



京都大学
KYOTO UNIVERSITY



京都大学防災研究所 公開講座 第30回
「災害を事前に管理する
～被災してもしなやかに生きるための備え～」

建物側の自助努力 耐震・免震・制震(振)

地震防災研究部門 耐震機構研究分野

池田 芳樹

主な内容

1. なぜ、建物の耐震化は重要か
2. 建物の揺れ方を知る基礎知識
3. 耐震
4. 免震
5. 制震(振)

なぜ、建物の耐震化は重要か？

- 防災・減災対策の3要素
 - 被害の抑止力を高める。⇒ その一つが建物の高耐震化
 - 被害に上手に対応する。
 - 適切な復旧・復興を行う。
- 日本は地震学的に非常に活動度の高い時期
- 想定されている大地震による被害総額は膨大
- 地震防災対策では、行政だけではなく一般市民の役割も重要
建物の高耐震化は、一般市民の役割の一つ(=自助努力)
- 建物の耐震補強, 建替え, 家具の転倒防止
 - 地震直後の建物被害と死傷者数を大きく左右
 - 復旧・復興の様々な問題に大きく影響
- 耐震技術への理解は、自分の命, 家族, 財産を守る第一歩

1995年1月17日の兵庫県南部地震

- 初めて経験した近代大都市の直下を震源とする地震
- 1995年1月17日 5時46分
- 気象庁マグニチュード: 7.3
- 気象庁震度階7の初めての適用
- 死者・行方不明者: 6,437人, 負傷者: 43,792人
- 住家全壊: 104,906棟, 住家半壊: 144,274棟, 全半焼: 7,132棟
- 犠牲者の約90%が地震発生直後の約15分間で死亡. その多くは建物の下敷き. 焼死者の多くも建物の下敷きが原因
- まず, 地震直後に生き残ることが重要 ⇒ 自衛隊・消防隊の対応以前に, 建物倒壊防止が本質的問題
- 生き残った後の復旧を考えると, 建物の倒壊を逃れる(=人命保護)だけでなく, 建物の機能回復・継続利用も重要
- 耐震・免震・制震は自助努力すべき技術の一つ

全壊: 基本的機能を喪失, 補修しても元通りの再使用が困難

半壊: 基本的機能の一部を喪失, 補修すれば元通りに再使用は可能

道路を塞ぐ：救助・復旧などに影響



灘区六甲新道周辺(写真提供：神戸市)

道路を塞ぐ：救助・復旧などに影響



中央区御幸通5・6丁目（写真提供：神戸市）

耐震を知る基礎知識：建物の強さと粘り

■ 建物A

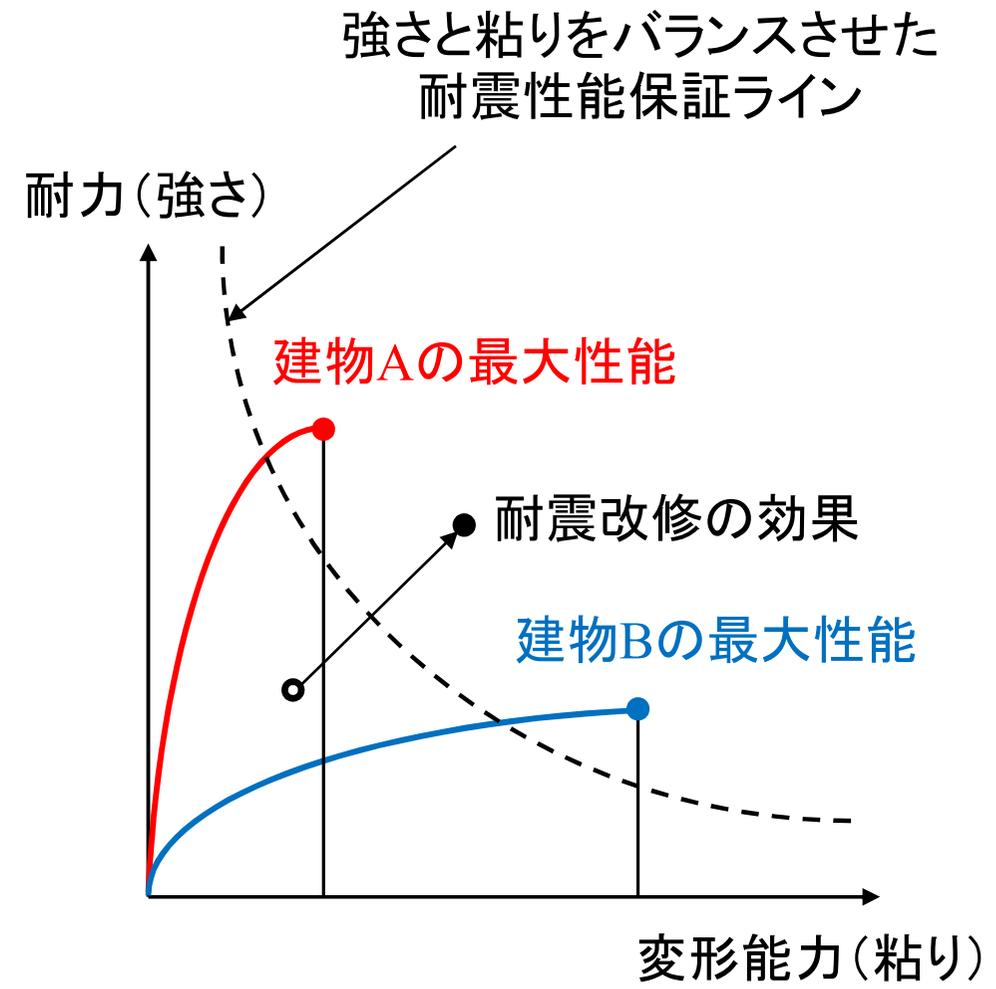
耐力(大), 強度(高), 強い
大きな地震を受けると変形
できずに崩壊する可能性

■ 建物B

変形能力(高), 粘り強い,
しなやか
変形が進み過ぎて, 重量を
支え切れない可能性

■ 曲線と横軸で囲まれた面積
が地震エネルギー吸収能力
(AとBで同じ)

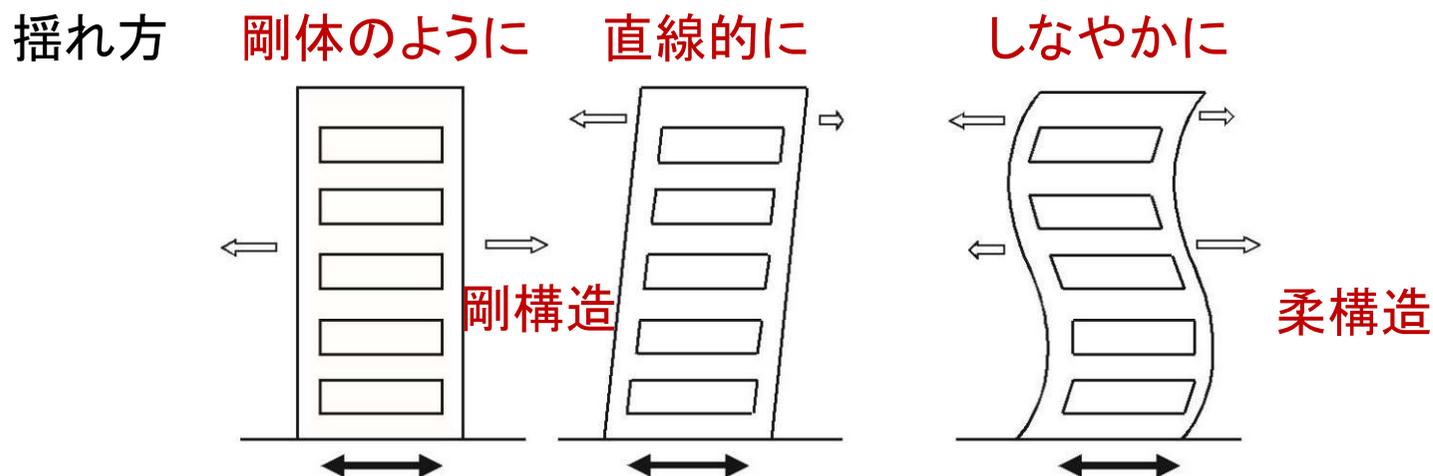
■ 強さと粘りのバランスが重要



建物の変形能力と耐力の関係

耐震設計の典型的考え方：剛構造と柔構造

- 自由に選択できない. 超高層建物を剛構造に設計できない.
- **剛構造 ⇒ 静的設計法**
 - 柱・梁を太く, 耐震壁を多くして, 変形し難くする. 力尽くで地震に対抗
 - 鉄筋コンクリート造, 鉄骨鉄筋コンクリート造
- **柔構造 ⇒ 動的設計法**
 - 自ら柔らかくなり, 地震で受ける力を低減
 - 高層建物, 展望塔, 五重塔



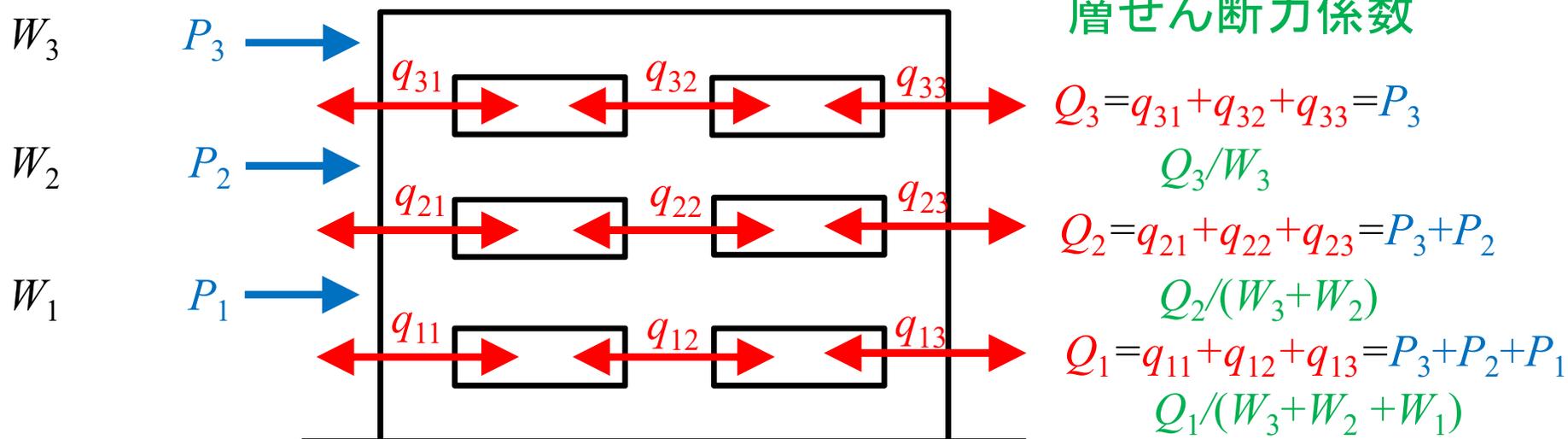
層せん断力と層間変形角

- **層せん断力**: 各層が負担する水平力の総和
- **層せん断力係数**: 各層が負担する水平力/支える重量

層重量 地震力

層せん断力

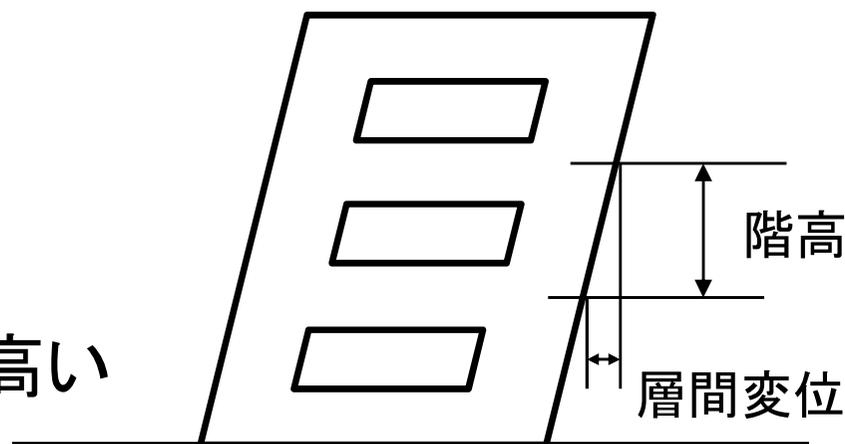
層せん断力係数



- **層間変形角 (無次元量)**

層間変位/階高

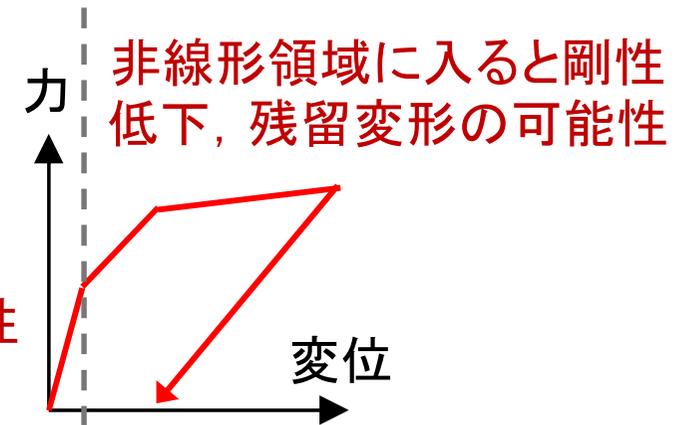
建物の損傷と相関性が高い



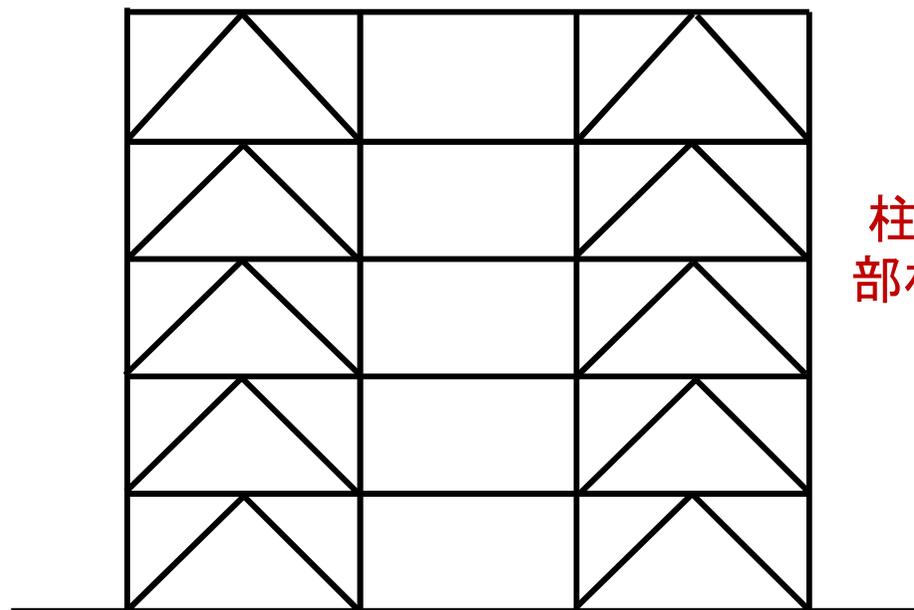
建物の揺れ方を知る基礎知識：振動解析モデル

- 重量, 剛性, 減衰
- 線形, 非線形
- フレームモデル, 質点系モデル
- 建物の運動方程式

$$M\ddot{x}(t) + C(t)\dot{x}(t) + K(t)x(t) = -MI\ddot{y}(t)$$

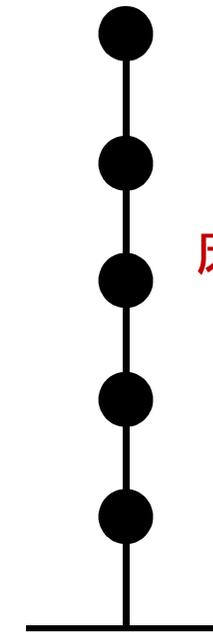


力と変位の関係



2次元フレームモデル

柱, 梁, 筋交, 壁を
部材ごとにモデル化



質点系モデル

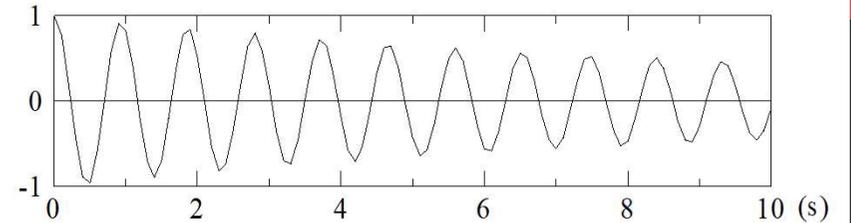
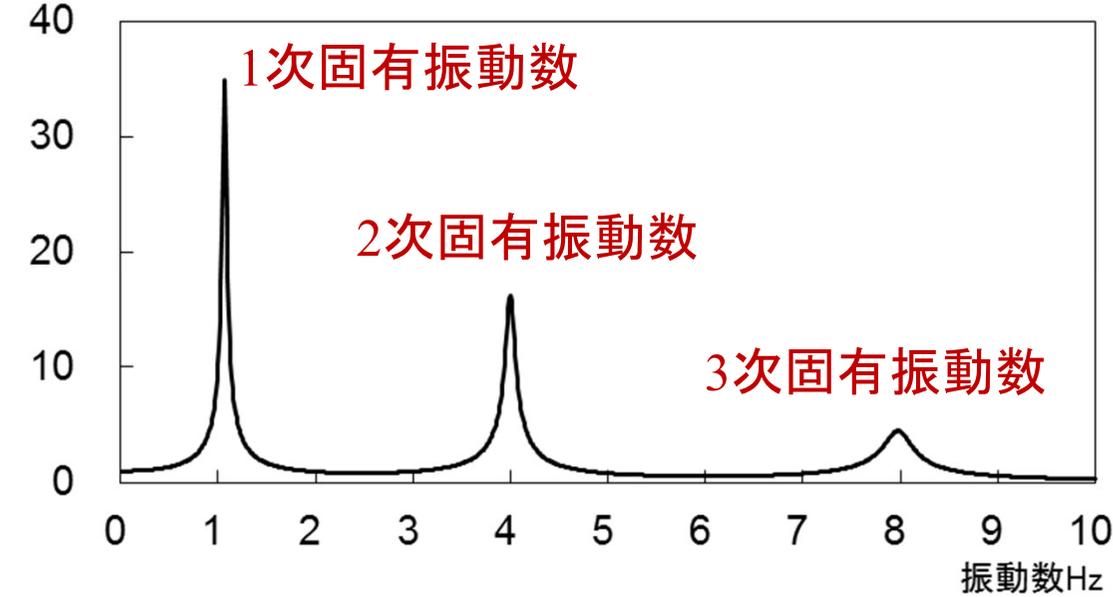
床位置に重量
を集約

建物固有の性質：固有モード

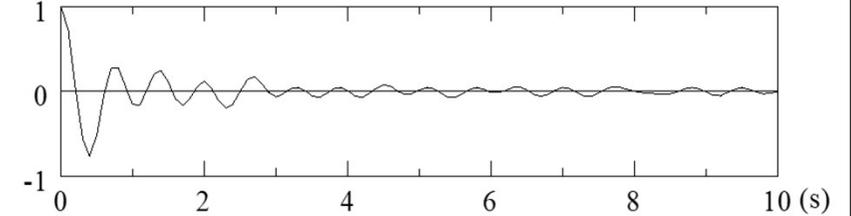
伝達率

固有振動数 逆数は固有周期

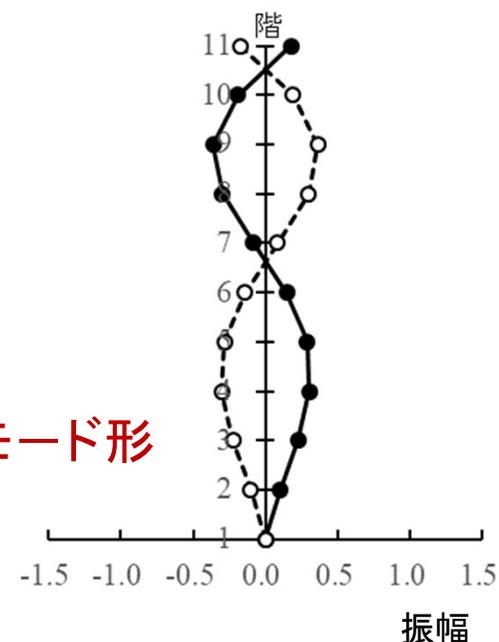
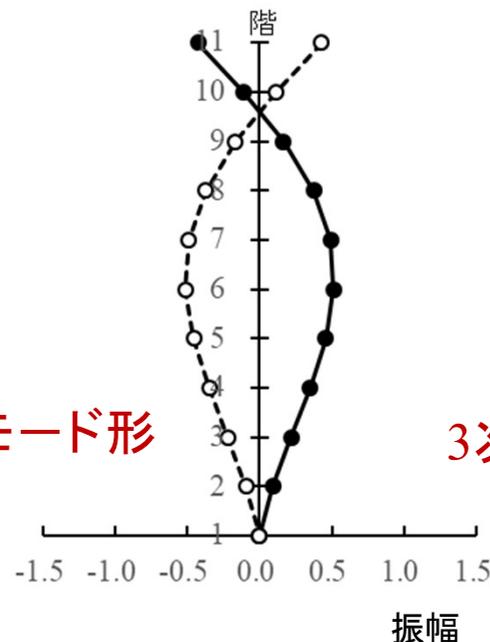
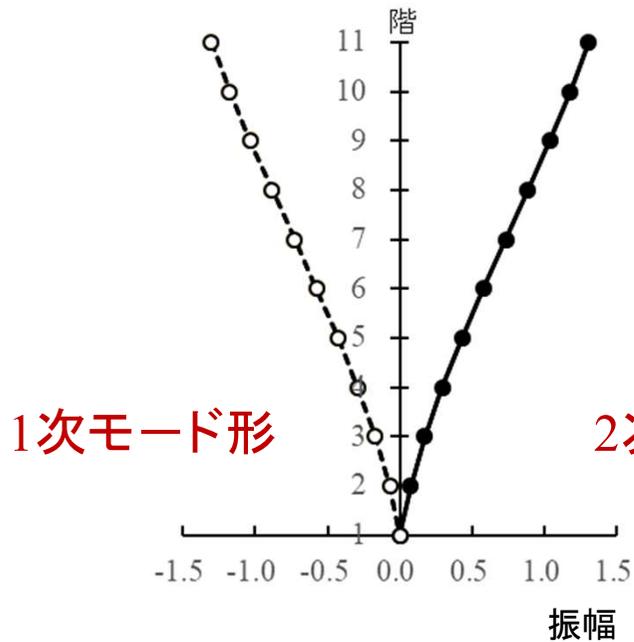
モード減衰



減衰が大きいと、揺れは早く収束

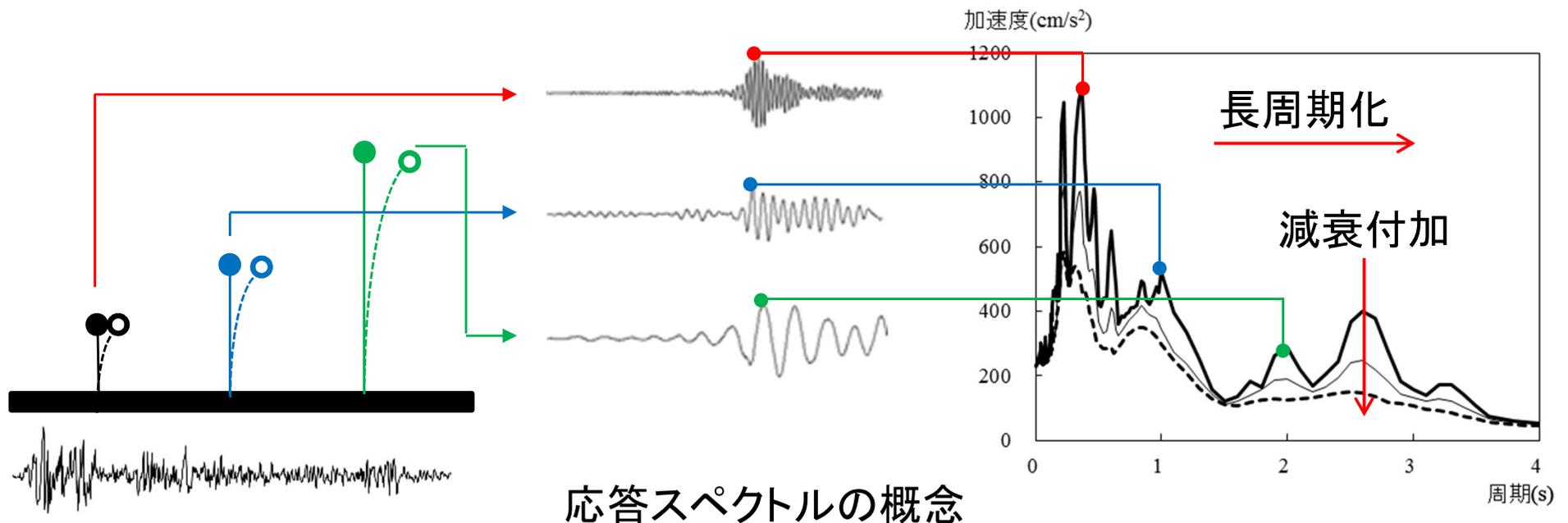


高次モードほど振幅は小さい



モード情報の重要性と応答スペクトル

- 建物の耐震性能を調べる基本情報
- 揺れは固有周期, 減衰, 位置(モード形)で異なる.
- 構造評定資料の概要に記載する重要情報
- 建物の地震被害の原因の1つに共振現象
- 大地震時に建物は非線形振動するが, レベルに応じた固有周期を考えると, 振動現象の理解が容易



「新」耐震設計法 1981年

- 日本の耐震規定に**振動論的な考え方**を導入
- 建物に**粘り強さ**を与えて、構造部材に部分的に損傷が生じても**倒壊を回避(=人命保護)**。兵庫県南部地震では、「新」耐震設計法の想定を超えて地表が揺れた地域もあったが、新耐震設計法による建物に大きな被害は少なく、**設計法は実証**
- 地震力の強さは原則2段階、最近は3段階も
 - **1次設計**: 建物の耐用年限中に数度は遭遇する程度の中地震に対して、建物の再使用を意図
 - **2次設計**: 耐用年限以内に一度遭遇するかもしれない程度の大地震に対して、終局耐震性の確認
- 建物の構造安全性の確認は**構造設計**作業。設計手順は建築基準法が提示。法律上は、建築主・設計者・施工者は「**最低基準**」を守れば差支えないが、**基準以上の質の建築物を創る努力**は必要。この法令は、建物の安全ならびに国民の生命・健康・財産の保護を「完全に」保証しない。

建物の耐震診断

- 兵庫県南部地震は「**新**」耐震設計法の妥当性を検証したが、「**旧**」耐震設計法で設計された**既存不適格建物**が多数存在
- **耐震診断**は既存建物の耐震安全性を調査し、想定した地震による建物被害を推定
- 現在の知見で評価すると、**強度と靱性が不足**して大地震時に倒壊する可能性の建物あり。耐震性が低い建物を継続使用するためには、適切な**耐震補強**が必要
- 新耐震設計法による建物であっても、経年劣化などから耐震診断を受けることあり
- 建物の種類（鉄筋コンクリート造，鉄骨造，木造）や診断精度に応じて種々の評価法

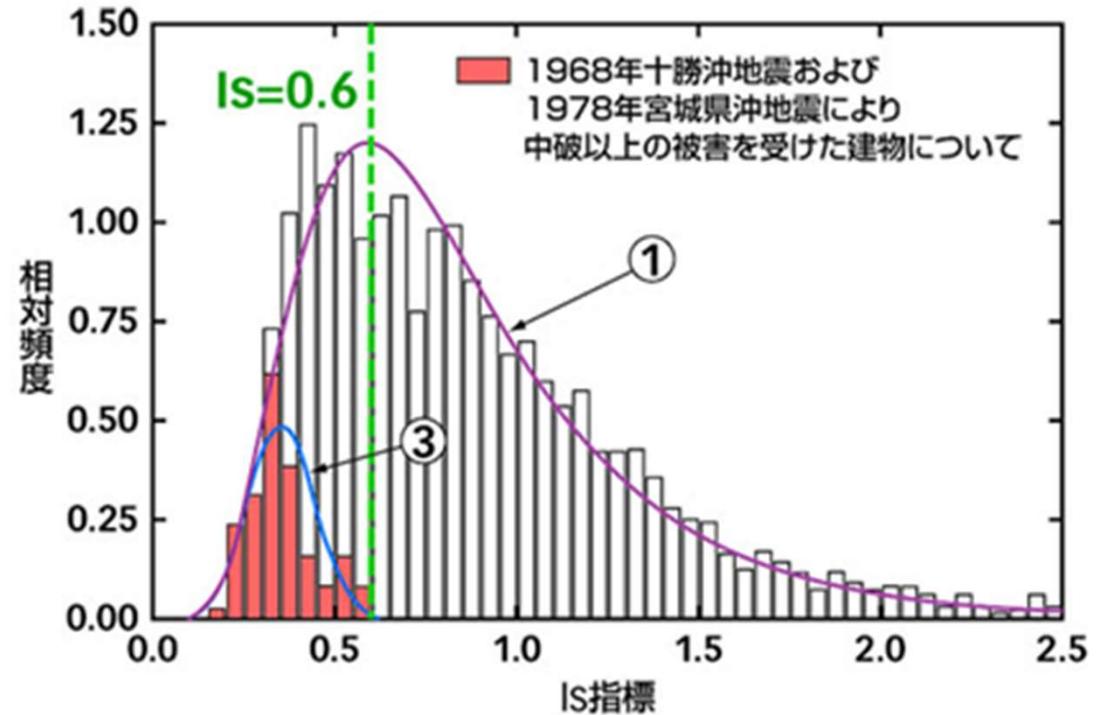
鉄筋コンクリート系建物の耐震診断

- **1次診断**: 壁式鉄筋コンクリート造など壁が多い建物を対象とした簡便な方法. **各階の柱と壁の断面積とその階が支えている重量から診断**. 設計図面が残っていれば、現地調査は不要. 補強設計を的確に行うことは不可能で、耐震補強を行う可能性がある建物には推奨されない.
- **2次診断**: 主に柱や壁の破壊で耐震性能が決まる建物を対象. **各階の柱と壁のコンクリートと鉄筋の寸法から終局耐力を計算して、その階が支えている建物重量と比較**. コンクリートの圧縮強度や中性化などの試験, ひび割れ・漏水・鉄筋錆・コンクリート爆裂といった建物の劣化状態の調査が必要. 1次診断より信頼性は高く, **学校・庁舎といった公共建築物で多用**. **2次診断結果から耐震補強を提案**
- **3次診断**: 主に梁の破壊や壁の回転で耐震性能が決まる建物を対象. 2次診断の柱と壁に加えて**梁も考慮**. **現行の建築基準法と同程度のレベル**で建物の終局耐力を評価

建物の耐震指標 IS 値

- ① 被害地震を未経験の建物
- ③ 1968年十勝沖地震および1978年宮城県沖地震で中破以上の被害を受けた建物群

IS 値が0.6以上の場合、中破以上の被害を受けていない。



■ Seismic Index of Structure

- 強度と靱性
- 建物形状
- 経年変化

| 被害 | ランク | 軽微 | 小破 | 中破 | 大破 | 倒壊 |
|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|------------|---------------|
| | 状況 | | | | | |
| RC造 SRC造 | | 二次壁の損傷もほとんど無い | 二次壁にせん断ひび割れ | 柱・耐震壁にせん断ひび割れ | 柱の鉄筋が露出・座屈 | 建物の一部または全体が倒壊 |
| 地震規模 | 中地震 震度5強程度 | IS=0.6 | | | | |
| | 大地震 震度6強以上 | IS=0.6 | | | | |

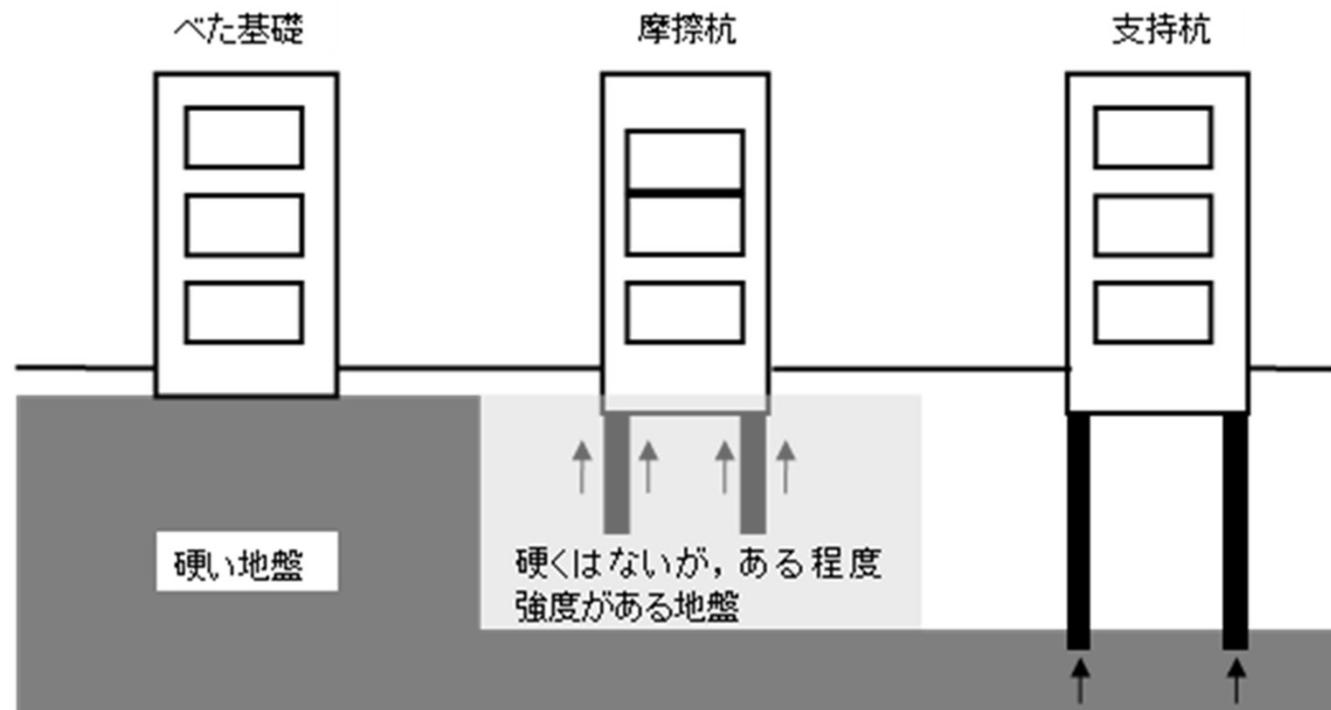
既存建物の耐震補強

- 耐震診断の結果，一つの階のある水平方向だけが耐震性が不足していても，基本的には耐震補強は必要
- 耐震部材の高さ方向や平面的なバランス良い配置は耐震補強でも重視．耐震性が不足していた層や方向に補強部材を配置するだけで，補強工事が終わらない可能性あり
- 建物を使用しながら工事を進めることが多く，都市部の建物過密地域では選択できる施工法に制約
- 効果の大きい補強部材を配置して，補強部材数を減らすことが原則．施工が難しいために効果が小さい部材を多数用いる場合あり
- ダンパなどの機械的要素を利用した耐震補強は制震補強とも．免震改修は建物基礎部の工事となるため大掛かり
- 水平力に対する建物耐力を増すために，耐震壁・筋交の追加や柱の補強が一般的．付随して梁の補強も必要の可能性あり

耐震対策 地盤と基礎

- 建物の耐震対策では、地盤調査がまず重要
- 「砂上の楼閣」は、見かけは立派そうな事がしっかりしていない基礎のために壊れ易い例え
- 地盤調査に基づいて建物と地盤に相応しい基礎構造を選択することは、建物の耐震性を向上させる最初の手順
- 建物完成後の地盤改良や基礎構造の補強は大変面倒で、多大な工事費

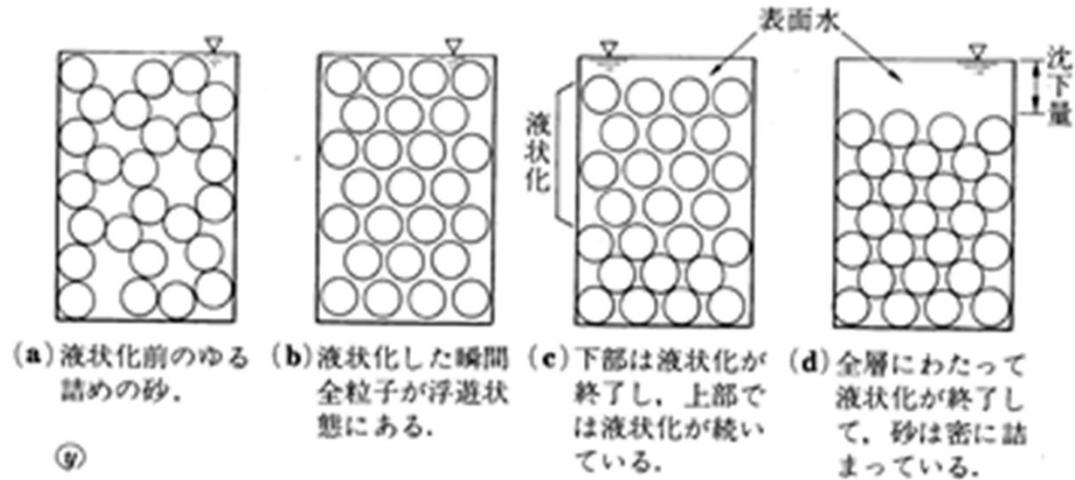
基礎の種類



地盤の液状化

- 地下水位が高く、緩い堆積した砂や砂質土で比較的大きな地震時に観察。三角州、湾岸地域の埋立地、旧河川や池の跡地、水田跡などで発生
- 1964年新潟地震で、新潟市内で落橋、RC造建物の転倒、下水管などの地中埋設物の浮き上がりを確認。その後は多数
- 東北地方太平洋沖地震後の被害調査では、液状化が同じ場所で繰り返し起きていることや、地表面の加速度がそれほど大きくななくても、揺れの時間が長いと生じ易いことを確認
- 一方、液状化対策を施していた地盤の被害が少ない。近接する埋立地でも埋立年代、埋土の種類、埋立方法によって被害に大きな違い。精度が高い液状化判定法の研究を推進
- 海辺や河口付近で発展した日本の大都市では、液状化による震害が懸念。液状化の発生危険箇所をとりまとめたハザードマップも公表されている。

地盤の液状化 原理と被害例



砂の液状化の発生から終了までの過程

吉見吉昭: 砂地盤の液状化(第2版)、技報堂出版、1991年



基礎の補強工法の例

■ 工事の大変さを認識. 各工法に一長一短あり

| 基礎の耐震補強工法 | | 建物外周部に直杭を増設 | 建物外周部に斜杭を増設 | 建物下に格子状地盤改良体を施工 | 建物外周部にRC連続壁を施工 | 建物下に免震装置を設置 |
|-----------|----------|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|
| 平面 | | | | | | |
| 断面 | | | | | | |
| 液状化層 | | | | | | |
| 非液状化層 | | | | | | |
| 支持層 | | | | | | |
| 補強効果 | 地震入力低減 | △ | △ | △ | △ | ◎ |
| | 耐力・靱性向上 | ◎ | ◎ | ○ | ◎ | △ |
| | 液状化への抵抗 | △ | ○ | ◎ | ◎ | △ |
| | 側方流動への抵抗 | △ | △ | ◎ | ◎ | △ |
| 層ながらでの補強 | | ◎ | ◎ | △ | ○ | ◎ |
| 工期 | | ◎ | ◎ | △ | △ | △ |

◎：効果大、適当 ○：効果有り、可能 △：効果小、困難

設計地震力の地盤種別依存性

- 設計時に地上部各層に作用させる地震力は、各層が支える重量に層せん断力係数 C_i を掛ける(建築基準法)。

$$C_i = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0$$

Z : 地震地域係数(0.7~1.0)

R_t : 振動特性係数. 弾性時の1次固有周期と地盤の種類に依存

A_i : 振動特性に応じた層せん断力係数の高さ方向分布係数(1.0以上)

C_0 : 標準せん断力係数

(1次設計0.2以上、2次設計1.0)

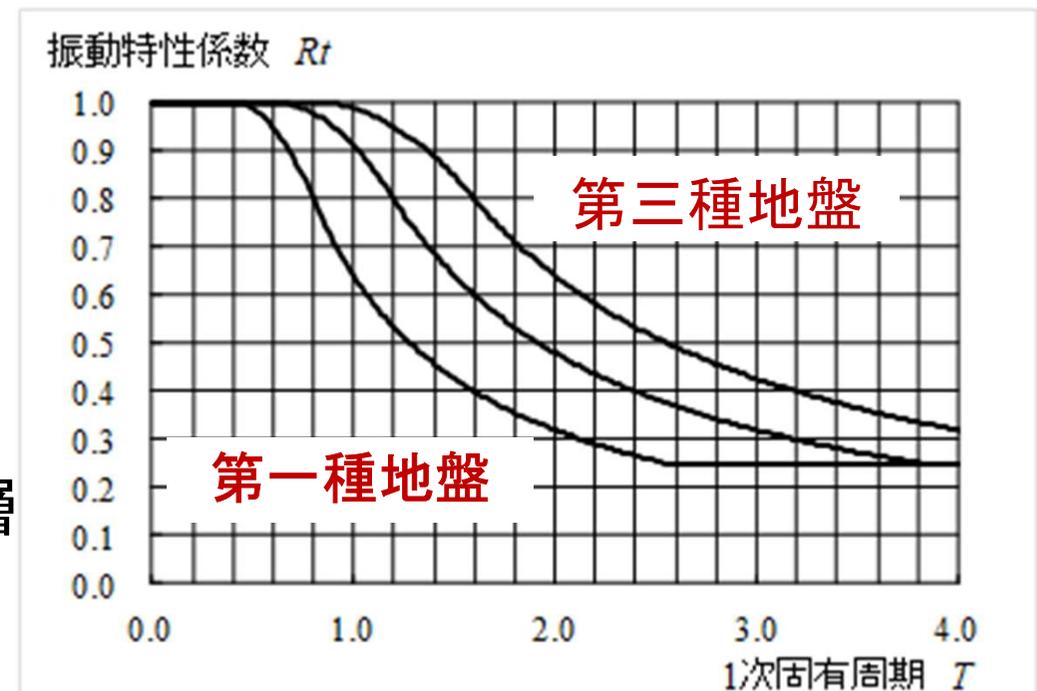
第一種地盤

岩盤, 硬質砂礫層, 第三紀

(6430~260万年前)以前の地層

第三種地盤

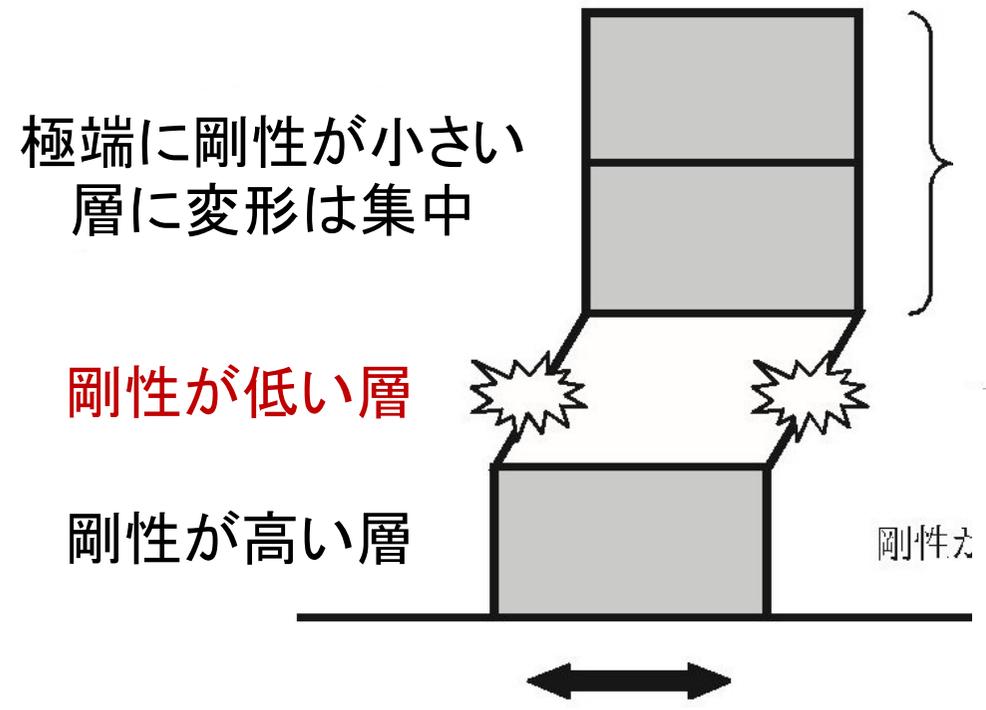
腐植土, 泥土, 沖積層



構造部材の耐震対策

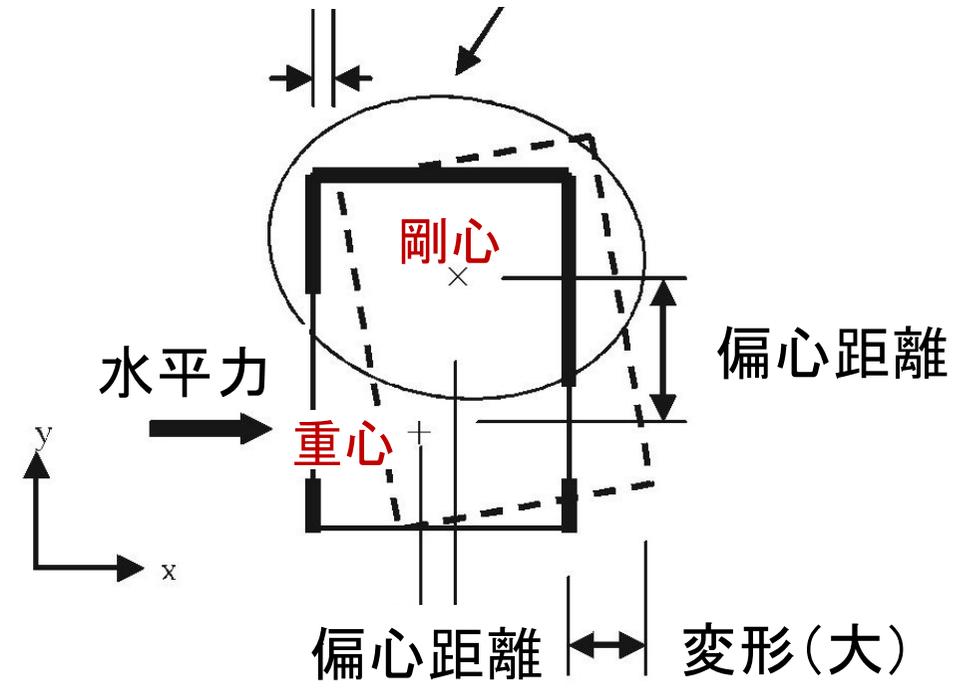
- 水平力に抵抗する主要部材は、柱・梁・壁・筋交・方づえ。総称して耐震要素。もちろん強風にも抵抗
- 機械的要素であるが、免震・制震で利用される各種ダンパーも同様の役割
- 耐震性の向上には、地盤と基礎がしっかりしていることがまず重要。次に耐震要素の補強や追加
- 部材の大きさや形状、部材の量、部材の配置バランスを総合的に考慮。部材相互の接合方法、ダンパーの接合方法、上部構造部材と基礎構造との繋がりも重要
- 構造部材やダンパーは、単独ではなく骨組・架構として水平力に対抗するので、接合方法が適切な場合に各部材が一体となって機能

剛性の適切な分布で建物耐震性が向上



中央区三宮町「神戸交通センタビル近く(写真提供:神戸市)

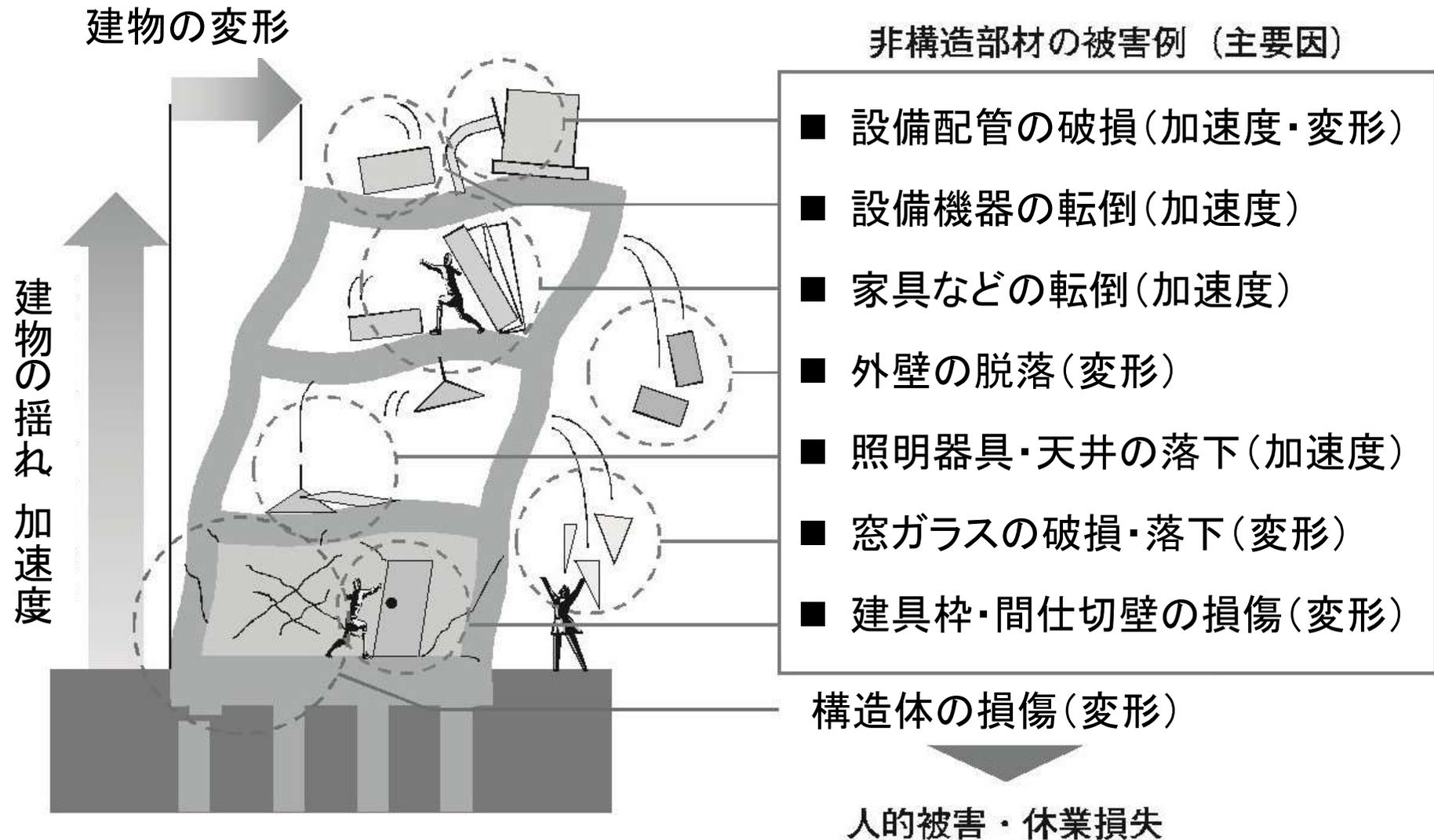
変形(小) 壁の偏り



中央区磯上通り5丁目付近(写真提供:神戸市)

ねじれ振動

非構造部材の耐震対策



建物の被害は構造体だけではない

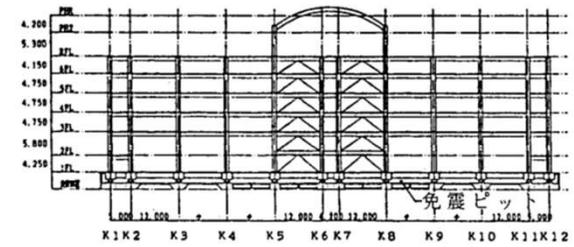
建物の構造設計の4段階

1. **鉛直荷重**(自重・積載荷重)に抵抗
2. **水平荷重**(地震・風)に**耐震・耐風構造**で抵抗
 - **静的設計法と動的設計法**
 - **柔剛論争**: 建物を硬くして変形を抑える**剛構造**の考えと, 柔らかくして地震との共振を避けて揺れを抑える**柔構造**の考えの対立 ⇒ 剛構造・柔構造ではなく, 建物が変形して破壊までに蓄える**ポテンシャルエネルギーが重要**(棚橋1935) ⇒ 免震・制震(振)
3. 耐震・耐風構造に**装置を付与**して抵抗
 - 免震, パッシブ制御, セミアクティブ制御, アクティブ制御
4. 建物ー装置**全体系の最適化**
 - 免震, パッシブ制御, セミアクティブ制御
 - 地震の不確定性が高いので**最適化には限界**. **でも建物側で対処する必要あり** ⇒ ロバスト性, 冗長性の考慮

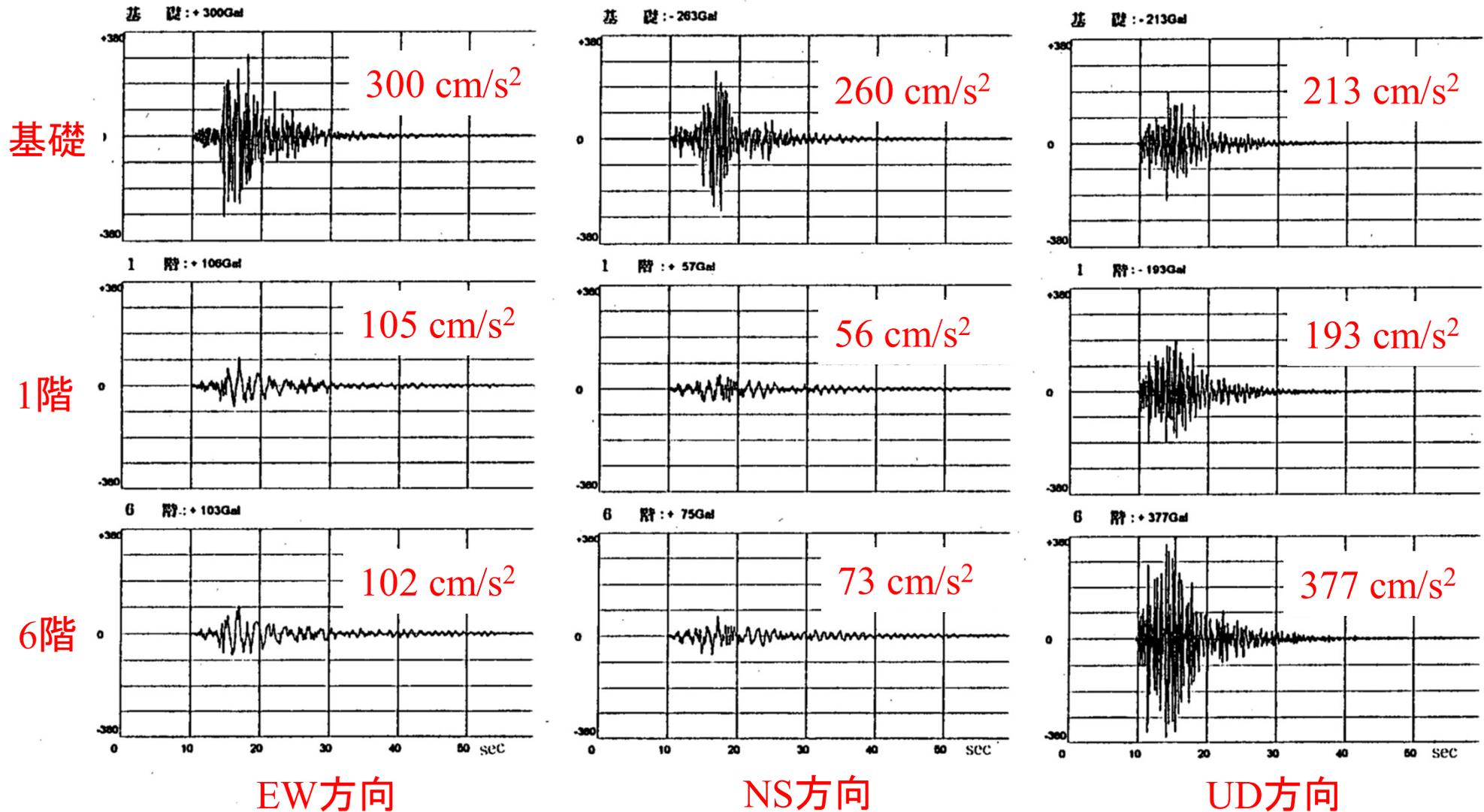
免震・制震(振)普及の背景

- 1995年兵庫県南部地震による近代都市の被害
 - 建物が損傷を受けても、倒壊せずに人命を守るという耐震の限界。人命を守れても機能低下 ⇒ 結局は取り壊し
 - 高度情報化社会の要請 ⇒ 建物の継続使用
 - 免震効果の確認 ⇒ 郵政省WESTビル
- 建物の高機能化 ⇒ 大地震後の継続使用, 居住性の向上
- 性能が信頼できる装置の出現
 - 積層ゴム, ダンパなど機械分野との協力
- 耐震研究の知見の新たな展開=進歩
 - 変形能力の確保 ⇒ エネルギー吸収能力の向上
 - 1981年施行の「新」耐震設計法の地震による実証
 - 耐震と明確に区別できないパッシブ制震(振)は多数
- 1990年代以降の情報関連技術の発達
 - 特にアクティブ・セミアクティブ制御の振動計測
- ライフサイクルコストの考え ⇒ 免震・制震(振)
- 入力地震動の不確定性 ⇒ 建物側で対処

兵庫県南部地震時の郵政省 WESTビルの免震効果



断面図



免震・制震に対する地震後の事務所建物 テナントの意識調査

- 日経不動産マーケット情報「3.11以降の事務所建物テナントのニーズ」, 日経BP社, 2012.8(2011.4-5に実施)
- 東京都内の延床10,000m²以上の事務所
- 有効回答数315社／調査票送付4516社
- 回答建物数は225
- 地震後に重視する建物選びの視点
 1. 免震・制震といった高い防災性能 83%
 2. 新耐震(1981)以降の設計 62%
 3. 非常用電源58%
 4. 非常用備蓄35%, エネルギーコスト32%

免震技術とは？ 免震構造の考え方

■ 鉛直支持能力

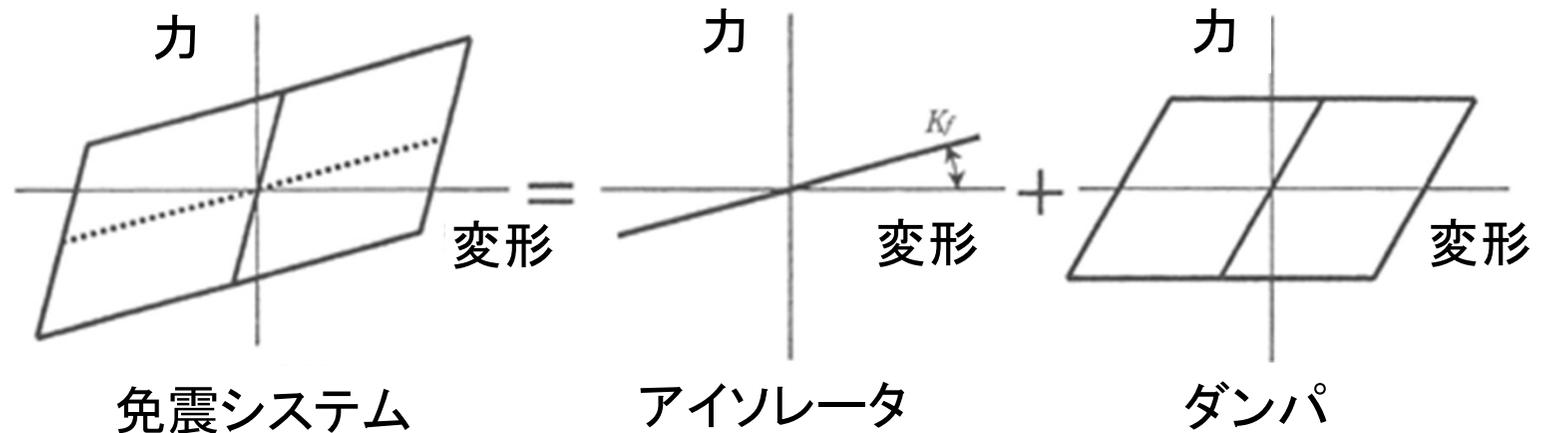
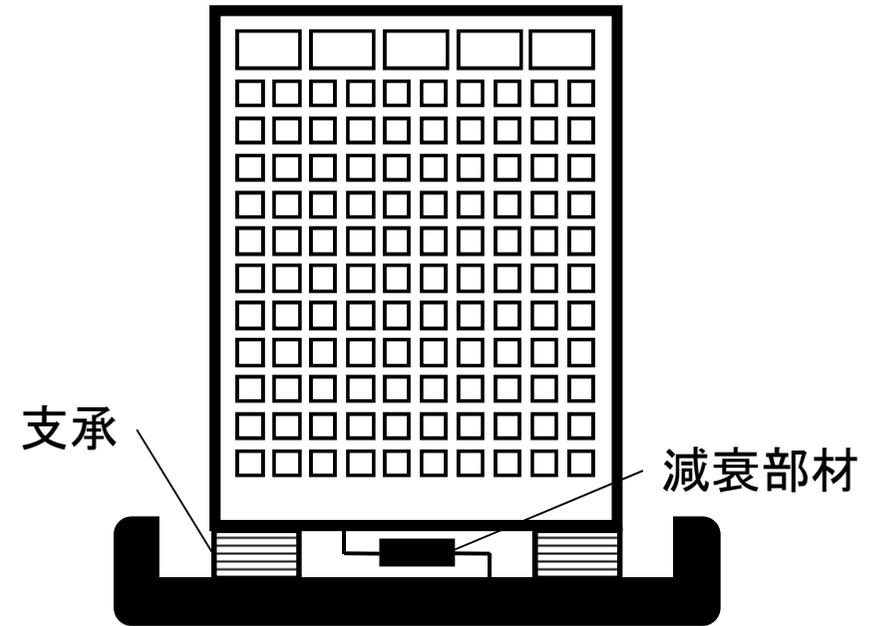
長期間の荷重支持

■ 水平変形能力

- 変動軸力に対する安定性
- 限界変形能力
- 面圧・速度・ひずみ依存性の評価

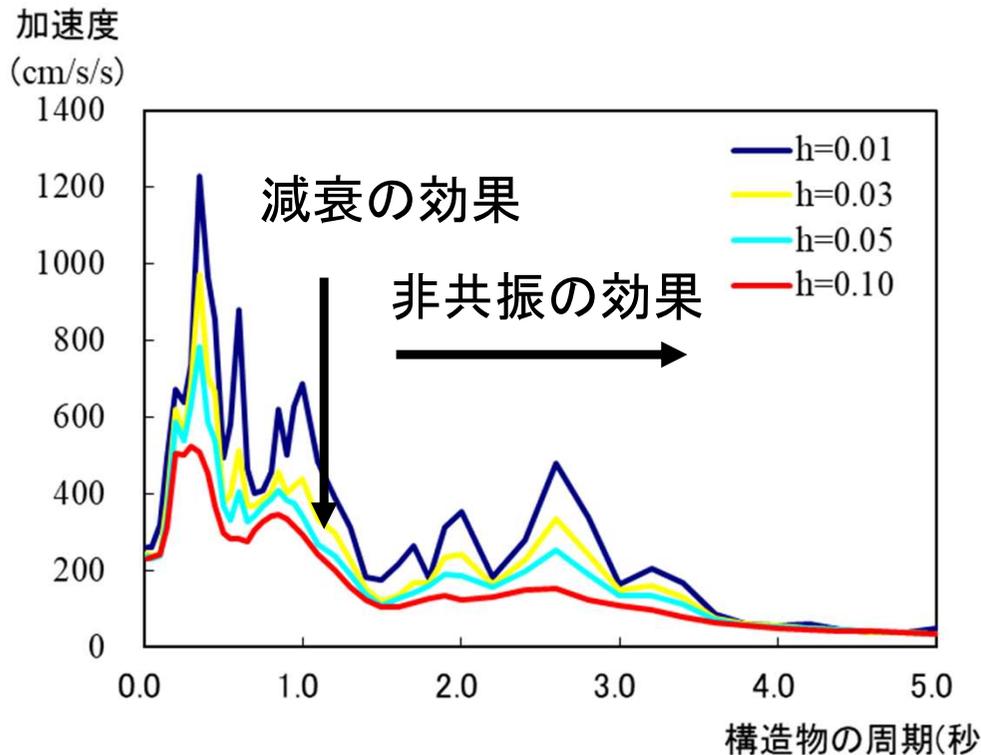
■ 復元能力

■ 耐久性

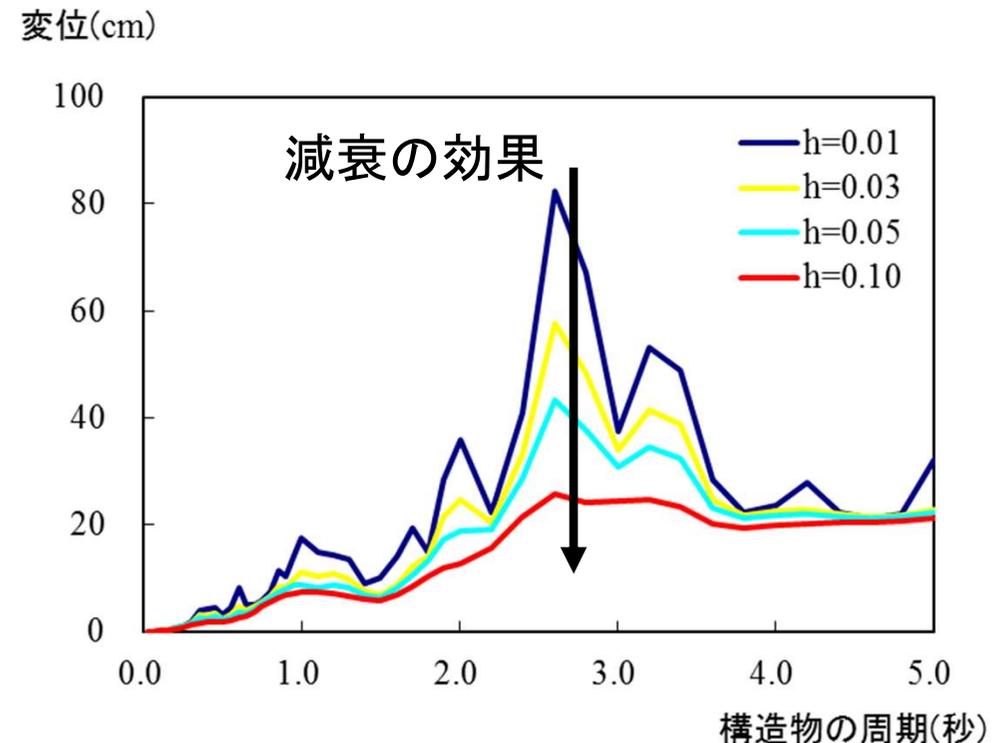


免震の原理：減衰と非共振の効果

- 建物近傍で起きる地震では，加速度で効果は大きい
- 免震層の変形は大きい，上部構造物の変形は小さい
- 免震層を揺らして，集中的にダンパでエネルギーを吸収する



加速度応答スペクトル



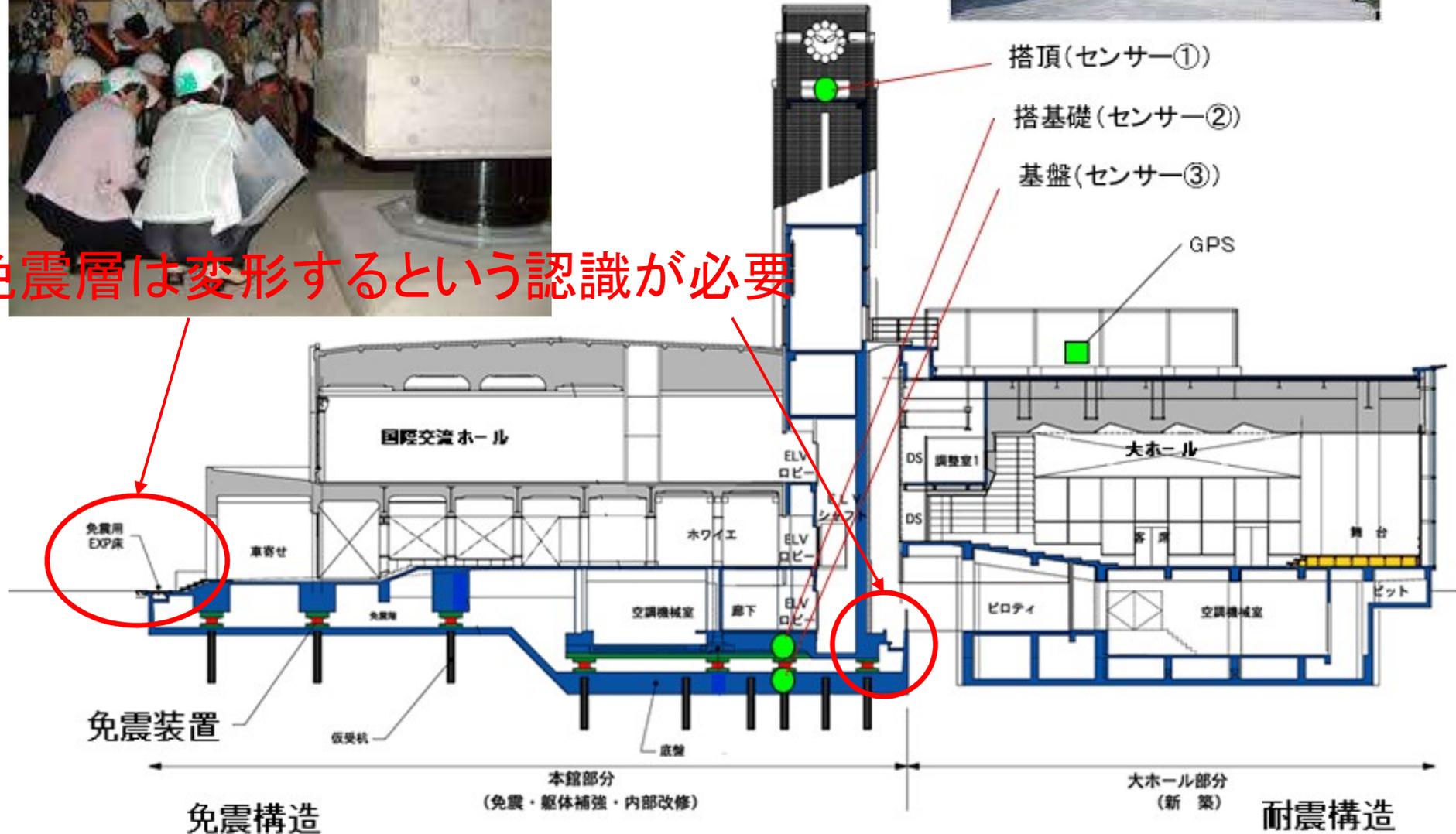
変位応答スペクトル

Hachinohe (NS) 1968.5.18

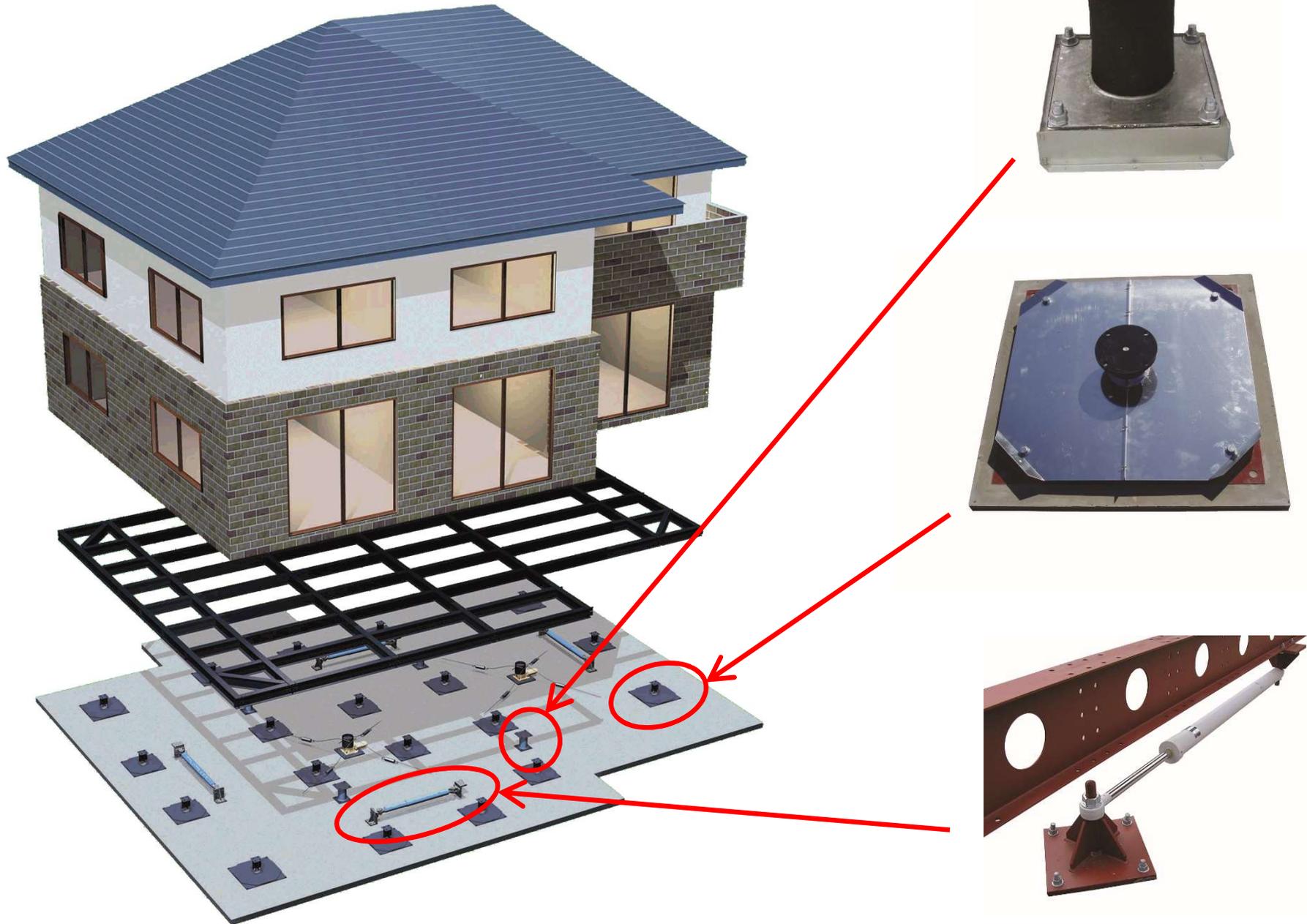
免震改修の例 京都大学 百周年時計台記念館



免震層は変形するという認識が必要

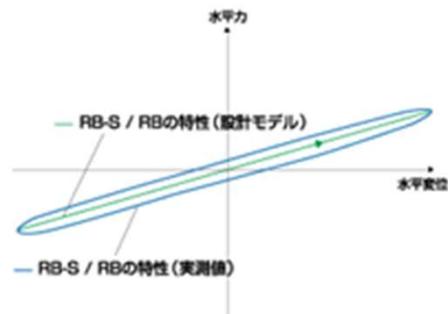
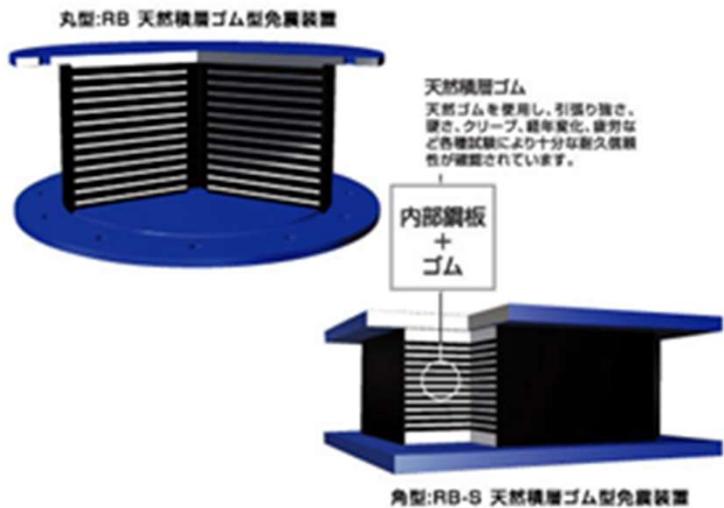


戸建て住宅の免震構造の例



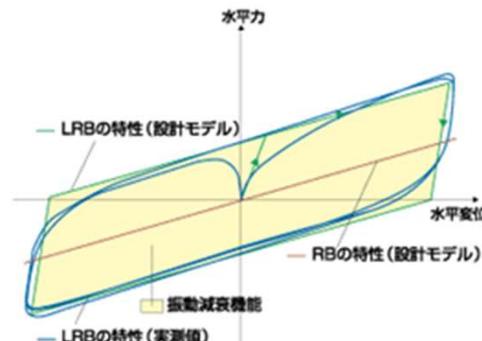
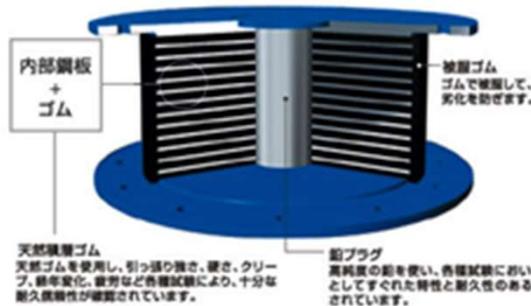
免震システムの分類

- **機能分離型** 天然ゴム系積層ゴム＋鋼棒・鉛ダンパ
- **機能複合型** 鉛プラグ挿入型積層ゴム, 高減衰ゴム系積層ゴム
- **アイソレータ混用型** 鉛プラグ型＋高減衰ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承
積層ゴム＋転がり支承＋ダンパ など

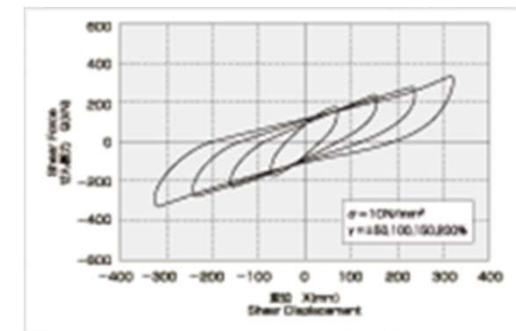
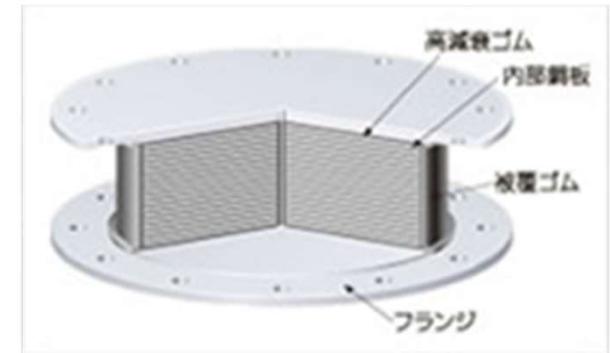


天然ゴム系

(オйлレス工業)



鉛プラグ挿入型



高減衰ゴム系

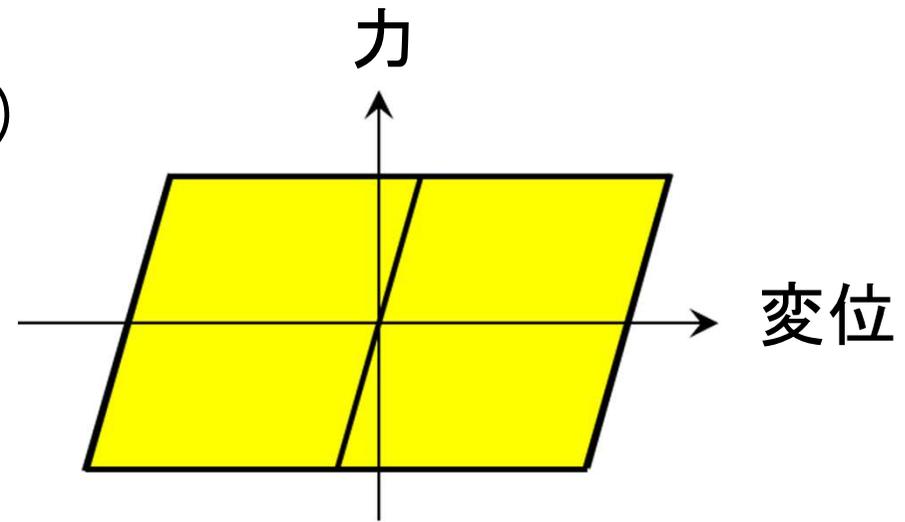
(ブリヂストン)

ダンパの分類

■ 履歴減衰型 (変位型)

弾塑性型

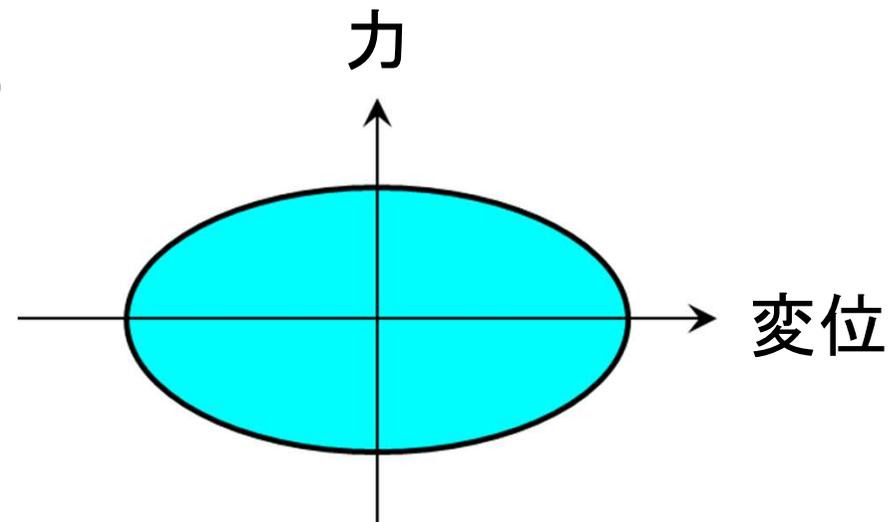
摩擦型



■ 粘性減衰型 (速度型)

粘弾性型

オイルダンパ



ダンパの種類

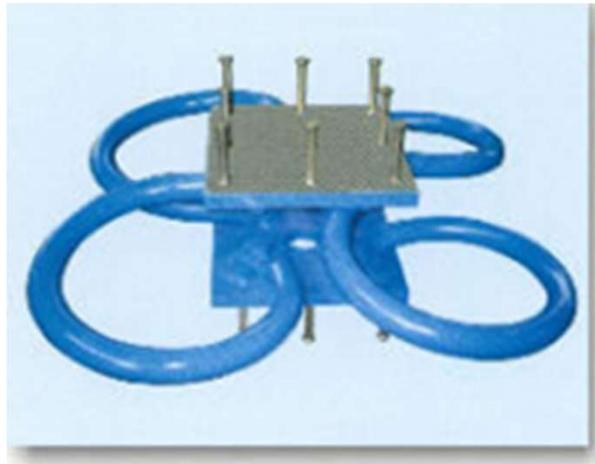
- アイソレータ機能複合型
 - 鉛プラグ挿入型積層ゴム
 - 高減衰ゴム系積層ゴム
 - 滑り支承 など
- 機能分離型
 - 鉛ダンパ
 - 鋼材ダンパ
 - オイルダンパ など

荷重支持機能は
要求されない



鉛ダンパ

(住友金属鉱山シポレックス)



鋼材ダンパ

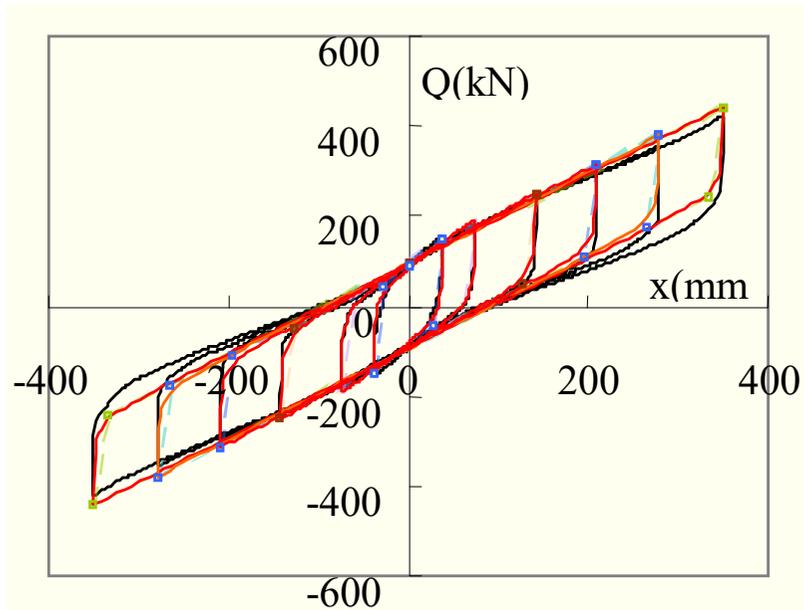
(巴コーポレーション)



オイルダンパ

(日立オートモティブシステムズ)

鉛プラグ挿入型積層ゴムのモデル例



鉛プラグ挿入型積層ゴム
直径 $\phi 700$ 鉛径 $\phi 120$

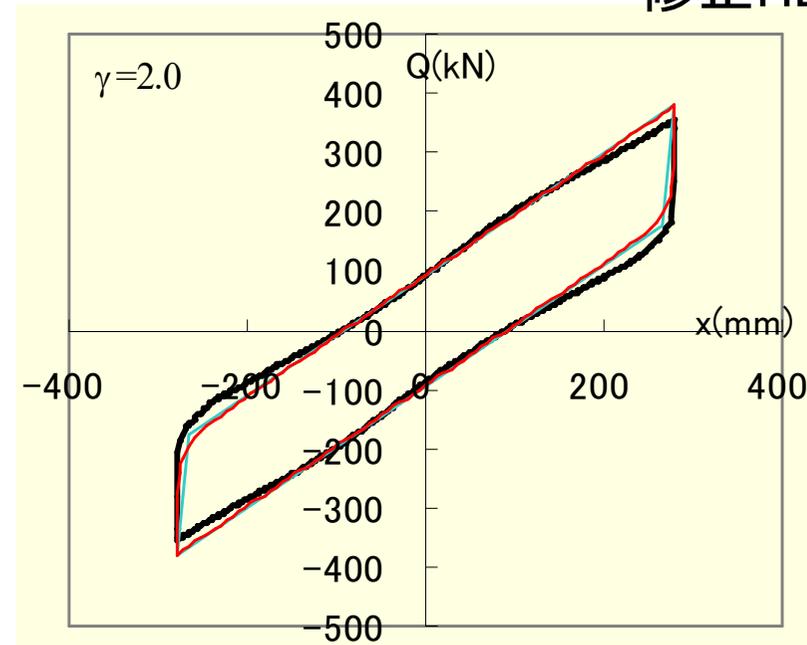
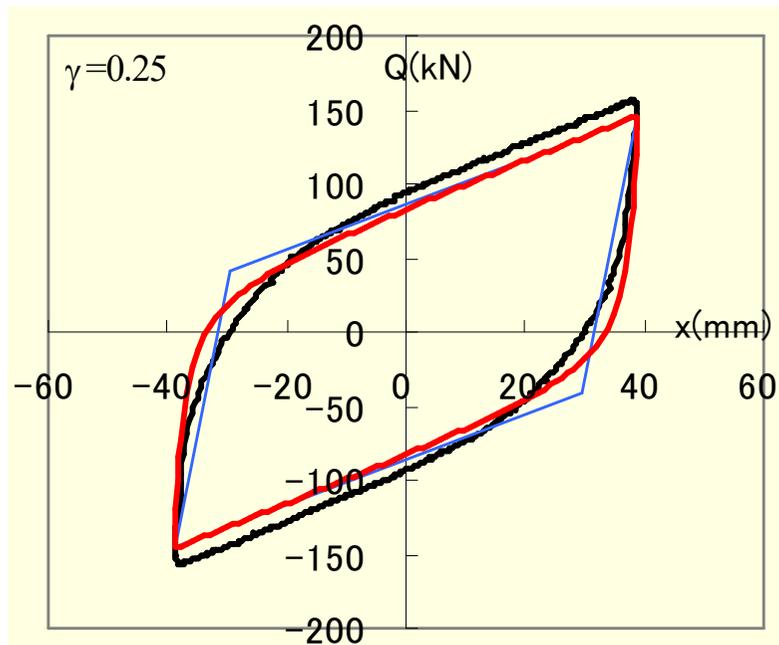
ゴムG4

ゴム総厚さ137.2mm

$S1=34.7$ $S2=5.1$

凡例

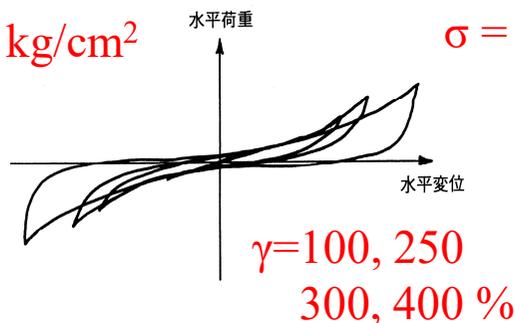
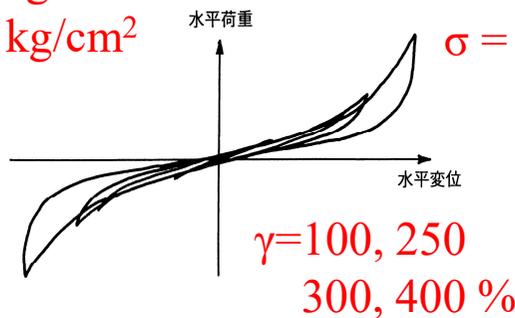
- 積層ゴム実験結果
- 修正Bilinearモデル
- 修正HDモデル



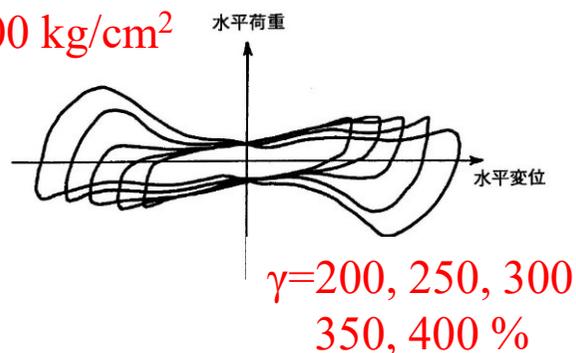
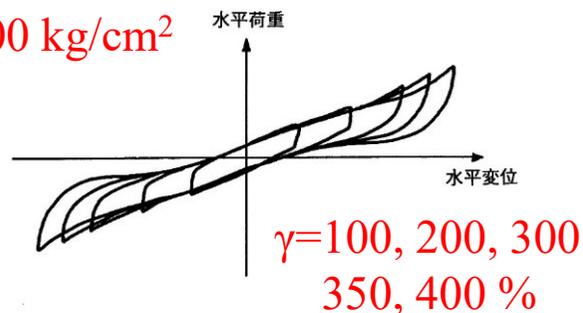
装置・部材の性能が安定している領域で使用

- 実際の物は、材質の経年劣化、環境の違い、想定外の地震など **不確実性を含んだ状況** で使われる。それらの事象を想定して設計を行うが、**全てのことを考慮できない**。
- 実際にはある程度の余裕をもって設計 ⇒ **安全率, 余裕度**

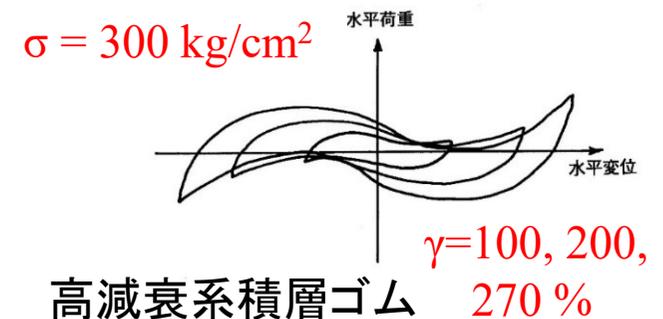
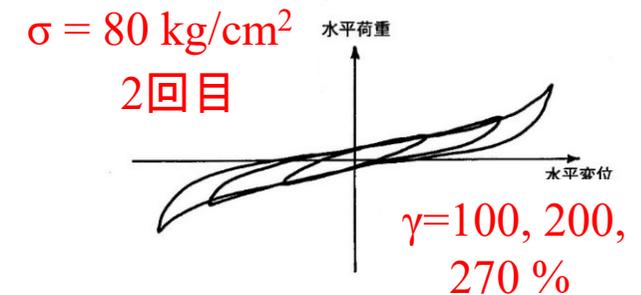
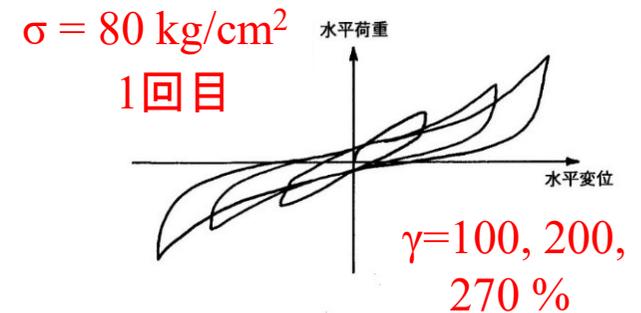
$\sigma = 100 \text{ kg/cm}^2$
 150 kg/cm^2



天然ゴム系積層ゴム

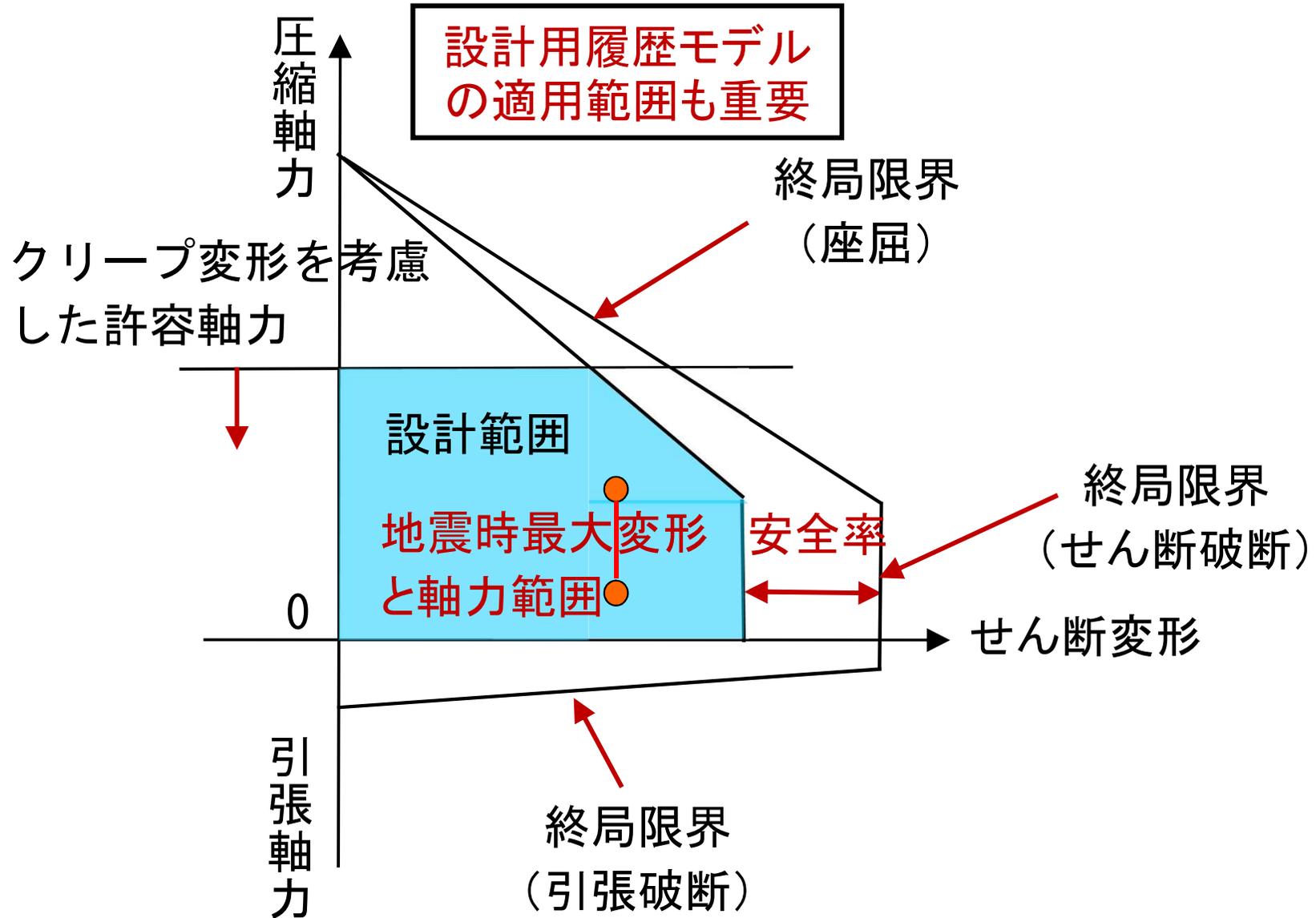


鉛プラグ挿入型積層ゴム



高減衰系積層ゴム

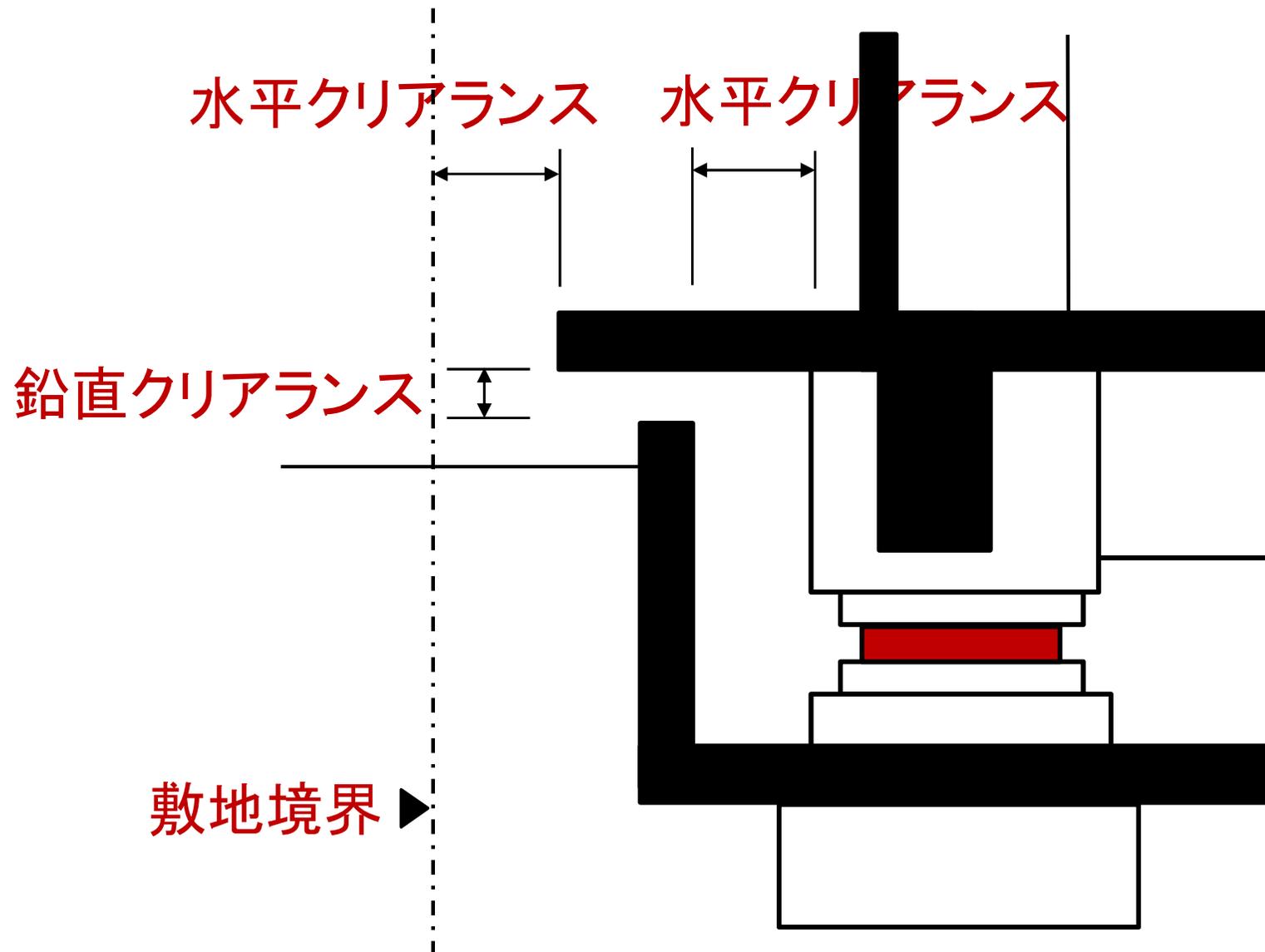
積層ゴム支承の設計範囲



免震建物の設計＝免震層の設計

- **免震層の設計**. 建物の検討は従来通り
 - **免震クリアランスの確保** 水平50～80cm, 鉛直5cm程度
 - **上部構造全体重心と免震層剛性中心の一致**
偏心率で2～3%以下が目安
弾塑性特性の異なる免震装置併用の場合に注意
 - **免震層通過配管**, エレベータ, 階段の対処
 - 免震層の有効利用, 耐火被覆など
 - 維持管理**点検スペース**, 装置取替え法
- 基本的には**動的設計**
⇒ 免震層の復元力特性を設定して, 時刻歴応答解析
- 復元力特性は **面圧とせん断歪に依存**
- **基準値を求めた条件(実験)と設計の対応**
- **特性が大きく変動しない領域での設計が前提**
- 耐久性の検討(酸化反応, クリープ変形)

免震層のクリアランス

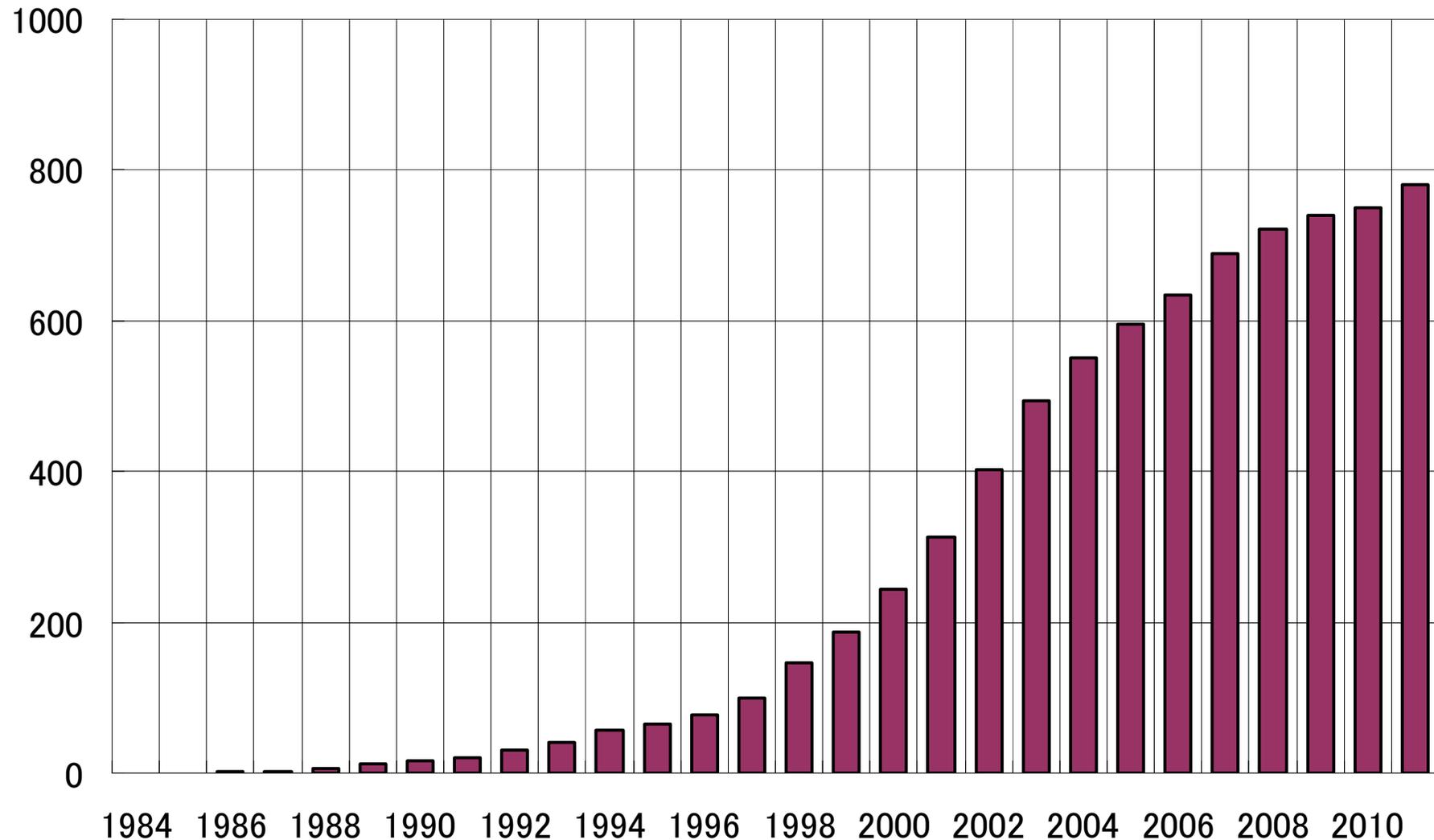


長周期地震動で擁壁への衝突の可能性あり

免震装置の維持管理計画

- 通常点検(建物管理者が実施)
 - 半年に1回
 - 免震装置目視, 免震層周辺見回り
 - 定期点検(専門技術者)
 - 竣工時, 2年後, 5, 10, 20, ...年後
 - 免震装置詳細点検, クリープ変形・残留変形測定
 - 臨時点検(専門技術者)
 - 震度5弱以上の地震, 暴風時, 冠水時, 火災時
 - 点検項目は定期点検と同じ
- 免震装置に限らず, すべての物には**維持管理**が必要
 - 維持管理を継続することは, 物に関心があること
 - ⇒ **結果的に防災につながる.**

制震(振)建物の累積数の推移 (1986-2011.2)

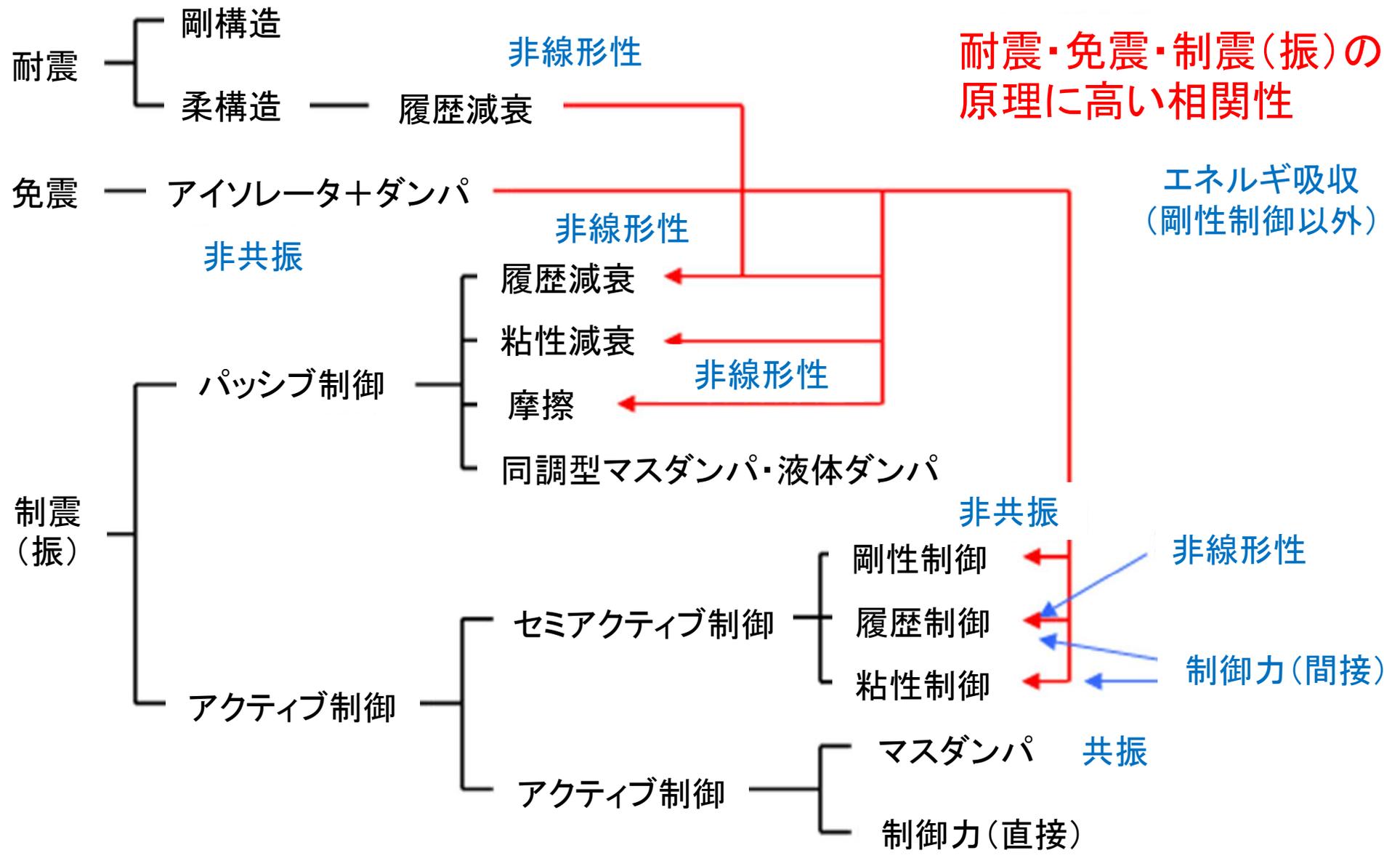


池田芳樹:耐震と免震, 制震(その2)制震構造の立場から, AIJシンポジウム「阪神・淡路大震災を振り返り, 来る大地震に備えるー建築振動研究に課せられたものー」, 2011.3.7

制震(振)技術の30年間を振り返ると

- 1980年代に研究開発が本格化
- 1990年代に適用が本格化
- 適用例が1995年兵庫県南部地震以降に急増
- 鉄骨造, 特に中高層建物の標準的構造技術に成長. 鉄骨造建物は制震(振)との相性良し
- 木造戸建住宅への適用も増加
- 制御機構によっては設計法が確立
- 基本的な制御方法は出揃った印象
- 常に免震と比較されるが, 効果の表現に難しさ
- 日本の強みは先進技術をすぐに適用すること. 普及が進み, もはや先進ではない

耐震・免震・制震(振)と振動制御の基本策



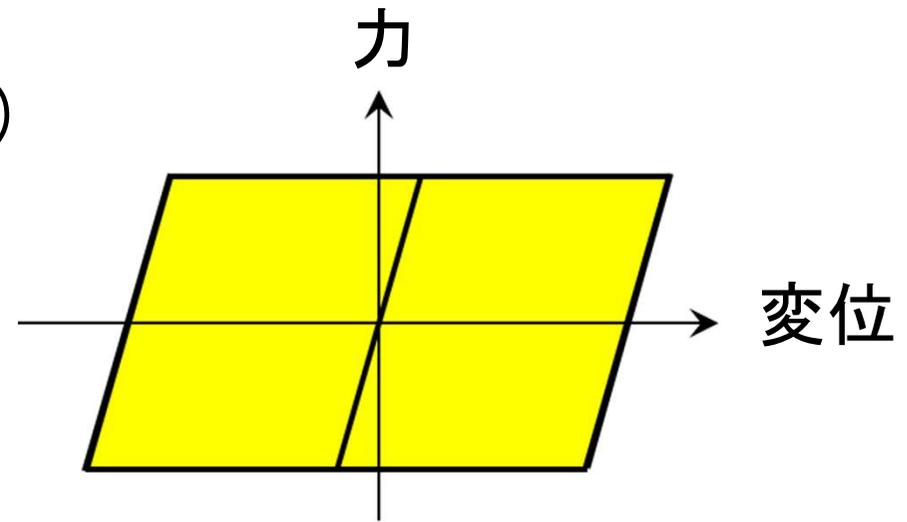
■ 装置や材料に基づく分類もある(鋼材ダンパ, オイルダンパなど)

ダンパの分類

■ 履歴減衰型 (変位型)

弾塑性型

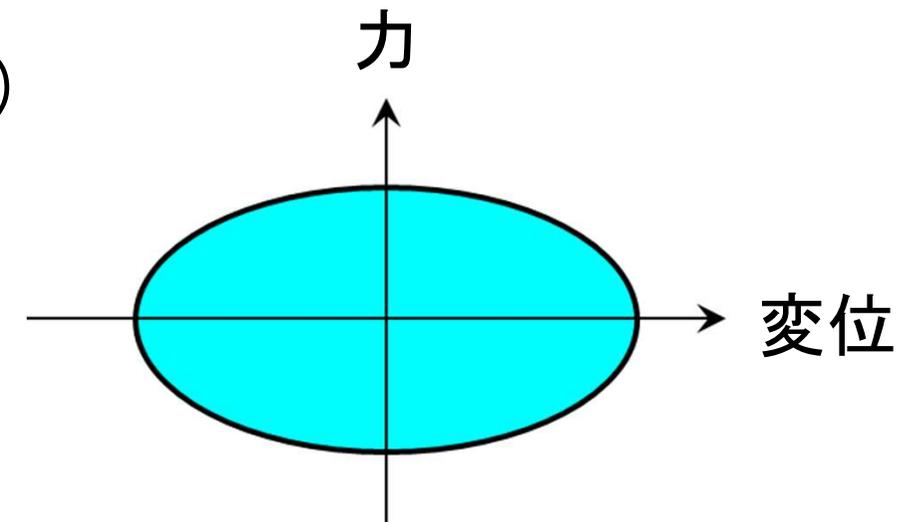
摩擦型



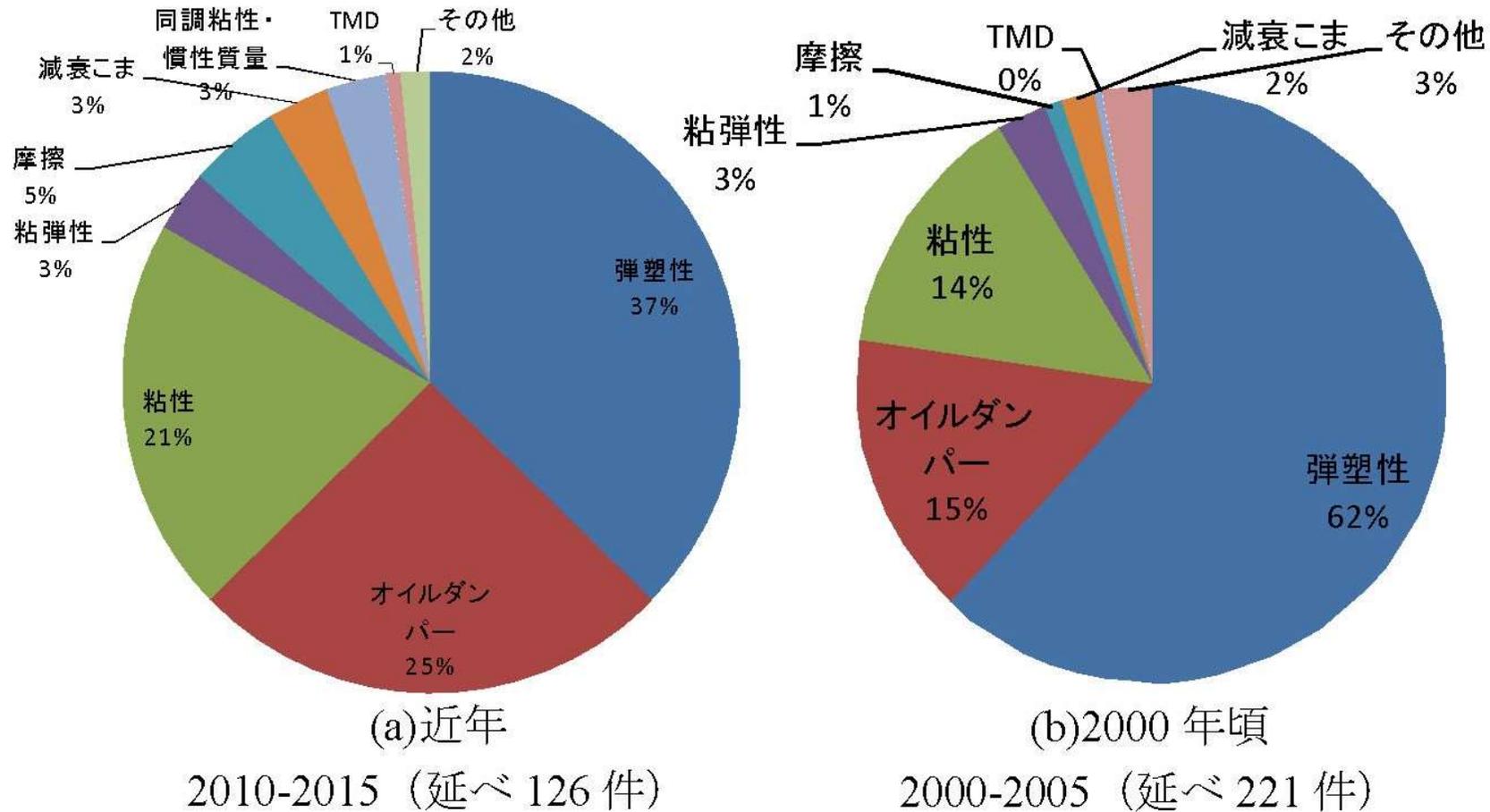
■ 粘性減衰型 (速度型)

粘弾性型

オイルダンパ



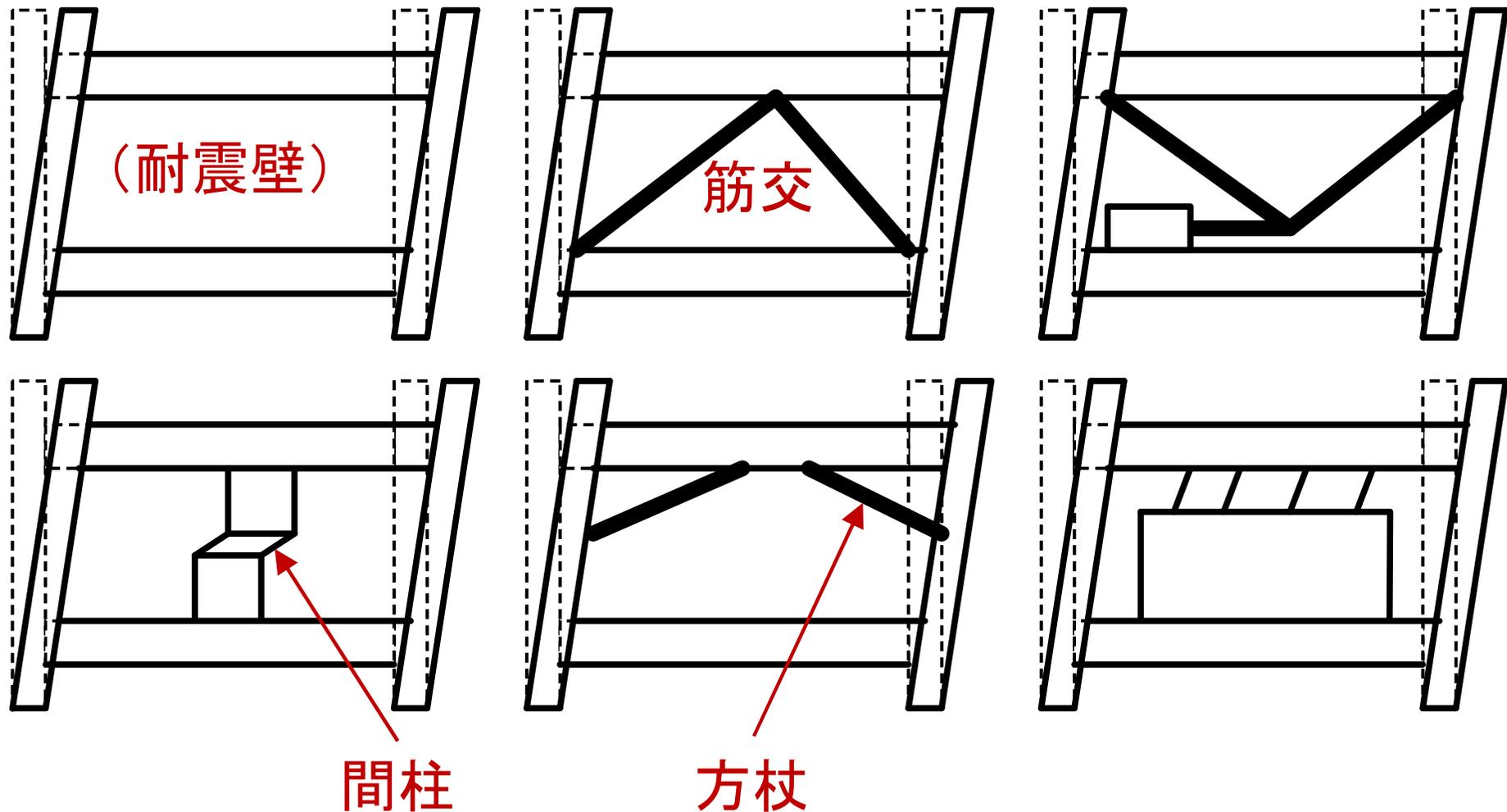
適用傾向に変化 速度依存型ダンパの増加



- 日本建築センターで性能評価された制震建物の分類
- 速度依存型ダンパ(粘性系とオイルダンパ)が増加

2点間の応答に効くダンパの取付方法

- 設置方法は耐震改修の部材と似ている。
- 取り付けに多くの場所が必要である。
- 関心をもって頂くために、具体例をいくつか示す。

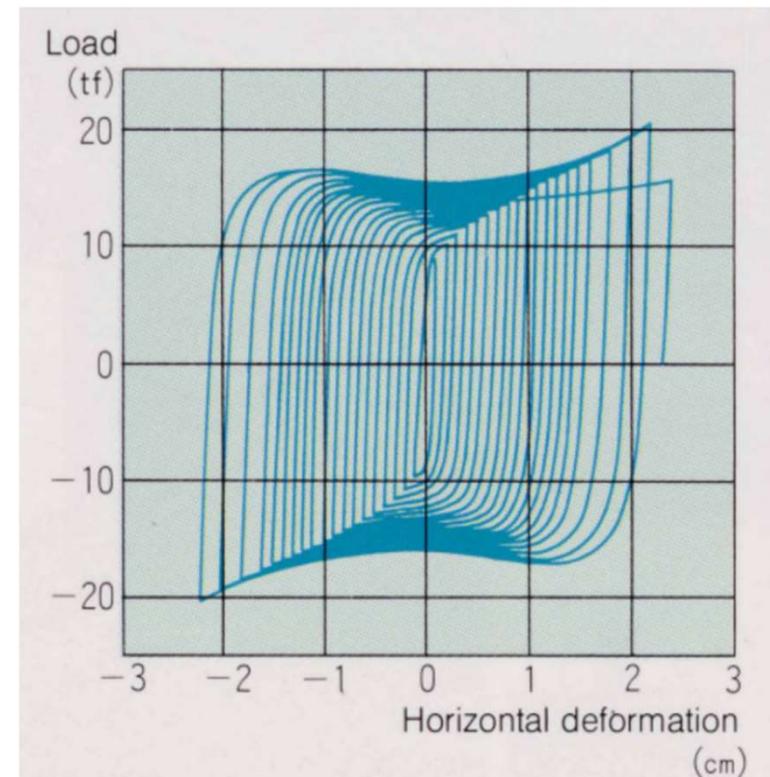


履歴型ダンパ(弾塑性ダンパ) 鋼材の利用⁵⁰

- 鋼材の塑性域を利用したエネルギー吸収
- 安定した履歴形状
- 経年変化(小), 温度依存性(無), 歪速度依存性(小)
- 微小振幅の効果(小)・弾性領域の効果なし ⇒ 小さな層間変形をどのように捕らえるか工夫が必要
- 低降伏点鋼
- 広くは, 座屈拘束ブレースも
- 疲労損傷評価



座屈拘束ブレースの例

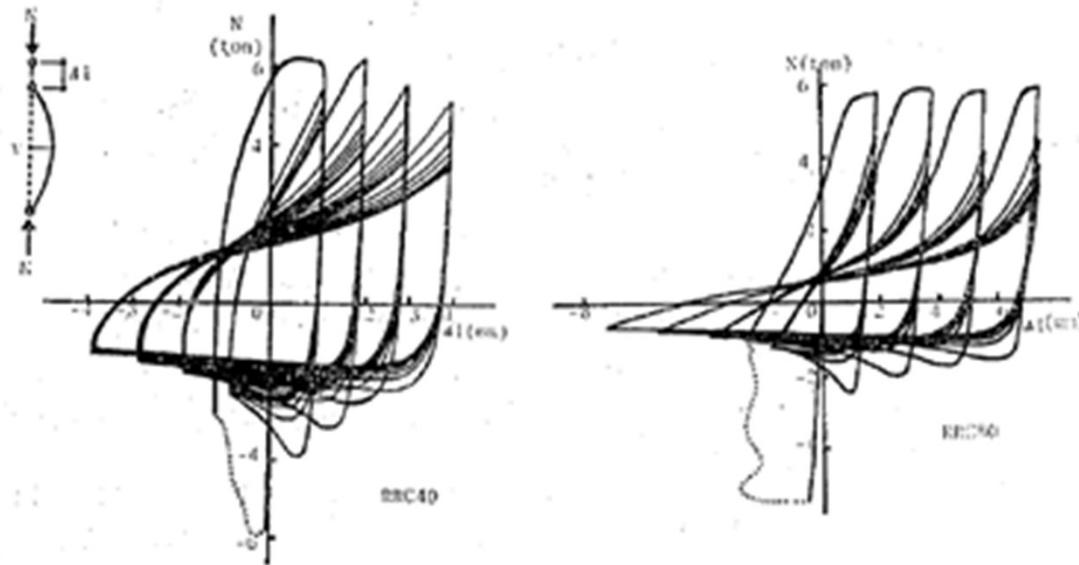


安定した履歴形状の例

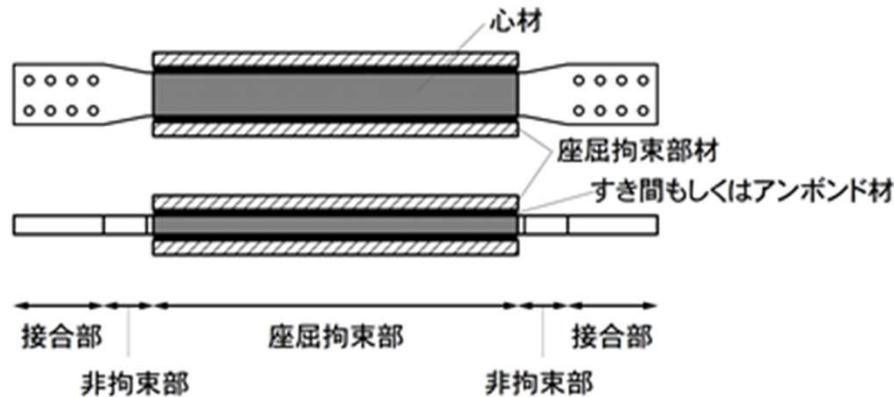
(日鉄 エンジニアリング: アンボンドブレース)

https://www.eng.nipponsteel.com/steelstructures/product/base_isolation/unbondedbrace/

座屈拘束ブレース

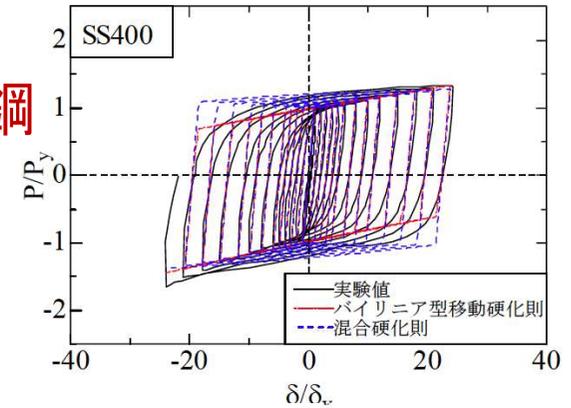


圧縮引張繰返し軸方向力を受ける直線状部材の軸方向力-軸方向変形関係¹

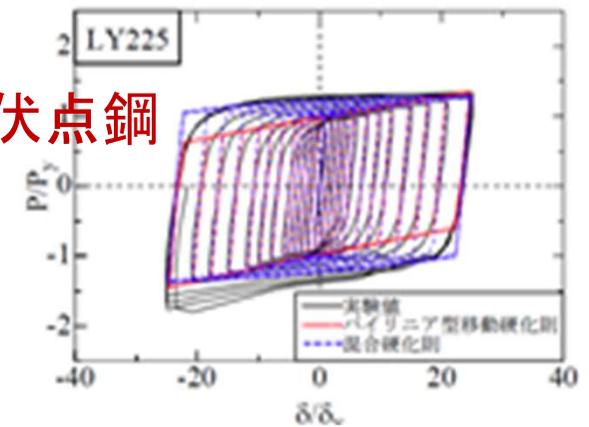


座屈拘束ブレースの基本構成

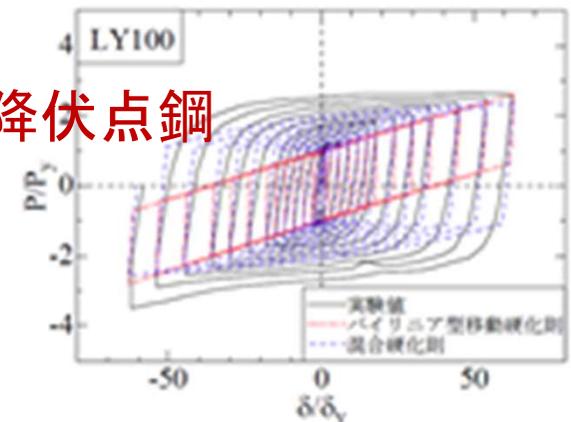
普通鋼



低降伏点鋼



極低降伏点鋼



座屈拘束ブレースの復元力特性²

1. 構造標準委員会鋼構造分科会:II. 筋違材および筋違付骨組に関する実験的研究(筋違付骨組の弾塑性挙動について), AIJ論文報告集, pp.67-71, 1976.5
2. 千田耕大ほか:鋼種の異なる座屈拘束ブレースの復元力特性, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.183-184, 2005.9

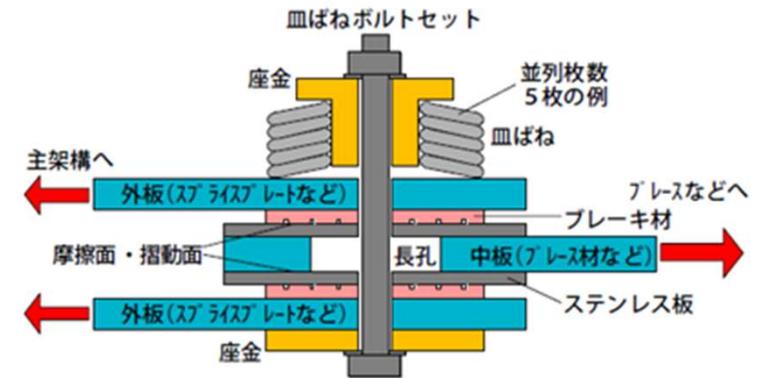
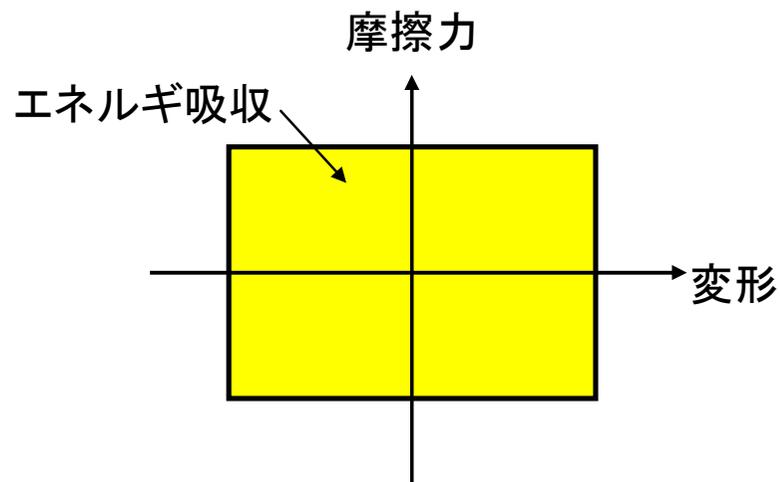
摩擦ダンパ

- 接触する2つの物質が滑る場合、**滑り方向とは逆方向の運動を止める方向に摩擦力が発生**
- **クーロンの摩擦の法則**: 摩擦力が垂直抗力(圧縮力)に比例する」という経験則

$$F_f = \mu N$$

F_f : 摩擦力, N : 圧縮力, μ : 摩擦係数

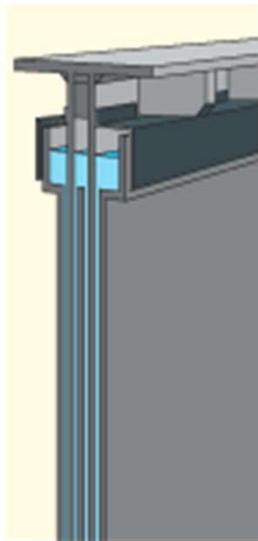
- 物体の運動エネルギーを**熱エネルギーに変換して吸収**



高カボルト摩擦接合滑りダンパ

粘性・粘弾性ダンパ

- **粘性**: 速度に比例して抵抗力を発生する特性
- **粘弾性**: 上記に加えて, 元に戻ろうとする弾性の性質
- 小さい振動から大きな振動までに効く性質



壁型粘性ダンパの設置例

(オイレス工業)

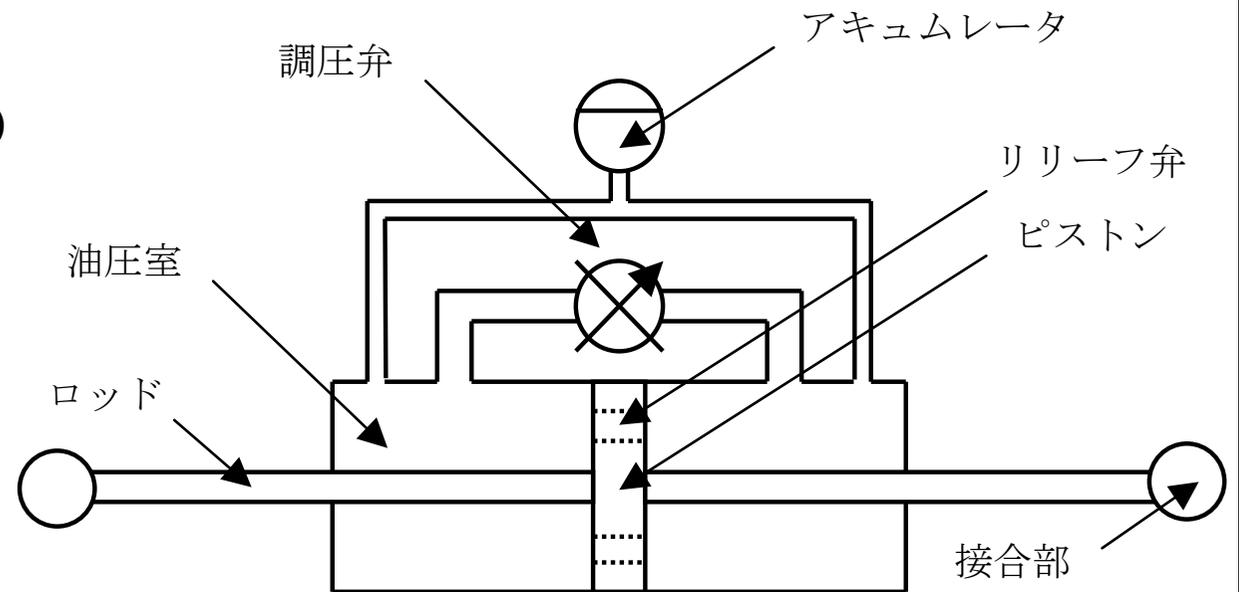
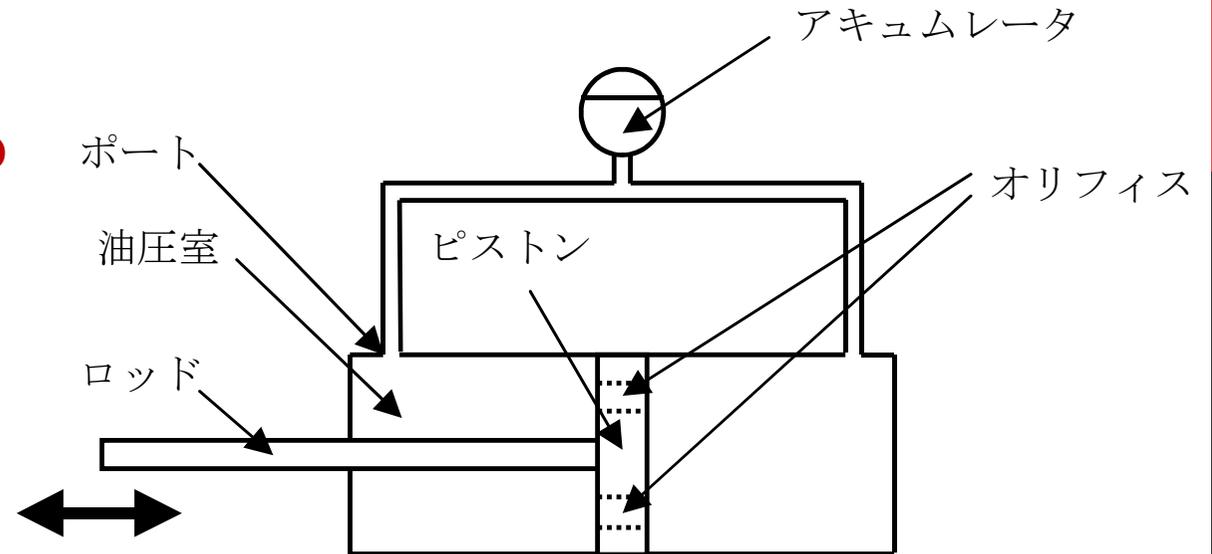


シリンダ型粘性ダンパ(ブレース利用)

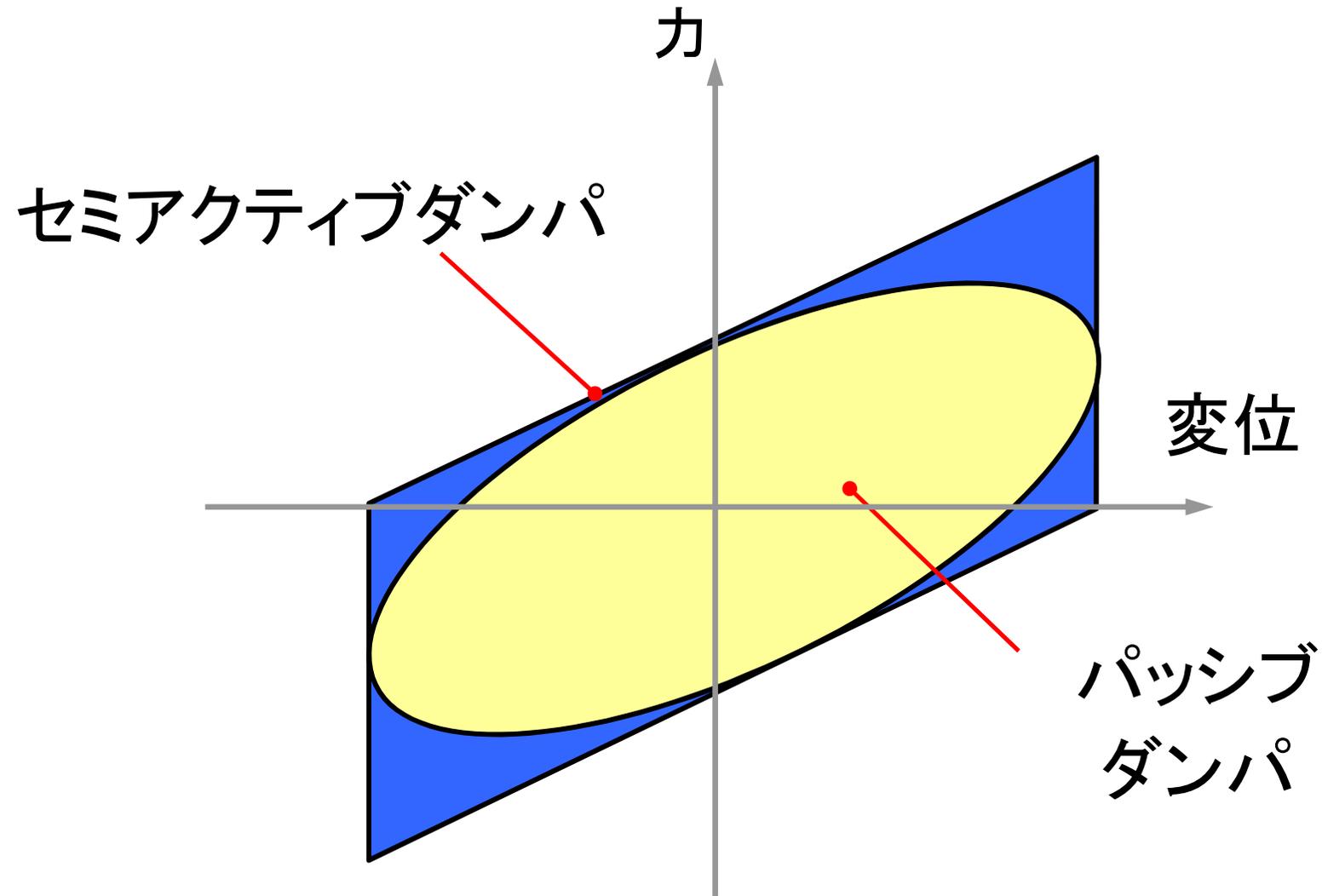
(オイレス工業)

オイルダンパ

- 油が調圧弁を通過する時の流体抵抗で減衰効果
- いろいろ派生した機構あり
- 片ロッド型は向きを変えて一対で設置
- 片ロッド型は免震層のダンパで利用多し



セミアクティブダンパのエネルギー吸収

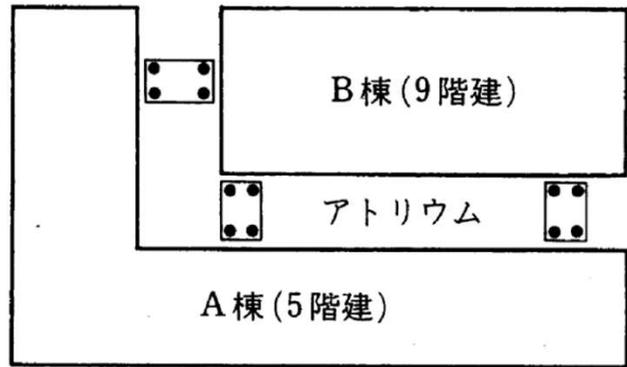


フェイルセーフ

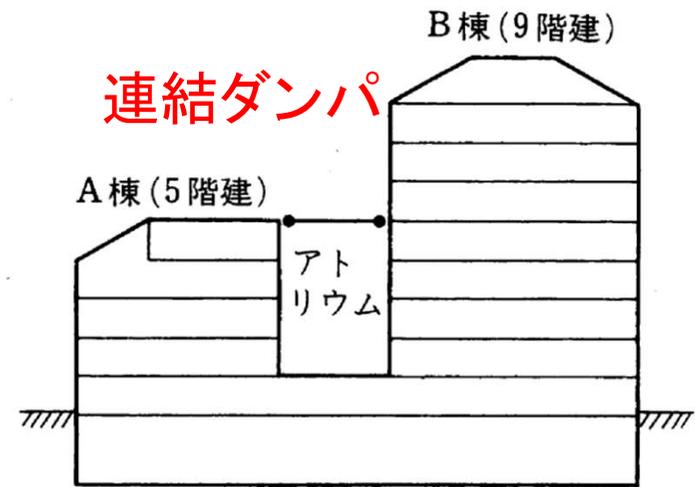
- 装置の故障・不具合・人間の誤操作による障害を**予め想定し、被害を最小限に**
- **100%の安全なし** ⇒ フェイルセーフの考え方がよく整理＝安全な証
- 装置がいかなる状態でも、**構造物に想定外の力を作用させない**
- 高性能なアクティブ・セミアクティブ制御でも技術を過信しない
 - 断線, 停電, 制御弁・センサ・演算の異常検知
 - 装置の機能維持
 - 最低限, パッシブ制御としての機能
 - 故障内容と調圧弁の開閉の関係の整理

連結ダンパ(特定装置を意味しない)

● ベルダンパ

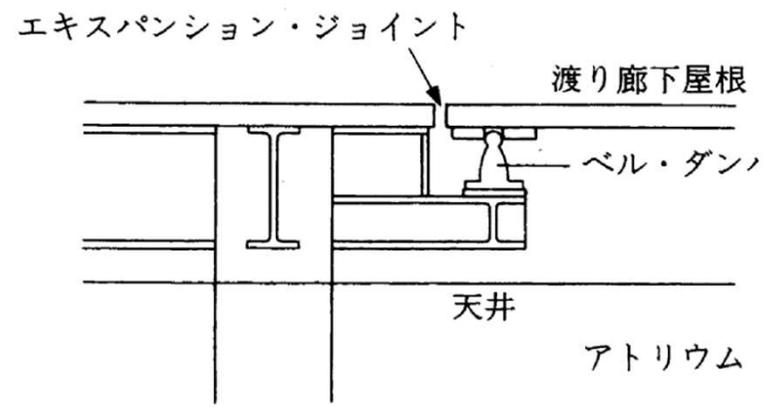


平面

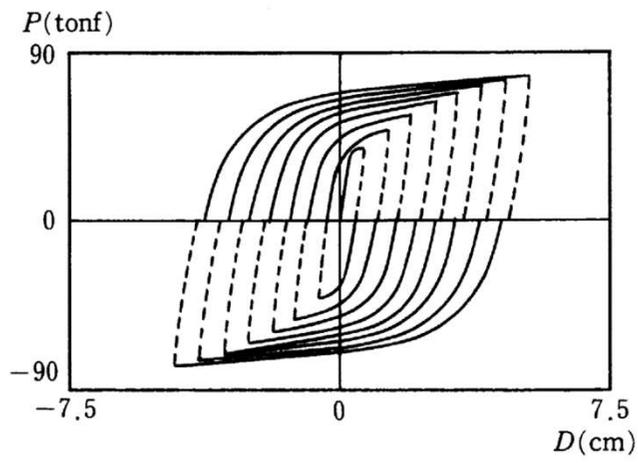


断面

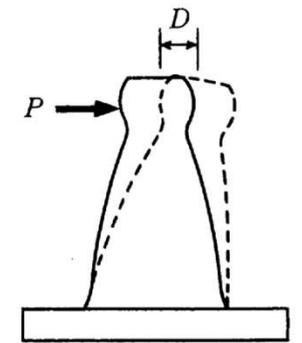
建物形状



連結ダンパの取付



変位-荷重曲線



小堀鐸二ほか:弾塑性型ジョイントダンパに関する研究(その4)実際の建物への適用, AIJ大会梗概集B構造I, pp.595-596、1988

制震技術の研究開発・適用の特徴

- 免震と比較して、**制御方法・設置方法が多様**
- 装置の多様化は落ち着く傾向
- 同一建物で**異なる装置の組み合わせが多様化**、**併用の増加**
 - アクティブ制御＋パッシブ制御
 - 履歴型ダンパ＋粘性ダンパ
- 大地震対応 ⇒ パッシブ制御，セミアクティブ制御
- 居住性改善 ⇒ アクティブ制御（マスダンパにほぼ限定）
- 歴史的経緯もあり、**制震と耐震の区別**が分かり難い
 - 震が関ビルのスリット壁：今だったら制震
 - ほとんど全体に影響を与えない装置を数個付けて制震？
実際には効いていない制震？
 - 付加減衰0.5%でも，総入力エネルギーの数%の吸収でも制震

制震(振)建物の性能目標

- 制震(振)建物の発想 ⇒ 耐震より高性能

現実には、耐震と同じ性能の制震あり

性能向上ではなく、建築費の低減に制震利用

- 従来の構造部材(壁・筋交・・・)を利用拡大したは、耐震との区別がやや困難 単なる定義の問題？

- 制震(振)改修では、耐震と同程度の性能をようやく確保あり

- 大地震時の目的: 構造体の損傷低減(=最大層間変形角, 最大塑性率の低減)

免震と比較して、優位性を一般人に伝えにくい評価指標

⇒ 専門用語の「意識」が必要

制震建物の性能目標 耐震と同じ？

■ 日本建築学会大会

1987-2006

振動部門

■ ダンパの種類

履歴型ダンパ

粘(弾)性ダンパ

オイルダンパ

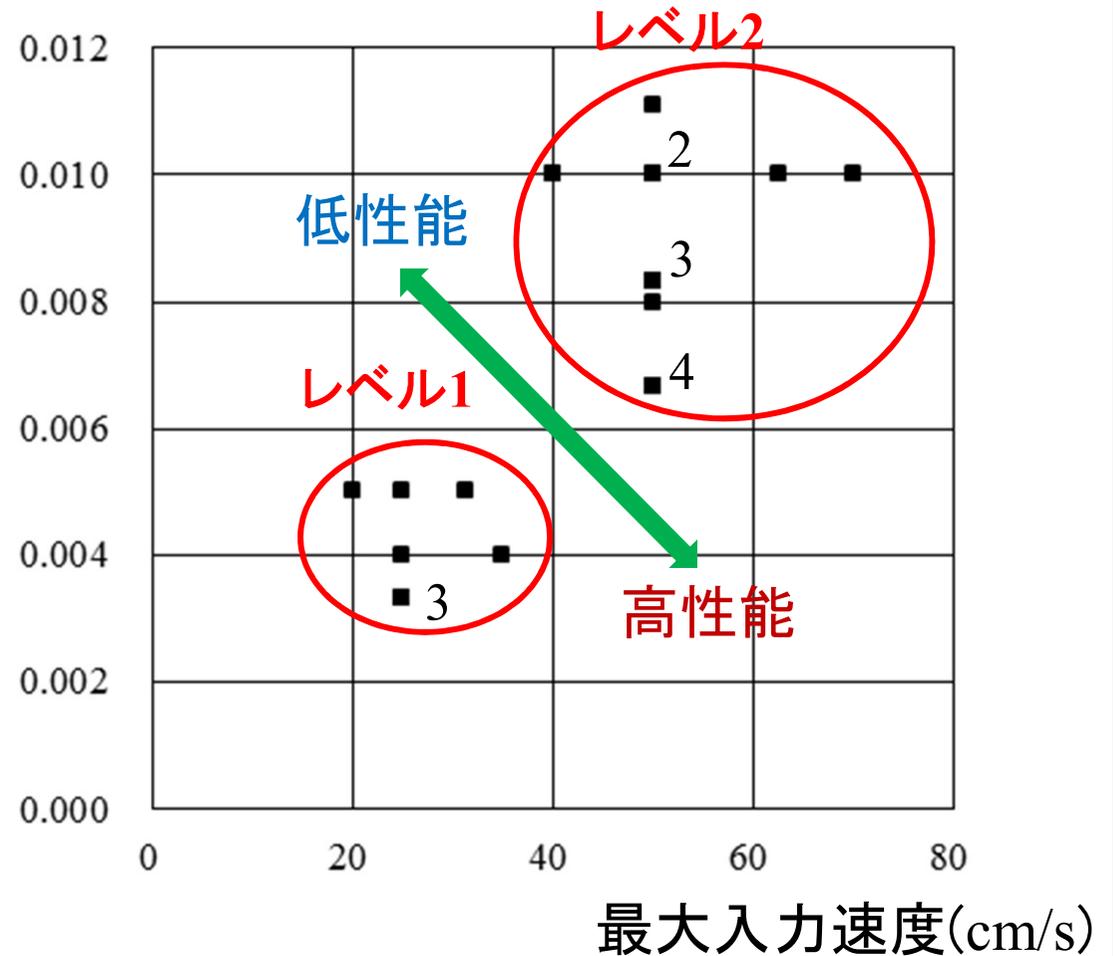
■ 入力地震動

El Centro

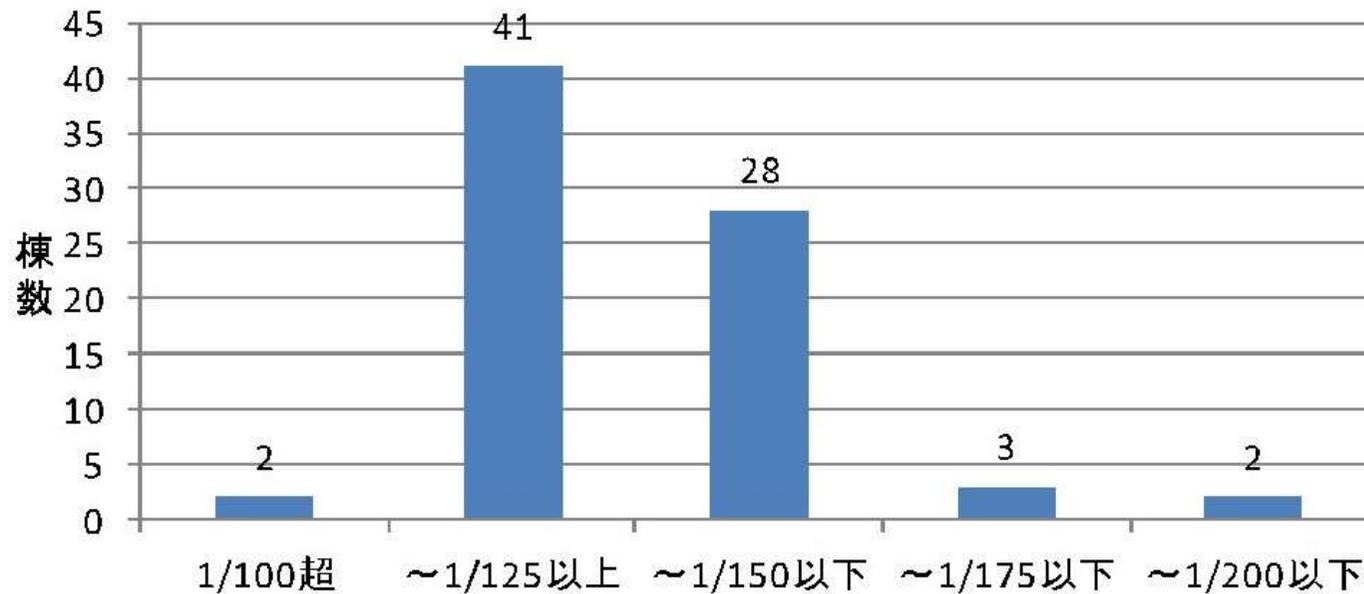
Taft

Hachinohe

目標とする最大層間変形角



最近目標にされている最大層間変形角

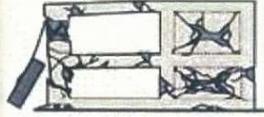
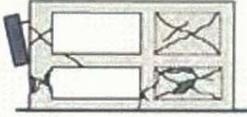
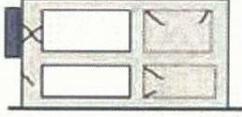


目標とする最大層間変形角(レベル2地震)

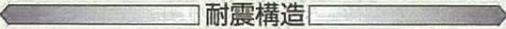
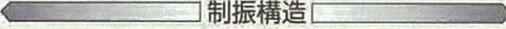
- 2010年9月～2015年8月に日本建築センター評価された制震建物
 - 事務所60%, 共同住宅26%
 - S造37%, CFT造35%, RC造27%
 - 60-100mが40%

制震(振)の性能目標 免震より理解しにくい

耐震性能グレード (大震災時に発生する被害例)

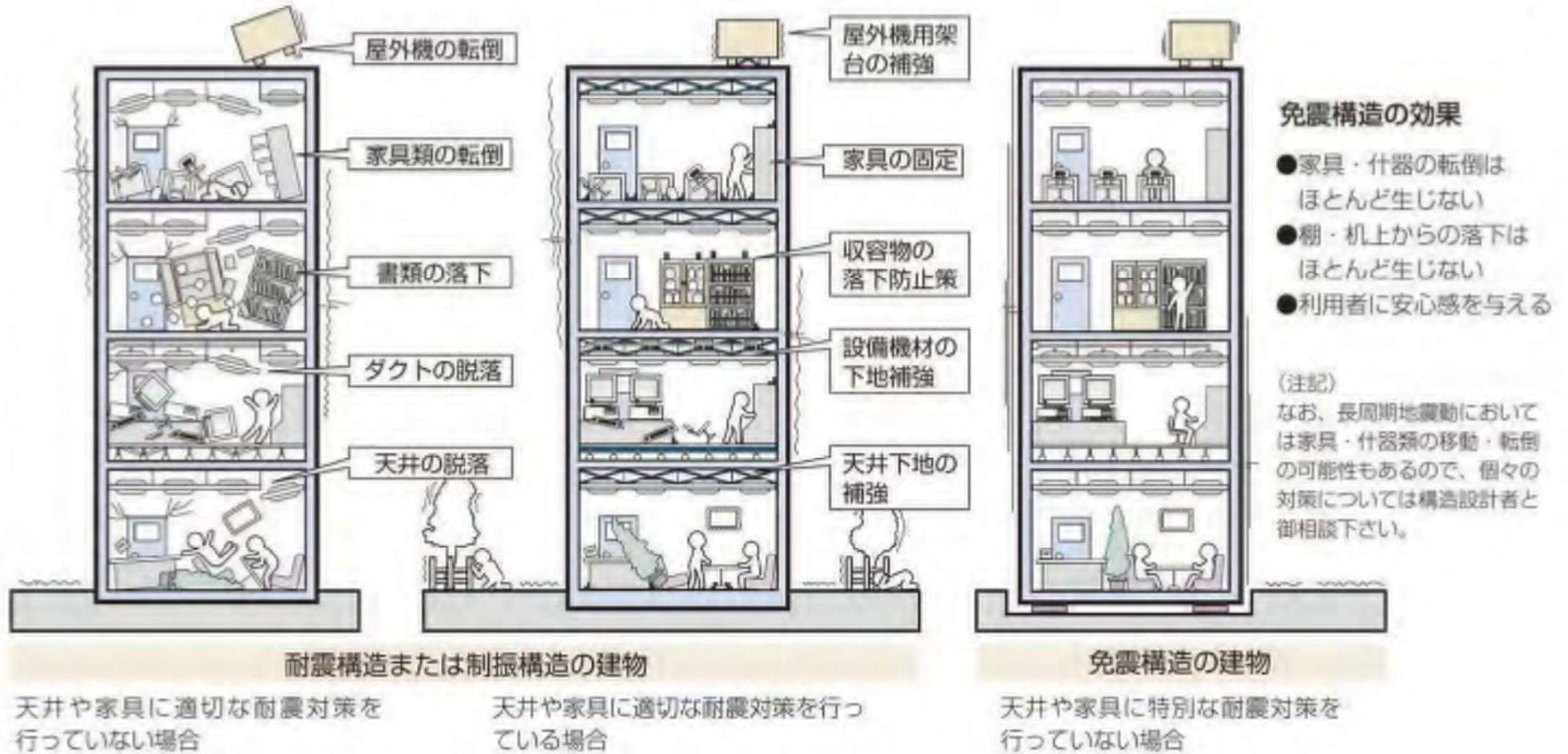
| 耐震性能グレード | | 基準級 | 上 級 | 特 級 |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 大地震後の建物の状態は？ | 構造体 |  大破～中破 人命は守れるが建物にはある程度被害が生じる |  中破～小破 局所的な被害が生じる |  軽微・無被害 被害はほとんど生じない |
| | 非構造壁 | 大きな被害を受け、一部の壁は崩れ補修に時間がかかる | 一部被害を受けるが修復が容易 | ほとんど被害は生じない |
| | 仕上げ材 非構造部材 | 広範囲に被害が生じ、大規模な補修が必要 | | |
| | 設備機器等 | 機器の脱落・損傷等の被害が生じ、修理が必要になる | 一部に機能障害が発生する | |
| 再使用はできるのか？ ※1 | 再使用のための修復に半年～1年程度を要する修復できない建物もある | 再使用のための修復に1週間～半年程度を要する | ほとんどの場合、地震直後から使用可能 | |
| 総建設費用は？ ※2 基準級との比較 | 1.0 | 1.05～1.10 | 1.05～1.15 | |

実現できる構造形式

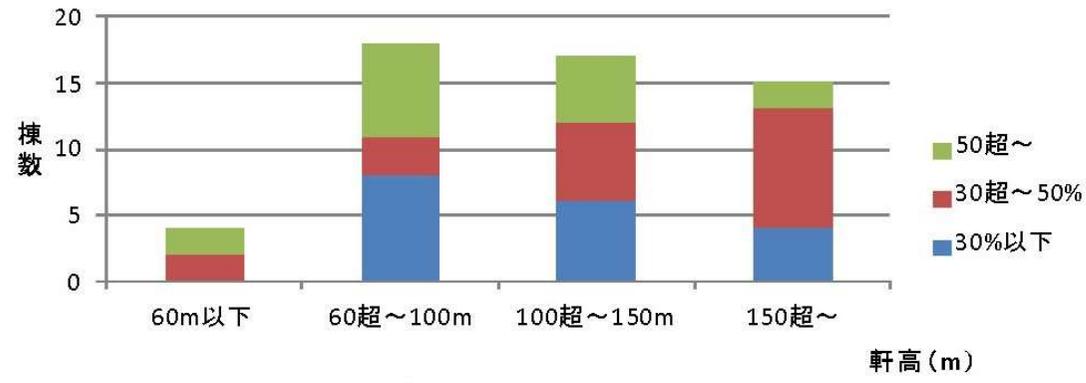

※1：あくまでも相対的な目安です。実際の期間は震災の規模により異なる可能性があります。
 ※2：基準級を1.0とした比率です。建物規模や地盤によって異なります。

制震(振)の性能目標 免震より理解しにくい

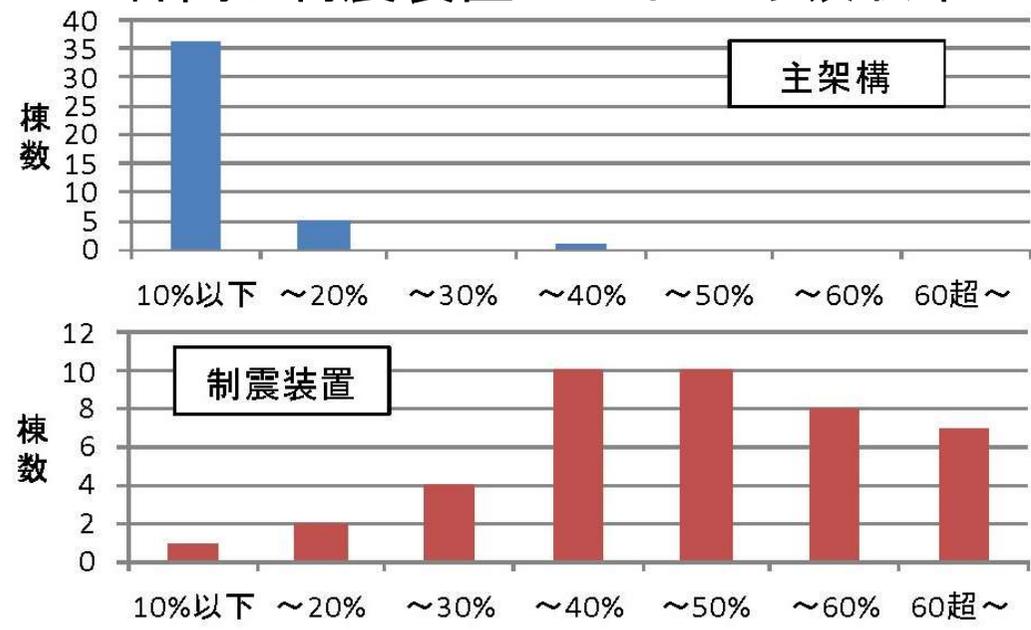


大地震が起こった時の建物内部の様子

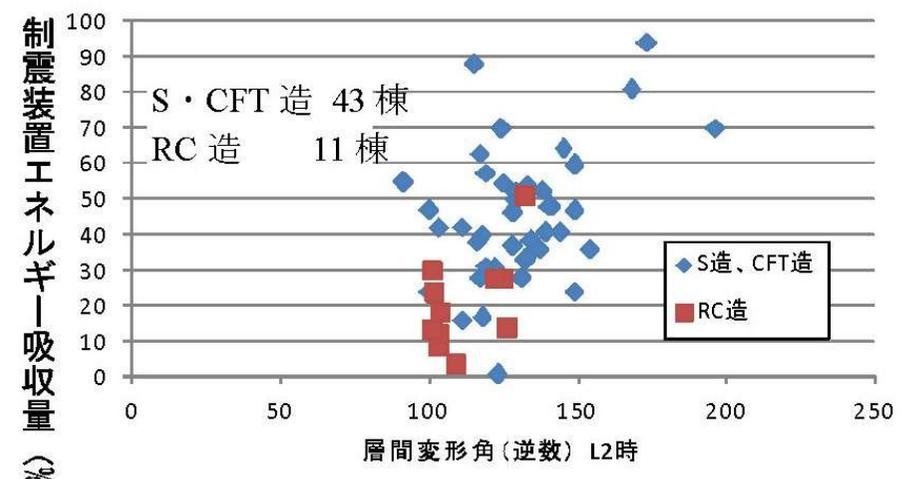
制震の定義？ どの程度のエネルギー吸収



軒高と制震装置のエネルギー吸収率



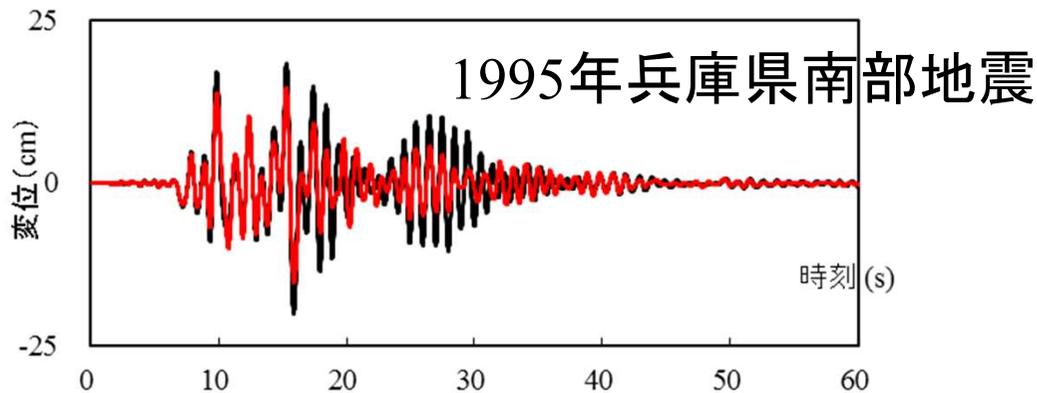
エネルギー吸収率 (S造とCFT造の42棟)



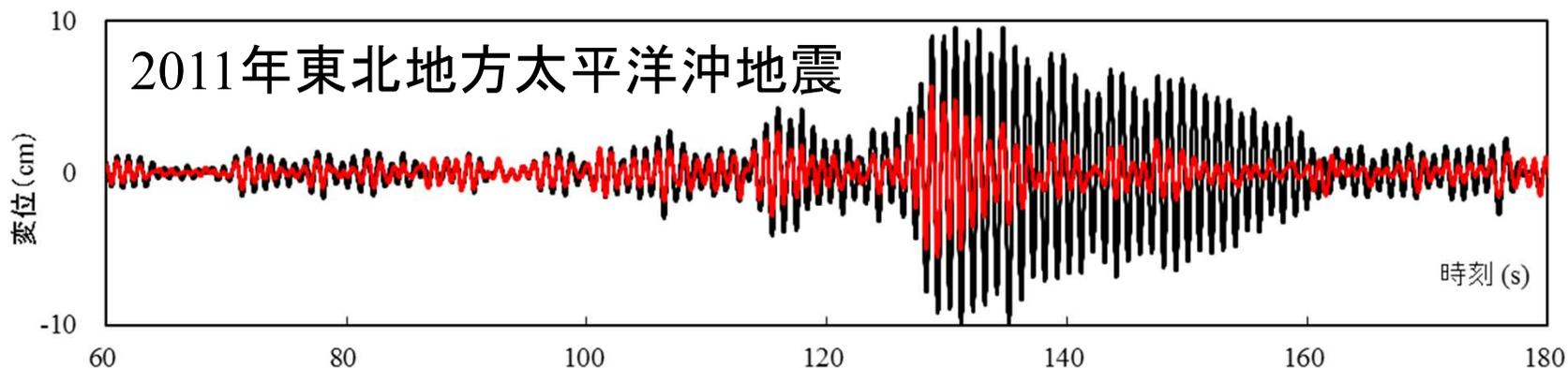
最大層間変形角とエネルギー吸収率 (レベル2地震)

制震でよく指摘される問題

- 免震・制震の多くは、駆動・変形しながら**建物の振動エネルギーを徐々に吸収する原理**
- 波形が**パルス状で継続時間が短い地震動では、十分なエネルギー吸収が不可能**。建物と装置の**変形追従性が必要**
- 2011.3.11地震は比較的効果が発揮し易い波形



- パルス地震動は苦手
- 徐々に振幅が大きくなる地震動は得意

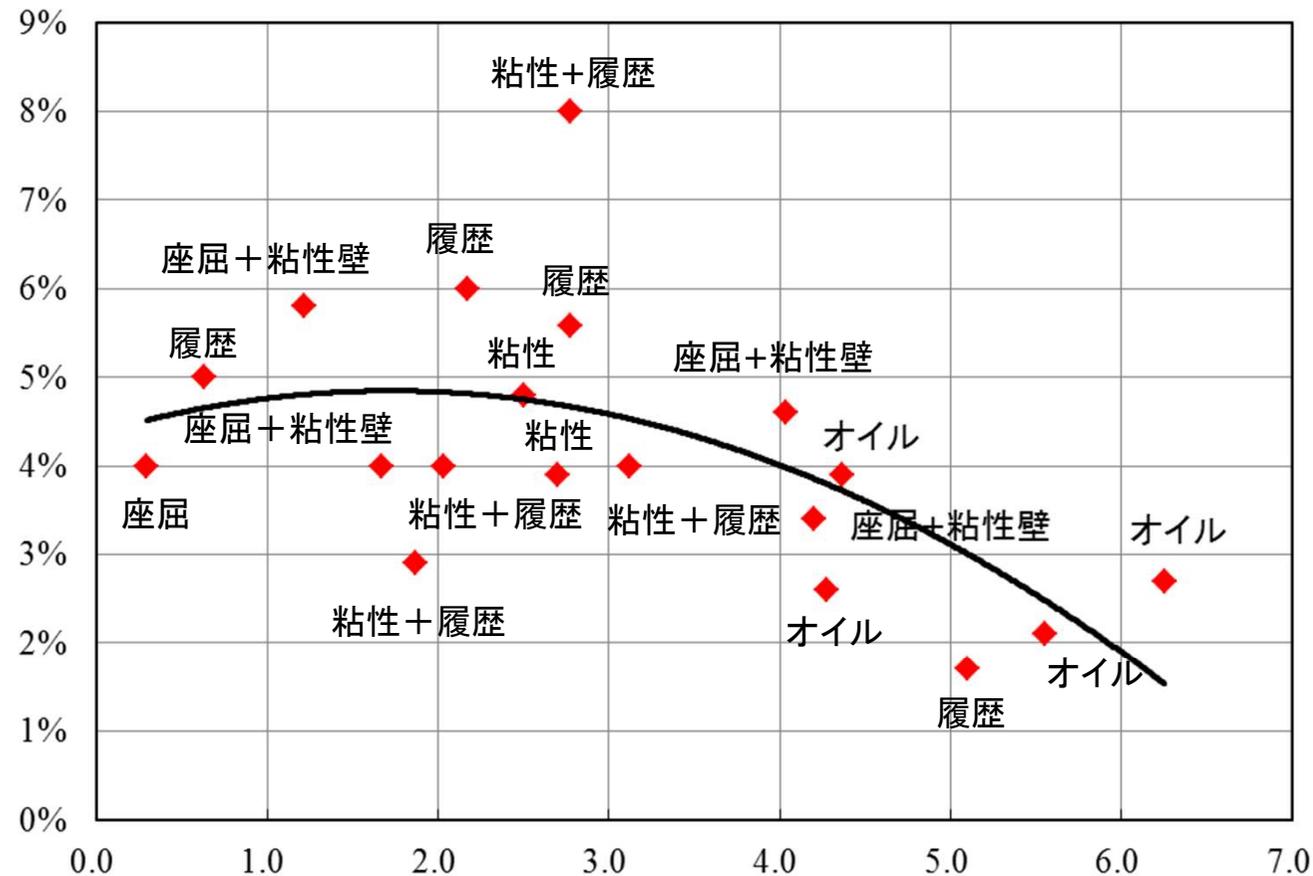


2011.3.11地震時のパッシブ制震の効果

1次モードの等価減衰比

- 効果の公表は、日本免震構造協会・応答制御建築物調査委員会の報告書をほとんど超えていない

1次モードの等価減衰比(%)



おわりに

- 建物の耐震化は、防災・減災の重要な自助努力
- 身近に使っている建物・部屋を一度点検
- 普段歩いている街を見て、建物の耐震に興味を
- 地震災害をイメージするのも自助努力の一つ
- 良い技術でも苦手なものあり
- 現象の不確定性は避けられず、100%の安全なし
- 耐震・免震・制震(振)で「安ければ良い」なし
- 少子高齢化・人口減少の社会「良い場所に、良い家を建て、よく維持管理して、長く使う」が原則