

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	2013 超高層免震建物の地震・風応答特性に関する研究(構造)
Title	
著者(和文)	海老原 崇弘, 佐藤 大樹, 大木洋司, 盛川仁, 山田哲, 坂田弘安, 山中浩明, 笠井和彦, 和田章, 北村春幸
Authors	daiki sato, YOJI OOKI, Hitoshi Morikawa, Satoshi YAMADA, HIROYASU SAKATA, HIROAKI YAMANAKA, KAZUHIKO KASAI, akira wada, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集 I, , No. 78,
Citation(English)	, , No. 78,
発行日 / Pub. date	2008, 1
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110006941767

超高层免震建物の地震・風応答特性に関する研究

構造—振動

免震構造 超高层 地震観測

風観測 長期観測 振れ応答

准会員	○ 海老原崇弘 ^{*1}	正会員	佐藤大樹 ^{*2}
正会員	大木洋司 ^{*3}	正会員	盛川仁 ^{*4}
正会員	山田哲 ^{*4}	正会員	坂田弘安 ^{*4}
正会員	山中浩明 ^{*4}	正会員	笠井和彦 ^{*5}
正会員	和田章 ^{*5}	正会員	北村春幸 ^{*6}

1. はじめに

1995年に起こった兵庫県南部地震をきっかけに、免震構造の有用性が注目され、免震構造建物が急激に建設されるようになった。従来、上部構造として中高層 RC 造に主として適用されてきたが、現在は高さ 100m を超える超高层建築物への適用例もあり、今後は益々高層化していくものと考えられる。

免震構造は長周期化によって地震時の応答を低減することを目的としているが、長周期化による風外力のスペクトルピーク周波数と建物の固有振動数との接近の問題が挙げられる。また、一般に免震建物は、振れの固有振動数が並進の固有振動数に近接しているため、風外力の空間的な不均一性によって生じる振れ力に対して敏感であるといわれている¹⁾。

免震建物の地震、風応答の実挙動観測としては、安井ら¹⁾、荒川ら²⁾の事例が挙げられるが、まだ少ないのが現状である。

本報では超高层免震建物である東京工業大学 J2 棟³⁾⁴⁾を対象とし、風観測記録をもとに、地震、風応答について報告する。

2. 対象建物及び観測概要

2.1. 建物概要及び計測概要

対象建物である J2 棟の概略を図 1 に示す。対象建物は地上 20 階、棟屋 2 階、高さ 91.85m の超高层建物であり、平面形状 46.2×15.8m の、塔状比が 5 に達している比較のスレンダーな形状をした建物である。敷地は傾斜地に位置しており、1 階の半分以上が周囲の土に埋もれている状態になっているため、1 階と 2 階の間に免震層を設けた免震構造を採用している。上部構造は鉄骨構造（柱にはコンクリート充填鋼管を使用）、基礎および 1 階は鉄筋コンクリート構造である。構造形式は、上部構造の梁間方向がブレース付きラーメン構造、桁行方向が純ラーメン構造となっている。免震層は直径 1100mm~1200mm の天然ゴム系積層ゴム支障（16 基）と免震用オイルダンパー（2 基）および鋼製ダンパー（一体型 12 基、別置型 2 基）で構成されている。建築地盤は第 1 種地盤であり、建物の基礎形式は直接基礎となっている。なお、この建物の短辺方向を X 方向、長辺方向を Y 方向と定義する（図 1）。

設計時の建物固有周期は、基礎固定・免震層固定とした場合、X 方向が 2.18 秒、Y 方向が 2.51 秒である。これに対して免震層を考慮した場合、レベル 1 入力（免震層のせん断変形角=50%）で、1 次固有周期が X 方向で 3.61 秒、Y 方向で 3.79 秒、レベル 2 入力時（免震層のせん断変形角=150%）で 1 次固有周期が X 方向で 4.23 秒、Y 方向で 4.38 秒である³⁾。

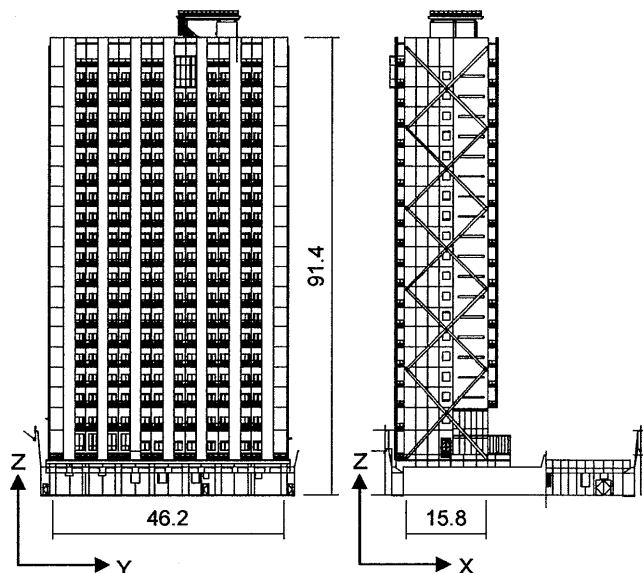


図 1. 東京工業大学 J2 棟（単位:m）

2.2. 観測概要

加速度計の設置位置を図 2 に示す。1 階には X, Y, Z 方向とも 1 地点ずつ（NW）、免震層、2 階については X 方向に 2 地点（NN, SS）、Y 方向に 1 地点（NN）、Z 方向に 3 地点（NN, EE, SS）、7 階、14 階は X 方向に 2 地点（NE, SW）、Y 方向に 1 地点（NE）、Z 方向に 3 地

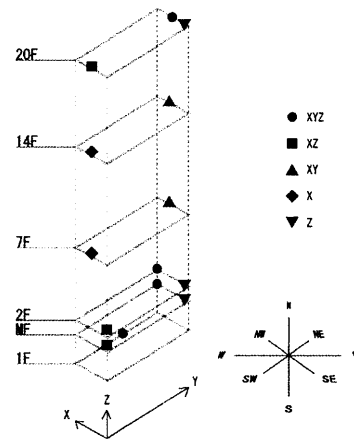


図 2. 加速度計設置位置

点 (NE, EE, SW) に計 27ch の加速度計が設置してある。また、建物頂部には 2 台の風速計を設置している (NN, SS)。なお、その他の観測システムについては文献 3 を参照されたい。

2.3. 地震・風観測概要

本報で対象とした地震は、2005 年 7 月 23 日に観測された千葉県北西部を震源とするものと (千葉県北西部地震)、2005 年 8 月 16 日に観測された宮城県沖を震源とするものである (宮城県沖地震)。千葉県北西部地震は震源が北緯 35.6 度、東経 140.1 度、震源深さ 73km、マグニチュード 6.0 である。宮城県沖地震は震源が北緯 38.8 度、東経 142.16 度、震源深さ 42km、マグニチュード 7.2 である。千葉県北西部地震での 1 階の加速度を図 3 に、宮城県沖地震での 1 階の加速度を図 4 に示す。

風観測記録に関しては、3 月 17 日の 0 時 50 分から 3 時 00 分に

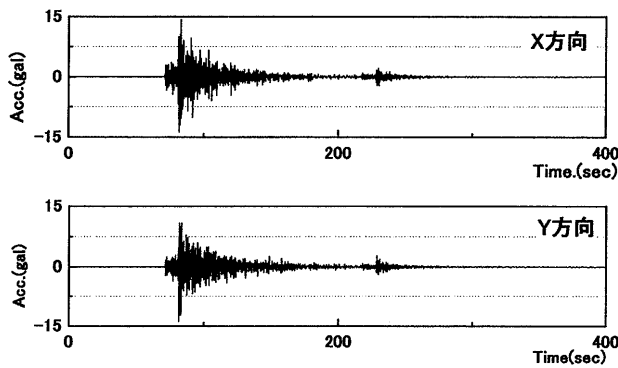


図 3. 千葉県北西部地震の 1 階の加速度応答

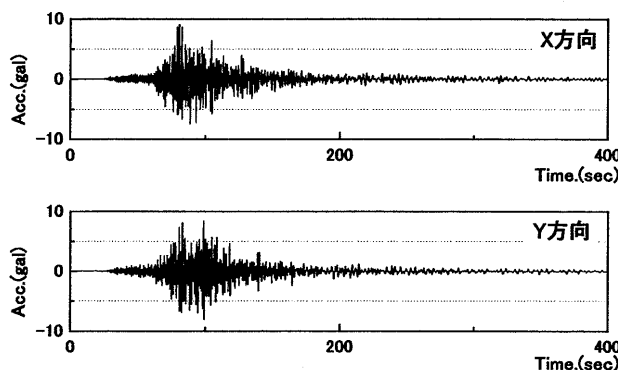


図 4. 千葉県北西部地震の 1 階の加速度応答

観測された風観測記録と 3 月 19 日 17 時 30 分から 19 時 40 分に観測された風観測記録に関して、各々の日最大平均風速を示した 3 月 17 日の 1 時 50 分から 2 時 00 分、3 月 19 日の 18 時 30 分から 18 時 40 分の 10 分間について報告する。3 月 17 日の日最大平均風速は 16.1m で、風向は南南西である。3 月 19 日の日最大平均風速は 17.2m で、風向は北西である (図 2)。

3. 地震応答特性

3.1. 最大値分布

千葉県北西部地震と宮城県沖地震に関する絶対加速度と 1 階に対する変位の最大値分布図を図 5 に示す。変位は加速度計で得られた加速度データをもとに積分から求めたものである⁹⁾。

加速度の最大値分布図より、千葉県北西部地震では頂部の最大加速度が 21.0gal, Y 方向では 12.9gal である。宮城県沖地震では頂部の最大加速度は X 方向で 24.1gal, Y 方向で 17.1gal である。変位の最大値分布より、千葉県北西部地震では X 方向は 1.75cm, Y 方向で 1.03cm, 宮城県沖地震では頂部の最大変位は X 方向で 2.99cm, Y 方向で 1.92cm 変位している。免震層の層間変形オービット⁹⁾より、千葉県北西部地震では、免震層は X 方向で 0.65cm, Y 方向で 0.37cm, 宮城県沖地震では、免震層は X 方向で 1.11cm, Y 方向で 0.88cm 変位している。なおこれらの値は鋼材ダンパーの弾性範囲内(3.17cm)である。

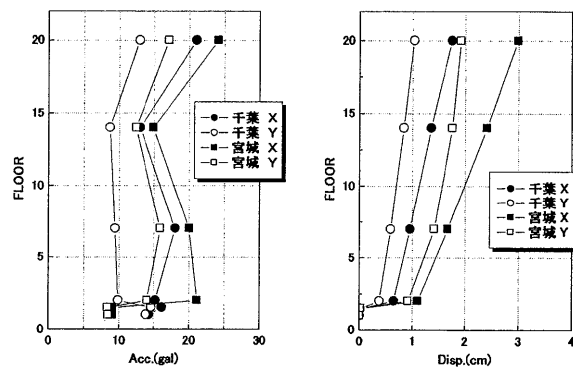


図 5. 地震応答の最大値分布図

3.2. パワースペクトル

千葉県北西部地震の 20 階加速度のパワースペクトルを図 6、宮城県沖地震の 20 階加速度のパワースペクトルを図 7 に示す。千葉県北西部地震では、X 方向で 0.39Hz と 1.19Hz, Y 方向で 0.42Hz と 1.31Hz で卓越している。宮城県沖地震では、X 方向で 0.41Hz と 1.15Hz, Y 方向で 0.43Hz と 1.22Hz で卓越している。千葉県北西部地震、宮城県沖地震のふたつの X 方向のピークについて、それぞれ 0.3Hz~0.5Hz, 1Hz~2Hz のバンドパスフィルターをかけて、変位の時刻歴波形を作成したところ、両地震とも、0.3Hz~0.5Hz にバンドパスフィルターをかけたものは、NE, SW の変位応答は同位相であった。同様に 1Hz~2Hz にバンドパスフィルターをかけ、NE, SW の変位の時刻歴波形を作成したところ、こちらも同位相であった。このことより両地震とも、X 方向に関して 0.4Hz 付近のピークが 1 次の並進の固有振動数で、1.2Hz 付近のピークが 2 次の並進の固有振動数である。

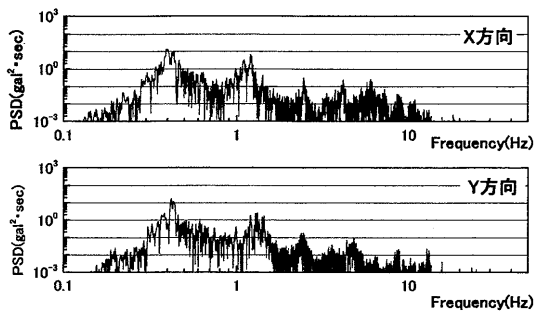


図6. 千葉県北西部地震の20階の加速度パワースペクトル

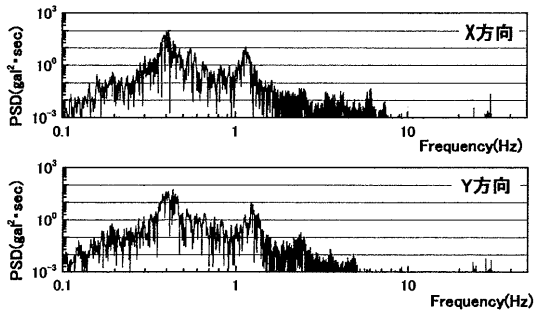


図7. 宮城県沖地震の20階の加速度パワースペクトル

4. 風応答特性

4.1. 最大値分布

3月17日の1時50分から2時の10分間に観測された風応答記録と、3月19日の18時30分から18時40分の10分間に観測された風応答記録に関する最大値分布図を図8に示す。

加速度の最大値分布図より、3月17日の頂部の最大加速度はX方向で1.45gal, Y方向で1.06galである。3月19日の10分間の頂部の最大加速度はX方向で、1.04gal, Y方向で0.79galである。これらは居住性能評価でH-10以下であった⁹⁾。変位の最大値分布図より、3月17日の頂部の最大変位はX方向で0.21cm, Y方向で0.07cm変位している。3月19日の頂部の最大変位はX方向で0.13cm, Y方向で0.06cmである。また、免震層はほとんど動いていないことが確認できた。

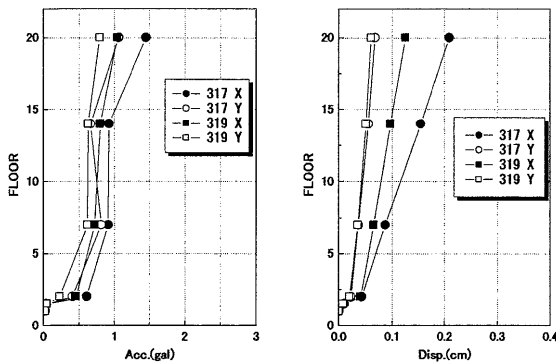


図8. 風応答の最大値分布図

4.2. パワースペクトル

3月17日の1時50分から2時の10分間の20階加速度のパワースペクトルを図9に示す。3月19日の18時30分から18時40分の10分間の20階加速度のパワースペクトルを図10に示す。3月17日の1時50分から2時の10分間では、X方向で0.49Hzと0.78Hz, Y方向では0.57Hzで卓越している。3月19日の18時30分から18時40分の10分間では、X方向で0.49Hzと0.84Hz, Y方向では0.60Hzで卓越している。X方向の2つのピークについて、各々0.4Hz~0.6Hz, 0.7Hz~0.9Hzのバンドパスフィルターをかけて、変位の時刻歴波形を作成したところ、0.4Hz~0.6Hzでバンドパスフィルターをかけたものは、2波ともNE, SWの変位応答は同位相であった。一方、0.7~0.9Hzでバンドパスフィルターをかけたものは、2波とも逆位相となった。このことよりX方向について、各々0.5Hz付近のピークが1次の並進の固有振動数であり、0.8Hz付近のピークが1次の振れの固有振動数である。地震応答と風応答では、風応答の方が並進の固有振動数が高い。これは地震応答では免震層が変位しているため、固有振動数が低い値を示したものと考えられる。振れ応答について、5章でさらに言及する。

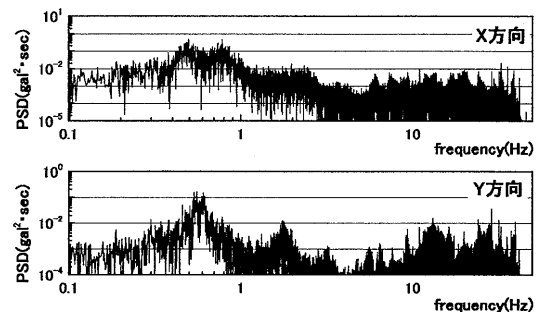


図9. 3月17日の20階加速度のパワースペクトル

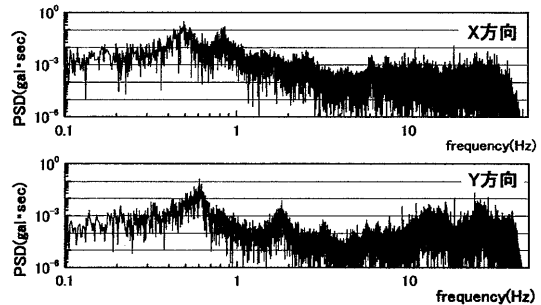


図10. 3月17日の20階加速度のパワースペクトル

5. 地震・風応答時の振れ特性の比較

地震応答では振れによるスペクトルピークは確認できないが、風応答に関しては並進と振れの両方の変形をすることが確認できた。

ここで風応答の全体の変形に対して、どの程度振れ成分が含まれているのか考えるために、振れ率 a_g を定義する。

$$\alpha_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta x}}{\sigma} \quad (1)$$

$\sigma_{\theta x}$: 振れによる X 方向変位の標準偏差

σ : X 方向変位の標準偏差

3月17日の0時50分から3時00分までの10分間毎の13個のデータと、3月19日の17時30分から19時40分の10分間毎の13個のデータに対して、2~20階の振れ率を図11(a)、2~20階のX方向の振れの回転中心を図11(b)に示す。剛心位置の評価方法については文献2を参考にした。図11のプロットのNは7~20階のNE、2階のNNのX方向、プロットのSは7~20階のSW、2階のSSのX方向の振れ率をプロットしたものである。

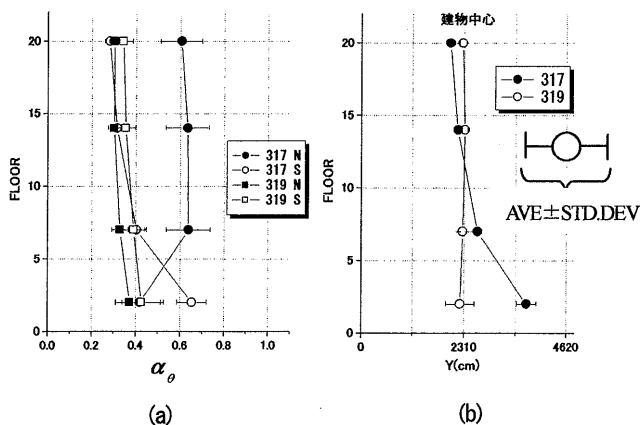


図11. 風応答に対する(a)振れ率(b)振れ回転中心

図11の(a)より、3月17日のNの振れ率は7~20階で60%~65%程度で、2階は42%と2階のみ低い値を示した。Sについては、7~20階で30%~40%程度であるのに対して、2階では65%の高い値を示した。また下の階ほどばらつきがある。3月19日のNについて、2~20階とも振れ率は30%~40%であるが、下の階ほど振れ率が高く、ばらつきも大きい。Sについて2~20階とも34%~43%であるが、こちらも下の階に行くほど振れ率が高く、ばらつきが大きくなっている。

振れの回転中心について、3月17日は20階、14階が南側、7階、2階が北側に回転中心がくる。2階については回転中心が、建物中心よりも14mも北側にあるが、これは2階の加速度応答が小さく、精度が低いと考えられる。3月19日に関しては2~20階とも回転中心が建物中心に近い位置にあるが、2階に関しては7、14、20階に比べて建物中心からの変位が大きく、またばらつきも大きい。3月17日と3月19日で振れ率、回転中心位置の値、プロットの傾向ともに違いがみられた。これは風向の違いが原因ではないかと考えられるが、現時点では不明である。

6. まとめ

超高層免震建物の地震・風応答から最大値分布図、パワースペクトルを調べるとともに、風応答に関しては、全体の变形に対して振れがどの程度含まれているか検討した。以下に知見を示す。

1. 地震応答では免震層が変位しているが、風応答では免震層がほとんど変位していないことが確認された。
2. 地震応答と風応答では、風応答が高い振動数を示した。これは地震応答では、免震層が変形しているために、固有振動数が風応答に比べて低くなったものと考えられる。
3. パワースペクトルより、地震では並進によるスペクトルピークだけが確認されたが、風応答では並進によるスペクトルピークの他に、振れによるスペクトルピークが確認された。
4. 風応答に関して、全体の变形に含まれる振れ成分および、振れの回転中心について明らかにした。

謝辞

本研究は、東京工業大学21世紀COEプログラム「都市地震工学の発展と体系化(代表者:大町達夫教授)」と共同で行ったものであり、J2棟の観測データを提供して頂きました。また、風速データについては東京工業大学田村哲郎教授より提供して頂きました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 安井八紀, 大熊武司, 小賀伸一, 下村祥一: 中高層免震建物の強風時実挙動観測, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.445-450, 2002
- 2) 荒川利治, 吉瀬維昭: 実測データに基づく鉄骨造建物における振動特性の評価と振幅依存性に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第22号, pp.157-162, 2005.12
- 3) 大木洋司, 山下忠道, 盛川仁, 山田哲, 坂田弘安, 山中浩明, 笠井和彦, 和田章: 超高層免震建物の長期観測システム構築に関する具体的取り組み, 日本建築学会技術報告集, 第21集, pp.73-77, 2005
- 4) 菊池岳史, 藤森智, 竹内徹, 和田章: メガブレースを用いた超高層免震鋼構造建築物の設計, 日本建築学会技術報告集, 第22集, pp.217-222, 2005.12
- 5) 山田哲, 大河原勇太, 山中浩明, 坂田弘安, 盛川仁, 大木洋司, 笠井和彦, 和田章: 超高層免震建物における地震観測の概要, 日本建築学会学術講演梗概集B-2 pp.963-964, 2007.8
- 6) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 丸善, 2004.5

*1 東京理科大学 学部生

*2 東京理科大学 助教

*3 東京工業大学 助教

*4 東京工業大学 准教授

*5 東京工業大学 教授

*6 東京理科大学 教授