

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

Estimation of Interstory Lateral Displacement and Structural Damage of High-rise Buildings Based on Acceleration Records

2.構造-2.振動

鋼構造

高層建物

層間変形

履歴ループ

損傷

Eディフェンス

正会員

○平田 悠貴*

HIRATA Yuki

正会員

飛田 潤**

TOBITA Jun

正会員

福和 伸夫***

FUKUWA Nobuo

1. はじめに

長周期地震動による既存高層建物の応答や構造被害の予測や評価は、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。大地震時に多数の建物の健全性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。一方で鋼構造建物は、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。また構造の一部に重大な損傷が生じても固有振動数（建物の全体剛性）の変化は小さく、損傷評価は容易ではないことが示されている¹⁾。

本論では、ごく一般的なスタンドアロン強震計の利用を前提として、従来の建物全体の振動特性（固有振動数やモード形等）に加えて、各層の弾塑性履歴特性の評価とそれによる損傷同定の可能性を検討する。層の履歴特性が評価できれば鋼構造の損傷や残余耐力の評価に大きなメリットがあるが、層間変形の計測にあたって変位計の設置やコストに難点がある。ここでは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、層の上下に設置した加速度計の差の積分による層間変形と、加速度応答による慣性力から求めた層せん断力を用いることとし、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。

2. 実験と計測の概要

2.1 試験体の概要

試験体の概要と加速度計設置位置を図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建物を想定する。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²⁾。

2.2 計測機材と観測体制

本論文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する。

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る。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を検証することが出来る。

2.3 加振・計測スケジュール

実験は2009/9/14～10/2の期間で、試験体の補強条件を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。加振入力として、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、これらの加振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振が行われている。

本論では、最後に実施された無補強の状態、三の丸波加振により顕著に構造損傷を生じたケースを中心に考察する。関連する加振・計測スケジュールを表1に示す。

10/2の無補強状態での加振では、試験体に破断が発生するまで三の丸波加振が繰り返し行われている。三の丸波rec807（2方向加振）でEW（桁行）方向の第1層に1箇所、第2層6箇所で梁フランジ溶接部周辺の破断が生じた。次に三の丸波をNS（張間）方向のみで2度加振した結果、張間方向についても第3・4層に各2箇所、梁フランジ溶接部周辺の破断・損傷を生じた。また、9/25の加振（オイルダンパーによる補強状態）で、三の丸波2方向加振により、第6層で、5層分の剛性・減衰性能を縮約した積層ゴム一体型U型鋼材ダンパーが接合部で損傷した。これは実験としては想定外であるが、結果として層の復元力特性の変化がきわめて顕著なため、本論文の手法の検証として用いるものとする。

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

* 名古屋大学環境学研究科 大学院生

** 名古屋大学環境学研究科 准教授・工博

*** 名古屋大学環境学研究科 教授・工博

* Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

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

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

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。積分を行う際に問題となる長周期側の特性は、概ね0.1～0.2Hz以下で振幅差が大きく、何らかの対応が必要なことがわかる。

次に、10/2の無補強状態での加振における固有振動数の変化を図4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¹⁾。全体として加振に伴い低下する傾向が読み取れ、顕著な損傷が生じた前後(rec806～rec808)が最も低下が大きい、5%程度の低下に留まっている。

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各地点の加速度記録について、試験体の1次固有振動数より低振動数の帯域を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。

③の手順は、①で抽出した長周期帯域の記録の精度が十分であれば不要になるはずであるが、本論で扱うような長周期建物では、固有周期より長い周期帯域の加速度記録は十分な精度がない場合もあり、実際にはいくつかのケースで③の補正を目視で行う必要があった。この手順も含めた時刻ずれの補正の自動処理は十分可能と考えられ、今後の課題としたい。

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比較した結果を図5に示す。三の丸波 rec805 入力時の2層で、最大振幅で3割強の差が見られるが、ホワイトノイズ加振時および三の丸波加振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。

次に層の弾塑性履歴ループを、加速度記録から求めた結果と変位計との差を図6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5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加速度計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 縮約層の損傷同定

三の丸波 rec603 加振で破断が生じた第6層の履歴ループを図7に示す。この図では、全加振時間での履歴ループを黒線で各図に共通に示しており、傾きが明確に異なる履歴ループが重なっていることが見て取れる。そこで、さらに時間区間ごとに履歴ループの変化を詳細に観察し、特性が変化した時点の前後4秒間の1秒毎の履歴を太線で図7の各図に描いた。これにより、層の損傷により層の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わかる。ただし、ここで検出できた層の剛性の変化は、縮約層の主要な復元力を担う装置が想定外に損傷した結果であるため、手法の検証の意味合いが強い。

4.2 一般層の損傷同定

10/2の三の丸波2方向加振 rec807 により EW（桁行）方向に顕著な損傷を受けた第2層について、その前後の加振（rec802～rec808）の履歴ループを図8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振では40%弱の剛性低下が確認できる。この際の固有振動数の低下が5%程度であるのに対して、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ている。

次に三の丸波100%両方向加振である rec805 と rec807 を比べると、損傷のあった rec807 の方がループ面積が小さくなっている。また rec807 の履歴ループの一部を1秒毎に描いたものを図9に示す。これより傾きが変化した時刻（損傷発生時刻）を明確に特定できることがわかる。

一方、三の丸波 NS 方向加振 rec811 により損傷した第2層 NS（張間）方向について、その前後を含めた rec806～rec812 の履歴ループを図10に示す。三の丸波 rec811 ではループ面積が大きく、加振中の剛性変化は EW 方向ほど明確には確認できない。前後のホワイトノイズ加振

では剛性変化が見られるがEW方向の第2層に比べかなり小さい。これは破断箇所数など2方向の損傷程度の差が現れていると考えられる。

5. 結論

本論では既存の高層建物の構造被害を想定して、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る手法を検討し、高層試験体の損傷同定を試みた。結果として、被害の程度に応じて特定層の剛性や履歴特性の変化、あるいは損傷発生時刻までを十分検出できることが示された。この結果は、建物全体の固有周期やモード形の変化に加えて、構造物の損傷評価のために有効に用いられると考えられる。

今後、他の種類の強震計との比較を行うとともに、履歴特性の定量評価や累積塑性変形などの検討を加え、より安価で実証的な構造被害評価手法の構築を試みる。

謝辞

本研究は文部科学省「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の一部として実施したものである。防災科学

技術研究所・長江拓也主任研究員をはじめとする本プロジェクトの関係各位に深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 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、日本建築学会学術講演梗概集、pp.543-544、2009.8
- 2) 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

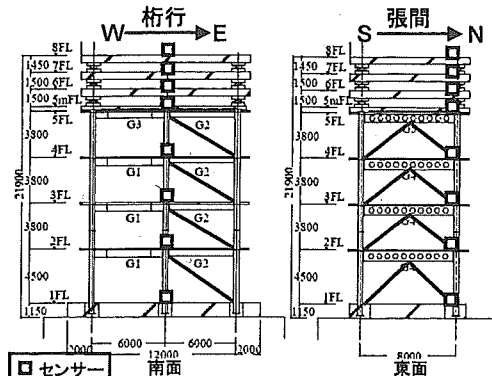


図1 試験体概要および加速度計設置点

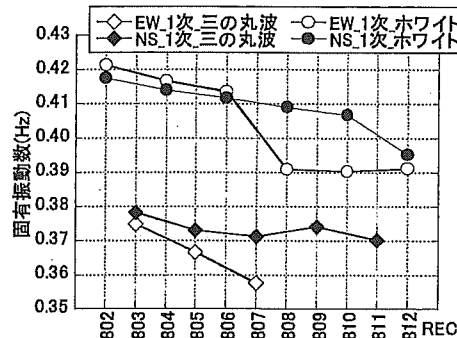


図4 固有振動数の変化(rec802~812)

表1 加振・計測スケジュール

2009.9.25	
補強:オイルダンパー1~4層	記号
加振地震波	rec802
ホワイトノイズ	rec803
三の丸波100%	rec804
ホワイトノイズ	rec805
2009.10.2	
補強:無し	記号
加振地震波	rec806
ホワイトノイズ	rec807
三の丸波80%	rec808
ホワイトノイズ	rec809
三の丸波100%	rec810
ホワイトノイズ	rec811
三の丸波100%(NSのみ)	rec812
ホワイトノイズ	rec813

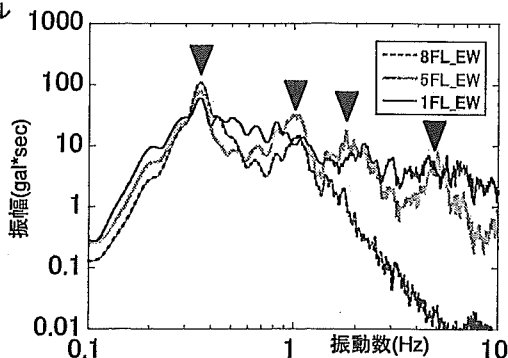


図2 加速度フーリエスペクトル(三の丸波rec805)

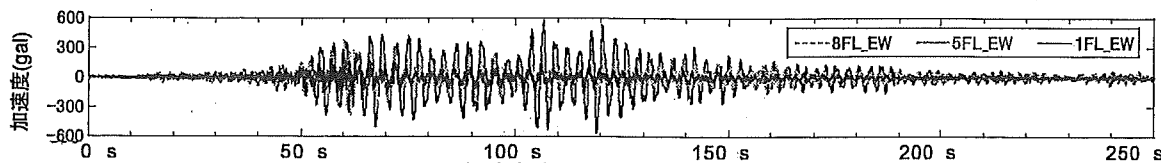


図3 加速度波形(三の丸波rec805)

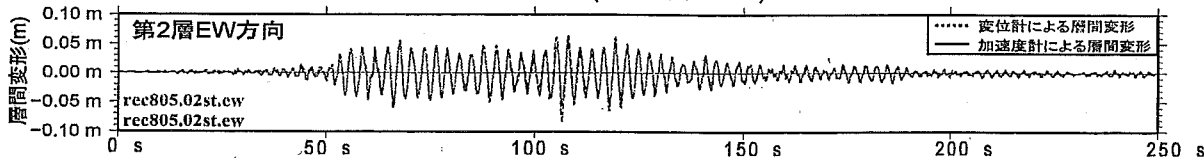


図5 加速度計による層間変形と変位計によるものの比較(三の丸波rec805)

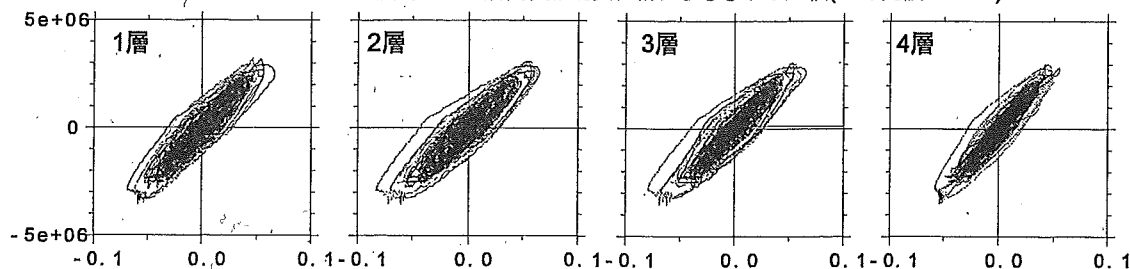


図6 加速度計による層間変形と変位計によるものの比較(三の丸波rec805)

