

観測記録に基づく合理的上下地震応答評価法に関する研究

野木 淑 裕 野 畑 有 秀
田 中 清 和 藤 森 健 史

Research on Rational Vertical Seismic Response Evaluation Method Based on Observation Record

Yoshihiro Nogi Arihide Nobata
Kiyokazu Tanaka Takeshi Fujimori

Abstract

It is important to evaluate vertical seismic motion rationally to prevent falling of ceilings and to reduce vibration of long-span beams. In evaluating the response of structures, the proper evaluation of input seismic motion has a great influence on its result. Horizontal-vertical ratios are used in practice to make vertical motion. In this paper, we analyzed the ratio based on the observation records accumulated for years and revealed a possibility that the seismic level can be reduced from the instinctive ratio. We also conducted seismic observation at a long-span beam in a high-rise building and clarified its vibration characteristics, then evaluated its response using three-dimensional frame model analysis. Finally, frame analysis considering soil-structure interaction was performed to show its effect.

概 要

建築物の天井脱落対策やロングスパン梁の振動抑制対策において、上下地震応答を合理的に評価することは重要である。上部構造物の地震時応答を評価するにあたっては、入力地震動の評価がその結果に大きく影響する。上下方向の地震動評価には建築研究所・日本建築センターの水平上下比が実務上よく用いられるが、本論文ではこれまでに蓄積された観測記録に基づく水平上下比を分析し、一部の周期帯で日本建築センターの水平上下比からレベルを低減できる可能性があることを示した。また、超高層建築物のロングスパン梁を対象とした地震観測を行い、ロングスパン梁の振動特性を明らかにした。あわせて、立体フレームによる応答解析結果と観測記録の比較を行い、最後に地盤連成を考慮した立体フレーム解析によりその効果を示した。今後、より大きな観測記録が得られることで、実務設計への適用を見据えた検討等が可能となると考えられる。

1. はじめに

公共性の高い大型建築物やより高い安全性を求められる建築物の耐震設計においては、水平方向に加えて上下（鉛直）方向の地震動（以下、上下動と記す）について検討される。上下動の検討は、免震構造の建物における免震部材の引抜き力、ロングスパンの梁の応答、大空間構造物における内外装材の落下対策¹⁾、高い安全性が求められる発電所などにおいて行われる。

近年、オフィスビルでは執務空間レイアウトの自由度や視認性の向上を目的に、一般的な長さ7～8m程度の梁では無く、ロングスパン梁を用いて柱間スパンを長く取る建物が多くみられる。一方で、ロングスパン梁の中央部は地震などで振動すると、梁端部における上下動と比べて振動が大きくなることが知られている。加えて、大地震が発生する度に振幅レベルが増大されてきた設計用入力地震動と、建物高層階における増幅²⁾とにより、梁中央の上下動が大きな評価結果となり、設計が難しくなっているという課題がある。

そのため、ロングスパン梁の実挙動を把握する事は地震時安全性の確保や設計の妥当性検証に有用であるが、ロングスパン梁中央部における地震時の振動の観測事例はみられず、構造設計で用いている応答解析が実現象をどの程度再現できるのかを把握することは困難であった。

一方で、上部構造物の地震応答評価にあたっては、入力地震動の評価がその結果に大きく影響する。平成12年建設省告示1461号第四号（以下、告示と記す）においては上下動について適切に考慮するよう記載されているが、具体的な設定方法は定められておらず、水平成分のスペクトルに建築研究所・日本建築センター（BCJ）の水平上下比³⁾（以下、建築センター水平上下比と記す）を乗じて算出する手法がよく用いられる。しかし、建築センター水平上下比の策定当時と比べて、近年、国による地震観測網の整備が進み、多数の地震観測記録が蓄積されてきており、これらを用いることで水平上下比を見直す余地があると思われる。

そこで本検討では、これまでに蓄積された地盤における観測記録の水平上下比にみられる特徴の整理と比較に

より入力地震動の評価を行った。次に、超高層建築物のロングスパン梁を対象として地震観測を実施しロングスパン梁の振動特性を明らかにした。最後に、立体フレーム解析によりロングスパン梁の上下動の評価を行った。また、立体フレームに地盤ばねを付加することで、地盤-建物の動的相互作用による上下動への影響を確認した。

2. 観測記録にもとづく水平上下比の評価

2.1 既往の水平上下比の概要

設計用入力地震動の指針においては、水平動と比較して不明な点が多く直接の被害事例が少ない上下動の大きさを単純に水平動の1/2程度とするものも多かった⁵⁾。しかし、日本建築センターによる「設計用入力地震動作成手法技術指針(案)」⁴⁾では、全周期帯で一律に係数を掛けるのではなく、短周期領域で増幅する事を考慮した上下動成分係数(建築センター水平上下比)が提案されている(Fig. 1)。

建築センター水平上下比は宮城県仙台市の工学的基盤相当の強震観測点(地表)4地点における地震観測記録17個を用いて、その水平動と上下動の加速度応答スペクトル(減衰5%, 2次元スペクトル)の比をもとに作成されている。レベル2地震動の水平上下比は周期0.1秒で振幅が0.85と最大になり、0.2秒より長周期側で振幅が0.5で一定となる。17地震記録はマグニチュード3.3~7.2程度、震源距離は20~280km程度であり、観測記録の振幅レベルの明示はないが幅があると推測できる。なお文献1においては、マグニチュードの影響は小さく、震源距離が長くなるほど水平上下比が平坦になると分析されている。

2.2 建築センター水平上下比との比較に用いる観測記録の選定

検討には、防災科学技術研究所による地震観測網K-NETとKiK-netによる観測記録を用いた。設計で上下動を検討する際も、水平動と同様に大きな振幅レベルを検討対象とすると考えられるため、レベル2程度の地震動を選択して建築センター水平上下比と比較する。

建築センター水平上下比は工学的基盤に対して定められているため、防災科学技術研究所より公開されているK-NETとKiK-net観測点の地盤構造をもとに工学的基盤相当の観測点を選定した。具体的には、地表で岩盤が露出している事、もしくは岩盤上部の軟弱地盤が極めて薄い事、地表からN値 ≥ 50 である事などを条件とし、36観測点を選定した。なおKiK-netはK-NETよりも硬質な地盤の場所に設置される事が多いが、地盤調査が深度方向に比較的粗い地点は対象外とした。

次に、対象観測点で得られた地震記録の中から振幅レベルの大きい記録を選定した。記録の振幅レベルについては様々な指標で考えられるが、該当記録数の確保と大地震に近い振幅のバランスを考慮して、本研究では計測震度 ≥ 5.0 を目安として選定した。さらに地震記録波形の

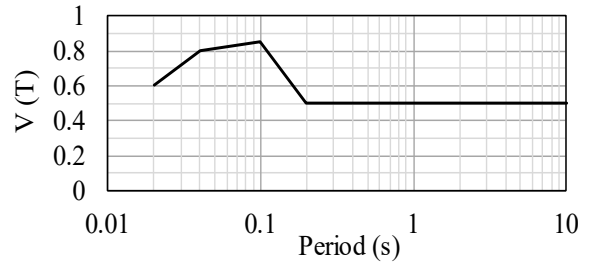
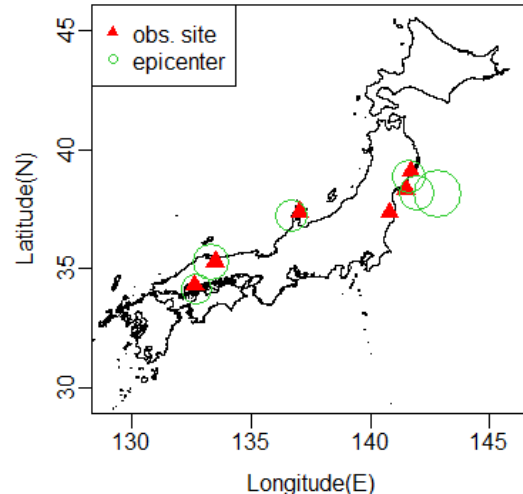


Fig. 1 日本建築センターの上下動成分係数 $V(T)$ ⁴⁾ Horizontal-Vertical Ratio $V(T)$ by BCJ

Table 1 水平上下比算出に使用した地震観測記録 Seismic Observation Records Used to Calculate the Horizontal-Vertical Ratio

観測点名	日付	時刻	気象庁 マグニ チュード	震源 深さ (km)	震央 距離	PGA (最大成 分, cm/s^2)	PGA (上下, cm/s^2)	計測 震度
K-NET江府	2000/10/6	13:30	7.3	9	13	725	404	5.8
KiK-net奥	2001/3/24	15:28	6.7	46	20	336	265	5.2
K-NET大船渡	2003/5/26	18:24	7.1	72	29	367	155	5.1
KiK-net柳田	2007/3/25	09:42	6.9	11	35	359	204	5.4
K-NET牡鹿	2011/3/11	14:46	8.4	24	121	921	254	5.6
K-NET川内	2011/3/11	14:46	8.4	24	199	452	271	5.5
K-NET牡鹿	2011/4/7	23:32	7.2	66	38	1356	302	5.4



(円の大きさはマグニチュードの大きさを表す)

Fig. 2 観測記録の観測点と震央 Observation Points and Epicenters of Observation Records

形状や既往研究⁶⁾をもとに不適と判断した記録を除外し、最終的に7記録を選定した(Table 1)。これらの記録は、加速度(上下成分) $\geq 100\text{gal}$ 、計測震度5.1~5.8(3成分)、気象庁マグニチュード ≥ 6.7 、震央距離 $\leq 200\text{km}$ 、震源深さ $\leq 72\text{km}$ であり、設計のレベル2地震動を若干下回る程度の振幅レベルを下限とするデータセットと言える。また7記録の地理的分布(Fig. 2)を見ると、観測点は宮城・岩手・福島・石川・鳥取・広島県に分布する。これらの事から、建築センター水平上下比と比較して振幅が大きく、かつ地域的偏りの少ない記録を選定できたと判断した。

2.3 観測記録の水平上下比

前節の7記録について、加速度応答スペクトル(減衰5%、

2次元スペクトル)を用いて水平上下比を算出した。Fig. 3に各記録の水平上下比, それらの最大(包絡形状)と平均+ σ と平均, および建築センター水平上下比を重ねて示す。

平均スペクトルは周期0.04~10秒の全周期で建築センター水平上下比を下回り, 周期0.5秒で振幅は最小となり0.2程度である。

平均+ σ の水平上下比においては, 周期0.3~2秒で建築センター水平上下比より小さく, 周期1秒付近では建築センター水平上下比よりも振幅が3割程度小さい。また最大(包絡形状)を見ると, 周期0.7~2秒の間で建築センター水平上下比よりも振幅が2割程度小さい一方で, 周期0.08秒以下や3秒以上では建築センター水平上下比よりも振幅が大きくなる傾向がある。

このように, 最大や平均+ σ の水平上下比を用いた場合でも対象とする周期帯によって地震動レベルを低減できる可能性があると言える。

3. 超高層建築物ロングスパン梁の上下動を対象とした地震観測

3.1 地震観測概要

ロングスパン梁の応答把握を目的として, 東京湾岸地域に建つ地上31階, 地下3階建ての鉄骨造建築物(一部SRC造)にて地震観測を実施した。基準階の平面は約70m×約45m, ロングスパン梁長さ約18m, 階高約4.1m, 高さ約140mである。

当該建物では1階梁端部と31階梁端部に既設地震計があり, 本検討で28階梁端部と28階梁中央に地震計を追加し, 計4箇所を観測を行っている(Fig. 4)。いずれも同機種種の3成分加速度計である。また, 1・28・31階梁端部の3箇所は平面的に同じ位置に設置されている(Fig. 5)。

3.2 観測記録の整理

2018年9月29日に地震観測を開始し, 2020年2月17日までの約1年5ヶ月で29地震を観測した。観測した地震の傾向としては, 観測地点から近い茨城県・千葉県・福島県周辺を震源とする記録が多い。東京湾・東京23区を震源とする地震は各1記録であった。最もマグニチュードが大きかった地震は2019年7月28日に三重県南東沖で発生した地震(Table 2における地震No.15)であった。

当該建物内4箇所の観測記録の一部について, 最大加速度をTable 2にあわせて記す。チャンネル名はX方向が建物短辺方向, Y方向が建物長辺方向, Zが建物上下方向である。また, 「28FX」は28階梁端部における短辺方向, 「28FCX」は28階梁中央における短辺方向を示す。

全記録のうち水平方向の最大加速度は, 2019年8月4日に発生した福島県沖の地震(地震No.16)で観測した12.0cm/s², 上下方向の最大加速度は2019年5月25日に発生した千葉県南部の地震(地震No.9)で観測した22.4cm/s²であった。

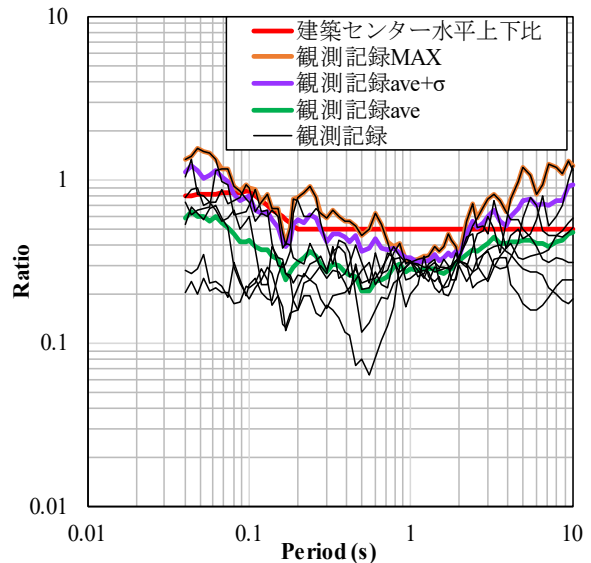


Fig. 3 観測記録と建築センター水平上下比
Observation Records and the Horizontal-Vertical Ratio by BCJ

4. 観測記録に基づくロングスパン梁応答の分析

4.1 地震観測結果の分析

前章で述べた地震観測記録を用いて, ロングスパン梁を中心に建物の振動特性について整理する。

はじめに, 地震観測位置における振動特性の差異を確認する。Fig. 6には全29記録の上下方向の最大加速度について, 1階と28階梁端および梁中央の関係をプロットした。この図は, 1:1の点線(1階と28階の加速度が等しい位置)よりも上側に位置する記録ほど, 1階に対する28階の振幅が増大していることを示す。28階梁端を黒丸, 梁中央を赤丸でプロットしているため, 1地震につき黒丸と赤丸が各1点プロットされる。28階梁中央のプロットは28階梁端より上方向に位置しており, 梁中央の振幅が梁端部と比較して大きい傾向が俯瞰できる。28階梁端の振幅は1階より大きい記録が多いが, 1階とほぼ同等もしくはそれ以下の記録もある。1階に対する28階梁端の比率は0.4~5.1倍, 28階梁端に対する28階梁中央の比率は1.4~2.9倍であった。

次に, 全29記録の中で上下方向の最大加速度を記録した2019年5月25日に発生した千葉県南部の地震(地震No.9)を例にとり, 地震観測位置による振動特性の差異を確認する。Fig. 7上段の加速度波形を見ると, 1階で3.9cm/s²程度であった地震波は28階梁端部と31階ではそれぞれ15.2cm/s², 15.6cm/s²であり, 建物低層から高層にかけて振幅の増大が確認できる。28階梁中央では22.4cm/s²と, 28階梁端からさらに振幅が増大しており, 28階梁端比で1.5倍, 1階比で5.8倍の振幅となり, 高層階のロングスパン梁中央における梁応答の増大が確認できる。

続いて, 同地震記録のフーリエスペクトル(Fig. 7下段)を見ると, 28階梁端・28階梁中央・31階の記録の周期0.4

Table 2 観測記録リスト (網掛けの濃さは振幅の大きさに対応)
Observation Record List (Color Depth of the Hatch Corresponds to the Amplitude)

No.	日付	時刻	震源	マグニチュード	深さ (km)	最大加速度(水平X方向, cm/s ²)				最大加速度(上下方向, cm/s ²)				②/①
						31階	28階 梁端	28階 梁中央	1階	31階	①28階 梁端	②28階 梁中央	1階	
1	2018/10/12	13:15	千葉県北東部	5.2	52	1.5	1.2	1.1	1.2	2.9	2.7	3.8	0.8	1.4
4	2018/11/27	08:33	茨城県南部	5.0	44	5.0	3.8	3.8	8.2	6.9	6.6	15.2	6.8	2.3
7	2019/01/14	13:23	茨城県南部	4.9	50	3.8	3.6	3.8	6.9	5.7	5.4	11.8	3.3	2.2
8	2019/01/18	21:46	茨城県南部	5.3	54	4.5	3.4	3.4	4.4	4.8	4.8	7.6	2.0	1.6
9	2019/05/25	15:20	千葉県南部	5.1	38	9.6	6.9	6.8	10.1	15.6	15.2	22.4	3.9	1.5
11	2019/06/01	07:58	千葉県北東部	4.7	35	3.7	2.7	2.8	3.9	4.3	4.2	9.2	2.0	2.2
13	2019/06/24	09:12	千葉県南東沖	5.2	61	3.8	5.7	5.7	9.1	10.2	10.0	15.4	4.6	1.5
15	2019/07/28	03:33	三重県南東沖	6.6	393	2.5	3.4	3.4	4.2	4.2	4.0	7.0	1.6	1.7
16	2019/08/04	19:24	福島県沖	6.4	45	12.0	6.8	6.8	7.0	9.9	9.7	17.1	2.2	1.8
26	2020/01/14	04:53	茨城県南部	4.8	46	4.7	4.6	4.6	7.0	11.3	10.9	18.6	6.7	1.7
27	2020/02/01	02:07	茨城県南部	5.3	63	5.9	5.4	5.3	6.3	10.2	10.0	19.8	2.8	2.0
29	2020/02/17	12:40	茨城県南部	4.4	40	1.0	1.4	1.5	1.9	2.5	2.3	4.7	0.9	2.0

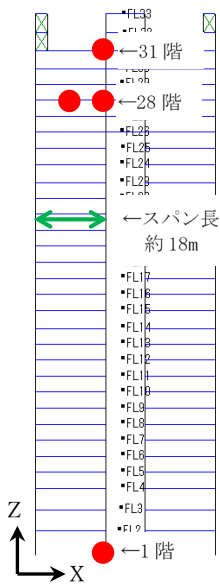


Fig. 4 地震計設置場所 (立面)
Seismometer Installation Location (Elevation)

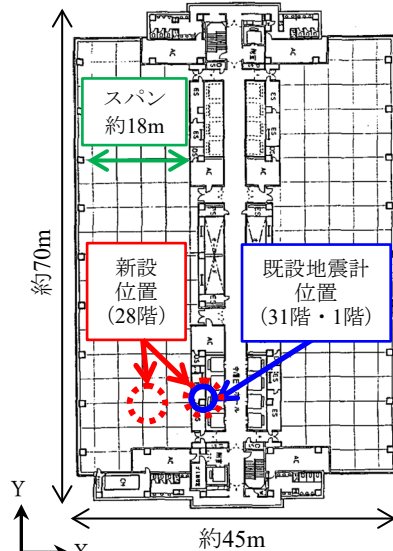


Fig. 5 地震計設置場所 (平面)
Seismometer Installation Location (Plan)

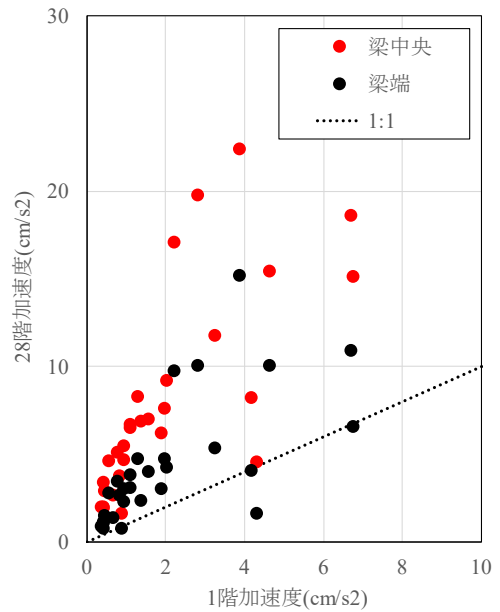


Fig. 6 1階と28階における上下動最大加速度の関係
Correlation between Vertical Peak Acceleration on the 1st and 28th Floors

秒付近で卓越が確認できる。この卓越は1階の記録にはみられないため、これが建物の低層階から高層階への上下動 (主に柱を介して伝播する振動) の卓越周期と考えられる。一方、28階梁中央の記録では周期0.2秒付近にも卓越がみられるが、28階梁端と31階の記録に卓越はみられないため、周期0.2秒付近がロングスパン梁の振動周期と考えられる。2019年5月25日の地震観測記録以外の記録においても、周期0.4秒付近および周期0.2秒付近で同様の卓越がみられることから、ロングスパン梁中央部の振動は周期0.2秒付近と判断した。

4.2 常時微動観測結果の分析

地震計で常時観測している連続記録を用いて、ロングスパン梁の平時の振動特性を確認する。

連続記録のうち、建物利用者が少なく振動が落ち着いていると考えられる夜間の記録 (Table 3に示した7区間)

を抽出した。一例として2018年10月1日に28階梁中央で観測された時刻歴加速度波形をFig. 8に示す。上下方向の最大加速度は約3cm/s²であり、特に振幅の落ち着いている区間では0.5cm/s²程度で振動している事がわかる。フーリエスペクトルを見ると (Fig. 9), 水平成分 (XおよびY方向) が周期4秒前後で卓越しているのに対して、上下成分 (Z方向) は0.2秒付近で卓越している。

Table 3に示した残りの6波の記録について、同様に上下動に関してフーリエスペクトルを算出し比較すると (Fig. 10), 記録により振幅レベルは異なるが、梁端では周期0.4秒付近、梁中央では0.2秒付近で卓越している点が地震時と共通している。

続いて、フーリエスペクトルから読み取れる卓越周期の経時変化をFig. 11に整理する。28階梁端は周期0.36~0.4秒付近、28階梁中央は周期0.16~0.19秒付近に卓越周期があり、経時的な大きな変化は見られない。また、こ

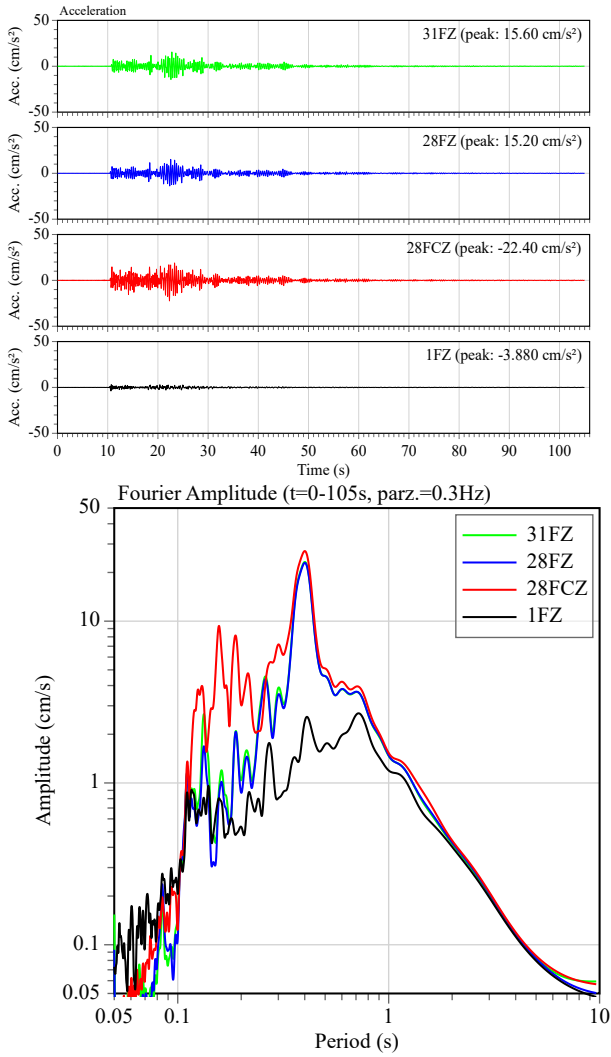


Fig. 7 地震観測記録の例 (地震No.9, 上下方向)
Example of Earthquake Observation Record
(Earthquake No. 9, Vertical)

これらの周期はトリガー観測による地震記録における卓越周期とよい対応を示しており、平時・地震時ともに類似の卓越周期でロングスパン梁が振動していると言える。

5. 立体フレームモデルを用いた応答解析

5.1 応答解析の概要

観測記録の再現性を確認するため、対象建物の立体フレームモデルを用いて、地震観測記録を用いた地震応答解析を行った。立体フレームモデルは地上部分のみについて、小梁・孫梁・スラブを含んでモデル化されている。質量は梁の両端部と中央に分布しており、モデル全体にレイリー減衰を1次固有周期1.04秒と18次周期0.26秒で2%となるように与えている。1階に設置されている地震計における地震観測記録を入力波として、主に28階ロングスパン梁中央を対象に応答解析結果を観測記録と比較する。解析コードはSNAP ver.7を用いた。立体フレームモデルの俯瞰図をFig. 12に示す。

Table 3 使用した常時微動記録および読み取った卓越周期 (単位: 秒)
Used Microtremor Records and Peak Period (unit: sec.)

年月日	時刻	28F梁端			28F梁中央		
		X	Y	Z	X	Y	Z
2018/10/01	0:00:00 ~ 0:30:00	4.304	3.542	0.364	4.290	3.562	0.169
2018/11/01	0:00:00 ~ 0:30:00	3.866	3.236	0.366	3.838	3.240	0.172
2018/12/01	0:00:00 ~ 0:30:00	3.913	3.236	0.364	3.884	3.244	0.180
2019/01/01	0:00:00 ~ 0:30:00	3.936	3.213	0.364	3.936	3.220	0.186
2019/02/01	0:00:00 ~ 0:30:00	3.895	3.265	0.392	3.884	3.265	0.172
2019/03/01	0:00:00 ~ 0:30:00	3.948	3.293	0.365	3.948	3.302	0.174
2019/04/01	0:00:00 ~ 0:30:00	3.960	3.285	0.393	3.954	3.289	0.186

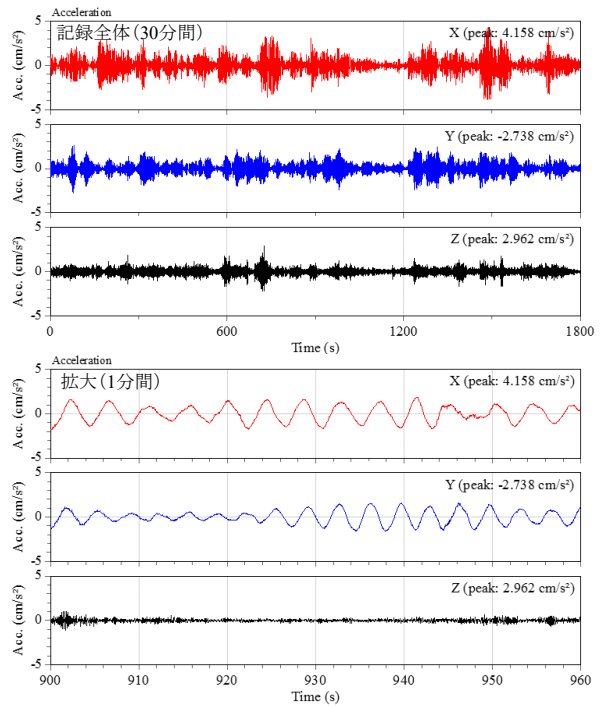


Fig. 8 常時微動記録の時刻歴波形例
(28階梁中央, 2018年10月1日0:00~0:30)
Example of Microtremor Waves
(28th Floor Beam Center, October 1, 2018 0:00-0:30)

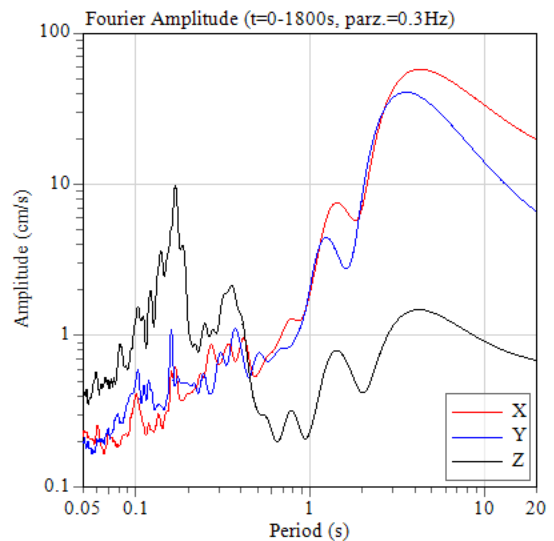


Fig. 9 常時微動記録フーリエスペクトル
(28階梁中央, 2018年10月1日0:00~0:30)
Fourier Spectra of Microtremor Records
(28th Floor Beam Center, October 1, 2018 0:00-0:30)

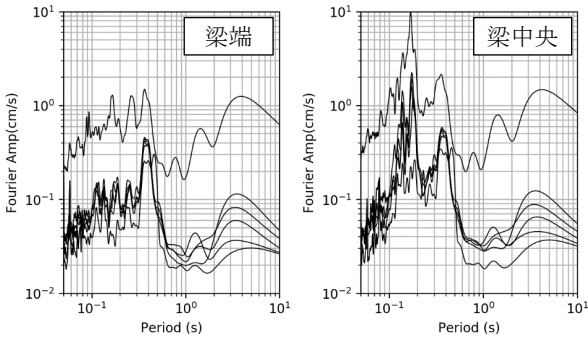


Fig. 10 常時微動観測記録のフーリエスペクトル (上下成分)
Fourier Spectra of Microtremor Records (Vertical)

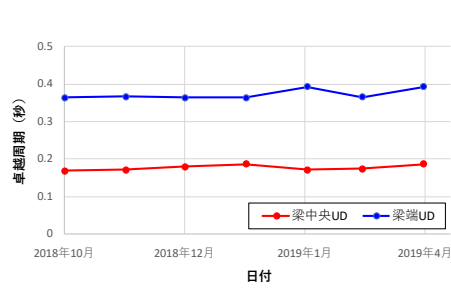


Fig. 11 常時微動観測記録の卓越周期の変化 (上下成分)
Changes in Peak Periods of Microtremor Records (Vertical)

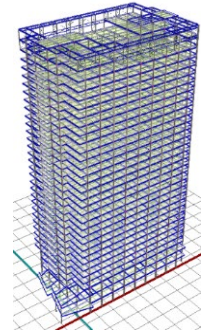


Fig. 12 立体フレームモデル俯瞰図
3D Frame Model Bird's Eye View

5.2 上下動に対する水平動の影響検討

はじめに、上下動に対する水平動の影響検討を、1次元解析と3次元解析の比較により実施した。

1次元解析と3次元解析の差異について、1階の上下方向加速度が観測記録の中で最大であった2018年11月27日茨城県南部の地震(地震No.4)の記録を用いて比較する。1次元解析では立体フレームモデルの水平方向を拘束し、上下成分のみ入力し、3次元解析では拘束条件を外して水平・上下3成分を入力した。Fig. 13に28階梁中央位置における応答解析結果の加速度波形を観測記録とあわせて示す。1次元解析と3次元解析の波形は継続時間全体を通して良く似ており、最大加速度も11.5cm/s²と11.3cm/s²でほぼ同じである。しかし、これら解析結果は観測記録と比較すると振幅がやや小さい傾向がみられる。

フーリエスペクトル (Fig. 14) を見ると、周期1~2秒付近において1次元解析と3次元解析の間に差異がみられ、3次元解析の結果が観測記録に近い。この周期帯は建物水平方向の固有周期に対応するため、3次元解析は1次元解析で表現しきれない水平動に起因する要素を考慮できると考えられる。

一方、0.1秒程度の短周期側においては解析結果の振幅が観測と比べて小さい傾向があり、これは短周期側でレイリー減衰が強く影響していると考えられる。なお、モード減衰の使用も検討したが、3次元解析で解析時間がレイリー減衰と比べ非常に長くなったため使用しなかった。

5.3 立体フレームモデルを用いた応答解析と観測記録の比較

立体フレームモデルを用いて応答解析を行い、28階ロングスパン梁中央における応答解析結果と地震観測記録の比較を行うことで、解析による観測記録の再現性を確認する。検討対象は上下成分であるが、水平動に起因する振動を考慮するため観測記録3成分を用いて解析した。

観測記録のうち1階の振幅とマグニチュードの大きさを考慮して2019年6月24日に発生した千葉県南東沖の地震(地震No.13)を入力として観測と解析の比較を行った。

Fig. 15に28階梁中央における加速度波形を示す。主要

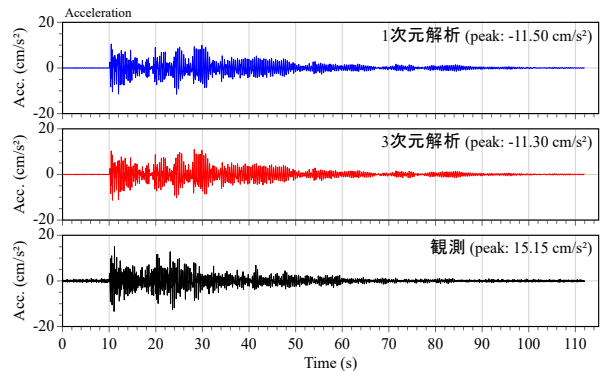


Fig. 13 28階梁中央における1次元解析と3次元解析の上下方向加速度波形
Vertical Acceleration Waves of 1D and 3D Analyses at the Center of 28th Floor Beam

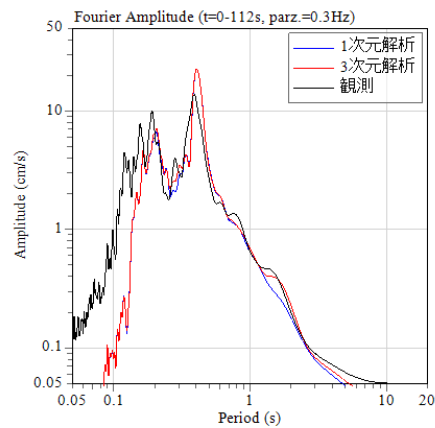


Fig. 14 28階梁中央における1次元解析と3次元解析のフーリエスペクトル (上下成分)
Fourier Spectra of 1D and 3D Analyses at the Center of 28th Floor Beam (Vertical)

動に注目すると、X方向・Y方向は観測記録の振幅に近い結果が得られた一方、Z方向は観測記録よりも解析の方が大きい傾向がみられた。Z方向の位相の対応は概して良好だが、短周期成分の細かな波形を特に再現できていない。

次に、観測記録のうち比較的振幅の大きい3地震(地震No.4・9・13)を対象に、1階に対する28階のフーリエスペクトル比を観測記録と解析結果について算出し、周期特性を確認した (Fig. 16)。28階梁端においては、周期

0.4秒付近に卓越があり、そのフーリエスペクトル比は10～13程度である。観測に比べて解析の方がやや長周期側に卓越があり、解析モデルの上下方向の剛性が実建物と比べて小さい可能性が考えられる。28階梁端の周期0.3秒以下では観測と解析に差異が見られ、特に0.15秒程度より短周期側では差が大きくなる。

28階梁中央においては、梁端と同じく周期0.4秒付近に卓越があることに加え、周期0.2秒付近でも卓越が確認できる。周期0.4秒付近の卓越は梁端での振動に伴うものと推測される。周期0.2秒付近の卓越は解析の方がやや長周期側にあり、フーリエスペクトル比はやや小さい。このことは、解析モデルのロングスパン梁は実建物と比べて剛性が小さく、減衰が大きい可能性を示している。

観測と解析の間にみられるこれらの差異は、例えば柱部材等の剛性の違いや、壁部材や仕上げ材など解析モデルに含まれていない部材に起因する可能性が一因として考えられる。また周期0.1秒付近において、解析は観測と比べてフーリエスペクトル比が特に小さいことから、短周期側の解析精度に留意が必要である。

6. 動的相互作用を考慮した応答解析

5章の解析検討では、1階で得られた観測記録を入力とするため上部構造のみをモデル化した。しかし、実現象では、地震動が地盤から建物に入力する際の地盤—建物の動的相互作用により、上部構造の応答が影響を受ける。また、構造設計における上下動を対象とした応答解析では、1階床を固定とする場合と地盤—建物の動的相互作用を考慮する場合があり、その差異を確認することは重要と思われる。そこで、ロングスパン梁の上下動に対する動的相互作用の影響を確認するため、地盤ばねの有無による応答解析結果を比較する。

前節まで用いていた立体フレームモデルをもとに、1階床スラブを剛体として上下ばねと上下ダッシュポットを付けた。地盤ばね（インピーダンス）の設定にあたっては、2層地盤上の剛基礎を対象とした評価手法⁷⁾を用いて、現地地盤調査資料のせん断波速度 V_s および密度より地盤剛性を算出し設定した。地盤物性値は1層目（層厚10.6m）が $V_s550\text{m/s}$ 、2層目（半無限層）が $V_s650\text{m/s}$ で、P波速度 1940m/s と密度 1.93t/m^3 は各層共通とした。対象建物は隣接する複数の高層建築物と地下躯体が繋がっており地下躯体の全長が350mほどあるが、地下躯体の上下方向の剛性は水平方向と比較して小さいと考えられることから長大な地下躯体を剛とみなさず、対象建物直下の基礎構造を対象として埋め込み部分を無視して地盤ばねを算出した。

応答解析の入力波は告示波（安全限界）の乱数位相と神戸位相の2波を用いた。解析結果の加速度波形をFig. 17に示す。両ケースともに、地盤ばねを考慮することで加速度振幅が低減する傾向がみられ、最大加速度で比較すると2割程度の差がある。フーリエスペクトル（Fig. 18）

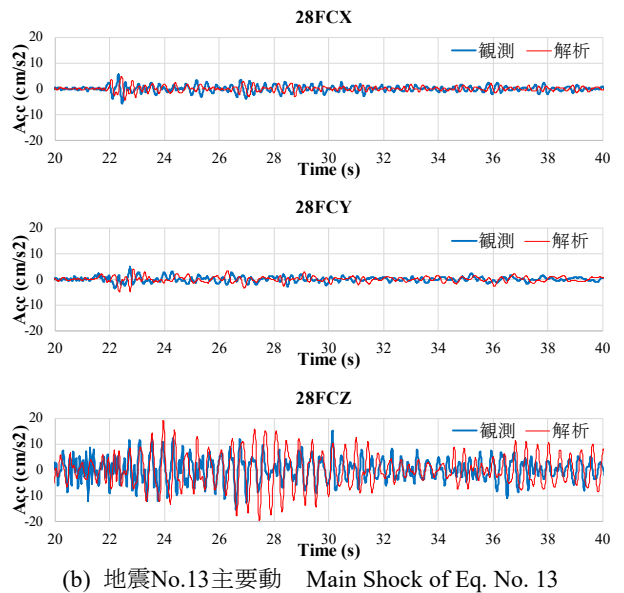
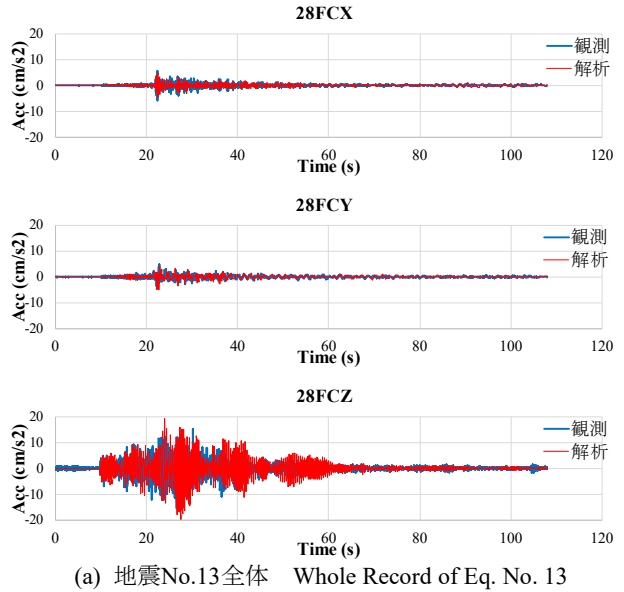


Fig. 15 28階梁中央における観測と解析の加速度波形
Acceleration Waves of Observation and Analyses
at the Center of 28th Floor Beam

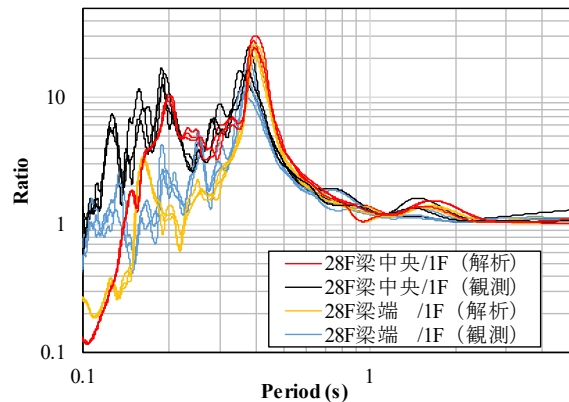


Fig. 16 1階に対する28階のフーリエスペクトル比
(3地震, 上下方向)
Fourier Spectrum Ratio of 28th Floor to 1st Floor
(3 Earthquakes, Vertical Direction)

を見ると、乱数位相においては、周期0.4秒付近の卓越において振幅の低減が目立つ。神戸位相においては、周期0.4秒付近の卓越振幅に大きな差はなく、これは乱数位相の方が波の繰り返し数が多く、パルス的な神戸位相よりも減衰の効果が出たことによる差と考えられる。また、地盤ばねを考慮することで若干卓越周期が長周期化していること、また0.1~0.2秒程度の短周期側で振幅が低下していることも表れており、動的相互作用による効果とレベル低減の余地を確認できた。

7. まとめ

本検討では、建築物の上下動の適切な評価へ向けた水平上下比の観測記録の比較と、ロングスパン梁の振動特性を把握することを目的とした超高層建築物の地震観測を実施した。地震観測は、ロングスパン梁の端部と中央部に地震計を各1台設置し、1階・31階に設置されている既設地震計とあわせ4台体制で行い、計29地震を観測した。その観測記録を用いて立体フレーム応答解析を行った。本検討の成果を以下に整理する。

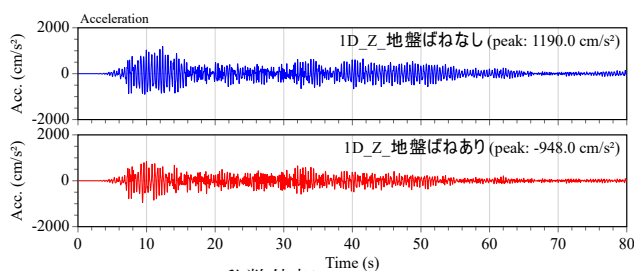
- 1) 工学的基盤相当地点の地震観測記録から算出した水平上下比は、一部の周期帯で建築研究所・建築センターの水平上下比の振幅を下回り、地震動レベルを低減できる可能性を示した。
- 2) 地震観測記録および常時微動記録を用いてロングスパン梁の振動特性を明らかにした。建物の高さ方向の伝播による地震動の増幅、およびロングスパン梁の端部から中央の増幅を確認し、それぞれの卓越周期(0.4秒付近, 0.2秒付近)や増幅倍率(最大加速度比で、0.4~5.1倍, 1.4~2.9倍)を明らかにし、地震時および平時の常時微動で類似の卓越周期で振動することを確認した。
- 3) 立体フレーム解析では、水平動入力も考慮することで長周期成分において、観測記録とのより高い整合性を得ることができた。
- 4) 地盤と建物の動的相互作用を考慮することにより、安全限界レベルの入力に対してロングスパン梁中央の上下動が低減する事例を示した。

なお、課題として、大地震の観測記録が得られていないことがあげられる。今後、より大きな記録が得られる事に加え、別建物も対象とすることで、実務設計への適用を見据えた検討等が可能となると考えられる。

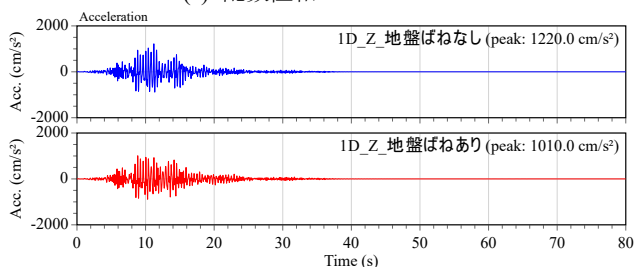
謝辞

本検討では防災科学技術研究所の強震観測データおよび観測点地盤データを利用させて頂いた。記して謝意を表す。

参考文献



(a) 乱数位相 Random Phase



(b) 神戸位相 Kobe Phase

Fig. 17 動的相互作用を考慮した時の28階梁中央における加速度応答

Acceleration Response at the Center of the 28th Floor Beam when Considering Soil-Structure Interaction

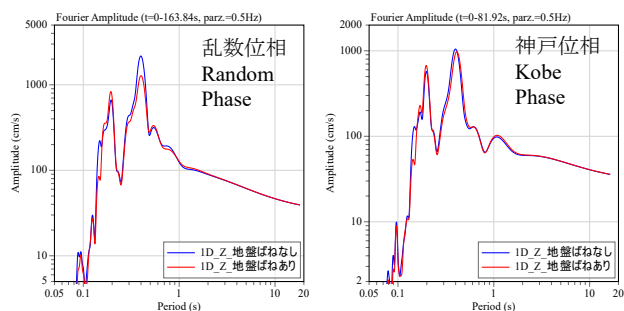


Fig. 18 動的相互作用を考慮した時の28階梁中央における応答のフーリエスペクトル

Fourier Spectra of Response at the Center of the 28th Floor beam when Considering Soil-Structure Interaction

- 1) 板硝子協会：平成28年（2016年）熊本地震におけるガラス等の被害調査報告書，pp. 19, 2017.
- 2) 源栄正人：東日本大震災における地震動と建物被害の実態と教訓，東日本大震災に関する技術講演会論文集，pp. 21-39, 2012.1
- 3) 井川望：超高層集合住宅における上下方向地震応答（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 891-892, 2015.
- 4) 建設省建築研究所・財団法人日本建築センター：設計入力地震動作成手法技術指針(案) 本文解説編・資料編，1992.
- 5) 大塚久哲ほか：鉛直方向設計入力地震動に関する基礎的考察，トンネル工学研究論文・報告集，第10巻，pp. 71-78, 2000.
- 6) 大町達夫ほか：2008年岩手・宮城内陸地震のKiK-net一関西における大加速度記録の成因の推定，日本地震工学会論文集，第11巻，第1号，pp. 32-47, 2011.
- 7) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，pp. 341-343, 1996.