

建築におけるアンボンド PC技術の現状

静岡理工科大学 理工学部 建築学科
丸田 誠



本報告

- アンボンドPCについて
- 建築基準法での位置づけなど
 - 建築における利用
 - 最近の実験から
 - 部材設計法
 - 様々な研究例
 - 今後の課題など

アンボンドPCとは

－発達の歴史と特徴－

京都大学名誉教授 六車 熙

内 容

- 1.1 はじめに
- 1.2 アンボンド工法の発達の歴史
- 1.3 防錆材に要求される性質
- 1.4 防錆材の防錆耐久性
- 1.5 プレストレス導入時の摩擦係数
- 1.6 アンボンドPC部材の曲げ破壊強度
- 1.7 アンボンドPC部材の曲げ疲労耐力
- 1.8 プレストレス導入理念の変遷
- 1.9 おわりに
(参考文献)

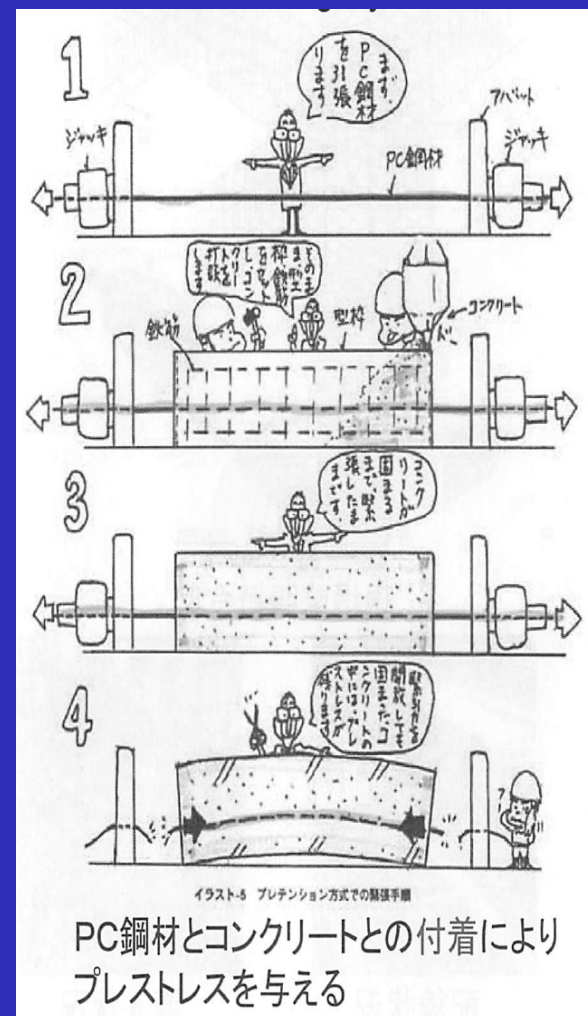
プレストレストコンクリート

(故 六車先生資料から)

- プレテンション工法

工場で規格部品の大量製造
主として直線配置PC鋼材使用
比較的短スパン部材に適用

→アンボンドにする必要なし



ポストテンション工法

- 工場、現場を問わず製造可能
- PC鋼材を曲げモーメント分布と相似な曲線形に配置可能
- PC鋼材の防錆と付着の寄与のためにグラウトが必要
- 不完全グラウト(高速注入、W/C高)、グラウト忘れなど

→PC鋼材破断事故

- 丁寧なグラウト施工
- アンボンドPC鋼材の利用
(防錆処置を施したPC鋼材)

アンボンドPC鋼材の米国歴史

1952年：米国中西部の建物に初めて使用

その後ラスベガスの学校床スラブに使用

1953年：建設後間もなく垂れ下がり発生→取り壊し

過大または過小プレストレス設計が原因

1964年：アラスカ地震 完成間近の5階建てアパートが倒壊→PCaスラブのアンボンドPC鋼材のくさび定着部の破壊が原因→くさびの研究進む

1969年：アンボンドPC部材に関する暫定指針設定
(ACI-ASCE 423委員会) PCフラットスラブ

1970年：PC鋼材の80～90%がアンボンド

日本での発達

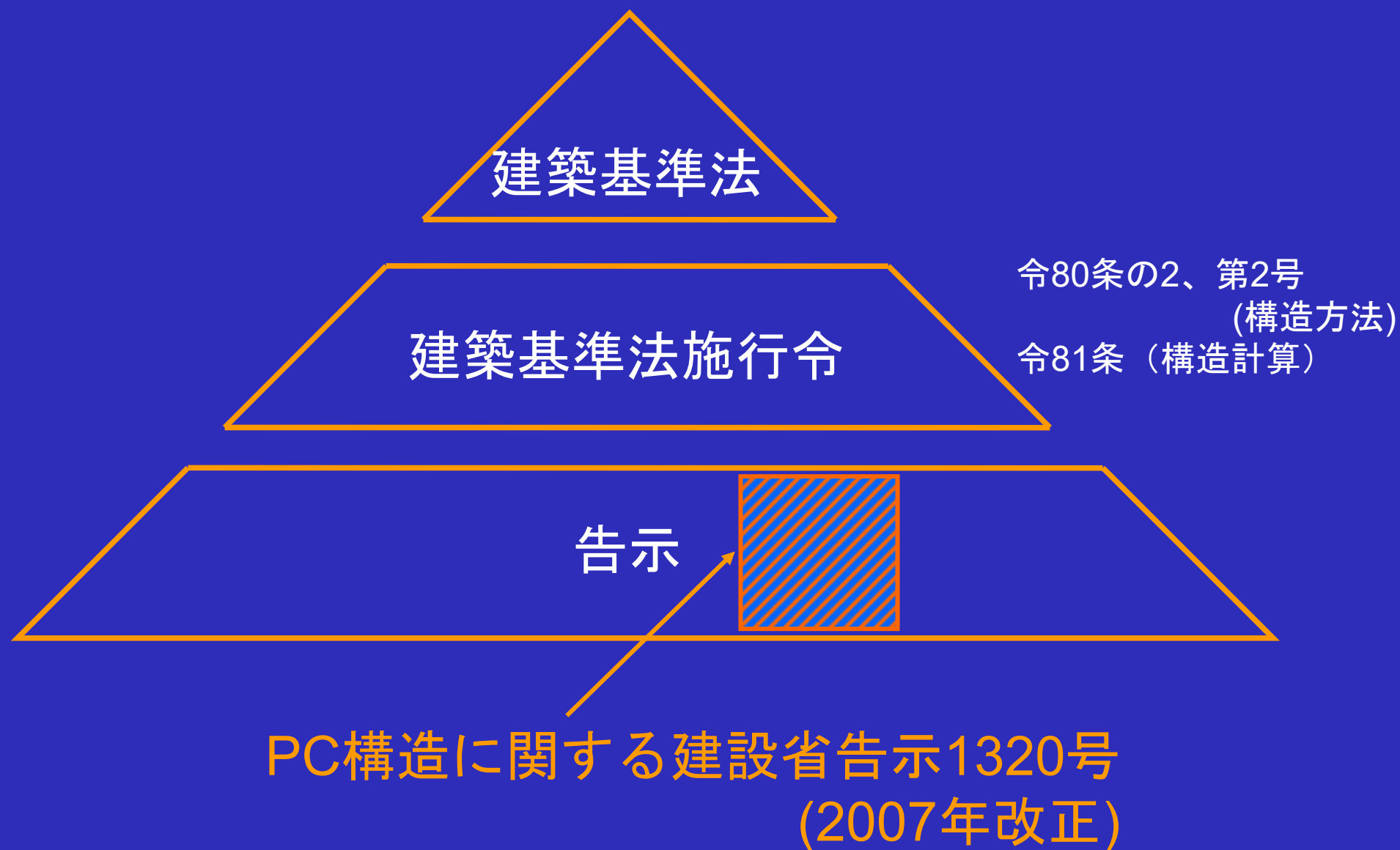
1950年代：京都大学六車研で実験開始
アンボンドPC枕木試験敷設
アンボンド曲げ強度計算式

1960年：アンボンドPC矢板
→伊勢湾台風災害復旧に使用

1970年：非構造部材にアンボンド工法が徐々に使用
建築では「アンボンドフラットスラブ」が多数

2007年：基準法改定に伴う、PC構造告示の大改定、
アンボンドPC耐震部材の使用を盛り込む

建築基準法におけるPC構造の位置付け



告示に規定されるPC構造の設計法

		1960	1973	1983	2007
設計法・荷重の組合わせ	P C 造	終局強度型設計法 $1.2(G+P)+1.5K$			
		(ルート3a) $G+P+1.5K$ (曲げ) $G+P+2.0K$ (せん断)			
	R C 造	保有水平耐力計算 (ルート3b)			
		2000 限界耐力計算			
P C 造 建 物 の 高 さ 制 限	P C 造	1981 短期許容応力度設計法 + 保有水平耐力計算			
		1950 短期許容応力度設計法 $G+P+K$			
	P C 造 建 物 の 高 さ 制 限	16m以下	31m以下	60m以下	60m以下

2007年PC造告示改正のポイント

- a. 限界耐力計算法への対応
- b. 主要構造部材でのアンボンドPC鋼材の使用
- c. 後硬化型PC鋼材(プレグラウトPC鋼材)の使用
- d. 建築基準法改正に伴う修正
(構造計算により除外される仕様規定、圧着接合の明確化、等)
- e. 最新JISへの対応、SI単位への対応

主要耐震部材へアンボンドPC鋼材 を使用する場合の条件

限界耐力計算法による設計

→ 耐力と変形の両面から構造物の性能を照査する

構造物としての終局安全性の確保

万一、アンボンドPC鋼材が破断するような不測の事態に対する配慮

→ Redundancy(冗長性)の確保

アンボンドPCの利用状況

アンボンドPC工法の利点

- ①グラウト不要によるコスト低減
- ②PC鋼材の応力腐食(stress corrosion)の防止
- ③プレストレス緊張時の摩擦損失の低減
- ④コンクリートの効果的なひび割れ制御

※建築分野では主にスラブ、小梁等の軽微な非耐震部材に採用されている。

→告示、学会指針において使用範囲限定。

材料はシングルストランドのみ

ロードバランス法 (Load Balancing Method)

- ・ T. Y. Linにより提案された方法
- ・ P C鋼材のプレストレス力を等分布の吊り上げ荷重に置き換えることにより、プレストレスの影響を簡単に計算できる方法
- ・ 吊り上げ荷重 ω を以下の式で計算し、吊り上げ荷重 ω_p （端部に緊張力 P ）を与えることによりプレストレスによる応力を算定する方法

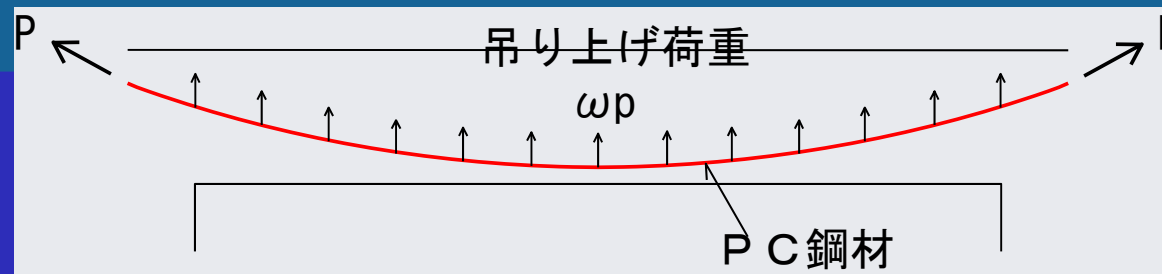
$$\omega = \frac{8 \cdot P \cdot e}{L^2}$$

ここで、 ω : 吊り上げ荷重

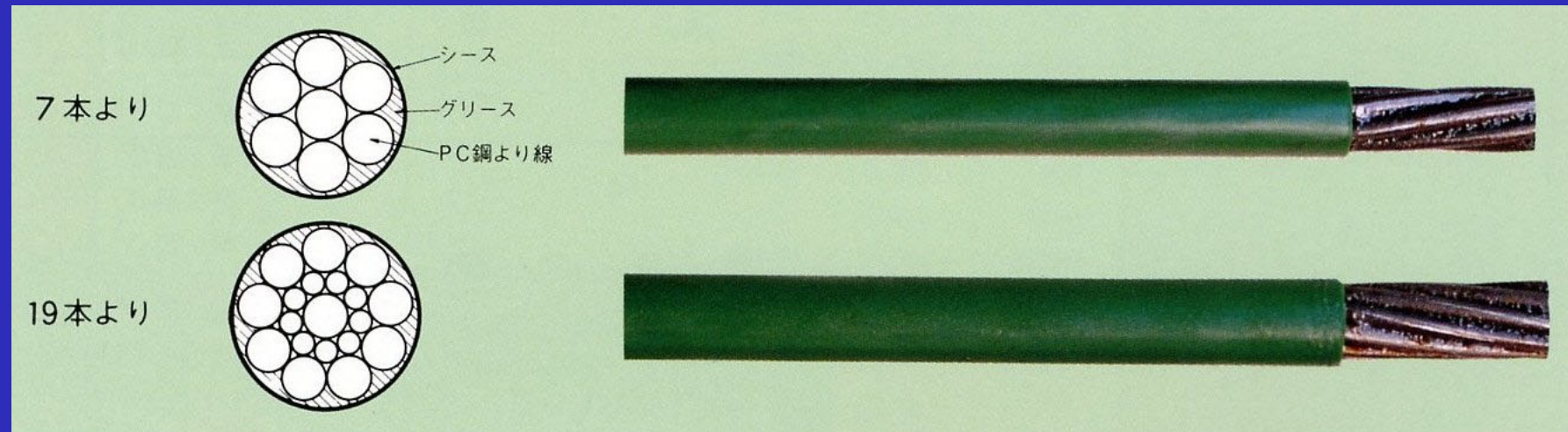
P : P C鋼材の緊張力

e : P C鋼材の偏心量

L : スパン長



アンボンドPC鋼材



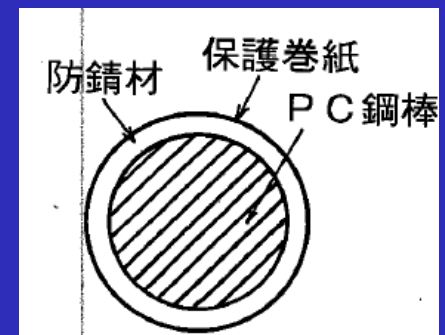
PC鋼材 : JIS G3109, G3536など

防錆材 : アスファルト系, グリース, ポリマー系

保護シース: 硬質ポリエチレン、ポリプロピレン

要求性能

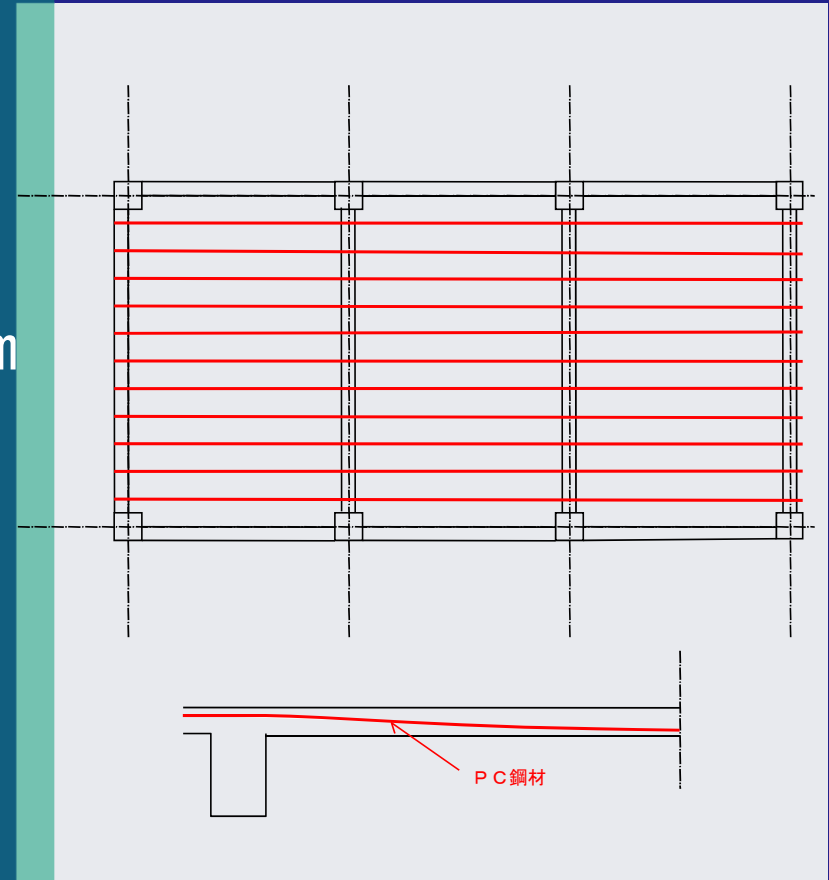
- ✓ PC鋼材に対する防錆効果
- ✓ 適度な粘性と軟度
- ✓ 温度に対する安定性(蒸気養生)
- ✓ 化学的な安定性



塗布型アンボンド
PC鋼棒

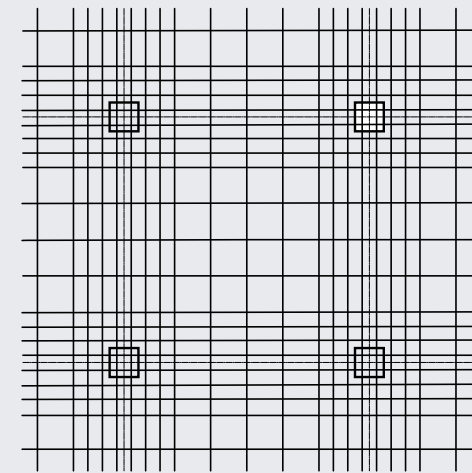
アンボンドスラブ

- ・ 採用建物：マンションに多く採用
- ・ 採用理由：
 - ・ 遮音性で最低スラブ厚が決定し、最低スラブを余り厚くすることなく小梁を省略可
(スラブ厚200mmでも短辺スパン6m～8mを設計可)
 - ・ 広範囲、多本数のシース配線、グラウトの不要
 - ・ ロードバランス法により比較的簡単に設計可
- ・ 設計の傾向：
 - ・ PRCの設計が多い
 - ・ キャンセル率は60～70%
 - ・ プレストレスの軸力効果無視
 - ・ 短辺方向の1方向に配置

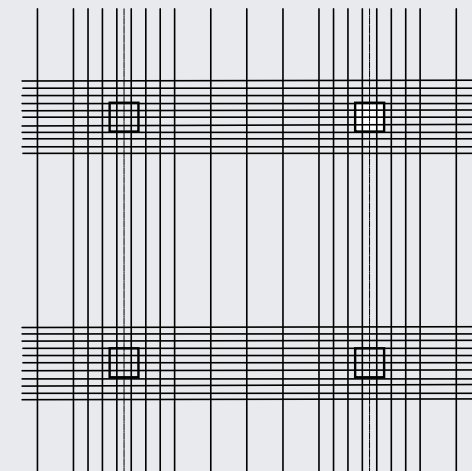


アンボンドフラットスラブ

- ・ 採用建物： 倉庫
- ・ 採用理由：
 - ・ スパンが8m程度を越える場合は、RCで設計するとスラブ厚が厚くなり不経済（経済性）
 - ・ たわみ制御
 - ・ ひびわれが少ない
- ・ 設計の傾向：
 - ・ 有限要素法を用いて計算
 - ・ PRCの設計が多い
 - ・ 耐震要素は壁等で確保
 - ・ PC鋼材は、両方向に均等配線する場合と1方向を柱列帯に集中配線する場合有



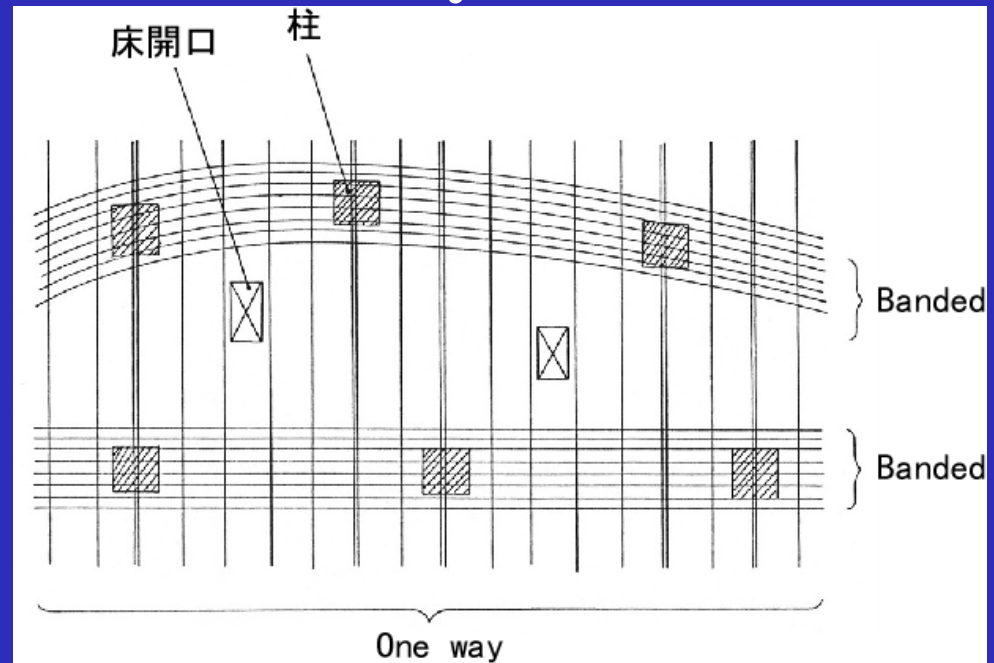
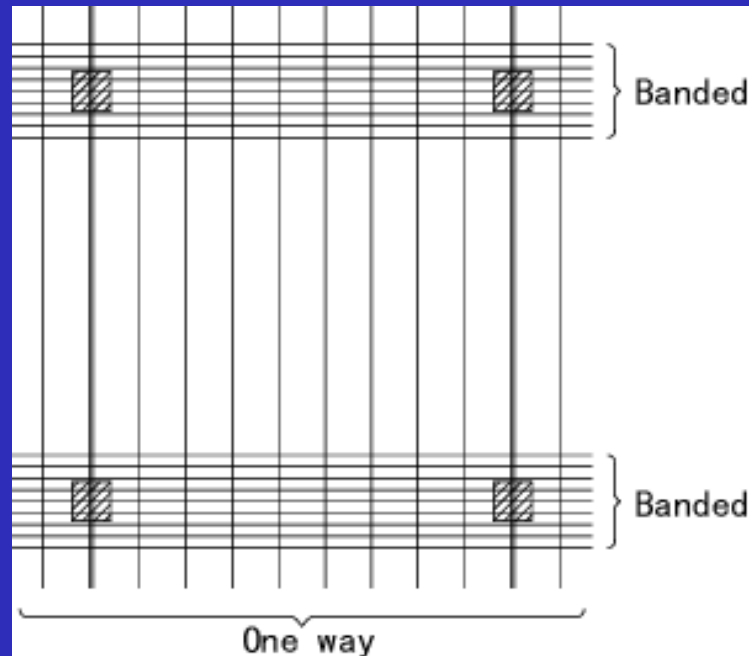
均等の配置



1方向柱列帯に集中して配置

海外のアンボンドフラットスラブ構造

- スパン8m規模以上のフラットスラブにアンボンド工法が多く採用されている。ストランド径は $\phi 12.7$ が主流。
- ドロップパネルやキャピタルがない“フラットプレート構造形式”が多い。
- PC鋼線配置は“Banded Tendons System”が主流。



米国のアンボンドフラットスラブ



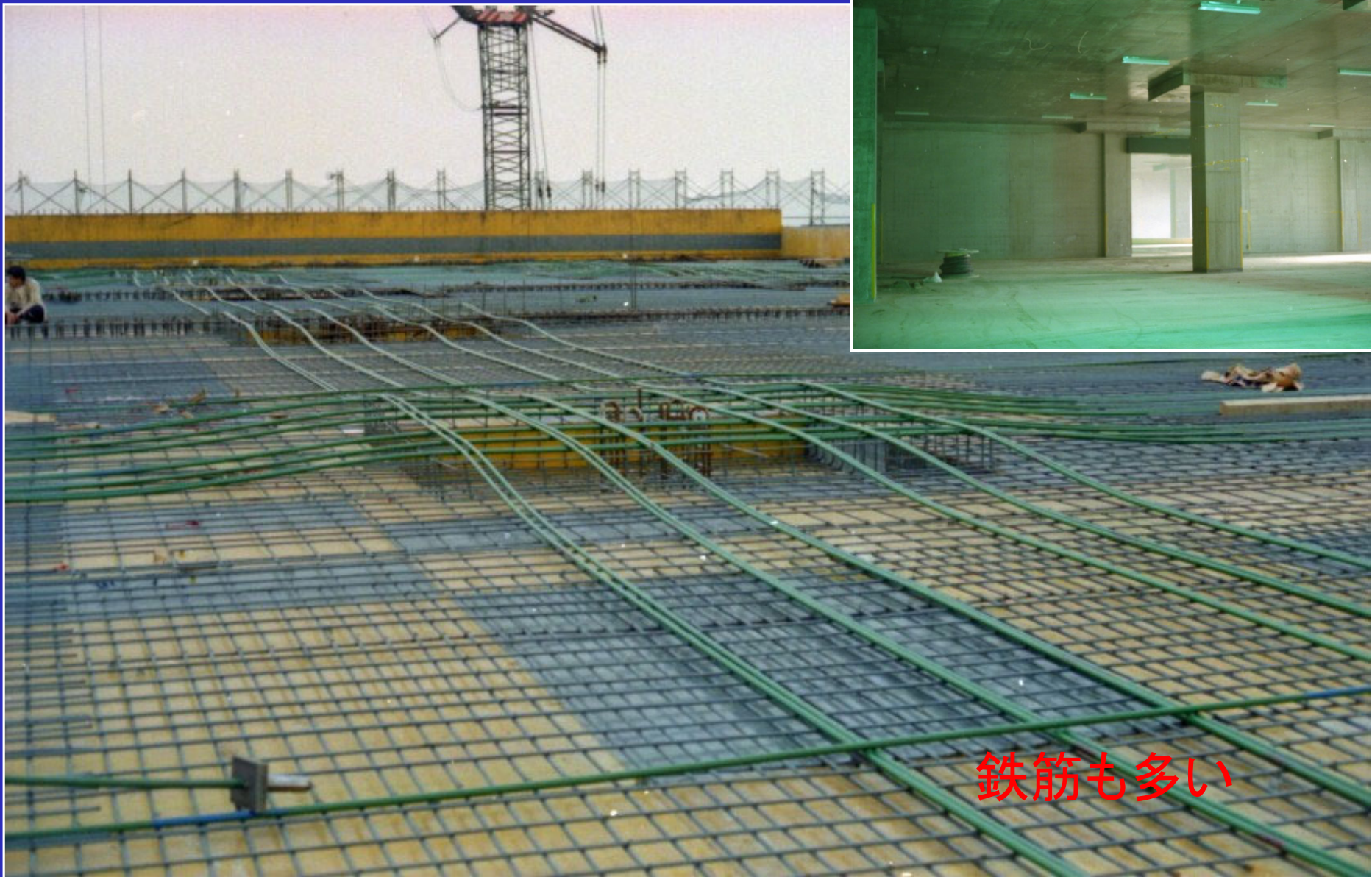
スタッドレール
(パンチング防止)



配筋・配線

鉄筋が少ない

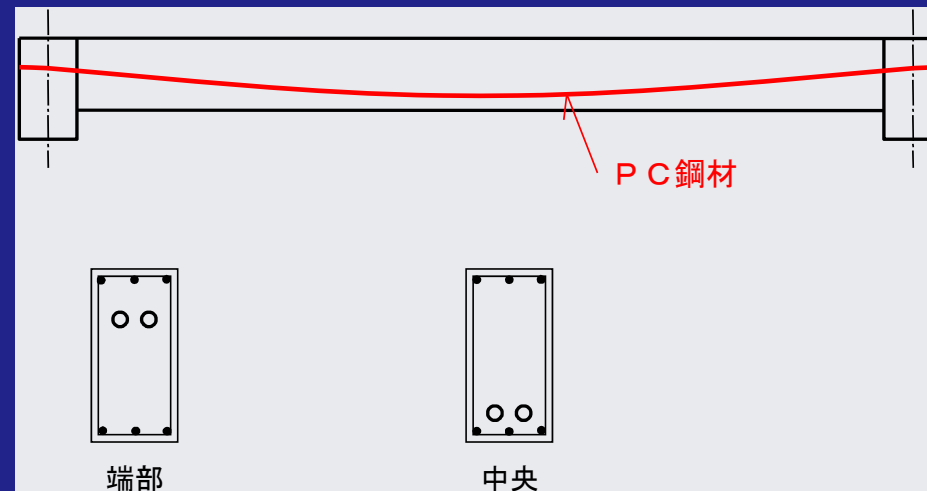
日本のアンボンドフラットスラブ



鉄筋も多い

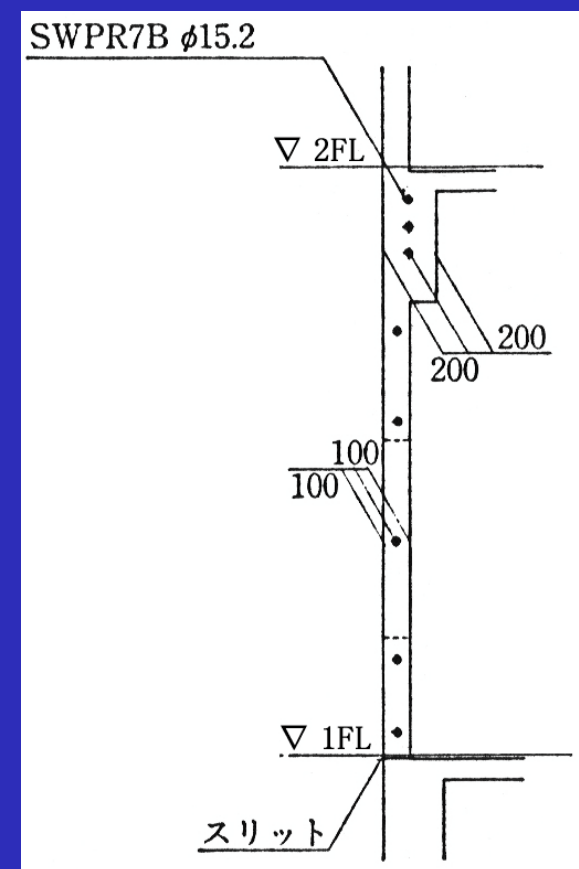
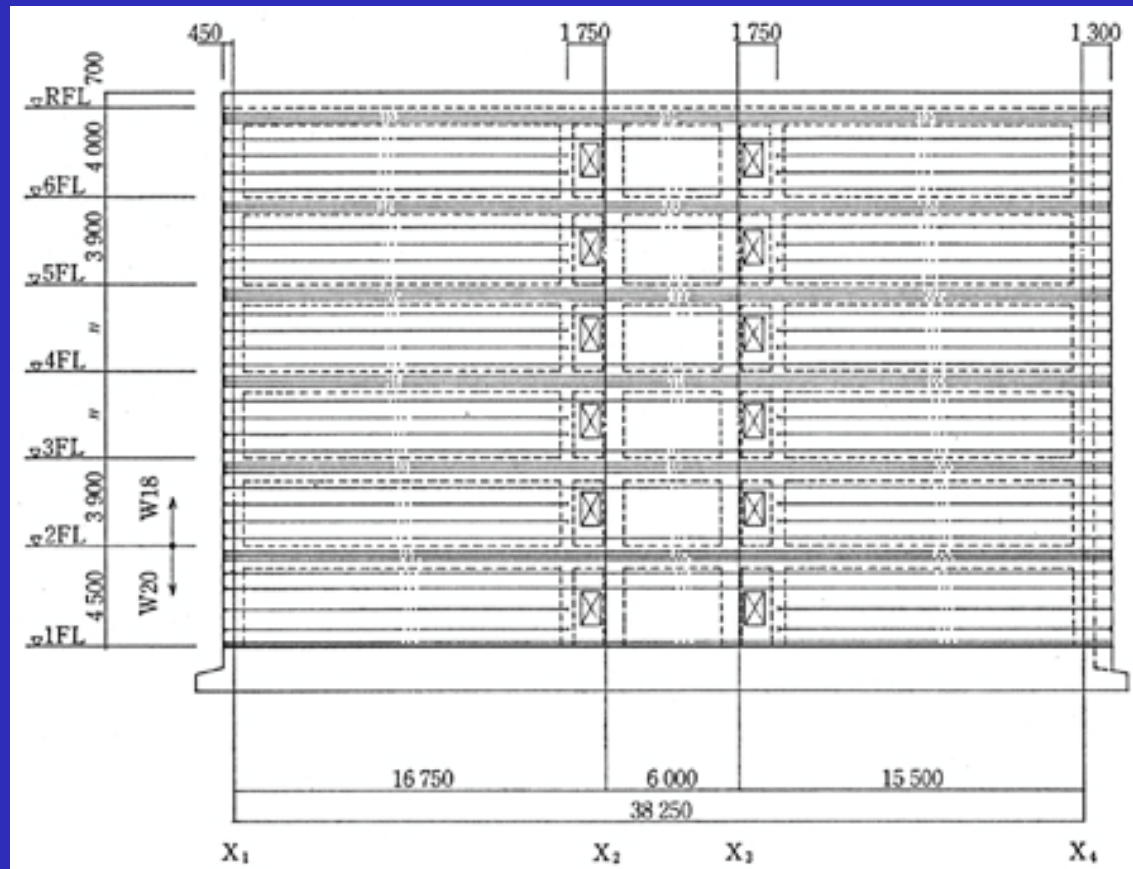
アンボンド小梁

- ・ 採用建物 : 事務所、学校
- ・ 採用理由 :
 - ・ スパンが比較的長い
 - ・ たわみ制御
 - ・ ひびわれ制御
- ・ 設計の傾向 :
 - ・ **P R C**の設計が多い
 - ・ キャンセル率はD Lの60%~100%
 - ・ **ロードバランス法**により計算
 - ・ プレストレスの軸力の効果は採否両方



外壁コンクリートのひび割れ制御

- 平均プレストレス量 1.0N/mm^2
- 最も信頼できるひび割れ防止対策



現状の利用状況

- アンボンドフラットスラブ（従来と同じ）が主
- 主要耐震部材への使用は、認められたが、実際には1件もなし
 - 1) 限界耐力法が前提(実績なし)
 - 2) 冗長性の確保(あご、普通鉄筋)
 - 3) 実績が無いので使わない？
 - コストの試算もできない？

近年の2つの研究から

- 新構造システムの実大実験
「解体・補修・再利用も視野 損傷制御性
設計法提示」
- 長寿命建築システム普及推進協議会
「長寿命建築に対応したプレストレスト造設
計施工ガイドライン」

新構造システムの実大実験概要

(BCS RC事務所ビル 塩原委員長)

(1) 実大施工実験(組立, 解体)

- 新構造システムの生産合理性

(2) 実大構造性能実験(加力実験)

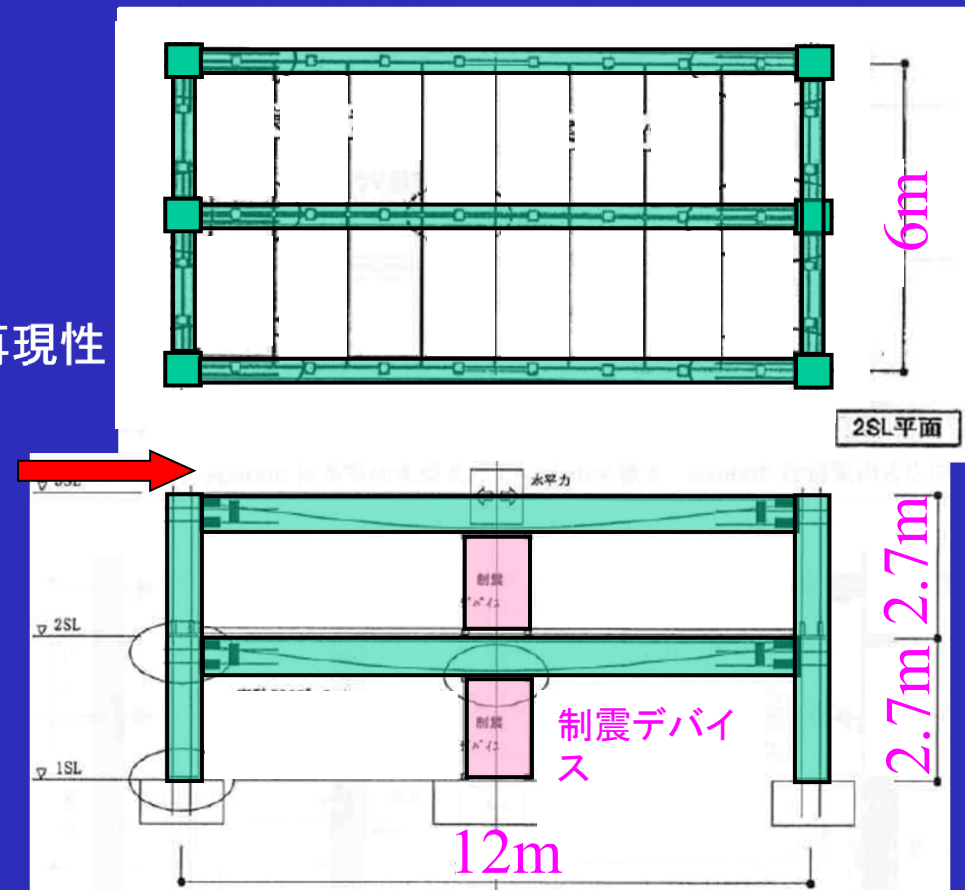
- 水平加力実験
 - 新構造システムの構造安全性
 - 損傷部材の修復後の構造性能再現性
- スラブの面内せん断伝達実験
- 振動実験

→ 2層の実大建物の
施工・構造実験

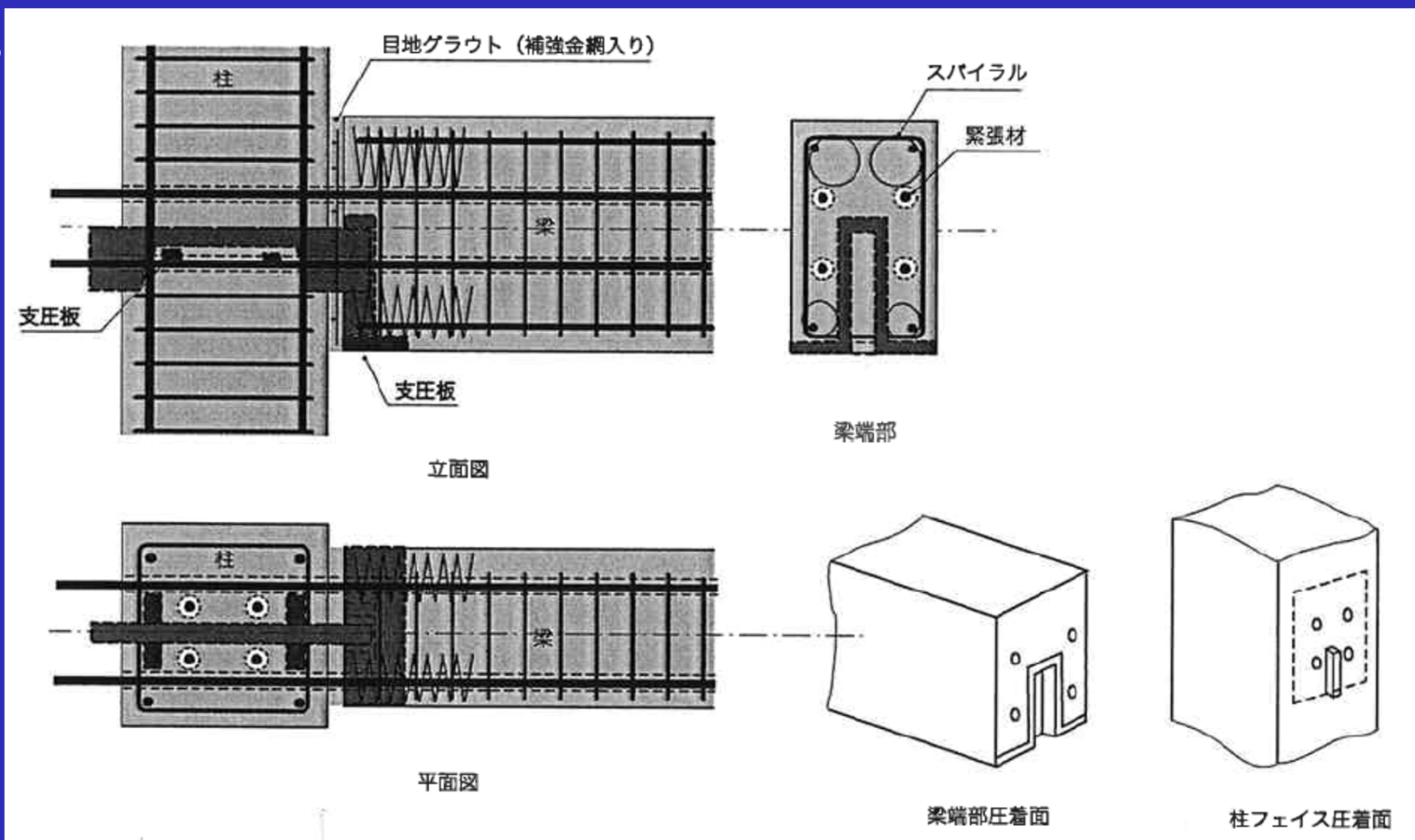
X方向 12m×1スパン

Y方向 3m×2スパン

於: 国土交通省・建築研究所



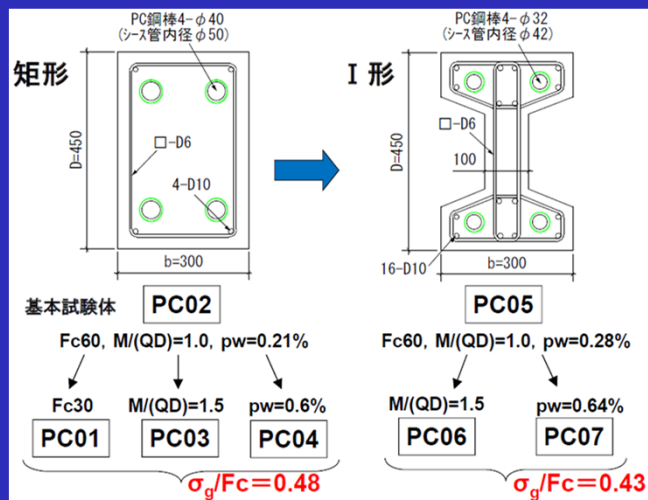
新構造システムの概要



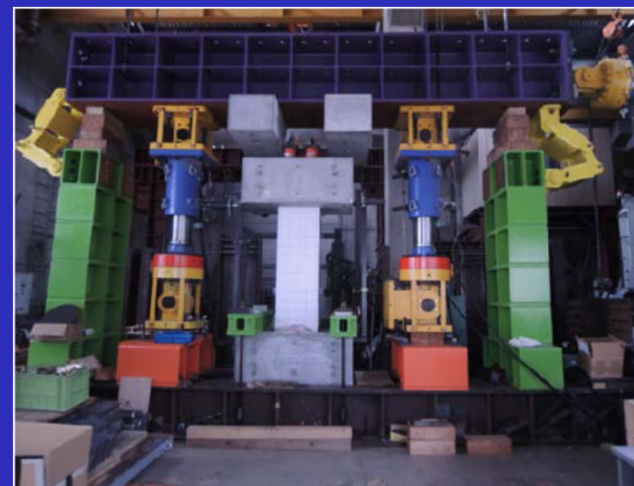
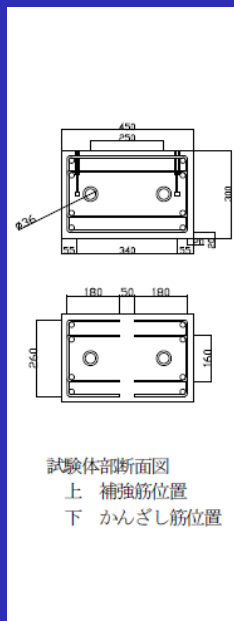
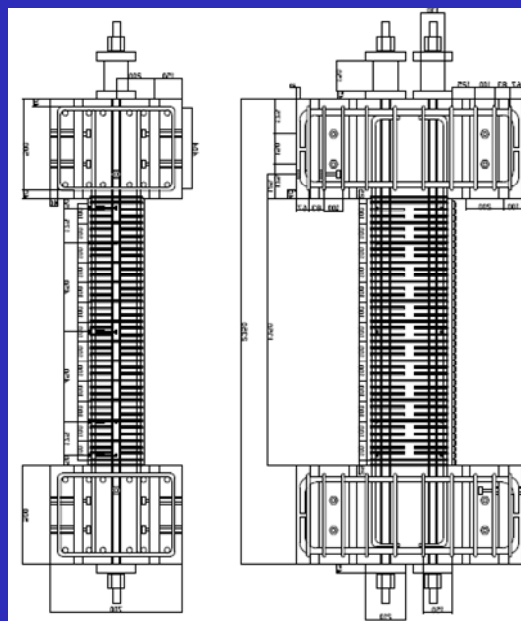
長寿命研究

- 長寿命建築システム普及推進協議会の基に建設業16社が集まり長寿命建築としてアンボンドプレストレスト構造の研究を実施した
 - 柱はRC造として大梁をアンボンドプレストレスト部材とすることを前提とした
- 大梁の基本はPCaアンボンドプレストレスト(圧着)工法としている

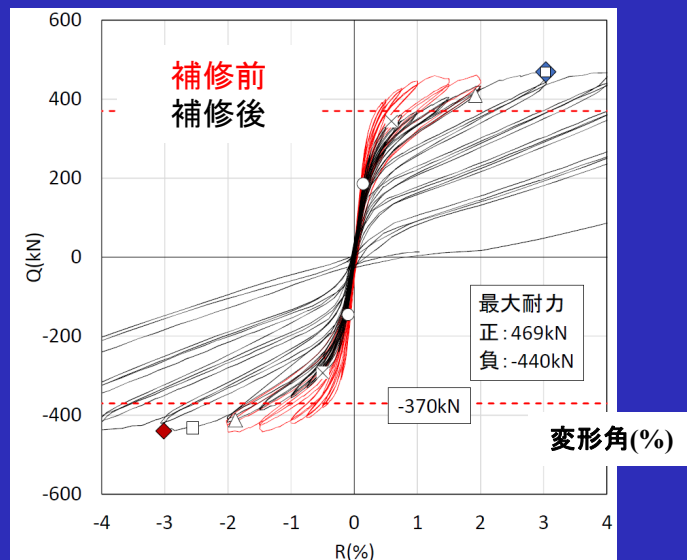
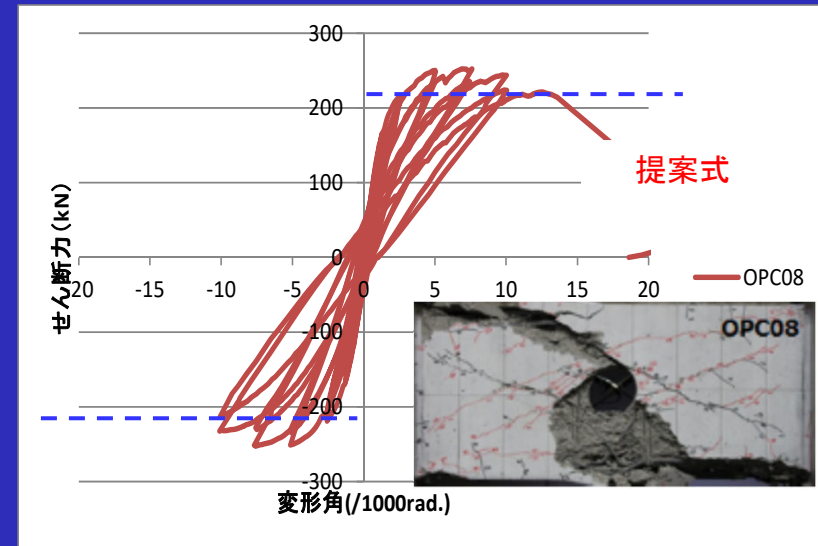
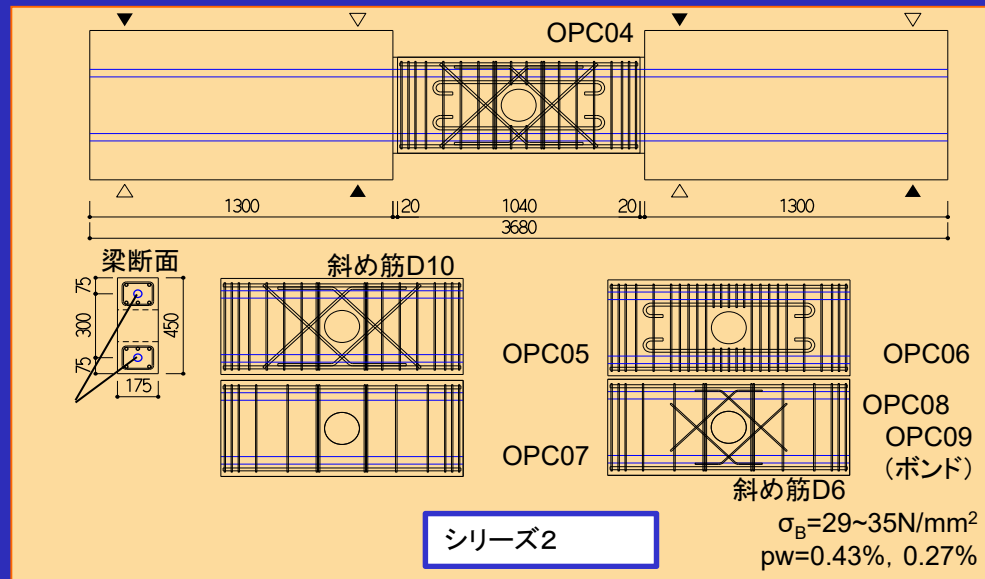
梁の曲げせん断実験



上: 神奈川大
下: 東工大

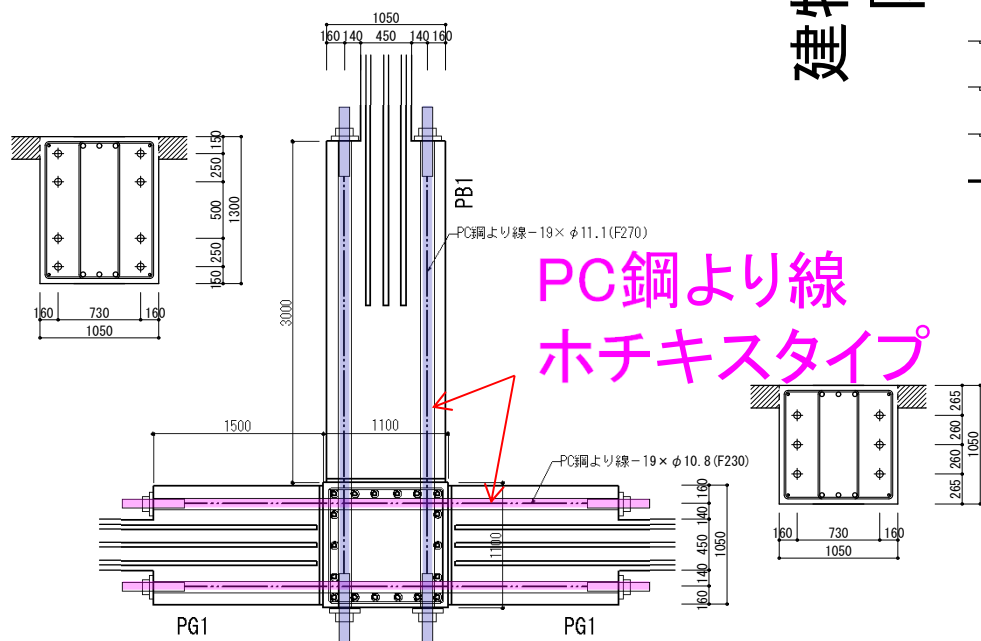


有孔梁、スラブ付き梁曲げせん断



上: 島根大
 下: 戸田建設
 + 東工大

◆ 14 階建て集合住宅モデル



仮定断面

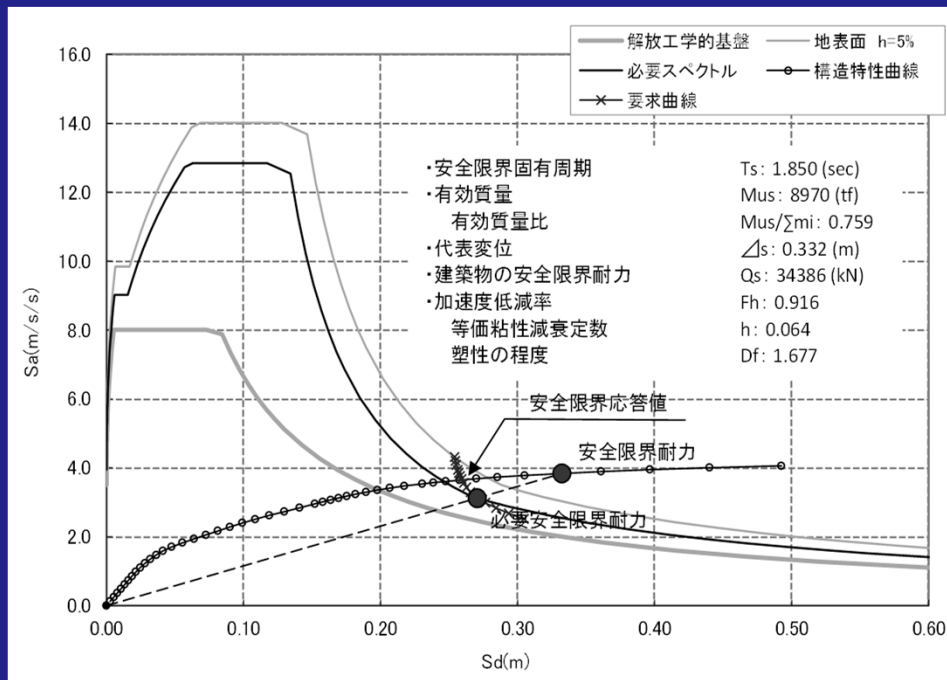
特記なき限り 1. 鉄筋種別 主筋 D16:SD295A D25:SD345 D32:SD390 D35,D38:SD490
2. あばら筋 D13:SD295A
3. PC鋼線の材質 19:SWPR19L 7A:SWPR7AL 7B:SWPR7BL
4. 腹筋 2-D10

断面	PB1						
	端部			中央部			
階	1段目	2段目	3段目	4段目	中央部上下主筋	端部あばら筋	中央部あばら筋
R階	2-F200(19xφ9.5-7B)	2-F200(19xφ20.3-19)	2-F50(19xφ20.3-19)	2-F200(19xφ9.5-7B)	5-D32	□-D13@200	□-D13@150
13, 14階	2-F200(19xφ9.5-7B)	2-F50(19xφ20.3-19)	2-F50(19xφ20.3-19)	2-F200(19xφ9.5-7B)	5-D32	□-D13@200	□-D13@150
11, 12階	2-F200(19xφ9.5-7B)	2-F50(19xφ20.3-19)	2-F50(19xφ20.3-19)	2-F200(19xφ9.5-7B)	5-D32	□-D13@200	□-D13@150
9, 10階	2-F270(19xφ11.1-7B)	2-F70(7xφ9.5-7B)	2-F70(7xφ9.5-7B)	2-F270(19xφ11.1-7B)	5-D35	□-D13@200	□-D13@150
7, 8階	2-F270(19xφ11.1-7B)	2-F130(7xφ12.7-7B)	2-F130(7xφ12.7-7B)	2-F270(19xφ11.1-7B)	6-D35	□-D13@200	□-D13@125
5, 6階	2-F270(19xφ11.1-7B)	2-F230(19xφ10.8-7A)	2-F230(19xφ10.8-7A)	2-F270(19xφ11.1-7B)	6-D38	□-D13@200	□-D13@125
2~4階	2-F270(19xφ11.1-7B)	2-F270(19xφ11.1-7B)	2-F270(19xφ11.1-7B)	2-F270(19xφ11.1-7B)	6-D38	□-D13@200	□-D13@100

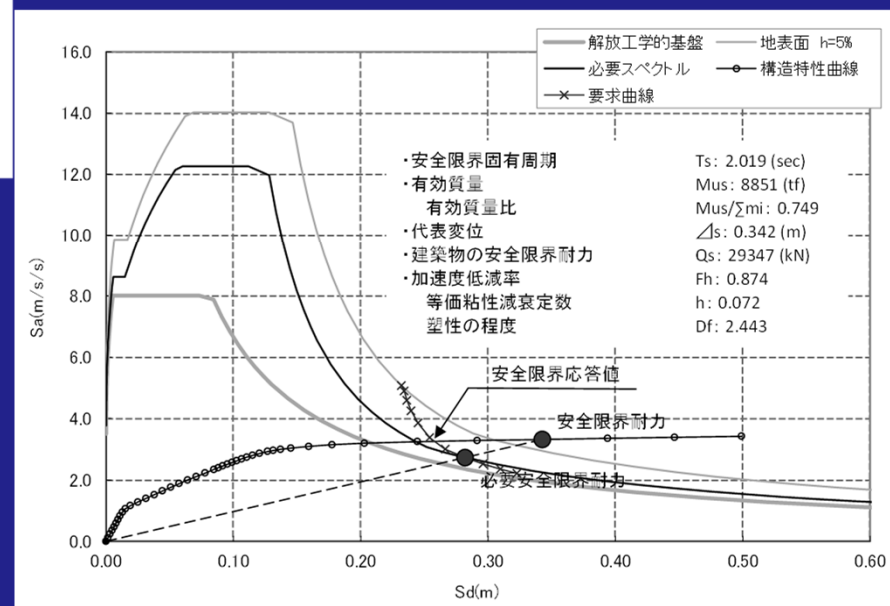
断面	PG1						
	端部			中央部			
階	1段目	2段目	3段目	4段目	中央部上下主筋	端部あばら筋	中央部あばら筋
R階	2-F50(19xφ20.3-19)	----	2-F50(19xφ20.3-19)		3-D25	□-D13@200	□-D13@200
13, 14階	2-F100(7xφ11.1-7B)	----	2-F100(7xφ11.1-7B)		3-D25	□-D13@200	□-D13@200
11, 12階	2-F130(7xφ12.7-7B)	----	2-F130(7xφ12.7-7B)		3-D29	□-D13@200	□-D13@200
9, 10階	2-F170(7xφ15.2-7A)	----	2-F170(7xφ15.2-7A)		3-D32	□-D13@200	□-D13@200
7, 8階	2-F190(7xφ15.2-7B)	2-F50(19xφ20.3-19)	2-F190(7xφ15.2-7B)		3-D35	□-D13@200	□-D13@150
5, 6階	2-F190(7xφ15.2-7B)	2-F130(7xφ12.7-7B)	2-F190(7xφ15.2-7B)		3-D35	□-D13@200	□-D13@150
2~4階	2-F190(7xφ15.2-7B)	2-F130(7xφ12.7-7B)	2-F190(7xφ15.2-7B)		3-D35	□-D13@200	□-D13@150

限界耐力計算結果

(ダンパの効果は無し)



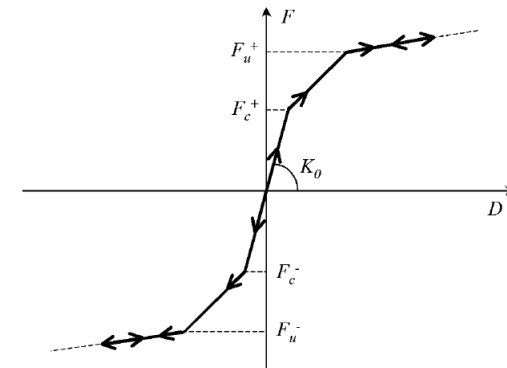
極めて稀に発生する地震
推定される応答値
最大層間変形角
X方向: 1/92, Y方向: 1/98



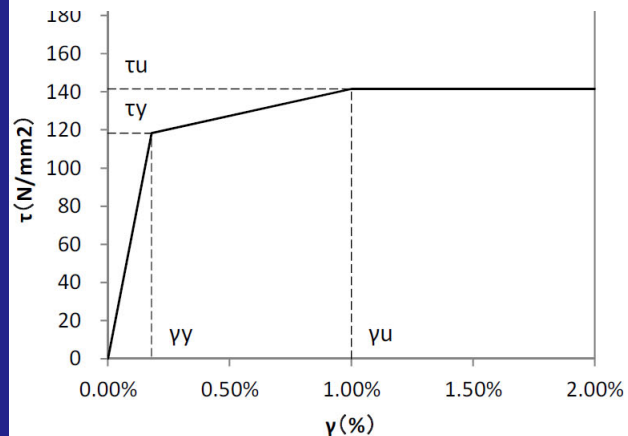
復元力モデル

架構の復元力特性(アンボンドPC)

部位	変位	スケルトンカーブ	履歴則
大梁 (PC 造)	曲げ	Tri-Linear	逆行
	せん断	Linear	—
柱 (RC 造)	曲げ	Tri-Linear	武田モデル ($\gamma=0.4$)
	せん断	Linear	—
	軸方向	圧縮側: Bi-Linear 引張側: Tri-Linear	逆行
制振要素 (履歴型)	軸方向	Tri-Linear	ノーマル



制震要素(間柱型鋼材ダンパー)



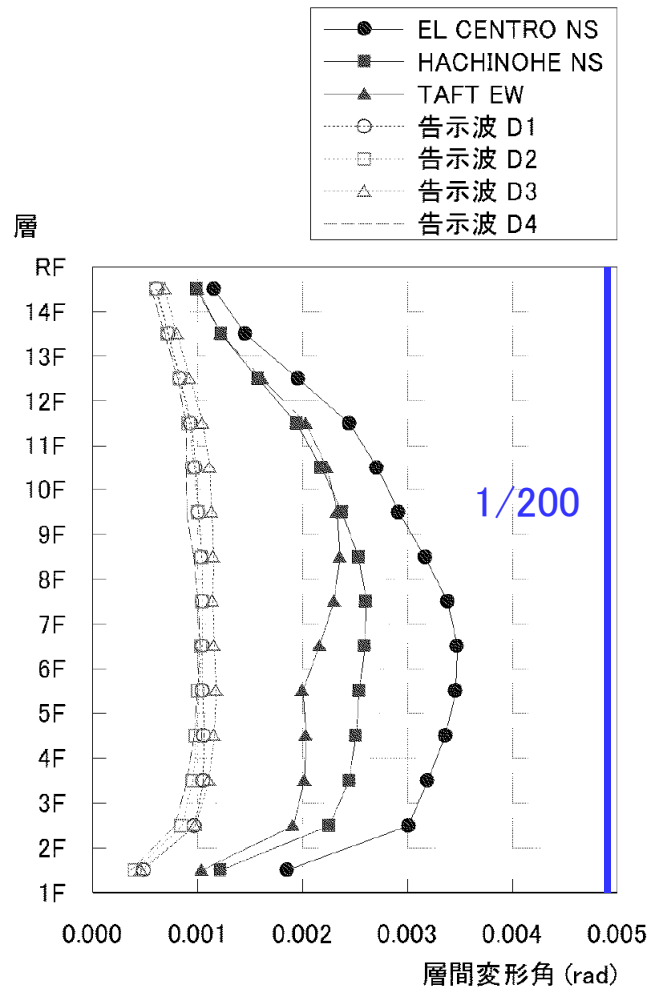
τ_y : 降伏せん断応力度, $\tau_y = 118 \text{ N/mm}^2$
 τ_u : 最大せん断応力度, $\tau_u = 141 \text{ N/mm}^2$
 γ_y : 降伏せん断ひずみ, $\gamma_y = 0.18\%$

特性を軸方向に変換する.

減衰 内部粘性(剛性比例型, 1次の減衰定数0.03)

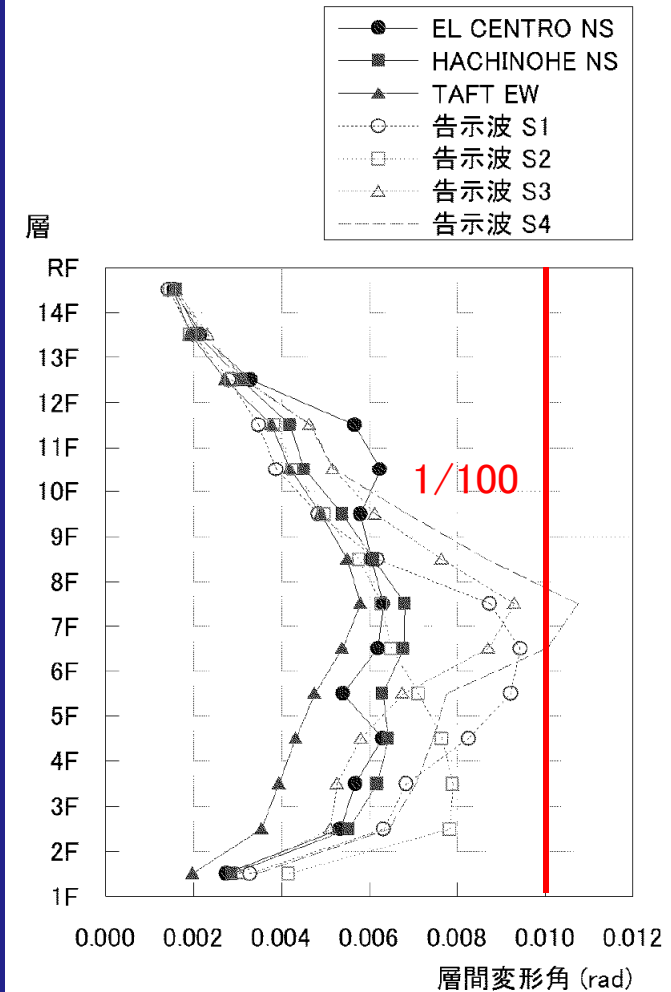
時刻歴応答解析結果(ダンパ付き)

最大応答(層・重心) 層間変形角 Y方向



稀に発生する地震(アンボンドPC)

最大応答(層・重心) 層間変形角 Y方向



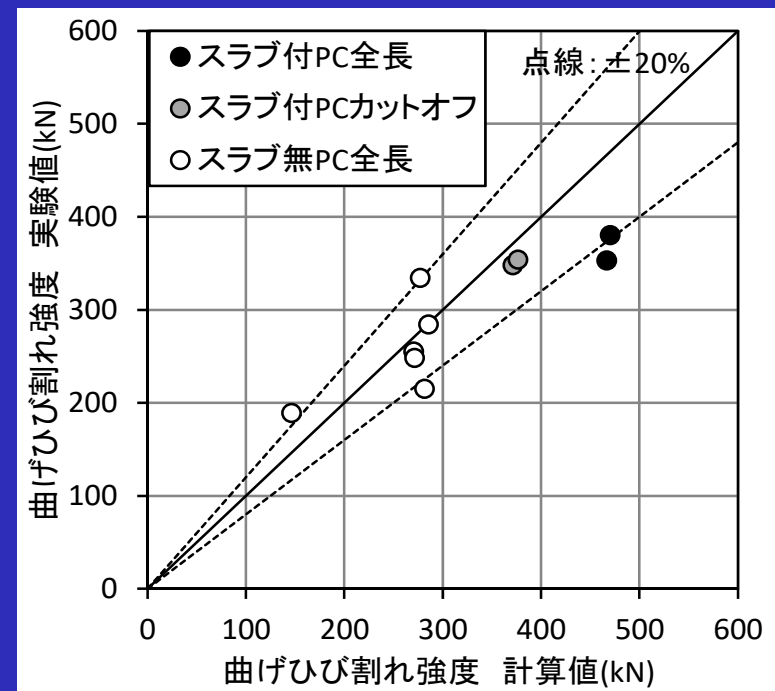
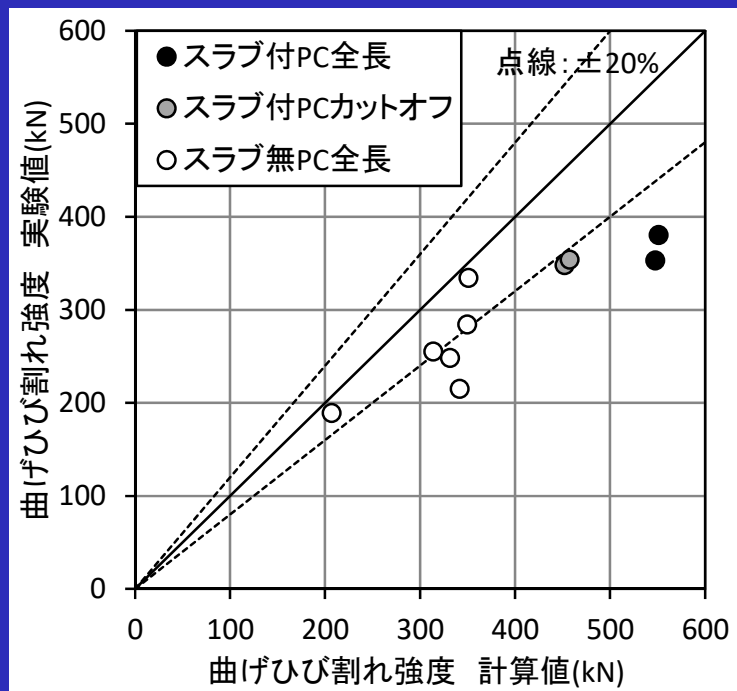
極めて稀に発生する地震(アンボンドPC)

アンボンドPC 部材設計

曲げひび割れ強度

$$M_{cr} = \sigma_{tb} \cdot Z + \left(\frac{Z}{A} + e \right) \sum P_e$$

$$\sigma_{tB} = 0.24\sqrt{\sigma_B}$$

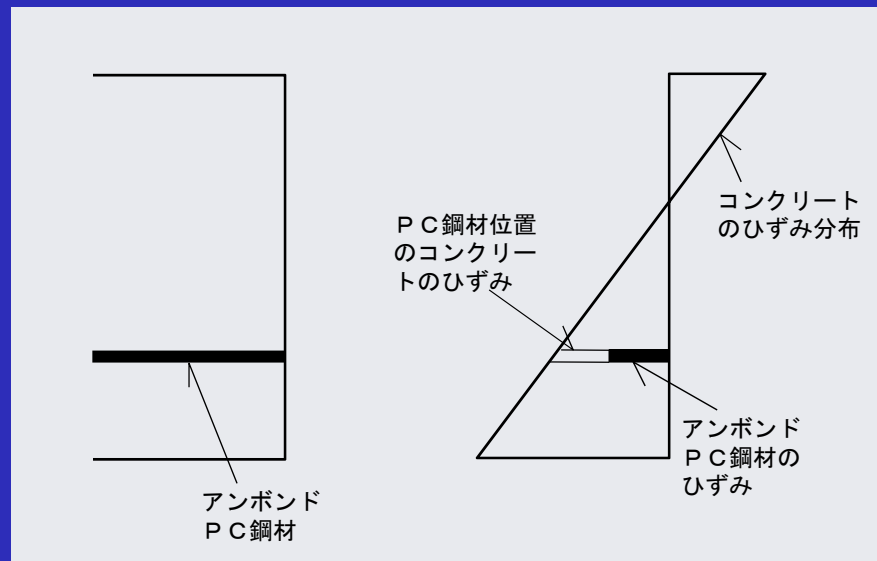


(1) $\sigma_{tB} = 0.24\sqrt{\sigma_B}$ とした場合 (2) $\sigma_{tB} = 0$ とした場合

終局曲げモーメント

- ・ ボンド有りとアンボンドの場合、終局時のP C鋼材の**応力増分**が異なる。長期設計は同じ
- ・ **鉛直荷重**に対しては、終局曲げモーメント算定用のP C鋼材応力 σ_{pu} として下式採用
$$\sigma_{pu} = 0.75 \cdot \sigma_{pe} + 0.25 \cdot \sigma_{py}$$
を使用

平面保持仮定
の非成立



曲げ終局強度略算式

- 1) 載荷による破壊断面での緊張材伸びひずみ増分とコンクリートの伸びひずみ増分を結び付けるひずみの適合係数(F値)を用いる。(Baker)
- 2) 曲げ終局時における緊張材応力を半理論式もしくは実験式で直接与える。(増分)

Pannel, Mattock, 竹本, 最上

曲げ終局時に対する緊張材応力度 $\Delta\sigma_p$ として下式が与えられている。

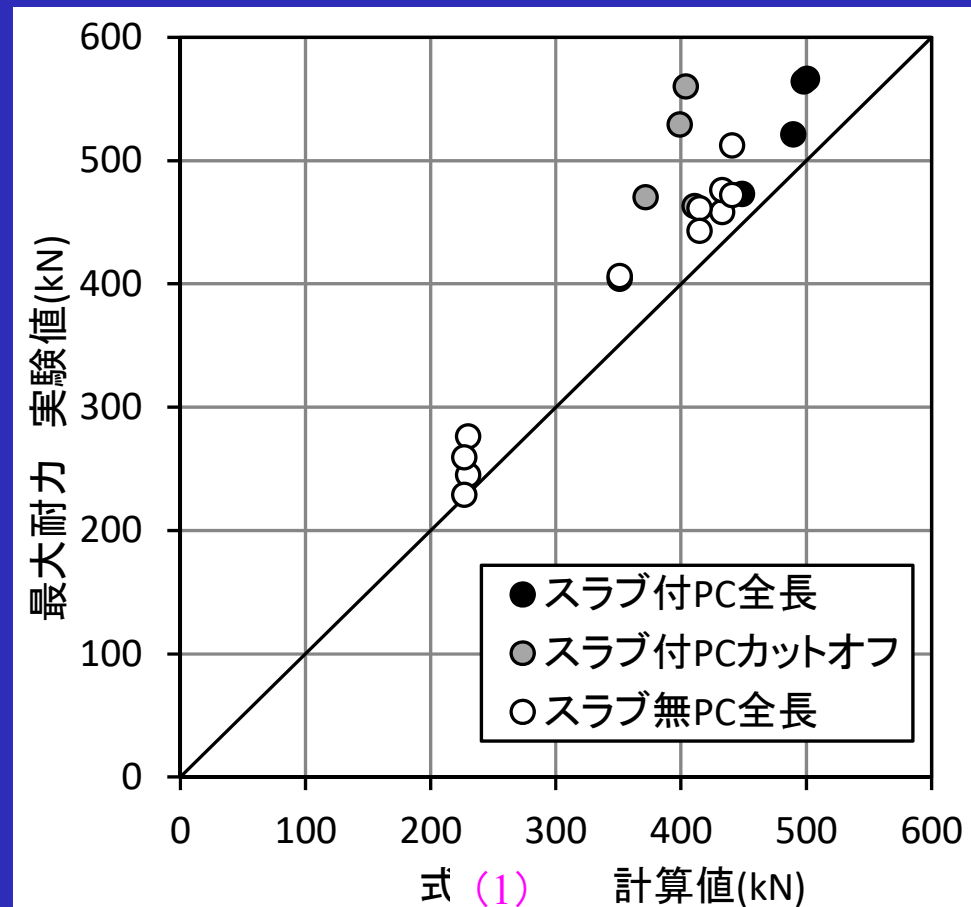
$$\left. \begin{array}{ll} l/d_p \leq 20 & \Delta\sigma_p = 2000 - \frac{5 \times 10^7}{F_c} \rho_p \\ 20 \leq l/d_p \leq 60 & \Delta\sigma_p = \left(2000 - \frac{5 \times 10^7}{F_c} \rho_p \right) \frac{60 - l/d_p}{40} \\ l/d_p \geq 60 & \Delta\sigma_p = 0 \end{array} \right\} \quad \text{竹本式} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

曲げ強度

$$M_u = T_{pc} \cdot d_{pa} + T_{py} \cdot d_{pb} + T_{sy} \cdot d_t - C_{sy} \cdot d_c - (T_{pc} + T_{py} + T_{sy} - C_{sy}) \cdot k_2 \cdot x_n \quad (1)$$

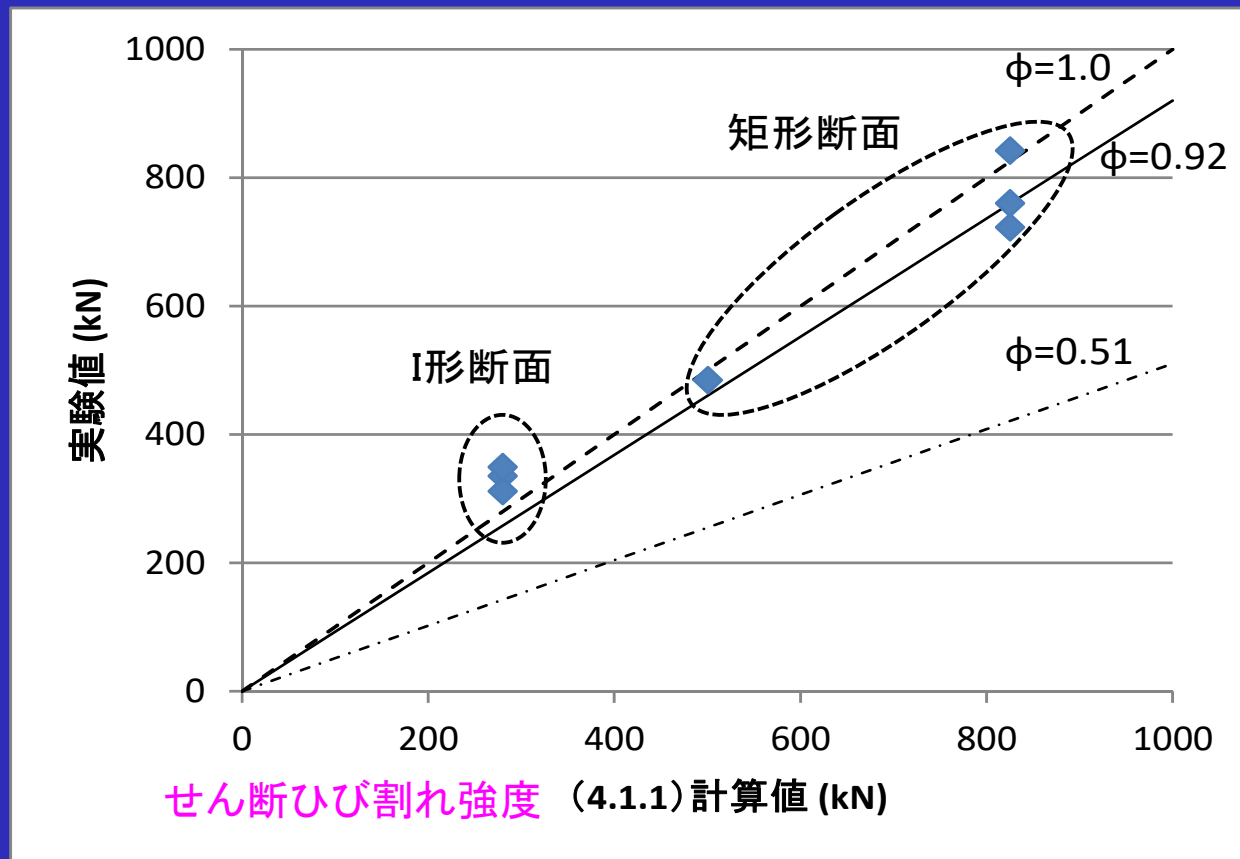
$$\sigma_{py} = \sigma_{pe} + \Delta\sigma_p \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_p = 100 - 5 \times 10^{-7} \frac{P_p}{F_c}$$



せん断ひび割れ強度

$$Q_c = \phi \cdot \left(\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_t \cdot \sigma_0} \right) \cdot b \cdot D / \kappa$$

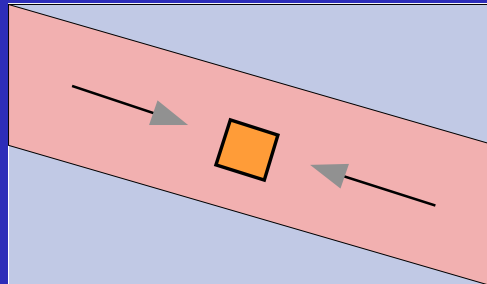


せん断強度

考え方はトラス・アーチもしくは
コンクリート項と補強筋項を有する許容応力度式

$$Q_u = b_0 j_0 p_w w f_y + \frac{b_0 D}{2} (\nu_1 \sigma_B - 2 p_w w f_y) \tan \theta$$

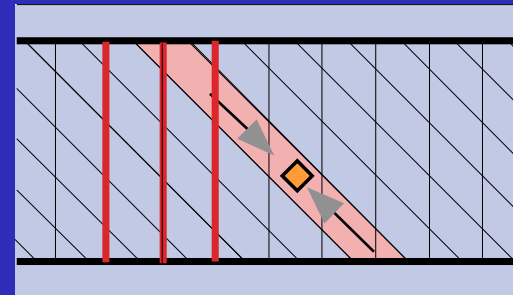
アーチ



トラス: 横補強筋と主筋の付着、束のコンクリートが必要



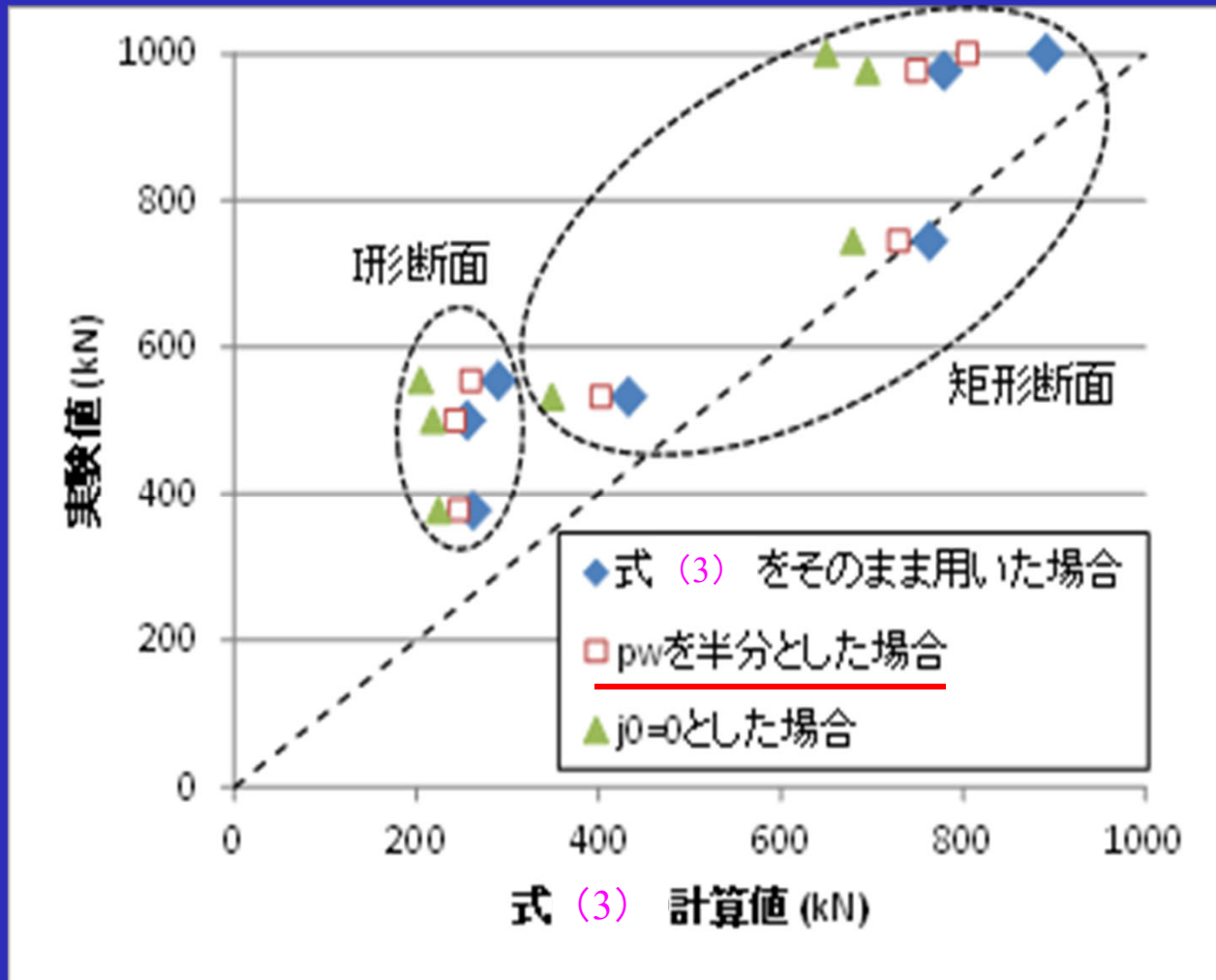
付着が無いのでトラス機構は未成立



せん断強度

$$Q_u = b_0 j_0 p_w w f_y + \frac{b_0 D}{2} (\nu_1 \sigma_B - 2 p_w w f_y) \tan \theta$$

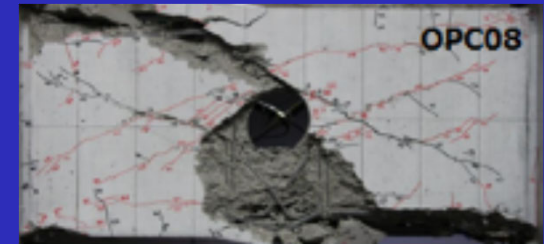
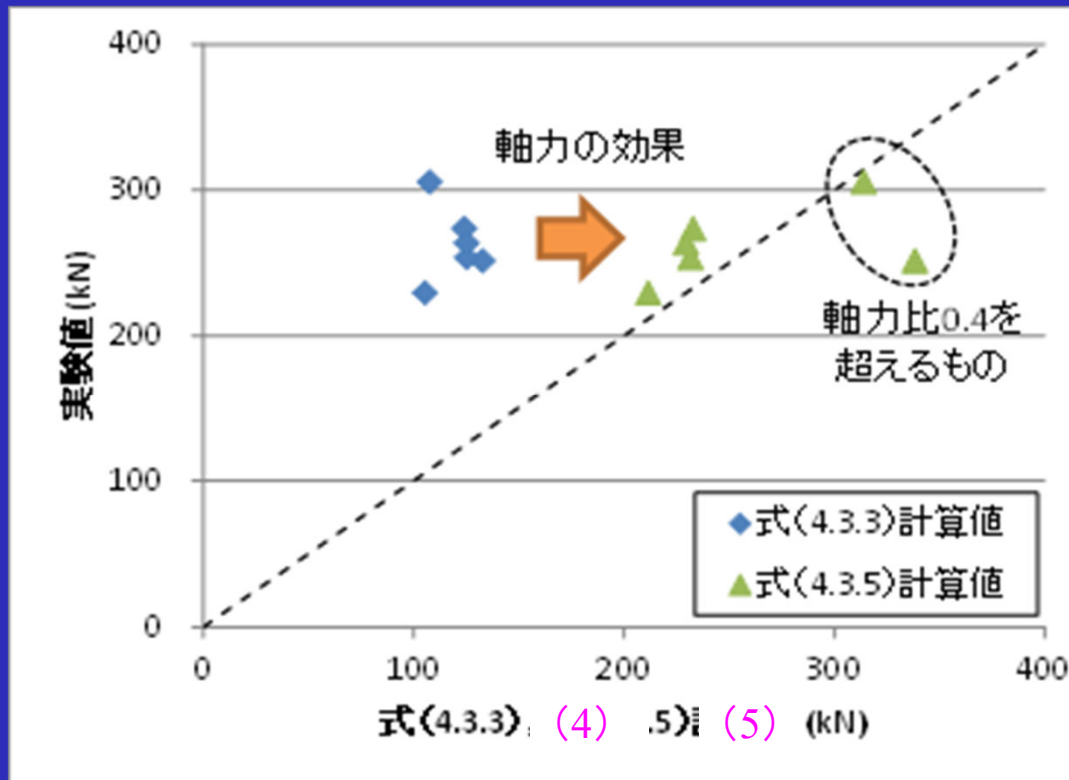
付着が無いが半分程度の補強筋は有効と仮定



有孔梁せん断強度(斜め筋)

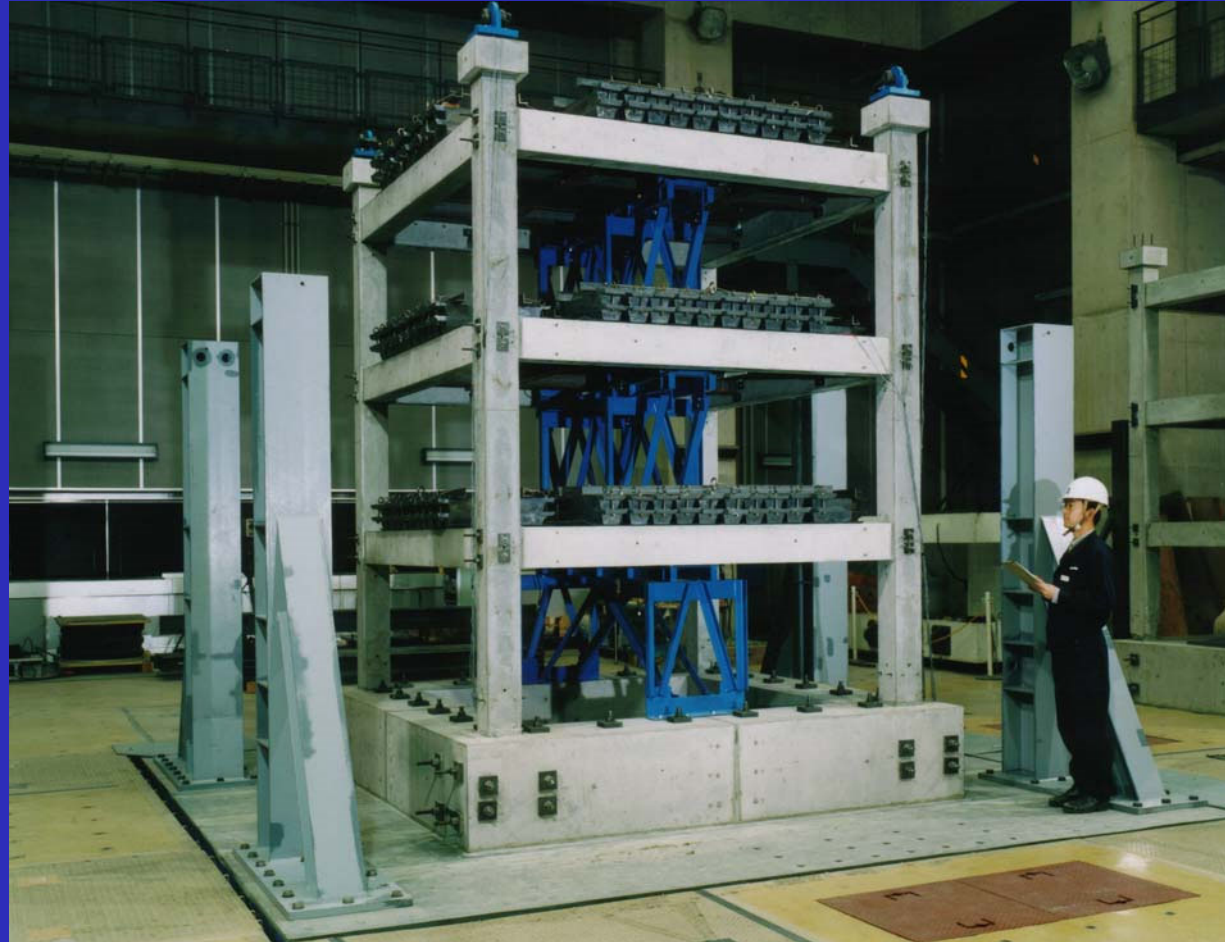
$$Q_{u0} = \left\{ \frac{0.092k_u k_p (F_c + 18)}{\frac{M}{Qd} + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_s s \sigma_y} \right\} b j$$

$$Q_{u2} = \alpha_1 \cdot 0.1 \sigma'_g \cdot b_0 j + Q_{u0}$$



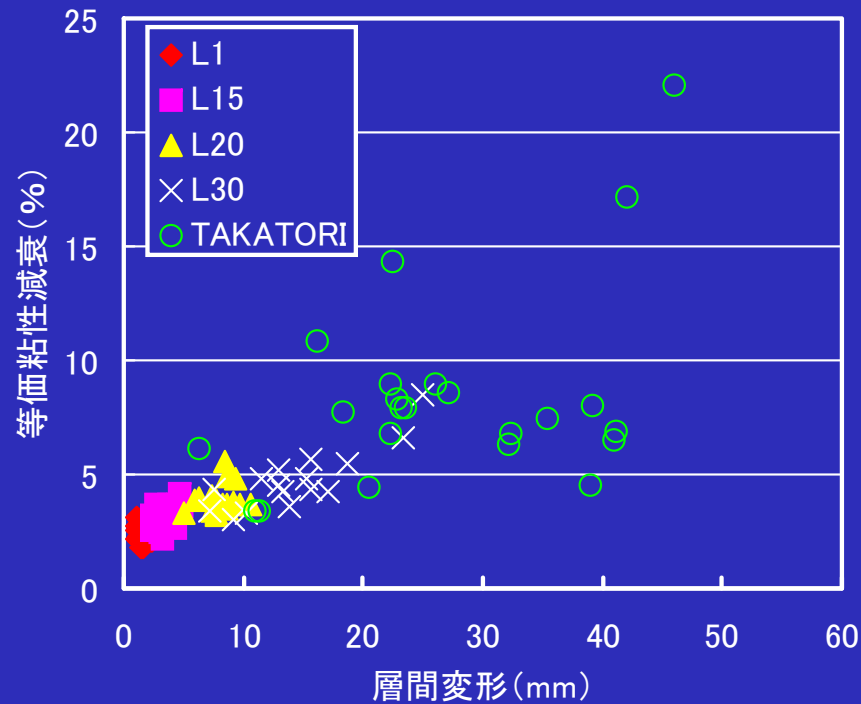
研究例

振動台を用いた動的実験

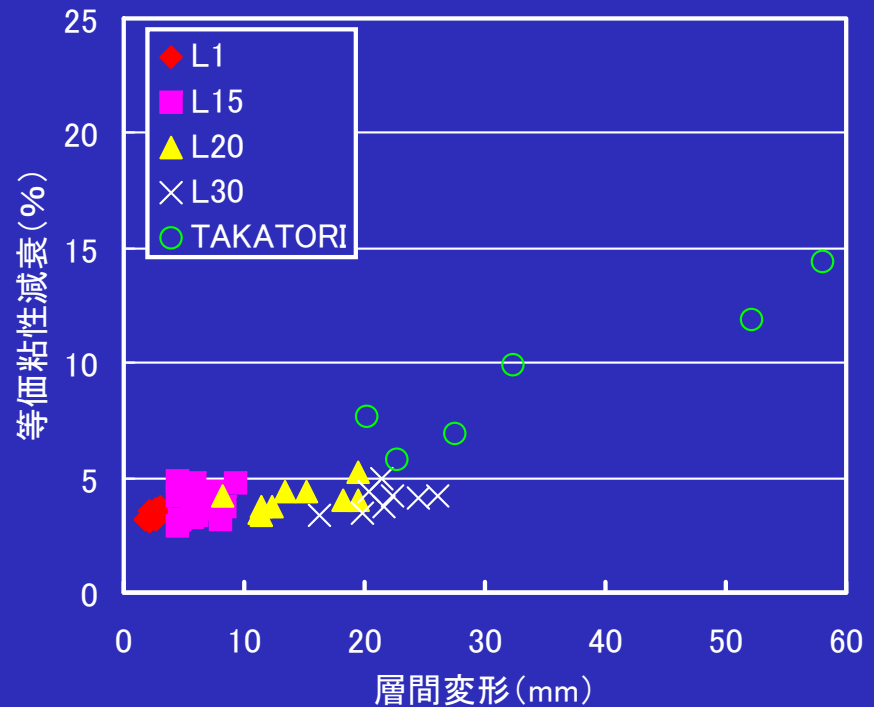


各層約6ton 計18ton (1/4 Scale)

等価粘性減衰（振動台実験）



ボンド試験体



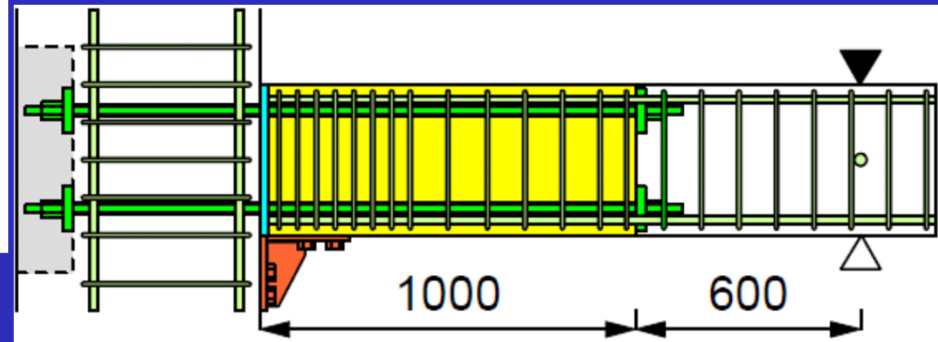
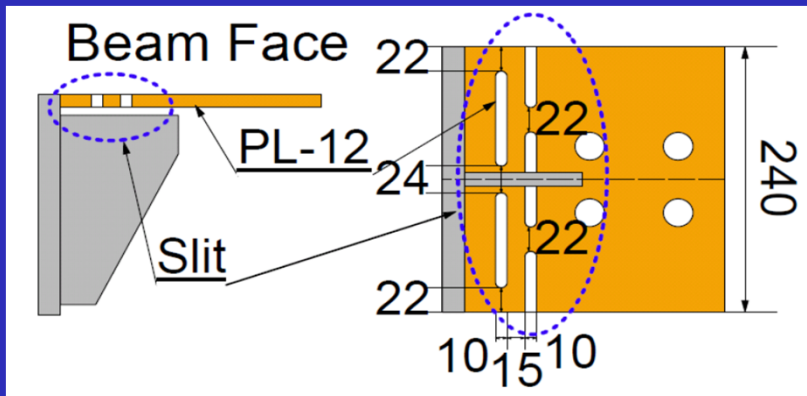
アンボンド試験体

アンボンドPC梁+制震装置(動的実験)

アンボンド PC+制震プレート

制震プレート

Large Opening → Plastic
Slit: Energy Consuming



アンボンド PC+普通強度鉄筋

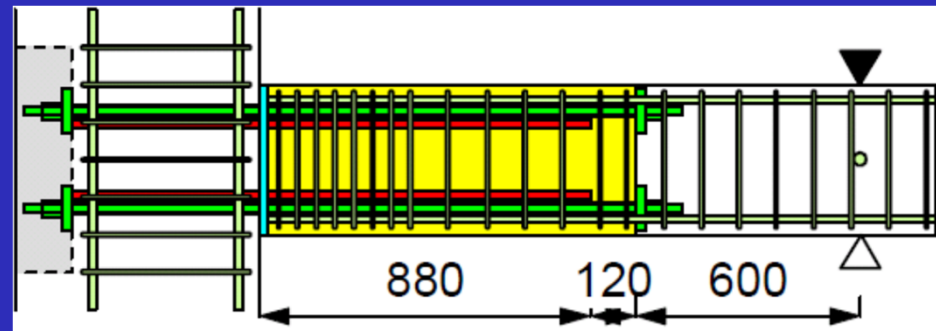
D19.

σ_y : 295N/mm²

PC導入後

1.鉄筋挿入

2.モルタルをグラウト



荷重—変形関係

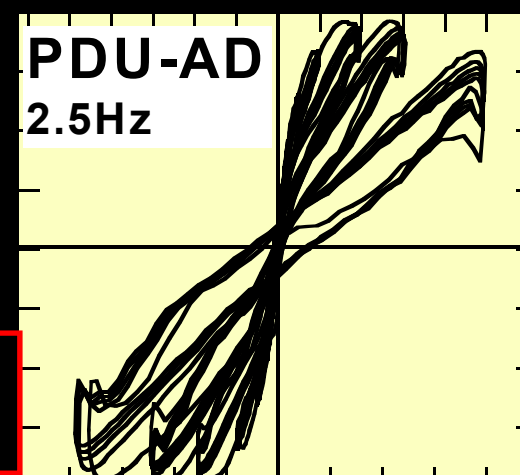
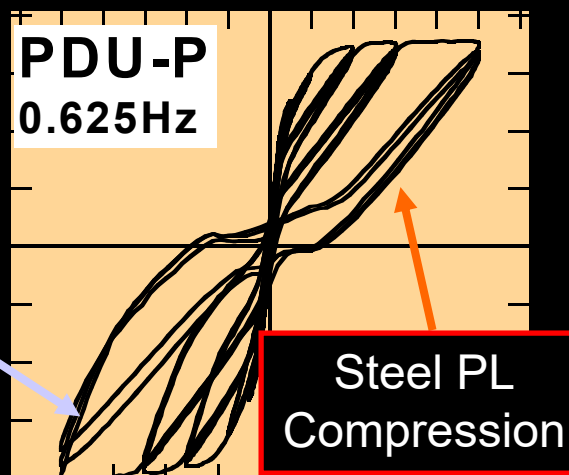
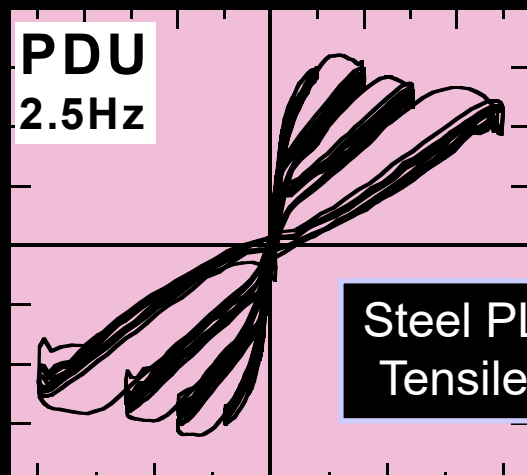
アンボンド PC

+制震プレート

+普通鉄筋

Horizontal Load (KN)

Drift Angle R(%)



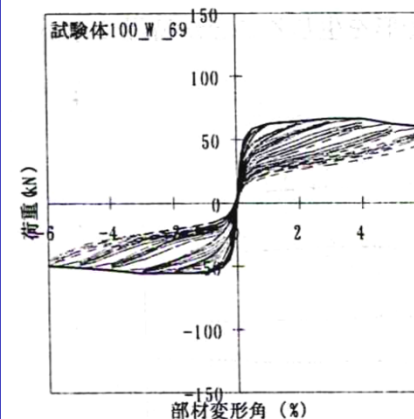
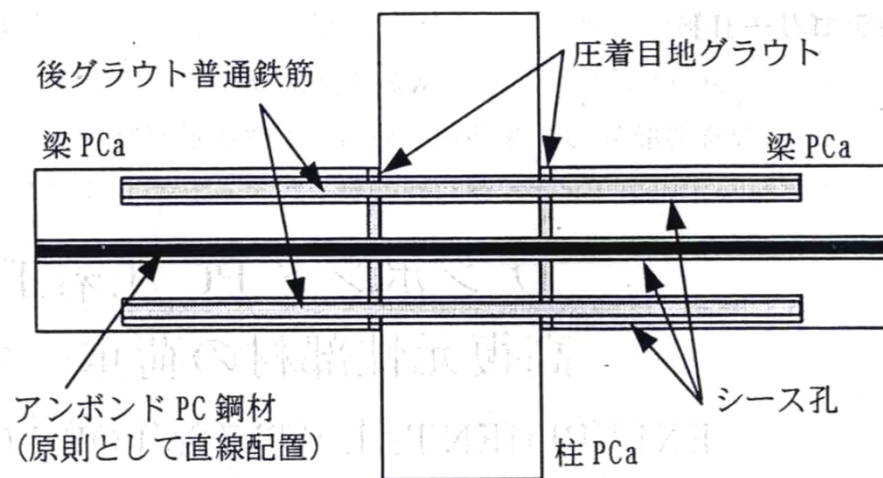
Displacement

■エネルギー吸収

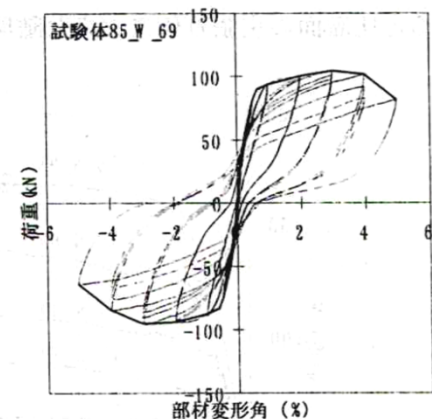
アンボンド PC < +普通鉄筋 < +制震プレート

菅田らの研究

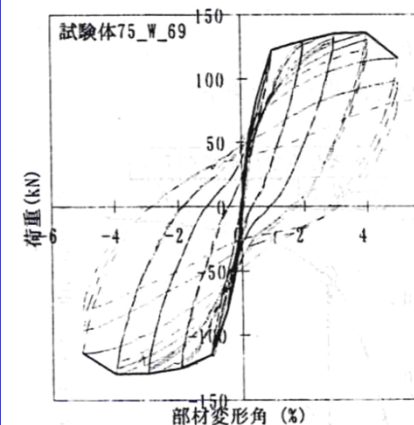
アンボンドPC+普通鉄筋



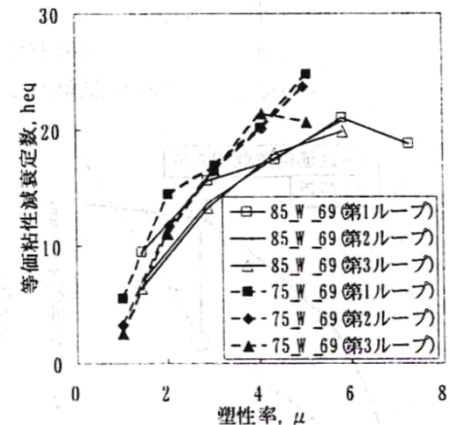
(a) 100_W_69 試験体の Q-R 関係



(b) 85_W_69 試験体の Q-R 関係

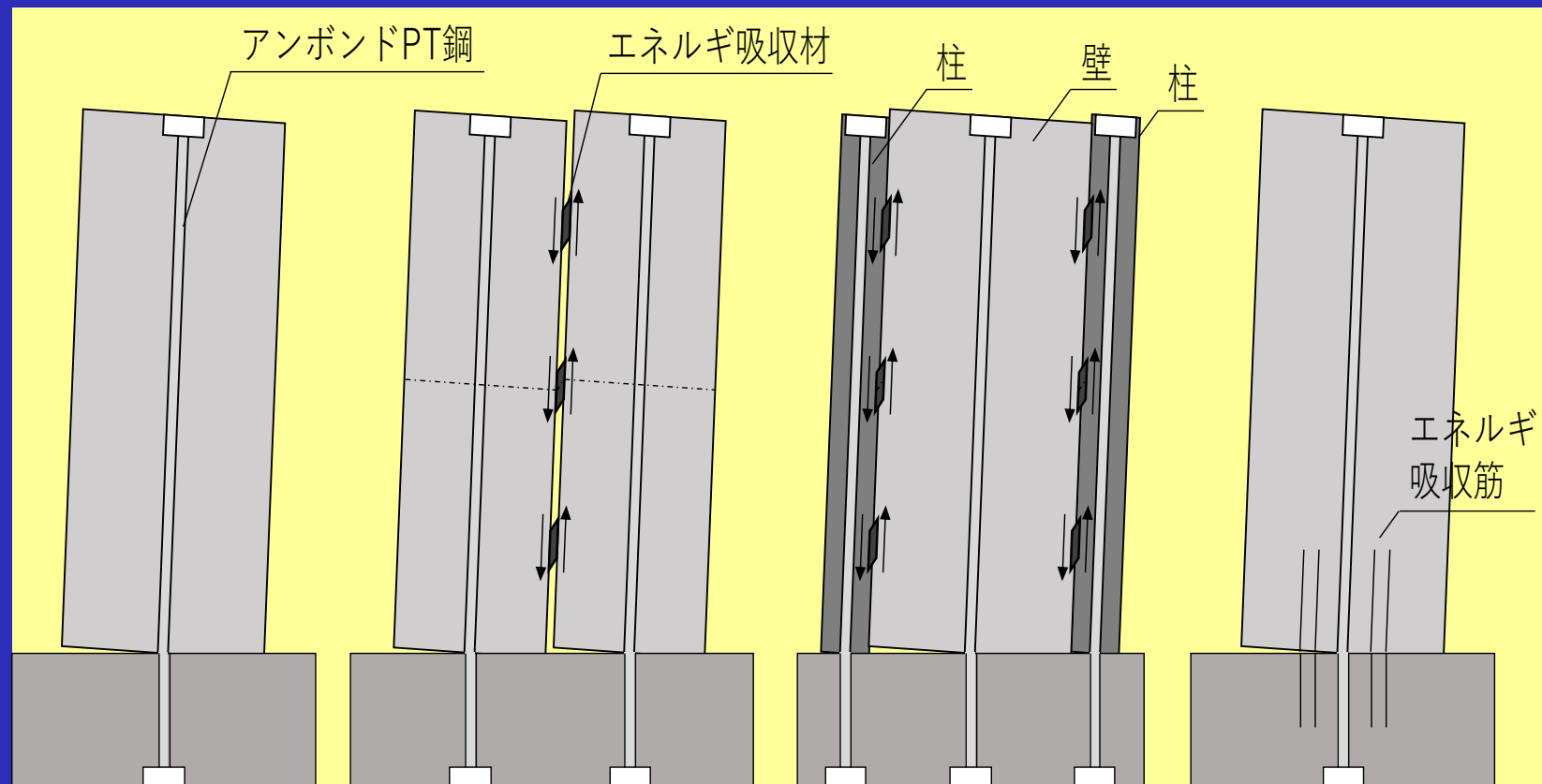


(c) 75_W_69 試験体の Q-R 関係



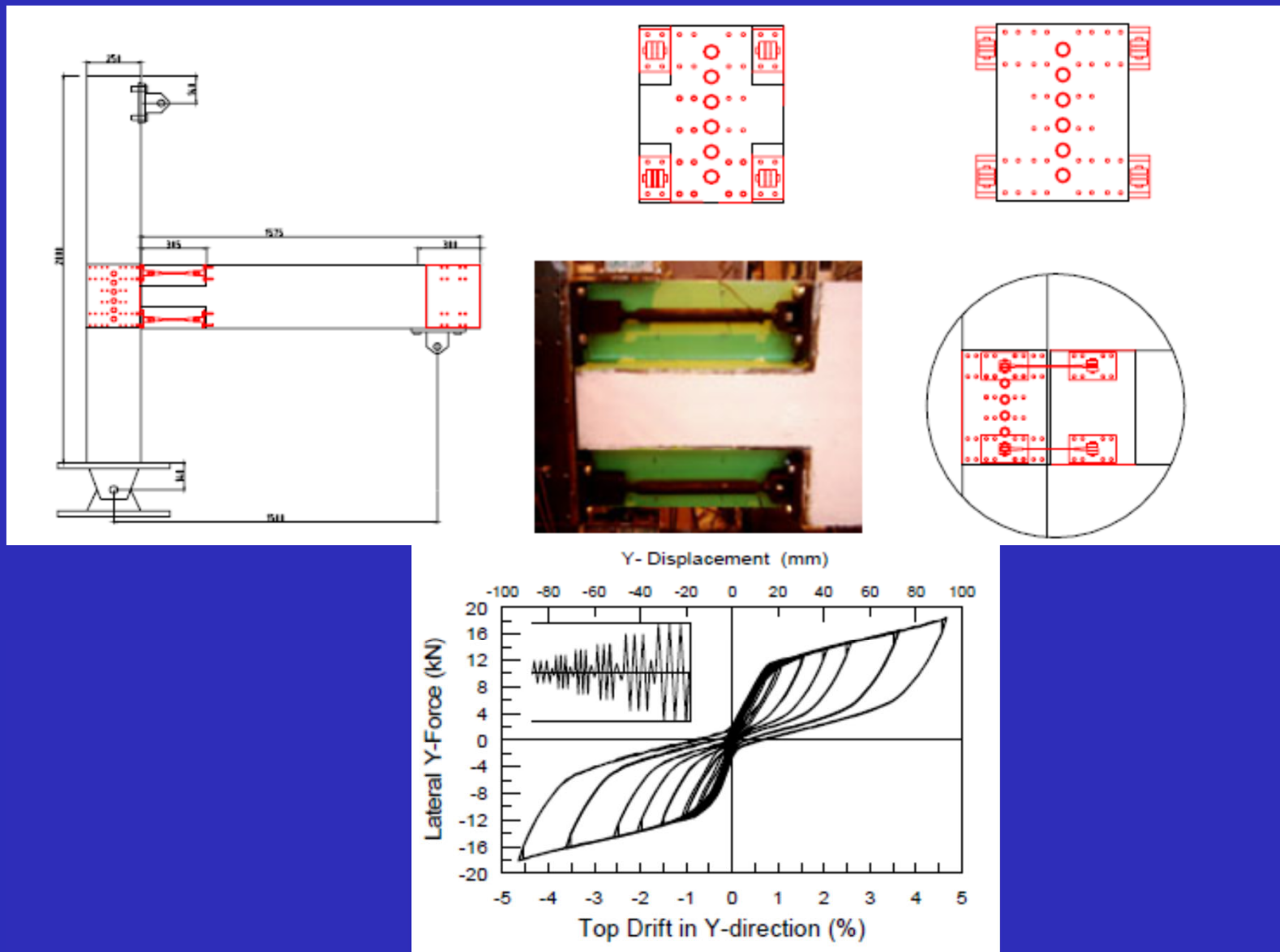
(d) 各試験体の等価粘性減衰定数

Jointed接合を有する構造壁



Smith and Kurama など

Pampaninらの研究



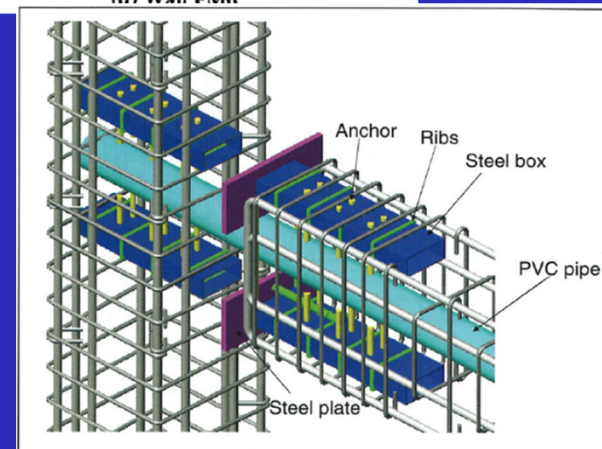


Fig. 3. Connection detail of post-tensioned specimens. Note: PVC = polyvinyl chloride.

課題

- 限界耐力計算法の未普及→新耐震設計法ルート3bでの適用(知見の蓄積、行政への依頼)
- 曲げ強度がボンドタイプより小さい
→アンボンドマルチケーブル？入るか？
- どのような減衰システムを考えるか？
→新アンボンドPC鋼線、ホチキスタイプ(?)
アンボンド柱は必要か？
- 課題は多い — 全体的にデータ不足
コンクリート強度、鋼材係数
- コンクリートの圧壊の防止→損傷を制御

アンボンドPCの将来

- 簡易施工を可能にする合理化工法
→BIMを含めて全体で進め、職人不足に対応
- 最新の研究や評価法の確立で信頼性UP
 - 1) 免震・制震等の組み合わせで効果を発揮
 - 2) コンクリートの高強度化とマッチ→圧壊防止
 - 3) 地震応答解析の有効利用



推進する価値は有

ご清聴ありがとうございました



ピーエス三菱殿提供

