

告示1320号改正を機に変わる PC建築の設計

西山 峰広

2008年

PC建築技術講習会

PC建築設計準拠基規準

- 日本建築センター
 - 「プレストレストコンクリート造設計施工指針(1983)」
- 日本建築学会
 - 「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説(1998)」
 - 「プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説(2003)」
 - 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(1999)」
- 日本建築センター
 - 「プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例」編集委員会(執筆・編集中)
- 「建築物の構造関係技術基準解説書(2007)」

「PC性能評価型設計施工指針」 日本建築学会PC構造運営委員会

- PC性能評価型設計施工指針(新PC規準)
 - － 材料・施工編
 - － 常時荷重設計編
 - PCとPRCの連続性
 - － 部材性能評価編
 - 部材解析法, 耐力式, 変形性能評価など
 - － 耐震設計編
 - 限界耐力計算に基づく

建築学会構造委員会

- 「構造設計規準等の基本原則(案)」(構造本委員会)
 - 「建築物の構造設計に係わる規準などの基本原則を述べたものであり、これに基づいて各種構造設計規準等を作成することを基本とする。」
 - 「総則，用語の定義，構造設計の基本，構造材料，荷重・外力，限界状態の設定，目標構造性能の設定，構造システムの構築，目標構造設計の検証，設計図書，工事監理と品質の検証，維持管理計画」
- 「コンクリート系構造基準」(RC構造運営委員会)
 - 「各種コンクリート系規準や指針の上位に位置し，C系に共通するクライテリアや材料特性などを当基準に集約し，C系構造規準の体系化を目指す」
 - 「目標構造性能の設定，構造材料の特性，建物のモデル化，目標構造性能の確認，性能の表示」

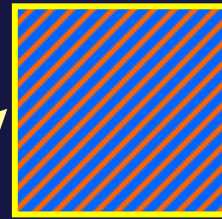
建築基準法におけるPC構造の位置付け

建築基準法

建築基準法施行令

令80条の2、第2号
(構造方法)
令81条 (構造計算)

告示



PC構造に関する建設省告示1320号
(2007年改正)

PC構造に関する告示の変遷

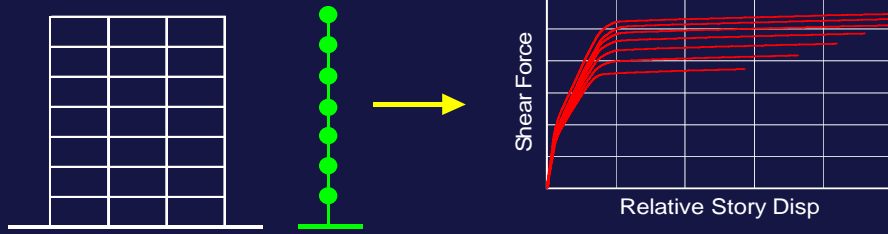
- 1950 建築基準法
- 1960 建設省告示第223号
終局強度設計法
建物高さ16m以下、かつ4階以下
- 1973 建設省告示第949号
荷重係数の変更、せん断設計
建物高さ31m以下
- 1983 建設省告示第1320号
新耐震設計法(1981年)への対応
終局強度設計法を保有水平耐力計算と同等な設計法として位置付け(2次設計)
PRC構造
- 2007 建設省告示第1320号改正(平成19年 国土交通省告示第600号)
建築基準法改正への対応
限界耐力計算の導入

告示に規定されるPC構造の設計法

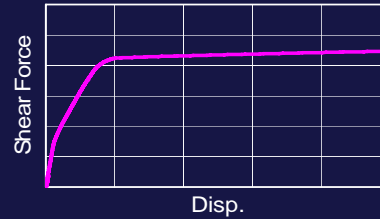
| | | 1960 | 1973 | 1983 | 2007 |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------|--|
| 設計法・荷重の組合わせ | PC造 | 終局強度型設計法 $1.2(G+P)+1.5K$ | | | (ルート3a) $G+P+1.5K$ (曲げ) $G+P+2.0K$ (せん断) |
| | | | | 保有水平耐力計算 (ルート3b) | |
| RC造 | | | | | 2000 限界耐力計算 |
| | | | 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 $G+P+K$ | | | | |
| PC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

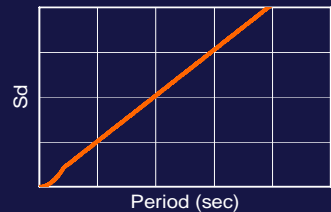
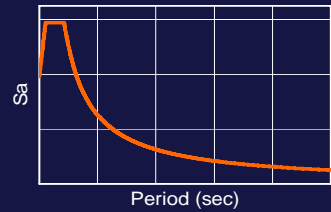


多層建物の非線形増分解析

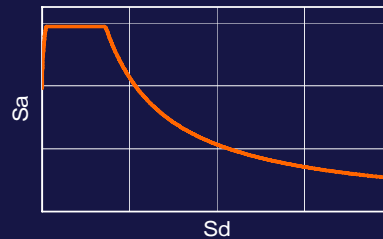


等価 1 質点系の荷重 - 変形関係

建物側



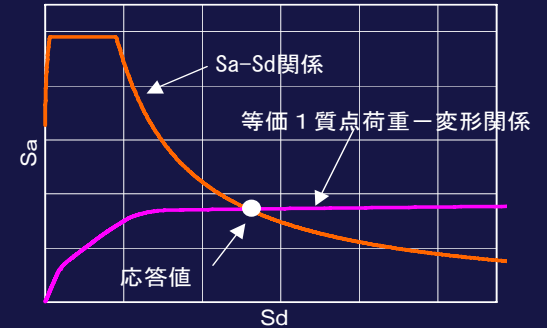
加速度応答スペクトル (Sa),
変位応答スペクトル (Sd) の算定



Sa-Sd関係

荷重側

PC造部材の多様な復元性(減衰)を構造計算に取り入れるための工夫



応答値の評価

限界耐力計算の手順

限界耐力計算

- PCとRCの設計法統一を図る好機
- しかし, ...
 - PC構造に対する短期許容応力度(損傷限界)検討
 - PC鋼材の短期許容応力度を決めるだけでは対応できない
 - コンクリート短期許容応力度
 - 部材の減衰と建物の減衰 → 重みつけ平均
 - せん断強度式: RCでは, 荒川mean式, PCでは?
 - 従来のRCの短期許容耐力 $+0.1\sigma_g$ と, トラス・アーチ式
 - せん断設計用応力: 割り増し係数の設定
 - RCと同じにするか?

コンクリート短期許容応力度

- PC構造では、終局強度設計が利用され、短期許容応力に対する検定は省略されていた
- コンクリート短期許容応力度: $2F_c/3$
 - 応力–ひずみ関係がほぼ線形弾性
 - 繰返し応力を受けても劣化しない
- 軸圧縮と曲げ圧縮の違い？
- 材料の応力–ひずみ関係レベルでの損傷か、部材レベルでの損傷か？
- 部材レベルで残留変形がなければ、損傷がないと考えるか？

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。
ただし、許容応力度等計算においても使用できるように模索中

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

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。
 - ただし、許容応力度等計算においても使用できるように模索中
- ・ 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
 - 常時荷重によるせん断力と曲げ(M_o)に対する設計

構造計算により除外される仕様規定

- 終局強度設計(ルート3a)、保有水平耐力計算(ルート3b)によって構造安全性を確認した場合には、仕様規定の一部が適用除外となる

第8 柱の構造

第9 床版の構造

第10 はりの構造

第11 耐力壁

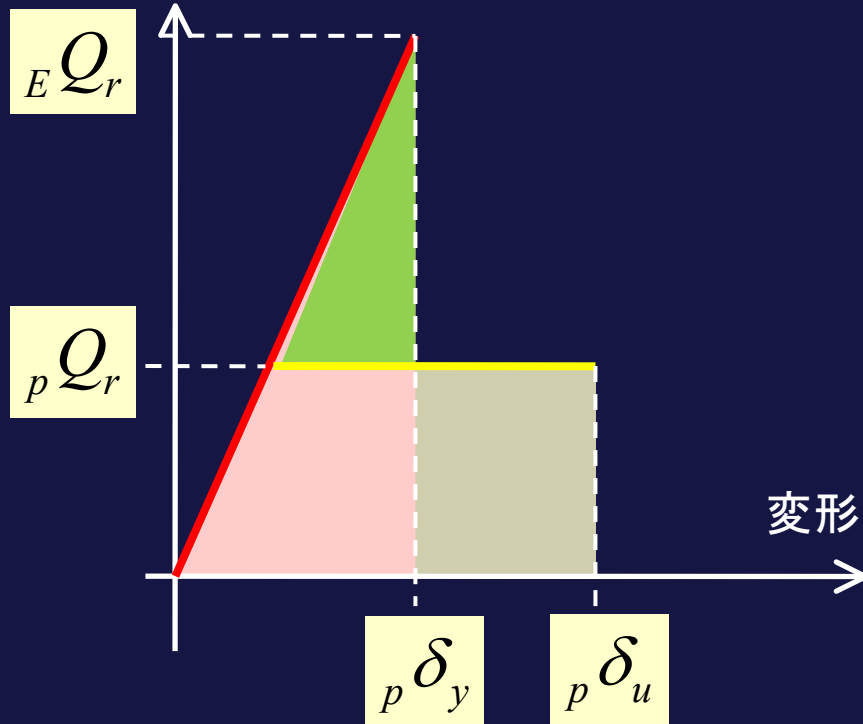
} 仕様規定の一部

- 限界耐力計算を行えば、耐久性等関係規定(材料品質、耐久性、施工等に係わる規定)以外の仕様規定は適用除外

保有水平耐力計算

- 部材種別の考え方

荷重
(応答)



$$D_s = \frac{{}_p Q_r}{E Q_r} = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}}$$

$$\mu = \frac{{}_p \delta_u}{{}_p \delta_y}$$

$$D_s = 0.3 \Rightarrow \mu = 6$$

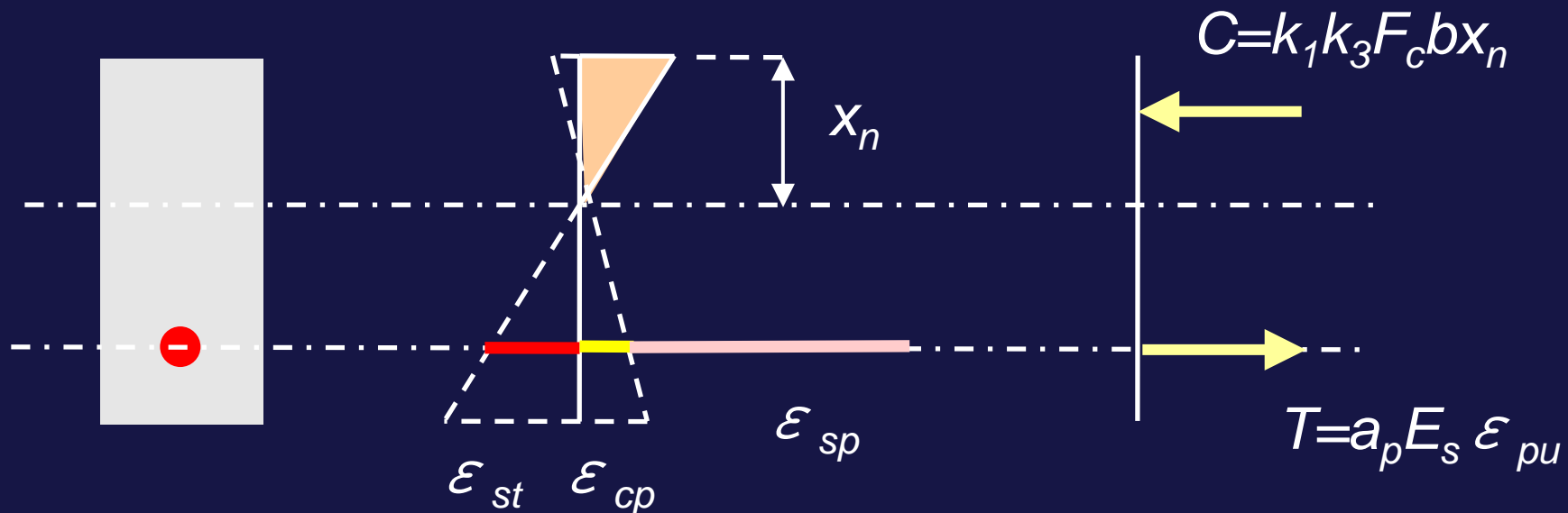
$$D_s = 0.55 \Rightarrow \mu = 2.15$$

曲げ靱性確保

- PC鋼材の降伏をコンクリートの圧壊よりも先行させる
 - コンクリートの横拘束
 - 高一様伸びPC鋼材の利用
- 日本建築センター「プレストレストコンクリート造設計施工指針(1983)」
 - 部材種別は曲げ靱性のみに基づく
 - コンクリート横拘束によるコンクリート靱性増加, PC鋼材の実強度と規格強度の比, コンクリート圧縮強度増加による靱性の低下
- 日本建築学会PC規準
 - 鋼材係数 ≤ 0.3 を推奨
 - 曲げ強度略算式の適用範囲(PC鋼材降伏を仮定)

PC部材断面のつり合い鋼材比(1)

- 曲げ破壊時のPC鋼材ひずみ $\varepsilon_{pu} = \varepsilon_{sp} + \varepsilon_{cp} + \varepsilon_{st}$
 - プレストレス導入時ひずみ ε_{sp}
 - PC鋼材配置位置コンクリート圧縮ひずみが引張に転じるまでのひずみ ε_{cp} (他のひずみに比べて小さい)
 - PC鋼材配置位置コンクリート引張ひずみ ε_{st}



PC部材断面のつり合い鋼材比(2)

- コンクリート圧縮破壊時ひずみ $\varepsilon_{cu}=0.003$
- 幾何学的に

$$x_n = \frac{0.003}{0.003 + \varepsilon_{st}} d_p$$

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_{py} - \varepsilon_{cp} - \varepsilon_{sp}$$

- コンクリート圧縮合力CとPC鋼材張力Tは

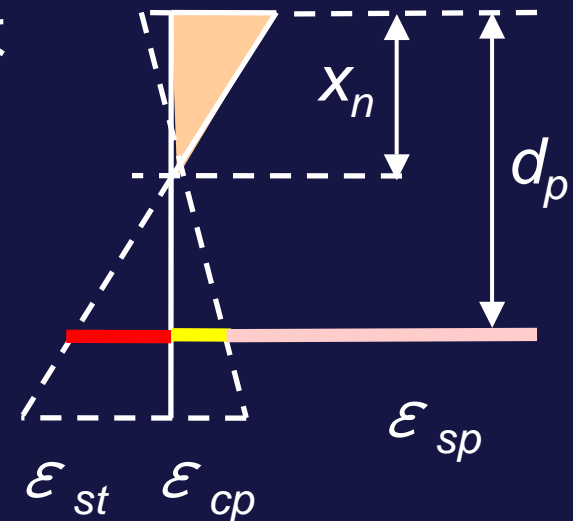
$$C = k_1 k_3 F_c b x_n$$

$$T = a_p f_{py}$$

- 力のつり合いC=Tより

$$a_p = \frac{k_1 k_3 F_c b x_n}{f_{py}}$$

- 導入力の大きさ(ε_{sp})によりつり合い鋼材比を制御可能
- 通常は, $\varepsilon_{sp} \leq 0.7 \varepsilon_{py}$



必要保有水平耐力計算における部材種別(1)

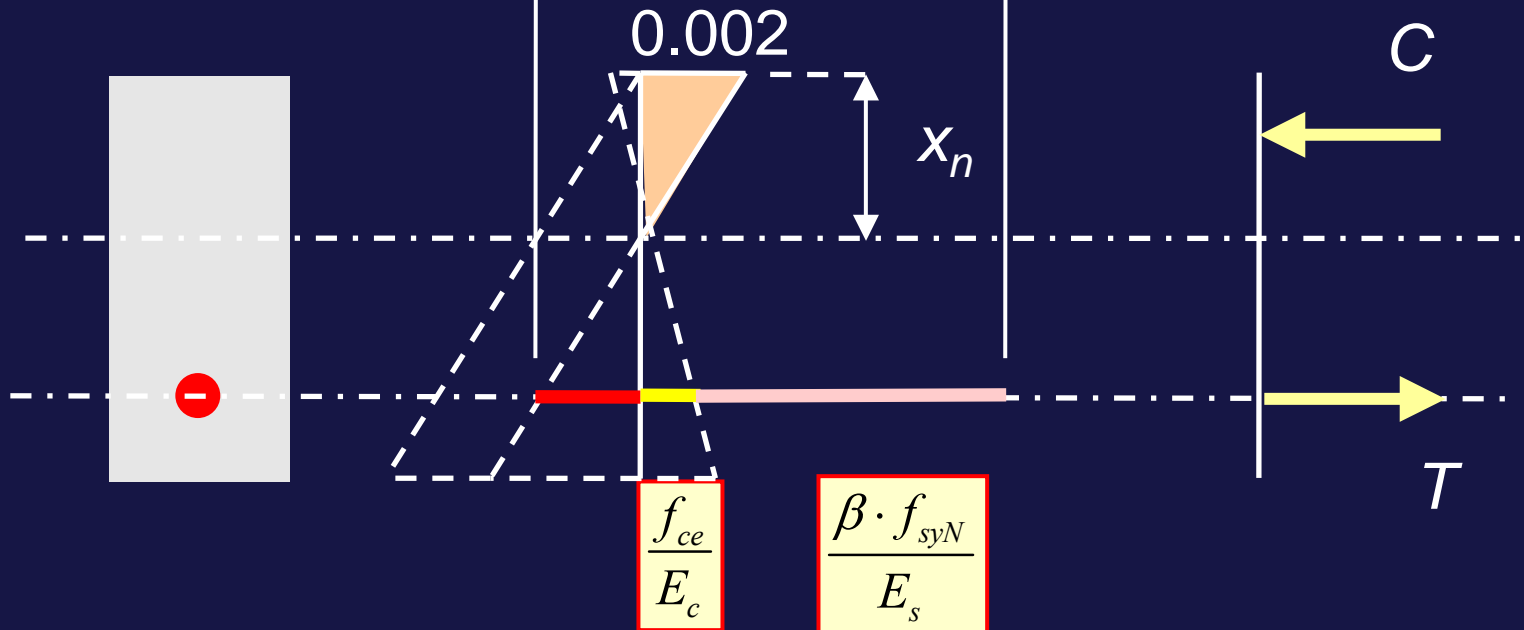
- 現行「プレストレストコンクリート造設計施工指針(1983)」

$$q_{cr} = \frac{1}{\sqrt{\theta_u} \times 10^3} \left(4.33 \times \frac{p_{wr}^2}{F_c^{0.9}} + \frac{1.13}{F_c^{0.2}} \right)$$

$$\theta_u = \frac{\alpha \cdot f_{syN}}{E_s} + 0.002 - \left(\frac{\beta \cdot f_{syN}}{E_s} + \frac{f_{ce}}{E_c} \right)$$

$$\frac{\alpha \cdot f_{syN}}{E_s} - \left(\frac{\beta \cdot f_{syN}}{E_s} + \frac{f_{ce}}{E_c} \right)$$

$$x_{nb} = d_p \times \frac{0.002}{0.002 + \frac{\alpha - \beta}{E_c} f_{syN}}$$



必要保有水平耐力計算における部材種別(2)

- 軸力のつり合いより

$$k_1 k_3 F_c b x_{nb} = a_{pb} f_{syN}$$

- つり合い破壊時のPC鋼材断面積は,

$$a_{pb} = \frac{k_1 k_3 F_c b}{f_{syN}} \times d_p \times \frac{0.002}{0.002 + \frac{\alpha - \beta}{E_c} f_{syN}}$$

- つり合い破壊時のPC鋼材係数は,

$$q_{pb} = \frac{a_{pb} f_{syN}}{b d_p F_c} = \frac{0.002 k_1 k_3}{0.002 + \frac{\alpha - \beta}{E_c} f_{syN}} = \frac{0.002 k_1 k_3}{\theta_u}$$



$$q_{cr} = \frac{1}{\sqrt{\theta_u} \times 10^3} \left(4.33 \times \frac{P_{wr}^2}{F_c^{0.9}} + \frac{1.13}{F_c^{0.2}} \right)$$

必要保有水平耐力計算における部材種別(3)

- q_{pb} を大きくする方法

- $k_1k_3 > 0.8$

- $\varepsilon_{cu} > 0.003$

$$q_{pb} = \frac{k_1k_3\varepsilon_{cu}}{\theta_u}$$

- θ_u を小さくする($\alpha - \beta$ を小さくする: 導入力率を大きくとる)

- 例えば, $k_1k_3=0.8$, $\alpha - \beta = 1.15 - 0.7 = 0.45$, $\varepsilon_{py} = 0.006$

- $\varepsilon_{cu} = 0.003 \rightarrow q_{pb} = 0.34$

- $\varepsilon_{cu} = 0.005 \rightarrow q_{pb} = 0.52$

- PC規準では, q を0.3以下とすることを推奨
 - 曲げ耐力略算式の適用範囲

RC部材種別(現行)

| 柱部材種別 | FA | FB | FC | FD |
|-----------------|--|---------|--------|-------------------------|
| 共通条件 | せん断破壊, 付着割裂破壊及び圧縮破壊その他の構造耐力上支障のある急激な耐力低下のおそれのある破壊を生じないこと | | | FA,FBまたはFCのいずれにも該当しない場合 |
| h_o/D | 2.5以上 | 2.0以上 | - | |
| σ_o/F_c | 0.35以下 | 0.45以下 | 0.55以下 | |
| $p_t(\%)$ | 0.8以下 | 1.0以下 | - | |
| τ_{cD}/F_c | 0.1以下 | 0.125以下 | 0.15以下 | |

| 梁部材種別 | FA | FB | FC | FD |
|-----------------|--|---------|--------|-------------------------|
| 共通条件 | せん断破壊, 付着割裂破壊及び曲げ圧縮破壊その他の構造耐力上支障のある急激な耐力低下のおそれのある破壊を生じないこと | | | FA,FBまたはFCのいずれにも該当しない場合 |
| τ_{cD}/F_c | 0.1以下 | 0.125以下 | 0.15以下 | |

PC部材種別(提案)

| 柱部材種別 | FA | FB | FC | FD |
|-----------------|--|---------|--------|-------------------------|
| 共通条件 | せん断破壊, 付着割裂破壊及び圧縮破壊その他の構造耐力上支障のある急激な耐力低下のおそれのある破壊を生じないこと | | | FA,FBまたはFCのいずれにも該当しない場合 |
| h_o/D | 2.5以上 | 2.0以上 | - | |
| σ_o/F_c | 0.35以下 | 0.45以下 | 0.55以下 | |
| $p_t(\%)$ | 0.8以下 | 1.0以下 | - | |
| τ_{cD}/F_c | 0.1以下 | 0.125以下 | 0.15以下 | |

| 梁部材種別 | FA | FB | FC | FD |
|-----------------|--|---------|--------|-------------------------|
| 共通条件 | せん断破壊, 付着割裂破壊及び曲げ圧縮破壊その他の構造耐力上支障のある急激な耐力低下のおそれのある破壊を生じないこと | | | FA,FBまたはFCのいずれにも該当しない場合 |
| τ_{cD}/F_c | 0.1以下 | 0.125以下 | 0.15以下 | |

部材種別の考え方(1)

- ・ h_o/D : 短柱を避けて, せん断破壊に関わる塑性変形能力を評価する指標
 - PC部材にもそのまま適用可能
- ・ σ_o/F_c : 軸力比 σ_o/F_c の大きな柱では, 圧縮側コンクリートによってその破壊形態が支配されることになり, 変形能力は小さくなる。
 - PC柱でも軸力比が大きな場合, RC柱と同様に変形能力は低下する。ただし, プレストレス力が導入されているので, 有効プレストレス力分だけ外力としての軸力に加算されるとする。有効プレストレス力からの増減は, 引張側PC鋼材と圧縮側PC鋼材間で相殺されるとした。

部材種別の考え方(2)

- ・ ρ_t (%): 付着割裂破壊に関連する指標
 - PC部材にもそのまま適用可能。普通強度引張鉄筋のみを算入する。ただし、PC鋼材に異形鋼棒やより線が使用されており、かぶりが小さい場合には、PC鋼材も引張鉄筋比に適宜算入する。
- ・ τ_{cD}/F_c : 柱と梁両方に規定されているせん断耐力確保に関する指標
 - PC部材に適用する際に問題となるのは、 τ_{cD} を算出する際の応力中心間距離。コンクリート圧縮合力位置と、普通強度鉄筋とPC鋼材の合力位置間の距離としているが、プレキャストPC部材の使用も考慮して、簡略には0.8Dとしてもよいこととした。

PC柱の曲げ耐力

- PC鋼棒(丸鋼)使用時の曲げ耐力と部材寸法の関係
- 平均付着応力度

$$\tau_{av} = \frac{\pi(d/2)^2 (f_{py} - f_{pe})}{\pi dl} = \frac{d}{4l} (f_{py} - f_{pe})$$

$$\tau_{av} = \frac{d}{4 \frac{M}{Q}} (f_{py} - f_{pe})$$

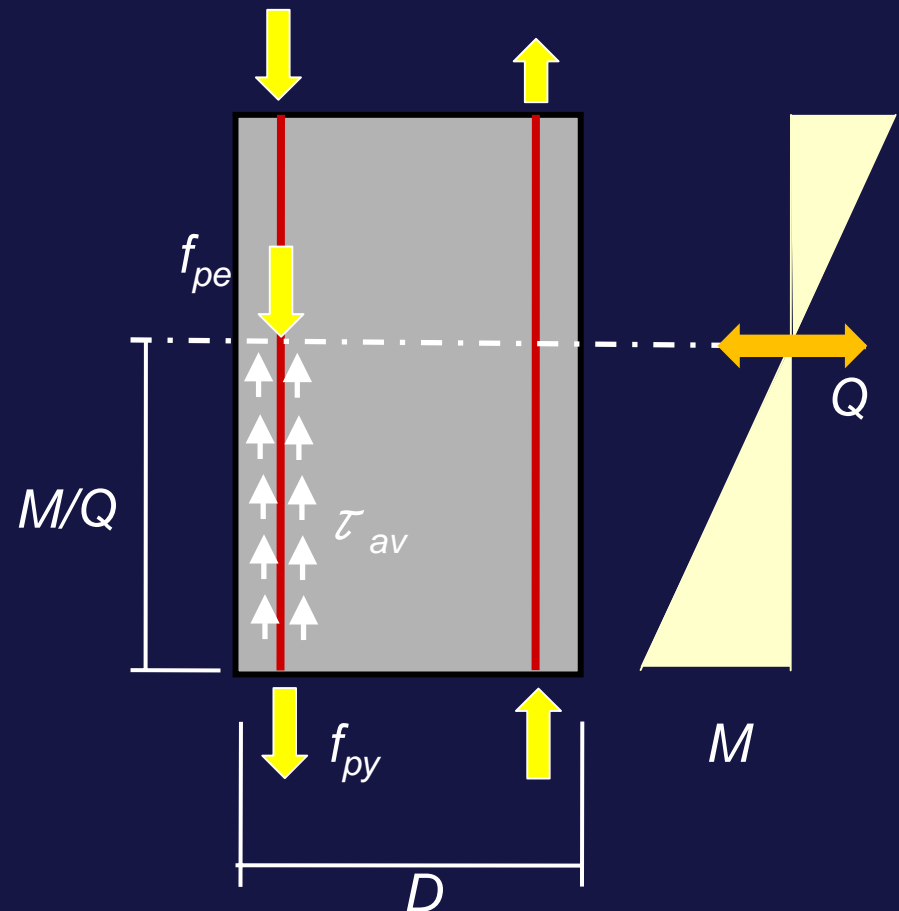
$$\frac{2M}{QD} = \frac{(f_{py} - f_{pe}) d}{2\tau_{av} D}$$

$$f_{py} - f_{pe} \approx 300 \text{N/mm}^2$$

$$\tau_{av} = 2 \text{N/mm}^2$$

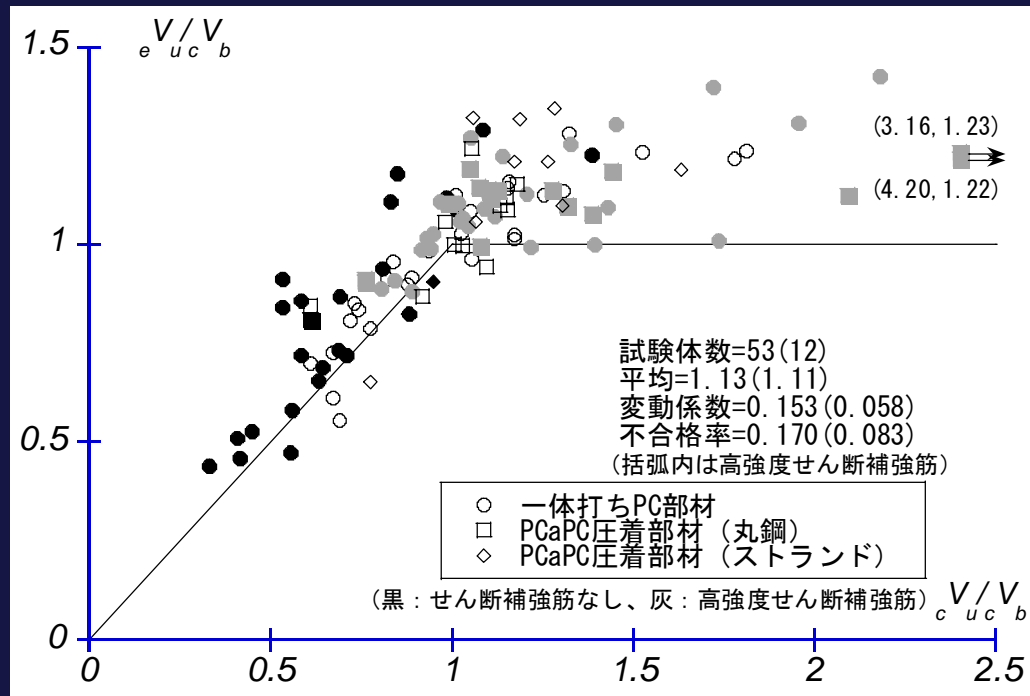
$$d / D = 32 / 1000$$

$$\frac{2M}{QD} = \frac{300 \times 32}{2 \times 2 \times 1000} = 2.4$$



せん断補強筋強度

- 現行PC規準など
 - － せん断補強筋強度は295N/mm²まで



- 技術基準解説書, 新PC規準
 - － 390N/mm²までの予定

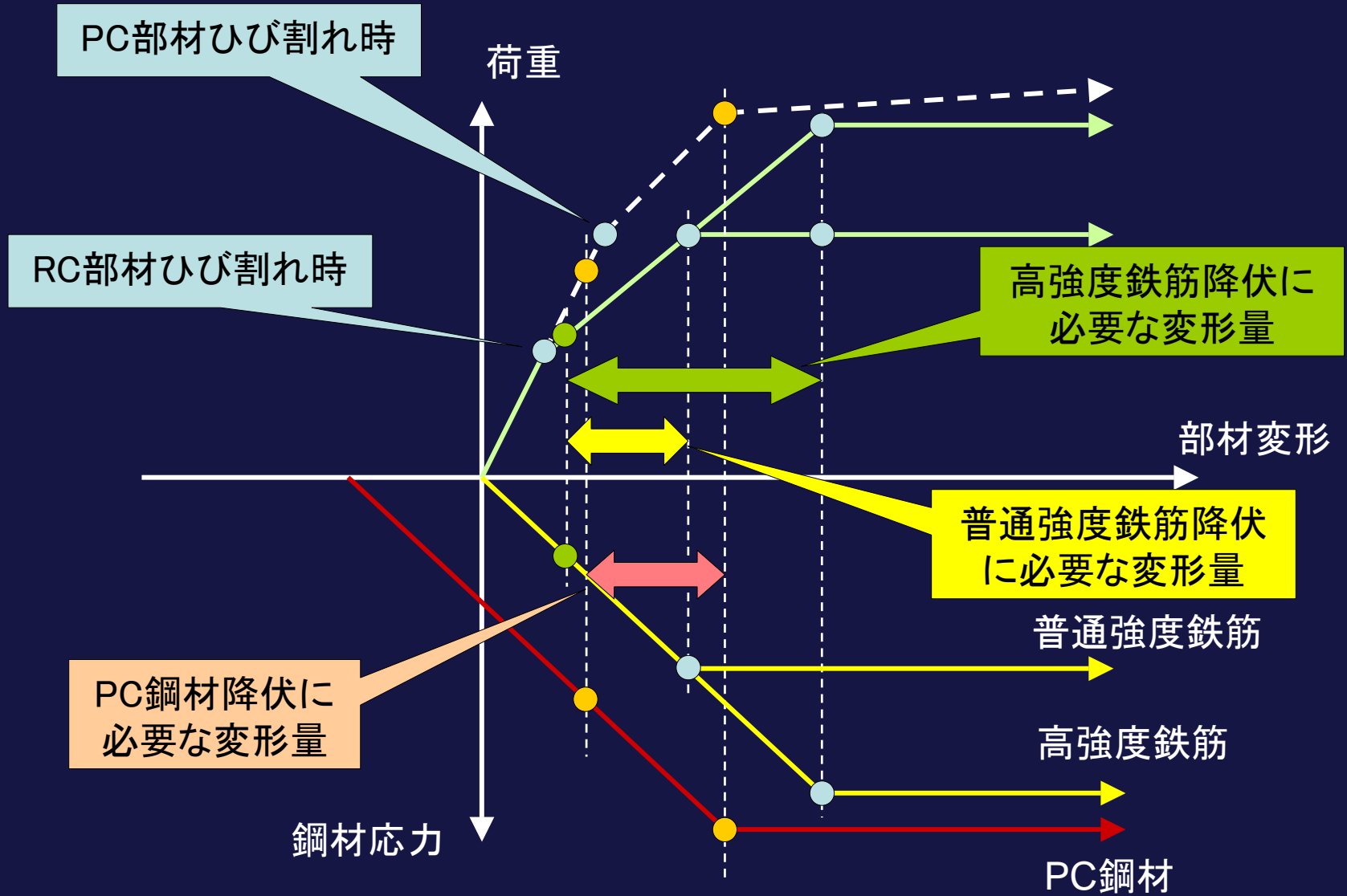
高強度材料の開発と実用化

- New RCプロジェクト
 - 高強度材料の実用化
 - コンクリート 60 MPa
 - 鉄筋 700 MPa
- 現在の高層RC住宅
 - 50階を超える高さ, 200mにまで達する
 - コンクリート 150 MPa
 - 主筋 USD685
 - せん断補強筋 SBPD1275

PCにおける高強度材料

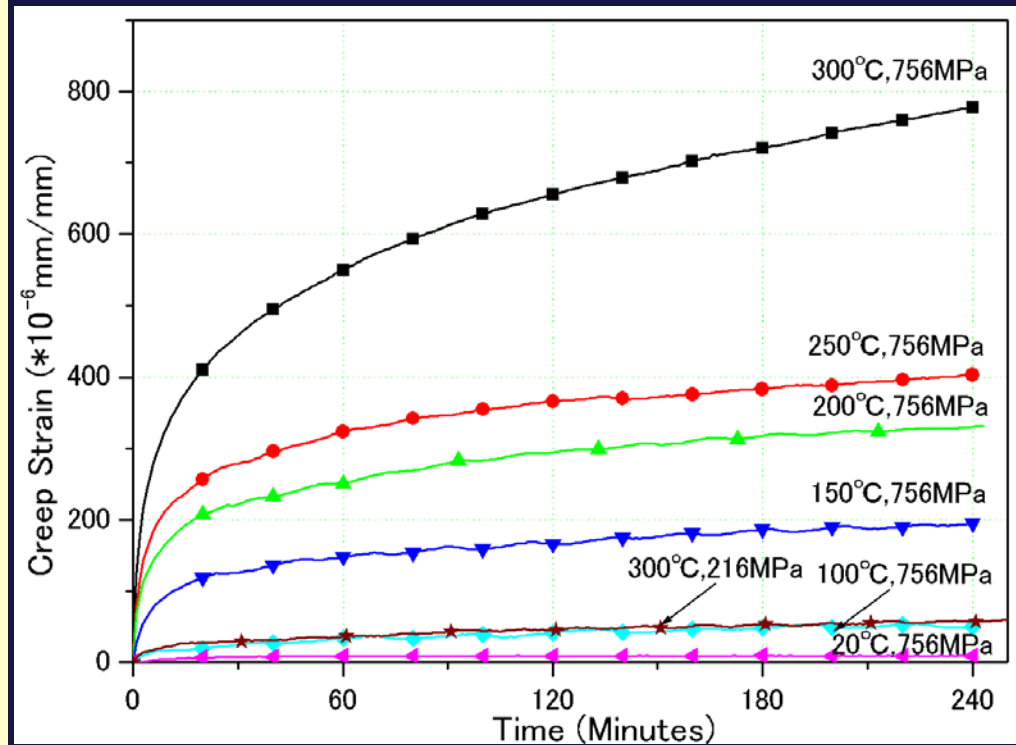
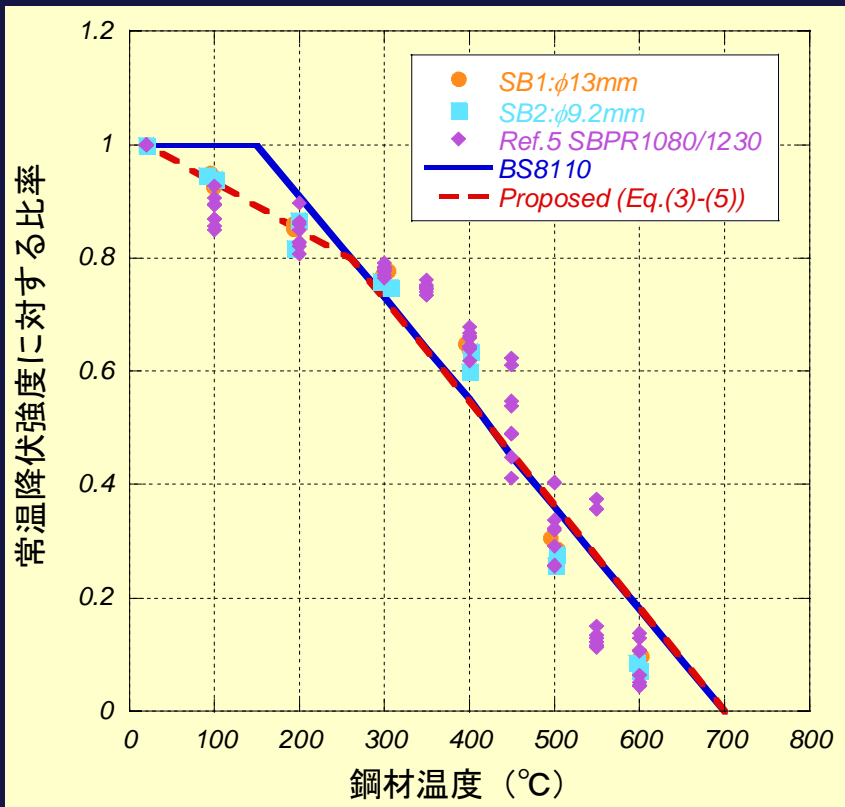
- PCでは従来高強度コンクリートを使用
- さらなる高強度化の研究は進んでいない
- PCの非線形弾性的履歴復元力特性を有効利用
 - 無損傷構造には、高強度材料の弾性範囲を利用

高強度鉄筋の梁への利用とプレストレス



PC部材の耐火性

- PC鋼材の耐火性



PC鋼棒高温引張試験結果

PC鋼棒高温クリープ試験結果

PC部材の耐火性

- PC鋼材の高温レラクセーションによるプレストレス力の減退
 - たわみやひび割れ幅の増加
- 高温によるPC鋼材の強度低下
 - 常時荷重によりPC鋼材が破断し、部材の崩壊に
- プレテンション部材では、高温により付着が減退
 - プレストレス力が失われ、常時荷重を支持できない
 - せん断耐力も低下

PC部材の耐火性

- 常時(鉛直)荷重に対する終局強度設計を行うことにより、曲げ強度が1/1.7(約60%)に低下しても、常時(鉛直)荷重は保持できる
- 普通強度鉄筋よりにもかぶりが厚いため、コンクリートに爆裂が生じても、PC鋼材がすぐに高温に曝されるわけではない



まとめ

- PC告示1320号改正を機に, PC構造設計を見直し
- RC構造の設計法との整合性
- PC構造普及のための教育・啓蒙活動
- PC構造の特徴を有効利用した構造システム