

一般的な強震計を用いた高層建物試験体の層の履歴特性の推定と損傷評価

強震計	損傷評価	履歴特性
鋼構造	高層建物	実大振動台実験

1. 序論

南海トラフ等の大規模地震では、長周期地震動により多数の高層建物が被害を受ける可能性がある。地震後には、地震による応答や損傷を速やかに把握し、再使用の可否や補修の判断を行う必要がある。しかし、その判断ができるのは専門技術者に限られ、特に鋼構造では構造部材が内装材や耐火被覆に覆われているため、明確な残留変形がなければ損傷の評価が難しい。固有振動数(建物の全体剛性)の変化に基づく損傷の程度や有無の評価も可能であるが、破断等の重大な構造損傷に対してもその変化量が小さいことや損傷層の特定が難しいこと等¹⁾の問題もある。

そこで本論では、従来の建物全体の振動特性(固有振動数等)の評価に加えて、E-ディフェンス実験^{2),3)}で実際に構造部材の破断等の損傷を生じた鋼構造の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ることで、損傷層の特定やその程度、時刻等の同定を試みた。

2. 実験と計測の概要

2.1 試験体の概要

試験体の概要及び使用した3種の強震計の設置位置を図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建物が再現された。ただし、第5層～21層は5層ずつ縮約が行われた²⁾。無損傷時の試験体のホワイトノイズ加震時の振動特性は、1次固有振動数0.42Hz、減衰定数2.5%である。

2.2 計測機材と観測体制

本論の計測で使用した強震計は、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、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。

2.3 加震・計測スケジュール

加震実験は2009/9/14～10/2の間、計8日間行われた。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。本論では、顕著な構造損傷を生じた10/2の加震ケースを主として取り扱う。表1に加震・計測スケジュール及び各加振の加振記号を示す。表1の10/2の加震では、試験体に破断が

正会員 ○平田 悠貴*1 同 飛田 潤*2
同 福和 伸夫*3 同 長江 拓也*4

発生するまで三の丸波加震が繰り返し行われた。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。

3. 加速度記録による層の弾塑性履歴ループの評価

3.1 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おらず、記録の相互の時刻ずれを補正した。手順は以下のとおりである。
①各強震計の上下動成分に対して、試験体の水平方向1次・2次固有振動数を避け、かつ基準点(1階)と各点との伝達関数の位相に乱れが少なく、同振幅も1付近で安定した周波数帯域でバンドパスフィルタを掛けた。
②基準点の記録との相互相関関数から各地点の時間ずれを求めて補正した。
③補正後の記録で基準点との伝達関数を求め、固有振動数以外の周波数帯域で位相の傾き(直線位相)がある場合は補正を加えた。

3.2 加速度記録による履歴ループの計算法

上記の方法で時刻同期を行った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 $x_i(t)$ を求めた。積分はFFTにより行い、0.1Hz以下の成分はカットした。

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

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た。

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

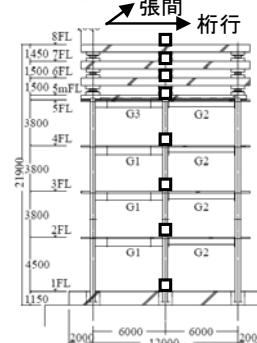


表1 加振・計測スケジュール

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

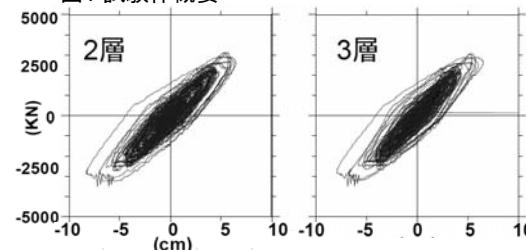


図2 強震計及び変位計による層間変形を用いた履歴ループの比較(三の丸波rec805、桁行)

3.3 加速度記録に基づく層間変形の精度検討

強震計記録及び変位計記録から求めた層間変形角を用いた、層の弾塑性履歴ループの比較を図2に示す。比較のため、縦軸の層せん断力は加速度記録から推定した同じ値を用いた。図2より、層間変形の値に多少の差があるが、層の復元力特性を十分に表現できており、損傷による層剛性の変化も定量的に評価可能であると考えられる。この際、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)。長周期ノイズ、三の丸波の卓越周期及び試験体の固有振動数も考慮して0.1Hzとした。

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、その前後のホワイトノイズ加震を含めたrec806～rec808の履歴ループを図3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。固有振動数の低下が約5%であった¹⁾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。また、rec807の履歴ループの一部を2秒毎に描いたものを図4に示す。図4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。

次に、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5に普及型強震計及び廉価型強震計に基づく履歴ル

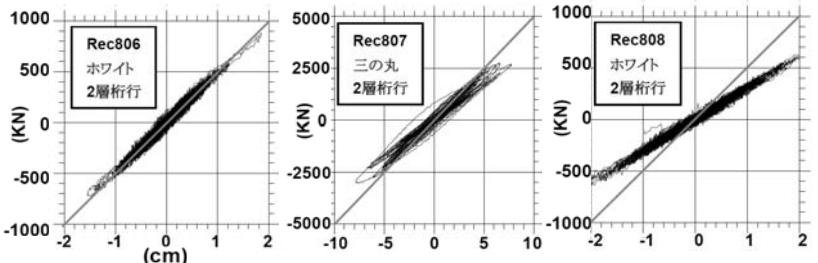


図3 履歴ループの比較(rec806～rec808、rec807で破断、第2層桁行)

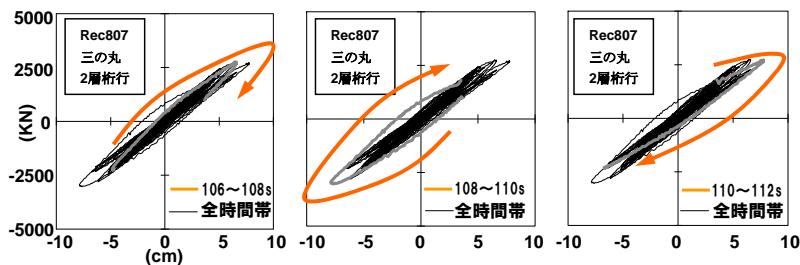


図4 2秒毎の履歴ループ(三の丸波rec807、第2層桁行)

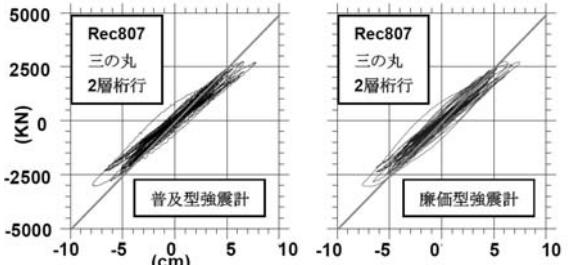


図5 普及型及び廉価型強震計による履歴ループの比較
(三の丸波rec807、第2層桁行)

*1 新日本製鐵(株)・修士(工学)・(元名古屋大学大学院生)

*2 名古屋大学大学院環境学研究科・准教授・工博

*3 名古屋大学大学院環境学研究科・教授・工博

*4 (独)防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 主任研究員・博士(工学) *4 Senior Researcher, Hyogo EERC, NIED, Dr. Eng.

の比較を示す。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比べ、乱れが生じており最大層間変形が10%程度異なる。

4.2 半ループ毎の層剛性の変化

損傷による層剛性の低下を詳細に検討するため、半ループ毎に層間変形の極大・極小値を求め、その時刻の層せん断力との比で等価剛性を求めた。図6に三の丸波rec807加震時の半ループ毎の等価剛性の時刻歴を示す。図6より、損傷のあつた1～3層において、110sec付近で顕著な剛性低下が見られ、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。

5. 結論

本論では、ごく一般的な強震計の加速度記録から層の弾塑性履歴特性を求め、被害の程度に応じた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を示した。固有周期やモード形等の建物全体の振動特性変化に比べ、損傷階の検出が容易となる。本論では全層で計測を行ったが、実際的には、損傷の可能性が高い層を中心に集中的に計測し、固有振動数等のモニタリング体制と組み合わせることで、より効果的な損傷評価が可能となると考えられる。

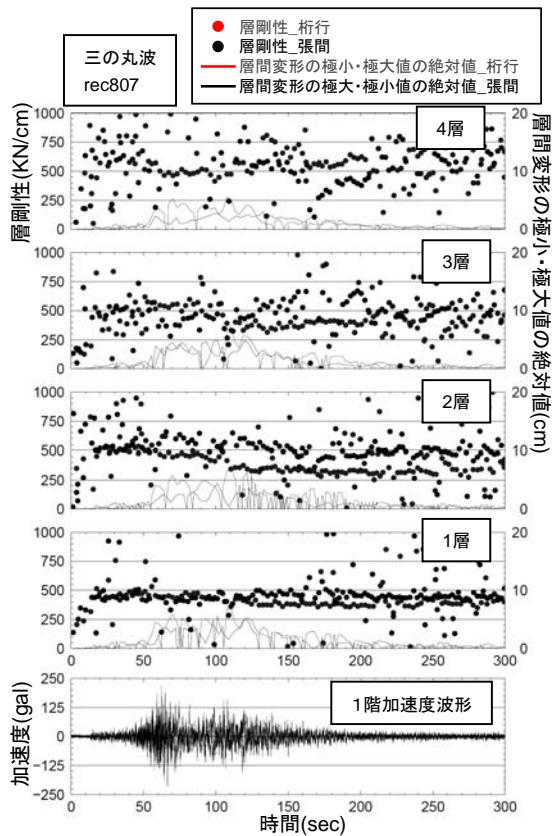


図6 層剛性の変化(三の丸波rec807)

参考文献

- 平田悠貴ら: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
- 井上貴仁ら:高層建物の耐震性能評価に関する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
- 長江拓也ら: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

*1 Nippon Steel Corp., M. Eng

*2 Assoc. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*3 Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*4 Senior Researcher, Hyogo EERC, NIED, Dr. Eng.