2011年東北地方太平洋沖地震における中低層RC造・SRC造建築物の振動特性の評価

ESTIMATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF MIDDLE-TO-LOW RISE RC/SRC BUILDINGS DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

森田高市 ——— *1 鹿嶋俊英 ——— *2

Koichi MORITA ——— *1 Toshihide KASHIMA — *2

キーワード：
東北地方太平洋沖地震, 強震観測, 固有周期, 減衰定数, 履歴減衰

Keywords:
The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Strong motion observation, Natural period, Damping ratio, Hysteretic damping

Dynamic properties of 23 middle-low rise RC/SRC buildings during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake was investigated through the identification of strong motion data. From the identification result of SDOF simulated wave, the identified results of strong motion data can be reproduced. Viscous damping can be estimated from the part of small amplitude. The change of natural periods during the earthquake is related to the damage condition of buildings.

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)では、東北地方から関東地方の広い地域の建物では、これまでに受けたことがないような強い揺れを経験した。強震計を設置している建物では、本震および余震において多数の強震記録^{1,2)}などが得られている。

いくつかの中低層RC造・SRC造建築物の強震観測とその分析結果が報告されており^{3)~6)}、これらの報告では、2011年東北地方太平洋沖地震による固有周期の延び(固有振動数の低下)や減衰定数の変動が観察されている。

本論文では、2011年東北地方太平洋沖地震で得られた中低層のRC造・SRC造建物の強震記録を用いて、固有振動数と減衰定数の同定を行い、地震中に変化する振動特性の傾向を把握する。一質点系シミュレーション解析波形の同定結果から、観測の同定結果の解釈を検討する。また、観測記録による固有周期の延びと建物損傷度の比較を行う。

2. 対象建物の概要

対象建物は、建築研究所が強震観測を行っている中低層のRC造およびSRC造建物のうち、東北地方太平洋沖地震で建物基礎部の震度4(計測震度3.5)以上の観測した建物23棟(表1)とする。ただし、建物が特殊な構造のものは除外した。建物#1は、3~9F部分がロッキング性状を示し大破に至った⁷⁾。建物#3はRC壁に亀裂が入り、軽微から小破⁸⁾、建物#6と#7は、RC壁の亀裂や柱の損傷が確認されており軽微から小破⁹⁾の被害程度と報告されている。建物#10は耐震壁、雑壁、および柱にひび割れ被害が見られた¹⁰⁾。

3. 個別建物の同定結果

入力(1階または地下階の水平成分)と応答(建物上部の水平成分)の加速度記録を用いて、システム同定手法により振動特性の同

定を行う。

最も単純なパラメトリックモデルのひとつであるARXモデル¹¹⁾によるパラメータ同定を行い、得られたモデル構造係数より固有周期と減衰定数を求める¹²⁾。モデル次数は、AIC(赤池情報量規範¹³⁾)が最小のものをを用いた。

各対象建物において、東北地方太平洋沖地震の際に得られた強震記録を用いて、固有周期と減衰定数を求めた。ただし、ここでは各

表1 建物の概要

番号	所在地	建物概要*1	震央距離(km)	計測震度*2
1	仙台市	SRC/9F	177	5.6
2	宮古市	RC/7F	188	4.8
3	いわき市	SRC/8F+B1F	210	5.3
4	八戸市	RC/6F+B1F	292	4.6
5	秋田市	RC/6F+B1F	299	4.3
6	つくば市	SRC/8F+B1F	330	5.2
7	つくば市	SRC/7F+B1F	330	5.1
8	新潟市	RC/6F+B1F	335	3.9
9	八千代市	RC/6F+B1F	361	5.0
10	宮代町	RC/6F	362	4.8
11	三郷市	SRC/7F+B1F	367	4.8
12	船橋市	RC/8F	368	4.8
13	千葉市	SRC/8F+B1F	369	4.7
14	市川市	SRC/5F+B1F	375	5.2
15	江戸川区	SRC/5F+B1F	377	4.8
16	足立区	RC/5F+B1F	377	4.8
17	戸田市	SRC/8F+B1F	380	5.0
18	北区	SRC/7F	380	4.6
19	文京区	SRC/9F	383	4.5
20	中野区	RC/5F	387	4.9
21	港区	SRC/7F	390	5.1
22	小平市	RC/3F	401	4.7
23	静岡市	SRC/6F	520	4.2

*1:構造/階数、*2:建物基部の記録から算出した計測震度

本稿は文献2)に追加検討を加えたものである。

¹⁾ 国土交通省国土技術政策総合研究所 室長・博士(工学)
(〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

²⁾ 国立研究開発法人建築研究所 主任研究員・博士(工学)

¹⁾ Head, National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT, Dr. Eng.

²⁾ Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

建物の強震記録を10分割し、各区間の1次固有周期と1次減衰定数を求めた。同定結果の例（建物#10）を図1に示す。これによると、固有周期は入力とともに徐々に長くなっており、主要動後ほとんど一定の値を取っている。減衰定数は入力が大きくなるにつれて大きな値になっており、その後、値がほぼ一定の値になっている。なお、建物#10では、主要動後減衰定数がほぼ一定となっているが、他の建物の例では、主要動後やや減少する傾向のものが多かった。

4. 一質点系シミュレーション波形への適用

ここでは、建物#10を想定した一質点系モデルを対象とした時刻歴応答波形を生成し、3.において強震記録に適用した同定方法と同じ方法をシミュレーション波形にも適用する。対象建物は、耐震壁を有するフレーム構造であり、短辺方向を対象とした。構造計算書を参考にして、系のベースシア係数 C_b を0.5とし、ひび割れ強度 Q_c を降伏荷重 Q_y の $1/3(=Q_y/3)$ 、ひび割れ強度時の変位 δ_c を降伏変位 δ_y の $1/9(=\delta_y/9)$ 、降伏後剛性を初期剛性の $1/1000$ 、履歴則をTakeda Modelとし、減衰を初期剛性比例型で1次減衰定数3%、除荷剛性低下指数 α を0.5とそれぞれ仮定した¹⁴⁾。弾性固有周期は、2011年東北地方太平洋沖地震の直前の地震で同定された固有周期0.32秒とした。同定結果を図2に示す。これを見ると、三区間目までは弾性範囲であり、固有周期は弾性固有周期、減衰定数は粘性減衰定数の値を示している。主要動付近では、塑性化により固有周期が伸び、履歴減衰の影響で減衰定数が増大しているのが分かる。図3に各区間のベースシア係数-変形関係を示す。

図1の強震観測の結果と比較すると、3区間目までの減衰定数の傾向が異なるが、これはシミュレーションでは、初期状態を弾性としているが、実際には東北地方太平洋沖地震以前からひび割れ等が生じており、小さな振幅でも減衰が増加したものと考えられる。

最大固有周期が若干異なるものの、シミュレーション波形により実現象をおおむね再現できている。減衰には、非構造部材の影響や建物-地盤の動的相互作用の影響など複雑な現象が含まれるが、2011年東北地方太平洋沖地震を対象とした今回の単純なモデルでは、建物の粘性減衰定数は、損傷を受ける前の微小振幅の区間からおおむね評価することが出来、履歴減衰も含めた減衰定数は、主要動付近の区間からおおむね評価できることが分かった。

5. 全対象建物の同定結果分析

4.に示した各建物の同定結果（図1）の値のうち、振幅の小さい初期部、振幅の大きい主要動部と後揺れの最後部を取り出して、傾向について検討する。基本的に、初期部は一区間目、最後部は十区間目とした。建物高さ H と初期部・主要動部・最後部の固有周期の関係を図4~6に示す。図中に示した実線は回帰直線であり、点線は目安の直線である。短辺と長辺、損傷確認建物とその他を分けて、図中に示した。

振動特性係数 R_t や層せん断力の分布係数 A_i を求める際には、RC造やSRC造の場合、以下に示す略算式による固有周期を用いている¹⁵⁾。

$$T=0.02H \quad (1)$$

ただし、 T は固有周期(s)、 H は建物高さ(m)である。

図4の強震動を受ける前の初期部の固有周期を見ると、いずれも

図1 東北地方太平洋沖地震の際の振動特性の変化（短辺）
（上段：固有周期、中段：減衰定数、下段：建物基部の記録）

図2 一質点系シミュレーション波形の振動特性の変化（短辺）
（上段：固有周期、中段：減衰定数、下段：建物基部の記録）

図3 一質点系シミュレーション波形各区間のベースシア係数-変形関係

0.01H から 0.025H の範囲に収まっている。全データの回帰式は、(1)式に比べてやや短めになっているが、実験・実測に基づく既往の回帰式¹⁶⁾に比べるとやや長めになっている。

図 5 の主要動部分の固有周期においては、一部の建物を除くと 0.01H から 0.03H の範囲にある。全データの回帰式は塑性化している建物のデータも含むため、(1)式に比べてやや長めになっているが、(1)式により強震時の固有周期がおおむね評価できると言える。

図 6 の最後部の固有周期を見ると、一部の建物を除くと 0.01H から 0.03H の範囲にあり、図 5 より周期がやや短くなっているが、初期部の周期には戻っていない。

地震中の固有周期の伸び（主要動部の固有周期／初期部の固有周期）と目視による建物の状況を表 2 に示す。今回、対象とした建物においては、固有周期比が 1.2 から 1.3 以下程度であれば、損傷は少なく、固有周期比が 1.5 から 1.6 程度であれば、軽微から小破程度となっていた。建物#1 は短辺方向が耐震壁側柱の崩壊により大破しており、短辺方向は 1.6 を大きく上回っていた。今回対象とした範囲で上記の結果が得られたが、一般的な傾向を得るにはさらなる検討が必要である。また、建物#3 の最大余震に対しては、ほとんど周期が変化しなかったことが報告されている¹⁷⁾。

初期部・主要動部・最後部の減衰定数を図 7～9 に示す。東北地方太平洋沖地震前からひび割れ等を受けている建物も含まれると考えられるが、弾性に近いと仮定すると、4. の検討から、振幅レベルの小さい初期部の減衰定数（図 7）は、おおむね粘性減衰定数と見なすことが出来る。地震前からひび割れが多い建物もあるため、5%以上の値を取っている建物もあるが、半分以上が 5%以下の値を取

っている。主要動部の減衰定数（図 8）は、履歴減衰も含むと考えられるが、ほとんどの場合で減衰定数は 5%を超えていた。最後部の減衰定数（図 9）は初期部と主要動部の中間の値をとっており、地震中にひび割れ等の損傷を受けたため、粘性減衰定数よりも大きいと考えられる。

図 5 主要動部の固有周期

図 6 最後部の固有周期

図 7 初期部の減衰定数

図 8 主要動部の減衰定数

図 9 最後部の減衰定数

表 2 固有周期比と建物損傷度の関係				
番号	計測震度	周期比(短辺)	周期比(長辺)	地震後の状況
1	5.6	1.95	1.43	大破
2	4.8	1.19	1.19	
3	5.3	1.58	1.71	軽微から小破
4	4.6	1.08	1.11	
5	4.3	1.10	1.15	
6	5.2	1.52	1.55	軽微から小破
7	5.1	1.54	1.62	軽微から小破
8	3.9	1.02	1.04	
9	5.0	1.31	1.11	
10	4.8	1.34	1.28	ひび割れ確認
11	4.8	1.20	1.16	
12	4.8	1.26	1.08	
13	4.7	1.38	1.32	
14	5.2	1.21	1.15	
15	4.8	1.16	1.14	
16	4.8	1.16	1.09	
17	5.0	1.20	1.41	
18	4.6	1.13	1.06	
19	4.5	1.17	1.22	
20	4.9	1.17	1.12	
21	5.1	1.14	1.16	
22	4.7	1.15	1.10	
23	4.2	1.11	1.10

図 4 初期部の固有周期

6. 各建物の固有周期と減衰定数の経年変化

長期にわたって強震観測を行っている建物#10の固有周期と減衰定数の経年変化を示す。建物の竣工年は1995年で1998年より観測を開始した。図10の固有周期においては、東北地方太平洋沖地震が発生するまでは、微小なひび割れ等により固有周期が徐々に延びる傾向が見られる。竣工後3年経ってから計測開始しているため、積載重量の変化による影響は小さいと考えられる。地震後に0.36-0.41秒程度に延びており、その後ほぼ一定の値になっている。図11の減衰定数は、2005年までやや増加する傾向も見られるが、2005年から2011年までは2-6%の範囲でばらつきも比較的小さい。地震後、地震前よりやや大きめになり、3-8%程度の値を取っており、ばらつきが大きい傾向が見られる。上記の固有周期と減衰定数のばらつきの主な要因は、地震動の振幅レベルの相違¹⁸⁾であると考えられる。

図10 固有周期の経年変化

図11 減衰定数の経年変化

7. まとめ

東北地方太平洋沖地震における、中低層のRC造・SRC造建物の振動特性を同定し、以下の知見を得た。

- 1) 地震中に固有周期は延びる傾向にあり、減衰定数は増大する傾向にある。
- 2) 一質点系シミュレーション解析波形の同定から、1)の結果が再現でき、振幅が小さい部分からおおむね粘性減衰定数が得られる。
- 3) 初期部の固有周期は設計用略算式よりやや短めになり、主要動部の固有周期はやや長めになっているが、設計用略算式により強震時の固有周期がおおむね評価できていると言える。
- 4) 固有周期の延びと建物損傷度の関係を調べたところ、固有周期比が1.2から1.3以下程度であれば、損傷は少なく、固有周期比が1.5から1.6程度であれば、軽微から小破程度、1.6を大きく上回

ると大破となっていた。

- 5) 初期部の減衰定数は、おおむね粘性減衰定数と見なすことが出来、半分以上が5%以下の値であった。主要動部の減衰定数は履歴減衰も含むと考えられるが、ほとんどの場合で5%を超えていた。

謝辞

強震観測の実施に当たっては、各建物の管理者や利用者のご理解とご協力を頂いている。また、本論文執筆にあたり、加藤博人氏（国立研究開発法人建築研究所）に助言頂いた。ここに記して深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鹿嶋俊英, 小山信, 飯場正紀, 大川出: 2011年東北地方太平洋沖地震によるコンクリート系建物の振動特性の変動, 日本地震工学会大会 2012 梗概集, pp.28-29, 2012.11
- 2) 森田高市, 鹿嶋俊英: 2011年東北地方太平洋沖地震における中低層RC造・SRC造建築物の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, p. 963-964, 2014.9
- 3) 高橋和丈, 師橋憲貴, 工藤一嘉, 桜田智之: 2011年東北地方太平洋沖地震による日本大学生産工学部における強震動と建物の振動性状, 日本建築学会大会学術梗概集 B2, pp.683-384, 2012.9
- 4) 磯圭一, 中井正一, 関口 徹: 千葉市における東北地方太平洋沖地震前後での建物の震動特性の変化, 日本建築学会大会学術梗概集 B2, pp.1139-1140, 2012.9
- 5) 森田高市, 鹿嶋俊英: 2011年東北地方太平洋沖地震前後のSRC造建築物の地盤・建物相互作用系動特性の変化, 日本建築学会大会学術梗概集 B2, pp.585-586, 2013.8
- 6) 見波進, 稲葉望, 山村一繁: 既存鉄骨鉄筋コンクリート造建物の強震観測, 日本建築学会大会学術梗概集 B2, pp.593-594, 2013.8
- 7) 鈴木一希, Hamood Alwashali, 前田匡樹, 市之瀬敏勝: 東北地方太平洋沖地震で大破したSRC造建物の被害と分析, コンクリート工学年次論文集 Vol.35, No.2, pp.1105-1100, 2013
- 8) 鹿嶋俊英, 小山信, 石原直, 飯場正紀: いわき市庁舎における2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録と余震観測, 日本地震工学会大会 2011 梗概集, pp. 294-295, 2011.11
- 9) 鹿嶋俊英: 2011年東北地方太平洋沖地震の建築研究所建物の強震記録, 日本建築学会大会学術梗概集 B2, pp. 319-320, 2011.8
- 10) 安達直人, 小豆畑達哉, 飯場正紀, 鹿嶋俊英, 上田遼, 岡野創: 非線形現象が生じた地震観測建物の動的相互作用解析 (その2建物にひび割れが生じた杭支持建物の事例), 日本建築学会大会学術梗概集 B2, pp. 31-32, 2013.8
- 11) 足立修一: MATLABによる制御のためのシステム同定, 東京電気大学出版局, 1996
- 12) 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
- 13) 赤池弘次: 情報量規範AICとは何か, 数理科学, 1976, No.153
- 14) 桑原里紗, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭: RC構造物における地震応答終了時の残留変位の評価法に関する解析的研究, 日本建築学会大会学術梗概集 C2, pp. 527-528, 2009.8
- 15) 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 全国官報販売協同組合, 2015
- 16) 小野潤一郎, 佐武直紀, 佐々木淳: 実測資料に基づく建築構造物の減衰性状: その2: 鉄骨鉄筋コンクリート造建物、鉄筋コンクリート造建物, 日本建築学会大会学術梗概集 B2, pp. 881-882, 1995.8
- 17) 鹿嶋俊英, 小山信: 東北地方太平洋沖地震によるいわき市庁舎の振動特性の変動と動的相互作用, 日本建築学会大会学術梗概集, pp. 883-884, 2015.9
- 18) 中村尚弘, 鹿嶋俊英, 木下拓也, 伊藤真二, 宮本泰志, 曽根孝行, 荻本孝久, 犬伏徹志: 振幅依存性を考慮した中低層RC, SRC造建物の水平1次振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第721号, pp.471-482, 2016.3

[2016年2月3日原稿受理 2016年3月22日採用決定]