

LRB を用いた超高層免震建物における風応答解析 Time History Analysis of Base-isolated High-rise Building using LRB during Strong Wind

竹内 章博*
Akihiro Takeuchi

要 約

近年、大都市における巨大地震の発生が危惧される中で、安全性確保のため、超高層建物でも免震化が進んでいる。一方で超高層免震建物は長周期化している関係上、風の影響を受けやすくなるため、風に対する応答特性を把握することは設計上重要である。

本論では、LRB（鉛プラグ挿入型積層ゴム）を主体とした超高層免震建物の立体風応答解析を行い、その風応答特性について検討した。

さらに、免震建物と非免震建物の両方に対して風応答解析を行い、風外力による入力エネルギー量の比較検討を行ったので報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 解析条件
- § 3. 超高層免震建物の風応答特性
- § 4. 免震と非免震の入力エネルギー
- § 5. おわりに

§ 2. 解析条件

2-1 対象建物

図-1 に対象建物を示す。対象建物は、地上 37 階で 3 階部分に免震層がある RC 中間層免震建物である。

建物高さは $H = 125\text{ m}$ 、免震層上部の高さは $H' = 115\text{ m}$ 、

§ 1. はじめに

近年、超高層建物でも免震化が進んでいる。一方で超高層免震建物は、通常の免震建物に比べて固有周期が長くなる傾向にあるため、風による影響を受けやすくなる。

このため、超高層免震建物の設計では、耐震設計と同様に耐風設計も重要な課題となり、風に対する応答特性を事前に十分検討する必要がある。

また、風荷重は地震動と異なり、長時間継続して作用する荷重である。このため、免震層の設計では、風外力による入力エネルギー量を把握し、免震層の耐風安全性を検証する必要がある。

そこで、本報では LRB を主体とした超高層免震建物について風応答解析を行い、以下の事項について明らかにした。

- ① 免震層上部の風応答特性
- ② 免震層全体および免震装置の風応答特性
- ③ 風外力による入力エネルギー

以下、検討結果について報告する。

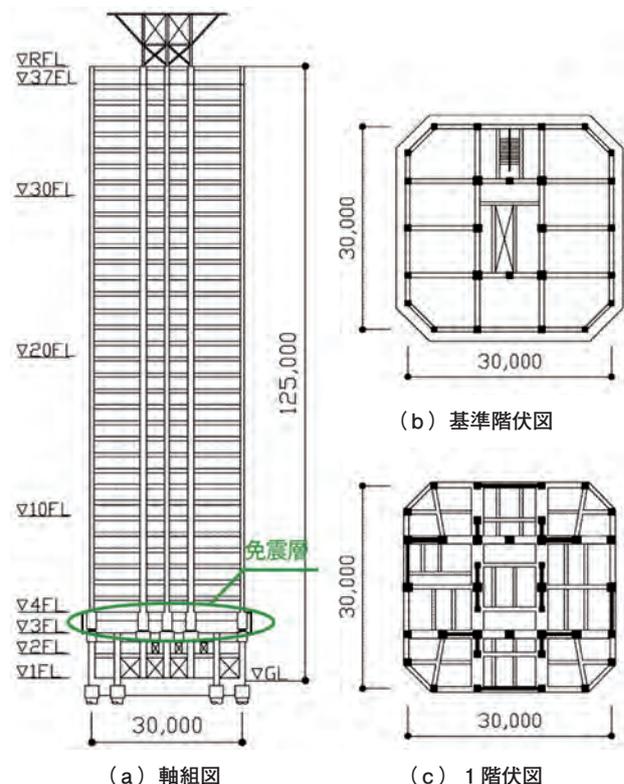


図-1 対象建物

* 建築設計部構造課

平面形状は隅欠きを有する正方形で幅 $B=30\text{ m}$ 、アスペクト比 $H/B=4.17$ である。また初期弾性時固有周期 2.94 秒、建物密度 4.34 kN/m^3 である。

免震装置の配置を図-2に示す。周辺部にLRBを18個、中央部分に低摩擦の弾性すべり支承を8個配置している。各免震装置の概要を表-1に、免震層の $Q-\delta$ を図-3に示す。

2-2 解析モデル

風応答解析^{1),2)}では、免震層より上部の34層を解析対象とした。解析モデルを図-4に示す。

解析モデルは立体モデルとし、弾塑性解析プログラム(SNAP Ver.4: 株式会社システム)を使用した。上部構造は弾性として解析した。

2-3 風外力

縮尺 1/400 の模型を用いて周辺建物を除いた状態で風洞実験を実施し、風力天秤を用いて建物基部転倒モーメントのパワースペクトル密度を測定した。これを基に34層の風外力の時刻歴波形を算出した³⁾。建物頂部風速は $UH=61.9\text{ m/s}$ (神戸, 地表面粗度区分II, レベルII (再現期間500年))としている。入力波形は、水平2方向および揺れ方向の3方向を同時入力とする。風向は建物壁面に正対し、X方向が風直交、Y方向が風方向に該当する。一つの波形は、時間間隔 $\Delta t=0.06$ 秒、データ個数 15,000 個の計 900 秒である。最初の 150 秒間を計算安定のために助走区間とし、150~750 秒の 600 秒間を解析対象としている。解析に用いた代表的な層の風力を図-5に示す。

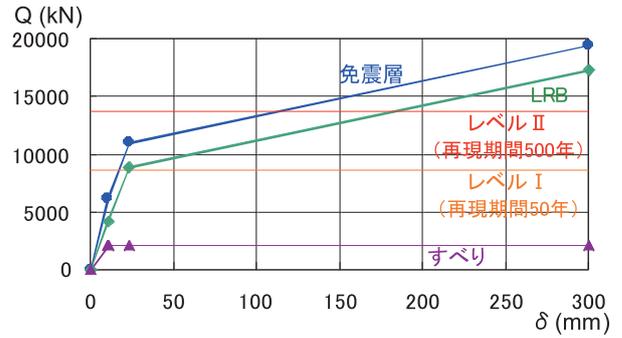


図-3 免震層 $Q-\delta$

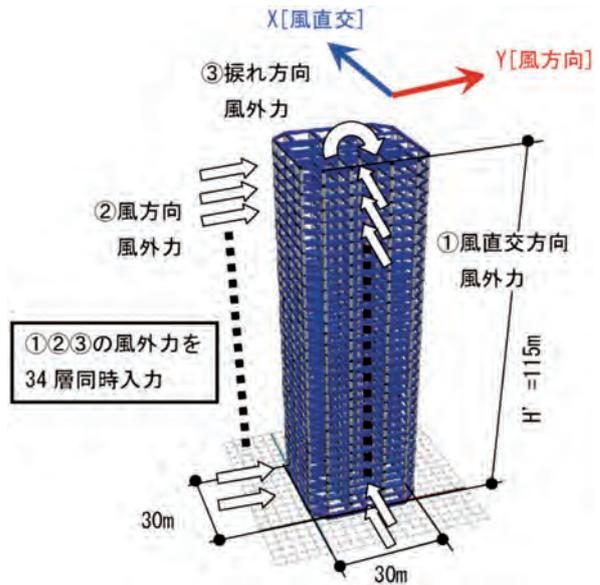


図-4 解析モデル図

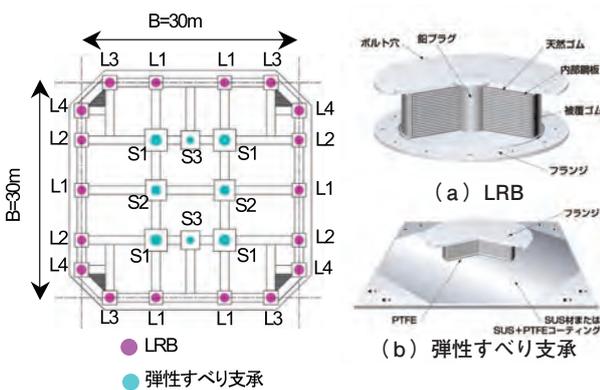


図-2 免震装置配置

表-1 免震装置概要

装置	番号	径	数量	せん断弾性率(Nmm ²)	ゴム総厚(mm)	鉛径(mm)	摩擦係数
LRB	L1	φ 1300	6	0.385	252	300	
	L2	φ 1200	4	0.385	248	280	
	L3	φ 1100	4	0.385	252	250	
	L4	φ 1000	4	0.385	248	230	
弾性すべり支承	S1	φ 1400	4	0.78	40		0.013
	S2	φ 1200	2	0.78	40		0.011
	S3	φ 1000	2	0.78	40		0.011

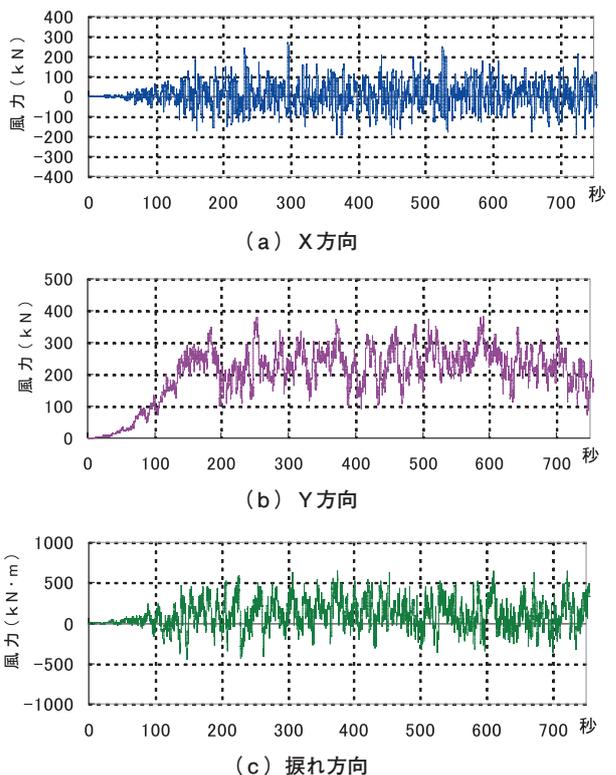
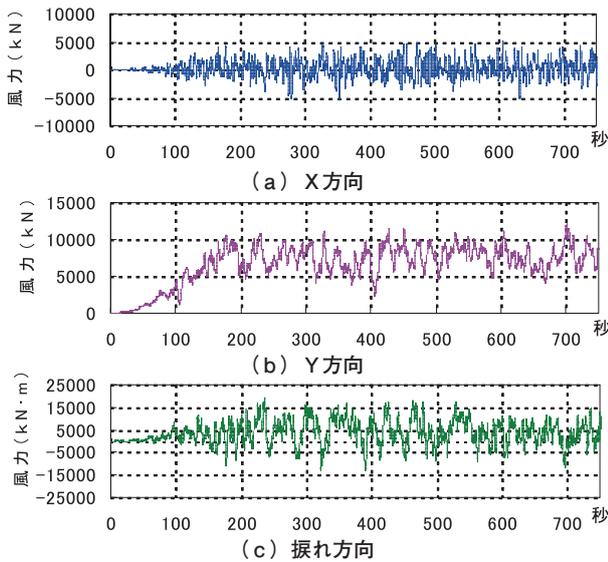
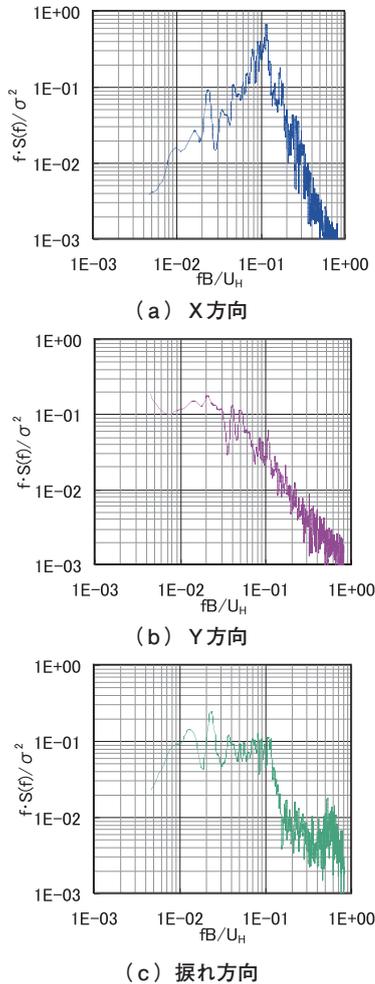


図-5 中間層(17階)の風力波形



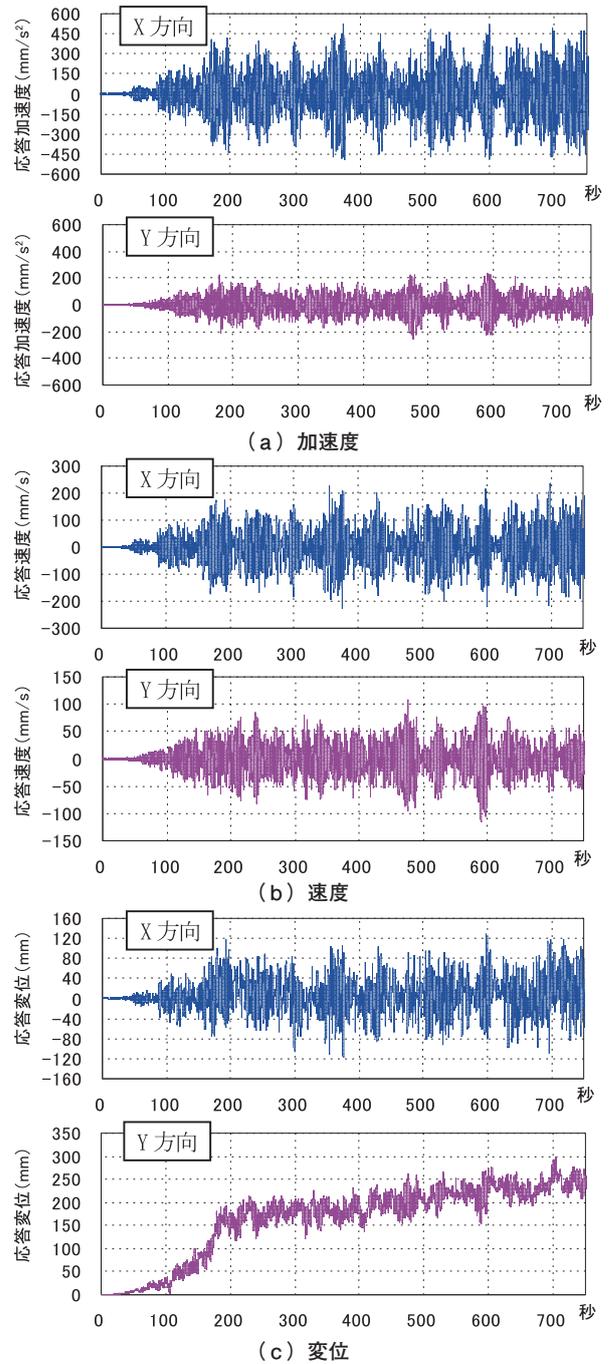
図一六 免震層に作用する風力波形



図一七 無次元化パワースペクトル密度

図一六には、免震層に作用する風力を示し、図一七には、同風力波形の変動風力の無次元化パワースペクトル密度を示した。

風直交のスペクトルは鋭いピークを持つものに対して、風方向は低周波成分にパワーを持つただらかな形状を示している。揺れ方向は、風方向に近い形状を示している。



図一八 建物最上層の応答値

§3. 超高層免震建物の風応答特性

3-1 建物最上層の応答値

最上層の水平2方向の応答加速度、速度、変位の波形を図一八に示す。最大応答加速度は、X方向（風直交）で 531 mm/s^2 Y方向（風方向）で 259 mm/s^2 であり、風直交のほうが大きい。応答速度も同様の傾向がみられる。

この原因として、対象建物のアスペクト比が高いことが主な原因と考えられる。

なお、Y方向（風方向）については、風の平均的な力を受けて、変位が徐々に増加していることが分かる。

3-2 免震層の応答値

免震層における水平2方向の応答加速度，速度，変位の波形を図-9に示す。

最上層の場合と同様に，免震層においても応答値はY方向（風方向）に比べてX方向（風直交）の方が大きい。

なお，変位波形の場合，X方向（風直交）では，両側に振れており，時々大きくずれる箇所が見られる。一方，Y方向（風方向）には，風の平均的な力を受けて，変位が徐々に増加していることが分かる。特に助走区間が終了した直後の150~180秒において，変位が大きくずれる現象が見られる。この傾向は，他の波を使用した解析結果でも同様である（図省略）。

免震層の変位軌跡図を図-10に示す。これより風方向に押されながら，風直交に振れている様子が分かる。最大応答変位は，風直交で52mm，風方向で207mmである。

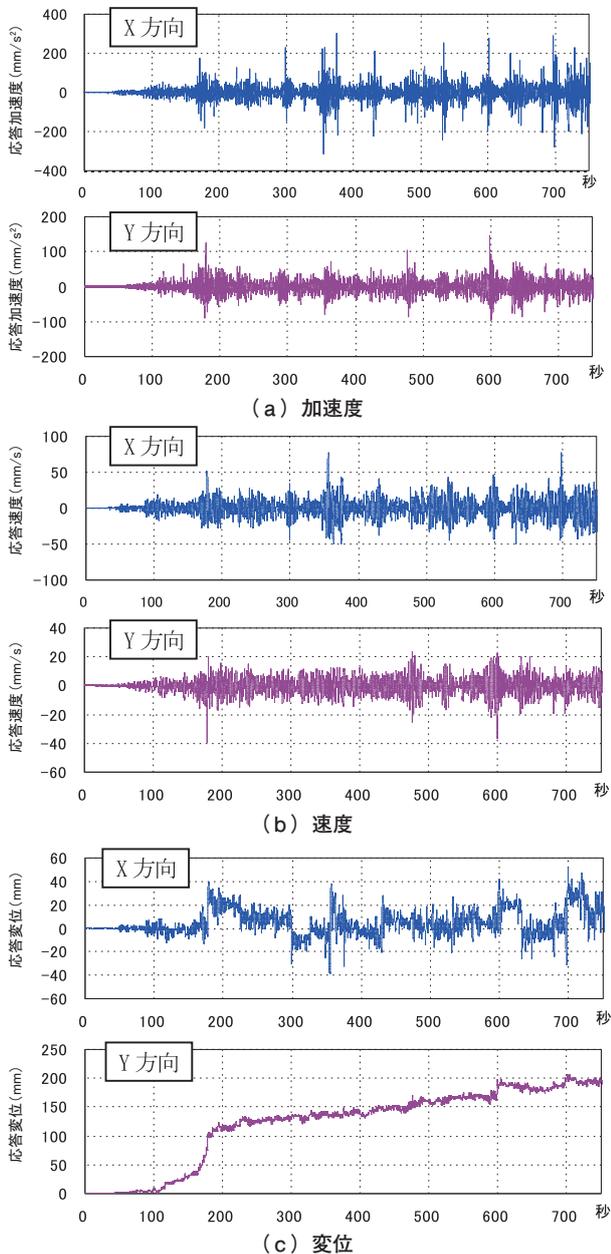


図-9 免震層の応答値

3-3 Q-δ曲線

水平2方向の免震層のQ-δ曲線を図-11に示す。X方向（風直交）の場合，LRBと弾性すべり支承を合わせた免震層のQ-δ曲線に応じた履歴を描いている。

一方，Y方向（風方向）では，初期はLRBと弾性すべり支承を合わせたQ-δ曲線に対応している。その後，徐々にずれが生じて途中からはLRBのみのQ-δ曲線に応じた履歴を描いており，弾性すべり支承の影響が含まれていないように見える。この原因として，弾性すべり支承は鉛と同じように，平均成分には効かずに変動成分のみに効いていることが考えられる。

図-12に弾性すべり支承1基に対するY方向（風方向）のQ-δ曲線を示す。弾性すべり支承のQ-δ図は徐々にQ=0に近づく性状を示し，平均成分には効かずに変動成分のみに効いていることが確認できる。風直交は平均成分がないため，風方向のような現象が生じていない。

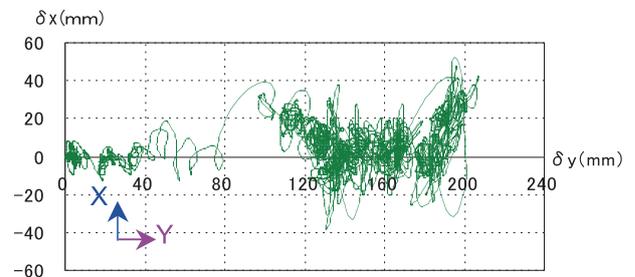


図-10 免震層変位軌跡図

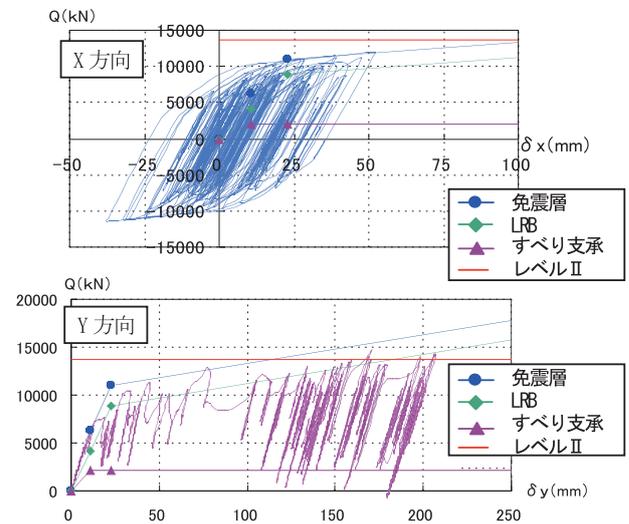


図-11 免震層のQ-δ曲線

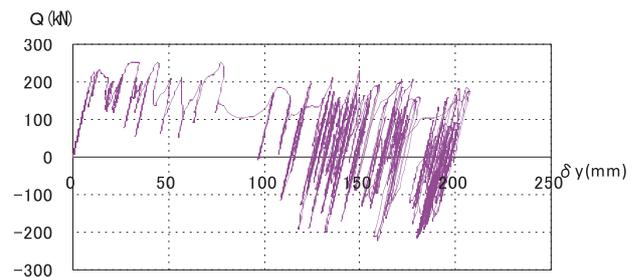


図-12 弾性すべり支承1基のQ-δ曲線（Y方向）

§4. 免震と非免震の入力エネルギー

風による入力エネルギー量の把握は、超高層免震建物の免震装置の設計時に重要である。そこで、以下では免震建物における風による入力エネルギー量を、非免震建物との比較を通して検討する。前章からの解析モデルを「免震建物」とし、そのモデルの免震層を固定にして非免震に相当するモデルを「免震層固定」とする。

4-1 入力エネルギー

時刻歴応答解析1波形における風力3成分（水平2成分と捩れ成分）のエネルギー応答の時刻歴を、項目別に図-13に示す。

600秒間（150～750秒）の入力エネルギー量は、免震建物で15,079 kN・m、免震層固定で5,160 kN・mとなり、免震建物が約3倍である。構造減衰エネルギーは免震建物で若干小さいが、免震建物ではLRBと弾性すべり支承のエネルギーが含まれて両者の差になると考えられる。なお別途実施した風力3成分単独の解析より、本建物の入力エネルギーは風直交成分が支配的であることが判明しているため、風直交成分を中心に検討する。

4-2 固有値解析

固有値解析による風直交の1～3次モードを図-14に示す。(a)が免震層固定の場合で1次固有周期 $T_1=2.54$ 秒である。免震建物の(b)が初期剛性($\gamma=0\%$)で $T_1=2.94$ 秒、(c)が変位40mm($\gamma=16\%$)で $T_1=3.36$ 秒であり、免震層が動くことでモード形状が免震層固定と異なる。変位200mm($\gamma=80\%$)までの免震層変位と1次固有周期 T_1 の関係は図-15に示すように、変位の増加と共に周期が長くなる。

4-3 パワースペクトル密度を用いた入力エネルギー

吉江らの方法⁴⁾を用いて、変動風力パワースペクトル密度から入力エネルギー量を算出し、周期の違いが入力エネルギー量に与える影響について検討する。免震層固定の周期は前述の2.54秒とする。免震建物の周期は、初期弾性時の2.94秒と、風直交の最大変位52mmに近い変位40mm時の3.36秒との中間値である3.15秒を有効周期として用いる⁵⁾。

エネルギー量の計算結果を、時刻歴応答解析の結果と合わせて表-2示す。免震層固定と免震建物の入力エネルギー量の比率を見ると、両者は同じような傾向を示しており、建物周期が入力エネルギー量に与える影響が大きいことが分かる。なお吉江らの方法による計算結果は時刻歴応答解析に比べて小さい。この違いの原因として、時刻歴応答解析は1波のみの結果であるのに対して、吉江らの方法はアンサンブル平均における期待値を表すことが挙げられる。さらに、本検討で吉江らの方法を用いる際に、最も支配的である風直交成分のみを用いたこと、

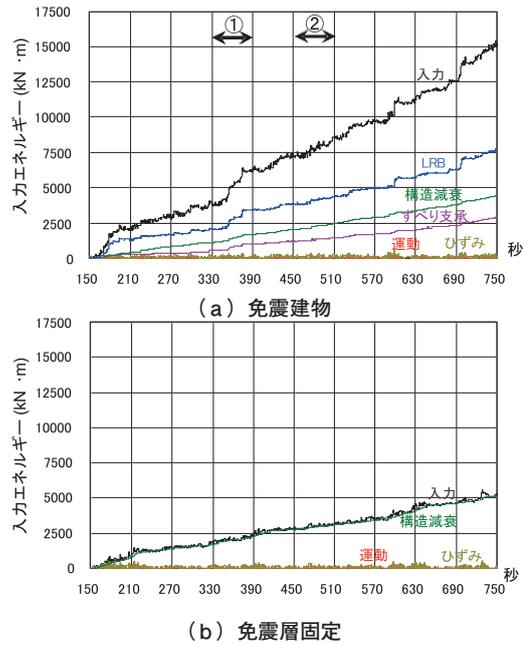


図-13 エネルギー応答の時刻歴

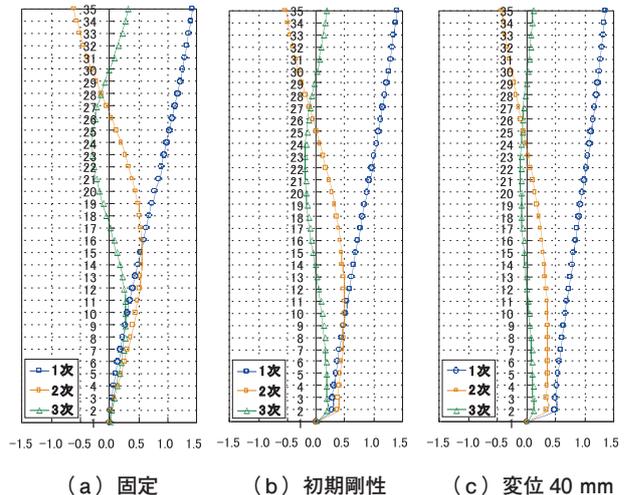


図-14 振動モード（風直交方向1～3次）

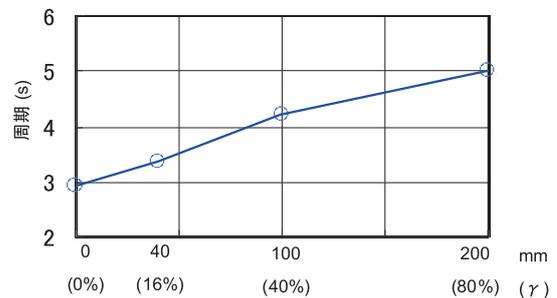
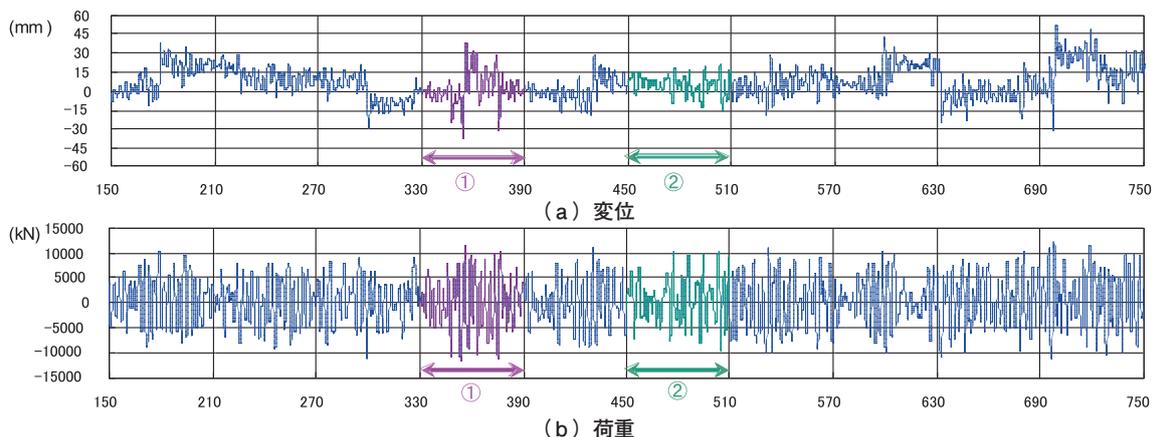


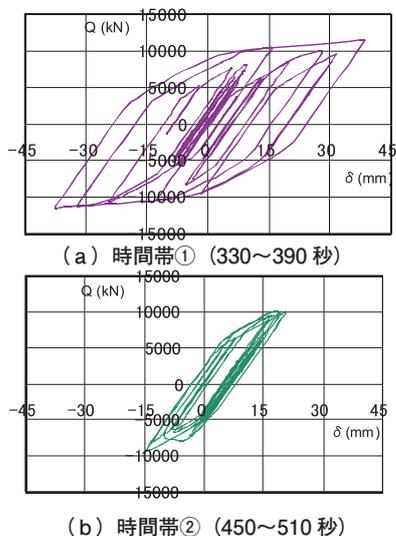
図-15 免震層変位と1次固有周期

表-2 入力エネルギー量の算出結果

対象風向		時刻歴応答解析	吉江らの方法
		風向3成分	風直交のみ
入力エネルギー量	免震層固定 A ($T=2.54s$)	5,160 kN・m	3,403 kN・m
	免震建物 B ($T=3.15s$)	15,079 kN・m	8,577 kN・m
	比率 (B/A)	2.9	2.5



図一16 免震層の時刻歴波形（風直交方向）



図一17 免震層のQ-δ曲線（風直交方向）

周期の違いのみに着目するために免震建物でも免震層固定と同じ振動モードとしたことなども一因と考えられるため、今後検討項目としていきたい。

4-4 エネルギー入力時の挙動

図一13(a)より免震建物では、入力エネルギー量が急激に大きくなる時間帯があることが分かる。そこで60秒間の時刻歴を60秒区切りとし、入力エネルギー量が急激に増加する時間帯①を330~390秒、緩やかに増加する時間帯②を450~510秒とする。図一16(a)の免震層における風直交方向の変位時刻歴より、時間帯②に比べて、時間帯①では変位の大ききずれが生じている。これらの時間帯の免震層の風直交方向Q-δ曲線(図一17)を見ると、時間帯①では大きなループを描いてエネルギー吸収量が大きく、時間帯②ではそれほど大きなループを描いていないためエネルギー吸収量は小さいと考えられる。

なお図一16(b)の荷重時刻歴では、2つの時間帯で傾向は特に見られていない。これらの結果より、変位が大ききずれすることで、周期が長くなり、エネルギー吸収が大きくなる事が分かる。

§5. おわりに

以上、超高層免震の立体モデルを用いた風応答解析を実施し、LRBを用いた免震建物の風応答特性、入力エネルギーについて検討した。

その結果、以下の事項が明らかとなった。

風方向のQ-δ曲線を検討した結果、弾性すべり支承は平均成分に効かない傾向があることが判明した。

風外力による入力エネルギーには、建物周期の違いが大きく影響することを確認した。

超高層免震建物の場合、一般的な免震建物に比べて固有周期が長くなる傾向にあるため、構造設計時に風応答特性を十分検討する必要がある。

今回得られた知見をもとに、風とエネルギーについてより詳細に検討し、免震の設計に反映させていく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、大熊武司神奈川大学名誉教授のご指導を頂いた。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) 竹内, 佐々木：LRBを用いた超高層免震建物における風応答解析その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010
- 2) 佐々木, 竹内：LRBを用いた超高層免震建物における風応答解析その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010
- 3) 丸川他：動的天秤データを利用した高層建築物の時刻歴風力シミュレーションに関する研究, 第12回風工学シンポジウム, pp.207-212, 1992.
- 4) 吉江他：変動風力による弾塑性構造物への総エネルギー入力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第572号, pp.31-38, 2003.10.
- 5) 秋山 宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版