

## PC 梁部材の残留変形率に関する解析的検討

大阪大学大学院	正会員	○ 隅田 寛
大阪大学大学院	正会員 博士 (工学)	岸本 一蔵
大阪大学大学院	修士	李 德基
大阪大学大学院	正会員 工博	大野 義照

## 1. はじめに

建築物の耐震設計では、大変形域での安全を確保する終局限界に加えて、より小さい変形域での性能確保を目的とした使用限界や修復限界等の新たな限界値の設定が必要となりつつある。使用限界、修復限界の設定の重要な指標の一つは建物や部材の残留変形量であるが、プレストレストコンクリート (PC) 部材では鉄筋コンクリート (RC) 部材よりも原点指向性の強い曲げ挙動を示すことはよく知られており、一般に PC 部材の残留変形量は小さいとされる。従ってこの特性を有効に利用することにより、他のコンクリート部材に比べて残留変形の点において有利な建物耐震設計の構築が可能と考えられる。一方、残留変形量は PC 鋼材量、普通鉄筋量、鋼材配置位置、鋼材-コンクリート間の付着程度等、様々な条件により大きく変わることが予想されるが、残留変形量とこれらの要因について系統的に検討した研究は殆どない。本論文は、PC 梁部材の残留変形量におよぼす諸要因の影響を断面解析を用いることにより検討するものである。

## 2. 解析条件

## 2. 1 解析手法

本検討は、梁部材を対象として材端部の断面を解析することにより行った。解析手順については、一般的なファイバーモデルを用いた断面解析手法と同等であり、仮定した断面曲率 ( $\phi$ ) に対し各材料の応力を算定し、圧縮合力と引張合力が釣り合う圧縮縁ひずみを収斂計算により求めモーメントを計算した。また、ヒンジ部での部材回転角は、解析から計算される  $\phi$  と等価塑性ヒンジ長さ ( $l_{eq} : 0.75D$  と仮定、 $D$  は断面せい) の積により求めた。コンクリート及び普通鉄筋に対しては、平面保持を適用し、PC 鋼材に対しては後述するひずみ適合係数 (F 値) を用いてひずみを計算した。

## 2. 2 解析対象断面とパラメータ

図-1に解析対象とした断面の一例とそのモデル化概要を示す。断面形状は幅( $b$ )400mm、せい( $D$ )1000mmの矩形断面であり、解析にあたってはファイバーモデル(断面せい方向100分割)を用いた。せん断補強筋内部のコンクリートはその拘束効果を考慮し、中塚等の提案式<sup>1)</sup>

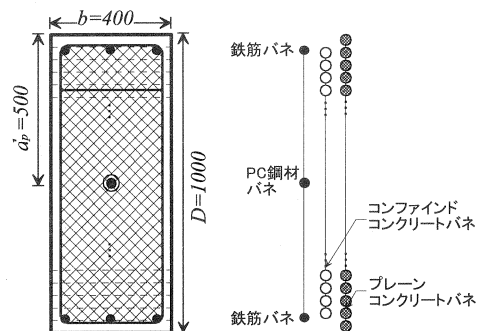


図-1 解析対象断面とそのモデル化概要

により求めた値を用いた。採用した解析パラメータは、鋼材係数 ( $q_{pr}$ )、終局プレストレス率 ( $\lambda$ )、PC 鋼材-コンクリート間の付着程度 (ひずみ適合係数:  $F$  (図-2 参照))、PC 鋼材の本数および配置位置である。表-1 にパラメータとその他の共通諸元を示す。 $q_{pr}$  および  $\lambda$  は式(1)、(2)により求められる値である。概説すると  $q_{pr}$  は PC 鋼材量を表し、PC 鋼材降伏時力 (圧縮側に位置すると判定される鋼材は初期導入力として評価) に対するコンクリートの断面圧縮能力に対する比率で表され、全 PC 鋼材が断面引張側に位置するケースでは、PC 鋼材量は  $q_{pr}$  に比例した量となる。 $\lambda$  は、断面の曲げ耐力に対する PC 鋼材の寄与率を表しており、1.0 の場合普通鉄筋のない PC 部材、0 の場合は完全な RC 部材を表す。

$$q_{pr} = \frac{(T_{py} + C_{po}) + (T_{ry} - C_{ry})}{b \cdot D \cdot F_c} = \frac{T_{py} + C_{po}}{b \cdot D \cdot F_c} \dots (1)$$

$$\lambda = \frac{M_p}{M_p + M_r} \dots (2)$$

ここで、 $T_{py}$ : 引張側 PC 鋼材降伏時応力、 $C_{po}$ : 圧縮側 PC 鋼材長期有効張力、 $T_{ry}$ : 引張鉄筋降伏時応力、 $C_{ry}$ : 圧縮鉄筋降伏時応力、 $b$ : 梁幅、 $D$ : 梁せい、 $F_c$ : プレーンコンクリートの圧縮強度、 $M_p$ : 終局時 PC 鋼材曲げ耐力負担分、 $M_r$ : 終局時普通鉄筋曲げ負担分

※ $q_{pr}$ 、 $\lambda$  の計算方法の詳細を論文末の付録に示す。

鋼材-コンクリート間の付着程度を表す  $F$  値は、図-3 に示すように、PC 鋼材ひずみ増分とコンクリートひずみ増分との差 ( $\Delta \epsilon_{c-pc}$ ) の関数として取り扱っており、図-3 (a) に示す異型 PC 鋼棒を対象に行われた実

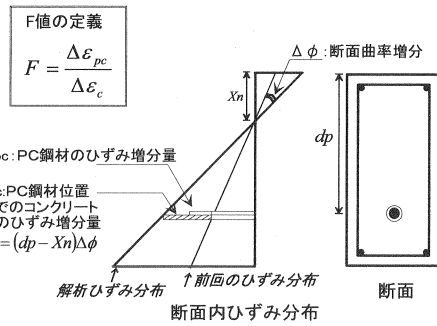


図-2 ひずみ適合係数(F値)

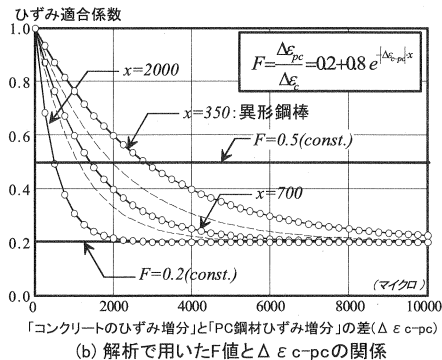
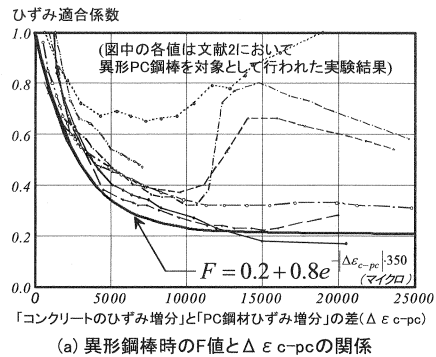


図-3 解析に用いたひずみ適合係数

表-1 解析に用いたパラメータ及び条件

要因	記号	水準
鉄筋鋼材係数	$q_r$	0.1, 0.2, 0.3
終局プレストレス率	$\lambda$	0.2, 0.5, 0.7, 0.9
ひずみ適合係数	$F$	図3参照

【共通事項】  
 コンクリート圧縮強度=40N/mm<sup>2</sup>  
 コンクリートヤング係数=20500N/mm<sup>2</sup>  
 普通鉄筋降伏強度=350N/mm<sup>2</sup>  
 普通鉄筋ヤング係数=20500N/mm<sup>2</sup>  
 PC鋼材降伏強度=1500N/mm<sup>2</sup>  
 PC鋼材ヤング係数=200000N/mm<sup>2</sup>  
 横拘束補強 D13@50mm  
 PC導入力: 降伏強度の60%  
 有効プレストレス率: 85%

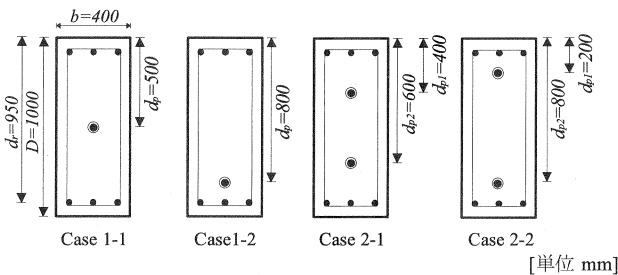


図-4 解析断面と呼称

験結果に基づき、異形 PC 鋼棒の F 値のデータを基準として、丸鋼及びより線では付着の劣化程度がより大きくなるであろうことを x の値を大きく (x =700, x=2000) することで考慮した。図-3 (a) 中の実線は(b)の x=350 のケースに対応する。PC 鋼材配置位置および本数については、断面重心位置および重心位置より 0.8D (D は断面せい) 偏心した位置に単段で配置される 2 つのケース (Case1-1, Case1-2) と、2 本の PC 鋼材が断面せいの中心軸に対し対象となるように配置し、中心軸からの距離を変えた 2 つのケース (Case2-1, Case2-2) とし、計 4 種類のケースを解析した (図-4 参照)。

2. 4 材料の応力度-ひずみ度関係

各材料バネの履歴則を図-5に示す。コンクリートの応力度-ひずみ度 (S-S) 関係は応力上昇域を n 次関数、応力下降域を直線で近似するモデル 1) を、また、鉄筋の S-S 関係は繰り返し応力を受ける場合の

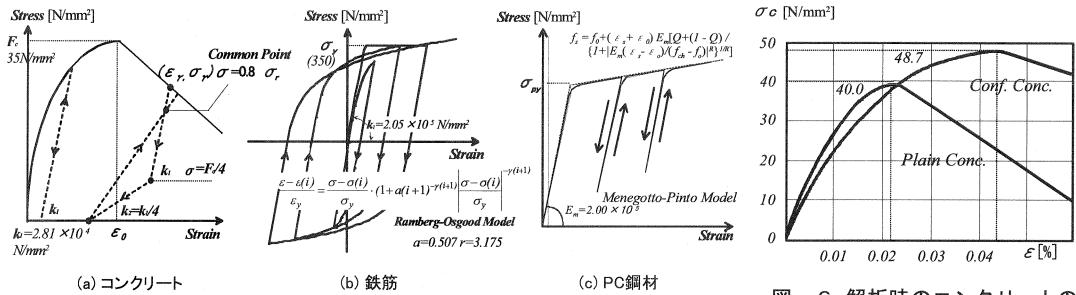


図-5 材料の応力度-ひずみ度関係

図-6 解析時のコンクリートの応力度-ひずみ度関係

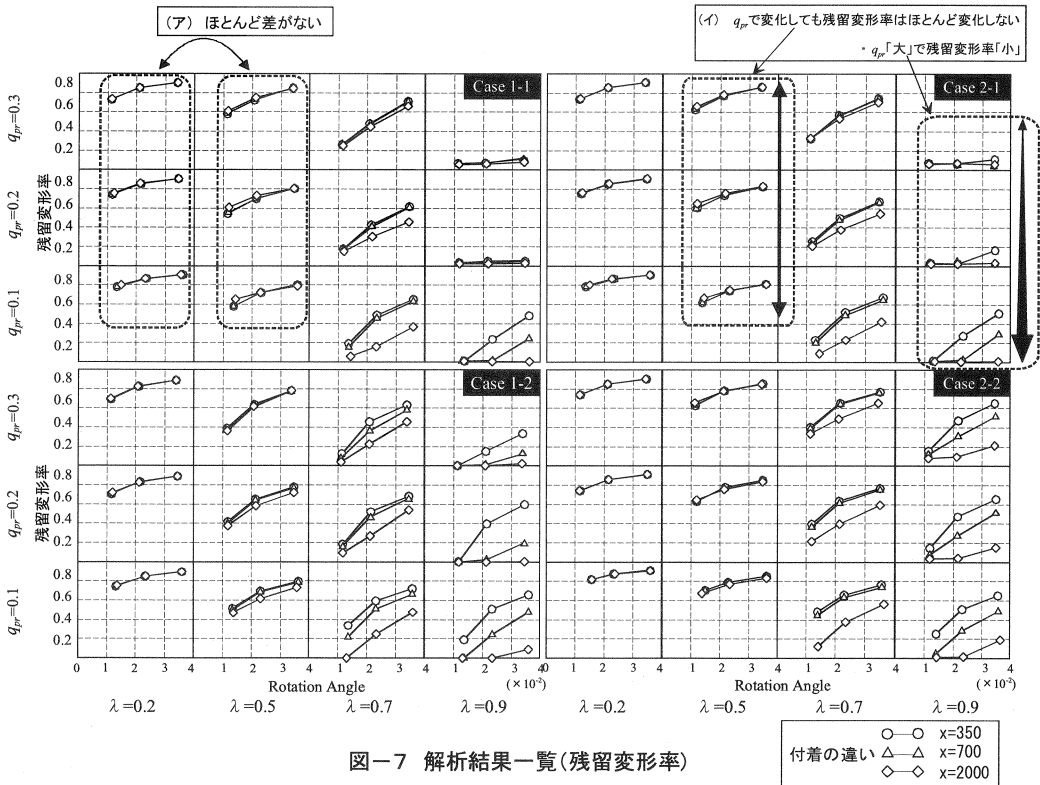


図-7 解析結果一覧(残留変形率)

Bauschinger 効果を考慮したモデル<sup>2)</sup>を用いた。PC 鋼材については、文献 3 で提案される Magonetto-Pinto モデルを用いた。図-6 に解析時の、プレーンおよびコンファインドコンクリートの応力度-ひずみ度関係を示す。

### 3. 解析結果

図-7 は全ケースの解析結果 (残留変形率) である。以下に各要因別の影響について示す。

(1) 終局プレストレス率 ( $\lambda$ ) の影響について:  $\lambda$  が小さいケース (普通鉄筋量が多い場合) についてみると、 $\lambda=0.5$  の残留率は、より普通鉄筋の多い  $\lambda=0.2$  のケースとほぼ同じ残留変形率となっている。 $\lambda=0.5, 0.2$  間の値に大きな差がないことから  $\lambda=0.5$  以下の場合には PC 特有の高復元性が期待できず、RC 部材と同程度の残留変形量になると考えられる。すなわち全てのケースにおいて、鋼材係数 ( $q_{pr}$ )、終局プレストレス率

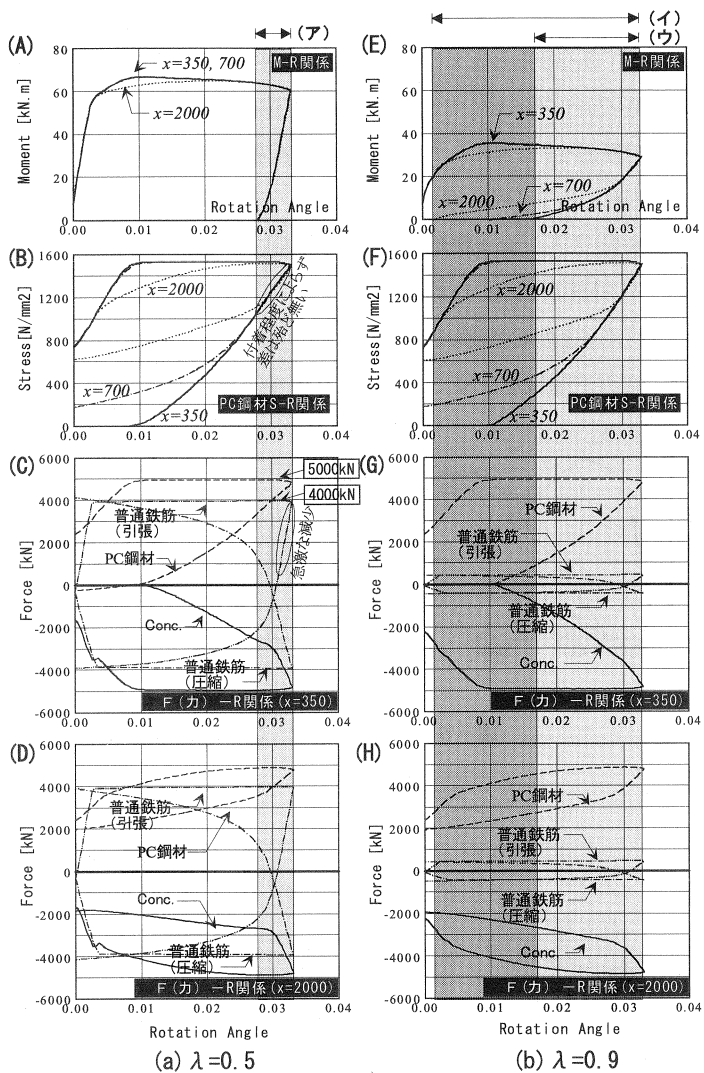


図-8 終局プレストレス率 ( $\lambda$ ) の影響 (Case1-2の例)

( $\lambda$ )、鋼材-コンクリート間の付着程度に関わりなくほぼ同じ残留変形率となる (例えば図-7 の (ア))。図-8 に Case1-2 の断面で  $q_{pr}=0.3$ 、 $\lambda=0.5$  と  $0.9$  のケースについて、曲げモーメント (M) - 回転角 (R) 関係、PC 鋼材の応力度 (S) - R 関係、各材料の F (力) - R 関係 ( $x=350, 2000$ ) を示すが、同図(a)  $\lambda=0.5$  によれば、PC 鋼材は付着程度が異なればそれぞれ異なった挙動をしている (図(B))。しかしながら図 (C) の F-R 関係を見ると引張力のおおよそ半分 (PC 鋼材  $\approx 5000\text{kN}$ 、普通鉄筋  $\approx 4000\text{kN}$ ) を占める普通鉄筋の力が除荷直後に急激に減少しており、これに伴いモーメントも大きく減少していることがわかる。また同図(a) (ア) の除荷時点から残留変形率の評価点であるモーメントが 0 となる時点間の変形領域では、付着程度の違いによる PC 鋼材力の差は殆ど無く (図 (B))、従って M-R 関係上に差は現れない。一方  $\lambda=0.9$  の場合の図 (b) では、普通鉄筋の力は PC 鋼材による力に比べ 1/10 程度であることから、普通鉄筋の力の減少がモー

メントに及ぼす影響は非常に小さく、(b)の(イ)、(ウ)の領域におけるPC鋼材の挙動、即ちPC鋼材-コンクリート間の付着の違いがM-R関係に直接影響していることがわかる。

(2) 鋼材係数 ( $q_{pr}$ ) の影響について:  $q_{pr}$  の残留変形率への影響は、 $\lambda$  の値により大きく異なる。詳述すると、 $\lambda$  が 0.7 以下の領域ではその影響は小さく、普通鉄筋が非常に少ない  $\lambda=0.9$  の場合のみ  $q_{pr}$  が大きいほど残留変形率は小さくなる傾向がある (例えば図-7の(イ))。

(3) PC鋼材配置の影響について: 図-7より、Case1-1とCase2-1、Case1-2とCase2-2の残留変形率は  $q_{pr}$ ,  $\lambda$ , 鋼材-コンクリート間の付着の程度にかかわらず非常に近似した値となっている。部材の荷重-変形

関係に及ぼすPC鋼材の影響は、鋼材位置の中立軸から引張側への距離が大きほど強くなると考えられる。従って図-4に示すように、上記の2つのケースについてもPC鋼材が2段で配筋される場合、引張縁に近いPC鋼材が同位置で単段に配置される場合の残留変形率に近くなると考えられる。この事は、2段以上の複数段でPC鋼材が配置される場合であっても、引張側に位置する鋼材を適切に評価すれば、その残留変形率を単段で鋼材が配置される断面の残留変形率で推定できる可能性を示している。

(4) PC鋼材-コンクリート間の付着程度の影響: (1)で述べたように、 $\lambda$  が大きいほど残留変形率に及ぼす付着程度の影響は大きく、付着程度が大きくなるほど残留変形率は大きくなる。付着程度はPC鋼材の塑性化程度と密接な関係を有することから、図-9にCase1-2を例として  $q_{pr}$  を変化させた場合のM-R関係とPC鋼材のS-S関係を示す。同図(J), (L), (N)を比較すると、付着の程度がPC鋼材の塑性化程度に及ぼす影響は  $q_{pr}$  が小さい程大きいことがわかる。しかしながら、 $q_{pr}$  が変わる場合であっても付着程度が同じであれば残留変形率はほぼ同じである。従って、残留変形率が同じであっても  $q_{pr}$  の違いによりPC鋼材の塑性化程度は異なることがわかる。

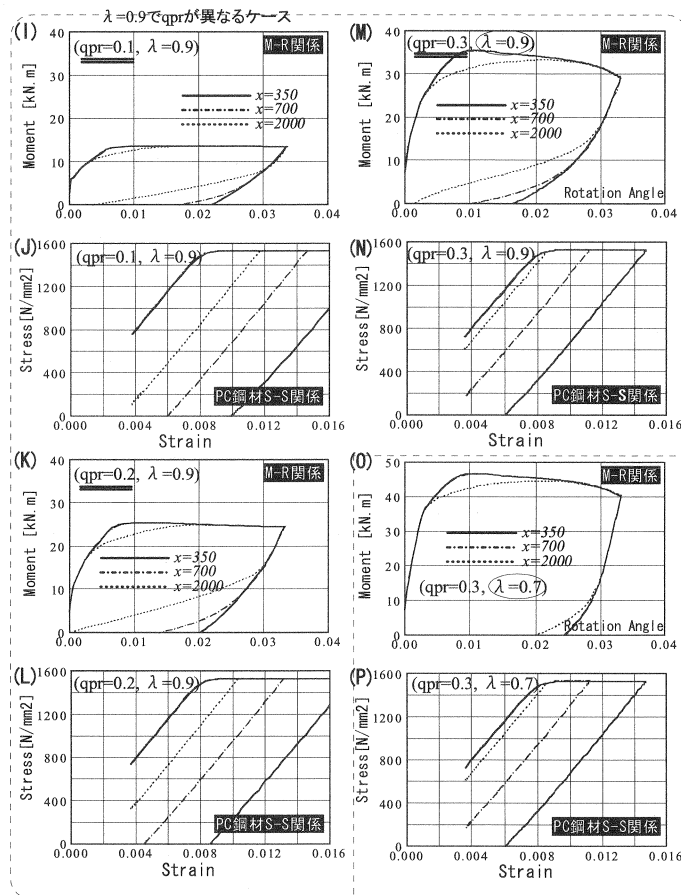


図-9 PC鋼材-コンクリート間の付着程度の影響 (Case1-2の例)

4. まとめ

断面解析を用いてプレストレストコンクリート梁部材の残留変形率について統計的に検討を行い、残留変形率に及ぼす諸要因の影響を検討し以下の知見が得られた。(1)  $\lambda = 0.5$  以下では残留変形率は  $q_{pr}$ ,  $\lambda$ ,  $F$  値に関わらずほぼ同じになる。(2)  $\lambda$  が大きい場合、 $q_{pr}$  が大きいほど残留変形率は小さくなるが、 $\lambda = 0.7$  以下ではその差は非常に小さい。(3) PC 鋼材が 2 段で配筋される場合、引張縁に近い PC 鋼材が同位置で単段に配置される場合の残留変形率に近くなる。(4)  $\lambda$  が大きいほど残留変形率に及ぼす付着程度の影響は大きく、付着程度が大きくなるほど残留変形率は大きくなる。

今後コンクリートを含めた各材料の発生する力の状態のより細かい検討を行い、残留変形率に及ぼす各要因の影響程度について算定式を提案したいと考えている。

参考文献

1) 中塚 佑, 阪井由尚, 中川裕史: コンファインドコンクリートの強度・変形特性推定式, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol505, pp93-99, 1998.3 2) 榎本 秀文, "PRC 梁の履歴性質に関する解析的性質", 大阪大学大学院修士論文, pp60-65, 1981 3) 日本建築学会: コンクリート構造 (PC, PRC) 部材の靱性設計手法と耐震架構への応用, pp58-81, 1997.9

【付録】

[鋼材係数  $q_{pr}$ ]

$$q_{pr} = \frac{(T_{py} + C_{po}) + (T_{ry} - C_{ry})}{b \cdot D \cdot F_c}$$

$$T_{py} = \sum_i a_{pi} \times \sigma_{py}, \quad C_{po} = \sum_i \eta P_{ei}$$

$$T_{ry} = \sum_i a_{ri} \times \sigma_{ry}, \quad C_{ry} = \sum_i a_{ci} \times \sigma_y$$

$T_{py}$ : 引張側 PC 鋼材規格降伏時力,  $T_{ry}$ : 引張側普通鉄筋規格降伏時力,  
 $C_{po}$ : 圧縮側 PC 鋼材長期有効張力,  $\eta$ : プレストレス有効率,  
 $P_e$ : 初期導入力,  $C_{ry}$ : 圧縮側普通鉄筋降伏時力,  $b$ : 断面幅,  
 $D$ : 断面せい,  $F_c$ : コンクリート圧縮基準強度,

[終局プレストレス率  $\lambda$ ]

$$\lambda = \frac{M_p}{M_p + M_r}$$

$$M_p = \sum_i a_{pi} \times \sigma_{pi} \times (d_{pi} - k_2 \times x_n) + \sum_j \eta P_{ej} \times (d_{pj} - k_2 \times x_n)$$

$$x_n = \frac{q_{pr}}{k_1 k_{3max}} \times D$$

$$M_r = \sum_k a_{rk} \times \sigma_{yk} \times (d_{rk} - k_2 \times x_n)$$

$$k_2 = 0.42$$

$M_p$ : 部材曲げ耐力の PC 鋼材負担分,  
 $M_r$ : 部材曲げ耐力の普通鉄筋負担分

< $q_{pr}$  算出についての概説>

- 引張領域内に位置する PC 鋼材は降伏応力として評価する ( $a_{pi} \times \sigma_p$ )。
- 圧縮領域内に位置する PC 鋼材は長期有効張力 ( $\eta P_e$ ) として評価する。
- 引張・圧縮領域の判定には暫定的中立軸位置  $x_n'$  を用いる (式付-1)。各 PC 鋼材位置 ( $d_{pi}$ ) が暫定的中立軸位置を超えている場合 ( $x_n' < d_{pi}$ ) は引張領域内とする。

$$x_n' = \frac{q_{sp}}{k_1 k_{3max}} \times D \quad \text{ここで, } k_1 k_{3max} = 0.83$$

$q_{sp}$  は断面内の全 PC 鋼材を降伏応力として算出した鋼材係数 (式付-2)。

$$q_{sp} = \frac{\sum_i a_{pi} \times \sigma_{py} + (T_{ry} - C_{ry})}{b \cdot D \cdot F_c} \quad (\text{複筋比 } \gamma = 1 \text{ の場合は } T_{ry} = C_{ry} \text{ であり } T_{ry} - C_{ry} = 0 \text{ となる。})$$

< $\lambda$  算出についての概説>

- PC 鋼材配置位置の圧縮・引張領域の判定は  $q_{pr}$  と同様。
- $M_p$ : 各 PC 鋼材の「力」と応力中心間距離 ( $d_{pi} - k_2 \times x_n$ ) の積の総和。 $x_n$  は  $q_{pr}$  を用いて算出する。