

主要な大都市において観測された東北地方太平洋沖地震の
強震動に対する超高層建物の揺れの時間長さの考察

池田 雄一*

**A Study on Time of Length of Shake on the Super High-Rise Building to Strong Ground
Motion Records of the 2011 Tohoku-Chiho Taiheiyo-Oki Earthquake Observed in the Big City**

Yuichi IKEDA

Summary

This study considered time of length of the shake on the super high-rise building in strong ground motion on the 2011 Tohoku-chiho Taiheiyo-Oki earthquake. The author analyzed the earthquake response analysis using the strong ground motion was observed Furukawa and Sendai in Miyagi, Inage and Urayasu in Chiba, Tatsumi and Shinjuku in Tokyo, Yokohama in Kanagawa, Kiyosu in Aichi, Konohana in Osaka on the major urban site of Japan. As a result of earthquake response analysis, the time of length of the shake on the building super high-rise than duration of a seismogram on the ground was long time.

Keywords: the 2011 Tohoku-Chiho Taiheiyo-Oki Earthquake, Super High-Rise Building,
Time of Length of the Shaking

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の強震動は、東北地方から遠く離れた東京・新宿の高層・超高層建物を揺らし、さらに震源から750km以上も離れた大阪・此花においても超高層建物が大きな揺れに襲われた¹⁾。

超高層建物を大きく揺らした原因の一つとして考えられるものが強震動に含まれる長周期地震動である。長周期地震動が大きくなる要因は、建物の建設されている地下構造にあり、堆積層の厚い沖積平野や埋立地の軟弱地盤において、長周期の振幅が大きくなりやすいためである。長周期地震動に襲われた高層・超高層建物の室内では、揺れによる家具の転倒・移動が問題となると同時に、居住者や使用者が地震時に建物の揺れによって避難行動を取ることが難しくなることが考えられる。2011年東北地方太平洋沖地震の高層・超高層建物における室内の家具の転倒・移動の問題、行動難度に関する研究については、多くの報告がなされている^{例えば2)、3)}。

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動による高層・超高層建物の揺れの特徴の一つに、強震動による建物の揺れの時間の長さがある。本地震はMw9.0の地震規模の大きさにより、長い時間建物が揺れ続いたことが挙げられる。先に述べた研究³⁾では、将来南海トラフで発生する可能性が指摘され

* 高知工業高等専門学校環境都市デザイン工学科准教授

ている東海・東南海・南海連動地震による東京都・新宿の強震動を予測し、その予測地震動を入力地震動として超高層建物に入力した場合、室内では行動に支障が生じる状態の時間長さが、5分程度続くという検討結果もある。既往の家具の転倒・移動による研究では、床加速度応答や床速度応答量の最大振幅値により、家具の転倒の有無や家具の移動距離について検討がなされるケースが多かった。しかし2011年東北地方太平洋沖地震のように地震規模の大きな巨大地震の場合、室内の居住者や使用者の避難行動を考えると、建物の揺れの長さを考慮することも耐震工学上、重要な課題であると考えている。そのためには、高層・超高層建物の揺れの時間長さについて、どの程度の時間揺れが続いたかを把握することが重要である。

そこで本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震において東北地方、関東地方、東海地方及び近畿地方の主要な大都市において、観測された強震記録を使用して、これらの強震動を解析用入力地震動として用い、超高層建物を対象とした地震応答解析を行って、先ず最初に2011年東北地方太平洋沖地震の強震動に対する超高層建物の揺れの時間長さについて定量的に把握する。次に、超高層建物の高さ方向（階数）の揺れの時間長さの違いを考察する。

2. 解析に用いた強震記録

解析に用いる強震記録は、宮城県の古川・仙台、千葉県の稲毛・浦安、東京都の辰巳・新宿、神奈川県横浜、愛知県の清洲、及び大阪府の此花の、以上9観測地点において地表で観測された強震動である。この強震動を選定した理由は、先の各観測地点は人口の多い大都市及びその近郊の地点であり、これらの観測地点は、経済活動が活発で高層・超高層建物が多く建設されている理由による。

本研究で用いる2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録を表1に示す。観測地点は、9地点の水平2成分合計18成分の強震記録である。表1に示す強震記録の中から、古川EW、辰巳EW、新宿EW、横浜5、清洲4及び此花5の合計6成分の速度応答スペクトルとエネルギースペクトルを図1に示す。

表1 解析に用いる強震記録^{注)}

地震名	No.	観測点	成分	最大加速度振幅	最大速度振幅	観測時間長さ (s)	備考
				(cm/s/s)	(cm/s)		
2011年 東北地方太平洋沖地震	1	FURUKAWA	NS	444.1	58.24	300	MYG006
			EW	571.5	90.43		
	2	SENDAI	NS	1517.2	74.26	300	MYG013
			EW	982.3	40.63		
	3	INAGE	NS	232.1	29.08	300	CHB024
			EW	203.2	31.25		
	4	URAYASU	NS	125.1	27.41	300	CHB008
			EW	157.3	30.34		
	5	TATSUMI	NS	219.3	29.53	300	TKY017
			EW	157.6	30.32		
	6	SHINJUKU	NS	192.4	17.55	300	TKY007
			EW	166.4	18.56		
	7	YOKOHAMA	4	209.4	23.00	300	KNGH10
			5	277.0	26.00		
	8	KIYOSU	4	16.1	5.00	298	AICH13
			5	15.9	4.25		
	9	KONOHANA	4	14.8	10.33	279	OSKH02
			5	16.1	10.58		

注) : 表1に掲載した強震記録は、独立行政法人防災科学技術研究所による強震記録観測網によって観測され、そして公開されたものである。なお、最大加速度振幅及び最大速度振幅は、著者の計算によって得られたものである。

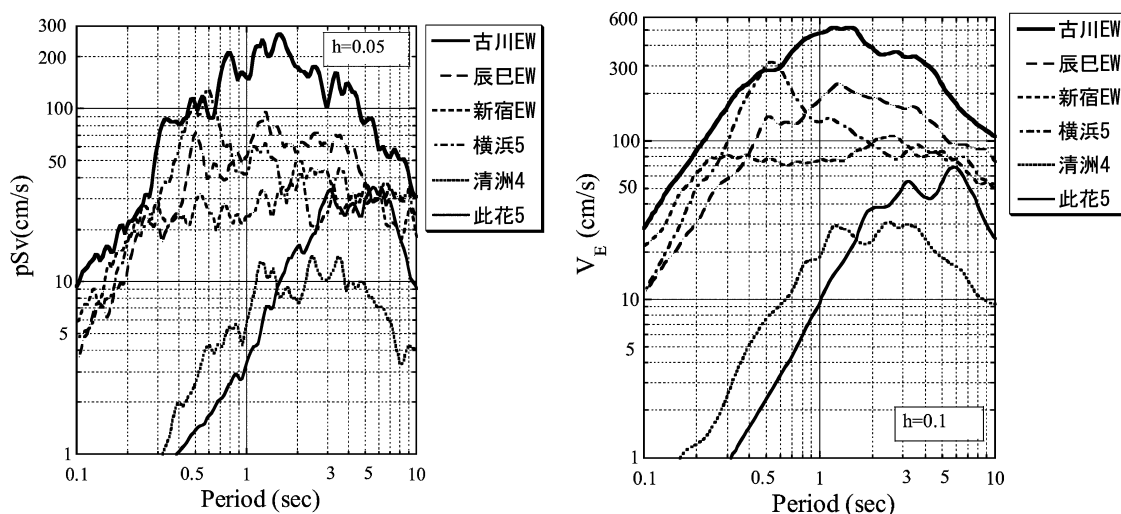


図1 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

3. 解析振動系モデル

対象とする超高層建物は、事務所建物を想定して鉄骨造29階建、鉄骨造39階建及び鉄骨造49階建とした建物解析モデルとする（以後、それぞれS29F、S39F及びS49Fと略称する）。建物解析モデルは、等価せん断型振動系モデルとする⁴⁾。建物の各階床重量は、10.1 (kN/m²) とし、梁降伏型架構を想定して、第1層のせん断力係数C_b（ベースシャー係数）を0.08（ただし、S49FはC_bを0.06）とし、高さ方向の剛性分布をA_i分布とした⁵⁾。このような純ラーメン架構を荷重増分法による静的弾塑性解析を行うと、設計層せん断力の1.28～2.0倍で弾性限耐力に、その弾性限耐力の1.16～1.35倍で終局耐力に達すると報告されている⁵⁾。よって、先に述べた研究報告⁵⁾やその他の研究資料を参考にし、本研究では設計層せん断力の1.5倍で弾性限耐力、弾性限耐力の1.2倍を終局耐力に設定した。

各層の復元力特性は、第1折れ点の変位 δ_1 を層間変形角の 1/300 に、第2折れ点の変位 δ_2 を層間変形角の 1/200 に設定し、第3折れ点の変位 δ_3 を層間変位角の 1/100 としたトリリニア型⁶⁾の復元力特性とした⁶⁾。

鉄骨造の超高層建物の一次固有周期T₁は、各階の平均高さHを4mとすると、おおよそT₁=0.1N（N：階数）という簡易式がおおよそ成立する⁵⁾。よって、S29Fは一次固有周期T₁が3秒、S39Fは一次固有周期T₁が4秒、S49Fは一次固有周期T₁が5秒となるように、先に初期剛性による固有値解析を行って、目標の周期に一致するよう各層の剛性を調整してから、地震応答解析を行っている。また、減衰定数は、初期剛性に対して2%の剛性比例型として解析を行った。

また、表2に各建物解析モデルの諸定数を示す。

表2 建物解析モデルの諸定数

構造	階数	各階床重量 (kN/m ²)	各階高さ (m)	ベースシャー 係数 C _b	一次固有周期 T ₁ (秒)	剛性分布	復元力特性	第1折れ点の	第2折れ点の	第3折れ点の	減衰定数
								層間変形角	層間変形角	層間変形角	
S造	30F	10.1	4	0.08	3.0	A _i 分布	トリリニア型	1/300	1/200	1/100	2%
	40F			0.08	4.0						
	50F			0.06	5.0						

4. 予備地震応答解析

高層建物や免震建物の地震応答解析に用いられる汎用地震動のEl Centro 1940 NS及びEW、 Taft 1952 NS及びEW、 Hachinohe 1968 NS及びEWの各成分の最大速度振幅 V_{max} が50cm/sになるように加速度振幅を拡幅し、これらを入力地震動とした予備地震応答解析を行った。S29F、S39F及びS49Fの各建物解析モデルの層間変形角が各層おおよそ同じになるようにするとともに、各建物解析モデルにおいて、塑性率が2以下になるように、予備地震応答解析を繰り返し行って、地震応答性状を確認した。図2-(a)、図2-(b)及び図2-(c)に、S39Fの最大加速度、最大変位及び塑性率を示す。図2-(b)から、El Centro 1940 EWやTaft 1952 NS及びEWの高層階における変位応答量が、他の強震動に比して比較的大きい応答量となっている。

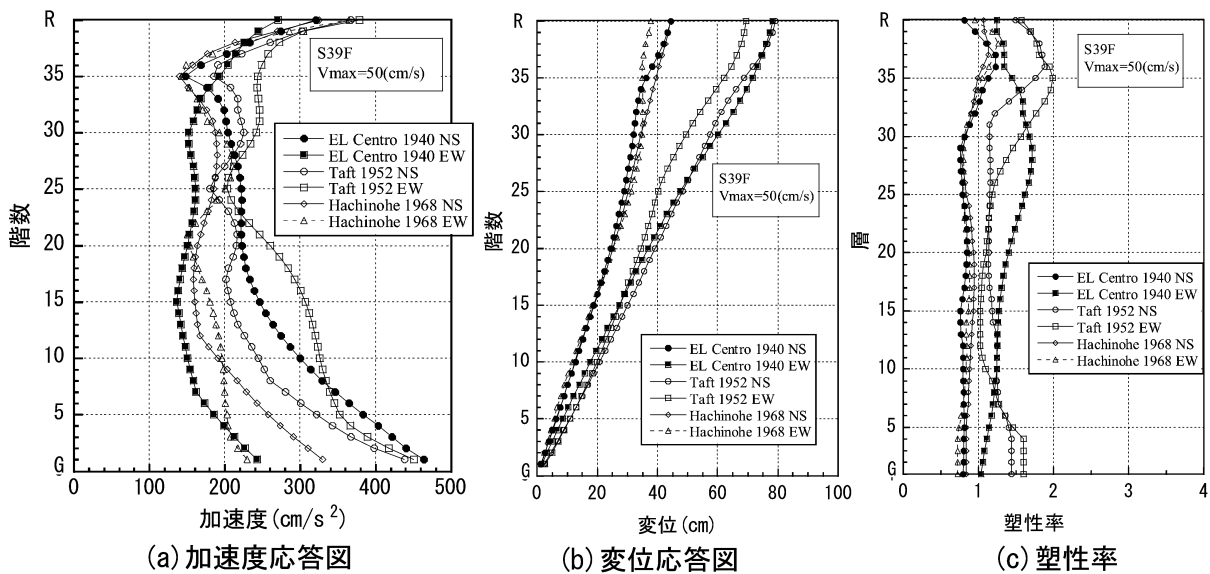


図2 予備地震応答解析の地震応答解析 (S39F)

5. 本研究における超高層建物の揺れの時間長さの定義

本研究では、超高層建物の揺れの時間長さを、地震応答解析によって得られた各階質点の時刻歴上の応答加速度振幅2乗に解析時間の刻み時間 Δt を乗じて、解析時間(観測記録時間)にわたって積分した値を計算し、その値に対して5%~95%の時刻歴上の要する時間長さを、各階の揺れの時間長さ a_{td} と定義する。各階質点の加速度振幅2乗に刻み時間 Δt を乗じて積分した値の時刻歴を、基準化した時刻歴を図3-(a)に示す。図3-(a)には新宿NSのS29Fの10階、20階及び屋上階のそれぞれの揺れの時間長さ a_{td} を示している。図から10階の a_{td} は155秒、20階の a_{td} は150秒及び屋上階の a_{td} は150秒となる。このように算出した新宿NSのS29F高さ方向(階数)の揺れの時間長さを、図3-(b)に示す。図3-(b)にある凡例地表(●)は、建物の揺れの時間長さと同様の考え方によって、地表の加速度振幅2乗に観測刻み時間 Δt を乗じて観測記録時間にわたって積分した値の5%~95%に要する時間長さ、既往の継続時間 a_{td} (地表)⁷⁾である。地表の揺れの長さ(継続時間) a_{td} (地表)よりも建物の5階以上の揺れの時間長さ a_{td} は、おおよそ2倍程度である。新宿NSの場合、地表の揺れの時間長さよりも建物の各階の揺れの時間長さは長くなり、地表の揺れが小さくなくても超高層建物は揺れ続けていると考えられる。

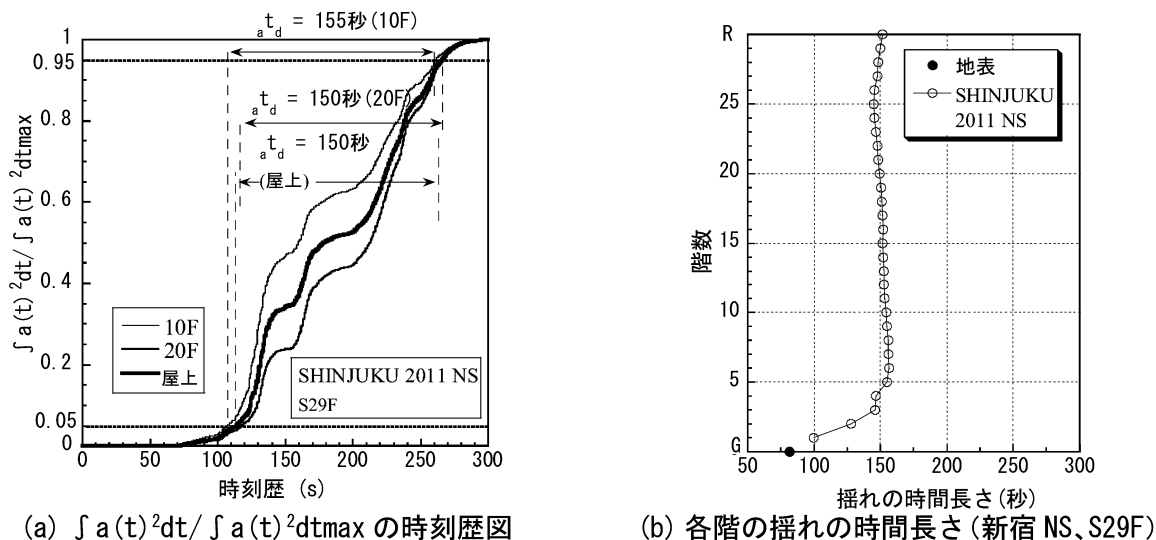


図3 本研究の揺れの時間長さに関する説明図

ここで本研究では、超高層建物の揺れの時間長さを先に述べた考え方で定義している。そのため既往の研究による家具の転倒・移動に及ぼす床加速度応答の最大値等については、検討を行っていない。本研究の揺れの時間長さの定義によると、例えば建物の揺れの時間長さは長いものの、建物の地震応答の振幅が小さければ、居住者や使用者の避難行動に支障をもたらさない可能性も考えられる。但し、人間の振動の感覚⁸⁾はバラツキも大きく、2011年東北地方太平洋沖地震のように連動した巨大地震では、複数の主要動部分が時間差を有して建設地に到達すること等をふまえると、地震動による建物の揺れは様々なケースが考えられる。その対応策を考えるためにも2011年東北地方太平洋沖地震の揺れの時間長さを定量的に把握することは、将来発生する可能性のある巨大地震に遭遇したとき、超高層建物の揺れの時間長さに関する一つの技術資料になるという考えに基づき本研究を実施した。

6. 各観測点における超高層建物の階毎の揺れの時間長さ

各観測点におけるS29F、S39F及びS49Fの階の揺れの時間長さを図4-1及び図4-2にわたって示す。図の凡例にあるGMは地表の揺れの時間長さ(図3-(b)と同様、継続時間)を示している。図4-2のS29F此花5、S39F及びS49Fの此花4・5を除けば、地表の揺れの時間長さ(継続時間)よりも超高層建物の揺れの時間長さは長くなっている。図4-1の古川NSはすべての建物モデルにおいて、中間階以上の揺れの時間長さが200秒を超える時間長さとなっている。図4-2の横浜5は、低層階から10階まで揺れの時間長さが急激に大きくなる傾向にある。図4-1の新宿NS・EWは、S39F及びS49Fにおいては、10階以上において150秒以上の揺れの長さになっている。一方、稲毛及び浦安については、建物モデルの違いによる揺れの時間長さの大きな違いは見られない。

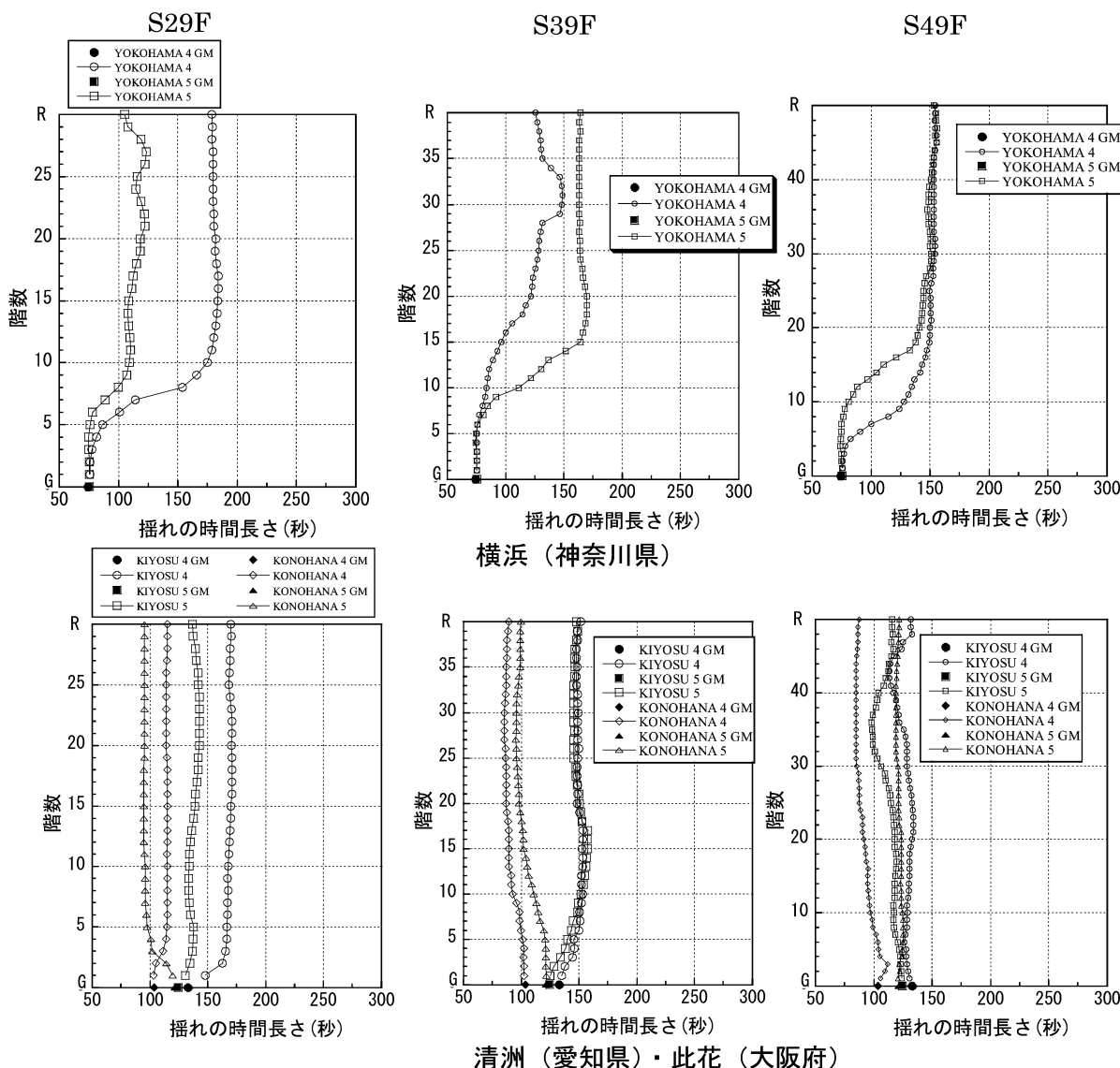


図 4-2 揺れの時間長さ

7. 地表の揺れの時間長さ（継続時間）に対する超高層建物の揺れの時間長さ

図 5 は、各階の揺れの時間長さを地表の揺れの時間長さ（継続時間）で除したものを階毎にプロットしたものである。よって図 5 は地表の揺れ（継続時間）に対する、各階の揺れの時間長さの比となる。

図 5 -(a)に示す古川EWでは、地表の揺れの長さに対して建物モデル毎の揺れの時間長さの形状は類似しており、S39FとS49Fの揺れの時間長さが一番長い階では、地表の2倍程度となっている。図 5 -(b)の辰巳EWは、S39Fモデルの高層階の揺れの時間長さが地表の揺れの長さの1.4倍程度と建物モデルの中で一番長くなっている。図 5 -(c)の新宿EWは、建物モデルに関係なく10階以上の揺れの時間長さが10階以下に比べて、かなり長くなっており、S49Fは地表の2倍以上の揺れの時間長さとなっている。

図 5 -(d)の横浜 5 は、建物モデル毎の揺れの時間長さの形状は類似しているが、新宿EWとは違って、低層階から急激に増加して揺れの時間長さが一定となる階まで、その階は解析建物モデルに

よって相違が見られ、S39Fの揺れの時間長さが各建物解析モデルの中で一番長くなり、地表の2倍以上ある階が見られる。図5-(e)の清洲4では、地表に比べて揺れの時間長さは他の観測地点に比べて長くはないものの、S29Fが他の建物モデルに比して長くなり、地表の約1.25倍程度となっている。図5-(f)此花5は、地表に比べて建物モデルの揺れの時間長さが長くなることはほぼ見られず、S29F及びS39Fでは逆に、地表に比べて揺れの時間長さは短くなっている。また図5-(e)及び(f)の清洲4・此花5では、他の観測地点に比べて高層階による揺れの時間長さの大きな違いは見られない。これは2011年東北地方太平洋沖地震の震源から遠方にあるため、短周期の地震動成分は減衰して、長周期の地震動成分により超高層建物を揺らし続けたものと考えられる。

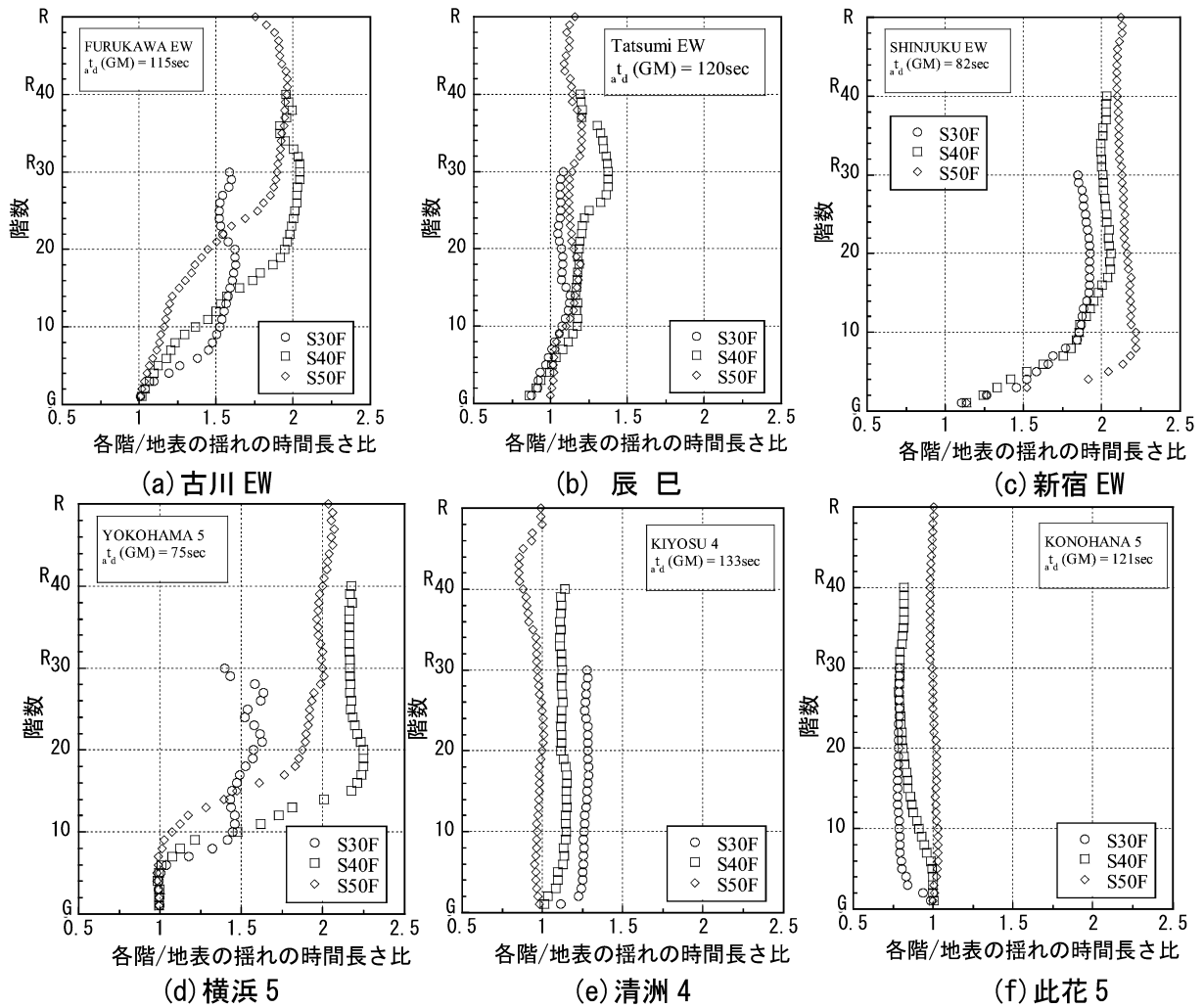


図5 地表の揺れの時間長さ（継続時間）に対する各階の揺れの時間長さの比

8. 結 語

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震において、主要な大都市で観測された強震動を使用して、超高層建物の地震応答解析を行い、超高層建物の揺れの時間長さについて検討を行った結果、下記に示すような揺れの時間長さに関する地震応答性状が得られた。

- 1) 各解析建物モデルのS29F、S39F及びS49Fの東北地方太平洋沖地震の強震動に対する、揺れの時間長さを定量評価した。

- 2) 震源域から遠方にある観測地点（清洲・此花）を除けば超高層建物の高さ方向の揺れの時間長さは、建物解析モデルと階によって、揺れの時間長さが200秒を超えることもある。
- 3) 地表の揺れの長さに比べて、清洲4及び此花5を除く、他の強震動による超高層建物の揺れの時間長さは大きくなり、地表の揺れの長さ（継続時間）の2倍を超える揺れの時間長さを有する超高層建物の階もある。
- 4) 超高層建物の階の揺れの時間長さは、観測地点の強震動特性や建物モデルによって、その高さ分布形状が類似したり、逆に高さ分布形状が大きく変わる場合もある。

謝 辞

解析に用いた強震記録は、独立行政法人防災科学技術研究所による強震記録観測網によって、公開されたものである。茲に記して関係機関に謝意を表する次第である。

本研究の超高層建物揺れの時間長さに関する研究は、国際理工情報デザイン専門学校建築設計科平成25年度卒業生 島田兼吾君が平成25年度卒業研究⁹⁾にて研究着手し、その後、現国際理工情報デザイン専門学校建築士専攻科生 綱川凌太君（平成26年度卒業研究¹⁰⁾によって研究の進展がなされた。この研究は両君学生の貢献によるところが大きい。茲に記して、御礼申し上げる次第である。

なお、この研究については、平成27年度高知工業高等専門学校環境都市デザイン工学科5年生池田研究室在籍の学生がさらに研究を進めているところである。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：4.1.4長周期地震動評価 第4章強震観測記録に基づく地震動特性と建築物の挙動、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告、国土技術政策総合研究所資料、第674号、2012年3月、建築研究資料、第136号、2012年3月、pp.4-1-10-4-1.15.
- 2) 肥田剛典、永野正行：アンケート調査と強震記録に基づく2011年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の室内被害－不安度と行動難度および家具の転倒率の検討－、日本建築学会構造系論文集、第677号、2012年7月、pp.1065-1072.
- 3) 金子美香：家具の転倒率関数を用いた住宅内の地震被害推定、日本建築学会構造系論文集、第693号、2013年11月、pp.1879-1886.
- 4) 北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門第二版、第6章 弾塑性応答解析モデル、彰国社、2009年4月、pp.75-79.
- 5) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、日本建築学会、2007年12月、pp.154-169.
- 6) 森田高市、長谷川隆、大川出、斉藤大樹：超高層鉄骨造建物の平均化した質点系モデルを用いた長周期地震動による地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、2011年8月、pp.1029-1030.
- 7) 日本建築学会：3.2.3.地震動の継続時間、地震動と地盤－地盤震動シンポジウム10年の歩み－、日本建築学会、1983年7月、pp.69.
- 8) 高橋徹、貞弘雅晴、斉藤大樹、小豆畑達哉、森田高市、野口和也、箕輪親宏：長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、2007年8月、pp.497-498.

- 9) 島田兼吾：長周期地震動が超高層建物の揺れに与える影響、－長周期地震動の視覚化による考察－、国際理工情報デザイン専門学校建築設計科平成25年度構造部門卒業研究論文、2014年3月
- 10) 綱川凌太：超高層建物の地震時の揺れの時間長さと居住性に関する研究、－2011年東北地方太平洋沖地震において観測された強震動による考察－、国際理工情報デザイン専門学校建築設計科平成26年度構造部門卒業研究論文、2015年3月

(2015年10月30日受理)