

建物・構築物の免震構造に関する検討チーム

第2回会合

免震構造の設計・維持管理に対する意見

北海道大学

菊地 優

検討事項

- 免震設計用の鉛直方向地震動の設定および利用、3方向成分の同時性を考慮した設計
- 一般建築物仕様の免震装置の許容限界の原子力発電所施設への適用
- 引張面圧1MPaの安全余裕、引張ひずみを許容限界とすることの適用性
- 履歴系ダンパーの設計時の安全余裕
- 地震後の免震装置の機能維持確認の方法、ヘルスマモニタリングなどのリアルタイムの管理方法の適用性
- 別置き試験体の設置の課題点、必要性、代替方法
- フェイルセーフの設置に対する留意事項
- その他

各検討事項の現状を説明しつつ、コメントを赤字で示す。

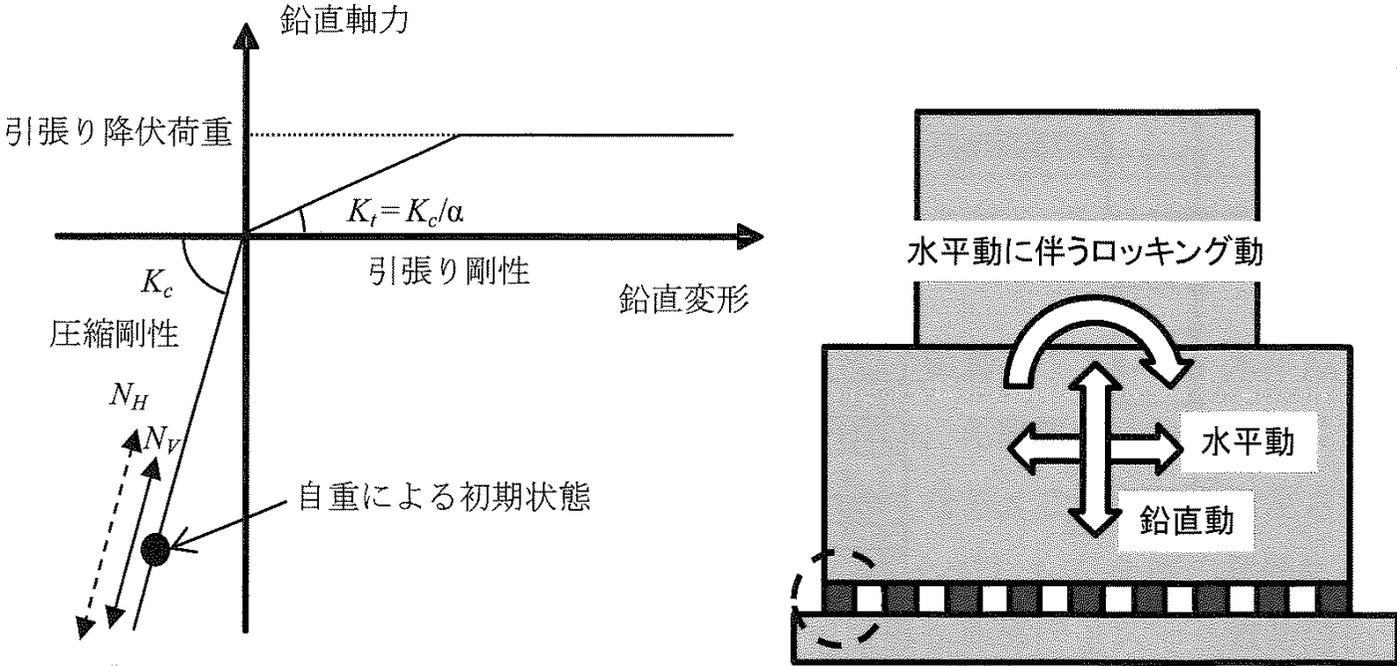
審査ガイドが参照する文献・資料(抜粋)

免震設計に関わる規格及び基準等として、参考とすべきもの

- 原子力発電所免震構造設計技術指針 JEAG4614-2013(2019) ((社) 日本電気協会)
- 免震建物の維持管理基準<改訂版> -2018 -((一社) 日本免震構造協会、2018年版)
- 時刻歴応答解析による免震建築物の設計基準・同マニュアル及び設計例 ((一社) 日本免震構造協会、2018年版)
- 免震部材の接合部・取付け躯体の設計指針<第2版> <第3版> ((一社) 日本免震構造協会、2014年版)
- 設計者のための建築免震用積層ゴム支承ハンドブック<改訂版>-2017-((一社) 日本免震構造協会、2017年版)
- 免震構造設計指針 ((一社) 日本建築学会、2013年版)

*更新あり

免震設計用の鉛直方向地震動の設定および利用、 3方向成分の同時性を考慮した設計（1）

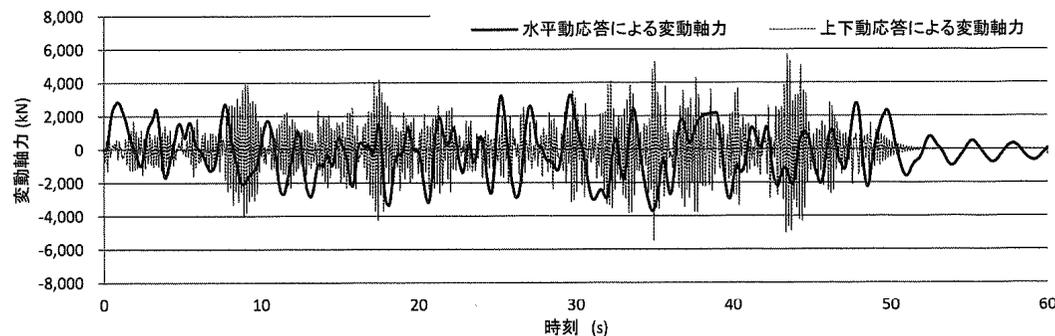


参図 4-2 地震時の免震装置における軸方向荷重

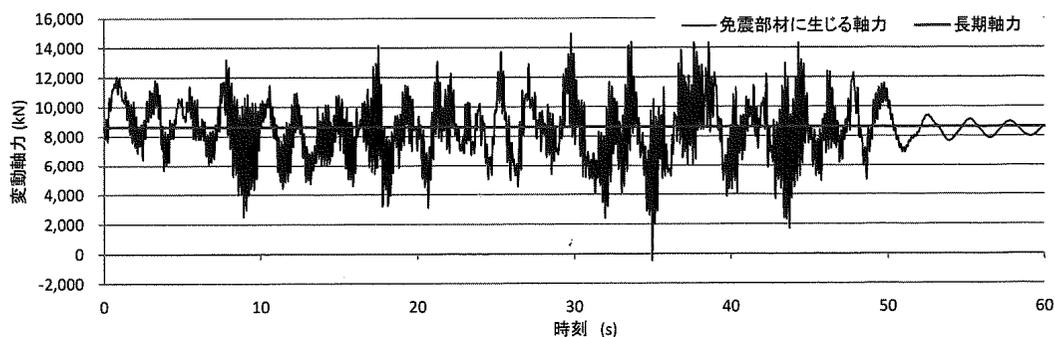
引用:原子力発電所免震構造設計技術指針JEAG4614-2013((社)日本電気協会)

免震設計用の鉛直方向地震動の設定および利用、 3方向成分の同時性を考慮した設計（2）

水平動と上下動の時刻歴応答波形の重ね合わせ



(水平動, 上下動による変動軸力の時刻歴)



(積層ゴム支承に作用する軸力の時刻歴)

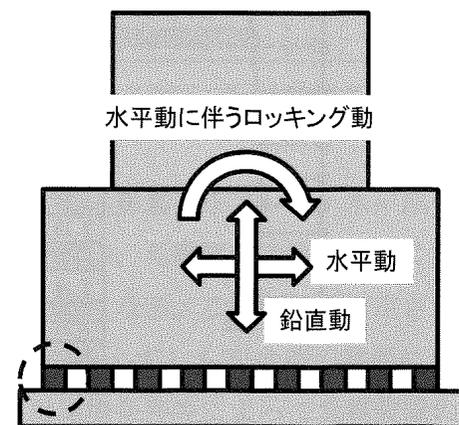


図11.2-11 水平動と上下動の時刻歴応答波形による重ね合わせの例

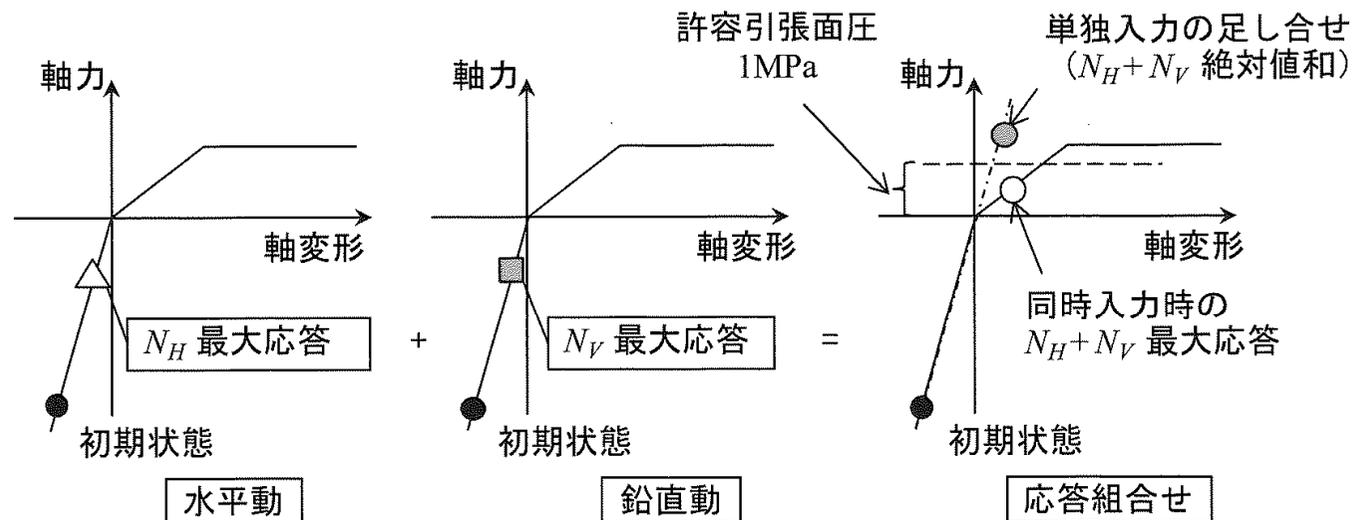
免震設計用の鉛直方向地震動の設定および利用、 3方向成分の同時性を考慮した設計 (3)

JEAG4614-2013の考え方

原則として絶対値和

圧縮領域： 絶対値和、時刻歴和、同時入力のいずれか

引張領域： 絶対値和は**過大に安全側**なので、
同時入力、**SRSS**、組み合わせ係数法の**包絡**



参図 4-3 積層ゴムの軸方向荷重組合せにおける引張領域の特殊性

免震設計用の鉛直方向地震動の設定および利用、 3方向成分の同時性を考慮した設計（4）

一般免震建築設計での考え方

免震告示

- ・上下動により生じる軸力を長期軸力の ± 0.3 倍（軸力係数）
- ・地震時軸力と上下動による軸力の和が、引張力とならないように設計

時刻歴解析による設計

- ・上下動軸力係数を上下動応答解析で求める方法
- ・水平動応答解析と上下動応答解析を別々*に行って

最大応答値の単純和**

時刻歴波形の重ね合わせ

とする方法

* 同一振動モデルによる上下水平同時入力では、減衰定数の設定に注意が必要

** 水平動固有周期3～5秒の振動モデルと上下動固有周期0.3秒前後の振動モデルでは、同時刻に最大値が重なることが十分に考えられる。

免震設計用の鉛直方向地震動の設定および利用、 3方向成分の同時性を考慮した設計 (5)

- 水平2方向にはSRSSを適用してもよいが、水平+上下へのSRSSの適用には疑問あり(理由は前頁の注釈の通り)
- 水平+上下には、絶対値和か時刻歴波形の重ね合わせ
- 水平、上下同時入力では、各方向の減衰を独立に設定できないのであれば、別々に解析して重ね合わせる
- 引張側の復元力特性の設定に注意(引張剛性を圧縮剛性の1/10程度剛性低下させる)
- 圧縮剛性と同じなら、過度であっても安全側には変わらない
- 引張剛性をゼロとするのは、引抜力を過小評価し危険側となる
- 積層ゴムのせん断成分と軸成分の間にせん断変形に応じて軸剛性が変化する(P- Δ 効果など)という相互作用がある(2次形状係数の小さい積層ゴムでは要考慮)
- 水平2方向変形に対する破断クライテリアの設定は必要ないか(高減衰ゴム系積層ゴムでは検討済み、他の履歴減衰型免震装置では要確認)

一般建築物仕様の免震装置の許容限界の 原子力発電所施設への適用 (1)

一般建築物における評価例

破断および座屈を生じさせないために、
右図の斜線内の領域内にあることを確認
する。

具体的な運用は、時刻歴解析と告示設計
で若干異なる。

時刻歴解析では右図のようになる。

設計用圧縮限界強度

設計用限界せん断ひずみ

$$\text{式: } \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} = 1 - \frac{\gamma}{S_2}$$

で囲まれる領域

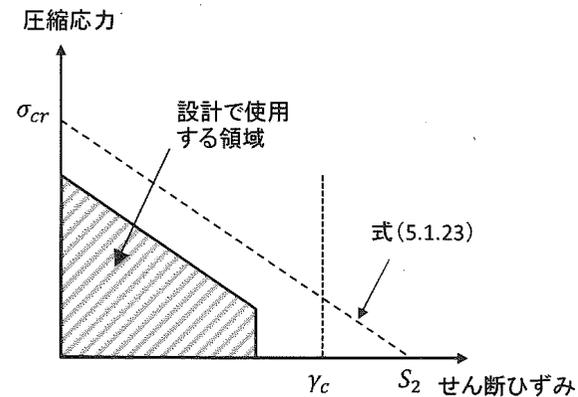


図-5.1.9 積層ゴムの限界性能と設計で使用する領域

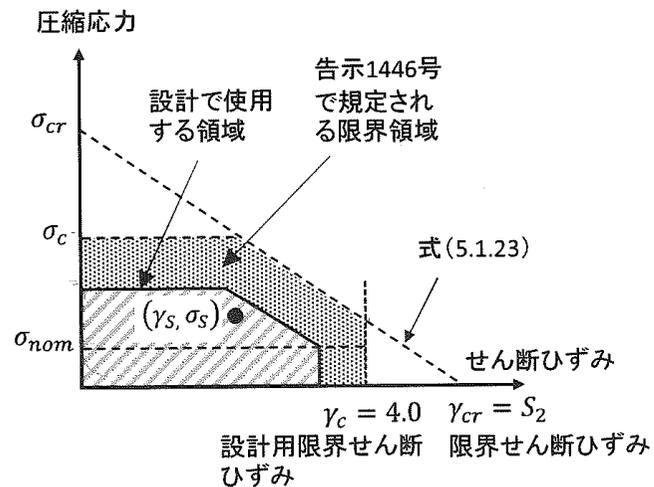


図-5.1.11 変形性能の照査

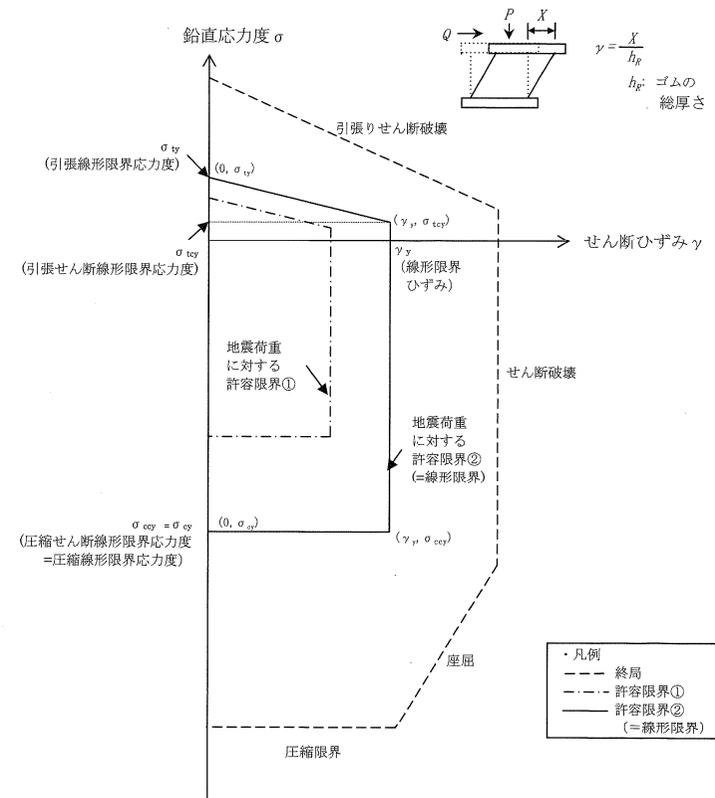
一般建築物仕様の免震装置の許容限界の 原子力発電所施設への適用 (2)

免震装置の許容限界に対するJEAG4614-2013の考え方

線形限界を規定する5つの定数

- ①せん断線形限界ひずみ
- ②圧縮線形限界応力度
- ③圧縮せん断線形限界応力度
- ④引張線形限界応力度
- ⑤引張せん断線形限界応力度

各定数は、
建築基準法第37条第2項の認定
あるいは、免震装置性能確認試験
により評価



* 許容限界①: 供用期間中の経年変化や温度変化, および積層ゴム免震要素の特性のばらつきを考慮しない場合
許容限界②: 供用期間中の経年変化や温度変化, および積層ゴム免震要素の特性のばらつきを考慮する場合

図 6.1.2-1 積層ゴム免震要素の終局, 線形限界及び許容限界の概念

一般建築物仕様の免震装置の許容限界の 原子力発電所施設への適用 (3)

電力共通研究「免震システムの評価手法開発」(2013~)の成果

鉛プラグ入り積層ゴム(1600mm径)13体の試験結果(せん断、引張)

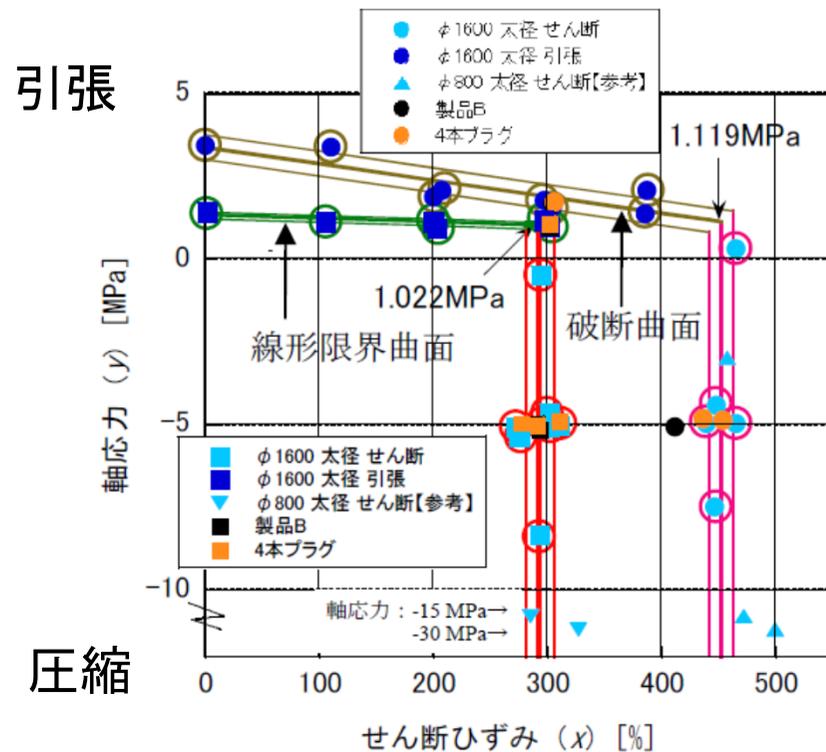


図1 線形限界曲面と破断曲面

引張領域に関しては、左図のような線形限界および破断の限界曲面が得られている

800mm径の結果もほぼ同様であり、スケール効果はない

池田ほか:原子力施設の免震技術の開発(その25)実規模免震装置の破断試験(破断曲面に関する詳細評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 2016年8月

一般建築物仕様の免震装置の許容限界の 原子力発電所施設への適用 (4)

一般建築物

- せん断と軸力との組み合わせは、圧縮領域のみを対象
- 引張は面圧(単体、全体、平均など)のみで確認
- **メーカーの評価実績は豊富、ただし実大での検討は？(試験が難しい)**

原子力発電所施設

- せん断と軸力との組み合わせは、引張～圧縮の全領域を対象
- **電共研「免震システムの評価手法開発」での検討対象積層ゴム(1600mm径LRBなど)に限れば、かなり踏み込んだ検討実績あり**

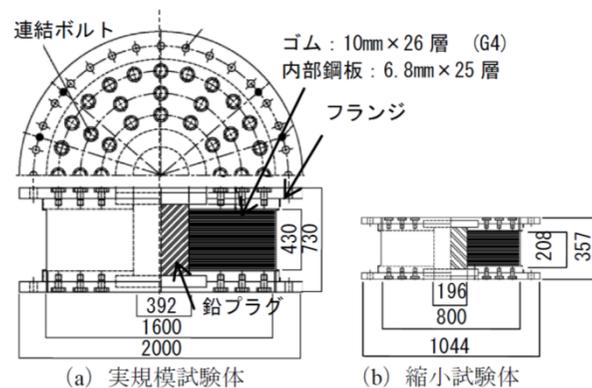


図1 試験体

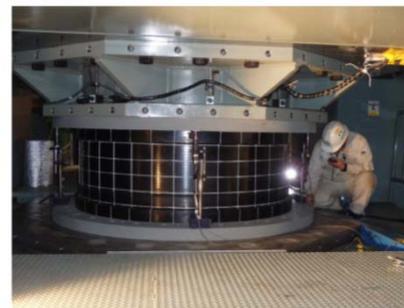


図2 実規模試験体



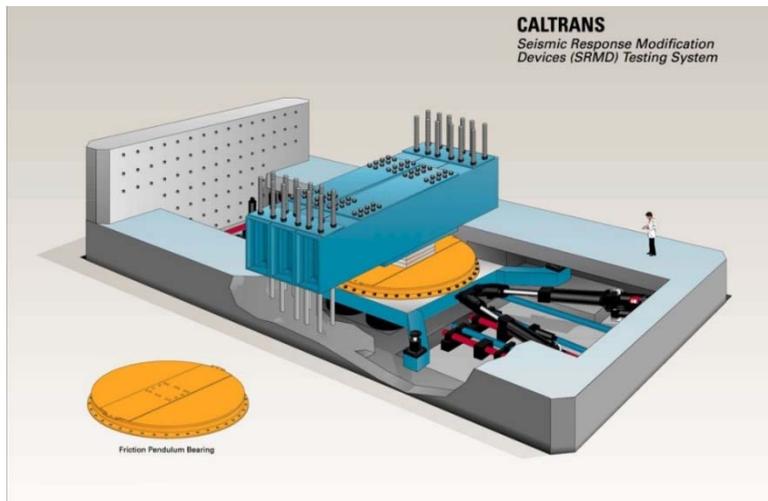
図3 破断試験装置

引用:栗原ほか, 原子力施設の免震技術の開発(その4)実規模免震装置の破断試験(試験概要と破断試験装置の性能確認), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 2014年9月

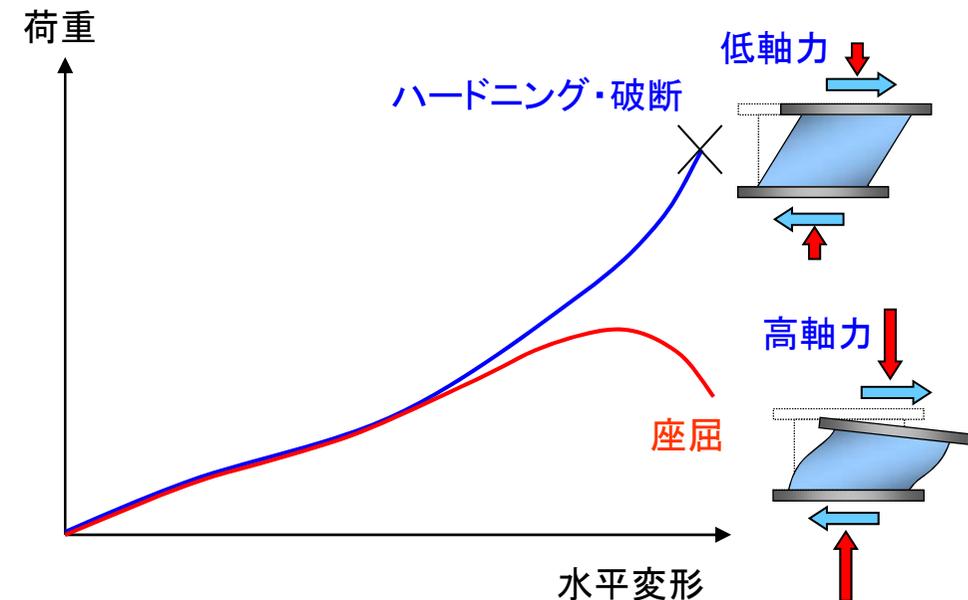
一般建築物仕様の免震装置の許容限界の 原子力発電所施設への適用 (5)

線形限界を超える挙動追跡では、以下の事項について確認が必要

- 動的加力時の挙動(ひずみ速度、繰り返し変形の影響)
- 水平2方向、水平変形+軸力の連成効果



米国UCサンディエゴ校の試験装置(SRMD)
実大免震装置の水平2方向動的加力試験が可能
(主軸方向: 1.2m、1.8m/s)



引張面圧1MPaの安全余裕、 引張ひずみを許容限界とすることの適用性 (1)

電共研「免震システムの評価手法開発」での成果

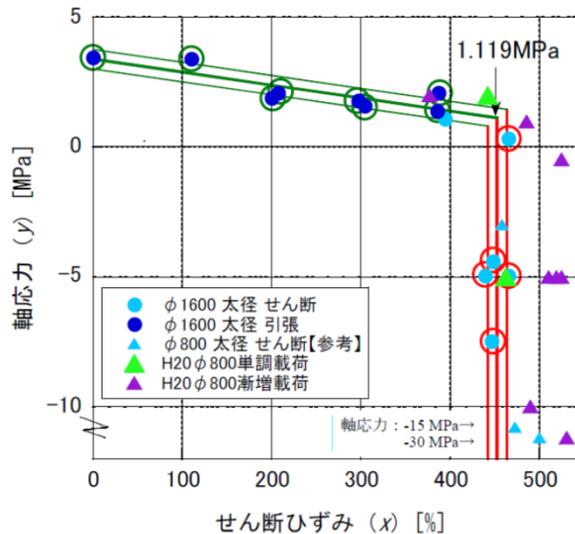


図2 せん断ひずみ-軸応力平面における破断曲面

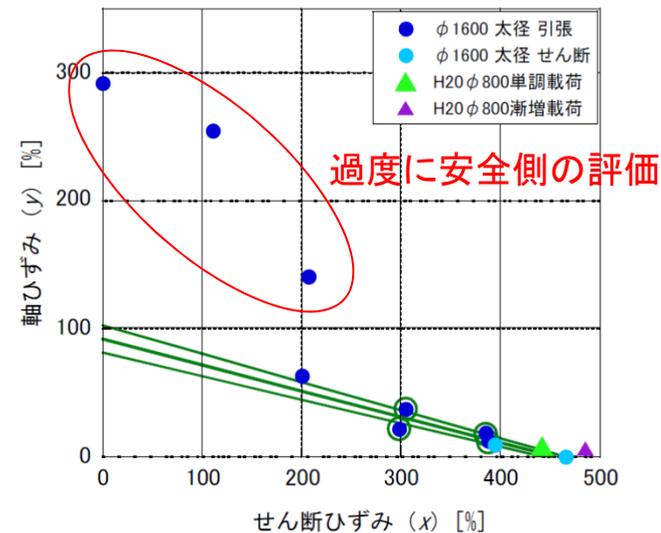


図3 せん断ひずみ-軸ひずみ平面における破断曲面

池田ほか:原子力施設の免震技術の開発(その25)実規模免震装置の破断試験(破断曲面に関する詳細評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 2016年8月

構造物の応答は力のつり合いと変位の適合条件を満たすように解いている。一般的に前者の方が精度は良い。積層ゴム単体では引張ひずみを許容限界とすることは良いかもしれないが、構造物全体としては引張面圧で評価すべきと考える。

引張面圧1MPaの安全余裕、 引張ひずみを許容限界とすることの適用性 (2)

- 引張载荷時に、面圧＝軸力／断面とすることの意味・解釈を明確にすべき、あくまでも平均値である
- 断面内で面圧は一様分布しているのか？
- フランジプレートの面外変形の影響はないのか、おそらくフランジ外周部で局部的に大きな引張面圧になっているはず

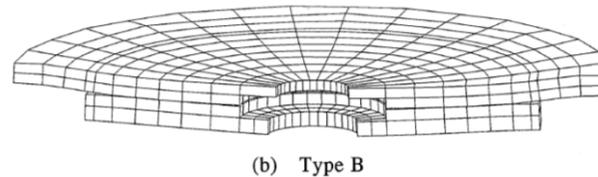
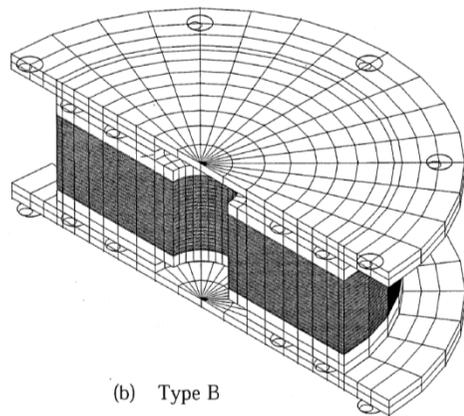


図-11 引張力を受ける積層ゴムの連結鋼板
およびフランジプレートの変形状態

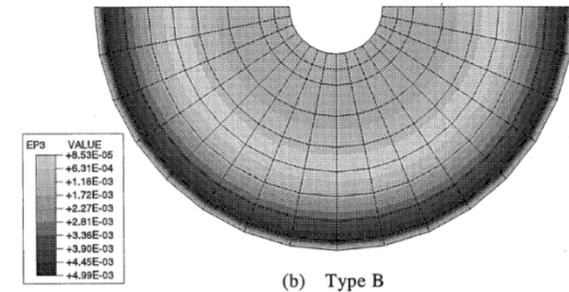


図-12 引張力を受ける積層ゴム端部のゴム部主ひずみ分布
(主ひずみ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ($\epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$)における ϵ_3)

引張力を受ける積層ゴムの有限要素解析

引用: 菊地ほか, 引張力を受ける積層ゴムの復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系
論文集, 第524号, 57-64, 1999年10月

引張面圧1MPaの安全余裕、 引張ひずみを許容限界とすることの適用性 (3)

- 一般建築物において、(平均)引張面圧1MPaを引張限界強度とした評価実績は豊富
- 原子力発電施設に関する検討では、(平均)引張面圧1MPaを引張限界強度とする前提で、データが分析・整理されている
- (平均)引張面圧1MPaでは剛性低下するだけであり、直ちに破断するわけではない(かなり変形は伸びる)
- 剛性低下すれば免震装置間で軸力の再配分が生じるため、上部構造にそれを伝達できる耐力・剛性が担保できれば、引張面圧1MPaの許容限界は安全側の評価と考えられる
- 理想的には、引張-せん断において引張面圧1MPaをチェックすべき(実大での試験は困難であるが)

引張面圧1MPaの安全余裕、 引張ひずみを許容限界とすることの適用性 (4)

積層ゴムが引張荷重を受けた場合に注意すべき点: 取付ボルトのてこ反力

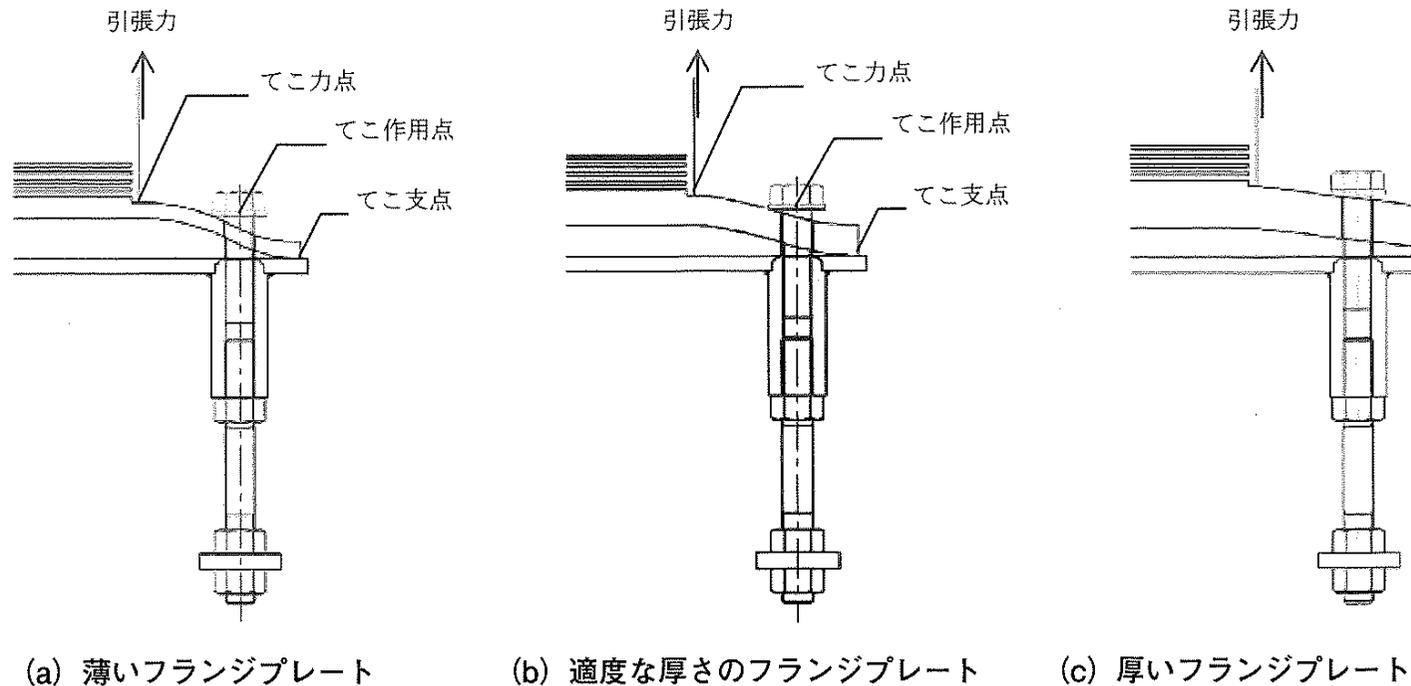


図1.11 てこ反力の考え方

フランジプレートの剛性によっては(プレート厚が薄い場合)、ボルトに作用する引張力が割り増されることがある。

履歴系ダンパーの設計時の安全余裕（1）

審査ガイドでは、

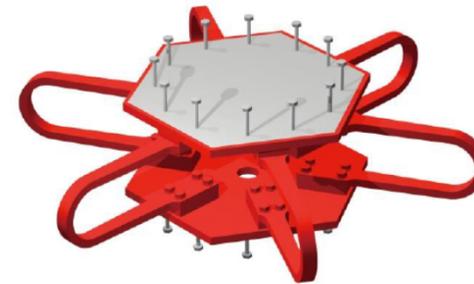
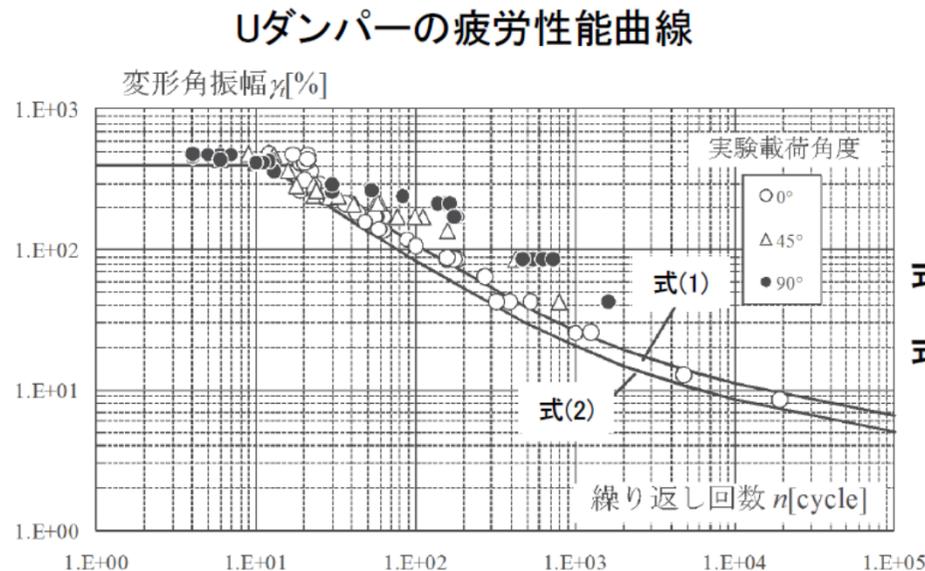
「ダンパーの許容限界については、ダンパーの構造、仕様に
応じた特性値（例えば累積疲労損傷度（鋼材ダンパー、鉛ダン
パー等）……）において設計で期待している減衰性能を維持で
きる制限値として設定していること。」

具体的な数値の規定なし

履歴系ダンパーの設計時の安全余裕（2）

履歴系ダンパーの代表例として、免震U型ダンパーでは、

- ・時刻歴応答変位にレインフロー法を適用して変位ごとの疲労回数を求め、これにマイナー則を適用して累積損傷度を評価している。
- ・累積損傷度の評価式は、実験値の回帰式に対して安全係数**0.7704(非破壊確率95%)**が乗じられている。



$$\text{式(1)} \quad \gamma_d = 35 N_f^{-0.15} + 3620 N_f^{-0.80}$$

$$\text{式(2)} \quad \gamma_d = 0.7704 \times (35 N_f^{-0.15} + 3620 N_f^{-0.80})$$

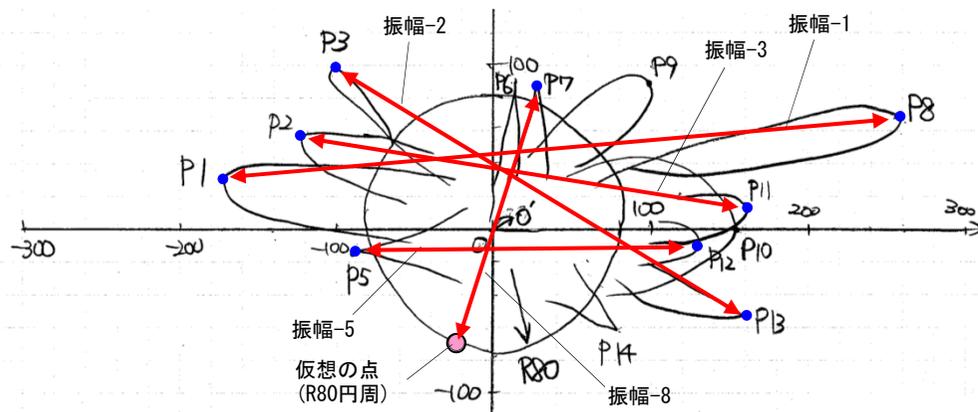
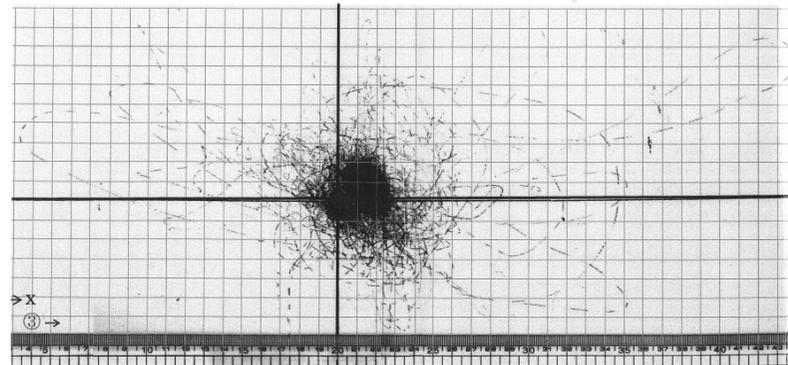
※式(2)は、式(1)に対してばらつきを考慮し非破壊確立95% (標準偏差で $\sigma=1.65$ 相当)となるように安全係数(0.7704)を掛けた式

履歴系ダンパーの設計時の安全余裕 (3)

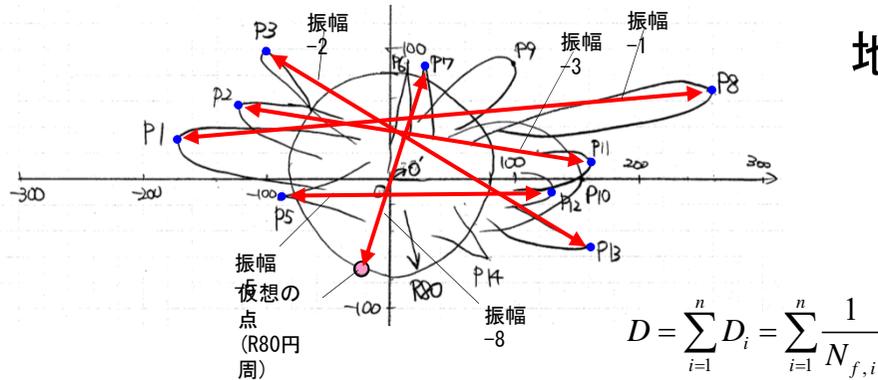
東北地方太平洋沖地震での事例



ケガキ計 No. 1 (H-1)



履歴系ダンパーの設計時の安全余裕（4）



けがき跡を基に評価した累積損傷度(けがき板1)

	西側			東側			δ_i [mm]	D_i	
	Pi	X	Y	Pj	X	Y			
1	P1	-170	36	P8	253	68	424.21	0.0118	
2	P3	-105	90	P13	158	-56	300.81	0.0070	
3	P2	-122	62	P11	160	15	285.89	0.0065	
4	P4	-107	14	P10	155	0	262.37	0.0057	
5	P5	-93	-16	P12	125	-7	218.19	0.0043	
6	半径 80mm の円周上の位置を仮定			P9	100	92	215.88	0.0042	
7				P14	84	-58	182.08	0.0033	
8				P7	22	87	169.74	0.0029	
9				P6	17	87	168.65	0.0029	
								D =	0.0487

地震後も95%の残存疲労性能を保有
(東北地方太平洋沖地震19回分の寿命が残存)

地震後に取り出したダンパーの試験結果

地震時最大変形

破断回数の比較

	振幅 [mm]	破断回数 (計算値)		破断回数 (実験値)
		新品	損傷	
1	±213	84	80	76
2				70
3				77
4	±490	24	23	25

設計許容変形

良く一致

実測・実験結果の比較から、累積損傷度の評価法は十分妥当なものと判断

安全余裕度については、他の免震装置との整合性をもって設定する

長周期地震動に対する考慮は別途必要

地震後の免震装置の機能維持確認の方法、ヘルスマモニタリングなどのリアルタイムの管理方法の適用性（1）

日本免震構造協会：免震建物の維持管理基準，2017年

項目	内容
a. 竣工時検査	以下のb～fの点検時に必要な項目の初期値を測定する。
b. 通常点検	毎年、免震機能の異常や不具合の早期発見を目的に、目視を中心に実施する。
c. 定期点検	定期的に異常の有無を検出する目的で、建物竣工後5年、10年、以後10年ごとに計測を含めた点検を実施し、記録する。
d. 応急点検	災害時に迅速に対応する目的で、大きな地震や火災、浸水などの災害を受けた直後に目視を中心とした見回りを実施する。
e. 詳細点検	通常点検、定期点検あるいは応急点検で免震部材の異常が認められた場合に、原因の把握と対応を検討するために、計測を含めた詳細点検を実施する。
f. 更新工事後点検	免震層内、建物外周部で免震機能に影響がある工事の完了後に実施する。点検項目は、竣工時検査に準じる。

地震後の免震装置の機能維持確認の方法、ヘルスマモニタリングなどのリアルタイムの管理方法の適用性 (2)

日本免震構造協会：免震建物の維持管理基準，2017年

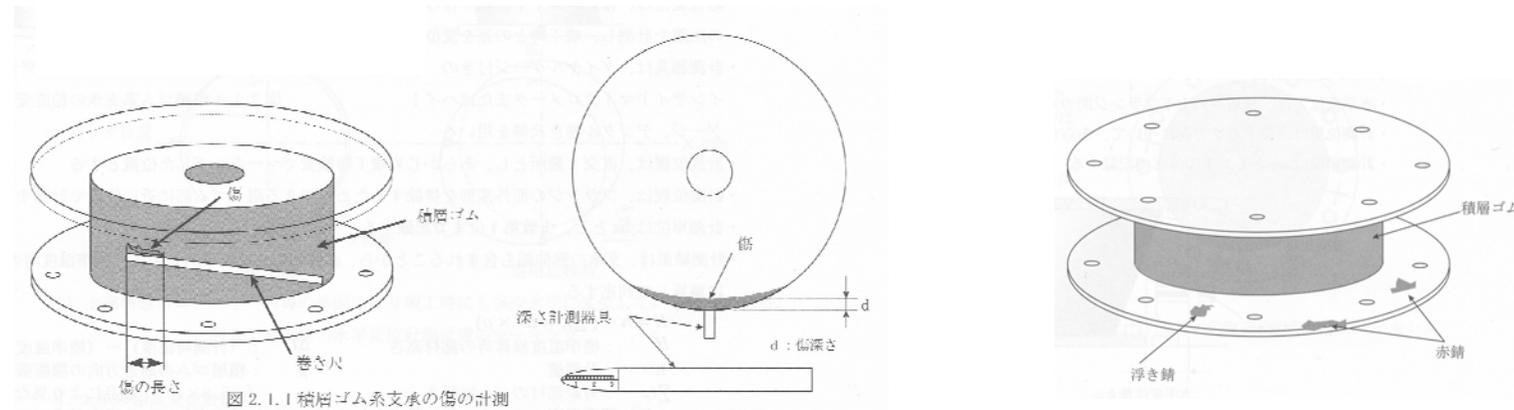


図 2.1.1 積層ゴム系支承の傷の計測

基本的には目視点検

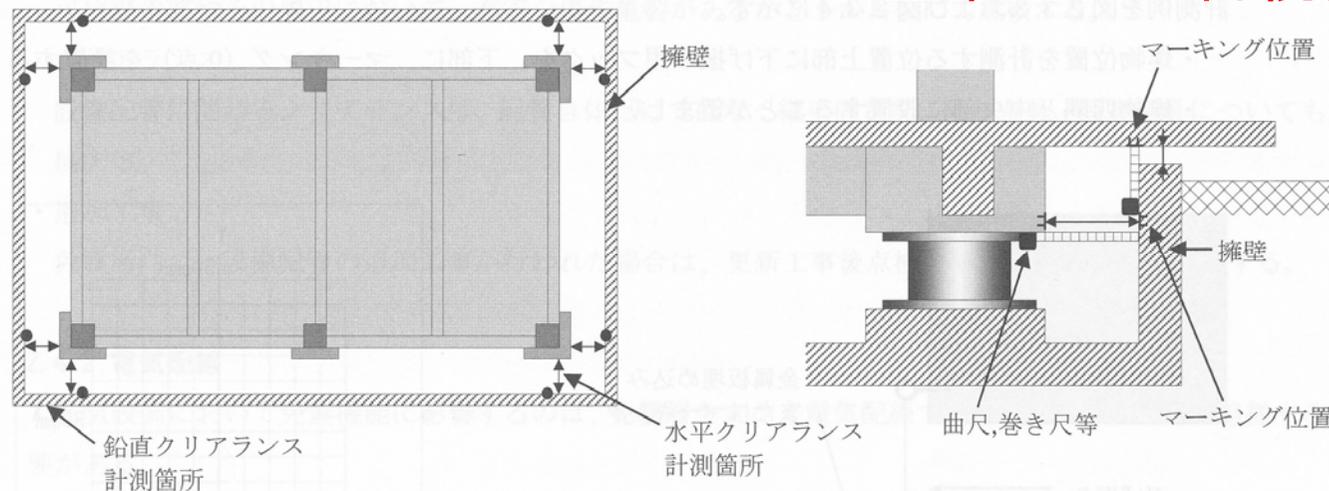
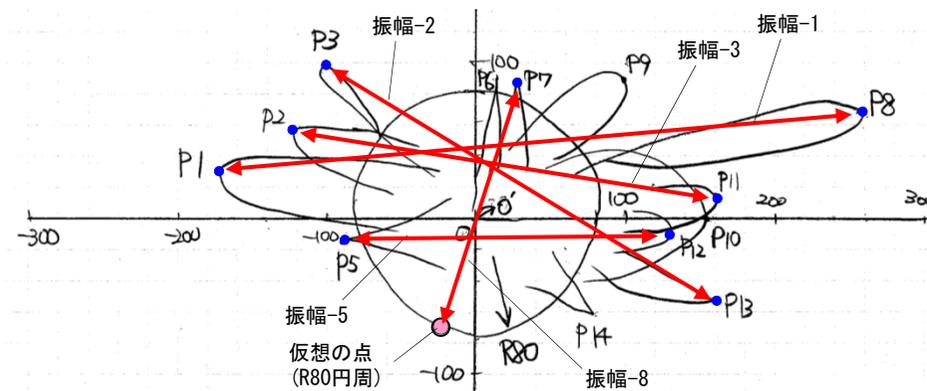
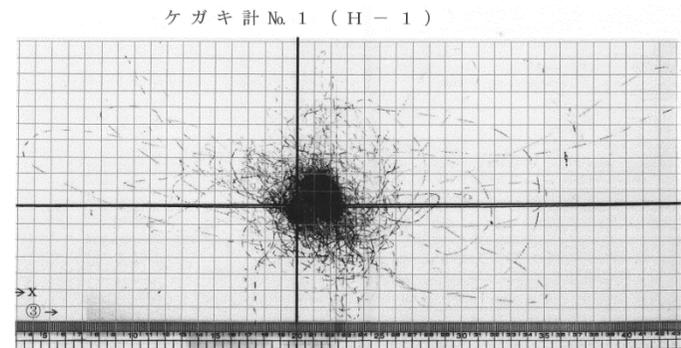


図 2.3.1 躯体間のクリアランスの計測例

地震後の免震装置の機能維持確認の方法、ヘルスマモニタリングなどのリアルタイムの管理方法の適用性 (3)

目視以上の点検には、変位履歴が必要

けがき変位計記録を用いた免震U型ダンパーの残存疲労性能評価事例



原点付近の変位履歴の読み取りが困難

地震後の免震装置の機能維持確認の方法、ヘルスマモニタリングなどのリアルタイムの管理方法の適用性 (4)

けがき記録のみでは、移動速度、順序を同定するのが困難



図-1 けがき記録 写し取りの様子

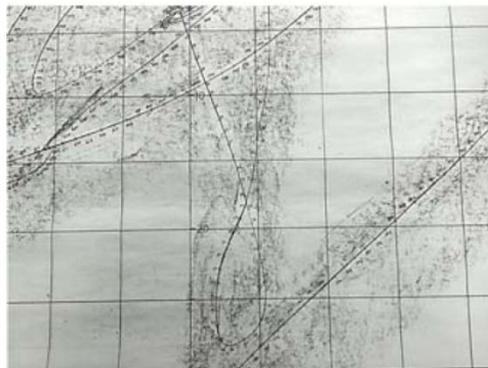


図-2 写し取ったけがき記録

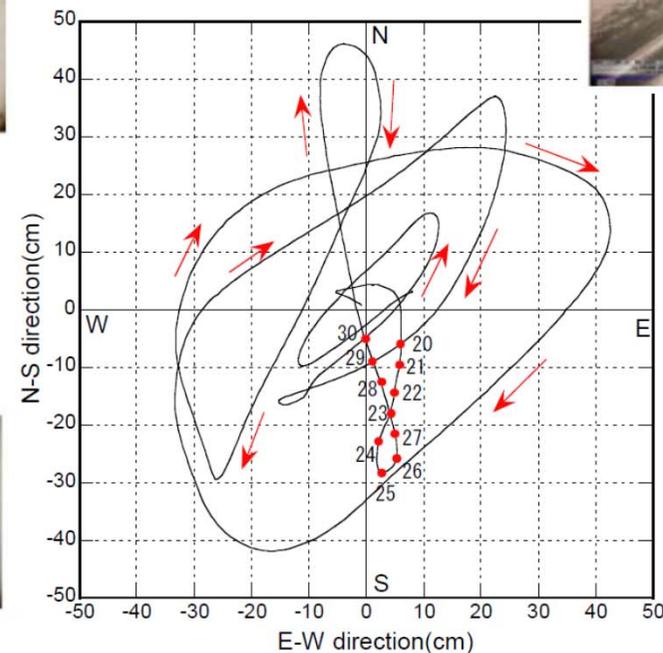
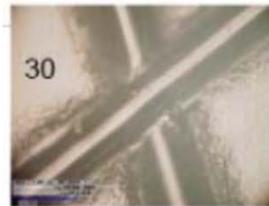


図-4 けがき記録 (赤丸は試料採取点)

熊本地震でのけがき記録の分析例

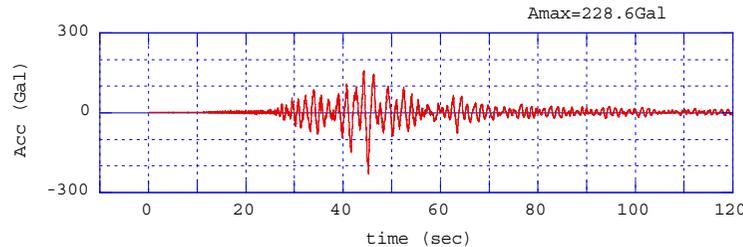
引用: 森田ほか, 免震建物の地震時挙動に関する研究, けがき記録から地震動変位データを採取する方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 2019年9月

地震後の免震装置の機能維持確認の方法、ヘルスマモニタリングなどのリアルタイムの管理方法の適用性 (5)

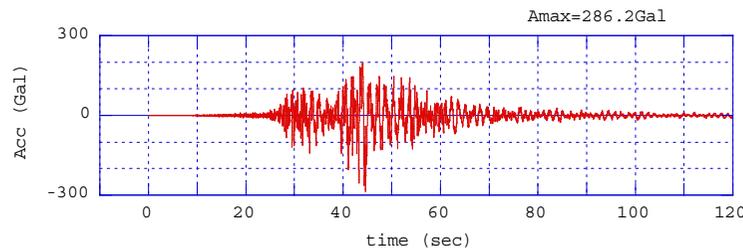
理想的には、変位の時刻歴データが欲しい
(加速度・速度の時刻歴波形からの再現でも可)



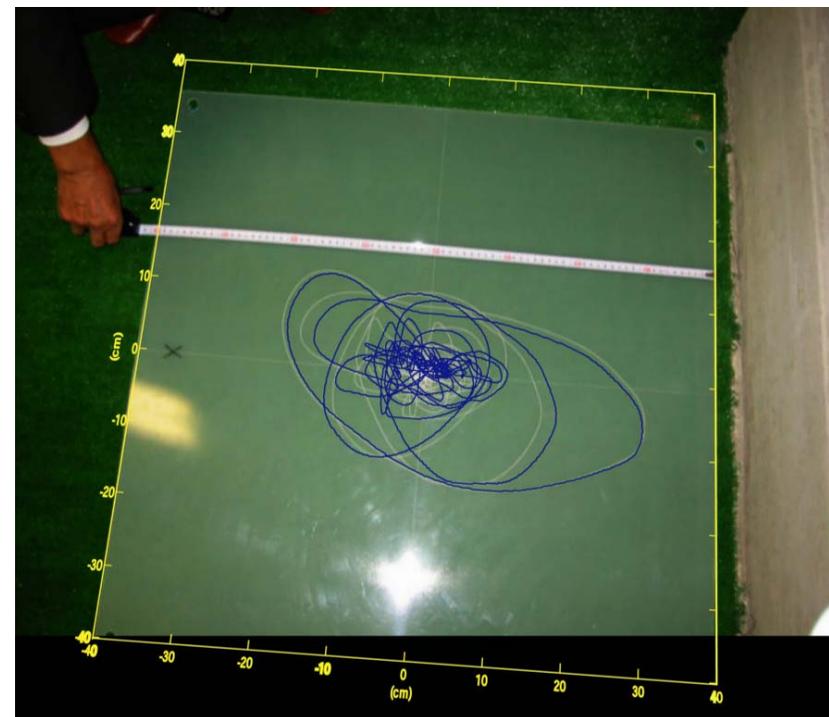
免震層上部



免震層下部



免震層上部・下部の加速度波形から変位
オービットを再現した例
白: けがき変位計記録
青: 加速度波形による再現



変位時刻歴データが得られれば、免震装置のリアルタイム損傷評価が可能

別置き試験体の設置の課題点、必要性、代替方法（1）

一般建築における別置き試験体の状況

- 基本的に縮小試験体とし、軸力を導入して、実機と同じ環境内に設置されている
- 初期の免震建物での設置例が多いが、最近ではあまり置かれていない
- 装置メーカーに管理を依頼することが多い



別置き試験体の設置の課題点、必要性、代替方法（2）

- 数十年にわたる運転期間において、積層ゴムの経年による力学性能の評価は必要（以下の2要因）

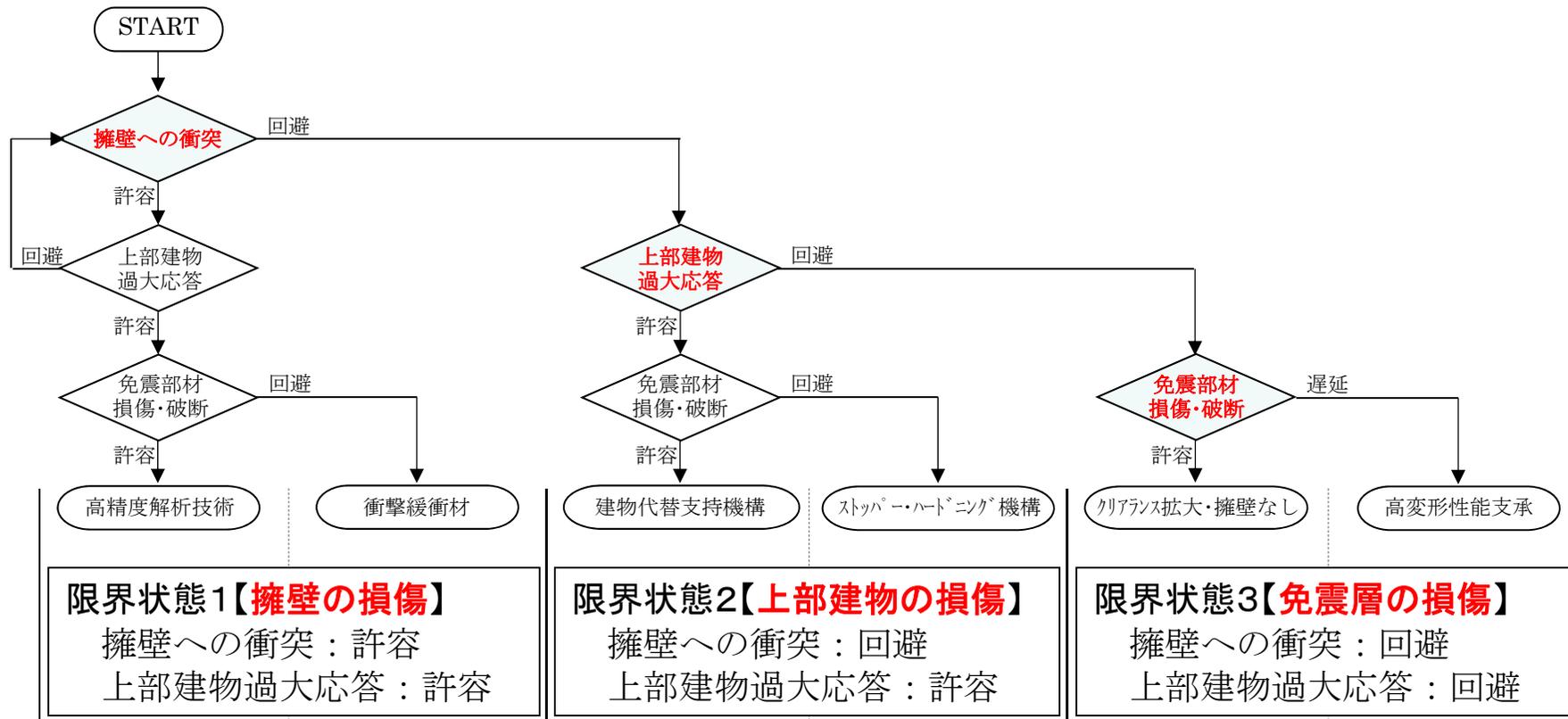
クリーブ変形による特性変化

ゴムの酸化による特性変化

- 縮小試験体：クリーブ変形の検証のための軸力導入が容易
- 実機：ゴムの酸化による特性変化を直接的に評価可能（縮小試験体ではスケール効果を考慮する必要あり）
- 原子炉建屋に免震構造を適用する場合は、数百基の積層ゴムが設置される。よって、数基程度の別置き試験体を建屋内免震層に設置することは何ら問題はないはず、ただし試験時のハンドリングは困難
- 縮小試験体におけるゴムの酸化のスケール効果が明確にできれば、別置き試験体は縮小試験体でもOKと考える

フェイルセーフの設置に対する留意事項 (1)

過大変形による限界状態とその対策



引用：濱口弘樹，免震建物の限界状態と過大変形対策，シンポジウム「巨大地震への備えを目指す免震構造の取り組み」，日本建築学会，2017年1月

フェイルセーフの設置に対する留意事項（2）

- 建物が擁壁に衝突すると上部構造に過大な応答加速度が生じ、機器の損傷が危惧されるため、擁壁への衝突を前提とした設計はすべきではない。
- よって、緩衝材のようなクリアランスを小さくするものは不要
- 原子力発電施設では、一般建築以上に免震クリアランスには余裕はあるはず
- 積層ゴムの破断変形以上の水平クリアランスを設けられれば、擁壁には衝突しない（衝突する前に、積層ゴムが損傷し荷重支持能力を喪失する）
- 要するに、前ページの限界状態3を選択するのが良い
- ただし、積層ゴムの荷重支持能力喪失は何らかの方法で防ぐべき
- 破断変形に到達しないよう、高変形性能支承や変位抑制装置を導入したい

その他

長周期地震動への対応 (1)

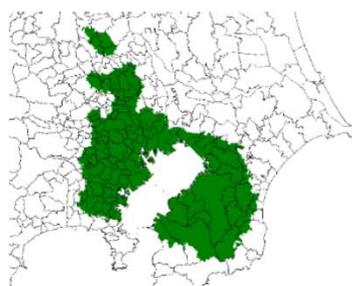
免震装置の多数回繰返し変形による性能変化(劣化)についての配慮が不足→ JEAG4614-2019で参考資料として紹介されている程度

長周期地震動の影響を考慮して設計を行う地域

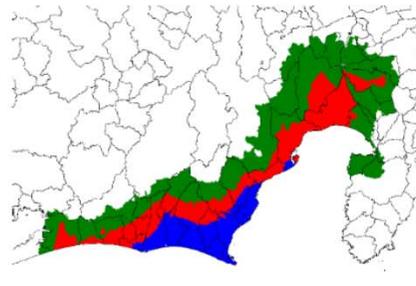
<対象地域>

下図の対象地域内の既存の超高層建築物等については、対象地震による建設地の設計用長周期地震動の大きさが、設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性があります。

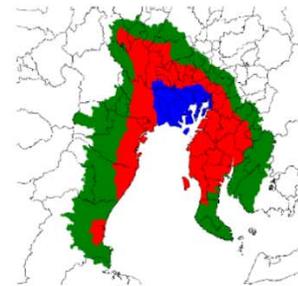
- : 設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性が非常に高い地域
- : 設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性が高い地域
- : 設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性がある地域



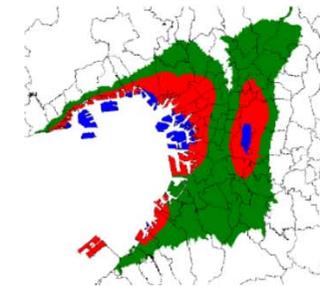
関東地域



静岡地域



中京地域



大阪地域

引用:国土交通省, 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対応について, 平成28年6月24日

その他

長周期地震動への対応 (2)

長周期大変形繰返しにより影響を受ける免震装置

免震装置の種類	積層ゴム支承				弾性すべり支承		履歴系ダンパー	流体系ダンパー	
	天然ゴム系積層ゴム	高減衰ゴム系積層ゴム	鉛プラグ積層ゴム	錫プラグ入り積層ゴム	高摩擦	低摩擦	U型ダンパー	オイルダンパー	減衰こま
影響を受ける項目	なし	等価剛性 等価粘性減衰定数	切片荷重	切片荷重	摩擦係数	なし	切片荷重 疲労損傷度	なし	減衰力

累積変形50m以上の繰返し試験を実施して、影響を評価

引用: 北村春幸, 大宮幸, 長周期地震動に対応する設計法・長周期地震動対応を行う際の注意点, 「特集・今知りたい長周期地震動の基本と対処法」, 建築技術, No.815, 2017年12月

前ページの対象地域外であっても、原子力発電施設への適用を考える免震装置については、繰返し変形の影響で線形限界を超える可能性が考えられる

以下、履歴系ダンパーと鉛プラグ入り積層ゴムの検討事例を紹介

その他

長周期地震動への対応 (3)

- 履歴型ダンパー(U型ダンパー)の長周期地震動対策では、繰り返し変形による吸収エネルギーの変化を考慮して、累積変位による降伏耐力の低減(最大0.8)を考慮している。

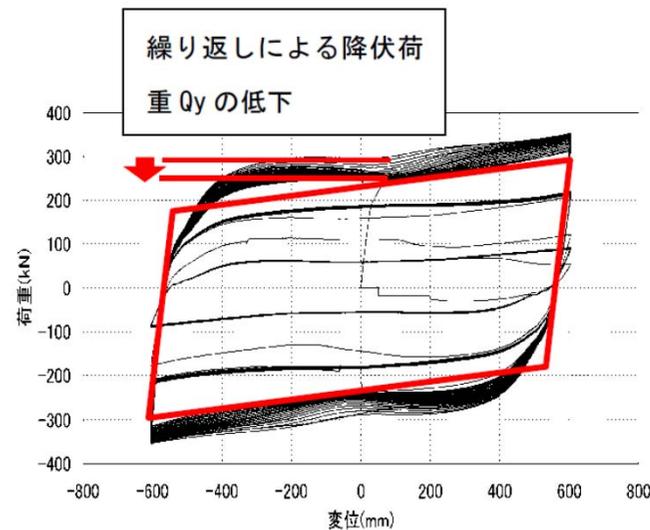


図4 UD50の一定振幅±600mm、A方向の試験結果とバイリニアモデル

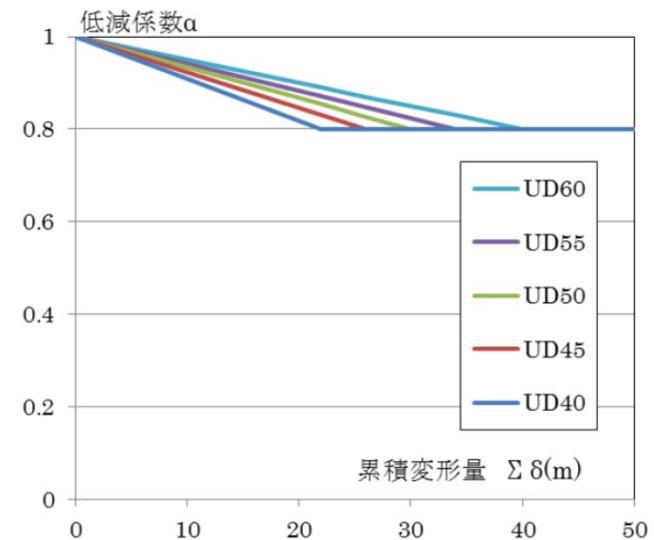


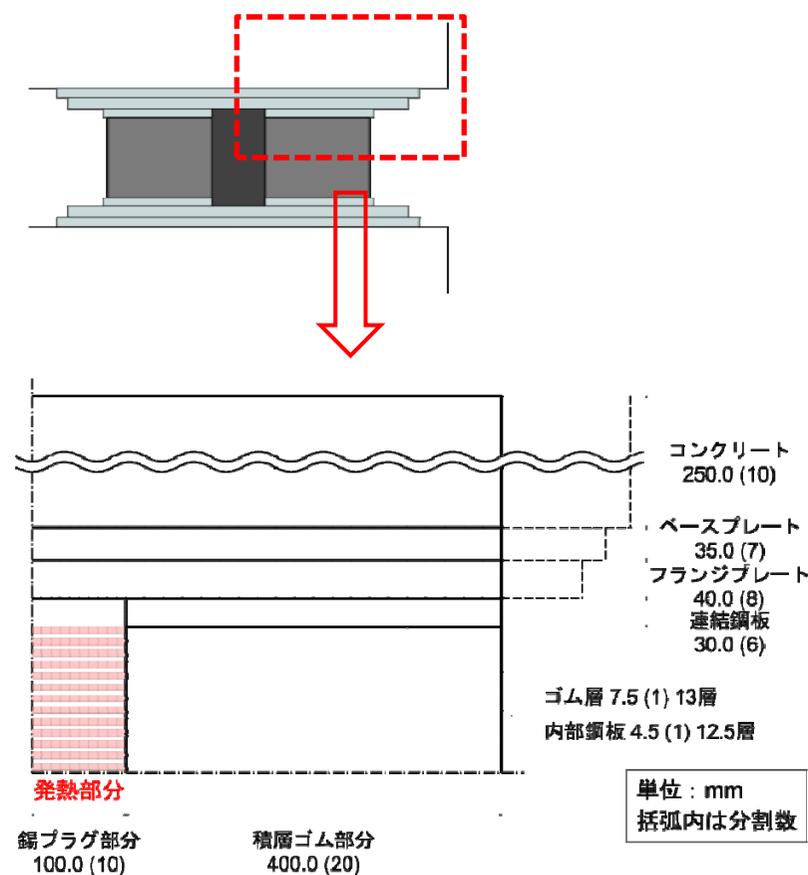
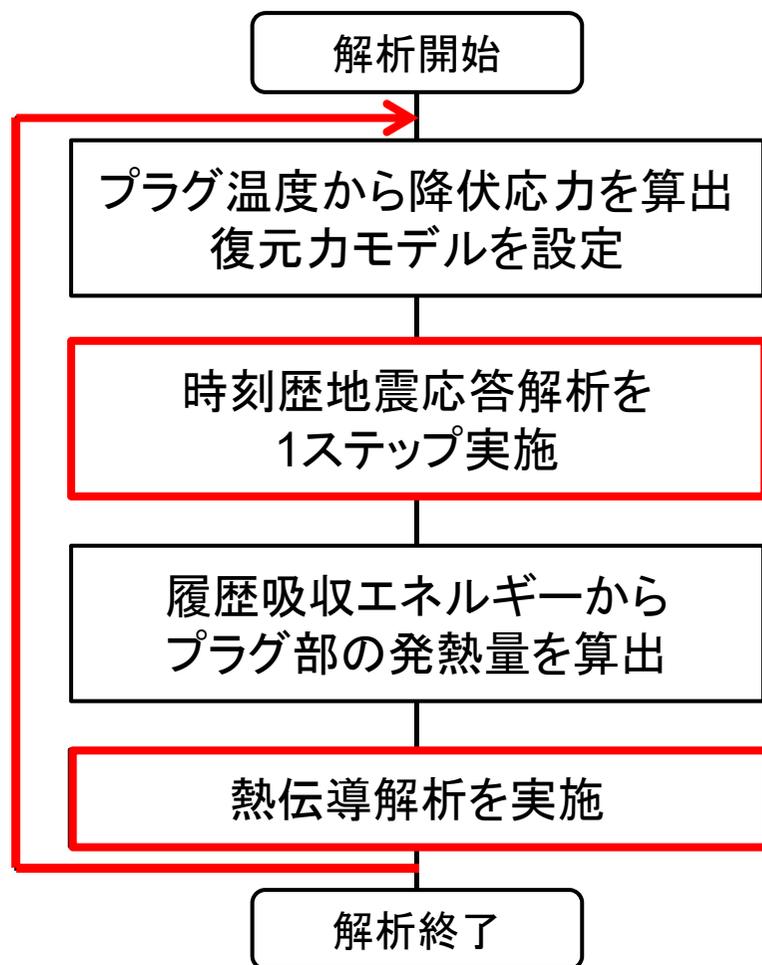
図5 降伏荷重 Q_y の低減係数 α と累積変形量 $\Sigma \delta$ の関係

引用:日鉄エンジニアリング, 長周期地震動に対する免震材料の性能変化(新日鉄住金エンジニアリング式免震U型ダンパー, 平成29年8月)

その他

長周期地震動への対応 (4)

鉛プラグ入り積層ゴムにおける詳細法による対応



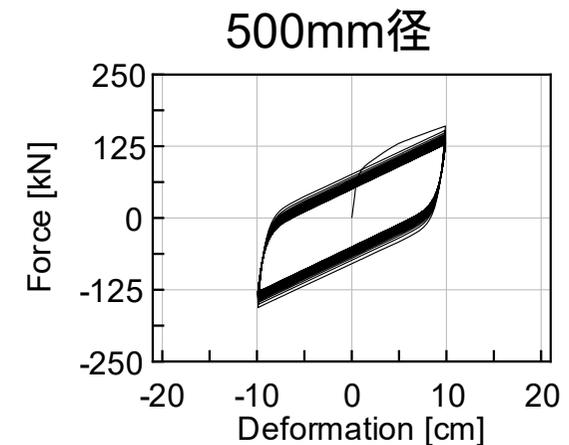
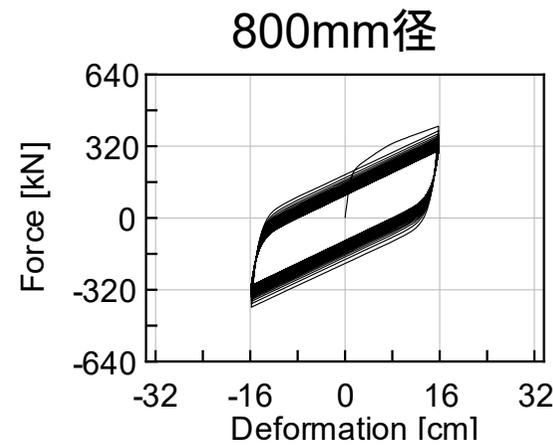
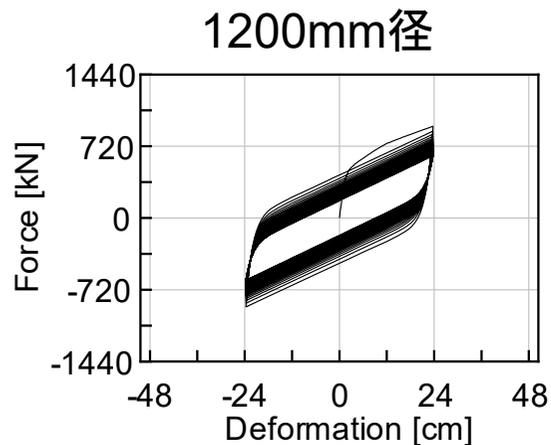
熱伝導解析モデル

その他

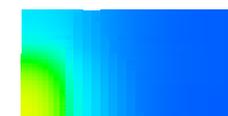
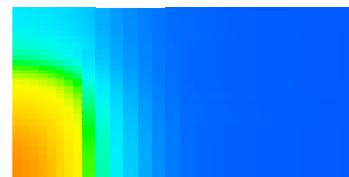
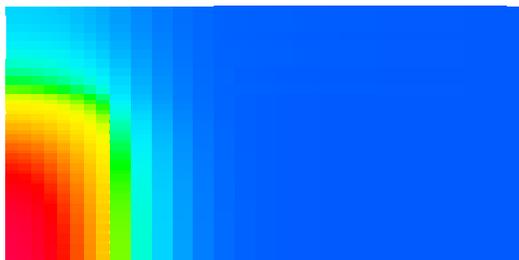
長周期地震動への対応 (5)

LRBの熱・力学連成挙動解析事例

大口径積層ゴムほど熱がたまりやすい←原子力発電所施設では要注意
発熱は体積、放熱は面積(サイズが2倍なら発熱は8倍、放熱は4倍)



荷重変形関係

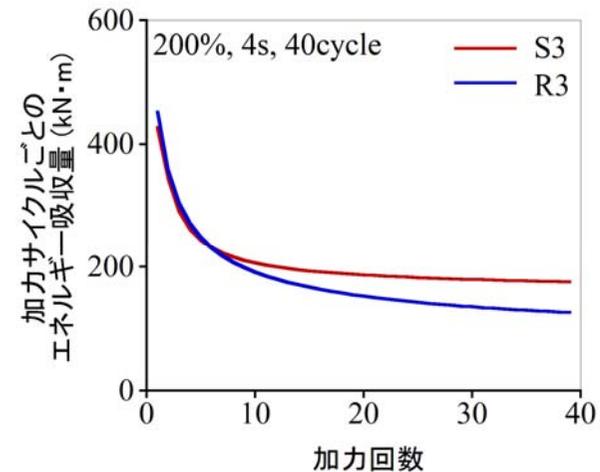
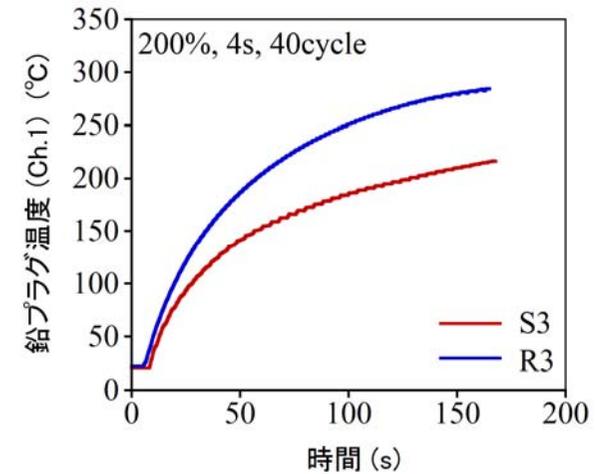
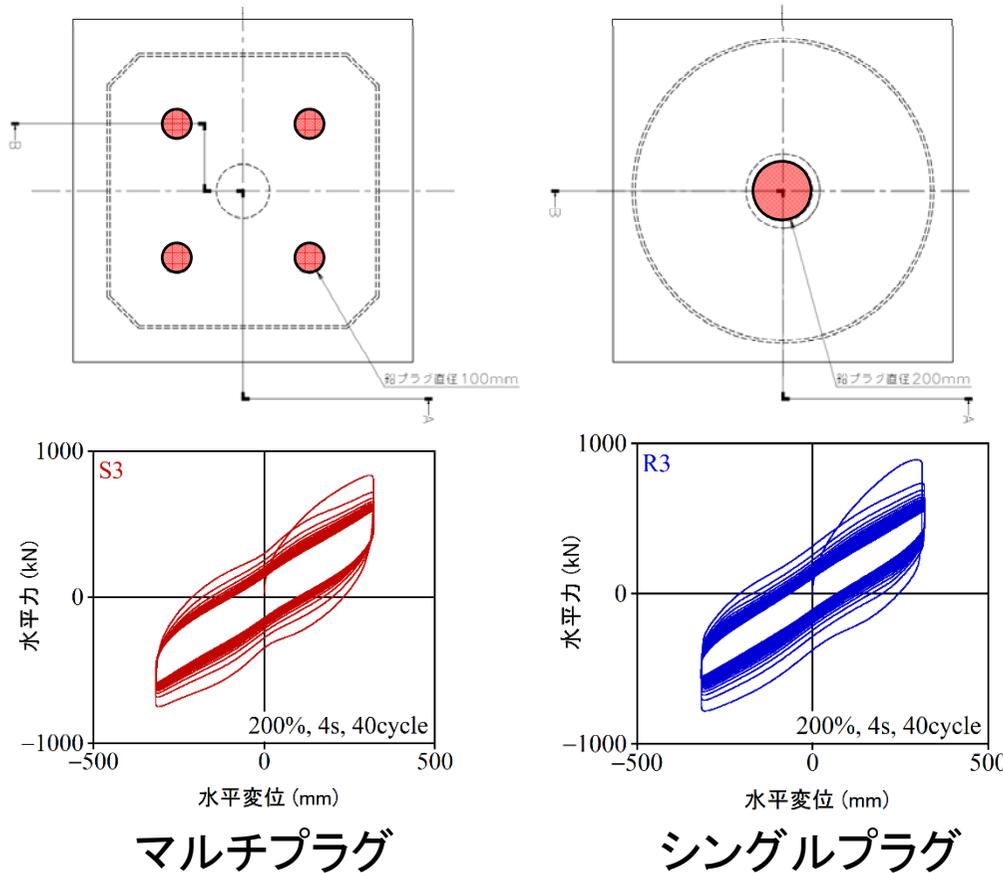


積層ゴム内部の温度分布

その他

長周期地震動への対応 (6)

対策の一例: 減衰材の分散配置
 温度上昇抑制と減衰能力低下抑制



引用: 和氣知貴, 菊地優, 石井建: 鉛プラグ入り積層ゴム支承の減衰材分散配置による熱力学特性の改善効果, 日本建築学会構造系論文集 第84巻 第763号, pp.1187-1197, 2019年9月

その他

長周期地震動への対応 (7)

地震応答解析による検討事例

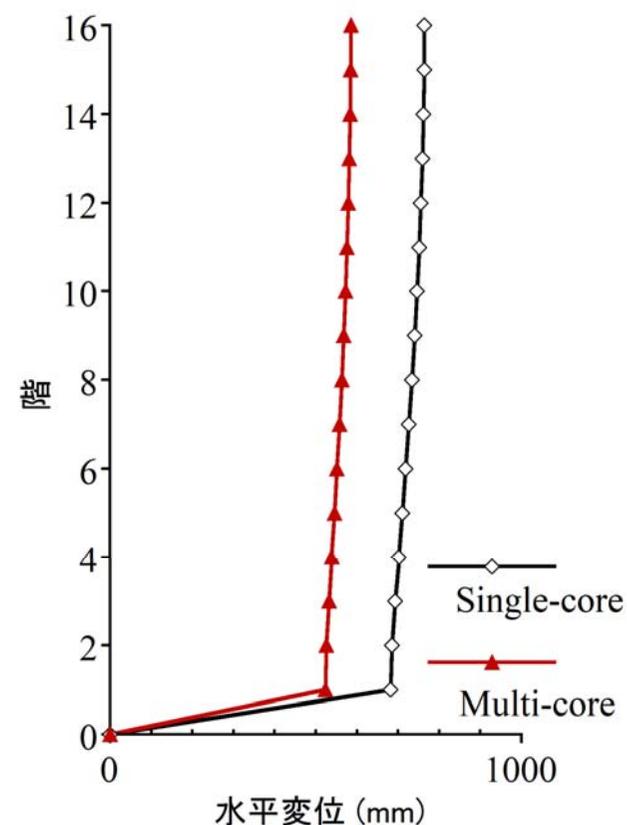
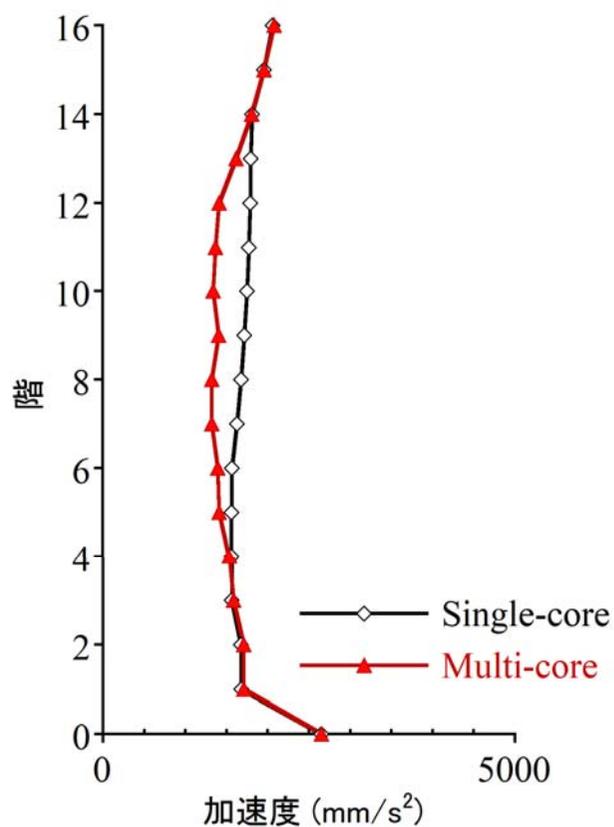
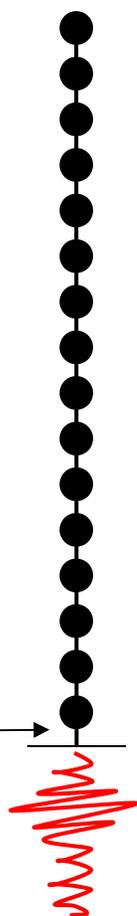
減衰材分散配置による変位抑制効果を確認

建物モデル
RC造15階建て

免震層

- ・シングルプラグLRB
- ・マルチプラグLRB

長周期地震動CH1



引用: Masaru Kikuchi, Ken Ishii, 'Thermal-Mechanical Coupled Behavior of Elastomeric Isolation Bearings Under Cyclic Loading', 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, 18-21 June 2018