

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2  
Seismic Isolation and  
Response evaluation 2

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

制振構造の設計 p45-74

(a) 各層配置 (b) 同調質量

**制振構造の構成**

**制振構造**

パッシブ制振      セミアクティブ      アクティブ制振

**構造形式の分類**

(a) 特定層への損傷集中 (耐震構造)    (b) 主架構の損傷 (耐震構造)    (c) 制振部材への損傷集中 (制振構造)

**耐震構造と制振構造の違い**

**制振部材の種類**

力学機構	制振部材
変位依存型ダンパー (履歴減衰部材)	① 鋼材ダンパー
	② 鉛ダンパー
	③ 摩擦ダンパー
速度依存型ダンパー (粘性減衰部材)	④ オイルダンパー
	⑤ 粘性ダンパー
	⑥ 粘弾性ダンパー

制振部材の種類と特性 p48

(1) 変位依存型ダンパー Displacement-dependent dampers

① 鋼材ダンパー Steel damper ・鋼材の優れた塑性変形能力を利用

**座屈拘束ブレース BRB**

制振部材の種類と特性 p49

**(1)変位依存型ダンパー Displacement-dependent dampers**

①鋼材ダンパー ・鋼材の優れた塑性変形能力を利用  
Steel damper

間柱せん断パネル Steel Shear Panel

制震部材の種類と特性 p50

**(1)変位依存型ダンパー Displacement-dependent dampers**

③摩擦ダンパー ・摩擦面が摺動することにより振動エネルギーを熱エネルギーに変換  
Friction damper

摩擦ダンパー(ボルト機構)

制震部材の種類と特性 p50

**(1)変位依存型ダンパー Displacement-dependent dampers**

③摩擦ダンパー ・摩擦面が摺動することにより振動エネルギーを熱エネルギーに変換  
Friction damper

摩擦ダンパー(リング機構)

制震部材の種類と特性 p50

**(2)速度依存型ダンパー Velocity-dependent damper**

①オイルダンパー ・作動油(オイル)の流体抵抗を利用  
Oil damper

オイルダンパー

制震部材の種類と特性 p50

**(2)速度依存型ダンパー Velocity-dependent damper**

②粘性ダンパー ・高分子材料のせん断動抵抗を利用  
Viscous damper

粘性ダンパー(壁型)

制震部材の種類と特性 p50

**(2)速度依存型ダンパー Velocity-dependent damper**

③粘弾性ダンパー ・粘弾性材のせん断抵抗を利用  
Visco-elastic damper

粘弾性ダンパー

制震部材の種類と特性 p50


### 制振部材の取付方法の分類<sup>4.1)</sup> Layout of dampers

	壁型	筋造型	シアリンク型
直接接合型			
間接接合型			
その他			


参考文献 4.1) 社団法人免震構造協会編「バツブ制振構造設計・施工マニュアル」第2版、2005.9  
制振部材の種類と特性 p51

### 制振部材の取付方法の分類 Diagonal Layout


	壁型	筋造型	シアリンク型
直接接合型			



(a) 座屈拘束ブレース  
BRB



(b) 摩擦ダンパーブレース  
Friction Damper

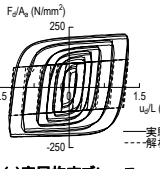


(c) オイルダンパーブレース  
Oil Damper

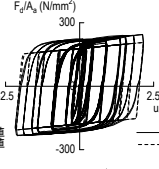
制振部材の種類と特性 p51

### 4.1.3 制振部材の設計上のモデル化 Analytical models

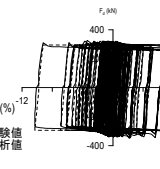
#### (1) 変位依存型ダンパー Displacement-dependent damper



(a) 座屈拘束ブレース (LY100)



(b) 座屈拘束ブレース (LY225)



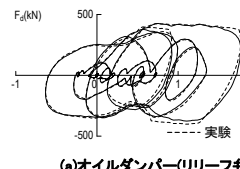
(c) 摩擦ダンパー

図4.1.11 鋼材・摩擦ダンパーの履歴曲線と解析値の比較<sup>4.1)</sup>

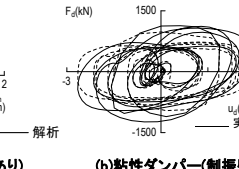
参考文献 4.1) 社団法人免震構造協会編「バツブ制振構造設計・施工マニュアル」第2版、2005.9  
制振部材の種類と特性 p52

### 制振部材の設計上のモデル化 Analytical models

#### (2) 速度依存型ダンパー Velocity-dependent damper



(a) オイルダンパー(リリーフ弁あり)



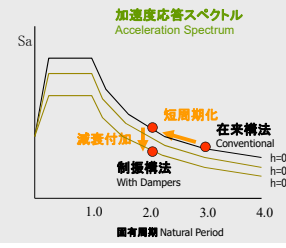
(b) 粘性ダンパー(制振壁)

図4.1.12 オイル・粘性ダンパーの履歴曲線と解析値の比較<sup>4.1)</sup>

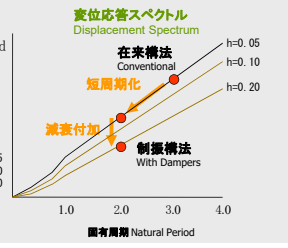
制振部材の種類と特性 p50

### 等価線形化手法による応答評価

#### 制振構造の応答低減効果 Response reduction mechanism of Passive Controlled Buildings



加速度応答スペクトル  
Acceleration Spectrum

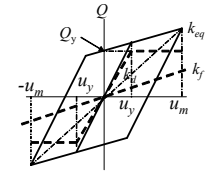


変位応答スペクトル  
Displacement Spectrum

図中有り Natural Period

### 等価線形化手法による応答評価

#### 弾塑性ダンパーの履歴モデル(剛性変化考慮)

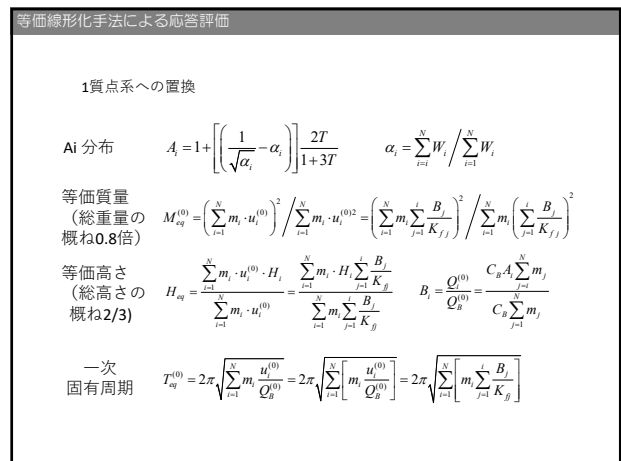
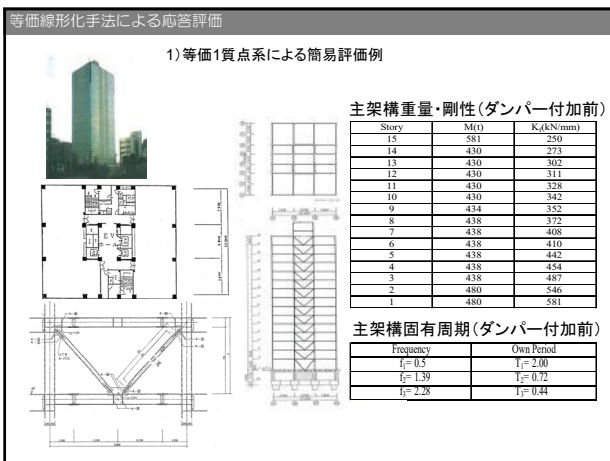
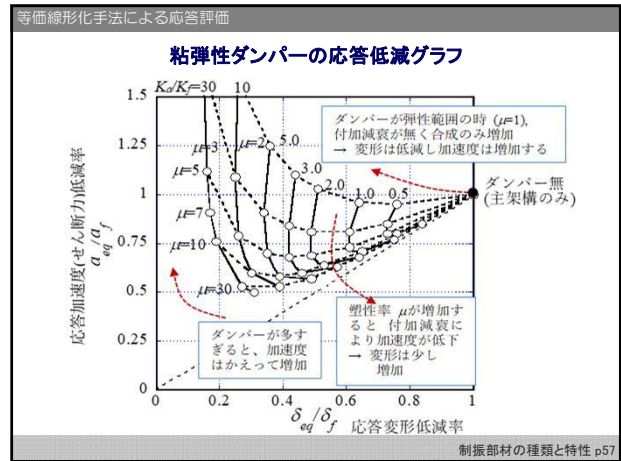
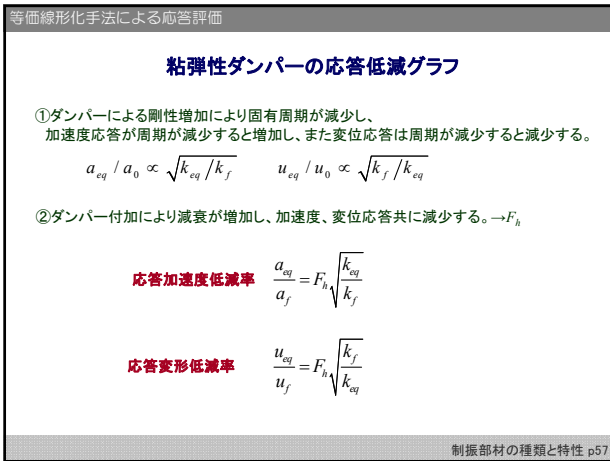
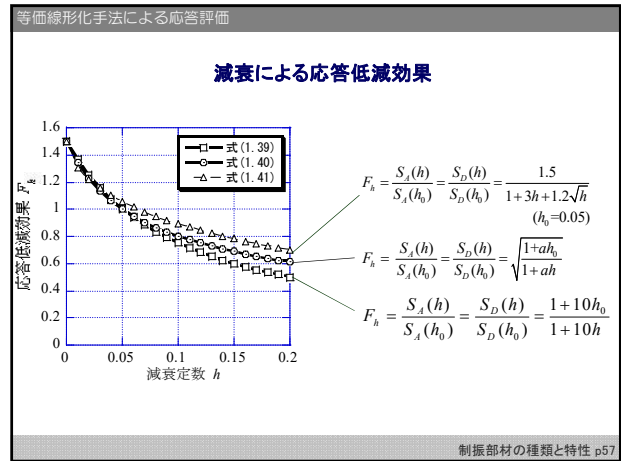
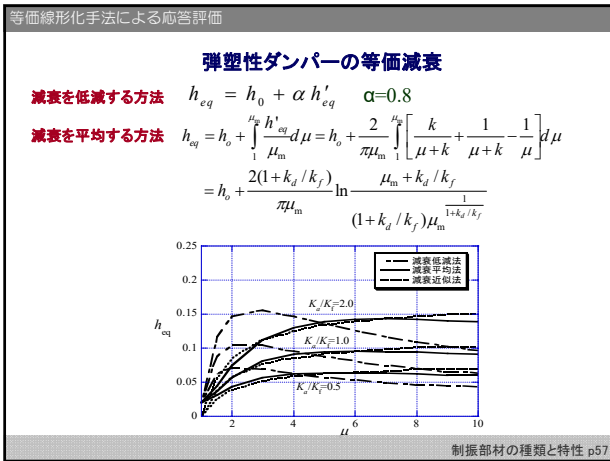


$$\text{等価剛性 } k_{eq} = \frac{k_d u_{dy} + k_f \mu u_{dy}}{\mu u_{dy}} = k_f + \frac{k_d}{\mu}$$

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

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

制振部材の種類と特性 p55



等価線形化手法による応答評価

等価質量:  $M_{eq} = 6753 \text{ t} \times 0.8 = 5402 \text{ t} = 52,940 \text{ kN}$

等価高さ:  $H_{eq} = 55 \text{ m} \times 0.67 = 37 \text{ m}$

等価質量と固有周期より、等価一質点系の等価剛性は;

$$K_f = M_{eq} \times (2\pi/T)^2 = 53.2 \text{ kN/mm}$$

設計用変位・速度・加速度応答スペクトル(長周期領域,  $h=0.02$ )を下記で表すと、

$$S_D = 0.825T/\pi (\text{m}), S_V = 1.65 (\text{m/s}), S_A = 3.3\pi T (\text{m/s}^2),$$

等価一質点系の応答加速度は;  $a^{(0)} = 3.3\pi T = 5.18 \text{ m/s}$

ベースシアは;  $Q^{(0)} = m_{eq} a^{(0)} = 27982 \text{ kN}$

等価一質点系の応答変位は;  $u^{(0)} = Q^{(0)}/K_f = 525 \text{ mm} (=0.825T/p)$

最大応答層間変形角は;

$$q^{(0)} = u^{(0)}/H_{eq} = 0.014 = 1/70$$

(基準階変位は  $3600/70=53 \text{ mm}$ )

等価線形化手法による応答評価

$K_d/K_f=2.0, K_d/K_f=2.5 (K_d/K_f=5.0)$  の弾塑性ダンパーを配置した場合、接合部剛性を考慮したダンパー/主架構剛性比は;

$$\frac{K_d}{K_f} = \frac{1}{(K_f/K_d + K_f/K_b)} = \frac{1}{(1/2.0 + 1/5.0)} = 1.43$$

等価ダンパー剛性は;  $K'_d = K_f \times 1.43 = 76 \text{ kN/mm}$

ダンパー降伏層間変形角を  $1/750$  とすると、降伏変形  $u^{(0)}$  は;

$$\mu^{(1)} = 750/70 = 10.7$$

ダンパー付加後の一質点系の等価剛性、等価減衰は;

$$k_{eq}^{(1)} = k_f + \frac{k_d}{\mu} = 53.2 + \frac{76}{10.7} = 60.3 \text{ kN/mm}$$

$$h_{eq}^{(1)} = h_0 + \frac{2(1+k_d/k_f)}{\pi\mu} \ln \frac{\mu+k_d/k_f}{(1+k_d/k_f)\mu^{1/k_f}} = 0.111$$

等価減衰による応答低減率は;

$$F_h^{(1)} = \sqrt{\frac{1+75h_0}{1+75h_{eq}}} = \sqrt{\frac{1+75 \times 0.02}{1+75 \times 0.111}} = 0.520$$

等価線形化手法による応答評価

ダンパー付加後の応答変位は;

$$u^{(1)} = u^{(0)} F_h \sqrt{\frac{k_f}{k_{eq}}} = 525 \times 0.520 \times \sqrt{\frac{53.2}{60.3}} = 256 \text{ mm}$$

層間変形角は  $\theta^{(1)} = u^{(1)}/H_{eq} = 0.0069 = 1/145$

前回仮定した塑性率  $\mu^{(1)}$  は  $\theta^{(1)}$  に対応したものである。新しい変形角  $\theta^{(1)}$  に対応した塑性率は;

$$\mu^{(2)} = 750/145 = 5.2$$

新しい等価剛性と等価減衰は;

$$K_{eq}^{(2)} = 68 \text{ kN/mm} \quad h_{eq}^{(2)} = 0.117 \quad F_h^{(2)} = 0.506 \quad u^{(2)} = 234 \text{ mm}$$

$$\theta^{(2)} = 0.0063 = 1/158 \quad (\text{基準階層間変形角 } 3600/158=22.7 \text{ mm})$$

これ以上繰り返しても値が変化しないため、上記低減率を用いる。

$$Q^{(2)} = Q^{(2)} F_h^{(2)} \sqrt{\frac{K_{eq}}{K_f}} = 27982 \times 0.506 \times \sqrt{\frac{67}{53.2}} = 16007 \text{ kN}$$

(ベースシア係数 = 0.24)

### 制振構造の計画

制振構造の検討フロー

制振構造の計画

### サンプル建物の概要

- 鉄骨造10階建て事務所ビル
- 純ラーメン構造
- 文献4.1)テ-マストラクチャー-在来タイプ(1階階高:6m→5m)
- X方向のみを検討

(a) 伏図 (b) Y1, Y3 通り層組図

制振構造の計画

### 主架構(非制振構造)の特性

表4.2.3 固有周期と刺激係数  
Natural periods & Participation factors

	固有周期 [sec]	刺激係数 $\beta$
1次	1.330	1.338
2次	0.479	-0.491
3次	0.274	-0.292

固有モード

層せん断力-層間変形関係

制振構造の計画

### (1)ダンパーの選択・配置計画 Layout of damper

(どのような種類の制振ダンパーをどこに配置するか)

ダンパーの種類 : (変位依存型ダンパー) 鋼材ダンパー/摩擦ダンパー  
(速度依存型ダンパー) オイルダンパー

取付方法 : プレース型に取り付ける。

平面的配置 : ダンパーの集中を避け、偏心が小さくなるように配置。

立面的配置 : 連層配置。

目標性能 : (設計用入力地震動) 極稀相当の模擬地震動3波  
(目標応答値) 層間変形角1/150rad

(a) 伏図 (b) Y2通り軸組図

制振構造の計画

### (2)投入量の設定 Target damping

目標性能 : (設計用入力地震動) 極稀相当の模擬地震動3波  
(目標応答値) 層間変形角1/150rad

設計用地震動の変位応答スペクトル

履歴曲線の概念図

制振構造の計画

### (2)投入量の設定 Target yield strength

必要付加減衰量を得るための制振部材の強度の算定

$$h_{eq} = 0.8 \times \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W_d}{W_f} = 0.8 \times \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu_d}\right) \times \frac{Q_{dy}}{Q_f} \quad (1.3.6)$$

より、

$$Q_{dy} = \frac{h_{req}}{0.8 \times \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu_d}\right)} \times Q_f \quad (1.3.7)$$

必要付加減衰量18%  
Required damping ratio

主架構1層層せん断力  
Base shear of main frame  
= 29,303(kN)

ダンパー塑性率=5.0  
Yield ratio of dampers

1層の制振部材の強度 (1層ダンパー強度) Yield strength of dampers at 1st floor

$$Q_{dy} = \frac{h_{req}}{0.8 \times \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu_d}\right)} \times Q_f = \frac{0.18}{0.8 \times \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{5.0}\right)} \times 29,303 = 11,507(kN)$$

履歴曲線の概念図

制振構造の計画

### (2)投入量の設定 Target yield strength

高さ方向の制振部材の配置 Distributions of dampers

- 各層のダンパー塑性率  $\mu_{di}$  は一定 ( $\mu_{di}=5.0$ )
- 目標層間変形角 (1/150rad) での層せん断力係数  $C_i$  の分布形状が  $A_i$  分布となるように配置  
Distributing clasto-plastic dampers along  $A_i$  distributions at target story drift angles

表4.2.5 各層の制振部材の諸元(層のダンパー強度とダンパー塑性)

階	目標 $\mu_i$ (mm)	$K_f$ (kN/mm)	$Q_f$ (kN)	$Q_{dy}$ (kN)	$C_i / A_i$	$K_{di}$ (kN/mm)	$\mu_{di}$
10	26.7	413	11,023	1,456	0.578	273	5.0
9	26.7	447	11,907	6,240	0.578	1,170	5.0
8	26.7	486	12,953	9,990	0.578	1,873	5.0
7	26.7	529	14,093	12,960	0.578	2,430	5.0
6	26.7	679	18,112	12,512	0.578	2,346	5.0
5	26.7	708	18,881	14,777	0.578	2,771	5.0
4	26.7	733	19,540	16,649	0.578	3,122	5.0
3	26.7	819	21,837	16,378	0.578	3,071	5.0
2	26.7	878	23,412	16,336	0.578	3,063	5.0
1	33.3	879	29,303	11,507	0.578	1,726	5.0

制振構造の計画

### 時刻歴応答解析による確認(予備応答解析)

Comparison with time-history analyses

時刻歴応答解析結果

制振構造の計画

### 制振部材の検討 Design of dampers

各層のダンパー強度とダンパー塑性

- 取付角度
- 1層当たりの設置本数

1層当たりのダンパー軸耐力とダンパー軸剛性の算定

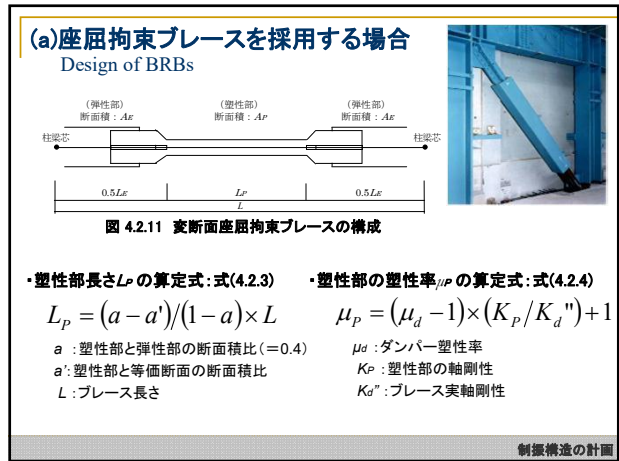
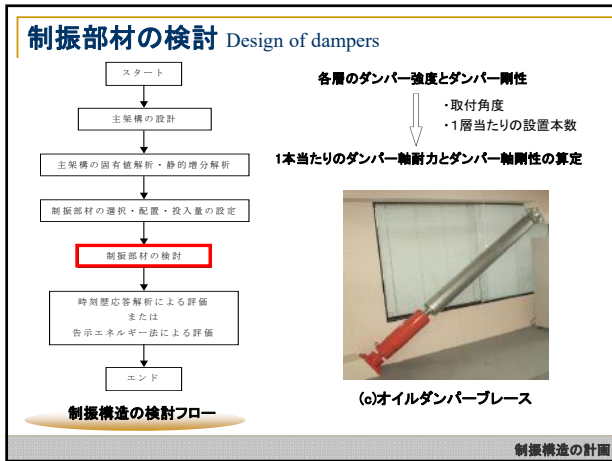
表4.2.6 各層の制振部材の諸元 (1層当たりのダンパー耐力とブレース軸剛性)

階	階高 $h_i$ (m)	スパン $b_i$ (m)	$\cos \phi$	設置本数 $n_i$	$Q_{dy}$ (kN)	$N_{di}^k$ (kN)	$k_{di}^k$ (kN/cm)	$k_{di}^c$ (kN/cm)
10	4.0	6.4	0.848	2	1,456	859	273	190
9	4.0	6.4	0.848	4	6,240	1,840	1,170	407
8	4.0	6.4	0.848	6	9,990	1,963	1,873	434
7	4.0	6.4	0.848	8	12,960	1,910	2,430	423
6	4.0	6.4	0.848	8	12,512	1,844	2,346	408
5	4.0	6.4	0.848	10	14,777	1,743	2,771	385
4	4.0	6.4	0.848	10	16,649	1,963	3,122	434
3	4.0	6.4	0.848	10	16,378	1,831	3,071	427
2	4.0	6.4	0.848	10	16,336	1,926	3,063	426
1	6.0	6.4	0.788	8	11,507	1,825	1,726	347

時刻歴応答解析による評価  
または  
告示エネルギー法による評価

制振構造の検討フロー

制振構造の計画

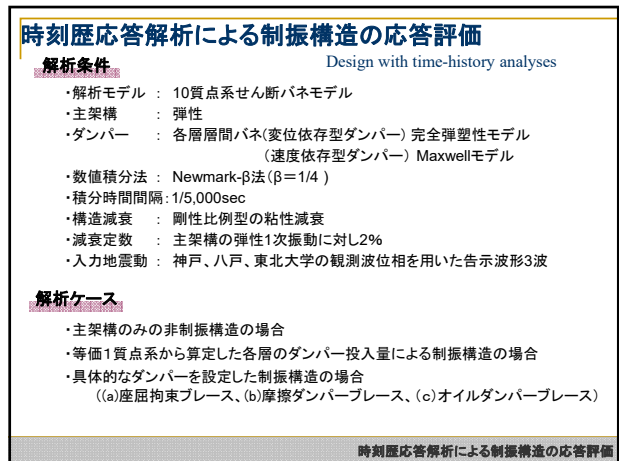
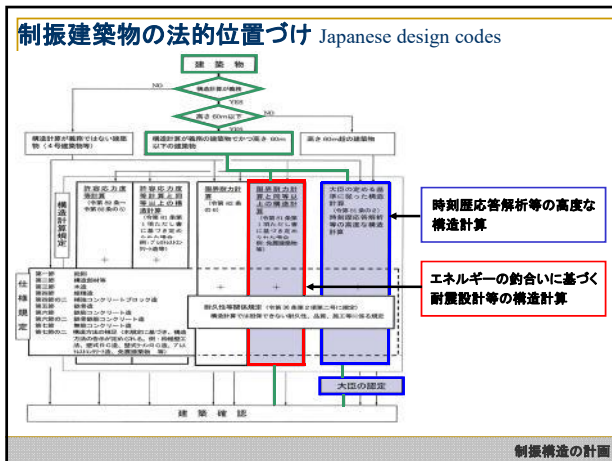
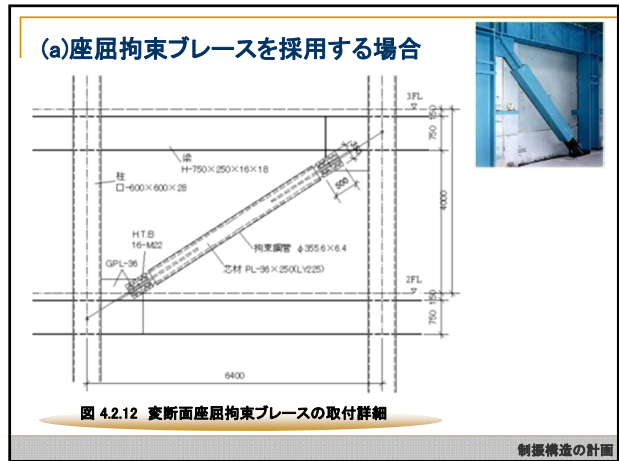


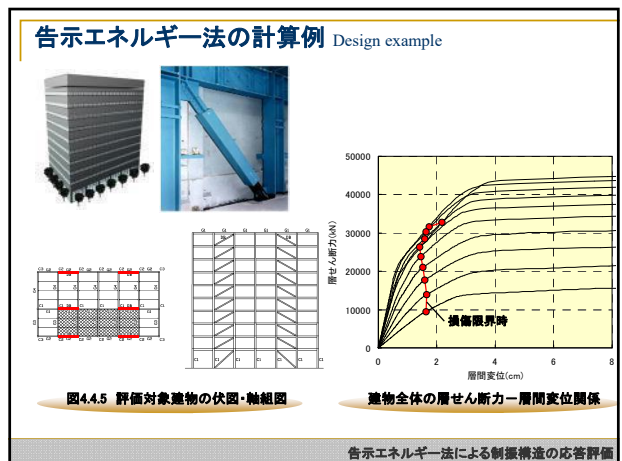
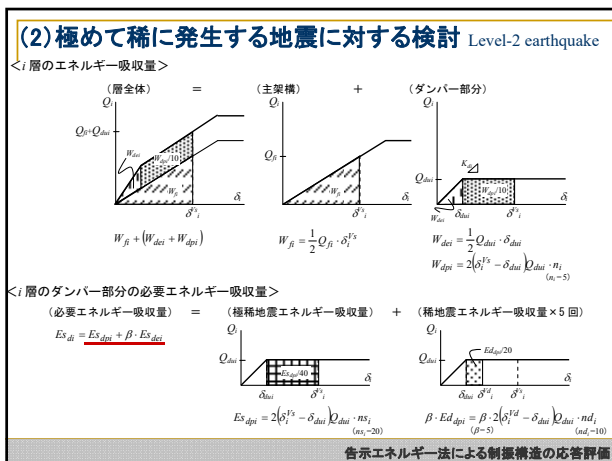
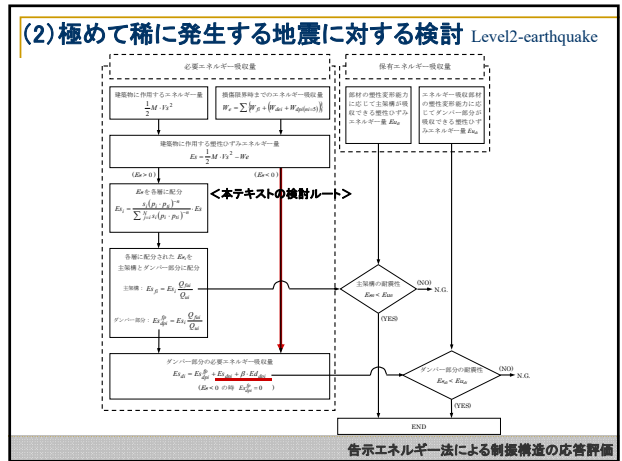
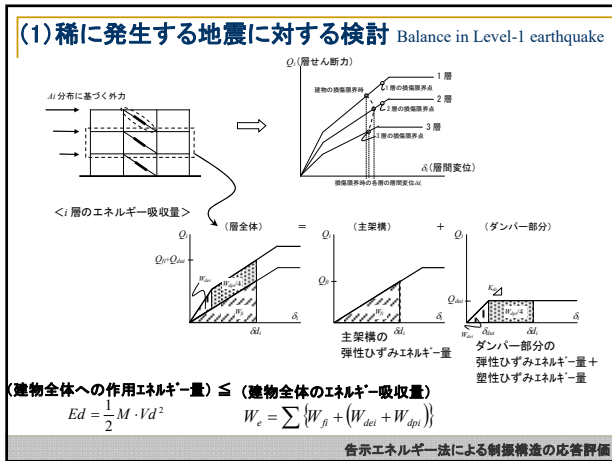
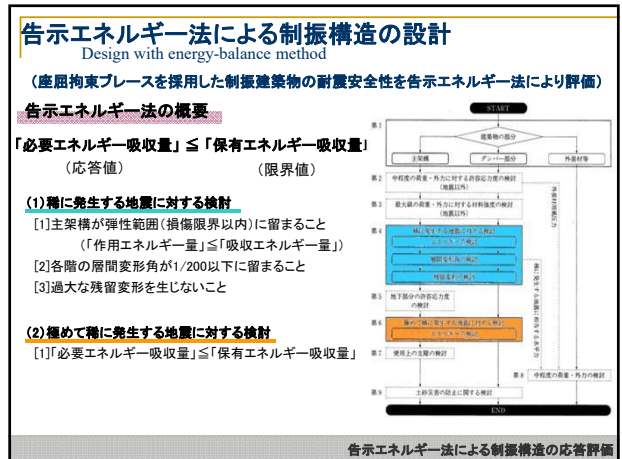
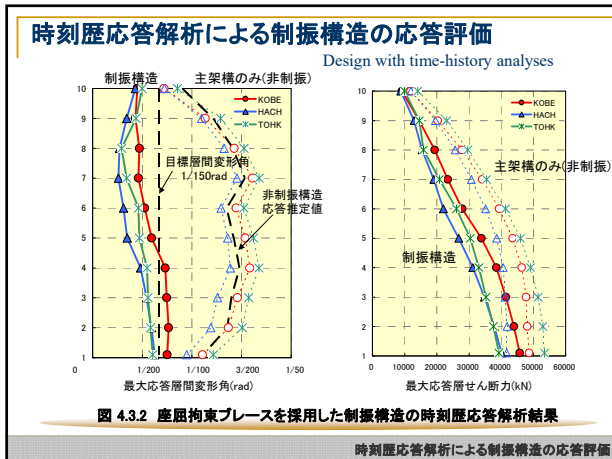
### (a)座屈拘束ブレースを採用する場合 Distribution of BRBs

表 4.2.7 各層の変断面座屈拘束ブレースの諸元

階	$N_d'$ (kN)	$K_d'$ (kN/mm)	$\delta dy$ (mm)	採用ブレース 降伏軸力 $F_y$	$A_p$ (mm <sup>2</sup> )	$L$ (mm)	$A_d$ (mm <sup>2</sup> )	$L_p$ (mm)	$L_p/L$	$K_p$ (kN/mm)	$\mu_p$	$N_d''$ (kN)	$K_d''$ (kN/mm)	$\mu_d''$
10	859	190	4.5	1,000	4,532	7,547	8,263	1,863	0.25	501	9.9	1,020	225	5.0
9	1,840	407	4.5	2,000	8,896	7,547	16,230	1,863	0.25	983	9.9	2,002	443	5.0
8	1,963	434	4.5	2,000	8,896	7,547	16,230	1,863	0.25	983	9.9	2,002	443	5.0
7	1,910	422	4.5	2,000	8,896	7,547	16,230	1,863	0.25	983	9.9	2,002	443	5.0
6	1,844	408	4.5	2,000	8,896	7,547	16,230	1,863	0.25	983	9.9	2,002	443	5.0
5	1,743	385	4.5	2,000	8,896	7,547	16,230	1,863	0.25	983	9.9	2,002	443	5.0
4	1,963	434	4.5	2,000	8,896	7,547	16,230	1,863	0.25	983	9.9	2,002	443	5.0
3	1,931	427	4.5	2,000	8,896	7,547	16,230	1,863	0.25	983	9.9	2,002	443	5.0
2	1,926	426	4.5	2,000	8,896	7,547	16,230	1,863	0.25	983	9.9	2,002	443	5.0
1	1,825	347	5.3	2,000	8,896	8,122	15,036	2,594	0.32	706	8.4	2,002	381	5.0

制振構造の計画







### 告示エネルギー法の計算例 Energy balance example

**表 4.4.2 損傷限界耐力および層間変位と主架構およびダンパー部分の耐力・剛性**

階	階高 (m)	建物全体				主架構		ダンパー部分			
		初期剛性 (kN/mm)	損傷限界耐力 (kN)	損傷限界時層間変位 (cm)	損傷限界時等価剛性 (kN/mm)	初期剛性 $K_E$ (kN/mm)	負担せん断耐力 $Q_E$ (kN)	初期剛性 $K_{dE}$ (kN/mm)	保有水平耐力 $Q_{dE}$ (kN)	降伏点層間変位 $\delta_{dE}$ (cm)	
10	4.0	8,836	640	9,484	1.82	384	478	7,755	133	1,729	1.30
9	4.0	6,959	951	13,904	1.89	840	430	7,115	547	6,789	1.24
8	4.0	6,731	1,357	17,691	1.98	1,121	476	7,507	859	10,184	1.19
7	4.0	6,731	1,830	20,974	1.52	1,382	487	7,395	1,349	13,579	1.01
6	4.0	6,830	2,184	23,871	1.45	1,642	708	10,292	1,423	13,579	0.95
5	4.0	6,888	2,849	26,381	1.42	1,854	661	9,407	2,195	18,974	0.77
4	4.0	6,928	3,089	28,516	1.59	1,785	727	11,542	2,365	18,974	0.72
3	4.0	6,942	3,384	30,286	1.63	1,856	816	13,312	2,546	16,974	0.67
2	4.0	6,959	3,605	31,703	1.74	1,823	847	14,729	2,795	16,974	0.61
1	5.0	7,085	2,814	32,775	2.18	1,506	926	20,157	1,858	12,618	0.68
2	41.0	70,602									

損傷限界時等価周期  $T_d = 0.897(\text{sec})$

告示エネルギー法による制振構造の応答評価

### 告示エネルギー法の計算例 Energy balance example

(1) 稀に発生する地震に対する検討

[1] 主架構が弾性範囲 (損傷限界以内) に留まること  
「作用エネルギー量」 ≤ 「吸収エネルギー量」

$$Ed = \frac{1}{2} M \cdot V d^2 = 392.3 \quad We = 5,508.6 (\text{kN}\cdot\text{m}) \quad \text{OK}$$

表 4.4.3 損傷限界時まで吸収できるエネルギー量の算定結果 (稀地震時)

階	共通		主架構		ダンパー部分		建物全体
	損傷限界時層間変位 $\delta_{dE}$ (cm)	保有水平耐力 $Q_{dE}$ (kN)	損傷限界時層間変位 $\delta_{dE}$ (cm)	保有水平耐力 $Q_{dE}$ (kN)	損傷限界時層間変位 $\delta_{dE}$ (cm)	保有水平耐力 $Q_{dE}$ (kN)	
10	1.62	7,755	66.0	1,729	1.30	11.3	26.4
9	1.66	7,115	99.9	6,789	1.24	42.2	112.4
8	1.58	7,507	99.3	10,184	1.19	60.4	169.7
7	1.92	7,395	99.1	13,579	1.01	69.3	277.8
6	1.45	10,292	74.8	13,579	0.95	44.3	414.4
5	1.42	9,407	66.9	18,974	0.77	60.9	569.2
4	1.59	11,542	91.7	18,974	0.72	60.9	569.2
3	1.63	13,312	109.6	16,974	0.67	56.9	569.2
2	1.74	14,729	129.1	16,974	0.61	56.9	569.2
1	2.18	20,157	219.3	12,618	0.68	42.8	555.2

表 4.4.4  $E_d$  入力時の層間変形角の算定結果 (p.160)  
( $We = 392.3 (\text{kN}\cdot\text{m})$  となる時の層間変形角を算定)

告示エネルギー法による制振構造の応答評価

### 告示エネルギー法の計算例 Energy balance example

(2) 極めて稀に発生する地震に対する検討

・建築物に作用する塑性ひずみエネルギー量  $E_s$  の算定

$$E_s = \frac{1}{2} M \cdot V s^2 - W = 9,806.8 - 11,595.2 = -1,788.4 < 0 \quad \text{主架構は塑性化しない}$$

表 4.4.5 損傷限界時まで吸収できるエネルギー量の算定結果 (稀地震時)

階	共通		主架構		ダンパー部分		建物全体
	損傷限界時層間変位 $\delta_{dE}$ (cm)	保有水平耐力 $Q_{dE}$ (kN)	損傷限界時層間変位 $\delta_{dE}$ (cm)	保有水平耐力 $Q_{dE}$ (kN)	損傷限界時層間変位 $\delta_{dE}$ (cm)	保有水平耐力 $Q_{dE}$ (kN)	
10	1.62	7,755	66.0	1,729	1.30	11.3	26.4
9	1.66	7,115	99.9	6,789	1.24	42.2	112.4
8	1.58	7,507	99.3	10,184	1.19	60.4	169.7
7	1.92	7,395	99.1	13,579	1.01	69.3	277.8
6	1.45	10,292	74.8	13,579	0.95	44.3	414.4
5	1.42	9,407	66.9	18,974	0.77	60.9	569.2
4	1.59	11,542	91.7	18,974	0.72	60.9	569.2
3	1.63	13,312	109.6	16,974	0.67	56.9	569.2
2	1.74	14,729	129.1	16,974	0.61	56.9	569.2
1	2.18	20,157	219.3	12,618	0.68	42.8	555.2

・稀地震時の各層層間変位およびダンパー部分の必要エネルギー吸収量の算定

表 4.4.6 稀地震時のダンパー部分の必要エネルギー吸収量の算定結果 (p.162)  
( $We = 9,806.8 (\text{kN}\cdot\text{m})$  となる時の層間変形角を算定)

告示エネルギー法による制振構造の応答評価

### 告示エネルギー法の計算例 Energy balance example

(2) 極めて稀に発生する地震に対する検討

・ダンパー部分の必要エネルギー吸収量の算定

表 4.4.7 変断面産屈拘束プレースの塑性部の必要平均累積塑性変形係数

階	必要エネルギー吸収量 $E_{sE}$ (kN·m)	設置本数	ブレース1本あたりの諸元			塑性部の必要平均累積塑性変形係数 $\bar{\mu}_{dp}$
			軸耐力 $N_{br}$ (kN)	剛性 $K_{br}$ (kN/mm)	塑性部の軸耐力 $K_p$ (kN/mm)	
10	174	2	1,020	225	501	21
9	819	4	2,002	443	983	25
8	1,071	6	2,002	443	983	22
7	1,963	8	2,002	443	983	30
6	2,094	8	2,002	443	983	32
5	3,456	10	2,002	443	983	42
4	2,992	10	2,002	443	983	41
3	5,673	10	2,002	443	983	70
2	6,791	10	2,002	443	983	83
1	6,928	8	2,002	381	706	76

・ダンパー部分の保有エネルギー吸収量との比較

鋼材ダンパーの累積塑性ひずみ評価式  $\chi_s (\%) = \beta \cdot \frac{1}{35} \left\{ \frac{\alpha_s + (1 - \alpha_s) \left( \frac{\epsilon_{ps}^{0.41}}{417} \right)^{0.41}}{1.14} \right\}$  (4.4.12)

告示エネルギー法による制振構造の応答評価

### 座屈拘束プレースの破断までの累積変形性能 Cumulative deformation capacity of BRBs

$\chi_s (\%) = 2\eta\epsilon_s$

図 4.4.7 座屈拘束プレースの累積塑性全歪量最大値と塑性部の最大塑性ひずみの関係

告示エネルギー法による制振構造の応答評価

### 建築設計上の留意点と維持管理 Design requirement

制振構造の設計：時刻歴応答解析を行い建物の応答を評価するのが基本

主架構・制振部材の特性が応答値に及ぼす影響を把握

入力条件、主架構および制振部材のモデル化の方法如何によって解析結果は大きく異なる

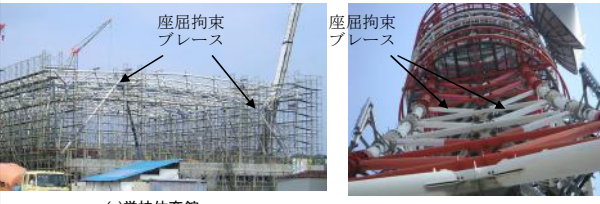
適切なモデル化

(主架構の剛性評価) 曲げ変形成分の影響評価 / 制振部材と取付部材および周辺部材の剛性評価

建築設計上の留意点と維持管理 p60

**制振構造の応用と可能性** Applications for various design

空間構造への応用 Application for spatial structures



(a) 学校体育館 (b) 通信鉄塔

弾塑性制振部材による制振トラス構造の事例

(塑性設計が困難であったトラス構造に座屈拘束ブレースを採用)

制振構造の応用と可能性 p88

**制振構造の応用と可能性** Applications for various design

空間構造への応用 Application for spatial structures


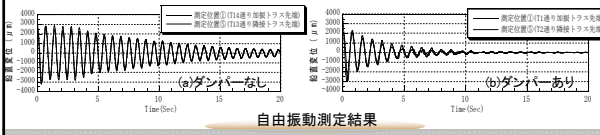


図 4.6.3 ばね付き粘弾性体ダンパーによるスタジアム屋根の制振



自由振動測定結果

制振構造の応用と可能性 p88

**制振構造の応用と可能性** Applications for various design

既存建物の耐震補強 Retrofit with energy-dissipating facades



改修コンセプト  
(空調負荷の低減と外観の刷新)

耐震改修後外観

制振構造の応用と可能性 p81

**制振構造の応用と可能性** Applications for various design

既存建物の耐震補強-2



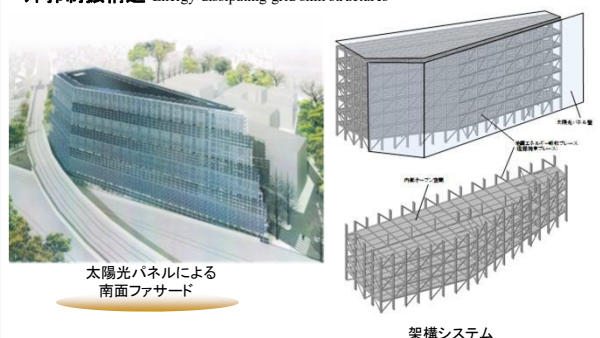
斜行ブレースによる  
制振補強と日照制御

耐震改修後外観

制振構造の応用と可能性 p81

**制振構造の応用と可能性** Applications for various design

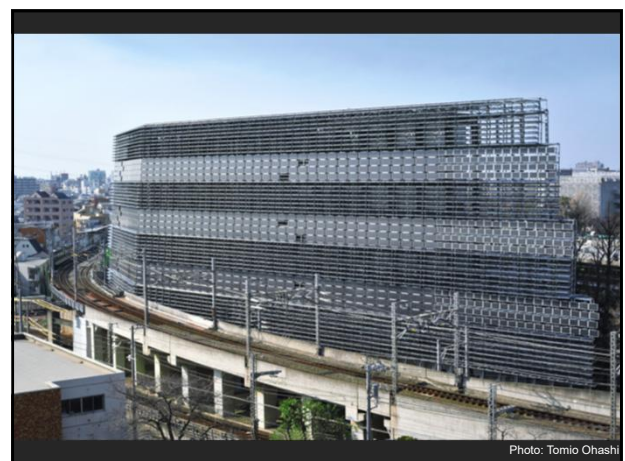
外郭制振構造 Energy-dissipating grid skin structures

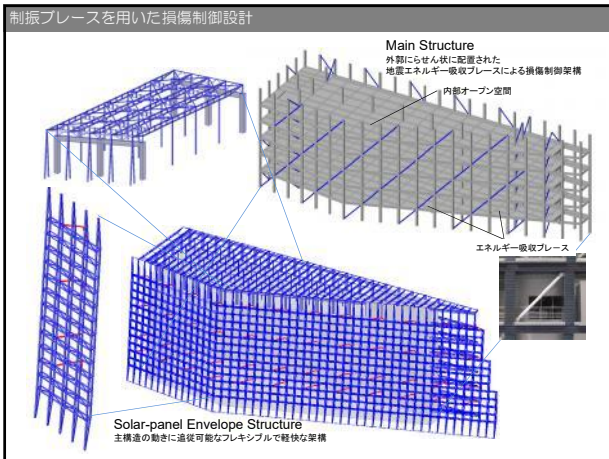


太陽光パネルによる  
南面ファサード

架構システム

制振構造の応用と可能性



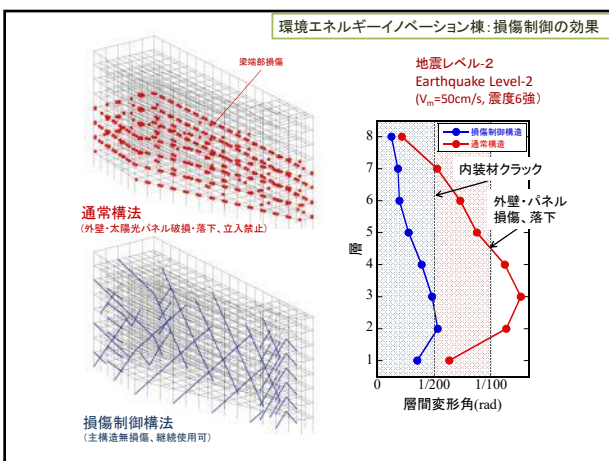
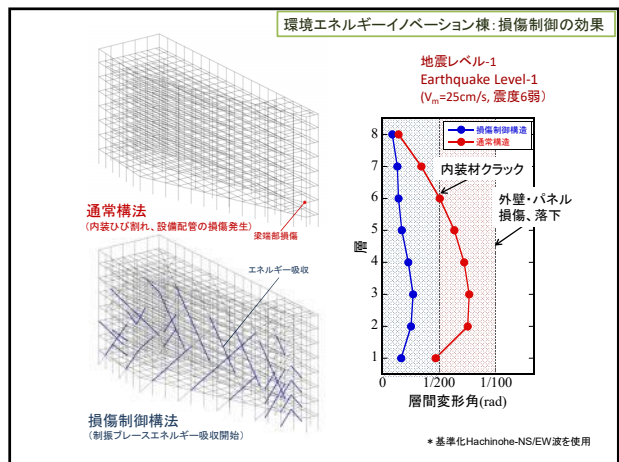
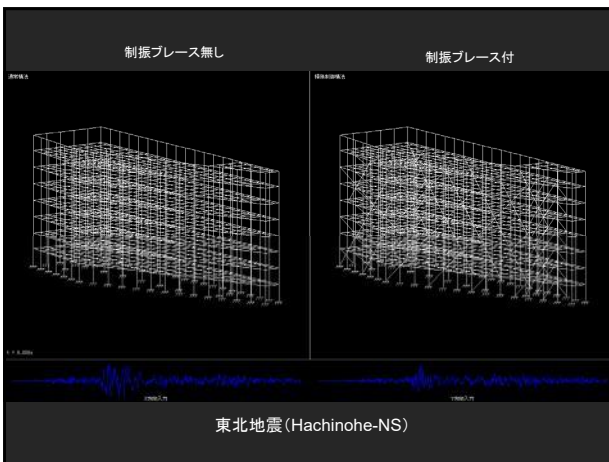


等価線形化法による応答評価

降伏軸力は1300kN~2000kNで外周にらせん状に配置されていますが、各層で見ると桁行方向で10本程度、梁間方向で7本程度が付加できます。ブレースの水平耐力は各方向で約10,000kNで主架構のおよそ1/8程度ですが、降伏層間変形角は1/700と小さいため、ベースシア係数0.15程度から塑性化を始め振動エネルギーを吸収します。制振部材と主架構の初期剛性比 $k_d/k_f$ は各方向で約1.0となり、主架構の塑性化が顕著となる層間変形1/100の際には制振ブレースの塑性率は $\mu_d=7$ 程度に達すると考えられます。

$$h_{eq} = h_0 + \frac{2(1+k_d/k_f)}{\pi\mu} \ln \frac{\mu+k_d/k_f}{(1+k_d/k_f)\mu^{1+k_d/k_f}} = 0.02 + \frac{2(1+1)}{7\pi} \ln \frac{7+1}{(1+0.8)7^{1+1}} = 0.095$$

$$F_h = \sqrt{\frac{1+25 \times 0.02}{1+25 \times 0.095}} = 0.67, \quad \frac{k_{eq}}{k_f} = 1 + \frac{k_d}{\mu k_f} = 1 + \frac{1}{7} = 1.14$$

$$\frac{a_{eq}}{a_f} = F_h \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_f}} = 0.71, \quad \frac{u_{eq}}{u_f} = F_h \sqrt{\frac{k_f}{k_{eq}}} = 0.63$$


Chapter 6: Performance Test Specification for BRB

地震後の検査と対処

Koriyama Big-Eye, a 24-story, 133m building complete in 1998 in Fukushima experienced Tohku Earthquake 2011 at 234km from epicenter. The cumulative deformation measurements and earthquake record were used to calibrate a finite element model, indicated a peak ductility demand of  $\mu \approx 4$  and a cumulative plastic strain of  $\sum \epsilon_p \approx 20\%$  ( $\sum \delta_p / \delta_y \approx 100$ ) in the Y direction, still 6% of their capacity.

Fukushima Koriyama Big-Eye

Inaba Y, Morimoto S, Tsuruta S, Takeuchi T, Matsui R. Damage record of buckling restrained braces that received actual ground motion. AIJ Kanto Branch Research Report Collection 2017

cumulative def. meter

max def. meter

Buckling-restrained Braces and Applications

外郭構造のデザイン

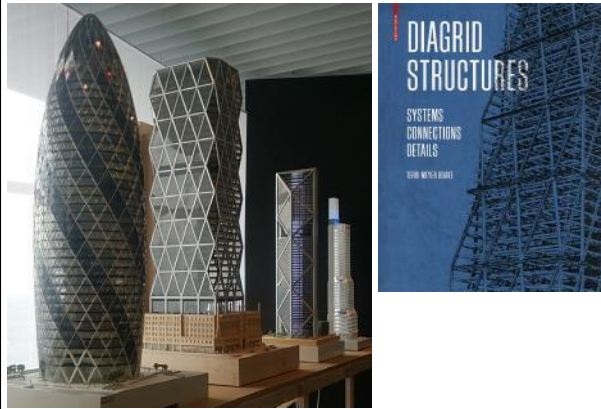
外郭構造: 外壁に耐震要素を配置し内部空間の自由度を確保  
→用途変更が容易で建物寿命を延ばす効果が期待できる



低層小規模建物→強度で抵抗しエネルギーを地盤に戻す  
中高層建物→免震化またはエネルギー吸収部材の配置により  
損傷制御を効果的に行う

Toru Takeuchi Tokyo Tech

海外における取り組み



すずかけG3棟レトロフィット 2010

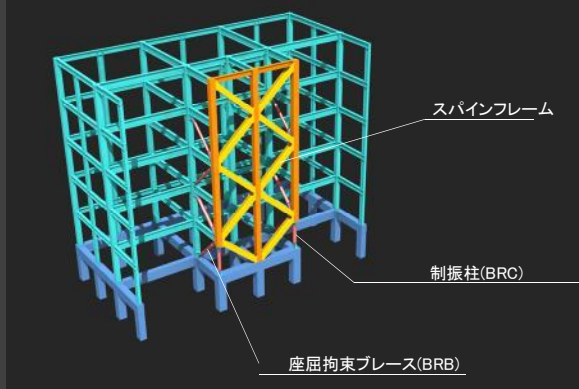


心棒架構の構造デザイン



すずかけ台元素研究所新棟計画

心棒架構の構造デザイン



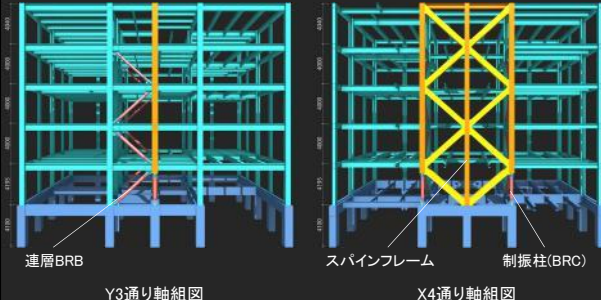
スパインフレーム

制振柱(BRC)

座屈拘束ブレース(BRB)

心棒架構の構造デザイン

- 建物中央部にノンリフトアップ型のロッキングフレームを挿入し、特定層の損傷集中を回避
- ロッキングフレーム→周辺架構の2段階損傷制御
- 大地震後の残留変形制御機能は外周フレームに依存



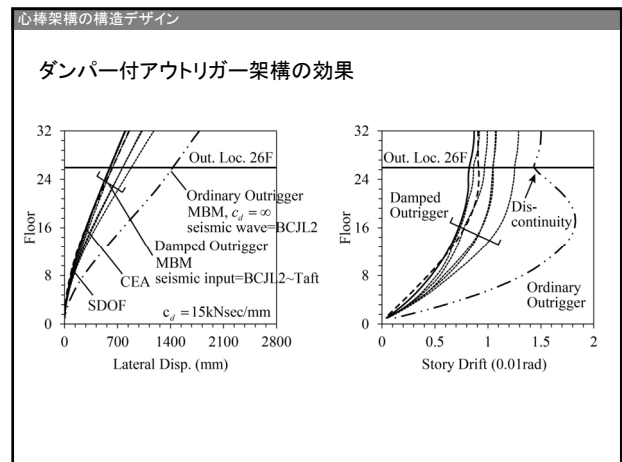
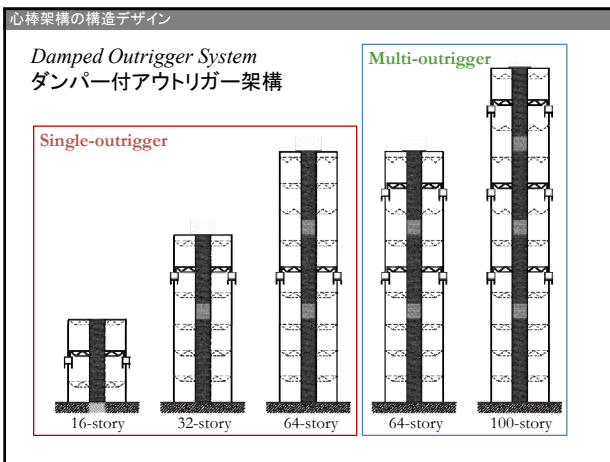
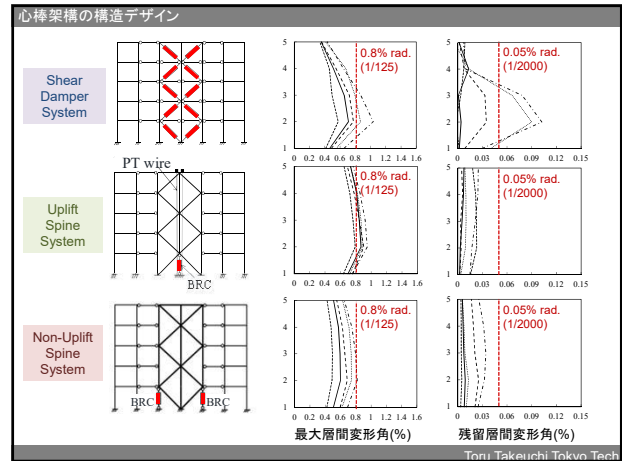
連層BRB

Y3通り軸組図

スパインフレーム

制振柱(BRC)

X4通り軸組図



心棒架構の構造デザイン

設計パラメータ

$$f(\alpha, R_w) = S_w^{-1} \cdot \frac{R_w + R_w^{-1}}{\alpha} \cdot \left( \frac{\gamma^2}{12\sin^2 \gamma} + \frac{\gamma \sin 2\gamma}{24\sin^2 \gamma} \right) + R_w$$

$\frac{l_c^2 h k_b}{3EI_c} = S_w$ : parameter of outrigger stiffness (constant)

$\alpha$ : outrigger location

$$\frac{c_d \omega}{k_b} = R_w$$
: parameter of damper       $\gamma = \gamma(\psi_0)$ ,       $\psi_0 = \frac{3-\alpha}{6-3\alpha} + S_w \cdot \frac{R_w}{1+R_w} \cdot \frac{\alpha^2}{2-\alpha}$ 

Application scope       $0.4 \leq \alpha \leq 1$        $0.2 < S_w < 2$        $0.5 < \psi_0 < 2.7$        $0.1 < R_w$

