

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2 累積損傷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（学部） 土橋 健治 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

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、検討をおこなった地震および風外乱について示した。その2では時刻歴応答解析結果および累積損傷エネルギーに関する検討を行う。

2. 時刻歴応答解析結果

2.1 地震外乱による応答結果

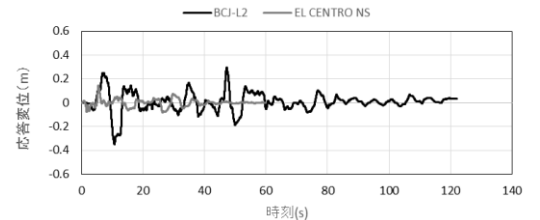
図1(a)~(e)に免震層の応答変位の時刻歴を示す。図2に免震層のせん断力-変位関係を示す。

El Centro NS波とBCJ-L2の最大応答変位はそれぞれ0.14m, 0.349mで、大きな振幅が1~3回程度繰り返される。長時間・長周期地震AIC003, KGIN, OSKH02, SZO024の最大応答変位はそれぞれ, aveで0.142m, 0.260m, 0.444m, 0.136m, $+\sigma$ で0.304m, 0.485m, 0.575m, 0.259mで、大きな振幅が断続的に多数回繰り返される。

2.2 風外乱による応答結果

図3に免震層のLevel2相当波形と台風波形による応答変位の時刻歴を示す。図4に免震層のせん断力-変位関係を示す。Level2相当波形の最大変位は、X方向（風方向）とY方向（風直交方向）で大きな差はないが、振幅は風外乱の変動成分の大きいY方向の方が大きくなっている。X方向（風方向）では、風外乱の平均成分の影響により水平クリープが生じている。

台風波形の最大変位は、X方向とY方向で大きな差はなく、X方向、Y方向ともに風方向となったときに生じている。風外乱の平均成分の影響で水平クリープが生じて変形が大きくなっている。最大せん断力は、X方向、Y方向ともに風外乱の変動成分が大きくなる風直交方向となったときに生じている。Level2相当波形と台風波形を比べると最大せん断力および最大変位に大きな差はない。図2の地震用解析モデルのせん断力-変位関係と図4の風用解析モデルのせん断力-変位関係を比較すると風用解析モデル



(a) EL CENTRO NS 波, BCJ-L2

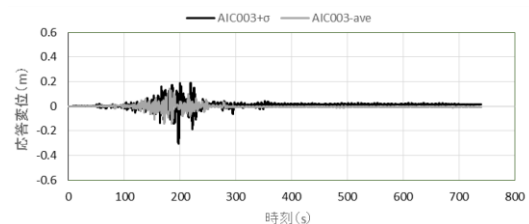
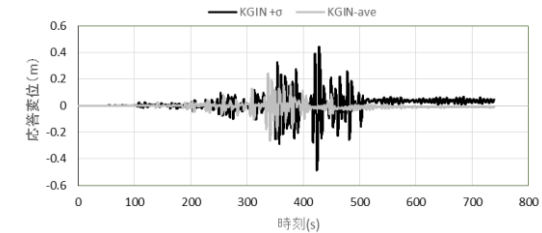
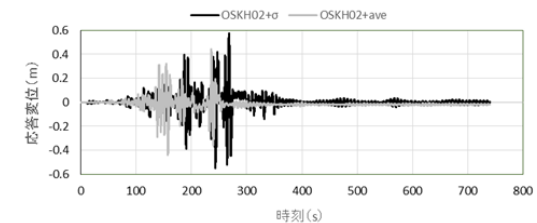
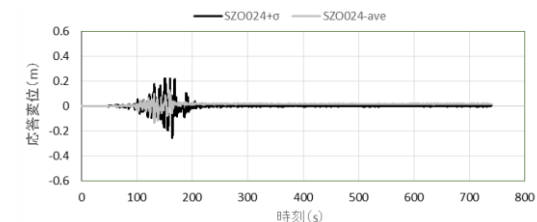
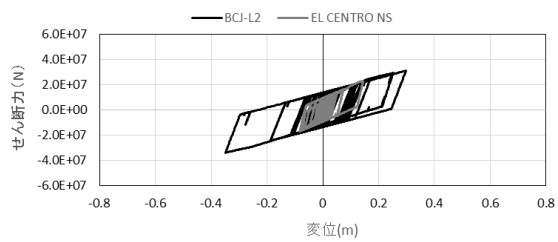
(b) AIC003 ave, $+\sigma$ (c) KGIN ave, $+\sigma$ (d) OSKH02 ave, $+\sigma$ (e) SZO024 ave, $+\sigma$

図1 応答変位の時刻歴

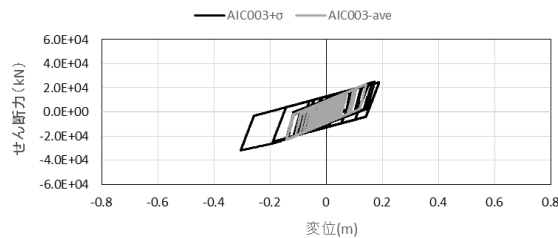
Study on Damage Estimation of a Super High-Rise Seismic Isolated Building using High-Damping Rubber Bearings under Earthquakes and Wind Excitations.

－ Part2 Cumulated Damage Energy Estimation －

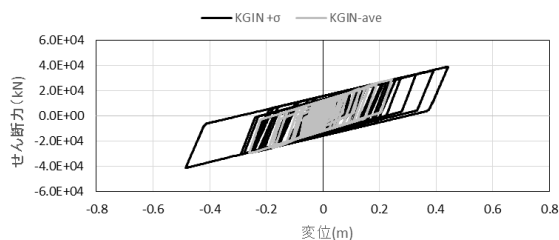
Sadamitsu TAKEUCHI, Kenji DOBASHI, Makoto KANDA, Tadamichi YAMASHITA,
 Narumi OUGIYA, Daiki SATO and Tetsushi INUBUSHI



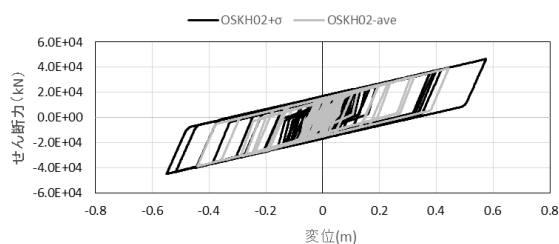
(a) EL CENTRO NS, BCJ-L2



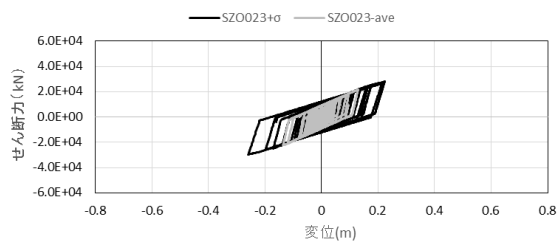
(b) AIC003 ave, $+\sigma$



(c) KGIN ave, $+\sigma$

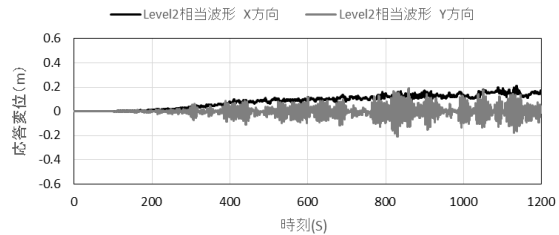


(d) OSKH02 ave, $+\sigma$

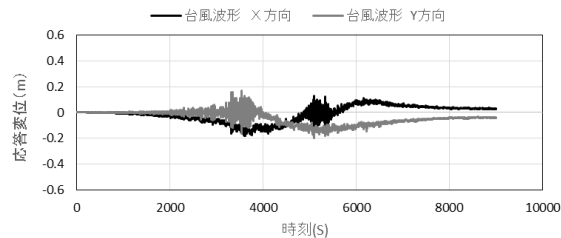


(e) SZ0024 ave, $+\sigma$

図2 せん断力-変位関係

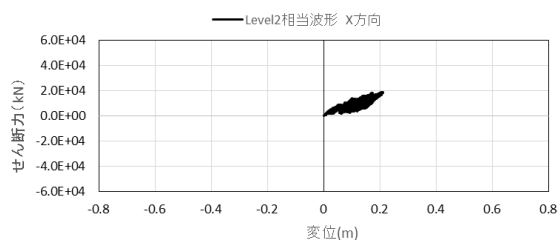


(a) Level2 相当波形

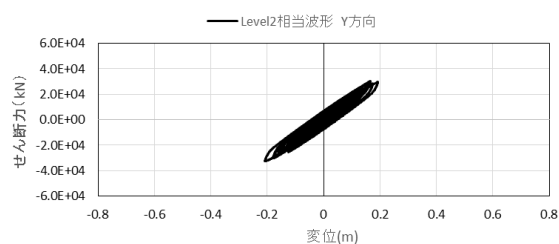


(b) 台風波形

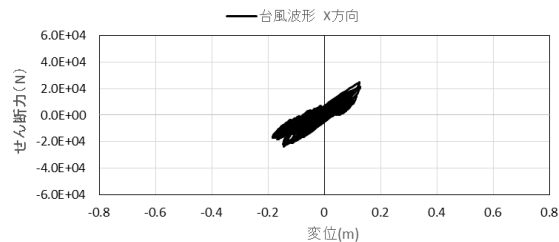
図3 応答変位の時刻歴



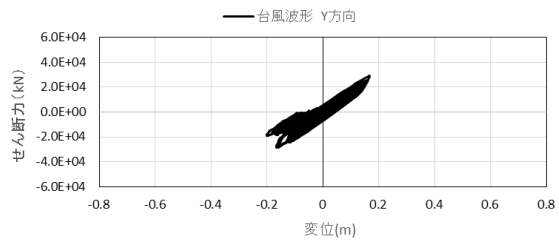
(a) Level2 相当波形 X 方向



(b) Level2 相当波形 Y 方向



(c) 台風波形 X 方向



(d) 台風波形 Y 方向

図4 せん断力-変位関係

は剛性が大きく減衰が小さくなっている。このような復元力モデルの違いによる影響が応答上に現れるメカニズムについては、今後の検討課題と考える。

3. HDR の累積損傷エネルギーに関する検討

3.1 実試験体による正弦波加振試験

実試験体により、正弦波加振による繰り返し試験を行った結果を示す。図 5 に試験体、表 1 に試験体形状を示す。試験体は、ゴム外径 $\phi 225\text{mm}$ 、1 次形状係数 35.2、2 次形状係数 5.02 である。表 2 に試験条件を示す。せん断応力 $0.2 \pm 0.2\text{MPa}$ （荷重制御）、周期 3 秒、正弦波加振を 2 時間実施した。

図 6 に試験結果としてせん断ひずみの時刻歴を示す。長時間の加力により水平クリープが確認できる。また、せん断ひずみが $\pm 20\%$ 程度繰り返し変形をしている。図 7 に試験時のゴムの表面温度を計測した結果を示す。繰り返しによっても表面温度は 10°C 程度と温度上昇は少ない。ここで、免震部材の損傷を評価するパラメータとして累積損傷エネルギーを定義する。累積損傷エネルギーとは、せん断力・変位関係から時間ステップごとに履歴の面積を求め合算し、単位ゴム体積当たりの量に換算したものである。本試験から繰り返し加振による単位ゴム体積当たりの累積損傷エネルギーは 0.0924kNmm/mm^3 程度であり、この程度では試験体には損傷はなく、安全性は十分確保できる。

3.2 累積損傷エネルギーに関する評価

地震、風外乱による損傷を評価するため累積損傷エネルギーを求めた。図 8(a), (b) にゴム体積当たりの累積損傷エネルギーを時刻/継続時間に対して示す。太線の実線および 1 点鎖線は風外乱に関するもの、破線、点線、2 点鎖線は地震外乱に関するもの、黒の中線は試験結果に関するものである。

各地震外乱の全累積損傷エネルギーを小さい順に列記すると次のようになる。EL Centro NS 波 < SZ0024-ave < AIC003-ave < BCJ-L2 < KGIN-ave < AIC003+ σ < SZ0024-ave < OSKH02-ave < KGIN+ σ < OSKH02+ σ 。既往波である EL Centro NS 波と長時間・長周期地震動 OSKH02+ σ と比較すると、OSKH02+ σ の方が全累積損傷エネルギーは 23 倍大きくなっている。長時間・長周期地震動で一番小さい SZ0024-ave は 2.4 倍となっている。各長時間・長周期地震動は応答変形が大きく、かつ大振幅が多数繰り返されることから全累積損傷エネルギーが大きくなっている。同じサイトの長時間・長周期地震動において ave の地震動と+ σ の地震動とを比べると、各地震動とも全累積損傷エネルギーは 2 倍以上となっている。

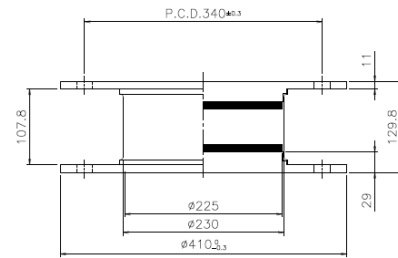


図 5 試験体

表 1 試験体形状

ゴム外径(mm)	φ 225
1次形状係数 S_1	35.2
2次形状係数 S_2	5.02
ゴム総厚さ(mm)	44.8

表 2 試験条件

面圧(MPa)	15
せん断応力(MPa)	0.2 ± 0.2
周期(s)	3
加振	正弦波
加振時間(s)	7200

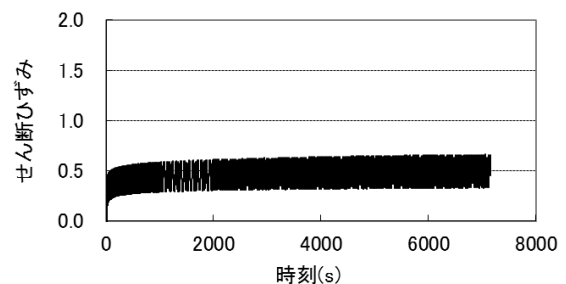


図 6 セン断ひずみの時刻歴

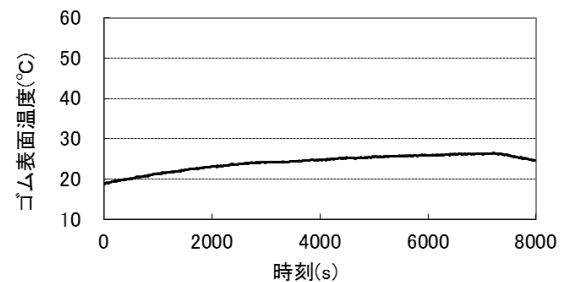


図 7 ゴム表面温度の時刻歴

Level2 相当波形をみると X 方向（風方向）は、変動成分が小さいため全累積損傷エネルギーが小さい。Y 方向（風直交方向）は変動成分が大きく、全累積損傷エネルギーは大きくなっている。台風波形を見ると、X 方向より Y 方向の方が全累積損傷エネルギーが大きくなっている。これは、Y 方向の方が変動成分が大きくなる風直交方向となっている時間が長かったため、繰り返し回数が多くなったためである。

Level2 相当波形と台風波形の全累積損傷エネルギーは、小さい順に列記すると次のようになる。Level2 相当波形（X 方向）< 台風波形（X 方向）< Level2 相当波形（Y 方向）< 台風波形（Y 方向）。Level2 相当波形（X 方向）と台風波形（Y 方向）とを比較すると、台風波形（Y 方向）の方が全累積損傷エネル

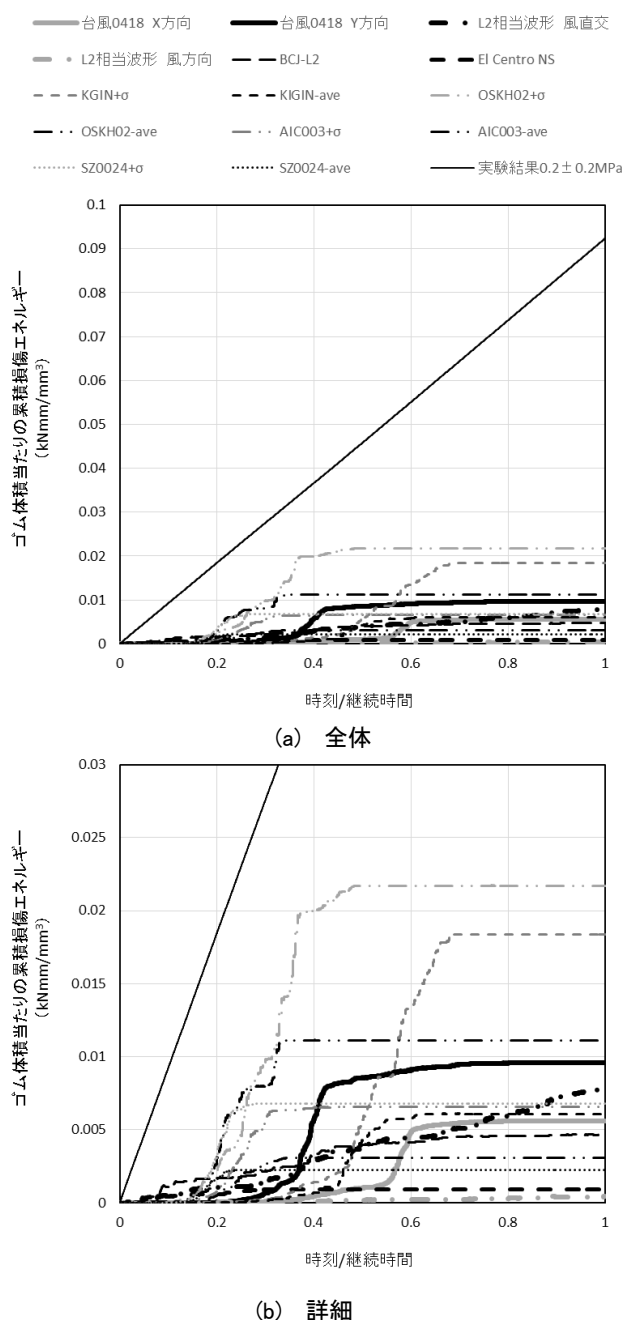


図7 ゴム体積あたりの累積損傷エネルギーと時刻/継続時間の関係

ギーは約 22 倍大きくなっている。Level2 相当波形（Y 方向）と台風波形（Y 方向）とを比較すると、台風波形（Y 方向）の方が全累積損傷エネルギーは約 1.2 倍とさほど差がない。Level2 相当波形と台風波形の全累積損傷エネルギーはさほど差がないため、免震部材の損傷評価を行う場合、Level2 相当波形と台風波形による評価を十分比較・検討することが望ましい。

既往地震動 EL Centro NS 波の全累積損傷エネルギーは、台風波形（Y 方向）の約 1/10、BCJ-L2 の全累積損傷エネルギーは、台風波形（Y 方向）の約

1/2 倍となっている。これより、通常地震動に比べて台風波形の全累積損傷エネルギーは大きいといえる。長時間・長周期地震動と台風波形とを比べると、長時間・長周期地震動の ave の全累積損傷エネルギーは、やや小さいかほぼ同等、 $+\sigma$ は地震動によっては大きいものがある。これより、台風波形は、継続時間が非常に長い場合全累積損傷エネルギーが大きくなり、長時間・長周期地震動と同等以上となることもあるので免震部材の損傷評価については、長時間・長周期地震動と同様に十分な注意が必要である。

3.1 節に示す試験結果と地震外乱および風外乱の解析結果とを比較すると図 7(a)に示す通り、全累積損傷エネルギーの一番大きかった OSKH02 $+\sigma$ に対して試験結果は 4 倍以上の値となっている。このことから、1 イベントに発生する地震および風外乱に関して今回用いた HDR の累積損傷は十分安全性を有していることが確認できた。

5.まとめ

超高層免震建築物の地震および風外乱による損傷評価に関して、累積損傷エネルギーによる評価を行った結果以下となった。

- ・地震外乱に関して、長時間・長周期地震動による全累積損傷エネルギーは、既往の地震動 EL Centro NS 波に比べて 2.4 倍～23 倍と非常に大きいことが確認できる。これより、免震部材の応答評価だけでなく、損傷評価についても十分な検討が求められる。
- ・風外乱に関して、変動成分の影響により全累積損傷エネルギーは大きくなる。Level2 相当波形と台風波形と比べると応答変位に大きな差異はなかったが、全累積損傷エネルギーは台風波形の方がやや大きくなる。これは長時間の繰り返しによる影響が大きい。風外乱による免震部材の損傷評価を行う場合は Level2 相当波形と台風波形による評価を十分比較・検討することが望ましい。

- ・地震と風外乱を比較すると、既往の地震動 EL Centro NS 波や BCJ L-2 より風外乱の全累積損傷エネルギーは大きい。長時間・長周期地震動と比べても同等以上の結果であり、風外乱による累積損傷エネルギーへの影響は大きいものであることが確認できる。

- ・本解析と HDR の実試験体の繰り返し試験で得られた全累積損傷エネルギーとを比較すると、HDR の耐久性は高く問題のないことが確認できた。1 イベントに発生する地震および風外乱に対して今回用いた HDR の累積損傷は十分安全性を有していることが確認できた。