

超高層免震建築物に用いた高減衰ゴム系積層ゴムの 地震および風外乱に対する累積吸収エネルギーの評価

－その1 解析諸元－

日大生産工 ○土橋 健治 (株)ブリヂストン 竹内 貞光
日大生産工 神田 亮 東京工業大学未来産業技術研究所 佐藤 大樹
ダイナミックコントロールデザインオフィス 山下 忠道 神奈川大・工学 犬伏 徹志
(株)長谷工コーポレーション 扇谷 匠己

1. 序論

東日本大震災以降、大都市に長周期成分の卓越した長周期・長時間地震動が襲う可能性が指摘されている。長周期・長時間地震動は、継続時間が数分を超える点が特徴的である。超高層免震建築物は固有周期が長いため、長周期・長時間地震動と共振しやすく、免震部材が長時間にわたり多数回繰り返し加振される。多数回繰り返し加振される影響として、田上、中西らにより、長周期地震動による高減衰ゴム系積層ゴム（以下、HDR）や鉛プラグ入り積層ゴム（以下、LRB）の実大加振実験が行われ、積層ゴムの降伏荷重の低下や履歴面積の減少が確認されている^{1),2)}。また、免震建築物の高層化により、建築物に作用する風外乱が増大し、地震外乱と拮抗するようなケースがみられる。代表的な強風である台風の風外乱は、継続時間は数時間にも及ぶため、長周期・長時間地震動と同様に免震部材が長時間にわたり多数回繰り返し加振される。宮崎、河内山らにより風外乱を想定したLRBの微小振幅多数繰り返し加振実験が行われ、LRBの健全性と疲労特性について確認されている^{3),4)}。これらの研究は、実試験体を用いた正弦波加振実験を用いて多数回繰り返しによる評価が行われている。

応答解析を用いた多数回繰り返しによる影響の研究として、北村らによりHDRの大振幅・多数回繰り返しによる積層ゴムの熱・力学的連成挙動を考慮した免震構造の地震応答解析手法が提案されている⁵⁾。その中では、累積履歴エネルギー依存性を考慮した応答解析と正弦波加振実験結果を累積履歴エネルギーで比較を行っている。しかし、応答解析から得られるランダムな挙動と正弦波加振実験から得られる正弦波な挙動は、単純には比較できない。両者が等価な条件であることを確認し比較することが必要である。

以上を踏まえて、本論文の目的は、超高層免震建築物における地震および風外乱の時刻歴応答解析を行い、多数回繰り返しによる免震部材の安全性の評価方法を提案する。多数回繰り返しによる免震部材の安全性を評価する上で、正弦波加振実験結果と応答解析結果の比較の基準として、免震部材の累積吸収エネルギーを挙げる。応答解析と正弦波加振実験を等価な比較を行うため、応答解析から得られるランダムな波形を正弦波置換し、振動数、振幅、継続時間に条件を設ける。なお、本論文では、既往波、告示波のみならず、長周期・長時間地震動や台風通過時に作用する風外乱（以下、台風波形）、Level2相当風力

Evaluation of Cumulative Absorbed Energy for Earthquakes and Wind Excitations acting on a Super High-Rise Seismic Isolated Building using High-Damping Rubber Bearings － Part1 Overview of Analysis －

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

波形を入力し、応答解析によってそのランダム挙動を求める。

2. 解析モデル

本論文の対象建築物は、 $30\text{m} \times 30\text{m} \times 150\text{m}$ の基礎に免震層を有する超高層免震建築物である。上部構造のアスペクト比 5 の 42 階建(階高は 1-2 階を 5.0m, 3-42 階を 3.5m)の RC 純ラーメン架構とする。対象建築物(上部構造)⁶⁾を Fig.1, 構造諸元を Table1 に示す。Fig.2 に示すように対象建築物の構造軸に対して X 方向を風方向, Y 方向を風直交方向, M 方向を振れ方向とする。地震動を入力した場合の免震層の復元力特性モデルは文献 7) で示したもの(「Deformation History Integral type モデル」という), 風外乱を入力した場合の免震層の復元力特性モデルは文献 8) で示したものをを用いた。地震動を入力した場合と風外乱を入力した場合で, 異なる復元力特性を用いるのは, 次のような理由からである。風外乱は, 平均成分を有し, 免震部材にクリープ変形を生じさせる。クリープ変形は, 免震部材の挙動に少なからず, 影響を与えるため, その影響を考慮できる復元力特性のモデルを風外乱に用いた。免震部材の配置を Fig.3 に, 構造性能を Table2 に示す。対象建築物の塑性時における免震周期は, 水平成分が 5.73 秒, 振れ成分が 5.11 秒となっている。

3. 解析に用いた地震外乱

Table3 に解析に用いた地震動を示す。既往波である El Centro NS は最大速度が 50cm/s となるように基準化した。告示波として日本建築センターで作成された BCJ-L2 を用いた。長周期・長時間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。長周期・長時間地震動は, 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。Fig.4 に一例として El Centro NS と OSKH02 の加速度波形を示す。

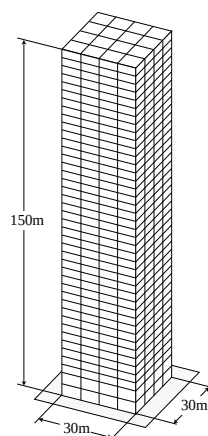


Fig.1 Model Building⁶⁾

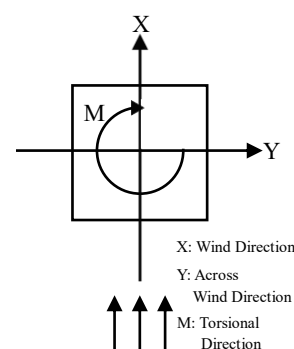


Fig.2 Wind Direction and Structural Axes

Table1 Structural Parameters

Building Weight[kN]	560424
Height[m]	150
Width・Depth[m]	30
Elastic First Natural Period[s]	3.13

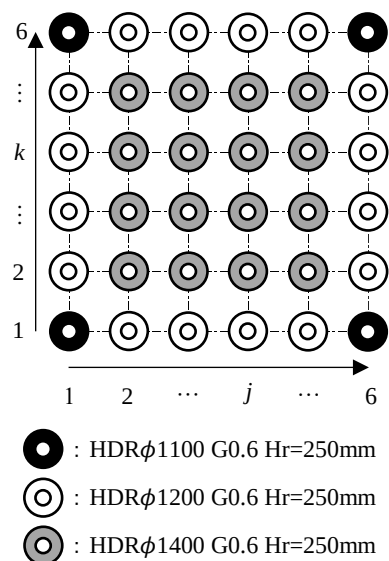


Fig.3 Arrangement of the Seismic Isolation

Table2 Parameters of the Seismic Isolation Layer

		Horizontal	Torsional
Yield Shear Force Coefficient		0.023	
Torsional Moment Coefficient at Yield			0.029
Seismic Isolation Period[s]	Elastic	1.81	1.62
	Plastic	5.73	5.11
	Equivalent Stiffness	4.41	3.93

※Shear Strain 100%

Fig.5 に解析に用いた地震動の速度応答スペクトルを示す。El Centro NS 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。BCJ-L2 を見ると固有周期が大きくなるにつれて、速度応答も大きくなるのがわかる。長周期・長時間地震動を見ると固有周期 0~2 秒にかけて、El Centro NS より速度応答が SZO024 以外は小さいが、固有周期 5 秒以降の速度応答が El Centro NS より大きい傾向にあるのがわかる。前述したように、本検討に用いる対象建築物の免震周期は、水平成分が 5.73 秒、捩れ成分が 5.11 秒であり、これらの長周期・長時間地震動と共振することが予想される。さらに、いずれも継続時間は 739.82 秒と El Centro NS や BCJ-L2 と比べて約 5~12 倍長く、免震部材により多く繰り返し挙動が生じる可能性がある。これらの地震外乱による時刻歴応答解析は 1 方向入力で行った。

4. 解析に用いた風外乱

検討を行った風力波形は、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(以下、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、Level2 相当波形)と、文献 10) に示した台風 0418 号の最大風速を再現期間 500 年相当に基準化した風力波形(以下、台風波形)を用いた。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。なお、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。Fig.6 に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。Fig.7 に Level2 相当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。台風波形では、経過時間 60 分から 100 分の間に著しい風向変化が生じている。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

Table3 Input Earthquake Motion

Earthquake Motion	Maximum Acceleration(cm/s ²)	Duration(s)
El Centro NS	511.53	53.74
BCJ-L2	355.66	120.0
KGIN	42.1	739.82
AIC003	199.4	739.82
OSKH02	98.5	739.82
SZO024	576.8	739.82

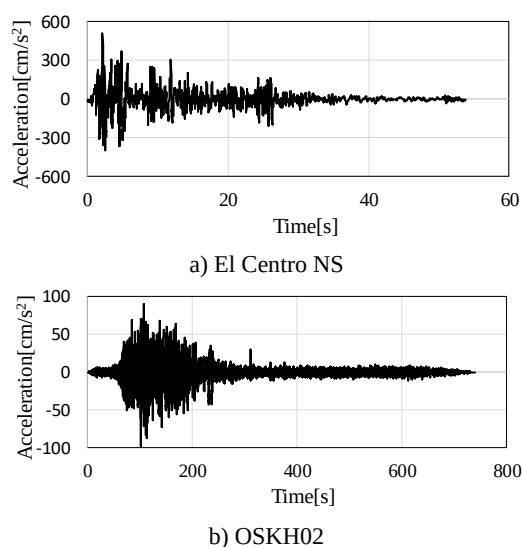


Fig.4 Input Earthquake Ground Acceleration

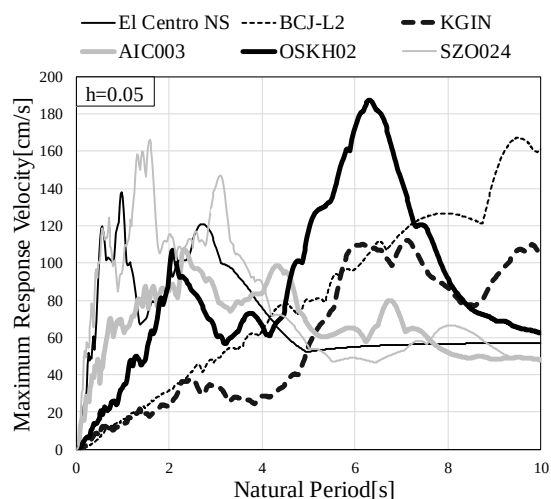


Fig.5 Seismic Response Spectra

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。

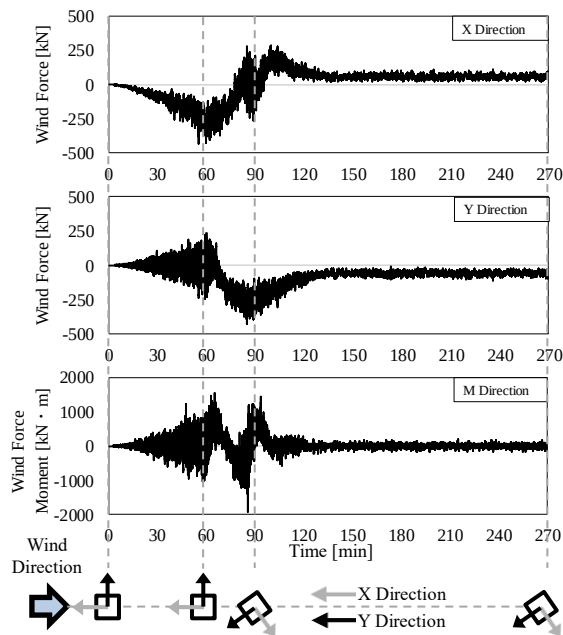


Fig.6 External Wind Force under Passing the Typhoon in Time History

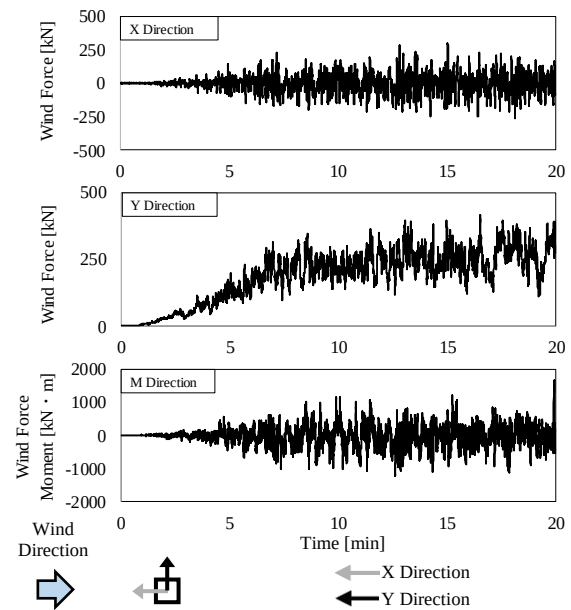


Fig.7 External Wind Force of Level2 in Time History

5. 結論

本論文その 1 では、対象建築物である超高層免震建築物の解析諸元および入力する地震外乱、風外乱について記した。その 2 では、時刻歴応答解析結果と多数回繰り返しによる免震部材の安全性の評価方法を提案する。

参考文献

- 1) 田上淳, 引田真規子, 竹中康雄, 梶原浩一, 田原健一, 高山峯夫, 飯場正紀: 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, pp.341-342, 2013.8
- 2) 中西 啓二, 山本 祥江, 高山 峯夫, 梶原浩一, 田原健一, 飯場正紀: 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, pp.345-346, 2013.8
- 3) 宮崎充, 河内山修, 由利健太, 北村春幸, 竹中康雄, 鈴木重信: 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, pp.719-720, 2013.8

- 4) 河内山 修, 神田 智之, 竹中 康雄, 宮崎 充, 中村 昌弘, 北村 春幸: 鉛プラグ入り積層ゴムの小振幅疲労特性実験, 日本建築学会技術報告集, Vol21, No48, pp.639-644, 2015.6
- 5) 北村春幸, 早川修平, 竹中康雄, 高岡栄治, 室田伸夫: 高減衰積層ゴムの熱・力学的連成挙動の免震建物応答への影響評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol75, No.655, pp.1635-1644, 2010.9
- 6) 日本建築学会: 免震構造設計指針, 日本建築学会, 2013.10
- 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, pp.495-506, 2014.3
- 9) 大川出, 佐藤智美, 佐藤俊明, 藤堂正喜, 北村春幸, 鳥井信吾, 辻泰一, 北村佳久: 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, pp.427-433, 2013.3