

論文 プレストレスト鉄筋コンクリート柱梁十字形部分架構における梁部材の各種限界状態

嶋田 洋介*1・北山 和宏*2

要旨: 梁曲げ破壊した PRC 柱梁十字形部分架構における梁部材について、各種限界状態を実験結果と平面保持を仮定した断面解析を用いて検討した。梁部材角は隅田・岸本等が提案する等価塑性ヒンジ長さに断面解析による曲率を乗じて算出し、残留曲げひび割れ幅を RC 梁部材の評価手法を準用して検討した。検討の結果、残留変形率は良好に評価できた。残留ひび割れ幅は精度に問題があるが提案した評価手法によって評価は可能である。各種限界状態は、実験、解析ともに、使用限界が主筋のひずみで、修復限界が残留変形角で決定され、限界状態を規定する損傷状況、及び梁部材角は解析によって概ね良好に評価できた。

キーワード: PRC 骨組, 梁, 耐震性能, 限界状態, 残留変形, 残留ひび割れ幅, 等価塑性ヒンジ長さ

1. はじめに

プレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)構造の耐震設計は、個々の部材、及び建物全体の地震時応答を意図した通りに制御することを可能とする性能評価型耐震設計法への移行に向けて、様々な研究が行われている。性能評価型の耐震設計法を確立するためには、要求性能に対応した各種限界状態を材料のひずみや、ひび割れ幅等の物理量を用いて明確に規定することが必要である。既往の PRC 柱梁十字形部分架構における梁部材を対象とした研究^{1),2)}では、ほとんどの試験体の修復限界が残留変形角によって決定され、残留変形角を精度よく評価することの重要性が再確認された。

部材の損傷を解析的に検討する場合、平面保持を仮定した断面解析によるのが簡便である。有限要素法によって精度よく部材損傷を検討することが可能だが、解析手法が複雑であり実務設計には向いていない。

本稿では PRC 造梁部材の各種限界状態を実験結果、及び、平面保持を仮定した断面解析結果を用いて検討した。

また、各種限界状態を規定する損傷状況である残留変形角、残留ひび割れ幅の評価手法についても考察した。

2. 試験体概要

本稿では、柱梁接合部パネルからの主筋、PC 鋼材の抜け出し、梁コンクリートのめり込み等を考慮するため、PRC 柱梁十字形部分架構の試験体を対象とした。既往の正負交番載荷する実験^{2),3),4)}より、梁曲げ破壊(梁曲げ破壊後に接合部破壊した試験体を除く)した試験体 11 体を対象とする。試験体形状例(試験体 GB-2)を図-1、試験体諸元を表-1 に示す。梁幅 $b=250(\text{mm})$ 、梁せい $D=400(\text{mm})$ 、梁せん断スパン比 3.56、柱断面 $350 \times 350(\text{mm})$ 、柱せん断スパン比 3.47 は共通である。試験体は全て一体打ちである。

コンクリート圧縮強度 σ_B は 58.8~77.2(MPa)、グラウト圧縮強度は 56.4~70.3、PC 鋼材は異形 PC 鋼棒、細径異形 PC 鋼棒、PC 鋼より線をそれぞれ用い、試験体 GBS-4 の梁断面中央に配置した細径異形 PC 鋼棒のみアンボン

表-1 試験体諸元・梁断面図

試験体名	GB-2	SB-3	GBS-4	M-2	M-5	N-4	N-5	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4
PC鋼材	2-D22		3-φ12.6	2-φ9.2	2-φ12.6	4-φ10.7		2-φ12.7	2-φ12.7	2-φ15.2	4-φ12.7
	異形PC鋼棒			細径異形PC鋼棒				PC鋼より線			
グラウト圧縮強度 (MPa)	65.3			56.4				70.3			
梁普通鉄筋 (主筋)	梁上端筋	2-D13	3-D13	3-D13	2-D19	4-D13	2-D13	2-D13	2-D19	2-D13	2-D13
	梁下端筋	2-D13	3-D13	3-D13	2-D19	2-D19	2-D13	2-D13	2-D19	2-D13	2-D13
	鉄筋材種	SD295A	SD490	SD345	SD345	SD345	SD295A	SD295A	SD345	SD295A	SD295A
コンクリート圧縮強度 (MPa)	77.2			58.8		63.4		68.8			
プレストレス率 λ	0.79	0.79	0.40	0.34	0.41	0.49	0.70	0.61	0.39	0.69	0.76
有効導入張力 T_{pe} 降伏時張力 T_{py} (%)	51.5	51.1	52.9	60.5	54.1	54.9	50.1	59.5	59.5	59.5	59.5
プレストレスレベル ($T_{pe}/bD\sigma_B$) (%)	5.4	5.3	3.5	0.9	1.6	1.2	1.1	3.0	3.0	4.2	5.9
梁断面											

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 博士前期課程 (正会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域教授 工博 (正会員)

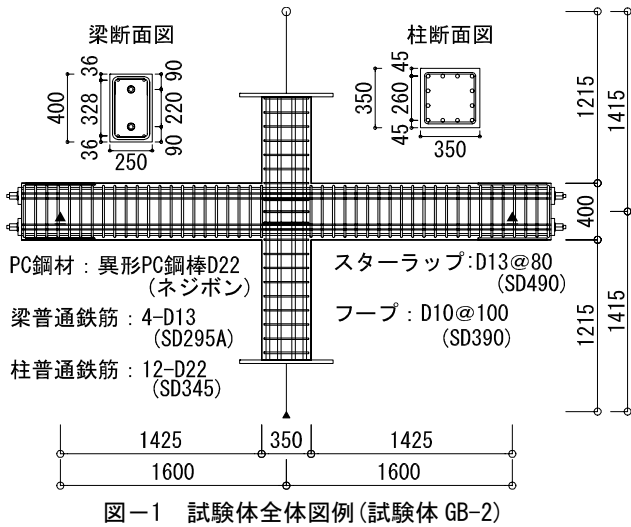


図-1 試験体全体図例(試験体 GB-2)

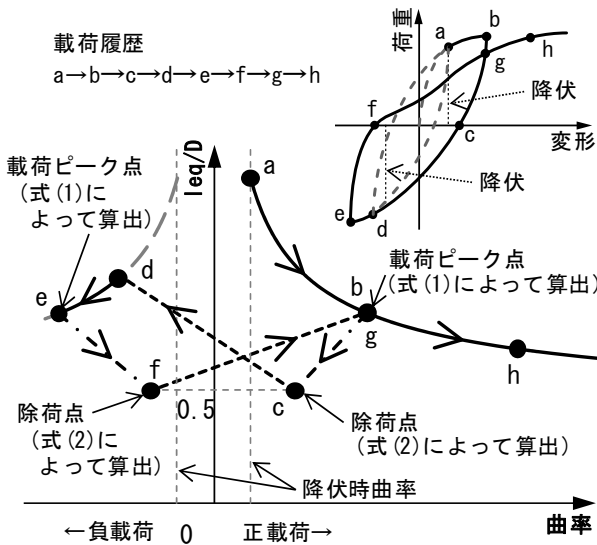


図-2 leq/D —曲率関係

ドである。部材の曲げ終局耐力に対する PC 鋼材の寄与率であるプレストレス率 λ は 0.34~0.79, PC 鋼材の降伏時張力 T_{py} に対する有効導入張力 T_{pe} は 50.1~60.5%, PC 鋼材の有効導入張力による梁断面全体に対する軸力比(プレストレスレバ)は 0.9~5.9%である。

3. 解析概要

3.1 平面保持を仮定した断面解析

本稿では平面保持を仮定した断面解析に、ファイバー法(せい方向分割数 400)を用いた。材料の履歴モデルは、コンクリートでは圧縮側包絡線及び除荷を中塚モデル^{5),6)}、引張側包絡線及び除荷を飯塚・野口モデル⁷⁾とした。鉄筋では Ramberg-Osgood 式に基づき、パウジンガー効果を考慮した履歴モデル⁸⁾、PC 鋼材では Menegotto-Pinto 式に基づく履歴モデル⁹⁾とした。

解析では、コンクリートと鉄筋は完全付着とし、コンクリートと PC 鋼材はひずみ適合係数 F 値¹⁰⁾を用いて付着性状を間接的に考慮した。既往文献¹¹⁾より、異形 PC

鋼棒では $F=1.0$ とした。細径異形 PC 鋼棒と PC 鋼より線では、異形 PC 鋼棒と丸鋼の中間程度の付着性状と考え、 $F=0.8$ とした。なお、試験体 GBS-4 の梁断面中央のアンボンド PC 鋼材では $F=0.03$ ¹²⁾とした。

解析における断面の降伏点は内田・浜原等の研究¹³⁾に習って、モーメント—曲率関係において初期剛性の 6% 以下¹⁴⁾になる点とした。

3.2 梁部材角

断面解析により求めた曲率 ϕ を用いて梁部材角を算出した。断面降伏以前は部材軸に沿った曲率分布を三角形と仮定し、曲率を積分することにより梁部材角を算出した。断面降伏以後は等価塑性ヒンジ長さ leq を仮定して、式(1)を用いて梁部材角 R を算出した。

$$R = \phi \times leq \quad (1)$$

leq は隅田・岸本等が提案する式(2)、式(3)¹⁵⁾を用いた。

$$leq_p = \left(\frac{A}{R_p} + 0.42 \right) D \quad (2)$$

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

$$leq_r = 0.5D \quad (3)$$

ここで、 leq_p, leq_r はそれぞれ荷重ピーク時、除荷時の等価塑性ヒンジ長さ、 $\eta Pe/T_{py}$ は PC 鋼材の降伏張力に対する有効導入張力の比(η はプレストレス有効率、 Pe は初期プレストレス導入力)、 R_p は荷重ピーク時部材角、 D は梁せいである。ただし、本稿では有効導入張力は荷重開始直前の値を用いた。式(1)~(3)より、荷重ピーク時、除荷時の部材角はそれぞれ式(4)、式(5)によって算出される。

$$R_p = \frac{0.42D + \sqrt{(0.42D)^2 + \frac{4AD}{|\phi|}}}{2} \phi \quad (4)$$

$$R_r = 0.5D\phi \quad (5)$$

ここで、 R_r は除荷時の部材角(残留変形角)である。

ただし、式(2)、式(3)はそれぞれ荷重ピーク時、除荷時の値である。そのため、荷重及び除荷途中の leq は後述するルールを仮定し、曲率を関数として導いた。 leq/D —曲率関係の説明図を図-2 に示す。同図内の点 a~h は荷重履歴の順番を示す。 leq/D —曲率関係の履歴は下記に示すルール A(同図内、実線)、ルール B(点線)、ルール C(一点鎖線)によって定めた。

- A) 荷重の途中において、曲率が経験最大部材角時曲率を超えた場合は式(4)を用いた。(a→b, d→e, g→h)
- B) 除荷後の逆方向荷重の途中において、曲率が経験最大部材角時曲率を超えない場合は、経験最大部材角時の点を目指す直線とした。(c→d, f→g)
- C) 除荷の途中は、荷重ピーク時の点と式(5)により定まる除荷点を結ぶ直線とした。(b→c, e→f)

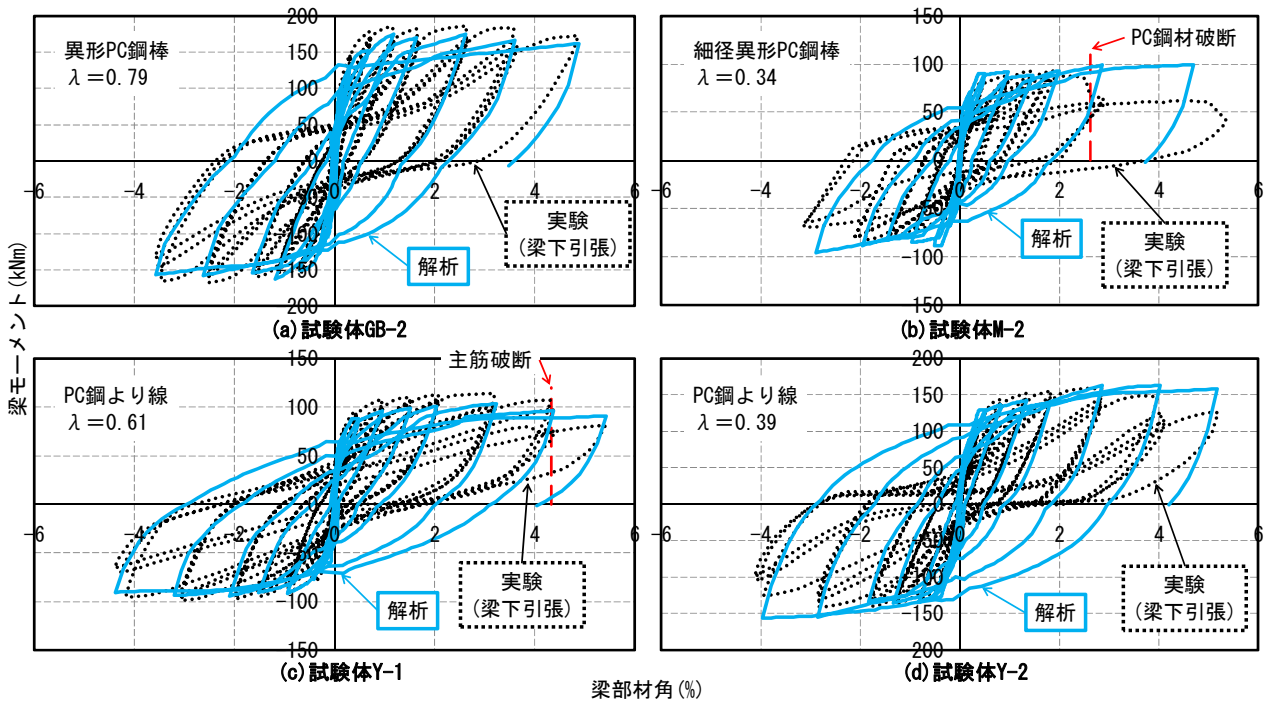


図-3 荷重変形関係

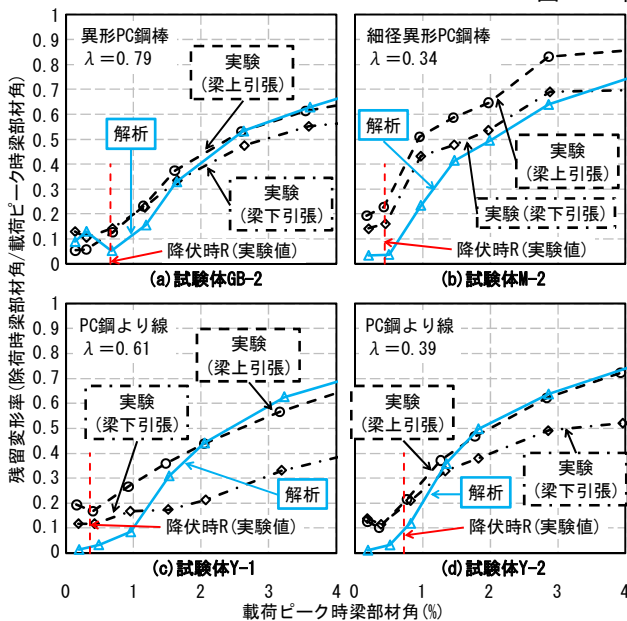


図-4 残留変形率-載荷ピーク時梁部材角関係

3.3 残留曲げひび割れ幅の最大値

PRC 部材の曲げひび割れ幅と部材角の関係については検討資料が少なく、定量的な評価方法が無い。そこで本稿では式(6)に示すように、RC 梁部材の場合の評価手法¹⁶⁾を準用した。すなわち、PC 梁部材の曲げ変形の機構を RC 梁と同様と考えた。ただし、通常の PC 梁では RC 梁と比較してスパンが長い場合が多く、RC 梁と同等の変形機構を示すかどうかは今後検討の余地が残る。

$$w_{r,f} = \frac{1}{n_f} \alpha (D - x_n) R_r \quad (6)$$

ここで、 $w_{r,f}$ は残留曲げひび割れ幅の最大値、 n_f は最大曲げひび割れ幅に対する曲げひび割れ幅総和の比(曲げひ

び割れの等価本数)、 α は部材の全変形に対する曲げひび割れによる変形の割合、 x_n は断面の圧縮縁から中立軸までの距離である。

PRC 梁部材の曲げひび割れの等価本数についてはほとんど研究がないため、RC 梁部材と同様に $n_f=2$ とした。また、部材の全変形に対する曲げひび割れによる変形の割合 α は、部材の変形レベル、せん断強度と曲げ強度の比等で変化するが、詳細な検討は為されていないため、 $\alpha=0.95$ (一定)とした。 x_n は断面解析の結果(ただし、文献16に従い $x_n \geq 0.2D$ とした)を用い、 R_r については断面解析により求めた曲率を用いて式(5)によって算出した。

4. 実験結果及び解析結果

4.1 モーメント-梁部材角関係

実験と解析の梁モーメント-梁部材角関係を図-3に示す。同図の第2,4象限で実験値と解析値が大きく乖離したが、これは実験では十字形柱梁接合部パネルからの鉄筋の抜け出しが観察されたが、解析ではこの点を考慮しないために生じたと考えられる。また、除荷履歴が梁部材角4%以前では実験を解析が良好に再現したが、4%付近から乖離し始めた。これは、実験ではPC鋼材が圧縮力を負担することは無いが、解析では圧縮側PC鋼材が圧縮力を負担したため、大変形時にはPC鋼材の導入張力による原点指向性が弱化したためと考えられる。

4.2 残留変形角

残留変形角の実験値と解析値の比較を、残留変形率を用いて検討した。残留変形率とは、残留変形角を載荷ピーク時の梁部材角で除したものである。残留変形率-載

荷ピーク時梁部材角関係を図-4 に示す。部材降伏前では、解析値が実験値を過小評価する傾向が見られたが、いずれの PC 鋼材種、プレストレス率でも、解析によって概ね良好に残留変形率を評価できた。

4.3 残留曲げひび割れ幅の最大値

残留曲げひび割れ幅の最大値—荷ピーク時梁部材角関係の実験値及び、解析値を図-5 に示す。残留曲げひび割れ幅の実験値は引張側主筋位置においてクラック

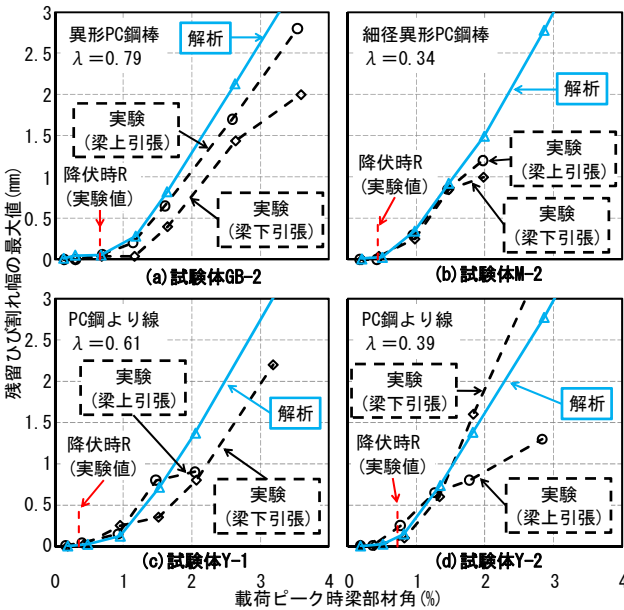


図-5 残留ひび割れ幅の最大値—ピーク時梁部材角関係

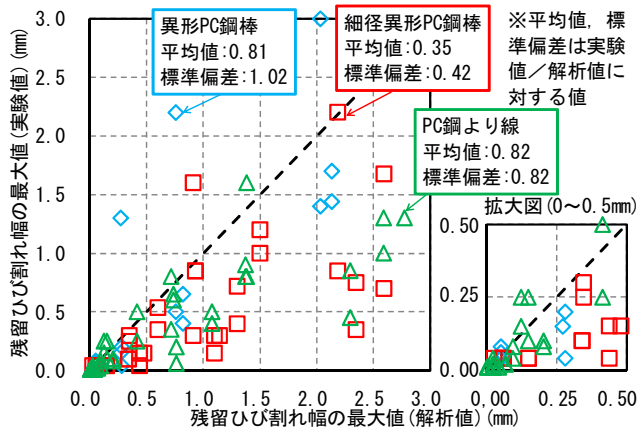


図-6 残留ひび割れ幅算出式精度検討

クスケールを用いて計測した。梁部材角が 2%を超えると、解析値が実験値を過大評価する傾向が見られたが、式(6)を用いて残留曲げひび割れ幅と部材角との関係を梁部材角 2%程度までは十分な精度で評価できる。

全試験体について、残留曲げひび割れ幅の最大値の実験と解析の比較を、鋼材種で分類して図-6 に示す。◇は異形 PC 鋼棒、□は細径異形 PC 鋼棒、△は PC 鋼より線の結果を示す。試験体数が少なく、統計的な評価としては正確とは言えないが、全体的に解析値が実験値を上回っており、安全側に評価した。これは、実験では PC 鋼材の緊張力によりひび割れが閉じるが、式(6)は RC 梁部材の計算式を準用しており、この点を考慮していないためと考えられる。鋼材種別に見ると、実験と解析の比(実験値/解析値)の平均値と標準偏差は、異形 PC 鋼棒、細径異形 PC 鋼棒、PC 鋼より線の順に平均値が 0.81, 0.35, 0.82 となり、標準偏差が 1.02, 0.42, 0.82 となり、いずれの鋼材種でも大きなばらつきが見られた。

残留曲げひび割れ幅の計算式(6)内の残留変形角 R_r は先に述べたように、実験と解析で概ね良好に一致した。このため、同式の精度を上げるためには、曲げひび割れの等価本数 n_r 及び、部材の全変形に対する曲げひび割れによる部材変形の割合 α について検討が必要である。

5. 各種限界状態の検討

5.1 損傷状況の定義

PRC 梁部材の各種限界状態を規定する損傷状況の提案¹⁷⁾を表-2 に示す。実験でのコンクリートの損傷状況の評価はそれぞれ、コンクリートに圧縮ひび割れ発生で「軽微なかぶりコンクリートの圧壊を許容」、かぶりコンクリートの剥落で「コアコンクリート部分が健全であること」、圧縮側主筋までコンクリート剥落で「コアコンクリートに圧壊が生じないこと」と判断した。解析でのコンクリートの損傷状況の評価はそれぞれ、かぶりコンクリート圧縮縁がコンクリート圧縮強度に達する点を「軽微なかぶりコンクリートの圧壊を許容」、コアコ

表-2 各種限界状態を規定する損傷状況¹⁷⁾

各種限界状態	具体的な損傷状況							
	λ	普通鉄筋	PC鋼材		コンクリート		残留変形角	残留ひび割れ
			付着が良い	付着が悪い	一般の曲げ部材	その他		
使用限界	1~0.75	僅かな降伏を許容	弾性範囲	弾性範囲	0.9 σ_B 以下	0.75 σ_B 以下	ほぼゼロ	0.2mm程度以下
	0.75~0.5		0.2%オフセット耐力点以下		(14/15 λ +0.2) σ_B 以下			
	0.5以下		弾性範囲		2/3 σ_B 以下			
修復限界 I	降伏を許容		僅かな降伏を許容	弾性範囲	軽微なかぶりコンクリートの圧壊を許容		1/400程度以下	0.2~1mm程度以下
修復限界 II	主筋が座屈しないこと		降伏を許容	0.2%オフセット耐力点以下	コアコンクリート部分が健全であること		1/200程度以下	1~2mm程度以下
安全限界	圧縮筋の座屈引張筋の破断		破断しないこと	降伏を許容	コアコンクリートに圧壊が生じないこと		-	-

表-3 各種限界状態の検討結果

		使用限界		修復限界Ⅰ		修復限界Ⅱ		安全限界	
		梁部材角(%)	要因	梁部材角(%)	要因	梁部材角(%)	要因	梁部材角(%)	要因
GB-2	実験	0.35	主筋	1.12	残留変形角	1.51	残留変形角	3.65	コンクリート
	解析	0.39	PC鋼材	1.27	残留変形角	1.59	残留変形角	-	-
SB-3	実験	0.35	主筋	1.09	残留変形角	1.55	残留変形角	5.19	コンクリート
	解析	0.39	PC鋼材	1.27	残留変形角	1.61	残留変形角	-	-
GBS-4	実験	0.47	主筋	1.15	残留変形角	1.64	残留変形角	2.60	PC鋼材
	解析	0.54	主筋	1.53	残留変形角	1.95	残留変形角	-	-
M-2	実験	0.38	主筋	0.69	残留変形角	1.06	残留変形角	2.62	PC鋼材
	解析	0.51	主筋	1.02	残留変形角	1.33	残留変形角	-	-
M-5	実験	0.63	主筋	0.96	残留変形角	1.40	残留変形角	3.83	コンクリート
	解析	0.41	主筋	1.05	残留変形角	1.38	残留変形角	-	-
N-4	実験	0.65	主筋	1.07	残留変形角	1.54	残留変形角	3.66	コンクリート
	解析	0.42	主筋	1.14	残留変形角	1.46	残留変形角	-	-
N-5	実験	0.47	主筋	0.91	コンクリート	1.89	残留変形角	3.06	PC鋼材
	解析	0.41	主筋	1.27	残留変形角	1.63	残留変形角	-	-
Y-1	実験	0.25	主筋	1.01	残留変形角	1.60	残留変形角	4.32	主筋
	解析	0.49	主筋	1.20	残留変形角	1.56	残留変形角	-	-
Y-2	実験	0.50	主筋	0.96	残留変形角	1.39	残留変形角	-	-
	解析	0.52	主筋	1.03	残留変形角	1.37	残留変形角	-	-
Y-3	実験	0.33	主筋	1.45	残留変形角	2.10	残留変形角	4.15	主筋
	解析	0.49	主筋	1.32	残留変形角	1.66	残留変形角	-	-
Y-4	実験	0.40	主筋	1.66	残留変形角	2.22	残留変形角	3.96	主筋
	解析	0.39	主筋	1.39	残留変形角	1.73	残留変形角	-	-

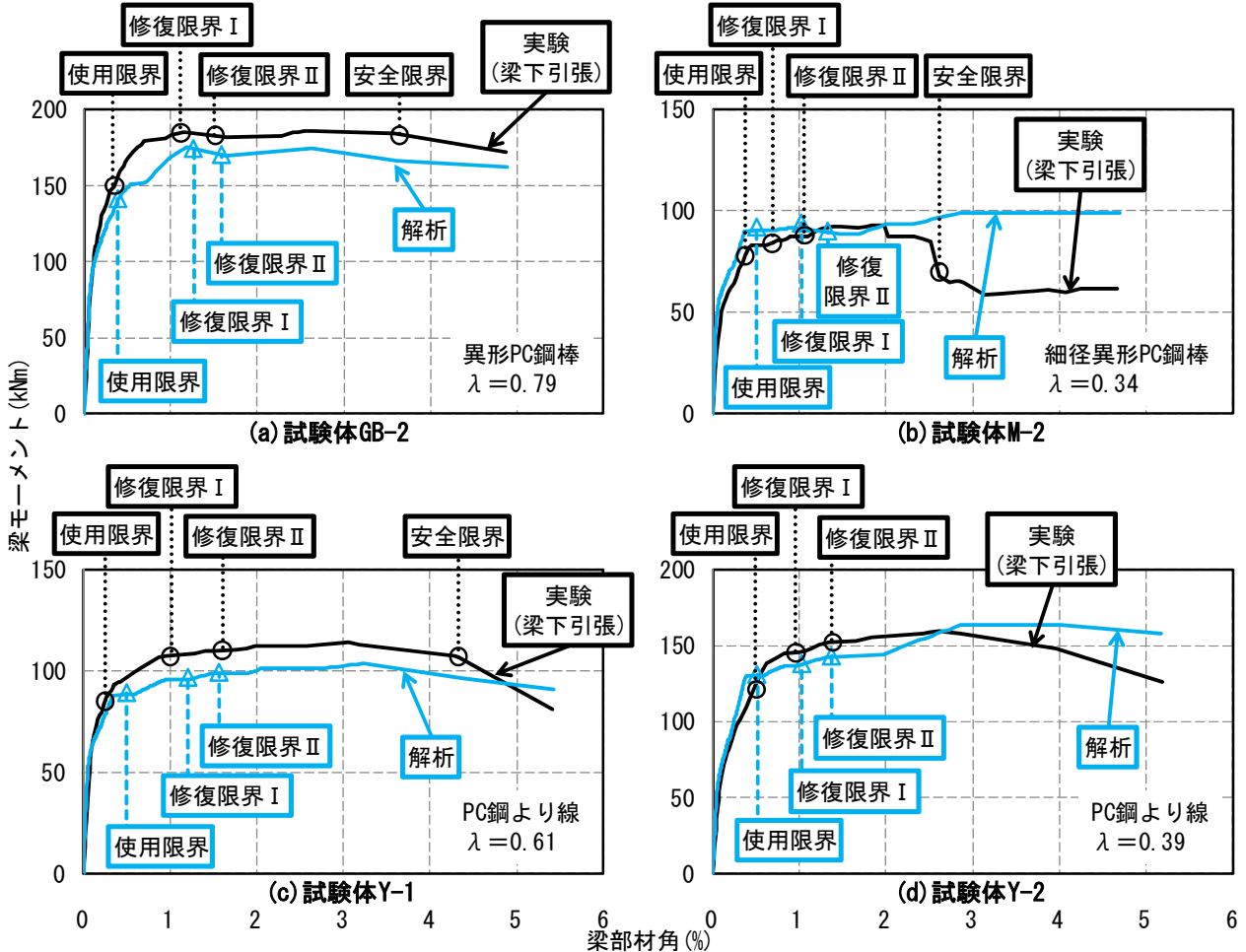


図-7 荷重-変形関係の包絡線と各種限界状態

コンクリート圧縮縁がコンクリート圧縮強度に達する点を「コアコンクリート部分が健全であること」、コアコンクリート圧縮縁が補強筋による拘束効果を考慮したコンクリート圧縮強度に達する点を「コアコンクリート

に圧壊が生じないこと」と定義した。

5.2 実験及び、解析による各種限界状態の比較

実験及び、解析を用いて検討した各種限界時の梁部材角とそれを決定した要因を表-3に、梁モーメント-梁

部材角関係(包絡線)と各種限界状態を図-7に示す。実験、解析ともに使用限界のほとんどが主筋のひずみによって決定され、修復限界(I, II)のほとんどが残留変形角で決定された。使用及び修復 I, II の各限界時における梁部材角は実験ではそれぞれ 0.25~0.65%, 0.69~1.66%, 1.06~2.22%, 解析では 0.39~0.54%, 1.02~1.53%, 1.33~1.95 となり、実験と解析の比(実験値/解析値)の平均値がそれぞれ 0.98, 0.89, 1.03, 標準偏差がそれぞれ 0.33, 0.16, 0.15 となり、精度良く評価出来た。

また、解析では全試験体において安全限界が決定されなかった。これは先に示した様に、解析では圧縮側 PC 鋼材が圧縮力を負担したために、コンクリートの損傷が抑制されたこと、主筋の座屈・破断や PC 鋼材の破断を評価できないこと等が原因である。

6. まとめ

既往の梁曲げ破壊した PRC 柱梁十字形部分架構における梁部材の実験結果と、平面保持を仮定した梁断面解析の結果を検討し、以下の知見を得た。

- (1). 平面保持を仮定した断面解析と隅田・岸本等が提案する等価塑性ヒンジ長さを組み合わせることにより、PRC 梁部材のモーメント-部材角関係を概ね良好に評価できた。
- (2). RC 梁部材の残留曲げひび割れ幅の評価手法を準用した式(6)によって、定数の同定と精度に課題は残るが、PRC 梁部材の残留曲げひび割れ幅を評価することは可能である。
- (3). 各種限界状態を検討した結果、限界状態を規定する損傷状況が実験、解析ともに、使用限界は主筋のひずみによって、修復限界は残留変形角によってそれぞれ決定され、その時の梁部材角も概ね良好に評価できた。

参考文献

- 1) 嶋田洋介, 北山和宏: PC 柱梁十字形部分架構の梁部材における各種限界状態の検討, 日本地震工学会大会梗概集, pp.22-23, 2009
- 2) 矢島龍人, 北山和宏: 梁曲げ破壊型プレストレストコンクリート十字形部分骨組みの耐震性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.511-516, 2010
- 3) 北山和宏, 田島祐之, 矢島龍人: PRC 柱梁十字形部分架構の耐震性能評価に関する実験的研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.157-158, 2008
- 4) 北山和宏, 岸田慎司, 田島祐之, 宮崎裕ノ介: 附着性能に着目したプレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 柱梁十字形部分架構の復元力特性に関する研究(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.1-4, 2006
- 5) 中塚 侑: コンクリートの応力度-ひずみ度特性とコンクリート曲げ部材の終局特性に関する基礎的研究, 大阪大学大学院博士論文, 1989
- 6) 下村健太郎, 中塚 侑, 前川元伸: 定ひずみ繰り返し単軸圧縮応力を受けるコンクリートの応力度-ひずみ度関係の履歴則, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系(38), pp.33-36, 1998
- 7) 飯塚崇文, 野口 博: 正負交番載荷時の高強度鉄筋コンクリートの構成モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, pp.49-54, 1991
- 8) 藤井俊二, 青山博之, 梅村 魁: 材料特性より求めた鉄筋コンクリート断面のモーメント-曲率関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系 48(構造), pp.1261-1262, 1973
- 9) 北島英樹, 福原武史, 陳 静, 孫 玉平: 高強度 RC 部材の耐震性能評価法の提案 その1 材料の繰り返し応力-歪関係のモデル化, 日本建築学会九州支部研究報告九州支部.1, 構造系(44), pp.349-352, 2005
- 10) 六車 熙, 渡辺史夫, 西山峰広: アンボンド PC 部材の曲げ終局耐力に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol.26, pp.10-16, 1984
- 11) 柴田祐丞, 岸本一蔵: 鋼材種および変形量を考慮した PC 梁部材の終局曲げ耐力算定法, 第17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.165-170, 2008
- 12) 嶋田洋介, 北山和宏: PRC 十字形部分架構における梁部材のひずみ適合係数に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.811-812, 2009
- 13) 内田龍一郎, 浜原正行, 末次宏光, 佐藤信夫, 大崎 寔義: 接合部の影響を考慮した PC 梁の復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, No.575, pp.105-112, 2004
- 14) 田島祐之, 北山和宏: 梁曲げ破壊するプレストレスト鉄筋コンクリート柱梁十字形部分架構の梁部材における等価粘性減衰定数の定量評価, 日本建築学会構造系論文集, No.644, pp.1831-1840, 2009
- 15) 隅田 寛, 岸本一蔵, 李 德基, 大野義照: PC 梁部材の残留変形率算定式, プレストレストコンクリート, Vol.49, pp.80-89, 2007
- 16) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート建造物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 日本建築学会, 2004
- 17) 日本建築学会: PC 構造研究の現状, 新 PC 基準へ向けての活動およびプレストレスト技術を有効利用した建物例, 日本建築学会大会 PD 資料, pp.22-38, 2007