

(32) 等価塑性ヒンジ長さと断面曲げ解析によるPC梁の荷重-変形関係の推定

(株)ピー・エス 大阪支店 建築部 正会員 ○石井 孝幸
 大阪大学 大学院工学研究科建築工学専攻 正会員 中塚 信
 (株)日建設 大阪本社 構造設計室 阿波野昌幸
 戸田建設(株) 東京支店 建築部 上東 弘英

1. まえがき

PC梁の曲げ耐力は比較的良好な精度で推定できることが示されている¹⁾。それに対し、たとえば最大耐力時変形や終局限界変形、さらには、ある圧縮縁ひずみ度の時の曲率やたわみ変形を精度良く推定できる解析方法はまだ十分に確立されていない。その理由として、塑性ヒンジ領域における変形集中性状、曲げ圧縮部コンクリートの応力-ひずみ特性、PC鋼材の付着特性などに関する知見が不十分であることが考えられる。

本報告は、筆者等の実験研究の結果²⁾³⁾を用いて、断面曲げ解析という局部的概念に適用できる等価塑性ヒンジ長さを提示し、その等価塑性ヒンジ長さ、PC鋼材の付着特性に関するひずみ適合係数(F値)、圧縮部コンクリートの応力-ひずみ特性などを考慮した曲げ解析が、荷重-変形関係、とくに変形状態の実験結果をどの程度推定できるかについて考察したものである。

2. 解析のための基礎データ

2.1. データの整理方針

本報告における等価塑性ヒンジ長さおよび断面曲げ解析に関する考察では、鋼材のスタブからの抜け出しによる付加変形を含まない実験結果および解析結果を対象とする。

既往の研究²⁾³⁾では、図1に示すような梁端部の塑性ヒンジ領域(第1(①)~第4(④)区間)における回転角を測定したが、その全領域での回転変形(θ_{total})と、スタブ内

のPC鋼材に貼付したゲージの測定ひずみから算出した抜けだしによる回転変形(θ_{slip})の測定例を図2に例示する。(圧着・一体)型ならびに(丸・異形)鋼棒いずれの試験体の場合でも θ_{slip} と θ_{total} はほぼ直線的な関係を示している。それ故、以下に示す各試験体の荷重-変形関係の検討では、付加回転変形 θ_{slip} は θ_{total} の κ_s 倍と仮定して全変形から控除した。

図3は塑性ヒンジ領域における回転変形の集中性状の測定結果例である。同図の上段は各区間における回転変形量の絶対値(第1

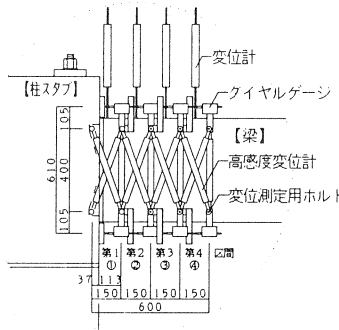


図1 回転角測定方法

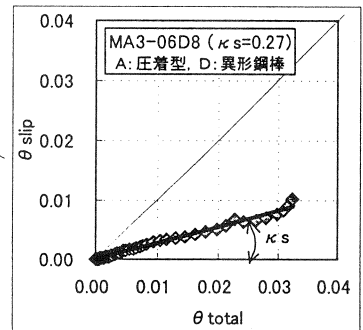


図2 θ_{total} - θ_{slip} 関係

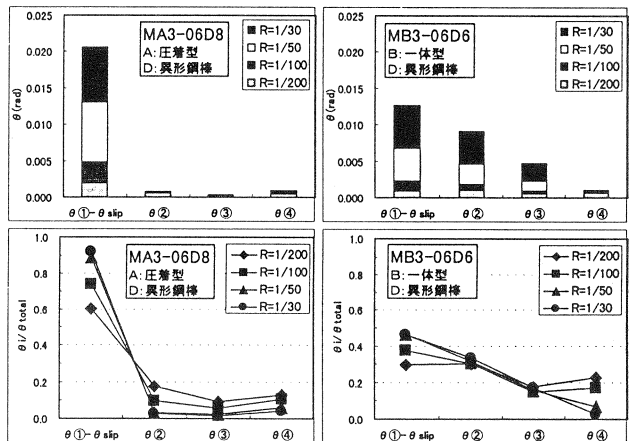


図3 回転変形の集中性状

区間では $\theta \textcircled{1} - \theta \text{slip}$) を、下段は $(\theta \text{total} - \theta \text{slip})$ に対する比率を示す。圧着型試験体においては、(丸・異形)鋼棒のいずれの場合でも回転変形は梁端部に局部的に集中して生じているが、一体型では異形鉄筋によるせん断ひび割れの発生やひび割れ分散作用などにより回転変形は塑性ヒンジ領域内に分散して生じている。

2.2. 等価塑性ヒンジ長さ

本報告では、断面という局所の曲げ解析から得られる曲率を等価塑性ヒンジ長さ(1eq)に乗じて回転変形やたわみを推定しようとするため、1eqの算定は、柱面に最も近い約D/4区間(①区間、D₂PC梁のせい)という極力短い区間で測定された回転変形(鋼材の抜け出しによる回転変形は除いている)から求めた平均曲率に基づくこととし、推定目的値がたわみ変形およびヒンジ領域での回転変形の場合についてそれぞれ1eqを求めた(表1の式(1)および(2)参照)。なお、解析と合わせて用いる1eqは推定目的値をたわみ(δ)としたときの式(1)によるものとする。図4に梁部材角(R)の増加に伴う(1eq/D)の変化状況を例示するが、1eq/DはRの増大に対して減少し一定の値に収束する傾向が見られる。表1は、1eq値がほぼ収束する大きいR領域、すなわちPC梁の部材角(R)が0.03ラジアンにおける等価塑性ヒンジ長さ比(1eq/D)の結果を示したものである。なお、0.03ラジアンまで測定できていない場合は最終測定点での値を示す。同表によれば、たわみ変形による1eq比(1式)の方が塑性ヒンジでの回転変形による1eq比(2式)より少し大きい値となるが大差はない。

圧着型の場合、1eq比におよぼすPC鋼棒の種類、およびシラスパン比の明確な影響は見られず、圧着型試験体の1eq/D(1式、2式とも)は平均で約0.3である。一体型のそれは、(1式)で0.64、(2式)で0.55であった。なお、同表中にはCorleyと同様にD/2区間(①および②区間)の平均曲率に基づいた1eq/D(4式)も示しているが、圧着型では平均で0.55、一体型では平均で0.71で、Corleyの算定式⁴⁾(式(5))による値と同程度か若干大きい値であった。

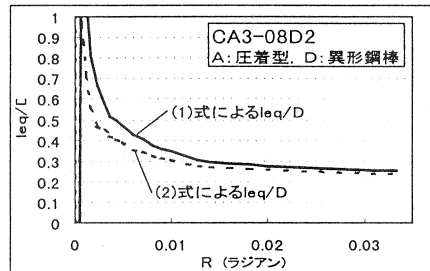


図4 1eq/D-R関係

表1 等価塑性ヒンジ長さ

接合形式 PC鋼材種 せん断スパン比 試験体名	圧着型:A															平均	
	丸鋼:R						異形:D										
	a/D=2		a/D=3		a/D=5		a/D=3										a/D=5
(1)式による1eq/D	0.28	0.26	0.29	0.35	0.29	0.27	0.30	0.39	0.34	0.25	0.37	0.26	0.35	0.28	0.33	0.28	0.31
(2)式による1eq/D	0.25	0.25	0.24	0.22	0.27	0.25	0.25	0.34	0.31	0.24	0.32	0.25	0.32	0.25	0.31	0.27	0.27
(3)式による1eq/D	0.24	0.24	0.23	0.22	0.23	0.24	0.23	0.26	0.26	0.23	0.24	0.22	0.25	0.23	0.23	0.25	0.24
(4)式による1eq/D	0.54	0.50	0.52	0.77	0.52	0.51	0.62	0.55	0.58	0.53	0.59	0.52	0.52	0.56	0.52	0.50	0.55
(5)式による1eq/D (d=dpの場合)	0.50	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.65	-
接合形式 PC鋼材種 せん断スパン比 試験体名	一体型:B																
	丸鋼:R						異形:D										
	a/D=2		a/D=3		a/D=4		a/D=5			a/D=3			a/D=5			平均	
(1)式による1eq/D	0.64	-	0.72	0.61	-	-	0.77	-	0.54	0.73	0.53	0.59	0.64	-	-		-
(2)式による1eq/D	0.53	-	0.63	0.52	-	-	0.65	-	0.48	0.61	0.47	0.52	0.55	-	-	-	-
(3)式による1eq/D	0.51	-	0.62	0.53	-	-	0.62	-	0.46	0.57	0.44	0.48	0.53	-	-	-	-
(4)式による1eq/D	0.62	0.89	0.60	0.73	0.52	0.88	0.66	0.86	0.63	0.75	0.65	0.67	0.71	-	-	-	-
(5)式による 1eq/D	0.50	0.55	0.55	0.55	0.60	0.65	0.65	0.65	0.55	0.55	0.65	0.65	-	-	-	-	-

★1eq算定式

1eq = $L \cdot \sqrt{[L^2 - 2l_0(\delta \text{total} - \delta \text{slip})] / (\theta \textcircled{1} - \theta \text{slip})}$ (1)式 弾性変形を含んだ載荷点たわみと塑性ヒンジ内①区間による1eq

1eq = $(\theta \text{total} - \theta \text{slip}) / (\theta \textcircled{1} - \theta \text{slip}) \cdot [l_0]$ (2)式 弾性変形を含んだ塑性ヒンジ内の全回転量と①区間による1eq

1eq = $(\theta \text{total} - \theta \text{slip} - \theta \text{elastic}) / (\theta \textcircled{1} - \theta \text{slip} - \theta \text{elastic} \textcircled{1}) \cdot [l_0]$ (3)式 弾性変形を除いた塑性ヒンジ内の全回転量と①区間による1eq

1eq = $[(\delta \text{total} - \delta \text{slip} - \delta \text{elastic}) / L] / [(\theta \textcircled{1} + \theta \text{slip} - \theta \text{elastic} \textcircled{1} + \textcircled{2})] \cdot [l_0 + l_2]$ (4)式 Corleyの方法による1eq

1eq = $[1 + (0.638 / \sqrt{d})(a/d)] \cdot [d/2]$ (5)式 Corleyの推定式による1eq

★ θslip 算定式

$\theta \text{slip} = \Delta \cdot \text{lt} \cdot \text{st} / (dp - X_n)$ (6)式

$\Delta \text{lt} \cdot \text{st}$: スタブ内からのPC鋼材抜け出し量

2. 3. 圧縮部コンクリートの応力-ひずみ特性

圧縮部コンクリートの応力-ひずみ特性表示式としては、ストレスブロック係数を圧縮縁ひずみの関数として表示できて取り扱いが簡便な、応力上昇域をn次曲線で、応力下降域を直線で表す表示式を採用する。図5は、既往の梁試験体^{2),3)}の圧縮部を模した、断面が170×170mmで高さが350mmの角柱試験体の圧縮試験から得た応力-ひずみ特性の例で、同図中には前述の表示方法による近似曲線も示している。

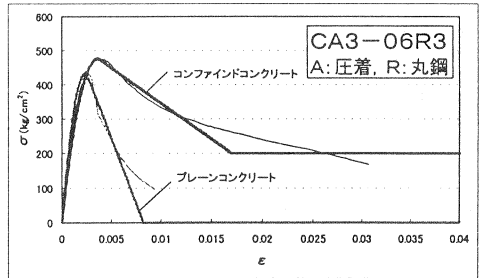


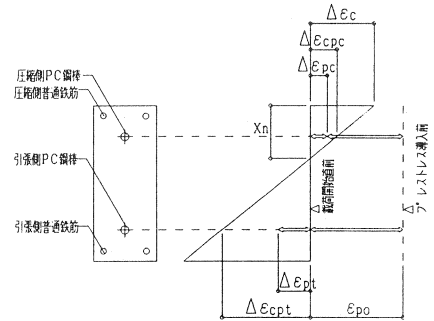
図5 圧縮部コンクリートの応力-ひずみ特性例

2. 4. PC鋼材および普通鉄筋の応力-ひずみ特性

PC鋼材および普通鉄筋の応力-ひずみ特性は、引張試験結果に基づいて、それぞれトリニア型およびバイリニア型で表した。

2. 5. PC鋼材のひずみ適合係数(F値)

PC鋼材とグラウトとの付着が良好でない場合、両者間に生ずるすべり変位のために、PC鋼材ひずみは、梁の曲げ変形によって生じるPC鋼材位置のコンクリートひずみに対して小さい値となる。本研究では、図6に示すようにPC鋼材位置のコンクリートひずみ変化量に対する鋼材ひずみ変化量の比(F値)を用いて付着特性を考慮することにした。図7は、柱面に隣接する第1(①)区間でのPC鋼材位置ひずみ(柱スタブからの抜け出しによるひずみは控除)に対する①区間での箱ひずみゲージによる測定ひずみの比(F値)を示したものである。図7(a), (b)は、コンクリートひずみの変化量(Δεc)を横軸にとって、引張側および圧縮側PC鋼材のF値を示したものである。F-Δεc関係は各試験体によって大きく異なるが、F値はΔεcの増大に対し収束する傾向が見られる。



$$F = \frac{\Delta \epsilon_{pc}}{\Delta \epsilon_{cpc}} \quad \text{引張} F = \frac{\Delta \epsilon_{pt}}{\Delta \epsilon_{cpt}}$$

Δεcpt, Δεcpc: コンクリート断面の平面保持仮定下におけるPC鋼材位置ひずみ変化量
 Δεpt, Δεpc: PC鋼材位置ひずみの実際の変化量

図6 ひずみ適合係数(F値)の説明

2. 6. 圧縮普通鉄筋の寄与

圧着型試験体では、写真1に示すように普通鉄筋は梁端部で切断されているため、梁の曲げ耐力・変形には関係ないと考えられる。しかし、本研究での圧着型試験体で測定された圧縮鉄筋の荷重開始からのひずみ増分の結果を例示した図8によれば、梁の部材角が大略1/50を超える段階では柱スタブ面に近い部分において圧縮鉄筋は降伏ひずみより大きなひずみを示している。他の圧着型試験体においてもR=1/50程度での圧縮鉄筋降伏が見られたので、後述の解析では圧縮鉄筋の

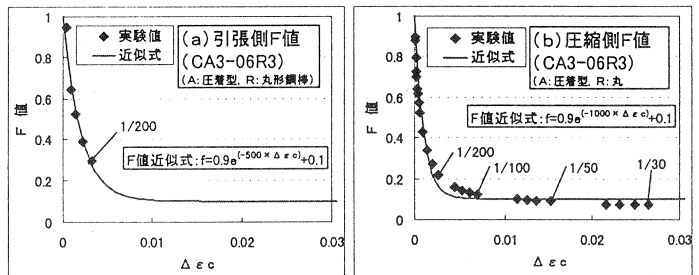


図7 PC鋼材のひずみ適合係数(F値)

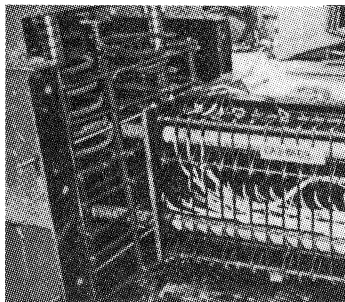


写真1 圧着型試験体配筋状況

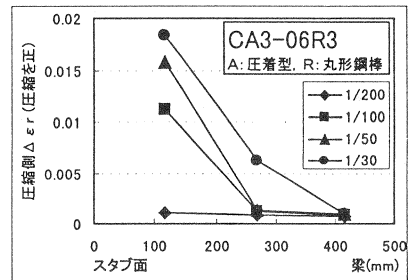


図8 圧縮鉄筋のひずみ増分例

ひずみ適合係数(F値)を0.2として、大変形領域に至るまでの圧縮鉄筋効果を考慮した。なお、一体型の場合は完全付着を仮定した。

3. 解析断面および解析方法

対象とした解析断面は図9に示すように、既往の研究^{2),3)}での試験体断面とした。解析は、上記の材料特性、コンクリートの引張応力を無視する仮定のもとに、いわゆる切断法(ファイバーモデル法)で、コンクリート断面の分割数を100として行った。また、図10には、解析結果(M-φ関係)に実験結果から求めた1eqを乗じて推定P-δ関係を導くフロー図を示す。

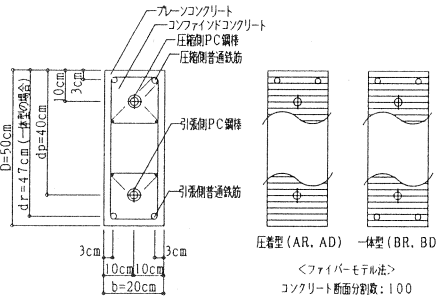


図9 解析断面

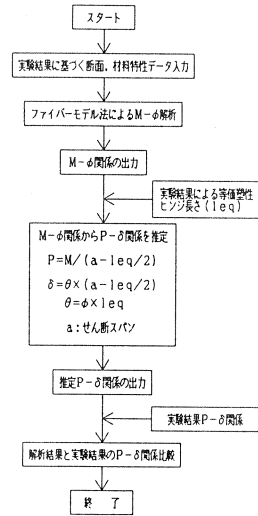


図10 P-δ関係の推定方法

4. 実験結果と解析結果の比較および考察

4.1. 実験結果と解析結果の比較

実験結果と解析結果を比較した2例を図11に示す。上段は、丸形鋼棒で圧着した試験体(CA3-06R3)、下段は、異形鋼棒で圧着した試験体(CA3-08D2)である。同図中の■◆▲●は、実験時の部材角(R)がそれぞれ1/200、1/100、1/50、1/30の時を表し、□◇△○は、単調断面解析での圧縮縁ひずみ度(εc)が、■◆▲●時でのそれと等しい時点を示す。またPC鋼棒降伏時を*で示した。なお、解析に必要な基礎データとしては、各試験体における値を用い、以下の荷重-変形(P-δ)関係における、実験結果のたわみは、柱スタブからのPC鋼材の抜け出しに起因するたわみを除いたものである。

同図によれば、いずれの試験体の場合でも推定P-δ関係は、δが小さい領域(5mm以下程度)では1eqを一定としているため実験結果の変形を過小評価している。しかし、1eqがほぼ収束値に近くなるδ=15mm(R=1/100に対応)以上の領域では、同じ圧縮縁ひずみ(εc)におけるたわみ変形(δ)を良好に推定している。また、CA3-06R3の場合では若干精度が落ちるものの、いずれの試験体でも推定の中立軸深さ(Xn)も良く算定出来ているので、断面のひずみ状態も良好に推定していることが分かる。

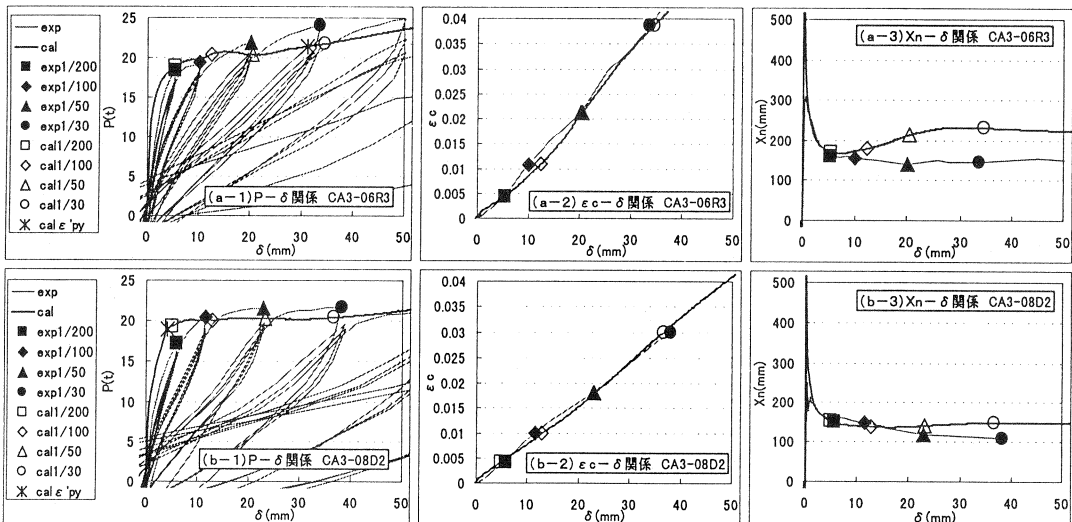
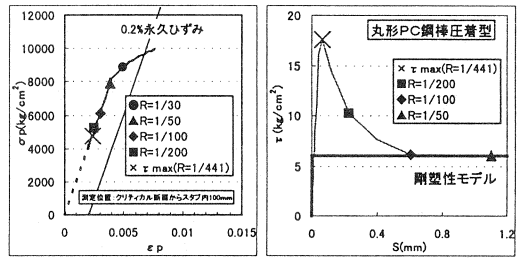


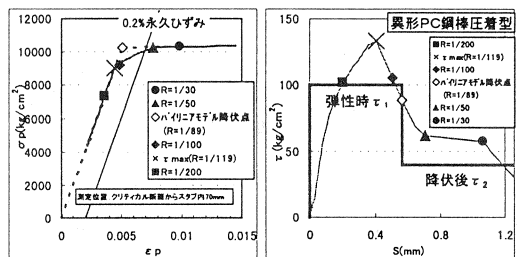
図11 実験結果と解析結果の比較例

4. 2. PC鋼材の抜け出しによる付加変形を考慮した解析結果と実験結果の比較

本項では、4.1 で述べた塑性ヒンジ領域のP-δ 関係推定方法とスタブからのPC 鋼材抜けだしによる付加変形とから梁全体のP-δ 関係を推定する方法について検討する。ここで付加回転変形の算出は、断面曲げ解析で得られた中立軸位置と、PC 鋼材張力および、柱スタブ内の鋼材に対する剛塑性型の仮定τ-S 関係(図12(b), 13(b)中の太線参照)に基づいた。なお、仮定τ-Sモデルは、単調載荷実験で得られた柱スタブ内PC 鋼材について得られた測定τ-S 関係(図12(b), 13(b)中の細線)をモデル化したものである。すなわち、梁のクリティカル断面から100mm および200mm 位置で測定したPC 鋼材の測定ひずみと図12(a) および13(a)に示す各PC 鋼材の応力-ひずみ関係とから求めた両位置における張力の差から算出されるτとPC 鋼材の定着端部から上記の200mm 位置までの測定ひずみの積分値である累積すべり(S)との関係をモデル化したものである。図12(b)に示す丸形PC 鋼棒のτ-S 関係では、τmax(×印)が梁の部材角Rで1/441と極めて小さい変形時に生じる。それ以降はSの増加に対しτは漸減し、本解析の対象である最大耐力時や終局限界時などと関係するR=1/50(▲印、Sで0.6mm程度)を越えるとほぼ収束する傾向が見られた。それ故、図12(b)中に示すように大すべり(S)領域でのτ値による剛塑性モデルを仮定した。一方、異形PC 鋼棒のτ-Sモデルでは、付着応力度は鋼材降伏後に急減するという知見⁹⁾に従って次のように仮定した。すなわち、図13(b)の太線で示すように、鋼材降伏時(◇印)までの測定τ-S 関係を面積的にほぼ等しくするτ₁が100kg/cm²の剛塑性モデルおよび鋼材降伏後はτ₂が40kg/cm²とするモデルを仮定した。



(a) $\sigma_p - \epsilon_p$ 関係 (b) $\tau - S$ 関係
図12 丸形PC 鋼棒の仮定モデル



(a) $\sigma_p - \epsilon_p$ 関係 (b) $\tau - S$ 関係
図13 異形PC 鋼棒の仮定モデル

図14は、丸形PC 鋼棒圧着型試験体(CA3-06R3)の実験結果と解析結果を比較したものであるが、柱スタブからの抜け出し変形も含む荷重-変形関係がほぼ良好に推定されている。これに対し、図15は異形PC 鋼棒圧着型試験体(CA3-08D2)の結果であるが、大変形領域において解析は、変形を過大評価する。それ故、τ-Sモデルにおける鋼材弾性域でのτ₁およびτ₂をそれぞれ2倍にした解析を行った。結果を図16、17に示すが、すべり(S)が大きい領域でのτ₂を増大させた場合の方が、解析結果と実験結果の適合性は高かった。

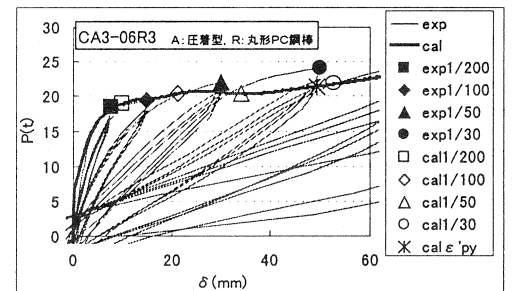


図14 丸形PC 鋼棒圧着型の比較

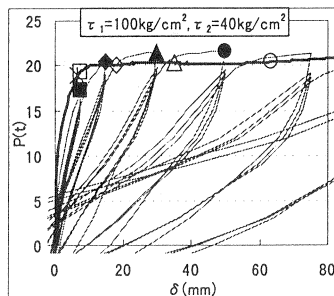


図15 異形PC 鋼棒圧着型の比較

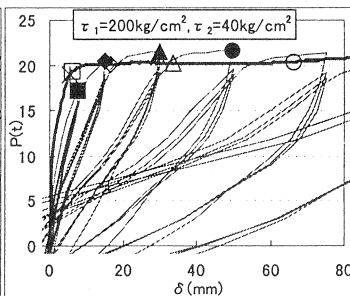


図16 τ₁を2倍にした場合

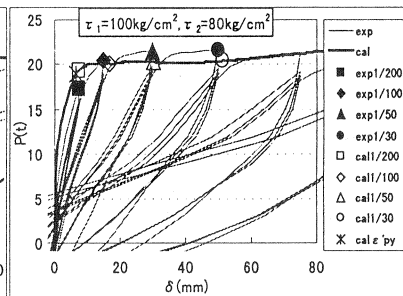


図17 τ₂を2倍にした場合

4.3. 各種要因(基礎データ)の荷重-変形関係におよぼす影響

図18~20は試験体 CA3-06R3 を例にとって、引張および圧縮 PC 鋼材の F 値(付着特性)、ならびにカットオフ筋の圧縮力分担、コンクリートの応力-ひずみ特性などが P- δ 関係におよぼす影響を調べた例である。図18は引張 PC 鋼材の F 値を 1.0、実験近似値および 0.1 としたときの P- δ 関係の比較図である。同図より、付着特性が悪くなると最大耐力は小さくなるが、PC 鋼材降伏時変形および同一 ϵ_c 時の変形は大きくなる傾向が見られる。

図19では、圧縮側 PC 鋼材の付着特性が P- δ 関係におよぼす影響を調べた。F が 1.0 と付着特性が良好な場合は、最大耐力は大きく、また変形の増加に伴うその低下も見られない。この理由として、付着特性が良好な場合断面変形の進行に伴って生ずる、圧縮側 PC 鋼材ひずみの戻りによるプレストレス力の減退、および圧縮鉄筋としての作用などが考えられる。逆に圧縮 PC 鋼材 F 値を実験近似値および 0.1 としたときは、鋼材ひずみが戻りにくいことプレストレス力の減退が小さくなるのでコンクリートへ大きな残存プレストレス力が作用し、それによって耐力低下が生じると考えられる。

図20には、カットオフ筋の圧縮力分担を(a)考慮する場合、(b)考慮しない場合、および(c)カットオフ筋の圧縮力分担とコンクリート応力-ひずみ特性の大変形域における応力一定域の両者を考慮しないという3種の場合での P- δ 関係を示す。同図によればカットオフ筋を考慮しない場合、その圧縮力分担に相当する曲げ耐力が小となっていることが分かる。また、コンクリート応力-ひずみ特性の大変形域における応力一定域を考慮しない(c)の場合、実験値 ϵ_c で $R=1/50$ と同等の損傷をコンクリートが受けると急激に耐力低下し再び上昇するという性状を示した。実際の試験体ではこの現象が見られなかったことから、コンクリート応力-ひずみ特性は実験結果を忠実にフォローする必要があると考えられる。

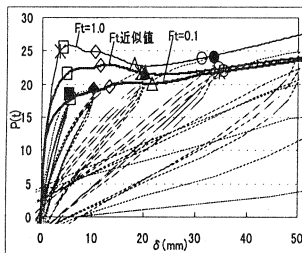


図18 引張側 F 値の影響

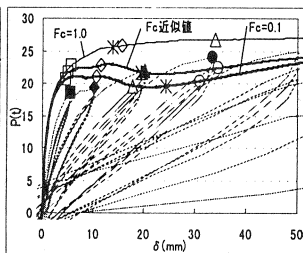


図19 圧縮側 F 値の影響

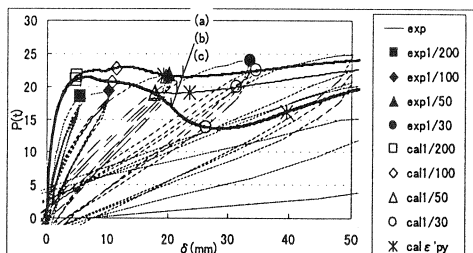


図20 圧縮鉄筋とコンクリートの影響

5. まとめ

実験結果を適切に評価した等価塑性ヒンジ長さ、圧縮部コンファインドコンクリートの応力-ひずみ特性、引張および圧縮 PC 鋼材の F 値ならびにカットオフ鉄筋の分担圧縮力さらには柱スタブ内での鋼材の付着応力度-すべり関係を用いれば、曲げ解析という方法によって、PC 梁の荷重-変形関係を、断面のひずみ分布に關係する圧縮縁コンクリートひずみおよび中立軸深さなども含めて良好に推定できることを示した。

[謝辞] 本研究の一部は、(社)建築研究振興協会に設けられた共同研究「PC 構造設計・施工指針の作成」の研究調整委員会(委員長 岡本伸)に所属する構造性能評価 WG(主査 渡邊史夫)で行われたものである。同 WG 内に設けられた塑性ヒンジ領域の回転変形能力に関する SWG の委員、加藤博人氏および是永健好氏には貴重な御討議をいただいた。上記して謝意を表する。

[参考文献] 1) 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:日本建築学会・PC 構造運営委員会、終局限界変形・変位小委員会シンポジウムテキスト、1997年9月

2) 石井孝幸、阿波野昌幸、中塚信、上田真也:「圧着型および一体型片持 PC 梁の塑性ヒンジ機構に関する実験研究(その1)、(その2)」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.129-140、1997年10月

3) 阿波野昌幸、中塚信、石井孝幸、上田真也:「圧着型および一体型片持 PC 梁の塑性ヒンジ機構に関する実験研究(その3)、(その4)」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.135-146、1998年10月

4) Corley, G. W.: Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams, Proc. of ASCE, Vol. 92, ST5, Oct. 1966, pp.121-146

5) 林芳尚、中塚信、他2名:「鋼管スリーブを用いたグラウト充填式継手における鉄筋の付着応力度-すべり特性」日本建築学会構造系論文集、No.462、pp.131-139、1994年8月