

博士論文

構造物の地震応答加速度記録の高次微分解析による  
損傷評価手法に関する研究

涌井 将貴







## 目次

第1章 序.....	
1.1 研究の背景.....	1-1
1.2 構造ヘルスマニタリングに関する既往研究.....	1-6
1.2.1 ヘルスマニタリングとは.....	1-6
1.2.2 最大応答値に着目した損傷検出.....	1-7
1.2.3 層剛性および減衰定数に着目した損傷検出.....	1-8
1.2.4 荷重-変形関係に着目した損傷検出.....	1-9
1.2.5 梁部材の振動モードに着目した損傷検出.....	1-10
1.2.6 梁部材の動ひずみ応答に着目した損傷検出.....	1-10
1.2.7 部材レベルの剛性低下に着目した損傷検出.....	1-10
1.2.8 層あるいは部材の非線形性に着目した損傷検出.....	1-12
1.3 本論文の着目範囲と目的.....	1-13
1.4 本論文の構成.....	1-15
1.5 参考文献.....	1-18
第2章 絶対加速度の高次微分の定式化.....	
2.1 はじめに.....	2-1
2.2 jerk および snap の定義.....	2-2
2.3 1 質点系における jerk および snap.....	2-2
2.4 多質点系における jerk および snap.....	2-4
2.5 デジタルデータにおける jerk および snap.....	2-8
2.5.1 数値微分法.....	2-8
2.5.2 差分方程式による jerk および snap.....	2-10
2.6 まとめ.....	2-14
2.7 参考文献.....	2-14

---

第3章 絶対加速度の微分を用いた損傷評価.....	
3.1 はじめに.....	3-1
3.2 振動系の非線形性検出方法（1質点系の場合）.....	3-1
3.2.1 非線形性検出の考え方.....	3-2
3.2.2 弾性振動中の絶対加速度と snap の対応関係.....	3-3
3.2.3 非線形性検出のための閾値.....	3-5
3.2.3.1 降伏耐力による設定.....	3-5
3.2.3.2 相対加速度による設定.....	3-7
3.2.4 まとめ.....	3-10
3.3 振動系の非線形性検出方法（多質点系の場合）.....	3-11
3.3.1 弾性振動中の jerk および snap.....	3-11
3.3.2 非線形性検出のための閾値.....	3-12
3.3.2.1 降伏層せん断力による設定.....	3-12
3.3.2.2 層間加速度による設定.....	3-13
3.4 剛性低下率の推定方法.....	3-14
3.4.1 剛性低下率の定義と算出方法.....	3-15
3.4.2 剛性低下率と snap の対応関係.....	3-16
3.4.3 多質点せん断系への拡張.....	3-17
3.5 塑性変形量の推定方法.....	3-18
3.5.1 降伏点速度の算出.....	3-18
3.5.1.1 jerk を用いた場合.....	3-18
3.5.1.2 snap を用いた場合.....	3-19
3.5.2 塑性変形量の算出.....	3-19
3.5.3 離散時刻歴解析によるずれの検証.....	3-19
3.5.4 多質点せん断系への拡張.....	3-21
3.6 応答解析による提案手法の検証.....	3-23
3.6.1 応答解析モデル.....	3-23
3.6.2 非線形性検出方法の適用性.....	3-24
3.6.3 塑性変形量推定方法の適用性.....	3-28
3.7 まとめ.....	3-30
3.8 参考文献.....	3-30

---

第4章	ノイズの影響とその対処方法.....	
4.1	はじめに.....	4-1
4.2	ノイズの影響.....	4-1
4.2.1	差分方程式の周波数応答.....	4-2
4.2.2	ノイズを含む場合の snap.....	4-5
4.2.3	ノイズの2階微分.....	4-5
4.2.4	非線形性検出のための $N_{max}$ の条件.....	4-5
4.3	ノイズへの対処方法.....	4-7
4.3.1	計測時間刻みによるノイズへの対処.....	4-7
4.3.2	ダウンサンプリング処理による時刻歴波形の算出.....	4-9
4.3.3	応答解析モデル.....	4-11
4.3.4	ノイズ低減効果の検証.....	4-11
4.4	非線形性の検出精度に与える影響.....	4-16
4.4.1	検出精度の評価指標.....	4-16
4.4.2	応答解析モデル.....	4-16
4.4.3	検討するダウンサンプリング時の時間刻み.....	4-18
4.4.4	検出精度の検証.....	4-19
4.5	まとめ.....	4-22
4.6	参考文献.....	4-23

第5章 構造部材ごとの振動台実験結果への適用性.....	
5.1 はじめに.....	5-1
5.2 露出型柱脚.....	5-2
5.2.1 スリップ型復元力特性を有する振動系の snap.....	5-2
5.2.2 状態の判別.....	5-4
5.2.3 試験体.....	5-6
5.2.4 実験装置.....	5-7
5.2.5 入力波と加振手順.....	5-8
5.2.6 snap による非線形性検出.....	5-9
5.2.6.1 No.24 試験体.....	5-9
5.2.6.2 No.25 試験体.....	5-17
5.2.7 塑性率の推定.....	5-23
5.3 柱梁接合部.....	5-26
5.3.1 試験体.....	5-26
5.3.2 実験装置.....	5-26
5.3.3 入力波と加振手順.....	5-26
5.3.4 snap による非線形性検出.....	5-28
5.3.5 剛性低下率の評価.....	5-31
5.4 鉛直ブレース.....	5-35
5.4.1 試験体.....	5-35
5.4.2 実験装置.....	5-36
5.4.3 入力波と加振手順.....	5-37
5.4.4 snap による非線形性検出.....	5-38
5.5 まとめ.....	5-42
5.6 参考文献.....	5-43

第6章	多層骨組構造物の振動台実験結果への適用性.....	
6.1	はじめに.....	6-1
6.2	骨組系への適用.....	6-2
6.2.1	骨組解析モデル.....	6-2
6.2.2	1層柱脚損傷ケース.....	6-5
6.2.2.1	静的増分解析.....	6-5
6.2.2.2	地震応答解析.....	6-5
6.2.2.3	解析結果.....	6-5
6.2.3	1層梁損傷ケース.....	6-11
6.2.3.1	静的増分解析.....	6-11
6.2.3.2	地震応答解析.....	6-11
6.2.3.3	解析結果.....	6-11
6.2.4	まとめ.....	6-17
6.3	18層鉄骨骨組構造物.....	6-18
6.3.1	試験体.....	6-18
6.3.2	実験装置.....	6-21
6.3.3	入力波と加振手順.....	6-22
6.3.4	多質点せん断系モデルへの置換.....	6-24
6.3.5	snapによる非線形性検出.....	6-29
6.4	まとめ.....	6-38
6.5	参考文献.....	6-39
第7章	結論.....	
7.1	本研究の結論.....	7-1
7.2	今後の課題.....	7-5

付録 A	18 層鉄骨骨組構造物の振動台実験結果.....	
A.1	はじめに.....	A-1
A.2	静的増分解析.....	A-1
A.2.1	骨組解析モデル.....	A-1
A.2.2	解析結果.....	A-3
A.3	層せん断力-層間変位関係および snap 時刻歴波形.....	A-5
付録 B	snap のフーリエ振幅スペクトル.....	
B.1	はじめに.....	B-1
B.2	フーリエ振幅スペクトル.....	B-1

# 第1章 序

## 1.1 研究の背景

地震大国である我が国において、地震によって建築構造物に生じる被害を抑えることは必要不可欠である。建築構造物が地震によって受けた被害経験をもとに、同様の被害が生じないようにするために技術開発が行われてきた。過去の多くの地震被害を契機として、建築構造に求められる要求も変化し、それに対応するために技術は進歩・発展してきたといえる。近代に入ってから、西洋科学技術の導入とともに、耐震設計の考え方が導入され、発展してきた。その経緯は、1914年佐野利器の「家屋耐震構造論」[1-1]において、佐野震度が提案され、1920年には市街地建築物法が施行されることに始まる。この時点では地震力に関する規定は設けられておらず、1923年関東地震を契機として、翌1924年に市街地建築物法の改正によって、水平震度0.1が定められた。水平震度とは、地震応答時の構造物に生じる水平加速度の重力加速度に対する比である。その後、1950年に建築基準法（旧耐震）が制定されると、水平震度0.2に引き上げられ、長期・短期許容応力度による耐震規定が定められた。耐震設計の研究と並行して、構造物の地震時挙動を解明するため、地震動およびこれに対する構造物の応答波形を記録することが行われてきた。我が国では、1952年に初めての強震計が開発され、強震観測（strong motion accelerograph, SMAC）が開始された[1-2]。1978年宮城県沖地震では、鉄筋コンクリート造建物の9階において、世界で初めて1G以上の加速度が記録された[1-3]。このように、大地震時においては、構造物に水平震度0.2以上の地震力が加わることが一般的に認識された。その後、1981年の建築基準法改正による新耐震設計法によって、1次設計および2次設計という2段階設計が導入された。1次設計では、建物の寿命期間内で比較的頻繁に発生する中規模地震に対して、弾性範囲を超えないことを目標とし、2次設計では、頻度の少ない大地震に対して建物の損傷を許容するが、倒壊することなく人命の安全

を確保することを目標としている。さらに、振動特性係数および構造特性係数などが考慮され、60m以上の高層建物に対しては地震波を用いた時刻歴応答解析による耐震計算が規定された。1995年兵庫県南部地震では、新耐震基準による建物の被害が、旧耐震基準による建物に比べて小さいことが明らかになった。一方で、新耐震設計は人命保護には効果を発揮したが、建物の損傷を許容するという考え方は、財産保全、機能維持の観点からは問題が残った。この問題に対して、設計者と発注者が建物の構造性能目標を決定し、建物の安全性を保証するという動きが始まる。1998年の建築基準法改正によって、性能規定型の設計体系への移行に伴い、様々な性能検証ルートが許容された。2000年には限界耐力計算、2005年にはエネルギー法が導入され、耐震設計は高度化した。近年では、パーソナルコンピュータの発達に伴い、複雑な構造物のモデル化、非線形領域を含む動的な地震応答解析が可能となり、想定される地震動入力に対して構造物の安全性を保証する設計が可能となってきた。さらに、2005年から運用が開始された兵庫耐震工研究センターの実験施設である実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）[1-4]では、今後発生が予想される地震動を模擬した入力地震動を用いた震動台実験によって、実建物と同規模の構造物が壊れていく過程および被害状況の観察、地震時の応答計測が行われている。このように、解析・実験の両面における技術躍進によって、詳細なモデル化や再現実験を行うことが可能となり、耐震性向上を目的とした検討が行われ、高い耐震性が確保されてきている。このように、我が国の建築構造分野は新しく建設される建物の耐震性確保に注力され、その成果を着実に上げてきた。

しかし一方で、1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震などの想定外の大地震に対しては、倒壊には至らなかったものの、重篤な構造被害を受けた建物が多くあった。今後の発生が懸念されている首都圏直下地震や南海トラフ地震では、多くの避難民が発生し、避難所が不足する可能性が危惧されている。このため、避難および修復の必要性判断や、継続使用性の向上などを求める声が強くなってきている。

これらの要求に対してまず、即時避難の判断指標として、「被災建築物応急危険度判定」（以下、応急危険度判定）が行われる。1998年に応急危険度判定の指針である「被

「震災建築物応急危険度判定マニュアル」[1-5]が発行された。応急危険度判定は地震直後，早急に，余震等に対する建築物の倒壊危険および部材の落下等を判定し，「危険」，「要注意」，「調査済」の表示を行うとともに，建築物への立ち入りの可否等に関する情報提供によって，被災後の人命に係わる二次的災害を防止することを目的としている。判定は，民間判定士のボランティアによる協力のもと，行政によって行われる。判定士は「応急危険度判定士」と呼ばれ，各都道府県が主体となって養成，登録を行っており，判定士の数は平成25年3月末時点において，全国で104,190名となっている[1-6]。

応急危険度判定後，建築物の修復必要性判断の指標として，「震災建築物の被災度区分判定」が行われる。判定のマニュアルとして，「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」[1-7]がある。応急危険度判定が実施された後，主として被災建築物の構造躯体に関する被災度の把握，および非構造部材の被害状況に基づいた継続使用のための復旧の可否を判定する。この判定は，目視および簡単な計測によって，建築の専門家である構造技術者や研究者によって行われる。一般建物の多くは，梁端に塑性ヒンジを計画する全体崩壊形として設計されているため（図1-1），全層にわたって梁端を調査しなければならない。しかし，梁端は天井などの仕上げ材に隠されており，仮に観察できたとしても，観察結果からどのように耐震性能を評価するのかという問題がある。

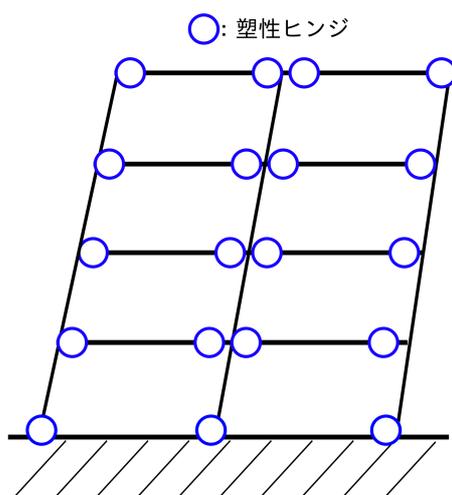


図 1-1 全体崩壊形

どちらの判定も、被災建築物および被災地域の早期回復に資することを目的としたものである。しかし、前述したように、これらの判定は判定士、設計技術者あるいは研究者が、目視で一棟ずつ行っているのが現状であるため、以下のような問題点が指摘されている。一般に、建物の構造躯体は、内外装材や、耐火被覆等によって覆われており、直接観察することが困難である。そのような場合には、非構造部材の状況によって層間変形を推定するなどの方法が考えられているが、必ずしも非構造部材の損傷状況と生じた最大層間変形との対応は正確ではないため、評価にばらつきが生じ、定性的なものとなる危険性がある。仮に躯体を直接観察できたとしても、建物が高層である場合や、被害が広範囲である場合には、判定を行うのに膨大な時間がかかる。実際に、2011年東北地方太平洋沖地震では、被害が広範囲であったことで、判定に時間を要し、判定士の不足や、大きな余震の発生による再度判定の必要などの問題点が指摘されている[1-8]。

さらに、継続使用性向上の声に対しては、1992年から損傷制御設計および損傷制御構造の提案がなされている[1-9]。これは、設計レベルで想定される大地震に対しても、建物の主要な構造部材である梁、柱を弾性範囲に留めることで、その後の使用性や修復性を確保することを目的としている。例えば、柱、梁などの主要構造と並列に組み込んだ制振ダンパーなどに損傷を集中させ、地震後に損傷が生じた制振ダンパーのみを取り替えることで、耐震安全性と共に、継続使用性も向上させるというものである。ただし、この場合は、損傷を集中させる制振部材の損傷診断が必要となる。この方法については、ダンパーに工夫をする方法などが提案されているものの、主要構造が本当に損傷していないのかを含めて包括的に評価する方法が必要となる

以上のように、地震時における建築構造物の安全性、修復必要性、継続使用性に関わる対策が取られてはいるものの、応急危険度判定などの目視による判断では、膨大な時間を要し、定量的な評価が困難であり、修復性および継続使用性についても定量的な指標が整備されていないなどの問題がある。地震による建築物の損傷を迅速かつ精確に評価し、安全性を確認すること、および修復・改築の判断を行うことを可能とする技術体系を確立することが必要である。このような背景から、建物の被害状況や損傷を評価することを目的

とした、ヘルスマモニタリング技術の活用が注目されている。一般に建築構造物に対しては、構造ヘルスマモニタリングと呼ばれ、構造物に予めセンサを設置しておき、センサによって計測されたデータを蓄積、処理することで、構造物の健全性を評価するというものである（図 1-2）。詳細は後述するが、建築構造物に適用する場合には、一般的に加速度や速度、または変位を計測し、計測したデータに何かしらの処理を行うことで、建物の損傷を検出し、残余性能を評価することを目的として行われる。

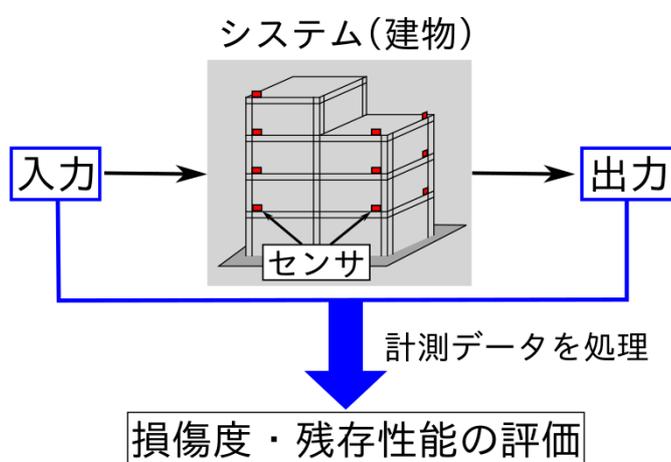


図 1-2 構造ヘルスマモニタリングの概念

ただし、計測記録と損傷との関係が不明確であり、そもそも損傷とは何かという定義が曖昧である。また、計測データから損傷検出を行う際に使用する閾値の設定方法に理論的妥当性がなく、経験的となる。このことは、設定した閾値による検出精度の評価自体を困難とする。一方で、計測技術やデータベースの整備に伴い、多くの建物において地震時の応答計測が行われている。計測データを整理し、実際の被害状況との対応関係を観察することで、評価指標を構築する方法も考えられる。しかし、建築構造物は一品生産であるため、同じ地震動入力であったとしても、同様の応答結果が生じるとは限らない。仮に構造形式が同様であっても、内装材や設置されている什器等が異なれば当然応答に影響がでるものと予想される。このような観点からのデータ蓄積によって、体系化した指標を作成することは困難だと考えられる。上記のように数多くの問題があるが、ヘルスマモニタリング

を行うために、最も重要なことは「損傷の定義」を確立することである。建物の健全性を判定するという目的である以上、検出対象とした「損傷」が評価するに値する重要な指標である必要がある。そこで、次節において、構造ヘルスマニタリングに関する既往研究をまとめ、着目された損傷ごとに整理する。

## 1.2 構造ヘルスマニタリングに関する既往研究

### 1.2.1 ヘルスマニタリングとは

ヘルスマニタリングとは、モニタリング対象である構造物に予め計測センサを設置し、センサによって計測される信号を蓄積、蓄積した信号を処理することで、建物の健全性を判定するものである。構造物のモニタリングによる損傷検出、健全性評価に関する研究は、およそ1970年代から数多く行われている。文献[1-10]では、振動計測を用いた損傷検出に関する研究について、1996年までに提案されている評価手法がまとめられている。

さらに、1998年からの5年間で、構造物の性能を最大限発揮するための自律性を持った構造システムの開発を目的として行われた「日米共同構造実験研究-高知能建築構造の開発」（以下、高知能建築構造の開発）におけるセンサー部会においても、それまでに提案されている損傷検出手法について整理がされている[1-11]。文献[1-12]では、振動計測による「損傷検出」を①損傷の有無、②損傷箇所の特定、③損傷程度の評価、④残余性能の予測、の4段階に区別している。多くの研究が①～③に関する段階の検討が主であり、残余性能に関してはほとんど検討が行われていない。①～③に関する研究の多くは、構造物における入出力データを信号処理することによって、建物全体または層レベルのモーダルパラメータを推定することで損傷検出を行うものである。すなわち、これらの研究における「損傷」とは、層せん断力-層間変位関係における等価剛性、減衰定数の変化を指しているものと考えられる。しかし、④の残余性能予測は、構造物のモーダルパラメータを同定しただけで行うことは困難であるとされている。これは、建物全体または層レベルにおいて、層剛性の低下率や減衰定数の変化が同定できたとしても、その後の余震等に対してどの程度余力を残しているかを判断することは困難であり、別の指標が必要になるためだと

考えられる。「高知能建築構造の開発」では、一連の研究成果として、「ヘルスマモニタリング技術利用ガイドライン」[1-11]が作成され、既往の手法に加え、新たな損傷検出手法の提案、およびそれらの適用性を解析的・実験的に検討している。しかし、適用対象は模型実験や部材実験までであり、実際の建物を対象とした例が少ない。しかし、この研究開発以降から実建物へのセンサの設置による構造ヘルスマモニタリングの実用化についての報告が行われている（[1-13], [1-14]など）。

### 1.2.2 最大応答値に着目した損傷検出

これは、対象とする建物のいくつかの層に計測センサを設定しておき、設置された加速度センサや変位センサによって、最大応答加速度または最大層間変形を計測、算出し、予め設定した評価値と比較することで、安全性などを判定するシステムである（図 1-3）。この手法における損傷検出の対象範囲は建物全体または層レベルとなる。

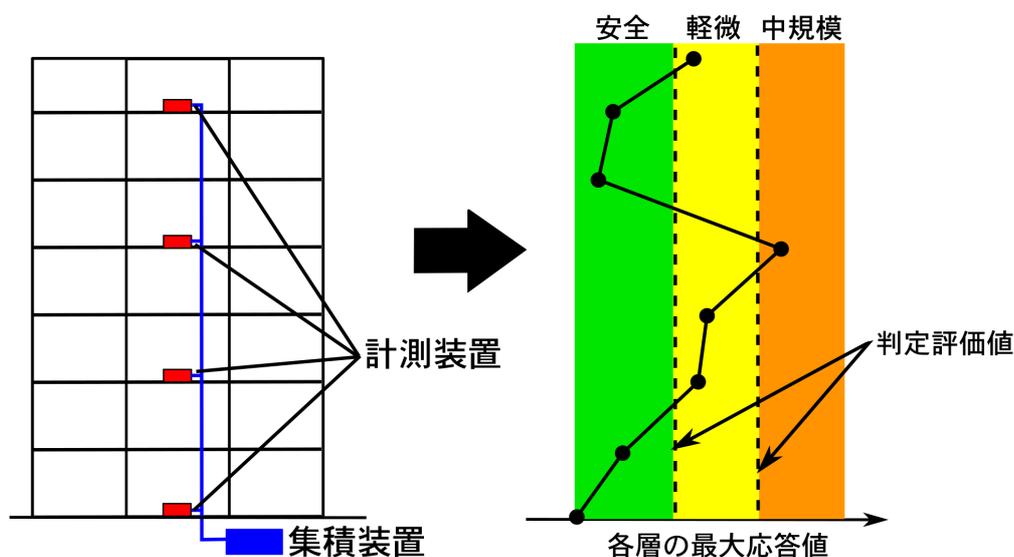


図 1-3 最大応答値による判定

層間変位を測定するためのセンサは、加速度センサと比較して、センサ設置用の治具が必要であることから、設置が煩雑となる。どちらを計測対象としても、最大応答値のみの判断では、損傷有無を判定する閾値の設定が定性的であり、実際に主要構造部材に生じた

損傷をを判定することは困難である。どちらかという、構造部材ではなく、家具などの非構造部材の損傷に関連する指標として使用されている（例えば[1-15]）。これは、非構造部材の耐震設計が、非構造部材に生じる慣性力、および層間変形に関連付けられていることが要因と考えられる[1-16]。

### 1.2.3 層剛性および減衰定数に着目した損傷検出

ここで対象とする損傷は、層剛性および減衰定数の変化を指しており、対象とする検出範囲は建物全体または層レベルとなる。システム同定によって建物の層剛性および減衰定数の変化を検出・評価することによって、損傷の有無や程度を判定する手法である。この手法は大きく分けて、モーダルパラメータを同定し、その変化によって損傷検出を行う手法（[1-17], [1-18]など）と、直接的に層剛性や剛性マトリクスなどの物理パラメータを推定し、その変化によって損傷検出を行う手法（[1-19], [1-20]など）の2つに分かれる。前者では、センサの設置数に違いがあるものの、建物の固有振動数や各層の剛性の変化によって損傷の有無を判断するものがほとんどである。さらに、同定に用いられているARXモデルなどは、次数の決定が一意的になされず、最小二乗法による繰り返し計算による計算負荷や、誤差評価が不明確であるなどの問題点がある。後者においては、直接層剛性を算出する手法が提案されており、同定する領域が周波数領域か時間領域かの違いがある。どちらの方法によっても、等価剛性の同定を行っており、変形が小さい領域のように、初期剛性に対する等価剛性の比が小さい場合は検出が困難となる（図 1-4）。前者・後者どちらにおいても、荷重-変形関係、あるいは層せん断力-層間変位関係上の等価剛性の変化を損傷として考えているが、その有無と程度の判断をするに留まっており、残余性能の予測まで検討しているものは少ない。

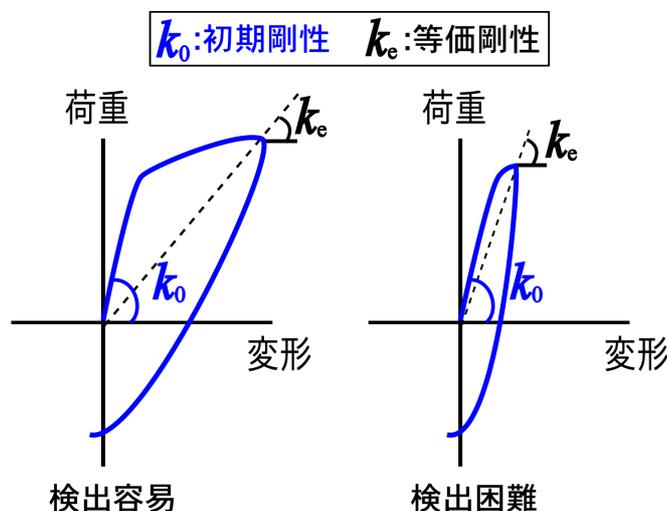


図 1-4 荷重-変形関係における等価剛性

#### 1.2.4 荷重-変形関係に着目した損傷検出

楠ら[1-21]は、各層に設置された加速度計による計測値から、地震後の残余耐震性能をリアルタイムで行う手法を提案している。この手法は、加速度記録から算出した建物の荷重-変形関係に相当する代表加速度-代表変位関係である性能曲線と、加速度応答スペクトル-変位応答スペクトル関係である要求曲線の比較により、余震に対する応答値を推定し、推定による変形と想定した限界変形を比較することで安全性を評価するというものである。これは前述した①～③の段階を経ることなく、建物の残存性能予測を直接的に行うという点で上記の研究とは異なる。ただし、高層建物において高次モードの影響が無視できない場合はその影響を考慮できない。

第 1.2.2～1.2.4 項は対象とする損傷検出範囲が建物全体または層レベルであり、損傷した箇所の判定までは想定されていない。地震後の修復性を考えた場合には、より局所的な損傷箇所（部材レベル）の同定を行う必要があるものと考えられる。しかし、これらの損傷検出手法は構造物を質点系として扱っており、部材レベルの損傷検出を行うことは困難となる。

### 1.2.5 梁部材の振動モードに着目した損傷検出

ここでは、部材レベルの損傷検出を目的とした既往研究をまとめる。日下ら[1-22]は鉄骨梁端部の破断を検知することに着目している。これは、1本の梁に対して複数の計測センサを設置し、梁ごとに上下振動成分を計測する。計測結果から、梁ごとの振動モードを算出し、2本の梁の振動モードを比較する。ある程度構造的関係が類似した梁では、変形も類似しているものと考え、振動モードの相対的な関係を評価し、構造計画から推定できる関係から大きく異なる場合、いずれかの梁端部が破断していると判断するものである。建物を水平固有一次振動数で加振したときを考えており、上下動や高次振動数による入力の影響、計測点数、複数の梁が破断している場合など、実用化の上では課題がある。

### 1.2.6 梁部材の動ひずみ応答に着目した損傷検出

Kurataら[1-23]は、動ひずみを計測するためのワイヤレスのセンサを梁端部に設置し、計測される動ひずみ応答から、梁の曲げ剛性の低下率を評価する手法を提案している。さらに、西野ら[1-24]は、算出した梁の曲げ剛性の低下率を、予め作成した解析モデルへフィードバックすることで、残存耐震性能を評価する手法を提案している。残存耐震性能は、無損傷時と損傷時の解析モデルにおいて、それぞれ静的増分解析を行い、解析結果を比較することで、どの程度耐力が低下したかによって判断している。楠ら[1-21]の研究と比べて解析モデルの作成や、更新を必要とするため処理が煩雑となる。

第1.2.5、1.2.6項が梁部材に着目したのは、現行の耐震設計では、柱よりも梁に降伏ヒンジを計画し、建物全体でより多くのエネルギー吸収を行う全体崩壊形が推奨されているため、損傷検出箇所として梁が重要と考えたものと推察される。

### 1.2.7 部材レベルの剛性低下に着目した損傷検出

第1.2.5、1.2.6項の梁部材のみの損傷に着目した研究に対して、梁および柱部材の剛性低下をシステム同定によって検出・評価する研究がある[1-25]~[1-26]。白石ら[1-25]は、MEMS型加速度センサ（並進3軸、回転3軸の計6軸を計測）を骨組の全ての節点（柱梁接合部）に設置し、各部分構造における入出力関係を、多入力1方向出力のARX

モデルとして同定することによって局所損傷検出を行っている。地震前後で同定したシステムを比較し、その残差の大きさによって損傷検出を行うものである。また、濱本ら[1-26]は、図 1-5 に示すような、質点系による簡易モデルから骨組系の詳細モデルへと物理パラメータを順次同定し、損傷位置を絞り込むことで、部材レベルの損傷検出を行う手法を提案している。部材損傷検出には、材端回転ばね付きの骨組モデルを用いており、材端回転ばねの剛性低下によって部材の損傷を判断している。これらの手法は、ARX モデルによって物理パラメータの同定を行っており、第 1.2.3 項と同様に、モデル次数の決定や、計算負荷が大きいなどの課題が残る。さらに、損傷度の評価が困難であることや、剛性低下率が小さい場合では検出が困難となることがある。

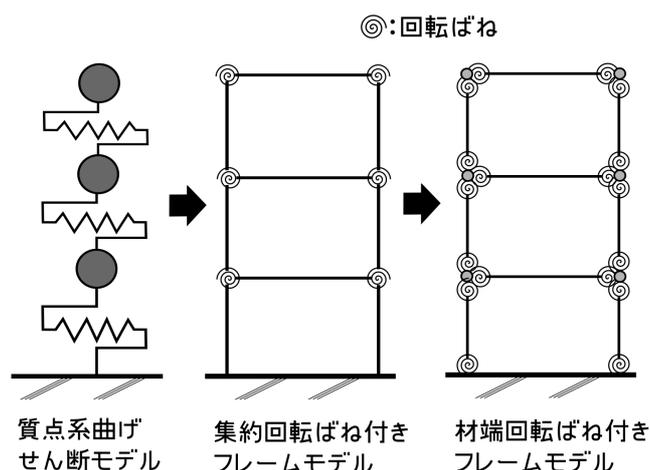


図 1-5 同定に用いる解析モデル

第 1.2.5～1.2.7 項のような部材レベルの局所損傷推定では、計測する物理量に関わらず、検出箇所を増やすことによって設置するセンサの数も増やす必要性が生じる。さらに、実用化を考える上では、既存建物では、センサの設置が困難となることが予想される。仮に新築であれば、施工段階で構造部材にセンサを設置することは可能だと考えられるものの、既存建物では、天井材や内装材等によって構造部材が覆われているため、センサの取り付けが困難である。

### 1.2.8 層あるいは部材の非線形性に着目した損傷検出

構造物の損傷によって、荷重-変形関係になんらかの不連続性、または非線形性が生じると考えられる。これを検出することを目的とした研究として、ウェーブレット変換を用いたものがある。曾根ら[1-27]は構造物が被害を受けて、弾性域から塑性域に移行する際に、履歴復元力が急激に弱くなることから生じる加速度応答の不連続性に着目し、これをウェーブレット変換によって検出する手法を提案している。さらに、瀬川ら[1-28]はウェーブレット解析を用いて、降伏点における相対速度の算出方法を提案し、算出した相対速度を用いて塑性率を推定する手法を提案している。バイリニア型復元力特性を有する1質点系モデルにおいて、数値応答解析を行い、解析結果を用いてその有用性を検討している。ある程度の精度を確保して推定することが可能であることを述べているが、これらウェーブレット解析を用いた手法は、使用するウェーブレット関数やレベルなどの選択については定性的に決定する必要がある。また、加速度応答波形にノイズが含まれるような場合における検討が行われておらず、実構造物における適用性については検討されていないことなど、いくつかの問題点がある。

ウェーブレット解析と同様に、加速度応答波形の不連続点を検出するために、加速度を微分した物理量に着目した研究が行われている（[1-29]，[1-30]など）。構造物が損傷した際の不連続波形には、高周波成分が多く含まれる。そこで、この高周波成分を検出することを目的として、田村ら[1-30]は加速度の1階微分であるジャークに着目した。ジャークを直接測定するためのセンサを開発し、これを用いて構造物の損傷を検出する研究を行っている。鋼材の振動台実験において、鋼材の亀裂発生に伴い、ジャークの時刻歴波形に不連続点が生じていることが報告されている。さらに、曾根ら[1-30]は、より微小な信号まで検出するために、加速度の2階微分（ジャークドット）に着目し、これを直接測定するためのセンサを開発した。振動台実験によって、鋼材の亀裂進展時にジャークドット波形に不連続点が生じること、ジャークセンサよりもより微小な信号に対して高い応答性を示していることを確認している。加速度を微分した物理量は、高周波成分を検出するという目的においては有益であるが、一方で高周波ノイズの影響を強く受けることが予想される

ため、この問題の解決策として、直接測定するためのセンサを開発している。

これらの手法は、加速度応答波形上に生じる高周波成分を検出するという点で同様であるが、波形に生じる値と損傷との対応関係について、理論的検討が不十分であるため、定量的な検出方法が確立されていない。

### 1.3 本研究の着目範囲と目的

前述した応急危険度判定や被災度区分判定では、図 1-6 に示すような主要構造部材である柱、梁、鉛直ブレースに生じる降伏、亀裂や破断、座屈や残留変形といった現象を観察することで被災度の判定を行っている。すなわち、このような現象を「損傷」として捉えているものと推測される。

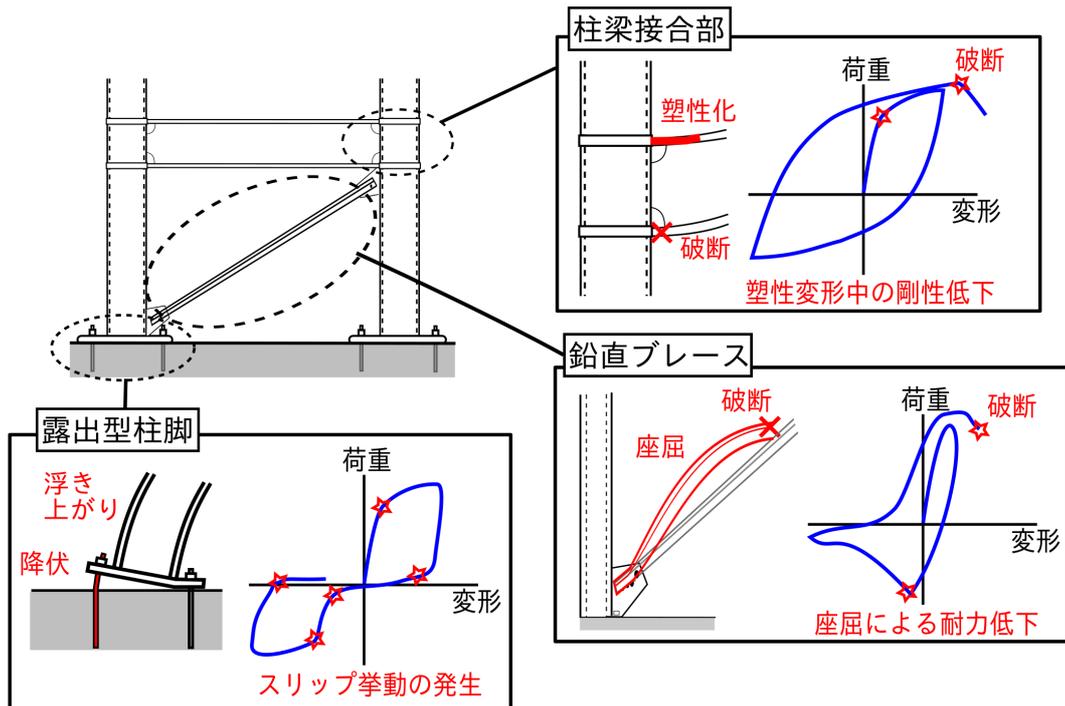


図 1-6 構造部材の損傷と荷重-変形関係

一方、既往研究では、荷重-変形関係、あるいは層せん断力-層間変位関係上の等価な剛性の変化や、非線形性を「損傷」として考えているものの、その変化や非線形性がどんな現象と対応しているのかを判別するといった観点での研究が行われていない。しかし、鉄骨構造物における各構造部材の挙動に関する研究はこれまでに数多く行われて、構造部材が地震時にどのような挙動となり、どのような現象を生じるのか、といった観点では十分な知見が得られており、地震応答時の荷重-変形関係と現象（降伏、破断、座屈など）との対応関係は概ね明らかとなっている。これらの現象は全て、荷重-変形関係において、剛性変化に起因した非線形性を呈することになる。すなわち、このような非線形性を定量的に検出し、損傷と考えられる現象の判別を行うことができれば、統一的な損傷評価手法として提案することが可能となる。さらに、骨組系においても、構造部材の集合として考えることで、骨組系の層せん断力-層間変位関係に生じる非線形性が、どの構造部材に起因するものか判断できる可能性がある。

そこで、本研究では、「損傷」を荷重-変形関係、あるいは層せん断力-層間変位関係上の剛性変化に起因する非線形性として定義し、構造物の計測によって得られるデータから、この非線形性を定量的に検出・評価する新たな手法を提案することを目指す。ヘルスマニタリング技術の既存建物への実用化、適用性を考えると、計測センサの設置が容易であることは重要である。本研究では、計測センサの設置が比較的容易であり、運動方程式によって理論的検討が容易である、絶対加速度を計測対象とすることにした。

絶対加速度の高次微分が、荷重-変形関係における接線剛性の変化に対応した値となることを利用することで、剛性変化に起因する非線形性を検出することが可能となる。構造物の地震応答加速度と荷重-変形関係を数式的に処理し、構造物の荷重-変形関係に生じる非線形性を、より直接的かつ定量的に検出する方法を提案することを目的とする。さらに、目視による判断が困難である非線形挙動の程度を示す指標として、損傷度を評価する上でも重要となる、剛性低下率と塑性変形量を評価する手法を提案する。

提案する損傷評価手法の特徴は、

- 1) 構造物で計測された地震応答加速度を時間に対して高次微分した物理量に着目し、

- 2) 質点系の運動方程式を用いて、加速度を微分した物理量と荷重-変形関係上の剛性変化との対応関係を定式化し、
- 3) 剛性変化に起因する非線形性を検出するための閾値、および計測記録に含まれるノイズへの対処方法を、振動系の物理パラメータから定量的に設定し、
- 4) 設定した閾値によって、荷重-変形関係に生じる非線形性を検出し、
- 5) 非線形挙動時の剛性低下率、あるいは塑性変形量を推定する

点である。

定量的な被災度区分判定手法の提案、および実構造物への適用を目指し、本研究ではその基礎的な検討として、絶対加速度の微分量を用いることで構造物の損傷を定量的に検出・評価する手法を提案し、その適用性を解析的・実験的に検討する。検討対象は、質点系および平面骨組系における数値応答解析結果、構造部材および多層骨組構造物の振動台実験結果とした。

## 1.4 本論文の構成

本論文は、本章を含めて7つの章と2つの付録から構成されている（図1-7）。各章の概要について以下に示す。

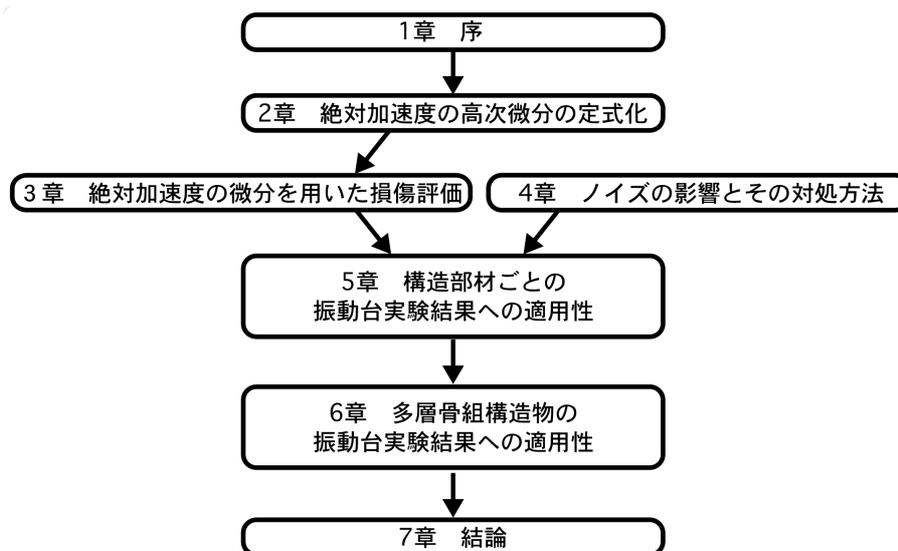


図1-7 本論文の構成

### ■ 第1章 序

本研究の背景と目的を述べている。社会的背景から、構造ヘルスマモニタリングによる建物の健全性評価の必要性を述べ、併せてそれに関する既往研究について概要等をまとめている。最後に、本研究の必要性と特色について説明している。

### ■ 第2章 絶対加速度の高次微分の定式化

本研究では、振動系の絶対加速度を高次微分した物理量に着目し、その物理量を用いて損傷を定量的に検出・評価する方法を提案する。そこで第2章では、絶対加速度を微分した物理量について定義している。せん断質点系の運動方程式から算出される絶対加速度を高次微分した物理量を定式化し、振動系の履歴復元力と、微分した物理量との対応関係を明らかにしている。本研究では、絶対加速度の時間に対する1階微分を jerk, 2階微分を snap と呼称することにする。また、振動計測によって得られる加速度応答記録はデジタルデータとして収録され、絶対加速度を高次微分する際には、差分方程式による数値微分を行う。そこで、加速度記録が時間に対して離散的である場合における、jerk および snap についても導出し、整理している。

### ■ 第3章 絶対加速度の微分を用いた損傷評価

本研究で提案する損傷評価手法は、絶対加速度を高次微分した物理量である jerk および snap が、振動系の履歴復元力と直接的に関係していることを利用するものである。第3章では、第2章で定式化した jerk および snap を用いて、振動系の損傷を評価する方法を提案している。ここで、提案する損傷評価手法は、荷重-変形関係に生じる非線形性の検出方法、非線形挙動時の剛性低下率、および塑性変形量の推定方法である。バイリニア型復元力特性を有する弾塑性1質点系モデルを用いて、地震応答解析を行い、解析結果によって提案方法の適用性を検討している。

#### ■ 第4章 ノイズの影響とその対処方法

一般的に、加速度センサによる振動計測では、計測された加速度応答記録にノイズが含まれる。本研究で提案する損傷評価手法は、加速度応答記録を微分した物理量である jerk および snap を使用する。微分処理は高周波ノイズの影響を強く受けるため、ノイズが含まれる加速度応答記録をそのまま微分処理してしまうと有益な情報を抽出することが困難となる。そこで第4章では、ノイズが jerk および snap に与える影響を検討するとともに、ノイズの影響を低減する方法について提案している。提案したノイズ低減処理方法の妥当性、および非線形性の検出精度に与える影響を数値応答解析によって検討している。

#### ■ 第5章 構造部材ごとの振動台実験結果への適用性

第5章では、既往研究で行われた構造部材の振動台実験結果を用いて、第3章で提案した損傷評価手法の適用性を検討している。この際、計測される加速度応答記録にはノイズが含まれることから、第4章で提案したノイズの低減処理方法を利用して jerk および snap を算出する。対象とする構造部材は、露出型柱脚、柱梁接合部、鉛直ブレースとする。検討した振動台実験は、損傷箇所が1箇所、1質点1自由度系として考えることができ、試験体の非線形挙動と提案手法との対応関係が観察しやすい。

#### ■ 第6章 多層骨組構造物の振動台実験結果への適用性

第3章で提案している損傷評価手法は、せん断質点系の運動方程式をもとにして理論構築を行っている。しかし、実際の建築物の多くは骨組系であることから、本章では、提案している損傷評価手法を骨組系へ拡張し、その適用性を検討している。検討対象は、18層からなる多層鉄骨骨組構造物の振動台実験結果としている。骨組系であっても梁がある程度の剛性を有している場合や、床スラブと梁が一体化している場合では、剛床の仮定によって、せん断質点系として置換することで、提案手法による損傷評価が可能になる。実験結果への適用性を検討する前に、3層1スパン平面骨組における地震応答解析を行い、骨組系への適用可能性について検討している。

### ■ 第7章 結

各章で得られた知見をまとめ、本研究の結論と今後の課題を述べている。

### ■ 付録 A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

第6章では、第3章で提案した損傷評価手法を骨組系へ拡張し、その適用性について、18層鉄骨骨組構造物の振動台実験結果を用いて検討している。snap時刻歴波形と閾値との関係から、層せん断力-層間変位関係に生じる非線形性を検出し、その検出回数についてまとめている。第6章では、snap時刻歴波形および層せん断力-層間変位関係を、全ての加振実験結果および全ての層については掲載していない。付録Aでは、全ての加振実験について、全層におけるsnap時刻歴波形および層せん断力-層間変位関係をまとめている。また、閾値を設定する際に必要となる降伏層せん断力を推定するため、構造物の平面骨組解析モデルを作成し、静的増分解析を行った。その際の解析モデルおよび解析結果をまとめている。

### ■ 付録 B snapのフーリエ振幅スペクトル

第5章では、提案している損傷評価手法の適用性について、既往研究で行われた構造部材の振動台実験を用いて検討している。非線形性検出方法で用いているsnap時刻歴波形は、第4章で提案したノイズ低減処理を用いて算出している。付録Bでは、ノイズ低減処理の有無がsnap時刻歴波形に与える影響を周波数領域で観察することを目的として、各加振実験で算出したsnapのフーリエ振幅スペクトルを整理し、まとめている。

## 1.5 参考文献

[1-1]佐野利器：家屋耐震構造論，震災予防調査会報告大83号，(甲)1916，(乙)1917.

[1-2]柴田明德：最新耐震構造解析<第2版>，森北出版株式会社，2003.5.

[1-3]志賀敏男，柴田明德，渋谷純一，高橋純一：東北大学工学部建設系建物における強震応答の実測と解析（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.449-450，1979.9.

- [1-4]兵庫耐震工学研究センター：<http://www.bosai.go.jp/hyogo/>，アクセス日時 2015/10/14 11:13.
- [1-5]一般財団法人日本建築防災協会：被災建築物応急危険度判定マニュアル，1998.6.
- [1-6]一般財団法人日本建築防災協会：被災建築物応急危険度判定 OQ 通信，第 17 号，2015.2.
- [1-7]一般財団法人日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2005.12.
- [1-8]一般財団法人日本建築防災協会：被災建築物応急危険度判定 OQ 通信，第 15 号，2013.2.
- [1-9]和田章，清水敬三，川合広樹，岩田衛，安部重孝：建築物の損傷制御設計，丸善株式会社，1998.9.
- [1-10]Doebbling, S.W., C.R.Farrar, M.B.Prime and D.W.Shevitz : Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics, A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report LA^13070-MS, 1996.5.
- [1-11]日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」技術調整委員会，日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」センサー部会，独立行政法人建築研究所 国土交通省国土技術政策総合研究所，（財）日本建築センター：日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」ヘルスマonitoring技術利用ガイドライン，2003.3.
- [1-12]Rytter, A. : Vibration based inspection of civil engineering structures, Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark, 1993.
- [1-13]強震観測とヘルスマonitoring技術が災害時に果たすべき役割，2012 年度日本建築学会大会（東海）構造物門（振動）パネルディスカッション資料，2012.9.
- [1-14]鹿島建設ホームページ：『「揺れ」からまもる技術Ⅳ 被災度判定システム』，[http://www.kajima.co.jp/news/digest/sep\\_2011/feature/feature4/index-j.html](http://www.kajima.co.jp/news/digest/sep_2011/feature/feature4/index-j.html)，アクセス日時 2016/01/12 10:18.
- [1-15]斎藤知生：建物モデルのベイズ更新を用いた地震応答推定と確率的被災度評価，建築学会構造系論文集，第 683 号，pp.61-70，2013.1.
- [1-16]日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，第 2 版第 4 刷，2011.8.
- [1-17]斎藤知生：モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定，日本建築学会構造系論文集，第 508 号，pp.44-54，1998.6.
- [1-18]斎藤知生：システム同定による建築物の確率論的損傷評価，日本建築学会構造系論文集，第 557 号，pp.93-100，2002.7.
- [1-19]中村充，竹脇出，安井譲，上谷宏二：限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定，日本建築学会構造系論文集，第 528 号，pp.75-82，2000.2.

- [1-20]仁田佳宏，西谷章：各層を単位とするサブシステムの同定に基づく剛性のヘルスマニタリング，日本建築学会構造系論文集，第573号，pp.75-79，2003.11.
- [1-21]楠浩一，日向大樹，服部勇樹，田才晃：加速度計を用いた実建造物の性能曲線算出法に関する研究 多質点系の場合，日本建築学会構造系論文集，第699号，pp.613-620，2014.5.
- [1-22]日下彰宏，鈴木康嗣，安達直人，岩本賢治，中島正愛：建物の水平加振時の上下振動成分データを利用した鉄骨梁端部の破断検知，日本建築学会構造系論文集，第680号，pp.1051-1509，2012.10.
- [1-23]Kurata, , M., LI, X., Fujita, K., and Yamaguchi, M. : Piezoelectric dynamic strain monitoring for detecting local seismic damage in steel buildings. Smart Materials and Structures 22(11), 115002, 2013.
- [1-24]西野博道，鈴木明子，李小華，倉田真宏：局所損傷同定とモデル更新に基づく鋼構造骨組の残存耐震性能評価，鋼構造年次論文報告集，第23号，pp.333-340，2015.11.
- [1-25]白石理人，斎藤知生，三田彰：部分構造のARXモデルを用いた三次元建造物の局所損傷検出，日本建築学会技術報告集，第44号，pp.55-60，2014.2.
- [1-26]濱本卓司，井上了太：並列モデル同意を用いた多層建築物の部材損傷検出，日本建築学会構造系論文集，第655号，pp.1661-1670，2010.9.
- [1-27]曾根彰，山本鎮男，増田新，中岡明，芦野隆一：強震記録のウェーブレット解析による履歴復元力特性を有する建築物の累積損傷の推定，日本建築学会構造系論文集第476号，pp.67-74，1995.10.
- [1-28]瀬川柳太郎，山本鎮男，曾根彰，増田新，濱洲忠：地震観測値のウェーブレット解析によるバイリニア型復元力特性を有する建造物の塑性率の推定，日本建築学会構造系論文集 第522号，pp.29-35，1999.8.
- [1-29]田村雅巳，山本鎮男，曾根彰，増田新：振動ジャイロと片持ち梁を組み合わせたジャークセンサによる建築建造物の地震応答に含まれる不連続点の検出，日本建築学会構造系論文集，第517号，pp.53-60，1999.3.
- [1-30]曾根彰，増田新，松浦孝，山村貴彦，山田眞，山本鎮男：ジャークドットセンサによる建造物の損傷検出，日本機械学会論文集（C編），70巻693号，pp.94-99，2004.5.

## 第2章 絶対加速度の高次微分の定式化

### 2.1 はじめに

第1章 1.2 節で述べたように、1970 年代以降、建築構造物の損傷を検出・評価する手法に関する研究が数多く行われている。特に、比較的計測センサが安価で、設置が容易である加速度を用いた研究例が多い。これらの研究の多くは、計測記録によって建物の固有周期や固有モードを同定し、等価剛性や減衰定数の変化を検出することで、損傷を評価するというものである。このような方法では、計測対象の荷重-変形関係における接線剛性の変化を評価することは困難できず、また、変形が小さい場合には検出が困難となる。そこで、本研究では、より直接的に荷重-変形関係における接線剛性の変化を検出する手法を提案するために、振動系の絶対加速度を高次微分した物理量に着目した。加速度を高次微分した物理量に着目した研究は稀であり、その原因の1つとして、ノイズの影響が考えられる。通常、振動計測によって得られる加速度記録はデジタルデータとして保存され、その際、本来の信号とは無関係な信号、いわゆるノイズが含まれることになる。一般的に、微分操作では計測記録に含まれる高周波ノイズの影響を強く受ける。ノイズの影響と対処方法については第4章で議論するが、このような問題がある中、既往研究[2-1]（曾根ら、2004年）では加速度の2階微分を直接計測する計測器を開発し、計測記録と鋼材の亀裂進展についての定性的な関係について検討している。加速度の2階微分と亀裂との理論的な関係については未検討であるものの、加速度の2階微分という物理量と構造物の損傷には相関があることを示している。

ここでは、せん断質点系の振動モデルを対象として、運動方程式から導出される絶対加速度が時間に対して連続であるものとして扱い、絶対加速度の時間に対する高次微分と履歴復元力における接線剛性との関係を定式化する。まずは1質点1自由度系について検討を行い、その後、1質点系の理論を拡張することで多質点系についての理論構築を行

う。前述したように、振動計測によって得られる加速度記録はデジタルデータとして収録されることになるため、デジタルデータにおける数値微分法について整理し、加速度記録がデジタルデータである場合の高次微分についても定式化する。

### 2.2 jerk および snap の定義

本研究では、加速度の時間  $t$  に対する 1 階微分すなわち加加速度（躍度とも呼ばれる）を jerk, 2 階微分すなわち加加加速度を snap と呼ぶ。jerk については一般的に使用されている用語であり、国際標準となっている [2-2]。しかし、jerk より高次の微分については、一般的な名称が定まっていない。文献[2-1]では、加速度の 2 階微分を「ジャークドット」と呼んでいるが、例えば文献[2-3]によれば、加速度の 2 階微分を「snap」または「jounce」、3 階微分を「crackle」、4 階微分を「pop」と呼ぶとの提案があるとされている。あるいは加速度の 2 階微分は「spasm」、「sprite」、「surge」とも呼ばれるとされる [2-4]。以上のように、加速度の 2 階微分以上の物理量においては、その名称が定まっていないことから、議論になることが稀であり、加速度を高次微分することによって得られる物理量に着目した研究例が少ないといえる。

### 2.3 1 質点系における jerk および snap

1 質点系の運動方程式は、質量  $m$ 、粘性減衰定数  $c$ 、復元力  $Q(x)$  で表すと次式となる（図 2-1）。

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + Q(x) = -m \ddot{x}_0 \quad (2-1)$$

$x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{x}_0$  は、それぞれ系の相対変位、相対速度、相対加速度、および地動加速度である。ここで、減衰定数  $c=0$  とすると、(2-1)式は、

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_0) = -Q(x) \quad (2-2)$$

となる。ここで、 $a = \ddot{x} + \ddot{x}_0$  とすると、 $a$  は絶対加速度となり、(2-2)式は、

$$m a = -Q(x) \quad (2-3)$$

と表される。(2-3)式の両辺を  $m$  で除すと、 $a$  は、

$$a = -\frac{1}{m}Q(x) \quad (2-4)$$

となる。

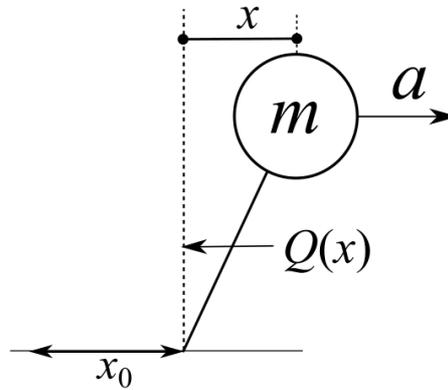


図 2-1 1 質点系モデル

(2-4)式より絶対加速度の時間に対する 1 階微分  $\dot{a}$  は、

$$\begin{aligned} \dot{a} &= \frac{d a}{d t} \\ &= -\frac{1}{m} \frac{d Q(x)}{d t} \\ &= -\frac{1}{m} \frac{d Q(x)}{d x} \frac{d x}{d t} \end{aligned} \quad (2-5)$$

となる。ここで、 $k(x)$  をある時刻における接線剛性とする、

$$k(x) = \frac{d Q(x)}{d x} \quad (2-6)$$

であるから、(2-5)式は、

$$\begin{aligned} \dot{a} &= -\frac{1}{m} k(x) \frac{d x}{d t} \\ &= -\frac{1}{m} k(x) \dot{x} \end{aligned} \quad (2-7)$$

となり、jerk は(2-7)式で表される。すなわち、jerk は接線剛性と相対速度の値に応じて振動する値となる。snap は jerk の時間に対する 1 階微分であるから、

$$\begin{aligned}
 \ddot{a} &= \frac{d\dot{a}}{dt} \\
 &= -\frac{1}{m} \left\{ \frac{dk(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \dot{x} + k(x) \frac{d\dot{x}}{dt} \right\} \\
 &= -\frac{1}{m} \{ k'(x) \dot{x}^2 + k(x) \ddot{x} \}
 \end{aligned} \tag{2-8}$$

となり，snap は(2-8)式で表される。振動系の剛性が瞬間的に変化するような場合，(2-8)式の第一項中の  $k'(x)$  が瞬間的に大きな値をとるものと考えられる。一方，剛性が  $k(x)$  で一定である場合には第一項はゼロとなり，(2-8)式は，

$$\ddot{a} = -\frac{1}{m} k(x) \ddot{x} \tag{2-9}$$

となる。すなわち，(2-9)式より，系の剛性が一定である場合でも，snap は相対加速度と剛性に応じて振動する値となる。

特に，振動系が弾性振動している状態にあるときには，jerk および snap は(2-7)，(2-9)式において， $k(x)=k_0$  とすると，それぞれ，

$$\dot{a} = -\frac{k_0}{m} \dot{x} \tag{2-10}$$

$$\ddot{a} = -\frac{k_0}{m} \ddot{x} \tag{2-11}$$

となる。このとき， $k_0$  は振動系の初期弾性剛性である。すなわち，系が健全であり，剛性が一定である場合には，jerk は相対速度に，snap は相対加速度に応じて振動する値となる。

## 2.4 多質点系における jerk および snap

図 2-2 に示すような多質点せん断系において， $j$  層における運動方程式は，各質点の動的なつり合いを考えると次式となる。

$$m_j \ddot{x}_j + Q(\delta_j) - Q(\delta_{j+1}) = -m_j \ddot{x}_0 \tag{2-12}$$

ここで， $\ddot{x}_j$  は  $j$  層の相対加速度， $\delta_j$  は  $j$  層の層間変位を表し，層せん断力  $Q(\delta)$  は層間変位によって決まる関数とする。(2-12)式より，

$$m_j(\ddot{x}_j + \ddot{x}_0) = -Q(\delta_j) + Q(\delta_{j+1}) \quad (2-13)$$

ここで、 $a_j = \ddot{x}_j + \ddot{x}_0$  とすると、 $a_j$  は  $j$  層の絶対加速度となり、(2-13)式は、

$$m_j a_j = -Q(\delta_j) + Q(\delta_{j+1}) \quad (2-14)$$

と表される。(2-14)式の両辺を  $m_j$  で除すと、 $a_j$  は、

$$a_j = -\frac{1}{m_j} \{Q(\delta_j) - Q(\delta_{j+1})\} \quad (2-15)$$

となる。

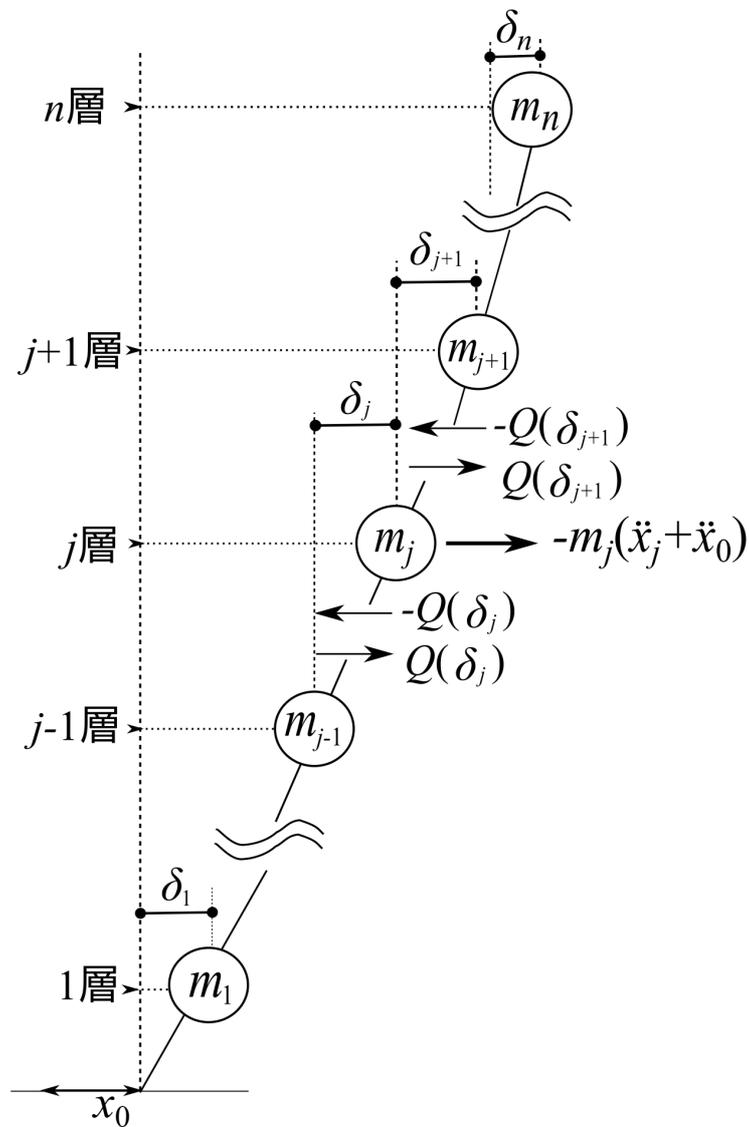


図 2-2 多質点せん断系モデル

ここで、各層の質量が全て等しい値  $m$  であり、各層の絶対加速度が計測されているとする。(2-15)式を用いて  $j$  層から上層の絶対加速度を最上層である  $n$  層まで足し合わせた値を絶対加速度和  ${}_s a_j$  とすると、 ${}_s a_j$  は、

$$\begin{aligned} {}_s a_j &= \sum_j^n a \\ &= -\frac{1}{m} [\{Q(\delta_j) - Q(\delta_{j+1})\} + \{Q(\delta_{j+1}) - Q(\delta_{j+2})\} + \dots + \{Q(\delta_{n-1}) - Q(\delta_n)\} + Q(\delta_n)] \\ &= -\frac{1}{m} Q(\delta_j) \end{aligned} \quad (2-16)$$

となる。(2-16)式より、 ${}_s a_j$  は  $j$  層における層せん断力  $Q(\delta_j)$  に比例する。

一方、各層の質量が異なる場合では、 $j$  層の質量を基準として、基準層との質量の割合分だけ、各層で計測される加速度記録を調節する必要がある。ここで、各層の質量が既知であるとする。 $j$  層の質量  $m_j$  を基準として、 $l$  層 ( $j \leq l \leq n$ ) の質量  $m_l$  との比を  $M_l$  とすると、 $m_l$  は、

$$m_l = M_l \cdot m_j \quad (2-17)$$

と表される。(2-15)、(2-17)式より  $l$  層における絶対加速度  $a_l$  は、

$$a_l = -\frac{1}{M_l \cdot m_j} \{Q(\delta_l) - Q(\delta_{l+1})\} \quad (2-18)$$

となるから、(2-18)式の両辺を  $M_l$  倍すると、

$$M_l \cdot a_l = -\frac{1}{m_j} \{Q(\delta_l) - Q(\delta_{l+1})\} \quad (2-19)$$

となる。(2-19)式を用いて、 $j$  層から上層の絶対加速度を最上層である  $n$  層まで足し合わせた値  ${}_s a_j$  は、

$$\begin{aligned} {}_s a_j &= \sum_{l=j}^n M_l \cdot a_l \\ &= -\frac{1}{m_j} [\{Q(\delta_j) - Q(\delta_{j+1})\} + \dots + \{Q(\delta_l) - Q(\delta_{l+1})\} + \dots + Q(\delta_n)] \\ &= -\frac{1}{m_j} Q(\delta_j) \end{aligned} \quad (2-20)$$

となり、(2-16)式と同様となる。これ以降、多質点系について考える場合では、各層の質

量が全て等しく  $m$  である場合について考えることにする。

ここで、(2-16)式より、 ${}_s a_j$  の時間に対する1階微分  ${}_s \dot{a}_j$  は、

$$\begin{aligned} {}_s \dot{a}_j &= \frac{d {}_s a_j}{d t} \\ &= -\frac{1}{m} \frac{d Q(\delta_j)}{d t} \\ &= -\frac{1}{m} \frac{d Q(\delta_j)}{d \delta_j} \frac{d \delta_j}{d t} \end{aligned} \quad (2-21)$$

となる。ここで、 $k(\delta_j)$  をある時刻における  $j$  層の接線剛性とする、

$$k(\delta_j) = \frac{d Q(\delta_j)}{d \delta_j} \quad (2-22)$$

であるから、(2-22)式は、

$$\begin{aligned} {}_s \dot{a}_j &= -\frac{1}{m} k(\delta_j) \frac{d \delta_j}{d t} \\ &= -\frac{1}{m} k(\delta_j) \dot{\delta}_j \end{aligned} \quad (2-23)$$

となり、jerk は(2-23)式で表される。さらに、snap は jerk の時間に対する1階微分であるから、

$$\begin{aligned} {}_s \ddot{a}_j &= \frac{d {}_s \dot{a}_j}{d t} \\ &= -\frac{1}{m} \left\{ \frac{d k(\delta_j)}{d \delta_j} \frac{d \delta_j}{d t} \cdot \dot{\delta}_j + k(\delta_j) \frac{d \dot{\delta}_j}{d t} \right\} \\ &= -\frac{1}{m} \{ k'(\delta_j) \dot{\delta}_j^2 + k(\delta_j) \ddot{\delta}_j \} \end{aligned} \quad (2-24)$$

となり、snap は(2-24)式で表される。以上から、多質点せん断系において、各層の絶対加速度が計測されているとすると、当該層以上の絶対加速度の和によって、当該層の jerk および snap は1質点系と同様に考えることができる。特に、 $j$  層が弾性状態である場合の jerk および snap は、(2-23)、(2-24)式よりそれぞれ、

$${}_s\dot{a}_j = -\frac{k_{0j}}{m} \dot{\delta}_j \quad (2-25)$$

$${}_s\ddot{a}_j = -\frac{k_{0j}}{m} \ddot{\delta}_j \quad (2-26)$$

となる。ここで、 $k_{0j}$  は  $j$  層における初期弾性剛性である。すなわち、 $j$  層が健全であり、剛性が一定である場合には、jerk は層間速度に、snap は層間加速度に応じて振動する値となる。

## 2.5 デジタルデータにおける jerk および snap

前節までの jerk および snap の数式化においては、絶対加速度を時間に対して連続であるとして検討した。しかし、振動計測によって得られる加速度記録はデジタルデータとして収録されることになる。そこで、本節ではデジタルデータにおける数値微分法について整理し、デジタルデータでの jerk および snap の定式化を行う。

### 2.5.1 数値微分法

関数  $f(x)$  を  $x$  で定義にしたがって微分すると、

$$f'(x) = \frac{d f(x)}{d x} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (2-27)$$

として求められる。微分の定義では  $h$  を無限小とするが、デジタルデータでは一定間隔ごとのデータしかないため、極限をとることができない。そこで、微分の近似として差分法 (difference method) が用いられる。

関数  $f(x)$  を Taylor 展開すると、

$$f(x+h) = f(x) + h f'(x) + \frac{h^2}{2} f''(x) + \frac{h^3}{6} f'''(x) + \dots \quad (2-28)$$

ここで、 $h$  は十分に小さい有限の正の値であるとすると、 $h^2 \ll h$  であるから、 $h$  の 2 乗以上の項を無視して(2-28)式を変形すると、

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (2-29)$$

として、前進差分 (forward difference) の近似式が得られる。同様に、

$$f(x-h) = f(x) - hf'(x) + \frac{h^2}{2} f''(x) - \frac{h^3}{6} f'''(x) + \dots \quad (2-30)$$

とすると、後退差分 (backward difference) の近似式は以下のようなになる。

$$f'(x) \approx \frac{f(x) - f(x-h)}{h} \quad (2-31)$$

ここで、(2-28)、(2-30)式の  $h$  の3乗以上の項を無視して差をとると、

$$f(x+h) - f(x-h) \approx 2hf'(x) \quad (2-32)$$

であるから、これを変形すると、

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (2-33)$$

となり、中央差分 (central difference) の近似式が得られる。前進差分、後退差分では  $h$  が打ち切り誤差となるが、中央差分では  $h$  の2乗が打ち切り誤差となる。

さらに、2階微分については、(2-28)、(2-30)式の  $h$  の3乗以上の項を無視して和をとると、

$$f(x+h) + f(x-h) \approx 2f(x) + h^2 f''(x) \quad (2-34)$$

となるから、これを変形すると、

$$f''(x) \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} \quad (2-35)$$

となり、2次の中央差分の近似式が得られる。

ここで、離散時刻歴記録の第  $i$  ステップにおけるデータを  $y_i$ 、計測時間刻みを  $\Delta t$  とする。 $y_i$  の前進差分による1階微分を  ${}_f \dot{y}_i$ 、後退差分による1階微分を  ${}_b \dot{y}_i$ 、中央差分による1階微分を  ${}_c \dot{y}_i$  とすると、(2-29)、(2-31)、(2-33)式よりそれぞれ、

$${}_f \dot{y}_i = \frac{1}{\Delta t} (y_{i+1} - y_i) \quad (2-36)$$

$${}_b \dot{y}_i = \frac{1}{\Delta t} (y_i - y_{i-1}) \quad (2-37)$$

$${}_c \dot{y}_i = \frac{1}{2\Delta t} (y_{i+1} - y_{i-1}) \quad (2-38)$$

となる。

$y_i$  の中央差分による2階微分は(2-35)式より,

$$\ddot{y}_i = \frac{1}{\Delta t^2} (y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}) \quad (2-39)$$

で表される。

### 2.5.2 差分方程式による jerk および snap

1 質点系において, 離散時刻歴記録の第  $i$  ステップにおける絶対加速度  $a_i$  と復元力  $Q(x_i)$  の関係は(2-4)式より,

$$a_i = -\frac{1}{m} Q(x_i) \quad (2-40)$$

となる。これより, 第  $i$  ステップにおける絶対加速度  $a_i$  の1階微分である jerk  $\dot{a}_i$  を後退差分によって算出すると, (2-37), (2-40)式より,

$$\begin{aligned} \dot{a}_i &= -\frac{1}{m \Delta t} [Q(x_i) - Q(x_{i-1})] \\ &= -\frac{1}{m} \left\{ \frac{Q(x_i) - Q(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \cdot \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \right\} \end{aligned} \quad (2-41)$$

となる。ここで, 図2-3より,

$${}_b k = \frac{Q(x_i) - Q(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \quad (2-42)$$

とし, (2-37)式より,

$${}_b \dot{x}_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \quad (2-43)$$

であるから, (2-41)式は,

$$\dot{a}_i = -\frac{1}{m} {}_b k \cdot {}_b \dot{x}_i \quad (2-44)$$

となる。特に, 振動系が弾性振動している場合には,  ${}_b k = k_0$  であるから, jerk は,

$$\dot{a}_i = -\frac{k_0}{m} {}_b \dot{x}_i \quad (2-45)$$

となり, (2-10)式と一致していることがわかる。

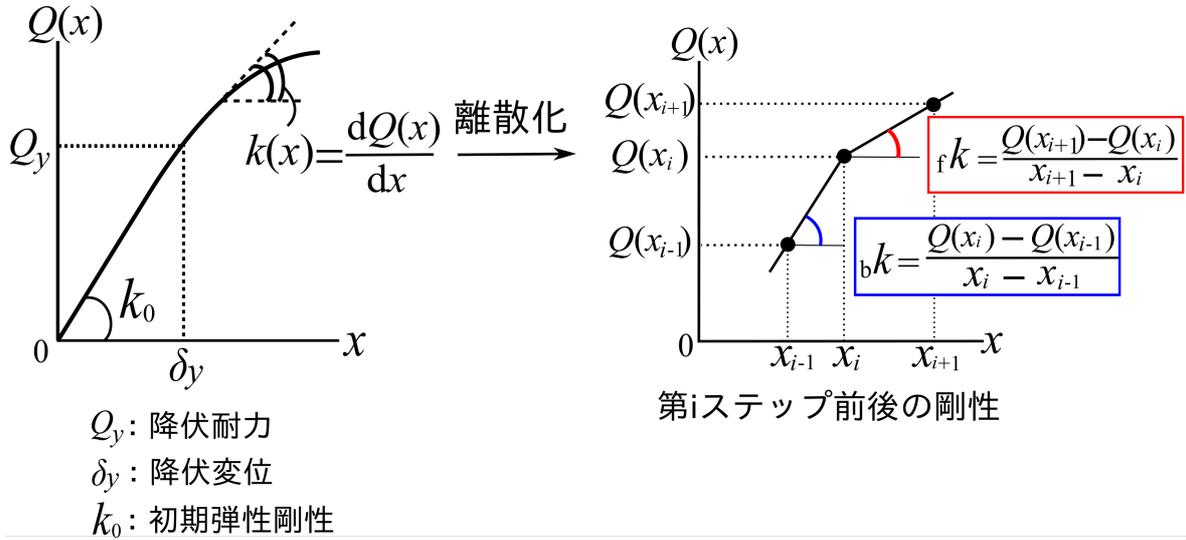


図 2-3 離散データにおける剛性

同様に、第*i*ステップにおける絶対加速度  $a_i$  の 2 階微分である snap  $\ddot{a}_i$  を中央差分によって算出すると、(2-39)、(2-40)式より、

$$\begin{aligned}
 \ddot{a}_i &= -\frac{1}{m \Delta t^2} \{Q(x_{i+1}) - 2Q(x_i) + Q(x_{i-1}))\} \\
 &= -\frac{1}{m \Delta t^2} \left[ \{Q(x_{i+1}) - Q(x_i)\} - \{Q(x_i) - Q(x_{i-1})\} \right] \\
 &= -\frac{1}{m \Delta t} \left\{ \frac{Q(x_{i+1}) - Q(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \cdot \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} - \frac{Q(x_i) - Q(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \cdot \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \right\} \quad (2-46)
 \end{aligned}$$

となる。ここで、図 2-3 より、

$${}_f k = \frac{Q(x_{i+1}) - Q(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (2-47)$$

$${}_b k = \frac{Q(x_i) - Q(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \quad (2-48)$$

とする。それぞれ、第*i*ステップ前後での剛性を表している。また、(2-36)、(2-37)式より、

$${}_f \dot{x}_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \quad (2-49)$$

$${}_b \dot{x}_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \quad (2-50)$$

であるから、(2-46)式より snap は、

$$\ddot{a}_i = -\frac{1}{m \Delta t} \left( {}_f k \cdot {}_f \dot{x}_i - {}_b k \cdot {}_b \dot{x}_i \right) \quad (2-51)$$

となる。ここで、 ${}_f \dot{x}_i$ 、 ${}_b \dot{x}_i$  の差をとると、

$$\begin{aligned} {}_f \dot{x}_i - {}_b \dot{x}_i &= \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} - \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \\ &= \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\Delta t} \\ &= \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\Delta t^2} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2-52)$$

となる。(2-39)式より、第*i*ステップにおける相対加速度  ${}_c \ddot{x}_i$  は、

$${}_c \ddot{x}_i = \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (2-53)$$

であるから、(2-52)式は、

$${}_f \dot{x}_i - {}_b \dot{x}_i = {}_c \ddot{x}_i \Delta t \quad (2-54)$$

となるため、 ${}_f \dot{x}_i$  と  ${}_b \dot{x}_i$  の差は  $\ddot{x}_i \Delta t$  として与えられる。(2-54)式より、

$${}_b \dot{x}_i = {}_f \dot{x}_i - {}_c \ddot{x}_i \Delta t \quad (2-55)$$

であるから、(2-55)式を(2-51)式へ代入すると snap は、

$$\begin{aligned} \ddot{a}_i &= -\frac{1}{m \Delta t} \left\{ {}_f k \cdot {}_f \dot{x}_i - {}_b k \cdot ({}_f \dot{x}_i - {}_c \ddot{x}_i \Delta t) \right\} \\ &= -\frac{1}{m \Delta t} \left\{ ({}_f k - {}_b k) {}_f \dot{x}_i + {}_b k \cdot {}_c \ddot{x}_i \Delta t \right\} \\ &= -\frac{{}_b k}{m \Delta t} \left( \frac{{}_f k - {}_b k}{{}_b k} {}_f \dot{x}_i + {}_c \ddot{x}_i \Delta t \right) \end{aligned} \quad (2-56)$$

として表される。第一項は剛性の変化量と相対速度との積になっており、剛性の変化がなければこの項はゼロであるが、剛性変化が生じるとこの項の値が大きくなる。一方、第二項は相対加速度に比例する項であり、剛性の変化量には関係なく振動の状態に応じて値が変化することになる。一方、振動系が弾性振動している場合、(2-56)式において、

$${}_f k = {}_b k = k_0 \quad (2-57)$$

であるから、snap は、

$$\ddot{a}_i = -\frac{k_0}{m} \ddot{x}_i \quad (2-58)$$

となり、(2-11)式と一致する。

同様に、多質点せん断系の jerk および snap について考える。(2-44)および(2-56)式における jerk および snap についてそれぞれ、相対  $x$  を層間  $\delta$ 、絶対加速度  $a$  を  $j$  層から最上層までの絶対加速度の和  ${}_s a_j$ 、として置き換えればよい。ここでは、各層の質量は全て等しく  $m$  とする。

(2-44)式より、第  $i$  ステップにおける  $j$  層の jerk  ${}_s \dot{a}_{ji}$  は、

$${}_s \dot{a}_{ji} = -\frac{1}{m} {}_b k \cdot {}_b \dot{\delta}_{ji} \quad (2-59)$$

となる。特に、 $j$  層が弾性振動している場合では、 ${}_b k = k_{0j}$  となることから、jerk は、

$${}_s \dot{a}_{ji} = -\frac{k_{0j}}{m} \cdot {}_b \dot{\delta}_{ji} \quad (2-60)$$

となり、(2-25)式と一致していることがわかる。同様に考えると、(2-56)式より、第  $i$  ステップにおける  $j$  層の snap  ${}_s \ddot{a}_{ji}$  は、

$${}_s \ddot{a}_{ji} = -\frac{{}_b k}{m \Delta t} \left( \frac{{}_i k - {}_b k}{{}_b k} \cdot {}_i \dot{\delta}_{ji} + {}_c \ddot{\delta}_{ji} \Delta t \right) \quad (2-61)$$

となる。第一項は剛性の変化量と層間速度との積になっており、剛性の変化がなければこの項はゼロであるが、剛性変化が生じるとこの項の値が大きくなる。一方、第二項は層間加速度に比例する項であり、剛性の変化量には関係なく振動の状態に応じて値が変化することになる。一方、 $j$  層が弾性振動している場合、(2-61)式において、

$${}_i k = {}_b k = k_{0j} \quad (2-62)$$

であるから、snap は、

$${}_s \ddot{a}_{ji} = -\frac{k_{0j}}{m} {}_c \ddot{\delta}_{ji} \quad (2-63)$$

となり、(2-26)式と一致する。

### 2.6 まとめ

本章では、せん断質点系の運動方程式から求まる絶対加速度を微分した物理量の定式化を行った。加速度の1階微分は jerk として名称が定まっているものの、2階微分以上ではその名称が定まっていない。本論文では、絶対加速度の2階微分を snap と呼称することにした。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 無減衰1質点系における振動系について、運動方程式から得られる絶対加速度の時間に対する1階微分および2階微分を定式化した。その結果、1階微分である jerk は、振動系の剛性と相対速度の積で表されること、2階微分である snap は振動系の剛性変化と相対速度の積および剛性と相対加速度の積の和で表されることを示した。
- 2) 1)の定式化においては、加速度が時間に対して連続であるものとして扱ったが、振動計測によって得られる加速度はデジタルデータとして収録される。数値微分法について整理し、加速度記録が離散データである場合についての jerk および snap について定式化を行った。
- 3) 1), 2)において行った1質点系の jerk および snap の理論を、多質点せん断系に拡張した。全ての層で絶対加速度が計測されるとすると、当該層以上の絶対加速度を最上層まですべて足し合わせた絶対加速度の和は、当該層の復元力と比例する。これより、絶対加速度の和の jerk および snap は、1質点系における jerk および snap と同様に考えることが可能であり、当該層の剛性に関係することを示した。

### 2.7 参考文献

- [2-1]曾根彰, 増田新, 松浦孝, 山村貴彦, 山田眞, 山本鎮男: ジャークドットセンサによる構造物の損傷検出, 日本機械学会論文集 (C編), 70巻693号, pp.94-99, 2004.5.
- [2-2]SO2041(1990) Vibration and shock -Vocabulary, page2
- [2-3]Matt Visser, Cosmography.Cosmology without the Einstein equations, General Relativity and Gravitation, Volume.37, Issue 9, pp.1541-1548, September, 2005.
- [2-4]J. C. Sprott : Some simple chaotic jerk functions Am. J. Phys. 65(6), 537-543, June, 1997.

## 第3章 絶対加速度の微分を用いた損傷評価

### 3.1 はじめに

第2章では、質点系の運動方程式による絶対加速度と、復元力との数式的関係から、絶対加速度の時間に対する1階微分 (jerk) および2階微分 (snap) を定式化した。その結果、jerk は接線剛性に関する値、snap は接線剛性の変化に関する値となることを示した。

本章では、これら加速度を微分した物理量を用いて、振動系の損傷評価を行う方法を提案する。本研究において、「損傷」とは、荷重-変形関係の剛性変化に起因する非線形性を指す。前章で定式化した jerk および snap を用いて、荷重-変形関係に生じる剛性急変による非線形性を検出する方法、検出した時点から生じる塑性変形量を推定する方法、塑性変形中の剛性低下率を算出する方法を提案する。

はじめに1質点系における損傷評価手法の提案を行い、それをもとにして多質点せん断系における提案手法へ拡張する。バイリニア型復元力特性を有する振動系において、地震応答解析を行い、解析結果を用いて提案手法の適用性を検討する。

### 3.2 振動系の非線形性検出方法(1質点系の場合)

第2章において、質点系の jerk および snap を定式化した。その結果、jerk および snap の値はそれぞれ、振動系の剛性および剛性の変化に対応した値をとる可能性について述べた。ここでは、振動系において、履歴復元力中の剛性が急変する時点を snap によって検出する方法を提案する。これは、振動系が弾性で振動している場合の snap の上限値または下限値を超えたら、振動系が非線形状態に突入したと判断する方法である。

### 3.2.1 非線形性検出の考え方

第2章より，無減衰1質点系における絶対加速度，jerk および snap は以下の式でそれぞれ表される。

$$\text{絶対加速度: } a = -\frac{1}{m}Q(x) \quad (3-1)$$

$$\text{jerk: } \dot{a} = -\frac{1}{m}k(x)\dot{x} \quad (3-2)$$

$$\text{snap: } \ddot{a} = -\frac{1}{m}\{k'(x)\dot{x}^2 + k(x)\ddot{x}\} \quad (3-3)$$

特に，振動系が弾性振動の状態にあるとき，初期弾性剛性を  $k_0$  とすると，絶対加速度，jerk および snap はそれぞれ以下の式で表される。

$$\text{絶対加速度: } a = -\frac{k_0}{m}x \quad (3-4)$$

$$= -\omega_0^2 x \quad (3-5)$$

$$\text{jerk: } \dot{a} = -\frac{k_0}{m}\dot{x} \quad (3-6)$$

$$= -\omega_0^2 \dot{x} \quad (3-7)$$

$$\text{snap: } \ddot{a} = -\frac{k_0}{m}\ddot{x} \quad (3-8)$$

$$= -\omega_0^2 \ddot{x} \quad (3-9)$$

ここで， $\omega_0$  は弾性時固有円振動数である。すなわち，系が健全であり，剛性が一定の場合では，絶対加速度は相対変位と  $\omega_0^2$  の積に，jerk は相対速度と  $\omega_0^2$  との積に，snap は相対加速度と  $\omega_0^2$  との積に応じて，それぞれ振動する値となる。一方，系が塑性化するなどして，履歴復元力が非線形性を呈し，剛性  $k(x)$  が変化する場合には，その微分  $k'(x)$  に比例して(3-3)式中の第一項が非ゼロの値をとる。特に，剛性が急変する場合には  $k'(x)$  の絶対値が大きくなるため，snap の値は瞬間的に大きくなり，これを捉えることができれば，剛性の急変を察知できる可能性がある。

振動系が弾性振動する場合の snap は、以下の範囲で振動する値をとるものと考えられる。

$$-\omega_0^2 |\dot{x}_{E_{\max}}| \leq \ddot{a} \leq \omega_0^2 |\dot{x}_{E_{\max}}| \quad (3-10)$$

(3-10)式は弾性振動中の最大相対加速度  $\dot{x}_{E_{\max}}$  と  $\omega_0^2$  の積によって上限値と下限値が決定する。すなわち、snap の値が(3-10)式の範囲を超えた場合に振動系が非線形性を呈したと判断することが可能と考えられる。一方で、snap を示す(3-3)式において、第一項には相対速度の二乗も含まれていることから、相対速度がゼロに近い状態では剛性が急変しても第一項の値は小さなものとなる。塑性域から除荷が生じるような、剛性が急変しているにもかかわらず、相対速度がほぼゼロであるような場合では、これを検出するのは困難となることが予想される。

### 3.2.2 弾性振動中の絶対加速度と snap の対応関係

ここでは、前 3.2.1 項で議論した弾性振動中の絶対加速度および snap の対応関係について考える。振動系が弾性状態で調和振動している場合においては、

$$\ddot{x} = -\omega_0^2 x \quad (3-11)$$

が成り立つ。これより、(3-5)、(3-9)、(3-11)式から、

$$\ddot{a} = -\omega_0^2 a \quad (3-12)$$

が得られる。ここで、図 3-1 に示すような、縦軸を snap、横軸を絶対加速度とした平面を考える。これ以降、図 3-1 に示した平面を snap-絶対加速度関係と呼ぶことにする。系が調和振動している際の snap と絶対加速度の関係は、(3-12)式より、逆位相となり、図 3-1 に示すように、 $-\omega_0^2$  を傾きとした線形関係が成り立つことになる。一方で、snap-絶対加速度関係の線形性が保持されていない場合では、系に非線性が生じたものと判断することが可能だと考えられる。

上記議論より、系が弾性状態で調和振動していれば、固有円振動数  $\omega_0$  は snap-絶対加速度関係において、snap と絶対加速度の線形履歴の傾きから算出することが可能となる。周波数解析を行わずに、固有円振動数を算出することによって、等価剛性の変化を検出、評

価することができるものと考えられる。例えば、鉛直ブレースが設置されているような骨組構造物において、地震動入力により、鉛直ブレースが破断する被害を受けた際、鉛直ブレースの破断前後で、snap-絶対加速度関係の傾きに変化が生じることになり、等価剛性の減少を検出、評価することが可能になるものと考えられる。

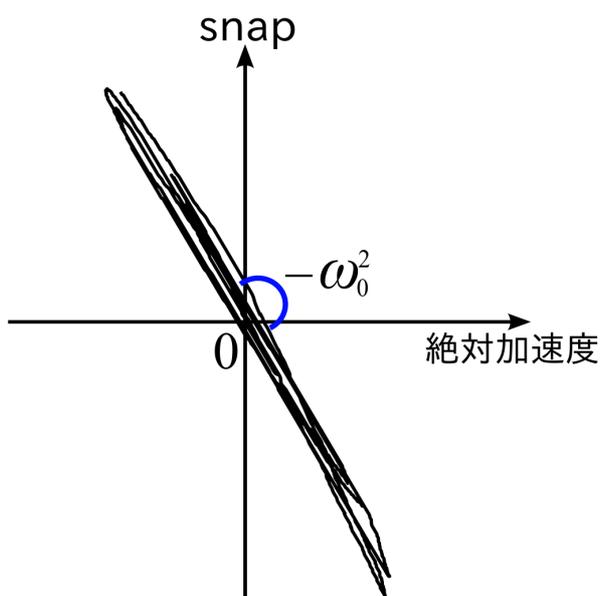


図 3-1 snap-絶対加速度関係

### 3.2.3 非線形性検出のための閾値

#### 3.2.3.1 降伏耐力による設定

第3.2.1項で議論したように、系が弾性振動している際の snap の範囲を決定することによって系が非線形性を呈した瞬間を捉えることが可能であると考えられる。ここでは、降伏耐力を弾性限界とすることで、弾性振動時の snap の範囲を決定することで閾値を設定する。

弾性振動中の復元力  $Q(x)$  は降伏耐力  $Q_y$  よりも小さいと考えると、第2章(2-2)式より、

$$-Q_y \leq m(\ddot{x} + \ddot{x}_0) \leq Q_y \quad (3-13)$$

であるから、相対加速度  $\ddot{x}$  の範囲は、

$$-\frac{Q_y}{m} - \ddot{x}_0 \leq \ddot{x} \leq \frac{Q_y}{m} - \ddot{x}_0 \quad (3-14)$$

となる。弾性振動している系の snap  $\ddot{a}$  の値は、(3-9)、(3-14)式から、

$$-\omega_0^2 \left( \frac{Q_y}{m} - \ddot{x}_0 \right) \leq \ddot{a} \leq \omega_0^2 \left( \frac{Q_y}{m} + \ddot{x}_0 \right) \quad (3-15)$$

となる範囲を取る。(3-15)式の範囲を閾値とすることで、snap の値がこの範囲を超える場合に非線形挙動が生じたものと判断できる。この範囲の上限値および下限値には地動加速度  $\ddot{x}_0$  が含まれているため、時々刻々変化する値となる。そのため、地動加速度の計測およびそれを用いた時刻ごとの閾値の算出が必要となる。

そこで、(3-15)式において地動加速度  $\ddot{x}_0$  の値を無視できる場合、すなわち、(3-13)式において、相対加速度に比べて地動加速度が小さい場合について考える。定常応答における振動系の絶対加速度応答倍率  $|a/\ddot{x}_0|$  は以下のようなになる[3-2]。

$$\left| \frac{a}{\ddot{x}_0} \right| = \sqrt{\frac{1 + 4h^2 \left( \frac{\omega_p}{\omega_0} \right)^2}{\left\{ 1 - \left( \frac{\omega_p}{\omega_0} \right)^2 \right\}^2 + 4h^2 \left( \frac{\omega_p}{\omega_0} \right)^2}} \quad (3-16)$$

このとき、 $h$  は減衰定数、 $\omega_p$  は入力地動の円振動数である。縦軸を絶対加速度応答倍率

$|a/\ddot{x}_0|$ ，横軸を振動数比  $\omega_p/\omega_0$  としたものを図3-2に示す。

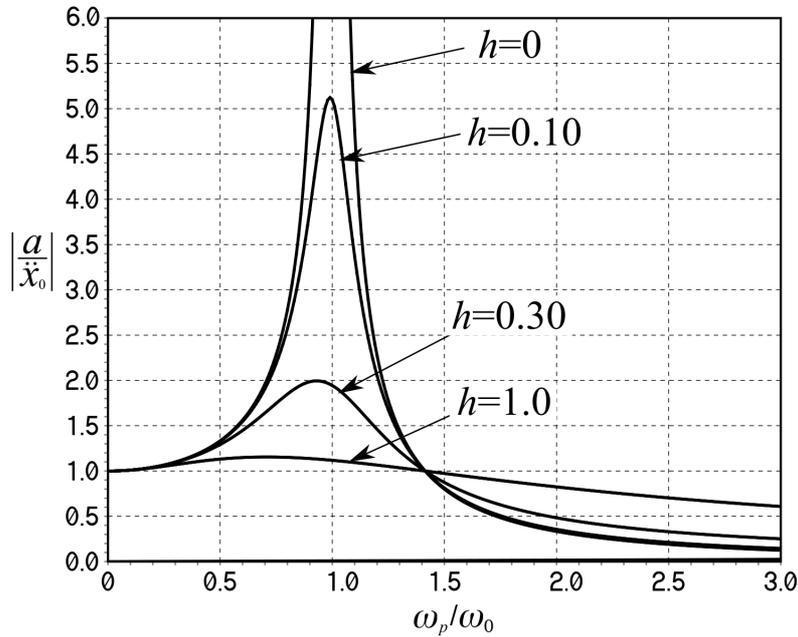


図3-2 絶対加速度応答倍率

ここで， $a=\ddot{x}+\ddot{x}_0$  より  $|a/\ddot{x}_0|$  は，

$$\begin{aligned} \left| \frac{a}{\ddot{x}_0} \right| &= \left| \frac{\ddot{x}+\ddot{x}_0}{\ddot{x}_0} \right| \\ &= \left| \frac{\ddot{x}}{\ddot{x}_0} + 1 \right| \end{aligned} \quad (3-17)$$

となる。(3-16)式より，無減衰系では，振動系の固有周期と入力地動周期が共振する点  $\omega_p/\omega_0=1$  において， $|a/\ddot{x}_0|=\infty$  となることから，(3-17)式より， $\ddot{x}_0 \ll \ddot{x}$  となり，相対加速度に比べて地動加速度は十分に小さいといえる。これより，(3-15)式において地動加速度を無視した場合，弾性振動している振動系の snap の範囲は，

$$-\omega_0^2 \frac{Q_y}{m} \leq \ddot{a} \leq \omega_0^2 \frac{Q_y}{m} \quad (3-18)$$

と考えることができる。この(3-18)式には地動加速度が含まれていないため，地動加速度の計測が不要であり，閾値を一定値とすることができる。しかし，振動系の固有周期と入力地動周期が共振していない場合では， $\ddot{x}_0 \ll \ddot{x}$  という地動加速度と相対加速度の関係が成

立せず、弾性振動時であっても、snap の値はこの範囲を超えてしまう場合が生じることが予想される。一方で、(3-15)式で示した地動加速度を考慮した閾値は、(3-18)式で示した閾値の幅を保持したまま、地動加速度によって  $\omega_0^2 \ddot{x}_0$  の分だけ変動することになる。

どちらの閾値においても、降伏後の二次剛性比が大きい場合などで復元力  $Q(x)$  の絶対値が降伏耐力  $Q_y$  よりも大きい場合では、(3-3)式中の第二項が大きくなり、弾性範囲においても snap の値が閾値を超えてしまう場合が考えられる。

### 3.2.3.2 相対加速度による設定

項目 3.2.3.1 では、降伏耐力を既知とし、降伏耐力を弾性限とすることによって非線形性検出の閾値を設定する方法を提案した。しかし、振動系の降伏耐力を推定することが困難であり、実際の降伏耐力が推定値と一致するとは限らない。ここでは、相対加速度から弾性振動時の snap を算出し、それとの差分を求めることで剛性急変による非線形性を検出する方法を考える。

弾性振動時の snap との差  $\Delta \ddot{a}$  は、(3-3)、(3-8)式より、

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{a} &= -\frac{1}{m} \{k'(x) \dot{x}^2 + k(x) \ddot{x}\} + \frac{k_0}{m} \ddot{x} \\ &= -\frac{1}{m} k'(x) \dot{x}^2 - \frac{1}{m} \{k(x) - k_0\} \ddot{x} \end{aligned} \quad (3-19)$$

として表される。第一項は剛性変化と相対速度の積となる一方、第二項は接線剛性と弾性剛性の差に関係する値となる。ここで、(状態 1) 弾性、(状態 2) 降伏、(状態 3) 塑性、の 3 つの状態での  $\Delta \ddot{a}$  の値について考える。

(状態 1) 系が弾性振動している場合では、 $k(x) = k_0$  かつ  $k'(x) = 0$  となるから、(3-19)式より  $\Delta \ddot{a}$  は、

$$\Delta \ddot{a} = 0 \quad (3-20)$$

となる。すなわち、系の剛性が初期弾性剛性と等しい状態で振動している場合には、 $\Delta \ddot{a}$  は常にゼロとなる。

(状態 2) 系が降伏点を通過する時点では、 $k'(x)$  が瞬間的に大きくなることで(3-19)式

の第一項が大きくなり、一方で、降伏点直前では剛性  $k(x)$  は初期弾性剛性と等しいと考え、第二項はほぼゼロであり、 $\Delta\ddot{a}$  は、

$$\Delta\ddot{a} = -\frac{1}{m} k'(x) \dot{x}^2 \quad (3-21)$$

と考えることができる。 $\Delta\ddot{a}$  の値は第一項のみによって決まるものと考えられ、 $k'(x)$  と相対速度の2乗によって決まる。これより、降伏点前後における剛性の変化が予想できれば、 $\Delta\ddot{a}$  から降伏点における相対速度を算出することが可能になるものと思われる。

(状態3) 降伏後、系の剛性が低下し、ある剛性  $k(x)$  で塑性変形が進行しているとす。弾性振動時と同様に  $k'(x)=0$  であるから、(3-19)式は第二項のみが残るため、 $\Delta\ddot{a}$  は、

$$\Delta\ddot{a} = -\frac{1}{m} [k(x) - k_0] \ddot{x} \quad (3-22)$$

となる。すなわち、塑性変形時の剛性と初期弾性剛性との差と相対速度の積に応じて振動する値となる。

ここで、第2章と同様に、離散データの場合について考える。第2章より、第*i*ステップにおける snap、および弾性振動している場合の snap はそれぞれ、

$$\ddot{a}_i = -\frac{{}_b k}{m \Delta t} \left( \frac{{}_f k - {}_b k}{{}_b k} {}_f \dot{x}_i + {}_c \ddot{x}_i \Delta t \right) \quad (3-23)$$

$$\ddot{a}_i = -\frac{k_0}{m} {}_c \ddot{x}_i \quad (3-24)$$

となる。第*i*ステップにおける  $\Delta\ddot{a}_i$  は(3-23)、(3-24)式より、

$$\begin{aligned} \Delta\ddot{a}_i &= -\frac{{}_b k}{m \Delta t} \left( \frac{{}_f k - {}_b k}{{}_b k} {}_f \dot{x}_i + {}_c \ddot{x}_i \Delta t \right) + \frac{k_0}{m} {}_c \ddot{x}_i \\ &= -\frac{1}{m \Delta t} ({}_f k - {}_b k) {}_f \dot{x}_i - \frac{1}{m} ({}_b k - k_0) {}_c \ddot{x}_i \end{aligned} \quad (3-25)$$

となる。

ここでは、復元力モデルとして図3-3に示すバイリニア型復元力特性を考える。降伏後の二次剛性比を  $\gamma$  ( $0 \leq \gamma < 1$ ) とする。

(状態1) 第*i*ステップにおいて、振動系が弾性振動している場合では  ${}_f k = {}_b k = k_0$  であ

るから、

$$\Delta \ddot{a}_i = 0 \quad (3-26)$$

となり、(3-20)式に一致していることがわかる。

(状態2) 一方、第*i*ステップにおいて、系が降伏したとすると、第*i*ステップ前後の剛性はそれぞれ、 ${}_b k = k_0$ 、 ${}_f k = \gamma k_0$ であるから、(3-25)式より  $\Delta \ddot{a}_i$  は、

$$\Delta \ddot{a}_i = -\frac{1}{m} \frac{(\gamma - 1) k_0}{\Delta t} {}_f \dot{x}_i \quad (3-27)$$

となる。 $\gamma$  は初期剛性に対する比率であるから、 $(\gamma - 1) k_0$  は降伏点における剛性の変化を示している。これより、降伏点における  $\Delta \ddot{a}_i$  は降伏点前後の剛性変化と降伏点通過時の相対速度の積によって表され、前述した(3-21)式と一致していることになる。

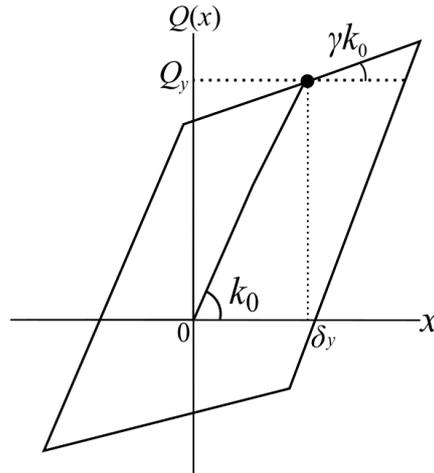


図 3-3 バイリニア型復元力特性

(状態3) 降伏後の二次剛性  $\gamma k_0$  で系が振動しているとすると、 ${}_f k = {}_b k = \gamma k_0$  であるから、 $\Delta \ddot{a}_i$  は(3-25)式より、

$$\Delta \ddot{a}_i = -\frac{1}{m} k_0 (\gamma - 1) {}_c \ddot{x}_i \quad (3-28)$$

となり、(3-22)式と一致する。(3-28)式から  $0 \leq \gamma < 1$  より、塑性変形中の  $\Delta \ddot{a}_i$  の範囲は、

$${}_c\ddot{x}_i \geq 0 \text{ のとき } 0 < \Delta \ddot{a}_i \leq \frac{k_0}{m} {}_c\ddot{x}_i \quad (3-29)$$

$${}_c\ddot{x}_i < 0 \text{ のとき } \frac{k_0}{m} {}_c\ddot{x}_i \leq \Delta \ddot{a}_i < 0 \quad (3-30)$$

となる。これより，相対加速度を用いて算出した snap との差分  $\Delta \ddot{a}_i$  が，(3-29)，(3-30)式で示した範囲を超えた場合に剛性の急変による非線形性が生じたと判断することが可能となる。この方法では，項目 3.2.3.1 で提案した降伏耐力を用いた場合の閾値の設定方法とは異なり，二次勾配をもつ復元力特性であったとしても，その影響によって弾性振動を誤検出することがない。これは， $0 \leq y < 1$  であるためである。しかし，項目 3.2.3.1 で提案した閾値とは異なり，閾値の幅が一定とはならず，相対加速度に応じて変化することになる。

### 3.2.4 まとめ

本節では，振動系の非線形性検出を目的とした閾値の設定方法として，2種類提案した。設定方法ごとに必要とする物理量を整理したものを表 3-1 に示す。snap を算出するために必要とする絶対加速度および計測時間刻みについては，どちらの方法でも共通して必要であるため記載していない。

表 3-1 設定方法ごとに必要な物理量

設定方法	必要な物理量	備考
①	$\omega_0, m, Q_y, \ddot{x}_0$	入力地震動に対して，振動系が共振していれば $\ddot{x}_0$ は不必要
②	$\omega_0, \ddot{x}_0$	必要な物理量が最も少ない

表 3-1 から，設定方法②が最も必要な物理量が少なく，設定方法①が最も多い。各設定方法で一長一短があるものの，必要な物理量が既知であれば，振動系の非線形性を検出することが可能となる。

### 3.3 振動系の非線形性検出方法(多質点系の場合)

前3.2節では、無減衰1質点系を対象として、振動系の非線形性検出方法として2種類の方法を提案した。ここでは、無減衰1質点系において提案した検出方法をそれぞれ拡張し、多質点せん断系における層せん断力-層間変位関係に生じる非線形性を検出する方法について検討する。

#### 3.3.1 弾性振動中の jerk および snap

第2章で述べたように、多質点せん断系において、検出対象層(ここでは $j$ 層)から最上層までの加速度応答記録を全て足し合わせたものから jerk および snap を算出することで、対象層の評価が可能となる。第2章より、 $j$ 層から最上層の絶対加速度を足し合わせたものを ${}_s a_j$ とすると、その jerk および snap は以下の式でそれぞれ表される。

$$\text{jerk: } {}_s \dot{a}_j = -\frac{1}{m} k(\delta_j) \dot{\delta}_j \quad (3-31)$$

$$\text{snap: } {}_s \ddot{a}_j = -\frac{1}{m} \{k'(\delta_j) \dot{\delta}_j^2 + k(\delta_j) \ddot{\delta}_j\} \quad (3-32)$$

$\delta_j$ ,  $\dot{\delta}_j$ ,  $\ddot{\delta}_j$  はそれぞれ $j$ 層の層間変位, 層間速度, 層間加速度を表し,  $k(\delta_j)$  をある時刻における $j$ 層の接線剛性,  $k'(\delta_j)$  は層間変位に対する $k(\delta_j)$ の微分である。特に, $j$ 層が健全であり, 弾性状態で振動している場合の jerk および snap はそれぞれ以下の式で表される。

$$\text{jerk: } {}_s \dot{a}_j = -\frac{k_{0j}}{m} \dot{\delta}_j \quad (3-33)$$

$$\text{snap: } {}_s \ddot{a}_j = -\frac{k_{0j}}{m} \ddot{\delta}_j \quad (3-34)$$

$k_{0j}$  は $j$ 層における初期弾性剛性である。当該層が健全であり, 剛性が一定の場合では, jerk は層間速度に, snap は層間加速度に応じて振動する値となる。

### 3.3.2 非線形性検出のための閾値

#### 3.3.2.1 降伏層せん断力による設定

ここでは、各層における降伏層せん断力を弾性限として、層が弾性状態で振動している際の snap の範囲を閾値として設定する方法を提案する。

$j$  層が健全状態で振動しているとすると、 $j$  層における層せん断力  $Q(\delta_j)$  は  $j$  層の降伏層せん断力  $Q_{yj}$  よりも小さいと考えられることから、第2章(2-13)式より、

$$-Q_{yj} \leq m(\ddot{x}_j + \ddot{x}_0) - Q(\delta_{j+1}) \leq Q_{yj} \quad (3-35)$$

であるから、 $j$  層の相対加速度  $\ddot{x}_j$  について整理すると、

$$-\frac{Q_{yj}}{m} - \ddot{x}_0 + \frac{1}{m} Q(\delta_{j+1}) \leq \ddot{x}_j \leq \frac{Q_{yj}}{m} - \ddot{x}_0 + \frac{1}{m} Q(\delta_{j+1}) \quad (3-36)$$

となる。(3-36)式より、

$$-\frac{Q_{yj}}{m} - \ddot{x}_0 - \ddot{x}_{j-1} + \frac{1}{m} Q(\delta_{j+1}) \leq \ddot{x}_j - \ddot{x}_{j-1} \leq \frac{Q_{yj}}{m} - \ddot{x}_0 - \ddot{x}_{j-1} + \frac{1}{m} Q(\delta_{j+1}) \quad (3-37)$$

とすると、このとき、 $\ddot{\delta}_j = \ddot{x}_j - \ddot{x}_{j-1}$ 、 $a_{j-1} = \ddot{x}_0 + \ddot{x}_{j-1}$  であり、(2-16)式より、

$${}_s a_{j+1} = -\frac{1}{m} Q(\delta_{j+1}) \quad (3-38)$$

であるから、(3-37)式から  $\ddot{\delta}_j$  は、

$$-\frac{Q_{yj}}{m} - a_{j-1} - {}_s a_{j+1} \leq \ddot{\delta}_j \leq \frac{Q_{yj}}{m} - a_{j-1} - {}_s a_{j+1} \quad (3-39)$$

となる。よって、 $j$  層が弾性状態で振動している場合の snap  ${}_s \ddot{a}_j$  の値は、(3-34)、(3-39)式から、

$$-\frac{k_{0j}}{m} \left( \frac{Q_{yj}}{m} - a_{j-1} - {}_s a_{j+1} \right) \leq {}_s \ddot{a}_j \leq \frac{k_{0j}}{m} \left( \frac{Q_{yj}}{m} + a_{j-1} + {}_s a_{j+1} \right) \quad (3-40)$$

となる範囲を取る。(3-40)式は各層の絶対加速度が含まれており、時々刻々変化する値である。この範囲を閾値とすることで、snap の値がこの範囲を超える場合には  $j$  層の層せん断力-層間変位関係において、非線形性が生じたものと判断できる。

ここで、(3-40)式において各層の絶対加速度を無視できると仮定した場合において、 $j$  層

が弾性状態で振動している場合の snap の範囲は、

$$-\frac{k_{0j}Q_{yj}}{m^2} \leq_s \ddot{a}_j \leq \frac{k_{0j}Q_{yj}}{m^2} \quad (3-41)$$

と表される。(3-41)式には各層の加速度が含まれておらず、検出の閾値を一定値とすることができ一方、各層の加速度の影響が大きい場合には、当該層が線形挙動時であっても snap の値はこの範囲を超えてしまうことが考えられる。一方で、(3-40)式で示した各層で計測される加速度を考慮した閾値は、(3-41)式で示した閾値の幅を保持したまま、各層の加速度の影響を考慮して、 $\frac{k_{0j}}{m}(a_{j-1}+_s a_{j+1})$  の分だけ変動することになる。各層の加速度を含むため、その計測が必要なことや時々刻々閾値が変動するという欠点があるが、各層の加速度が大きい場合にも高い精度で検出ができるようになるものと予想される。

どちらの閾値においても、降伏後の二次剛性比が大きい場合など、復元力  $Q(\delta)$  の絶対値が降伏層せん断力  $Q_{yj}$  よりも大きい場合では、(3-32)式中の第二項が大きくなり、線形範囲においても閾値を超えてしまう場合が考えられる。

### 3.3.2.2 層間加速度による設定

ここでは、1質点系を対象として、項目 3.2.3.2 において提案した相対加速度による閾値の設定方法を多質点せん断系の場合に拡張する。項目 3.2.3.2 の各式において、相対  $x$  を層間  $\delta$ 、絶対加速度  $a$  を  $j$  層から最上層までの絶対加速度の和  $_s a_j$ 、としてそれぞれ置き換えることで、多質点せん断系における層の非線形性検出方法として適用が可能となる。

$j$  層が弾性状態で振動しているときの snap との差  $\Delta_s \ddot{a}_j$  は、(3-19)式より、

$$\Delta_s \ddot{a}_j = -\frac{1}{m} k'(\delta_j) \dot{\delta}_j^2 - \frac{1}{m} \{k(\delta_j) - k_{0j}\} \ddot{\delta}_j \quad (3-42)$$

となる。第一項は剛性変化と層間速度の積となる一方、第二項は接線剛性と弾性剛性の差に関係する値となる。(状態 1) 弾性、(状態 2) 降伏、(状態 3) 塑性、の 3 つの状態での  $\Delta_s \ddot{a}_j$  の値は、(3-20)~(3-22)式からそれぞれ、

$$\text{弾性： } \Delta_s \ddot{a}_j = 0 \quad (3-43)$$

$$\text{降伏： } \Delta_s \ddot{a}_j = -\frac{1}{m} k'(\delta_j) \dot{\delta}_j^2 \quad (3-44)$$

$$\text{塑性： } \Delta_s \ddot{a}_j = -\frac{1}{m} \{k(\delta_j) - k_{0j}\} \ddot{\delta}_j \quad (3-45)$$

となる。次に、離散データの場合を考える。 $j$ 層における復元力特性は1質点系のとおりと同様に、図3-3に示したバイリニア型復元力特性とする。第*i*ステップにおける状態ごとの $\Delta_s \ddot{a}_{ji}$ は、(3-26)～(3-28)式からそれぞれ、

$$\text{弾性： } \Delta_s \ddot{a}_{ji} = 0 \quad (3-46)$$

$$\text{降伏： } \Delta_s \ddot{a}_{ji} = -\frac{1}{m} \frac{(\gamma-1)k_{0j}}{\Delta t} \dot{\delta}_{ji} \quad (3-47)$$

$$\text{塑性： } \Delta_s \ddot{a}_{ji} = -\frac{1}{m} k_{0j}(\gamma-1) \ddot{\delta}_{ji} \quad (3-48)$$

となる。(3-48)式において $0 \leq \gamma < 1$ より、塑性変形中の $\Delta_s \ddot{a}_{ji}$ の範囲は、

$${}_c \ddot{\delta}_{ji} \geq 0 \text{ のとき } 0 < \Delta_s \ddot{a}_{ji} \leq \frac{k_{0j}}{m} {}_c \ddot{\delta}_{ji} \quad (3-49)$$

$${}_c \ddot{\delta}_{ji} < 0 \text{ のとき } \frac{k_{0j}}{m} {}_c \ddot{\delta}_{ji} \leq \Delta_s \ddot{a}_{ji} < 0 \quad (3-50)$$

となる。これより、層間加速度を用いて算出したsnapとの差分 $\Delta_s \ddot{a}_{ji}$ が、(3-49)、(3-50)式で示した範囲を超えた場合に、 $j$ 層において剛性の急変による非線形性が生じたと判断することが可能となる。しかし、項目3.3.2.1の閾値とは異なり、閾値の幅が一定とはならず、層間加速度に応じて変化することになる。

### 3.4 剛性低下率の推定方法

第3.2、3.3節において、振動系の剛性変化に起因した非線形性を検出する方法を提案した。その結果、snapの値と設定した閾値を比較することで、剛性急変を検出することが可能であることを示した。しかし、提案方法は剛性の急変を検出するものであり、どの程度剛性が変化したのかを評価するものではない。本節では、より直接的に剛性の変化を評価

する方法の提案する。鋼構造物において、地震被害による剛性低下を評価することは、損傷度を評価する指標として重要である。損傷度の評価指標として、剛性の低下に着目した研究例の多くは、固有振動数やモード形状の変化から剛性の低下を同定しているものであるが、実際の荷重 - 変位関係における瞬間的な剛性の変化を捉えているわけではなく、等価な剛性変化を評価している。ここでは、加速度の1階微分である jerk を用いて、振動系の接線剛性の変化を剛性低下率とし、それを算出する方法を提案する。

### 3.4.1 剛性低下率の定義と算出方法

無減衰1質点系における jerk は(3-2)式から、相対速度  $\dot{x}$  に比例する値となる。 $\dot{x} \neq 0$  とすると、接線剛性  $k(x)$  は(3-2)式から、

$$k(x) = -m \frac{\dot{a}}{\dot{x}} \quad (3-51)$$

と表される。(3-51)式を弾性剛性  $k_0$  で除すと、

$$\frac{k(x)}{k_0} = -\frac{m \dot{a}}{k_0 \dot{x}} \quad (3-52)$$

となる。ここで、剛性低下率を  $\alpha$  で表し、以下のように定義する。

$$\alpha = 1 - \frac{k(x)}{k_0} \quad (3-53)$$

(3-53)式は弾性剛性  $k_0$  に対する接線剛性  $k(x)$  の低下率を表し、 $\alpha$  が0に近ければ剛性の低下が小さく、1に近ければ剛性が大きく低下していることになる。一方、 $\alpha$  が負の値となるときは接線剛性  $k(x)$  が弾性剛性  $k_0$  よりも過大であることを示す。(3-52)、(3-53)式より  $\alpha$  は、

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 + \frac{m \dot{a}}{k_0 \dot{x}} \\ &= 1 + \frac{1}{\omega_0^2} \frac{\dot{a}}{\dot{x}} \end{aligned} \quad (3-54)$$

となる。(3-54)式から、固有円振動数、jerk および相対速度  $\dot{x}$  によって剛性低下率  $\alpha$  を算出することができる。なお、(3-54)式は相対速度を分母にもつため、除荷点付近における

速度反転時など相対速度が微小となる瞬間には、 $\alpha$ の値が不安定となり瞬間的に大きく変動することが予想される。ただし、速度反転時には構造損傷は進行しないため、このような不安定な $\alpha$ の値は損傷には寄与しないものとする。

また、jerkを用いずに剛性低下率 $\alpha$ を算出する別の手法として、荷重-変形関係を微分することで接線剛性 $k(x)$ を求め、(3-53)式から算出する方法が考えられる。その場合、相対加速度の2階積分によって相対変位を、絶対加速度から荷重をそれぞれ算出し、荷重-変形関係を描き、その微分によって $k(x)$ を算出する必要がある。この方法では、積分2回、微分1回の演算処理が必要であるが、提案手法では微分と積分を1度ずつ行うだけでよいことから演算処理回数を減らすことができる。

### 3.4.2 剛性低下率とsnapの対応関係

実測する加速度記録には、本来の信号とは無関係のノイズが含まれることが考えられる。前3.4.1項で提案した剛性低下率 $\alpha$ を算出する際には、絶対加速度の1階微分であるjerk、および相対加速度の1階積分である相対速度を必要とする。これらの値はそれぞれノイズを含んだ加速度記録から算出することになるため、ノイズの影響によって $\alpha$ の値を正しく評価することが困難となる場合が予想される。そこで、非線形性検出能を有するsnapと剛性低下率 $\alpha$ との対応関係を考慮することで評価精度を向上させる可能性について検討する。

(3-53)式から剛性低下率 $\alpha$ の時間に対する1階微分 $\dot{\alpha}$ は、

$$\begin{aligned}\dot{\alpha} &= \frac{d\alpha}{dt} \\ &= -\frac{1}{k_0} \frac{dk(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \\ &= -\frac{1}{k_0} k'(x) \dot{x}\end{aligned}\tag{3-55}$$

となる。(3-55)式には $k'(x)$ が含まれることから、剛性が急変する時点においては $\dot{\alpha}$ は極値を取るものと考えられる。一方、(3-3)式に示されるように、snapは第一項に $k'(x)$ が含まれることから、snapの値がピークを取る時点において剛性が急変することになる。snapの

値が閾値を超えてピークとなる時点において、 $\dot{\alpha}$ は極値を取り、剛性低下率 $\alpha$ の変曲点となることが予想され、 $\alpha$ とsnapとの対応関係を観察することで、より精度の良い評価が可能になるものと考えられる。

### 3.4.3 多質点せん断系への拡張

第3.4.1項で提案した1質点系における剛性低下率の算出方法を、多質点せん断系の場合に拡張する。前項までに示した(3-5)~(3-55)式において、相対 $x$ を層間 $\delta$ 、絶対加速度 $a$ を $j$ 層から最上層までの絶対加速度の和 ${}_s a_j$ 、としてそれぞれ置き換えることで、多質点せん断系における層剛性低下率の算出方法として適用が可能となる。ここでは、各層の質量は全て等しく $m$ とする。

$j$ 層におけるjerkは(3-31)式から、層間速度 $\dot{\delta}_j$ に比例する値となる。 $\dot{\delta}_j \neq 0$ とすると、 $j$ 層における接線剛性 $k(\delta_j)$ は(3-31)式から、

$$k(\delta_j) = -m \frac{{}_s \dot{a}_j}{\dot{\delta}_j} \quad (3-56)$$

と表される。(3-56)式を $j$ 層における弾性剛性 $k_{0j}$ で除すと、

$$\frac{k(\delta_j)}{k_{0j}} = -\frac{m}{{}_s k_{0j}} \frac{\dot{a}_j}{\dot{\delta}_j} \quad (3-57)$$

となる。ここで、 $j$ 層の剛性低下率を $\alpha_j$ で表し、以下のように定義する。

$$\alpha_j = 1 - \frac{k(\delta_j)}{{}_s k_{0j}} \quad (3-58)$$

(3-58)式は弾性剛性 ${}_s k_{0j}$ に対する接線剛性 $k(\delta_j)$ の低下率を表し、 $\alpha_j$ が0に近ければ剛性の低下が小さく、1に近ければ剛性が大きく低下していることになる。一方、 $\alpha$ が負の値となるときは接線剛性 $k(\delta_j)$ が弾性剛性 ${}_s k_{0j}$ よりも過大であることを示す。(3-57)、(3-58)式より $\alpha_j$ は、

$$\alpha_j = 1 + \frac{m}{{}_s k_{0j}} \frac{\dot{a}_j}{\dot{\delta}_j} \quad (3-59)$$

と表される。これより、1質点系における剛性低下率の算出方法は、多質点せん断系にお

いて、層剛性低下率の算出方法へと拡張できる。1質点系の場合と同様に、 $j$ 層における snap との対応関係を考慮することを考えると、(3-55)式より、層剛性低下率  $\alpha_j$  の時間に対する1階微分  $\dot{\alpha}_j$  は、

$$\dot{\alpha}_j = -\frac{1}{k_{0j}} k'(\delta_j) \dot{\delta}_j \quad (3-60)$$

となる。(3-60)式より、層剛性が急変する時点においては  $\alpha_j$  は極値を取るものと考えられることから、 $\alpha_j$  と snap との対応関係を観察することで、より精度の良い評価が可能になるものと考えられる。

### 3.5 塑性変形量の推定方法

本節では、jerk または snap によって降伏点における相対速度（以下、降伏点速度）を推定し、それを用いて塑性変形量を推定する方法を提案する。建築構造物において、地震被害による損傷度を評価する指標として、塑性変形量は重要な情報を与える。ここでは、第3.2節と同様に図3-3のような二次剛性比を  $\gamma$  ( $0 \leq \gamma < 1$ ) とするバイリニア型復元力特性の場合を考える。

#### 3.5.1 降伏点速度の算出方法

##### 3.5.1.1 jerk を用いた場合

第2章より、第  $i$  ステップにおける jerk  $\dot{a}_i$  は、

$$\dot{a}_i = -\frac{{}_b k}{m} \cdot {}_b \dot{x}_i \quad (3-61)$$

となる。第  $i$  ステップにおいて、振動系が降伏したとすると、 ${}_b k = k_0$  であるから、

$$\dot{a}_i = -\frac{k_0}{m} \cdot {}_b \dot{x}_i \quad (3-62)$$

となる。このときの相対速度  ${}_b \dot{x}_i$  を降伏点速度  $\dot{x}_y$  とすると、 $\dot{x}_y$  は(3-62)式より、

$$\dot{x}_y = -\frac{m}{k_0} \dot{a}_i = -\frac{1}{\omega_0^2} \dot{a}_i \quad (3-63)$$

として得られる。すなわち、振動系の固有円振動数が既知であれば、jerk によって降伏点

における相対速度を算出することが可能となる。

### 3.5.1.2 snap を用いた場合

項目 3.2.3.2 で議論したように、第  $i$  ステップにおいて振動系が降伏した場合、 $\Delta \ddot{a}_i$  は、

$$\Delta \ddot{a}_i = -\frac{1}{m} \frac{(\gamma-1)k_0}{\Delta t} \cdot {}_r\dot{x}_i \quad (3-27)$$

となる。そのときの相対速度  ${}_r\dot{x}_i$  を降伏点速度  $\dot{x}_y$  とすると、 $\dot{x}_y$  は(3-27)式より、

$$\dot{x}_y = -\frac{m}{(1-\gamma)k_0} \Delta \ddot{a}_i \cdot \Delta t = -\frac{1}{(1-\gamma)\omega_0^2} \Delta \ddot{a}_i \cdot \Delta t \quad (3-64)$$

として得られる。振動系の固有円振動数、降伏後の二次剛性比  $\gamma$  が既知であれば、 $\Delta \ddot{a}_i$  によって降伏点における相対速度を算出することが可能となる。

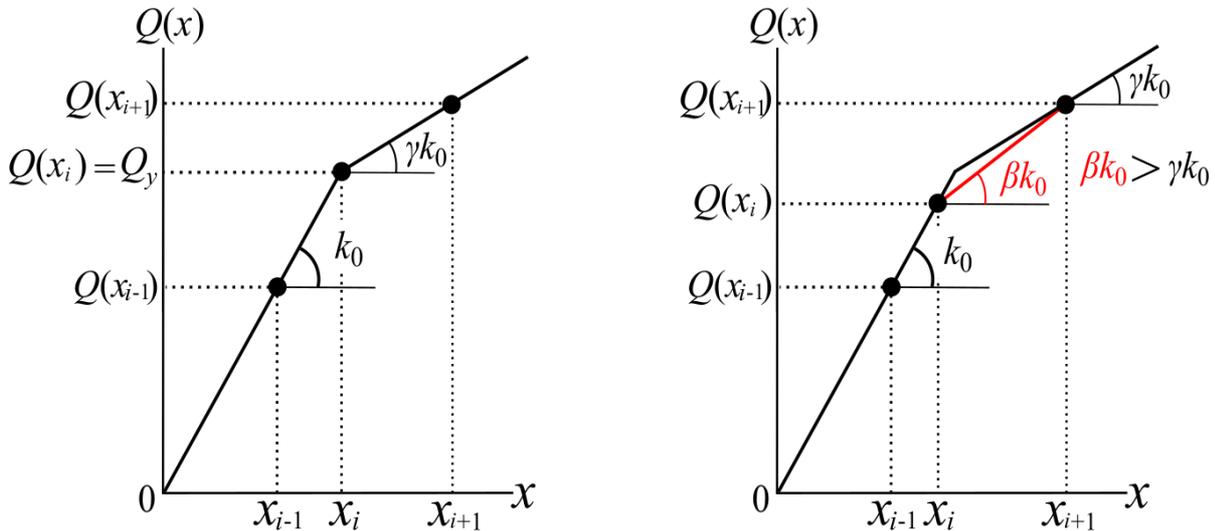
### 3.5.2 塑性変形量の算出

(3-63)、または(3-64)式によって得られた降伏点速度と、計測される相対加速度から、数値積分法を用いて塑性変形中の相対速度および相対変位を算出し、塑性変形量を推定する。使用する数値積分法は、Newmark- $\beta$  法において、 $\beta=1/6$  である線形加速度法とする [3-1]。数値積分によって、降伏点速度以降の相対速度および相対変位を順次算出し、 $\dot{x}_y \cdot \dot{x}_n \leq 0$  となる第  $n$  ステップ ( $n \geq i$ ) まで計算を行う。第  $n$  ステップにおいて、相対速度が反転することになるため、この時点が除荷点となる。この時点をも塑性変形終了時点として、第  $n$  ステップの相対変位を塑性変形量とする。

### 3.5.3 離散時刻歴解析によるずれの検証

第 3.5 節において提案した塑性変形量の推定方法の中で、項目 3.2.3.2 で議論した降伏点における  $\Delta \ddot{a}_i$  と相対速度の関係から降伏点速度を算出する方法を示した。しかし、離散時刻歴解析では、履歴復元力において、解析ステップが設定した降伏点を必ずしも通過するとは限らない (図 3-4)。このような場合、降伏点前後において解析ステップを取るようになるため、1 度の降伏で履歴復元力が非線形性を呈する時点が 2 点生じることになる。そのため、解析ステップが降伏点を通過する場合と比べて snap の値が小さくなり、

$\Delta \ddot{a}_i$  が過小評価されることになる。そこで、このような場合における  $\Delta \ddot{a}_i$  の値と、それに伴って過小評価となる相対速度の値を是正する方法を検討する。



(a)解析ステップが降伏点を通る (b)解析ステップが降伏点を通らない

図 3-4 解析ステップのずれ

図 3-4(b)において、黒丸は解析時間ステップを示し、赤線はそれを結んだものである。このとき、降伏点直前の解析ステップを第  $i$  ステップとすると、第  $i$  ステップおよび第  $i+1$  ステップの2つステップにおいて剛性が変化し、非線形となる。第  $i$  ステップ  $\Delta \ddot{a}_i$  は、(3-25)式において、第  $i$  ステップ前後の剛性がそれぞれ  ${}_b k = k_0$ 、 ${}_i k = \beta k_0$  であるから、

$$\begin{aligned}
 \Delta \ddot{a}_i &= -\frac{1}{m \Delta t} ({}_i k - {}_b k) {}_i \dot{x}_i - \frac{1}{m} ({}_b k - k_0) {}_c \ddot{x}_i \\
 &= -\frac{1}{m \Delta t} (\beta k_0 - k_0) {}_i \dot{x}_i - \frac{1}{m} (k_0 - k_0) {}_c \ddot{x}_i \\
 &= -\frac{k_0}{m \Delta t} (\beta - 1) {}_i \dot{x}_i
 \end{aligned} \tag{3-65}$$

となる。一方、第  $i+1$  ステップの  $\Delta \ddot{a}_{i+1}$  は、(3-25)式において、第  $i+1$  ステップ前後の剛性がそれぞれ  ${}_b k = \beta k_0$ 、 ${}_i k = \gamma k_0$  であるから、

$$\begin{aligned}
 \Delta \ddot{a}_{i+1} &= -\frac{1}{m\Delta t}({}_f k - {}_b k) {}_f \dot{x}_{i+1} - \frac{1}{m}({}_b k - k_0) {}_c \ddot{x}_{i+1} \\
 &= -\frac{1}{m\Delta t}(\gamma k_0 - \beta k_0) {}_f \dot{x}_{i+1} - \frac{1}{m}(\beta k_0 - k_0) {}_c \ddot{x}_{i+1} \\
 &= -\frac{k_0}{m\Delta t}(\gamma - \beta) {}_f \dot{x}_{i+1} - \frac{k_0}{m}(\beta - 1) {}_c \ddot{x}_{i+1} \\
 &= -\frac{k_0}{m\Delta t}(\gamma - \beta) {}_f \dot{x}_{i+1} - \frac{k_0}{m}(\beta - 1) \frac{{}_f \dot{x}_{i+1} - {}_b \dot{x}_{i+1}}{\Delta t} \\
 &= -\frac{k_0}{m\Delta t}(\gamma - 1) {}_f \dot{x}_{i+1} + \frac{k_0}{m\Delta t}(\beta - 1) {}_b \dot{x}_{i+1}
 \end{aligned} \tag{3-66}$$

となる。ここで、(3-65)、(3-66)式より  $\Delta \ddot{a}_i$  と  $\Delta \ddot{a}_{i+1}$  の和は、

$$\Delta \ddot{a}_i + \Delta \ddot{a}_{i+1} = -\frac{k_0}{m\Delta t}(\beta - 1) {}_f \dot{x}_i - \frac{k_0}{m\Delta t}(\gamma - 1) {}_f \dot{x}_{i+1} + \frac{k_0}{m\Delta t}(\beta - 1) {}_b \dot{x}_{i+1} \tag{3-67}$$

となる。このとき、 ${}_f \dot{x}_i = {}_b \dot{x}_{i+1}$  であるから(3-67)式は、

$$\Delta \ddot{a}_i + \Delta \ddot{a}_{i+1} = -\frac{1}{m} \frac{(\gamma - 1)k_0}{\Delta t} {}_f \dot{x}_i \tag{3-68}$$

となり、(3-27)式に一致することになる。すなわち、解析ステップが降伏点を通過せず、その前後で値を取ってしまう場合は、 $\Delta \ddot{a}_i$  と  $\Delta \ddot{a}_{i+1}$  の和を求めることで、第  $i$  ステップが降伏点を通過する場合の  $\Delta \ddot{a}_i$  と一致した値を算出することができる。これより、解析ステップが降伏点を通過しない場合は、 $\Delta \ddot{a}_i$  と  $\Delta \ddot{a}_{i+1}$  の和から降伏点速度を算出することで、過小評価を是正することが可能となる。

### 3.5.4 多質点せん断系への拡張

第 3.5.2 項で提案した 1 質点系における塑性変形量の推定方法を、多質点せん断系の場合に拡張する。相対  $x$  を層間  $\delta$ 、絶対加速度  $a$  を  $j$  層から最上層までの絶対加速度の和  ${}_s a_j$ 、としてそれぞれ置き換えればよい。第  $i$  ステップにおいて  $j$  層が降伏した場合に、降伏点における層間速度を  $\delta_{yj}$  とすると、 $\delta_{yj}$  は(3-63)、または(3-64)式より、

$$\delta_{yj} = -\frac{m}{k_{0j}} {}_s \dot{a}_{ji} \tag{3-69}$$

$$\delta_{yj} = -\frac{m}{(1-\gamma)k_{0j}} \Delta {}_s \ddot{a}_{ji} \cdot \Delta t \tag{3-70}$$

として得られる。(3-69), または(3-70)式によって得られた降伏点速度と計測される層間加速度から, 数値積分法を用いて塑性変形中の層間速度および層間変位を算出し,  $j$ 層における塑性変形量を推定する。1質点系の場合と同様に, 数値積分によって降伏点速度以降の層間速度および層間変位を順次算出し,  $\dot{\delta}_{yj} \cdot \dot{\delta}_{jn} \leq 0$ となる第 $n$ ステップ ( $n \geq i$ )まで計算を行う。第 $n$ ステップにおいて, 層間速度が反転するため, その時点を塑性変形終了時点として, 第 $n$ ステップで算出した層間変位を $j$ 層における塑性変形量とする。また, 離散時刻歴解析では, 多質点せん断系の場合においても, 1質点系の場合と同様に, 降伏点における解析ステップのずれが生じるものと考えられる。これについては, 第3.5.3項で提案した1質点系における方法を, 多質点せん断系の場合へと拡張して考えることが可能である。同様に, 相対 $x$ を層間 $\delta$ , 絶対加速度 $a$ を $j$ 層から最上層までの絶対加速度の和 ${}_s a_j$ , としてそれぞれ置き換えればよい。

### 3.6 応答解析による提案手法の検証

本節では、第 3.2 節で提案した非線形性検出方法、第 3.5 節で提案した塑性変形量の推定方法の適用性を検討する。各節で論述したように、多質点せん断系においては、1 質点系の理論を拡張することで対応可能であることから、ここでは、1 質点系モデルについてのみ検証する。

#### 3.6.1 応答解析モデル

応答解析に用いるのは弾塑性 1 質点系とする。使用する復元力特性は、図 3-3 に示したバイリニア型復元力特性とし、二次剛性比  $\gamma$  は  $\gamma=0,0.2$  の 2 種類とする。 $\gamma=0$  のときは完全弾塑性型となる。振動系の固有周期  $T=1.0$  秒とし、減衰定数は 0% とする。降伏耐力については、一回の解析中で複数回の降伏を観察するため、弾性時の最大復元力  $Q_e$  をもとに、 $Q_y=0.3Q_e$  とした。入力する地震動は、兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録 NS 成分とした[3-3]。応答解析における数値積分は、線形加速度法で行う。応答解析する際の時間刻み  $\Delta t$  は  $\Delta t=0.01$  秒とした。地動加速度の時間刻みは 0.02 秒であるから、地動加速度記録が無い時刻における加速度については、時刻前後の記録から内挿により算出した。

### 3.6.2 非線形性検出方法の適用性

前3.6.1項で示した応答解析モデルを用いて地震応答解析を行った。応答解析モデルは二次剛性比をパラメータとした2種類である。2種類の応答解析モデルごとに、応答解析によって得られた絶対加速度応答時刻歴波形から、第2章で示した中央差分(2-39)式によって snap 時刻歴波形を算出した。算出した snap 時刻歴波形と、応答解析によって得られた荷重-変形関係および相対速度時刻歴波形を図3-5にそれぞれ示す。荷重-変形関係は、横軸を降伏変位で基準化した相対変位、縦軸を降伏耐力で基準化した復元力とした。snap 時刻歴波形では、横軸を時刻、縦軸を snap、(3-15)式によって算出した閾値を赤線で示す。相対速度時刻歴波形では、横軸を時刻、縦軸を相対速度とした。各グラフにおいて、snap の値が閾値を超えた時点を青色の○で示し、一定時間連続で閾値を超えている場合は、snap が極値となる時点を赤色の○で示している。

図3-5より、二次剛性比によらず、復元力が降伏点を通る際に snap の値が閾値を超えていることが観察される。二次剛性比  $\gamma$  が0である図3-5(a)では、除荷点においては閾値を超えていない。一方で二次剛性比  $\gamma$  が0.2である図3-5(b)では、除荷点においても閾値を超えている時点が観察された。これは、項目3.2.3.1における閾値の設定方法で議論したように、降伏耐力を弾性限界としているため、降伏耐力以上の復元力を有している状態から除荷が生じた場合には、線形範囲においても、閾値を超えてしまうことになる。

(3-3)式より、振動系が非線形となる時点での snap の値は、剛性変化と相対速度によって大きく影響を受ける。そのため、閾値を超えてピークとなる際の snap の絶対値は、概ね相対速度の絶対値が大きいほど、大きくなっている。

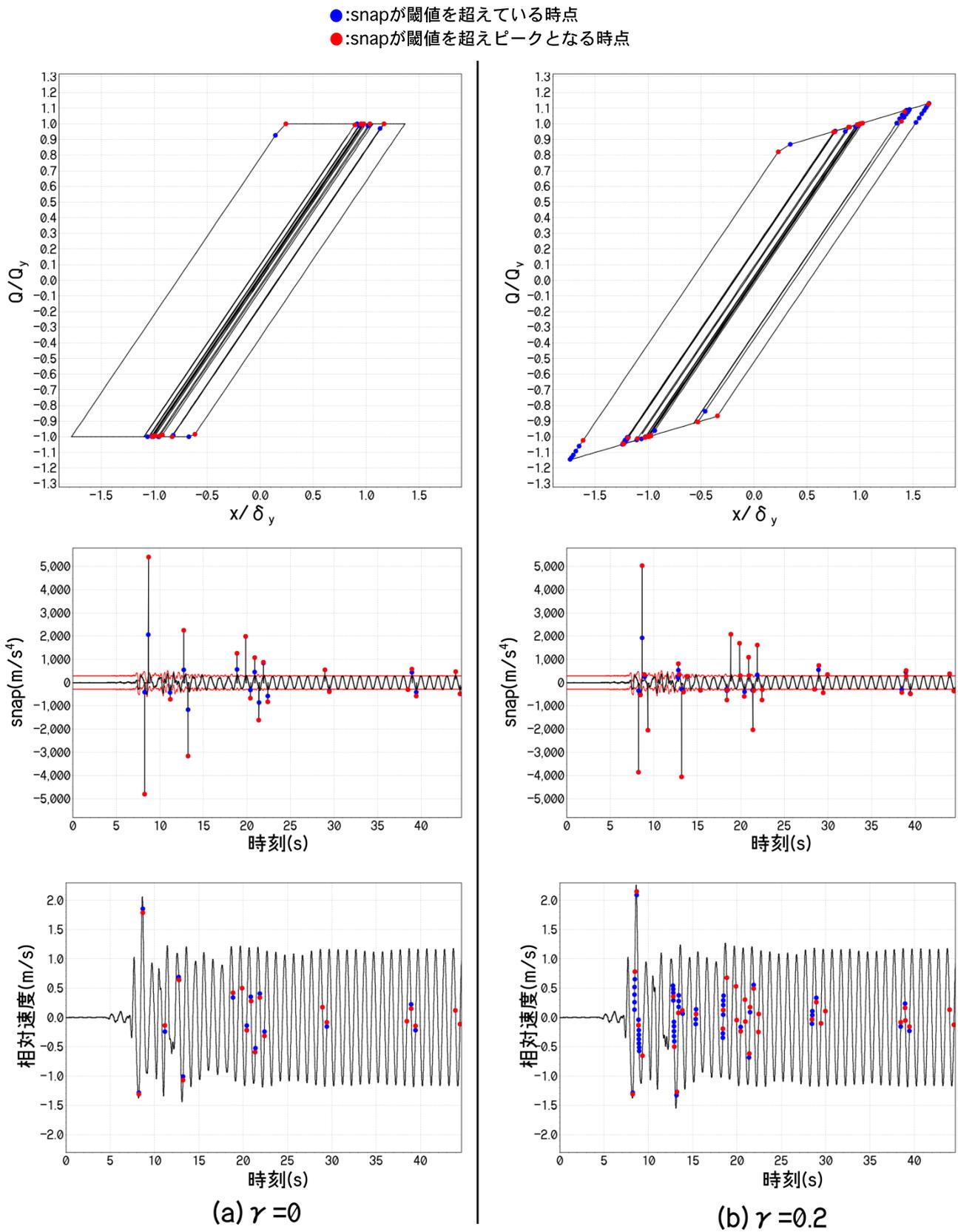


図 3-5 解析結果(荷重-変形関係, snap 時刻歴波形, 相对速度時刻歴波形)

ここで、より詳細に検証するため、解析結果の一部である 7.0～10.5 秒までの結果のみを図 3-6 に示す。図 3-6(a)より、復元力特性における二次剛性比が  $\gamma=0$ ，すなわち完全弾塑性型である場合には、荷重-変形関係が非線形となる降伏点において閾値を超えていることが観察される。降伏点における snap の値は、相対速度に影響を受けるため、相対速度の絶対値が大きい方が snap の絶対値も大きくなっていることがわかる。一方で、除荷点においても荷重-変形関係が非線形となっているにもかかわらず、snap の値は閾値を超えていない。これは除荷点における相対速度がほぼゼロとなっているためである。しかし、図 3-6(b)より、二次剛性比  $\gamma=0.2$  では、復元力が降伏耐力よりも大きい状態から除荷が生じる場合、snap の値は閾値を超えていることが観察された。除荷点以降、荷重が降伏耐力よりも小さくなるまで、snap の値は閾値を超え続けている。これは、提案方法によって設定した閾値が、振動系の弾性限（線形範囲）を降伏耐力によって決定していることが原因である。そのため、復元力が降伏耐力以下で除荷が生じる時点では、snap の値は閾値を超えていない。二次剛性比がゼロでない復元力特性を有する振動系においては、除荷点の検出も可能であるといえる一方、線形範囲であるにもかかわらず、snap の値が閾値を超えるような場合が生じることになる。

二次剛性比  $\gamma$  によらず、降伏点における snap の値は設定した閾値を超えていることが確認できたが、一度の降伏において snap の値が閾値を超えている時点が 2 箇所観察される。これは、第 3.5.3 項で検証した離散時刻歴解析における解析ステップのずれの影響である。このため、解析ステップが降伏点を通過しない場合では、一度の降伏にもかかわらず、連続する 2 つのステップにおいて snap の値が閾値を超えてしまうことになる。

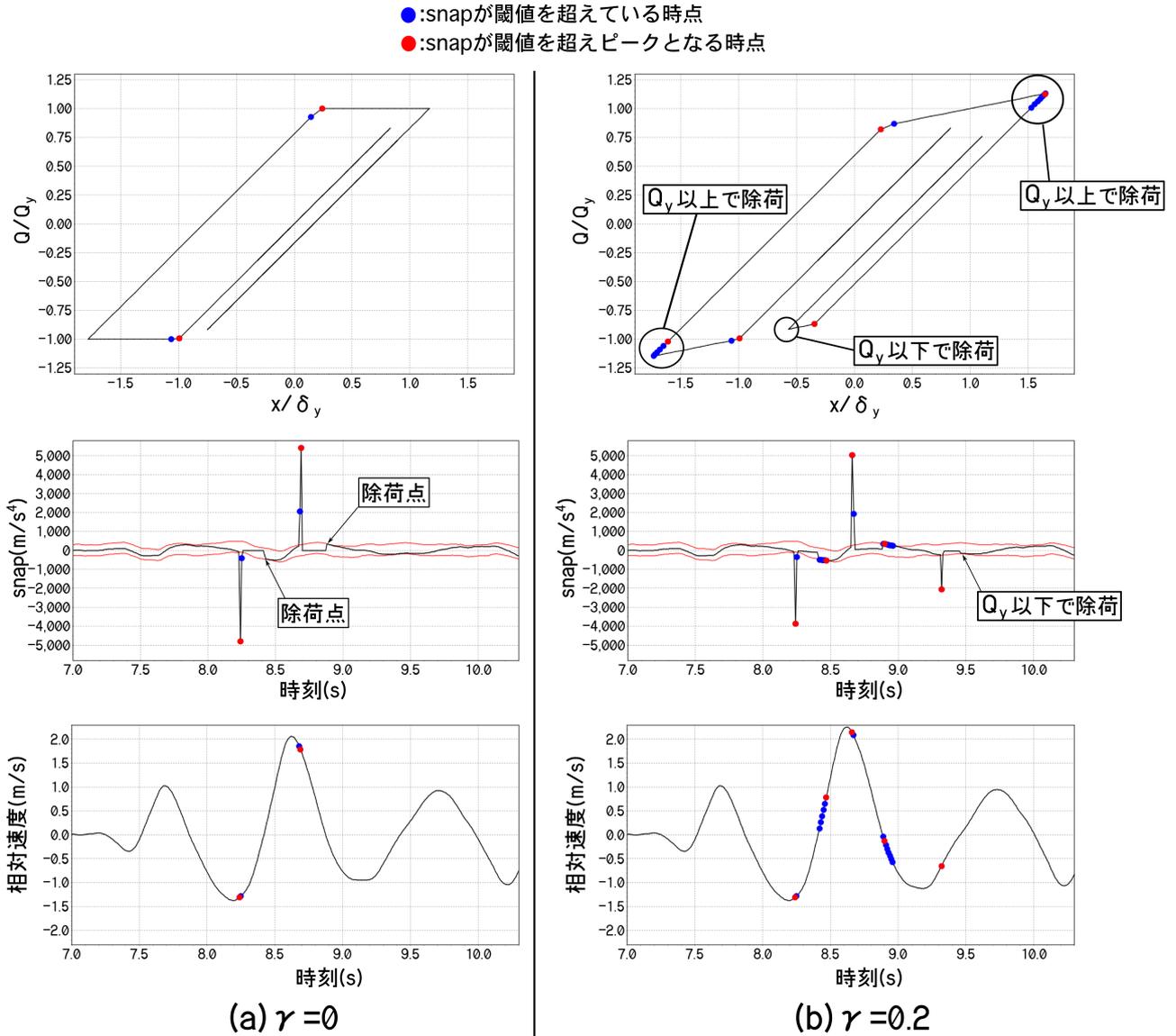


図 3-6 7.0～10.5 秒の解析結果 (荷重-変形関係, snap 時刻歴波形, 相対速度時刻歴波形)

### 3.6.3 塑性変形量推定方法の適用性

ここでは、第 3.5.1 項で提案した塑性変形量の推定方法の検証を行う。降伏点速度の算出には項目 3.5.1.2 で提案した snap を用いた方法とした。検証には、第 3.6.2 項において行った応答解析結果を用いる。提案した塑性変形量の推定方法は、降伏点速度を推定し、その降伏点速度から塑性変形量を算出しているため、塑性変形量は降伏点速度の推定精度に大きく影響を受ける。推定方法によって算出した降伏点速度および塑性変形量の推定精度をまとめたものを図 3-7 に示す。それぞれ、横軸を提案方法にによって算出した推定値、縦軸を解析結果から得られた実測値とし、実測値に対する推定値の絶対誤差の平均値および変動係数を併せて示す。図 3-7 の右図は第 3.5.3 項において提案した離散解析上のずれを考慮して修正して算出した場合である。塑性変形が生じた回数は、二次剛性比  $\gamma=0$  で 19 回、 $\gamma=0.2$  で 22 回となっており、塑性化回数はほぼ同じである。

図 3-7 の左図より、二次剛性比の大きさによらず、離散解析によるずれの影響を考慮しない場合には、降伏点速度の推定値が過小評価となっているため、塑性変形量も大きく過小評価となっている。絶対誤差の平均値および変動係数は、降伏点速度に比べて塑性変形量の方がより精度が悪い。これは、推定した降伏点速度から、数値積分法を用いて塑性変形中の相対速度を算出し、速度の反転が生じた時点の相対変位を塑性変形量としているため、降伏点速度が過小評価されると、実際よりも早い時点で相対速度が反転することが原因である。二次剛性比  $\gamma$  によらず、降伏点速度がおよそ 3 割も過小評価となるのは、第 3.5.3 項で議論したように、離散時刻歴解析では降伏点を通過しない場合、snap の値を過小評価することが原因である。第 3.5.3 項で提案した方法によって、解析のずれを考慮し、降伏点速度を算出した場合では、図 3-7 の右図より、降伏点速度の推定精度が大幅に向上し、これによって塑性変形量も精度よく推定することが可能となった。降伏点速度の実測値と推定値に若干の誤差が生じるのは、実測値は中央差分による相対速度であるのに対し、推定値は前進差分による相対速度であることが要因として考えられる。

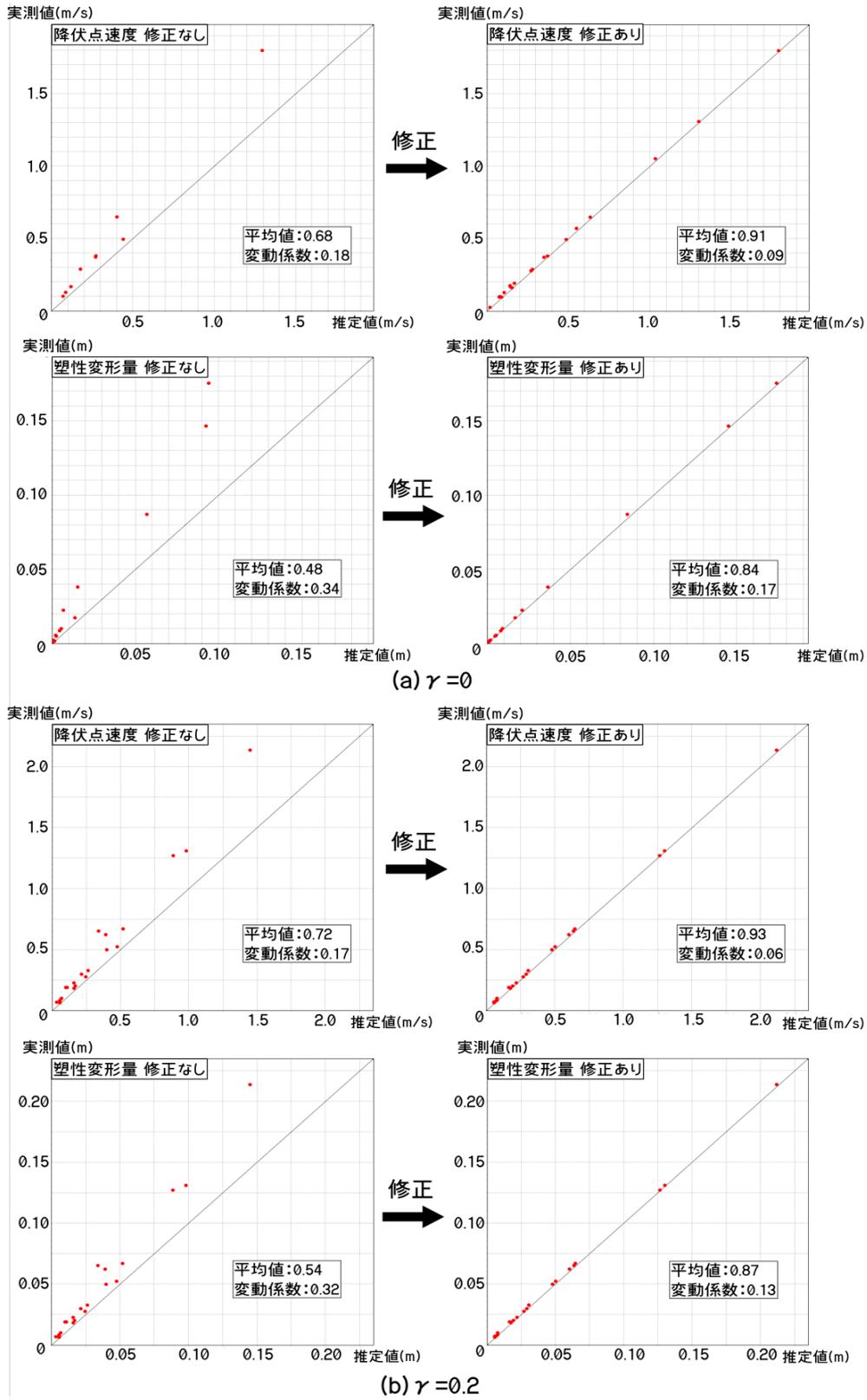


図 3-7 推定精度

#### 3.7 まとめ

本章では、第2章で定式化した質点系における絶対加速度の jerk および snap を用いた損傷評価手法を提案した。提案した損傷評価手法は、振動系の剛性変化に起因する履歴復元力の非線形性を検出する方法、剛性低下を評価する方法、降伏後の塑性変形量を推定する方法の3つである。非線形性検出方法、および非線形性検出後の塑性変形量の推定方法の適用性を検討するため、数値応答解析を行った。バイリニア型復元力特性を有する1質点系において、地震応答解析を行い、解析結果を用いて検討した。

非線形性検出方法では、振動系が弾性振動している場合の snap の上限値と下限値を定め、それを非線形性検出の閾値として設定した。バイリニア型復元力特性を有する振動系における地震応答解析を行い、解析によって得られた絶対加速度応答時刻歴波形から snap 時刻歴波形を算出した。snap の値と設定した閾値とを比較することで、振動系の非線形性を検出することが可能であることを示した。

さらに、降伏点における相対速度を算出することで、降伏後の塑性変形量を推定する手法を提案した。提案手法は、jerk または snap から降伏点速度を算出し、降伏点以降の相対速度および相対変位を相対加速度の数値積分によって求め、相対速度が反転する時点の相対変位を塑性変形量として推定する方法である。地震応答解析結果を用いて、提案手法によって推定した塑性変形量の推定精度を検討した。推定精度は5割程度であるものの、数値解析上のずれを是正することで、推定精度の平均値が9割程度となり、変動係数も10~20%と、十分な精度で推定できることを示した。

#### 3.8 参考文献

- [3-1]Newmark N.M. : A Method of Computation for Structural Dynamics , Proc. ASCE, Vol.85, No.EM3, pp.67-94, 1959.7.
- [3-2]柴田明德：最新耐震構造解析<第2版>，森北出版株式会社，2003.5.
- [3-3]国土交通省 気象庁ホームページ： <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>，アクセス日時 2014/09/18 16:19.

## 第4章 ノイズの影響とその対処方法

### 4.1 はじめに

一般的に、加速度センサによって計測される加速度応答記録はデジタルデータとして収録される。この際、計測記録には本来の信号とは無関係である信号、いわゆる雑音やノイズが含まれる。このようなノイズが計測記録に含まれる場合、計測記録に何かしらの演算処理を行うことで、ノイズを除去し、本来の信号のみを抽出する必要性が生じる。

第3章述べたように、本研究で提案している損傷評価手法では、加速度応答記録を高次微分することによって得られる物理量を用いている。ノイズが含まれた計測記録をそのまま微分処理してしまうと、算出される波形はノイズの影響を受け、本来得られるはずの波形とは異なる波形が得られることになる。特に、微分操作では高周波ノイズの影響を強く受けることになる。そのため、振動計測によって得られた加速度応答記録を微分することによって算出する jerk および snap は、ノイズの影響によって正しい波形を得ることができず、第3章で提案した損傷評価手法の適用が困難になることが予想される。

そこで、本章では加速度応答記録にノイズが含まれる場合に、ノイズが snap に与える影響を検討し、その対処方法を提案する。第3章で提案した閾値によって、非線形性検出が行えるようにノイズの影響を低減する方法を検討する。また、デジタルデータにおける微分は差分方程式によって算出するため、差分方程式の周波数応答について整理する。

### 4.2 ノイズの影響

ここでは、デジタルデータの微分および積分を差分方程式によって算出する際に、各操作によって得られる出力データの周波数応答について検討する。この結果を踏まえて、計測記録に含まれるノイズが snap に与える影響について検証する。

### 4.2.1 差分方程式の周波数応答

線形差分方程式から、それぞれの周波数応答を求め、各操作が出力の周波数に与える影響を検証する。第2章では、離散時刻歴データにおいて、加速度記録を数値微分する際の近似式を差分方程式によって算出した。これは、入出力関係が線形差分方程式で表されるシステムによって考えることができる（図4-1）。このように、入出力関係が線形差分方程式で表されるシステムはデジタルフィルタと呼ばれる。ここでは、微分および積分のデジタルフィルタの周波数応答について整理する。

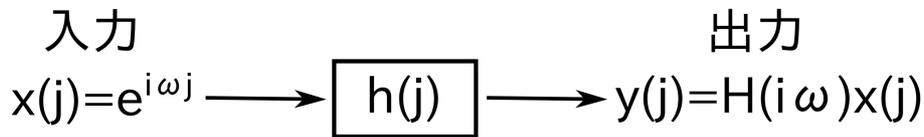


図4-1 周波数応答

離散時刻歴データにおいて、第 $j$ ステップにおける入力を $x_j$ 、時間刻みを $\Delta t$ とすると、第2章より、後退差分による1階微分の出力 $y_j$ は、

$$y_j = \frac{1}{\Delta t} (x_j - x_{j-1}) \quad (4-1)$$

となる。ここで、 $x_j = e^{i\omega j \Delta t}$  とすると、(4-1)式は、

$$\begin{aligned}
 y_j &= \frac{1}{\Delta t} \{ e^{i\omega j \Delta t} - e^{-i\omega(j-1)\Delta t} \} \\
 &= \frac{1}{\Delta t} (1 - e^{-i\omega \Delta t}) e^{i\omega j \Delta t} \\
 &= \frac{1}{\Delta t} (1 - e^{-i\omega \Delta t}) x_j
 \end{aligned} \quad (4-2)$$

となる。このとき、1階微分の周波数応答 $H(i\omega)$ は、

$$H(i\omega) = \frac{1}{\Delta t} (1 - e^{-i\omega \Delta t}) \quad (4-3)$$

となる。ここで、 $e^{-i\omega \Delta t} = \cos \omega \Delta t - i \sin \omega \Delta t$  とすると、(4-3)式は、

$$H(i\omega) = \frac{1 - \cos \omega \Delta t - i \sin \omega \Delta t}{\Delta t} \quad (4-4)$$

となることから振幅特性 $|H(i\omega)|$ は、

$$|H(i\omega)| = \frac{\sqrt{2-2\cos\omega\Delta t}}{\Delta t} \quad (4-5)$$

となる。

同様に、中央差分による2階微分の差分方程式は、

$$y_j = \frac{1}{\Delta t^2} (x_{j+1} - 2x_j + x_{j-1}) \quad (4-6)$$

となるから、 $x_j = e^{i\omega j\Delta t}$  とすると、(4-6)式は、

$$y_j = \frac{1}{\Delta t^2} \{e^{i\omega(j+1)\Delta t} - 2e^{i\omega j\Delta t} + e^{i\omega(j-1)\Delta t}\} \quad (4-7)$$

となる。(4-7)式は、

$$\begin{aligned} y_j &= \frac{1}{\Delta t^2} \{e^{i\omega(j+1)\Delta t} - 2e^{i\omega j\Delta t} + e^{i\omega(j-1)\Delta t}\} \\ &= \frac{1}{\Delta t^2} \{e^{i\omega\Delta t} - 2 + e^{-i\omega\Delta t}\} e^{i\omega j\Delta t} \\ &= \frac{1}{\Delta t^2} \left( e^{\frac{i\omega\Delta t}{2}} - e^{-\frac{i\omega\Delta t}{2}} \right)^2 x_j \end{aligned} \quad (4-8)$$

となり、このとき、2階微分の周波数応答  $H(i\omega)$  は、

$$H(i\omega) = \frac{1}{\Delta t^2} \left( e^{\frac{i\omega\Delta t}{2}} - e^{-\frac{i\omega\Delta t}{2}} \right)^2 \quad (4-9)$$

となる。ここで、 $e^{i\omega\Delta t} = \cos\omega\Delta t + i\sin\omega\Delta t$  とすると、(4-9)式は、

$$H(i\omega) = \frac{2}{\Delta t^2} (\cos\omega\Delta t - 1) \quad (4-10)$$

となることから、振幅特性  $|H(i\omega)|$  は、

$$|H(i\omega)| = 2 \frac{|1 - \cos\omega\Delta t|}{\Delta t^2} \quad (4-11)$$

となる。

同様に考えて、台形積分の差分方程式は、

$$y_j = \frac{1}{2} (x_j + x_{j-1}) \Delta t + y_{j-1} \quad (4-12)$$

となるから、 $x_j = e^{i\omega j\Delta t}$  とすると、周波数応答  $H(i\omega)$  は、

$$H(i\omega) = -\frac{i \sin \omega \Delta t}{2(1 - \cos \omega \Delta t)} \quad (4-13)$$

となる。(4-13)式より、振幅特性  $|H(i\omega)|$  は、

$$|H(i\omega)| = \frac{1}{2} \left| \frac{\sin \omega \Delta t}{1 - \cos \omega \Delta t} \right| \quad (4-14)$$

となる。(4-5), (4-11), (4-14)式から、それぞれの振幅特性を図4-2にまとめて示す。横軸を  $\omega$ 、縦軸を  $|H(i\omega)|$  とし、 $\omega_n$  は Nyquist 周波数である。図4-2より、微分操作では、高周波数成分の応答が大きくなり、入力信号に含まれる高周波ノイズの影響を強く受けることになる。一方、積分操作では、低周波成分の応答が大きくなる。

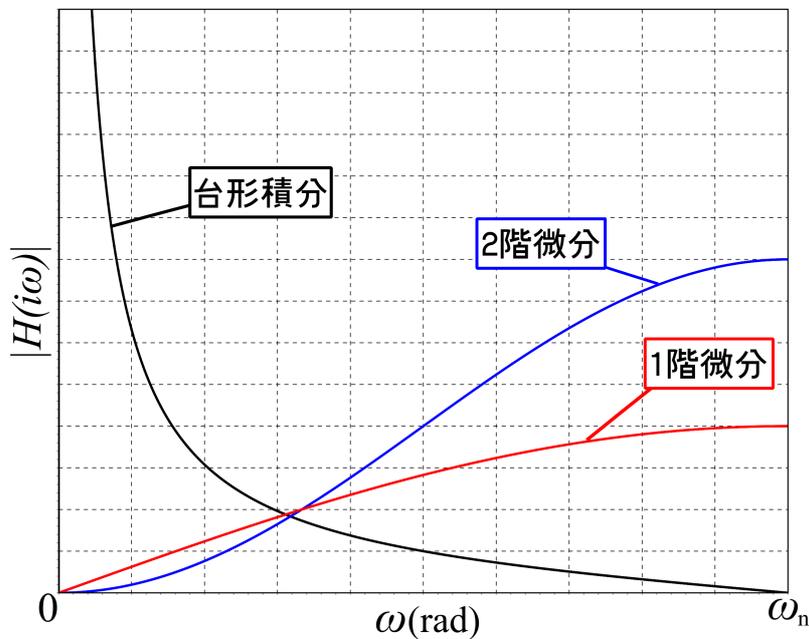


図4-2 振幅特性

#### 4.2.2 ノイズを含む場合の snap

絶対加速度  $a$  にノイズ  $N$  が含まれた場合の絶対加速度を  $a_N$  とすると、 $a_N$  は、

$$a_N = a + N \quad (4-15)$$

と表され、この2階微分  $\ddot{a}_N$  は、

$$\ddot{a}_N = \ddot{a} + \ddot{N} \quad (4-16)$$

となる。(2-8)式より、(4-16)式は、

$$\ddot{a}_N = -\frac{1}{m} \{k'(x)\dot{x}^2 + k(x)\ddot{x}\} + \ddot{N} \quad (4-17)$$

と表される。すなわち、ノイズが含まれる加速度記録を微分した場合には、snap の値にノイズの2階微分が足し合わされることになる。

#### 4.2.3 ノイズの2階微分

前4.2.2項で示したように、計測される加速度記録にノイズが含まれる場合、snap の値にはノイズの2階微分が含まれることになる。ここでは、離散データとして計測される加速度記録に含まれるノイズの2階微分について検討する。

計測される加速度記録は離散データとして計測されることから、離散時刻歴記録において、第  $i$  ステップにおけるノイズの値を  $N_i$  とすると、ノイズの2階微分  $\ddot{N}_i$  は、

$$\ddot{N}_i = \frac{1}{\Delta t^2} (N_{i+1} - 2N_i + N_{i-1}) \quad (4-18)$$

となり、計測時間刻み  $\Delta t$  の2乗に反比例する。ここで、ノイズの最大値を  $N_{\max}$  とすると、(4-18)式より  $\ddot{N}_i$  は、

$$|\ddot{N}_i| \leq \frac{4}{\Delta t^2} N_{\max} \quad (4-19)$$

となる範囲を取るようになる。

#### 4.2.4 非線形性検出のための $N_{\max}$ の条件

第3.2, 3.3節において、振動系の非線形性検出方法を提案した。この方法は、非線形性検出のための閾値を設定し、その閾値と snap の値を比較することで、snap の値が閾値を

超えていれば振動系に非線形性が生じたと判定する方法である。前4.2.2項で議論したように、計測記録にノイズが含まれる場合には、snapの値にノイズの2階微分が足し合わされることになる。ノイズの2階微分量が閾値よりも大きくなる場合には、振動系が弾性状態であるにもかかわらず、snapの値が閾値を超えてしまうことが予想される。少なくとも、設定した閾値よりも $|\ddot{N}_i|$ の最大値が小さくなる必要がある。そこで、第3章で提案した非線形性検出方法に使用する閾値が、 $|\ddot{N}_i|$ の最大値よりも小さくなるためのノイズの最大値 $N_{\max}$ の条件を考える。

第3章3.2.3項3.2.3.1で提案した、幅が一定である閾値を用いる。第3章(3-18)式より、閾値の最大値は $\omega_0^2 \frac{Q_y}{m}$ であるから、(4-19)式より、

$$\frac{4}{\Delta t^2} N_{\max} \leq \omega_0^2 \frac{Q_y}{m} \quad (4-20)$$

となる必要がある。これを $N_{\max}$ について解くと、

$$N_{\max} \leq \frac{\omega_0^2}{4} \frac{Q_y}{m} \Delta t^2 \quad (4-21)$$

となる。提案した閾値によって非線形性を検出するためには、 $N_{\max}$ の値は(4-21)式の範囲を満たす必要がある。(4-21)式から、計測時間刻み $\Delta t$ を小さくすると、 $N_{\max}$ も小さくする必要が生じ、計測器のノイズに対する要求性能が高くなるといえる。

ここで、第2章より、離散データにおけるsnapは以下の式で表される。

$$\ddot{a}_i = -\frac{b k}{m \Delta t} \left( \frac{r k - b k}{b k} r \dot{x}_i + c \ddot{x}_i \Delta t \right) \quad (4-22)$$

(4-21)式から、計測時間刻み $\Delta t$ を大きくすると、計測器のノイズに対する要求性能を下げることができる。しかし、(4-22)式より、snapの値は $\Delta t$ に反比例することから、 $\Delta t$ を大きくすることによって、snapの値は小さくなってしまい、検出精度が悪化する可能性がある。

### 4.3 ノイズへの対処方法

ここでは、前4.2節で検討したノイズがsnapに与える影響をもとに、ノイズへの対処方法を提案する。さらに、提案したノイズ対処方法の有用性を、数値応答解析によって検討する。数値応答解析では、地震応答解析によって得られる加速度応答記録に、ホワイトノイズを加えることで、ノイズを含む加速度応答記録を作成する。作成したノイズを含む加速度応答記録を用いて、提案するノイズ対処方法の有用性を検討する。

#### 4.3.1 計測時間刻みによるノイズへの対処

第4.2.4項では、第3.2.3項3.2.3.1で提案した閾値を使用するための $N_{\max}$ の条件を求めたが、 $N_{\max}$ は計測センサ等に固有の値であり、(4-21)式を満たすように変更することは困難だと考えられる。そこで、 $N_{\max}$ がある決まった値を取るとして、計測時間刻み $\Delta t$ を変更することで、ノイズの影響を低減し、提案した閾値によって非線形性検出を行えるようにすることを考える。

(4-21)式を $\Delta t$ について解くと、

$$\frac{2}{\omega_0} \sqrt{N_{\max} \frac{m}{Q_y}} \leq \Delta t \quad (4-23)$$

となる。すなわち、提案した閾値を使用するためには、ノイズの最大値 $N_{\max}$ に応じて、計測時間刻み $\Delta t$ が(4-23)式を満たすように変更する必要がある。計測時間刻みが(4-23)式よりも小さい値であった場合には、計測記録をダウンサンプリング処理することで、ノイズの影響を軽減し、提案した閾値を使用することが可能になると考えられる。(4-23)式ではダウンサンプリングする時間刻みの下限値を設定しているのみで、上限値は不明である。前述したように、snapの値は計測時間刻みに反比例するため、計測時間刻みを大きくするとsnapの値も小さくなり、検出精度が悪化する恐れがある。そのため、どこまでも大きくしてもよいわけではなく、上限値を設定する必要がある。ただし、ノイズの2階微分は計測時間刻みの2乗に反比例するのに対し、snapは計測時間刻みに反比例するため、ノイズの低減と比較して、snapの低減は小さいと考えられる。

ここで、振動系の固有周期を  $T$  とすると、 $\omega_0 = (2\pi)/T$  であるから、(4-23)式よりその下限値  $\Delta t_{\min}$  は、

$$\Delta t_{\min} = \frac{1}{\pi} \sqrt{N_{\max} \frac{m}{Q_y}} T \quad (4-24)$$

となり、 $\Delta t_{\min}$  は  $\frac{1}{\pi} \sqrt{N_{\max} \frac{m}{Q_y}}$  を係数とした固有周期  $T$  の実数倍として表される。そこで、ダウンサンプリングする際の時間刻みの上限値を  $\Delta t_{\max}$  とし、 $\Delta t_{\max}$  を  $\Delta t_{\min}$  と同様に、固有周期  $T$  の実数倍とし、以下の式で表すことにする。

$$\Delta t_{\max} = DT \quad (4-25)$$

ここで、ダウンサンプリングに使用する時間刻みを  $\Delta t_d$  とすると、(4-24)、(4-25)式よりその範囲は、

$$\frac{1}{\pi} \sqrt{N_{\max} \frac{m}{Q_y}} T \leq \Delta t_d \leq DT \quad (4-26)$$

として得られる。(4-26)式より、 $\Delta t_d$  は固有周期の実数倍によって下限値および上限値を決定することになるため、振動系が振動する際の1サイクル中に解析ステップを何個取るかというように考えられる。1/4サイクル中に少なくとも2個の解析ステップを取れば、線形か否かの判断が可能だと考え、上限値を決定する  $D$  については、 $D \leq 1/8$  を目安として考えることにした。以上より、 $\Delta t_d$  の範囲は、

$$\frac{1}{\pi} \sqrt{N_{\max} \frac{m}{Q_y}} T \leq \Delta t_d \leq \frac{T}{8} \quad (4-27)$$

となる。このとき、

$$\text{下限値: } \Delta t_{\min} = \frac{1}{\pi} \sqrt{N_{\max} \frac{m}{Q_y}} T, \quad \text{上限値: } \Delta t_{\max} = \frac{T}{8} \quad (4-28)$$

である。上限値を定める  $D$  の範囲を  $D \leq 1/8$  としたが、対象とする構造物や入力される地震動によっては必ずしも適切とはならず、使用者の判断で修正する必要があるものと考えられる。

### 4.3.2 ダウンサンプリング処理による時刻歴波形の算出

エイリアシングの影響を防ぐため、加速度応答時刻歴波形に  $1/(2\Delta t_d)$  を遮断周波数とするローパスフィルタをかけたのち、時間刻みが  $\Delta t_d$  となるよう  $(\Delta t_d/\Delta t)-1$  個ごとにデータを間引くことでダウンサンプリング処理を行う。このとき、データを間引き始める時間ステップは  $\Delta t_d/\Delta t$  個考えられることから、ダウンサンプリング処理後の加速度応答時刻歴波形が  $\Delta t_d/\Delta t$  個得られる。得られた波形ごとに数値微分を行い、jerk および snap の時刻歴波形を算出する。算出した  $\Delta t_d/\Delta t$  個の jerk および snap の時刻歴波形を全て重ね合わせることで、全ての時間ステップにおける jerk および snap の時刻歴波形が得られることになる（図 4-3）。このように、加速度応答記録をダウンサンプリングした後に微分することで、jerk および snap 時刻歴波形を算出する方法をノイズ低減処理とする。

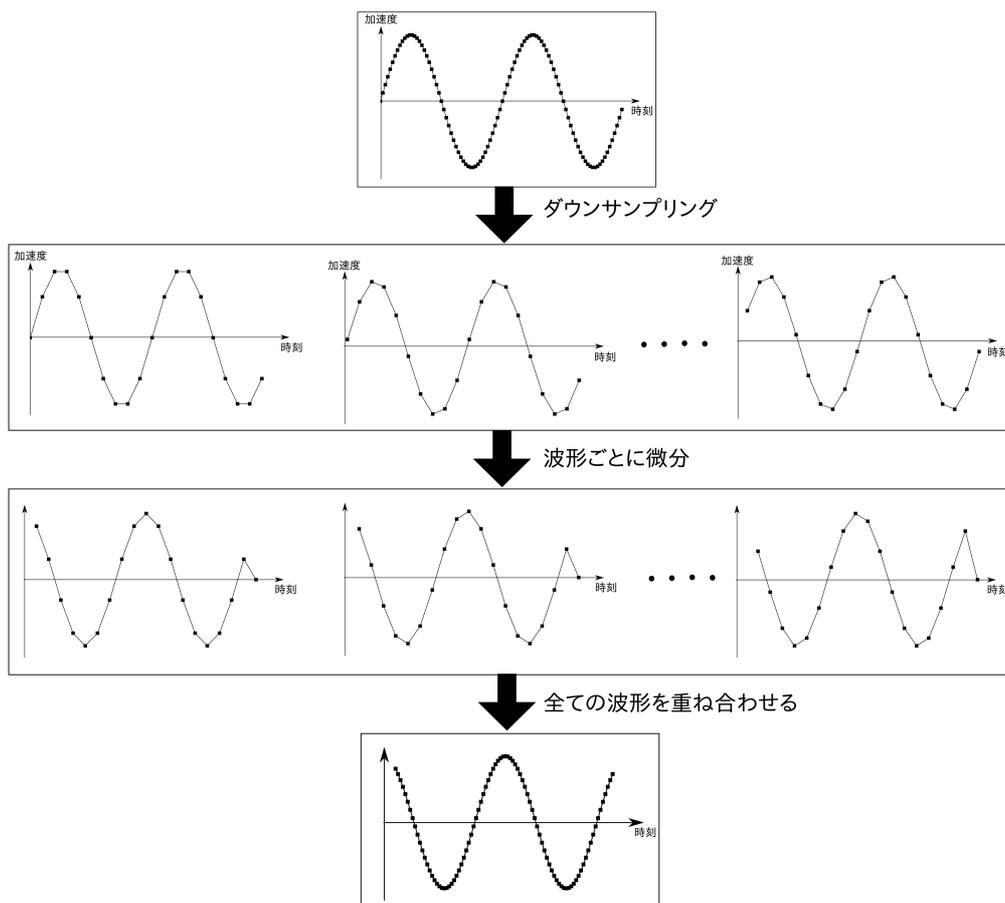


図 4-3 ダウンサンプリング処理による時刻歴波形の算出

提案したノイズへの対処方法では、遮断周波数である  $1/(2\Delta t_d)$  Hz 以下の周波数領域のみに着目し、遮断周波数よりも高周波となる成分を無視することになる。すなわち、加速度応答記録の周波数領域において、ノイズとして無視する周波数領域の上限値を決定しているといえる。そのため、遮断周波数よりも高周波数の領域に有益な情報がある場合には、それを無視することになる。ノイズの大きさによっては、 $\Delta t_d$  が大きくなり過ぎると、遮断周波数が小さくなり、有益な周波数成分が失われる場合が考えられる。

一方で、現在の振動計測で使用されている加速度センサのサンプリング周波数はおよそ 50~1000Hz 程度であるが、構造物の固有振動数はそれほど大きくはなく、高周波領域には影響が少ないとも考えられる。今回は、 $\Delta t_d$  の上限値を振動系の固有周期に対する実数倍として決定しているが、検出対象とする構造物の損傷、すなわち非線形挙動ごとに、 $\Delta t_d$  の上限値を決定する必要があるとも考えられる。これについては、より多くの実測結果を構造部材や構造物ごとに蓄積し、検討を行う必要があるものと考えられる。

一方で、高サンプリングでの振動計測は、本来着目すべき周波数領域に比べて無関係なノイズの領域が大きいともいえる。すなわち、ダウンサンプリング処理によって、有益な周波数領域を無視することになる一方で、相対的にノイズの影響が大きい周波数領域の割合を減らしているともいえる。このことは、上述したように、検出対象とする構造物の非線形挙動ごとに、着目すべき周波数成分が異なるとする場合に、どの範囲の周波数成分が重要であるか、という問題と関連することになる。

### 4.3.3 応答解析モデル

応答解析に使用する振動系モデルは、弾塑性 1 質点系とし、復元力特性は完全弾塑性型とする。振動系の固有周期  $T=1.0$  秒、減衰定数は 0%とする。降伏耐力については、一回の解析中で複数回の降伏を観察するため、弾性時の最大復元力  $Q_e$  をもとに、 $Q_y=0.3Q_e$  とした。入力する地動加速度は、兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録 NS 成分とする[4-1]。応答解析する際の時間刻み  $\Delta t$  は  $\Delta t=0.01$  秒とした。地動加速度の時間刻みは 0.02 秒であるから、地動加速度記録の無い時刻における加速度については、時刻前後の記録から内挿により算出した。絶対加速度応答記録に加えるホワイトノイズは、絶対加速度応答の最大値の 2%をノイズの最大値として、乱数を発生させることで作成する。

### 4.3.4 ノイズ低減効果の検証

応答解析によって得られた絶対加速度応答時刻歴波形の最大値から、ノイズの最大値  $N_{\max}$  を  $N_{\max}=0.168$  ( $\text{m/s}^2$ )と算出した。絶対加速度応答波形に  $N_{\max}$  を最大値として作成したホワイトノイズを加え、ノイズを含む絶対加速度応答時刻歴波形を作成した。作成した波形から、第 4.3.2 項で提案した方法によって snap 時刻歴波形を算出する。(4-28)式から  $\Delta t_{\min}=0.05$  秒と算出した。提案手法によって snap 時刻歴波形を算出する際のダウンサンプリングに使用する時間刻み  $\Delta t_d$  は、 $\Delta t_{\min}$  と同様に、 $\Delta t_d=0.05$  秒とした。 $\Delta t_d$  は固有周期の 1/20 であり、(4-27)式の範囲内に収まっている。 $\Delta t=0.01$  秒であるから、4 ステップごとにダウンサンプリング処理を行った。

図 4-4(a)には、ノイズ対処方法を用いずに算出した snap 時刻歴波形、図 4-4(b)にはノイズ対処方法によって算出した snap 時刻歴波形、図 4-4(c)にはノイズを含まない加速度波形から算出した snap 時刻歴波形を示す。横軸を時刻、縦軸を snap、(3-15)式によって算出した閾値を赤線でそれぞれ示す。

図 4-4(a)より、ノイズが含まれた加速度波形からそのまま snap 波形を算出した場合には、ノイズの影響により、振動系の状態によらず snap の値が閾値を超えてしまっている。ノイズの2階微分の最大値  $\ddot{N}_{\max}$  を(4-19)式から算出すると、およそ  $\ddot{N}_{\max}=6700$  (m/s<sup>2</sup>)であった。snap の最大値が  $\ddot{N}_{\max}$  の9割程度であることから、ノイズの2階微分の範囲はおよそ想定内であったといえる。一方、図 4-4(b)より、提案したノイズ対処方法によって算出した snap 波形は、ノイズの影響を低減し、設定した閾値によって snap のピークを検出することが可能となった。図 4-4(c)に示したノイズを含まない場合の snap 波形と比較しても、ピーク位置はほぼ同じ時点で生じており、同様の波形状となっていることがわかる。しかし、ダウンサンプリングによって時間刻みを大きくしているため、snap の値は小さくなっている。そのため、青色で囲んだ領域のように、もともとの snap の値が小さく、閾値をわずかに超えているような時点を、提案方法によって算出した snap 波形では閾値によって非線形か否かを判断することが困難となる。一方、提案方法によってある程度はノイズの影響を低減できることを示せたが、完全にノイズの影響を消すことができるわけではなく、振動系が線形にもかかわらず閾値を超えてしまっている時点が観察された。このような誤検出を含む検出精度については、次節において検討する。

提案方法によって snap 時刻歴波形を算出した場合の影響として、荷重-変形関係における非線形回数の増加が挙げられる。第3章において、数値応答解析では、降伏点を通過せず、解析ステップがずれることで、1度の降伏に対して、非線形となる時間ステップが2点生じることを示した。提案したノイズ低減処理では、ダウンサンプリングを開始する時間ステップが  $\Delta t_d/\Delta t$  個あり、ダウンサンプリングした  $\Delta t_d/\Delta t$  の加速度波形をそれぞれ微分し、 $\Delta t_d/\Delta t$  個の snap 波形を重ね合わせることで全時間ステップにおける snap 時刻歴波形を算出している。そのため、1度の降伏点において、 $\Delta t_d/\Delta t$  個の snap 波形はそれぞれで閾値を超える時点が生じるため、閾値を超えている時間ステップの数が増えることになる。このことを検証するため、図 4-4(b)において、灰色で網掛けした時間領域(8.1~8.6秒)の解析ステップのみとした、荷重-変形関係と snap 時刻歴波形を図 4-5 に示す。

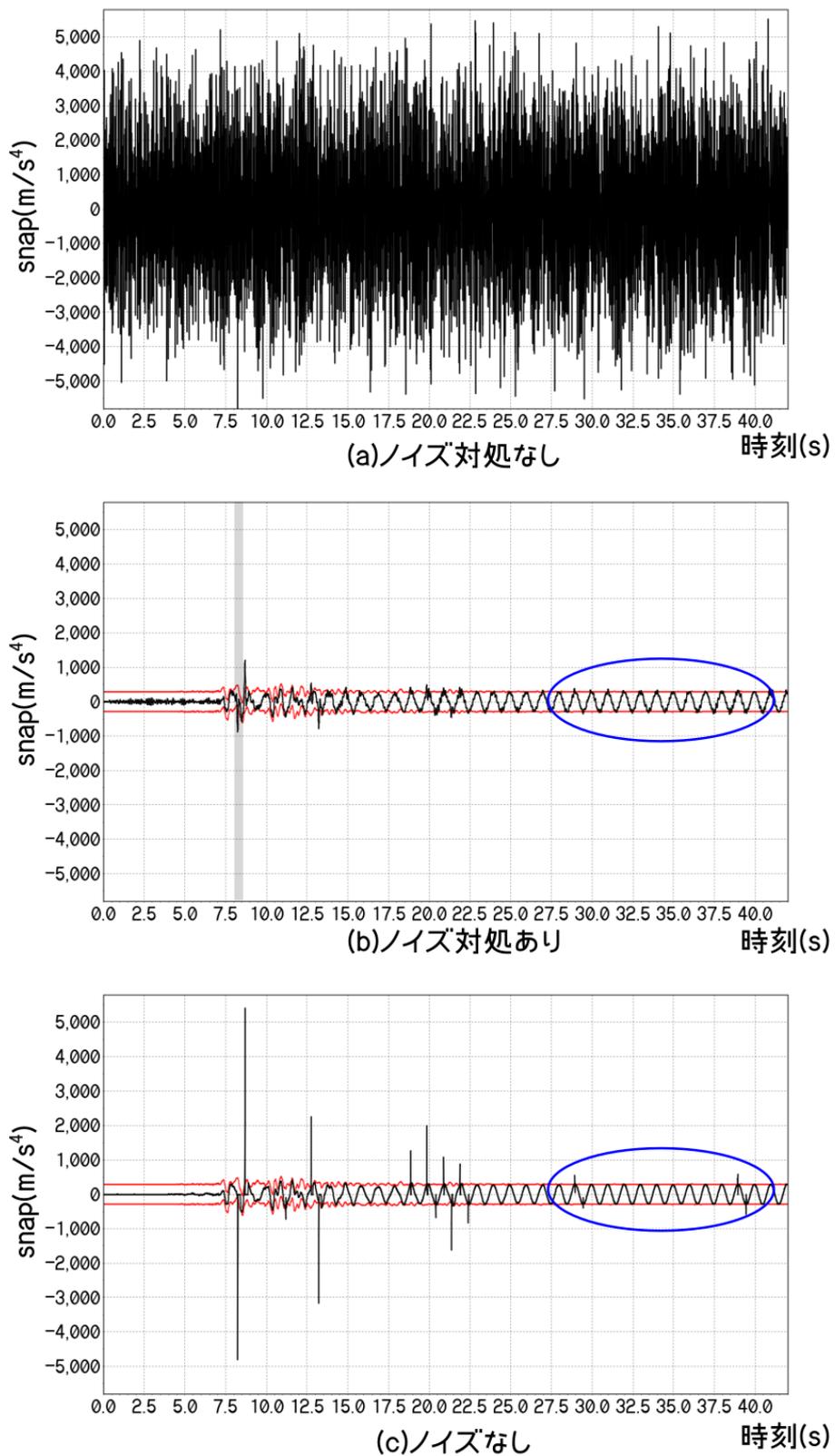


図 4-4 解析結果

荷重-変形関係は、横軸を降伏変位で基準した相対変位、縦軸を降伏耐力で基準化した復元力とする。

図4-5では、今回は重ね合わせた波形が5つあり、波形ごとに5種類に色分けしてある。5つの波形ごとに1度の降伏点において、非線形となるステップが2点生じているため、閾値を超えている時間が長くなっていることがわかる。計測時間刻みを大きくすると、snapの値が小さくなり、1度の降伏点に対して、閾値を超えている時間ステップが増え、snap波形が広がりをもつようになる。すなわち、本来では、荷重-変形関係の降伏点における剛性急変を検出目標としているが、ダウンサンプリングを行うことで、剛性が滑らかに変化する荷重-変形関係の非線形性を検出していることになる。ノイズなしと比較すると、snap時刻歴波形は降伏点付近で波形が鈍くなることになるが、非線形となる時点を検出することは可能であることがわかった。

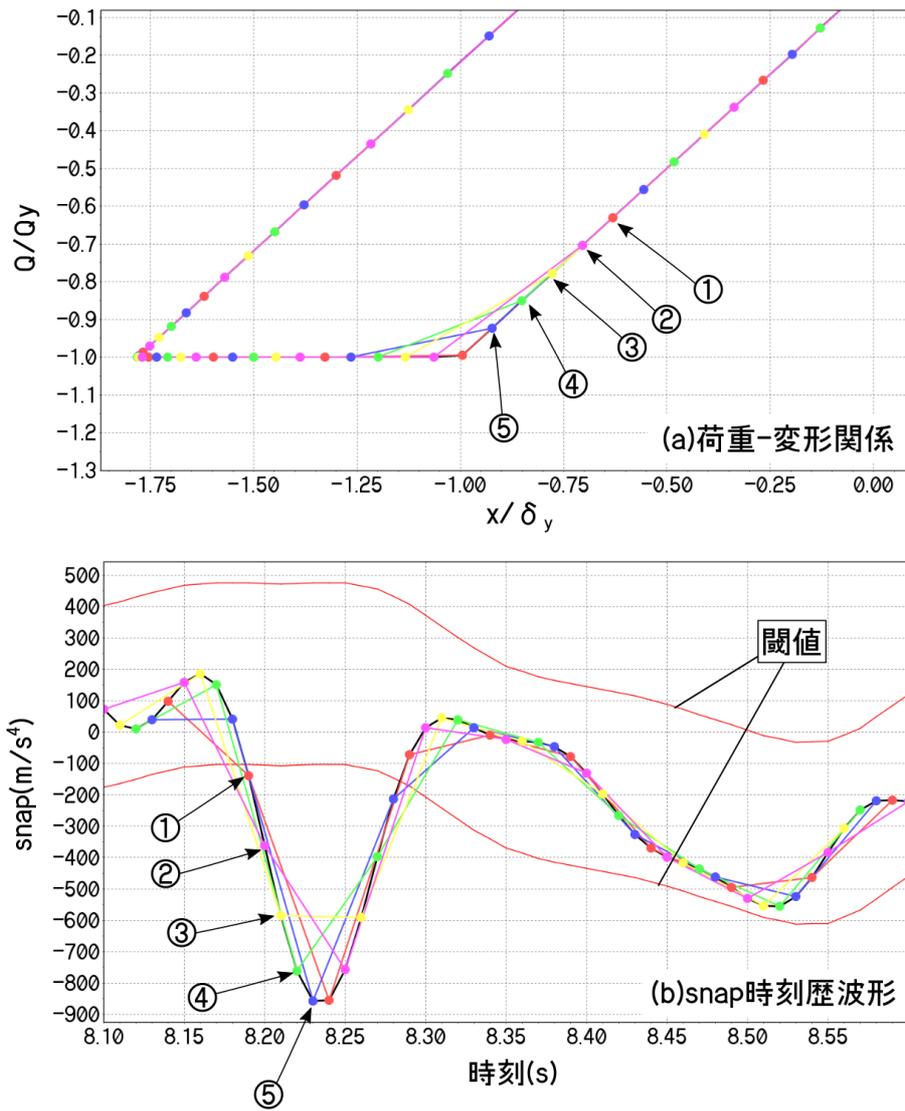


図 4-5 ダウンサンプリングによる snap 波形への影響

## 4.4 非線形性の検出精度に与える影響

第4.3.4項で検証したように、提案したダウンサンプリングを用いたノイズ低減処理では、設定した閾値による非線形性検出を可能にする一方、もともとの  $\text{snap}$  の値が小さい場合には、設定した閾値による非線形性検出が困難になる場合があることがわかった。これより、ノイズ低減処理において、ダウンサンプリングに使用する時間刻み  $\Delta t_d$  の値が非線形性の検出精度に影響を与えるものと考えられる。そこで、本節ではダウンサンプリング時の時間刻み  $\Delta t_d$  をパラメータとして、(4-26)式の範囲内外の時間刻みによってノイズ低減処理を行い、 $\Delta t_d$  が検出精度に与える影響を検討する。

### 4.4.1 検出精度の評価指標

検出精度の評価指標とその定義を図4-6に示す。検出回数は  $\text{snap}$  のピーク値が閾値を超えた回数、非線形回数は実際に振動系の履歴復元力が非線形となった回数、正検出は  $\text{snap}$  によって振動系の非線形性を正しく検出できた回数である。Precision と Recall は基本的にはトレードオフの関係にあり、F-measure は Precision と Recall の調和平均である。

### 4.4.2 応答解析モデル

振動系モデルは弾塑性1質点系とし、復元力特性は完全弾塑性型とする。振動系の固有周期  $T$  は 0.5, 1.0, 2.0 秒の3種類とし、減衰定数は 0% とする。降伏耐力については、一回の解析で多くの降伏を観察するため、弾性時の最大復元力  $Q_e$  をもとに、 $Q_y = 0.2Q_e$  とした。

入力する地震動は、実地震動として兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録 NS 成分（以下、JMA 神戸 NS 成分）[4-1]と、模擬地震動1波の計2波とする。模擬地震動のスペクトルは金井・田治見スペクトル[4-2]に従うもので、卓越周期は 1.0 秒、スペクトル形状を定める係数  $hg$  は 0.6 とした。また、フーリエ位相差分布の標準偏差については、海洋型に分類されている  $0.50 \times \pi$  とした[4-3]。フーリエ位相差分布の標準偏差が  $0.50 \times \pi$  となるように正規乱数によりフーリエ位相を決め、上述したフーリエ振幅スペクトルとともに、

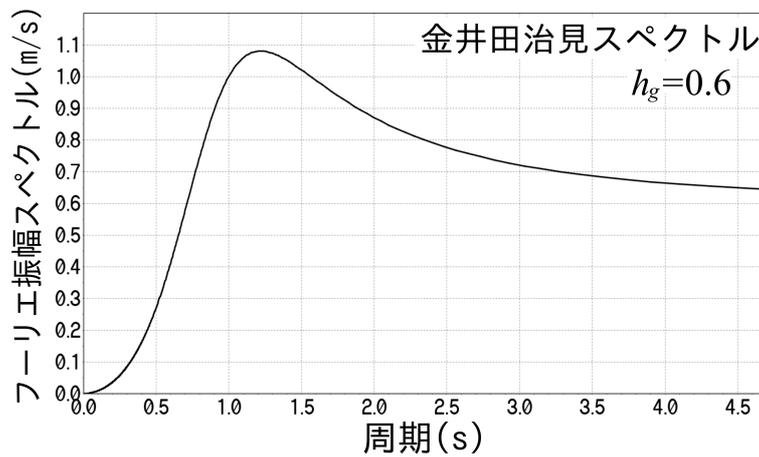
非線形性 閾値	○	×
超えた	a	b
超えてない	c	d

$$\text{Precision} = \frac{a}{a+b} = \frac{\text{正検出}}{\text{検出回数}}$$

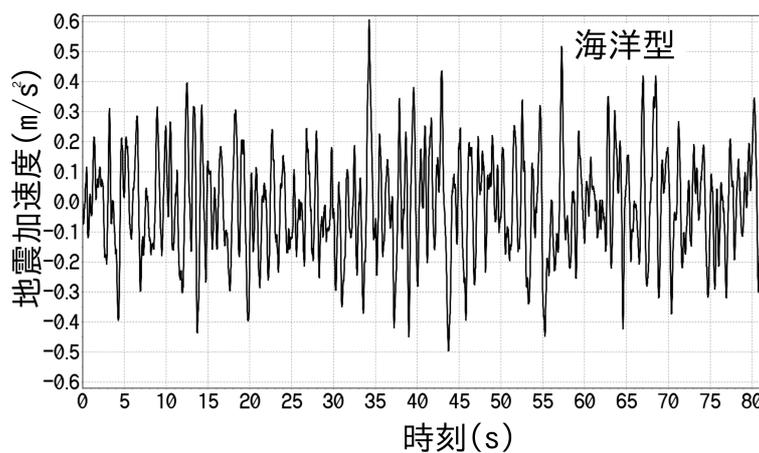
$$\text{Recall} = \frac{a}{a+c} = \frac{\text{正検出}}{\text{非線形回数}}$$

$$\text{F-measure} = 2 \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

図 4-6 検出精度の評価指標



(a)フーリエ振幅スペクトル



(b)模擬地震動加速度記録

図 4-7 模擬地震動特性

フーリエ逆変換することによって模擬地震動を作成した。時間刻みは0.02秒とし、データ長は4096個とした。したがって継続時間は81.92秒である。用いたフーリエ振幅スペクトル形状および作成した模擬地震動加速度記録を図4-7に示す。応答解析する際の時間刻み $\Delta t$ は $\Delta t=0.004$ 秒とした。地動加速度の時間刻みはどちらも0.02秒であるから、地動加速度記録の無い時刻における加速度については、時刻前後の記録から内挿により算出した。絶対加速度応答記録に加えるホワイトノイズは、絶対加速度応答の最大値の2%をノイズの最大値として、乱数を発生させることで作成した。

#### 4.4.3 検討するダウンサンプリング時の時間刻み

検討するダウンサンプリング時の時間刻み $\Delta t_d$ を図4-8に示す。 $\Delta t_{\min}$ と $\Delta t_{\max}$ の中央値を $\Delta t_c$ とし、(4-27)式で定義した範囲内を5分割した5つの時間刻みと、(4-27)式の範囲外の4点の時間刻み、計9つの時間刻みをパラメータとする。各時間刻みを用いて、第4.3.2項で提案した方法によって算出したsnap時刻歴波形ごとに、非線形性の検出精度を検討する。

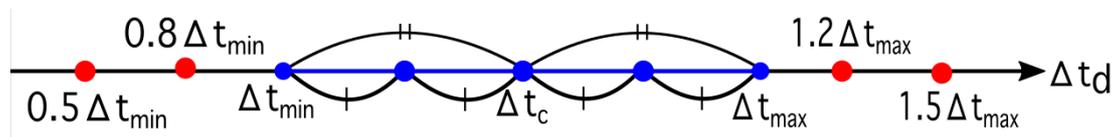


図4-8 検討する時間刻み $\Delta t_d$ の設定

#### 4.4.4 検出精度の検証

入力地震動ごとの検出精度を図 4-9, 4-10 にそれぞれ示す。縦軸を検出精度，横軸をダウンサンプリングに使用した時間刻み  $\Delta t_d$  とする。青い点線で囲まれた範囲の 5 つの時間刻みは，(4-27)式で提案した範囲内の時間刻みである。また，それぞれにおいて，塑性率 1.2 以上の場合の Recall と F-measure を再計算した場合の検出精度を併せて示す。

図 4-9, 4-10 より，固有周期や入力波によらず，時間刻みが小さい場合には，誤検出が増えるため Precision の値は小さく，時間刻みが大きくなるに従い精度が向上する。一方，Recall は検出感度の指標であるから，時間刻みが小さい場合には精度が高く，非線形性を見逃さずに検出することができている，しかし，時間刻みを大きくするに従い，見逃しが増えるため，精度が悪化している。このように，Precision と Recall は概ねトレードオフの関係になっているため，それらの調和平均である F-measure は，概ね範囲内の中央値付近で精度が良くなっている。

JMA 神戸 NS 成分の場合では，範囲内の中央値付近の時間刻みにおいては 80%程度の検出精度を得られている。しかし，振動系の固有周期が 2.0 秒である場合には，範囲内の最小値  $\Delta t_{\min}$  付近の時間刻みの方が検出精度が高い。入力地震動の卓越周期に対して，振動系の固有周期が長い場合には，時間刻みを大きくすることによる Precision の向上がみられなかったためである。一方で，模擬地震動においては，振動系の固有周期による検出精度の違いがそれほど観察されず，範囲内の中央値付近の時間刻みにおいては，80%以上の検出精度を得られている。模擬地震動は JMA 神戸 NS 成分に比べてスペクトル形状が滑らかであり，入力地震動の卓越周期と系の固有周期の差の影響が小さいためだと考えられる。

どちらの入力地震動においても，塑性率 1.2 以上である場合のみの Recall を算出した場合には，Recall の精度向上により，F-measure の精度も向上した。概ね 90%以上の検出精度を確保することができている。このことから，塑性率が小さい場合には，snap の値が小さく，検出が困難であるため精度が低い，検出に耐えられる塑性率を設定した場合には，十分な検出精度を保証できることになる。

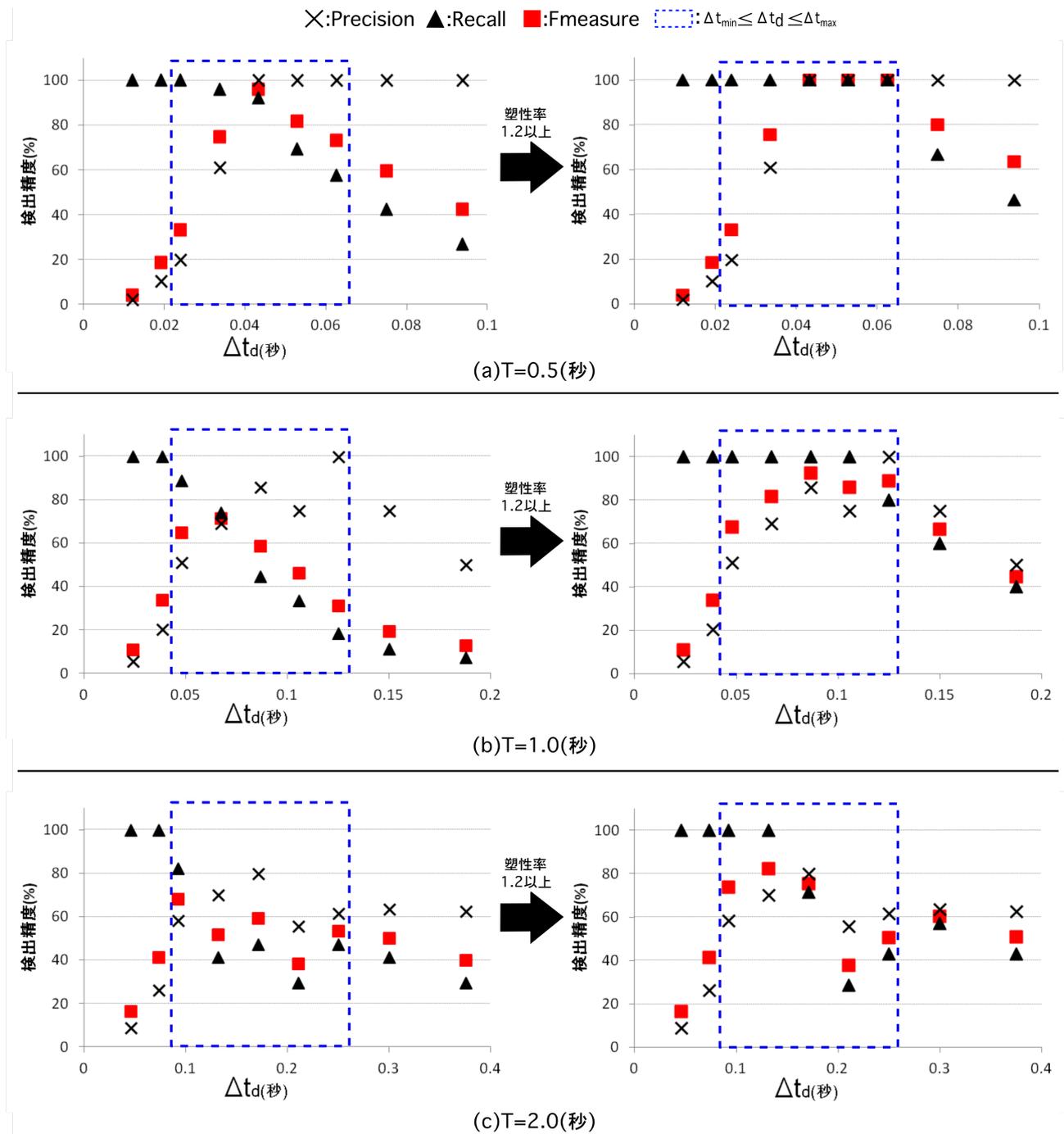


図 4-9 検出精度(JMA 神戸 NS 成分)

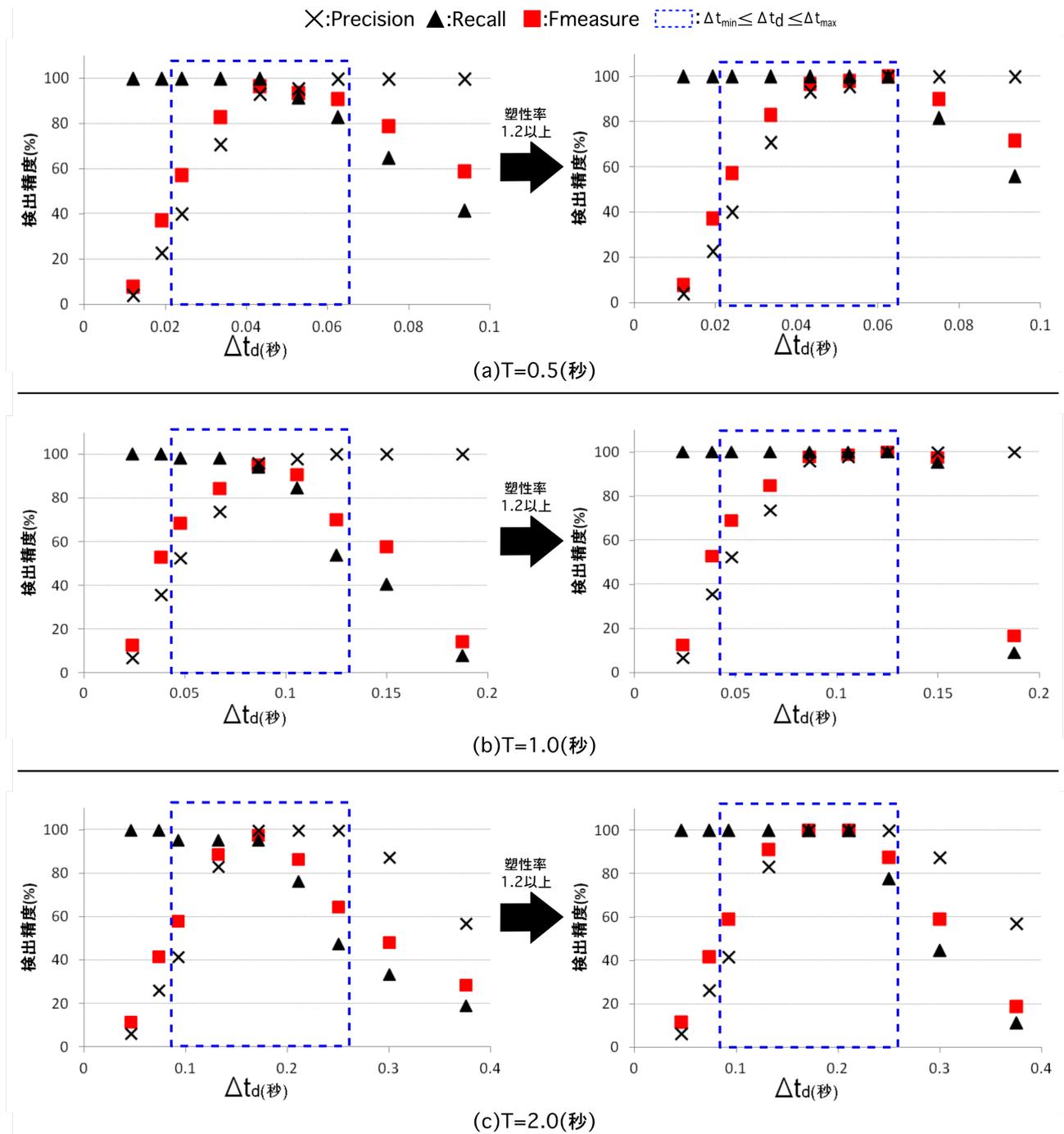


図 4-10 検出精度(模擬地震動)

### 4.5 まとめ

振動計測によって得られる加速度記録はデジタルデータとして収録され、計測記録にはノイズが含まれることになる。このようにノイズが含まれた計測記録をそのまま差分方程式によって微分操作を行うと、ノイズの影響によって正しい波形が得られない場合がある。

そこで、本章では、数値微分における差分方程式の周波数応答について整理することで、ノイズが `snap` に与える影響を検証し、ノイズへの対処方法を提案した。差分方程式の周波数応答が示すように、差分方程式によって数値微分を行う場合、高次微分になるほど高周波成分の振幅特性が大きくなる。振動計測によって得られる加速度記録にノイズが含まれる場合、加速度の2階微分である `snap` にはノイズの2階微分量が足し合わされることになる。

提案したノイズ対処方法は、ノイズの2階微分量を小さくするため、加速度応答記録にダウンサンプリング処理を行ってから、微分操作を行うというものである。この方法をノイズ低減処理と呼ぶ。ダウンサンプリングに使用する時間刻みは、第3章で提案した非線形性検出に使用する閾値と、計測記録に含まれるノイズの最大値によって算出される。完全弾塑性型復元力特性を有する1質点系モデルにおける地震応答解析を行い、解析結果を用いて提案したノイズ低減処理の有用性を検討した。

絶対加速度応答波形にノイズが含まれる場合でも、提案したノイズ低減処理によって算出した `snap` 時刻歴波形では、ノイズの影響を軽減し、設定した閾値によって `snap` のピークを検出することが可能となることを示した。しかし、本来の荷重-変形関係における剛性急変と比べて、剛性の変化が滑らかとなった荷重-変形関係における非線形性を検出していることがわかった。このことは、ダウンサンプリングによって `snap` の値が小さくなることとも対応している。

提案したダウンサンプリングに使用する時間刻みの範囲内外における時間刻みをパラメータとして、ダウンサンプリング時の時間刻みが非線形性の検出精度に与える影響を検

討した。その結果、範囲内の中央値付近の時間刻みであれば、概ね 80%程度の検出精度を得られる。しかし、入力地震動のスペクトル特性や、振動系の固有周期によっては範囲内の時間刻みによってダウンサンプリングを行ったとしても、十分な検出精度を得られないことがわかった。一方で、ある程度の塑性率を生じる場合を検出対象とした場合には、90%程度の検出精度が得られることを示せた。微分操作という高周波ノイズへの耐性が低い信号処理方法を用いているが、提案したノイズ低減処理を行うことによって、十分な精度で非線形性を検出することが可能になることを示した。

## 4.6 参考文献

- [4-1]国土交通省 気象庁ホームページ : <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, アクセス日時 2014/09/18 16:19.
- [4-2]Tajimi H:A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, pp.781-797, 1960.
- [4-3]岩田善裕, 桑村仁 : 鋼構造建築物の耐震性能評価における入力地震動の研究 その 2 代表的な記録地震動のスペクトル特性, 日本建築学会関東支部研究報告集 73(I), pp.133-136, 2003.2.



## 第5章 構造部材ごとの振動台実験結果への適用性

### 5.1 はじめに

第2章において、無減衰1質点系の運動方程式をもとに、絶対加速度の jerk および snap と荷重-変形関係における非線形挙動との物理的解釈を行った。第3章において、jerk および snap を用いた損傷評価手法を提案した。予め設定した閾値と snap を比較することによって、振動系の剛性急変を検出する方法、jerk と相対速度から接線剛性を算出し、剛性低下を評価する方法、jerk または snap から降伏点速度を算出し、塑性変形量を推定する方法である。弾塑性1質点系モデルにおける地震応答解析を行い、解析結果を用いて、提案手法の適用性を検討した。第4章においては、絶対加速度応答記録にノイズが含まれる場合に、ノイズが snap に与える影響について検証した。さらに、ノイズが含まれる場合であってもノイズの最大値に応じて、絶対加速度応答時刻歴波形にダウンサンプリング処理を行うことで、ノイズの影響を軽減し、設定した閾値による非線形性検出が可能となることを示した。

ここまでの検討では、数値解析結果による適用性についてのみしか扱っておらず、実際の構造要素や構造物による実測結果を用いた検討には至っていない。そこで、本章では、既往研究で行われた構造部材の振動台実験結果を用いて、第3章で提案した損傷評価手法の適用性を検討する。snap および jerk 波形を算出する際に問題となるノイズについては、第4章で提案した方法で対処する。

## 5.2 露出型柱脚

### 5.2.1 スリップ型復元力特性を有する振動系の snap

露出型柱脚においては、その復元力特性はスリップ型となることが知られている。ここでは、図 5-1 に示すようなスリップ型復元力特性（完全弾塑性型）を有する 1 質点系の挙動と snap の理論式について検討する。図 5-2 より、系の剛性が急変する瞬間として以下の 4 つが考えられる。

状態 A（降伏）：アンカーボルトまたはベースプレートが降伏する点

状態 B（除荷）：塑性領域から弾性領域へ移行する点

状態 C（スリップ開始）：スリップを開始する点

状態 D（スリップ終了）：スリップを終了し、剛性が復活する点

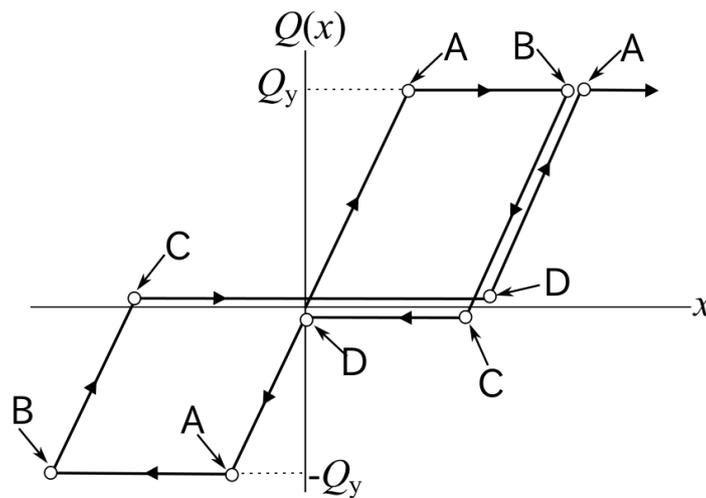


図 5-1 スリップ型復元力特性

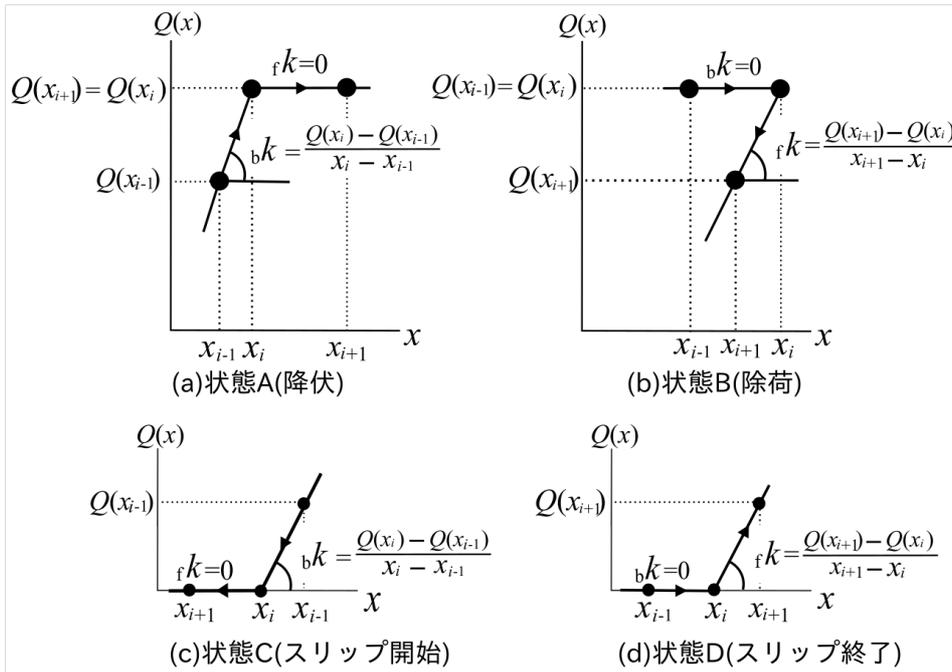


図 5-2 剛性が急変する状態

第 2 章より，離散時刻歴記録の第  $i$  ステップにおける絶対加速度  $a_i$  と復元力  $Q(x_i)$  の関係および snap  $\ddot{a}_i$  はそれぞれ以下の式で表される。

$$a_i = -\frac{1}{m} Q(x_i) \quad (5-1)$$

$$\ddot{a}_i = -\frac{b_k}{m \Delta t} \left( \frac{f_k - b_k}{b_k} f \dot{x}_i + c \ddot{x}_i \Delta t \right) \quad (5-2)$$

ここで，状態 A および状態 C では図 5-2(a), (c) より，

$$b_k = k_0, \quad f_k = 0 \quad (5-3)$$

であるから，(5-2)式より snap  $\ddot{a}_i$  は，

$$\ddot{a}_i = \frac{k_0}{m \Delta t} b \dot{x}_i \quad (5-4)$$

となる。一方，状態 B および状態 D では，図 5-2(b), (d) より，

$$b_k = 0, \quad f_k = k_0 \quad (5-5)$$

であるから，(5-2)式より snap  $\ddot{a}_i$  は，

$$\ddot{a}_i = -\frac{k_0}{m \Delta t} \int \dot{x}_i \quad (5-6)$$

となる。(5-4)式と(5-6)式は相対速度が前進差分か後退差分かの違いがあるものの、符号が異なるだけであり、snapの絶対値は相対速度に比例することがわかる。状態A、状態Cおよび状態Dは変形が進行中の状態であり、相対速度が比較的大きいと考えられることから、snapの絶対値は大きなものとなり、この瞬間を検出できる可能性が高い。一方、状態Bのような除荷点では、相対速度の正負が逆転する付近であることから、相対速度は理想的にはゼロであり、snapによる検出性は低いと考えられる。

### 5.2.2 状態の判別

(5-1)式に示すように、絶対加速度と復元力は比例関係にあることから、状態Cおよび状態Dのように復元力がほぼゼロである場合には絶対加速度も小さな値となる。一方、状態Aおよび状態Bでは、復元力 $Q(x_i)$ が降伏耐力以上であるから、絶対加速度はある程度大きくなるものと予想される。降伏耐力での絶対応答加速度を $a_y$ とすると、(5-1)式より $a_y$ は、

$$|a_y| = \frac{Q_y}{m} \quad (5-7)$$

となる。ここで、図5-3にsnap-絶対加速度関係を示す。(3-18)式から求めた一定値の閾値を一点鎖線で、(5-7)式から求めた $a_y$ を二点鎖線でそれぞれ示す。状態Aおよび状態Bでは絶対加速度が $a_y$ を超えた範囲、すなわち図中の黒色の領域でsnapにピークが生じ、状態Cおよび状態Dでは絶対加速度が $a_y$ 以下の範囲、すなわち図中の灰色の領域でピークが生じるものと考えられる。地動加速度の影響が無視できない場合では、(3-15)式で示した時刻ごとに変動する閾値によって図の領域が決定するものと考えられるが、便宜上一定値の閾値によって領域を区別している。さらに、状態Aおよび状態Cではsnapと相対速度は同符号であり、状態Bおよび状態Dは異符号となる。以上から、絶対加速度および相対速度によって各状態の判別基準は表5-1のようになる。

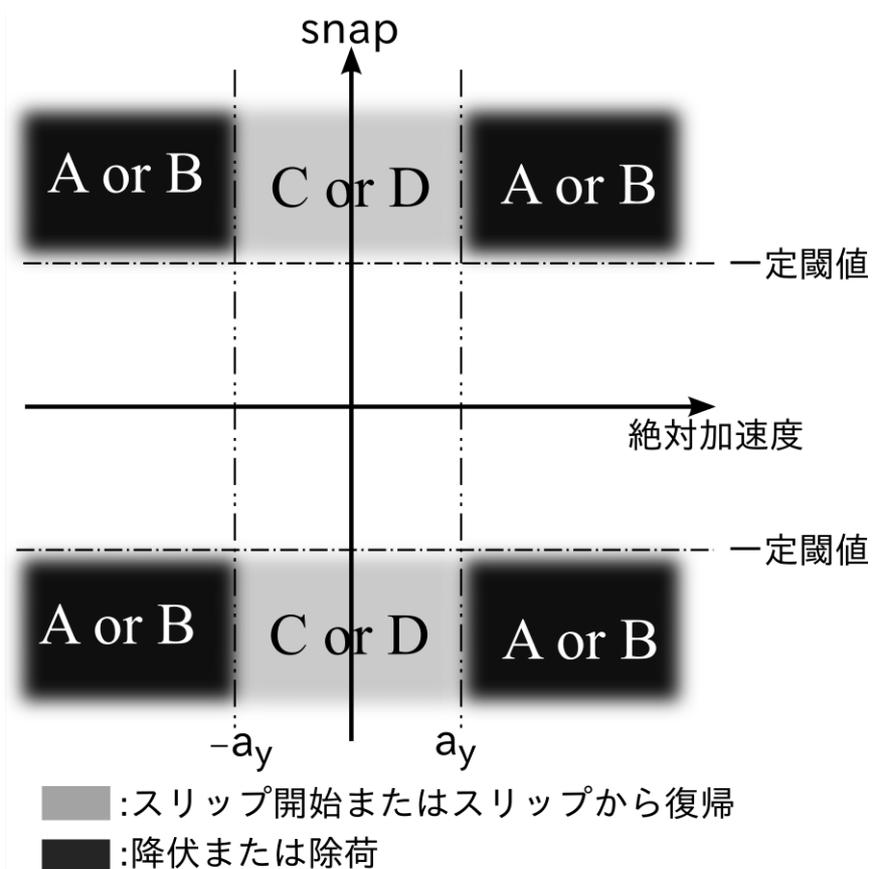


図 5-3 snap-絶対加速度関係

表 5-1 非線形検出時における各状態の判別基準

状態	絶対加速度 $a$	相対速度 $\dot{x}$
A(降伏)	$a \geq  a_y $	snap と同符号
B(除荷)	$a \geq  a_y $	0
C(スリップ開始)	$a <  a_y $	snap と同符号
D(スリップ終了)	$a <  a_y $	snap と異符号

### 5.2.3 試験体

検討するのは文献[5-1]で報告されている露出型柱脚の実大振動台実験結果とする。試験体は文献中[5-1]で No.24, No.25 とされる 2 体である。図 5-4 に試験体形状を示す。No.24 はベースプレートの板厚を 60mm とするアンカーボルトが先行降伏するように設計された試験体であり, No.25 はベースプレートの板厚を 30mm とするベースプレートが先行降伏するように設計された試験体である。どちらの試験体においても, 冷間成形角形鋼管柱 (RBox-500×500×22) およびベースプレートは, アンカーボルトに対して十分な強度を有しており, 塑性化しないことから, 試験体の非線形挙動はアンカーボルトの降伏あるいはベースプレートの降伏によるものと考えられる。パルス加振で得られた試験体を含む実験装置の固有周期は No.24 試験体が 0.83 秒, No.25 試験体が 0.81 秒, 減衰は No.24 試験体が 1.9%, No.25 試験体が 2.3% となっている。

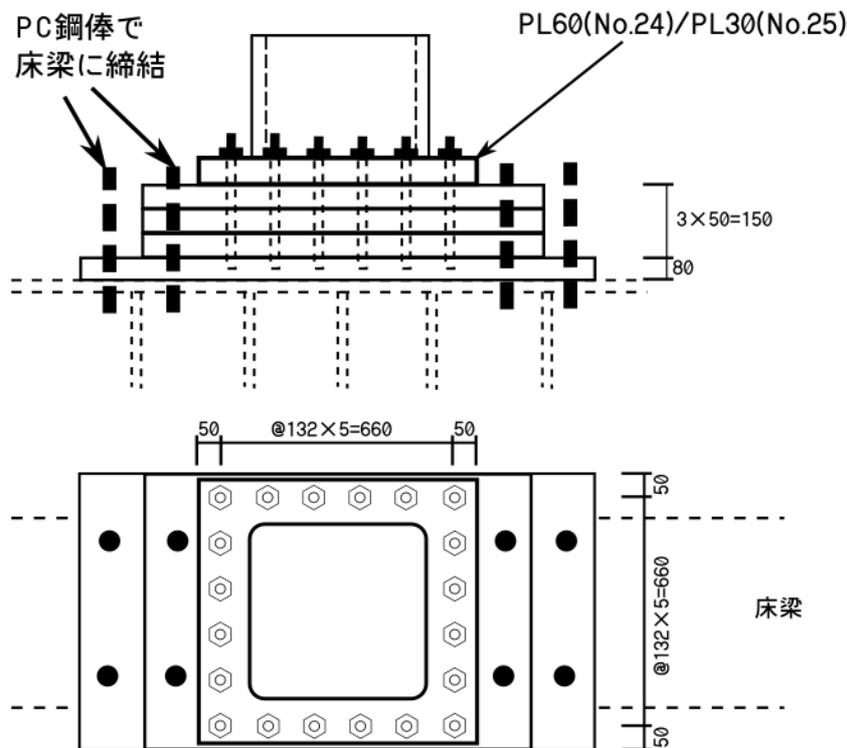


図 5-4 試験体形状 (単位[mm])

## 5.2.4 実験装置

実験装置の略図を図 5-5 に示す。本論文で使用する計測データは、加力梁に貼付した歪みゲージによって計測される試験体頂部に作用する荷重，ワイヤー変位計によって計測される加力点の水平変位，加力フレームに設置してある加速度計によって計測される絶対加速度，および振動台に設置してある加速度計によって計測される地動加速度である。これらのデータは 0.001 秒刻みで計測された後，高周波ノイズを落とすために 5 ステップ毎の平均値をとって 0.005 秒刻みのデータとして収録されている。

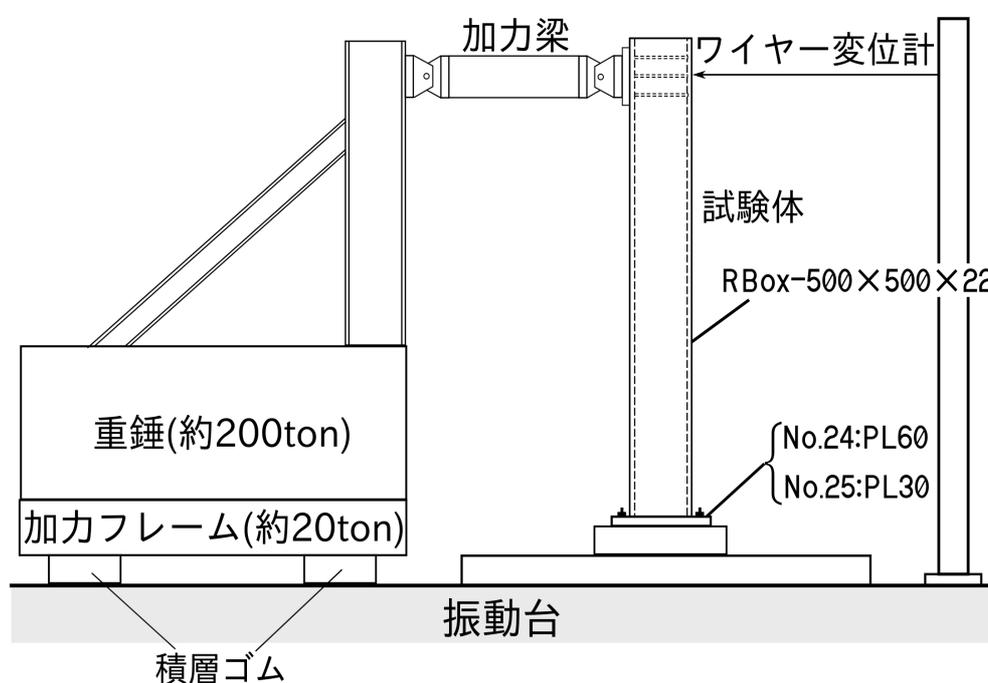


図 5-5 実験装置略図

### 5.2.5 入力波と加振手順

入力波には兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録 NS 成分を用いている。この地震記録に加速度倍率を乗じることによって、入力波の最大速度を変化させて入力レベルの異なる加振を行っている。加振順序、入力レベルおよび試験体状態を表 5-2、5-3 にそれぞれ試験体ごとに示す。入力波の卓越周期はおよそ 0.68 秒であった。例として入力レベル 60kine のフーリエ振幅スペクトルを図 5-6 に示す。

表 5-2 No.24 試験体

加振順序	入力レベル	試験体状態
1	5kine	弾性
2	10kine	若干塑性
3	40kine	終局
4	60kine	

表 5-3 No.25 試験体

加振順序	入力レベル	試験体状態
1	5kine	弾性
2	10kine	若干塑性
3	40kine	終局
4	40kine	
5	60kine	
6	80kine	

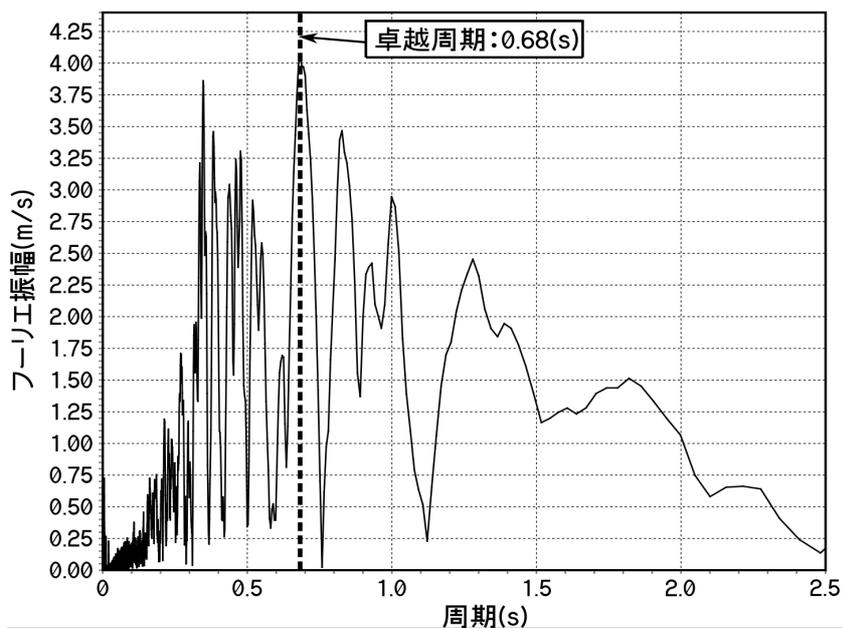


図 5-6 入力波のフーリエ振幅スペクトル (60kine)

## 5.2.6 snap による非線形性検出

ここでは、第3章で提案した損傷評価手法のうち、振動系の非線形性検出方法の適用性について検証する。計測された加速度記録にノイズが含まれるため、第4章で提案した方法によって snap 時刻歴波形を算出する。振動载荷が始まる前の1秒間に計測された絶対加速度応答記録の最大値をノイズの最大値  $N_{\max}$  とし、(4-24)式から  $\Delta t_{\min}$  をそれぞれ算出した結果、試験体 No.24 は  $\Delta t_{\min} = 0.055$  秒、No.25 試験体では  $\Delta t_{\min} = 0.050$  秒であった。どちらも、固有周期のおよそ 1/15 程度であり、(4-25)式の範囲内である。絶対加速度応答記録をダウンサンプリングする際の時間刻み  $\Delta t_d$  は  $\Delta t_{\min}$  と同値として、第4.3.2項で提案した方法によって snap 時刻歴波形を算出した。

### 5.2.6.1 No.24 試験体

No.24 試験体における、荷重-変形関係、snap 時刻歴波形、および snap-絶対加速度関係を入力レベルごとに図 5-7 に示す。荷重-変形関係は、縦軸を加力梁によって計測された荷重、横軸を試験体頂部で計測された相対変位とし、破線で降伏耐力を示す。snap 時刻歴波形では、(3-15)式で求めた地動加速度によって変動する閾値を赤線で、(3-18)式から求めた一定値である閾値を一点鎖線でそれぞれ示す。snap-絶対加速度関係では、縦軸を snap、横軸を絶対加速度とし、(3-18)式から求めた閾値を一点鎖線で、(5-7)式から求めた降伏耐力時の絶対加速度を二点鎖線でそれぞれ示す。

図 5-7 より、入力レベル 5kine では、試験体は弾性であり、荷重-変形関係が線形であるため、snap 時刻歴波形においても、snap の値が閾値を超えていないことが観察される。入力レベル 10kine では、試験体が若干塑性化しており、荷重-変形関係が非線形となっているため、snap の値がわずかに閾値を超えている時点が観察された。一方、入力レベル 40kine および 60kine では、アンカーボルトが降伏し、ある程度の塑性変形が生じており、荷重-変形関係はスリップ型の復元力特性となっている。荷重-変形関係において剛性が急変した時点では、それに対応して、snap の値が閾値を大きく超えていることが観察される。

振動系が弾性である場合には、絶対加速度と snap は逆位相の関係になるため、snap-絶対加速度関係は右下がりの線形履歴となり、その傾きは固有円振動数に対応したものとなる。このことから、入力レベル 5kine では snap-絶対加速度関係はほぼ線形の履歴挙動となっており、入力レベル 10kine でも概ね線形性を示している。一方、入力レベル 40kine および 60kine では、線形性が保持されておらず、スリップ挙動時には剛性がほぼゼロであるため、snap-絶対加速度関係の傾きもほぼゼロとなっている。第 5.2.2 項で説明した状態との対応関係より、状態 A, B は  $a_y$  以上の範囲で生じ、状態 C, D は  $a_y$  以下の範囲で生じている。さらに、塑性変形量の累積によってスリップする変位が増加していくに従い、snap がゼロとなる領域も大きくなる。このため、入力レベル 40kine よりも入力レベル 60kine の方が snap がゼロとなる領域が大きくなっているのがわかる。

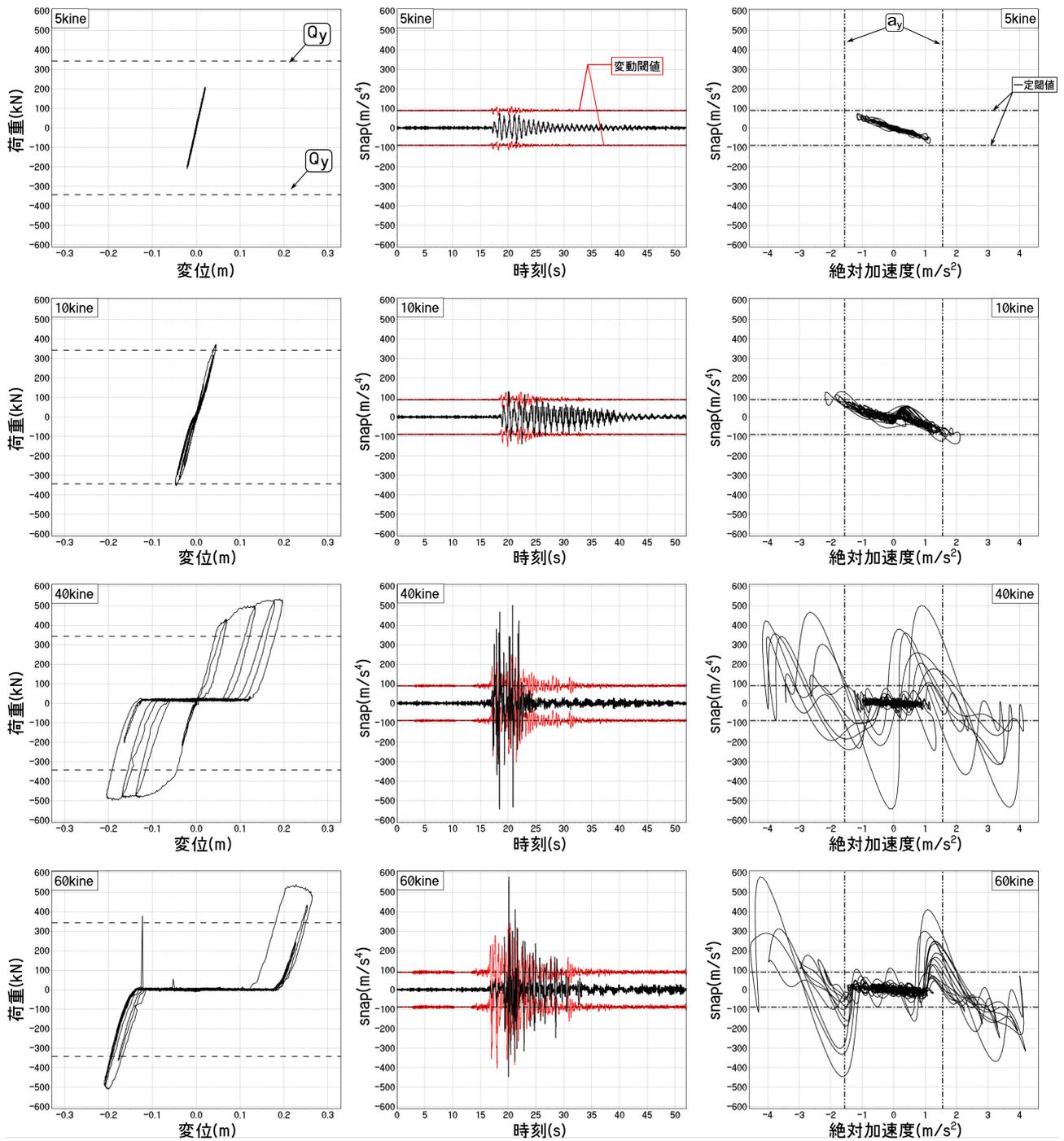


図 5-7 荷重-変形関係, snap 時刻歴波形, snap-絶対加速度関係

ここで、非線形挙動検出の様子を詳細に観察するため、十分な塑性化が観察された入力レベル 40kine および 60kine について、応答結果の主要動に対応する連続した5つのサイクルをそれぞれ分割して表示したものを、入力レベルごとに図 5-8, 5-9 にそれぞれ示す。図中の丸数字で示した青色の時点は、snap の値が(3-18)式で算出した一定値の閾値を超えて極値となる時点を示しており、特に□で囲われているものは、第 5.2.1 項で示した剛性が急変する状態 A から状態 D のいずれかに対応することを示している。これ以降、(3-15)式で求めた地動加速度を考慮した閾値を「変動閾値」、考慮しない一定値の閾値を「一定閾値」と呼ぶことにする。

丸数字で示された点の多くは□で囲われており、多くの場合で一定閾値によって非線形性が検出できることを示している。一方で、図 5-8 の第 1 サイクルの①や②、第 3 サイクルの⑤などのように、snap が一定閾値を超えているにも関わらず、荷重-変形関係は明らかに弾性範囲に留まっている場合がある。しかしこれらのうち、図 5-8 の第 1 サイクル①や第 3 サイクル⑤など、変動閾値の範囲には収まっており、変動閾値を用いれば誤検出を防げたものが観察された。一方、図 5-8 の第 1 サイクル①～②の間にみられるように、一定閾値の範囲内であるが変動閾値を超えているピークもいくつか観察されており、変動閾値を閾値として使用した場合に生じる誤検出も観察された。さらに、第 1 サイクルの②など、変動閾値によってもなお、誤検出を防げない場合もある。これらの原因については、主として計測ノイズの影響や、降伏や破壊などに関連する履歴復元力の不安定性などが考えられるが、原因を特定するに至っていない。

snap-絶対加速度関係をみると、状態 A, B は絶対加速度が  $a_y$  よりも大きな値となる範囲で生じており、状態 C, D は概ね  $a_y$  より小さい範囲かその付近で生じていることが観察される。すなわち、スリップ性状を有する復元力特性を持つ振動系の場合、検出した非線形挙動が降伏耐力以上で生じているのか、それ以下の範囲で生じているのかによって、それがスリップ挙動によるものか否かを判別することが可能である。



第5章 構造部材ごとの振動台実験結果への適用性

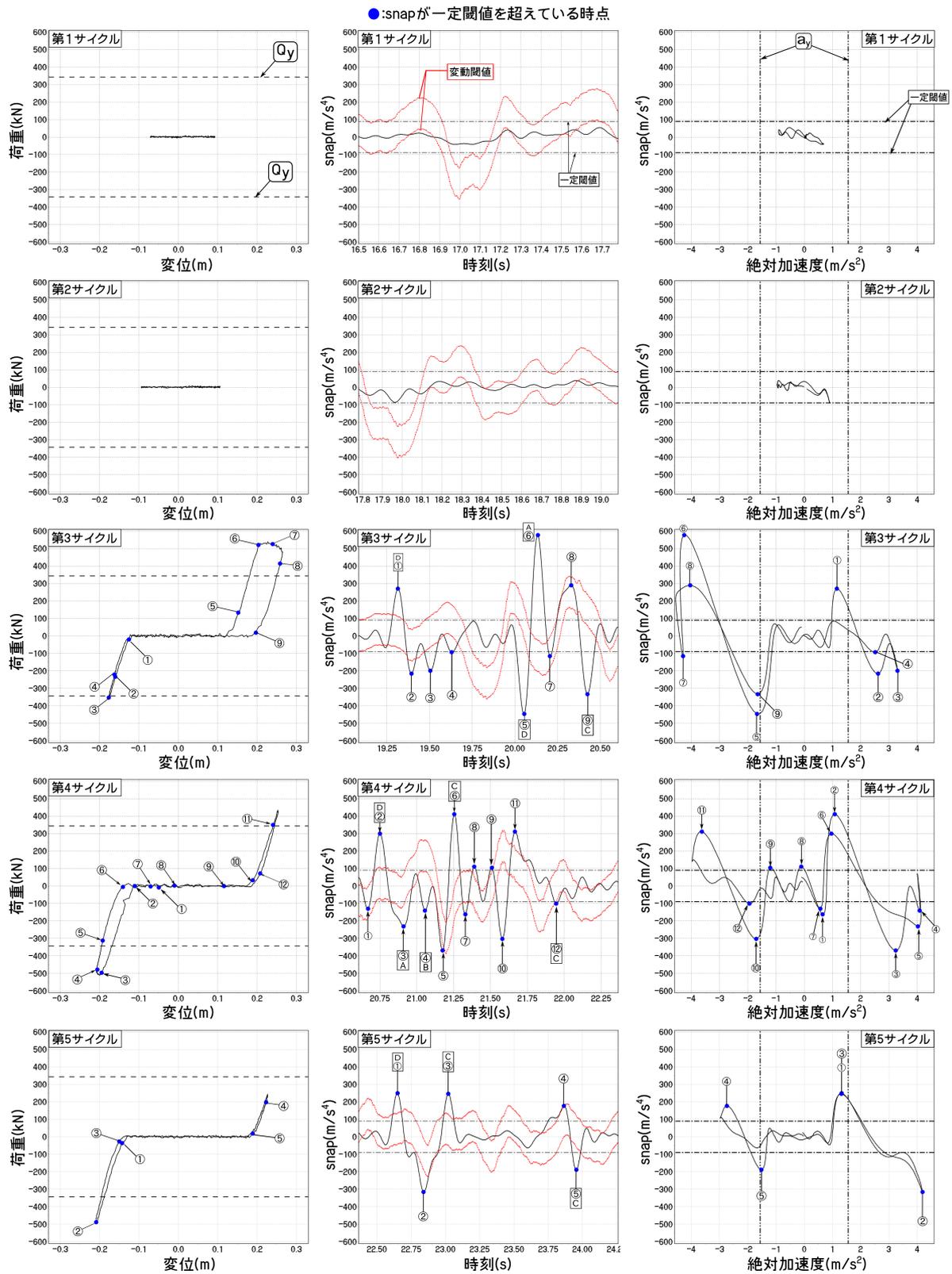


図 5-9 主要動における応答(60kine)

ここで閾値ごとの検出精度について検討する。検出精度の評価指標は、第4章で使用したものと同様とし、その定義を図5-10に再掲する。閾値ごとの検出精度をまとめたものを表5-4に、各状態ごとの Recall を表5-5示す。併用とは、一定閾値と変動閾値を合わせた領域であり、snap の値がどちらの閾値も超えている場合に閾値を超えたと判断する。

表5-4より、一定閾値でも十分な精度で非線形性検出が可能となっている。これは、試験体の固有周期と入力地震動の卓越周期が比較的近いためだと考えられる。また、変動閾値の方が一定閾値に比べて Precision が低いことがわかる。これは、地動加速度を考慮することで誤検出を減らすことができる一方で、スリップ挙動時では snap の値がゼロ付近で振動しているにもかかわらず、閾値が変動してしまい、閾値の範囲外となるピークが生じるためである。このため、一定閾値と変動閾値を併用した場合が最も検出精度が高くなっている。

表5-5より、状態A（降伏）および状態B（除荷）については、生じた回数を見逃さずに、全て検出できている。本来相対速度がゼロであるため、snap の値が小さくなり、検出が困難であるはずの状態Bが検出されている。これは、降伏点以降で荷重が増加し、降伏耐力以上で除荷が生じているため、除荷点近傍でも snap の値が閾値を超えているためである。スリップ挙動に関する状態C（スリップ開始）および状態D（スリップ終了）についても、十分な精度で検出が可能であることがわかった。状態C、状態Dともに同程度の検出精度となっており、スリップ開始か終了かという挙動による違いは観察されなかった。

非線形性 閾値	○	×
超えた	a	b
超えてない	c	d

$$\text{Precision} = \frac{a}{a+b} = \frac{\text{正検出}}{\text{検出回数}}$$

$$\text{Recall} = \frac{a}{a+c} = \frac{\text{正検出}}{\text{非線形回数}}$$

$$\text{F-measure} = 2 \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

図5-10 検出精度の評価指標

表 5-4 検出精度

閾値	Precision	Recall	F-measure
一定閾値	70.0	96.6	81.2
変動閾値	57.4	93.1	71.7
併用	79.4	93.1	85.7

表 5-5 状態ごとの Recall

閾値	状態A	状態B	状態C	状態D
一定閾値	100	100	100	85.7
変動閾値	100	100	87.5	85.7
併用	100	100	87.5	85.7

### 5.2.6.2 No.25 試験体

No.24 試験体の場合と同様に、荷重-変形関係、snap 時刻歴波形および snap-絶対加速度関係を入力レベルごとに図 5-11 に示す。図 5-7 と同様に、荷重-変形関係は、縦軸を加力梁よって計測された荷重、横軸を試験体頂部で計測された相対変位とし、破線で降伏耐力を示す。snap 時刻歴波形では、(3-15)式で求めた地動加速度によって変動する閾値を赤線で、(3-18)式から求めた一定値である閾値を一点鎖線でそれぞれ示す。snap-絶対加速度関係では、縦軸を snap、横軸を絶対加速度とし、(3-18)式から求めた閾値を一点鎖線で、(5-7)式から求めた降伏耐力時の絶対加速度を二点鎖線でそれぞれ示す。

図 5-11 より、入力レベル 5kine では試験体が弾性であり、荷重-変形関係および snap-絶対加速度関係はどちらも線形履歴となっている。snap 時刻歴波形においても、snap の値が閾値を超えている時点は観察されなかった。入力レベル 10kine では、試験体は若干塑性化し、荷重-変形関係に非線形性が観察され、snap-絶対加速度関係においても線形性が崩れている。snap 時刻歴波形においては、わずかではあるものの、snap の値が閾値を超えていることが観察された。このことは、No.24 試験体と同様の傾向である。

一方、試験体にある程度の塑性変形が生じることになる入力レベル 40kine および 60kine において、荷重-変形関係はスリップ型と除荷点指向型を合わせたような復元力特性となっている。それぞれの入力レベルの荷重-変形関係において、剛性の急変が観察された時点において、それに対応して、snap の値が閾値を超えていることが観察された。snap-絶対加速度関係では、線形性は保持されず、履歴が不安定となっている。特に、スリップ挙動時においては、入力レベル 40kine と比較して、入力レベル 60kine では snap の値がゼロとなる範囲が広がっていることが観察された。これは塑性変形量の累積によってスリップ領域が大きくなったためであり、No.24 試験体と同様の傾向を示している。

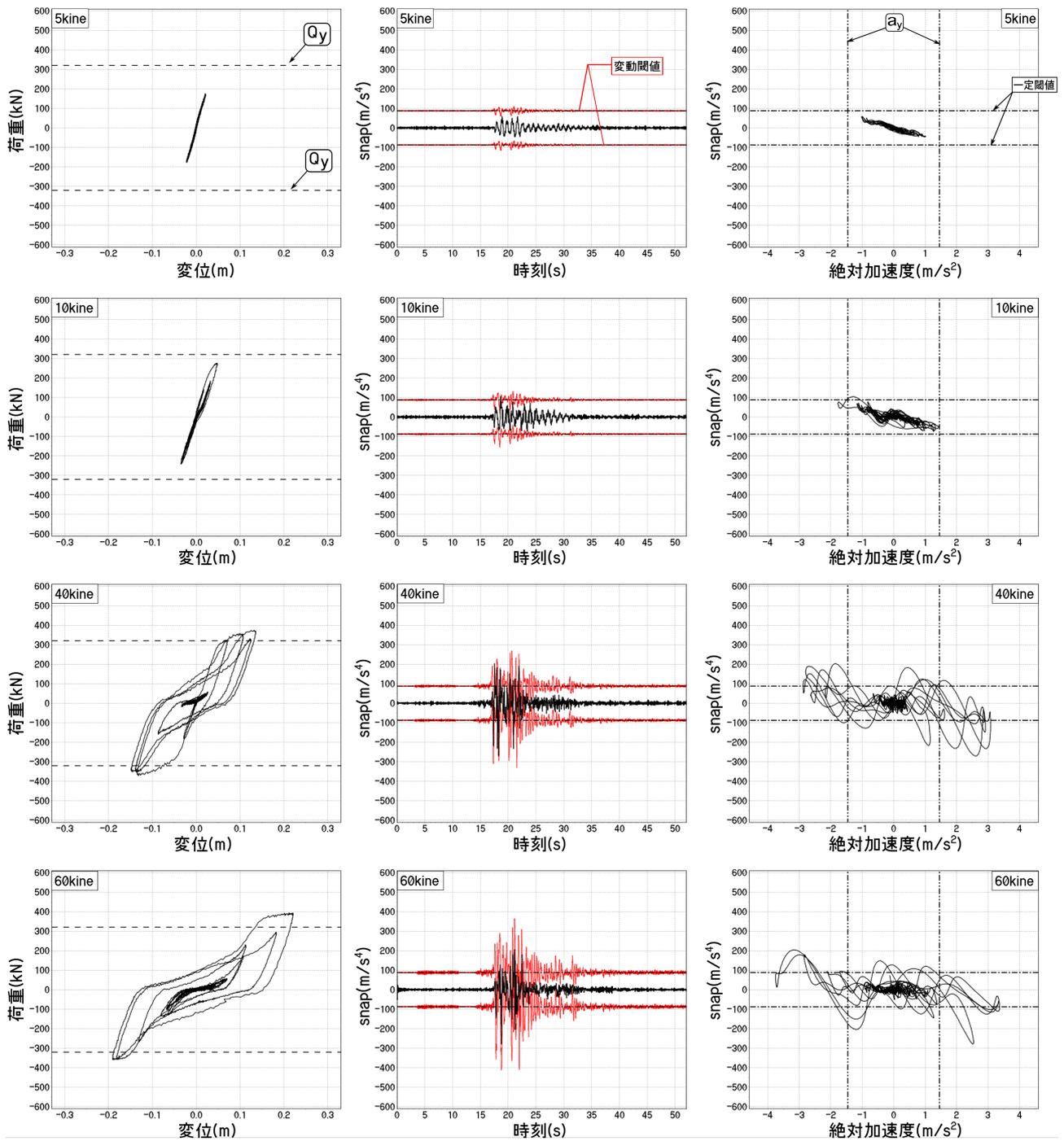


図 5-11 荷重-変形関係, snap 時刻歴波形, snap-絶対加速度関係

ここで、No.24 試験体と同様に、非線形挙動検出の様子を詳細に観察するため、十分な塑性化が観察された入力レベル 40kine および 60kine について、応答結果の主要動に対応する連続した5つのサイクルをそれぞれ分割して表示したものを、入力レベルごとに図 5-12, 5-13 にそれぞれ示す。図中に、丸数字で示した青色の時点は snap が閾値を超えてつ極値となっている時点を示しており、特に□で囲われているものは、第 5.2.1 項で示した剛性が急変する状態 A から状態 D のいずれかに対応するものである。

No.24 試験体と同様に、丸数字で示された点の多くは□で囲われており、多くの場合で一定閾値によって非線形性が検出できることを示している。一方で、図 5-12 の第 1 サイクルの①, ②, ④, 第 3 サイクルの⑦, 第 4 サイクルの④などのように、snap が一定閾値を超えているにも関わらず、荷重-変形関係は線形挙動であり、剛性が変化していない場合がある。しかし、これらのピークは変動閾値の範囲には収まっており、変動閾値を用いれば誤検出を防げるものが観察された。一方、図 5-12 の第 1 サイクル①～②の間にみられるように、一定閾値の範囲内であるが変動閾値を超えているピークもいくつか観察されており、変動閾値を閾値として使用した場合に生じる誤検出も観察された。これらの原因については、No.24 試験体と同様に、主として計測ノイズの影響や、降伏や破壊などに関連する履歴復元力の不安定性などが考えられるが、原因を特定するに至っていない。

No.24 試験体と比較すると、荷重-変形関係で剛性が変化している状態 C, D のスリップ挙動時に、snap の値が閾値を超えていない場合が多い。これは、復元力特性が除荷点指向型であるため、スリップ中の剛性がゼロとならず、スリップ開始前後またはスリップ終了前後での剛性変化が小さくなっていることが原因の 1 つとして挙げられる。

また、No.24 試験体と同様に、snap-絶対加速度関係をみると、状態 A, B は絶対加速度が  $a_y$  よりも大きな値となる範囲で生じ、状態 C, D は概ね  $a_y$  より小さい範囲かその付近で生じていることが観察される。

第5章 構造部材ごとの振動台実験結果への適用性

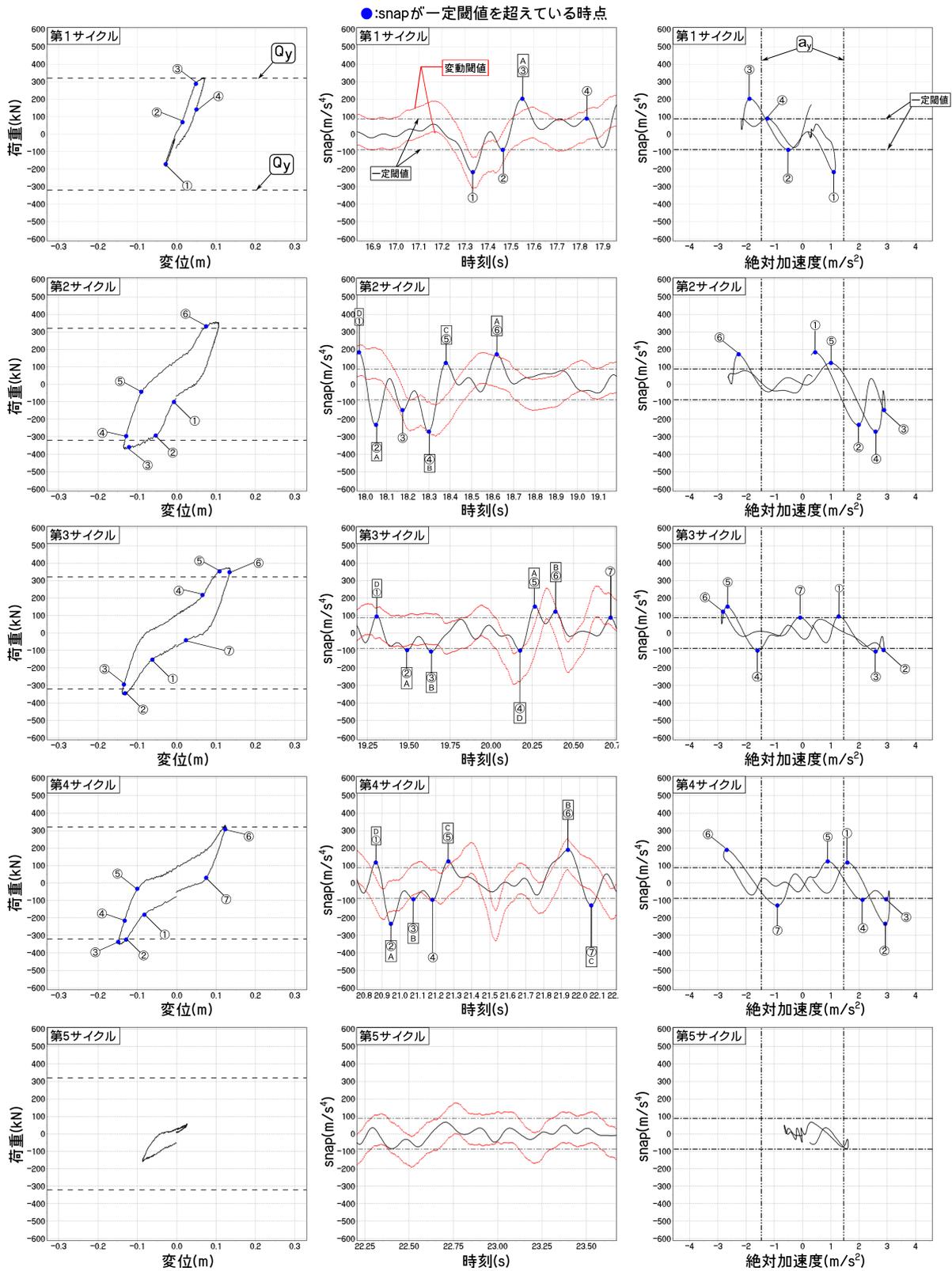


図 5-12 主要動部における応答(40kine)

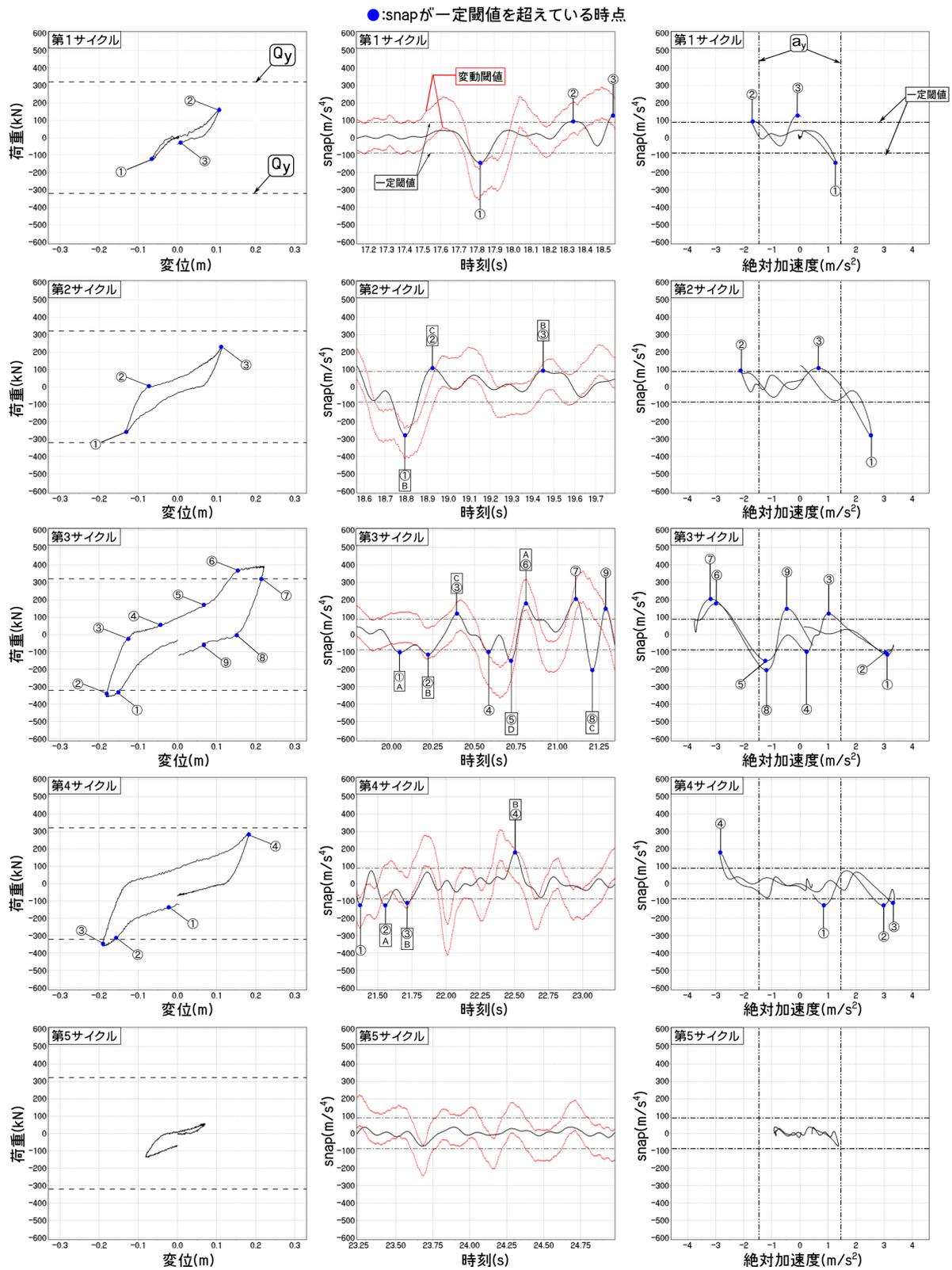


図 5-13 主要動部における応答(60kine)

No.24 試験体と同様に，図 5-10 に示した評価指標による検出精度を表 5-6 に，状態ごとの Recall を表 5-7 に示す。表 5-6 より，一定閾値よりも変動閾値の Precision が低いのは，No.24 試験体と同様に，スリップ挙動時において，閾値が変動し，snap の値が閾値の範囲外となるピークが生じるからである。また，No.24 試験体に比べて Recall が低いのは，表 5-7 より，状態 A 以外の検出精度が低いことが原因である。状態 B（除荷）については，降伏点以降の荷重がほとんど上昇せず，除荷点における荷重が降伏耐力と同程度であるためだと考えられる。状態 C（スリップ開始），D（スリップ終了）のようなスリップ性状に関する非線形挙動の検出精度が低いのは，前述したように，No.24 試験体と異なり，スリップ中の剛性がゼロとならず，スリップ開始前後またはスリップ終了前後での剛性変化が小さいことが原因の 1 つとして挙げられる。一方で，No.24 試験体と同様に，状態 A（降伏）については全て検出することが可能であった。

表 5-6 検出精度

閾値	Precision	Recall	F-measure
一定閾値	66.7	61.5	64.0
変動閾値	54.8	65.4	59.6
併用	92.3	46.2	61.5

表 5-7 状態ごとの Recall

閾値	状態A	状態B	状態C	状態D
一定閾値	100	42.9	42.9	66.7
変動閾値	100	42.9	71.4	50.0
併用	100	14.3	42.9	33.3

## 5.2.7 塑性率の推定

前 5.2.6 項より、検討対象としている 2 体の試験体は、どちらも降伏点が比較的明瞭であり、降伏後にある程度の塑性変形が生じていることが確認された。どちらの試験体においても降伏点については、提案した非線形性検出方法によって見逃さずに検出することが可能であることがわかった。

そこで、第 3.5 節で提案した塑性変形量の推定方法を用いて、各塑性化における塑性率を推定する。二次剛性比の予測が困難であることから、塑性変形量の推定に必要な降伏点速度は、第 3.5.1 項 3.5.1.1 で提案した jerk を用いた方法によって算出することにした。降伏後に生じる塑性変形量を  $d$ 、降伏変位を  $d_y$  とすると、塑性率  $\mu$  を、

$$\mu = \frac{d}{d_y} \quad (5-8)$$

として定義する。すなわち、塑性率  $\mu$  は降伏変位に対する比率を表すことになる。

塑性化ごとに、ワイヤー変位計で計測した塑性変形量から、(5-8)式によって算出した塑性率を実測値、提案手法から求めた塑性変形量から、(5-8)式によって算出した塑性率を推定値とする。試験体ごとに推定した塑性率をまとめたものを図 5-14 に示す。縦軸を実測値、横軸を推定値とする。併せて、実測値に対する推定値の比を求め、その平均値と変動係数をまとめたものを表 5-8 に示す。表 5-8 では、塑性率と同様に、降伏点速度の推定値と実測値の比の平均値と変動係数を併せて示す。降伏点速度の実測値は、相対加速度を台形積分することによって算出した。

図 5-14 より、どちらの試験体においても、比較的塑性変形量が小さい範囲、すなわち塑性率が 1.0 に近い場合の方が、推定精度が高いことがわかる。また、塑性率の大きさに関係なく、推定値は実測値と比較して過小評価となっている。提案手法による塑性変形量の推定値は、降伏点速度の推定精度に影響を受ける。第 3.6.3 項で検討したように、降伏点速度が過小評価されると、実際よりも早い時点で相対速度が反転したと判断することになるため、塑性変形量も過小評価される。そのため、表 5-8 より、どちらの試験体においても、降伏点速度の平均値と同程度の割合で、塑性率も過小評価されている。

表 5-8 より，No.24 試験体と No.25 試験体では，No.24 試験体の方が推定精度が高いことがわかる。これは，試験体が有する履歴特性が原因だと考えられる。No.24 試験体では，図 5-7 で示したように，荷重-変形関係がスリップ型復元力特性であるため，塑性化の程度に関係なく，降伏点直前の剛性は初期弾性剛性と同程度となっている。一方で，No.25 試験体では，図 5-11 で示したように，除荷点指向型となっているため，塑性化の程度によって降伏点直前の剛性が初期弾性剛性よりも小さくなってしまう。提案手法では，降伏点速度を初期弾性剛性を用いて推定しているため，実際の剛性が初期弾性剛性よりも小さい場合では，過小評価してしまうことになる。このことから，推定対象とする振動系において，降伏点直前の剛性が初期弾性剛性である履歴特性であれば，十分な精度で塑性率を推定できる一方で，降伏点直前の剛性が初期弾性剛性と異なるような履歴特性となる場合では，精度が悪く，推定が困難となることがわかった。

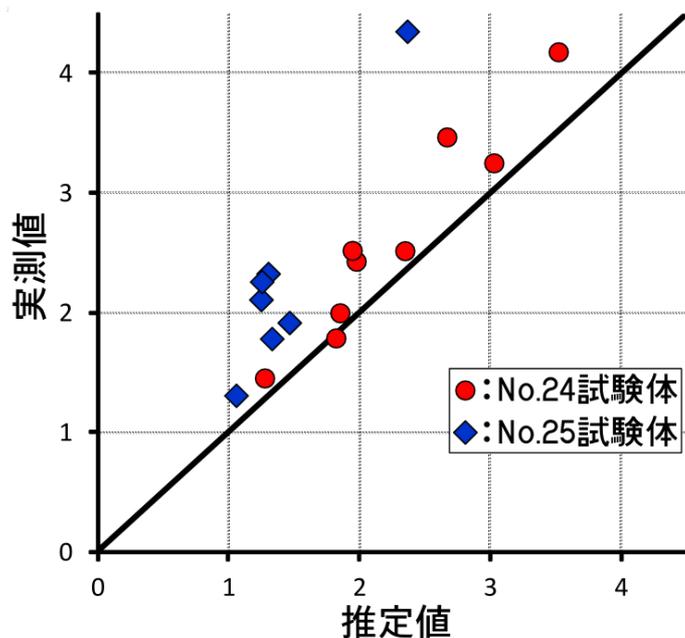


図 5-14 塑性率の推定精度

表 5-8 推定精度(平均値と変動係数)

試験体	塑性率		降伏点速度	
	平均値	変動係数	平均値	変動係数
No.24	0.87	0.09	0.83	0.10
No.25	0.65	0.16	0.51	0.19

## 5.3 柱梁接合部

### 5.3.1 試験体

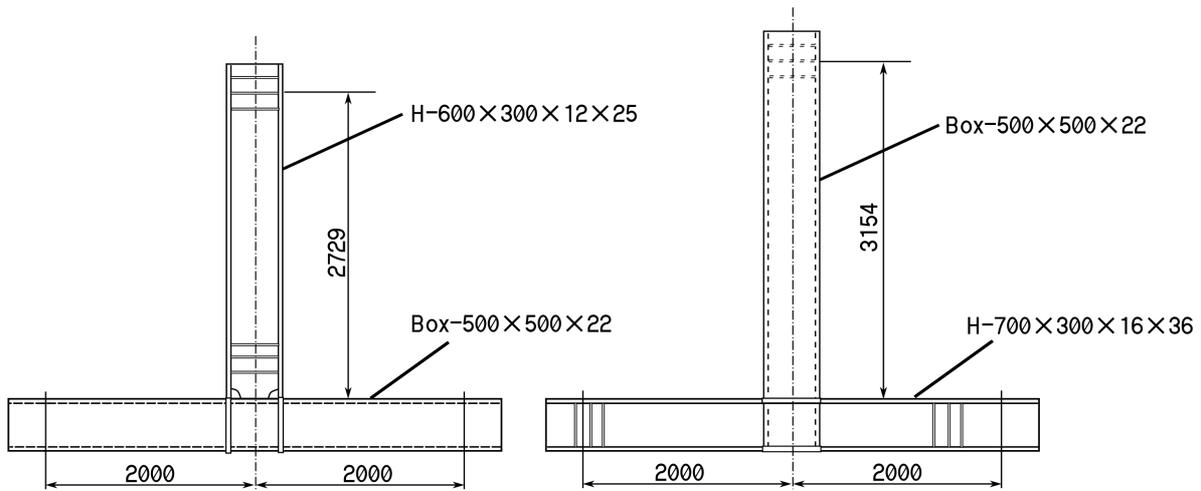
検討対象は文献中[5-3]で No.2（標準試験体），文献中[5-4]で No.10 とされる 2 体の柱梁接合部試験体とする。どちらの試験体も骨組の部分架構をモデル化した T 字形であり，垂直材と水平材は剛接合されている。図 5-15 に試験体形状をそれぞれ示す。No.2 試験体は水平材である角形鋼管柱（Rbox-500×500×22），垂直材として H 形鋼梁（RH-600×300×12×25）が接合されており，梁端破断を再現するため，柱およびパネル部は十分な強度を持つように設計されている。No.10 試験体は角形鋼管柱（Box-500×500×22）に梁貫通形式の接合により H 形梁（BH-700×300×16×36）を接合している。パルス加振によって得られた固有周期は，No.2 試験体が 0.64 秒，No.10 試験体が 0.72 秒となっている。

### 5.3.2 実験装置

実験装置は前 5.2 節で示した露出型柱脚の振動台実験と同様であり，図 5-16 のように試験体が設置されている。ここで使用する計測データも前 5.2 節と同様で，加力梁に貼付した歪みゲージによって計測される試験体頂部に作用する荷重，ワイヤー変位計によって計測される加力点の水平変位，加力フレームに設置してある加速度計によって計測される絶対加速度，および振動台に設置してある加速度計によって計測される地動加速度である。データの収録も同様で，0.001 秒刻みで計測された後，高周波ノイズを落とすために 5 ステップ毎の平均値をとって 0.005 秒刻みのデータとして収録されている。

### 5.3.3 入力波と加振手順

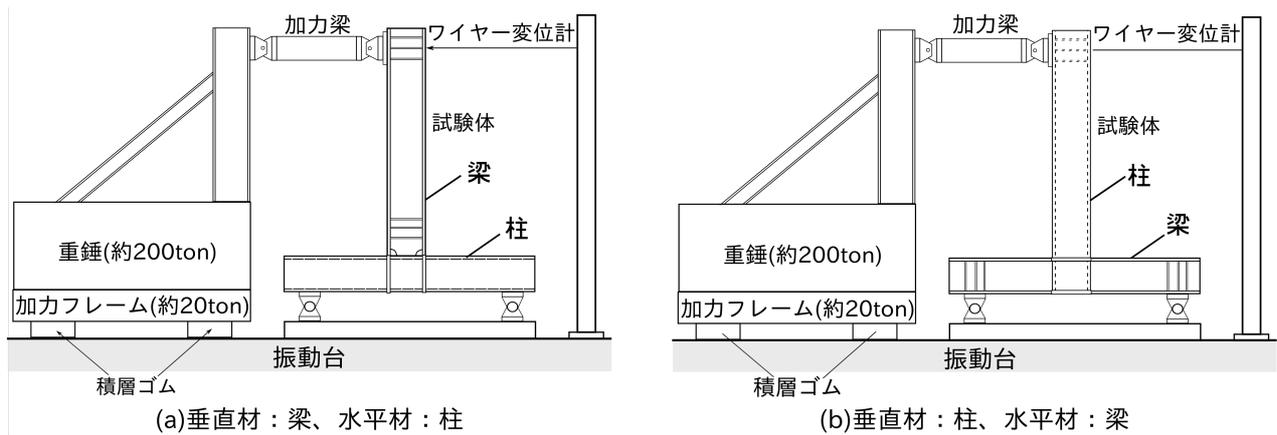
第 5.2 節と同様に，入力波には兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録 NS 成分を用いている。この地震記録に加速度倍率を乗じることによって，入力波の最大速度を変化させて加振が行われた。試験体の加振手順，入力レベルおよび試験体の状態をまとめたものを表 5-9，5-10 にそれぞれ示す。



(a)垂直材：梁  
水平材：柱

(b)垂直材：柱  
水平材：梁

図 5-15 試験体形状(単位[mm])



(a)垂直材：梁、水平材：柱

(b)垂直材：柱、水平材：梁

図 5-16 実験装置略図

表 5-9 No.2 試験体

加振順序	入力レベル	試験体状態
1	10kine	弾性
2	20kine	若干塑性
3	100kine	終局

表 5-10 No.10試験体

加振順序	入力レベル	試験体状態
1	10kine	弾性
2	100kine	終局

### 5.3.4 snapによる非線形性検出

ここでは、第3章で提案した非線形性検出方法の適用性について検討する。振動载荷が始まる前の1秒間に計測された絶対加速度応答記録の最大値をノイズの最大値  $N_{\max}$  として、(4-24)式から  $\Delta t_{\min}$  をそれぞれ算出した結果、試験体 No.2 は  $\Delta t_{\min}=0.030$  秒、No.10 試験体では  $\Delta t_{\min}=0.025$  秒であった。ここでは、ダウンサンプリングする際の時間刻み  $\Delta t_d$  は、 $\Delta t_{\min}$  の2倍として、試験体 No.2 では  $\Delta t_d=0.060$  秒、試験体 No.10 では  $\Delta t_d=0.050$  秒とし、第4.3.2項で提案した方法によって snap 時刻歴波形を算出した。どちらの  $\Delta t_d$  も、固有周期のおよそ 1/12 程度であり、(4-27)式の範囲内である。図5-17に試験体 No.2、図5-18に試験体 No.10 における入力レベルごとの荷重-変形関係、snap 時刻歴波形、snap-絶対加速度関係をそれぞれ示す。荷重-変形関係は、横軸をワイヤー変位計によって計測される試験体頂部の水平変位、縦軸をロードセルによって計測された荷重とし、破線で降伏耐力を示す。snap 時刻歴波形では、横軸を時刻、縦軸を snap とし、(3-15)式から算出した地動加速度を考慮した閾値を赤線で、(3-18)式から算出した地動加速度を考慮しない閾値を一点鎖線でそれぞれ示す。snap-絶対加速度関係では、横軸を試験装置の絶対加速度、縦軸を snap とする。一点鎖線で(3-18)式から求めた閾値、二点鎖線で(5-7)式で算出した降伏耐力時の絶対加速度をそれぞれ示す。

図5-17より、試験体 No.2 では、入力レベル 10kine では試験体は弾性であるため、荷重-変形関係はほぼ線形であり、snap 時刻歴波形において、snap の値が閾値を超えていることは観察されなかった。snap-絶対加速度関係において、snap と絶対加速度が線形関係であることから、試験体が線形挙動していることが判断できる。入力レベル 20kine においては、荷重が降伏耐力に到達し、若干非線形となっていることが観察された。snap の値が閾値を超えている時点が観察されるものの、わずかに超えているだけであること、snap-絶対加速度関係がほぼ線形性を保持していることから、ほぼ線形挙動であると判断できる。一方、試験体が終局状態となる入力レベル 100kine の加振実験では、荷重-変形関係において、大きな塑性変形が生じており、▼で示した時点において最大耐力をむかえ、△で

示した時点において梁端が破断し、急激に耐力が低下している。snap 時刻歴波形において、snap の値が閾値を大きく超えている時点があり、非線形挙動となる時点を検出することができる。snap-絶対加速度関係では、線形挙動が崩れ、試験体の挙動が不安定になっていることと対応している。

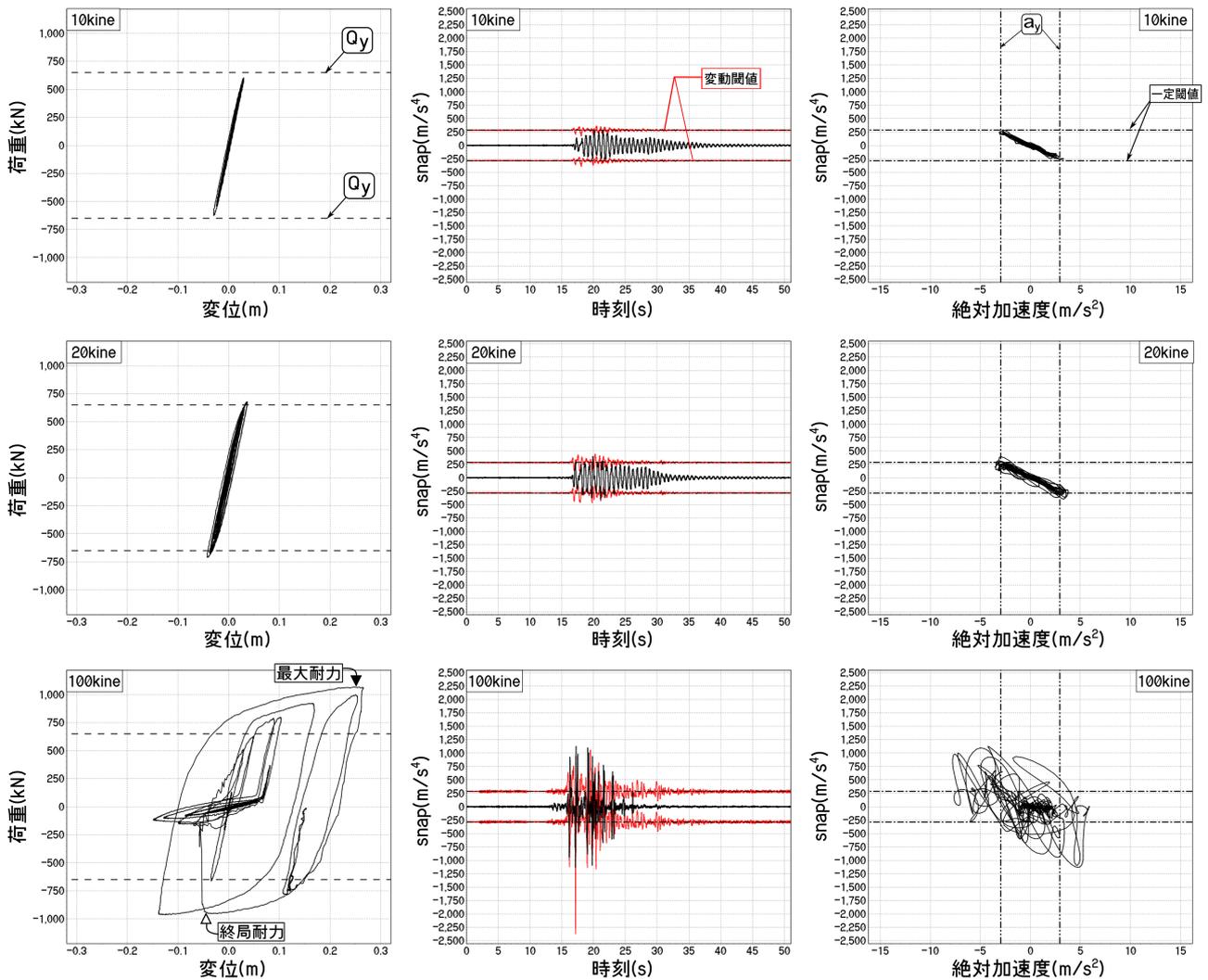


図 5-17 荷重-変形関係, snap 時刻歴波形, snap-絶対加速度関係

第5章 構造部材ごとの振動台実験結果への適用性

図5-18より、試験体 No.10 においても、試験体 No.2 と同様に、入力レベル 10kine では試験体は弾性であるため、荷重-変形関係および snap-絶対加速度関係はそれぞれ線形履歴であり、snap の値が閾値を超えていることは観察されなかった。一方、試験体が終局状態となる入力レベル 100kine の加振実験では、荷重-変形関係において、▼で示した時点において最大耐力をむかえ、部材断面の大部分が破断したため、最大耐力後、すぐに耐力が低下している。試験体の挙動が不安定になり、snap の値も大きく閾値を超えていることが観察された。snap-絶対加速度関係においても、部材の破断によって、履歴が不安定となり、線形性が大きく崩れている。試験体の不安定な挙動と対応している。

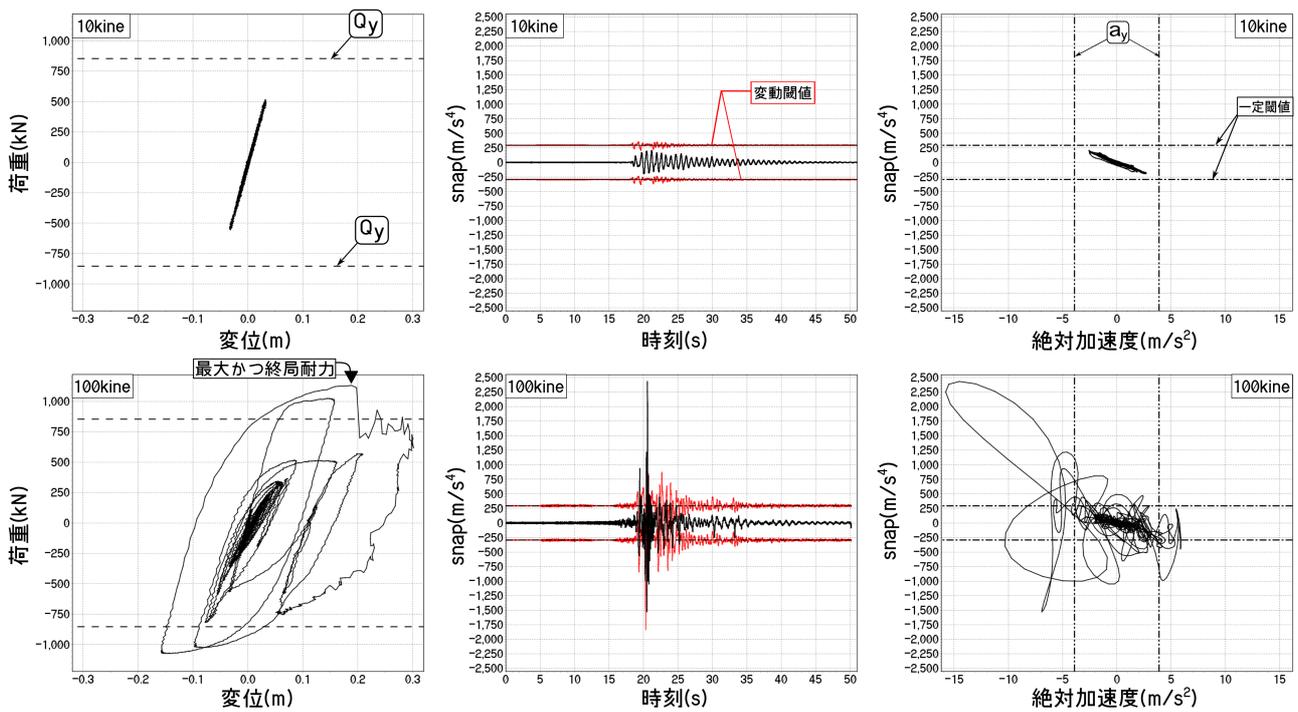
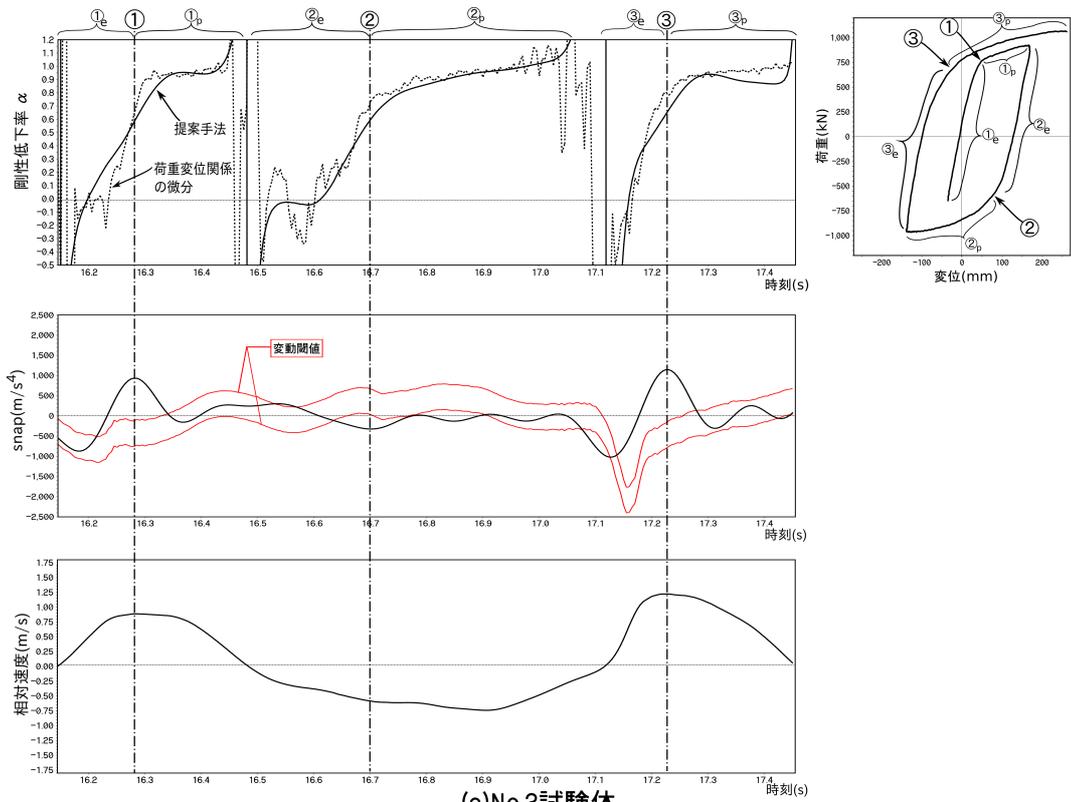


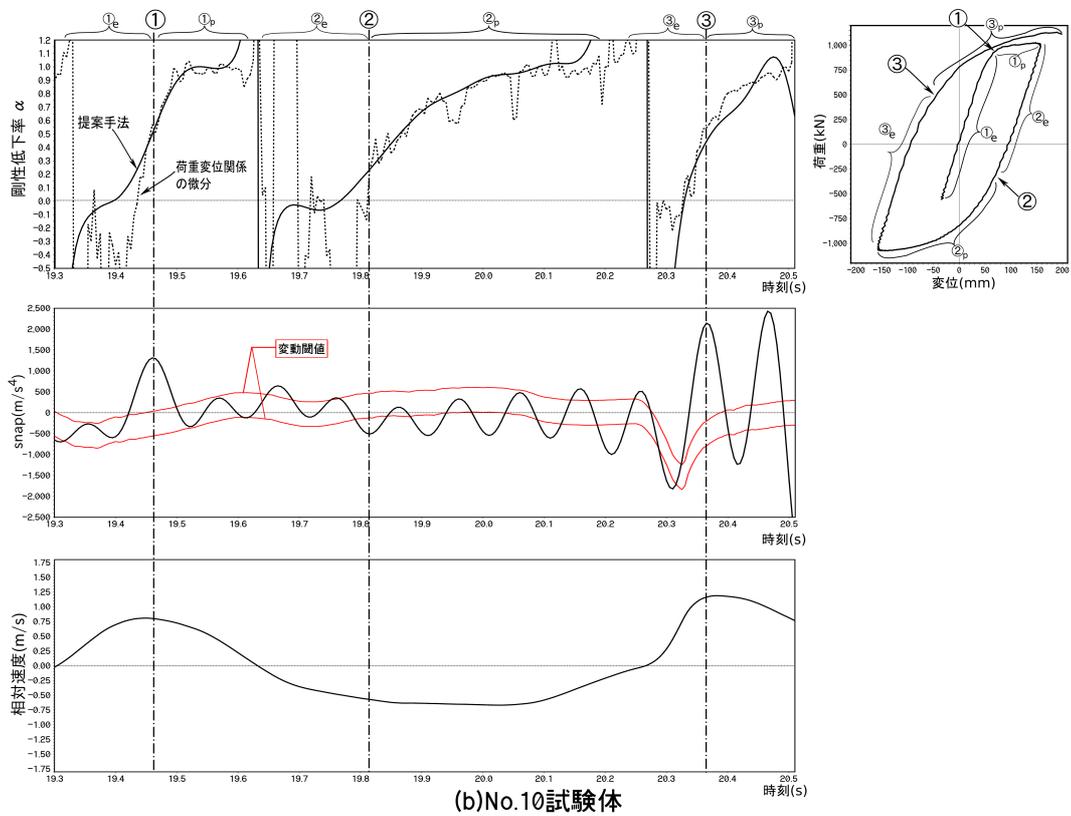
図 5-18 荷重-変形関係, snap 時刻歴波形, snap-絶対加速度関係

### 5.3.5 剛性低下率の評価

ここでは、試験体の剛性変化が大きく、終局挙動となる入力レベル 100kine の加振結果において、より詳細に応答挙動と snap との対応関係を検証するとともに、第 3 章で提案した剛性低下率の評価方法の適用性について検討する。試験体ごとに、第 3 章で提案した方法によって剛性低下率  $\alpha$  を算出する。 $\alpha$  を算出するためには、jerk および相対速度の時刻歴波形が必要となる。jerk 時刻歴波形は、snap 時刻歴波形と同様に、第 4 章で提案した方法によって算出する。ダウンサンプリングに使用する時間刻み  $\Delta t_d$  は、snap 波形を算出する際に使用した値とした。相対速度時刻歴波形は、振動台で計測された地動加速度と系の絶対加速度応答から相対加速度を求め、初期基線ずれを補正し、遮断周波数を 0.20Hz とするハイパスフィルタをかけたのち、台形積分によって算出した。初期基線ずれの値は、計測の開始から 10 秒間の相対加速度の平均値とした。得られた相対速度時刻歴波形と jerk 時刻歴波形を用いて、(3-54)式から剛性低下率の時刻歴波形を求めた。試験体に最初の塑性変形が生じる少し前の時刻から最大耐力に達する時刻までの剛性低下率時刻歴波形、snap 時刻歴波形、相対速度時刻歴波形、およびその時刻に対応する荷重-変形関係を試験体ごとに図 5-19 に示す。剛性低下率時刻歴波形では、縦軸を剛性低下率、横軸を時刻として、提案手法によって算出した剛性低下率を実線で示す。提案手法で算出した剛性低下率との比較対象として、荷重-変形関係を微分することで求めた接線剛性を用いて(3-53)式から算出した剛性低下率を破線で示す。図中の○数字は snap の値が閾値を超えてピークを取り、荷重-変形関係において剛性が急変した時点を示している。ピーク時点ごとに、ピーク時点よりも前を線形領域、ピーク時点より後を塑性領域として、線形領域では e を、塑性領域では p を○数字の右下に添えたものを併せて図 5-19 に示す。



(a)No.2試験体



(b)No.10試験体

図 5-19 主要動部の剛性低下率

図 5-19 の剛性低下率時刻歴波形において、荷重-変形関係の微分によって求めた剛性低下率を  $M$ 、提案手法によって求めた剛性低下率を  $N$  とし、これらの相対誤差  $R_e$  を次式で定義する。

$$R_e = \left| \frac{M-N}{M} \right| \quad (5-9)$$

それぞれの試験体において、線形領域  $e$ 、塑性領域  $p$  で求めた相対誤差  $R_e$  の時間における平均値を表 5-11 に示す。なお、第 3 章 3.4.1 項で述べたように、除荷点などの速度反転時には  $\alpha$  が大きく変動するが、この時点では損傷は生じないものと考え、 $\alpha$  が  $0 \leq \alpha \leq 1$  の範囲にあるときのみについて相対誤差を求めている。表 5-11 より、どちらの試験体においても線形領域に比べて塑性領域の方が精度が高いことがわかる。塑性領域の誤差については、No.2 試験体で 5~8%，No.10 試験体では 5~14% となっており、多少のばらつきがあるものの概ね精度よく評価できている。

表 5-11 相対誤差の平均値

試験体	番号	線形領域 $e$	塑性領域 $p$
No.2	①	13.5	0.06
	②	0.35	0.05
	③	1.93	0.08
No.10	①	1.70	0.05
	②	2.55	0.10
	③	1.23	0.14

線形領域においては、どちらの試験体においても、塑性領域と比べて誤差が大きくなっており、波形状も異なっている。このように、塑性領域ではある程度の精度で剛性の低下を評価できる一方、線形領域における微小な剛性変化を評価することは困難であることがわかった。なお、剛性低下率時刻歴波形御と snap 時刻歴波形との対応を観察すると、概

ね snap の値が閾値を超えてピークとなる時点で、剛性低下率は変曲点となっており、このことは、第3.4.2項における議論に対応している。

ここでは、提案手法による剛性低下率の精度検証として、荷重-変形関係を微分することで算出した剛性低下率を精解値として相対誤差を求めた。損傷が進行する塑性領域では剛性低下率の傾向を概ね評価可能である。しかし、より精解に近いと考えられる荷重-変形関係から算出した剛性低下率であってもかなりのばらつきを示しており、検証方法のありかたも含め、評価精度の向上を目指す必要がある。剛性低下率時刻歴波形と相対速度時刻歴波形との対応関係を観察する限り、相対速度が相対速度の最大値のおよそ10%以下となる範囲では、剛性低下率が安定せず、発散している傾向にある。このことから、評価精度を保証することができる相対速度の下限值を設定するなどの対応が必要だと考えられる。

## 5.4 鉛直ブレース

### 5.4.1 試験体

検討するのは、文献[5-7]で報告されている筋かい付ラーメン架構の振動台実験結果とする。図 5-20 に試験体形状を示す。試験体は 1 層 1 スパンのラーメン架構に筋かいを逆 v 字形に一对配した、実大建物を 70% に縮約した寸法である。筋かい材は寸法 75×75×3.2 の STKR 角形鋼管となっており、ホワイトノイズ加振で得られた試験体の固有周期は 0.21 秒となっている。この試験体は左右の筋かい材が破断するまで加振が行われるが、梁や柱材に損傷は確認されず、試験体の非線形挙動は筋かい材の損傷によるものと考えることができる。これ以降では、筋かい材のことを鉛直ブレースと呼ぶことにする。

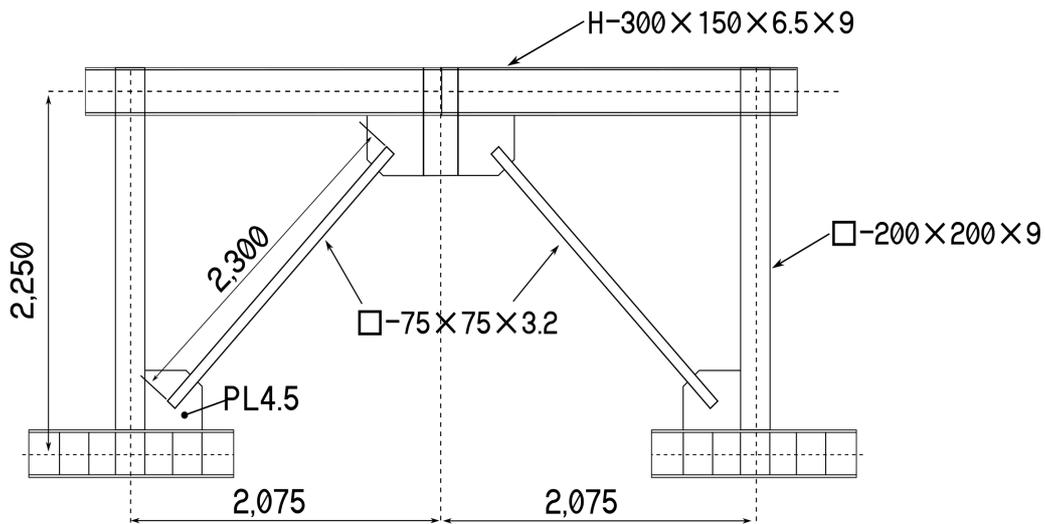


図 5-20 試験体概要(単位[mm])

### 5.4.2 実験装置

実験は防災科学技術研究所が運用する実大三次元震動台（E-ディフェンス）で行われた。実験装置の略図を図5-21に示す。本論文で使用する計測データは、ロードセルによって計測される試験体が負担する層せん断力，レーザー変位計によって計測される汎用質量の水平変位，汎用質量に設置してある加速度計によって計測される絶対加速度，震動台に設置してある加速度計によって計測される地動加速度である。これらのデータは計測時間刻みが0.001秒刻みで収録されている。

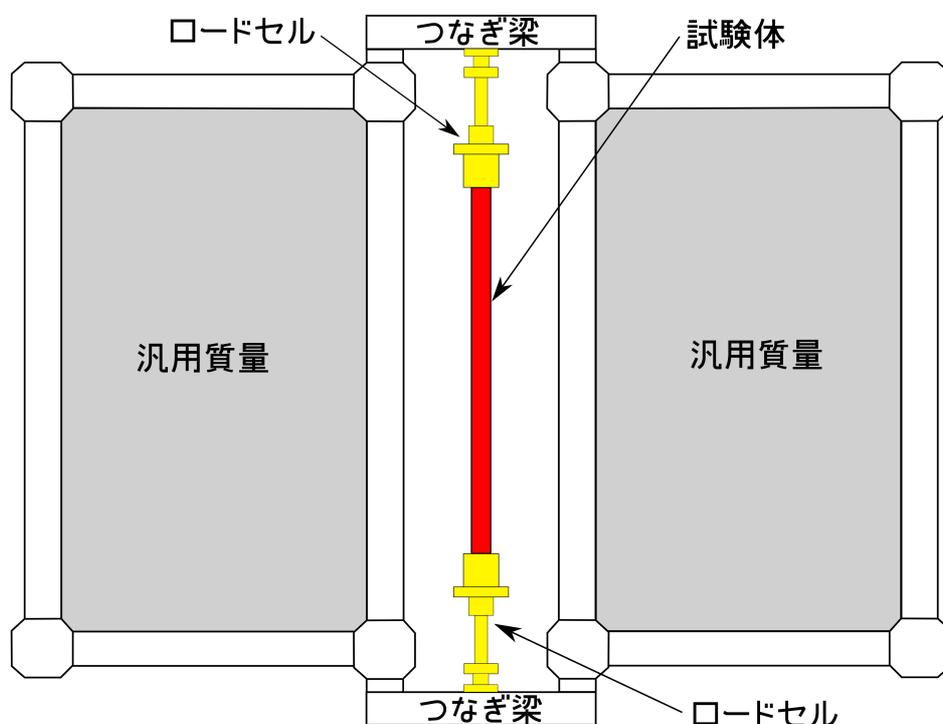


図5-21 実験装置伏図

### 5.4.3 入力波と加振手順

入力波には 1995 年兵庫県南部地震において、JR 鷹取駅で記録された EW 成分を用いている。この地震記録に加速度倍率を乗じることによって、入力波の入力レベルの異なる加振を行っている。加振順序、入力レベル、および試験体の状態を表 5-12 に示す。入力レベル 42% の入力波のフーリエ振幅スペクトルを図 5-22 に示す。入力波の卓越周期はおよそ 1.19 秒であり、試験体の固有周期と比べると 6 倍程度長周期である。

表 5-12 加振情報と試験体の状態

加振順序	入力レベル	試験体状態
1	10%	弾性
2	12%	
3	14%	
4	28%	
5	28%	
6	42%	鉛直ブレースの座屈
7	70%	鉛直ブレースの破断

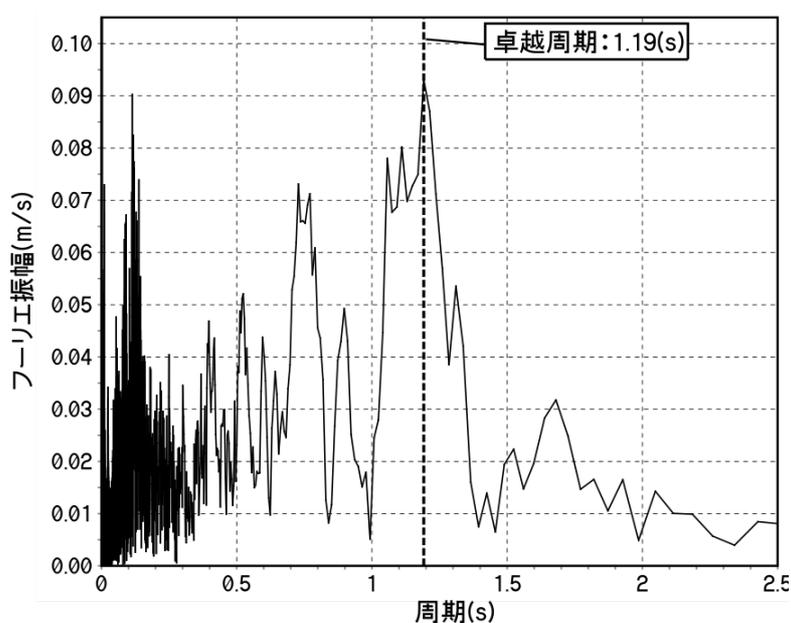


図 5-22 入力波のフーリエ振幅スペクトル(42%)

#### 5.4.4 snap による非線形性検出

鉛直ブレースの座屈，破断によって荷重-変形関係に生じる非線形性を，snap 時刻歴波形によって検出可能であるかを検討する。検討する入力レベルは，試験体がほぼ弾性範囲である 28%加振の 1 回目，部材に座屈が生じる 42%加振，部材が破断する 70%加振の 3 つの加振実験とする。

各加振実験で得られた絶対加速度応答時刻歴波形から，第 4 章で提案した方法によって，snap 時刻歴波形をそれぞれ算出する。振動载荷が始まる前の 1 秒間に計測された絶対加速度応答記録の最大値をノイズの最大値  $N_{\max}$  として，(4-24)式から  $\Delta t_{\min}$  を算出した結果， $\Delta t_{\min}=0.008$  秒であった。ダウンサンプリングする際の時間刻み  $\Delta t_d$  は， $\Delta t_{\min}$  の 2 倍として， $\Delta t_d=0.016$  秒とし，第 4.3.2 項で提案した方法によって snap 時刻歴波形を算出した。 $\Delta t_d$  は，固有周期のおよそ 1/13 程度であり，(4-27)式の範囲内である。図 5-23 に，荷重-変形関係，算出した snap 時刻歴波形，snap-絶対加速度関係を加振レベルごとに示す。荷重-変形関係では，横軸を水平変位，縦軸を層せん断力とし，降伏層せん断力を破線で示す。snap 時刻歴波形では，横軸に時刻，縦軸に snap を取り，(3-15)式で算出した変動する閾値を赤線で，(3-18)式で算出した一定値の閾値を一点鎖線でそれぞれ示す。snap-絶対加速度関係では，横軸を試験体の絶対加速度，縦軸を snap とし，(3-18)式から求めた閾値を一点鎖線で，(5-7)式で算出した降伏耐力時の絶対加速度を二点鎖線でそれぞれ示す。

図 5-23 より，試験体が弾性限界となる 28%加振では，荷重-変形関係および snap-絶対加速度関係ともに，ほぼ線形の履歴挙動となっている。しかし，負側の降伏層せん断力付近で若干非線形となっており，snap 時刻歴波形において，snap の値が閾値を超えている。42%加振では，荷重-変形関係および snap-絶対加速度関係はそれぞれ概ね線形であるが，鉛直ブレースに座屈が生じる時点で若干非線形となっている。snap 時刻歴波形においても，snap の値が閾値を超えているのが観察された。72%加振では，鉛直ブレースの降伏，あるいは破断によって，荷重-変形関係に非線形性が生じている。一方で，左右の鉛直ブレースが両方とも破断した後では，骨組がラーメン架構となり，履歴挙動が安定して

いる。このことは、snap-絶対加速度関係を観察することで判断することが可能である。鉛直ブレースの破断に伴い、snap-絶対加速度関係も不安定な履歴挙動となっているが、その後は線形履歴となっている。28%加振および42%加振と比較して、履歴の傾きが小さくなっているのがわかる。これは、鉛直ブレースの破断に伴い、骨組の剛性が低下したことに対応している。このことから、鉛直ブレースが設置されている骨組において、鉛直ブレースのみが損傷する場合には、snap-絶対加速度関係における線形履歴の傾きの変化のみで等価剛性の低下率および鉛直ブレースの破断を判断することが可能である。

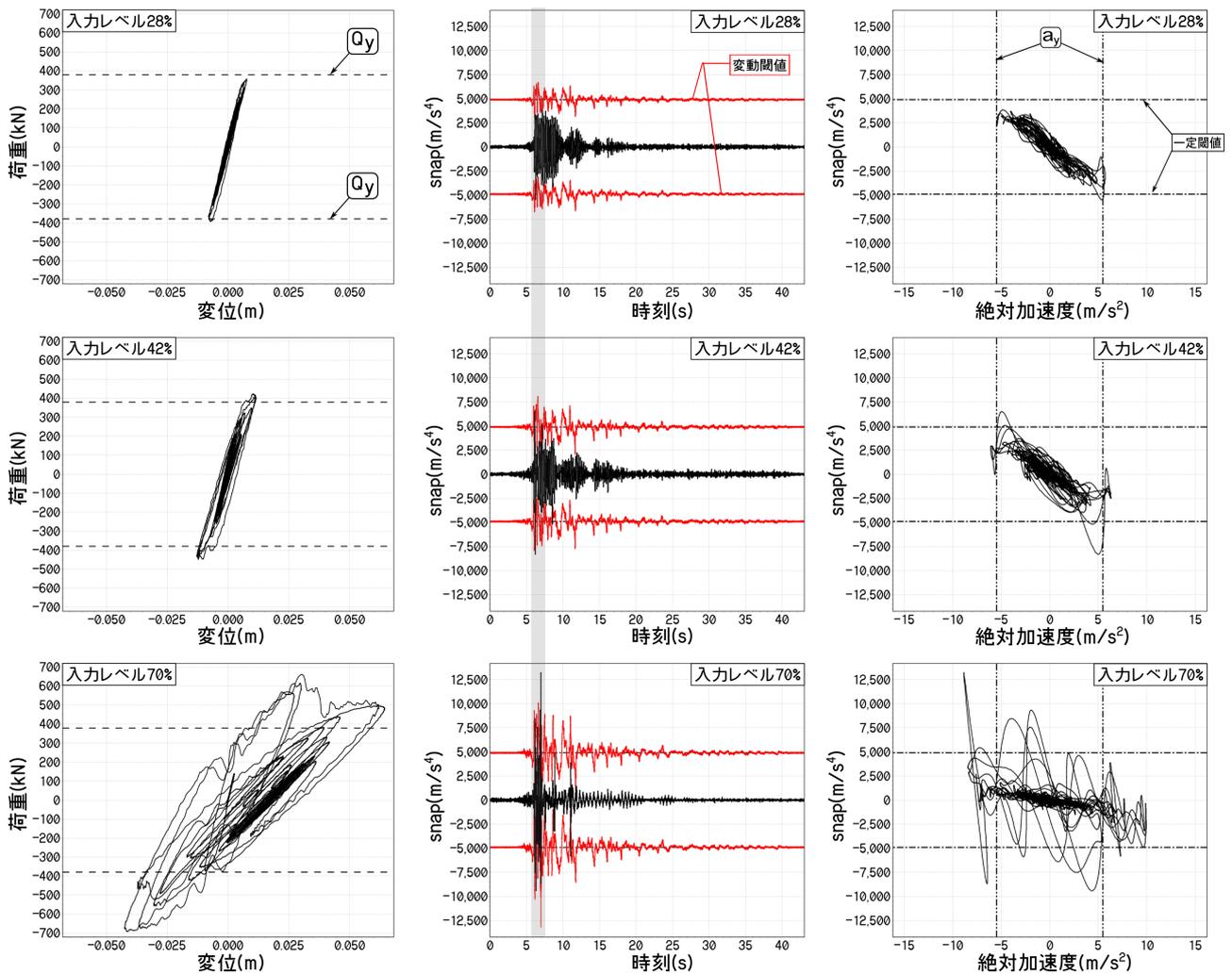


図 5-23 荷重-変形関係, snap 時刻歴波形, snap-絶対加速度関係

主要動部における応答挙動を観察するため、図 5-23 の snap 時刻歴波形上で網掛けした時間範囲のみの荷重-変形関係、snap 時刻歴波形、および相対速度時刻歴波形を図 5-24 に示す。相対速度時刻歴波形は、試験体の絶対加速と震動台で計測された地動加速度から相対加速度を算出し、算出した相対加速度を台形積分することによって求めた。地動加速度を考慮した閾値を赤線で示し、snap の値が閾値を超えている時点を青色の○で、その中で極値をとる時点を赤色の○でそれぞれ示す。

図 5-24 より、28%加振では、試験体は弾性範囲であるため、荷重-変形関係はほぼ線形となっており、ほとんどの時刻で snap は閾値の範囲内で振動している。しかし、荷重-変形関係において、若干の剛性変化が生じている時点において、snap の値も若干ではあるが、閾値を超えていることが観察された。42%加振では、鉛直ブレースに座屈が生じ、荷重-変形関係が非線形となっている時点において、snap の値が閾値を超えていた。70%加振においては、鉛直ブレースに破断が生じ、終局状態となっている。鉛直ブレースの降伏、または破断によって荷重-変形関係は非線形となっており、snap 時刻歴波形において閾値を超えている時点が観察された。

閾値を超えている snap の値を、加振レベルごとに比較すると、およそ相対速度の大きさに比例していることがわかる。特に、28%加振と 42%加振では、閾値を超えている時点における剛性の変化はそれほど変わらないものの、42%加振の相対速度は、入力レベル 28% の 1.5~2 倍程度の大きさとなっており、それに応じて snap のピーク時点での値も 1.5~2 倍程度となっている。これは snap の値が剛性の変化と相対速度の積によって決まることに対応している。また、28%加振および 42%加振では、弾性振動中の剛性にはほとんど変化がないため、弾性振動中の snap の値はほとんど変わらない。一方、入力レベル 70%において、7.0 秒付近で鉛直ブレースが破断し、その後はラーメン架構のみとなって振動するため、弾性剛性の低下に伴い snap の値が小さくなっていることが観察された。

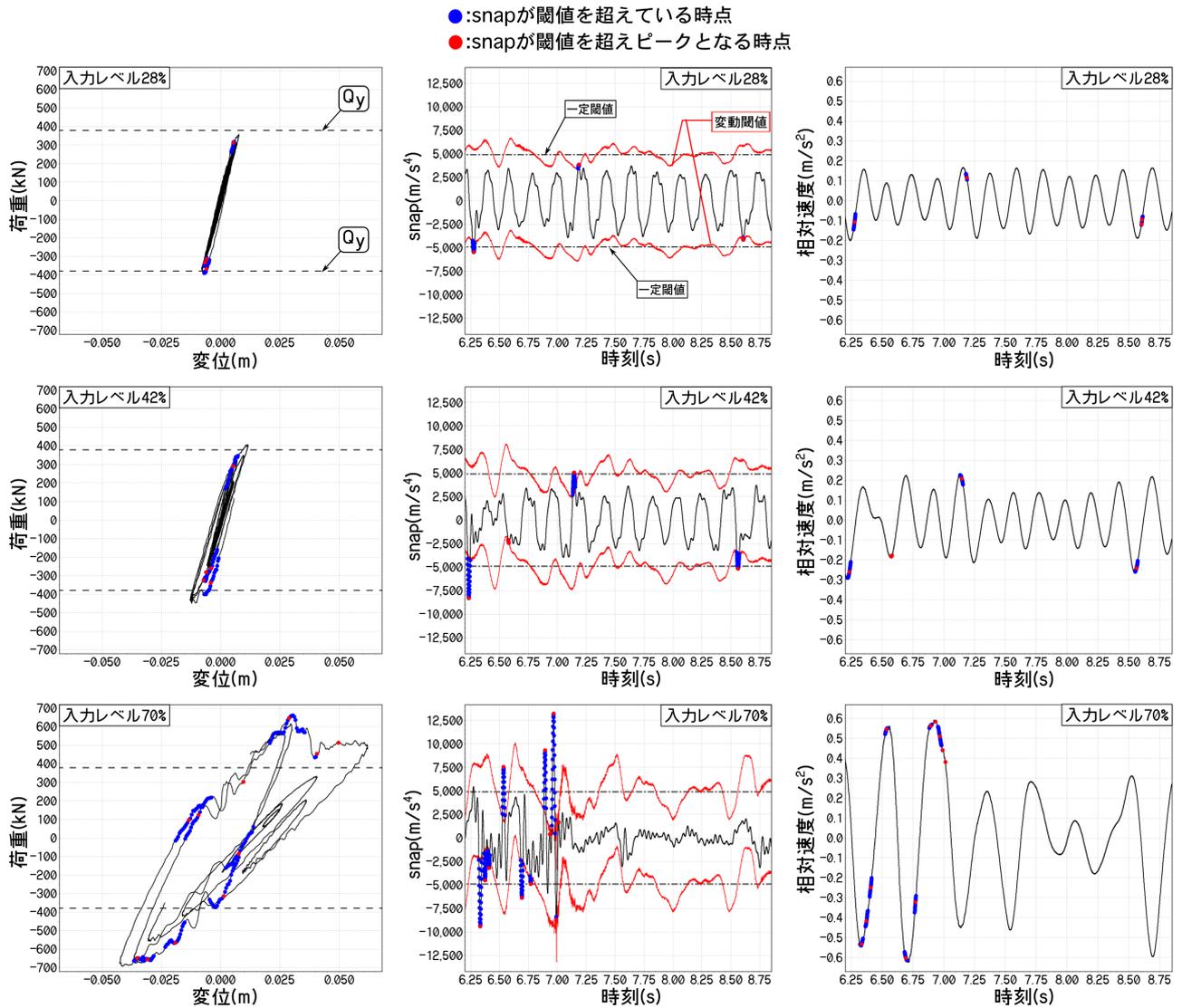


図 5-24 主要動における応答 (荷重-変形関係, snap 時刻歴波形, 相対速度時刻歴波形)

### 5.5 まとめ

本章では、第3章で提案した損傷評価手法の適用性を、既往研究で行われた構造部材の振動台実験結果を用いて検討した。検討した試験体は露出型柱脚2体、柱梁接合部2体、鉛直ブレース1体の計5体である。

露出型柱脚の荷重-変形関係はスリップ性状となり、非線形挙動として考えられる、降伏、スリップ開始、スリップ終了、という状態では、荷重-変形関係が非線形となる時点が明瞭であり、各挙動を snap によって検出可能であることを示した。併せて、検出した非線形挙動がスリップ挙動に起因するものか否かを、snap-絶対加速度関係から判別する方法を提案し、提案方法によって判別が可能であることを明らかにした。さらに、降伏点を検出可能であることから、第3章で提案した塑性変形量の推定方法を用いて、塑性化ごとの塑性率の推定精度を検証した。降伏点直前の剛性が初期弾性剛性と同定度である復元力特性を有する場合には、十分な精度で塑性率を推定することが可能であることを示した。

第3章で提案した剛性低下率の評価方法の適用性を、履歴復元力においてバウシंगाー部をもつ柱梁接合部試験体において検討した。jerk と相対速度から接線剛性を算出し、初期剛性に対する割合を剛性低下率として、概ね精度良く剛性低下を評価することが可能であることを示した。剛性低下率時刻歴波形の変曲点において、snap の値はピークとなることから、snap によって線形挙動時と塑性変形時を判別することで、塑性変形時の剛性低下のみを扱つことが可能であることがわかった。

鉛直ブレース試験体は、1スパンの骨組架構にブレース材がK形に配置されており、鉛直ブレースには座屈が生じ、最終的には破断する。ブレース部材破断後は骨組架構のみの安定した履歴挙動となる。鉛直ブレースの座屈や破断に起因する、架構の層せん断力-層間変位に生じる非線形性を snap によって検出することが可能であることを示した。さらに、鉛直ブレースの破断前後によって生じる等価剛性の変化を、snap-絶対加速度関係における線形挙動時の傾きの変化から検出・評価できる可能性を示した。

ここでは、構造部材の種類によらず、snap によって試験体の荷重-変形関係が非線形と

なる時点を検出することが可能であることを示した。しかし、snapによって検出される非線形性が、どの現象（降伏，亀裂や破断，座屈など）によるものなのかを判別することは困難であることがわかった。

本研究では，加速度の高次微分という高周波ノイズに対する耐性が低い演算によって算出した物理量を用いて，損傷評価手法を提案している。しかし，加速度記録にノイズが含まれる実測結果においても，第4章で提案したノイズ低減処理方法によって，損傷評価手法の適用が可能であることを示した。

## 5.6 参考文献

- [5-1]秋山宏，山田哲，高橋誠，桂大輔，木村克次，矢幡秀介：露出型柱脚の実大振動台実験，日本建築学会構造系論文集，第514号，pp.185-192，1998.12.
- [5-2]秋山宏，山田哲，箕輪親広，寺本隆幸，大竹章夫，矢部喜堂：慣性加力装置を用いた構造要素の実大振動台実験方法，日本建築学会構造系論文集，第505号，pp.139-146，1998.3.
- [5-3]秋山宏，山田哲，松本由香，松岡三郎，小倉桂治，北村春幸：実大振動台実験による柱梁接合部の破壊性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第512号，pp.165-172，1998.10.
- [5-4]秋山宏，山田哲，松本由香，田中宏志，三山剛史，寺田岳彦：冷間成形角形鋼管柱の実大振動台実験，日本建築学会構造系論文集，第521号，pp.133-140，1999.7.
- [5-5]秋山宏，山田哲，松本由香，松岡三郎，大竹章夫，杉本浩一：実大柱梁接合部の試験温度による延性破壊—脆性破壊遷移，日本建築学会構造系論文集，第522号，pp.105-112，1999.8.
- [5-6]秋山宏，山田哲，松本由香，竹内徹，杉本浩一：鋼構造柱梁改良接合部の終局耐震性に関する実大振動台実験，日本建築学会構造系論文集，第551号，pp.141-148，2002.1.
- [5-7]岡崎太一郎，引野剛，デミトリウス・G・リグノス，梶原浩一：筋かい端部をピンとした筋かい付ラーメン架構の振動台実験，鋼構造年次論文報告集，第21巻，pp.367-374，2013.11.
- [5-8]国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」より課題名「鉄骨造建物実験研究イノベティブ実験」(<https://www.edgrid.jp/datas>)，アクセス日時2014/03/17 1:12



## 第6章 多層骨組構造物の振動台実験結果への適用性

### 6.1 はじめに

第2章，第3章では，せん断質点系を対象として，絶対加速度の1階微分である jerk および2階微分である snap を用いた損傷評価手法を提案し，第4章では，計測時間刻みによるノイズへの対処方法を提案した。第5章において，既往研究で行われた振動台実験で得られた実測結果を用いて，それらの適用性を検討した。検討した振動台実験結果は，主要構造部材である露出型柱脚，柱梁接合部，鉛直ブレースを対象としたもので，各構造部材は損傷が1箇所であり，1自由度系とみなすことができる。試験体の非線形挙動と提案した損傷評価手法との対応関係が観察しやすいもので，荷重-変形関係に生じる非線形性を snap によって検出することが可能であることを示した。

しかし，実際の建築構造物の多くは骨組系であり，複数の構造部材によって構成されているため，損傷は1箇所ではなく，複数箇所が生じるものと考えられる。本章では，既往研究で行われた骨組構造物の振動台実験結果を用いて，第2章から第5章までに検討したせん断質点系における損傷評価手法を拡張し，骨組系における適用性を検討する。振動台実験結果への適用性を検討する前に，提案手法を骨組系へ拡張する際の問題点を考えるとともに，事前検討として，平面骨組モデルによる数値応答解析を行い，解析結果を用いて提案手法の適用性を検討する。

## 6.2 骨組系への適用

ここでは、第3章で提案した多質点せん断系における層の非線形性検出方法を骨組系に拡張し、その適用性を検討する。適用対象とする振動台実験は、2013年度に E-defense において行われた 18 層の鉄骨骨組構造物である。提案した多質点せん断系の非線形性検出方法は、振動系がせん断系であるものとしている。すなわち、ある層にのみ層間変位を与えた場合、当該層にのみ層せん断力が生じるものとして理論構築を行っている。しかし、一般的な骨組構造物は、せん断系ではないため、ある層に層間変位を与えた場合、層せん断力は当該層だけでなく、他の層にも生じることになる。せん断系として置換するためには、梁が十分な剛性を有している必要がある。

そこで、実験結果を用いて適用性を検討する前に、梁の剛性をパラメータとした骨組解析を行い、梁の剛性が骨組の応答に与える影響について検討する。また、損傷箇所によっては、層剛性に与える影響が異なる場合が予想される。そこで、損傷箇所をパラメータとして、柱のみが損傷する場合と梁のみが損傷する場合について、他の層の応答に与える影響についても併せて検討する。

### 6.2.1 骨組解析モデル

解析モデルは、後述する 18 層鉄骨構造物の部分架構として、3 層 1 スパン平面骨組とする。層重量、部材断面および力学特性は、試験体の情報を参考にして決定した。図 6-1 に解析モデルを示す。柱および梁は線材と材端ばねで構成し、1 層の柱脚は固定とする。材端ばねの復元力特性は完全弾塑性型とする（図 6-2）。各層重量は 71.3kN として、柱と梁の節点にそれぞれ 35.6kN とする。表 6-1 に柱および梁の部材断面、表 6-2 に部材の力学特性および断面性能をそれぞれ示す。表 6-2 に示した力学特性の解析ケースを「基準ケース」とし、梁部材のヤング率、および柱と梁の塑性断面係数を解析パラメータとして計 4 つの解析ケースについて解析を行う。表 6-3 に解析ケースのパラメータを、図 6-3 に解析ケースのモデルをそれぞれ示す。すべてのケースにおいて減衰定数は 0% とする。

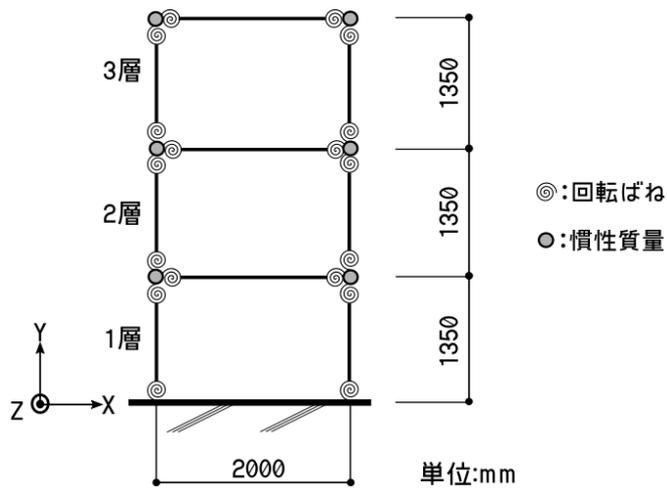


図 6-1 解析モデル

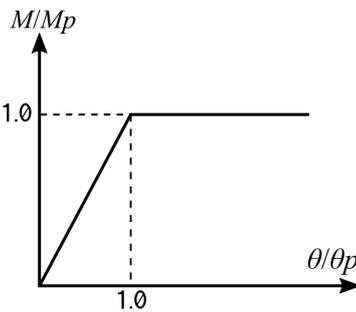


図 6-2 材端ばねの復元力特性

表 6-1 柱および梁の断面形状(単位:mm)

階	柱断面	梁断面
3	B-200×200×12 (SM490A)	BH-270×85×6×12 (SM490A)
2		
1		

表 6-2 部材の力学特性と断面性能(基準ケース)

部材	ヤング率 (kN/cm <sup>2</sup> )	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏応力 (kN/cm <sup>2</sup> )	Z 軸の断面 2 次モーメント $I_z$ (cm <sup>4</sup> )	塑性断面係数 $Z_p$ (cm <sup>3</sup> )
柱	20500	86.53	39	4980	601
梁	20500	35.16	39	4142	354

表 6-3 実行した解析ケース

解析ケース名	梁のヤング率 (kN/cm <sup>2</sup> )	梁の塑性断面係数 $bZ_p$ (cm <sup>3</sup> )	柱脚の塑性断面係数 $cZ_p$ (cm <sup>3</sup> )
梁基準_1層柱脚損傷	20500	1000000	601
梁剛_1層柱脚損傷	20500×10 <sup>4</sup>	1000000	601
梁基準_1層梁損傷	20500	354	1000000
梁剛_1層梁損傷	20500×10 <sup>4</sup>	354	1000000

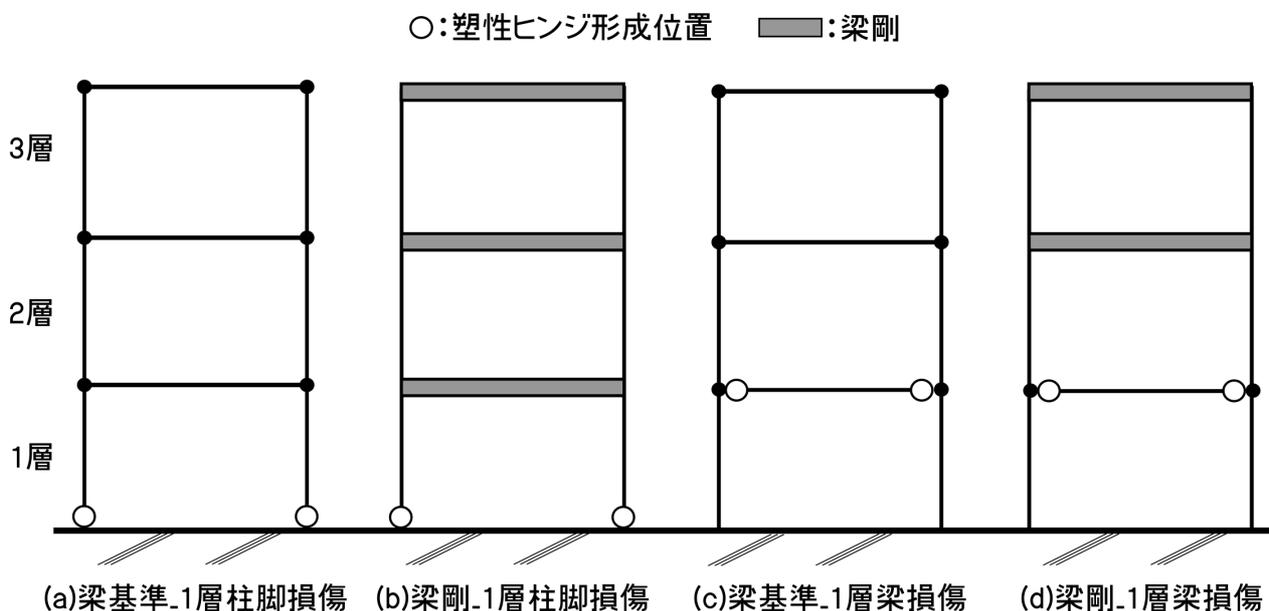


図 6-3 解析ケースのモデル

## 6.2.2 1層柱脚損傷ケース

### 6.2.2.1 静的増分解析

梁基準\_1層柱脚損傷および梁剛\_1層柱脚損傷の2つのケースについて、各層の初期弾性剛性および降伏層せん断力を算出するために静的増分解析を行う。外力分布を逆三角形分布として、1層の層間変形が1/20となるまで強制変位を与えることとする。増分解析によって得られた各層の初期弾性剛性および降伏層せん断力を表6-4に示す。降伏層せん断力は、初めて塑性ヒンジが生じた時点の層せん断力としている。

表 6-4 静的増分解析結果

解析ケース名	層	層剛性(kN/m)	降伏層せん断力(kN)
梁基準_1層柱脚損傷	1	43520	485
	2	25245	-
	3	21043	-
梁剛_1層柱脚損傷	1	93546	680
	2	83531	-
	3	71222	-

### 6.2.2.2 地震応答解析

静的増分解析を行った2つの解析ケースについて地震応答解析を行う。入力する地震動は、兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分[6-1]で加速度倍率3倍としたものとする。応答解析は、第3章で行った数値解析と同様に、線形加速度法により行った。応答解析する際の時間刻み $\Delta t$ は $\Delta t=0.004$ 秒とした。地動加速度の時間刻みは0.02秒であるから、地動加速度記録が無い時刻における加速度記録については、時刻前後の記録から内挿により算出した。

### 6.2.2.3 解析結果

解析ケースごとに、地震応答解析によって得られた各層の層せん断力-層間変位関係および、各層の層せん断力から算出した加速度記録から求めたsnap時刻歴波形を層ごとに

図6-4～6-6に示す。層せん断力-層間変位関係では、縦軸を層せん断力、横軸を層間変位とし、降伏層せん断力を破線で、初期弾性剛性を青線でそれぞれ示す。snap時刻歴波形では、縦軸をsnap、横軸を時刻とし、1層解析結果のみ第3章(3-40)式で算出した閾値を赤線で示す。併せて、初期弾性剛性と層間加速度を用いて第3章(3-42)式から算出した $\Delta_s \ddot{a}_j$ の時刻歴波形を示す。 $\Delta_s \ddot{a}_j$ は各層での弾性振動時のsnapと実際のsnapとの差を取った値である。縦軸を $\Delta_s \ddot{a}_j$ 、横軸を時刻とする。snapの値が設定した閾値を超えてピークとなった時点を青色の○で示す。

図6-4より、柱脚が損傷している1層において、梁剛ケースでは、層せん断力-層間変位関係の履歴挙動がせん断系と同様に、バイリニア型復元力特性のような安定した履歴となっている。一方、梁基準ケースでは、梁剛ケースに比べて、履歴挙動が不安定である。snap時刻歴波形より、梁の剛性に関係なく、層せん断力-層間変位関係が非線形となる時点をsnapによって検出することが可能であることがわかる。 $\Delta_s \ddot{a}_j$ 時刻歴波形においても、梁の剛性によらず、層せん断力-層間変位関係の非線形性に応じてピークが生じていることが観察された。しかし、梁剛ケースの方が梁基準ケースに比べると、よりピークが明瞭であり、線形挙動時では $\Delta_s \ddot{a}_j$ の値はほぼゼロとなっていることがわかる。これは、梁基準ケースでは、弾性振動中においても、層せん断力-層間変位関係が不安定であることが原因である。

一方、図6-5、6-6より、損傷が生じていない2層および3層において、梁剛ケースでは、層せん断力-層間変位関係は初期弾性剛性と同様の傾きで線形性を保持した履歴挙動となっている。一方で、梁基準ケースでは、当該層に損傷が生じていないにもかかわらず、履歴挙動が線形性を保持できていない。これは、梁の剛性が低いため、振動系がせん断系とならず、1層の損傷が上層の応答に影響を与えていることが原因として考えられる。このことから、せん断系とみなせるだけの剛性を梁が有している場合には、柱の損傷は当該層の応答にのみ影響を与えることがわかった。 $\Delta_s \ddot{a}_j$ 時刻歴波形において、梁剛ケースでは、 $\Delta_s \ddot{a}_j$ の値はほぼゼロであり、一定の幅で振動している。一方で、梁基準

ケースでは、梁剛ケースに比べて大きな値で振動した波形となっている。これは前述したように、1層の柱脚損傷によって、上層の層せん断力-層間変位にも若干ではあるものの非線形性が生じ、剛性が変化しているためだと考えられる。

以上から、梁が剛であり、骨組がせん断系として置換できる場合では、柱の損傷は当該層の応答のみに影響を与える。層の損傷が柱の損傷のみに起因する場合は、snapによって損傷した層を検出することが可能である。一方で、梁の剛性が不足し、非せん断系となる場合は、ある層に損傷が生じると、損傷層よりも上層の応答においても、損傷層の影響が生じる。層せん断力-層間変位関係は、概ね線形であるものの、せん断系と比較すると、不安定な履歴挙動となり、若干の非線形性が生じる。このため、無損傷層を損傷が生じたとして判定する可能性がある。

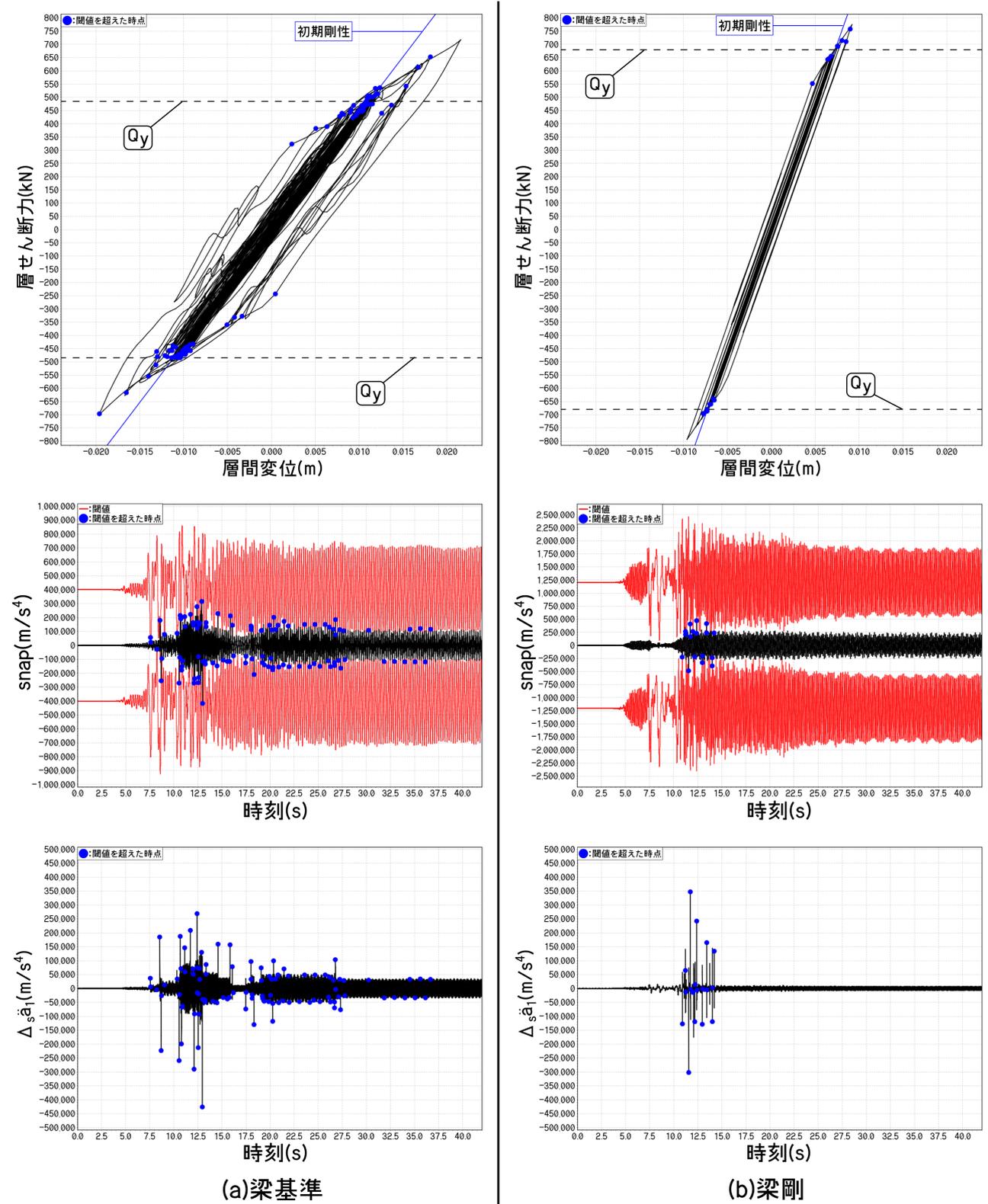


図 6-4 1層解析結果

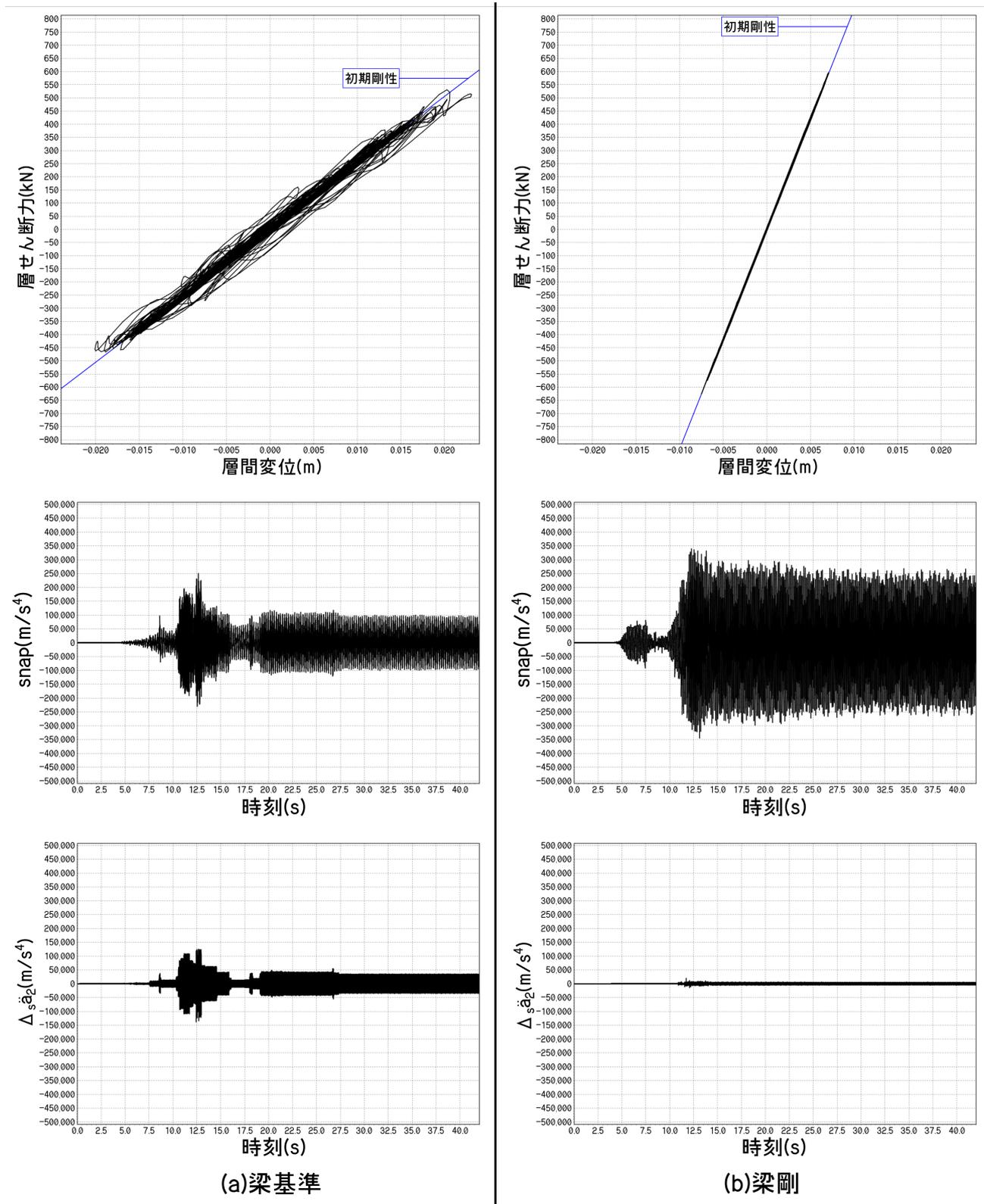


図 6-5 2層解析結果

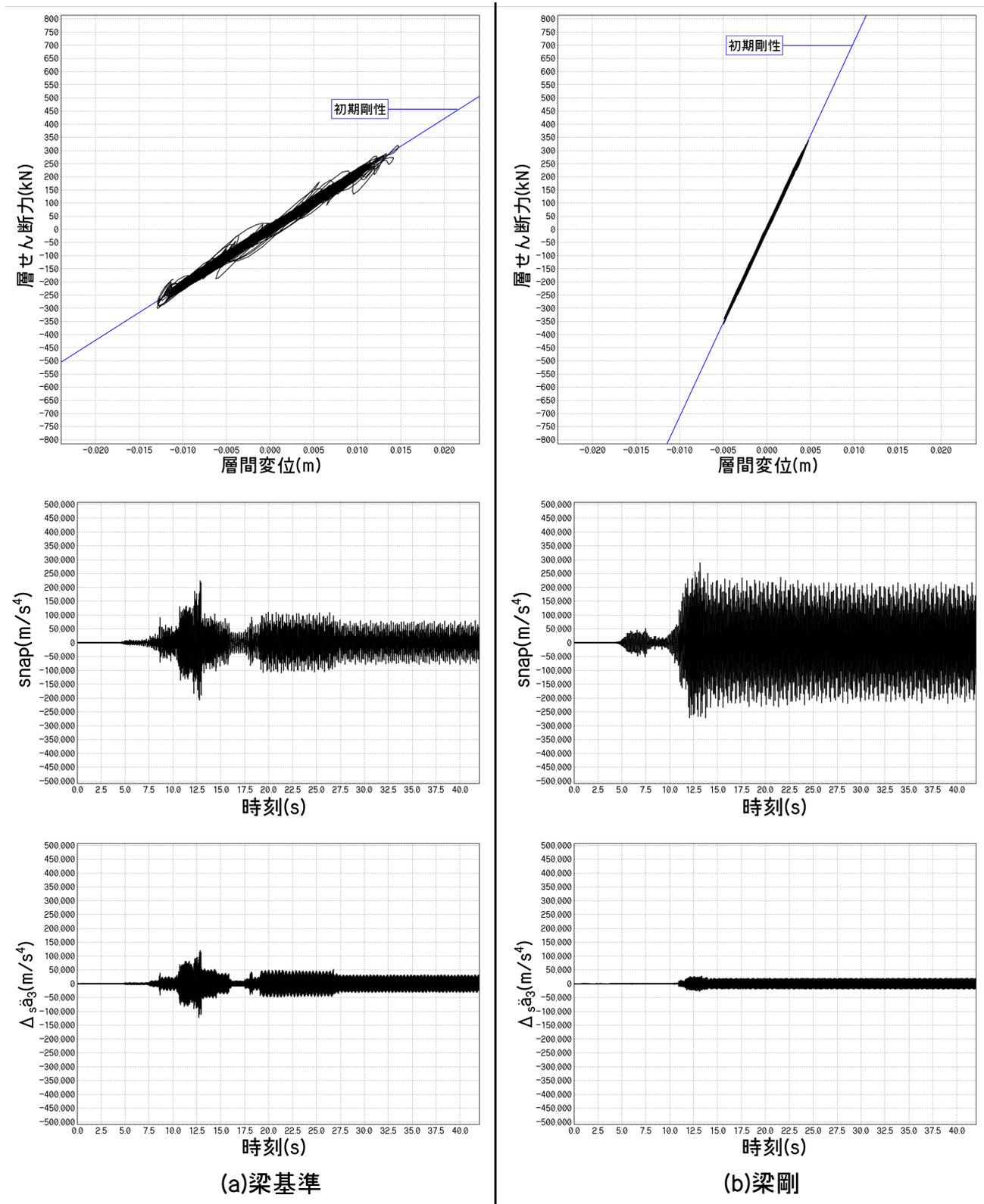


図 6-6 3層解析結果

## 6.2.3 1層梁損傷ケース

### 6.2.3.1 静的増分解析

梁基準\_1層梁損傷および梁剛\_1層梁損傷の2つのケースについて、各層の初期弾性剛性および降伏層せん断力を算出するために静的増分解析を行う。外力分布を逆三角形分布として、1層の層間変形が1/20となるまで強制変位を与えることとする。増分解析によって得られた各層の初期弾性剛性および降伏層せん断力を表6-5に示す。降伏層せん断力は、初めて塑性ヒンジが生じた時点の層せん断力としている。

表 6-5 静的増分解析結果

解析ケース名	層	層剛性(kN/m)	降伏層せん断力(kN)
梁基準_1層梁損傷	1	43523	298
	2	25236	-
	3	21055	-
梁剛_1層梁損傷	1	47686	357
	2	41549	-
	3	71198	-

### 6.2.3.2 地震応答解析

静的増分解析を行った2つの解析ケースについて地震応答解析を行う。入力する地震動は、兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録 NS 成分[6-1]で加速度倍率3倍したものとす。応答解析は、線形加速度法により行った。応答解析する際の時間刻み  $\Delta t$  は  $\Delta t = 0.004$  秒とした。地動加速度の時間刻みは0.02秒であるから、地動加速度記録が無い時刻における加速度記録については、時刻前後の記録から内挿により算出した。

### 6.2.3.3 解析結果

解析ケースごとに、地震応答解析によって得られた各層の層せん断力-層間変位関係および、各層の層せん断力から算出した加速度記録から求めた snap 時刻歴波形を層ごとに図6-7~6-9に示す。層せん断力-層間変位関係では、縦軸を層せん断力、横軸を層間変位

とし、降伏層せん断力を破線で、初期弾性剛性を青線でそれぞれ示す。snap 時刻歴波形では、縦軸を snap、横軸を時刻とし、1層解析結果のみ(3-40)式で算出した閾値を赤線で示す。併せて、初期弾性剛性と層間加速度を用いて第3章(3-42)式から算出した  $\Delta_s \ddot{a}_j$  の時刻歴波形を示す。 $\Delta_s \ddot{a}_j$  は各層での弾性振動時の snap と実際の snap との差を取った値である。縦軸を  $\Delta_s \ddot{a}_j$ 、横軸を時刻とする。snap の値が設定した閾値を超えてピークとなった時点を青色の○で示す。

図6-7より、梁が損傷している1層においては、第6.2.2項の柱脚損傷ケースと同様に、梁剛ケースの層せん断力-層間変位関係は、履歴挙動がバイリニア型復元力特性のような安定した挙動となっている。一方、梁基準ケースでは、梁剛ケースと比較して不安定な履歴挙動である。特に、梁端降伏後の塑性変形中の履歴は、柱脚損傷ケースと比較してもより不安定である。柱の損傷よりも梁の損傷の方が、より層の応答に影響が生じている。snap 時刻歴波形において、梁の剛性に関係なく、層せん断力-層間変位関係が非線形となる時点を snap によって検出することが可能であることがわかる。しかし、梁基準ケースでは、層せん断力-層間変位関係は損傷に無関係である非線形性が生じており、snap によってこのような非線形性も検出する場合がある。 $\Delta_s \ddot{a}_j$  時刻歴波形においても、梁の剛性によらず、層せん断力-層間変位関係の非線形性に依じてピークが生じていることが観察された。図6-4の柱脚損傷ケースと比較すると、梁の剛性によって  $\Delta_s \ddot{a}_j$  の値にそれほど違いはみられなかった。

図6-8より、梁の剛性に関係なく、損傷していない2層の層せん断力-層間変位関係も1層と同様に、バイリニア型の履歴特性となっており、非線形性を示している。これは、1層の梁端が降伏し、塑性ヒンジを形成した結果、柱の長柱化により、2層の剛性がみかけ上、低下するためである。梁の剛性が異なるため、若干ではあるものの、梁基準ケースは梁剛ケースに比べると不安定な履歴挙動となっている。 $\Delta_s \ddot{a}_j$  時刻歴波形をみると、梁の剛性によらず、1層と同様にピークを生じており、 $\Delta_s \ddot{a}_j$  の値にもそれほど違いが観察されなかった。一方で、図6-9より、梁剛性ケースでは、3層における層せん断力-層

間変位関係は初期弾性剛性で線形性を保持した履歴挙動となっている。しかし、梁基準ケースでは、当該層に損傷が生じていないにもかかわらず、履歴挙動が線形性を保持できていない。これは、柱脚損傷ケースと同様に、振動系がせん断系とならず、1層の梁損傷が上層の応答に影響を与えていることが原因と考えられる。このため、 $\Delta_s \ddot{a}_j$  時刻歴波形では、梁剛ケースではほぼ一定の値で振動しているが、梁基準ケースでは梁剛ケースよりも大きな値を取って振動してしまっている。

以上より、せん断系であったとしても、損傷箇所が梁である場合には、損傷した層の1つ上層の応答にも影響を与え、層せん断力-層間変位関係において非線形性が生じることがわかった。このことから、梁が十分な剛性を有しており、せん断系とみなせたとしても、柱の損傷と異なり、梁に損傷が生じた場合では、無損傷の層であっても層せん断力-層間変位関係が非線形となるため、無損傷層を損傷有りと判定する可能性がある。一方で、柱脚損傷ケースと同様に、梁基準ケースにおいては2層だけでなく、3層においても層せん断力-層間変位関係に非線形性が生じることがわかった。

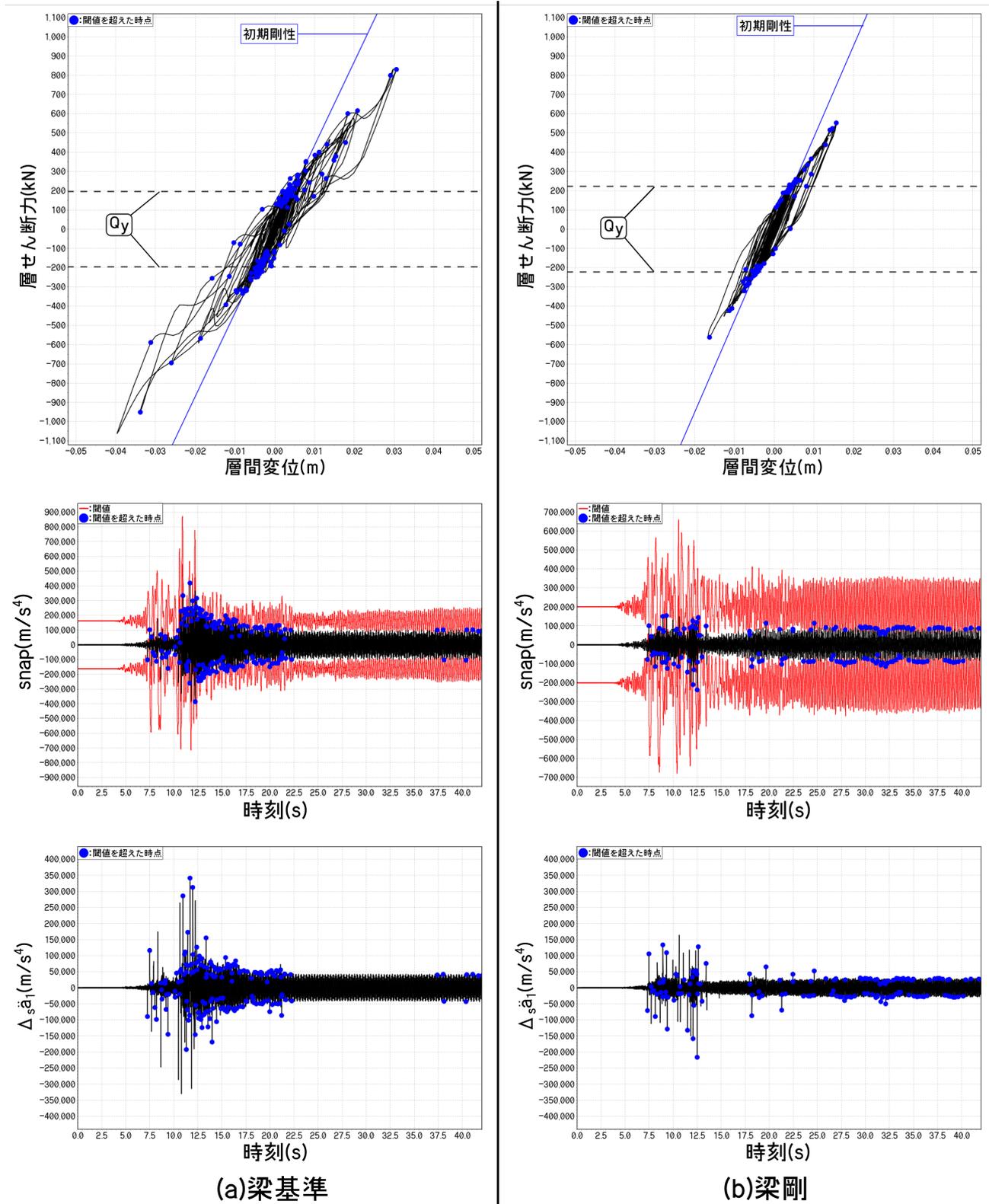


図 6-7 1層解析結果

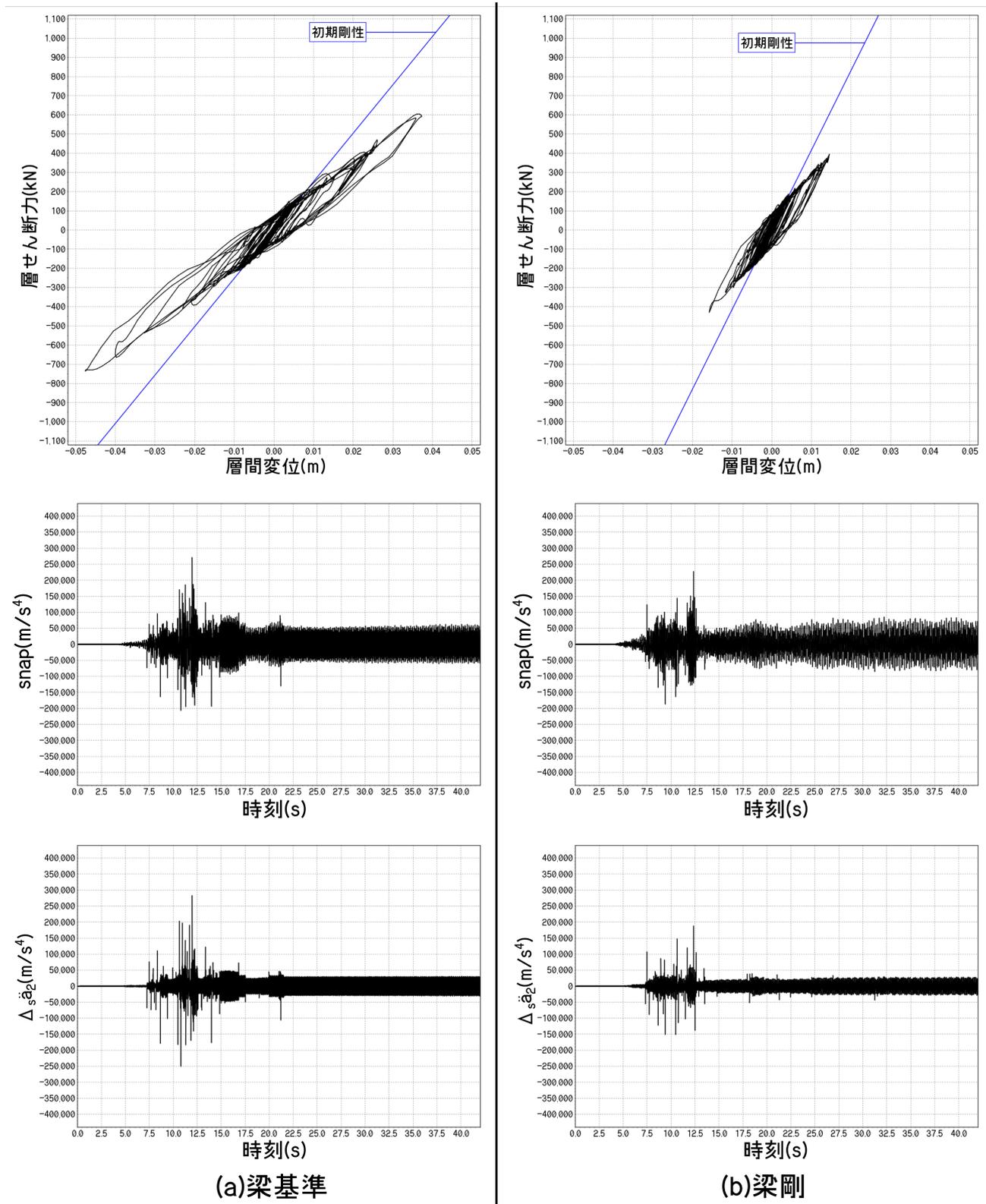


図 6-8 2層解析結果

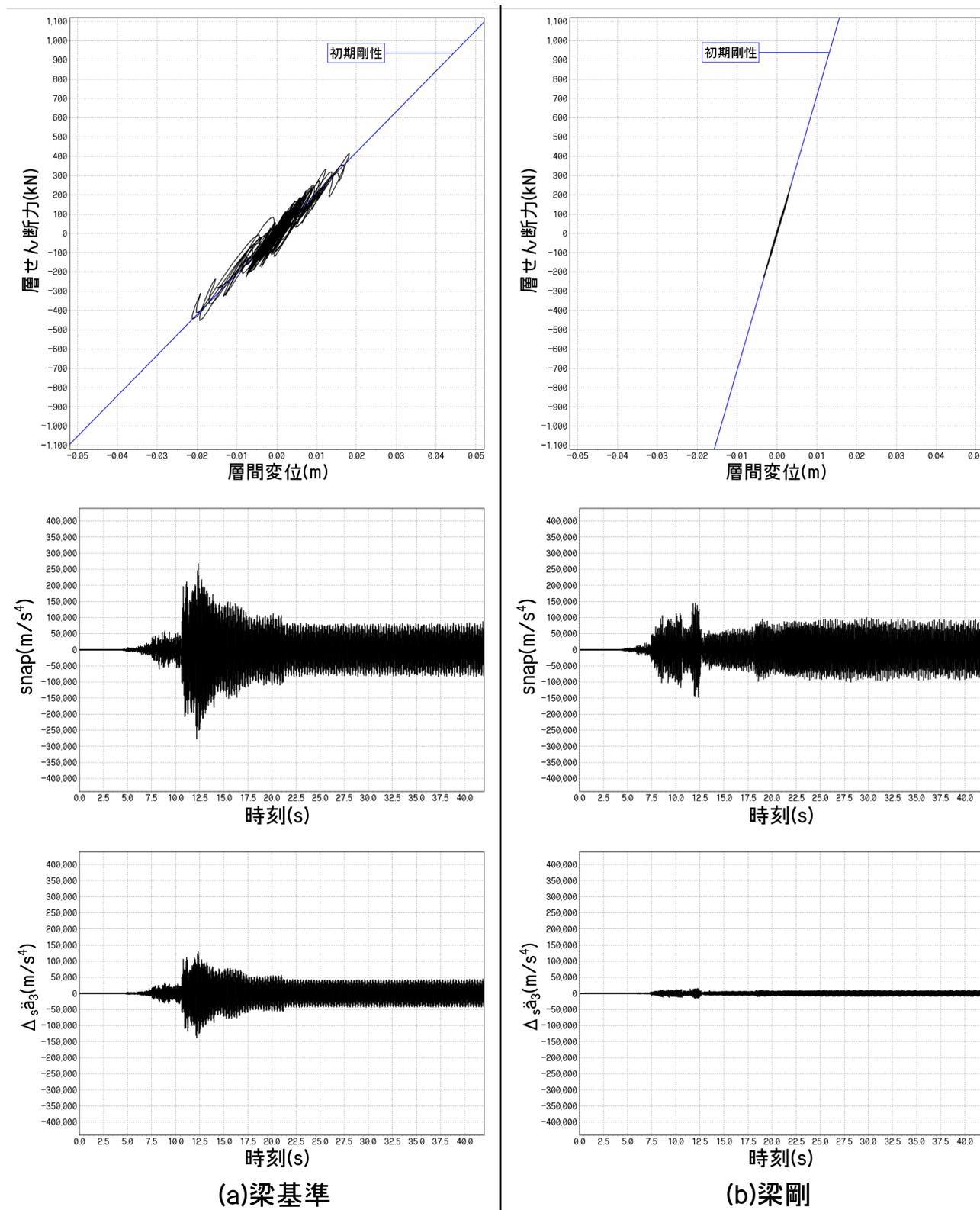


図 6-9 3層解析結果

#### 6.2.4 まとめ

ここまででは、多質点せん断系において提案した非線形性検出方法を、多層骨組系に拡張し、その適用性を数値応答解析によって検討した。解析モデルは3層1スパン平面骨組として、梁の剛性と損傷箇所をパラメータとして、静的増分解析および地震応答解析を行った。

梁が十分な剛性を有しており、振動系をせん断系とみなすことができるとすると、柱のみが損傷する場合には、snapによって、当該層の損傷として判定することが可能であることを示した。一方、梁が損傷する場合には、柱の長柱化により、損傷層の1つ上の層においても剛性が低下することになるため、層せん断力-層間変位関係に非線形性が生じる。このため、提案した方法では、無損傷層を損傷有りとして評価する可能性がある。

一方、一般的な骨組系のように、完全なせん断系とみなすことができない場合には、損傷箇所にかかわらず、損傷層より上層においても、層せん断力-層間変位関係に非線形性が生じる。このため、提案した方法による非線形性検出方法では、損傷層の同定および損傷度の評価が困難となる。しかし、層せん断力-層間変位における非線形性を検出することは可能であることから、検出回数が多い場合は、それだけ各層で非線形性が生じ、損傷状況と対応した関係となることが推察される。以上の知見をもとに、次節において、18層鉄骨骨組構造物の振動台実験結果を用いて、非線形性検出方法の適用性を検討する。

## 6.3 18層鉄骨骨組構造物

### 6.3.1 試験体

図 6-10 に試験体概要を示す[6-1]～[6-4]。試験体は 18 層の鉄骨造純ラーメン構造で、柱/梁曲げ耐力比を 1.5 倍程度とした梁降伏先行型として設計されている。縮尺は 1/3 で、Y 方向 6m (2m×3 スパン)，X 方向 5 m (5m×1 スパン)，試験体高さは 24.6m である。図の点線で囲まれたフレームは、実験時に試験体の倒れ込みが生じた際に、対応するように設計された防護フレームであり、ブレース付ラーメン骨組である。各階で使用されている柱および梁の断面を表 6-6 に示す。柱梁接合部は、2～7 階までを内ダイアフラム形式、それ以降では通しダイアフラム形式であり、梁端部ディテールは、フランジを突合せ溶接、ウェブをシアプレート (PL-6 140×70mm) による HTB 接合 (3-M16 S10T) としている。各階の床スラブは、厚さ 50mm とするデッキスラブで、各階の重錘は、小梁下フランジに取り付けられたフラットデッキにコンクリートが充填されている。各階重量は 214kN、試験体の 1 次固有周期は 1.15 秒となっている。試験体の梁はスラブによって一体化しており、梁端やスラブに損傷が生じるまでは、剛床と仮定できる。

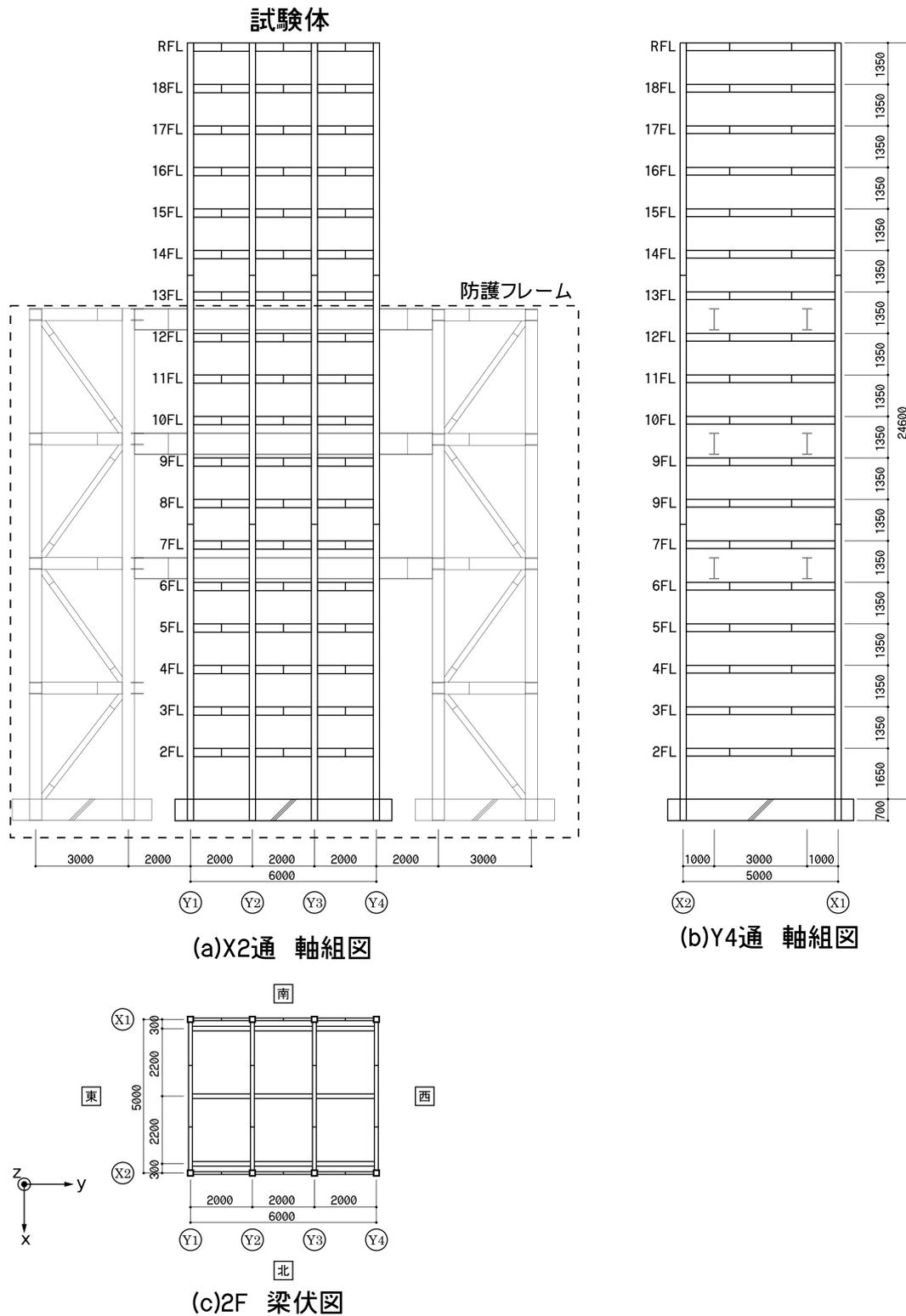


図 6-10 試験体概要

表 6-6 柱および梁の断面形状

階	柱断面	梁断面
R	-	
18	B-200×200×9 (BCR295)	BH-270×85×6×9 (AM490A)
17		
16		
15		
14		
13		
12	B-200×200×12 (BCR295)	BH-270×95×6×9 (AM490A)
11		
10		
9		
8		
7		
6	B-200×200×12 (SM490A)	BH-270×85×6×12 (AM490A)
5		
4		
3		
2		
1		-

### 6.3.2 実験装置

実験は防災科学技術研究所が運用する実大三次元震動台（E-ディフェンス）で行われた。実験装置の写真を図 6-11 に示す。本論文で使用する計測データは、各階床に設置された加速度計から計測される床応答加速度，震動台に設定された加速度計から計測される地動加速度，防護フレームから試験体までの間に設置されたワイヤー変位計から計測される水平変位，柱および梁部材に貼付してあるひずみゲージから計測されるひずみである。ワイヤー変位計については，2階から12階までしか設置されていない。ひずみゲージについては，梁，柱ともに，2階から7階および14階に貼付しており，柱については，X2構面のみである。これらのデータは計測時間刻みが0.005秒で収録されている。

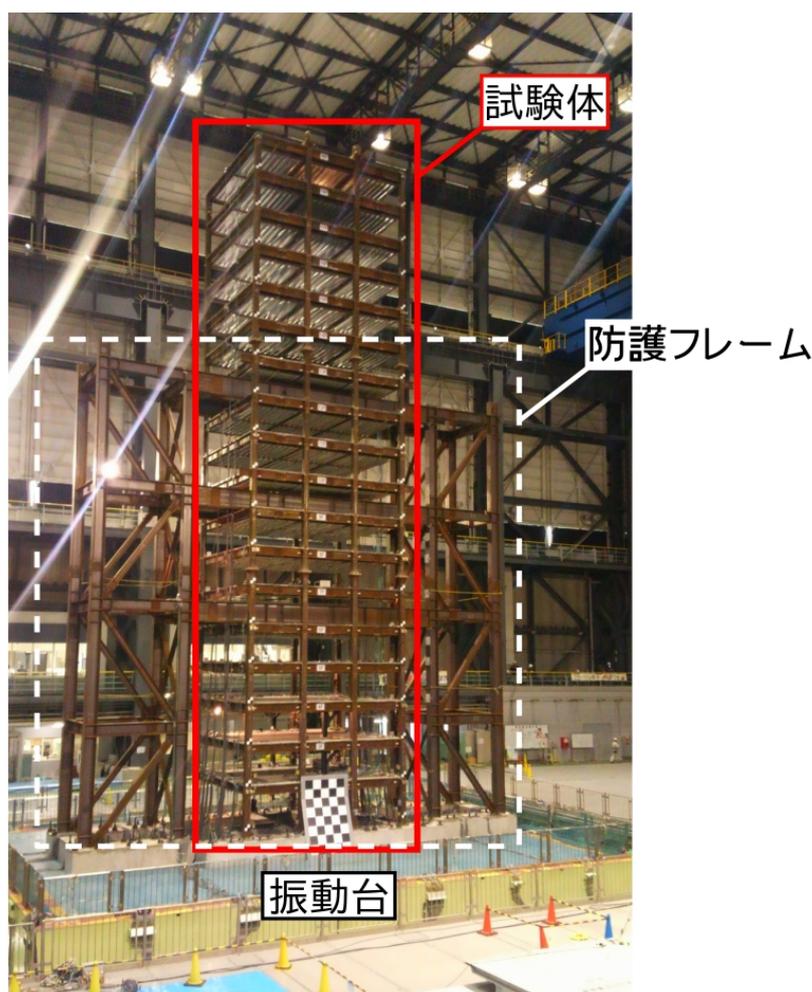


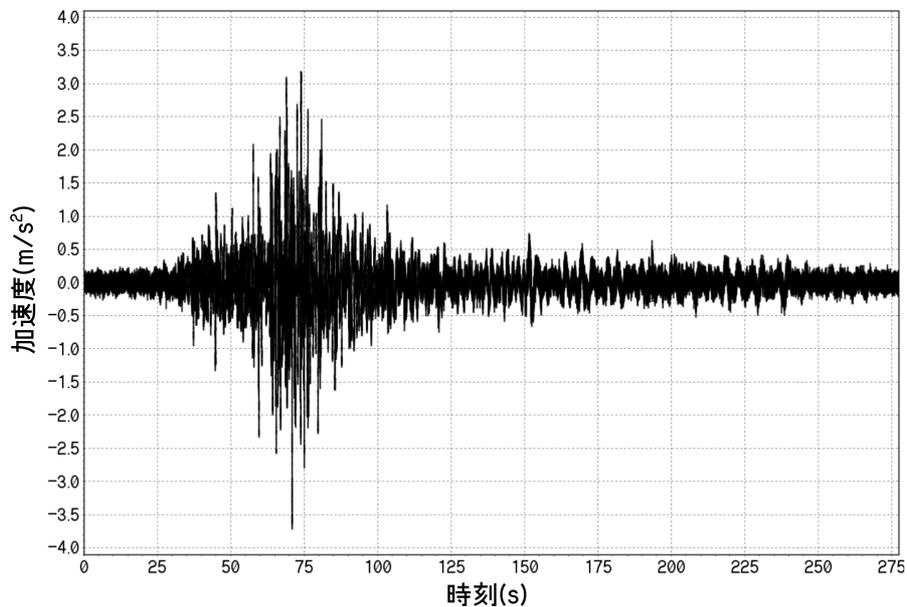
図 6-11 実験装置写真

### 6.3.3 入力波と加振手順

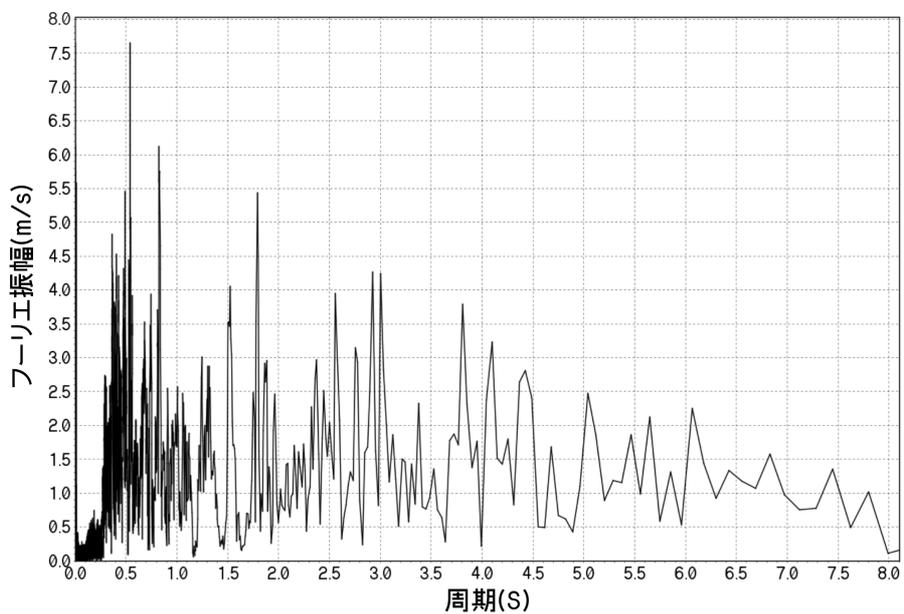
実験に用いられた入力波は、南海トラフを震源とした東海・東南海・南海の三連動を想定して作成された模擬地震動である。作成された模擬地震動の擬似速度応答スペクトル  $pSv110cm/s$  を基準（入力レベル 100%）として、これを係数倍することによって入力レベルの異なる加振が行われた。加振方向はY方向への一方向加振である。加振順序、入力レベルおよび試験体の状態を表 6-7 に示す[6-5]。入力レベル 100%の入力波の加速度時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトルを図 6-12 に示す。

表 6-7 加振手順と試験体の状態

加振順序	入力レベル	試験体の状態
1	37%	弾性挙動(損傷なし)
2	74.1%	梁端塑性化(2~4F)
3	100%	梁端(2~7F), 柱脚(1F)塑性化
4	100%	同上
5	163.6%	梁端(2~14F)降伏, 梁端(2~5F)亀裂の兆候
6	163.6%	梁端(2~14F)降伏, 梁端(2~5F)亀裂発生
7	200%	梁端(2F)破断
8	227.3%	梁端(2~3F)破断
9	272.7%	梁端(2~5F)破断
10	310%	梁端破断上階に進展, 柱脚(1F)局部座屈
11	310%	梁端破断上階に進展, 柱脚(1F)局部座屈進展
12	380%	下5層全梁端破断, 柱脚(1F)破断
13	380%	
14	380%	下5層全梁端破断, 柱脚(1F)破断, <b>倒壊</b>



(a)入力地動加速度時刻歴波形



(b)フーリエ振幅スペクトル

図 6-12 入力地震動(入力レベル 100%)

### 6.3.4 多質点せん断系モデルへの置換

第3章3.3節で提案した多質点せん断系における非線形性検出方法の適用性を検討する。適用性を検討するにあたり，多層骨組である試験体を多質点せん断系モデルへ置換する。試験体は，Y方向3スパンとなっているが，床スラブと梁が一体となっていることから，剛床と仮定できるものとして考え，図6-13のように多質点せん断系モデルに置換する。

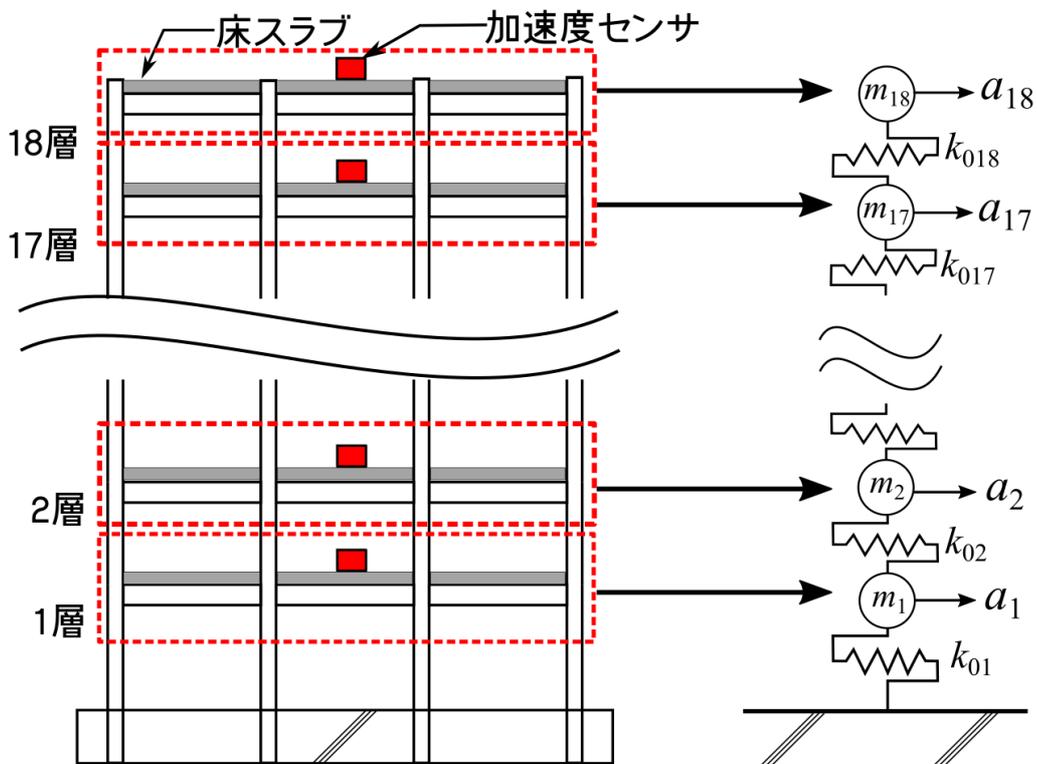


図 6-13 多質点せん断系モデル

各層の重量  $m_j$  は，文献[6-3]からすべての層で 214kN とする。各層の初期弾性剛性  $k_{0j}$  については，試験体が弾性挙動である入力レベル 37%加振時における層せん断力-層間変位関係から近似して求めることにする。図 6-14 および図 6-15 に，各層における層せん断力-層間変位関係をそれぞれ示す。縦軸に層せん断力，横軸に層間変位を示す。このとき， $j$ 層における層せん断力  $Q(\delta_j)$  は第2章(2-16)式を  $Q(\delta_j)$  について解いた以下の式で算出した。

$$Q(\delta_j) = -{}_s a_j m_j \quad (6-1)$$

ここで、 ${}_s a_j$  は  $j$  層から最上層までの床応答加速度の和である。層間変位は、各階の床応答加速度を 2 階積分することで絶対変位を求め、変位の差を取ることで算出した。積分操作は、初期基線ずれを補正し、遮断周波数を 0.50Hz とするハイパスフィルタをかけたのち台形積分によって行った。初期基線ずれの値は、時刻歴波形における 0 秒からの 10 秒間の平均値とした。図 6-14, 6-15 に示した層せん断力-層間変位関係において、各層の層せん断力-層間変位関係は概ね線形履歴となっている。赤線で示しているのは、層せん断力-層間変位関係を最小二乗法によって近似した直線であり、その傾きを層の初期弾性剛性とする。層剛性の変化を検証するために、文献[6-4]において、試験体の 1 次固有周期に大きな変化がないとされる入力レベル 227.3%加振までの層剛性を同様の方法で算出し、算出した層剛性を入力レベルごとに図 6-16 に示す。縦軸を基準化剛性、横軸を入力レベルとし、入力レベルが同一の加振については 1 回目の結果のみを示している。基準化剛性は、各入力レベルで算出した層剛性を 37%加振の層剛性で基準化した値である。

図 6-16 より、37%加振から 100%加振までは、どの層においても、大きな剛性変化は見られないが、加振レベルが大きくなるにしたがい、剛性が低下する傾向が観察された。図 6-16(a)より、227%加振では 3 層以下で剛性が大きく低下している。このことは、表 6-7 の加振レベル 227%における試験体の状態、2~3 階の梁端破断、と対応した結果である。一方で、4 層以上において基準化剛性は 0.8~0.9 程度となっており、層による大きな違いは観察されなかった。部分的ではあるものの、層剛性が大きく低下しているにもかかわらず、1 次固有周期が大きく変化しないことや、損傷が生じていない上層においても層剛性が低下していることから、周波数解析だけでは損傷を検出・評価することは困難であるものと考えられる。

層せん断力-層間変位関係に生じる非線形性を検出するための閾値は、第 3.3.2 項 3.3.2.1 で提案した降伏層せん断力によって設定するものとする。降伏層せん断力は、第 6.2.1 項と同様に、平面骨組モデルを作成し、静的増分解析を行うことで推定した。解析モデルおよび解析結果の詳細は付録 A に示す。

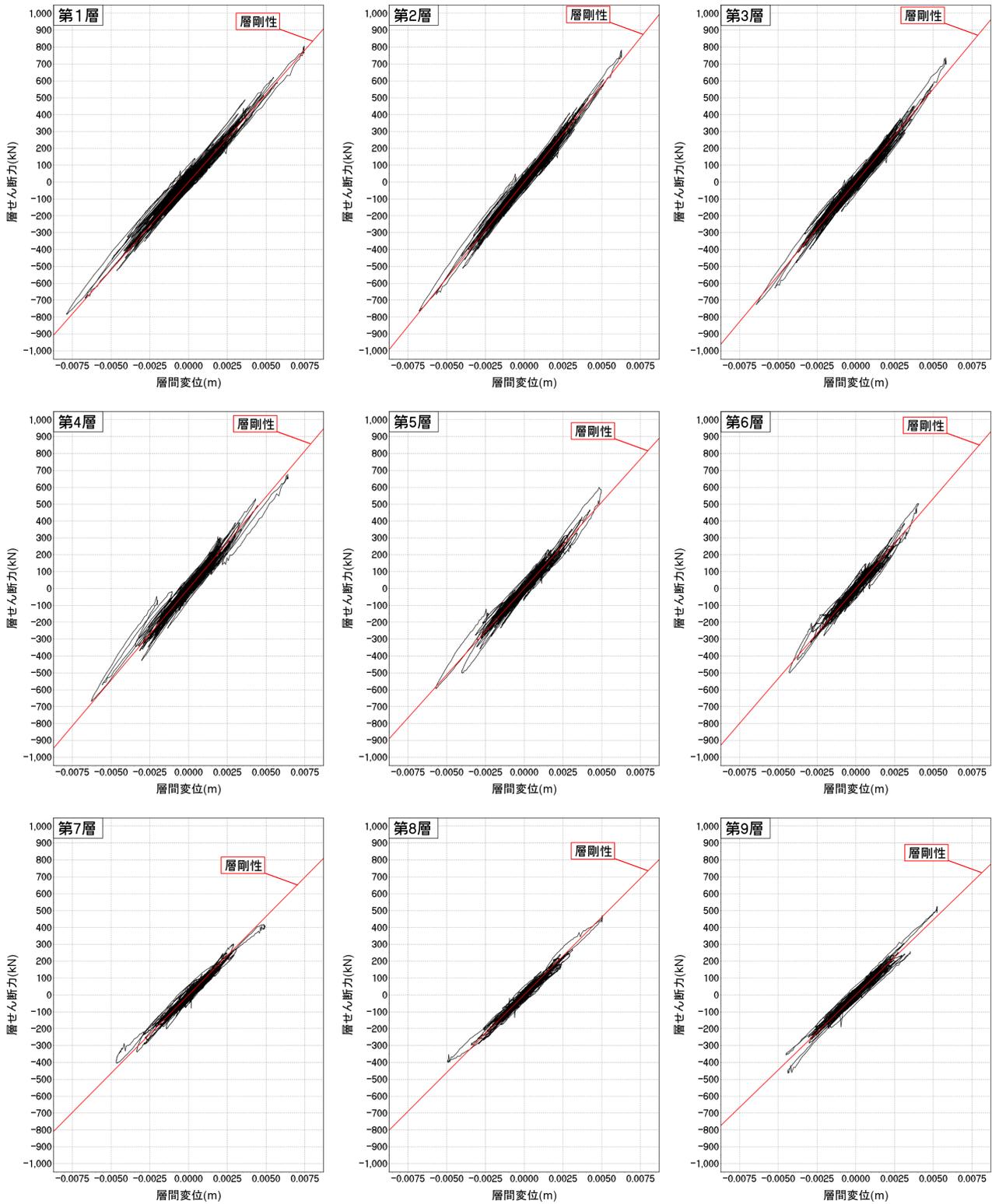


図 6-14 床応答加速度から算出した層せん断力-層間変位関係(第1層~第9層)

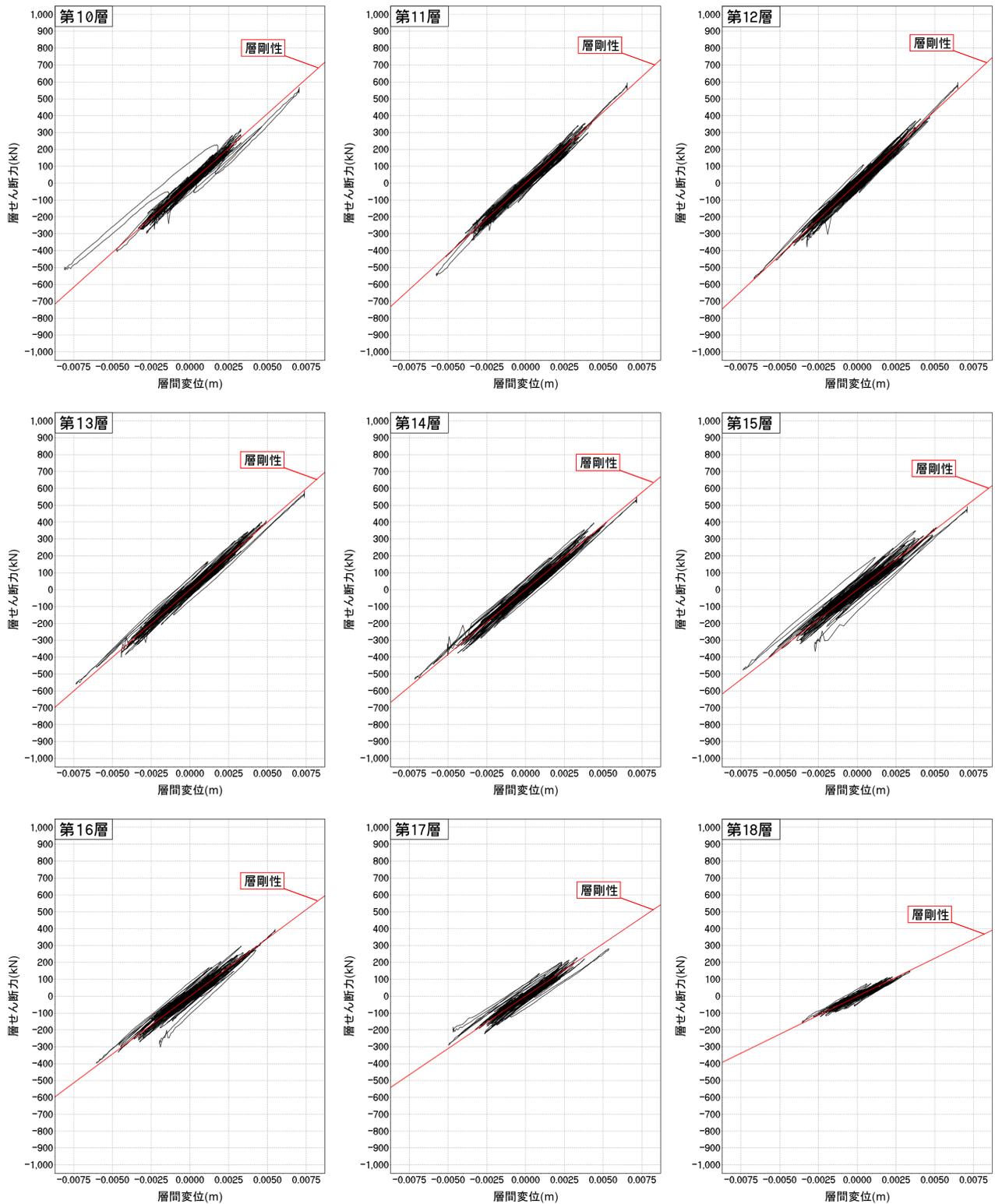


図 6-15 床応答加速度から算出した層せん断力-層間変位関係(第 11 層～第 18 層)

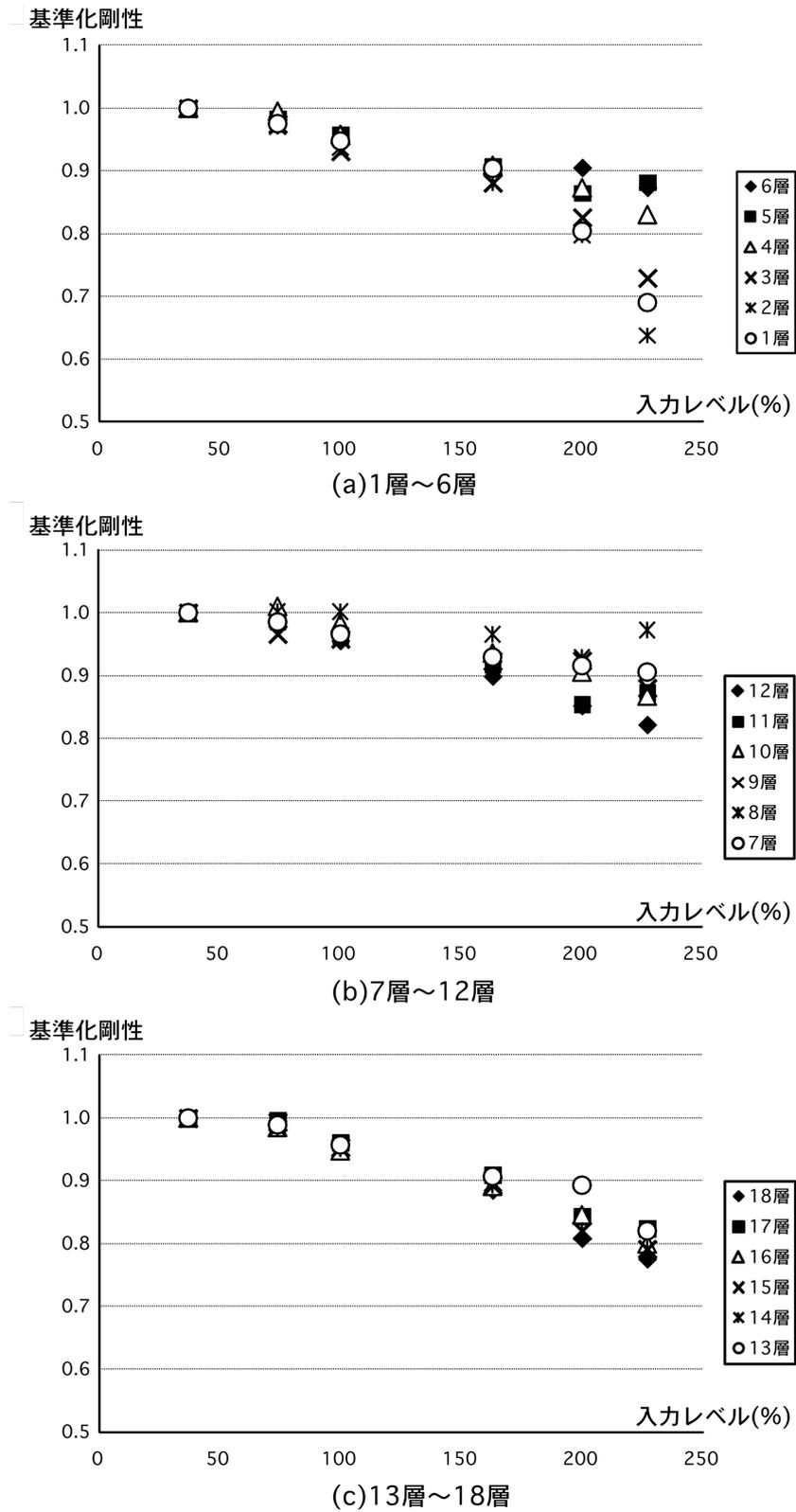


図 6-16 入力レベルによる層剛性の低下

### 6.3.5 snap による非線形性検出

各加振実験において、各層で計測された床応答加速度から、各層の絶対加速度和を求める。各層の絶対加速度和にはノイズが含まれるため、第4章で提案した方法によって snap 時刻歴波形を算出することを考える。振動载荷が始まる前の1秒間に計測された絶対加速度和の最大値をノイズの最大値  $N_{\max}$  として、(4-24)式から  $\Delta t_{\min}$  を算出した結果、 $\Delta t_{\min} = 0.0021$  秒であった。 $\Delta t_{\min}$  は、データ収録時の計測時間刻み 0.005 秒よりも小さいため、snap 時刻歴波形を算出する際には、第4章で提案したノイズ低減処理を行わずに(2-39)式によって算出した。各層における非線形性検出のため閾値を、(3-40)式からそれぞれ算出した。各加振実験において、各層の snap の値が設定した閾値を超えた回数を非線形検出回数とし、まとめたものを表 6-8 に示す。入力レベルの同じ加振が複数回行われている場合は、加振回数を○数字で示している。付録 A では、層せん断力-層間変位関係、snap 時刻歴波形、および非線形回数をすべての加振実験において、全層の結果を掲載している。

ここでは、表 6-8 で太字にした加振実験である、100%2 回目、163%1 回目、227%、310%1 回目、における 1 層および 13 層の層せん断力-層間変位関係、snap 時刻歴波形を図 6-17、図 6-18 にそれぞれ示す。snap 時刻歴波形では、縦軸を snap、横軸を時刻とし、(3-40)式で算出した閾値を赤線で示す。snap の値が閾値を超えている時点を青色の○で示している。層せん断力-層間変位関係は、縦軸を層せん断力、横軸を層間変位とし、降伏層せん断力を破線で示す。層せん断力は、前 6.3.4 項と同様に(6-1)式によって算出している。層間変位についても、前 6.3.4 項と同様に、各階の床応答加速度を 2 階積分することで絶対変位を求め、変位の差を取ることで算出した。積分操作は、初期基線ずれを補正し、遮断周波数を 0.50Hz とするハイパスフィルタをかけたのち台形積分によって行っている。初期基線ずれの値は、時刻歴波形における 0 秒からの 10 秒間の平均値とした。ただし、2 層における 227%加振、および 310% 1 回目加振においては、残留変形の影響を考慮し、ワイヤー変位計によって計測された水平変位の差を取ることで算出した。

表 6-8 snap による非線形性検出回数

層	74%	100% ①	100% ②	163% ①	163% ②	200%	227%	272%	310% ①	310% ②	380% ①	380% ②	380% ③
18	0	0	0	0	0	5	4	1	0	3	2	0	0
17	0	0	0	1	1	9	2	0	0	2	3	0	0
16	1	1	2	2	1	11	9	4	1	7	2	0	0
15	3	4	4	13	10	37	34	23	7	8	3	3	0
14	6	9	5	46	30	83	101	64	19	8	9	11	1
13	8	12	8	77	63	138	147	123	45	24	44	27	1
12	12	10	12	101	79	144	185	165	47	24	44	27	1
11	10	6	14	123	92	168	219	195	54	40	53	39	1
10	8	8	18	109	106	184	255	245	75	46	58	39	1
9	5	10	23	109	127	193	247	266	101	45	55	30	0
8	3	17	24	144	125	221	284	336	132	48	52	30	1
7	2	11	19	104	103	169	229	270	99	27	34	22	1
6	2	16	15	98	95	160	231	276	80	29	30	28	3
5	4	15	16	102	116	197	249	336	120	58	67	90	18
4	6	28	23	114	119	228	297	411	170	205	120	126	15
3	9	37	29	147	154	284	350	550	282	581	173	147	23
2	15	44	42	173	187	312	404	698	512	655	221	188	30
1	19	51	42	219	203	356	461	1091	1332	1175	408	315	41
合計	113	279	296	1682	1611	2899	3708	5054	3076	2972	1369	1117	137

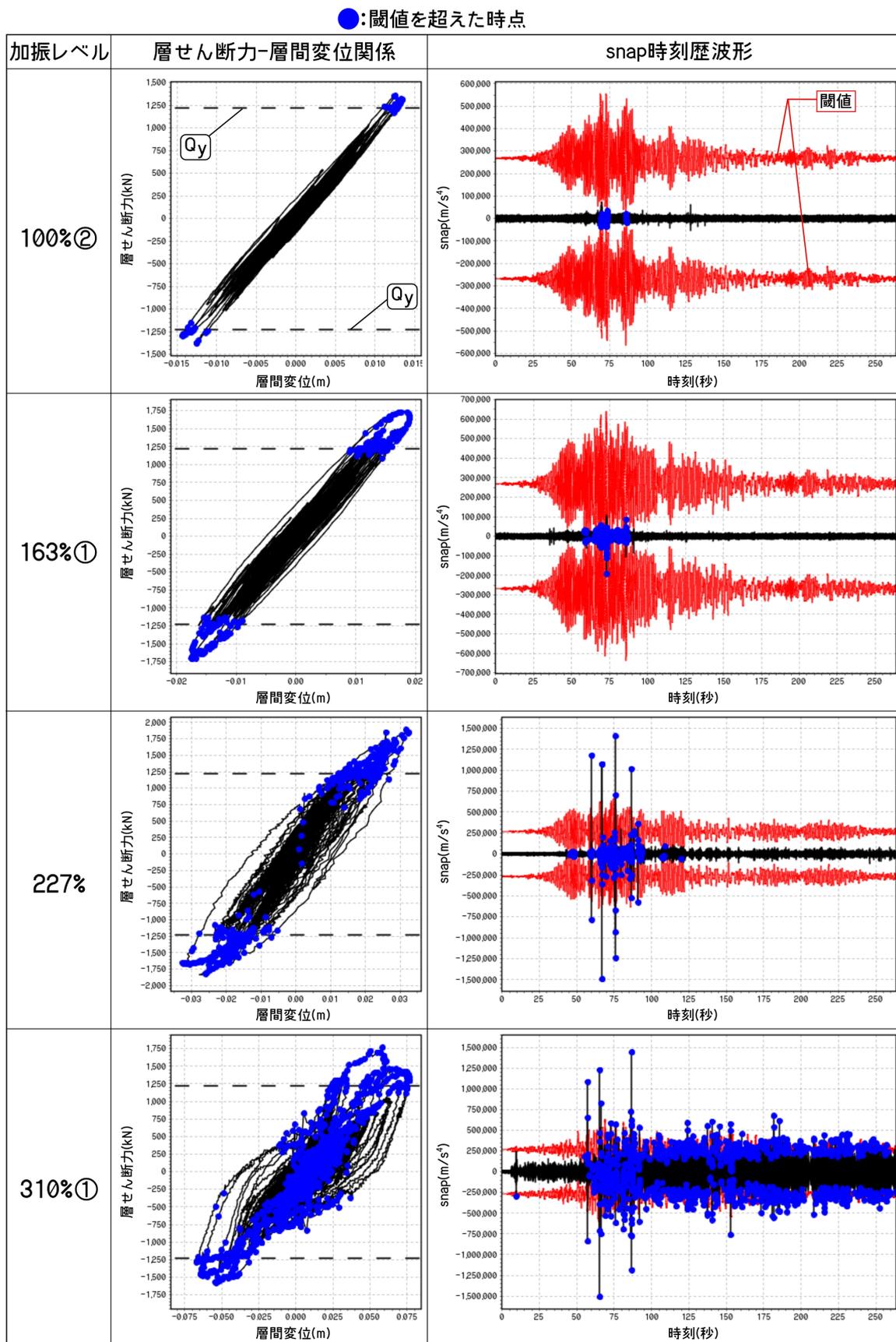


図 6-17 層せん断力-層間変位関係と snap 時刻歴波形(1層)

●: 閾値を超えた時点

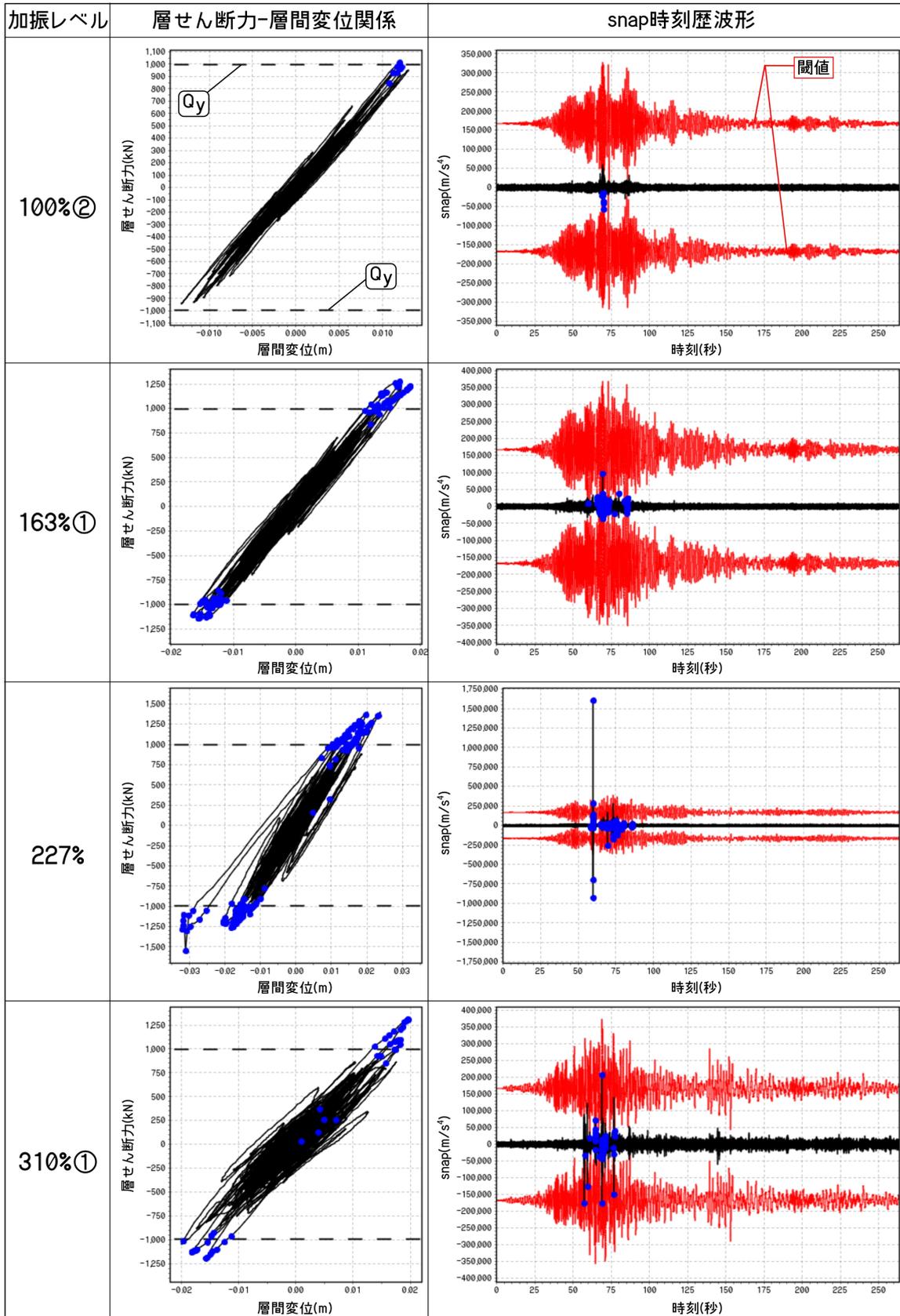


図 6-18 層せん断力-層間変位関係と snap 時刻歴波形(13層)

表 6-8 で示した非線形性検出回数と、各加振実験における損傷状況との対応関係を観察するため、図 6-19~6-20 に各加振実験終了後の損傷状況を整理したものを示す。○の色で各部材の損傷程度を示しており、青色が降伏、黄色が亀裂発生、橙色が部分的な破断、赤色が破断である。163%加振では、1 回目と 2 回目で損傷状況が同じであったため、2 回目の結果のみ掲載している。損傷状況は試験体に貼付してあるひずみゲージによって計測されたひずみの値から判断している。第 6.3.2 項で述べたように、ひずみゲージは、柱には X2 構面のみにはしか貼付されていないため、X1 構面の柱については、損傷の判断ができない。また、梁については、1 階~7 階と 14 階にはしか貼付されていないため、それ以外の階における梁の損傷は判断することができない。ただし、試験体が防護フレームに接触して、加振終了となった入力レベル 380%の 3 回目加振後に、目視によって各部材の損傷状況が観察されており、図 6-20(l)はその結果を示している。

図 6-17 より、1 層の層せん断力-層間変位関係は、入力レベルが大きくなるにしたがい、線形挙動から紡錘形に移行し、310%1 回目加振実験では逆 S 字形の履歴挙動となっている。層せん断力-層間変位関係が非線形挙動となっている時点と、snap の値が閾値を超えている時点は、概ね対応しており、snap によって非線形性を検出可能であることがわかった。非線形性検出回数と損傷状況との対応関係についてみると、図 6-19 より、100%2 回目加振後の損傷状況は、梁端部および柱脚の降伏のみであるが、163%1 回目加振後では、梁フランジに亀裂が生じている。表 6-8 から、100%2 回目加振後よりも、163%1 回目加振後では非線形検出回数は 5 倍程度多くなっている。さらに、図 6-19(f) より、227%加振後では、梁フランジの破断が数箇所観察され、163%1 回目加振後よりも非線形検出回数は 2 倍程度多くなっている。さらに損傷は進行し、図 6-20(h) より、310%1 回目加振後では、全ての梁端で破断が観察され、227%加振終了後よりも非線形検出回数は 3 倍程度多くなっている。損傷度を定量的に評価することは困難であるものの、損傷状況の進行に対応して、非線形検出回数が増加するという定性的な傾向があることがわかった。一方で、snap によって層せん断力-層間変位関係に生じる非線形性を検出することは可能であるが、検出した非線形性と損傷箇所との対応関係を明らかにし、損傷

箇所を同定することは困難であることがわかった。

図 6-18 より、13 層における層せん断力-層間変位関係も、1 層と同様に、入力レベルが大きくなるにしたがい、概ね線形から紡錘形、逆 S 字形の履歴挙動へと遷移している。層せん断力-層間変位関係が非線形挙動となっている時点と、snap の値が閾値を超えている時点は、概ね対応しており、snap によって非線形性を検出可能であることがわかった。非線形性検出回数と損傷状況との対応関係をみると、図 6-19 より、100%2 回目加振後では梁端の一部に降伏が観察され、163%1 回目加振後では梁端が全て降伏し、227%加振後には一部の梁端で破断が生じた。表 6-8 より、損傷の進行状況と対応して、非線形回数も増加していることがわかった。しかし、図 6-20(h)より、310%1 回目加振後に梁端の破断箇所が増えているにもかかわらず、非線形性検出回数は 227%加振よりも減少している。1 層では紡錘形の履歴挙動だった 227%加振と比べて、逆 S 字形である 310%1 回目加振では、非線形性検出回数が 3 倍程度も多くなっているが、13 層では 1/3 程度に減少している。これは、1 層の 310%1 回目加振では、降伏層せん断力付近における非線形挙動の継続時間が長くなり、さらに層せん断力が小さい範囲においても履歴挙動が非線形となっているためである。一方、13 層では、逆 S 字形の履歴挙動の方が、紡錘形の時よりも非線形挙動の継続時間が短く、降伏層せん断力以下の範囲においても、ほぼ線形のままであることため、非線形性検出回数が減少したものと考えられる。13 層よりも上層では、同様の傾向が観察されている。このことから、層せん断力-層間変位関係の履歴挙動によっては、降伏から破断のような損傷の進行に対して、非線形性検出回数が増加しない場合があることがわかった。

ひずみゲージ貼付位置から、検討することができるのは 1～6 層と 13 層だけであるが、損傷の進行状況にしたがい、層せん断力-層間変位関係の履歴挙動が線形から紡錘形に遷移するような場合では、非線形性検出回数が増加する傾向にある。しかし、第 6.2 節の平面骨組モデルにおける数値応答解析結果から、ある層が損傷した場合には、損傷した層よりも上層が無損傷であったとしても、上層の応答にも影響を与え、層せん断力-層間変位関係に非線形性が生じることがわかっている。そのため、2 層以上の層では、層せん

断力-層間変位関係に生じる非線形性が、当該層の損傷のみに起因するものとは限らず、非線形性検出回数の増加そのものが、当該層の損傷進行状況と直接的に関係しているとはいえない。しかし、1層の層せん断力-層間変位関係に生じる非線形性は、1層の損傷のみが原因として考えられるため、損傷の進行による非線形性検出回数の増加は、ある程度定量的な関係があるものと考えられる。

今回は骨組構造物の1つとして、18層鉄骨骨組構造物において非線形性検出方法の適用性を検討した。しかし、層せん断力-層間変位関係における層せん断力は、荷重を直接計測しているわけではなく、床応答加速度から算出したものであるため、実際に生じている層せん断力とは完全に一致していない可能性がある。さらに、各層の損傷は複雑であり、ひずみゲージが貼付されていない部材が存在するため、損傷状況が完全に把握できていないことや、各層の降伏層せん断力を予測することが困難である、などの問題点がある。しかし、多質点せん断系について提案した損傷評価手法を、骨組系に拡張し、層せん断力-層間変位関係に生じる非線形性を検出することが可能であることを示した。

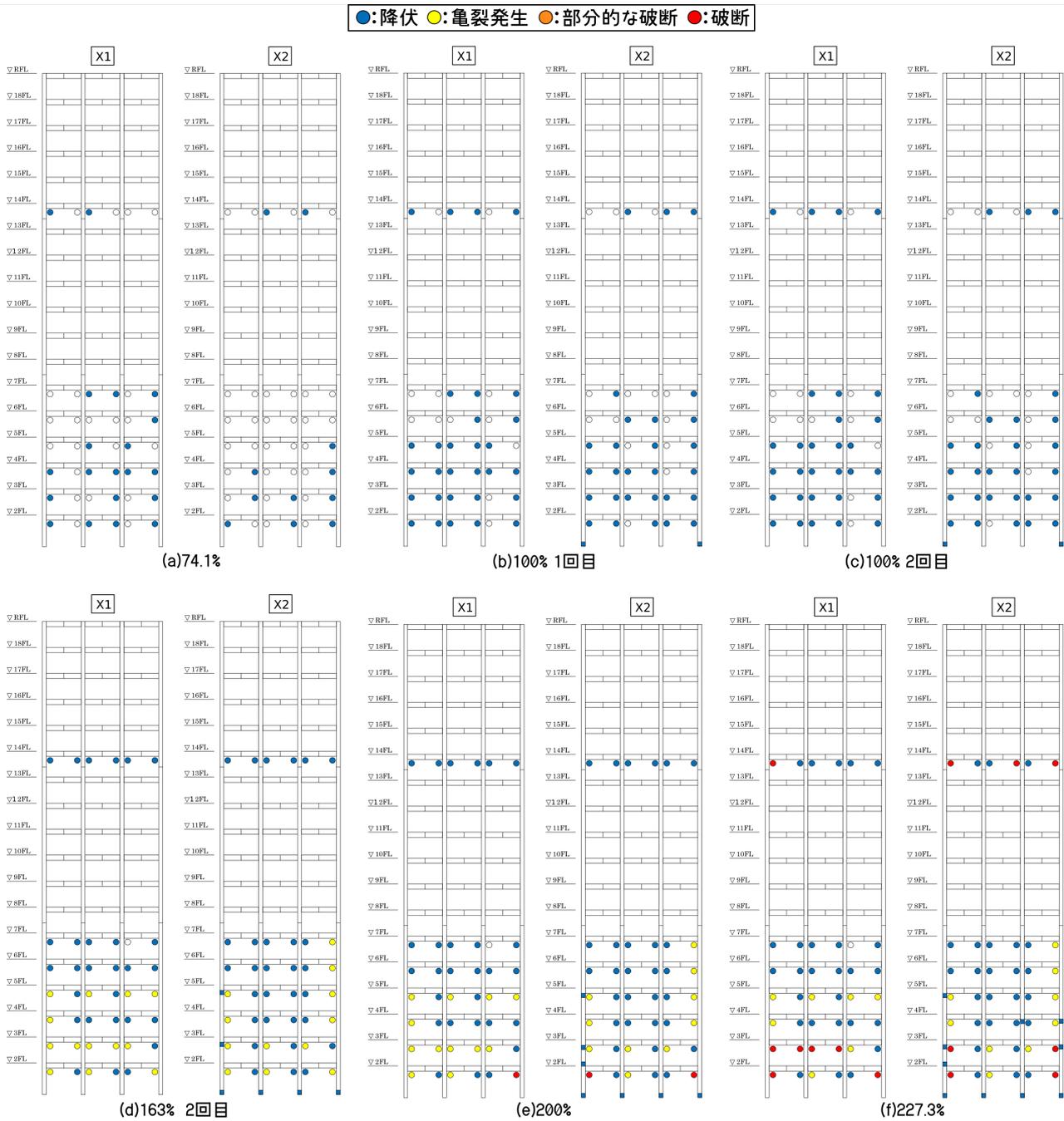


図 6-19 損傷状況(74%~227%加振)

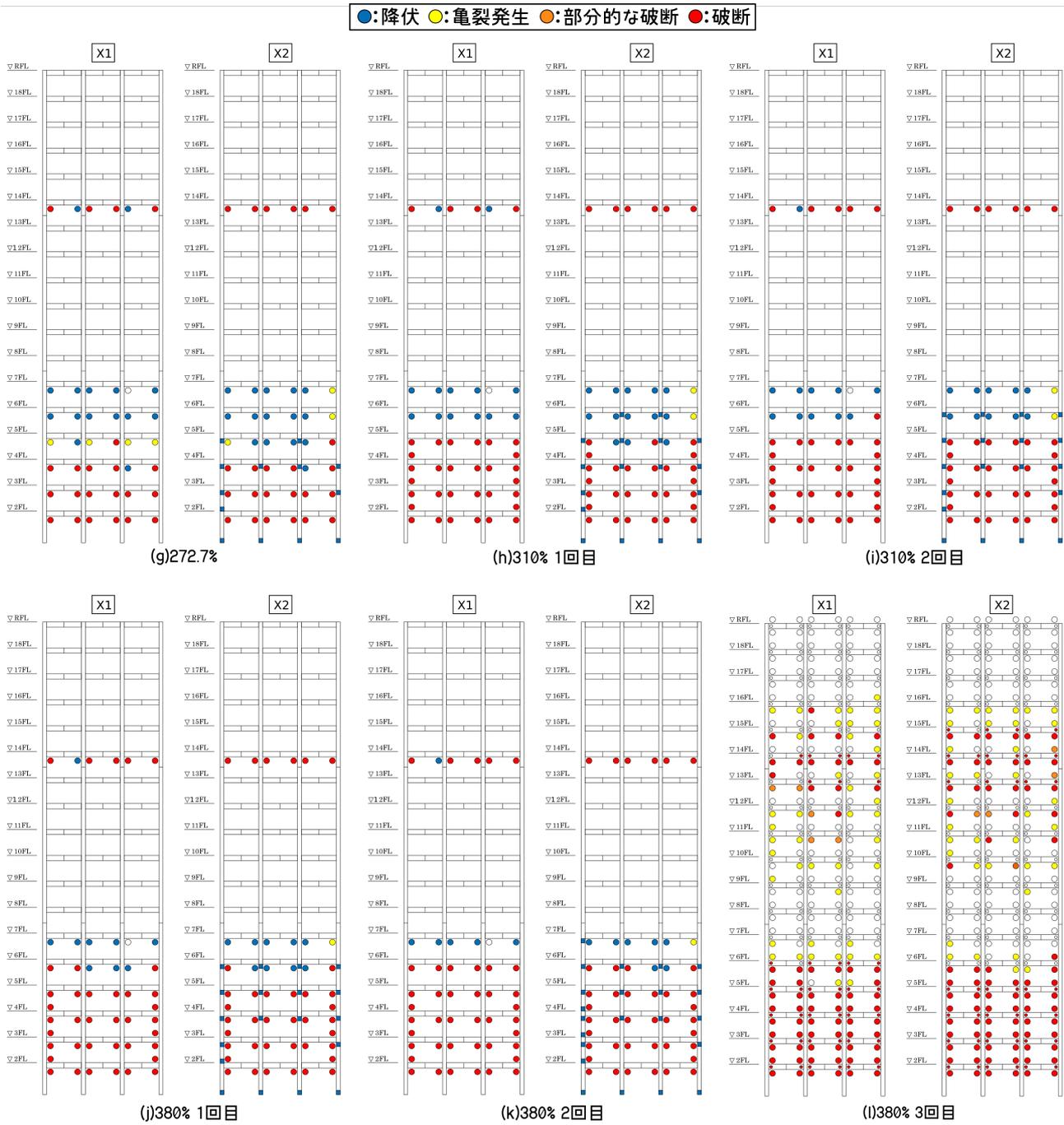


図 6-20 損傷状況損傷状況 (272%~380%加振 3 回目)

## 6.4 まとめ

第3章において提案した損傷評価手法は、せん断質点系モデルから構築したものである。しかし、一般的な建築構造物の多くは骨組系であり、必ずしもせん断系とはいえない。多質点せん断系の理論を多層骨組系へ拡張するためには、骨組系をせん断質点系として置き換える必要がある。しかし、骨組系では梁が剛ではないため、せん断系として考えることが困難である。一方で、せん断系と見なせるだけの剛性を梁が有していれば、提案している層レベルの非線形性検出方法を適用することが可能となる。そこで本章では、多質点せん断系の運動方程式から構築した損傷評価手法を、多層骨組系へと拡張し、その適用性を検討した。検討対象は18層からなる鉄骨骨組構造物における振動台実験結果である。事前検討として、3層1スパン平面骨組モデルについて、梁の剛性および損傷箇所をパラメータとした数値応答解析を行い、解析結果を用いて適用性を検討した。

応答解析結果から、梁がある程度の剛性を有している場合では、層せん断力-層間変位関係の履歴挙動は、せん断質点系と同様に安定した履歴となった。また、損傷箇所が柱のみである場合には、層せん断力-層間変位関係は損傷した層のみで非線形となり、上層は線形性を保持していた。一方で、梁が損傷した場合には、損傷した層だけでなく、その1つ上の層が無損傷であるにもかかわらず非線形挙動を示していた。すなわち、柱のみの損傷であれば、提案手法によって損傷層の特定が可能であるが、梁が損傷した場合には、無損傷の層まで損傷として判断してしまう可能性があり、損傷層の特定が困難であることがわかった。一方で、梁が一般的な骨組の剛性しか有していない場合では、損傷した層よりも上層においても、層せん断力-層間変位関係は非線形挙動を示しており、下層の損傷が上層の応答にも影響を与えていることが観察された。このため、損傷箇所にかかわらず、損傷層の同定が困難であることがわかった。

応答解析で得られた知見をもとに、18層鉄骨骨組構造物の振動台実験結果を用いて、層レベルの非線形性検出方法の適用性を検討した。層せん断力-層間変位関係が非線形性を呈する時点において、概ねsnapの値が閾値を超えていることが観察された。構造物の各

層において、損傷状況と非線形性検出回数の対応関係をみてみると、各層において損傷が進行するにしたいがい、非線形性検出回数が増加する傾向にあることがわかった。しかし、応答解析結果において検討したように、2層以上の層せん断力-層間変位関係における非線形挙動は、当該層の損傷のみが原因とは限らず、非線形性検出回数の増加が、当該層の損傷進行状況と直接的に関係しているとはいえない。

今回適用対象とした振動台実験結果は、各層に作用する荷重を直接計測していないため、床応答加速度記録から層せん断力を算出する必要があった。また、ひずみゲージが貼付されていない部材が存在するため、損傷状況が完全に把握できていないこ、各層の降伏層せん断力を予測することが困難であるなど、非線形性検出方法の適用性を検討する上で問題点があった。また、多層構造物では、せん断変形ではなく、建物の全体曲げ変形による影響が生じるため、損傷と関係なく非線形性が生じる場合がある。より損傷状況を観察しやすい状況下での振動台実験を行うなどして、各層および部材レベルでの損傷評価、曲げ変形の影響を検討する必要がある。

## 6.5 参考文献

- [6-1]国土交通省 気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>，アクセス日時 2014/09/18 16:19.
- [6-2]小鹿紀英，高橋元美，澤本佳和，久保田淳，清川貴世，鈴木芳隆，吹田啓一郎，聲高裕治，伊山潤，長江拓也：E-ディフェンス振動台実験の概要 鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発（その5），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.1237-1238，2014.9.
- [6-3]鈴木芳隆，小鹿紀英，高橋元美，澤本佳和，久保田淳，清川貴世，吹田啓一郎：振動台実験のための梁端破断を考慮した事前解析 鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発（その6），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.1239-1240，2014.9.
- [6-4]清川貴世，高橋元美，澤本佳和，久保田淳，小鹿紀英，鈴木芳隆：振動台実験における試験体の全体挙動 鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発（その8），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.1243-1244，2014.9.
- [6-5]都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト[都市災害プロジェクト]サブプロジェクト② 都市機能の維持・回復に関する調査研究：平成25年度 成果報告書 3. 研究報告 3.1.1 鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化，([http://www.toshikino.dpri.kyoto-u.ac.jp/report/2013/pdf/3.1.1\\_p.013-070.pdf](http://www.toshikino.dpri.kyoto-u.ac.jp/report/2013/pdf/3.1.1_p.013-070.pdf))アクセス日時 2015/10/23 16:52



## 第7章 結論

### 7.1 本研究の結論

現在、我が国では地震被害を受けた建築物等に対する被災状況の判定として、被災度区分判定が行われる。判定は判定士が目視で一棟ずつ行っているのが現状であるため、判定を行うのに時間がかかること、目視に依るが故に判定士によって判定がばらつくこと、内外装材等により構造躯体を直視することができないこと、などが問題点として挙げられる。特に、大規模な地震では、広範囲にわたって建築物に被害が生じるため、判定にはより膨大な時間を要する。このような被害状況を、迅速かつ定量的に評価することは、避難の必要性判断、安全性の確保など、早期の復旧・復興を目指す上で必要不可欠である。

このような背景から、近年では、建築物の被害を迅速かつ定量的に評価することを目的とした構造ヘルスマモニタリング技術が注目されている。構造ヘルスマモニタリングは、対象とする構造物に予め計測センサを設置しておき、計測されたデータを処理することで、構造物の健全性を評価するというものである。計測センサによって計測されたデータを用いるため、計測センサの取り付けが容易であり、安価である方が都合よい。

そこで本研究では、計測センサが小型軽量であり、センサの設置が比較的容易であることから、計測対象を絶対加速度とし、絶対加速度記録を用いた損傷評価手法を提案することにした。加速度記録を用いた既往研究の多くは、構造物の荷重-変形関係における等価剛性や減衰定数を、固有振動数や固有モードの変化から検出し、評価するというものである。本研究では、構造物の地震応答加速度と荷重-変形関係を数式的に処理し、構造物の荷重-変形関係の剛性変化に起因する非線形性を、より直接的かつ定量的に検出する方法を提案した。定量的な被災度区分判定手法の提案を目指し、本研究ではその基礎的な検討として、質点系および平面骨組系における数値応答解析結果、構造部材および多層骨組構造物の振動台実験結果を対象として、提案手法の適用性を検討した。

本節では、各章で得られた知見を要約し、まとめることで本研究の結論とする。

第1章“序”では、本研究の背景と目的について述べた。

地震発生後の建築構造物について、損傷度を定量的に評価することは重要である。そこで、振動計測記録を用いて、構造物の損傷を直接的に評価する手法の必要性を論じるとともに、振動計測および計測記録による損傷評価手法に関連する既往研究について整理し、その概要等をまとめた。併せて、本研究の目的、特徴について述べた。

第2章“絶対加速度の高次微分の定式化”では、せん断質点系の運動方程式から算出される絶対加速度を高次微分した物理量の定式化を行い、振動系応答との対応関係を示した。

本研究では、振動系の絶対加速度を高次微分した物理量に着目し、その物理量を用いて損傷を定量的に検出・評価する方法を提案することを目的としている。そこで第2章では、絶対加速度を微分した物理量について定義した。せん断質点系の運動方程式から算出される絶対加速度を微分した物理量を定式化し、振動系の履歴復元力と、微分した物理量との対応関係を明らかにした。本研究では、絶対加速度の時間に対する1階微分を jerk, 2階微分を snap と呼称することになっている。

上記の jerk および snap の定式化においては、加速度が時間に対して連続であるものとして行っているが、振動計測によって得られる加速度応答記録はデジタルデータとして収録される。加速度応答記録を微分することで、jerk あるいは snap 時刻歴波形を算出する際には、差分方程式を用いることになる。そこで、加速度応答記録が時間に対して離散的である場合における、jerk および snap についても整理した。

第3章“絶対加速度の微分を用いた損傷評価”では、第2章で定式化した絶対加速度を微分した物理量である jerk および snap を用いた損傷評価手法を提案した。

本研究において、「損傷」を荷重-変形関係に生じる剛性変化に起因する非線形性と定義した。提案した損傷評価手法は、絶対加速度を微分した物理量である jerk および snap

が、振動系の履歴復元力の剛性と直接的に関係した値であることを利用するものである。そこで、第3章では、第2章で定式化した jerk および snap を用いて、振動系の損傷を検出・評価する方法を提案した。提案した損傷評価手法は、荷重-変形関係における剛性の変化に起因する非線形性を検出し、非線形挙動時の剛性低下率、あるいは塑性変形量を推定するものである。まずは、無減衰1質点系についての損傷評価理論を構築し、その後、多質点せん断系の理論へ拡張した。

提案した損傷評価手法の適用性を数値解析によって検討した。バイリニア型復元力特性を有する弾塑性1質点系モデルについて、地震応答解析を行い、解析結果を用いて提案方法の適用性を検討した。降伏点における剛性急変を検出し、降伏後の塑性変形量を推定することが可能であることを示した。

第4章“ノイズの影響とその対処方法”では、振動計測によって得られる加速度応答記録に含まれるノイズが、snap に与える影響を検討し、その対処方法について提案した。

一般的に、加速度センサによる振動計測では、計測された加速度応答記録にノイズが含まれることになる。本研究で提案している損傷評価手法では、加速度応答記録を微分した物理量である jerk および snap を利用して理論構築を行っている。微分処理は高周波ノイズの影響を強く受けるため、ノイズが含まれる加速度応答記録をそのまま微分処理してしまうと有益な情報を抽出することが困難となる。

そこで第4章では、絶対加速度を微分して snap を算出する際に、ノイズが与える影響を検討するとともに、ダウンサンプリングによってノイズの影響を低減する方法を提案した。提案したノイズ低減処理方法の妥当性を、数値応答解析結果を用いて検討した。その結果、ノイズを含む加速度記録をそのまま微分した場合には、ノイズの影響によって、設定した閾値による剛性変化に起因する非線形性の検出が困難であるが、ノイズ低減処理を行うことで、設定した閾値によって非線形性検出が可能となることを示した。高周波ノイズへの耐性が低い、微分操作を用いた手法ではあるが、提案したノイズ低減処理方法によって概ね非線形性検出が可能であり、その有用性を示せた。

第5章“構造部材ごとの振動台実験結果への適用性”では、第3章で提案した損傷評価手法の適用性を、既往研究で行われた構造部材の振動台実験結果を用いて検討した。

検討した構造部材は、露出型柱脚2体、柱梁接合部2体、鉛直ブレース1体の計5体である。これらの振動台実験では、試験体の損傷箇所が1箇所、1質点1自由度系として考えることができるため、振動系の非線形挙動と提案手法との対応関係が観察しやすい。

加振実験において得られた加速度応答記録から、第4章で提案したノイズ低減処理方法を用いて jerk および snap 時刻歴波形を算出している。算出した snap の値と、設定した閾値を比較することで、荷重-変形関係における非線形性検出が可能であることを示した。特に、露出型柱脚では、明確に降伏点を検出可能であることから、第3章で提案した塑性変形量の推定方法を用いて、塑性化ごとの塑性率を算出し、推定精度を検証した。降伏点直前の剛性が初期弾性剛性と同等である復元力特性を有する場合には、十分な精度で塑性率を推定することが可能であることがわかった。また、柱梁接合部試験体では、初期弾性剛性に対する接線剛性の低下率を5~15%程度の誤差で評価することが可能であることを示した。鉛直ブレース試験体では、snap と絶対加速度の関係から、試験体の線形性を判定することが可能であり、ブレース材の破断前後の剛性変化を評価できる可能性を示した。しかし、snap によって検出される非線形性が、どの現象（降伏、亀裂や破断、座屈など）によるものなのかを判別することは困難であることがわかった。

第6章“多層骨組構造物の振動台実験結果への適用性”では、第3章で提案した多質点せん断系の損傷評価手法を、多層骨組系へ拡張することを試みた。

第3章で提案した損傷評価手法は、せん断質点系の運動方程式から理論構築を行っている。実際の建築物の多くは骨組系であることから、提案した損傷評価手法を骨組系へ拡張し、その適用性を検討する必要がある。骨組系であっても、梁が十分な剛性を有している場合には、せん断質点系として置換することで、提案した多質点せん断系における層レベルの非線形性検出方法を適用することが可能と考えられる。

そこで、18層鉄骨骨組構造物の振動台実験結果を用いて、非線形性検出方法の適用性を

検討した。試験体の梁と床スラブは一体化しており、スラブや梁にある程度の損傷が生じるまでは、せん断系として考えられるものとした。各層で計測される床応答加速度記録を用いて、snap 時刻歴波形および層せん断力-層間変位関係をそれぞれ算出した。各層の層せん断力-層間変位関係に非線形性が生じる時点を、snap 時刻歴波形と設定した閾値によって検出することが可能であることを示した。損傷の進行に伴い、非線形性検出回数も増加することから、損傷状況と非線形性検出回数には定性的な関係があることを示した。

しかし、多層骨組系では、1つの層のみが損傷した場合でも、他の層の層せん断力-層間変位関係に非線形性を生じさせること、せん断変形だけでなく、建物全体の曲げ変形によっても非線形性を示すこと、などの要因から、提案手法では損傷層の同定や、損傷度の評価を行うことは困難であり、今後の検討が必要であることがわかった。

本論文では、絶対加速度の高次微分と構造物の荷重-変形関係における剛性の変化とが、直接的に関係することを用いた損傷評価手法を提案した。既往研究で提案されている損傷評価手法とは異なり、荷重-変形関係における接線剛性の変化に対して感度の高い、新たな着眼点と定量的な評価方法を提案した点で、意義のある成果と考えている。この手法は加速度の高次微分を用いているため、高周波ノイズに対する耐性が低く、実測結果への適用が困難と考えられていた。しかし、ノイズを含む実測結果においても、提案したノイズ低減処理によって、損傷評価手法の適用が可能となることを示せた。ノイズ低減処理に用いたダウンサンプリングに使用する時間刻みは、定量的に決定できることから、評価手法の精度検討が可能であり、実用化に対する可能性を示すことができたものとする。

## 7.2 今後の課題

本研究では、地震応答時の構造物において計測される絶対加速度を微分した物理量を用いて損傷評価を行う手法を提案している。加速度の微分量の算出方法、損傷検出方法、およびノイズへの対処方法は、せん断質点系かつ無減衰における運動法方程式をもとに、可

能な限り理論的に導出することを目指した。提案手法の実構造物へ適用を目指した上で、基礎的な検討として、比較的損傷と応答との関係が観察しやすい振動系の数値応答解析および振動台実験結果を用いて、その適用性を検討している。得られた知見をもとに、今後検討が必要な項目について整理しておく。

### ①数学モデルの検討

前述したように、本研究による損傷評価手法は、せん断質点系かつ無減衰における運動方程式をもとにしている。建物をせん断系としてモデル化しても、それほど影響はないものと考え、最も単純なモデルで検討している。しかし、実際の建物は非せん断系であり、減衰も生じるものと考えられる。そのような場合では、各層の運動は水平方向だけでなく、鉛直方向および回転方向の考慮、および減衰項の導入、などが必要となる。また、高層建物については、建物全体の曲げ変形、高次モード、減衰の影響は無視できないと考えられる。このような場合に、絶対加速度和の算出方法や、提案手法の評価精度へ与える影響、それに対する新たな理論的検討を行う必要がある。

### ②質量が検出精度に与える影響

本研究で提案している振動系の非線形性検出には、振動系の物理パラメータから決定される閾値を使用する。この閾値を設定する際のパラメータの1つとして、質点の質量がある。そのため、実際の建物への適用を考える上では、各層の質量が既知である必要がある。しかし、実際の建物の質量を精確に把握することは困難となる場合が考えられる。例えば、構造躯体以外の非構造部材の設置や移動、または鉄筋コンクリート構造では構造躯体が連続しているため、どこからどこまでを層の質量として考えるのか、といった場合である。閾値の値は質量の2乗に反比例するため、各層で推定した質量に誤差が含まれる場合では、検出精度に影響を与えるものと予想される。質量の推定方法、推定誤差が閾値に与える影響を検討することが必要となる。さらに、健全時に推定した各層の質量が精確であったとしても、地震応答により、構造躯体の損傷や、非構造部材の落下や移動によっ

て、層の質量が変化するような場合でも、閾値に影響を与えることが考えられる。今回は、質量の変化が生じない範囲を対象としているが、質量の変化が大きい場合を対象範囲とするには、質量の変化に対応できるような数学モデルを検討する必要がある。

### ③損傷位置の同定に関する検討

多層骨組系が非せん断系である場合には、各層の変形は当該層の層せん断力-層間変位関係だけでなく、他層にも影響を与えることになる。そのため、ある層が損傷した場合に、他の層が無損傷であったとしても、層せん断力-層間変位関係に非線形性が生じることになる。多層平面骨組モデルにおける数値応答解析によって、層せん断力-層間変位関係の非線形性を検出する提案手法では、無損傷にもかかわらず損傷有りとして判定する可能性が示された。さらに、建物全体の曲げ変形が卓越するような振動をする場合では、損傷に無関係な非線形性が生じることになる。このような問題に対して、損傷した層を同定する手法について検討する必要がある。

### ④多層骨組系における損傷度の評価手法に関する検討

本研究では、損傷度の指標の1つである塑性変形量を推定する手法を提案している。塑性変形量を推定するためには、絶対加速度の2階微分である snap 時刻歴波形から降伏点を検出することが必要となる。しかし、骨組構造物においては、上記③の理由によって、snap が閾値を超えた時点が当該層における損傷であるか否かの判断が困難となることがわかった。そのため、当該層が降伏した時点を検出することが困難であり、提案手法による塑性変形量の推定が不可能である。18層鉄骨骨組構造物の振動台実験においては、非線形性検出回数と損傷状況との定性的な関係については述べたが、定量的な損傷度の指標は整理できていない。実構造物への適用性を考える上では、このような場合における損傷度の評価手法を提案する必要がある。

さらに、多層の実建物においては、計測センサを全層に設置できない場合が想定される。何層かに1つの割合でしか計測センサを設置できない場合では、当該層から最上層ま

での絶対加速度の和を算出することが不可能となる。そのような場合における対処方法や、評価精度に与える影響を検討する必要がある。

### ⑤被災度区分判定への利用

本研究で提案している損傷評価手法では、加速度の2階微分（snap）によって、荷重-変形関係に生じる剛性変化を検出することが可能であることを数式的に明らかにした。詳細な適用範囲については、より多くの構造部材や構造物における実験的検討が必要であるものの、実測結果においても提案手法の適用が可能であることを示せた。しかし、現時点では、検出した剛性変化が、降伏や破断、座屈などの、どの現象に起因するものかを判断することは困難である。将来的に、構造部材の荷重-変形関係に生じる非線形性がどの現象（降伏、破断、座屈など）に起因するものであるかを判別し、定量的な評価を行うことができれば、被災度区分判定に対して、有益な情報提供が可能となるものと考えられる。

## 付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

### A.1 はじめに

本論6章において、18層鉄骨骨組構造物の振動台実験結果を用いて、snapによる各層の非線形性検出方法の適用性を検討した。ここでは、各加振実験において、snapの値が設定した閾値を超えた回数についてまとめ、報告した。閾値を設定する際には、各層の降伏層せん断力が必要となる。降伏層せん断力を推定するため、平面解析モデルを作成し、静的増分解析を行った。ここでは、解析モデルおよび解析結果を示すことにする。

また、本論中では、層せん断力-層間変位関係およびsnap時刻歴波形を全ての層および全ての加振実験について掲載していない。全ての加振実験において、snapの値が閾値を超えた時点と層せん断力-層間変位関係における非線形挙動との対応関係を観察することを目的として、ここでは、各加振実験における全層のsnap時刻歴波形および層せん断力-層間変位関係を掲載することにする。

### A.2 静的増分解析

#### A.2.1 骨組解析モデル

解析モデルは、本論6章で検討した18層鉄骨構造物試験体をもとにした、18層3スパン平面骨組モデルとする。図A-1に解析モデルを示す。柱および梁は線材と材端バネで構成し、1層の柱脚は固定とする。柱および梁の材端バネは完全弾塑性型とする（図A-2）。層重量、部材断面、および力学特性は、本論6章6.3.1項の試験体情報を参考にして決定した。各層重量は107kNとして、各節点に作用する鉛直荷重は外柱に17.8kN、内柱に35.7kNとした。外力分布は $A_i$ 分布に基づくものとし、1階の層間変形角が0.10(rad)となるまで強制変位を与えることとする。表A-1に与えた外力分布を示す。

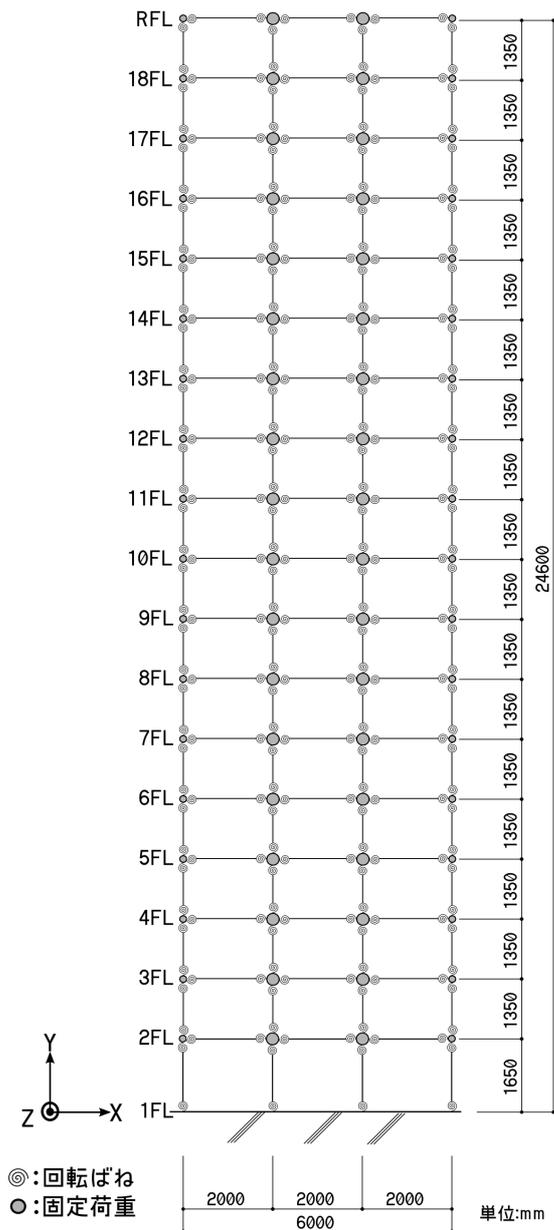


図 A-1 解析モデル

表 A-1 増分解析の外力分布

層	$A_i$
18	2.92
17	2.33
16	2.05
15	1.87
14	1.74
13	1.64
12	1.56
11	1.48
10	1.42
9	1.36
8	1.31
7	1.26
6	1.21
5	1.16
4	1.12
3	1.08
2	1.04
1	1.0

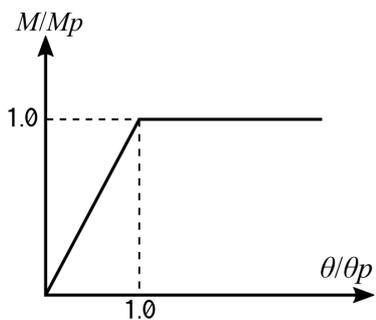


図 A-2 材端ばねの復元力特性

## A.2.2 解析結果

図 A-3 に静的増分解析で得られた各層の層せん断力-層間変形角関係を示す。赤色の丸は、各層において最初に塑性ヒンジが発生した時点を示しており、その時点の層せん断力を2倍した値を降伏層せん断力とする。表 A-2 に各層の降伏層せん断力を示す。9層から上層は、層に塑性ヒンジが形成されなかったため、8層の降伏層せん断力と同値とした。

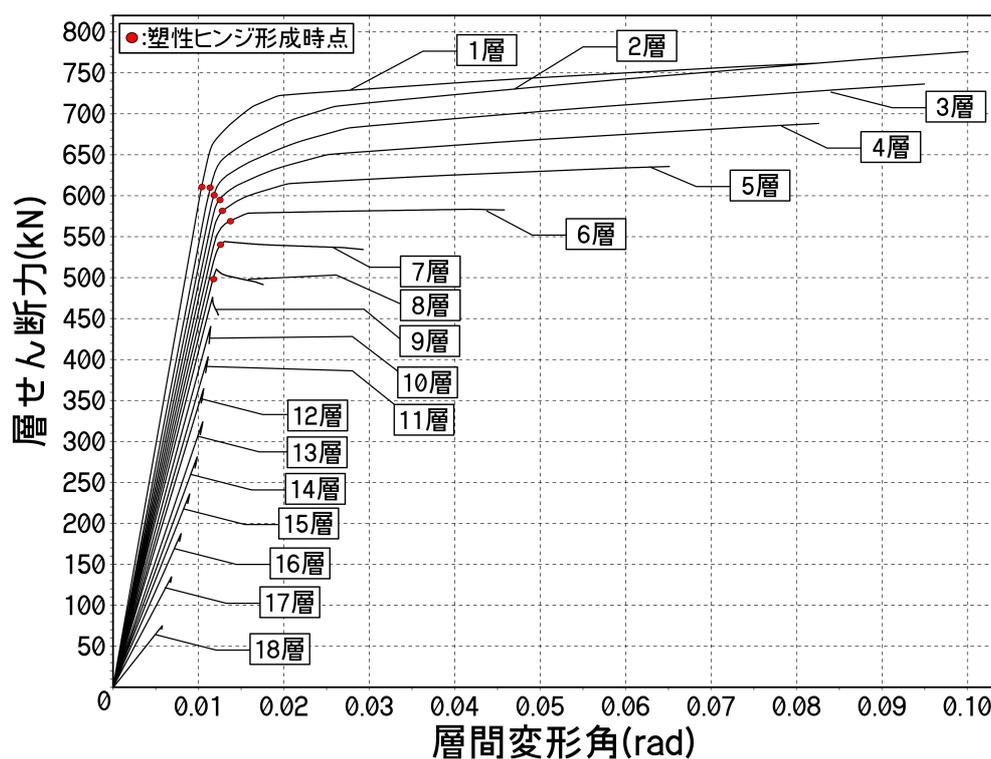


図 A-3 層せん断力-層間変形角関係

表 A-2 降伏層せん断力

層	降伏層せん断力(kN)
18	997
17	997
16	997
15	997
14	997
13	997
12	997
11	997
10	997
9	997
8	997
7	1087
6	1136
5	1166
4	1194
3	1209
2	1224
1	1225

### A.3 層せん断力-層間変位関係および snap 時刻歴波形

本論 6 章では、37%加振実験以降の加振結果についてのみ検討しているが、37%加振前に 14.8%加振が行われている。ここでは、14.8%加振実験から試験体が倒壊と判定された 380%加振の 3 回目までの加振実験の全てにおいて、全層の層せん断力-層間変位関係および snap 時刻歴波形を掲載することにする。層せん断力-層間変位関係では、縦軸を層せん断力、横軸を層間変位とし、破線で降伏層せん断力を示す。このとき、 $j$  層における層せん断力  $Q(\delta_j)$  は本論 2 章(2-16)式を  $Q(\delta_j)$  について解いた以下の式で算出した。

$$Q(\delta_j) = -{}_s a_j m_j \quad (\text{A-1})$$

ここで、 ${}_s a_j$  は  $j$  層から最上層までの床応答加速度の和である。層間変位は、各階の床応答加速度を 2 階積分することで絶対変位を求め、変位の差を取ることで算出した。積分操作は、初期基線ずれを補正し、遮断周波数を 0.50Hz とするハイパスフィルタをかけたのち台形積分によって行った。初期基線ずれの値は、時刻歴波形における 0 秒からの 10 秒間の平均値とした。ただし、入力レベル 227%加振以降では、残留変形の影響を考慮し、ワイヤー変位計によって計測された水平変位の差を取ることで算出した。本論 6 章 6.3.2 項の実験装置より、ワイヤー変位計は 2 階から 12 階までしか設置されていないため、12 層より上層については全ての入力レベルにおいて 2 階積分によって算出している。snap 時刻歴波形は、縦軸を snap、横軸を時刻とし、本論 3 章(3-40)式で算出した閾値を赤線で示す。snap の値が閾値を超えてピークとなった時点を青色の○で、層せん断力-層間変位および snap 時刻歴波形においてそれぞれ示す。併せて、閾値を超えてピークを示した回数を示す。入力レベルが最も小さい 14.8%加振実験から、入力レベルが大きくなる順に掲載している。

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			0
2層			0
3層			0
4層			0

図A-4 14.8%加振実験(1層~4層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			0
6層			0
7層			0
8層			0

図 A-5 14.8%加振実験(5層～8層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			0
10層			0
11層			0
12層			0

図 A-6 14.8%加振実験(9層~12層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			0
14層			0
15層			0
16層			0

図 A-7 14.8%加振実験(13~16層)

付録 A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			0
18層			0

図 A-8 14.8%加振実験(17層~18層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			5
2層			4
3層			4
4層			3

図 A-9 37%加振実験(1層~4層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			3
6層			2
7層			3
8層			4

図 A-10 37%加振実験(5層~8層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			6
10層			6
11層			5
12層			6

図 A-11 37%加振実験(9層~12層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			7
14層			7
15層			5
16層			0

図 A-12 37%加振実験(13~16層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			0
18層			0

図 A-13 37%加振実験(17層~18層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			19
2層			15
3層			9
4層			6

図 A-14 74.1%加振実験(1層～4層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			4
6層			2
7層			2
8層			3

図 A-15 74.1%加振実験(5層～8層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			5
10層			8
11層			10
12層			12

図 A-16 74.1%加振実験(9層~12層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			8
14層			6
15層			3
16層			1

図 A-17 74.1%加振実験(13~16層)

付録 A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			0
18層			0

図 A-18 74.1%加振実験(17層~18層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			51
2層			44
3層			37
4層			28

図 A-19 100%\_1 回目加振実験(1層～4層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			15
6層			16
7層			11
8層			17

図 A-20 100%\_1 回目加振実験(5層~8層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			10
10層			8
11層			6
12層			10

図 A-21 100%\_1 回目加振実験(9層~12層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			12
14層			9
15層			4
16層			1

図 A-22 100%\_1 回目加振実験(13~16層)

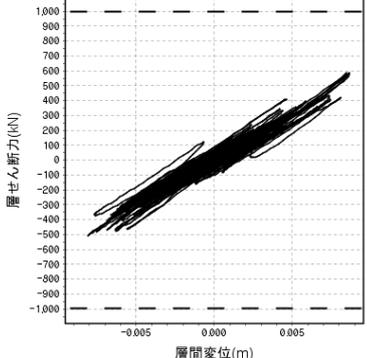
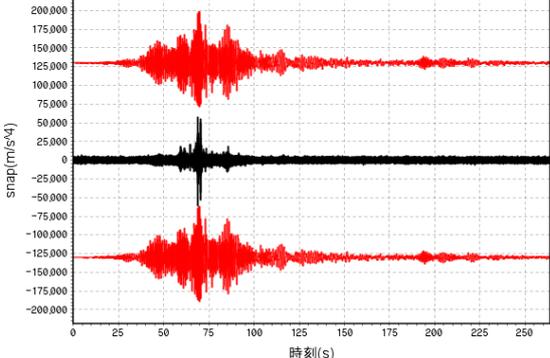
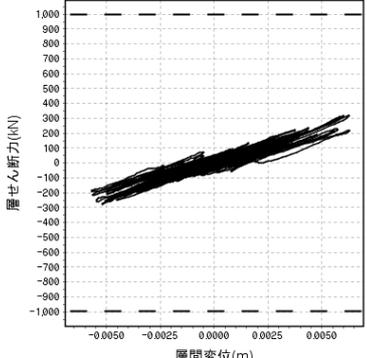
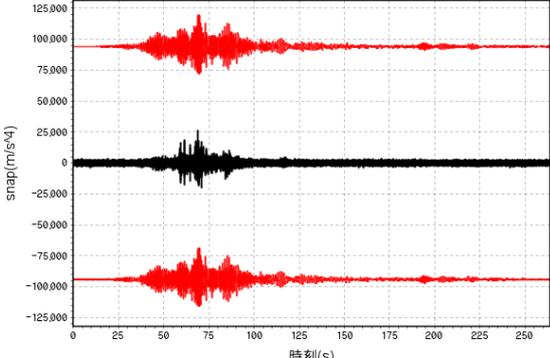
層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			0
18層			0

図 A-23 100%\_1 回目加振実験(17層~18層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			42
2層			42
3層			29
4層			23

図 A-24 100%\_2 回目加振実験(1層~4層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5 層			16
6 層			15
7 層			19
8 層			24

図 A-25 100%\_2 回目加振実験(5 層~8 層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			23
10層			18
11層			14
12層			12

図 A-26 100%\_2 回目加振実験(9層~12層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13 層			8
14 層			5
15 層			4
16 層			2

図 A-27 100%\_2 回目加振実験(13~16 層)

付録 A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			0
18層			0

図 A-28 100%\_2回目加振実験(17層~18層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			219
2層			173
3層			147
4層			114

図 A-29 163.6%\_1 回目加振実験(1層~4層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			102
6層			98
7層			104
8層			144

図 A-30 163.6%\_1 回目加振実験(5層~8層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			109
10層			109
11層			123
12層			101

図 A-31 163.6%<sub>1</sub> 回目加振実験(9層~12層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			77
14層			46
15層			13
16層			2

図A-32 163.6%\_1回目加振実験(13~16層)

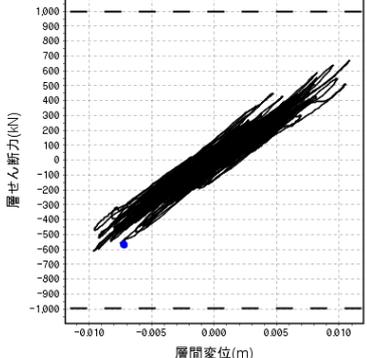
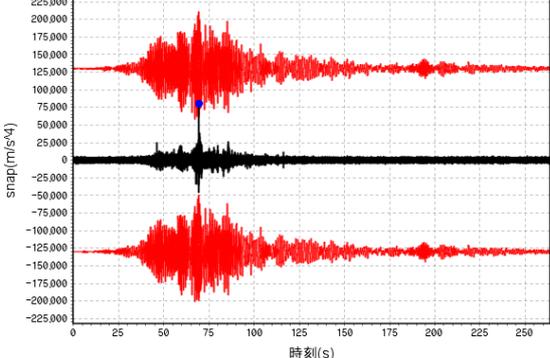
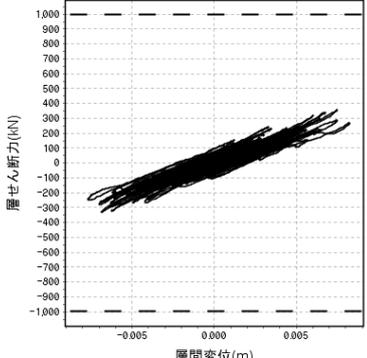
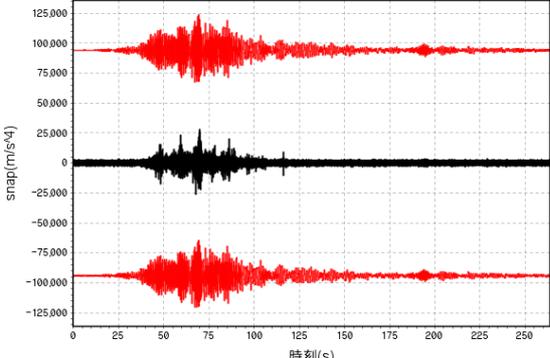
層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17 層			1
18 層			0

図 A-33 163.6%\_1 回目加振実験(17 層~18 層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			203
2層			187
3層			154
4層			119

図A-34 163.6%\_2回目加振実験(1層~4層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5 層			116
6 層			95
7 層			103
8 層			125

図 A-35 163.6%\_2 回目加振実験(5 層～8 層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			127
10層			106
11層			92
12層			79

図 A-36 163.6%\_2 回目加振実験(9層~12層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			63
14層			30
15層			10
16層			5

図 A-37 163.6%\_2 回目加振実験(13~16層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

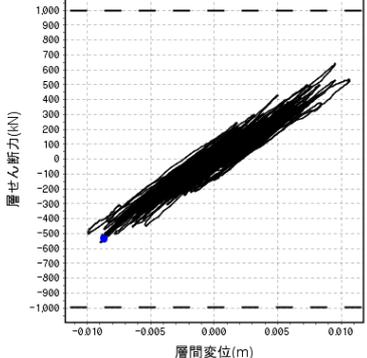
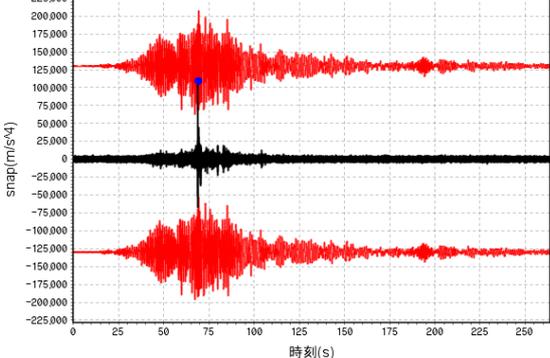
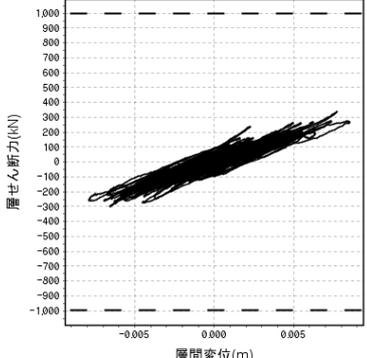
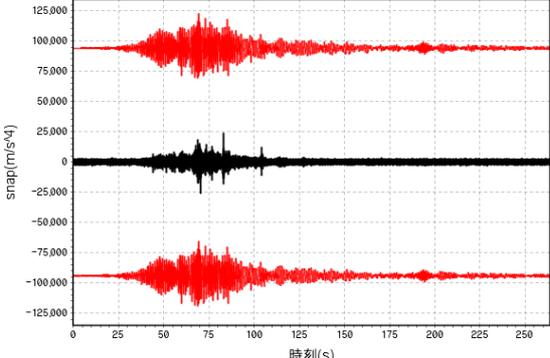
層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			1
18層			0

図 A-38 163.6%\_2 回目加振実験(17層~18層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			356
2層			312
3層			284
4層			228

図 A-39 200%加振実験(1層~4層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			197
6層			160
7層			169
8層			221

図 A-40 200%加振実験(5層~8層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			193
10層			184
11層			168
12層			144

図 A-41 200%加振実験(9層~12層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			138
14層			83
15層			37
16層			11

図 A-42 200%加振実験(13~16層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			9
18層			5

図 A-43 200%加振実験(17層~18層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			461
2層			404
3層			350
4層			297

図 A-44 227.3%加振実験(1層～4層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			249
6層			231
7層			229
8層			284

図 A-45 227.3%加振実験(5層～8層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			247
10層			255
11層			219
12層			185

図 A-46 227.3%加振実験(9層~12層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13 層			147
14 層			101
15 層			34
16 層			9

図 A-47 227.3%加振実験(13~16層)

付録 A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			2
18層			4

図 A-48 227.3%加振実験(17層~18層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			1091
2層			698
3層			550
4層			411

図 A-49 272.7%加振実験(1層～4層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			336
6層			276
7層			270
8層			336

図 A-50 272.7%加振実験(5層~8層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			266
10層			245
11層			195
12層			165

図 A-51 272.7%加振実験(9層～12層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			123
14層			64
15層			23
16層			4

図 A-52 272.7%加振実験(13~16層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			0
18層			1

図 A-53 272.7%加振実験(17層~18層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			1332
2層			512
3層			282
4層			170

図A-54 310%\_1回目加振実験(1層~4層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			120
6層			80
7層			99
8層			132

図 A-55 310%\_1 回目加振実験(5層~8層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			101
10層			75
11層			54
12層			47

図 A-56 310%\_1 回目加振実験(9層~12層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13 層			45
14 層			19
15 層			7
16 層			1

図 A-57 310%\_1 回目加振実験(13~16 層)

付録 A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			0
18層			0

図 A-58 310%\_1 回目加振実験(17層~18層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			1175
2層			655
3層			581
4層			205

図 A-59 310%\_2 回目加振実験(1層~4層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			58
6層			29
7層			27
8層			48

図A-60 310%\_2回目加振実験(5層~8層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			45
10層			46
11層			40
12層			24

図 A-61 310%\_2 回目加振実験(9層~12層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			11
14層			8
15層			8
16層			7

図 A-62 310%\_2 回目加振実験(13~16層)

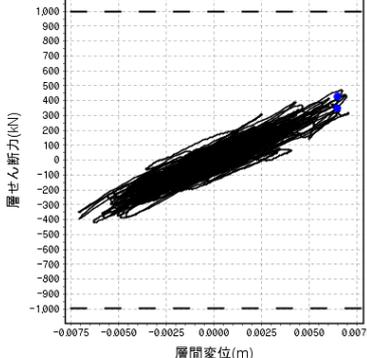
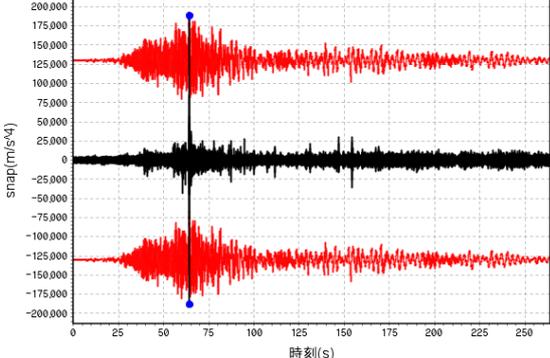
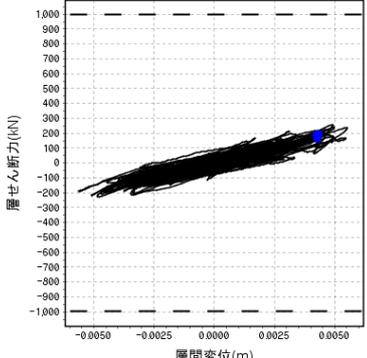
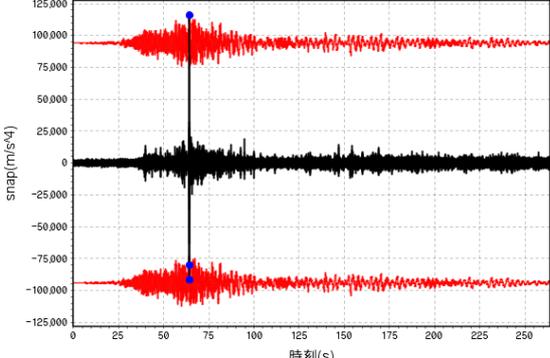
層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			2
18層			3

図 A-63 310%\_2 回目加振実験(17層~18層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			408
2層			221
3層			173
4層			120

図 A-64 380%\_1 回目加振実験(1層~4層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			67
6層			30
7層			34
8層			52

図 A-65 380%\_1 回目加振実験(5層~8層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			55
10層			58
11層			53
12層			44

図 A-66 380%\_1 回目加振実験(9層~12層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			35
14層			9
15層			3
16層			2

図 A-67 380%\_1 回目加振実験(13~16層)

付録 A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

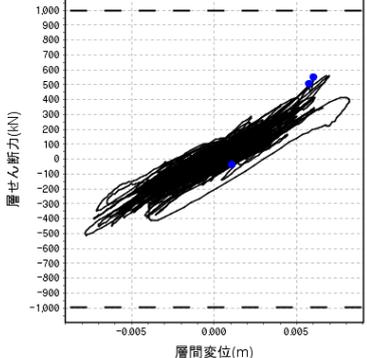
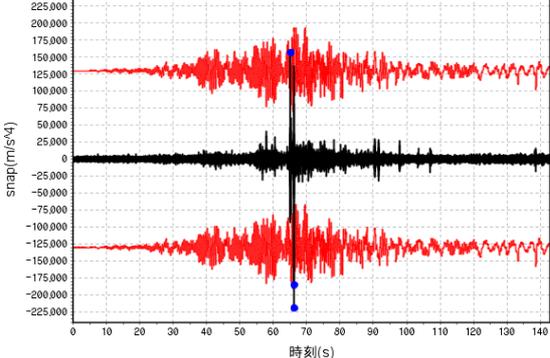
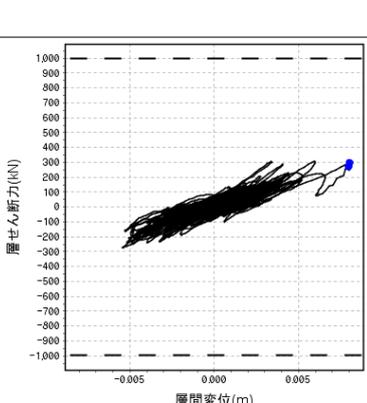
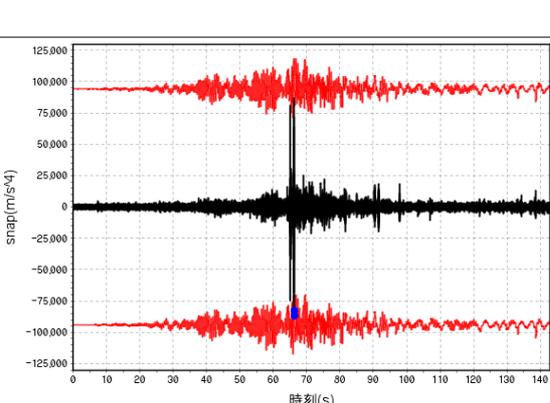
層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			3
18層			2

図 A-68 380%\_1 回目加振実験(17層~18層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			315
2層			188
3層			147
4層			126

図 A-69 380%\_2 回目加振実験(1層~4層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5層			90
6層			28
7層			22
8層			30

図A-70 380%\_2回目加振実験(5層~8層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			30
10層			39
11層			39
12層			27

図 A-71 380%\_2 回目加振実験(9層~12層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			22
14層			11
15層			3
16層			0

図 A-72 380%\_2 回目加振実験(13~16層)

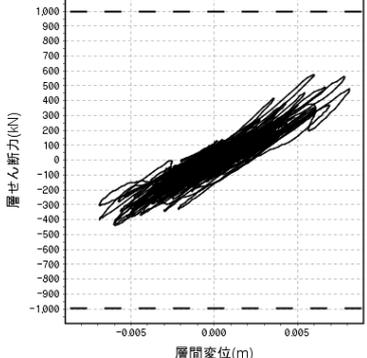
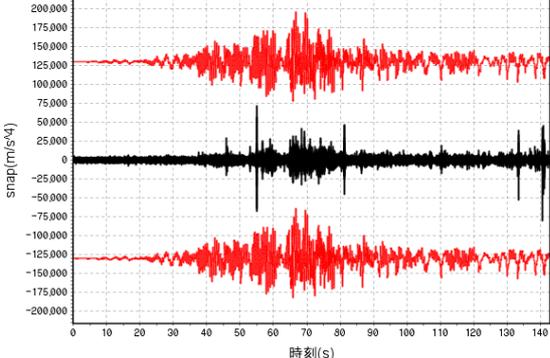
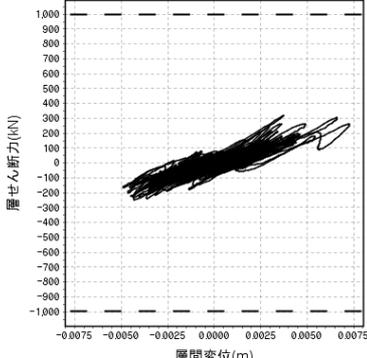
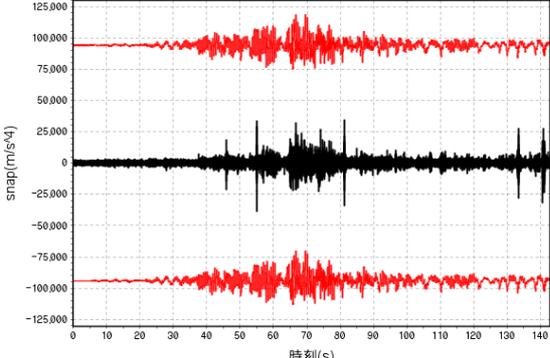
層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			0
18層			0

図 A-73 380%\_2 回目加振実験(17層~18層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
1層			41
2層			30
3層			23
4層			15

図 A-74 380%\_3目加振実験(1層~4層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
5 層			18
6 層			3
7 層			1
8 層			1

図 A-75 380%\_3 回目加振実験(5 層～8 層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

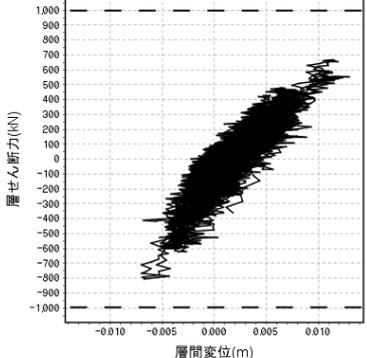
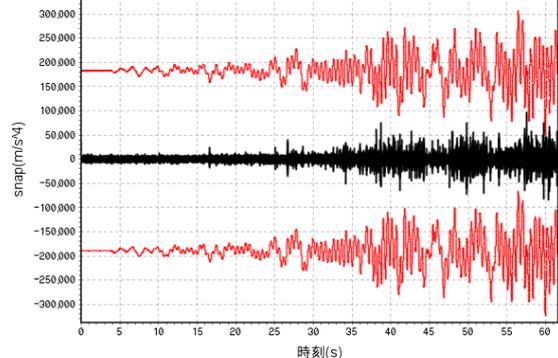
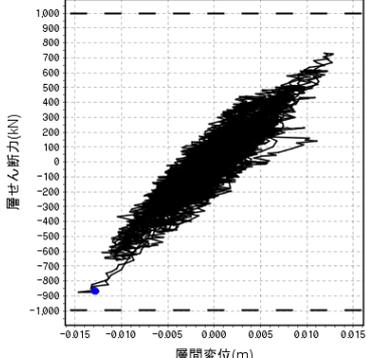
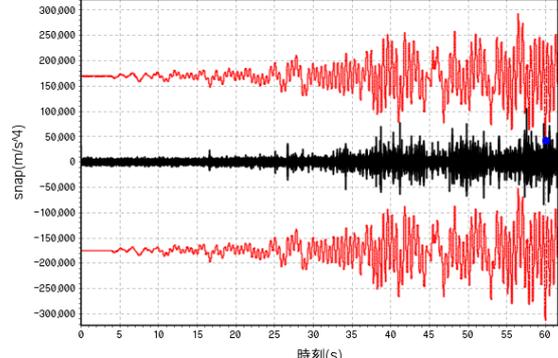
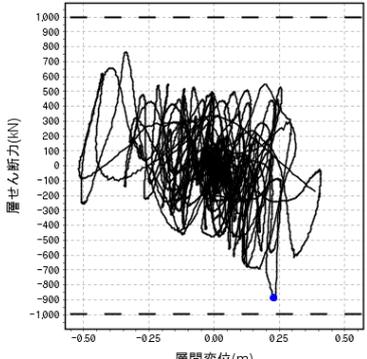
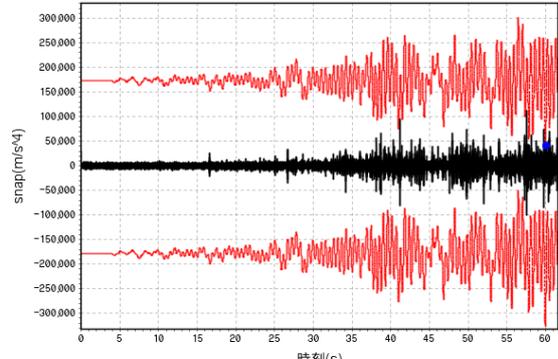
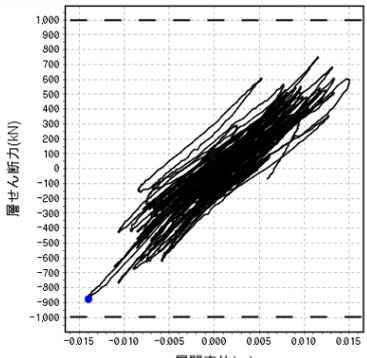
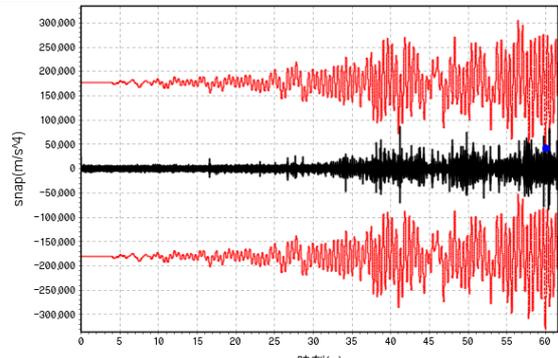
層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
9層			0
10層			1
11層			1
12層			1

図 A-76 380%\_3 回目加振実験(9層~12層)

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
13層			1
14層			1
15層			0
16層			0

図 A-77 380%\_3 回目加振実験(13~16層)

付録A 18層鉄骨骨組振動台実験の実験結果

層	層せん断力-層間変位関係	snap 時刻歴波形	検出回数
17層			0
18層			0

図 A-78 380%\_3 回目加振実験(17層~18層)

## 付録B snap のフーリエ振幅スペクトル

### B.1 はじめに

本論 5 章において、既往研究で行われた構造部材の振動台実験結果を用いて、本論文で提案した損傷評価手法の適用性を検討した。構造部材の履歴復元力における非線形性を検出するために、絶対加速度の時間に対する 2 階微分である snap を用いている。計測された絶対加速度応答時刻歴波形はノイズを含むため、ノイズの影響を低減して snap 時刻歴波形を算出する方法を本論 4 章において提案した。ここでは、ノイズ低減処理の有無が snap に与える影響について、周波数領域から観察することを目的として、snap のフーリエ振幅スペクトルを掲載することにする。

### B.2 フーリエ振幅スペクトル

本論 5 章で検討した、露出型柱脚、柱梁接合部、鉛直ブレースの加振実験ごとに snap のフーリエ振幅スペクトルを掲載する。フーリエ振幅スペクトルは縦軸を振幅、横軸を周波数として、ローパスフィルタをかける際の遮断周波数近傍までの結果を表示している。ノイズ低減処理を行った snap のフーリエスペクトルを実線で、処理を行っていないものを点線でそれぞれ示す。併せて、snap 時刻歴波形を算出するために使用した絶対加速度応答時刻歴波形のフーリエ振幅スペクトルも示すこととする。それぞれのスペクトルには、試験体の固有振動数を赤色の破線で示した。図 B-1, B-2 に露出型柱脚試験体、図 B-3, B-4 に柱梁接合部試験体、図 B-5 に鉛直ブレース試験体、のフーリエ振幅スペクトルをそれぞれ示す。

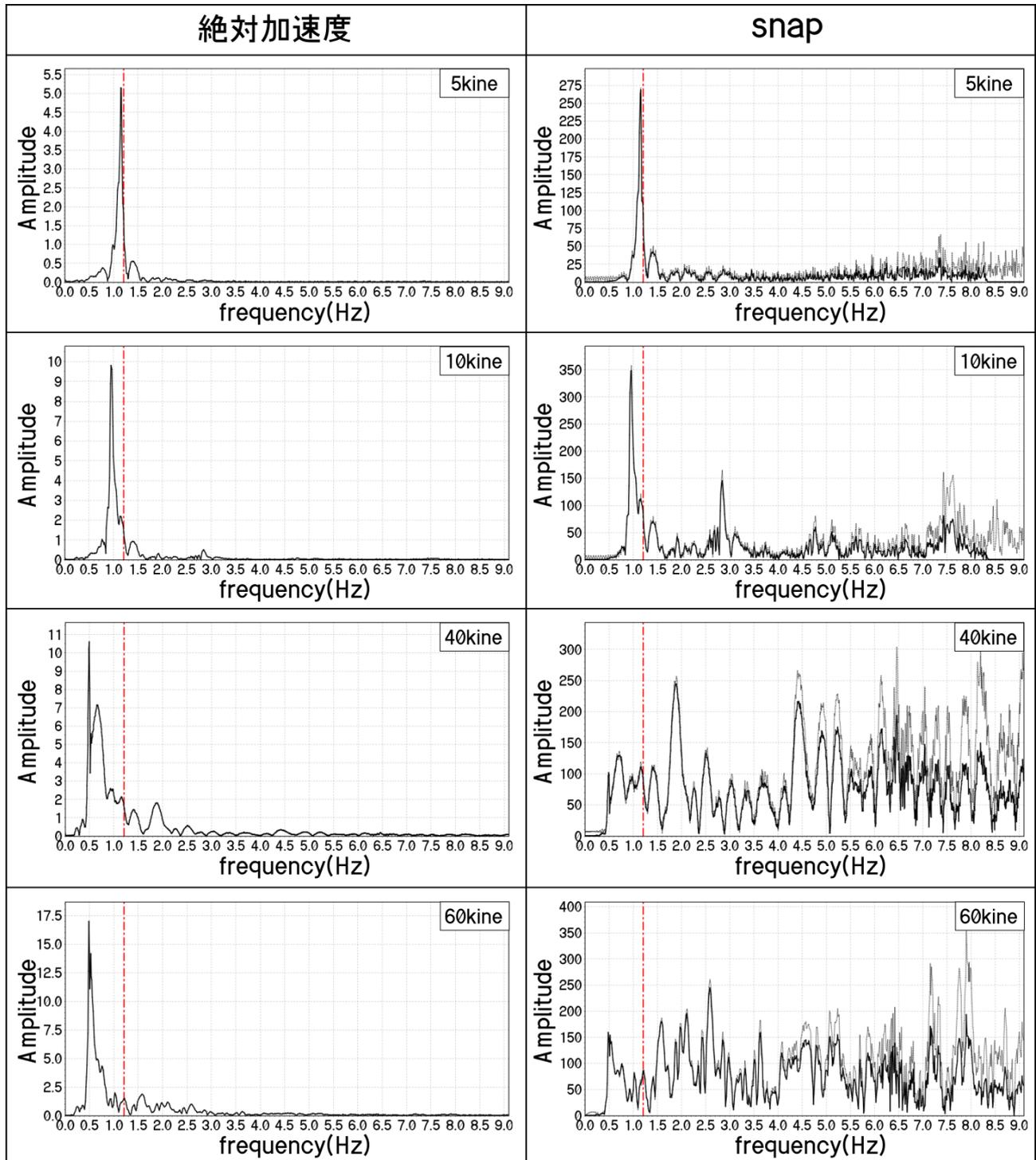


図 B-1 露出型柱脚試験体 No.24 (アンカーボルト降伏型)

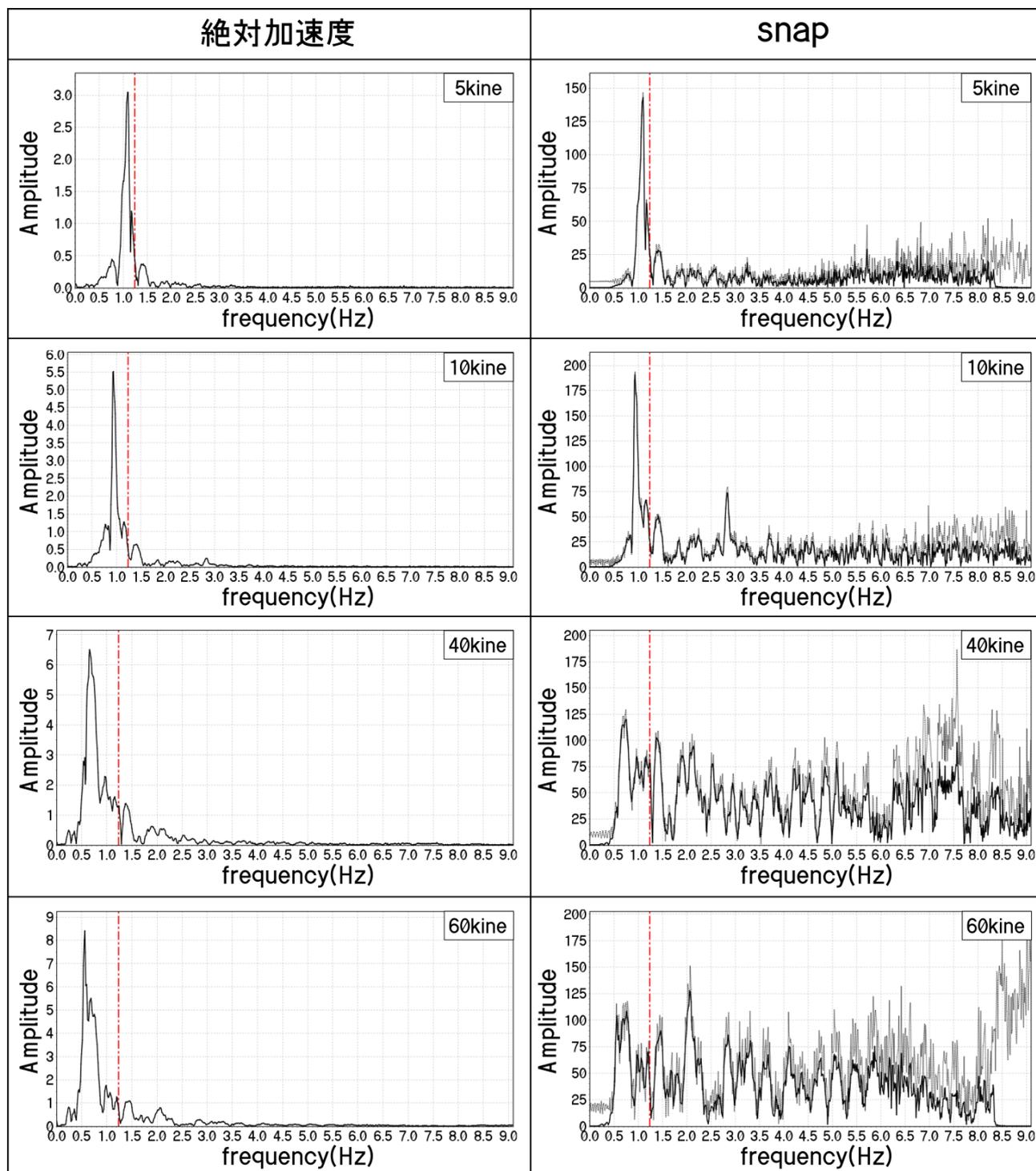


図 B-2 露出型柱脚試験体 No.25(ベースプレート降伏型)

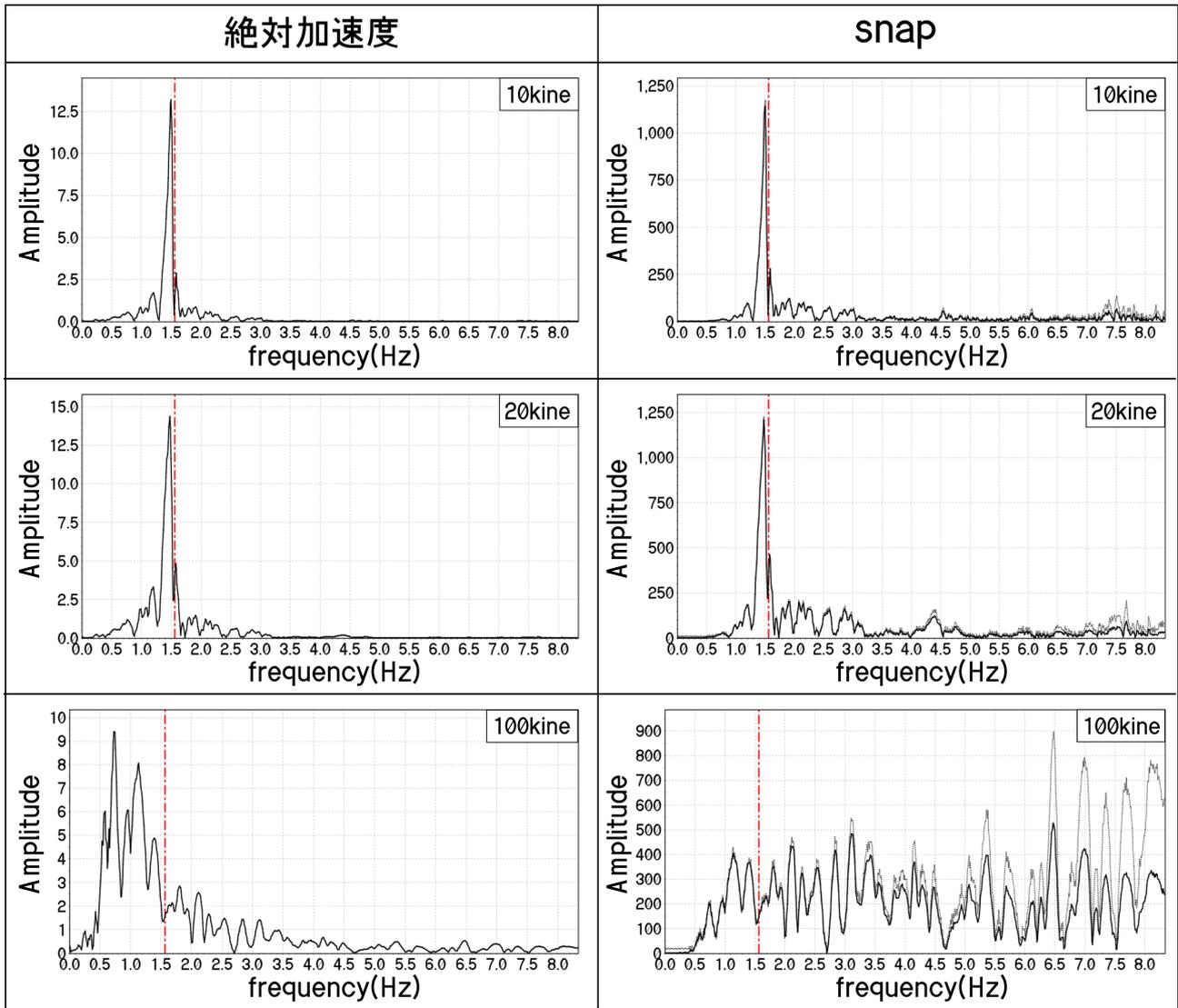


図 B-3 柱梁接合部試験体 No.2(梁側損傷)

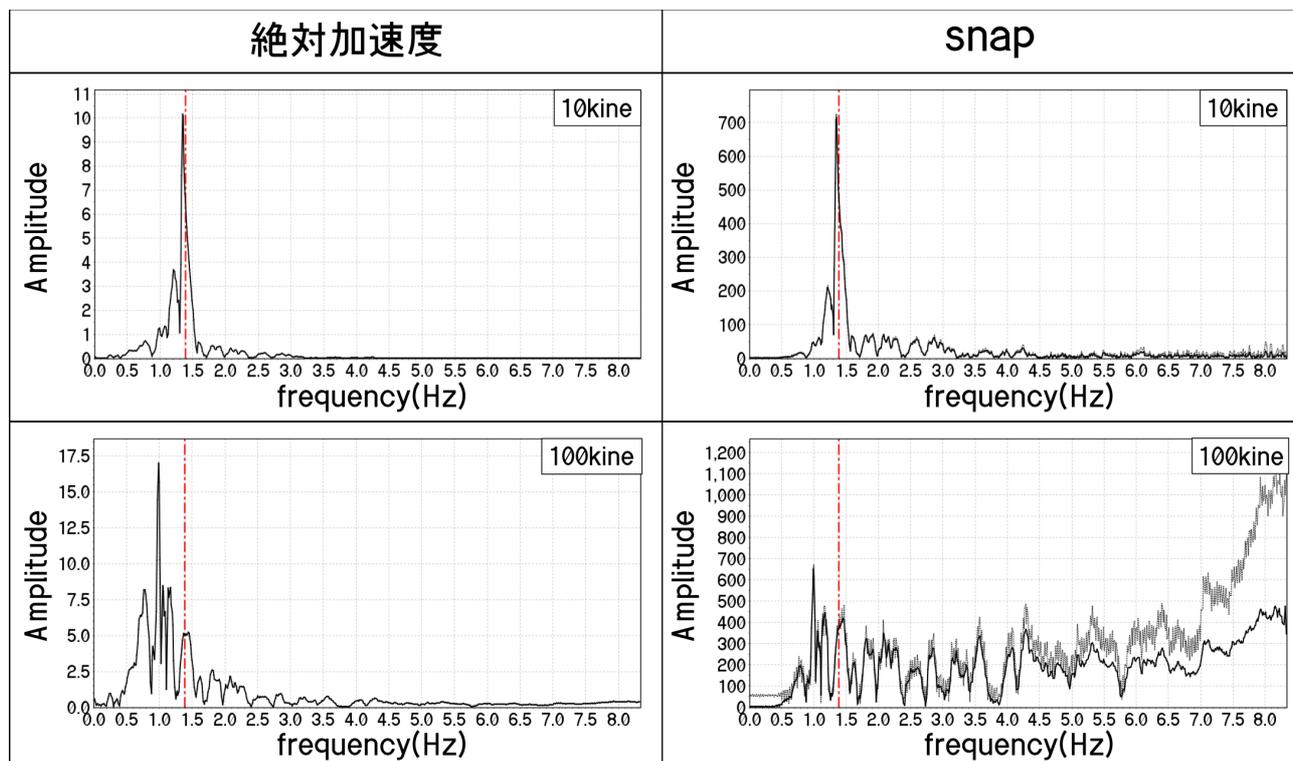


図 B-4 柱梁接合部試験体 No.10(柱側損傷)

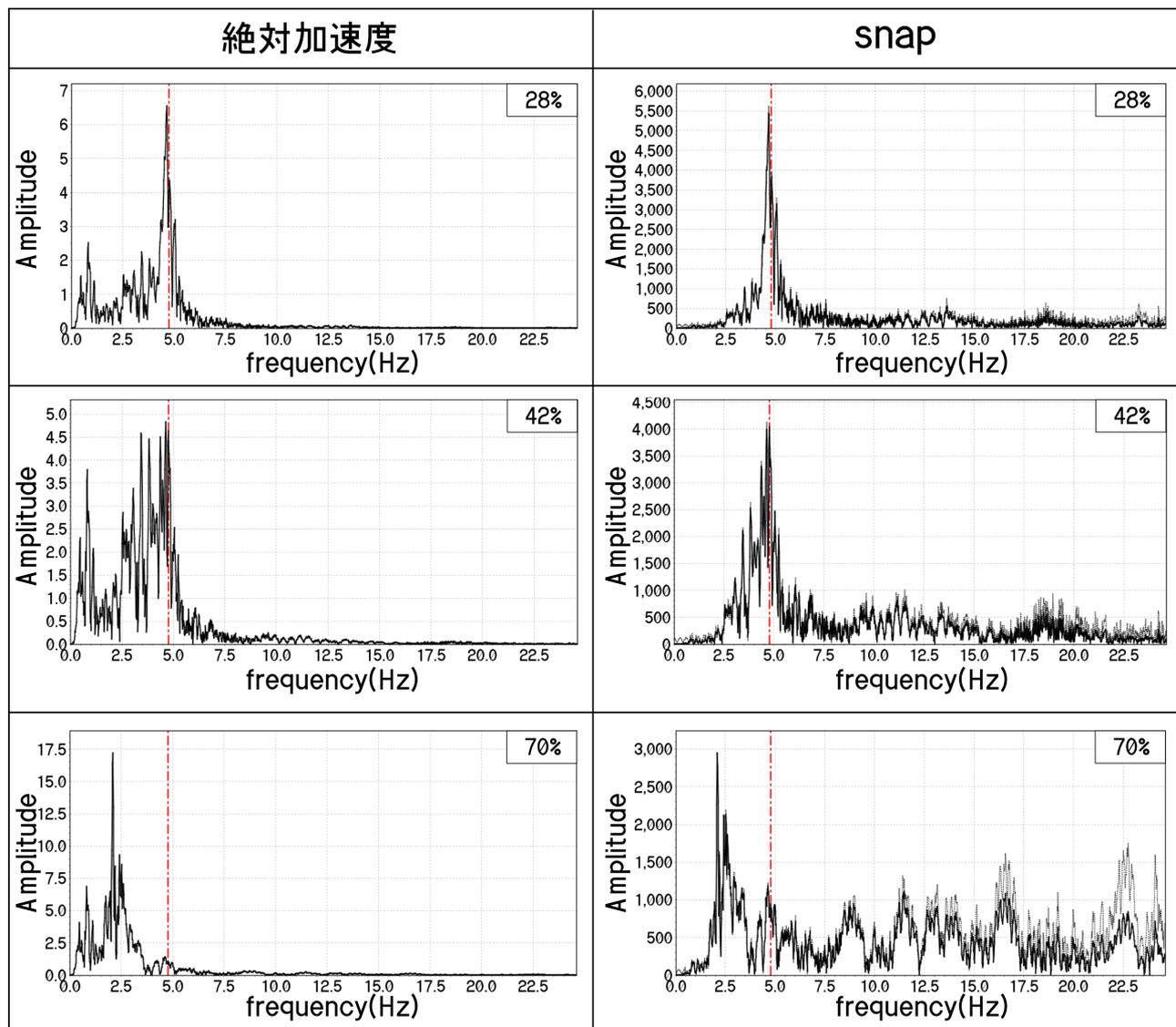


図 B-5 鉛直ブレース試験体

## おわりに

本論文は、著者が東京大学大学院博士課程に進学し、鋼構造研究室に在籍した3年間に行った研究をまとめたものです。

著者の指導教員である東京大学大学院工学系研究科准教授 伊山潤先生には、修士課程2年間を含む5年間にわたり、ご指導・ご鞭撻を賜りました。本論文を作成するにあたり、数多くの貴重なご意見をいただきました。ここに、深甚なる謝意を申し上げます。

著者が研究生活を過ごす上で、鋼構造研究室の方々には数多くのご助言・ご協力をいただきました。本論文の副査でもあります、東京大学大学院工学系研究科教授 桑村仁先生には、折に触れて研究に関するご助言をいただきました。著者の研究の核心を捉えるもので、その深さには常に感嘆しておりました。ここに、厚くお礼申し上げます。同 助教 小山毅先生には、研究の相談にのっていただくだけでなく、国際会議における発表論文の執筆においては、懇切丁寧なご指導をいただきました。ここに、厚くお礼申し上げます。また、研究室の先輩および後輩の皆様には大変お世話になりました。ここに、感謝申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科准教授 藤田香織先生、同 楠浩一先生、東京大学大学院情報理工学系研究科准教授 眞溪歩先生には、著者の副査をお引き受けいただくことになりました。様々な視点からのご指摘をいただき、大変勉強になりました。ここに、厚くお礼申し上げます。

東京工業大学教授 山田哲先生、横浜国立大学准教授 松本由香先生、北海道大学准教授 岡崎太一郎先生、「都市機能の維持・回復のための調査研究」運営委員会 S 高層分科会には、既往研究で行われた振動台実験の計測データ、および実験に関する資料をご提供いただきました。ここに、深甚なる謝意を申し上げます。

また、東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻 森健士郎氏には、数値解析プログラムや研究内容についての相談だけでなく、国際会議参加時の手配など、様々な場面でご協力いただき、大変感謝しております。ここに、厚くお礼申し上げます。

博士課程3年間の研究活動において、東京大学大学院工学系研究科博士課程学生特別リサーチ・アシスタントによるご支援を賜りました。ここに記して謝意を表します。

最後になりましたが、今日に至るまで、自分のわがままを許し、大学進学から現在に至るまで、全面的に協力し、支えてくれた父と母に心より感謝します。

2015年12月1日

涌井 将貴