

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	加速度と速度の最大値を用いた建物の固有周期と損傷の程度の関係
Title(English)	Relationship between damage and natural period of an RC building developed using absolute maximum acceleration and velocity
著者(和文)	久田翔俊, 佐藤大樹, Alex Shegay
Authors(English)	Takatoshi Hisada, Daiki Sato, Alex Shegay
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 461-464
Citation(English)	, , , pp. 461-464
発行日 / Pub. date	2023, 2
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

加速度と速度の最大値を用いた建物の固有周期と損傷の程度の関係

構造—振動

正会員 ○ 久田翔俊^{*1}
" Alex Shegay^{*3}正会員 佐藤大樹^{*2}

RC 造建物 地震応答解析 損傷評価

構造ヘルスマモニタリング

1 はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震で多くの人が一斉に帰宅しようとしたため、幹線道路は大渋滞し、救急車や消防車も身動きが取れない状態となった¹⁾。これを契機として、国や自治体は震災後にできるだけ避難をせずに建物内にとどまることを求めている²⁾。地震が発生した後も建物内に留まるためには、建物の健全性の早期の把握が必要不可欠であり、建物の損傷を評価しなければならない。

地震被害を受けた建築物等に対する被災状況の判定には、余震等に対する建築物の倒壊危険性やその付帯物の落下・転倒危険性を地震直後の段階で判定し、建築物の使用者やその付近を通行する第三者に対する危険回避を目的とした応急危険度判定がある³⁾。応急危険度判定は、建築構造技術者が建築物の内部に立ち入り判定を行う。しかし、通常は建物の構造体は仕上げに覆われていることが多く、建物の損傷や劣化を目視により確認することが困難な場合がある。また、地震災害時には、建物全体の損傷を早期に把握することが困難な場合も生ずる。さらに、大都市では構造物の超高層化が進められており、建物の規模が大きくなると、点検にはさらに多くの時間と労力を要する⁴⁾。一方、構造ヘルスマモニタリングシステム (SHM) と呼ばれる建物に設置されたセンサーを用いて建物の損傷を推定する技術への関心が高まっている。しかし、SHMを行うのに十分なデータを取るために必要な台数のセンサーを確保しようとすると大変な導入費用が掛かる⁵⁾。

そこで、センサーの内部での演算に使用されるメモリの消費量が小さく、安価なセンサーを用いて建物の健全性および使用の可否を早期に判断することが必要であると考えられる。本研究では、地震動およびその応答の加速度などの時刻歴波形を記録せず、絶対加速度および絶対速度の最大値のみなどが得られるようなセンサーから得られる簡易的な指標を用いて、目視では判断が難しい損傷の程度を推定する手法を構築することを目的とする。本報では、最大絶対加速度と最大絶対速度のみから建物の固有周期を推定し、その変化と建物損傷の程度の関係について分析する。

2 建物モデル概要

建物モデルは、共同住宅を想定した地上5階、高さ14.3mの5層RC造建物と地上14階、高さ43.7mの14層RC造建物⁶⁾（以降、それぞれ5Model、14Model）とする。図1、図2にそれぞれ5Modelと14Modelの立面図および基準階平面図を示す。また、建物の諸元を表1に示す。

本解析には構造計算プログラムであるRESP-Dを用いた。柱部材を両端ファイバー梁要素でモデル化し、梁を両端に剛塑性回転ばねを有する線材としてモデル化した。耐震壁は間柱部分にファイバー梁要素を適用したモデルとしている⁷⁾。外周部の壁については三方スリットを設けているため⁸⁾、耐震壁ではなく、壁の上側の大梁の剛域に寄与するモデル化をした⁹⁾。また、本モデルでは、バルコニーや開口部についてもモデル化した。構造減衰は減衰定数 $\zeta=0.02$ の瞬間剛性比例型とする。

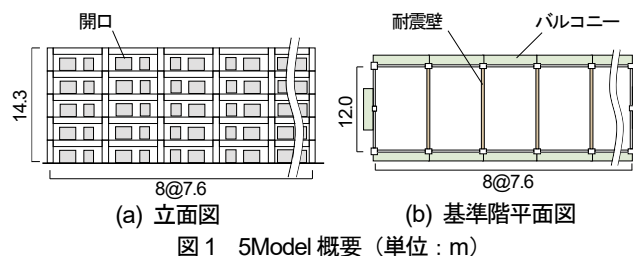


図1 5Model 概要 (単位: m)

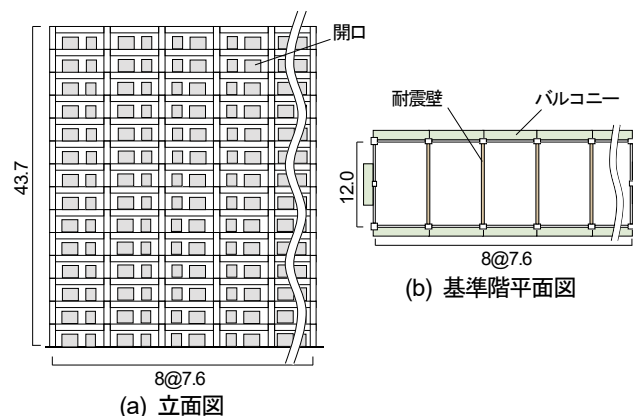


図2 14Model 概要 (単位: m)

表1 建物諸元

モデル名	5Model	14Model
建物高さ	14.3 m	43.7 m
平面プラン	2×8スパン	
	12 m × 60.8 m	
梁寸法	梁せい600~700 mm	梁せい600~1000 mm
	梁幅300~550 mm	梁幅300~800 mm
柱寸法	柱幅600~850 mm	柱幅600~1050 mm
主筋	295~785 N/mm ²	
Fc	24~33 N/mm2	27~36 N/mm2

図3、図4にそれぞれ5Modelと14Modelの各層の重量とX方向およびY方向の水平剛性を示す。5Modelと14ModelのどちらもY方向の剛性は、X方向の剛性と比較すると非常に大きいことが分かる。また、5ModelのX方向の各層の剛性は、14ModelのX方向の各層の剛性と比較すると小さく、5ModelのY方向の各層の剛性は、14ModelのY方向の各層の剛性と比較すると大きいことが分かる。

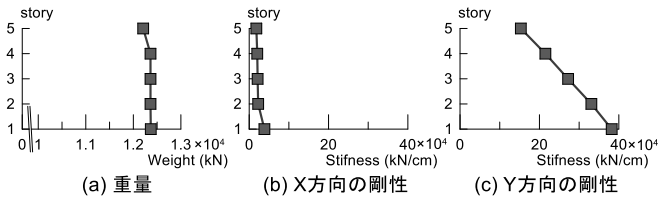


図3 5Modelの重量・剛性分布

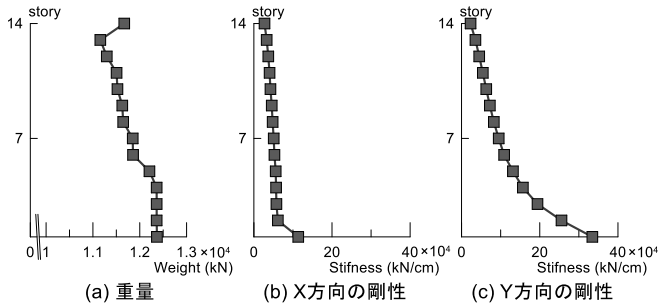


図4 14Modelの重量・剛性分布

表2に各建物モデルの1次と2次の固有周期および有効質量比を示す。表2より、1次モードにおける5Modelの有効質量比は大きく、1次モードの寄与が大きいことが分かる。一方、14Modelの有効質量比は5Modelに比べて小さいため、1次モードの寄与が小さいと考えられる。

表2 各モデルの固有周期および有効質量比

固有周期(s)	5Model		14Model	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
1次	0.464	0.135	0.847	0.596
2次	0.148	0.0420	0.297	0.149
有効質量比	5Model		14Model	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
1次	0.822	0.818	0.776	0.641
2次	0.105	0.147	0.112	0.233

図5に5Modelと14ModelのX方向とY方向の静的増分解析による層せん断力 Q と層間変形角 R の関係を示す。荷重は A_1 分布を用いた。図中に、各層のいずれかの部材にひび割れが発生した点(●)と各層のいずれかの部材に曲げ降伏が発生した点(●)を併せて示す。また、表3にひび割れおよび曲げ降伏が初めに発生した層とその時のベースシア係数(それぞれ、 C_c 、 C_y)を示す。図3、図4に示す5Modelと14Modelの各層のX方向の水平剛性からもわかるように、5Modelの各層の剛性は小さいことが分かるが、各層のいずれかの部材が初めに塑性化するときの層間変形角は、5Modelと14Modelの多くの層で1/200 rad (0.005 rad) 前後と大きな差はないことが分かる。

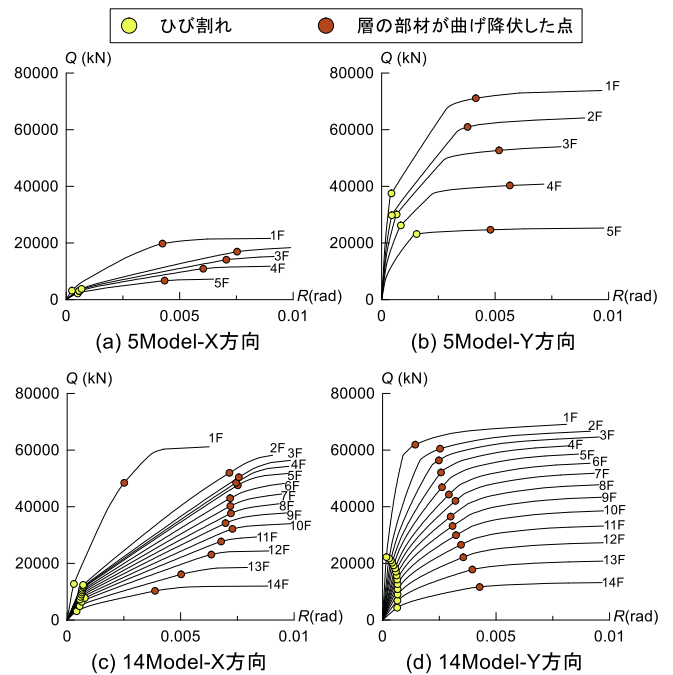


図5 静的増分解析

表3 各モデルのひび割れおよび降伏時のベースシア係数

		5Model		14Model	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向
ひび割れ	層	1層	2層	1~10層	全層
	C_c	0.06	0.63	0.077	0.13
降伏	層	2, 3層	2層	1層	8, 9層
	C_y	0.36	1.30	0.29	0.31

3 地震応答解析

3.1 入力地震動

本報で対象とする入力地震動は、Hachinohe(1968)EW成分を位相特性とし、コーナー周期0.64s以降で擬似速度応答スペクトル pS_r (減衰定数 $h=5\%$)が80 cm/sで一定となる告示波(以降、ART HACHI)とする。地震応答解析には、ART HACHIの0.1倍、0.5倍、1.0倍波を用いる。図6にART HACHIの1.0倍波の加速度の時刻歴波形を示す。また、図7にART HACHIの1.0倍波の $h=5\%$ 時の速度応答スペクトル S_v と $h=10\%$ 時のエネルギースペクトル V_E を示す。

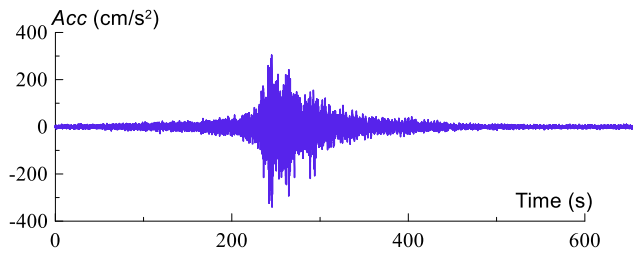


図6 入力地震動の加速度波形(1.0倍)

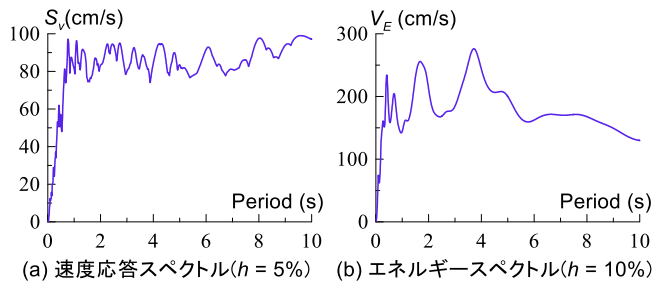


図7 入力地震動スペクトル(1.0倍)

3.2 解析結果

図8に5Modelと14ModelのX方向とY方向にART HACHIの0.1倍波、0.5倍波、1.0倍波を入力したときの層間変形角 R の高さ方向分布を示す。図中には、各層のいずれかの部材にひび割れが発生したときと各層のいずれかの部材に曲げ降伏が発生したときの層間変形角の高さ方向分布を併せて示す。

5ModelのX方向では、ART HACHIの0.1倍波を入力したときは、多くの層で最初の部材にひび割れが発生した程度で、0.5倍波を入力したときは、すべての層でひび割れが発生しているが、降伏は発生しておらず、1.0倍波を入力したときは、すべての層で降伏が発生していることが分かる。5ModelのY方向は、剛性が非常に大きいため、ART HACHIの1.0倍波を入力したときでも、すべての層でひび割れも発生していないことが分かる。

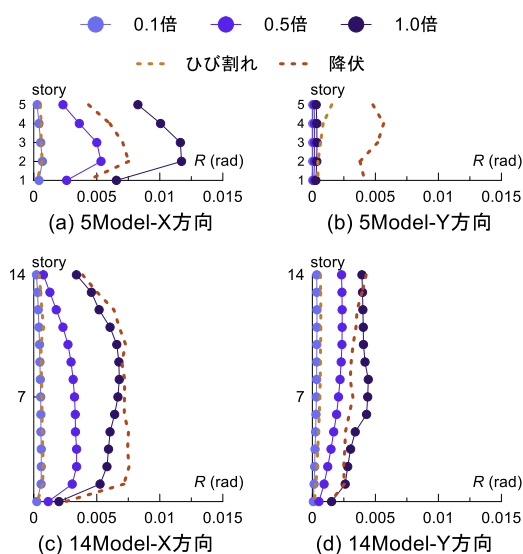


図8 14Model-Y方向の高さ方向分布

14ModelのX方向では、ART HACHIの0.1倍波を入力したときは、すべての層でひび割れは発生しておらず、0.5倍波と1.0倍波を入力したときは、すべての層でひび割れが発生しているが、降伏は発生していないことが分かる。14ModelのY方向では、ART HACHIの0.1倍波を入力したときは、すべての層でひび割れは発生しておらず、0.5倍波を入力したときは、すべての層でひび割れが発生しているが、降伏は発生しておらず、1.0倍波を入力したときは、多くの層で降伏が発生していることが分かる。

3.3 建物損傷評価手法の提案

本報で想定しているセンサーから得られる加速度および速度の最大値を用いて式(1)により、 i 層における周期 T_{eqi} を推定する。

$$T_{eqi} = 2\pi \frac{PFV_i}{PFA_i} \quad (1)$$

ここで、 PFA_i は建物の i 層の応答波における最大絶対加速度、 PFV_i は建物の i 層の応答波における最大絶対速度である。図9に PFA および PFV の例として、14ModelのX方向にART HACHIの1.0倍波を入力したときの1層の絶対加速度および絶対速度の時刻歴波形を示す。

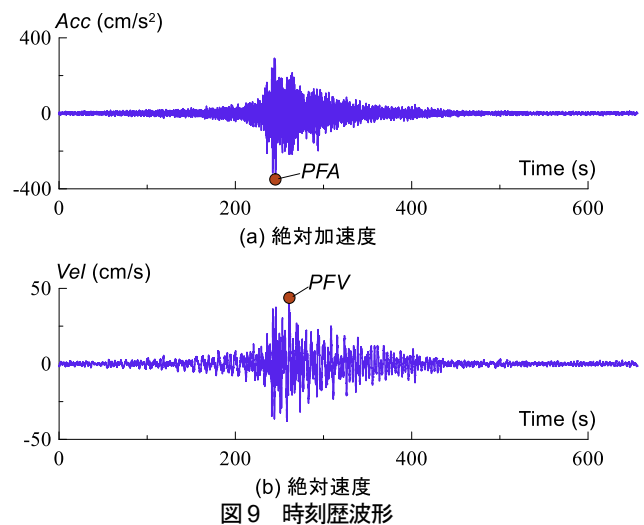


図9 時刻歴波形

図10に、5Modelと14ModelのX方向およびY方向にART HACHIの0.1倍波、0.5倍波、1.0倍波を入力したときの T_{eq} の高さ方向分布を示す。図中の T_{eq} の高さ方向分布の横軸に、各モデルの各方向における1次固有周期 T_1 を▲印で示している。

建物モデルが1次モードで振動している場合、多くの層で最大加速度と最大速度から求まる周期は建物の1次固有周期とほぼ一致することを確認している(附録A)。しかし、図10より、本報での地震応答解析では、高次モードの影響により、各層の最大加速度と最大速度から求まる周期はばらつきが生じていることが分かる。図10より、5Modelと14ModelのX方向において、入力地震動の倍率が大きく、建物の応答が大きくなるほ

ど、 T_{eq} が長くなる層が多くあることが分かる。入力地震動の倍率が大きく、建物の応答が大きくなり、損傷などが発生することで、建物の剛性が低下することで、周期 T_{eq} は長くなると考えられる。

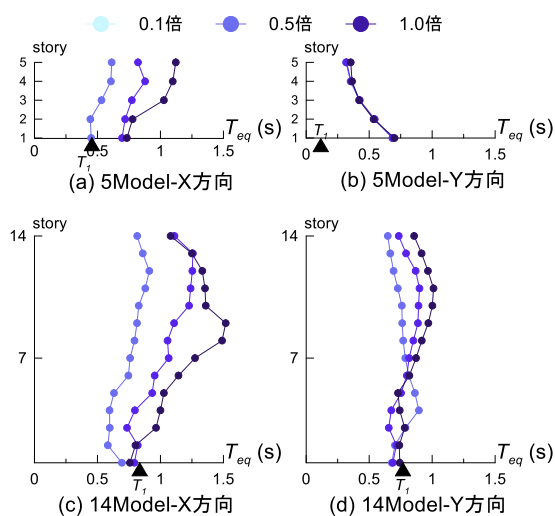


図 10 T_{eq} の高さ方向分布

3.2 節で示す地震応答解析結果より、剛性が非常に大きく、損傷は発生していないと考えられる 5Model の Y 方向では、入力地震動の倍率の大きさにかかわらず T_{eq} は全層でほぼ一致していることが分かる。また、14Model の Y 方向では、建物モデルの下層では、入力地震動の倍率が大きいほど T_{eq} が大きくなるといった傾向は見られなかったが、7 層より上の層では、入力地震動の倍率が大きいほど T_{eq} が大きくなることが確認された。

4 まとめ

本報では、絶対加速度および絶対速度の最大値のみが得られる簡易的なセンサーが建物の各層に設置されている場合を想定し、最大絶対加速度と最大絶対速度のみから建物の固有周期を推定し、その変化と建物損傷の程度の関係について分析した。

その結果、5 階建ての RC 造建物モデルと 14 階建ての RC 造建物モデルの桁行方向に入力する地震動の倍率が大きく、建物の応答が大きくなるほど、多くの層で最大加速度と最大速度から推定される周期が大きくなることを確認した。入力地震動の倍率が大きく、建物の応答が大きくなり、損傷などが発生することで、建物の剛性が低下し、周期が大きくなると考えられる。

今後は、このように地震動やその応答などの加速度等の時刻歴波形を記録せず、最大値などの値のみが得られる簡易的なセンサーを用いて、目視では判断が難しい損傷の程度を推定する手法の構築についての検討を行う。

参考文献

- 1) 日本建築学会：逃げないですむ建物とまちをつくる一大都市を襲う地震等の自然災害とその対策一、技報堂出版、2015 年
- 2) 東京都総務局総合防災部防災管理課：“帰宅困難者対策ハンドブック・帰宅困難者対策条例の概要リーフレット”、東京都防災ホームページ
https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_001/000/939/japanese_01.pdf
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，一般財団法人 日本建築防災協会，2005 年
- 4) 板生清：構造物モニタリング技術の開発と応用《普及版》，株式会社シーエムシー出版，2020 年
- 5) 財団法人 日本建築防災協会：構造設計・部材断面事例集，2007 年
- 6) 建築構造物の構造解析・振動解析プログラム RESP-D 利用者マニュアル（計算編）

附録 A

14Model の X 方向と等しい重量および剛性を有するせん断モデルを作成し、1 次固有周期の正弦波を用いて動的解析を行う。

せん断モデルの質点数は 14Model の階数と同じとしている。各階の重量を各質点の重量とし、図 5(c)に示す静的増分解析の 1 ステップ目の層せん断力 Q と層間変形角 R をもとに、せん断モデルの各質点を結ぶばねの剛性とする。また、せん断モデルの各質点を結ぶばねは弾性とする。

せん断モデルの 1 次固有周期は、0.838 s となり、14Model の X 方向の 1 次固有周期とほぼ一致した。周期がせん断モデルの 1 次固有周期である 0.838 s，最大加速度 50 cm/s^2 で 50 周期の正弦波を入力する。

図 A-1 にせん断モデルに 1 次固有周期の正弦波を入力したときの T_{eq} の高さ方向分布を示す。図中の T_{eq} の高さ方向分布の横軸に、せん断モデルの 1 次固有周期 T_1 を▲印で示している。図 A-1 より、多くの層で一致していることが分かる。

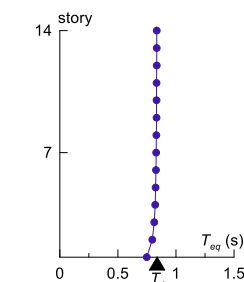


図 A-1 T_{eq} の高さ方向分布

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 大学院生

*2 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士（工学）

*3 東京工業大学未来産業技術研究所 助教 Ph.D

Gaduate Student, Tokyo Institute of Technology

Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng

Assistant Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D