

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2 累積吸収エネルギーに関する評価－

(株)ブリヂストン ○竹内 貞光 日大生産工 土橋 健治
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

その1では、解析に用いた超高層免震建築物の概要、高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデル、検討に用いる地震および風外乱について示した。その2ではそれらを用いた応答解析を行うとともに、多数回繰返しによる免震部材の安全性の評価方法を提案する。

2. 応答解析結果

2.1 最大応答変位

免震層の最大応答変位を Fig.1 に示す。地震外乱の最大応答変位は、OSKH02, BCJ-L2, KGIN が大きな応答を示した。一方、風外乱の最大応答変位は、Level2 相当波形と台風波形はあまり差がない。地震外乱と風外乱で比較すると免震層の最大応答変位は地震外乱によるものが大きな応答を示した。OSKH02, BCJ-L2, KGIN が大きな応答を示したのは、その1の Fig.5 に示した速度応答スペクトルより、これらのスペクトルピークが6秒付近にあり、本論文に用いた超高層免震建築物の免震周期（水平成分が5.73秒、捩れ成分が5.11秒）の近傍にあることから、共振が生じたためと考えられる。

2.2 最大応答せん断力係数

1層の最大応答せん断力係数を Fig.2 に示す。地震外乱の最大せん断力係数は、最大応答変位同様、OSKH02, BCJ-L2, KGIN が大きな応答を示した。風外乱の最大せん断力係数は、Level2 相当波形の風向方向がやや小さいが、それ以外は概ね同程度となっている。地震外乱と風外乱で比較すると1層の最大応答せん断力係数はあまり差がなく、拮抗するレベルとなっている。

2.3 最大累積吸収エネルギー

免震部材の吸収エネルギー評価を行うパラメータとしてゴム単位体積あたりの累積吸収エネルギーを定義する。これは、免震部材のせん断力-変形関係から時間ステップごとに履歴の面積を求め合算し、それをゴム体積当たりで除して求めたものである。

免震層の最大累積吸収エネルギーを Fig.3 に示す。地震外乱と風外乱のゴム体積あたりの累積吸収エネルギーを比較すると、既往波である El Centro NS は、台風波形（Y方向）の約1/10、BCJ L2 は、台風波形（Y方向）の約1/2倍となっている。これより、通常の地震動に比べて台風波形のゴム体積あたりの累積

Evaluation of Cumulative Absorbed Energy for Earthquakes and
Wind Excitations acting on a Super High-Rise Seismic Isolated Building using
High-Damping Rubber Bearings
－ Part2 Estimation of Cumulative Absorbed Energy －

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

吸収エネルギーは大きいといえる。長周期・長時間地震動である OSKH02 と台風波形（Y 方向）を比較すると、最大応答値には差があったものの、累積吸収エネルギーでは拮抗するレベルとなっていることがわかる。

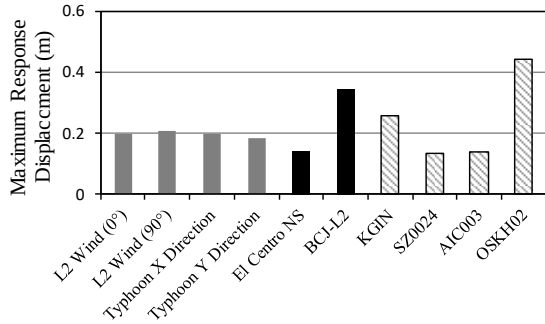


Fig.1 Maximum Response Displacement

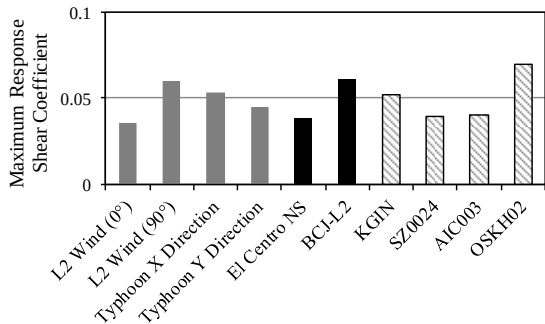


Fig.2 Maximum Response Shear Coefficient

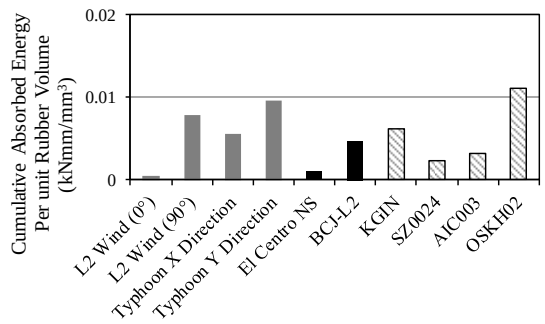


Fig.3 Maximum Cumulative Absorbed Energy

3. 解析結果と正弦波加振実験の比較条件

超高層免震建築物に用いた HDR が長周期・長時間地震動や台風波形により、多数回繰り返し加振される影響を検討するため、解析より得られた累積吸収エネルギーと正弦波加振実験結果との比較を行う。当然、正弦波加振実験における HDR に与えられる挙動は、本解析より得られたランダムな挙動と異なる。これらの 2 つの挙動を等価に比較するために、ランダム挙動に対し、正弦波置換法¹⁾を適用し、置換振

数 f_r 、置換振動数 f_r を式(1)～(2)によって求める。

$$f_r = N/t_0 \quad (1)$$

$$A_r = \sqrt{2} \times \sigma \quad (2)$$

N はランダム波の繰り返し数、 t_0 は継続時間、 σ はランダム波の標準偏差である。本論文では、文献 2) を準用して免震層変形の継続時間 t_0 を定義した。つまり、地震外乱、台風波形については、ゴム体積当たりの累積吸収エネルギーが 5%～95% を示す時間とし、Level2 相当波形は後半の 10 分間とした。繰り返し回数 N は、実行継続時間内に変位振幅が 0 軸を正の傾きで超える回数とした。ここで、Level2 相当波形の X 方向と台風波形は風外乱の平均成分の影響により変位波形がドリフトしているため、移動平均法により、平均成分を求め、原波形から平均成分を差し引いて、変動成分のみを抽出した。風外乱の平均成分の影響については今後の課題としたい。正弦波加振により得られる正弦波挙動の継続時間を t_s 、繰り返し数を N_s 、振幅を A_s とすると、以下に示す条件を満足すれば、実試験体に対する正弦波加振実験の方が、解析により、得られたランダムな挙動下において免震部材はその性能を保てると考えられる。

$$\text{振動数} : f_r \leq N_s/t_s$$

$$\text{継続時間} : t_0 \leq t_s$$

$$\text{振 幅} : A_r \leq A_s$$

4. 解析結果と正弦波加振実験の比較検討

Table1 に正弦波置換法に従って求めた各パラメータを示す。Table1 をみると、地震外乱では、置換振動数が 0.178～0.421Hz、等価振幅が 0.056～0.179m、継続時間は既往波で 33.9～73.1 秒、長周期・長時間地震で 59.3～191.3 秒である。風外乱では、置換振動数が 0.122～0.204Hz、等価振幅が 0.019～0.090m、継続時間が 600～2806.6 秒である。正弦波加振試験に用いた Test A、Test B は文献 3) に記載したもの、Test C は文献 4) に記載したものをを用いた。Test A、B は風荷重を想定し、Test C は、地震荷重を想定した正弦波加振実験である。Table2 に試験条件を示す。本試験条件は文献 3) に記載の耐風安全性の評価において、Test A はランク b または c、Test B はランク c

に相当する。ここで、ランク b は風荷重の変動成分が免震部材の降伏応力を超えない状態、ランク c は風荷重の変動成分が免震部材の降伏応力を超えている状態を示す。実試験体と地震および風外乱を比較すると、振動数、振幅、継続時間は概ね試験結果内に収まっているが、El Centro NS, SZO024 は振動数が試験結果より範囲外である。この部分については、別途検討を要するが、解析結果はおおよそ試験結果の範囲内にあることから、本試験結果を用いて解析結果を評価することは安全側であると判断できる。

5. 累積吸収エネルギーの比較

Fig.4 にゴム単位体積当たりの累積吸収エネルギーの時刻歴を示す。Fig.4 は両対数を使用することで、解析結果から求めた継続時間内のゴム単位体積当たりの累積吸収エネルギーの変化と実験結果を容易に確認することができる。図には本解析でゴム単位体

積当たりの累積吸収エネルギーの大きかった OSKH02, Level2 相当波形 (Y 方向), 台風波形 (Y 方向) と実験結果を示した。風外乱である Level2 相当波形 (Y 方向) と台風波形 (Y 方向) は、長周期・長時間地震動である OSKH02 と累積吸収エネルギーが拮抗していることがわかる。この結果から、地震外乱のみならず風外乱に関しても HDR の繰り返しによる影響を考慮した検討が必要であると言える。また、風外乱である Level2 相当波形 (Y 方向) と台風波形 (Y 方向), そして長周期・長時間地震動である OSKH02 を正弦波加振実験の Test A と比較すると、ゴム単位体積当たりの累積吸収エネルギーは実験の方が約 10 倍も大きいことがわかる。この実験において試験体には損傷はなく、安全性は確認できているため、応答解析で用いた HDR は十分に安全であると言える。

Table1 Parameters of Replacement of Sine Wave

Excitation		Duration time t_0 (s)	Cyclic Number N (times)	Replacement of Period T_r (s)	Replacement of Frequency f_r (1/s)	Replacement of Amplitude A_r (m) (strain)
EL Centro NS		33.9	12	2.82	0.354	0.056 (0.244)
BCJ L2		73.1	13	5.62	0.178	0.144 (0.576)
KGIN		191.3	25	7.65	0.131	0.097 (0.389)
SZO024		59.3	25	2.37	0.421	0.061 (0.279)
AIC003		104.3	23	4.97	0.201	0.070 (0.279)
OSKH02		127.2	19	6.70	0.149	0.179 (0.716)
Level2	X	600	73	8.22	0.122	0.019 (0.077)
	Y	600	96	6.25	0.160	0.088 (0.179)
Typhoon	X	2529.8	452	5.60	0.179	0.090 (0.362)
	Y	2806.6	573	4.90	0.204	0.087 (0.347)
Sine Wave Excitation	A	7227.58	—	3.00	0.330	0.200
	B	7200	—	3.00	0.330	0.300
	C	600	—	3.00	0.330	(2.00)

Table2 Test Condition

Test	Compression Stress (MPa)	Shear Stress (MPa)	Shear Strain	Period (s)	Frequency (Hz)	Total time (s)
Test A	15	0.2±0.2	—	3.0	0.33	7200
Test B	15	0.3±0.3	—	3.0	0.33	7200
Test C	15	—	±2.0	3.0	0.33	600

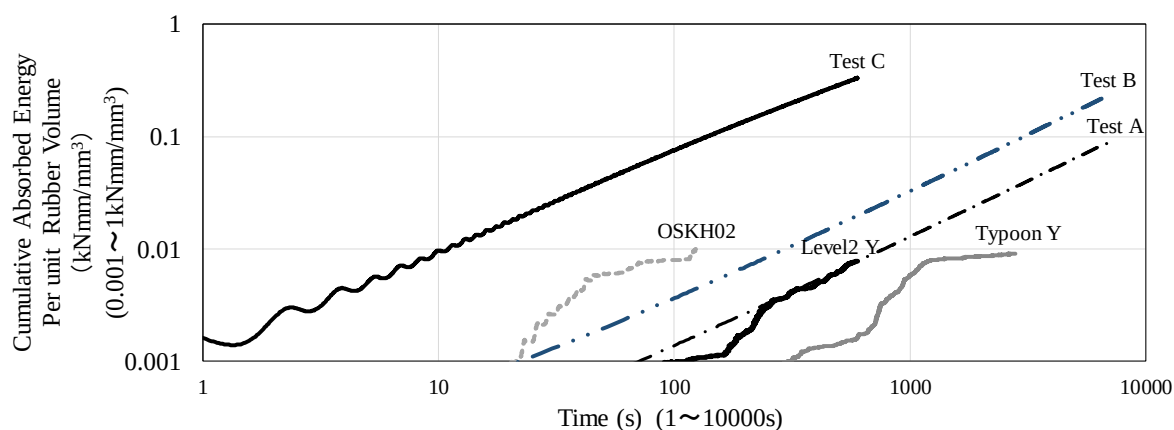


Fig.4 Cumulative Absorbed Energy per unit Rubber Volume in Time History

6. 結論

本論文その 2 では、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を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ・ 免震層の最大応答変位に関して、地震外乱と風外乱を比べると、地震外乱が大きな応答を示した。最大せん断力係数に関して、地震外乱と風外乱を比べるとあまり差がなく、拮抗するレベルであった。最大累積吸収エネルギーに関して、地震外乱と風外乱を比べると、既往波である El Centro NS に比べて風外乱が大きく、長周期・長時間地震波と拮抗するレベルである。したがって、地震外乱のみならず風外乱に関しても高減衰ゴム系積層ゴム（以下、HDR）の繰り返しによる影響を考慮した検討が必要である。
- ・ 解析で得られたランダム応答波形を正弦波置換法により等価な正弦波と置き換えて、正弦波加振試験との比較に条件を設けた。振動数、継続時間、振幅が概ね試験で確認した範囲内であり、試験結果と比較することは妥当であることを確認した。
- ・ ゴム単位体積当たりの累積吸収エネルギーに関して、地震および風外乱を用いた応答解析結果は、安全性を確認した正弦波加振実験結果よりも十分に小さいため、HDR の安全性は問題ない。

- ・ 本論文によって HDR の安全性を確認することが出来たが、多数回繰り返しによる復元力特性の変化についてまだ確認できていない。よって、今後の展望として、多数回繰り返し加振による HDR の等価剛性、等価減衰定数の変化などを累積吸収エネルギーに基づいて評価を行う。さらに、本論文の累積吸収エネルギーを基準とした評価方法をサブストラクチャ・リアルタイム・オンライン応答実験⁵⁾で検討する。

参考文献

- 1) 佐藤大樹, 所 健, 笠井和彦, 北村春幸: 風応答振動時における粘弾性ダンパーの特性および正弦波による簡易評価手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol80, No.710, pp.571-581, 2015.4
- 2) Trifunac, M.D and Brady, A.G: A Study on Duration of Strong Earthquake Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.65, No.3, pp.581-626, 1975.6
- 3) 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
- 4) 「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
- 5) 横田健次, 諸沢征治, 竹内貞光, 神田亮: 高層免震建築物に関するサブストラクチャ・リアルタイム・オンライン応答実験(その 1 実験概要), 日本建築学会梗概集, No.21298, 2016.8