

平成22年度
建築基準整備促進事業

「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」

報告会

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（１）

- （イ） 多数繰返し荷重を受ける免震部材の構造実験
縮小実験（免震部材実験WG）
実大実験計画（実大実験計画WG）
- （ロ） 長周期地震動に対する免震建築物の応答評価
建物応答評価（建物応答評価WG）
- （ハ） 免震建築物の地震観測
地震観測（地震観測WG）

調査の内容（2）

■ 免震部材

免震部材	試験体数
天然ゴム系積層ゴム	3
高減衰積層ゴム	3
鉛プラグ入り積層ゴム	3
弾性すべり支承（高摩擦）	3
弾性すべり支承（低摩擦）	3
鉛ダンパー	3
鋼材ダンパー	3
オイルダンパー	3
粘性ダンパー	3

調査の実施体制（１）

事業主体	管理技術者	担当業務
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
◎大成建設	長島一郎	全体調整・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
鹿島建設	計5名	免震部材実験（鉛プラグ入り積層ゴム、鋼材ダンパー）、建物応答
清水建設	計4名	免震部材実験（高減衰積層ゴム、鉛ダンパー）、建物応答
◎大成建設	計8名	全体とりまとめ 免震実験部材（天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承、オイルダンパー）、建物応答、実大実験計画
竹中工務店	計3名	免震部材（弾性すべり支承、粘性ダンパー）実験、建物応答

*地震観測は、適用物件に応じて担当を決定

（社）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）

実大実験計画WG（主査：長島一郎）

建物応答評価WG（主査：古橋剛）

地震観測WG（主査：飯場正紀）



本日の報告内容

1. 縮小実験（免震部材実験WG）
2. 建物応答評価（建物応答評価WG）
3. 実大実験計画（実大実験計画WG）
4. 地震観測（地震観測WG）



1. 縮小実験（免震部材実験WG）



1.1 実験の目的

各種免震部材の性能を明らかにすることを目的として、縮小または実大試験体による多数回繰返し荷重を受ける免震部材の性能評価実験を行う

- ・ 主な課題

- 繰返しに伴う温度上昇・疲労などの要因による履歴特性の変化および限界性能の把握

- ・ 実験装置

- 免震部材メーカー等の既存の試験機を使用

1.2 実験方針（1） 支承

・ 対象部材

- 鉛プラグ入り積層ゴム
- 高減衰積層ゴム
- 天然ゴム系積層ゴム
- 弾性すべり支承（高摩擦）
- 弾性すべり支承（低摩擦）

既往の知見（繰返し特性）



温度上昇に伴う降伏荷重の低下、剛性の低下



温度上昇・摩耗に伴う摩擦係数の変化

・ 試験体の仕様

実大試験体（Φ1000）の縮小モデル

試験装置の性能範囲内のできる限り

寸法の大きい縮小試験体を使用

・ 実験方法

圧縮力载荷、水平1方向動的せん断加振



1.2 実験方針（2）ダンパー

・対象部材

既往の知見（繰返し特性）

○鋼材ダンパー

○鉛ダンパー

○オイルダンパー

○粘性ダンパー



低サイクル疲労・温度上昇による限界性能の変化



油温上昇・粘度低下による限界性能・減衰性能の変化

・試験体の仕様

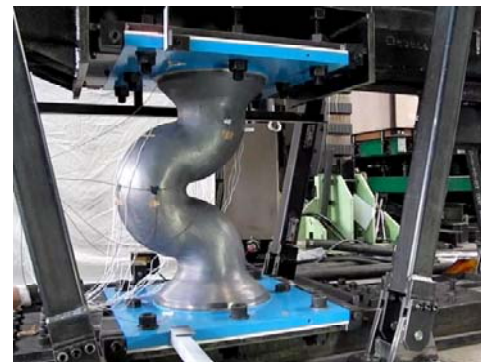
原則として実大

試験装置の性能範囲内で選定



・実験方法

動的／静的、水平1方向動的せん断加振



1.2 実験方針（3）

・実験条件の設定

既往の検討結果*に基づき、基本条件（6ケース）を定める

入力エネルギーの等価速度：3.0m/s～4.0m/s

免震の累積変形量：20～30m 程度

最大変形量：500～600mm 程度

*平成21年度本事業「12免震建築物の基準の整備に資する検討」

ケース	試験条件	加振周期 s	変位振幅(ひずみ振幅)		換算速度 cm/s	サイクル数 回	時間 s	累積変形 m
			±mm	%				
1A	長周期	4	100	50	15.7	125	500	50
1B	限界	4	100	50	15.7	250	1000	100
2A	長周期	4	200	100	31.4	60	240	48
2B	限界	4	200	100	31.4	120	480	96
3A	長周期	4	400	200	62.8	30	120	48
3B	限界	4	400	200	62.8	60	240	96
備考			ダンパー・ すべり支承	積層ゴム 支承				

1.3 調査結果 (1)

- 鉛プラグ入り積層ゴム ($\Phi 500$: プラグ本数2種)
- 高減衰積層ゴム ($\Phi 250$: 荷重履歴漸増ケース)
- 天然ゴム系積層ゴム ($\Phi 250$: 軸力変動ケース)

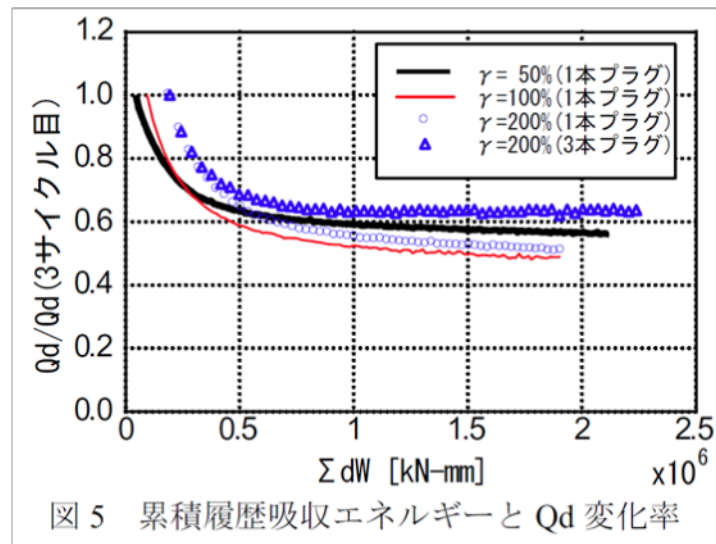
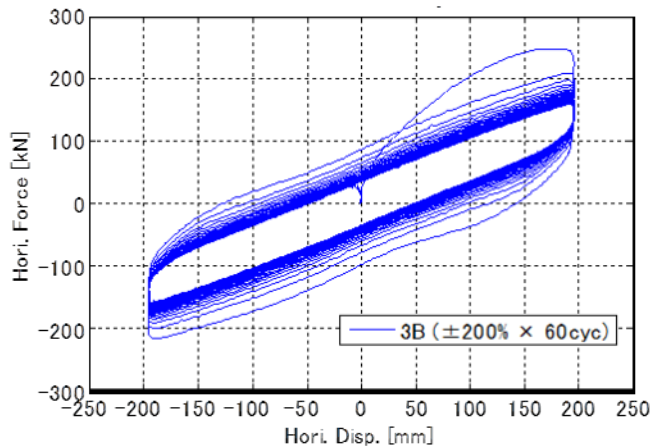
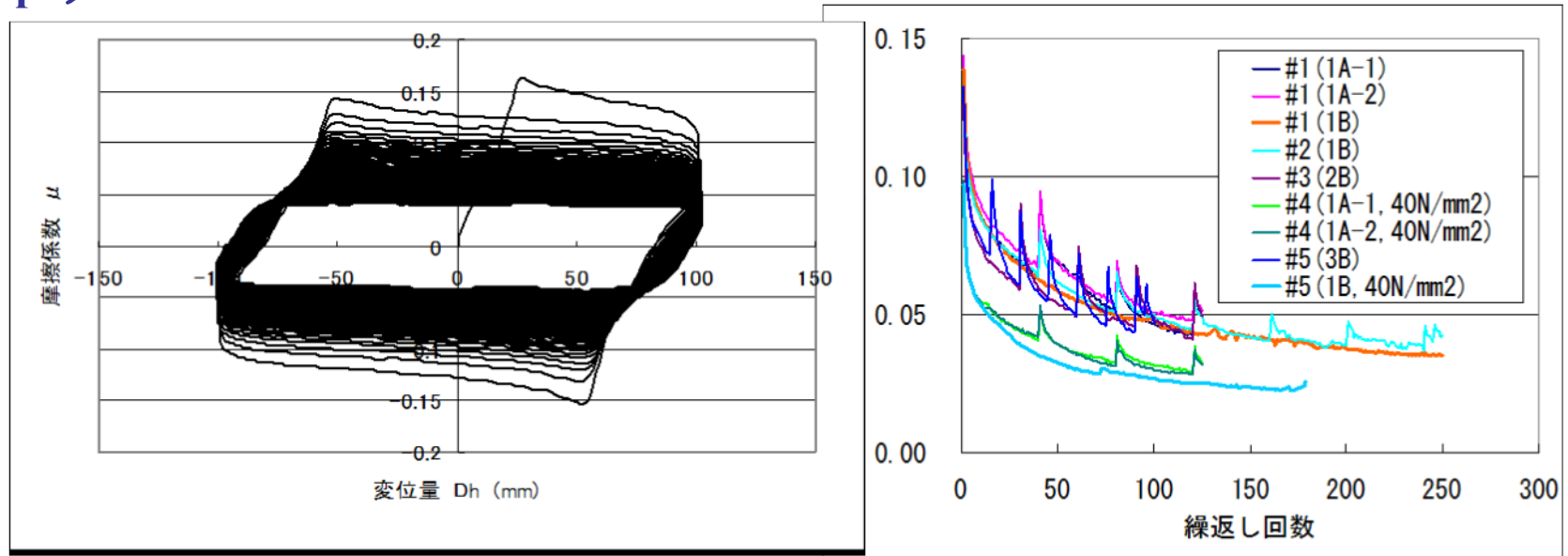


図5 累積履歴吸収エネルギーと Qd 変化率

多数回繰返し実験による特性変化の例 (鉛プラグ入り積層ゴム)

1.3 調査結果 (2)

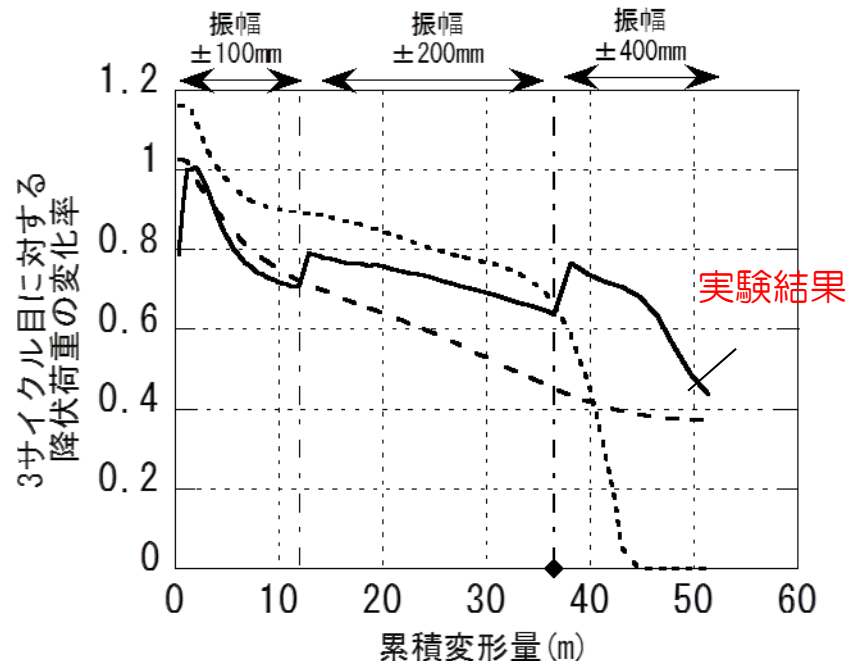
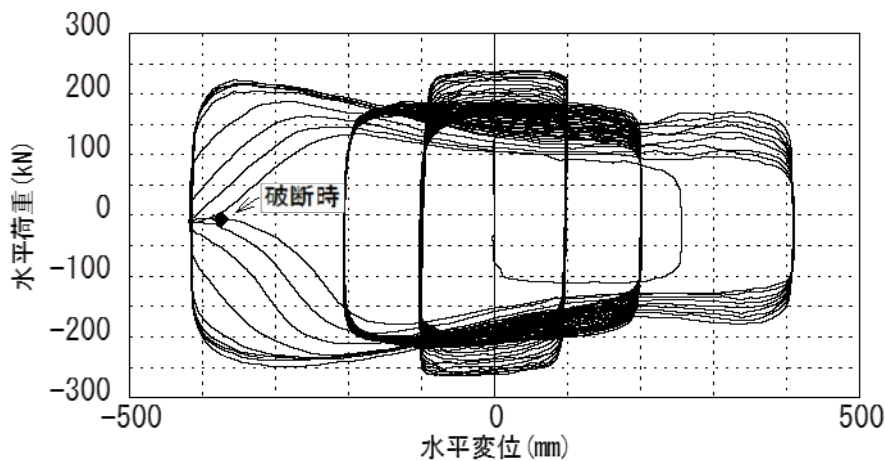
- 弾性すべり支承 (高摩擦) (Φ300 : 高面圧ケース40Mpa)
- 弾性すべり支承 (低摩擦) (Φ400/350 : 高面圧ケース30Mpa)



多数回繰返し実験による特性変化の例 (弾性すべり支承 (高摩擦))

1.3 調査結果 (3)

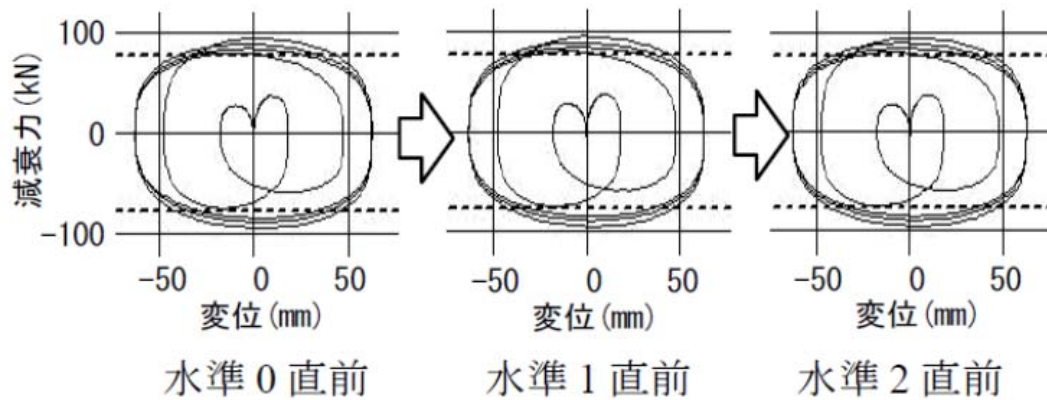
- 鋼材ダンパー (300kN / 定振幅・変動振幅)
- 鉛ダンパー (220kN / 変動振幅・加振方向)



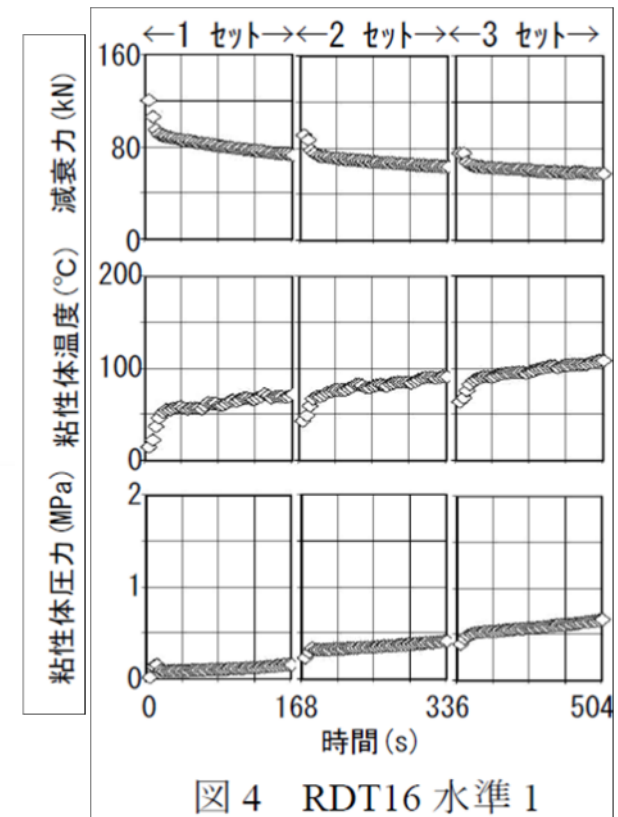
多数回繰返し実験による特性変化の例 (鉛ダンパー)

1.3 調査結果 (4)

- オイルダンパー (1000kN / 減衰特性3タイプ)
- 粘性ダンパー (80, 160, 300kN / 減衰力3タイプ)



多数回繰返し実験による特性変化の例
(粘性ダンパー)





1.4 まとめと今後の課題

- ・長周期地震動に対する免震建築物の安全性を検討するために必要となる各種免震部材の性能を明らかとすることを目的として、多数回繰返し実験を行い、エネルギー吸収性能の変化を確認した。
- ・今後の課題として、影響要因の整理と繰返し特性を反映した履歴特性および特性値評価式の検討、地震応答や連続加振のもとでの特性把握、実大試験体の実験によるスケール効果の把握、などが挙げられる。



2. 建物応答評価（建物応答評価WG）



2.1 検討の目的

長周期地震動に対する免震建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する。



2.2 検討ケース

- ① 鉛プラグ入り積層ゴム (鹿島建設)
- ② 高減衰積層ゴム (清水建設)
- ③ 天然ゴム系積層ゴム＋鋼材ダンパー (鹿島建設)
- ④ 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー (清水建設)
- ⑤ 天然ゴム系積層ゴム＋オイルダンパー (大成建設)
- ⑥ 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承(高摩擦)
(大成建設)
- ⑦ 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 (竹中工務店)



2.3 検討方針

既往の研究と免震部材メーカー提供による多数回繰返し特性を解析に反映させ、長周期地震動に対する免震建物の応答解析を実施し、応答評価を行う。

評価手法の整理

- ・ 応答解析に反映させるべきもの

(累積変形、温度上昇などの関数として評価できるもの)

解析プログラムの改良と整備

- ・ 通常の応答解析を行なって結果から評価できるもの



2.4 解析モデルと入力地震動（1）

解析モデル

上部構造を剛体モデルとした1質点モデル

免震層の設定

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3.0～3.5%を標準

入力地震動

N-OSKH02-AV	(大阪・此花(南海地震)平均)
T-TN-AIC003-AV	(愛知・津島K-NET(東海・東南海連動)平均)
T-TN-AIC004-AV	(名古屋K-NET(東海・東南海連動)平均)
T-TN-KGIN1F-AV	(東京・工学院大(東海・東南海連動)平均)

2.4 解析モデルと入力地震動（2）

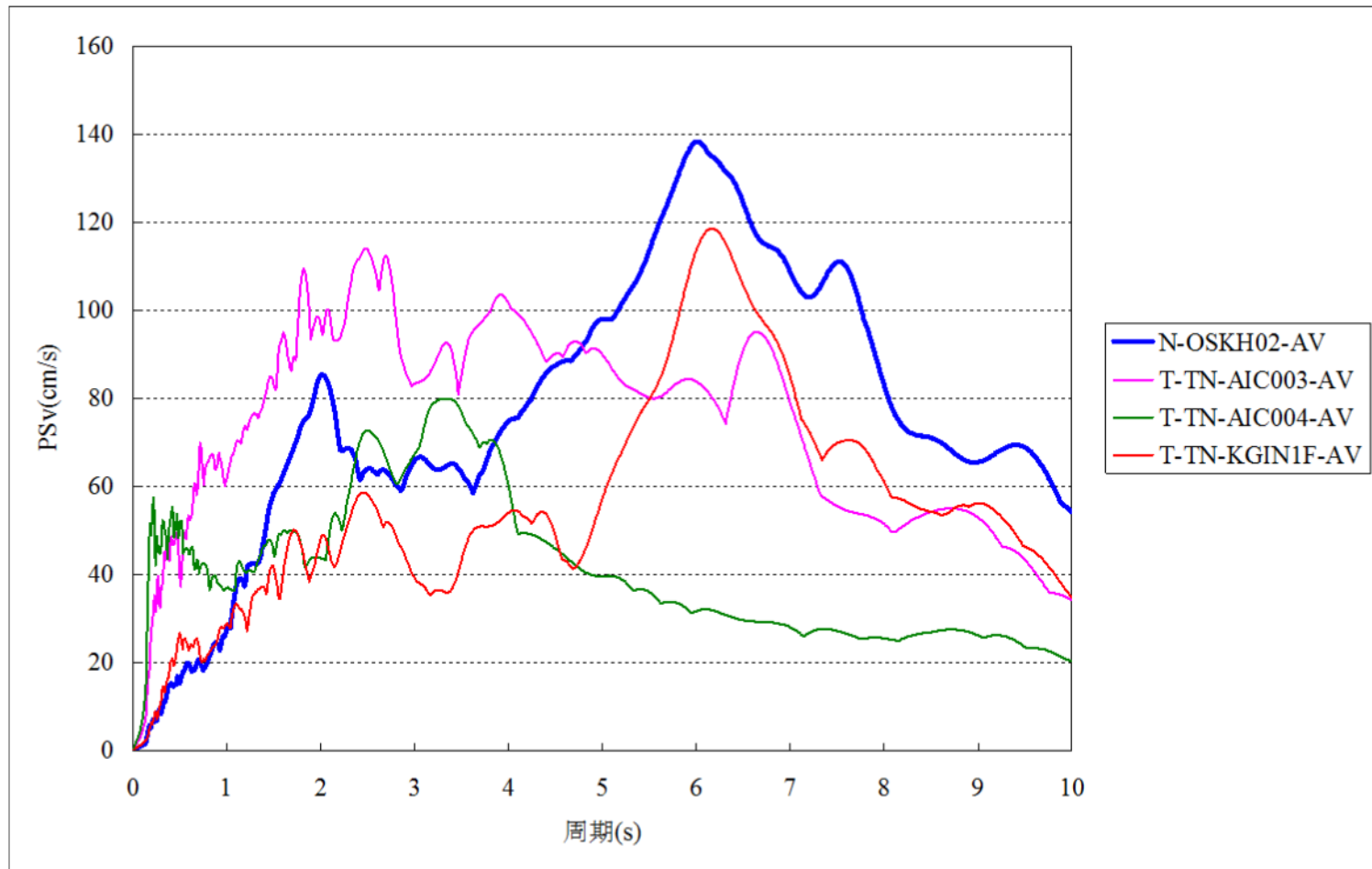
入力地震動の諸元

地震波	加速度 (cm/s^2)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	継続時間 (s)
N-OSKH02-AV	70.9	34.2	30.4	625.36
T-TN-AIC003-AV	221	31.0	24.1	645.36
T-TN-AIC004-AV	323	22.3	13.7	645.36
T-TN-KGIN1F-AV	89.6	21.5	23.1	620.0

※入力地震動のレベルを1.0倍、1.25倍、1.5倍として応答解析を実施
(平均地震波を用いて地震動レベルの違いによる繰返し依存性を検討)

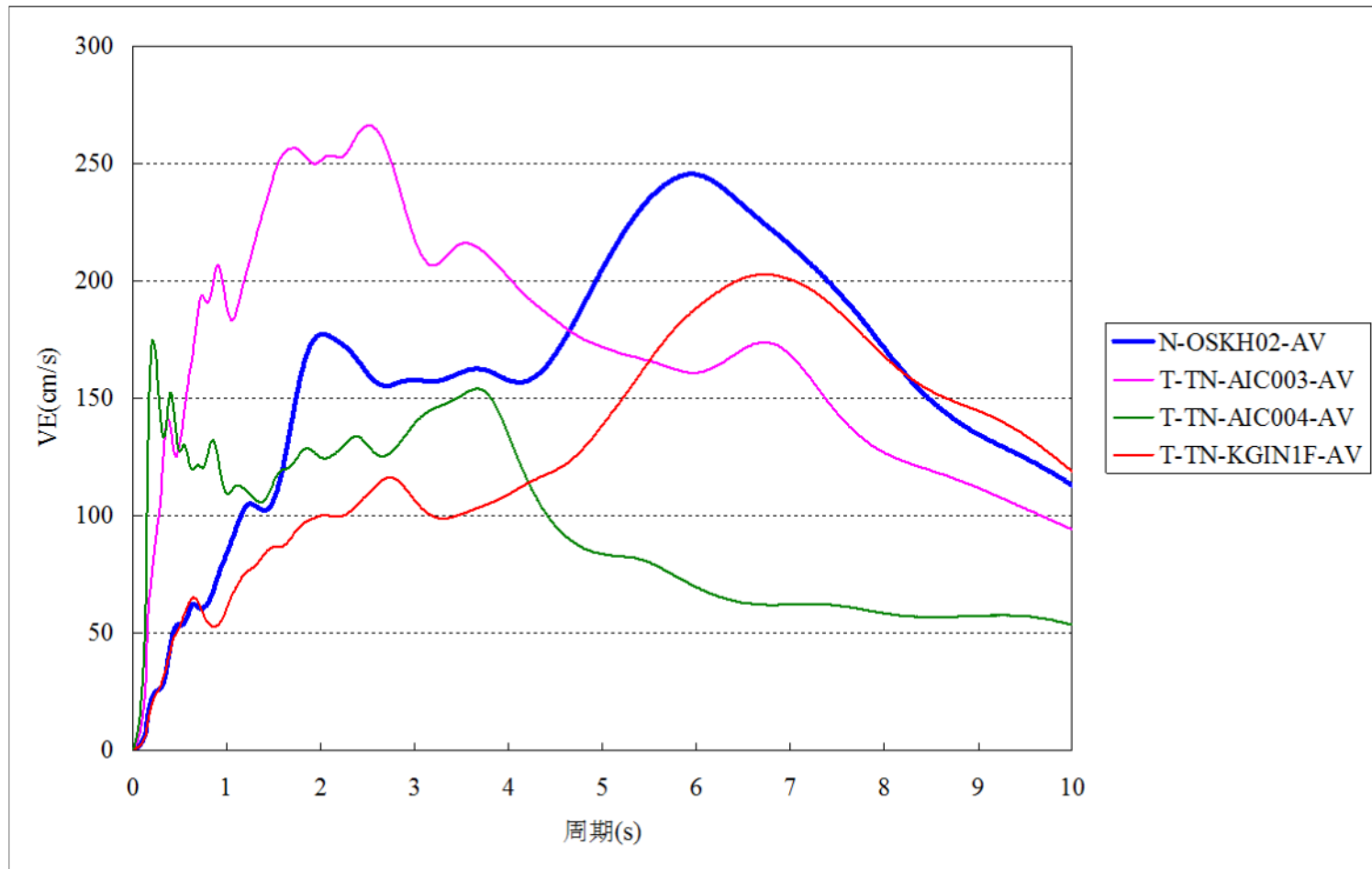
2.4 解析モデルと入力地震動 (3)

入力地震動 擬似速度応答スペクトル($h=0.05$)



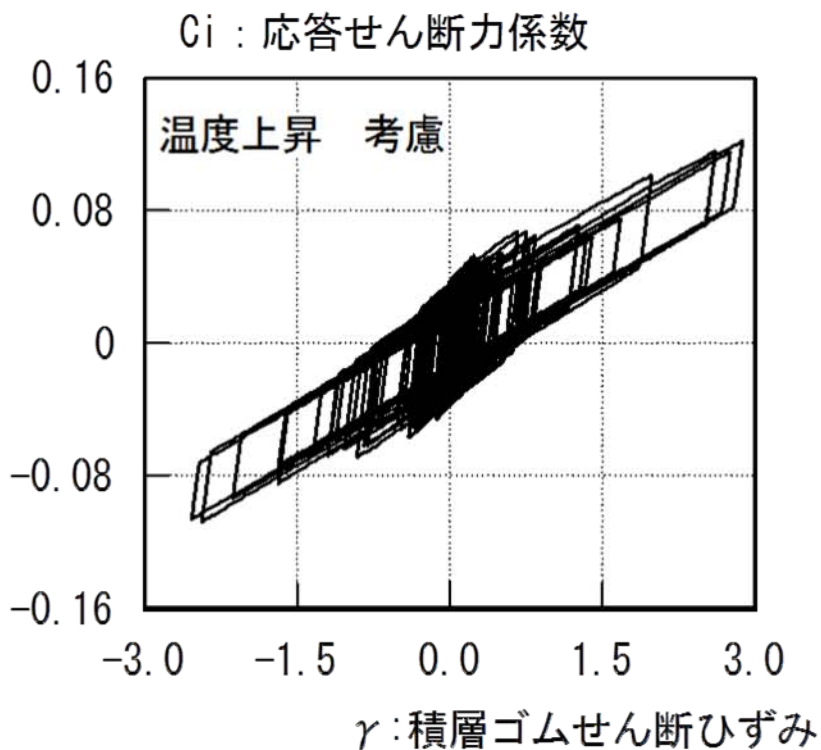
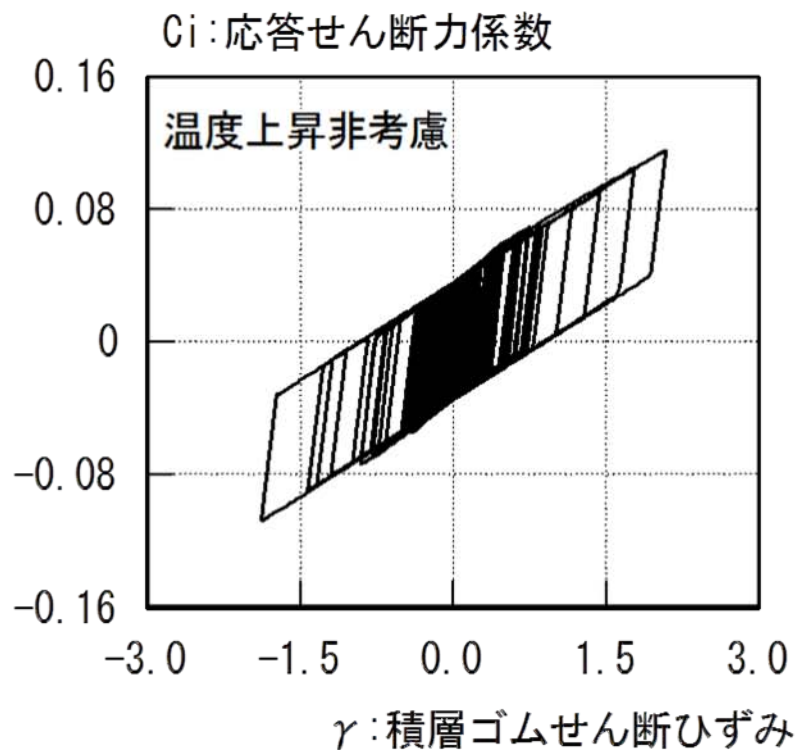
2.4 解析モデルと入力地震動（4）

入力地震動 エネルギースペクトル(h=0.10)



2.5 解析結果 (1)

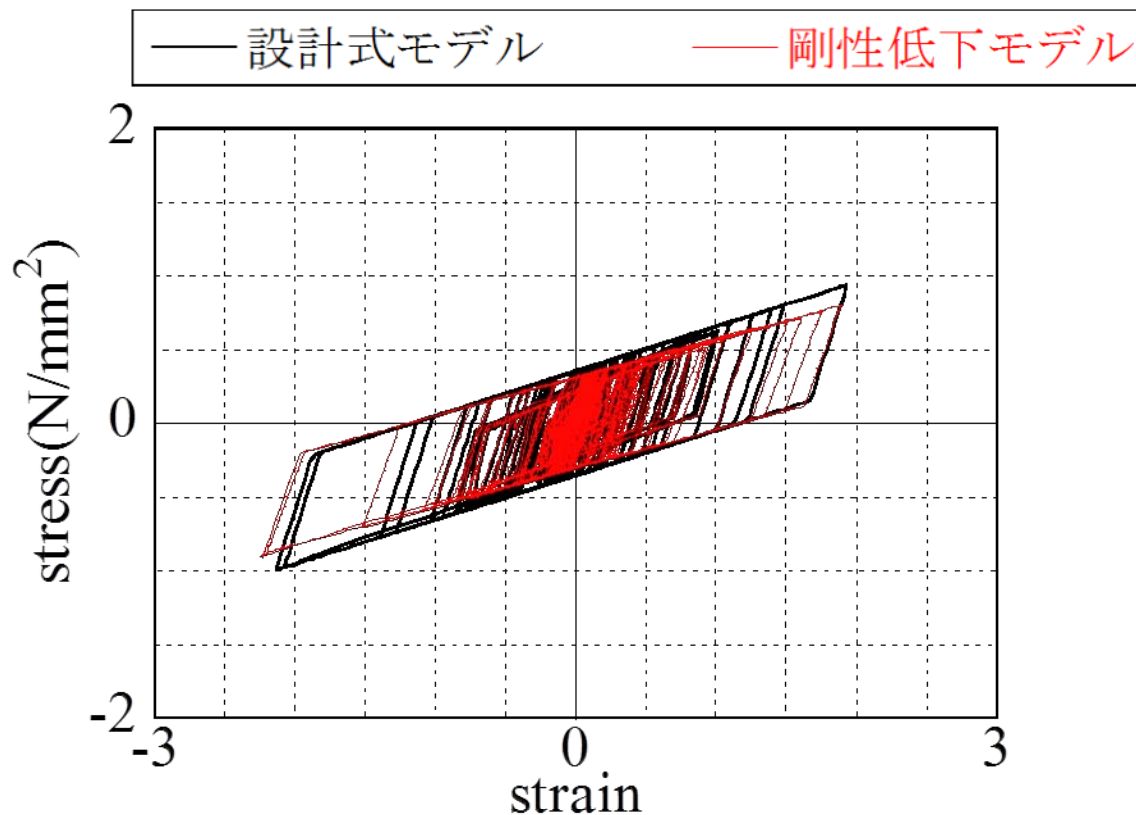
① 鉛プラグ入り積層ゴム



(T-TN-AIC003_AV 1.5倍入力時)

2.5 解析結果 (2)

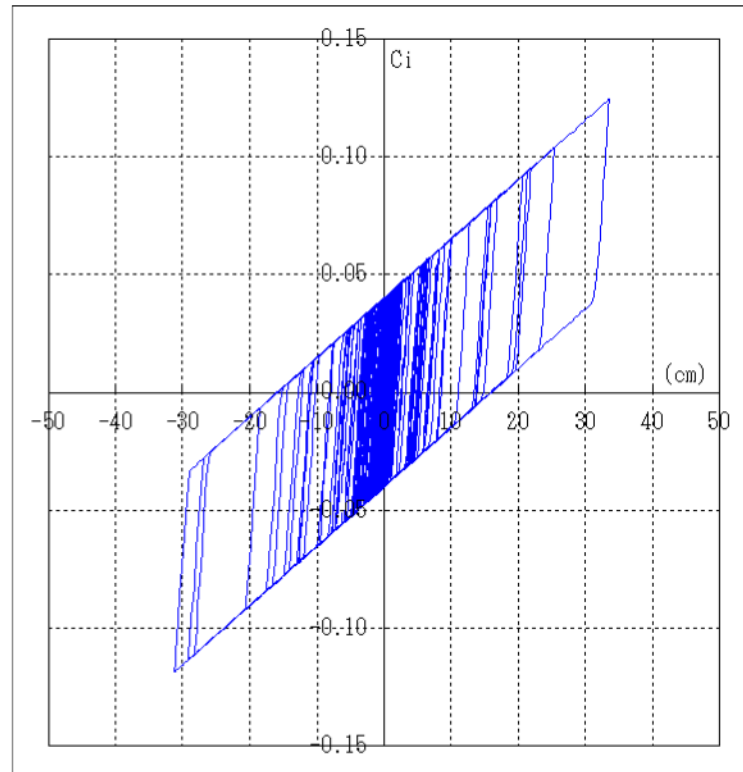
② 高減衰積層ゴム



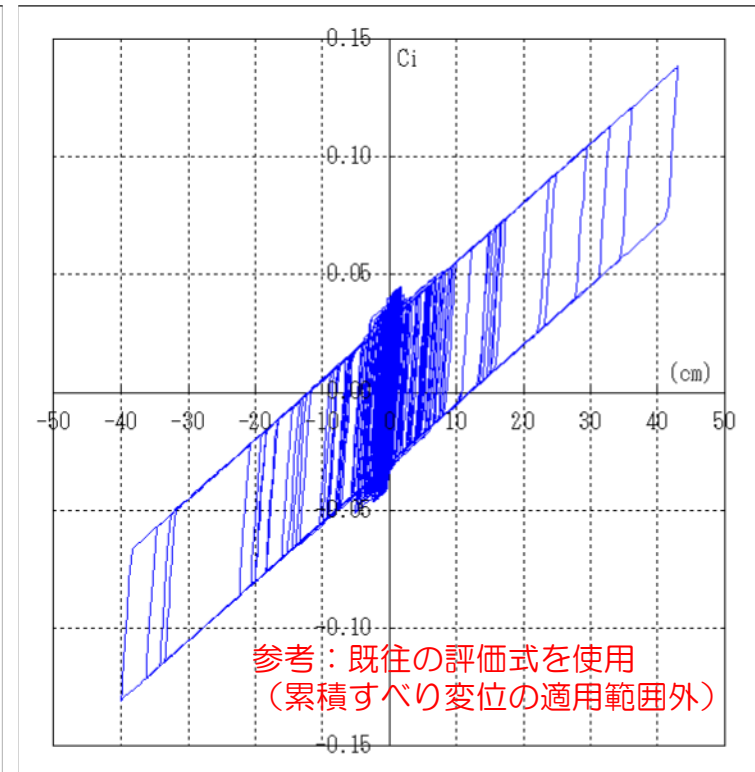
(T-TN-AIC003_AV 1.5倍入力時)

2.5 解析結果 (3)

⑥ 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承 (高摩擦)



免震層C- δ 履歴 (依存性無視)



参考：既往の評価式を使用
(累積すべり変位の適用範囲外)

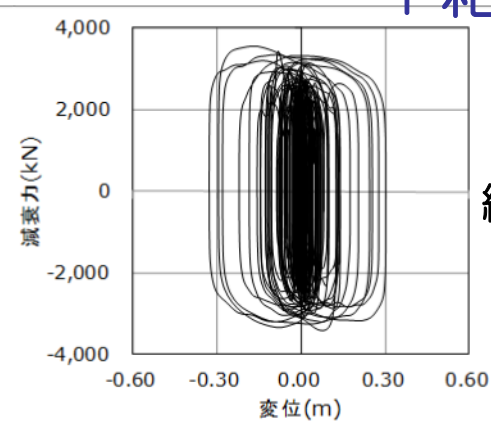
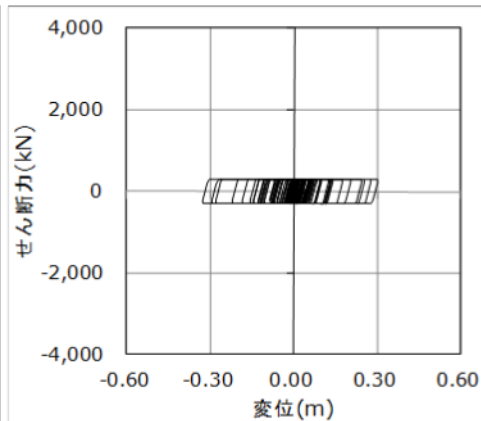
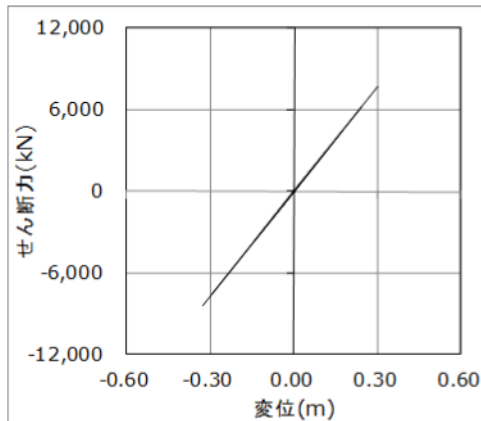
免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

(T-TN-AIC003_AV 1.5倍入力時)

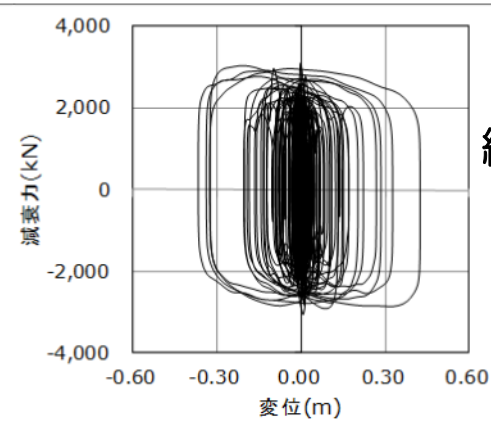
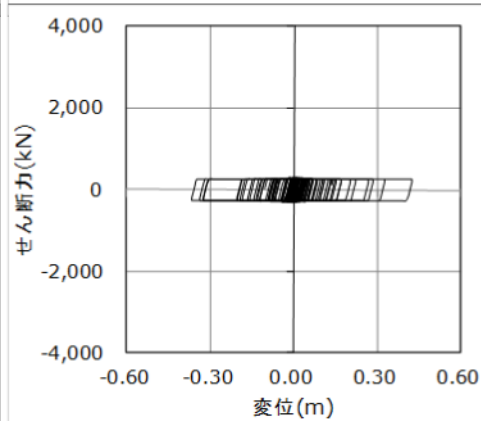
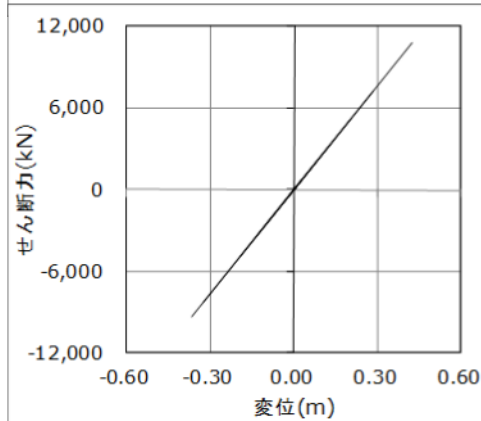
2.5 解析結果 (4)

⑦ 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



繰返し依存性非考慮



繰返し依存性考慮

(T-TN-AIC003_AV 1.5倍入力時)



2.6 まとめ (1)

- ・鉛プラグ入り積層ゴム

繰返し加振による温度上昇に伴い、降伏荷重が低下する特性を考慮した応答解析を実施し、その影響評価を行った。

- ・高減衰積層ゴム

既往の研究により提案されている累積履歴エネルギー吸収量による等価剛性の評価式を用いることで、多数回繰返し加振を受けることによる復元力特性の変化を考慮した。

- ・鋼材ダンパー

繰返し加振によって特性変化が生じないと考えられるので、応答値に対する疲労損傷評価を行った。

- ・鉛ダンパー

温度依存性および過去に実施された一定振幅正弦波加振試験結果に基づき、鉛ダンパーの繰返しによる耐力劣化を考慮した。



2.6 まとめ（2）

- ・オイルダンパー

温度上昇について放熱を考慮した場合と無視した場合について検討し、検討した範囲ではその違いは小さい。

- ・弾性すべり支承（高摩擦）

摩擦係数の累積すべり変位依存性により、摩擦係数の低下を考慮した検討を行い、応答量が適用範囲を超える結果となった。

- ・弾性すべり支承（低摩擦）

摩擦係数の繰返し依存性を考慮した検討を行い、累積すべり量は実験で確認されている値に対して十分な余裕があった。

- ・粘性ダンパー

材料認定書記載の繰返し依存性を考慮し、温度変化は生じないものとして検討した。

2.7 今後の課題（1）

- 鉛プラグ入り積層ゴム
鉛プラグの温度上昇に伴う降伏荷重の評価手法の検証
- 高減衰積層ゴム
広範囲に渡った既往の評価式の検証
- 鋼材ダンパー
繰返し加振時の特性評価と疲労損傷度の評価手法の検証
- 鉛ダンパー
部材実験結果との整合性の検証、耐力劣化モデルの見直し
- 弾性すべり支承（高摩擦）
累積すべり変位依存性を考慮する評価式の適用範囲拡大
- 粘性ダンパー
部材実験の結果の分析、繰返しによる抵抗力の低下の評価



3. 実大実験計画（実大実験計画WG）



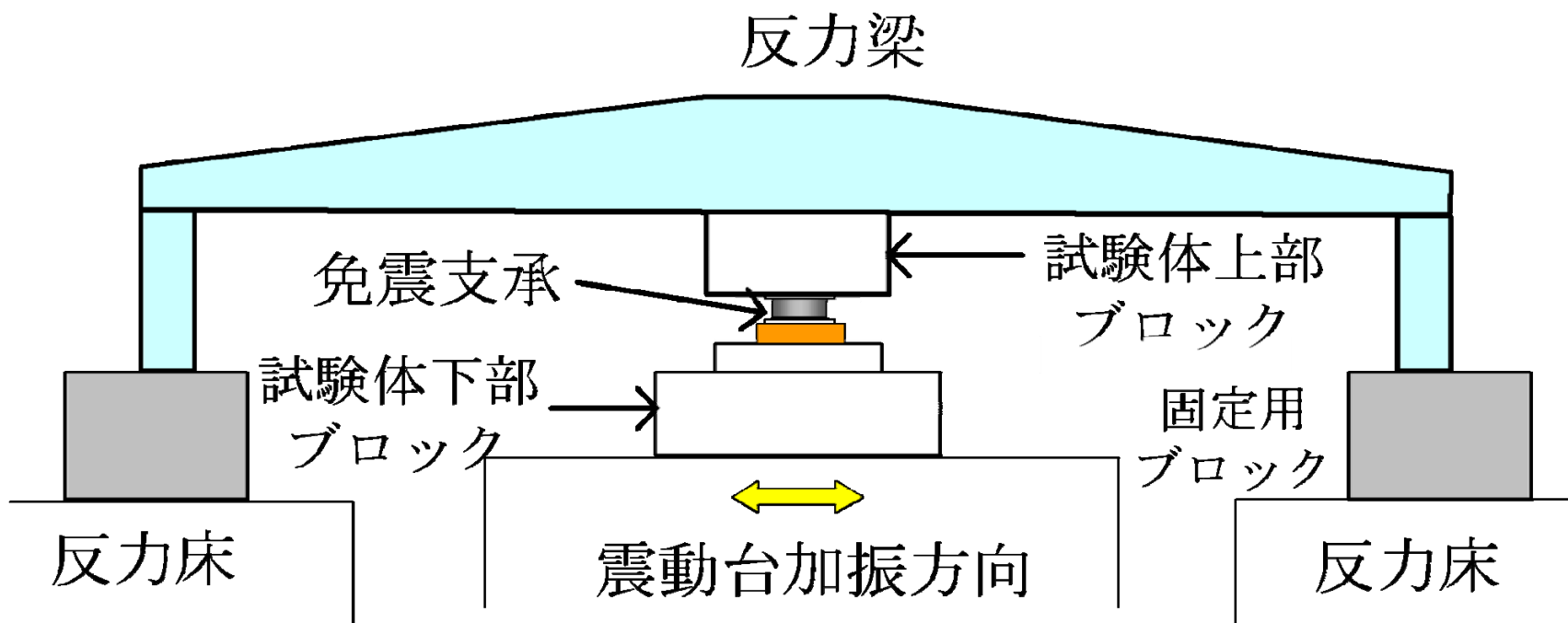
3.1 実験条件の設定（1）

- 1) 長時間・大振幅動的繰返し加力
- 2) 鉛直載荷
- 3) 水平2方向加力
- 4) 破断実験

3.1 実験条件の設定（2）

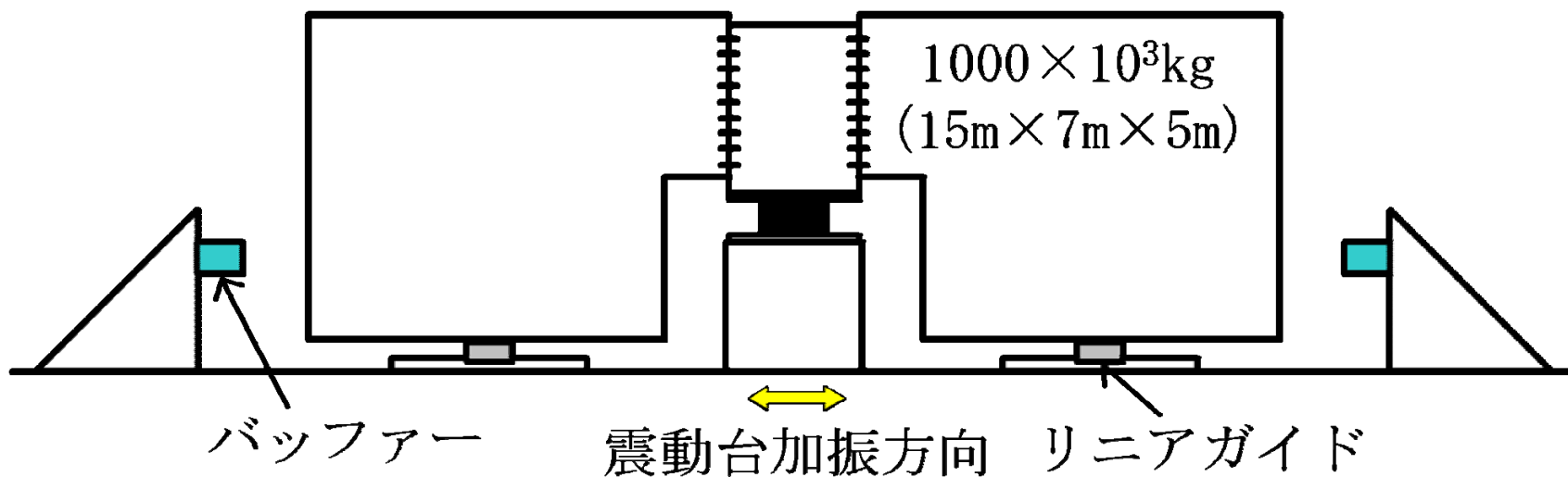
実験条件	目標値	留意点
試験体寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・積層ゴム：φ1000 ・弾性すべり支承：φ500～φ800 	<ul style="list-style-type: none"> ・弾性すべり支承は、積層ゴムより基準面圧大きいため、直径を小さく設定
長時間・大振幅動的繰返し加力	<ul style="list-style-type: none"> ・±40cm ・4秒周期30～60回（累積変形で50～100m） 	<ul style="list-style-type: none"> ・φ1000積層ゴムでせん断歪200%相当
鉛直載荷	<ul style="list-style-type: none"> ・最大10000kN 	<ul style="list-style-type: none"> ・面圧変動の許容値+20%程度目標（震動台制御精度に依存）
水平2方向加力	<ul style="list-style-type: none"> ・合成振幅で±40cm 	
破断実験	<ul style="list-style-type: none"> ・±90cmまで漸増加振（破断時荷重6000kN、衝撃力9000kN考慮） 	<ul style="list-style-type: none"> ・φ1000積層ゴムでせん断歪450%相当

3.2 実験手法の比較検討（1）



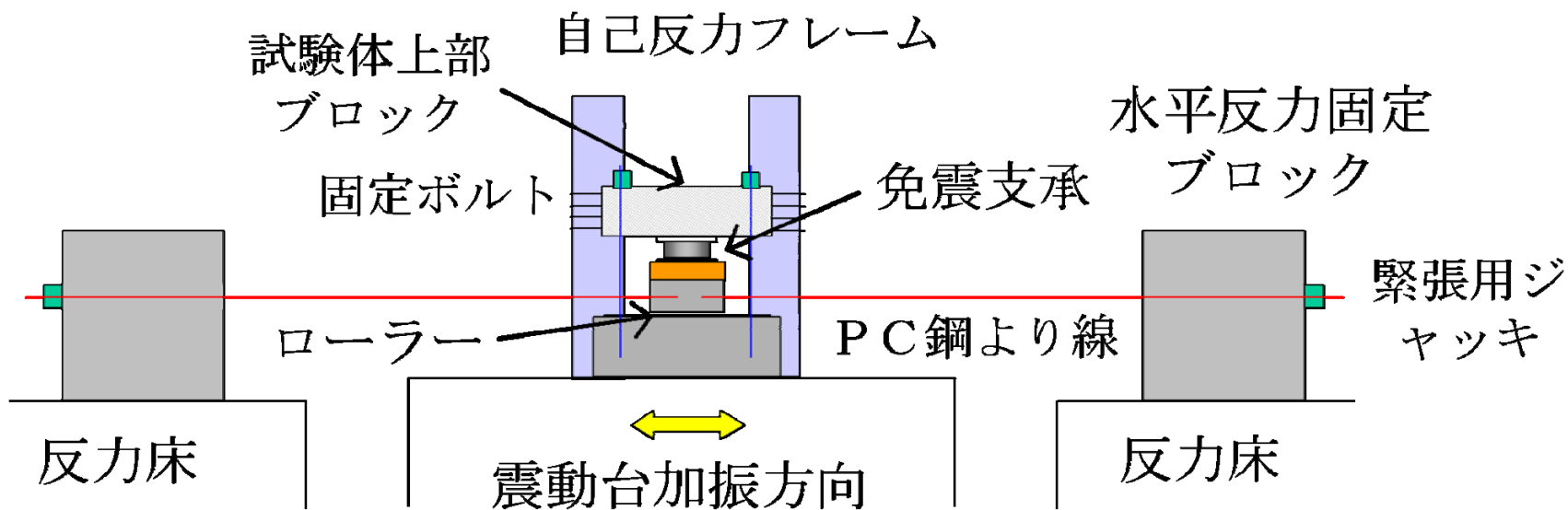
(A案) 上部反力梁方式

3.2 実験手法の比較検討 (2)



(B案) 慣性マス方式

3.2 実験手法の比較検討（3）



(C案) 外部水平反力方式

3.2 実験手法の比較検討 (4)

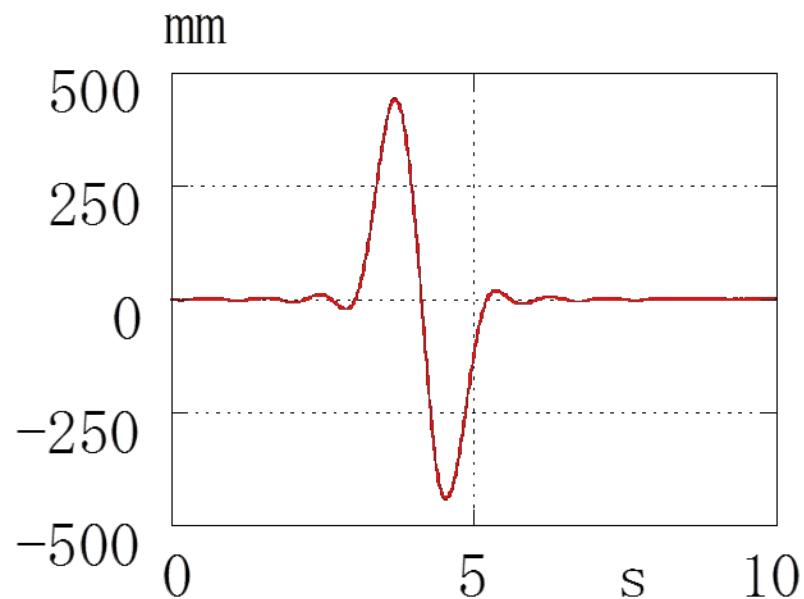
実験条件	A案	B案	C案
1) 長時間・大振幅動的繰返し加力	○	○	○
2) 鉛直載荷	○	△	○
3) 水平2方向加力	○	△	×
4) 破断実験	○	×	×

3.2 実験手法の比較検討 (5)

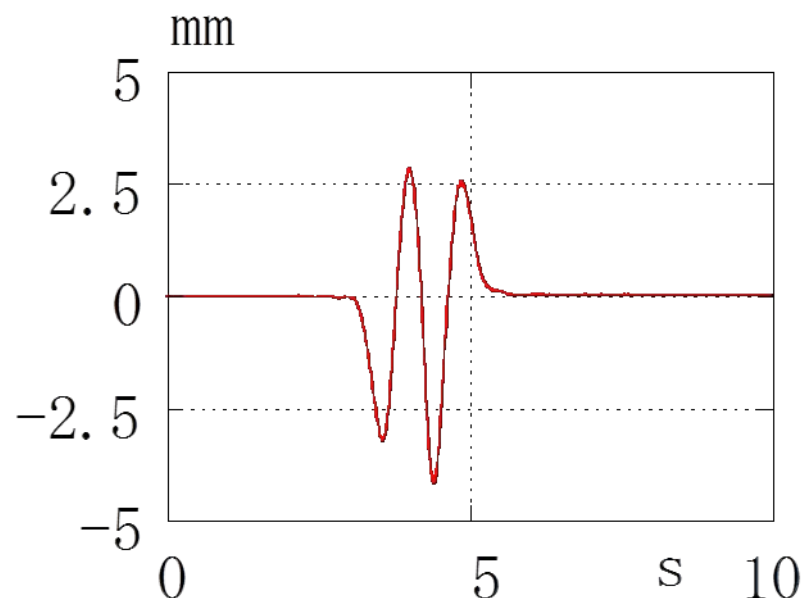
● 水平加振時の鉛直変位実測例：

30×10³kgの試験体を搭載

加振振幅±450mm（振動数0.54Hz）変位制御正弦波加振



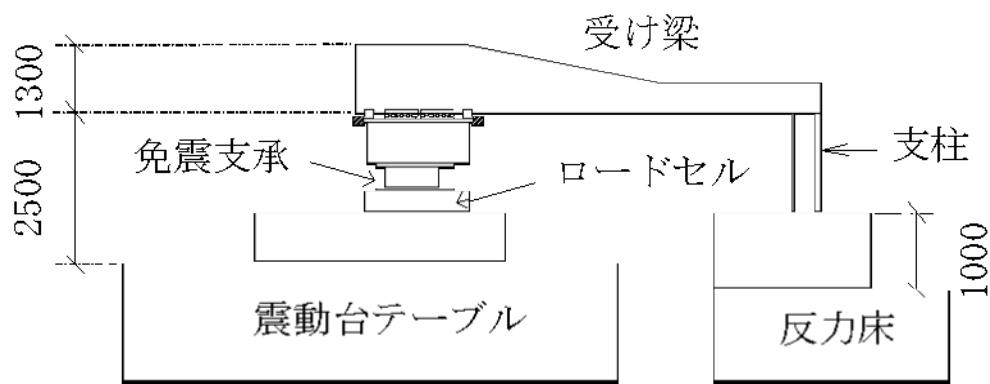
加振方向（Y軸）水平変位



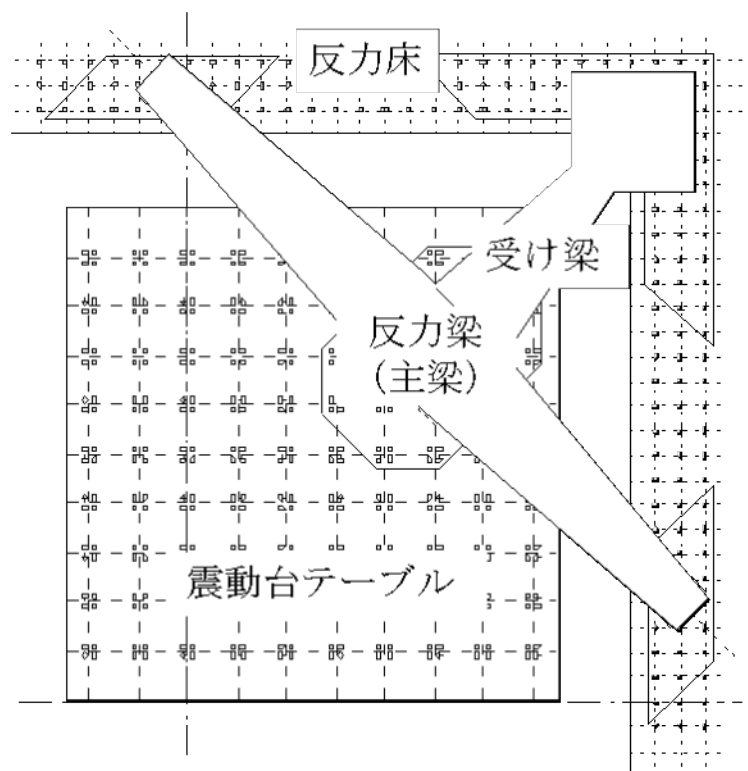
鉛直方向（Z軸）変位

3.3 実験計画 (1)

●加力装置計画 (上部反力梁方式)



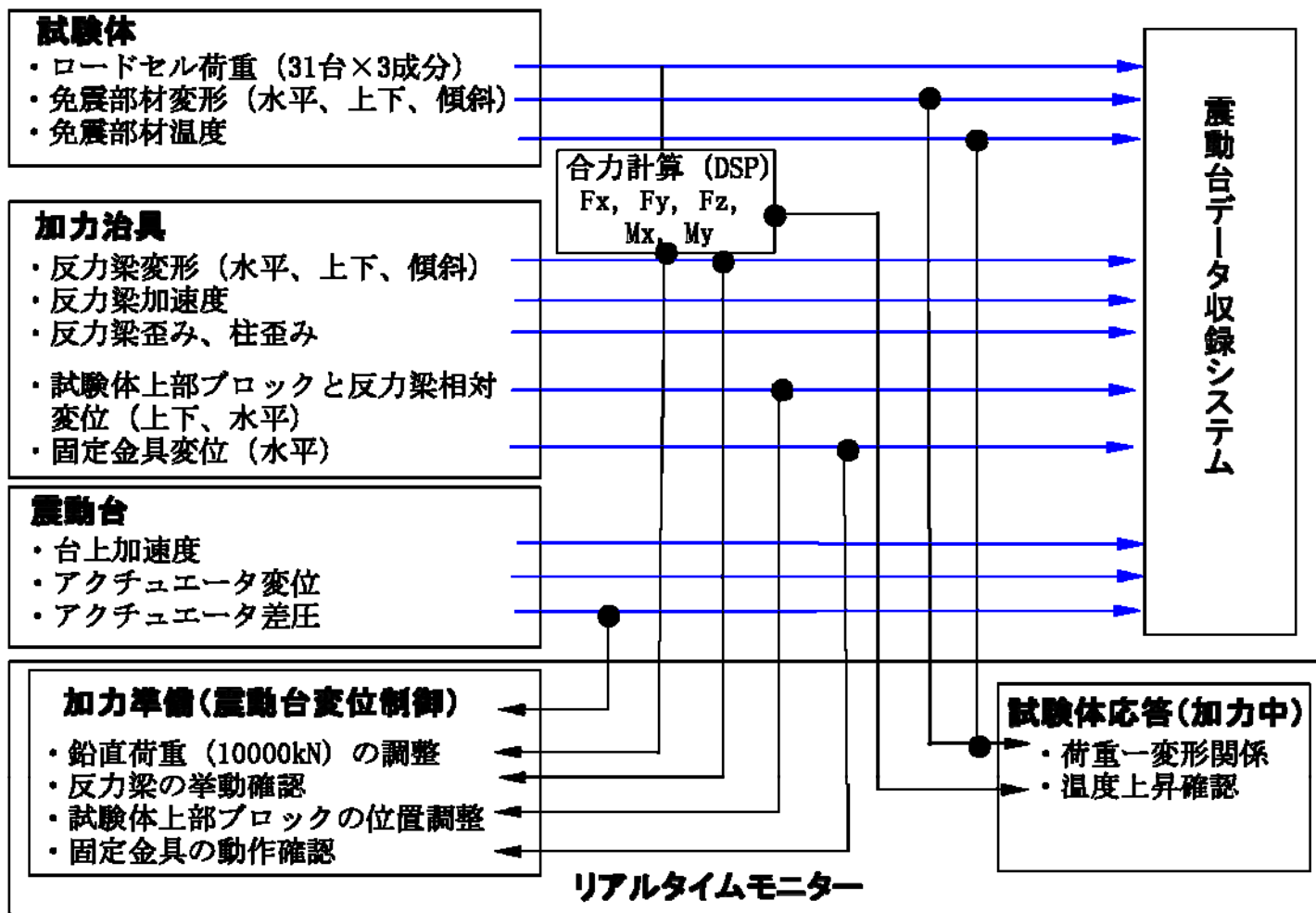
(a) 受け梁方向断面図



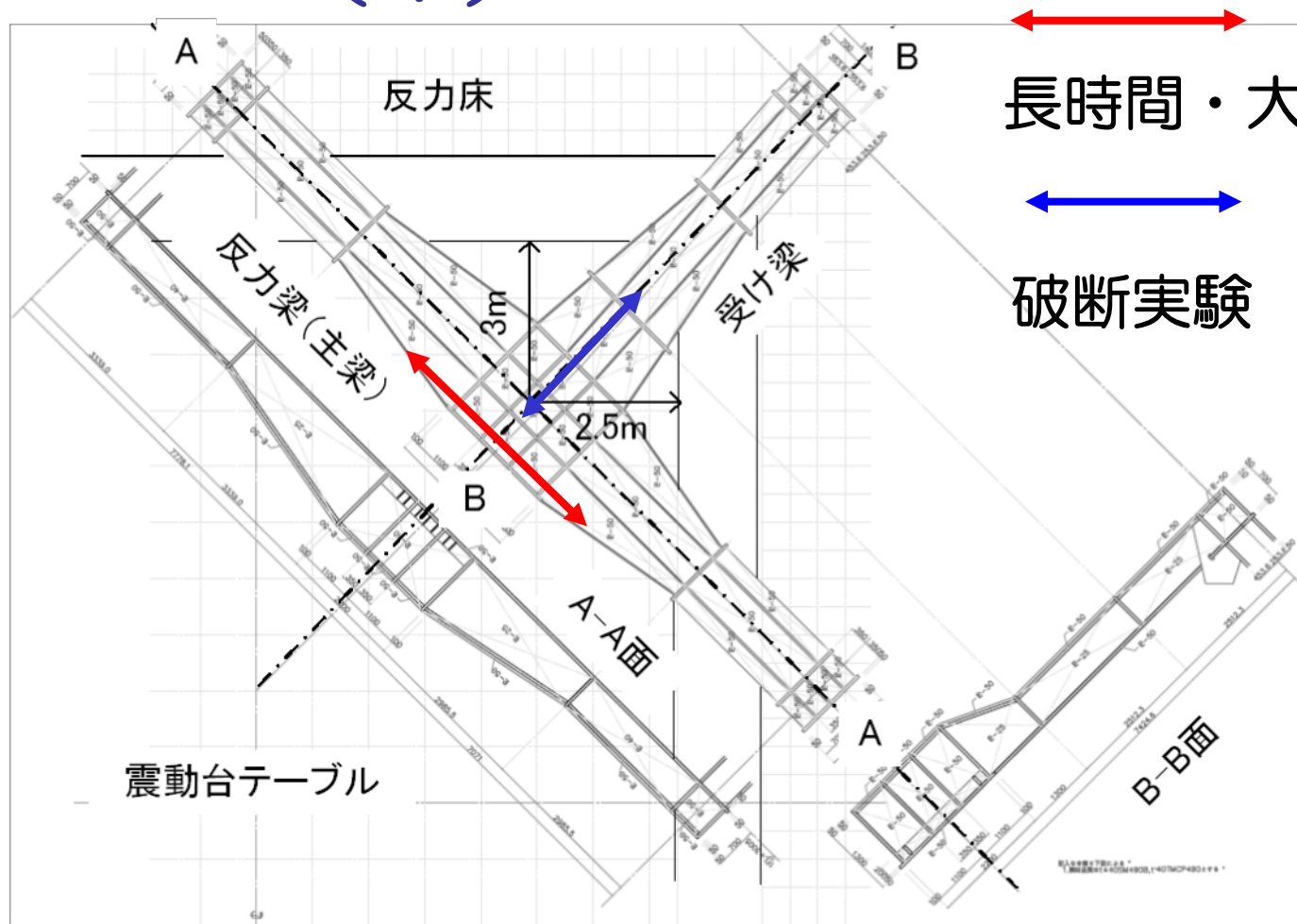
(b) 平面図

3.3 実験計画 (2)

● 計測計画



3.4 加力装置の設計 (1)

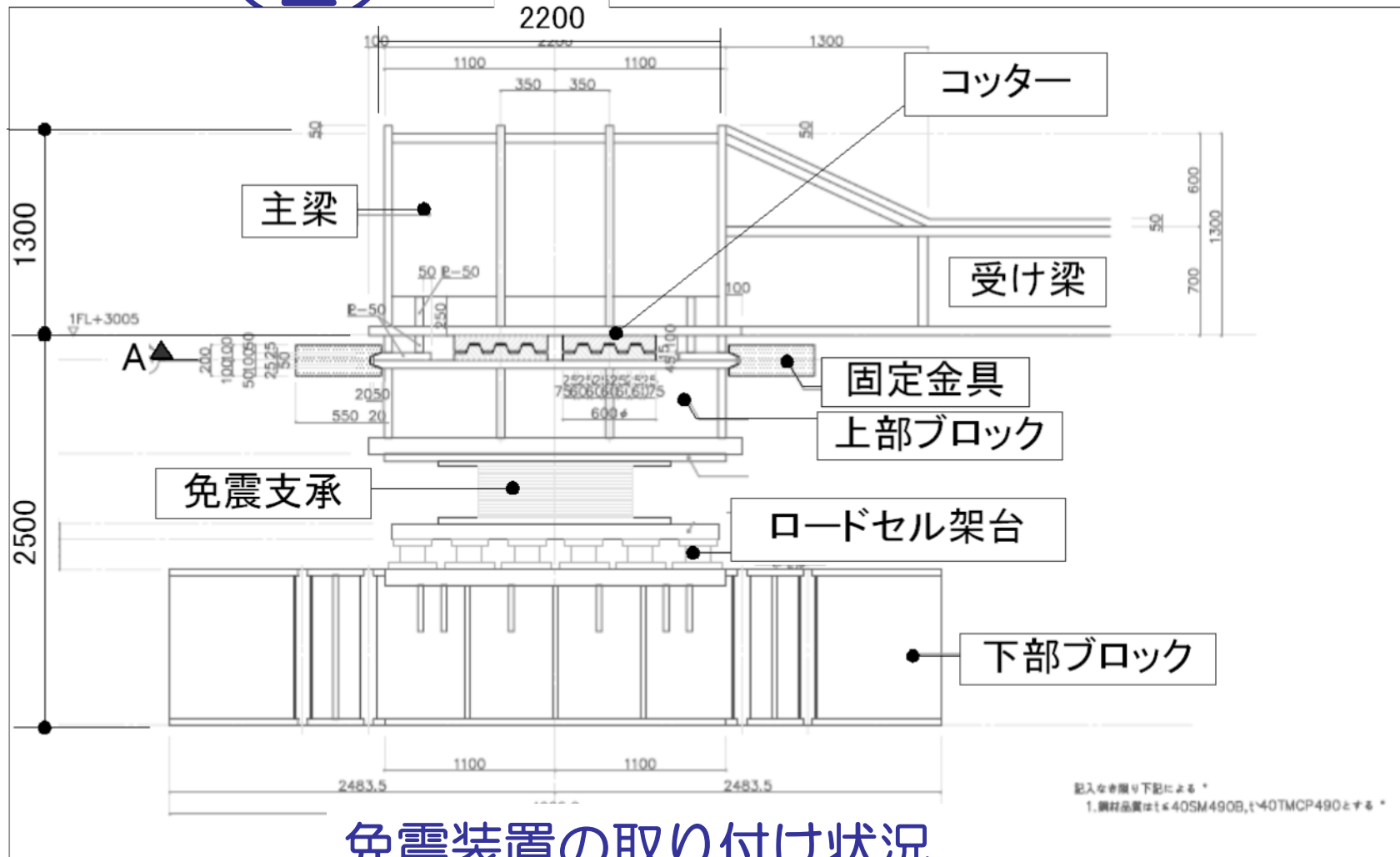


長時間・大振幅繰返し加力

破断実験

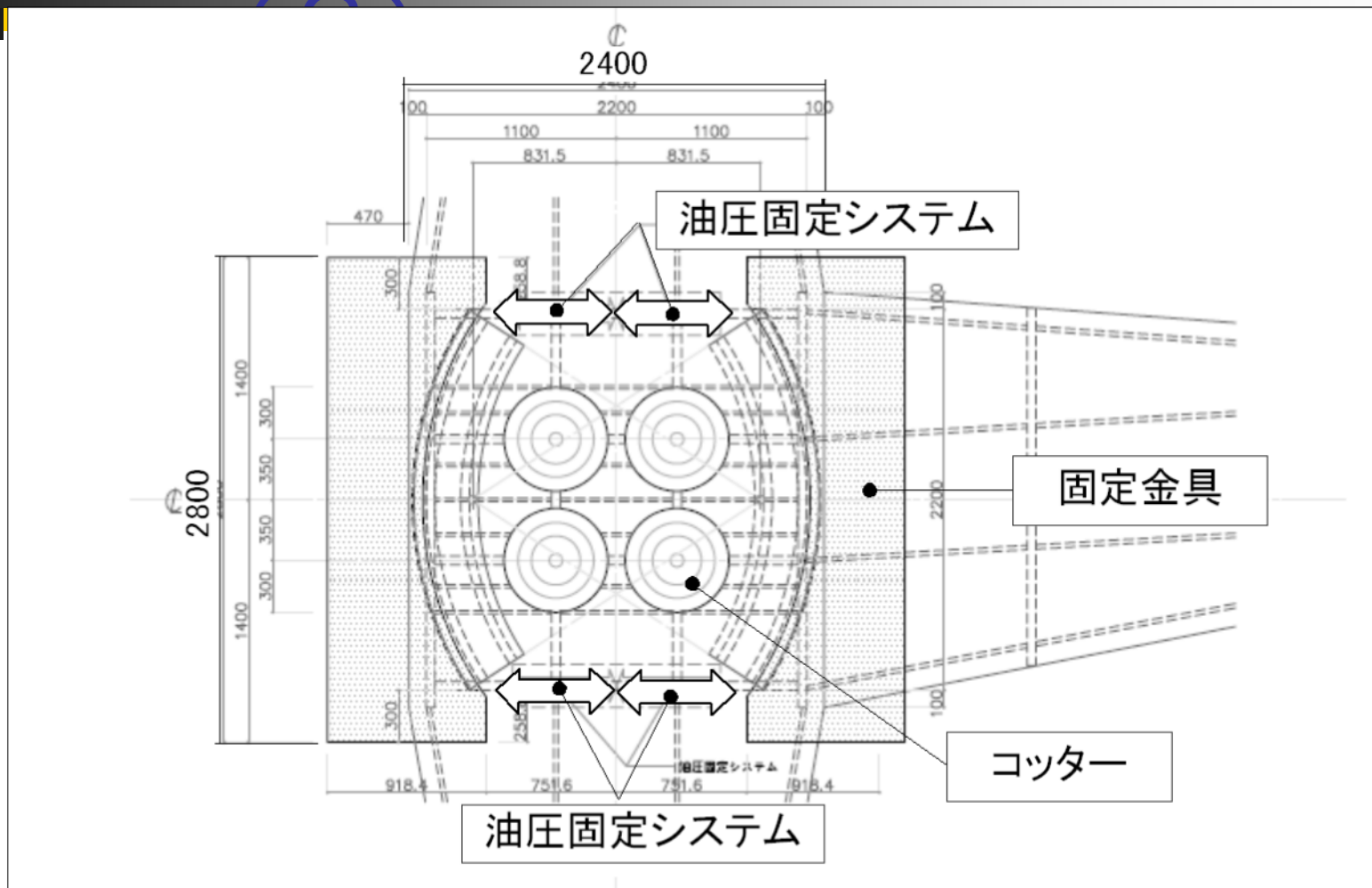
反力梁の架設

3.4 加力装置の設計 (2)



免震装置の取り付け状況

3.4 加力装置の設計



固定金具による上部ブロック固定



3.4 加力装置の設計

(4)

● 検討ケース

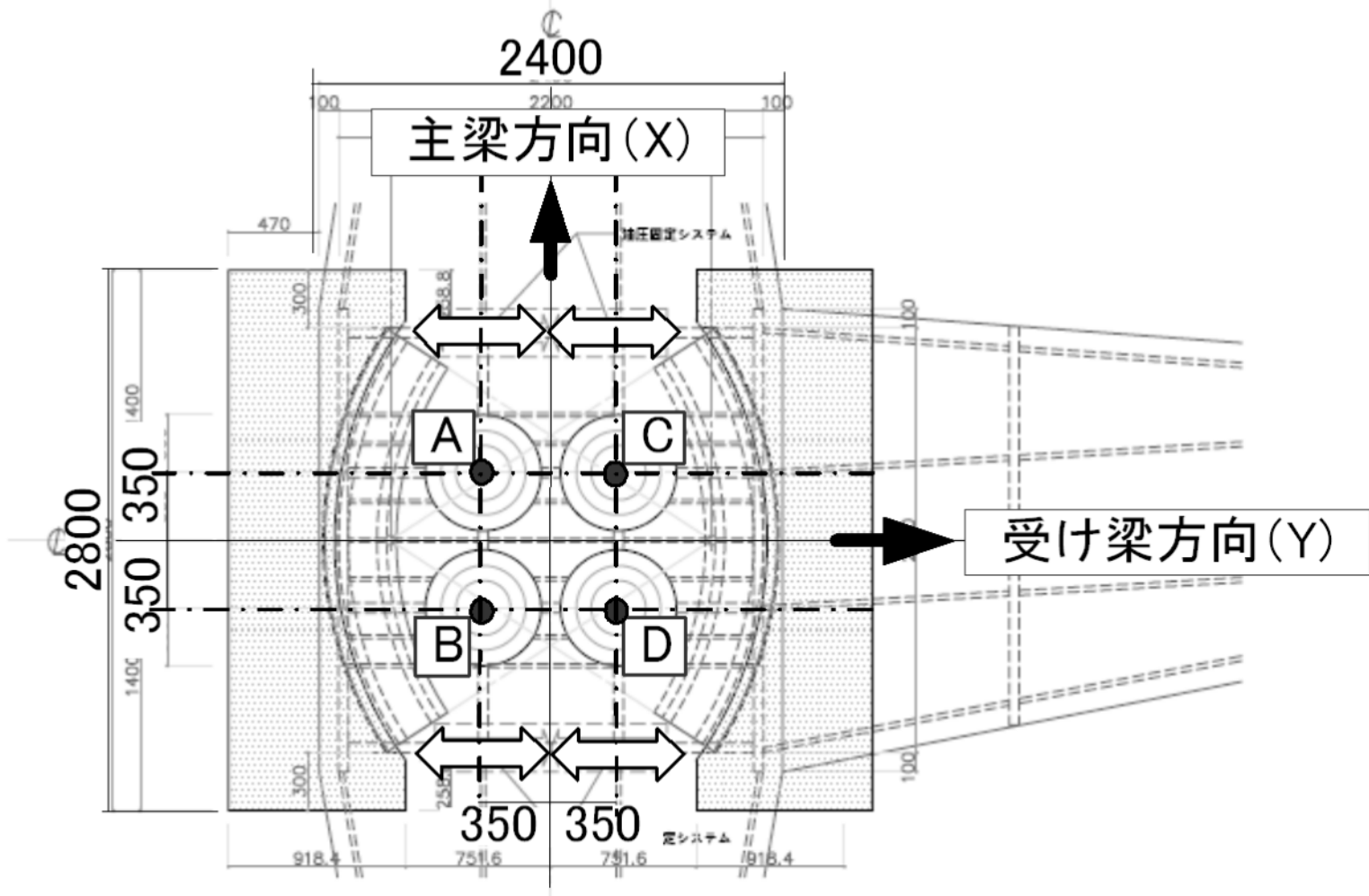
Case1 : 鉛直荷重10000kN

Case2 : 鉛直荷重10000kN＋水平荷重2000kN主梁方向

Case3 : 鉛直荷重10000kN＋水平荷重9000kN受け梁方向

Case3の荷重に対しても、ほぼ長期許容応力度内であることを確認。

3.4 加力装置の設計 (5)



3.4 加力装置の設計

(6) ●反力梁の変形

		X方向 主梁 方向	Y方向 受け梁 方向	Z方向 鉛直 方向	Z方向 CASE1 との差	X軸廻り回転
CASE1	A	0.3	2.4	41.4		1/ 174
	B	0.4	2.4	41.1		
	C	0.3	2.4	37.4		
	D	0.3	2.5	37.0		
CASE2	A	3.9	2.5	40.9	-0.5	1/ 175
	B	3.9	2.7	41.3	0.2	
	C	3.7	2.5	36.9	-0.4	
	D	3.7	2.7	37.3	0.2	
CASE3	A	1.0	7.7	36.2	-5.2	1/ 519
	B	1.0	7.7	36.0	-5.1	
	C	0.9	7.6	34.9	-2.5	
	D	1.0	7.6	34.6	-2.4	

単位 : mm



3.4 加力装置の設計 (7)

● 加力実験上の留意点

1) 主梁両端柱下部の固定ブロックのすべり

鉛直荷重導入時にすべり。水平加力時はすべらない。

2) 主梁・受け梁の変形と傾き

主梁方向の軸周りの傾きをキャンセルする、傾斜板 (1/200) を用意。

3) 転倒モーメント固定金具

1500kN油圧ジャッキ4台で締付け。



3.5 今後の予定

2011年度

- ・ 実験手法検証の予備実験

天然ゴム系積層ゴム

弾性すべり支承（高摩擦）、ダンパー（一部）

2012年度（最終年度）

- ・ 実大免震部材の加振実験



4. 地震観測（地震観測WG）



4.1 地震観測の目的

長周期地震動の発生が予想される地点（東京・大阪）に建設されている免震建築物をそれぞれ1棟選定し、建物及びその周辺地盤に計測機等を設置して、長周期地震動が免震建築物の応答に及ぼす影響を把握することを目的とする。



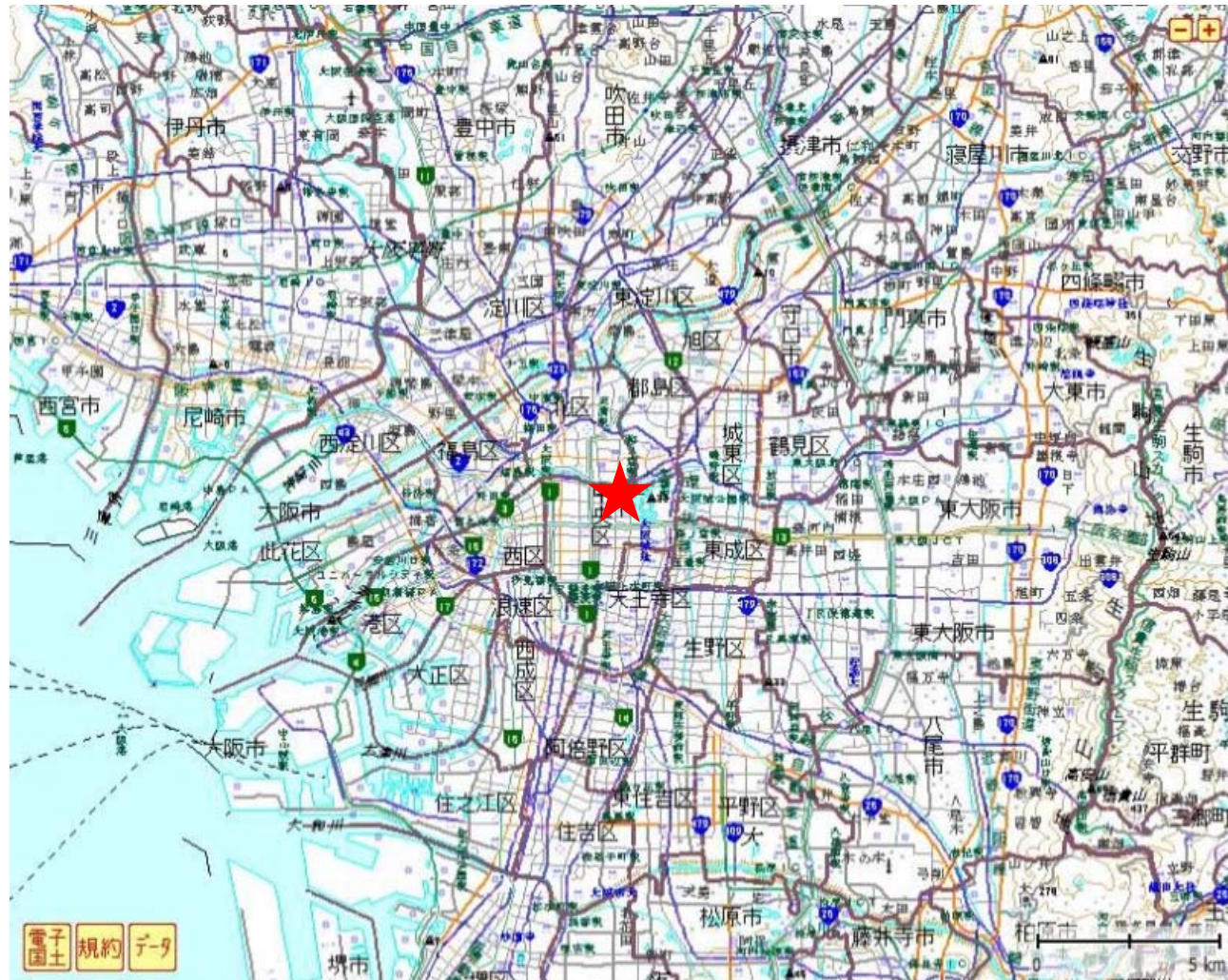
4.2 観測内容（1）A建物

建物概要

- 所在地 : 大阪府大阪市中央区
- 竣工 : 平成20年3月（元建物は昭和34年竣工）
（耐震改修による免震構造）
- 構造 : 鉄骨鉄筋コンクリート造、
地下1階、地上8階、塔屋2階
地下1階柱頭免震構造(耐震改修による)
- 基礎形式 : 直接基礎
- 免震装置 : RB55台、直動転がり55台
- 高さ : 28.550m
- 延床面積 : 24,226m²

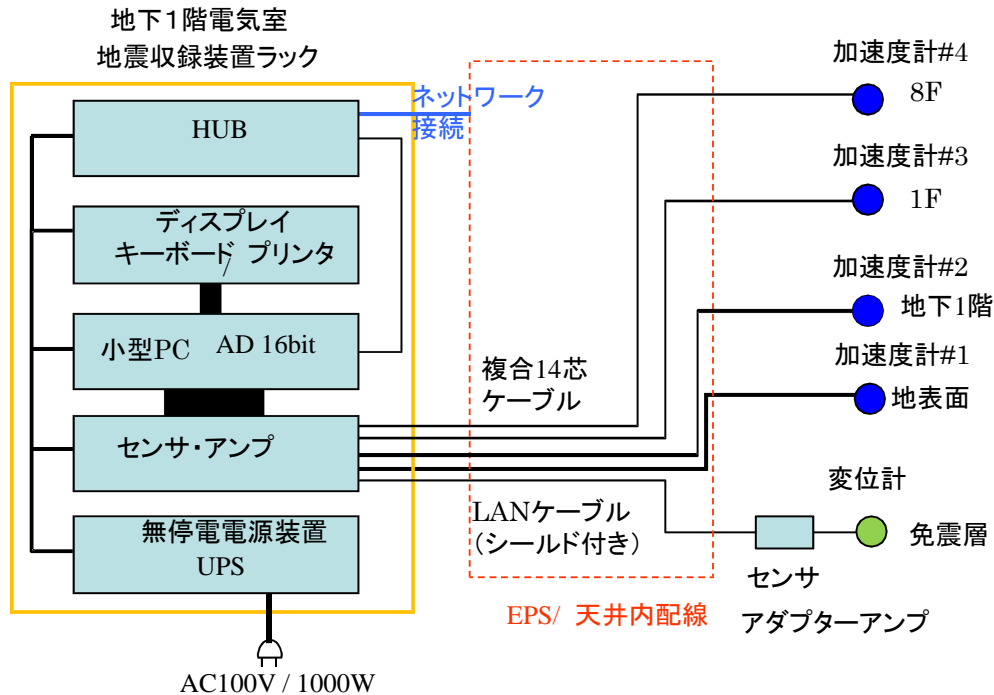
4.2 観測内容 (1) A建物

所在地



4.2 観測内容（1）A建物

観測機器概要



4.2 観測内容（1）A建物

観測記録（2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震）

加速度最大値

位置	X	Y	Z
8F	10.5	13.3	4.4
1F	10.1	12.8	4.3
B1F	9.2	11.2	4.3
GL	9.5	10.7	4.7

4.2 観測内容（2） B建物

建物概要

- 所在地 : 東京都江東区
竣工 : 2011年2月
構造 : RC造、免震構造（3-4階間に免震層）
基礎形式 : 杭基礎（場所打ちコンクリート拡底杭）
免震装置 : 鉛プラグ入り積層ゴム40台、
天然ゴム系積層ゴム11台
用途 : 共同住宅・駐車場
敷地面積 : 7,380m²
建築面積 : 3448m²
延床面積 : 51,856m²
軒高 : 114m
最高高さ : 123m
階数 : 地下なし、地上36階、塔屋1階

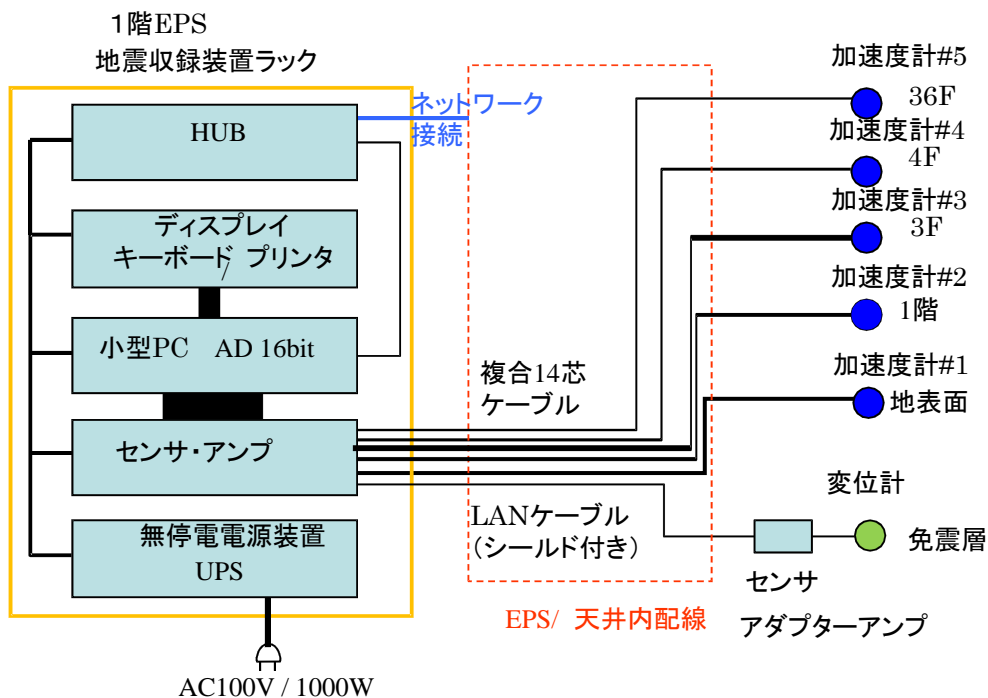
4.2 観測内容 (2) B建物

所在地



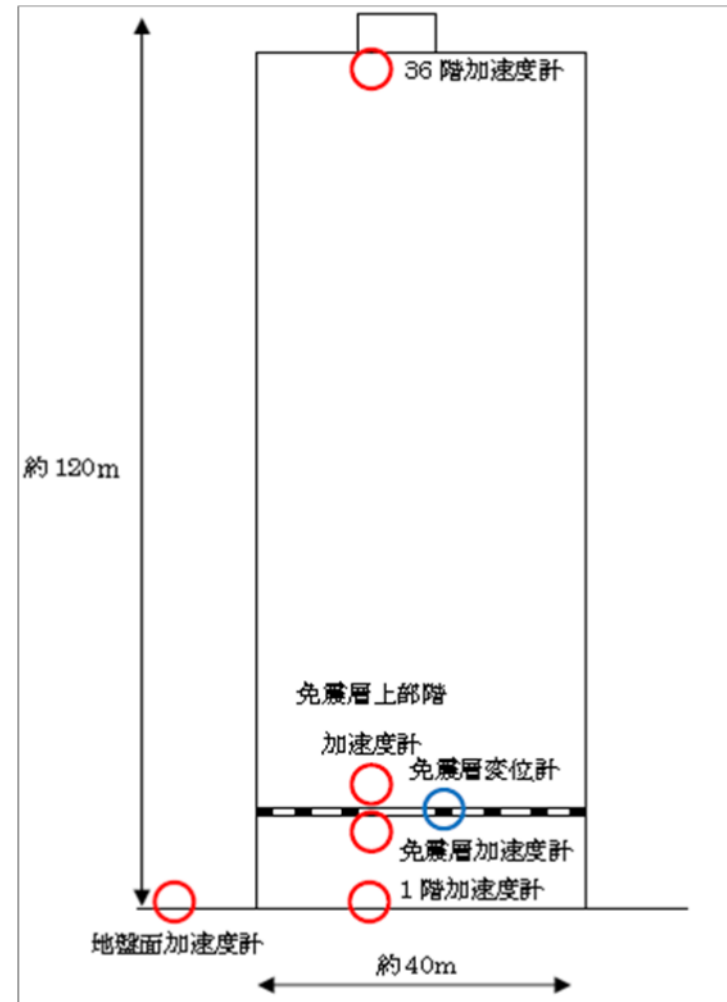
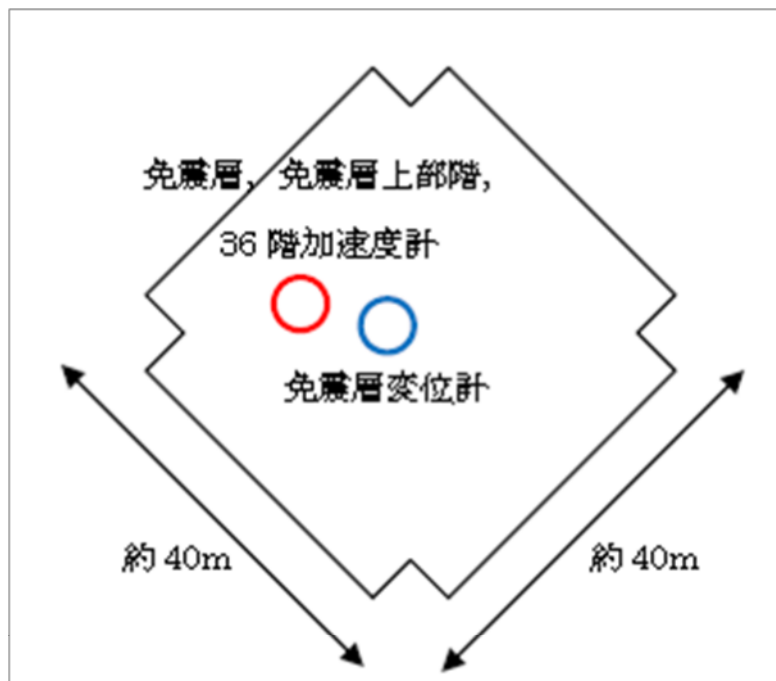
4.2 観測内容（2） B建物

観測機器概要



4.2 観測内容（2）B建物

地震計位置



4.2 観測内容（2）B建物

観測記録（2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震）

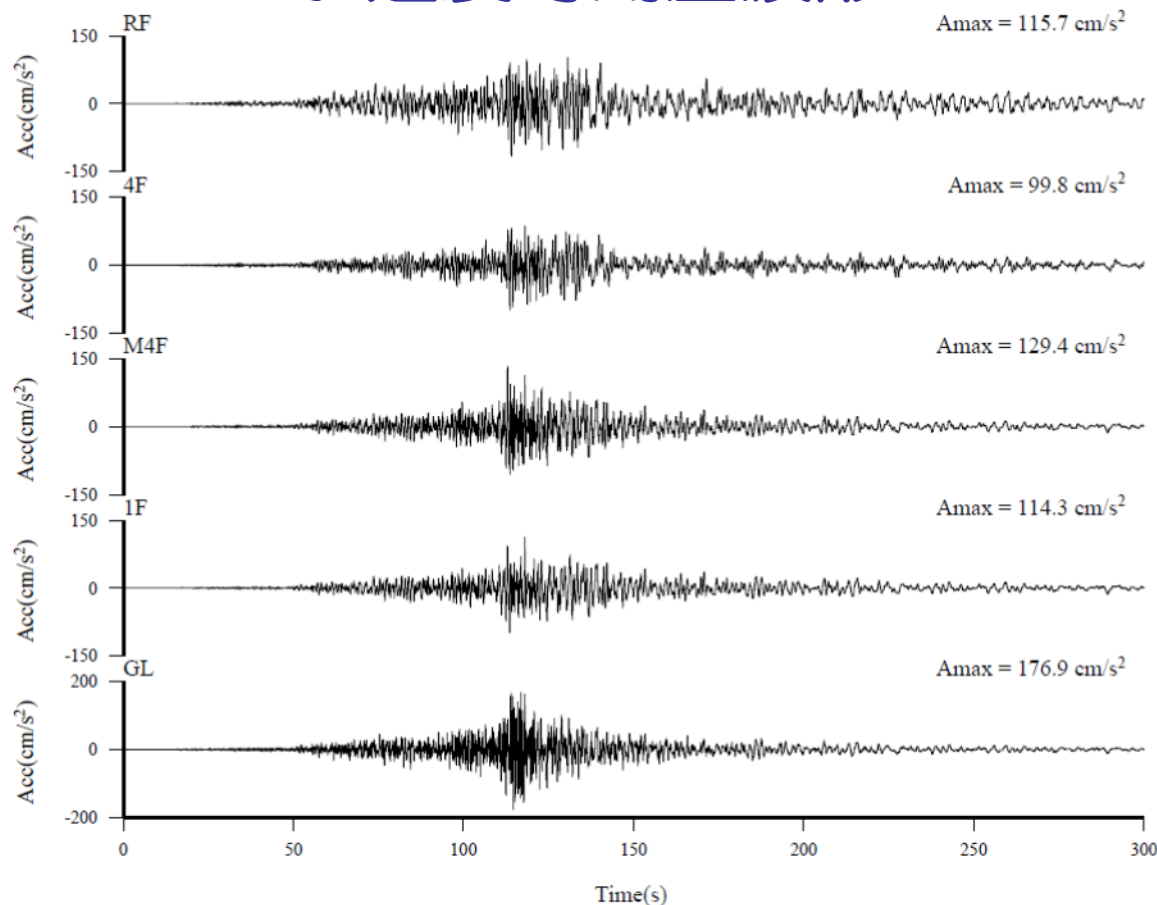
加速度最大値（ cm/s^2 ）

	X	Y	Z
36F	115.7	91.9	95.2
4F	99.8	75.1	46.7
M4F	129.4	108.6	42.6
1F	114.2	85.0	39.8
GL	177.1	173.4	152.6

4.2 観測内容（2）B建物

観測記録（2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震）

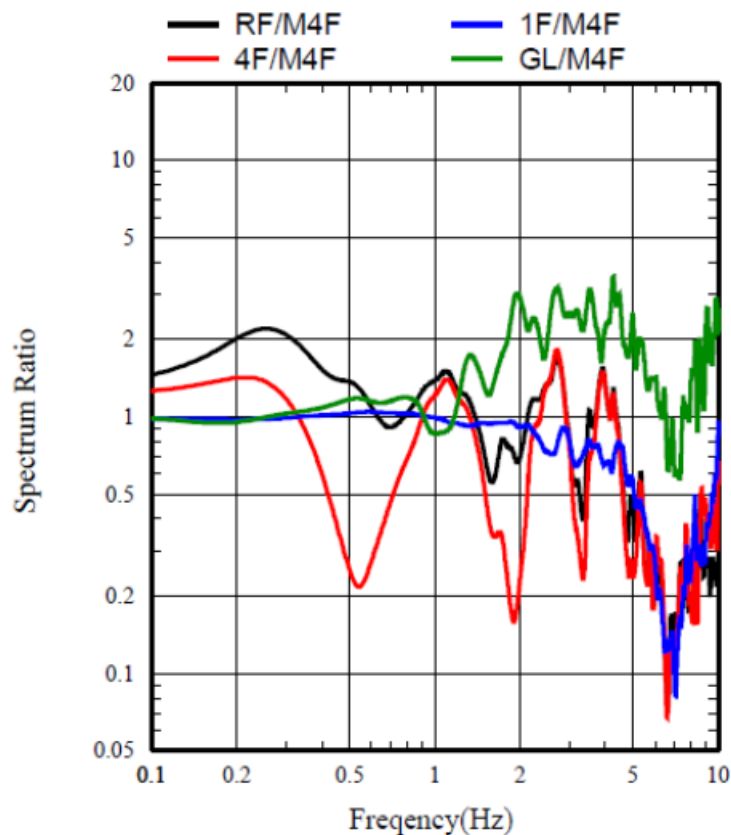
加速度時刻歴波形



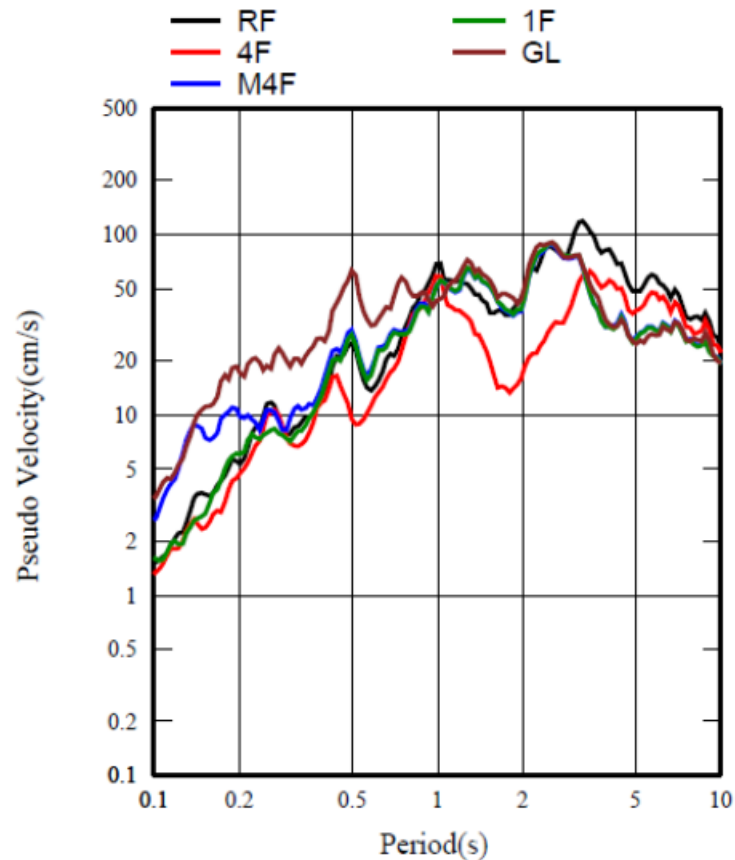
4.2 観測内容（2）B建物

観測記録（2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震）

スペクトル比



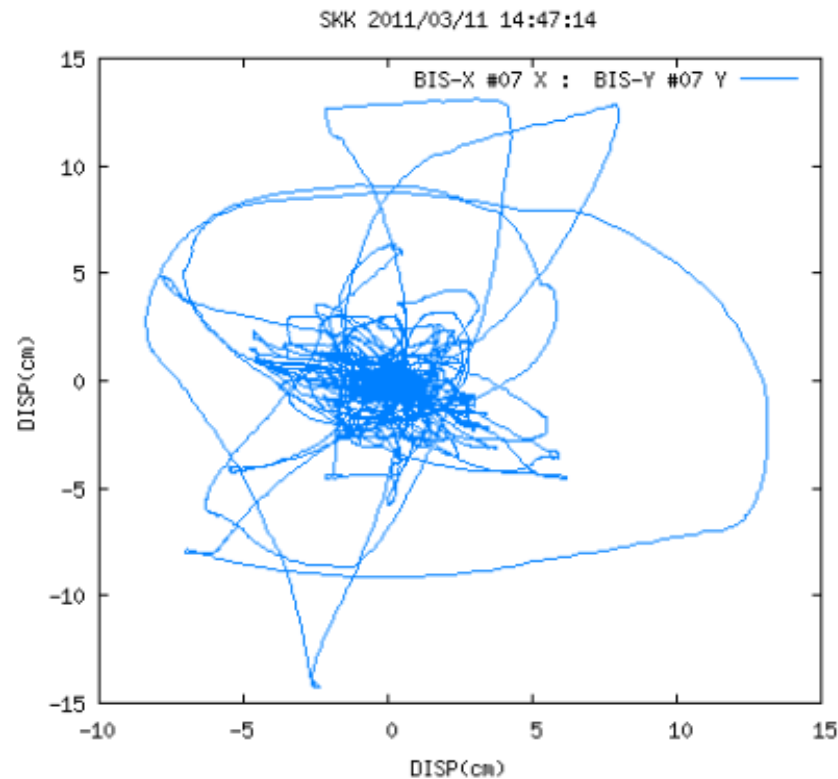
擬似速度スペクトル



4.2 観測内容（2）B建物

観測記録（2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震）

免震層の相対変位





4.3 まとめ

長周期地震動の発生が予想される地点（東京・大阪）に建設されている免震建築物をそれぞれ1棟選定し、建物及びその周辺地盤に計測機等を設置して、地震観測体制を整備した。

両地点とも、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震での貴重な記録が観測された。



END