

平成 29 年度 博士論文

**津波漂流船舶の衝突時における衝撃外力が
建築物の応答に与える影響評価に関する研究**

浅井 竜也

東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 中埜研究室

平成 29 年 8 月

目次

目次.....	I
論文の内容の要旨.....	IV
発表論文.....	VII
謝辞.....	X

第1章 序論

1.1 研究の背景.....	1-1
1.2 既往の研究.....	1-4
1.2.1 津波来襲時の漂流物挙動に関する既往の研究.....	1-4
1.2.2 津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に関する既往の研究.....	1-5
1.2.3 津波漂流物の衝突に対する建築物の安全性検討手法に関する既往の研究.....	1-13
1.3 本論文の目的.....	1-14
1.4 本論文の構成.....	1-15
[参考文献].....	1-18

第2章 津波来襲時における船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度

2.1 はじめに.....	2-1
2.2 検討対象船舶データベースの作成.....	2-2
2.2.1 検討対象船舶のデータソース.....	2-2
2.2.2 検討対象船舶データの主要目の特定.....	2-4
2.2.3 検討対象船舶データの構成.....	2-8
2.3 AIS データに基づく各港における船舶の実挙動分析.....	2-9
2.3.1 八戸港における船舶挙動.....	2-10
2.3.2 釜石港における船舶挙動.....	2-12
2.3.3 大船渡港における船舶挙動.....	2-14
2.3.4 石巻港における船舶挙動.....	2-17
2.3.5 仙台塩釜港塩釜港区における船舶挙動.....	2-19
2.3.6 仙台塩釜港仙台港区における船舶挙動.....	2-21
2.3.7 相馬港における船舶挙動.....	2-24
2.3.8 原町火力発電所における船舶挙動.....	2-27
2.3.9 小名浜港における船舶挙動.....	2-28
2.3.10 茨城港日立港区における船舶挙動.....	2-30
2.3.11 茨城港常陸那珂港区における船舶挙動.....	2-31
2.3.12 茨城港大洗港区における船舶挙動.....	2-34
2.4 船舶の陸域遡上生起頻度.....	2-35

2.4.1	船舶の操舵可否および喫水と浸水深との大小関係の特定	2-35
2.4.2	船舶の陸域遡上生起頻度の検討	2-38
2.4.3	船舶の操舵可否および喫水と総トン数との関係	2-40
2.5	まとめ	2-45
	[参考文献]	2-46
第3章 津波漂流船舶の衝突時衝撃外力		
3.1	はじめに	3-1
3.2	津波来襲時における船舶と構造物との衝突事例	3-2
3.2.1	釜石港における一般貨物船と建築物との衝突事例	3-2
3.2.2	相馬港における石炭専用船と防波堤との衝突事例	3-5
3.2.3	八戸港における探査船と岸壁との衝突事例	3-8
3.2.4	八戸港におけるケミカルタンカーと岸壁との衝突事例	3-9
3.2.5	銚子港における漁船と防波堤との衝突事例	3-11
3.3	船舶の衝突条件	3-13
3.3.1	船舶の漂流時の速度および方向	3-13
3.3.2	船舶の衝突時の速度および方向	3-16
3.4	船舶衝突時の衝撃外力	3-17
3.4.1	衝撃外力評価事例のまとめ	3-18
3.4.2	衝撃外力評価式と各事例の評価結果との比較	3-21
3.4.3	船舶衝突時の衝撃外力の定義	3-25
3.5	まとめ	3-29
	[参考文献]	3-30
第4章 津波波力および衝撃外力に対する弾性多質点系応答の簡易評価手法		
4.1	はじめに	4-1
4.2	弾性応答の導出と特性	4-2
4.2.1	1 質点系応答	4-2
4.2.2	多質点系応答	4-6
4.3	弾性応答の簡易評価手法の提案	4-48
4.3.1	1 質点系応答	4-48
4.3.2	多質点系応答	4-50
4.3.3	簡易評価手法の適用条件の検討	4-56
4.3.4	津波波力を考慮した応答評価手法	4-59
4.4	まとめ	4-60
	[参考文献]	4-61

第5章 津波波力および衝撃外力に対する弾塑性多質点系応答の簡易評価手法

5.1 はじめに.....	5-1
5.2 弾塑性応答の導出と特性.....	5-2
5.2.1 1 質点系応答.....	5-3
5.2.2 多質点系応答.....	5-15
5.3 弾塑性応答の簡易評価手法の提案.....	5-37
5.3.1 1 質点系応答.....	5-37
5.3.2 多質点系応答.....	5-41
5.4 津波避難ビルを想定した簡易評価手法の適用.....	5-50
5.4.1 解析緒元.....	5-50
5.4.2 簡易評価手法の適用.....	5-53
5.5 まとめ.....	5-66
[参考文献]	5-67

第6章 提案応答評価手法を用いた対津波漂流物設計への応用

6.1 はじめに.....	6-1
6.2 津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計手順.....	6-2
6.3 まとめ.....	6-23
[参考文献]	6-24

第7章 結論

付録1 検討対象船舶一覧

付1.1 はじめに.....	付1-1
付1.2 船舶一覧.....	付1-2

付録2 平均停泊船舶数の定義と御前崎港を対象にしたその算定例

付2.1 はじめに.....	付2-1
付2.2 平均停泊船舶数の定義.....	付2-2
付2.3 御前崎港を対象にした平均停泊船舶数の算定例.....	付2-3

付録3 エネルギー一定則に基づく最大弾塑性応答の推定

付3.1 はじめに.....	付3-1
付3.2 応答推定精度の検討.....	付3-2

付録4 津波来襲時における船舶の陸域遡上距離

付4.1 はじめに.....	付4-1
付4.2 船舶の陸域遡上距離の検討.....	付4-2

質疑・回答

論文の内容の要旨

論文題目 津波漂流船舶の衝突時における衝撃外力が建築物の応答に与える影響評価に関する研究

氏 名 浅井 竜也

本研究は、過去の津波来襲時に広く一般に漂流が確認され、なおかつ衝突により建築物に重大な影響を及ぼし得る大規模船舶を対象として、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時におけるその実挙動の分析結果に基づき船舶衝突時衝撃外力を評価し、同衝撃外力に対する建築物応答の簡便な推定手法を提案することにより、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の定量的な安全検討手法を確立しようとするものである。津波来襲時の船舶挙動に関する本分析では、同津波来襲時に取得された船舶の AIS (Automatic Identification System ; 船舶の位置、速度等の情報をリアルタイムに送受信するシステム) データ、ならびに船舶の避難行動に関するアンケート調査結果等に基づくことにより、津波来襲時における船舶の挙動を大規模かつ体系的に分析を行った点に特徴がある。本論文では、この分析結果に基づき、津波来襲時における船舶と建築物との衝突可能性を把握するべく、津波来襲時において陸域に遡上した船舶の割合、すなわち船舶の陸域遡上生起頻度を検討し、また、船舶と構造物との実衝突事例に基づき船舶衝突時の衝撃外力レベルを評価した。さらに、同衝撃外力に対する建築物の応答特性を把握するべく、質点系モデルに置換した建築物にその衝撃外力を入力し、弾性応答では、最大応答生起時に卓越する 1 次モードに着目することにより、弾塑性応答では、衝撃外力による仕事と建築物の復元力による仕事が等値であると仮定することにより、それぞれ最大応答を簡便に推定する手法を提案した。以下に、本論文の構成及び各章の概要を示す。

第 1 章「序論」では、過去の津波来襲時における津波漂流物の発生事例を紹介し、特に 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時には漂流船舶の衝突による建築物の崩壊事例が確認されたものの、津波外力に対する現行の構造設計手法においては船舶衝突に対する津波避難ビル等の建築物の定量的な安全検討手法は提示されていないため、将来の津波来襲時において同様の被害を防ぐためには同手法の確立ならびにその衝突に耐え得る建築物に必要とされる構造性能の評価を行う必要があることを述べた。さらに、同手法に関連する既往研究における未解決の課題として、1) 津波来襲時における船舶挙動の把握を目的とした数値シミュレーション解析では人為的要因（操舵や投錨など）が考慮されていないこと、2) 船舶衝突時の衝撃外力については船舶工学分野において検討されているものの複数の異なる評価式が提案されていること、3) 船舶衝突に対する建築物挙動の検討事例は極めて少なく、また、船舶の破壊形式を適切に反映した外力に対する建築物の挙動は検討されていないこと、の 3 点を挙げた。そして、本研究では、上記 3 課題を解決するべく、1) 津波来襲時における船舶の実挙動および陸域遡上生起頻度の検討、2) 津波

漂流船舶の衝突時衝撃外力の評価、3) 船舶衝突時の衝撃外力に対する建築物応答の簡易評価手法の提案、の3点を目的として設定した。

第2章「津波来襲時における船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度」では、船舶が陸上の建築物に衝突するためには船舶が陸域に遡上することが必要条件であることに着目し、津波来襲時における船舶の陸域遡上生起頻度を検討すること目的とし、まず、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶のAISデータ等に基づき、総トン数100 ton以上を対象とした船舶計143隻のデータベースを作成した。続いて、同データベースにおいてAISデータが取得された船舶を対象に津波来襲時の実挙動を分析することにより、船舶の「操舵可否」および「喫水と浸水深との大小関係」が船舶の陸域遡上に重要な要因として特定した。そして、上記二要因をパラメータとして、同津波来襲時における船舶の陸域遡上生起頻度を検討し、津波来襲時において「操舵可能」もしくは「喫水 \geq 浸水深」を満たす船舶においては1事例を除き陸域に遡上した船舶は確認されなかったが、一方、「操舵不可」および「喫水 $<$ 浸水深」の二条件を満たす船舶においては、その7割以上が陸域に遡上したことから、これらの条件が津波来襲時に建築物に衝突し得る船舶を検討する上で重要であることを明らかにした。さらに、船舶の操舵可否および喫水それぞれと船舶規模との関係を検討することにより、発災時に操舵不可の状態であった船舶の割合は総トン数500 ton未満の船舶において比較的多いこと、船舶の発災時喫水はその積荷状況により大きく変動し得ること、をそれぞれ明らかにした。

第3章「津波漂流船舶の衝突時衝撃外力」では、船舶の衝突時衝撃外力を定量的に評価することを目的とし、まず、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時において、船舶が構造物（建築物、防波堤および岸壁）と衝突した5事例について、その衝突時における船舶の運動量変化および運動エネルギー変化、被衝突防波堤ケーソンの滑動耐力、にそれぞれ基づくことで、各船舶の衝突時衝撃外力の大きさを評価した。また、同5事例のうち衝突時の速度変化が把握可能であった2事例を対象にその衝突時の速度および船首方位を検討し、船舶が縦方向で構造物に接近する場合にはその接近に伴う漂流速度の低減は限定的であることを明らかにした。さらに、船舶が操舵されずに漂流した5事例について船舶の漂流速度およびその船首方位を検討し、船舶は数百m程度の漂流により最大漂流速度に達し得ること、その漂流速度は横方向よりも縦方向において比較的高いこと、をそれぞれ明らかにした。以上の知見に基づき、本研究では、船舶が縦方向に、津波流速に等しい速度で構造物に衝突する時の衝突時衝撃外力を、上述の実衝突事例に基づく評価結果による大きさと、船舶工学分野における既往の研究結果による矩形パルス波形状で設定することを提案した。

第4章「津波波力および衝撃外力に対する弾性多質点応答の簡易評価手法」では、第3章で定義した衝撃外力に対する建築物の弾性応答を簡便に推定する手法を提案することを目的とし、まず、建築物をせん断質点系モデルに置換し衝撃外力に対する弾性応答特性を分析することで、そ

の応答特性が荷重作用継続時間 τ と一次固有周期 T との比 τ/T に依存すること、実際の船舶衝突において一般に観測される条件 $\tau/T \geq 0.5$ の場合には衝突位置より上階では高次モードが強く励起されるものの衝突位置以下では一次モードが卓越すること、を明らかにした。さらに、この知見に基づき、最大応答層間変形の推定式を「衝撃外力と外力レベルが等価な静的外力に対する層間変形」と「一次モード振幅」との和として導出される応答予測式を提案し、これにより、津波避難ビルとして一般的な中低層建築物であれば、船舶衝突に対する最大応答層間変形を精度良く推定可能であることを明らかにした。

第 5 章「津波波力および衝撃外力に対する弾塑性多質点応答の簡易評価手法」では、第 3 章で定義した衝撃外力に対する建築物の弾塑性応答を簡便に推定する手法を提案することを目的とし、まず、バイリニア型の復元力特性を有するせん断質点系モデルに置換し、その衝撃外力に対する弾塑性応答特性を検討した。その結果、同モデルの弾塑性応答は、荷重作用継続時間 τ と一次固有周期 T との比 τ/T が 0.5 以上の場合には、層の降伏耐力 Q_y と津波波力 F_w との差 $Q_y - F_w$ に対する衝撃外力 F の比 $F/(Q_y - F_w)$ が最大となる層において最大となる傾向を確認した。また、その応答は τ/T の増大と共に増加するものの、最終的にはある一定値に収束し、その収束値は $F/(Q_y - F_w)$ の増大と共に増加し、その増加は $F/(Q_y - F_w)$ が 0.7~1.0 程度以上において顕著であることを明らかにした。また、衝撃外力による仕事と建築物の復元力による仕事とが等値と仮定し、さらにその弾性限における推定値が第 4 章で提案した推定式により求まる値と一致するよう補正した最大応答層間変形の推定式は、応答塑性率が 2 程度以下にとどまる場合には精度良く最大応答を推定すること、その場合には $F/(Q_y - F_w)$ が 0.8 程度以下であることを明らかにした。

第 6 章「提案応答評価手法を用いた津波漂流物設計への応用」では、第 2 章～第 5 章における検討によって得られた知見に基づき、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計手順を提案するとともに、同手順において建築物の応答評価に用いるパラメータを整理した。また、津波避難ビルを対象に、津波波力のみに対する必要耐力、津波波力と船舶衝突時衝撃外力との組み合わせ外力に対する必要耐力、および一般的な耐震建築物の必要耐力、の 3 つをケーススタディにより比較することで、耐震設計および耐津波波力設計された津波避難ビルであれば、一般的な港湾で想定される総トン数 500 ton 未満程度の船舶が衝突したとしても、崩壊等の著しい不具合が生じる可能性は低いことを明らかにした。

第 7 章「結論」では、本研究で提案した津波漂流船舶の衝突時衝撃外力に対する建築物の応答評価手法について、得られた成果と今後の課題について取りまとめた。

以上、本論文では、津波漂流物の衝突に対する建築物の構造設計手法の確立に資する知見を提供することを目的として、津波漂流船舶の衝突時衝撃外力を評価し、その外力に対する建築物の応答評価手法を提案した。

発表論文

1. 査読付き論文（筆頭著者）

- [1] 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭 : 津波漂流物の衝突衝撃外力による建築物の弾性応答評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38 No.2, pp.973-978, 2016.7
- [2] 浅井竜也, 舘野公一, 中埜良昭, 福山洋, 藤間功司, 芳賀勇治, 菅野忠, 岡田恒男 : 2011年東北地方太平洋沖地震による建築物等の被害調査に基づく津波荷重の評価 比較的単純な工作物および建築物の被害調査結果に基づく検討, 構造工学論文集, Vol.58B, pp.97-104, 2012.3

2. 査読付き論文（筆頭著者以外）

- [3] T. Chibana, D. Harada, K. Yamashita, and T. Asai : Characteristics of Riverbed Configuration Affected by River-crossing Structures, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.16 Issue 2, pp.223-227, 2012.2

3. 査読無し論文（国際会議発表論文含む）（筆頭著者）

- [4] 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭 : 2011年東北地方太平洋沖地震における船舶の陸域遡上生起頻度, 日本建築学会学術講演梗概集（中国）, 構造IV, pp.721-722, 2017.9
- [5] T. Asai, K. Matsukawa, H. Choi, Y. Nakano : Simplified Response Estimation Method of Buildings due to Tsunami-Driven Ship Impact Loads, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 2017.1
- [6] 浅井竜也, 中埜良昭 : 大規模津波漂流物の衝突による建築物の弾性応答評価とその簡易推定, 日本地震工学会大会梗概集, T-3, pp.1-7, 2016.9
- [7] 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭 : 津波漂流物衝突時の衝撃外力が作用する建築物の弾性応答簡易評価, 日本建築学会学術講演梗概集（九州）, 構造IV, pp.347-348, 2016.8
- [8] 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭 : 建築物に作用する津波漂流物衝突時の衝撃外力, 日本地震工学会大会梗概集, P2-4, pp.1-4, 2015.11
- [9] 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭 : 衝撃外力が作用する津波避難ビルの弾性応答評価手法, 日本建築学会学術講演梗概集（関東）, 構造II, pp.257-258, 2015.9
- [10] T. Asai, K. Matsukawa, H. Choi, Y. Nakano : Response Estimation Method of Reinforced Concrete Buildings due to Waterborne Debris Impact Loads, 3rd International Conference on Computational Design in Engineering, 2015.12
- [11] T. Asai, K. Matsukawa, H. Choi, Y. Nakano : Response Estimation Method of Buildings due to Waterborne Debris Impact Loads, 10th Pacific Conference on Earthquake Engineering, 2015.10
- [12] 浅井竜也, 舘野公一, 崔琥, 高橋典之, 中埜良昭 : 2011年東北地方太平洋沖地震による津波被害調査に基づく建築物の転倒に関する検討, 日本地震工学会大会梗概集, pp.20-21,

2012.11

- [13] 浅井竜也, 館野公一, 中埜良昭, 福山洋, 芳賀勇治, 菅野忠, 岡田恒男 : 建築物等の被害調査結果に基づく津波荷重の評価 その2 抗力式に基づく検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (東海), オーガナイズドセッション, 構造IV, pp.77-80, 2012.9
- [14] T. Asai, Y. Nakano, T. Tateno, H. Fukuyama, K. Fujima, T. Sugano, Y. Haga, T. Okada : Tsunami Load Evaluation Based on Field Investigations of the 2011 Great East Japan Earthquake, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012.9
- [15] T. Asai, Y. Nakano, T. Tateno, H. Fukuyama, K. Fujima, T. Sugano, Y. Haga, T. Okada : Tsunami Load Evaluation Based on Damage Observation after the 2011 Great East Japan Earthquake, International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake, 2012.3
- [16] 浅井竜也, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭 : 免震工法により改修計画された RC 造 5 層建物の振動性状の変化に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), 構造 II, pp.343-344, 2011.8
- [17] 浅井竜也, 知花武佳, 鳩山紀一郎 : 河川の整備状況が住民の都市河川環境に対する評価構造に及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 2 部門, pp.311-312, 2006.9

4. 査読無し論文 (国際会議発表論文含む) (筆頭著者以外)

- [18] 松川和人, 根本雄平, 浅井竜也, 崔琥, 中埜良昭 : 津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮した RC 造建物の応答評価に関する研究 その 1 1 層建物の弾性応答性状とその簡易評価手法の提案, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), 構造 II, pp.117-118, 2017.9
- [19] 根本雄平, 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭 : 津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮した RC 造建物の応答評価に関する研究 その 2 多層建物における応答評価手法の提案, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), 構造 II, pp.119-120, 2017.9
- [20] 根本雄平, 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭 : 津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮した 1 層建物の弾性応答性状とその簡易評価法, 日本地震工学会大会梗概集, P1-14, pp.1-8, 2016.9
- [21] 根本雄平, 崔琥, 浅井竜也, 中埜良昭, 迫田丈志 : 常時微動測定に基づく SRC 造 6 層建物の振動特性評価, 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), 構造 II, pp.665-666, 2016.8
- [22] 松川和人, 崔琥, 板倉正英, 浅井竜也, 中埜良昭 : 津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に基づく RC 造建築物の応答特性 その 1 縮小試験体を用いた振り子衝突実験, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), 構造 II, pp.311-312, 2015.9
- [23] 板倉正英, 崔琥, 松川和人, 浅井竜也, 中埜良昭 : 津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に基づく RC 造建築物の応答特性 その 2 実験結果に基づく衝撃外力評価と非線形時刻歴応答解析による建物応答評価, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), 構造 II, pp.313-314, 2015.9
- [24] 芳賀勇治, 浅井竜也, 館野公一, 中埜良昭, 福山洋, 菅野忠, 岡田恒男 : 建築物等の被

害調査結果に基づく津波荷重の評価 その1 静水圧式に基づく検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (東海), オーガナイズドセッション, 構造IV, pp.73-76, 2012.9

- [25] 中埜良昭, 浅井竜也, 館野公一, 福山洋, 藤間功司, 芳賀勇治, 菅野忠, 岡田恒男 : 2011年東北地方太平洋沖地震による建築物等の被害調査に基づく津波荷重の評価 (その1) 比較的単純な工作物を主とした被害に基づく検討, 日本地震工学会大会梗概集, pp.56-57, 2011.11

謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 博士課程在学中に行った研究をまとめたものです。本論文を作成するにあたり、数多くの方々からのご支援を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

東京大学生産技術研究所 中埜良昭教授には、私が研究室に配属した修士課程および博士課程の5年間、研究の実施および論文の作成全般にわたって丹念にご指導いただきました。研究においては常に客観性を欠かさず、論理的かつ直感的な分析を行い、その分析結果を受け手が無理なく発表する姿勢をご教授していただきました。また、委員会活動や被害調査、国際会議など、日常とは異なる学びの機会を非常に多く与えていただき、心より感謝申し上げます。そのように根気良くご指導いただいたにもかかわらず、未だ先生の教えを体現するには至っていない未熟者ですが、常にその教えを研究・人生の指針として、これからも精進する所存です。

東京大学生産技術研究所 崔琥助教には、研究生活、日常生活の両面において常に暖かくご指導いただきました。また、私の研究テーマ以外についても、常に分け隔てなく議論をさせていただくことで、幅広い視野を持つことができました。厚く御礼申し上げます。

東京大学生産技術研究所 松川和人助教には、細やかな気配りにより常に円滑に物事を進めるよう配慮していただき、特に研究の難局においては、強い推進力によって後押しをしていただいたことでそれを打破することができました。厚く御礼申し上げます。

東京大学 高田毅士教授、田島芳満教授、田尻清太郎准教授、中央大学 有川太郎教授には、博士論文の審査の副査を務めていただきました。至らぬ発表にも耳を傾けていただき、貴重なご指摘、ご助言をいただきました。また、深く研究を掘り下げつつも、時に原点に立ち戻り広い視野で全体を見渡し、重要な問題は何かを再度問い直すことの重要性をご教示いただきました。ここに深く御礼申し上げます。

研究室の秘書である今本貴子様、特任研究員である楊勇氏、修士研究員である Sangita DAS 氏、後輩である鈴木涼平氏、小島大輝氏、福富佑氏、研究生である S.A.M. Nassif ZUBAYE 氏には、学業面や研究室生活・行事など様々な面で支えていただきました。研究室の皆様のお蔭で、非常に明るい研究室の雰囲気の中、大学院生活を送ることができました。心より感謝致します。

本研究の内容の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金（研究課題番号 15H04072、研究課題名：津波漂流物の衝突が建築物の応答に及ぼす影響とその作用荷重評価に関する研究、研究代

表者：中埜良昭), 大林財団 奨励研究助成 (奨励研究課題名：建築物に作用する津波荷重評価に関する研究, 研究代表者：浅井竜也), および LIXIL 住生活財団 若手研究助成 (研究代表者：浅井竜也) の助成の下に実施しました。関係者各位に深く謝意を表します。

また, 本研究の実施においては, 海上保安庁より 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波来襲時の AIS データを, 日本海難防止協会より「東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時の船舶の避難行動と被災状況に係るアンケート」の調査結果を, それぞれご提供いただきました。共に大変貴重なデータであり, 両データなくしては本研究の成果を得ることはできませんでした。厚く御礼申し上げます。

最後に私事になりますが, 常に私の意志を尊重し, そして何があってもあたたかく支えてくれた両親, 姉, 今までの生活でお世話になったすべての皆様に深く感謝いたします。

2017 年 8 月 2 日

浅井竜也

第 1 章

序論

1. 序論

1.1 研究の背景

地震に伴い発生する津波は世界各地で度々甚大な人的・物的被害を生じさせてきた。その被害は、主に津波の波力および浮力に起因するが、津波により移動を開始した漂流物もまた、衝突により被害を生じさせ得る。津波漂流物の発生は、1933 年昭和三陸地震^[1.1]、1960 年チリ地震^[1.2]、1964 年アラスカ地震^[1.3]、1983 年日本海中部地震^[1.4]、1993 年北海道南西沖地震^[1.5]、2004 年スマトラ島沖地震^[1.6]など、過去の津波来襲のたびに確認されている（写真 1.1 (a) ～ (f)）。死者約 2 万人の大災害を引き起こした 2011 年東北地方太平洋沖地震^{[1.7]～[1.10]}においても多量の漂流物が確認され、その種類はコンテナや自動車、航空機、船舶など様々である（写真 1.2 (a) ～ (d)）。その中において比較的大規模な船舶は多くの漂流事例が確認されたことに加え、その衝突は建築部材の損傷、さらには建築物の崩壊を生じさせたことが報告されている（写真 1.2 (e) および (f)）。

以上のような津波漂流物の衝突による被害事例を勘案し、2011 年に国土交通省により定められた「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」^[1.11]では、建築物に作用する波力や浮力に対する定量的な検討手法に加え、津波漂流物の衝突に対しては、「漂流物の衝突による損傷を考慮し、衝突により構造耐力上主要な部分が破壊を生じないこと又は柱若しくは耐力壁の一部が損傷しても、建築物全体が崩壊しないことを確かめる」ことが提示されている。しかしながら、その漂流物に対する検討手法は、漂流物の衝突による建築部材の局所的な損傷を対象としており、衝突に対する建築物全体の挙動については考慮されていない。2016 年に新たに津波外力が盛り込まれた建築物荷重指針・同解説^[1.12]においても、漂流物衝突時の衝撃外力について複数の評価式が提示されているものの、それらは主に流木やコンテナといった比較的小規模な漂流物を対象としており、船舶といった建築物全体の挙動に重大な影響を及ぼし得る大規模漂流物の衝突による衝撃外力の評価式は示されていない。日本と同様に津波避難ビルの構造設計法を定める米国においてもその状況は同様であり、FEMA^[1.13]およびその内容を改定して 2017 年に出版が予定されている ASCE7^[1.14]では、大規模漂流物に対する定量的な検討手法は示されていない。

このように、船舶といった大規模漂流物の衝突に対する建築物の設計手法は未整備であるものの、その衝突は建築構造部材の局所的な損傷のみならず建築物全体の挙動に重大な影響を及ぼしかねず、実際に建築物の崩壊事例が報告されている。現状では建築物への衝突が確認された事例数は少ないものの、津波波力を効果的に低減し得る構造形式として 2011 年以降特に注目されるピロティ構造の建築物に対しては、津波がその周囲を迂回せずにピロティ部を通過するため、その津波による漂流物の衝突は生起しやすいものと懸念される。以上を踏まえ、今後の津波防災の観点から、大規模津波漂流物の衝突に対しても建築物の構造安全性を定量的に検討する手法を確立するとともに、その衝突に耐え得る建築物に必要とされる構造性能について明らかにすることが望まれる。



(a) 1933 年昭和三陸地震 岩手県釜石町（当時）^[1.1]



(b) 1960 年チリ地震 宮城県塩竈市^[1.2]



(c) 1964 年アラスカ地震 Kodiak, U.S.A^[1.3]



(d) 1983 年日本海中部地震 青森県深浦町^[1.4]

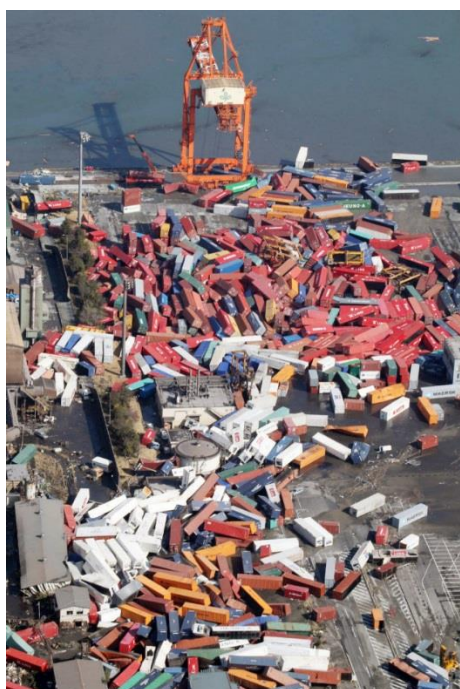


(e) 1993 年北海道南西沖地震 奥尻町^[1.5]



(f) 2004 年スマトラ島沖地震 Galle, Sri Lanka^[1.6]

写真 1.1 過去の津波来襲時に発生した漂流物の事例



(a) 津波で漂流したコンテナ 宮城県仙台市^[1.7]



(b) 津波で漂流した自動車 岩手県釜石市^[1.8]



(c) 津波で漂流した航空機 宮城県東松島市^[1.7]



(d) 建築物に衝突後座礁した船舶 岩手県釜石市



(e) 外壁が破壊された建築物 宮城県名取市^[1.9]



(f) 船舶衝突による崩壊建築物 岩手県釜石市^[1.10]

写真 1.2 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時の漂流物とその衝突による被害事例

1.2 既往の研究

津波漂流物の衝突に対する建築物の安全性を検討する上では、

- 1) 建築物周辺における津波漂流物の挙動を予測すること、
- 2) 漂流物衝突時に建築物に作用する衝撃外力を評価すること、
- 3) 同衝撃外力に対する建築物の挙動を把握すること、

が肝要であると考え、本節では、上記3項目に関する代表的な既往の研究事例を紹介する。

1.2.1 津波来襲時の漂流物挙動に関する既往の研究

津波来襲時の漂流物挙動を予測する上で有用な手法の一つとしては流体—固体連成系の数値シミュレーション解析が挙げられ、水理模型実験や過去の津波来襲時における漂流物挙動を再現すべく、その解析精度の向上が図られている。その研究事例としては、後藤ら^[1.15]、藤井ら^[1.16]、橋本ら^[1.17]、榊原ら^[1.18]、菅ら^[1.19]、富田ら^[1.20]、松田ら^[1.21]、許ら^[1.22]、野島ら^[1.23]、増田ら^[1.24]などによるものがある。また、漂流物の挙動は、その初期位置といった諸条件により大きく変動し、それを確定論的に求めることは困難なため、確率論的に議論する研究事例もある。その研究事例としては、吉田ら^[1.25]、藤井ら^[1.26]、木原ら^[1.27]、甲斐田ら^[1.28]、桜庭ら^[1.29]などによるものがある。

また、星野ら^[1.30]は、水理模型実験により構造物近傍の流れ場が漂流物の挙動に与える影響について検討し、津波の流れに対して直交する方向における構造物の幅が大きいほど、構造物前面における反射波の影響により漂流物の衝突速度が低下することを確認した。

上記は、津波来襲時において流木やコンテナ、船舶といった漂流物が自然に（人為的要因に左右されずに）漂流する場合に着目した研究事例である。しかし、そのうち船舶については、津波来襲時においても船員により操舵や投錨が行われる可能性があり、そのような人為的要因は上記数値シミュレーション解析には一般に反映されていない。日本海難防止協会^[1.31]は、2011年東北地方太平洋沖地震の後に海事関係者を対象としたアンケート調査を実施し、津波来襲時における船舶の避難行動について広く情報を収集した。同文献には、津波到達前に沖出し（港外に避難すること）に成功した事例や、沖出しが間に合わず港内において津波の来襲を受けた船舶についても懸命な操舵により座礁や構造物との衝突をさけた事例が報告されている。また、松田ら^[1.21]および牧野ら^[1.32]は、同津波来襲時に取得されたAIS（Automatic Identification System, 2章に詳述する）データに基づき鹿島港および小名浜港における船舶の挙動をそれぞれ分析しており、同二文献においても、津波到達前に沖出しに成功した事例が少なからず報告されている。このように沖出しに成功した船舶は、建築物に対して衝突の脅威となる可能性は極めて低いものと考えられる。そのため、船舶衝突に対する建築物の安全性を検討するためには、船舶の操舵など、上述の数値シミュレーション解析には一般に反映されていない人為的要因が、船舶と建築物との衝突の生起に重要な影響を及ぼし得ることを踏まえて、船舶の建築物への衝突可能性を評価する必要がある。

1.2.2 津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に関する既往の研究

津波漂流物の衝突により生じる外力評価に関する既往の研究事例については、建築物荷重指針・同解説（日本建築学会）^[1.12]において流木およびコンテナの衝突を対象とした事例がまとめられており、松富^[1.33]、池野ら^[1.34]、水谷・廉ら^[1.35]、^[1.36]、有川ら^[1.37]、^[1.38]、米 FEMA^[1.13]によりそれぞれ提案された荷重評価式が紹介されている。なお、米国では、Aghl et al.^[1.39]が、流木およびコンテナの実大衝突実験に基づき上記 FEMA^[1.13]による荷重評価式を見直しており、2017 年に出版が予定されている ASCE7^[1.14]にその成果が盛り込まれる予定である。

上記は、流木およびコンテナといった比較的小規模な漂流物に着目した既往の研究事例である。大規模津波漂流物の衝突により生じる外力の評価式は、建築工学分野においては提示されていないものの、そのうち船舶については、主に船舶工学分野において、船舶同士もしくは船舶と橋脚との衝突といった海難事故における船舶および橋梁の被害を定量的に予測すること目的とし、その衝突時の外力評価が行われてきた。なお、同研究事例では、一般に自力航行中の船舶の衝突に着目しているため、船舶が船首から衝突する時の衝撃外力が主に評価されている。

Minorsky^[1.40]は、船舶同士の実衝突事例を収集しその被害分析を行うことで、船舶の衝突時運動エネルギーと、衝突船舶において破壊が生じた鋼材の体積との間に線形関係があることを明らかにした。これはすなわち、船舶の衝突においては、船舶の運動エネルギーが主に船舶における鋼材の破壊により消費されることを示唆している。本成果により、船舶の衝突時被害量を定量的に検討する道が拓かれた。

Woisin^[1.41]、^[1.42]は、船舶の衝突に耐え得る船殻構造を検討すべく、船首模型と船側模型との大規模衝突実験を行った（図 1.1）。同実験では、船首模型の縮小倍率は 1/7.5 および 1/12 であり、載貨重量トン数（Deadweight Tonnage：船舶に載荷可能な総重量）13,740DWT～195,000DWT の 6 種類の船舶が、速度 3m/s～10m/s 程度で船首から衝突する場合を想定している。同実験より、衝突において、船首はその船側外板（船舶の外側面を構成する構成部材）が座屈し、内側に折り畳まれるように破壊することが示され（図 1.2、以降に紹介する研究においても同様の破壊形式が確認されている）、その破壊過程における荷重は、衝突初期の非常に短い時間（実大スケールに換算して 0.1 秒～0.2 秒程度）にその最大値 P_{\max} が生起した後、その半分程度の荷重 $P_m = P_{\max}/2$ により概ね一定になることが明らかとなった。本文献には荷重の時刻歴波形は明示されていないため、Knott et al.^[1.43]によるその模式図を図 1.3 に示す。同実験結果に基づき、Saul et al.^[1.44]は、船首衝突時外力の簡便な評価式(1.1)、(1.2)を導出した。なお、同式(1.1)中における荷重の±50%の変動は、衝突船舶の船首形状、補強鋼材の配置、衝突速度、バラスト水の有無によるものである。米 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)^[1.45]は、同実験結果に基づき橋脚に対する設計用荷重を定めているが、その際に、最大荷重 P_{\max} （式(1.1)）は生起時間が短いため橋脚の応答に重大な影響を与えないものとして無視し、その後概ね一定となる荷重 P_m （式(1.2)）のみを考慮している。

$$P_{\max} \cong 0.88\sqrt{DWT} \pm 50\% \quad (1.1)$$

$$P_m \cong P_{\max} / 2 \quad (1.2)$$

ここで,

P_{\max} : greatest impact force [MN]

P_m : medium impact force [MN]

DWT : deadweight tonnage [ton]

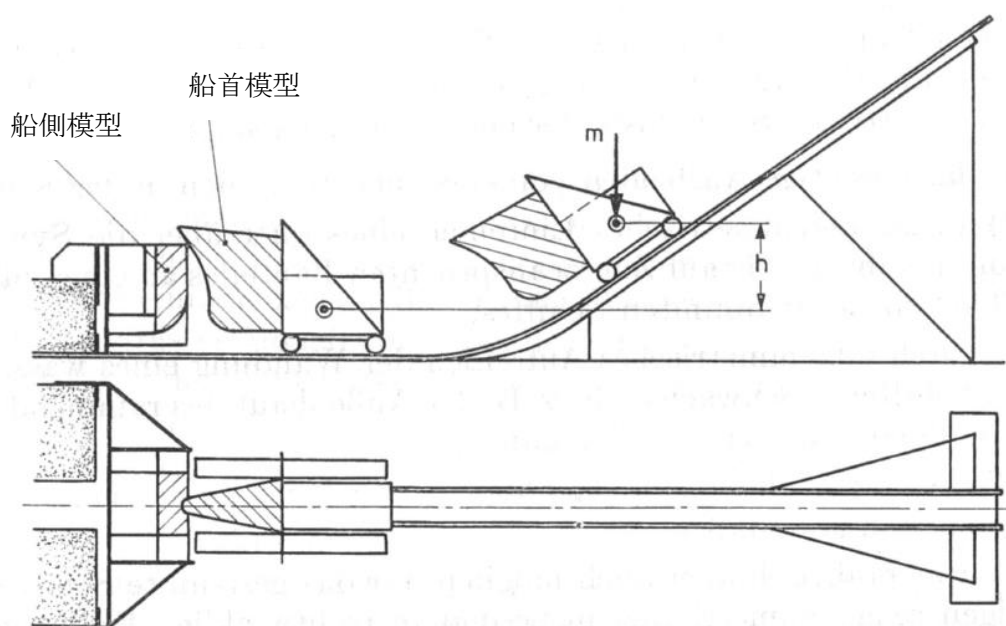


図 1.1 船首模型と船側模型との衝突実験装置の概略図（模型名称は著者追記）^[1.41]

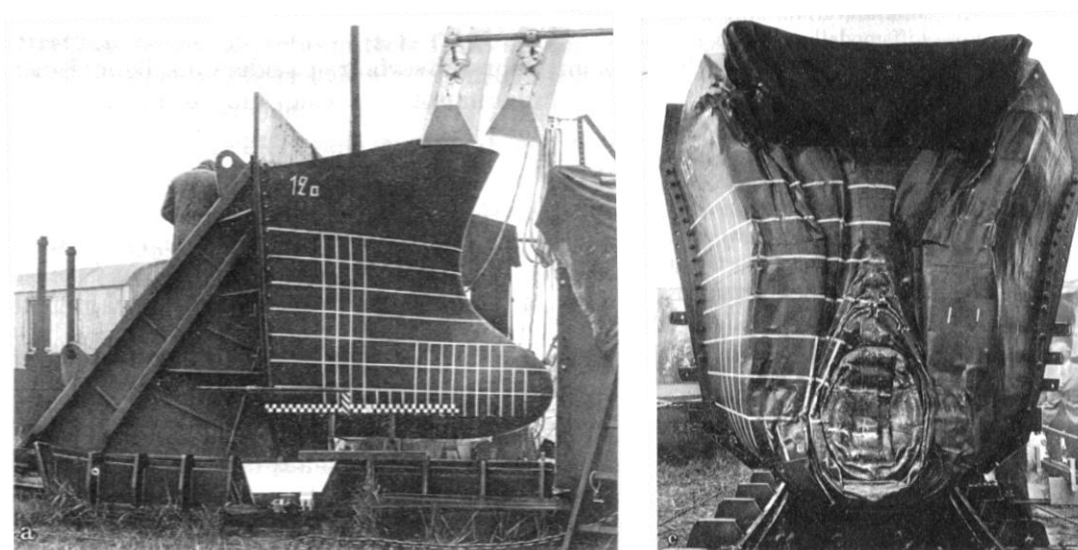


図 1.2 195,000DWT 船舶の 1/12 船首模型の衝突前後の様子^[1.41]

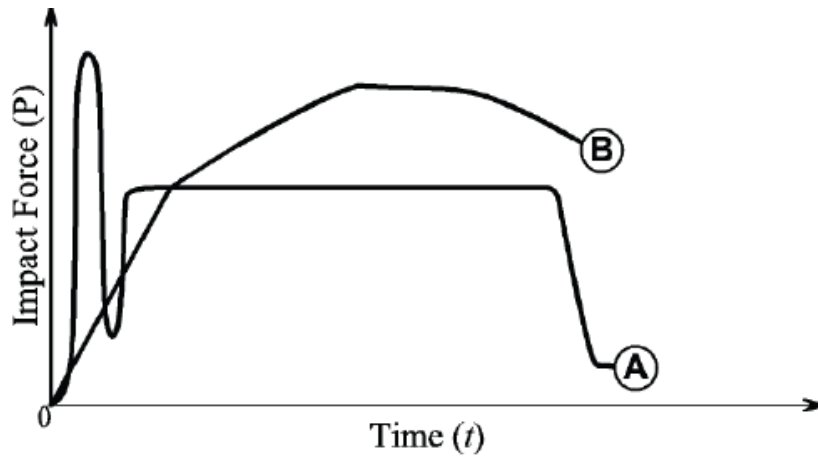


図 1.3 Woisin^{[1.41], [1.42]} (A) と Pedersen^[1.46] (B) との船首衝突時の衝撃外力波形の比較^[1.43]

一方, Pedersen et al.^[1.46]は, 船首の縮小模型を用いた静的加力実験結果 (Amdahl et al.^[1.47], Hagiwara et al.^[1.48]) に基づき Amdahl et al.^[1.47]が提案する数値解析手法を修正した。そして, 同手法を用いて船首の荷重変形関係について事例解析を行うことで, 500DWT~300,000DWT の船舶を対象とした船首衝突時の外力評価式(1.3)を提案した。同式(1.3)は, EUROCODE^[1.49]において橋脚の設計用外力として取り入れられている。

$$P_{bow} = \begin{cases} P_0 \bar{L} [\bar{E}_{imp} + (5.0 - \bar{L}) \bar{L}^{1.6}]^{0.5} & \text{for } \bar{E}_{imp} \geq \bar{L}^{2.6} \\ 2.24 P_0 [\bar{E}_{imp} \bar{L}]^{0.5} & \text{for } \bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6} \end{cases} \quad (1.3)$$

ここで,

$$\bar{L} = L_{pp} / 275 \quad [-]$$

$$\bar{E}_{imp} = E_{imp} / 1425 \quad [-]$$

$$E_{imp} = \frac{1}{2} m_x V_0^2 \quad [\text{MNm}]$$

P_{bow} : maximum bow collision load [MN]

P_0 : reference collision load equal to 210 [MN]

E_{imp} : energy to be absorbed by plastic deformations [MNm]

L_{pp} : length of vessel [m]

m_x : mass plus added mass (5%) with respect to longitudinal motion [$\times 10^6$ kg]

V_0 : initial speed of vessel [m s^{-1}]

Knott et al.^[1.43]は, 上記 Woisin^{[1.41], [1.42]}および Pedersen^[1.46]の提示する船首衝突時の衝撃外力が, その最大荷重のみならず時刻歴波形形状が互いに大きく異なる点を指摘し (図 1.3), その違いの要因について, 前者は動的衝突実験結果に, 後者は静的加力実験結果にそれぞれ基づくことを挙げているものの, その明確な根拠は示していない。

船舶の船首衝突時外力の動的载荷／静的载荷による違いについては, Stroheim et al.^[1.50]が FEM 解析により検討している。同文献では, 歪速度の影響を考慮するために一般的に用いられている Cowper and Symonds^[1.51]の式(1.4)において, 現在の船舶の構成部材として広く用いられている高張力鋼を対象とし, さらに船舶の衝突時挙動に重要な降伏後の流動応力については, 係数 $C = 400,000 \text{ s}^{-1}$, $p = 5$ 程度の値を採用することで動的効果を適切に再現できることを示した。そして, 同値を用いて, 排水トン数 (Displacement Tonnage : 船舶の質量) 7,500 t の船舶の船首 (図 1.4) が速度 4 m/s で剛壁に衝突する場合の荷重変形関係を求め (図 1.5), その荷重の動的载荷による上昇は 1 割程度であることを示した。一方, FEM 解析においては, 式(1.4)における係数は従来 $C = 40.4 \text{ s}^{-1}$, $p = 5$ が広く用いられてきたが, 同値は軟鋼の降伏応力を対象として定められたため, その値を用いて求まる衝撃外力は過大評価となり得ることを指摘している。なお, 上記解析においては, $C = 40.4 \text{ s}^{-1}$ の場合の荷重は, $400,000 \text{ s}^{-1}$ の場合に比べ 3 割程度大きい結果が得られている (図 1.5)。

$$\sigma_{dynamic} = \sigma_{static} \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (1.4)$$

ここで,

$\sigma_{dynamic}$: dynamic stress [N/mm²]

σ_{static} : static stress [N/mm²]

$\dot{\epsilon}$: strain rate

C : coefficient to be determined based on test data [s⁻¹]

p : coefficient to be determined based on test data [-]

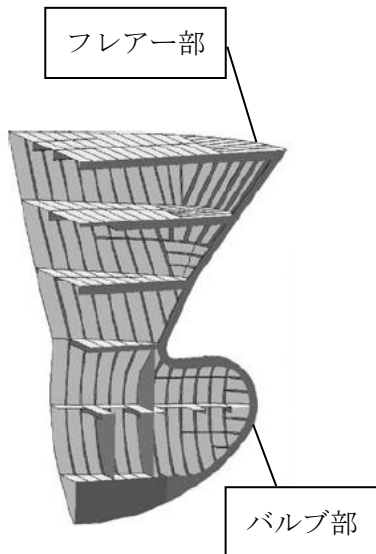


図 1.4 FEM 解析モデル^[1.50]

(名称は著者追記)

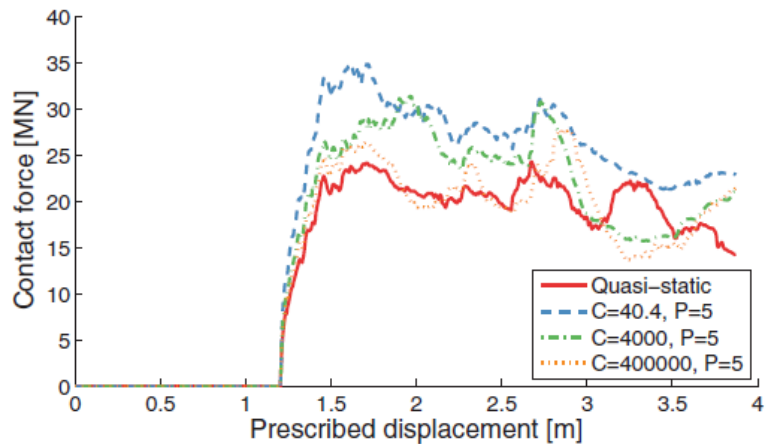


図 1.5 船首バルブ部の荷重変形関係^[1.50]

(船首フレアー部の先端位置を変位 0m としている)

上記文献^[1.50]では、船舶の衝突速度が衝突時荷重に与える影響について、船舶が速度 4 m/s で剛壁に衝突する場合を対象に検討している。ここで、津波漂流船舶に想定される衝突速度を対象に、衝突速度が衝突時荷重に与える影響について考察する。船舶の津波来襲時における衝突速度は、本研究の3章に示す衝突事例では最大 7 m/s 程度であり、その時の歪速度は、上記文献における検討事例の歪速度 (100 s^{-1}) を衝突速度に比例させて求まる 175 s^{-1} ($=100 \times 7/4$) 程度より小さいと想定される（船舶の衝突は弾性衝突ではなく弾塑性衝突のため）。よって、その歪速度のときの鋼材の降伏後の流動応力の動的倍率は、既往の実験結果（図 1.6 の点プロット）^[1.50]に基づく 1.0～1.2 割程度であり、津波漂流船舶の衝突速度程度の範囲では、衝突時荷重の衝突速度による変化は限定的であると考えられる。なお、物体が弾性衝突する場合には、衝突速度の上昇による動的応力の上昇は弾塑性衝突の場合よりも大きく（例えば弾性の一様金属棒が材軸方向に弾性衝突する場合の衝撃外力は速度に比例する^[1.52]）、弾塑性衝突とは異なることがわかっている。

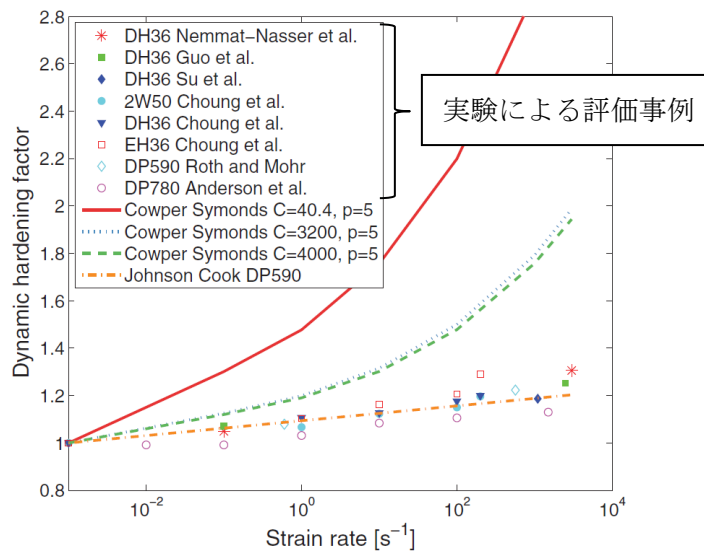


図 1.6 流動応力の歪速度と動的倍率と関係^[1.50]

ここで、上述の式(1.4)と、前述の Pedersen et al.^[1.46]で用いられている式(1.5)とによる動的倍率 ($\sigma_{dynamic} / \sigma_{static}$) の違いを図 1.7 に比較する。なお、船舶衝突時の歪速度は最大 100 s^{-1} 程度との Stroheim et al.^[1.50]の検討結果に基づき、同値を上限値として動的倍率を比較する。同図より、式(1.5)による動的倍率は、式(1.4)において係数 $C = 400,000 \text{ s}^{-1}$ とした場合と比べ大きく評価されていることがわかる。

$$\sigma_{dynamic} = 1.29\sigma_{static}\dot{\epsilon}^{0.037} \quad (1.5)$$

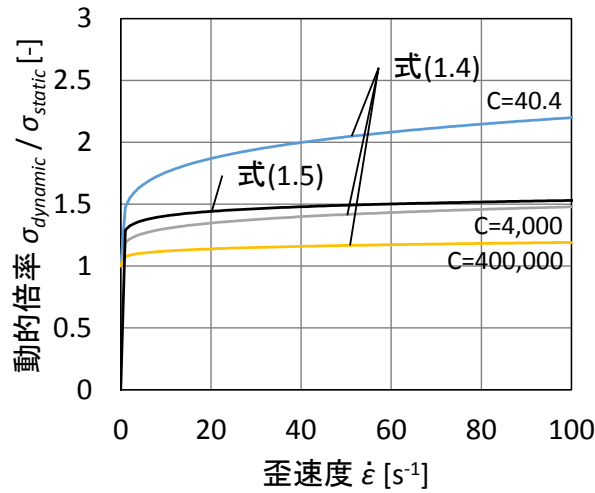


図 1.7 式(1.4)と式(1.5)との動的倍率の比較

日本国内では、長沢ら^[1.53]が、船側外板の座屈強度により定まる船首の破壊強度 P_{cr} を式(1.6)により表し、その妥当性を船首の縮小模型を用いた静的加力実験により確認した。同実験では、上述の Woisin^{[1.41], [1.42]}および Pedersen et al.^[1.46]による実験と比べて比較的小規模な船舶、すなわち総トン数（Gross Tonnage：船舶の容積を表す指標）500 ton および 4000 ton の船舶を対象としている。船首模型は、500 ton 船舶に対しては垂直型船首（図 1.8）および傾斜型船首（図 1.9 右下の模式図参照）の二種類の 1/4 縮小模型を、4000 ton 船舶に対しては垂直型船首のみの 1/8 縮小模型を、それぞれ作成した（いずれの模型においても船首バルブ部は再現されていない）。同模型を載荷することで得られた船首の荷重変形関係は、図 1.9 に総トン数 500 ton の場合について例示するとおり、垂直型船首の場合には載荷直後に急激に荷重が立ち上がるものの、その後は P_{cr} で概ね一定となり、Woisin^{[1.41], [1.42]}と近い傾向が得られた（すなわち Pedersen et al.^[1.46]とは異なる結果となった。三研究による荷重の比較は 3 章で行う）。傾斜型船首の場合は、載荷直後の荷重の上昇が比較的緩やかな点が垂直型船首の場合と異なりものの、荷重が P_{cr} に収束する点では同様の結果となった。以上により妥当性が確認された船首衝突時の荷重評価式(1.6)は、本州四国連絡橋公団^[1.54]により、橋脚を防護するために設置する緩衝工の設計手法に反映されている。また、庄司ら^[1.55]は、船舶の標準寸法^[1.53]を用いて式(1.6)を変換し、船首強度 P_{cr} を船舶の総トン数 T_G のみの関数として式(1.8)により表した。

$$P_{cr} = 2Dt\sigma_{cr} \cos(\theta/2) \quad (1.6)$$

$$\sigma_{cr} = k\pi^2 E(t/b)^2 / \{12(1-\nu^2)\} \quad (1.7)$$

ここで、

P_{cr} : 船首の破壊強度 [tf]

σ_{cr} : 船側外板の弾性座屈応力値 [t/m²]

D : 船舶の型深 [m]

t : 船側外板の板厚 [m]

- a : フレームの間隔 [m]
 b : 縦通材の間隔 [m]
 θ : 船首の水平開き角 [°]
 E : 船側外板のヤング係数 [t/m²]
 ν : ポアソン比 (0.3 とする) [-]
 k : 四辺が単純支持された板材の座屈係数 [-] ($= (a/b + b/a)^2$)

$$P_{cr} = 1.17 T_G^{1/3} (0.82 T_G^{1/6} + 1)^3 \quad (1.8)$$

ここで,

T_G : 船舶の総トン数 [ton]

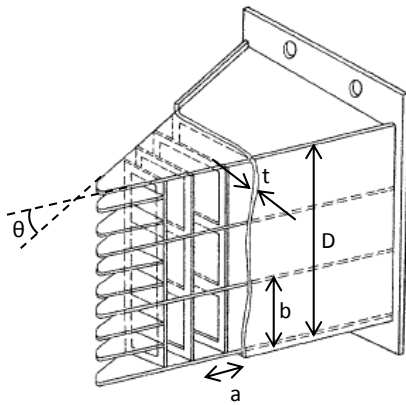


図 1.8 垂直型船首模型 [1.53]
(各記号は著者追記)

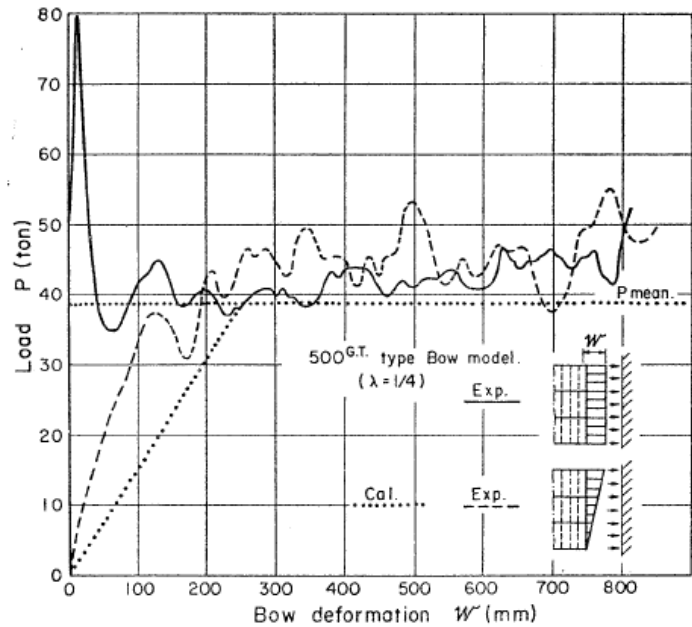


図 1.9 船首の荷重変形関係の理論値と実験値との比較 [1.53]
(総トン数 500 ton 船舶の 1/4 模型の例)

なお、上記 Woisin^{[1.41], [1.42]}および長沢ら^[1.53]による実験結果では、船首の衝突（船首への载荷）直後に最大荷重が生起することが共に確認されたが、船舶工学分野においては、その生起時間は短いため、船首損傷量の評価を行う上での影響は小さいとして一般に着目されていない。Haris et al.^[1.56]は、同最大荷重は、船首を構成する鋼材における初期たわみや欠陥、溶接による残留応力などに依存するため、現在一般的に用いられる解析手法では、その正確な予測は困難であることを指摘している。

以上は、縮小模型実験や理論的考察等に基づき、船首の衝突時外力の評価式を提案した研究事例である。一方、1990年代からは、FEMを用いた船舶の衝突解析が行われるようになり、その研究事例としては船舶同士の衝突を対象とした Kierkegaard^[1.57]、黒岩ら^[1.58]、Endo et al.^[1.59]、Kitamura et al.^[1.60]、Törnqvist et al.^[1.61]、Haris et al.^[1.62]、船舶と橋脚や浮体式施設といった構造物との衝突を対象とした Wang et al.^{[1.63], [1.64]}、Fan et al.^[1.65]、Storheim et al.^[1.66]によるものなどがある。ただし、上述のとおり、FEMで動的効果を考慮する際に広く適用されてきた手法では動的倍率を過大評価し得ることが近年指摘されているため^[1.50]、FEMを用いて得られた結果の妥当性については適切に判断する必要がある。

以上、船舶の衝突により生じる外力評価について、船舶工学分野ではこれまでに様々な実験的・解析的研究により知見が蓄積されてきた。ただし、同外力については、米国、欧州、日本においてそれぞれ異なる評価式が提案されており、船舶衝突による建築物への入力荷重を設定する上では、その目的に合わせて上記の知見を適切に参照する必要がある。

1.2.3 津波漂流物の衝突に対する建築物の安全性検討手法に関する既往の研究

津波漂流物の衝突に対する建築物の安全性を確認する手法は、1.1 節に述べたとおり、「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」^[1.11]により、被衝突部材の局所的な損傷が建築物全体の崩壊を招かないよう確認することが提示されている。中村ら^[1.67]は、鉄筋コンクリート壁部材と衝突体との衝突実験により、漂流物が衝突する建築部材の破壊形式および損傷量を定量的に評価する手法を提案した。

一方、船舶といった大規模漂流物の衝突は、上述のような建築構造部材の局所的な損傷のみならず、建築物全体の挙動に重大な影響が生じかねない。そのため、筆者の所属する中塾研究室では、大規模漂流物として津波来襲時に広く一般に漂流が確認された船舶に着目し、その衝突時衝撃外力に対する建築物の応答特性に関する研究に取り組んできた^{[1.68]~[1.71]}。また、大貫ら^[1.72]は、漂流物の衝撃外力を廉ら^[1.36]の縮小模型実験結果に基づいて定め、その外力に対する建築物の安全性について、特定の建築物を対象に平面架構モデルを用いた静的漸増載荷解析および質点モデルを用いた動的応答解析により検討した。董ら^[1.73]は、船舶を建築物と同様に立体骨組みによりモデル化することで、その衝突時における船舶と建築物の相互作用を考慮した衝突解析を実施した。

以上に津波漂流物の衝突に対する建築物の安全性検討手法に関する研究事例を示したが、その事例は極めて少ないのが現状である。さらに、大規模津波漂流物である船舶に対しては、1.2.2 項に記したその衝突時の破壊形式を適切に反映した外力はこれまで考慮されていない。船舶の衝突に対して建築物の応答を適切に評価するためには、同衝突荷重の適切な設定が必要不可欠である。

なお、津波漂流物に対しては、工作物等を用いて建築物への衝突を防ぐことも有効な手段の一つである。津波漂流物対策施設設計ガイドライン^[1.73]では、津波漂流物の堰き止めを目的とした工作物（ポール、ネットなど）を対象に、漂流物の衝突エネルギーを対策施設の変形により吸収することで津波漂流物を堰き止めるための設計手法を示している。そのような工作物は本論文では検討対象としないが、津波漂流物への対策手法の一つとして参考までに紹介する。

1.3 本論文の目的

以上、1.1 節では、大規模津波漂流物、特に過去の津波来襲時に広く一般に漂流が確認された船舶の衝突に対し、建築物の構造安全性を定量的に検討する手法の確立が望まれることを、1.2 節では、その確立にあたり主に下記3つの課題があることを、それぞれ指摘した。

- 1) 津波来襲時における船舶の挙動を把握するべく開発が進められる数値シミュレーション解析では、船舶の挙動に重要な影響を及ぼし得る操舵や投錨といった人為的要因が考慮されていないこと（1.2.1 項）。
- 2) 大規模漂流物衝突時の衝撃外力は、船舶については船舶工学分野において検討されているものの複数の異なる評価式が提案されており、建築工学分野ではその適切な設定手法は検討されていないこと（1.2.2 項）。
- 3) 船舶衝突に対する建築物挙動の検討事例は極めて少なく、さらに、船舶の破壊形式を適切に反映した外力に対する建築物の挙動は検討されていないこと（1.2.3 項）。

以上のことを踏まえて本研究では、大規模津波漂流物として船舶に着目し、その衝突時衝撃外力に対する建築物の安全性検討手法を提案することを目的とし、以下3つの検討を行う。

1) 津波来襲時における船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度

2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時には、AIS データや記録映像など、船舶の挙動に関する多くのデータが記録されたため、本研究では、同データに基づき船舶の操舵といった人為的要因も含めた船舶の実挙動を把握する。そして、船舶が陸上の建築物に衝突するためには、船舶が陸域に遡上することが必要条件であることに着目し、同津波来襲時において陸域に遡上した船舶の割合、すなわち船舶の陸域遡上生起頻度を検討する。

2) 津波漂流船舶の衝突時衝撃外力

船舶衝突時の衝撃外力は、船舶の衝突条件（衝突速度、衝突方向）により大きく左右されるため、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶の実漂流挙動および実衝突事例に基づき、その衝突条件を定める。また、同実衝突事例に基づいて衝撃外力を評価し、さらに船舶工学分野における知見を参照することで、建築物に入力する衝撃外力を定める。

3) 船舶衝突時の衝撃外力に対する建築物応答の簡易評価手法

設計実務において建築物の安全性を検討する際には、一般的に最大応答層間変形がクライテリアとして用いられることが多い。そのため、上記 2) で定めた船舶衝突時の衝撃外力に対しても、建築物の最大応答層間変形を簡便に推定できると便利である。そこで、建築物を質点系モデルに置換し、同衝撃外力に対する建築物の最大応答を簡便に推定する手法を提案する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章 序論

第2章 津波来襲時における船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度

第3章 津波漂流船舶の衝突時衝撃外力

第4章 津波波力および衝撃外力に対する弾性多質点系応答の簡易評価手法

第5章 津波波力および衝撃外力に対する弾塑性多質点系応答の簡易評価手法

第6章 提案応答評価手法を用いた対津波漂流物設計への応用

第7章 結論

第 1 章「序論」では、船舶等の大規模津波漂流物の衝突に対する建築物の構造安全性を定量的に検討する手法を確立することの重要性について述べ、日本国内及び国外において実施された関連する既往研究について、現状および課題について述べる。次に、本研究の「津波漂流船舶の衝突時における衝撃外力が建築物の応答に与える影響評価」について、その具体的な目的と検討内容を述べる。最後に、本論文の構成について説明する。

第 2 章「津波来襲時における船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度」では、船舶が陸上の建築物に衝突するためには船舶が陸域に遡上することが必要条件であることに着目し、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶の実挙動を分析することで、津波来襲時において船舶の陸域遡上に関係が深い要因の特定と、船舶の陸域遡上生起頻度の検討を行う。

第 3 章「津波漂流船舶の衝突時衝撃外力」では、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶と構造物との衝突事例、ならびに船舶の漂流事例を分析し、同分析結果と船舶工学分野における既往の知見に基づき、船舶衝突時の衝撃外力を定義する。

第 4 章「津波波力および衝撃外力に対する弾性多質点系応答の簡易評価手法」では、3 章で定義した船舶衝突時衝撃外力に対する建築物の弾性応答特性を検討し、その検討結果に基づき、最大弾性応答を簡便に推定する手法を提案する。

第 5 章「津波波力および衝撃外力に対する弾塑性多質点系応答の簡易評価手法」では、3 章で設定した船舶衝突時衝撃外力に対する建築物の弾塑性応答特性を検討し、その検討結果と、4 章で提案した弾性応答推定手法に基づき、最大弾塑性応答を簡便に推定する手法を提案する。

第 6 章「提案応答評価手法を用いた対津波漂流物設計への応用」では、2 章～5 章における検討によって得られた知見に基づき、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の応答評価手順を提案する

とともに、その衝突に耐え得る建築物に必要とされる構造性能を検討する。

第 7 章「結論」では、本論文で得られる結論を総括するとともに、今後引き続き検討すべき課題について記述する。

本論文の構成本論文の構成を図 1.10 に示す。

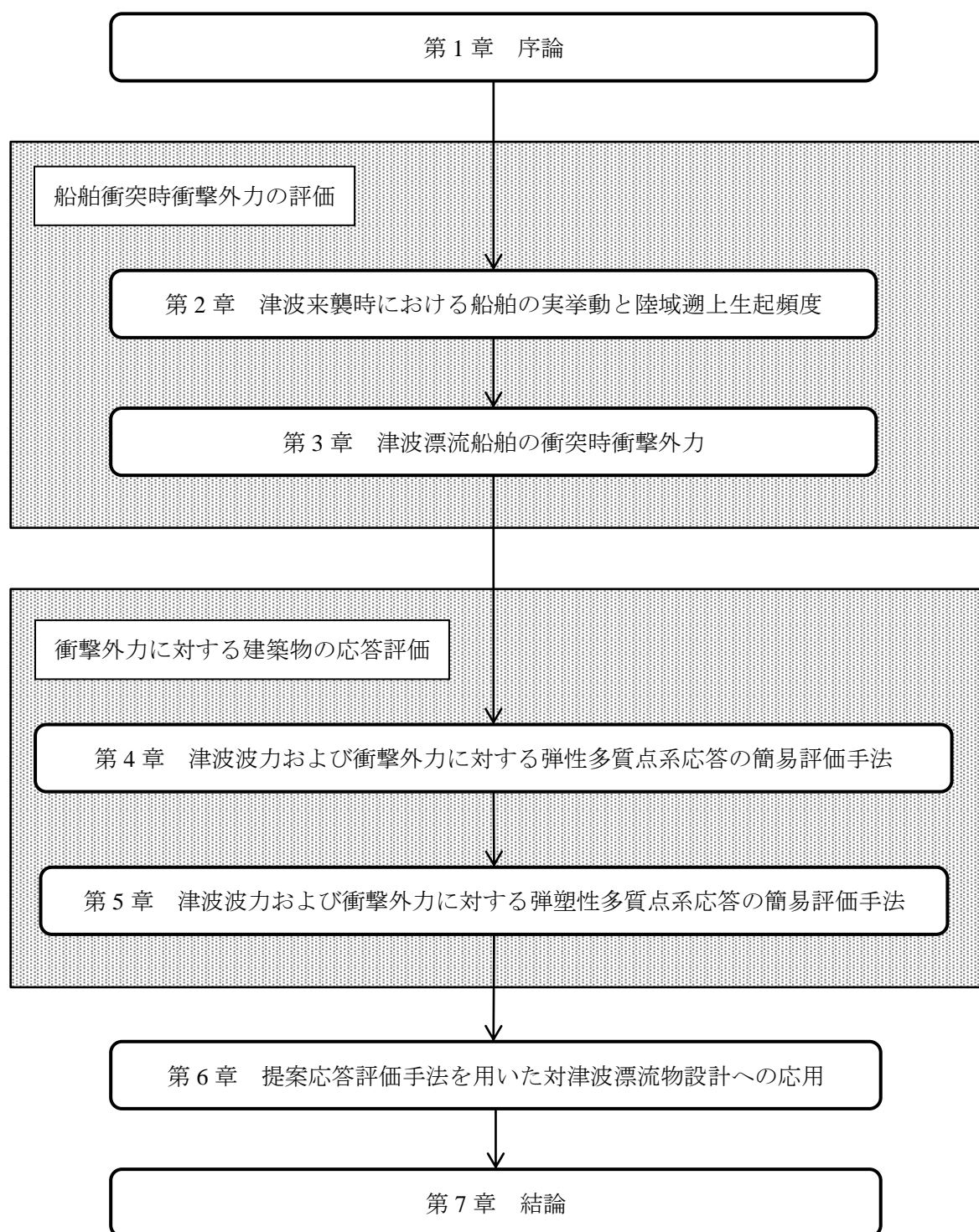


図 1.10 本研究の流れ

[参考文献]

- [1.1] 時事通信社：「特集 日本の震災」
http://www.jiji.com/jc/v2?id=20100822earthquake_disaster_of_japan
- [1.2] 共同通信社：戦後 20 年写真集，1965 年
- [1.3] 京都大学防災研究所 巨大災害研究センター：「災害と防災の世界」
<http://inpaku.dpri.kyoto-u.ac.jp/jp/>
- [1.4] 河北新報：「大津波の追い打ち」，1983 年 5 月 26 日
- [1.5] 土木学会耐震工学委員会：「1993 年北海道南西沖地震震害調査報告」
<https://www.jsce.or.jp/library/eq10/book/bklist/44808/eqbk01.htm>
- [1.6] インド洋地震津波災害調査研究グループ：The 2004 Indian Ocean Tsunami Disaster Survey Report, <http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/index-j.html>
- [1.7] 日本経済新聞：日本経済新聞電子版，3 月 12 日
<http://www.nikkei.com/article/DGXZZO34197320T20C11A8000000/>
- [1.8] 東京大学生産技術研究所 中埜研究室：2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震による建築物の地震被害および津波被害調査報告，2012 年 3 月
- [1.9] 国土交通省国土技術政策総合研究所，建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震調査研究（速報）東日本大震災，建築研究資料，No.132，2011 年 5 月
- [1.10] 港湾空港技術研究所：2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231，2011 年 4 月
- [1.11] 国土交通省：東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針，2011 年 11 月
- [1.12] 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2015），2015 年 2 月
- [1.13] FEMA/Federal Emergency Management Agency: Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Second Edition, *FEMA P-646*, 2012.4.
- [1.14] ASCE/American Society of Civil Engineers: ASCE7 Chapter 6 Tsunami Loads and Effects, 2017（予定）
- [1.15] 後藤智明，佐々木順次，首藤伸夫：津波による木材の流動，海岸工学講演会論文集，第 29 巻，pp.491-495，1982 年 10 月
- [1.16] 藤井直樹，大森政則，池谷毅，朝倉良介，武田智吉，柳沢賢：港湾における津波漂流物の数値解析，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.296-300，2005 年 11 月
- [1.17] 橋本貴之，越村俊一，小林英一：津波による大型船舶の漂流挙動解析 インドネシア・バンダアチェにおける事例，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.65，No.1，pp.316-320，2009 年 11 月
- [1.18] 榊原繁樹，安部郁男，津金正典：東北地方太平洋沖地震津波来襲時の係留 VLCC の挙動再現について，日本航海学会論文集，第 127 号，pp.57-68，2012 年 5 月
- [1.19] 菅裕介，越村俊一，小林英一：2011 年東北地方太平洋沖地震による気仙沼湾における大型

- 船舶の漂流・座礁の解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp. I _251- I _255, 2012 年 11 月
- [1.20] 富田孝史, 丹羽竜也: 八戸港における東北地方太平洋沖地震津波の再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp. I _236- I _240, 2013 年 11 月
- [1.21] 松田信彦, 富田孝史: AIS を用いた津波漂流船舶の挙動と衝突被害分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp. I _1657- I _1662, 2015 年 11 月
- [1.22] 許松, 嶋原良典, 多田毅, 林建二郎: 津波による船舶群の漂流・座礁に関する水理実験と数値モデルの検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp. I _277- I _282, 2015 年 11 月
- [1.23] 野島和也, 桜庭雅明, 小園裕司: 津波バリアの影響を考慮した実務的な津波漂流物計算モデルの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp. I _283- I _288, 2015 年 11 月
- [1.24] 増田光一, 相田康洋, 居駒知樹, 惠藤浩朗: 仮想弾性境界の有用性について 津波漂流物と構造物の衝突問題への MPS 法の応用に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.722, pp.813-823, 2016 年 4 月
- [1.25] 吉田郁政, 竹内大記, 大森政則, 藤井直樹, 柳沢賢: 津波漂流物による衝突力ハザードの算定方法について, 土木学会地震工学論文集, 第 29 巻, pp.912-917, 2007 年 8 月
- [1.26] 藤井直樹, 福山貴子, 稲垣聡, 池谷毅, 柳沢賢, 大森政則: 津波による漂流物挙動の変動性に関する実験と評価手法の提案, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.241-245, 2007 年 11 月
- [1.27] 木原直人, 松山昌史, 藤井直樹: 漂流物挙動解析による津波漂流物衝突に関する確率論的評価手法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp. I _341- I _345, 2013 年 11 月
- [1.28] 甲斐田秀樹, 木原直人: 陸上遡上津波中の漂流物挙動に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp. I _1159- I _1164, 2016 年 11 月
- [1.29] 桜庭雅明, 野島和也, 小園裕司: 建物の影響及び漂流物の不確定性を考慮した漂流物被害予測モデルの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp. I _445- I _450, 2016 年 11 月
- [1.30] 星野智史, 増田光一, 居駒知樹, 惠藤浩朗: 津波作用時の構造物が流れ場に与える影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 海洋建築, pp.41-42, 2015 年 9 月
- [1.31] 日本海難防止協会: 大地震及び大津波来襲時の航行安全対策調査 津波影響による船舶避難行動と被災状況等に係る基礎調査 報告書, 2012 年 3 月
- [1.32] 牧野秀成, 小林英一, 長谷川和彦: AIS データを用いた大津波時の船舶の避難状況解析 — 2011 年東北地方太平洋沖地震大津波時の事例 —, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 16 号, pp.43-46, 2013 年 5 月
- [1.33] 松富英夫: 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No.621, II -47, pp.111-127, 1999 年 5 月

-
- [1.34] 池野正明, 田中寛好: 陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.721-725, 2003年10月
- [1.35] 水谷法美, 高木裕介, 白石和睦, 宮島正悟, 富田孝史: エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.741-745, 2005年10月
- [1.36] 廉慶善, 水谷法美, 白石和睦, 宇佐美敦浩, 宮島正悟, 富田孝史: 陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.851-855, 2007年10月
- [1.37] 有川太郎, 大坪大輔, 中野史丈, 下迫健一郎, 石川信隆: 遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.846-850, 2007年10月
- [1.38] 有川太郎, 鷺崎誠: 津波による漂流木のコンクリート壁面破壊に関する大規模実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.781-785, 2010年10月
- [1.39] Aghl, P.P., Naito, C.J. and Riggs, H.R.: Full-Scale Experimental Study of Impact Demands Resulting from High Mass, Low Velocity Debris, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 04014006, 2014.5.
- [1.40] Minorsky, V. U.: An Analysis of Ship Collisions with Reference to Protection of Nuclear Power Plants, *Journal of Ship Research*, Vol.3, pp.1-4, 1959.10.
- [1.41] Woisin, G.: Die Kollisionsversuche der GKSS, *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, Vol.70, pp.465-487, 1976.
- [1.42] Woisin, G.: Conclusions from Collision Examinations for Nuclear Merchant Ships in the FRG, *Proceedings of Symposium on the Safety of Nuclear Ships*, pp.137-147, 1977.12.
- [1.43] Knott, M. A., Moffatt, P.E. and Richmond, N.: Vessel Collision Design - Risk Analysis and Deep Foundation Issues for Bridges over Navigable Waterways, *A Perspective on the Design and Construction of Deep Marine Foundations*, Deep Foundations Institute, No.1654, 2013.1.
- [1.44] Saul, R. and Svensson, H.: On the Theory of Ship Collision against Bridge Piers, *International Association for Bridge and Structural Engineering Conference Proceedings*, P-51/82, pp.29-40, 1982.2.
- [1.45] AASHTO/American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS, 2014.
- [1.46] Pedersen, P.T., Valsgard. S., Olsen, D. and Spangenberg, S.: Ship Impacts: Bow Collisions, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.13, No.2, pp.163-187, 1993.
- [1.47] Amdahl, J.: Energy Absorption in Ship-Platform Impacts, Ph. D Thesis of The Norwegian Institute of Technology, Report No. UR-83-34, 1983.9.
- [1.48] Hagiwara, K., Takanabe. H., and Kawano, H.: A Proposed Method of Predicting Ship Collision Damage, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.1, No.3, pp.257-279, 1983.
- [1.49] European Committee for Standardization: Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-7: General actions - Accidental actions, 2014.
- [1.50] Storheim, M., and Amdahl, J.: On the Sensitivity to Work Hardening and Strain-rate Effects in
-

- Nonlinear FEM Analysis of Ship Collisions, *Journal of Ships and Offshore Structures*, Vol.12, No.1, pp.100-115, 2017.1.
- [1.51] Cowper, J., and Symonds, P: Strain-hardening and Strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams, *Technical Report No.28*, Division of Applied Mathematics, Brown University, 1957.9.
- [1.52] 横山隆：衝撃工学の基礎と応用，共立出版，2014 年 5 月
- [1.53] 長沢準，有田喜久雄，谷政明，岡修二：通航船舶の橋脚衝突時の圧壊強度について，日本造船学会論文集，第 142 号，pp.323-332，1977 年 11 月
- [1.54] 本州四国連絡橋公団：複合材型緩衝工の設計要領（案），1981 年 3 月
- [1.55] 庄司邦昭，高林時子：橋脚衝突時の船首強度計算式に対する船体所寸法の影響，日本航海学会論文集，第 101 号，pp.201-209，1999 年 5 月
- [1.56] Haris, S., and Amdahl, J: Analysis of Ship-Ship Collision Damage Accounting for Bow and Side Deformation Interaction, *Journal of Ships and Offshore Structures*, Vol.7, No.2, pp.185-195, 2012.
- [1.57] Kierkegaard, H.: Ship Bow Response in High Energy Collisions, *Journal of Marine Structures*, 6, pp.359-376, 1993.
- [1.58] 黒岩隆夫，北村欧，川本要次：船体構造の耐衝突・座礁性能に関する研究，三菱重工技報，Vol.34, No.5, pp.350-353，1997 年 9 月
- [1.59] Endo, H., Yamada, Y., Kitamura, O. and Suzuki, K.: Model Test on the Collapse Strength of the Buffer Bow Structures, *Journal of Marine Structures*, 15, pp.365-381, 2002.
- [1.60] Kitamura, O.: FEM Approach to the Simulation of Collision and Grounding Damage, *Journal of Marine Structures*, 15, pp.403-428, 2002.
- [1.61] Törnqvist, R.: Design of Crashworthy Ship Structures, Ph. D Thesis of Technical University of Denmark, 2003.6.
- [1.62] Haris, S., and Amdahl, J: Analysis of Ship-Ship Collision Damage Accounting for Bow and Side Deformation Interaction, *Journal of Marine Structures*, 32, pp.18-48, 2013.
- [1.63] Wang, J., Yan, H., and Qian, H.: Comparisons of Ship Collision Design Formula for Bridges Based on FEM Simulations, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, Vol.1, No.1, pp.46-50, 2006.
- [1.64] Wang, J., Yan, H., and Qian, H.: Basic Impact Loading Models of Head Bow-on Collision Between a Ship and Rigid Wall, *Chinese Journal of Vibration and Shock*, Vol.29, No.11, pp.165-170, 2010.
- [1.65] Fan, W., and Yuan, W.: Ship Bow Force-deformation Curves for Ship-Impact Demand of Bridges Considering Effect of Pile-Cap Depth, *Journal of Shock and Vibration*, 201425, pp.1-19, 2014.3.
- [1.66] Storheim, M., and Amdahl, J.: Crushing Resistance of a Cruciform and Its Application to Ship Collision and Grounding, *Journal of Marine Structures*, 37, pp.157-162, 2014.7.
- [1.67] 中村聡，渡邊秀和，河野進，藤掛一典，田中仁史，鈴木紀雄，小原拓：津波浮遊物の衝突を受ける RC 壁の局部損傷評価に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.80，

- No.715, pp.1459-1468, 2015 年 9 月
- [1.68] 崔琥, 本村友一, 高橋典之, 松川和人, 楊勇, 中埜良昭: 津波漂流物の衝突による建築物の応答特性に関する研究 その 1 非線形時刻歴応答解析による建物の応答評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造 I, pp.251-252, 2013 年 8 月
- [1.69] 楊勇, 本村友一, 崔琥, 高橋典之, 松川和人, 中埜良昭: 津波漂流物の衝突による建築物の応答特性に関する研究 その 2 縮小試験体を用いた建物と津波漂流物の衝突実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造 I, pp.253-254, 2013 年 8 月
- [1.70] 松川和人, 板倉正英, 崔琥, 浅井竜也, 中埜良昭: 津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に基づく RC 造建築物の応答特性 その 1 縮小試験体を用いた振り子衝突実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造 II, pp.311-312, 2015 年 9 月
- [1.71] 板倉正英, 崔琥, 松川和人, 浅井竜也, 中埜良昭: 津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に基づく RC 造建築物の応答特性 その 2 実験結果に基づく衝撃外力評価と非線形時刻歴応答解析による建物応答評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造 II, pp.313-314, 2015 年 9 月
- [1.72] 大貫かほり, 高橋典之: 津波避難ビルの漂流物衝突に対する構造性能評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1-6, 2016 年 7 月
- [1.73] 董元奇, 磯部大吾郎: 津波と津波漂流物の衝突による建物の崩壊解析, 計算工学講演会論文集, Vol.18, 2013 年 6 月
- [1.74] 沿岸技術研究センター, 寒地港湾技術研究センター: 津波漂流物対策施設設計ガイドライン, 2014 年 3 月

第 2 章

津波来襲時における 船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度

2. 津波来襲時における船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度

2.1 はじめに

津波来襲時における船舶の衝突に対する建築物の安全性を検討するためには、船舶の挙動を操舵といった人為的要因による影響も含めて把握し、建築物への衝突可能性を検討する必要がある。そこで本章では、船舶が陸上の建築物に衝突するためには、船舶が陸域に遡上することが必要条件であることに着目し、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶の実挙動をAISデータや船舶の避難行動に関するアンケート調査結果等に基づき分析することで、船舶の陸域遡上と関係の深い要因を特定する。そして、その要因をパラメータとし、同津波来襲時において陸域に遡上した船舶の割合、すなわち船舶の陸域遡上生起頻度を検討する。最後に、同要因と船舶規模との関係を明らかにすることで、将来の津波来襲時において、建築物への衝突船舶規模の設定に資する知見を導出する。

2.2 検討対象船舶データベースの作成

2.2.1 検討対象船舶のデータソース

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震による津波の影響を受けた船舶のうち、下記の①～③を満たす船舶を以下のデータソースⅠ～Ⅲより抽出し、船舶の実挙動および陸域遡上生起頻度の検討を目的としたデータベースを作成した。

- ①2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時に、その影響を受けたと考えられる苫小牧港と銚子港との間に位置する各港に在港していた船舶。
- ②総トン数 100 ton 以上の船舶。
- ③起重機船、台船などの特殊な形状を有する作業船を除く船舶。

なお、上記②について、総トン数 100 ton 以上の船舶の多く（日本国籍の船舶において 96 %^[2.1)]）が鋼製船舶なのに対し、100 ton 未満の船舶における鋼製船舶の割合は比較的低いことがわかっている（日本国籍の船舶において 54 %であり、その他 46 %は強化プラスチックやアルミニウムなどで構成されている^[2.1)]）。鋼製船舶とその他の船舶とでは衝突時の衝撃外力において異なる性状を示す可能性があるため、本研究では比較的大規模な 100 ton 以上の船舶を対象を絞ることとした。

以下に、各データソースⅠ～Ⅲそれぞれについて記す。

(1) データソースⅠ：2011年3月11日における船舶のAISデータ

AIS（Automatic Identification System）とは、船舶の識別番号や名称等の基本的な情報に加え、船位（緯度、経度）、針路、速度等の航行に関する情報を船舶局相互間および船舶局と陸上局間でリアルタイムに送受信するシステムのことである。日本国内では、「船舶設備規程第四百六十六条の二十九」^[2.2)]において、下記 i) ～ iii) のいずれかの条件を満たす船舶に対し AIS 装置の搭載が義務付けられている。

- i) 国際航海に従事する総トン数 300 ton 以上のすべての船舶
- ii) 国際航海に従事する総トン数 300 ton 未満の旅客船
- iii) 国際航海に従事しない総トン数 500 ton 以上の船舶

AIS データは船舶の速度に応じて 2 秒～6 分間隔で自動的に送信されるものの、船舶局もしくは陸上局の停電時などの場合にはデータの送受信が行われない。また、同データのうち、船位は平均的に 6～8 m 程度、最大で 20 m 程度の誤差の発生が指摘されていること^[2.3)]、船舶の仕向け港や喫水など、船員が直接入力する一部の項目については正確性に欠ける場合があること、にそれぞれ注意が必要である。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時において海上保安庁の陸上局により AIS データが取得された船舶の中から検討対象船舶を抽出した。

(2) データソースⅡ：船舶の避難行動に関するアンケート調査結果

2011年東北地方太平洋沖地震による甚大な津波被害を受け、海事関係者を対象に、同津波来襲

時の船舶の避難行動に関するアンケート調査が日本海難防止協会により実施され、その調査結果に基づき同津波来襲時の船舶の状況（船位や積荷状況など）や発災後の避難行動が体系的に把握・分析された^[2.4]。さらに、その成果は今後の津波に対する船舶の安全対策の検討へと反映されている^{[2.5]~[2.7]}。本研究では、同アンケート調査により津波来襲時の行動が把握された船舶の中から、検討対象船舶を抽出した。

(3) データソースⅢ：津波来襲時の船舶挙動に関する各種文献

同津波来襲時の船舶挙動については、官公庁やマスメディア等により各種報告がなされているため、それらの文献^{[2.8]~[2.29]}に基づき検討対象船舶を抽出した。ただし、先述のとおり、本研究では船舶の陸域遡上生起頻度を検討することを目的としているため、同文献のうち、特に陸域遡上した船舶のみに着目した文献は対象外とすることで、検討母集団に偏りが生じないよう配慮した。

以上のデータソースⅠ～Ⅲにより抽出した船舶データ数はそれぞれ 78 隻、70 隻、81 隻であるが、各データソース間で互いに重複する船舶データが存在するため、検討対象データはその単純和とはならず、合計 143 隻となった（図 2.1）。付録 1 に、検討対象船舶の一覧を掲載する。

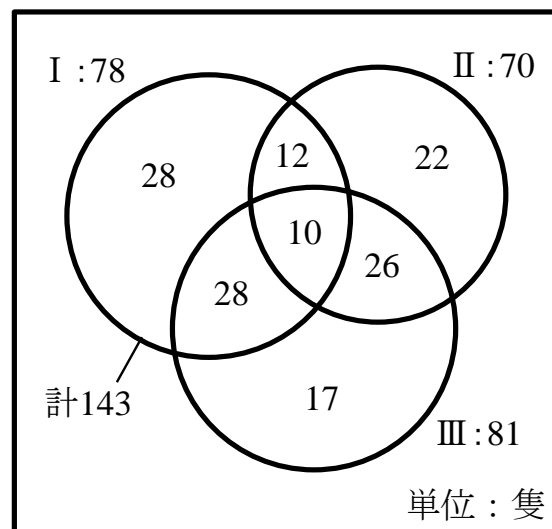


図 2.1 各データソースから抽出した船舶データ数

2.2.2 検討対象船舶データの主要目の特定

本項では、前項で抽出した船舶データについて、検討に用いる船舶の3主要目（全長、総トン数および喫水）の特定手法を記す。同3主要目は、基本的には前節のデータソースⅡ、Ⅲに加え船舶明細書^[2.1]（日本国籍の全船舶のデータを収録した冊子）および Marine Traffic^[2.30]などの船舶の位置情報提供サイトにに基づき特定したものの、特定できない場合にはそれぞれ以下に示す手法によりその値を仮定した。

(1) 船舶の全長の特定

船舶の全長は、船舶の前端から後端までの水平距離として定義される（図 2.2）。本検討対象船舶のうち、上述のデータソース等によって全長データが特定できなかった船舶4隻のうち、大船渡港と石巻港の船舶計2隻（OFT-04, ISM-06）については、Google Earth Pro(Google 社)における航空写真において両船舶を識別し、同ソフトウェアの距離計測機能によりその全長を計測した（「付録 1. 検討対象船舶一覧」の「全長」における青色着色部）。残りの船舶2隻（KSM-11, 12）については、両船舶が在港していた鹿島港において、当該船舶と運航会社が同じであり、なおかつ総トン数が等しい5隻の船舶（KSM-03～07）の全長と等しいと仮定して定めた（同赤色着色部）。

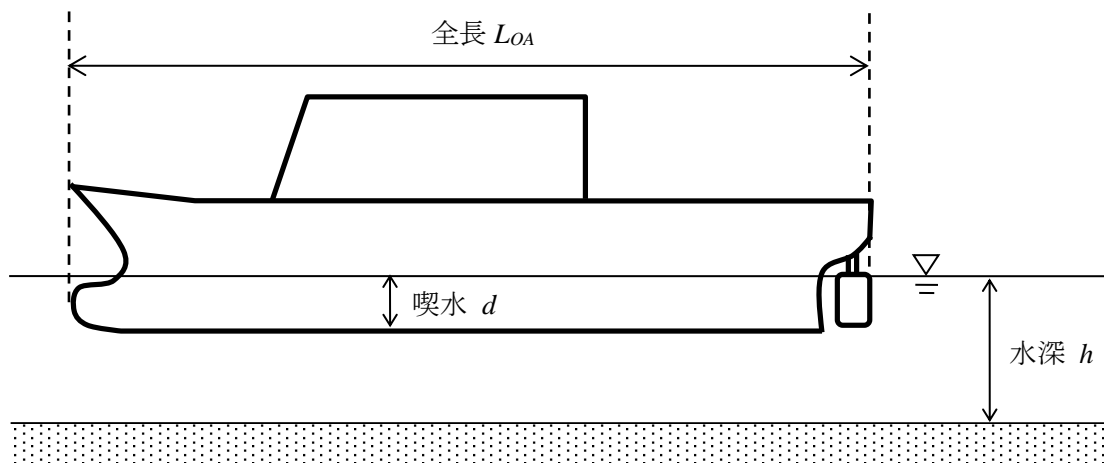


図 2.2 船舶の全長 L_{OA} および喫水 d の定義

(2) 船舶の総トン数の特定

船舶の総トン数とは、船舶の容積規模を表す指標であり、船舶規模を議論する際に一般的に用いられる。総トン数には、国際的な統一基準として定める国際総トン数 t [ton]と、日本国内独自で定める国内総トン数 T_G [ton]とがあり、両総トン数の算出方法は「船舶のトン数の測度に関する法律施行規則」^[2.31]において、まず国際総トン数 t を船舶の容積に基づいて算出し、その値を式(2.1)に代入することで国内総トン数 T_G を算出するよう定められている。ただし、二層以上の甲板を備

える船舶で同規則 36 条に該当する船舶については、式(2.1)により求まる値に、さらに第二甲板の位置に応じて求まる係数（0.45～0.65 の値をとる）を乗じて国内総トン数 T_G を算出する。

$$T_G = [(0.6+t/10,000) \times \{1 + (30-t)/180\}] \times t \quad (2.1)$$

ただし、

$$(0.6+t/10,000) \leq 1 \quad (\text{すなわち } 4,000 \text{ ton 以上の船舶に対しては } 1.0 \text{ をとる})$$

$$\{1 + (30-t)/180\} \geq 1 \quad (\text{すなわち } 30 \text{ ton 以上の船舶に対しては } 1.0 \text{ をとる})$$

なお、前項の AIS の搭載条件 i) ～ iii) における総トン数は、「船舶設備規程第一条」^[2.11]により、国際総トン数を取得している船舶は国際総トン数を、取得していない船舶は国内総トン数を、それぞれ用いることが定められている。

本検討対象データには、国際総トン数のみを有する外国籍の船舶と、国際総トン数を取得しておらず国内総トン数のみを有する日本国籍の船舶が混在する。そのため同データを国内総トン数により統一的に議論するためには（本検討対象船舶には日本国籍の船舶が多いため、便宜上国内総トン数を用いて議論する）、外国籍の船舶の国際総トン数を国内総トン数に換算する必要があるものの、同船舶が先述の規則 36 条に該当するかを判断するための十分なデータが得られていない。そこでここでは、本検討対象船舶に含まれる外国籍船舶の船種のうち、漁船を除く 10 船種（一般貨物船、ケミカルタンカー、撒積専用船、冷蔵・冷凍運搬船、石炭専用船、砂利運搬船、自動車専用船、油送船、木材専用船、LPG 船）においては、船舶明細書^[2.7]に両総トン数が登録されている船舶 81 隻すべてが先述の規則 36 条には該当していないことに着目し、外国籍船舶の国際総トン数を一律式(2.1)により国内総トン数に換算することとした（「付録 1. 検討対象船舶一覧」の「国内総トン数」における青色着色部）。なお、本検討対象船舶における外国籍の漁船（OFT-01 の 1 隻のみ）については、式(2.1)により求まる国内総トン数を用いても、同 36 条に該当する船舶に適用される係数を乗じた総トン数を用いても、その総トン数を用いた結果（図 2.4、図 2.26 および図 2.27）および本稿の結論に差異を生じさせないため、以上のように定めることとした。

(3) 船舶の喫水の特定

船舶の喫水とは、図 2.2 に示すとおり、船舶の最下端から水面までの垂直距離 d として定義され、その距離は船舶の載荷状況によって軽荷喫水 d_L から満載喫水 d_F まで変動する。本検討では、各船舶の津波来襲時の喫水（発災時喫水）および満載／軽荷喫水それぞれについて、以下のように特定した。

まず、発災時喫水は、データソースⅡおよびⅢならびに各種文献に基づき、計 53 隻の値を特定した（先述のとおりデータソースⅠに記録された喫水は、船員により逐次手入力され、一般に停泊中の喫水変動が反映されていないため本検討では用いないこととした）。なお、喫水は、船舶における積荷状況の偏りにより船首と船尾との間でその差（トリム）が生じる場合があるが、本検討では喫水と浸水深とを比較し船舶の着底を判断することを目的としているため、その場合には

両喫水のうち大きい方の値を発災時喫水として採用した。

次に、船舶の満載／軽荷喫水については、その特定手法に応じて以下のように信頼度 i および ii の喫水にそれぞれ分類した。信頼度 i の喫水は、データソースⅡ、Ⅲおよび各種文献に基づき特定した喫水とし、信頼度が高いと思われる喫水である。一方、信頼度 ii の喫水は、同データソースや文献により特定できなかったため、国内船舶の全長と総トン数との一般的な関係に基づき推定した喫水とし、比較的信頼度が低い喫水である（「付録 1. 検討対象船舶一覧」の「軽荷喫水」および「満載喫水」における青色着色部）。すなわち、まず船舶をその種類に応じて表 2.1 のように分類し、その船種分類ごとに船舶明細書^{2.1)}に掲載されている船舶データに基づき船舶の全長から満載／軽荷喫水を推定する直線回帰式を最小二乗法により導出し（図 2.3）、同式を用いて両喫水を推定した。ただし、プロットの傾向を勘案して、図 2.3 の分類 B および E については、船舶の全長と軽荷喫水との関係を一直線で表すのは適切でないと判断し、分類 B では全長 40 m、分類 E では 100 m をそれぞれ境界値として、両値未満の範囲ではその範囲内のデータに基づく直線回帰式により喫水を推定し、両値以上の範囲では同回帰式に境界値を代入して求まる値で一定とした。なお、表 2.1 に示した分類 F の船舶については、そのうち巡視船については船舶明細書に本検討対象船舶（HHE-01, KIS-05, SGM-01, SND-17）と同規模の喫水データが掲載されていないこと、油回収船（KJI-01）については信頼度 i の満載喫水が得られており、以降の検討では本船舶の軽荷喫水は用いないこと、を勘案し、船舶の全長と喫水との関係は検討していない。

表 2.1 船舶の船種による分類

分類	船種
A	旅客船
B	漁船，漁業指導船，漁業調査船，漁業指導調査船
C	曳船，揚錨／曳兼用船，曳／救助専用船，押／曳兼用船
D	一般貨物船，フェリー，フルコンテナ船，探査船，冷凍・冷蔵運搬船，自動車／貨物兼用船，自動車専用船
E	撒積専用船，油送船，LPG船，石炭専用船，ケミカルタンカー，セメント専用船，砂利運搬船，鉱／炭兼用船，木材専用船
F	巡視船，油回収船

以上により特定した船舶の全長，総トン数および喫水（発災時喫水および満載／軽荷喫水）を、「付録 1 検討対象船舶一覧」に記す。

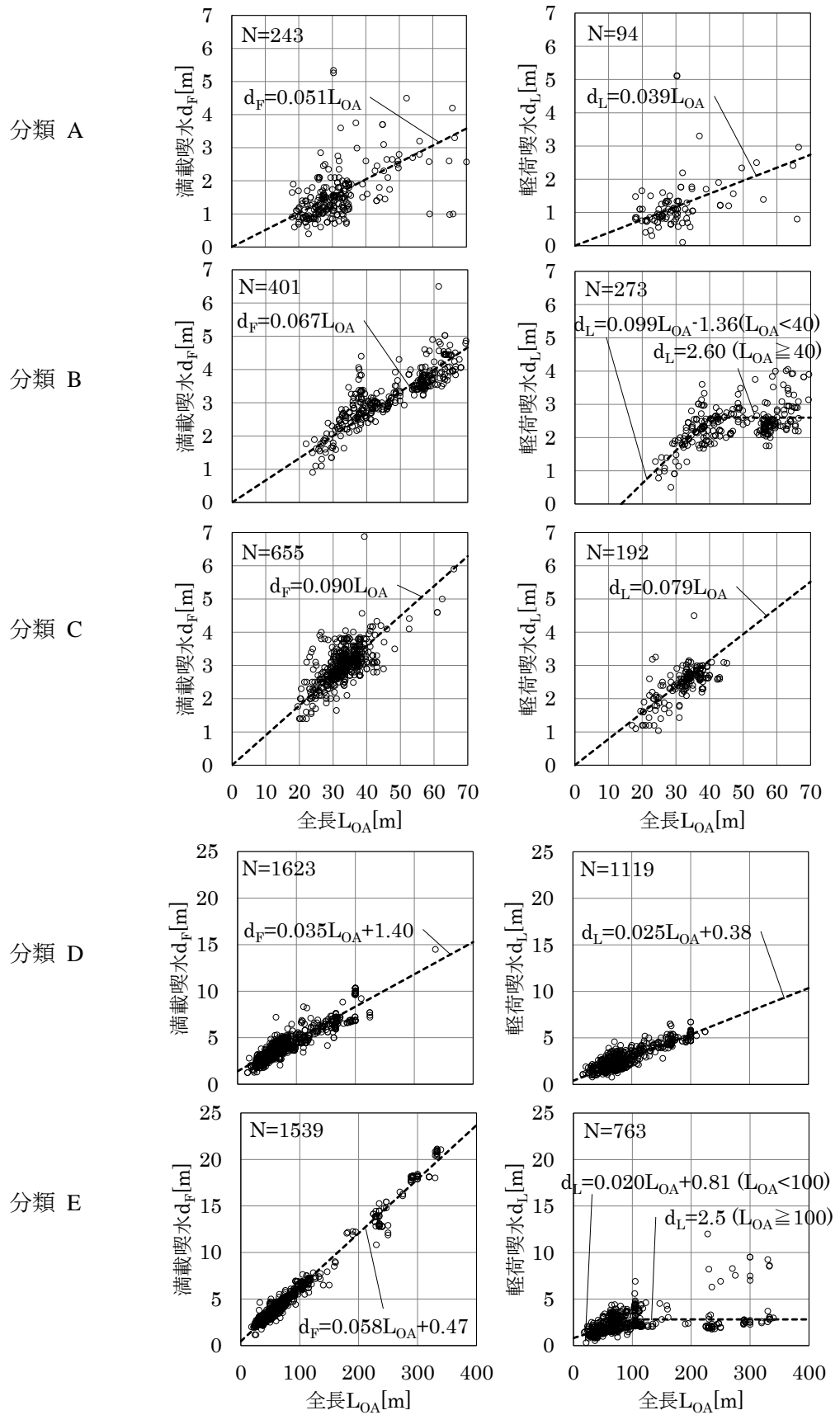
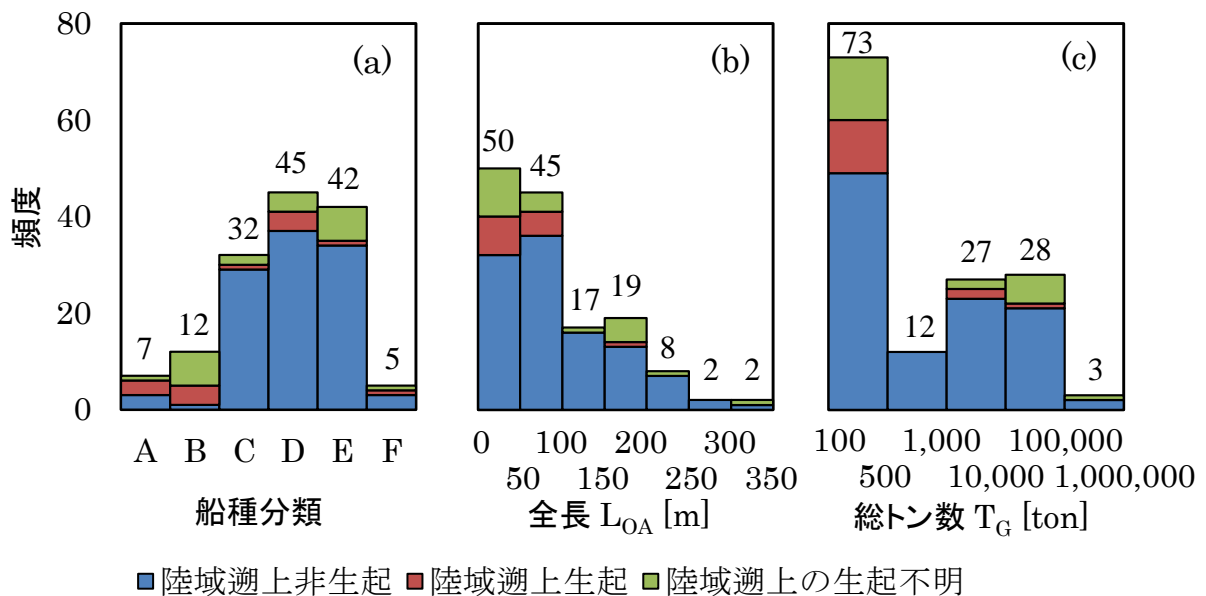


図 2.3 船舶の全長 L_{OA} と満載喫水 d_F および軽荷喫水 d_L との関係 (文献[2.1]に基づき作成)

2.2.3 検討対象船舶データの構成

以上に作成した検討対象船舶データの構成を把握するため、図 2.4 には、船舶の船種分類、全長、および総トン数の頻度分布について、陸域遡上の生起／非生起の船舶数を併せて示す。同図(a)より、船種分類は一般貨物船および撒積貨物船にそれぞれ代表される分類 D および E の船舶が多く、ついで曳船に代表される分類 C が多いことが、同図(b)より、全長は 100 m 未満の船舶が 95 隻と 7 割近くを占めることが、同図(c)より、総トン数（国内総トン数）は 500 ton 未満の船舶が 73 隻と 5 割以上を占めていることが、それぞれわかる。また、陸域遡上した船舶は、全長にして 100 m 未満、総トン数にして 500 ton 未満の比較的小規模な船舶に多いことがわかる。以上に得られた船舶データを用いて、船舶の陸域遡上に重要な要因の特定と、陸域遡上頻度を検討する。



* 図(b), (c)における頻度は、各階級における下限値以上、上限値未満の船舶数を示す。

図 2.4 検討対象船舶の頻度分布 (N=143)

2.3 AIS データに基づく各港における船舶の実挙動分析

本節では、船舶の陸域遡上に重要な要因を特定することを目的に、2011 年東北地方太平洋沖地震による津波来襲時に記録された AIS データ（前節データソース I）に基づき各港における船舶の実挙動を分析する。

なお、原町火力発電所に隣接する港湾ならびに鹿島港については、両港に在港していた船舶の AIS データは得られているものの、いずれの船舶についてもその詳細な挙動を把握し得る十分なデータ数が得られなかったため、本節における分析は省略する。なお、鹿島港における船舶の挙動については、富田ら^[2.8]が別途入手した AIS データに基づき検討しているため、次節における船舶の陸域遡上生起頻度の検討では、同文献を参照した。

2.3.1 八戸港における船舶挙動

図 2.5 には、八戸港において AIS データが得られた船舶 HHE-01～06 の軌跡について、GoogleEarthPro を用いて航空写真上にプロットして示す。同図では、地震発生時刻である 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分から同日 19 時まで（港外に避難もしくは漂流した船舶はその時間まで）の同港における各船舶の軌跡をプロットする。また、各船舶の地震発生時刻における位置を丸印により示し、その移動開始時刻（速度 0.5 knot 以上（0.26 m/s 以上）となった時刻と定義する）を併記する（以降の他の港湾における軌跡図においても同様）。

同図より、同港において AIS データが得られた全 6 隻のうち、比較的早く避難を開始した 4 隻の船舶（HHE-03～06）は順調に港外避難を成功させたことが確認できる。当然、これらの船舶はいずれも陸域に遡上していない。

残りの 2 隻のうち HHE-01 については、その発災時の避難行動の詳細（避難判断、操舵可否等）については不明であるが、AIS データに基づく限りでは、同船舶は上記 4 隻の船舶とは異なり早期の冲出しは行わず、そのため津波の影響を受けて港内を回流している。ただし、その後無事に港外に避難しており、本船舶も陸域遡上には至っていない。

残りの 1 隻の HHE-02 は、津波の到達までに離棧作業が間に合わず、引き波時に係留索が切断し移動を開始した船舶であり、津波の影響により船体運動の制御が困難となりながらも、懸命な操舵および投錨により他船との衝突等を避けた事例である^[2.9]。図 2.6 には、同船舶の挙動をより詳細に把握するために、船舶の全長および船首方位を反映させた軌跡図を示す。なお、同図においては、2.2 節に記したとおり、船位のプロットは一定の時間間隔とはなっていないこと、船位には最大 20 m 程度の誤差を含むこと、にそれぞれ注意されたい。同船舶は船尾が岸壁および消波ブロックと衝突したことが報告されているが^[2.10]、同図においてもその様子を確認することができる（衝突時の挙動の詳細については 3 章に記す）。なお、本船舶も陸域への遡上には至っていない。

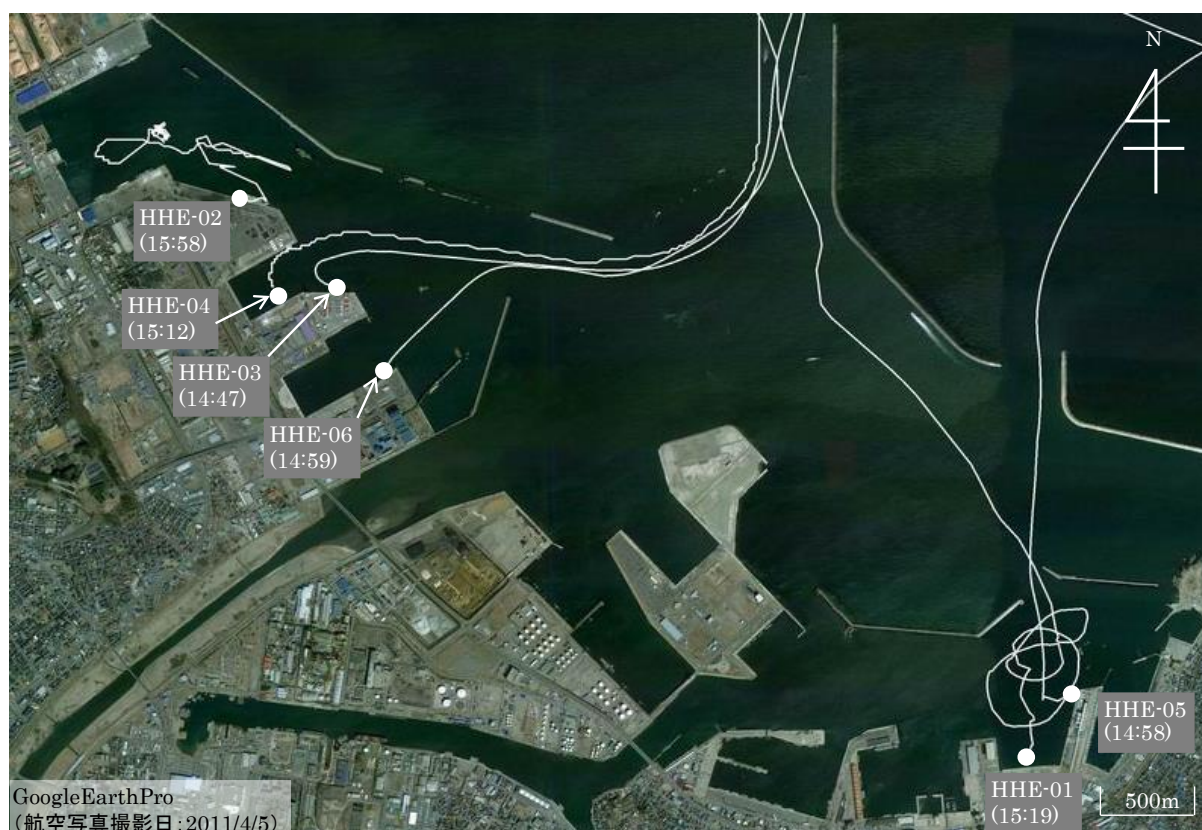


図 2.5 八戸港における船舶 HHE01-06 の挙動 (2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分)

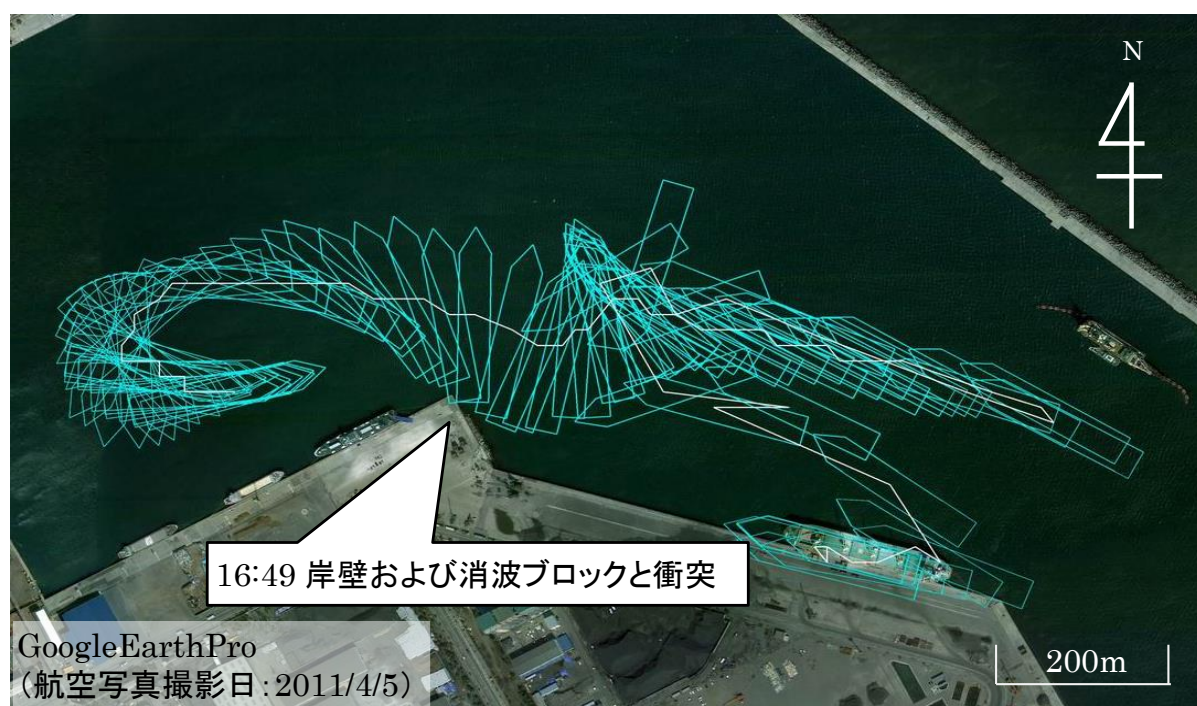


図 2.6 HHE-02 の挙動の詳細 (2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～16 時 56 分)

2.3.2 釜石港における船舶挙動

図 2.7 および図 2.8 には、釜石港において AIS データが得られた船舶 KIS-01 の軌跡を示す。同船舶は、地震による陸上側の停電のため、船舶上の荷役クレーンの引き上げが不可能となり、そのため出港を断念して総員が退船した事例である^[2.9]。同船舶は、第一波の引き波時に係留索が切断されて漂流を開始し、その後第二波の押し波時に建築物に船首から衝突し、最終的に岸壁に乗り上げて座礁した。同船舶の衝突により崩壊した建築物および同船舶の座礁後の様子をそれぞれ写真 2.1 および写真 2.2 に示す。

同船舶の津波来襲時の漂流挙動については、海上保安庁が撮影した映像よりその一部が収められている。同映像に基づく、同船舶の津波来襲時の喫水は 3.5 m 程度と判別される。一方、同船舶の座礁位置における最大浸水深は、「津波痕跡データベース」^[2.32]を参照しその近傍（図 2.8 中の星印位置）における津波痕跡高 9.4 m から座礁位置の標高 0.3 m（共に T.P.基準）を差し引くと 9.1 m と求まり、船舶の喫水が最大浸水深を下回っていたことがわかる。



写真 2.1 KIS-01 の衝突による崩壊建築物

写真 2.2 KIS-01 の座礁後の様子
(2011 年 6 月 11 日撮影)



図 2.7 釜石港における船舶 KIS-01 の挙動 (2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分)

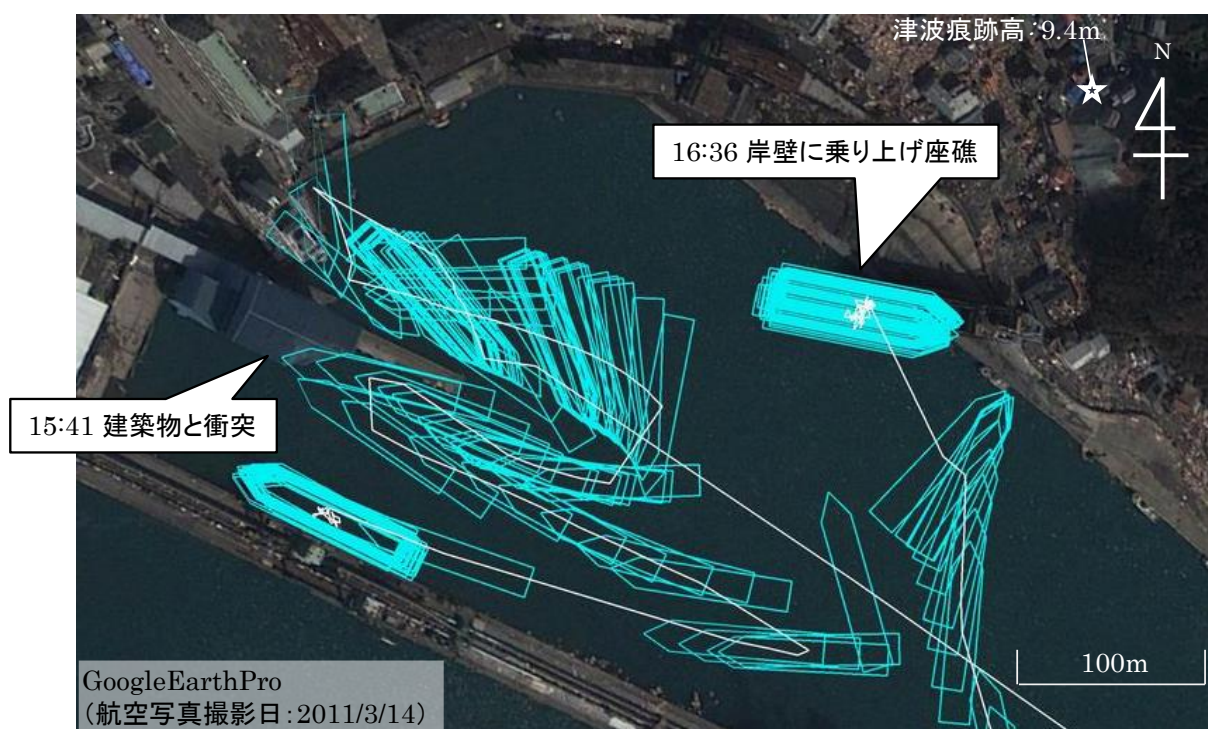


図 2.8 KIS-01 の挙動の詳細 (2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分)

2.3.3 大船渡港における船舶挙動

図 2.9 には、大船渡港において AIS データが得られた船舶 OFT-01～03 の軌跡を示す。まず、OFT-02 および OFT-03 は、それぞれ 15 時 22 分および 15 時 23 分に離棧して港外避難を試みたものの、その途中で津波の来襲を受けたため断念し、港内において津波の影響を強く受けながらも、操舵および投錨により移動範囲を最小限に留め、構造物との衝突や座礁、陸域への遡上を避けた事例である^[2.9]。同図より、両船舶は津波の影響により繰り返し南北に移動しており、その移動範囲は南北に OFT-02 は約 1 km、OFT-03 は約 1.6 km 程度であったことがわかる。

一方、OFT-01 は、地震発生後から津波到達までに離棧準備が間に合わず、15 時 25 分に操舵不可の状態で錨を降ろしたまま漂流を開始した船舶である^[2.11]。図 2.9 より、同船舶も上記 2 船舶と同様に港内を繰り返し南北に移動していることが確認され、引き波時には湾内の珊瑚島に座礁する形で停止していることがわかる。また、その漂流範囲は南北に 3.3 km 程度と、操舵により移動範囲を小さくとどめた船舶 OFT-02 および OFT-03 の 2 倍以上であったことがわかる。同船舶の漂流時の詳細な挙動を図 2.10 により確認すると、同船舶は船首方位を不規則に変えながら湾内に向かって漂流し、15 時 29 分に陸域に遡上した後 300 m 以上内陸まで到達したことがわかる。なお、同船舶の発災時喫水データは得られていないものの、その上限値となる満載喫水は 4.5 m である^[2.8]。一方、陸域遡上開始地点の最大浸水深は、その近傍（図 2.10 の星印位置）の津波痕跡高 6.6 m^[2.32]と遡上開始地点の標高 1.0 m（共に T.P.基準）との差により 5.6 m と求まり、船舶の喫水が最大浸水深を下回っていたことがわかる。

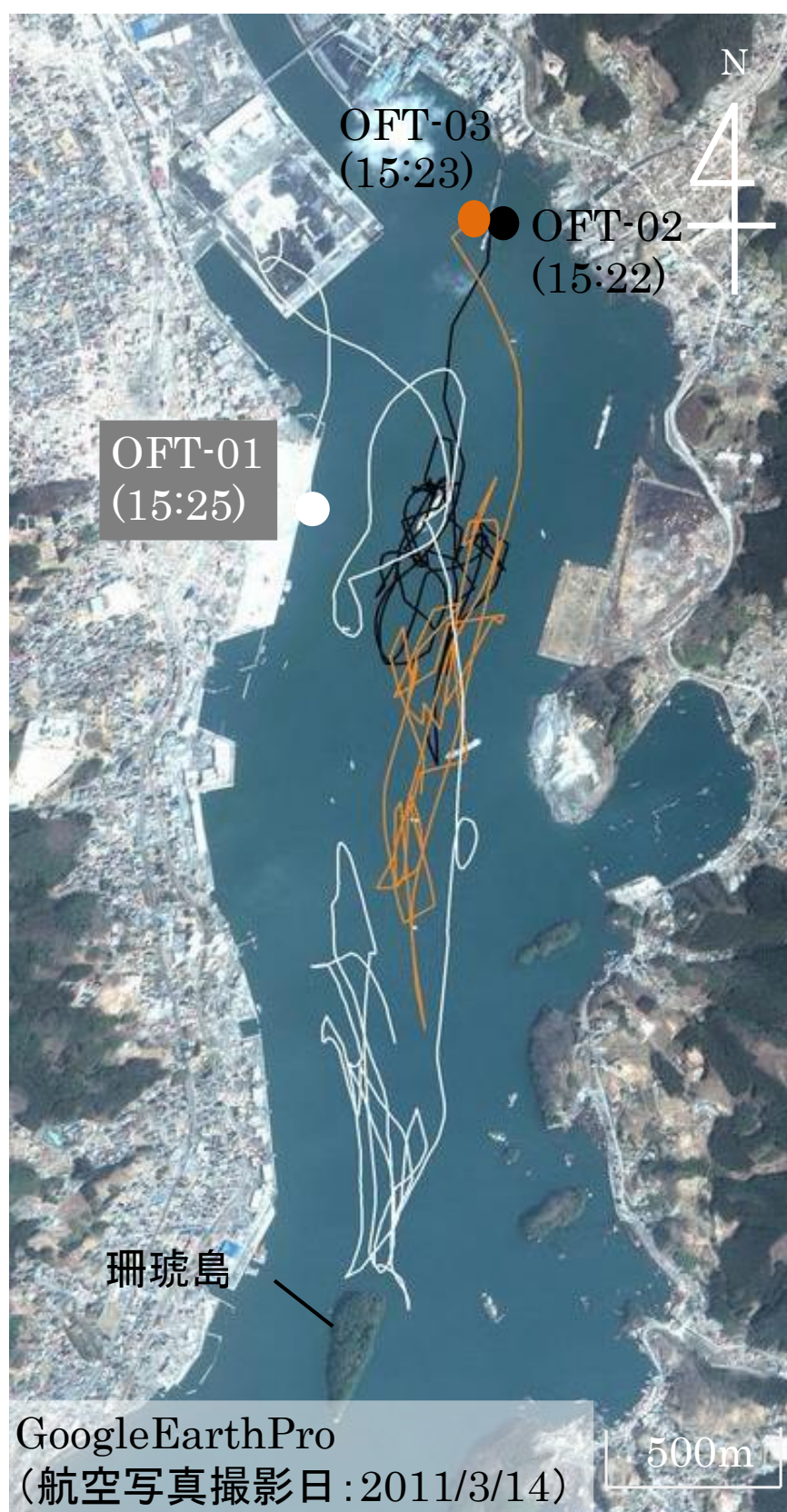


図 2.9 大船渡港における船舶 OFT-01～03 の挙動 (2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分)



図 2.10 船舶 OFT-01 の挙動の詳細

2.3.4 石巻港における船舶挙動

図 2.11 および図 2.12 には、石巻港において AIS データが得られた船舶 ISM-01 の軌跡を示す。同船舶は、出航準備中であつたが、津波到達時間が迫っていたため、係留状態のまま船体を放棄して総員が退船し付近の建物に避難した事例である^[2.10]。同船舶は、16 時 00 分に漂流を開始し、港内を回流後、引き波により港外へと漂流した。なお、同船舶は上述の KIS-01、OFT-01 と同様に自然漂流した（操舵や投錨されていない）事例であるが、両船舶とは異なり陸域遡上には至っていない。同船舶の発災時喫水はデータベースⅡより 9.0 m であることが確認されている一方、陸域遡上開始地点の最大浸水深は、その近傍（図 2.12 の星印位置）の津波痕跡高 4.6 m^[2.32]と停泊位置の岸壁の標高 1.2 m（共に T.P.基準）との差により 3.4 m と求まる。よって、同船舶の喫水は最大浸水深を上回っていたことがわかる。



図 2.11 石巻港における船舶 ISM-01 の挙動（2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分）



図 2.12 ISM-01 の挙動の詳細

2.3.5 仙台塩釜港塩釜港区における船舶挙動

図 2.13 には、仙台塩釜港塩釜港区において AIS データが得られた船舶 SGM-01～04 の軌跡を示す。同図より、同港において AIS データが得られた全 4 隻のうち比較的早期に港外避難を開始した 2 隻の船舶（SGM-03 および SGM-04）は順調に港外避難を成功させたことがわかる。

一方、その他の 2 隻のうち、SGM-02 は避難を開始したものの津波により押し戻された事例であり^[2.12]、図 2.14 より、同船舶が船首を港外に向けたまま港内側に押し戻された様子が把握できる。同船舶は、その後港内に留まり続けている。

残りの SGM-01 については、その発災時の避難行動の詳細（避難判断、操舵可否等）については不明であるが、同船舶の AIS データを参照する限り、15:59 に移動を開始して港内側へ移動したものの、その後元の停泊位置付近に戻り、そのまま港内に留まっている。なお、同船舶は、津波の収束後にはプロペラ等に漂流物が絡み、航行不能となっていたことがわかっている^[2.13]。

なお、SGM-01 および SGM-02 は共に陸域には遡上していない。



図 2.13 仙台塩釜港塩釜港区における船舶 SGM-01～04 の挙動
(2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分)

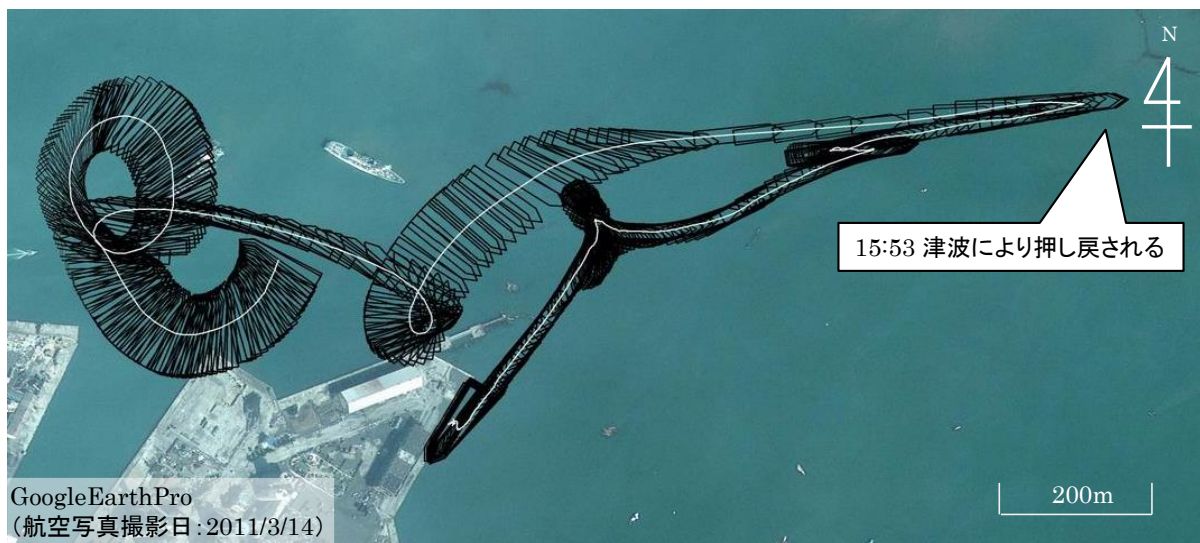


図 2.14 SGM-02 の挙動の詳細 (2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～16 時 10 分)

2.3.6 仙台塩釜港仙台港区における船舶挙動

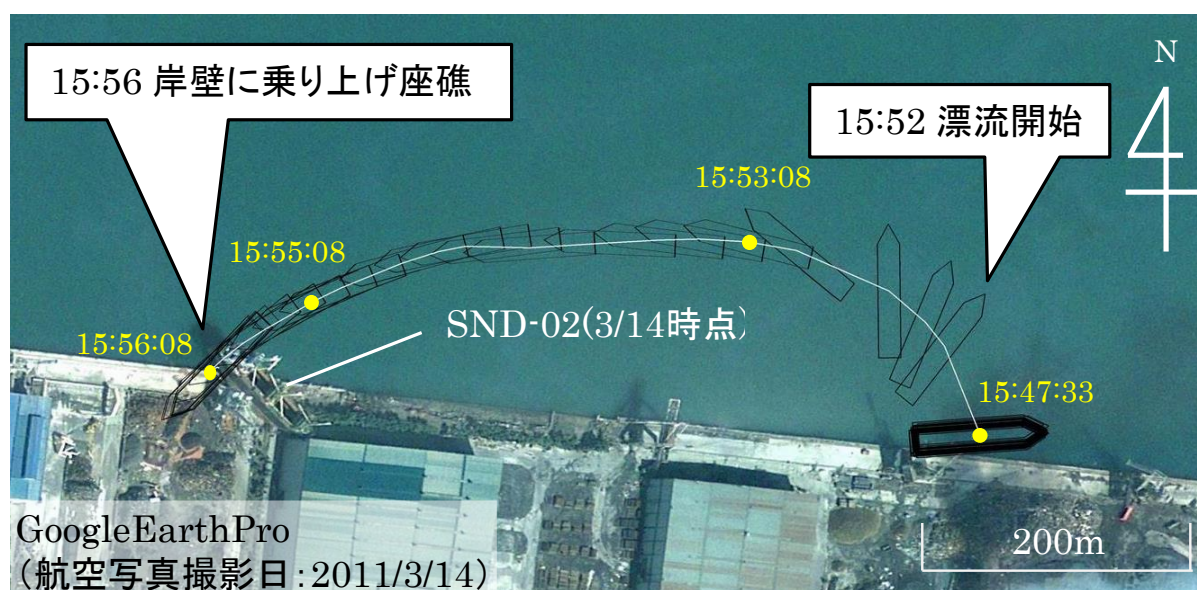
図 2.15 には、仙台塩釜港仙台港区において AIS データが得られた船舶 SND-01～15 の軌跡を示す。なお、同図において、SND-07 は地震発生前の 14 時 41 分に既に離棧し移動を開始していたため、地震発生時刻における位置を示す丸印は岸壁から離れた位置にプロットされている。同図より、同港において AIS データが得られた全 15 隻のうち 12 隻の船舶（SND-04～15）が 15 時 46 分まで、すなわち地震発生から 1 時間以内に避難を開始し、そのうち比較的離棧時刻が遅い SND-04、11 の 2 隻は港内で津波の影響をやや受けたものの^[2.10]、すべて順調に港外避難を成功させたことがわかる。

一方、その他の 3 隻のうち、SND-01 は総トン数 10 万トンを超える大型船舶であり離棧作業に時間を要したため^[2.9]、SND-03 は地上に降りていた乗組員が船舶に帰還するのを待ったため^[2.14]、それぞれ上記 12 隻の船舶よりも避難開始時刻が遅くなり、港内において陸側に押し戻されるなど津波の影響を強く受けた。しかし、両船舶共に操舵により構造物との衝突や座礁、陸域への遡上を避け、最終的に沖合いに避難している。

残りの 1 隻（SND-02）については、その発災時の避難行動の詳細（避難判断、操舵可否等）については不明であるが、図 2.16 より、同船舶は地震発生後も同位置に留まり続けた後、15 時 52 分に漂流を開始し、その後 15 時 56 分に船首から船体の半分が岸壁に乗り上げる形で座礁したことがわかる。なお、同図において、船首方位は図中の黄色丸印に示す時刻においてのみ正確なデータが得られたため、その間のプロットにおける船首方位は、船舶の回転角が漂流距離に比例すると仮定して内挿した。同船舶の船首および船尾の喫水は、同船舶の座礁時の写真 2.3^[2.33]を用いて同船舶の側面に残された痕跡より判別すると、それぞれ 2.1 m および 4.9 m 程度である。一方、同船舶の座礁位置における浸水深は、その近傍（図 2.14 中の星印位置）における津波痕跡高 6.8 m^[2.32]から座礁位置の標高 2.6 m（共に T.P.基準）を差し引くと 4.2 m と求まる。この喫水と浸水深との大小関係を考慮すると、本船舶が船首から岸壁に接近した際、船首喫水が浸水深を下回っていたため陸域に遡上を開始したものの、船尾喫水が浸水深を上回っていたためすぐに着底し停止したものと推察される。なお、同船舶は、岸壁に乗り上げた後、津波の押し引きにより船首方位を変えており、最終的には図 2.16 および写真 2.3 に示される方位となっている。



図 2.15 仙台塩釜港仙台港区における船舶 SND-01～12 の挙動 (2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分) 3/14 撮影



* 黄色丸印およびそれに付記する時刻は，正確な船首方位が得られた位置および時刻を示す。
(その他のプロットの船首方位は，船舶の回転角が漂流距離に比例すると仮定して内挿した)。

図 2.16 SND-02 の挙動の詳細



写真 2.3 SND-02 の岸壁に乗り上げた様子^[2.33]

2.3.7 相馬港における船舶挙動

図 2.17 には、相馬港において AIS データが得られた船舶 SMA-01～06 の軌跡を示す。同図より、同港において AIS データが得られた全 6 隻のうち 4 隻の船舶（SMA-03～06）が順調に港外避難を成功させたことがわかる。

その他の 2 隻の船舶のうち、SMA-01 は、陸上の停電により荷役設備を抱え込んだまま身動きが取れない状況に陥り、その後津波の影響により漂流を余儀なくされて、漂流中の座礁や衝突などにより船体に損傷が生じたため自力航行が不可能な状態に陥った事例である^[2.9]。図 2.18 より、同船舶は、15 時 50 分に漂流を開始し港内を回流後、防波堤に船尾より衝突し（衝突時の詳細は 3 章で記す）、その後港外へと漂流したことがわかる。残りの 1 隻の SMA-02 については、その発災時の避難行動の詳細（避難判断、操舵可否等）については不明であるが、SMA-01 と同じ 15 時 50 分に移動を開始後、南に 300 m ほどの位置で座礁した事例である^[2.15]。

なお、SMA-01 および SMA-02 は共に陸域への遡上には至っていない。両船舶の発災時喫水は、それぞれ 10.8 m および 12.7 m であり^[2.19]、一方、同船舶の最寄り岸壁位置における最大浸水深は、その近傍（図 2.17 中の星印位置）における津波痕跡高 9.0 m^[2.32]から座礁位置の標高 2.3 m（共に T.P.基準）を差し引くと 6.7 m と求まり、両船舶の喫水が最大浸水深よりも大きかったことがわかる。



図 2.17 相馬港における船舶 SMA-01～06 の挙動 (2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分)



図 2.18 SMA-01 の挙動の詳細

2.3.8 原町火力発電所における船舶挙動

図 2.19 には、原町火力発電所の隣接港において AIS データが得られた船舶 HRM-01～02 の軌跡を示す。同図より、同港において AIS データが得られた全 2 隻のうち 1 隻の船舶（HRM-02）が港外避難を成功させたことがわかる。

一方、HRM-01 は、その操舵可否については不明であるものの、地震による陸上側の停電のため、船舶上の荷役クレーンの引き上げが不可能となり、身動きが取れなくなり^[2.18]、16 時 10 分に移動を開始後、東に 400 m ほどの位置で座礁したことがわかっている^[2.20]。



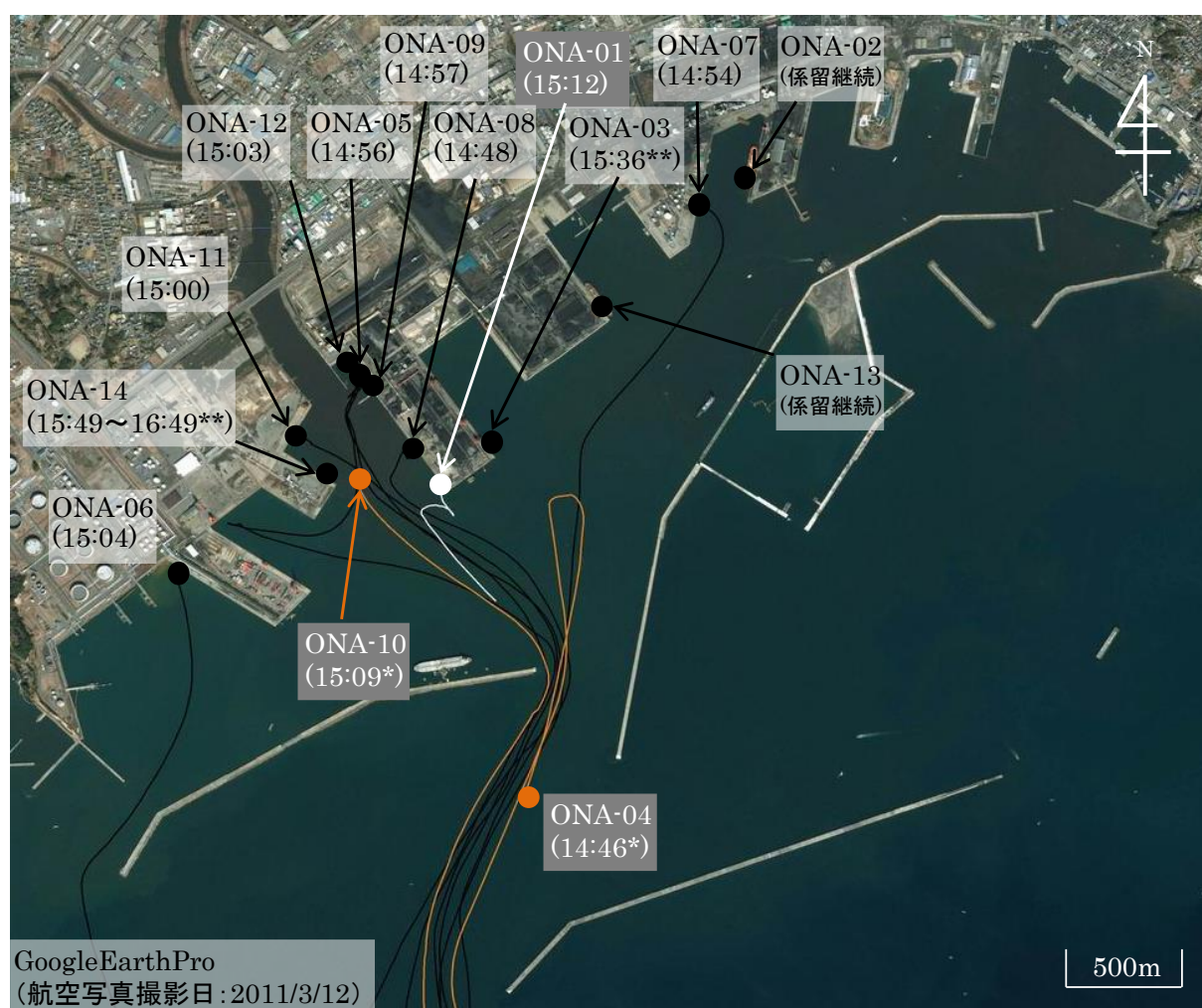
図 2.19 原町火力発電所における船舶 HRM-01, 02 の挙動
(2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分)

2.3.9 小名浜港における船舶挙動

図 2.20 には、小名浜港における船舶 SMA-01～14 の軌跡を示す。なお、同図では、小名浜港においては津波により陸上の AIS アンテナが被災し、15 時 26 分以降の AIS データは一定期間取得されなかったためその時刻までの軌跡を示しており、また、ONA-04 は入港中であつたため発災時（14 時 46 分）の位置を、ONA-10 は AIS データが取得されたのは 15 時 09 分からであつたためその時刻における位置を、それぞれ丸印で示している。同図より、同港において AIS データが得られた全 14 隻のうち 9 隻の船舶（ONA-04～12）が順調に港外避難を成功させたことがわかる。また、ONA-01 については、本研究で得られた AIS データでは港外に向かう途中までの挙動しか把握できないものの、牧野ら^[2.21]が入手した AIS データによると、同船舶は上記船舶に比べて避難の開始が遅かつたため津波の影響を受けたものの、無事に港外避難したことがわかっている。ONA-14 も同様に、港外避難を開始した時間は比較的遅かつたものの、無事に港外避難をした^[2.22]。

残りの 3 隻のうち、ONA-02 および ONA-13 は、津波来襲時にも係留状態のまま津波を凌いだ事例である^[2.22]。

残りの 1 隻 ONA-03 は、陸上側の停電により荷役設備を抱え込んだまま身動きが取れない状況に陥り^[2.10]、引き波時に係留索が切断されて漂流を開始し、南防波堤に衝突後、座礁した船舶である^[2.21]。なお、本船舶が漂流時に操舵可能な状態であつたかは不明である。



* ONA-04 は地震発生時刻（14 時 46 分）に入港中であったためその時刻の位置を，ONA-10 は AIS データの入手が 15 時 09 分以降であったためその時刻の位置を，それぞれ丸印により示す。

** ONA-03 は文献[2.21]，ONA-14 は文献[2.22]に基づく時刻を記す。

図 2.20 小名浜港における船舶 ONA-01～14 の挙動（2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～15 時 26 分）

2.3.10 茨城港日立港区における船舶挙動

図 2.21 には、茨城港日立港区における船舶 HTC-01 の軌跡を示す。同図より、同船舶は順調に港外避難を成功させたことがわかる。



図 2.21 茨城港日立港区における船舶 HTC-01 の挙動(2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分)

2.3.11 茨城港常陸那珂港区における船舶挙動

図 2.22 には、茨城港常陸那珂港区において AIS データが得られた船舶 HIC-01～04 の軌跡を示す。なお、同図では、移動開始時刻（18 時 55 分）が比較的遅かった HIC-01 の挙動を把握するため、他の港における軌跡図とは異なり 21 時まで（19 時までではなく）の軌跡を示す。同図より、同港において AIS データが得られた全 4 隻のうち 2 隻の船舶（HIC-02, HIC-04）が港外避難を成功させたことがわかる。

一方、HIC-01 は、地震発生後に係留索を増し取る作業を行っていたが、18 時 55 分に移動を開始した事例である。東側の防波堤との間の流れが強かったため、タグボート HIC-03 等による制動も困難となり、緊急投錨した錨を中心に回転を繰り返した船舶である^[2.10]。なお、図 2.23 に示すとおり、同船舶は 19 時 15 分に港の東側に位置する防波堤に接近しているものの、その衝突に関する報告は確認されておらず、また防波堤に滑動した形跡も見られないため、両者の衝突の生起については不明である。



図 2.22 茨城港常陸那珂港区における船舶 HTC-01～04 の挙動
(2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～21 時 00 分)



図 2.23 HTC-01 の挙動の詳細 (2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 25 分)

2.3.12 茨城港大洗港区における船舶挙動

図 2.24 には，茨城港大洗港区における船舶 OAR-01 の軌跡を示す。同図より，同船舶は順調に港外避難を成功させたことがわかる。



図 2.24 茨城港大洗港区における船舶 OAR-01 の挙動
(2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～21 時 00 分)

2.4 船舶の陸域遡上生起頻度

前節では、八戸港から茨城港までの12港における津波来襲時の船舶の実挙動をAISデータに基づき分析した。その結果、発災時に船舶が操舵可能な状態にあった船舶については、津波到達前の冲出しにより被害を免れた事例や、冲出しが間に合わず港内において津波の来襲を受けた船舶についても懸命な操舵により構造物等との衝突や座礁、陸域への遡上を避けた事例が確認された。一方、操舵不可の状態にあった船舶には、津波により漂流し陸域に遡上した事例が確認されており、それらの事例においては、いずれの場合にも船舶の喫水が最大浸水深を下回っていた。よって、本章では、船舶の「操舵可否」および「喫水と浸水深との大小関係」が陸域遡上に重要な要因と考え、同二要因をパラメータとして船舶の陸域遡上頻度を検討する。

2.4.1 船舶の操舵可否および喫水と浸水深との大小関係の特定

まず本項では、検討対象船舶それぞれについて、「操舵可否」および「喫水と浸水深との大小関係」を特定する。

(1) 船舶の「操舵可否」の特定

本検討において「操舵可能」な状態とは、津波来襲時に主機関を用いて船舶を操縦できる状態のこととし、データベースⅠ～Ⅲおよび各種文献に基づき、以下のように操舵可否を判断した。なお、投錨によっても船舶の挙動を制御し得るが、前節のOFT-01の事例のように投錨したにもかかわらず漂流し陸域遡上に至った事例に基づき、操舵可否を判断する上で投錨の有無は考慮しないこととする。

1) 「操舵可能」と判断した船舶（97隻）

- ① 操舵を行ったことが報告されている船舶。
- ② データベースⅠ（AISデータ）により津波到達前の冲出しを確認した船舶。

2) 「操舵不可」と判断した船舶（37隻）

- ① 人命を優先し総員が退船したこと、もしくは係留のまま放棄されたことが報告されている船舶。
- ② 造船所において修理もしくは艤装（完成した船体に、水上で各種設備を装備すること）が行われていたことが報告されている船舶。
- ③ 陸上側の停電により荷役設備を船舶から切り離すことができず、操舵を断念したことが報告されている船舶。
- ④ その他、直接的な理由は不明であるが、出船準備が間に合わなかったこと、もしくは無人

での漂流していたこと、が報告されている船舶。

3) 「操舵可否不明」と判断した船舶（9 隻）

- ① 上記 1), 2)の操舵可否を判断する資料が得られなかった船舶。

(2) 船舶の「喫水と浸水深との大小関係」の特定

次に、船舶の喫水と浸水深との大小関係を特定する。船舶の喫水は、2.2 節で特定した発災時喫水および満載／軽荷喫水を採用した。それと比較する浸水深は、陸域に遡上した船舶に対しては遡上開始地点の岸壁位置（遡上開始地点が不明で漂着位置のみが既知の場合は、漂着位置から最寄りの岸壁位置）の浸水深を、陸域に遡上していない船舶に対しては得られた船位データのうち地震発生（2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分）以降最も早い時刻における船位の最寄り岸壁位置の浸水深を、「津波痕跡データベース」^[2.32]により得られる近傍の津波痕跡高と同岸壁位置の標高（共に T.P.基準）との差によって求めた（2.3 節における船舶 OFT-01, SND-02 などに対する手順と同様）。なお、文献[2.32]に津波痕跡高データが掲載されていない原町火力発電所および広野火力発電所に隣接する港湾では、文献[2.23]における浸水深を参照した。ただし、発災時の船位が不明な船舶については、その浸水深は特定できていない。

以上に得られたデータを用いて、発災時喫水 d が既知の場合はその値を、不明の場合は満載喫水 d_F もしくは軽荷喫水 d_L をそれぞれ用いて、以下のように船舶の喫水と浸水深 h との大小関係を特定した。

1) 「発災時喫水 $d \geq$ 浸水深 h 」（図 2.25(a)の状態）と判断した船舶（72 隻）

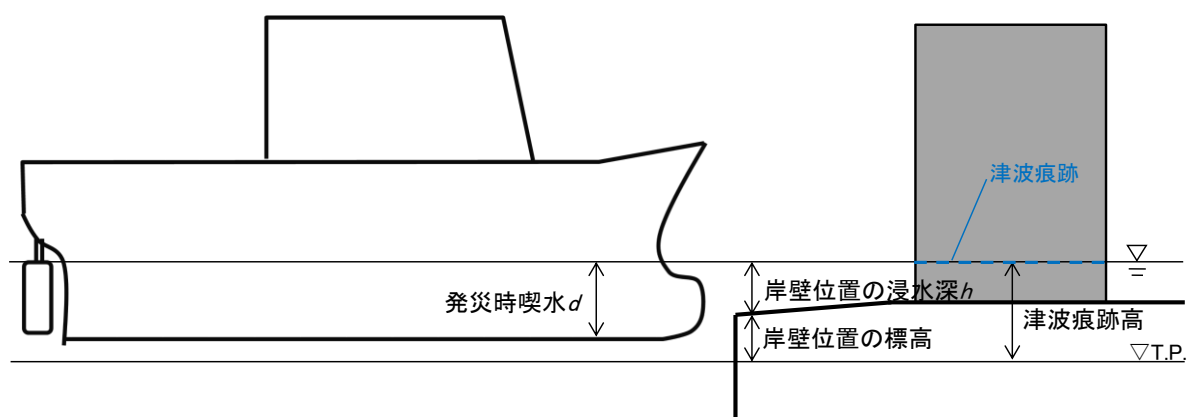
- ① 「発災時喫水 $d \geq$ 浸水深 h 」を満たす船舶。
② 「 $d_L >$ 浸水深 h 」を満たす船舶（発災時喫水 d が不明の場合）。

2) 「発災時喫水 $d <$ 浸水深 h 」（図 2.25(b)の状態）と判断した船舶（41 隻）

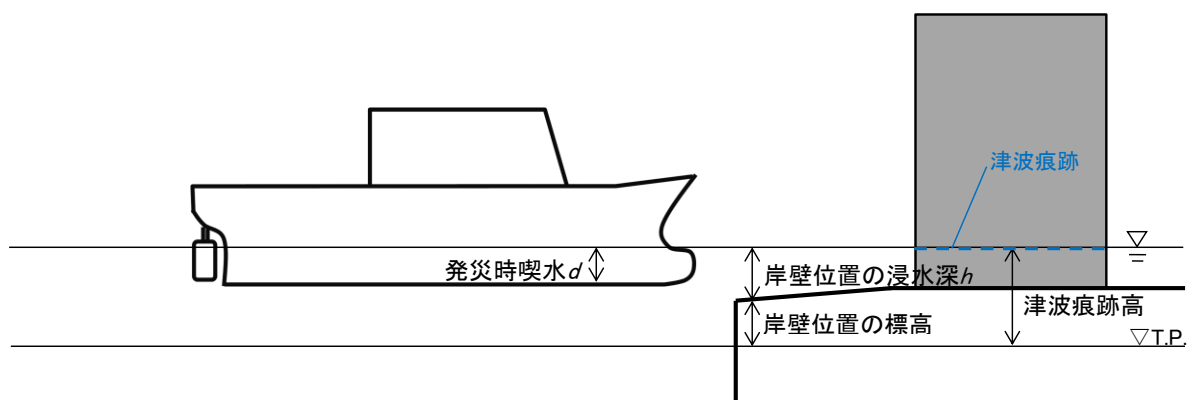
- ① 「発災時喫水 $d <$ 浸水深 h 」を満たす船舶。
② 「 $d_F <$ 浸水深 h 」を満たす船舶（発災時喫水 d が不明の場合）。

3) 「発災時喫水 d と浸水深 h との大小関係は不明」と判断した船舶（30 隻）

- ① 「発災時喫水 d が不明」かつ「 $d_L <$ 浸水深 $h <$ d_F 」を満たす船舶。
② 「浸水深 h が不明」の船舶。



(a) 発災時喫水 $d \geq$ 浸水深 h の場合



(b) 発災時喫水 $d <$ 浸水深 h の場合

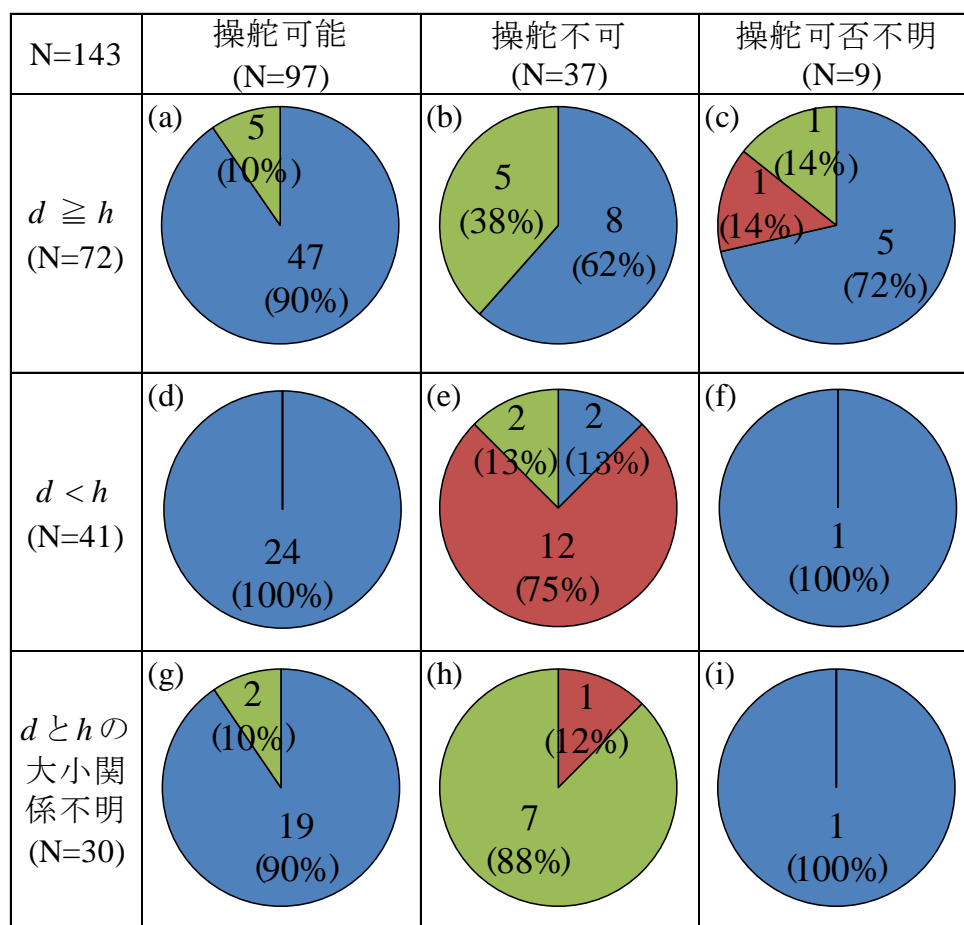
図 2.25 船舶の発災時喫水 d と浸水深 h との大小関係の模式図

2.4.2 船舶の陸域遡上頻度の検討

以上に特定した各検討対象船舶の「操舵可否」および「喫水と浸水深との大小関係」をパラメータとし、津波来襲時に陸域に遡上した／しなかった船舶数およびその割合を図 2.26 に示す。まず同図(a)～(c), (d), (g)より、船舶が「操舵可能」もしくは「喫水 $d \geq$ 浸水深 h 」の条件を満たす船舶 143 隻には、同図(c)における 1 隻 (SND-02) を除き、陸域に遡上した船舶は確認されなかったことがわかる。なお、唯一陸域への遡上が確認された船舶 SND-02 は、2.3.6 項に記したとおり、船体の半分のみが岸壁に乗り上げて停止した事例であり、同船舶の喫水は「船首喫水 $d_F <$ 浸水深 $h <$ 船尾喫水 d_A 」であったため、津波来襲時において同船舶は船首から岸壁に乗り上げたもののすぐに着底し停止したと推察される事例である。

一方、同図(e)より、船舶が「操舵不可」かつ「喫水 $d <$ 浸水深 h 」の条件を満たす場合には、全 16 隻のうち 7 割以上の 12 隻の船舶が陸域に遡上したことが確認された。なお、残りの 4 隻のうち、操舵不可にもかかわらず陸域に遡上しなかった船舶 2 隻 (SGM-05,06) は、津波来襲時において係留索が切断されず漂流に至らなかった事例である^[2.10]。そのため、本検討対象船舶においては、津波来襲時において「操舵不可」および「喫水 $d <$ 浸水深 h 」の二条件を満たし、なおかつ係留索が切断され漂流に至った船舶は、すべて陸域に遡上したことが確認された。

なお、同図(h)の「操舵不可」かつ「喫水と浸水深との大小関係が不明」のうち、陸域に遡上した船舶 1 隻 (ISM-05) については、その発災時喫水は不明であるものの、同船舶は発災時において石巻港で艀装作業が行われていた船舶であり^[2.10]、その積荷状況は軽荷状態に近かったものと推察される。同船舶の軽荷喫水は 2.2.2 項に示す手法により 2.8 m 程度と推定される一方、遡上位置における浸水深は 2.4.1 項に示す手法により 4.3 m と求まるため、両者の比較から、同船舶の喫水が浸水深を下回っていたものと考えられる。



■ 陸域遡上非生起
 ■ 陸域遡上生起
 ■ 陸域遡上の生起不明

* d : 発災時の喫水[m] h : 津波浸水深[m]

図 2.26 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における陸域遡上生起／非生起船舶数とその割合

2.4.3 船舶の操舵可否および喫水と総トン数との関係

船舶の衝突時外力は、その規模に依存することがわかっている^{[2.34], [2.35]}。そのため、前節で特定した船舶の陸域遡上に重要な要因、すなわち船舶の「操舵可否」および「喫水」それぞれと船舶規模との関係が得られると、将来の津波来襲時において、建築物への衝突船舶規模の設定に資する知見となり得る。そのため本項では、船舶規模の指標として一般的な総トン数に着目し、両パラメータと総トン数との関係を検討する。なお、検討においては、2.2 節に先述のとおり国内総トン数を用いることとする。

(1) 船舶の操舵可否と総トン数との関係

まず、船舶の操舵可否と総トン数との関係を検討する。検討対象船舶を用い、操舵不可となった船舶の割合および操舵不可となるに至った理由を検討したところ、総トン数 500 ton を境に異なる傾向が得られた。そのため、図 2.27 には、操舵不可となった船舶の割合およびその理由について、総トン数 500 ton 未満の船舶と 500 ton 以上の船舶それぞれに分けて示す。同図(a)より、500 ton 未満の船舶全 73 隻のうち、約 4 割にあたる 29 隻の船舶が津波来襲時に操舵不可となったことが確認されており、そのうちの 25 隻の船舶は船体放棄により、3 隻は修理・艀装中であつたことにより、それぞれ操舵不可となつていた。

一方、500 ton 以上の船舶では、計 70 隻のうち操舵不可になつたことが確認された船舶は約 1 割にあたる 8 隻と比較的少ない。そのうち、船体放棄された事例および修理・艀装中であつた事例がそれぞれ 3 隻である。一方、500 ton 未満の船舶では確認されなかつた事例として、陸上側の停電により荷役設備を船舶から切り離すことができず身動きが取れなくなつたため船員が退船した事例（KSM-16）が確認されている。また、同図における「操舵可否不明」の船舶 9 隻のうち 5 隻（HHE-07, SMA-01, HRM-01, KSM-15, KSM-19）についても同様の理由により迅速な離棧が妨げられたことがわかつており、それらの船舶はいずれも他の船舶や岸壁等との衝突、もしくは座礁といった被害が生じ、そのうち少なくとも 3 隻（SMA-01, KSM-15, KSM-19）が最終的に自力航行不能な状態に陥つたことが確認されている。今次津波では、いずれの船舶においても喫水が津波浸水深を上回つていたため陸域への遡上には至らなかつたものの、将来的にそのような船舶の喫水を上回るような津波が予測される場合には注意が必要である。なお、上述の被害を踏まえ、災害時にも確実に船舶と荷役設備の切り離しができるよう、大型タンカーバースにおける電源を二重化することが海上保安庁による行政指導指針に盛り込まれており^[2.36]、同対策が各港湾で実施されれば、将来的には同様の被害事例は減少するものと期待される。

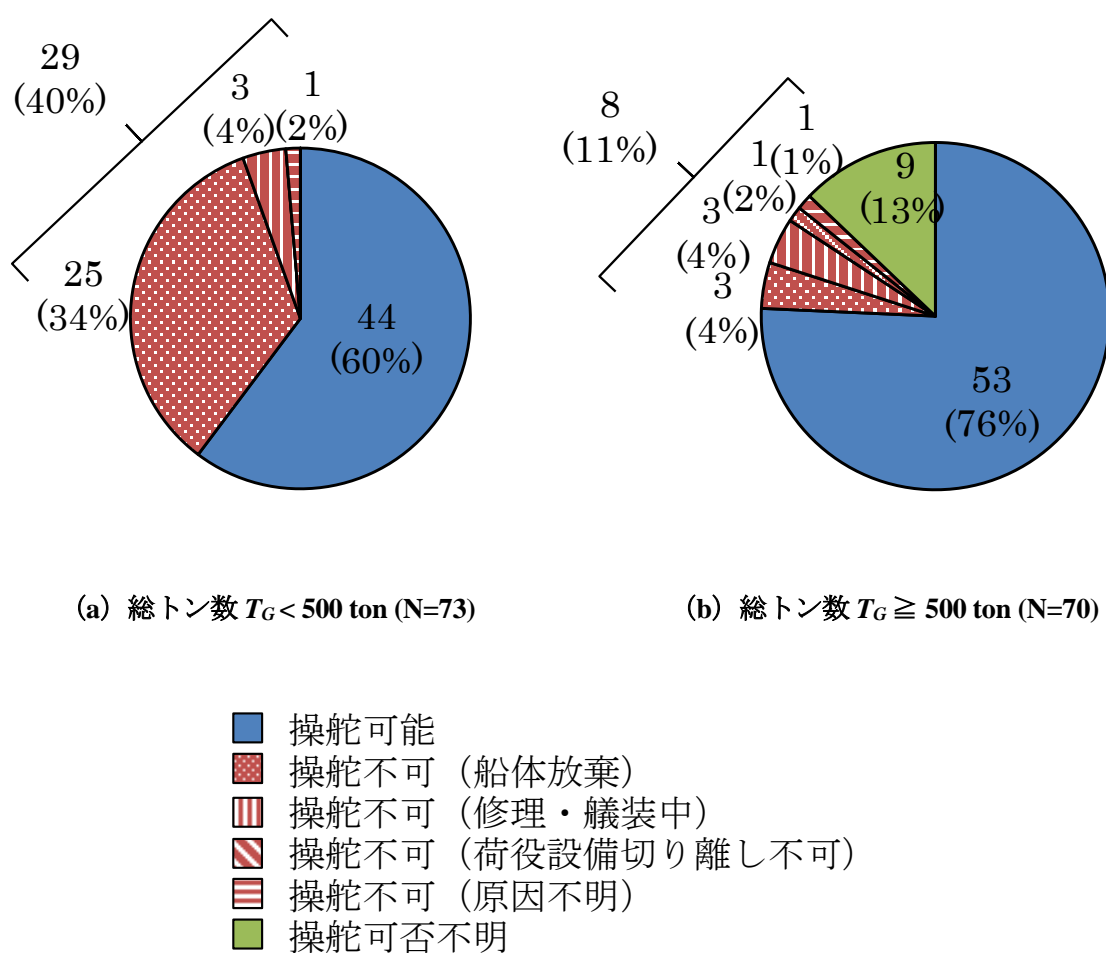


図 2.27 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における操船可／不可の船舶数とその割合

(2) 船舶の喫水と総トン数との関係

次に、船舶の喫水と総トン数との関係を検討する。図 2.28 には、発災時喫水が得られた船舶 53 隻を船種分類ごとに分け、その中で総トン数の昇順に左から並べ、それぞれの喫水および総トン数をプロットする。なお、同図では、2.2 節で定義した満載／軽荷喫水の信頼度 i および ii を、黒抜きおよび白抜きのプロットによりそれぞれ表す。同図より、船舶にトリムが生じている場合の発災時喫水としては大きい方の値を採用していること、満載／軽荷喫水の一部は推定値（信頼度 ii の喫水）であること、により多少の例外は生じているものの、発災時喫水は概ね満載喫水と軽荷喫水との間にプロットされていることがわかる。また、上記(1)で船体放棄される割合が高かった総トン数 500 ton 未満の船舶（同図の網掛け部）の発災時喫水は概ね 1～5m 程度と低い値に分布し、500 ton 以上の船舶ではその値は総トン数と共に上昇し、2m～18m 程度に広く分布していることがわかる。ただし、その値は船舶の積荷状況により変動するため、一概に総トン数と対応する値にはなっておらず、特に撒積専用船に代表される分類 E の船舶において、その変動は顕著である。

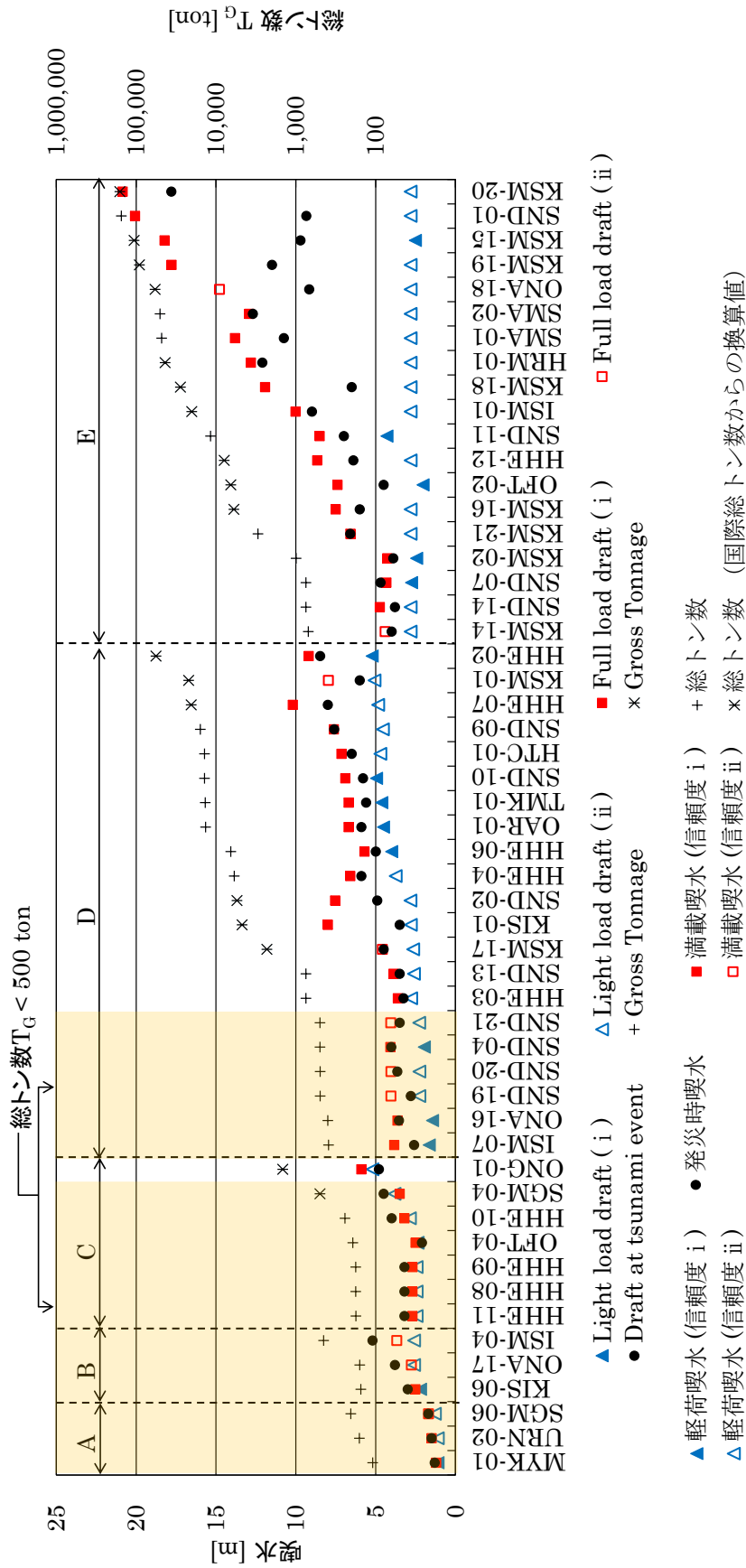


図 2.28 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶の喫水と総トン数
(発災時喫水が既知の船舶 53 隻を対象)

以上、船舶の「操舵可否」および「喫水」それぞれと総トン数との関係性を検討した。両者を併せて考慮すると、まず総トン数 500 ton 未満の船舶は、津波来襲時において操舵不可の状態となる割合が比較的多く（4 割）、加えて喫水が 1～5m 程度と比較的低いため、将来的な津波来襲時においても衝突可能性は比較的高いものと想定される。

一方、総トン数 500 ton 以上の船舶には津波来襲時に操舵不可であった事例は比較적少く（約 1 割）、また、それらの喫水は 500 ton 未満の船舶に比べて大きいため、将来的な津波来襲時における衝突可能性は比較的低いものと考えられる。ただし、500 ton 以上の船舶は、その衝突により建築物に与える影響が比較的大きいものと想定されること、船舶の修理・艀装を行う造船所の近傍や、電源二重化等の防災対策が実施されていない港湾では、操舵不可の船舶が漂流する可能性が比較的高いこと、貨物船では積荷状況による喫水変動（トリムによる平面的な変動を含む）が比較的大きいこと、にそれぞれ注意が必要である。

ただし、本章の知見は、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における限られたデータに基づくため、津波の発生時刻や、地震の発生から津波の到達までの時間等が異なる場合には、得られる結果が異なる可能性がある。特に、総トン数 500 ton 未満の比較的小規模の船舶は、総トン数 500 ton 以上の比較的大規模の船舶と比べて無人の状態に係留される場合が比較的多いことがわかっているため（ただし、規則等により比較的大規模の船舶における船員の常駐義務が課せられているわけではない）、そのような船舶においては、乗組員が船舶に到達することが比較的困難な夜間の津波来襲時には、操舵不可の船舶の割合が図 2.27 における結果（4 割）よりもさらに増加する可能性がある。そのため、将来の津波来襲時における衝突船舶を設定する上では、本研究成果に加え、上述のような可能性も考慮して、安全側に外力を設定するよう配慮する必要がある。

2.5 まとめ

本章では、津波来襲時における船舶の陸域遡上に関係が深い要因の特定と、船舶の陸域遡上生起頻度を検討することを目的に、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶の実挙動を分析した。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 2011年3月11日における船舶のAISデータ、船舶の避難行動に関するアンケート調査結果、および津波来襲時の船舶挙動に関する各種文献、の3つのデータソースに基づき、計143隻の検討対象船舶によるデータベースを作成した。
- 2) 上記データベースにおいて、主にAISデータを用いて各港における船舶の実挙動を分析し、津波来襲時における船舶の「操舵可否」および「喫水と浸水深との大小関係」が、船舶の陸域遡上に重要な要因と特定した。
- 3) 上記二要因をパラメータとして船舶の陸域遡上生起頻度を検討し、津波来襲時において「操舵可能」もしくは「喫水 \geq 浸水深」を満たす船舶143隻には、トリムの影響により「船首喫水 $<$ 浸水深 $<$ 船尾喫水」となっていた船舶1隻を除き、陸域に遡上した船舶は確認されなかった。一方、「操舵不可」および「喫水 $<$ 浸水深」の二条件を満たす船舶では、その16隻のうち7割以上の14隻が陸域に遡上したことを明らかにした。
- 4) 船舶の総トン数と津波来襲時における操舵可否との関係を検討し、操舵不可であった船舶の割合は、総トン数500 ton以上の船舶では1割程度であったのに対し、総トン数500 ton未満の船舶では4割程度であったことを明らかにした。
- 5) 船舶の総トン数と喫水との関係を検討し、総トン数500 ton未満の船舶の発災時喫水は1~5m程度であり、総トン数500 ton以上の船舶では2m~18m程度と広く分布することを明らかにした。ただし、その値は船舶の積荷状況により軽荷喫水から満載喫水まで変動し、その傾向は特に撒積専用船に代表される分類Eの船舶において顕著であることを明らかにした。

将来の実務設計において津波来襲時における船舶の建築物への衝突可能性の検討を要する場合には、まず初めに対象港湾における船舶の平均的な停泊数を示す平均停泊船舶数（付録2にその定義および適用手法を示す）を求め、続いて本章で得られた結論に基づき陸域に遡上し得る船舶数を限定することが、有用な手法の一つとなり得る。また、さらに船舶の津波漂流シミュレーション解析を併用することで、建築物への衝突可能性についてより詳細に検討することが可能となる。

[参考文献]

- [2.1] 日本海運集会所：船舶明細書，2015
- [2.2] 国土交通省：船舶設備規程
- [2.3] 浦野千尋：AIS とその位置情報の信頼性について，東京海洋大学卒業論文，2014 年 2 月
- [2.4] 日本海難防止協会：大地震及び大津波来襲時の航行安全対策調査 津波影響による船舶避難行動と被災状況等に係る基礎調査 報告書，2012 年 3 月
- [2.5] 日本海難防止協会：2012 年度大地震及び大津波来襲時の航行安全対策に関する調査研究報告書，2013 年 5 月
- [2.6] 日本海難防止協会：2013 年度大地震及び大津波来襲時の航行安全対策に関する調査研究報告書，2014 年 4 月
- [2.7] 同上 港内津波対策の手引き，2014 年 4 月
- [2.8] 松田信彦，富田孝史：AIS を用いた津波漂流船舶の挙動と衝突被害分析，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.71，No.2，pp. I_1657- I_1662，2015 年 11 月
- [2.9] 国土交通省近畿運輸局：津波に遭遇した船の行動事例集 ～東日本大震災で津波に遭遇した船のその時の行動に学ぶ～，2011 年 9 月
- [2.10] 日本海難防止協会：【特集】巨大地震と大津波の教訓を伝える，日本海難防止協会情報誌「海と安全」，No.552，2012 年 3 月
- [2.11] 毎日新聞：2014 年 7 月 17 日朝刊「オピニオン」
- [2.12] 宮城県土木部：東日本大震災 職員の証言（想い）「そのとき，それから，これからあの日を忘れない」，2012 年 3 月
- [2.13] 東日本大震災 伝えなければならない 100 の物語 6 絆（きずな），学研教育出版，2013 年 2 月
- [2.14] PDK Selayang（マレーシアにおける障害者福祉施設）：2011 年 3 月 16 日ブログ，<http://pdkselayang.blogspot.jp>
- [2.15] 海上保安庁：2012 海上保安レポート 特集 東日本大震災 一海上保安庁の対応と今後の対策一，2012 年 5 月
- [2.16] 榊原繁樹，阿部郁男，津金正典，久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時の係留 VLCC の挙動再現について，日本航海学会論文集，第 127 号，pp.57-68，2012 年 9 月
- [2.17] 榊原繁樹，阿部郁男，津金正典，久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時のアフラマックスタンカー係留避泊に関する一考察，第 128 回日本航海学会講演予稿集，1 巻 1 号，pp.12-14，2013 年 4 月
- [2.18] 榊原繁樹，阿部郁男，津金正典，久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時の栈橋係留大型石炭船の挙動再現について，第 130 回日本航海学会講演予稿集，2 巻 1 号，pp.71-72，2014 年 4 月
- [2.19] 榊原繁樹，阿部郁男，久保雅義，津金正典：東日本大震災で被災した隣接 2 隻の大型石炭

- 船に来襲した津波および船体に作用する津波波力に関する一考察，第133回日本航海学会講演予稿集，3巻2号，pp.118-120，2015年9月
- [2.20] 吉井匠，松山昌史，工藤悟志：東日本大震災における原町火力発電所の被災過程と津波対策に関する検討 ―福島沿岸域に來襲する津波の特性―，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70，No.1，pp.50-64，2014年11月
- [2.21] 牧野秀成，小林英一，長谷川和彦：AIS データを用いた大津波時の船舶の避難状況解析 ―2011年東北地方太平洋沖地震大津波時の事例―，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第16号，pp.43-46，2013年5月
- [2.22] 牧野秀成，小葉武史：船舶ビッグデータを用いた津波の動向把握に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70，No.2，pp. I_1421- I_1425，2014年11月
- [2.23] 土木学会エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会：東日本大震災におけるエネルギー施設（火力・水力・送変電・ガス）の被害状況と今後への展開について 報告書（最終報告），2014年8月
- [2.24] 盛岡タイムス：Web News 「久慈国家石油備蓄基地，地下タンクに損傷なし」，2011年4月1日，<http://www.morioka-times.com/news/2011/1104/01/11040107.htm>
- [2.25] 国土交通省東北地方整備局 釜石港湾事務所：岩手県北自動車（株）インタビュー，2016年5月26日，http://www.pa.thr.mlit.go.jp/kamaishi/interview/img.pdf/folder.2016-05-31.2044254704/160526_interview.pdf
- [2.26] （株）潮プランニング：2012年3月11日ブログ
<http://altair65vega62.blog13.fc2.com/blog-entry-477.html>
- [2.27] 水産業・漁村活性化推進機構：北部太平洋大中型まき網地域漁業復興プロジェクト漁業復興計画書（大津地区部会），2014年4月
http://www.fpo.jf-net.ne.jp/gyoumu/hojyogigyo/08hukkou/hukkou_gyogyo/nintei_file/H260730_kitamaki_ootu_2_H271124_henkou.pdf
- [2.28] 宮城県水産技術総合センター：水産技術総合センターの沿革
<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/mtsc/enkaku.html>
- [2.29] 海上保安庁：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震への対応等について （第3報）平成23年3月12日0400現在
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h23/k20110312/k110312-1.pdf>
- [2.30] Marine Traffic：<https://www.marinetraffic.com/>
- [2.31] 国土交通省：船舶のトン数の測度に関する法律施行規則
- [2.32] 東北大学災害科学国際研究所：津波痕跡データベース，<http://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp/>
- [2.33] Shipplotting.com: <http://www.shipspotting.com/>
- [2.34] 長沢準，有田喜久雄，谷政明，岡修二：通航船舶の橋脚衝突時の圧壊強度について，日本造船学会論文集，第142号，pp.323-332，1977年11月
- [2.35] Saul, R. and Svensson, H.: On the Theory of Ship Collision against Bridge Piers, *International*
-

Association for Bridge and Structural Engineering Conference Proceedings, P-51/82, pp.29-40, 1982.2

- [2.36] 海上保安庁：大型タンカー及び大型タンカーバースの安全防災対策基準（行政指導指針），2011.1（2014.3 一部改正）

第 3 章

津波漂流船舶の衝突時衝撃外力

3. 津波漂流船舶の衝突時衝撃外力

3.1 はじめに

本章では、船舶の衝突時衝撃外力を定量的に評価することを目的とし、まず初めに、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶と構造物との衝突事例を対象に、船舶の衝突条件（衝突速度、衝突方向）および衝突時衝撃外力を検討する。次に、船舶の衝突条件は船舶の漂流時の挙動に左右されるものの、上記事例においてその漂流開始から衝突までの一連の挙動を把握可能な事例は限られているため、その他の船舶の漂流事例を対象にその速度および方向の変化についても分析を行い、それに基づき船舶の衝突条件を定める。最後に、その衝突条件における船舶の衝突時衝撃外力について、実衝突事例に基づく評価結果と船舶工学分野における既往の評価結果とを比較することで、本研究において建築物に入力する船舶衝突時の衝撃外力を定める。

3.2 津波来襲時における船舶と構造物との衝突事例

本節では、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶と構造物との衝突事例について、その衝突時の船舶挙動をAISデータ（前章データソースⅠ）もしくは記録映像に基づき把握可能であった釜石港、相馬港、銚子港における各1事例、八戸港における2事例の計5事例を対象に、船舶の構造物との衝突条件（衝突速度および衝突方向）および衝撃外力を検討する。

3.2.1 釜石港における一般貨物船と建築物との衝突事例

本項では、釜石港における一般貨物船（付録1. 検討対象船舶一覧のKIS-01）と建築物との衝突事例について、AISデータに基づき分析する。図3.1および図3.2には、その衝突時の船舶の挙動および速度の時刻歴変化を、それぞれ示す。なお、両図はAISデータに基づき作成したため、前章に記したとおり、両図におけるプロットの時間間隔は一定ではないこと、船位には最大20m程度の誤差を含むこと、にそれぞれ注意されたい（ただし、速度は超音波を用いる手法等により別途計測されるため、位置情報の誤差の影響は受けない）。また、図3.2における各時刻の速度は、その変化に基づき衝撃外力評価を行うことを目的に、衝突直前の速度ベクトル方向への投影成分（図3.3）をプロットする。図3.1および図3.2より、同船舶は縦方向に船首から建築物に接近し、その時の速度は建築物に近づくほど大きく、最終的に6 m/s以上の速度で建築物に衝突したことがわかる。

ここで、衝突時の船舶の運動量変化に着目し、式(3.1)を用いて衝突時衝撃外力 F を求める。なお、同式では、衝突中における流体力の影響を衝撃外力に比べて十分小さいものとして無視し、また、衝撃外力 F の値は衝突中に一定であることを仮定している。

$$F = m \Delta v / \Delta t \quad (3.1)$$

ここで、

F : 衝撃外力 [kN]

m : 船舶の質量（排水量） [t]

Δv : 船舶の速度変化 [m/s]

Δt : 衝突継続時間 [s]

同式における船舶の発災時の質量（排水量） m [t]は、一般貨物船を含む分類Dの船舶（前章の2.2.2項参照）の総トン数 T_G と排水量との一般的な関係（船舶明細書^[3.1]に基づき図3.4に特定）に基づく満載排水量 m_F および軽荷排水量 m_L 、および2.2.2項において特定した満載喫水 d_F 、軽荷喫水 d_L および発災時喫水 d を用いて、船舶の積荷による喫水の変動と排水量の変動との間には線形関係が成立することを仮定して、式(3.2)により推定した。

$$m = m_L + (m_F - m_L) / (d_F - d_L) \times (d - d_L) \quad (3.2)$$

同式により得られた $m = 4179 \text{ t}$ 、および $\Delta v = 6.43 - (-2.56) = 8.99 \text{ m/s}$ 、 $\Delta t = 26 \text{ s}$ (図 3.2) を式(3.1)に代入すると衝撃外力 $F = 1,445 \text{ kN}$ が求まる。ただし、ここでは Δt が衝突前後の AIS データ記録時刻から算定されており、実際の衝突時間に比べて過大評価していると考えられるため、上記外力 F は実際の値に対して過小評価となっていると考えられる。

なお、以上の船舶の運動量変化に着目した手法の他、船舶の運動エネルギー変化に基づく手法によっても衝撃外力を評価し得るが、そのためには船舶の衝突時における移動距離を特定する必要がある。しかし、AIS データによってはその移動距離を精度良く特定できないため、本事例では同手法を用いた衝撃外力評価は行わないこととした。

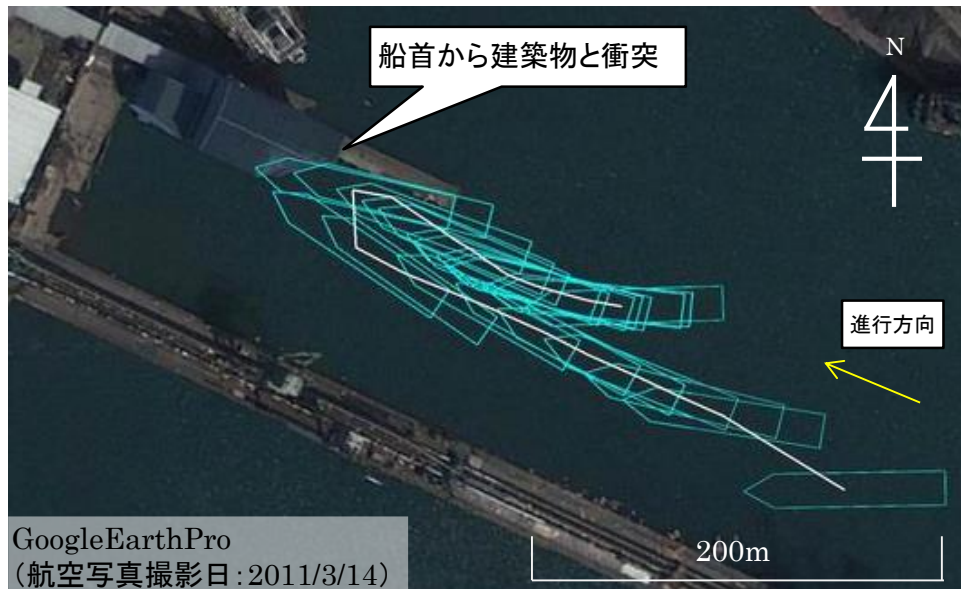


図 3.1 釜石港における一般貨物船(KIS-01)の建築物との衝突時の挙動

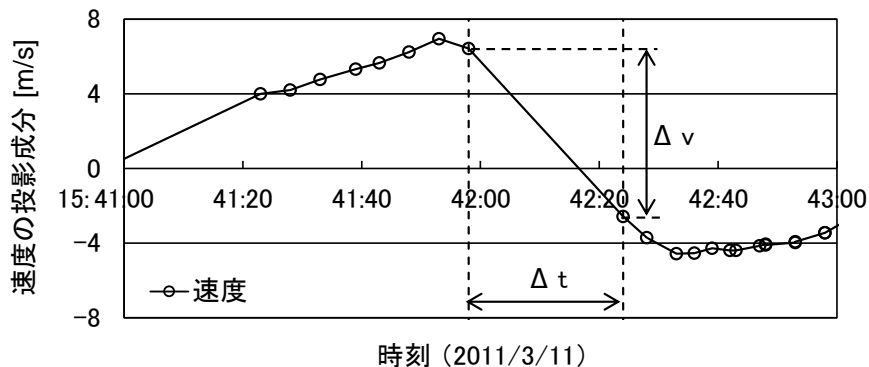
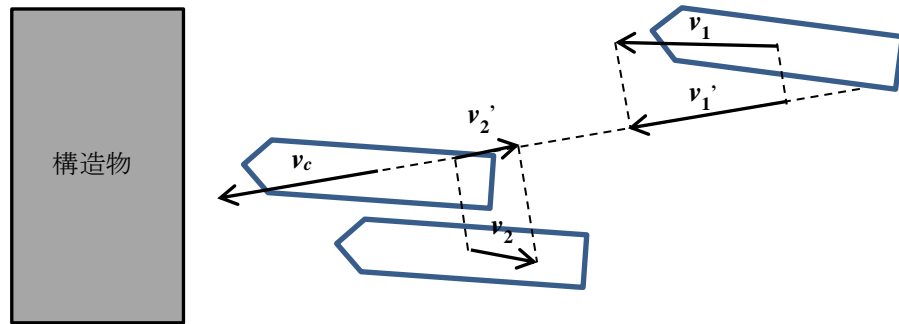


図 3.2 釜石港における一般貨物船(KIS-01)の速度変化
(衝突直前の速度ベクトル方向への投影成分)



v_c : 衝突直前の速度ベクトル

v_1, v_2 : 各時刻の速度ベクトル

v_1', v_2' : 各時刻の速度ベクトルの v_c 方向への投影ベクトル

図 3.3 船舶速度の衝突直前の速度ベクトル方向への投影

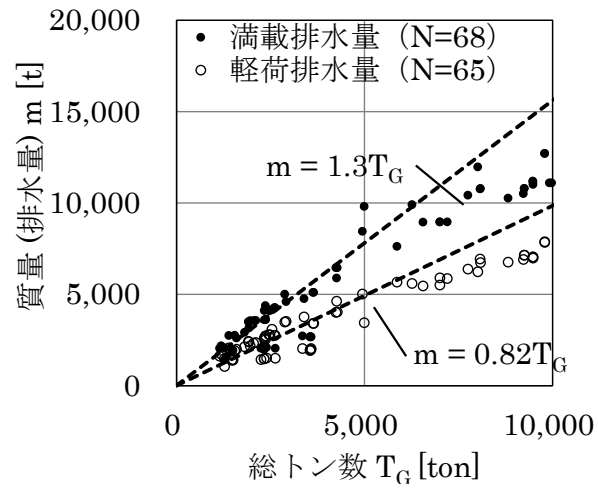


図 3.4 分類 D の船舶の総トン数 T_G と質量（排水量） m との関係（文献^[3.1]に基づき作成）

3.2.2 相馬港における石炭専用船と防波堤との衝突事例

本項では、相馬港における石炭専用船（付録 1. 検討対象船舶一覧の SMA-01）と建築物との衝突事例について AIS データに基づき分析する。図 3.5 および図 3.6 には、その衝突時の船舶の挙動およびの速度の時刻歴変化を、それぞれ示す。なお、前項における事例と同様に、図 3.6 における速度は、衝突直前の速度ベクトル方向への投影成分をプロットしている。両図より、同船舶は縦方向に船尾から防波堤に衝突し、その時の速度は 2 m/s 程度であったことがわかる。

ここで、3.2.1 項と同様に、衝突時の船舶の運動量変化に着目し、式(3.1)によりその時の衝撃外力 F を求める。同船舶の質量 m を文献^[3.2]に基づき 76,000 t と定め、図 3.6 に基づき $\Delta v = (2.16-0.87) = 1.29$ m/s、 $\Delta t = 10$ s とすると、同外力 $F = 9,804$ kN と求まる。ただし、前項と同様に、ここでは Δt が衝突前後の AIS データ記録時刻から算定されており、実際の衝突時間に比べて過大評価していると考えられるため、上記外力 F は実際の値に対して過小評価となっていると考えられる。

また、本事例では、被衝突防波堤のケーソン二函の滑動が確認されたことから（図 3.7）、船舶衝突時の衝撃外力 F はケーソンの二函分の滑動耐力以上であったと想定される。防波堤の滑動耐力は、一般にケーソンの滑動耐力のみが考慮されるが、ここでは衝撃外力を精度良く評価することを目的に、ケーソン背部にありケーソンと共に滑動した消波ブロックの滑動耐力も考慮した式(3.3)により求める。なお、同式における防波堤各部の浸水体積を求めるにあたり、衝突時刻における正確な津波高さは不明であるが、津波来襲後において同船舶の最後尾の垂直面には衝突痕が形成されていないことを考慮すると^[3.3]、防波堤の天端高さはその最後尾の垂直面の下端以下であったと想定される。そのため、防波堤と水面との高さ方向の位置関係を検討すると（図 3.8）、衝突時刻において防波堤は概ね浸水していたものと推察される。よって、ここでは防波堤がすべて浸水していたと仮定し（すなわち式(3.4)および式(3.5)における $V_{cc} = V_{cci}$, $V_{cs} = V_{csi}$, $V_d = V_{di}$ ）、式(3.3)によりケーソン二函分の滑動耐力 $Q_b = 33,514$ kN を求めた。以上より、船舶の実際の衝撃外力 F はケーソン二函分の滑動耐力 Q_b (33,514 kN) より大きかったと考えられる。

$$Q_b = \mu_c N_c + \mu_d N_d \quad (3.3)$$

$$N_c = \{ \gamma_{cc} (V_{cc} - V_{cci}) + (\gamma_{cc} - \rho) V_{cci} + \gamma_{cs} (V_{cs} - V_{csi}) + (\gamma_{cs} - \rho) V_{csi} \} g \quad (3.4)$$

$$N_d = \{ \gamma_d (V_d - V_{di}) + (\gamma_d - \rho) V_{di} \} g \quad (3.5)$$

ここで、

Q_b : 防波堤のケーソンの滑動耐力 [kN]

μ_c : ケーソンおよび根固ブロックの摩擦係数 [-]

（「港湾の施設の技術上の基準・同解説」^[3.4]に則り静止摩擦係数を 0.6 とする）

μ_d : 消波ブロックの摩擦係数 [-]

（設計値は与えられていないため、ここではケーソンと同じく 0.6 とする）

N_c : ケーソンおよび根固ブロックの自重による鉛直力 [kN]

N_d : 消波ブロックの自重による鉛直力 [kN]

- γ_{cc} : ケーソンのコンクリート部および根固めブロックの単位体積重量 [kN/m³]
 (24 kN/m³ とする)
 γ_{cs} : ケーソンの中詰砂の単位体積重量 [kN/m³] (16 kN/m³ とする)
 γ_d : 消波ブロックの単位体積重量 [kN/m³] (23 kN/m³ とする)
 ρ : 水の単位体積重量 [kN/m³] (10 kN/m³ とする)
 V_{cc} : ケーソン二函分のコンクリート部および根固めブロックの体積 [m³]
 V_{cci} : ケーソン二函分のコンクリート部および根固めブロックの浸水体積 [m³]
 V_{cs} : ケーソンの中詰砂の体積 [m³]
 V_{csi} : ケーソンの中詰砂の浸水体積 [m³]
 V_d : ケーソン二函分の背後に設置されている消波ブロックの体積 [m³]
 (「テトラポッド パンフレット」^[3.5]を参照し、設置空間の 0.5 倍とする)
 V_{di} : 消波ブロックの浸水体積 [m³]

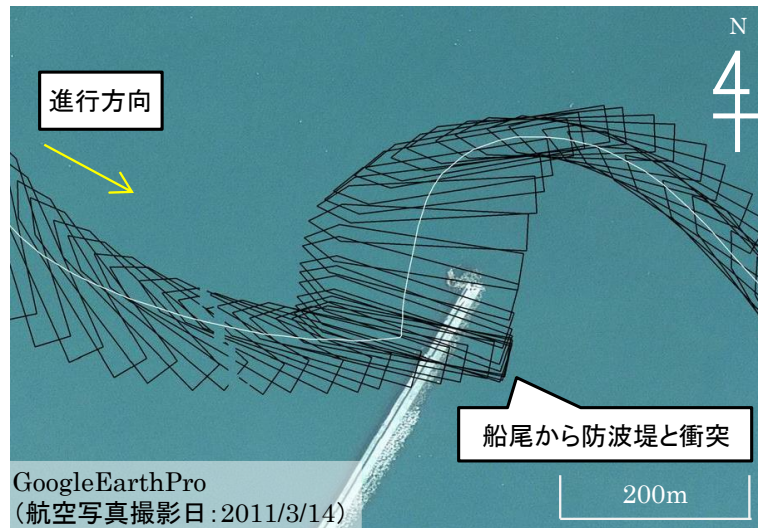
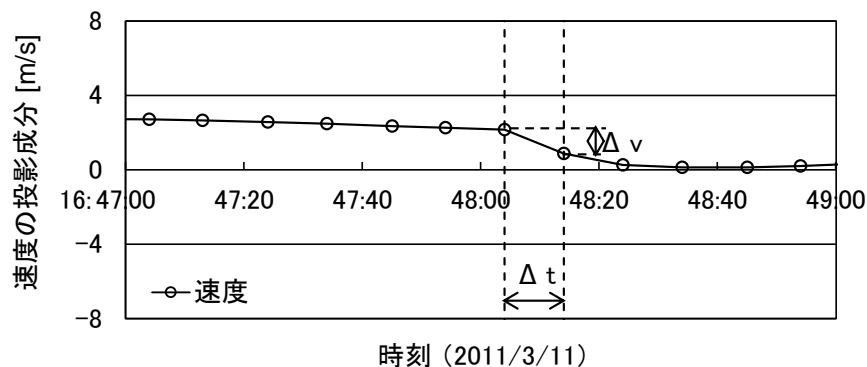


図 3.5 相馬港における石炭専用船(SMA-01)の防波堤との衝突時の挙動


 図 3.6 相馬港における石炭専用船(SMA-01)の速度変化
 (衝突直前の速度ベクトル方向への投影成分)

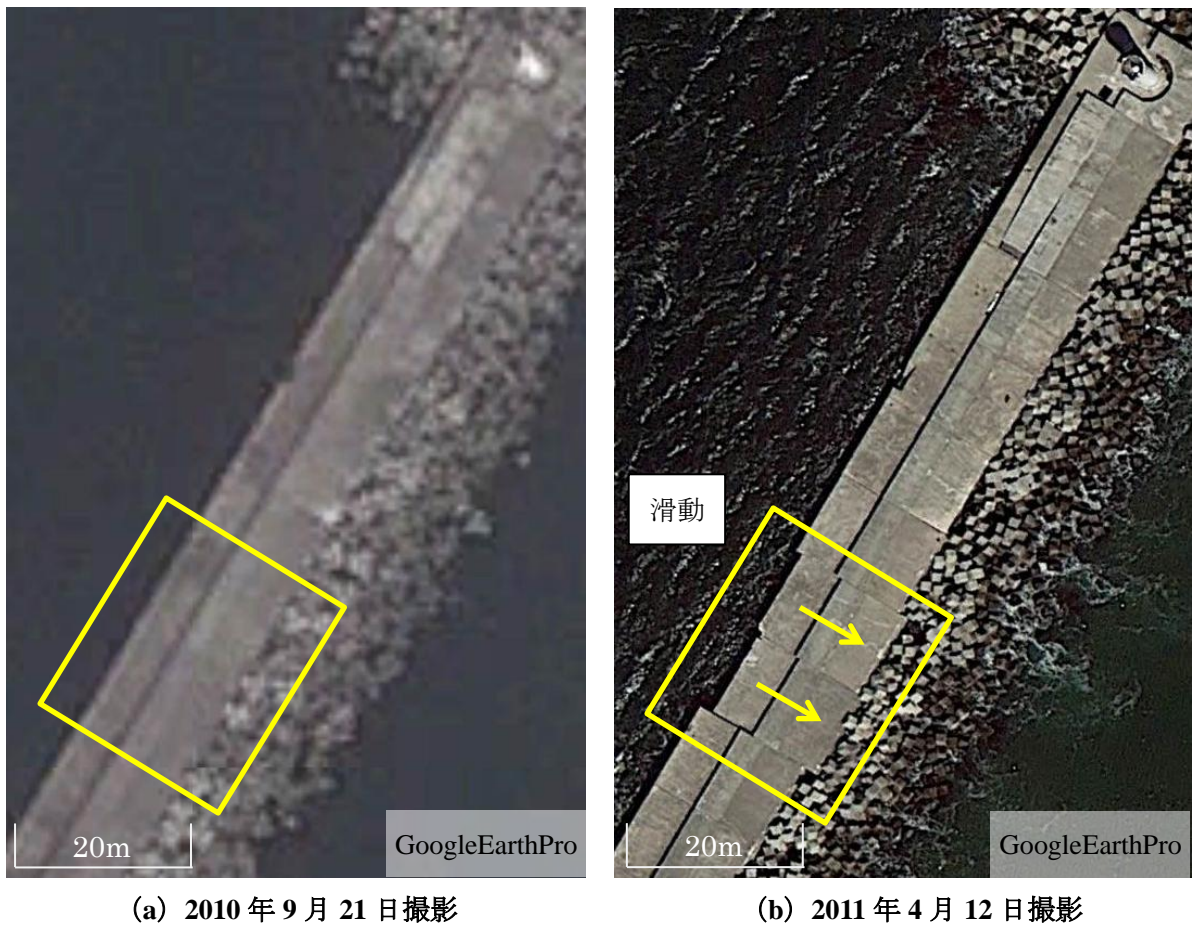


図 3.7 相馬港防波堤の発災後の滑動の様子

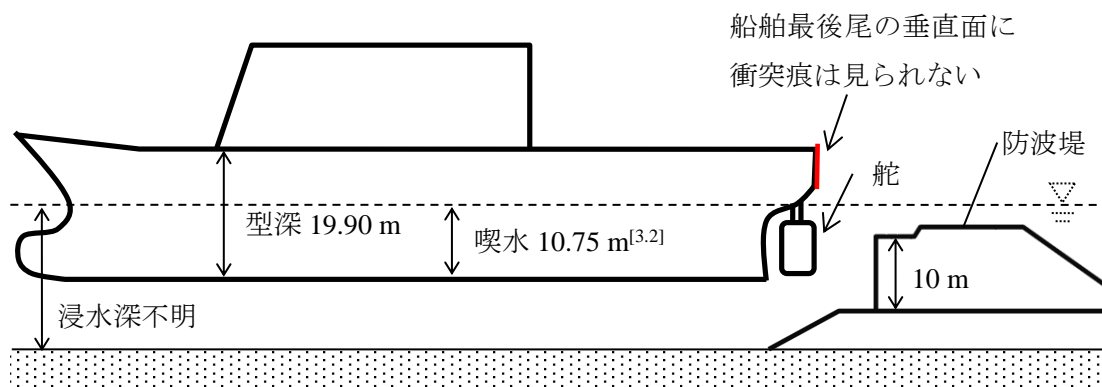


図 3.8 相馬港防波堤と船舶(SMA-01)の高さ関係の模式図

3.2.3 八戸港における探査船と岸壁との衝突事例

本項では、八戸港における探査船（付録1. 検討対象船舶一覧の HHE-02）と岸壁および消波ブロックとの衝突事例について記す。図 3.9 には同船舶の衝突時の挙動を、図 3.10 にはその速度および船首方位の時刻歴変化を、それぞれ示す。なお、図 3.10 には、明確ではないものの、衝突が生起したと考えられる区間についても示している。両図より、同船舶が横方向に、船尾が擦るように岸壁と衝突し、それに伴い船舶に反時計周りの回転が生じていることがわかる。

なお、本事例については、船舶の衝突直前における速度変化に操舵による人為的要因が影響している可能性があること、また、本研究で検討する船舶衝突時衝撃外力は、前2項における事例のように船舶が縦方向に衝突する場合の外力とすること（3.3 節）、を考慮し、船舶衝突時の衝撃外力評価は行わないこととする。



図 3.9 八戸港における探査船(HHE-02)の岸壁および消波ブロックとの衝突時の挙動

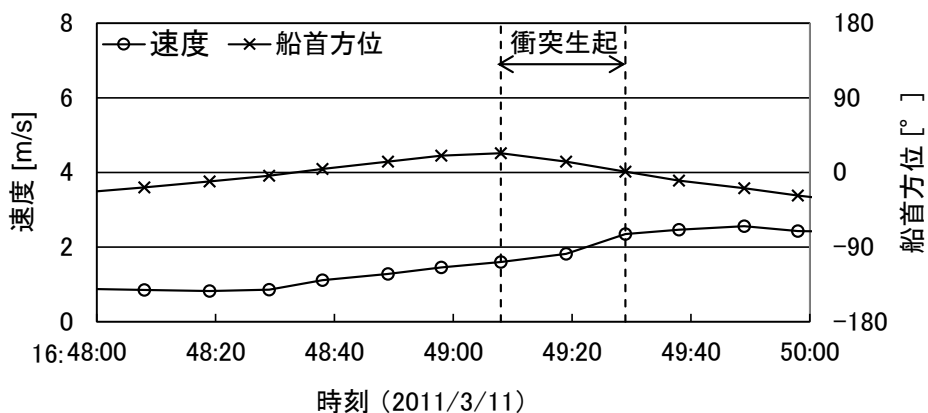


図 3.10 八戸港における探査船(HHE-02)の速度および船首方位変化
(船首方位は北を0度とする)

3.2.4 八戸港におけるケミカルタンカーと岸壁との衝突事例

本項では、八戸港におけるケミカルタンカー（付録1. 検討対象船舶一覧のHHE-12）と建築物との衝突事例について、津波来襲時の記録映像に基づき分析する。図3.11には、同船舶が引き波時に岸壁に接近する時の映像（衝突時の映像は収められていない）^[3.3]のキャプチャ画像を、図3.12には、同船舶がその後船首から岸壁に衝突し座礁した様子を、それぞれ示す。

本事例では、被衝突岸壁が損傷したことから（図3.13）、船舶衝突時の衝撃外力 F は岸壁の耐力 Q_q 以上であったと想定される。そこで、岸壁の耐力 Q_q を、記録映像により推定される同船舶の衝突速度 v （1.5 m/s 程度）と、図3.13より特定される岸壁の損傷距離 L （5 m 程度）とを用いて、船舶の運動エネルギー（ $1/2mv^2$ ）と岸壁の仕事量（ Q_qL ）との釣り合いに基づく式(3.6)により推定する。なお、同式における船舶の発災時の質量（排水量） m [t]は、3.2.1 項の事例と同様に、ケミカルタンカーを含む分類Eの船舶（2.2.2 項参照）の総トン数 T_G と満載排水量 m_F および軽荷排水量 m_L との一般的な関係（船舶明細書^[3.1]に基づき図3.14に特定）、ならびに2.2.2 項において特定した満載喫水 d_F 、軽荷喫水 d_L および発災時喫水 d を用いて式(3.2)により特定した。以上により得られた $m=10,970$ t、および $\Delta v=1.5$ m/s、 $L=5$ m を式(3.6)に代入すると、岸壁の耐力 $Q_q=2,468$ kN が求まる。よって、船舶衝突時の実際の衝撃外力 F は岸壁の耐力 Q_q （2,468 kN）以上であったと考えられる。

$$Q_q = 1/2mv^2 / L \quad (3.6)$$

ここで、

Q_q : 岸壁の耐力 [kN]

L : 岸壁の損傷量 [m]



図 3.11 船舶(HHE-12)の岸壁への接近時の映像^[3.3]のキャプチャ



図 3.12 岸壁に衝突した船舶(HHE-12) [3.8]



図 3.13 船舶(HHE-12)衝突による岸壁の損傷 [3.9]

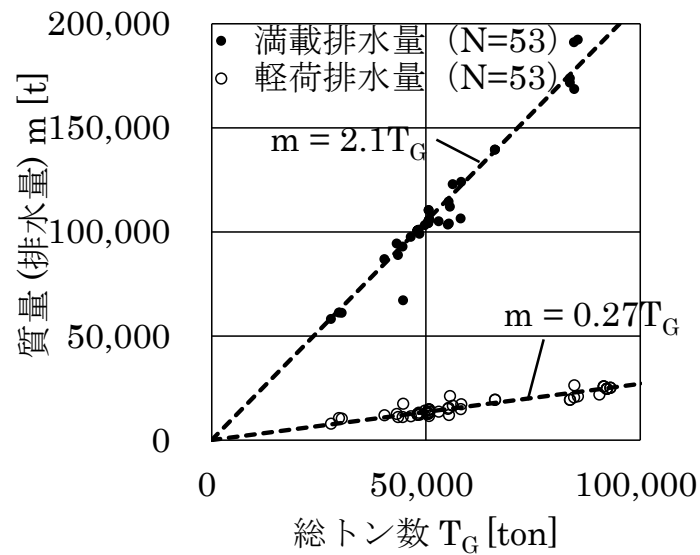


図 3.14 分類 E の船舶の総トン数 T_G と質量 (排水量) m との関係 (文献 [3.1] に基づき作成)

3.2.5 銚子港における漁船と防波堤との衝突事例

本項では、銚子港における漁船（付録1. 検討対象船舶一覧には含まれていない）と防波堤との衝突事例について、津波来襲時の記録映像に基づき分析する。図3.15には、同船舶が引き波時に岸壁に接近する時の映像^[3.7]のキャプチャ画像を、図3.16には、同映像における船舶および防波堤、ならびにその撮影場所である銚子ポートタワーの概ねの平面的な位置関係を、それぞれ示す。同映像を分析すると、同船舶の全長は50 m程度、防波堤への衝突速度は4.8 m/s程度、衝突継続時間は0.54秒程度、とそれぞれ推定された。さらに、同船舶の総トン数を漁船の総トン数と全長との一般的な関係^[3.1]（図3.17）に基づき求めると、244 ton程度と推定される。

ここで、3.2.1項および3.2.2項と同様に、船舶の衝突時の運動量変化に着目し、式(3.1)により衝突時の荷重 F を求める。なお、船舶の発災時質量については、上記映像から同船舶の載荷状況を特定することは困難であるため、文献^[3.10]により（文献^[3.1]には漁船の排水量データは掲載されていないため）得られる分類Bの船舶の総トン数と満載／軽荷排水量との一般的な関係（図3.18）に基づく両排水量を用いて衝撃外力の上下限值として定めた。以上、式(3.1)により船舶の衝突時衝撃外力 F を算出すると、船舶が軽荷状態の場合は3,882 kN、満載状態の場合は6,630 kNとそれぞれ求まる。

また、本事例では、被衝突防波堤が滑動していないことから、船舶衝突時の衝撃外力 F は防波堤の滑動耐力以下であったと想定される。よって、防波堤の滑動耐力を3.2.2項と同様に式(3.3)により求めると、 $Q_b = 23,704$ kNとなるため、船舶の実際の衝撃外力 F は防波堤の滑動耐力 Q_b （23,704 kN）以下であったと考えられる。



図 3.15 船舶と防波堤の衝突時映像^[3.7]のキャプチャ

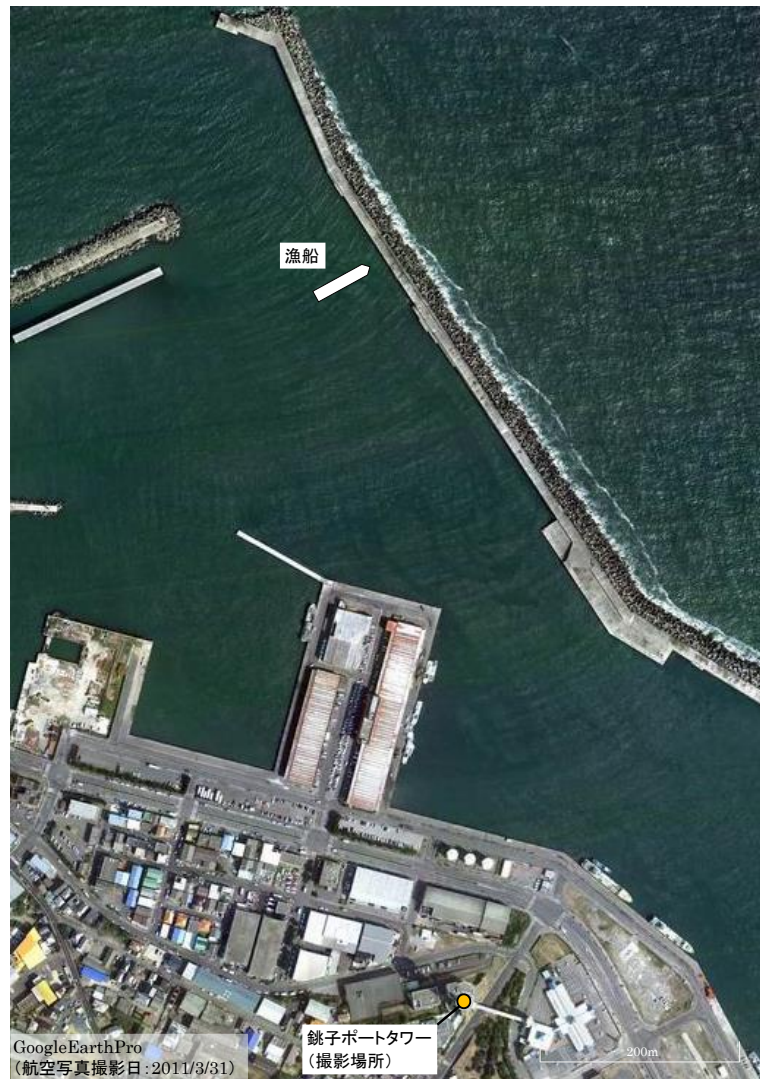


図 3.16 鉾子港における漁船および防波堤，撮影場所の概ねの平面的位置関係

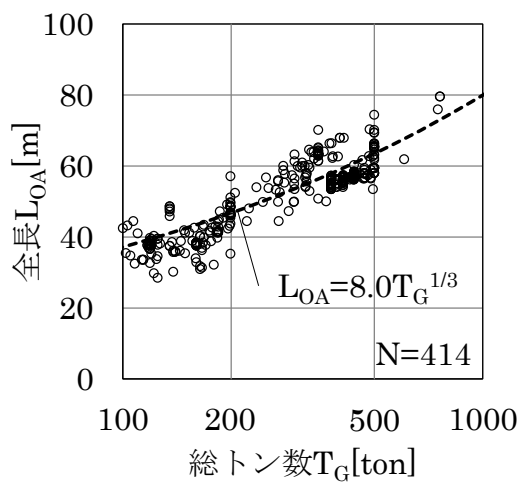


図 3.17 漁船の総トン数と全長との関係
(文献^[3.1]に基づき作成)

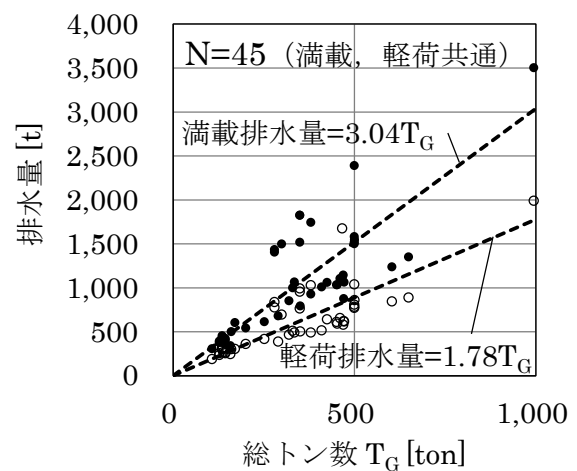


図 3.18 漁船の総トン数と排水量との関係
(文献^[3.10]に基づき作成)

3.3 船舶の衝突条件

前節では、津波来襲時における漂流船舶の実衝突事例について、その衝突条件（衝突速度、衝突方向）および衝撃外力を検討した。船舶の衝突条件は船舶の漂流時の挙動に左右されるものの、前節の事例においてその漂流開始から衝突までの一連の挙動を把握可能な事例は限られている。よって、本節では、その他の船舶の漂流事例を対象に、その速度および方向の変化についても分析を行うことで、船舶の衝突条件を定める。

3.3.1 船舶の漂流時の速度および方向

まず、船舶の漂流開始後の速度変化について検討する。検討対象とする船舶は、津波来襲時のAIS データが取得されている船舶のうち、操舵されることなく自然漂流したことが確認された船舶 KIS-01（釜石港）、OFT-01（大船渡港）、ISM-01（石巻港）の3隻と、操舵可否は不明だが操舵された挙動を示すことなく岸壁に乗り上げた SND-02（仙台塩釜港仙台港区）、操舵により港外避難を試みたものの押し戻された SGM-02（仙台塩釜港塩釜港区）の計5隻である。同5隻の船舶の漂流距離と漂流速度との関係を図3.19に示す。同図では、それぞれ図3.20に示す丸印間の速度変化を示している。図3.19より、各船舶は、その規模や漂流方向によらず、いずれも100 m～400 m程度の漂流により、概ね速度の極大値（3 m/s～7 m/s程度）に達していることがわかる。また、その速度は、2011年東北地方太平洋沖地震における津波流速を記録映像に基づき筆者らが計測した結果（上記港湾のすべての港湾で計測されているわけではないが、釜石港および大船渡港において3 m/s～6 m/s程度）^[3.11]と概ね一致していることから、船舶の衝突速度としては安全側に津波流速程度を考慮することが望ましいと考えられる。

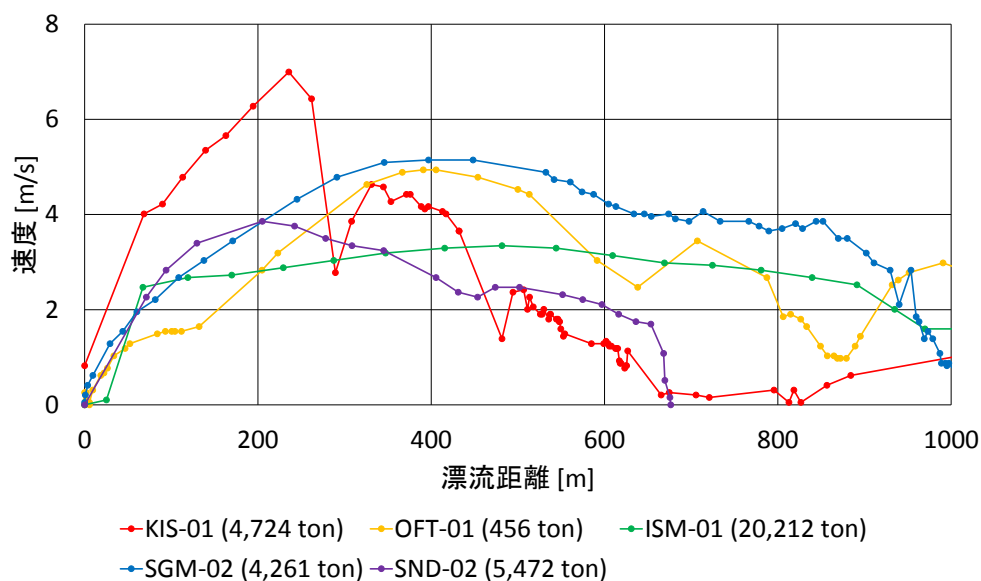


図 3.19 船舶の漂流距離と速度との関係

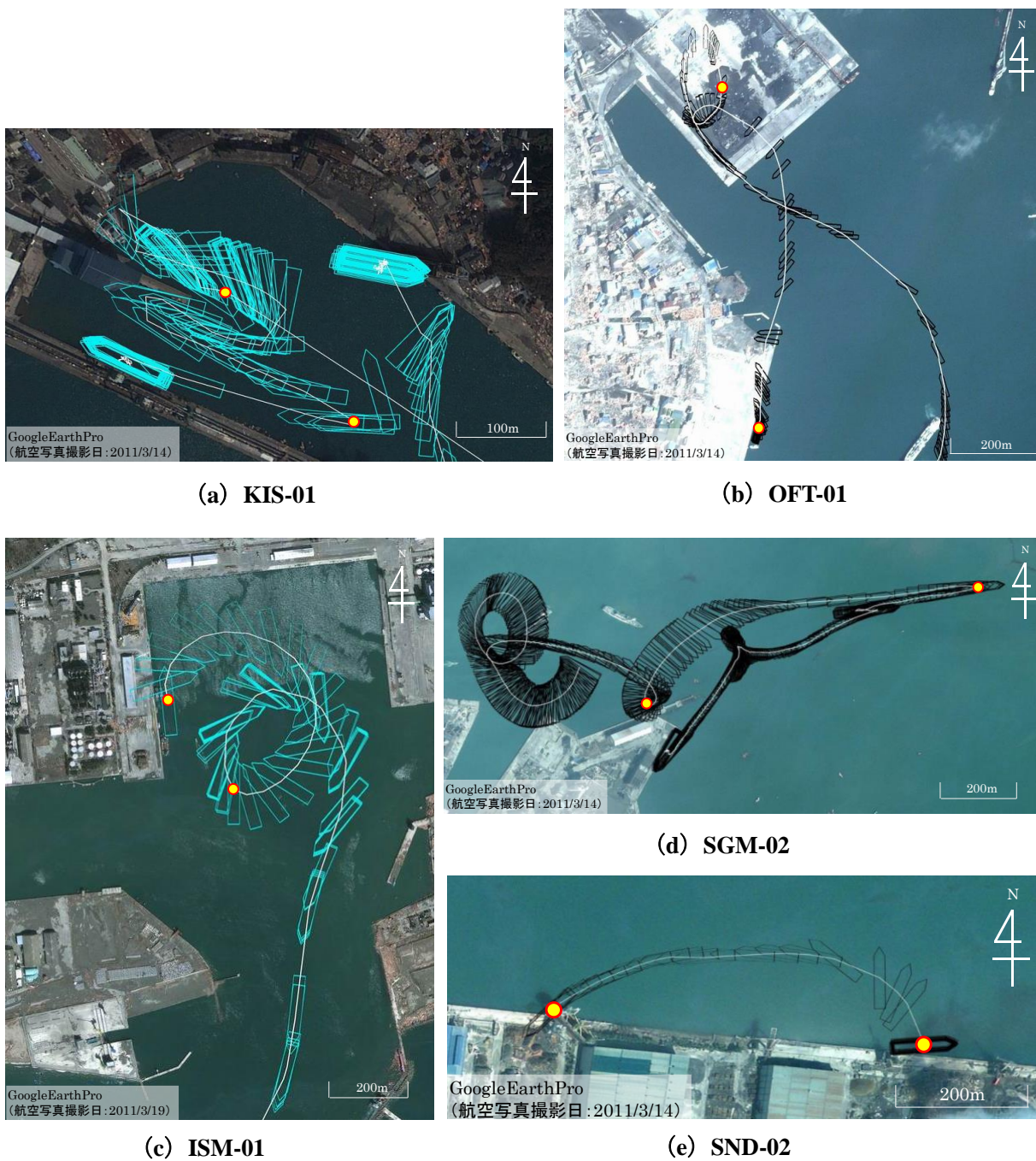


図 3.20 船舶の漂流距離と漂流速度との関係（図 3.19）の図示区間

次に、船舶の漂流速度と漂流方向（縦方向、横方向など）の関係を把握するべく、上記漂流速度の検討対象船舶5隻のうち、操舵が確認されているSGM-02を除く4隻を対象に、船舶の船首方位に対する針路と漂流速度との関係を図3.21に示す。同図では、凡例に示すように、船首方位に対する針路を角度により、漂流速度の大きさを原点からの距離により、それぞれ表している。すなわち、同図における 0° もしくは 180° 近傍のプロットは船舶が縦方向に漂流していた時の速度を、 90° もしくは 270° 近傍のプロットは船舶が横方向に漂流していた時の速度を、それぞれ示す。同図より、自然漂流した4隻すべてにおいて、船舶の速度は、横方向漂流時に比べ、縦方向漂流時において大きい傾向を確認することができる。

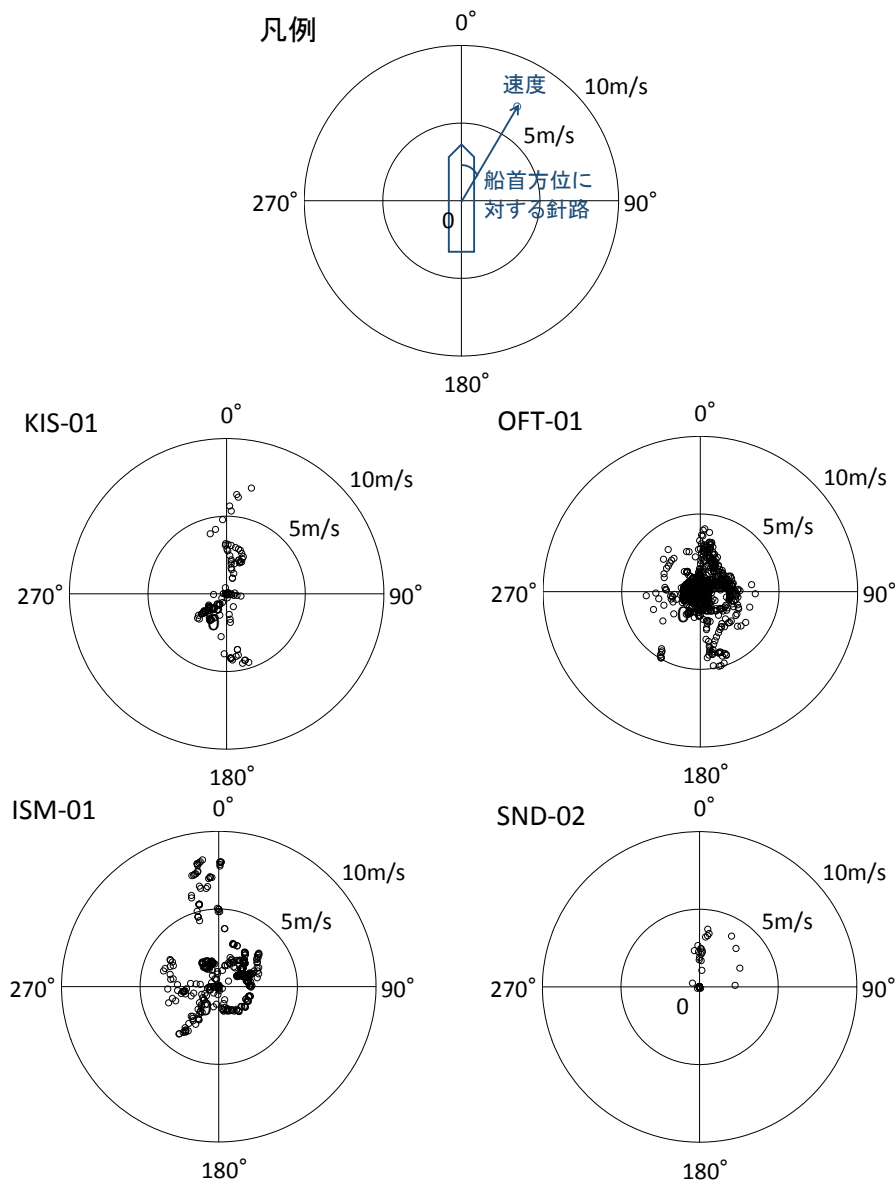


図 3.21 船舶の船首方位に対する針路と漂流速度との関係
(2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分～19 時 00 分)

3.3.2 船舶の衝突時の速度および方向

本項では、漂流船舶が構造物に衝突する時の速度および方向について検討する。検討対象船舶は、衝突時の速度が把握可能であった船舶 KIS-01（釜石港）、SMA-01（相馬港）の2隻である。両船舶の衝突時の速度変化について、各船舶が最も構造物に接近した時の距離を0 mとして図3.22に示す。同図より、KIS-01は衝突の数十 m 手前までは速度が上昇していたことが、SMA-01は構造物に接近するにつれて若干減速しているものの、その減速は限定的であることが、それぞれわかる。既往の研究^[3,12]では、コンテナが横方向で構造物に接近する場合には、構造物前面における反射波の影響により、その衝突速度が低下する（場合によっては速度が0にまで低下する）ことが水理模型実験に基づき確認されている。しかし、上記二船舶のように、船舶が縦方向で構造物に接近する場合には、構造物前面における反射波による減速の影響は限定的であったものと想定される。

以上、前項における漂流時の速度および方向の検討結果、本項における衝突時の速度および方向の検討結果を踏まえ、本研究においては、船舶の衝突条件としては比較的生起しやすいと考えられる縦方向を考慮し（実際に3.2節に紹介した実衝突事例では5事例のうち4事例が縦方向衝突である）、また、その時の船舶の衝突速度としては津波流速と同等の速度を考慮することとする。

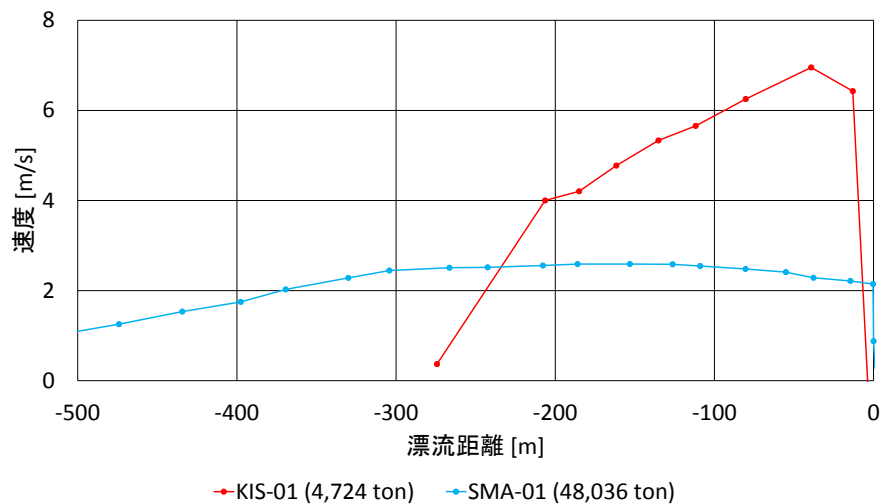


図 3.22 構造物と衝突した船舶の漂流速度変化

3.4 船舶衝突時の衝撃外力

前節では、船舶の衝突条件について検討した。本節では、同衝突条件における船舶の衝突時衝撃外力を検討する。すなわち、3.2 節における津波漂流船舶の実衝突事例における衝撃外力の評価結果と、船舶工学分野における既往の評価結果とを比較し、その結果に基づき本研究において建築物に入力する衝撃外力を定義する。

3.4.1 衝撃外力評価事例のまとめ

(1) 実衝突事例に基づく衝撃外力評価結果

まず、3.2 節において評価した津波漂流船舶の衝突時衝撃外力を表 3.1 にまとめる。なお、同評価結果が衝撃外力の上／下限値を定める場合、もしくは過大／過小評価となる場合には、同表における「評価値」にその旨を記した。なお、同表における番号①および②については後述する。

(2) FEM 解析を用いた既往の衝撃外力評価結果

1.2.2 項に紹介したとおり、船首衝突時の衝撃外力については、FEM 解析によってもその評価が行われている。そのため、上記(1)の衝撃外力評価事例数を補うべく、同解析事例のうち、船首と剛壁との衝突を対象としており、なおかつ検討対象船舶の規模が明示されている 10 隻の解析事例 [3.13]～[3.19]の衝撃外力を参照し、表 3.2 にまとめる。なお、参照した外力については、図 3.23 に例示するとおり、船首のフレア一部とバルブ部との両部位による外力の総和とし、その値が概ね一定となった時の平均的な外力とした。また、同表における「歪速度効果の評価手法」の項目には、歪速度の影響を考慮するために文献[3.20]における式(3.7)を採用している場合には、同手法における係数 C の値を示した。なお、1.2.2 項に先述のとおり、同手法において $C = 40.4$ および 3,600 の値を用いる場合には、衝撃外力を過大評価し得ることが指摘されている [3.21]。また、同項目における「考慮せず」とは、船舶衝突において動的効果が限定的であること [3.21]に基づき動的効果を考慮しなかった事例である。

$$\sigma_{dynamic} = \sigma_{static} \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \quad (3.7)$$

ここで、

$\sigma_{dynamic}$: dynamic stress [N/mm²]

σ_{static} : static stress [N/mm²]

$\dot{\epsilon}$: strain rate

C : coefficient to be determined based on test data [s⁻¹]

P : coefficient to be determined based on test data [-]

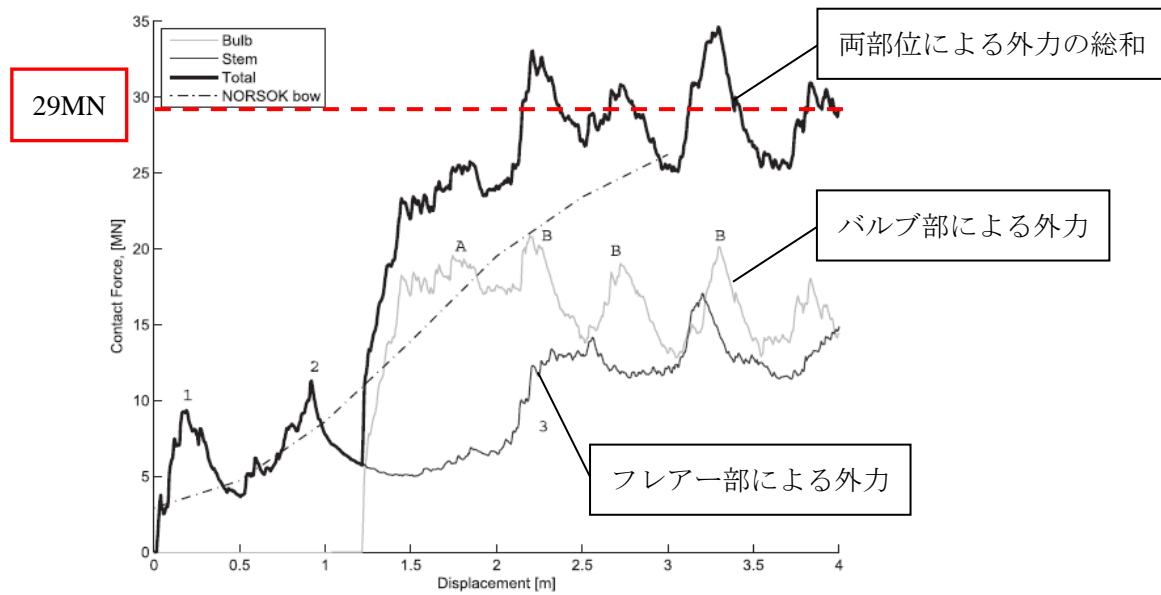


図 3.23 文献[3.18]における外力の参照（注釈は著者追記）

表 3.1 実衝突事例に基づく衝撃外力評価結果のまとめ

評価 番号	項番号	評価手法	船種	総トン数 T _G [ton]	載荷重量トン数 DWT [ton]		排水量 [t]		衝突速度 [m/s]	荷重 [kN]	評価傾向
1	3.2.1項	運動量変化	一般貨物船	4,724	8,374	—	4,179	—	6.4	1,445	過小評価
2	3.2.2項	運動量変化	石炭専用船	48,036	88,279	—	76,000	—	2.2	8,436	過小評価
3		防波堤耐力	石炭専用船	48,036	88,279	—	76,000	—	2.2	33,514	過小評価
4	3.2.4項	運動E変化	ケミカルタンカー	7,912	12,601	—	10,970	—	1.5	2,468	過小評価
5	3.2.5項	運動量変化	漁船	244	307	②	434	①	4.8	3,882	下限値
6			漁船	244	307	②	742	①	4.8	6,630	上限値
7		防波堤耐力	漁船	244	307	②	588	①	4.8	23,704	過大評価

* 評価番号 5～7（3.2.5 項）の船舶の排水量は未知であるものの、船舶の運動量変化に基づく荷重評価番号 5 および 6 では、それぞれその値を軽荷排水量および満載排水量として仮定し、荷重を評価している。一方、評価番号 6 は、荷重を防波堤の滑動耐力により算定しているため、船舶の排水量を仮定していない。そこで、同評価番号 6 の排水量は、満載排水量と軽荷排水量との平均値を示した。

表 3.2 FEM 解析に基づく既往の衝撃外力評価結果のまとめ

評価 番号	文献 番号	発表年	船種	総トン数 T _G [ton]		載荷重量トン数 DWT [ton]	排水量 [t]		衝突速度 [m/s]	荷重 [kN]	歪速度効果 評価手法
8	[3.13]	1993年	撒積専用船	80,214	⑤	150,000	174,850	—	7.7	440,000	C=40.4
9	[3.14]	2003年	撒積専用船	2,211	⑤	4,135	5,700	—	6.0	34,000	C=3600
10	[3.15]	2006年	撒積専用船	26,738	⑤	50,000	62,000	—	4.0	100,000	C=40.4
11	[3.16]	2010年	撒積専用船	1,604	⑤	3,000	3,962	—	5.0	12,000	C=40.4
12	[3.16]	2010年	コンテナ船	7,255	③	5,000	6,710	—	5.0	29,000	C=40.4
13	[3.16]	2010年	撒積専用船	6,417	⑤	12,000	16,700	—	5.0	42,000	C=40.4
14	[3.17]	2013年	油送船	67,380	⑤	126,000	74,118	⑥	5.0	64,000	考慮せず
15	[3.18]	2014年	撒積専用船	2,674	⑤	5,000	6,878	—	5.0	41,000	C=40.4
16	[3.18]	2014年	コンテナ船	17,059	③	10,000	11,937	—	5.0	43,000	C=40.4
17	[3.19]	2014年	サプライ船	7,356	④	7,500	8,092	⑥	4.0	29,000	考慮せず

なお、表 3.1 および表 3.2 では、載荷重量トン数 DWT 、船舶の質量（排水量） m および国内総トン数 T_G の一部の値を下記の①～⑥の関係を用いて推定したため、その場合には①～⑥の番号を同二表に付記することで示した。

- ①分類 B の船舶の総トン数 T_G と排水量との関係（図 3.18）
- ②分類 B の船舶の総トン数 T_G と載荷重量トン数 DWT との関係（図 3.24(a)）
- ③コンテナ船の総トン数 T_G と載荷重量トン数 DWT との関係（図 3.24(b)）
- ④サプライ船の総トン数 T_G と載荷重量トン数 DWT との関係（図 3.24(c)）
- ⑤分類 E の船舶の総トン数 T_G と載荷重量トン数 DWT との関係（図 3.24(d)）
- ⑥分類 E の船舶の総トン数 T_G と排水量との関係（図 3.14）

なお、④のサプライ船とは、海上のプラットフォームに資材や燃料を輸送する船舶のことであり、同船舶については文献^[3.1]に掲載されている船舶は無かったため、同船舶を所有する会社 6 社の計 47 隻の公開データ^{[3.22]～[3.27]}に基づき総トン数 T_G と載荷重量トン数 DWT との関係を求めた。ただし、同船舶の排水量は明示されていなかったため、⑥により求まる満載排水量と軽荷排水量の平均値により仮定した。

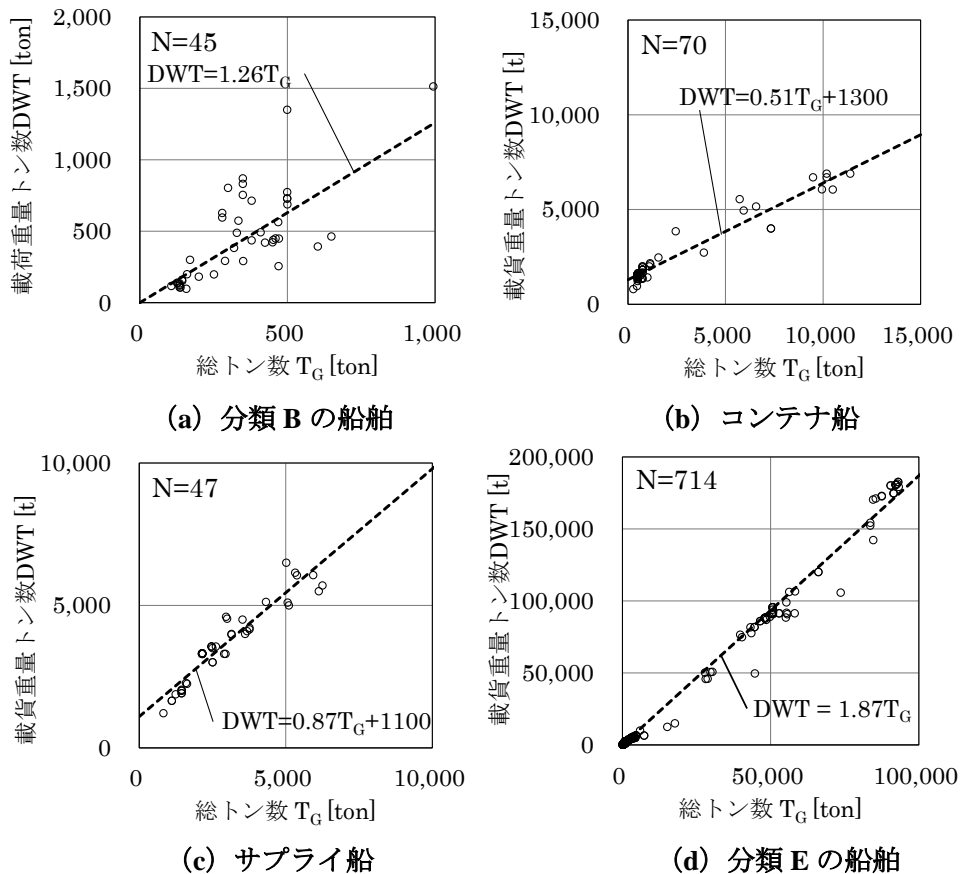


図 3.24 総トン数 T_G と載荷重量トン数 DWT との関係

((a) は文献^[3.10]に、(b) , (d) は文献^[3.1]に、(c) は文献^{[3.22]～[3.27]}に、それぞれ基づき作成)

3.4.2 衝撃外力評価式と各事例の評価結果との比較

本項では、船舶衝突時の衝撃外力について、前項にまとめた評価結果と、既往の評価式による結果とを比較する。衝撃外力の評価式は、1.2.2 項に紹介したとおり、衝突実験結果に基づく式(3.8)および式(3.9)^{[3.28]~[3.30]}、動的効果を見込んだ数値解析に基づく式(3.10)^[3.31]、理論的考察および静的加力実験結果に基づく式(3.11)^{[3.32],[3.33]}の主に3式が提案されており、そのうち式(3.8)は動的効果を過大に考慮しており、そのため衝撃外力を過大に評価し得ることを1.2.2 項において指摘した。以下に、あらためて各評価式を示す。

$$P_{\max} \cong 0.88\sqrt{DWT} \pm 50\% \quad (3.8)$$

$$P_m \cong P_{\max} / 2 \quad (3.9)$$

ここで、

P_{\max} : greatest impact force [MN]

P_m : medium impact force [MN]

DWT : deadweight tonnage [ton]

$$P_{\text{bow}} = \begin{cases} P_0 \bar{L} [\bar{E}_{\text{imp}} + (5.0 - \bar{L}) \bar{L}^{1.6}]^{0.5} & \text{for } \bar{E}_{\text{imp}} \geq \bar{L}^{2.6} \\ 2.24 P_0 [\bar{E}_{\text{imp}} \bar{L}]^{0.5} & \text{for } \bar{E}_{\text{imp}} < \bar{L}^{2.6} \end{cases} \quad (3.10)$$

ここで、

$$\bar{L} = L_{pp} / 275 \quad [-]$$

$$\bar{E}_{\text{imp}} = E_{\text{imp}} / 1425 \quad [-]$$

$$E_{\text{imp}} = \frac{1}{2} m_x V_0^2 \quad [\text{MNm}]$$

P_{bow} : maximum bow collision load [MN]

P_0 : reference collision load equal to 210 [MN]

E_{imp} : energy to be absorbed by plastic deformations [MNm]

L_{pp} : length of vessel [m]

m_x : mass plus added mass (5%) with respect to longitudinal motion [$\times 10^6$ kg]

V_0 : initial speed of vessel [m s^{-1}]

$$P_{cr} = 1.17 T_G^{1/3} (0.82 T_G^{1/6} + 1)^3 \quad (3.11)$$

ここで

P_{cr} : 船首の破壊強度 [tf]

T_G : 船舶の総トン数 [ton]

以上の評価式による衝撃外力の評価結果と、前項にまとめた各事例における同外力の評価結果とを図 3.25～図 3.27 に比較する。なお、文献[3.28]および[3.22]では、1.2.2 項に先述のとおり、船舶の衝突初期においてその最大値（文献[3.28]における式(3.8)）が生起することが確認されているものの、その生起はごく短時間であり、建築物応答への影響は小さいため、本項ではその後の一定となった時の外力値について検討する。

まず、図 3.25 には、式(3.9)^{[3.28]～[3.30]}による衝撃外力の評価結果と、表 3.1 および表 3.2 の各事例による評価結果とを比較する。同図では、表 3.1 および表 3.2 に示す外力評価番号を各プロットに付記するとともに、実衝突事例において過小評価および過大評価していると想定される事例には上矢印および下矢印を、上下限界を表す二つのプロットの間には両矢印を、それぞれ記した。また、FEM 解析において歪速度効果を過大に考慮し、そのため衝撃外力も過大評価していると考えられる事例は△印により示した。同図より、式(3.9)により求まる衝撃外力は、○印のプロットよりもやや大きく、△印のプロットと概ね符合していることがわかる。なお、衝撃外力を過大評価もしくは過小評価していないと想定される評価事例 14 および評価事例 17（同図における白抜きの○印のプロット）の評価結果について、式(3.9)による算定結果との基準化誤差（「各事例の衝撃外力評価結果」－「式(3.9)による算定値」）／「式(3.9)による算定値」を算出すると、それぞれ 0.59 および 0.24 と求まる。

次に、図 3.26 には、式(3.10)^[3.31]による衝撃外力の評価結果と、表 3.1 および表 3.2 の各事例による評価結果とを比較する。同図では、衝突事例および FEM 解析における衝突速度（2 m/s～6 m/s 程度および 3 m/s～6 m/s 程度）を考慮し、同式において衝突速度 v を 2 m/s および 6 m/s とした時の衝撃外力の評価結果を示している。同図より、式(3.10)により求まる衝撃外力は、各事例の評価結果と比べて過大となっていることがわかる。その理由としては、1.2.2 項に指摘したとおり、同式の導出に用いた解析においては歪速度効果を過大に見込んでいることが一因として考えられる。なお、式(3.9)の場合と同様に評価事例 14 および 17 について基準化誤差を算出すると、それぞれ 0.83 および 0.51 と求まる。

最後に、図 3.27 には、式(3.11)^{[3.32],[3.33]}による衝撃外力の評価結果と、表 3.1 および表 3.2 の各事例による評価結果とを比較する。同図より、式(3.11)により求まる衝撃外力は△印のプロットよりもやや小さく、概ね○印のプロットの平均的な値となっていることがわかる。なお、同式は、①動的效果は考慮されておらず、また、②船首バルブ部を再現していない垂直型船首を対象とした理論的考察および実験結果に基づくものの、①に対しては、船舶衝突における動的效果の影響は限定的であることが指摘されており^[3.21]、また、②に対しては、船首のフレア一部とバルブ部が共に変形する場合には、同式で仮定している船首全体の船側外板の変形時と同様の外力となることが想定されるため、上記①および②の要因が衝撃外力評価結果に与える影響は小さいと考えられる。なお、上二式の場合と同様に評価事例 14 および 17 について基準化誤差を算出すると、それぞれ 0.43 および 0.32 と求まる。

以上、船舶衝突時の衝撃外力評価式(3.9)～式(3.11)による衝撃外力の評価結果と、表 3.1 および表 3.2 における各事例の評価結果とを比較したところ、データ数に限りがあるため明確な傾向が

得られたわけではないが、式(3.11)が比較的各事例の評価傾向（すなわち過大評価もしくは過小評価）と全体的に符号し、なおかつ衝撃外力を過大評価もしくは過小評価していないと想定される評価事例 14 および評価事例 17 の評価結果との基準化誤差が比較的小さいことがわかった。ただし、本検討における検討事例数は十分とは言えず、同衝撃外力は船舶の船首形状や衝突速度等による変動し得ること（文献^[3,28]では±50%）、上述の検討においても式(3.11)に-43%～+32%の誤差を有することが明らかになっていることから、同衝撃外力についてはその誤差も含め、さらなる精査が必要であり、設計実務において建築物への外力を設定する際には以上のことに十分配慮する必要がある。

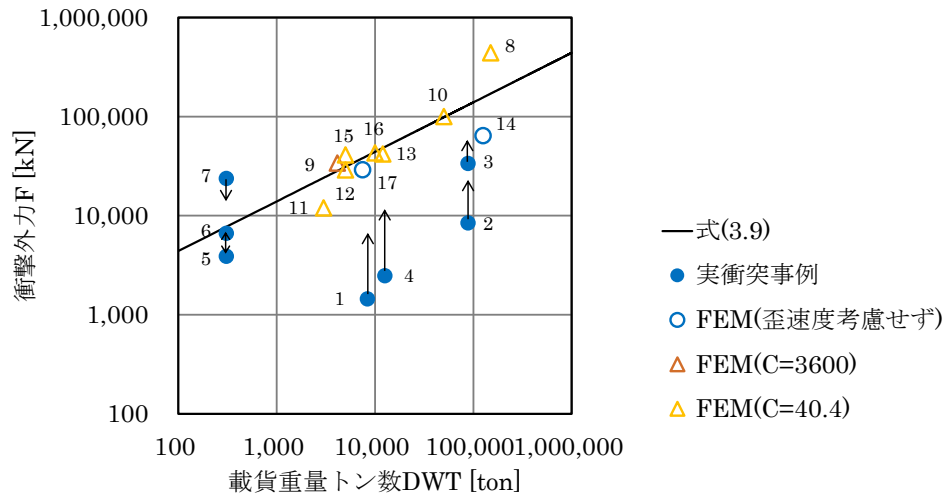


図 3.25 式(3.9)と各外力評価事例との衝撃外力 F の比較

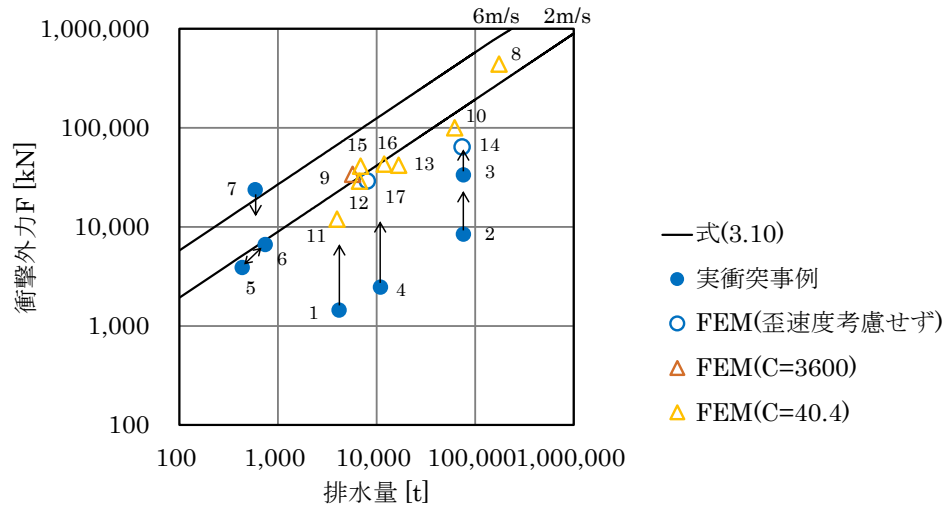


図 3.26 式(3.10)と各外力評価事例との衝撃外力 F の比較

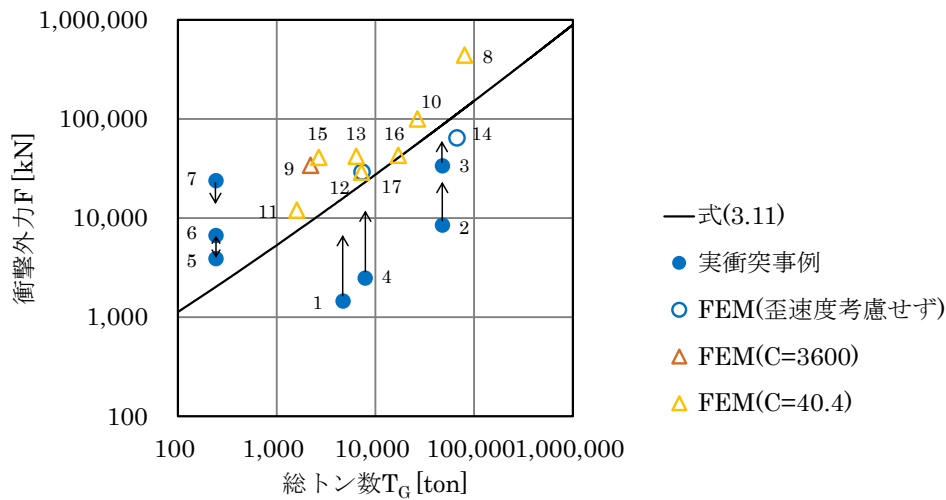


図 3.27 式(3.11)と各外力評価事例との衝撃外力 F の比較

3.4.3 船舶衝突時の衝撃外力の定義

船舶衝突時の衝撃外力は、先述のとおり、衝突初期のごく短時間にその最大値が生起し、その後の船首の船側外板が座屈し内側に折り畳まれるように破壊が進行する過程においては概ね一定になることが、静的加力実験^[3.32]および衝突実験^[3.28]により確認されている。衝突初期の最大荷重については、その生起はごく短時間であり、建築物応答への影響は小さいため、前項ではその後の一定となった時の外力値の評価を行った。本研究では、その外力評価結果と、同外力が衝突において概ね一定であること、さらに下記の仮定①～⑤を導入することにより、船舶衝突時の衝撃外力を式(3.12)および式(3.13)により定まる矩形パルス波（図 3.28）として定義する。

なお、仮定③について、船首形状によっては、図 3.23 の例のように船首のフレア一部とバルブ部とが同時に建築物に衝突するとは限らず、さらに両部位による外力の作用位置は高さ方向に異なるものの、両外力が同時にフレア一部の位置に（すなわち高い方の位置に）作用する状況を考慮することで、建築物の応答を簡便に、なおかつ安全側に評価することができるため（4 章の検討により、衝突位置が高いほど各層の応答が大きいことが確認されたため）、同仮定を導入した。

- ①船舶が船首から、津波流速に等しい速度で衝突すること（3.3 節）。
- ②船舶の衝突位置は、建築物において十分剛と仮定できる床位置であること。
（被衝突部材の局所的な破壊および建築物の応答が衝撃外力に与える影響は無視する。）
- ③フレア一部による荷重とバルブ部による荷重が同時に同位置に作用すること。
- ④船舶周囲の水による付加質量の影響は十分小さいものとして無視すること。
- ⑤衝突船舶が有するすべての運動量 mv が衝突により建築物の運動量に変化すること。
（船舶が衝突後に停止することを仮定。）

$$F = P_{cr} g = 1.17 T_G^{1/3} (0.82 T_G^{1/6} + 1)^3 g \quad (3.12)$$

$$\tau = mv / F \quad (3.13)$$

ここで、

F : 船舶の衝突時衝撃外力 [kN]

P_{cr} : 船首の破壊強度 [tf]

T_G : 船舶の総トン数 [ton]

g : 重力加速度 [m/s^2]

τ : 衝撃外力の荷重作用継続時間 [s]

m : 船舶の質量（排水量）[t]

v : 船舶の衝突速度（津波流速に等しいとする）[m/s]

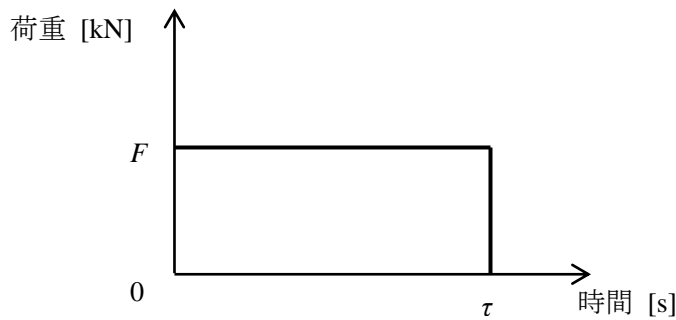
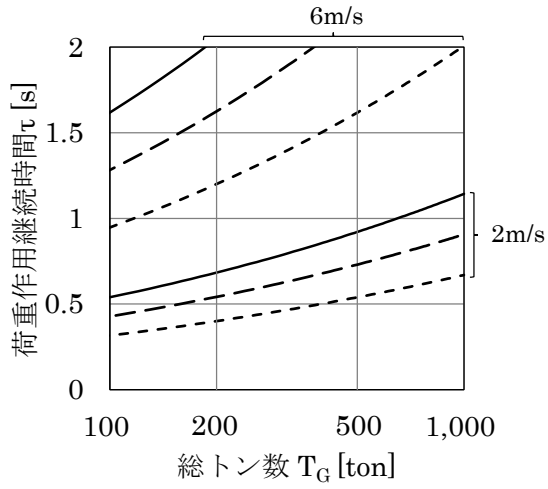


図 3.28 船舶衝突時の衝撃外力の定義

ここで、衝撃外力に対する建築物の応答は荷重作用継続時間 τ により大きく左右されることが次章以降の検討で明らかとなったため、船舶の衝突により実際に生じ得る τ の長さを検討する。式(3.13)により τ を算出するためには質量 m [t] の値が必要となるため、ここではその質量と総トン数との一般的な関係を特定できた分類 B (図 3.18)、分類 D (図 3.4) および分類 E の船舶 (図 3.14) を対象に検討する (分類 A の旅客船、分類 C の曳船等については、船舶明細書^[3.11]にその排水量が掲載されておらず、その一般的な関係が特定できなかったため荷重作用継続時間 τ の検討はしていない)。同式における船舶の衝突速度 v については、2011 年東北地方太平洋沖地震における津波来襲時の記録映像を用いて計測された津波流速 (3 m/s～6 m/s 程度)^[3.11] および実衝突事例の衝突速度 (2 m/s～6 m/s 程度、3.2 節) に基づき、2 m/s～6 m/s として設定する。以上より、船舶衝突時の荷重作用継続時間 τ と船舶の総トン数 T_G との関係を式(3.12)により求め、図 3.29 示す。同図より、総トン数 T_G が大きくなるほど、また積載貨物の重量が大きいほど、 τ は長くなることがわかる。また、 τ の値は、分類 B の船舶) では 0.3 s 程度以上となり、分類 D および分類 E の船舶では、2011 年東北地方太平洋沖地震の発災時喫水において半載程度 (満載と軽荷の間) には積荷を有していたこと (図 2.28) を考慮すると 0.25 s 程度以上と想定される。

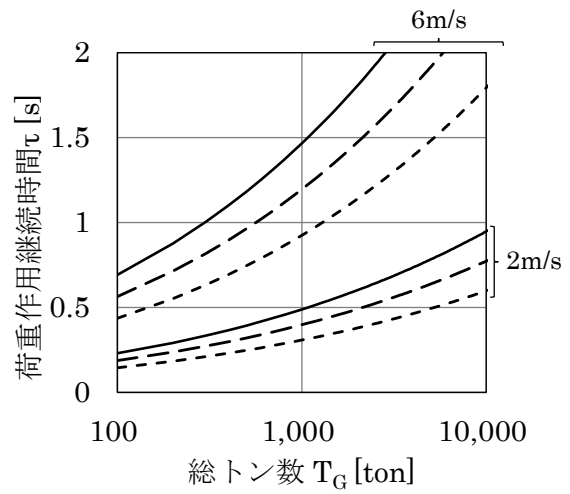
以上に求めた τ と、津波避難ビルとして一般的な中低層建築物として 3 層および 6 層建築物の固有周期 T (階高を 3.0 m として $0.02 H$ (H [m]: 建築物の軒の高さ) により算定すると 0.18 s および 0.36 s) との比 τ/T を図 3.30 および図 3.31 に示す。両図では、次章に提案する応答評価手法が $\tau/T \geq 0.5$ において推定精度が良いことが明らかとなったため、 $\tau/T = 0.5$ の値も併せて示している。両図より、100 ton 以上の船舶が 3 層もしくは 6 層建築物に衝突する場合には、概ね $\tau/T \geq 0.5$ となることがわかる。なお、分類 D および分類 E の船舶において、積荷状態が軽荷に近い場合には $\tau/T < 0.5$ となり得るが、先述のとおり、分類 D および分類 E の船舶が 2011 年東北地方太平洋沖地震において概ね半載程度には積荷を有していたことを考慮すると、そのような事例数はごく限られるものと想定される。

なお、本研究では、船舶衝突に対する建築物の安全性を検討することを目的として上記衝撃外力を定めたが、上記①～⑤の仮定が導入できる場合には、他の構造物 (海岸施設等) の船舶衝突に対する安全性の検討においても、同衝撃外力を用いることができると考えられる。



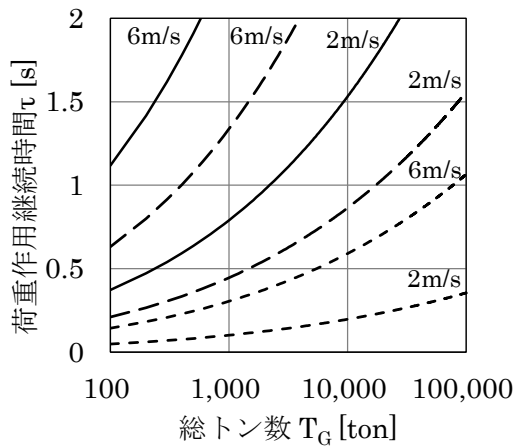
— 満載状態 — 半載状態 --- 軽荷状態

(a) 分類 B の船舶



— 満載状態 — 半載状態 --- 軽荷状態

(b) 分類 D の船舶



— 満載状態 — 半載状態 --- 軽荷状態

(c) 分類 E の船舶

図 3.29 船舶衝突時の総トン数と荷重作用継続時間との関係

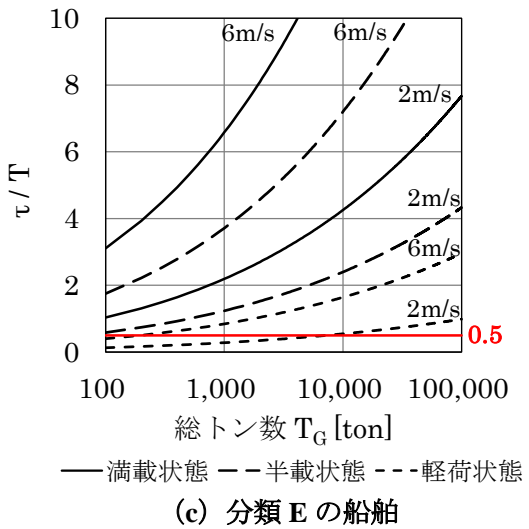
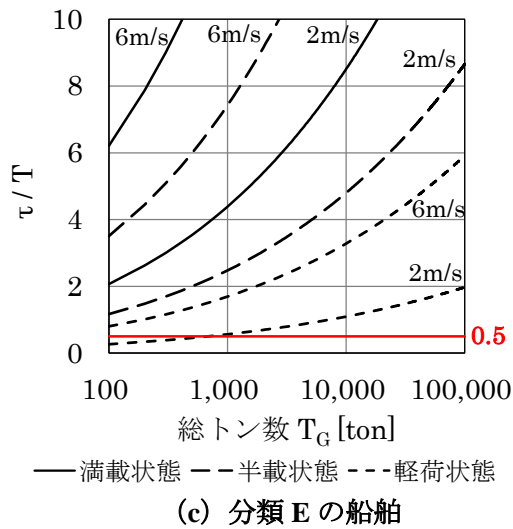
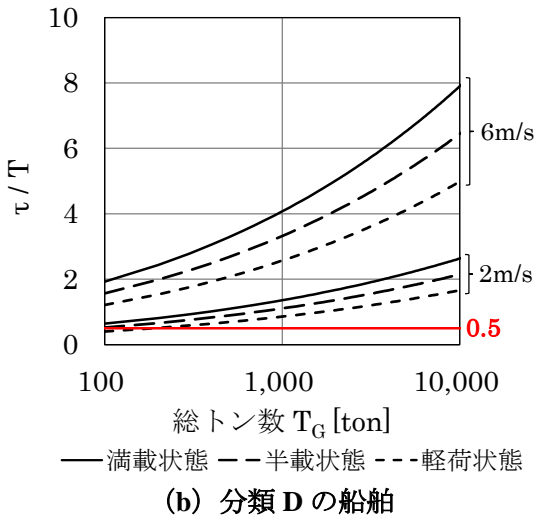
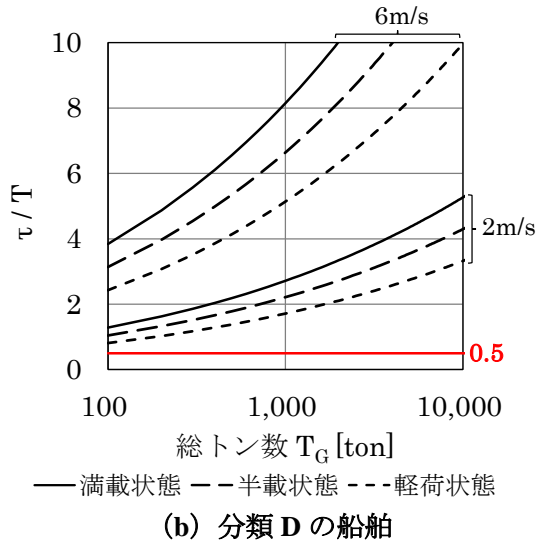
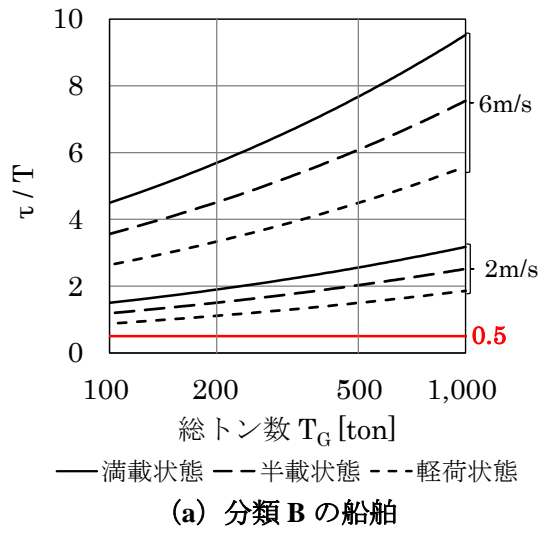
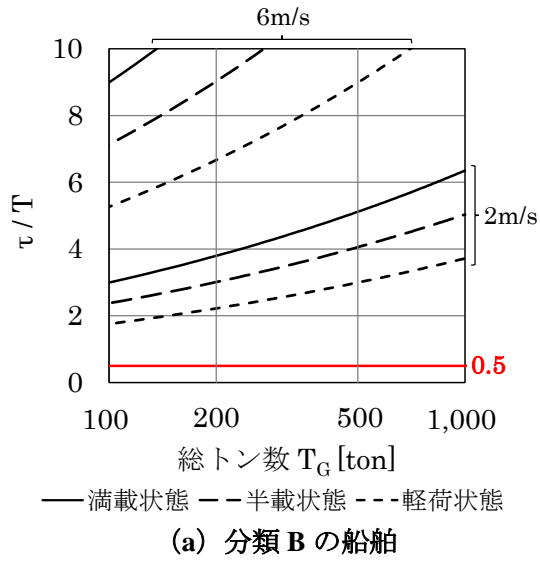

 図 3.30 船舶衝突時の総トン数と τ との関係
(3層建築物の場合)

 図 3.31 船舶衝突時の総トン数と τ との関係
(6層建築物の場合)

3.5 まとめ

本章では、津波漂流船舶衝突時の衝撃外力を評価することを目的に、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶と構造物との衝突事例、ならびに船舶の漂流事例を分析した。また、同分析により得られた船舶衝突時の衝撃外力評価結果と船舶工学分野における既往の衝撃外力評価結果を比較することで、本研究で考慮する衝撃外力を定義した。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時において、船舶が構造物と衝突した5事例について、その衝突時の速度および方向を検討し、また、各船舶の衝突時衝撃外力を評価した。
- 2) 同津波来襲時における船舶の漂流速度は、数百 m 程度の漂流距離で最大漂流速度に達し得ること、その速度は横方向よりも縦方向において比較的高い傾向にあること、船舶が縦方向で構造物に接近する場合にはその接近に伴う漂流速度の低減は限定的であること、をそれぞれ明らかにした。以上の知見に基づき、本研究において考慮する船舶の衝突条件としては、船舶が縦方向に、津波流速に等しい速度で衝突する場合とした。
- 3) 2)で定めた船舶の衝突条件における衝突時衝撃外力について、1)による評価結果と、船舶工学分野における既往の評価結果とを比較することで、船舶衝突時の衝撃外力を式(3.12)および式(3.13)により定まる矩形パルス波として設定した。

次章以降では、本章で設定した衝撃外力に対する建築物の応答特性と、その最大応答の簡易評価手法を検討する。

[参考文献]

- [3.1] 日本海運集会所：船舶明細書，2015
- [3.2] 榊原繁樹，阿部郁男，久保雅義，津金正典：東日本大震災で被災した隣接 2 隻の大型石炭船に來襲した津波および船体に作用する津波波力に関する一考察，第 133 回日本航海学会講演予稿集，3 卷 2 号，pp.118-120，2015 年 9 月
- [3.3] 海上保安庁：動画配信コーナー「八戸海上保安部 津波撮影」
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/stream/#meta21.asx>
- [3.4] 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007 年
- [3.5] 不動テトラ：テトラポッド パンフレット
http://www.fudotetra.co.jp/products/images/tetrapod_fig07.pdf
- [3.6] 神奈川新聞：カナロコ「福島県・相馬沖，海保ヘリコプターによる吊り上げ救助」（映像提供：海上保安庁）
- [3.7] NHK：特別報道番組，2011 年 3 月 11 日
- [3.8] 八戸市，三沢市，おいらせ町，階上町：青森震災アーカイブ ギャラリー 八戸市「岸壁に津波で流されたタンカーが衝突した様子」，<http://archive.city.hachinohe.aomori.jp/gallery-1/>
- [3.9] Trankiel：東日本大震災 北日本造船株式会社「建造船座礁」
<http://www.trankiel.com/Aardbeving-Tsunami-Kitanihon-j.html>
- [3.10] 漁船協会：最新漁船資料集 第 5 編，1993 年 10 月
- [3.11] 浅井竜也，館野公一，中埜良昭，福山洋，藤間功司，芳賀勇治，菅野忠，岡田恒男：2011 年東北地方太平洋沖地震による建築物等の被害調査に基づく津波荷重の評価 比較的単純な工作物および建築物の被害調査結果に基づく検討，構造工学論文集，日本建築学会，Vol.58B，pp.97-104，2012 年 3 月
- [3.12] 星野智史，増田光一，居駒知樹，惠藤浩朗：津波作用時の構造物が流れ場に与える影響に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，海洋建築，pp.41-42，2015 年 9 月
- [3.13] Kierkegaard, H.: Ship Bow Response in High Energy Collisions, *Journal of Marine Structures*, 6, pp.359-376, 1993.
- [3.14] Törnqvist, R.: Design of Crashworthy Ship Structures, Ph. D Thesis of Technical University of Denmark, 2003.6.
- [3.15] Wang, J., Yan, H., and Qian, H.: Comparisons of Ship Collision Design Formula for Bridges Based on FEM Simulations, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, Vol.1, No.1, pp.46-50, 2006.
- [3.16] Wang, J., Yan, H., and Qian, H.: Basic Impact Loading Models of Head Bow-on Collision Between a Ship and Rigid Wall, *Chinese Journal of Vibration and Shock*, Vol.29, No.11, pp.165-170, 2010.
- [3.17] Haris, S., and Amdahl, J.: Analysis of Ship-Ship Collision Damage Accounting for Bow and Side Deformation Interaction, *Journal of Marine Structures*, 32, pp.18-48, 2013.

- [3.18] Fan, W., and Yuan, W.: Ship Bow Force-deformation Curves for Ship-Impact Demand of Bridges Considering Effect of Pile-Cap Depth, *Journal of Shock and Vibration*, 201425, pp.1-19, 2014.3.
- [3.19] Storheim, M., and Amdahl, J.: Crushing Resistance of a Cruciform and Its Application to Ship Collision and Grounding, *Journal of Marine Structures*, 37, pp.157-162, 2014.7.
- [3.20] Cowper, J., and Symonds, P: Strain-hardening and Strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams, *Technical Report No.28*, Division of Applied Mathematics, Brown University, 1957.9.
- [3.21] Storheim, M., and Amdahl, J: On the Sensitivity to Work Hardening and Strain-rate Effects in Nonlinear FEM Analysis of Ship Collisions, *Journal of Ships and Offshore Structures*, Vol.12, No.1, pp.100-115, 2017.1.
- [3.22] Eidesvik 社（ノルウェー）：<https://www.eidesvik.no/>
- [3.23] SIEM OFFSHORE 社（ノルウェー）：<http://www.siemoffshore.com/>
- [3.24] Maersk Supply Service 社（デンマーク）：<http://www.maersksupplyservice.com/>
- [3.25] SEACOR Marine 社（アメリカ）：<https://www.seacormarine.com/>
- [3.26] Vallianz 社（シンガポール）：<http://www.vallianzholdings.com/>
- [3.27] Great Offshore 社（インド）：<http://www.goloffshore.com/>
- [3.28] Woisin, G.: Die Kollisionsversuche der GKSS, *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, Vol.70, pp.465-487, 1976.
- [3.29] Woisin, G.: Conclusions from Collision Examinations for Nuclear Merchant Ships in the FRG, *Proceedings of Symposium on the Safety of Nuclear Ships*, pp.137-147, 1977.12.
- [3.30] Saul, R. and Svensson, H.: On the Theory of Ship Collision against Bridge Piers, *International Association for Bridge and Structural Engineering Conference Proceedings*, P-51/82, pp.29-40, 1982.2.
- [3.31] Pedersen, P.T., Valsgard. S., Olsen, D. and Spangenberg, S.: Ship Impacts: Bow Collisions, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.13, No.2, pp.163-187, 1993.
- [3.32] 長沢準, 有田喜久雄, 谷政明, 岡修二: 通航船舶の橋脚衝突時の圧壊強度について, 日本造船学会論文集, 第142号, pp.323-332, 1977年11月
- [3.33] 庄司邦昭, 高林時子: 橋脚衝突時の船首強度計算式に対する船体所寸法の影響, 日本航海学会論文集, 第101号, pp.201-209, 1999年5月

第 4 章

津波波力および衝撃外力に対する 弾性多質点系応答の簡易評価手法

4. 津波波力および衝撃外力に対する弾性多質点系応答の簡易評価手法

4.1 はじめに

本章では、津波漂流船舶の衝突に対する建築物全体の挙動を把握することを目的として、前章で設定した船舶衝突時衝撃外力に対する建築物の弾性応答特性を検討し、その検討結果に基づき、最大弾性応答を簡便に推定する手法を提案する。

なお、船舶衝突に対する建築物の応答を検討する上では、船舶の衝突以前から継続的に作用している津波波力を併せて考慮する必要があるが、本章では建築物の弾性応答に着目するため、衝撃外力および津波波力に対する応答は、それぞれの外力に対する応答の線形和として求めることができる。津波波力に対する応答は、本研究では津波波力を文献^[4.1]が提示する静的外力として扱うため、力の釣り合いを考慮することで容易に求めることができる。一方、衝撃外力に対する応答を求めるためには、その動的挙動を把握する必要があり、比較的複雑な検討を要する。そのため本章では、まずは4.3.3節までにおいて衝撃外力のみに対する建築物応答の導出および推定手法の検討を行い、その後に4.3.4節において津波波力も考慮した場合の応答推定手法を提案することとする。

4.2 弾性応答の導出と特性

本節では、3章において矩形パルス波として設定した船舶衝突時衝撃外力（図4.1）に対する建築物の弾性応答特性について、せん断質点系モデルを用いて検討する。なお、本研究では、衝撃外力に対する建築物全体の基礎的な応答性状を把握することを目的とし、建築物のねじれ挙動および被衝突部材の局所的な損傷については考慮しないこととする。

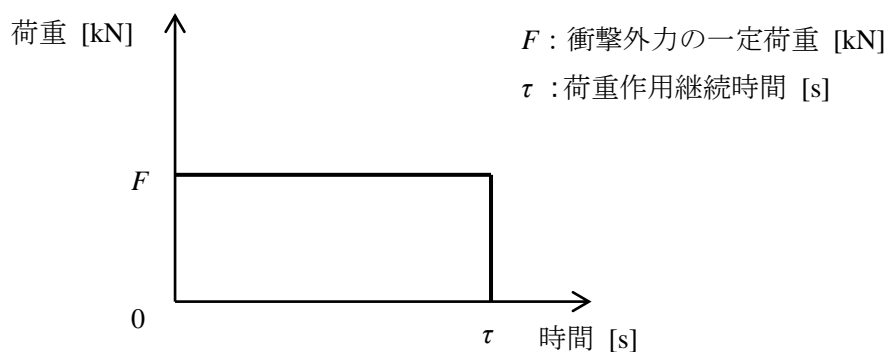


図4.1 4章で定義した船舶衝突時の衝撃外力

4.2.1 1質点系応答

まず、本項では、質点系モデルの基本系である1質点系モデル（図4.2）を対象とし、その応答の導出と特性の検討を行う。

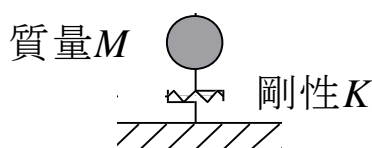


図4.2 1質点系モデル

(1) 応答の導出

矩形パルス波（図4.1）として設定した衝撃外力に対する応答は、最初に衝突終了以前（ $t \leq \tau$ ）の一定荷重に対する応答（過渡応答）を求め、続いて衝突終了以後（ $t > \tau$ ）の応答（自由振動）を求める。

(a) 衝突終了以前の応答

衝突終了以前の応答は、時刻 $t=0$ から生じる一定荷重に対する過渡応答として求まる。すなわち、一般的な運動方程式（式(4.1)）より、質点系モデルに一定荷重 F [kN]が作用するときの変位 y [m]は、式(4.2)として求まる。

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = f(t) \quad (4.1)$$

$$y = \frac{F}{K} - \frac{F}{K} e^{-h\omega t} \left(\cos \omega' t + h \frac{\omega}{\omega'} \sin \omega' t \right) \quad (t \leq \tau) \quad (4.2)$$

$$\omega' = \sqrt{1 - h^2} \omega \quad (4.3)$$

ここで、

M : 質量 [t]

C : 粘性減衰係数 [kN s/m]

K : 剛性 [kN/m]

y : 変形 [m]

t : 時間 [s]

$f(t)$: 衝撃外力 [kN]

F : 衝撃外力の一定荷重 [kN]

h : 減衰定数 [-]

ω : 角振動数 [1/s]

(b) 衝突終了以後の応答

一方、衝突終了以後の応答 y' [m]は、衝突終了以前の応答と、時刻 τ からの逆向きの一定荷重（ $-F$ ）に対する応答との足し合わせとして式(4.4)として求まる。

$$\begin{aligned} y'(t) &= y(t) - y(t - \tau) \\ &= -\frac{F}{K} e^{-h\omega t} \left\{ \left(\cos \omega' t + h \frac{\omega}{\omega'} \sin \omega' t \right) - \left(\cos \omega' (t - \tau) + h \frac{\omega}{\omega'} \sin \omega' (t - \tau) \right) \right\} \quad (t > \tau) \end{aligned} \quad (4.4)$$

(2) 応答特性の検討

(a) 検討条件

次に、以上に得られた弾性 1 質点系応答について、その特性を検討する。検討により、同応答特性は荷重作用継続時間 τ と建築物の固有周期 T との比 (τ/T) に依存する傾向が得られたため、 τ/T をパラメータとして 0.1~2.0 まで変化させて応答特性を比較する。なお、津波避難ビルとして一般的な中低層建築物（3 層および 6 層建築物）を対象とすると、概ね $\tau/T \geq 0.5$ を満たすことが前章よりわかっているが、ここでは τ/T の違いによる振動性状の変化を把握することを目的として、 $\tau/T = 0.1$ の場合についても併せて検討することとする。また、本章では、衝撃外力に対する建築物の応答特性を把握することを目的とし、特定の建築物の応答を評価することは目的としていないため、応答特性の議論においては応答（式(4.2)および式(4.4)）を F/K により基準化して議論する。建築物の減衰定数 $h = 0.02$ とする。

(b) 応答特性

1 質点系モデルの衝撃外力に対する応答時刻歴波形（式(4.2)および式(4.4)）を、 $\tau/T = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0$ の場合それぞれについて図 4.3 に示す。同図では、横軸は建築物の一次固有周期 T により基準化した時間 t/T 、縦軸は F/K により基準化した応答変形とし、また、式(4.2)の F/K 項（第一項、 F/K で基準化されているため 1.0 で一定）および振動項（第二項）の応答も併せて示す。また、衝突終了時刻を▽により、最大応答生起時刻を★により、それぞれ示す。

同図より、 $\tau/T = 0.1$ の場合の応答は、過渡応答の時間が短いためインパルス応答と同様の性状となり、その最大応答は衝突終了以後の自由振動において生起している。一方、 $\tau/T = 0.5, 1.0, 2.0$ の場合の応答は、 F/K を中心とした振動の最大値が生起する $t/T \approx 0.5$ （減衰を有するため厳密に $t/T = 0.5$ とはならない）まで衝突が継続しており、そのため同条件における最大応答は、 F/K とその振動の振幅 (F/K) との和 ($2F/K$) に概ね一致していることがわかる。

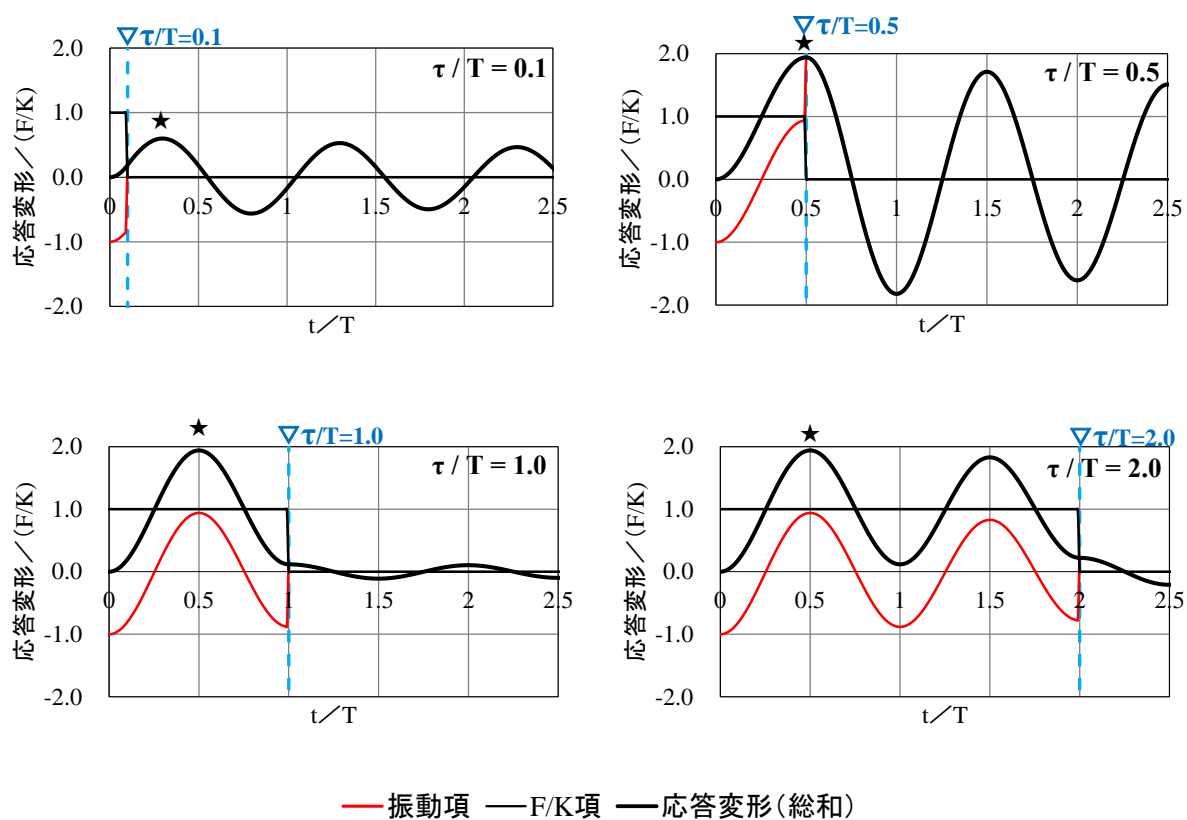


図 4.3 1 質点系モデルの時刻歴応答変形

4.2.2 多質点系応答

次に、本項では、弾性多質点系モデル（図 4.4）を対象とし、その応答の導出と特性の検討を行う。

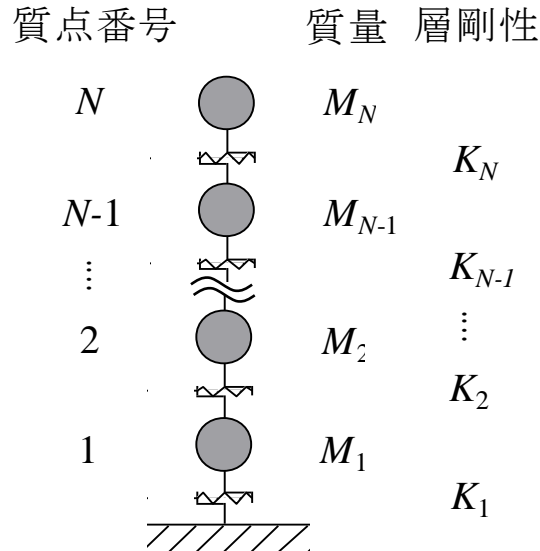


図 4.4 多質点系モデル

(1) 応答の導出

弾性多質点系応答については、モーダルアナリシスによってその応答を求める。応答は、前項における 1 質点系応答の場合と同様に、最初に衝突終了以前の応答を求め、続いて衝突終了以後の応答（自由振動）を求める。

(a) 衝突終了以前の応答

衝突終了以前の応答は、時刻 $t=0$ から生じる一定荷重に対する過渡応答として求まる。すなわち、一般的な運動方程式（式(4.5)）より、 N 質点系モデルの質点 i に一定荷重 F [kN] が作用するときの変位ベクトル $\{y\}$ [m] は、式(4.6)として求まる。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{f(t)\} \quad (4.5)$$

$$\{y\} = \sum_{s=1}^N {}_s u_i \{ {}_s u \} \frac{F}{{}_s K} \left\{ 1 - e^{-{}_s h {}_s \omega t} \left(\cos {}_s \omega' t + {}_s h \frac{{}_s \omega}{{}_s \omega'} \sin {}_s \omega' t \right) \right\} \quad (4.6)$$

$${}_s \omega' = \sqrt{1 - {}_s h^2} {}_s \omega \quad (4.7)$$

ここで,

$[M]$: 質量マトリクス [t]

$[C]$: 粘性減衰マトリクス [kN s/m]

$[K]$: 剛性マトリクス [kN/m]

$\{y\}$: 変位ベクトル [m]

t : 時間 [s]

$\{f(t)\}$: 外力ベクトル [kN]

F : 衝撃外力 [kN]

$\{ {}_s u \}$: s 次のモードベクトル ($\{ {}_s u \}^T \{ {}_s u \} = 1$ として基準化)

${}_s K$: s 次の広義剛性 [kN/m]

${}_s h$: s 次の減衰定数 [-]

${}_s \omega$: s 次の角振動数 [1/s]

j 階の応答層間変形 $y_j - y_{j-1}$ [m] は, 式(4.6)を用いて式(4.8)として求まる。

$$y_j - y_{j-1} = \sum_{s=1}^N {}_s u_i \left({}_s u_j - {}_s u_{j-1} \right) \frac{F}{{}_s K} \left\{ 1 - e^{-{}_s h {}_s \omega t} \left(\cos {}_s \omega' t + {}_s h \frac{{}_s \omega}{{}_s \omega'} \sin {}_s \omega' t \right) \right\} \quad (4.8)$$

ここで, 式(4.8)に含まれる $\sum_{s=1}^N {}_s u_i {}_s u_j / {}_s K$ を ij 成分とするマトリクスは, 式(4.9)により, 撓性マトリクス $[\alpha]$ に一致することがわかる。

$$\left[\sum_{s=1}^N \frac{{}_s u_i {}_s u_j}{{}_s K} \right] = [U] [{}_s K]^{-1} [U]^T = [U] ([U]^T [K] [U])^{-1} [U]^T = [K]^{-1} = [\alpha] \quad (4.9)$$

撓性マトリクス $[\alpha]$ の成分 α_{ij} (すなわち $\sum_{s=1}^N {}_s u_i {}_s u_j / {}_s K$) は, 質点 i に単位荷重を作用させたときの j 階の変位を表す。そのため, j 層の層間変形 $\alpha_{ij} - \alpha_{ij-1}$ (すなわち $\sum_{s=1}^N {}_s u_i ({}_s u_j - {}_s u_{j-1}) / {}_s K$) は, 衝突位置以下では $1/K_j$ (K_j は j 層の層剛性を表す) として求まり, 衝突位置より上階では, 荷重が作用しないため 0 となる (式(4.10))。よって, 式(4.8)の当該部分を $1/K_j$ もしくは 0 に置換すると, 式(4.11)を得る。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{s=1}^N \frac{{}_s u_i ({}_s u_j - {}_s u_{j-1})}{{}_s K} = \alpha_{ij} - \alpha_{ij-1} = \frac{1}{{}_s K_j} \quad (i \geq j) \\ = 0 \quad (i < j) \end{aligned} \right\} (4.10)$$

$$\left. \begin{aligned} y_j - y_{j-1} &= \frac{F}{{}_s K_j} - \sum_{s=1}^N ({}_s u_j - {}_s u_{j-1}) {}_s u_i \frac{F}{{}_s K} e^{-{}_s h_s \omega t} \left(\cos {}_s \omega' t + {}_s h \frac{{}_s \omega}{{}_s \omega'} \sin {}_s \omega' t \right) \quad (i \geq j, t \leq \tau) \\ &= - \sum_{s=1}^N ({}_s u_j - {}_s u_{j-1}) {}_s u_i \frac{F}{{}_s K} e^{-{}_s h_s \omega t} \left(\cos {}_s \omega' t + {}_s h \frac{{}_s \omega}{{}_s \omega'} \sin {}_s \omega' t \right) \quad (i < j, t \leq \tau) \end{aligned} \right\} (4.11)$$

(b) 衝突終了以後の応答

一方、衝突終了以後の応答層間変形 $y'_j - y'_{j-1}$ [m] は、衝突終了以前の応答と、時刻 τ からの逆向きの一定荷重 ($-F$) に対する応答との足し合わせとして式(4.12)として求まる。

$$\left. \begin{aligned} y'_j - y'_{j-1} &= [y_j(t) - y_{j-1}(t)] - [y_j(t - \tau) - y_{j-1}(t - \tau)] \\ &= - \sum_{s=1}^N ({}_s u_j - {}_s u_{j-1}) {}_s u_i \frac{F}{{}_s K} e^{-{}_s h_s \omega t} \\ &\quad \times \left\{ \left(\cos {}_s \omega' t + {}_s h \frac{{}_s \omega}{{}_s \omega'} \sin {}_s \omega' t \right) - \left(\cos {}_s \omega' (t - \tau) + {}_s h \frac{{}_s \omega}{{}_s \omega'} \sin {}_s \omega' (t - \tau) \right) \right\} \quad (t > \tau) \end{aligned} \right\} (4.12)$$

(2) 応答特性の検討

(a) 検討条件

次に、以上に得られた弾性多質点系応答について、その特性を検討する。検討対象モデルは、津波避難ビルとして一般的な中低層建築物を想定して3質点系モデルおよび6質点系モデルとし、その質量は各階において等しく、また、その剛性は高さ方向に直線一次モード形状となるよう定めた。図4.5に両モデルの刺激関数を示す。なお、建築物の耐震設計においては外力分布として A_i 分布が用いられることが一般的であり、同外力分布に対して合理的に設計された建築物の耐力分布は A_i 分布になるため、各層の降伏変形が等しい場合には剛性分布も同様の分布となる。そのため、上述の建築物が直線一次モード形状となるように定めた剛性分布と、通常の耐震設計に用いられる A_i 分布とを図4.6に比較する。同図では、各層の剛性は1層剛性により基準化して示しており、また、 A_i 分布は建築物の固有周期 T により異なるため、3層建築物および6層建築物それぞれの固有周期 T を建築物の階高3mとして $0.02H$ (H : 建築物の高さ) によりそれぞれ0.18sおよび0.36sとして求め、剛性分布を算出している。同図より、直線一次モード形状を仮定することで、上階の剛性を A_i 分布に比べ比較的大きく設定しているものの、その差は最大で1割程度であり、両者に大きな違いは無いことがわかる。

検討においては、前項と同様に、衝撃外力の荷重作用継続時間 τ と建築物の一次固有周期 ${}_1T$ との比 $(\tau/{}_1T)$ をパラメータとして0.1~2.0まで変化させてモデルに入力するとともに、応答特性の議論においては応答(式(4.11)および式(4.12))を F/K_1 により基準化して議論する。なお、両モデルの減衰は剛性比例型(一次の減衰定数 ${}_1h=0.02$)とする。

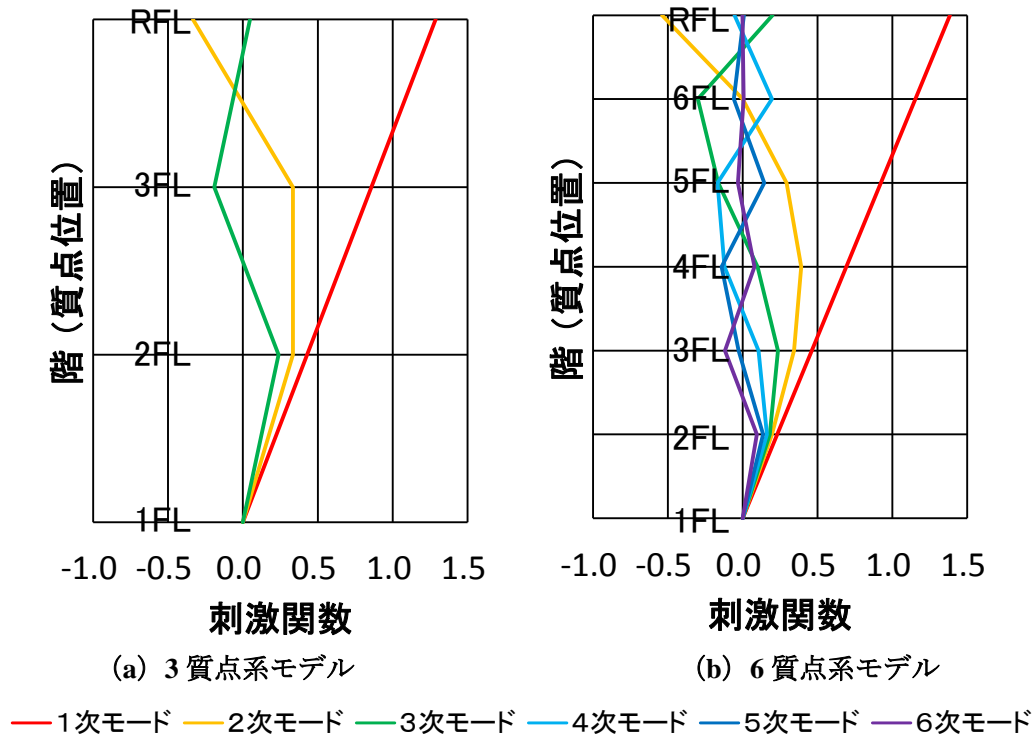


図 4.5 多質点系モデルの刺激関数

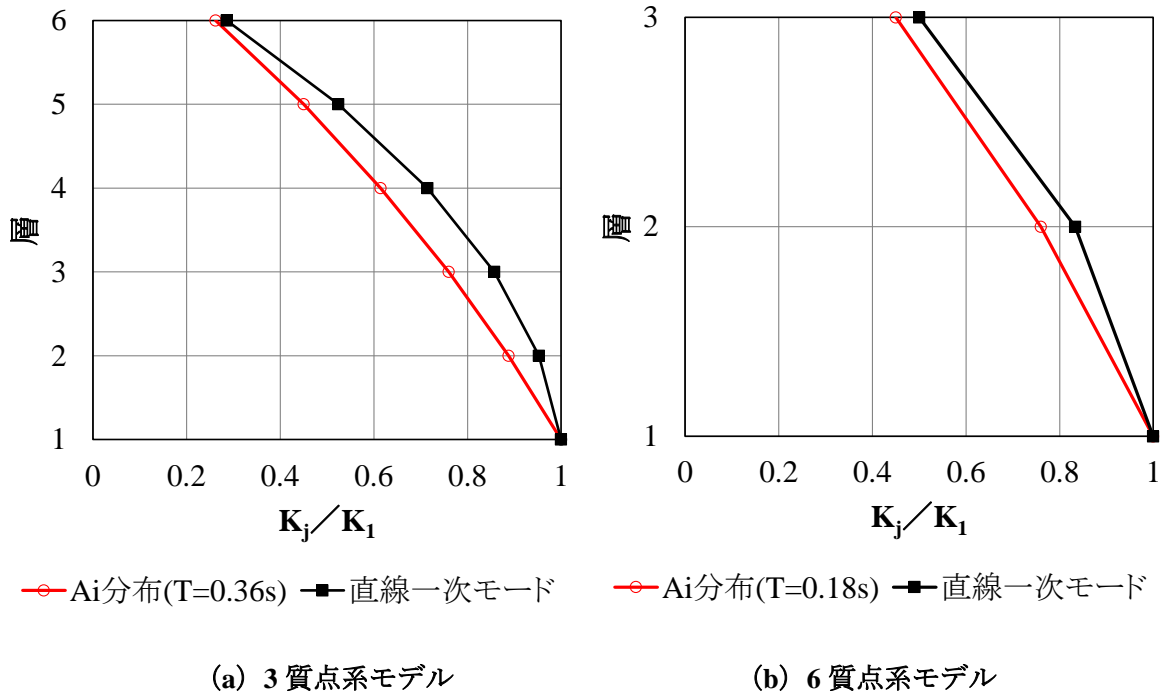


図 4.6 多質点系モデルの刺激関数

(b) 応答特性

両モデルの衝撃外力に対する時刻歴応答層間変形（式(4.11)および式(4.12)）について、 $\tau_1 T = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0$ として設定した衝撃外力を任意の床位置に作用させたときの結果を（図4.7に衝突位置および層間変形検討位置の定義を記す）、3質点系モデルは図4.8～図4.19に、6質点系モデルは図4.20～図4.43に、それぞれに示す。なお、応答変形ではなく応答層間変形に着目するのは、それが設計実務においては一般に設計クライテリアとなるためである。各図では、前項と同様に、横軸は建築物の一次固有周期 T_1 により基準化した時間 t/T_1 、縦軸は F/K_1 により基準化した応答変形とし、式(4.11)および式(4.12)の各モードおよび F/K_j 項の応答も併せて示す。縦軸の値の範囲は、基本的に $\tau_1 T = 0.5$ の場合は $-4.0 \sim 4.0$ 、 $\tau_1 T = 0.1, 1.0, 2.0$ の場合は $-2.0 \sim 4.0$ としたものの、6質点系モデルにおける $\tau_1 T = 0.5, 1.0, 2.0$ かつ衝突位置がRFの場合のみ、その最大値を6.0とし、他と異なることを示すために軸の値を赤色とした。また、同図では、衝突終了時刻を▽により、最大応答生起時刻を★により、それぞれ示している。

各図より、弾性多質点系の応答特性は、前項において確認された $\tau_1 T$ の長短による違いに加え、 $\tau_1 T$ が比較的長い場合には、衝突位置より上階と衝突位置以下とにおいても異なる傾向が得られた。まず、 $\tau_1 T = 0.1$ の場合（図4.8～図4.10、図4.20～図4.25）には、建築物応答においては一次モードのみならず高次モードが強く励起され、また、その最大応答は衝突終了以後の自由振動において生起していることがわかる。一方、 $\tau_1 T = 0.5, 1.0, 2.0$ の場合（図4.11～図4.19、図4.26～図4.43）には、衝突位置より上階では高次モードが強く励起されているものの、衝突位置以下では一次モードが卓越し、その最大応答は、一次モード振動が最大となる時刻 $t/T_1 \approx 0.5$ において生起する傾向を確認することができる。

卓越モードについてより詳細に検討するべく、図4.43および図4.44には、式(4.11)における F/K_j および各モード振幅それぞれを F/K_1 により基準化し、それらをまずは F/K_j 、続いて各モード振幅の低次モードから順に積み上げた結果を示す。なお、 F/K_j は衝突位置以下の応答（式(4.11)上段）にのみ含まれる項であるため、両図においても衝突位置以下（網掛け部）にのみプロットされている。また、両図では、 F/K_1 により基準化した最大応答層間変形 $\delta_{\max,j} = (y_j - y_{j-1})_{\max}$ も○印により併せてプロットしている。両図より、 F/K_j 項が含まれる衝突位置以下（網掛け部）において振幅の総和が比較的大きいこと、衝突位置が上階となるほど一次モード振幅が増大し卓越する傾向にあること、衝突位置における最大応答層間変形は F/K_j と一次モード振幅との和に概ね等しいこと（両者の比較は次節において行う）、をそれぞれ確認することができる。

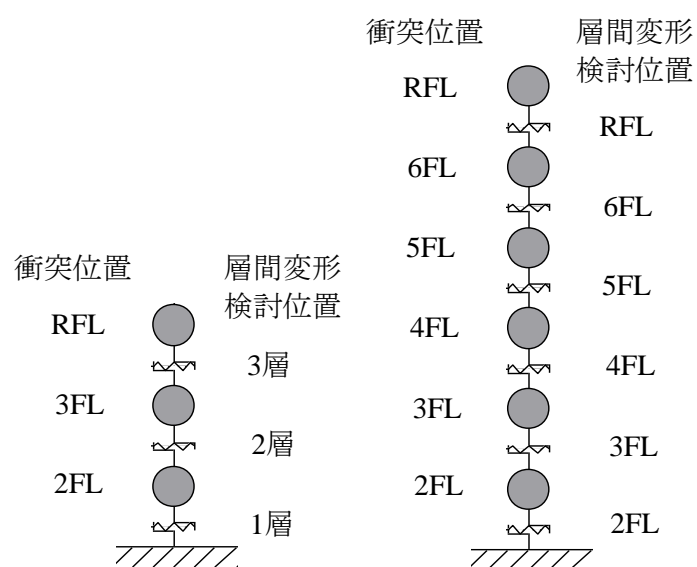
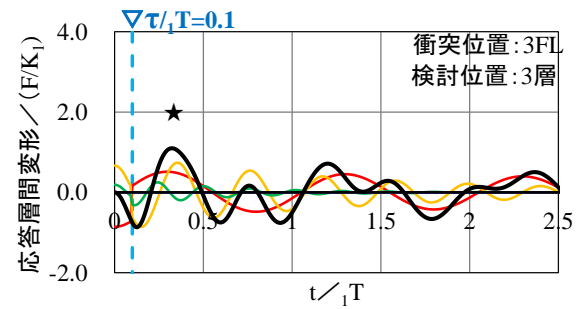
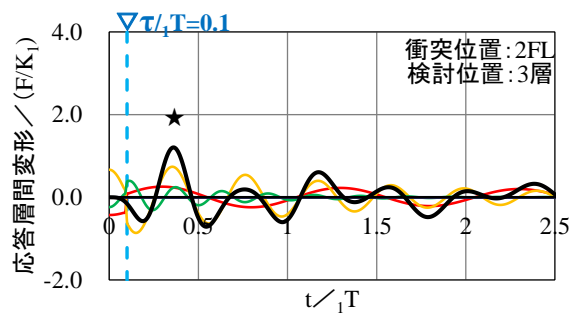
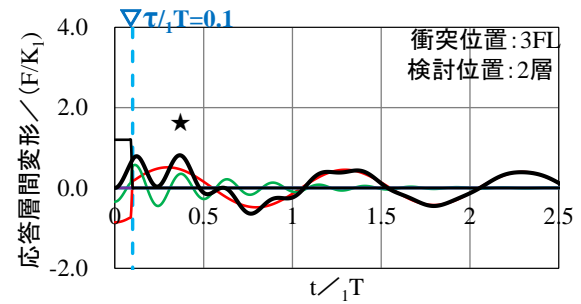
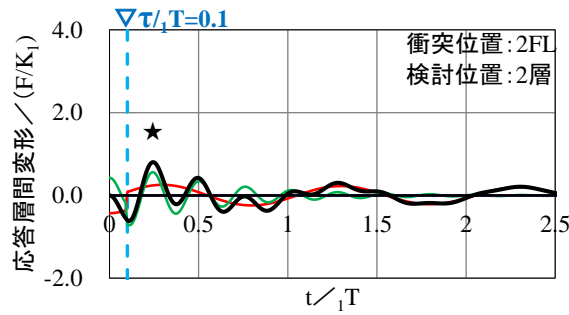
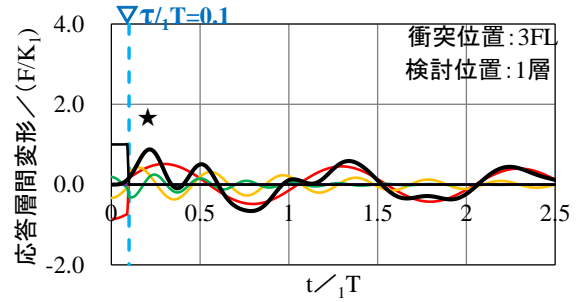
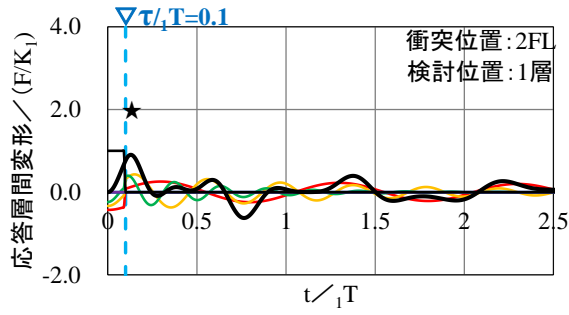


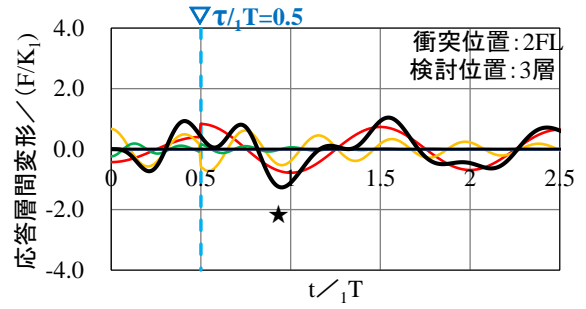
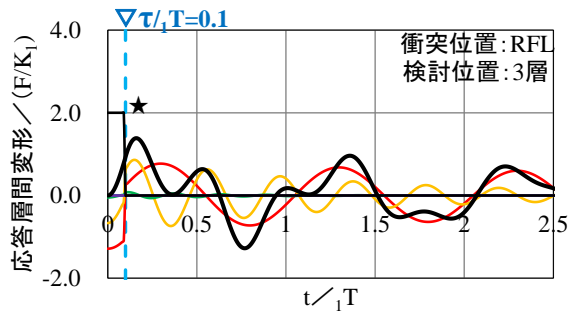
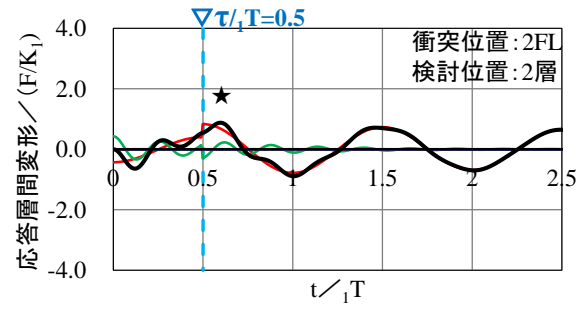
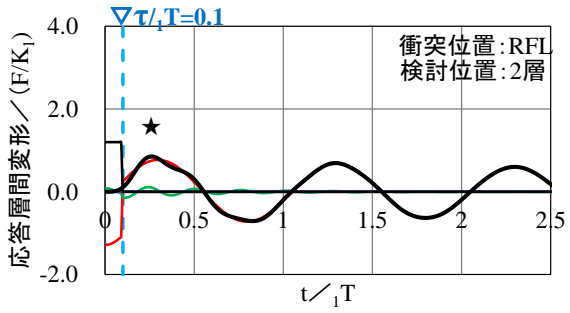
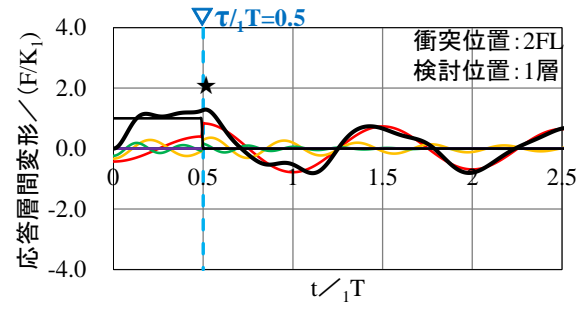
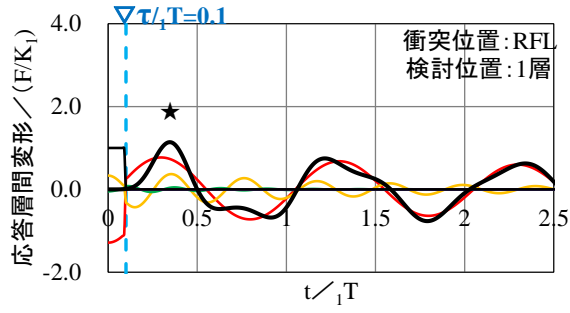
図 4.7 両モデルの衝突位置と層間変形検討位置



— 1次モード — 2次モード — 3次モード — F/K_j — 層間変形(総和)

図 4.8 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置: 2FL, $\tau/1T=0.1$)

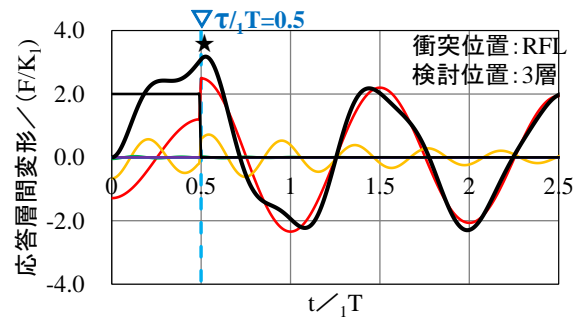
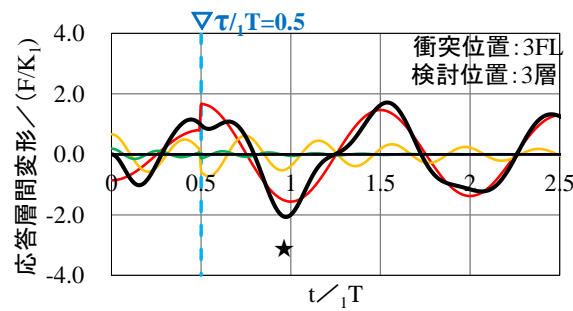
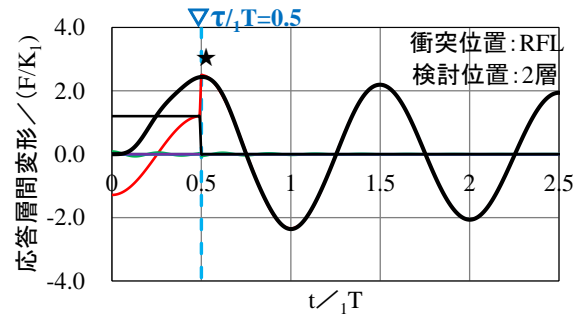
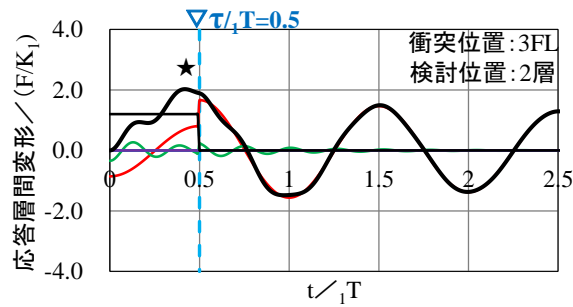
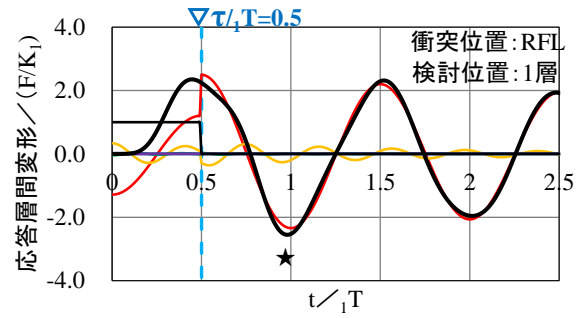
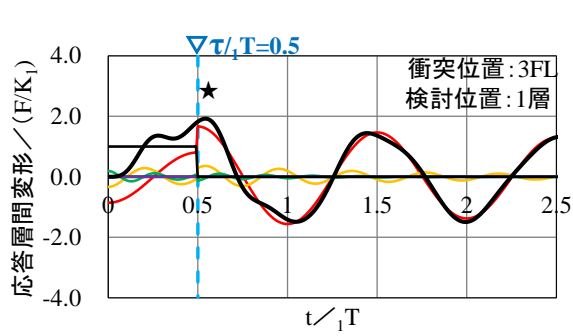
図 4.9 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置: 3FL, $\tau/1T=0.1$)



— 1次モード — 2次モード — 3次モード — F/K_j — 層間変形(総和)

図 4.10 3質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置: RFL, $\tau_1/T = 0.1$)

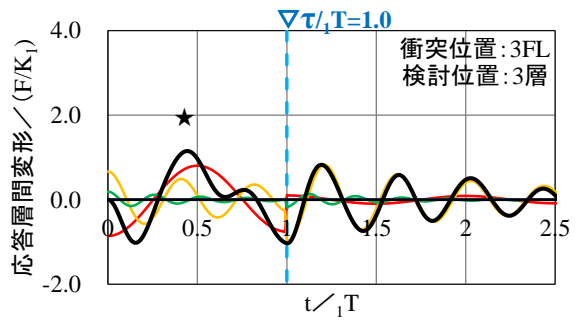
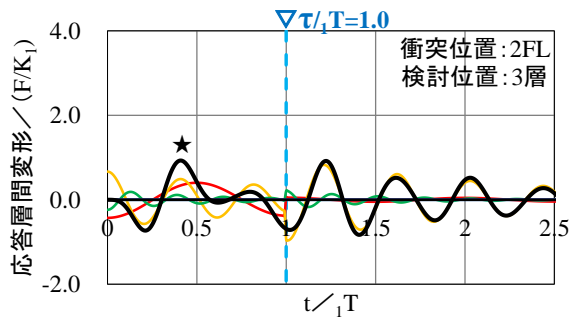
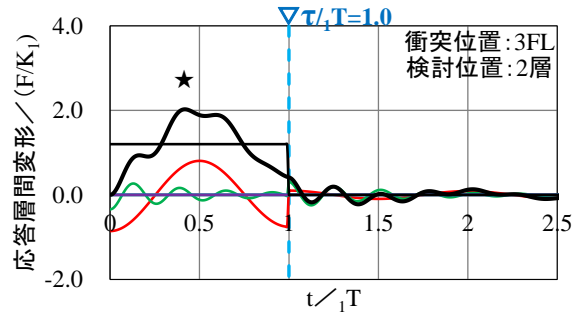
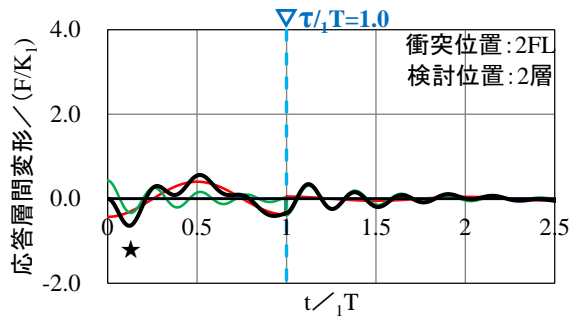
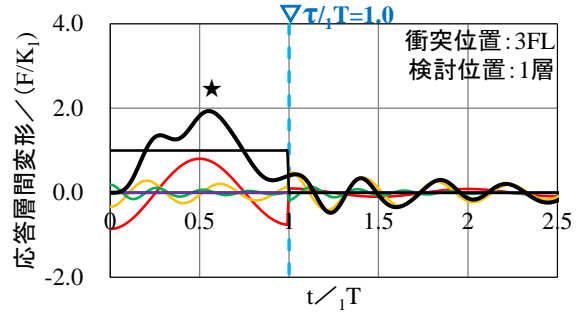
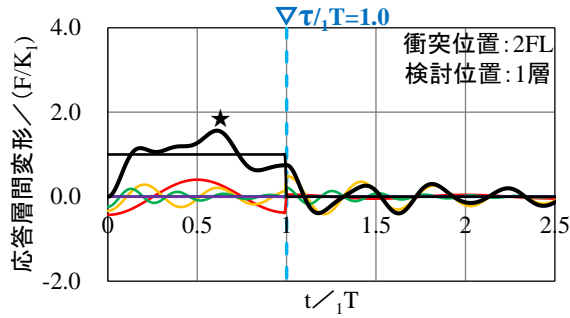
図 4.11 3質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置: 2FL, $\tau_1/T = 0.5$)



— 1次モード — 2次モード — 3次モード — F/K_j — 層間変形(総和)

図 4.12 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置: 3FL, $\tau/1T=0.5$)

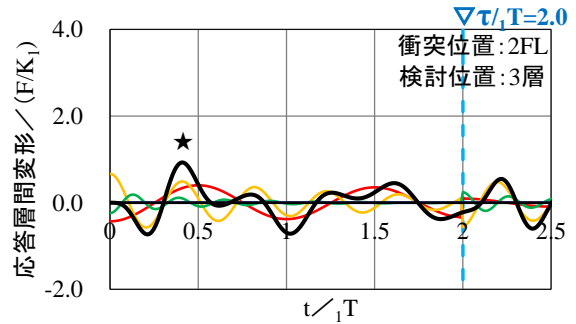
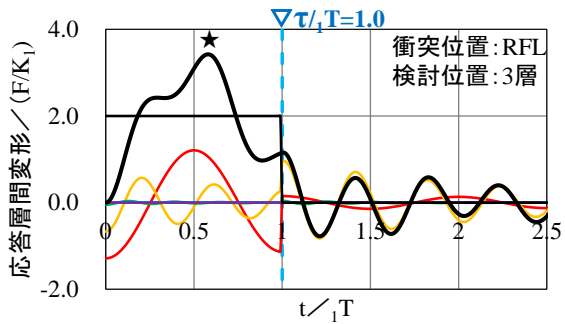
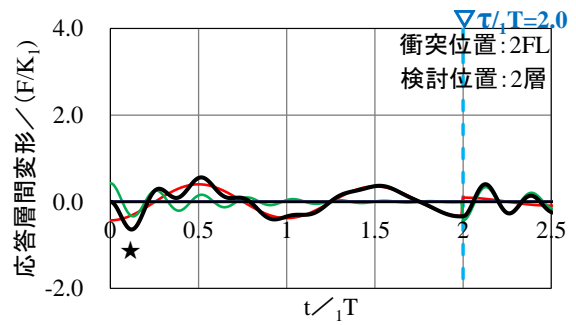
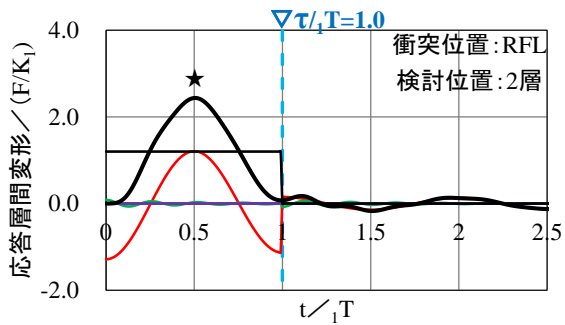
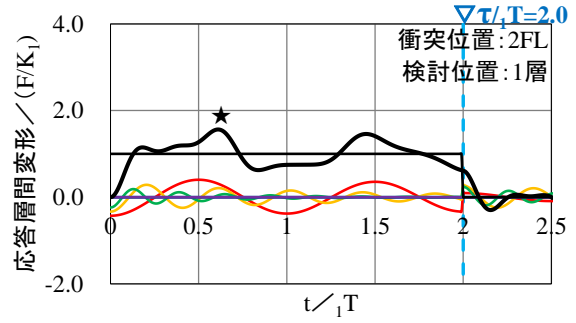
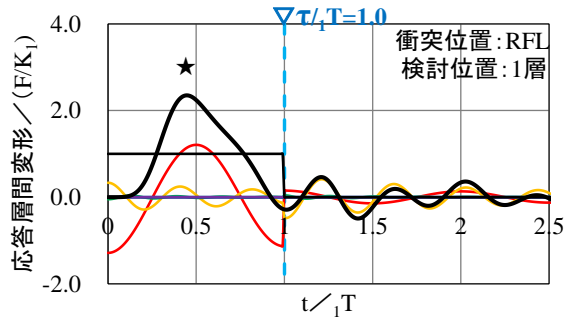
図 4.13 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置: RFL, $\tau/1T=0.5$)



— 1次モード — 2次モード — 3次モード — F/K_j — 層間変形(総和)

図 4.14 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置: 2FL, $\tau/T=1.0$)

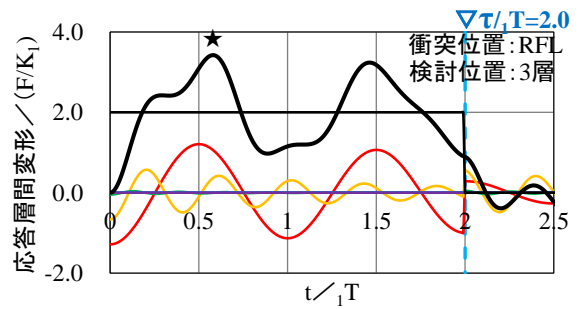
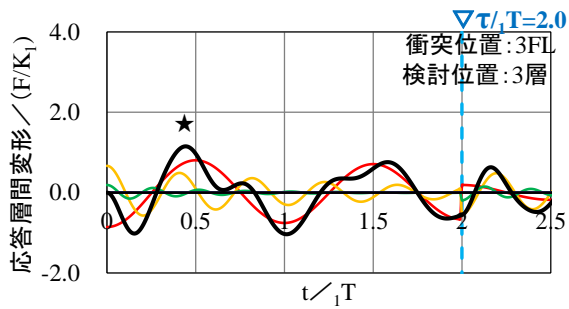
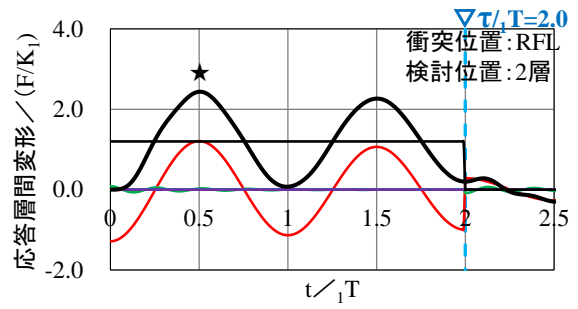
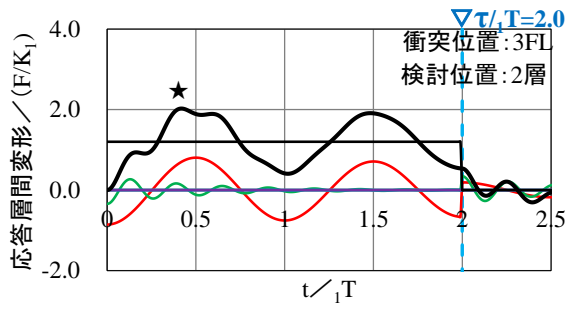
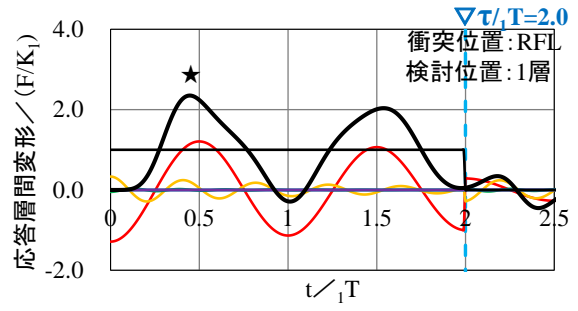
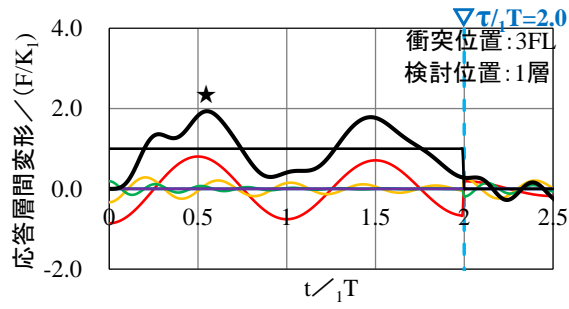
図 4.15 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置: 3FL, $\tau/T=1.0$)



— 1次モード — 2次モード — 3次モード — F/K_j — 層間変形(総和)

図 4.16 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置 : RFL, $\tau/{}_1T=1.0$)

図 4.17 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置 : 2FL, $\tau/{}_1T=2.0$)



— 1次モード — 2次モード — 3次モード — F/K_j — 層間変形(総和)

図 4.18 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置 : 3FL, $\tau/{}_1T = 2.0$)

図 4.19 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形
(衝突位置 : RFL, $\tau/{}_1T = 2.0$)

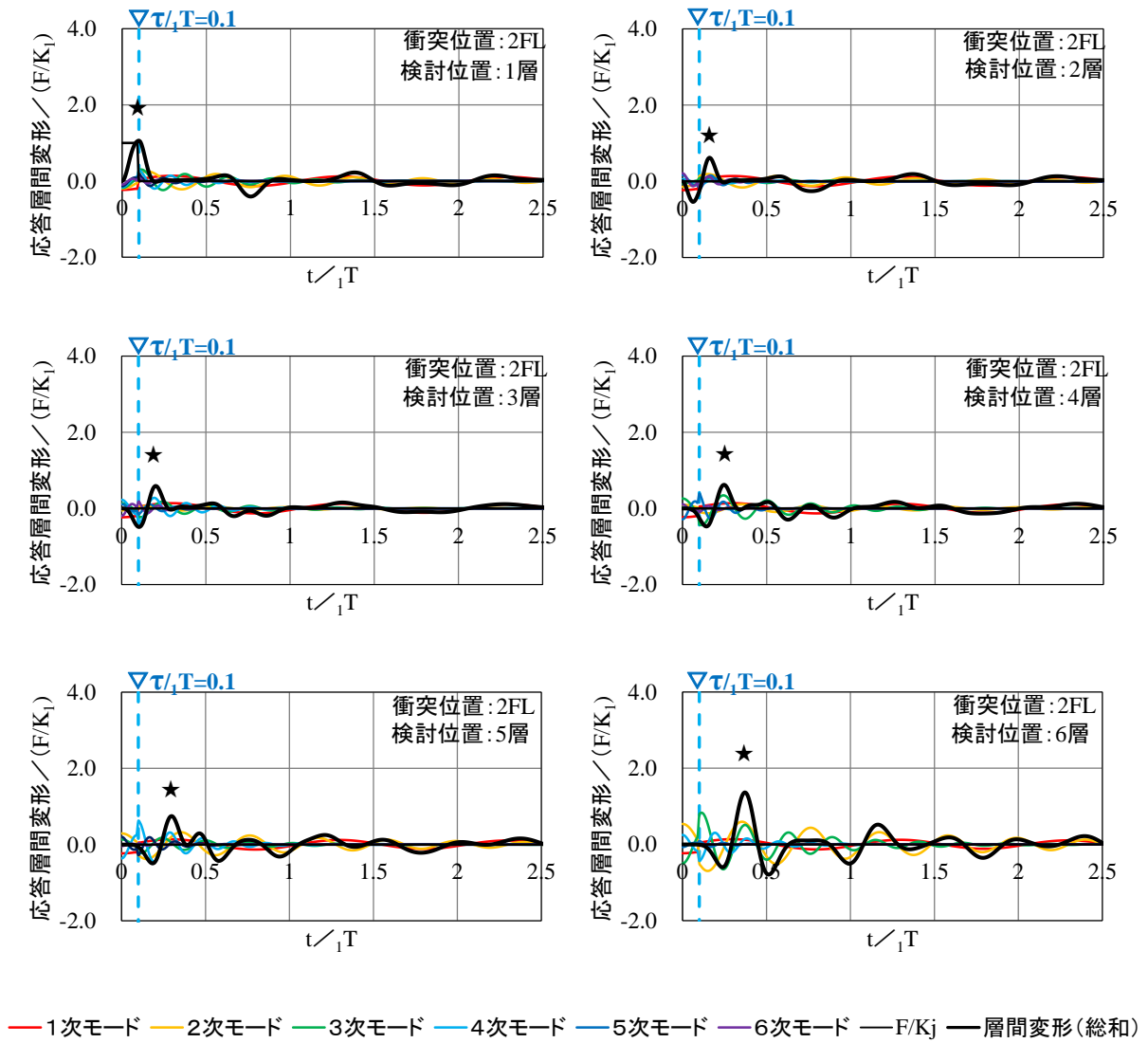


図 4.20 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：2FL, $\tau/1T=0.1$ ）

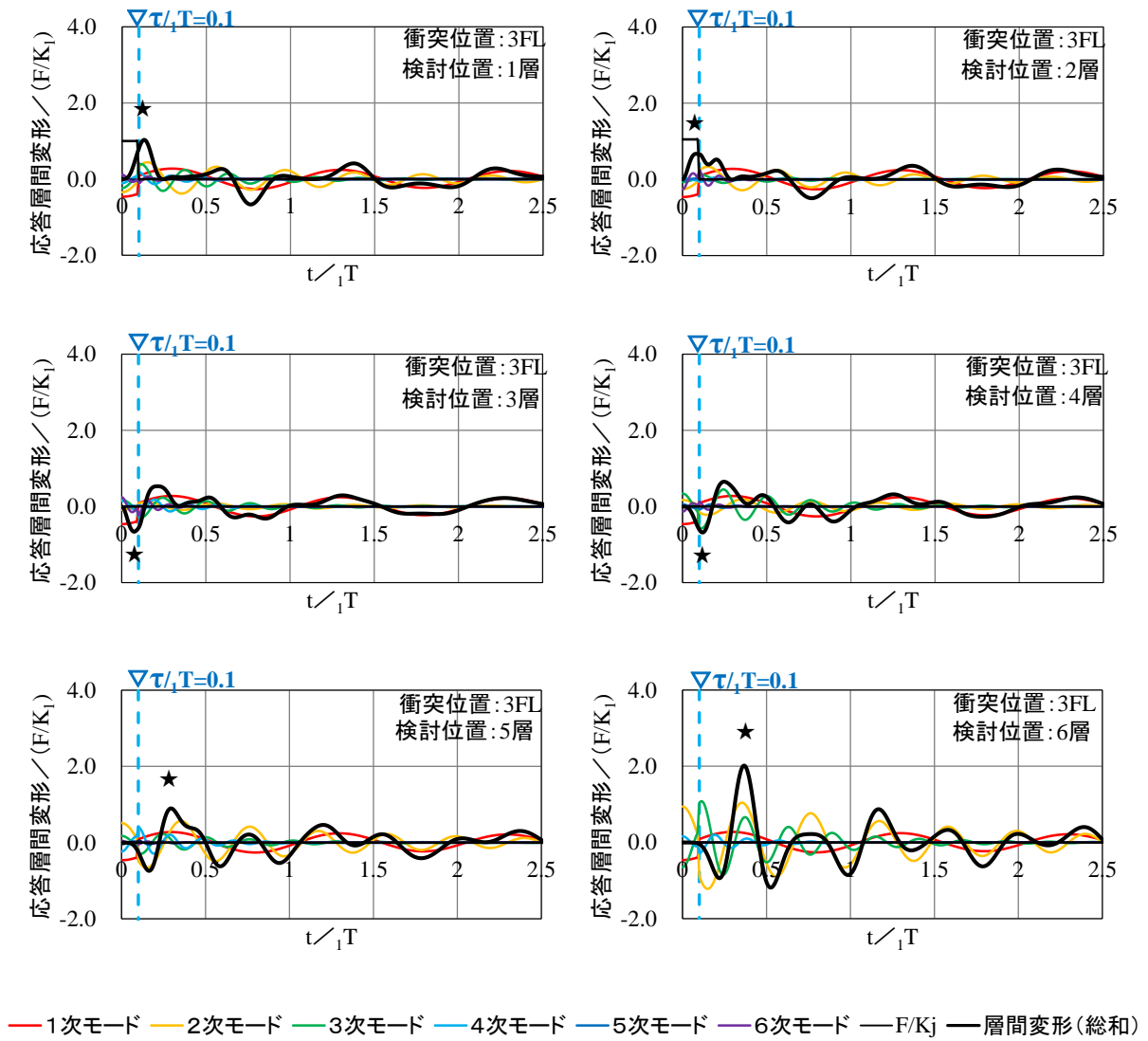


図 4.21 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：3FL， $\tau/1T=0.1$ ）

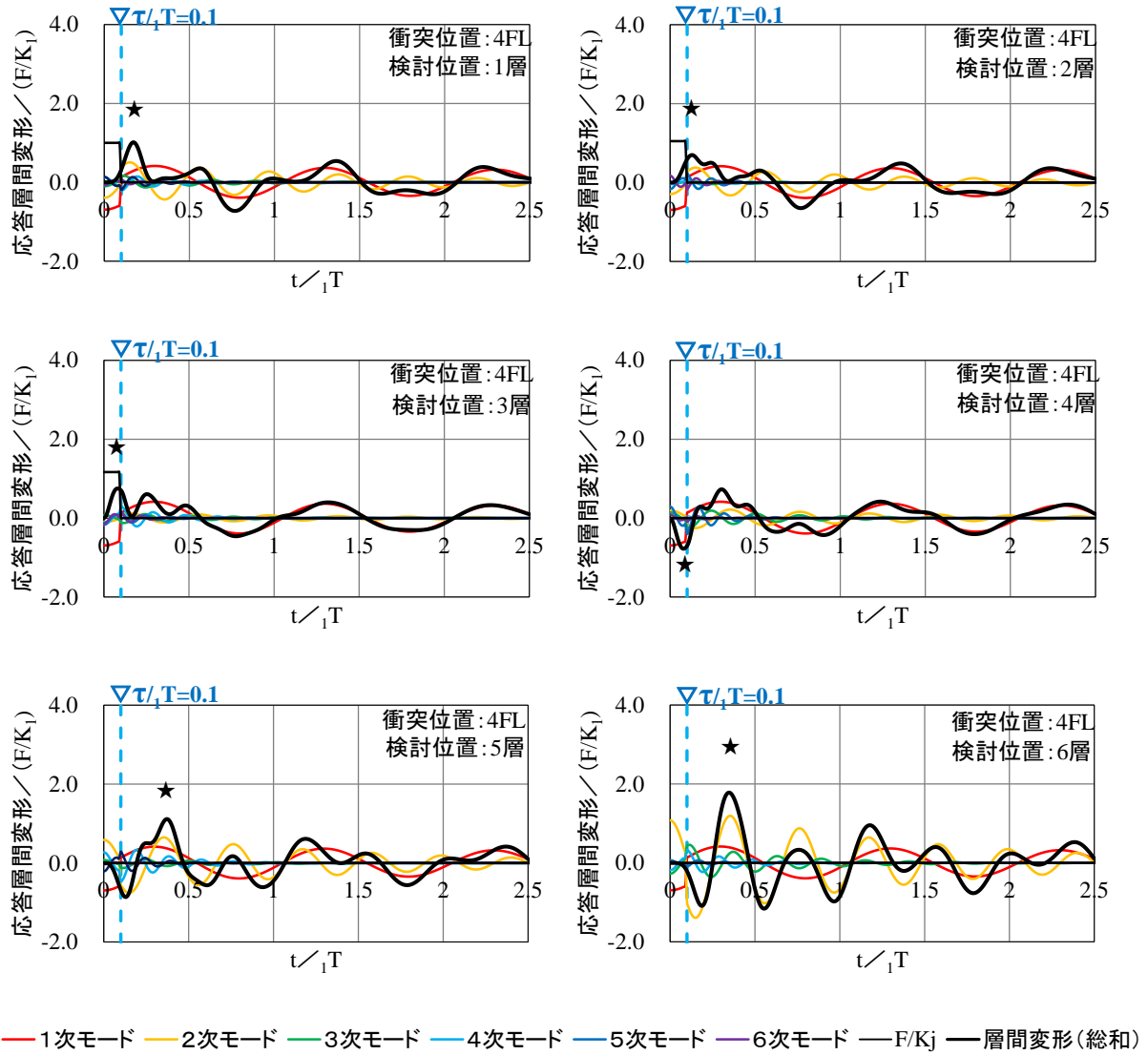


図 4.22 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 4FL, $\tau/T = 0.1$)

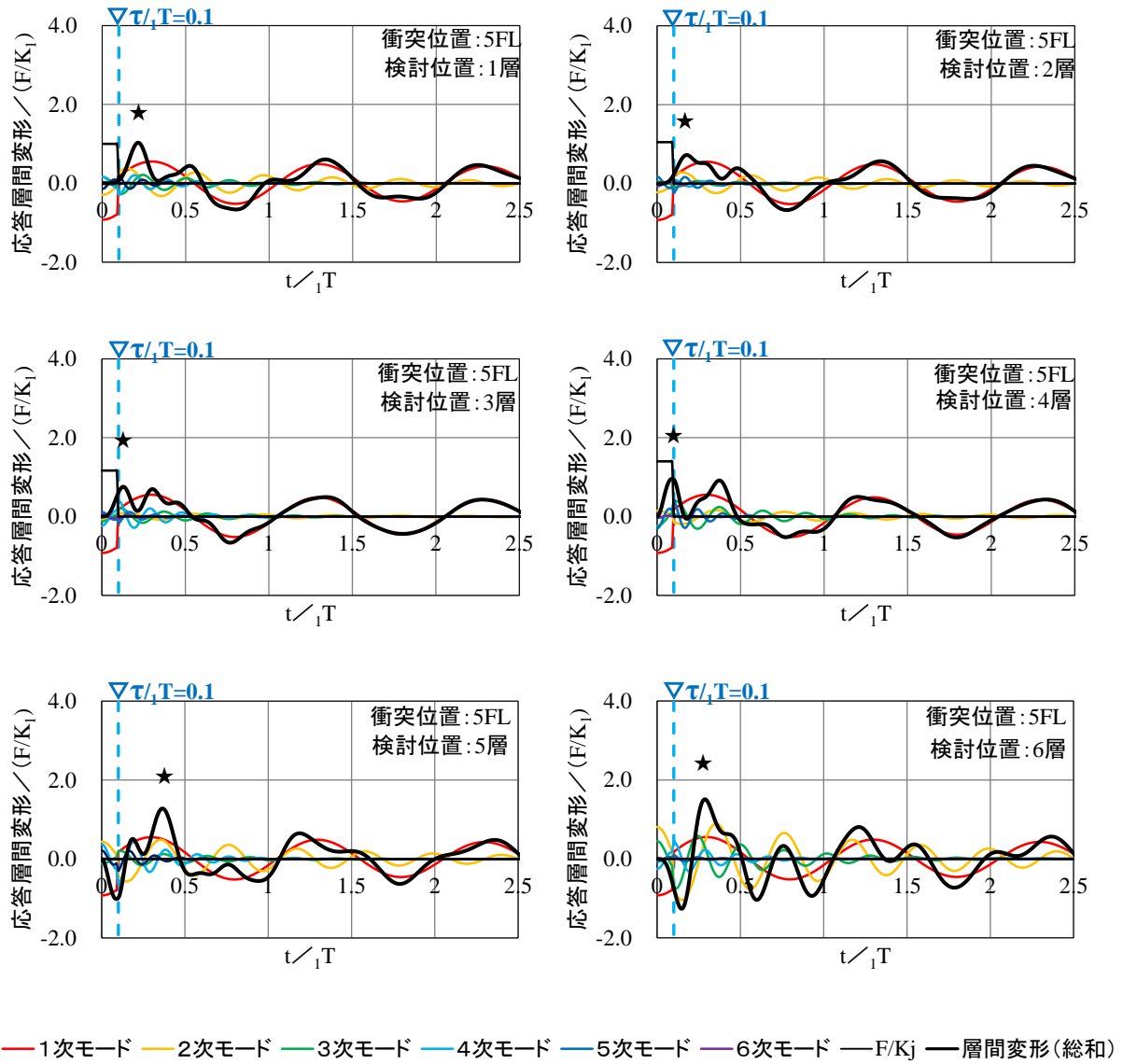


図 4.23 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置 : 5FL, $\tau_1/T=0.1$)

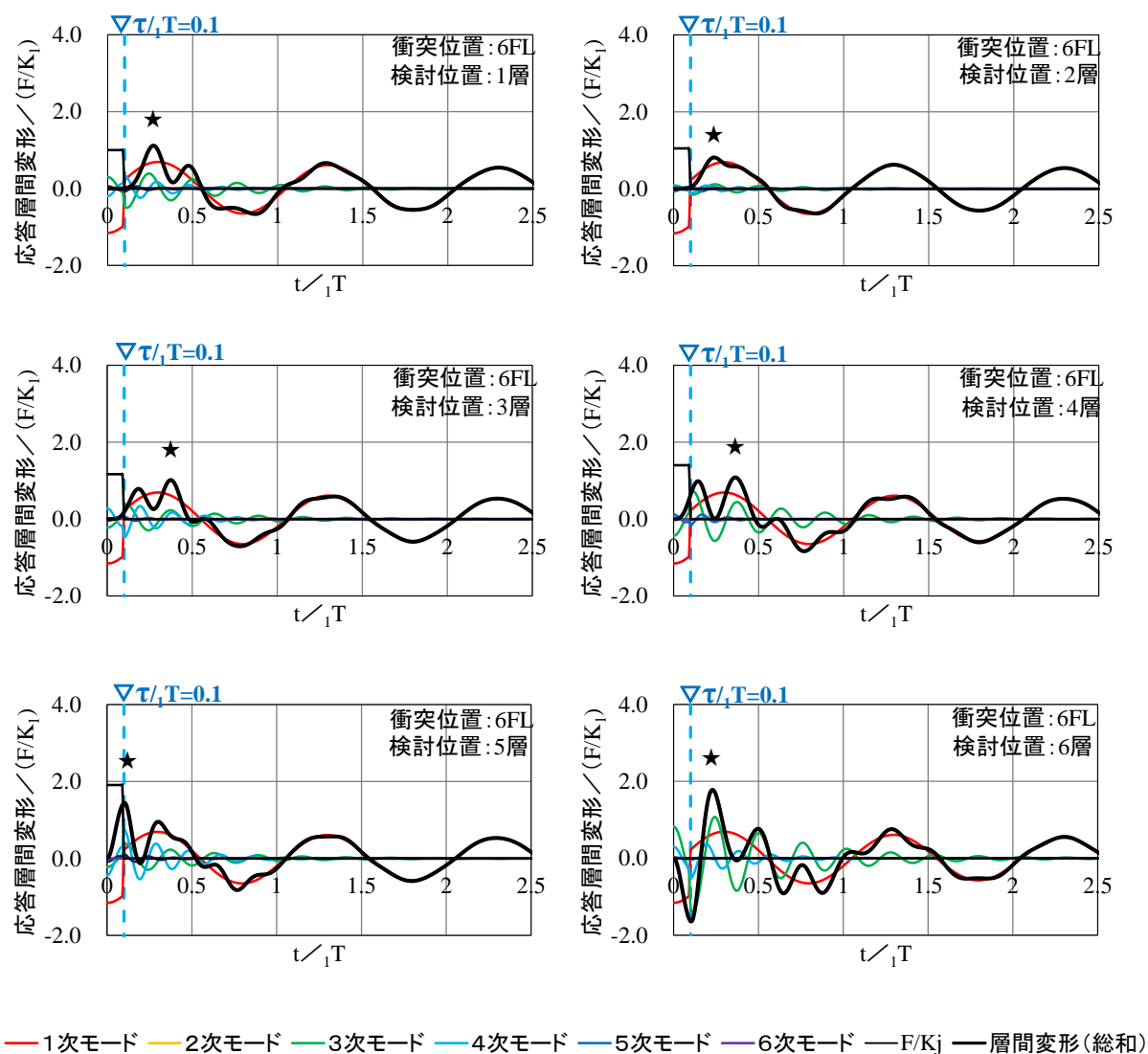
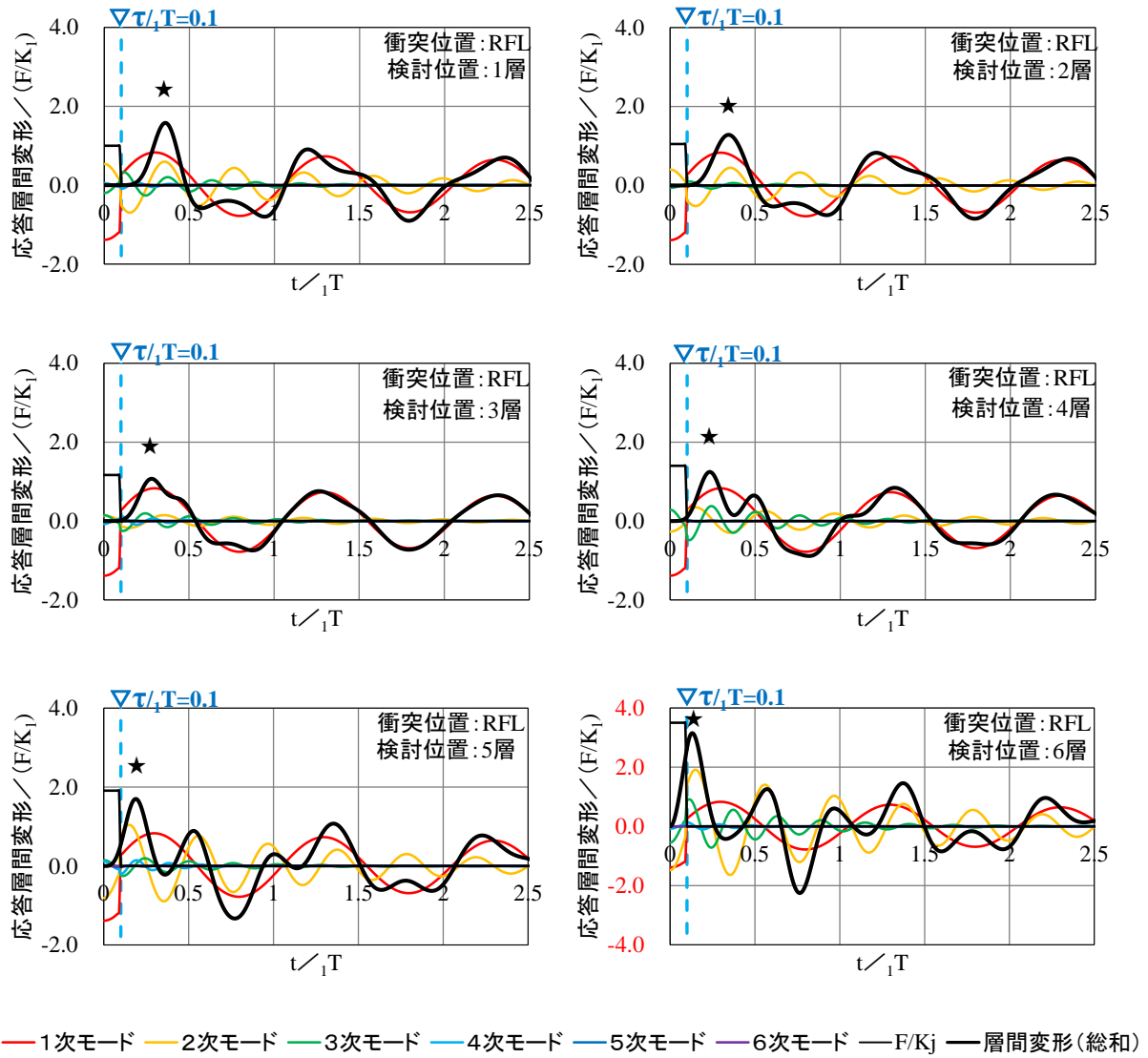


図 4.24 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 6FL, $\tau / T_1 = 0.1$)



* 「衝突位置：6層」のグラフ（右下）は縦軸が他のグラフと異なるため、その値を赤字により示す。

図 4.25 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：RFL, $\tau/T=0.1$ ）

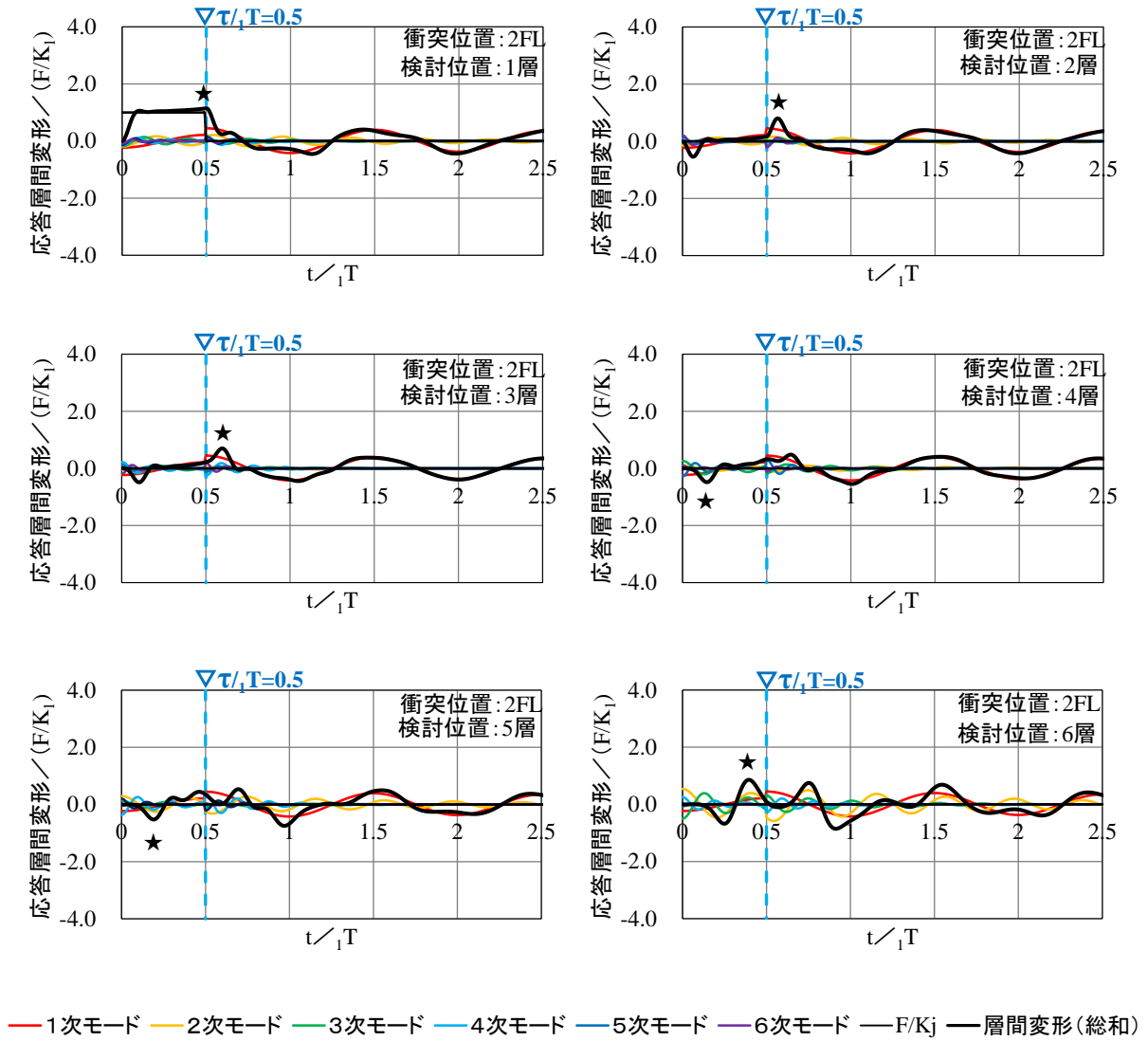


図 4.26 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 2FL, $\tau / T = 0.5$)

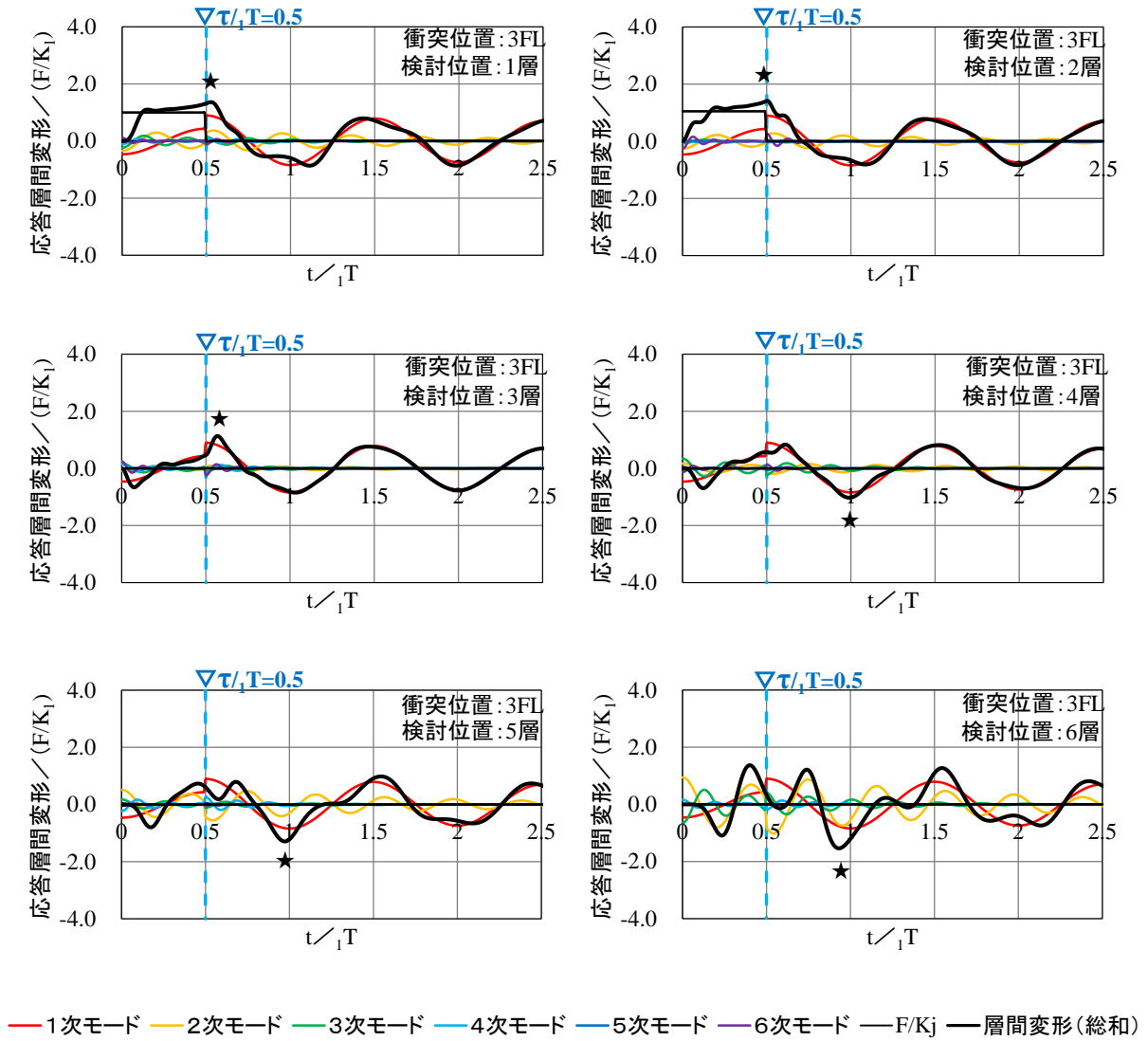


図 4.27 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 3FL, $\tau / T = 0.5$)

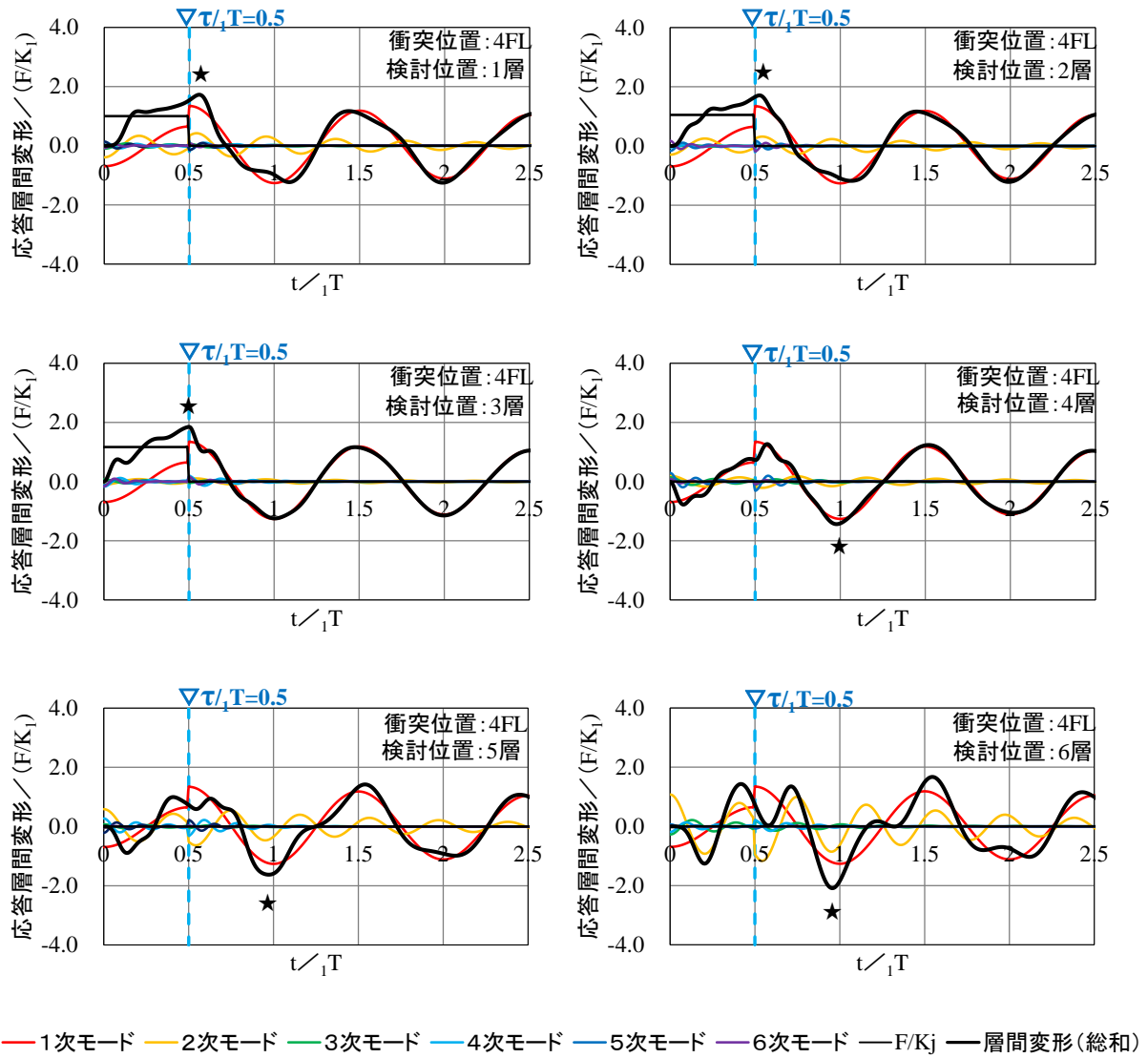


図 4.28 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 4FL, $\tau/{}_1T = 0.5$)

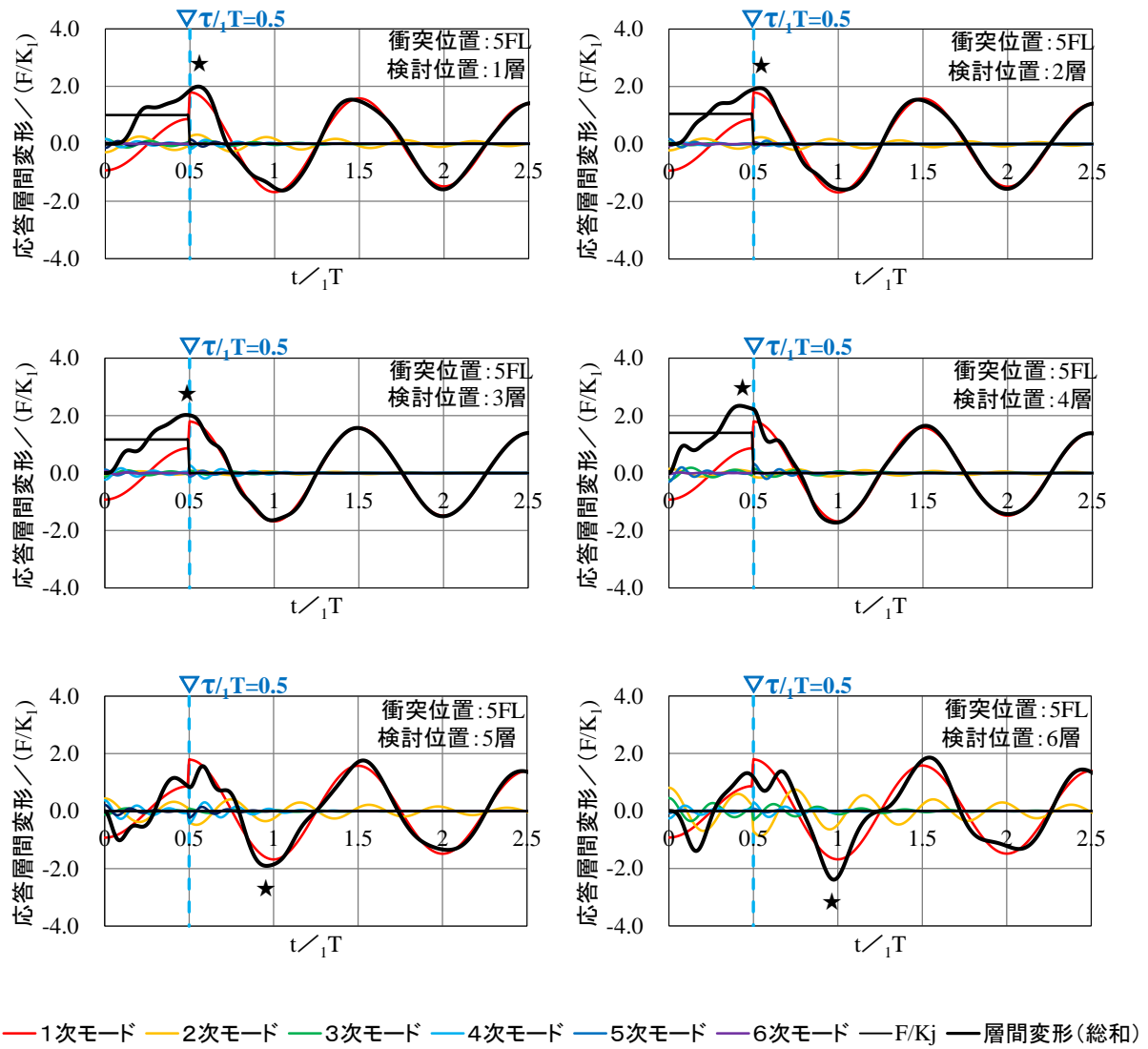


図 4.29 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置 : 5FL, $\tau / T = 0.5$)

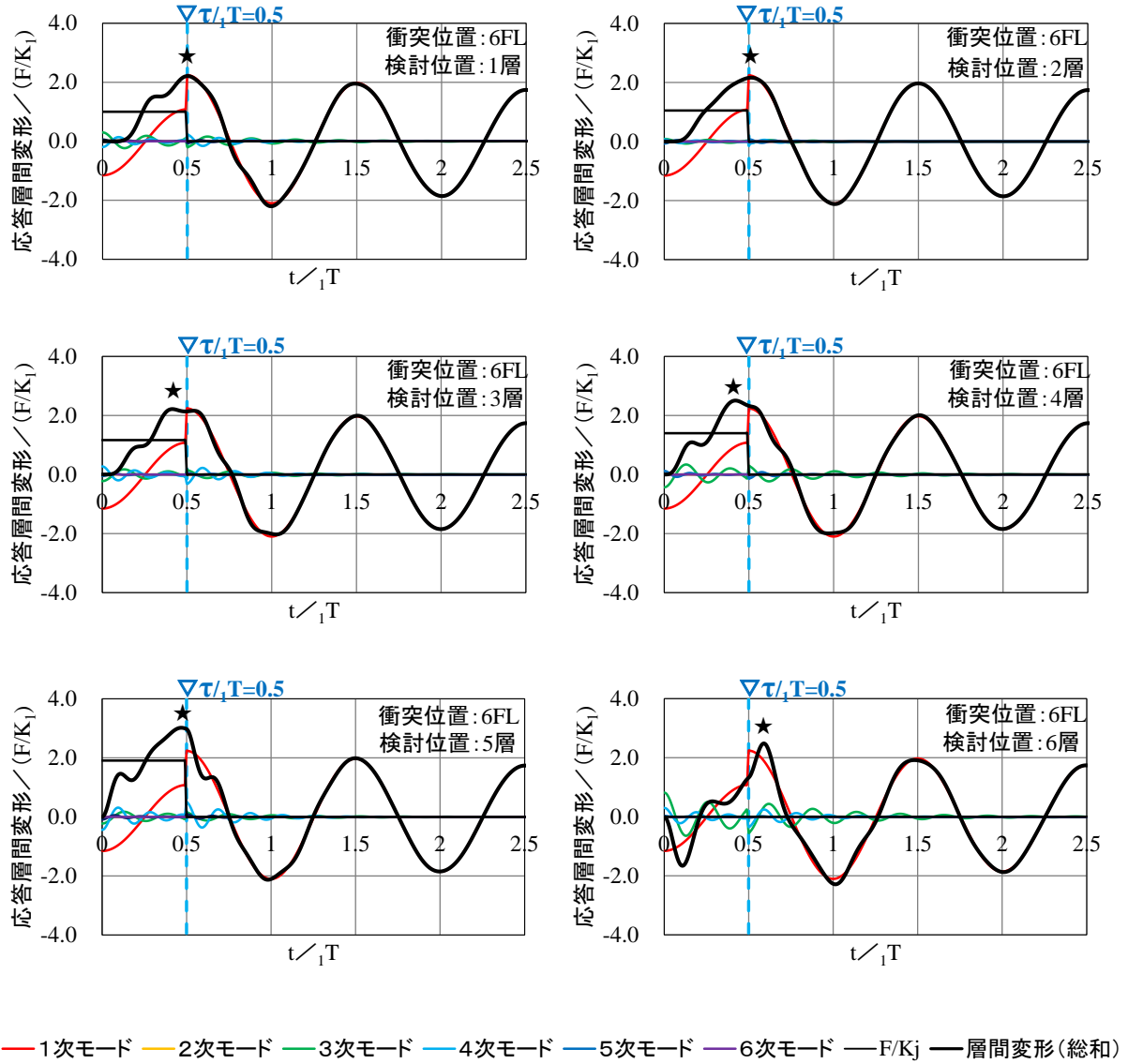


図 4.30 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 6FL, $\tau/{}_1T=0.5$)

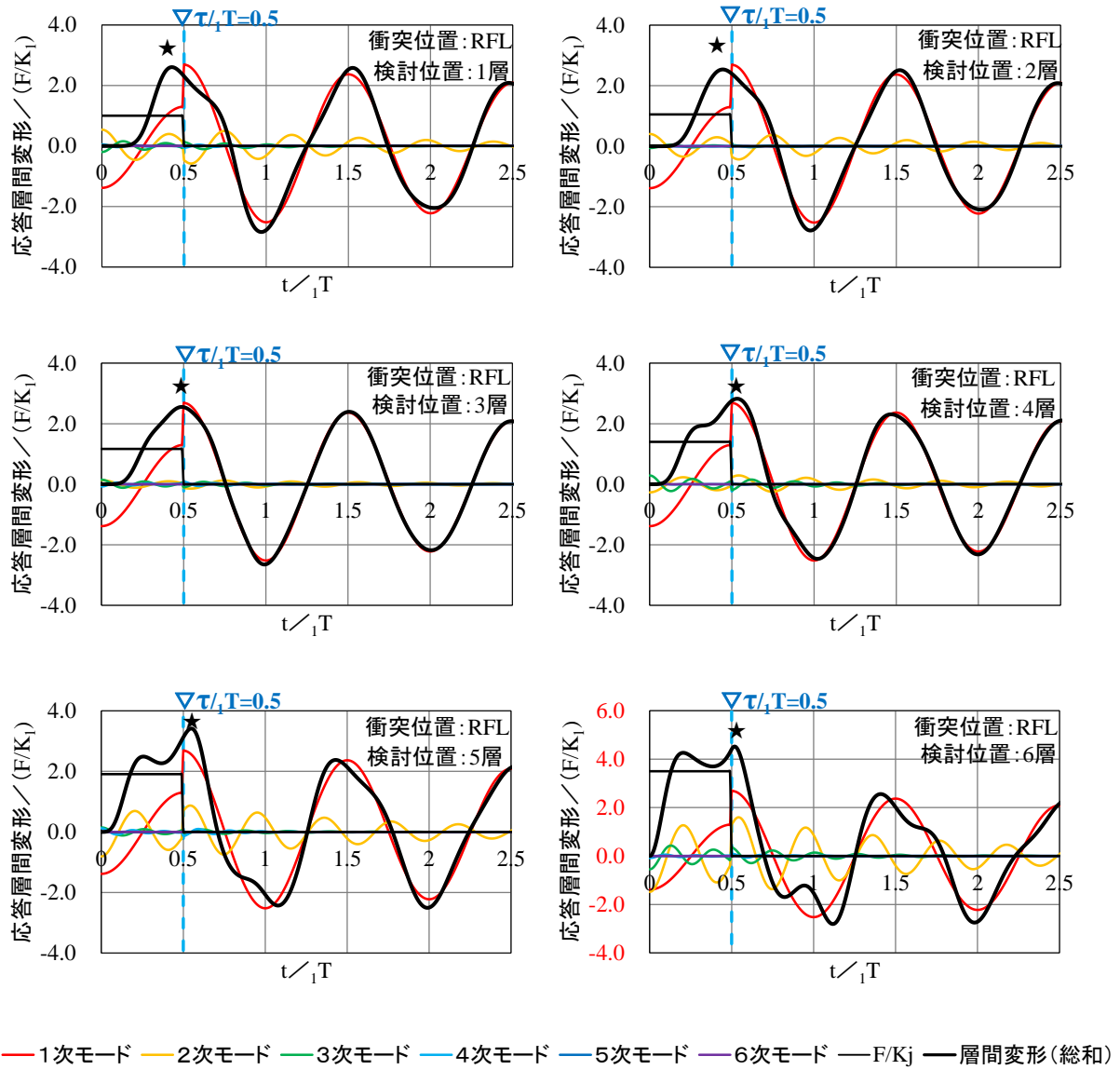


図 4.31 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：RFL, $\tau/T_1=0.5$ ）

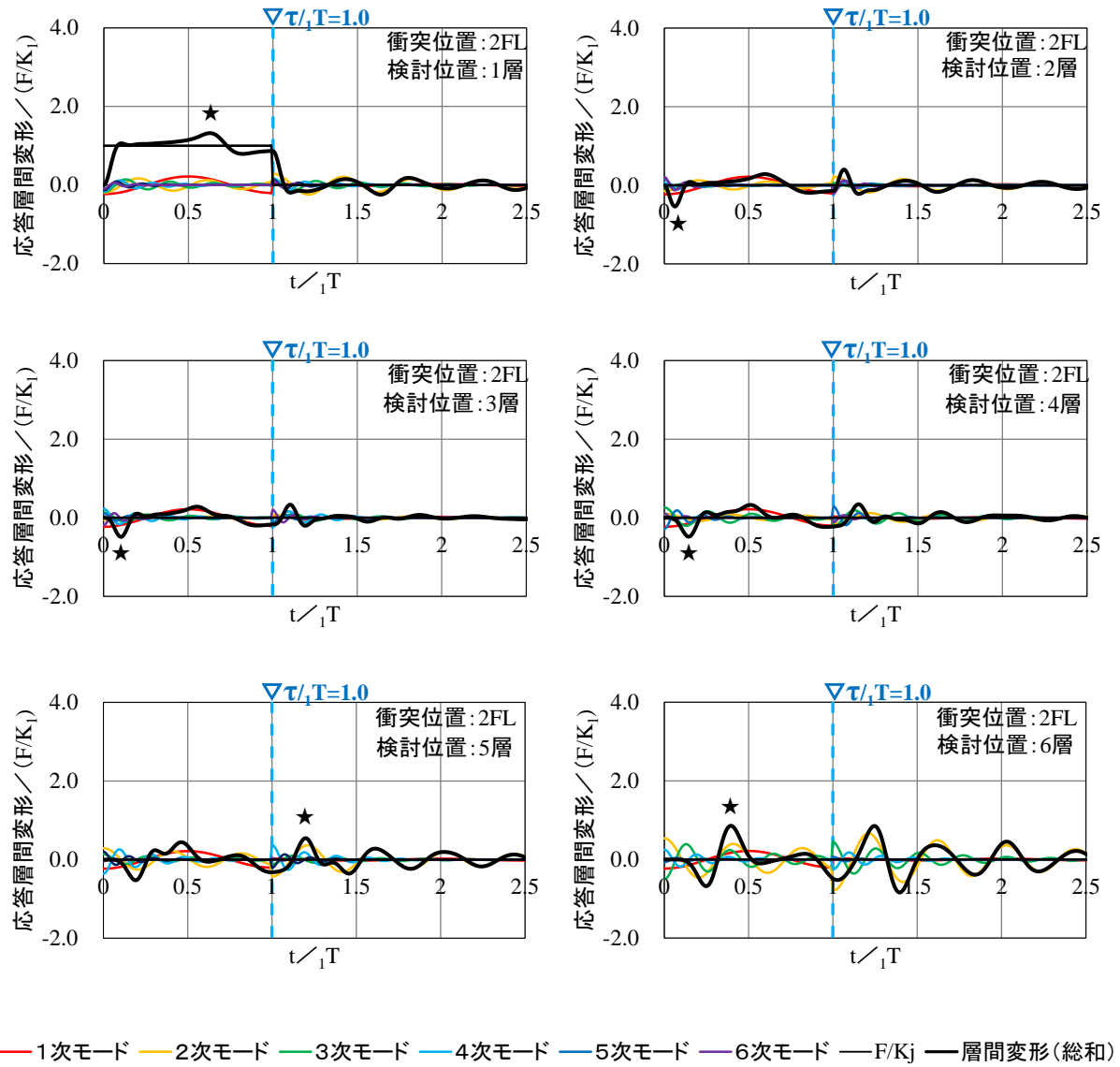


図 4.32 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 2FL, $\tau/1T = 1.0$)

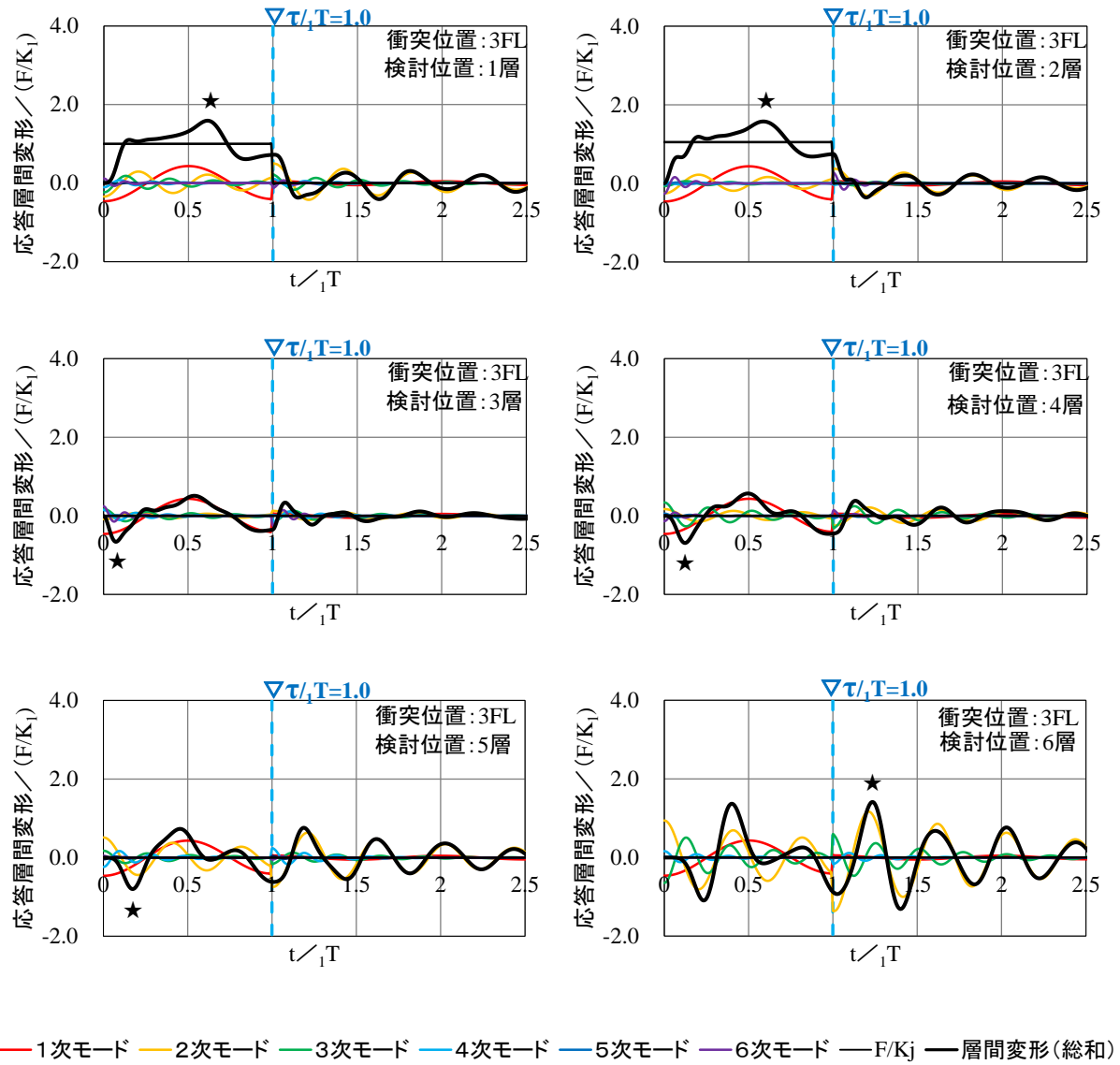


図 4.33 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 3FL, $\tau/{}_1T=1.0$)

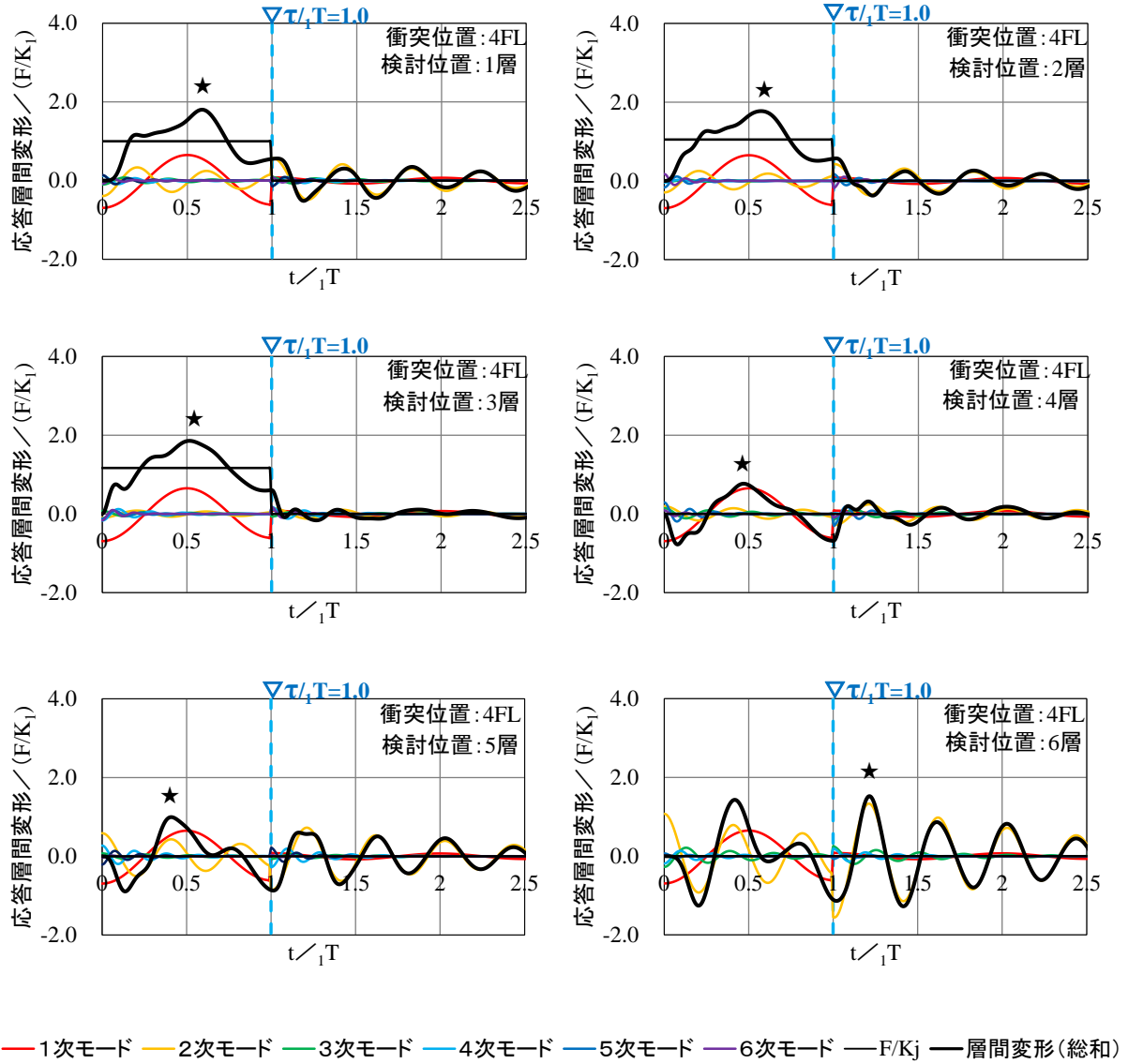


図 4.34 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 4FL, $\tau/1T=1.0$)

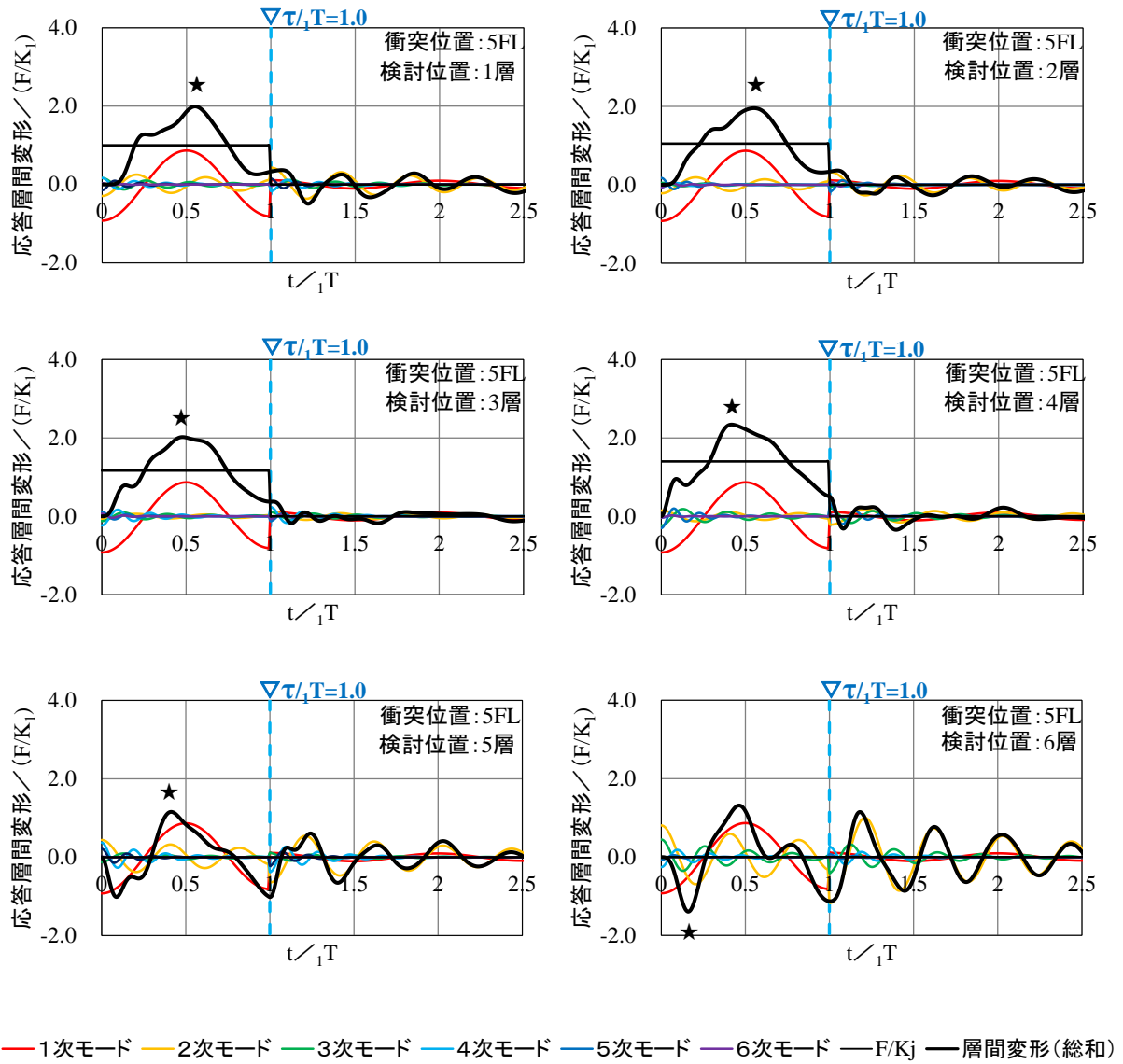


図 4.35 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 5FL, $\tau/1T=1.0$)

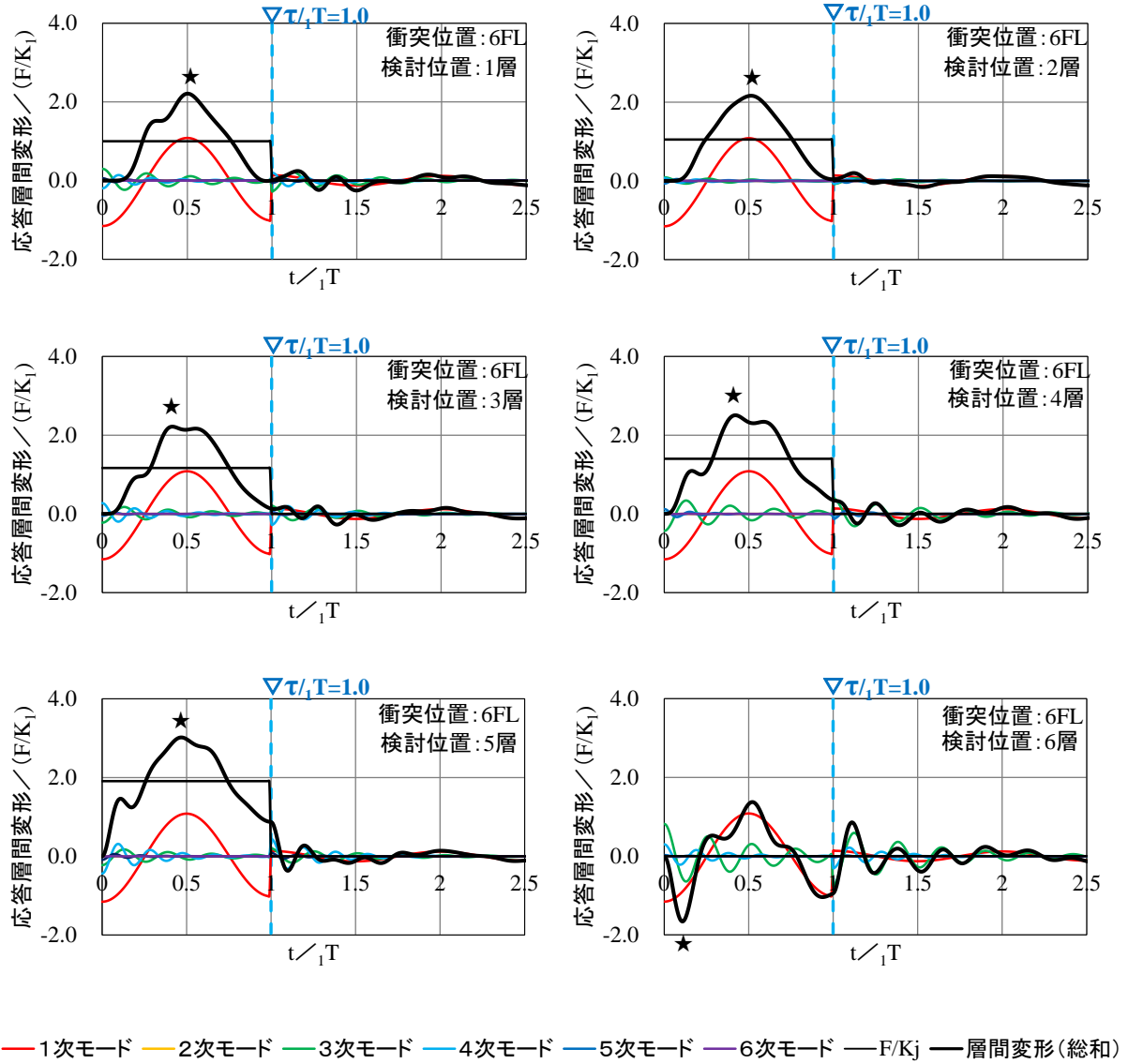
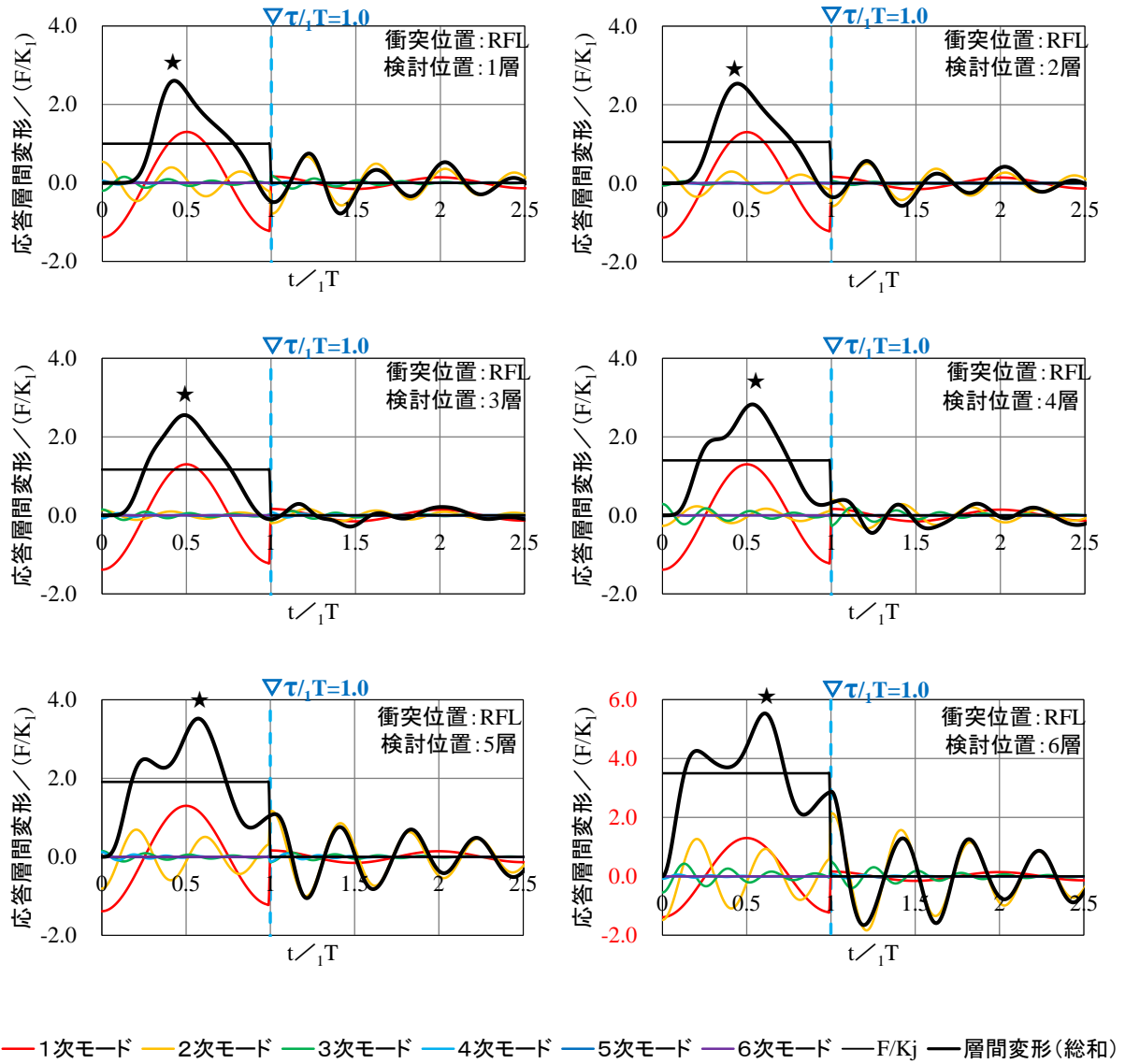


図 4.36 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：6FL, $\tau/{}_1T=1.0$ ）



* 「衝突位置：6層」のグラフ（右下）は縦軸が他のグラフと異なるため、その値を赤字により示す。

図 4.37 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：RFL， $\tau/1T=1.0$ ）

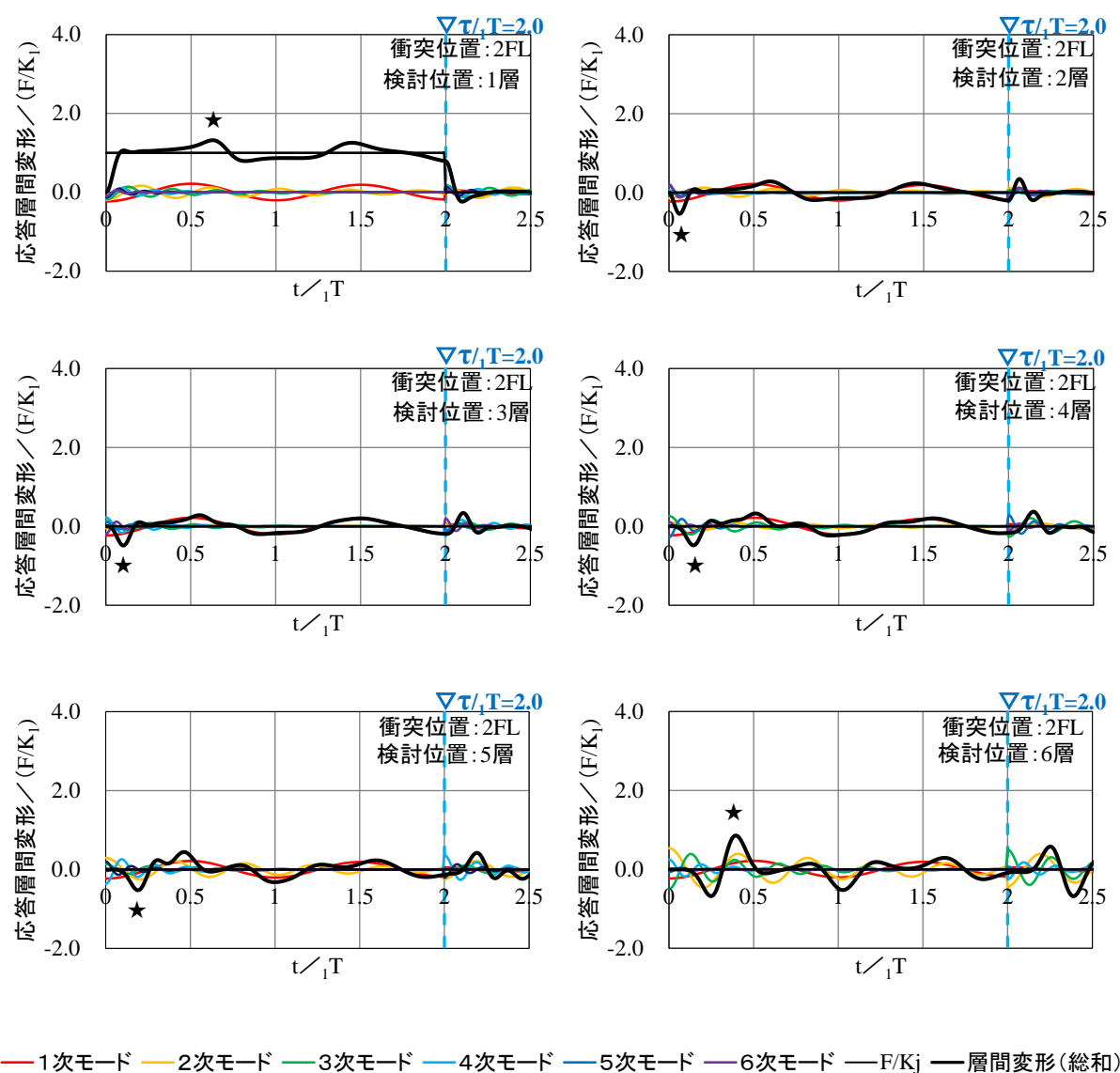


図 4.38 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 2FL, $\tau_1/T = 2.0$)

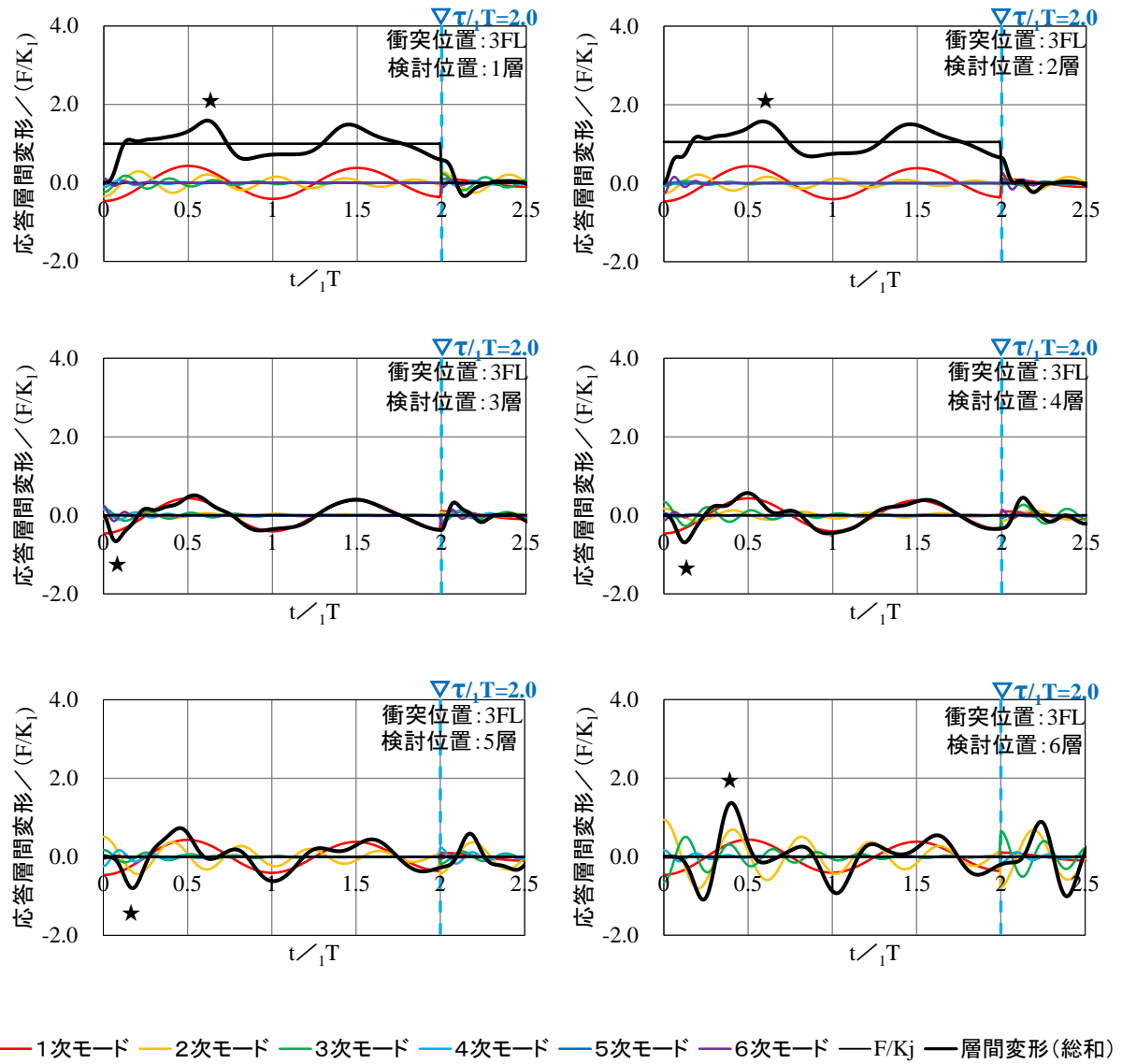


図 4.39 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 3FL, $\tau/{}_1T=2.0$)

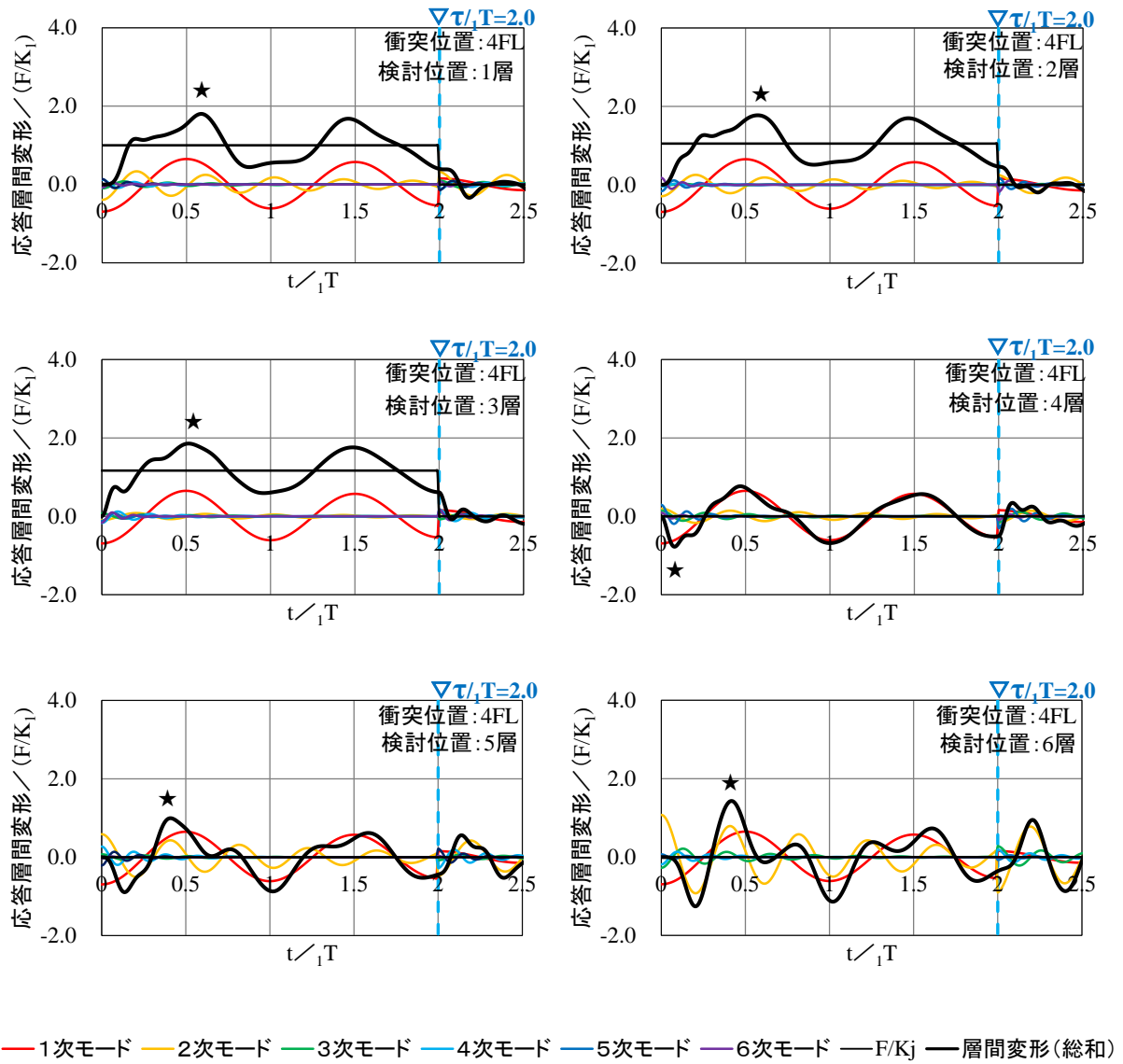


図 4.40 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 4FL, $\tau/{}_1T=2.0$)

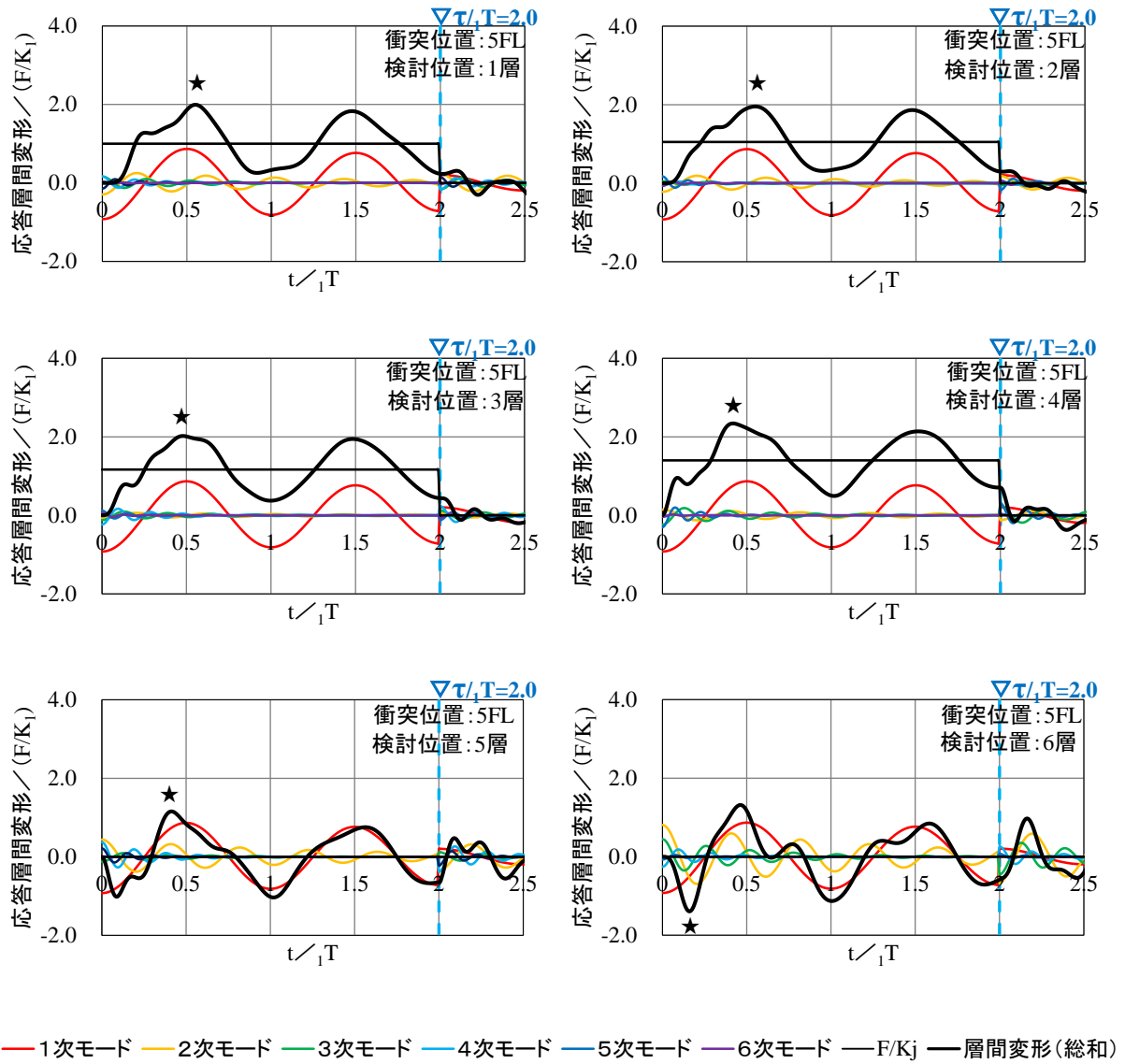


図 4.41 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 5FL, $\tau/1T=2.0$)

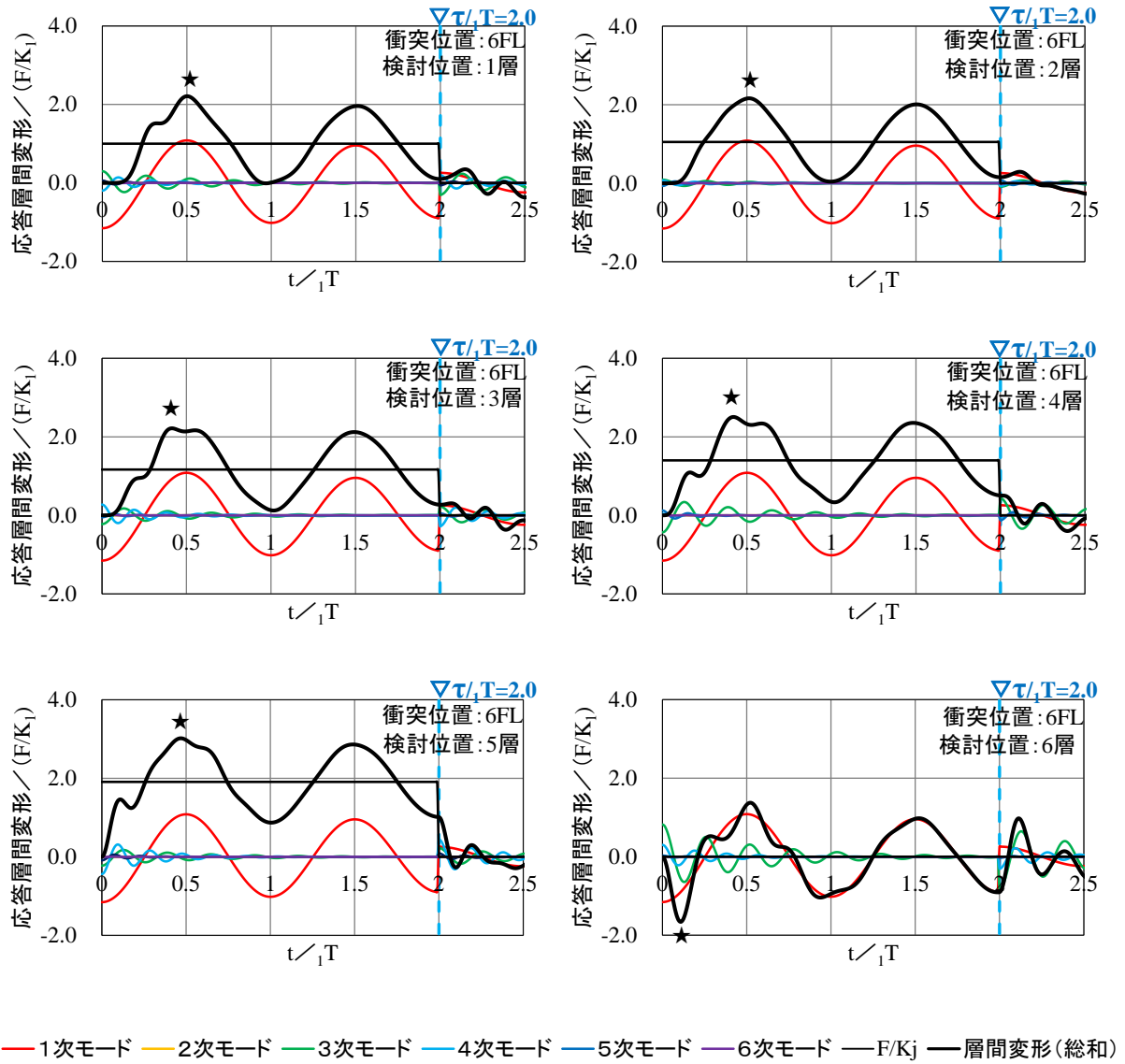
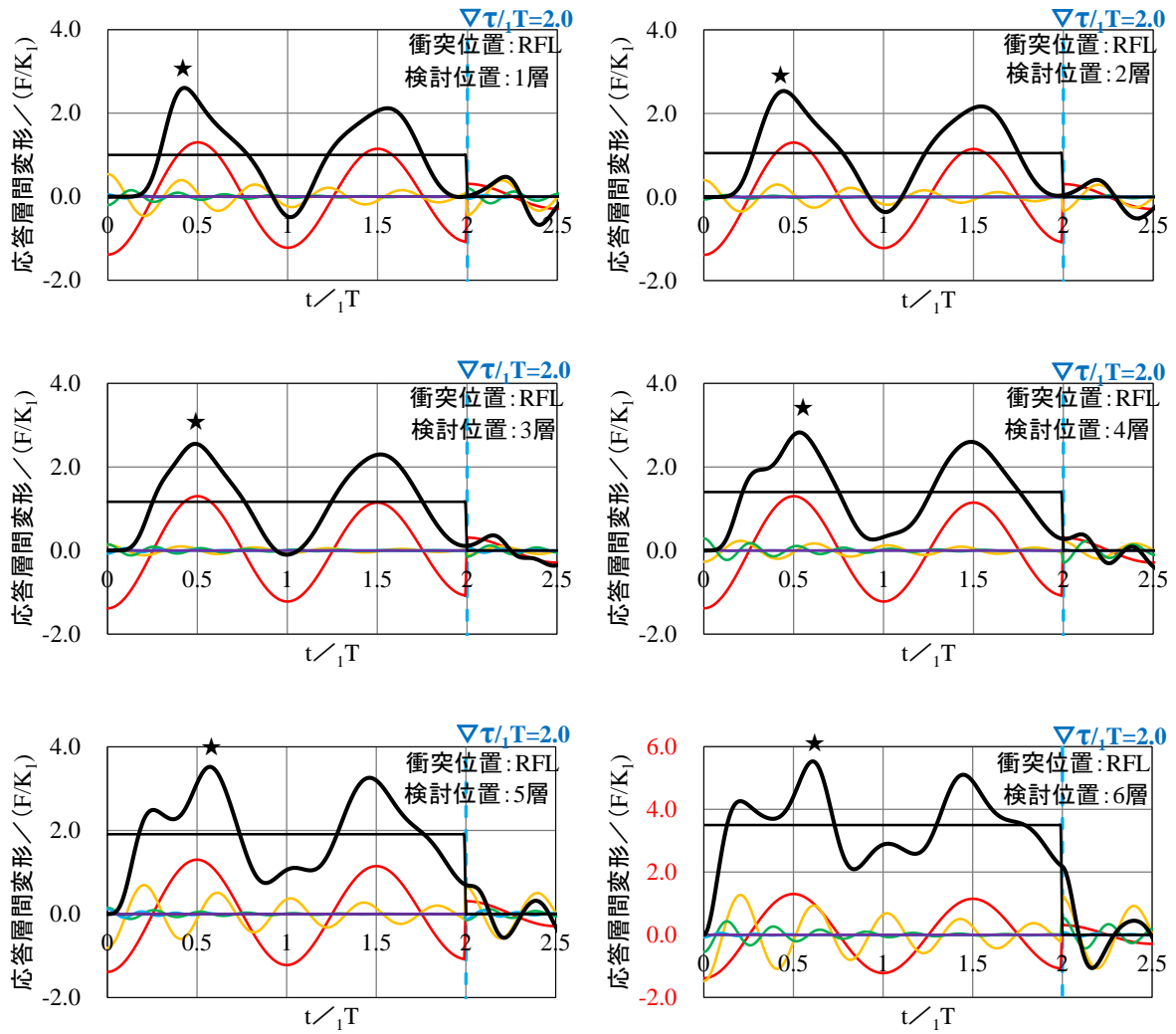


図 4.42 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 6FL, $\tau/1T=2.0$)



* 「衝突位置：6層」のグラフ（右下）は縦軸が他のグラフと異なるため、その値を赤字により示す。

— 1次モード — 2次モード — 3次モード — 4次モード — 5次モード — 6次モード — F/K_j — 層間変形(総和)

図 4.43 6 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：RFL, $\tau/T = 2.0$ ）

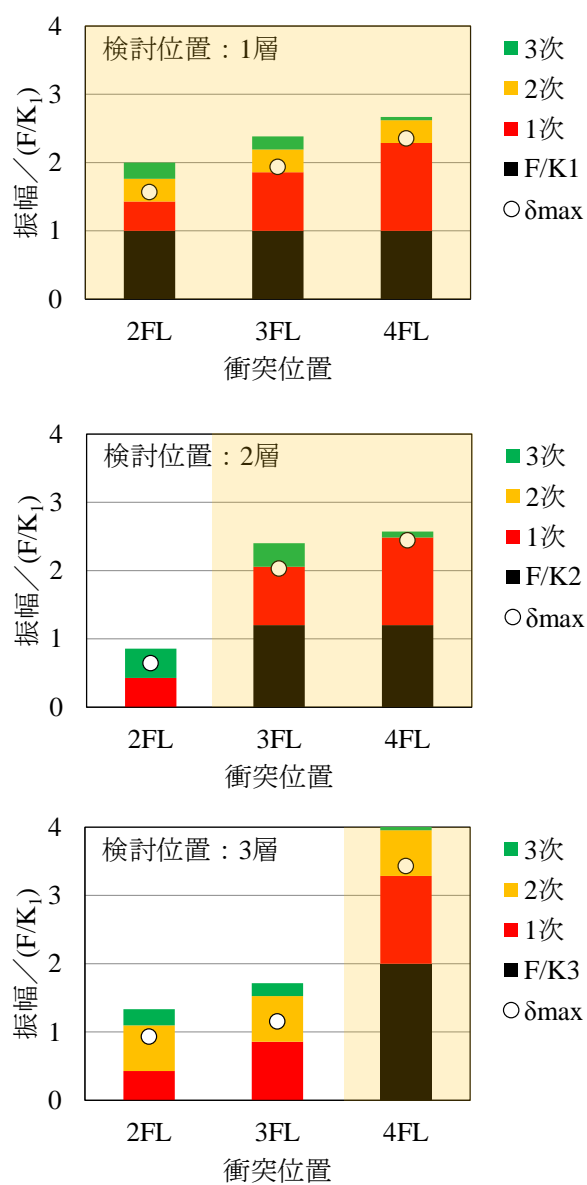


図 4.44 3 質点系モデルの各モード振幅と最大応答層間変形

* 網掛け部は衝突位置以下の層の振幅を示す。

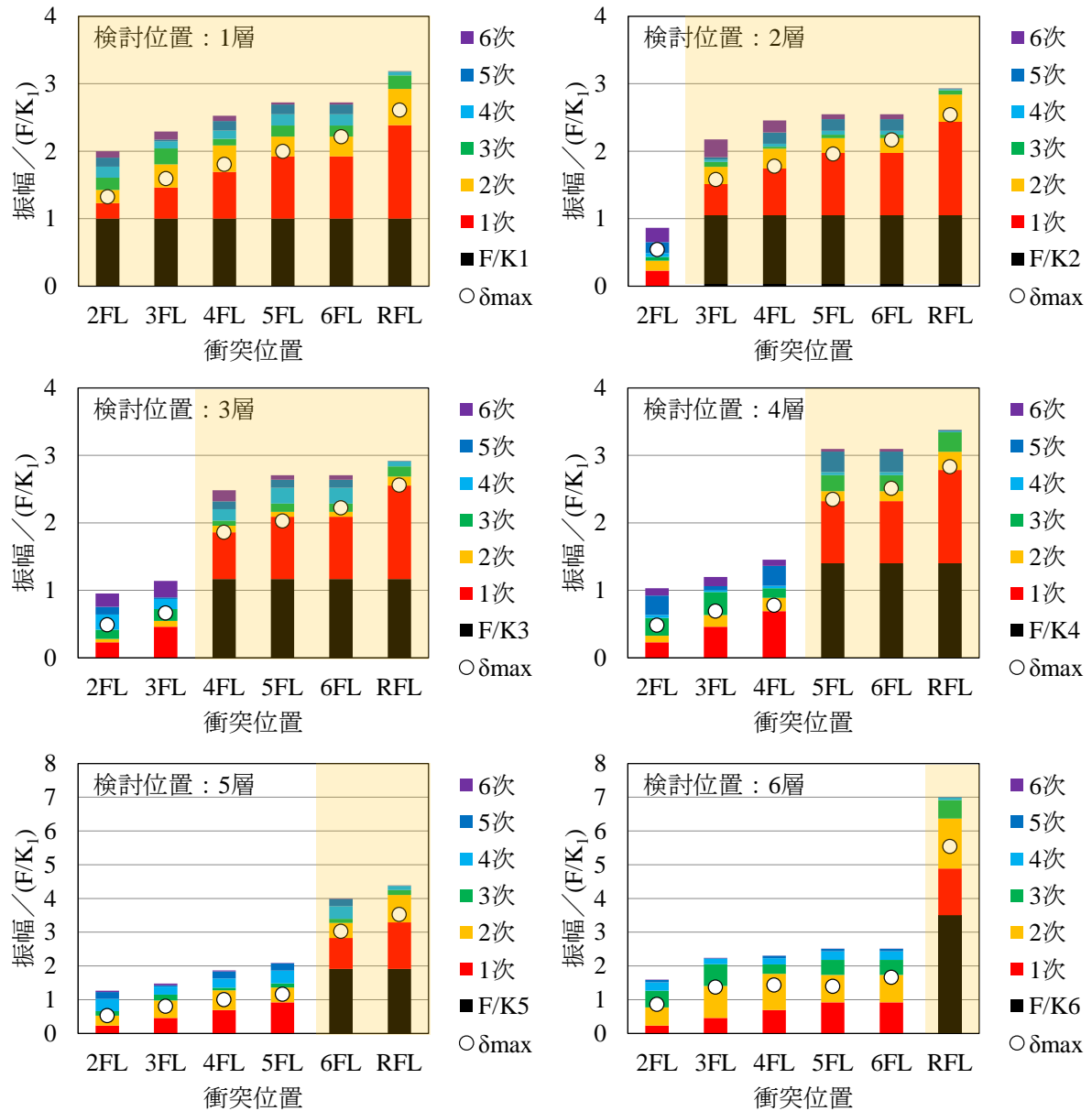


図 4.45 6 質点系モデルの各モード振幅と最大応答層間変形

* 網掛け部は衝突位置以下の層の振幅を示す。

次に、衝撃外力に対する質点系モデルの最大応答層間変形に着目し、その建築物の高さ方向の分布について、3質点系モデルについては図4.46に、6質点系モデルについては図4.47に、それぞれ示す。両図より、 $\tau_1 T = 0.1, 0.5$ の場合は、衝突位置より上階の応答が衝突位置以下の応答を上回る場合があるのに対し、 $\tau_1 T = 1.0, 2.0$ の場合は、衝突位置より上階の応答は衝突位置以下のいずれの層の応答も下回る傾向が得られた。ただし、 $\tau_1 T = 0.5$ の場合には、 $\tau_1 T = 0.1$ の場合ほど衝突位置より上階の応答が強く励起されておらず、その応答は、概ね衝突位置における応答と同程度もしくはそれ以下となっていることがわかる。先述のとおり、実際に想定し得る津波避難ビルと船舶との衝突においては、概ね $\tau/T \geq 0.5$ となること、さらに、図4.46および図4.47では考慮されていないものの、実際には衝撃外力と同時に津波波力が作用しており、同波力が下階ほど大きい外力分布系になること^[4.1]、の二点を考慮すると、船舶衝突時には、建築物の衝突位置より上階に比べ、衝突位置以下の応答が重要になると想定される。よって、以降は衝突位置以下の応答に焦点を絞り、その最大応答の簡易評価手法を提案する。

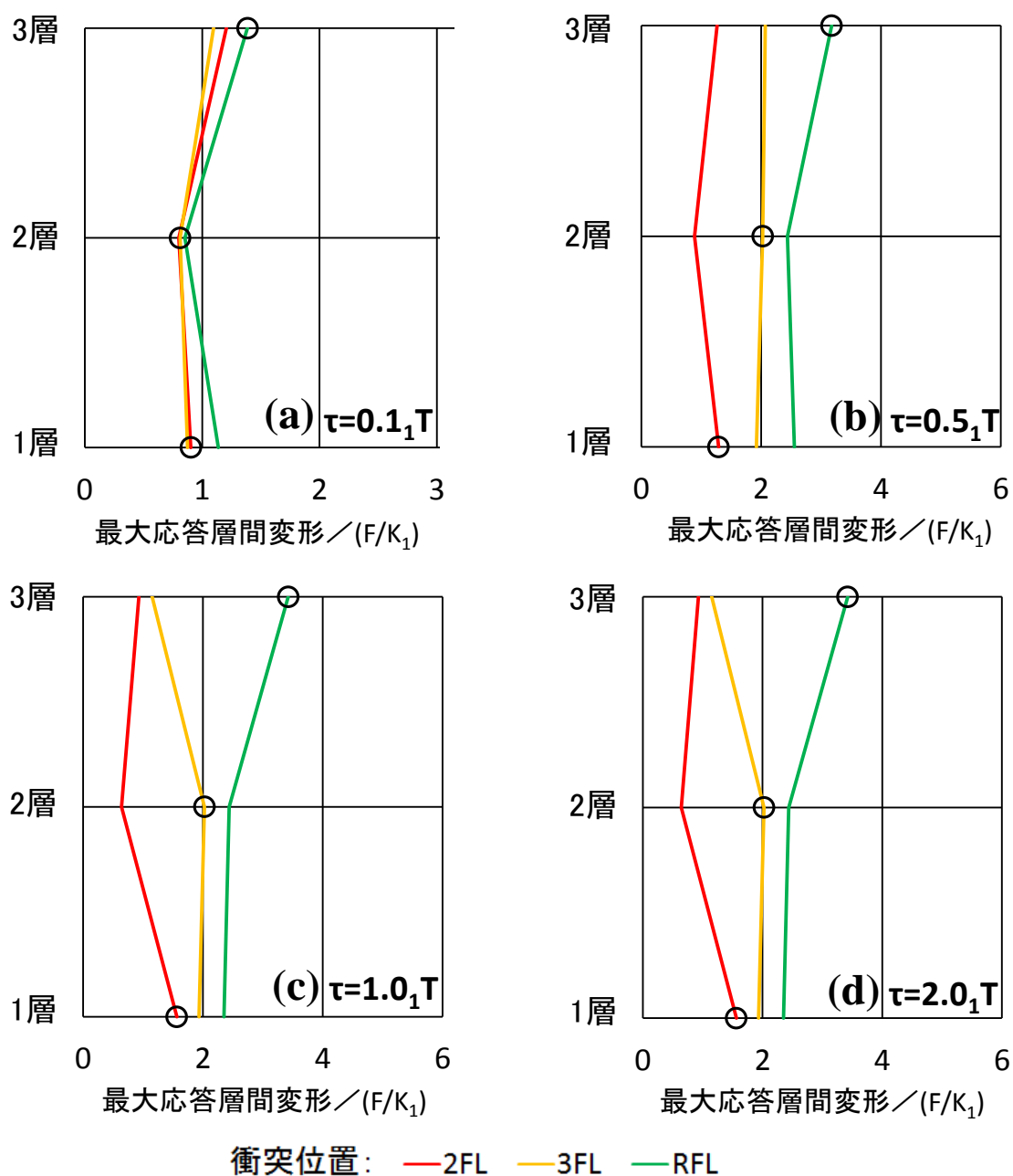
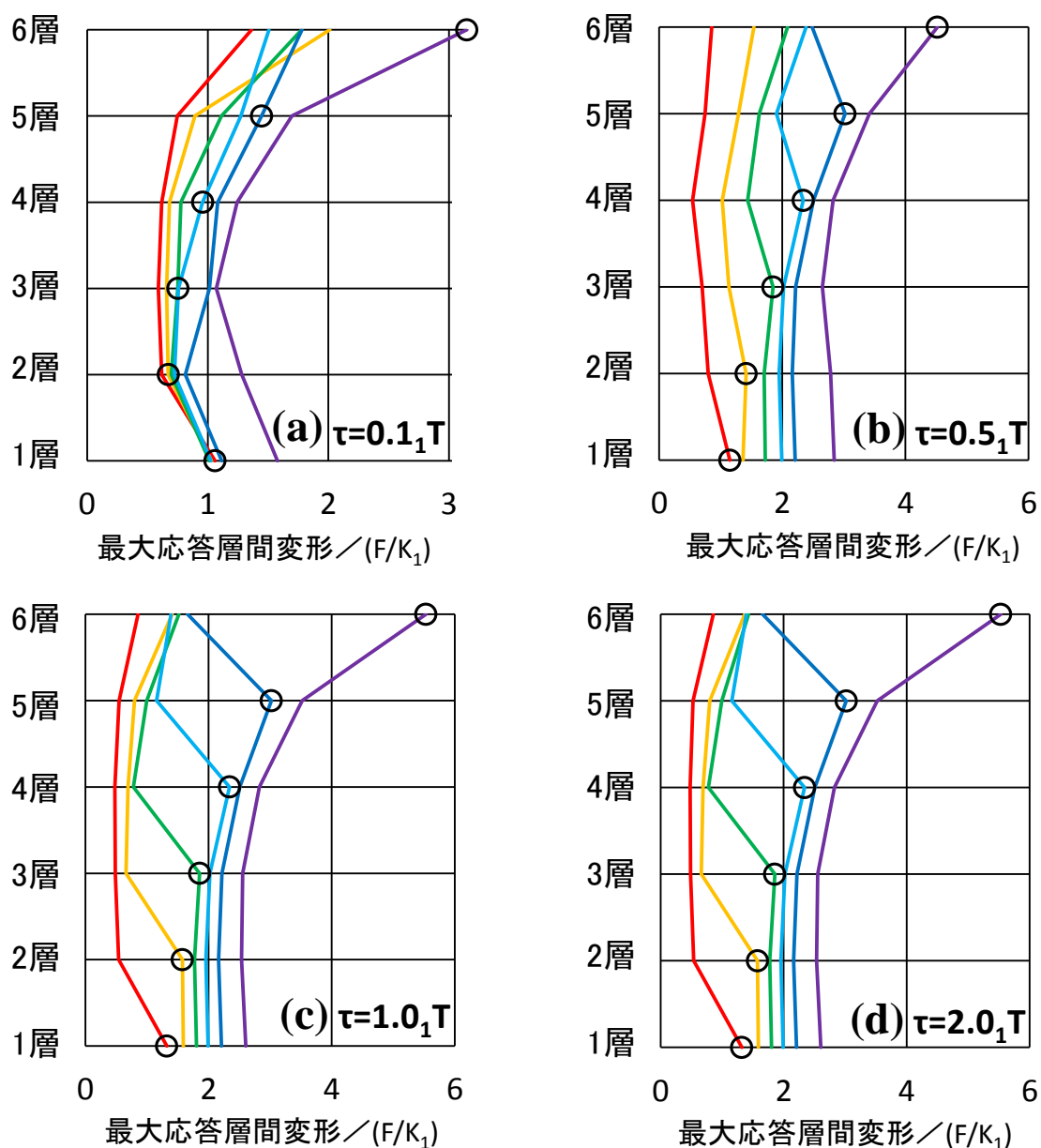


図 4.46 3 質点系モデルの最大応答層間変形



衝突位置: — 2FL — 3FL — 4FL — 5FL — 6FL — RFL

* ○は衝突直下階の応答を示す。

図 4.47 6 質点系モデルの最大応答層間変形

4.3 弾性応答の簡易評価手法の提案

本節では、前節で得られた衝撃外力に対する建築物の応答特性に基づき、その最大応答の簡易評価手法を提案する。

4.3.1 1質点系応答

まず、衝撃外力に対する1質点系の最大応答変形 δ_{\max} は、4.2.1 項に記したとおり、 $\tau/T \geq 0.5$ の場合には式(4.14)により概ね求まることが明らかになったため、同式を推定式とする。

$$\delta_{\max} = \frac{2F}{K} \quad (4.14)$$

ここで、

δ_{\max} : 最大応答変形 [m]

F : 衝撃外力 [kN]

K : 剛性 [kN/m]

式(4.14)の推定精度について、衝撃外力の荷重作用継続時間 τ と建築物の固有周期 T との比 (τ/T) をパラメータとして検討した結果を図 4.48 に示す。同図では、横軸に τ/T を、縦軸に式(4.14)による推定値と式(4.2)および式(4.4)による正解値との比を示す。同図より、式(4.14)は $\tau/T \geq 0.5$ の場合には非常に精度良く最大応答を推定し、一方の $\tau/T < 0.5$ の場合には τ/T が小さくなるほど最大応答を過大に評価することがわかる。なお、 $\tau/T \geq 0.5$ においてもごくわずかに推定値が正解値を上回るのは、推定式(4.14)において減衰は無視しているものの、実際の応答では減衰により応答が低減されることが要因である。

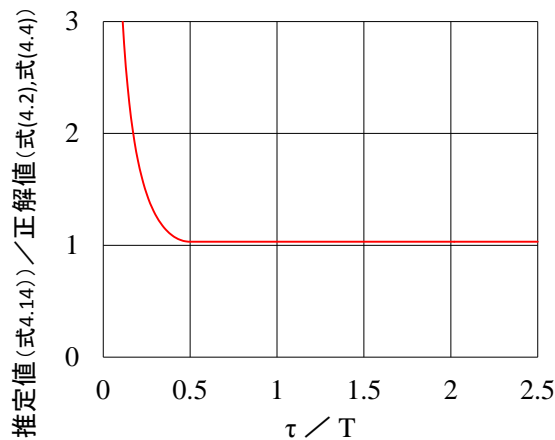


図 4.48 1質点系の応答推定精度

なお、式(4.14)は、最大応答が衝突終了以前に生起すること、ならびに、減衰 $h = 0$ を仮定し、衝撃外力による仕事（図 4.49 の青色部）と、建築物の復元力による仕事（同赤色部）とが等価である（式(4.15)）ことに基ついても導出される。

$$F\delta_{\max} = \frac{1}{2}K\delta_{\max}^2 \quad (4.15)$$

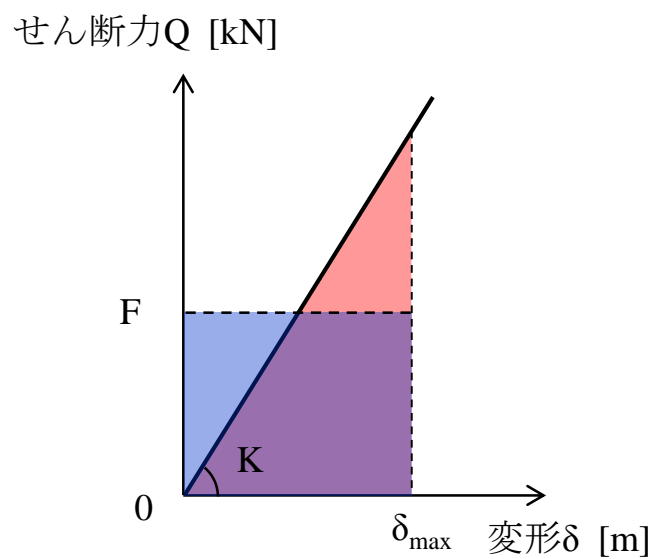


図 4.49 1 質点系モデルの応答推定手法の概念図

4.3.2 多質点系応答

次に、衝撃外力に対する多質点系応答の最大応答層間変形の簡易評価手法を提案する。なお、前項に先述のとおり、ここでは比較的応答が大きい衝突位置以下を対象とする。前節の検討により、多質点系応答の最大応答層間変形は、 $\tau/T \geq 0.5$ の場合には、 F/K_j と一次モード振幅との和により概ね求まることがわかったため、式(4.11)において減衰 $\gamma_h=0$ として F/K_j 項と一次モードを合成し、さらに高さ方向に直線一次モード形状となる建築物を仮定することで得られる式(4.16)を推定式とする。同式は、荷重 F と各層の層剛性 K_j 、衝突質点位置 i が得られれば最大応答層間変形の推定が可能な非常に簡便な式である。また、式(4.14)は、式(4.16)において質点数 $N=1$ とした場合に一致するため、以降は、式(4.16)を1質点系も含めた最大応答層間変形の推定式とする。

$$\delta_{\max_j} = \frac{F}{K_j} + i \frac{F}{\sum_{j=1}^N K_j} \quad (4.16)$$

ここで、

δ_{\max_j} : j 層の最大応答層間変形 [m]

F : 衝撃外力 [kN]

K_j : j 層の剛性 [kN/m]

N : 建築物の層数 [層]

i : 衝突質点位置 [-]

同式(4.16)の推定精度について、前節と同様の3質点系および6質点系モデルを対象として検討した結果を図4.50および図4.51に示す。両図では、横軸に衝撃外力の荷重作用継続時間 τ と建築物の一次固有周期 $1T$ との比 $(\tau/1T)$ を、縦軸に式(4.16)による推定値とモーダルアナリシス(式(4.11)および式(4.12))による正解値との比を示す。

両図より、式(4.16)は、3質点系および6質点系に共通し、 $\tau/1T \geq 0.5$ の範囲では非常に良い推定値を与えるが、一方で、 $\tau/1T < 0.5$ の範囲ではモーダルアナリシスの結果を過大評価することがわかる。これは、 $\tau \geq 0.5 \cdot 1T$ の場合には、一次モードの最大応答生起時刻 ($t = 0.5 \cdot 1T$) に最大応答層間変形が概ね生起し(前項の時刻歴波形参照)、そのときの最大応答が式(4.16)により求まる値に概ね等しくなるのに対し、 $\tau < 0.5 \cdot 1T$ の場合には、その生起時刻 ($t = 0.5 \cdot 1T$) 以前に衝突が終了し、式(4.16)の導出元である式(4.12)の仮定条件を満足しない(すなわち最大応答生起時刻 $t > \tau$) ことが要因である。

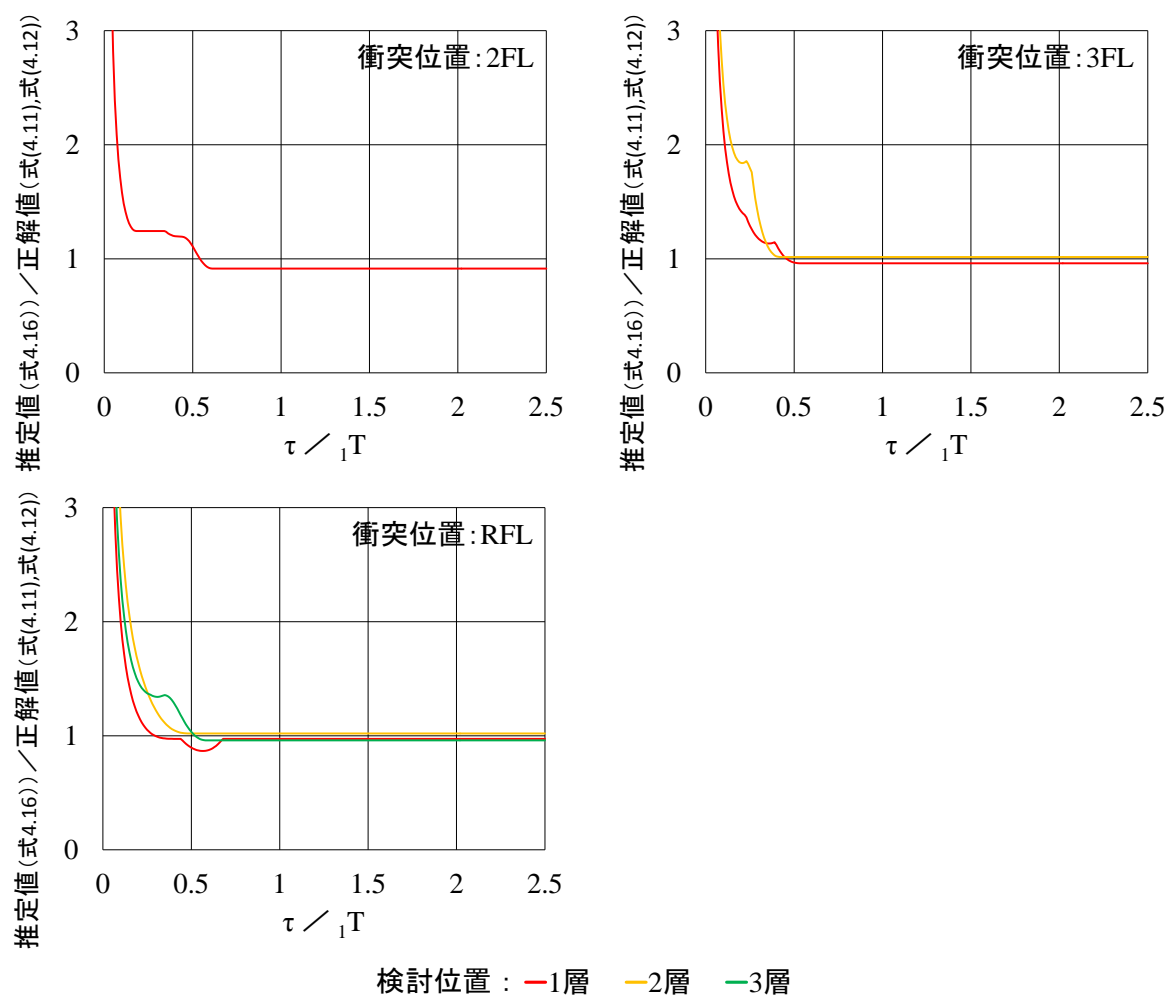


図 4.50 3 質点系モデルの応答推定精度

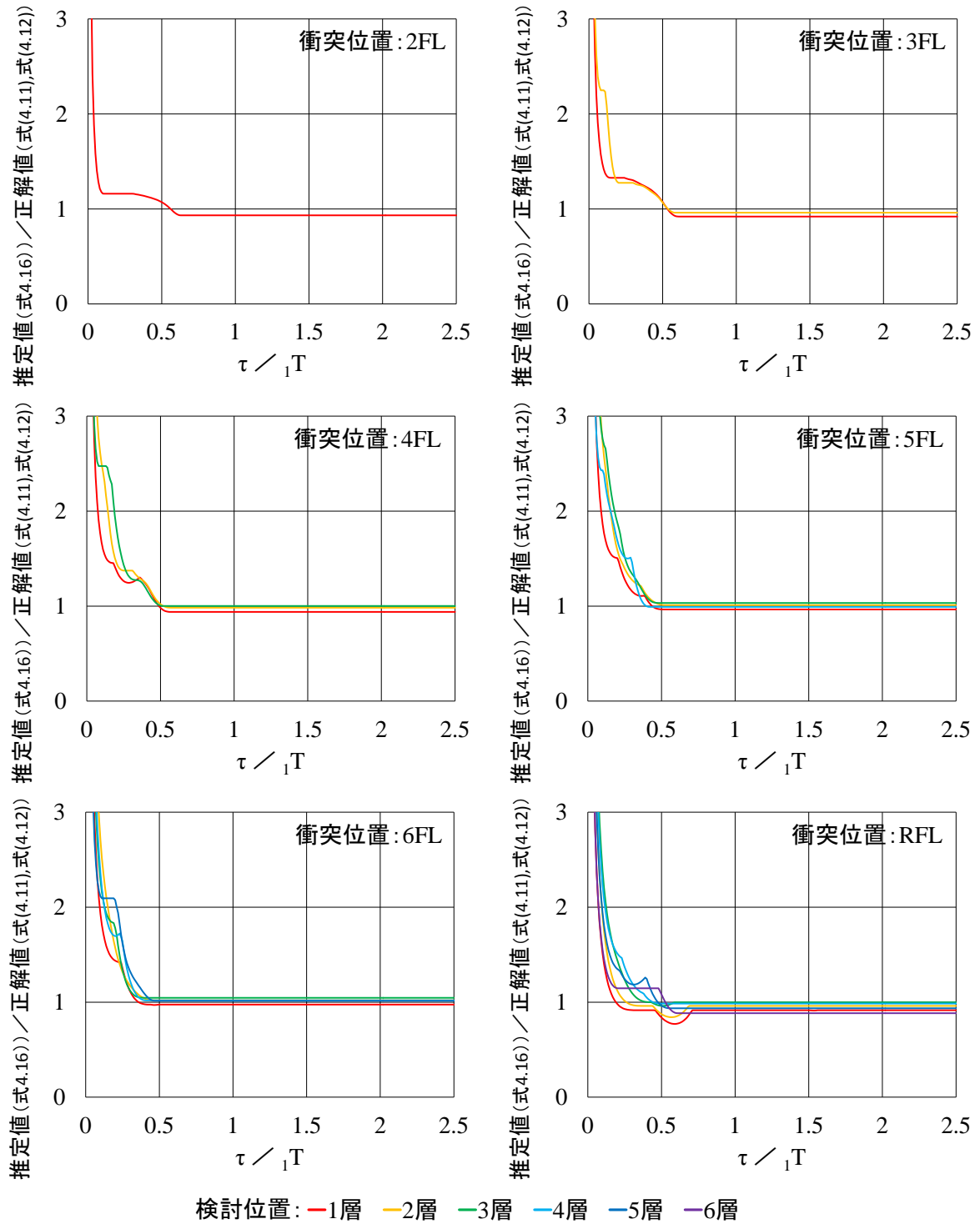


図 4.50 6 質点系モデルの応答推定精度

なお、多質点系に対しても、一質点系に対する検討と同様に、衝突位置以下の j 層において衝撃外力による仕事（図 4.51 の青色部）と、建築物の復元力による仕事（同赤色部）とが等価である（式(4.17)）と仮定すると、式(4.14)と同様に式(4.18)が求まる。しかし、同式は、一次モードが卓越する多質点系の応答性状に基づき導出した式(4.16)とは異なっており、その推定精度を検討すると（図 4.52, 図 4.53）、式(4.18)は、式(4.16)（図 4.49, 図 4.50）と比べて推定誤差が大きいことがわかる。これは、式(4.18)は、ある特定の層において、衝撃外力による仕事がすべて同層におけるばねのひずみエネルギーに変換されることを仮定して導出されているものの、実際には他層のばねのひずみエネルギーや質点の運動エネルギーとの間でエネルギーが交換され、対象層のみににおけるエネルギーの変換が厳密には成立しないためである。

よって、本研究においては、最大弾性応答の推定式として式(4.16)を採用する。

$$F\delta_{\max_j} = \frac{1}{2} K_j \delta_{\max_j}^2 \quad (4.17)$$

$$\delta_{\max_j} = \frac{2F}{K_j} \quad (4.18)$$

ここで、

δ_{\max} : 最大応答変形 [m]

F : 衝撃外力 [kN]

K : 剛性 [kN/m]

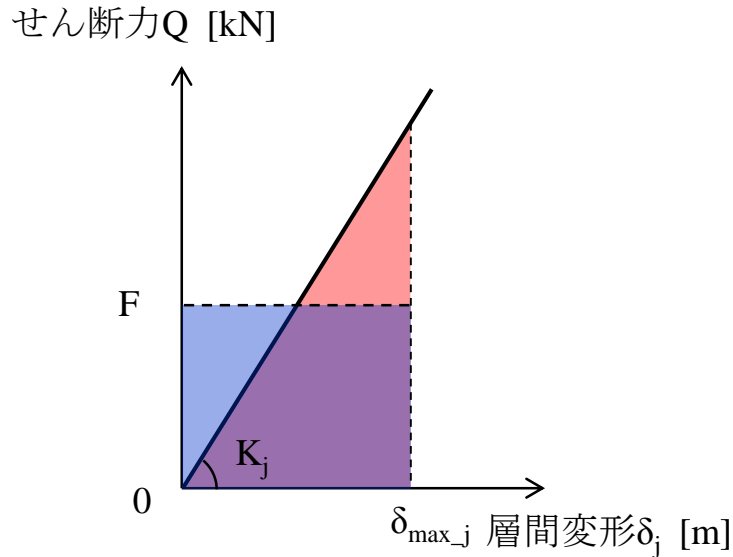


図 4.51 多質点系モデルの応答推定手法の概念図

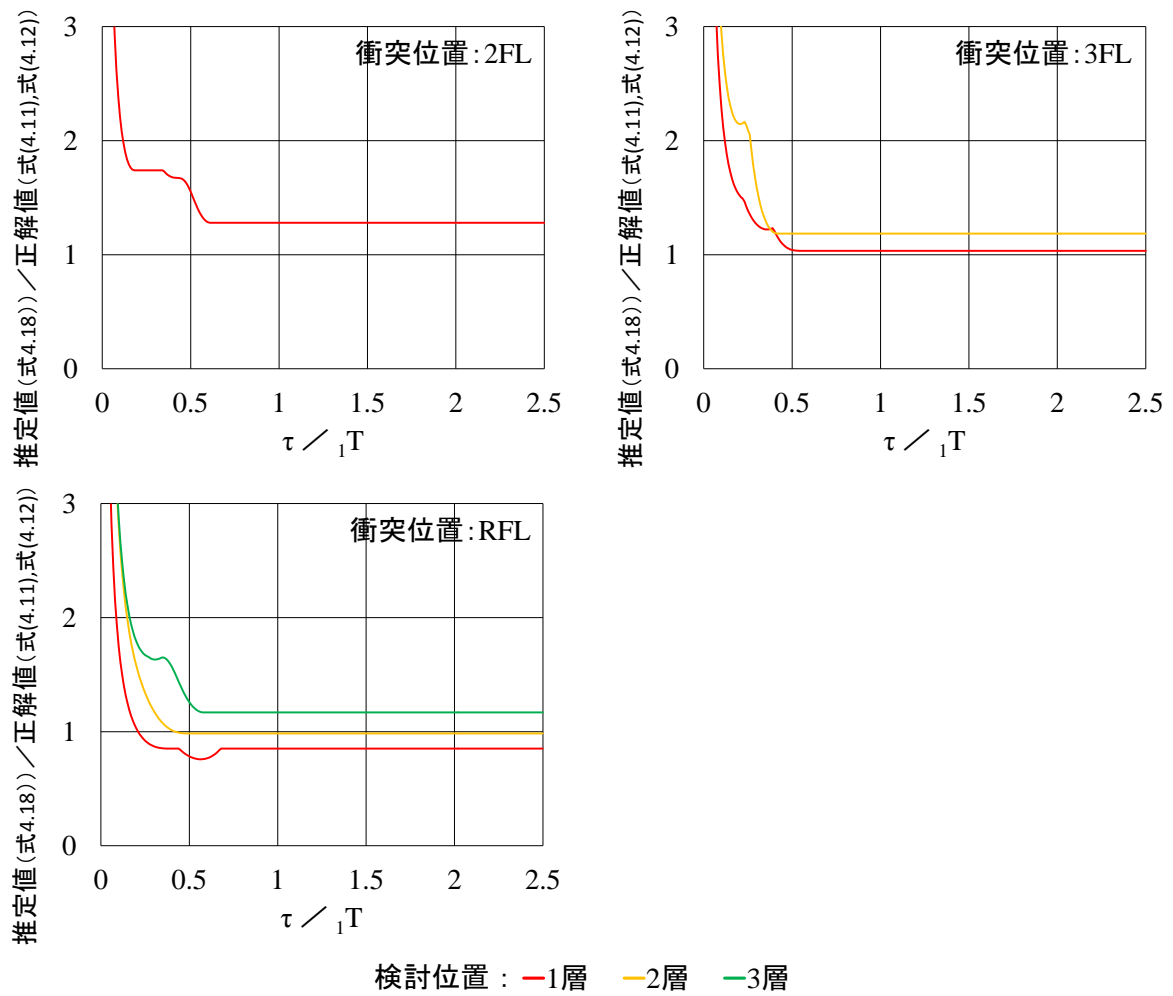


図 4.52 3 質点系モデルの応答推定精度

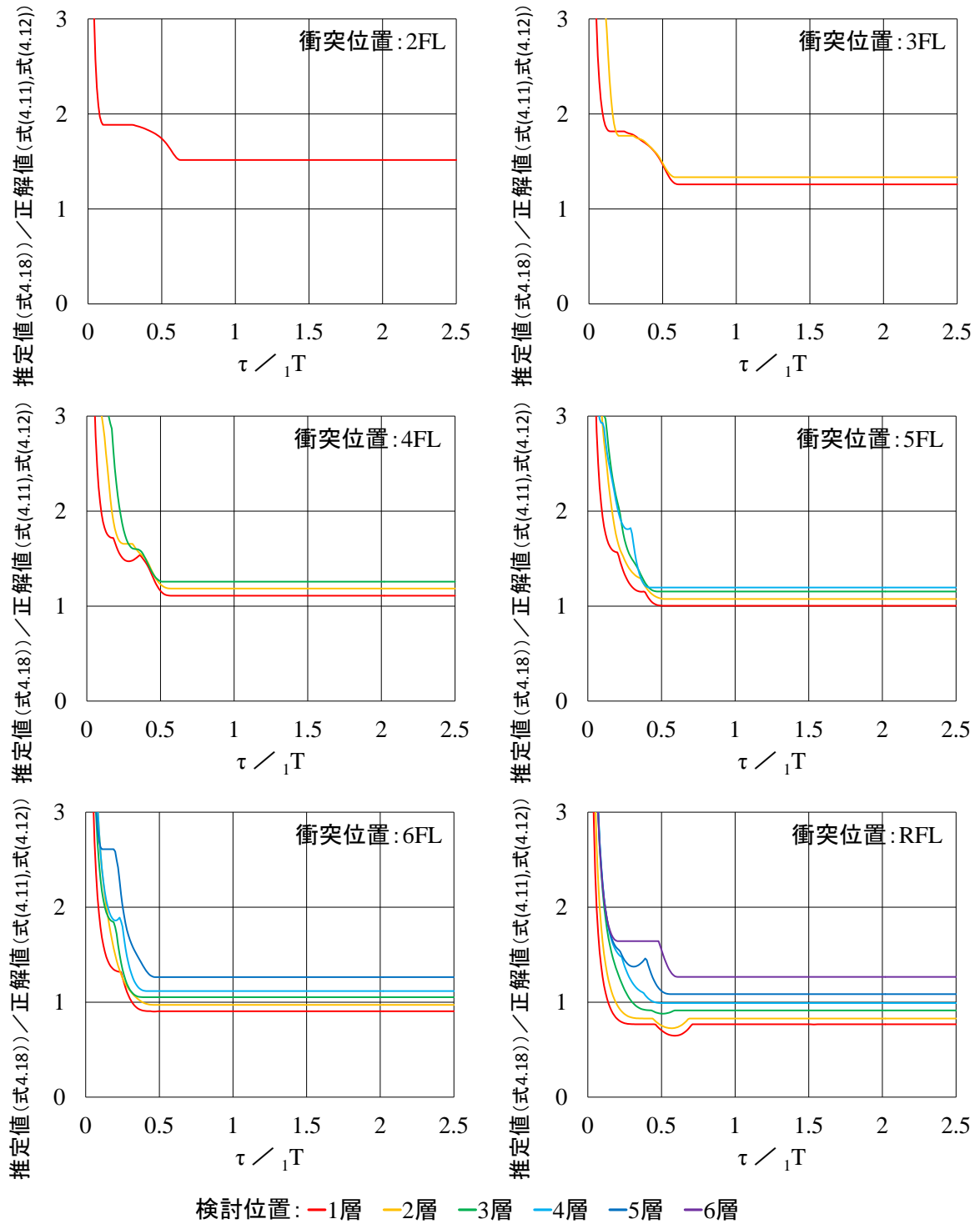


図 4.53 6 質点系モデルの応答推定精度

4.3.3 簡易評価手法の適用条件の検討

前項では、式(4.16)が良い推定精度を与えるためには条件「 $\tau/{}_1T \geq 0.5$ 」を満たす必要があり、同条件を満たさない場合には最大応答を過大評価することがわかった。3.4.3 項では、想定される船舶衝突時には、概ね $\tau/{}_1T \geq 0.5$ を満たすことを確認しているものの、 ${}_1T$ は建築物の層数 N に、 τ は船舶の総トン数 T_G にそれぞれ依存することに着目し、ここでは同条件を満足するための N と T_G との関係をより定量的に検討する。

3 章で定義した船舶衝突時衝撃外力を定める式(3.11)および式(3.12)に加え、3.2 節に示した船舶の排水量 m と総トン数 T_G との線形関係を式(4.19)として定式化し（係数 α は船種と積荷状況により異なり、分類 B、分類 D、分類 E それぞれの船舶に対し図 3.18、図 3.4、図 3.14 に示す値と定める）、また、建築物の 3 層および 6 層建築物の一次固有周期 ${}_1T$ は階高を 3.0 m として ${}_1T = 0.02H$ により求めることとすると、 $\tau/{}_1T$ は式(4.20)により表すことができる。同式が 0.5 以上になることが式(4.16)が精度良く最大応答を推定する条件であるため、同条件を満たす建築物層数と船舶総トン数との関係を求め、その総トン数の下限値を図 4.51 にプロットする（すなわち、同図のプロット以上の総トン数であれば、式(4.16)が精度良く最大応答を推定する条件を満たすこととなる）。同図では、3.4.3 項における検討と同様に、船舶の衝突速度 v は 2 m/s～6 m/s として、船舶の排水量は満載排水量、軽荷排水量およびその中間状態の排水量の 3 つとして、それぞれ設定している。また、2.2.1 項に述べたとおり、本研究では総トン数 100 ton 以上の船舶に対象を絞っているため、総トン数 100 トン未満の範囲には網掛けをした。

$$F = P_{cr} g = 1.17 T_G^{1/3} (0.82 T_G^{1/6} + 1)^3 g \quad (3.12) \text{再録}$$

$$\tau = mv / F \quad (3.13) \text{再録}$$

$$m = \alpha_m T_G \quad (4.19)$$

$$\tau/{}_1T = \left(\frac{\alpha_m T_G v}{1.17 T_G^{1/3} (0.82 T_G^{1/6} + 1)^3 g} \right) / 0.02(3.0N) \quad (4.20)$$

ここで、

F : 船舶の衝突時衝撃外力 [kN]

P_{cr} : 船首の破壊強度 [tf]

T_G : 船舶の総トン数 [ton]

g : 重力加速度 [m/s²]

τ : 衝撃外力の荷重作用継続時間 [s]

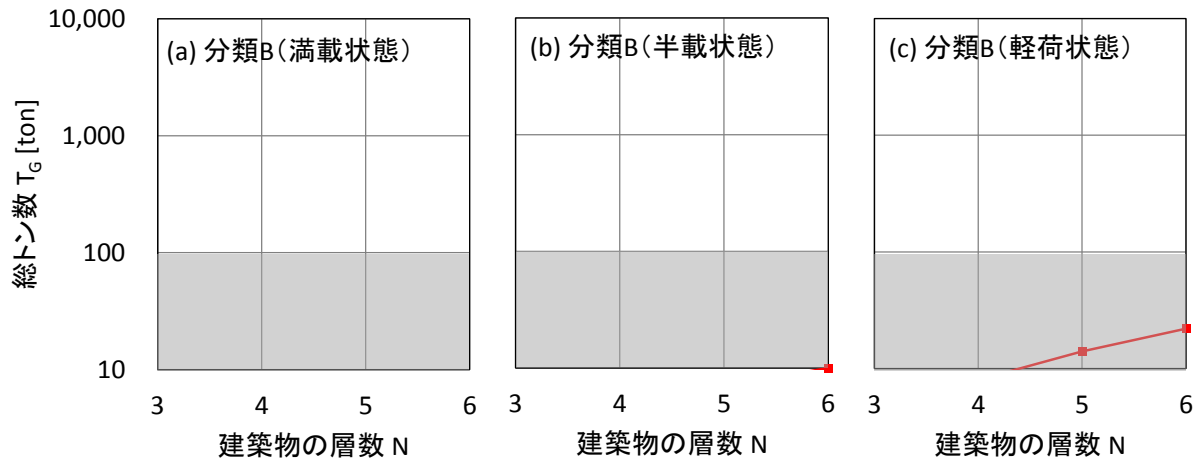
m : 船舶の質量（排水量）[t]

v : 船舶の衝突速度（津波流速に等しいとする）[m/s]

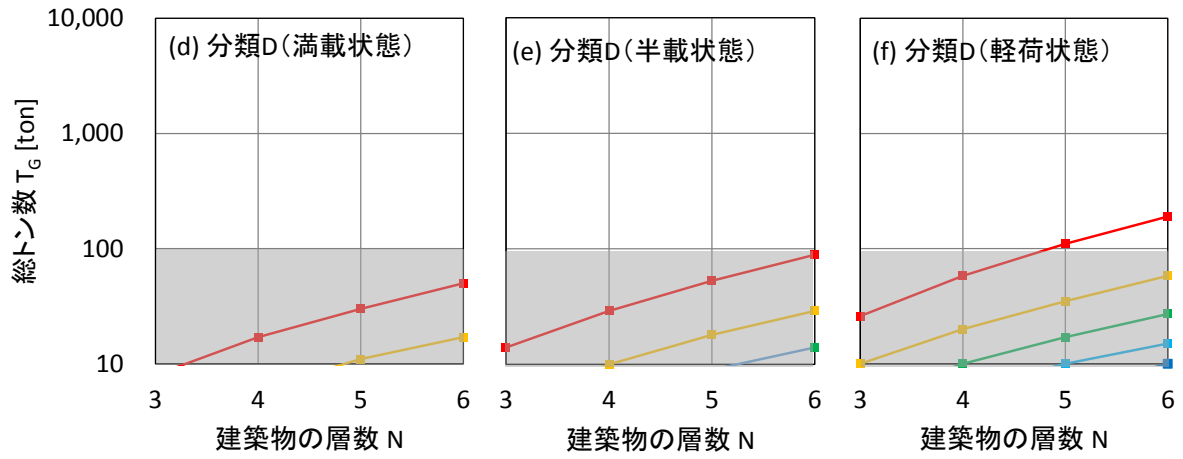
α_m : 船舶の総トン数から質量へ換算するための係数 [-]

N : 建築物の層数 [層]

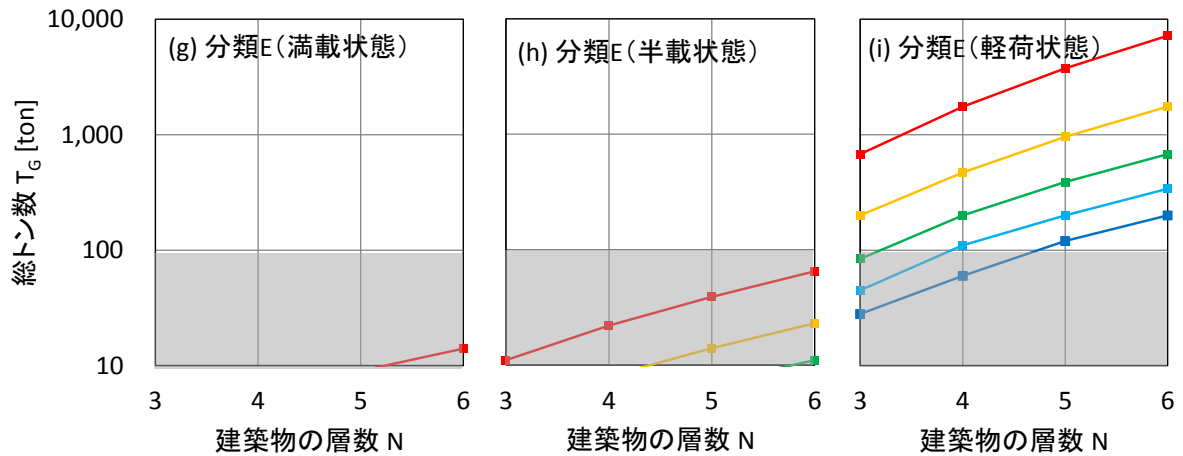
図 4.54 より、が軽荷状態の分類 D の船舶（一般貨物船に代表される船舶）および分類 E の船舶（撒積専用船に代表される船舶）に対しては、総トン数 100 ton 以上の範囲にプロットされるケースが存在する、すなわち式(4.15)が精度良く最大応答を推定可能な衝突船舶の総トン数の下限が総トン数 100 ton 以上に生じるものの（同図(f)および(i)）、その他の場合には、いずれも総トン数 100 ton 未満にプロットされる、すなわち式(4.16)の条件「 $\tau_1 T \geq 0.5$ 」を満たすことがわかる（同図(a)～(e), (g), (h)）。2011 年東北地方太平洋沖地震発災時の分類 D および分類 E の各船舶が概ね半載程度には積荷を有していたこと（3.4.3 項）を考慮すると、式(4.16)は津波来襲時に船舶が衝突し得る建築物の弾性応答推定に、広く適用することができることがわかる。



(a) 分類Bの船舶



(b) 分類Dの船舶



—■— $v=2\text{m/s}$ —■— $v=3\text{m/s}$ —■— $v=4\text{m/s}$ —■— $v=5\text{m/s}$ —■— $v=6\text{m/s}$

(c) 分類Eの船舶

* 総トン数 10 ton 以上のプロットを示す。

図 4.54 $\tau_1/T = 0.5$ となる建築物層数 N と船舶総トン数 T_G との関係

4.3.4 津波波力を考慮した応答評価手法

以上、船舶衝突時の衝撃外力に対する建築物の弾性応答の推定式として式(4.16)を提案した。同式は衝撃外力のみに対する応答の推定式であるが、4.1節に記したとおり、船舶衝突に対する建築物の応答を検討する上では、船舶の衝突以前から継続的に作用している津波波力を併せて考慮する必要がある。そこで、本章では建築物の弾性応答に着目していることを考慮し、両外力に対する建築物応答の推定式は、衝撃外力のみに対する応答推定式(4.16)に津波波力に対する応答を足し合わせた式(4.21)として求めることができる。なお、本研究で考慮する津波波力の算定手法については、次章に詳述する。

$$\delta_{\max_j} = \frac{F_{w_j}}{K_j} + \frac{F}{K_j} + i \frac{F}{\sum_{j=1}^N K_j} \quad (4.21)$$

ここで、

F_{w_j} : j 層以上に作用する津波波力の合計 [kN]

4.4 まとめ

本章では、津波漂流船舶衝突時の衝撃外力に対する建築物全体の弾性応答特性を検討し、その検討結果に基づき最大応答の簡易評価手法を提案した。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 衝撃外力に対する1質点系モデルの弾性応答は、荷重作用継続時間 τ と固有周期 T との比 τ/T によりその特性が異なること、実際の船舶衝突において一般に観測される条件 $\tau/T \geq 0.5$ の場合には最大応答は衝突終了以前の時刻 $t/T \approx 0.5$ で生起しその最大応答値は $2F/K$ に概ね一致すること、を明らかにした。
- 2) 衝撃外力に対する多質点系モデルの弾性応答についても同様に、荷重作用継続時間 τ と一次固有周期 $_1T$ との比 $\tau/_1T$ によりその特性が異なること、 $\tau/_1T \geq 0.5$ の場合には衝突位置より上階では高次モードが強く励起されるものの衝突位置以下では一次モードが卓越すること、最大応答が比較的大きい衝突位置以下の最大応答は「衝撃外力と外力レベルが等値な静的外力に対する層間変形」と「一次モード振幅」との和により概ね求まること、を明らかにした。
- 3) 上記の1)および2)の応答特性に基づき、最大応答層間変形の推定式(4.16)（津波波力も考慮する場合には式(4.21)）を導出し、同式が精度良く最大応答を推定する条件「 $\tau/_1T \geq 0.5$ 」を明らかにした。また、同条件を満足するための船舶規模と建築物層数との関係を検討したところ、想定され得る船舶と津波避難ビルとの衝突において、同式は広く適用可能であることを明らかにした。なお、上記条件を満足しない場合（すなわち $\tau/_1T < 0.5$ ）には最大応答は過大評価されるものの、設計実務上は安全側の評価となる。

本章では、津波波力および衝撃外力に対する建築物の弾性応答評価手法を提案した。次章では、両外力に対する弾塑性応答評価手法を提案する。

[参考文献]

- [4.1] 国土交通省：東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針，2011年11月

第 5 章

津波波力および衝撃外力に対する 弾塑性多質点系応答の簡易評価手法

5. 津波波力および衝撃外力に対する弾塑性多質点系応答の簡易評価手法

5.1 はじめに

本章では、津波漂流船舶の衝突に対する建築物全体の挙動を把握することを目的として、3章で設定した船舶衝突時衝撃外力に対する建築物の弾塑性応答特性を検討し、その検討結果に基づき、最大応答を簡便に推定する手法を提案する。

なお、前章における弾性系応答を対象とした検討では、津波波力および衝撃外力に対する応答は、津波波力のみに対する応答と、衝撃外力のみに対する応答との線形和として求まるため、両外力に対する応答はそれぞれ検討することができた。しかし、弾塑性系の衝撃外力に対する応答は、衝撃外力に先んじて作用する津波波力に対する応答履歴の影響を受けるため、本章では両外力を同時に考慮して、検討を行う。

5.2 弾塑性応答の導出と特性

本節では、津波波力および船舶衝突時衝撃外力に対する建築物の弾塑性応答特性について、前章と同様にせん断質点系モデルを用いて検討する。なお、応答特性の検討および最大応答推定手法の提案をそれぞれ行う本節（5.2 節）および次節（5.3 節）では、特定の建築物を対象とはせず、に一般的な議論を行い、続く 5.4 節において、津波避難ビルとして特定の建築物を想定し、その津波波力および衝撃外力に対する最大応答の把握と、5.3 節において提案する推定手法の適用性の検討を行う。

② 入力外力

入力外力については、(a) 衝撃外力のみを考慮する場合（津波波力を考慮しない場合）と、(b) 津波波力および衝撃外力の両外力を考慮する場合、の2ケースを設定する。

衝撃外力は、前章と同様に、3章で定義した矩形パルス波（図5.3）とし、前章の弾性応答特性の検討では、その荷重作用継続時間 τ と固有周期 T との τ/T のみをパラメータとして検討したが、本検討では、その一定荷重 F と建築物の降伏耐力 Q_y との比 F/Q_y もパラメータとして建築物の応答特性を検討する。

津波波力（上記ケース(b)の場合）は、文献^[5.1]に基づき静的外力として定め、その大きさ F_w は浸水深や建築物の幅、開口率等に依存するものの、ここでは建築物の降伏耐力 Q_y の半分に相当するとして設定し（すなわち $F_w = Q_y/2$ ）、質点に集中荷重として作用させる。なお、 $F_w = Q_y/2$ となる津波波力について、例えば5.4.2項のCase1では3層建築物に浸水深 $h = 3\text{m}$ の津波が作用する場合を想定しているが、この場合には津波波力による変形と降伏変形の比 $\delta_w/\delta_y = 0.5$ すなわち $F_w = Q_y/2$ となっており、現実的に想定し得る設定であることがわかる。津波波力 F_w が $Q_y/2$ を上回ることも十分想定され得るが、その場合には比較的衝突可能性が高い総トン数 100 ton～500 ton 程度の船舶（2.4.3 項）の衝撃外力が建築物に与える影響が津波波力と比べて小さくなるため、衝撃外力に着目する本検討においては、 $F_w = Q_y/2$ として設定した。

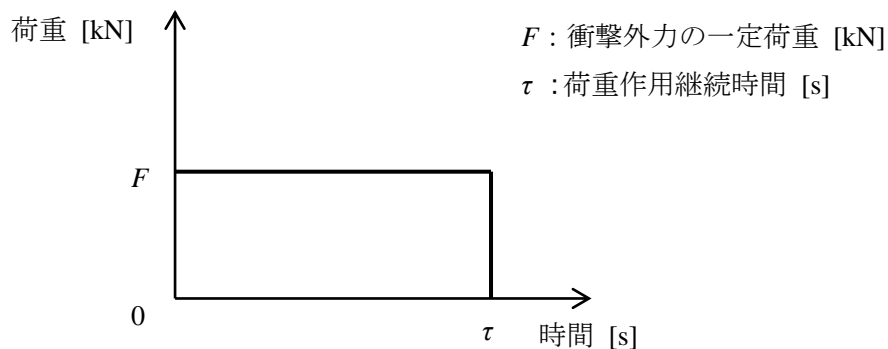


図 5.3 3章で定義した船舶衝突時の衝撃外力

③ 数値積分法

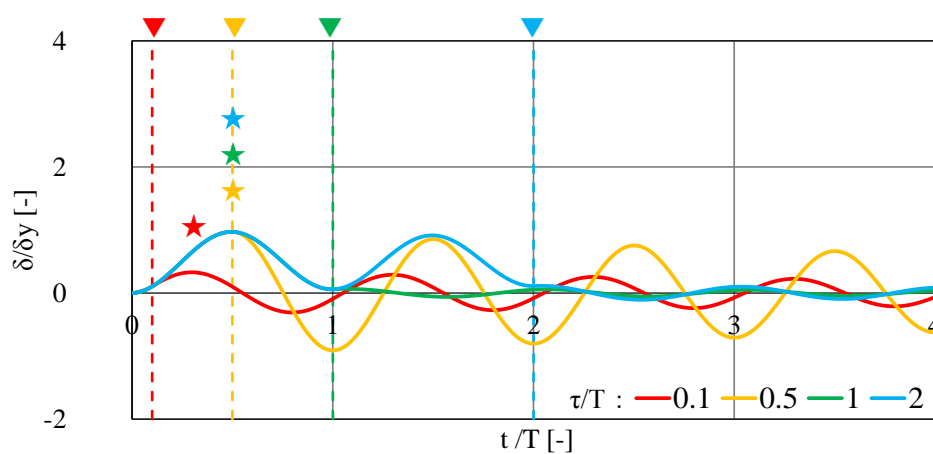
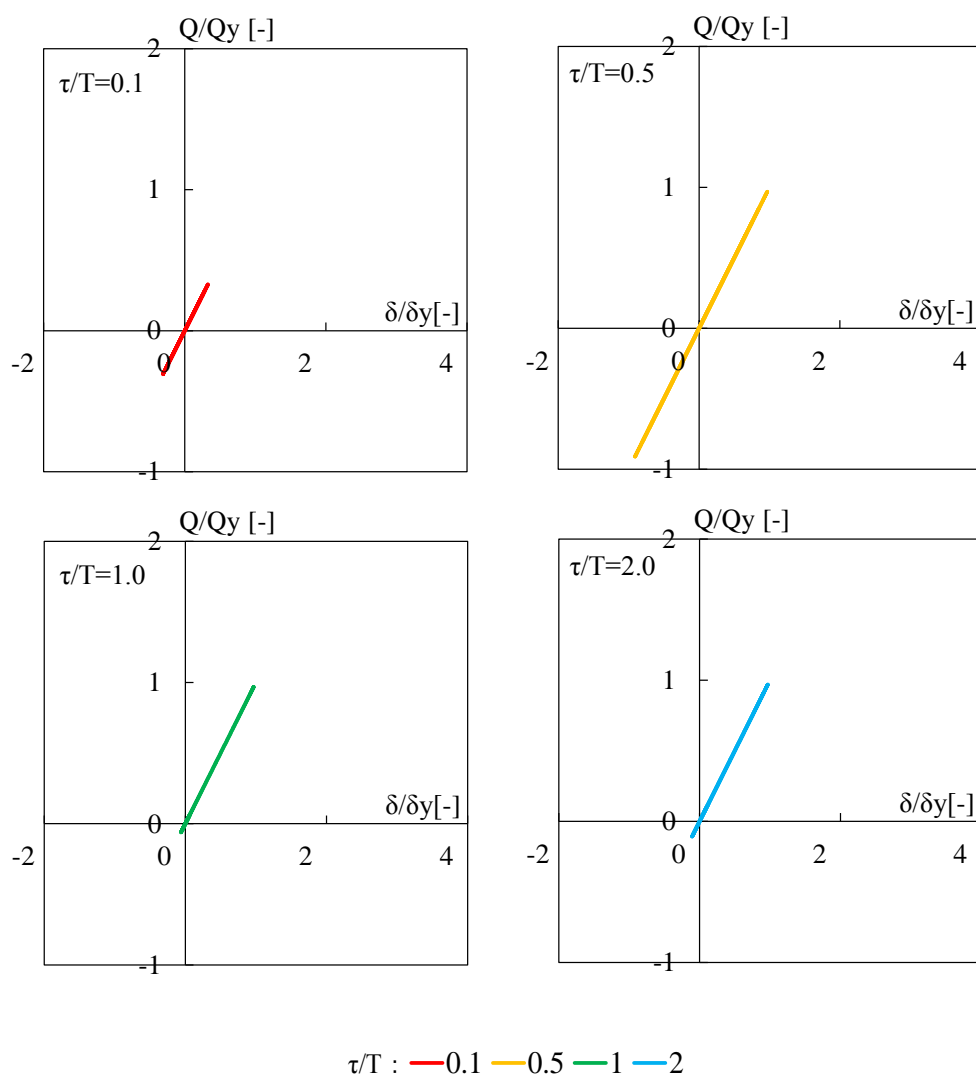
数値積分法は Newmark- β 法 ($\beta=1/6$) を用い、積分時間刻み $\Delta t/T = 0.001$ とした。減衰は瞬間剛性比例型とし、弾性剛性に対する減衰定数は 0.02 と設定する。

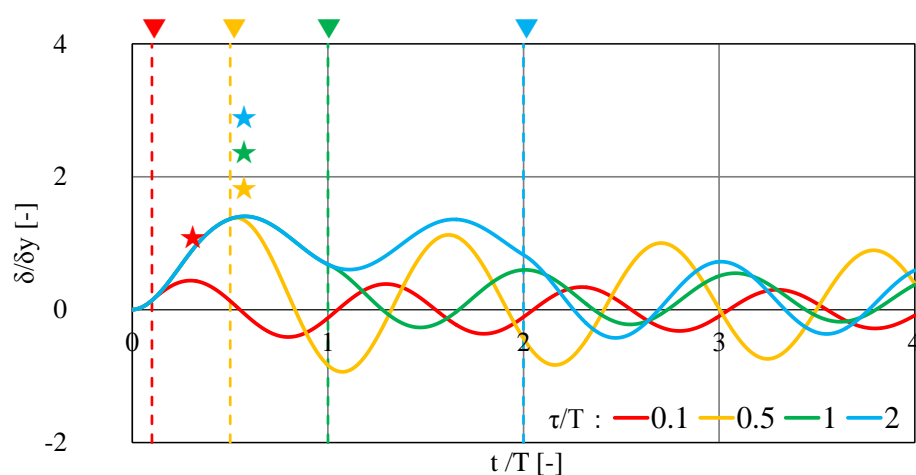
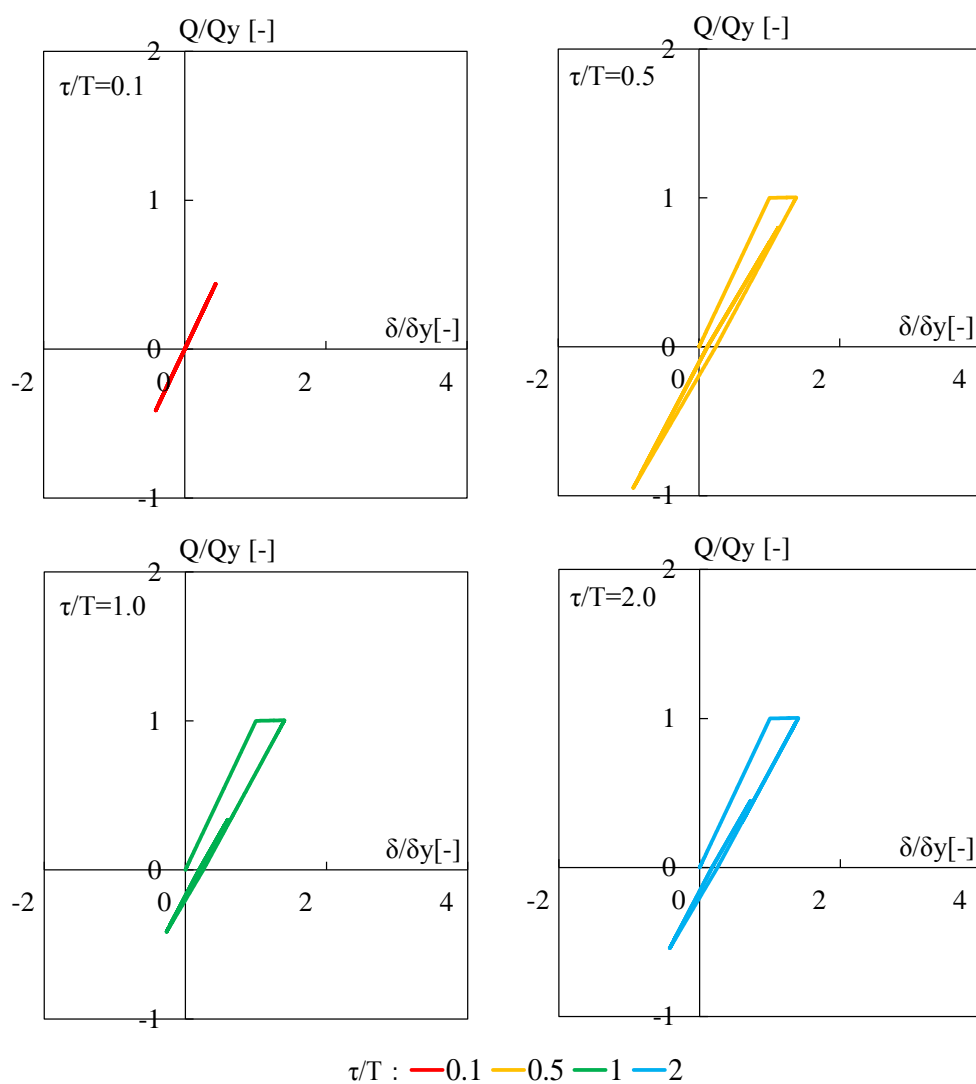
(2) 応答特性の検討

(a) 衝撃外力のみに対する応答

まず、1 質点系弾塑性モデルについて、衝撃外力のみが作用する場合の応答特性を検討する。同モデルの衝撃外力に対する時刻歴応答波形および荷重変形関係について、衝撃外力の一定荷重を $F/Q_y = 0.5, 0.75, 1.0$ として、荷重作用継続時間を $\tau/T = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0$ として建築物に入力したときの結果を図 5.4～図 5.9 に示す。応答時刻歴波形（図 5.4, 図 5.6, 図 5.8）では、横軸には建築物の固有周期 T により基準化した時刻 t/T を、縦軸には降伏時の変形 δ_y により基準化した応答 δ/δ_y （すなわち塑性率）を、それぞれとり、衝突終了時刻を▼により、最大応答生起時刻を★により、それぞれ示す。荷重変形関係（図 5.5, 図 5.7, 図 5.9）では、横軸には δ_{\max}/δ_y を、縦軸には建築物の降伏耐力 Q_y により基準化したせん断力 Q/Q_y を、それぞれとっている。なお、 $F/Q_y = 0.5$ の場合（図 5.4 および図 5.5）は、 $\tau/T \geq 0.5$ の場合には最大弾性応答変形 δ_{\max} が降伏変形 δ_y と一致し、応答が弾塑性領域には至らないものの、ここでは弾塑性応答との比較のために図示した。

まず、 $F/Q_y = 0.5$ の場合（図 5.4 および図 5.5）については、上述のとおり建築物は弾性応答となっており、 $\tau/T = 0.5, 1.0, 2.0$ の場合の最大応答 $2F/K$ が $\delta/\delta_y \approx 1.0$ （減衰があるため厳密に 1.0 とはならない）と一致していることがわかる。一方、 $F/Q_y = 0.75, 1.0$ の場合（図 5.6～図 5.9）には、 $\tau/T = 0.5, 1.0, 2.0$ の場合において建築物は塑性化しており、特に $F/Q_y = 1.0$ かつ $\tau/T = 1.0, 2.0$ の場合は特に最大応答変形 δ_{\max}/δ_y は 5 以上と大きな値に達していることがわかる。また、最大応答生起時刻（図中の★）に着目すると、 $F/Q_y = 0.75$ の場合には、弾性応答の最大応答生起時刻 $t/T \approx 0.5$ よりもやや遅れて $t/T \approx 0.6$ 程度で最大応答が生起し、 $F/Q_y = 1.0$ の場合には衝突終了時刻（図中の▼）程度まで応答が増大していることがわかる。


 図 5.4 1 質点系モデルの時刻歴応答変形 ($F/Q_y = 0.5$)

 図 5.5 1 質点系モデルの荷重変形関係 ($F/Q_y = 0.5$)


 図 5.6 1 質点系モデルの時刻歴応答変形 ($F / Q_y = 0.75$)

 図 5.7 1 質点系モデルの荷重変形関係 ($F / Q_y = 0.75$)

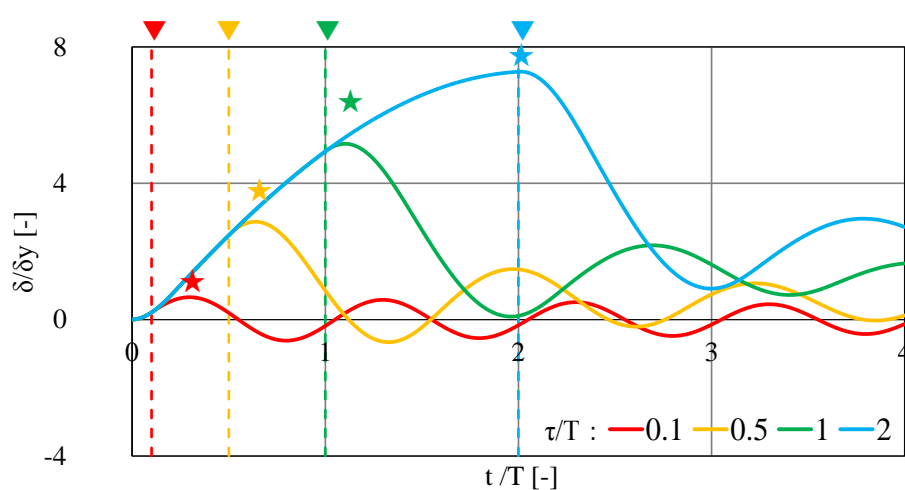


図 5.8 1 質点系モデルの時刻歴応答変形 ($F/Q_y = 1.0$)

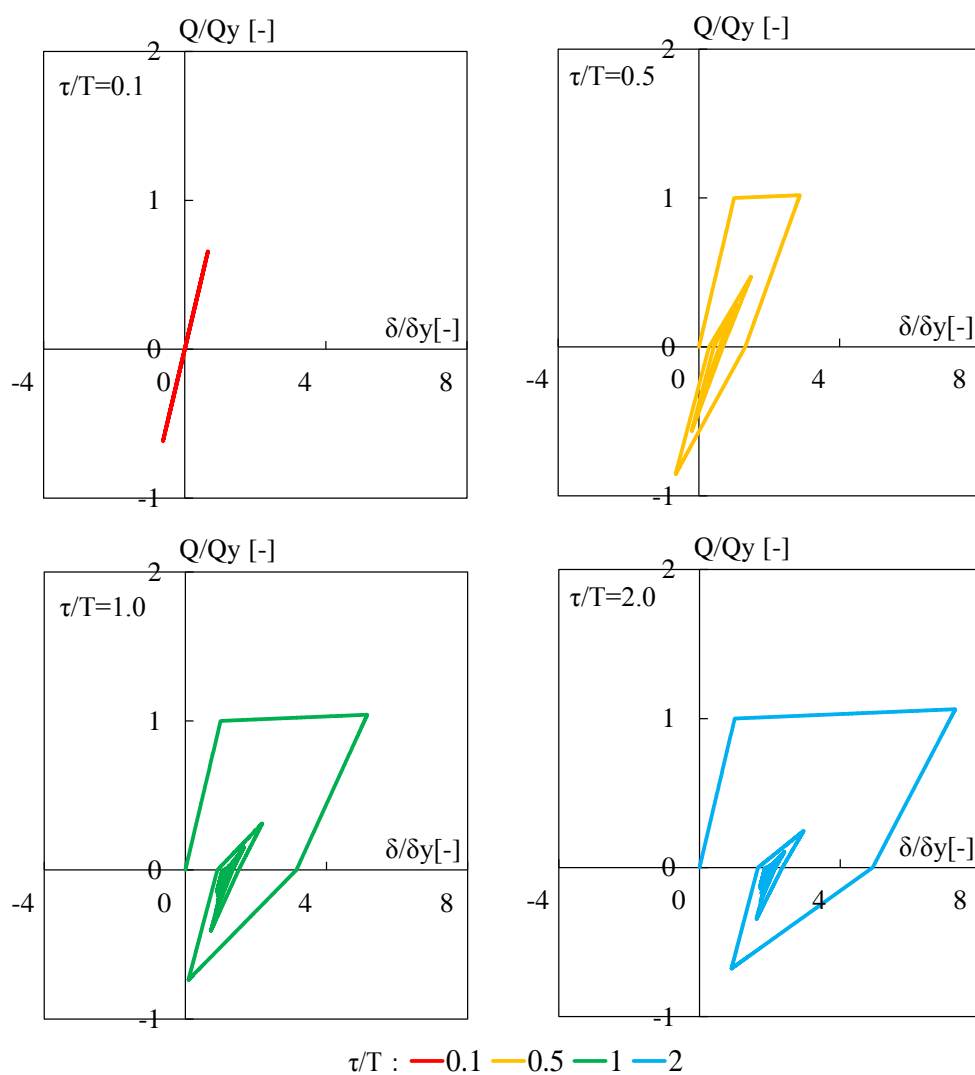


図 5.9 1 質点系モデルの荷重変形関係 ($F/Q_y = 1.0$)

衝撃外力に対する最大応答 δ_{\max}/δ_y についてより詳細な傾向を把握するべく、図 5.10 には、衝撃外力を $F/Q_y = 0.5 \sim 1.1$ として設定し、 τ/T を変化させて 1 質点系モデルに入力したときの δ_{\max}/δ_y の結果を示す。同図より、最大応答 δ_{\max}/δ_y は τ/T の増大と共に増加するものの、最終的にはある一定値に収束することがわかる。その収束値ならびに δ_{\max}/δ_y が収束するときの τ/T の値は、 F/Q_y の増大とともに増加し、 $F/Q_y = 0.8$ 程度までは $\delta_{\max}/\delta_y = 2.0$ 程度にとどまっているものの、それ以上の範囲ではさらに顕著に増大することがわかる。これは、 F/Q_y が 1.0 に近づくと、外力 F と復元力 Q_y との差 ($F - Q_y$) が 0 に近づき、すなわち質点の変形を低減させる力が 0 に近づき、さらに $F/Q_y > 1.0$ ($F - Q_y > 0$) となると、質点は変形が増大する方向に加速度運動するため、外力が衝突の終了まで変形が増大し続けることが要因である。

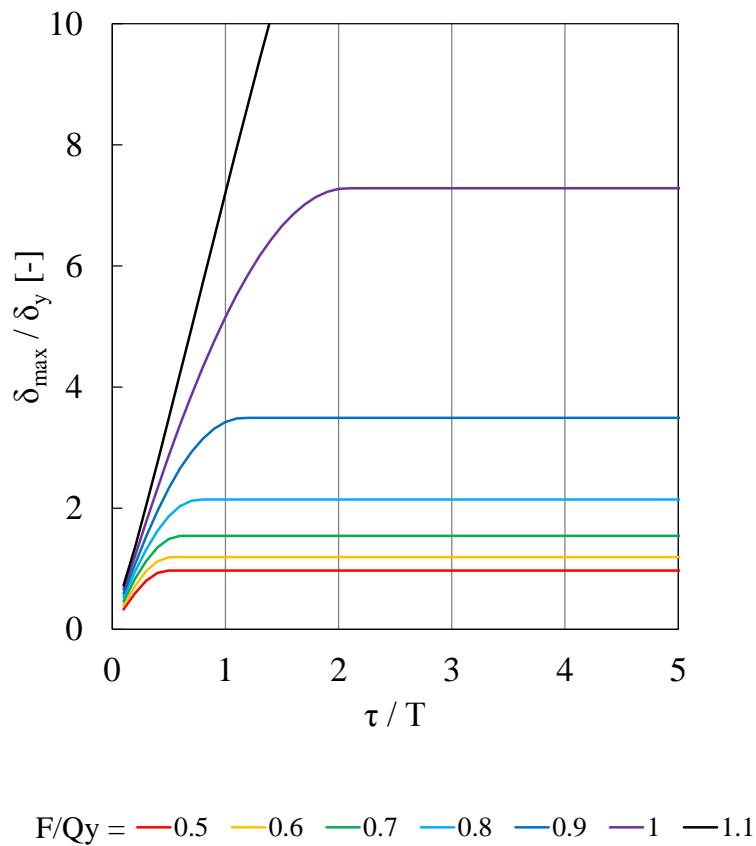
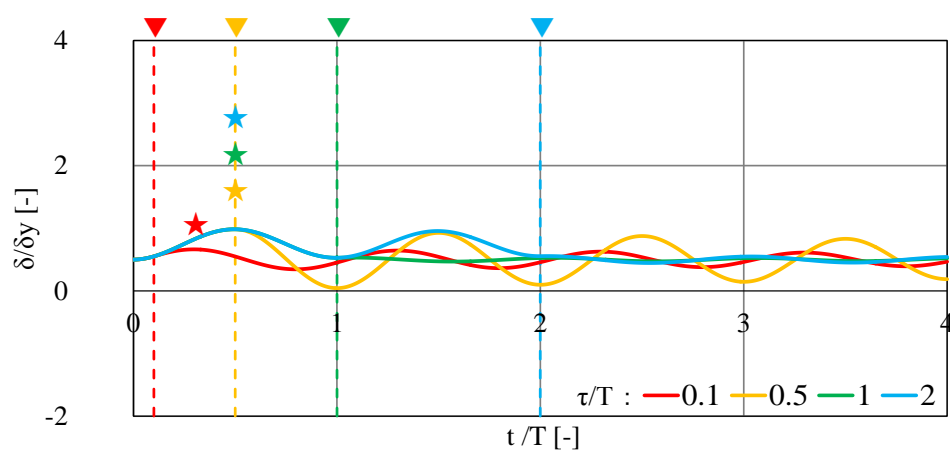
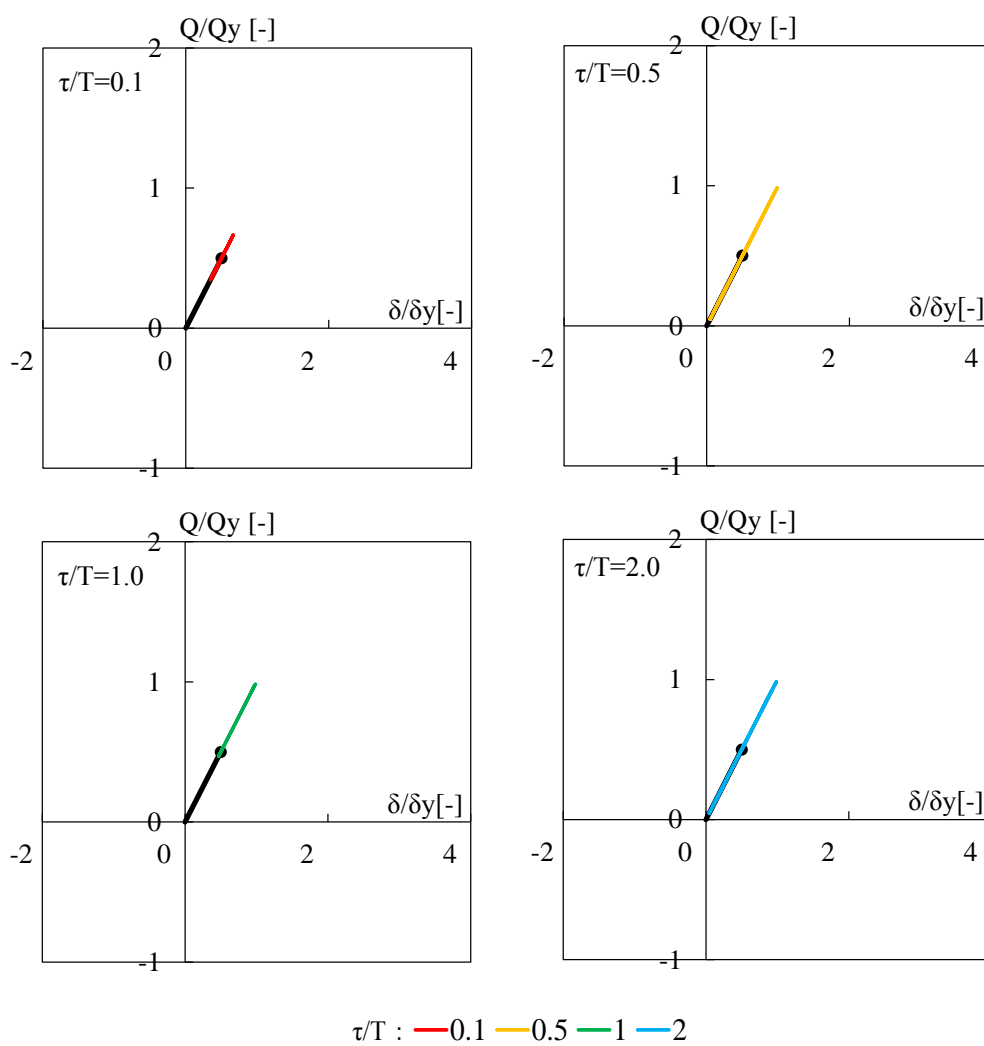


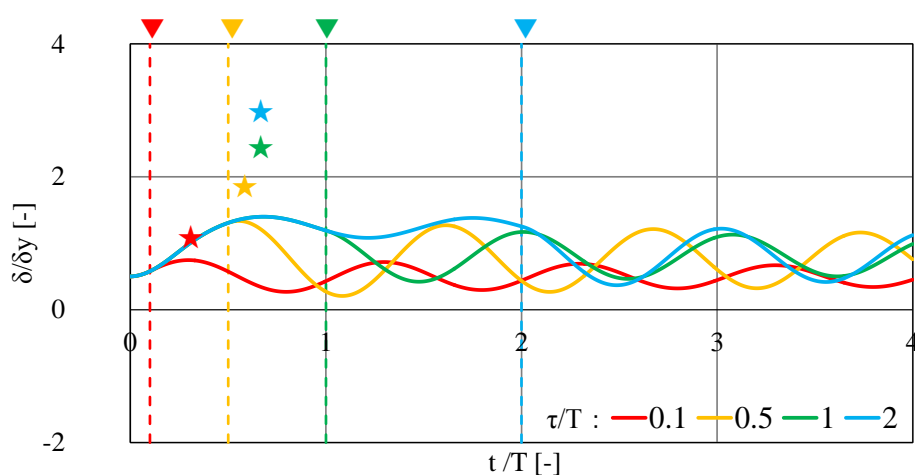
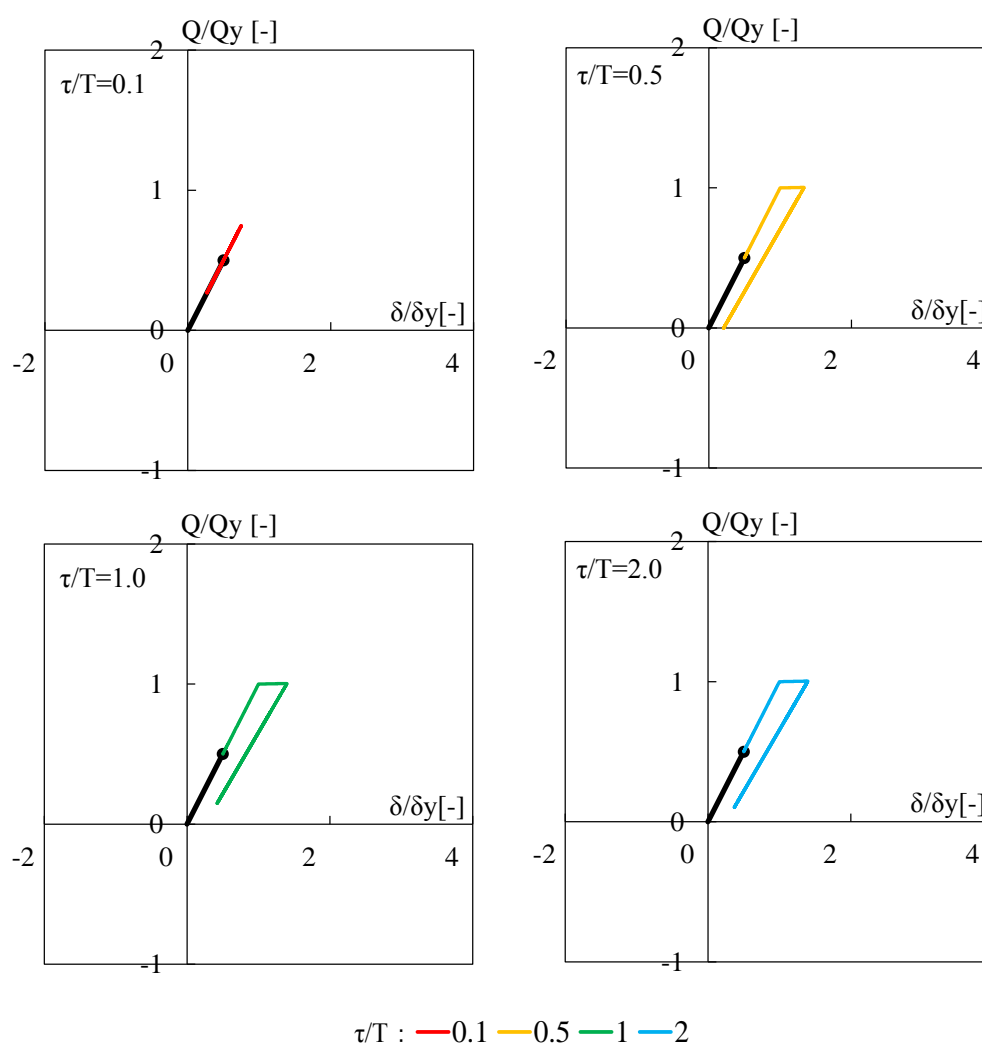
図 5.10 1 質点系モデルの τ/T と δ/δ_y の関係

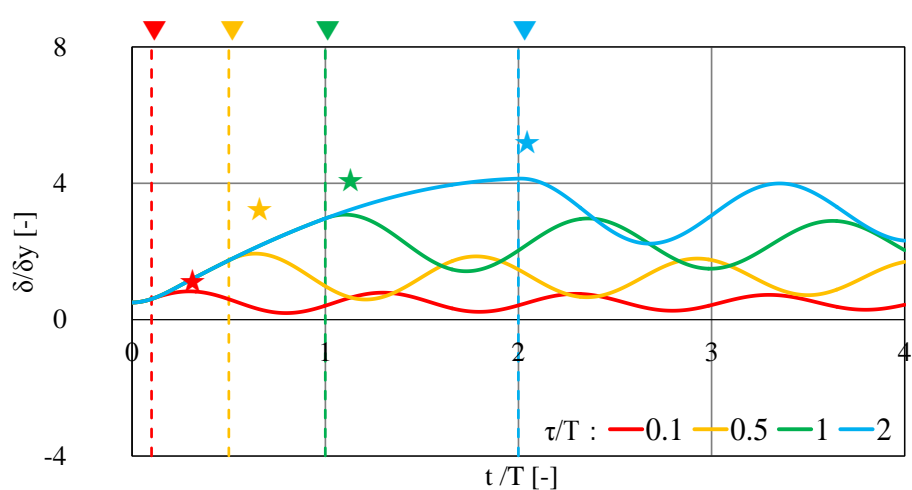
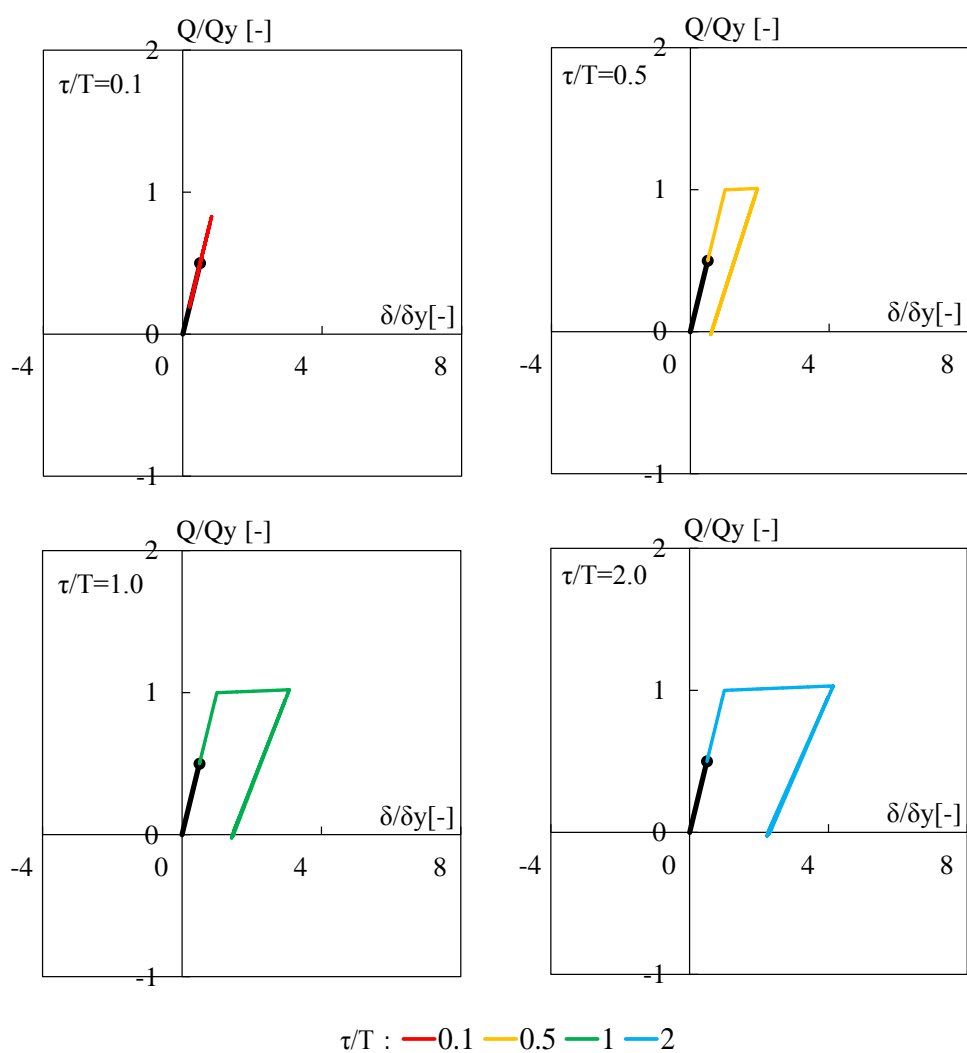
(b) 津波波力および衝撃外力に対する応答

次に、衝撃外力に加え、それに先んじて作用する津波波力を考慮した場合における 1 質点系モデルの弾塑性応答を検討する。同モデルの衝撃外力に対する時刻歴応答波形および荷重変形関係について、(1)に設定した津波波力 F_w ($F_w / Q_y = 0.5$) 作用下における結果を図 5.11～図 5.16 に示す。各図では、衝撃外力の一定荷重は $F/(Q_y - F_w) = 0.5, 0.75, 1.0$ として (すなわち $F/Q_y = 0.25, 0.375, 0.5$)、荷重作用継続時間は $\tau/T = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0$ として、それぞれ設定しており、復元力特性 (図 5.12, 図 5.14, 図 5.16) では、黒線により津波波力による変形履歴を、黒丸により静的外力として設定した津波波力と復元力の釣り合い点を、それぞれ示している。なお、「(a) 衝撃外力のみに対する応答」における $F/Q_y = 0.5$ の場合と同様に、 $F/(Q_y - F_w) = 0.5$ ($F/Q_y = 0.25$) の場合 (図 5.11 および図 5.12) は、応答は弾塑性領域には至らない。

各図より、まず、 $F/(Q_y - F_w) = 0.5$ の場合 (図 5.11 および図 5.12) については、上述のとおり建築物は弾性応答となり、 $\tau/T = 0.5, 1.0, 2.0$ の場合には最大応答 $\delta_{\max}/\delta_y \approx 1.0$ を確認することができる。一方、 $F/(Q_y - F_w) = 0.75, 1.0$ の場合については、 $\tau/T = 0.5, 1.0, 2.0$ の場合において建築物は塑性化し、「(a) 衝撃外力のみに対する応答」と同様に、特に $F/(Q_y - F_w) = 1.0$ 、 $\tau/T = 1.0, 2.0$ の場合において最大応答変形 δ_{\max}/δ_y は 3 以上と大きな値に達していることがわかる。また、最大応答生起時刻 (図中の★) についても、 $F/(Q_y - F_w) = 0.75$ の場合には、弾性応答の最大応答生起時刻 $t/T \approx 0.5$ よりもやや遅れて $t/T \approx 0.6$ 程度で最大応答が生起し、 $F/(Q_y - F_w) = 1.0$ の場合には衝突終了時刻 (図中の▼) 程度まで応答が増大していることがわかる。


 図 5.11 1 質点系モデルの時刻歴応答変形 ($F/(Q_y - F_w) = 0.5$)

 図 5.12 1 質点系モデルの荷重変形関係 ($F/(Q_y - F_w) = 0.5$)


 図 5.13 1 質点系モデルの時刻歴応答変形 ($F/(Q_y - F_w) = 0.75$)

 図 5.14 1 質点系モデルの荷重変形関係 ($F/(Q_y - F_w) = 0.75$)


 図 5.15 1 質点系モデルの時刻歴応答変形 ($F/(Q_y - F_w) = 1.0$)

 図 5.16 1 質点系モデルの荷重変形関係 ($F/(Q_y - F_w) = 1.0$)

津波波力および衝撃外力に対する最大応答 δ_{\max}/δ_y について、 $F/(Q_y - F_w) = 0.5 \sim 1.1$ の場合について検討すると（図 5.17）、「(a) 衝撃外力のみに対する応答」（図 5.10）と同様に、最大応答 δ_{\max}/δ_y は τ/T の増大と共に増加するものの、最終的にはある一定値に収束し、その収束値ならびに δ_{\max}/δ_y が収束するときの τ/T の値は $F/(Q_y - F_w)$ の増大とともに増加する傾向が得られた。ただし、同図では $F/Q_y = 0.9$ 程度まで $\delta_{\max}/\delta_y = 2.0$ 程度にとどまるなど、図 5.10 に示す結果と比べて比較的小さいが、これは、両図では $F/(Q_y - F_w)$ （図 5.17）と F/Q_y （図 5.10）が対応しているものの（共に $0.5 \sim 1.1$ ）、図 5.17 では建築物に動的応答を生じさせる衝撃外力 F の値が比較的小さい（ここでは $F_w = Q_y/2$ と設定しているため図 5.10 の半分の値）ことが要因である。

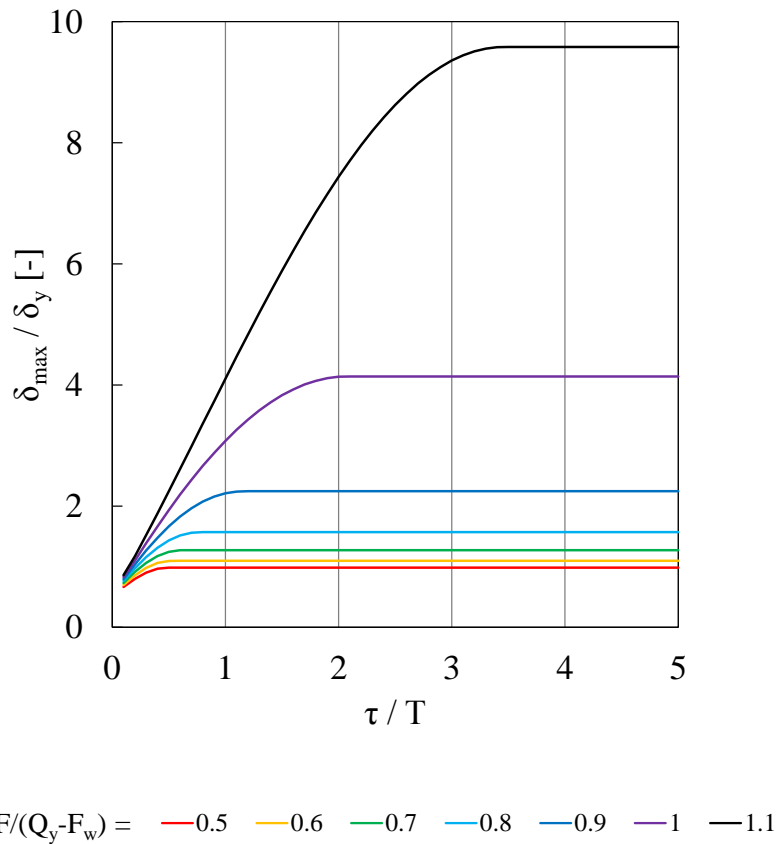


図 5.17 1 質点系モデルの τ/T と δ/δ_y の関係

5.2.2 多質点系応答

次に、本項では、弾塑性多質点系モデルを対象とし、その応答特性の検討を行う。

(1) 解析緒元

① 解析対象モデル

解析対象モデルは、各階等質量、階高 3 m の多質点系モデルとし、質点数は、前章と同様に、津波避難ビルの規模として一般的な中低層建築物を想定し 3 質点系および 6 質点系とする。各層のせん断ばねの復元力特性は、前項と同様に図 5.18 に示すバイリニア型とし、その各層の降伏点剛性 $K_{y,j}$ は、建築物が高さ方向に直線一次モード形状となるように設定する。また、各層の層間変形 $\delta_{y,j}$ は各階で等しいとし、すると各層の降伏耐力 $Q_{y,j}$ は必然的に $Q_{y,j} = K_{y,j} \delta_{y,j}$ として定まる。

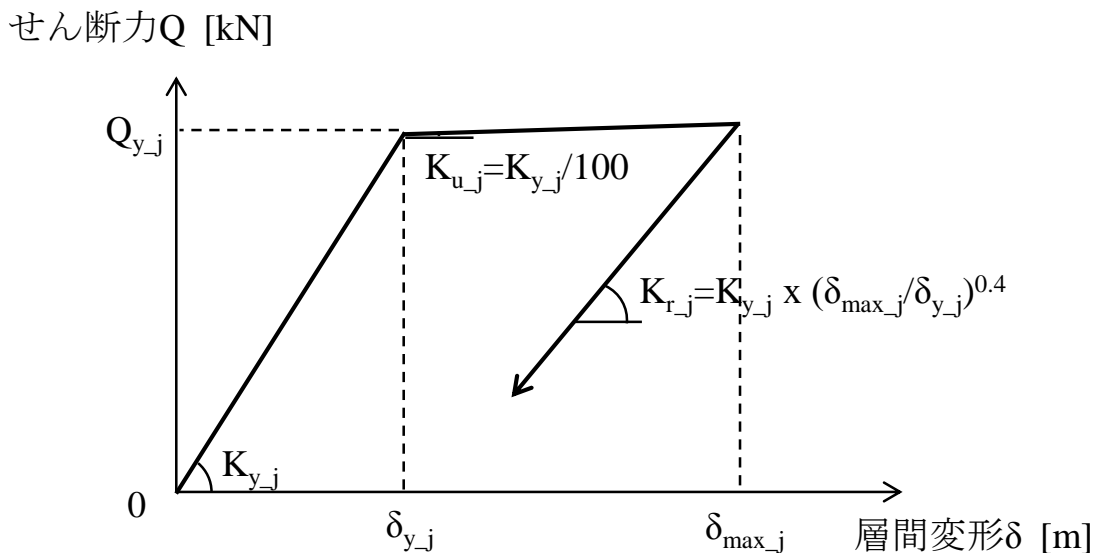


図 5.18 j 層せん断ばねのバイリニア型復元力特性

② 入力外力

入力外力については、前項と同様に、(a) 衝撃外力のみを考慮する場合（津波波力を考慮しない場合）と、(b) 津波波力および衝撃外力の両外力を考慮する場合、の 2 ケースを設定する。

衝撃外力は、前章と同様に矩形パルス波（図 5.3）とし、その一定荷重 F と建築物の降伏耐力 Q_y との比 F/Q_y 、ならびに、荷重作用継続時間 τ と建築物の一次固有周期 ${}_1T$ との比 $\tau/{}_1T$ 、の二つをパラメータとして建築物の応答特性を検討する。

津波波力は（上記ケース(b)の場合）、文献^[5.1]に基づき三角形波圧分布を仮定し、その波圧を高さ方向に積分することで求まる波力を各質点に作用させる。津波の浸水深 h は、3 質点系に対し

ては建築物の1層分の高さ(3 m)に、6質点系に対してはその2層分の高さ(6 m)に、それぞれ等しいとして設定し、同文献に定める水深係数 $a = 2.0$ とする(図5.19)。また、その大きさ f_w は、建築物の幅や開口率等に依存するものの、ここでは2 FL以上の波力の総和が建築物の降伏耐力の半分に相当するように設定し(すなわち $F_{w-1} = \sum f_{w-j} = Q_{y-1}/2$)、質点に集中荷重として作用させる。なお、 $F_{w-1} = Q_{y-1}/2$ となるように津波波力を設定したのは、1質点系を対象とした検討と同様に、その設定が現実的に想定し得ることに加え、津波波力 F_w をさらに大きく設定すると、本検討において着目する船舶の衝撃外力の影響が津波波力と比べて小さくなることを考慮したためである。

なお、実際の船舶と建築物との衝突においては、船舶の衝突位置は浸水深および船舶規模に依存するが、ここでは衝撃外力に対する建築物の応答性状の一般的な議論のため、衝突位置は任意階の床レベルとして設定した。

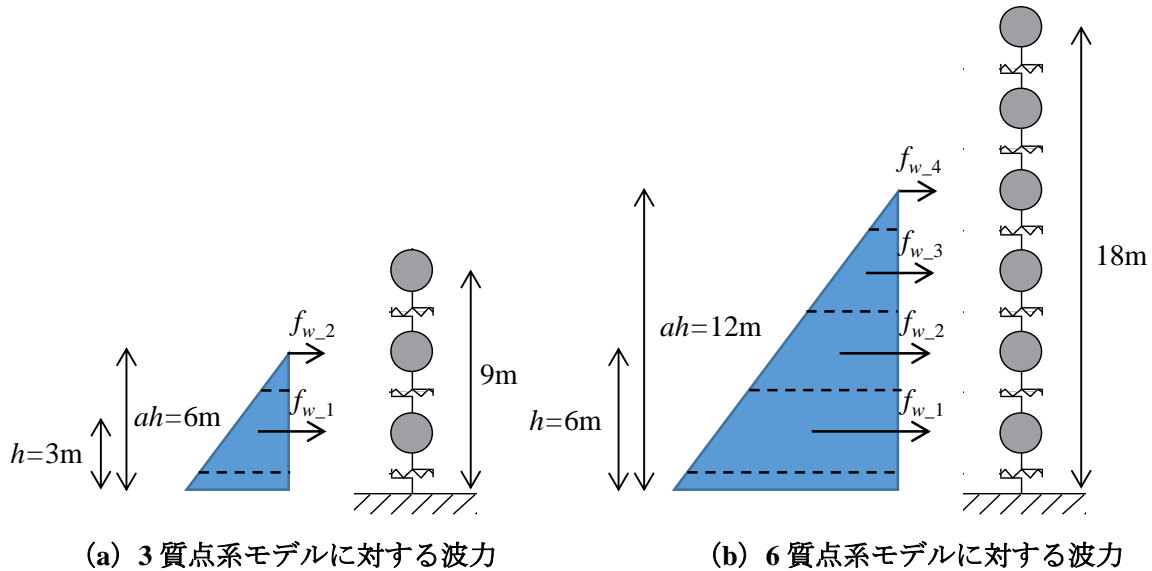


図 5.19 各層に作用させる津波波力

③ 数値積分法

数値積分法の前項と同様に設定し、積分時間刻みは $\Delta t_1 T = 0.001$ 、減衰定数は弾性一次モードに対して0.02として設定する。

(2) 応答特性の検討

(a) 衝撃外力のみに対する応答

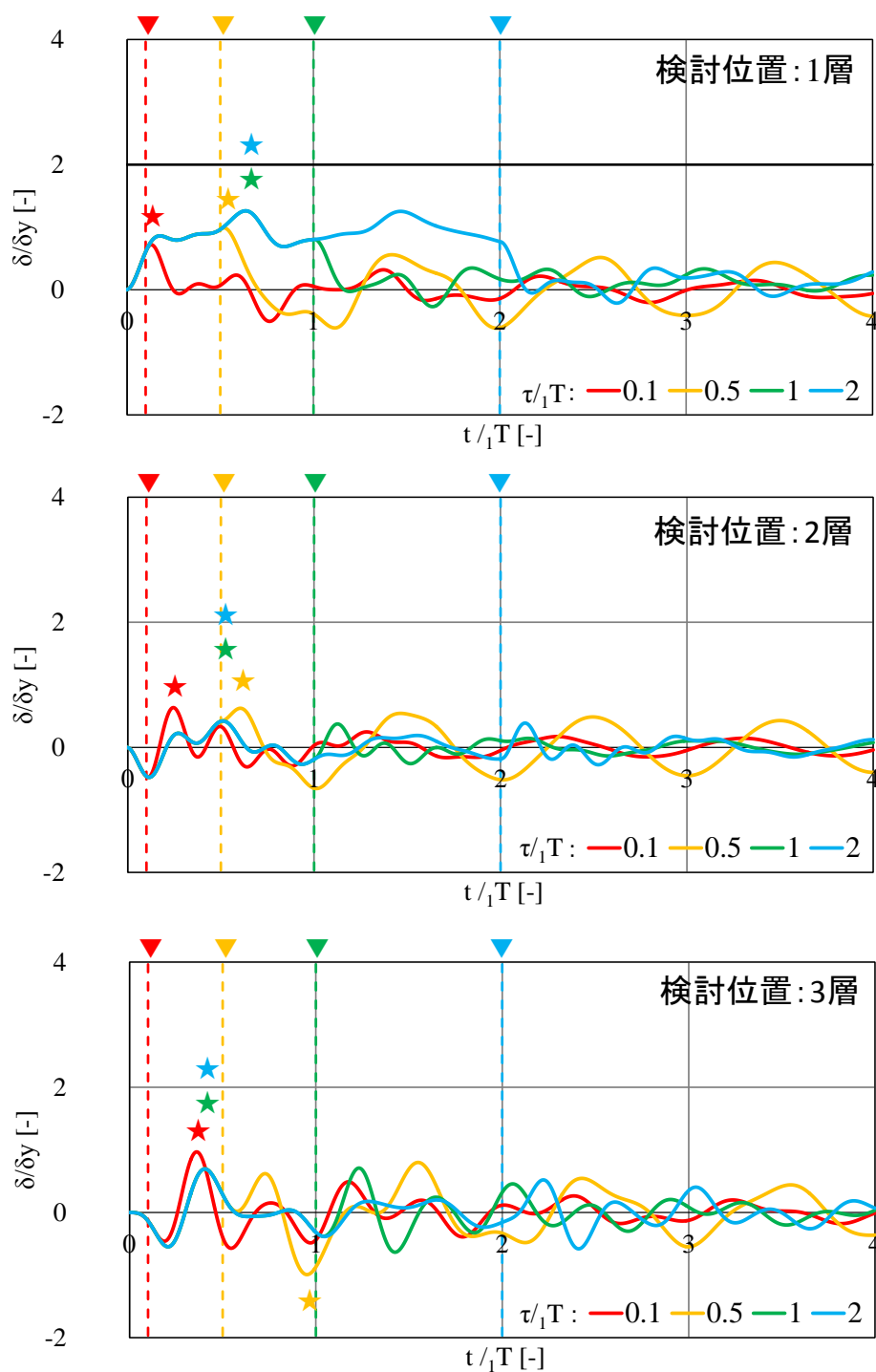
まず、3 質点系弾塑性モデルについて、衝撃外力のみが作用する場合の応答特性を検討する。同モデルの衝撃外力に対する時刻歴応答波形および荷重変形関係（応答が最大となる衝突直下階のみ）について、応答が塑性領域に至るよう衝撃外力の荷重を $F/Q_{y,i} = 0.75$ (i : 衝突質点位置) として設定した場合を例に、図 5.20～図 5.25 に示す。なお、衝突直下層の $F/Q_{y,i}$ ($=0.75$) の値を定めると、それより下階における F/Q_y の値は、3 FL に衝突する場合 ($F/Q_{y,2}=0.75$) は $F/Q_{y,1}=0.625$ 、RFL に衝突する場合 ($F/Q_{y,3}=0.75$) は $F/Q_{y,1}=0.375$ 、 $F/Q_{y,2}=0.45$ 、とそれぞれ必然的に定まり（表 5.1）、下階ほど剛性が大きい（上述のとおり直線一次モード形状となるよう剛性を定めているため）本モデルでは、下階ほど F/Q_y が小さい値となる。

各図より、衝撃外力のみに対する 3 質点系の応答は衝突直下階において最大となり、2 FL に衝突する場合には $\tau_1 T = 1.0, 2.0$ の場合において、3 FL もしくは RFL に衝突する場合には $\tau_1 T = 0.5, 1.0, 2.0$ の場合において、同階に塑性化が生じたことがわかる。一方、衝突直下階以外の層においては、いずれの応答についても弾性範囲内にとどまった。また、衝突直下階の最大応答生起時刻（図中の★）は、前項の 1 質点系を対象とした検討と同様に、弾性応答における時刻 $\tau_1 T \approx 0.5$ よりやや遅れ、概ね $\tau_1 T \approx 0.6$ となった。

表 5.1 衝撃外力のみに対する 3 質点系の各層の F/Q_y の設定値 ($F/Q_{y,i} = 0.75$)

検討位置	F/Q _y		
	衝突位置: 2FL	衝突位置: 3FL	衝突位置: RFL
3層	0	0	0.75
2層	0	0.75	0.45
1層	0.75	0.625	0.375

* 網掛けは衝突直下階を、赤字は応答が最大となる層を、それぞれ示す。


 図 5.20 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：2FL, $F/Q_{y-1}=0.75$ ）

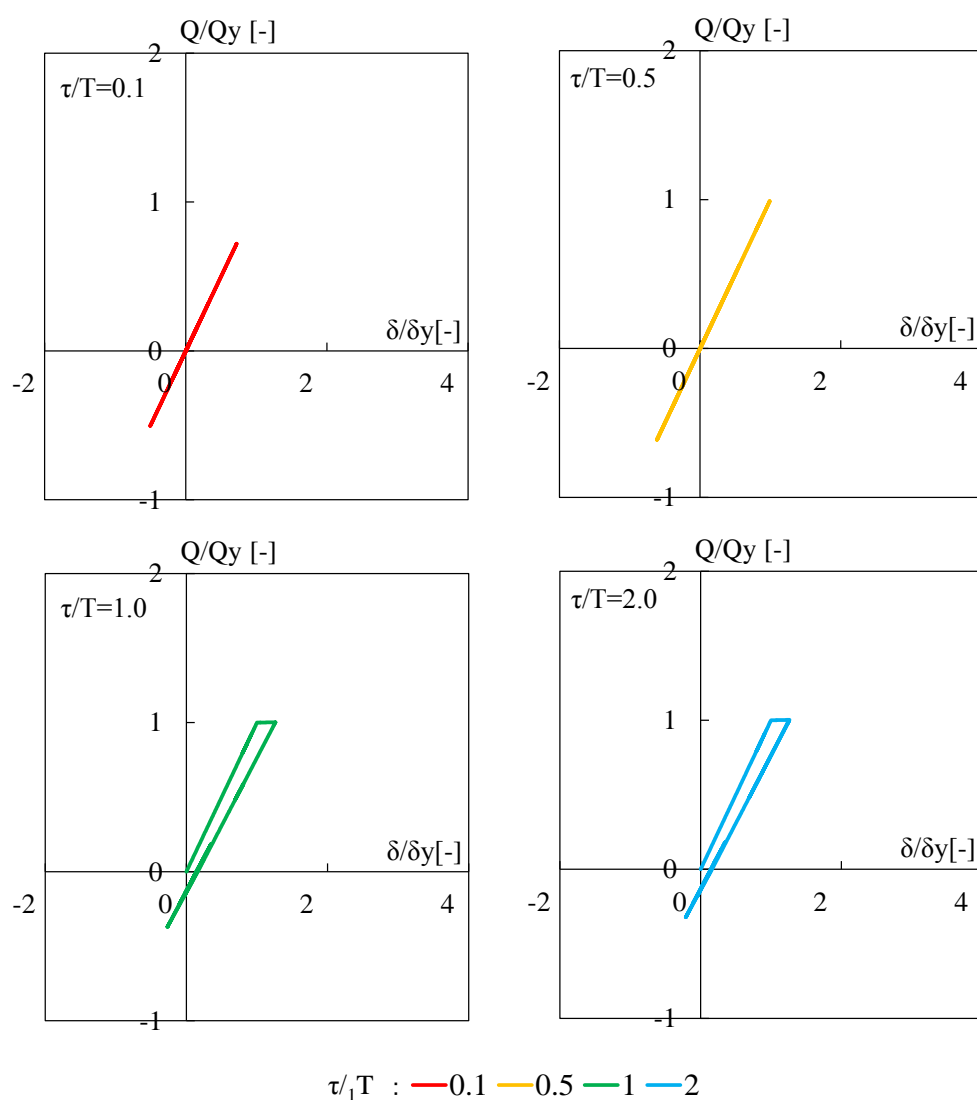


図 5.21 3 質点系モデルの 1 層の荷重変形関係 (衝突位置 : 2FL, $F/Q_{y-1}=0.75$)

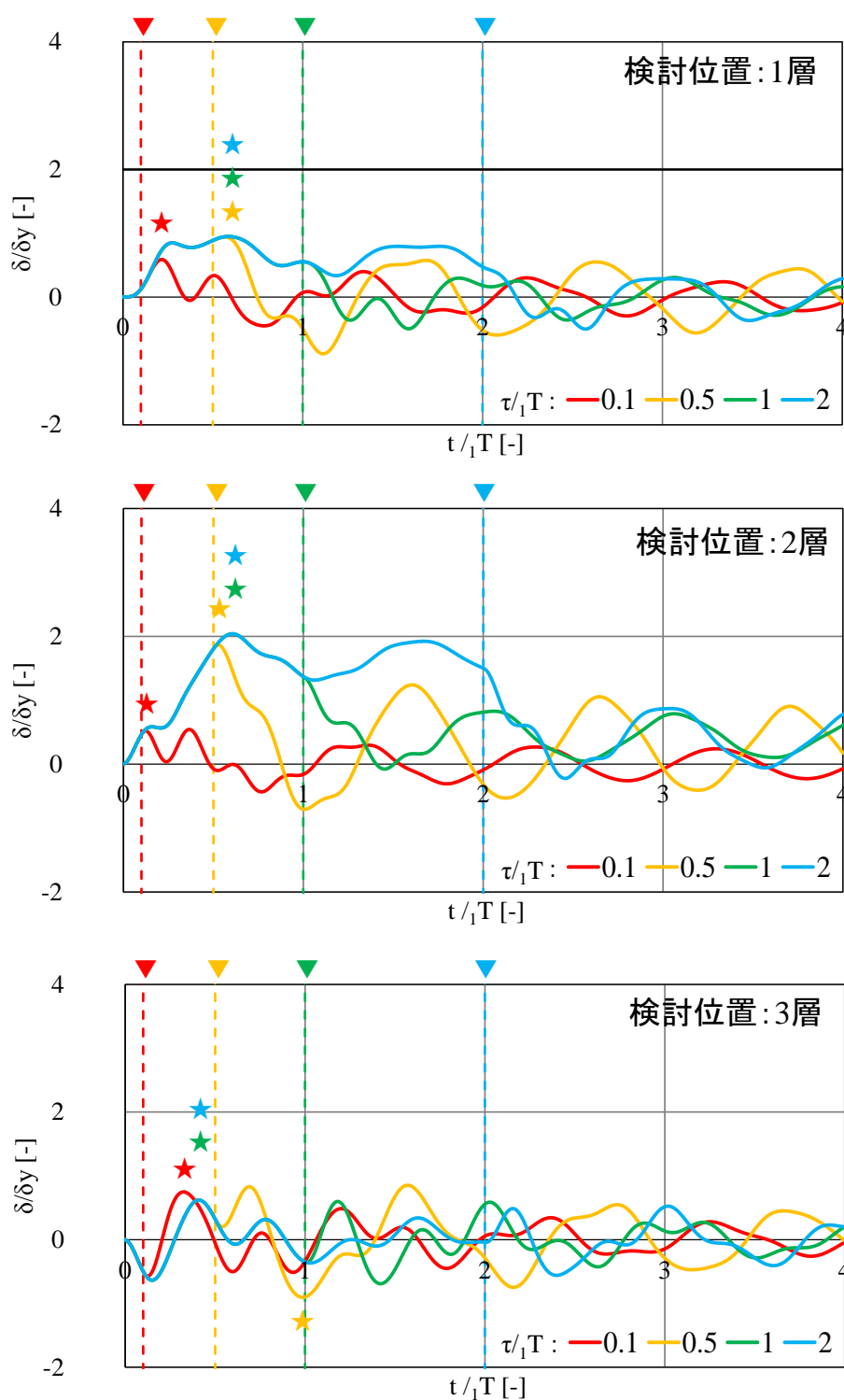


図 5.22 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：3FL, $F/Q_{y_2}=0.75$ ）

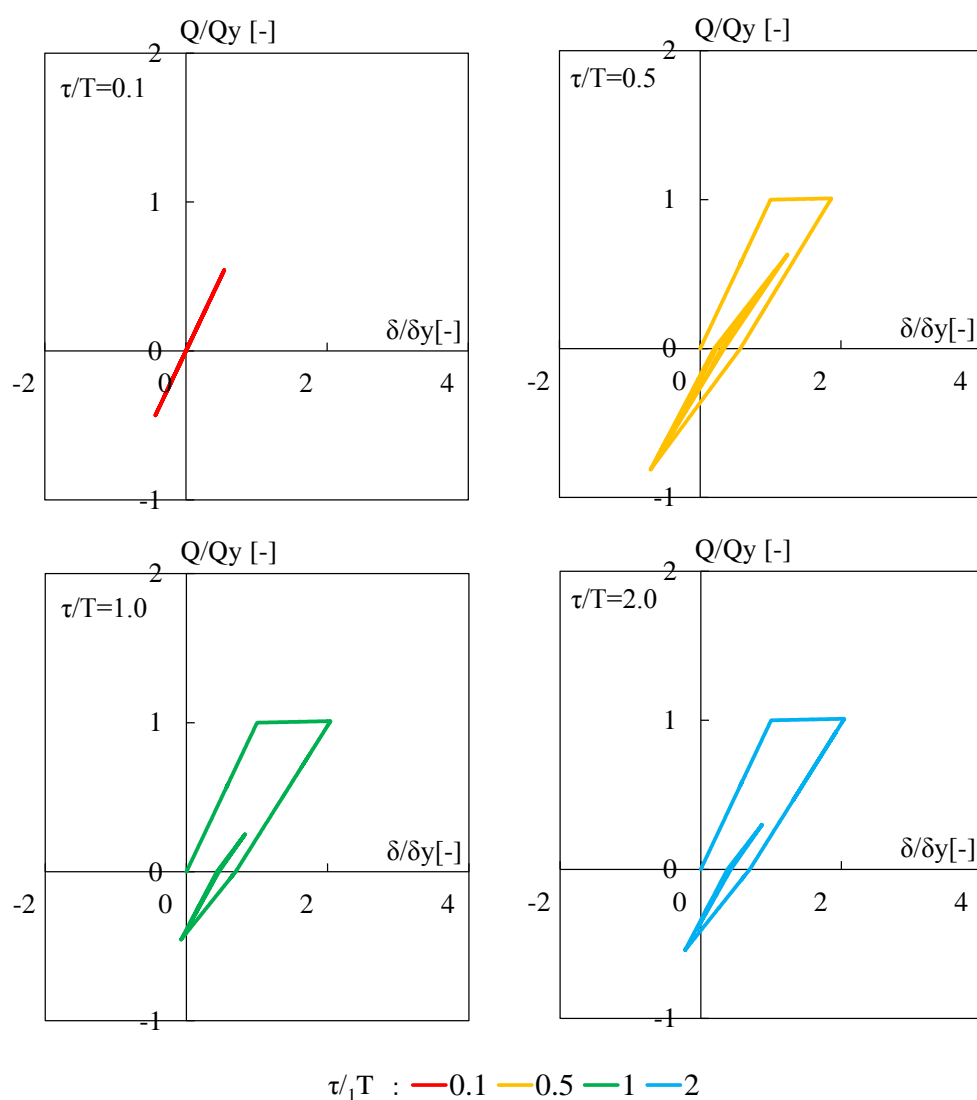


図 5.23 3 質点系モデルの 2 層の荷重変形関係 (衝突位置: 3FL, $F/Q_{y2}=0.75$)

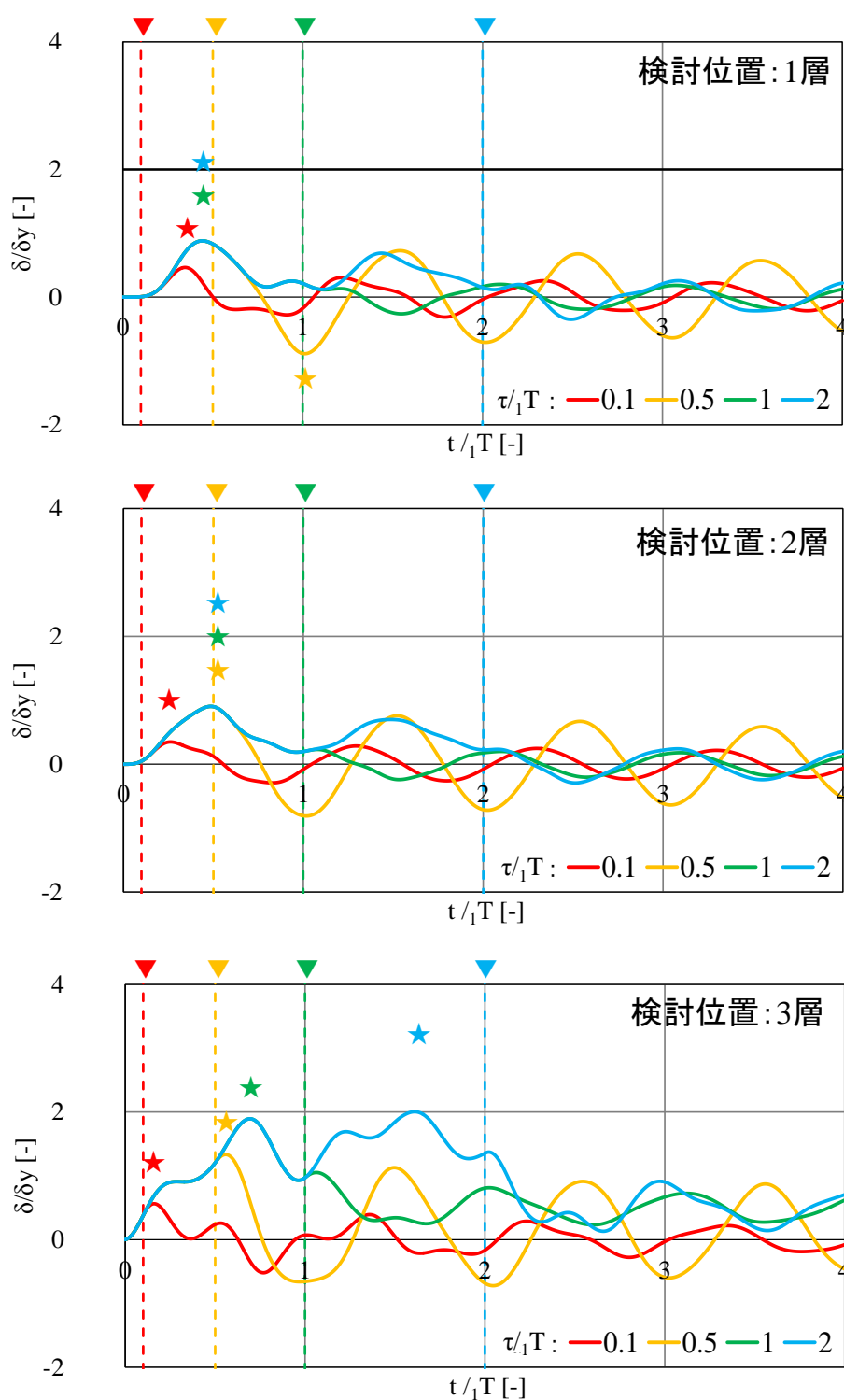


図 5.24 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：RFL, $F/Q_{y_3}=0.75$ ）

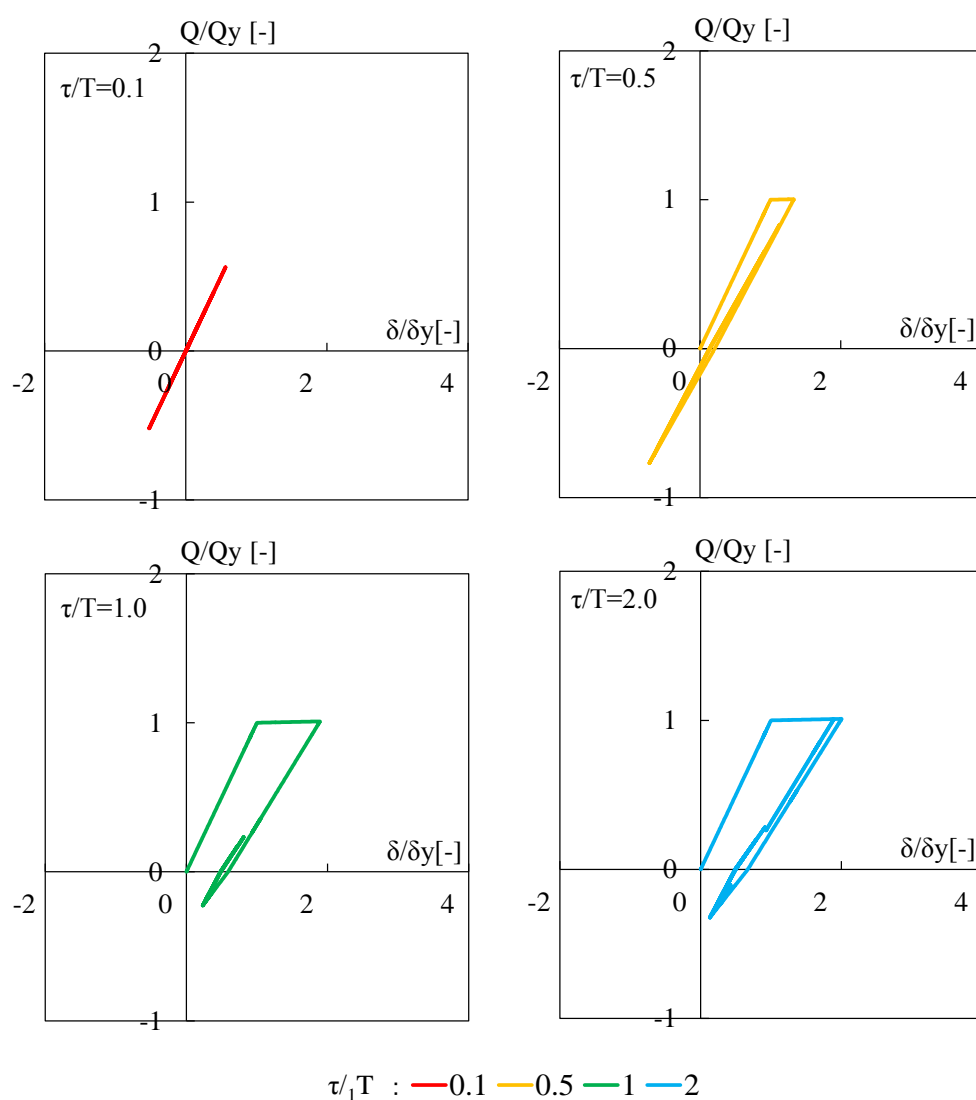


図 5.25 3 質点系モデルの 3 層の荷重変形関係 (衝突位置 : RFL, $F/Q_{y_3}=0.75$)

衝突直下階の最大応答 δ_{\max}/δ_y についてより詳細な傾向を把握するべく、図 5.26 には、衝撃外力を $F/Q_y = 0.5 \sim 1.1$ として設定し（表 5.2 に各層の F/Q_y の値を示す）、 $\tau_1 T$ を変化させて入力したときの δ_{\max}/δ_y の結果を示す。同図より、衝突位置による最大応答 δ_{\max}/δ_y の違いはあるものの、1 質点系モデルの結果（図 5.10）と同様の傾向を示し、最大応答 δ_{\max}/δ_y は $\tau_1 T$ の増大と共に増加し、最終的にはある一定値に収束することがわかる。その収束値ならびに δ_{\max}/δ_y が収束するときの $\tau_1 T$ の値は、 F/Q_y の増大とともに増加し、 $F/Q_y = 0.75 \sim 0.9$ 程度までは $\delta_{\max}/\delta_y = 2.0$ 程度にとどまっているものの、それ以上の範囲ではさらに顕著に増大することがわかる。

6 質点系モデルについても、3 質点系モデルと同様に、衝突直下階の最大応答 δ_{\max}/δ_y の検討結果を図 5.27 に示す。同図より、6 質点系モデルにおいても、衝突位置の違いによる応答の違いはあるものの、上述した 3 質点系モデルと同様の傾向を確認することができる。

表 5.2 衝撃外力のみに対する 3 質点系の各層の F/Q_y の値 ($F/Q_{y,i} = 0.5 \sim 1.1$)

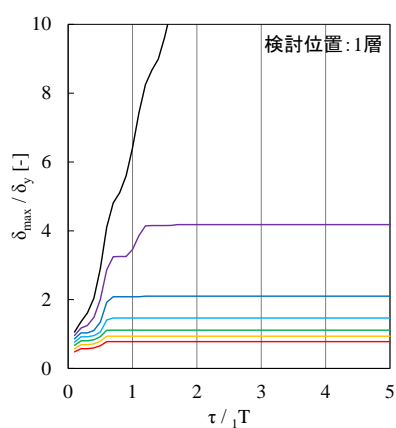
検討位置	F/Q_y		
	衝突位置:2FL	衝突位置:3FL	衝突位置:RFL
3層	0	0	0.5~1.1
2層	0	0.5~1.1	0.3~0.66
1層	0.5~1.1	0.42~0.92	0.25~0.55

* 網掛けは衝突直下階を、赤字は応答が最大となる層を、それぞれ示す。

表 5.3 衝撃外力のみに対する 6 質点系の各層の F/Q_y の値 ($F/Q_{y,i} = 0.5 \sim 1.1$)

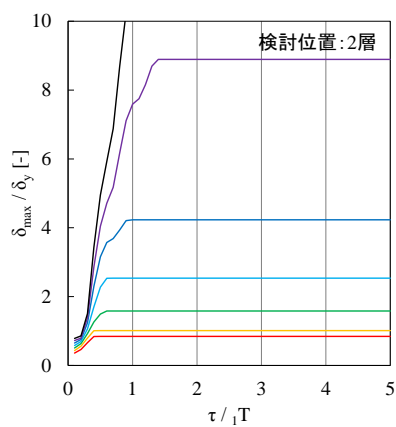
検討位置	F/Q_y					
	衝突位置:2FL	衝突位置:3FL	衝突位置:4FL	衝突位置:5FL	衝突位置:6FL	衝突位置:RFL
6層	0	0	0	0	0	0.5~1.1
5層	0	0	0	0	0.5~1.1	0.27~0.60
4層	0	0	0	0.5~1.1	0.37~0.81	0.20~0.44
3層	0	0	0.5~1.1	0.42~0.92	0.31~0.67	0.17~0.37
2層	0	0.5~1.1	0.45~0.99	0.38~0.83	0.28~0.61	0.15~0.33
1層	0.5~1.1	0.48~1.05	0.43~0.94	0.36~0.79	0.26~0.58	0.14~0.31

* 網掛けは衝突直下階を、赤字は応答が最大となる層を、それぞれ示す。



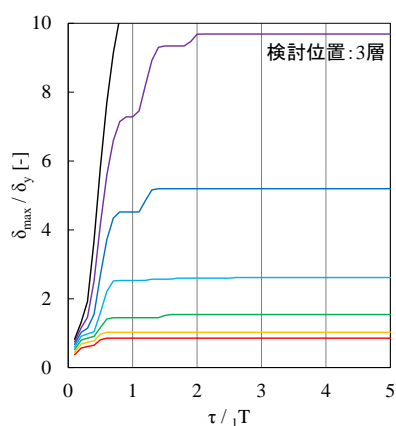
$F/Q_{y_1} =$ — 0.5 — 0.6 — 0.7 — 0.8 — 0.9 — 1 — 1.1

(a) 2FL 衝突時の 1 層の最大応答



$F/Q_{y_2} =$ — 0.5 — 0.6 — 0.7 — 0.8 — 0.9 — 1 — 1.1

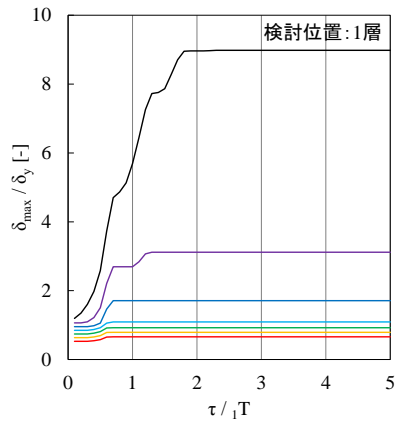
(b) 3FL 衝突時の 2 層の最大応答



$F/Q_{y_3} =$ — 0.5 — 0.6 — 0.7 — 0.8 — 0.9 — 1 — 1.1

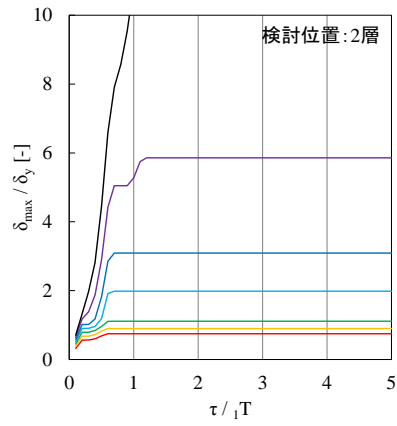
(c) RFL 衝突時の 3 層の最大応答

図 5.26 衝撃外力が作用する 3 質点系モデルの τ/T と δ/δ_y の関係



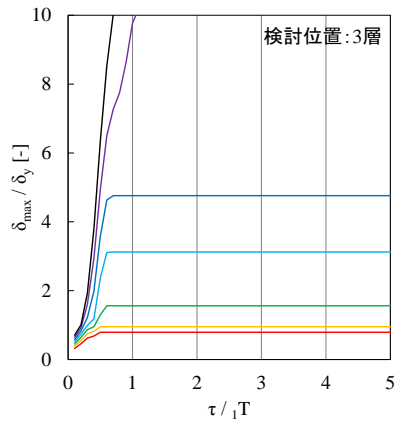
$F/Q_{y,1} = 0.5 \text{ } 0.6 \text{ } 0.7 \text{ } 0.8 \text{ } 0.9 \text{ } 1 \text{ } 1.1$

(a) 2FL 衝突時の 1 層の最大応答



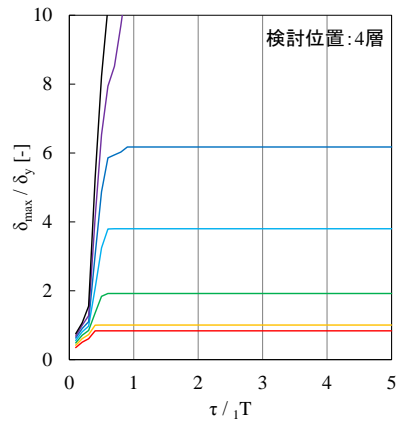
$F/Q_{y,2} = 0.5 \text{ } 0.6 \text{ } 0.7 \text{ } 0.8 \text{ } 0.9 \text{ } 1 \text{ } 1.1$

(b) 3FL 衝突時の 2 層の最大応答



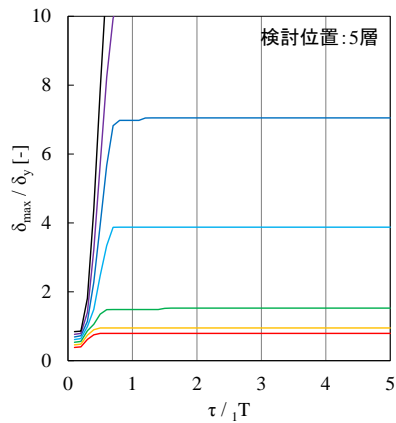
$F/Q_{y,3} = 0.5 \text{ } 0.6 \text{ } 0.7 \text{ } 0.8 \text{ } 0.9 \text{ } 1 \text{ } 1.1$

(c) 4FL 衝突時の 3 層の最大応答



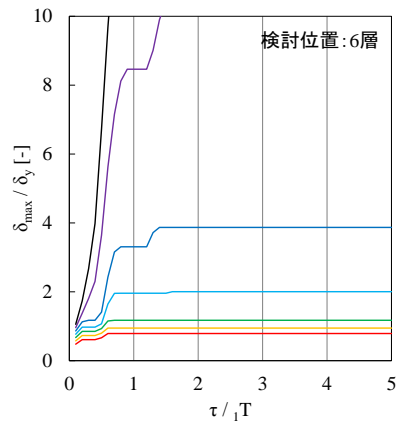
$F/Q_{y,4} = 0.5 \text{ } 0.6 \text{ } 0.7 \text{ } 0.8 \text{ } 0.9 \text{ } 1 \text{ } 1.1$

(d) 5FL 衝突時の 4 層の最大応答



$F/Q_{y,5} = 0.5 \text{ } 0.6 \text{ } 0.7 \text{ } 0.8 \text{ } 0.9 \text{ } 1 \text{ } 1.1$

(e) 6FL 衝突時の 5 層の最大応答



$F/Q_{y,6} = 0.5 \text{ } 0.6 \text{ } 0.7 \text{ } 0.8 \text{ } 0.9 \text{ } 1 \text{ } 1.1$

(f) RFL 衝突時の 6 層の最大応答

図 5.27 衝撃外力が作用する 6 質点系モデルの τ/T と δ/δ_y の関係

(b) 津波波力および衝撃外力に対する応答

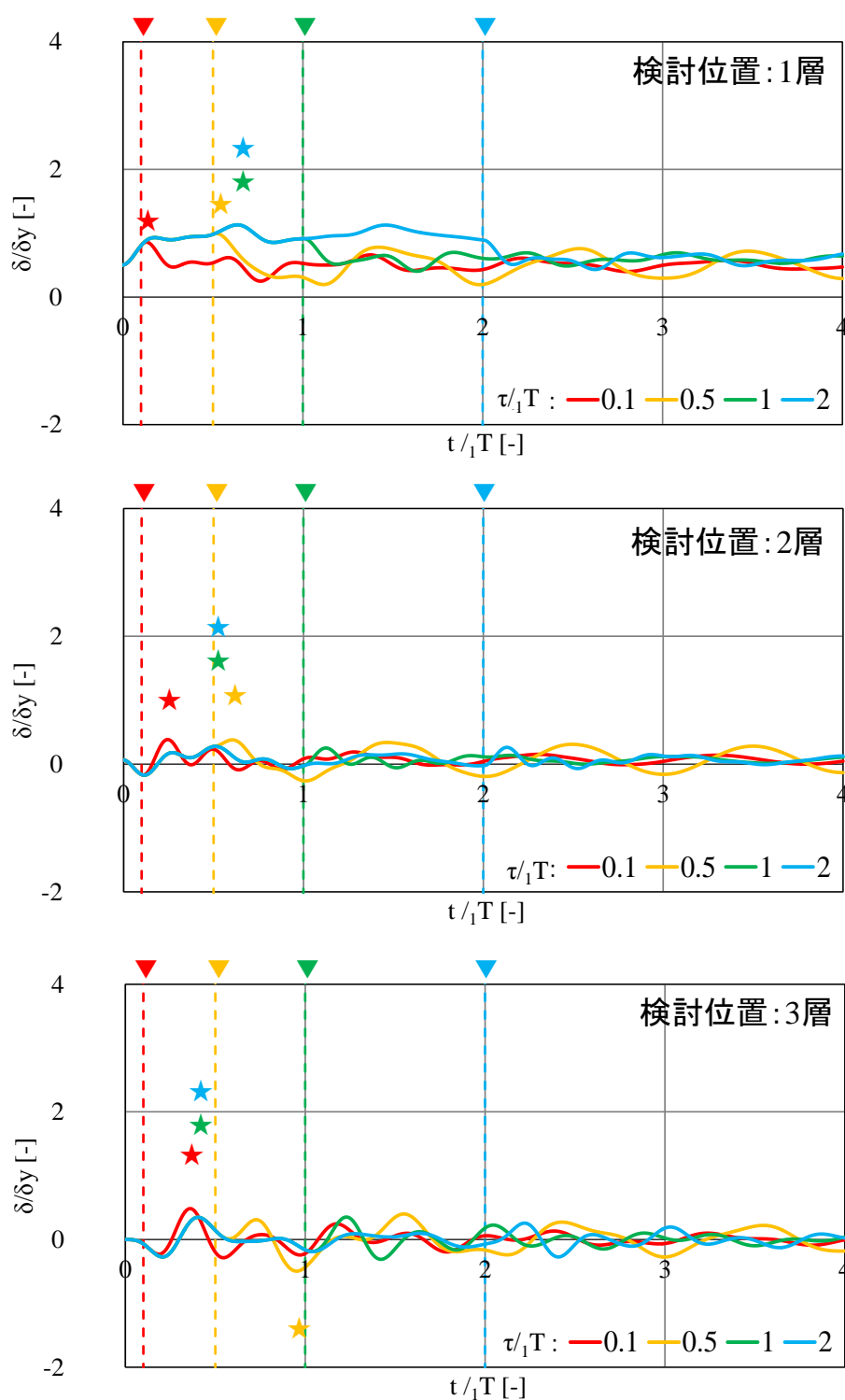
次に、衝撃外力に加え、それに先んじて作用する津波波力を考慮した場合における3質点系モデルの弾塑性応答を検討する。同モデルの衝撃外力に対する時刻歴応答波形および荷重変形関係について、(1)に設定した津波波力 F_w ($F_w/Q_y = 0.5$) 作用下における結果を図 5.28～図 5.33 に示す。なお、「(a)衝撃外力のみに対する応答」では衝突直下階において応答が最大となったが、津波波力が作用する本検討では最下階の1層の応答が最大となったため、荷重変形関係は1層の結果を示し、衝撃外力の一定荷重は $F/(Q_{y,1} - F_{w,1}) = 0.75$ として設定している。なお、1層の $F/(Q_{y,1} - F_{w,1}) (=0.75)$ の値を定めると、上階における $F/(Q_y - F_w)$ の値は、3 FL に衝突する場合は $F/(Q_{y,2} - F_{w,2}) = 0.48$ ，RFL に衝突する場合は $F/(Q_{y,2} - F_{w,2}) = 0.48$ ， $F/(Q_{y,3} - F_{w,3}) = 0.75$ ，とそれぞれ必然的に定まり（表 5.4），3 FL に衝突する場合は1層において、RFL に衝突する場合は1層および3層において、 $F/(Q_y - F_w)$ の値が最大（0.75）となっている。

図 5.28，図 5.30，図 5.32 より、津波波力および衝撃外力に対する3質点系の応答は、「(a)衝撃外力のみに対する応答」（図 5.20～図 5.25）とは異なり、衝突直下階ではなく、 $F/(Q_y - F_w)$ の値が最大となる1層において最大となることが、また、図 5.29，図 5.31，図 5.33 より、2 FL に衝突する場合には $\tau_1 T = 1.0, 2.0$ の場合において、3 FL もしくは RFL に衝突する場合には $\tau_1 T = 0.5, 1.0, 2.0$ の場合において、1層に塑性化が生じたことが、それぞれわかる。一方、1層以外においては、いずれの場合においても弾性範囲内にとどまっており、RFL に衝突する場合は3層において $F/(Q_{y,3} - F_{w,3}) = 0.75$ と 0.5 以上の値となっているが、塑性化は1層に集中していることがわかる。

表 5.4 衝撃外力および津波波力に対する3質点系の各層の $F/(Q_y - F_w)$ の値 ($F/(Q_{y,1} - F_{w,1}) = 0.75$)

検討位置	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$		
		衝突位置:2FL	衝突位置:3FL	衝突位置:RFL
3層	0	0	0	0.75
2層	0.067	0	0.48	0.48
1層	0.5	0.75	0.75	0.75

* 網掛けは衝突直下階を、赤字は応答が最大となる層を、それぞれ示す。


 図 5.28 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形 (衝突位置: 2FL, $F/(Q_{y1} - F_{w1}) = 0.75$)

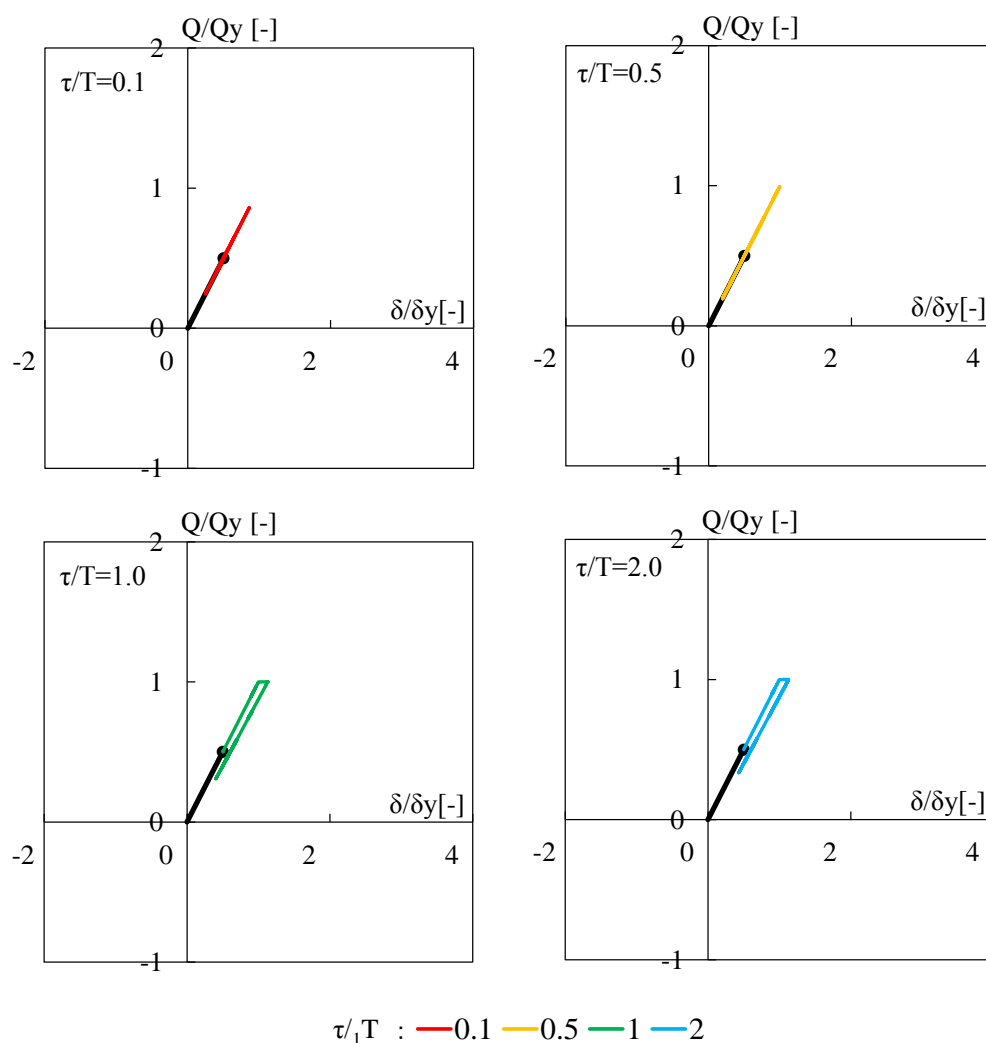


図 5.29 3 質点系モデルの 1 層の荷重変形関係 (衝突位置: $2FL$, $F/(Q_{y,1} - F_{w,1}) = 0.75$)

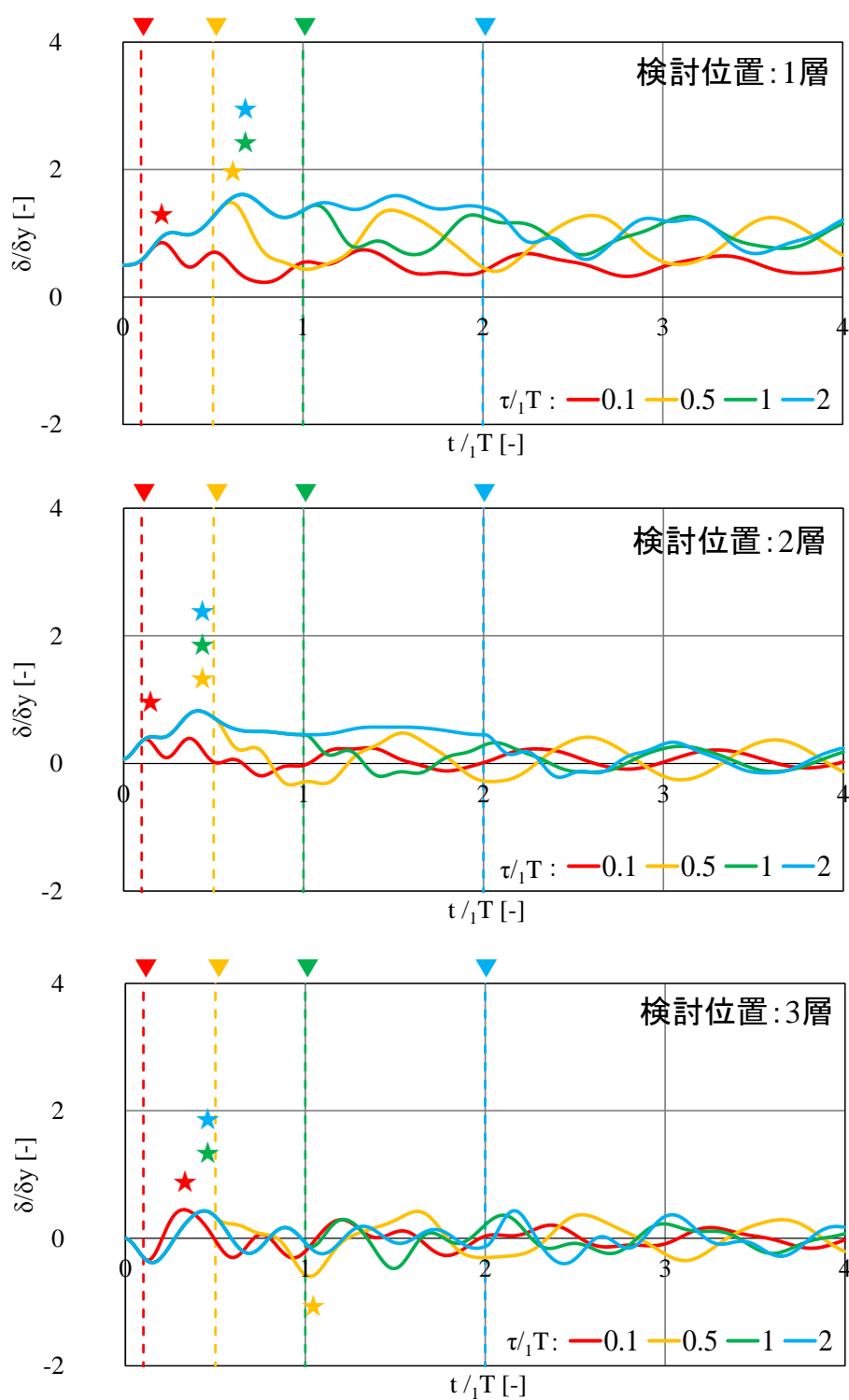


図 5.30 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：3FL, $F/(Q_{y,1} - F_{w,1}) = 0.75$ ）

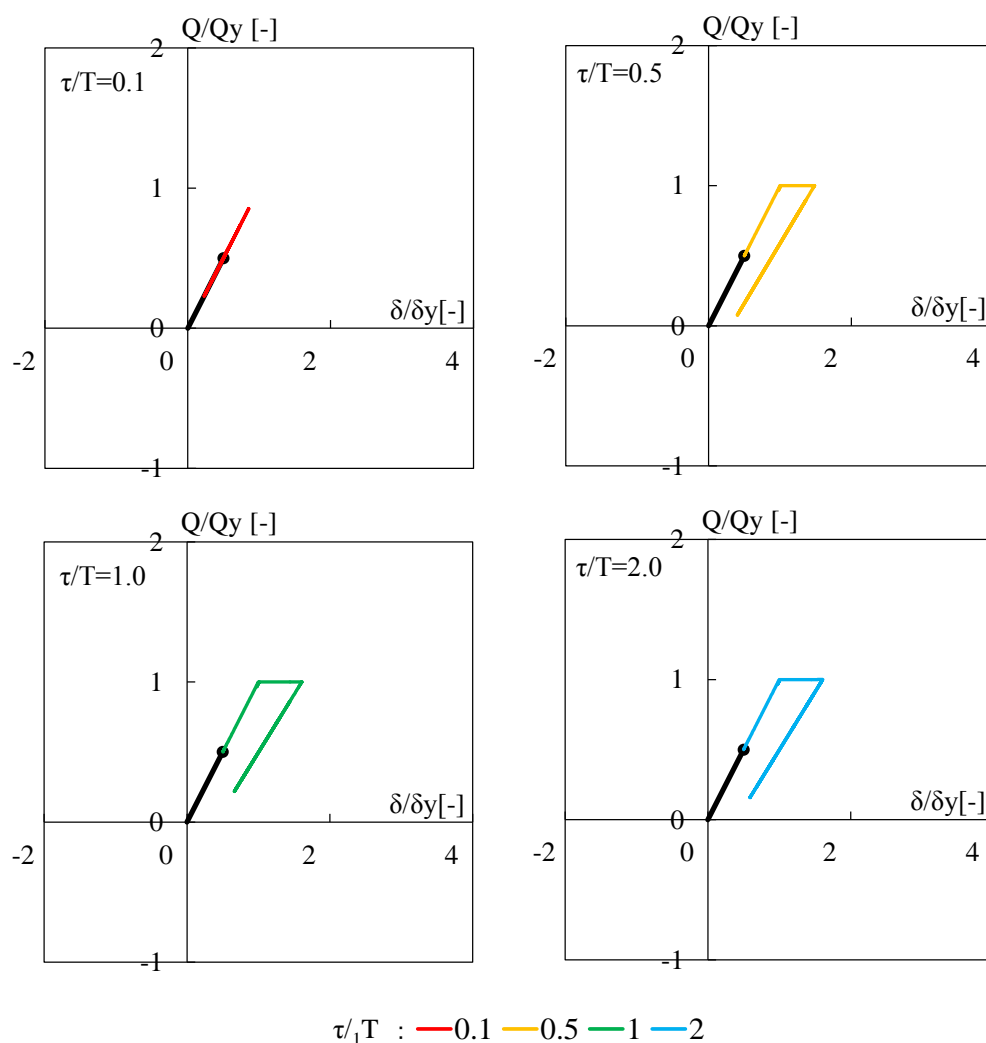
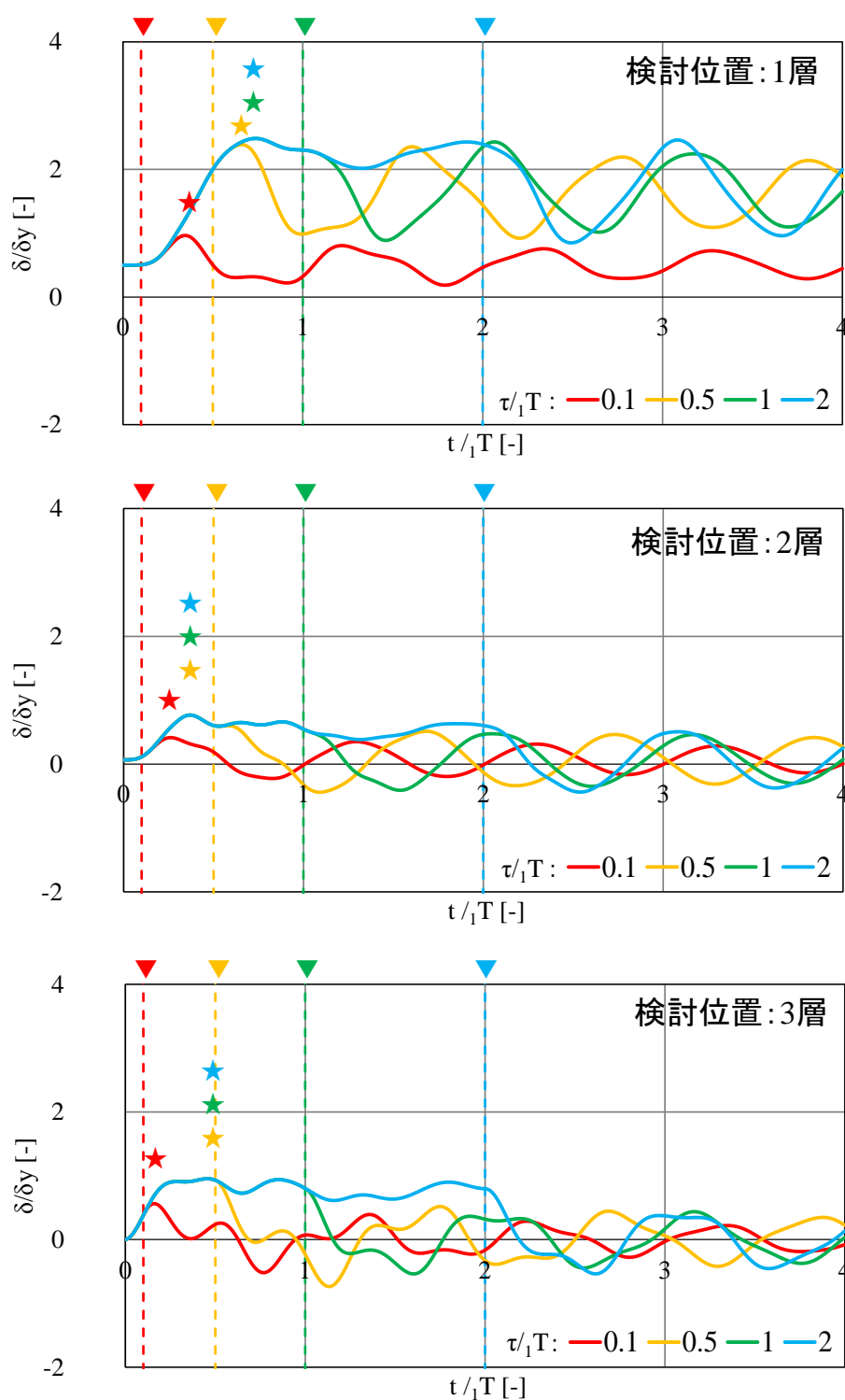


図 5.31 3 質点系モデルの 1 層の荷重変形関係 (衝突位置: 3FL, $F/(Q_{y,1} - F_{w,1})=0.75$)


 図 5.32 3 質点系モデルの時刻歴応答層間変形（衝突位置：RFL, $F/(Q_{y-1} - F_{w-1})=0.75$)

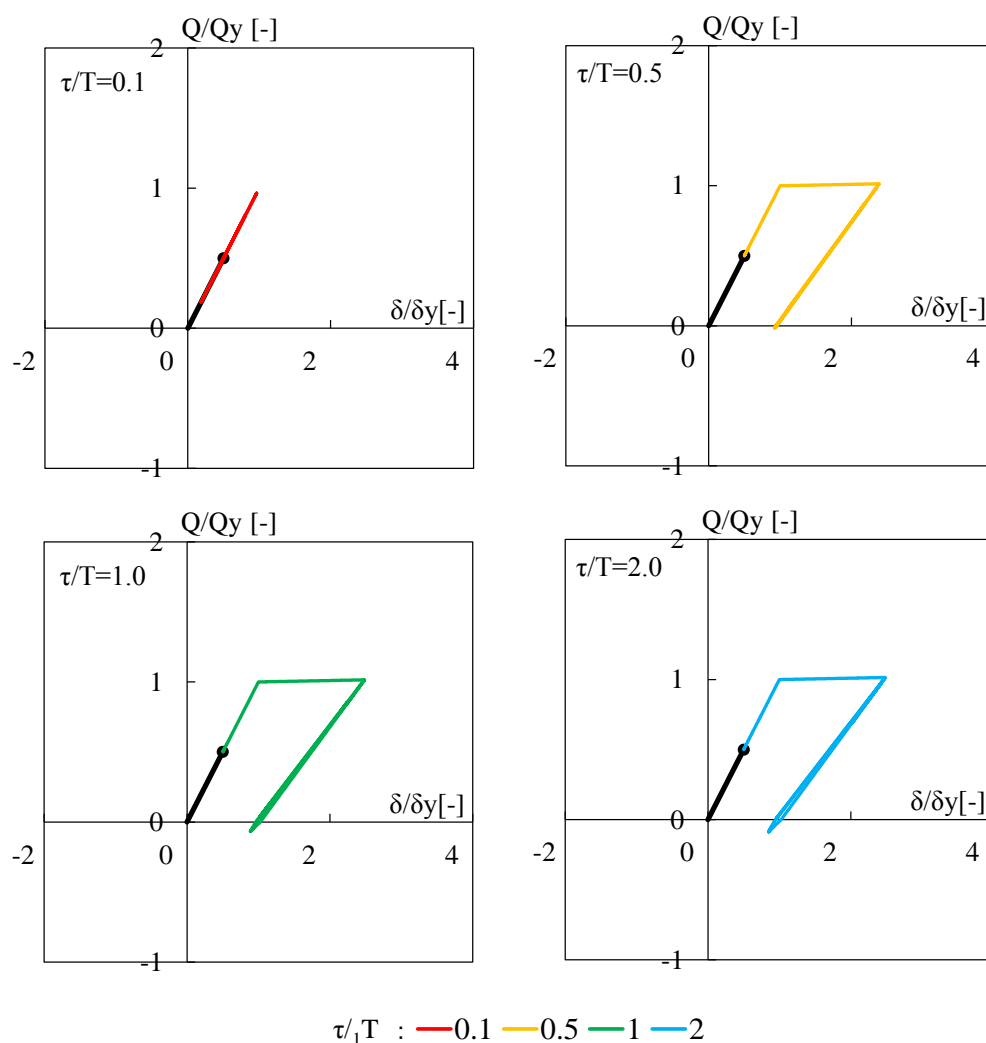


図 5.33 3 質点系モデルの 1 層の荷重変形関係 (衝突位置: RFL, $F/(Q_{y-1} - F_{w-1})=0.75$)

上記の検討において、1層の応答が最大となることが明らかとなったため、その最大応答 δ_{\max}/δ_y についてより詳細な傾向を把握するべく、図 5.34 には、衝撃外力を $F/(Q_{y-1} - F_{w-1})=0.5\sim 1.1$ (1層に着目するため1層の値をパラメータとする) として設定し (表 5.5), $\tau_1 T$ を変化させて入力したときの δ_{\max}/δ_y の結果を示す。同図より、1層の最大応答 δ_{\max}/δ_y は、1質点系モデルの結果 (図 5.10, 図 5.17) および衝撃外力のみに対する多質点系の衝突直下階の結果 (図 5.26) と同様に、 $\tau_1 T$ の増大と共に増加するものの、最終的にはある一定値に収束することがわかる。その収束値ならびに、 δ_{\max}/δ_y が収束するときの $\tau_1 T$ の値は、 $F/(Q_{y-1} - F_{w-1})$ の増大とともに増加し、 $F/(Q_{y-1} - F_{w-1}) = 0.70\sim 1.0$ 程度までは $\delta_{\max}/\delta_y = 2.0$ 程度にとどまっているものの、それ以上の範囲ではさらに顕著に増大することがわかる。

なお、6質点系モデルについても、3質点系モデルと同様に1層の最大応答 δ_{\max}/δ_y の検討結果を図 5.35 に示す (各層の $F/(Q_y - F_w)$ は表 5.6 に示すとおり)。同図より、6質点系モデルにおいても、上述した3質点系モデルと同様の傾向を確認することができる。なお、本検討ケースでは、RFL に衝撃外力が作用する場合においてのみ、 $F/(Q_y - F_w)$ の値が1層よりも6層において大きく、1層よりも6層において先に塑性化が生じているため、図 5.35 に示す1層の δ_{\max}/δ_y の結果は、他の6FL以下に衝撃外力が作用する場合と異なる性状を示している。

表 5.5 衝撃外力および津波波力に対する3質点系の各層の $F/(Q_y - F_w)$ の値 ($F/(Q_{y-1} - F_{w-1}) = 0.5\sim 1.1$)

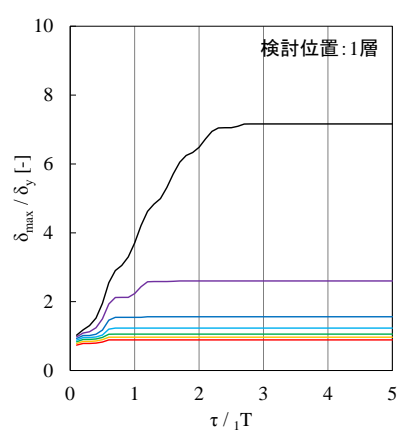
検討位置	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$		
		衝突位置:2FL	衝突位置:3FL	衝突位置:RFL
3層	0	0	0	0.5~1.1
2層	0.067	0	0.32~0.71	0.32~0.71
1層	0.5	0.5~1.1	0.5~1.1	0.5~1.1

* 網掛けは衝突直下階を、赤字は応答が最大となる層を、それぞれ示す。

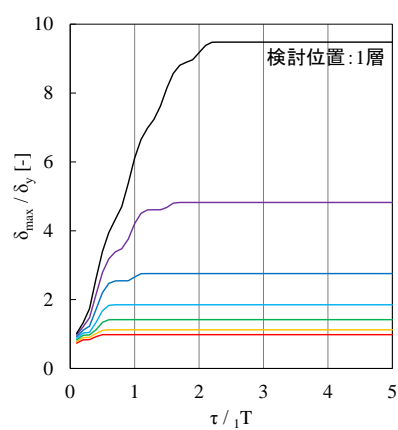
表 5.6 衝撃外力および津波波力に対する6質点系の各層の $F/(Q_y - F_w)$ の値 ($F/(Q_{y-1} - F_{w-1}) = 0.5\sim 1.1$)

検討位置	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$					
		衝突位置:2FL	衝突位置:3FL	衝突位置:4FL	衝突位置:5FL	衝突位置:6FL	衝突位置:RFL
6層	0	0	0	0	0	0	0.875~1.93
5層	0	0	0	0	0	0.48~1.05	0.48~1.05
4層	0.014	0	0	0	0.36~0.78	0.36~0.78	0.36~0.78
3層	0.11	0	0	0.33~0.72	0.33~0.72	0.33~0.72	0.33~0.72
2層	0.27	0	0.36~0.79	0.36~0.79	0.36~0.79	0.36~0.79	0.36~0.79
1層	0.5	0.5~1.1	0.5~1.1	0.5~1.1	0.5~1.1	0.5~1.1	0.5~1.1

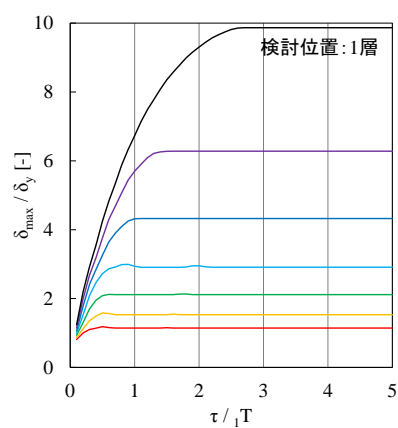
* 網掛けは衝突直下階を、赤字は応答が最大となる層を、それぞれ示す。



(a) 2FL 衝突時の 1 層の最大応答



(b) 3FL 衝突時の 1 層の最大応答



(c) RFL 衝突時の 1 層の最大応答

$F/(Q_{y1}-F_{w1}) =$ —0.5 —0.6 —0.7 —0.8 —0.9 —1 —1.1

図 5.34 津波波力および衝撃外力が作用する 3 質点系モデルの τ/T と δ/δ_y の関係

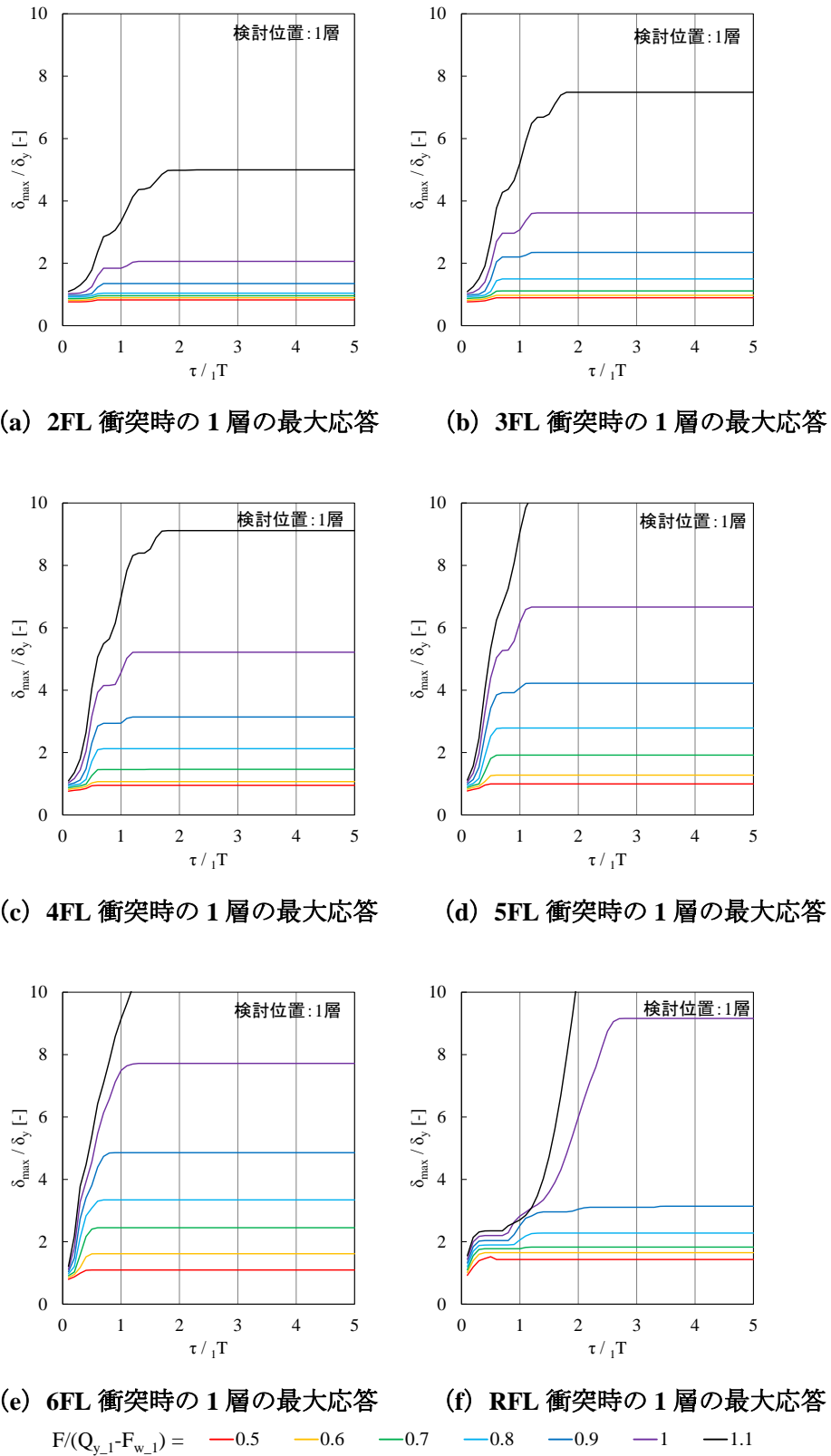


図 5.35 津波波力および衝撃外力が作用する 6 質点系モデルの τ/T と δ/δ_y の関係

5.3 弾塑性応答の簡易評価手法の提案

本節では、前節で得られた建築物の弾塑性応答特性に基づき、その最大応答の簡易評価手法を提案する。なお、前章と同様、検討は最大応答が比較的大きい衝突位置以下に対象を絞って行う。

5.3.1 1質点系応答

(a) 衝撃外力のみに対する応答

まず、衝撃外力のみに対する弾塑性1質点系の最大応答 δ_{\max}/δ_y の推定式は、最大応答が衝突終了以前に生起すること、減衰 $h=0$ 、降伏後の剛性 $K_u=0$ 、をそれぞれ仮定し、衝撃外力による仕事（図5.36の青色部）と、建築物の復元力による仕事（同赤色部）とが等値である（式(5.1)）として導出される式(5.2)とする。なお、同式は応答が弾塑性領域に達する場合を対象としているため、適用においては最大弾性応答 $2F/K \geq \delta_y$ すなわち $F/Q_y \geq 0.5$ を満たす必要があること、また、 $F/Q_y \geq 1.0$ の場合は上述した外力による仕事と復元力による仕事との等値が成立し得ないこと、の二点より、式(5.2)の適用条件は $0.5 \leq F/Q_y < 1.0$ となる。

$$F\delta_{\max} = \frac{1}{2}Q_y\delta_y + Q_y(\delta_{\max} - \delta_y) \quad (5.1)$$

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_y} = \frac{1}{2\left(1 - \frac{F}{Q_y}\right)} \quad (0.5 \leq F/Q_y < 1.0) \quad (5.2)$$

ここで、

F : 衝撃外力 [kN]

Q_y : 降伏耐力 [kN]

δ_{\max} : 最大応答変形 [m]

δ_y : 降伏変形 [m]

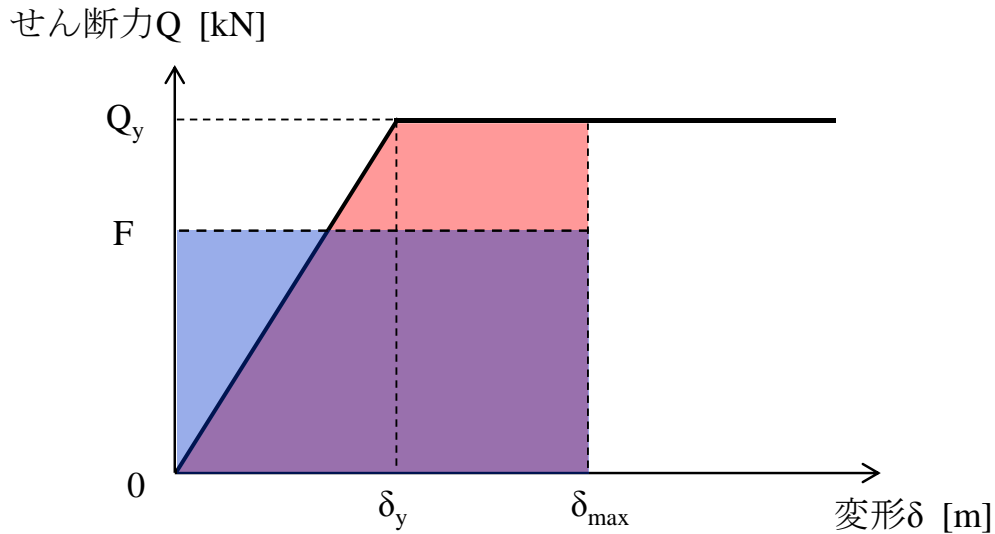


図 5.36 衝撃外力のみに対する 1 質点系モデルの応答推定手法の概念図

式(5.2)より求まる推定値と、前節における解析結果（図 5.10）との比較結果を、式(5.2)の適用範囲である $F/Q_y=0.5\sim0.9$ の場合を対象に図 5.37 に示す。同図より、 $\tau/T < 0.5$ の場合には、 τ/T が小さいほど同式は最大応答を過大評価するものの、 $\tau/T \geq 0.5$ の場合には、 $F/Q_y = 0.9$ の場合を除き、精度良く最大応答を推定することがわかる。 $F/Q_y = 0.9$ の場合は、 $\tau/T \geq 1.0$ において最大応答を 5 割程度過大評価しているが、これは、推定式(5.2)においては降伏後の耐力増加および減衰は無視しているものの、実際の応答では両者により応答が低減されることが要因である。なお、一般に、地震力に対する建築物の最大弾塑性応答はエネルギー一定則に基づき推定されるが、同手法による推定誤差は式(5.2)によるそれよりも大きい（付録 3）、本研究では式(5.2)を衝撃外力に対する最大弾塑性応答の推定式として採用した。

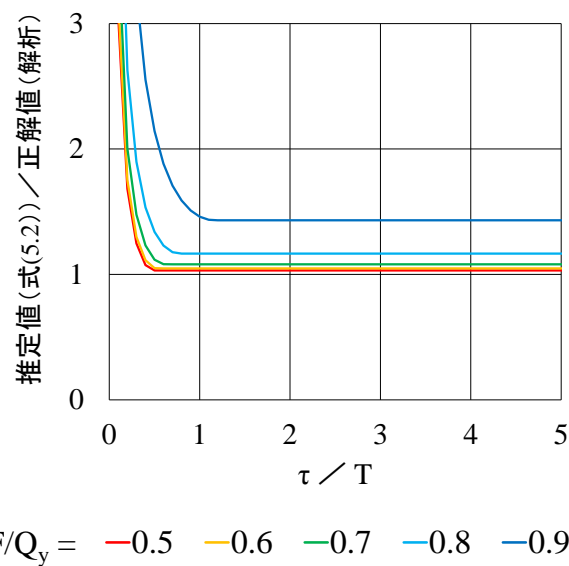


図 5.37 衝撃外力のみに対する 1 質点系モデルの応答推定精度

(b) 津波波力および衝撃外力に対する応答

次に、津波波力および衝撃外力に対する弾塑性1質点系の最大応答 δ_{\max}/δ_y の推定式は、「(a) 衝撃外力のみに対する応答」と同様に、津波波力と復元力との釣り合い位置から、衝撃外力による仕事（図 5.38 の青色部）と、建築物の復元力による仕事（同赤色部）とが等値である（式(5.3)）として導出される式(5.4)とする（同式において津波波力 $F_w = 0$ とすると、当然式(5.2)に一致する）。なお、同式の適用条件は、式(5.2)と同様に、 $0.5 \leq F/(Q_y - F_w) < 1.0$ となる。

$$F\delta_{\max} = \frac{1}{2}(Q_y - F_w)(\delta_y - \delta_w) + (Q_y - F_w)(\delta_{\max} - \delta_y) \quad (5.3)$$

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_y} = \frac{F_w}{Q_y} + \frac{\left(1 - \frac{F_w}{Q_y}\right)^2}{2\left(1 - \frac{F_w}{Q_y} - \frac{F}{Q_y}\right)} \quad (0.5 \leq F/(Q_y - F_w) < 1.0) \quad (5.4)$$

ここで、

F_w : 津波波力 [kN]

δ_w : 津波波力による変形 [m] ($=F_w/Q_y \times \delta_y$)

せん断力 Q [kN]

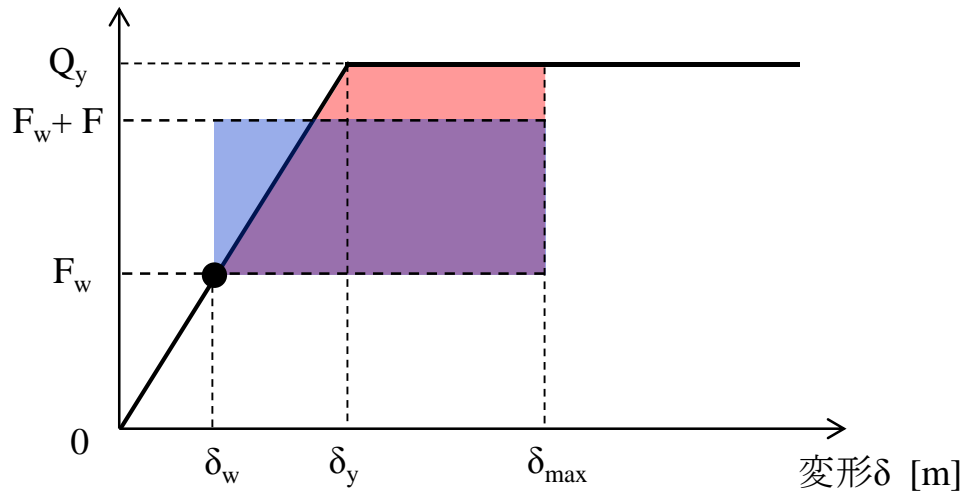
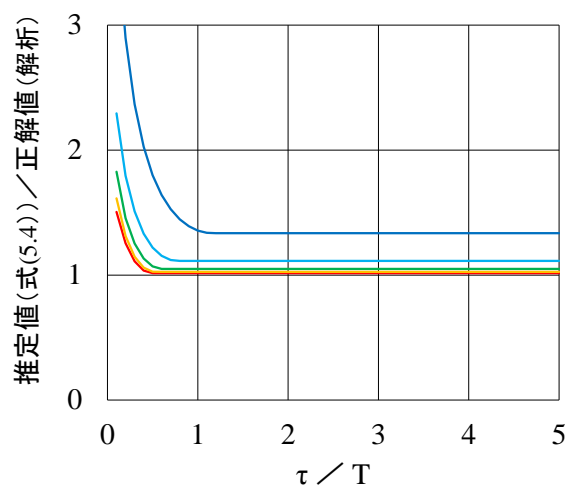


図 5.38 津波波力および衝撃外力に対する 1 質点系モデルの応答推定精度

式(5.4)より求まる推定値と、前節における解析結果（図 5.17）との比較結果を、式(5.4)の適用範囲である $F/(Q_y - F_w) = 0.5 \sim 0.9$ の場合を対象に図 5.39 に示す。同図より、式(5.4)の推定精度の結果は、式(5.2)と同様の傾向となり、 $\tau/T \geq 0.5$ の場合には、精度良く最大応答を推定することがわかった。



$$F/(Q_y - F_w) = \quad \text{red } 0.5 \quad \text{yellow } 0.6 \quad \text{green } 0.7 \quad \text{cyan } 0.8 \quad \text{blue } 0.9$$

図 5.39 津波波力および衝撃外力に対する 1 質点系モデルの応答推定精度

5.3.2 多質点系応答

(a) 衝撃外力のみに対する応答

衝撃外力のみに対する弾塑性多質点系の j 層の最大応答 $\delta_{\max_j}/\delta_{y_j}$ について、1 質点系応答における検討と同様に、衝撃外力による仕事（図 5.40 の青色部）と、建築物の復元力による仕事（同赤色部）とが等値である（式(5.5)）と仮定すると式(5.6)が求まる。なお、同式の適用条件は、式(5.2)と同様に、 $0.5 \leq F/Q_{y_j} < 1.0$ である。なお、式(5.5)においては外力による仕事がすべてばねのひずみエネルギーに変換されることを想定しているため、多質点系においては、最大応答の生起時刻において各質点の運動エネルギーがゼロ（すなわち衝突位置以下では最大応答が同時に生起していることを仮定し、衝突位置より上階の振動の影響は無視する）をさらに仮定している。

$$F\delta_{\max_j} = \frac{1}{2}Q_{y_j}d_{y_j} + Q_{y_j}(\delta_{\max_j} - d_{y_j}) \quad (5.5)$$

$$\frac{\delta_{\max_j}}{\delta_{y_j}} = \frac{1}{2\left(1 - \frac{F}{Q_{y_j}}\right)} \quad (0.5 \leq F/Q_{y_j} < 1.0) \quad (5.6)$$

ここで、

F : 衝撃外力 [kN]

Q_{y_j} : j 層の降伏耐力 [kN]

δ_{\max_j} : j 層の最大応答層間変形 [m]

δ_{y_j} : j 層の降伏層間変形 [m]

せん断力 Q [kN]

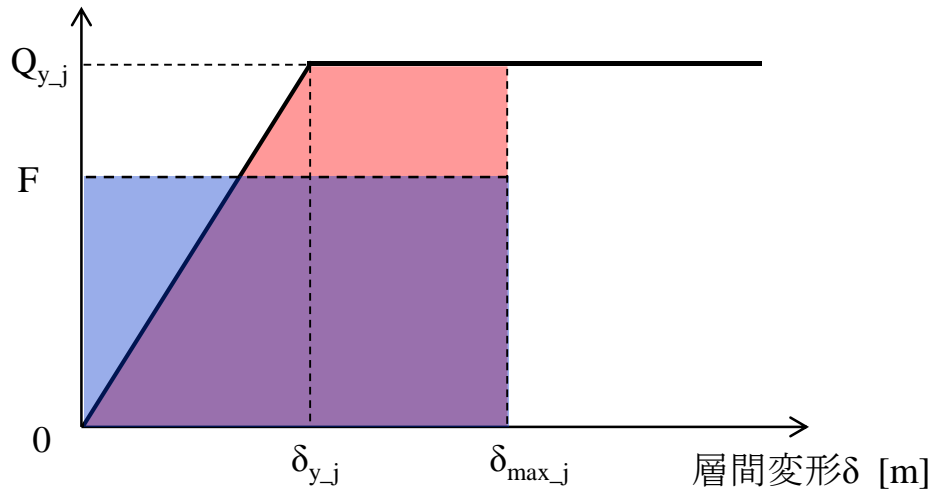


図 5.40 衝撃外力のみに対する 1 質点系モデルの応答推定精度

式(5.6)より求まる推定値と、前節における解析結果（図 5.26）との比較結果について、式(5.6)の適用範囲である $F/Q_{y,j}=0.5\sim 0.9$ の場合を対象に、応答が最大となる衝突直下階の結果を図 5.41 に示す。同図より、式(5.6)は、3 FL もしくは RFL に衝撃外力が作用するときの応答は、 $\tau_1 T \geq 0.5$ の範囲において概ね精度良く最大応答を推定するものの、2 FL に衝撃外力が作用するときは、最大 140 %ほど応答を過大評価している。これは、1 質点系の検討で先述したとおり、推定式(5.5)においては降伏後の耐力増加および減衰は無視しているものの、実際の応答では両者により応答が低減されることに加え、外力の仕事が衝突位置より上階の運動エネルギーに変換されていることが原因である。よって、式(5.6)における後者の原因による誤差を改善すべく、ここでは、同式に係数 α を乗じた式(5.8)を導入する。なお、係数 α は、式(5.6)による荷重と変形の関係が、弾性限では精度良く推定するように、すなわち 4 章で提案した弾性応答推定式(5.7)により得られる荷重と降伏変形の関係に一致するように式(5.9)により定めることとする。なお、本手法のように変形を補正する係数 α を導入する手法以外にも、荷重を補正する手法も考えられるが、比較的推定精度が良い本手法を採用することとした。

$$\frac{\delta_{\max,j}}{\delta_{y,j}} = \frac{\frac{F}{K_j} + i \frac{F}{\sum_{j=1}^N K_j}}{\delta_{y,j}} = \frac{F}{Q_{y,j}} + i \frac{F}{\sum_{j=1}^N Q_{y,j}} \quad (5.7)$$

ここで、

F : 衝撃外力 [kN]

K_j : j 層の剛性 [kN/m]

N : 建築物の層数 [層]

i : 衝突質点位置 [-]

$$\frac{\delta_{\max,j}}{\delta_{y,j}} = \frac{1}{2 \left(1 - \frac{F}{Q_{y,j}} \right)} \times \alpha \quad (0.5 \leq F/Q_{y,j} < 1.0) \quad (5.8)$$

$$\alpha = \frac{2}{\sum_{j=1}^N K_j + \frac{1}{i K_j}} \quad (5.9)$$

式(5.9)の推定精度について、式(5.6)と同様に検討すると（図 5.42）、特に応答を過大評価していた 2 FL に衝撃外力が作用する場合において推定精度が改善されたことがわかる。

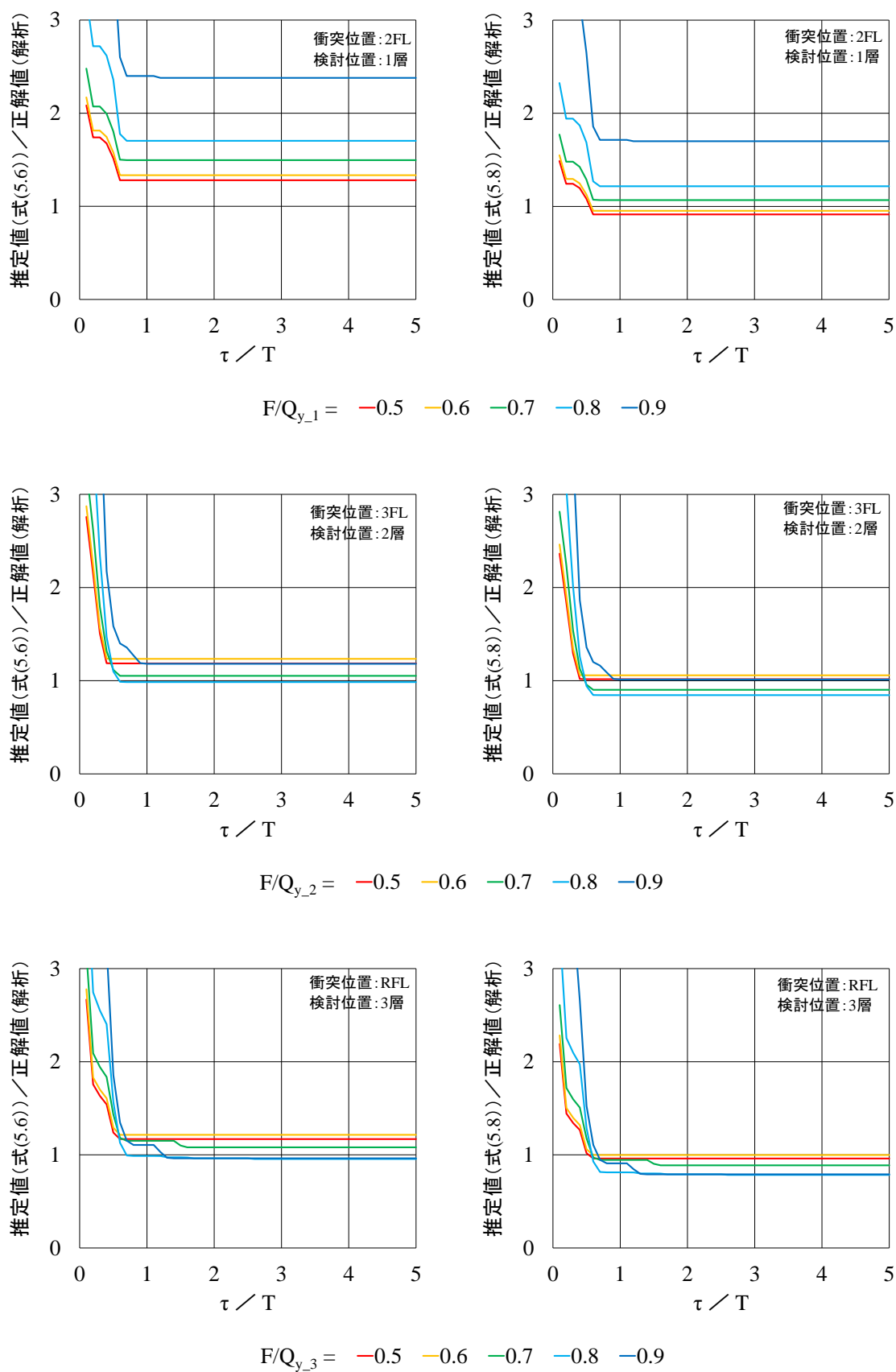


図 5.41 3 質点系モデルの式(5.6)の推定精度 図 5.42 3 質点系モデルの式(5.8)の推定精度

(b) 津波波力および衝撃外力に対する応答

津波波力が作用する場合についても同様に、衝撃外力による仕事（図 5.43 の青色部）と、建築物の復元力による仕事（同赤色部）とが等値である（式(5.10)）と仮定すると式(5.11)が求まる。なお、同式の適用条件は、これまでの議論と同様に導出すると、 $0.5 \leq F/(Q_{y-j} - F_{w-j}) < 1.0$ と求まる。

$$F(\delta_{\max-j} - \delta_{w-j}) = \frac{1}{2}(Q_{y-j} - F_{w-j})(\delta_{y-j} - \delta_{w-j}) + (Q_{y-j} - F_{w-j})(\delta_{\max-j} - \delta_{y-j}) \quad (5.10)$$

$$\frac{\delta_{\max-j}}{\delta_{y-j}} = \frac{F_{w-j}}{Q_{y-j}} + \frac{\left(1 - \frac{F_{w-j}}{Q_{y-j}}\right)^2}{2\left(1 - \frac{F_{w-j}}{Q_{y-j}} - \frac{F}{Q_{y-j}}\right)} \quad (0.5 \leq F/(Q_{y-j} - F_{w-j}) < 1.0) \quad (5.11)$$

ここで、

F_{w-j} : j 層以上に作用する津波波力の合計 [kN]

δ_{w-j} : 津波波力による j 層の層間変形 [m] ($=F_{w-j}/Q_y \times \delta_y$)

せん断力 Q [kN]

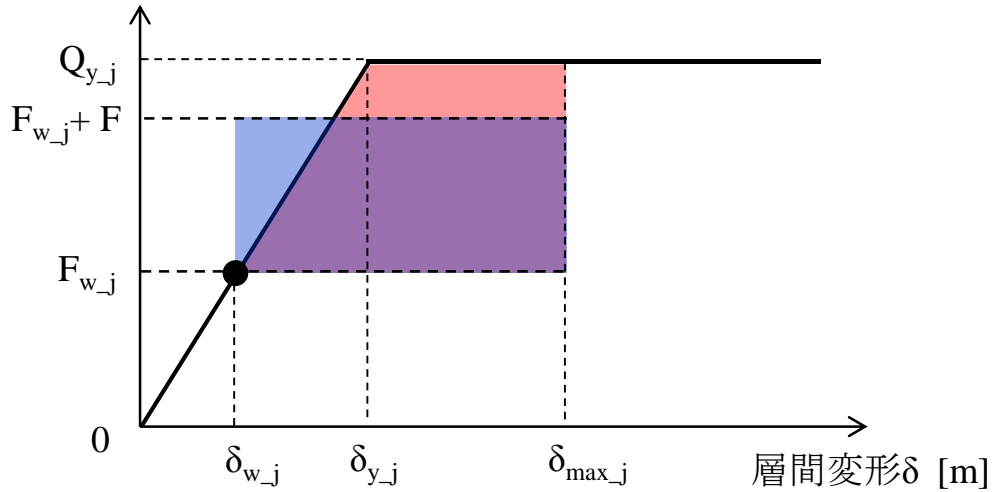


図 5.43 衝撃外力のみに対する 1 質点系モデルの応答推定精度

式(5.11)より求まる推定値と、前節における解析結果（図 5.34）との比較結果を、式(5.11)の適用範囲である $F/(Q_{y-j}-F_{w-j})=0.5\sim 0.9$ の場合を対象に、応答が最大となる 2 FL の結果を図 5.44 に示す。同図より、式(5.11)は、 $\tau_1 T \geq 0.5$ の場合において、3 FL に衝撃外力が作用する場合は最大応答を精度良く推定するものの、2 FL および RFL に衝撃外力が作用する場合は、それぞれ応答を過大評価および過小評価している。そこで、式(5.8)と同様に、式(5.11)に補正係数 α を乗じた式(5.12)を導入する。

$$\frac{\delta_{\max-j}}{\delta_{y-j}} = \frac{F_{w-j}}{Q_{y-j}} + \frac{\left(1 - \frac{F_{w-j}}{Q_{y-j}}\right)^2}{2\left(1 - \frac{F_{w-j}}{Q_{y-j}} - \frac{F}{Q_{y-j}}\right)} \times \alpha \quad (0.5 \leq F/(Q_{y-j} - F_{w-j}) < 1.0) \quad (5.12)$$

$$\frac{\delta_{\max-j}}{\delta_{y-j}} = \frac{F_{w-j}}{Q_{y-j}} + \frac{F}{Q_{y-j}} + i \frac{F}{\sum_{j=1}^N Q_{y-j}} \quad (5.13)$$

同式の推定精度について図 5.45 に検討すると、2 FL に衝撃外力が作用する場合については、式(5.8)と比べ推定精度が向上していることがわかる。ただし、2 FL に衝撃外力が作用するときの $F/(Q_{y-j}-F_{w-j})=0.9$ の場合、および RFL に衝撃外力が作用するとき $F/(Q_{y-j}-F_{w-j})=0.6\sim 0.9$ の場合は、それぞれ応答を 2 割～3 割程度に過大評価および過小評価している。

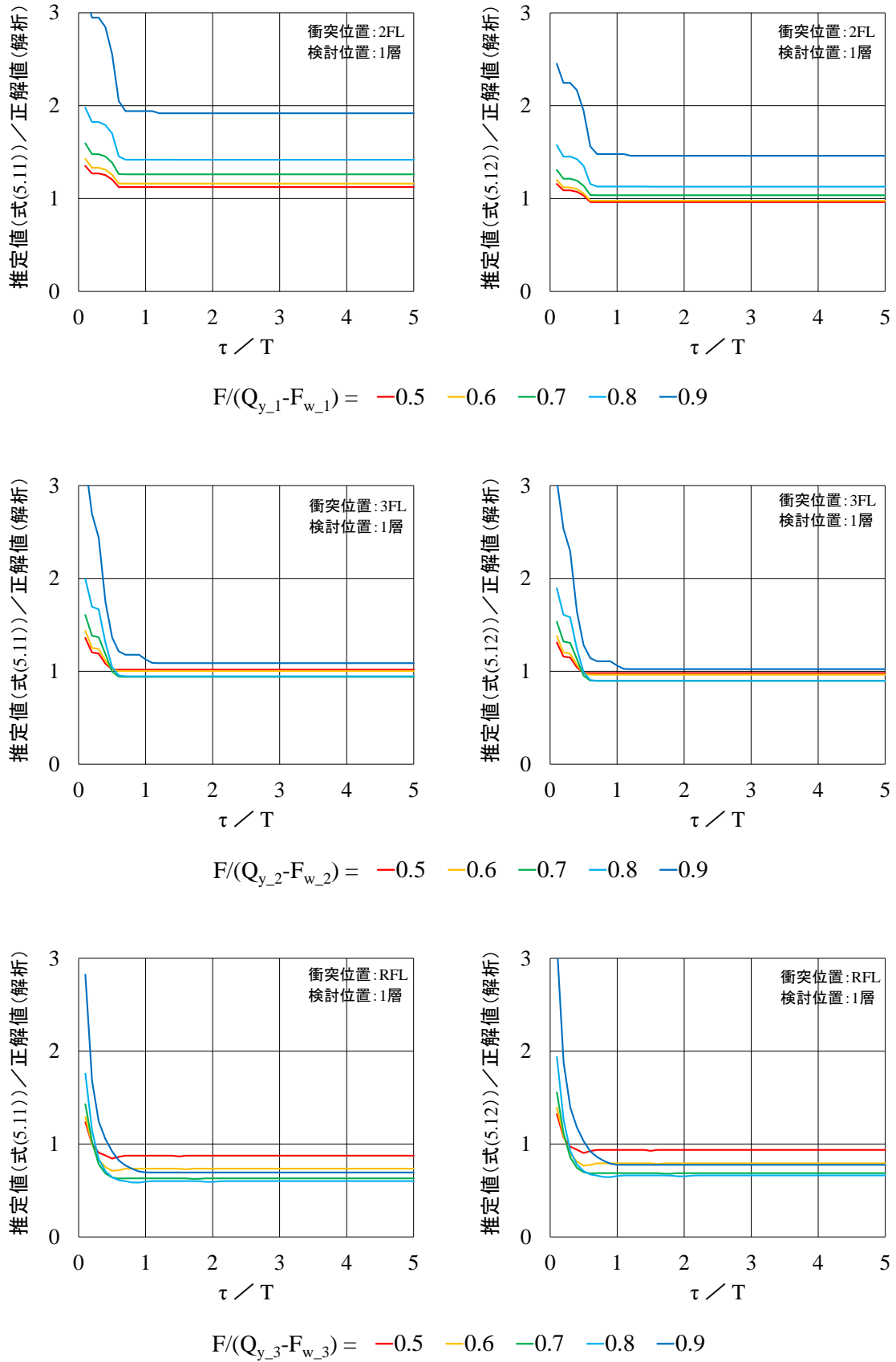


図 5.44 3 質点系モデルの式(5.11)の推定精度 図 5.45 3 質点系モデルの式(5.12)の推定精度

津波波力および衝撃外力が作用する弾塑性6質点系についても、式(5.12)の推定結果と前節における解析結果（図 5.27，図 5.35）とを図 5.46 および図 5.47 に比較する。両図より，推定式(5.12)の推定精度について $\tau_1 T \geq 0.5$ の場合に着目して検討すると，2 FL に衝撃外力が作用するときの $F/(Q_{y,j} - F_{w,j}) \geq 0.8$ の場合は4割以上応答を過大評価し得ること，また，4 FL～6 FL に衝撃外力が作用するときは最大5割程度応答を過小評価し得ることが，それぞれわかる。その他については，概ね精度良く最大応答を推定した。

以上，本節では，津波波力および衝撃外力に対する弾塑性多質点系応答の推定手法を提案し，その推定精度について，特定の建築物を対象とはせず，一般的な議論に基づき検討を行った。しかし，設計実務におけるより現実的な状況を想定すると，建築物の塑性率の上限値や，津波浸水深と衝突位置との関係等の条件を考慮する必要がある。よって，次節においては，津波避難ビルとして一般的な規模の建築物を想定し，その津波波力および衝撃外力に対する最大応答に加え，提案した推定式の適用性を検討する

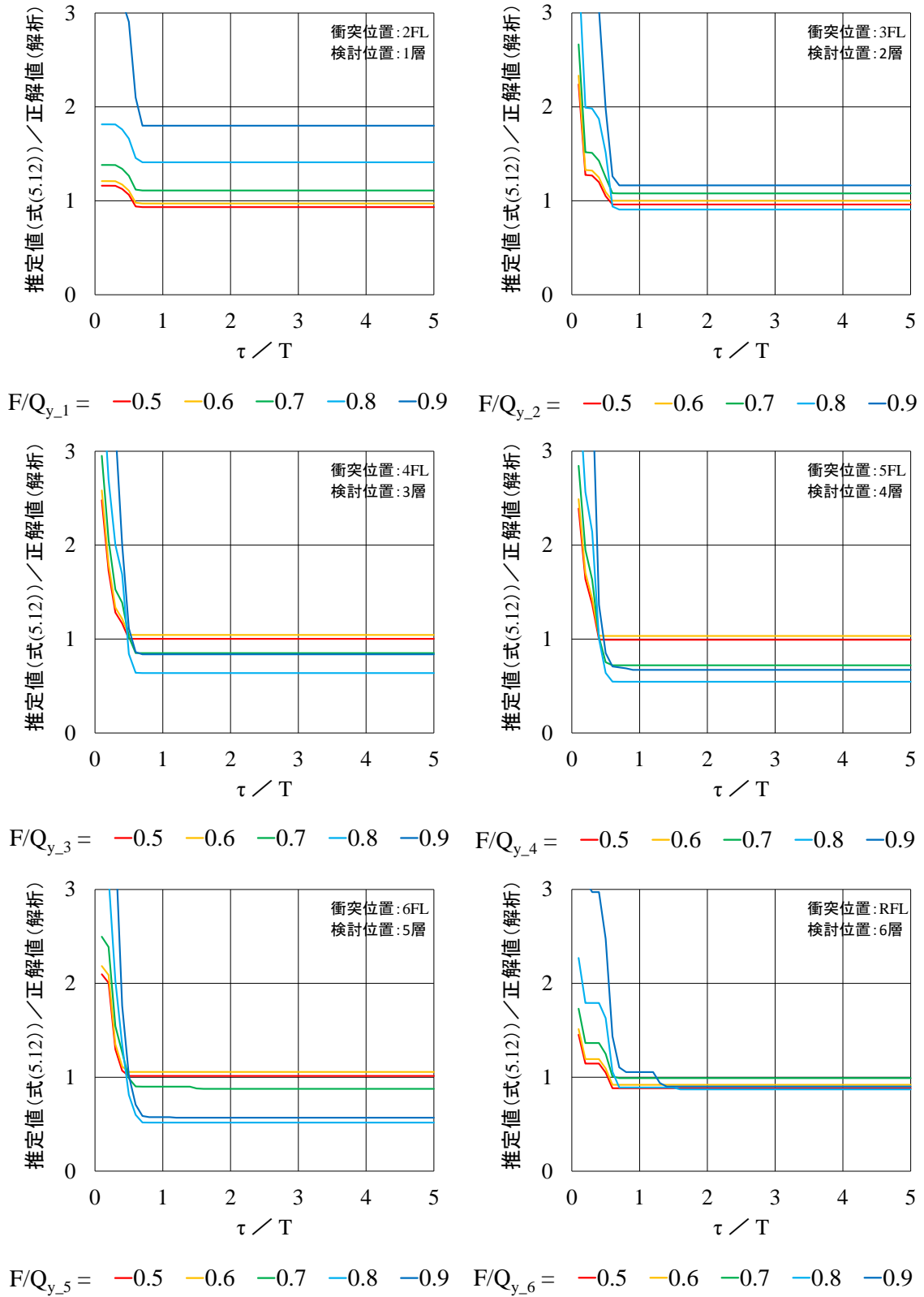


図 5.46 衝撃外力のみに対する式(5.12)の6質点系モデルの応答推定精度

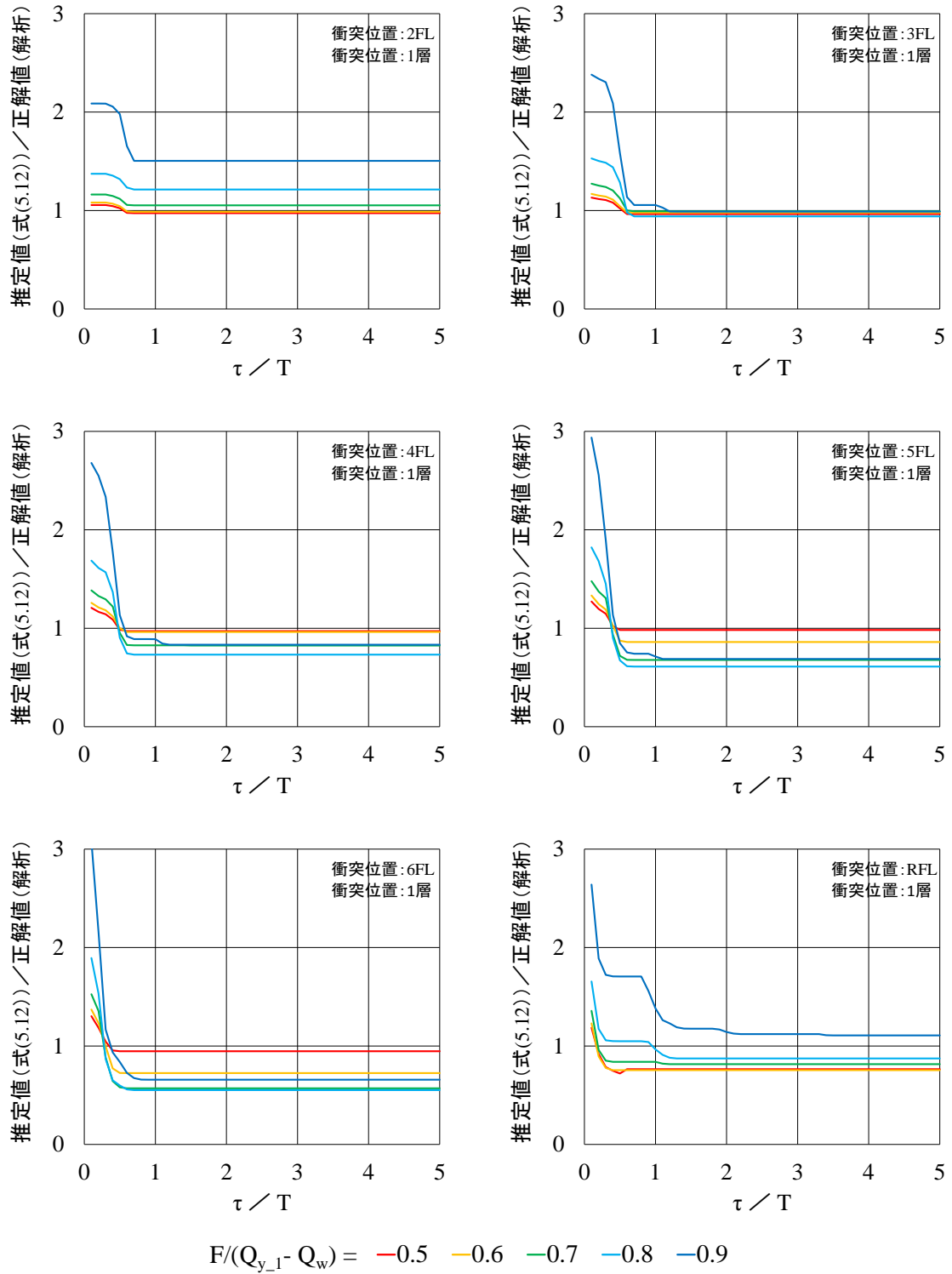


図 5.47 津波波力および衝撃外力に対する式(5.12)の6質点系モデルの応答推定精度

5.4 津波避難ビルを想定した簡易評価手法の適用

以上、前節までにおいては、特定の建築物は対象とせず、一般的な議論により、津波波力および衝撃外力に対する弾塑性系の応答性状の検討と、比較的応答が大きい衝突位置以下を対象に、最大応答の簡易評価手法の提案を行った。本節では、津波避難ビルを想定し、その津波波力および衝撃外力に対する最大応答の把握と、5.3 節において提案した推定手法 ($F/(Q_{y,j} - F_{w,j}) < 0.5$ では式(5.13), $0.5 \leq F/(Q_{y,j} - F_{w,j}) < 1.0$ では式(5.12)) の適用性の検討を行う。

5.4.1 解析緒元

① 解析対象モデル

検討対象建築物は、3 層および 6 層（階高 3 m）の整形な建築物とし、その $B \times D = 18 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ および $B \times D = 54 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ (B を津波受圧面における幅とする)、単位面積重量は 12 kN/m^2 、復元力特性はバイリニア型とし、その弾性剛性は建築物が高さ方向に直線一次モード形状となるように設定する。また、降伏時ベースシア係数は $C_o = 0.30, 0.55$ とし、降伏変形角は $C_o = 0.30$ の場合は純ラーメン構造を想定して $1/150$, $C_o = 0.55$ の場合は壁式構造を想定して $1/300$ としてそれぞれ設定する。同建築物について、前節における検討と同様に多質点系モデルに置換し、津波波力および衝撃外力に対する最大応答層間変形を検討する。

② 入力外力

津波波力は、3 層建築物に対しては浸水深 $h = 3 \text{ m}$ 、6 層建築物に対しては $h = 3 \text{ m}, 6 \text{ m}$ とし、水深係数は $a = 2.0$ 、開口率は 0.3 、とそれぞれ設定し、文献^[5,11]に提示される手法に基づき算定する。なお、同条件においては、 Q_y/F_w は 3 層建築物に対しては $0.3 \sim 0.5$ 程度、6 層建築物に対しては $0.15 \sim 0.8$ 程度が設定されていることになる（表）。なお、本検討のように、津波浸水深が最大の時に船舶が衝突すると考慮することにより建築物の応答を安全側に評価することができるものの、船舶の衝突に対してより実状に則した合理的な設計を行う場合には、船舶が衝突する時の浸水深を別途適切に評価する必要がある。

船舶衝突時の衝撃外力は、衝突船舶の総トン数は $100 \text{ ton} \sim 1,000 \text{ ton}$ （2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時に比較的多くの漂流が確認された $100 \text{ ton} \sim 500 \text{ ton}$ を含む（2 章））、船種は漁船に代表される分類 B、一般貨物船に代表される分類 D、および撒積貨物船に代表される分類 E（船種分類については 2.2.2 項参照）、積荷は半載状態、衝突速度は $2 \text{ m/s}, 4 \text{ m/s}, 6 \text{ m/s}$ （船舶の実衝突事例における速度に基づく）、としてそれぞれ設定し、3.4 節に定義した式(3.11)および式(3.12)によりその一定荷重 F および荷重作用継続時間 τ を算定する。また、船舶の衝突位置は、浸水深 h が 3 m のときは 3 FL（高さ 6 m ）、 $h = 6 \text{ m}$ のときは 4 FL（高さ 9 m ）として設定する。

③ 数値積分法

数値積分法は前節と同様に設定し、積分時間刻みは 0.001 秒、減衰定数は弾性一次モードに対して 0.02 として設定する。

以上の条件に基づき、図 5.48 に示す 10 ケースについて検討を行う。各ケースにおける F_w/Q_y および $F/(Q_y - F_w)$ は表 5.7 に示すとおりである。

なお、本研究では船舶の衝突に対して建築物全体が一体的に挙動することを仮定しているが、そのためには建築物の床スラブが船舶衝突時衝撃外力を平面的に建築物全体に伝達する必要がある。そこで、例えば厚さ $t = 280 \text{ mm}$ (津波避難ビル設計例^[5.21]を参照した)、 $F_c = 24 \text{ N/mm}^2$ (短期許容せん断応力度 $f_s = (0.49 + 24/100) \times 1.5 = 1.1 \text{ N/mm}^2$)、奥行 $D = 12 \text{ m}$ の床スラブを想定すると、その短期許容せん断力 Q_{as} は式(5.14)より 3,679 kN と求まり、総トン数 500 ton の衝撃外力 $F = 3,301 \text{ kN}$ を上回る。よって、津波来襲時において陸域に遡上し得る、すなわち建築物に衝突し得る割合が比較的高かった総トン数 500 ton 未満の船舶 (2 章) の衝突に対しては、特別な配慮をしなくても建築物全体が一体的に挙動するよう設計し得ることがわかる。

$$Q_{as} = f_s t D = 3679 \text{ kN} \quad (5.14)$$

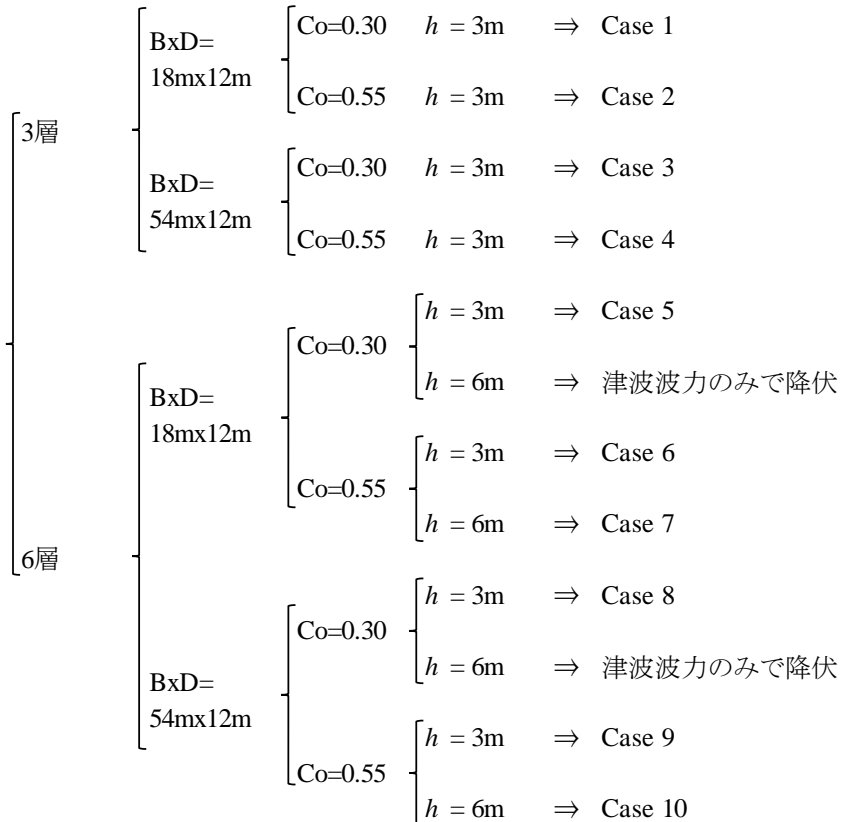


図 5.48 簡易評価手法の適用を行う検討ケース

表 5.7 衝撃外力および津波波力に対する各モデルの F_w/Q_y および $F/(Q_y - F_w)$ の値

検討位置	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$
3層	0	0	0	0	0	0	0	0
2層	0.071	0.62~2.95	0.071	0.33~1.55	0.071	0.21~0.98	0.071	0.11~0.52
1層	0.54	1.04~4.91	0.54	0.37~1.76	0.54	0.35~1.64	0.54	0.12~0.59

検討位置	Case 5		Case 6		Case 7		Case 8	
	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$
6層	0	0	0	0	0	0	0	0
5層	0	0	0	0	0	0	0	0
4層	0	0	0	0	0.023	0	0	0
3層	0	0	0	0	0.17	0.19~0.87	0	0
2層	0.031	0.26~1.24	0.017	0.14~0.66	0.43	0.24~1.14	0.031	0.087~0.42
1層	0.27	0.33~1.56	0.15	0.15~0.73	0.8	0.65~3.04	0.27	0.11~0.52

検討位置	Case 9		Case 10	
	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$	F_w/Q_y	$F/(Q_y - F_w)$
6層	0	0	0	0
5層	0	0	0	0
4層	0	0	0.023	0
3層	0	0	0.17	0.062~0.29
2層	0.017	0.047~0.22	0.43	0.080~0.38
1層	0.15	0.051~0.24	0.8	0.22~1.01

* 網掛けは衝突直下階を、赤字は応答が最大となる層を、それぞれ示す。

5.4.2 簡易評価手法の適用

図 5.48 の検討ケース 1～10 に基づき, 図 5.49～図 5.68 には, 対象建築物および入力外力の条件, ならびに, 同建築物の津波波力および衝撃外力に対する応答層間変形角を示す。入力条件を示した各図においては, 建築物の規模および構造形式 (ラーメン構造 ($Co = 0.30$) もしくは壁式構造 ($Co = 0.55$)), 津波波力および衝撃外力の作用位置を, それぞれ示す。応答層間変形角を示した各図においては, 横軸に衝突船舶の総トン数を, 縦軸に建築物の応答層間変形角を, それぞれとり, 建築物の降伏変形角 δ_y ($Co = 0.30$ の場合は $1/150$, $Co = 0.55$ の場合は $1/300$), 津波波力のみに対する応答層間変形角 δ_w , および前節の検討に用いた $F/(Q_y - F_w)$ (これのみ第二軸にプロットする) を併せて示している。また, 応答層間変形角の解析値については, 衝突速度を着色により (2 m/s : 赤色, 4 m/s : 緑色, 6 m/s : 青色), 船種分類を線種により (分類 B (主に漁船) : 直線, 分類 D (主に一般貨物船) : 破線, 分類 E (主に撒積貨物船) : 点線), それぞれ区別してプロットし, 式 (5.12) および式(5.13)により求まる推定値は, その適用条件である $F/(Q_y - F_w) < 1.0$ の範囲において黒線により示した (なお, 同推定式は応答が最大となる層を対象とするため, ここでは応答が最も大きい 1 層においてのみ推定値をプロットする)。すなわち, 着色した線 (赤色, 緑色, 青色) と黒色の線とが一致すれば, 両式が精度よく最大応答変形角を推定することとなる。

各図より, 建築物の各層の応答は, 衝突船舶の総トン数の増大に伴い増加し, また, 応答が最大となる 1 層においては, 特に $F/(Q_y - F_w)$ (第二軸にプロットした灰色線) が 1.0 に近づくにつれて急激に増大することを確認することができる。また, 応答の衝突速度および船種分類による差異, すなわち衝撃外力の荷重作用継続時間 τ (式(3.12)) による差異 (荷重 F は総トン数にのみ依存するため) は, 建築物が弾性領域にとどまる場合には比較的小さいものの, 弾塑性領域に至ると大きくなる傾向が得られる。これは, 先述のとおり, $F/(Q_y - F_w) \geq 1.0$ の場合には, 衝突終了程度まで応答が増大するため (例えば図 5.8), τ が長いほど最大応答が大きくなるためである。

応答が最大となる 1 層について, 最大応答層間変形の推定値と解析値とを比較すると, 応答が弾性領域にとどまる場合は, 両者は概ね良く整合するものの, 応答が弾塑性領域に至る場合は, 両者は必ずしも整合しない。しかし, 先述のとおり, 設計実務においては塑性率に上限値を設けることが一般的であるため, 次に, Case1～10 における式(5.12)および式(5.13)の推定精度について, 塑性率 δ_{\max}/δ_y および $F/(Q_{y,1} - F_{w,1})$ と関係を図 5.69 および図 5.70 に示す。両図では, 図 5.69 では荷重作用継続時間 τ が最も長いケースを, 図 5.70 では τ が最も短いケースを, それぞれ想定し, 分類 B の船舶 (3 分類の中で最も重量が大きい) が 6 m/s で衝突する場合, および分類 D の船舶 (3 分類の中で最も重量が小さい) が 2 m/s で衝突する場合を, それぞれ設定した。まず, 図 5.69 より, $F/(Q_{y,1} - F_{w,1})$ が 0.7 程度以上において最大応答 δ_{\max}/δ_y が急激に増大し, $F/(Q_{y,1} - F_{w,1}) = 0.8$ 程度で塑性率 $\delta_{\max}/\delta_y = 2.0$ 程度に達すること, $F/(Q_{y,1} - F_{w,1}) \leq 0.9$ (塑性率 $\delta_{\max}/\delta_y \leq 2.0$) では両式が非常に良い推定精度を与えることが, それぞれわかる。一方, 図 5.70 では, 比較的 τ が短い結果にばらつきが生じており, 推定精度も図 5.68 よりやや過大評価する傾向にあるものの, $F/(Q_{y,1} - F_{w,1}) \leq 0.8$ 程度においては概ね良い推定精度を与えることがわかる。

(1) Case 1

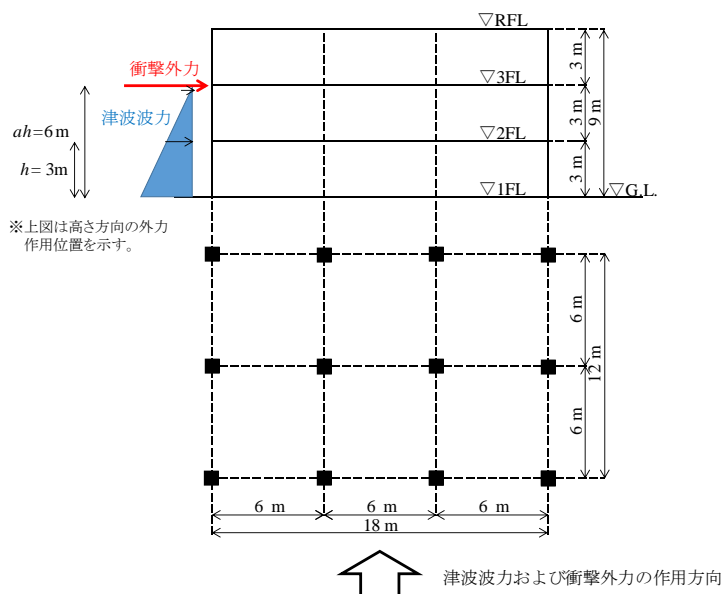


図 5.49 建築物および外力の条件 (Case 1)

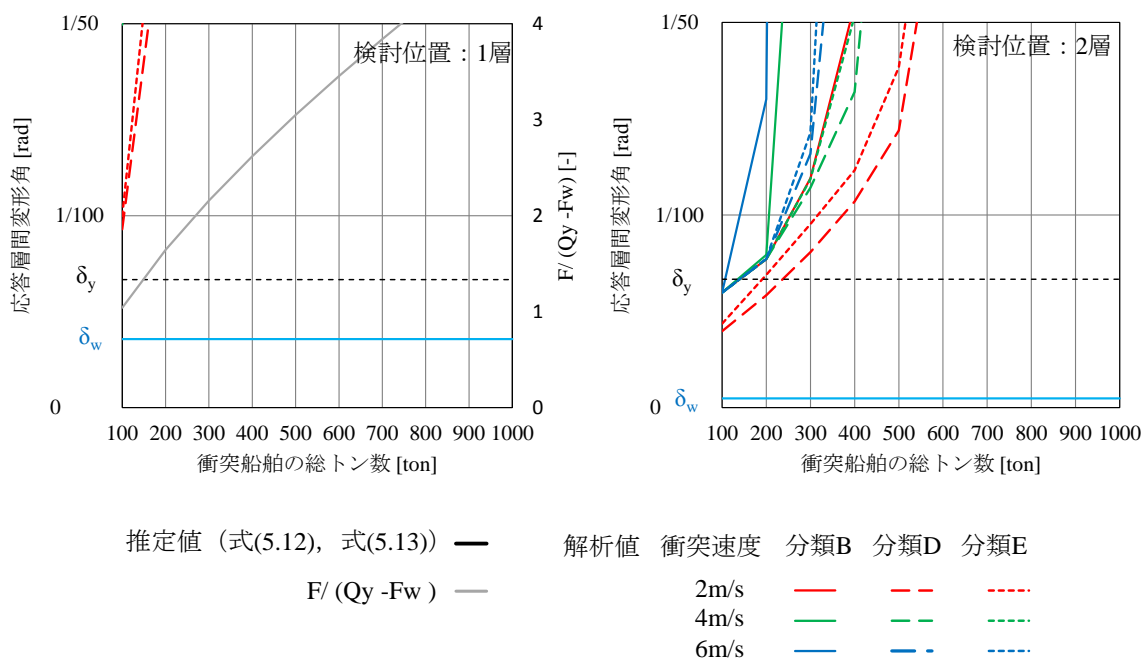


図 5.50 推定式と解析値との比較 (Case 1)

(2) Case 2

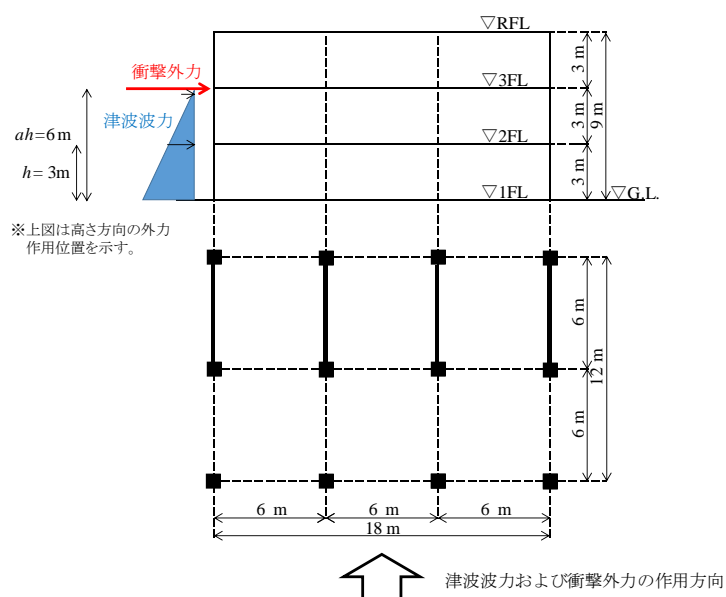


図 5.51 建築物および外力の条件 (Case 2)

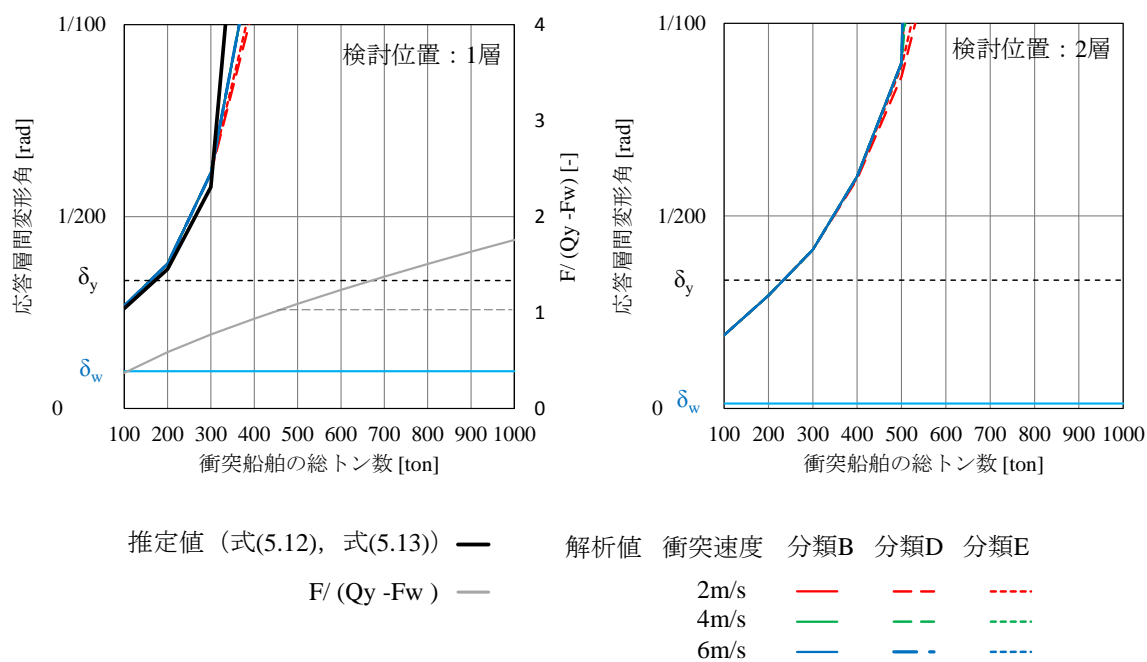


図 5.52 推定式と解析値との比較 (Case 2)

(3) Case 3

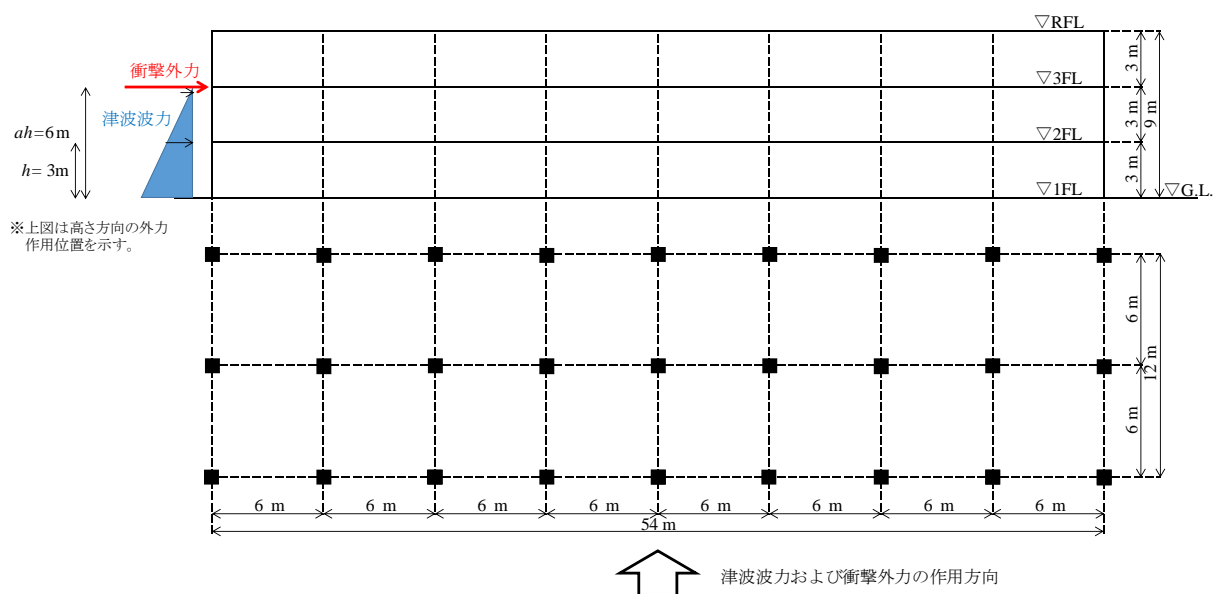


図 5.53 建築物および外力の条件 (Case 3)

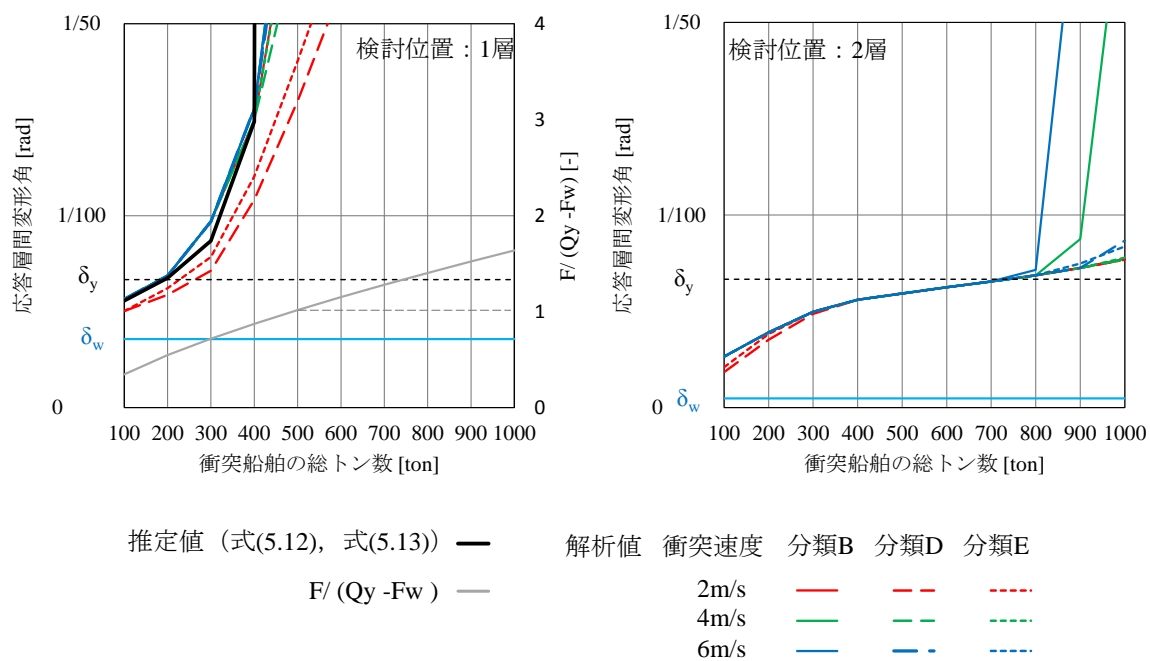


図 5.54 推定式と解析値との比較 (Case 3)

(4) Case 4

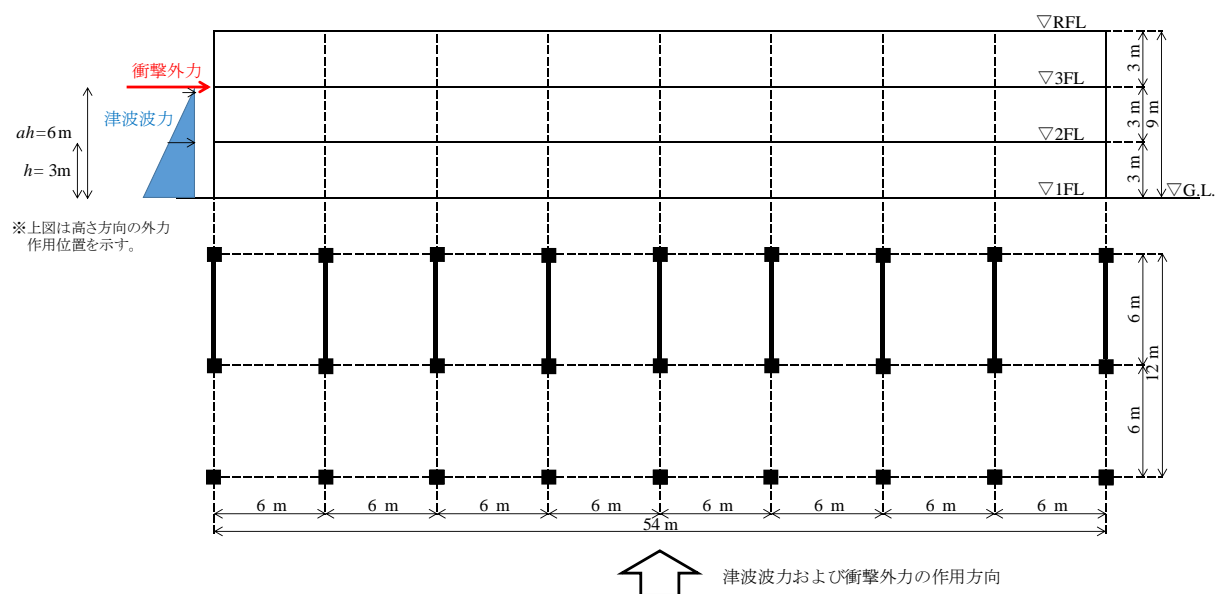


図 5.55 建築物および外力の条件 (Case 4)

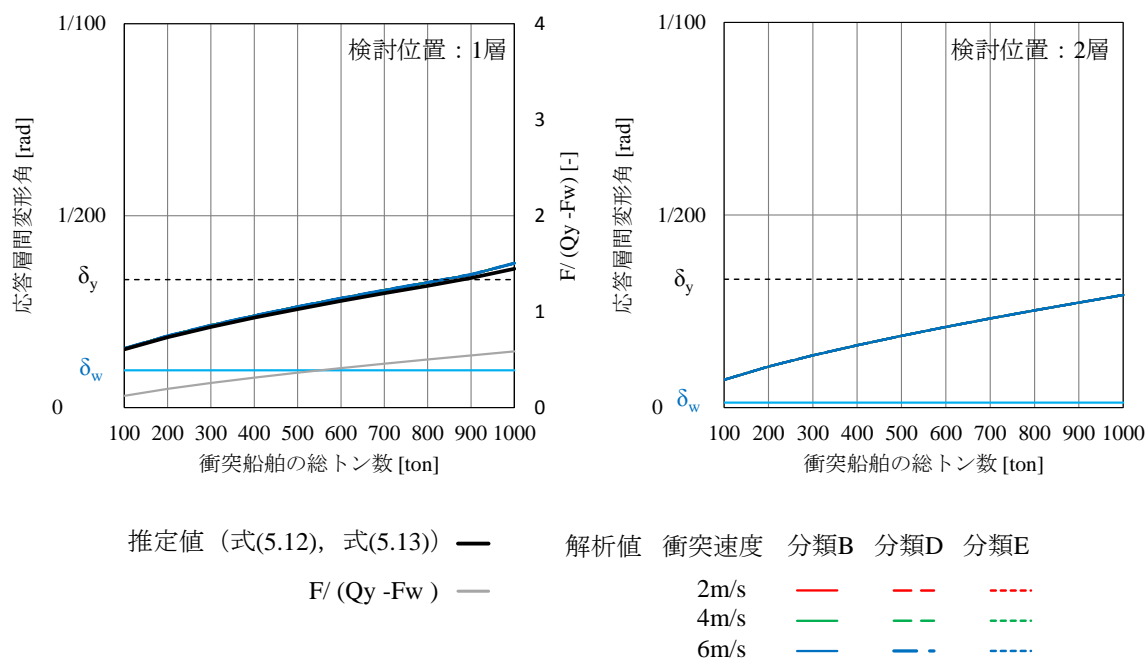


図 5.56 推定式と解析値との比較 (Case 4)

(5) Case 5

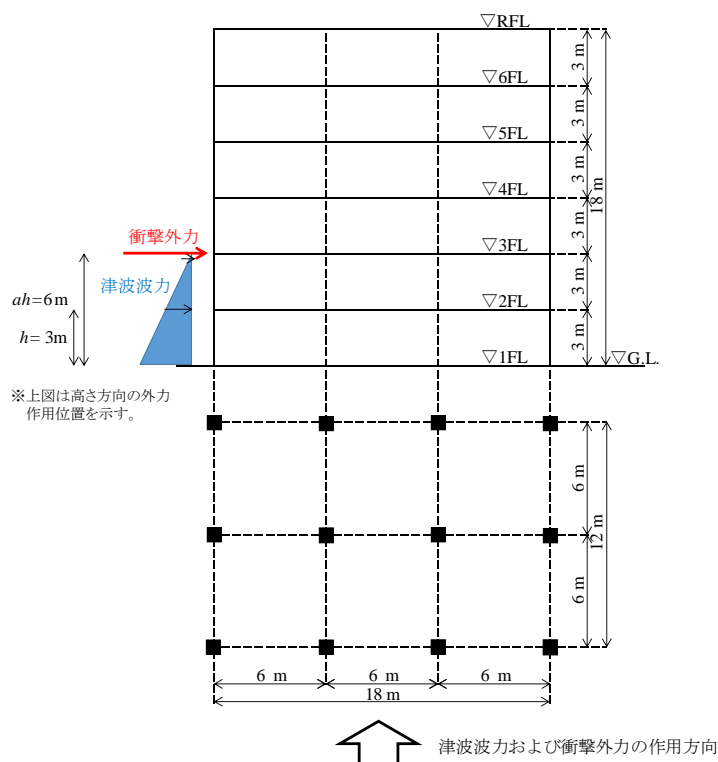


図 5.57 建築物および外力の条件 (Case 5)

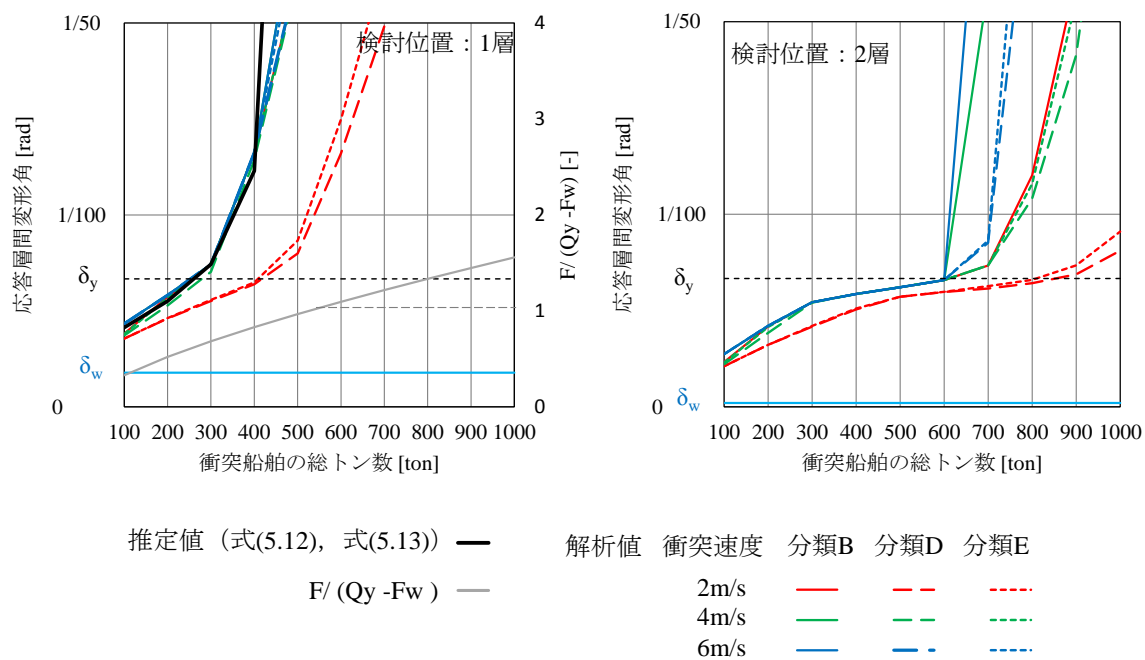


図 5.58 推定式と解析値との比較 (Case 5)

(6) Case 6

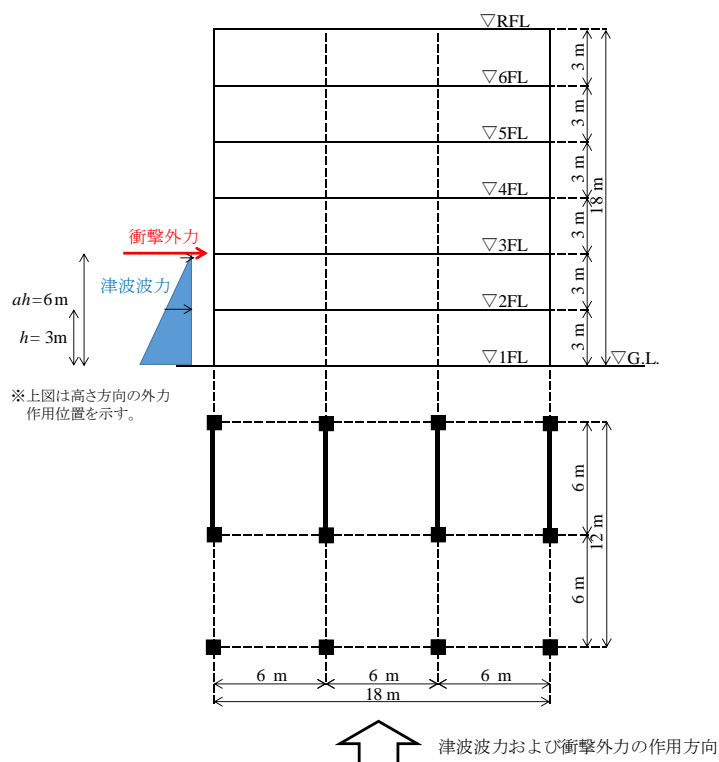


図 5.59 建築物および外力の条件 (Case 6)

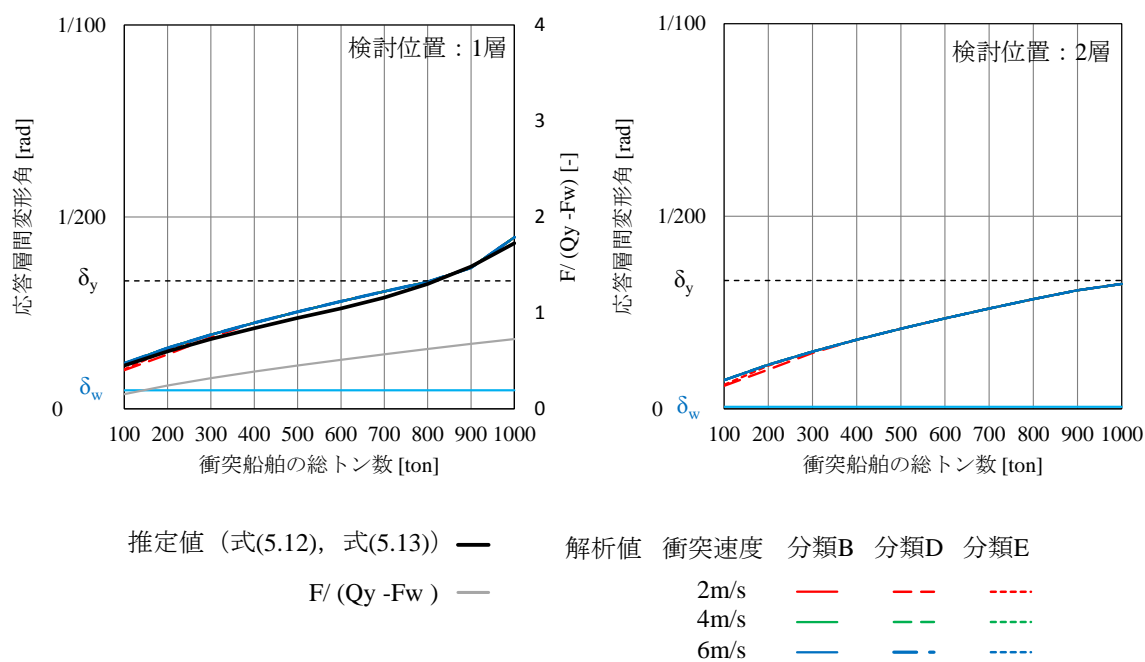


図 5.60 推定式と解析値との比較 (Case 6)

(7) Case 7

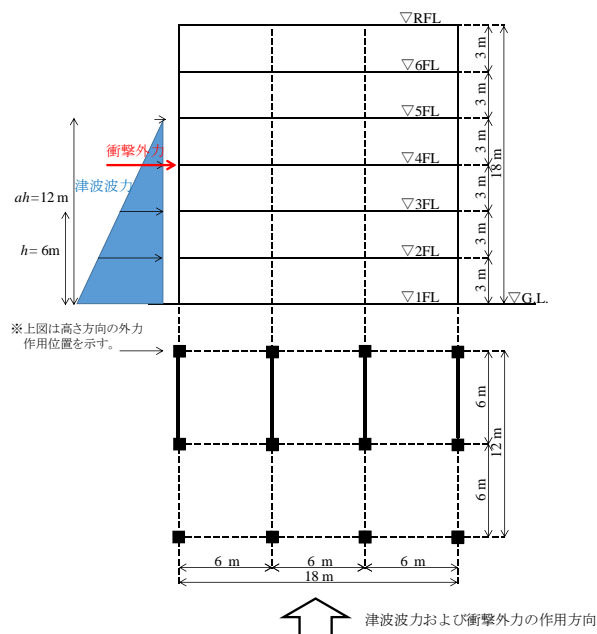


図 5.61 建築物および外力の条件 (Case 7)

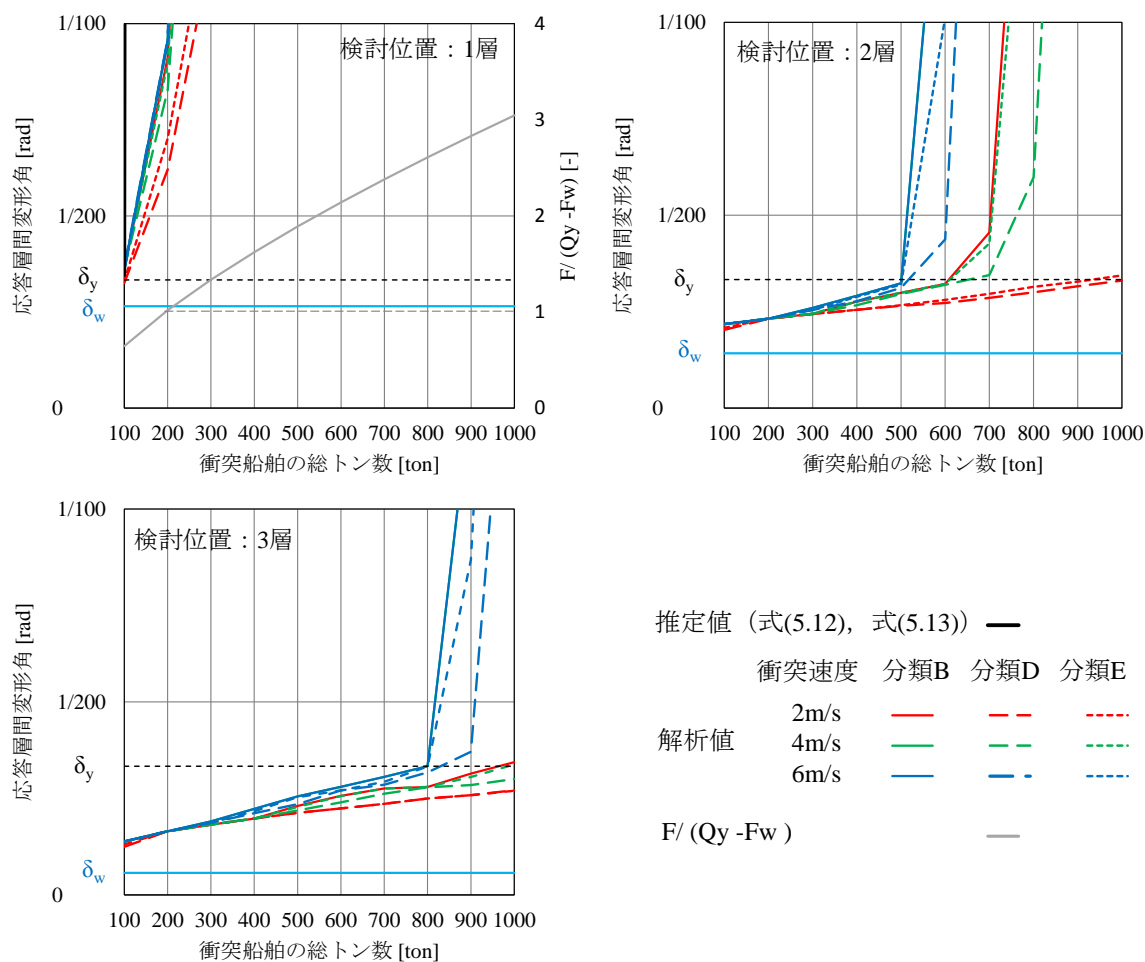


図 5.62 推定式と解析値との比較 (Case 7)

(8) Case 8

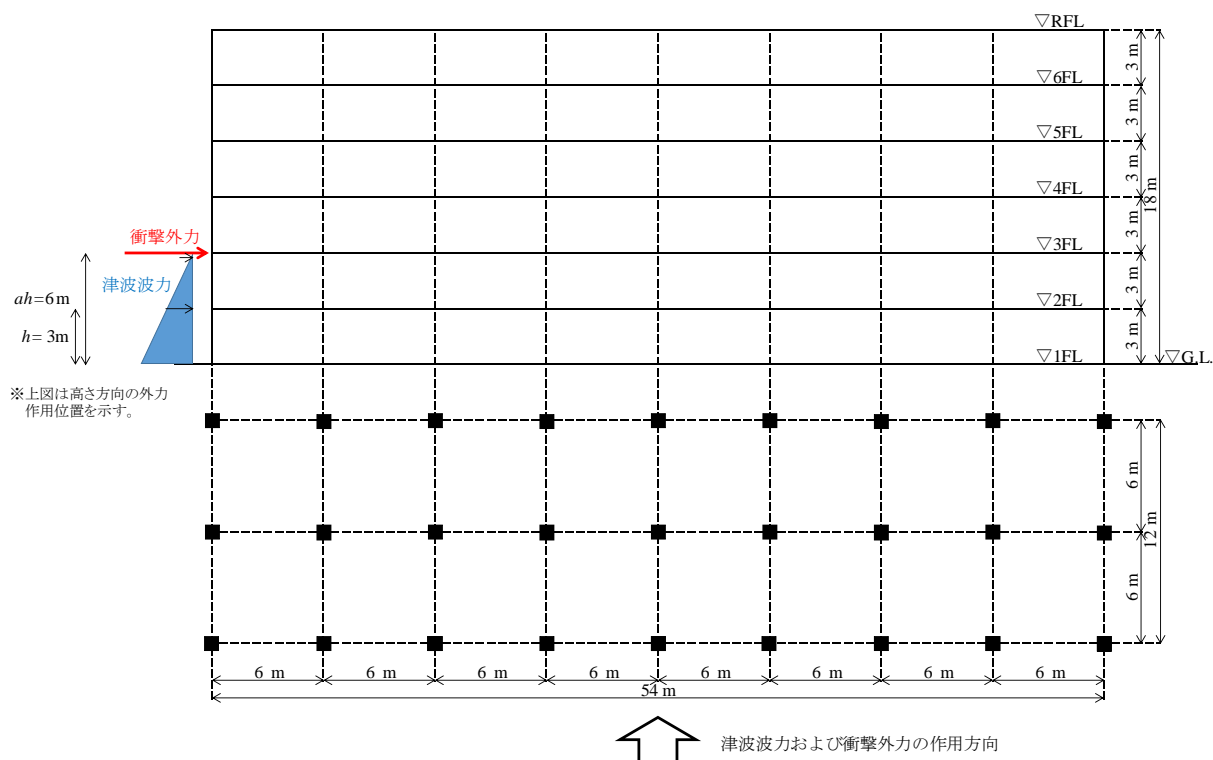


図 5.63 建築物および外力の条件 (Case 8)

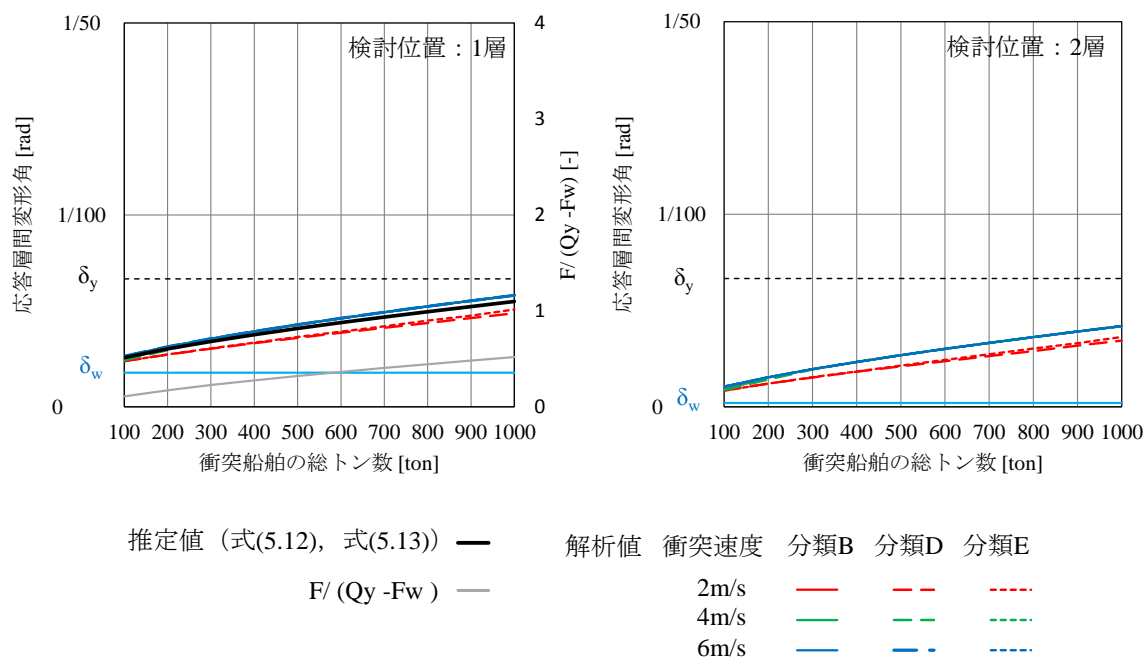


図 5.64 推定式と解析値との比較 (Case 8)

(9) Case 9

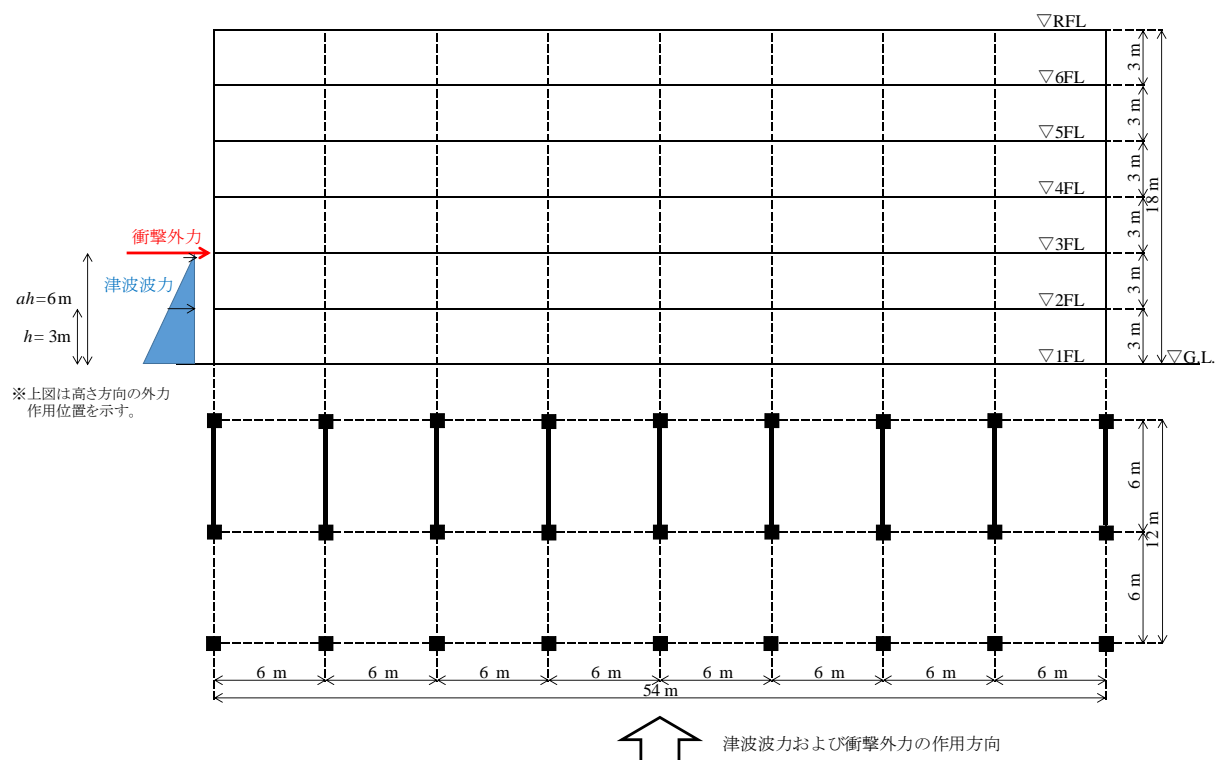


図 5.65 建築物および外力の条件 (Case 9)

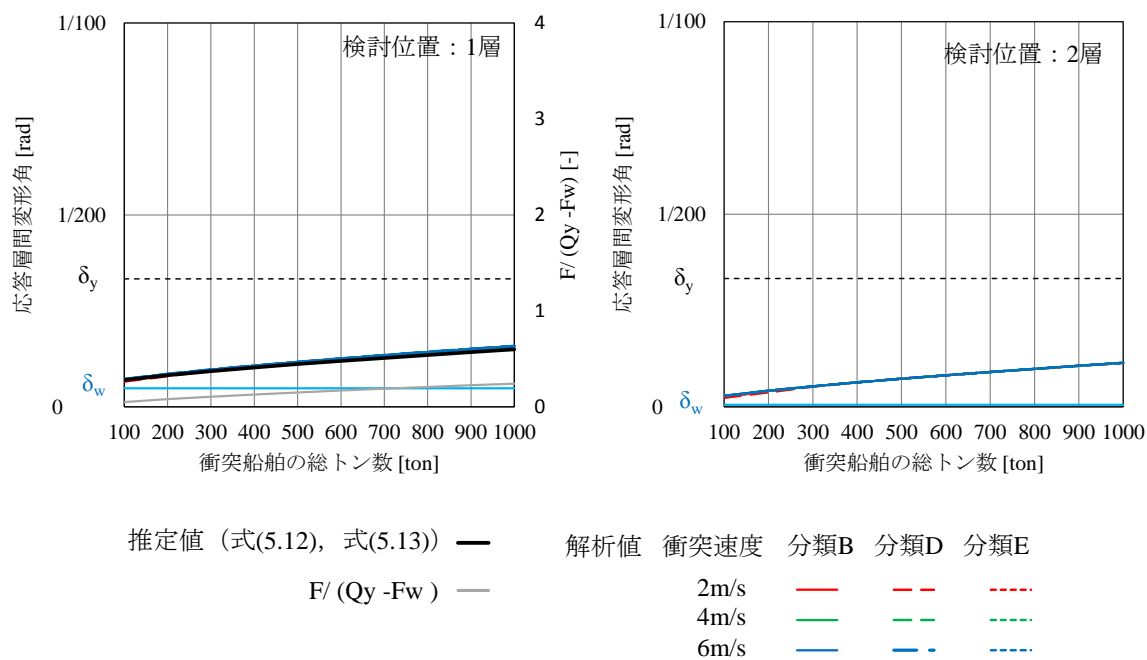


図 5.66 推定式と解析値との比較 (Case 9)

(10) Case 10

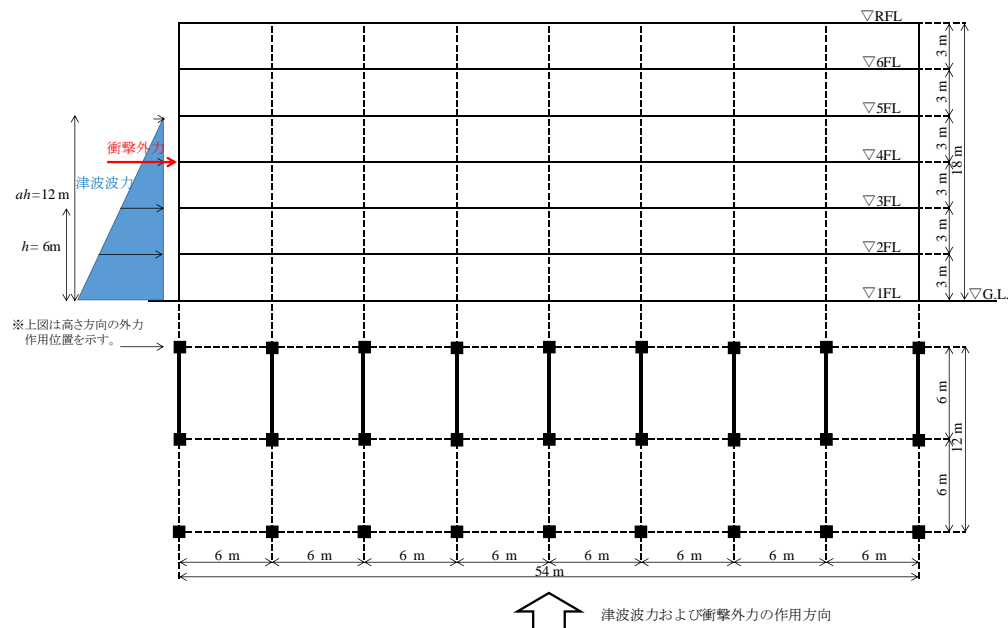


図 5.67 建築物および外力の条件 (Case 10)

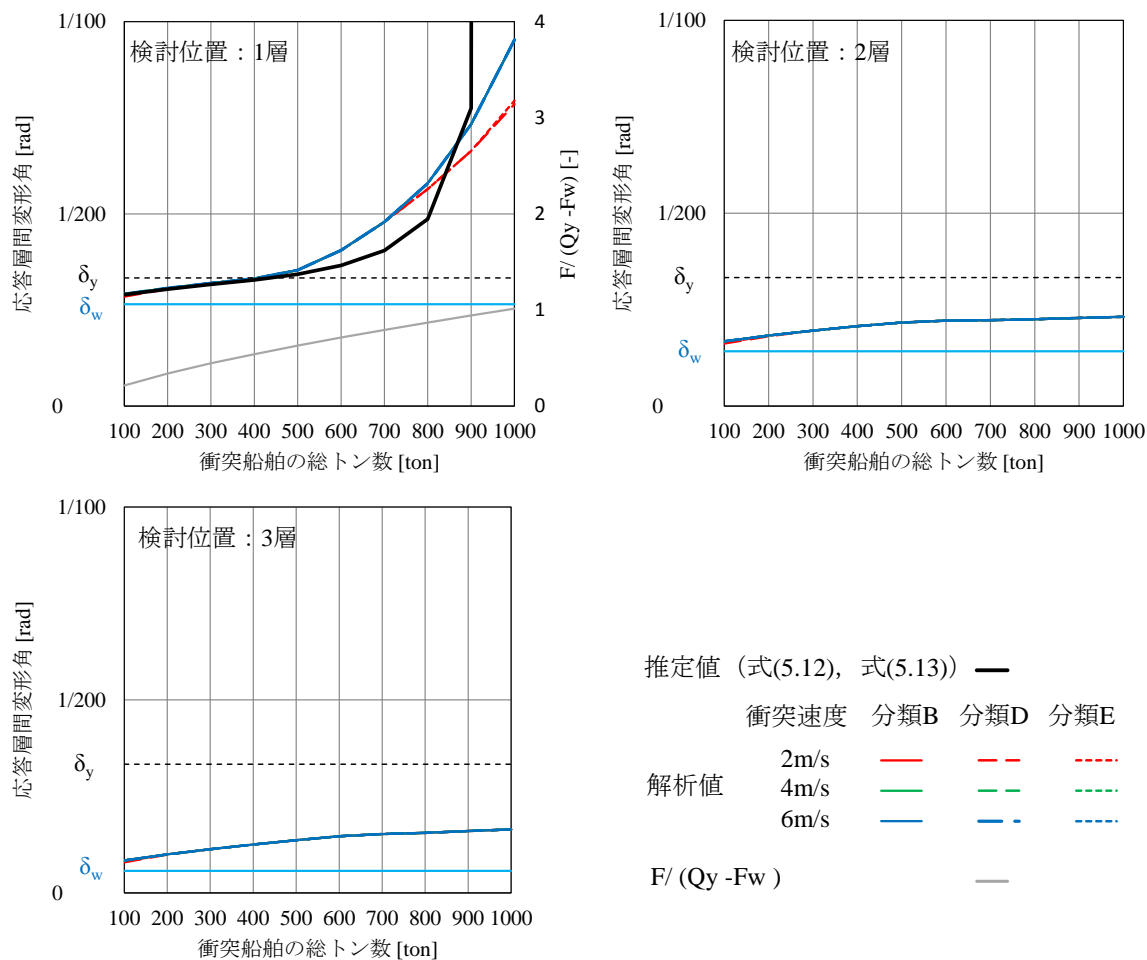


図 5.68 推定式と解析値との比較 (Case 10)

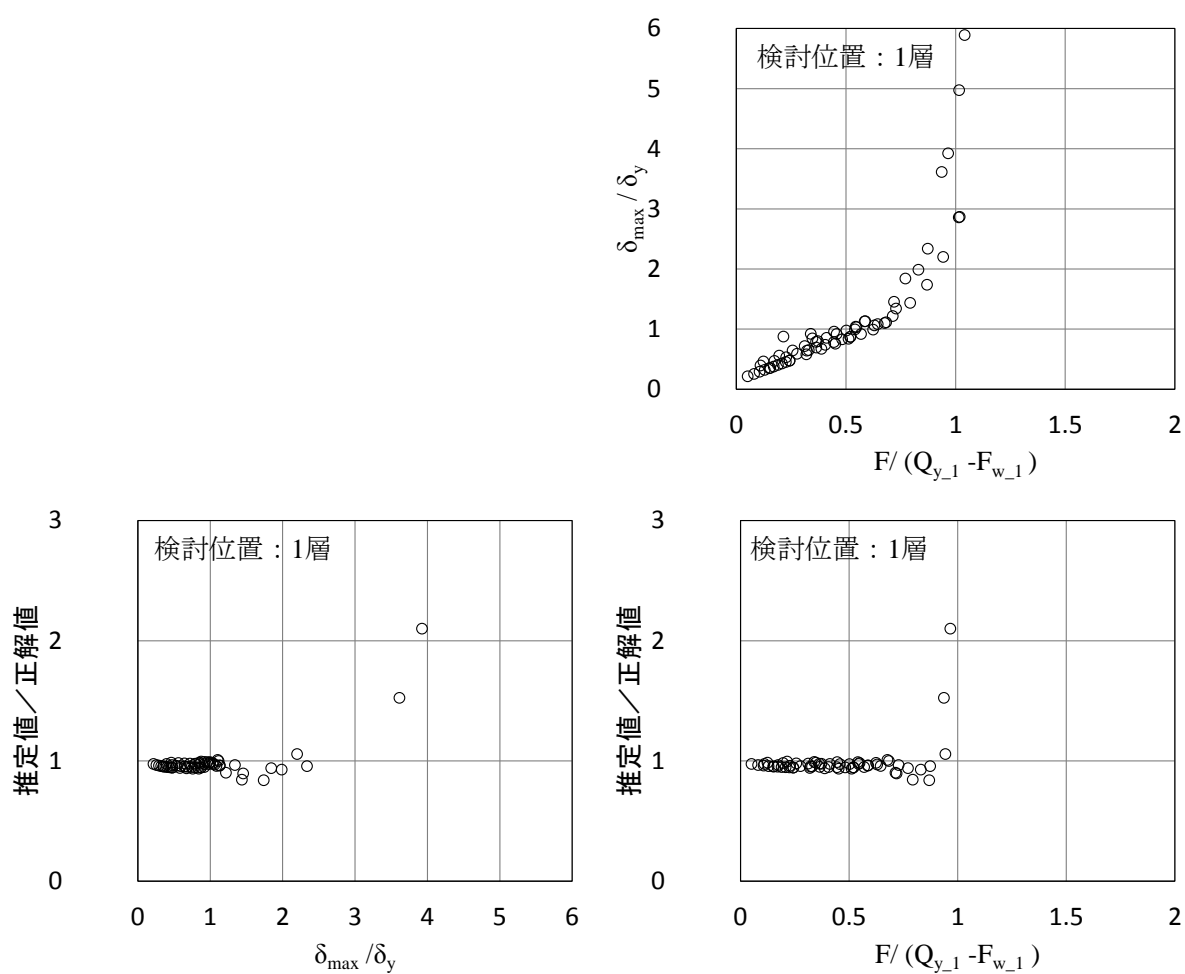


図 5.69 分類 B の船舶衝突時の塑性率，推定精度， $F/(Q_{y1} - F_{w1})$ の関係
(衝突速度：6 m/s，Case 1～Case 10)

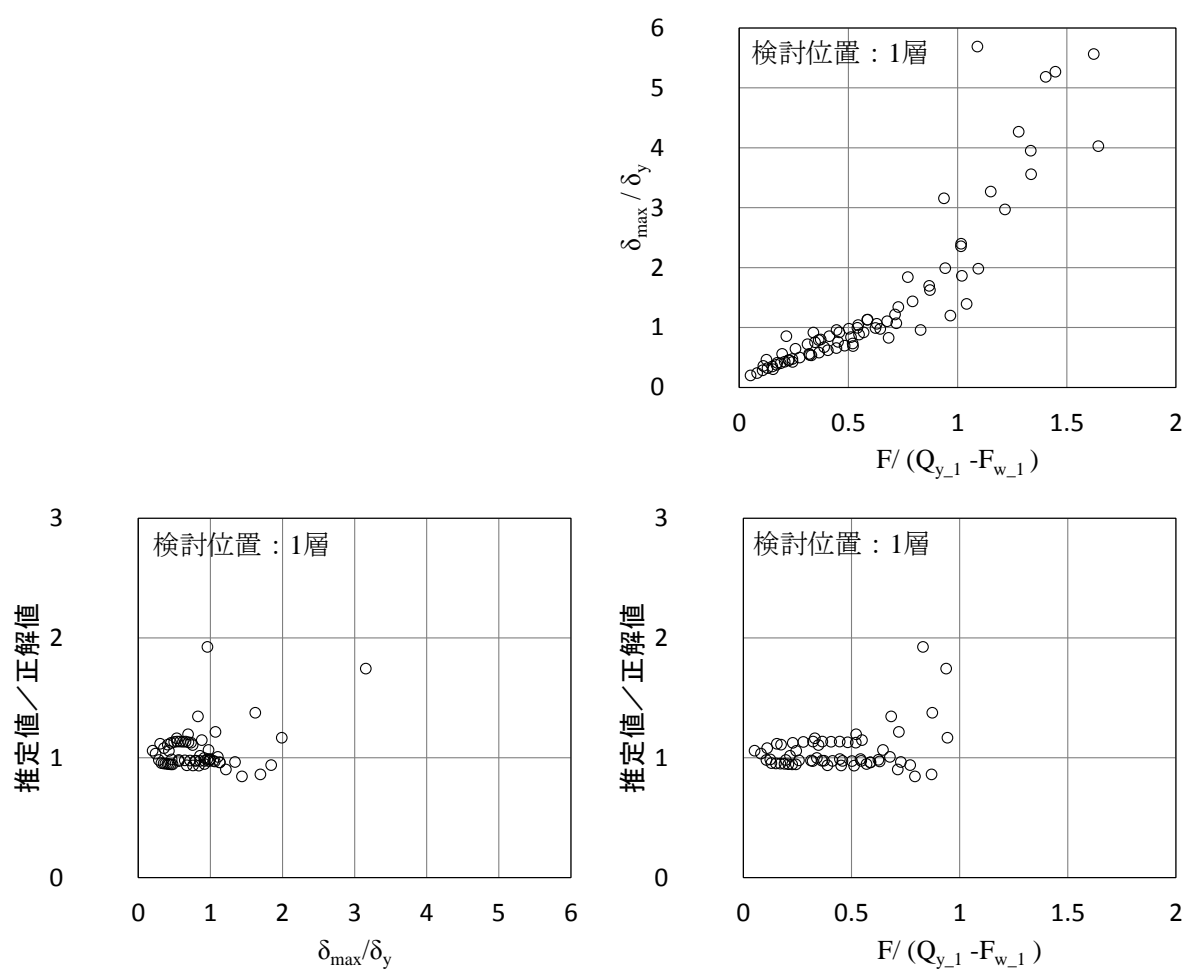


図 5.70 分類 B の船舶衝突時の塑性率，推定精度， $F/(Q_{y1} - F_{w1})$ の関係
(衝突速度：2 m/s，Case 1～Case 10)

5.5 まとめ

本章では、津波漂流船舶衝突時の衝撃外力に対する建築物全体の弾塑性応答特性を検討し、その検討結果に基づき、最大応答の簡易評価手法を提案した。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 衝撃外力に対する1質点系モデルの最大弾塑性応答は、 τ/T の増大と共に増加するものの、最終的にはある一定値に収束し、その収束値は $F/(Q_y - F_w)$ の増大と共に増加し、その増加は $F/(Q_y - F_w)$ が0.8~0.9程度以上において顕著であることを明らかにした。
- 2) 衝撃外力に対する多質点系モデルの最大弾塑性応答は、 τ_1/T が0.5以上の場合には、 $F/(Q_y - F_w)$ が最大となる層において最大となる傾向を確認した。また、その応答は τ_1/T の増大と共に増加するものの、最終的にはある一定値に収束し、その収束値は $F/(Q_y - F_w)$ の増大と共に増加し、その増加は $F/(Q_y - F_w)$ が0.7~1.0程度以上において顕著であることを明らかにした。
- 3) 衝撃外力による仕事と建築物の復元力による仕事とが等値と仮定し、さらにその弾性限における推定値が4章で提案した推定式により求まる値と一致するように補正することで $F/(Q_y - F_w)$ の関数となる最大応答層間変形の推定式(5.12)および式(5.13)を提案し、これにより応答塑性率が2程度以下にとどまる場合にはその値は精度良く推定されること、その場合には概ね $F/(Q_y - F_w)$ が0.8程度以下となることを明らかにした。なお、2)に上述のとおり $F/(Q_{y,j} - F_{w,j})$ が1.0に近づくと最大応答は急激に増大するため、同条件を満たすように建築物の耐力を定めることにより、衝撃外力の変動により最大応答が顕著に増大することを防止できると考えられる。

以上の知見に基づき、津波漂流船舶衝突時の衝撃外力に対する建築物を設計する手順としては、まず、①応答が最大となる層を各層の $F/(Q_y - F_w)$ の値に着目することで特定し（この時点で $F/(Q_y - F_w)$ が0.8より大きい場合は建物の耐力 Q_y を上昇させるよう再設計する）、続いて、②同層の最大応答を推定式(5.12)、(5.13)を用いて算定し、③その推定値が許容応答層間変形以内におさまることを確認する、という流れを想定している。

[参考文献]

- [5.1] 国土交通省：東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針，2011 年 11 月
- [5.2] 国土交通省国土交通省国土技術政策総合研究所：津波避難ビル等の構造上の要件の解説，2012 年 2 月

第 6 章

提案応答評価手法を用いた 対津波漂流物設計への応用

6. 提案応答評価手法を用いた対津波漂流物設計への応用

6.1 はじめに

本章では、以上の2章～5章における検討によって得られた知見に基づき、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計手順を提案する。また、津波避難ビルを対象に、津波波力に加え船舶衝突時衝撃外力を考慮することによる必要耐力の変化について検討する。ただし、本研究では、両外力に対する建築物上部構造の応答のみに着目しているため、両外力に対する建築物の転倒や滑動、および局所的な損傷については別途検討する必要がある。

6.2 津波漂流船舶の衝突に対する設計手順

(1) 設計フロー

本研究では、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計は、図 6.1 に示す手順により行うことを提案する。同図に示すとおり、応答評価は、Ⅰ．津波漂流船舶衝突時の衝撃外力の設定、Ⅱ．設定した衝撃外力に対する応答評価、にそれぞれ分けて①～⑥の手順により行うこととする。なお、⑤については、現行の津波外力に対する構造設計手法^[6.1]の一環として実施される検討である。以下にその手順の詳細を記す。

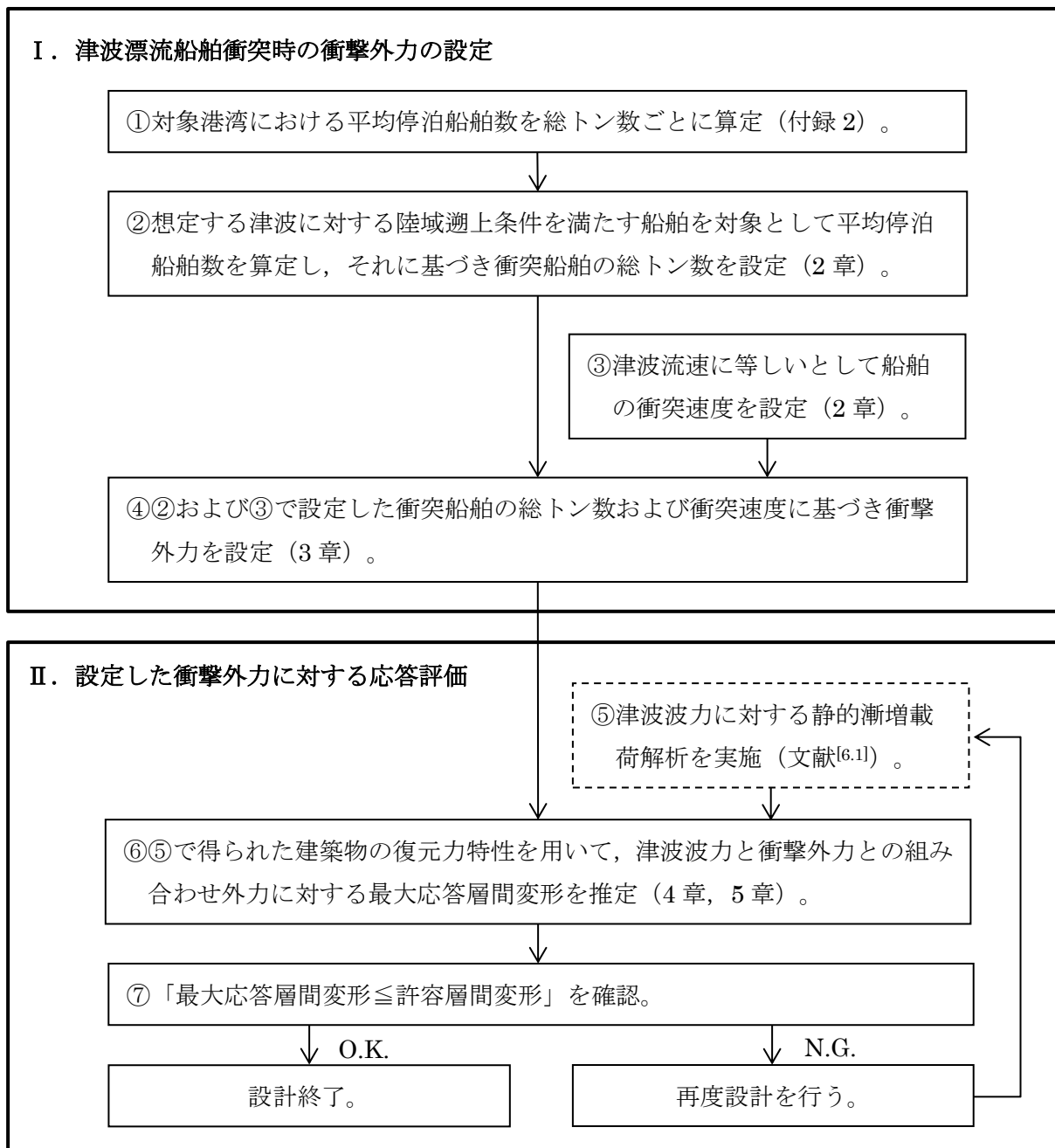


図 6.1 津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計フロー

I. 船舶衝突時の衝撃外力の設定

①対象港湾における平均停泊船舶数の算定（付録2）

津波来襲時において建築物との衝突を考慮する船舶を特定するためには、建築物近傍における船舶の在港状況（すなわち在港する船舶数およびその総トン数）を把握する必要がある。しかし、津波来襲時におけるその状況を事前に正確に予測することは極めて困難であるため、ここでは船舶の過去の位置データ等に基づき、船舶の在港状況を把握する指標として平均停泊船舶数（対象港湾において停泊している船舶数の平均値、付録2参照）を総トン数ごとに算定し、その値を総トン数の小さい船舶から累積した累積平均停泊船舶数（図6.2）を導入する。

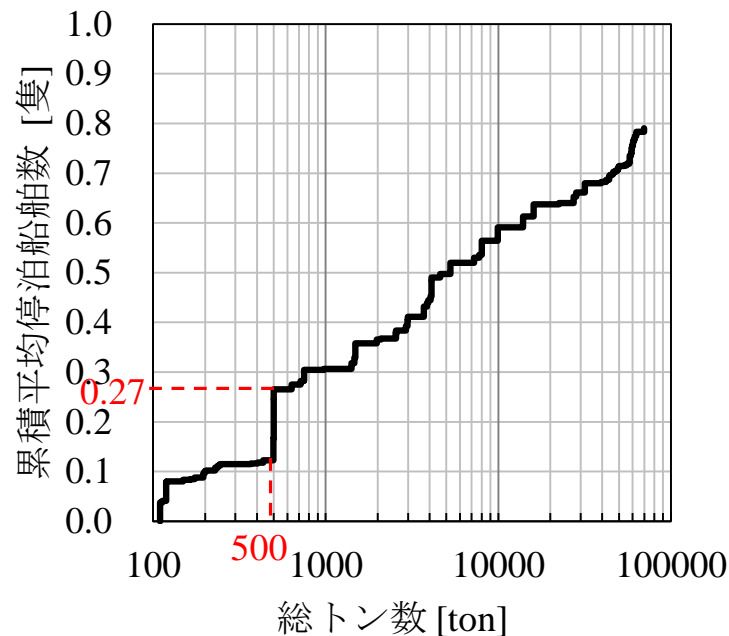


図 6.2 港湾における累積平均停泊船舶数の算定例

②陸域遡上条件を満たす船舶の平均停泊数に基づき衝突船舶の総トン数を設定

①で対象とした船舶のうち、すべての船舶が建築物に衝突に至るわけではないものの、各船舶の建築物との衝突可能性を正確に予測することは容易ではない。そこで、船舶が陸上建築物に衝突に至るには船舶が陸域に遡上することが必要条件であることに着目し、2章で得られた船舶の陸域遡上条件（すなわち「操舵不可」かつ「喫水<浸水深」）を満たす船舶のみに対象を絞った累積平均停泊船舶数を考慮することで、比較的容易に、なおかつ比較の実状に即した衝突船舶の総トン数を設定することが可能となる。同条件を満たす船舶の総トン数は、2章に先述のとおり、造船所との位置関係や、港湾の防災対策等によって異なると想定されるものの、同章では「操舵不可」である船舶は500 ton未満に比較的多いことが明らかになったことに着目し、例えば500 ton

未満の船舶のみを衝突可能性がある船舶として考慮することとすると、図 6.2 より、500 ton 未満の船舶は平均的に 0.27 隻対象港湾に停泊している、すなわち、津波来襲時に陸域に遡上し建築物に衝突し得る総トン数 100 ton～500 ton の船舶は、平均的に 0.27 隻停泊していることを把握することができる。

以上の結果に基づいて衝突船舶の総トン数を定める際には工学的な判断が必要であるが、安全側に総トン数を設定する手段としては、衝突可能性のある船舶の最大の総トン数を採用することが挙げられる。ただし、衝突船舶の総トン数をより実状に則して設定するためには、停泊船舶の総トン数の頻度分布（図 6.3 に総トン数 500 ton 未満を対象とした算定例を示す）を平均停泊船舶数より求め、これを初期条件として津波漂流シミュレーション解析を用いたモンテカルロ計算^[6.2]を実施することで衝突船舶の総トン数のハザード曲線を算定することも有用な手法の一つと考えられる（ただし、この場合には上述の平均停泊船舶数をその合計が 1 となるように基準化するため、平均停泊船舶数の隻数(上記 0.27 隻など)を確率的な検討に直接的に用いることはできない）。

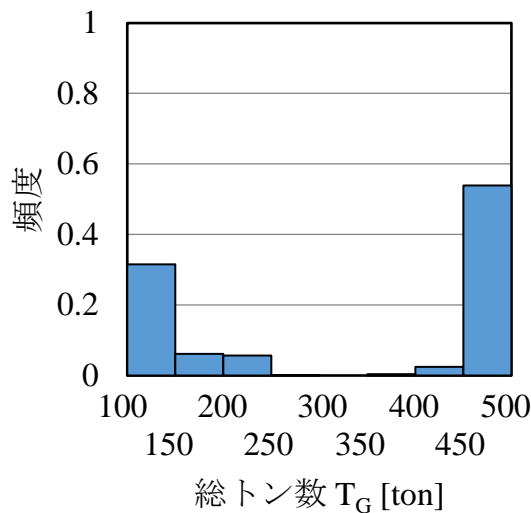


図 6.3 港湾における停泊船舶総トン数の頻度分布の算定例

③津波流速に等しいとして船舶の衝突速度を設定

船舶の衝突速度については、3 章における検討結果に基づき、津波流速に等しいとして設定する。ただし、津波流速は、自治体等が公表する津波ハザードマップには一般に明示されていないため、設計実務においてあらためて津波シミュレーション解析等を実施しない場合には、文献^[6.1]により定義される水深係数 a と、水勢を表す指標である Fr ($= v_w / \sqrt{gh}$, v_w : 流速 [m/s], g : 重力加速度 [m/s²], h : 水深 [m]) との関係について水理模型実験により導出された式(6.1)および式(6.2)^[6.3]等に基づき適宜定めることとする。

$$a = 1.0 + 0.5F_r \quad (\text{幅の小さな 3 次元構造物}) \quad (6.1)$$

$$a = 1.0 + 1.4F_r \quad (\text{壁式構造物}) \quad (6.2)$$

④衝突船舶の総トン数および衝突速度に基づき衝撃外力を設定

船舶の衝突時衝撃外力は、3章における検討結果に基づき、式(6.3)^[6.4]および式(6.4)により定まる矩形パルス波として設定する。なお、両式における船舶の総トン数 T_G および衝突速度 v は、上記②および③に定めた値を用いることとし、また、船舶の質量 m (すなわち排水量) は、3章に示した総トン数と排水量との一般的な関係を用いて定めることとする。

$$F = P_{cr} g = 1.17 T_G^{1/3} (0.82 T_G^{1/6} + 1)^3 g \quad (6.3)$$

$$\tau = mv / F \quad (6.4)$$

ここで、

P_{cr} : 船首の破壊強度 [tf]

T_G : 船舶の総トン数 [ton]

g : 重力加速度 [m/s^2]

τ : 衝撃外力の荷重作用継続時間 [s]

m : 船舶の質量 (排水量) [t]

v : 船舶の衝突速度 (津波流速に等しいとする) [m/s]

II. 設定した衝撃外力に対する応答評価

⑤津波波力に対する静的漸増載荷解析を実施

文献^[6.11]では、津波波力に対する安全性を検討するために、津波波力作用時の浮力も考慮した静的漸増載荷解析を実施することが定められている。同解析により得られる津波波力ならびに建築物の復元力特性を用いて、⑥において建築物の衝撃外力に対する応答を推定する。

⑥津波波力と衝撃外力との組み合わせ外力に対する最大応答層間変形を推定

以上の検討結果に基づき、津波波力と衝撃外力との組み合わせ外力に対する最大応答層間変形は、図 6.4 に示す入力情報 (赤字のパラメータ) を入力情報として、4章および5章により提案した手法を用いて図 6.5 に示す手順により推定する。なお、同式が精度良く最大応答を推定する条件は $F/(Q_{y,j} - F_{w,j}) \leq 0.8$ であるが、 $F/(Q_{y,j} - F_{w,j})$ が 1.0 に近づくと最大応答は急激に増大するため、同条件を満たすように建築物の耐力を定めることにより、衝撃外力の変動により最大応答が顕著に増大することを防止できると考えられる。

なお、5章に先述のとおり、津波浸水深が最大の時に船舶が衝突すると考慮することにより建築物の応答を安全側に評価することができるものの、より実状に即した合理的な設計を行う場合には、船舶が衝突する時の浸水深を別途適切に評価する必要がある。

$$\frac{\delta_{\max_j}}{\delta_{y_j}} = \frac{F_{w_j}}{Q_{y_j}} + \frac{F}{Q_{y_j}} + i \frac{F}{\sum_{j=1}^N Q_{y_j}} \quad (6.5)$$

$$\frac{\delta_{\max_j}}{\delta_{y_j}} = \frac{F_{w_j}}{Q_{y_j}} + \frac{\left(1 - \frac{F_{w_j}}{Q_{y_j}}\right)^2}{2 \left(1 - \frac{F_{w_j}}{Q_{y_j}} - \frac{F}{Q_{y_j}}\right)} \times \alpha \quad (6.6)$$

$$\alpha = \frac{2}{\sum_{j=1}^N K_j} \frac{1 + \frac{1}{i K_j}}{1 + \frac{1}{i K_j}} \quad (6.7)$$

ここで,

F : 衝撃外力 [kN]

F_{w_j} : j 層以上に作用する津波波力の合計 [kN]

δ_{\max_j} : j 層の最大応答層間変形 [m]

δ_{y_j} : j 層の降伏層間変形 [m]

Q_{y_j} : j 層の降伏耐力 [kN]

K_j : j 層の剛性 [kN/m]

N : 建築物の層数 [層]

i : 衝突位置 [-]

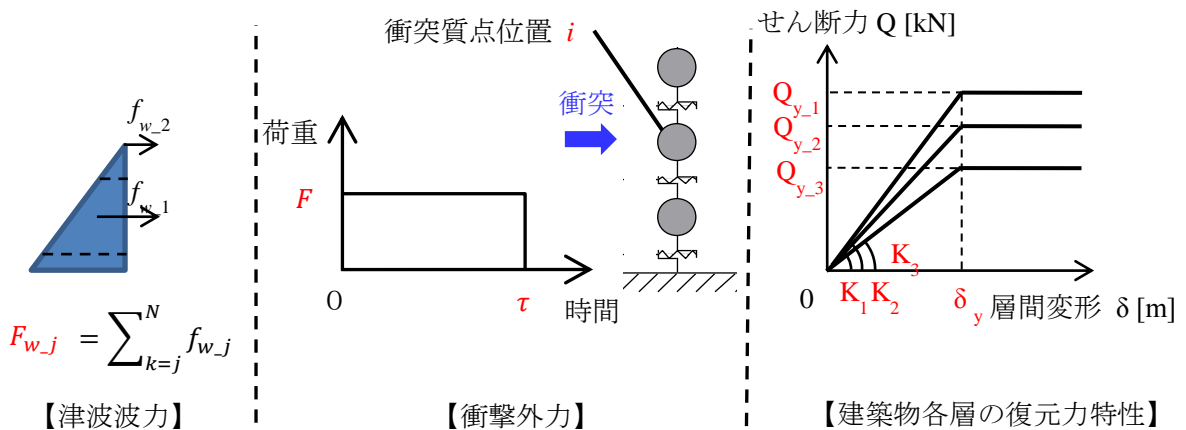


図 6.4 衝撃外力に対する建築物応答の推定に用いる入力情報

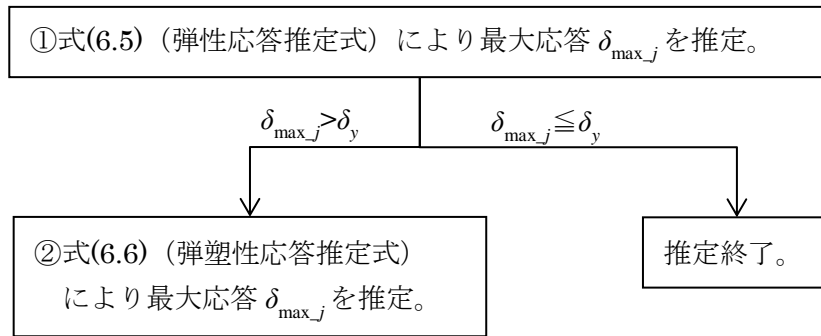


図 6.5 衝撃外力に対する建築物の最大応答層間変形の評価手順

⑦「最大応答層間変形 \leq 許容層間変形」を確認

⑥で得られた最大応答層間変形が許容層間変形以下になることを確認し、同条件を満足しない場合には、再度設計を行う必要がある。なお、許容層間変形については、対象とする建築物の要求性能等を考慮して定めることとする。

(2) 提案した設計手順による応答評価精度

以上、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計手順を提案した。本提案手法を設計実務に適用する上では、本手法において導入した仮定条件による影響や、提案した応答評価手法の精度などを把握する必要があるため、それぞれについて以下 i) ～ iii) にまとめる。

(a) 本提案手法の前提条件となる仮定

- i) 建築物の応答を過大に（安全側に）評価する仮定
 - ・船舶の衝突位置は、建築物において十分剛と仮定できる床位置であること（3.4 節）。
 - ・船舶のフレア一部による荷重とバルブ部による荷重が同時に同位置に作用すること（3.4 節）。

(b) 本提案手法で導入したが、別途検討によりさらに実状に即した設定が可能な仮定

- i) 建築物の応答を過大に（安全側に）評価する仮定
 - ・陸域遡上条件を満たす停泊船舶のうち総トン数が最大の船舶の衝突を考慮すること（7.2 節）。
 - ・船舶が津波流速に等しい速度で衝突すること（3.3 節）。
 - ・船舶衝突時に浸水深が最大（津波波力が最大）であること（5.4 節）。
- ii) 建築物の応答を平均的に評価する仮定
 - ・衝撃外力 F を式(6.3)により定義すること（さらなる精査が必要であるが誤差 $\pm 50\%$ 程度（3.4 節 図 3.27））。

(c) 提案した応答評価手法

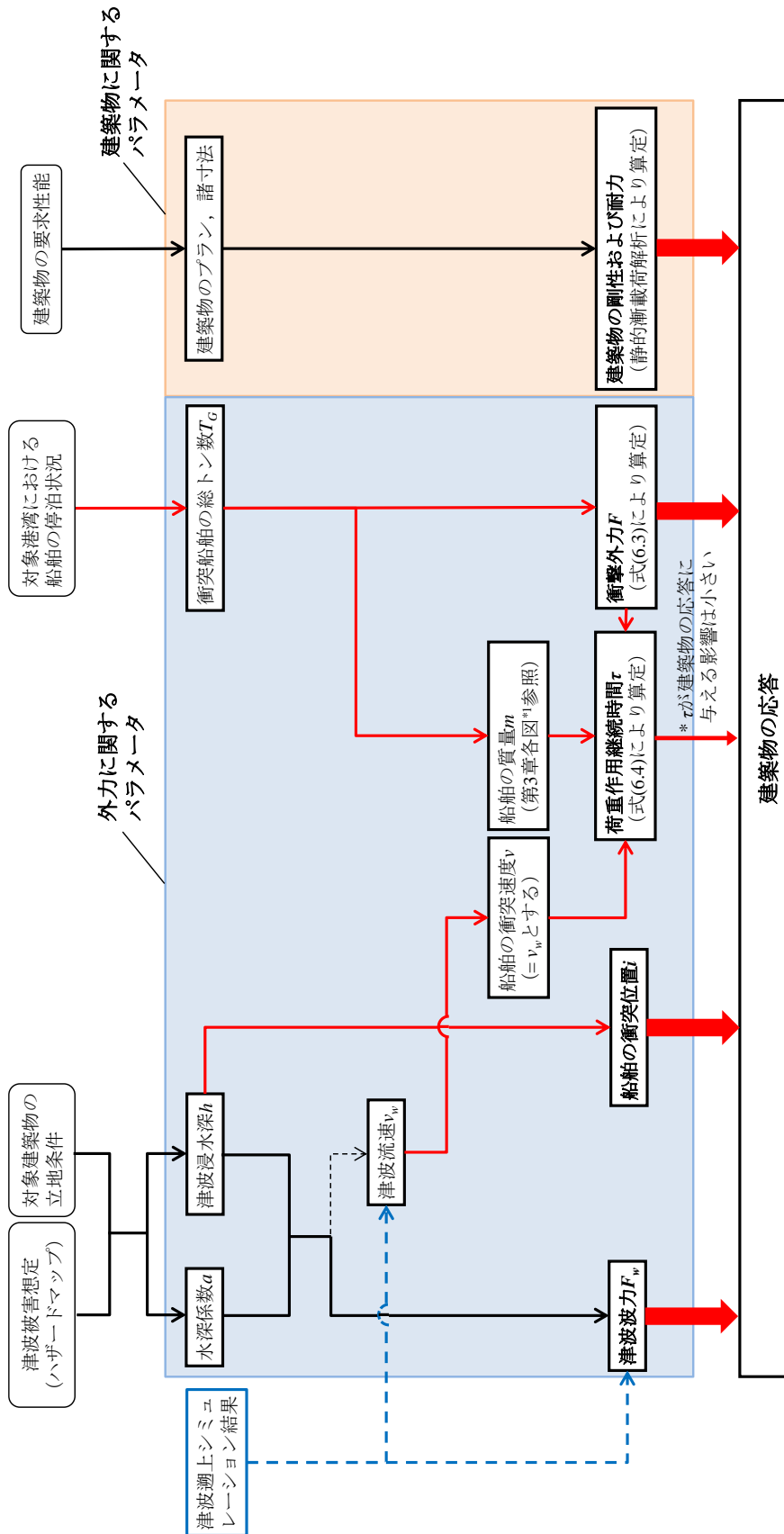
- i) 建築物の応答を平均的に評価する手法
 - ・衝撃外力に対する応答評価手法（誤差 $-20\% \sim +5\%$ 程度，5.4 節 図 5.68）。

また、津波漂流船舶の衝突に対して建築物を設計する上では、対象建築物の要求性能を考慮する必要がある。本研究成果の主な適用対象として想定される津波避難ビルは、津波来襲時に人を避難させる重要な施設であるため、一般の建築物よりも高い要求性能が付与されるものと考えられる。そのため、本章で提案した設計手法を適用する上では、以上にまとめた本提案手法の誤差、評価傾向等に加え、対象建築物の要求性能を総合的に勘案する必要がある。

(3) 建築物の応答評価に用いるパラメータの整理

以上に提案した設計手順において、建築物の応答評価に用いるパラメータを図 6.6 に整理する。同図では、矢印の始点となる上位のパラメータを用いて、その終点となる下位のパラメータを導出することを示しており、複数の矢印が合流する場合には、複数の上位パラメータを用いて下位のパラメータを導出することを示している。それらの矢印のうち、本研究で提案したルートを赤色により、文献^[6.1]に基づくルートを黒色（実線）により、式(6.1)もしくは式(6.2)^[6.3]を用いて津波浸水深 h および水深係数 a から津波流速 v を算定する手法（上記③）を黒色（破線）により、それぞれ示しており、また、文献^[6.1]では津波遡上シミュレーションを用いて津波波力 F_w および津波流速 v を算定することも可能としているため、その手法を青色（破線）により示している。また、外力に関するパラメータと、建築物に関するパラメータを左右（青色と橙色）に分けて示しており、両者において最下部に太字で示す 5 つのパラメータ（津波波力 F_w 、船舶の衝突位置 i 、荷重作用継続時間 τ 、衝撃外力 F 、建築物の剛性および耐力）が、建築物の応答を求める際に直接的に用いるパラメータである。

同図における外力に関するパラメータ（青色の背景により示す部分）のうち、荷重作用継続時間 τ については、第 3 章～第 5 章の検討により、船舶と建築物との衝突においては一般的に観測される条件 $\tau/T > 0.5$ (T : 建築物の固有周期)のもとでは、建築物の最大応答層間変形は概ね τ によらず一定の値となる（そのため応答推定式(6.5)および式(6.6)が τ の関数となっていないにもかかわらず精度良く最大応答を推定した）こと、すなわち τ が建築物の最大応答に与える影響は小さいこと、がわかっている。よって、その上位パラメータのうち、 τ のみの上位パラメータである船舶の衝突速度 v およびその質量 m も建築物の応答に与える影響は比較的小さい。一方、その他のパラメータ、すなわち津波浸水深 h および水深係数 a により定まる津波波力 F_w 、衝突船舶の総トン数 T_G により定まる船舶の衝突時衝撃外力 F 、津波浸水深 h により定まる船舶の衝突位置 i は建築物の応答に与える影響が比較的大きい重要なパラメータである。なお、建築物の応答において、津波波力と船舶衝突時衝撃外力とのどちらが支配的な外力であるかは、それらを定めるパラメータ（すなわち津波浸水深 h 、水深係数 a 、および船舶の総トン数 T_G ）によって異なる。よって、以下に建築物と船舶との衝突事例を想定し、 h 、 a 、 T_G をパラメータとして変化させながら（それに伴いそれらの下位パラメータである F_w 、 F 、 i も変化させながら）、建築物の応答に支配的な外力について検討する。



- 本研究における提案ルート
 - 文献^[6.11]に基づくルート (津波遡上シミュレーションを行わない場合)
 - 文献^[6.11]に基づくルート (津波遡上シミュレーションを行う場合)
 - 文献^[6.3]の式(6.1)もしくは式(6.2)を用いるルート
- *1 船舶の総トン数と排水量 (質量 m) との関係を示す図3.4, 図3.14および図3.18

図 6.6 津波波力と衝撃外力との組み合わせ外力に対する建築物の応答評価に用いるパラメータ

(a) 検討条件

まず、検討対象建築物としては津波波力に耐え得るように設計された鉄筋コンクリート造の津波避難ビルとし、その立地条件としては、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時には、陸域への遡上が確認された船舶うちその半数以上（全33隻中19隻）の陸域遡上距離が100 m以下であったことを考慮し（付録4。陸域遡上距離は船舶の遡上位置から最寄り岸壁までの直線距離として定義しており、全33隻中30隻はその漂流過程が不明のため最終漂着位置から岸壁の距離を用いている。）、それら船舶が衝突し得る岸壁近傍に立地するものと想定する。

次に、その津波避難ビルに作用する津波波力と衝撃外力との組み合わせ外力については、津波波力最大時に船舶の衝突が生起すると仮定することで建築物応答を安全側に評価することができるものの、上述のように岸壁近傍に立地する津波避難ビルに対しては、例えば津波浸水深が比較的緩やかに上昇する地域では津波が最大浸水深に達する前に船舶の衝突が生起するなど、船舶衝突時において津波波力が最大値に到達していないことも十分想定される。よって、同組み合わせ外力をより実状に即して設定するためには、津波漂流シミュレーション解析等の詳細な検討により船舶衝突生起時の津波波力を適切に評価する必要があるが、ここでは、津波波力の設定に用いられる水深係数 $a^{[6],[1]}$ と、津波の来襲形態との関係に着目し、以下の3ケースによりその組み合わせ外力を設定することとする。

①防波堤等の津波遮蔽効果を期待し得る構造物が無い場合において、船舶が衝撃段波と同時に建築物に衝突する場合（ $a=3$, $h=h_{\max}$ （ h, h_{\max} ：船舶衝突時の津波浸水深，最大津波浸水深），図6.7①）

・実際には津波漂流船舶の到達は津波先端部の段波よりも遅れると想定されるため、本組み合わせ外力は過大である（建築物の応答を安全側に評価する）と考えられる。

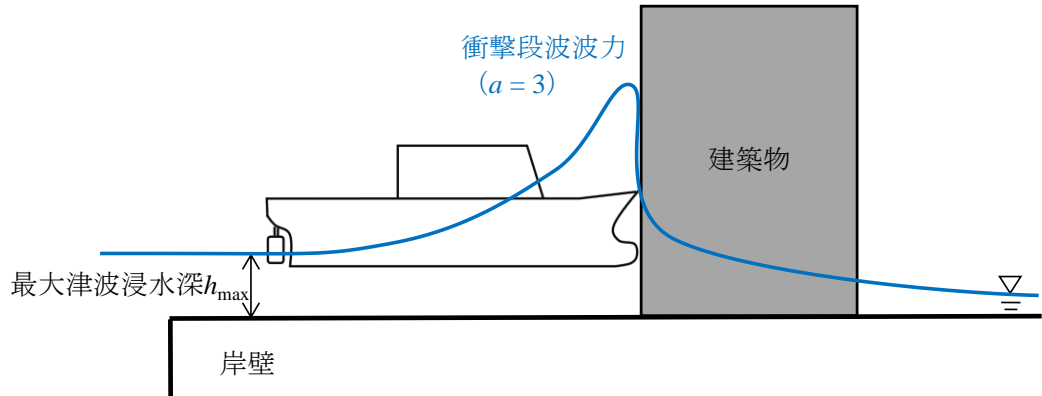
②防波堤等の津波遮蔽効果を期待し得る構造物が有る場合において、最大浸水深 h_{\max} 時の重複波力作用下に船舶が建築物に衝突する場合（ $a=2$, $h=h_{\max}$ ，図6.7②）。

・実際には津波漂流船舶の衝突は最大浸水深 h_{\max} の生起に先行してまたは遅れて生起すると想定されるため（最大浸水深時は押し波から引き波に移行する時であり津波流速は0 m/sに近いと想定されるため）、本組み合わせ外力は過大（建築物の応答を安全側に評価する）と考えられる。

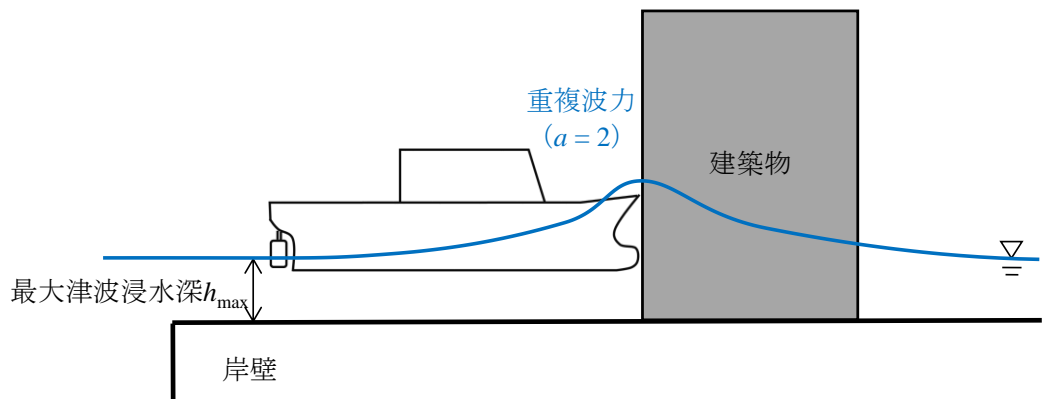
③防波堤等の津波遮蔽効果を期待し得る構造物が有る場合において、最大津波波力の生起と船舶衝突の生起との間に時間差が生じ、浸水深 $0.8 h_{\max}$ 時の重複波力作用下に船舶が建築物に衝突する場合（ $a=2$, $h=0.8 h_{\max}$ ，図6.7③）。

・②に先述のとおり船舶の衝突は最大浸水深 h_{\max} 未満の時（ $h < h_{\max}$ ）と想定されるため、その状況を反映した組み合わせ外力の一例として上記のとおり設定する。ただし、船舶衝突時の浸水深 h を十分な根拠に基づいて設定することは現状では困難であるため、ここでは一例として $h=0.8 h_{\max}$ の時に船舶が衝突する場合について検討する。

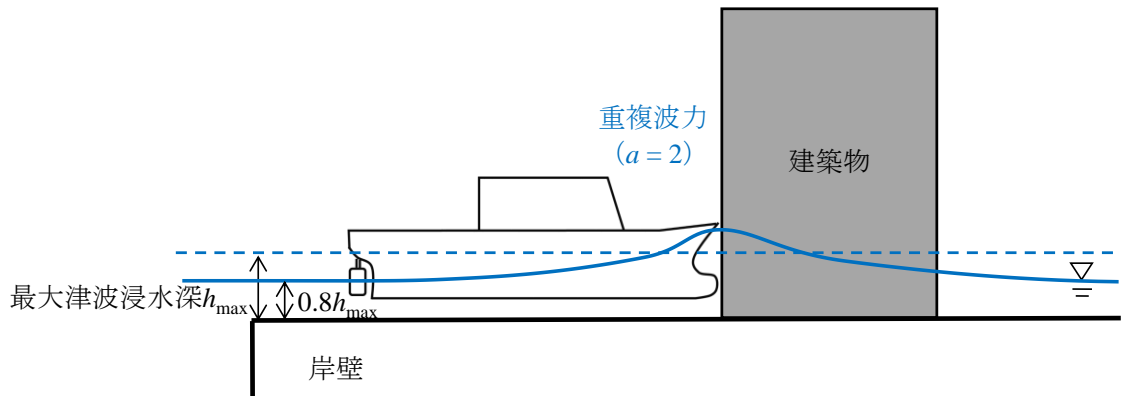
なお、文献^[6.1]では水深係数 $a = 1.5$ の場合も定められているが、それは建築物が岸壁等から 500 m 以上内陸に位置する場合を対象としているものの、本検討範囲内では 500 m 以上内陸まで遡上が確認された船舶事例は極めて少ないため（33 隻中 2 隻のみ、付録 4）、ここでは考慮しないこととする。



①衝撃段波波力と船舶衝突時衝撃外力が同時に作用する場合



②最大浸水深 h_{\max} 時の重複波力作用下に船舶衝突時衝撃外力が作用する場合



③浸水深 $0.8 h_{\max}$ 時の重複波力作用下に船舶衝突時衝撃外力が作用する場合

図 6.7 津波波力と船舶衝突時衝撃外力との組み合わせ外力についての概念図

検討対象建築物および外力（津波波力および船舶衝突時衝撃外力）に関するその他の緒元は表 6.1 に示すとおりである。建築物の規模は一般的な津波避難ビルを想定して設定しており、各層の降伏耐力 $Q_{y,j}$ については、1 層の降伏耐力 $Q_{y,1}$ は後述のとおり定めることとし、それを用いて 1 層の降伏点剛性 $K_1 = Q_{y,1} / \delta_{y,1}$ ($\delta_{y,1} = 1/300 H$, H [m] : 階高) を求め、続いて一次モード形状が直線となるように各層の降伏点剛性 K_j を定め、それを用いて $Q_{y,j} = K_j \delta_{y,j}$ として定めることとする。なお、建築物の降伏層間変形角については、本検討では津波波力に耐え得るように比較的剛強に設計された津波避難ビルを想定し、耐震設計された一般的な建築物のそれよりも比較的小さい $1/300 \text{ rad}$ と設定している。津波波力については、文献^[6.1]に基づき図 6.9 に示すような三角形波圧分布を高さ方向に積分することで求め、建築物の 1 層において階高の半分以下の位置に作用する津波波力については本検討では考慮しないこととする。衝突船舶の総トン数は 500 ton もしくは 4,000 ton としており、その理由は、前者については津波来襲時において陸域に遡上し得る、すなわち建築物に衝突し得る船舶の割合は総トン数 500 ton 未満の船舶に比較的多かったためその上限の総トン数として設定するためであり（2 章）、後者については釜石港において建築物と衝突した一般貨物船（図 3.2）の総トン数（4,724 ton）と同程度に設定するためである。

表 6.1 検討対象建築物および外力の緒元

	緒元		
	層数	3層	6層
建築物	幅B × 奥行さD (図6.8に定義を示す)	18 m ~ 54 m × 12 m ~ 36 m	
	階高H	3 m	
	単位床面積重量	12 kN/m ²	
	復元力特性	バイリニア型	
	各層の降伏層間変形角 $\delta_{y,j}/H$	1/300 rad (各層で共通)	
	各層の降伏耐力 $Q_{y,j}$	$Q_{y,1}$: 後述のとおり定める $Q_{y,j} = K_j \delta_{y,j}$ (図6.10参照)	
	各層の降伏点剛性 K_j	$K_1 = Q_{y,1} / \delta_{y,1}$ として定める K_j : 一次モード形状が直線となるように定める	
	外力作用面の開口率	0.7	
津波波力	最大津波浸水深 h_{\max}	1 m, 1.5 m, 2 m, ..., 3 m	1 m, 2 m, 3 m, ..., 12 m
	水深係数 a	3.0, 2.0	
衝撃外力	船舶の総トン数 T_G	0 ton (衝突を考慮しない場合), 500 ton, 4,000 ton	
	船舶の種類	一般貨物船	
	船舶の積荷状況	半載状態	
	船舶の衝突速度	式(6.1)および船舶衝突時の浸水深を用いて算出	
	船舶の衝突質点位置 i	建築物において船舶衝突時の 浸水深 + 3 m 以上の最も低い質点位置	

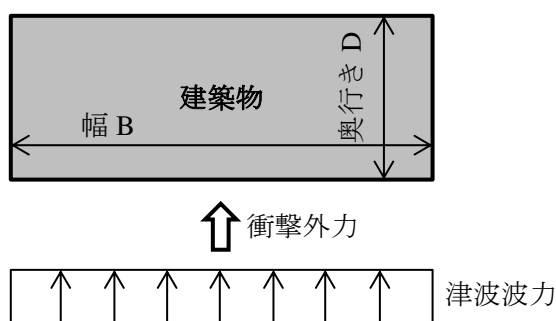
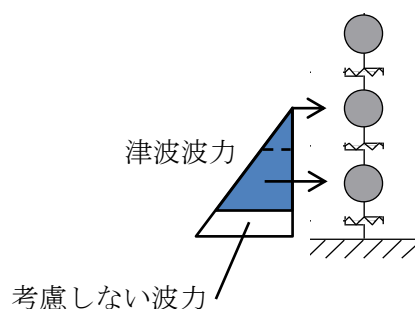
図 6.8 建築物の幅 B および奥行き D の定義

図 6.9 津波波力の概念図

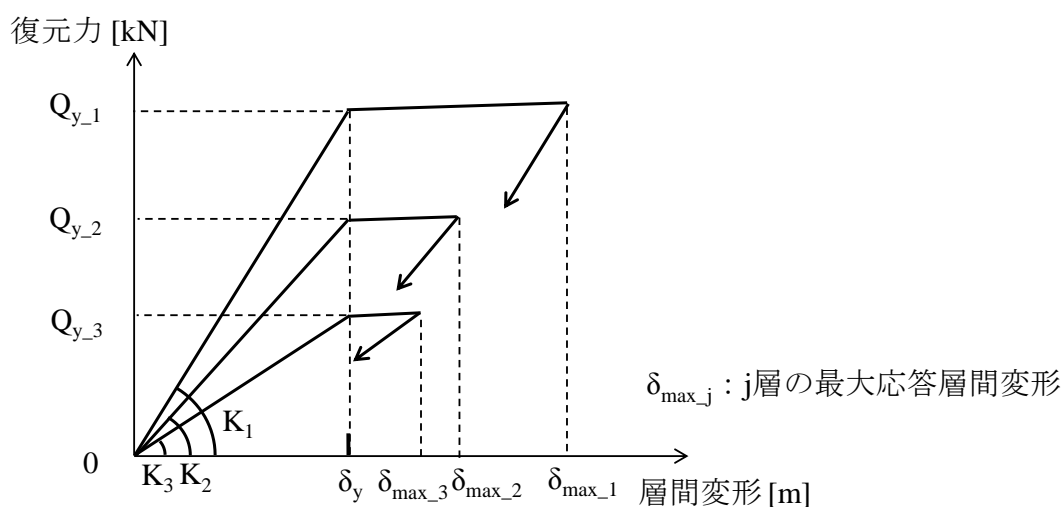


図 6.10 建築物各層の復元力特性の概略図（3層の場合を対象に例示）

以上に設定した検討条件のもと、建築物の応答において津波波力と船舶衝突時衝撃外力とのどちらが支配的な外力であるかを検討するべく、建築物が津波波力のみに耐えるために必要なベースシア係数 C_{B_Fw} と、津波波力と衝撃外力との組み合わせ外力に耐えるために必要なベースシア係数 C_{B_Fw+F} とを比較する。前者の C_{B_Fw} は、建築物の1層の降伏耐力 $Q_{y,1}$ が津波波力 $F_{w,1}$ に等しいときのベースシア係数として定義し、式(6.8)により求める。後者の C_{B_Fw+F} は、津波波力と衝撃外力との組み合わせ外力に対し建築物の最大応答塑性率 δ_{max}/δ_y が 2.0 となるときのベースシア係数として定義し、その値は、建築物のベースシアを C_{B_Fw} から 0.01 ずつ増加させながら応答解析により最大応答塑性率 δ_{max}/δ_y を逐一算定し、それが 2.0 に一致する時のベースシア係数として求める。なお、5章で示したとおり、津波波力と衝撃外力との組み合わせ外力に対して最大応答が生起する層は、津波波力が比較的小さい場合には船舶衝突位置直下の層であるが（図 6.11(a)）、津波波力が増大するにつれて1層に移行する（同(b)）。また、ここでは津波波力 F_w および建築物の重量 W は共に建築物の幅 B に比例すると仮定しているため、式(6.8)により求まる C_{B_Fw} は幅 B に依存しない値となる（ C_{B_Fw+F} は C_{B_Fw} とは異なり建築物の幅 B に依存する）。

$$C_{B_Fw} = Q_{y_1} / W_1 g = F_{w_1} / W_1 g \quad (6.8)$$

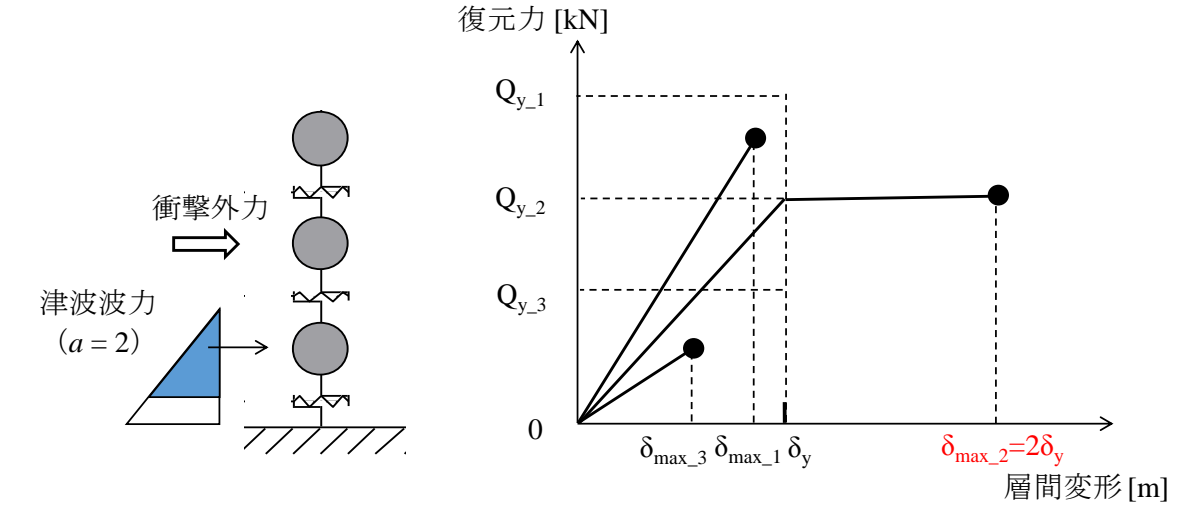
ここで、

C_{B_Fw} : 津波波力のみ能耐得る建築物に必要なベースシア係数 [-]

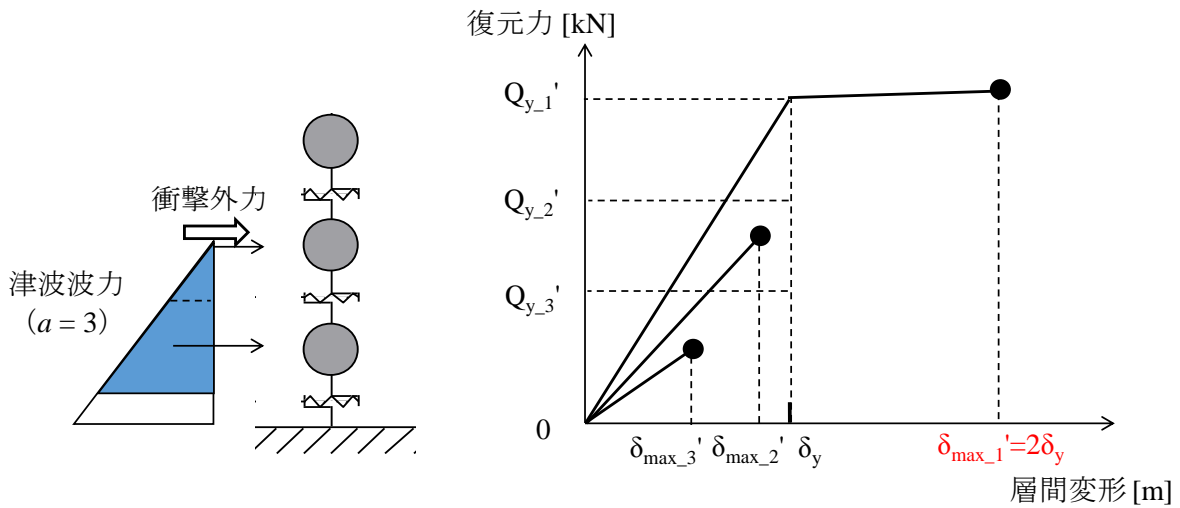
Q_{y_1} : 建築物の1層の降伏耐力 [kN]

F_{w_1} : 1層以上に作用する津波波力の合計 [kN]

W_1 : 1層以上の建築物重量の合計 [tf]



(a) 津波波力が比較的小さい場合 (水深係数 $a=2$)



* 降伏耐力 Q_y および最大応答層間変形 δ_{\max} はケース(a)と等しい値になるとは限らないため、それぞれ $Q_{y,j}'$ および $\delta_{\max,j}'$ ($j=1\sim3$) と表記している。

(b) 津波波力が比較的大きい場合 (水深係数 $a=3$)

図 6.11 C_{B_Fw+F} 算定時の建築物各層の履歴の概念図

(3層建築物, $h_{\max}=3$ m, 衝突質点位置 $i=2$ の場合について例示)

(b) 津波波力および衝撃外力に対する建築物の必要耐力

以上に求めた建築物の必要ベースシア係数 C_{B_Fw} および C_{B_Fw+F} の検討結果を図 6.12～図 6.15 に示す。ここで、黒実線は C_{B_Fw} を、着色線は 500 ton（実線）もしくは 4,000 ton（破線）の船舶衝突に対する C_{B_Fw+F} を、それぞれ示す。また、 C_{B_Fw+F} は上述のとおり建築物の幅 B に依存するため、その幅 B による違いを着色（赤色、緑色、青色）により表している（ C_{B_Fw} は建築物の幅 B に依存しないため黒色のみ）。各図の最上部には衝突床位置を示しており、最大応答となる層（すなわち塑性率 2.0 となる層）がその直下の層の場合のプロットは白抜きにより、それが 1 層の場合のプロットは黒塗りにより、それぞれ表している。

同図から、まず、津波浸水深 $h_{\max} = 1.0 \text{ m}$ の場合の C_{B_Fw} は極めて小さい値となっているが、これは先述のとおり 1 層において階高の半分以下の位置に作用する津波波力は考慮していないため（図 6.9）、建築物に作用させている津波波力が極めて小さいことが要因である。

また、津波浸水深 h_{\max} が増加し津波波力が増加すると建築物の必要ベースシア係数 C_{B_Fw+F} もそれに応じて増加すると予想されるが、主に 3 層建築物の結果（図 6.12 および図 6.13）においては C_{B_Fw+F} が変化しない場合がある。これは、津波波力が比較的小さい条件では、船舶衝突位置直下の層において最大応答が生起し（図 6.11(a)に例示するケース）、その場合には h_{\max} が増加しても最大応答層に必要な耐力が変わらず、一方、1 層の必要耐力はこの耐力により自動的に定まるため（(a)に記した各層の耐力設定手法により「自動的に」定まる）、必要ベースシア係数 C_{B_Fw+F} も変化しないためである。

さらに、主に 6 層建築物の場合（図 6.14 および図 6.15）においては、津波浸水深 h_{\max} が増加すると C_{B_Fw+F} が低下する場合がある。これは、最大応答となる層以外の層が津波波力の増加に伴い新たに塑性領域に至り、最大応答層への変形の集中が緩和され、その層の必要耐力が低下したことが要因である。

加えて、算出した必要ベースシア係数（ C_{B_Fw} , C_{B_Fw+F} ）は、建築物規模（建築物の幅 B , 奥行き D , 層数）と概ね反比例の関係にあることがわかる。これは、外力条件が同じであれば必要耐力は建築物の形状によらず当然等しいが、必要ベースシア係数はその耐力を建築物重量、すなわち建築物規模で除して求めているためである。建築物規模に関するパラメータそれぞれについて、必要ベースシア係数との関係を確認すると、まず、幅 B は、先述のとおり津波波力に対する必要ベースシア係数 C_{B_Fw} には影響を与えないものの、衝撃外力のみに対する必要ベースシア係数（ $C_{B_Fw+F} - C_{B_Fw}$ ）とは上述の理由により反比例の関係にある。次に、奥行き D も、上述の理由により C_{B_Fw} および C_{B_Fw+F} と反比例の関係にある。最後に、建築物の層数は、同様の理由により C_{B_Fw} とは反比例の関係にあるものの、 C_{B_Fw+F} とは、衝撃外力に対する建築物の振動性状は層数により変化するため（振動モード数が変化するため）、概ね反比例の関係にあるもののその関係は厳密ではない。

以下に、図 6.12～図 6.15 から得られた知見を要約する。

- i) まず、ケース①（船舶が衝撃段波と同時に建築物に衝突する場合、 $a = 3$, $h = h_{\max}$ ）およびケース②（最大浸水深 h_{\max} 時の重複波力作用下に船舶が建築物に衝突する場合、 $a = 2$, $h = h_{\max}$ ）について、 C_{B_Fw} （各図における黒線）に対する C_{B_Fw+F} （同着色線）の比率を検討する。本ケースでは、衝突船舶の総トン数 T_G が小さいほど、また、津波浸水深 h_{\max} および建築物の幅 B が大きいほど、すなわち津波波力が支配的となるほど、その比率は低下する。ただし、いずれの場合についても、衝撃外力を考慮することにより、津波波力のみを考慮した場合に比べて必要耐力は増加する（ $C_{B_Fw+F} > C_{B_Fw}$ ）。
- ii) 次に、外力を比較的実情に即して設定したケース③（浸水深 $0.8 h_{\max}$ 時の重複波力作用下に船舶が建築物に衝突する場合、 $a = 2$, $h = 0.8 h_{\max}$ ）について、 C_{B_Fw} と C_{B_Fw+F} とを比較する。本ケースでは、船舶衝突時の浸水深 $h = 0.8 h_{\max}$ と設定したため、上記ケース②に比べ必要耐力（ C_{B_Fw+F} ）が低下している（津波波力のみに対する必要耐力（ C_{B_Fw} ）は②と同じである）。それにより、本ケースでは 6 層建築物の一部の検討結果において $C_{B_Fw+F} \leq C_{B_Fw}$ となっており、これらの場合には、津波波力に耐え得る建築物であれば船舶衝突時の衝撃外力にも耐え得ることを示している。また、総トン数 500 ton の船舶の衝突に対する C_{B_Fw+F} （各図③の着色実線）に着目すると、多くのケースで $C_{B_Fw+F} \leq C_{B_Fw}$ もしくは $C_{B_Fw+F} \leq C_{B_E}$ （ C_{B_E} : 耐震設計された一般的な鉄筋コンクリート造建築物のベースシア係数で 0.30～0.55 程度）を満たしていることがわかる（例えば一般的な壁式構造の建築物を想定して $C_{B_E} = 0.55$ とすると、 $B \times D = 18 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ を除くすべてのケースで同条件を満たしている）。よって、最大津波波力と船舶衝突との時間差を考慮した本検討ケースでは、多くの場合において、耐震設計および耐津波波力設計された建築物であれば総トン数 500 ton 以下の船舶の衝突にも耐え得ることがわかる。

以上の結論に加え、津波来襲時において陸域に遡上し得る、すなわち建築物に衝突し得る船舶の割合は総トン数 500 ton 未満の船舶に比較的多いこと（2 章）を考慮すると、一般的な港湾で想定される 500 ton 未満の船舶の衝突が生じたとしても、耐震設計および耐津波波力設計された建築物であれば崩壊等の著しい不具合が生じる可能性は低いと考えられる。ただし、さらに実状に即した検討を行うためには、船舶衝突時の津波浸水深を適切に評価することが肝要である。なお、先述のとおり、以上の検討は建築物上部構造の応答のみに着目しているため、建築物の滑動、転倒、および局所的な損傷に関する安全性の検討については別途行う必要がある。

(補足) 本検討とは異なる津波波力もしくは衝撃外力を設定した場合における C_{B_Fw+F} の算定法

本検討とは異なる津波波力もしくは衝撃外力を設定した場合には、図 6.12～図 6.15 の結果に基づき、以下の手法を用いることで C_{B_Fw+F} の概ねの値を算定することができる。

船舶の衝突が生起する時の津波波力を別途の手法により低減させる場合（例えば船舶衝突時の津波浸水深を最大浸水深の「0.8 倍」ではなく「0.5 倍」とするなど）の必要ベースシア $C_{B_Fw+F'}$ は、式(6.9)に示すとおり、津波波力の低減に伴う必要ベースシアの低下分 $(= (1 - F_w' / F_w) C_{B_Fw})$ を各図の結果 C_{B_Fw+F} から差し引くことにより求めることができる。また、本検討で対象とした 2 つの総トン数 (500 ton および 4,000 ton) の中間的な総トン数の船舶を想定し、その衝突に対する必要ベースシア $C_{B_Fw+F'}$ を求めるためには、式(6.10)に示すとおり、その船舶の衝突時衝撃外力 F' (式(6.3)により算出) に応じて本検討結果 ($C_{B_Fw+F(500ton)}$ および $C_{B_Fw+F(4000ton)}$) を内分することにより求めることができる。

$$C_{B_Fw'+F} = C_{B_Fw+F} - \left(1 - \frac{F_w'}{F_w}\right) C_{B_Fw} \quad (6.9)$$

$$C_{B_Fw'+F} = C_{B_Fw+F(500ton)} + \frac{F' - F_{500ton}}{F_{4000ton} - F_{500ton}} (C_{B_Fw+F(4000ton)} - C_{B_Fw+F(500ton)}) \quad (6.10)$$

ここで、

F_w : 低減前の津波波力 [kN]

F_w' : 低減後の津波波力 [kN]

C_{B_Fw} : 低減前の津波波力 (F_w) のみに対する建築物の必要ベースシア係数 [-]

C_{B_Fw+F} : 低減前の津波波力 (F_w) と衝撃外力との組み合わせ外力に対する建築物の必要ベースシア係数[-]

$C_{B_Fw'+F}$: 低減後の津波波力 (F_w') と衝撃外力との組み合わせ外力に対する建築物の必要ベースシア係数[-]

F' : 新たに考慮する船舶の衝突時衝撃外力 [kN]

F_{500ton} : 500 ton 船舶の衝突時衝撃外力 [kN] (= 3,300 kN)

$F_{4000ton}$: 4000 ton 船舶の衝突時衝撃外力 [kN] (= 14,100 kN)

$C_{B_Fw+F(500ton)}$: 津波波力と 500 ton 船舶衝突時衝撃外力との組み合わせ外力に対する建築物の必要ベースシア係数[-]

$C_{B_Fw+F(4000ton)}$: 津波波力と 4,000 ton 船舶衝突時衝撃外力との組み合わせ外力に対する建築物の必要ベースシア係数[-]

$C_{B_Fw'+F}$: 津波波力と新たに考慮する船舶衝突時衝撃外力との組み合わせ外力に対する建築物の必要ベースシア係数[-]

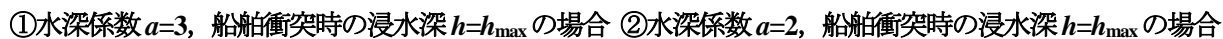
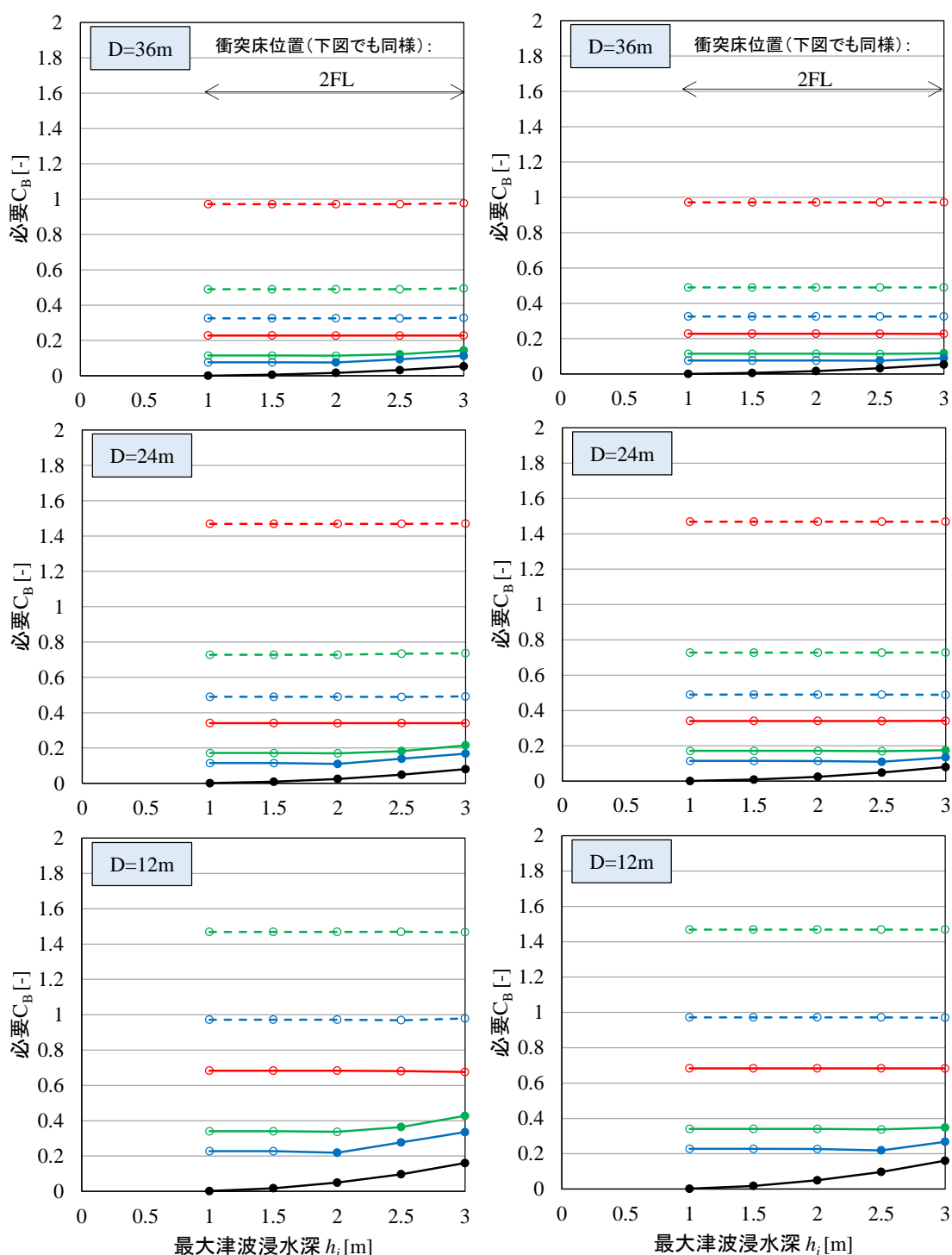


図 6.12 3 層建築物の必要ベースシア係数 C_B (検討ケース①～②)


 ②水深係数 $a=2$, 船舶衝突時の浸水深 $h=h_{\max}$ の場合 ③水深係数 $a=2$, 船舶衝突時の浸水深 $h=0.8h_{\max}$ の場合

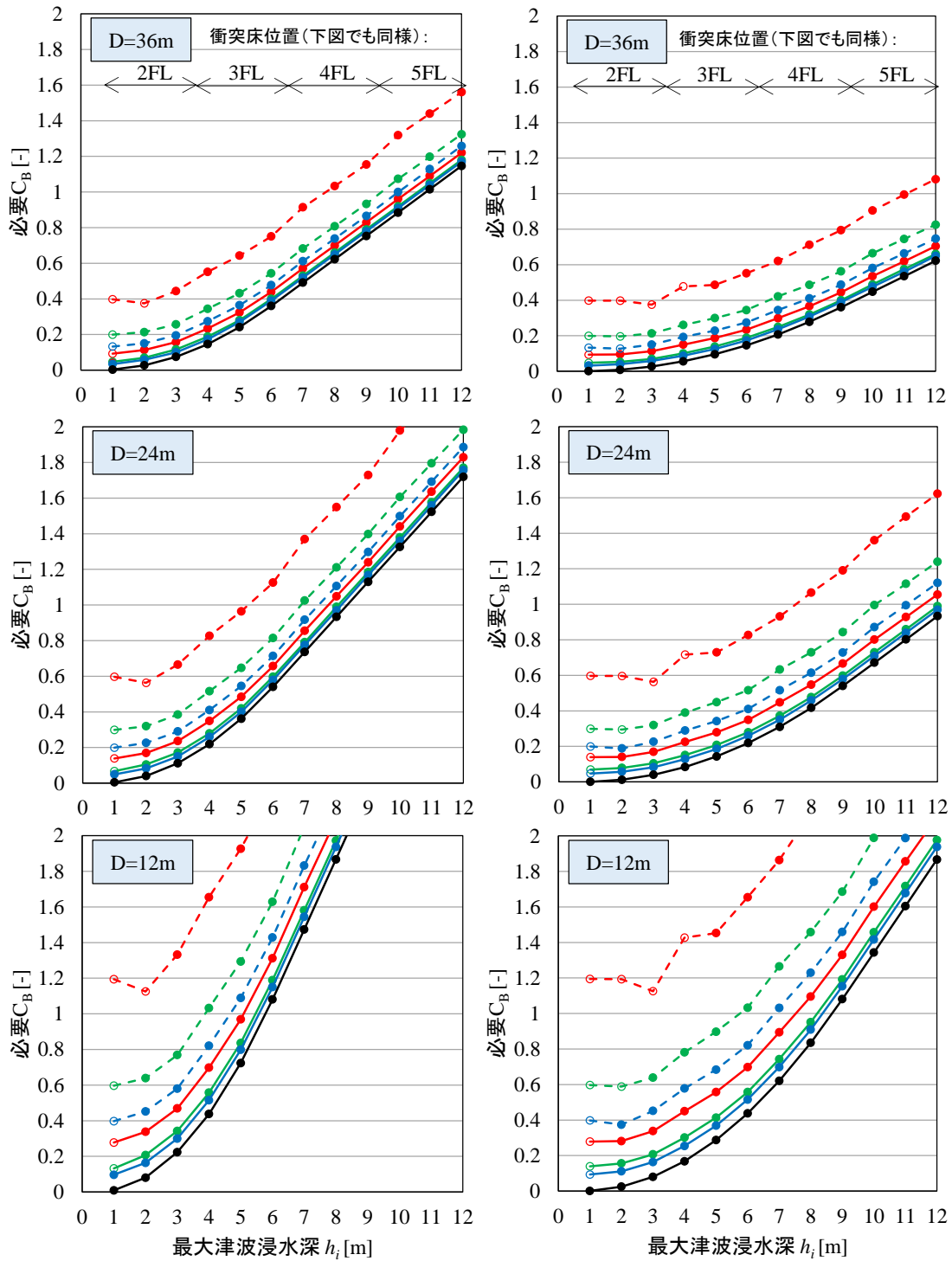
(図 6.12②のグラフを再録)

 (C_{B_Fw} の算出時には最大浸水深 h_{\max} を用いた)

C_{B_Fw+F} $B=18m$ $B=36m$ $B=54m$ * 最大応答が衝突位置直下の層の場合
 $T_G = 4,000 \text{ ton}$ (red dashed line with open circles) (green dashed line with open circles) (blue dashed line with open circles)
 $T_G = 500 \text{ ton}$ (red solid line with solid circles) (green solid line with solid circles) (blue solid line with solid circles)
 C_{B_Fw} (black solid line with solid circles)

は白抜き, 1 層の場合は黒塗りとする。

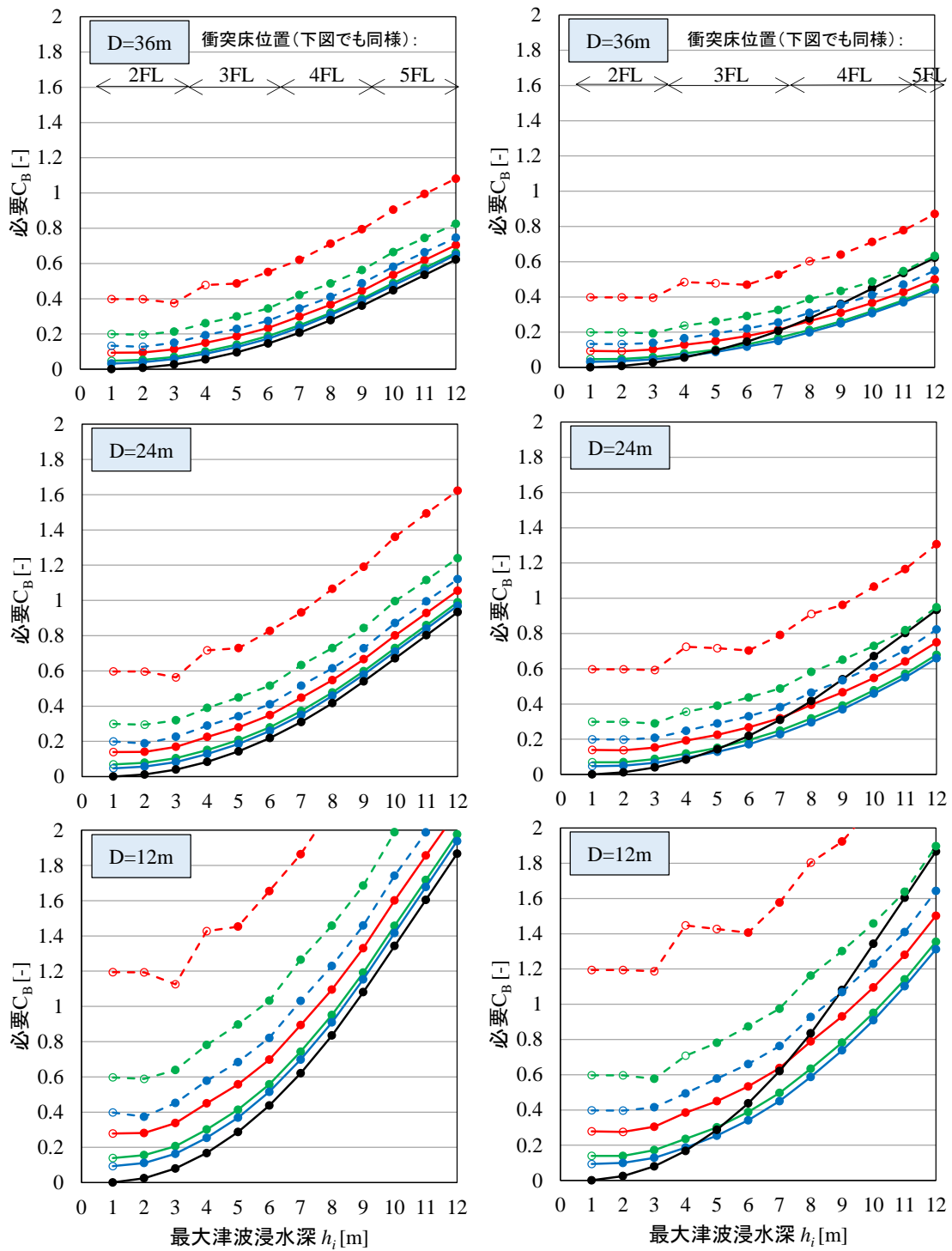
 図 6.13 3 層建築物の必要ベースシア係数 C_B (検討ケース②～③)



①水深係数 $a=3$, 船舶衝突時の浸水深 $h=h_{\max}$ の場合 ②水深係数 $a=2$, 船舶衝突時の浸水深 $h=h_{\max}$ の場合

C_{B_FW+F} $B=18m$ $B=36m$ $B=54m$ * 最大応答が衝突位置直下の層の場合
 $T_G = 4,000 \text{ ton}$ —●— —●— —●— は白抜き, 1層の場合は黒塗りとする。
 $T_G = 500 \text{ ton}$ —●— —●— —●—

図 6.14 6層建築物の必要ベースシア係数 C_B (検討ケース①～②)



②水深係数 $a=2$, 船舶衝突時の浸水深 $h=h_{\max}$ の場合 ③水深係数 $a=2$, 船舶衝突時の浸水深 $h=0.8h_{\max}$ の場合

(図 6.12②のグラフを再録)

(C_{B_Fw} の算出時には最大浸水深 h_{\max} を用いた)

C_{B_Fw+F} $B=18m$ $B=36m$ $B=54m$ * 最大応答が衝突位置直下の層の場合
 $T_G = 4,000 \text{ ton}$ (Red dashed line with circles) (Green dashed line with circles) (Blue dashed line with circles)
 $T_G = 500 \text{ ton}$ (Red solid line with circles) (Green solid line with circles) (Blue solid line with circles)
 C_{B_Fw} (Black solid line with circles)

は白抜き, 1 層の場合は黒塗りとする。

図 6.15 6 層建築物の必要ベースシア係数 C_B (検討ケース②～③)

6.3 まとめ

本章では、2章～5章における検討によって得られた知見に基づき、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計手順を提案するとともに、同手順において建築物の応答評価に用いるパラメータを整理した。また、津波避難ビルを対象に、津波波力のみに対する必要耐力、津波波力と船舶衝突時衝撃外力との組み合わせ外力に対する必要耐力、および一般的な耐震建築物の必要耐力、の3つをケーススタディにより比較することで、耐震設計および耐津波波力設計された津波避難ビルであれば、一般的な港湾で想定される総トン数 500 ton 未満程度の船舶が衝突したとしても、崩壊等の著しい不具合が生じる可能性は低いことを明らかにした。

[参考文献]

- [6.1] 国土交通省：東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針，2011 年 11 月
- [6.2] 木原直人，松山昌史，藤井直樹：漂流物挙動解析による津波漂流物衝突に関する確率論的評価手法，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp. I_341- I_345，2013 年 11 月
- [6.3] 榊山勉：陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp. I_771- I_775，2012 年 11 月
- [6.4] 長沢準，有田喜久雄，谷政明，岡修二：通航船舶の橋脚衝突時の圧壊強度について，日本造船学会論文集，第 142 号，pp.323-332，1977 年 11 月

第 7 章

結論

7. 結論

本研究では、津波来襲時にその衝突が建築物に重大な影響を及ぼし得る大規模船舶を対象に、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶の実挙動分析に基づきその陸域遡上生起頻度の検討および衝突時衝撃外力の評価を行い、同外力に対する建築物応答の簡便な推定手法を提案した。以下に、本論文において各章から得られた知見を章ごとにまとめて示す。

第1章「序論」では、船舶等の大規模津波漂流物の衝突に対する建築物の構造安全性を定量的に検討する手法を確立することの重要性について述べ、それに関する既往研究を紹介するとともに、未解決の課題として以下3点を挙げた。

- 1) 津波来襲時における船舶の挙動を把握するべく開発が進められる数値シミュレーション解析では、船舶の挙動に重要な影響を及ぼし得る操舵や投錨といった人為的要因が考慮されていないこと。
- 2) 大規模漂流物衝突時の衝撃外力の適切な設定手法は建築工学分野では検討されておらず、そのうち船舶については船舶工学分野において検討されているものの、複数の異なる評価式が提案されていること。
- 3) 船舶衝突に対する建築物挙動の検討事例は極めて少なく、さらに、船舶の破壊形式を適切に反映した外力に対する建築物の挙動は検討されていないこと。

以上を踏まえ、本研究では、1) 津波来襲時における船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度の検討、2) 津波漂流船舶の衝突時衝撃外力評価、3) 船舶衝突時の衝撃外力に対する建築物応答の簡易評価手法の提案、の3つを目的とした。

第2章「津波来襲時における船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度」では、船舶が陸上の建築物に衝突するためには船舶が陸域に遡上することが必要条件であることに着目し、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶の実挙動をAISデータや船舶の避難行動に関するアンケート調査結果等に基づき分析することで、津波来襲時において船舶の陸域遡上に関係が深い要因の特定と、船舶の陸域遡上生起頻度の検討を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 2011年3月11日における船舶のAISデータ、船舶の避難行動に関するアンケート調査結果、および津波来襲時の船舶挙動に関する各種文献、の3つのデータソースに基づき、計143隻の検討対象船舶によるデータベースを作成した。
- 2) 上記データベースにおいて、主にAISデータを用いて各港における船舶の実挙動を分析し、津波来襲時における船舶の「操舵可否」および「喫水と浸水深との大小関係」が、船舶の陸域遡上に重要な要因と特定した。

- 3) 上記二要因をパラメータとして船舶の陸域遡上生起頻度を検討し、津波来襲時において「操舵可能」もしくは「喫水 \geq 浸水深」を満たす船舶 143 隻には、トリムの影響により「船首喫水 $<$ 浸水深 $<$ 船尾喫水」となっていた船舶 1 隻を除き、陸域に遡上した船舶は確認されなかった。一方、「操舵不可」および「喫水 $<$ 浸水深」の二条件を満たす船舶では、その 16 隻のうち 7 割以上の 14 隻が陸域に遡上したことを明らかにした。
- 4) 船舶の総トン数と津波来襲時における操舵可否との関係を検討し、操舵不可であった船舶の割合は、総トン数 500 ton 以上の船舶では 1 割程度であったのに対し、総トン数 500 ton 未満の船舶では 4 割程度であったことを明らかにした。
- 5) 船舶の総トン数と喫水との関係を検討し、総トン数 500 ton 未満の船舶の発災時喫水は 1~5m 程度であり、総トン数 500 ton 以上の船舶では 2 m~18 m 程度と広く分布することを明らかにした。ただし、その値は船舶の積荷状況により軽荷喫水から満載喫水まで変動し、その傾向は特に撒積専用船に代表される分類 E の船舶において顕著であることを明らかにした。

第 3 章「津波漂流船舶の衝突時衝撃外力」では、船舶の衝突時衝撃外力を定量的に評価することを目的とし、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶と構造物との衝突事例、ならびに船舶が操舵されずに漂流した事例を対象に、船舶の衝突条件（衝突速度、衝突方向）および衝突時衝撃外力を検討した。同衝撃外力について、船舶工学分野における既往の評価結果と比較することで、本研究において建築物に入力する船舶衝突時の衝撃外力を定めた。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時において、船舶が構造物と衝突した 5 事例について、その衝突時の速度および方向を検討し、また、各船舶の衝突時衝撃外力を評価した。
- 2) 同津波来襲時における船舶の漂流速度は、数百 m 程度の漂流距離で最大漂流速度に達し得ること、その速度は横方向よりも縦方向において比較的高い傾向にあること、船舶が縦方向で構造物に接近する場合にはその接近に伴う漂流速度の低減は限定的であること、をそれぞれ明らかにした。以上の知見に基づき、本研究において考慮する船舶の衝突条件としては、船舶が縦方向に、津波流速に等しい速度で衝突する場合とした。
- 3) 2)で定めた船舶の衝突条件における衝突時衝撃外力について、1)による評価結果と、船舶工学分野における既往の評価結果とを比較することで、船舶衝突時の衝撃外力矩形パルス波として設定した。

第 4 章「津波波力および衝撃外力に対する弾性多質点応答の簡易評価手法」では、第 3 章で定義した船舶衝突時衝撃外力に対する建築物の弾性応答特性を検討し、その検討結果に基づき、最大弾性応答を簡便に推定する手法を提案した。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 衝撃外力に対する 1 質点系モデルの弾性応答は、荷重作用継続時間 τ と固有周期 T との比 τ/T

によりその特性が異なること、実際の船舶衝突において一般に観測される条件 $\tau/T \geq 0.5$ の場合には最大応答は衝突終了以前の時刻 $t/T \approx 0.5$ で生起しその最大応答値は $2F/K$ (F : 衝撃外力, K : 剛性) に概ね一致すること、を明らかにした。

- 2) 衝撃外力に対する多質点系モデルの弾性応答についても同様に、荷重作用継続時間 τ と一次固有周期 ${}_1T$ との比 $\tau/{}_1T$ によりその特性が異なること、 $\tau/{}_1T \geq 0.5$ の場合には衝突位置より上階では高次モードが強く励起されるものの衝突位置以下では一次モードが卓越すること、最大応答が比較的大きい衝突位置以下の最大応答は「衝撃外力と外力レベルが等値な静的外力に対する層間変形」と「一次モード振幅」との和により概ね求まること、を明らかにした。
- 3) 上記の 1) および 2) の応答特性に基づき、最大応答層間変形の推定式を導出し、同式が精度良く最大応答を推定する適用条件 ($\tau/{}_1T \geq 0.5$) を明らかにした。また、同適用条件を満足するための船舶規模と建築物層数との関係を検討したところ、想定され得る船舶と津波避難ビルとの衝突において、同式は広く適用可能であることを明らかにした。

第5章「津波波力および衝撃外力に対する弾塑性多質点応答の簡易評価手法」では、第3章で設定した船舶衝突時衝撃外力に対する建築物の弾塑性応答特性を検討し、その検討結果と、第4章で提案した弾性応答推定手法に基づき、最大弾塑性応答を簡便に推定する手法を提案した。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 衝撃外力に対する1質点系モデルの最大弾塑性応答は、荷重作用継続時間 τ と固有周期 T との比 τ/T の増大と共に増加するものの、最終的にはある一定値に収束し、その収束値は、建築物の降伏耐力 Q_y と津波波力 F_w との差 $Q_y - F_w$ に対する衝撃外力 F の比 $F/(Q_y - F_w)$ の増大と共に増加し、その増加は $F/(Q_y - F_w)$ が 0.8~0.9 程度以上において顕著であることを明らかにした。
- 2) 衝撃外力に対する多質点系モデルの最大弾塑性応答は、荷重作用継続時間 τ と一次固有周期 ${}_1T$ との比 $\tau/{}_1T$ が 0.5 以上の場合には、 $F/(Q_y - F_w)$ が最大となる層において最大となる傾向を確認した。また、その応答は $\tau/{}_1T$ の増大と共に増加するものの、最終的にはある一定値に収束し、その収束値は $F/(Q_y - F_w)$ の増大と共に増加し、その増加は $F/(Q_y - F_w)$ が 0.7~1.0 程度以上において顕著であることを明らかにした。
- 3) 衝撃外力による仕事と建築物の復元力による仕事とが等値と仮定し、さらにその弾性限における推定値が第4章で提案した推定式により求まる値と一致するように補正することで $F/(Q_y - F_w)$ の関数となる最大応答層間変形の推定式を提案し、これにより応答塑性率が2程度以下にとどまる場合にはその値は精度良く推定されること、その場合には概ね $F/(Q_y - F_w)$ が 0.8 程度以下となることを明らかにした。

第6章「提案応答評価手法を用いた対津波漂流物設計への応用」では、第2章~第5章における検討によって得られた知見に基づき、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計手順を提案するとともに、同手順において建築物の応答評価に用いるパラメータを整理した。また、津波避難

ビルを対象に、津波波力のみに対する必要耐力、津波波力と船舶衝突時衝撃外力との組み合わせ外力に対する必要耐力、および一般的な耐震建築物の必要耐力、の3つをケーススタディにより比較することで、耐震設計および耐津波波力設計された津波避難ビルであれば、一般的な港湾で想定される総トン数 500 ton 未満程度の船舶が衝突したとしても、崩壊等の著しい不具合が生じる可能性は低いことを明らかにした。

第7章「結論」の本章では、本論文で得られた成果と今後の課題について取りまとめた。

以上、本論文では、津波漂流物の衝突に対する建築物の構造設計手法の確立に資する知見を提供することを目的として、津波漂流船舶の衝突時衝撃外力を評価し、その外力に対する建築物の応答評価手法を提案した。同評価手法を設計実務に適用するためには、今後解決すべきもしくは留意すべき項目として下記の項目が挙げられる。

1) 津波来襲時における船舶の実挙動と陸域遡上生起頻度（第2章）

①本研究における船舶の陸域遡上生起頻度の検討結果は、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶挙動に関するデータに基づいて算定されている。しかし、船舶の挙動は、地震発生から津波到達までの時間、地震発生時刻、港湾における防災対策、などの条件により異なると想定されるため、津波来襲時における船舶の挙動およびその陸域遡上生起頻度については、今後も引き続き知見の蓄積が必要と考えられる。

2) 津波漂流船舶の衝突時衝撃外力（第3章）

①本研究における津波漂流船舶衝突時の衝撃外力の評価においては、明確な結論に至るための十分なデータを得られていないため、今後さらなる精査が必要である。また、同外力は、既往研究では±50%程度、本研究においても-43%～+32%のばらつきを含むことが明らかになっているため、設計実務においては、そのことを念頭に安全側に同衝撃外力を設定することが望ましい。

②本研究における衝撃外力の設定においては、同外力に対する建築物の応答を簡便に、なおかつ安全側に評価する（すなわち衝撃外力を過小評価しない）ことを目的に、建築物における被衝突部材の局所的な損傷や、衝突時における建築物の振動による影響は考慮していない。そのため、両者を考慮し、今後衝撃外力をさらに精度良く設定するためには、船舶の破壊および建築物の応答を同時に考慮することが可能な解析手法等による詳細な検討が必要であると考えられる。

3) 津波波力および衝撃外力に対する建築物応答の簡易評価手法（第4章、第5章）

①本評価手法を適用する上では、船舶衝突時の浸水深を定める必要がある。本研究における事例解析においては、最も安全側に建築物応答を評価することを目的として最大浸水深時に船舶が衝突することを想定した。しかし、より実状に則して船舶衝突時の浸水深を設定するた

めには、対象建築物と船舶との位置関係などを適切に考慮する必要があると考えられる。

- ②本評価手法は、衝撃外力による建築部材の局所的な損傷は無視して提案された。しかし、船舶の衝突により建築物の構造部材が損傷すると、建築物の耐力および剛性は低下するため応答は増大する。設計実務においては、そのような状況も念頭に、評価手法に入力する建築物の剛性および耐力を定める必要があると考えられる。
- ③本評価手法は、高さ方向に直線一次モード形状となる質点系モデルの応答性状に基づいて導出され、また、その妥当性の検証も同モデルを用いて行われた。しかし、津波波力を効果的に低減し得る構造形式として着目されるピロティ形式の建築物では、1層の剛性が比較的小さく同様のモード形状にはならない可能性があるため、そのような建築物に対する本評価手法の適用性を検証する必要があると考えられる。
- ④本評価手法は、建築物の復元力特性はバイリニア型と仮定して提案されたが、鉄筋コンクリート造建築物の復元力特性としては一般的にトリリニア型が採用される。津波に先んじて生じる地震により建築物がひび割れ以上に損傷する場合には、バイリニア型の復元力特性は妥当な設定と考えられるが、震源が遠方のため地震による建築物の損傷が生じない場合には、同設定による応答は過大評価となる。
- ⑤本評価手法は、津波波力および衝撃外力に対する並進応答の評価を対象とし、建築物のねじれ応答は評価の対象とはしていない。ねじれ応答を考慮した建築物の応答については文献^[7.4]に検討されているため、本研究成果に加え、同文献に提案されている応答評価手法を用いることにより、ねじれ応答を考慮した建築物の応答を評価することができる。
- ⑥本評価手法は、津波波力および衝撃外力に対する建築物の水平変形を推定する手法であるが、両外力に対しては建築物が転倒もしくは滑動する恐れもあるため、両者に関しても安全性の検討手法を確立する必要があると考えられる。

4) 提案応答評価手法を用いた対津波漂流物設計への応用（第6章）

- ①本研究では、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の応答評価手法を提案したが、同手法を用いて建築物を設計する際には、対象建築物の要求性能を決定する必要がある。特に、本研究成果の主な適用対象として想定される津波避難ビルは、津波来襲時に人を避難させる重要な施設であることを考慮して要求性能を検討する必要がある。
- ②本評価手法を設計実務に適用するためには、導入した仮定条件による影響や、応答評価手法の推定精度など（6.2節）に加え、上記①に記した検討対象建築物の要求性能を総合的に勘案する必要がある。

[参考文献]

- [7.1] 根本雄平:津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮した RC 造建物の応答評価に関する研究,
東京大学修士学位論文, 2017 年 3 月

付録 1

検討対象船舶一覧

付録 1. 検討対象船舶一覧

付録 1.1 はじめに

2 章では、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶の陸域遡上生起頻度の検討を行った。その検討対象船舶 143 隻の一覧を掲載する。

付録1.2 船舶一覧

船舶符号	発災時 船位	船籍	船種 ^{*2}	分類	全長 ^{*3}	国内	国際	データ ソース			陸域 遡上 生起 ^{*6}	操舵 可否	喫水 $d <$ 浸水深 h_i	発災時 喫水 d [m]	軽荷	満載
					L_{04} [m]	総トン数 ^{*4} T_G [トン]	総トン数 ^{*5} t [トン]	I	II	III					喫水 ^{*7} d_L [m]	喫水 ^{*7} d_F [m]
TMK-01	苫小牧港	日本	フェリー	D	192	13,654	-	×	○	×	×	○	○	5.6	4.6	6.7
HHE-01	八戸港	日本	巡視船	F	89	1,300	-	○	×	×	×	○	○	不明	不明	不明
HHE-02		日本	探査船	D	210	56,752	56,752	○	○	○	×	○	○	8.5	5.2	9.2
HHE-03		日本	フルコンテナ船	D	96	749	-	○	○	×	×	○	×	3.3	2.8	3.6
HHE-04		日本	一般貨物船	D	135	5,930	-	○	○	×	×	○	○	5.9	3.7	6.6
HHE-05		日本	一般貨物船	D	79	691	-	○	×	×	×	○	○	不明	2.3	4.7
HHE-06		日本	フェリー	D	135	6,558	-	○	○	×	×	○	○	5.0	4.0	5.7
HHE-07		外国	一般貨物船	D	179	20,471	20,471	×	○	○	不明	不明	○	8.0	4.9	10.2
HHE-08		日本	曳船	C	31	178	-	×	○	×	×	○	×	3.2	2.4	2.7
HHE-09		日本	曳船	C	31	178	-	×	○	×	×	○	×	3.2	2.4	2.7
HHE-10		日本	曳船	C	36	243	-	×	○	×	×	○	○	4.0	2.9	3.2
HHE-11		日本	曳船	C	31	177	-	×	○	×	×	○	×	3.2	2.4	2.7
HHE-12		外国	ケミカルタンカー	E	126	7,912	7,912	×	×	○	×	×	○	6.4	2.8	8.7
KJI-01	久慈港	日本	油回収船	F	34	194	-	×	×	○	65	×	×	不明	不明	3.2
MYK-01	宮古港	日本	旅客船	A	29	109	-	×	○	×	×	○	不明	1.3	1.1	1.2
MYK-02		日本	旅客船	A	29	109	不明	×	○	○	214	×	×	不明	1.1	1.2
KIS-01	釜石港	外国	一般貨物船	D	97	4,724	4,724	○	×	○	36	×	×	3.5	2.8	8.0
KIS-02		日本	曳船	C	32	173	不明	×	○	○	×	○	×	不明	2.5	2.9
KIS-03		日本	曳船	C	31	192	不明	×	○	○	×	○	×	不明	2.4	2.7
KIS-04		日本	曳船	C	34	296	不明	×	○	○	×	○	×	不明	2.7	3.1
KIS-05		日本	巡視船	F	68	325	-	×	×	○	×	○	不明	不明	不明	不明
KIS-06		日本	漁業指導調査船	B	41	154	不明	×	○	×	×	○	×	3.0	2.2	2.5
OFT-01	大船渡港	外国	漁船	B	54	456	683	○	×	○	326	×	×	不明	2.6	4.6
OFT-02		日本	セメント専用船	E	133	6,544	6,544	○	○	○	×	○	×	4.5	2.0	7.4
OFT-03		日本	セメント専用船	E	115	4,906	4,906	○	×	○	×	○	×	不明	2.3	7.0
OFT-04		日本	曳船	C	30	194	不明	×	×	○	900	×	×	2.1	2.4	2.5
KSN-01	気仙沼港	日本	漁船	B	48	379	-	×	○	○	不明	×	不明	不明	2.6	3.2
KSN-02		日本	漁船	B	49	379	-	×	○	○	28	×	×	不明	2.6	3.5
KSN-03		日本	フェリー	D	29	198	不明	×	○	○	不明	×	×	不明	2.2	2.6
KSN-04		日本	旅客船	A	26	109	不明	×	○	○	不明	×	×	不明	1.0	1.3
KSN-05		日本	旅客船	A	32	109	不明	×	○	○	○	×	×	不明	1.2	1.6
KSN-06		日本	漁船	B	32	166	不明	×	○	×	不明	×	不明	不明	1.8	2.1
KSN-07		日本	漁船	B	32	166	不明	×	○	×	不明	×	不明	不明	1.8	2.1
KSN-08		日本	漁船	B	36	196	不明	×	○	×	不明	×	不明	不明	2.2	2.4
URN-01	浦ノ浜港	日本	フェリー	D	50	306	-	×	○	○	131	×	×	不明	1.6	2.3
URN-02		日本	旅客船	A	29	160	-	×	○	○	111	×	×	1.5	1.1	1.5
ONG-01	女川港	日本	揚船／曳兼用船	C	66	1,460	1,832	×	○	○	×	○	×	4.8	5.2	5.9
ISM-01	石巻港 ^{*1}	外国	撤積専用船	E	177	20,212	20,212	○	○	○	×	×	○	9.0	2.8	10.0
ISM-02		日本	漁船	B	38	135	不明	×	○	○	12	×	×	不明	2.7	3.1
ISM-03		日本	漁船	B	51	317	-	×	○	○	15	×	×	不明	2.6	3.4
ISM-04		日本	漁業指導船	B	55	450	不明	×	○	○	不明	×	○	5.2	2.6	3.7
ISM-05		外国	撤積専用船	E	157	15,861	15,861	×	×	○	17	×	不明	不明	2.8	9.7
ISM-06		外国	撤積専用船	E	157	15,800	15,800	×	×	○	不明	×	不明	不明	2.8	9.6
ISM-07		日本	一般貨物船	D	70	391	-	×	×	○	52	×	×	2.6	1.7	3.8
SGM-01	仙台塩釜港 (塩釜港区)	日本	巡視船	F	105	3,100	-	○	×	○	×	不明	不明	不明	不明	不明
SGM-02		外国	冷蔵・冷凍運搬船	D	116	4,261	4,261	○	×	○	×	○	○	不明	3.3	7.1
SGM-03		日本	油送船	E	90	2,030	-	○	×	×	×	○	○	不明	2.8	5.9
SGM-04		日本	曳／救助兼用船	C	48	500	655	○	○	×	×	○	○	4.5	3.8	3.5
SGM-05		日本	旅客船	A	26	129	-	×	○	○	×	×	×	不明	1.0	1.4
SGM-06		日本	旅客船	A	33	205	不明	×	○	×	×	×	×	1.7	1.3	1.7
SND-01	仙台塩釜港 (仙台区)	日本	油送船	E	333	154,159	-	○	×	○	×	○	○	9.4	2.8	20.1
SND-02		外国	一般貨物船	D	98	5,472	5,472	○	×	○	36	不明	○	4.9	2.8	7.5
SND-03		外国	一般貨物船	D	101	6,181	6,181	○	×	○	×	○	不明	不明	2.9	8.2
SND-04		日本	一般貨物船	D	76	499	-	○	○	×	×	○	○	4.0	2.0	4.1
SND-05		日本	ケミカルタンカー	E	105	3,792	-	○	×	×	×	○	不明	不明	2.2	6.8
SND-06		日本	油送船	E	90	1,821	-	○	×	○	×	○	不明	不明	2.0	5.5
SND-07		日本	ケミカルタンカー	E	70	748	-	○	○	×	×	○	○	4.7	2.8	4.3
SND-08		日本	油送船	E	77	919	-	○	×	×	×	○	不明	不明	2.8	5.2
SND-09		日本	自動車／貨物兼用船	D	167	15,781	-	○	○	×	×	○	○	7.6	4.6	7.6
SND-10		日本	フェリー	D	193	13,937	-	○	○	○	×	○	○	5.8	5.0	6.9
SND-11		日本	セメント専用船	E	159	11,736	-	○	○	○	×	○	○	7.0	4.3	8.5
SND-12		日本	LPG船	E	72	998	-	○	×	×	×	○	×	不明	2.4	4.4
SND-13		日本	フルコンテナ船	D	89	749	-	○	○	×	×	○	×	3.5	2.6	3.9
SND-14		日本	油送船	E	70	747	-	○	○	×	×	○	×	3.8	2.8	4.8
SND-15		外国	一般貨物船	D	73	1,110	1,483	○	×	×	×	○	×	不明	2.2	5.0
SND-16		日本	一般貨物船	D	74	499	-	×	○	×	×	○	不明	不明	1.8	4.3
SND-17		日本	巡視船	F	91	1,200	-	×	×	○	不明	×	不明	不明	不明	不明
SND-18		日本	油送船	E	70	747	不明	×	○	×	×	○	不明	不明	2.8	4.5
SND-19		日本	一般貨物船	D	76	498	不明	×	○	×	×	○	不明	2.8	2.3	4.0
SND-20		日本	一般貨物船	D	76	498	不明	×	○	×	×	○	不明	3.7	2.3	4.0
SND-21		日本	一般貨物船	D	76	499	不明	×	○	×	×	○	不明	3.5	2.3	4.1
SND-22		日本	曳船	C	30	147	-	×	×	○	×	○	×	不明	2.3	2.6
SND-23		日本	曳船	C	33	197	-	×	×	○	×	○	×	不明	2.7	2.9
SND-24		日本	曳船	C	33	192	-	×	×	○	×	○	×	不明	2.5	3.0
SND-25		日本	曳船	C	37	247	-	×	×	○	×	○	×	不明	2.9	3.1

船舶符号	発災時 船位	船籍	船種*2	分類	全長*3 L_{OA} [m]	国内 総トン数*4 T_G [トン]	国際 総トン数*5 ϵ [トン]	データ ソース			陸域 遡上 生起*6	操舵 可否	喫水 $d <$ 浸水深 h_i	発災時 喫水 d [m]	軽荷 喫水*7 d_L [m]	満載 喫水*7 d_F [m]
								I	II	III						
SMA-01	相馬港	日本	石炭専用船	E	230	48,036	-	○	×	○	×	不明	○	10.8	2.8	13.8
SMA-02		日本	石炭専用船	E	235	50,489	-	○	×	○	×	不明	○	12.7	2.8	12.9
SMA-03		日本	曳船	C	34	319	-	○	×	×	×	○	×	不明	2.7	3.8
SMA-04		日本	曳船	C	33	253	-	○	×	×	×	○	×	不明	2.6	3.3
SMA-05		日本	曳船	C	34	322	-	○	×	×	×	○	×	不明	2.7	3.8
SMA-06		日本	一般貨物船	D	75	499	-	○	×	×	×	○	×	不明	2.0	4.3
HRM-01	原町火力 発電所	外国	石炭専用船	E	229	43,434	43,434	○	×	○	×	不明	×	12.1	2.8	12.8
HRM-02	広野火力 発電所	日本	曳船	C	34	319	-	○	×	×	×	○	×	不明	2.7	3.8
HRN-01	日本	油送船	E	104	3,598	-	-	○	×	○	不明	×	○	不明	4.3	6.6
ONA-01	小名浜港	外国	砂利運搬船	E	83	1,213	1,597	○	×	○	×	○	○	不明	2.8	4.0
ONA-02		外国	撤積専用船	E	180	22,409	22,409	○	×	○	×	○	○	不明	2.8	6.5
ONA-03		外国	石炭専用船	E	225	39,659	39,659	○	×	○	×	○	○	不明	2.8	13.8
ONA-04		日本	油送船	E	105	3,572	-	○	×	×	×	○	○	不明	2.1	6.6
ONA-05		日本	曳船	C	33	253	-	○	×	×	×	○	○	不明	2.6	3.6
ONA-06		日本	油送船	E	77	922	-	○	×	×	×	○	○	不明	2.7	5.3
ONA-07		日本	一般貨物船	D	71	399	-	○	×	×	×	○	不明	不明	1.4	3.6
ONA-08		日本	一般貨物船	D	82	747	-	○	×	×	×	○	○	不明	2.1	4.4
ONA-09		日本	曳船	C	33	254	-	○	×	×	×	○	○	不明	2.6	3.3
ONA-10		日本	曳船	C	35	196	-	○	×	×	×	○	不明	不明	2.7	3.0
ONA-11		日本	曳船	C	34	322	-	○	×	×	×	○	○	不明	2.7	3.8
ONA-12		日本	曳船	C	32	299	-	○	×	×	×	○	○	不明	2.6	3.8
ONA-13		外国	撤積専用船	E	177	19,887	19,887	○	×	○	×	○	○	不明	2.8	10.0
ONA-14		外国	自動車専用船	D	198	50,681	50,681	○	×	○	×	○	○	不明	5.3	11.6
ONA-15		日本	漁船	B	32	173	-	×	○	×	不明	×	不明	不明	1.8	2.1
ONA-16		日本	一般貨物船	D	71	399	-	×	○	×	×	○	不明	3.6	1.4	3.6
ONA-17		日本	漁業調査船	B	41	159	不明	×	○	○	不明	×	○	3.8	2.6	2.8
ONA-18		外国	油送船	E	247	58,100	58,100	×	×	○	×	不明	○	9.2	2.8	14.8
HTC-01	茨城港 (日立港区)	日本	一般貨物船	D	173	13,950	-	○	○	○	×	○	○	6.5	4.7	7.1
HIC-01	茨城港 (常陸那珂 港区)	外国	石炭専用船	E	225	39,738	39,738	○	×	○	×	○	○	不明	2.8	14.1
HIC-02		外国	撤積専用船	E	169	18,108	18,108	○	×	○	×	○	○	不明	2.8	9.7
HIC-03		日本	曳船	C	36	226	-	○	×	○	×	○	○	不明	2.9	3.2
HIC-04		日本	一般貨物船	D	150	9,348	-	○	×	○	×	○	○	不明	4.5	6.8
HIC-05	茨城港 (大洗港区)	日本	押／曳兼用船	C	28	171	-	×	×	○	不明	○	不明	不明	2.2	2.8
OAR-01		日本	フェリー	D	192	13,539	-	○	○	○	×	○	○	5.9	4.5	6.7
KSM-01	鹿島港	外国	一般貨物船	D	188	22,089	22,089	×	○	×	×	○	○	6.0	5.1	8.0
KSM-02		日本	LPG船	E	70	995	-	×	○	×	×	○	不明	3.9	2.4	4.3
KSM-03		日本	一般貨物船	D	75	499	-	×	○	×	×	○	不明	不明	2.4	4.3
KSM-04		日本	一般貨物船	D	75	499	不明	×	○	○	不明	×	○	不明	2.3	4.0
KSM-05		日本	一般貨物船	D	75	499	不明	×	○	○	不明	×	○	不明	2.3	4.0
KSM-06		日本	一般貨物船	D	75	499	不明	×	○	○	×	○	○	不明	2.2	4.0
KSM-07		日本	一般貨物船	D	75	499	不明	×	○	○	×	×	○	不明	2.3	4.0
KSM-08		日本	一般貨物船	D	75	498	不明	×	○	○	×	×	○	不明	2.2	4.0
KSM-09		日本	一般貨物船	D	63	298	不明	×	○	○	×	×	○	不明	2.0	3.6
KSM-10		日本	一般貨物船	D	59	199	-	×	○	○	×	×	○	不明	1.9	3.1
KSM-11		日本	一般貨物船	D	75	499	不明	×	×	○	×	○	○	不明	2.3	4.0
KSM-12		日本	一般貨物船	D	75	499	不明	×	×	○	×	×	○	不明	2.3	4.0
KSM-13		日本	曳船	C	33	193	-	×	×	○	不明	○	不明	不明	2.6	3.0
KSM-14		日本	油送船	E	68	699	不明	×	○	×	×	○	不明	4.0	2.8	4.4
KSM-15		日本	鉤／炭兼用船	E	300	106,333	106,333	○	○	○	×	不明	○	9.7	2.5	18.2
KSM-16		外国	油送船	E	119	5,988	5,988	○	○	○	×	×	○	6.0	2.8	7.5
KSM-17		外国	一般貨物船	D	91	2,308	2,664	×	○	×	×	○	不明	2.4	2.7	4.6
KSM-18		外国	撤積専用船	E	190	27,989	27,989	○	○	×	不明	○	○	6.5	2.8	11.9
KSM-19		外国	撤積専用船	E	289	91,178	91,178	○	○	○	×	不明	○	11.5	2.8	17.8
KSM-20		日本	油送船	E	333	160,133	160,066	○	○	×	不明	○	○	17.8	2.8	20.9
KSM-21		日本	油送船	E	105	2,986	不明	○	○	×	×	○	○	6.6	2.8	6.6
KSM-22		外国	木材専用船	E	200	36,008	36,008	○	×	×	不明	○	○	不明	2.8	13.5
KSM-23		外国	撤積専用船	E	187	22,089	22,089	○	×	×	不明	○	○	不明	2.8	9.7
KSM-24		外国	一般貨物船	D	102	6,566	6,566	○	×	×	×	○	○	不明	2.9	8.5
KSM-25		日本	曳船	C	28	131	-	○	×	○	×	○	○	不明	2.2	2.7
KSM-26		日本	曳船	C	28	129	-	○	×	○	×	○	○	不明	2.2	2.7
KSM-27		日本	曳船	C	33	190	-	○	×	○	×	○	○	不明	3.0	3.1
KSM-28		日本	曳船	C	30	160	-	○	×	○	×	○	○	不明	2.4	2.8
KSM-29		日本	曳船	C	31	166	-	○	×	○	×	○	○	不明	2.4	2.9
KSM-30		日本	曳船	C	31	166	-	○	×	○	×	○	○	不明	2.4	2.7
KSM-31		外国	一般貨物船	D	112	5,321	5,321	○	×	×	×	○	○	不明	3.2	7.5
KSM-32		外国	撤積専用船	E	190	26,449	26,449	○	×	×	×	○	○	不明	2.8	11.8
KSM-33		外国	LPG船	E	100	4,429	4,429	○	×	×	×	○	○	不明	2.8	6.3
KSM-34		外国	LPG船	E	230	47,027	47,027	○	×	×	不明	○	○	不明	2.8	11.6

*1 2011年3月11日時点の名称（2012年10月に仙台塩釜港石巻港区に変更された）。

*2 船種の表記は船舶明細書の表記に準ずる。

*3 青色はGoogleEarthProにより航空写真上で計測した全長を、赤色は同じ港において総トン数が等しい船舶の値を参考に推定した全長を、そ

*4 青色は国際総トン数から式(2.1)により換算した国内総トン数を示す。

*5 "—"は国際総トン数が登録されていないことを、"不明"は国際総トン数の登録有無が明らかでないことを、それぞれ示す。

*6 数字は陸域遡上距離（すなわち陸域遡上が生じた事例）を示す。

*7 青色は2.2.2項に示す手法により推定した軽荷／満載喫水を示す。

付録 2
平均停泊船舶数の定義と
御前崎港を対象にしたその算定例

付録 2. 平均停泊船舶数の定義と御前崎港を対象にしたその算定例

付録 2.1 はじめに

将来の想定津波に対して、建築物との衝突を考慮する船舶の規模を特定するためには、建築物近傍における船舶の停泊状況（すなわち停泊している船舶数およびその総トン数）を把握する必要がある。しかし、津波来襲時におけるその状況を事前に正確に予測することは極めて困難であるため、ここでは過去の船舶の位置データに基づき、船舶の在港状況を把握する指標として平均停泊船舶数を定義する。

付録 2.2 平均停泊船舶数の定義

津波襲来時に漂流物となりうる船舶規模を検討する上で参考となる指標として、港湾においてある瞬間の平均的な停泊船舶数を示す平均停泊船舶数を式(付 2.1)により定義し、総トン数 x の関数 $f(x)$ として表す。さらに、その平均停泊船舶数 $f(x)$ を、総トン数 x の小さい船舶から順に累積した累積平均停泊船舶数 $F(x)$ を式(付 2.2)により定義する。これは、ある瞬間の総トン数 x 以上の船舶の平均的な停泊船舶数を表す指標である。次項に、同二指標の具体的な適用例を示す。

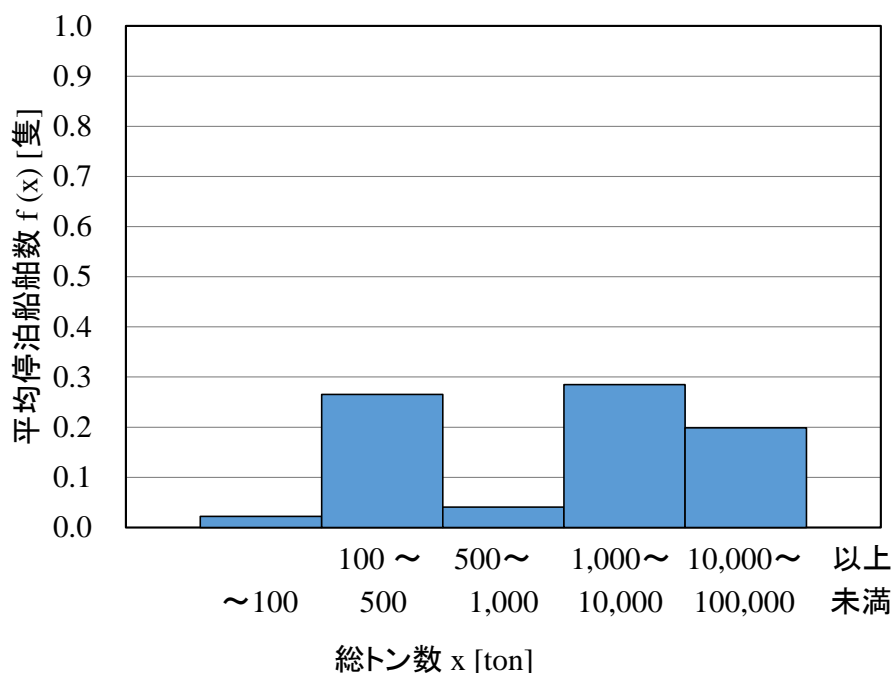
$$f(x) = \frac{\text{ある船舶（総トン数 } x \text{ トン）の停泊時間}}{\text{対象期間の時間}} \times 1 \text{ (隻)} \quad (\text{付 2.1})$$

$$F(x) = \sum_{k=x}^{\infty} f(k) \quad (\text{付 2.2})$$

付録 2.3 御前崎港を対象にした平均停泊船舶数の算定例

本項では、前項において定義した平均停泊船舶数および累積平均停泊船舶数の算定例を示すことを目的とし、御前崎港における 2015 年 3 月 1 日 0:00～9 月 11 日 9:47 の AIS データ (Vessel Finder 社提供) を用いて、同港における平均停泊船舶数を算定する。なお、2 章に述べたとおり、AIS 装置の搭載義務は船舶の種類および総トン数に基づいて定められており、500 ton 未満の船舶には AIS 搭載義務が課されていない船舶が多いため、その船舶数は過小評価され得る点に注意が必要である。

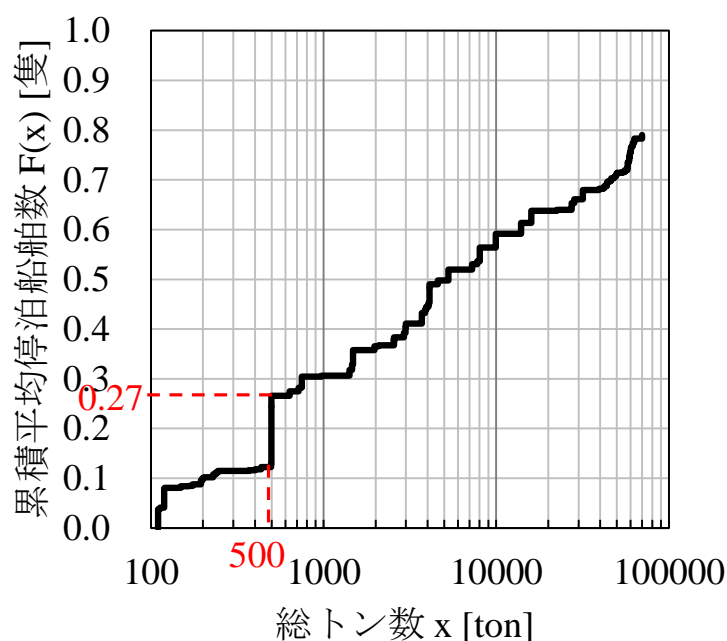
同データに基づき、まず、平均停泊船舶数を式(付 2.1)により求め、総トン数の階級別に足し合わせた結果を付図 2.1 に示す。同図より、御前崎港に停泊している平均的な船舶数を総トン数ごとに把握することができ、同港の検討対象期間においては、100 ton～500 ton、1000 ton～10,000 ton、10,000～100,000 ton の階級の船舶が、それぞれ平均的に 0.2～0.3 隻程度停泊していることがわかる。ただし、上述のとおり、500 ton 未満の船舶には AIS 装置を搭載していないためその停泊実態が把握されていない船舶も少なからず存在するため、500 ton 未満の船舶の実際の平均停泊船舶数は、同図に示す値より多いものと想定される。



付図 2.1 御前崎港における総トン数別の平均停泊船舶数

次に、上記に求めた平均停泊船舶数を、総トン数の小さい船舶から順に累積した累積平均停泊船舶数を式(付 2.2)により算出し、付図 2.2 に示す。同図は、ある瞬間における総トン数 x 以下の船舶の平均的な停泊船舶数を表すため、例えば、同図において累積平均船舶停泊数が 0.5 となる総トン数は 5,000 ton 程度であることから、御前崎港には、総トン数 5,000 ton 程度以下の船舶が平均的に 0.5 隻停泊していることがわかる。さらに、2 章の検討において、津波来襲時に船舶が陸域に遡上する条件の一つとして船舶が「操舵可否」であることを明らかにし、そのような船舶は 500 ton 未満において比較的多いことを明らかにしたため、同図において総トン数 500 ton 未満の船舶を対象を絞ると、そのような船舶は同港において平均的に 0.27 隻程度停泊していることがわかる。同。なお、2 章の検討では、船舶が陸域に遡上する条件として「 $d < h_i$ (d : 喫水, h_i : 設計用津波浸水深)」もその一つであることを明らかにした。そのため「 $d \geq h_i$ 」を満たす船舶は衝突を考慮する船舶から除くことが可能であるものの、御前崎港における想定浸水深は主な地域で 5 m 以上であり、一方で本研究で対象とした船舶の喫水は総トン数 500 ton 未満の船舶では 2~5 m 程度 (2 章) であったため 500 ton 未満の船舶は一般に陸域遡上条件「 $d < h_i$ 」を満たすものと想定される。

以上より、対象港湾における停泊船舶の総トン数および停泊時間がわかれば、平均停泊船舶数および累積平均停泊船舶数が算出可能となり、同二指標と本検討で明らかにした陸域遡上条件を考慮することで、将来の津波来襲時に建築物に衝突し得る船舶の総トン数と、その平均的な停泊数を算定することが可能となる。同資料が各港湾において蓄積されれば、将来の津波来襲時に漂流物として想定すべき船舶規模を検討する際に参考とすることができる。



付図 2.2 御前崎港における累積平均停泊船舶数

付録 3
エネルギー一定則に基づく
最大弾塑性応答の推定

付録 3. エネルギー一定則に基づく最大弾塑性応答の推定

付録 3.1 はじめに

第 5 章では、衝撃外力に対する建築物の最大弾塑性応答の推定式を、衝撃外力による仕事と建築物の復元力による仕事とが等値であるとして導出した。しかし、地震力に対する建築物の最大弾塑性応答については、一般に、エネルギー一定則、すなわち弾性系の最大ひずみエネルギーと弾塑性系の最大ひずみエネルギーが等価であることに基づき推定される。そこで、ここでは 1 質点系モデルを対象に、エネルギー一定則に基づく推定式の適用性について検討する。

付録 3.2 応答推定精度の検討

エネルギー一定則に基づく最大弾塑性応答の推定式は、衝撃外力 F に対する弾性系の最大ひずみエネルギー（付図 3.1 の青色部）と、同外力に対する弾塑性系の最大ひずみエネルギー（同赤色部）が等価である（式(付 3.1)）と仮定すること、衝撃外力に対する弾性 1 質点系の最大応答は式(付 3.2)により概ね求まること（第 4 章）、の二点から式(付 3.3)として求まる。

衝撃外力に対する最大弾塑性応答について、式(付 3.3)により求まる推定値と、解析により求まる正解値との比を付図 3.2 に示す。同図より、式(付 3.3)は、衝撃外力 F が比較的小さい場合 ($F/Q_y \leq 0.7$) には精度良く最大弾塑性応答を推定するものの、衝撃外力 F が大きくなるにつれて推定誤差は大きくなり、その誤差は第 5 章で採用した推定式(5.2)（衝撃外力による仕事と建築物の復元力による仕事とが等値として導出した推定式、図 5.39）よりも大きいことがわかる。よって、本研究では式(5.2)を衝撃外力に対する最大弾塑性応答の推定式として採用した

$$\frac{1}{2} K \delta_e^2 = K \delta_y \delta_p - \frac{1}{2} K \delta_y^2 \quad (F/Q_y \geq 0.5) \quad (\text{付 3.1})$$

$$\delta_e = \frac{2F}{K} \quad (\text{付 3.2})$$

$$\delta_p = \frac{\delta_e^2 + \delta_y^2}{2\delta_y} = \left\{ \frac{1}{2} + 2 \left(\frac{F}{Q_y} \right)^2 \right\} \delta_y \quad (F/Q_y \geq 0.5) \quad (\text{付 3.3})$$

ここで、

δ_y : 弾塑性系の降伏変形 [m]

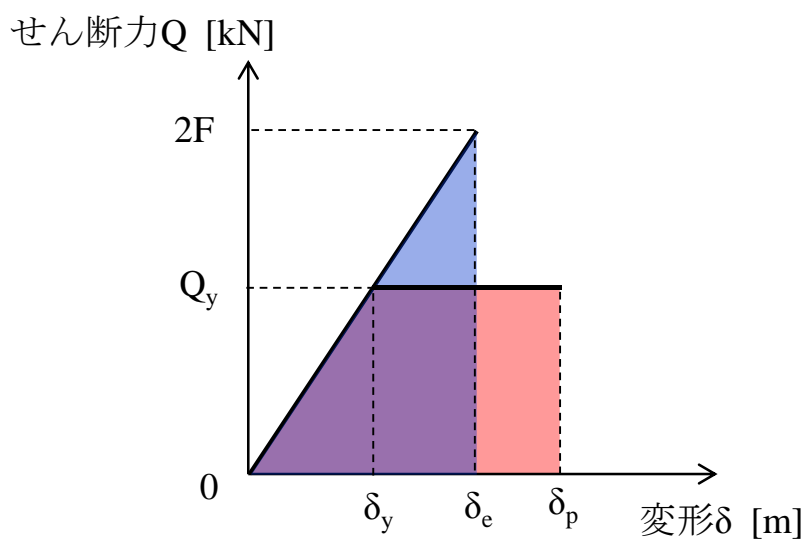
δ_e : 弾性系の最大応答 [m]

δ_p : 弾塑性系の最大応答 [m]

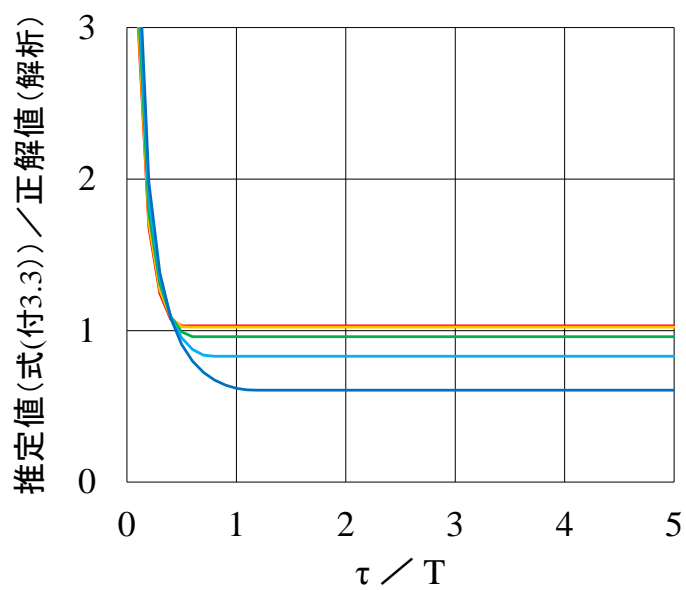
F : 衝撃外力 [kN]

Q_y : 降伏耐力 [kN]

K : 剛性 [kN/m]



付図 3.1 エネルギー一定則に基づく最大応答推定の概念図



$F/Q_y =$ —0.5 —0.6 —0.7 —0.8 —0.9

付図 3.2 エネルギー一定則に基づく最大弾塑性応答の推定精度

付録 4

津波来襲時における船舶の陸域遡上距離

付録 4. 津波来襲時における船舶の陸域遡上距離

付録 4.1 はじめに

ここでは、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時に、陸域への遡上が確認された船舶を対象としてその陸域遡上距離を検討する。

付録 4.2 船舶の陸域遡上距離の検討

検討対象船舶は、付表 4.1 に示す計 35 隻の船舶とする。同表では、第 2 章で検討対象とした船舶のうち陸域遡上距離が把握されている船舶（データソースⅠ～Ⅲのいずれかが○印のデータ）に加え、陸域遡上した船舶のみに着目した文献から参照した船舶（データソースⅢが△印のデータ）および津波来襲後に陸域に残されたことが GoogleEarth の航空写真により確認された船舶（データソースⅠ～Ⅲのいずれも×印のデータ）を検討対象船舶として含めている。なお、同表における陸域遡上距離は、船舶の陸域遡上位置から最寄り岸壁までの直線距離として定義し、津波来襲時における AIS データ（データソースⅠ）が得られている船舶は漂流期間中に最大の陸域遡上距離を、その他の船舶は津波来襲時に最終的に漂着した位置からの遡上距離を、それぞれ GoogleEarth における距離計測機能により計測している。

付表 4.1 陸域遡上距離の検討に用いた船舶一覧

船舶符号	発災時 船位	船籍	船種	分類 ^{*1}	全長 ^{*2} L_{OA} [m]	国内 総トン数 ^{*3} T_G [トン]	国際 総トン数 ^{*4} t [トン]	データ ^{*5} ソース			陸域 遡上 距離 [m]	操舵 可否	喫水 $d <$ 浸水深 h_i	発災時 喫水 d' [m]	軽荷 喫水 d_L [m]	満載 喫水 d_F [m]
								Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ						
HHE-13	八戸港	日本	漁船	B	39	175	—	×	×	×	77	不明	○	不明	2.5	2.6
HHE-14		日本	漁船	B	41	184	不明	×	×	×	58	不明	○	不明	2.6	2.7
HHE-15		日本	漁船	B	37	152	—	×	×	×	30	不明	○	不明	2.3	2.5
KJI-01	久慈港	日本	油回収船	F	34	194	—	×	×	○	65	×	○	不明	不明	3.2
MYK-02	宮古港	日本	旅客船	A	29	109	不明	×	○	○	214	×	○	不明	1.1	1.2
OTJ-01	大槌港	日本	旅客船	A	27	109	不明	×	×	△	222	×	○	2.0	1.1	2.0
OTJ-02		日本	漁船	B	37	119	不明	×	×	△	120	不明	○	不明	2.3	2.5
KIS-01	釜石港	外国	一般貨物船	D	97	4,724	4,724	○	×	○	36	×	○	3.5	2.8	8.0
OFT-01	大船渡港	外国	漁船	B	54	456	683	○	×	○	326	×	○	不明	2.6	4.6
OFT-04		日本	曳船	C	30	194	不明	×	×	○	900	×	○	2.1	2.4	2.5
KSN-02	気仙沼港	日本	漁船	B	49	379	—	×	○	○	28	×	○	不明	2.6	3.5
KSN-09		日本	漁船	B	60	330	不明	×	×	△	654	×	○	2.8	2.6	3.9
KSN-10		不明	不明	B	38	112	不明	×	×	×	371	不明	○	不明	2.4	2.5
KSN-11		不明	不明	B	38	112	不明	×	×	×	291	不明	○	不明	2.4	2.5
KSN-12		日本	漁船	B	44	199	—	×	×	△	235	不明	○	不明	2.6	2.9
KSN-13		日本	漁船	B	44	184	—	×	×	△	192	不明	○	2.8	2.6	2.8
KSN-14		日本	漁船	B	40	172	不明	×	×	△	180	不明	○	不明	2.6	2.7
KSN-15		日本	漁船	B	46	199	—	×	×	△	170	不明	○	不明	2.6	3.0
KSN-16		日本	漁船	B	39	173	—	×	×	△	72	不明	○	不明	2.5	2.6
KSN-17		日本	漁船	B	48	420	不明	×	×	△	180	×	○	不明	2.6	3.2
KSN-18		不明	不明	B	45	187	不明	×	×	×	7	不明	○	不明	2.6	3.0
URN-01	浦ノ浜港	日本	フェリー	D	50	306	—	×	○	○	131	×	○	不明	1.6	2.3
URN-02		日本	旅客船	A	29	160	—	×	○	○	111	×	○	1.5	1.1	1.5
ISM-02	石巻港	日本	漁船	B	38	135	不明	×	○	○	12	×	○	不明	2.7	3.1
ISM-03		日本	漁船	B	51	317	—	×	○	○	15	×	○	不明	2.6	3.4
ISM-05		外国	撤種専用船	E	157	15,861	15,861	×	×	○	17	×	不明	不明	2.8	9.7
ISM-07		日本	一般貨物船	D	70	391	—	×	×	○	52	×	○	2.6	1.7	3.8
ISM-08		日本	漁業実習船	B	56	452	不明	×	×	△	54	×	○	3.6	2.6	3.6
ISM-09		不明	不明	B	43	157	不明	×	×	×	53	不明	○	不明	2.6	2.8
ISM-10		不明	不明	B	40	131	不明	×	×	×	35	不明	○	不明	2.6	2.7
ISM-11		日本	漁業実習船	B	32	139	不明	×	×	△	387	×	○	不明	1.8	2.4
ISM-12		日本	漁業指導調査船	B	34	120	120	×	×	△	4	不明	○	不明	2.0	2.6
ISM-13		日本	漁船	B	42	196	—	×	×	△	50	不明	○	3.1	2.6	3.0
SND-02	仙台塩釜港 (仙台港区)	外国	一般貨物船	D	98	5,472	5,472	○	×	○	36	不明	×	4.9	2.8	7.5
ONA-19	小名浜港	日本	漁船	B	55	299	不明	×	×	△	13	×	○	3.6	2.6	3.6

*1 青色は分類Bとの仮定した事例を示す。

*2 青色はGoogleEarthProにより航空写真上で計測した全長を示す。

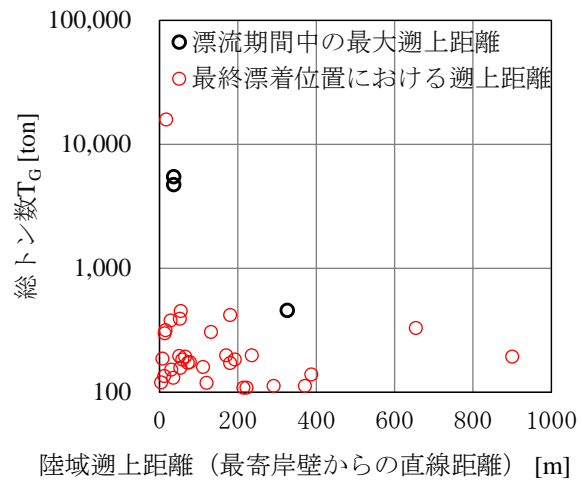
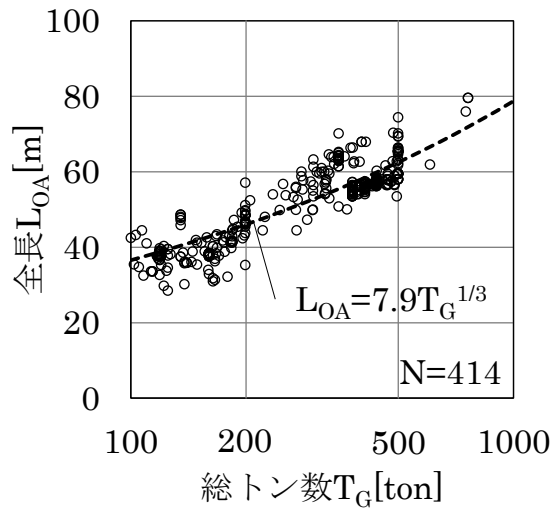
*3 青色は付図4.1に基づき推定した国内総トン数を、赤色は国際総トン数から式(2.1)により換算した国内総トン数を、それぞれ示す。

*4 "—"は国際総トン数が登録されていないことを、"不明"は国際総トン数の登録有無が明らかでないことを、それぞれ示す。

*5 "△"は陸域遡上した船舶のみに着目した文献を参照したことを示し（そのため2章の検討からは除外した事例）、Ⅰ～Ⅲすべてが"×"のデータはGoogleEarthの航空写真のみにより特定した船舶を示す。

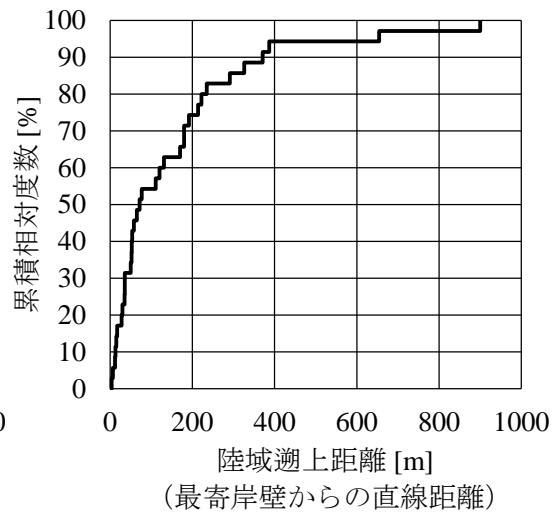
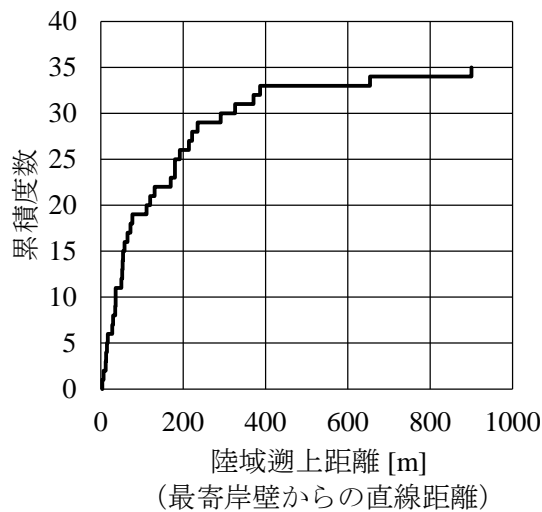
*6 青色は2.2.2項に示す手法により推定した軽荷／満載喫水を示す。

同表に示した船舶について、その総トン数と陸域遡上距離との関係を付図 4.2 に示す。同表において、黒丸は津波来襲時における AIS データが得られたため漂流期間中の最大遡上距離が把握できた船舶を、赤丸は同データが得られていないため最終的に漂着した位置のみ把握できた船舶を、それぞれ示す。よって、赤丸の陸域遡上距離は、津波来襲時における最大陸域遡上距離よりも短い可能性がある点に留意が必要である。同図より、陸域に遡上が確認された船舶のうち、陸域遡上距離が岸壁から 100 m 程度以内であった船舶が比較的多く、特に総トン数 500 ton 以上の 3 隻すべての船舶の陸域遡上距離が 100 m 以内であった。また、陸域遡上距離についての累積度数および累積相対度数を付図 4.3 に示すと、陸域への遡上が確認された船舶のうち、陸域遡上距離が 100 m 以内であった船舶が 5 割以上、400 m 以内であった船舶が 9 割以上、であったことがそれぞれわかる。



付図 4.1 漁船の総トン数 T_G と全長 L_{OA} との関係

付図 4.2 船舶の総トン数 T_G と陸域遡上距離との関係



付図 4.3 船舶の陸域遡上距離の累積度数および累積相対度数

質疑・回答

質疑・応答

【質疑 1】（田尻准教授）

船舶の衝突に対する建築物の安全性を確保する上では、本研究で対象としている建築物全体の応答に起因する崩壊よりも、建築部材の損傷に起因する崩壊を防ぐ方が設計においては困難であり、重要な事項ではないか。また、船舶衝突時には、建築物はその衝突箇所近傍にのみ変形が生じ、建築物全体の応答とはならないのではないか。

【回答 1】

現行の構造設計手法では、船舶の衝突による建築部材の損傷に起因する崩壊を防止することについては明示されているが、同衝突による建築物全体の応答については考慮されていないため、本研究では建築物全体の応答に着目した（1.1 節参照）。ただし、船舶の衝突による建築部材の損傷に起因する崩壊についても、今後定量的な検討手法の確立が必要である。また、船舶衝突時に建築物が一体として応答するかという点については、総トン数 500 トン未満程度の船舶であれば、その衝突時のせん断力を建築物の床スラブにより伝達し得ることを別途確認している。（5.4.1 項に、船舶衝突時衝撃外力と建築物床スラブのせん断耐力との比較を行い、総トン数 500 トン程度未満の衝突時衝撃外力であれば床スラブにより伝達し得ることを示した。）

【質疑 2】（高田教授）

本研究では津波来襲時に船舶が衝突したときの建築物の全体応答に着目しているが、実際には浮力による転倒など他の崩壊シナリオも想定され得るため、まずは津波避難ビルのあるべき姿を考慮した上で検討を行うべきではないか。

【回答 2】

本研究では、まずは建築物全体の応答の評価手法を提案することに焦点を置いて検討を行ったが、建築物の滑動、転倒、局所的な損傷による崩壊といったその他の崩壊シナリオについては別途検討が必要になる（6.1 節参照）。

【質疑 3】（田尻准教授）

総トン数 500 ton 以上の比較的大型の船舶は、津波来襲時に操舵可能であった割合が高かった結果を示している。本研究で対象としている 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波とは異なる場合、例えば夜間に地震が発生した場合などには、異なる傾向になる可能性もあるが、衝突を考慮すべき／すべきでない船舶を明確にする必要があるのではないか。

【回答 3】

本研究で得られたデータの範囲内では、総トン数 500 トン以上の船舶には乗組員が在船していた確率が高かったものの、停泊船舶における船員の常駐義務が規則等により規定されているわけではないため、本研究のみから断定的な結論を導くことはできない。さらに、地震発生が夜間の場合には沖出しが比較的困難になることも想定されるため、より明確に傾向を示すためにはさらな

るデータの蓄積が必要である（2.4.3 項参照）。（2.4.3 項に、規則等により比較的大規模の船舶における船員の常駐義務が課せられているわけではない旨を追記した。）

【質疑 4】（田島教授）

衝突船舶の規模を定める際に平均停泊船舶数を用いることを提案しているが、停泊船舶が漂流時に建築物に衝突するかどうかの判断も加えて必要ではないか。また、衝突速度に直接的に用いる流速の評価精度と、それによる建築物応答評価への影響はどのように考えているのか。

【回答 4】

衝突船舶規模を設定する上では、陸域遡上条件を満たす停泊船舶のうち最大規模の船舶の総トン数を採用することが簡便かつ安全側の手法となるが、停泊船舶と建築物との衝突可能性を含めてより実状に即した設定を行うためには、平均停泊船舶数より停泊船舶の総トン数の頻度分布を求め、それを初期条件としてモンテカルロ計算を行い衝撃外力の Hazard 曲線を算定する手法も挙げられる（6.2 節参照）。また、現状では流速を精度良く評価することは困難であるが、本研究における提案手法では流速は衝撃外力の荷重作用継続時間のみに影響し、建築物応答は荷重作用継続時間によらず概ね一定であることがわかっているため、流速の評価誤差が建築物の応答に与える影響は小さいと考えられる。（6.2 節に、津波流速より定める船舶の衝突速度が建築物応答に与える影響は小さい旨を追記した。）

【質疑 5】（有川教授）

本研究では、船舶衝突時の衝撃外力レベルは衝突速度に依存しないと仮定している。津波流速は、例えば浸水深 10 m 程度の場合には 10 m/s 程度にまで達し得るが、船舶がそのような速度で衝突する場合と、低速で衝突する場合とで衝撃外力レベルは変わらないのか。

【回答 5】

弾性衝突であれば衝撃外力レベルは衝突速度に依存するが、船舶の衝突は船首の破壊を伴う弾塑性衝突であり、既往研究では鋼板の降伏後応力の歪速度への依存性は極めて低いことがわかっているため、船舶の衝突速度が衝突時衝撃外力レベルに与える影響は小さいと考えられる（1.2.2 項参照）。

【質疑 6】（有川教授）

本研究で定義した船舶衝突時衝撃外力は、擁壁や防波堤といった海岸構造物にも適用可能か。

【回答 6】

本研究で定義した船舶衝突時衝撃外力は、その衝突時の条件が同じであればその他の構造物にも適用できると考えられる。（3.4.3 項に、その旨を追記した。）

【質疑 7】（田尻准教授）

衝撃外力に対する弾塑性応答推定式に導入した係数 α の物理的な意義は何か。また、既に弾塑

性領域に至った応答を弾性限の応答に合わせる現在の手法よりも、塑性開始点における応答を弾性限の応答に合わせる手法の方が合理的ではないか。

【回答 7】

弾塑性 1 質点系を対象に導出した応答推定式では、検討対象とする層のみに着目しており、他の層の振動の影響が考慮されていないため、それを考慮するために係数 α を導入している (5.3.2 項参照)。塑性開始点における応答を弾性限の応答に合わせる手法も検討したが、結果的に比較的推定精度が良い現在の手法を採用した。(5.3.2 項に、比較的推定精度が良い現在の手法を採用した旨を追記した。)

【質疑 8】(中埜教授)

累積平均停泊船舶数を用いることで総トン数 500 トン以下の船舶が平均的に 0.25 隻停泊していることが把握できるということだが、「隻」という単位を持ったままでは確率論的な検討に用いることはできないと考えられるがどうか。

【回答 8】

モンテカルロ計算等の確率的な検討においては、平均停泊船舶数の総和が 1 となるように変換した総トン数の頻度分布を用いる必要があるため、「0.25 隻」という値を確率的な議論に直接的に用いることはできないと考えている。(6.2 節に、その旨を追記した。)

【質疑 9】(中埜教授)

5 章の事例解析結果に基づくと、比較的大規模な 6 層建築物であれば、総トン数 500 ton 以下の比較的小規模な船舶の衝突に対しては降伏変形まで至らないということが良いか。

【回答 9】

建築物の変形は津波波力にも依存するが、比較的大規模な 6 層建築物であれば、総トン数 500 ton 以下の比較的小規模な船舶の衝突が建築物の応答に与える影響は小さい。また、より小規模な建築物であっても、想定する津波波力が大きく耐力の高い建築物であれば同様の傾向となる。(6.2 節に、総トン数 500 ton 未満の船舶の衝突に対しては、耐震設計および耐津波波力設計された建築物であれば耐え得ることを示した。)

【質疑 10】(有川教授)

本研究では、津波来襲時に建築物に作用する鉛直力について議論されていないが、どのように扱っているのか。

【回答 10】

本研究において鉛直力は陽な形では議論されていないが、本研究で提案した応答評価手法を適用する上では、鉛直力も考慮した静的漸増載荷解析により求めた建築物の剛性・耐力を用いる必要がある。(6.2 節に、静的漸増載荷解析実施時に浮力を考慮している旨を追記した。)

【質疑 11】（中埜教授）

津波来襲時に建築物に作用する鉛直力については、建築物の転倒について別途検討する際に考慮する必要があるが、本研究では触れていないということではないか。実際の設計においては、本研究で対象としている上部構造のせん断変形よりも、建築物全体の転倒もしくは滑動による破壊パターンとなることが多いため注意が必要である。

【回答 11】

本研究では、船舶衝突時に生じる建築物上部構造のせん断変形のみに着目しており、鉛直力が重要な要因となる建築物の転倒については考慮していない。転倒および滑動については、本研究内容とは別途検討を行う必要がある（6.1 節参照）。

【質疑 12】（有川教授）

5 章における検討では、船舶の衝突速度は 4 m/s と設定しているが、水深係数とフルード数との関係に基づいて算定するのであればそれよりも大きい値となるのではないか。

【回答 12】

5 章における検討では、津波来襲時における船舶の漂流速度・衝突速度を考慮してその平均的な値を採用した。ただし、先述のとおり、本検討範囲内では衝突速度が建築物応答に与える影響は極めて小さいため、どちらの速度を用いても同様の結果が得られると考えられる（5.4 節参照）。（5.4 節に、衝突速度を船舶の実衝突事例に基づき定めた旨を追記した。）

【質疑 13】（高田教授）

本研究で提案した設計手順は船舶の衝突のみに着目しているため、例えば津波高さなど、実際の津波避難ビルの設計においては重要であるにもかかわらず触れられていないパラメータがある。津波避難ビルの設計全体を考慮した上で、重要なパラメータは何かを明確にすること。

【回答 13】

津波避難ビルの設計に関連するパラメータとしては、津波高さ、衝突船舶の規模、津波の発生時刻など様々であるが、現状では整理されていないため、重要なパラメータについて整理する。（6.2 節に、建築物の応答評価に重要なパラメータを整理した。）

【質疑 14】（田尻准教授）

津波避難ビルにおける設計用津波浸水深と、船舶の衝突に対する影響との関係について示すことはできないか。例えば、浸水深〇m 以上の津波に対して設計された津波避難ビルであれば船舶の衝突は別途考慮する必要がないなど。

【回答 14】

津波避難ビルにおける設計用津波浸水深と、船舶の衝突に対する影響との関係について検討する。（6.2 節に、両者の関係の検討結果を整理し、総トン数 500 ton 未満の船舶の衝突に対しては、耐震設計および耐津波波力設計された建築物であれば耐え得ることを示した。）

【質疑 15】（有川教授）

現在，沿岸の建築物は一般に船舶の衝突を考慮した設計がされていないため，それらの建築物が船舶の衝突に耐え得るかどうかを判断するための指針があると良い。

【回答 15】

【質疑 14】に対する回答と同様。

【質疑 16】（中埜教授）

本研究を開始した当初は船舶の衝突が建築物に与える影響は非常に大きいと想定されていたが，実はそのような船舶が建築物に衝突する可能性は極めて低く，当初想定していたほど大きい外力を考慮する必要はないということか。

【回答 16】

津波来襲時に約 5,000 ton の大規模船舶が建築物に衝突した事例が確認されたものの，2 章の検討により建築物への衝突可能性が比較的高いことが明らかとなった 500 ton 未満の船舶については，建築物の応答に与える影響は小さいことがわかった。（6.2 節に，根拠となる検討結果を追加した。）

