

高減衰ゴム系積層ゴムを用いた超高層免震建築物の地震及び風外乱に対する耐久性の検討

—その1 解析モデルについて—

日大生産工 (学部) ○土橋 健治 (株)ブリヂストン 竹内 貞光 日大生産工 神田 亮
 ダイナミックコントロールデザインオフィス 山下 忠道 (株)長谷工コーポレーション 扇谷 匠己
 東京工業大・建築物理研究センター 佐藤 大樹 神奈川大・工学 犬伏 徹志

1. 序論

近年, 超高層免震建築物の普及により, その設計には地震および風外乱について詳細な検討が必要になってきており, 多くの研究がおこなわれている。例え¹⁾

地震外乱に対する検討にあたって, 超高層免震建築物の固有周期が長い²⁾ため, 従来検討してきた既往波や告示波に加えて, 長周期成分が卓越した長時間・長周期地震動に対して検討が求められている。また, 長時間・長周期地震動は継続時間が10分を超えるため, 構造物が大幅で多数回繰り返し加振されるので耐力評価に対する検討のみならず免震部材の損傷についても検討が必要である。この他, 長時間・長周期地震動による免震部材の繰り返しにより, 代表的な免震部材である鉛プラグ入り積層ゴム (以下 LRB) や高減衰ゴム系積層ゴム (以下 HDR) などは, 水平剛性やエネルギー吸収量が低下するなど復元力特性が複雑に変化する。

2), 3)

風外乱に対する検討にあたっては, 代表的な強風である台風の継続時間が長い⁴⁾ため, 長時間・長周期地震動と同様に免震部材の多数繰り返しによる損傷評価を考慮した検討が必要である。また, 風外乱成分は変動成分だけでなく平均成分を有するため, LRB や HDR などの免震部材は水平クリープを発生し, 応答変形が大きくなる。⁴⁾ 免震建築物の地震や風外乱による応答評価は, 応答変位, せん断力係数, 応答加速度などについて様々な研究がなされてきているが, 損傷評価について検討した例はいくつかあるもののまだ不十分である。^{5), 6)} 特に継続時間の長い風外乱は, 耐力的には評価出来ているが多数繰り返しによる累積損傷につ

いて許容できるものか明らかになっていない。

以上のことを踏まえて, 本論文の目的は, 地震および風外乱に対する累積損傷による免震部材の安全性を検証することである。本論文では, 免震部材として HDR を用い強震動や強風の1イベントにおける累積損傷エネルギーを解析により求め, 実試験体の正弦波加振実験と比較することで, その安全性を評価する。

2. 解析モデルの概要

2.1 対象建築物

本論文の対象建築物は, 図1に示すような建築物高さ150m, 幅30m, 奥行30m, 塔状比5の42階建 (階高1~2階を5.0m, 3~42階を3.5m) である。構造形式はRC純ラーメン架構とする。粘性減衰は上部構造を基礎固定と考えた場合, 1次固有周期(3.13s)に対して2%の初期剛性比例型とし, 免震層の粘性減衰は0%とした。対象建築物の構造諸元を表1に示す。免震部材はHDRのみを使用し, その配置を図2に示す。

表1 構造諸元

建築物重量	560424[kN]
高さ	150[m]
幅	30[m]
1次固有周期	3.13[s]

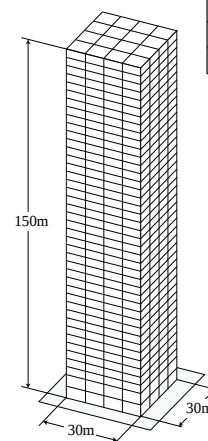
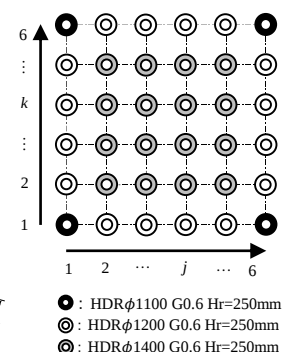
図1 建築物概要¹⁾

図2 免震部材の配置

Study on Damage Estimation of a Super High-Rise Seismic Isolated Building using High-Damping Rubber Bearings under Earthquakes and Wind Excitations.
 -Part1 Overview of analysis model-

Kenji DOBASHI, Sadamitsu TAKEUCHI, Makoto KANDA, Tadamichi YAMASHITA,
 Narumi OUGIYA, Daiki SATO and Tetsushi INUBUSHI

免震部材のゴム外径 ϕ は、1100, 1200, 1400mm, ゴム厚さは 250mm, セン断ひずみ 100%時のセン断弾性率は 0.62MPa, 等価減衰定数は 0.24 である。免震層の構造性能を表 2 に示す。

表 2 免震層の構造性能

	水平	振れ
降伏セン断力係数	0.023	
降伏振れモーメント係数		0.029
免震層周期 [s]	弾性	1.81
	塑性	5.73
	等価	4.41

※セン断ひずみ 100%

2.2 HDR の解析に用いる復元力

ここでは、地震外乱と風外乱に対してそれぞれ異なる復元力モデルを用いる。地震応答解析で HDR を用いる場合、一般的に復元力モデルとして修正バイリニアモデルが使用される。一方、風応答解析では、風外乱の水平方向には一定に加わり続ける力があり、水平クリープ変形を考慮しなければならないので、地震外乱と風外乱は、同じ復元力モデルを用いることができない。よって風外乱に対してクリープ変形を考慮できる復元力モデルを用いる必要がある。

2.2.1 地震用解析モデルの概要

地震用解析モデルは、HDR の地震応答解析に用いる修正バイリニアモデルを用いた。⁷⁾ セン断弾性率 G_{eq} (MPa), 等価減衰定数 H_{eq} , 降伏荷重特性係数 u は、セン断ひずみ依存性を有し、式(1)~(3)で表す。等価剛性 K_{eq} (N/mm) は、セン断弾性率 G_{eq} , 積層ゴム断面積 A (mm²), ゴム厚さ h (mm)から式(4)となる。図 3 に修正バイリニアモデルのセン断応力-セン断ひずみ関係を示す。図 3 は、セン断ひずみ 50%, 100%, 150%, 200%時の値を示す。セン断ひずみが大きくなると等価剛性が低下し、降伏セン断力係数は大きくなる傾向にある。

$$G_{eq} = G_0(2.855 - 3.878\gamma + 2.903\gamma^2 - 1.016\gamma^3 + 0.1364\gamma^4) \quad (1)$$

$$H_{eq} = H_0(0.1950 + 0.2364\gamma - 0.1804\gamma^2 + 0.02902\gamma^3) \quad (2)$$

$$u = u_0(0.9028 + 0.2711\gamma - 0.2083\gamma^2 + 0.03421\gamma^3) \quad (3)$$

$$K_{eq} = G_{eq} \cdot A/h \quad (4)$$

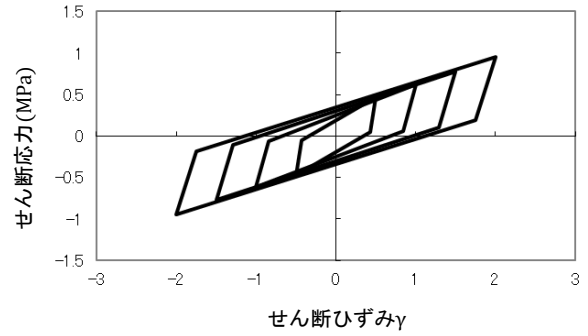


図 3 修正バイリニアモデルのセン断応力-セン断ひずみ関係

2.2.2 風用解析モデルの概要

風用解析モデルは、HDR の変位依存性や、風外乱の主に平均成分により生じる水平クリープの挙動を表現できる DHI モデルを用いた。⁸⁾ DHI モデルの水平 2 方向に関するセン断応力 τ_x, τ_y とセン断ひずみ γ_x, γ_y の関係を式(5)~(8)に示す。ここで n は非線形弾塑性ばねの数, Γ はセン断変形の累積値を示す。 $W(\gamma)$ は積層ゴムが大変形を受けた際の剛性低下を評価するものであり、経験した最大セン断ひずみ γ_{max} の関数である。 Γ', γ' はデュアメル積分に用いる積分変数である。式(5)の第 1 項が非線形弾性ばね, 第 2 項が非線形弾塑性ばねの挙動を表している。第 1 項の非線形弾性ばねにおいてクリープ変形は考慮されている。 $a, b, \theta, \beta, g_1, \dots, g_n, l_1, \dots, l_n$ は物性パラメータである。式(7)の線積分は、 (γ_x, γ_y) が描く変形軌道に関するもので、この場合の Γ は、初期状態から描いた X, Y 方向におけるひずみの総量となっている。式(5)~(8)の物性パラメータは、高減衰ゴムを試験体とした平均成分と変動成分を有する正弦波加振試験の結果から定めている。定めた物性パラメータを表 3 に示す。図 4 に DHI モデ

$$\tau_x(\gamma_x, \gamma_y) = W[a\gamma_x + b\gamma_x(\gamma_x^2, \gamma_y^2)] + \sum_{i=1}^n g_i \int_0^{\Gamma} e^{-(\Gamma-\Gamma')/l_i} \frac{d}{d\Gamma'} \left[\frac{1}{3} (\gamma'_x - \gamma_y)(\gamma'^2_x + \gamma'^2_y) + \gamma'_x \right] d\Gamma' \quad (5)$$

$$\tau_y(\gamma_x, \gamma_y) = W[a\gamma_y + b\gamma_y(\gamma_x^2, \gamma_y^2)] + \sum_{i=1}^n g_i \int_0^{\Gamma} e^{-(\Gamma-\Gamma')/l_i} \frac{d}{d\Gamma'} \left[\frac{1}{3} (\gamma'_y - \gamma_x)(\gamma'^2_x + \gamma'^2_y) + \gamma'_y \right] d\Gamma' \quad (6)$$

$$\Gamma = \int_c \sqrt{d\gamma_x^2 + d\gamma_y^2} \quad (7)$$

$$W(\gamma_x, \gamma_y) = \theta + (1 - \theta)e^{(-\gamma_{max}/\beta)} \quad (8)$$

ルのせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。せん断応力 $0.2 \pm 0.2 \text{ MPa}$ で正弦波繰り返し加振した際の結果である。せん断応力-せん断ひずみ関係は曲線的な挙動を示し、繰り返し加振によりせん断ひずみが増大する水平クリープが確認できる。

表 3 風用解析モデルの物性パラメータ

a(MPa)	b(MPa)	θ (無次元)	β (無次元)	g_1 (MPa)	n
0.64	0.0	0.35	0.8	1.62	3
g_2 (MPa)	g_3 (MPa)	l_1 (無次元)	l_2 (無次元)	l_3 (無次元)	
0.445	0.06	0.0417	2.66	200	

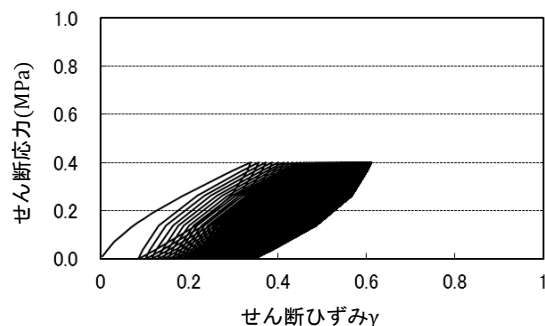


図 4 DHI モデルのせん断応力-せん断ひずみ関係

2.3 解析に用いた外乱

2.3.1 解析に用いた地震外乱

表 4 に解析に用いた地震動を示す。既往地震動の El Centro NS 波は最大速度が 50 cm/s となるようにした。長時間・長周期地震動として建築基準整備促進事業の平成 23 年度「超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討」⁹⁾で作成された地震動を用いた。長時間・長周期地震動は、東海、東南海、南海の 3 つの断層が連動して発生した場合のサイト波であり、選択したサイトは新宿 (KGIN)、津島 (AIC003)、此花 (OSKH02)、浜松 (SZO024) の 4 ヶ所である。図 5 に解析に用いた地震動を速度応答スペクトルで示す。El Centro を見ると固有周期 0~2 秒にかけて、非常に大きな速度応答があり、固有周期 5 秒以降の速度応答は一定になるのがわかる。KGIN や AIC003、OSKH02、SZO024 を見ると固有周期 0~2 秒にかけて、El Centro より速度応答が SZO024 以外は小さいが、固有周期 5 秒以降も速度応答が El Centro より大きい傾向にあるのがわかる。このように固有周期が 5 秒以降に大きな応答を示す地震動を長時間・長周期地震動と呼び、固有周期が長い超高層免震建築物は、これらの長時間・長周期地震動に対して共振してしまう可能性がある。

よって長時間・長周期地震動に対する検討が必要になるのがわかる。表中の ave は、各サイトにおいて多くの地震動を作成し、求めた応答スペクトルから平均的な大きさの地震動を示す。また、 $+\sigma$ は ave の場合と同様に地震動を作成し、応答スペクトルのばらつきから標準偏差で $1 \times \sigma$ のレベルの地震動を示す。いずれも継続時間は 739.82 秒と El Centro NS 波や BCJ-L2 と比べて約 5~12 倍長い。

表 4 解析に用いた地震動

地震動	最大加速度 (cm/s^2)	継続時間 (s)
El Centro NS 波 (50 cm/s)	511.53	53.74
BCJ-L2	355.66	120.0
KGIN $+\sigma$	77.2	739.82
KGIN ave	42.1	739.82
AIC003 $+\sigma$	380.4	739.82
AIC003 ave	199.4	739.82
OSKH02 $+\sigma$	147.1	739.82
OSKH02 ave	98.5	739.82
SZO024 $+\sigma$	576.8	739.82
SZO024 ave	1064.4	739.82

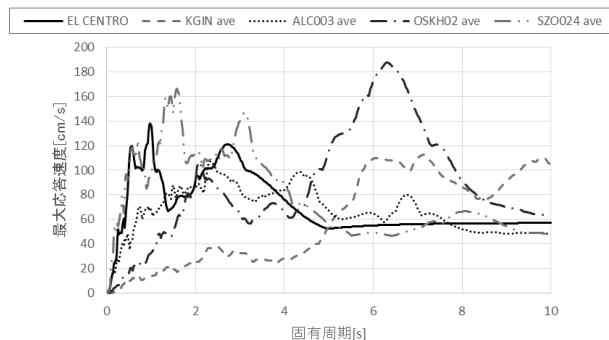
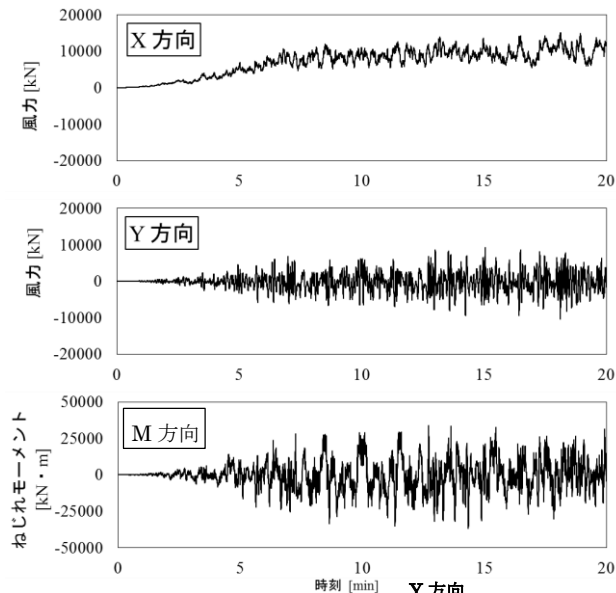


図 5 速度応答スペクトル

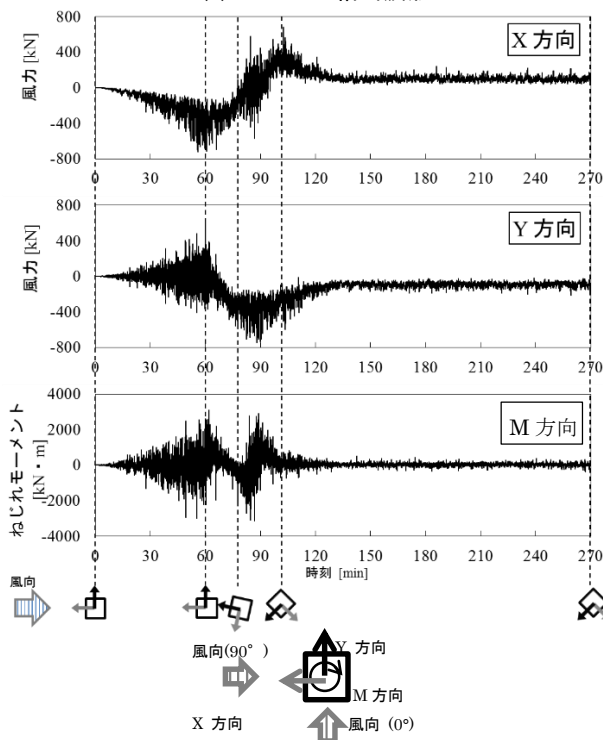
2.3.2 解析に用いた風外乱

検討をおこなった風力波形は、静止風圧実験により得られた結果を基に、極めて稀に発生する暴風(再現期間 500 年)によって基準化された時刻歴風力波形(以下、Level12 相当波形)と、文献 10) に示した台風 0418 号の風力波形(以下、台風波形)を用いる。台風波形は福岡県の朝倉観測所で実際に観測された記録に基づき、風向・風速変化をモデル化したものである。最大風速を再現期間 500 年相当(極めて稀に発生する暴風)に基準化している。尚、台風波形は、台風の接近に伴い風速

が増大し、通過した後は風速が低下していく特徴がある。図 6 に風力の時刻歴と構造軸を示す。図 6(a) の Level12 相当波形は免震層に作用する各層の風力および風力モーメントの合力の波形を示す。X 方向が風方向、Y 方向が風直交方向、M 方向が振れ方向である。図



(a) Level12 相当波形



(b) 台風 0418 号

図 6 各成分の風力の時刻歴と構造軸

6(b)は台風波形の地表面高さ約 100m 位置における X 方向と Y 方向の風力波形、M 方向の風力モーメント波形を示す。60 分から 100 分の間に著しい風向変化を確認することができる。この間、風速は最大となっている。風向変化中に建築物が風向に対して正対(0° , 90° など)する前後において、風力が正負に振れる現象が X 方向の風力波形に顕著に表れている。風向変化が起こっている時間帯には、M 方向の波形が大きく正負に変化しているのが確認できる。

3. まとめ

本論文その 1 では解析概要について記した。その 2 では解析結果について記す。

「参考文献」

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，日本建築学会，2013.10
- 2) 田上 淳，引田真規子，竹中康雄他：大型振動台を用いた長周期地震動に対する実大免震部材の加力実験（その 4 鉛プラグ入り積層ゴムの多数回繰り返し実験結果），日本建築学会大会梗概集，pp341-342，2013.8
- 3) 中西 啓二，山本 祥江，高山 峯夫：大型震動台を用いた長周期地震動に対する実大免震部材の加力実験（その 6：高減衰積層ゴムの実験概要），日本建築学会大会梗概集，pp345-346，2013.8
- 4) 日本免震構造協会：免震建築物の耐風設計指針，日本免震構造協会，2012. 9
- 5) 片桐純治，大熊武司，丸川比佐夫，鶴見俊雄：レインフロー法による基礎免震高層建築物の免震層風応答性状の検討，第 23 回風工学シンポジウム，pp307-312，2014
- 6) 宮崎充，河内山修，由利健太，北村春幸他：繰返し変形を受けた鉛プラグ入り積層ゴムの健全性（その 5 鉛プラグ入り積層ゴムの微小振幅疲労試験），日本建築学会梗概集，pp719-720，2013.8
- 7) 「高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R タイプ)技術資料」，(株)ブリヂストン，2011.5
- 8) 竹内貞光，山下忠道，神田亮，森隆浩，加藤秀章，扇谷匠己，梁川幸盛：高減衰ゴム系積層ゴムを適用した超高層免震建物の XY 方向風応答シミュレーション，構造工学論文集，Vol.60B，pp495-506，2014.3
- 9) 大川出，佐藤智美，藤堂正喜他：超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討-長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ 3 連動地震による超高層・免震建物の応答解析，建築研究所資料，No.144 号，2013.8
- 10) 扇谷匠己，神田亮，山下忠道，梁川幸盛，佐藤大樹，原田浩之，中村遼太郎：台風通過時に高層免震建築物に作用する風外乱の作成とその応答に関する研究，構造工学論文集，Vol.59B，pp427-433，2013.3