

第VI部

繰り返し依存性を簡易的に取り込むための手法の検討

第1章 免震部材特性のモデル化と簡易応答評価手法の検討

1.1 目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定に向けて、多数回繰り返し時の免震部材の特性評価とモデル化、免震部材の特性を考慮した応答解析に基づく応答評価を実施し、繰り返し依存性を簡易的に取り込むための手法を検討する。

1.2 全体方針

(1) 方針

第Ⅲ部第2章および第3章に示した繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを用い、長周期地震動に対する1質点モデルの応答解析を実施し、繰り返し依存性をどのようにしたら簡易的に評価できるかを応答変形、応答せん断力、入力エネルギー、部材の吸収エネルギー、累積変形、温度上昇などの面から検討する。

検討ケースは以下の通りとする。

- ① 鉛プラグ入り積層ゴム
- ② 高減衰ゴム系積層ゴム
- ③ 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー
- ④ 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）
- ⑤ 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（低摩擦）+粘性ダンパー

各支承、ダンパーで何を基準にすれば繰り返し依存性の傾向を表せるのかを分析し、通常使われている設計モデルのパラメータをどのように変更すれば簡易的に評価できるのかを検討する。なお、③、④、⑤については天然ゴム系積層ゴムの繰り返し依存性はないものとして扱い、ダンパーとすべり支承について検討を行う。

検討用長周期地震動は第Ⅲ部 3.1 に示す三連動地震の入力倍率を 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍としたものと、新たに作成された四連動地震の入力倍率を 1.0 倍としたものを用いる。

(2) 解析モデル

解析モデルは上部構造を剛体モデルとした1質点モデルとし、免震層の設定は積層ゴムによる免震周期 4.0 秒程度、ダンパーの負担せん断力係数 3.0~4.0%を標準とし、免震支承毎に設定を行なう。

(3) 入力地震動

検討用入力地震動は、第Ⅲ部 3.1 に示す東海・東南海・南海地震が連続して発生すると想定して作成した三連動地震、新たに作成された M9.0 を想定した四連動地震のそれぞれの4地点の地震動の平均波を用いる。

OSKH02 (大阪・此花 平均)
 AIC003 (愛知・津島 平均)
 SZO024 (静岡・浜松 平均)
 KGIN (東京・新宿 平均)

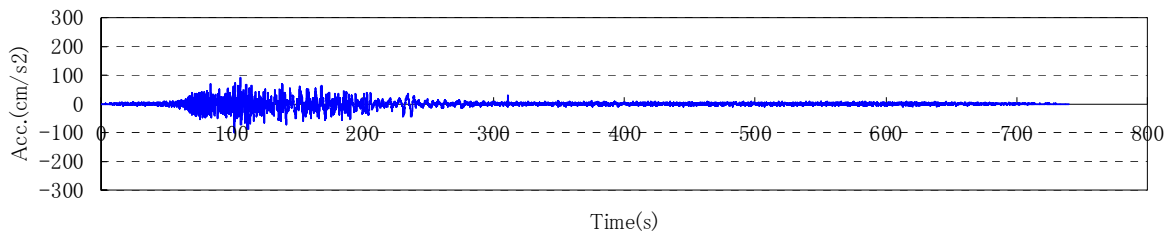
入力地震動の諸元を表 1.2-1 に、加速度時刻歴波形、速度時刻歴波形、変位時刻歴波形を図 1.2-1～3、擬似速度応答スペクトルを図 1.2-4、エネルギースペクトルを図 1.2-5 に示す。

表 1.2-1(a) 入力地震動諸元 (三連動地震) (各最大値と継続時間)

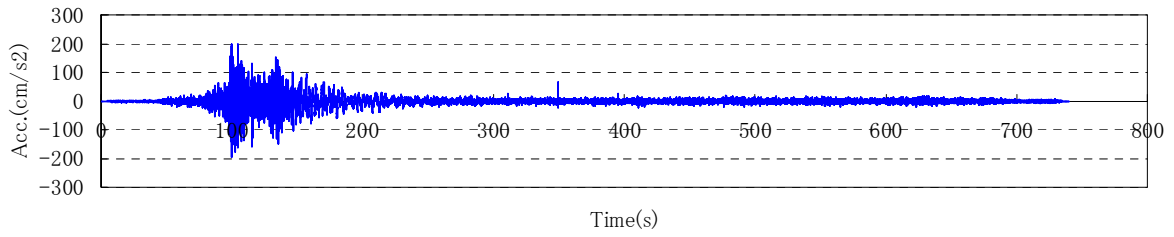
| 地震波名 | 三連動地震 | | | |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| | OSKH02 (此花) | AIC003 (津島) | SZO024 (浜松) | KGIN (新宿) |
| 加速度 (cm/s ²) | 98.49 | 199.4 | 576.9 | 42.11 |
| 速度 (cm/s) | 38.07 | 26.78 | 40.08 | 21.60 |
| 変位 (cm) | 31.43 | 21.62 | 21.13 | 26.29 |
| 継続時間 (s) | 739.82 | 739.82 | 739.82 | 739.82 |

表 1.2-1(b) 入力地震動諸元 (四連動地震) (各最大値と継続時間)

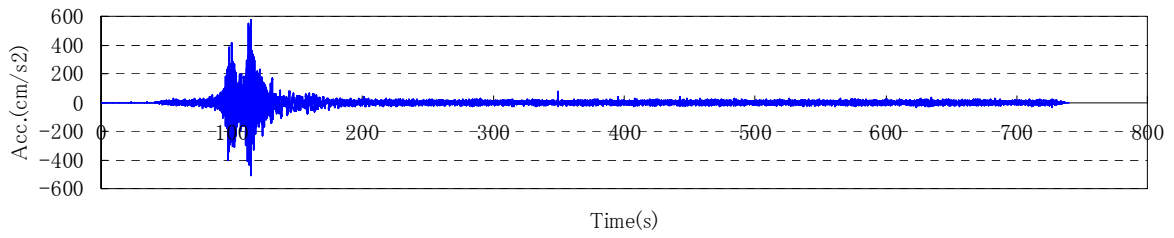
| 地震波名 | 四連動地震 | | | |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| | OSKH02 (此花) | AIC003 (津島) | SZO024 (浜松) | KGIN (新宿) |
| 加速度 (cm/s ²) | 133.0 | 545.4 | 640.3 | 55.51 |
| 速度 (cm/s) | 46.51 | 67.71 | 42.57 | 31.70 |
| 変位 (cm) | 38.51 | 43.65 | 26.99 | 38.24 |
| 継続時間 (s) | 655.36 | 655.36 | 655.36 | 655.36 |



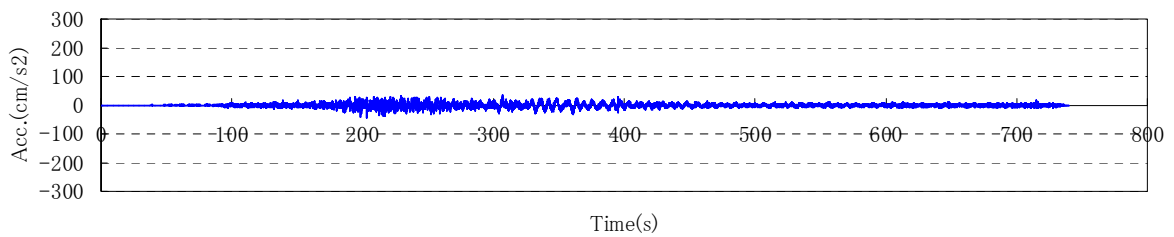
(a) OSKH02



(b) AIC003

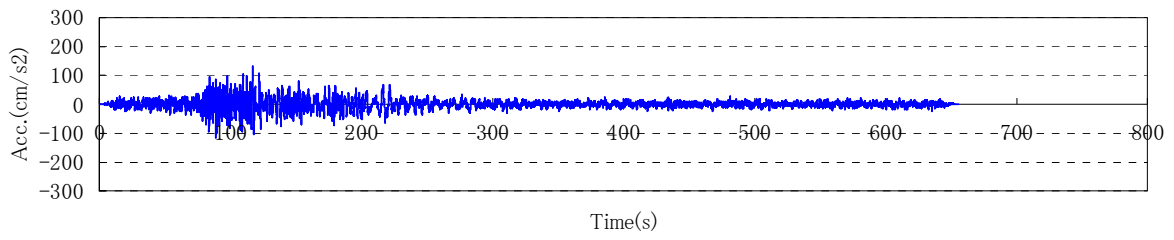


(c) SZO024

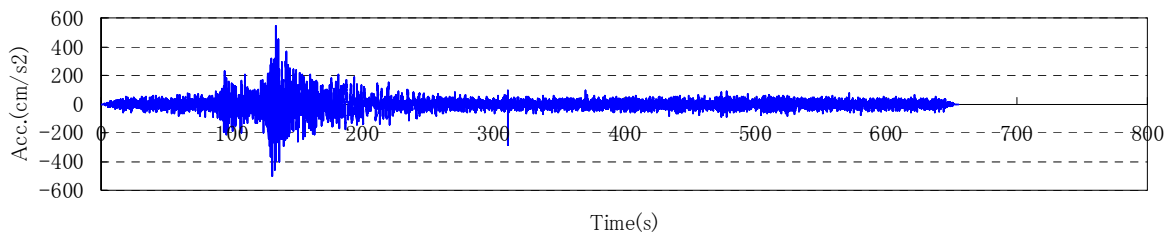


(d) KGIN

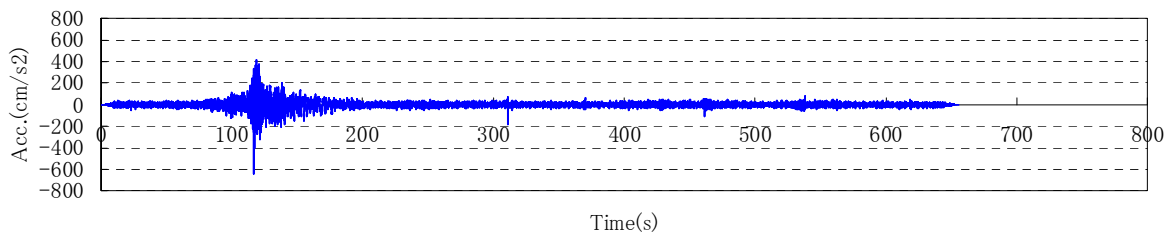
図 1.2-1(a) 入力地震動加速度時刻歴波形（三連動地震）



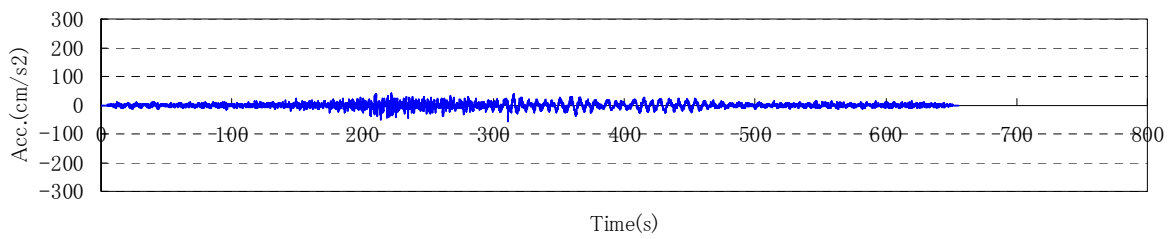
(a) OSKH02



(b) AIC003

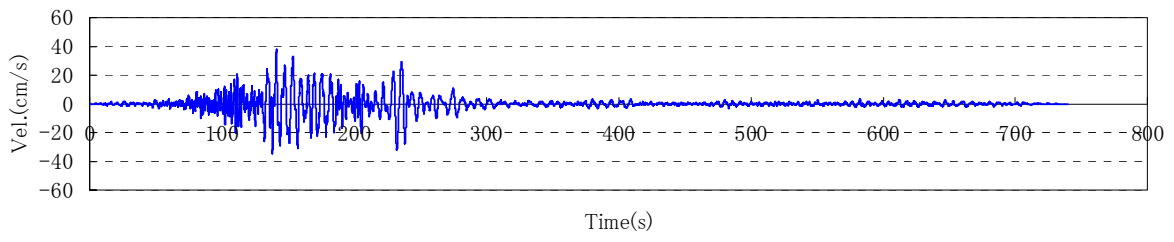


(c) SZO024

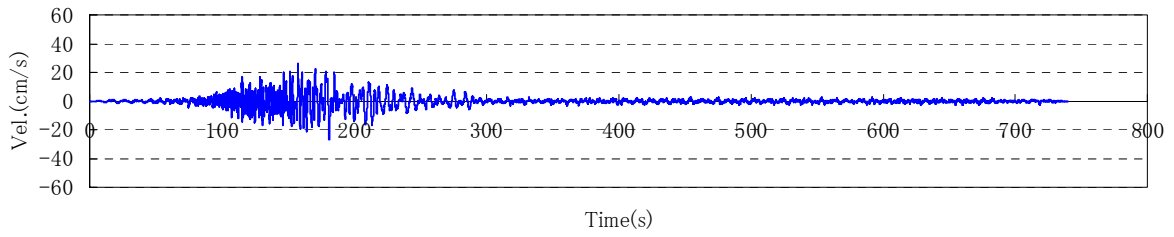


(d) KGIN

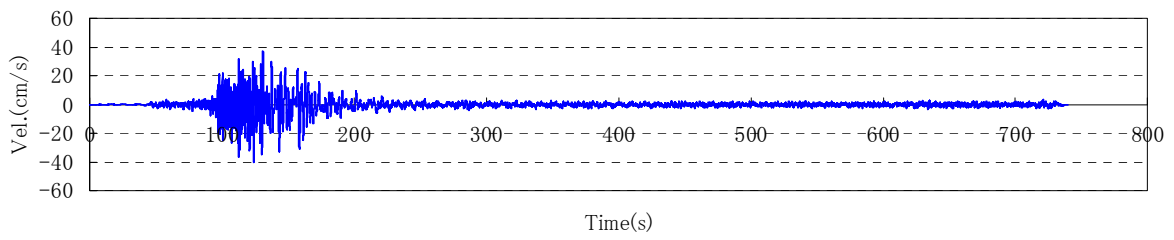
図 1.2-1(b) 入力地震動加速度時刻歴波形（四連動地震）



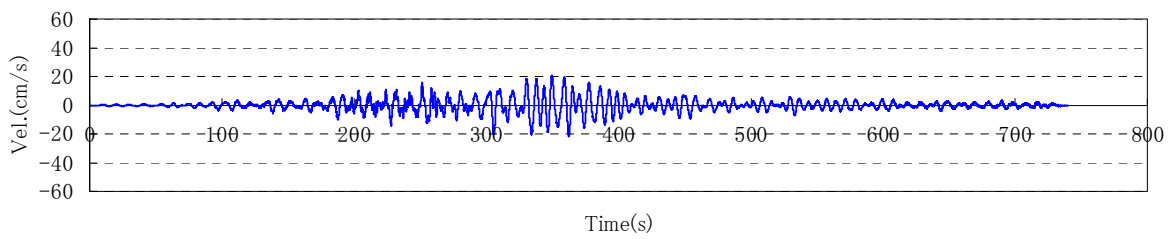
(a) OSKH02



(b) AIC003

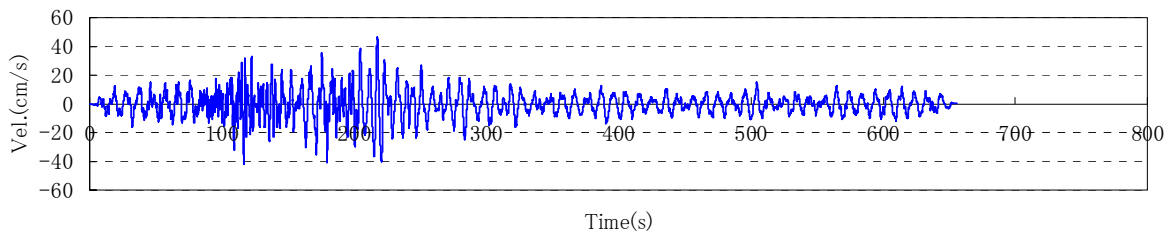


(c) SZO024

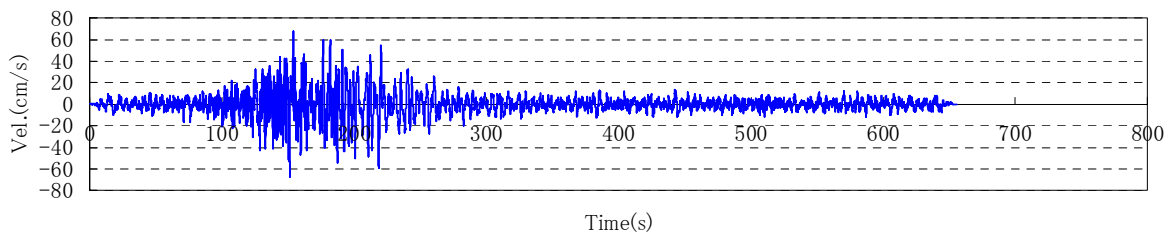


(d) KGIN

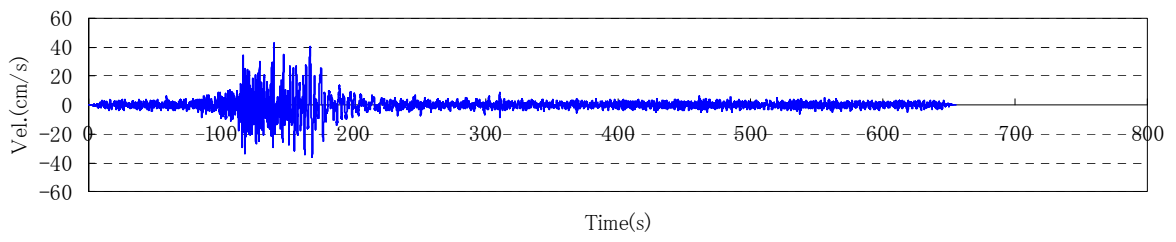
図 1.2-2(a) 入力地震動速度時刻歴波形（三連動地震）



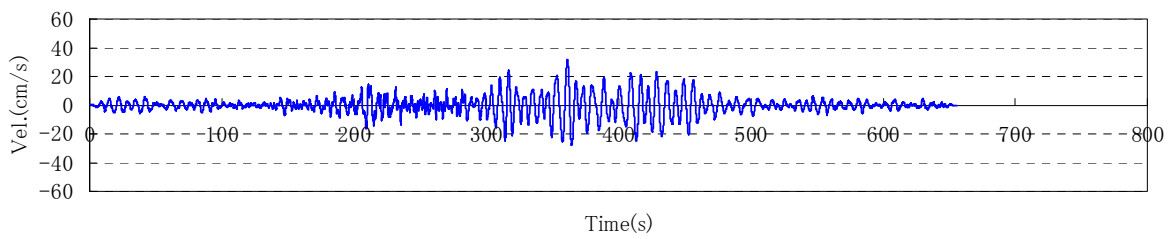
(a) OSKH02



(b) AIC003

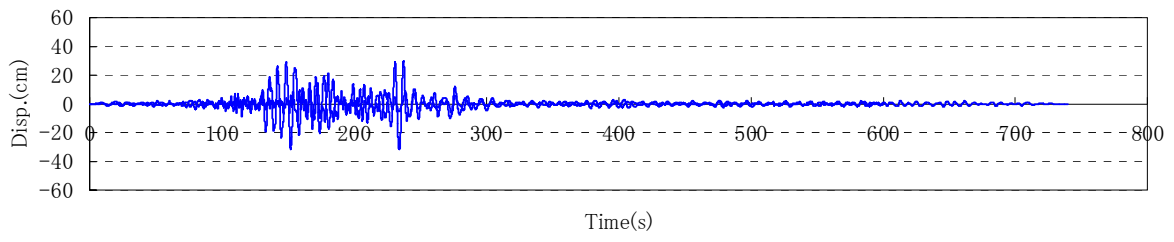


(c) SZO024

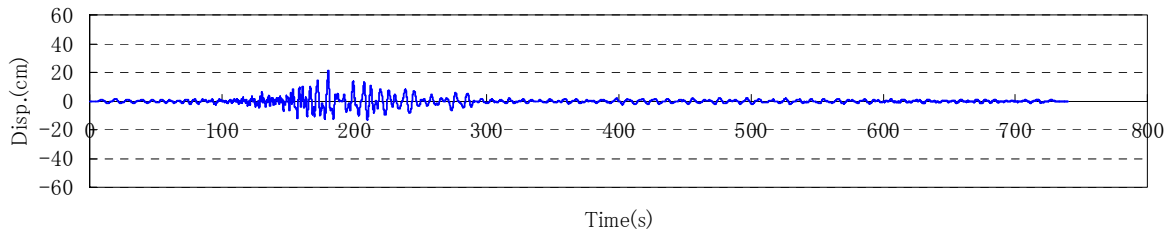


(d) KGIN

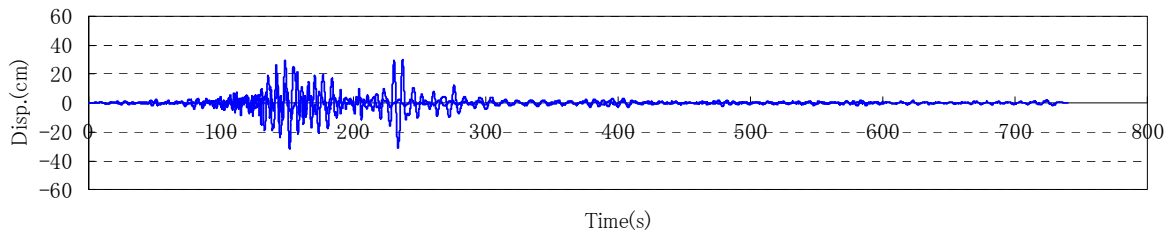
图 1.2-2(b) 入力地震動速度時刻歴波形 (四連動地震)



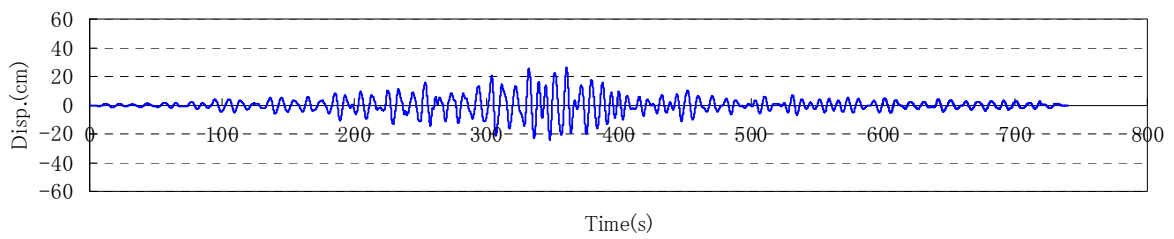
(a) OSKH02



(b) AIC003

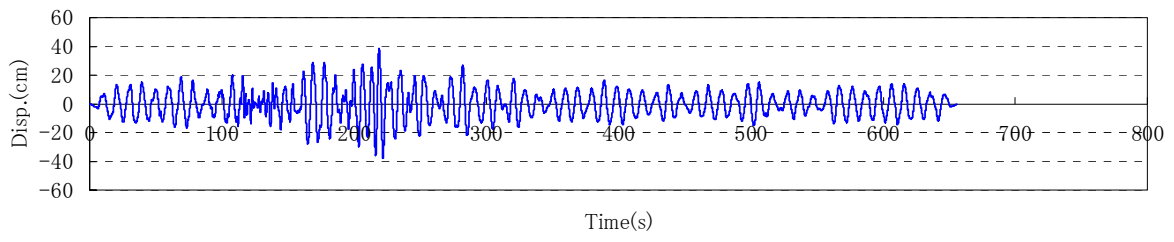


(c) SZO024

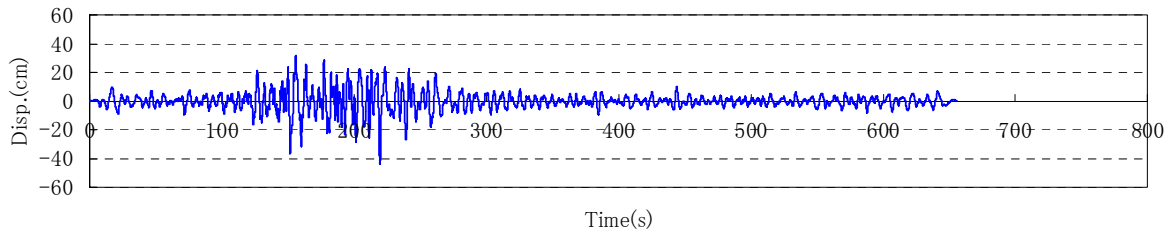


(d) KGIN

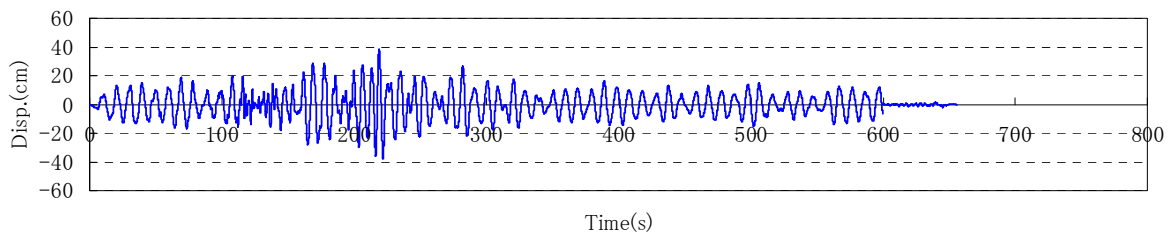
図 1.2-3(a) 入力地震動変位時刻歴波形（三連動地震）



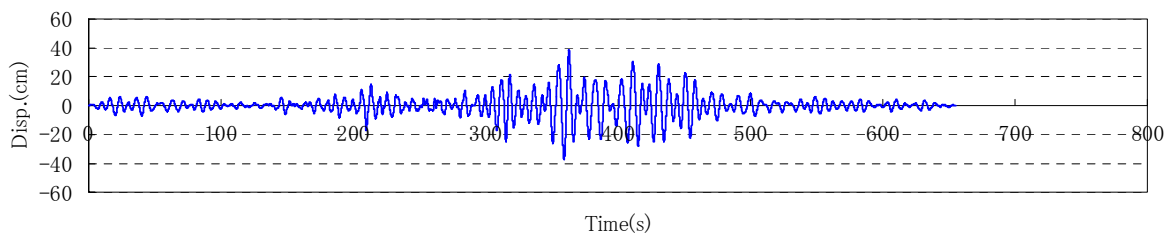
(a) OSKH02



(b) AIC003



(c) SZO024



(d) KGIN

図 1.2-3(b) 入力地震動変位時刻歴波形（四連動地震）

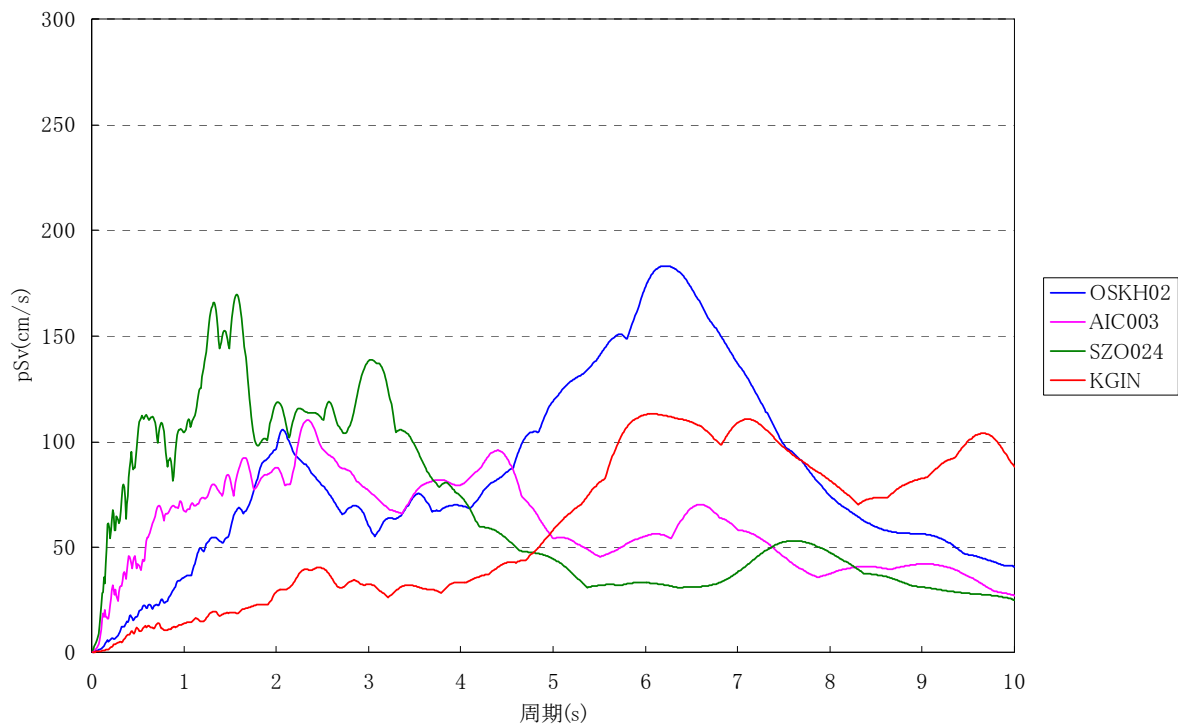


図 1.2-4(a) 入力地震波擬似速度応答スペクトル($h=0.05$) (三連動地震)

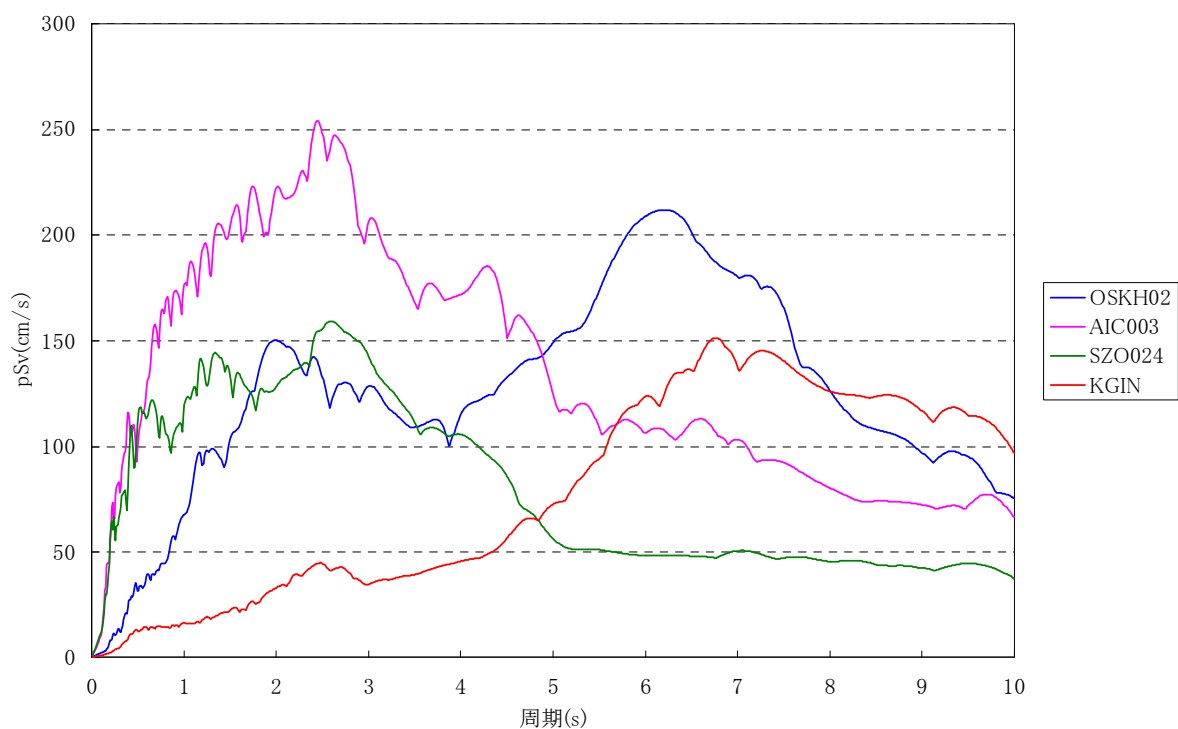


図 1.2-4(b) 入力地震波擬似速度応答スペクトル($h=0.05$) (四連動地震)

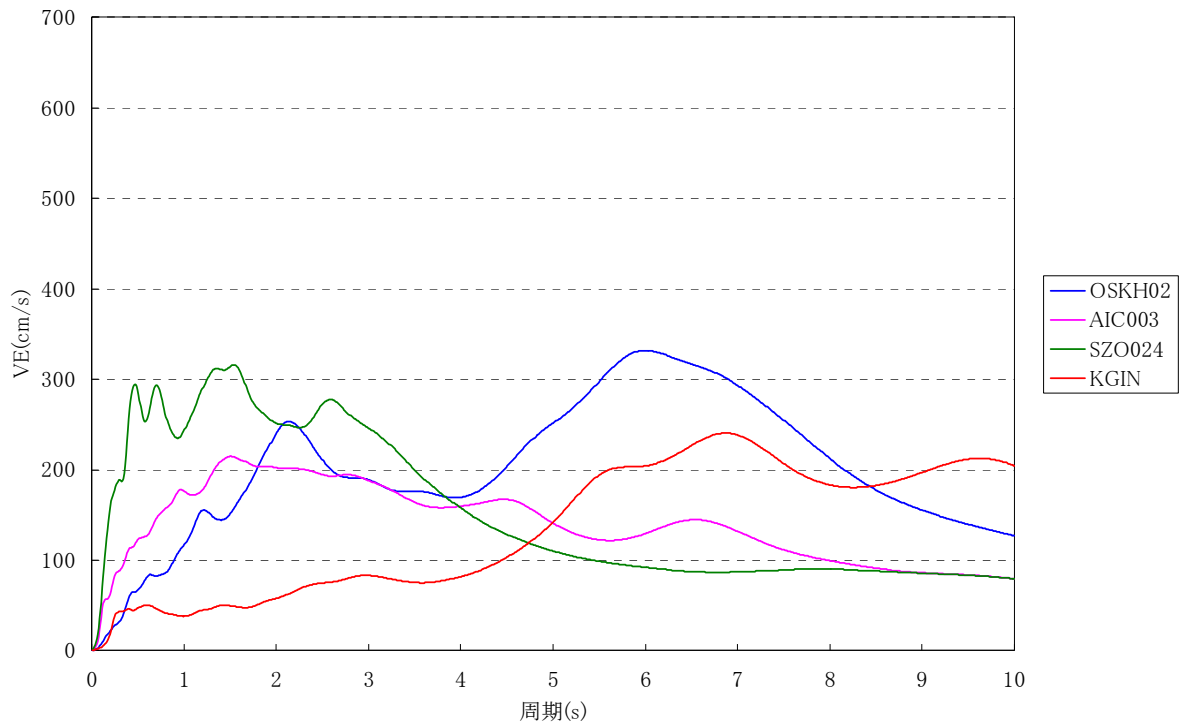


図 1.2-5(a) 入力地震波エネルギースペクトル(h=0.10) (三連動地震)

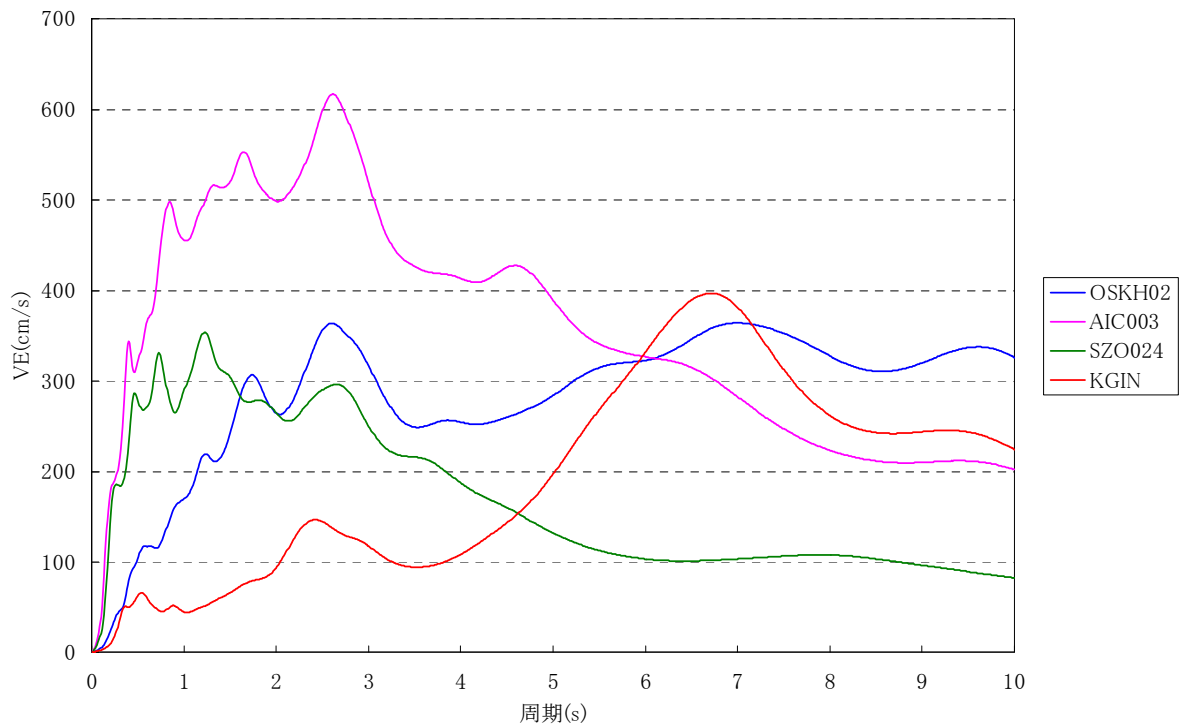


図 1.2-5(b) 入力地震波エネルギースペクトル(h=0.10) (四連動地震)

1.3 解析結果

1.3.1 鉛プラグ入り積層ゴム

鉛プラグ入り積層ゴムを対象として、繰り返し変形による（鉛プラグの温度上昇による）特性変動を考慮した場合応答評価について、簡易応答評価法による評価結果と詳細応答評価法としての地震応答解析結果との結果を比較し、簡易応答評価法の精度についての検討を実施する。

地震応答解析は免震層の特性を考慮した1質点系モデルにより実施し、繰り返し変形による特性変化（鉛プラグの温度上昇による影響）を考慮した場合の応答評価においては以下に示す手法1、手法2、手法3および手法3'についての検討を実施する。それぞれの手法は熱伝導解析と地震応答解析とを並行して行う手法（手法1：詳細地震応答解析手法）、エネルギーの釣合を基にした包絡解析法による簡易応答評価法について検討を実施する手法（手法2：簡易応答評価法1）、鉛プラグ入り積層ゴムについて、履歴吸収エネルギーより降伏荷重をあらかじめ低下させた場合の応答評価手法（手法3および3'：簡易応答評価法2）である。

なお、地震応答解析に用いる入力地震動は1.2に示される地震動とした。

(1) 建物モデル、免震層特性の設定

免震層の特性を表1.3.1-1に示す。基本ケースを鉛プラグ入り積層ゴムφ1000、ゴム総厚20cmとし、積層ゴム面圧を3ケース設定した。鉛プラグ入り積層ゴムについては形状（径、鉛径など）をパラメータとしている。

なお、解析結果をまとめる際には免震層の水平変形が80cm（ $\gamma=400\%$ ）を超えたものは除外した。

表 1.3.1-1 解析ケース

| 面圧 (N/mm ²) | 免震 周期*1 Tf(sec) | α_s | 積層ゴム径 (mm) | 1000 | | | 750 | 1500 |
|----------------------------|-----------------------|------------|---------------|------------|------------|------------|-----|------|
| | | | 鉛径 (mm) | (1) 200 | (2) 250 | (3) 150 | 150 | 300 |
| 7.5 | 3.9 | 0.046 | 解析 ケース | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 10.0 | 4.5 | 0.035 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 15.0 | 5.6 | 0.023 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

*1:免震周期 Tfはφ1000、鉛径標準径の値

解析においては鉛プラグ入り積層ゴムは修正バイリニアモデルによる履歴を考慮し、免震層の履歴減衰のみ考慮した。また、温度上昇を考慮する場合の初期温度は15℃とした。

(2) 応答評価手法

以下に各評価手法について述べる。

(評価手法1) 鉛プラグの温度上昇による特性変化を熱伝導解析と地震応答解析を並行して時刻歴解析を行う手法 (詳細応答評価法)

本手法は鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導方程式と免震建物運動方程式を並行して解く、時刻歴応答解析法による手法である。(参考文献 1.3.1-1)。鉛プラグ入り積層ゴムにおける熱伝導解析差分法モデルは、前進差分法による鉛入り積層ゴムを要素分割した差分法モデルとする(図 1.3.1-1 参照)。地震エネルギーの吸収量はすべて鉛プラグ部での発熱となると仮定し、モデル化範囲には取り付け部も含めることによって、鉛プラグから積層ゴム部、フランジ、上下基礎への熱エネルギーの拡散を考慮する。また、鉛プラグの温度-降伏荷重関係は、下記の提案式(1.3.1-1)に基づくものとする。(図 1.3.1-2)。本式は、鉛プラグが約 200°Cまで温度上昇した実験ケースを含む鉛プラグ入り積層ゴム加振実験結果の分析により得られた実験式である(参考文献 1.3.1-1)。

$$\tau = \tau_0 \left\{ 1 - (T/T_L)^{\alpha_T} \right\} \quad \alpha_T = 0.4 + 0.25 \cdot (T/T_L)$$

$$\tau_0 = 15.0(N/mm^2), T_L = 327.5(^{\circ}C)$$
(1.3.1-1)

ここに、 τ : 鉛降伏応力、 τ_0 : 0°Cにおける鉛降伏応力
 T : 鉛プラグ平均温度、 T_L : 鉛融点

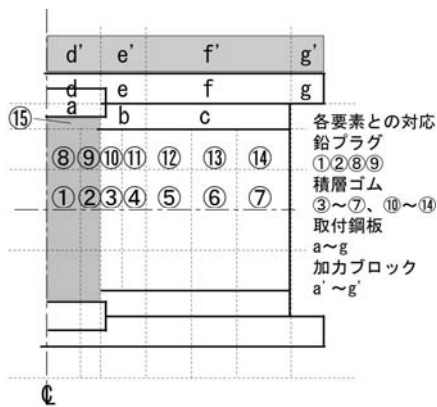


図1.3.1-1 鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導差分法モデルの例

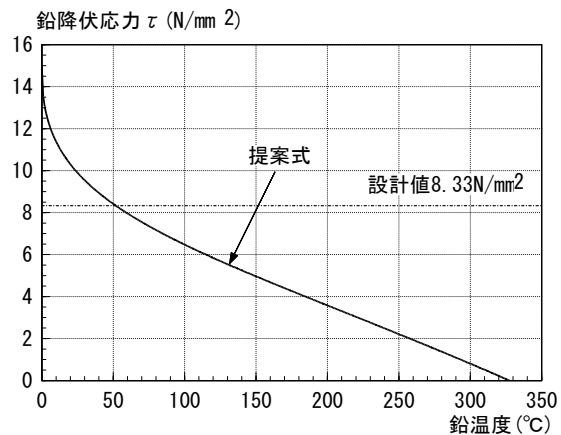


図1.3.1-2 鉛プラグ温度-降伏応力関係

本手法の時刻歴地震応答解析法は、免震建物の運動方程式と鉛プラグ入り積層ゴム熱伝導方程式を並行して時々刻々解く方法によるものである。地震応答解析フローを図 1.3.1-3 に示す。

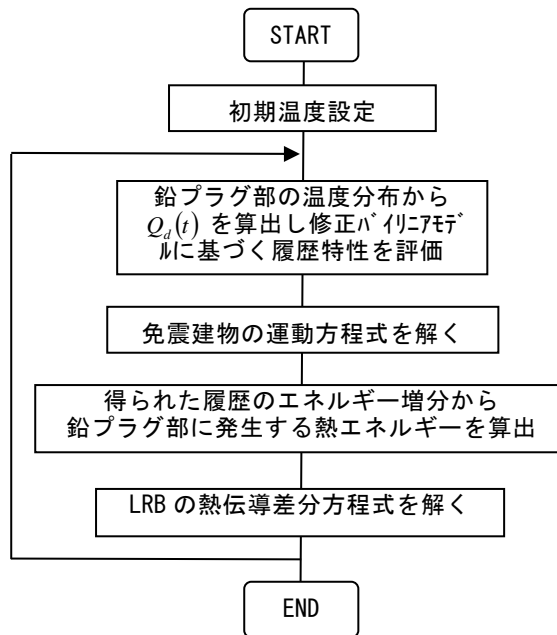


図1.3.1-3 地震応答解析フロー

(評価手法2) エネルギー釣合を基にした包絡解析法による応答予測評価法

(簡易応答評価法1)

温度上昇による鉛プラグ入り積層ゴムの特性変化による影響を考慮した地震応答評価法の一つとして、免震建築物のエネルギーの釣り合いに着目した手法を適用する。本評価法は鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇に伴う降伏荷重の低下を考慮しない従来の解析結果の履歴吸収エネルギーを用いて、温度上昇の影響を考慮した場合の降伏荷重の低下を推定し、さらにエネルギーの釣り合いに基づく応答評価法を適用して、従来の解析結果から温度上昇を考慮した応答値を予測する方法である。

①降伏荷重低下の評価

免震層要素が鉛プラグ入り積層ゴムのみで構成されている場合を想定して、鉛プラグ入り積層ゴムの降伏荷重 Q_d の低下率 ${}_{LRB}k_{min}$ を下式のように定義する。

$${}_{LRB}k_{min} = \frac{{}_{LRB}Q_d(\text{最小値})}{{}_{LRB}Q_d(\text{設計値})} \quad (1.3.1-2)$$

${}_{LRB}k_{min}$ は、温度上昇による特性変化を考慮しない解析によって得られた鉛プラグ入り積層ゴムの全履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$ を鉛プラグ体積 V_p で除した ${}_{LRB}W_p / V_p$ を用いて下式のように予測する。

$${}_{LRB}k_{min} = -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{{}_{LRB}W_p}{V_p} \times \frac{1}{360}\right) \quad (1.3.1-3)$$

本式は、図 1.3.1-4 に示すように手法1による多くの地震応答解析結果から設定されたものである。(参考文献 1.3.1-2)

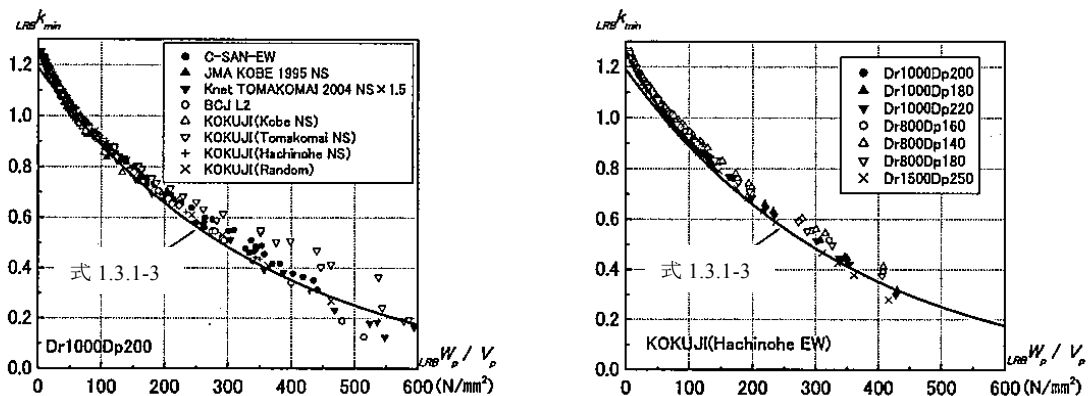


図 1.3.1-4 ${}_{LRB}k_{min}$ と ${}_{LRB}W_p$ の関係^{1.3.1-2)}

②免震層最大応答の評価

免震層最大応答の評価においては鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇を考慮した場合の入力エネルギーと考慮しない場合の入力エネルギーを同量と仮定してエネルギーの釣り合いによる応答評価法を適用して、温度上昇を考慮した場合の免震層最大変形 δ'_{\max} 及び応答層せん断力 Q'_{\max} を温度上昇による特性変化を考慮しない時刻歴応答解析から得られた免震層最大変形 δ_{\max} および先の降伏荷重 Q_d の低下率 ${}_{LRB}k_{\min}$ とLRBの全履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$ 、及び免震層積層ゴムによる剛性 k_f から、次式により予測する（参考文献 1.3.1-2）。

$$\delta'_{\max} = \frac{1}{k_f} \left\{ -\frac{(1+{}_{LRB}k_{\min}){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{(1+{}_{LRB}k_{\min}){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}}\right)^2 + k_f^2 \cdot \delta_{\max}^2 + 2k_f \cdot {}_{LRB}W_p} \right\} \quad (1.3.1-4)$$

$$Q'_{\max} = Q_y - \frac{(1+{}_{LRB}k_{\min}){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{(1+{}_{LRB}k_{\min}){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}}\right)^2 + k_f^2 \cdot \delta_{\max}^2 + 2k_f \cdot {}_{LRB}W_p} \quad (1.3.1-5)$$

（評価手法3及び3'）降伏荷重 Q_d をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法（簡易応答評価法2）

鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇による影響は主に降伏荷重特性値 Q_d の低下として現れることから、温度上昇を考慮しない通常の地震応答解析結果から上記（評価手法2）の応答予測評価法の式（1.3.1-3）により降伏荷重 Q_d の低下率 ${}_{LRB}k_{\min}$ を評価し、これによりあらかじめ低減させた降伏荷重を、従来の設計降伏荷重の代わりに一定値として考慮した地震応答解析を実施し、温度上昇の影響を評価する手法とする。なお、降伏荷重 Q_d 低下率を求める際の鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$ としては、手法3では通常的设计値としての Q_d を設定して、温度上昇による特性変化を考慮しない地震応答解析により評価した場合の地震終了時のエネルギーとし、手法3'では免震層の水平変形が最大となった時刻における鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギーを用いる。

図 1.3.1-5 に簡易応答評価法の評価フロー図を示す。

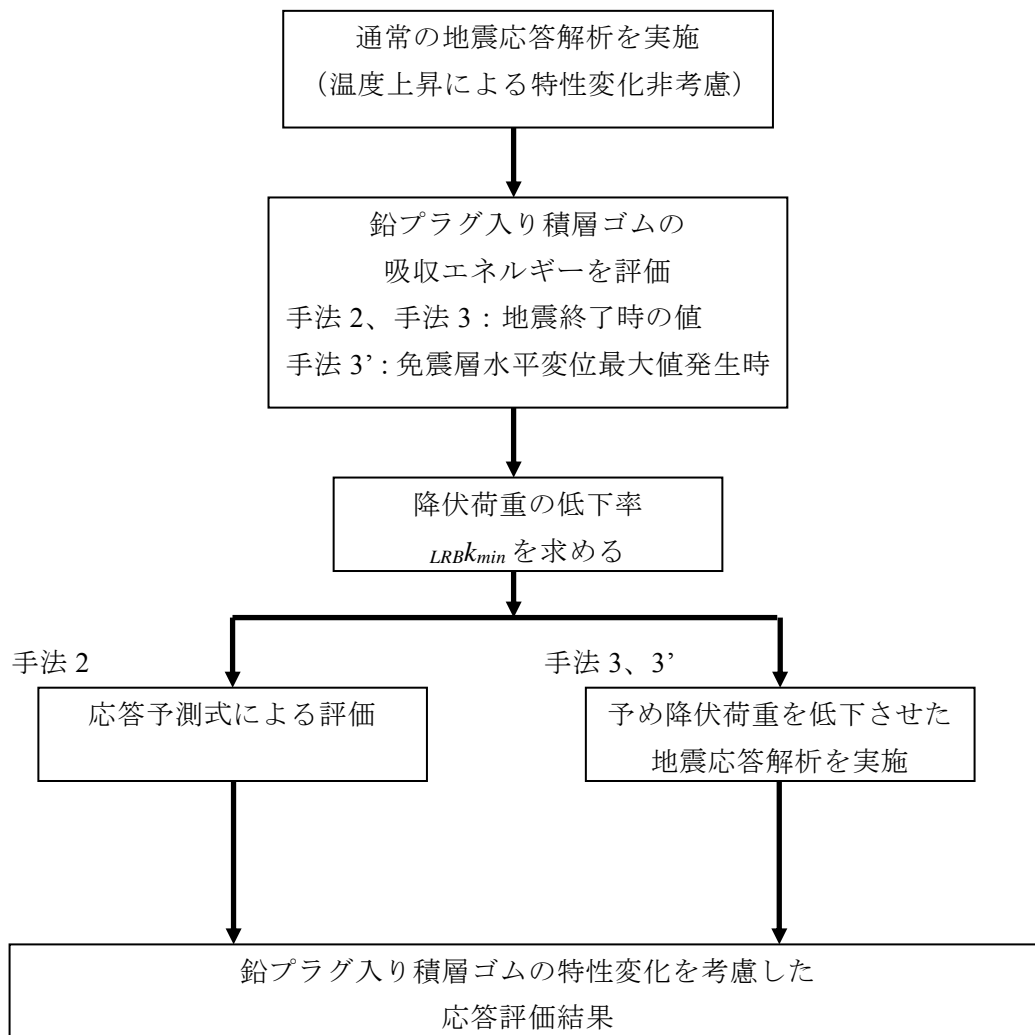


図 1.3.1-5 簡易応答評価法の評価フロー

(2) 応答評価結果

(a) 手法1による応答評価結果

図 1.3.1-6 に手法1を用いて鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合と考慮しない場合の免震層応答水平変形を比較して示す。免震層の水平変形が 20cm ($\gamma=100\%$) 程度以上となると、温度上昇による特性変化を考慮した場合の変位が考慮しない場合と比較して増大してくることが分かる。

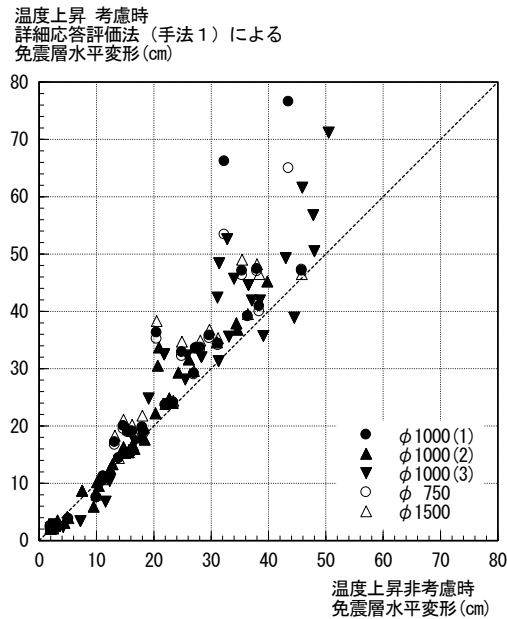


図 1.3.1-6 温度上昇非考慮時と考慮時の水平変形の比較

図 1.3.1-7 に鉛プラグの温度上昇による特性変化非考慮時の水平変形と考慮時の水平変形増大率を示す。水平変形の増大率は概ね 1.0~1.5 倍程度となっている。

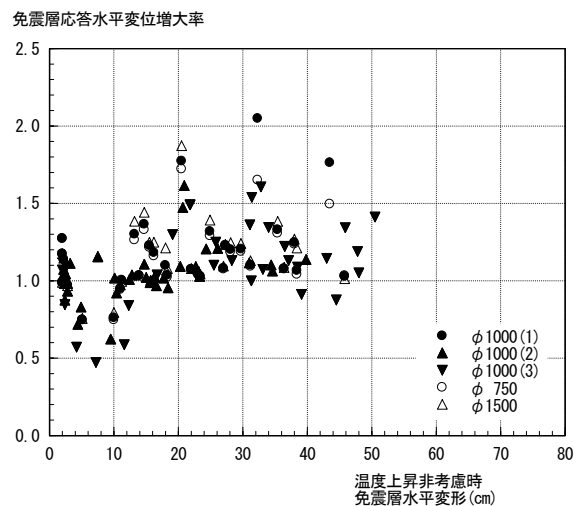


図 1.3.1-7 温度上昇非考慮時の水平変形と考慮時の水平変形増大率

図 1.3.1-8 に手法 1 を用いて鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合と考慮しない場合の免震層の応答層せん断力係数を比較して示す。免震層の応答層せん断力係数については免震層の応答水平変形と比較して、温度上昇を考慮した場合の増大は少なくなっている。

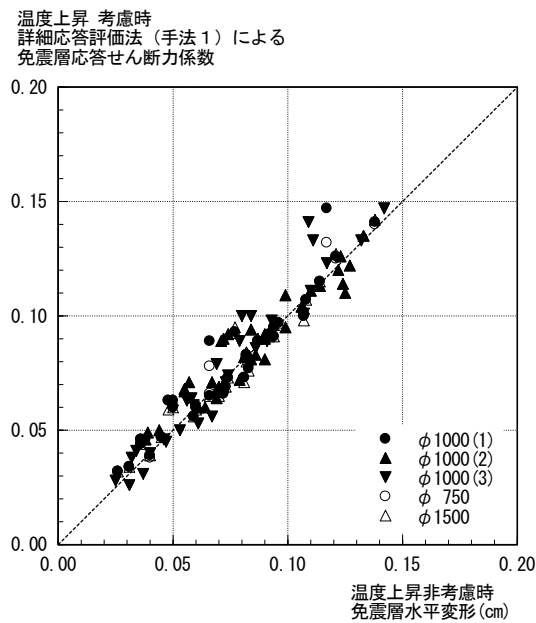


図 1.3.1-8 温度上昇非考慮時と考慮時の免震層応答層せん断力係数の比較

図 1.3.1-9 に鉛プラグの温度上昇による特性変化非考慮時の免震層応答層せん断力係数の増大率を示す。免震層応答層せん断力係数の増大率は概ね 1.0~1.25 倍程度である。

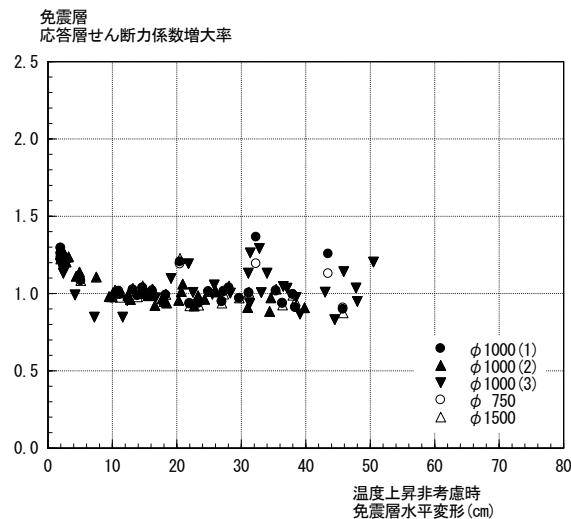


図 1.3.1-9 温度上昇非考慮時の水平変形と考慮時の免震層応答層せん断力係数増大率

図 1.3.1-10 に鉛プラグの温度上昇による特性変化非考慮時と考慮時の免震層の水平変形の増大率と応答層せん断力係数の増大率の関係を示す。温度上昇考慮時には免震層の水平変形が大きく増大するケースがあるものの、それと比較して、免震層の応答層せん断力係数については増大しない結果となっている。

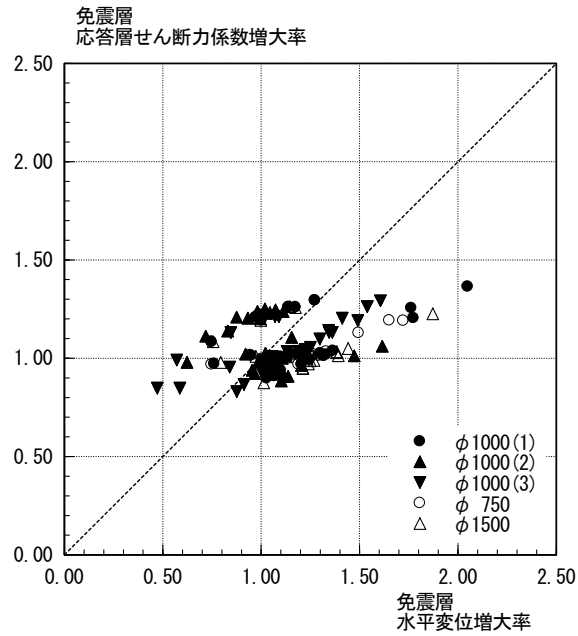


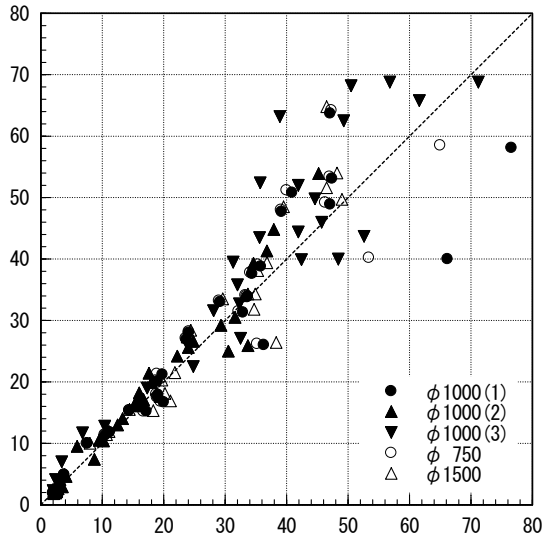
図 1.3.1-10 温度上昇非考慮時、考慮時の応答増大率の関係

(b) 手法2、3による応答評価結果

図 1.3.1-11 に簡易応答評価法（手法2、手法3）の違いによる結果を詳細応答評価法（手法1）による結果と比較して示す。

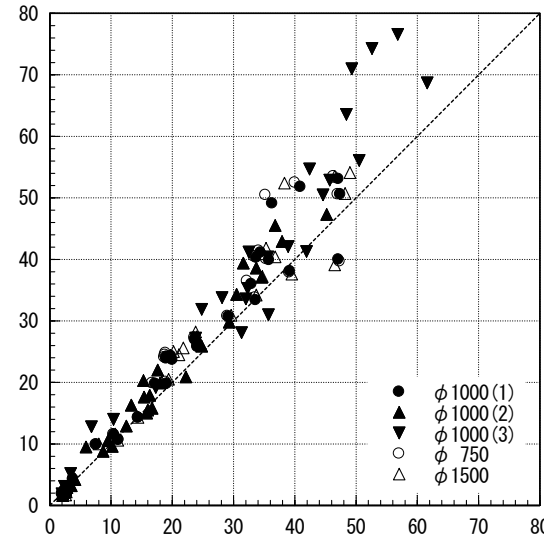
免震層の水平変形については手法2による簡易応答評価法による結果が詳細応答評価法による解析結果と比較的良好な一致を示しているが変形の大きな領域で過小評価しているケースも見られる。手法3については変形の大きな領域で手法1との応答値の差が見られる。免震層の応答層せん断力係数については手法2と手法3による結果に大きな違いが見られないが、手法3による結果が手法1による結果との差が比較的小さくなっている。

簡易応答評価法（手法2）による
免震層水平変形 (cm)



詳細地震応答解析（手法1）による
免震層水平変形 (cm)

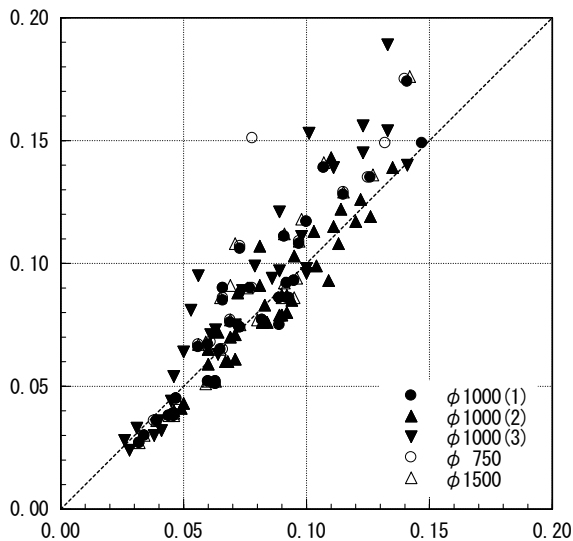
簡易応答評価法（手法3）による
免震層水平変形 (cm)



詳細地震応答解析（手法1）による
免震層水平変形 (cm)

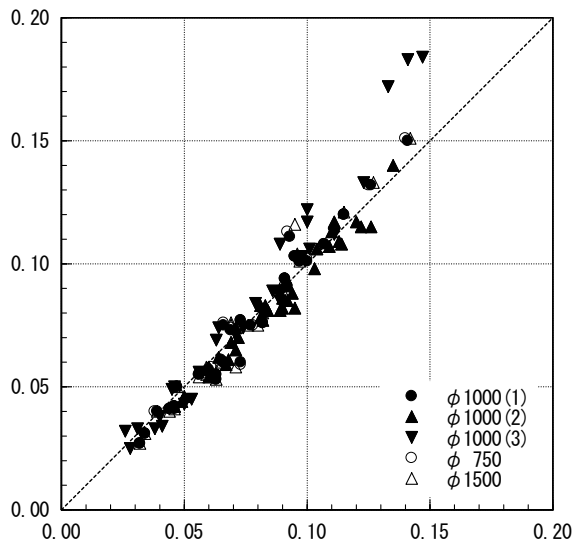
図 1.3.1-11(a) 評価手法の違いによる比較（免震層水平変形）

簡易応答評価法（手法2）による
免震層応答せん断力係数



詳細地震応答解析（手法1）による
免震層応答せん断力係数

簡易応答評価法（手法3）による
免震層応答せん断力係数



詳細地震応答解析（手法1）による
免震層応答せん断力係数

図 1.3.1-11(b) 評価手法の違いによる比較（免震層応答層せん断力係数）

(c) 手法 3、3' による応答評価結果

図 1.3.1-12 に簡易応答評価法（手法 3'）に関連して、従来の地震応答解析による地震動終了時の鉛プラグ単位体積当たりの吸収エネルギーと免震層水平変形最大値の発生時刻との関係を入力地震波毎に示す。KGIN 波については 150～250 秒程度で免震層の水平変形の最大値が発生し、他の入力地震動については全継続間 740 秒のうち、150 秒程度で免震層の水平変形の最大値が発生する。

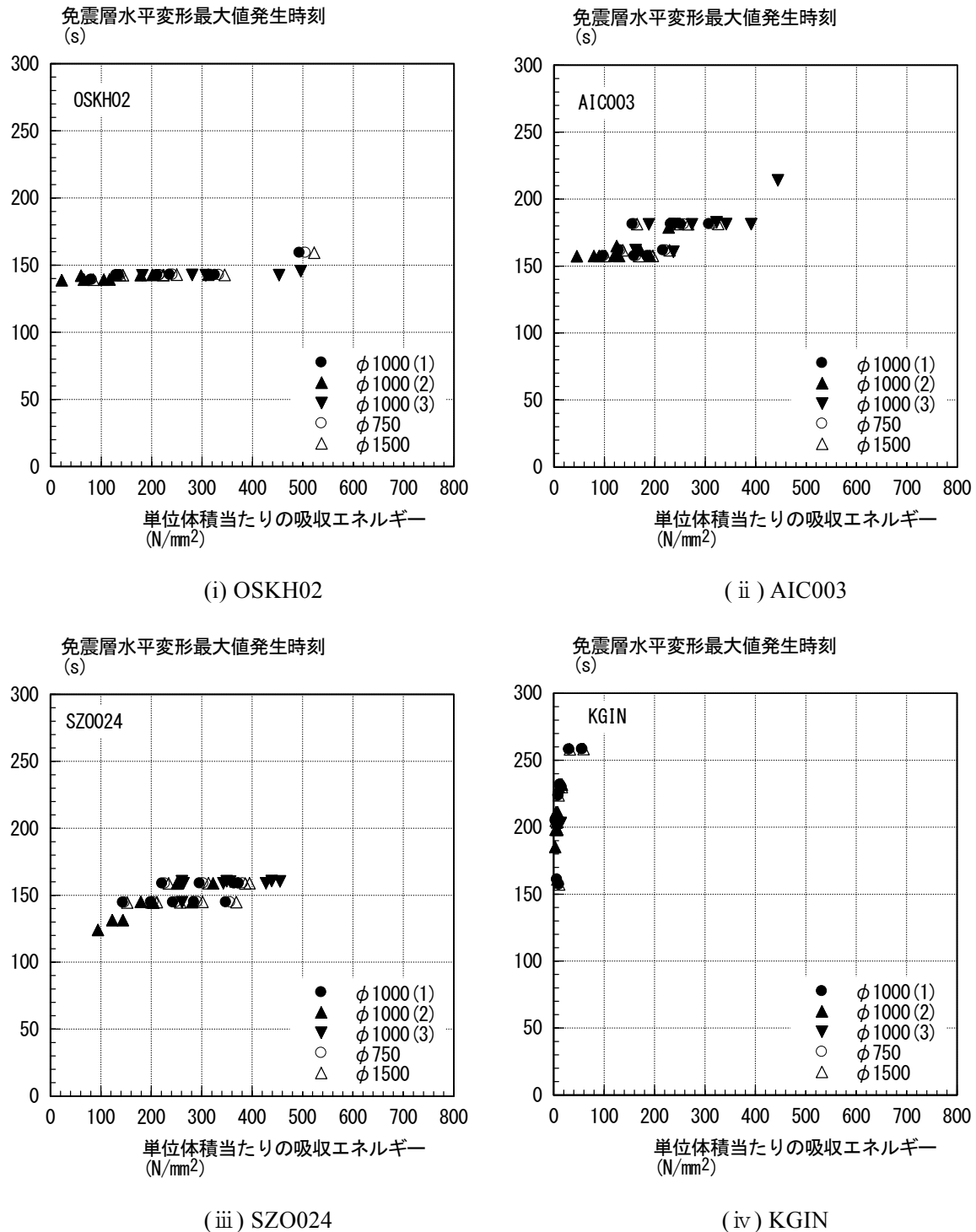


図 1.3.1-12 免震層水平変形最大値発生時刻

図 1.3.1-13 に吸収エネルギーとして従来の地震応答解析結果の地震終了時の鉛プラグの吸収エネルギー（手法 3 での応答評価時）と免震層の水平変位の最大値発生時刻における吸収エネルギー（手法 3' での応答評価時）の比を入力地震波毎に示す。免震層の水平変形の発生時刻についてはばらつきがあまり大きくない結果であったが吸収エネルギーについては比較的ばらつきの大きい結果となっている。

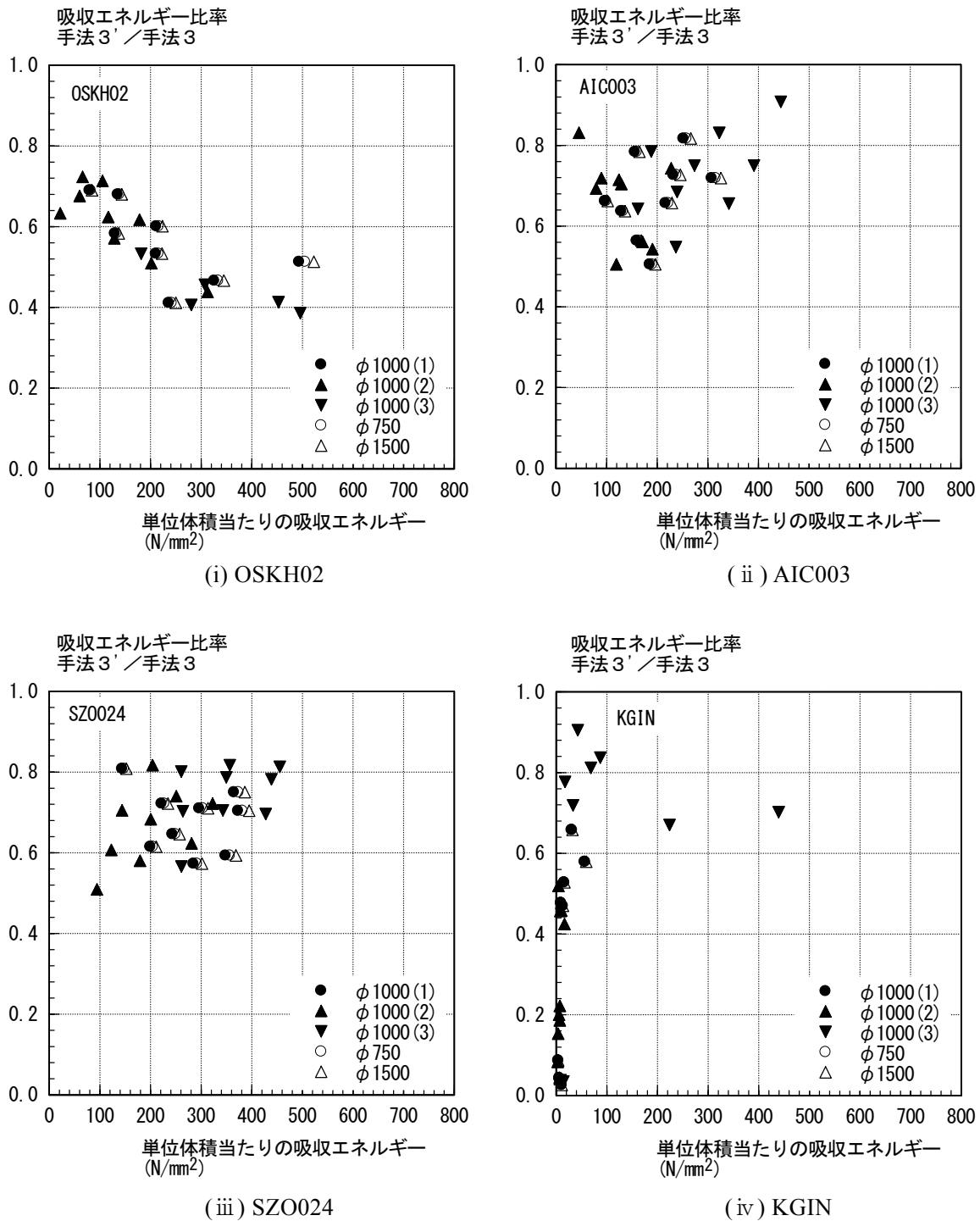


図 1.3.1-13 吸収エネルギー比率

図 1.3.1-14 に簡易応答評価法（手法 3、手法 3'）の違いによる結果を詳細応答評価法（手法 1）による結果と比較して示す。

免震層の水平変形については手法 3' による簡易応答評価法による結果が詳細応答評価法による解析結果と比較的良好一致を示している。しかし水平変形が大きい領域では過小評価となるケースも見られる。

免震層の応答層せん断力係数については手法 3 と手法 3' による結果に大きな違いが見られないが、比較的手法 3' による結果のばらつきが小さくなっている。

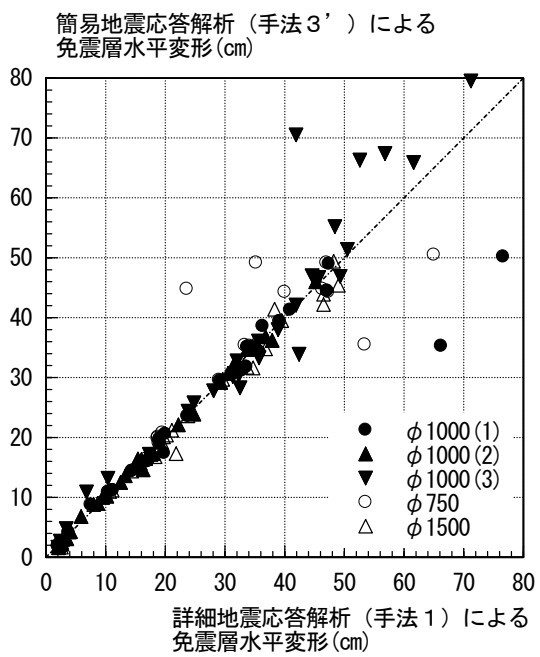
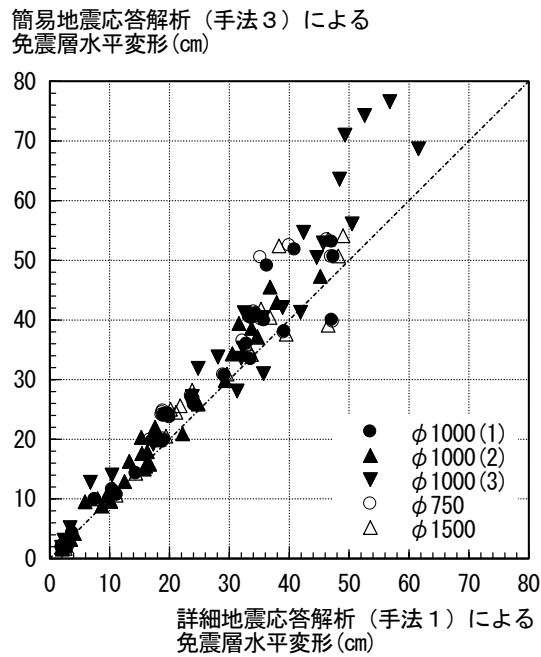


図 1.3.1-14(a) 評価手法の違いによる比較（免震層水平変形）

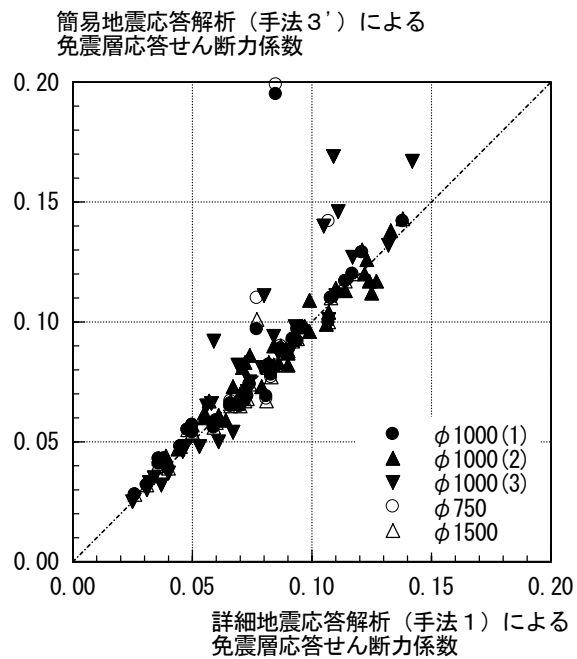
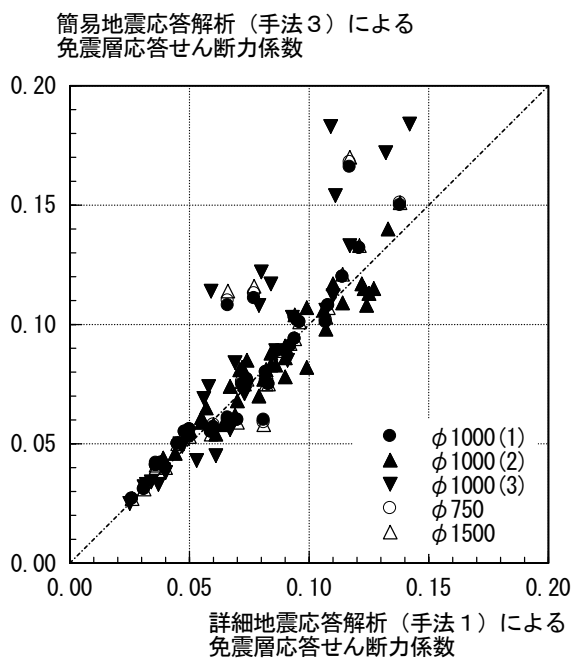


図 1.3.1-14(b) 評価手法の違いによる比較（免震層応答層せん断力係数）

図 1.3.1-15 に簡易応答評価法（手法 3、手法 3'）の違いによる結果を詳細応答評価法（手法 1）による結果との比として示す。

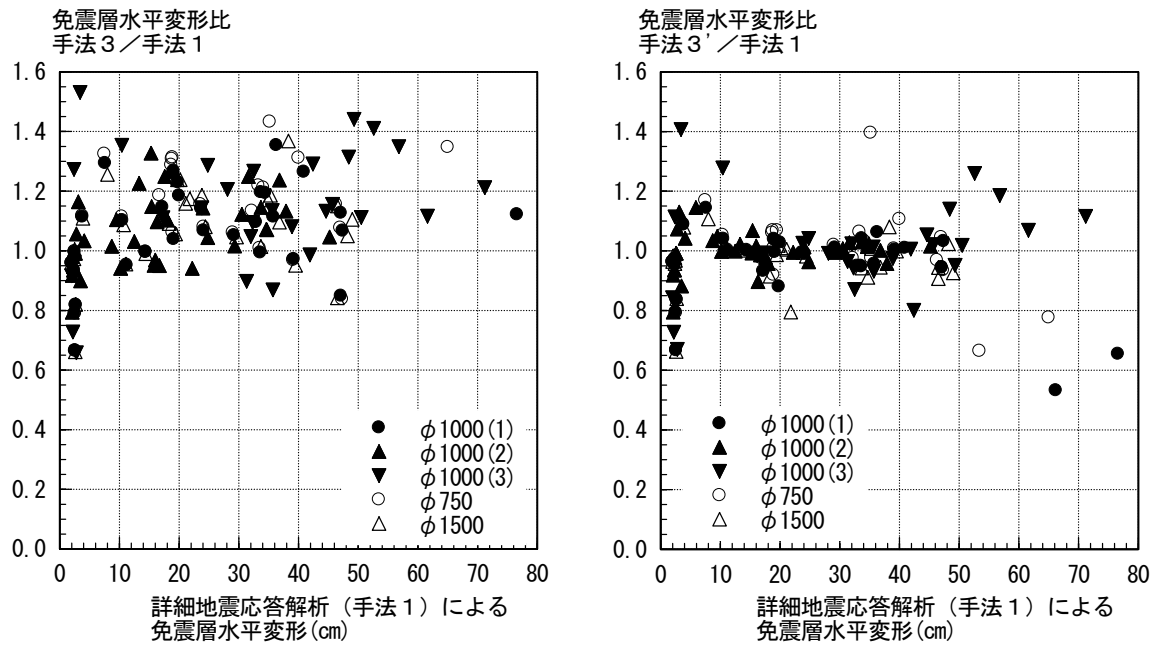


図 1.3.1-15(a) 評価手法の違いによる応答比（免震層水平変形）

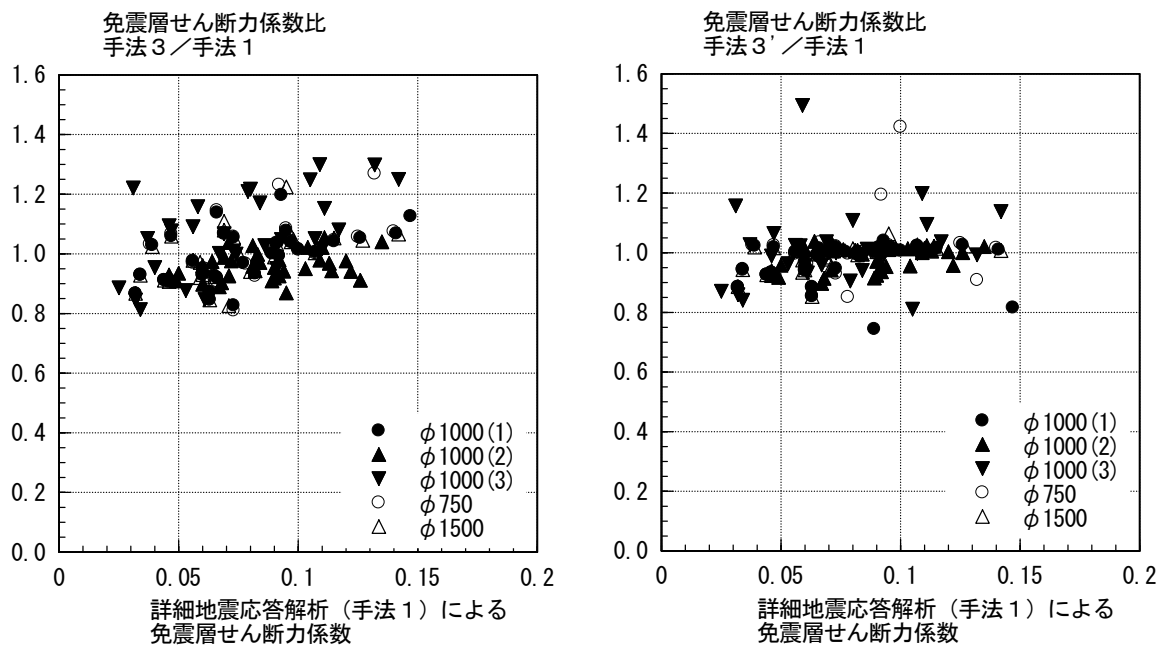
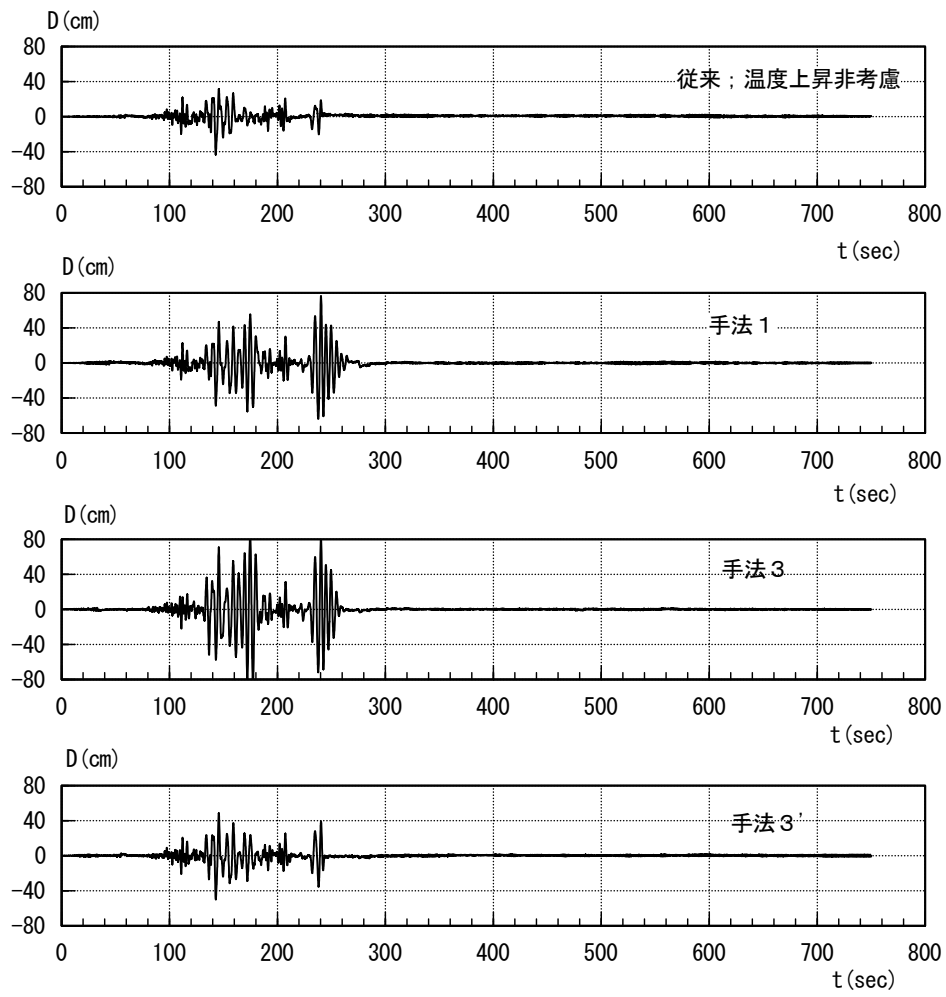


図 1.3.1-15(b) 評価手法の違いによる応答比（免震層応答層せん断力係数）

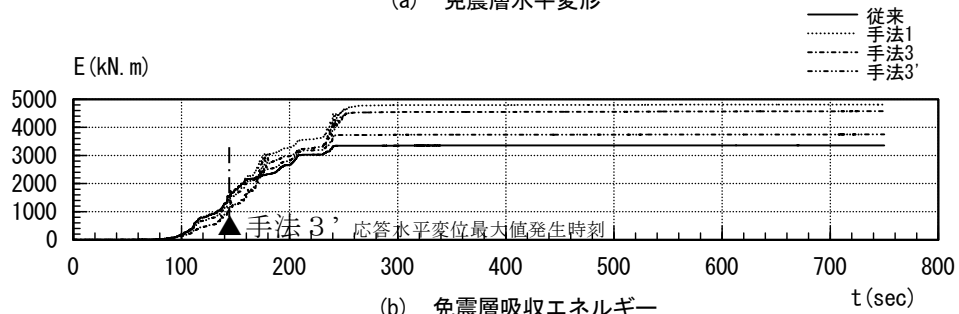
図 1.3.1-16 に手法 1 と手法 3'による応答評価結果に違いが大きい解析についての結果を示す。解析ケースは以下の通りである。

入力地震動が OSKH02x1.5 積層ゴム $\phi 1000$ 、鉛径 $\phi 200$ 、面圧 10N/mm^2

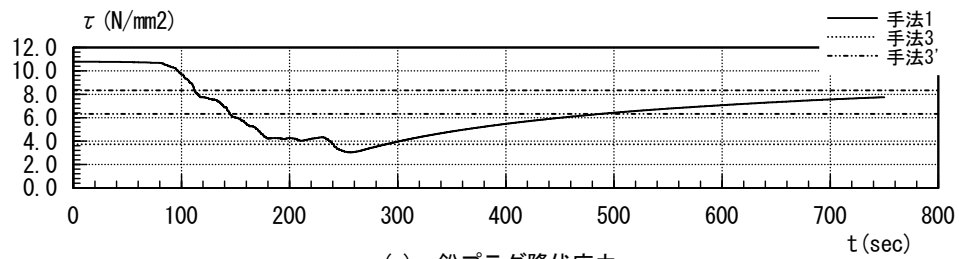
応答解析結果によると手法 1 と手法 3'による免震層応答水平変形の最大値発生時刻が入力地震動の周期特性の影響で大きく異なっている。このため手法 3' で鉛プラグ入り積層ゴムの降伏荷重の低下がより小さく（耐力低下があまりない）設定され、その結果として免震層応答水平変形がより小さめに評価される結果となっていると考えられる。



(a) 免震層水平変形



(b) 免震層吸収エネルギー



(c) 鉛プラグ降伏応力

図 1.3.1-16 評価手法の違いによる各応答時刻歴

(4) 4連動地震を入力地震動とした場合の応答評価結果

(a) 解析条件

応答評価を行った建物モデル諸元を表 1.3.1-2 に示す。応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は鉛プラグ入り積層ゴムのみで構成されるものとし、鉛プラグ入り積層ゴムはゴム種 G4、外径 ϕ 1000、鉛径 200mm、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 $T_f=4.5$ s、鉛降伏せん断力係数 ($\alpha_s=0.035$) となるよう設定した。

表 1.3.1-2 対象建物諸元

| 上部構造 重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN) | LRB 平均面圧 (N/mm ²) | T_f (sec) | α_s |
|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------|------------|
| 7477 | 9.9 | 4.5 | 0.035 |

T_f : ゴム剛性による免震周期

α_s : 鉛プラグ降伏せん断力係数

地震応答解析には前述の評価手法 1 である鉛プラグの温度上昇による特性変化を熱伝導解析と地震応答解析を並行して時刻歴解析を行う手法（詳細応答評価法）とした。

(b) 解析結果

表 1.3.1-3 に各入力地震動における解析結果を示す。

表 1.3.1-3(a) 応答解析結果（免震層応答最大水平変位、応答加速度）
平成 24 年度地震動

| 入力地震動 | 入力倍率 | 免震層応答最大水平変位 (cm) | | | 応答最大加速度 (cm/s ²) | | |
|--------|------|------------------|------------|------------|------------------------------|------------|------------|
| | | 温度上昇 非考慮 | 温度上昇 考慮 | 考慮 /非考慮 | 温度上昇 非考慮 | 温度上昇 考慮 | 考慮 /非考慮 |
| OSKH02 | 1.00 | 25.5 | 54.2 | 2.13 | 85 | 117 | 1.36 |
| AIC003 | 1.00 | 53.7 | - | - | 133 | - | - |
| SZ0024 | 1.00 | 31.0 | 36.7 | 1.18 | 95 | 93 | 0.98 |
| KGIN | 1.00 | 4.3 | 3.6 | 0.84 | 44 | 50 | 1.13 |

表中－は応答解析結果が解析適用範囲外となったことを示す。

表 1.3.1-3(b) 応答解析結果（応答最大せん断ひずみ、応答最大せん断力係数）
平成 24 年度地震動

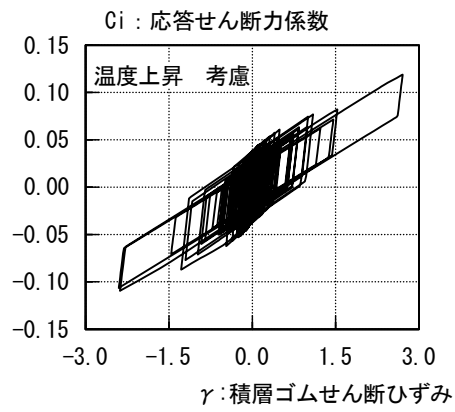
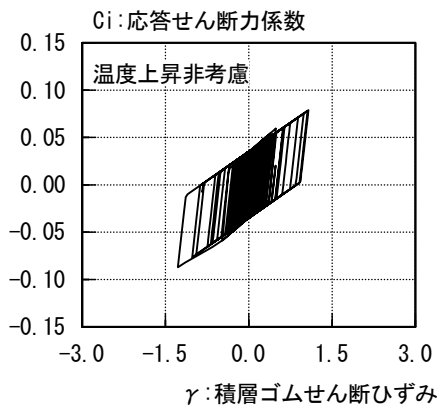
| 入力地震動 | 入力倍率 | 積層ゴム応答最大 せん断ひずみ (%) | | | 免震層応答最大 せん断力係数 | | |
|--------|------|------------------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|
| | | 温度上昇 非考慮 | 温度上昇 考慮 | 考慮 /非考慮 | 温度上昇 非考慮 | 温度上昇 考慮 | 考慮 /非考慮 |
| OSKH02 | 1.00 | 128 | 271 | 2.13 | 0.087 | 0.119 | 1.37 |
| AIC003 | 1.00 | 269 | - | - | 0.135 | - | - |
| SZ0024 | 1.00 | 155 | 184 | 1.18 | 0.097 | 0.095 | 0.98 |
| KGIN | 1.00 | 22 | 18 | 0.84 | 0.045 | 0.051 | 1.13 |

表 1.3.1-3(c) 応答解析結果（累積変位量、吸収エネルギー、鉛平均温度）
平成 24 年度地震動

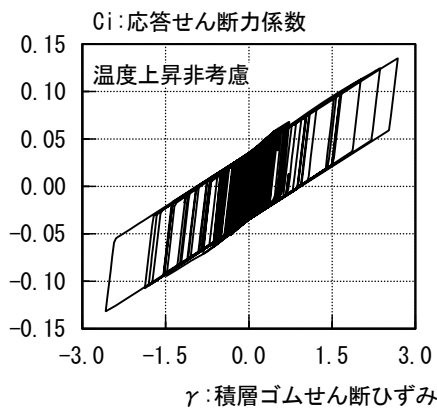
| 入力地震動 | 入力倍率 | 免震層累積 水平変位量 *1 (m) | | | 免震層吸収エネルギー 速度換算値 (cm/s) | | | 最大鉛 平均温度 (°C) |
|--------|------|-----------------------|------------|------------|-------------------------------|------------|------------|---------------------|
| | | 温度上昇 非考慮 | 温度上昇 考慮 | 考慮 /非考慮 | 温度上昇 非考慮 | 温度上昇 考慮 | 考慮 /非考慮 | 温度上昇 考慮 |
| OSKH02 | 1.00 | 15.2 | 21.8 | 1.43 | 256.0 | 296.7 | 1.16 | 179.0 |
| AIC003 | 1.00 | 35.9 | - | - | 430.2 | - | - | - |
| SZ0024 | 1.00 | 25.1 | 22.4 | 0.89 | 263.9 | 252.5 | 0.96 | 140.0 |
| KGIN | 1.00 | 6.9 | 12.0 | 1.74 | 56.9 | 52.0 | 0.91 | 19.5 |

*1 免震層累積水平変位量については総入力エネルギーに対して、入力エネルギーが 95%となる時刻における値とした。

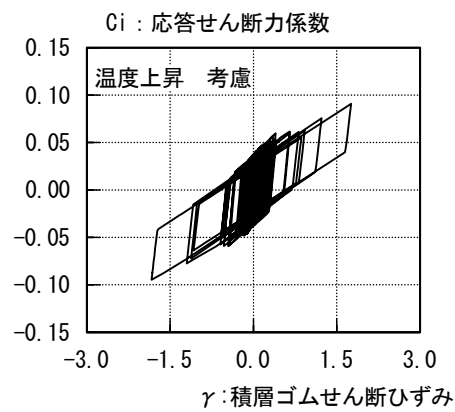
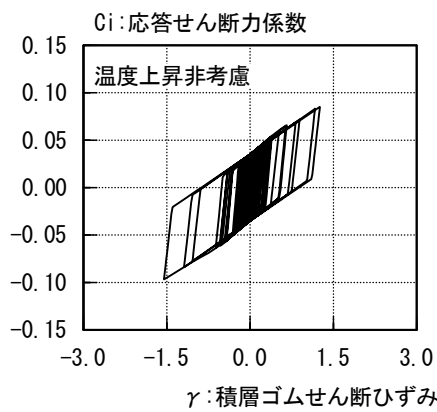
*2 表中－は応答解析結果が解析適用範囲外となったことを示す。



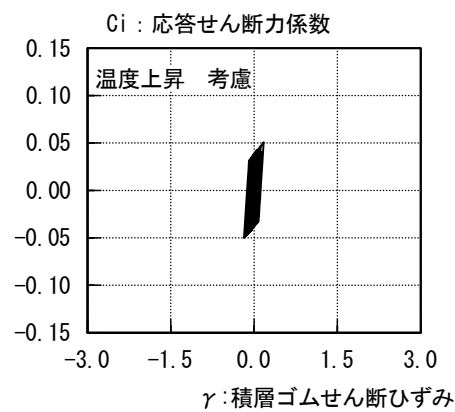
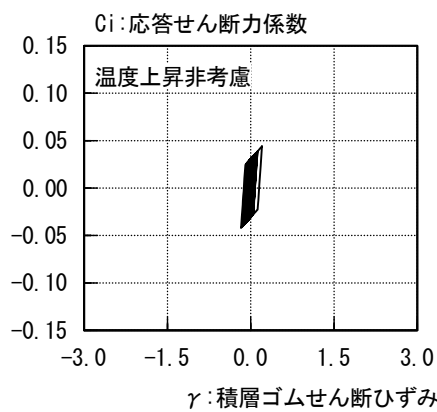
(a) OSKH02



(b) AIC003

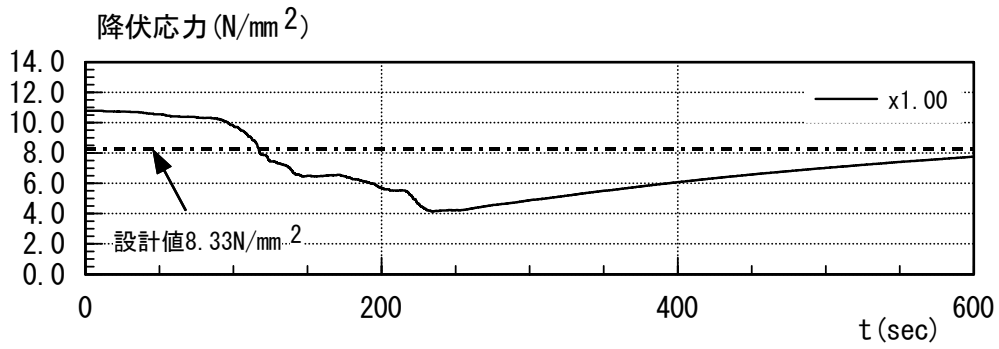


(c) SZO024

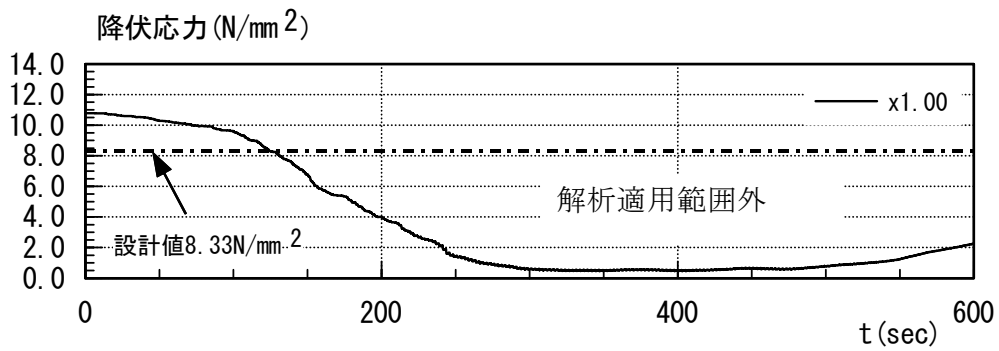


(d) KGIN

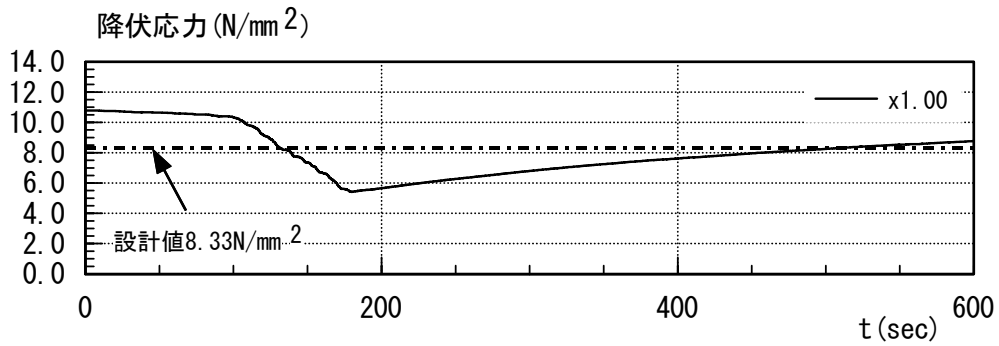
図 1.3.1-17 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図



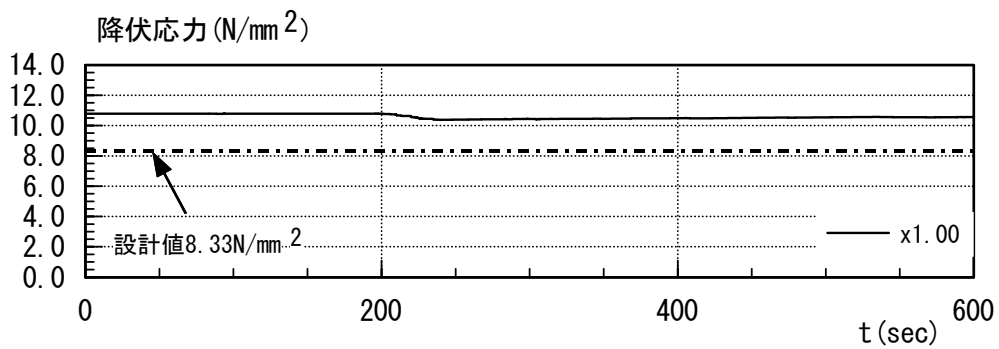
(a) OSKH02



(b) AIC003

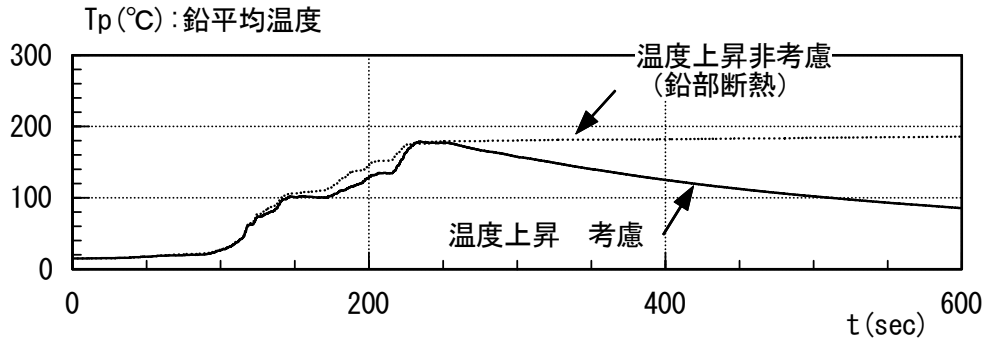


(c) SZO024

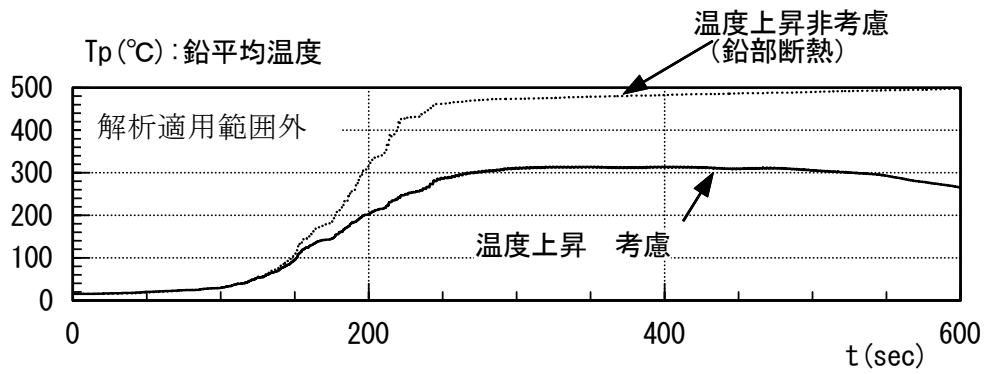


(d) KGIN

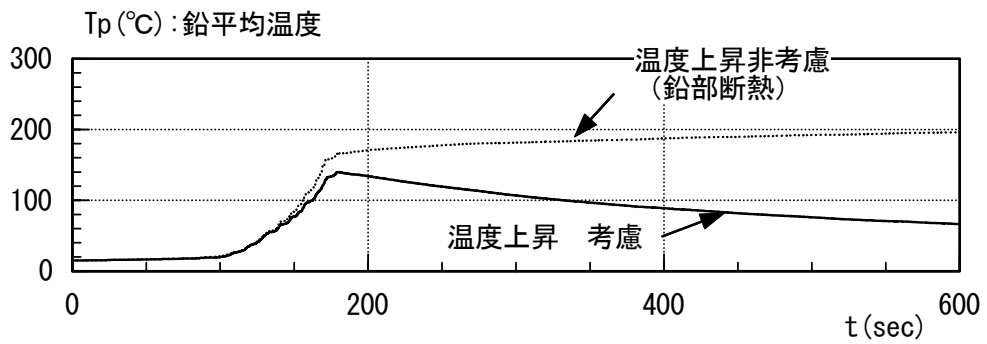
図 1.3.1-18 降伏応力時刻歴



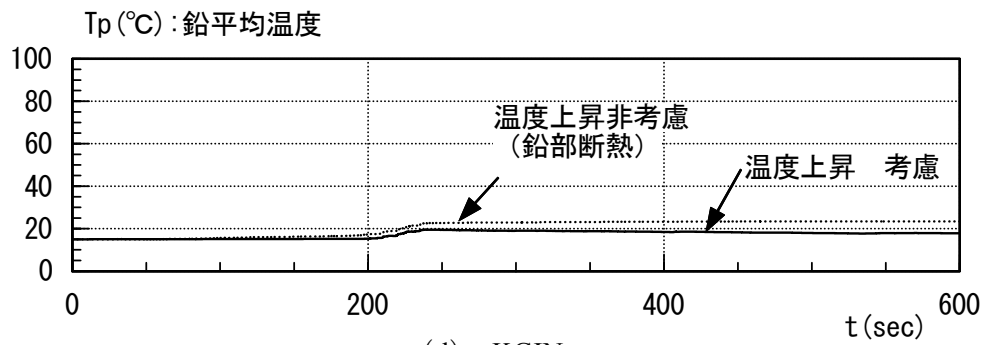
(a) OSKH02



(b) AIC003



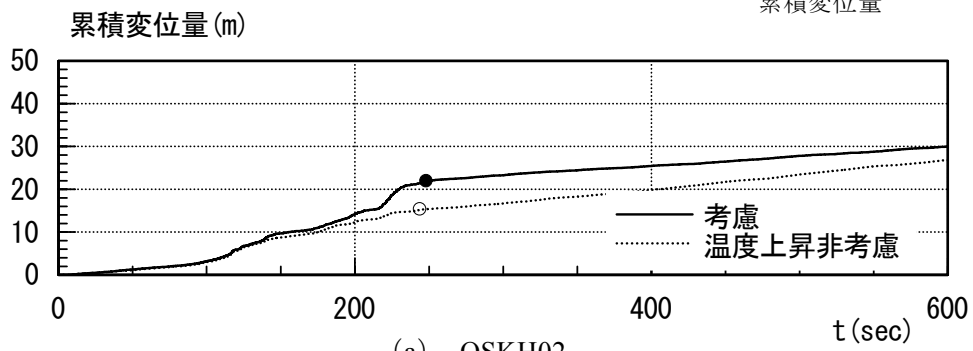
(c) SZO024



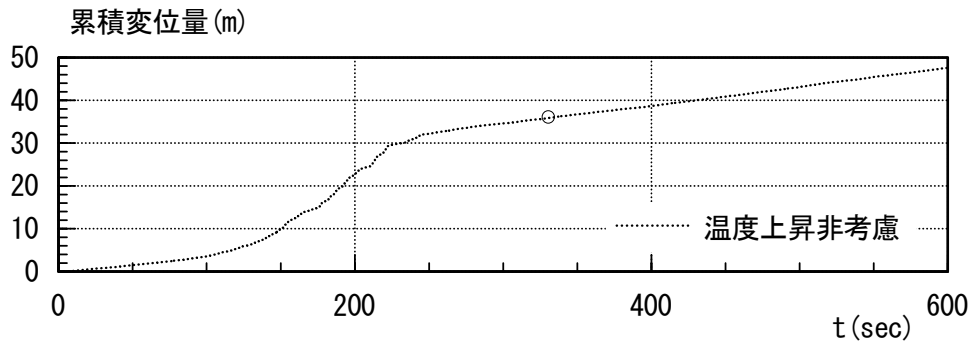
(d) KGIN

図 1.3.1-19 鉛部平均温度時刻歴

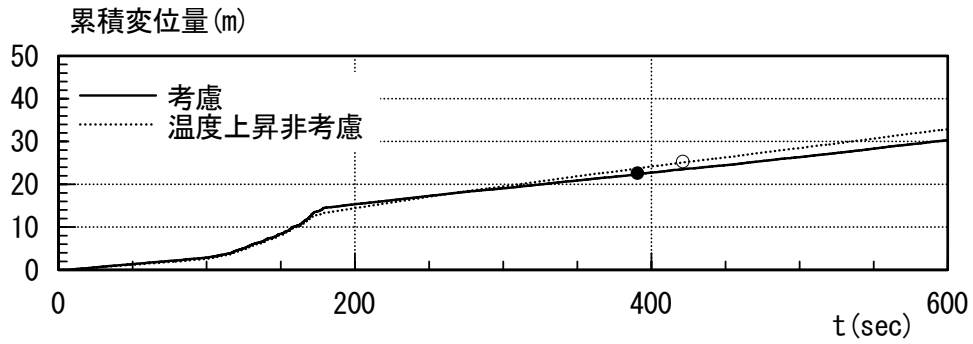
●, ○ 総入力エネルギーの 95%時



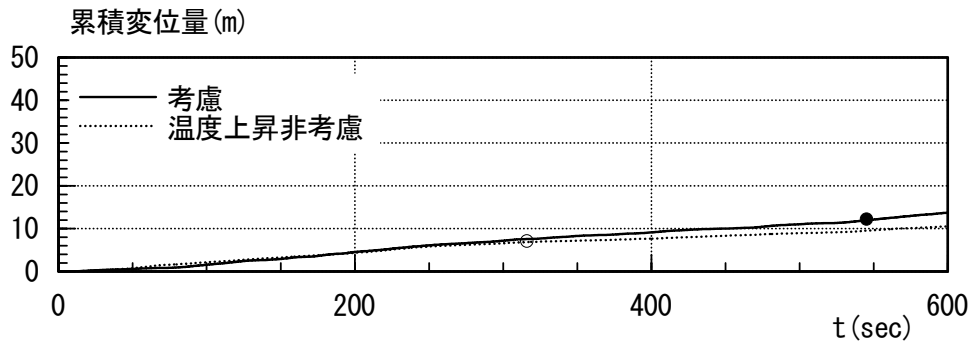
(a) OSKH02



(b) AIC003

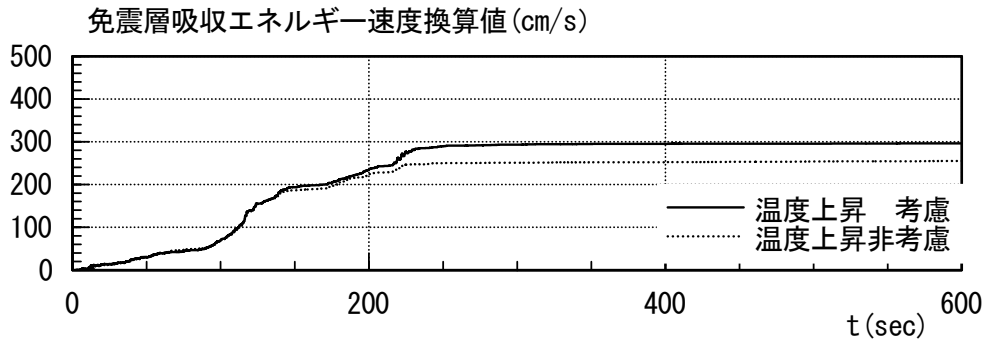


(c) SZO024

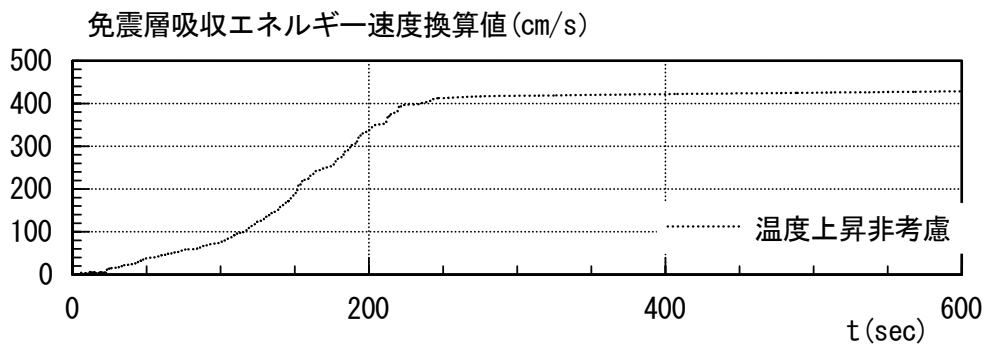


(d) KGIN

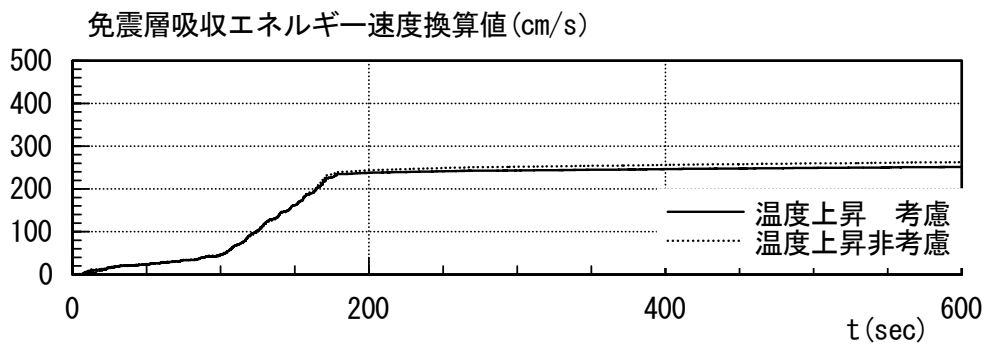
図 1.3.1-20 免震層累積水平変位量時刻歴



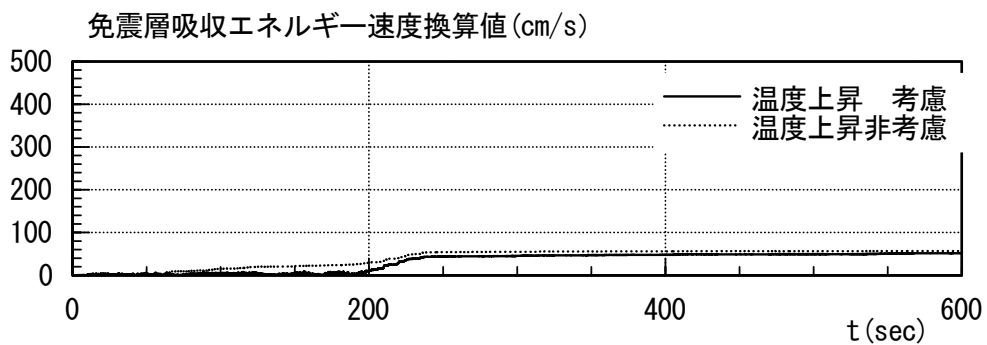
(a) OSKH02



(b) AIC003



(c) SZO024



(d) KGIN

図 1.3.1-21 免震層履歴吸収エネルギー—速度換算値時刻歴

(c) 簡易応答評価法による評価結果

表 1.3.1-4 に簡易応答評価法により、免震層の応答最大水平変位を評価した結果を、詳細応答解析結果と比較して示す。

簡易応答評価法により免震層の応答最大水平変位を評価した結果、AIC003 は評価適用範囲を超えたが、他の入力地震動では手法 3 による結果が詳細応答評価法の手法 2 と良い一致を示した。手法 3' については静岡（浜松：SZO024）、東京（新宿：KGIN）のケースにおいては手法 2、手法 3 と良い一致を示しているが、大阪（此花：OSKH02）については手法 3 と手法 3' で大きな違いが見られた。これは応答最大水平変位が生じる時刻に差があるため、Qd 低下の指標となる鉛プラグ入り積層ゴムで吸収されるエネルギー量の評価に大きな差があるためであると考えられる。

表 1.3.1-4 簡易応答評価法による免震層応答最大水平変位

| 入力地震動 | 入力倍率 | 温度上昇 非考慮 | 温度上昇 考慮 | | |
|--------|------|-------------|------------|------|------|
| | | 手法1 | 手法2 | 手法3 | 手法3' |
| OSKH02 | 1.00 | 25.5 | 54.2 | 58.6 | 25.5 |
| AIC003 | 1.00 | 53.7 | - | - | - |
| SZO024 | 1.00 | 31.0 | 36.7 | 40.2 | 37.6 |
| KGIN | 1.00 | 4.3 | 3.6 | 4.1 | 3.6 |

表中－は応答解析結果が解析適用範囲外となったことを示す。

(5) まとめ

鉛プラグ入り積層ゴムの鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合の免震建物の応答評価を、熱伝導解析と地震応答解析とを並行して実施する詳細応答評価法（手法1）、エネルギーの釣り合いを基にした包絡解析法による応答予測評価法（手法2）及び降伏荷重をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法（手法3、手法3'）の各手法により実施し、それらの結果を比較した。

熱伝導解析と地震応答解析とを並行して実施する詳細応答評価法（手法1）により応答評価した結果、免震層の水平変形が20cm（ $\gamma=100\%$ ）程度以上となると、温度上昇による特性変化を考慮した場合の変位が考慮しない場合と比較して増大する。免震層水平変形の増大率は概ね1.0～1.5倍程度である。免震層の応答層せん断力係数については免震層の応答水平変形と比較して、温度上昇を考慮した場合の増大は少なく、増大率は概ね1.0～1.25倍程度である。

免震層の水平変形についてはエネルギーの釣り合いを基にした包絡解析法による応答予測評価法（手法2）での結果が詳細応答評価法（手法1）による結果と比較的良好一致を示しているが、過小評価となっているケースも見られる。免震層の応答層せん断力係数については手法2と降伏荷重をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法（手法3）による結果に大きな違いが見られないが、比較的手法3による結果と詳細応答評価法（手法1）との差が比較的小さくなっている。

手法3については降伏荷重 Q_d の低下率を求める際に用いる鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギーについて地震終了時の値を用いる手法3と免震層の水平変形が最大となった時刻における履歴吸収エネルギーを用いる手法3'との評価結果を比較した。免震層の水平変形については手法3'による簡易応答評価法による結果が詳細応答評価法による解析結果と比較的良好一致を示しているが、水平変形が大きい領域では過小評価となるケースも見られる。

平成24年度に評価された4連動地震を入力した場合の地震応答解析結果は平成22年度に評価された3連動地震入力時の結果と比較して大きな応答結果となっている。特にAIC003地点においてはその差が大きく、鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合には解析の適用範囲（実験で確認された範囲）を超えるレベルであった。

本検討で示した簡易応答評価法（手法2、手法3及び手法3'）による応答評価結果は、詳細応答評価法による応答評価結果と良好一致を示すケースもあるが、地震動の特性によっては過大、過小評価するケースも見られる。簡易応答評価法の適用については解析対象の免震システムと入力地震動の関係によっては応答評価精度が異なる可能性があるため注意が必要である。

参考文献

- 1.3.1-1) 竹中康雄,近藤明洋他 6 名:大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その9~その11)、日本建築学会学術講演梗概集(中国)、B-2、pp.397-402、2008.9
- 1.3.1-2) T. Honma, A. Kondo, Y. Takenaka, H. Kitamura : Seismic Response Prediction Method Considering Heat-Mechanics Interaction Behavior of Lead Rubber Bearing, Proceeding of Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010.7

1.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム

(1) 繰返し依存性考慮・非考慮による応答値の違い

高減衰ゴム系積層ゴムは、繰返し変形を受けることにより等価剛性と等価減衰定数の低下が生じる。この繰返し依存性を考慮した場合と、考慮しない場合の建物応答の違いを検討するため、繰返し変形による復元力特性値の変化を時時刻々と反映させた解析モデル(3.4.2 参照)と、繰返しの依存性を考慮しない解析モデルを用いて地震応答解析を実施し、両者の応答値を比較する。解析モデルは、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する 1 質点剛体モデルとする。免震層は、せん断ひずみ 200%時の等価剛性が約 4.0 秒となるよう設定する。表 1.3.2-1 に、解析モデルの諸元を示す。繰返し依存性の特性変化を考慮する解析は、繰返し変形によるゴムの温度変化をもとに復元力特性値を変動させる。この解析における初期温度は全て 20℃とする。入力地震動は、5.2 に示す検討用長周期地震動を用いる。なお、本解析で用いる解析モデルの適用範囲は、 $\gamma=270\%$ (545mm)である。それを超える範囲については、復元力特性値を $\gamma=270\%$ 時の値で一定として解析を続行しているが、解析結果は本検討には用いない。

表 1.3.2-2 に、繰返し依存性を考慮した場合と、考慮しない場合の地震応答解析結果の最大応答値を比較して示す。今回実施した解析ケースの中で、OSKH02 の 1.5 倍入力(繰返し考慮)、AIC003 の四連動入力(繰返し非考慮、考慮共)のケースが解析の適用範囲を超えている。解析モデルの適用範囲内の解析結果について、最大応答加速度は繰返し考慮と非考慮の差は最大でも 7%と小さい。免震層変位は、AIC003 および OSKH02 の四連動を入力したケースで、繰返しを考慮した解析結果の方が 10~20%値が大きい。表 1.3.2-3 に、繰返し依存性を考慮した場合と、考慮しない場合の累積値を比較して示す。ここで、累積エネルギーは解析終了時の値の 95%値、累積変形量は累積エネルギーが解析終了時の値の 95%に達した時点の値としている。累積変形量は、OSKH02、AIC003 を入力したケースで考慮と非考慮で 5~10%程度の差が生じている。累積 V_E は、どのケースでも考慮と非考慮の差は 3%以下と小さい。図 1.3.2-1 に、単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギー E/V による繰返し依存性考慮・非考慮の応答値の差を示す。免震層最大変位および累積変形量は、 E/V が大きくなるにしたがって繰返し依存性考慮の解析結果の値が大きくなるが、最大応答加速度については明確な傾向は見られない。

以上より、繰返し依存性による高減衰ゴム系積層ゴムの特性変化は、建物応答として免震層変位を増大させる傾向がある。一方、最大応答加速度、累積吸収エネルギー量については、繰返し依存性の影響は小さい。

表 1.3.2-1 解析モデル諸元

| | |
|----------------------|-----------------------|
| 想定建物 | RC 造、10 階建て、基礎免震 |
| 上部構造重量 | 46,000kN |
| 積層ゴム台数 | 12 台 |
| 積層ゴム直径(内径) | 700mm (15mm) |
| ゴム層総厚 | 202.1mm |
| 積層ゴム面圧 | 10.0N/mm ² |
| $\gamma=100\%$ 時等価周期 | 3.6 秒 |
| $\gamma=200\%$ 時等価周期 | 4.1 秒 |

表 1.3.2-2 繰返し依存性を考慮した場合と考慮しない場合の最大応答値の比較

| 入力 | | | 応答 | | | | | |
|-----------------|------|--------------|------------|------------------|-----------|------------------|--------|------------------|
| 地震波 | 倍率 | 加速度 (Gal) | 質点加速度(Gal) | | 免震層変位(mm) | | せん断力係数 | |
| | | | 非考慮 | 考慮 | 非考慮 | 考慮 | 非考慮 | 考慮 |
| OSKH02 | 1.00 | 98.49 | 76.28 | 75.64 (0.99) | 304.64 | 315.95 (1.04) | 0.0778 | 0.0772 (0.99) |
| | 1.25 | 123.11 | 97.30 | 95.92 (0.99) | 426.45 | 444.88 (1.04) | 0.0993 | 0.0979 (0.99) |
| | 1.50 | 147.73 | 128.83 | — (—) | 540.36 | 545以上 (—) | 0.1315 | — (—) |
| AIC003 | 1.00 | 199.40 | 54.82 | 54.92 (1.00) | 153.34 | 171.43 (1.12) | 0.0559 | 0.0560 (1.00) |
| | 1.25 | 249.25 | 68.43 | 69.34 (1.01) | 255.56 | 286.80 (1.12) | 0.0698 | 0.0708 (1.01) |
| | 1.50 | 299.10 | 84.38 | 85.46 (1.01) | 352.24 | 397.01 (1.13) | 0.0861 | 0.0872 (1.01) |
| SZO024 | 1.00 | 576.78 | 71.69 | 69.31 (0.97) | 276.65 | 285.07 (1.03) | 0.0732 | 0.0707 (0.97) |
| | 1.25 | 720.98 | 85.96 | 82.10 (0.96) | 361.47 | 373.84 (1.03) | 0.0877 | 0.0838 (0.96) |
| | 1.50 | 865.17 | 100.63 | 94.93 (0.94) | 444.24 | 455.96 (1.03) | 0.1027 | 0.0969 (0.94) |
| KGIN1F | 1.00 | 42.11 | 36.49 | 36.52 (1.00) | 64.15 | 65.31 (1.02) | 0.0372 | 0.0373 (1.00) |
| | 1.25 | 52.64 | 43.70 | 43.32 (0.99) | 88.87 | 90.27 (1.02) | 0.0446 | 0.0442 (0.99) |
| | 1.50 | 63.17 | 50.34 | 50.01 (0.99) | 122.26 | 128.26 (1.05) | 0.0514 | 0.0510 (0.99) |
| OSKH02 (四連動) | 1.00 | 133.00 | 93.81 | 100.68 (1.07) | 406.93 | 487.77 (1.20) | 0.0957 | 0.1027 (1.07) |
| AIC003 (四連動) | 1.00 | 545.40 | — | — (—) | 545以上 | 545以上 (—) | — | — (—) |
| SZO024 (四連動) | 1.00 | 640.30 | 92.59 | 89.26 (0.96) | 399.90 | 413.03 (1.03) | 0.0945 | 0.0911 (0.96) |
| KGIN1F (四連動) | 1.00 | 55.51 | 48.15 | 48.13 (1.00) | 109.75 | 116.04 (1.06) | 0.0491 | 0.0491 (1.00) |

※()内は、(考慮/非考慮)の値。

※解析モデルの適用範囲($\gamma=270\%$, $\delta=545\text{mm}$)を超える解析結果については、本検討に用いない。

(適用範囲を超えるケース : OSKH02 1.5 倍(考慮)、AIC003 四連動(非考慮)、AIC003 四連動(考慮))

表 1.3.2-3 繰返し依存性を考慮した場合と考慮しない場合の累積値の比較

| 入力 | | | 応答 | | | | |
|-----------------|------|--------------|----------|-----------------|--------------------------|----------------|--------|
| 地震波 | 倍率 | 加速度 (Gal) | 累積変形量(m) | | 累積V _E (m/sec) | | 温度(°C) |
| | | | 非考慮 | 考慮 | 非考慮 | 考慮 | |
| OSKH02 | 1.00 | 98.49 | 13.20 | 13.89 (1.05) | 1.95 | 1.98 (1.02) | 26.06 |
| | 1.25 | 123.11 | 18.15 | 19.71 (1.09) | 2.54 | 2.63 (1.03) | 27.99 |
| | 1.50 | 147.73 | 23.44 | — (—) | 3.13 | — (—) | 30.48 |
| AIC003 | 1.00 | 199.40 | 12.02 | 11.74 (0.98) | 1.65 | 1.64 (0.99) | 24.22 |
| | 1.25 | 249.25 | 14.27 | 15.17 (1.06) | 1.99 | 2.01 (1.01) | 26.13 |
| | 1.50 | 299.10 | 17.85 | 18.86 (1.06) | 2.36 | 2.38 (1.01) | 27.21 |
| SZO024 | 1.00 | 576.78 | 13.15 | 13.47 (1.02) | 1.94 | 1.91 (0.99) | 25.73 |
| | 1.25 | 720.98 | 16.78 | 16.88 (1.01) | 2.30 | 2.25 (0.98) | 26.79 |
| | 1.50 | 865.17 | 20.06 | 21.28 (1.06) | 2.64 | 2.56 (0.97) | 27.79 |
| KGIN1F | 1.00 | 42.11 | 5.18 | 5.21 (1.00) | 0.74 | 0.75 (1.00) | 20.83 |
| | 1.25 | 52.64 | 6.95 | 7.06 (1.02) | 0.99 | 1.00 (1.01) | 21.54 |
| | 1.50 | 63.17 | 8.71 | 8.86 (1.02) | 1.25 | 1.26 (1.01) | 22.46 |
| OSKH02 (四連動) | 1.00 | 133.00 | 22.04 | 23.80 (1.08) | 2.72 | 2.76 (1.02) | 28.48 |
| AIC003 (四連動) | 1.00 | 545.40 | — | — (—) | — | — (—) | — |
| SZO024 (四連動) | 1.00 | 640.30 | 17.59 | 17.56 (1.00) | 2.08 | 2.03 (0.98) | 26.19 |
| KGIN1F (四連動) | 1.00 | 55.51 | 8.77 | 8.84 (1.01) | 1.20 | 1.21 (1.01) | 22.28 |

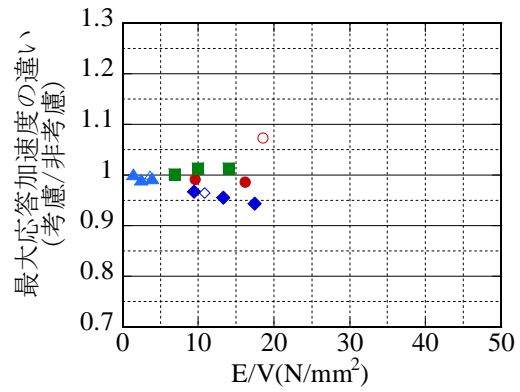
※()内は、(考慮/非考慮)の値。

※解析モデルの適用範囲($\gamma=270\%$, $\delta=545\text{mm}$)を超える解析結果については、本検討に用いない。

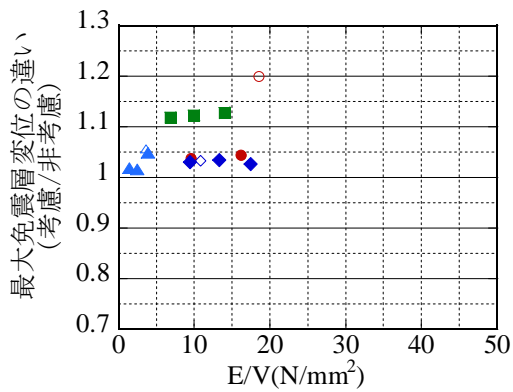
(適用範囲を超えるケース：OSKH02 1.5 倍(考慮)、AIC003 四連動(非考慮)、AIC003 四連動(考慮))

※累積吸収エネルギーは、解析終了時の値の95%値とする。

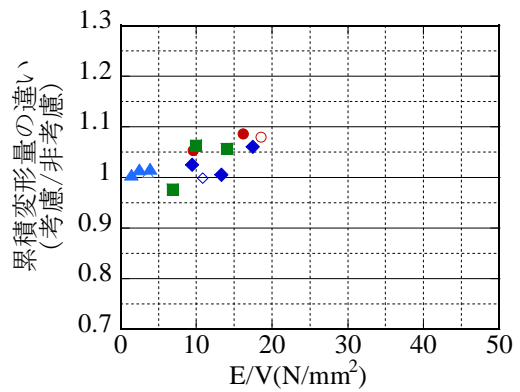
※累積変形量は、累積吸収エネルギーが解析終了時の95%に達した時点の値とする。



(a) 最大応答加速度



(b) 免震層最大変位



(c) 免震層累積変形量

図 1.3.2-1 累積吸収エネルギーと繰り返し依存性考慮・非考慮の応答値差の関係
 (※E/V は単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギー量であり、解析終了時の 95% のエネルギー量から算出)

(※解析モデルの適用範囲を超えているケースは除外)

(2) 簡易評価法の検討方針

時刻歴応答解析による建物応答の検討においては、製作ばらつき、環境温度、経年変化による特性変動を考慮し、ゴムが最もやわらかくなるソフトケースと、もっともかたくなるハードケースによる応答値を検討する。表 1.3.2-4 に、高減衰ゴム系積層ゴム X0.6R タイプのばらつき値を示す^{1.3.2-1)}。(1)に示す、繰返し依存性考慮・非考慮の解析結果の比較より、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し依存性による特性変化は免震層変位を増大させる傾向がある。従って、ソフト・ハードケースの検討において、繰返し依存性による変動をソフトケースの追加検討事項として加えることにより、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し依存性を簡易的に評価する手法を検討する。

図 1.3.2-1 より、繰返し依存性により応答値に差が生じるのは、単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギー量 E/V が 5N/mm^2 以上の範囲であることから、簡易評価においては E/V が 5N/mm^2 以上の場合に繰返し依存性を考慮する。図 1.3.2-2 に、繰返し依存性を考慮した解析ケースの累積吸収エネルギーと等価剛性、および等価減衰定数の低下率の関係を示す。図は、解析モデルの適用範囲内の解析結果で累積吸収エネルギー量が最も大きくなる OSKH02 を入力したケースの解析結果である。等価剛性は、 E/V が 5N/mm^2 で約 5%、 20N/mm^2 で約 10% 低下している。等価減衰定数は、 E/V が 15N/mm^2 で約 5% 低下している。この E/V と等価剛性および等価減衰定数の低下率の関係をソフトケースにおけるばらつき値として考慮する。 E/V による等価剛性の低下率 C_K 、および等価減衰定数の低下率 C_h は、下式で表される。

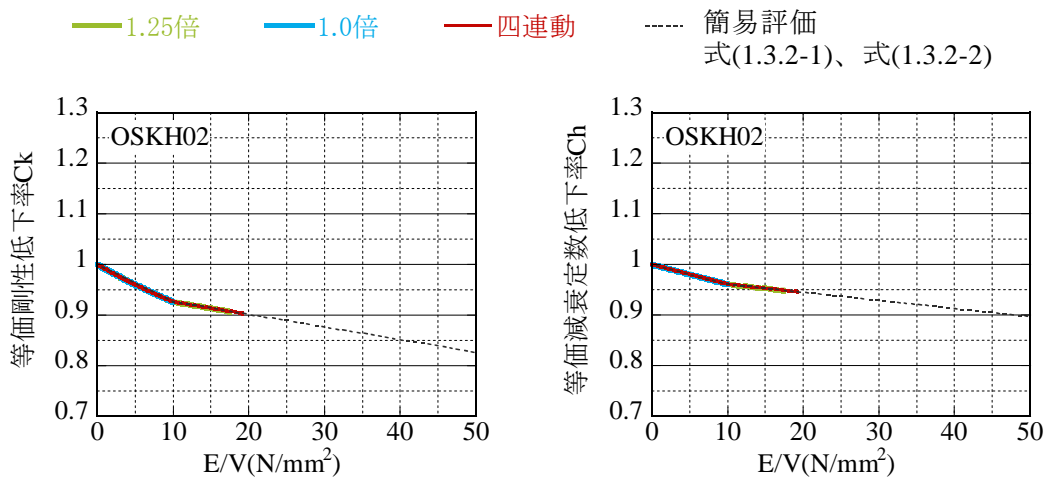
$$\left. \begin{aligned} C_K &= -0.0073 \cdot (E/V) + 1.0 \quad (E/V \leq 10.0\text{N/mm}^2) \\ C_K &= -0.0025 \cdot (E/V) + 0.952 \quad (E/V > 10.0\text{N/mm}^2) \end{aligned} \right\} \quad (1.3.2-1)$$

$$\left. \begin{aligned} C_h &= -0.0039 \cdot (E/V) + 1.0 \quad (E/V \leq 10.0\text{N/mm}^2) \\ C_h &= -0.0016 \cdot (E/V) + 0.977 \quad (E/V > 10.0\text{N/mm}^2) \end{aligned} \right\} \quad (1.3.2-2)$$

図 1.3.2-3 に、繰返し依存性の簡易評価法のフローを示す。一度、ばらつきを考慮しないノーマルケースによって時刻歴応答解析を行い、高減衰ゴム系積層ゴムの単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギー量 E/V を算出する。算出した E/V が 5N/mm^2 以上の場合、 E/V の値に応じた繰返し依存によるばらつき値を考慮して、ソフトケースの解析を実施する。これにより、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し依存性を簡易的に評価する。

表 1.3.2-4 高減衰ゴム系積層ゴムのばらつきの組合せ例^{1.3.2-1)}

| ゴム材料 | | X0.6R | |
|---------------------|----------|-------|------|
| | | +側 | -側 |
| 製造ばらつき *1 | 等価剛性 | +10% | -10% |
| | 等価粘性減衰定数 | -10% | +10% |
| 経年変化 | 等価剛性 | +10% | 0% |
| | 等価粘性減衰定数 | -10% | 0% |
| 環境温度変化 20°C±20°C | 等価剛性 | +21% | -16% |
| | 等価粘性減衰定数 | +7% | -13% |
| 合計 | 等価剛性 | +41% | -26% |
| | 等価粘性減衰定数 | -13% | -3% |



(a) 等価剛性の低下率

(b) 等価減衰定数の低下率

図 1.3.2-2 累積吸収エネルギー E/V と復元力特性値の低下率の関係
(※ E/V は単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギー量)

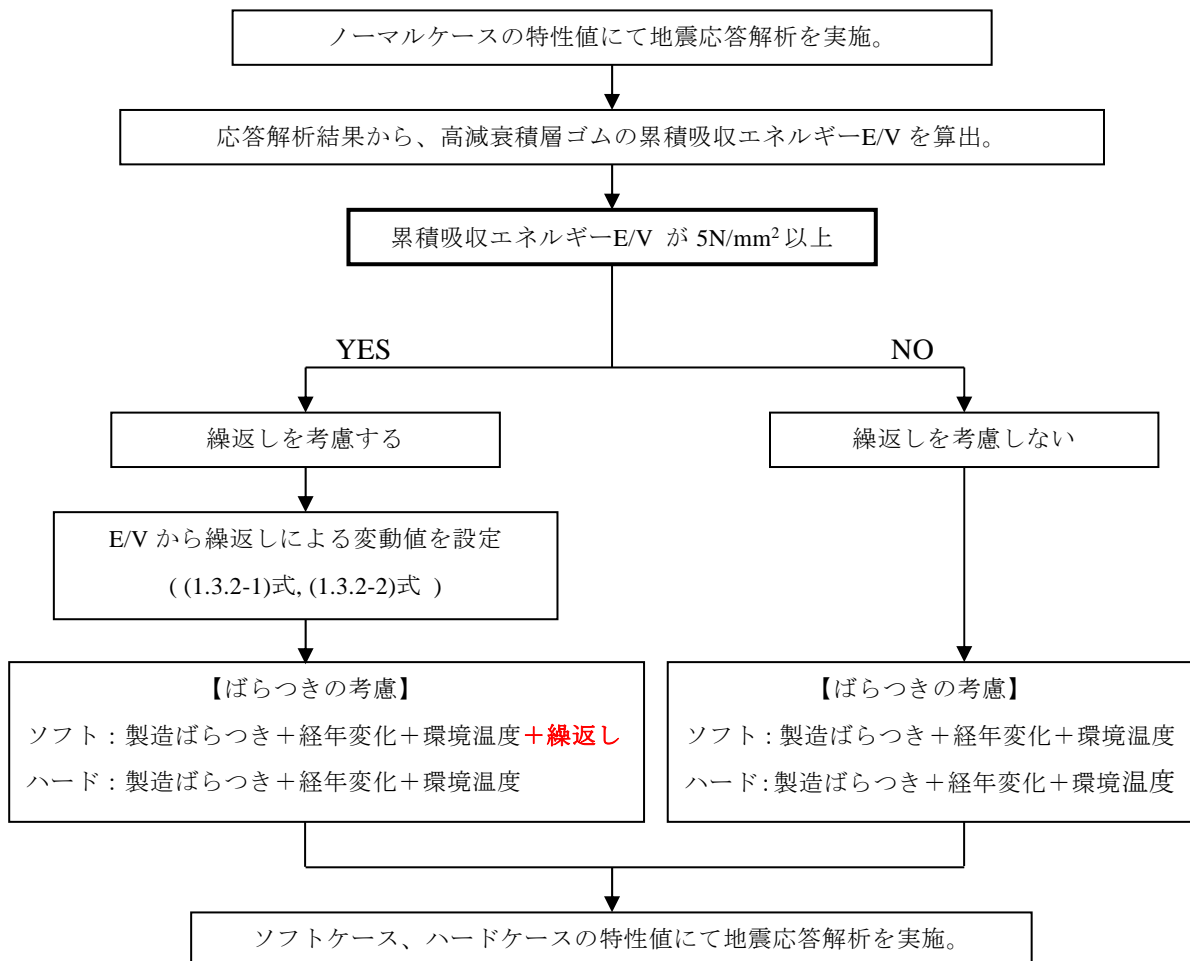


図 1.3.2-3 繰返し依存性の簡易評価法のフロー

(3) 簡易評価法による検討結果

(2)に示す繰返し依存性の簡易評価法と、繰返し依存性を時時刻々と考慮した場合の解析結果を比較し、簡易評価法の妥当性を検証する。表 1.3.2-5 に、式(1.3.2-1)、式(1.3.2-2)により算出した各解析ケースの等価剛性の低下率 C_K 、および等価減衰定数の低下率 C_h を示す。 E/V が $5N/mm^2$ より小さいケースについては、繰返し依存性を考慮しないため C_K 、 C_h とも 1.0 とする。簡易評価においては、表 1.3.2-5 に示す C_K 、 C_h を解析の最初から等価剛性、等価減衰定数の低下率として乗じて地震応答解析を行う。

表 1.3.2-6 に、繰返し依存性を考慮しない解析結果(非考慮)、時時刻々と考慮した解析結果(考慮)、表 1.3.2-5 に示す値によって簡易的に考慮した解析結果(簡易)の最大応答値を比較して示す。ただし、免震層変位が解析モデルの適用範囲である $\gamma=270\%$ (545mm)を超えているケースについては本検討に用いない。三者の最大応答加速度の差はほとんどない。免震層変位については、簡易評価の方が繰返し依存性を時時刻々と評価した解析結果よりやや値が大きい傾向があるが、その差は 6%以下と小さい。図 1.3.2-4 に、繰返し依存性の評価手法の違いによる応答値を比較して示す。最大応答加速度は、評価手法による明確な差は見られない。免震層変位、累積変形量については、繰返し依存性を考慮した場合に増加する傾向であり、時時刻々と評価した応答値と簡易的に評価した応答値はほぼ同等の結果を示している。

図 1.3.2-5 に、各解析手法による三連動地震の 1.5 倍入力時のせん断応力度—ひずみ関係を、図 1.3.2-6 に四連動地震入力時のせん断応力度—ひずみ関係を示す。ただし、解析モデルの適用範囲を超えているケースは除く。三連動地震の AIC003 1.5 倍入力のケース、四連動地震の OSKH02、SZO024 入力のケースにおいて、繰返し依存性を簡易評価した解析結果は、繰返し依存性を時時刻々と評価した解析結果のループに近い形状を示し、繰返し依存性を考慮しない解析結果よりも最大変位が増大していることがわかる。吸収エネルギー量が小さい三連動の KGIN 1.5 倍入力、四連動の KGIN 入力のケースでは、三者はほぼ同様のループとなっている。

図 1.3.2-7~1.3.2-11 に、三連動地震の 1.5 倍入力、および OSKH02 四連動を入力したケースの免震層変位、免震層の累積変形量、高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性および等価減衰定数の低下率の時刻歴を示す。等価剛性の低下率 C_K 、および等価減衰定数の低下率 C_h は、繰返し依存性非考慮の場合は 1.0 のまま一定であり、繰返し依存性を時時刻々と考慮する場合は、累積吸収エネルギーが増加するに従って低下していく。繰返し依存性を簡易的に評価する場合は、依存性を時時刻々と評価する場合の解析における下限値で一定となる。ただし、KGIN 1.5 倍入力のケースでは、累積吸収エネルギーが $5N/mm^2$ より小さいため、簡易評価では繰返し依存性による低減を行わないので、等価剛性および等価減衰定数の低下率は 1.0 で一定である。免震層変位の時刻歴波形は、どのケースでも繰返し依存性の評価手法に関わらずほぼ同等の波形を示している。図 1.3.2-7 に示す、OSKH02 1.5 倍入力のケースでは繰返し依存性を簡易評価した解析結果の方が、免震層変位の最大値が繰返し依存性を考慮しない解析結果よりも 4mm 小さい。しかし、免震層変位の時刻歴波形では、繰返し依存性を簡易評価した解析結果の方が繰返し依存性を考慮しない解析結果よりも全体的に変位が増幅し、累積変形量が 1.15 倍となっている。よって、最大変位は繰返しを考慮しないケースよりも小さいが、免震層変位は時刻歴の全域にわたって増大していることから、他のケースと同様に繰返し依存性により免震層変位が増大していることが確認できる。

以上より、図 1.3.2-3 に示す手法により繰返し依存性を簡易的に評価した解析結果は、繰返し

依存性を考慮しない場合よりも免震層変位を増大させ、繰返し依存性を時時刻々と評価した解析結果と近い応答値を示すことを確認した。ただし、簡易評価は復元力特性値の低下率を、繰返し依存性を時時刻々と評価する解析の下限値で一定とするため、免震層の変位をやや大きく評価する傾向がある。

表 1.3.2-5 簡易評価による等価剛性、等価減衰定数の低下率

| 入力地震動 | 倍率 | E/V(N/mm ²) | C _K | C _h |
|-------------|------|-------------------------|----------------|----------------|
| OSKH02 | 1.00 | 9.57 | 0.930 | 0.963 |
| | 1.25 | 16.20 | 0.912 | 0.951 |
| | 1.50 | 24.61 | 0.890 | 0.938 |
| AIC003 | 1.00 | 6.87 | 0.950 | 0.973 |
| | 1.25 | 9.99 | 0.927 | 0.961 |
| | 1.50 | 13.99 | 0.917 | 0.955 |
| SZO024 | 1.00 | 9.43 | 0.931 | 0.963 |
| | 1.25 | 13.33 | 0.919 | 0.956 |
| | 1.50 | 17.47 | 0.908 | 0.949 |
| KGIN1F | 1.00 | 1.39 | 1.000 | 1.000 |
| | 1.25 | 2.48 | 1.000 | 1.000 |
| | 1.50 | 3.92 | 1.000 | 1.000 |
| OSKH02(四連動) | 1.00 | 18.60 | 0.906 | 0.947 |
| AIC003(四連動) | 1.00 | — | — | — |
| SZO024(四連動) | 1.00 | 10.83 | 0.925 | 0.960 |
| KGIN1F(四連動) | 1.00 | 3.63 | 1.000 | 1.000 |

(※繰返しを考慮しない解析で、解析モデルの適用範囲を超えているケースは除外)

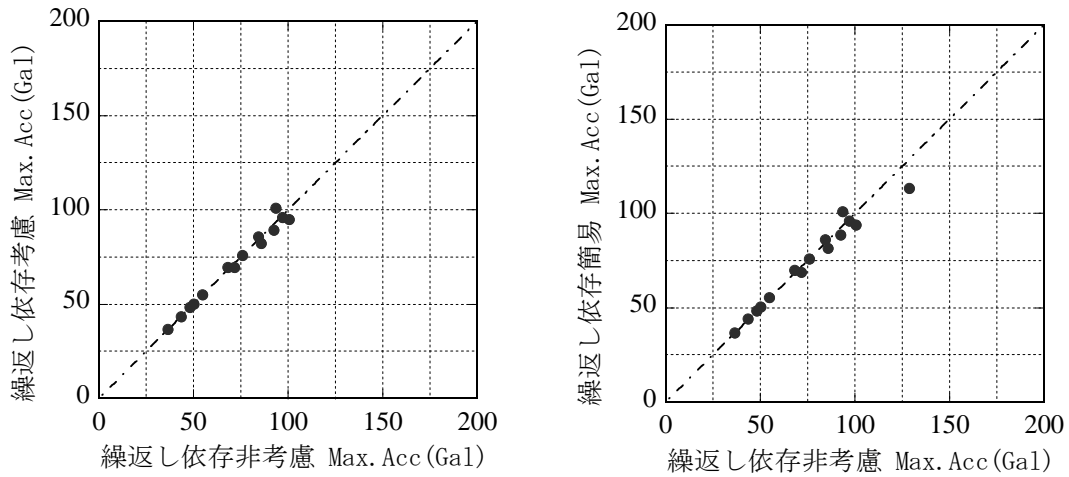
表 1.3.2-6 繰返し依存性の評価手法の違いによる最大応答値比較

| 地震波 | 入力 | | 応答 | | | | | |
|-----------------|------|--------------|------------|--------|------------------|-----------|--------|------------------|
| | 倍率 | 加速度 (Gal) | 質点加速度(Gal) | | | 免震層変位(mm) | | |
| | | | 非考慮 | 考慮 | 簡易 | 非考慮 | 考慮 | 簡易 |
| OSKH02 | 1.00 | 98.49 | 76.28 | 75.64 | 75.70 (1.00) | 304.64 | 315.95 | 334.84 (1.06) |
| | 1.25 | 123.11 | 97.30 | 95.92 | 95.81 (1.00) | 426.45 | 444.88 | 465.73 (1.05) |
| | 1.50 | 147.73 | 128.83 | — | 112.92 (—) | 540.36 | 545以上 | 536.06 (—) |
| AIC003 | 1.00 | 199.40 | 54.82 | 54.92 | 55.30 (1.01) | 153.34 | 171.43 | 180.09 (1.05) |
| | 1.25 | 249.25 | 68.43 | 69.34 | 69.74 (1.01) | 255.56 | 286.80 | 298.41 (1.04) |
| | 1.50 | 299.10 | 84.38 | 85.46 | 86.02 (1.01) | 352.24 | 397.01 | 406.91 (1.02) |
| SZO024 | 1.00 | 576.78 | 71.69 | 69.31 | 68.54 (0.99) | 276.65 | 285.07 | 288.55 (1.01) |
| | 1.25 | 720.98 | 85.96 | 82.10 | 81.38 (0.99) | 361.47 | 373.84 | 376.56 (1.01) |
| | 1.50 | 865.17 | 100.63 | 94.93 | 93.83 (0.99) | 444.24 | 455.96 | 457.66 (1.00) |
| KGIN1F | 1.00 | 42.11 | 36.49 | 36.52 | 36.49 (1.00) | 64.15 | 65.31 | 64.15 (0.98) |
| | 1.25 | 52.64 | 43.70 | 43.32 | 43.70 (1.01) | 88.87 | 90.27 | 88.86 (0.98) |
| | 1.50 | 63.17 | 50.34 | 50.01 | 50.34 (1.01) | 122.26 | 128.26 | 122.26 (0.95) |
| OSKH02 (四連動) | 1.00 | 133.00 | 93.81 | 100.68 | 100.90 (1.00) | 406.93 | 487.77 | 491.58 (1.01) |
| AIC003 (四連動) | 1.00 | 545.40 | — | — | — (—) | 545以上 | 545以上 | — (—) |
| SZO024 (四連動) | 1.00 | 640.30 | 92.59 | 89.26 | 88.51 (0.99) | 399.90 | 413.03 | 417.60 (1.01) |
| KGIN1F (四連動) | 1.00 | 55.51 | 48.15 | 48.13 | 48.15 (1.00) | 109.75 | 116.04 | 109.75 (0.95) |

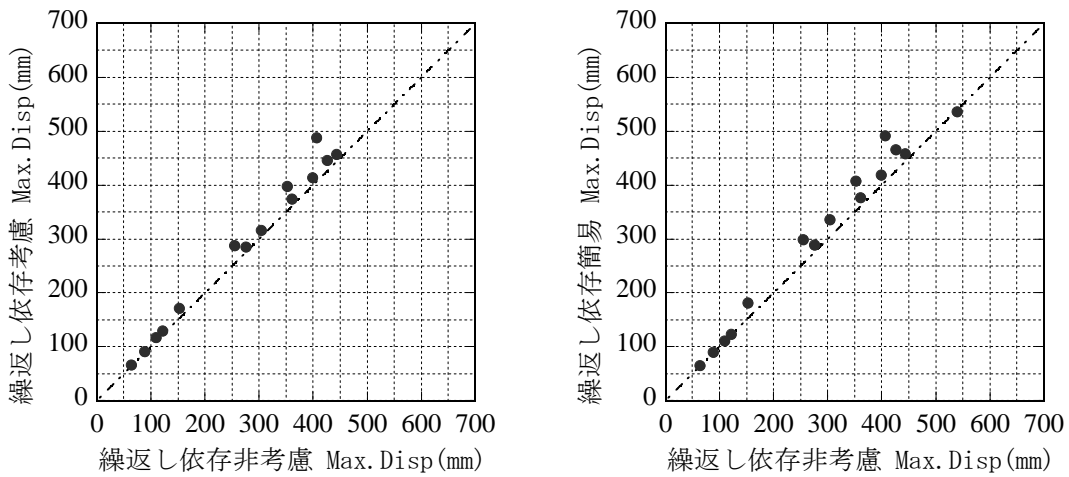
※()内は、(簡易/考慮)の値。

※解析モデルの適用範囲($\gamma=270\%$, $\delta=545\text{mm}$)を超える解析結果については、本検討に用いない。

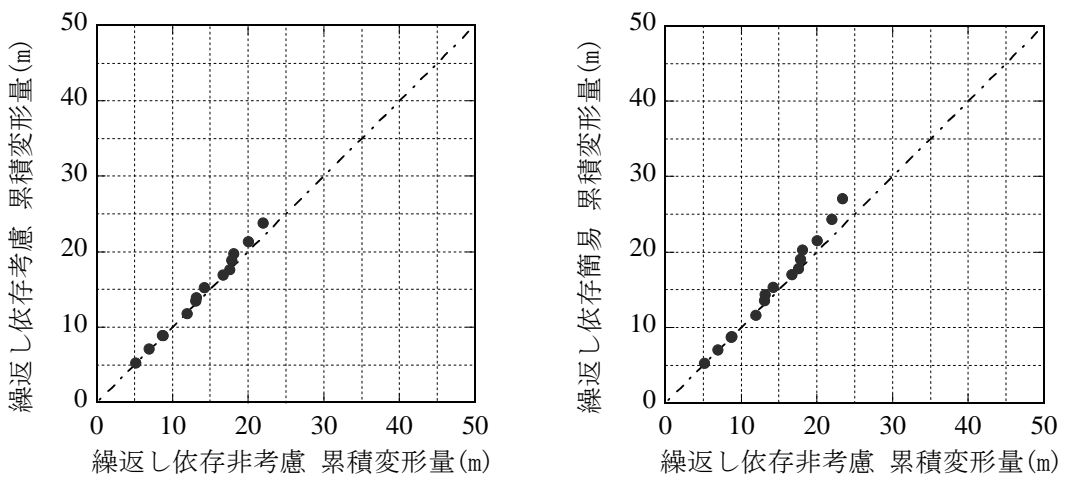
(適用範囲を超えるケース : OSKH02 1.5 倍(考慮)、AIC003 四連動(非考慮)、AIC003 四連動(考慮)、
AIC003 四連動(簡易))



(a) 最大応答加速度の比較

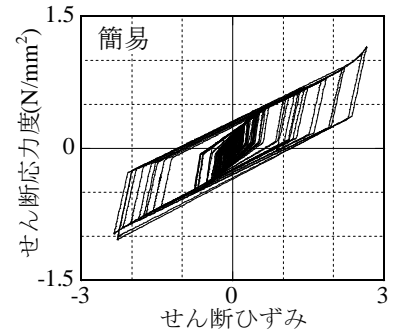
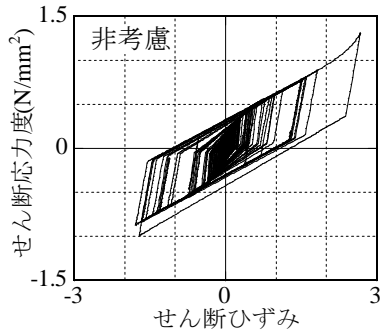


(b) 免震層最大変位の比較

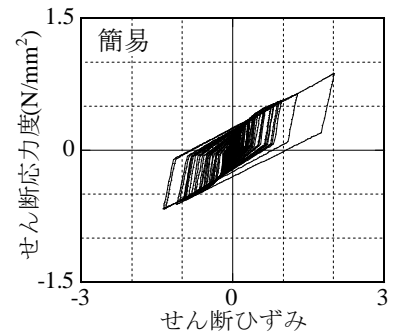
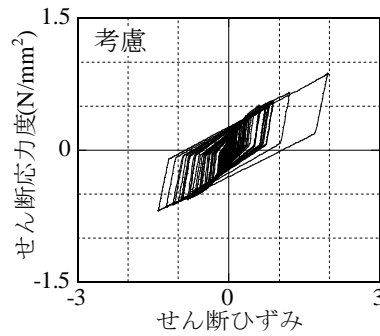
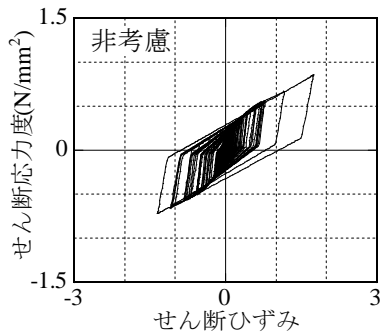


(c) 累積変形量の比較

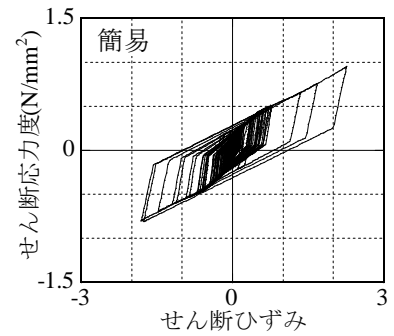
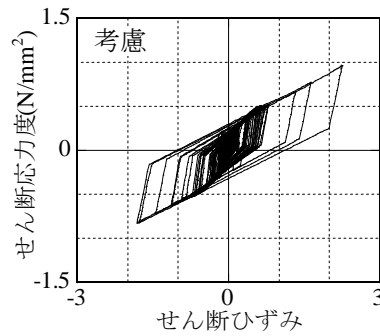
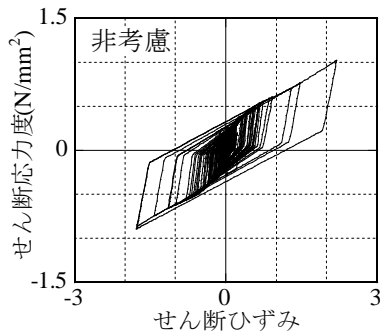
図 1.3.2-4 繰返し依存性の評価手法による応答値の違い



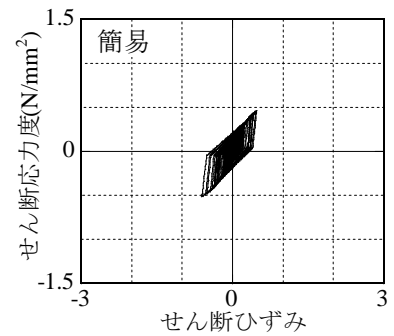
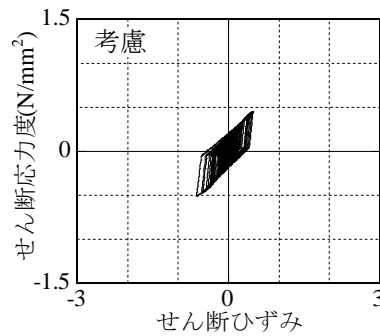
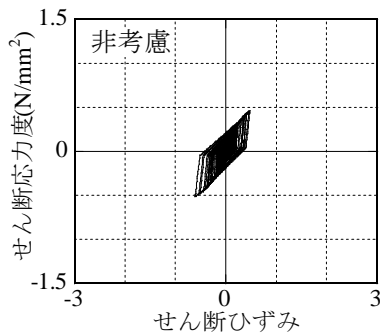
(a) OSKH02 1.5倍入力



(b) AIC003 1.5倍入力

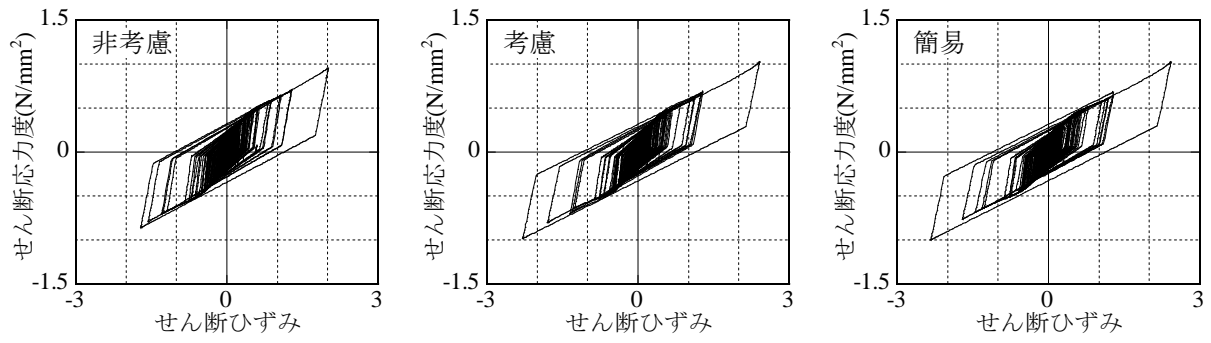


(c) SZO024 1.5倍入力

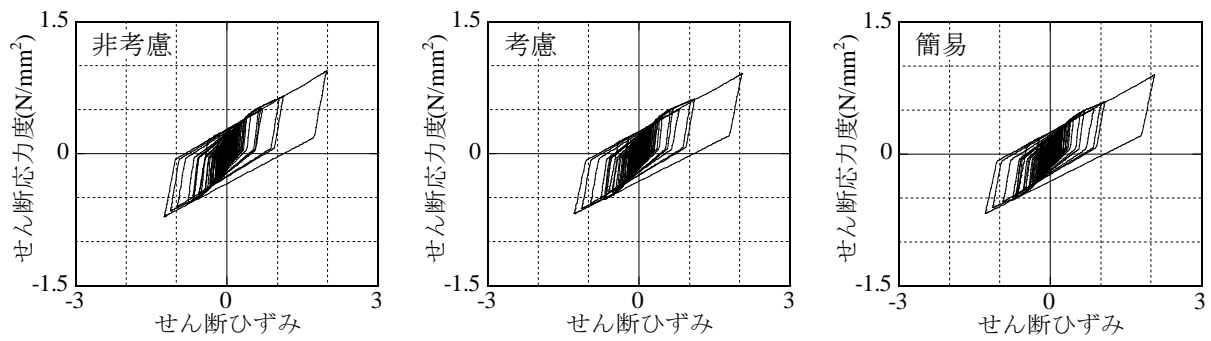


(d) KGIN1F 1.5倍入力

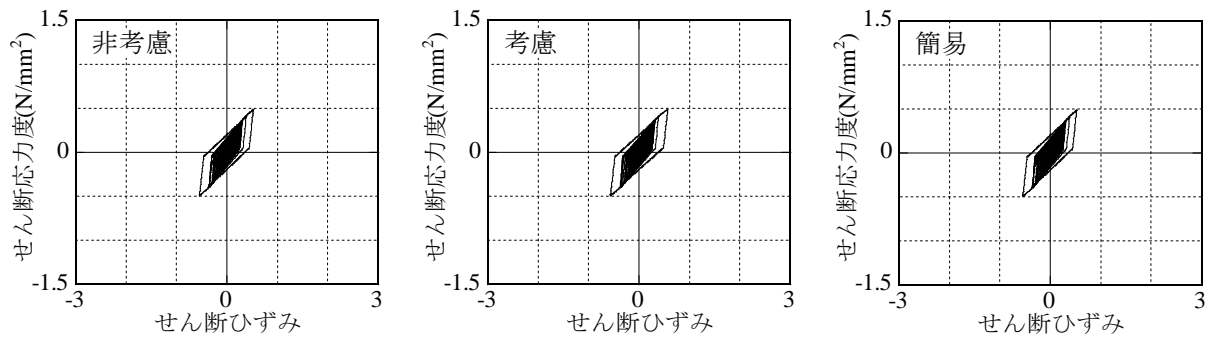
図 1.3.2-5 三連動地震 1.5倍入力時の解析結果のせん断応力度-ひずみ関係
(OSKH02 1.5倍入力の繰返し考慮のケースは解析モデル適用範囲外のため省略)



(a) OSKH02 四連動入力

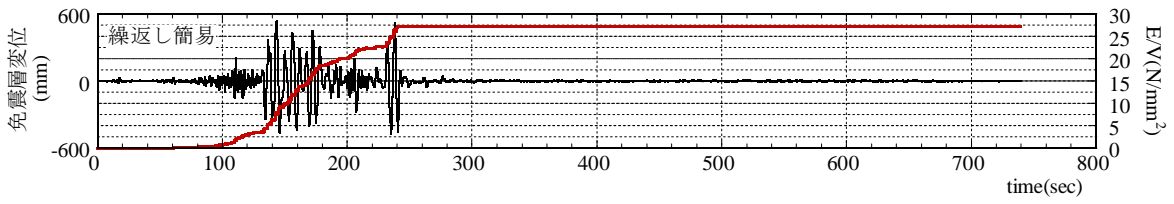
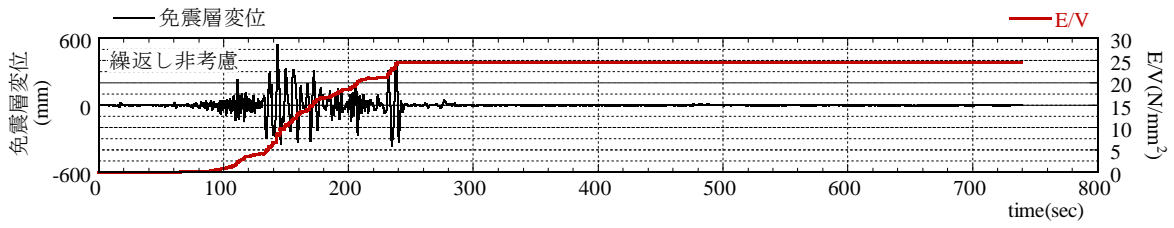


(b) SZO024 四連動入力

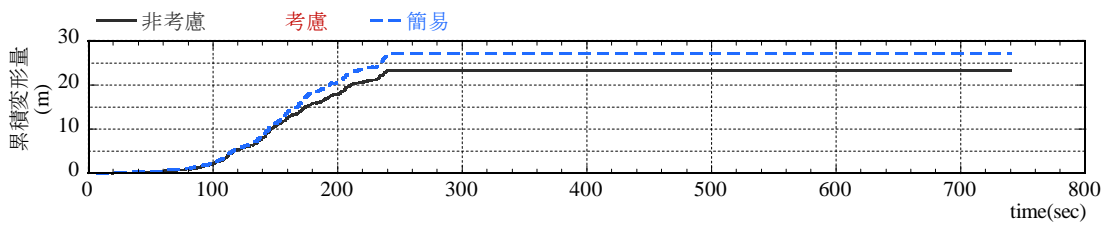


(c) KGIN 四連動入力

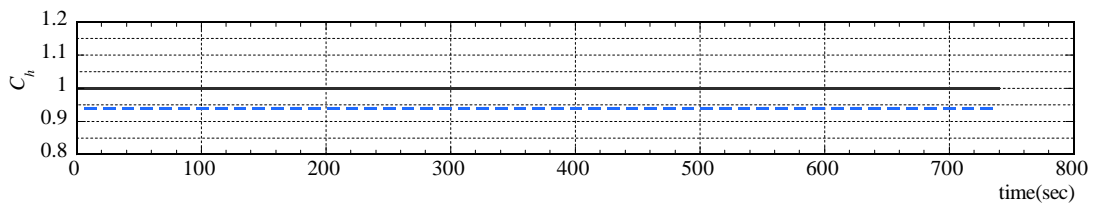
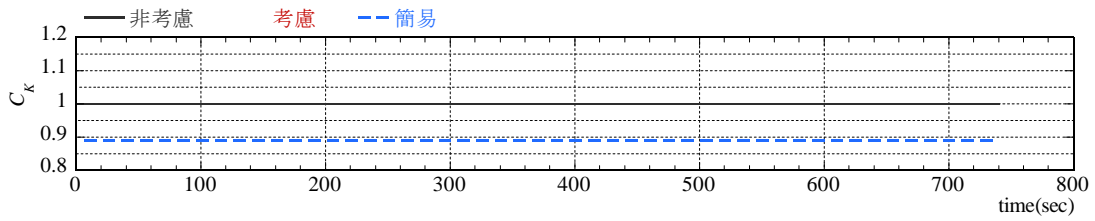
図 1.3.2-6 四連動地震入力時の解析結果のせん断応力度-ひずみ関係
(AIC003 四連動入力のケースは解析モデル適用範囲外のため省略)



(a) 免震層変位および E/V

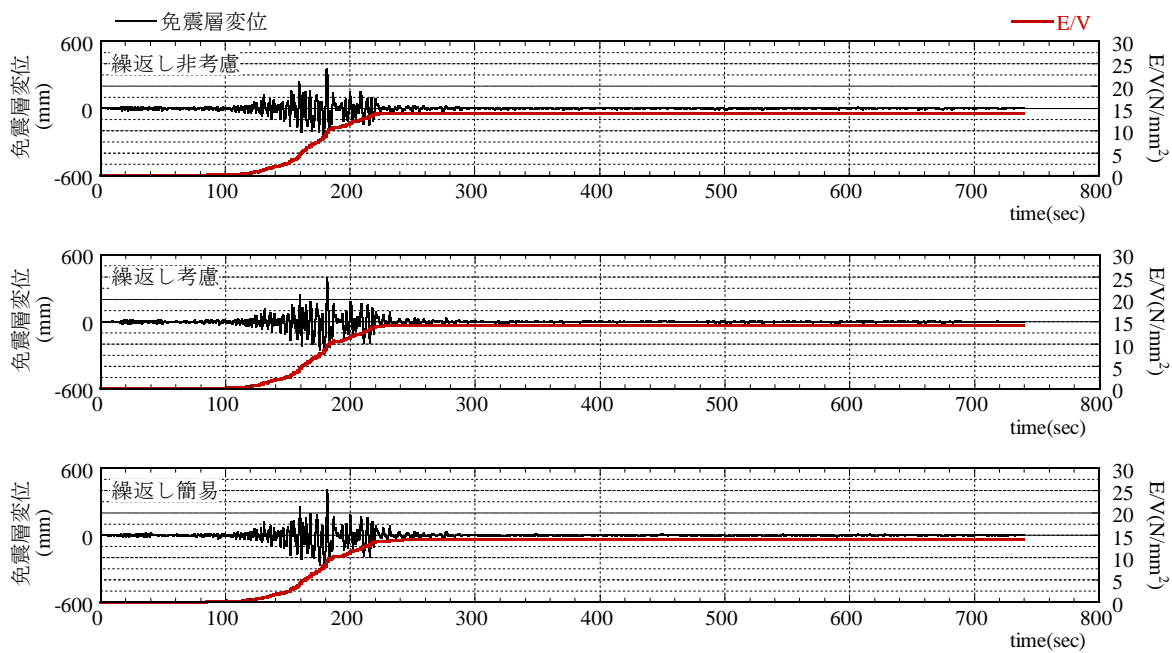


(b) 免震層累積変形量

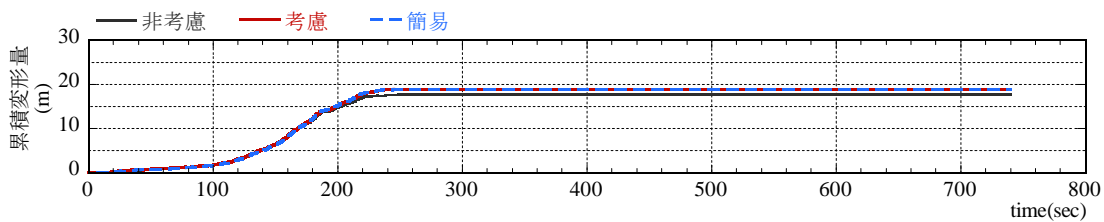


(c) 等価剛性低下率 C_k 、等価減衰定数低下率 C_h

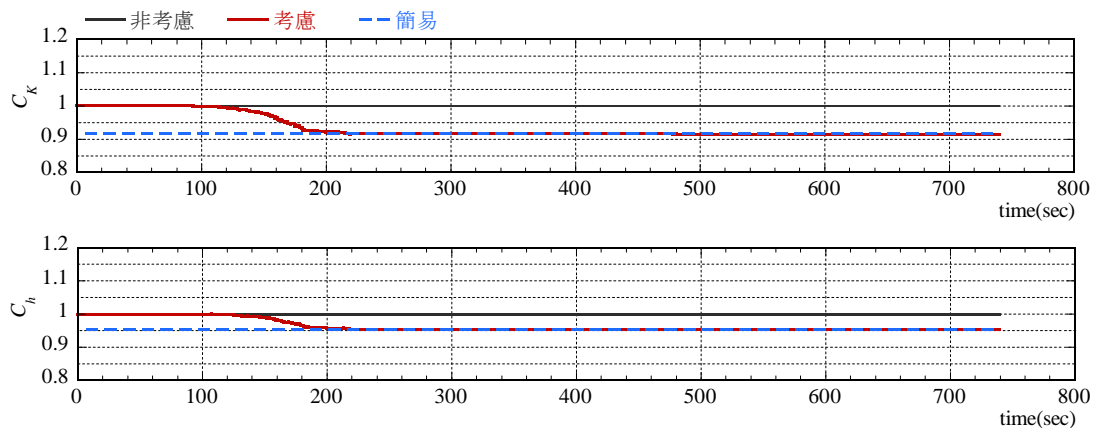
図 1.3.2-7 OSKH02 1.5 倍入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴



(a) 免震層変位および E/V

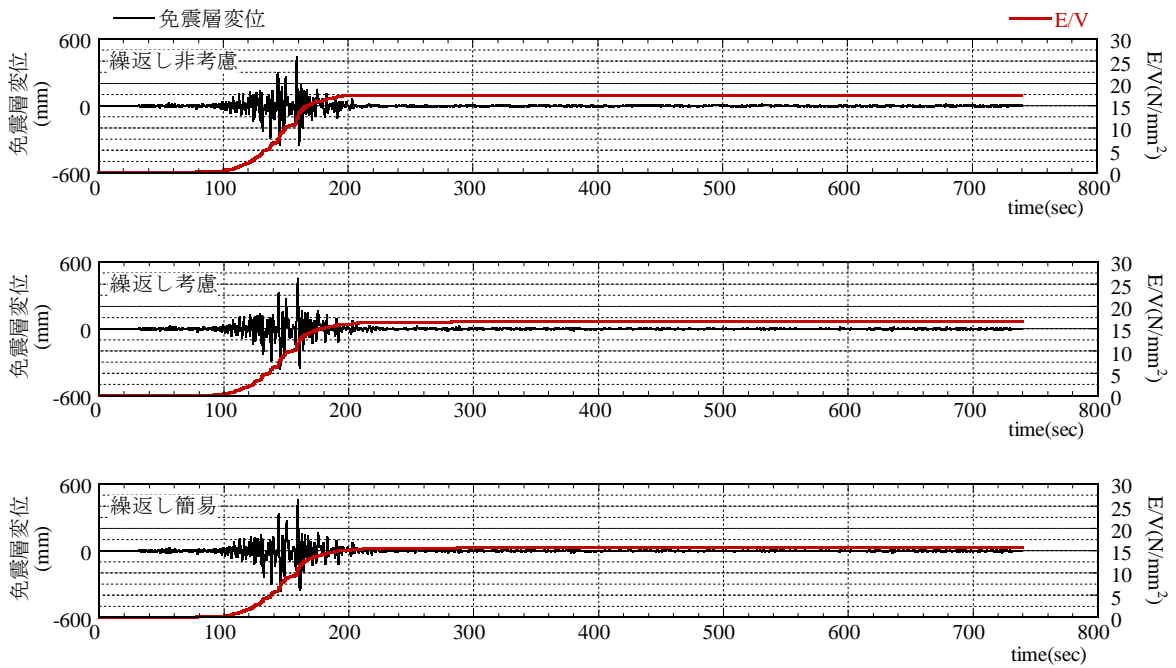


(b) 免震層累積変形量

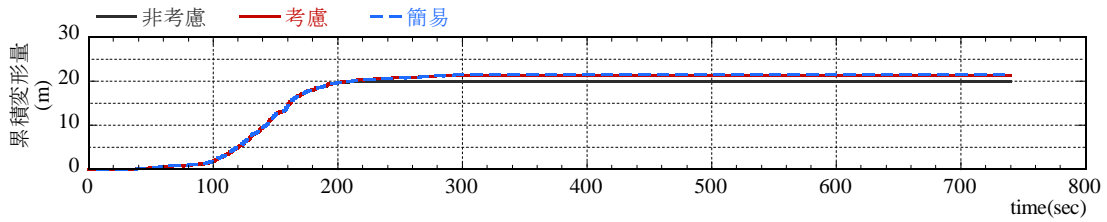


(c) 等価剛性低下率 C_k 、等価減衰定数低下率 C_h

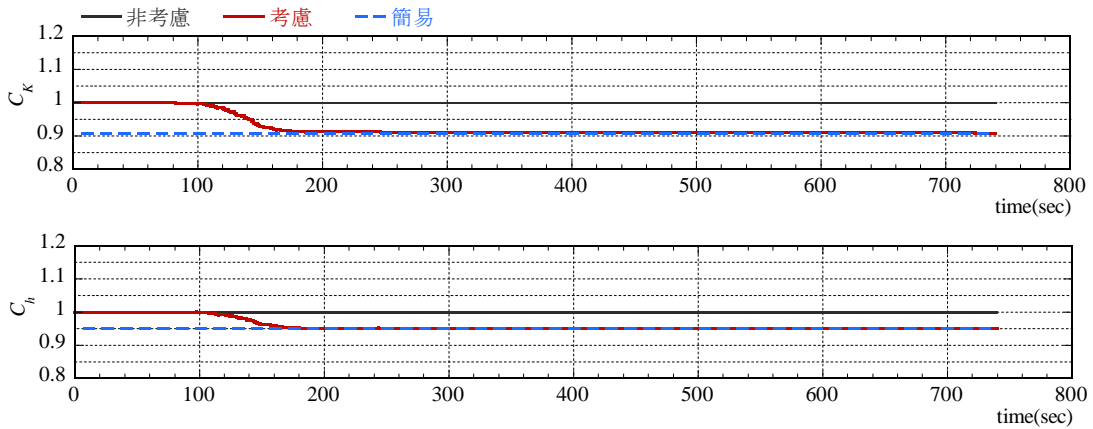
図 1.3.2-8 AIC003 1.5 倍入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴



(a) 免震層変位および E/V

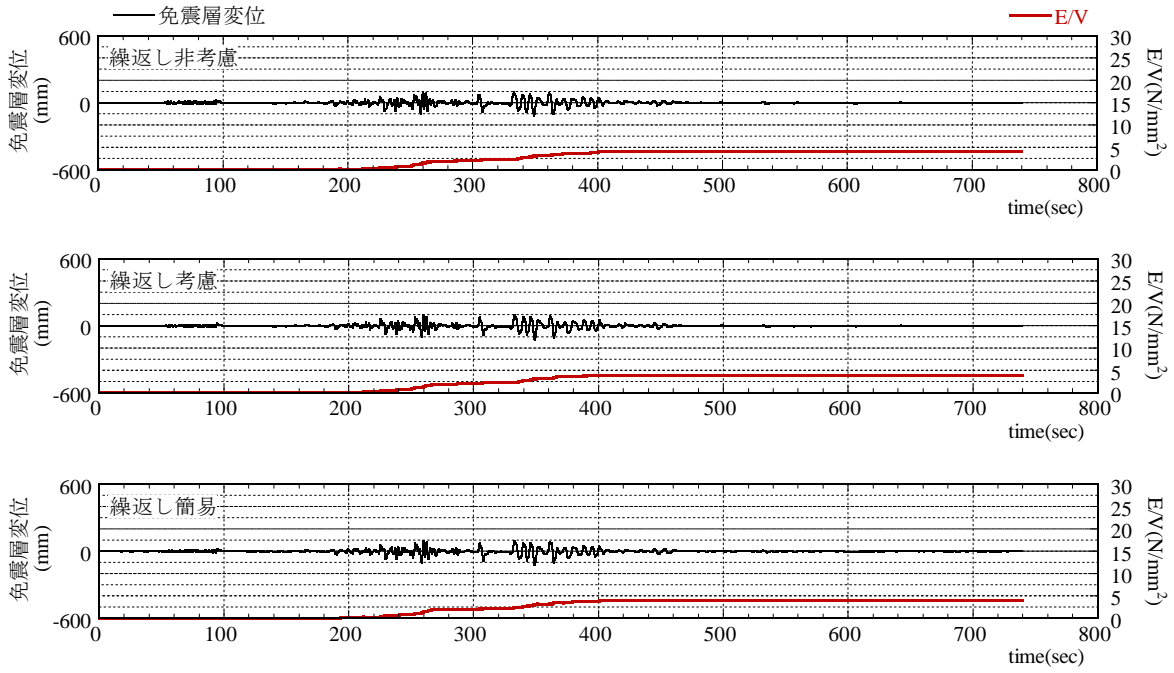


(b) 免震層累積変形量

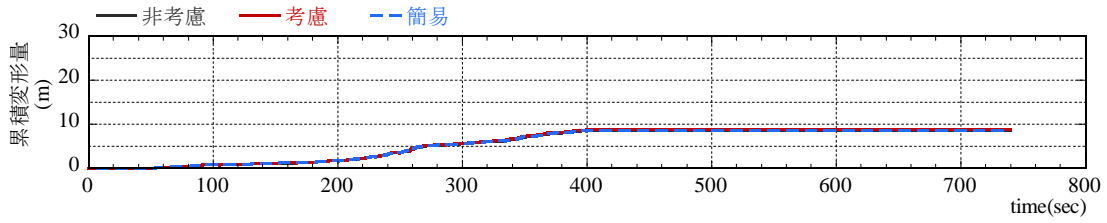


(c) 等価剛性低下率 C_k 、等価減衰定数低下率 C_h

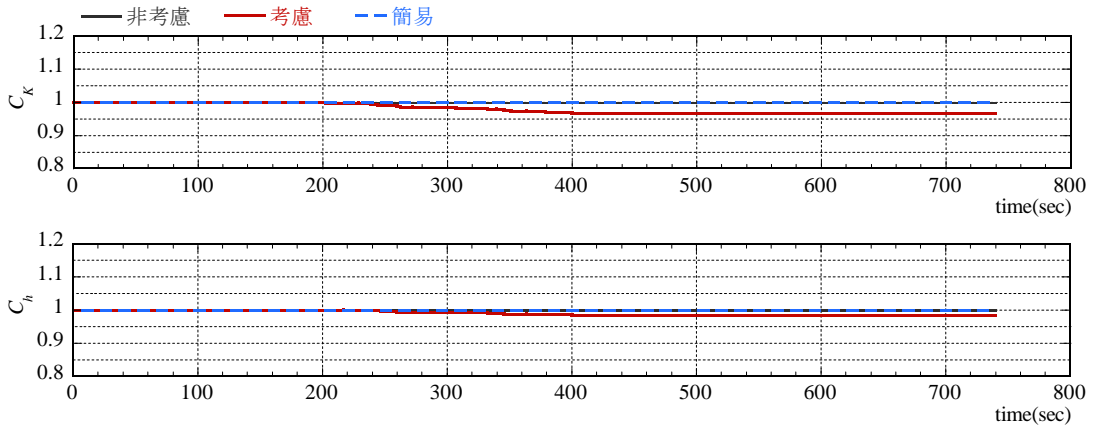
図 1.3.2-9 SZO024 1.5 倍入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴



(a) 免震層変位および E/V

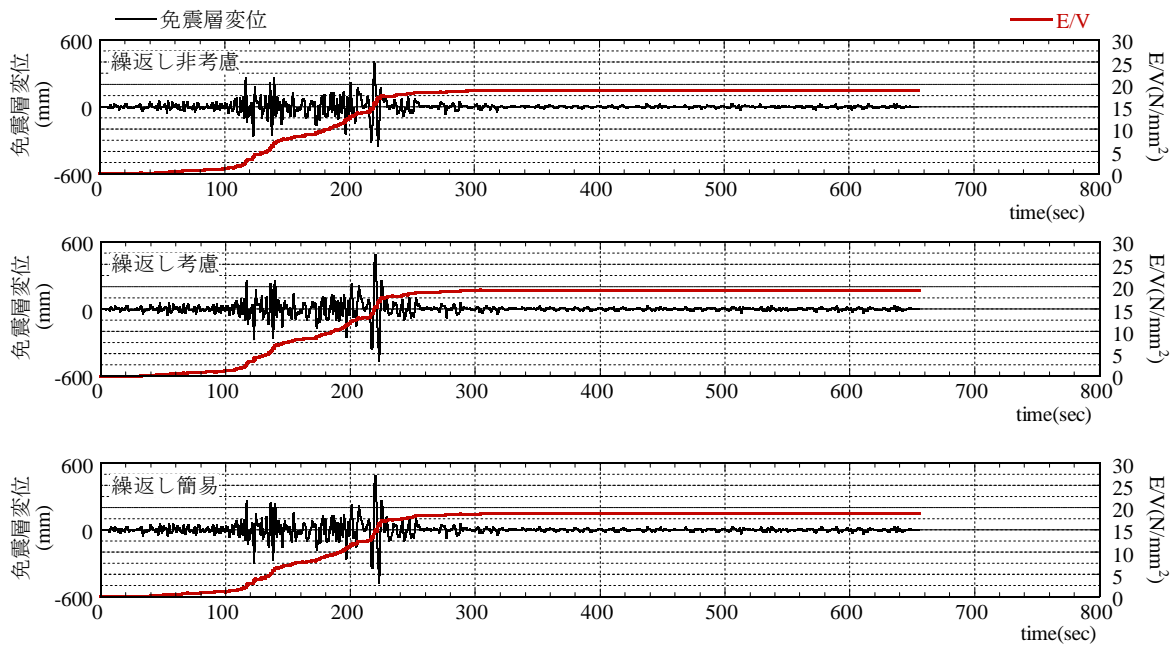


(b) 免震層累積変形量

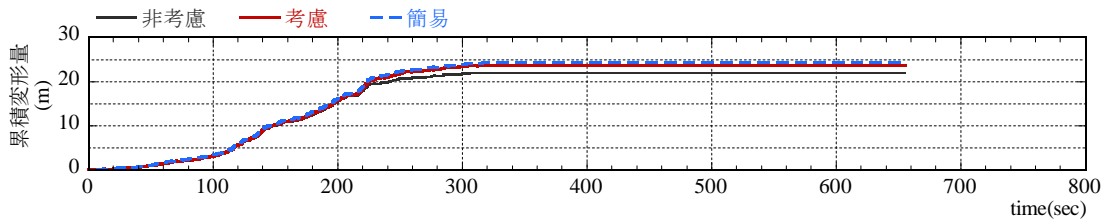


(c) 等価剛性低下率 C_k 、等価減衰定数低下率 C_h

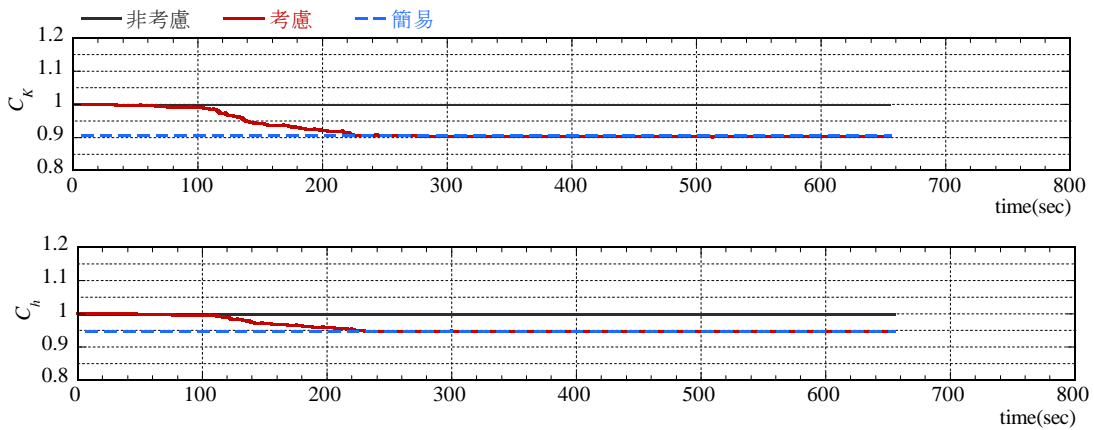
図 1.3.2-10 KGIN 1.5 倍入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴



(a) 免震層変位および E/V



(b) 免震層累積変形量



(c) 等価剛性低下率 C_k 、等価減衰定数低下率 C_h

図 1.3.2-11 OSKH02 四連動入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴

(4) まとめ

繰返し依存性による高減衰ゴム系積層ゴムの特性変動を簡易的に評価する手法として、累積吸収エネルギーの値(解析終了時の 95%値)を基に、高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性および等価減衰定数の低下率を設定し、地震応答解析時にソフトケースのばらつきのひとつとして考慮する手法を示した。

簡易評価による解析結果は、繰返し依存性を考慮しない解析結果よりも免震層最大変位と免震層の累積変形量を増大させ、繰返し依存性を時時刻々と考慮する解析結果に近い応答値を与えることを確認した。ただし、簡易評価は繰返し依存性を時時刻々と考慮する場合の等価剛性と等価減衰定数の低下率の下限値を、解析開始時から一定値として用いるため、免震層変位をやや大きめに評価する。

本検討で用いた長周期地震時に予想される高減衰ゴム系積層ゴムの繰返しによる特性変動は、等価剛性で-5%~-10%程度、等価減衰定数で-5%程度と比較的小さいことから、ソフトケースの検討において他のばらつき値(製品ばらつき、経年変化、環境温度)の方が建物応答に大きく影響する可能性が高い。今後は他のばらつき値を考慮したソフトケースにおける繰返し依存性の影響を確認する必要がある。また、今回の検討は1質点の剛体モデルにより実施したが、今後は多質点モデルによる検討を追加し、高層建物応答への影響についても確認する必要がある。

参考文献

1.3.2-1) 株式会社ブリヂストン：高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料

1.3.3 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー

(1) はじめに

第Ⅲ部第1章 1.3.7、第2章 2.3.4 および第3章 3.3.4 の検討では、

- 1) 実大鉛ダンパーの繰返し加振、地震応答変位加振
- 2) 実大鉛ダンパーの繰返し依存性評価モデルの構築
- 3) 繰返しによる特性変化を考慮した長周期地震動応答評価

を行った。

1)の実験より正弦波繰返し加振、地震応答変位加振において加振中の耐力低下が確認された。上記2)の評価モデルは、実大ダンパーの実験結果に基づき、時々刻々のダンパー累積吸収エネルギーに応じて復元力特性を変化させており、モデルが複雑なものとなっている。本検討では、繰返し依存性による鉛ダンパーの降伏耐力の変化を簡易的に取り込むための検討を行った。

(2) 提案した繰返しによる鉛ダンパーの耐力劣化評価

評価モデルにおける繰返しによる耐力低下は、速度反転時の変形およびダンパーの吸収エネルギー量から、以下のように降伏荷重の変化率 r_{Q_d} を算出しており、実大鉛ダンパーの正弦波繰返し加振、ならびに地震応答変位加振との整合性を確認している。降伏荷重の変化率の求め方を以下に示す。

降伏荷重の変化率 r_{Q_d} と吸収エネルギー E の関係を図 1.3.3-1 に示す折れ線にて表現する。折れ点の位置は図中の①～④の位置で水平変形により変化する。折れ線の座標 (E, r_{Q_d}) は式(1.3.3-1)～式(1.3.3-4)にて表現され、水平変形 $d(m)$ をパラメータとして、漸増連続正弦波加振結果に整合するように定めた。

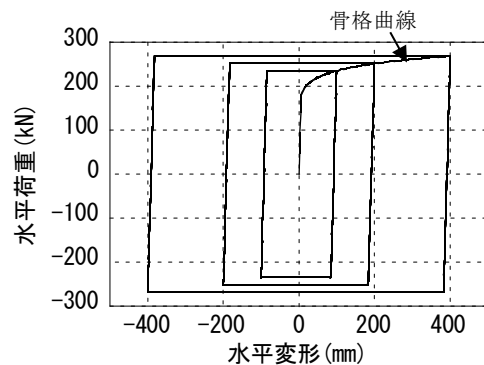
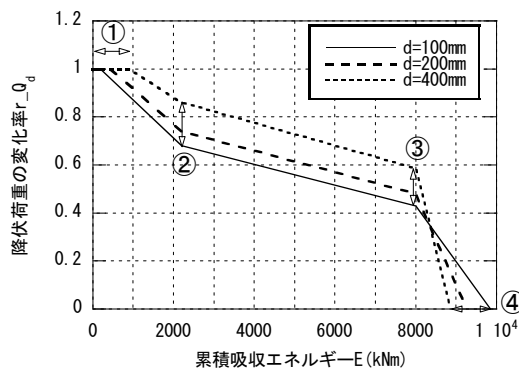


図 1.3.3-1 累積吸収エネルギーと降伏荷重の変化率

図 1.3.3-2 骨格曲線と履歴形状

①：耐力劣化開始点($E1, r_{Q_d1}=1.0$)

$$E1 = -37 + 2322|d| \quad (0.1 \leq |d| \leq 0.4)$$

$$195 \quad (|d| < 0.1), \quad 892 \quad (|d| > 0.4) \quad (\text{単位:kNm}) \quad (1.3.3-1)$$

②：第2折れ点($E2=2205(kNm), r_{Q_d2}$)

$$r_{Q_d2} = 0.62 + 0.60|d| \quad (0.1 \leq |d| \leq 0.4)$$

$$0.680 \quad (|d| < 0.1), \quad 0.860 \quad (|d| > 0.4) \quad (1.3.3-2)$$

③：第3折れ点($E3=8000(kNm), r_{Q_d3}$)

$$r_{Q_d3} = 0.375 + 0.525|d| \quad (0.1 \leq |d| \leq 0.4)$$

$$0.428 (|d| < 0.1), 0.585 (|d| > 0.4) \quad (1.3.3-3)$$

④：耐力喪失点($E4, r_{Qd}=0$)

$$E4 = 9683 - 2060|d| \quad (0.15 \leq |d| \leq 0.4)$$

$$9,854 (|d| < 0.15), 8,859 (|d| > 0.4) \quad (\text{単位:kNm}) \quad (1.3.3-4)$$

耐力劣化は変形が反転する際に生じ、その時点の水平変形 d および累積吸収エネルギー E により降伏荷重の変化率 r_{Qd} を求める。変形反転後の降伏耐力 Q_d' は以下の式(1.3.3-5)とする。

$$Q_d' = Q_d \cdot r_{Qd} \quad (1.3.3-5)$$

また、鉛ダンパーの降伏荷重は、振幅依存性がある^{1.3.3-1, 1.3.3-2}。これより、バイリニアモデルの骨格曲線を以下のように与える。

1) 初期は線形とし、剛性は U2426 ダンパーの初期剛性規格値 $K_1 (=30,000\text{kN/m})$ とする。

2) 降伏変形 (d_y) を超えると、水平変形 d の n 乗として規定される。

骨格曲線 Q_d は以下の式(1.3.3-6)および式(1.3.3-7)となる。

$$d < d_y (\text{m}) \quad Q_d = K_1 \cdot d \quad (\text{kN}) \quad (1.3.3-6)$$

$$d \geq d_y (\text{m}) \quad Q_d = Q_0 \cdot d^n \quad (\text{kN}) \quad (1.3.3-7)$$

ただし、U2426 鉛ダンパーに対して、パラメータを以下のように設定する。

K_1 : 初期剛性 30,000 (kN/m)

d_y : 降伏変位 5.88×10^{-3} (m)

d : 水平変形(m)

Q_0 : 293.1

n : 0.0958

式(1.3.3-7) 中の Q_0, n の算出にあたっては、実大鉛ダンパーの漸増正弦波加振試験結果と整合するように算出した。履歴曲線はバイリニアモデルとし、除荷剛性は常に初期剛性 K_1 、二次剛性は 0 とする。骨格曲線と履歴形状を図 1.3.3-2 に示す。

漸増連続加振における解析モデルと実験結果との比較を図 1.3.3-3 に示す。解析モデルによる降伏荷重 Q_d は実験結果とよく整合している。図 1.3.3-4 より振幅 $\pm 100\text{mm}$ 、 $\pm 200\text{mm}$ の解析モデル荷重変形関係は実験結果とよく整合している。 $\pm 400\text{mm}$ 時の履歴形状は試験結果のループが変形に対して非対称となっているため、本解析モデルによる表現が難しい。しかし、ループ全体の大きさとしては、図 1.3.3-3 の結果と考え併せて妥当なものと考えられる。地震応答波加振において、実験結果と解析モデルによる荷重値との比較を図 1.3.3-5 に示す。繰返しによる耐力低下を考慮した解析モデル

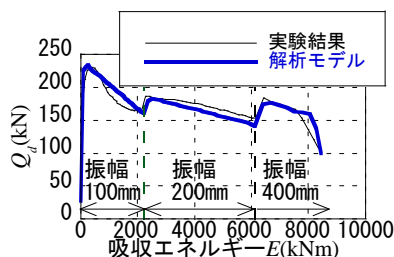


図 1.3.3-3 漸増正弦波加振
解析モデルと実験結果の比較

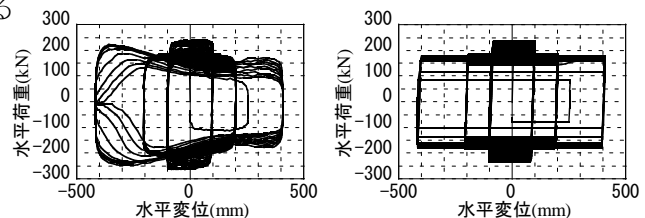


図 1.3.3-4 漸増正弦波加振 荷重変形関係

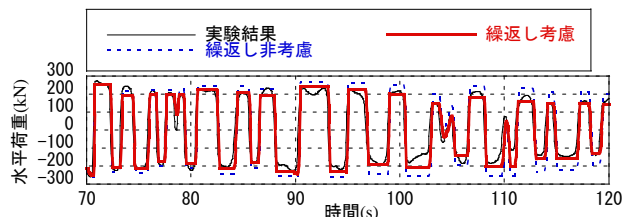


図 1.3.3-5 地震応答波加振 荷重時刻歴(地震波 1 回目)

は実験結果をよく表現できていることがわかる。

次に、天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーからなる免震層を有する1質点系の長周期地震動による応答解析を実施した。天然ゴム系積層ゴムの復元力特性は線形弾性とし、積層ゴムによる免震周期は4.0秒とした。鉛ダンパーの負担せん断力係数は0.033である。繰返しによる降伏荷重の変化を考慮するモデルを用いた場合と非考慮の場合で応答解析結果を比較した。なお、両モデルとも降伏荷重の振幅依存性は考慮している。入力地震波は4波（OSKH02_AV、AIC003_AV、SZO024_AV、KGIN_AV）、入力倍率は1.0、1.25、1.5倍とした。

繰返し非考慮および考慮時の免震層最大水平変位および質点の最大加速度を表1.3.3-1に示す。繰返しによる降伏荷重の変化を考慮すると、免震層最大変位は非考慮時に対して0.97~1.21倍となったSZO024_AVの入力倍率1.5で最も大きな変形となり、繰返し考慮時に最大変形が40.9cm、累積変形量は19.4mであった。

応答最大加速度は38~135cm/s²であった。繰返し特性考慮時のこれらの値は非考慮時に対して0.95~1.05倍であり、最大変位に比べてその変化は小さい。

複数の入力地震動のうち最大変形が最も大きいSZO024_AV入力倍率1.5時の免震層せん断力係数-変形関係を図1.3.3-6に、免震層変位および鉛ダンパー1台あたりの累積吸収エネルギー時刻歴を図1.3.3-7に示す。累積吸収エネルギーは、繰返し考慮により非考慮時と比べ0.95~1.12倍になった。検討ケースのうち最大は約3,500kNmであった。正弦波±400mm時加振時の最終エネルギー吸収量は8,850kNmであり、いずれの解析ケースもこの値を下回った。

表 1.3.3-1 繰返し考慮および非考慮時の最大応答値

| 入力地震動 | 入力倍率 | 免震層最大水平変位 (cm) | | | 応答最大加速度 (cm/s ²) | | |
|-----------|------|----------------|-----------|------------|------------------------------|-----------|------------|
| | | 繰返し 非考慮 | 繰返し 考慮 | 考慮/ 非考慮 | 繰返し 非考慮 | 繰返し 考慮 | 考慮/ 非考慮 |
| OSKH02_AV | 1.00 | 13.61 | 14.75 | 1.084 | 69.7 | 71.0 | 1.018 |
| | 1.25 | 22.43 | 24.93 | 1.111 | 93.3 | 97.9 | 1.049 |
| | 1.50 | 32.58 | 35.76 | 1.098 | 119.7 | 125.9 | 1.052 |
| AIC003_AV | 1.00 | 13.18 | 13.47 | 1.022 | 68.5 | 67.6 | 0.987 |
| | 1.25 | 17.39 | 16.93 | 0.973 | 79.9 | 76.3 | 0.955 |
| | 1.50 | 19.90 | 24.17 | 1.215 | 86.6 | 91.2 | 1.054 |
| SZO024_AV | 1.00 | 20.26 | 21.42 | 1.057 | 87.5 | 87.6 | 1.001 |
| | 1.25 | 27.95 | 29.92 | 1.070 | 107.7 | 107.9 | 1.002 |
| | 1.50 | 35.73 | 40.89 | 1.145 | 127.8 | 134.7 | 1.054 |
| KGIN_AV | 1.00 | 2.86 | 2.86 | 1.000 | 38.2 | 38.2 | 1.000 |
| | 1.25 | 3.29 | 3.29 | 1.000 | 39.7 | 39.7 | 1.000 |
| | 1.50 | 3.69 | 3.69 | 1.000 | 41.0 | 41.0 | 1.000 |

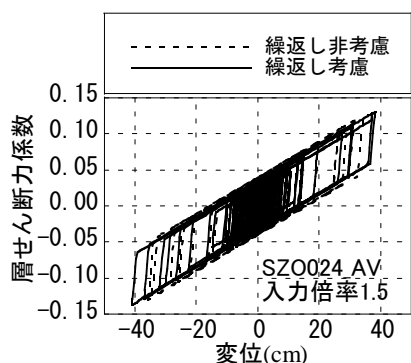


図 5.5.3-6 免震層せん断力係数-変位関係

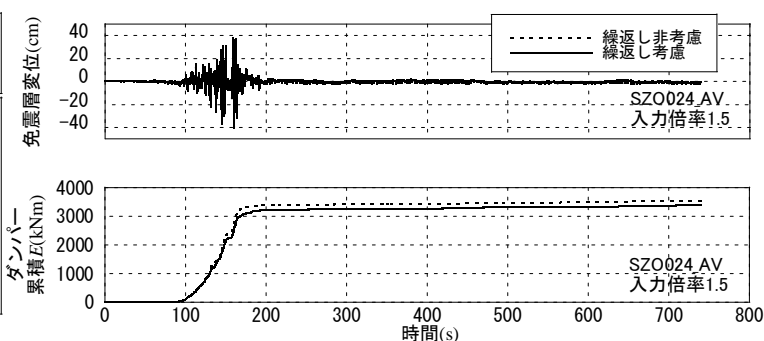


図 5.5.3-7 免震層変位およびダンパー1台の累積吸収エネルギー

(3) 繰返し依存性を簡易的に取り込む手法

前節で示した繰返しによる耐力劣化を評価するモデルを用いた時刻歴応答解析では、免震層変形が反転する際の変形または累積吸収エネルギーからダンパーの降伏耐力を変化させることが必要となり、解析コードがやや複雑となる。本節では、一般的なダンパーのモデル化方法を考慮し、繰返し依存性を簡易的に取り込む手法の提案を行う。提案する解析手法の手順を以下に示す。

＝鉛ダンパーの繰返し依存性を簡易的に取り込む解析手法＝

ステップ①：繰返しを考慮しないモデルにより時刻歴応答解析を実施する。

ステップ②：①の解析結果より式 (1) ～(4)を用い、降伏耐力の変化率 r_{Qd} を求める。 r_{Qd} 算出におけるダンパーの変形量 d と累積吸収エネルギー E は以下の 2 ケースが考えられる。

1) 手法 A：ダンパーの変形量 d は最大変形 d_{\max} 、ダンパーの累積吸収エネルギー E は最大変形発生時刻におけるダンパーの累積吸収エネルギー $E_{d\max}$ とする。

2) 手法 B：ダンパーの変形量 d は最大変形 d_{\max} 、ダンパーの累積吸収エネルギー E は解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギー E_{total} とする。

ステップ③：②で求めた r_{Qd} 分を初期状態から低減した降伏荷重により時刻歴応答解析を実施する。

ステップ④：③の解析結果が繰返し依存性を簡易的に取り込んだ応答とする。

繰返し依存性の簡易評価法のフローを図 1.3.3-8 に示す。

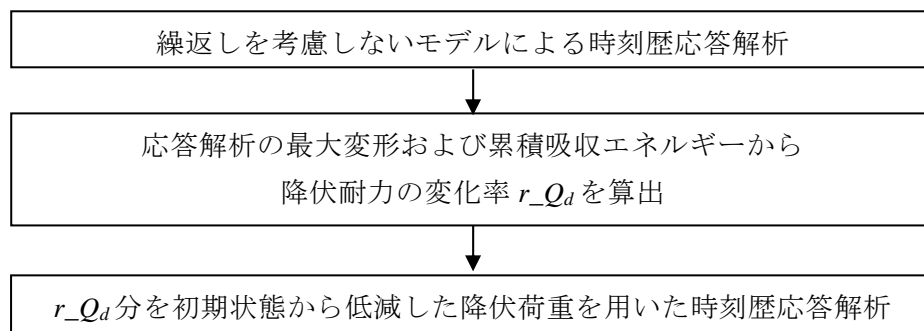


図 1.3.3-8 繰返し依存性の簡易評価法のフロー

(4) 簡易的手法による検討

上記の簡易的な評価手法による応答値を算出し、時々刻々のダンパーの復元力特性変化を表現しうるモデルを用いた場合と比較し、簡易手法の妥当性を検討する。

解析モデルは、1質点系モデル（図 1.3.3-9）とし、諸元を表 1.3.3-2 に示す。入力地震動は、三連動地震の4波（OSKH02_AV、AIC003_AV、SZO024_AV、KGIN_AV）とし、入力倍率は1.0倍、1.25倍、1.5倍に加えて、四連動地震における4波（OSKH02、AIC003、SZO024、KGIN）の検討も実施した。四連動地震の入力倍率は1.0とした。

表 1.3.3-2 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー解析モデル

| | |
|-------------------|------------------------|
| 想定建物 | RC造、10階建て基礎免震 |
| 上部構造重量 | 46,000kN |
| 鉛ダンパー台数 | 7台 |
| 積層ゴム台数 | 10台 |
| 積層ゴム直径(内径) | 750mm(15mm) |
| 積層ゴム面圧 | 10.1 N/mm ² |
| ゴムによる周期 | 4.0秒 |
| 鉛ダンパー負担 せん断力係数 | 0.033 |

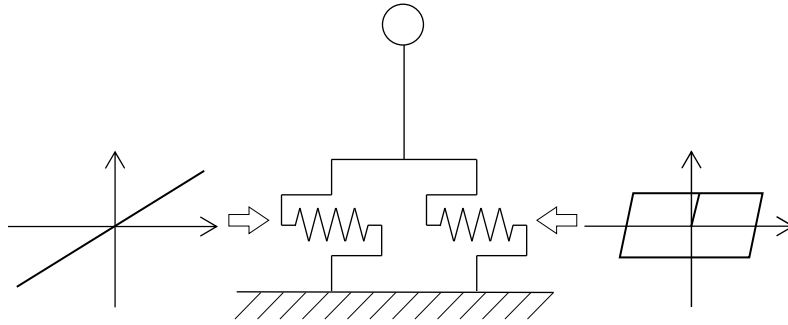


図 1.3.3-9 解析モデル模式図

表 1.3.3-3 簡易的手法のステップ①（繰返し非考慮モデル応答解析結果）とステップ②（降伏耐力の変化率 r_{Qd} ）による計算結果

| 入力地震動 | 入力倍率 | 繰返し非考慮モデルによる解析結果（ステップ①） | | | | r_{Qd} （ステップ②） | | |
|--------|------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------------|-------|
| | | 最大変形 d_{max} (cm) | 最大変形時のダンパー吸収エネルギー E_{dmax} (kNm) | 解析終了時のダンパー吸収エネルギー E_{total} (kNm) | E_{total}/E_{dmax} | 手法A d_{max}, E_{dmax} より算出 | 手法B d_{max}, E_{total} より算出 | |
| OSKH02 | 三連動 | 1.00 | 13.6 | 634 | 1087 | 1.71 | 0.945 | 0.875 |
| | | 1.25 | 22.4 | 920 | 1843 | 2.00 | 0.938 | 0.806 |
| | | 1.50 | 32.6 | 1222 | 2793 | 2.29 | 0.938 | 0.788 |
| | 四連動 | 1.00 | 23.5 | 475 | 2148 | 4.52 | 1.000 | 0.769 |
| AIC003 | 三連動 | 1.00 | 13.2 | 585 | 1153 | 1.97 | 0.951 | 0.863 |
| | | 1.25 | 17.4 | 794 | 1690 | 2.13 | 0.936 | 0.802 |
| | | 1.50 | 19.9 | 1267 | 2313 | 1.83 | 0.877 | 0.735 |
| | 四連動 | 1.00 | 54.7 | 5030 | 7105 | 1.41 | 0.726 | 0.627 |
| SZO024 | 三連動 | 1.00 | 20.3 | 1030 | 1699 | 1.65 | 0.913 | 0.815 |
| | | 1.25 | 28.0 | 1435 | 2616 | 1.82 | 0.890 | 0.769 |
| | | 1.50 | 35.7 | 1837 | 3524 | 1.92 | 0.878 | 0.772 |
| | 四連動 | 1.00 | 27.7 | 1654 | 2270 | 1.37 | 0.860 | 0.783 |
| KGIN | 三連動 | 1.00 | 2.9 | 30 | 54 | 1.79 | 1.000 | 1.000 |
| | | 1.25 | 3.3 | 48 | 90 | 1.87 | 1.000 | 1.000 |
| | | 1.50 | 3.7 | 88 | 153 | 1.74 | 1.000 | 1.000 |
| | 四連動 | 1.00 | 4.5 | 35 | 145 | 4.17 | 1.000 | 1.000 |

前節で示した簡易的手法のステップ①（繰返し非考慮モデル）における応答解析結果、およびステップ②の2つの手法（A,B）で算出した降伏耐力の変化率 r_{Qd} を表 1.3.3-3 に示す。

表 1.3.3-3 より、ステップ①における最大変形発生時刻におけるダンパーの累積吸収エネルギー E_{dmax} は 30~5,030 (kNm) であり、四連動地震の AIC003 が最大となった。また三連動では SZO024 の 1.5 倍入力時が最大であり、1,837kNm であった。解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギー E_{total} は、54~7,105 (kNm) であり、これも四連動地震の AIC003 が最大となった。また三連動では SZO024 の 1.5 倍入力時が最大であり、3,524kNm であった。KGIN の累積吸収エネルギーは他の3種類の波形よりも E_{dmax} および E_{total} ともにその値は小さな値となった。三連動地震時において解析終了時の累積吸収エネルギーと最大変形発生時刻の累積吸収エネルギーの比 E_{total}/E_{dmax} は、1.7~2.3 であった。四連動地震において AIC003 と SZO024 とでそれぞれ 1.41、1.37 であり、OSKH02 と KGIN ではそれぞれ 4.52、4.17 となり、解析終了時の累積吸収エネルギーと最大変形発生時刻の累積吸収エネルギーの比は四連動地震において入力波

の種類により異なった値となった。

ステップ①における免震層の最大変形は、四連動地震の AIC003 においては 54.7cm となったが、他のケースでは 36cm 以下の値であった。KGIN を入力とした場合では、三連動地震、四連動地震ともに 3~5cm となっており、累積吸収エネルギーと同様に、他の 3 種類の地震波に対して小さな値であった。

E_{dmax} より算出する手法 A で求めた降伏耐力の変化率 r_{Qd} は 0.73~1.0 の値であった。一方、 E_{total} より算出する手法 B では 0.63~1.0 となっている。手法 B による r_{Qd} は、すべての入力時において手法 A の算出値よりも同等かもしくは小さな値となり、ステップ③における時刻歴応答解析のダンパー降伏耐力は小さく評価されることとなった。KGIN 波では 3 連動、4 連動ともに最大変位が小さくダンパーの累積吸収エネルギーが小さいために、 r_{Qd} は 1.0 と評価された。

続いて表 1.3.3-3 に示す r_{Qd} により、ダンパーの耐力を初期から低減したモデルを用いて時刻歴応答解析を実施した (ステップ③)。結果を表 1.3.3-4~7 に示す。表中には、繰返しの影響を時々刻々考慮するモデル (表中「繰返し考慮」と示す。) を用いた解析結果も併せて示す。表 1.3.3-4 に免震層の最大変形を示す。AIC003 の 4 連動地震動では 70~80cm 程度の大きな最大変形となった。これ以外の入力時では、43cm 以下の最大変形であった。なお、積層ゴムの復元力特性はせん断ひずみが 250%を超えるとハードニング挙動を示し、非線形となる^{1.3.3-3)-1.3.3-5)}が、本検討では弾性挙動をするものとして評価した結果である。ゴム厚さ 160mm とした場合、43cm の最大変形はせん断ひずみで 270%程度であり、AIC003 の 4 連動地震動以外の入力における積層ゴムの復元力特性は、弾性挙動から大きく逸脱したものではないと考えられる。繰返し考慮モデルに対して簡略的手法の免震層最大変形は、手法 A においては-18%~+1%の誤差となっており、簡略的手法の結果は繰返しモデルの結果に対してやや過小な値となっている。手法 B では、手法 A および繰返し考慮モデルよりも最大変形は大きく評価されており、繰返し考慮モデルに対して 0%~+19%の誤差であった。全体として手法 B の方が手法 A よりも最大変形は大きな値として評価する傾向にあることがわかる。

表 1.3.3-4 簡略的手法および繰返し評価モデルによる免震層最大変形

| 入力地震動 | | 入力倍率 | 最大変位 (cm) | | | | |
|--------|-----|------|-----------|------------|---------------|------------|---------------|
| | | | 繰返し考慮 | 簡略法 手法A | 手法A 誤差 (%) | 簡略法 手法B | 手法B 誤差 (%) |
| OSKH02 | 三連動 | 1.00 | 14.7 | 14.6 | -1.2 | 16.9 | 14.4 |
| | | 1.25 | 24.9 | 24.7 | -0.8 | 29.7 | 19.3 |
| | | 1.50 | 35.8 | 35.0 | -2.2 | 40.3 | 12.7 |
| | 四連動 | 1.00 | 28.6 | 23.5 | -17.9 | 29.0 | 1.2 |
| AIC003 | 三連動 | 1.00 | 13.5 | 13.5 | 0.3 | 14.0 | 3.8 |
| | | 1.25 | 16.9 | 17.1 | 1.0 | 17.1 | 1.3 |
| | | 1.50 | 24.2 | 20.9 | -13.7 | 28.5 | 18.0 |
| | 四連動 | 1.00 | 69.1 | 70.6 | 2.3 | 82.3 | 19.1 |
| SZ0024 | 三連動 | 1.00 | 21.4 | 21.2 | -0.9 | 22.7 | 6.0 |
| | | 1.25 | 29.9 | 29.7 | -0.7 | 32.0 | 7.1 |
| | | 1.50 | 40.9 | 38.6 | -5.5 | 42.6 | 4.2 |
| | 四連動 | 1.00 | 32.6 | 32.2 | -1.1 | 34.3 | 5.3 |
| KGIN | 三連動 | 1.00 | 2.9 | 2.9 | 0.0 | 2.9 | 0.0 |
| | | 1.25 | 3.3 | 3.3 | 0.0 | 3.3 | 0.0 |
| | | 1.50 | 3.7 | 3.7 | 0.0 | 3.7 | 0.0 |
| | 四連動 | 1.00 | 4.5 | 4.5 | 0.0 | 4.5 | 0.0 |

表 1.3.3-5 簡略的手法および繰返し評価モデルによる上部質点最大絶対加速度

| 入力地震動 | | 入力倍率 | 絶対加速度 (cm/s ²) | | | | |
|--------|-----|------|----------------------------|------------|---------------|------------|---------------|
| | | | 繰返し考慮 | 簡略法 手法A | 手法A 誤差 (%) | 簡略法 手法B | 手法B 誤差 (%) |
| OSKH02 | 三連動 | 1.00 | 71.0 | 70.3 | -0.9 | 73.9 | 4.2 |
| | | 1.25 | 97.9 | 96.9 | -1.0 | 104.8 | 7.0 |
| | | 1.50 | 125.9 | 123.4 | -2.0 | 131.0 | 4.0 |
| | 四連動 | 1.00 | 102.4 | 96.1 | -6.1 | 101.4 | -0.9 |
| AIC003 | 三連動 | 1.00 | 67.6 | 67.7 | 0.1 | 65.7 | -2.8 |
| | | 1.25 | 76.3 | 76.7 | 0.5 | 71.9 | -5.8 |
| | | 1.50 | 91.2 | 84.5 | -7.4 | 98.9 | 8.4 |
| | 四連動 | 1.00 | 201.1 | 204.9 | 1.9 | 229.9 | 14.3 |
| SZ0024 | 三連動 | 1.00 | 87.6 | 86.8 | -0.8 | 87.0 | -0.7 |
| | | 1.25 | 107.9 | 108.0 | 0.1 | 109.2 | 1.2 |
| | | 1.50 | 134.7 | 130.4 | -3.2 | 136.2 | 1.1 |
| | 四連動 | 1.00 | 115.3 | 113.2 | -1.8 | 115.5 | 0.2 |
| KGIN | 三連動 | 1.00 | 38.2 | 38.2 | 0.0 | 38.2 | 0.0 |
| | | 1.25 | 39.7 | 39.7 | 0.0 | 39.7 | 0.0 |
| | | 1.50 | 41.0 | 41.0 | 0.0 | 41.0 | 0.0 |
| | 四連動 | 1.00 | 43.6 | 43.6 | 0.0 | 43.6 | 0.0 |

表 1.3.3-6 簡略的手法および繰返し評価モデルによるダンパー1台の累積吸収エネルギー

| 入力地震動 | | 入力倍率 | ダンパー累積吸収E (kJNm) | | | | |
|--------|-----|------|------------------|------------|---------------|------------|---------------|
| | | | 繰返し考慮 | 簡略法 手法A | 手法A 誤差 (%) | 簡略法 手法B | 手法B 誤差 (%) |
| OSKH02 | 三連動 | 1.00 | 1168 | 1121 | -4.0 | 1174 | 0.6 |
| | | 1.25 | 2033 | 1864 | -8.3 | 1959 | -3.7 |
| | | 1.50 | 3114 | 2881 | -7.5 | 2981 | -4.3 |
| | 四連動 | 1.00 | 2428 | 2148 | -11.5 | 2372 | -2.3 |
| AIC003 | 三連動 | 1.00 | 1158 | 1178 | 1.7 | 1101 | -4.9 |
| | | 1.25 | 1718 | 1667 | -2.9 | 1568 | -8.7 |
| | | 1.50 | 2403 | 2237 | -6.9 | 2061 | -14.3 |
| | 四連動 | 1.00 | 7007 | 6499 | -7.3 | 6267 | -10.6 |
| SZ0024 | 三連動 | 1.00 | 1770 | 1715 | -3.1 | 1667 | -5.8 |
| | | 1.25 | 2576 | 2514 | -2.4 | 2342 | -9.1 |
| | | 1.50 | 3382 | 3335 | -1.4 | 3094 | -8.5 |
| | 四連動 | 1.00 | 2252 | 2151 | -4.5 | 2037 | -9.5 |
| KGIN | 三連動 | 1.00 | 54 | 54 | 0.0 | 54 | 0.0 |
| | | 1.25 | 90 | 90 | 0.0 | 90 | 0.0 |
| | | 1.50 | 153 | 153 | 0.0 | 153 | 0.0 |
| | 四連動 | 1.00 | 145 | 145 | 0.0 | 145 | 0.0 |

質点の最大絶対加速度を表 1.3.3-5 に示す。四連動の AIC003 入力時では最大加速度が 200cm/s² を超えている。ただし、他の入力時では、140 cm/s² 以下となった。AIC003 四連動を除けば、繰返し考慮モデルに対して簡略法手法 A では-8%~+1%、手法 B では-6%~+8%の誤差となっている。最大変位と同様に全体として手法 B の方が手法 A よりも大きな値として評価する傾向にあることがわかる。

ダンパー1台あたりの累積吸収エネルギーを表 1.3.3-6 に示す。四連動の AIC003 入力時では約 7,000kJNm であり、他の入力時に対して 2 倍以上の値となった。手法 A では繰返し考慮モデルに対し-12%~+2%となり、手法 B では-15%~0%となった。誤差が 1 割を超えるケースは、

表 1.3.3-7 簡略的手法および繰返し評価モデルによるダンパーの累積変形量

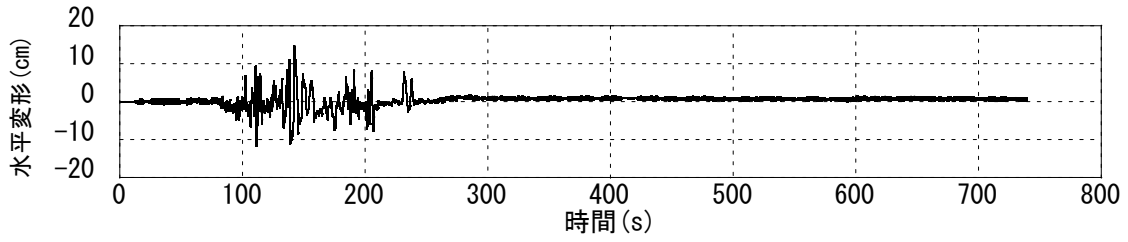
| 入力地震動 | | 入力倍率 | 累積変形量 (m) | | | | |
|--------|-----|------|-----------|------------|---------------|------------|---------------|
| | | | 繰返し考慮 | 簡略法 手法A | 手法A 誤差 (%) | 簡略法 手法B | 手法B 誤差 (%) |
| OSKH02 | 三連動 | 1.00 | 9.3 | 9.1 | -2.5 | 9.4 | 1.5 |
| | | 1.25 | 13.3 | 12.3 | -7.2 | 13.6 | 2.5 |
| | | 1.50 | 18.5 | 16.4 | -11.2 | 18.6 | 0.5 |
| | 四連動 | 1.00 | 16.2 | 16.2 | -0.3 | 16.7 | 2.7 |
| AIC003 | 三連動 | 1.00 | 11.6 | 14.2 | 21.9 | 11.5 | -1.1 |
| | | 1.25 | 14.3 | 16.1 | 12.2 | 12.3 | -14.4 |
| | | 1.50 | 17.0 | 17.2 | 1.0 | 15.4 | -9.4 |
| | 四連動 | 1.00 | 43.3 | 42.5 | -1.9 | 45.3 | 4.5 |
| SZO024 | 三連動 | 1.00 | 11.3 | 11.0 | -2.3 | 11.4 | 0.9 |
| | | 1.25 | 15.4 | 14.7 | -4.4 | 15.5 | 0.4 |
| | | 1.50 | 19.4 | 18.6 | -4.2 | 19.2 | -0.9 |
| | 四連動 | 1.00 | 18.7 | 19.6 | 4.6 | 19.1 | 2.3 |
| KGIN | 三連動 | 1.00 | 10.4 | 10.4 | 0.0 | 10.4 | 0.0 |
| | | 1.25 | 10.2 | 10.2 | 0.0 | 10.2 | 0.0 |
| | | 1.50 | 10.2 | 10.2 | 0.0 | 10.2 | 0.0 |
| | 四連動 | 1.00 | 9.9 | 9.9 | 0.0 | 9.9 | 0.0 |

手法 A では OSKH02 の四連動の場合であり、手法 B では三連動 AIC003×1.5 入力時、および四連動 AIC003 の場合であった。その他のケースで誤差は 1 割以内となっている。全体として、手法 A の方が手法 B に対して累積吸収エネルギーはやや大きめの値として評価する傾向にある。

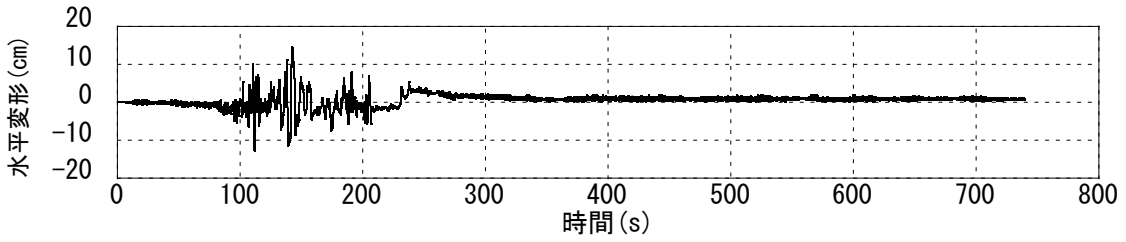
免震層の累積変形量を表 1.3.3-7 に示す。ここでの累積変形量は、免震層の累積吸収エネルギーが最終値の 95% を超えた時点での値である。AIC003 四連動入力以外において累積変形量は 10~20m となっている。AIC003 四連動では 45m 程度であった。手法 A、B ともに簡略的手法で求めた累積変形量は繰返し考慮モデルによる結果に対して 2 割程度のばらつきを有する。入力波形 SZO024 において簡略的手法の結果と繰返し考慮モデルの結果の誤差は、他のケースよりも小さくなっている。

繰返し考慮モデルを用いた解析と簡略的手法による解析との時刻歴波形を図 1.3.3-10~18 に示す。図(a)~(c)に繰返し考慮モデル、簡略法 A および B を用いた場合の水平変形をそれぞれ示す。三連動の OSKH02、AIC003、SZO024 と四連動の SZO024 において 100s~200s で免震層に大きな変形が生じている。一方、四連動の OSKH02、AIC003 は 100s~250s の 150 秒間に大きな免震層変形が生じていることがわかる。手法 A は、最大変形および最大変形時の吸収エネルギーを基にした降伏荷重の低減率を設定しており、三連動 SZO024 入力時のように最大変形発生時の後に免震層変位が収束する場合には繰返し考慮モデルとよい対応を示すものと考えられる。一方、手法 B では、OSKH02 の 1.0 倍入力および 1.5 倍入力時において図(e)に示すダンパーの吸収エネルギーでは手法 A よりも最終的な吸収エネルギーは繰返し考慮モデルによる結果に近くなった。ただし、大きな揺れが終了する 230 秒付近まで繰返し考慮時、簡略法 A、B ともにほとんど差異はみられない。

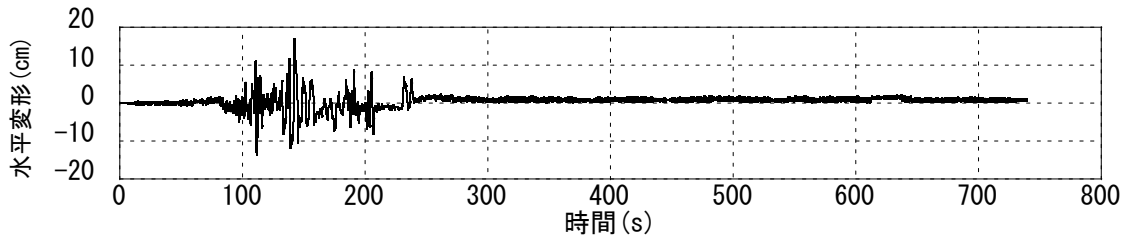
図 1.3.3-19~21 にダンパーの荷重変形関係を示す。履歴形状は概して手法 A の方が繰返し考慮モデルに近い。手法 B は初期状態からの降伏耐力低減量が大きいため、繰返し考慮モデルおよび手法 A よりも荷重値が全体として低い値となっていることがわかる。



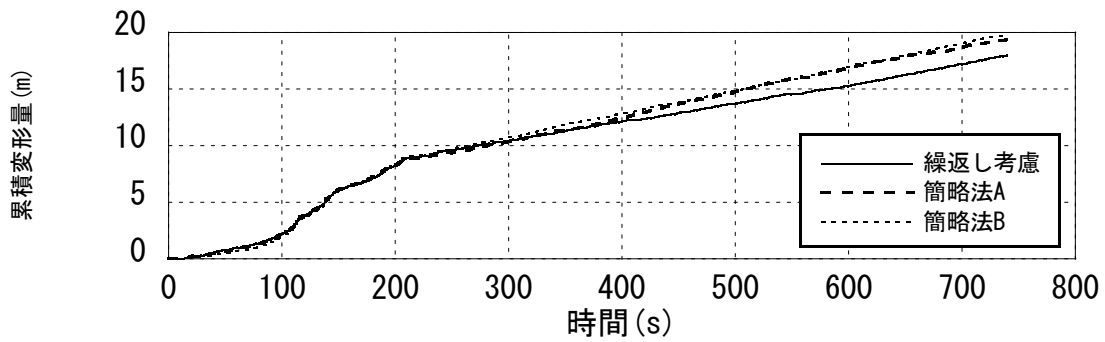
(a)繰返し考慮モデル 水平変位



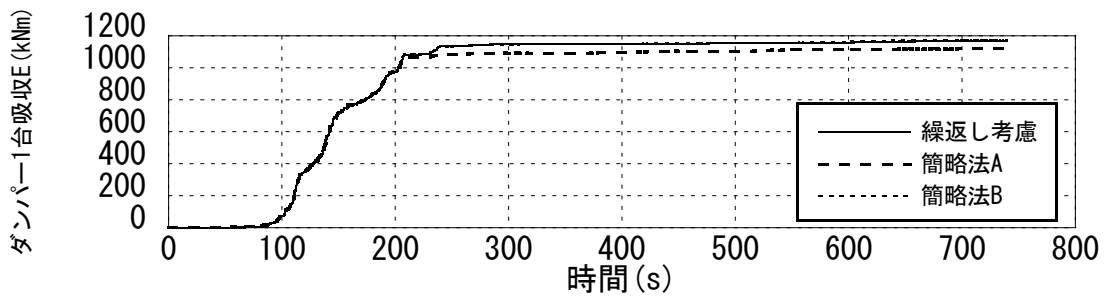
(b)簡略法手法 A 水平変位



(c)簡略法手法 B 水平変位

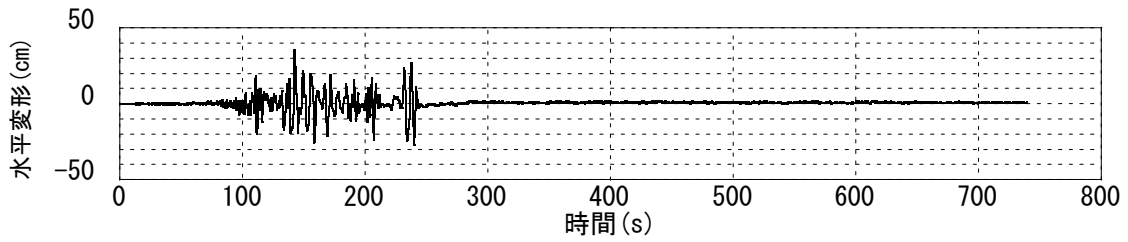


(d)累積変形量

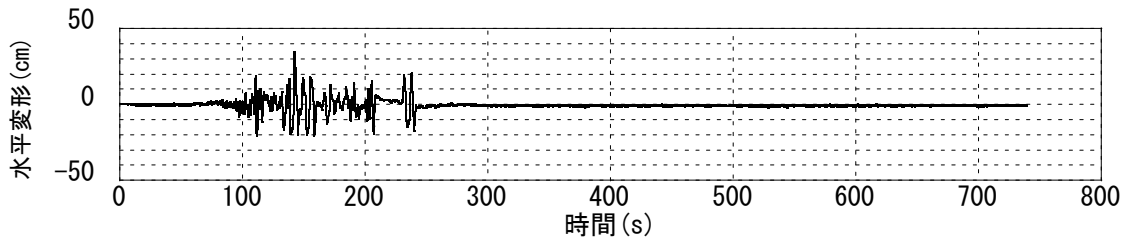


(e)ダンパー1台当たりの吸収エネルギー

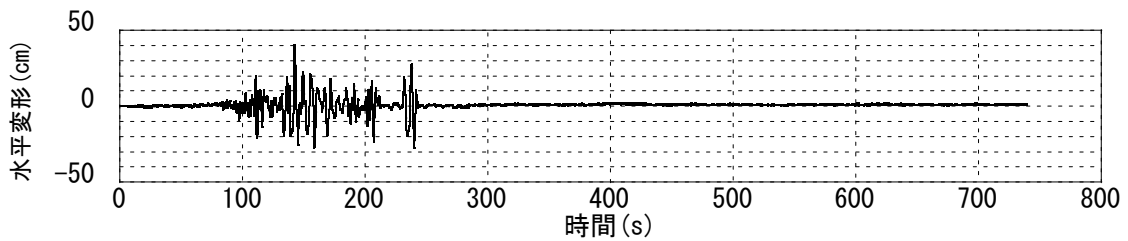
図 1.3.3-10 時刻歴波形 三連動 OSKH02×1.0



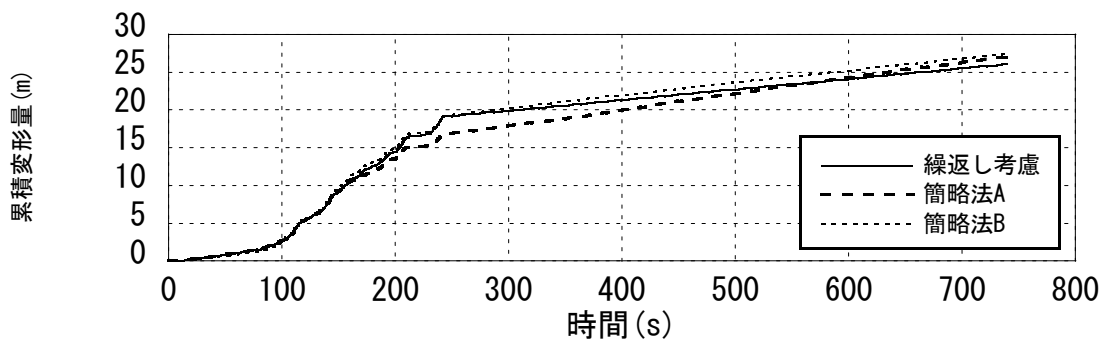
(a)繰返し考慮モデル 水平変位



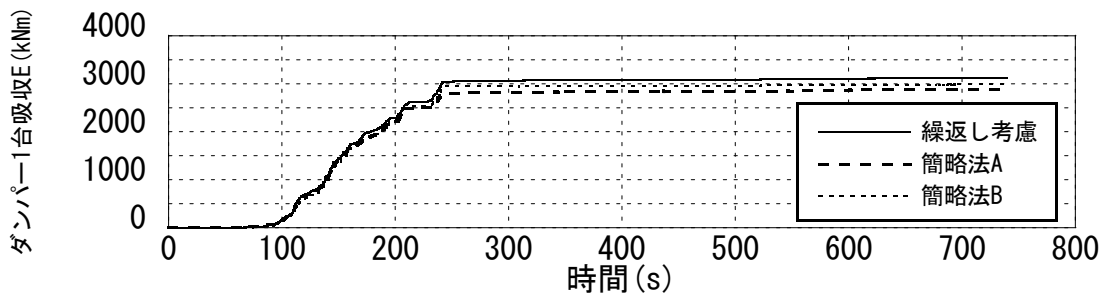
(b)簡略法手法 A 水平変位



(c)簡略法手法 B 水平変位

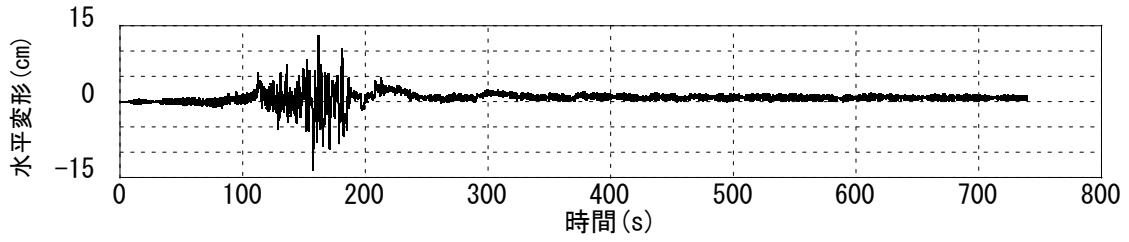


(d)累積変形量

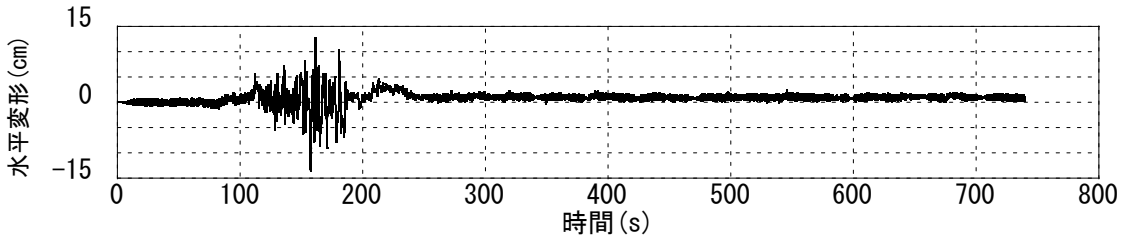


(e)ダンパー1台当たりの吸収エネルギー

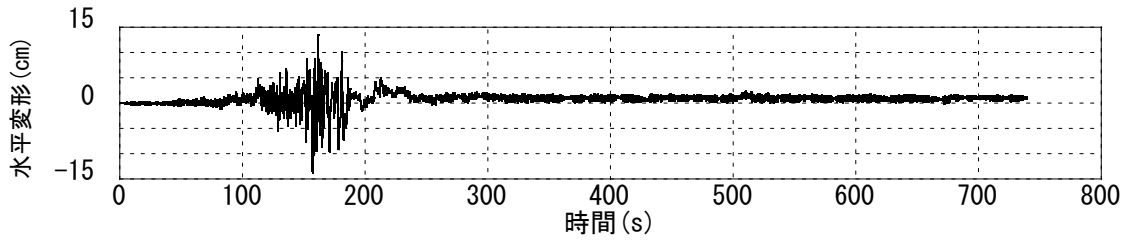
図 1.3.3-11 時刻歴波形 三連動 OSKH02×1.5



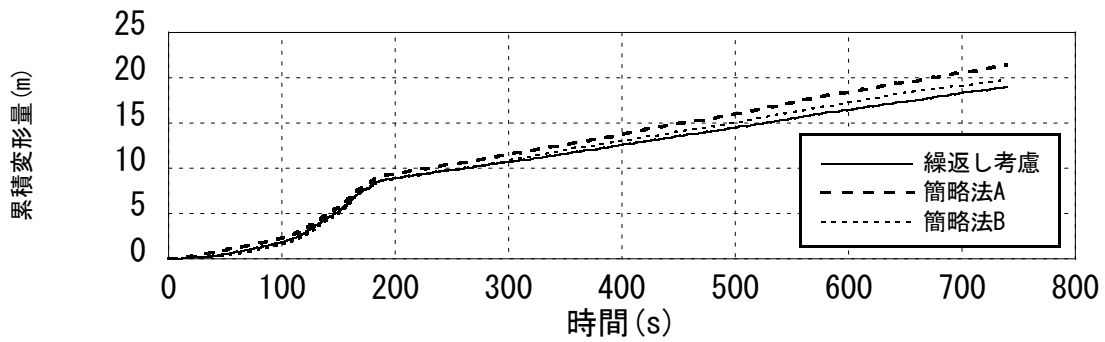
(a)繰返し考慮モデル 水平変位



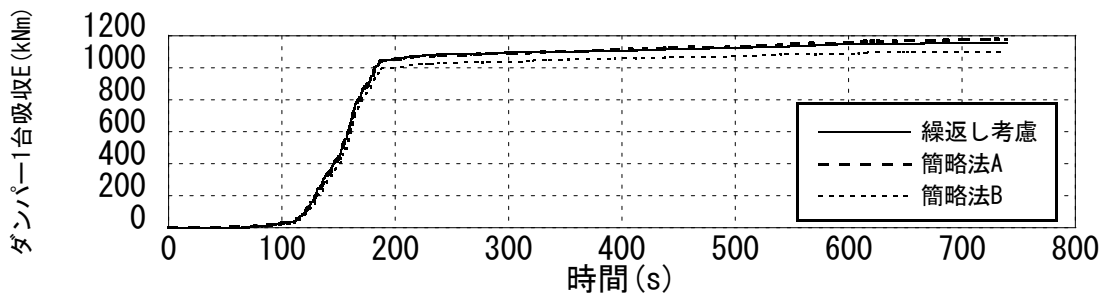
(b)簡略法手法 A 水平変位



(c)簡略法手法 B 水平変位

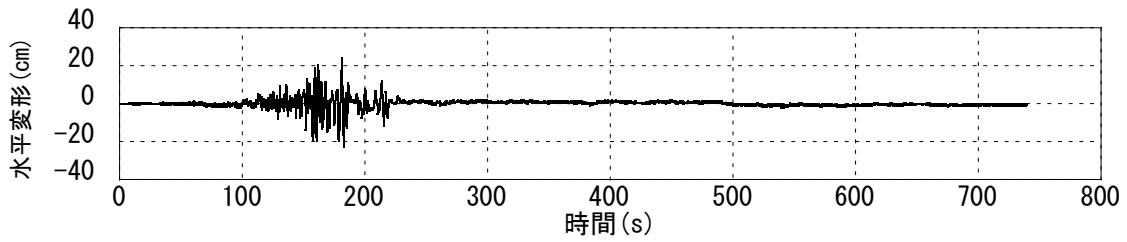


(d)累積変形量

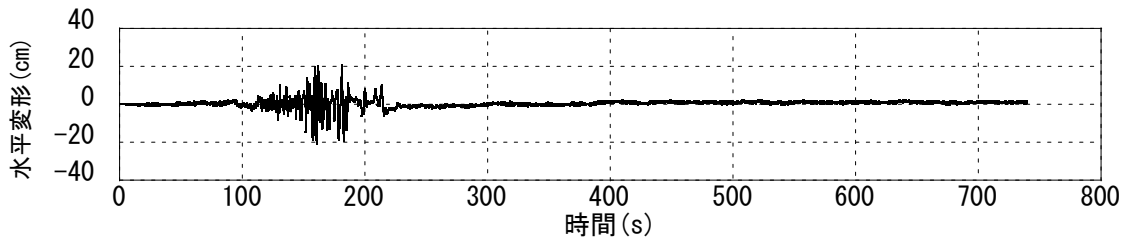


(e)ダンパー1台当たりの吸収エネルギー

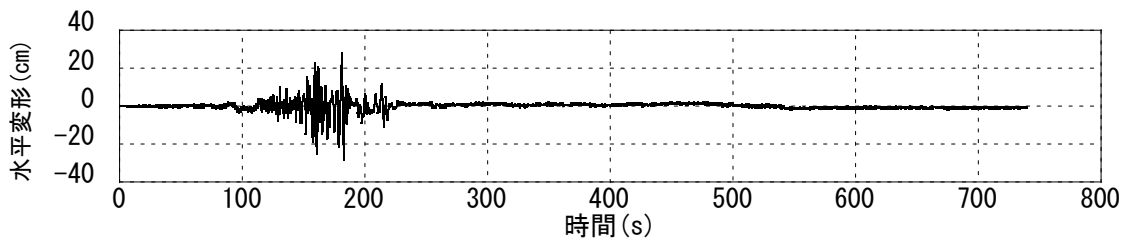
図 1.3.3-12 時刻歴波形 三連動 AIC003×1.0



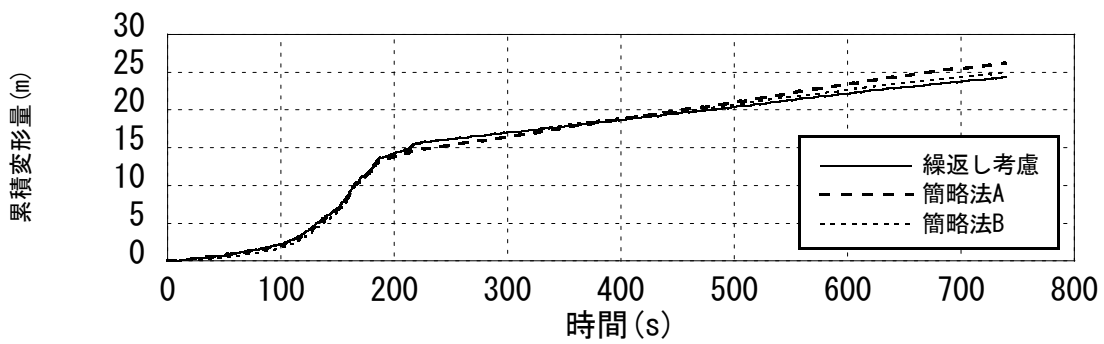
(a)繰返し考慮モデル 水平変位



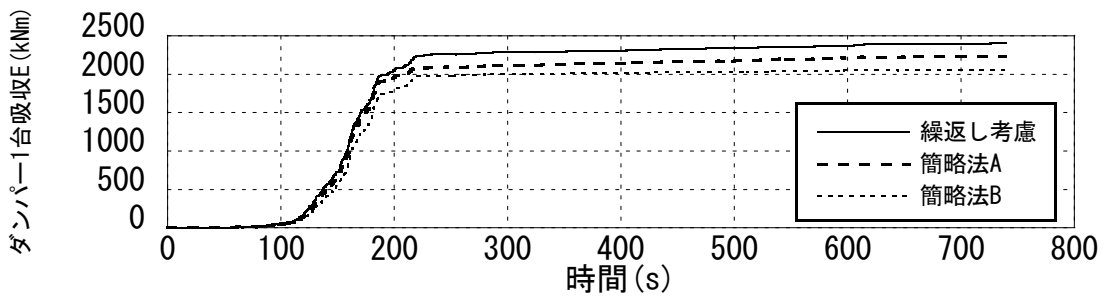
(b)簡略法手法 A 水平変位



(c)簡略法手法 B 水平変位

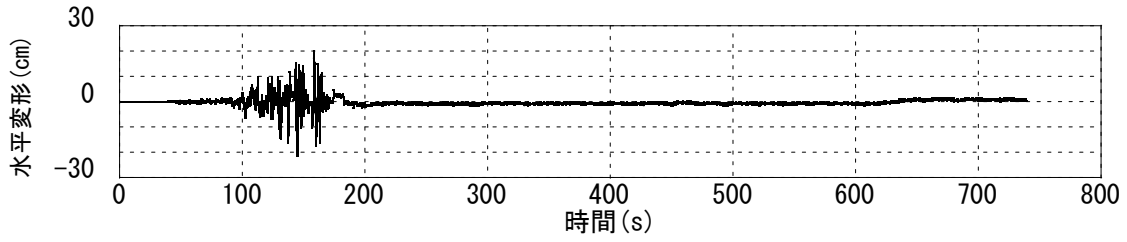


(d)累積変形量

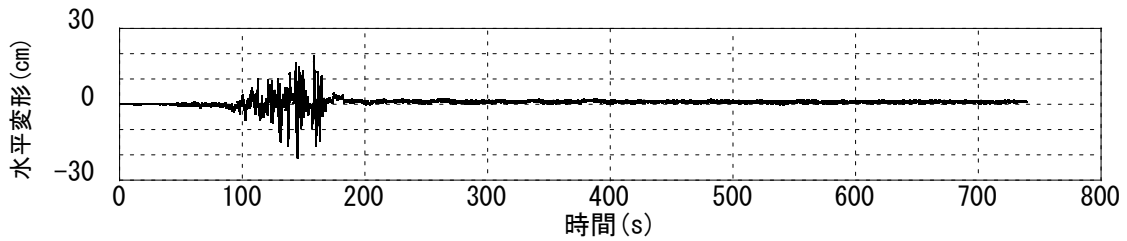


(e)ダンパー1台当たりの吸収エネルギー

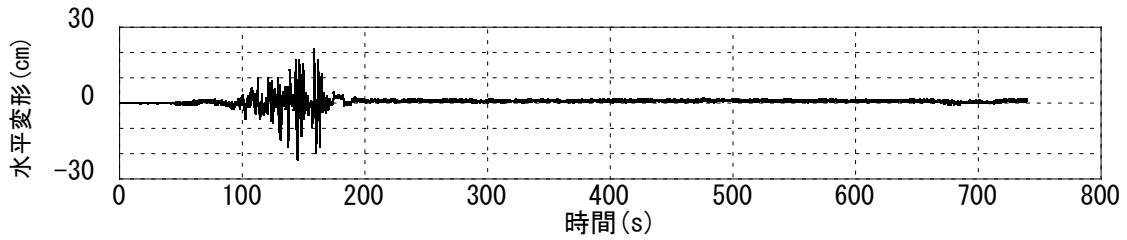
図 1.3.3-13 時刻歴波形 三連動 AIC003×1.5



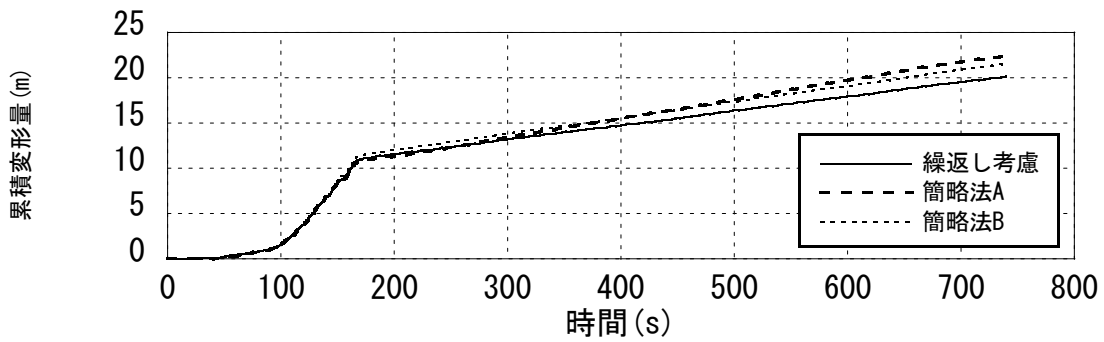
(a)繰返し考慮モデル 水平変位



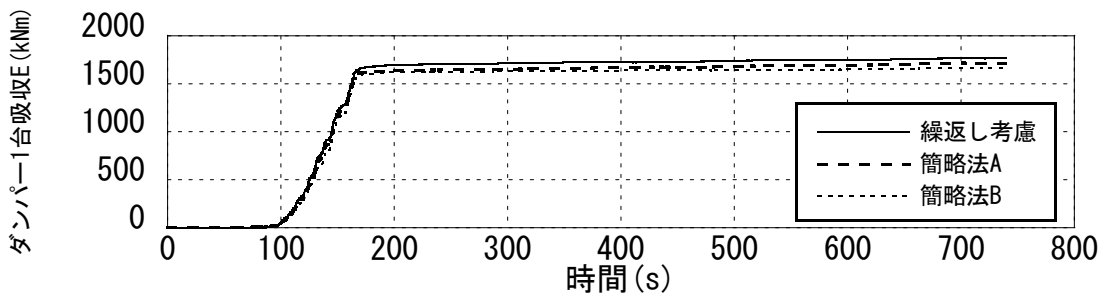
(b)簡略法手法 A 水平変位



(c)簡略法手法 B 水平変位

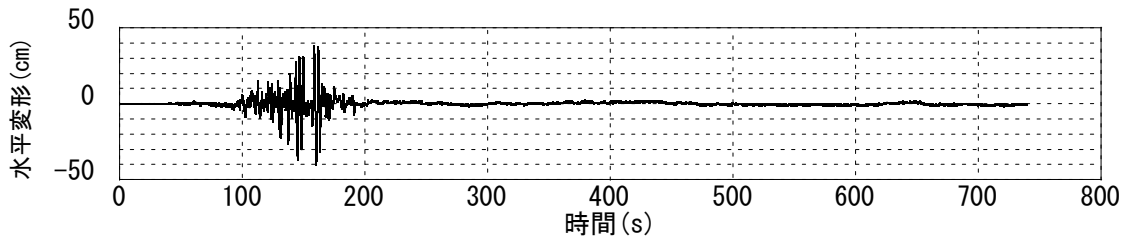


(d)累積変形量

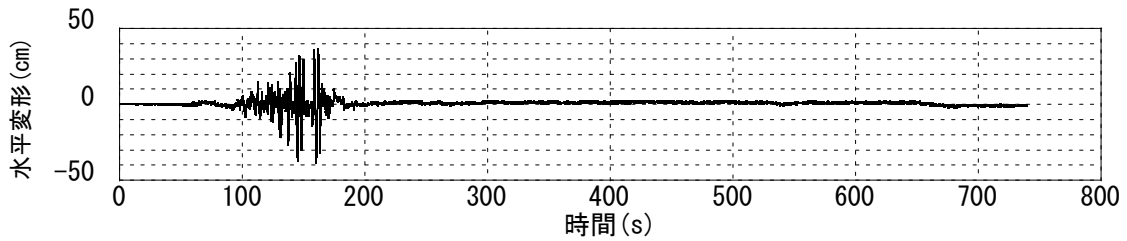


(e)ダンパー1台当たりの吸収エネルギー

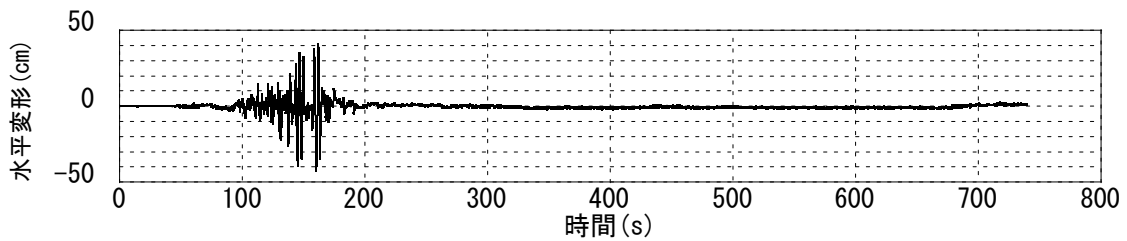
図 1.3.3-14 時刻歴波形 三連動 SZO024×1.0



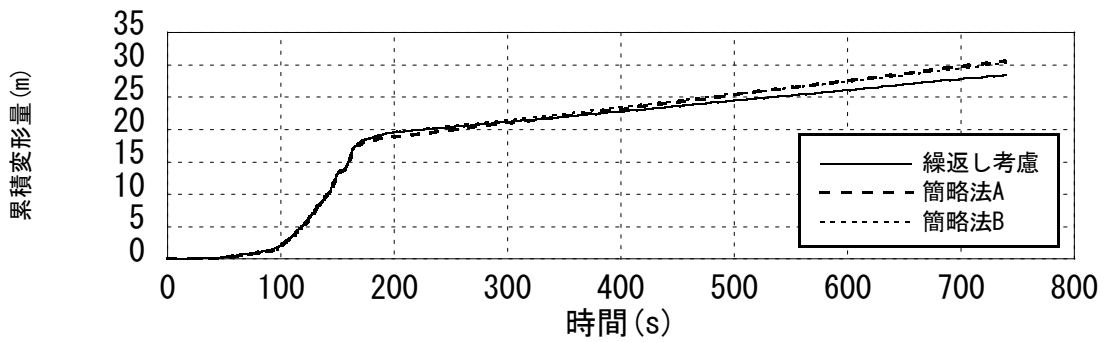
(a)繰返し考慮モデル 水平変位



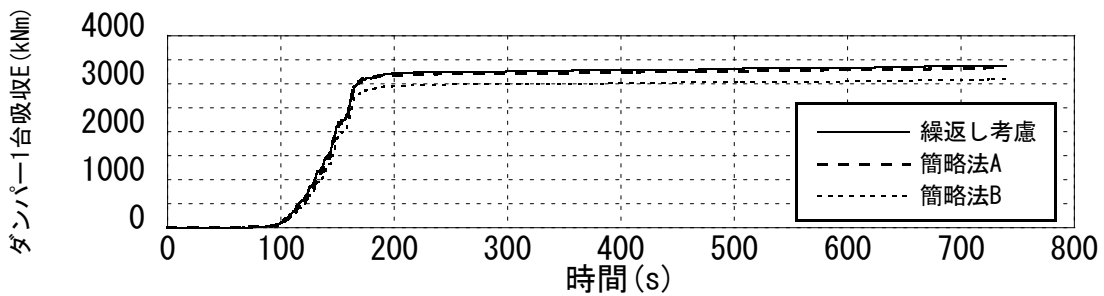
(b)簡略法手法 A 水平変位



(c)簡略法手法 B 水平変位

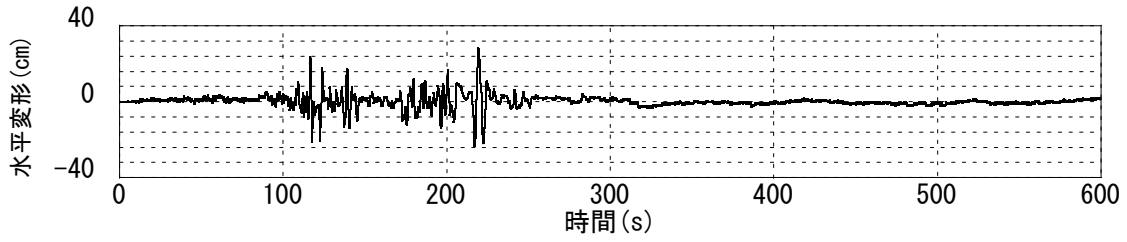


(d)累積変形量

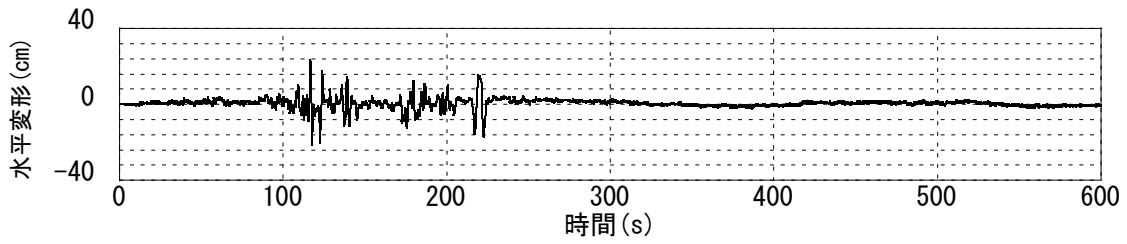


(e)ダンパー1台当たりの吸収エネルギー

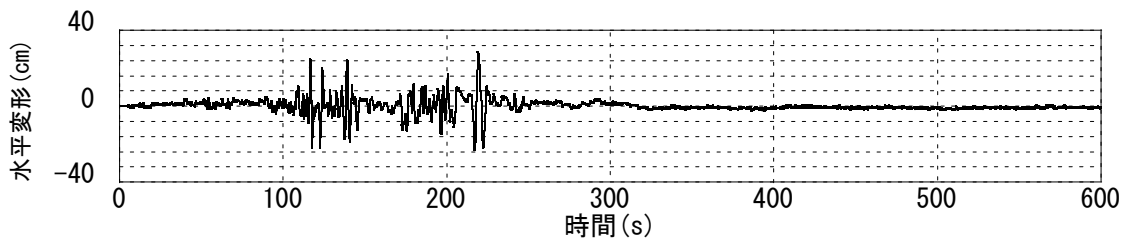
図 1.3.3-15 時刻歴波形 三連動 SZO024×1.5



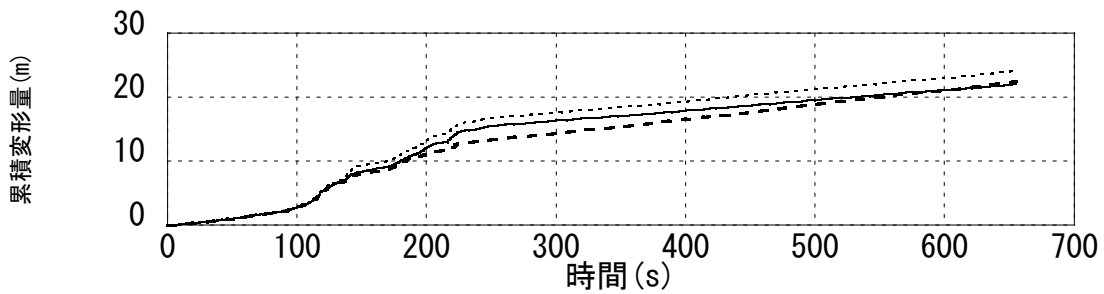
(a)繰返し考慮モデル 水平変位



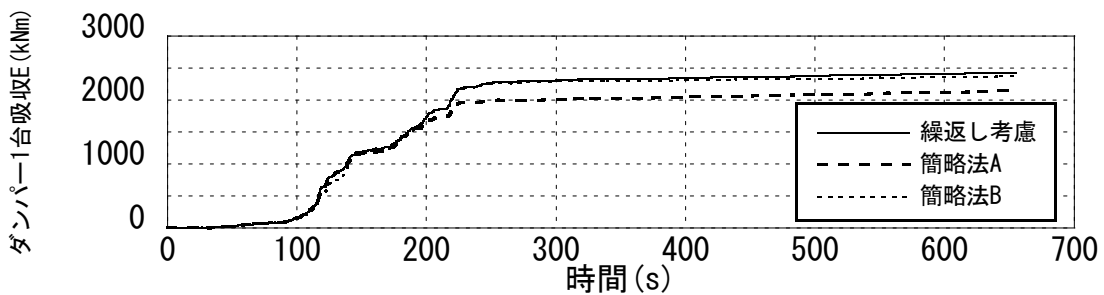
(b)簡略法手法 A 水平変位



(c)簡略法手法 B 水平変位

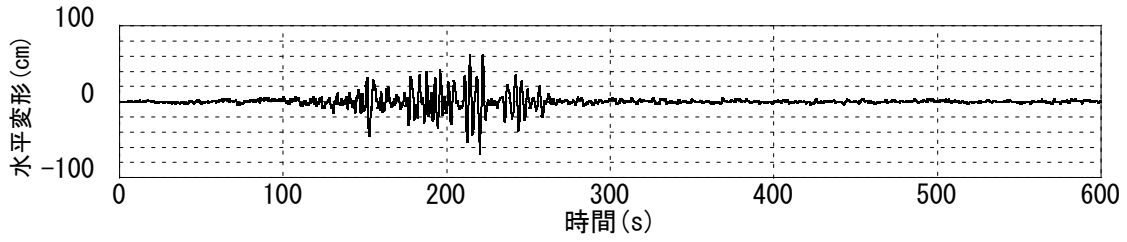


(d)累積変形量

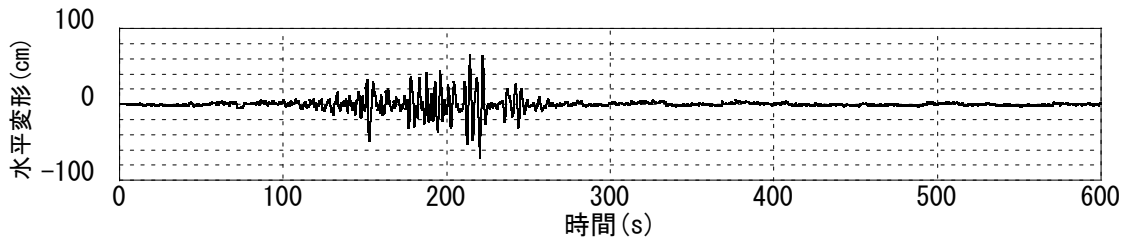


(e)ダンパー1台当たりの吸収エネルギー

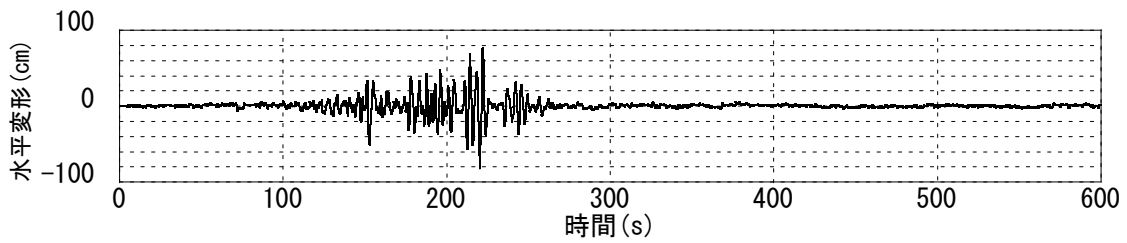
図 1.3.3-16 時刻歴波形 四連動 OSKH02×1.0



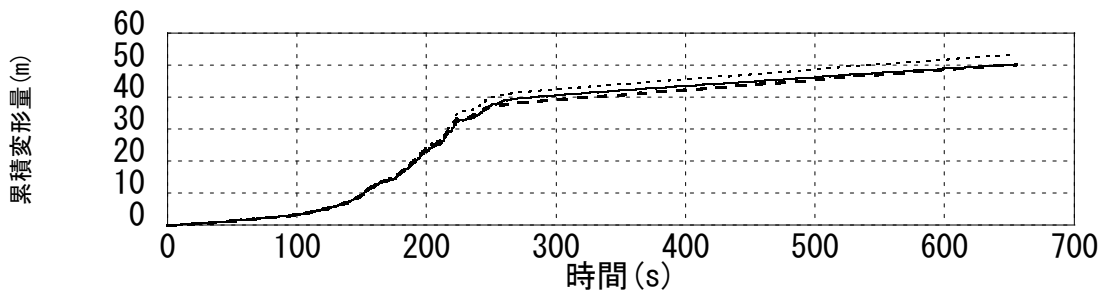
(a)繰返し考慮モデル 水平変位



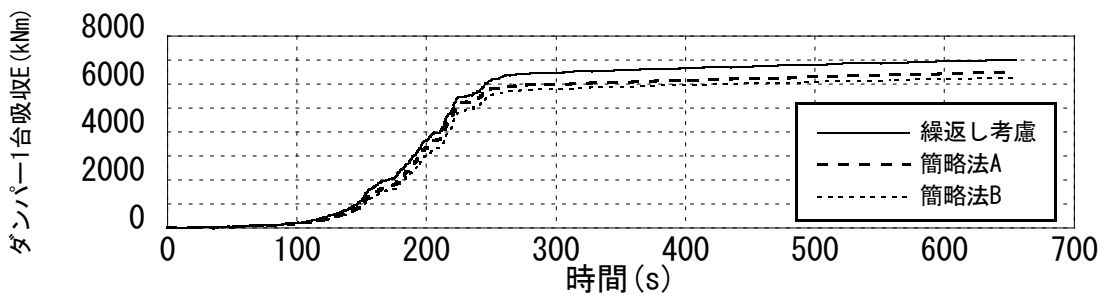
(b)簡略法手法 A 水平変位



(c)簡略法手法 B 水平変位

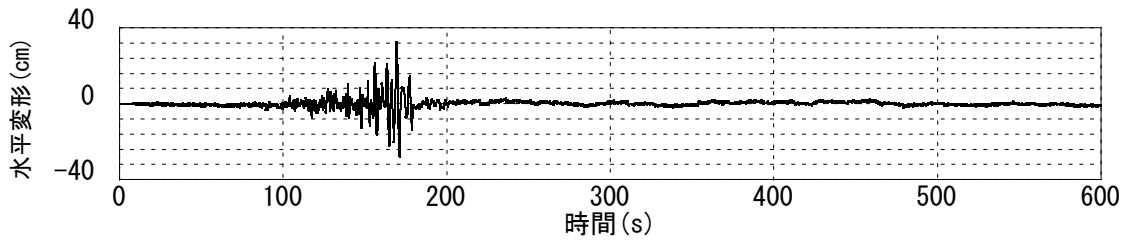


(d)累積変形量

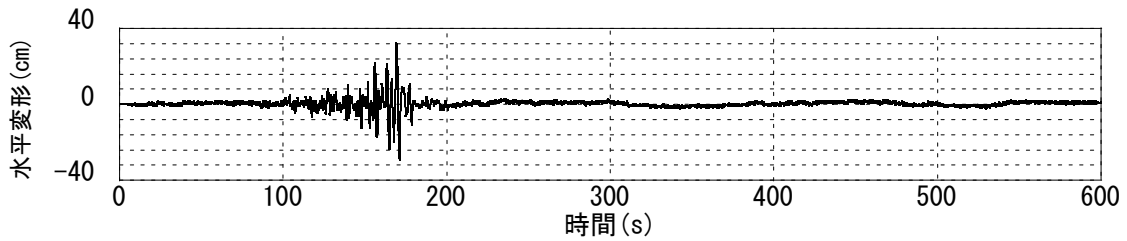


(e)ダンパー1台当たりの吸収エネルギー

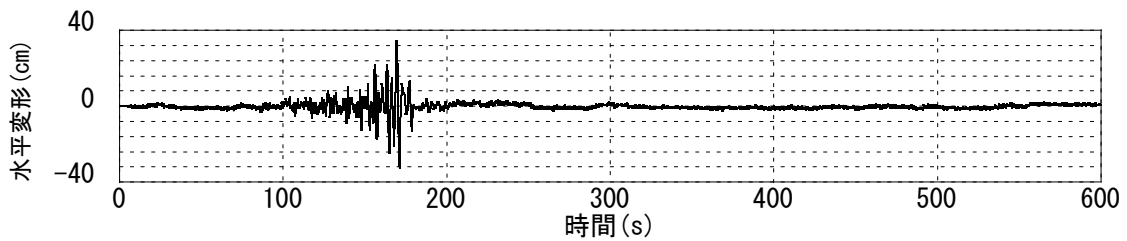
図 1.3.3-17 時刻歴波形 四連動 AIC003×1.0



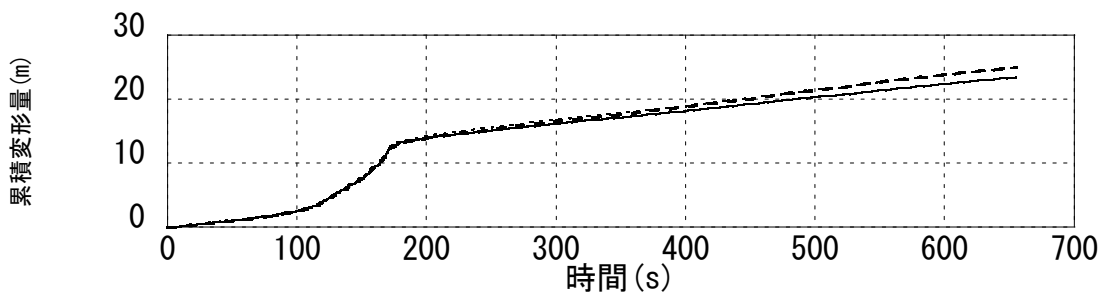
(a)繰返し考慮モデル 水平変位



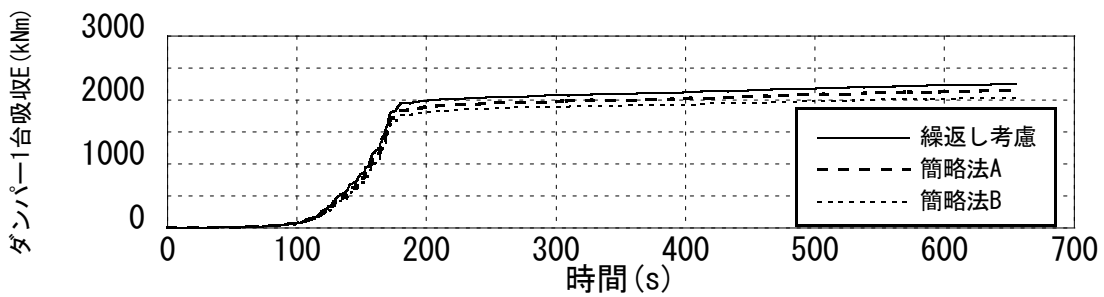
(b)簡略法手法 A 水平変位



(c)簡略法手法 B 水平変位

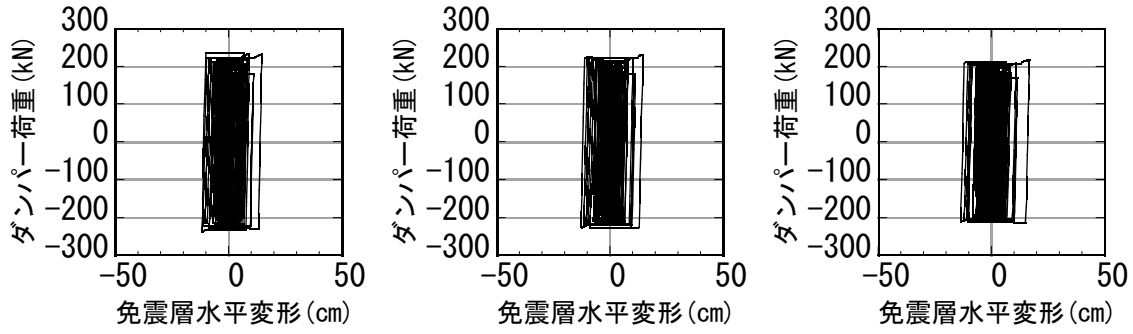


(d)累積変形量

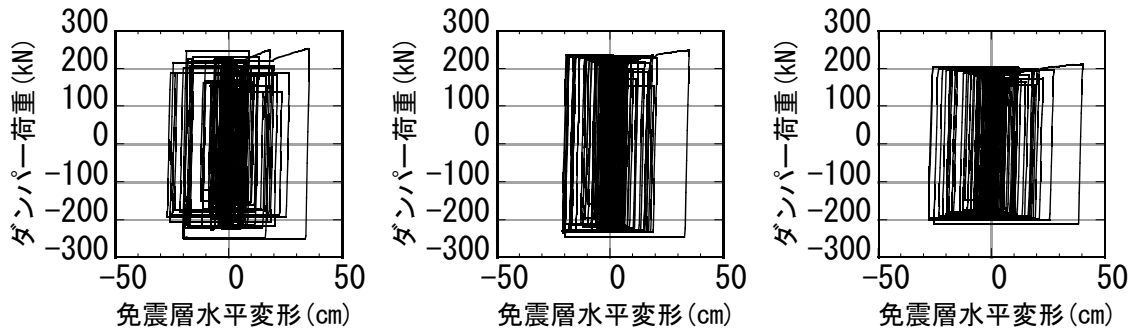


(e)ダンパー1台当たりの吸収エネルギー

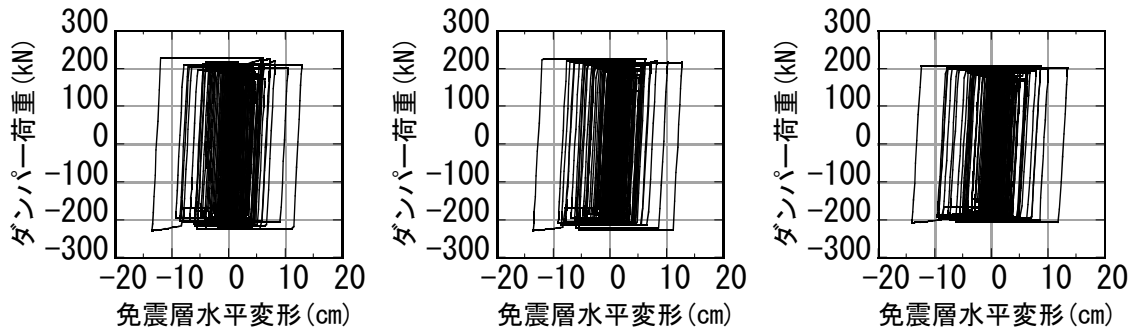
図 1.3.3-18 時刻歴波形 四連動 SZO024×1.0



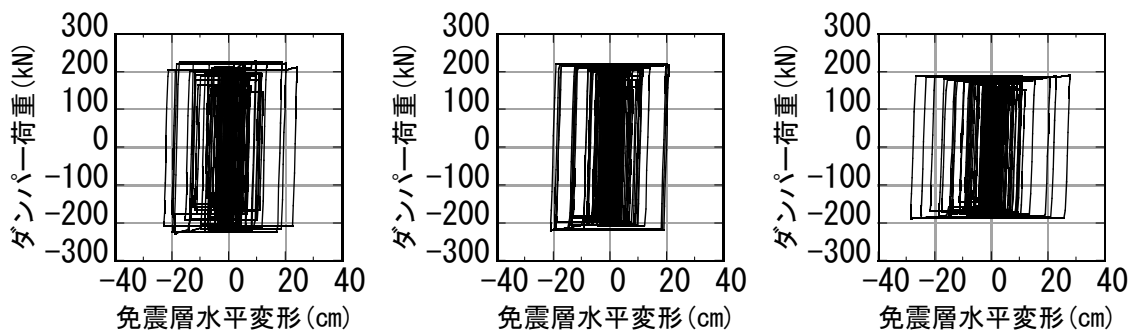
1) 三連動 OSKH02×1.0



2) 三連動 OSKH02×1.5



3) 三連動 AIC003×1.0



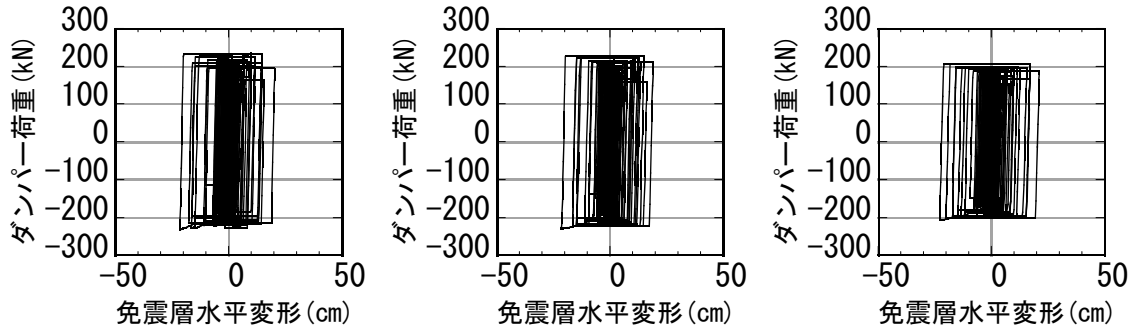
4) 三連動 AIC003×1.5

(a)繰返し考慮モデル

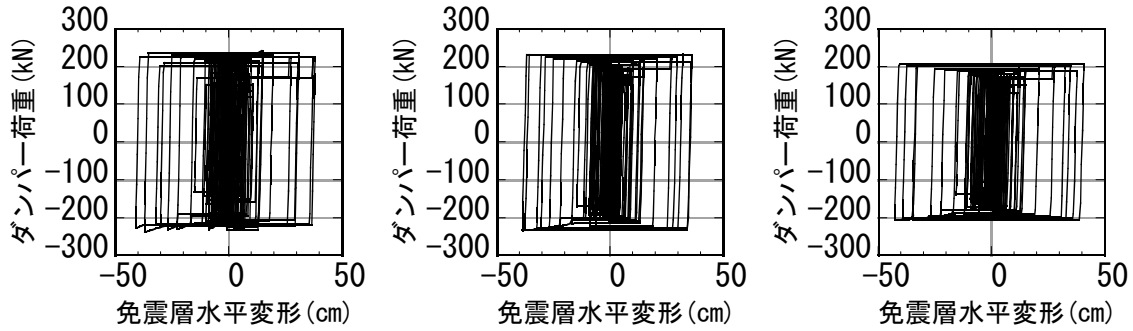
(b)簡略法手法 A

(c)簡略法手法 B

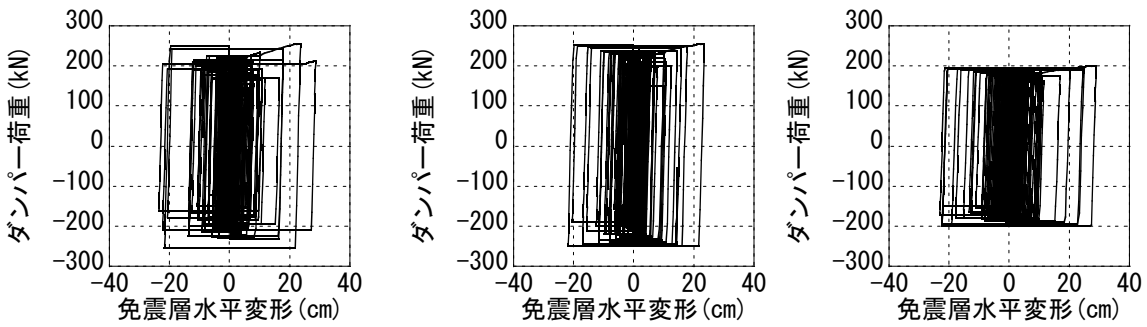
図 1.3.3-19 ダンパーの荷重変形関係 (その 1)



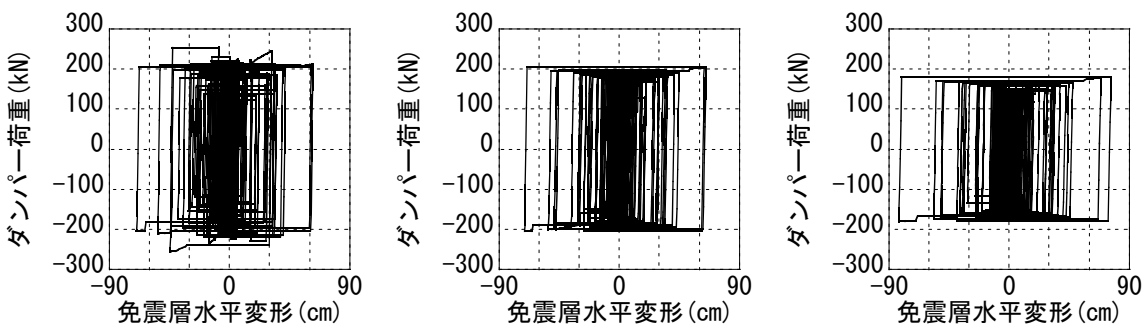
1) 三連動 SZO024×1.0



2) 三連動 SZO024×1.5



3) 四連動 OSKH02×1.0



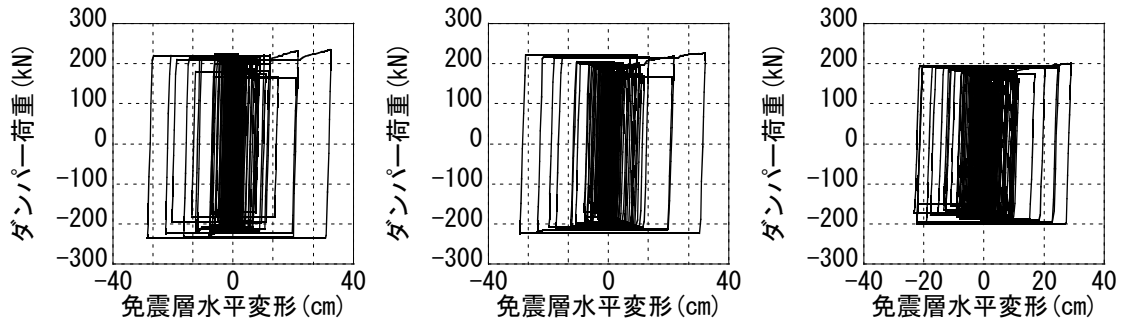
4) 四連動 AIC003×1.0

(a)繰返し考慮モデル

(b)簡略法手法 A

(c)簡略法手法 B

図 1.3.3-20 ダンパーの荷重変形関係 (その 2)



1) 四連動 SZO024×1.0

(a)繰返し考慮モデル

(b)簡略法手法 A

(c)簡略法手法 B

図 1.3.3-21 ダンパーの荷重変形関係 (その 3)

表 1.3.3-8 簡略的手法および繰返し評価モデルによる亀裂に対する疲労損傷度

| 入力地震動 | | 入力倍率 | 亀裂に対する疲労損傷度 | | | | |
|--------|-----|------|-------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | | | 繰返し考慮 | 簡略法 手法A | 手法A 誤差(%) | 簡略法 手法B | 手法B 誤差(%) |
| OSKH02 | 三連動 | 1.00 | 144% | 144% | -0.2 | 165% | 14.6 |
| | | 1.25 | 337% | 280% | -17.2 | 378% | 12.1 |
| | | 1.50 | 690% | 536% | -22.3 | 729% | 5.6 |
| | 四連動 | 1.00 | 408% | 292% | -28.6 | 484% | 18.5 |
| AIC003 | 三連動 | 1.00 | 132% | 141% | 6.8 | 145% | 9.8 |
| | | 1.25 | 227% | 221% | -2.5 | 255% | 12.4 |
| | | 1.50 | 393% | 368% | -6.4 | 446% | 13.3 |
| | 四連動 | 1.00 | 2494% | 2448% | -1.9 | 2962% | 18.7 |
| SZ0024 | 三連動 | 1.00 | 274% | 271% | -1.0 | 311% | 13.5 |
| | | 1.25 | 521% | 505% | -3.1 | 583% | 11.7 |
| | | 1.50 | 833% | 812% | -2.5 | 906% | 8.8 |
| | 四連動 | 1.00 | 373% | 380% | 2.0 | 413% | 10.9 |
| KGIN | 三連動 | 1.00 | 26% | 26% | 0.0 | 26% | 0.0 |
| | | 1.25 | 27% | 27% | 0.0 | 27% | 0.0 |
| | | 1.50 | 30% | 30% | 0.0 | 30% | 0.0 |
| | 四連動 | 1.00 | 30% | 30% | 0.0 | 30% | 0.0 |

表 1.3.3-9 簡略的手法および繰返し評価モデルによる破断に対する疲労損傷度

| 入力地震動 | | 入力倍率 | 破断に対する疲労損傷度 | | | | |
|--------|-----|------|-------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | | | 繰返し考慮 | 簡略法 手法A | 手法A 誤差(%) | 簡略法 手法B | 手法B 誤差(%) |
| OSKH02 | 三連動 | 1.00 | 4% | 4% | 0.2 | 5% | 14.4 |
| | | 1.25 | 10% | 8% | -16.3 | 11% | 11.8 |
| | | 1.50 | 19% | 15% | -21.6 | 20% | 5.5 |
| | 四連動 | 1.00 | 12% | 8% | -27.6 | 14% | 18.2 |
| AIC003 | 三連動 | 1.00 | 4% | 4% | 7.3 | 4% | 9.6 |
| | | 1.25 | 7% | 6% | -1.9 | 7% | 12.0 |
| | | 1.50 | 11% | 10% | -5.9 | 13% | 12.7 |
| | 四連動 | 1.00 | 68% | 66% | -2.0 | 80% | 18.0 |
| SZ0024 | 三連動 | 1.00 | 8% | 8% | -0.5 | 9% | 13.2 |
| | | 1.25 | 15% | 14% | -2.7 | 16% | 11.5 |
| | | 1.50 | 23% | 22% | -2.2 | 25% | 8.6 |
| | 四連動 | 1.00 | 10% | 11% | 2.3 | 12% | 10.7 |
| KGIN | 三連動 | 1.00 | 1% | 1% | 0.0 | 1% | 0.0 |
| | | 1.25 | 1% | 1% | 0.0 | 1% | 0.0 |
| | | 1.50 | 1% | 1% | 0.0 | 1% | 0.0 |
| | 四連動 | 1.00 | 1% | 1% | 0.0 | 1% | 0.0 |

鉛ダンパーの繰返し加力時の特性として、破断前に亀裂が発生することが報告されている。亀裂や破断に対する鉛ダンパーの疲労損傷評価法としては、鋼材ダンパーと同様に Miner 則を用いた検討が実施されている^{1.3.3-6)}。変位振幅 δ と亀裂発生時繰返し数 N_c 、破断時繰返し数 N_d の関係は以下の式(1.3.3-8)および(1.3.3-9)とした。

$$N_c = 4.69 \times 10^4 \delta^{-1.87} \quad (1.3.3-8)$$

$$N_d = 1.38 \times 10^6 \delta^{-1.83} \quad (1.3.3-9)$$

δ : 片振幅(mm)

地震応答解析結果より鉛ダンパーの疲労損傷評価を行うため、レインフロー法により免震層

水平変位波形の振幅と繰返し数 n_i との関係を求めた。亀裂および破断に対する累積疲労損傷度 D_c 、 D_d を式(1.3.3-10)および式(1.3.3-11)にて評価する。Miner 則では損傷度 $D=1$ (100%) で亀裂および破断が生じるものとする。

$$D_c = \sum_i \frac{n_i}{N_{ci}} \quad (1.3.3-10)$$

$$D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_{di}} \quad (1.3.3-11)$$

D_c : 亀裂に対する累積損傷度

D_d : 破断に対する累積損傷度

n_i : i 番目の振幅の繰返し数

N_{ci} : i 番目の振幅の亀裂発生繰返し数

N_{di} : i 番目の振幅の破断時繰返し数

表 1.3.3-8 および表 1.3.3-9 に繰返し考慮モデル、簡略法手法 A および B による解析結果から算出した疲労損傷度を示す。手法 A は、繰返し考慮モデルに対して 2 割以下損傷度を小さく評価する場合があることがわかる。一方、変形が小さな KGIN を除き、手法 B は繰返し考慮モデルよりも大きな値として評価しており、その誤差は 19% 未満であった。

(5) まとめ

鉛ダンパーの繰返し依存性を簡略的に評価する方法として、初期から一律にダンパーの降伏耐力を低減する手法を提案した。提案手法は、繰返し考慮なしの地震応答解析を実施したのちに、その応答結果によりダンパー耐力を低減し、再度地震応答解析を実施するものである。ダンパーの耐力低減方法としてここでは2通りの手法を用いた。手法Aは、最大変形と最大変形発生時刻におけるダンパーの累積吸収エネルギーを用いるものであり、手法Bは、最大変形と解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーを用いるものである。繰返し依存考慮モデルを用いた三連動および四連動の長周期地震動の1質点系解析結果との比較から、これらの妥当性を検討した。

手法Bにより算出された最大変位は、ほとんどのケースにおいて手法Aおよび繰返し考慮モデルよりも最大変形は大きく評価されており、繰返し考慮モデルに対して-1%~+19%の誤差であった。

最大絶対加速度は繰返し依存考慮モデルの結果に対してAIC003四連動を除けば1割以内の誤差であり、手法A、Bの大小関係は入力地震動により異なる。

ダンパー1台あたりの累積吸収エネルギーは、手法AおよびBともに繰返し依存考慮モデルの結果に対して1割以内の誤差となった。簡略的手法は、繰返し依存考慮モデルの結果に対して過小評価となる場合があるため、ダンパーの累積吸収エネルギー能力に対する評価において、簡略的手法による解析に基づく場合には、安全率を考慮するなどの配慮が必要である。手法A、Bともに簡略的手法で求めた累積変形量は繰返し考慮モデルによる結果に対して2割以内の誤差となった。

簡略法手法Aによる解析結果から算出した疲労損傷度は、繰返し考慮モデルに対して2割以下損傷度を小さく評価する場合があった。一方、手法Bは繰返し考慮モデルよりも大きな値として累積損傷度を評価し、その誤差は18%未満であった。

以上より、本検討で提案した2つの簡略法のうち、ダンパーの変形量を最大変形時、ダンパーの累積吸収エネルギー E は解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーとして、降伏耐力を低減する方法（本検討では「手法B」）を用いた方が、ダンパーの最大変形量ならびに累積損傷度を繰返し考慮モデルよりも大きな値として評価し、安全側の評価となることがわかった。

なお、本検討では三連動および四連動地震のOSKH02、SZO024ならびにKGINの応答では免震層の最大変形は43cm以下、ダンパーの破断に対する累積損傷値は25%以下であり、上記の入力地震動による免震部材の破断の可能性は少ないと考えられる。一方、四連動AIC003の場合で最大変形が70cmを超える結果となった。ただし、本検討の解析モデルは、積層ゴムを線形弾性としており、40~50cm以上の水平変形時から生じるハードニング挙動を模擬できていないため、最大応答値の評価に注意を要する。より高精度な評価とするためには、上記のような積層ゴムの非線形挙動も模擬しうるモデルにて評価する必要がある。

参考文献

- 1.3.3-1) 森田慶子ほか：免震構造用鉛ダンパーの実験的研究－別置型鉛ダンパーの復元力モデルと繰返し特性の評価について－，日本建築学会構造系論文集，No.570，pp.53-60，2003.8
- 1.3.3-2) 日本免震構造協会編：免震部材部会ダンパー小委員会活動報告，2007.3

- 1.3.3-3) 高山峯夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能，日本建築学会技術報告集，No.1，pp.160-165，1995.12
- 1.3.3-4) 矢花修一ほか：積層ゴム免震要素の線形限界に関する検討，日本建築学会大会学術梗概集，B-2 分冊，pp.691-694，1996.9
- 1.3.3-5) 中澤俊幸ほか：免震構造物における耐震安全性の確率論的評価に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.662，pp.745-754，2011.4
- 1.3.3-6) 安永亨ほか：鉛ダンパーの風応答に関する研究：(その2)微小変位での高サイクル疲労特性，日本建築学会大会学術梗概集，B-2 分冊，pp.289-290，2010.8

1.3.4 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）

(1) 免震部材実験結果に基づく弾性すべり支承（高摩擦）摩擦特性のモデル化

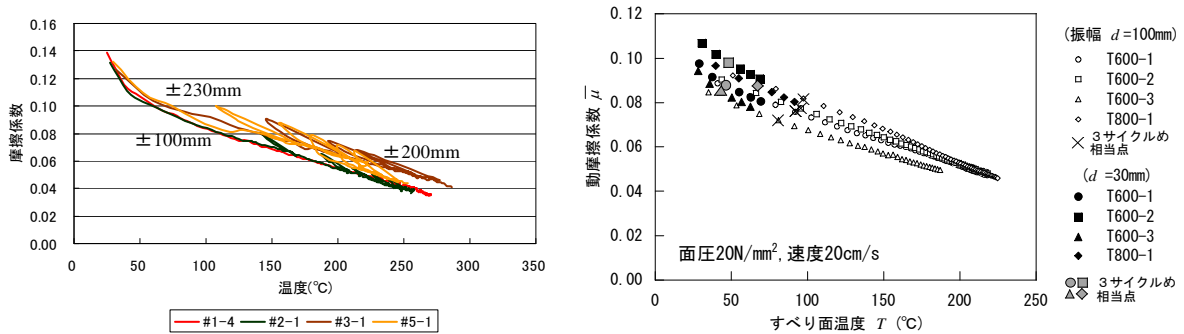
第Ⅲ部第1章 1.3.4 に示したφ300 試験体の実験により、累積変形 100m 相当までの範囲で、温度上昇に伴う摩擦係数の低下傾向、インターバル加振時の摩擦の復元などが確認された。温度や累積変形量に対する摩擦係数の変化傾向を分析し、摩擦特性モデルに取り込んで同モデルの適用範囲拡大を図る。

○多数回繰り返し実験結果の分析

すべり板温度、累積吸収エネルギー、累積変位量に対する摩擦係数の変化傾向を把握するため、各パラメータに関する単回帰分析を実施し、各パラメータに対する依存性を定式化した。

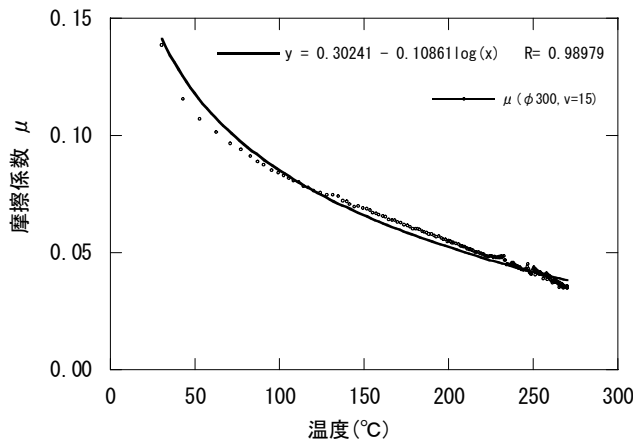
分析対象ケースは、インターバル無しで連続で行った限界試験（試験体#1-4、面圧 20N/mm²、変位振幅±100mm、連続 250 回載荷、累積変形 100m）とした。既往の知見により、摩擦係数の変化にはすべり面の温度影響が大きいと考えられるので、累積変位量としては摩擦発熱量との関連付けが容易な累積すべり変位量を採用した。図 1.3.4-1～3 に実験結果および既往の評価結果と回帰結果を示す。

各パラメータに対する摩擦傾向の減少傾向は、いずれも対数近似により良好に回帰されている。



(a) 実験結果

(b) 既往の評価結果* (φ 600, φ 800)



(c) 実験結果の回帰（#1-4 限界試験）

図 1.3.4-1 摩擦係数—すべり板温度関係

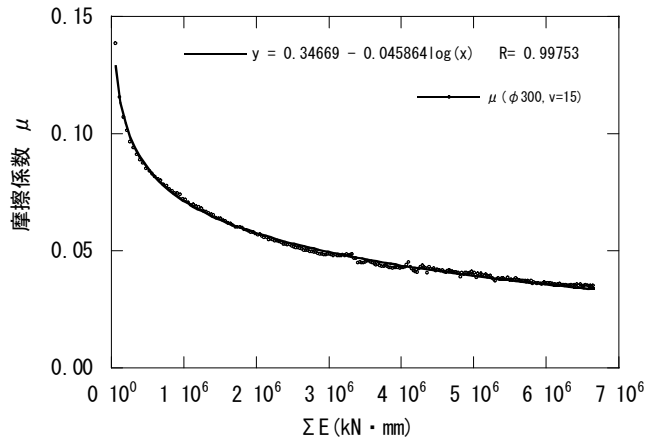
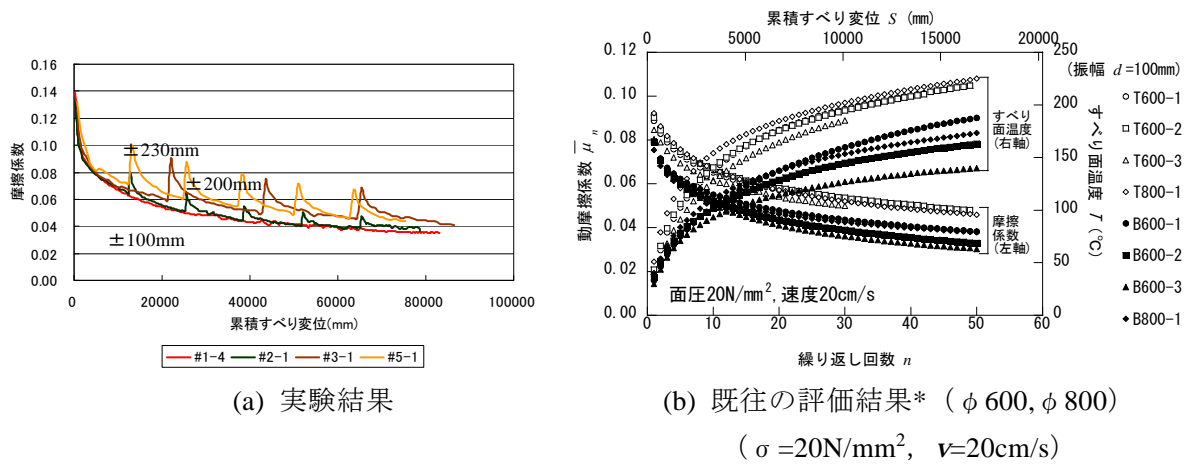
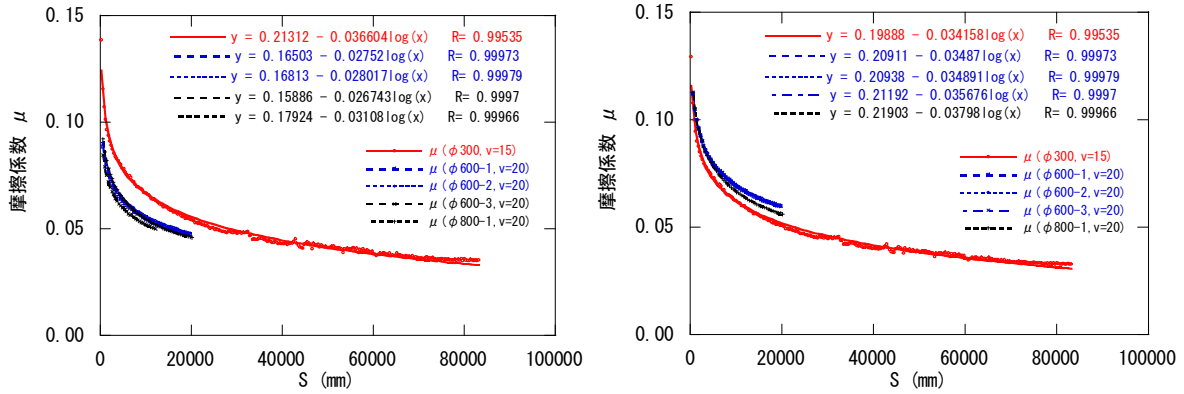


図 1.3.4-2 摩擦係数－累積吸収エネルギー関係（実験結果）



(a) 実験結果

(b) 既往の評価結果* (φ600, φ800)
(σ=20N/mm², v=20cm/s)



(c) 実験結果の回帰（#1-4 限界試験）

(d) 3 サイクルめで基準化

図 1.3.4-3 摩擦係数－累積すべり変位関係

*日比野浩、高木政美、勝田庄二：実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 574 号、pp.45-52、2003.12

○復元力特性モデルの作成

長周期地震動に対する免震建築物の応答特性把握に供するための、支承の多数回繰り返し特性を表現するパラメータを選定し、修正復元力特性モデルを作成する。

前述のように、多数回繰り返し特性を表す指標として、すべり板温度、累積吸収エネルギー、累積すべり変位量などを用いることが可能であることが示された。特に累積吸収エネルギーまたは累積すべり変位を用いると、摩擦係数の低下傾向が対数近似により良好に回帰できることを確認できた。両パラメータは、地震応答解析による応答値により摩擦係数を決定できるので、熱伝導解析を介することなく応答解析が行える利点がある。

以下では、摩擦係数 μ の速度 v 、累積吸収エネルギー E （または累積すべり変位 S ）の両パラメータに関する依存性を表現する以下の関数型を用いた重回帰分析を行う。

$$\mu(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log E(t) - \log E_0) + b \quad (1.3.4-1)$$

$$\mu(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log S(t) - \log S_0) + b \quad (1.3.4-2)$$

ここに a 、 b は回帰係数である。例として図1.3.4-4に v 、 S 軸を対数軸として、式(1.3.4-2)で表される曲面を3次元座標空間に表現したものを示す。式(1.3.4-1)、式(1.3.4-2)式の定数 v_0 、 S_0 は、 μ が一定値 b となる速度、累積吸収エネルギー、累積すべり変位を表す。表1.3.4-1に、実験により得られた回帰結果を既往の評価結果と併せて示す。また、実験結果による回帰曲面を図1.3.4-5に示す。

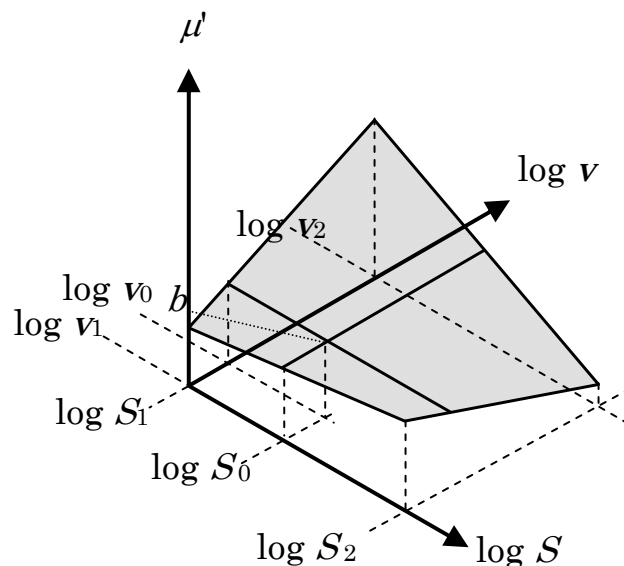


図 1.3.4-4 速度・すべり変位依存性の面回帰モデル

表 1.3.4-1 回帰結果一覧

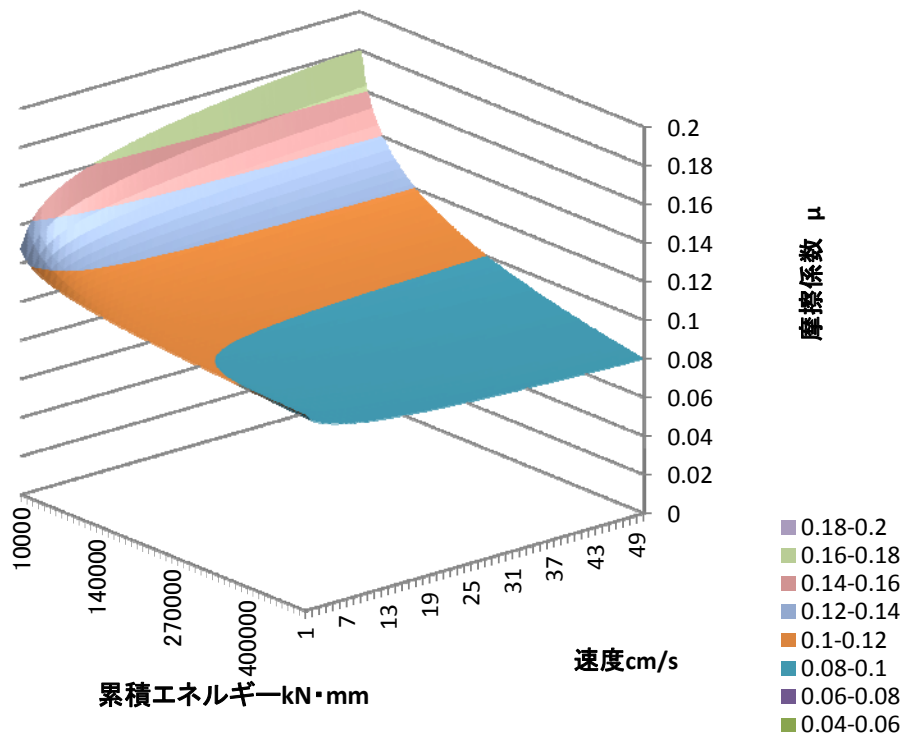
(a)累積吸収エネルギー依存

| | 面圧 σ (N/mm ²) | 使用データ範囲 | | | | 使用データ範囲 | | | |
|------------------------|--|------------|-----------|-----------------|-------------------|---------------|-------------|----------------|--------------|
| | | a | b | v_0 (cm/s) | $*E_0$ (kN·mm) | v (cm/s) | | E (kN·mm) | |
| | | | | | | 下限 v_1 | 上限 v_2 | 下限 $*E_1$ | 上限 $*E_2$ |
| 実験結果 (変位 ±100mm) | 20 | -2.575E-02 | 1.086E-01 | 2.546E-01 | 1.638E+05 | 15 | 37 | 7.600E+02 | 6.643E+06 |

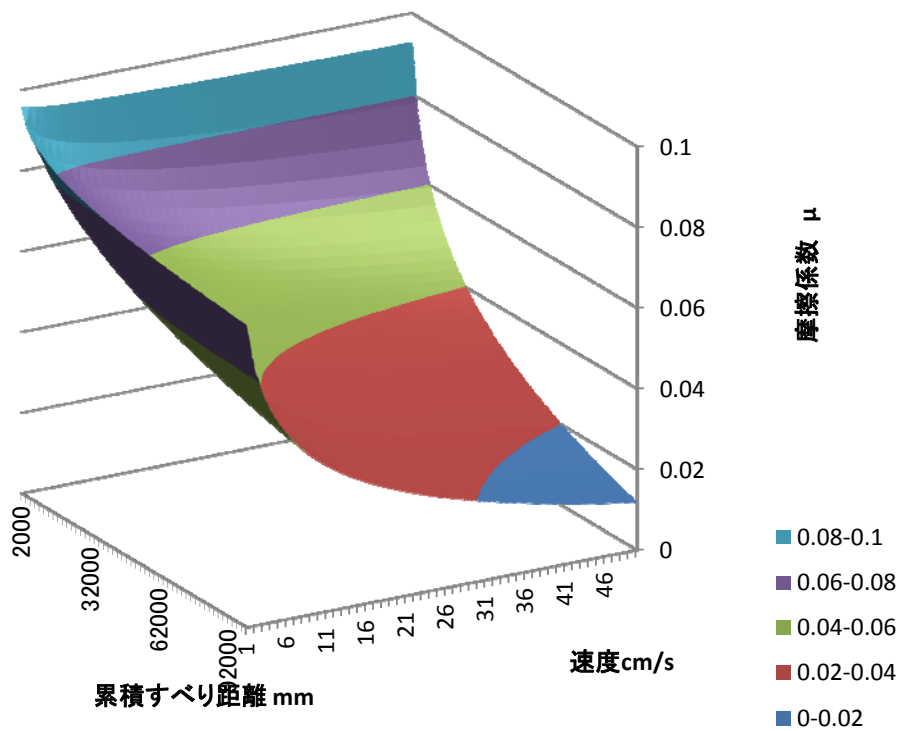
*注：φ300、面圧 20mm²の値であり、免震層ですべりが負担する軸力の比率で係数倍して用いる。

(b)累積すべり変位依存

| | 面圧 σ (N/mm ²) | 使用データ範囲 | | | | 使用データ範囲 | | | |
|------------------------|--|------------|-----------|-----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| | | a | b | v_0 (cm/s) | S_0 (mm) | v (cm/s) | | S (mm) | |
| | | | | | | 下限 v_1 | 上限 v_2 | 下限 S_1 | 上限 S_2 |
| 実験結果 (変位 ±100mm) | 20 | -2.079E-02 | 9.684E-02 | 2.545E-01 | 1.638E+03 | 15 | 37 | 257 | 83155 |
| 参考) | 10 | -2.070E-02 | 9.010E-02 | 1.412E+00 | 1.470E+03 | 0.4 | 60 | 110 | 2050 |
| 既往評価結果 (φ600,800) | 20 | -1.310E-02 | 7.120E-02 | 2.546E-01 | 1.638E+03 | 0.4 | 60 | 112 | 2048 |



(a) 累積吸収エネルギー依存

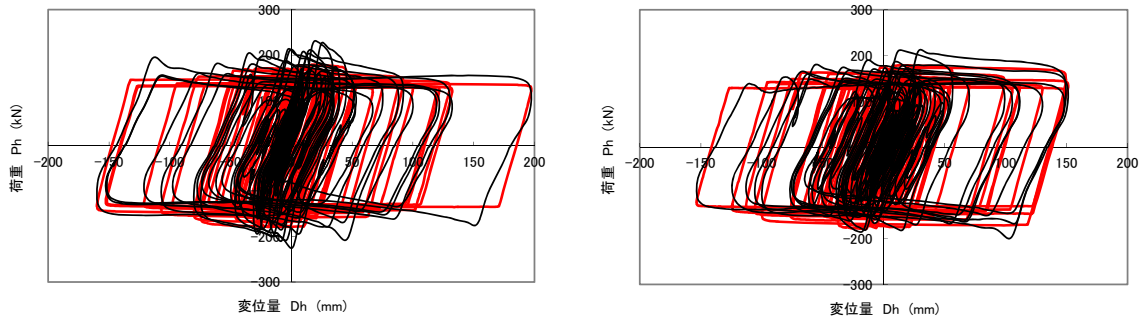


(b) 累積すべり変位依存

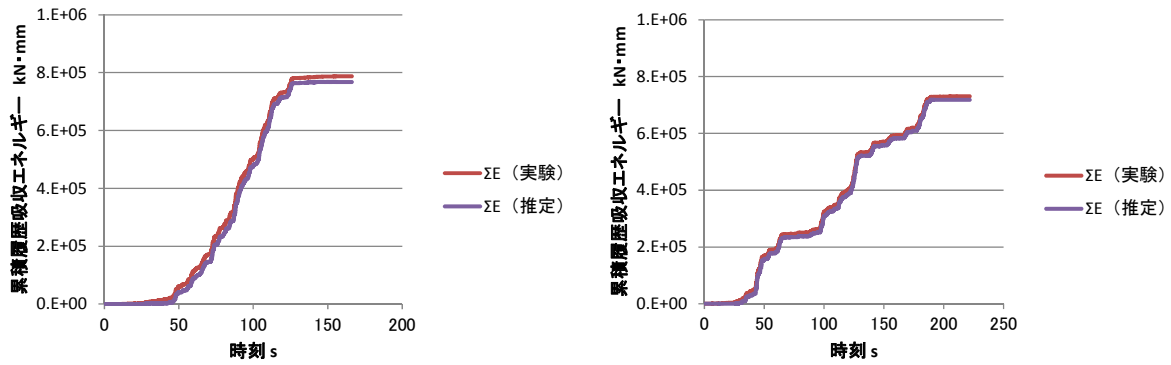
図 1.3.4-5 重回帰分析結果 (変位±100mm、 $\sigma = 20\text{N/mm}^2$)

○復元力モデルの再現性確認

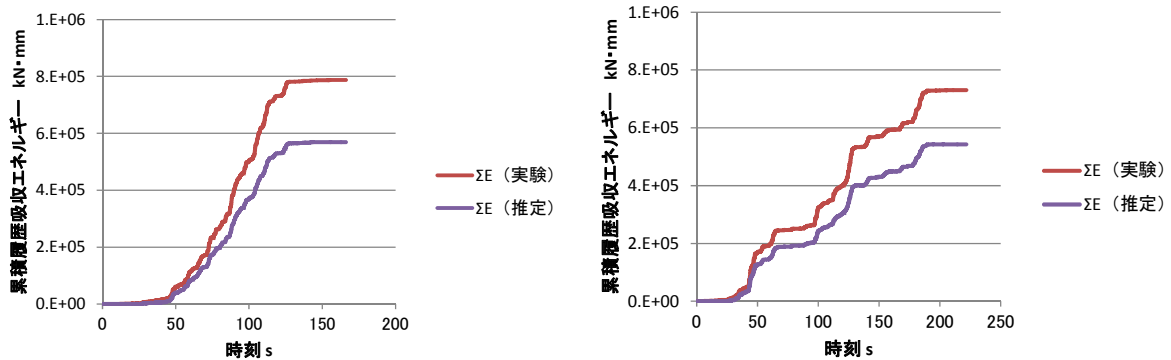
前項に示した摩擦係数の繰り返し依存モデルにより、実験で実施した地震応答波加振による履歴の再現を試みる。地震波加振の2ケース（AIC003、OSKH02）について、ステップ毎の摩擦係数を式(1.3.4-2)により評価し、荷重-変位関係を実験結果と比較した。図 1.3.4-6 に評価結果を示す。評価では積層ゴム部の1次剛性を9.0kN/mm、累積すべり変位の初期値 $S_{\text{initial}} = 257\text{mm}$ とした。地震波加振は非連続すべり状態となるため S の低減係数を0.08とした。



(黒：実験結果、赤：推定結果)



(参考：S の低減係数 1.0 の場合)



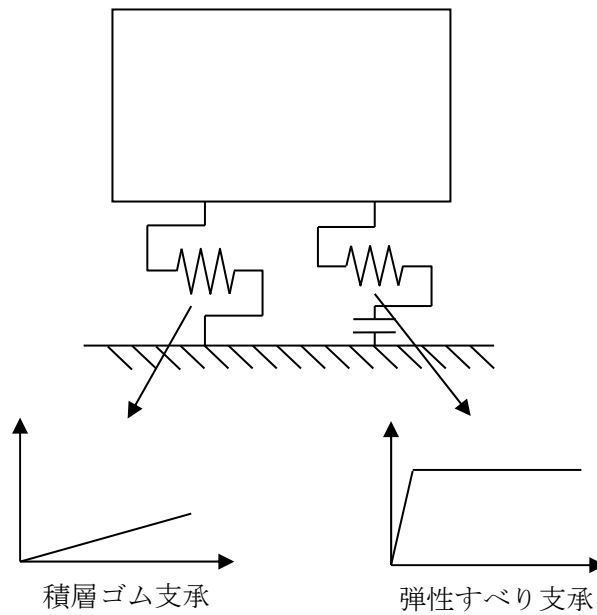
(a) AIC003

(b) OSKH02

図 1.3.4-6 荷重-変位関係および累積履歴吸収エネルギーの推移の比較

(2) 解析条件

本検討では、長周期地震動に対する摩擦係数の累積すべり変位依存性による応答変位の増幅を、簡易的に評価できる手法を提案することを目的とする。解析モデルを図 1.3.4-7 に示す上部構造を剛体とした 1 質点系モデルとする。



モデル諸元

| | |
|----------------|-----------------------------|
| 建物重量 | W=51453.9kN |
| 弾性すべり支承負担軸力 | Ns=20920.1kN |
| 基準摩擦係数 μ_0 | $\mu_0=0.112$ |
| 弾性すべり支承水平耐力 | Qy=2343.0kN(Ci=0.046) |
| 弾性すべり支承平均面圧 | $\sigma =15.0\text{N/mm}^2$ |
| 弾性周期 | T1=1.0s |
| 免震周期 | T2=4.0s |
| 考慮する依存性 | 累積すべり変位による摩擦係数 |

図 1.3.4-7 解析モデル

(3) 検討結果

a) 設計モデル・依存性モデル応答履歴比較

累積すべり変位・累積吸収エネルギー考慮した摩擦係数低下モデル(以後、依存性モデル)および基準摩擦係数 μ_0 一定バイリニア型の非線形モデル(以後、設計モデル)、各モデルにおける履歴ループ比較を示す。

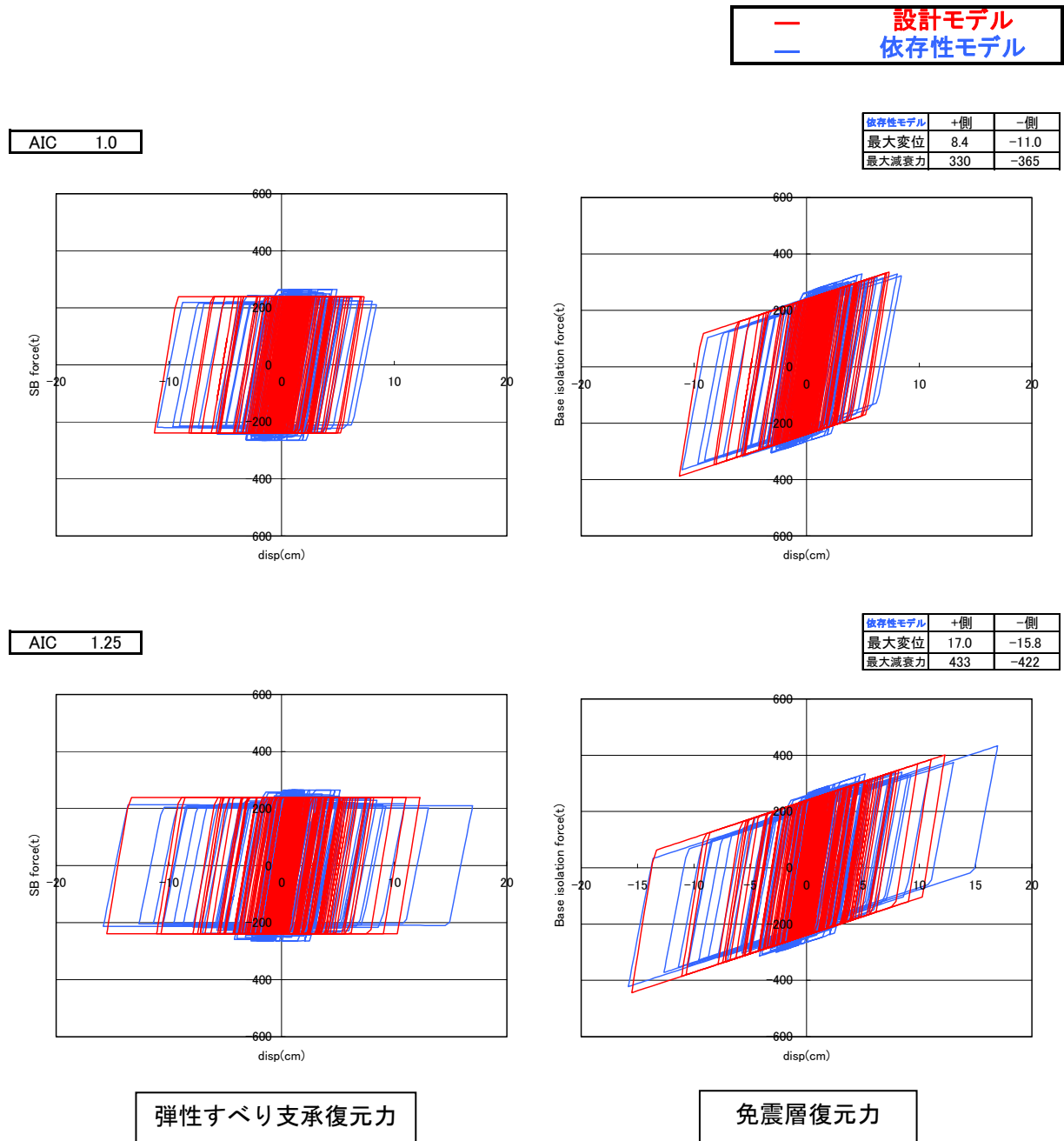
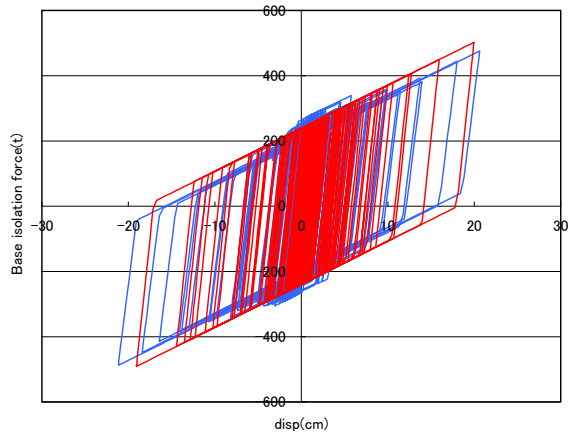
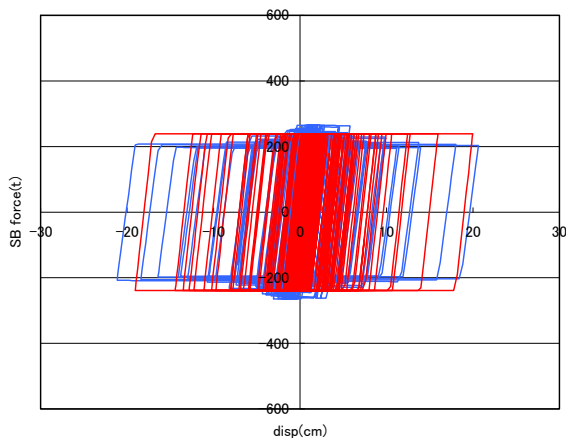


図 1.3.4-8(1) 応答履歴

— 設計モデル
— 依存性モデル

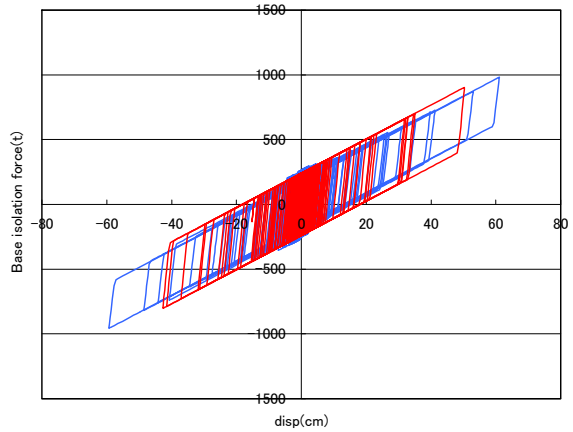
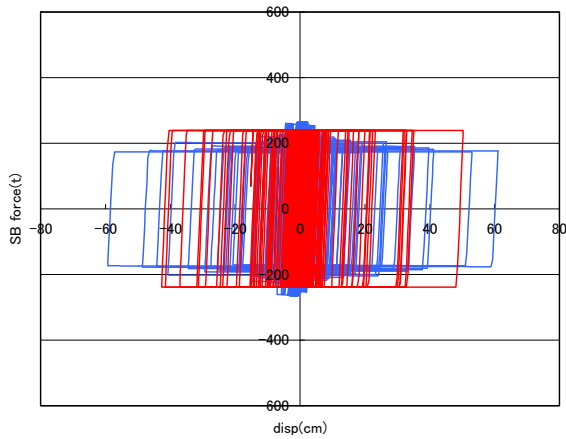
AIC 1.50

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|------|-------|
| 最大変位 | 20.6 | -21.2 |
| 最大減衰力 | 476 | -488 |



4連動
AIC 1.00

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|------|-------|
| 最大変位 | 61.1 | -59.3 |
| 最大減衰力 | 982 | -957 |



弾性すべり支承復元力

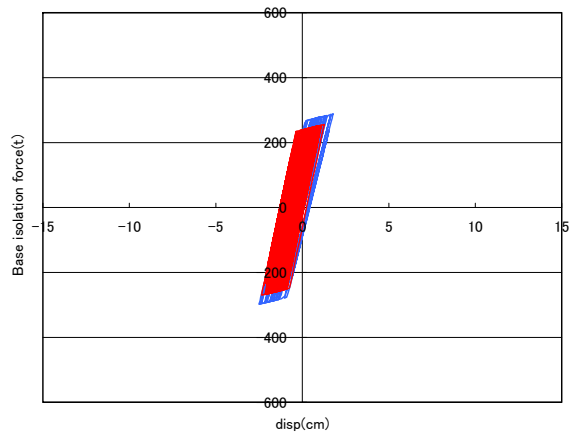
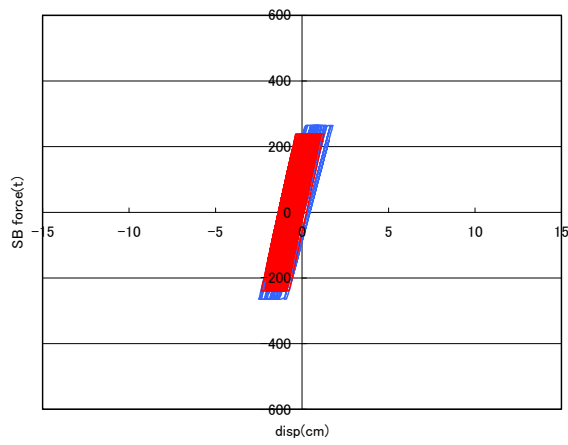
免震層復元力

図 1.3.4-8(2) 応答履歴

— 設計モデル
— 依存性モデル

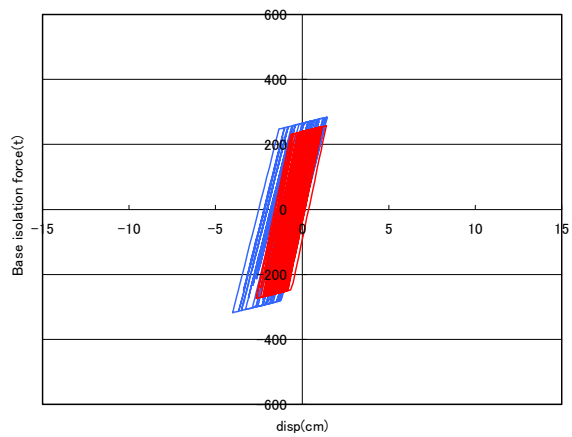
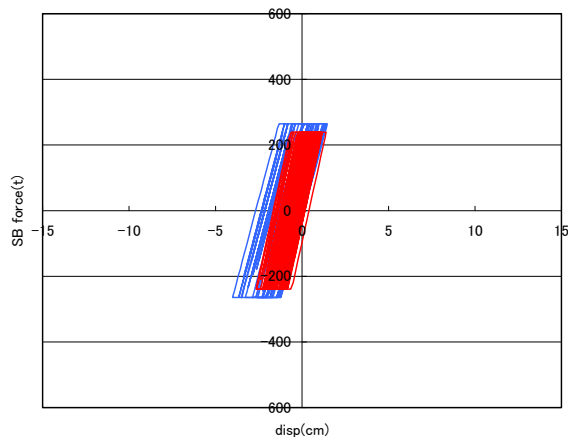
KGIN 1.0

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|-----|------|
| 最大変位 | 1.8 | -2.5 |
| 最大減衰力 | 288 | -298 |



KGIN 1.25

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|-----|------|
| 最大変位 | 1.5 | -4.0 |
| 最大減衰力 | 284 | -318 |



弾性すべり支承復元力

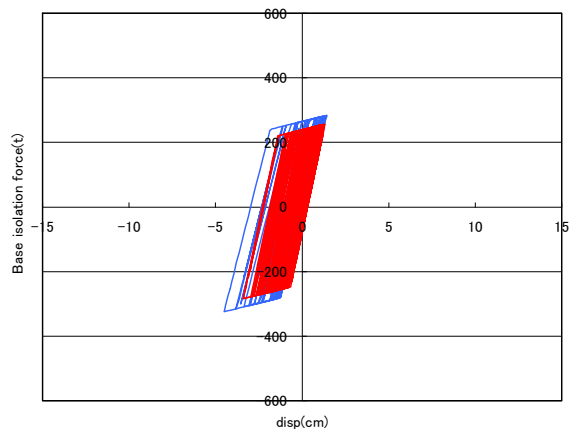
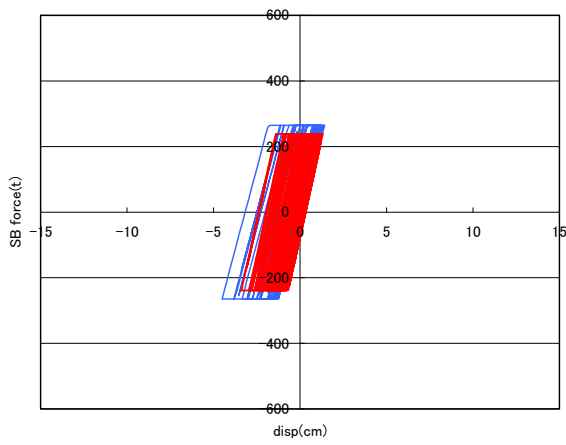
免震層復元力

図 1.3.4-8(3) 応答履歴

— 設計モデル
— 依存性モデル

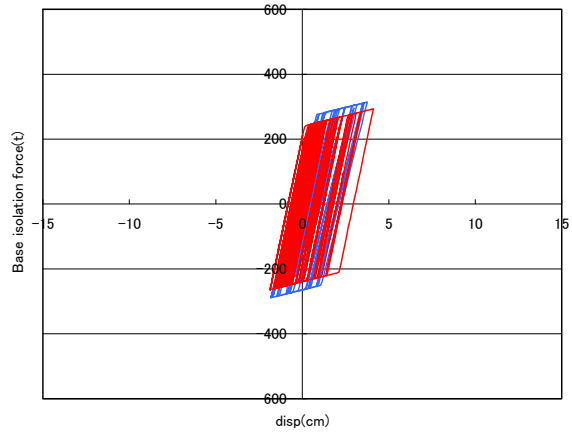
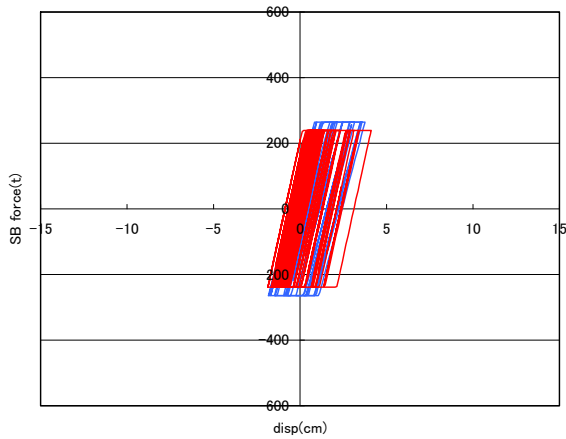
KGIN 1.50

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|-----|------|
| 最大変位 | 1.4 | -4.5 |
| 最大減衰力 | 283 | -324 |



4連動
KGIN 1.00

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|-----|------|
| 最大変位 | 3.8 | -1.8 |
| 最大減衰力 | 314 | -289 |



弾性すべり支承復元力

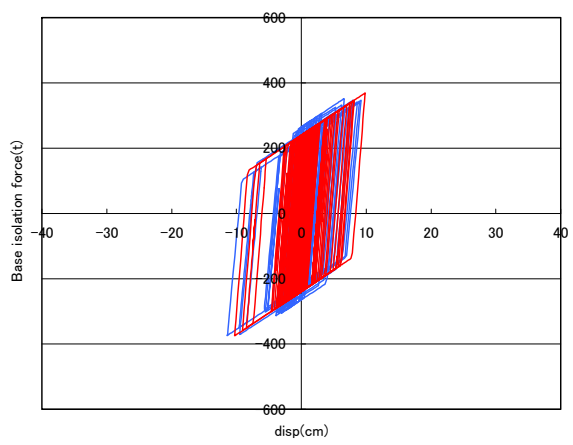
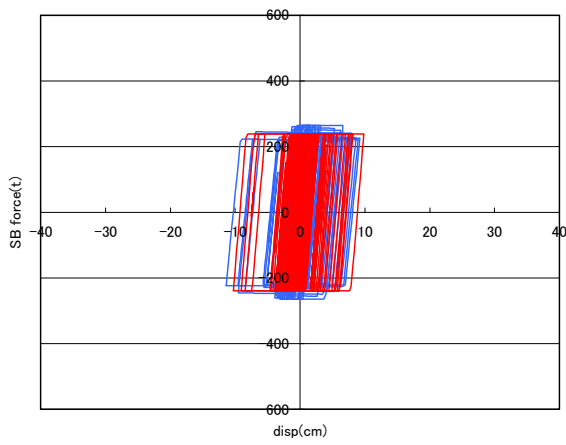
免震層復元力

図 1.3.4-8(4) 応答履歴

— 設計モデル
— 依存性モデル

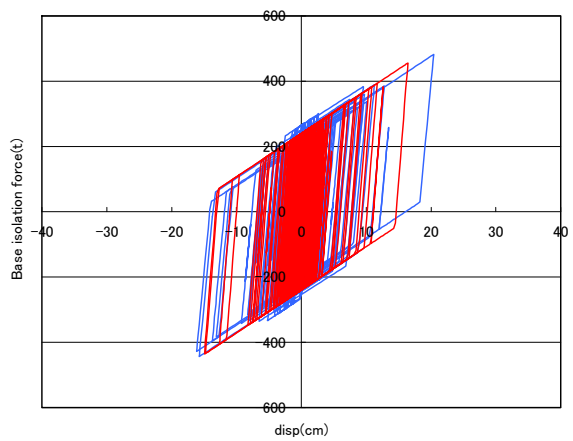
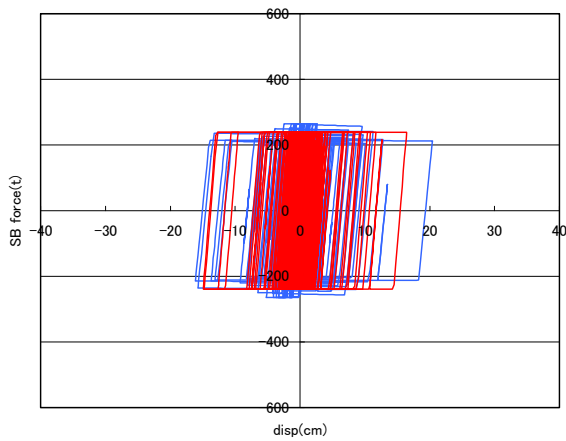
OSK 1.0

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|-----|-------|
| 最大変位 | 9.2 | -11.4 |
| 最大減衰力 | 352 | -374 |



OSK 1.25

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|------|-------|
| 最大変位 | 20.4 | -16.1 |
| 最大減衰力 | 482 | -443 |



弾性すべり支承復元力

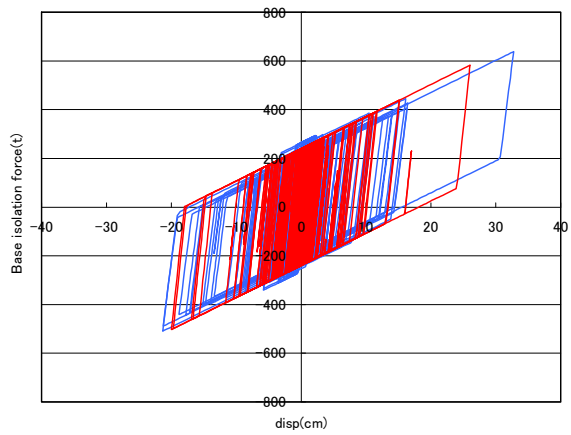
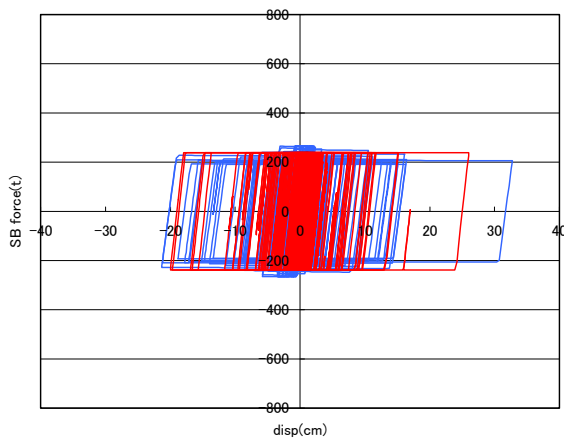
免震層復元力

図 1.3.4-8(5) 応答履歴

— 設計モデル
— 依存性モデル

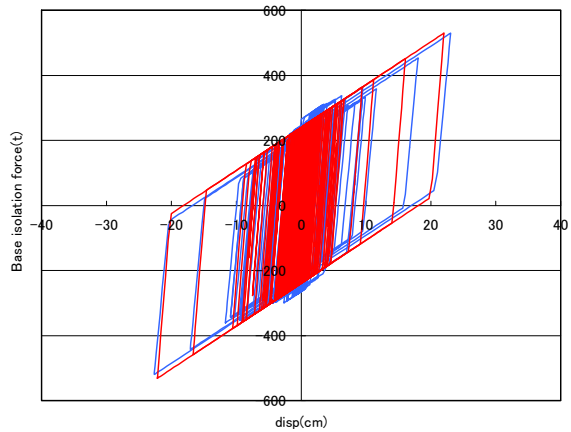
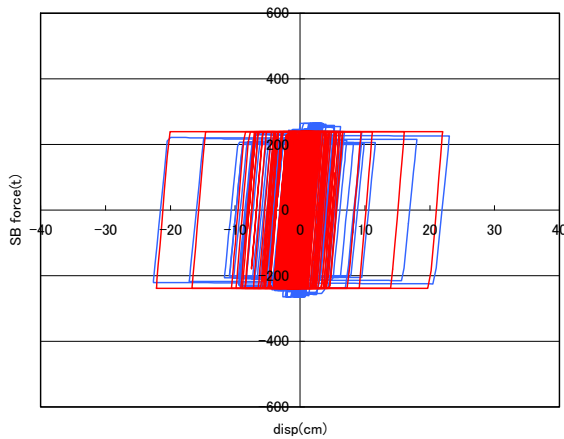
OSK 1.50

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|------|-------|
| 最大変位 | 32.7 | -21.3 |
| 最大減衰力 | 638 | -509 |



4連動
OSK 1.00

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|------|-------|
| 最大変位 | 23.0 | -22.6 |
| 最大減衰力 | 529 | -520 |



弾性すべり支承復元力

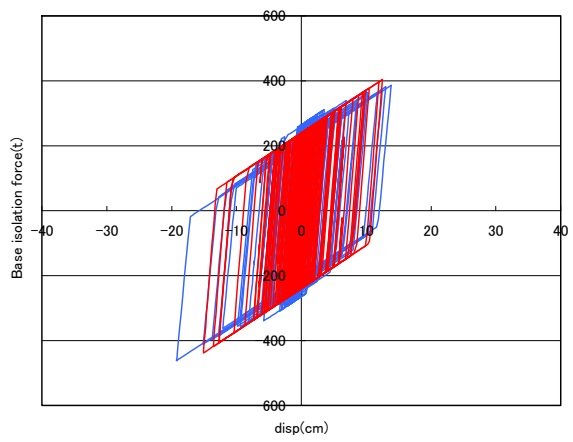
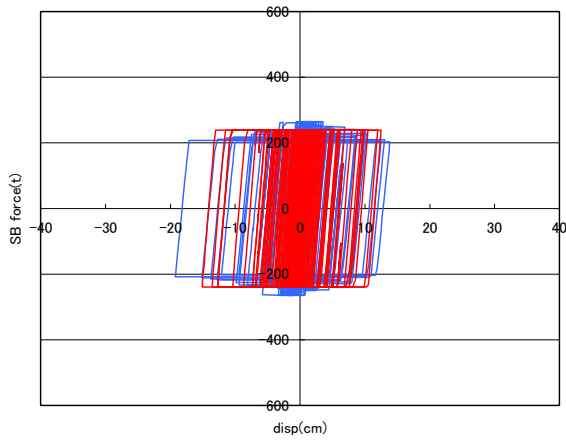
免震層復元力

図 1.3.4-8(6) 応答履歴

— 設計モデル
— 依存性モデル

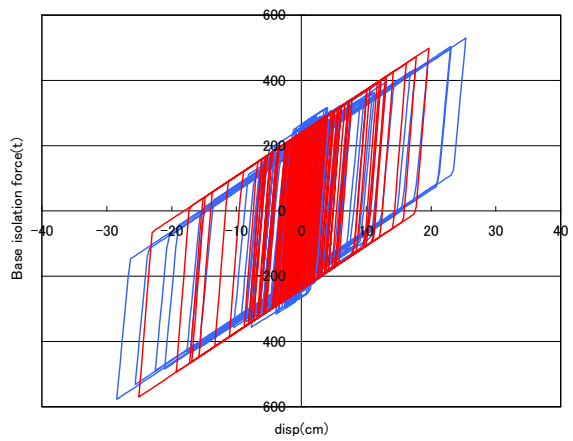
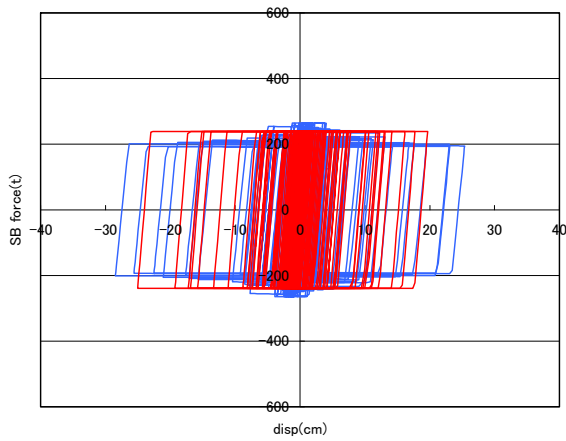
SHO 1.0

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|------|-------|
| 最大変位 | 13.8 | -19.2 |
| 最大減衰力 | 386 | -462 |



SHO 1.25

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|------|-------|
| 最大変位 | 25.4 | -28.5 |
| 最大減衰力 | 530 | -577 |



弾性すべり支承復元力

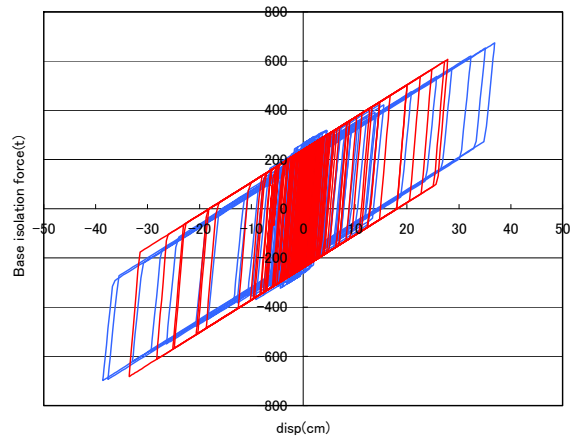
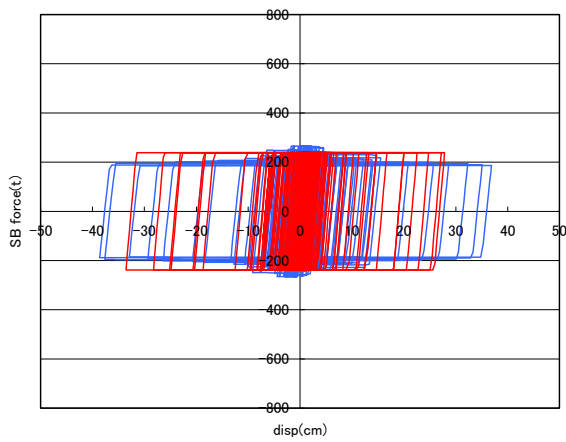
免震層復元力

図 1.3.4-8(7) 応答履歴

— 設計モデル
— 依存性モデル

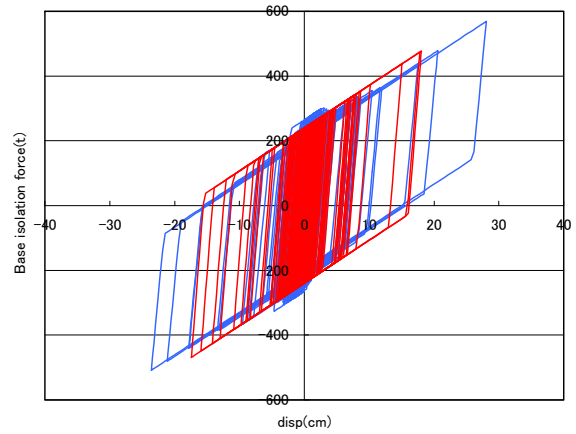
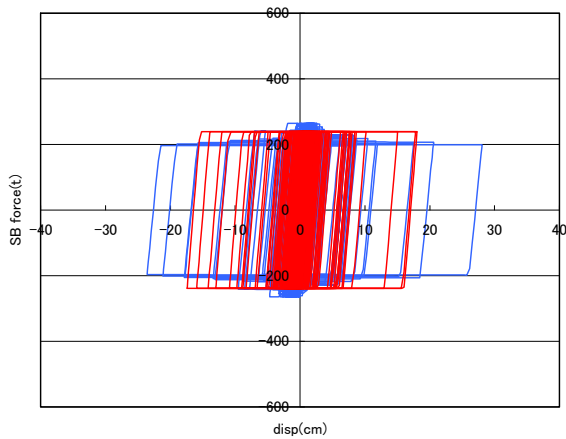
SZO 1.50

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|------|-------|
| 最大変位 | 36.9 | -38.6 |
| 最大減衰力 | 674 | -698 |



4連動
SZO 1.00

| 依存性モデル | +側 | -側 |
|--------|------|-------|
| 最大変位 | 28.1 | -23.6 |
| 最大減衰力 | 569 | -509 |



弾性すべり支承復元力

免震層復元力

図 1.3.4-8(8) 応答履歴

設計モデルおよび依存性モデルの最大変位一覧を下表に示す。また、最大変形プロット図を示す。設計モデルよりも依存性モデルの方が、最大変形が大きい傾向が確認できる。最大で設計モデルの1.56倍の変位が生じている。このことから、既往の設計モデルで想定している免震層最大変位よりも過大な変形が生じる可能性が考えられる。

表 1.3.4-2 最大値一覧

| AIC-1.0 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 11.3 | 11.0 | 0.98 |
| 最大減衰力 t | 387.7 | 365.0 | 0.94 |

| KGIN-1.0 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 2.4 | 2.5 | 1.06 |
| 最大減衰力 t | 270.1 | 298.0 | 1.10 |

| AIC-1.25 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 15.5 | 17.0 | 1.10 |
| 最大減衰力 t | 443.7 | 433.0 | 0.98 |

| KGIN-1.25 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 2.7 | 4.0 | 1.50 |
| 最大減衰力 t | 274.2 | 318.0 | 1.16 |

| AIC-1.5 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 20.0 | 21.2 | 1.06 |
| 最大減衰力 t | 502.5 | 488.0 | 0.97 |

| KGIN-1.5 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 3.4 | 4.5 | 1.32 |
| 最大減衰力 t | 284.1 | 324.0 | 1.14 |

| 4連動AIC-1.0 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|------------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 50.3 | 61.1 | 1.21 |
| 最大減衰力 t | 903.2 | 982.0 | 1.09 |

| 4連動KGIN-1.0 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-------------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 4.1 | 3.8 | 0.92 |
| 最大減衰力 t | 293.3 | 314.0 | 1.07 |

| OSK-1.0 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 10.3 | 11.4 | 1.11 |
| 最大減衰力 t | 374.6 | 374.0 | 1.00 |

| SZO-1.0 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 15.1 | 19.2 | 1.27 |
| 最大減衰力 t | 438.2 | 462.0 | 1.05 |

| OSK-1.25 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 16.4 | 20.4 | 1.24 |
| 最大減衰力 t | 456.0 | 482.0 | 1.06 |

| SZO-1.25 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 25.0 | 28.5 | 1.14 |
| 最大減衰力 t | 569.4 | 577.0 | 1.01 |

| OSK-1.5 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 26.0 | 32.7 | 1.26 |
| 最大減衰力 t | 582.5 | 638.0 | 1.10 |

| SZO-1.5 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|-----------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 33.5 | 38.6 | 1.15 |
| 最大減衰力 t | 681.9 | 698.0 | 1.02 |

| 4連動OSK-1.0 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|------------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 22.2 | 23.0 | 1.04 |
| 最大減衰力 t | 531.5 | 529.0 | 1.00 |

| 4連動SZO-1.0 | 設計モデル | 依存性モデル | 比率(依存性モデル/設計モデル) |
|------------|-------|--------|------------------|
| 最大変位 cm | 18.0 | 28.1 | 1.56 |
| 最大減衰力 t | 477.3 | 569.0 | 1.19 |

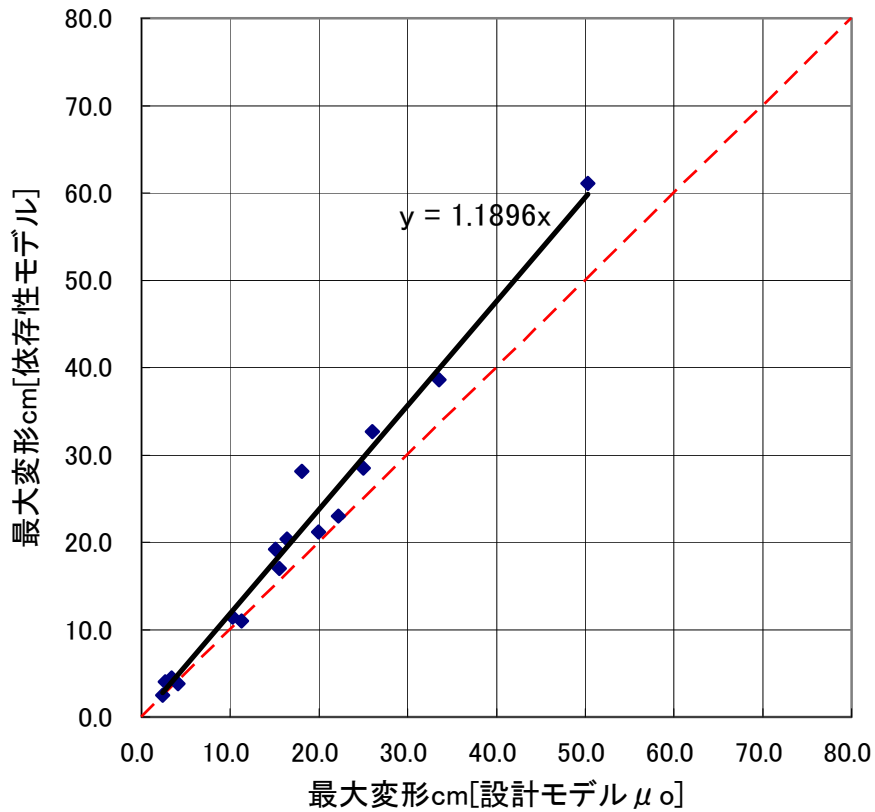


図 1.3.4-9 最大変形プロット図

■設計モデルと依存性モデルによる違い

- ・最大変形：通常設計で見込むばらつき以外に、繰り返し依存性により変形が増大する傾向がある。
- ・最大減衰力：繰り返し依存性により増加した減衰力と通常設計で見込むばらつき (+) 側の最大減衰力の大小関係で、上部構造への影響もありうる。

⇒本検討では繰り返し依存性による変形増大をターゲットにした簡易評価法を検討する。

b) 依存性モデルにおける摩擦係数低下傾向

依存性モデルの摩擦係数と累積すべり変位、累積すべりエネルギーの関係を示す。累積すべり変位・累積吸収エネルギーが過大なほど、摩擦係数の低減が大きいことが確認できる。

μ_0 : 設計モデルの基準摩擦係数=0.112

$\mu(t)$: 依存性モデルの最終ステップ時摩擦係数

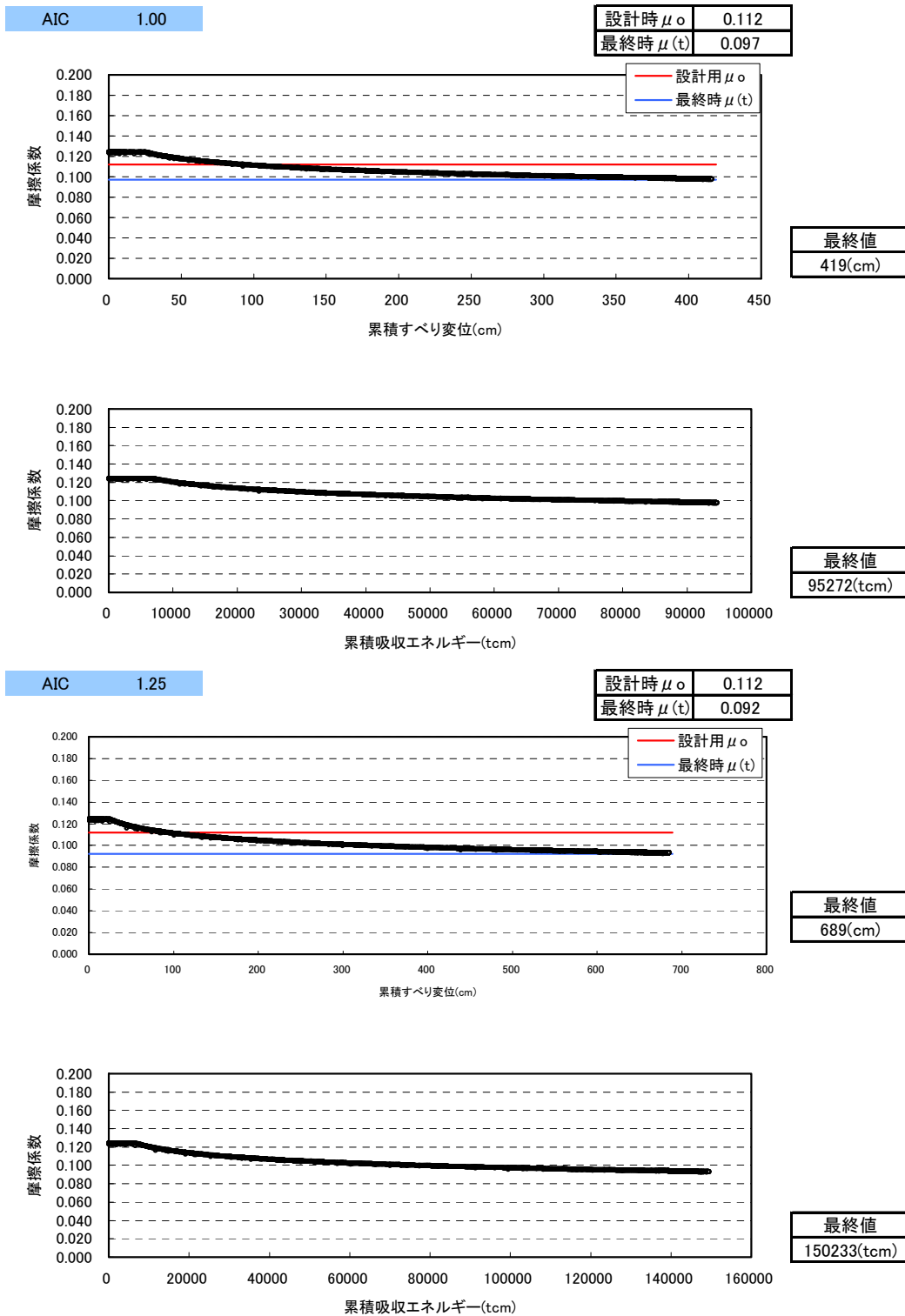
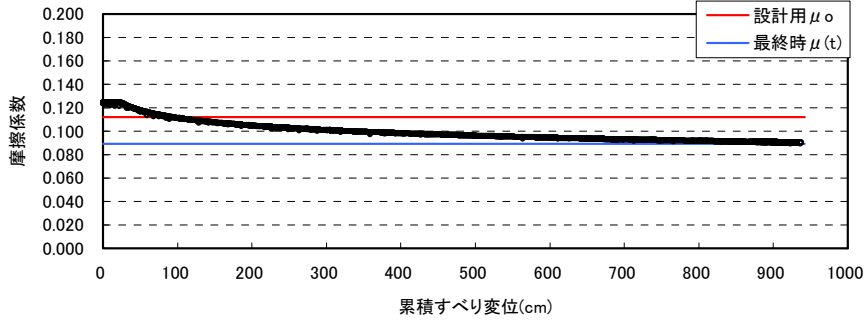


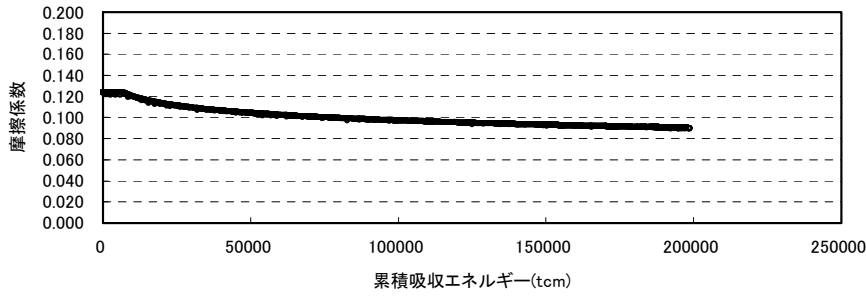
図 1.3.4-10(1) 摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

AIC 1.50

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.089 |



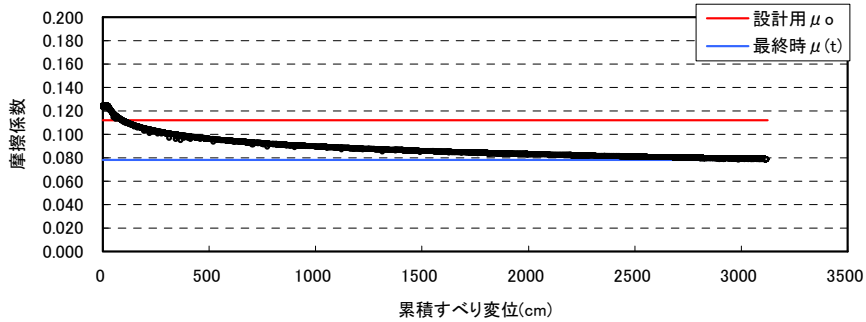
最終値
942(cm)



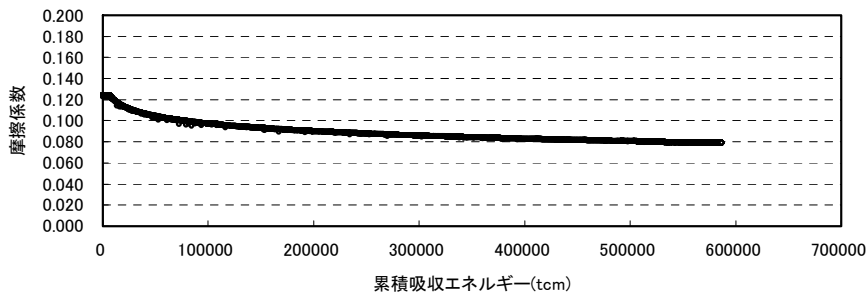
最終値
199568(tcm)

4連動
AIC 1.00

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.078 |



最終値
3125(cm)

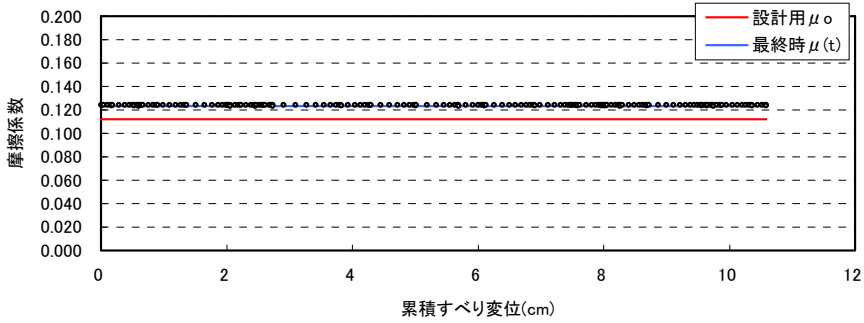


最終値
587879(tcm)

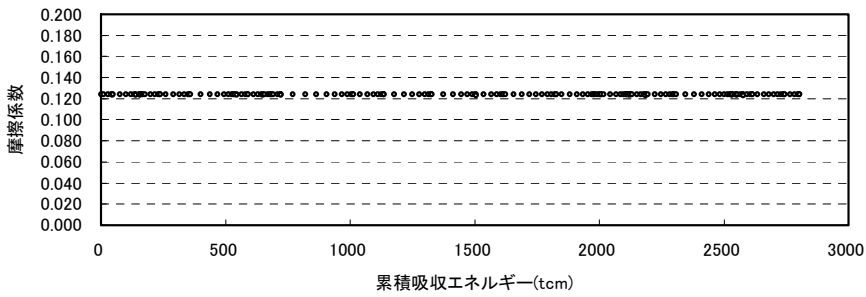
図 1.3.4-10(2) 摩擦係数—累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

KGIN 1.00

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.123 |



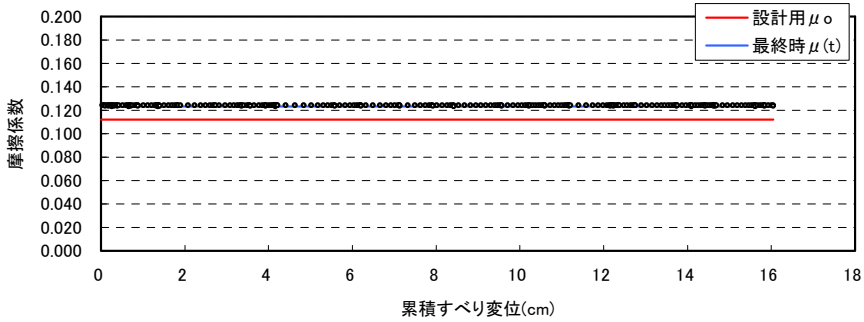
最終値
11(cm)



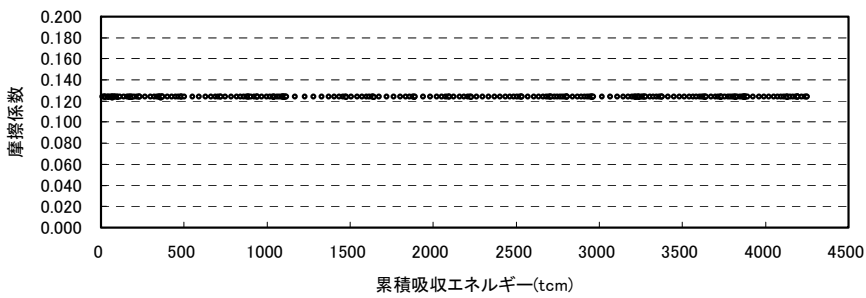
最終値
2804(tcm)

KGIN 1.25

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.123 |



最終値
16(cm)

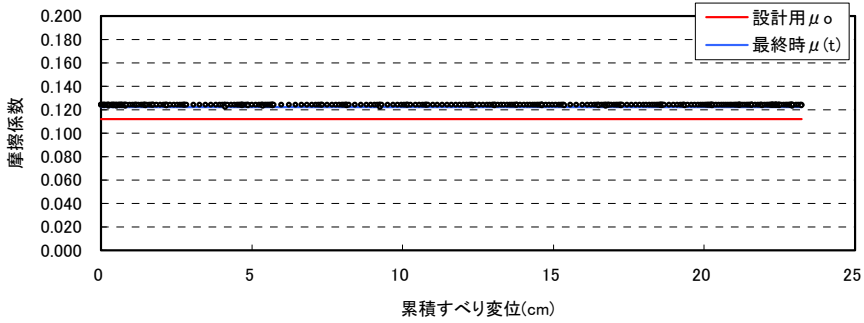


最終値
4250(tcm)

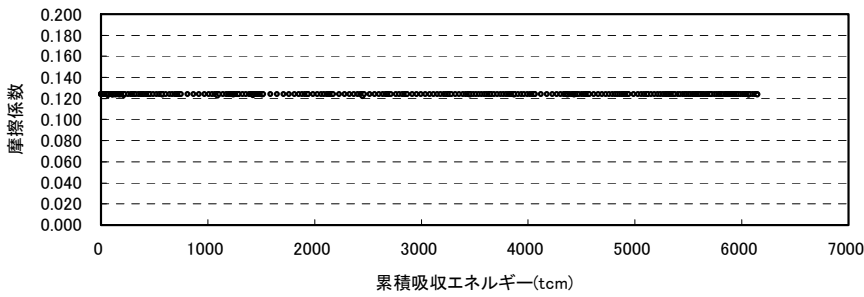
図 1.3.4-10(3) 摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

KGIN 1.50

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.122 |



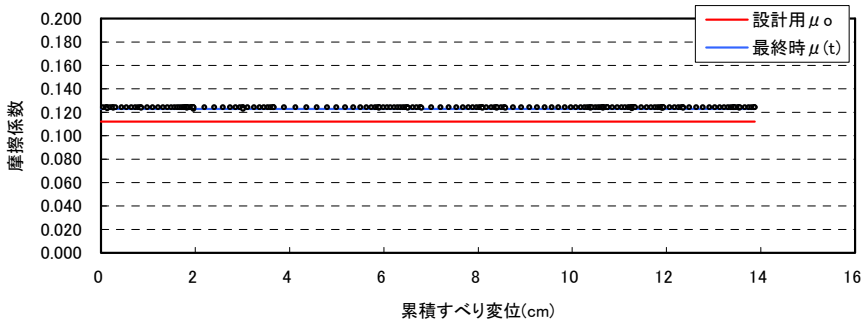
最終値
23(cm)



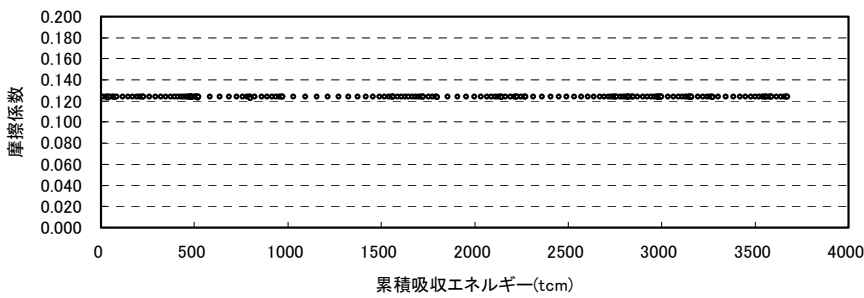
最終値
6149(tcm)

4連動
KGIN 1.00

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.123 |



最終値
14(cm)

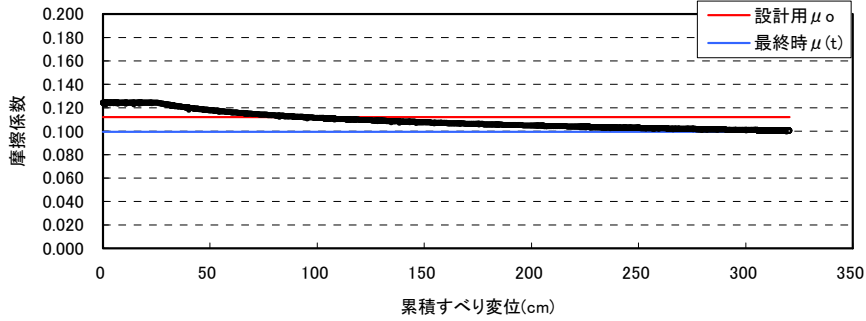


最終値
3673(tcm)

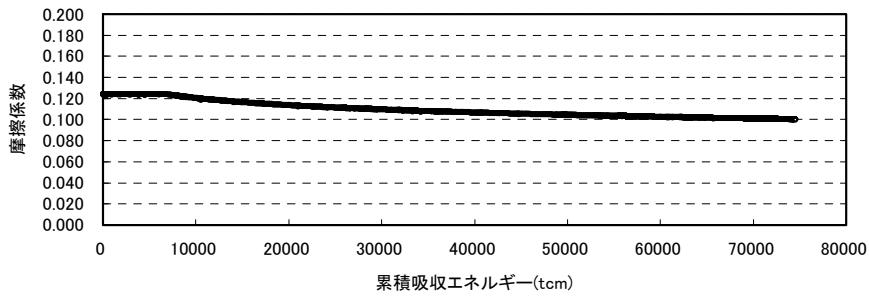
図 1.3.4-10(4) 摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

OSK 1.00

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.100 |



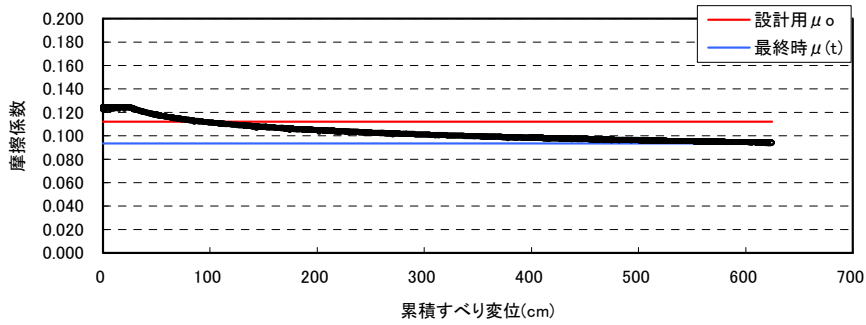
最終値
321(cm)



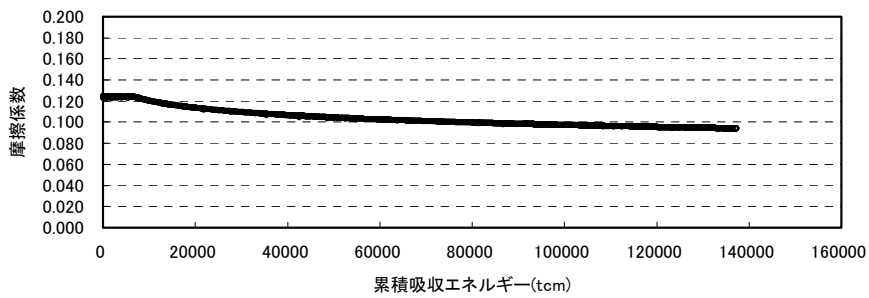
最終値
74529(tcm)

OSK 1.25

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.093 |



最終値
625(cm)

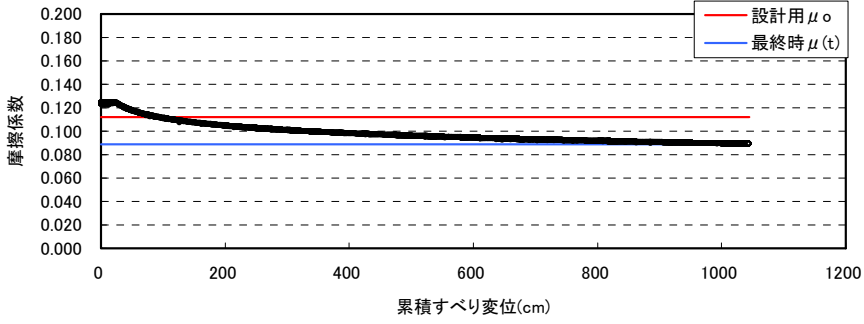


最終値
137366(tcm)

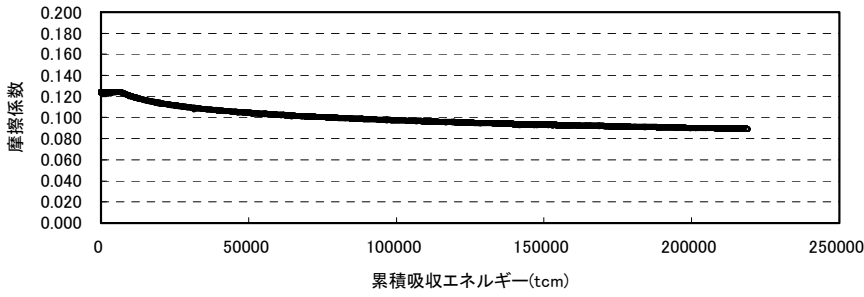
図 1.3.4-10(5) 摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

OSK 1.50

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.089 |



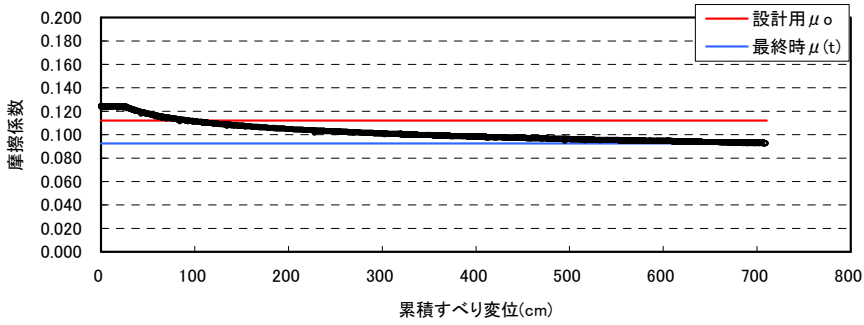
最終値
1044(cm)



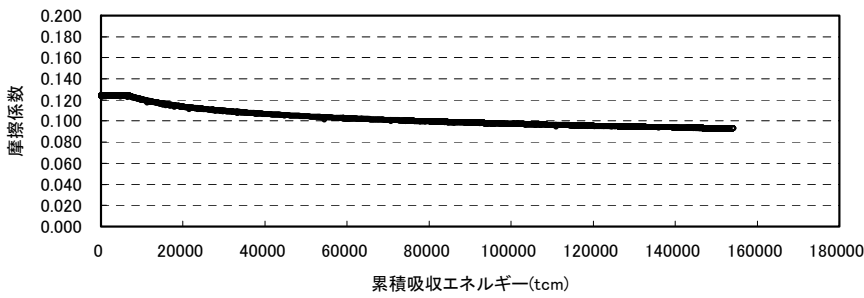
最終値
219155(tcm)

4連動 OSK 1.00

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.092 |



最終値
711(cm)

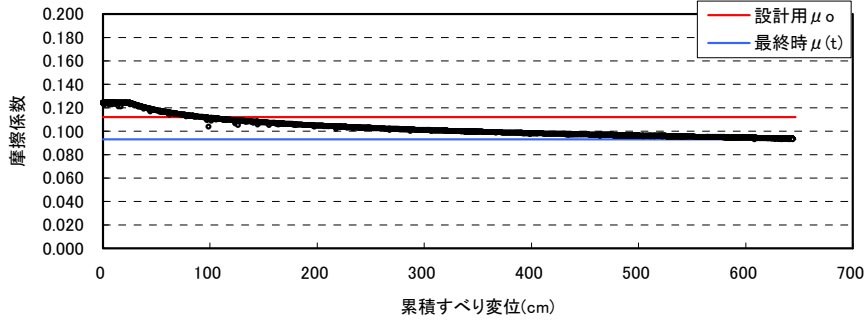


最終値
154438(tcm)

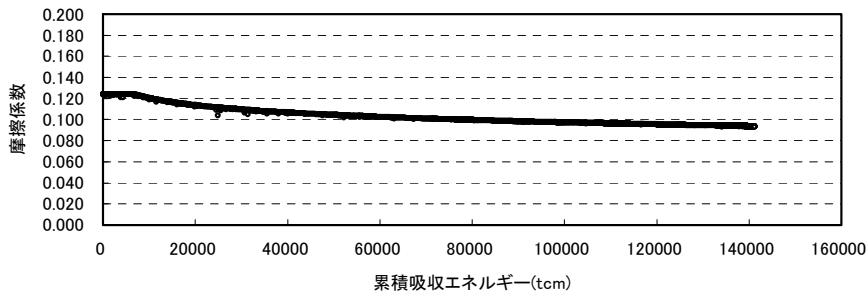
図 1.3.4-10(6) 摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

SZO 1.00

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.093 |



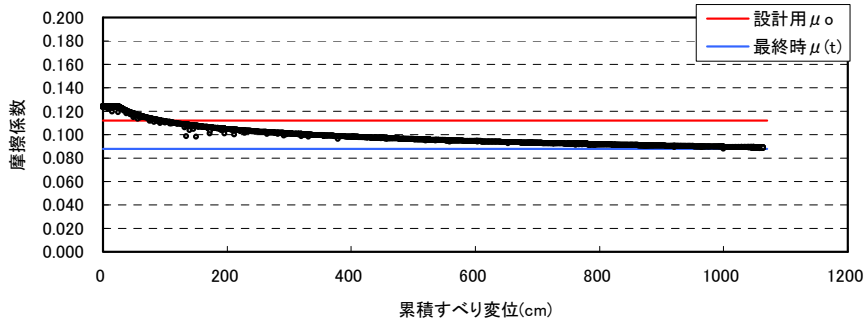
最終値
646(cm)



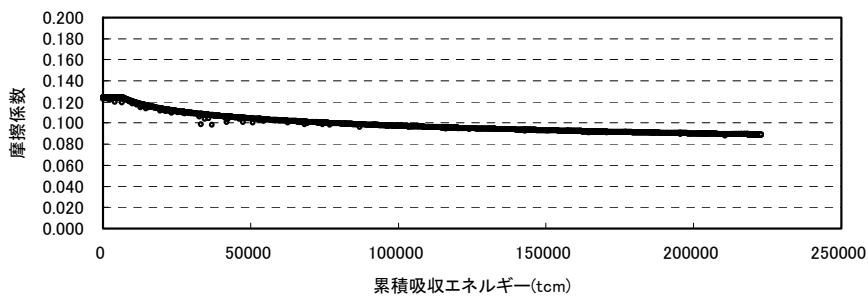
最終値
141666(tcm)

SZO 1.25

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.088 |



最終値
1070(cm)

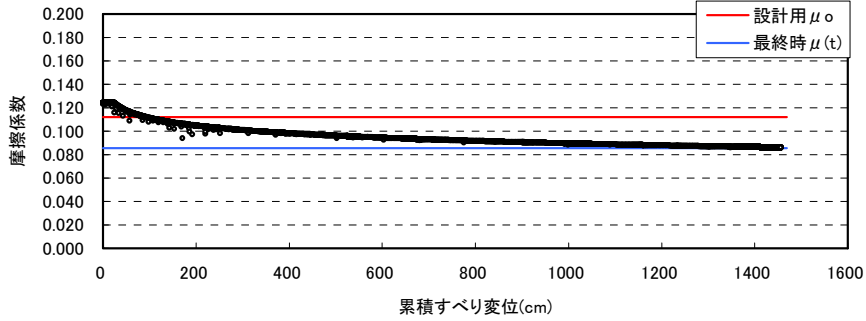


最終値
223968(tcm)

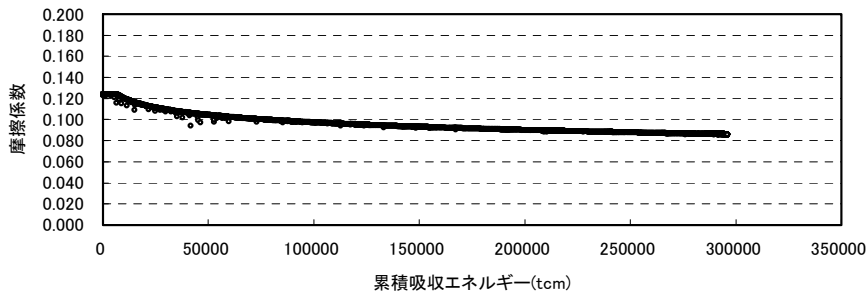
図 1.3.4-10(7) 摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

SZO 1.50

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.085 |



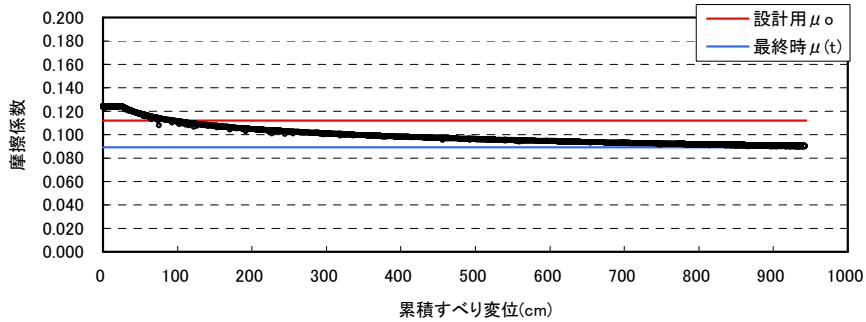
最終値
1468(cm)



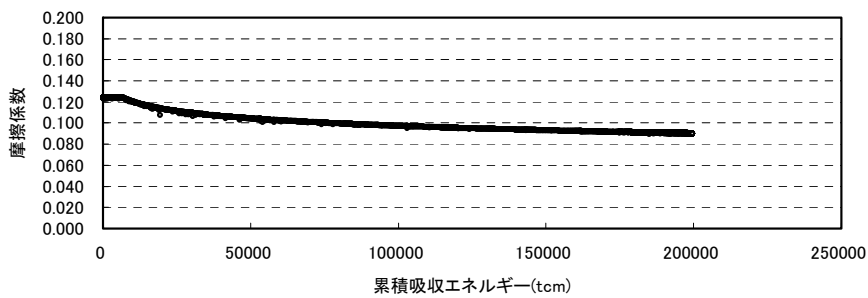
最終値
298271(tcm)

4連動
SZO 1.00

| | |
|--------------|-------|
| 設計時 μ_0 | 0.112 |
| 最終時 $\mu(t)$ | 0.089 |



最終値
944(cm)



最終値
200044(tcm)

図 1.3.4-10(8) 摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

c) 設計モデル応答時刻歴

設計モデル ($\mu_0=0.112$) における変形及び累積すべり変位の時刻歴を示す。

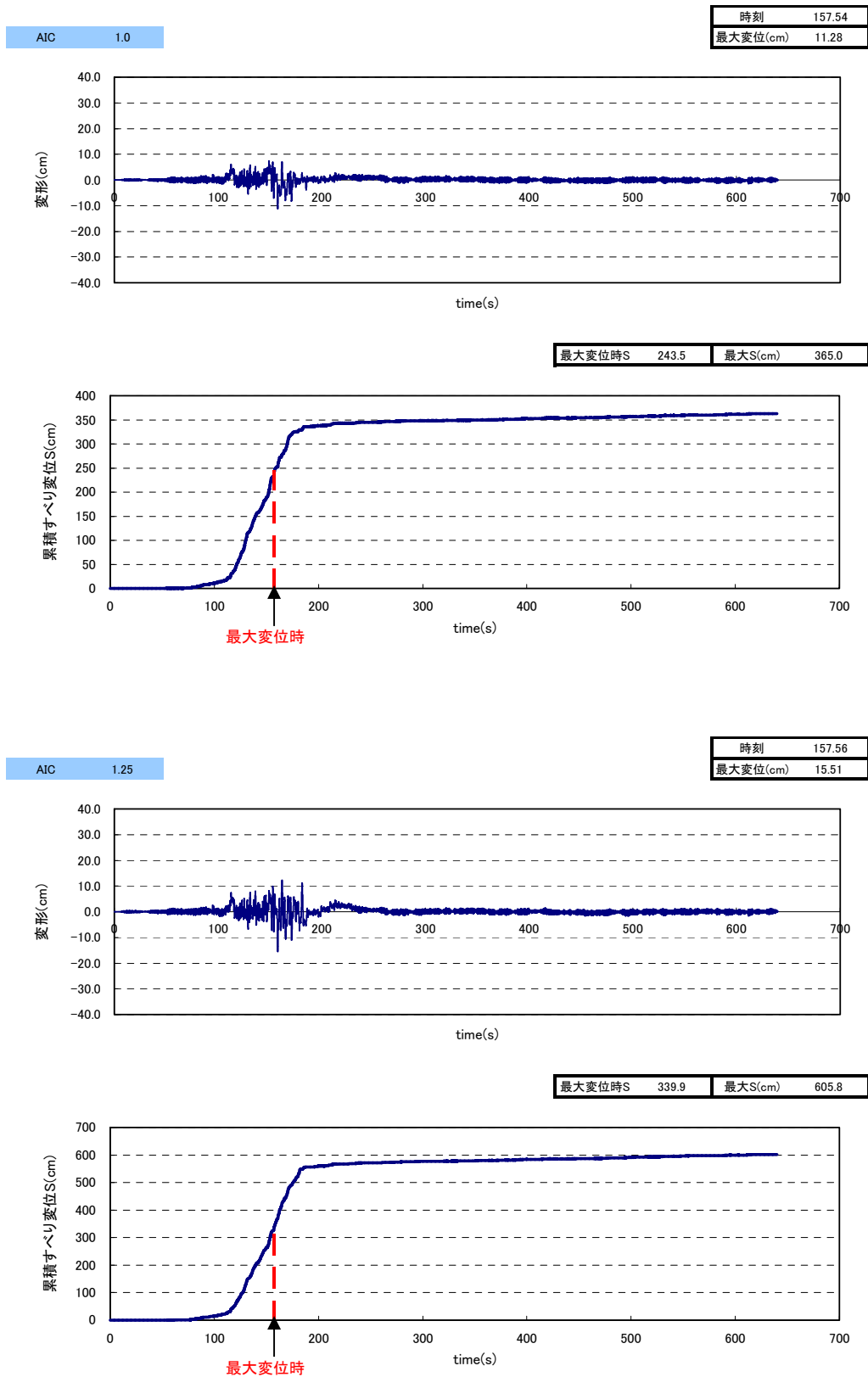


図 1.3.4-11(1) 変形・累積すべり変位時刻歴

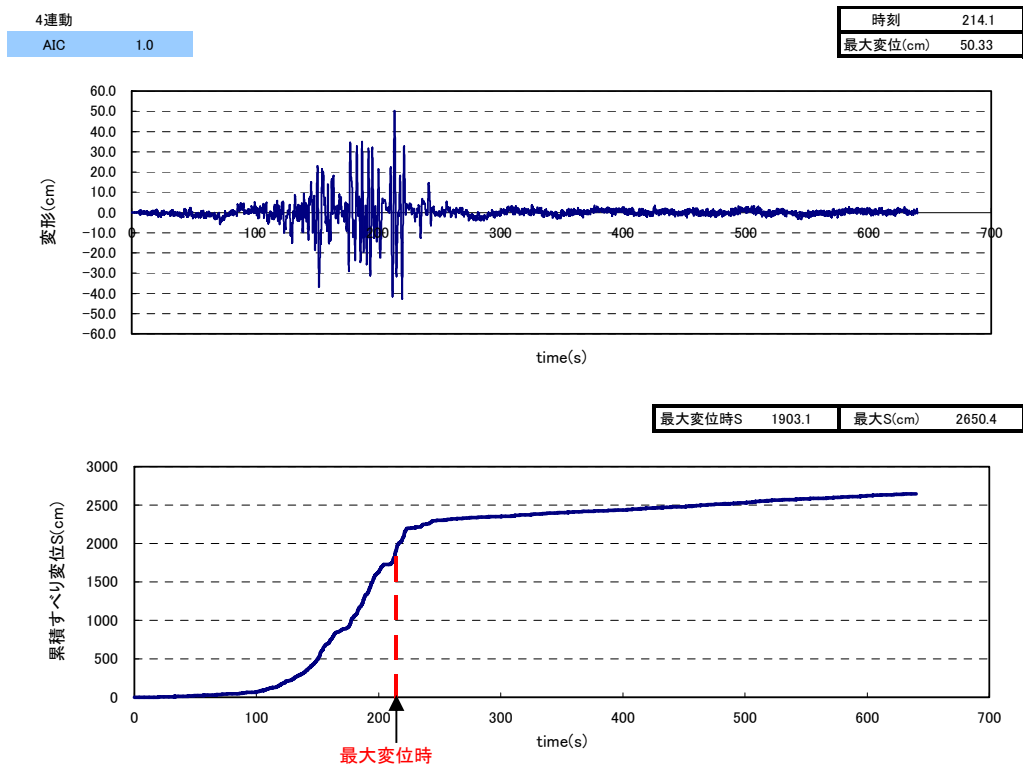
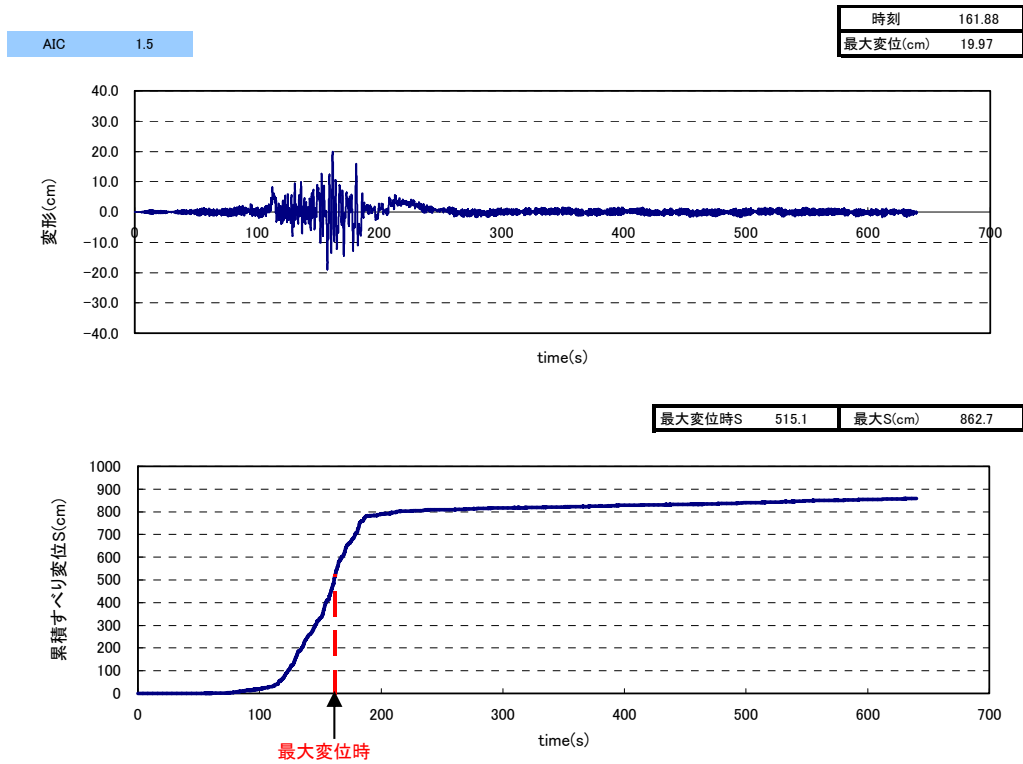


図 1.3.4-11(2) 変形・累積すべり変位時刻歴

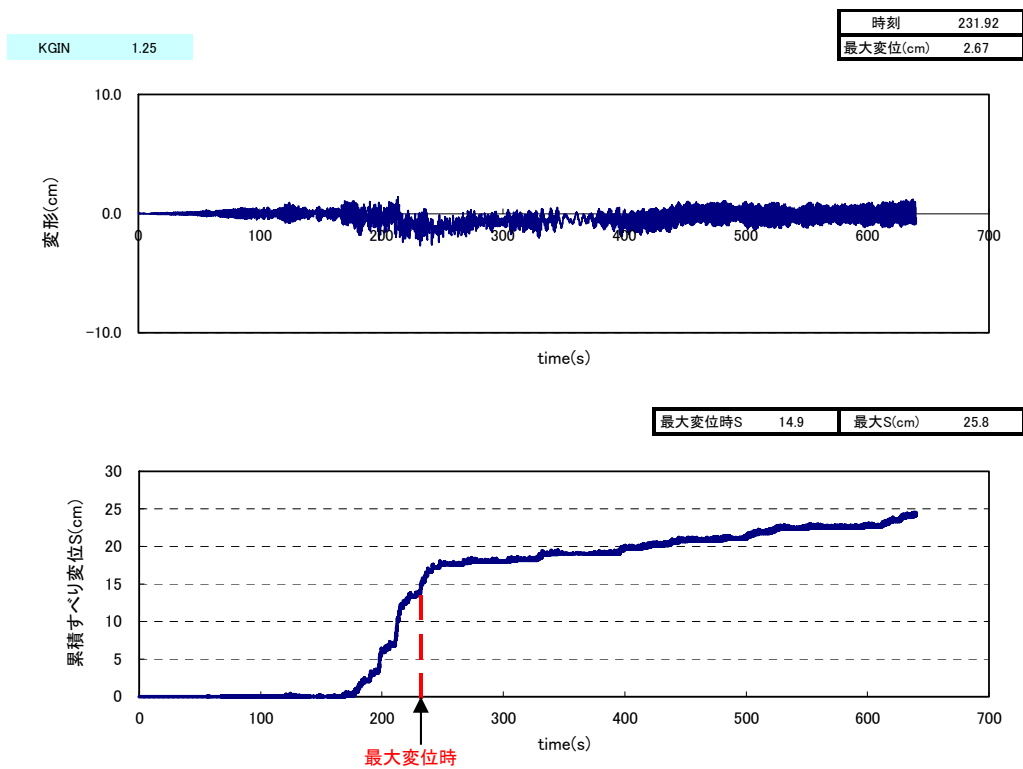
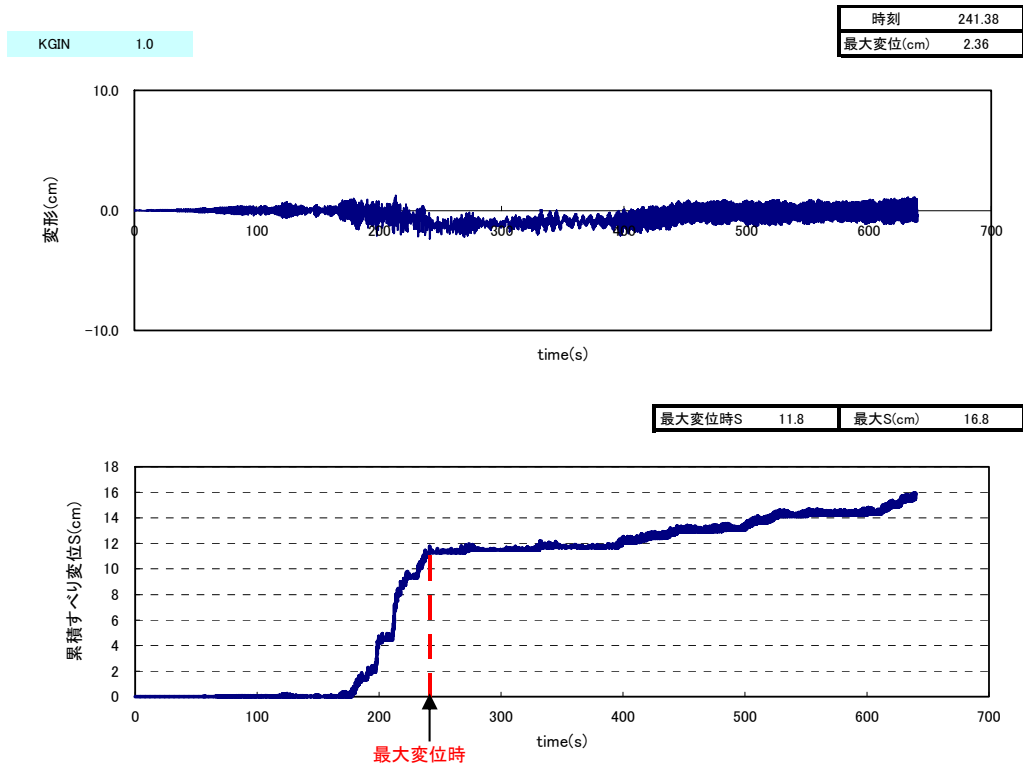


図 1.3.4-11(3) 変形・累積すべり変位時刻歴

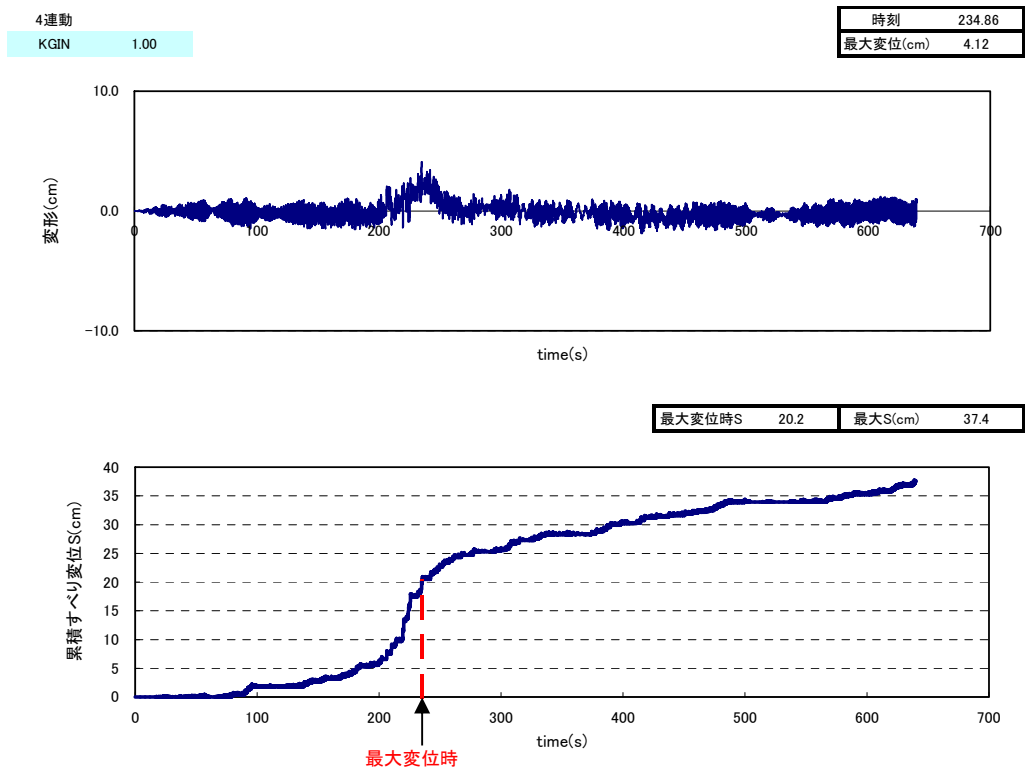
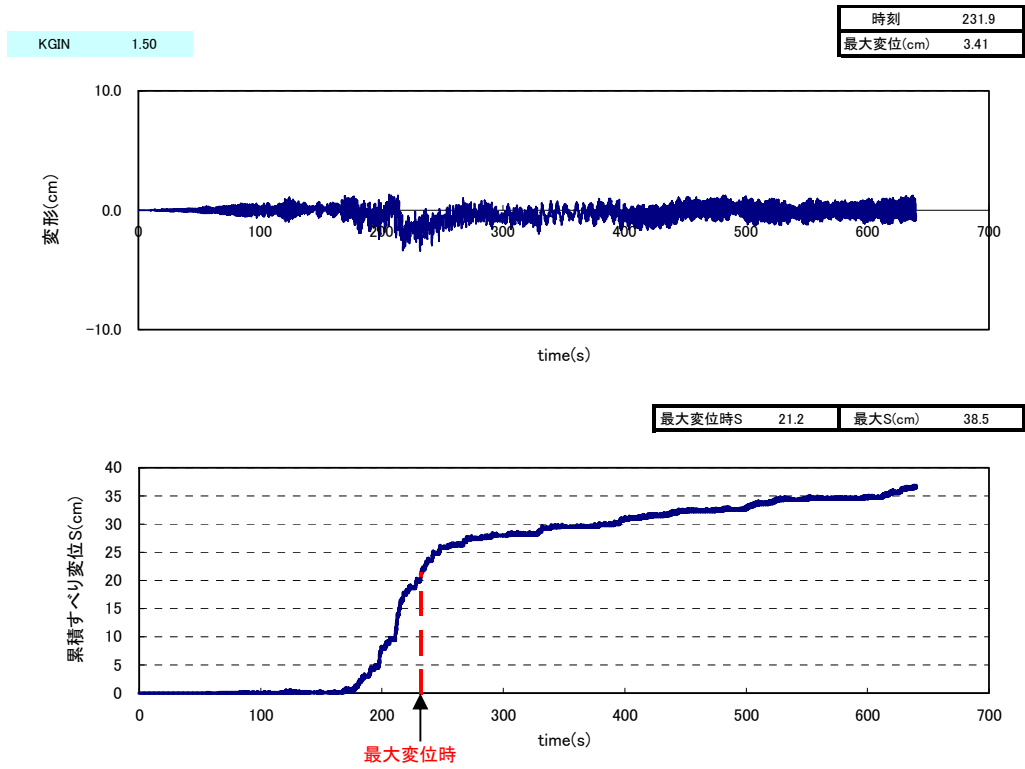
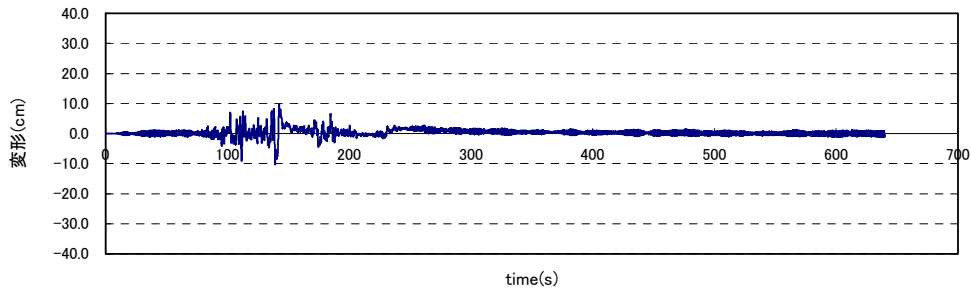


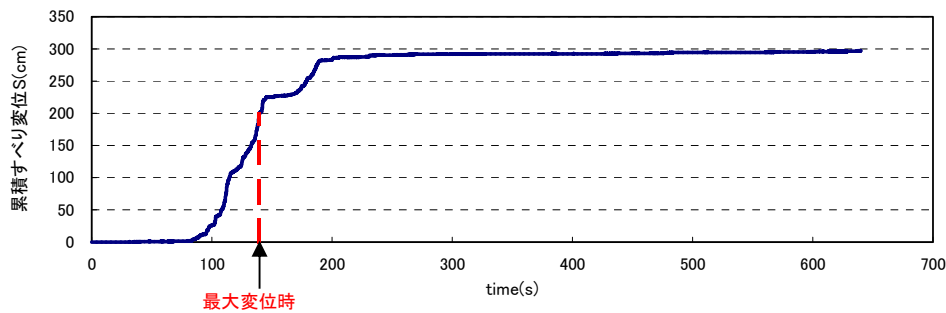
図 1.3.4-11(4) 変形・累積すべり変位時刻歴

OSK 1.0

| | |
|----------|-------|
| 時刻 | 139.3 |
| 最大変位(cm) | 10.28 |

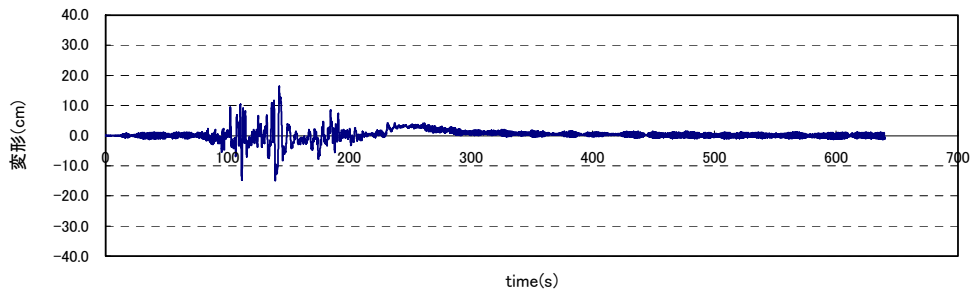


| | | | |
|--------|-------|---------|-------|
| 最大変位時S | 198.5 | 最大S(cm) | 298.8 |
|--------|-------|---------|-------|



OSK 1.25

| | |
|----------|--------|
| 時刻 | 142.64 |
| 最大変位(cm) | 16.44 |



| | | | |
|--------|-------|---------|-------|
| 最大変位時S | 337.0 | 最大S(cm) | 519.9 |
|--------|-------|---------|-------|

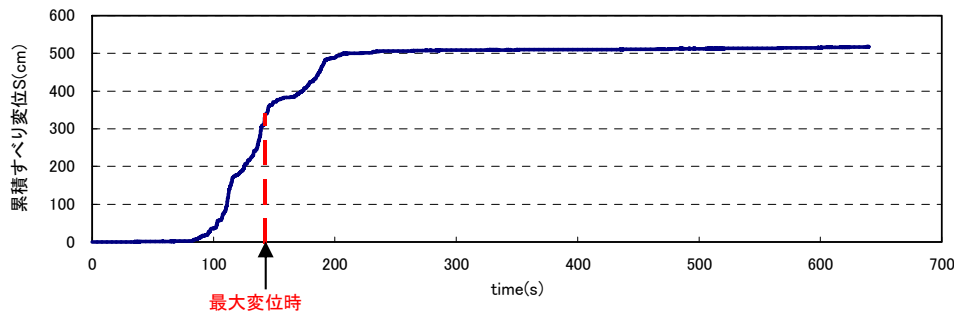


図 1.3.4-11(5) 変形・累積すべり変位時刻歴

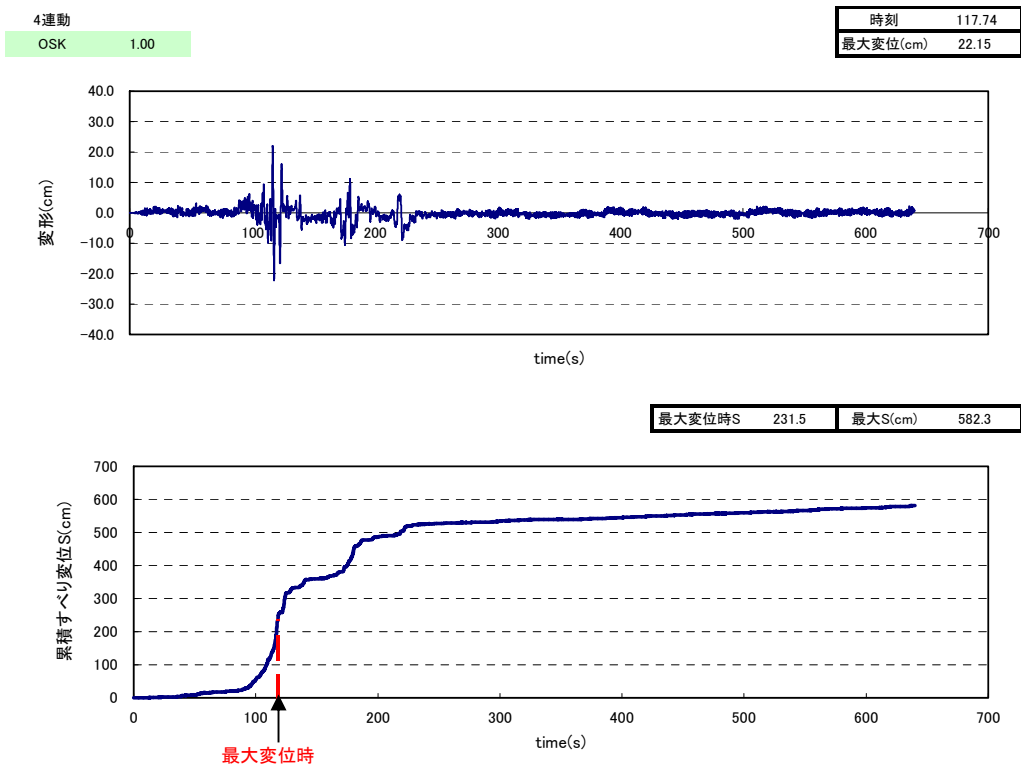
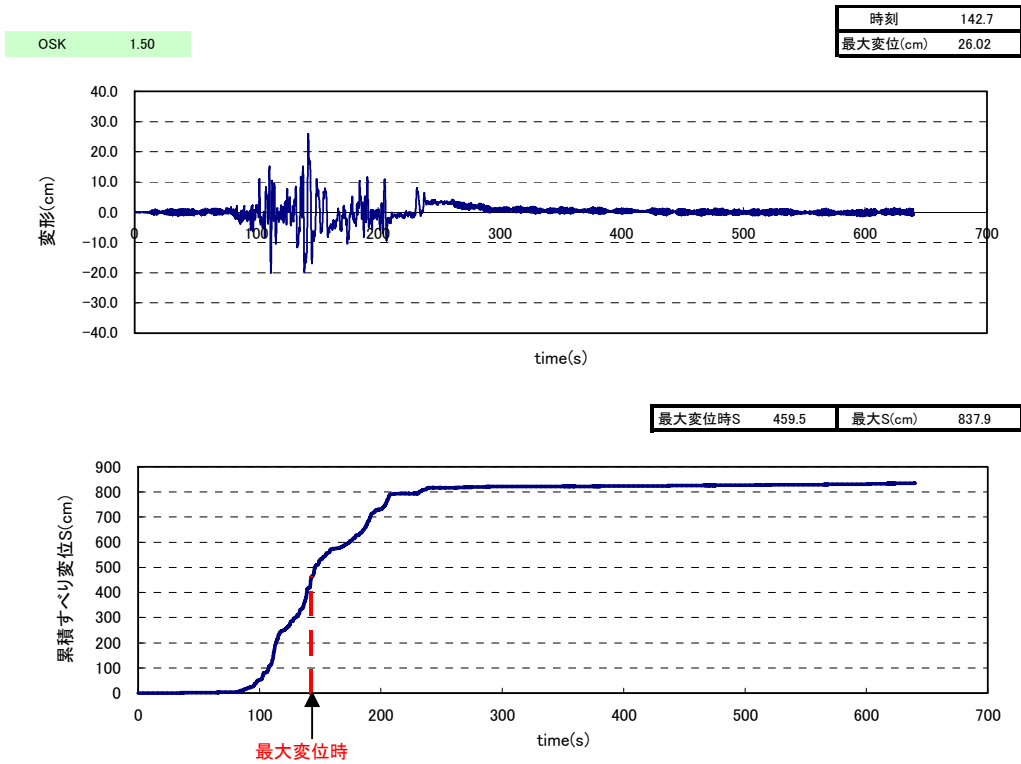


図 1.3.4-11(6) 変形・累積すべり変位時刻歴

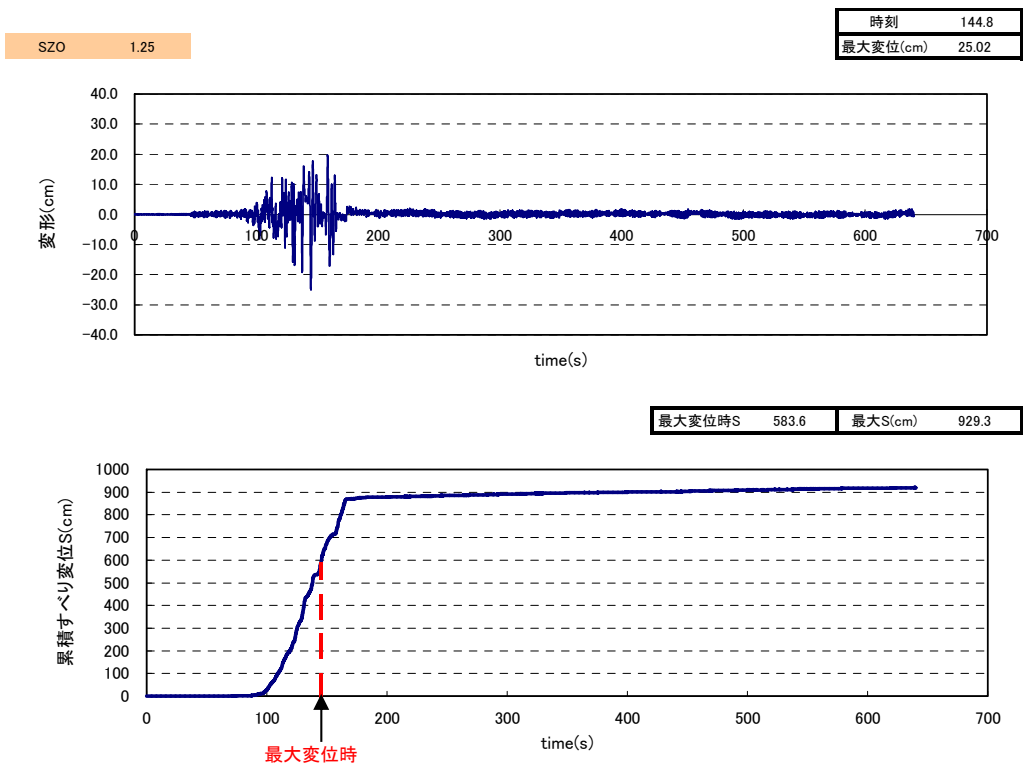
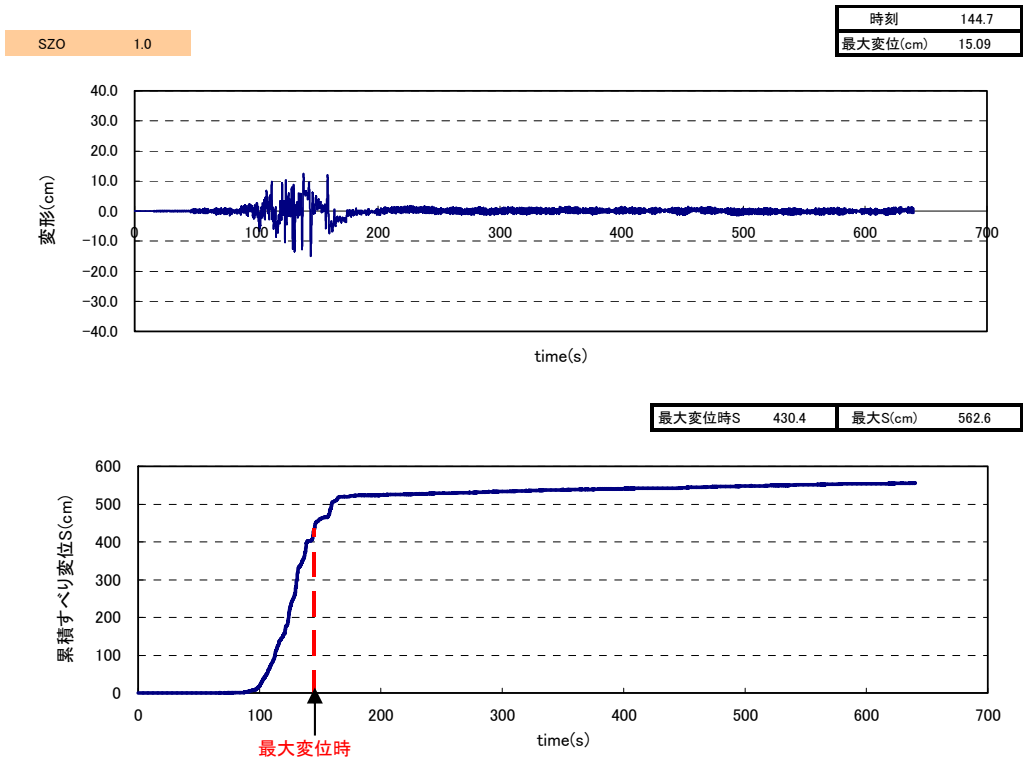


図 1.3.4-11(7) 変形・累積すべり変位時刻歴

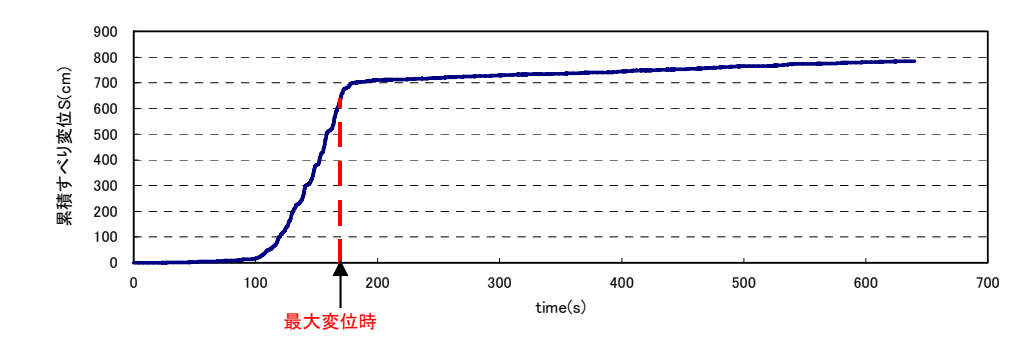
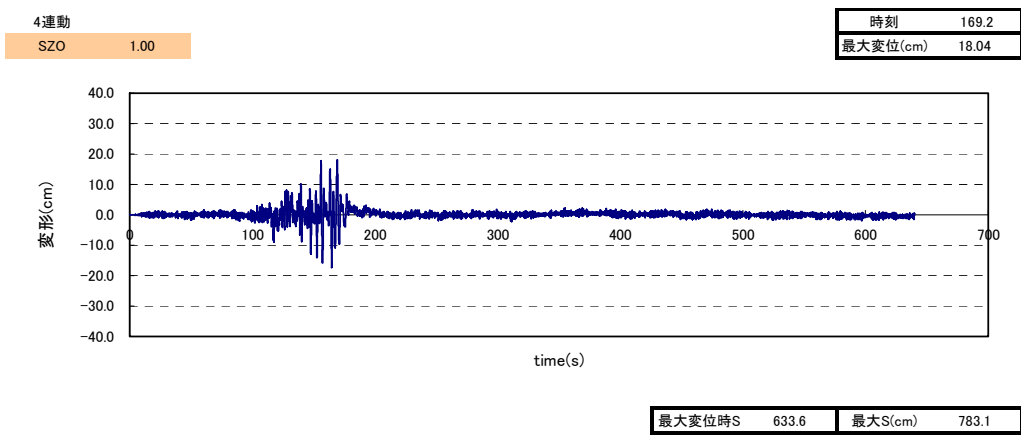
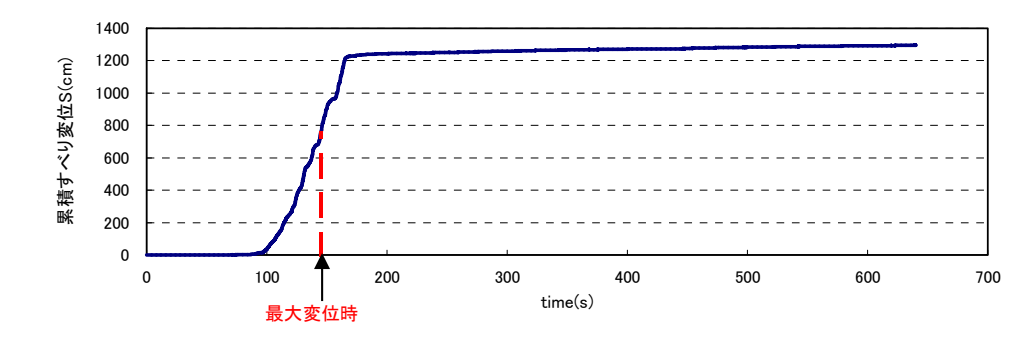
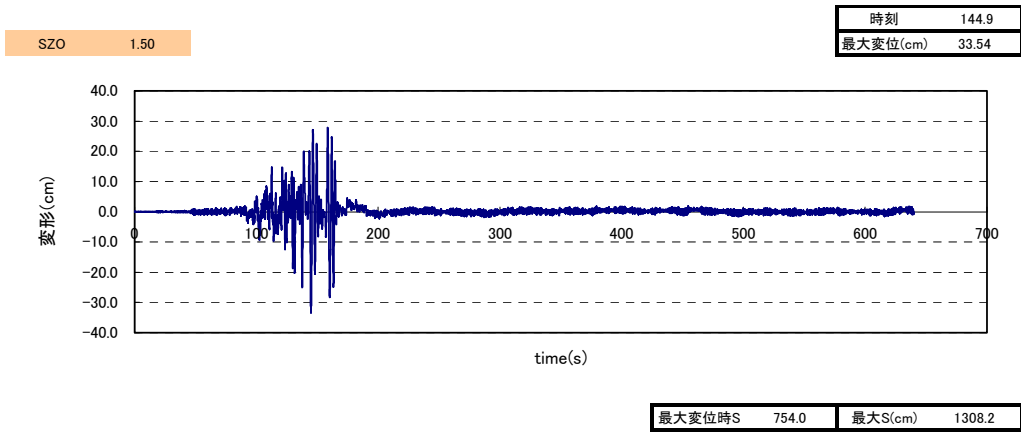


図 1.3.4-11(8) 変形・累積すべり変位時刻歴

d) 簡易評価指標の検討

弾性すべり支承は、繰り返し挙動(累積すべり変位・累積吸収エネルギー)により、摩擦係数が低下することが実験的に確認されている。しかし、通常は、基準摩擦係数 μ_0 一定バイリニア型の非線形モデル(設計モデル)として評価していることが多い。そのため、摩擦係数低下により、設計で想定している以上の応答変位が生じることが考えられるため、低減摩擦係数の簡易評価について検討した。

摩擦係数の最大値および最大変位時の累積すべり変位を表 1.3.4-(3)-2 にまとめる。最終ステップ時 $\mu(t)$ を評価指標とすると、応答変形が過剰評価となるため、 μ_1 (設計モデルでの最大変形時累積すべり変位 S を依存式に代入して算定)を評価指標として使用する。なお、 μ_2 (依存性モデルでの最大変形に合うよう、逆算した設計モデルの摩擦係数)は、評価指標の妥当性確認のために使用している。

実験により仮定した依存式:

$$\mu(t) = a[\log S(t) - \log S_0] + b \quad (1.3.4-3)$$

$$\text{面圧 } \sigma = 20\text{N/mm}^2 \rightarrow a = -2.079\text{E-}02 \quad S_0 = 1.638\text{E}+03 \quad b = 9.684\text{E-}02$$

なお、式(1.3.4-3)を元に使用面圧 σ に応じて、パラメータ a, b に実験係数 $\alpha = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{\left(\frac{1}{3}\right)}$ を乗じる。

本検討では $\sigma = 15\text{N/mm}^2$ より、 $\alpha = 1.1006$

$$\mu(t) = 2.2869\text{E-}02[\log S(t) - \log(1.638\text{E}+03)] + 1.065\text{E-}01 \quad (1.3.4-4)$$

μ_0 : 設計モデルの基準摩擦係数=0.112

μ_1 : 依存式(1.3.4-2)に設計モデル最大変形時累積すべり変位 S [mm]を代入して算定

μ_2 : 依存性モデルの最大変形と同等となる設計モデルの摩擦係数

(※設計モデルの μ を調整して、パラメトリックスタディにより μ_2 を設定)

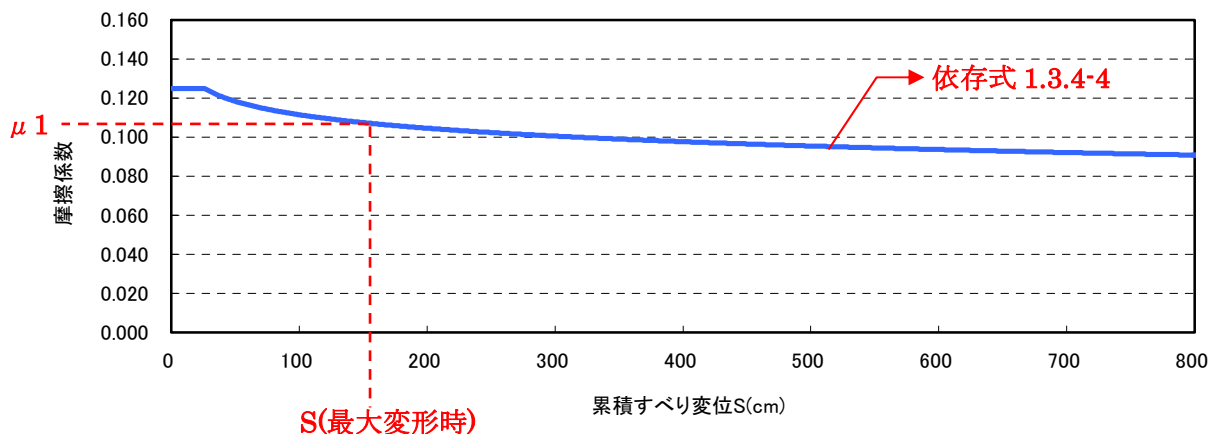


表 1.3.4-3 累積すべり変位・摩擦係数・最大変形一覧

| | 累積すべり変位S cm | | | 最大変形時 |
|------|-------------|-------|-------|-------|
| | 三連動 | | | 四連動 |
| | ×1.00 | ×1.25 | ×1.50 | ×1.00 |
| AIC | 243.5 | 339.9 | 515.1 | - |
| KGIN | - | - | - | - |
| OSK | 198.5 | 337.0 | 459.5 | 231.5 |
| SZO | 430.4 | 583.6 | 754.0 | 633.6 |

| | μ1 ※依存式5.3.4-2に上記のSを代入して算出 | | | |
|------|----------------------------|-------|-------|-------|
| | 三連動 | | | 四連動 |
| | ×1.00 | ×1.25 | ×1.50 | ×1.00 |
| AIC | 0.103 | 0.099 | 0.095 | - |
| KGIN | - | - | - | - |
| OSK | 0.105 | 0.099 | 0.096 | 0.103 |
| SZO | 0.097 | 0.094 | 0.091 | 0.093 |

| | μ2 ※パラストより算定 | | | |
|------|--------------|-------|-------|-------|
| | 三連動 | | | 四連動 |
| | ×1.00 | ×1.25 | ×1.50 | ×1.00 |
| AIC | 0.093 | 0.095 | 0.100 | - |
| KGIN | - | - | - | - |
| OSK | 0.102 | 0.099 | 0.097 | 0.103 |
| SZO | 0.097 | 0.095 | 0.090 | 0.094 |

| | μ1/μ2 | | | |
|-----------|-------|-------|-------|---------------|
| | 三連動 | | | 四連動 |
| | ×1.00 | ×1.25 | ×1.50 | ×1.00 |
| AIC | 110% | 105% | 95% | - |
| KGIN | - | - | - | - |
| OSK | 103% | 100% | 99% | 100% |
| SZO | 100% | 99% | 102% | 99% |
| 平均 | | | | 101.1% |

| | γmax μ1 cm ※μ=μ1 設計モデル | | | |
|------|------------------------|-------|-------|-------|
| | 三連動 | | | 四連動 |
| | ×1.00 | ×1.25 | ×1.50 | ×1.00 |
| AIC | 12.2 | 16.6 | 21.0 | - |
| KGIN | - | - | - | - |
| OSK | 11.0 | 20.4 | 33.1 | 23.0 |
| SZO | 19.2 | 28.7 | 38.3 | 28.4 |

| | γmax μ2 cm ※μ=μ2 設計モデル | | | |
|------|------------------------|-------|-------|-------|
| | 三連動 | | | 四連動 |
| | ×1.00 | ×1.25 | ×1.50 | ×1.00 |
| AIC | 11.0 | 17.0 | 21.2 | - |
| KGIN | - | - | - | - |
| OSK | 11.4 | 20.4 | 32.7 | 23.0 |
| SZO | 19.2 | 28.5 | 38.6 | 28.1 |

| | γmax μ1/γmax μ2 | | | |
|-----------|-----------------|-------|-------|---------------|
| | 三連動 | | | 四連動 |
| | ×1.00 | ×1.25 | ×1.50 | ×1.00 |
| AIC | 111% | 98% | 99% | - |
| KGIN | - | - | - | - |
| OSK | 96% | 100% | 101% | 100% |
| SZO | 100% | 101% | 99% | 101% |
| 平均 | | | | 100.6% |

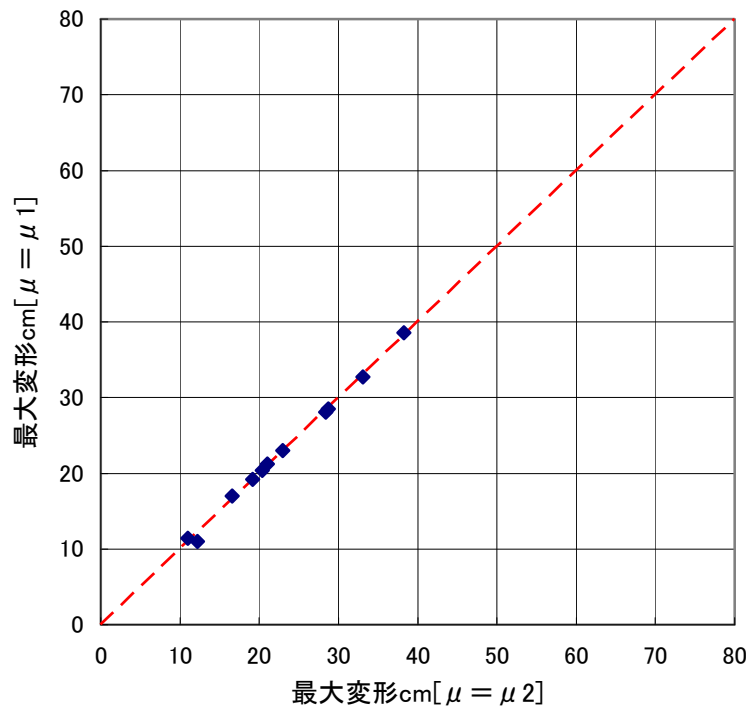


図 1.3.4-12 最大変形プロット図

■簡易評価方法および評価フロー

表 1.3.4-3 の結果より、 $\mu 1/\mu 2$ は平均で 1%程度 of 誤差である。また、各摩擦係数時の最大変形については、平均誤差 0.6%と過小である。図 1.3.4-12 に、全波(累積すべり変位の小さい KGIN 波および応答変位がせん断ひずみ 400%を超える 4連動 AIC 波は除外)における最大変形プロット図を示す。パラメトリックスタディにより算定した $\mu 2$ による設計モデルでの最大変形と、依存式(1.3.4-4)により算定した $\mu 1$ による設計モデルでの最大変形の関係を示している。これより、赤破線で示す基準線をよくとらえられていることが確認できる。したがって、依存式(1.3.4-4)による $\mu 1$ で評価することは妥当と判断する。

次に、簡易評価フローを図 1.3.4-13 示す。本簡易評価法としては、あくまで既往の設計モデルで設計した上で、その累積すべり変位 S を指標に、変形増幅の有無および増幅する場合の摩擦係数を簡易に評価するものである。

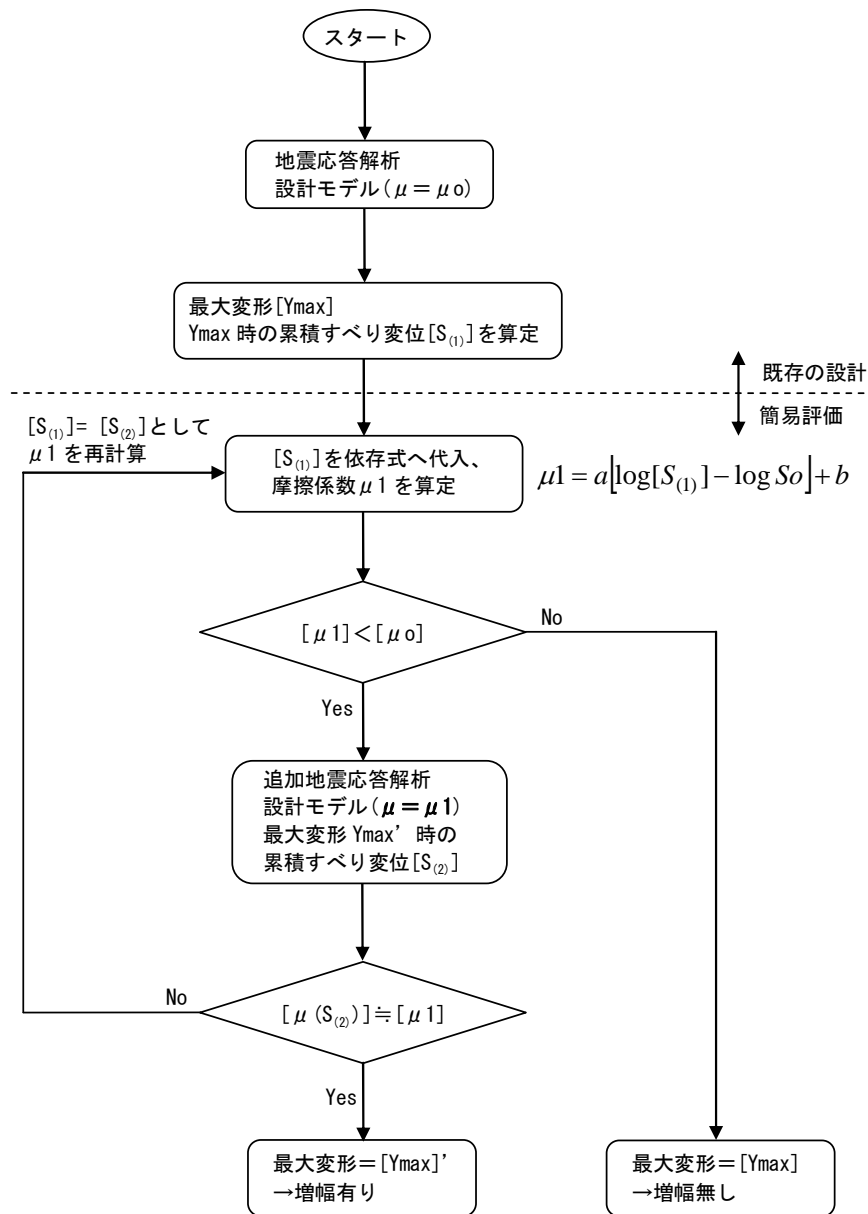


図 1.3.4-13 簡易評価フロー

(4) まとめ

[評価方法]

既往の設計モデル(基準摩擦係数 μ_0)に対して、累積すべり変位依存性モデルでは、繰り返し挙動に伴う摩擦係数低下による応答変形増幅傾向がある。簡易評価手法としては、累積すべり変位と摩擦係数の関係式(実験結果より仮定した依存式(1.3.4-4))を用いて、設計モデルにおける最大変形時累積すべり変位を指標に、低下摩擦係数 μ_1 を算定する。再度設計モデル($\mu = \mu_1$)において時刻歴応答解析を行い、増幅した応答変形を確認する。

[結果]

累積すべり変位依存性モデルにおける応答最大変形と設計モデル($\mu = \mu_1$)における応答最大変形は、概ね一致しており、簡易評価方法の妥当性を確認した。

[今後の課題]

本検討においては、建物モデルとして固有周期、せん断力係数を1ケース仮定し、入力地震動としても4種類という条件下において、簡易評価をまとめたものである。今後の課題としては、周期・せん断力係数・入力地震動のケースを増やし、簡易評価方法の精度を確認する必要がある。

1.3.5 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（低摩擦）+粘性ダンパー

(1) 検討方針

1) モデル化方針

提案モデルは一般的に用いられている解析モデルの定数を修正することで、繰り返し依存特性を簡易的に評価するものとする。設定する定数は免震層の変位が生じやすいモデル（ここでは簡易 A モデルと呼ぶ）、および変位が生じにくいモデル（ここでは、簡易 B モデルと呼ぶ）の 2 つを設定することとする。

設計時には両モデルの応答値の最大値に対して、健全性を検討するものとする。なお、繰り返し依存性を考慮することにより、応答変位は増加するため、繰り返し依存性は主に簡易 A モデルに組み込まれることになる。

天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承（低摩擦）、粘性ダンパーはそれぞれ以下の方針によってモデル化するものとする。

① 天然ゴム系積層ゴム

積層ゴムは従来通り、線形モデルとして扱う。

② 弾性すべり支承（低摩擦）

低摩擦すべり支承は、ハードニングを考慮しない摩擦係数一定の単純なバイリニア型でモデル化する。摩擦係数については、面圧・速度依存性および繰り返し依存性を考慮した場合の、最大値および最小値の 2 種を設定する。

③ 粘性ダンパー

粘性ダンパーは第Ⅲ部 2.3.7 に記述したと同様、材料認定書^{1.3.5-1)}に基づく解析モデルを基本とする。本モデルは一般の設計者が利用する解析コードに導入されているモデルである。

本検討では、繰り返し依存係数 α （一定値、基準値は 0.85）、および初期温度 T_0 （一定値）を調整して、繰り返し依存性の影響を簡易的に評価することを図る。

2) 簡易モデルの設定フロー

低摩擦すべり支承および粘性ダンパーの簡易モデルの設定方法の概要について説明する。
なお、細かい数値や計算式の説明については、後述する「3) 免震要素諸元」にて説明する。

モデルの設定フローを図 1.3.5-1 に示す。

モデルは、減衰力を小さく評価し、変位を大きめに評価するモデル（簡易 A モデル）、減衰力を大きく評価し、変位を小さめに評価するモデル（簡易 B モデル）の 2 種のモデルを設定する。なお、一般的に繰り返し依存性を考慮することで減衰力は低下するため、繰り返し依存性の効果は主として簡易 A モデルに反映されることになる。ただし、地震動や建物諸元によっては一概に減衰力が小さい方が危険側になるとは限らないため、設計時には両モデルの応答値の最大値に対して、健全性を検討するものとする。

簡易 A モデルにおける、低摩擦すべり支承の摩擦係数は、面圧・速度依存性および繰り返し依存性を考慮した場合の、最小値（0.60%）として設定する。ただし、この値は面圧 20MPa を前提に計算されているため、面圧が変わる場合には修正が必要となる。

粘性ダンパーの繰り返し依存係数 α は下限値である 0.70 とする。入力温度は、地震終了時の換算温度とする。この換算温度は、入力温度を初期温度とした場合の累積吸収エネルギーに基づき実験からの回帰式により設定する。

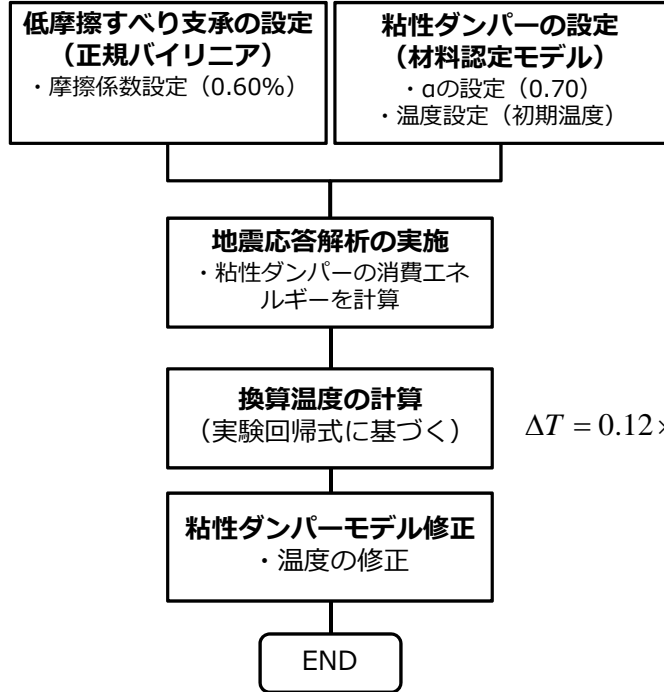
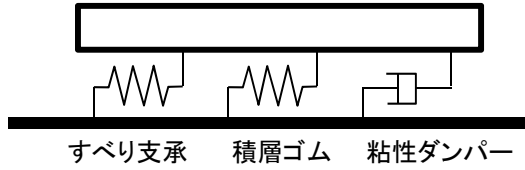
$$\Delta T = 0.12 \times (Ed / Vv)^{0.7} \quad (1.3.5-1)$$

ここで、 ΔT : 上昇温度 (°C)、 Ed : 吸収エネルギー (J)、 Vv : 粘性体の体積 (cc) であり、吸収エネルギーは入力温度を初期温度とした場合の解析における最終累積エネルギーの 95% の値を用いる。

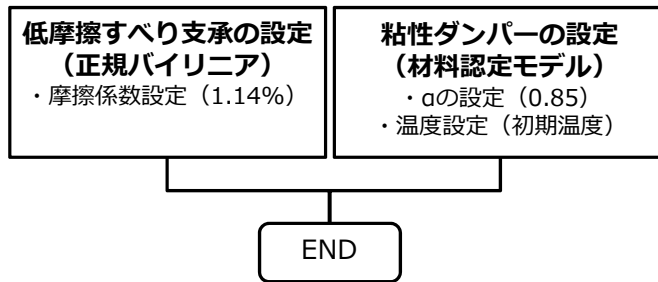
以上のように、簡易 A モデルについては一度地震応答解析を実施した後にモデルの諸元が確定することになる。

簡易 B モデルにおける、低摩擦すべり支承の摩擦係数は、面圧・速度依存性および繰り返し依存性を考慮した場合の、最大値（1.14%）として設定する。この値についても、面圧 20MPa を前提に計算されているため、面圧が変わる場合には修正が必要となる。

粘性ダンパーの繰り返し依存係数 α は基準値である 0.85 とし、入力温度は初期温度とする。



(a)簡易 A (減衰力小・変位大)



(b)簡易 B (減衰力大・変位小)

図 1.3.5-1 モデルの設定フロー

3) 免震要素諸元

低摩擦すべり支承の摩擦係数および粘性ダンパーの繰り返し依存係数および初期温度の扱いを以下のように考慮する。

① 弾性すべり支承（低摩擦）の摩擦係数

弾性すべり支承（低摩擦）において摩擦係数は面圧・速度依存性および繰り返し依存性の 2 種の影響を受ける。

材料認定書においては面圧・速度依存性は、下式で評価される。

$$\mu(\sigma_s, V) = (0.0355 - 0.0093 \cdot \exp(-0.1 \cdot V)) \cdot \sigma_s^{-0.44} \quad (1.3.5-2)$$

ここに、 σ_s は面圧 (N/mm²)、 V は水平速度 (mm/sec) を示す。

想定面圧を初期値 (20.0MPa) で一定と考えれば、 V が無限大の場合に最大値($\mu=0.0095$)、0.0 の場合に最小値($\mu=0.0070$)となる。

一方で、累積すべり量 50m を超える領域までの繰り返しによる摩擦係数の変動幅は、メーカー提供の実験値によれば、基準値に対して、最大で 1.20 倍、最小で 0.85 倍である。

以上より、本検討で扱う簡易モデルの摩擦係数の最大値および最小値は以下のように設定する。

最大値： $\mu_{\max} = 0.0095 \times 1.20 = 0.0114$ (※簡易 B モデル用)

最小値： $\mu_{\min} = 0.0070 \times 0.85 = 0.00595$ (※簡易 A モデル用)

なお、当該モデルの一基あたりの想定面圧は 20.0MPa (対応する軸力は 7697kN) であるため、一基あたりのすべり荷重は、摩擦係数最大の場合に 87.7kN、最小の場合に 45.8kN となる。

② 粘性ダンパーの繰り返し依存係数および初期温度

材料認定書に記載されたモデルでは、繰り返し依存性を表す係数 α は、累積吸収エネルギーに応じて評価する場合と、一定値とする場合があるが、ここでは簡易的な一定値（基準値 0.85）で評価する方法を用いて、 α の値を修正して用いる。

本検討では、繰り返し依存性を考慮しない場合の α を基準値 0.85（簡易 B モデル用）とし、繰り返し依存性を考慮する場合には下限値 0.70（簡易 A モデル用）を用いることとする。繰り返し依存係数 α と単位容積当りの粘性累積吸収エネルギーとの関係を図 1.3.5-2 に示す。

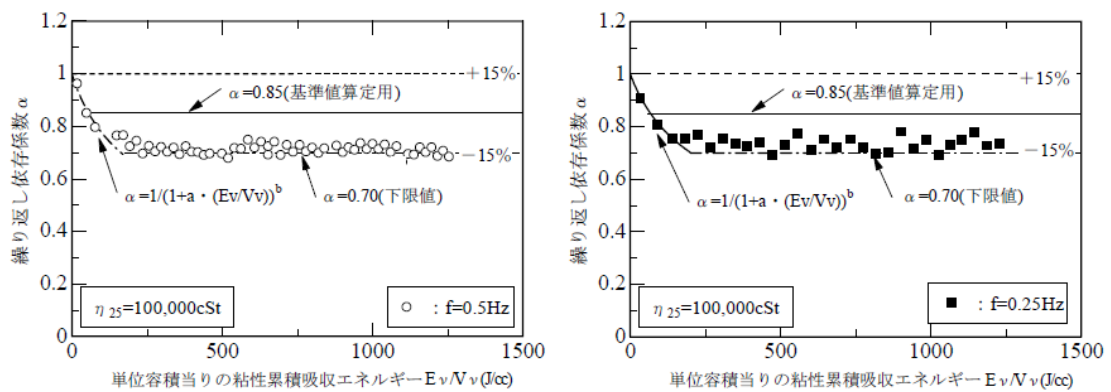


図 1.3.5-2 単位容積当りの粘性累積吸収エネルギー E_v と繰り返し依存係数 α の関係の一例

また、温度については、繰り返し依存性を考慮しない簡易 B モデルについては、初期温度（ここでは $T_0=15^\circ\text{C}$ ）で一定値とする。一方、繰り返し依存性を考慮するモデル（簡易 A モデル）については、予備解析結果に基づき別途計算した想定温度を用いる。

簡易 A モデルの想定温度は、部材実験結果を参照し、粘性ダンパーの吸収エネルギーに応じた近似式を作成して算定する。図 1.3.5-3 に近似式を図示する。本検討では、吸収エネルギー量は初期値を用いた場合、(予備解析)モデルの解析結果における、最終累積吸収エネルギーの 95% の値を用いて簡易 A モデルの入力温度を決定することとする。

$$\Delta T = 0.12 \times (Ed / Vv)^{0.7} \quad (1.3.5-3)$$

ここで、 ΔT : 上昇温度 ($^\circ\text{C}$)、 Ed : 吸収エネルギー (J)、 Vv : 粘性体の体積 (cc)

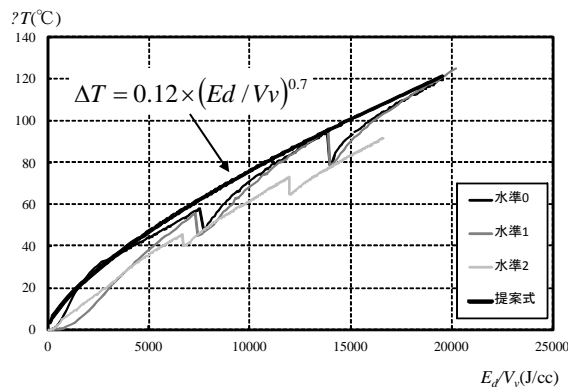


図 1.3.5-3 温度上昇の算定式

4) 解析対象

解析対象は第Ⅲ部 2.3.7、第Ⅲ部 3.2.6 と同じく、建物を 1 質点剛体と仮定した応答解析モデルとする。

想定する建物は 30m×30m の平面形状を持つ RC 造の 9 層建物とする。建物の総重量は 100,000kN とする。免震周期、ダンパーの諸条件は以下の通りとした。

- ・建物の免震周期は 4 秒程度
- ・免震層の最大応答変位は 250mm 程度
- ・ダンパーの負担層せん断力係数は 3.0%~3.5% 程度

免震部材の配置状況を図 1.3.5-4 に示す。配置する免震部材は天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承(低摩擦)および粘性ダンパーとする。解析では建物を 1 質点剛体でモデル化し、水平 1 方向入力とする。そのため粘性ダンパーについては加振方向に平行に配置された 4 基をモデル化する(図 1.3.5-5)。

なお、繰り返し依存性を考慮した詳細モデルの設定は、第Ⅲ部 3.2.6 と同様とする。

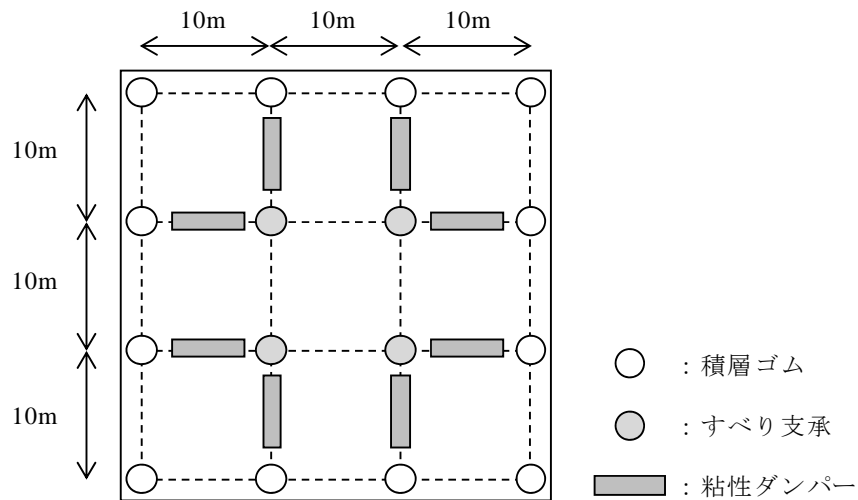


図 1.3.5-4 想定する建物モデルの平面形状

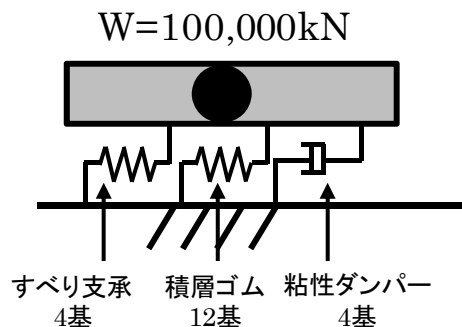


図 1.3.5-5 解析モデル(1 質点系剛体モデル・1 方向入力)

5) 解析ケース

設定した簡易モデルの概要および解析ケース一覧を下表に示す。

弾性すべり支承（低摩擦）の摩擦係数、粘性ダンパーの繰り返し依存係数 α および入力温度 T_0 を変化させ、簡易モデルを2モデル設定する。簡易Aモデルは変位を大きめに、簡易Bモデルは小さめに評価するモデルとしている。

なお、簡易Aモデルについては、換算温度計算のための予備解析として、入力温度を初期温度とした場合の解析を実施する。

これらのモデルによる解析結果を繰り返し依存性を詳細に考慮したモデルと比較して、簡易モデルの妥当性を検証する。

表 1.3.5-1 簡易モデル概要

| モデル | | 低摩擦すべり支承 | 粘性ダンパー | | 備考 |
|------|----|------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------|
| | | 摩擦係数 μ (一定値) | 繰り返し依存係 数 α | 温度 T_0 | |
| 簡易 A | 予備 | 0.60% (μ_{\min}) | 0.70 | 初期温度 $T_0=15^\circ\text{C}$ | 換算温度算定用 |
| | 正式 | | | 換算温度 | |
| 簡易 B | | 1.14% (μ_{\max}) | 0.85 | 初期温度 $T_0=15^\circ\text{C}$ | 減衰力大・変位小 |

表 1.3.5-2 解析ケース一覧

| 解析モデル | | 入力地震動 | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|--------|------|-----|------|--------|------|-----|------|--------|------|-----|------|------|------|-----|------|
| | | OSKH02 | | | | AIC003 | | | | SZO024 | | | | KGIN | | | |
| | | M8.7 | | | M9.0 | M8.7 | | | M9.0 | M8.7 | | | M9.0 | M8.7 | | | M9.0 |
| | | 1.0 | 1.25 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.25 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.25 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.25 | 1.5 | 1.0 |
| 簡易 A1 | μ_{\min} $\alpha=0.70$ T_0 : 初期温度 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 簡易 A2 | μ_{\min} $\alpha=0.70$ T_0 : 換算温度 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 簡易 B | μ_{\max} $\alpha=0.85$ T_0 : 初期温度 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 詳細 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

(2) 検討結果

1) 初期温度入力とした簡易 A モデルの応答結果（簡易 A 予備モデル）

簡易 A モデルの温度入力値を初期温度とした予備解析（簡易 A 予備）における、簡易 A、簡易 B、および詳細モデルの応答結果の比較を行う。比較する応答値は、免震層の最大応答変形および加速度、せん断力係数 C_i 、累積変形量、等価エネルギー速度 V_E 、免震部材の荷重変形関係とする。

表 1.3.5-3～表 1.3.5-6 に最大応答値一覧表を、図 1.3.5-6～図 1.3.5-9 に各モデルにおける最大応答値のばらつきを、図 1.3.5-10～図 1.3.5-25 には各免震層の荷重変形関係を示す。なお、荷重変形関係の縦軸は、各免震部材の減衰力の合計である。

表 1.3.5-3～表 1.3.5-6 および図 1.3.5-6～図 1.3.5-9 より、繰り返し依存性の影響を考慮した詳細モデルの結果は、地震動種別によらず変位を小さめに評価するものとして設定した簡易 B モデルの結果よりも最大変位を大きめに評価している。一方、詳細モデルと変位を大きめに評価するものとして設定した簡易 A モデルの結果を比較すると、現状では必ずしも詳細モデルよりも簡易 A モデルの応答変位は大きくなっていない。その他の応答値についても両簡易モデルの結果の間に詳細モデルの結果が入らない場合があり、概ね簡易 A モデルと詳細モデルが対応する結果となった。これは、図 1.3.5-10～図 1.3.5-25 に示した荷重変形関係においても同様の傾向であった。

以上の結果より、初期温度を一定とした場合の簡易 A モデルでは、繰り返し依存性による減衰力の低下が十分に反映されておらず、詳細モデルよりも応答変位を大きくするためには更なる減衰力の低下を考慮する必要があると考えられる。

① 最大応答値一覧

表 1.3.5-3 最大応答値一覧 (OSKH02、簡易 A 予備)

| 応答値 | OSKH02 | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | M8.7 三連動 | | | | | | | | | M9.0 四連動 | | |
| | ×1.0 | | | ×1.25 | | | ×1.5 | | | ×1.0 | | |
| | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 |
| 最大応答変位 (cm) | 21.45 | 17.55 | 21.99 | 29.90 | 25.78 | 31.20 | 38.19 | 34.36 | 39.07 | 33.60 | 24.06 | 37.35 |
| 最大応答加速度 (cm/s ²) | 72.43 | 68.38 | 72.76 | 94.12 | 89.85 | 94.95 | 115.42 | 111.91 | 115.31 | 103.35 | 84.49 | 109.32 |
| 最大せん断力係数 C_i | 0.0739 | 0.0697 | 0.0742 | 0.0960 | 0.0916 | 0.0968 | 0.1177 | 0.1141 | 0.1176 | 0.1054 | 0.0862 | 0.1115 |
| 累積変位量 (m) | 8.928 | 6.998 | 10.08 | 12.97 | 10.36 | 14.53 | 17.42 | 14.24 | 19.44 | 15.54 | 12.33 | 19.36 |
| 等価エネルギー速度 V_E (m/s) | 1.841 | 1.749 | 1.918 | 2.343 | 2.271 | 2.412 | 2.821 | 2.786 | 2.880 | 2.532 | 2.445 | 2.641 |

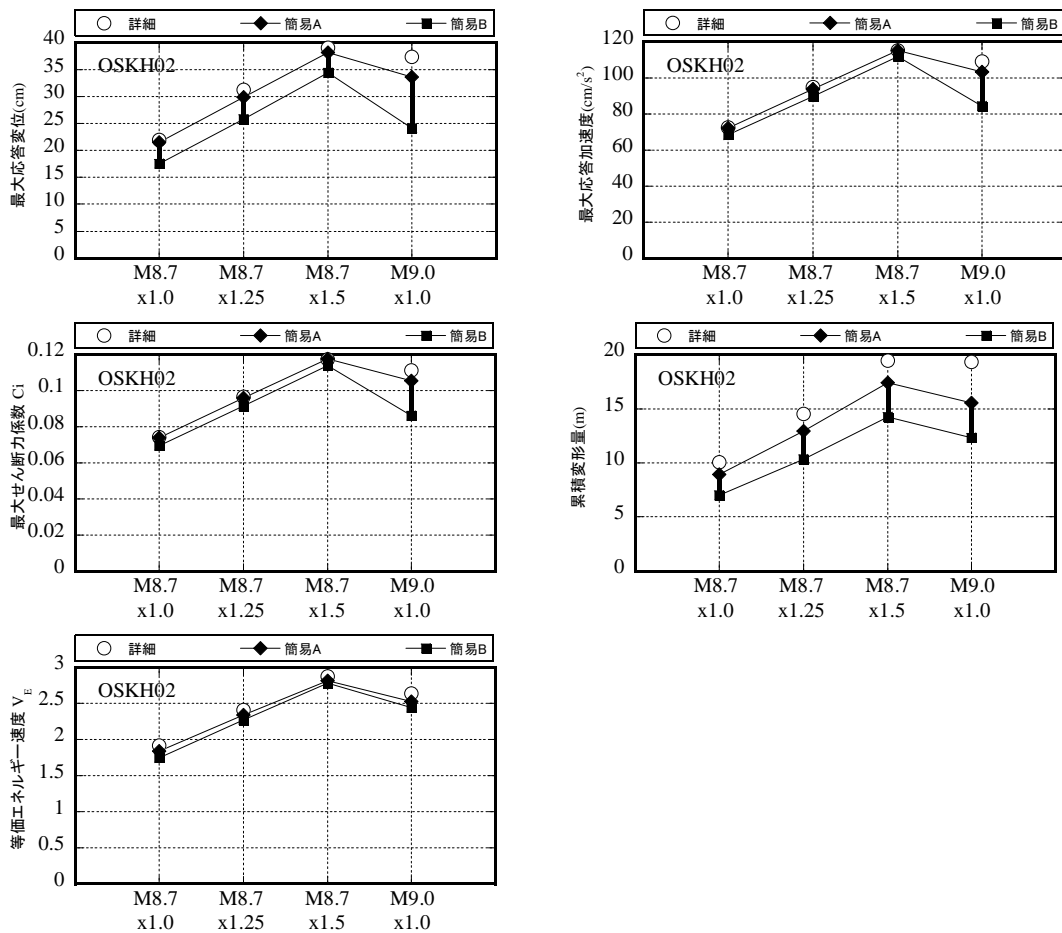


図 1.3.5-6 最大応答値の比較 (OSKH02、簡易 A 予備)

表 1.3.5-4 最大応答値一覧 (AIC003、簡易 A 予備)

| 応答値 | AIC003 | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | M8.7 三連動 | | | | | | | | | M9.0 四連動 | | |
| | ×1.0 | | | ×1.25 | | | ×1.5 | | | ×1.0 | | |
| | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 |
| 最大応答変位 (cm) | 13.27 | 9.96 | 15.67 | 20.05 | 15.16 | 22.96 | 28.23 | 21.45 | 32.30 | 64.98 | 50.42 | 74.83 |
| 最大応答加速度 (cm/s ²) | 50.98 | 48.56 | 54.30 | 68.74 | 62.05 | 73.51 | 90.00 | 78.57 | 97.32 | 182.82 | 152.40 | 202.77 |
| 最大せん断力係数 C_i | 0.0520 | 0.0495 | 0.0554 | 0.0701 | 0.0633 | 0.0750 | 0.0918 | 0.0801 | 0.0992 | 0.1864 | 0.1554 | 0.2068 |
| 累積変位量 (m) | 7.044 | 6.029 | 8.048 | 9.835 | 8.387 | 11.09 | 12.95 | 11.03 | 14.57 | 36.13 | 30.99 | 41.86 |
| 等価エネルギー速度 V_E (m/s) | 1.599 | 1.603 | 1.699 | 1.989 | 2.002 | 2.081 | 2.373 | 2.394 | 2.464 | 4.221 | 4.282 | 4.263 |

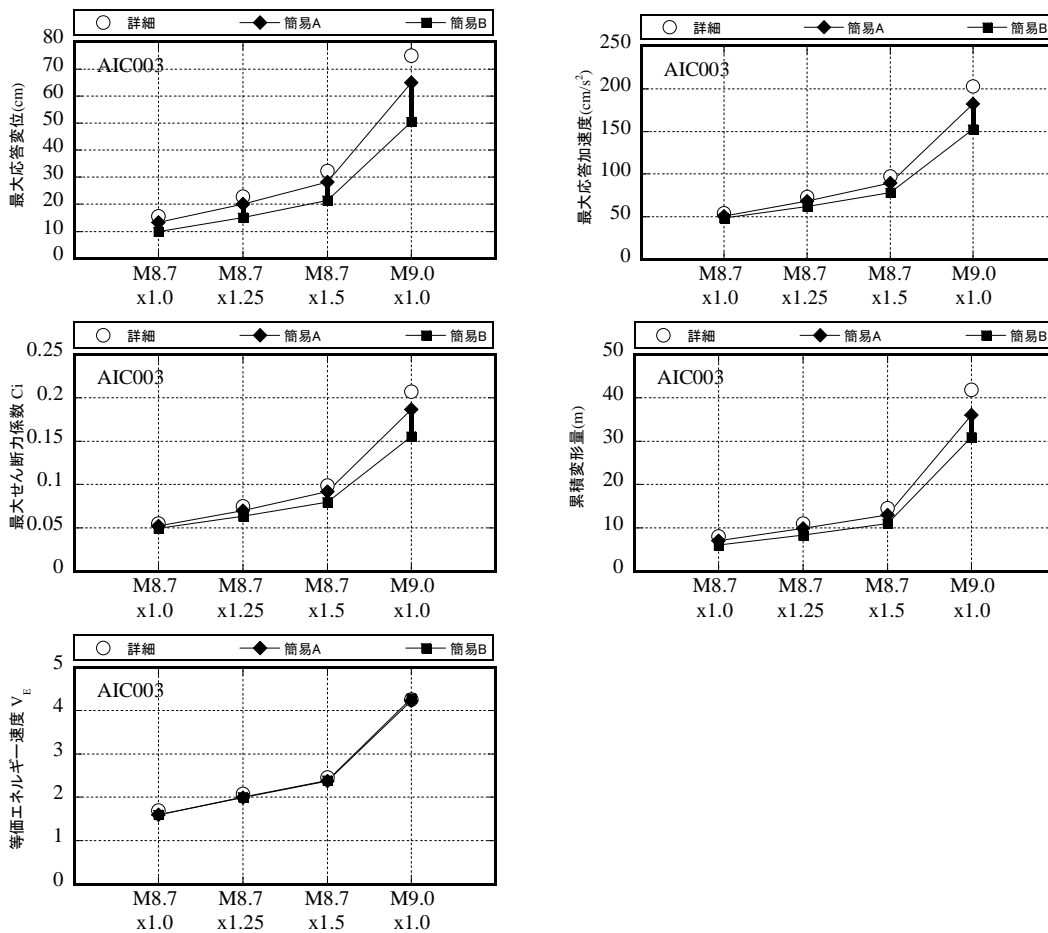


図 1.3.5-7 最大応答値の比較 (AIC003、簡易 A 予備)

表 1.3.5-5 最大応答値一覧 (SZO024、簡易 A 予備)

| 応答値 | SZO024 | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | M8.7 三連動 | | | | | | | | | M9.0 四連動 | | |
| | ×1.0 | | | ×1.25 | | | ×1.5 | | | ×1.0 | | |
| | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 |
| 最大応答変位 (cm) | 19.73 | 16.91 | 21.30 | 28.77 | 24.10 | 30.94 | 38.80 | 32.34 | 41.06 | 31.20 | 26.30 | 33.04 |
| 最大応答加速度 (cm/s ²) | 68.20 | 66.25 | 68.64 | 91.56 | 85.55 | 94.07 | 117.69 | 106.57 | 120.04 | 97.71 | 91.65 | 99.82 |
| 最大せん断力係数 C_i | 0.0695 | 0.0676 | 0.0700 | 0.0934 | 0.0872 | 0.0959 | 0.1200 | 0.1087 | 0.1224 | 0.0996 | 0.0935 | 0.1018 |
| 累積変位量 (m) | 9.669 | 8.538 | 10.32 | 13.20 | 11.77 | 13.87 | 16.97 | 15.25 | 17.59 | 13.36 | 11.98 | 13.52 |
| 等価エネルギー速度 V_E (m/s) | 2.042 | 2.102 | 2.084 | 2.477 | 2.581 | 2.489 | 2.883 | 3.027 | 2.870 | 2.263 | 2.336 | 2.250 |

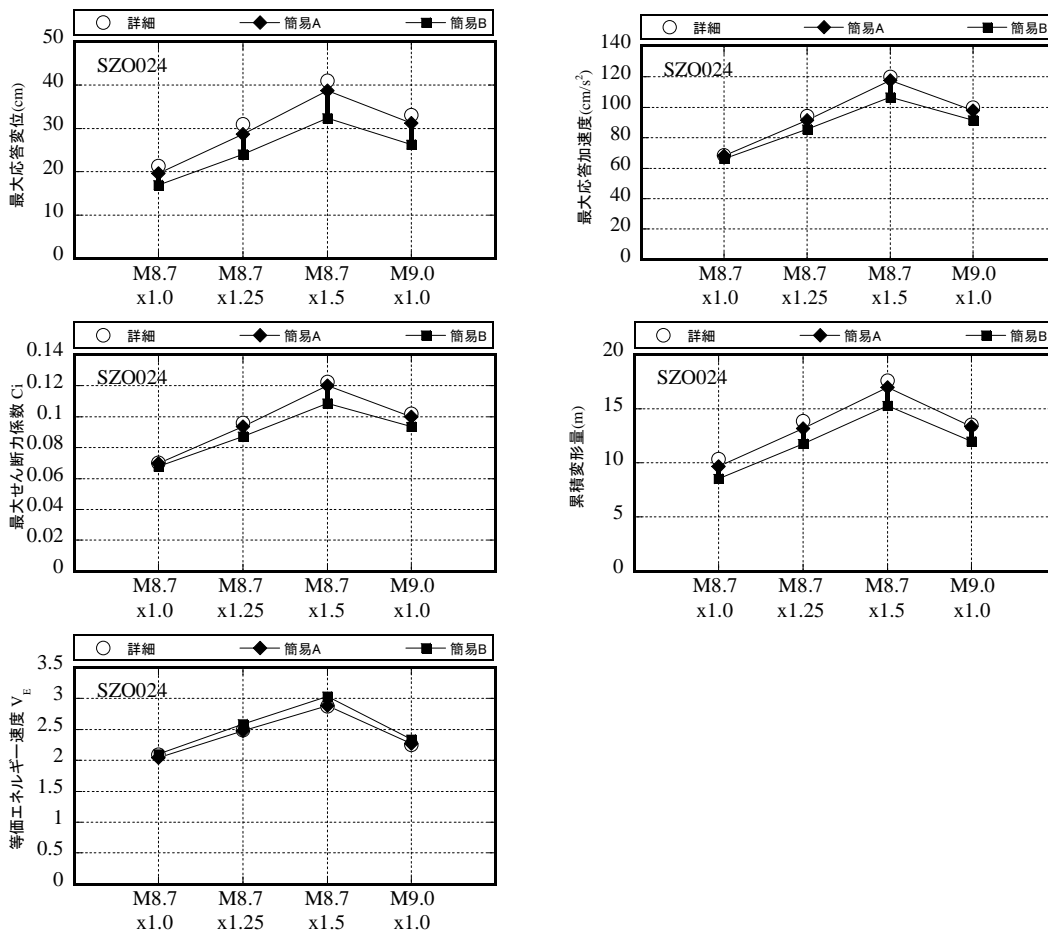


図 1.3.5-8 最大応答値の比較 (SZO024、簡易 A 予備)

表 1.3.5-6 最大応答値一覧 (KGIN、簡易 A 予備)

| 応答値 | KGIN | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | M8.7 三連動 | | | | | | | | | M9.0 四連動 | | |
| | ×1.0 | | | ×1.25 | | | ×1.5 | | | ×1.0 | | |
| | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A 予備 | 簡易 B | 詳細 |
| 最大応答変位 (cm) | 5.03 | 3.40 | 2.90 | 7.75 | 5.21 | 5.98 | 11.10 | 7.55 | 10.36 | 10.33 | 7.22 | 8.80 |
| 最大応答加速度 (cm/s ²) | 25.27 | 23.62 | 23.31 | 33.57 | 30.42 | 30.97 | 43.09 | 37.96 | 41.11 | 40.61 | 36.54 | 37.95 |
| 最大せん断力係数 C_i | 0.0258 | 0.0241 | 0.0238 | 0.0342 | 0.0310 | 0.0316 | 0.0439 | 0.0387 | 0.0419 | 0.0414 | 0.0373 | 0.0387 |
| 累積変位量 (m) | 3.028 | 2.500 | 1.678 | 4.300 | 3.389 | 3.276 | 5.837 | 4.435 | 5.577 | 5.800 | 4.339 | 4.385 |
| 等価エネルギー速度 V_E (m/s) | 0.736 | 0.654 | 0.571 | 0.980 | 0.860 | 0.859 | 1.241 | 1.088 | 1.197 | 1.176 | 1.024 | 1.055 |

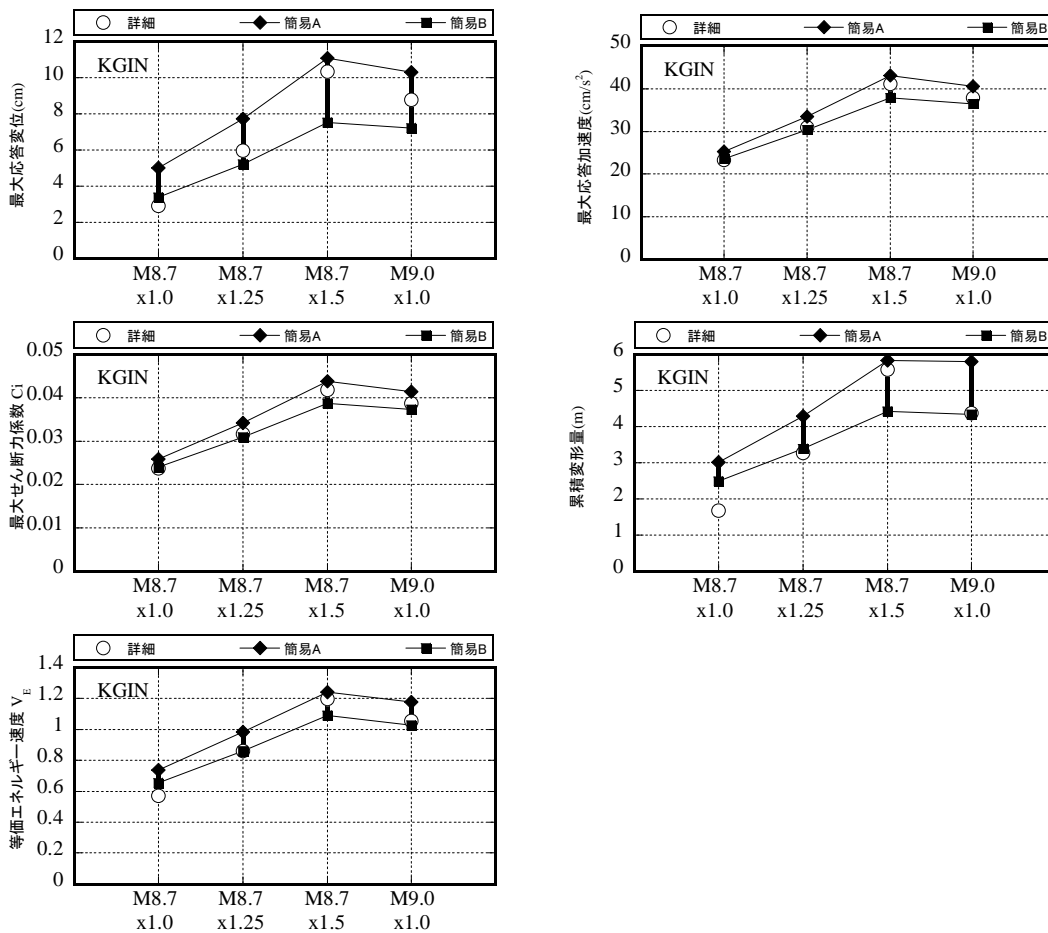
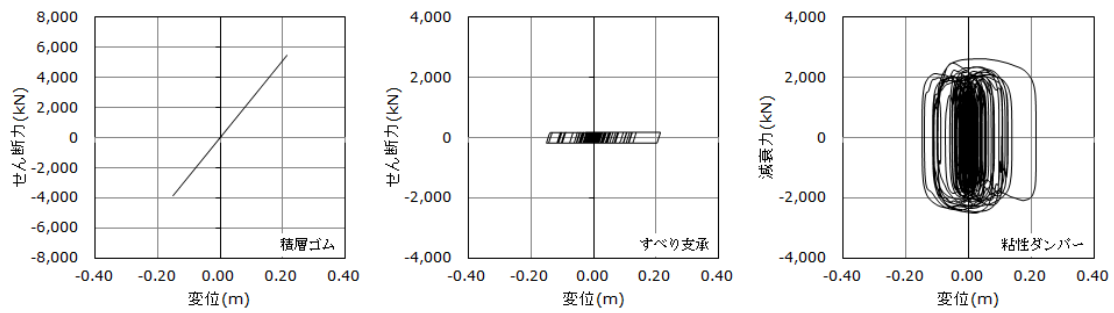
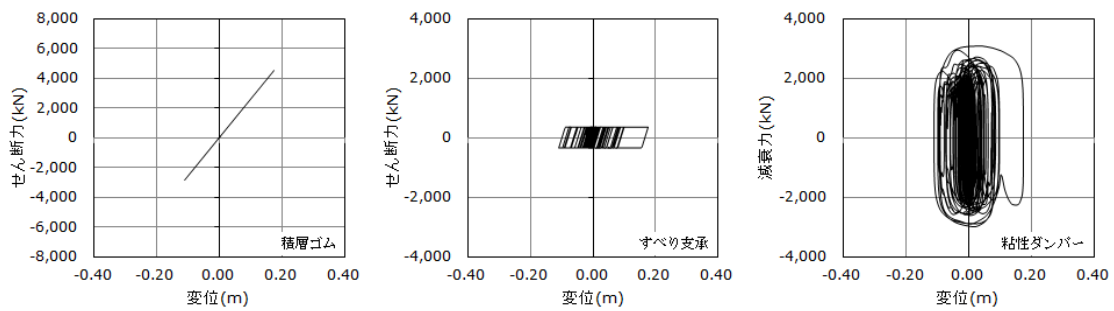


図 1.3.5-9 最大応答値の比較 (KGIN、簡易 A 予備)

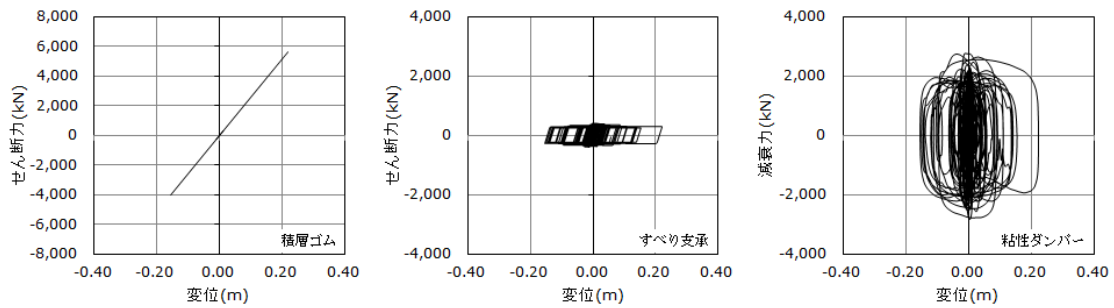
② 荷重変形関係



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

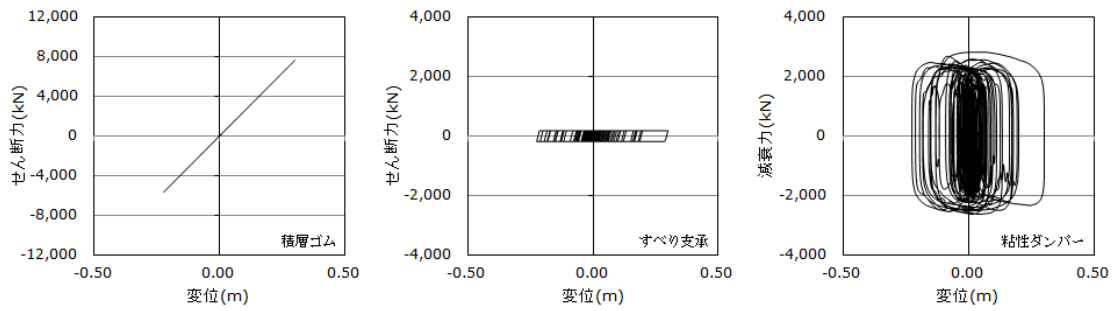


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

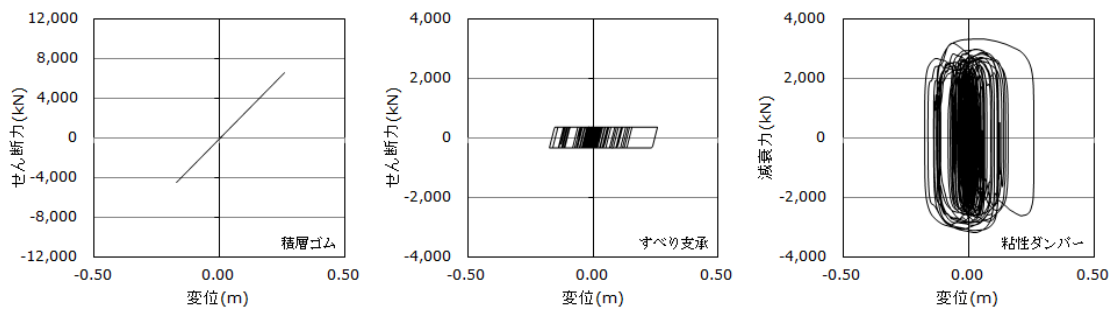


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

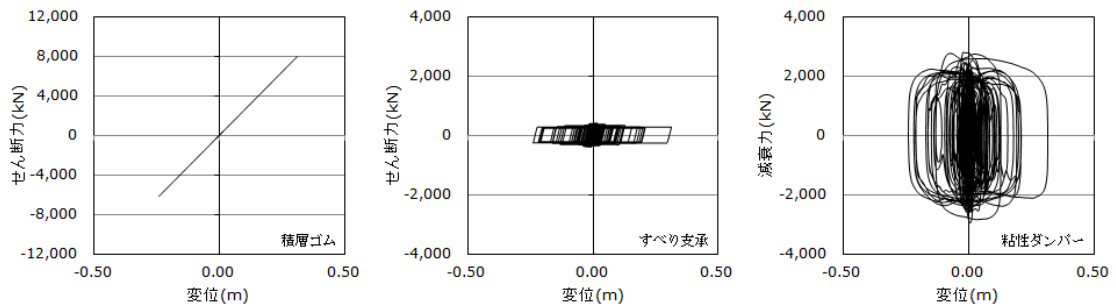
図 1.3.5-10 免震層の荷重変形関係 (OSKH02・M8.7・1.0 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

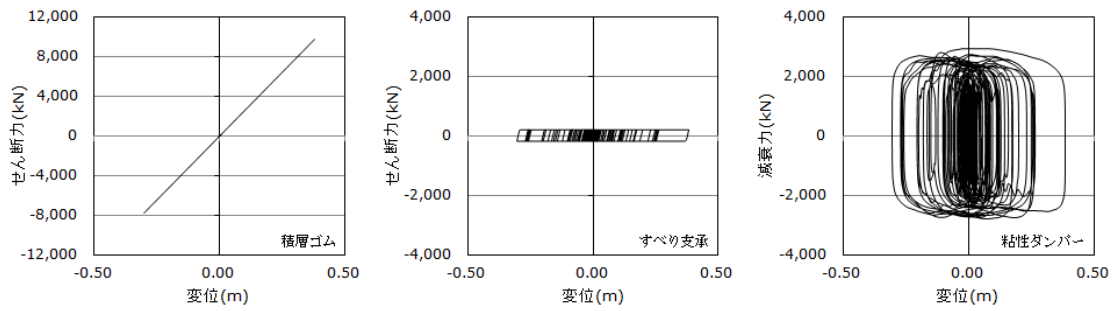


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

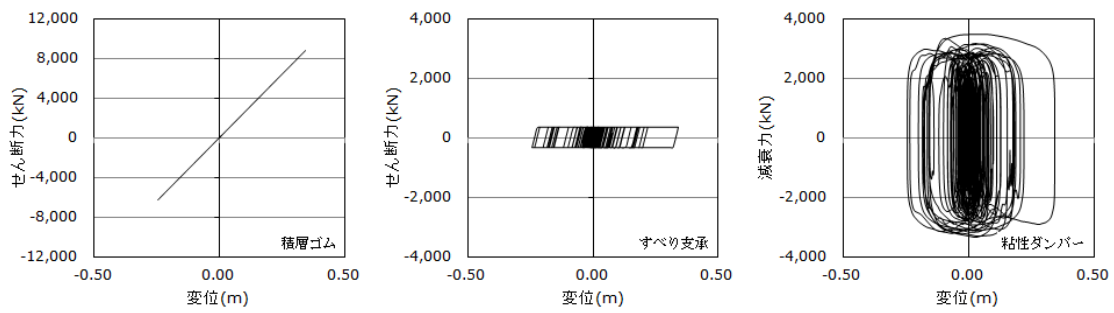


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

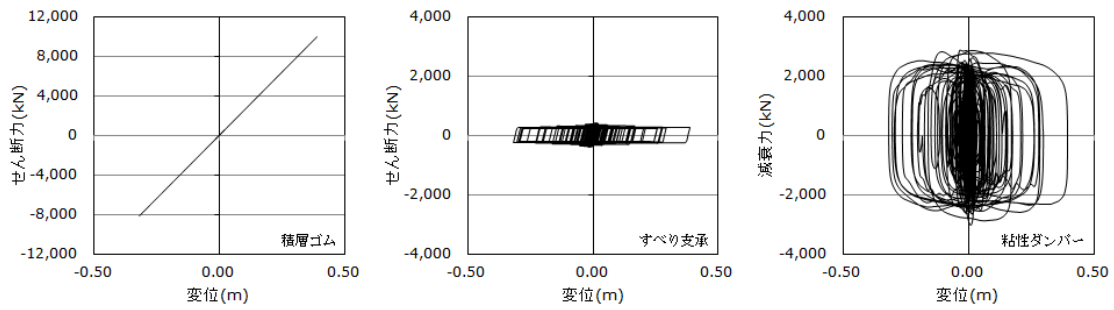
図 1.3.5-11 免震層の荷重変形関係 (OSKH02・M8.7・1.25 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

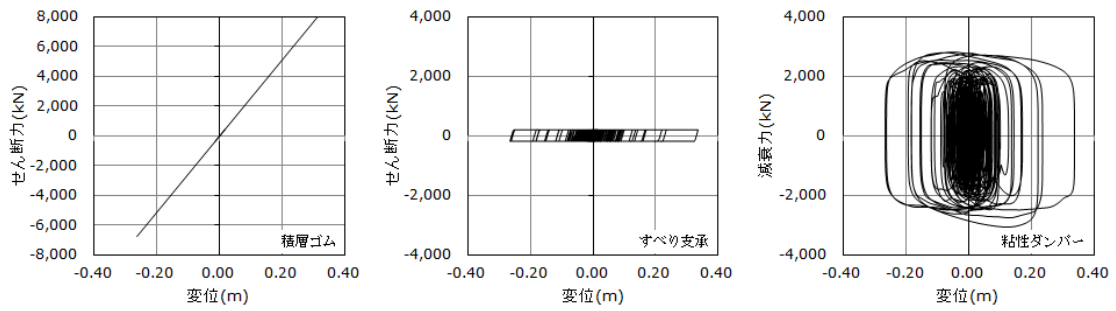


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

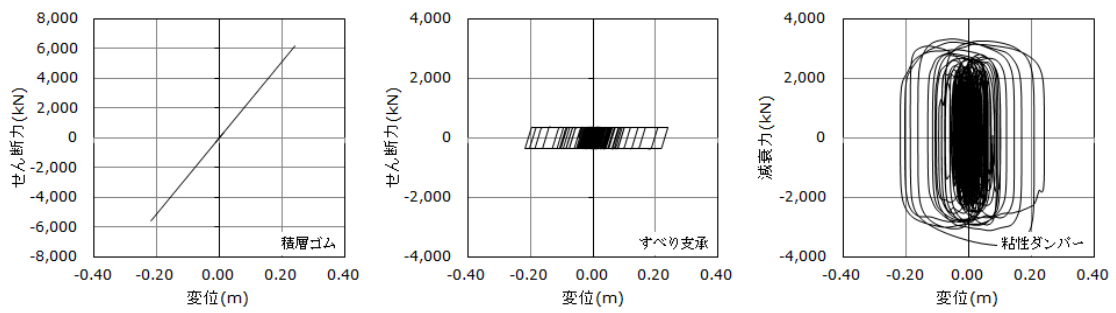


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

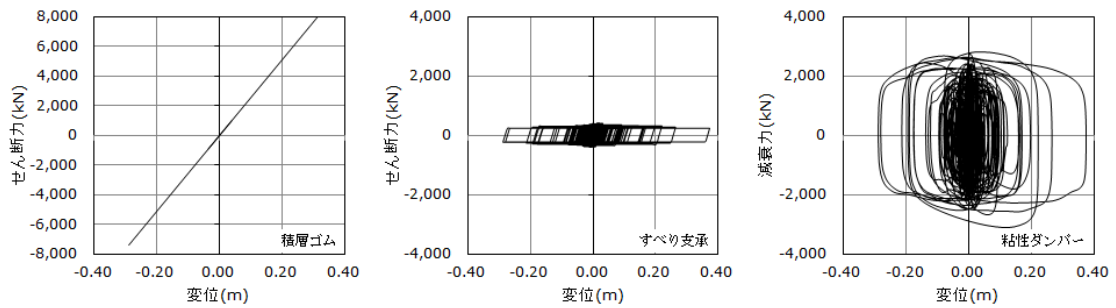
図 1.3.5-12 免震層の荷重変形関係 (OSKH02・M8.7・1.5 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

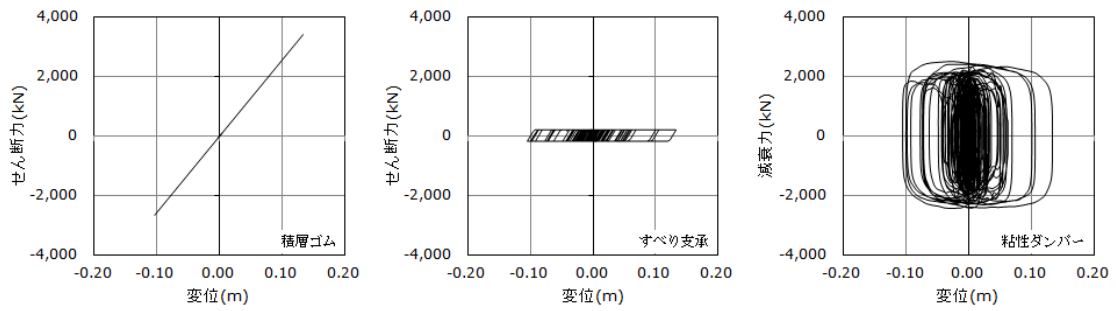


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

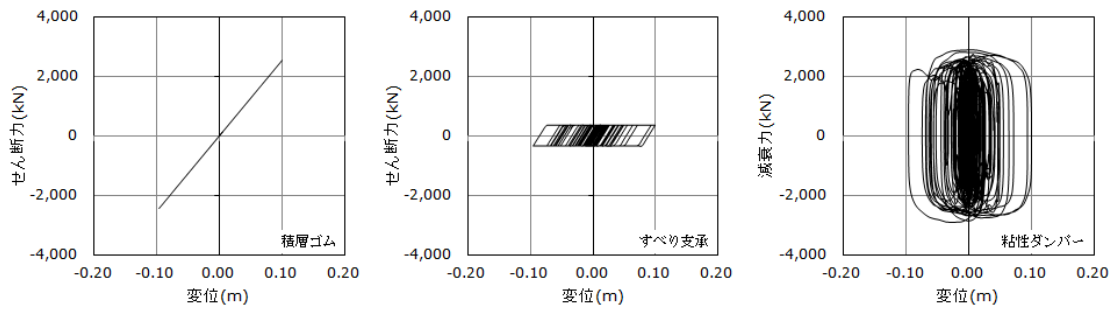


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

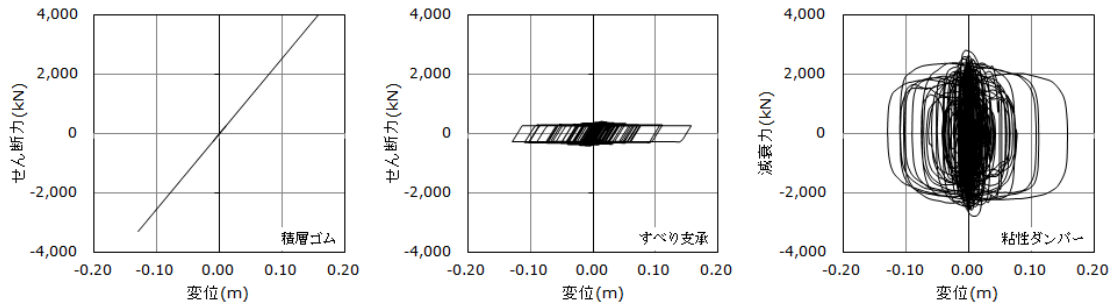
図 1.3.5-13 免震層の荷重変形関係 (OSKH02・M9.0・1.0 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

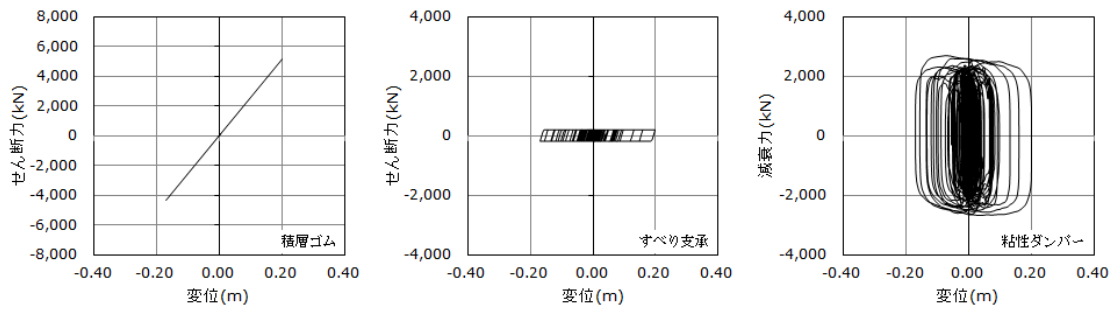


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

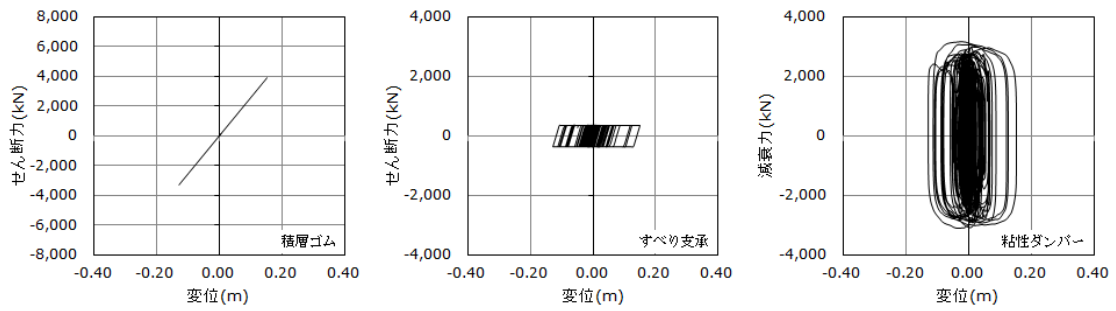


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

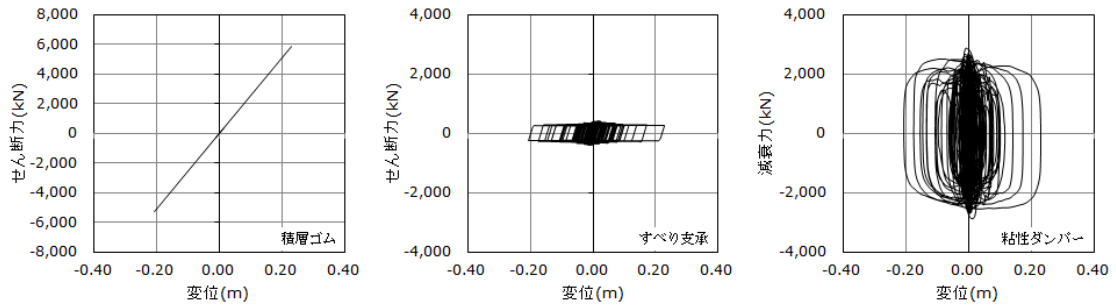
図 1.3.5-14 免震層の荷重変形関係 (AIC003・M8.7・1.0 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

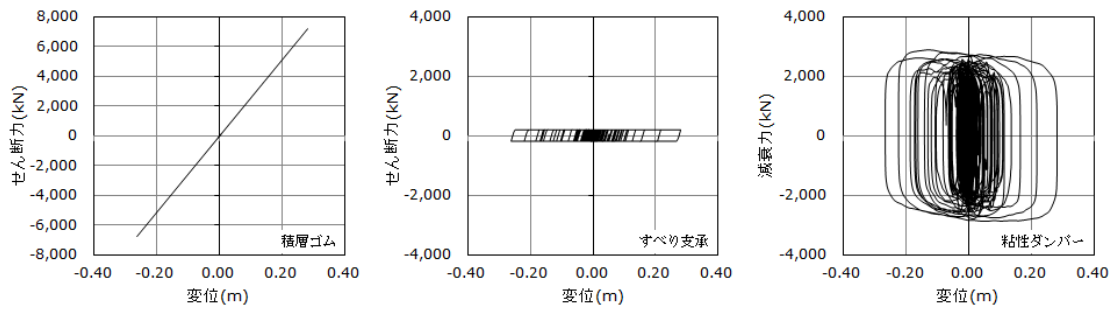


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

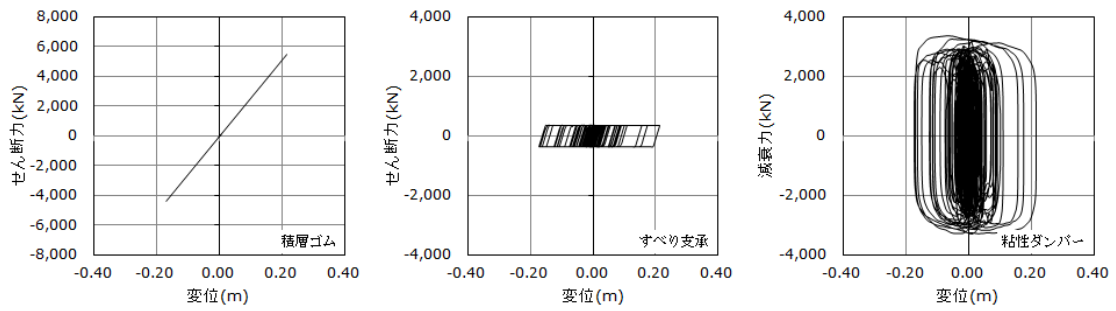


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

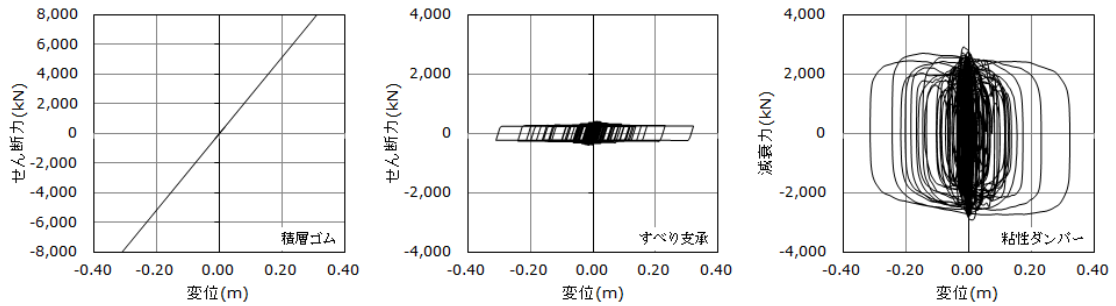
図 1.3.5-15 免震層の荷重変形関係 (AIC003・M8.7・1.25 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

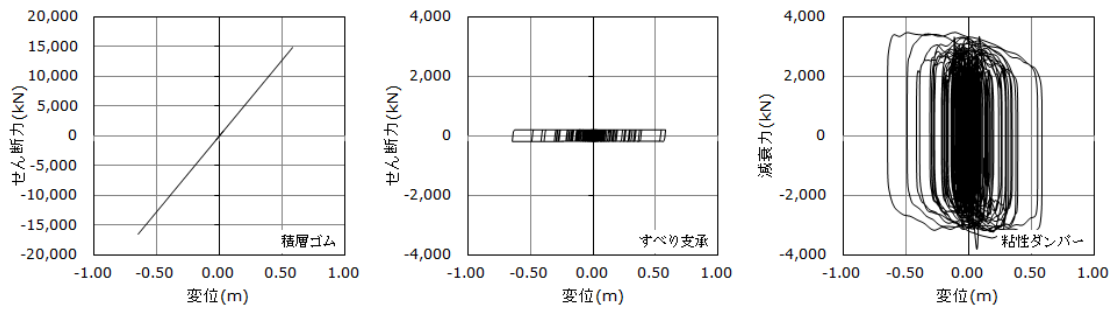


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

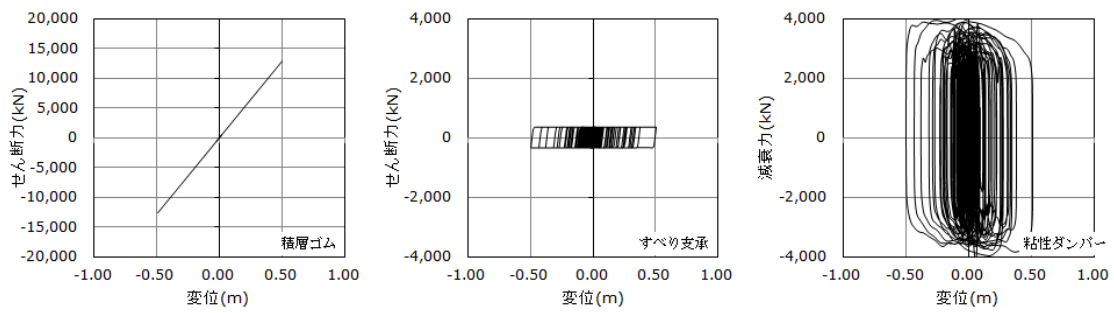


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

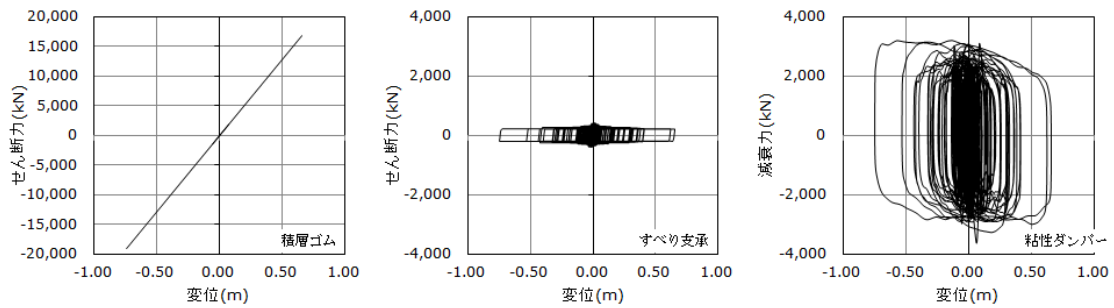
図 1.3.5-16 免震層の荷重変形関係 (AIC003・M8.7・1.5倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

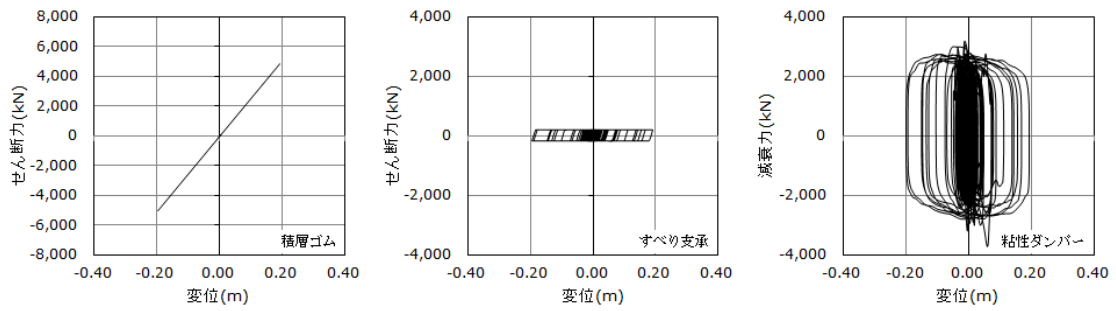


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

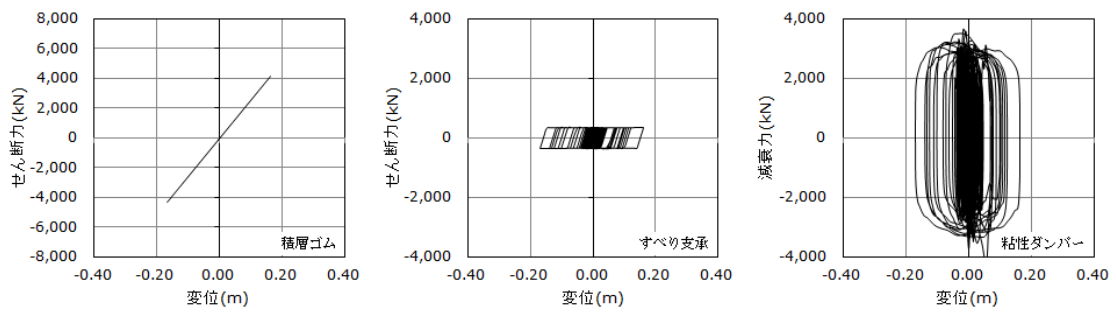


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

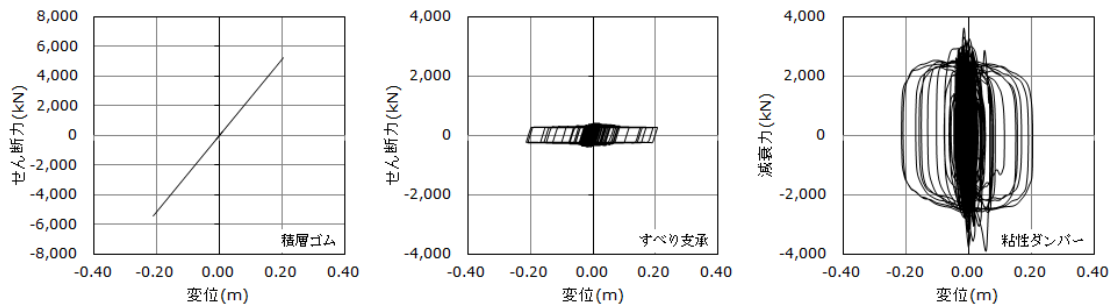
図 1.3.5-17 免震層の荷重変形関係 (AIC003・M9.0・1.0 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

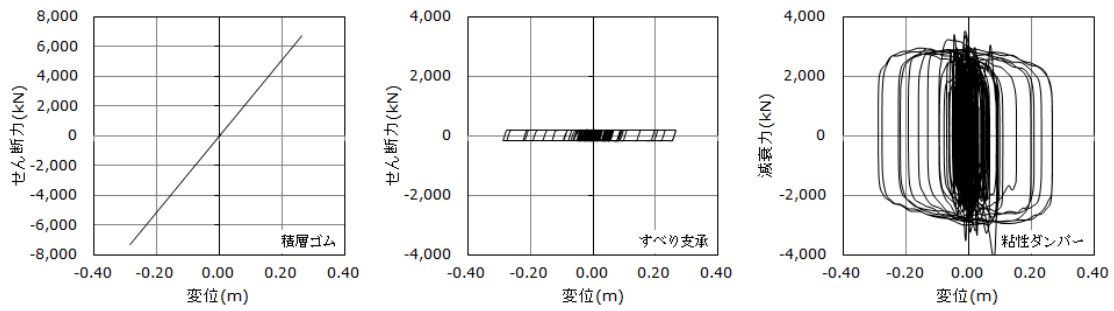


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

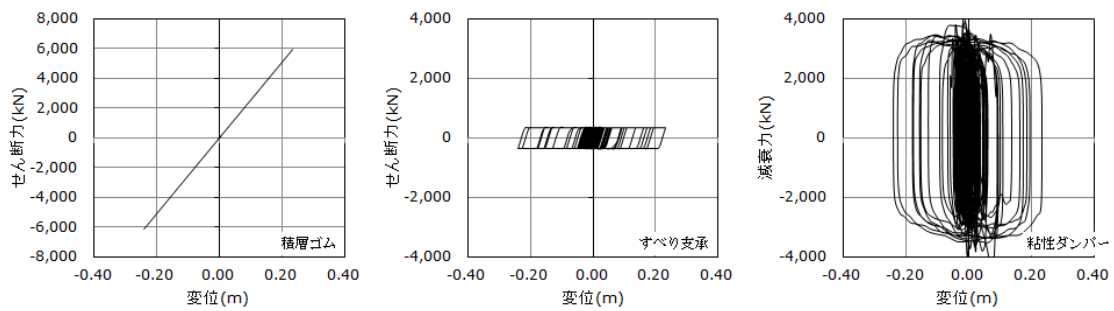


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

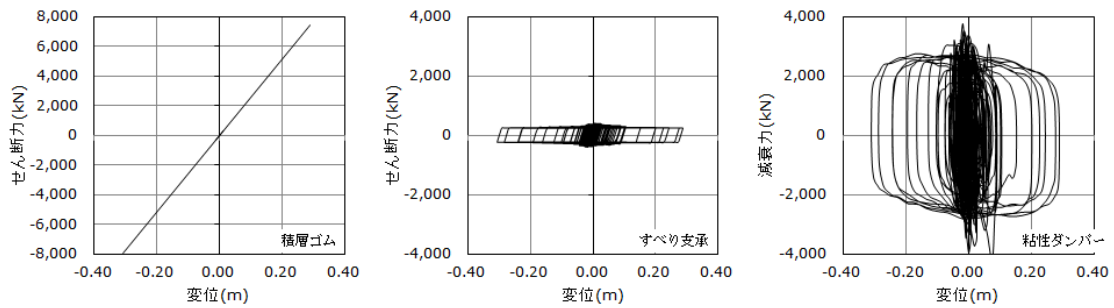
図 1.3.5-18 免震層の荷重変形関係 (SZO024・M8.7・1.0倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

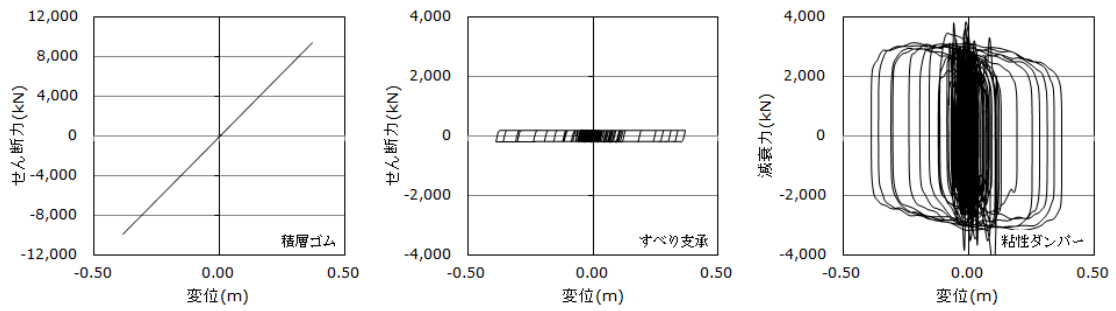


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

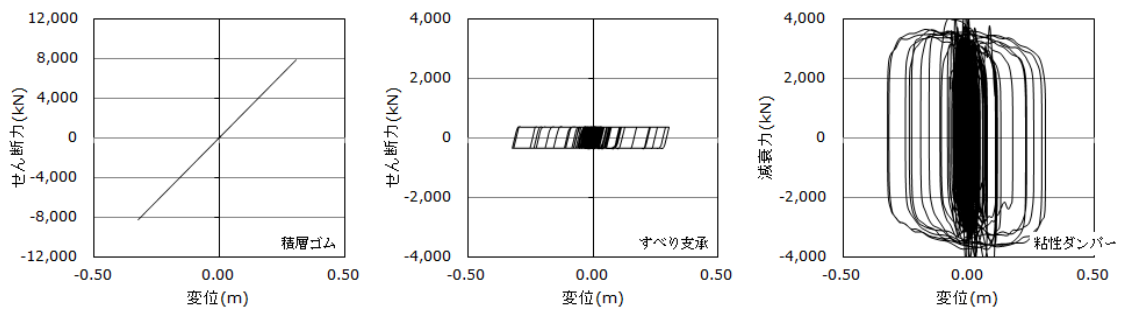


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

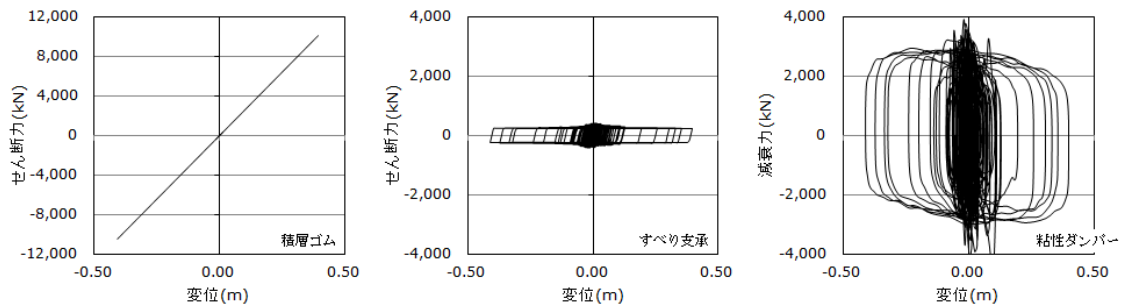
図 1.3.5-19 免震層の荷重変形関係 (SZO024・M8.7・1.25 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

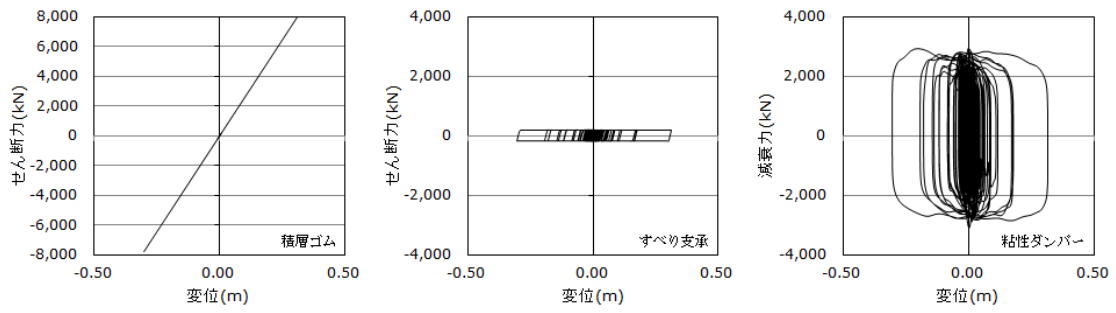


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

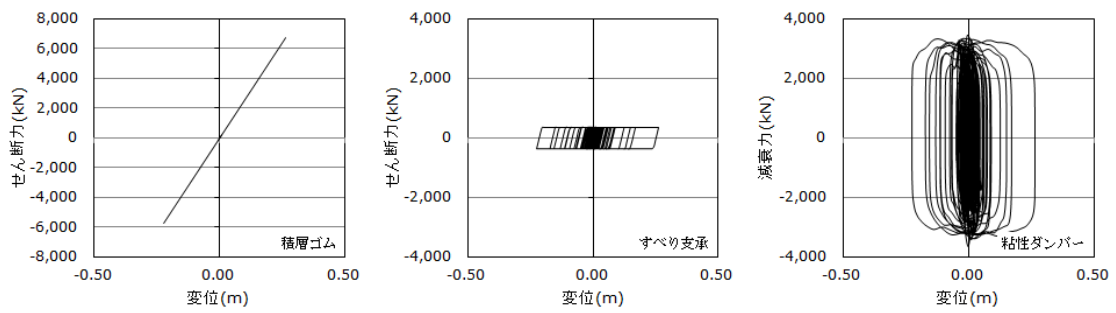


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

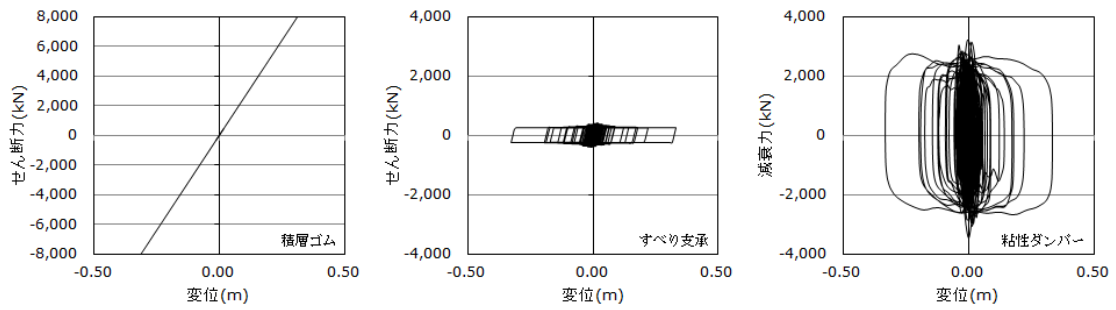
図 1.3.5-20 免震層の荷重変形関係 (SZO024・M8.7・1.5 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

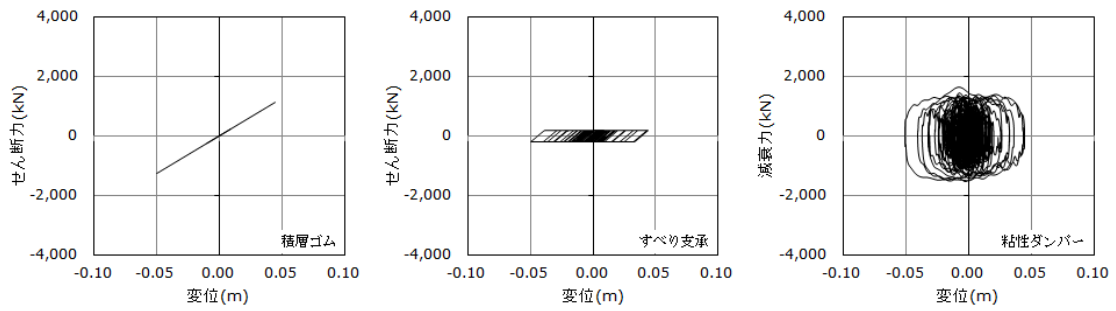


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

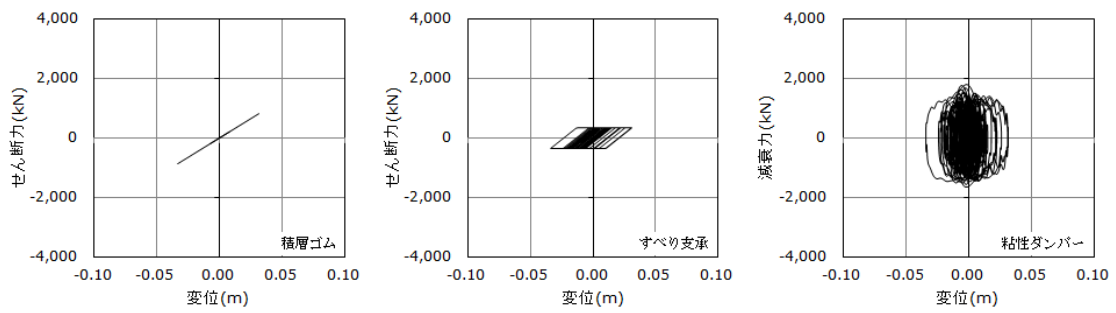


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

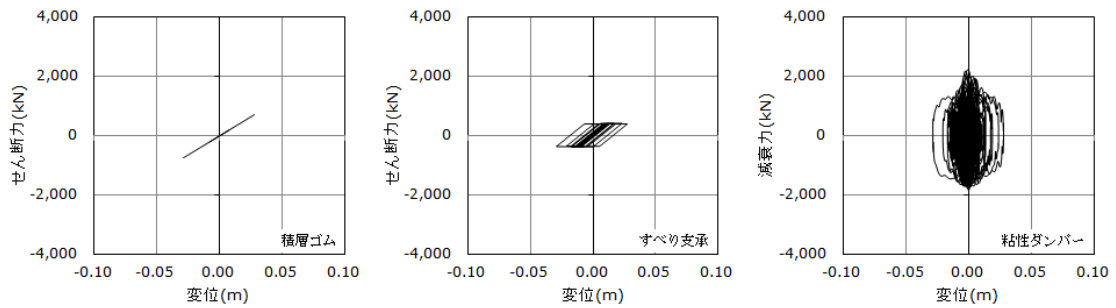
図 1.3.5-21 免震層の荷重変形関係 (SZO024・M9.0・1.0倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

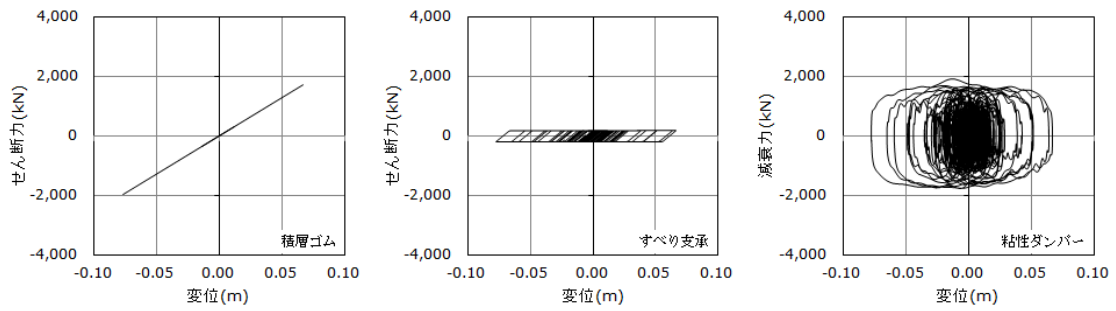


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

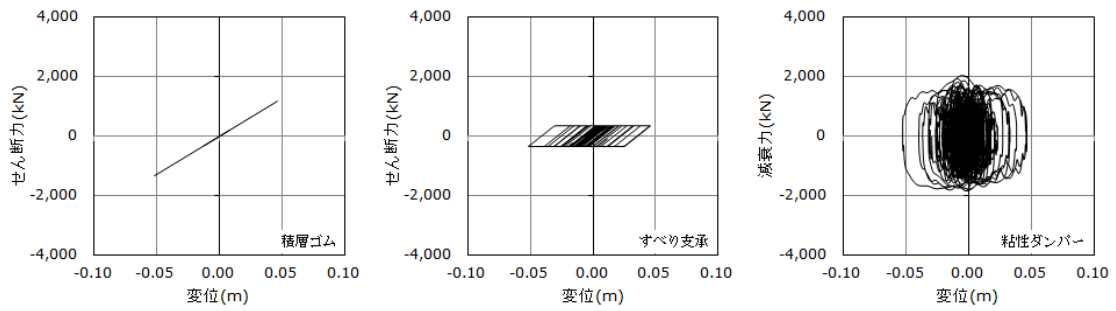


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

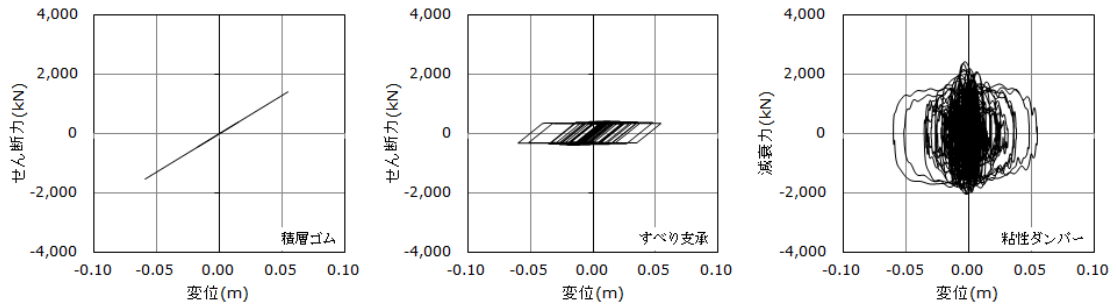
図 1.3.5-22 免震層の荷重変形関係 (KGIN・M8.7・1.0 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

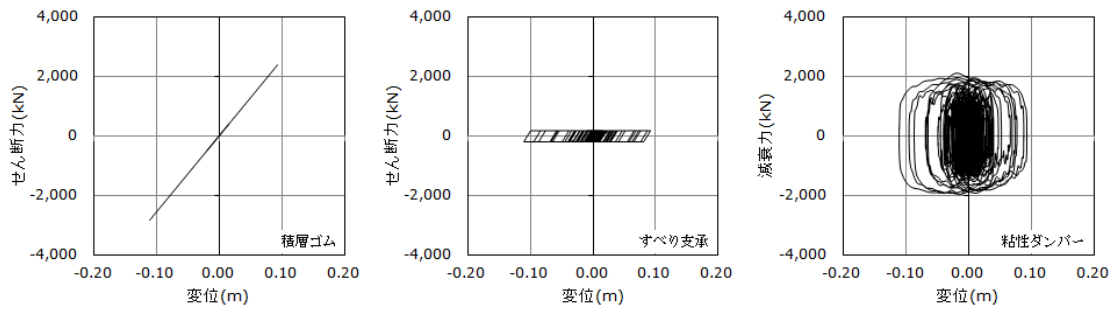


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

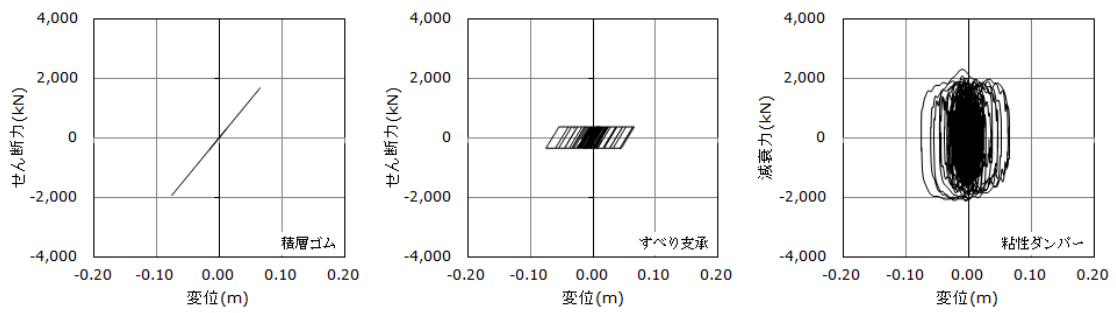


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

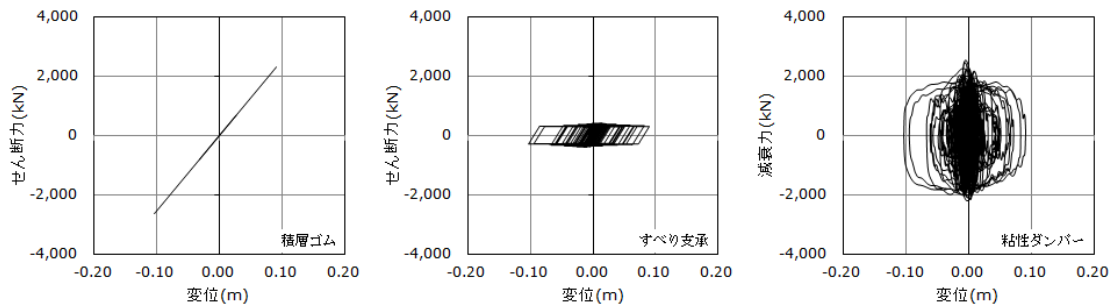
図 1.3.5-23 免震層の荷重変形関係 (KGIN・M8.7・1.25 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

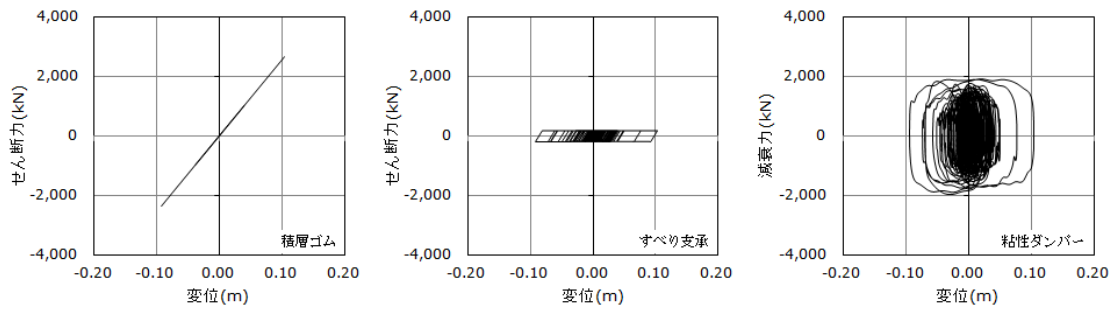


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

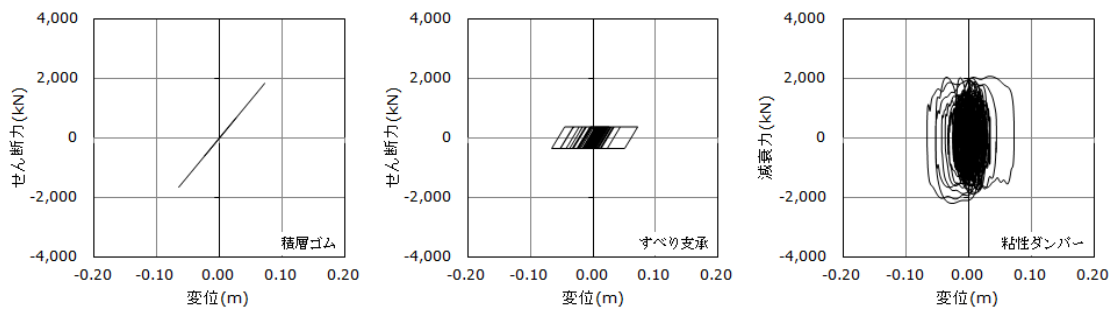


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

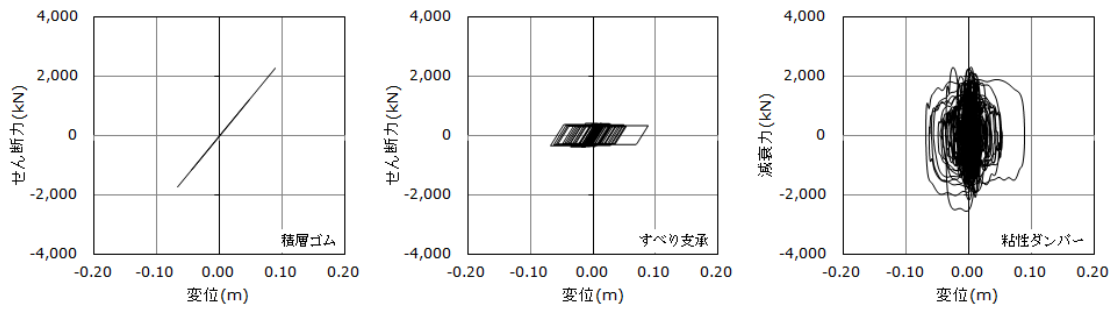
図 1.3.5-24 免震層の荷重変形関係 (KGIN・M8.7・1.5 倍入力)



(a)簡易モデル A 予備 (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=15^\circ\text{C}$)



(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)



(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

図 1.3.5-25 免震層の荷重変形関係 (KGIN・M9.0・1.0 倍入力)

2) 換算温度入力とした簡易 A モデルの応答結果

簡易 A 予備モデルによる解析結果の「最終累積吸収エネルギーの 95%」の値を基に計算された換算温度を用いたモデルの解析結果を示す。なお、計算に用いた累積吸収エネルギー量および計算された上昇温度、換算温度は下表に示すとおりである。最も大きな温度増分は、AIC003 の M9.0 の 1 倍入力時における 57.2°C であった。

表 1.3.5-7 簡易 A モデルの換算温度（簡易 A 予備の最終累積エネルギー95%から計算）

| Case | | 粘性ダンパー Ed(Nm=J) 4基分 | Ed/Vv (J/cc) | 温度増分 Δ T (°C) | 入力T ₀ |
|---------|-----------|---------------------------|-----------------|---------------------|------------------|
| OSKH002 | M8.7x1.00 | 1.56E+07 | 1.25E+03 | 17.7 | 32.7 |
| | M8.7x1.25 | 2.54E+07 | 2.04E+03 | 24.9 | 39.9 |
| | M8.7x1.50 | 3.69E+07 | 2.97E+03 | 32.3 | 47.3 |
| | M9.0x1.00 | 2.96E+07 | 2.38E+03 | 27.7 | 42.7 |
| AIC003 | M8.7x1.00 | 1.18E+07 | 9.52E+02 | 14.6 | 29.6 |
| | M8.7x1.25 | 1.84E+07 | 1.48E+03 | 19.8 | 34.8 |
| | M8.7x1.50 | 2.62E+07 | 2.10E+03 | 25.4 | 40.4 |
| | M9.0x1.00 | 8.33E+07 | 6.69E+03 | 57.2 | 72.2 |
| SZO024 | M8.7x1.00 | 1.94E+07 | 1.56E+03 | 20.6 | 35.6 |
| | M8.7x1.25 | 2.87E+07 | 2.30E+03 | 27.1 | 42.1 |
| | M8.7x1.50 | 3.89E+07 | 3.13E+03 | 33.6 | 48.6 |
| | M9.0x1.00 | 2.40E+07 | 1.93E+03 | 23.9 | 38.9 |
| KGIN | M8.7x1.00 | 2.43E+06 | 1.96E+02 | 4.8 | 19.8 |
| | M8.7x1.25 | 4.33E+06 | 3.48E+02 | 7.2 | 22.2 |
| | M8.7x1.50 | 6.96E+06 | 5.60E+02 | 10.1 | 25.1 |
| | M9.0x1.00 | 6.21E+06 | 4.99E+02 | 9.3 | 24.3 |

※Ed：簡易 A 予備の最終累積エネルギーの 95%

簡易 A モデルに換算温度を入力した場合における、簡易 A、簡易 B、および詳細モデルの応答結果の比較を行う。比較する応答値は、免震層の最大応答変形および加速度、せん断力係数 Ci、累積変形量、等価エネルギー速度 V_E、免震部材の荷重変形関係とする。

表 1.3.5-8～表 1.3.5-11 に最大応答値一覧表を、図 1.3.5-26～図 1.3.5-29 に各モデルにおける最大応答値のばらつきを、図 1.3.5-30～図 1.3.5-45 には各免震層の荷重変形関係を示す。なお、荷重変形関係の縦軸は、各免震部材の減衰力の合計である。

表 1.3.5-8～表 1.3.5-11 および図 1.3.5-26～図 1.3.5-29 より、簡易 A モデルに換算温度を入力した結果、詳細モデルよりも変位を大きめに評価する結果となっている。その他の応答値についても簡易 A および B の両簡易モデルの結果の間に詳細モデルの結果が入る性状に修正された。これは、図 1.3.5-30～図 1.3.5-45 に示した荷重変形関係においても同様の傾向であった。

以上の結果より、簡易 A モデルの温度入力値を換算温度とすることにより、繰り返し依存性による剛性低下は反映され、詳細モデルよりも応答変位を大きくするといえる。

この方法により、簡易 A、B モデルを設定すれば、詳細モデルの結果を挟み込めるといえる。

① 最大応答値一覧

表 1.3.5-8 最大応答値一覧 (OSKH02、簡易 A)

| 応答値 | OSKH02 | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | M8.7 三連動 | | | | | | | | | M9.0 四連動 | | |
| | ×1.0 | | | ×1.25 | | | ×1.5 | | | ×1.0 | | |
| | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 |
| 最大応答変位 (cm) | 23.08 | 17.55 | 21.99 | 31.70 | 25.78 | 31.20 | 39.92 | 34.36 | 39.07 | 39.33 | 24.06 | 37.35 |
| 最大応答加速度 (cm/s ²) | 73.79 | 68.38 | 72.76 | 94.99 | 89.85 | 94.95 | 114.77 | 111.91 | 115.31 | 113.90 | 84.49 | 109.32 |
| 最大せん断力係数 C_i | 0.0752 | 0.0697 | 0.0742 | 0.0969 | 0.0916 | 0.0968 | 0.1170 | 0.1141 | 0.1176 | 0.1161 | 0.0862 | 0.1115 |
| 累積変位量 (m) | 10.37 | 6.998 | 10.08 | 15.30 | 10.36 | 14.53 | 20.82 | 14.24 | 19.44 | 19.34 | 12.33 | 19.36 |
| 等価エネルギー速度 V_E (m/s) | 1.879 | 1.749 | 1.918 | 2.361 | 2.271 | 2.412 | 2.812 | 2.786 | 2.880 | 2.590 | 2.445 | 2.641 |

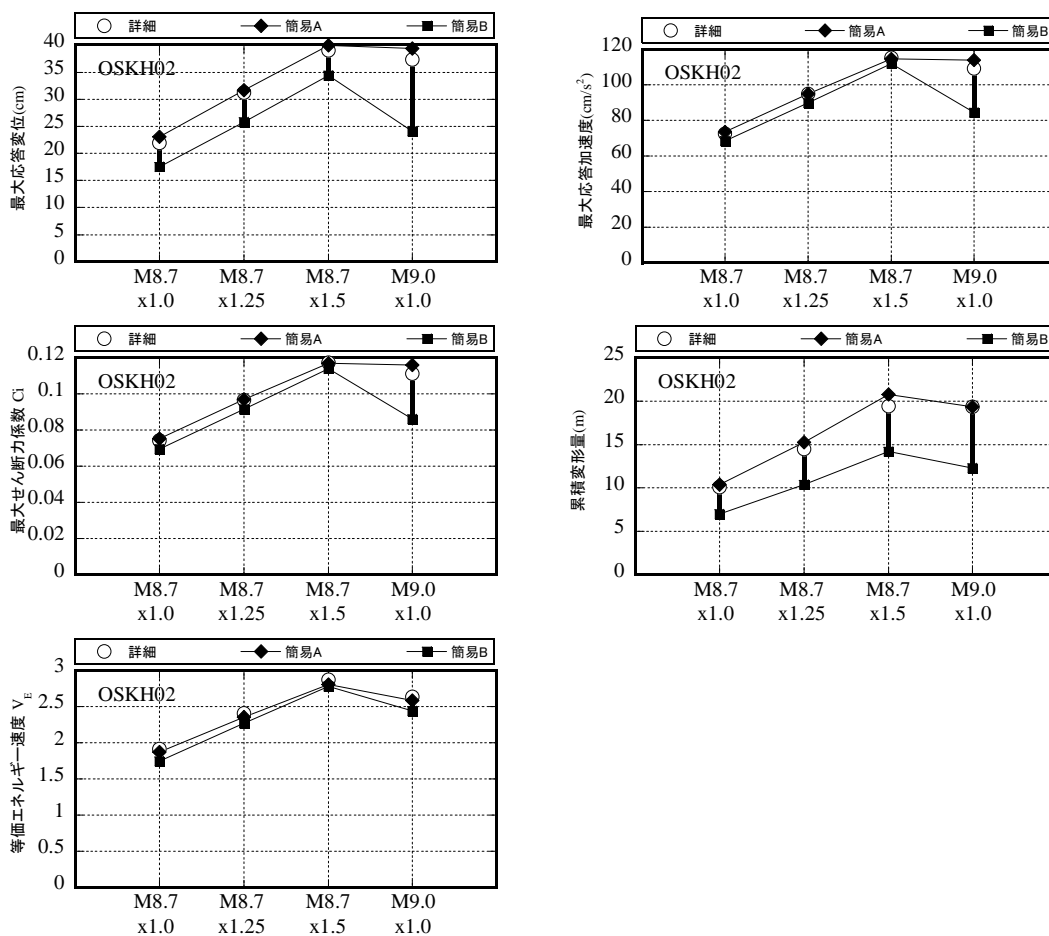


図 1.3.5-26 最大応答値の比較 (OSKH02、簡易 A)

表 1.3.5-9 最大応答値一覧 (AIC003、簡易 A)

| 応答値 | AIC003 | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | M8.7 三連動 | | | | | | | | | M9.0 四連動 | | |
| | ×1.0 | | | ×1.25 | | | ×1.5 | | | ×1.0 | | |
| | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 |
| 最大応答変位 (cm) | 15.08 | 9.96 | 15.67 | 23.44 | 15.16 | 22.96 | 33.93 | 21.45 | 32.30 | 83.69 | 50.42 | 74.83 |
| 最大応答加速度 (cm/s ²) | 53.36 | 48.56 | 54.30 | 74.45 | 62.05 | 73.51 | 100.62 | 78.57 | 97.32 | 221.81 | 152.40 | 202.77 |
| 最大せん断力係数 C_i | 0.0544 | 0.0495 | 0.0554 | 0.0759 | 0.0633 | 0.0750 | 0.1026 | 0.0801 | 0.0992 | 0.2262 | 0.1554 | 0.2068 |
| 累積変位量 (m) | 7.829 | 6.029 | 8.048 | 11.15 | 8.387 | 11.09 | 15.05 | 11.03 | 14.57 | 46.85 | 30.99 | 41.86 |
| 等価エネルギー速度 V_E (m/s) | 1.604 | 1.603 | 1.699 | 1.992 | 2.002 | 2.081 | 2.377 | 2.394 | 2.464 | 4.137 | 4.282 | 4.263 |

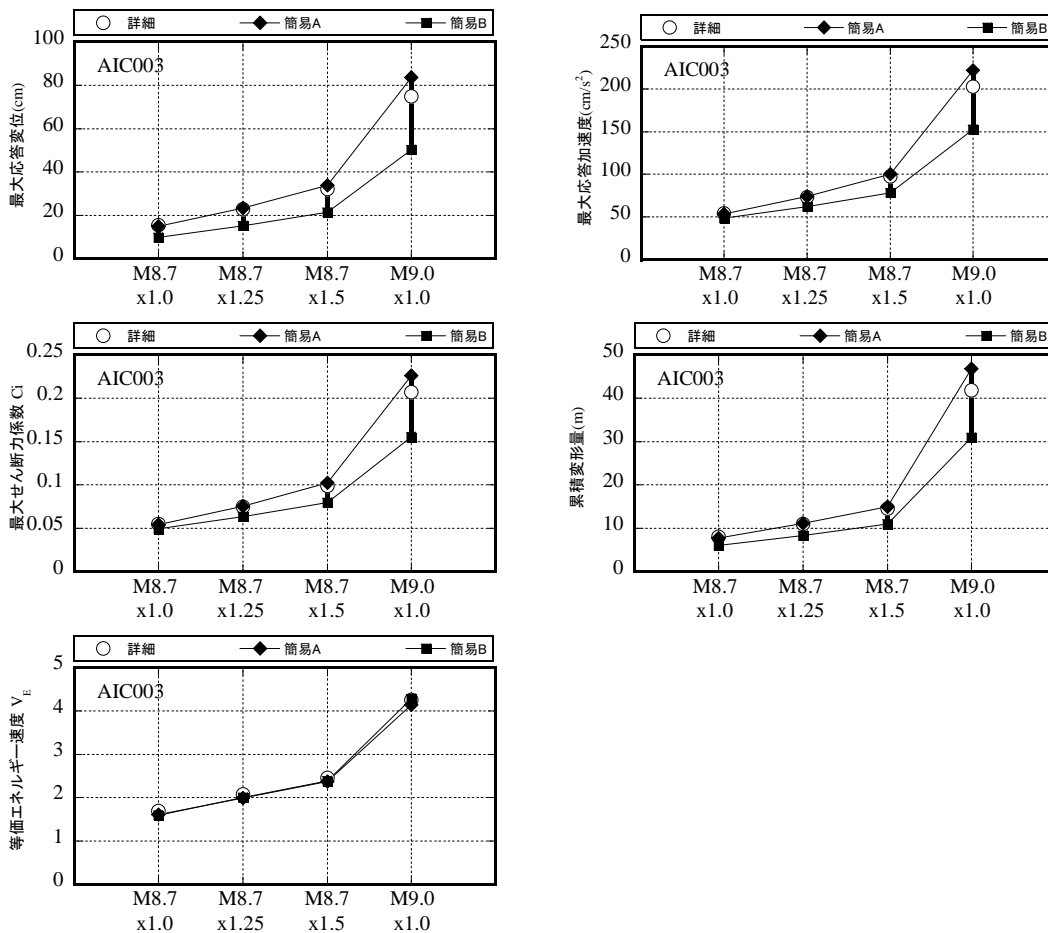


図 1.3.5-27 最大応答値の比較 (AIC003、簡易 A)

表 1.3.5-10 最大応答値一覧 (SZO024、簡易 A)

| 応答値 | SZO024 | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | M8.7 三連動 | | | | | | | | | M9.0 四連動 | | |
| | ×1.0 | | | ×1.25 | | | ×1.5 | | | ×1.0 | | |
| | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 |
| 最大応答変位 (cm) | 21.86 | 16.91 | 21.30 | 32.16 | 24.10 | 30.94 | 42.80 | 32.34 | 41.06 | 34.16 | 26.30 | 33.04 |
| 最大応答加速度 (cm/s ²) | 70.01 | 66.25 | 68.64 | 96.39 | 85.55 | 94.07 | 122.63 | 106.57 | 120.04 | 101.53 | 91.65 | 99.82 |
| 最大せん断力係数 C_i | 0.0714 | 0.0676 | 0.0700 | 0.0983 | 0.0872 | 0.0959 | 0.1250 | 0.1087 | 0.1224 | 0.1035 | 0.0935 | 0.1018 |
| 累積変位量 (m) | 10.58 | 8.538 | 10.32 | 14.53 | 11.77 | 13.87 | 18.78 | 15.25 | 17.59 | 14.68 | 11.98 | 13.52 |
| 等価エネルギー速度 V_E (m/s) | 2.000 | 2.102 | 2.084 | 2.395 | 2.581 | 2.489 | 2.755 | 3.027 | 2.870 | 2.204 | 2.336 | 2.250 |

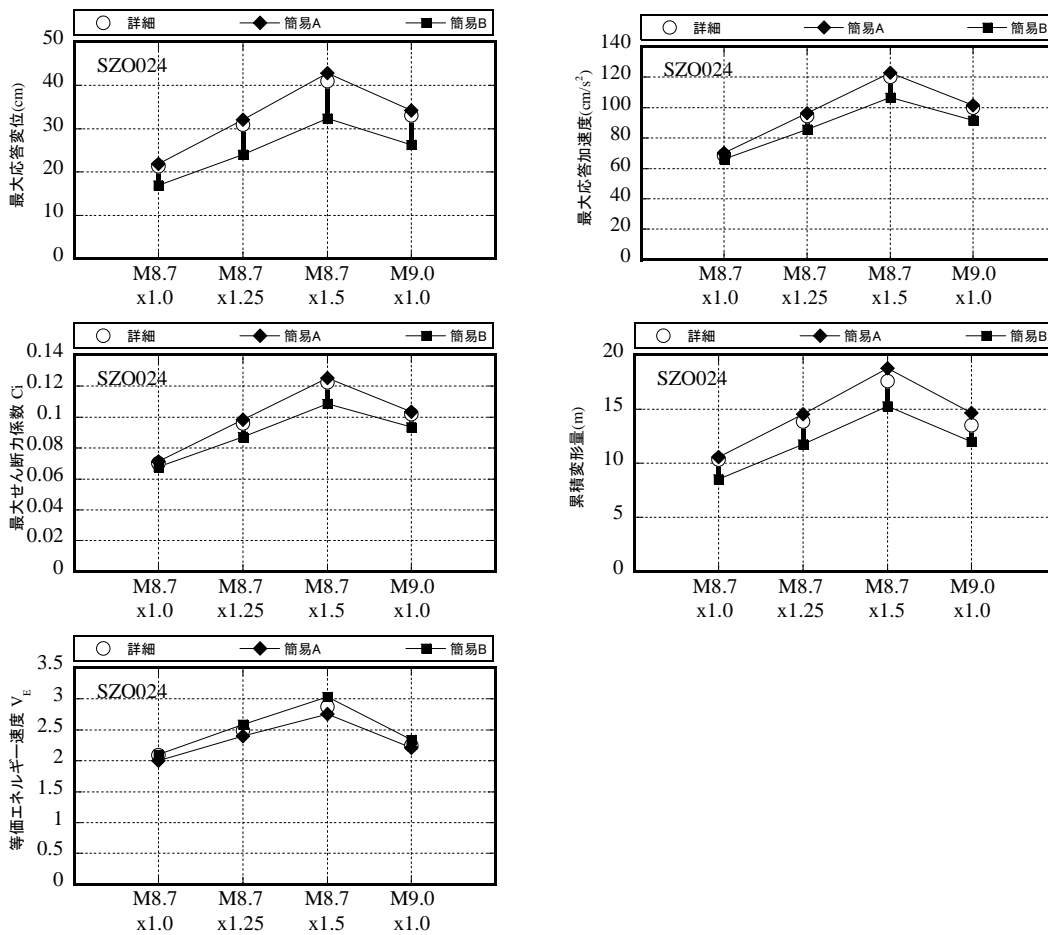


図 1.3.5-28 最大応答値の比較 (SZO024、簡易 A)

表 1.3.5-11 最大応答値一覧 (KGIN、簡易 A)

| 応答値 | KGIN | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | M8.7 三連動 | | | | | | | | | M9.0 四連動 | | |
| | ×1.0 | | | ×1.25 | | | ×1.5 | | | ×1.0 | | |
| | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 | 簡易 A | 簡易 B | 詳細 |
| 最大応答変位 (cm) | 5.40 | 3.40 | 2.90 | 8.47 | 5.21 | 5.98 | 12.26 | 7.55 | 10.36 | 11.17 | 7.22 | 8.80 |
| 最大応答加速度 (cm/s ²) | 25.66 | 23.62 | 23.31 | 34.53 | 30.42 | 30.97 | 44.61 | 37.96 | 41.11 | 41.23 | 36.54 | 37.95 |
| 最大せん断力係数 C_i | 0.0262 | 0.0241 | 0.0238 | 0.0352 | 0.0310 | 0.0316 | 0.0455 | 0.0387 | 0.0419 | 0.0420 | 0.0373 | 0.0387 |
| 累積変位量 (m) | 3.227 | 2.500 | 1.678 | 4.723 | 3.389 | 3.276 | 6.616 | 4.435 | 5.577 | 6.633 | 4.339 | 4.385 |
| 等価エネルギー速度 V_E (m/s) | 0.755 | 0.654 | 0.571 | 1.014 | 0.860 | 0.859 | 1.290 | 1.088 | 1.197 | 1.231 | 1.024 | 1.055 |

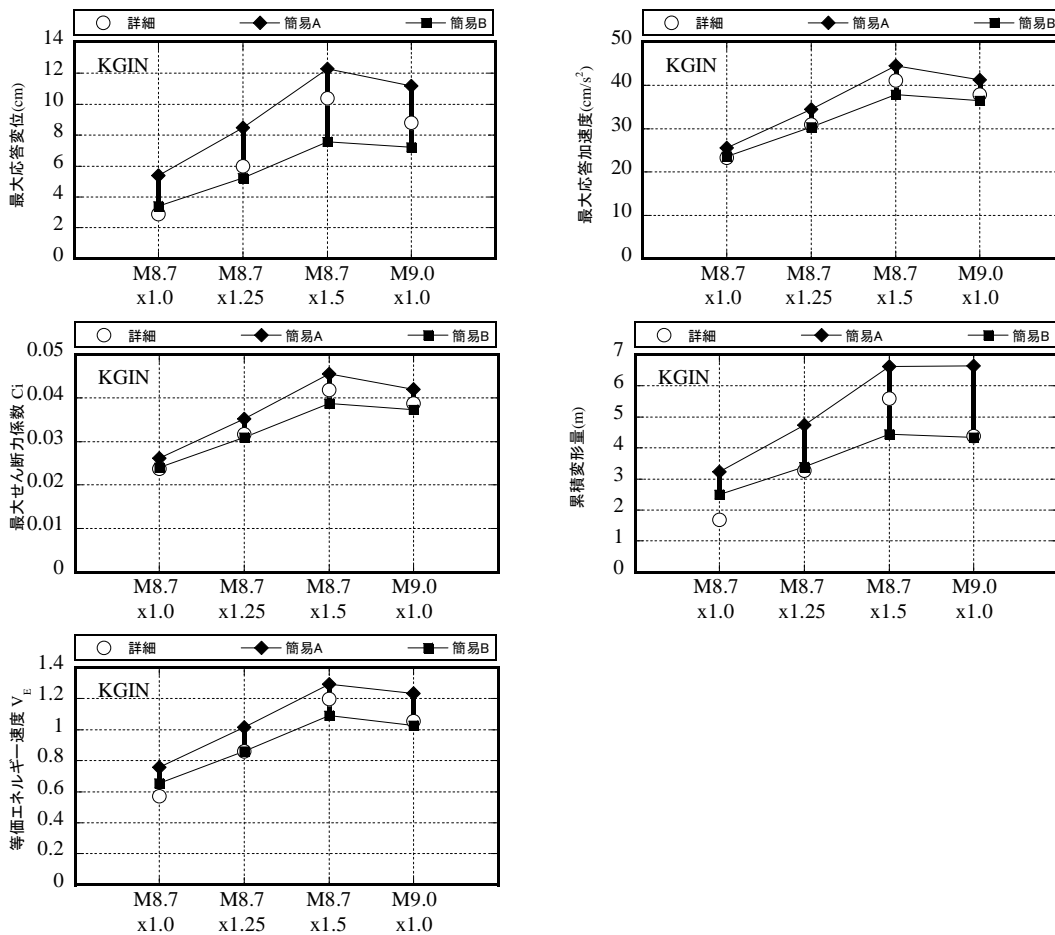
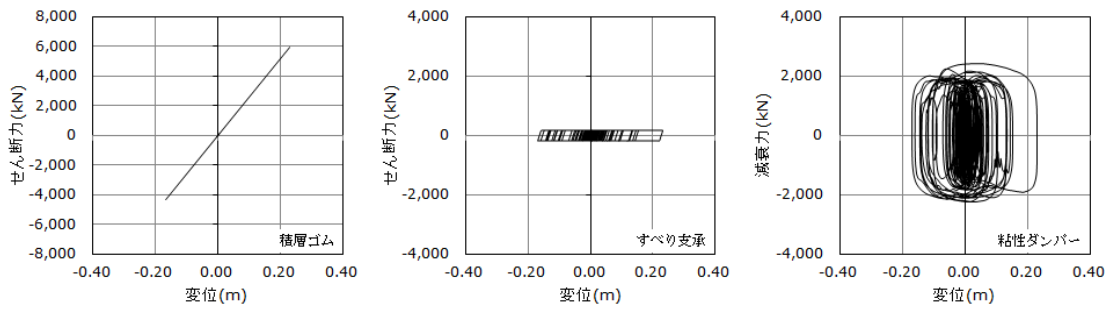
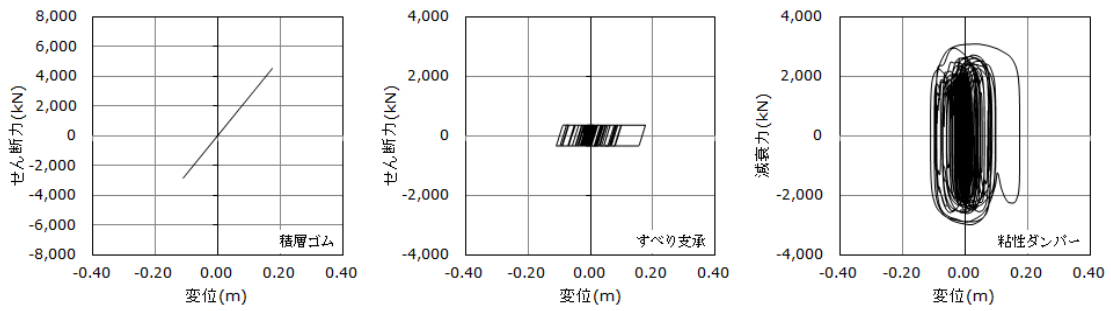


図 1.3.5-29 最大応答値の比較 (KGIN、簡易 A)

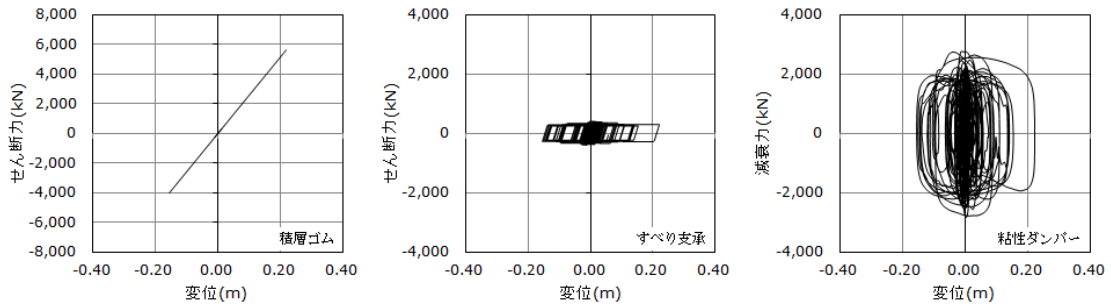
② 荷重変形関係



(a)簡易モデル A (μ_{\min} 、 $\alpha=0.70$ 、 $T_0=32.7^\circ\text{C}$)

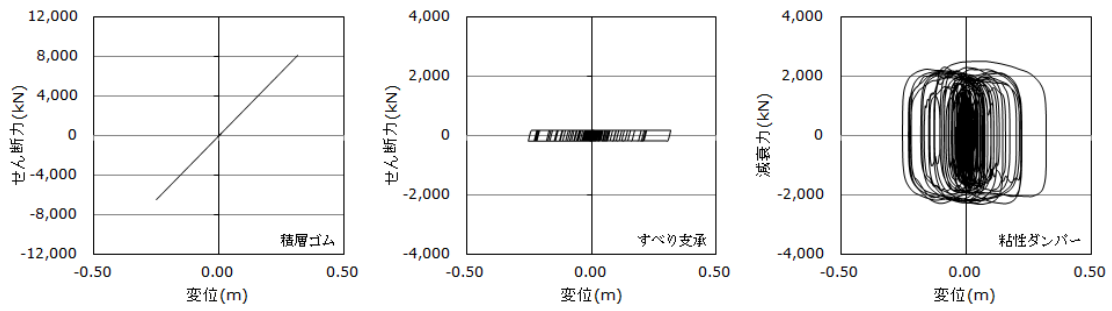


(b)簡易モデル B (μ_{\max} 、 $\alpha=0.85$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$)

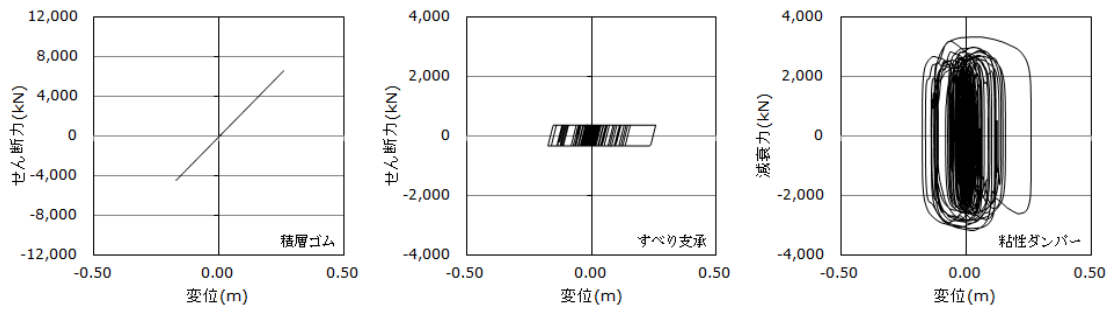


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

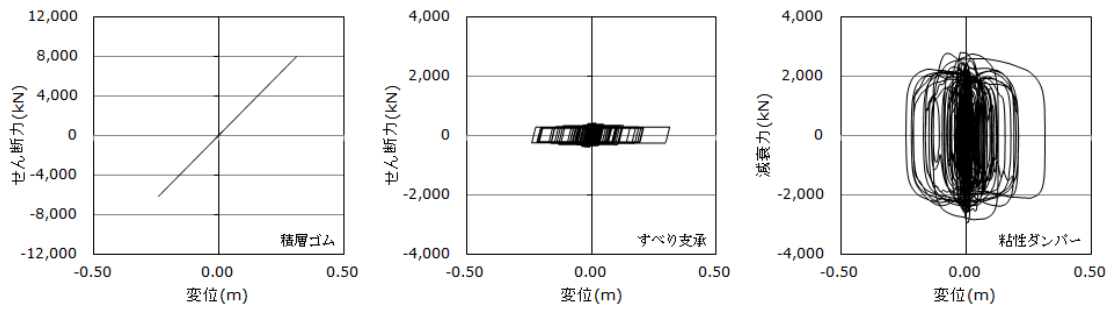
図 1.3.5-30 免震層の荷重変形関係 (OSKH02・M8.7・1.0 倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} 、 $\alpha=0.70$ 、 $T_0=39.9^\circ\text{C}$)

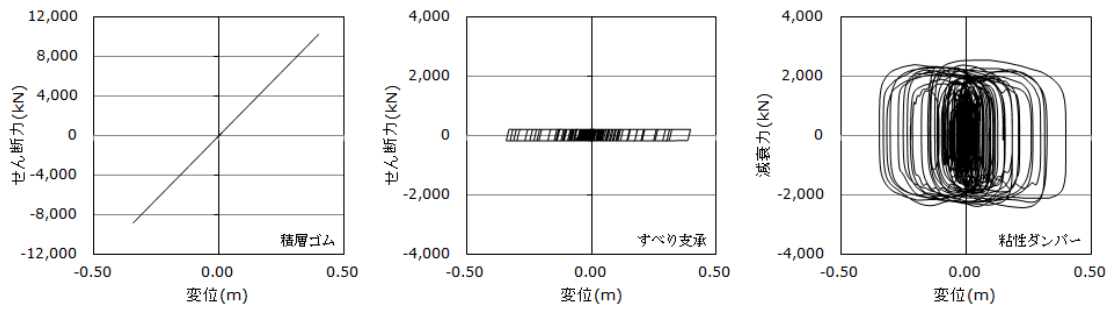


(b)簡易モデル B (μ_{\max} 、 $\alpha=0.85$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$)

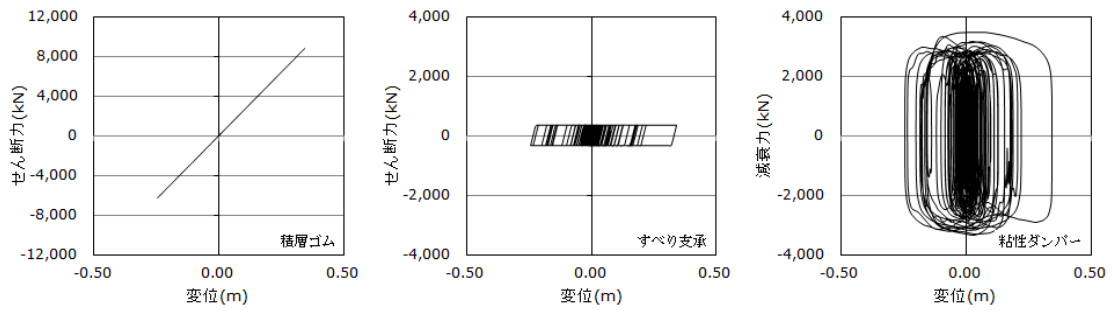


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

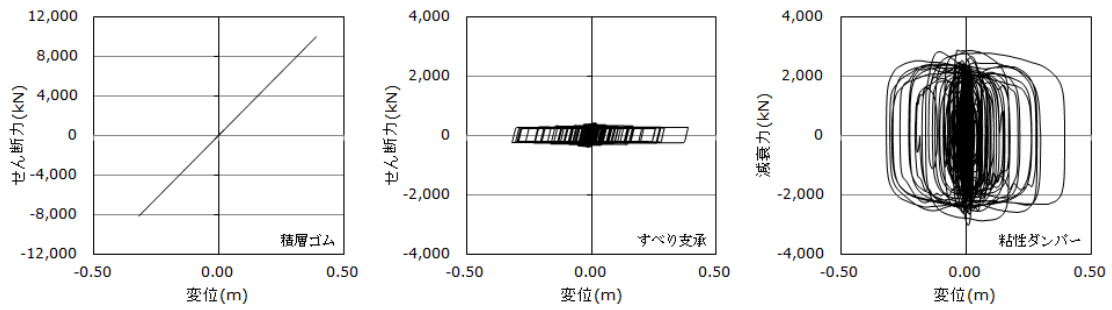
図 1.3.5-31 免震層の荷重変形関係 (OSKH02・M8.7・1.25 倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=47.3^\circ\text{C}$)

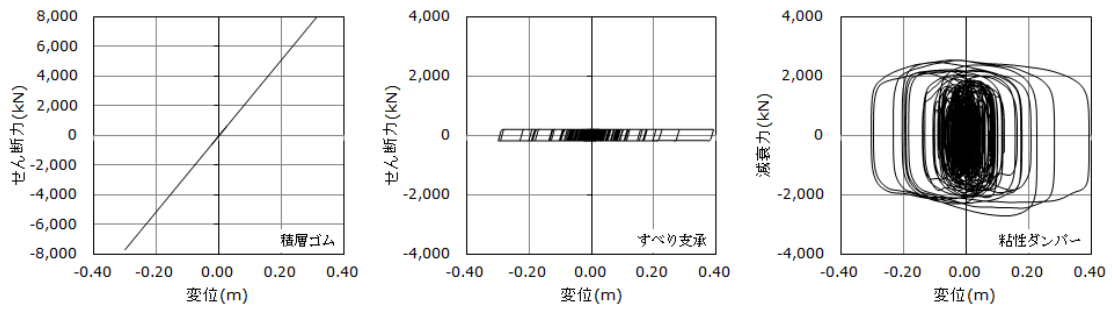


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

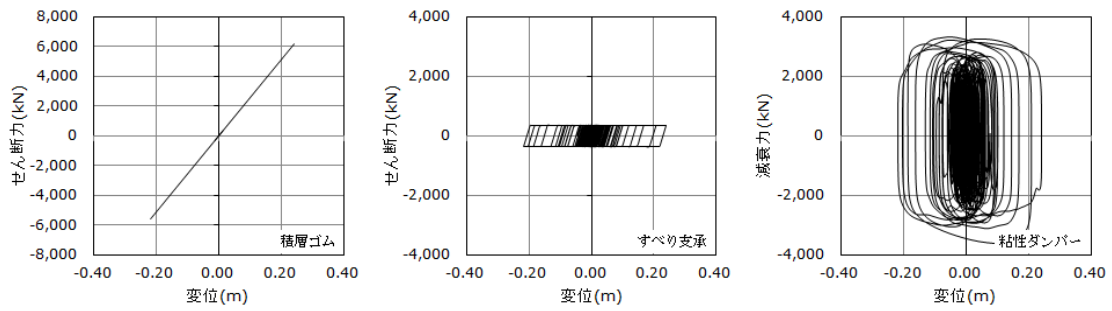


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

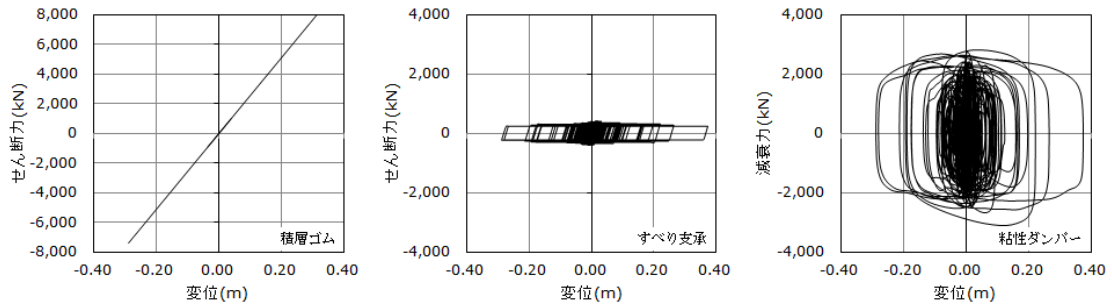
図 1.3.5-32 免震層の荷重変形関係 (OSKH02・M8.7・1.5 倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} 、 $\alpha=0.70$ 、 $T_0=42.7^\circ\text{C}$)

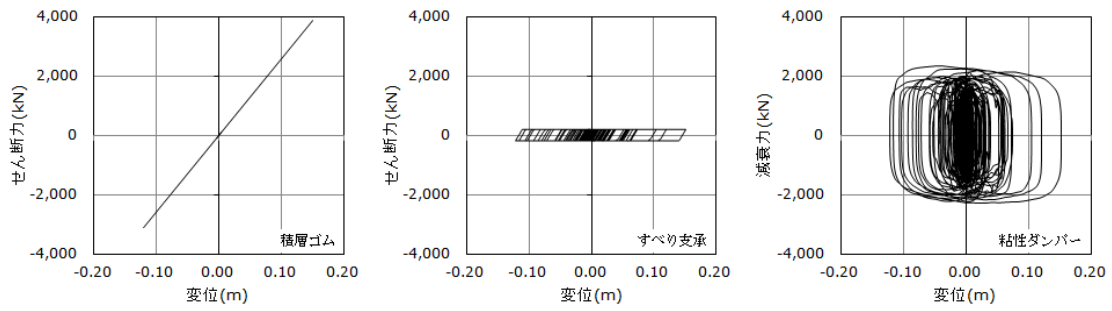


(b)簡易モデル B (μ_{\max} 、 $\alpha=0.85$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$)

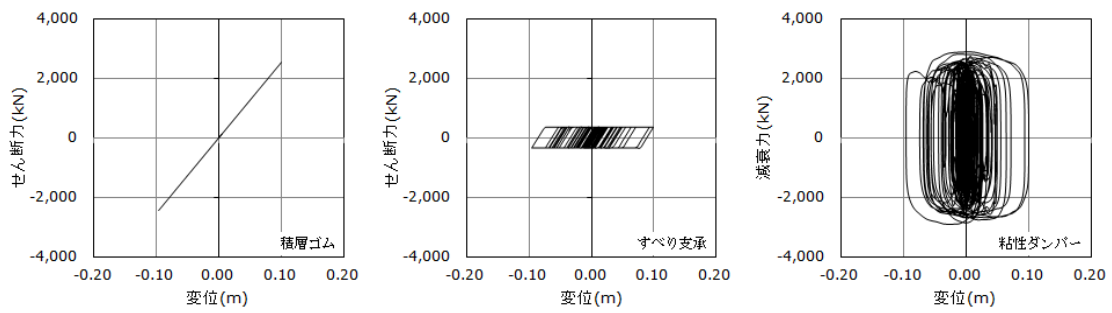


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

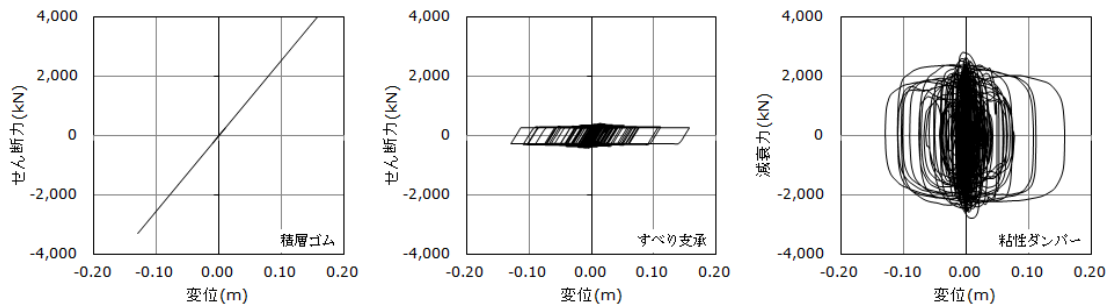
図 1.3.5-33 免震層の荷重変形関係 (OSKH02・M9.0・1.0倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=29.6^\circ\text{C}$)

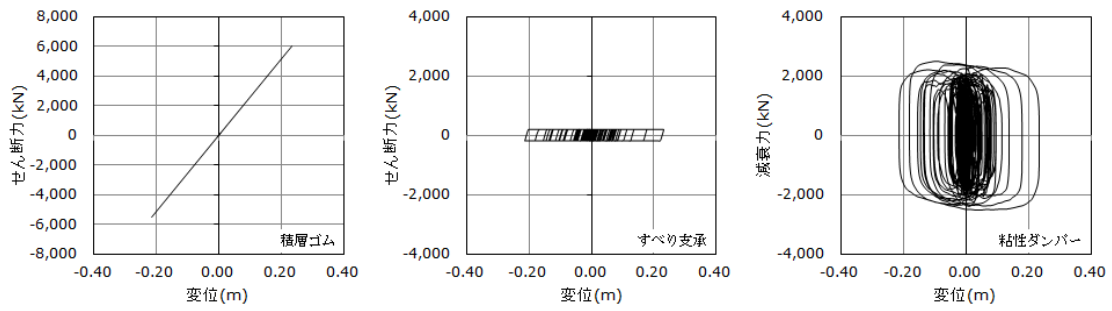


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

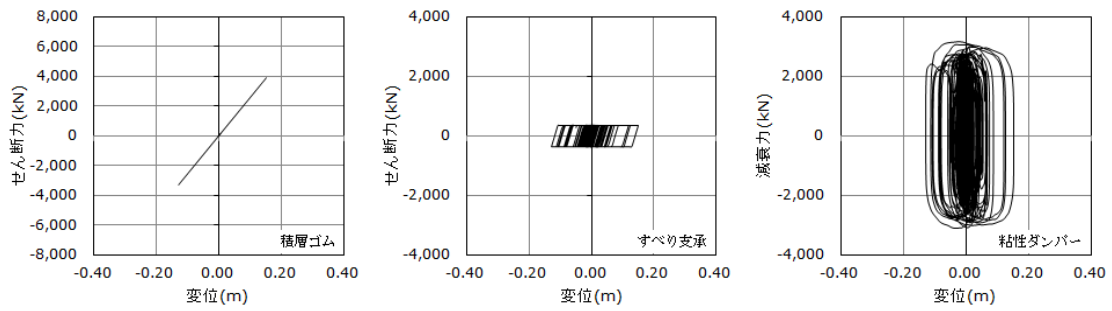


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

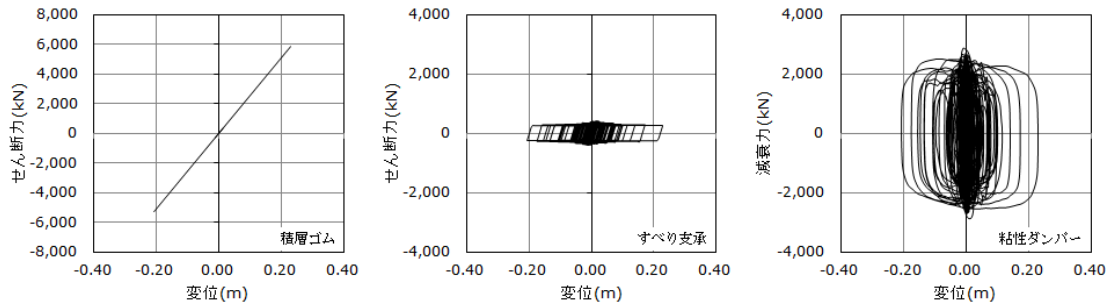
図 1.3.5-34 免震層の荷重変形関係 (AIC003・M8.7・1.0 倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} 、 $\alpha=0.70$ 、 $T_0=34.8^\circ\text{C}$)

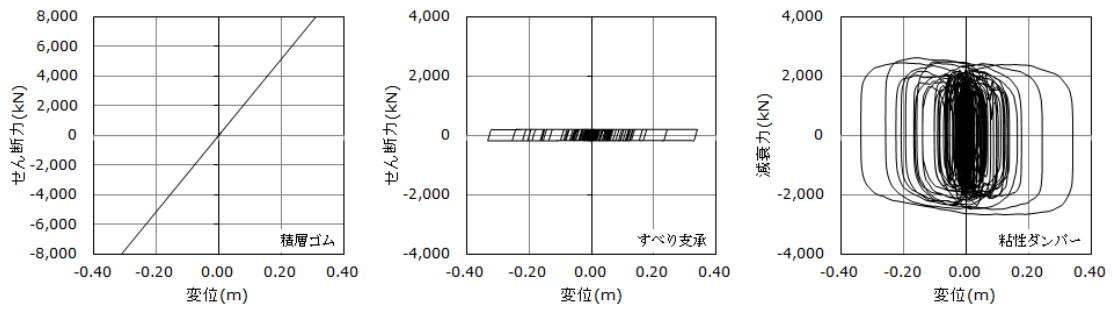


(b)簡易モデル B (μ_{\max} 、 $\alpha=0.85$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$)

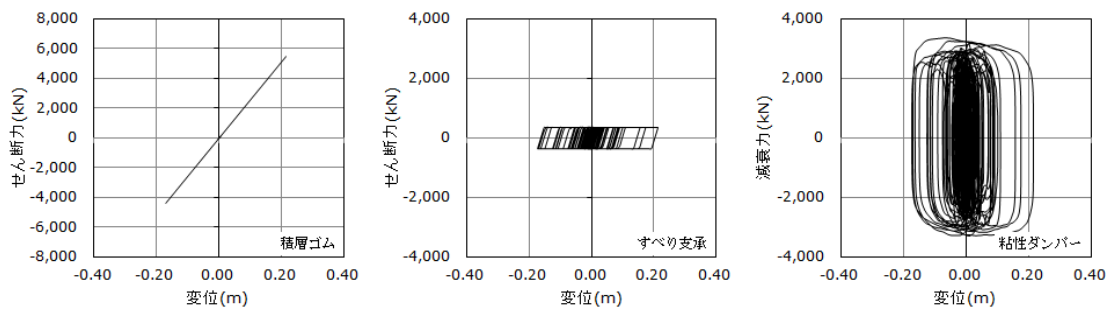


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

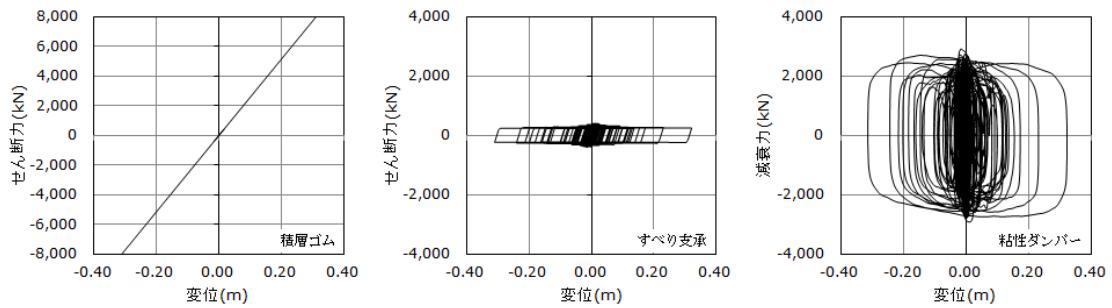
図 1.3.5-35 免震層の荷重変形関係 (AIC003・M8.7・1.25倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} 、 $\alpha=0.70$ 、 $T_0=40.4^\circ\text{C}$)

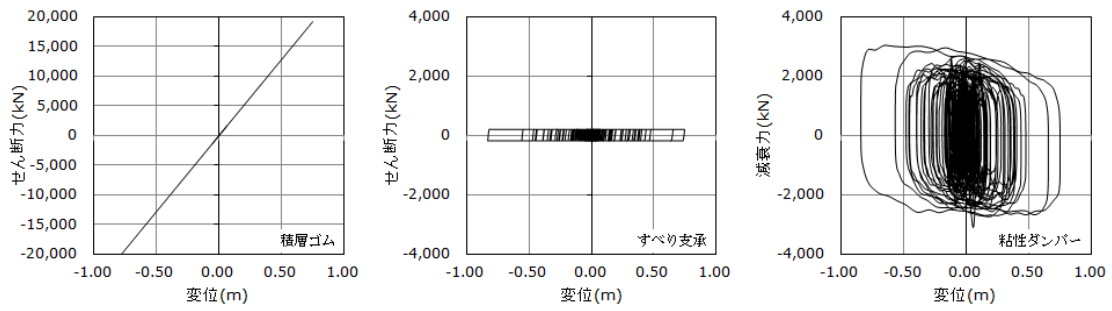


(b)簡易モデル B (μ_{\max} 、 $\alpha=0.85$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$)

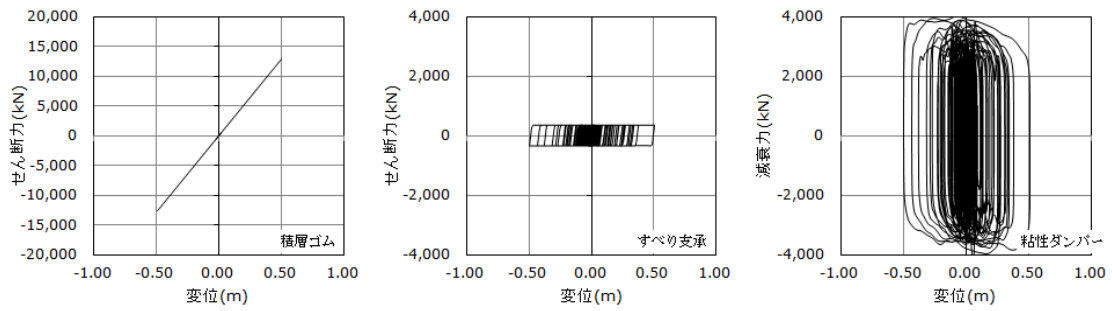


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

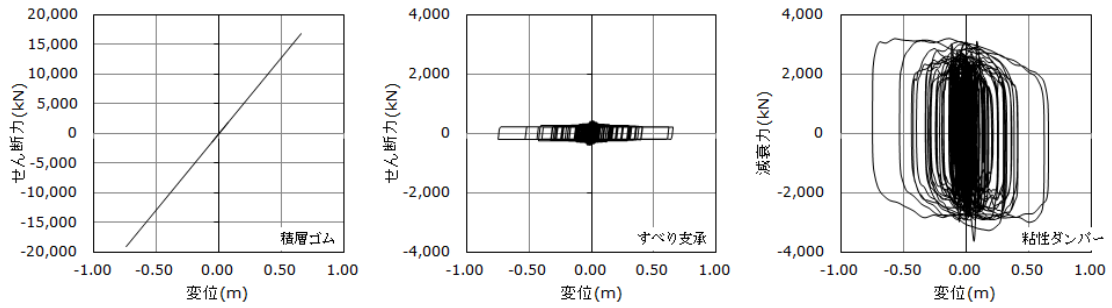
図 1.3.5-36 免震層の荷重変形関係 (AIC003・M8.7・1.5倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=72.2^\circ\text{C}$)

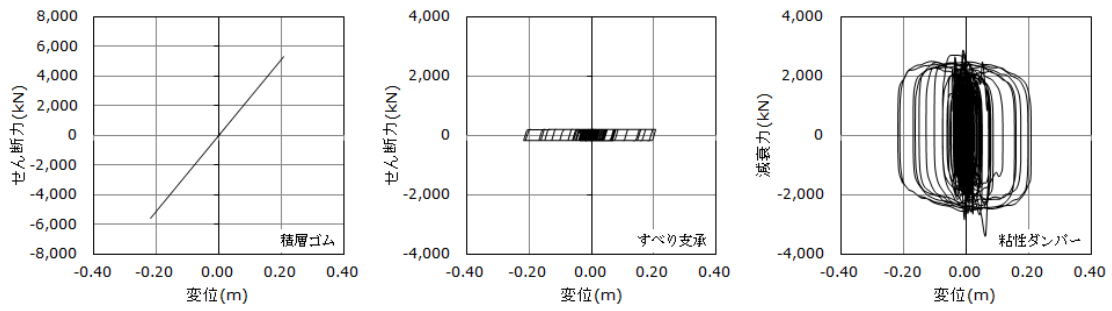


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

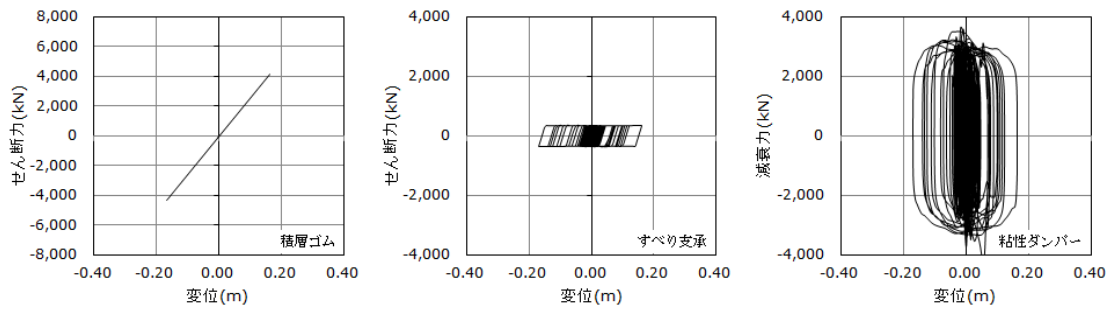


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

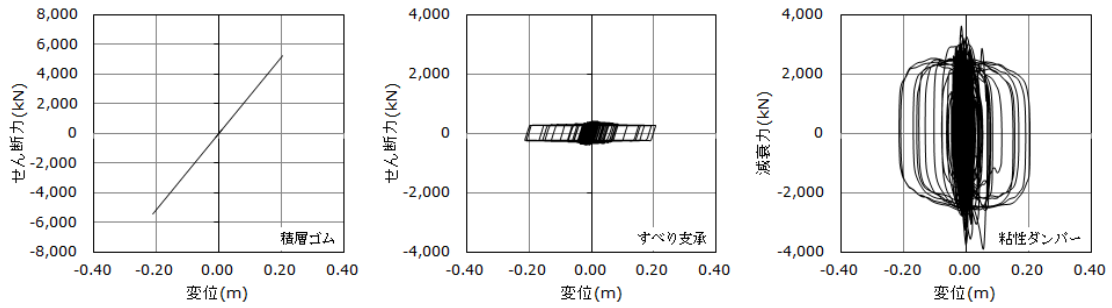
図 1.3.5-37 免震層の荷重変形関係 (AIC003・M9.0・1.0倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} 、 $\alpha=0.70$ 、 $T_0=35.6^\circ\text{C}$)

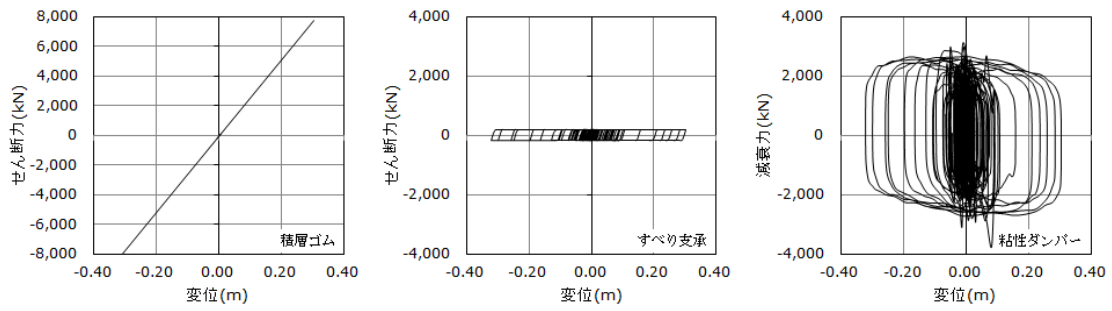


(b)簡易モデル B (μ_{\max} 、 $\alpha=0.85$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$)

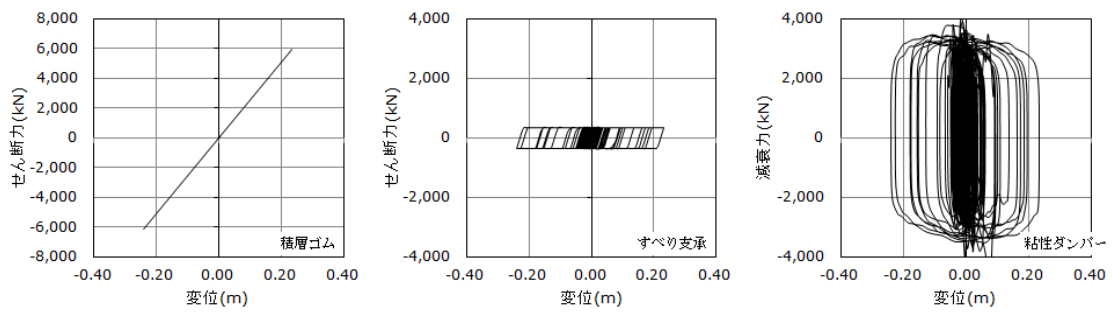


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

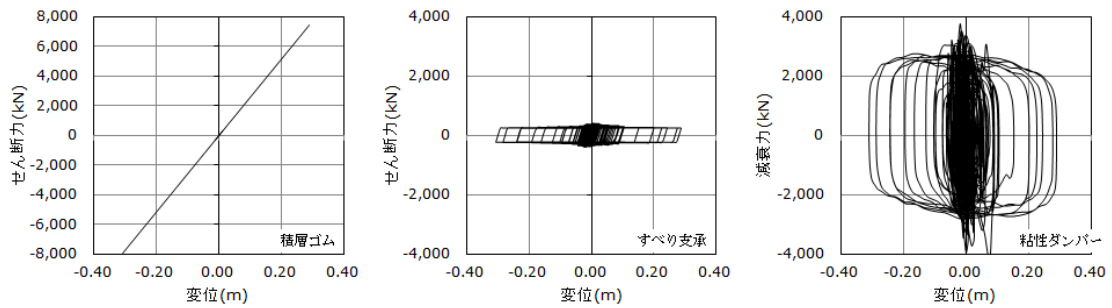
図 1.3.5-38 免震層の荷重変形関係 (SZO024・M8.7・1.0倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=42.1^\circ\text{C}$)

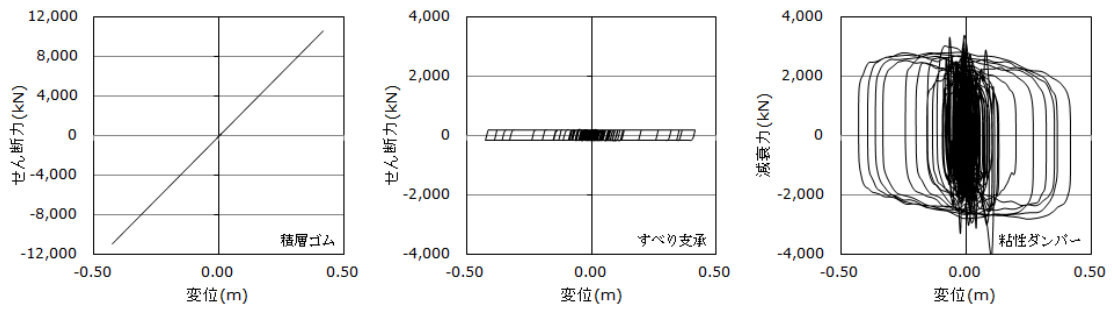


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

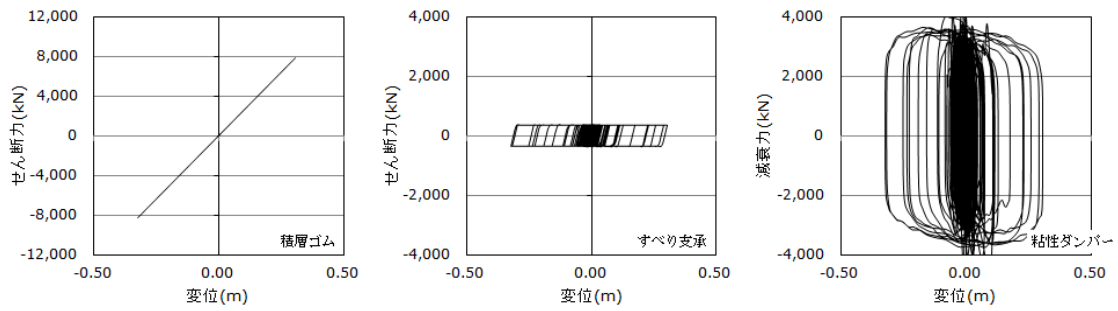


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

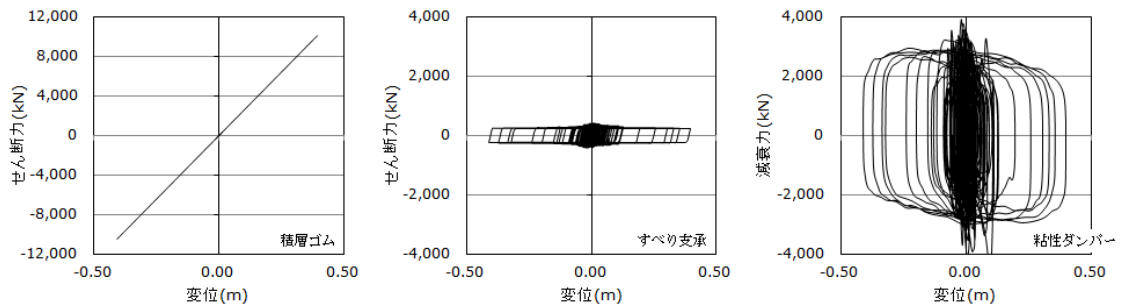
図 1.3.5-39 免震層の荷重変形関係 (SZO024・M8.7・1.25 倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} 、 $\alpha=0.70$ 、 $T_0=48.6^\circ\text{C}$)

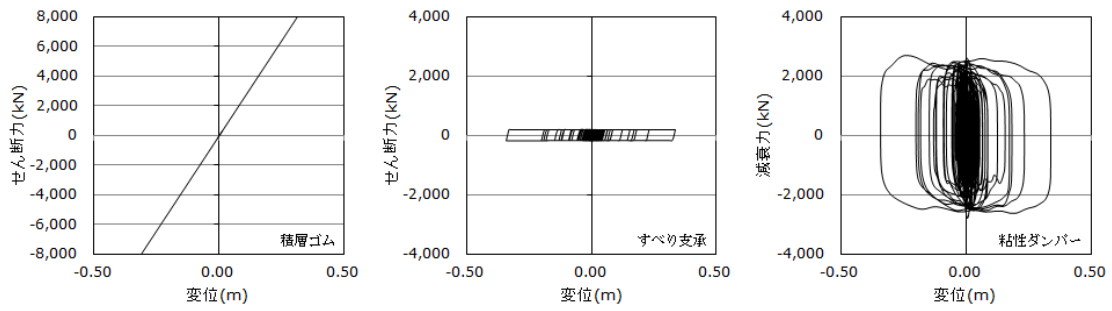


(b)簡易モデル B (μ_{\max} 、 $\alpha=0.85$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$)

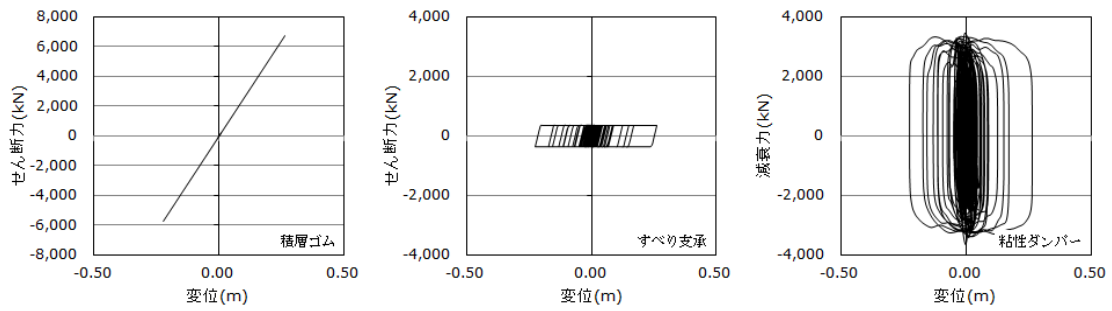


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

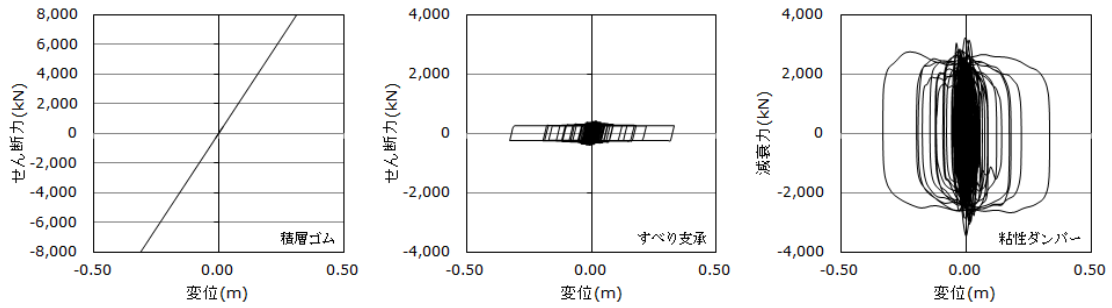
図 1.3.5-40 免震層の荷重変形関係 (SZO024・M8.7・1.5倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} 、 $\alpha=0.70$ 、 $T_0=38.9^\circ\text{C}$)

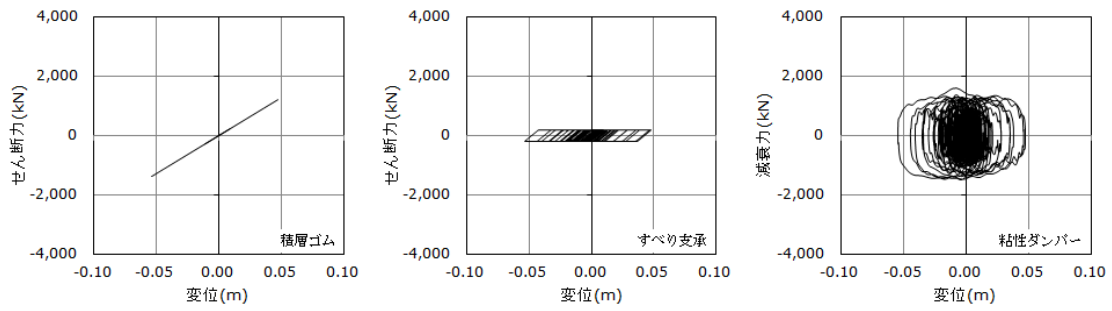


(b)簡易モデル B (μ_{\max} 、 $\alpha=0.85$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$)

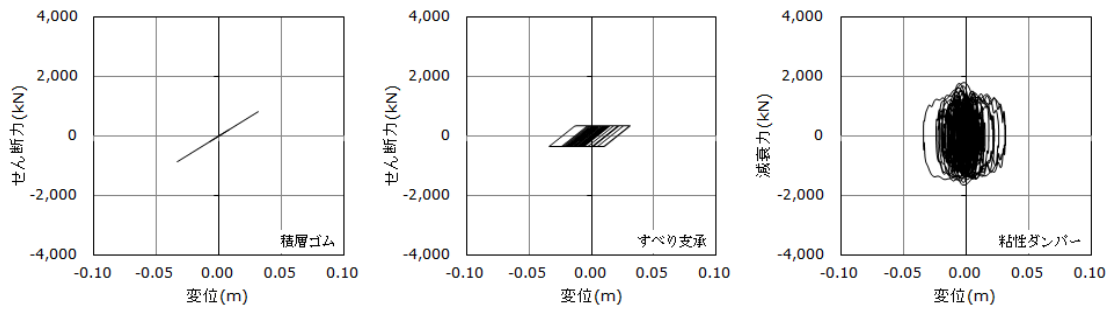


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

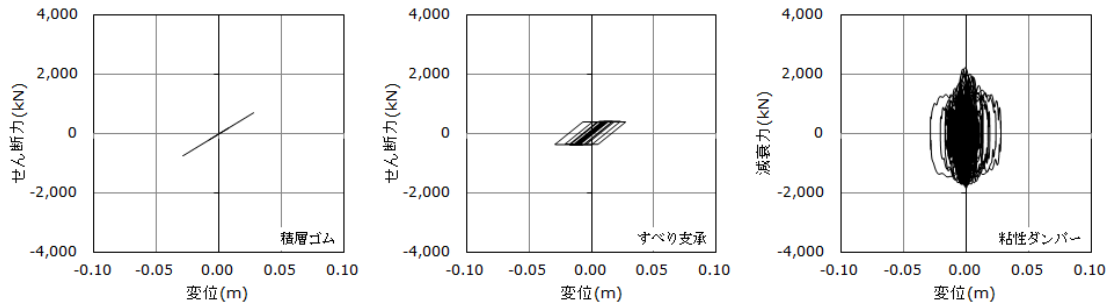
図 1.3.5-41 免震層の荷重変形関係 (SZO024・M9.0・1.0倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=19.8^\circ\text{C}$)

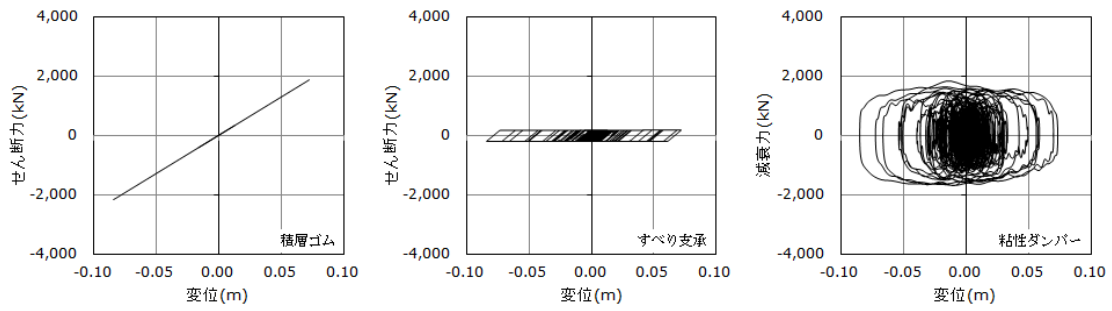


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

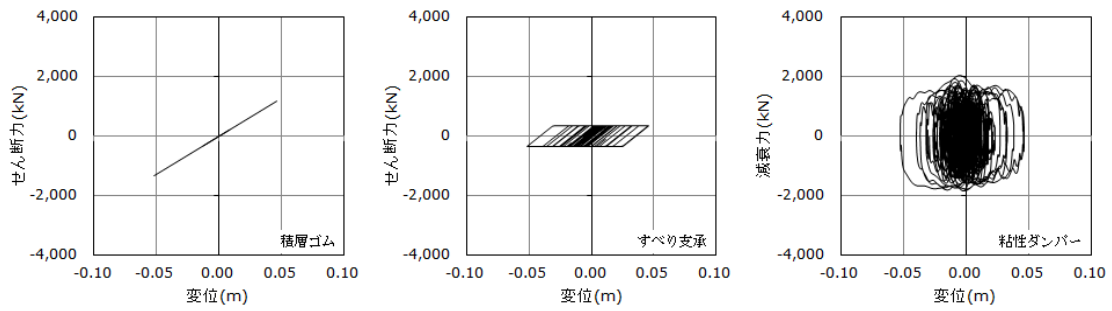


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

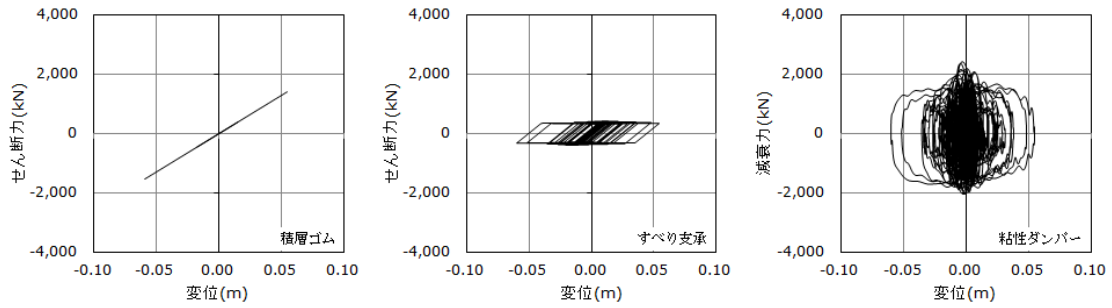
図 1.3.5-42 免震層の荷重変形関係 (KGIN・M8.7・1.0 倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=22.2^\circ\text{C}$)

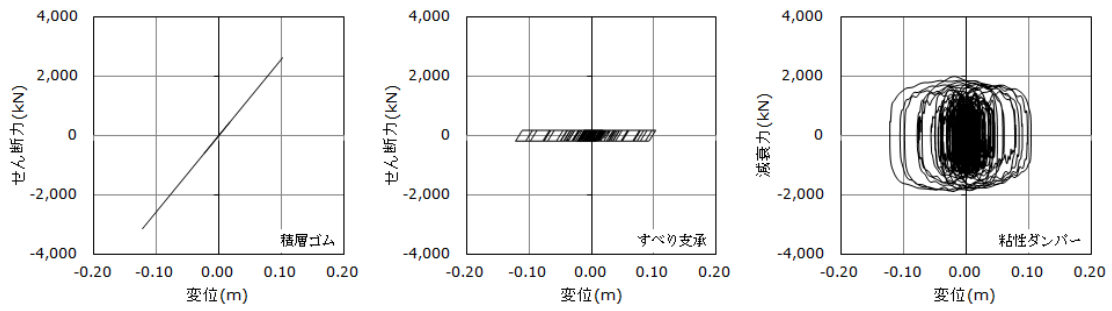


(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)

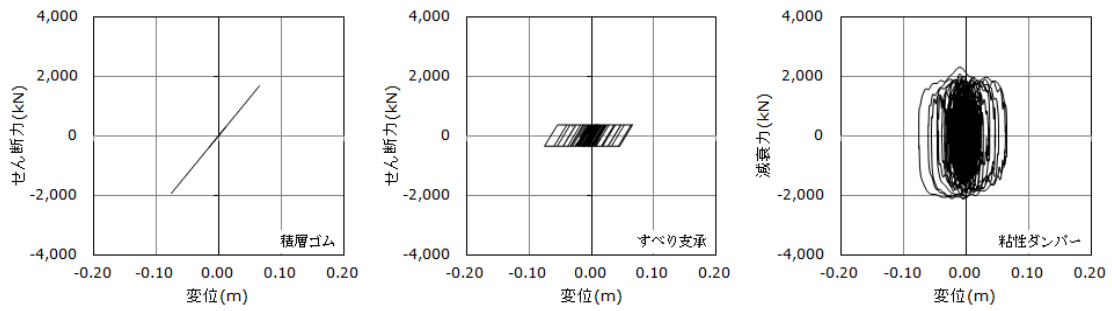


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

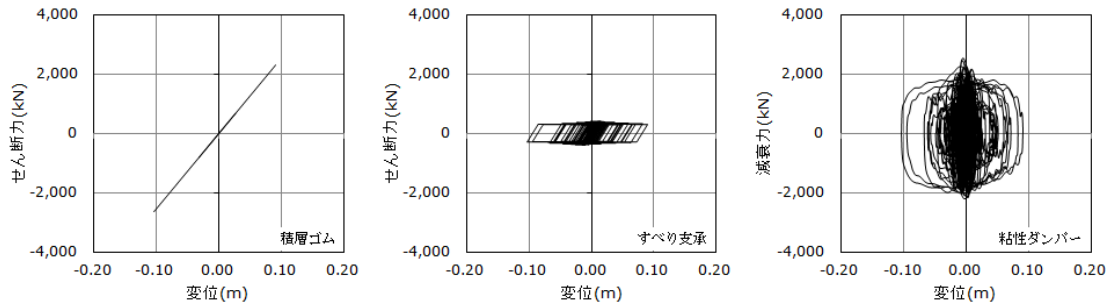
図 1.3.5-43 免震層の荷重変形関係 (KGIN・M8.7・1.25 倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} 、 $\alpha=0.70$ 、 $T_0=25.1^\circ\text{C}$)

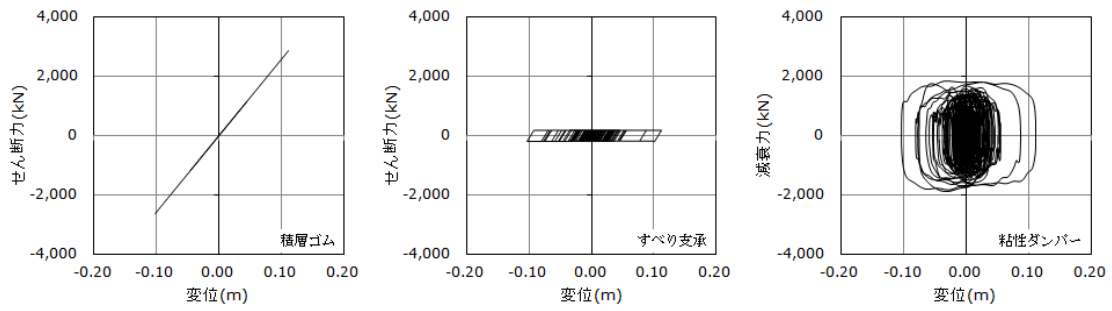


(b)簡易モデル B (μ_{\max} 、 $\alpha=0.85$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$)

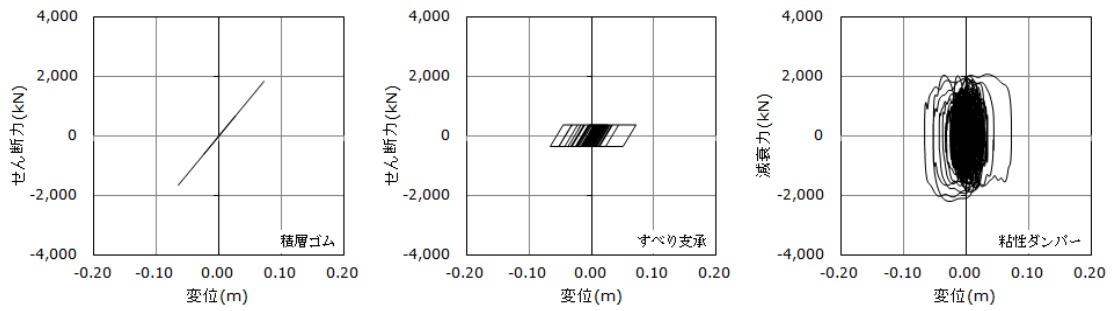


(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

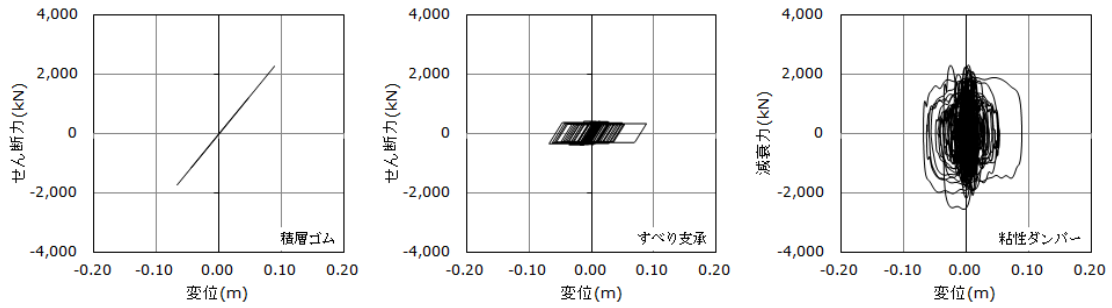
図 1.3.5-44 免震層の荷重変形関係 (KGIN・M8.7・1.5 倍入力)



(a)簡易モデル A (μ_{\min} , $\alpha=0.70$, $T_0=24.3^\circ\text{C}$)



(b)簡易モデル B (μ_{\max} , $\alpha=0.85$, $T_0=15^\circ\text{C}$)



(c)詳細モデル (繰り返し依存性考慮)

図 1.3.5-45 免震層の荷重変形関係 (KGIN・M9.0・1.0 倍入力)

(3) まとめ

天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承(低摩擦)および粘性ダンパーの繰り返し依存性の簡易評価モデルの設定法の提案を行い、地震応答解析を実施しその妥当性検証を行った。以下に、本検討のまとめを示す。

- 1) 弾性すべり支承(低摩擦)をバイリニアモデルにより、粘性ダンパーを材料認定書モデルによってモデル化する簡易モデルの設定法を提案した。簡易モデルは変位を大きめに評価する簡易 A モデルおよび小さめに評価する簡易 B モデルの 2 種の設定法を示した。ここで、弾性すべり支承(低摩擦)においてはバイリニアモデルにおける折れ点を決定する摩擦係数に、粘性ダンパーにおいては繰り返し依存係数 α および入力温度 T_0 に繰り返し依存性を考慮した値を入力することとした。なお、簡易 A モデルの入力温度 T_0 については、初期温度を用いた解析結果から得られる吸収エネルギーから実験回帰式に基づいて設定することとした。
- 2) 弾性すべり支承(低摩擦)の摩擦係数に最小値を適用し、粘性ダンパーの繰り返し依存係数 α を最小値 (0.70)、入力温度 T_0 を換算温度とした簡易 A モデルの各種応答結果は、概ね詳細モデルの結果を安全側に近似した。一方、弾性すべり支承(低摩擦)の摩擦係数に最大値を適用し、粘性ダンパーに繰り返し依存性を考慮しない ($\alpha = 0.85$ 、 $T_0 =$ 初期温度) 簡易 B モデルの応答結果は、詳細モデルよりも応答を全体的に小さめに評価する傾向となった。
- 3) 今後の課題として、入力がさらに大きくなった場合の簡易モデルの適用限界の把握、2 方向入力による検討、建物をより詳細にモデル化した検討、などが挙げられる。

参考文献

1.3.5-1) 国土交通省：オイレス式弾性すべり支承、 建築材料認定書（認定番号MVBR-0377）別表、2008.6

1.4 まとめ

第Ⅲ部第2章および第3章に示した繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを用い、長周期地震動に対する1質点モデルの応答解析を実施し、繰り返し依存性を簡易的に取り込むための手法を検討した。

各免震部材の繰り返し依存性をどのようにしたら通常使用している設計モデルで評価できるかを検討し、そのまとめと今後の課題は以下の通りである。

(1)まとめ

・鉛プラグ入り積層ゴム

鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合の免震建築物の応答評価を、熱伝導解析と地震応答解析と並行して実施する詳細応答評価法(手法1)、エネルギーの釣り合いを基にした包絡解析法による応答予測評価法(手法2)及び降伏荷重をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法(手法3、手法3')の各手法により実施し、それらの結果を比較した。

免震層の水平変形についてはエネルギーの釣り合いを基にした包絡解析法による応答予測評価法(手法2)での結果が詳細応答評価法(手法1)による結果と比較的良好一致を示しているが、過小評価となっているケースも見られた。免震層の応答層せん断力係数については手法2と降伏荷重をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法(手法3)による結果に大きな違いが見られなかった。

降伏荷重の低下率を求める際に用いる鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギーについて地震終了時の値を用いる手法3と免震層の水平変形が最大となった時刻における履歴吸収エネルギーを用いる手法3'との評価結果を比較した。免震層の水平変形については手法3'による簡易応答評価法による結果が詳細応答評価法による解析結果と比較的良好一致を示しているが、水平変形が大きい領域では過小評価となるケースも見られた。

・高減衰ゴム系積層ゴム

繰り返し依存性による高減衰ゴム系積層ゴムの特性変動を簡易的に評価する手法として、累積吸収エネルギーの値(解析終了時の95%値)を基に、高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性および等価減衰定数の低下率を設定した。通常の考慮される免震部材特性のばらつき(製品ばらつき、経年変化、環境温度)に、累積吸収エネルギーによる低下率を加え、地震応答解析を行う方法を示した。

簡易評価による解析結果は、繰り返し依存性を考慮しない解析結果よりも免震層最大変位と免震層の累積変形量を増大させ、繰り返し依存性を時時刻々と考慮する解析結果に近い応答値を与えることを確認した。ただし、簡易評価は繰り返し依存性を時々刻々と考慮する場合の等価剛性と等価減衰定数の低下した値を、解析開始時から一定値として用いるため、免震層変位をやや大きめに評価する結果となった。

・鉛ダンパー

鉛ダンパーの繰り返し依存性を簡易的に評価する方法として、初期から一律にダンパーの降伏耐力を低減する手法を提案した。ダンパーの耐力低減方法として2通りの簡易的手法を用い、手法Aは、最大変形と最大変形発生時刻におけるダンパーの累積吸収エネルギーを用いるもの

であり、手法 B は、最大変形と解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーを用いるものである。

手法 B により算出された最大変位は、ほとんどのケースにおいて手法 A の結果よりも最大変形は大きく評価されており、繰り返し考慮モデル(精算法)に対して-1%~+19%の差であった。

最大加速度は繰り返し依存考慮モデルの結果に対して AIC003 四連動を除けば 1 割以内の差であり、手法 A、B の大小関係は入力地震動により異なった。

ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、手法 A および B とともに繰り返し依存考慮モデルの結果に対して 1 割以内の差となった。簡略的手法は、繰り返し考慮モデルの結果に対して過小評価となる場合があるため、ダンパーの累積吸収エネルギー能力に対する評価において、簡略的手法による解析に基づく場合には、安全率を考慮するなどの配慮が必要である。また手法 A、B で求めた累積変形量は繰り返し考慮モデルによる結果に対して 2 割以内の差となった。

簡略法手法 A による解析結果から算出した疲労損傷度は、繰り返し考慮モデルに対して 2 割以下損傷度を小さく評価する場合があった。一方、手法 B は繰り返し考慮モデルよりも大きな値として累積損傷度を評価し、その差は 18%未満であった。

本検討で提案した 2 つの簡略法のうち、ダンパーの変形量を最大変形時、ダンパーの累積吸収エネルギーは解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーとして、降伏耐力を低減する方法(手法 B)を用いた方が、ダンパーの最大変形量ならびに累積損傷度を繰り返し考慮モデルよりも大きな値として評価し、安全側の評価となることがわかった。

- ・弾性すべり支承(高摩擦)

既往の設計モデル(基準摩擦係数 μ_0)に対して、繰り返し挙動に伴う摩擦係数の低下により応答変形が増大する傾向がある。累積すべり変位と摩擦係数の関係式を用いて、設計モデルにおける最大変形時における累積すべり変位から、摩擦係数を簡易的に評価した。その結果、累積すべり変位による摩擦係数の低減による免震層の最大応答変位と設計モデルにおける最大応答変位は概ね一致し、簡易評価方法の妥当性を確認した。

- ・弾性すべり支承(低摩擦) + 粘性ダンパー

弾性すべり支承(低摩擦)をバイリニアモデルにより、粘性ダンパーを免震材料認定に基づく値を用いてモデル化する簡易モデルの設定法を提案した。簡易モデルは変位を大きめに評価する簡易 A モデルおよび小さめに評価する簡易 B モデルの 2 種の設定法を示した。ここで、弾性すべり支承(低摩擦)においてはバイリニアモデルにおける折れ点を決定する摩擦係数に、粘性ダンパーにおいては繰り返し依存係数 α および入力温度 T_0 に繰り返し依存性を考慮した値を入力した。なお、簡易 A モデルの入力温度 T_0 については、初期温度を用いた解析結果から得られる吸収エネルギーから実験回帰式に基づいて設定した。

弾性すべり支承(低摩擦)の摩擦係数に最小値を適用し、粘性ダンパーの繰り返し依存係数 α を最小値(0.70)、入力温度 T_0 を換算温度とした簡易 A モデルの各種応答結果は、概ね詳細モデルの結果を安全側に近似する結果となった。一方、弾性すべり支承(低摩擦)の摩擦係数に最大値を適用し、粘性ダンパーに繰り返し依存性を考慮しない($\alpha=0.85$ 、 T_0 =初期温度)簡易 B モデルの応答結果は、詳細モデルよりも応答を全体的に小さ目に評価する傾向となった

(2)今後の課題

- ・鉛プラグ入り積層ゴム

本検討で示した簡易応答評価法（手法2、手法3及び手法3'）による応答評価結果は、詳細応答評価法による応答評価結果と良い一致を示すケースもあるが、地震動の特性によっては過大、過小評価するケースも見られた。簡易応答評価法の適用については解析対象の免震システムと入力地震動の関係によっては応答評価精度が異なる可能性があるため注意が必要である。

- ・高減衰ゴム系積層ゴム

本検討で用いた長周期地震時に予想される高減衰ゴム系積層ゴムの繰り返しによる特性変動は、等価剛性で-5%~-10%程度、等価減衰定数で-5%程度と比較的小さいことから、繰り返しによる影響に比べて、通常的设计で考慮される免震部材特性のばらつき値(製品ばらつき、経年変化、環境温度)が建物応答に大きく影響する可能性が高い。今後は通常のばらつき値の大きさと比較することにより、繰り返し依存性の影響を確認していく必要がある。

- ・鉛ダンパー

本検討では、四連動 AIC003 を除いた入力地震動に対する免震層の最大変位は 43cm 以下、ダンパーの破断に対する累積損傷値は 25% 以下となり、免震部材の破断の可能性は少ないと考えられる。ただし、四連動 AIC003 の場合には、最大変位が 70cm を超える結果となった。本検討で用いた解析モデルは、積層ゴムを線形弾性と仮定しており、40~50cm 以上の水平変形時から生じるハードニング挙動を模擬できていないため、最大応答値の評価に注意を要する。より高精度な評価とするためには、積層ゴムの非線形挙動も模擬しうるモデルを用いて評価する必要がある。

- ・弾性すべり支承（高摩擦）

本検討においては、建物モデルとして固有周期、せん断力係数を 1 ケース仮定し、入力地震動としても 4 種類という条件下において、簡易評価をまとめたものである。今後の課題としては、周期・せん断力係数・入力地震動のケースを増やし、簡易評価方法の精度を確認する必要がある。

- ・弾性すべり支承（低摩擦）+粘性ダンパー

今後の課題として、入力がさらに大きくなった場合の簡易モデルの適用限界の把握、2 方向入力による検討、建屋を詳細モデルとした地震応答解析による応答の評価、などが挙げられる。

また、今回の検討は 1 質点の剛体モデルにより実施したが、今後は多質点モデルによる検討を追加し、高層建物応答への影響についても確認する必要がある。