

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おいて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 ${}_1T$ との比 $\tau/{}_1T$ 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 $\tau/{}_1T \geq 0.5$ 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、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 ${}_1T$ との比 $\tau/{}_1T$ 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 $\tau/{}_1T$ 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。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。