

3) 繰り返し加振を受ける試験体の強震応答・非線形履歴特性の変化と損傷評価

a) 補強なしの試験体の繰り返し加振

一連の加振の最終日には、制震補強を全て取り除いた状態で三の丸波を繰り返し入力し、結果として 1～3 層の一部の柱梁接合部などで破断や顕著な変形などの損傷を生じた。表 2 に加振ケースと損傷状況の概要を示す。以後、加振ケースを表中の番号で示すものとする。損傷については、加振を繰り返している間は試験体上での目視確認ができないため、計測データ等から顕著な損傷が生じたと考えられるケースのあとに振動台を停止し、確認できた内容となっている。記載した梁の下フランジ溶接部周辺の破断のほかに、フランジやウェブの亀裂や局部座屈、コンクリートスラブの亀裂などが多数観察されている。

表 2 無補強試験体の三の丸波繰り返し加振

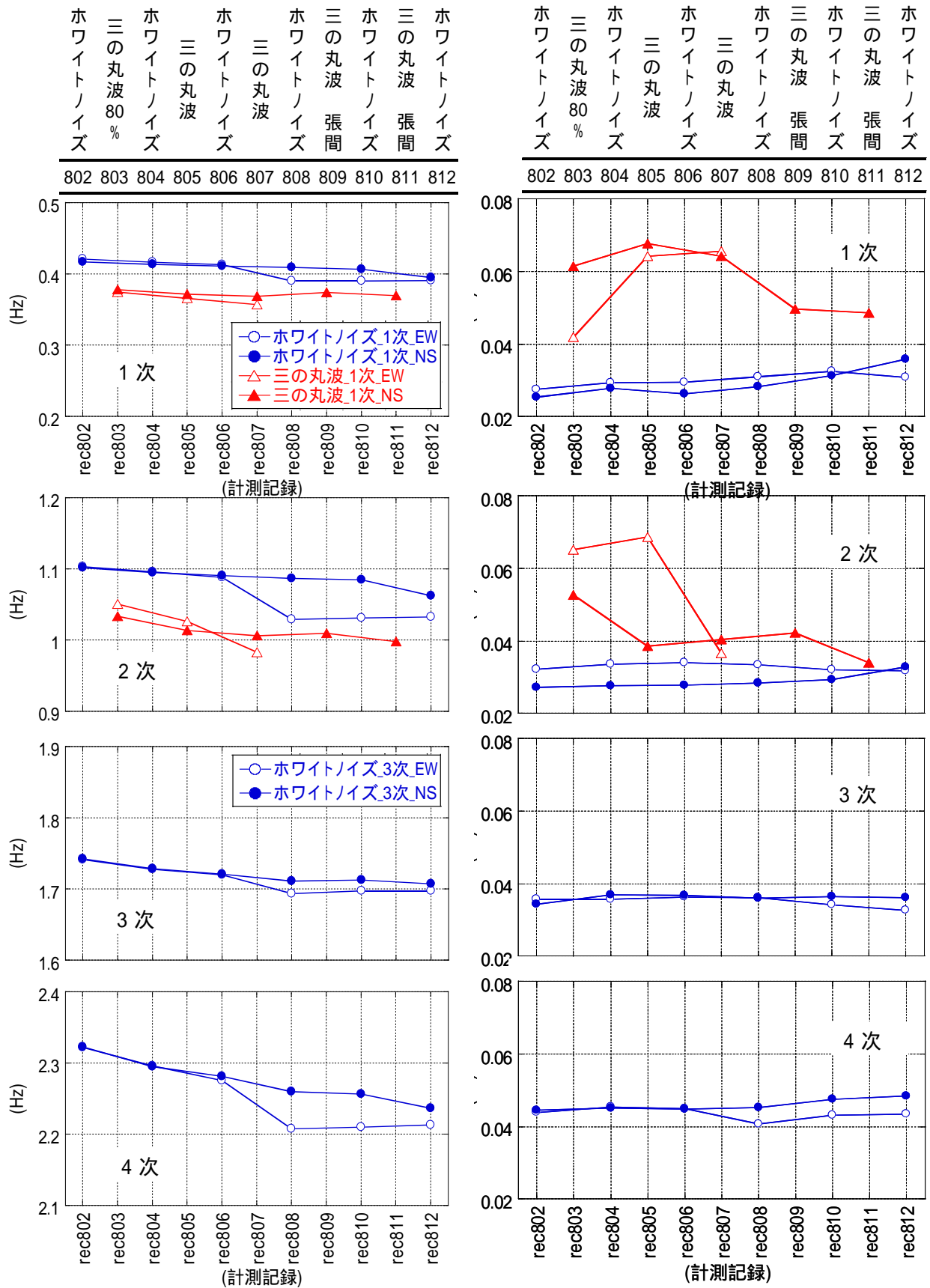
加振入力	ケース名	目視による損傷状況
ホワイトノイズ (レベル 2)	802	
三の丸波、2 方向、80%	803	
ホワイトノイズ (レベル 2)	804	
三の丸波、2 方向、100%	805	
ホワイトノイズ (レベル 2)	806	
三の丸波、2 方向、100%	807	桁行方向 2 層梁 6 箇所・1 層梁 1 箇所破断
ホワイトノイズ (レベル 2)	808	
三の丸波、張間方向、100%	809	
ホワイトノイズ (レベル 2)	810	
三の丸波、張間方向、100%	811	張間方向 2 層・3 層梁の各 2 箇所破断
ホワイトノイズ (レベル 2)	812	

b) 固有振動数・減衰定数などの変化に基づく損傷評価

19 年度に実施された実験に関して、損傷に対応した固有振動数の低下やモード形の変化などの結果が得られている (19・20 年度本業務報告書、引用文献¹⁾ など)。その際に用いた手法とほぼ同様の手順で、今年度の実験における試験体の基本的な振動特性の推定を行った。繰り返し加振による固有振動数と減衰定数の変化を図 6 に示す。

固有振動数については、一連の加振の最初の状態で 2 方向の値はほぼ同一である。その後はホワイトノイズ加振の値の変化から、3 回目の三の丸波加振 (807) の際に桁行方向で大きく低下、その後の 2 回目の張間方向加振 (811) で張間方向も低下していることがわかる。この傾向は表 2 に示した目視による損傷状況とよく対応している。詳しく見ると、最初の 2 回の三の丸波加振でも若干の低下が見られる。また、各次振動数の低下度合いに注目すると、807 加振の桁行方向で 1 次・2 次が約 5.5%、3 次が 1.5%、4 次が 3%の低下、811 加振の張間方向では 1 次で約 3%、2 次で 2%、3 次・4 次では 1%以下の低下となっている。なお、三の丸波加振時の値は、振幅が大きいためホワイトノイズより低い値となるが、損傷による低下はほぼ同じ傾向が得られている。ただし 809 と 811 では加振した張間のみの推定結果とし、3 次・4 次は安定した推定結果が得られない場合もあるため図では省いた。

減衰定数はホワイトノイズ加振について 3～5%となり、高次ほど大きい値となっている。損傷に伴う変化は、1 次で大きくなる傾向も見られるが、全体に明確でない。また三の丸波加振ではかなり大きい減衰が推定されているが、条件により安定しない。



(a)固有振動数 (b)減衰定数
 図6 無補強試験体の繰り返し加振に伴う固有振動数と減衰定数の変化

モード形の変化を図7に示す。桁行1次について損傷に伴って低層部で大きくなる傾向、逆に4次では小さくなる傾向が明確であるが、張間は変化が少ない。以上のように、損傷に伴って固有振動数の明確な低下が見られるが、低下幅は最大で約5%である。モード形の変化も含めて、構造物全体の固有振動特性は局所的な構造損傷の影響を表しているが、損傷の程度や位置の評価感度は必ずしも高くないことがわかる。これは19年度実験の分析結果とも整合する。局所的な損傷を評価できる手法との併用が必要と考えられる。

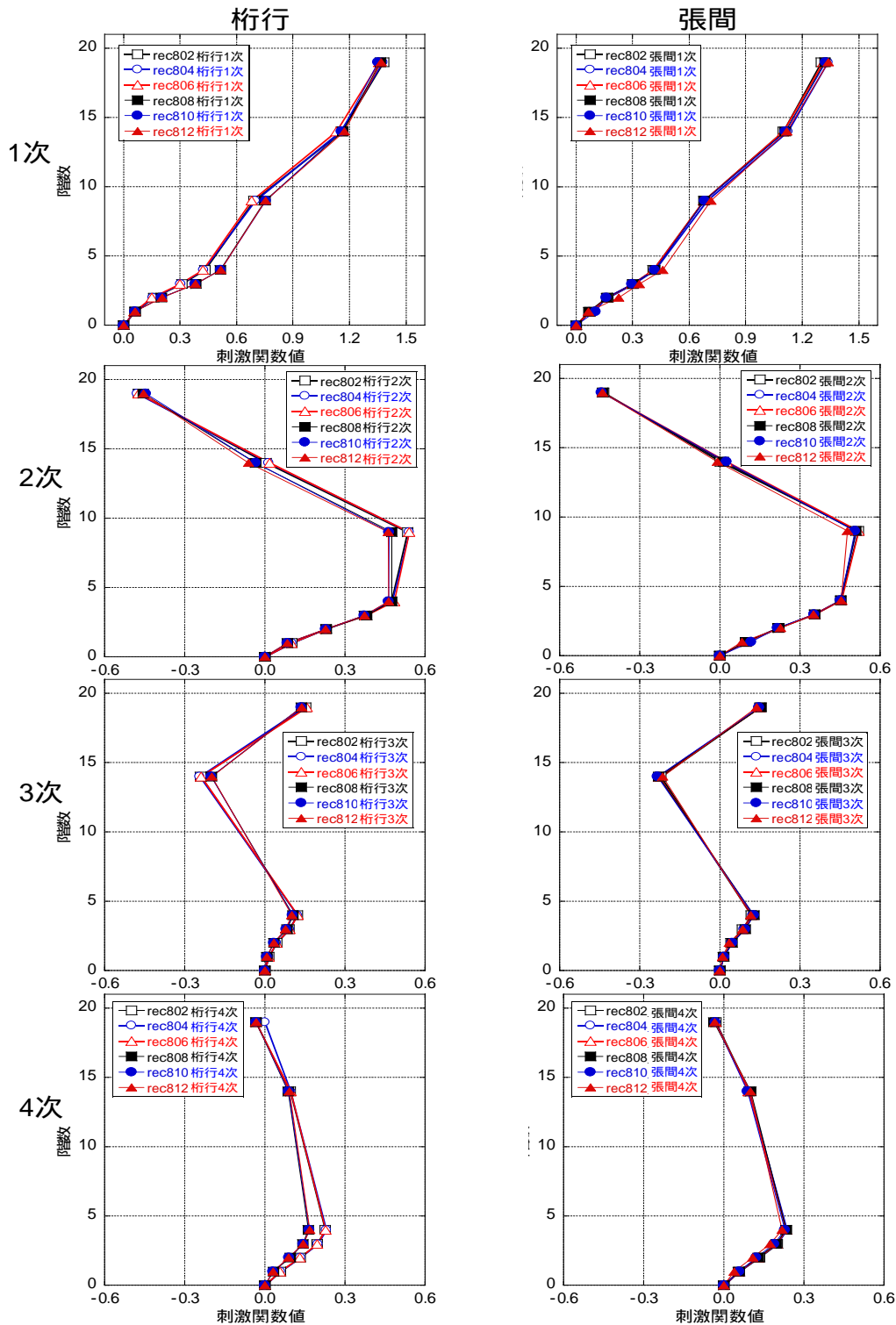


図7 無補強試験体の繰り返し加振に伴うモード形の変化

c) 層の履歴特性による損傷の評価

三の丸波の加振 807 により顕著な損傷を生じた桁行方向について、前後の加振 802～809 の 1～4 層の履歴特性を図 8 に示す。上段が三の丸波加振、下段がホワイトノイズ加振であり、それぞれで縦軸と横軸をそろえ、さらに縦軸と横軸の比率は全てそろえてあるので、ループの形状や傾きを直接比較できる。

これらの結果から、特に加振 807 で大きくループを描いており、加振途中での剛性の変化も確認できる。前後のホワイトノイズ加振 806 と 808 の比較では、ループの傾きの変化から剛性低下の状況が読み取れ、2 層では最大 40% 程度の層剛性の低下になっている。これは固有振動数の 5～6% の低下から推定される値よりかなり大きく、局所的な損傷の影響を明確に捉えていることがわかる。

加振 807 の 2 層について、ループの時間経過を詳細に追った結果を図 9 に示す。全時間のループ（黒線で表示）から前半と後半で異なる傾きになっていることが読み取れるが、さらにある 1 周期のループ（赤で表示）では、その間に傾きが変化していることがわかる。この結果から、明確な構造損傷が生じた場合には、加速度記録から層剛性の変化により検出できる可能性がある。

張間方向に関して各加振・各層の履歴特性を図 10 に示す。損傷が生じた加振 811 で 3～4 層の剛性が低下していることが、損傷後のホワイトノイズ加振 812 も含めて読み取れるが、桁行方向ほど明確ではない。これは固有振動数の変化が張間方向で少ないこととも対応しており、損傷の箇所数の差を表しているものと考えられる。

以上の傾向を定量的に評価するため、半周期ごとに層間変形が最大となった時刻における層剛性（層せん断力／層間変形）の値を求め、時刻歴でプロットした結果を図 11 に示す。図中には層間変形の半周期ごとの極大値の時刻歴も細実線で示した。明確な損傷が生じなかった加振 805 では、加振の最初と最後の層剛性の値に大きな変化はなく、振幅依存によるみかけの剛性低下がわずかに見られる以外はほぼ一定となっている。一方、桁行方向に損傷を生じた加振 807 では、加振途中で明確な層剛性の低下が見られ、桁行方向 2 層で約 35%、1・3 層で 20% 程度の低下となっている。またその際に、桁行方向 2・3 層で 7cm (1/55) 程度の最大層間変形が生じており、加振 805 より大きいこともわかる。

図 12 に、半周期ごとの層剛性の変化を層間変形との関係で示す。これより、剛性低下は最大の層間変形の前後で生じていることや、損傷による剛性低下と振幅依存性のある程度区別できることなどが確認できる。

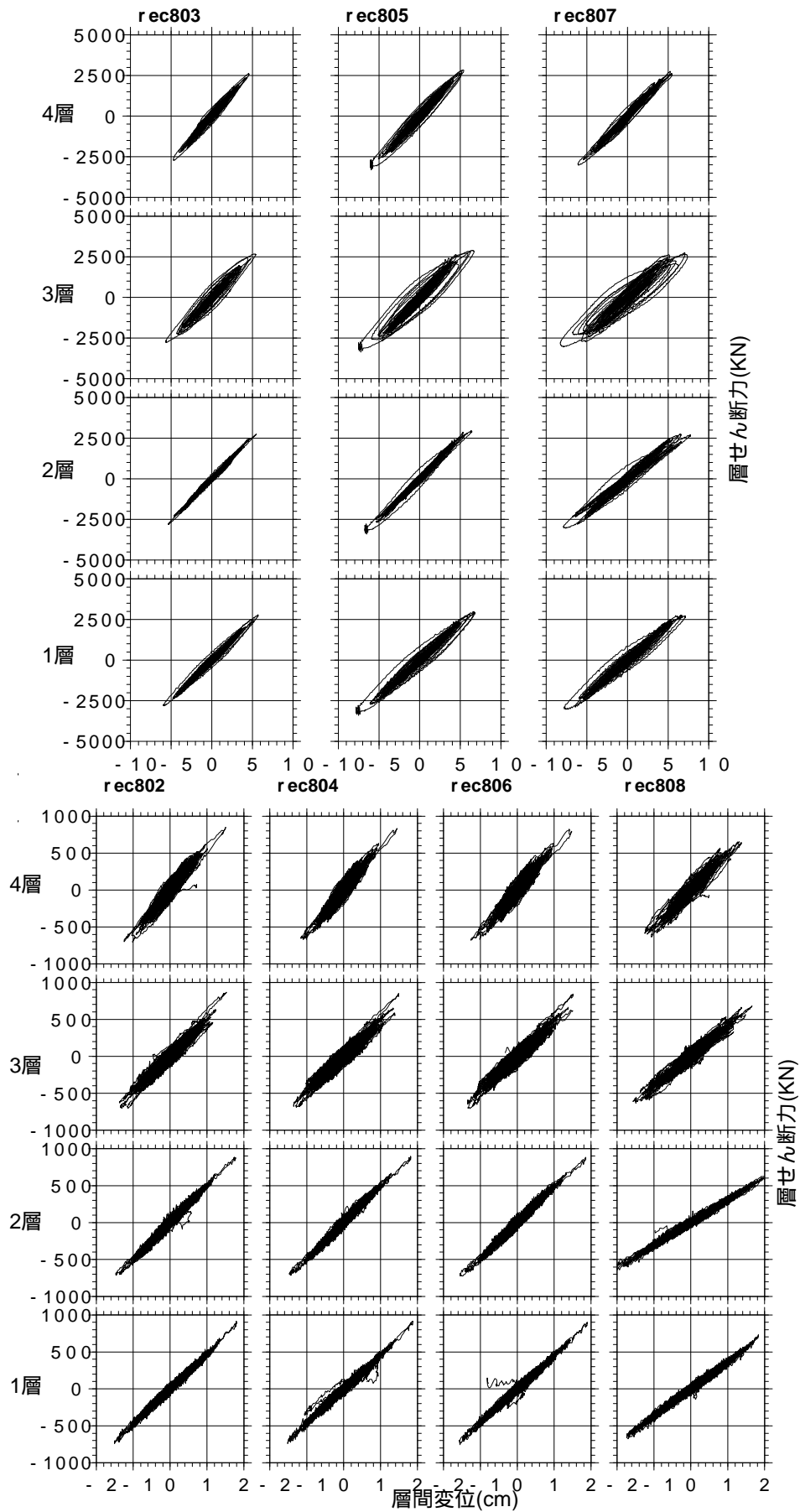
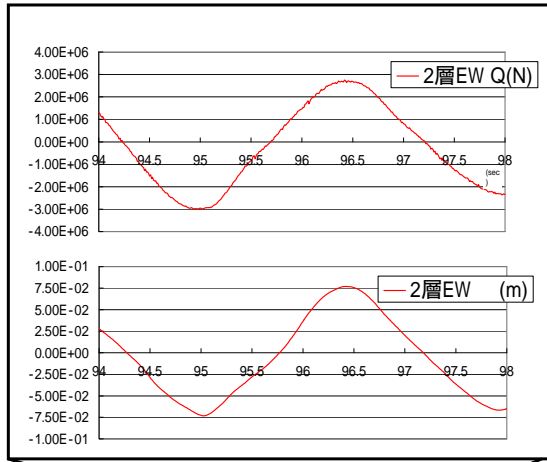
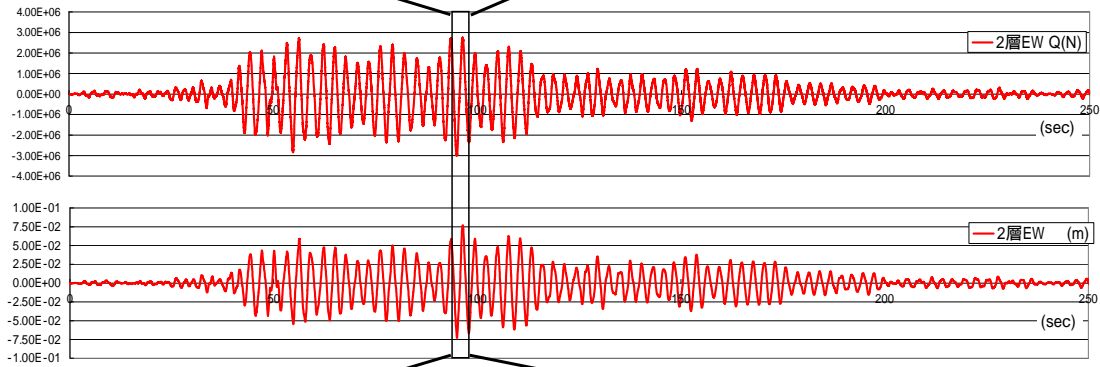


図8 桁行方向の各加振・各層の履歴ループ



94 ~ 98sを取り出す



94 ~ 98sの履歴ループを取り出す

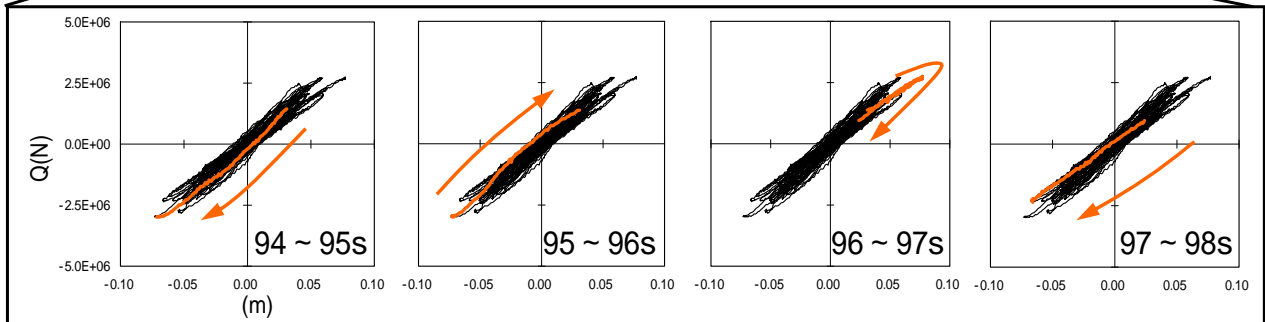


図9 加振中の履歴ループの傾きの変化（加振807、損傷を生じた2層の桁行方向）

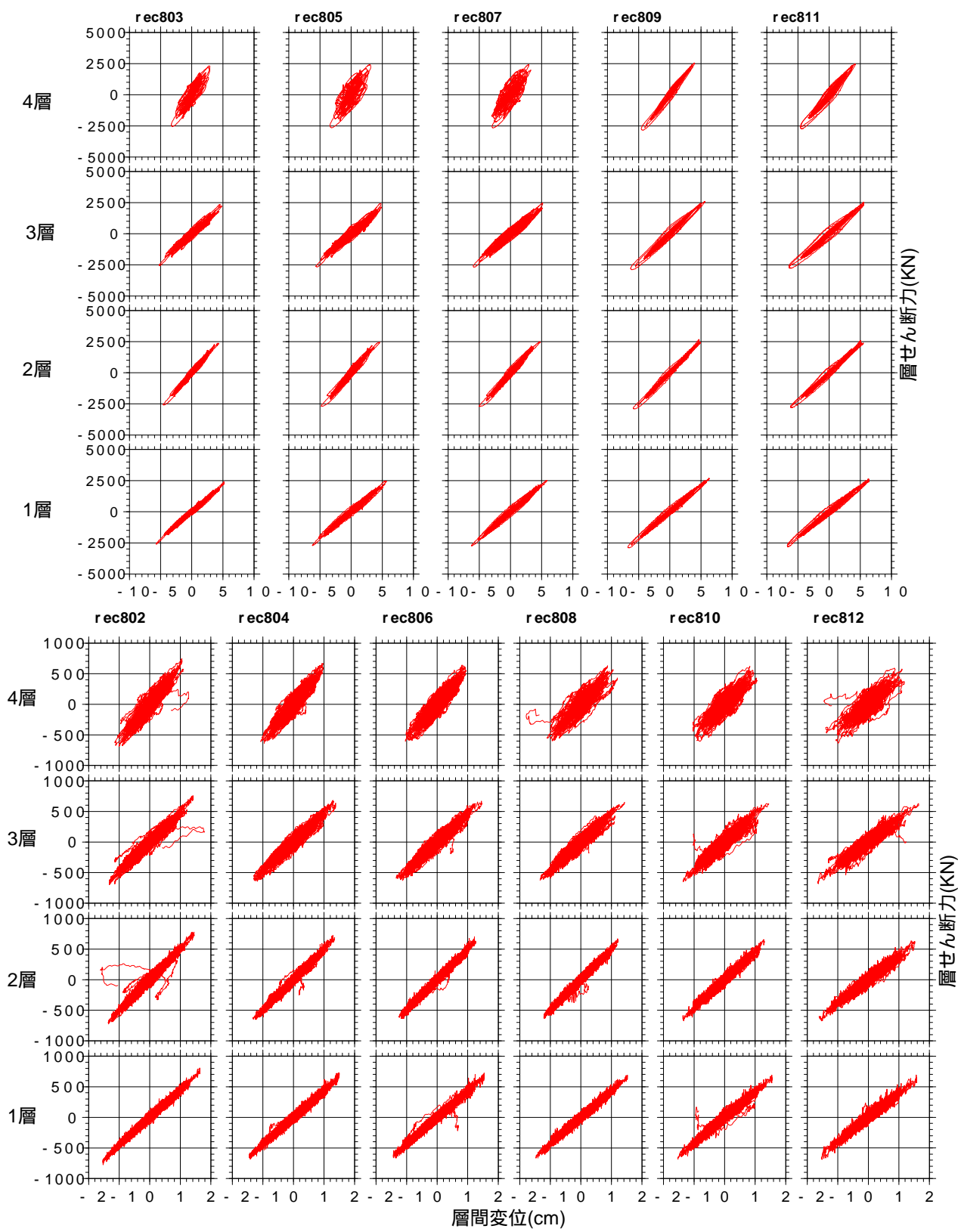
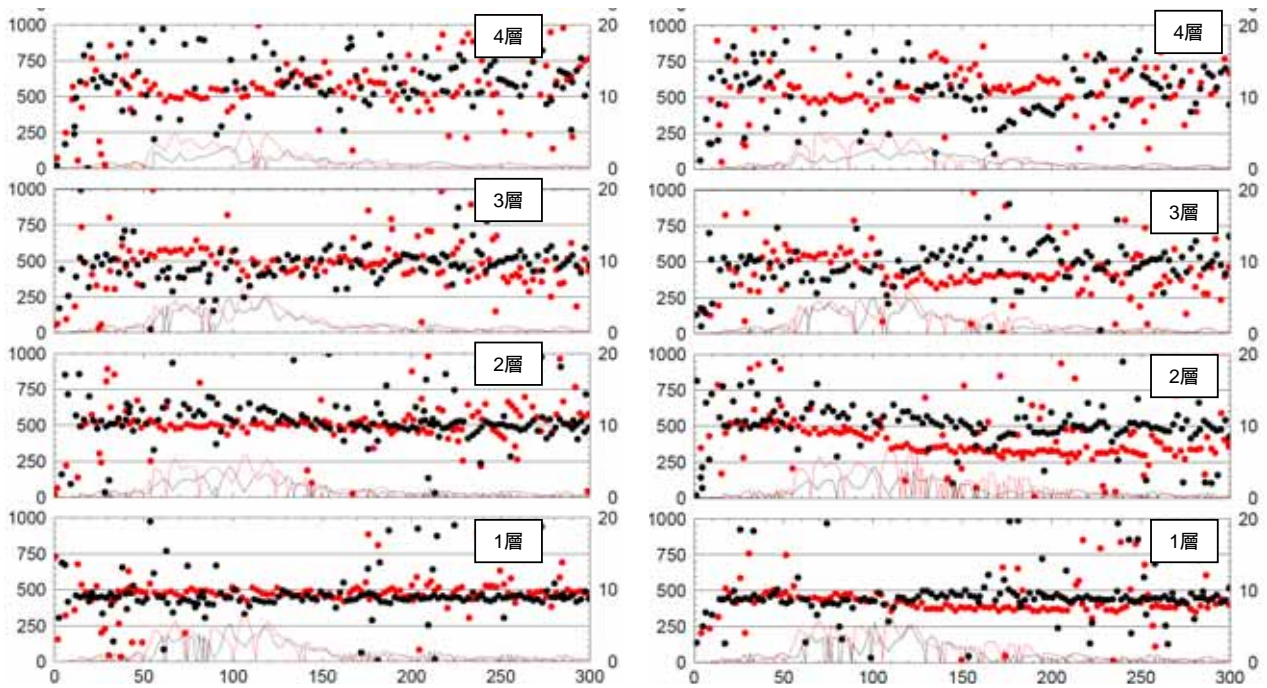


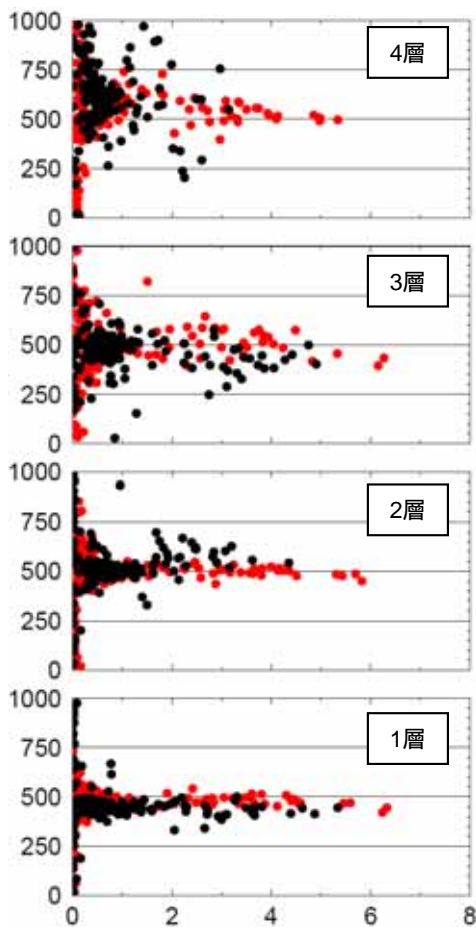
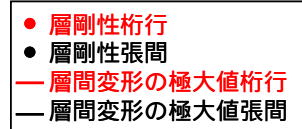
図 10 張間方向の各加振・各層の履歴ループ



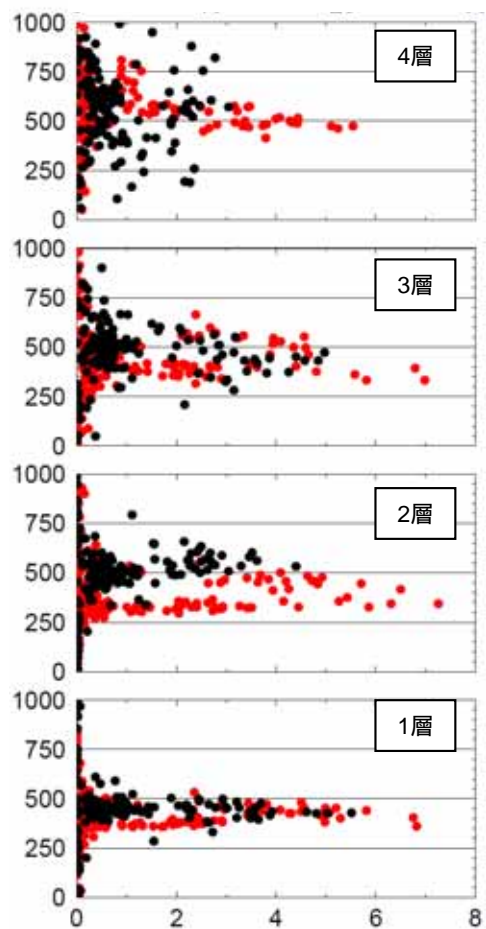
加振 805

加振 807

図 11 応答半周期ごとの等価層剛性の時刻歴



層間変形 (cm)
加振 805



加振 807

図 12 応答半周期ごとの等価層剛性と層間変形の関係

4) 強震計による高層建物の応答・損傷評価の特性

a) 層の履歴特性評価

加速度記録の積分による変位や層の履歴特性の評価においては、強震計の特性の差異が影響を及ぼす可能性がある。図13に強震計①と③による比較を示す。前節までに示した強震計①に比べて、③は0.1Hzより長周期側で感度が異なる傾向がある(前年度報告書図2)。先に述べたように、積分に当たって0.1Hzのローカットフィルタを適用したところ、ほぼ同一の結果が得られたが、最もループが大きくなる3層では形状に差異が見られる。本試験体より大幅に周期の長い超高層建物であれば、固有振動数と強震計特性との関係で影響が大きくなることも予想される。

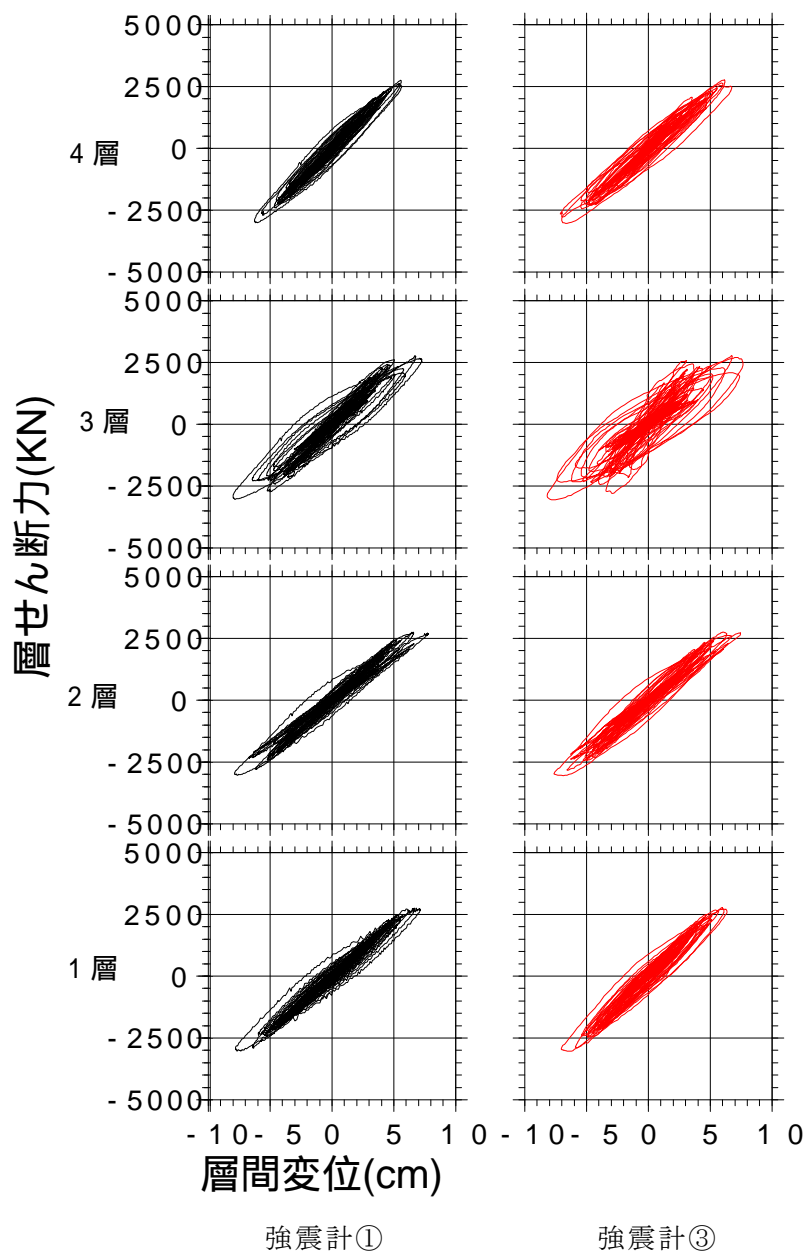


図13 2種の強震計により評価した層の履歴特性の相違(加振807、桁行方向)

b) 強震計による常時微動計測

固有振動数の変化に基づく構造ヘルスマニタリングや損傷評価において、常設の強震計により常時微動特性を評価できればメリットは大きい。本業務では昨年の報告書において、強震計、動コイル型常時微動計および光ファイバセンサなどによる固有振動数の検出特性を比較検討している。

図 14 は、試験体とは別の建物において、強震計による加速度記録の積分を常時微動計と比較した結果である。強震計と常時微動計の位置が若干異なることによりねじれ周期の影響が異なるが、長周期側を含めて十分な精度を持つことがわかる。

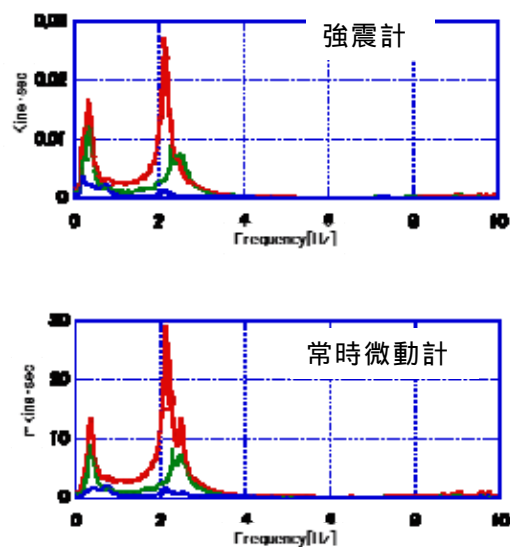


図 14 強震計による常時微動観測の検討

c) ネットワーク接続型強震計によるリアルタイムモニタリングの可能性

今年度の実験においては、ネットワーク接続型の小型センサを多数設置し、リアルタイムモニタリングを試みた。現状では、波形や図 15 のような応答の立体表示ができる。加えて、本報告で述べてきた固有振動特性や層の履歴特性をリアルタイムで算出・表示することも可能であり、損傷のリアルタイム検出に応用できる可能性がある。

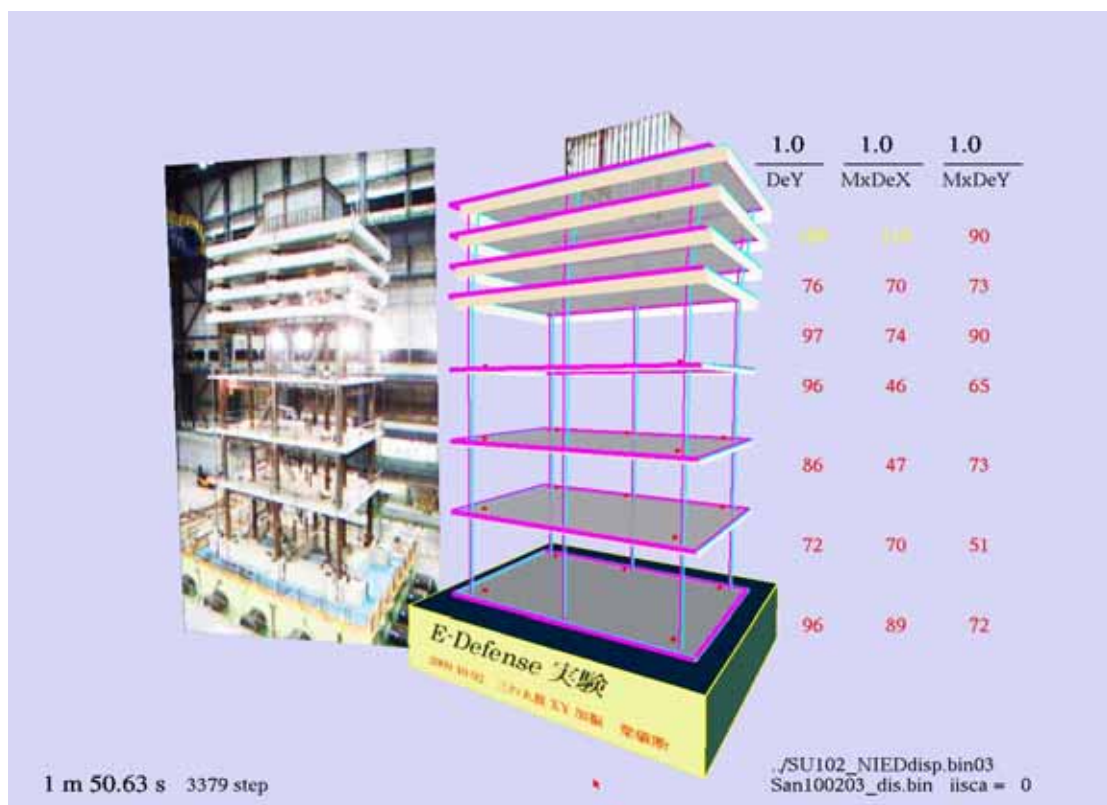


図 15 ネットワーク接続型強震計を用いた多点同時計測による立体振動表示

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度に実施された制震装置を組み込んだ高層建物のEーディフェンス振動実験において、4種類の強震計を計66箇所を設置し、震動実験の全ての加振ケースおよび常時微動時のデータを取得した。また光ファイバセンサや動コイル型常時微動計の記録も収集した。

本年度の主たる技術検討課題として、スタンドアロン型の一般的強震計の加速度記録を用いて、層間変形と層せん断力から層の非線形特性を求める手法の検討を行った。この際に、連動していない強震計による加速度記録の時刻合わせや、積分に伴うフィルタ特性の影響などの検討により、層の履歴特性を適切に評価できることを示した。またこの手法により、異なる制震補強法による構造躯体の非線形応答性状の相違を示し、制震効果や損傷の直接的な評価に有用であることを示した。

繰り返し加振により損傷が進行した一連の加振ケースについて、層の履歴特性を詳細に検討し、固有振動数や減衰定数の同定による構造物の全体的な損傷評価と比較して、局所的な損傷の位置や程度をよりの確に評価できるメリットを示した。また強震計の相違による履歴特性の評価の差を検討し、本計測対象に関しては影響が小さいことを示した。

ネットワーク接続型強震計の性能の検討を行い、基礎的な成果としてリアルタイム応答評価の有用性を確認した。また強震計による常時微動の評価精度の検討も行った。以上の結果から、機材と手法を組み合わせれば、一般的な強震計による高層建物の損傷モニタリングの可能性が開けると考えられる。今後の課題として、機材の性能の影響をより詳細に確認する必要があること、実際の損傷評価システムの構築に向けた技術課題を整理すること、特性の異なる観測機材（ネットワーク接続型強震計など）によるリアルタイム評価の可能性を検討すること、などが挙げられる。

なお、本業務に関連して、データ分析等を中心に名古屋大学環境学研究科大学院生・平田悠貴君の協力を得た。また実験時の計測について、白山工業(株)（ネットワーク接続型強震計）および(株)IHI 検査計測（光ファイバセンサ）の協力を得た。実験全般については名古屋大学・小島宏章助教、平塚義正技術職員、ならびに地震工学・防災研究グループの学生ほかの協力を得た。以上、記して謝意を表す。

(d) 引用文献

- 1) 飛田潤, 福和伸夫, 西澤崇雄: 光ファイバセンサによる鋼構造試験体の静的・動的柱軸変形の計測, 構造工学論文集, Vol.55B, pp.577-582, 2009.3
- 2) Tobita, J.: Evaluation of Nonstationary Damping Characteristics of Structures under Earthquake Excitations, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.59, Nos. 2, 3, pp.283-298, 1996.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・国際の別
強震計と光ファイバセ	平田悠貴、	日本建築学会学術	2009.8	国内

ンサによる鋼構造試験体の地震応答と損傷の評価その1、口頭発表	飛田潤、 福和伸夫、	講演梗概集、 Vol. B2、pp. 543-544		
強震計と光ファイバセンサによる鋼構造試験体の地震応答と損傷の評価その2、口頭発表	飛田潤、 福和伸夫、 平田悠貴、 西澤崇雄	日本建築学会学術講演梗概集、 Vol. B2、pp. 545-546	2009. 8	国内
加速度計の記録に基づく高層建物の層間変形と損傷の評価、口頭発表	平田悠貴、 飛田潤、 福和伸夫、	日本建築学会東海支部研究報告集 第48号、pp. 225-228	2010. 2	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・国際の別
普及型強震計による高層建物の応答特性と損傷のモニタリング	飛田潤、 福和伸夫、 平田悠貴、 長江拓也	構造工学論文集 Vol. 56B pp. 577-582	2010. 3	国内

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 22 年度業務計画案

(a)高層建物の強震観測による損傷評価を視野に入れたモニタリング技術の開発

平成 21 年度の E-ディフェンス震動台実験で得られた観測データの分析を進め、一般的な強震計等の観測機器による高層建物の強震応答と損傷のモニタリングの可能性を検討すると共に、実際のシステムの技術的課題を整理し、課題解決に向けた要素技術の開発を行う。具体的には、以下のような内容を予定している。

- ・ 高層建物の応答と損傷の評価に最低限必要な強震計の機能、性能、数および配置の検討
- ・ 実地的なモニタリングシステムを構築するためのハード・ソフトの技術課題の洗い出し
- ・ モニタリング結果の効果的な表示方法の検討
- ・ 旧式の機材（たとえばリプレースされた震度計）の性能と活用方法の検討
- ・ 新たな機材（たとえばネットワーク接続型強震計や光ファイバセンサなど）の可能性の検討

(b)地震時室内状況・床応答シミュレータの開発

修復性、室内安全性の観点から、実規模実験で明らかにされた大振幅の揺れの中での内装材・家具・什器等の転倒・飛散現象に対する転倒防止、飛散防止、機能回復等への具体的対策案を提示するため、建物床応答や室内被害様相等を再現・体験できる地震時室内状況・床応答シミュレータ構築のための構成要素の検討や基本設計を行う。具体的には以下の内容を予定している。

- ・ シミュレータの構成要素として、体験用の加振システムの必要性能とメカニズムの検討、制御と記録のためのセンシング手法の検討、体感のための映像連動や画像処理手法の検討などを行う。
- ・ シミュレータに要求される性能をまとめ、基本設計を行う。

