

PC 梁の荷重-変形関係の推定法 その 3

—等価塑性ヒンジ法による解析—

岸本 一蔵*

1. はじめに

ここでは部材の $P-\delta$ 関係を求める手法としてもっとも一般的な断面解析+等価塑性ヒンジ法を用いて、各指標点発生時の回転角および残留変形量について検討する。

2. 等価塑性ヒンジ法による推定方法

2.1 等価塑性ヒンジ法について

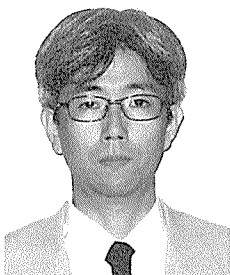
等価塑性ヒンジ法は、断面解析により危険断面での曲率を求め、その曲率の大きさがヒンジ領域（等価塑性ヒンジ）に等しく分布すると考えて回転角を求める方法である（(1)式参照）。

$$R = \phi \cdot l_{eq} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 R ：塑性ヒンジ領域に発生する回転角、 ϕ ：断面曲率（断面解析で求める）、 l_{eq} ：等価塑性ヒンジ長さ

この方法で求めているのは塑性ヒンジ領域において発生する回転角であり、部材の塑性ヒンジ領域外で発生する弾性変形等は基本的に含まれていない。ただし、検討する変形領域が比較的大きな場合（たとえば部材変形角が $1/100$ を越えるような場合）では、部材回転角に占める塑性ヒンジ領域の回転角はかなり大きくなることが予想されるため、一般には塑性ヒンジ領域における回転角≒部材回転角としてもよいと考える。

等価塑性ヒンジ法は考え方が単純であり、また計算手法も比較的簡単であるという特徴を有する。一方、問題点としては、本来部材の曲げ変形は引張側に発生するひび割れの大きさに強く依存することが知られているが、本方法では部材を連続体として考えており、基本的な考え方が実際の変形機構と大きくかけ離れていることがあげられる。また、等価塑性ヒンジの大きさは、同方法で算定される回転角に直接影響を与えるものであるが（(1)式参照）、この大きさの設定には十分な資料がない。経験的に、 $0.5D \sim 1.0D$ 程度（ D は断面せい）とされているが、精緻な決定方法はまだない。



* Ichizo KISHIMOTO

大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 建築工学部門 講師

2.2 PC 鋼材-コンクリート間の付着の取り扱い方法

本解析法では、PC 鋼材-コンクリート間の付着は断面解析時に考慮される。通常の断面解析では平面保持の仮定が用いられるため、“断面内に配置される鋼材ひずみは、当該鋼材位置でのコンクリートひずみと同じだけのひずみを受ける”と仮定される。これに対し、PC 鋼材-コンクリート間の付着劣化を考慮する場合には、PC 鋼材のひずみ増分は、同位置でのコンクリートひずみ増分に低減係数を積することにより求める（図-1参照）。この低減係数をひずみ適合係数（ F 値）と呼び、その値が 1.0 の場合は付着が完全（“鋼材ひずみ増分” = “コンクリートひずみ増分”）であることを、0 の場合、PC 鋼材のひずみ増分がまったくないことを意味する。また、ひずみ適合係数は断面が受ける変形状態により変化すると考えられるが、その値を文献 1)、2) では、断面曲率の関数として、文献 3) では PC 鋼材-コンクリート間の“ひずみの差”の関数として取り扱っている。ここでは後者の方法、すなわち“両者のひずみ差”の関数として取り扱うものとする。具体的な数値については後述する。

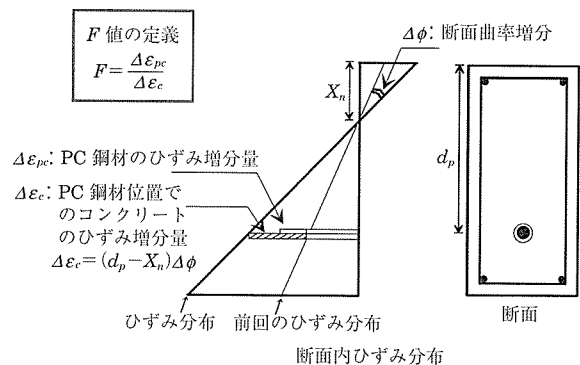


図-1 ひずみ適合係数（ F 値）

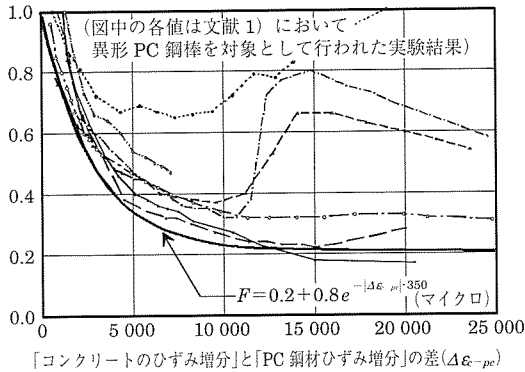
2.3 解析その 1：各指標点時の塑性ヒンジ部回転角の検討

(1) 解析手法および仮定

ここで用いた断面解析法は、一般的なファイバーモデルを用いた解析手法であり、仮定した断面曲率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。さらに、(1)式のように解析から計算される断面曲率と等価塑性ヒンジ長さの積により同部での回転角を求めた。等価塑性ヒンジ長さは断面せい（ D ）の 0.75 倍の値（ $0.75D$ ）とした。コンクリートおよび普通鉄筋に対しては、平面保持の仮定を適用し、PC 鋼材に対しては前述のひずみ適合係数（ F 値）を用いて計算している。 F 値は、図-2 に示すよう

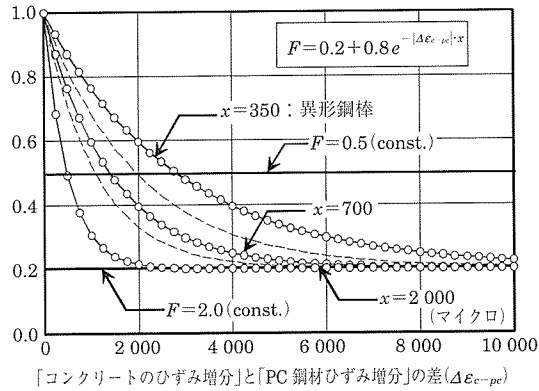
に、PC 鋼材ひずみ増分とコンクリートひずみ増分との差 ($\Delta \varepsilon_{c-pc}$) の関数として取り扱っており、同図 (a) に示す実験結果より異形 PC 鋼棒の F 値のデータを基準 (図 (a) 中の実線=図 (b) の $x = 350$ のケース) として、その他の鋼材種では付着の劣化程度がより大きくなるであろうことを x の値を大きく ($x = 700, x = 2000$) することで考慮した。また、参考データとして F 値を 0.2, 0.5 の固定とした場合の解析も行った。

ひずみ適合係数



(a) 異形鋼棒時の F 値と $\Delta \varepsilon_{c-pc}$ の関係

ひずみ適合係数



(b) 解析で用いた F 値と $\Delta \varepsilon_{c-pc}$ の関係

図 - 2 解析に用いたひずみ適合係数

(2) 解析対象断面とパラメータ

図 - 3 に解析対象とした断面とそのモデル化概要を示す。

断面形状は幅 (b) 400 mm, せい (D) 1 000 mm の矩形断面とし、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⁴⁾により求めた値を用いた。採用した解析パラメータは、鉄筋鋼材係数 (q_{pr}): (2) 式, 終局プレストレス率 (λ): (3) 式, 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 鋼材の配置位置 (図 - 3 参照), である。

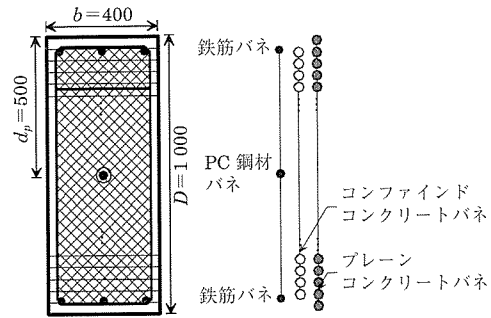


図 - 3 解析対象断面とそのモデル化概要

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

$$\lambda = \frac{M_p}{M_p + M_r} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 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 鋼材初期張力, 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, M_p : PC 鋼材により発生する曲げ耐力, M_r : 普通鉄筋により発生する曲げ耐力

q_{pr} と λ は断面内の鋼材量を決定する係数であり、おおまかにいうと、前者が PC 鋼材量を表し、後者が PC 鋼材と普通鉄筋の勢力バランスを表している。PC 鋼材量を表す q_{pr} は、終局時における PC 鋼材力 (計算方法は後述) の断面

表 - 1 解析に用いたパラメータおよび条件

要因	記号	水準
鉄筋鋼材係数	q_{pr}	0.1, 0.3
終局プレストレス率	λ	0.5, 0.9
ひずみ適合係数	F	図 - 2 参照
PC 鋼材位置	d_p	500, 800

【共通事項】

- コンクリート圧縮強度 = 35 N/mm²
- コンクリートヤング係数 = 20 500 N/mm²
- 普通鉄筋降伏強度 = 350 N/mm²
- 普通鉄筋ヤング係数 = 205 000 N/mm²
- PC 鋼材降伏強度 = 1 500 N/mm²
- PC 鋼材ヤング係数 = 200 000 N/mm²
- 横拘束補強 D13 @100 mm
- PC 導入力: 降伏強度の 60 %
- 有効プレストレスト率: 85 %

(a) $d_p = 500$ mm の場合					
PC 鋼材			λ	鉄筋量	
q_{pr}	mm ²	%		cm ²	%
0.1	93	0.23	0.5	33	0.83
			0.9	3.7	0.09
0.3	280	0.70	0.5	97	2.4
			0.9	11	0.27

(b) $d_p = 800$ mm の場合					
PC 鋼材			λ	鉄筋量	
q_{pr}	mm ²	%		cm ²	%
0.1	93	0.23	0.5	20	0.50
			0.9	22	0.06
0.3	280	0.70	0.5	52	1.31
			0.9	5.8	0.15

の耐圧縮能力 (= 全断面圧縮時力) に対する比率であり、RC 柱の軸力比 (η) に相当する。したがって部材の変形能力をよく表し、この係数が大きいほど変形能力が小さくなる。また、(2) 式からもわかるように、普通鉄筋の複筋比が 1.0 で引張、圧縮普通鉄筋が等量の場合、 q_{pr} と PC 鋼材量は比例関係となる。PC 鋼材と普通鉄筋の勢力バランスを表す λ は、断面曲げ耐力 (モーメント) に対する両者の寄与率を基に計算される。 $\lambda = 0$ の場合完全な RC 部材、 $\lambda = 1.0$ の場合完全な PC 部材となる。したがって λ は“PC 的性質”をよく表し、残留変形量やエネルギー吸収能の指標値として適当といえる。表 - 1 にパラメータとその水準および共通諸元を示す。また同表には q_{pr} と λ の組合せに対する鋼材量の一覧も記す。

(3) 解析に用いた材料履歴モデル

解析に用いた各材料パネの履歴則は、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⁴⁾を、また、鉄筋の $S-S$ 関係は繰り返し応力を受ける場合の Bauschinger 効果を考慮したモデル⁵⁾を用いた。PC 鋼材については、文献⁶⁾を参考にトリリニアモデルとした。

(4) 検討した指標点

検討対象とした指標点は次のとおりである。(部材) 最大耐力時点。(主筋、PC 鋼材) 降伏時。(コンクリート) 断面圧縮縁がプレーンコンクリートの圧縮強度に達した時点、コア部コンクリートの圧縮縁がコンファインドコンクリートの圧縮強度時ひずみに達した時点、およびそのストレスブロック係数 (k_1, k_3) 最大時点。これらの指標点の発生時点でのヒンジ部の回転角が前述パラメータの違いによりどのように影響を受けるか検討した。

(5) 解析結果

[モーメント-回転角関係]

図 - 4 に解析結果 (モーメント (M) - 回転角 (R) 関係) の一例を示す。同図は $d_p = 800$ の断面について、 $q_{pr} = 0.3$ 、 $\lambda = 0.9$ の場合 (PC 鋼材量が多く、PC 的性質が強い場合) と $q_{pr} = 0.1$ 、 $\lambda = 0.5$ (PC 鋼材量が少なく、RC 的性質が強い場合) について示している。なお、 $q_{pr} = 0.3$ 、 $\lambda = 0.9$ の場合については、補強筋量を D13 @ 100 から D16 @ 75 と変更し、コアコンクリートがより強く拘束される場合についても検討を行っている。図 - 4 から次のようなことがわかる。

① $x = 350$ と $x = 700$ の $M-R$ 関係にはほとんど違いが

ない。

② $x = 2000$ では、 $x = 350$ と対比して $R = 1 / 200$ 程度から明確な違いが表れる。また、 $M-R$ 関係および各指標点の現れる位置について $F = 0.5$ (const) の値と比較的近似している。

③ コアコンクリートの補強程度を上昇した場合 (D16 @ 75)、PC 鋼材降伏時回転角に大きな違いはないものの、付着程度が小さい場合には最大耐力時回転角は大幅に大きくなる。

[各種指標点発生時回転角の比較]

上記のように得られる各指標点発生時の回転角を、すべての解析ケースについて示したものが図 - 5 である。同図は、各ライン上に記載している指標点の現れる回転角を、PC 鋼材-コンクリート間の付着程度が異なる 5 つのケース

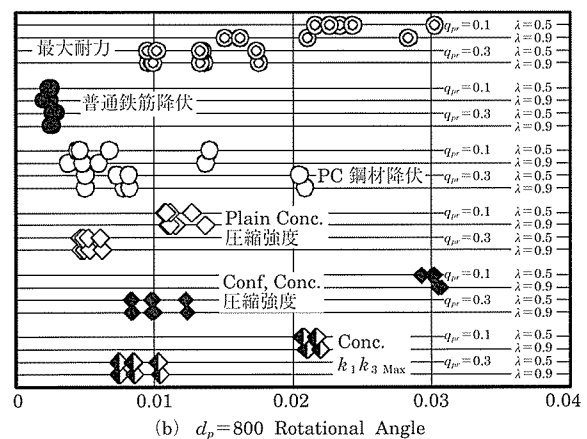
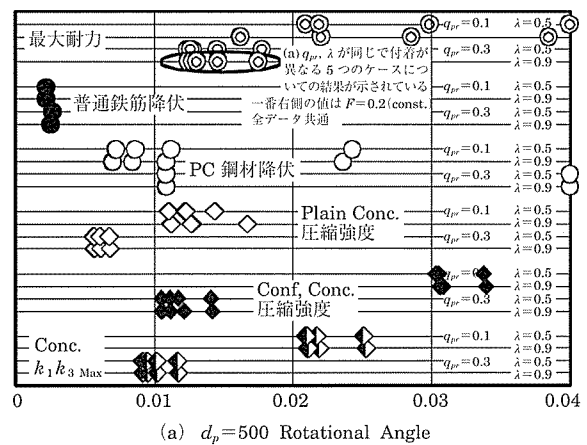


図 - 5 各種指標点の発生回転角の比較一覧

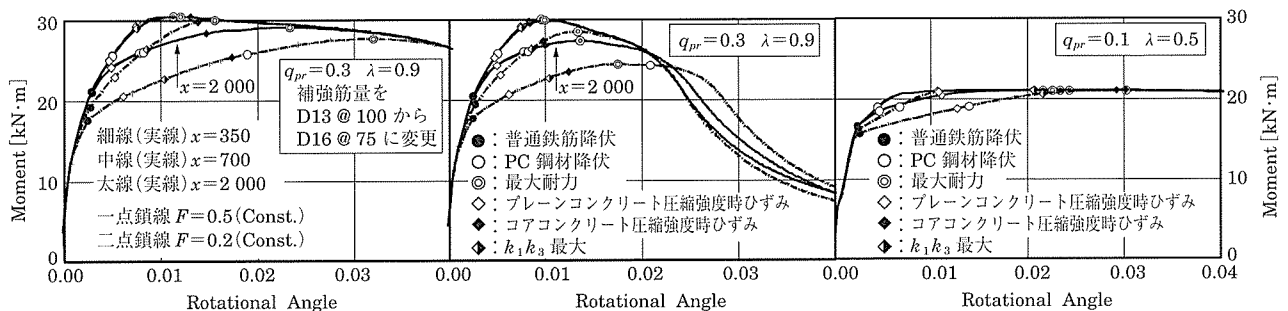


図 - 4 全付着が変わる場合の $M-R$ 関係解析例 (各指標点の位置関係の検討: $d_p = 800$)

を同一の線上に記載したものである（図中(a)参照）。また、同一線上のデータのうち一番大きな回転角のデータは $F = 0.2$ (const.)、2番目が $F = 0.5$ (const.) or $x = 2000$ のデータ、もっとも小さいデータは $x = 350, 700$ のデータである。

- ① PC 鋼材降伏時回転角は付着程度に強く影響を受けるが、 $F = 0.2$ (const.) の場合の値が他の場合に比べて突出して大きな値となっている。たとえば、異形鋼棒降伏時の値である $x = 350$ の時と比較して 3 ~ 4 倍程度大きい。これに対し、 $x = 2000$ 、 $F = 0.5$ (const.) の場合、 $x = 350$ の時と比較して 1.5 ~ 1.8 倍程度大きくなるものの、 $R = 1/100 \sim 1/60$ の範囲で鋼材降伏が発生している。このことから、鋼材降伏時回転角は付着がわずかに劣化する程度のケースでは付着劣化程度にあまり大きな影響をうけないが、 $x = 2000$ を越える、あるいは F が 0.5 以下の範囲では付着劣化の影響を非常に強く受けるようになり、その値が大きく変わることが予測される。
- ② 付着程度は PC 鋼材降伏時以外の指標点発生時の回転角の大きさについても影響を与えるがその影響は小さい。
- ③ 普通鉄筋降伏時回転角は q_{pr} 、 λ 、付着程度、PC 鋼材位置のいずれにもほとんど影響をうけない。
- ④ λ は最大耐力を含め各指標点発生時の回転角に影響を与えない。
- ⑤ コンクリート系の指標点は q_{pr} に大きく影響を受ける。これは RC 柱部材と軸力比 (η) の関係によく似ており、 q_{pr} が大きくなると各指標点発生時回転角は小さくなる。

2.4 解析その 2：残留変形量（率）の検討

(1) 検討対象

回転角 $R = 1/100, 1/50, 1/33, 1/25$ の各回転角を最大経験回転角とし、それぞれの回転角からその値を減少させ耐力（モーメント）が 0 となる位置での回転角（残留変形量）を調べた。なお、解析条件等については解析その 1 と同じである。

(2) 解析結果

[モーメント-回転角関係]

図 - 6 に解析結果（モーメント (M) - 回転角 (R) 関係) の一例を示す。同図は解析その 1 と同じく $d_p = 800$ の断面について、 $q_{pr} = 0.3$ 、 $\lambda = 0.9$ の場合（PC 鋼材量が多く、

PC 的性質が強い場合）と $q_{pr} = 0.1$ 、 $\lambda = 0.5$ （PC 鋼材量が少なく、RC 的性質が強い場合）についての解析例である。なお、 $q_{pr} = 0.3$ 、 $\lambda = 0.9$ の場合については、補強筋量を D13 @ 100 から D16 @ 75 と変更し、コアコンクリートがより強く拘束される場合についても検討を行っている（煩雑になるのを避けるため図 - 6 には $R = 1/25$ のケースについてのみ記載）。図 - 6 から次のようなことがわかる。前述の“(2) 解析対象断面とパラメータ”で示したとおり、履歴形状は λ の値により大きく異なる。すなわち $\lambda = 0.5$ の場合、RC 的性質が強いため PC 特有の原点指向的履歴はみれず付着程度の影響もほとんど現れていない。これに対し、 $\lambda = 0.9$ の PC 的性質が強い断面では、いずれの回転角であっても原点指向の強い履歴を示す。ただし、補強筋量の異なる 2 つの図の比較からわかるように、残留変形量の大小についてはコアコンクリートの補強程度が大きく影響し、その傾向は大きな変形領域でとくに顕著となる。すなわち補強筋量が多く圧縮側コンクリートが健全であれば、付着程度の差は残留変形量の差に明確に現れ、付着程度が小さいケース程残留変形量は小さくなる。解析その 1 で、各指標点発生時の回転角におよぼす付着程度の影響の結果と比較すると、同解析では $x = 350$ の場合と 700 の場合とではほとんど差が認められなかったのに対し、残留変形量については大きな違いがみられ、付着程度の大小は残留変形量により大きな影響を与えることがわかる。

[残留変形量（率）の比較]

図 - 7 にすべての解析ケースについて残留変形率（耐力 0 時の回転角 / 最大経験回転角）を示す。いずれのケースでも、付着程度が小さい程残留変形率は小さいが、 $\lambda = 0.5$ の RC 的性質が強い断面では、残留変形率は q_{pr} の値、付着の程度にほとんど影響を受けない。一方、 $\lambda = 0.9$ の PC 的性質が強い断面では、補強筋の程度の差により残留変形量は大きく異なる。これは最大回転角経験時の圧縮部コンクリートの損傷程度の違いにより発生する差違であり、コアコンクリートが十分拘束されている場合、付着程度の影響は顕著になる。逆に補強程度が小さく、かつ最大経験回転角が大きくなると付着程度の影響は小さくなる。 $q_{pr} = 0.3$ （D16 @ 75 補強）と $q_{pr} = 0.1$ の場合を比較すると、最大経験回転角の違い、付着程度の違いが残留変形率におよぼす影響は両者で似た傾向をもち、 $q_{pr} = 0.3$ の場合、全体的に小さい値を示す。 $x = 2000$ 時の値は、 $F = 0.2$ (const.) の値と同程度となっており、前掲の各指標点発生時の回転角

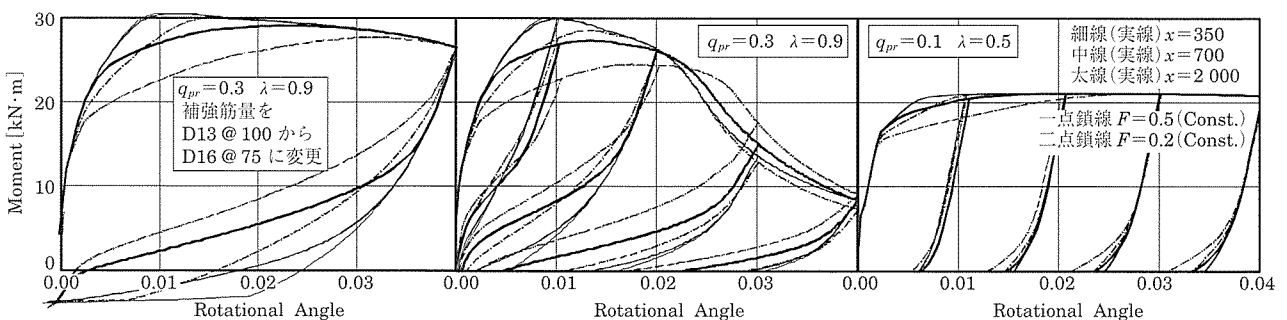


図 - 6 付着が変わる場合の $M - R$ 関係解析例（残留変形量の検討 $d_p = 800$ ）

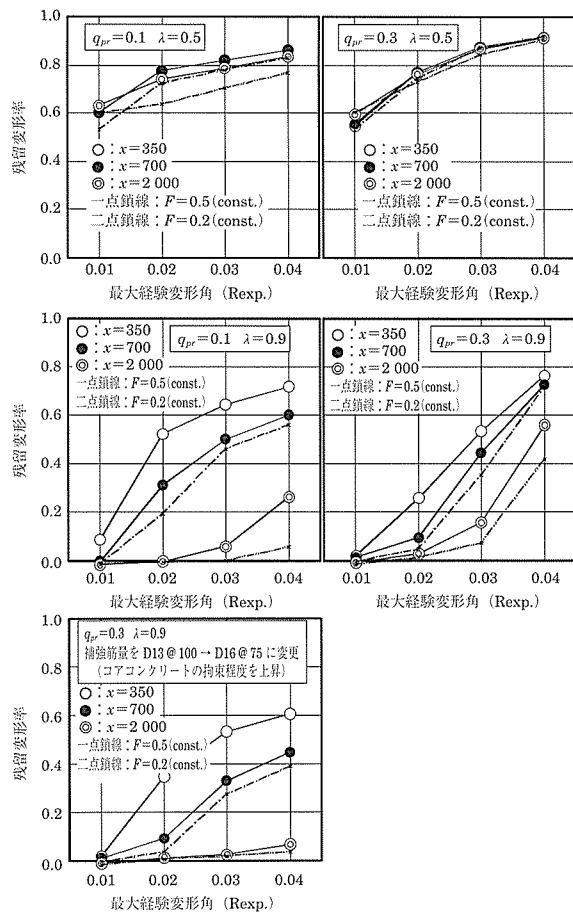


図-7 付着が変わる場合の残留変形率の比較

への影響では、 $x = 2000$ 時の値が $F = 0.5$ (const.) と同程度となっていることを考えると、付着程度の残留変形量への影響は各指標点発生時の回転角に及ぼす影響よりもかなり大きいといえる。

3. まとめ

断面解析+等価塑性ヒンジ法を用いて PC 部材の指標点発生時の回転角および残留変形量について検討した。同法は等価塑性ヒンジ長さや F 値の設定方法等、検討すべき課題も多いが、簡便で部材曲げ性能検討の有効な手法であると考えられる。

参考文献

- 鈴木計夫, 中塚信: 繰り返し載荷をうける高靱性 PC はりの曲げモーメント-曲率関係についての解析的研究, 日本建築学会近畿支部梗概集, pp.153 ~ 156, 1979.6
- 足立将人, 西山峰広: プレキャスト圧着接合柱の曲げ強度の評価, 日本建築学会大会梗概集, pp.895 ~ 896, 1996.6
- 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, 1981.3, pp.60 ~ 65
- 中塚信, 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, Vol.505
- 岡田潔, 六車照編: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.452 ~ 464, 1985
- 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, pp.58 ~ 81, 1997.9

[2005 年 5 月 30 日受付]



刊行物案内

プレストレストコンクリート技士試験 講習会資料

平成17年度 PC 技士試験講習会

資料のほか、過去3年間の試験問題、正解及び解説が掲載されています。

(平成17年6月)

頒布価格: 3500円 (送料を含む)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会