

粘弾性ダンパーを用いた超高層集合住宅における地震・風観測とその評価

Observation and Evaluation of Earthquake and Wind Response of High-rise Building with Visco-elastic Damper

井川 望*¹ 伊藤 真二*¹ 宮久保 秀樹*²
Nozomu Ikawa Shinji Ito Hideki Miyakubo

要旨

大阪市に建つコンクリート充填鋼管柱を用いた超高層集合住宅では、強風時の居住性能を改善し、地震時の応答性状に余力を与えることを目的として、粘弾性ダンパーをブレース形式で用い、建物の減衰性能を高めている。その耐震、耐風設計にあたっては振動解析や風洞実験により構造安全性を確認している。

本建物では耐震、耐風性能の確認のため、建物竣工時より地震・風観測を行っている。地震観測については、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震時の記録について、立体フレームモデルを用いて検討を行い、観測記録と良い対応を示すことやダンパーの効果などが確認できた。風観測では5年間の観測データから設計時に設定した居住性能を満足していることが確認できた。

キーワード：超高層住宅 粘弾性ダンパー 地震観測 東北地方太平洋沖地震 風観測

1. はじめに

大阪市に建つコンクリート充填鋼管柱を用いた超高層集合住宅では、強風時の居住性能を改善し、地震時の応答性状に余力を与えることを目的として、粘弾性ダンパーをブレース形式で用い、建物の減衰性能を高めている。その耐震、耐風設計にあたっては振動解析や風洞実験により構造安全性を確認し、日本建築センターの評定を取得している。

本建物では耐震、耐風性能の確認のため、建物竣工時(1999年7月)より地震・風観測を行っている。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震時の記録について、立体フレームモデルによる数値解析による検証を行ったので、そ

の概要を報告する。さらに、5年間の風観測記録より本建物での風の特性、応答加速度の評価および再現期間1年の居住性能評価を行い、設計時の評価を検証した。

2. 建物概要

本建物は大阪市此花区に1999年に竣工した地上40階、地下1階、塔屋2階の高さ132.5mの超高層集合住宅である。写真1に建物外観を、図1に基準階伏図を、図2に軸組図を示す。地上部分は37.5m×37.5mの矩形プランで、中央にボイド空間を設けたクロスチューブ架構となっている。鉄



写真1 建物外観

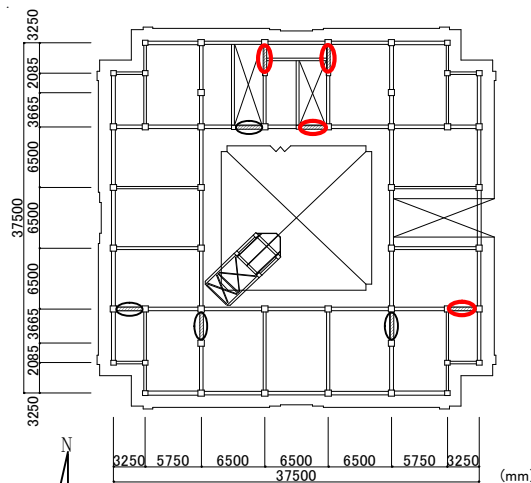


図1 基準階伏図
○ ダンパー設置位置(1~19階)
● ダンパー設置位置(1~38階)

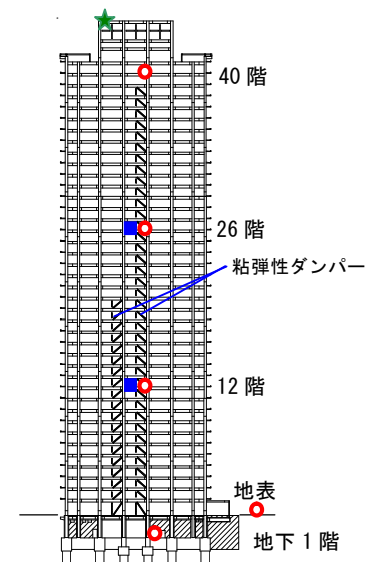


図2 軸組図 (観測装置設置場所)
○ : 加速度計 (他に杭先端)
■ : ダンパー用歪ゲージ, 変位計
★ : 風向・風速計

*1 技術研究所 建築技術研究部門 *2 大阪本店 建築設計部

骨造で、柱にはコンクリート充填鋼管を用いている。建物の減衰性能を高めるため、1~19階では、南北・東西方向のそれぞれ4箇所(合計8箇所)に、20~38階ではそれぞれ2箇所(合計4箇所)に、粘弾性ダンパーをブレース形式で設置している。杭はGL-60mを先端とする場所打ちコンクリート拡頭拡底杭である。

地震観測用の加速度計は建物地下1階、地上12, 26, 40階と地表、杭先端にある。12, 26階は水平2方向のみ、他の点では水平2方向と上下1方向の3成分であり、地下1階では建物中央付近(水平2方向と上下1方向の3成分)以外に、建物南端と西端で上下方向を測定しており、全部で18成分である。ダンパーについては12, 26階の東西、南北方向各1箇所(全部で4箇所)で、応力測定用歪ゲージ、粘弾性体部の変形測定用変位計などを設置している。杭先端加速度が0.5cm/s²を超えた場合に、0.01秒ピッチで収録を行っている(遅延時間20秒)。

風観測は、屋上の風向・風速計、40階と地下1階の水平方向加速度(各2成分)および12階のダンパー2箇所の歪みと変位を収録している。データは常時10分間毎の風速の統計量を記録し、瞬間風速10m/s以上の強風時には全チャンネルの時系列データをサンプリングピッチ0.1秒で600秒間記録している。

3. 地震観測

3.1 観測記録

建物竣工時(1999年7月)より2012年12月末までに130を超える地震記録が得られている。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9.0、震央距離765km、以下、太平洋沖地震)の概要を以下に示す。

太平洋沖地震における観測記録の最大加速度を表1に、ダンパーの応答最大値を表2に示す。また、40階の水平方向加速度波形を図3に示す。なお、観測記録は8分を超えるものであるが、時刻歴波形については解析結果と同じ250秒について示す。水平方向最大加速度は地表、地下1階で9~13cm/s²程度であるが、40階で80cm/s²を超えている。加速度を積分することにより求めた40階の変位(地下1階に対する相対変位)の最大は23.6cm(南北)、9.65cm(東西)である。ダンパーの最大歪は246~455×10⁻⁶、最大変位は0.40~0.58mmである。加速度より求めた地表の最大速度は8.4cm/s(南北方向)、計測震度は3.0である。

なお、この建物で最も大きな加速度が観測されたのは、2004年9月5日23時57分の東海道沖の地震(マグニチュード7.4、震央距離232km)で、40階南北方向で82.0cm/s²であり、太平洋沖地震とほぼ同程度である。この地震での

ダンパーの最大歪は114~160×10⁻⁶であり、太平洋沖地震と比べ半分以下であるが、最大変位は1.11~1.78mmと2倍以上大きい。太平洋沖地震と比べ温度が高いため、粘弾性体の温度依存性により、歪は小さく、変形は大きくなったものと考えられる。

表1 最大加速度(単位: cm/s²)

	南北	東西	上下	上下(西端)	上下(南端)
40階	81.5	38.2	6.34	—	—
26階	51.5	22.9	—	—	—
12階	25.0	14.3	—	—	—
地下1階	13.6	9.47	6.00	6.03	5.66
地表	13.2	9.22	5.84	—	—
杭先端	11.4	7.06	6.22	—	—

表2 ダンパー最大測定値一覧

	12階		26階	
	南北	東西	南北	東西
歪(×10 ⁻⁶)	387	455	246	364
変位(mm)	0.395	0.565	0.466	0.580

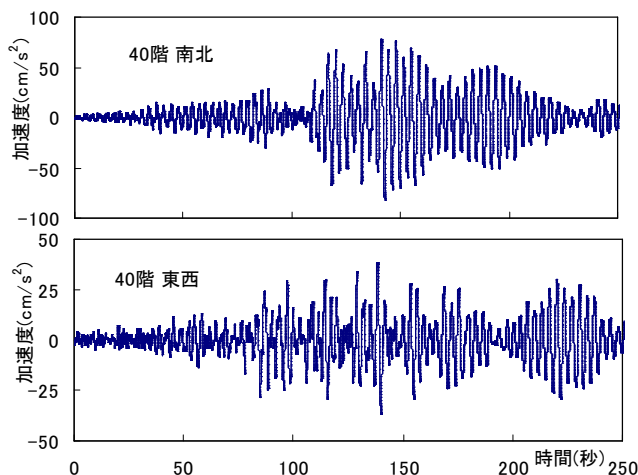


図3 観測記録の加速度波形(40階)

図4に地下1階に対する40階のフーリエスペクトル比を示す。なお、フーリエスペクトルはバンド幅0.2HzのParzen ウィンドウによる平滑化を行っている。南北、東西方向とも3.5秒、1.1秒、0.6秒付近などに明瞭なピークが認められる。図5にこれまでの観測記録で得られた40階最大加速度振幅と1次固有周期の関係を示す。なお、2004年9月5日の地震まで、2004年9月6日~2011年3月11日の太平洋沖地震まで、2011年3月11日の余震以降で記号を変えて表示している。固有周期は揺れの大きさにより幾分変わっており、小さな揺れでは周期が短く、大きな揺れでは周期が長くなる傾向が見られる。また、南北方向では2004年9月5日の地震前後で周期がやや異なり、地震後、幾分周期が長くなっている。

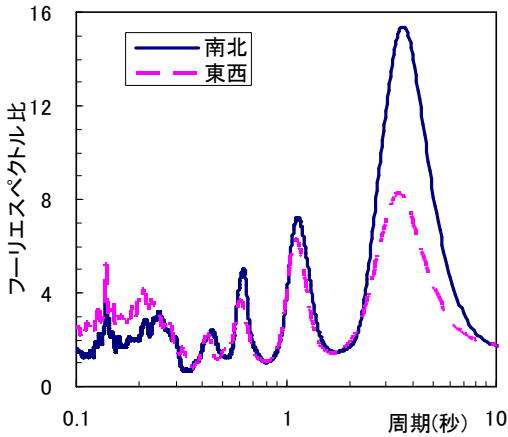
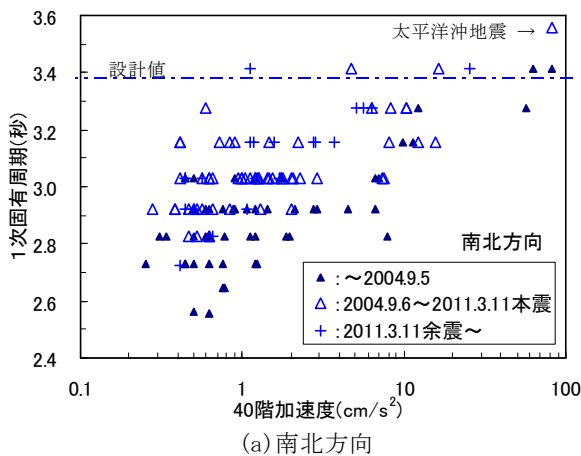
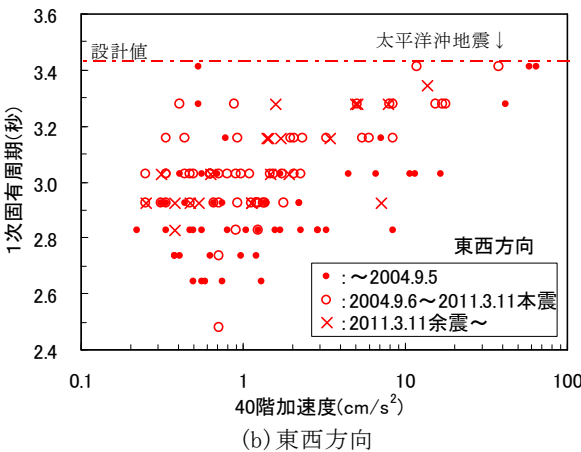


図4 地下1階に対する40階のフーリエスペクトル比



(a) 南北方向



(b) 東西方向

図5 40階最大加速度と1次固有周期の関係

3.2 解析モデル

設計時には、静的増分解析をもとに、0°（東西方向）、45°、90°（南北方向）の3方向について、地下1階床レベルを固定とし、各階1質点（全44質点）の等価せん断モデルが作られ、時刻歴解析が行われている。ダンパーは耐震、耐風設計上考慮されていないが、3要素モデル（1つのばねと2つのダッシュポット）を用い、一部検討が行われている。今回、質点系モデルではダンパーの評価が難しいものと考え、立

体フレームモデルを作成し、解析を行った。ダンパーについては設計時と同じ3要素モデルとした。ただし、粘弾性ダンパーには温度依存性、振幅依存性が確認されている。東北地方太平洋沖地震時のダンパー付近の温度は5~7°C程度と考えられるので、設計値(20°C)の2.5倍程度のばね剛性とダッシュポットの減衰係数と推定される。また、測定を行っているダンパーの地震時の変形は最大でも0.58mmであり、粘弾性体の厚さ(8.75mm)の6.6%である。最大振幅が厚さの10%の場合の実験で100%時の1.5倍程度の剛性、減衰となる結果が得られているので、1.5倍以上と考えられる。今回の検討では設計値の3.75(=2.5×1.5)倍の剛性と減衰とし、ダンパーのモデル化を行った。

3.3 解析結果

表3に上記解析モデル(以下、立体モデル1)の固有周期を太平洋沖地震時の観測記録のスペクトル比より求めた周期、設計時の質点系モデルの周期とあわせて示す。観測記録より得られた周期と比べ、東西方向1次周期については立体モデル1はやや長い、南北方向については立体モデル1が4%程度短い。2次については両方向とも立体モデル1がやや長めである。立体モデル1と設計時の質点系モデルの1次周期は近いが、2次は立体モデル1がやや短く、観測から得られるものに近い。上下方向については、立体モデル1は観測値より5%程度長い。

表3 固有周期(単位:秒)

	南北		東西		上下
	1次	2次	1次	2次	1次
観測	3.56	1.13	3.41	1.11	0.292
設計時モデル	3.38	1.33	3.43	1.35	-
立体モデル1	3.42	1.23	3.47	1.26	0.307
立体モデル2	3.56	1.28	3.62	1.31	0.320

設計時モデルは質点系モデル(等価せん断モデル)
立体モデル2は各部材の剛性を8%低減したモデル

40階の加速度波形を図6に示す。東西方向については観測記録と比較的良くあっているが、南北方向については、観測記録と解析モデルにおける周期の違いによる波形のずれが見られる。表3のように観測された周期は解析モデルの周期と東西方向は比較的近いが、南北方向は解析モデルがやや短い。各部材の剛性を一様に修正(8%低減)し、観測記録と時刻歴波形の周期特性が合うようにしたモデル(以下、立体モデル2)により解析を行った。40階の加速度波形を図7に示す。このモデルでは、南北方向については観測記録と比較的良くあっているが、東西方向については、わずかに波形のずれが見られる。

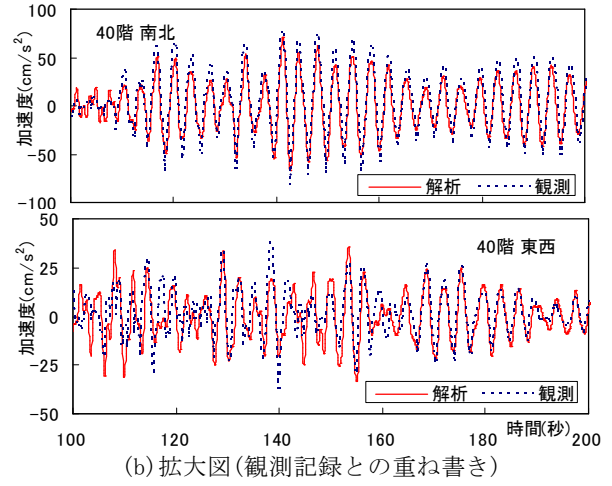
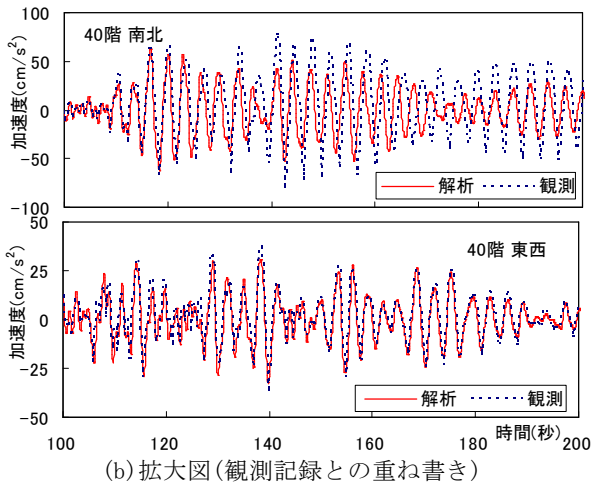
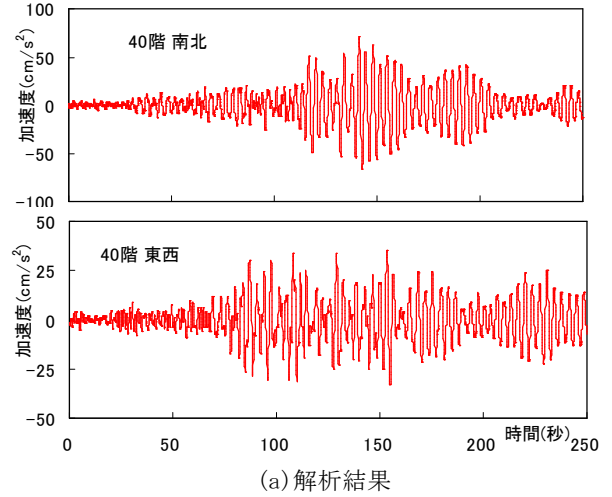
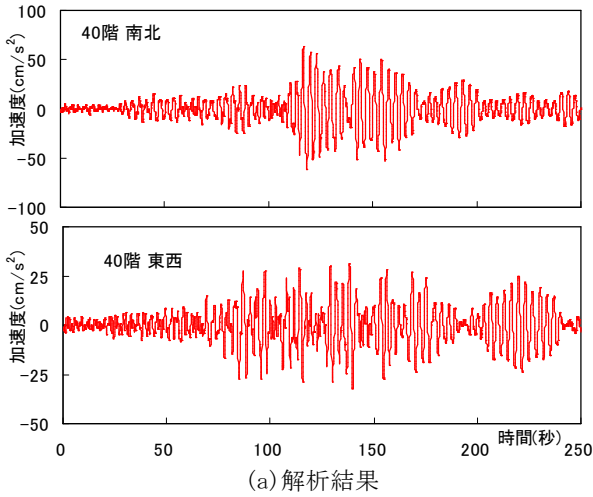


図6 40階の加速度波形(立体モデル1)

図7 40階の加速度波形(立体モデル2)

立体モデル1,2の各階の最大値分布(加速度、変位)を観測記録とともに図8に示す。加速度、変位とも南北方向は立体モデル2が観測記録に近いが、東西方向ではどちらのモデルでも、観測記録に近い結果となっている。以下の検討では、南北方向については立体モデル2、東西方向については立体モデル1の結果を示す。

歪ゲージ、変位計を設置している26階のダンパーについて、荷重の解析結果と観測記録の時刻歴波形(東西方向)を図9に示す。荷重は歪ゲージが取り付けられている断面の鋼材の断面積から計算している。南北、東西方向とも解析による最大変形は観測記録よりやや大きくなっているが、荷重は概ね観測結果と対応が取れている。

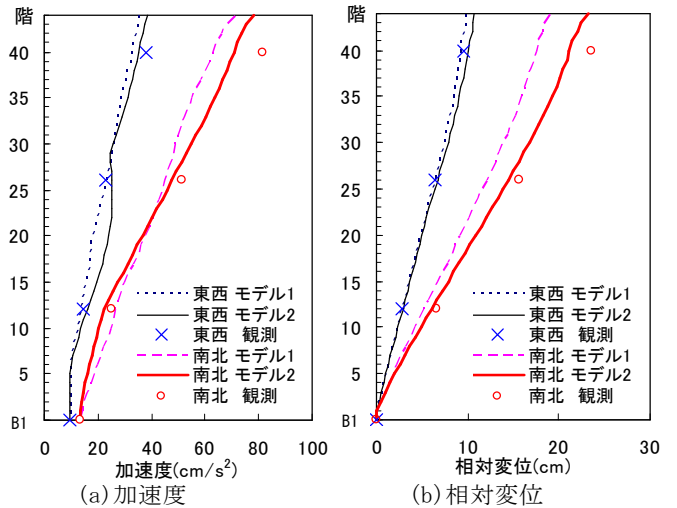


図8 最大値分布

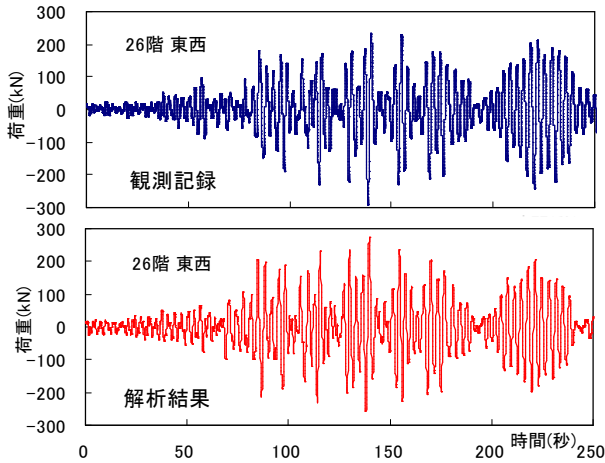


図9 26階東西方向のダンパーの荷重

ダンパーの効果を確認するため上記モデルからダンパーを取り除いたモデルについて解析を行った。40階の南北方向加速度波形を図10に、各階の最大値分布を図11に示す。ダンパーの有無により応答値に違いが見られ、40階観測位置でダンパーがない場合の加速度、変位の解析値は、ダンパーがある場合の解析値と比較して、最大値で南北方向20%程度、東西方向50%弱、RMS値で南北方向30%程度、東西方向50%程度が増大している。図11(b)には層間変位分布を示す。南北方向の最大で、ダンパーがある場合の0.62cm(層間変形角で1/482)が、ない場合は0.76cm(1/398)

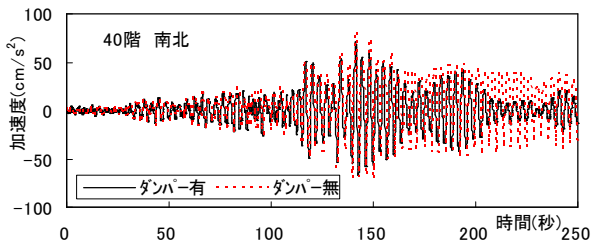


図10 加速度時刻歴波形 (ダンパーの有無の比較)

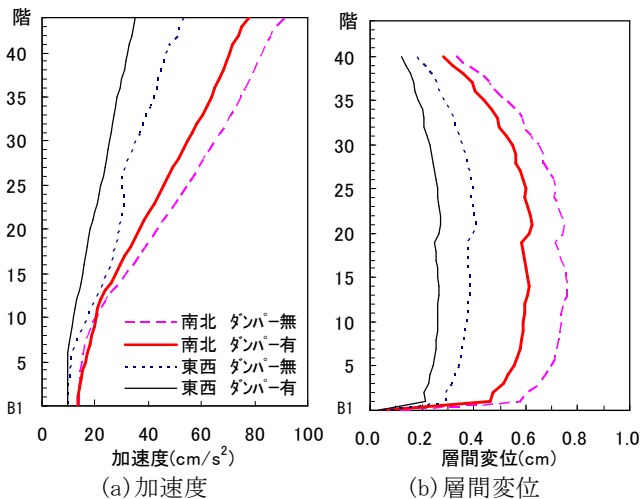


図11 最大値分布 (ダンパーの有無)

と、20%程度増大している。なお、40階のねじれ(端部2点での応答値の差から計算)について、ダンパーがない場合は、ある場合と比べて2倍程度応答(加速度、変位とも)が大きくなっている。

今回の検討は立体モデルを用いており、上下方向についても水平方向と同時に結果が得られている。建物40階の上下方向加速度波形を図12に示す。観測記録と良い対応を示している。なお、上下方向については、立体モデル1と2での違い、ダンパーの有無による違いは水平に比べて小さい。

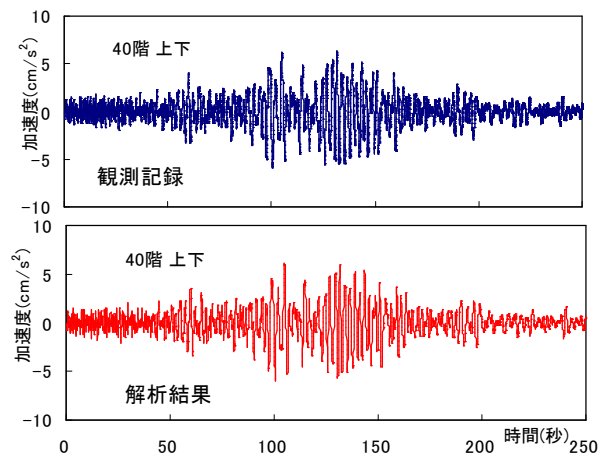


図12 40階の上下方向加速度波形

4. 風観測

4.1 観測記録の概要

表4に1999年7月から2012年6月までの最大値の一覧を示す。最大瞬間風速は2010年12月3日に44.1m/s、最大風速は同じ日に31.7m/s、最大加速度は2004年4月27日にEW方向で2.42cm/s²、2004年6月21日にNS方向で2.81cm/s²をそれぞれ記録している。なお、2004年7月以降は収録装置の故障などで間欠的に記録が欠損しているため、以下では1999年7月から2004年6月までの5年間の記録について検討する。

表4 最大値一覧
(1997年7月~2012年6月)

観測要素	日時	風向	平均風速(m/s)	瞬間風速(m/s)	最大加速度(cm/s ²)	
					NS方向	EW方向
平均風速	2010/12/03	18:30	31.7	44.1	1.93	1.60
瞬間風速	2010/12/03	18:30	31.7	44.1	1.93	1.60
EW加速度	2004/04/27	10:38	23.1	38.3	1.68	2.42
NS加速度	2004/06/21	13:07	16.4	28.4	2.81	1.23

4.2 風向・風速

図13に平均風速10m/s以上(上位10%)の強風時の風配図を示す。西南西からの風が最も多く、次に多い南西の風と合わせると90%以上がこれらの風向である。同じ図に大阪管区气象台(本建物から西へ約8km, 観測高さ22.9m)における平均風速5m/s以上の風配を併記した。气象台では西風が最も多く、本建物での卓越風向とは1方位分のずれがある。本建物は淀川沿いに建設されており、淀川の川筋が西南西方向であるため、この地形の影響で本建物の周辺では西南西からの風が卓越すると考えられる。

図14に風向毎の最大風速を示す。卓越風向と同じ西南西、南西からの風の場合の最大風速が大きい。図15に風速の乱れ強さを平均風速1m/s刻みで平均して示した。乱れ強さは平均風速10m/s以上で約10%の値に収束する。これは、設計時に設定した荷重指針による粗度区分Ⅱ¹⁾に相当する乱れの強さ12%よりやや小さい値である。

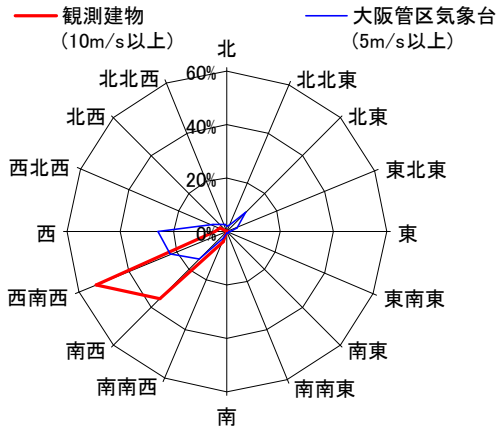


図13 風配図

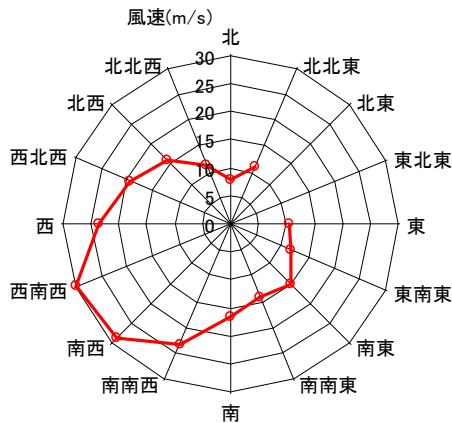


図14 風向別の最大風速

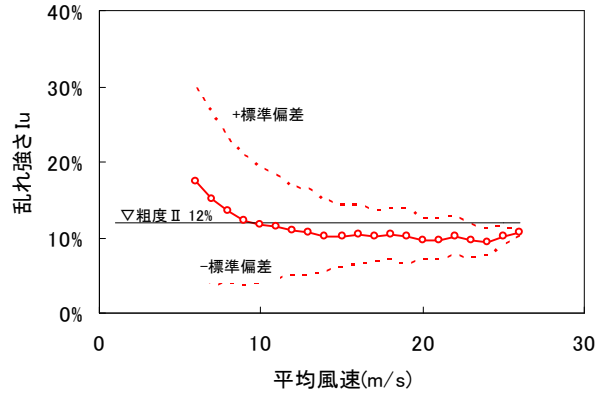


図15 風速の乱れの強さ

4.3 応答加速度

図16に日最大加速度を示す。図中のH-10, H-30, H-50, H-70 および H-90 の直線は、居住性能評価指針²⁾に示された水平振動に対する知覚確率であり、例えば H-10 直線は10%の人が知覚する振動である。ここ示された5年間で日最大加速度がH-10を上回ったのは2日間のみであり、風による振動はほとんど知覚されていないと考えられる。

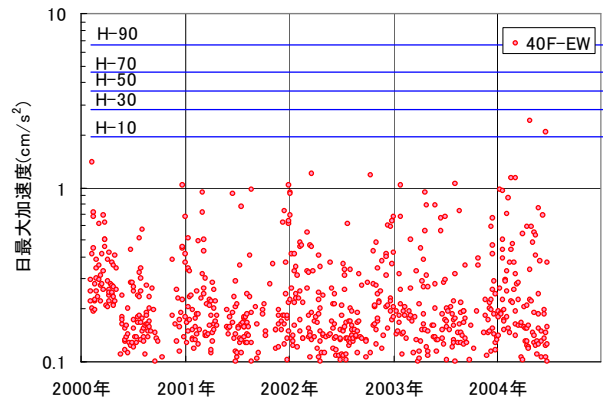
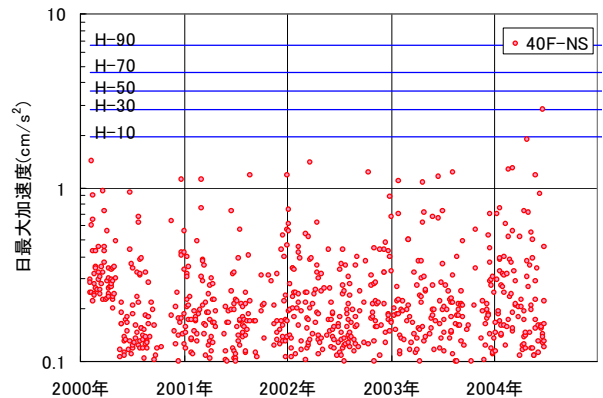


図16 日最大加速度

図 17 に頻度の多い風向が南西と西南西の場合の平均風速と 40 階の最大加速度の関係を示す。風向南西と西南西ではあまり違いは無い。NS 方向は EW 方向に比べてやや勾配が急である。

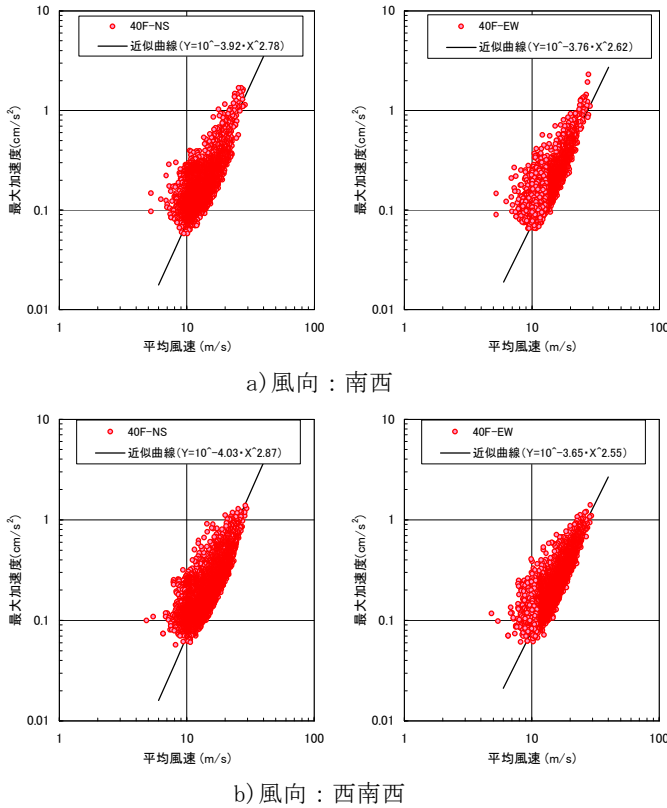


図 17 風速と最大加速度の関係

4.4 居住性能評価

1 年以上の連続した日最大加速度の超過確率より再現期間 1 年の応答加速度を求めるという方法で直接的に居住性能を評価することができるが、応答加速度データは強風時のみの収録なので、以下の方法で居住性能を評価した。まず、常時の風速記録より日最大風速を求め、日最大風速の超過確率より再現期間 1 年の風速を得た。その風速を図 17 の近似曲線に代入して再現期間 1 年の応答加速度を求めた。

積率法で推定した日最大風速の確率分布 (Gumbel 分布) より求めた再現期間 1 年の日最大風速は 29.2m/s である。本建物で観測された風速値は、建物の影響によって 1.12 倍になることが風洞実験によって確認されているので、それを考慮した風速は 26.0m/s となる。表 5 に再現期間 1 年の最大加速度を、図 18 に居住性能評価³⁾の結果をそれぞれ示す。観測による評価では NS, EW 方向共に H-1 曲線以下であり、住居として望ましいレベルであるランク I を満たしている。設計時の解析⁴⁾ではランク II (H-2 以下)であった。

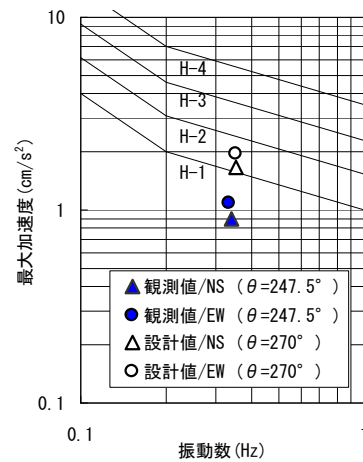


図 18 居住性能評価

観測結果が設計値を下回っていることについて考察する。図 19 は月別の強風発生割合と大阪管区気象台での月平均気温を示したものである。本建物では強風は 12 月～3 月の月平均気温が 10℃以下の場合に多い。粘弾性ダンパーの性能は温度依存性があり、低温の方が減衰性能が良くなる傾向にある。よって設計時には 20℃で検討していたが、実際の強風時はもっと低温であることが多かったため、設計時よりも観測による居住性能が良くなっているものと思われる。なお、設計時の再現期間 1 年の風速は 25.3m/s であり、観測では 26m/s であるので、風速値の設定は妥当であった。

表 5 再現期間 1 年の応答加速度

	再現期間1年の風速(m/s)	最大加速度(cm/s ²)		固有振動数(Hz)	
		風向	NS		EW
設計値	25.3	西	1.95	1.63	0.350
観測値	26.0	南西	1.05	0.88	
		西南西	1.08	0.89	

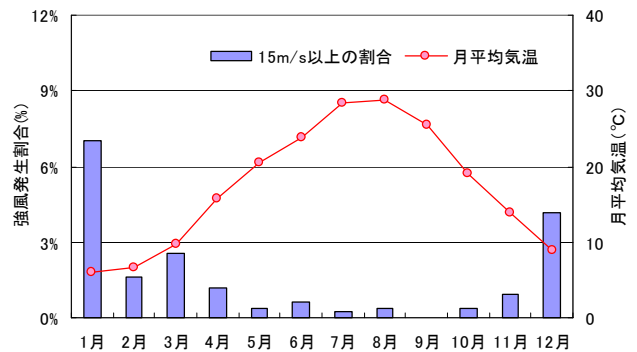


図 19 月別の強風発生割合と月平均気温

5. まとめ

コンクリート充填鋼管柱を用い、ブレース形式の粘弾性ダンパーを持つ超高層集合住宅における地震・風観測について概要を報告した。地震観測では、東北地方太平洋沖地震で観測された記録について、立体フレームモデルを用いて検討を行った。その結果、建物やダンパーの応答など観測記録を再現できた。また、ダンパーのないモデルについても検討を行い、ダンパーの効果が確認できた。風観測においては、強風時の揺れを居住者がほとんど知覚していない可能性が高いことが分かった。また、設計時に設定した居住性能が満足されていることが確認できた。

謝辞

本建物の地震・風観測は独立行政法人都市再生機構との共同研究として行っているものである。ご協力いただいた関係各位に厚くお礼申し上げます。

また、解析モデルにおけるダンパーの評価において昭和電線デバイステクノロジー・三須基規氏にご助言いただいた。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説、1993
- 2) 日本建築学会:建築物の振動に関する居住性能評価指針、2004
- 3) 日本建築学会:建築物の振動に関する居住性能評価指針、1991
- 4) 森裕重ほか:粘弾性ダンパーを用いたCFT造超高層住宅、日本建築学会大会梗概集、pp.907-912、1997.9