

論文 解析法の違いによるプレストレストコンクリート梁部材の残留率の比較

李 德基^{*1}・岸本 一蔵^{*2}・西山 峰広^{*3}・大野 義照^{*4}

要旨：断面解析法を用いて部材損傷評価を行う場合の算定精度を検討することを目的として、既往の実験を対象にその結果と、同解析法による算定結果との比較を行った。更に、分割要素法の結果との比較も行った。また、断面解析法および分割要素法によるパラメトリックスタディを行い、PC 鋼材量と普通鉄筋の量の違いが残留変形に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード：プレストレストコンクリート, ファイバー法, 分割要素法, 残留変形

1. はじめに

建築構造部材の耐震設計では、性能評価型設計法への移行に伴い“部材挙動”を“材料レベルでの損傷程度”と関連づけて把握する必要がでてきた。特に、PC部材ではPC鋼材が配置される複雑性(鋼材量, 鋼材種, 配置位置等, 多くのバリエーションがあり部材損傷の定義も複雑になる)から、RC部材に比べて部材損傷の定義を詳細に検討・定義しなければならない。部材損傷を解析的に検討する場合、部材危険断面を対象に断面解析を行うことが一般的である。同解析法の欠点は、(1)部材材軸方向の鋼材ひずみの分布状況を考慮することができない、(2)実際の部材変形は、同解析の基本理論である“断面で発生する曲率の材軸方向の積分”で生じているというよりも、“材軸方向に離散的に発生するひび割れにより強く依存する”ため、実現象と解析での変形の発生メカニズムが根本的に異なるという点にある。しかし、技術的な簡便さ、理論の理解のしやすさ、更には、適当な等価塑性ヒンジ長さをを用いて計算を行

うことにより、部材の曲げ変形挙動を“ある程度正確に”追跡できるといった多くのメリットを有することから、今後も設計に多用されると考えられる。

本論文は、部材損傷の検討手法として断面解析法を用いる場合の算定精度を検討することを目的とし、その第一段階として異形PC鋼棒を用いた部材を対象に、その残留変形に着目し、既往の実験結果との比較を行うと共に、技術的により高度な解析法である分割要素法の結果との比較を行う。

2. 解析条件等の概要

本論文で用いた2つの解析法、即ち断面解析法(ファイバー法)および、技術的により高度

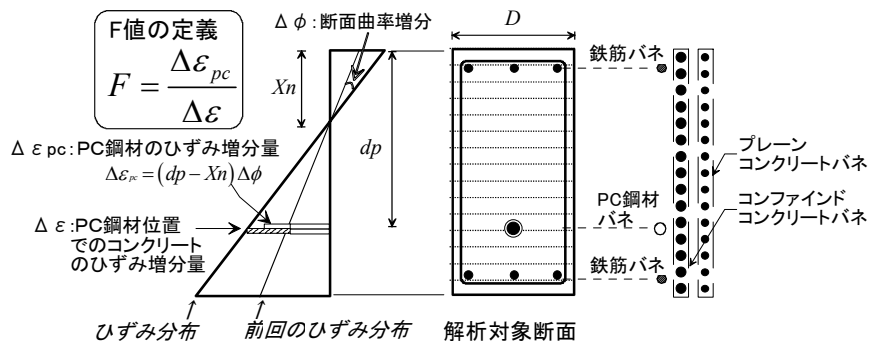


図-1 梁断面のモデル化例とひずみ適合係数(F値)の定義 (ファイバーモデル)

*1 大阪大学大学院	工学研究科建築工学専攻	博士課程	工修 (正会員)
*2 大阪大学大学院	工学研究科建築工学専攻	講師	工博 (正会員)
*3 京都大学大学院	工学研究科都市環境工学専攻	助教授	工博 (正会員)
*4 大阪大学大学院	工学研究科建築工学専攻	教授	工博 (正会員)

な部材解析法である分割要素法の条件等について概説する。

2.1 断面解析法(ファイバー法)

部材断面を断面せい方向に分割(分割数 100)し、分割されたそれぞれの要素に、コンクリートおよび鋼材(普通鉄筋, PC鋼材)の応力度-ひずみ度関係をモデル化したバネを考え、断面内の力の釣り合いと平面を保持しながら断面曲率(ϕ)を漸増させて計算する(図-1)。更に、この ϕ が部材の塑性ヒンジ領域(等価塑性ヒンジ領域長さ(l_{eq} : 1.0Dと 0.5D, Dは断面せい))に等しく分布すると仮定して、ヒンジ部に発生する回転角(R)を求める(式(1))。

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

式(1)からわかるように l_{eq} の大きさは直接回転角の大きさを左右する要素である。過去の研究では概ね 0.5D~1.0Dとするものが多く、本論文では上限と下限を押さえる目的で前述の値を採用した。

解析では、コンクリート及び普通鉄筋については平面保持が成り立つものとし、PC鋼材の付着劣化については、ひずみ適合係数(F値)を用いて計算した(図-2)。ひずみ適合係数値は、“PC鋼材が配置される位置のコンクリートひずみ”と“PC鋼材のひずみ”の差($\Delta \epsilon - \Delta \epsilon_{pc}$)が大きくなるに従い小さく(即ち滑りが大きく)なるように設定し、その関数を文献 1)で行われた実験結果をもとに定めた(図-2 および図-2 中の式参照)。

2.2 分割要素法

本解析法は Nishiyama et al. 2)により提案された手法を基礎としており、図-3 に示すように部材を部材せい方向及び材軸方向に

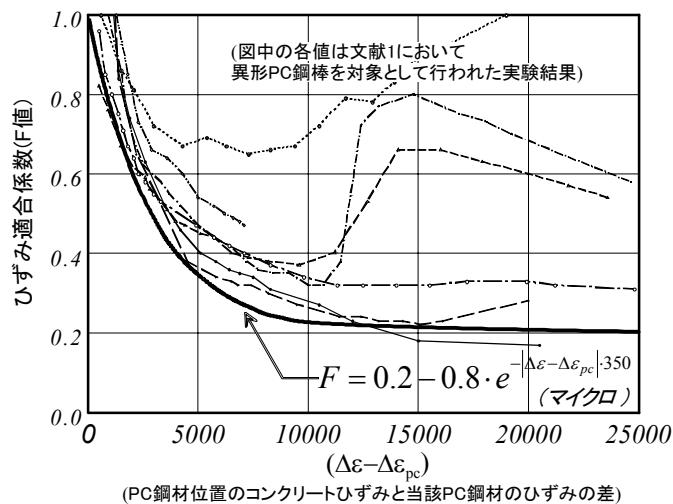


図-2 解析で用いたひずみ適合係数(F)

それぞれ分割して部材剛性マトリックスを誘導する方法である(詳細については文献 3 参照)。材軸方向に分割され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ており、PC鋼材-コンクリート間の付着-すべり関係には、森田・角モデル⁴⁾を用いている。断面せい方向の分割数は 100 とし、材軸方向の分割幅は 0.3Dとした。

2.3 材料履歴モデル

材料の履歴モデルは、断面解析法、分割要素法ともに同じものを用いている。コンクリートの応力-ひずみ(S-S)履歴は、その包絡線をNew RC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式に基づきバウジンガー効果を考慮した履歴モデル¹⁾を、PC鋼材は、Menegotto-Pinto式に基づく履歴モデル⁸⁾を用いた。

3. 既往の実験結果との比較

3.1 実験概要

図-4 に検討対象とした実験の概要⁷⁾を示す。対象とした試験体は 2 体であり、共に断面幅 200mm, せい 500mmの矩形断面を有する柱梁一体型PC梁試験体である。表-1 に材料特性を示す。PC鋼材は異形PC鋼棒を用いており、初期導入力は降伏強度(1100.0N/mm²)の 50%, また、終局プレストレス率 λ_t が 0.91 (普通鉄筋量が鉄筋比で 0.3%) と、PC的性質が極めて強い部材である。2 つの試験体はスパン長およびせん断補強筋量の

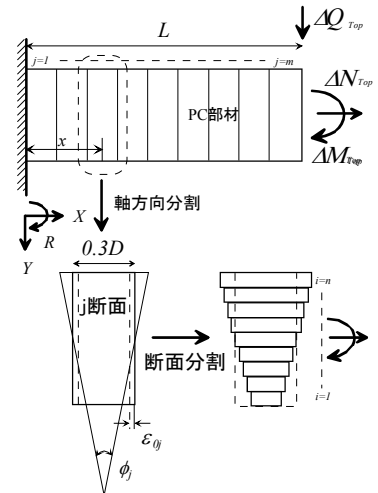


図-3 分割要素方法

みが異なる試験体であり，ここではスパン長の短い試験体(スパン長=3D)を試験体(A) [文献 7) での呼び名はCB3-12D3]，長い試験体(スパン長=5D)を試験体(B)[同CB5-06D3] と呼ぶ。

3.2 解析結果と実験結果の比較

(1) 荷重-変形角関係

図-5 に解析および実験での荷重-変形角(P-R)関係を示す。なお，断面解析法ではスパン長の差を解析に考慮することができない。即ち，同解析で得られる試験体(A),(B)のP-R関係は，断面解析法で得られる全く同じ値のモーメントをそれぞれのスパン長で割ったものになり，履歴形状に違いはない。従って試験体(B)のP-R関係は省略している。また，断面解析法では塑性ヒンジ長さ(l_{eq})を2種類(0.5D, 1.0D)設定しているため，それら両方の結果を示している。図-5を概括的にみると，断面解析法，分割要素法共にPC部材特有の原点指向性の強い履歴モデルをよく再現しており，極端に異なる結果を示すも

のではないことがわかる。そこで以下に変形レベル別に状況を検討する。

[R=1/200, R=1/100 時] : 実験結果では，R=1/200

表-1 材料特性

試験体名称	A (CB3-12D3)	B (CB5-06D3)
シアスパン比	3	5
PC鋼材	異形鋼棒 2-35Φ	
断面積	956.6[mm ²]	
0.2%オフセット降伏耐力	1100.0[kN]	
鋼材係数 q_{sp}	0.265	
プレストレスカ	585.3[kN]	
普通鉄筋	2-D16	
断面積	199.0[mm ²]	
降伏強度	377.5[N/mm ²]	
横補強筋	8.8Φ	6.2Φ
横補強筋比	1.2[%]	0.6[%]
降伏強度	359.2[N/mm ²]	418.1[N/mm ²]
コンクリート圧縮強度	41.6[N/mm ²]	41.5[N/mm ²]

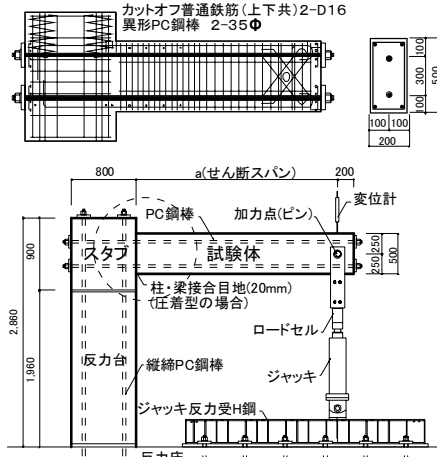


図-4 検討対象とした試験体概要⁷⁾

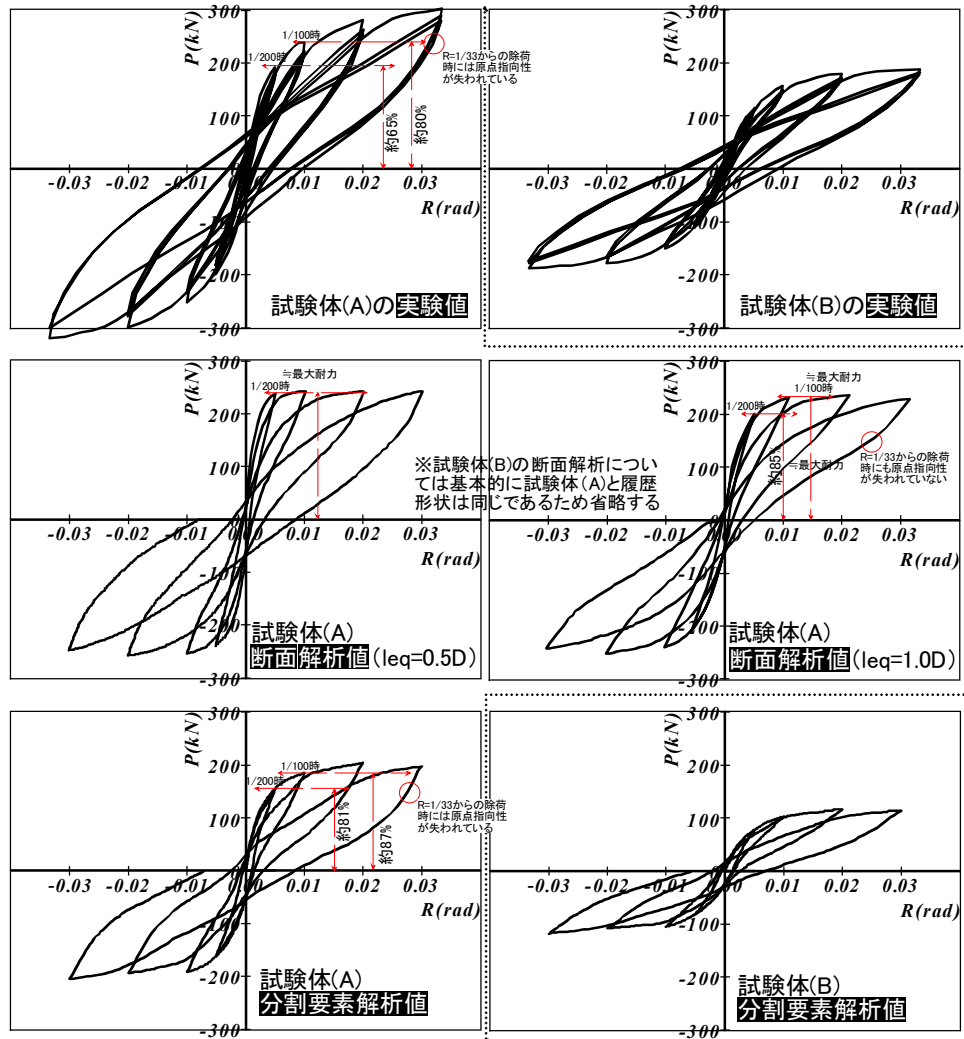


図-5 荷重-変形角(P-R)関係

時の耐力は最大耐力の 65%程度であるのに対し，

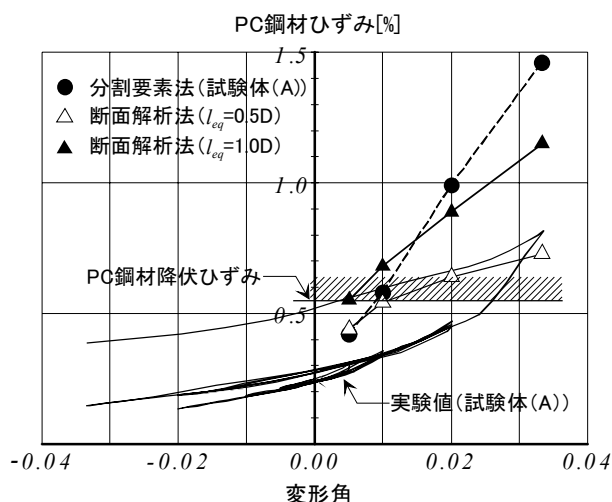


図-6 PC鋼材ひずみ一回転角関係の比較

断面解析法($l_{eq}=0.5D$)ではほぼ最大耐力に、断面解析法($l_{eq}=1.0D$)では約85%となっている。また、 $R=1/100$ 時では、実験結果で同約80%、断面解析法($l_{eq}=1.0D$)では最大耐力に達している。以上より、断面解析法では、 $R=1/100$ 程度以下の比較的小さい変形領域では、PC鋼材等の材料ひずみをかなり過大に算定する傾向にあることがわかる。一方、分割要素法での $R=1/200, 1/100$ 時の耐力比(最大耐力に対する比率)は、それぞれ約65%、85%と実験結果とよく一致している。

[$R=1/50, R=1/30$ 時]: $R=1/50$ を越える領域では材料の塑性化程度が大きくなり残留変形量が問題となることから、除荷時の原点指向性について検討する。断面解析法($l_{eq}=1.0D$)の場合、 $R=1/30$ からの除荷時の履歴形状が実験結果と異なっていることがわかる。詳述すると、実験結果では $R=1/50$ 以下の変形領域でみられた原点指向性の強い履歴が $R=1/30$ 時には失われているのに対し、 $l_{eq}=1.0D$ の履歴では $R=1/30$ 時にも原点指向性の強い履歴となっている。これに対し、 $l_{eq}=0.5D$ の結果では、実験結果と同様の原点指向性は弱くなっている。これは、“ l_{eq} の値が大きくなれば、同じ変形角になる曲率(ϕ)が小さくてよいため、材料(コンクリート、普通鉄筋、PC鋼材)の受けるひずみ度も小さくなる”ためである。一方、分割要素法での履歴は、スパン長の大小にかかわらず実験結果と同様に $R=1/50$ 以下では原点指向性の強い履歴になっているのに対し、 $R=1/30$ 時にはその傾向が弱まる現象が現れてい

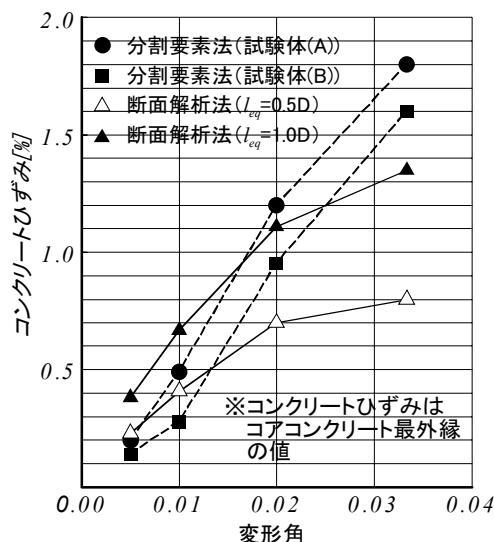


図-7 コンクリートひずみ一回転角関係の比較

る。また、スパン長が5D(試験体(B))の場合に対して3D(試験体(A))の場合、ややエネルギー吸収の良い(即ち面積の大きい)履歴となっており、この点についても実験結果をよくトレースしているといえる。

(2) 材料のひずみ度—部材変形角関係

ここでは、PC鋼材およびコンクリートに発生するひずみ度を部材角との関係で比較し、解析法の材料損傷評価の精度について検討する。図-6は、試験体(A)について実験と解析により得られるPC鋼材のひずみを変形角を横軸にとり示したものである。同図より、両解析によるPC鋼材ひずみは実験値を過大評価していることがわかる。ただし、変形増加に伴うひずみ増分の点からみると、断面解析法($l_{eq}=0.5D$)の傾きは実験値のものと同様である。分割要素法による値は、 $R=1/200$ 時点では最も実験値に近い値を示しているが、変形増加に伴う増分は最も大きく、 $R=1/30$ 時では実験値のおよそ2倍の値となっている。図-7は、図-6と同じく、コンクリート(コアコンクリートの最外縁部)のひずみ度を示したものである。実験値は不明(計測できない)のため比較はできないが、各解析値の傾向は、PC鋼材のひずみの場合と同様である。即ち、断面解析法では変形の小さい領域では相対的に大きなひずみとなるが、変形増加に伴う増分は分割要素法に比べて小さい。分割要素法では、スパン長3Dの場合値は、5Dの場合の値にくらべ全般に大きく、その差は変形角によらずほぼ一定である

ことがわかる。

(3) 残留変形率一部材角関係

図-8 は実験および解析による残留変形率(経験最大変形角に対する、荷重 0 時点の変形角の比率)を示す。同図より、全般に解析値は実験値より小さい値となっていることがわかる。詳細にみると断面解析法($l_{eq}=1.0D$)の値は、スパン長 $5D$ の実験値に比較的よく一致している。これに対し、断面解析法($l_{eq}=0.5D$)の値は大幅に実験値を過小評価しており、実験値の 5 割程度の値となっている。分割要素法による値は、概ね断面解析法による $l_{eq}=0.5D$ と $1.0D$ の間の値となっている。先に述べたように実験値との対応では断面解析法($l_{eq}=0.5D$)の場合が最も近い値となっているが、分割要素法でのシアスパン比の違いによる差は実験値でのシアスパン比の違いの差によく一致しており、適用性の高さをみることができる。

4. パラメトリックスタディ

本項では、断面解析法および分割要素法によるパラメトリックスタディを行い、PC 鋼材量と普通鉄筋の量の違いが残留変形に及ぼす影響に

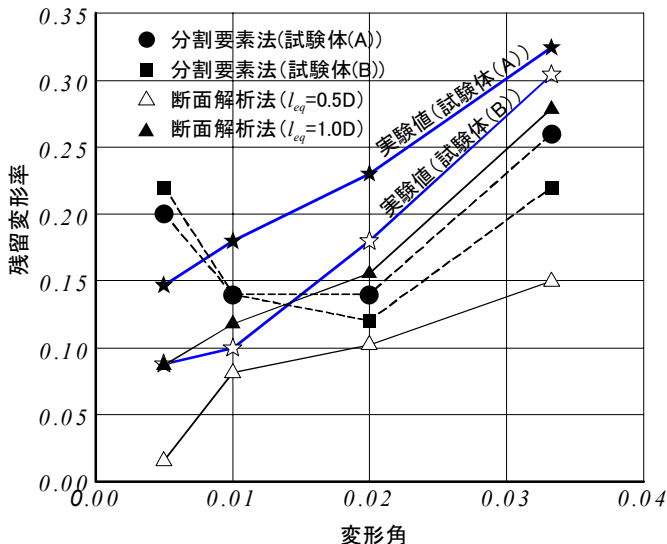


図-8 残留変形率一回転角関係の比較について検討する。

4.1 解析条件とパラメータ

解析対象とした部材は、3 節での試験体(A)を

基本とし、鋼材係数 q_{sp} (式(2)) [PC鋼材量そのものを表す、例えば $q_{sp}=0.3$ の場合のPC鋼材量は0.1の場合の3倍] と終局プレストレス率 λ_t (式(3)) [PC的性質の強さを表す 1.0 の場合純PC部材、0 の場合RC部材] の2つの指標としてPC鋼材量および普通鉄筋量を決定し、解析を行った。両指標の水準は $q_{sp}=0.15, 0.265$ (試験体(A)の基の値), 0.35 の3種類, $\lambda_t=0.5, 0.7, 0.91$ (試験体(A)の基の値) の3種類とし、それぞれを組み合わせた9 (3×3) 通りについて解析を行った。

$$q_{sp} = \frac{T_{py} + T_{ty} - C_{ty}}{b \cdot D \cdot F_c} = \frac{T_{py}}{b \cdot D \cdot F_c} \dots (2)$$

$$\lambda_t = \frac{T_{py}}{T_{py} + T_y} \dots (3)$$

ここで、
 T_{py} : 引張側PC鋼材降伏時応力,
 T_y : 引張鉄筋降伏時応力,
 C_{ty} : 圧縮鉄筋降伏時応力, b : 梁幅, D : 梁せい,
 F_c : プレールコンクリートの圧縮強度

4.2 解析結果

図-9 に計算結果を示す。PC的性質が非常に強い λ_t が 0.91 の場合、断面解析法、分割要素法のいずれも、 q_{sp} の違いによる残留変形率の差はみられず、解析法の違いによる有意な差もみられない。また、変形角が $1/30$ 付近の大きな変形領域を除くと殆どのケースで残留変形率は 0.2 以下と非常に小さい。 λ_t が 0.7 の場合、断面解析法では q_{sp} が大きくなるに従い残留変形率が小さくなる傾向があるのに対し、分割要素法では殆ど影響がない。 $q_{sp}=0.265, 0.35$ では両者の値は近似しているものの、 $q_{sp}=0.15$ の場合、断面解析法の値は分割要素法の値を大幅に上回る。RC的性質が強い λ_t が 0.5 の場合、 $q_{sp}=0.265, 0.35$ では分割要素法の値と断面解析法($l_{eq}=1.0D$)の値は近似しているが、 $l_{eq}=0.5D$ の場合、これらの値を大きく上回る。ただし変形角が大きくなるに従いその差は小さくなり、 $R=1/50$ 時ではおよそ 15%~20%、 $R=1/30$ では 10%以下となっている。

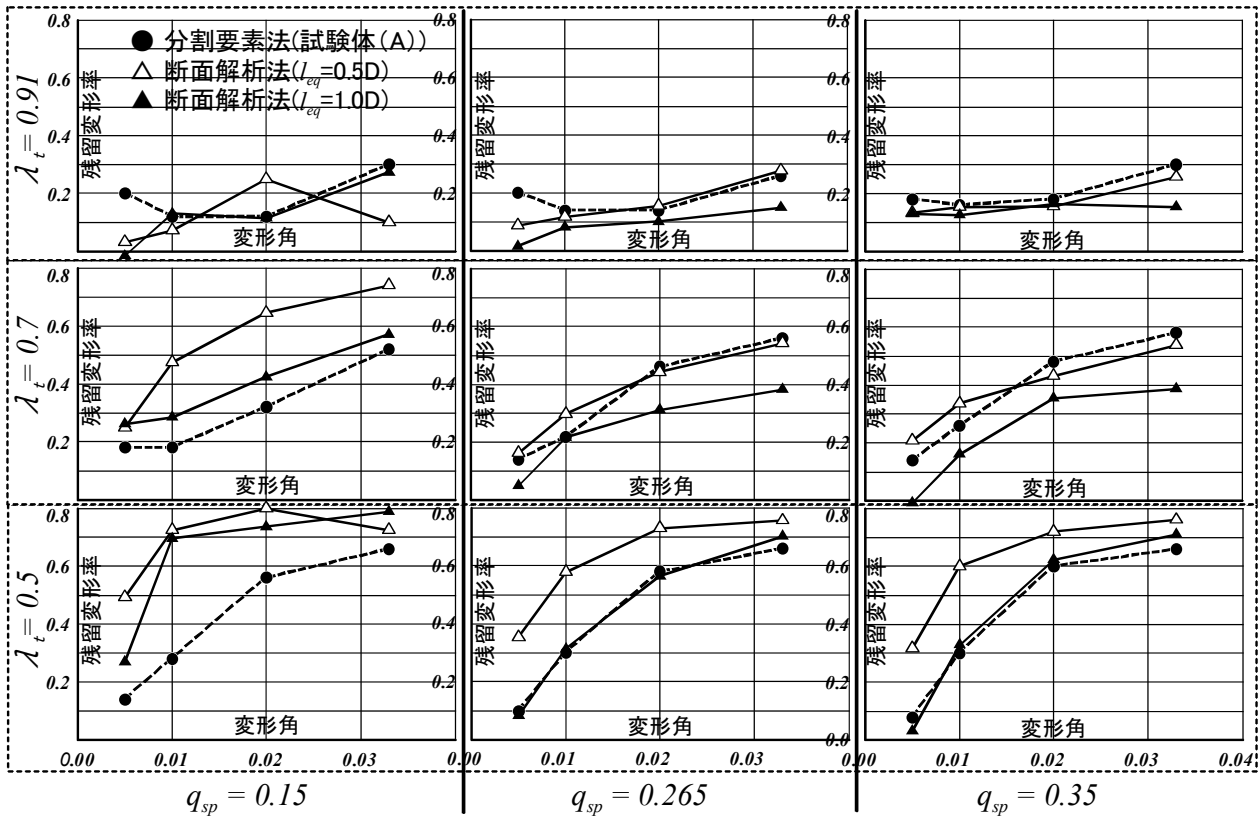


図-9 q_{sp} 、 λ_t をパラメータとした解析による残留変形率一回転角関係の比較

5. まとめ

部材損傷の検討手法として断面解析法を用いる場合の算定精度を検討することを目的として、同解析法による算定結果と既往の実験結果との比較を行った。また、分割要素法の結果との比較も行った。極めて限られた条件での検討であるため一般的な結果とは言えないが、等価塑性ヒンジ長さを断面せいの0.5~1.0程度に設定することにより、材料ひずみや残留変形をある程度推定できる可能性を示した。今後より広範囲のデータについて検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) Nishiyama et al. "Hysteretic Restoring Force Characteristics of Unbonded Prestressed Concrete Structure Under Earthquake Loads", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering Vol.22, No.2, pp.112-121, June 1989.
- 3) 前田博司，岸本一蔵，西山峰広：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集，Vol.26, No.2, pp.709-714, 2004
- 4) 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，1975.3

- 5) 崎野健治：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, 1994.7
- 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) 中塚侑，阿波野昌幸：接合形式(圧着型・一体型)とPC鋼材種(丸型・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，コンクリート工学論文集，第11巻第3号，2000.9
- 8) 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, 1997.9

[謝辞]

本論文に用いた実験結果⁷⁾は、大阪大学大学院助教授 中塚侑先生が行われたもので、貴重なデータを提供して頂きました。ここに感謝の意を表します。