

実大振動台実験に基づく高層建物の終局挙動把握と損傷同定への強震計活用に関する研究

名古屋大学大学院環境学研究科 都市環境学専攻
博士課程前期課程 2年 福和研究室 平田 悠貴

1. 序論

長周期地震動による既存高層建物の終局挙動把握と損傷同定は、近い将来の南海トラフ等の大規模地震を考えると極めて重要である。2007年度E-ディフェンス実験¹⁾においても、既存の高層建物を実大で再現した試験体に東海・東南海地震を想定した名古屋の地震動(三の丸波)を入力した際、柱梁接合部の破断を含む致命的な構造損傷が生じることが実証され、長周期地震動による既存高層建物被害の可能性は十分ある。

被災時、既存の高層建物の損傷の箇所・有無を評価するためには簡易かつ客観的なモニタリング手法を確立する必要がある。一方でその問題点として、鋼構造は構造部材が内装材や耐火被覆に覆われ、明確な残留変形がなければ損傷の評価が難しい。また、固有振動数(建物の全体剛性)の変化による損傷の程度や有無の評価が可能であるが、破断等の重大な構造損傷に対しても変化量が小さいこと及び破断層の特定が難しい等の問題が残る²⁾。層の履歴特性が評価できれば損傷や残余耐力の評価に大きなメリットがあるが、変位計には既存建物への設置やコストに難点もある。

そこで本論では、従来の建物全体の振動特性(固有振動数やモード形等)の評価に加えて、E-ディフェンス実験で実際に構造部材の破断等の損傷を生じた高層建物試験体について、ごく一般的なスタンドアロン強震計による加速度記録のみから履歴特性を求めることで、損傷層の特定やその程度、時刻等の同定を試みる。その過程における加速度記録の積分や時刻同期に関する技術も含めて詳細に検討する。また、強震計記録に基づく損傷評価と他の方法の併用による評価精度の向上を目的に、光ファイバセンサによる荷重変化や振動特性の評価を加えて行う。

2. 実験と計測の概要

2.1 試験体の概要

試験体の概要と用いた3種の強震計に共通の設置位置を図1に示す。試験体は1970年代の代表的な高層建物を想定して、鋼構造・地上21階・高さ80m建物を再現している。ただし、実験施設の規模の制約から、第1~4層は実大で再現し、第5層~21層については5層ずつ縮約を行い、質量はコンクリート錘で、層剛性と減衰は積層ゴムとダンパーで模擬している³⁾。

2.2 計測機材と観測体制

本論の目的のために使用した強震計は、①普及型強震計(サーボ加速度計)、②機器更新により廃棄された旧型地震計(サーボ加速度計)、③小型・廉価型強震計(半導体センサ加速度計)で、いずれも単独の筐体にセンサ・収録部・電源などを収めており、連動・時刻同期はしていない。これらは一般的な性能でコスト面に優れ、配線が最

小限のため大規模な高層建物でも建設時・竣工後を問わず設置が容易なメリットがある。本論では主に、①普及型強震計の記録を分析し、一部比較のため③廉価型強震計の記録を用いた。

一方、以上の独自計測とは別に、防災科学技術研究所により変位計・加速度計・歪ゲージ等による高密度観測が行われていた。変位計による層間変形の計測も行われており、本論で扱う加速度記録から求めた層の履歴特性の妥当性の検証に用いた。

2.3 加震・計測スケジュール

実験は2007年度・2009年度の2シリーズで行われた。2007年度(2008/3/17~21)は試験体が無補強の状態、2009年度実験は2009/9/14~10/2の期間で、補強条件を無補強状態を含み4タイプに変化させ、それぞれ2日間計8日間で行われた。補強は鋼製ダンパーまたはオイルダンパーによるものである。加震入力として、東海・東南海地震を想定した名古屋の地震動(三の丸波)、エルセントロ波などが用いられ、これらの加震前後に試験体の基本特性を検討するためのホワイトノイズ加震が行われた。本要旨では、紙面上2009年度実験の顕著に構造損傷を生じたケースを主として取り扱う。対象とする2009年度の無補強時(2009/10/2)の加震・計測スケジュール及び各加振毎の加振記号を表1に示す。

10/2の無補強状態での加震では、試験体に破断が発生するまで三の丸波加震が繰り返し行われている。三の丸波rec807(2方向加震)で桁行方向の第1層柱頭に1箇所、第2層柱頭に6箇所、全て梁フランジ溶接部周辺で破断が生じた。次に三の丸波を張間(張間)方向のみで2度加震した結果、張間方向についても第3・4層の柱頭に各2箇所、梁フランジ溶接部周辺の破断・損傷を生じた。

2.4 試験体の基本的振動特性とその変化

無補強時の試験体に三の丸波rec805を入力した際の1階、5階、8階の加速度波形およびフーリエスペクトルを図2、3に示す。基礎固定のため1階の応答は入力地震動にはほぼ等しく、三の丸波の特性である0.3Hz(3秒)付近の卓越が見られる。

次に、10/2の加震における固有振動数・モード形・減衰定数の変化をそれぞれ図4・図5・図6に示す。推定は線形多自由度フィッティングにより行った²⁾。図4より全体として加震に伴い固有振動数が低下する傾向が読み取れ、顕著な損傷が生じた前後(rec806~rec808)が最も低下幅が大きく約5%である。このように損傷の程度に応じて明確に低下の傾向は異なる。ただし、低下量自体は破断を伴う致命的な構造損傷に対して大きいものではなく、損傷層の特定は難しい。次にモード形の変化に関して考察する。図5のモード形は7層縮約モデルではなく

21層モデルで表現した。3次以降の第6質点の値は推定できない場合があり、除いている。1次モードでは桁行・張間方向共に破断を含む顕著な損傷の前後で2層から4層に変形が集中するようなモード形となっている。一方、3次・4次モードでは、各方向とも顕著な損傷の前後で損傷の生じた階のモード振幅が小さくなる傾向を示している。図6においてホワイトノイズrec802～rec812の減衰定数の変化を比較している。次数が大きくなるにつれて減衰が大きな値をとる傾向が確認できる。ただし、顕著な損傷の前後での明確な変化の傾向は見いだせない。

3. 加速度記録による層の弾塑性履歴ループの評価

3.1 加速度記録による履歴ループの計算法

i階とi+1階の加速度応答 $a_i(t)$ 、 $a_{i+1}(t)$ を用い、下式からi層の層間変形 $x_i(t)$ を求める。

$$x_i(t) = \iint \{a_{i+1}(t) - a_i(t)\} dt dt \quad (1)$$

さらに、各階の質量 m_i を用いてi層の層せん断力をi+1階より上の慣性力の和として下式のように求める。

$$f_i(t) = \sum_{k=i+1}^n m_k a_k(t) \quad (2)$$

3.2 時刻同期の手順

本論の計測では地震計間の時刻同期は行っていないため、記録の相互の時刻ずれを補正する必要がある。その手順は以下の通りである。①各地点の上下方向の加速度記録について、試験体の上下方向の1次固有振動数より低振動数の帯域かつ地震計間で振幅差の大きい0.2Hz以下を除きバンドパスフィルタにより抽出する。②基準点(1階)の記録との相互相関関数から各地点の記録の時間ずれを求めて時刻ずれの補正を行う。③補正した記録で基準点からの伝達関数を求め、特に位相差に着目して、試験体の固有振動数付近以外の帯域で傾いていないか(直線位相による時刻ずれが残っていないか)を確認する。もしまだ時刻ずれがあれば補正を加える。

①で抽出した振動数帯域の加速度記録相互で時刻ずれが補正し切れないケースがあり、③の補正を目視で行う必要があった。

3.3 加速度記録に基づく層間変形の精度検討

加速度記録から求めた層間変形の精度を検討するため、変位計により計測された層間変形との比較結果を図8に示す。三の丸波rec807入力時の2層で、最大振幅で30%程度の差が見られるが、ホワイトノイズ加震時および三の丸波加震時ともに波形の形状は概ね一致している。

この際に加速度記録の積分を行う際のローカットフィルタの影響も検討した(図は省略している)。図2のスペクトル特性も参考に、カットする振動数を0.05Hz、0.1Hz、0.2Hz、0.3Hzと変えて比較したところ、0.05Hzでは長周期ノイズが大きく現れたが、0.1Hz以上では波形や振幅の差は小さい結果となった。ここでは、三の丸波の卓越周期や試験体の固有振動数も考慮して0.1Hzとした。

次に加速度記録及び変位計を用いた履歴ループの比較を図7に示す。比較のため、縦軸の層せん断力は加速度計から推定した同じ値を用いている。図8で示したよ

うに層間変形の振幅が異なることにより、剛性(ループの傾き)の差が一部みられるが、損傷に伴う変化を検出する目的のためには、強震計による加速度記録でも十分な精度を有していると考えられる。

4. 層の弾塑性履歴ループの変化による構造損傷の評価

4.1 層の損傷同定

三の丸波2方向加震rec807により桁行方向に顕著な損傷を受けた第2層について、その前後の加震(rec802～rec808)の履歴ループを図9に示す。損傷したrec807では応答の途中で剛性の変化が確認され、その前後のホワイトノイズ加震では約35%の剛性低下が確認できる。この際の固有振動数の低下が約5%であるのに対して、履歴ループを用いることで明確に損傷した層とその程度を評価できることが分かる。次に、三の丸波両方向加震であるrec805とrec807でループ面積を比べる。剛性低下によりrec807では層間変形角が増大しループ面積が増大している傾向が見られる。またrec807の履歴ループの一部を1秒毎に描いたものを図10に示す。図10より、層の損傷により層剛性に明確な変化が生じた時刻まで十分特定できることが分かる。

4.2 廉価型強震計による損傷同定

廉価型強震計による損傷評価精度についても検討する。図11に普及型強震計及び廉価型強震計に基づく履歴ループを示す。廉価型強震計によるループにおいても損傷による剛性の変化は十分に確認することができる。ただし、普及型強震計のループに対し、乱れが生じ最大層間変形が10%程度異なる。

4.3 半ループ毎の層剛性の変化

各層の履歴ループにおける半ループ毎の等価剛性変化について論じる。等価剛性は、半ループ毎に層間変形が極大値または極小値をとる際の層せん断力を層間変形により除した値を用いている。図12に三の丸波rec805・807加震時の時刻歴での半ループ毎の等価剛性を示す。図11では等価剛性と共に層間変形の極大・極小値の絶対値を時刻歴で表示しており、剛性と層間変形振幅の対応を見ることができる。図12より、破断を伴う損傷を生じていないrec805の層剛性は、全時間帯で損傷に伴う明確な低下は確認できず、振幅依存性(主として塑性化に伴う)による剛性の変化も小さく、ほぼ一定の値をとっている。一方rec807では、110sec付近において2層で35%程度、1・3層で20%程度の剛性の低下が確認できる。次に図13において三の丸波rec805・807加震時の層剛性と層間変形の関係を見る。1～4層に共通して振幅依存性による層剛性の変化は小さい。1～3層ではrec807において、損傷により層剛性が一部低い値を取っているのが確認できる。

5. 結論

本論では、比較的簡易な計測体制による既存の高層建物の構造被害の評価を目的とした。ごく一般的な強震計の加速度記録から基本的振動特性(固有振動数・モード形等)及び層の弾塑性履歴特性を求める手法を検討し、高層

試験体の損傷同定を試みた。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 固有振動数の低下傾向により損傷の程度を十分判断でき、かつ非常に簡易である。ただし、その変化の程度は小さく、損傷箇所の特定には至らない。
- (2) 一般的な強震計による加速度記録のみに基づく履歴ループの評価により、被害の程度に応じて層剛性や履歴特性の変化、損傷発生時刻までを十分検出できることが示された。固有周期やモード形の変化と比して損傷に対する変化の程度は大きく感度は高い。
- (3) 以上の結果から、普及型強震計による限定された計測体制でも、基本振動特性による構造全体の特性変化と特定層の弾塑性挙動の評価を併用することで、鋼構造高層建物の強震応答と構造損傷のモニタリングを有効に行うことを示した。

本稿では紙面の都合上扱わなかったが、光ファイバセンサによる静的計測により荷重変動を、動的な柱軸変形の計測により躯体損傷に伴う構造体の応力状態の変化を十分捉え得る可能性も示されている。基本的振動特性の変化に加えて、このような計測を併用することで、さらなる損傷評価精度の向上が望める。

また、強震計による時刻同期プロセス、損傷による層剛性変化の検出等は全て自動化できると考えられ、被災時の迅速な構造損傷評価システムの構築に繋げたい。

参考文献

- 1) 井上貴仁、長江拓也ら：高層建物の耐震性評価に関するE-ディフェンス実験、その1~6、建築学会大会、C-1、823-832、873-874、2008.8
- 2) 平田悠貴、飛田潤、福和伸夫：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1 限定された機材・観測体制での強震観測記録の利用、日本建築学会大会、pp.543-544、2009.8
- 3) 長江拓也ほか：高層建物の耐震性能を検証する大規模実験システムの構築—E-ディフェンス震動台実験—、日本建築学会構造系論文集、No.640、pp.1163-1171、2009.6

表1 加振・計測スケジュール

2009.10.2 補強・無し	
加振地震波	記号
ホワイトノイズ	rec802
三の丸波80%	rec803
ホワイトノイズ	rec804
三の丸波100%	rec805
ホワイトノイズ	rec806
三の丸波100%	rec807
ホワイトノイズ	rec808
三の丸波100%(NSのみ)	rec809
ホワイトノイズ	rec810
三の丸波100%(NSのみ)	rec811
ホワイトノイズ	rec812

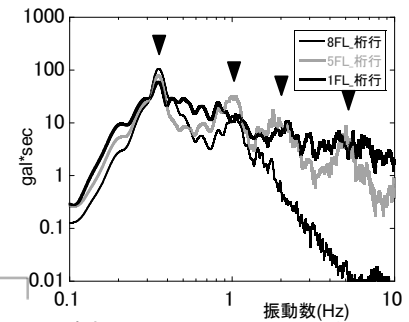
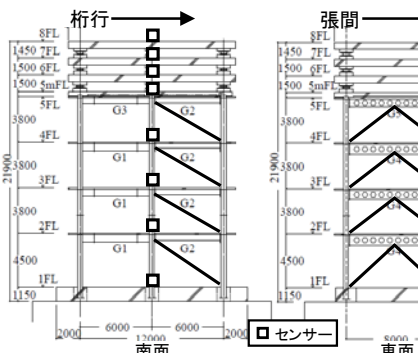


図1 試験体概要及びセンサー設置図

図2 加速度フーリエスペクトル(三の丸波rec805)

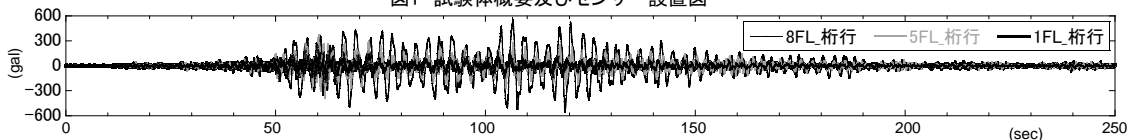


図3 加速度波形(三の丸波rec805)

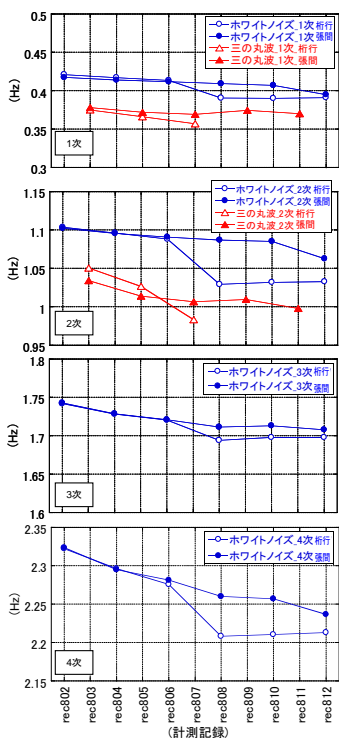


図4 固有振動数の変化 (ホワイトノイズrec802~rec812)

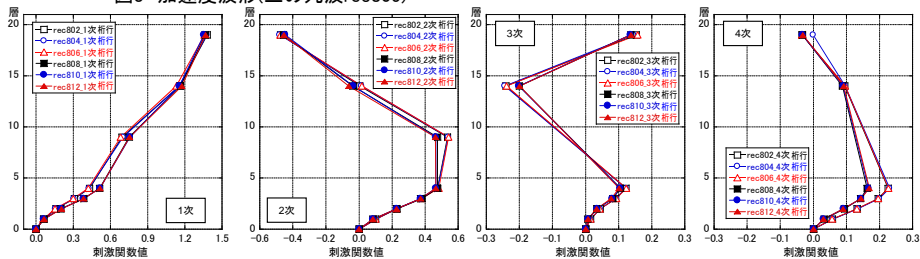


図5 モード形の変化(ホワイトノイズrec802~rec812)

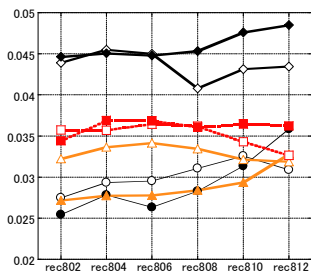


図6 減衰定数の変化 (ホワイトノイズrec802~rec812)

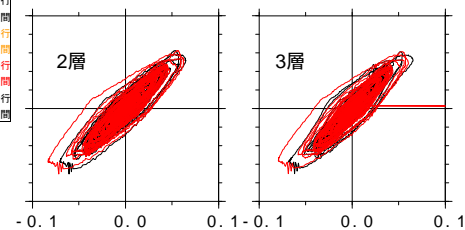


図7 加速度計及び変位計による層間変形を用いた履歴ループの比較(三の丸波rec805、桁行)

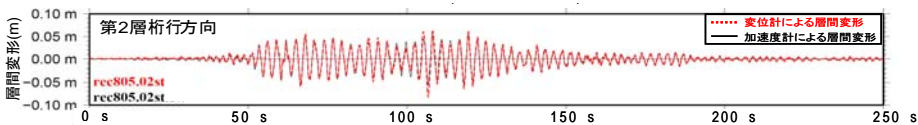


図8 加速度計及び変位計による層間変形の比較(三の丸波rec805、桁行)

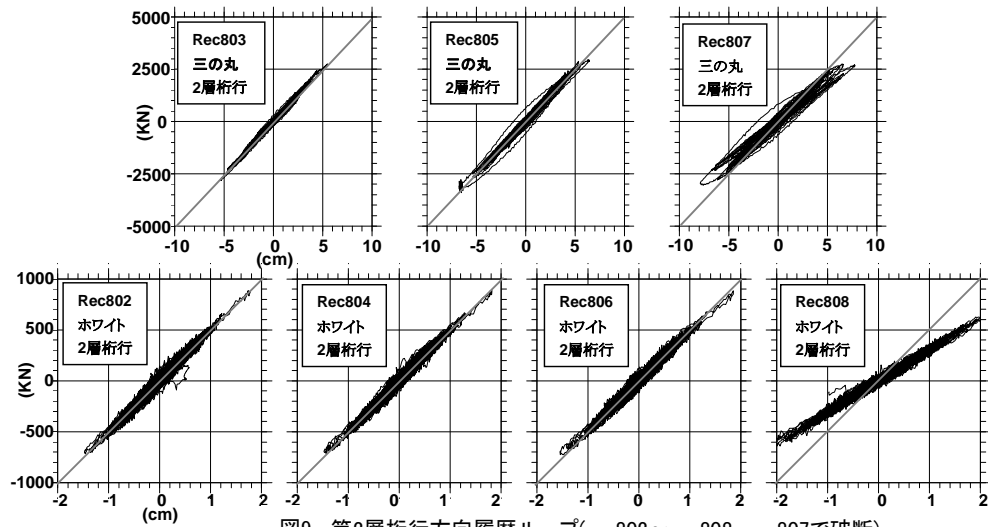


図9 第2層桁行方向履歴ループ(rec802~rec808、rec807で破断)

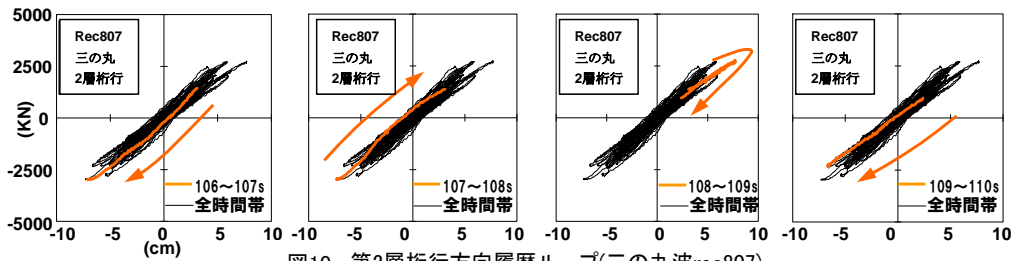


図10 第2層桁行方向履歴ループ(三の丸波rec807)

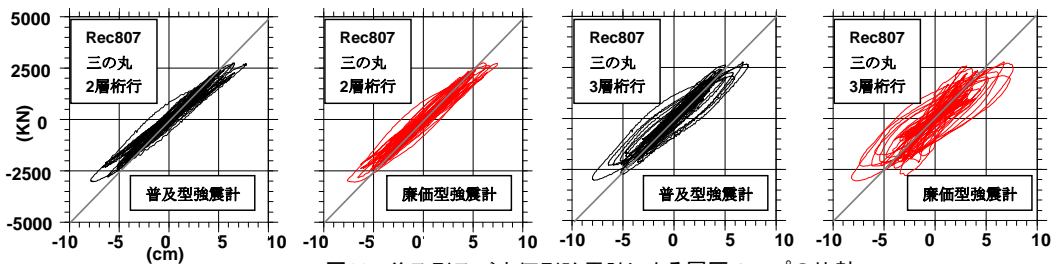


図11 普及型及び廉価型強震計による履歴ループの比較

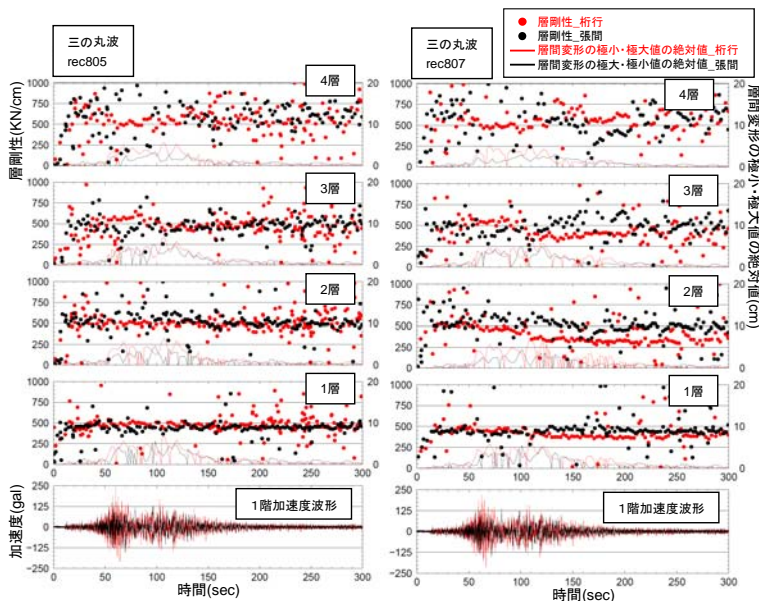


図12 層剛性の変化(三の丸rec805・807)

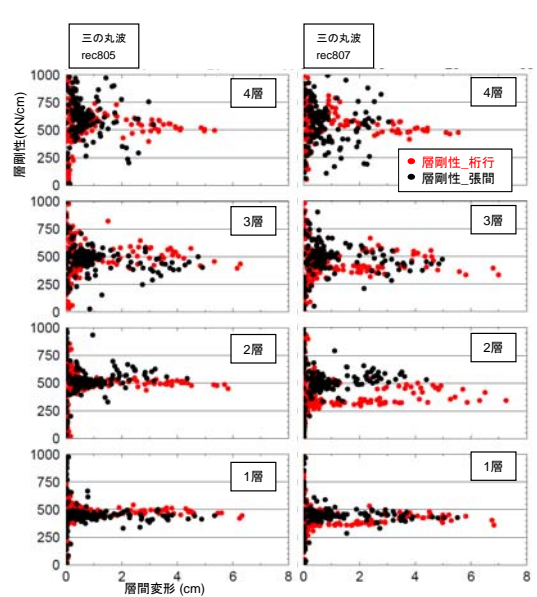


図13 層剛性と層間変形の関係(三の丸波rec805・807)