

高次システム化対応教育プログラム
最近の建築構造設計と耐震・制振・免震技術
その1
Seismic Isolation and
Response evaluation 1

東京工業大学 竹内徹
Toru Takeuchi / Tokyo Institute of Technology

梁端部の塑性化

従来構造(耐震構造) 免震支承(ばね支承) 免震構造

免震構造の揺れ方

従来建物

ガタガタと強く揺れる
地震力は地盤から直接建物に入る
部分的に壊れたり倒壊
人的被害、財産消失
地震後は補修、解体・建替え

免震建物

ゆったりと揺れる(長周期)
地震力は免震装置で低減されて建物に入る
壊れない
被害・損傷なし
地震後は免震部材の点検のみ

免震装置

免震構造設計のポイント

上部構造は硬い(水平剛性の高い)架構とする。靱性は必ずしも必要ない。
Superstructure for seismically isolated structure requires stiffness, but ductility

世界最初の免震構造(1931)

不動銀行下関支店
Construction: 1931
建築設計: 関根陽太郎
構造設計: 岡 隆一
(both Tokyo Tech graduates)

- 基礎梁
- 摩擦ピン (砂によるエネルギー吸収)
- ロッキングコラム (曲率の差により復元力と周期を調整)

免震構造の応用例と可能性

免震支承(積層ゴム支承) Rubber Bearing

取付けボルト 中心孔 上フランジ
被覆ゴム 中間鋼板 内部ゴム
下フランジ

ゴムブロック

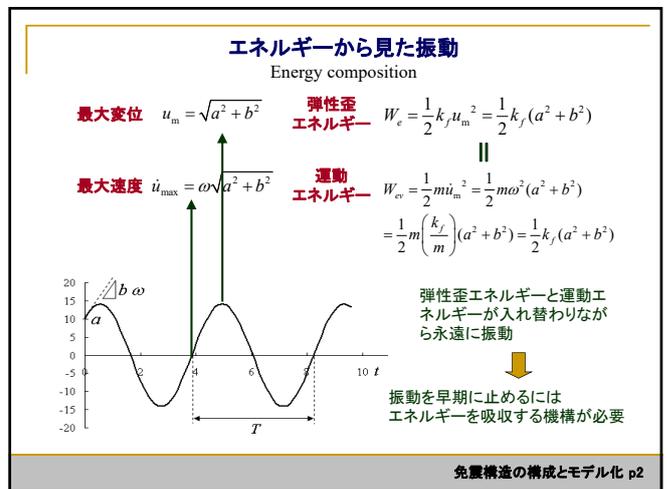
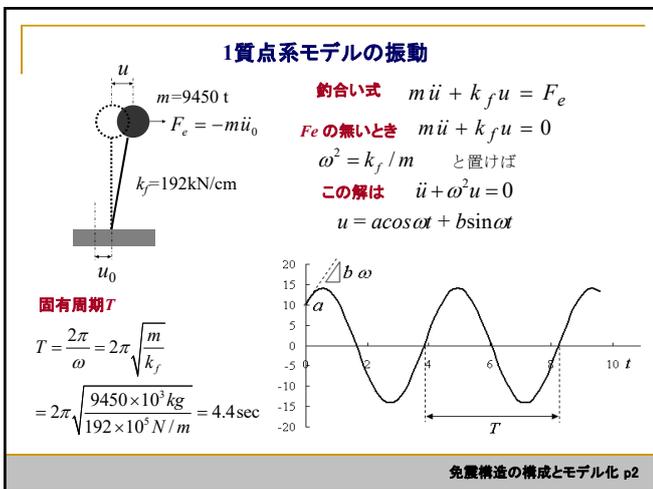
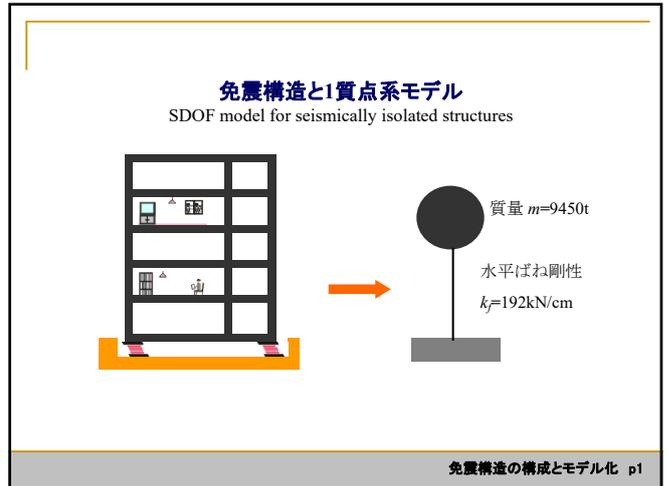
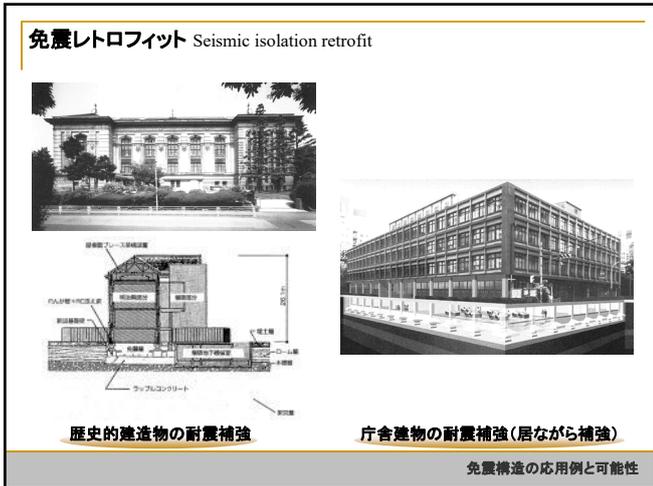
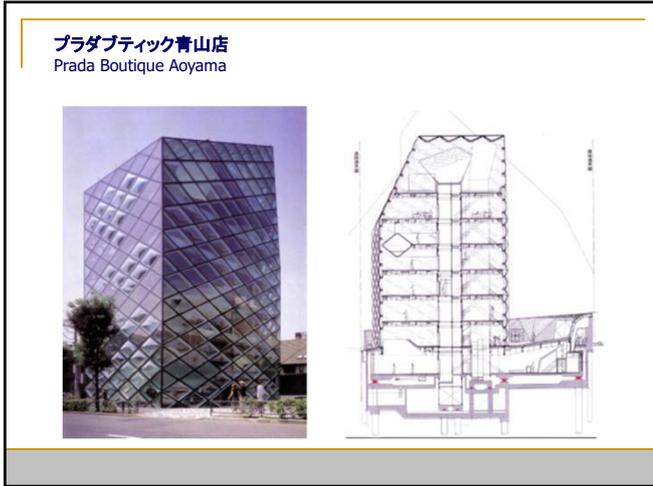
初期状態

鉛直荷重

水平荷重

積層ゴム

免震部材の種類と特性 p20



ダンパー(減衰機構)付き免震構造 Damped SDOF

質量 m_{eq}
水平ばね剛性 k_f
付加減衰係数 c_d
速度 \dot{u} に対し、 $c_d \dot{u}$ の抵抗値を発揮

積層ゴム ダンパー

免震構造の構成とモデル化 p3

免震支承とダンパーの組み合わせ例

RS L システム
・天然積層ゴム+鋼材ダンパー (+鉛ダンパー)
・ダンパーの点検交換が容易

LRB システム
・鉛ダンパープラグ入り積層ゴム
・場所を取らない
・LRBの代わりに鋼減衰積層ゴムを使用する方式もある。

粘性系ダンパー
・天然積層ゴム+オイルダンパー
・加速度低減に効果あり。風荷重時の応答低減にも効果。

積層ゴム 鋼材ダンパー 鉛ダンパー
鉛プラグ入り積層ゴム
積層ゴム オイルダンパー

モデル化
線形ばね+弾塑性履歴
線形ばね+粘性減衰

免震構造の構成とモデル化 p3

減衰付きモデルの振動

質量 m_{eq}
水平ばね剛性 k_f
付加減衰係数 c_d

釣合い式 $m\ddot{u} + c_d\dot{u} + k_f u = 0$
 $k_f/m = \omega^2, c/m = 2h\omega$ とおくと
 $\ddot{u} + 2h\omega\dot{u} + \omega^2 u = 0$
この解は ($h < 1$ のとき)
 $u = e^{-h\omega t} (a \cos \omega t \sqrt{1-h^2} + b \sin \omega t \sqrt{1-h^2})$
 $c = (a^2 + b^2)/a$

減衰定数の評価
 $h \approx \frac{\ln(u_1/u_2)}{2\pi}$

$T' = T/\sqrt{1-h^2}$

免震構造の構成とモデル化 p4

ステップ外力に対する応答 Response against step-input

釣合い式 $m\ddot{u} + c_d\dot{u} + k_f u = F$
 $\alpha = F/m$ とおくと
 $\ddot{u} + 2h\omega\dot{u} + \omega^2 u = \alpha$

この解は
 $u = \alpha / \omega^2 \left[1 - e^{-h\omega t} \left(\cos \omega' t + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin \omega' t \right) \right]$

減衰の無いとき
 $u = \alpha / \omega^2 (1 - \cos \omega t) = u_s (1 - \cos \omega t)$

減衰あり
減衰無し

免震構造の構成とモデル化 p5

応答スペクトルの概念 Response spectrum

短周期
中周期
長周期

地震波(ランダム波)

応答時刻歴
デュアメル積分

最大応答加速度
 $S_A(T_1)$
 $S_A(T_2)$
 $S_A(T_3)$

応答スペクトル
 h_1, h_2, h_3
周期 T_1, T_2, T_3

$u(t) = \int_0^t \ddot{u}_0(\tau) \cdot g(t-\tau) d\tau$
 $\dot{u}(t) = \int_0^t \dot{\ddot{u}}_0(\tau) \cdot \dot{g}(t-\tau) d\tau$
 $\ddot{u}(t) + \ddot{u}_0(t) = \int_0^t \ddot{u}_0(\tau) \cdot \ddot{g}(t-\tau) d\tau$

地震入力と応答スペクトルによる応答評価 p7

設計用応答スペクトルの考え方

最大応答加速度
 S_A (cm/s^2)

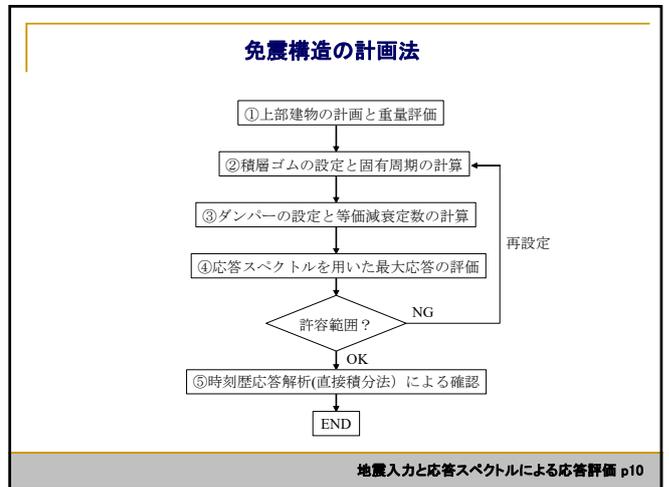
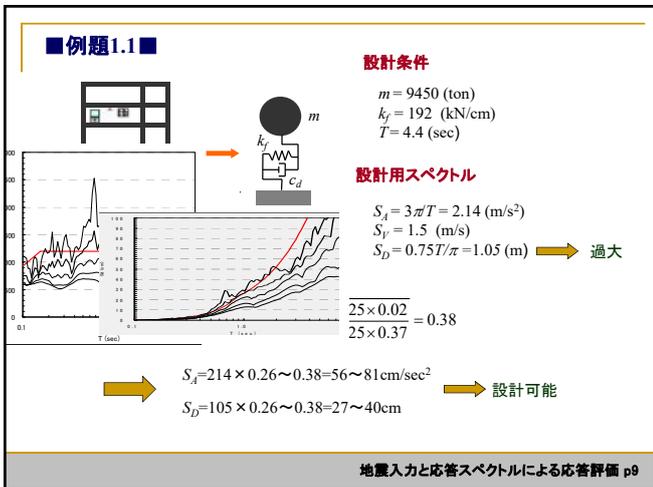
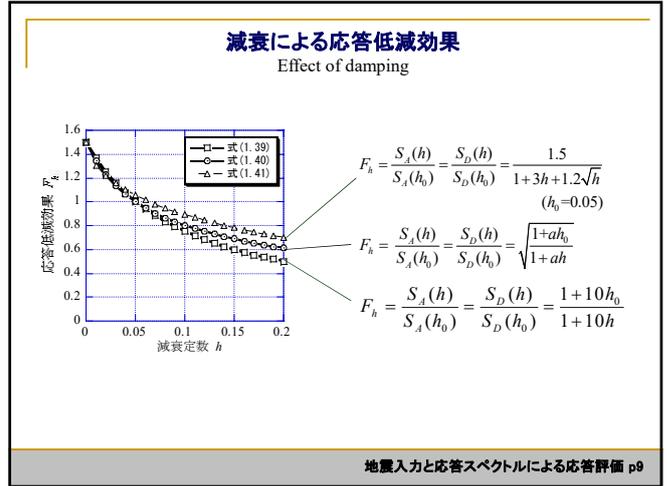
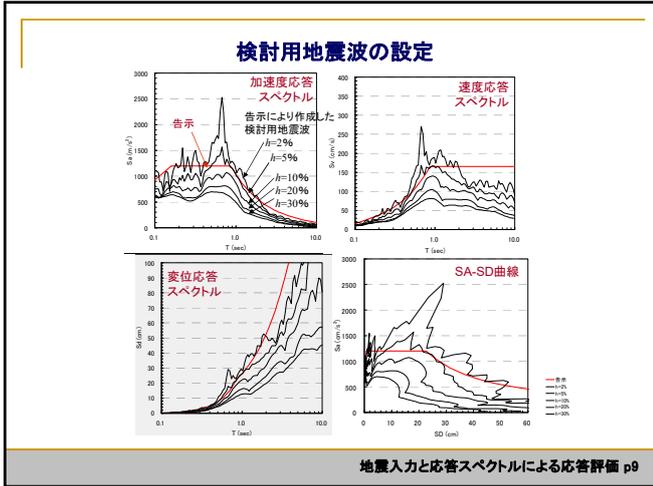
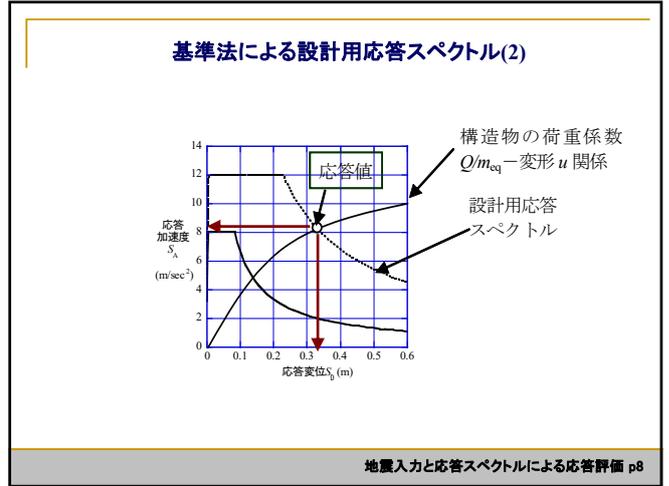
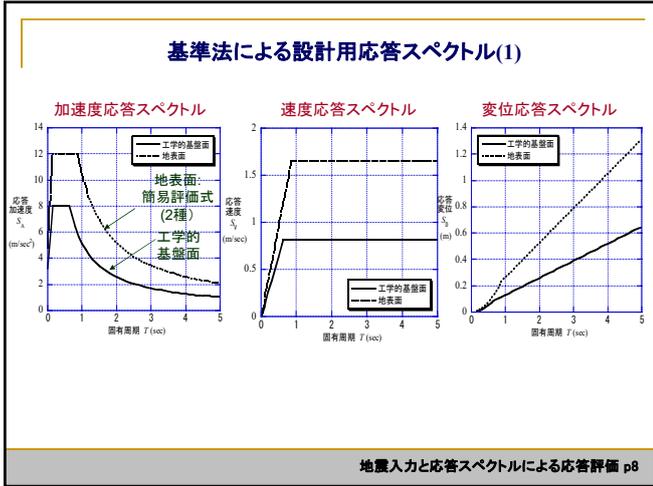
設計用
 $S_{Ap} = 846.36 \text{ cm/s}^2$
観測地震波のスペクトル
 $S_{Ag} = 282.12 \text{ cm/s}^2$

入力最大加速度

固有周期 T (s)

震源域
地殻構造
地表面
地震波

地震入力と応答スペクトルによる応答評価 p7



粘性ダンパーの履歴モデル Equivalent damping of visco-elastic system

積層ゴム 粘性ダンパー 免震層

$$Q_0 = c_d \dot{u}_m = c_d \omega u_m$$

$$E_d = \frac{\pi c_d \omega u_m^2}{2 \pi k_f u_m^2} = \frac{c_d \omega}{2 k_f}$$

$$E_d = \frac{\pi c_d \omega u_m^2}{2 \pi k_f u_m^2} = \frac{c_d \omega}{2 k_f}$$

減衰定数 $h_{eq} = \frac{c_d}{2 \omega m} = \frac{c_d}{2 \sqrt{k_f m}} = \frac{c_d \omega}{2 k_f}$

$$= \frac{\pi c_d \omega u_m^2}{2 \pi k_f u_m^2} = \frac{E_d}{2 \pi k_f u_m^2} = \frac{E_d}{4 \pi W_e}$$

等価線形化法による応答評価 p11

例題1.2 減衰定数35%を満足するオイルダンパー

$$c_d = 2 h_{eq} m \omega = \frac{2 h_{eq} k_f}{\omega}$$

$$= \frac{2 \times 0.35 \times 1.92 \times 10^7 \text{ N/m} \times 4.4 \text{ sec}}{2 \pi} = 94 \text{ kNsec/cm}$$

付録1より、250kN オイルダンパー: $c_{d1} = 37.5 \text{ kNsec/cm} \times 3 \text{台} (\times 2 \text{方向})$

注: 現実のオイルダンパーは荷重が一定以上で減衰定数が頭打ちになるため、約3倍(各方向8~10台)必要となる。

等価線形化法による応答評価 p11

弾塑性ダンパーの履歴モデル Equivalent damping of elasto-plastic system

積層ゴム 弾塑性ダンパー 免震層

$$E_d = 4 Q_{dy} (\mu - 1) u_{dy} = 4 Q_{dy} (u_m - u_{dy})$$

履歴ループで囲われる面積

$$\text{減衰定数 } h_d = \frac{E_d}{2 \pi k_f (u_m)^2} \times 0.8 = \frac{2 Q_{dy} (u_m - u_{dy})}{\pi k_f (u_m)^2} \times 0.8 = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \frac{Q_{dy}}{Q_f} \times 0.8$$

最大振幅が変化する影響を考慮
減衰定数が最大振幅(塑性率)に依存する

等価線形化法による応答評価 p11

例題1.3 減衰定数35%を満足する弾塑性ダンパー

鋼棒ダンパー ($u_{dy} = 3 \text{ cm}, Q_{dy} = 450 \text{ kN}, u_m = 35 \text{ cm}$)

$$Q_{dy} = \frac{\pi h_{eq} k_f (u_m)^2}{1.6 (u_m - u_{dy})} = \frac{\pi \times 0.35 \times 192 \times (35)^2}{1.6 (35 - 3)} = 5048 \text{ (kN)} \rightarrow 12 \text{ 台}$$

鉛ダンパー ($u_{dy} = 0.73 \text{ cm}, Q_{dy} = 220 \text{ kN}$)

$$Q_{dy} = \frac{\pi h_{eq} k_f (u_m)^2}{1.6 (u_m - u_{dy})} = \frac{\pi \times 0.35 \times 192 \times (35)^2}{1.6 (35 - 0.73)} = 4714 \text{ (kN)} \rightarrow 22 \text{ 台}$$

等価線形化法による応答評価 p12

粘弾性ダンパーの履歴モデル Effect on stiffness / visco-elastic system

積層ゴム 粘弾性ダンパー 免震層

$$Q_0 = \eta_d k_{eq} u_m = \eta_d k_d u_m$$

$$\eta_d = \frac{Q_0}{k_d u_m} = 2 h_d = \frac{c_d \omega}{k_d}$$

等価剛性 $k_{eq} = k_f + k_d$ 等価剛性変化率 $\frac{k_{eq}}{k_f} = 1 + \frac{k_d}{k_f}$

固有周期変化率 $\frac{T_{eq}}{T_f} = \frac{1}{\sqrt{1 + k_d/k_f}}$

等価減衰 $h_{eq} = \frac{E_d}{2 \pi k_{eq} u_m^2} = \frac{\pi \eta_d k_d u_m^2}{2 \pi k_{eq} u_m^2} = \frac{\eta_d}{2 (1 + k_f/k_d)}$

等価線形化法による応答評価 p12

免震構造の応答低減効果 Response reduction effects with seismic isolation

加速応答スペクトル Acceleration Spectrum

変位応答スペクトル Displacement Spectrum

在来構法 Conventional

免震構法 Base Isolation

減衰付加

長周期化

固有周期 Own Period

等価線形化法による応答評価 p12

粘弾性ダンパーの応答低減グラフ Performance curve for visco-elastic system

①ダンパーによる剛性増加により固有周期が減少し、
加速度応答が周期が減少すると増加し、また変位応答は周期が減少すると減少する。

$$a_{eq} / a_0 \propto \sqrt{k_{eq} / k_f} \quad u_{eq} / u_0 \propto \sqrt{k_f / k_{eq}}$$

②ダンパー付加により減衰が増加し、加速度、変位応答共に減少する。→ F_h

応答加速度低減率 $\frac{a_{eq}}{a_f} = F_h \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_f}}$

応答変形低減率 $\frac{u_{eq}}{u_f} = F_h \sqrt{\frac{k_f}{k_{eq}}}$

等価線形化法による応答評価 p13

例題1.4

低減率早見グラフ (速度一定領域)

変形を0.4倍に低減する粘弾性体 $\eta=1.0$ の粘弾性 $k_d/k_f=0.50$ 導入

応答せん断力 0.70倍に低減

応答変形 0.40倍に低減

等価線形化法による応答評価 p13

弾塑性ダンパーの履歴モデル(剛性変化考慮) Effect on stiffness / elasto-plastic system

等価剛性 $k_{eq} = \frac{k_d u_{dy} + k_f \mu u_{dy}}{\mu u_{dy}} = k_f + \frac{k_d}{\mu}$ **等価剛性変化率** $\frac{k_{eq}}{k_f} = 1 + \frac{k_d}{\mu k_f}$

等価減衰 (最大変形時) $h'_{eq} = \frac{E_d}{2\pi k_{eq} (\mu u_{dy})^2} = \frac{4(\mu-1)k_d}{2\pi(k_f + k_d/\mu)\mu^2} = \frac{2(\mu-1)k_d/k_f}{\pi\mu(\mu + k_d/k_f)}$

等価線形化法による応答評価 p14

弾塑性ダンパーの等価減衰 Equivalent damping for elasto-plastic system

減衰を低減する方法 $h_{eq} = h_0 + \alpha h'_{eq} \quad \alpha=0.8$

減衰を平均する方法 $h_{eq} = h_0 + \int_1^{\mu_m} h'_{eq} d\mu = h_0 + \frac{2}{\pi\mu_m} \int_1^{\mu_m} \left[\frac{k}{\mu+k} + \frac{1}{\mu+k} - \frac{1}{\mu} \right] d\mu$

$$= h_0 + \frac{2(1+k_d/k_f)}{\pi\mu_m} \ln \frac{\mu_m + k_d/k_f}{(1+k_d/k_f)\mu_m^{1+k_d/k_f}}$$

等価線形化法による応答評価 p14

例題1.5 ■鉛ダンパーを22台投入した時の応答

ダンパーの無いとき、 $S_D = u^{(0)} = 105\text{cm}$, $S_d = 214\text{cm/sec}^2$

$$\frac{k_d}{k_f} = \frac{300\text{kN/cm} \times 22}{192\text{kN/cm}} = 34, \quad \mu_m = \mu^{(0)} = \frac{105\text{cm}}{0.73\text{cm}} = 143$$

$$h_{eq}^{(1)} = 0.02 + \frac{2(1+34)}{143\pi} \ln \frac{143+34}{(1+34)143^{1+34}} = 0.25 \quad F_h^{(1)} = \sqrt{\frac{1+25 \times 0.02}{1+25 \times 0.25}} = 0.45 \quad \frac{k_{eq}^{(1)}}{k_f} = 1 + \frac{34}{143} = 1.24$$

低減された $\mu^{(1)}$ は、

$$u^{(1)} = u^{(0)} F_h \sqrt{\frac{k_f}{k_{eq}}} = 105 \times 0.45 \times \sqrt{\frac{1}{1.23}} = 42.3\text{cm}$$

μ が変わるので、等価剛性・等価減衰も変化する

得られた $\mu^{(1)}$ を用いてさらに $h^{(2)}$, $F_h^{(2)}$, $k_{eq}^{(2)}$, $\mu^{(2)}$ をもとめ、 μ の値が一定になるまで繰り返す。

ダンパー付きでは、
 $S_D = 105 \times 0.3 = 32\text{cm}$,
 $S_d = 214 \times 0.5 = 107\text{cm/sec}^2$

等価線形化法による応答評価 p15

接合部剛性の影響 Effect of connection stiffness

等価減衰定数

$$h_{eq} = \frac{1}{2} \frac{c_d \omega}{\frac{1}{k_b} + k_f \left(1 + \frac{c_d^2 \omega^2}{k_b^2}\right)^2}$$

ダンパーの容量に対し接続部剛性が十分で無い場合は、得られる等価減衰は低下する。

等価線形化法による応答評価 p16

エネルギーの釣合いに基づく応答評価

Response evaluation by energy-balance principle

$W_e + W_h + W_p = E$ ← $T=1\text{sec}$ 以上ではほぼ一定
 弾性エネルギー 減衰エネルギー 弾塑性エネルギー 入力エネルギー
 Assume that total input energy is constant over $T>1\text{ sec}$

$E = \frac{mV_E^2}{2}$: エネルギー入力を V_E で表現 Normalized input energy

ダンパーの無い時の応答せん断力係数
 Response shear-coefficient without damper
 $\alpha_0 = \frac{2\pi V_E}{T_f g}$

エネルギーの釣合いに基づく応答評価 p17

エネルギーの釣合いに基づく応答評価

Dissipated energies

積層ゴムせん断力係数 $\alpha_f = \frac{Q_f}{mg}$ ダンパーせん断力係数 $\alpha_d = \frac{Q_{dy}}{mg}$

弾性エネルギー
 Elastic energy $W_e = \frac{Q_f u_m}{2} = \frac{Q_f^2}{2k_f} = \frac{\alpha_f^2 (mg)^2}{2k_f}$

減衰エネルギー
 Viscous energy $W_h = 2n\pi h \frac{\alpha_f^2 (mg)^2}{k_f}$

弾塑性エネルギー
 Plastic energy $W_p = 4n_s Q_{dy} u_m = 4n\alpha_d \frac{\alpha_f (mg)^2}{k_f}$

エネルギーの釣合いに基づく応答評価 p17

エネルギーの釣合いに基づく応答評価(3)

$W_e + W_h + W_p = E$
 弾性エネルギー 減衰エネルギー 弾塑性エネルギー 入力エネルギー

$\frac{\alpha_f^2 (mg)^2}{2k_f} + 2n\pi h \frac{\alpha_f^2 (mg)^2}{k_f} + 4n\alpha_d \alpha_f \frac{(mg)^2}{k_f} = \frac{mV_E^2}{2} = \frac{\alpha_0^2 (mg)^2}{2k_f}$

$n=2, a=8\left(\frac{\alpha_d}{\alpha_0}\right)$ とおくと、 $(1+8\pi h)\left(\frac{\alpha_f}{\alpha_0}\right) + 2a\left(\frac{\alpha_f}{\alpha_0}\right) - 1 = 0$

“a” as a damper volume index

$h=0$ のとき
 $\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{\alpha_f + \alpha_d}{\alpha_0} = -\frac{7}{8}a + \sqrt{a^2 + 1}$

上式は、 $a=1.8$ 程度で最小値をとる。
 Optimal damper volume is decided around $a=1.8$

エネルギーの釣合いに基づく応答評価 p18

例題1.6

鉛ダンパーを22台 ($Q_{dy}=4840\text{kN}$) 投入した時の応答

$E = \frac{mV_E^2}{2} = \frac{9450 \times 1.65^2}{2} = 12864\text{kNm}$

$\alpha_0 = \frac{2\pi V_E}{T_f g} = \frac{2 \times 3.14 \times 1.65}{4.4 \times 9.8} = 0.24$ $\alpha_d = \frac{Q_{dy}}{mg} = \frac{4840}{9500 \times 9.8} = 0.052$

ダンパー比 $a = 8\left(\frac{\alpha_d}{\alpha_0}\right) = 8\left(\frac{0.052}{0.24}\right) = 1.73$ ← 1.8 に近い

$\frac{\alpha}{\alpha_0} = -\frac{7}{8}a + \sqrt{a^2 + 1} = 0.48$ $\alpha = 0.24 \times 0.48 = 0.115$, $\alpha_f = 0.115 - 0.052 = 0.063$

最適設計を行ったとき、 $\alpha_f \approx \alpha_d \approx 0.05$, $\alpha \approx 0.10$

最大変形 $u_m = \frac{Q_f}{k_f} = \frac{\alpha_f mg}{k_f} = \frac{0.063 \times 9500 \times 10^3 \times 9.8}{1.92 \times 10^7} = 0.31(\text{m}) = 31(\text{cm})$

累積吸収エネルギー $W_p = 4nQ_{dy}u_m = 4 \times 22 \times 30 \times 220\text{kN} \times 0.34\text{m} = 197,472\text{kNm} > E = 12,864\text{kNm}$

エネルギーの釣合いに基づく応答評価 p18

免震構造の機構

Composition of Seismic Isolation

① 鉛直荷重を支持する機構
 ② 水平方向の復元力を与える機構
 ③ 変形を抑制する機構

免震層

免震支承
 Isolation Bearings

ダンパー
 Damper

免震部材の種類と特性 p19

免震部材の種類

Popular seismic isolation systems

代表的な“免震支承”と“ダンパー”

免震支承 Bearing	積層ゴム支承 Rubber bearing	天然ゴム系積層ゴム支承 高減衰ゴム系積層ゴム支承 鉛プラグ型積層ゴム支承
	すべり支承 Sliding bearing	弾性すべり支承
	転がり支承 Rolling bearing	ボールベアリング支承
ダンパー Damper	履歴減衰型 Elasto-plastic	鋼材ダンパー 鉛ダンパー
	粘性減衰型 Viscous	粘性ダンパー オイルダンパー
	摩擦減衰型 Friction	摩擦ダンパー

免震部材の種類と特性 p19

積層ゴム支承(天然ゴム系積層ゴム) Natural Rubber Bearing

天然ゴム系積層ゴムの履歴特性

- ・引張り強さや伸び、耐クリープ性に優れ、温度変化による物性変化が少ない天然ゴムを主体とした積層ゴム支承
- ・①と②の機構に特化したもの
- ・履歴特性は軸力の変動や変位履歴による影響がほとんどなく大変形まで安定

免震部材の種類と特性 p20

積層ゴム支承(高減衰ゴム系積層ゴム) High-damping Rubber Bearing

高減衰ゴム系積層ゴムの履歴特性

- ・ゴム材料に特殊添加剤を配合しゴムの弾性挙動に減衰能力を付加させたもの
- ・①②③の機構を合わせ持つもの
- ・荷重履歴、せん断変形量、面圧、振動数、温度、繰返し回数などの各種依存性が顕在化し、水平方向の復元力特性が複雑

免震部材の種類と特性 p20

積層ゴム支承(鉛プラグ型積層ゴム) Lead Rubber Bearing

鉛プラグ型積層ゴムの履歴特性

- ・天然ゴム系積層ゴムの中央に鉛プラグを挿入したのも
- ・積層ゴムにより①、②の機構を、鉛プラグにより③の機構をもたせる
- ・鉛プラグを挿入するために積層ゴムの中心部に設けた欠損の影響により面圧依存性が大きくなる傾向がある

免震部材の種類と特性 p20

免震支承(摩擦すべり支承) Friction Bearing

弾性すべり支承の構造と履歴特性

- ・テフロンとステンレスの組合せ等により摩擦抵抗を小さくした支承
- ・積層ゴムと組合わせて免震周期の長周期化を図る手段として利用することもある
- ・摩擦力をダンパーとして利用することもあるが、軸力変動の大きい柱を支持する場合には注意が必要

免震部材の種類と特性 p20

免震支承(転がり支承) Roll Bearing

転がり支承の構造と設置例

- ・支持荷重に影響されずに免震周期を設定できる
- ・転がり支承のみで用いる場合は復元力とダンパーが必要
- ・球面上を転がることで復元力を持たせるものもある
- ・機械的な機構のため、維持管理が不可欠

免震部材の種類と特性 p20

球面すべり支承 Friction Pendulum or Spherical Sliding Bearing

球面すべり支承の構造と設置例

- ・支持荷重に影響されずに免震周期を設定できる
- ・軽量構造や重量変化を伴う構造物に適している
- ・許容変形量が大きな支承を容易に製作できる

免震部材の種類と特性 p20

ダンパー(鋼材ダンパー) Steel Loop Damper

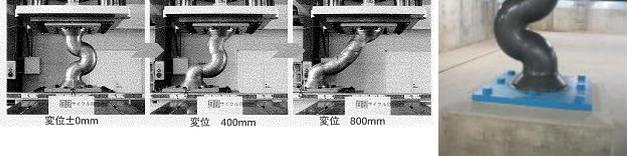


鋼棒ループダンパーの設置例 **U型ダンパーの設置例**

- ・延性に優れた軟鋼の塑性履歴エネルギー吸収能力を利用したもの
- ・ループ状に加工したり、U型に加工することにより、大きな変形追随性能と高い繰返し能力を有する

免震部材の種類と特性 p21

ダンパー(鉛ダンパー) Lead damper

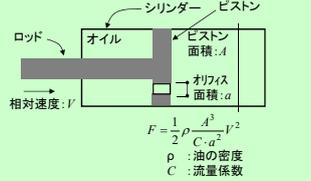


鉛ダンパー大変形時の状況 **鉛ダンパーの設置例**

- ・鉛の塑性履歴エネルギー吸収能力を利用したもの
- ・純鉛を大変形に追随できるようにたるみを持たせた形状の物が一般的
- ・繰返し大変形を受けると軟化するが、再結晶により元に戻る性質をもつ

免震部材の種類と特性 p21

ダンパー(オイルダンパー) Viscous damper



オイルダンパーの機構 **オイルダンパーの設置例**

$$F = \frac{1}{2} \rho \frac{A^3}{C^2 a^5} V^2$$

ρ : 油の密度
C : 流量係数

- ・シリンダー内に挿入されたオイルをピストンに設けられたオリフィスを通して流動させることにより流体粘性減衰を發揮させるもの
- ・リリーフ弁により圧力を制御して一定の抵抗力を維持しながら可動することによるエネルギー吸収を利用するものが多い

免震部材の種類と特性 p22

免震部材の配置 Layout of bearings and dampers



- ・免震支承は建物の鉛直荷重を支持する役目があるため、柱直下に設置されることが一般的
- ・ダンパーは鉛直荷重を支持していないので、設置位置は任意であり、これにより免震層の剛性調整が容易となる

免震部材の種類と特性 p22

免震部材の配置 Layout of bearings and dampers

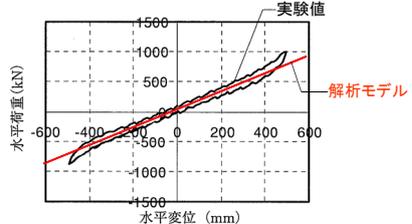


U型ダンパー一体型の天然ゴム系積層ゴム支承の設置例
Steel U-shape dampers set around rubber bearing

- ・天然ゴム系積層ゴム支承には、免震層の省スペース化を図るため、鋼材ダンパーを一体化した製品もある

免震部材の種類と特性 p22

免震部材の設計上のモデル化 Analytical model for time-history analyses
免震支承(天然ゴム系積層ゴム) Analytical model for natural rubber bearing



天然ゴム系積層ゴム支承のモデル化例

- ・天然ゴム系積層ゴム支承の履歴特性は、ほとんど履歴ループを描かず安定した挙動を示すため線形なバネとして評価する

免震部材の種類と特性

免震支承(高減衰ゴム系積層ゴム)

Analytical model for high-damping rubber bearing

等価剛性 $K_{eq} = (Q_{max} - Q_{min}) / (X_{max} - X_{min})$
 等価減衰定数 $H_{eq} = 1/4 \pi \cdot \Delta W / W$
 $W = 1/2 \cdot K_{eq} \cdot X_{max}^2$
 ΔW : 吸収エネルギー
 W : ひずみエネルギー
 降伏荷重係数 $U = Q_d / Q_{max}$
 Q_d : 切片荷重
 等価せん断弾性係数 $G_{eq} = (n \cdot tr / A) \cdot K_{eq}$
 n : ゴム総数
 tr : 一層当たりのゴム厚さ
 A : ゴム断面積

高減衰ゴム系積層ゴムの特性評価方法

- 荷重-変形関係が履歴ループを描き、せん断ひずみに依存した履歴特性
- 剛性は各ひずみレベルの最大変形時の荷重を変形量で除した**等価剛性**
- 減衰は履歴ループが囲む面積をひずみエネルギーで除した**等価減衰定数**

免震部材の種類と特性

免震支承(高減衰ゴム系積層ゴム)

Analytical model for high-damping rubber bearing

高減衰ゴム系積層ゴムのモデル化例

- せん断ひずみ γ と等価せん断弾性係数や等価減衰定数等の関係式から復元力の特性を決めるための諸定数を求め、**修正バイリニアモデル**に置換する

免震部材の種類と特性

免震支承(鉛プラグ型積層ゴム)

Analytical model for lead rubber bearing

鉛プラグ型積層ゴムのモデル化例

- 履歴特性はバイリニア型のループを描き、せん断ひずみの対し依存性を有する
- 降伏後剛性と除荷剛性の2種類のバネ定数と降伏荷重をひずみの関数で設定した**修正バイリニアモデル**が用いられることが多い

免震部材の種類と特性

ダンパー(鋼材ダンパー)

Analytical model for Steel Damper

鋼棒ループダンパーのモデル化例

- バイリニア型の復元力で評価するのが一般的
- 降伏後に**2次剛性を持たせる**ことが多い

免震部材の種類と特性

ダンパー(鉛ダンパー)

Analytical model for Lead Damper

鉛ダンパーのモデル化例

- バイリニア型の復元力で評価するのが一般的
- 降伏後の**2次剛性を持たない完全弾塑性型**の復元力でモデル化することが多い

免震部材の種類と特性

ダンパー(オイルダンパー)

Analytical model for Viscous Damper

オイルダンパーの履歴特性

- 復元力特性は楕円に近い形状
- 作動オイルが一定以上の圧力に達したときに油圧を下げるリリース弁を持つものもある

免震部材の種類と特性

ダンパー(オイルダンパー) Analytical model for Viscous Damper

$$\frac{1}{K_b} = \frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_v}$$

ダンパー内部
ダンパー剛性
取付部材剛性

最大減衰力 Fmax
リリーフ荷重 Fy
リリーフ速度 Vy
最大速度 Vmax

オイルダンパーのモデル化例

- ・ ダッシュポットとダンパー剛性、取り付け部材剛性を直列結合した **Maxwellモデル**を用いることが多い
- ・ リリーフ弁により**速度と減衰力の関係にバイリニア**の特性を持たせるものもある

免震部材の種類と特性

免震層の位置 Position of isolated layer

(a)基礎免震

(b)中間層免震

- ・ 上部構造、免震層、下部構造およびその外周部の空間要素で構成される
- ・ “基礎免震”と“中間層免震”に大別できる

免震構造の計画

免震建物各部の計画 Notes for designing structures

- 1. 上部構造 Superstructures**
 - ・ 上部構造に作用する地震力は一般耐震建物に比べ小さい
 - ・ 地震エネルギーのほとんどは免震層の減衰機構(ダンパー等)で吸収される
 - ・ 免震層を介して伝わる水平力に抵抗できる強度を確保する
 - ・ 水平剛性が低いと下層に比べ上層の応答が大きくなり免震効果が落ちる
- 2. 下部構造 Foundation**
 - ・ 免震層に有害な不同沈下を生じさせない鉛直支持能力をもたせる
 - ・ 免震層に生じる水平力と下部構造自身に加わる地震力を安全に地盤に伝える基礎構造としての性能をもたせる

免震構造の計画 p23

免震建物各部の計画

3. 免震層 Isolated layer

- ・ 免震部材全体の剛心を上部構造の重心に一致させる
- ・ 積層ゴムの直径は面圧が許容面圧以下となるよう選定する
- ・ 最小径は免震層の設計変位の2倍程度とする ($S_2=5, \gamma=250\%$)
- ・ 免震支承には引張力を生じさせないことが原則
積層ゴム支承のせん断変形時の挙動は、せん断変形率 $\gamma=250\%$ 程度まではほぼ線形範囲である。これ以降はハードニング現象により剛性が徐々に大きくなり、最終的には約400%で破断にいたる。よって、設計変位としては $\gamma=250\%$ 程度以下を目標とする。

通常使われている2次形状係数が5程度の積層ゴム支承ではせん断変形率250%は直径の半分の変形に相当する。

免震構造の計画 p23

免震建物各部の計画

4. 建物外周部 Around the isolated structures

- ・ 建物周囲に可動範囲といわれる空間が必要
- ・ 上部構造と擁壁で支えられた周辺地盤との間隔が**免震クリアランス**
- ・ 建物と周辺地盤との衝突を避けることの出来る十分な量を確保する

免震構造の計画 p23

免震構造の計画 Design Example of Isolated Building

建築面積: 2500m² 延床面積: 4900m²
構造種別: 鉄筋コンクリート造 階数: 地上2階 上部構造総質量: 9450t

免震構造の計画 p25

免震支承の設定と固有周期の計算 Layout of bearings and natural periods

- ・ 免震支承のみの剛性による周期は**4秒以上**となるよう計画
- ・ 建物外周部(20箇所)に**低弾性系の天然ゴム系積層ゴム支承**中柱下(12箇所)に**弾性すべり支承**を設置
- ・ 建物外周部の免震支承が支持する荷重は約3000kN
免震支承の面圧が許容面圧 10N/mm²以下となるよう、直径は700φとする

・ 免震支承のみの剛性は

$$k_f = 8 \times 10^5 \times 20 = 160 \times 10^5 \text{ N/m}$$

・ 免震支承のみの固有周期は、式(1. 1. 5)より

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_f}} = 2\pi \sqrt{\frac{9450 \times 10^3}{160 \times 10^5}} = 4.83 \text{ sec} \geq 4.0 \text{ sec}$$

免震構造の計画 p26

ダンパーの設定 Design of dampers

- ・ 免震層の目標最大変形を支承径の半分(35cm)程度とする(2次形状係数が5の支承でせん断ひずみ250%に相当)
- ・ 1章の例題1. 1と同様な計算により等価減衰35%程度のダンパーを設置する
- ・ 降伏変位 0.73 cmの鉛ダンパーを使用する

・ 必要ダンパー耐力は、式(1. 3. 7)より

$$Q_{dy} = \frac{\pi h_d k_f u_m^2}{1.6(u_m - u_{dy})} = \frac{\pi \times 0.35 \times 160 \times 35^2}{1.6(35 - 0.73)} = 3930 \text{ (kN)}$$

- ・ 降伏耐力 220 kNの鉛ダンパーを18台設置する(220×18=3960 kN)
- ・ 免震層内の設備配管との干渉を避けるためと、免震層のねじれ剛性を高めるため、ダンパーは建物外周部に配置する

免震構造の計画 p26

最大応答値の評価(応答スペクトル法)

Response Evaluation with response spectrum method with equivalent linearization

・ 1章の例題1. 5と同様に最大応答値を評価する

・ 塑性率 μ は、式(1. 2. 9)、(1. 3. 18)、(1. 3. 21)より

$$\text{最大応答変位 } S_D = 0.75T/\pi = 0.75 \times 4.83/\pi = 1.15 \text{ m} = 115 \text{ cm}$$

$$\frac{k_d}{k_f} = \frac{300 \times 18}{160} = 34, \quad \mu^{(0)} = \frac{115}{0.73} = 157$$

$$h_{eq}^{(1)} = h_0 + \frac{2(1+k_d/k_f)}{\pi\mu_m} \ln \frac{\mu_m + k_d/k_f}{(1+k_d/k_f)\mu_m^{1+k_d/k_f}}$$

$$= 0.02 + \frac{2(1+34)}{\pi \times 157} \ln \frac{157+34}{(1+34)157^{1+34}} = 0.24, \quad F_h^{(1)} = \sqrt{\frac{1+25 \times 0.02}{1+25 \times 0.24}} = 0.46$$

$$\frac{k_{eq}^{(1)}}{k_f} = 1 + \frac{34}{157} = 1.22, \quad \mu^{(1)} = \mu^{(0)} F_h \sqrt{\frac{k_f}{k_{eq}^{(1)}}} = 157 \times 0.46 \times \sqrt{\frac{1}{1.22}} = 66$$

免震構造の計画 p26

最大応答値の評価(応答スペクトル法)

・ μ の値が一定になるまで繰り返す

$$h_{eq}^{(2)} = 0.33, \quad F_h^{(2)} = 0.40, \quad k_{eq}/k_f^{(2)} = 1.52, \quad \mu^{(2)} = 51$$

$$h_{eq}^{(3)} = 0.36, \quad F_h^{(3)} = 0.39, \quad k_{eq}/k_f^{(3)} = 1.67, \quad \mu^{(3)} = 47$$

$$h_{eq}^{(4)} = 0.37, \quad F_h^{(4)} = 0.38, \quad k_{eq}/k_f^{(4)} = 1.72, \quad \mu^{(4)} = 46$$

$$h_{eq}^{(5)} = 0.37, \quad F_h^{(5)} = 0.38, \quad k_{eq}/k_f^{(5)} = 1.74, \quad \mu^{(5)} = 46$$

・ 得られた塑性率 μ より最大応答変位は

$$0.73 \times 46 = 33.6 < 35 \text{ cm}$$

免震構造の計画 p26

最大応答値の評価(エネルギー法)

Response evaluation with energy balance method

・ 例題1. 6と同様にエネルギー法により最大応答値を評価する

設計用 $V_E = 165 \text{ cm/s} = 1.65 \text{ m/s}$ とすると式(1. 4. 5)、(1. 4. 9)より

$$E = \frac{mV_E^2}{2} = \frac{9453 \times 1.65^2}{2} = 12864 \text{ kNm}$$

$$\alpha_0 = \frac{2\pi V_E}{T_f g} = \frac{2 \times 3.14 \times 1.65}{4.83 \times 9.8} = 0.219 \quad \alpha_d = \frac{Q_{dy}}{mg} = \frac{220 \times 18}{9453 \times 9.8} = 0.043$$

$$\text{ダンパー比 } a = 8 \left(\frac{\alpha_d}{\alpha_0} \right) = 8 \left(\frac{0.043}{0.219} \right) = 1.57$$

免震構造の計画

最大応答値の評価(エネルギー法)

Response evaluation with energy balance method

このときの応答値は、式(1. 4. 22)より

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = -\frac{7}{8}a + \sqrt{a^2 + 1} = 0.488, \quad \alpha = 0.219 \times 0.488 = 0.107,$$

$$\alpha_f = 0.107 - 0.043 = 0.064$$

最適設計時には、積層ゴムとダンパーのせん断力が同等となる。
ベースシアは計0.1~0.2程度

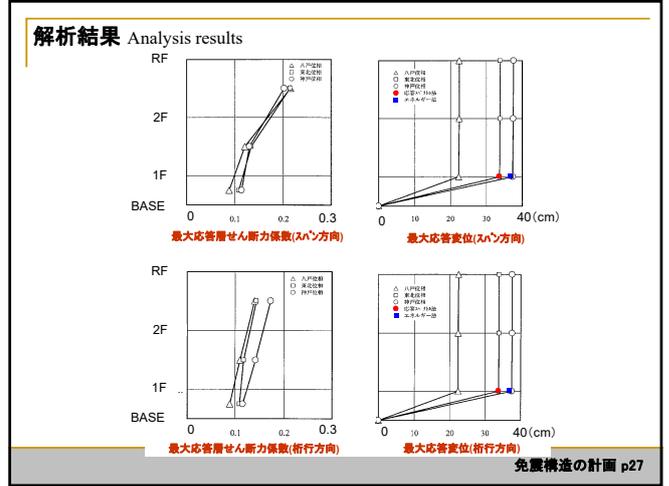
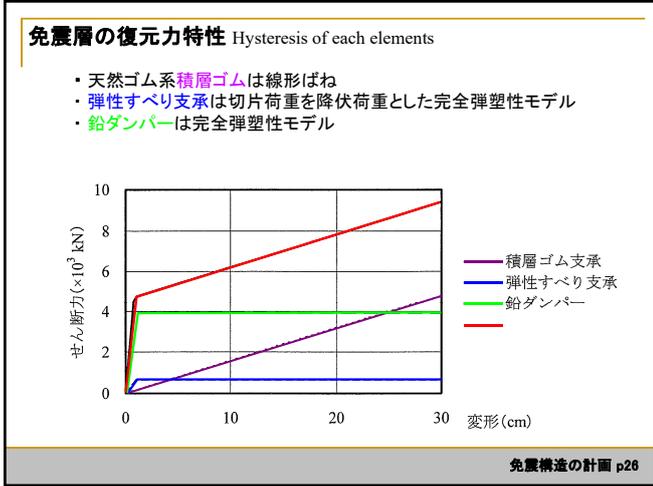
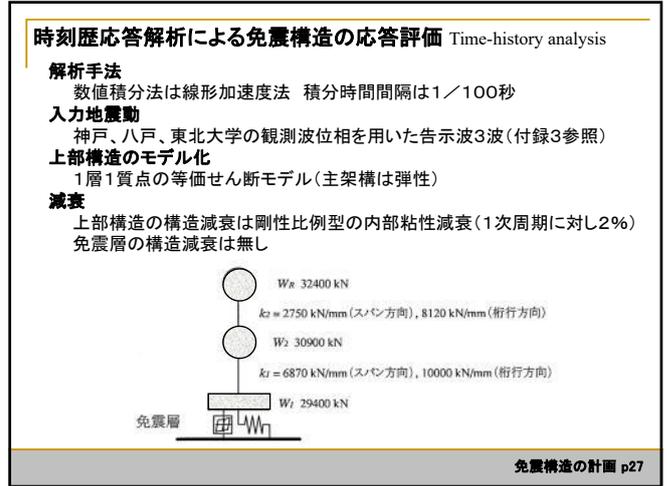
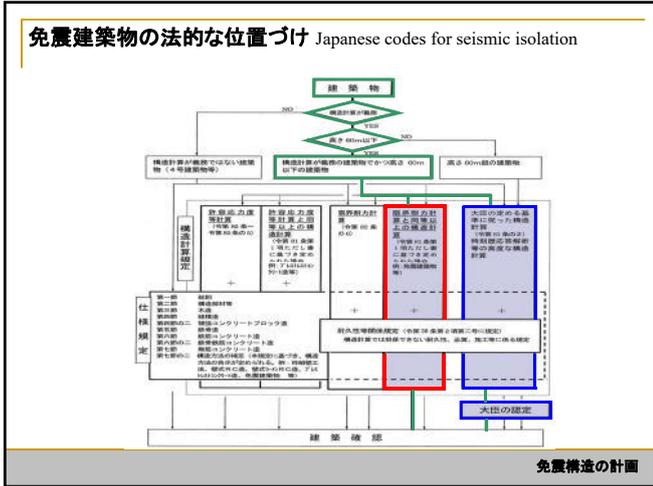
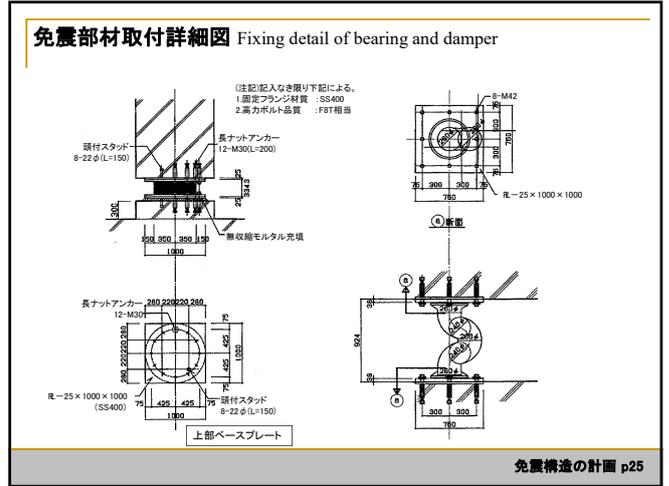
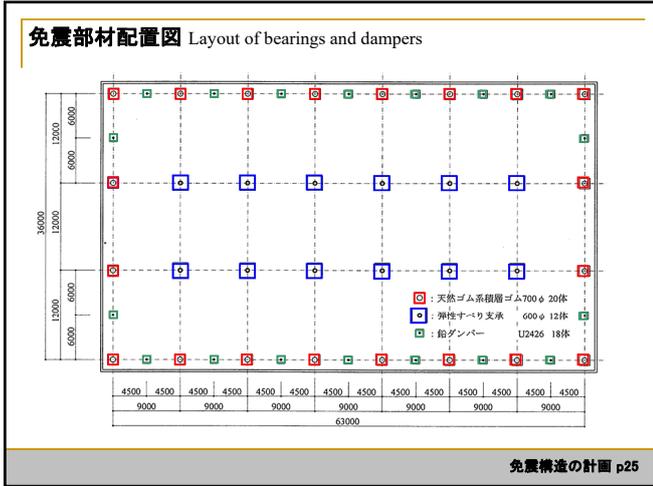
最大変形は、式(1. 4. 24)より

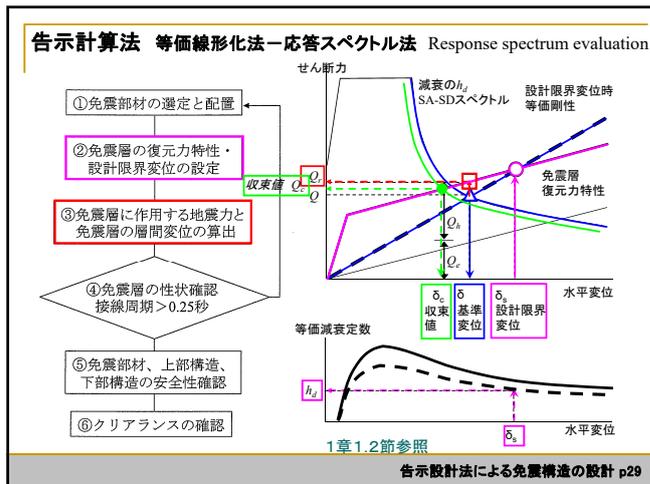
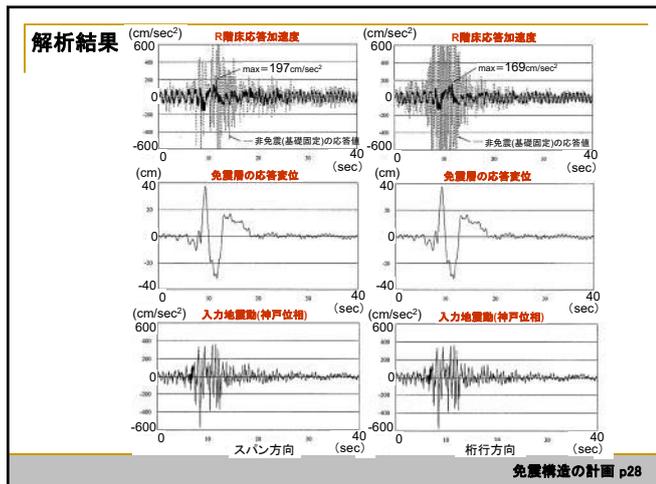
$$u_m = \frac{Q_f}{k_f} = \frac{\alpha_f mg}{k_f}$$

$$= \frac{0.064 \times 9450 \times 10^3 \times 9.8}{160 \times 10^5} = 0.37 \text{ (m)} = 37 \text{ (cm)}$$

その時免震層最大変形は30~40cm

免震構造の計画





免震層に作用する地震力と免震層の応答変位の算出

免震層の設計限界変位 δ_s . Allowable maximum deformation

	積層ゴム 700 φ	弾性すべり支承	鉛ダンパー
水平基準変形 δ_m (m)	0.560	0.650	0.800
荷重支持条件に関する係数 β	0.8	0.9	1.0
設計限界変形 δ_s (m)	0.448	0.585	0.800
免震層の設計限界変位 δ_s (m)	0.448		

告示設計法による免震構造の設計 p29

免震層に作用する地震力と免震層の応答変位の算出

設計限界固有周期 T_s (設計限界変位時の固有周期)

Equivalent natural period at allowable maximum deformation

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad \text{式(1.1.5) 参照}$$

ここで、 T_s : 設計限界固有周期 (sec)
 M : 上部構造の総質量 (ton)
 K : 免震層の等価剛性 (kN/m)

等価剛性は免震層の復元力特性上の設計限界変位 δ_s の点と原点を結んだ傾きである

免震層を構成する各免震部材の復元力特性³⁴⁾

告示設計法による免震構造の設計 p28

免震層に作用する地震力と免震層の層間変位の算出

免震層の等価剛性 K Equivalent stiffness at max. deformation

設計限界変位時における免震層の等価剛性は前節で示した免震部材諸元より

$$K = \frac{16000 \times 0.448 + 664 + 3960}{0.448} = 26321 \text{ (kN/m)}$$

上部構造体の総質量は $M = 9450$ (ton)であるので、設計限界固有周期は

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{9450}{26321}} = 3.77 \text{ (sec)}$$

告示設計法による免震構造の設計 p28

免震層に作用する地震力と免震層の応答変位の算出

免震層の等価粘性減衰定数 h_d Equivalent damping factor

$$h_d = \frac{0.8}{4\pi} \frac{\sum \Delta W_i}{\sum W_i} = \frac{0.8}{4\pi} \frac{8143}{2642} = 0.196 \quad \text{式(1.3.6) 参照}$$

$$\sum \Delta W_i = 4 \times 3960 \times (0.448 - 0.0073) + 4 \times 664 \times (0.448 - 0.0105) = 8143 \text{ (kNm)}$$

$$\sum W_i = 3960 \times 0.448 / 2 + 664 \times 0.448 / 2 + 16000 \times 0.448^2 / 2 = 2642 \text{ (kNm)}$$

免震層を構成する各免震部材の W_i ³⁴⁾

告示設計法による免震構造の設計 p28

免震層に作用する地震力と免震層の応答変位の算出

設計限界固有周期における加速度の低減率 F_h
Response reduction ratio by additional damping

設計限界固有周期における免震層の振動の減衰による加速度低減率 F_h を次式により計算する

$$F_h = \frac{1.5}{1+10(h_d+h_v)} = \frac{1.5}{1+10 \times 0.196} = 0.506 > 0.40$$

ここで、 h_d : 履歴免震材による免震層の等価粘性減衰定数
 h_v : 流体系の減衰材による免震層の等価粘性減衰定数 (本例では0)

1章の(1.2.8)式において $h_0 = 0.05$ としたものと同一である

告示設計法による免震構造の設計 p28

免震層に作用する地震力と免震層の応答変位の算出

免震層に作用する地震力 Q
Response shear force at isolated layer

$0.64 \leq T_s = 3.77$ より、免震層に作用する地震力 Q は、(1.2.4)式のスペクトルに、精算した地盤増幅係数 G_s を使用して以下のようになる

$$Q = \frac{5.12}{T_s} \cdot M \cdot F_h \cdot Z \cdot G_s = \frac{5.12}{3.77} \times 9450 \times 0.506 \times 1.0 \times 1.208 = 7845 \text{ (kN)}$$

ここで、 Z : 地域係数=1
 G_s : 付録3参照

告示設計法による免震構造の設計 p28

免震層に作用する地震力と免震層の応答変位の算出

免震層の応答変位 δ_r Response deformation at isolated layer

免震層の応答変位 δ_r が設計限界変位 δ_s を超えないことを確認する

免震層の基準変位 δ は

$$\delta = \frac{Q}{K} = \frac{7845}{26321} = 0.298 \text{ (m)} = 30 \text{ (cm)}$$

これに免震材のばらつき、環境及び経年変化に関する係数 $\alpha = 1.2$ を乗じて免震層の代表変位 δ_r を算定する

$$\delta_r = \alpha \cdot \delta = 1.2 \times 0.298 = 0.358 \text{ (m)}$$

ねじれに関しては、免震層の偏心率を0.03以内にした上で、不測の偏心の影響などを念頭に置いて、**応答値を1.1倍**して免震層外縁部の免震部材の応答変位 δ_r を評価する

$$\delta_r = 1.1 \cdot \delta_r = 1.1 \times 0.358 = 0.394 < \delta_s = 0.448 \text{ (m)} \quad \text{OK}$$

告示設計法による免震構造の設計 p28

免震クリアランスの確認

免震層のクリアランス Required clearance around the building

免震層のクリアランスは上部構造が周囲の擁壁等に衝突することがないように、応答変位の**1.25倍以上**でかつ応答変位に**0.2mを加えた**数値以上とする

$$1.25 \cdot \delta_r = 1.25 \times 0.394 = 0.473 \text{ (m)}$$

$$\delta_r + 0.20 = 0.394 + 0.20 = 0.594 \text{ (m)}$$

$$\max(1.25 \cdot \delta_r, \delta_r + 0.20) = 0.594 \text{ (m)}$$

免震層のクリアランス0.6(m)とする

告示設計法による免震構造の設計 p28

免震の接線周期の確認 natural period with tangent stiffness

免震建築物の特徴は建築物を長周期化して建物に作用する地震力を低減することにあるため、告示では過去の実例を参考にして免震層の応答変位時の接線周期を**2.5秒以上**とする制限が設けられている。

ここでいう接線周期は全ての弾塑性系減衰材が降伏した後の免震層の剛性に対する周期を意味している

接線剛性 $K_t = 16000 \text{ (kN/m)}$

$$T_t = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_t}} = 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{9450}{16000}} = 4.83 > 2.5 \text{ (sec)} \quad \text{OK}$$

告示設計法による免震構造の設計 p28

設計用せん断力の算定 Shear force distribution for superstructures

設計用せん断力の分布としては、支承材及び復元材の負担せん断力には高さ方向への増幅は考えず、減衰材及びこれと同等の減衰特性を有する支承材の部分の負担せん断力には分布の増幅(Ai分布)を考える

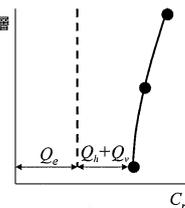
地震層せん断力係数は、次式によって算定する

$$C_n = \gamma \cdot \frac{\sqrt{(Q_h + Q_e)^2 + 2\epsilon(Q_h + Q_e)Q_v + Q_v^2} \cdot A_i(Q_h + Q_v) + Q_e}{M \cdot g} = \gamma \cdot \frac{A_i \cdot Q_h + Q_e}{M \cdot g} = \gamma \cdot A_i \cdot 0.1 \quad (\because Q_e = 0)$$

ここで、基準変位時の各免震材料の負担せん断力として

- 鉛ダンパー : $Q_h = 3960 \text{ (kN)}$
- 弾性すべり支承 : $Q_e = 664 \text{ (kN)}$
- 積層ゴム支承 : $Q_v = 16000 \times 0.298 = 4768 \text{ (kN)}$

とし、免震材のばらつき、環境及び経年変化の影響を考慮した係数 $\gamma = 1.3$ として計算する



告示設計法による免震構造の設計 p29

上部構造の検討 Design of superstructure

以上により各層の設計せん断力は下表ようになる

階	w_i (kN)	Σw_i (kN)	A_i	C_{vi}	Q_i (kN)
2	32400	32400	1.352	0.155	5010
1	30900	63300	1.138	0.141	8910
(免震層)	29400	92700	1.000	0.132	12210

上記地震力に対し、許容応力度設計を行う。

各階の層間変形角が1/300以内であることを確認する

告示設計法による免震構造の設計 p29

免震部材の検討 Design of bearings

長期荷重および地震時荷重に対し以下の検討を行う。

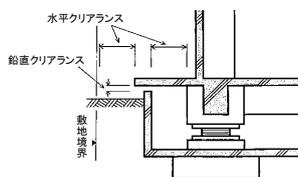
- ①長期
長期支持荷重が長期許容圧縮荷重以下であること。
- ②地震時圧縮
長期支持荷重と設計地震時圧縮力の和が短期許容圧縮荷重以下であること。
- ③地震時圧縮+地震時鉛直
長期支持荷重を1.3倍した値と設計地震時圧縮力の和が材料強度から求まる圧縮荷重以下であること。
- ④地震時引張+地震時鉛直
長期支持荷重を0.7倍した値と設計地震時引張力の和は0以上であること。

告示設計法による免震構造の設計 p29

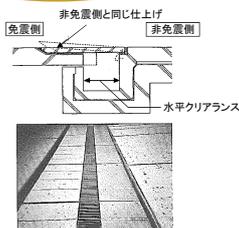
可動部分の設計 Design of Exp. Joint

一般建物と大きく違う点は、免震層という水平方向に大きく変形する部分が存在すること

免震クリアランス



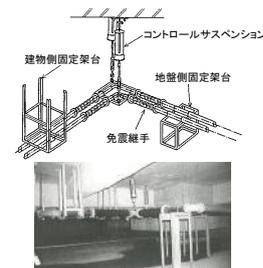
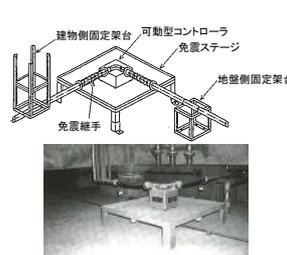
出入り口



建築設計上の留意点と維持管理 p31

可動部分の設計 Treatments for pipe works

設備配管・配線



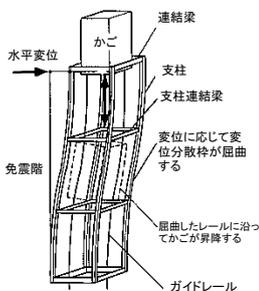
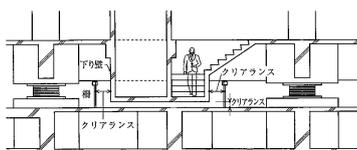
キャスト支持タイプ

ばね吊りタイプ

建築設計上の留意点と維持管理 p31

可動部分の設計

階段・エレベーター
Stairs and Elevators



階段・エレベーターピットの断面

可換エレベーターフレーム

建築設計上の留意点と維持管理 p32

建築設計上の留意点 Notes for architectural design

風に対する設計

強風時に揺れが問題とならないよう、風荷重に対してはダンパーを降伏させないようにするのが一般的である

上下動

免震建築で用いる積層ゴムは、水平方向には柔らかいが、上下方向に対しては通常のRC部材の鉛直剛性と変わらないため、上下動に対して免震効果は無く、通常の建物と同じである

耐火被覆

基礎免震建物の場合、免震支承は基礎とみなされ、耐火被覆は必要とならないが、中間層免震の場合は、免震支承が法的には柱とみなされるため、免震支承に耐火被覆を施すか、防火区画により免震層に火災が及ばないようにするなどの配慮が必要になる

建築設計上の留意点と維持管理 p32

維持管理 maintenance

No.	項目	施工時点検	定期点検	竣工後5.10年、以後10年ごと	応急点検	詳細点検
1	実施時期	建物竣工時	1回/年程度	竣工後5.10年、以後10年ごと	災害発生時	災害発生時
2	検査・点検対象	免震部材、免震層・建物外周部、設備配管・配線可視部、別置き試験体				
3	箇所	全数	目視:全数 記録:1/2	目視:全数 記録:1/2	目視:全数 記録:1/2	目視:全数 記録:1/2
4	方法	目視、計測	目視	目視、計測	目視	目視、計測
5	管理態	設計図書またはJSSI免震建築物維持管理基準による				
6	実施者	点検技術者	建物管理者、点検技術者			点検技術者

建築物所有者(管理組合等含む) ← 相談 → 建物設計者
 報告・改善提案 ← 委託 → 点検技術者** (専門業者または第三者機関)**
 建物管理者 ← 異常時に連絡 → 点検技術者**
 報告・改善提案 ← 異常の早期発見 → 点検技術者**
 日常的に建物の異常を監視する (参考資料: ユーザーズマニュアル)
 ・(竣工検査)
 ・定期点検
 ・応急点検
 ・詳細点検

建築設計上の留意点と維持管理 p32

免震部材の取付方法 Anchorage for bearings

確認孔兼空気抜き孔、ベースプレート、無収縮モルタル、はかま筋、頭付きスタッド、炭ナット、圧入

グラウト充填工法

パイプレータをかけすぎないようにする、余盛をしておく(後で削る)、専用ホッパー、コンクリートの流れ、気泡が移動、ベースプレート、確認孔兼空気抜き、型枠、150~300mm程度

コンクリート打込み工法

建築設計上の留意点と維持管理

建築計画の自由度の増加 Design possibility with seismic isolation

ガラス、レンガ、コンクリートコア、免震部材、地域免震、軌道上空ビル、やじるべ免震

カーテンウォールを剛性材として利用、層の不明快な構造

今後、免震構造を利用した新たな建築の可能性を期待したい

免震構造の応用例と可能性 p38

中間層免震 (飯田橋ファーストビル・ファーストヒルズ飯田橋) Mid-level isolated buildings

免震構造の応用例と可能性

中間層免震 (住友汐留ビル) Shiodome Sumitomo Bld.

Height 126 m
Isolated at 12th floor

免震構造の応用例と可能性

中間層免震 (鉄鋼ビル) Tekko building, Tokyo, 2016

24F, 135m & 100m
Isolated at 3rd floor

免震構造の応用例と可能性

中間層免震(六本木グランドタワー)

Roppongi Grand Tower, Tokyo, 2016
43F, 231mm
Isolated at 29th floor

中間層免震(トライセブン六本木)

Tri-seven Roppongi, Tokyo, 2016
14F, 80m
Isolated at 3rd floor

Reasons for Mid-level Isolation

- 1) No space for expansion joints at the ground level.
- 2) Well fitting with architectural program as tEV shaft.
- 3) Avoiding Tsunami risk (Isolation layer flood).
- 4) Avoiding lift-up at Bearings

屋根免震(イスタンブール国際空港)

[28] M. Constantinou, A. S. Whittaker, E Velivasakis: Seismic Evaluation and Retrofit of the Ataturk International Airport Terminal Building, Research Progress and Accomplishments: 2000-2001, MCEER Bulletin.

免震構造の応用例と可能性

屋根免震(サンフランシスコ国際空港)

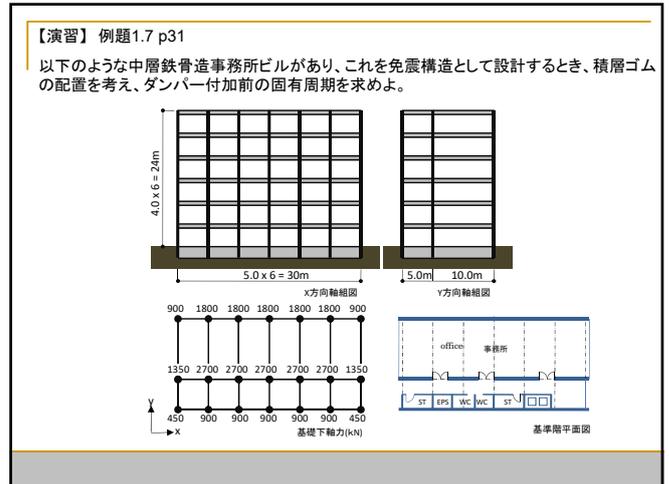
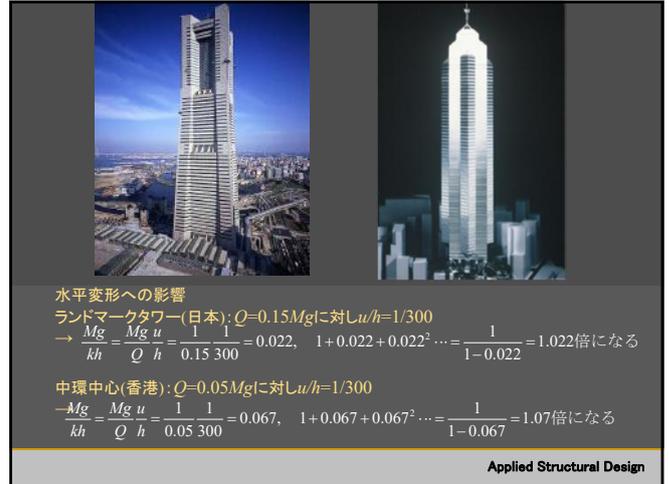
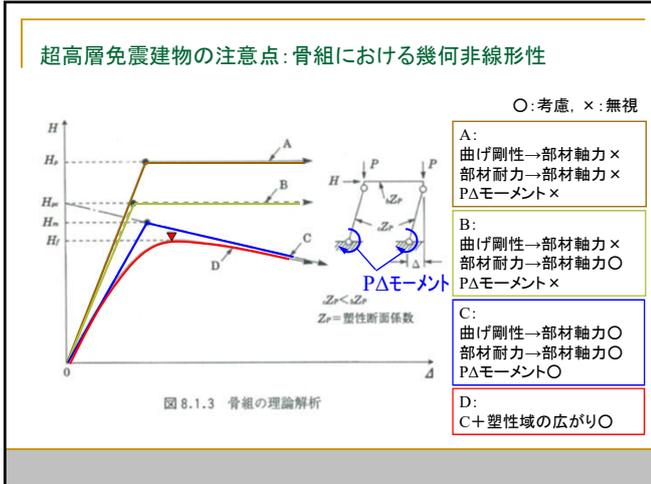
[32] A. S. Mokha, P. L. Lee, X. Wang, P. Yu: Seismic Isolation Design of the New International Terminal at San Francisco International Airport, Conf. Struct. Eng. in the 21st Century, 1999

屋根免震(吹田サッカースタジアム)

Suita Football Stadium, Osaka, 2016
40,000 seats,
Roof area 23,000m² weight 3,500t

屋根免震(オリンピックアクアティクスセンター)

Aqua Arena for Olympic 2020, Tokyo,
under construction
20,000 seats,



使用できる積層ゴム(とダンパー)

積層ゴムの常時面圧を 10 N/mm^2 以下とすること。
レベル2相当の免震層の変形 300mm を許容するように積層ゴムを選択すること。

積層ゴムの諸元(面圧 10N/mm^2 タイプ) *設計限界変形は直径の0.64倍とする

外径(mm)	φ300	φ400	φ500	φ600	φ700	φ800	φ900
鉛直剛性(kN/mm)	1070	1427	1784	2140	2497	2854	3210
水平剛性(kN/mm)	0.34	0.46	0.57	0.69	0.80	0.92	1.03

ダンパーの諸元

名称	UD55x4
降伏せん断力(kN)	304
初期剛性(kN/mm)	9.6
降伏変位(mm)	31.7

*設計限界変形は 0.8m とする

本日は考慮しない

固有周期を求める式 $T_f = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_f}}$

積層ゴム ダンパー