

平成24年度
建築基準整備促進事業報告会

「27-3 長周期地震動に対する免震建築物の
安全性検証方法に関する検討」

事業者：鹿島建設，清水建設，大成建設，竹中工務店

共同研究者：建築研究所，日本免震構造協会
防災科学技術研究所



調査の目的

多数繰り返し加力実験に基づいて、実大免震部材のエネルギー吸収性能を把握し、長周期地震動に対する免震建築物の安全性向上に寄与すること。



調査の内容

- (イ) 多数回繰返し荷重を受ける免震部材の構造実験
実大支承試験体の実験（免震部材実験WG）
免震部材の試験法・特性評価（繰返し特性評価SWG）
- (ロ) 長周期地震動に対する免震建築物の応答評価
繰返し依存性の簡易的とり込み法（建物応答評価WG）
- (ハ) 免震建築物の地震観測
観測の実施・記録の分析（建物地震観測WG）
東日本大震災の本震・余震による拳動分析（同上）

調査の実施体制（１）

事業主体	管理技術者	担当業務
◎大成建設	長島一郎	全体調整・調査業務全般
鹿島建設	竹中康雄	調査業務全般
清水建設	中西啓二	調査業務全般
竹中工務店	山本雅史	調査業務全般

◎幹事会社

担当技術者		主な担当業務
◎大成建設	計8名	全体とりまとめ 実大免震部材実験・建物応答（天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承、オイルダンパー）、実大実験計画
鹿島建設	計7名	免震部材実験、建物応答（鉛プラグ入り積層ゴム、鋼材ダンパー）、建物挙動
清水建設	計4名	免震部材実験、建物応答（高減衰積層ゴム、鉛ダンパー）、地震観測、建物挙動
竹中工務店	計4名	免震部材実験、建物応答（弾性すべり支承、粘性系ダンパー）、建物挙動

（社）日本免震構造協会内に委員会設置
（学識経験者、実務技術者により構成）

調査計画、結果の検討・評価

調査の実施体制（2）

■有識者による委員会（日本免震構造協会）

本委員会（主査：北村春幸）

免震部材実験WG（主査：高山峯夫）

免震部材の繰返し特性評価SWG

（主査：飯場正紀）

建物応答評価WG（主査：古橋剛）

建物地震観測WG（主査：飯場正紀）



本日の報告内容

1. 実大実験計画・実大支承実験の実施
(免震部材実験WG)
(繰返し特性評価SWG)
2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法
(建物応答評価WG)
3. 地震観測・建物挙動分析
(建物地震観測WG)



本日の報告内容

1. 実大実験計画・実大支承実験の実施
(免震部材実験WG)
(繰返し特性評価SWG)
2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法
(建物応答評価WG)
3. 地震観測・建物挙動分析
(建物地震観測WG)

多数回繰返し荷重を受ける免震部材の構造実験の実施

■ 目的

実大免震部材を用いて、長周期・長時間の揺れに対するエネルギー吸収性能を詳細に把握する。

■ 実施方針

実大免震支承について大型震動台（E-ディフェンス）を用いた実験詳細計画を作成し、実験を実施する。

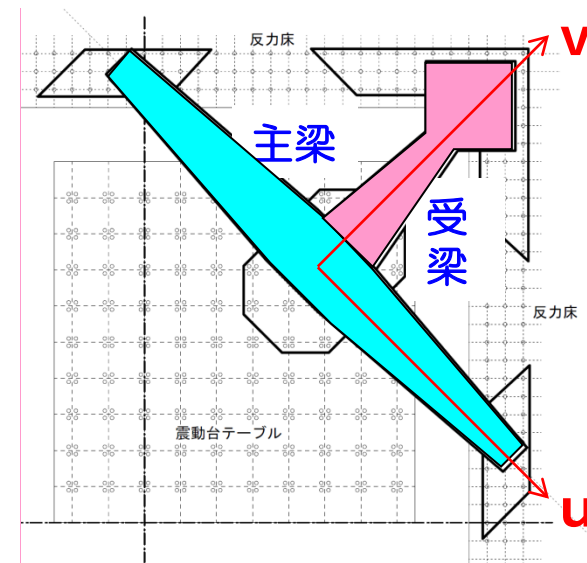
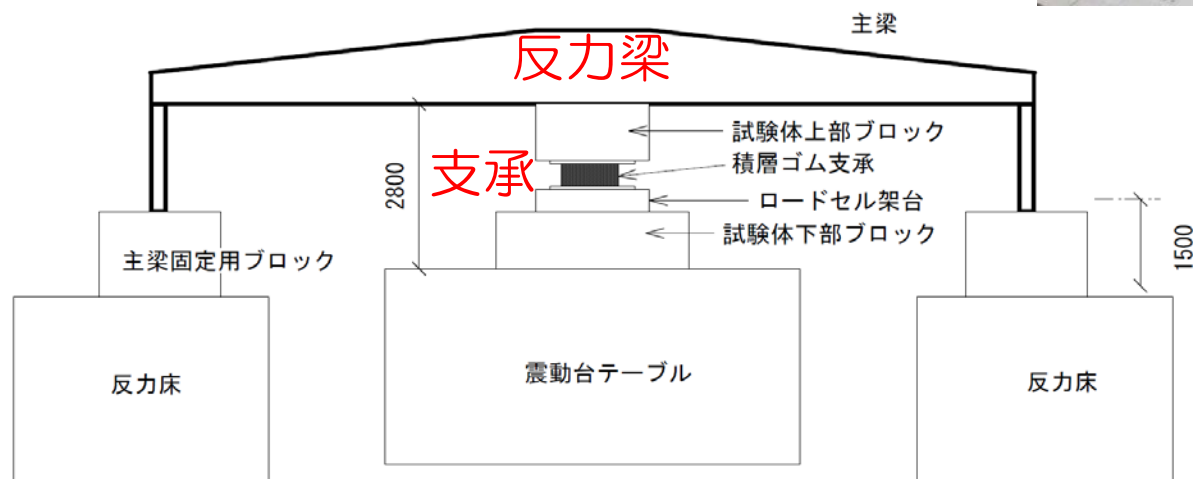
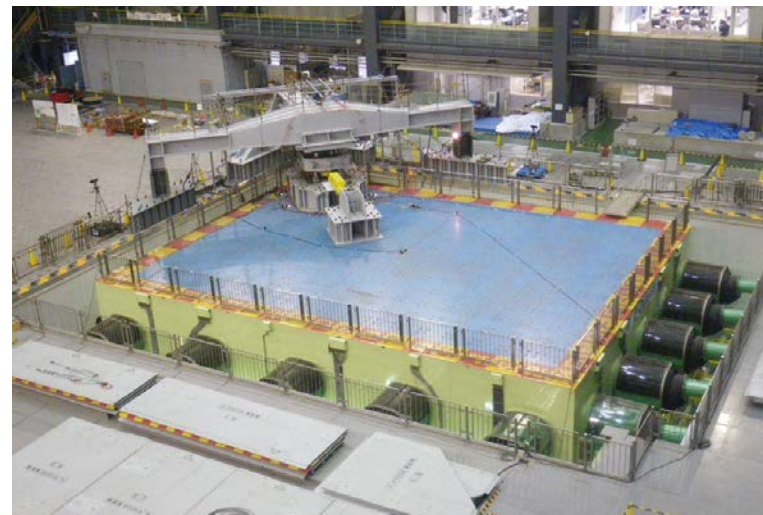
今年度試験体	①鉛プラグ入り積層ゴム $\Phi 1000$	動的繰返し試験, 地震波
	②高減衰積層ゴム $\Phi 1000$	動的繰返し試験, 地震波

1. 実大実験計画・実施

加力装置

■ 加力装置

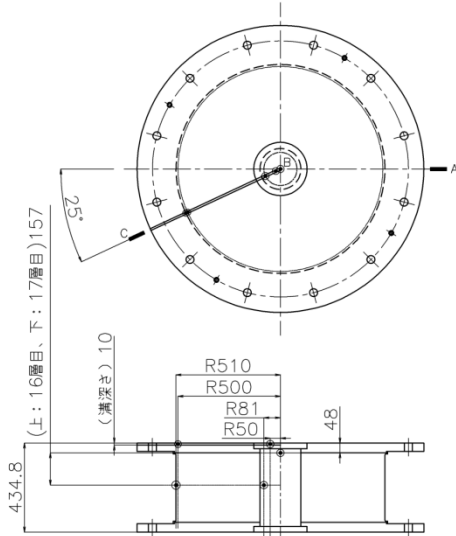
- 震動台と上部の反力梁間に
支承を挟み、鉛直軸力を導入
- 水平1方向、2方向に加力



1. 実大実験計画・実施

鉛プラグ入り積層ゴム (1)

■ 実大鉛プラグ入り積層ゴム(1,000) 実施ケース



1,000 LRB試験体



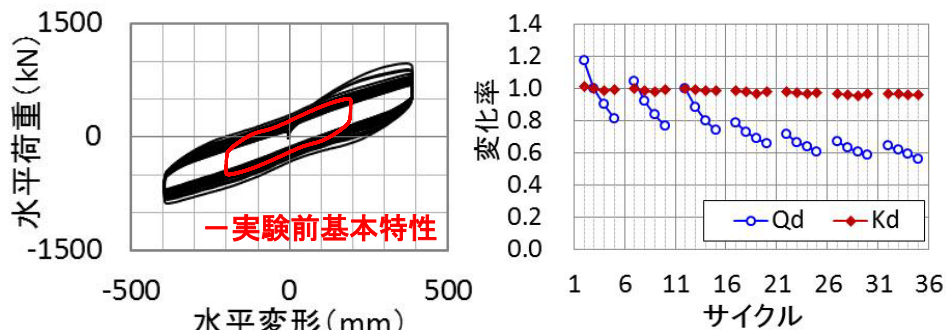
加振状況(400mm変形時)

No.	試験種類	加振条件	サイクル	面圧 (Mpa)	周期 (秒)	累積変形 (m)
1	正弦波1方向	γ 200%	35 (5 × 7)	5	4	55
2	地震応答 1方向	γ 109%	1	5	-	10
3	地震応答 2方向	U: γ 109% V: γ 70%	6	5	-	90
4	正弦波2方向 (楕円)	U: γ 200% V: γ 100%	60 (5 × 12)	5	4	119
5	正弦波2方向 (真円)	U: γ 200% V: γ 200%	21 (3 × 7)	5	4	57
6	破断試験	γ 300%	3	5	4	7
7	破断試験	γ 350%	2	5	4	6
8	破断試験	γ 400%	2	5	4	-

1. 実大実験計画・実施

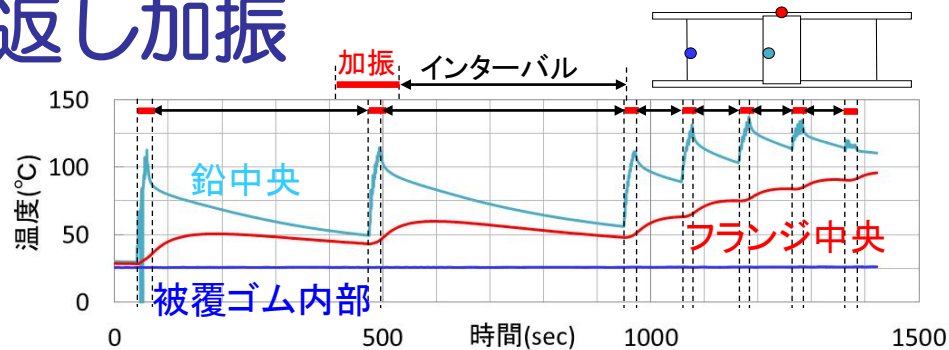
鉛プラグ入り積層ゴム (2)

正弦波1方向多数回繰り返し加振



荷重-変形関係

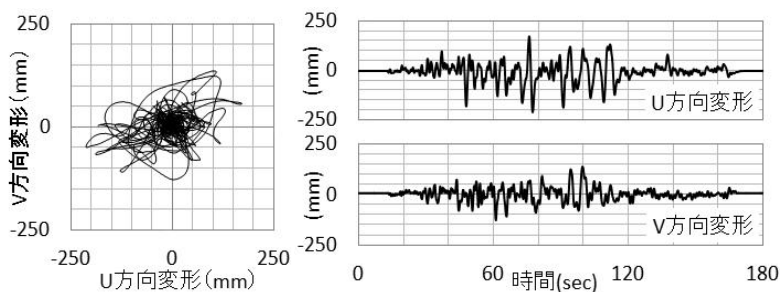
Qd, Kdの変化



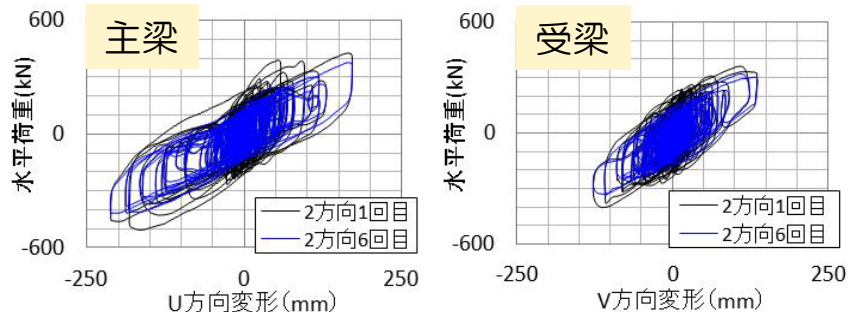
支承温度計測

累積50m超の多数回繰り返しにおいても安定したループを描いている

地震応答2方向加振



変位軌跡・時刻歴波形



荷重-変形関係

- エネルギー吸収にともなう支承温度の上昇と降伏荷重の低下を実大レベルで定量的に把握 → シミュレーション解析

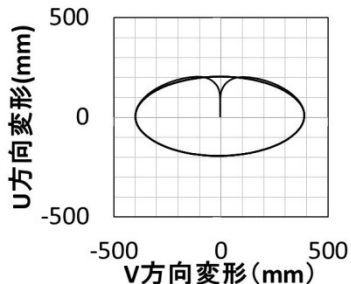
1. 実大実験計画・実施

鉛プラグ入り積層ゴム (3)

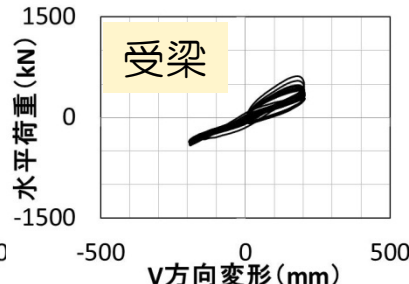
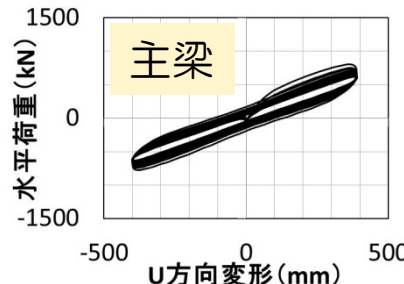
■ 正弦波2方向多数回繰り返し加振

楕円加振

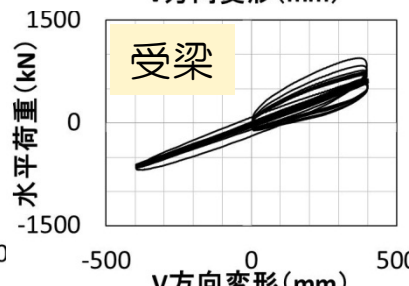
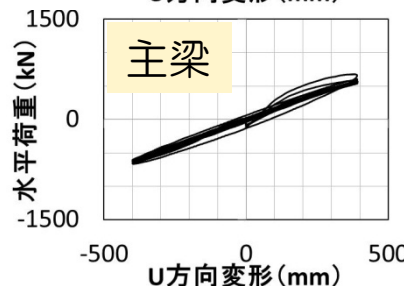
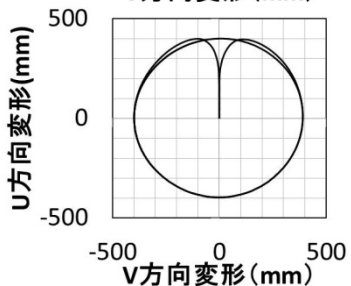
変位軌跡



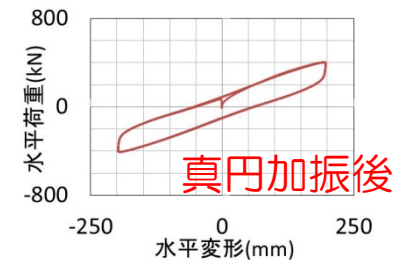
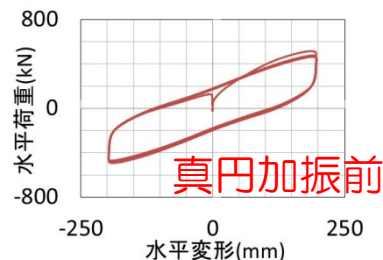
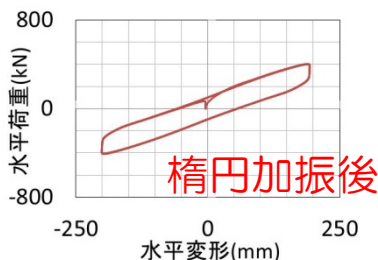
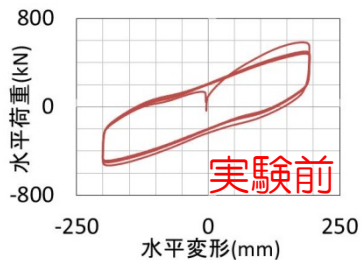
荷重-変形関係



真円加振



基本特性の変化

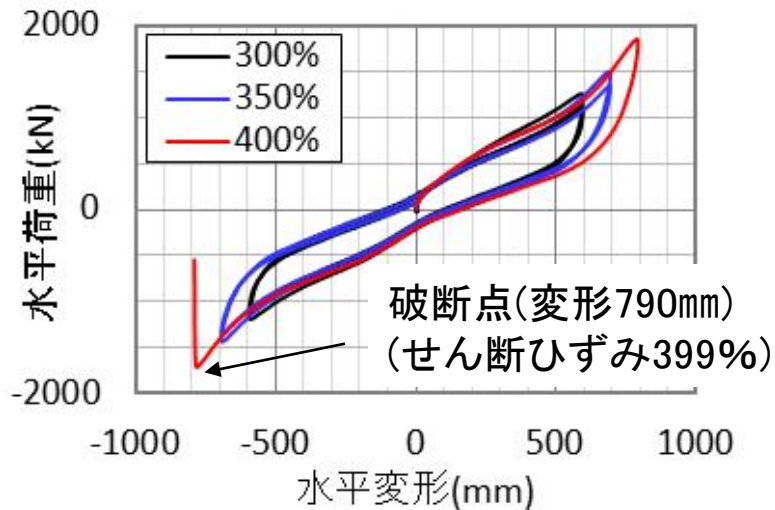


- 過酷な加振条件、温度上昇により降伏荷重・履歴面積が減少したと思われるが、この現象は既往円加振実験では見られない。今後の検討課題。

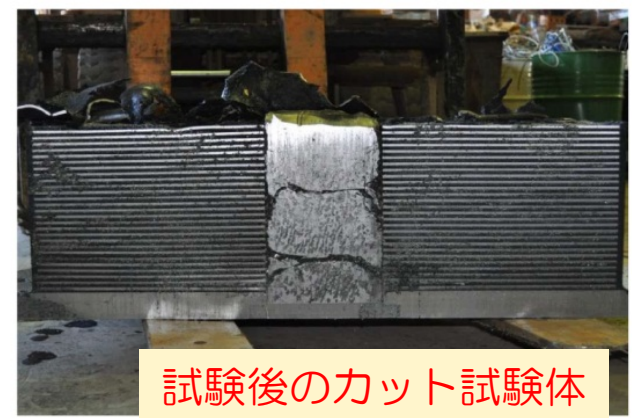
1. 実大実験計画・実施

鉛プラグ入り積層ゴム (4)

■ 破断試験 (正弦波1方向)



- γ 250%程度まで荷重-水平関係は線形
その後ハードニングが顕著になった
- γ 300%、350%は異常なし
- γ 400%において、+400%経験後、
-399%で積層ゴム破断
- 破断時水平荷重は1,614kNであった

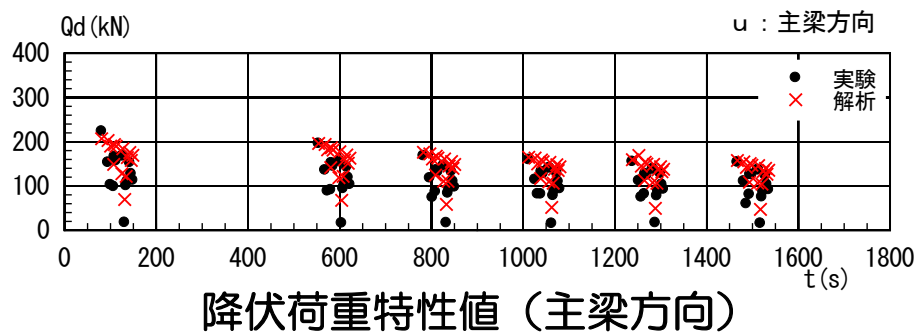
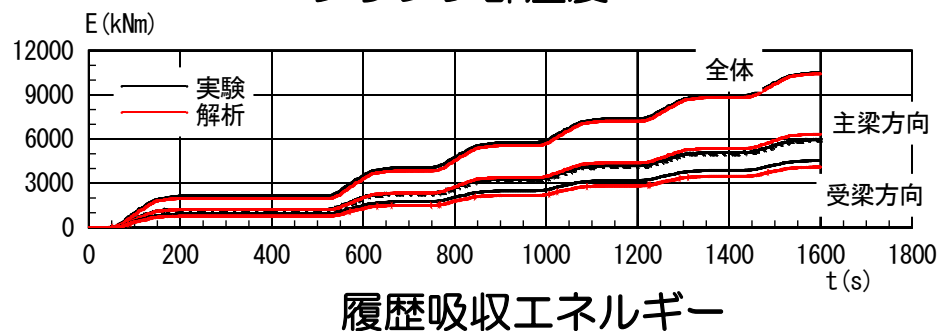
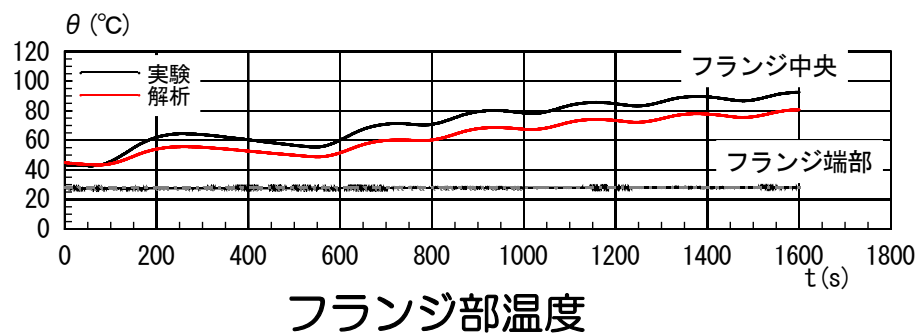
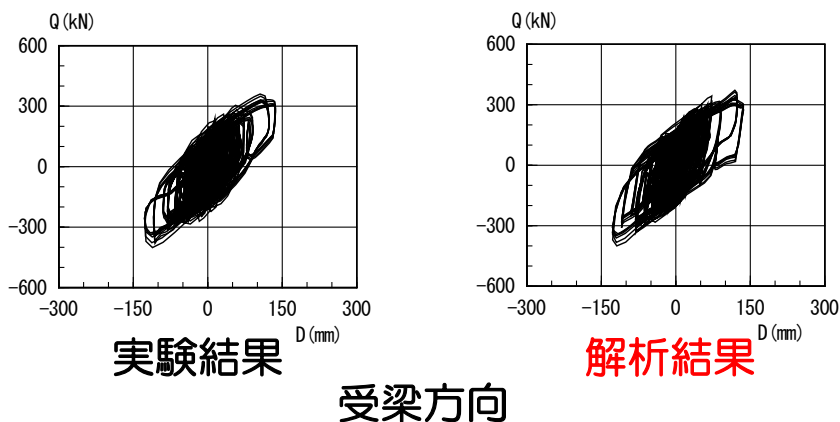
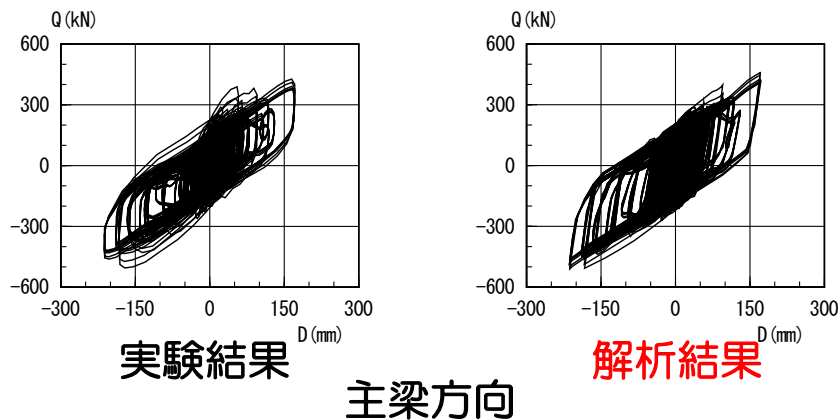


1. 実大実験計画・実施

鉛プラグ入り積層ゴム (5)

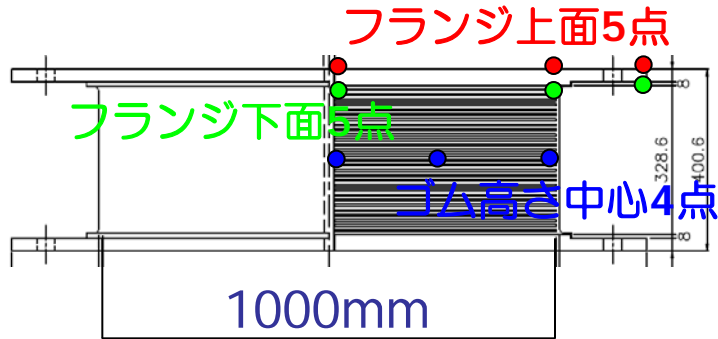
シミュレーション解析結果 (地震応答波2方向加振)

解析は履歴エネルギーが鉛プラグの発熱に費やされると仮定し、差分法による熱伝導解析と鉛温度～降伏応力関係から実験による荷重変形関係をシミュレートするものとした。

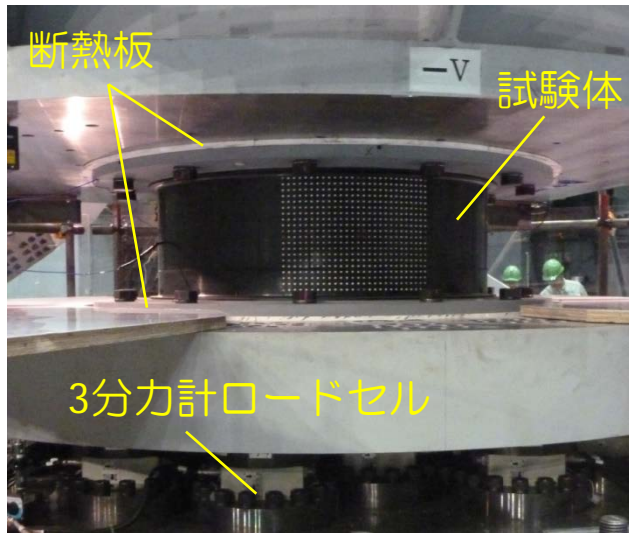


1. 実大実験計画・実施

高減衰積層ゴム(X0.6R)



● ● ● 温度計測点



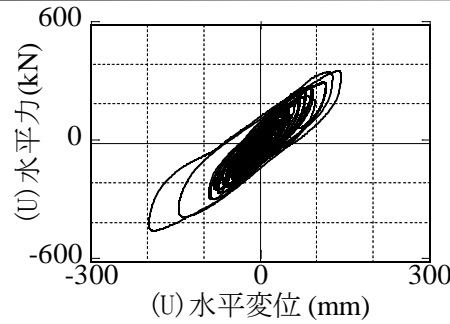
実験ケース一覧

実験条件	面圧 (N/mm ²)	加振方向	変形	加振周期	サイクル数	累積変形
地震応答波 NS	5.0	U	最大変形200mm			10.5m
地震応答波 EW		V	最大変形268mm			14.6m
地震応答波 2方向		U V	最大変形200mm 最大変形268mm		19.2m × 4回	
冷却約30分						
楕円繰返し	5.0	U V	400mm 200mm	4秒	5cyc. × 12回	116m
冷却約17時間						
正弦波繰返し	5.0	U	400mm	4秒	5cyc. × 12回	96m
冷却約100分						
真円繰返し	5.0	U V	400mm 400mm	4秒	3cyc. × 7回	53m
冷却約60分						
大振幅	3.0	V	400mm 500mm	4秒	2cyc.	3.2m 4.0m

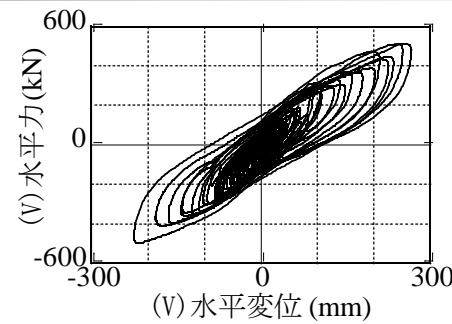
1. 実大実験計画・実施

1方向入力

NS : ゴム1.3°C上昇
EW : ゴム2.7°C上昇



1方向NS入力

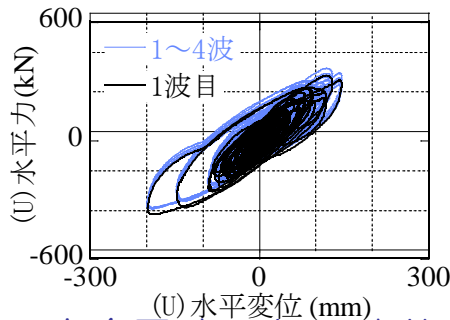


1方向EW入力

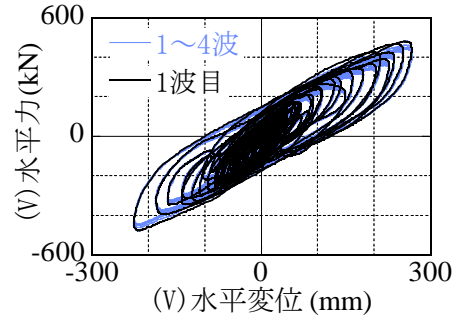
水平1方向と水平2方向の履歴ループ形状はほぼ同様。2方向入力による影響は比較的小さい。

2方向同時入力 (1回目)

ゴム3.6°C上昇



2方向同時入力NS成分

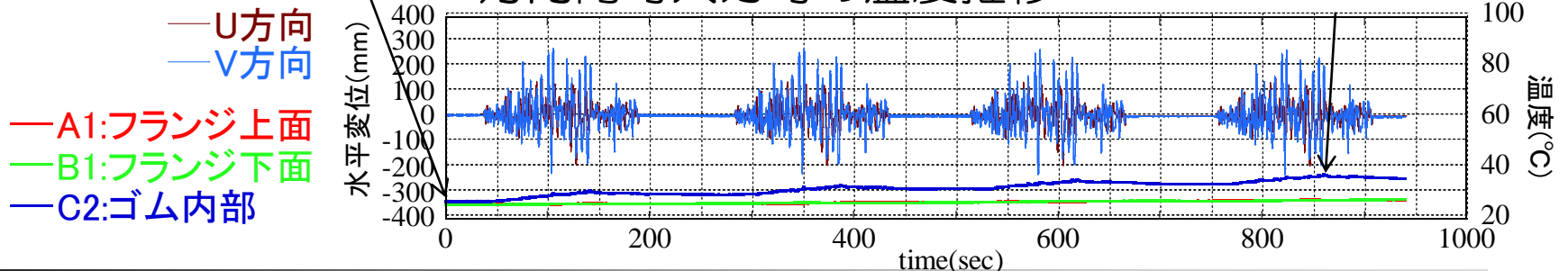


2方向同時入力EW成分

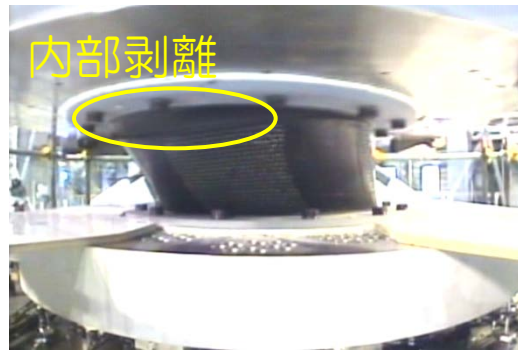
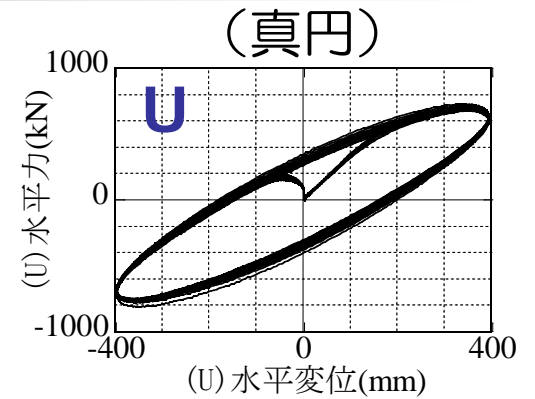
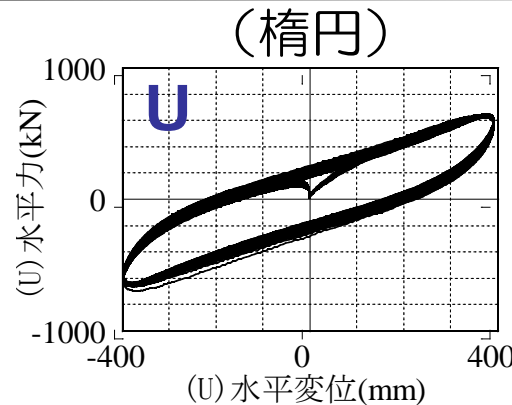
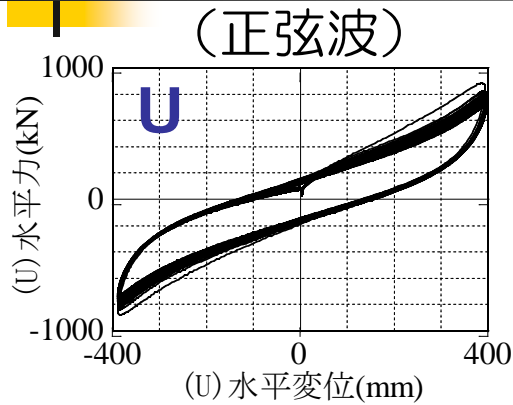
開始時27°C

2方向同時入力時の温度推移

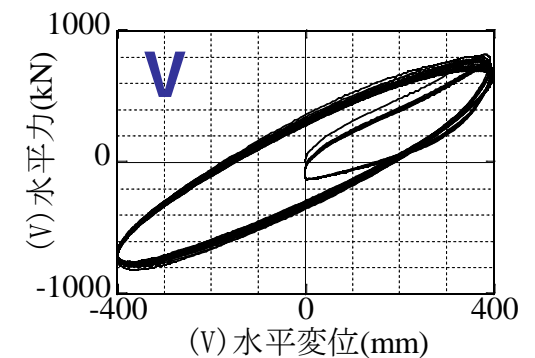
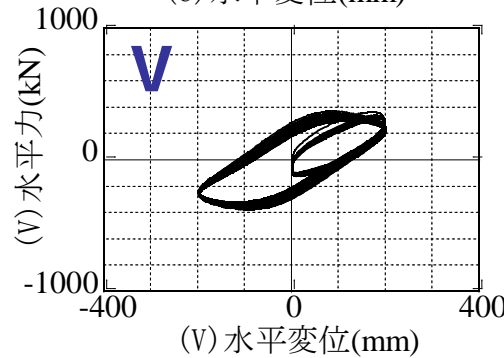
最高37°C



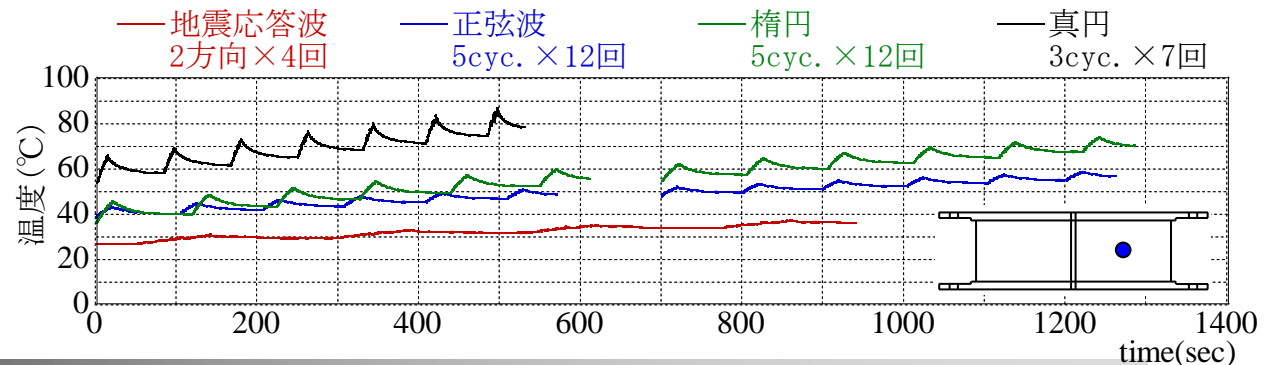
1. 実大実験計画・実施 (1方向・楕円・真円加振結果)



真円加振3cyc. × 7回目

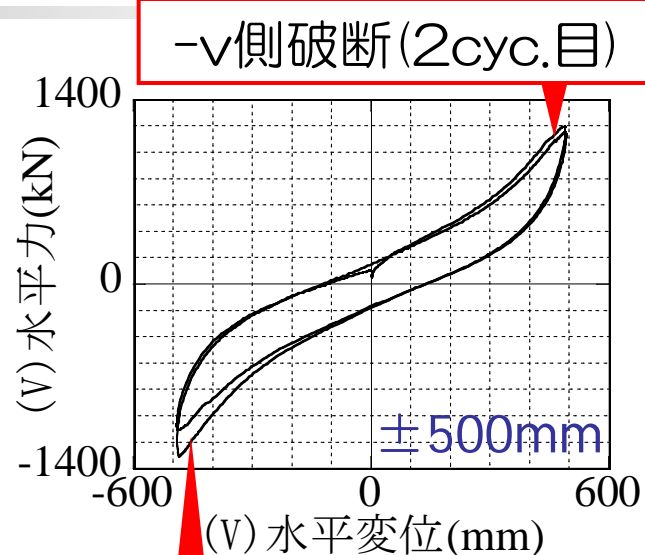
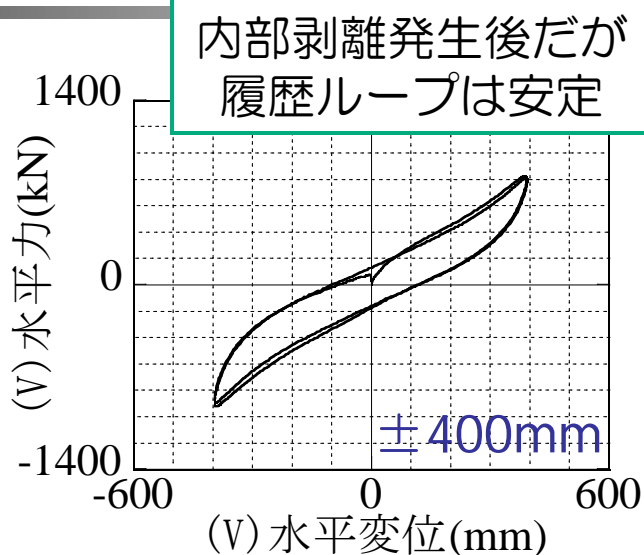
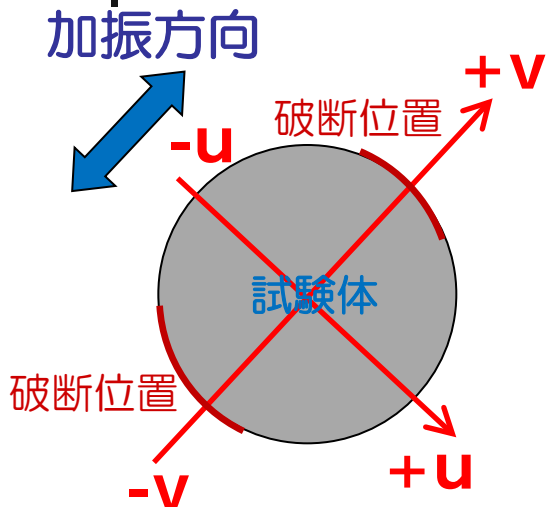


水平2方向加振を含む多数回繰返し加振による復元力特性変化を実大レベルで把握。



1. 実大実験計画・実施

高減衰積層ゴム (4) (大振幅加振結果)



大振幅±500mm 2サイクル目



実験終了後の試験体

今回の損傷には、高温状態での多数回繰返しという厳しい加振条件による疲労の影響が大きいと考えられる。



本日の報告内容

1. 実大実験計画・実大支承実験の実施
(免震部材実験WG)
(繰返し特性評価SWG)
2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法
(建物応答評価WG)
3. 地震観測・建物挙動分析
(建物地震観測WG)

2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法 (1)

■ 方針

- 昨年度は、繰返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備

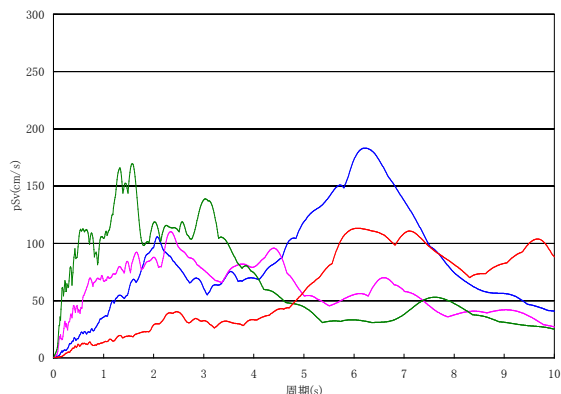


- 長周期地震動に対する1質点モデルの応答解析で、通常使われている設計モデルのパラメータをどのように変更したら、簡易的に評価できるかを検討
- 検討ケース
 - ①鉛プラグ入り積層ゴム
 - ②高減衰積層ゴム
 - ③天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー
 - ④天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）
 - ⑤天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー

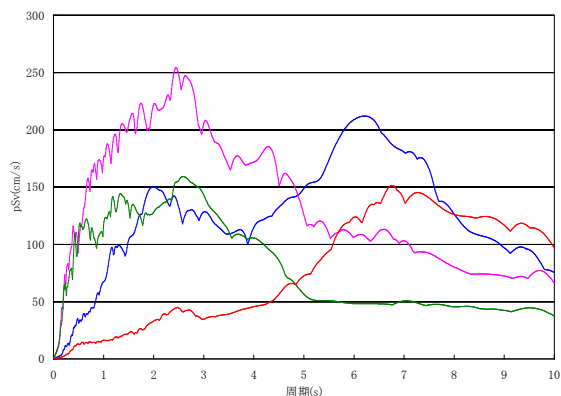
2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法 (2)

■ 検討用長周期地震動

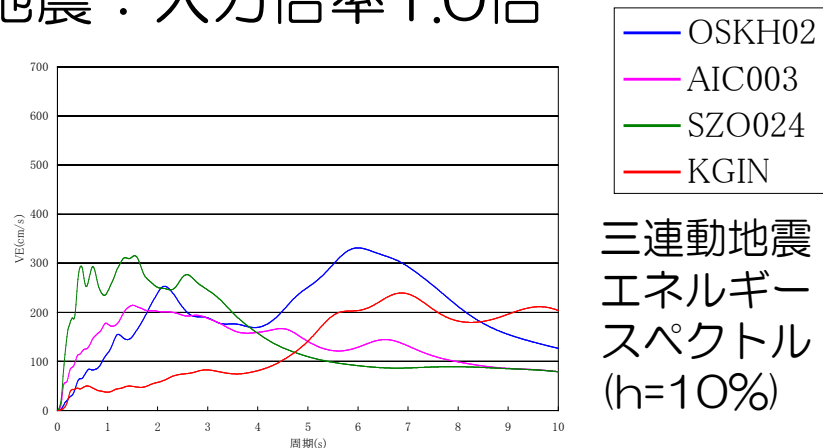
- 平成23年度に用いた**三連動**地震 : 入力倍率1.0, 1.25, 1.5倍
- 平成24年度に作成された**四連動**地震 : 入力倍率1.0倍



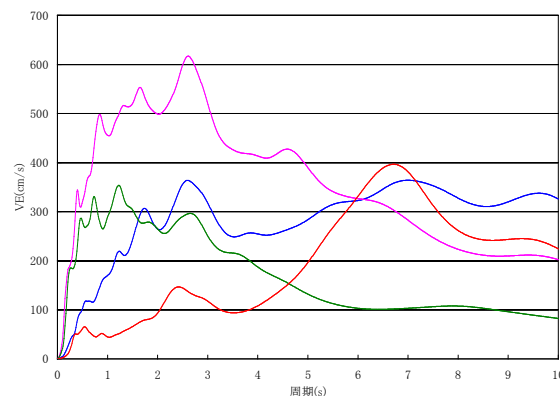
三連動地震
擬似速度応答
スペクトル
(h=5%)



四連動地震
擬似速度応答
スペクトル
(h=5%)



三連動地震
エネルギー
スペクトル
(h=10%)

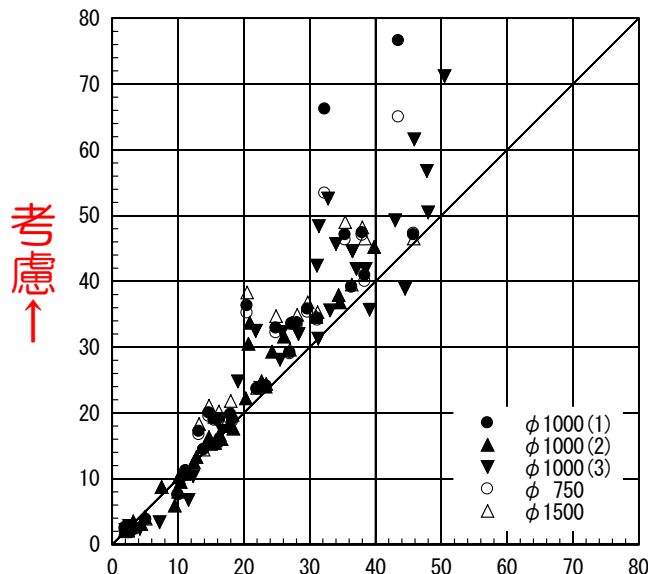


四連動地震
エネルギー
スペクトル
(h=10%)

2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法 (3)

■ 温度上昇考慮時（詳細モデル）の水平変形

温度上昇 考慮時
詳細応答評価法（手法1）による
免震層水平変形 (cm)

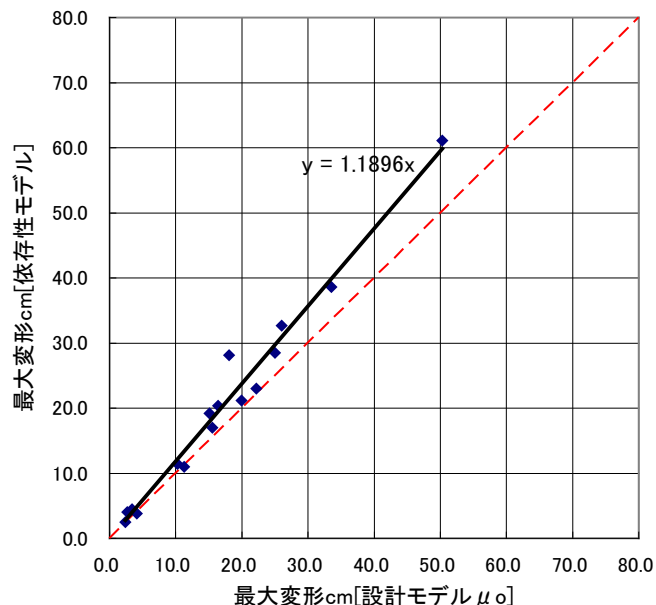


、非考慮

鉛プラグ入り積層ゴム

免震層の水平変形が20cm ($\gamma=100\%$)
程度以上となると変形が増大する傾向

考慮↑



、非考慮

弾性すべり支承（高摩擦）

通常設計で見込むばらつき以外に、繰
返し依存性により変形が増大する傾向

2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法 (4)

■ ①鉛プラグ入り積層ゴム

- 手法1 : 熱伝導と地震応答解析とを並行して実施する**詳細評価**
- 手法2 : **エネルギーの釣合い**を基にした包絡解析法による評価
- 手法3, 3' :
降伏荷重をあらかじめ低減させて地震
応答解析を行う

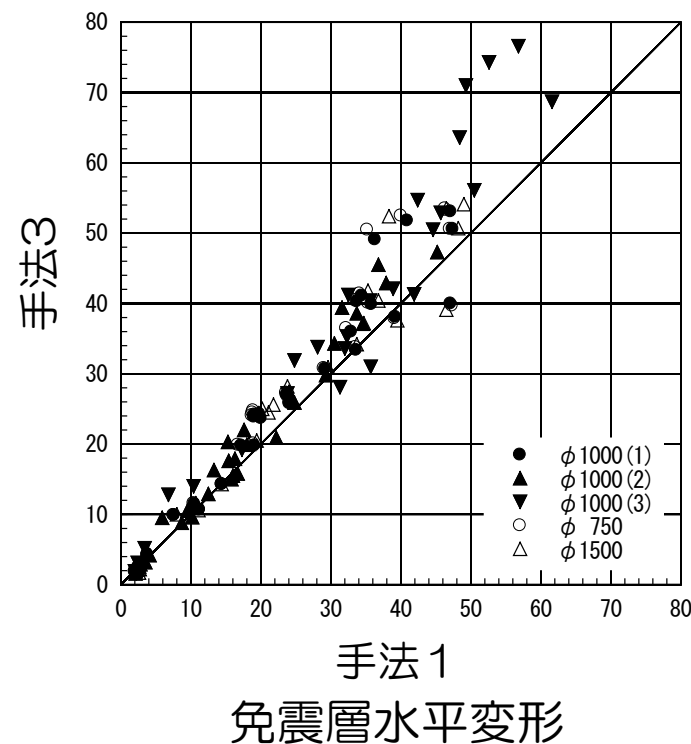
降伏荷重の低減に用いる履歴吸収エネルギー

手法3 : 地震終了時

手法3' : 免震層水平変形最大時



免震層水平変形については、
手法3が比較的よい一致



2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法 (5)

■ ②高減衰積層ゴム

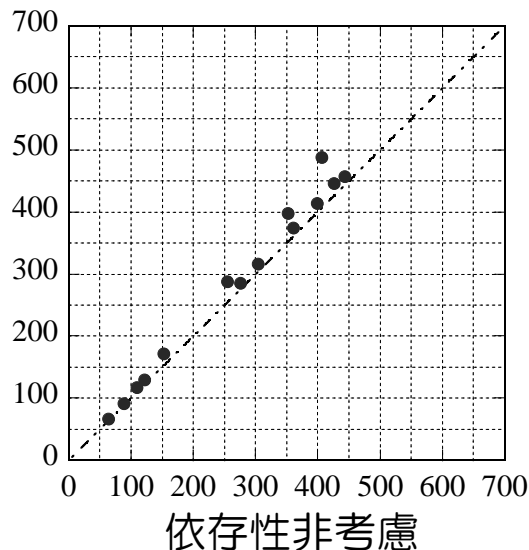
累積吸収エネルギーの値（解析終了時の95%値）を基に、高減衰積層ゴムの等価剛性および等価減衰定数の低下率を設定し評価



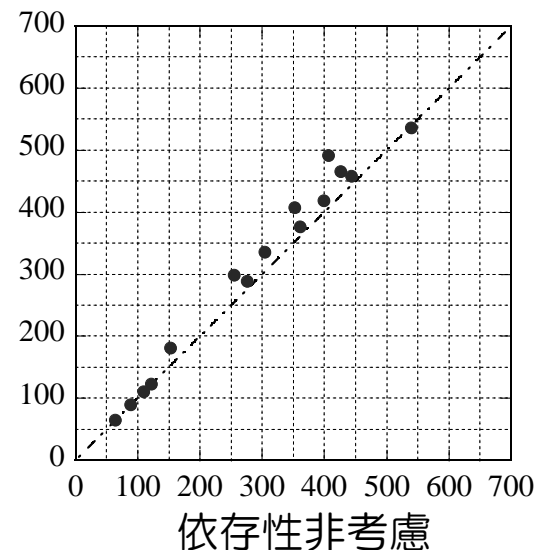
低下率を解析開始時から一定値としているため、免震層水平変形をやや大きめに評価

免震層
水平変形

詳細解析



簡易評価



2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法 (6)

■ ③天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー

初期から一律に鉛ダンパーの降伏耐力を低減し、簡易評価

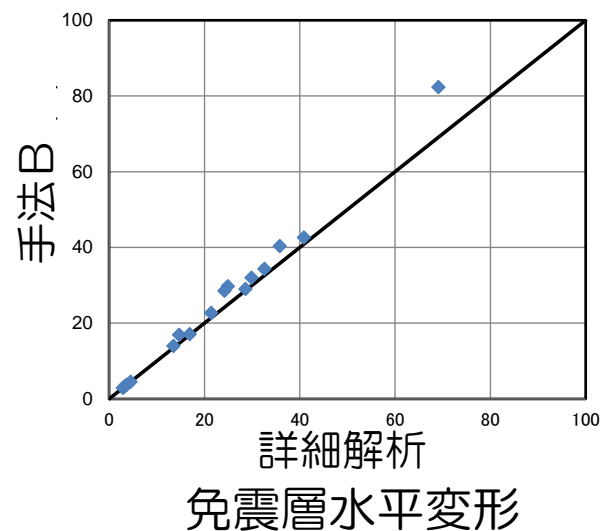
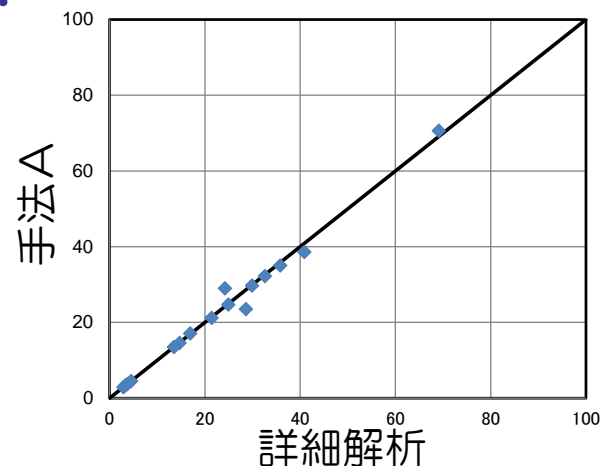
鉛ダンパーの降伏耐力低減方法

手法A：最大変形と最大変形時の累積吸収エネルギーを用いる

手法B：最大変形と解析終了時の累積吸収エネルギーを用いる



手法Bは、詳細解析や手法Aより免震層水平変形をやや大きめに評価



2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法 (7)

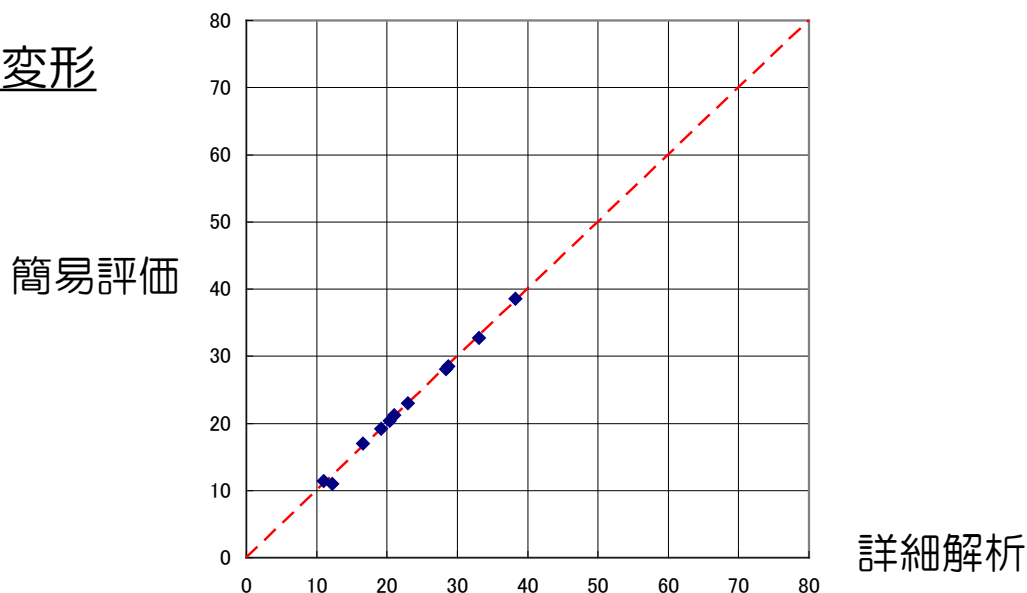
■ ④天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承 (高摩擦)

累積すべり変位と摩擦係数の関係式を用いて、**最大変形時累積すべり変位**を基に、**低下した摩擦係数**を設定



簡易評価の免震層水平変形は、詳細解析の値と概ね一致した

免震層水平変形



詳細解析

2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法 (8)

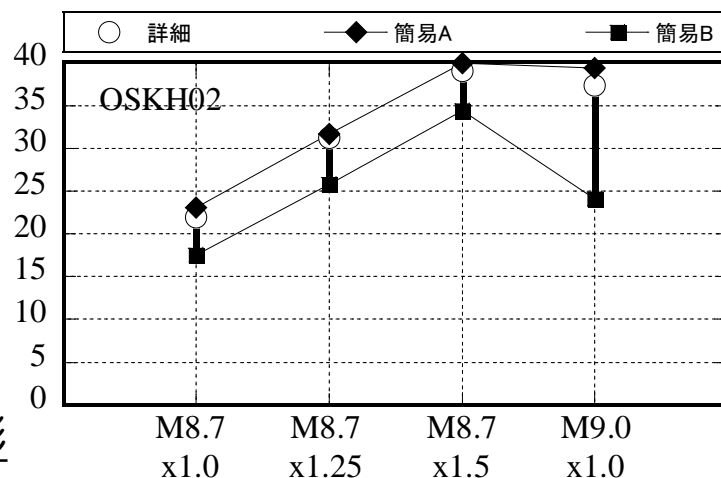
■ ⑤天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承 (低摩擦) +粘性ダンパー

- 簡易A : 弾性すべり支承の摩擦係数を**最小値** $\mu = 0.00595$
粘性ダンパーの繰返し依存係数を**下限値** $\alpha = 0.70$
粘性ダンパー温度 予備解析より別途計算した**想定温度**
- 簡易B : 弾性すべり支承の摩擦係数を**最大値** $\mu = 0.0114$
粘性ダンパーの繰返し依存係数を**基準値** $\alpha = 0.85$
粘性ダンパー温度 **15°C**



免震層変形は詳細解析より、
簡易Aは大きく、
簡易Bは小さくなる

免震層
水平変形



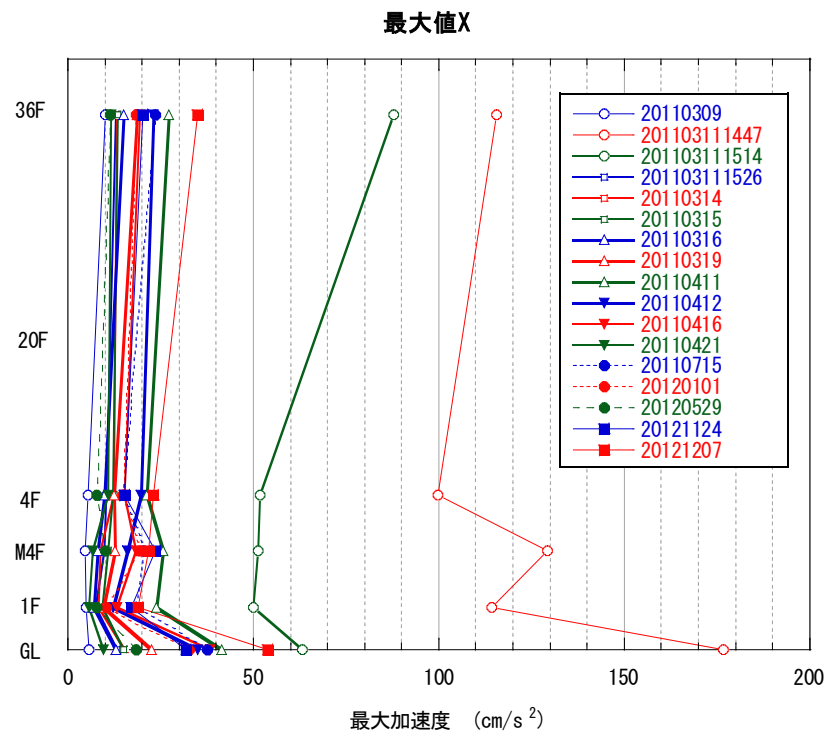
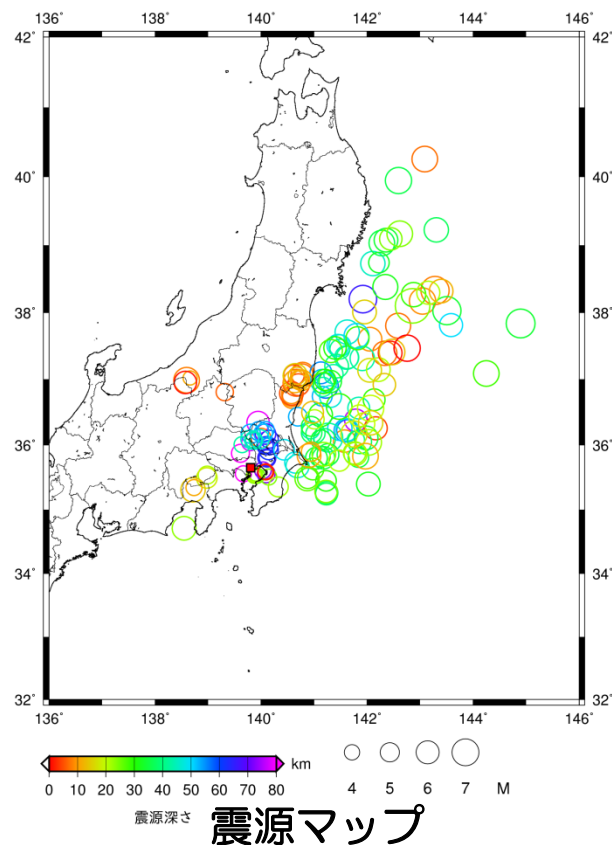


本日の報告内容

1. 実大実験計画・実大支承実験の実施
(免震部材実験WG)
(繰返し特性評価SWG)
2. 繰返し依存性の簡易的とり込み法
(建物応答評価WG)
3. 地震観測・建物挙動分析
(建物地震観測WG)

地震観測結果

大阪と東京において、各1棟の免震建物の地震観測を実施した。東京の建物においては、2011年東北地方太平洋沖地震を始めとして、多くの記録が観測された。計測震度2.0以上は、17地震であった。

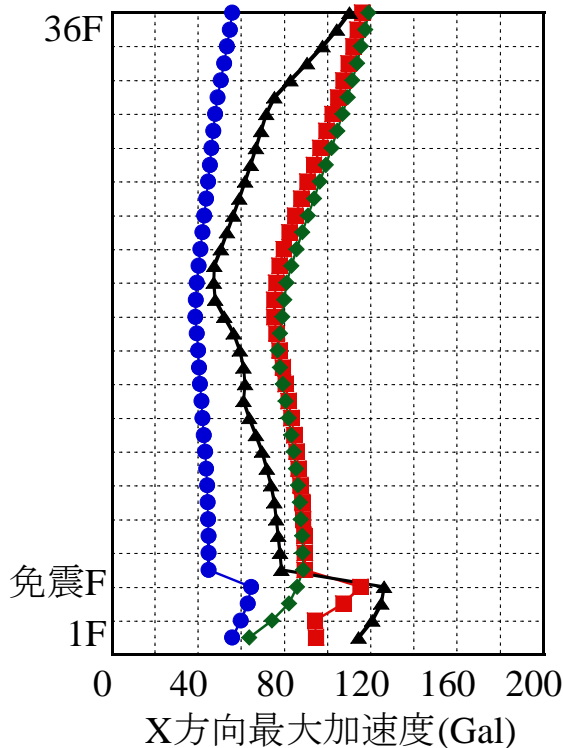


最大加速度の分布

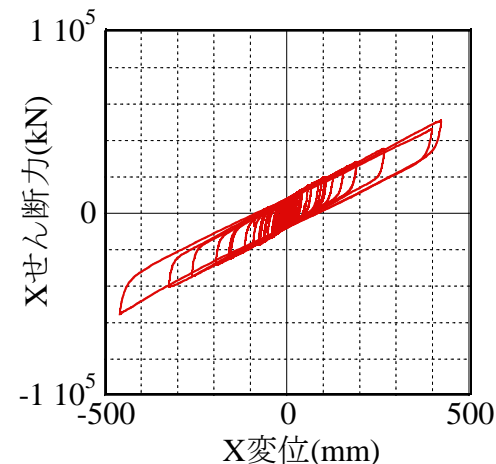
南海トラフの巨大地震についての応答解析

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震時の建物応答を再現したモデルを用い、3連動・4連動地震の解析を実施

- 3連動地震 (平均)
- 3連動地震 (平均+標準偏差)
- ◆ 4連動地震
- ▲ 東北地方太平洋沖地震 本震



- 免震建物の応答は、それほど大きくなならない
- 免震層の最大変位は、45.9cmと311の約3倍



東日本大震災の本震・余震観測記録に基づく 免震建築物の地震時挙動（１）

地震計：基礎・免震層直上階
最上階または屋上階
検討項目：加速度・計測震度
免震層変位
免震層累積変位
固有周期・減衰定数

検討対象建物

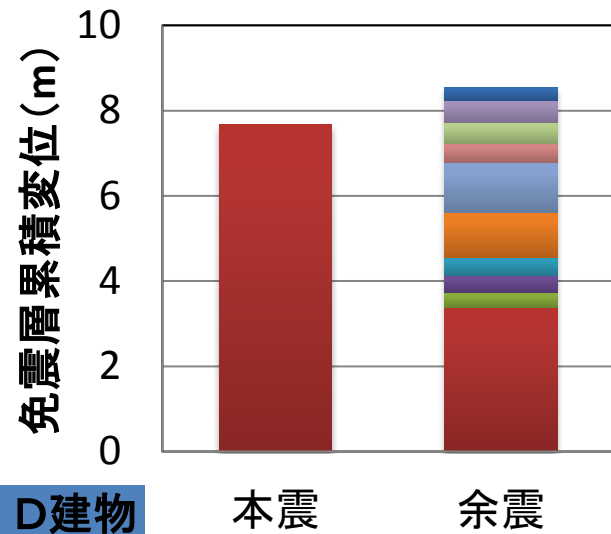
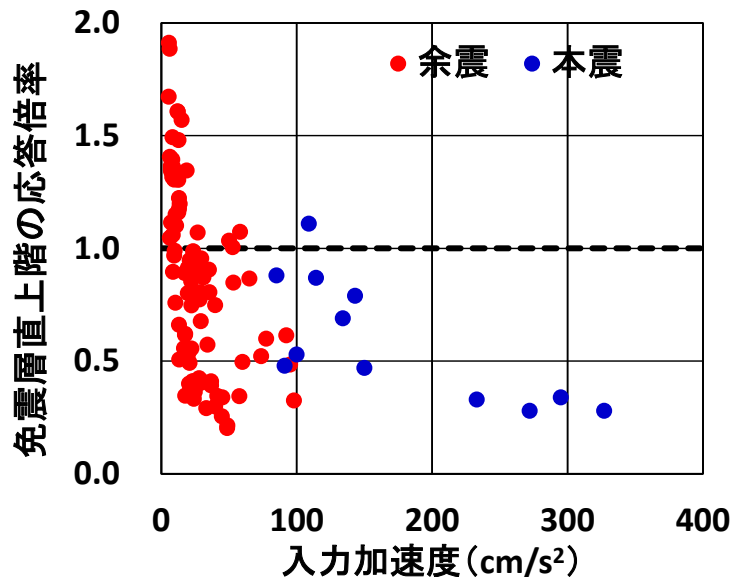
建物	所在地	構造	
A	東京都調布市	RC	2F
B	東京都江東区	RC	12F
C	千葉県船橋市	RC	3F
D	茨城県つくば市	S	6F
E	東京都江東区	RC	36F
F	茨城県つくば市	PC	7F

対象とした主な地震（2011年）

発生日	震央	規模	A	B	C	D	E	F
3/11	三陸沖(本震)	9.0	○	○	○	○	○	○
3/11	茨城県沖	7.6		○	○	○	○	○
3/11	三陸沖	7.5					○	
3/14	茨城県沖	6.2				○	○	
3/15	静岡県東部	6.4	○	○			○	
3/16	千葉県東方沖	6.1			○	○	○	○
3/19	茨城県北部	6.1	○			○	○	○
4/07	宮城県沖	7.2	○	○	○	○		○
4/11	福島県浜通り	7.0	○	○	○	○	○	○
4/11	福島県浜通り	5.9				○		○
4/12	千葉県東方沖	6.4		○	○	○	○	
4/12	福島県中通り	6.4				○		○
4/16	茨城県南部	5.9	○	○	○	○	○	○
4/21	千葉県東方沖	6.0					○	
7/15	茨城県南部	5.4		○				○
7/31	福島県沖	6.5			○			

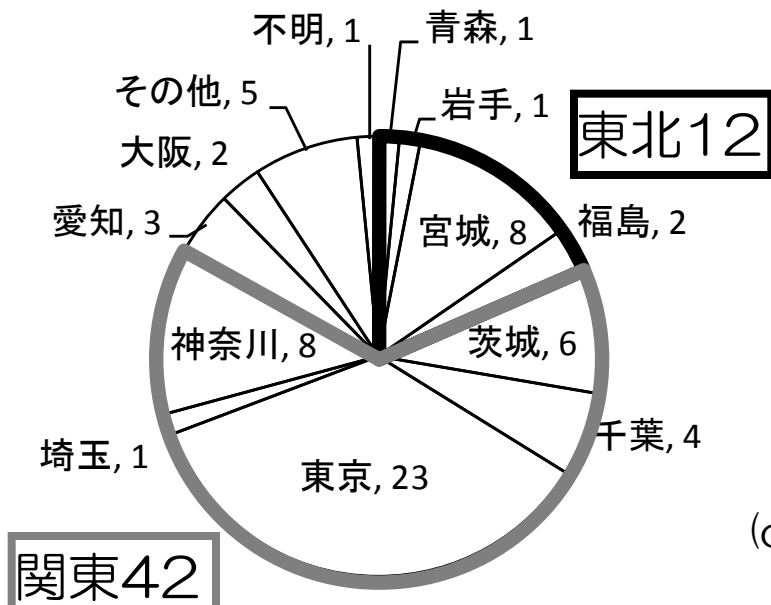
東日本大震災の本震・余震観測記録に基づく 免震建築物の地震時挙動（2）

- 余震による入力加速度は最大 100cm/s^2 、震度階級は3又は4、免震層変位は最大 8cm であり、概ね免震効果が認められた。
- 余震による主要動継続時間の免震層累積変位の総和は $2.5\sim 8.5\text{m}$ であり、本震累積変位に対して $50\sim 114\%$ であった。複数の余震を受けることで、本震に匹敵するあるいはそれを上回る累積変位が免震層に生じたことが確認された。



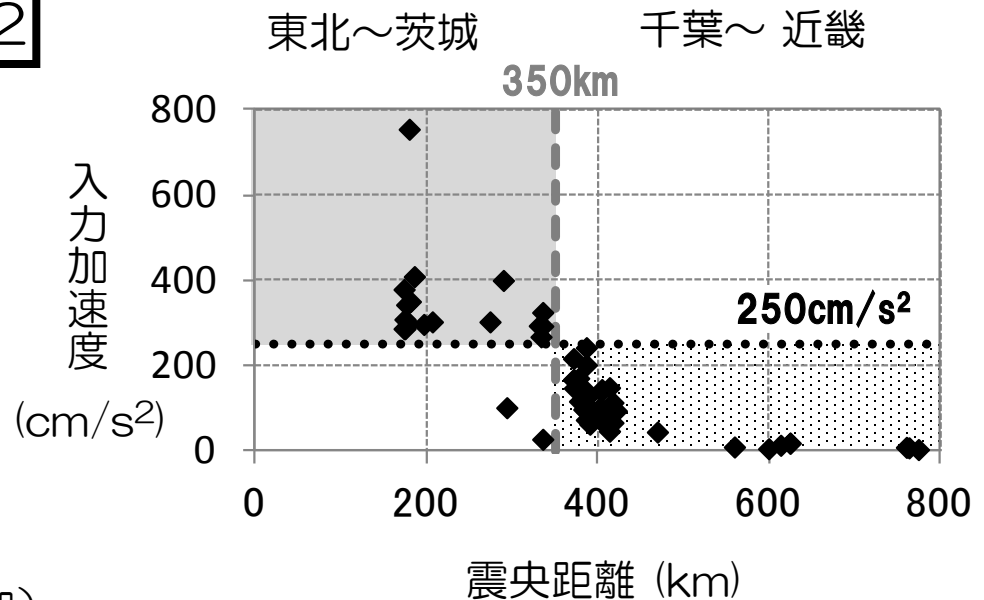
観測記録による挙動・免震効果（1）

昨年度収集したデータに、今年度新たに公表された3棟を追加し、**全65棟**について分析を実施

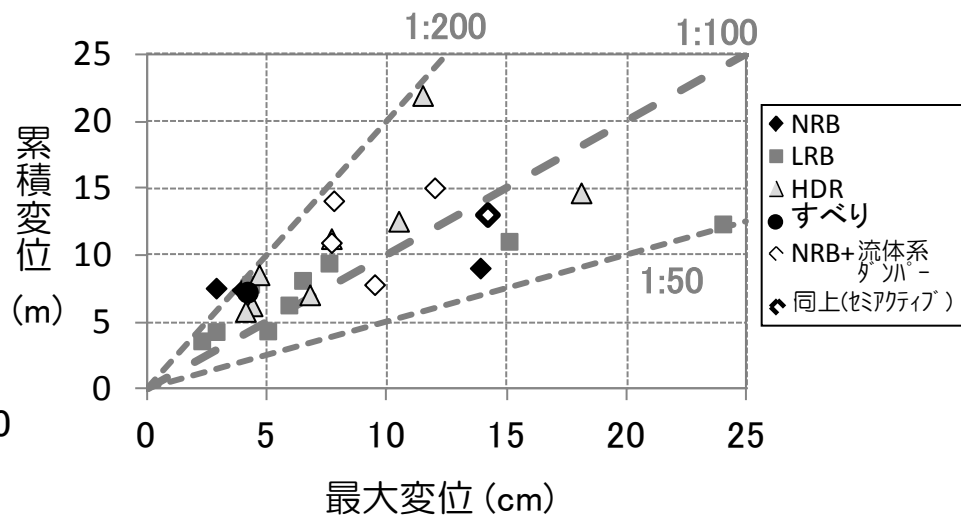
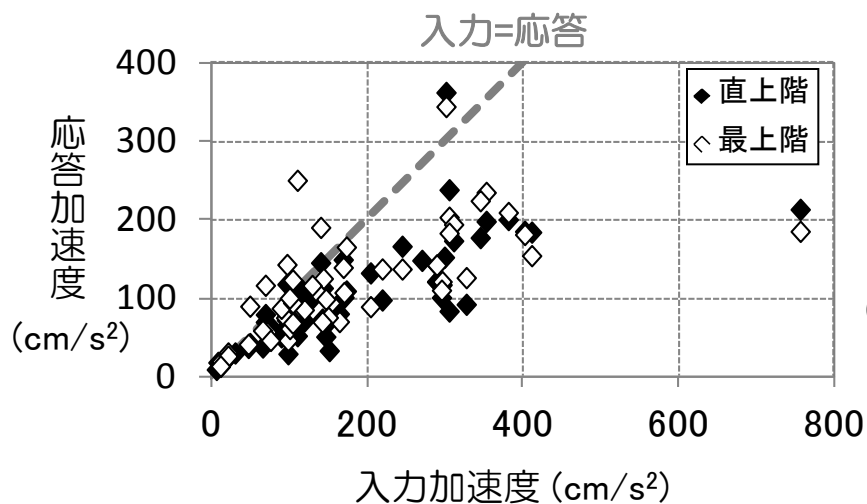


都道府県の内訳

(宮城1件、埼玉1件、神奈川1件追加)



観測記録による挙動・免震効果（2）



- 上部構造の加速度（応答加速度）は 250cm/s^2 で頭打ちとなり、免震効果が見られた。
- 免震層変位は東北で $5\sim 24\text{cm}$ 、関東で $3\sim 10\text{cm}$ であった。関東でも免震装置の組み合わせによっては 15cm 程度となった。
- 累積変位は免震層変位のおよそ100倍であった。



まとめと今後の課題

3年度に亘る本事業では、免震部材の長周期地震動に対する性能評価と建築物応答への影響を評価することを目的として、縮小免震部材の多数回繰返し加振実験、実大免震部材のE-ディフェンス震動台を用いた多数回繰返し加振実験、繰返し免震部材特性を考慮した応答解析、免震建築物の地震観測を実施した。

本検討により各種免震材料の長周期・長時間の揺れに対するエネルギー吸収性能および建築物応答への影響が明らかとなり、長周期地震動に対する免震建築物の安全性を照査するためのクライテリア設定の根拠となるデータを取得した。

2方向・実応答を想定した実大減衰材の加振実験の実施、縮小試験体による繰返し特性把握の試験条件の整理、加速度応答スペクトルに基づく免震層の応答評価法の提案は今後の課題である。