

PC 梁部材の残留変形率算定式

隅田 寛^{*1}・岸本 一蔵^{*2}・李 德基^{*3}・大野 義照^{*4}

1. はじめに

建築物の耐震設計では、地震に対する建物の性能を明示する性能設計への移行が進みつつある。同時に、従来設計法がその前提としていた「大地震時における建物の安全性」に加えて、大中地震後の建物の使用性や修復性が設計上の明確な目標として認識されるようになってきた。地震後の使用性や修復性等を正確に把握するためには、建物を構成する材料レベルにおける検討が不可欠であるが、実務的な見地からは、より単純で扱いやすい指標が必要であり、残留変形量、すなわち地震後に建物や部材に残留する変形量を指標とすることがもっとも有用であると考えられる。

プレストレストコンクリート (PC) 造建物は鉄筋コンクリート (RC) 造建物等よりも原点指向性の強い挙動を、すなわち残留変形量の小さい履歴を示すことがよく知られている。この特性を有効に利用することにより、他のコンクリート構造物に比べて高性能な建物耐震設計の構築が可能と考えられるが、PC 部材の履歴形状は部材に配置される 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強度等、さまざまな条件により大きく変動する。現状では、これらの要因と残留変形量について系統的に検討された研究はほとんどない。本論文は、PC 梁部材を対象として分割要素法による曲げ解析、および既往の実験結果を用いた検討から、PC 梁部材の残留変形算定式を提案するものである。

2. 残留変形算定式誘導の手法について

2.1 基本方針

コンクリート部材の荷重-変形 (部材変形角) 関係を解析的に推定する代表的な手法として、断面解析に等価塑性ヒンジ長さの仮定を組み合わせる方法がある。この方法は、断面レベルにおける力の釣合い条件を基に、断面に発生する荷重と断面曲率の関係を求め、さらにその曲率が、仮定するヒンジ領域の範囲 (等価塑性ヒンジ長さ) に等しく分布するとして部材変形角 (= 断面曲率 × 等価塑性ヒンジ長さ) を計算する方法である。同手法は、その原理が理論的に明快であり、曲率の大きさに及ぼす各種要因の影響の定性的な傾向および定量的な把握が比較的容易にできる利点を有している。一方、実際のコンクリート系部材の変形性

状は引張側に発生するひび割れに大きく支配されるが、同手法では部材の変形を連続体としてとらえ、かつ“等価塑性ヒンジ”の仮定を用いることから、その算定の精度は必ずしも高くない。さらに PC 部材を対象とする場合、PC 鋼材とコンクリートの付着の影響を、付着-すべり ($\tau-S$) 関係等により直接評価して考慮することができない問題を有する。これに対し、部材全体を要素分割し、材軸方向の力の釣合い、および変形の適合条件を満たすことを条件に解析を行う分割要素法がある。同手法は部材全体を評価し、鋼材-コンクリート間の付着を両者間の $\tau-S$ 関係に基づき解析可能であり、既往の報告¹⁾では、前者の解析法に比べ PC 部材の荷重-変形角関係を良好な精度で計算できることが確認されている。その一方で、解析手法が複雑なため、部材に関する各種要因の、結果に対する因果関係を物理的に説明することはきわめて困難である。このように、両手法はそれぞれ利点と欠点を有している。そこで本論文では、両者の利点を利用し、次のような方針で残留変形率算定式を求めることとした。

まず、PC 梁部材の残留変形率を、等価塑性ヒンジ法に基づき式展開し、梁端部の断面曲率と等価塑性ヒンジ長さの値を変数にもつ残留変形率算定基本式を誘導する。次に、分割要素解析を用いて、各種要因をパラメータとした解析を行い、その結果から各種要因の残留変形に及ぼす影響を定量的に把握し、基本式中の諸数値を決定する。さらに既往の実験結果と比較し、前述の数値に修正を加える。

2.2 考慮する要因

本算定式において、残留変形率に対する部材要因による影響として、次の 1) ~ 6) を考える。

- 1) プレストレッシング係数 (λ)
- 2) 鋼材係数 (q_{pr})
- 3) PC 鋼材配置位置 (d_{pr})
- 4) PC 鋼材種 (PC 鋼材-コンクリート間の付着強度)
- 5) 初期導入力の大きさ ($\eta P_c / T_{py}$)
- 6) 部材の最大経験変形角 (R_p)

以下に上記パラメータの説明を記す。

- 1) プレストレッシング係数 (λ) は「終局時曲げ耐力に対する PC 鋼材の寄与率」を表し、式 (1) により計算される。 λ の範囲は 0 ~ 1.0 であり、1.0 の場合純 PC 部材、0 の場合 RC 部材を表す。

^{*1} Hiro SUMIDA : (株) 日本総研ソリューションズ 修士 (工学)

^{*2} Ichizo KISHIMOTO : 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 博士 (工学) 准教授

^{*3} Duckkee LEE : 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 修士 (工学) 博士課程

^{*4} Yoshiteru OHNO : 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 工学博士 教授

$$\lambda = \frac{M_p}{M_p + M_r} \quad (1)$$

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

- 2) 鋼材係数 (q_{pr}) は「コンクリート断面の中心軸圧縮強度に対する，終局時の全鋼材応力の比率」を表し，式 (2) により計算される。式 (2) から分かるように，複筋比が 1.0，すなわち圧縮側普通鉄筋と引張側普通鉄筋が同量 ($T_{ry} = C_{ry}$) で，すべての PC 鋼材が引張側に位置する場合，PC 鋼材量は q_{pr} に比例する。

$$q_{pr} = \frac{T_{py} + T_{po} + (T_{ry} - C_{ry})}{b \cdot D_s \cdot F_c} \quad (2)$$

T_{py} ：引張側 PC 鋼材降伏時力， T_{po} ：圧縮側 PC 鋼材長期有効張力

T_{ry} ：引張側普通鉄筋降伏時力， C_{ry} ：圧縮側普通鉄筋降伏時力

b ：断面幅， D_s ：断面せい， F_c ：コンクリート圧縮強度

- 3) PC 鋼材配置位置 (d_{pi}) は，圧縮縁から PC 鋼材配置位置までの距離 (d_p) を断面せい (D_s) で除し無次元化した値である。本論文で検討した断面は，2 本の PC 鋼材を断面せい方向重心軸に対して対称に配置しており，より引張側に位置する鋼材の値をもって d_{pi} を定義する。
- 4) PC 鋼材種は，異形 PC 鋼棒，PC 鋼より線，丸形 PC 鋼棒を対象とし，解析上はコンクリート-鋼材間の付着強度の違いとして考慮する。具体的には，4.1 節で後述する。
- 5) 初期導入力の大きさは，PC 鋼材降伏耐力に対する初期導入力量の比率 ($\eta P_c / T_{py}$ ： η はプレストレス有効率， P_c はプレストレス初期導入力) で表す。

3. 残留変形率算定基本式の誘導

3.1 記号および条件

矩形断面 ($b \times D_s$ ： b は断面幅， D_s は断面せい) を対象として残留変形率算定のための基本式を誘導する。

図 - 1 に示すように部材の経験変形量の最大時点 (以下ピーク時) 部材角を R_p ，ピーク時から除荷状態となり部材に発生するモーメントが 0 となる時点 (以下 残留変形時) の部材角を R_r と定義すると，残留変形率 (REr) は R_r / R_p

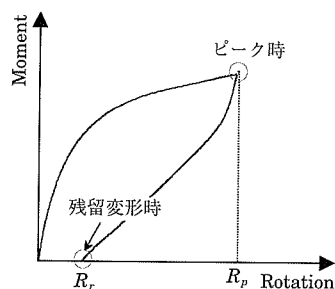


図 - 1 M-R 関係における R_p および R_r の定義

と表せ，前述のように部材変形角を断面曲率と等価塑性ヒンジ長さの積として表すと， R_p および R_r は，式 (3) のように表される。式 (3) では等価塑性ヒンジ長をピーク時と残留変形時で異なった値として定義しているが，これは部材に作用するモーメントが増加する状況と，除荷により変形が減少する状況では，鋼材に作用する力がまったく逆となり，ヒンジ部の挙動が異なると考えたためである。モーメントが増加する場合の値を leq_p (ピーク時等価塑性ヒンジ長さ)，減少する場合の値を leq_r (残留変形時等価塑性ヒンジ長さ) とする。

$$R_r = \phi_r \cdot leq_r, \quad R_p = \phi_p \cdot leq_p \quad (3)$$

R_r ：残留変形時部材角， R_p ：ピーク時部材角

ϕ_r ：残留変形時曲率， ϕ_p ：ピーク時曲率

3.2 基本式の誘導

図 - 2 に示すように，残留変形時の曲率 ϕ_r は，ピーク時の曲率 (ϕ_p) から除荷によって生じる曲率減少量 ($\Delta \phi_{p-r}$) を引いたものであり，式 (4) のように表せる。

$$\phi_r = \phi_p - \Delta \phi_{p-r} \quad (4)$$

$\Delta \phi_{p-r}$ ：ピーク時～残留変形時の曲率減少量

したがって，これに式 (3) を代入すると残留変形率 (REr) は式 (5) のように表せる。

$$\begin{aligned} REr &= \frac{R_r}{R_p} = \frac{\phi_r \cdot leq_r}{\phi_p \cdot leq_p} = \frac{(\phi_p - \Delta \phi_{p-r}) \cdot leq_r}{\phi_p \cdot leq_p} \\ &= leq_r \cdot \left(\frac{1}{leq_p} - \frac{\Delta \phi_{p-r}}{R_p} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) を残留変形率算定基本式とし，同式における諸数値 (leq_p , leq_r , $\Delta \phi_{p-r}$) に適切な値を与えることによって，任意の R_p における残留変形率を算定できる。次章ではこれらの諸数値を分割要素解析により求める。

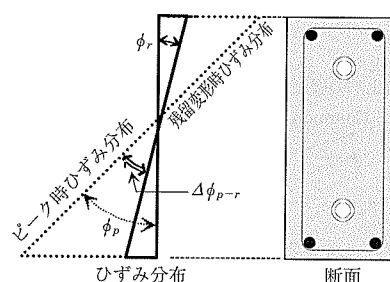


図 - 2 曲率に関する記号の定義

4. 残留変形率算定基本式中の諸数値の決定

本章では，分割要素解析を用いて図 - 3 に示す PC 梁部材に対し荷重-変形解析を行い，基本式 (式 (5)) 中の諸数値を決定する。なお解析を行うにあたって各パラメータおよびその範囲を表 - 1 に示すものとし，そのうち基準条件を $d_{pi} = 0.5$ ， $\eta P_c / T_{py} = 65$ (%)， $q_{pr} = 0.2$ ， $R_p = 1/50$ の組合せとした。

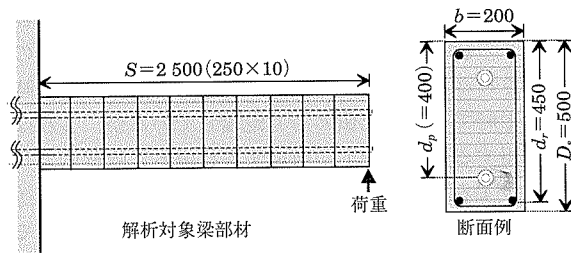


図-3 解析対象梁部材・断面例

表-1 解析パラメータおよび共通諸元

パラメータ	記号	水準
プレストレス係数	λ	0.1 ~ 1.0 (0.1 刻み)
鋼材種 (付着強度)	τ_y	1, 3, 10 (N/mm ²)
PC 鋼材配置位置	d_{pl}	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9
鋼材係数	q_{pr}	0.1, 0.2, 0.3
初期導入力大きさ	$\eta P_e / T_{py}$	40, 50, 65 (%)
経験最大部材角	R_p	1/100, 1/50, 1/30

共通諸元 ※網掛けは基準条件

コンクリート圧縮強度 = 41.6 (N/mm²) 横拘束補強 D 6@50 mm
 PC 鋼材降伏応力度 = 1150 (N/mm²) 普通鉄筋降伏応力度 = 378 (N/mm²)
 横拘束補強筋降伏応力度 = 378 (N/mm²)

4.1 解析概要

(1) 解析仮定および条件

本論文で用いる分割要素法は、部材を材軸方向および断面せい方向にそれぞれ分割し、分割した各要素の材料特性から部材剛性マトリクスを誘導し、部材材端に作用する力に対し各分割要素間の力の釣合いおよび変形の適合条件を満足するように解析を行うものである¹⁾。以下、材軸方向に分割した要素を「ブロック」と呼ぶ。材軸方向の分割幅は $0.5 D_s$ 、断面せい方向の分割数は 100 とした。各ブロック内のコンクリートおよび鉄筋については平面保持を仮定し、PC 鋼材-コンクリート間には森田・角モデルによる付着-すべり関係を考慮した (図-4 (d))。

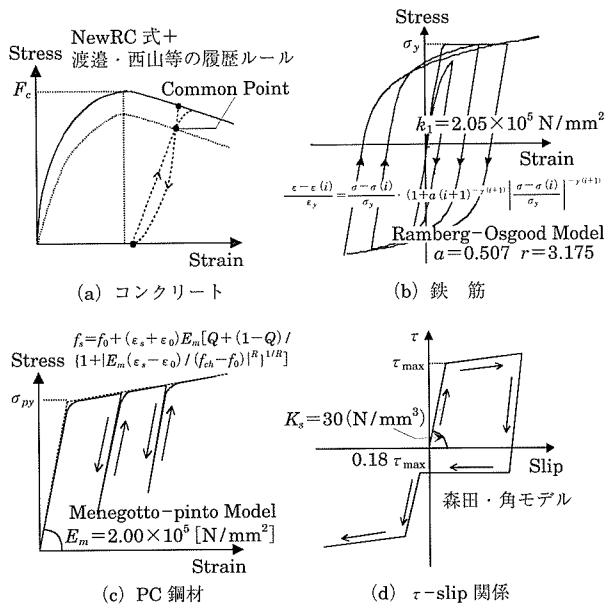


図-4 材料モデル

(2) 解析対象部材および材料特性

解析対象とした部材は、図-3に示すように、 $b \times D_s = 200 \times 500$ (mm)、せん断スパン = 2500 (mm) の PC 片持ち梁である (パラメータ等については表-1)。PC 鋼材は断面せい方向重心軸について対称に 2 本配置するものとした。PC 鋼材種 (異形 PC 鋼棒, PC 鋼より線, 丸形 PC 鋼棒) の違いによる鋼材-コンクリート間の付着強度の違いが残留変形量に及ぼす影響を考察するために、文献 3), 4) を参考に、それぞれの PC 鋼材種の付着降伏応力度 (τ_y) を $\tau_y = 10, 3, 1$ (N/mm²) と設定した。

(3) 材料履歴モデル

コンクリートの応力-ひずみ (S-S) 履歴は、その包絡線を NewRC 式⁵⁾により定め、繰返しルールを Watanabe らによって提案されたモデル⁶⁾とした。普通鉄筋は、Ramberg - Osgood 式に基づきバウジナガー効果を考慮した履歴モデル⁷⁾を、PC 鋼材は、Menegotto - Pinto 式に基づく履歴モデル⁸⁾を用いた。分割要素法解析における各材料特性モデルの概要を図-4に示す。

4.2 残留変形率算定基本式中の諸数値の検討

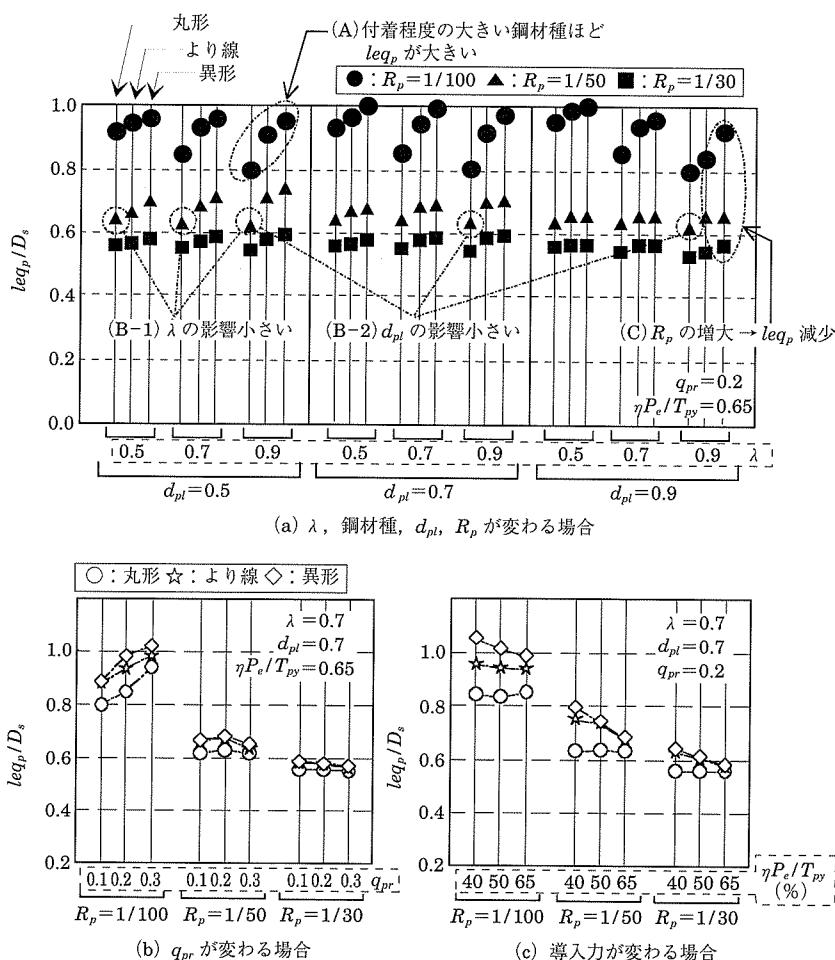
4.2.1 等価塑性ヒンジ長さ

等価塑性ヒンジ長さについてはさまざまな研究がなされているが、その算定法については定まった算出方法がない。そこで、既往の実験²⁾で「部材角を危険断面から 0.2 ~ 0.5 D_s 程度の測定区間での平均曲率で除して等価塑性ヒンジ長さの算出を算出している」ことを参考に、ここでは「部材角」を解析から得られる「危険断面位置でのブロック (ブロック幅 = $0.5 D_s$) の曲率」で除した値として求めた。このようにして求める等価塑性ヒンジ長さ (leq_p, leq_q) は当然解析パラメータにより変化する。そこで (a) プレストレッシング係数 (λ)、PC 鋼材種、PC 鋼材位置 (d_{pl}) およびピーク時部材角 (R_p) が変わる場合、(b) 鋼材係数 (q_{pr}) が変わる場合、(c) 初期導入力の大きさ ($\eta P_e / T_{py}$) が変わる場合、の解析を行い、ピーク時および残留変形時の等価塑性ヒンジ長さ (leq_p, leq_q) を検討した。解析結果を図-5、図-6に示す。

(1) ピーク時等価塑性ヒンジ長さ (leq_p)

- 図-5 (a) は λ , PC 鋼材種, d_{pl} , R_p が変化するときの leq_p を調べた図である。同図より、ピーク時等価塑性ヒンジ長さ (leq_p) は付着強度の大きい鋼材種ほど大きな値を示すが (例: 同図中 (A)), λ と d_{pl} にはほとんど影響を受けない (例: 同図中 (B-1), (B-2))。一方、 R_p に強く影響を受け、 R_p が大きいほど leq_p は減少する (例: 同図中 (C))。
- 図-5 (b) は q_{pr} が変化するときの leq_p を調べた図である。 $R_p = 1/50$ 以降ではいずれの PC 鋼材種においても、 q_{pr} の leq_p に対する影響はほとんどない。
- 図-5 (c) は $\eta P_e / T_{py}$ が変化するときの leq_p を調べた図である。同図より、丸形 PC 鋼棒以外の PC 鋼材種では、 $\eta P_e / T_{py}$ が大きくなると leq_p は小さくなり、その程度は、付着強度の大きい異形 PC 鋼材の方が若干大きい。

以上 1) ~ 3) より、 leq_p はピーク時部材角 (R_p)、PC 鋼

図-5 各要因の変化に対する leq_p の値

材種、初期導入力の大きさ ($\eta P_e / T_{py}$) に影響を受けており、これらの関数とすればよいことが分かる。関数化の具体的な方法を検討するために、図-7に各PC鋼材種、 $\eta P_e / T_{py} = 0.4, 0.5, 0.65$ の場合について、 R_p が1/30まで一方に増大する場合の解析結果 (leq_p) を示す。同図によると、 R_p が増大すると leq_p は徐々に減少しながら一定値へと漸近していくことが分かる。したがって、 leq_p を R_p の増大に対して一定値に漸近する関数 (R_p に反比例する形状、 $R_p \rightarrow \infty$ で $leq_p / D_s \rightarrow 0.42$) とし、解析値に対して最小二乗法を用いて係数を決定し、式(6)のように定めた。図中に同式で計算されるラインを示すが、 leq_p の推移をよく捉えている。

$$leq_p = \left(\frac{A}{R_p} + 0.42 \right) \cdot D_s$$

$$A \times 10^4 = \begin{cases} 114 - 88 \cdot \eta P_e / T_{py} & \cdots \text{異形PC鋼棒} \\ 95 - 61 \cdot \eta P_e / T_{py} & \cdots \text{PC鋼より線} \\ 45 & \cdots \text{丸形PC鋼棒} \end{cases} \quad (6)$$

(2) 残留変形時の等価塑性ヒンジ長さ (leq_r)

残留変形時の等価塑性ヒンジ長さ (leq_r) を検討した図-6より、 leq_r は λ 、PC鋼材種、 d_{pt} 、 R_p 、 $\eta P_e / T_{py}$ 、 q_{pr} の違いによらず、多くの場合でおよそ $0.5 D_s$ 程度、あるいは R_p が1/100でかつ λ が比較的大きい場合など、かぎられた条

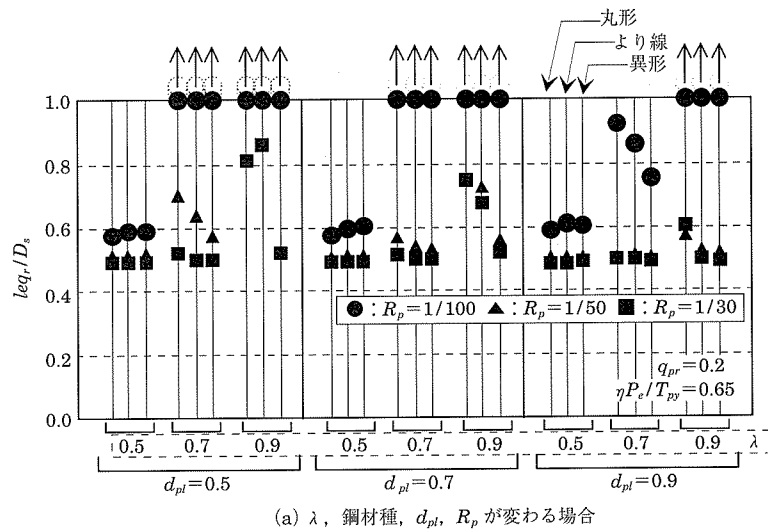
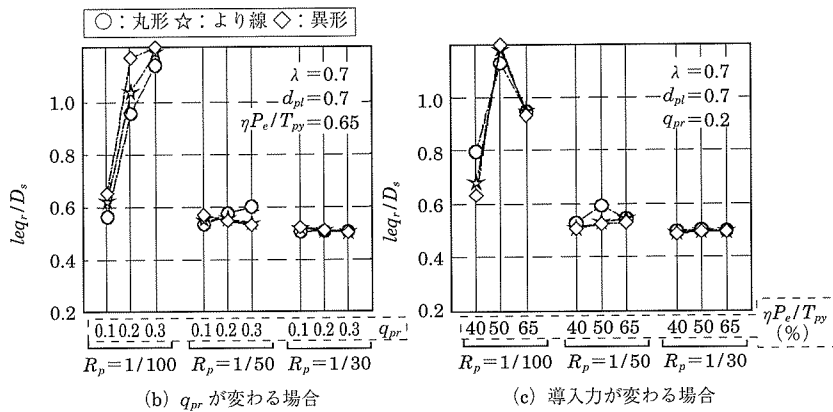
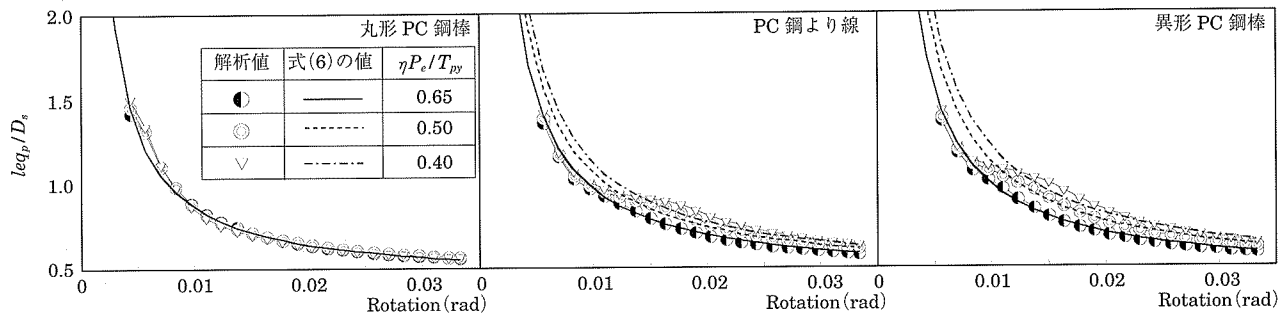
件で $1.0 D_s$ を超える値になっていることが分かる。 leq_r が $1.0 D_s$ を超える場合は以下の理由によりその結果を無視できると考え、 leq_r は条件にかかわらず共通に $0.5 D_s$ とする(式(7))。

$$leq_r = 0.5 \cdot D_s \quad (7)$$

(理由) leq_r が $1.0 D_s$ を超える条件は主にピーク時の変形量が小さく、 λ が大きい場合、すなわち残留変形が非常に小さい場合に相当する。この場合、危険断面位置でのブロックの曲率 (ϕ_r) も小さい値となり、 $leq_r (= R_r / \phi_r)$ はこの値を分母として計算されるため、結果として $1.0 D_s$ を超える大きな値になる傾向をもつ。しかしながら、残留変形量の非常に小さい領域であることから leq_r を $0.5 D_s$ と小さく評価しても絶対的な誤差は小さく、算定精度に与える影響は小さい。

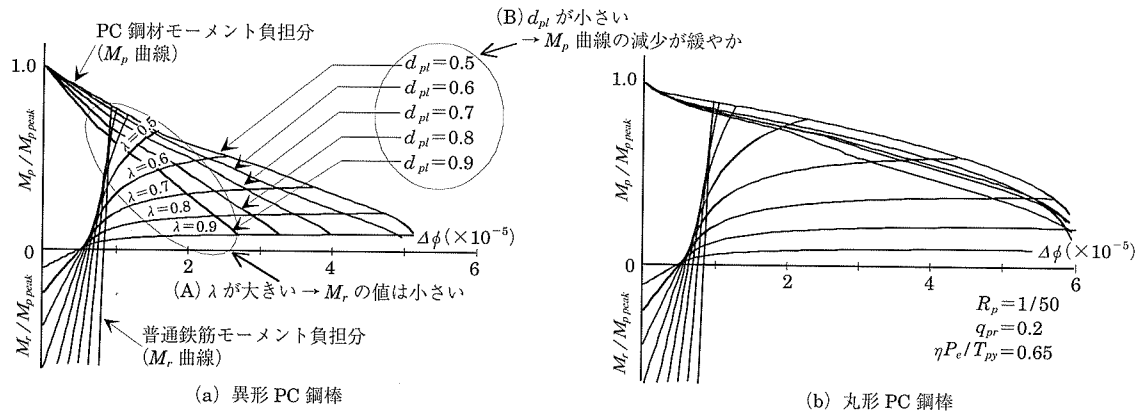
4.2.2 曲率減少量 ($\Delta \phi_{pr}$)

ピーク時から残留変形時間に発生する危険断面位置での曲率減少量 ($\Delta \phi_{pr}$) の値を検討する。残留変形時は危険断面位置でのモーメントが0になる時点と定義されるが、モーメントは、圧縮側コンクリートによる圧縮力と、PC鋼材、引張側普通鉄筋により発生する引張力とによる偶力モーメントの和である。したがってこれらの偶力モーメント(PC鋼材により発生する偶力モーメントと引張側普通鉄筋によ

(a) λ , 鋼材種, d_{pl} , R_p が変わる場合(b) q_{pr} が変わる場合(c) 導入力 q_{pr} が変わる場合図 - 6 各要因の変化に対する leq_p の値図 - 7 R_p の増大に対する leq_p の推移

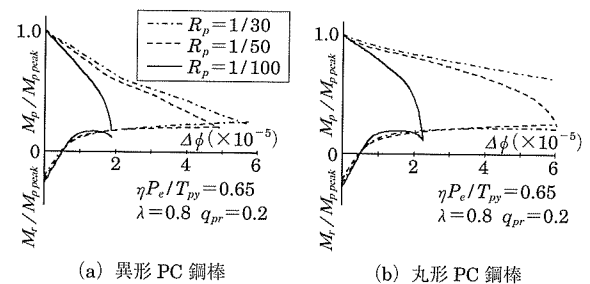
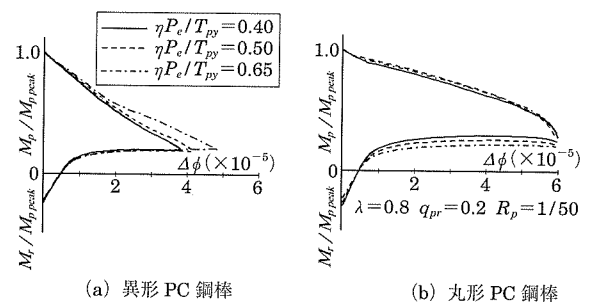
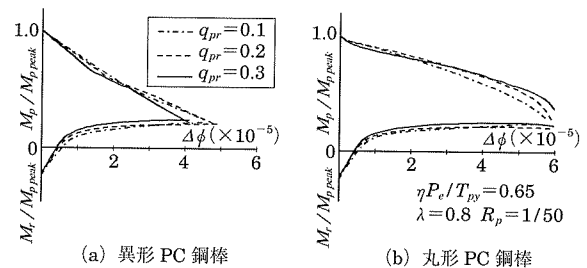
り発生する偶力モーメント)を足し合わせた値が0となる時点が残留変形時を示すことになる。そこで図 - 8 に、横軸に「ピーク時からの曲率減少量 ($\Delta\phi$)」、縦軸に「PC 鋼材および普通鉄筋の発揮するモーメント」を、PC 鋼材がピーク時に発揮するモーメント ($M_{p\text{ peak}}$) を 100 % として示す。同図は、部材のピーク時から除荷が行われる場合の、その戻り量 ($\Delta\phi$) と、各時点での鋼材の発揮する曲げモーメントの推移を示すことになる。以下、PC 鋼材、普通鉄筋それぞれに対する図中のラインを M_p 曲線および M_r 曲線と呼ぶ。 M_r 曲線の符号は後の説明の理解を容易にするため図中

の正負方向を PC 鋼材と逆向き (すなわち下方向が正) に表現している。したがって M_p 曲線と M_r 曲線の交点では両者の絶対値が等しく正負が逆になるため、その点で断面の発揮するモーメントがほぼ 0 となり、その点での $\Delta\phi$ がピーク時～残留変形時間の断面曲率減少量 ($\Delta\phi_{p-r}$) となる。 $\Delta\phi_{p-r}$ が大きいほどピーク時からの戻り量が大きいので、一般に残留変形率は小さくなる。図 - 8 ではプレストressing係数 (λ) および PC 鋼材配置位置 (d_{pl}) が変わる場合の $M/M_{p\text{ peak}} - \Delta\phi$ 関係について示している。同様に図 - 9 はピーク時部材角 (R_p) が変わる場合、図 - 10 は初期導

図-8 $M/M_{peak}-\Delta\phi$ 関係 (λ と d_{pt} が変わる場合)

入力大きさ ($\eta P_e / T_{py}$) が変わる場合、図-11は鋼材係数 (q_{pr}) が変わる場合の $M/M_{peak}-\Delta\phi$ 関係を示したものであり、図-8～11より以下のことが分かる。

- 1) 図-8より、PC鋼材の発揮するモーメント (M_p) は $\Delta\phi$ の増大に対して線形的に減少する。一方普通鉄筋の発揮するモーメント (M_r) は λ ごとに傾向の異なる曲線となっている。この両者の推移の違いは、除荷時におけるPC鋼材と普通鉄筋のS-S関係から説明できる。図-12に、異形PC鋼棒を例に、解析時の鋼材のS-S関係の推移を示す。PC鋼材では除荷開始時(図中●印)～残留変形時(図中■印)では、そのひずみは引張域の範囲内にあり、かつ鋼材の弾性領域が長いので線形的挙動を示す。これに対し普通鉄筋は除荷開始点のひずみは引張域にあるが、その後は圧縮ひずみを受けるようになる。圧縮側ではバウジガー効果により図に示すように非線形挙動を示す。以上より、PC鋼材により発揮されるモーメントは曲率の減少に伴う直線となり、普通鉄筋では減少程度が徐々に低下する曲線となる。
- 2) プレストッシング係数 (λ) の大小による違いを見ると(図-8(a)-(A))、 λ が大きい断面では普通鉄筋量が少なく、普通鉄筋により発揮されるモーメント (M_r) の絶対値が小さくなる。したがって M_p 曲線との交点は、 λ が大きいほど、より大きな $\Delta\phi$ となる。
- 3) PC鋼材位置 (d_{pt}) が小さいほど、 $\Delta\phi$ に対する M_p の減少が緩やかになり、 M_r との交点の $\Delta\phi$ が大きくなる(図-8(a)-(B))。これは、 d_{pt} が小さくなるほど、すなわちPC鋼材配置位置が断面中央に近づくほど、除荷時の断面曲率の減少に伴うPC鋼材ひずみの減少量が小さくなり、PC鋼材により発現するモーメントの減少量が小さくなるためである。
- 4) 付着強度の小さいPC鋼材種ほど(図-8(a)-(b)の比較)、 $\Delta\phi$ に対する M_p の減少が緩やかとなり、 M_r との交点の $\Delta\phi$ が大きくなる。これは付着強度の大きい鋼材ほど、コンクリートとのずれ量が小さくなり、断面曲率の減少に伴うPC鋼材ひずみの減少量が大きくなることから、その結果、PC鋼材により発現するモーメントの減少量が大きくなるためである。

図-9 $M/M_{peak}-\Delta\phi$ 関係 (R_p が変わる場合)図-10 $M/M_{peak}-\Delta\phi$ 関係 ($\eta P_e / T_{py}$ が変わる場合)図-11 $M/M_{peak}-\Delta\phi$ 関係 (q_{pr} が変わる場合)

- 5) 図-9より、 R_p が変わる場合には、いずれのPC鋼材種も $\Delta\phi$ に対する M_p の減少程度が大きく変化する。 R_p が大きくなるほど M_p の減少は緩やかとなり、 M_r との交点の $\Delta\phi$ は大きくなる。
- 6) 図-10より、異形PC鋼棒の場合、 $\eta P_e / T_{py}$ が大きく

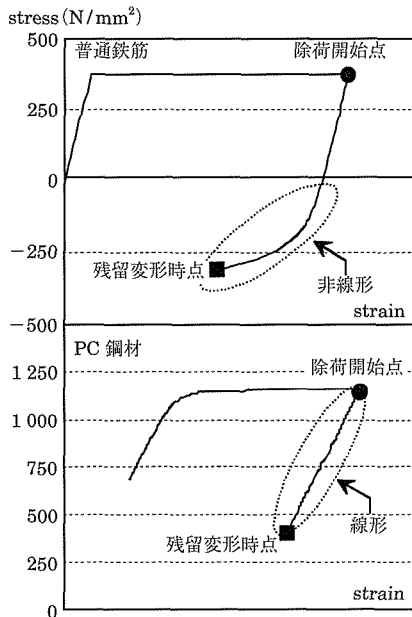


図 - 12 PC 鋼材と普通鉄筋の S-S 関係

なるほど $\Delta\phi$ に対する M_p の減少が緩やかになる。一方、丸形 PC 鋼棒の場合、 $\eta P_e / T_{py}$ の影響はほとんどない。

7) 図 - 11 より、 q_{pr} が変わる場合の $\Delta\phi$ に対する M_p の減少程度の差は小さい。

以上 1) ~ 7) をまとめると、 $M / M_{p\text{ peak}} - \Delta\phi$ 関係における M_p 曲線は d_{pl} 、 R_p 、PC 鋼材種、 $\eta P_e / T_{py}$ 、 M_r 曲線は λ の影響を強く受けることが分かる。したがって、 M_p 、 M_r 両曲線の交点である $\Delta\phi_{p-r}$ をこれら要因の関数として求めることとし、次のような方針とした。

- ① M_p 曲線に対する各要因の影響を検討し、それを「 M_p の変化の程度を示す数値 (S_{mp}) : 詳細は後述」で表す。
- ② $\Delta\phi_{p-r}$ は M_p 曲線と M_r 曲線の交点の $\Delta\phi$ であり、 M_r 曲線は λ に影響を受けるので、 $\Delta\phi_{p-r}$ を S_{mp} と λ の関数として定式化する。

(1) M_p 曲線について

[S_{mp} について] 図 - 8 ~ 11 から分かるように、 M_p 曲線は $\Delta\phi$ に関してほぼ線形の関係をもつ。よって、これを直線に近似する (以下 M_p 直線と呼ぶ)。 M_p 直線は、Y 切片を $(\Delta\phi, M_p) = (0, 1)$ とし、その傾きを $M / M_{p\text{ peak}} - \Delta\phi$ 関係上の各点から最小自乗法を用いて求める。同直線は前述のとおり d_{pl} 、 R_p 、PC 鋼材種、 $\eta P_e / T_{py}$ の関数となるが、図 - 13 に示すように Y 切片を固定することから、各要因の影響は同直線の傾きに対する影響として表現される。さらに本論文ではその扱いをより簡単にするため、 M_p 直線と X 軸 (X 軸は $M_r = 0$, すなわち $\lambda = 1.0$ のときに相当) との交点をもって M_p 直線の傾きの大きさを表すこととし、その交点を以下 S_{mp} と呼ぶ (図 - 13)。

- 1) PC 鋼材配置位置 (d_{pl}) の影響について：図 - 14 に d_{pl} と S_{mp} の関係を PC 鋼材種ごとに示す。同図より、いずれの PC 鋼材種においても、 S_{mp} は d_{pl} の増加に従

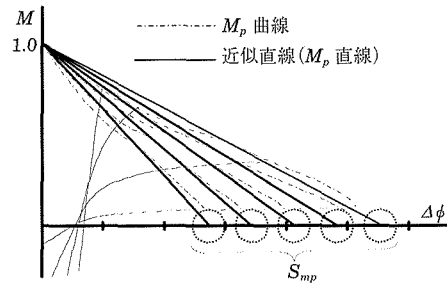
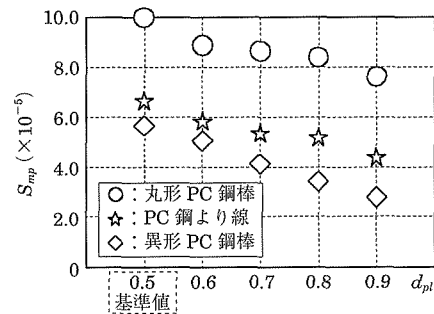
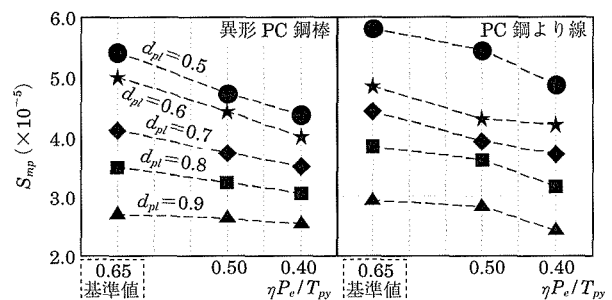
図 - 13 M_p 曲線の直線近似例および S_{mp} の定義図 - 14 d_{pl} と S_{mp} の関係

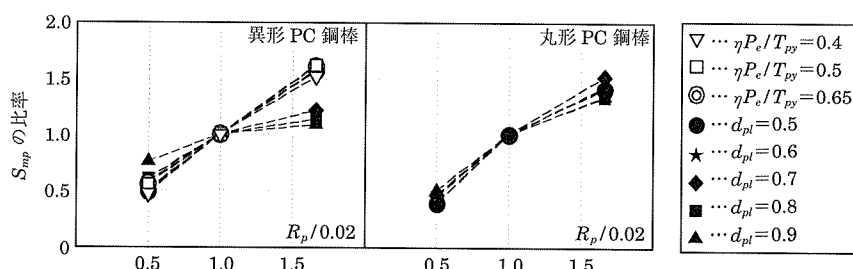
表 - 2 各係数の値

鋼材種	係数 ($\times 10^{-5}$)			係数 ($\times 1$)
	α	β	C	D
異形 PC 鋼棒	7.3	5.4	5.6	0.6
PC 鋼より線	5.1	4.1	6.6	1.0
丸形 PC 鋼棒	5.3	0	10	0.5

いはほぼ線形的に減少していることが分かる。したがって、 d_{pl} の増加に対する S_{mp} の減少する割合を α で表し、図 - 14 の各点から最小自乗法によりその値を求めた (表 - 2)。

- 2) 初期導入力 ($\eta P_e / T_{py}$) の影響について：図 - 15 に $\eta P_e / T_{py}$ と S_{mp} の関係を各 d_{pl} について示す。同図より S_{mp} は、 $\eta P_e / T_{py}$ の減少に対して線形的に減少し、その傾きは d_{pl} の違いによらず同程度であることが分かる。したがって、 $S_{mp} - \eta P_e / T_{py}$ 関係を線形関係とし、 $\eta P_e / T_{py}$ の増加減少に対する S_m の減少割合を β で表し、その値を 1) と同様、最小自乗法により求めた (表 - 2)。

図 - 15 $\eta P_e / T_{py}$ と S_{mp} の関係

図 - 16 「 $R_p/0.02$ 」と「 $R_p/0.02$ 時を基準とした S_{mp} の比率」の関係

3) ピーク時部材角 (R_p) の影響について: 図 - 16 に R_p と S_{mp} の関係を各 d_{pl} (図中黒印) および $\eta P_e / T_{py}$ (図中白印) について示す。なお同図は、縦軸・横軸をそれぞれ基準条件 ($d_{pl} = 0.5$, $\eta P_e / T_{py} = 0.65$, $q_{pr} = 0.2$, $R_p = 1/50$) の値に対する比率 (γ) としている。図 - 16 より γ は、 d_{pl} および $\eta P_e / T_{py}$ の違いによらず、 $R_p / 0.02$ の増大に対し線形的に増大することが分かる。このことから、 γ を図 - 16 の (1, 1) を通る一次関数で表し、各条件時の S_{mp} を $R_p = 0.02$ 時の S_{mp} の値に γ を乗じて求めることとした (式 (8))。一次関数の傾きを D とし、その値を図 - 16 の各点から最小自乗法を用いて求めた (表 - 2)。

$$\gamma = D \cdot \left(\frac{R_p}{0.02} - 1 \right) + 1 = D \cdot (50R_p - 1) + 1 \quad (8)$$

以上より、任意の条件での S_{mp} は、基準条件の値から d_{pl} および $\eta P_e / T_{py}$ の影響 (それぞれ、 $\alpha \cdot (d_{pl} - 0.5)$, $\beta \cdot (0.65 - \eta P_e / T_{py})$) を減じ、その値に R_p の変化による S_{mp} の比率 (γ) を乗じて求められるので、基準条件での S_{mp} を C とすると、 S_{mp} は式 (9) のように表せる。

$$S_{mp} = \gamma \cdot \{ C - \alpha \cdot (d_{pl} - 0.5) - \beta \cdot (0.65 - \eta P_e / T_{py}) \} \quad (9)$$

各定数の値は、表 - 2 に示すとおりである。

(2) $\Delta \phi_{p-r}$ と S_{mp} , λ の関係について

$\Delta \phi_{p-r}$ は M_p 直線と M_r 曲線 (λ に影響を受ける) の交点であるので、 $\Delta \phi_{p-r}$ と λ の関係を $S_{mp} = 2.0, 6.0, 10$ ($\times 10^{-5}$) の場合について図 - 17 に示す。なお、 S_{mp} の値については本論文で検討したパラメータの範囲では $0.931 \times 10^{-5} \sim 13.3 \times 10^{-5}$ と計算されることから、その範囲内でグラフの傾向が把握できるように上記のように設定した。 λ に対する $\Delta \phi_{p-r}$ の変化を $S_{mp} = 10$ (図中○印) を例にとり見てみると、 $\Delta \phi_{p-r}$ は、 $\lambda = 0.1$ から λ が大きくなるにしたがい徐々に増加し、 $\lambda = 0.5$ 辺りからはその増加が大きくなり、 $\lambda = 1.0$ 付近で再び比較的緩やかな増加となることが分かる。 $S_{mp} = 2.0, 6.0$ の場合も、 λ の増加に伴う $\Delta \phi_{p-r}$ の推移は $S_{mp} = 10$ の場合と同様の傾向をもち、 S_{mp} が大きいほど $\Delta \phi_{p-r}$ は大きくなるが、 $\lambda = 0$ 付近ではいずれも 1 ($\times 10^{-5}$) 程度となっている。また、 $\lambda = 1$ では $\Delta \phi_{p-r} = S_{mp}$ となる (図 - 13 で示すように S_{mp} は $\lambda = 1$ (X 軸) 上での $\Delta \phi_{p-r}$ なので定義どおりの値となる)。以上の結果に基づき、 λ と S_{mp} を用いて、 $\Delta \phi_{p-r}$ を式 (10) のように定式化した。図 - 17 に式 (10) による値を実線で示す。同式のラインは $\lambda =$

$\Delta \phi_{p-r}$ 関係の推移によく合致することが分かる。

$$\Delta \phi_{p-r} = B^{-(\lambda-1)^2} \cdot (S_{mp} - 1) + 1 \quad (\times 10^{-5} \text{ rad/mm}) \quad (10)$$

($B = 800$: B は $\Delta \phi_{p-r} - \lambda$ 関係の勾配)

(3) 断面せいの影響

式 (10) は、対象断面せい (D_s) が 500 (mm) の場合の値であるが、本検討では等価塑性ヒンジ長さは断面せいに比例すると定義している。したがって、断面曲率は部材角が同じであれば D_s に反比例する。詳述すれば部材角 R と断面曲率 ϕ および等価塑性ヒンジ長さ leq の関係は $R = \phi \times leq$ であり、等価塑性ヒンジ長さ leq は断面せい D_s に比例することから、 R が同じであれば断面曲率は D_s に反比例する。よって、式 (10) の D_s が異なる場合の $\Delta \phi_{p-r}$ は式 (11) と表すことができる (式 (11) は断面せいの影響を考慮しない場合の $\Delta \phi_{p-r}$, すなわち式 (10) 以前の $\Delta \phi_{p-r}$ を $\Delta \phi_o$ と改めて用いている)。

$$\Delta \phi_{p-r} = \Delta \phi_o \times \frac{500}{D_s} \quad (11)$$

以上をまとめ、残留変形率算定式を式 (12) に示す。

残留変形率算定式

残留変形率算定基本式は次式となる

$$REr = \frac{R_r}{R_p} = leq_r \cdot \left(\frac{1}{leq_p} - \frac{\Delta \phi_{p-r}}{R_p} \right) \quad (12)$$

$$leq_p = \left(\frac{A}{R_p} + 0.42 \right) \cdot D_s$$

$$A \times 10^4 = \begin{cases} 114 - 88 \cdot \eta P_e / T_{py} & \cdots \text{異形PC鋼棒} \\ 95 - 61 \cdot \eta P_e / T_{py} & \cdots \text{PC鋼より線} \\ 45 & \cdots \text{丸形PC鋼棒} \end{cases}$$

$$leq_r = 0.5 \cdot D_s$$

$$\Delta \phi_{p-r} = \Delta \phi_o \times \frac{500}{D_s}$$

$$\Delta \phi_o = B^{-(\lambda-1)^2} \cdot (S_{mp} - 1) + 1 \quad (\times 10^{-5})$$

$$S_{mp} = \gamma \cdot \{ C - \alpha \cdot (d_{pl} - 0.5) - \beta \cdot (0.65 - \eta P_e / T_{py}) \}$$

$$\gamma = D \cdot (50R_p - 1) + 1$$

leq_p (ピーク時等価塑性ヒンジ長さ),

leq_r (残留変形時等価塑性ヒンジ長さ), $\Delta \phi_{p-r}$ (曲率減少量)

各定数 (C , D , α , β) については表 - 2 (実験値による修正後の値は表 - 3) 参照。

4.3 算定式と既往の実験値の比較と修正

図 - 18 に算定式と既往の実験^{10)~19)}の残留変形率 (REr)

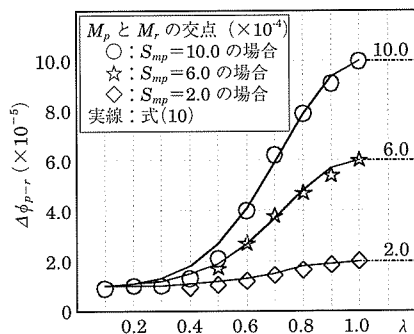


図 - 17 $\lambda - \Delta\phi_{p-r}$ 関係

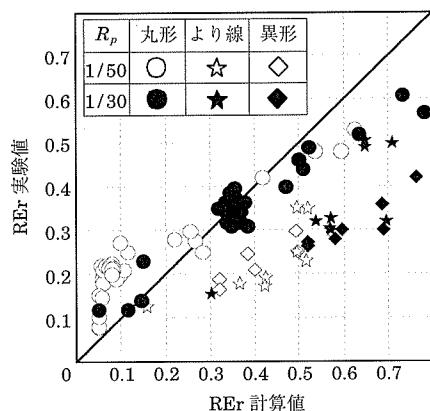


図 - 18 算定式と実験値の比較

の比較を、ピーク時部材角 (R_p) が 1/50 と 1/30 の場合について示す。同図より、① 全体に REr の大きい範囲で算定式の値は実験値を過大評価、小さい範囲ではその逆となっている。② とくに異形 PC 鋼棒および PC 鋼より線では、算定式は全体に実験値に対して大きいことが分かる。

これらの傾向は $\Delta\phi_{p-r}$ 算定式時に M_p 曲線を直線近似したことが主因と考えられるものの、個別にそれらの要因を分析することはきわめて難しい。そこで本節では、算定式の各係数 (B , C , D) が算定値に与える影響を検討し、そこから上記 ①、② の傾向を補正するように同係数を修正することとした。

[係数 B と C について] 図 - 19 は、 B と C のそれぞれ値が変わる場合の、 λ の変化に対する算定式の残留変形率の推移 ($REr - \lambda$ 関係) を比較したものである。同図 (a) より、 B の値を変化させると、 λ の小さい範囲、つまり残留変形率の大きい範囲で B が大きいほど残留変形率は大きくなる。 λ の大きい範囲では B による残留変形率の違いは小さく $\lambda = 1$ ではいずれも同じ値となる。一方、同図 (b) より、 C の値を変化させると、 B の場合とは逆に、 λ が小さく残留変形率が大きい範囲では、 C による違いはほとんど現れず、 λ の大きい範囲では C が小さいほど残留変形率は大きくなる。したがって、 B と C を適切に変えることで、残留変形率の大きい範囲と小さい範囲、それぞれ個別に修正が可能である。

[係数 D について] 係数 D は、図 - 16 に示すように、 $S_{mp} - R_p$ 関係の傾きを表すことから、この値を小さくするこ

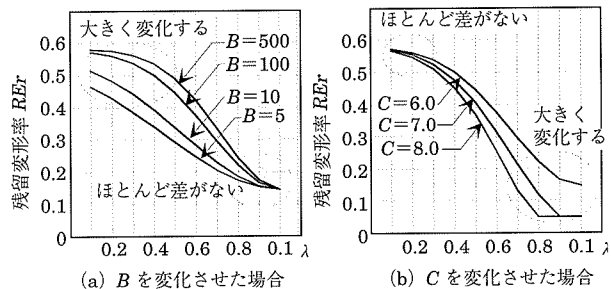


図 - 19 B , C による $\lambda - REr$ 関係の違い

とにより S_{mp} は大きくなり、算定式で計算される残留変形率を大きくするよう修正が可能である。

$\Delta\phi_{p-r}$ 修正の具体的な方法は、算定式と既往の実験の残留変形率との比較において、定数 B , C , D の三つのパラメータに対し、1) 回帰直線の Y 切片、2) 回帰直線の傾き、3) 相関係数、の三項目を検討し、 Y 切片 = 0、傾き = 1 となるなかで、もっとも相関係数の高くなる値を求めることとした。これにより得られた各係数の値を表 - 3 に示す。

以上の修正を行った後の算定式と既往の実験結果との比較を図 - 20 に示す。同図に示されるように両者は比較的よく一致している。

表 - 3 修正後の各係数の値

鋼材種	係数		
	B	$C (\times 10^{-5})$	D
異形 PC 鋼棒	4.5	6.8	1.3
PC 鋼より線	16	8.1	0.9
丸形 PC 鋼棒	43	7.1	1.0

※ α , β については表 - 2 参照

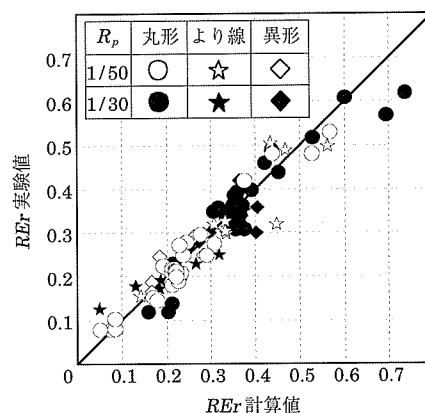


図 - 20 修正値を用いた算定式と実験値の比較

5. ま と め

PC 梁部材を対象とした残留変形率算定式を、以下の 1) ~ 3) の手順により誘導、提案した。

- 1) 残留変形率の定義に基づき、等価塑性ヒンジ法を利用して、残留変形率算定のための基本式を誘導した。
- 2) 分割要素解析を用い、各種要因の残留変形率に及ぼす影響を検討し、その結果を用いて基本式中の諸数値

(l_{eq_p} , l_{eq_r} , $\Delta\phi_{p-r}$) に対する適切な値を定式化した。

- 3) 既往の実験結果と算定式の比較検討から式の諸係数の修正を行い、残留変形率算定式を提案した。

今後の課題として、より多くの実験結果による算定式精度の確認と同式の簡略化が必要と考えている。

謝 辞

本研究は文部科学技術省科学研究補助金（基盤（B））、課題名：部材接合部に制震装置を配した損傷制御型 PCa 構造システムの開発、代表者 田中 仁史（京都大学教授）の一部を受けて行った。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 前田博司・岸本一蔵・西山峰広・大野義昭：「PC 鋼材の付着すべりを考慮したプレキャスト PC 部材の履歴挙動解析法」コンクリート工学年次論文報告集，第 27 巻，第 2 号，pp.709 - 714，2004 年
- 2) 巽英明・中塚信・寒川勝彦・浅川弘一：「PC 梁の等価塑性ヒンジ長さと同長さをを用いる荷重-変形関係推定法における課題」第 15 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.49 - 52，2006 年 10 月
- 3) 日本建築学会：「プレストレスト（鉄筋）コンクリート部材の終局性能評価手法-考え方の基礎から最前線まで-」，pp.1 - 14，2005 年 1 月
- 4) プレストレストコンクリート技術協会：「付着が拓く PC 構造の近未来-構造性能評価における鋼材付着の役割-」 2005 年 6 月
- 5) 崎野健治・孫玉平：「直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係」日本建築学会構造系論文集，第 461 号，pp.95 - 104，1994
- 6) F.Watanabe, J.Y.Lee, M.Nishiyama : 「Structural Performance of Reinforced Concrete Columns with Different Grade Longitudinal Bars」ACI Structural Journal, vol.92, No.4, pp.412 - 418, 1995.7 - 8
- 7) 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，1981 年
- 8) 三隅哲志・田川浩之・西山峰広：「PC 鋼棒の応力度-ひずみ度関係のモデル化」日本建築学会学術講演梗概集，pp.885 - 886，1997 年 9 月
- 9) 森田司郎・角徹三：「繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究」日本建築学会論文報告集，第 229 号 pp.15 - 27，1975.年 3 月
- 10) 中塚信・阿波野昌幸：「接合形式（圧着型・一体型）と PC 鋼材種（丸形・異形）の異なる片持 PC 梁の耐荷・変形機構と力学性能に関する実験的考察」コンクリート工学年次論文報告集，第 11 巻 3 号 2000 年
- 11) 太田義弘・岡本晴彦：「接合部を有する PC 部材の復元力特性に関する実験的研究」日本建築学会学術講演梗概集，pp.919 - 920，2001 年
- 12) YUE Wei・西山峰広：「PC 外柱梁接合部の力学性状に及ぼす鋼材定着位置の影響」コンクリート工学年次論文報告集，第 26 巻 2 号，pp.661 - 666，2004 年
- 13) 岳偉・足立将人・西山峰広・河野進：「PC 梁柱接合部の力学的性状に及ぼす鋼材種別の影響」コンクリート工学年次論文報告集，第 24 巻 2 号，pp.625 - 630，2002 年
- 14) 姫野洋一：「PRC 部材の復元力特性に関する実験的研究」大阪大学卒業論文，1981 年
- 15) 浜原正行・渡邊史夫・岡本晴彦・西山峰広：「PC 造柱梁接合部研究委員会報告 第 2 年度までの中間成果-その 2-実験結果と評価」第 12 回 プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.133 - 136，2005 年
- 16) 伊藤央・杉本訓祥・塩原等・小谷俊介：「プレストレスト鉄筋コンクリート造梁部材の繰返し載荷実験」コンクリート工学年次論文報告集，第 19 巻 2 号，pp.1137 - 1142，1997 年
- 17) 鈴木計夫・中塚信・平松一夫：「コンファインドコンクリート（横拘束コンクリート）を曲げ圧縮部に適用した PRC 梁の高靱性挙動」コンクリート工学年次講演会論文集，第 7 巻，pp.485 - 488，1985 年
- 18) 平松一夫：「多数回正負交番繰返し荷重をうける高靱性 PRC 梁の終局域特性」大阪大学大学院修士論文 1985 年
- 19) 本岡順二郎・末次宏光・浜原正行：「プレストレストコンクリート梁の平均プレストレスがその靱性に及ぼす影響」プレストレストコンクリート Vol.27, No.2, pp.44 - 49，1985 年 3 月

【2007 年 3 月 28 日受付】



図書案内

PC技術規準シリーズ

複合橋設計施工規準

頒布価格：会員特価 6,000 円（送料 500 円）

：非会員価格 6,825 円（送料 500 円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編
技報堂出版