

既存の建築物に対する新たな耐震性能の向上手法の提案に関する研究

日大生産工(学部) ○菊池 研吾 日大生産工 藤本 利昭

1. はじめに

旧耐震基準では震度6以上の定義がないが、1981年に改定された現行の新耐震基準では震度6強から7程度の地震が発生しても倒壊しない基準となっている。近年では、より大規模な地震が発生するとされており、それらに対して耐えられる新築建築物を建てることはコスト面での課題がある。既存の建築物に対しては耐震性能の向上の必要性が迫られてる可能性があり、新たな耐震技術の提案が必要である。本研究の目的は、既存の建築物に対して大幅な改築を行わずに、付加物による効果的な耐震性能の向上手法の提案を行う。本報では耐震性能の向上の確認するため対象とした建物の概要を示すとともに解析モデルの妥当性の確認として、固有周期・減衰定数の評価の検討を行った。対象建物は本学津田沼キャンパスにおいて地震計が設置されている建物の中で比較的構造が明快で耐震補強をしていない39号館とした。

2. 建物概要

建物概要を表1に示す。日本大学生産工学部津田沼キャンパス内の西に位置する39号館は、2012年3月に竣工された高さ30.9m、幅45.3m、奥行き51.85mの建物であり、現在も使用されている。1階には工房・ギャラリー、2階にはカフェテリア、3~5階には教室、6階には大型ホールが設けられている。

表1 建物概要

竣工	2012年3月
用途	学校
構造	S造 一部RC造
階層	地上6階
建築面積	2,702.26m ²
延床面積	13,859m ²

3. 観測概要

図1に39号館の地震計設置箇所の平面図・断面図を示す。地震計は建物1階、3階、6階の3箇所に設置しており、1階は建物に入力される地震波として記録され、3、6階は建物の応答値として記録することを目的としている。また、

観測記録は3階に設置してある収録器に記録され、データ回収は遠隔操作が行えるシステムになっている。地震計(LU201-SU201(株)白山工業製有線LAN地震計)は2014年8月に設置され、今日まで観測している。

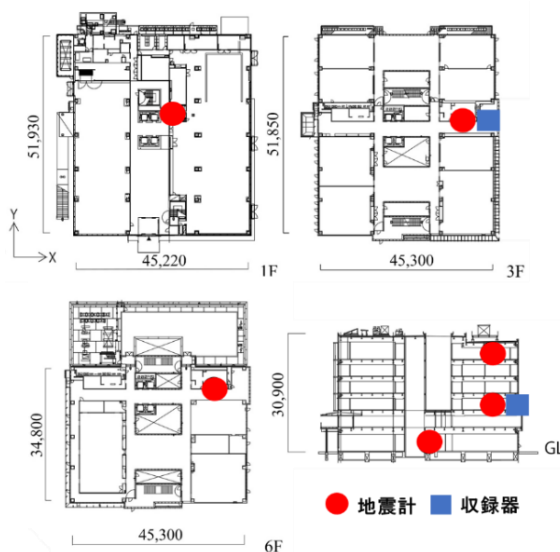


図1 地震計設置箇所(平面図・断面図)

4. 解析モデル概要

図2に示している解析モデルは設計図書¹⁾に記載されている情報を基に柱、梁、配筋等を正確に入力し、一貫構造計算ソフト²⁾を用いて作成を行った。積載荷重については教室、倉庫、トイレ・EPS、機械室、非歩行屋根、歩行用屋上の6種類に分けて設定した。

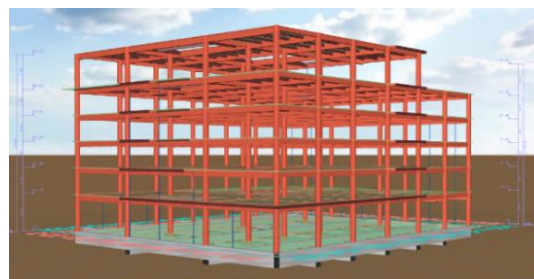


図2 解析モデル

Research on a proposal for a new method of improving the seismic performance of existing buildings

Kengo KIKUCHI, Toshiaki FUJIMOTO

5. 解析モデルの妥当性の検討

5.1 固有周期の評価

評価方法に関しては実測データによる推定、解析モデル、既往の評価式を用いた三つの方法で評価をした。2022年3月16日から2023年6月4日までの実測データの中から最大応答加速度が概ね中央値であるデータを用いた。ただし、表2の他の実測データにおいても固有周期の大きなばらつきはなかった。また、用いた実測データの地震概要を表3に示すとともに固有値解析の方法を以下に示す。

表2 実測データ一覧

日付	最大加速度(X方向)	最大加速度(Y方向)
2022年3月16日23時35分07秒	53.12	96.27
2022年4月4日22時30分33秒	14.58	18.74
2022年5月29日15時55分41秒	6.36	14.42
2022年11月3日19時4分43秒	10.16	13.52
2022年11月9日17時40分24秒	6.89	8.43
2022年11月17日21時43分40秒	5.89	7.88
2023年3月11日5時13分56秒	9.81	8.77
2023年5月10日11時21分6秒	5.45	8.2
2023年5月11日4時16分53秒	16.58	12.28
2023年5月26日19時3分35秒	21.44	28.8
2023年6月4日10時58分43秒	6.97	8.95

表3 地震概要

発生日時	2023年5月11日4時16分41秒
震央地	千葉県南部
震央	北緯35度10.2分 東経140度11.1分
震源深さ	40km
マグニチュード	M : 5.2
震度	震度3(千葉県習志野市鷺沼)
最大震度	震度5強

(a) 実測データによる推定

固有値解析の方法としてはフーリエ解析²⁾し、図3に示す1階に対する3階および6階のフーリエスペクトル比を求めた。なお、スペクトルの平滑化のためParzen型ウインド（バンド幅0.1Hz）を用いた。図3から卓越するフーリエスペクトル比の振動数が建物の固有周期と推定すると、X方向の1次が約1.06Hz(0.94s)、2次が約3.06Hz(0.33s)、3次が約4.87Hz(0.21s)、Y方向の1次が約1.02Hz(0.98s)、2次が約3.02Hz(0.33s)、3次が約4.70Hz(0.21s)であることが分かる。

(b) 解析モデル

固有値解析の方法としては、一貫構造計算ソフト³⁾で作成した解析モデルを用いて固有値解析を行い、固有周期を算出した。

(c) 既往の評価式

固有値解析の方法としては、1次固有周期の算出方法として参考文献4)から用いた式(1)を利用した。2次、3次固有周期については対象建物が純ラーメン構造であることからせん断モ

デルと仮定し、式(1)で算出された1次固有周期の結果を式(2)(3)で用いることとした。

$$T_1 = 0.03H \quad (1)$$

(1次固有周期 T_1 ・建物高さ H)

$$T_2 = \frac{T_1}{3} \quad (2)$$

(2次固有周期 T_2)

$$T_3 = \frac{T_1}{5} \quad (3)$$

(3次固有周期 T_3)

また、解析モデルの固有周期の解析結果と既往の評価式を用いた結果を表4に示す。(a), (b), (c)の三つの方法での解析結果はそれぞれ比較的近い値となっている。

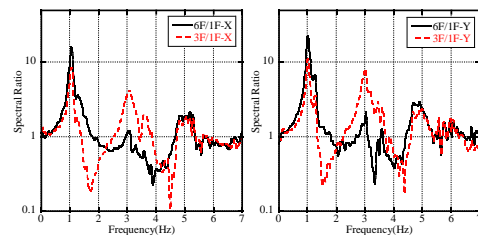


図3 実測値のフーリエスペクトル比

表4 固有周期の解析結果一覧

評価方法	X方向(s)			Y方向(s)		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
モデル	0.942	0.346	0.224	0.949	0.344	0.217
実測値	0.936	0.327	0.205	0.981	0.331	0.213
評価式	0.927	0.309	0.185	0.927	0.309	0.185

5.2 減衰定数の評価

減衰定数を算出するための実測データの取得方法は起振機による定常加振や引き綱法といった人為的な振動を観測する方法や常時微動測定、風応答観測、地震応答観測といった自然的な振動を観測する方法がある。それらの観測された実測データの分析方法、減衰定数の評価法についても様々な方法がある。減衰定数の算出方法の一覧を表5に示す。

評価方法に関しては実測値からRD法を用いた評価、解析モデルの応答値から同定、既往の評価式を用いた三つの方法で評価をした。図4にRD法の手順を図化したものを示す。

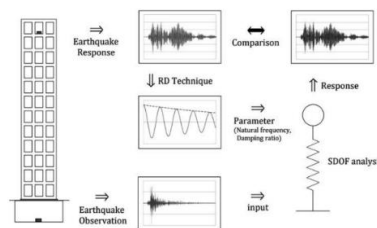


図4 RD法のフローチャート⁶⁾

表5 実測に基づく減衰定数の評価法の分類⁵⁾

振動の種類	実測データの取得法	取得データ	実測データの分析方法	主な減衰定数の評価法
定常振動	起振機による定常加振	振幅と位相 (周波数データ)	共振曲線と位相曲線 (周波数データ)	周波数応答データ カーブフィット法 ハーフパワー法, 1/√2法 位相勾配法
ランダム振動	定常微動測定 風応答観測 地震応答観測	ランダム波形 (時刻歴波形)	周波数応答データに変換 フーリエスペクトル パワースペクトル密度 伝達関数	
自由振動	起振機や制振装置で加振後急停止 人力加振機 引き綱法 振り子法	自由振動波形 (時刻歴波形)	自由振動波形に変換 自己相関関数法 RD法	自由振動波形 振幅減衰比による方法 最小2乗法による方法
ランダム振動や自由振動による時刻歴波形			システム同定手法: 拡張カルマンフィルタ, ARX法, ARMAX法など	

(a) RD法

実測値からRD法を用いた評価手順としては、6階の地震計で観測された加速度波形のフーリエスペクトルにおいて卓越している部分を含むバンドパスフィルターを施すことで卓越振動数成分を抽出する。その後、図5で示すようにバンドパスフィルター処理を行った加速度波形の毎極大値をピークとする小サンプルに分割し、その分割した小サンプルを重ね合わせることで図6に示す自由振動波形を作成し、最後に式(4)を用いて減衰定数を算出する。

$$\eta = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{a_0}{a_n} \quad (4)$$

(減衰定数 η ・加速度 a)

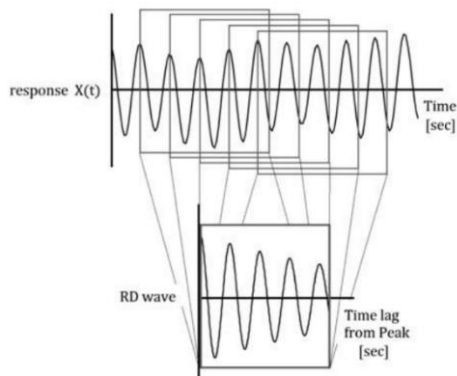


図5 重ね合わせの概念⁶⁾

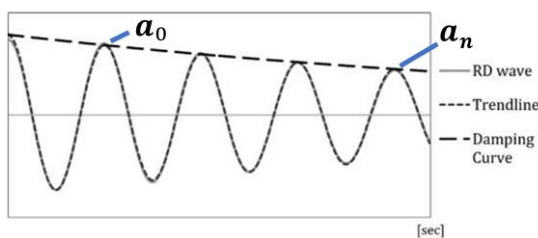


図6 自由振動波形の例⁶⁾

RD法を行う際に使用した実測データは表2で示した全ての実測データを使用した。しかし、

2023年5月10日11時21分6秒のY方向の実測データである加速度波形のフーリエスペクトルを確認したところ卓越している箇所が見られなかったため実施していない。

図7に関してバンドパスフィルター処理前後で卓越振動数成分以外の振動成分がバンドパスフィルター処理を施すことで1/1000になっていることが分かり、卓越振動数成分が正確に抽出されていることが確認できる。

図8についてはバンドパスフィルターのかけていない部分の逆フーリエ変換で戻った加速度波形であり、これは建物の1次周期のみを示す加速度波形を表している。

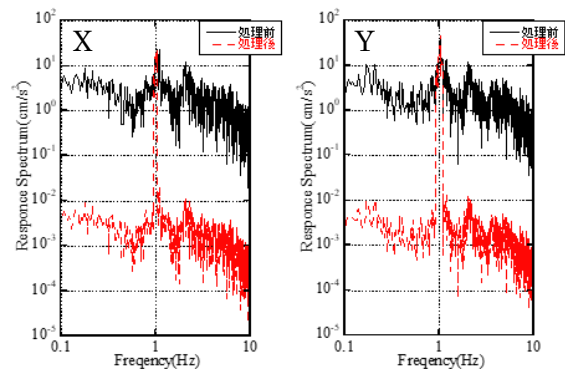


図7 バンドパスフィルター処理前後

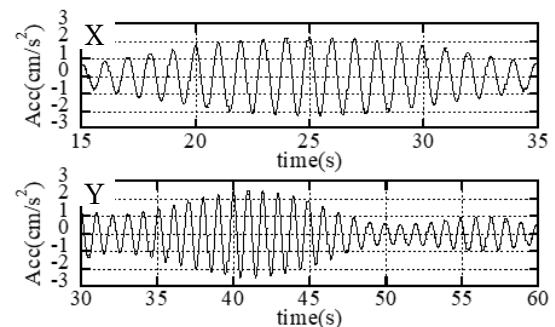


図8 フィルター処理後の加速度波形

図9に関して自由振動波形を作成する際に重ね合わせをする小サンプル数Nが少なすぎると正確に作成できないが今回の自由振動波形の作成では全ての実測データにおいてN=130~150程度となっているため十分であると考えられる。また、小サンプル継続時間はsT=15sとした。

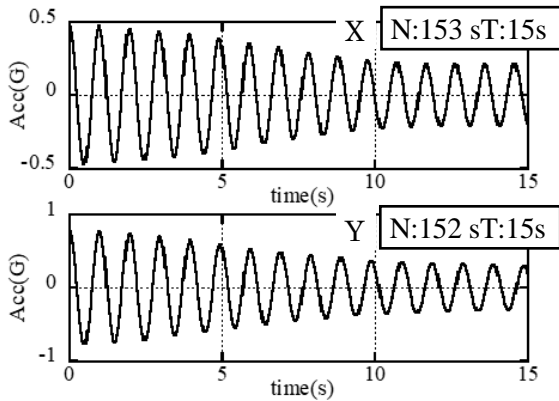


図9 自由振動波形

(b) 解析モデルの応答値からの同定

解析モデルの応答値からの同定に関して、弾塑性地震応答解析ソフトウェア⁷⁾を用いて減衰定数2%として1階の実測波形を入力地震波として地震応答解析をし、6階の応答加速度を算出した。ここで算出された応答加速度と実測の6階の応答加速度を比較し、その差異は減衰定数であると考えられるため減衰定数を変えて解析を繰り返すことで実測の6階の応答加速度波形に近似する減衰定数の同定を行った。

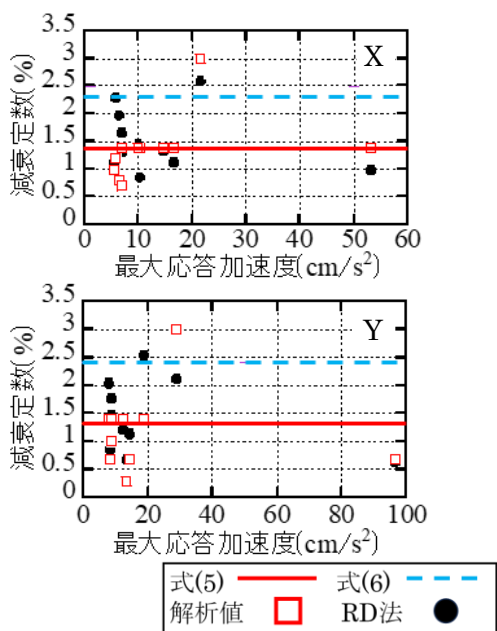


図10 減衰定数と最大応答加速度

(c) 既往の評価式

既往の評価式を用いた評価方法に関しては、参考文献(6)(8)から用いた式(5)(6)を利用した。式(5)について x/H が 2×10^{-5} を超えた場合 2×10^{-5} として計算を行う。

$$h = \frac{0.0131}{T_1} \quad (5)$$

$$h = \frac{0.0131}{T_1} + 400 \frac{x}{H} + 0.0029 \quad (6)$$

(頂部振幅 x)

図10に(a)(b)(c)の三つの方法で算出された減衰定数と最大応答加速度の関係一覧を図10に示す。RD法では応答値が小さい実測データの場合ばらつきが大きく、応答値が大きい実測データの場合にはX方向において最大応答加速度53.12cm/s²で1.4%となった。式(5)ではX方向約1.4%、Y方向約1.3%となり、式(6)ではX方向約2.5%、Y方向約2.4%となった。

6. まとめ

耐震性の向上の検討をするために対象建物の現状を知り、解析モデル用いて固有周期と減衰定数の評価・検討を行った。その結果、固有周期については実測値からX方向の1次が約0.94s、Y方向の1次が約0.98sと算定された。また、実測値、解析モデル、式(1)(2)(3)から得られた1次、2次、3次固有周期は近い値となった。減衰定数については、地震応答解析から得られた応答値から推定すると1.4%となり、式(6)と比較すると近い値となった。今後、構造骨組の安全性を評価するため応答値の最大値である時の減衰定数1.4%を耐震性能の向上の評価を行う際に用いる。また、今後の展望として今回作成した解析モデルを用いて新たな耐震性能の向上の提案と効果の確認を行う。

参考文献

- 1) 日本大学生産工学部津田沼校舎工房棟(仮称)新築工事(建築)設計図書、入江三宅設計事務所
- 2) 国立研究開発法人建築研究所「View Wave」
- 3) ユニオンシステム株式会社：SuperBuild/SS7
- 4) 藤本利昭，CFT造建物の振動特性，日本大学生産工学部第42回学術講演会(2009)
- 5) 日本建築学会，建築物の減衰，2000
- 6) 豊田堯博，鷹野澄，弱い地震動を用いた建物の減衰定数の推定：東京大学の建物を対象として，地震研究所彙報，Vol88(2013) pp.1-36
- 7) ユニオンシステム株式会社：SS21/DynamicPRO
- 8) 佐々木淳，田村幸雄，須田健一，建築物設計用の減衰定数に関する一考察 その3 設計用減衰定数の評価，1999年度日本建築学会 関東支部研究報告