

論文 PC 鋼より線を用いた PRC 梁部材のゲージ養生と純曲げ区間における各種限界状態に関する実験的研究

嶋田 洋介*1・北山 和宏*2・浜田 公也*3

要旨：PC 鋼より線を用いた梁形試験体を製作し、ひずみゲージ養生試験、及び載荷試験を行った。ゲージ養生試験では計 6 種の養生方法を検討した結果、素線一本に養生を二層行った上から PC 鋼より線全体に二層巻きつけた方法が最も良好であり、ゲージ出力値の信頼性がグラウトの水分により失われることが多かった。二点曲げ載荷の試験を行った結果、PC 鋼材の付着性状を示すひずみ適合係数は 0.6~0.7 と一定値を取った後 PC 鋼材降伏時には 0.35 になった。純曲げを受ける PRC 梁部材の使用限界は主筋及び PC 鋼材のひずみ状況で、修復限界のほとんどは残留変形角で各々決まり、既往の十字形部分架構梁部材の結果に類似した。

キーワード：PC 鋼より線, PRC 梁, ゲージ養生方法, 各種限界状態, 残留変形, ひび割れ幅

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ような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。しかし、純曲げを受ける PRC 梁部材の各種限界状態について検討した研究は少なく、PRC 構造の特徴とも言えるひび割れ幅の制御に関しても、主筋降伏以降のひび割れ幅の評価法等、未解明な課題も多い。

PC 鋼より線は実建造物に用いられる場合が他の PC 鋼

材に比べ多く、上記内容を早急に解決すべきである。しかし、素線を何本かまとめてねじって製作した PC 鋼より線では、その表面に貼付したひずみゲージの出力が、載荷試験前に信頼できなくなることが多い。プレストレス導入時やアンボンドの場合では信頼できる出力を得られるので、グラウトの注入によりひずみゲージの出力の信頼性が損なわれると考えられる。

そこで、本論では梁形試験体を製作し、プレストレス導入及びグラウト注入した状態での PC 鋼より線に貼付したひずみゲージの養生試験を行い、養生方法・性能を

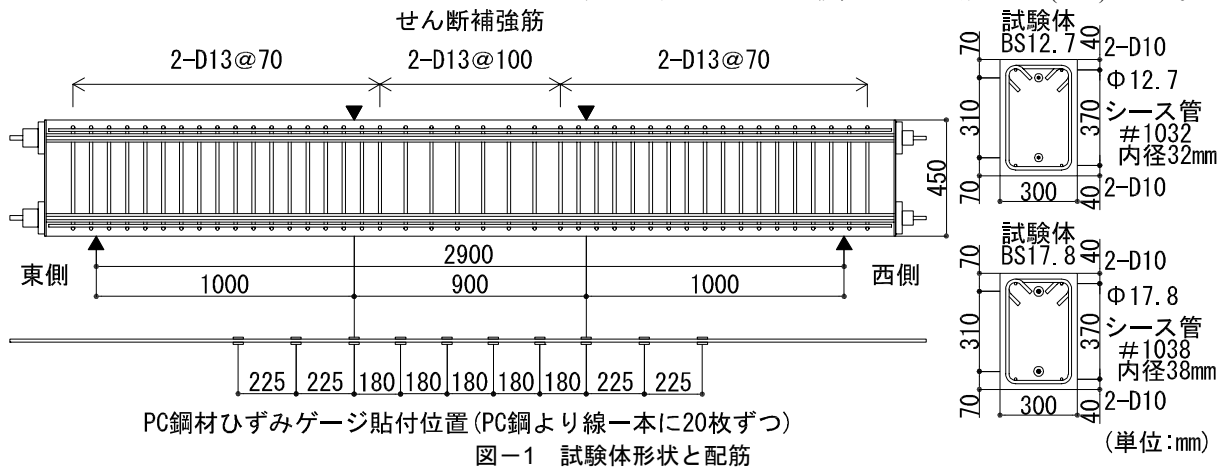
表-1 試験体諸元

試験体名	BS12.7	BS17.8
PC鋼より線	φ12.7 (SWPR7B)	φ17.8 (SWPR19)
梁スパン(mm)	2900	
せん断スパン(mm)	1000	
梁断面(mm)	300 × 450	
主筋	上側	2-D10(SD345)
	下側	2-D10(SD345)
せん断補強筋	2-D13(SD345)	
プレストレス率λ	0.75	0.86
プレストレスレベル(%)	4.03	7.71

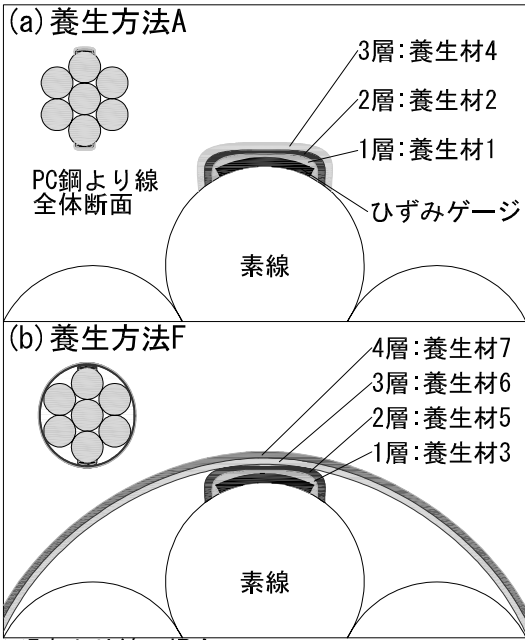
表-2 材料諸元

	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時 ひずみ(%)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
コンクリート	42.3	0.24	28.5	3.04
PCグラウト	51.8	0.61	14.0	1.87
鉄筋・PC鋼より線	降伏応力度 (MPa)	降伏ひずみ (%)	ヤング係数 (GPa)	引張強さ (MPa)
D10(SD345)	393	0.21	185	526
D13(SD345)	366	0.20	185	518
φ12.7(SWPR7B)	1834	1.07	210	2016
φ17.8(SWPR19)	1761	1.04	210	1977

※PC 鋼より線はミルシート値、ヤング係数は 210(GPa)とした。



*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)
 *3 株式会社ピーエス三菱 技術本部技術部部長 博(工) (正会員)



※7本より線の場合

図-2 養生方法

検討し、今後の実験へのフィードバックを目的とする。また、同じ梁形試験体の二点曲げ載荷試験から、PC 鋼より線の付着性状、純曲げを受ける PRC 梁部材のひび割れ幅と各種限界状態を検討することを目的とする。

2. 試験体概要

梁形試験体は2体である。試験体諸元、材料諸元、及び試験体形状と配筋を表-1、表-2、図-1に示す。同図に PC 鋼材に貼付したひずみゲージ位置を示す。ここで、プレストレス率 λ は部材の曲げ終局耐力に対する PC 鋼材の寄与率を表し、プレストレスレベルは PC 鋼材の有効導入張力を梁断面積とコンクリート圧縮強度で除した値である。梁断面 300×450(mm)、梁スパン 2900(mm)、コンクリート、PC グラウト、主筋、せん断補強筋は共通とし、PC 鋼材降伏後に曲げ破壊するように設計した。実験変数は PC 鋼より線の種類とし、試験体 BS12.7 には ϕ 12.7(SWPR7B)を、試験体 BS17.8 には ϕ 17.8(SWPR19)を、上下等配筋として1本ずつ配置した。

コンクリート材齢 34 日にプレストレス導入、及びグラウト注入を行った。初期導入張力は各 PC 鋼より線の規格降伏強度の 70%とした。プレストレスレベルは試験体 BS12.7 で 4.0%、試験体 BS17.8 で 7.7%であった。

3. ひずみゲージ養生試験

3.1 実験概要

試験体の PC 鋼より線にはひずみゲージを 20 枚ずつ、全試験体で計 80 枚を貼付し、6 種類のゲージ養生方法を検討した。養生材諸元と養生方法を表-3 に、養生方法を図-2 に示す。養生方法の C~F は素線 1 本に対しての

表-3 養生材諸元、養生方法

略称	正式名称	詳細又は製品名
養生材1	ホットメルト型コーティング剤	ロウ
養生材2	ゴム系感圧型コーティング剤	VMテープ
養生材3	ゴム系感圧型コーティング剤	SBテープ
養生材4	液常温硬化型エポキシ樹脂系接着剤	エポキシ硬性
養生材5	2液型弾性接着剤	エポキシ軟性
養生材6	自己融着テープ	ハイボンテープ
養生材7	常温硬化型2液型接着剤	P2

養生方法	養生層				貼付枚数 (合計80枚)
	1層	2層	3層	4層	
A	養生材1	養生材2	養生材4	—	8枚
B	養生材1	養生材2	養生材5	—	16枚
C	養生材1	養生材7	—	—	8枚
D	養生材3	養生材6	養生材7	—	16枚
E	養生材1	養生材2	養生材5	養生材7	16枚
F	養生材3	養生材5	養生材6	養生材7	16枚

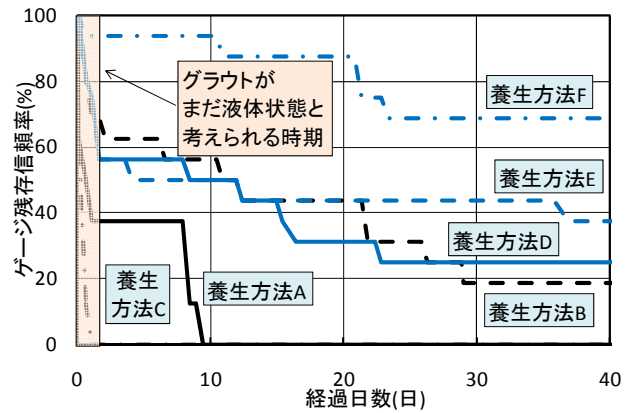


図-3 ゲージ残存信頼率

養生を数層行い、その上から PC 鋼より線全体に対しての巻きつけ養生を数層行った。養生方法 A,B は素線 1 本に対しての養生のみ行った。素線 1 本に対しての養生材は養生材 1,2,3,4,5 であり、PC 鋼より線全体に対しては養生材 6,7 である。養生材 6 は PC 鋼より線に巻きつけるのみだが、養生材 7 はガーゼに含浸させて PC 鋼より線に巻きつけた。養生方法は新たに考案したものだけでなく、既往の方法も採用しており、ひずみゲージの出力の信頼性が失われる時期を調査する。

3.2 実験結果

ゲージ養生試験結果を図-3 に示す。横軸はプレストレス導入、及びグラウト注入からの経過日数、縦軸は養生方法ごとの信頼できるひずみ値を出力したゲージ枚数を当該ゲージ枚数で除した値(以降、ゲージ残存信頼率と呼ぶ)である。養生方法 A,C はプレストレス導入及びグラウト注入直後にゲージ残存信頼率が急激に低下し、早期に全ゲージの信頼性が失われた。この時点ではグラウトが完全には硬化しておらず、液体状態と考えられることから、養生方法 A,C はグラウトの水分により信頼性が失われたと考えられる。また、養生方法 B,D,E もプレストレス導入、及びグラウト注入直後にそれぞれ 4 割程度ゲージ残存信頼率が低下し、その後も徐々に低下した。

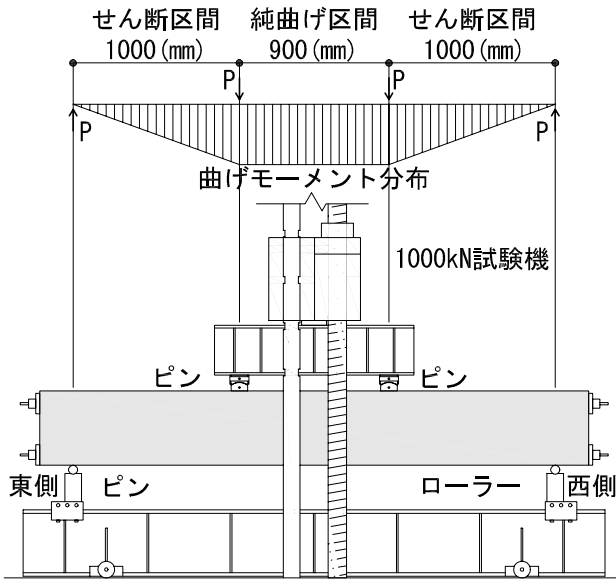


図-4 試験体載荷図

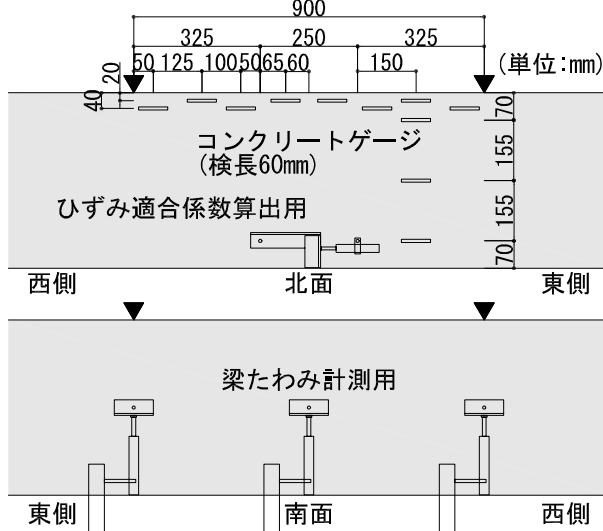


図-5 コンクリートゲージ, 変位計位置

しかし、養生方法Fは他の養生方法で見られたプレストレス導入、及びグラウト注入直後のゲージ残存信頼率の急激な低下が見られず、他の養生方法に比べ高い信頼性を保ち続けた。以上から、グラウトの水分に対する養生性能がゲージ出力の信頼性を決めると言える。

以降の荷重試験では養生試験の結果、信頼できるひずみゲージの出力のみを用いた。

4. 荷重試験

4.1 実験概要

試験体載荷装置を図-4に、変位計取り付け位置、及びコンクリートゲージ貼付位置を図-5に示す。実験は漸増片振り荷重とし、梁中央900(mm)区間を純曲げ区間とする2点荷重とした。梁中央及び荷重点のたわみと純曲げ区間のPC鋼材位置におけるコンクリートの変位を、それぞれ変位計を用いて測定した。荷重ピーク及び除荷の時期は、後に検討する各種限界状態を規定する損傷状

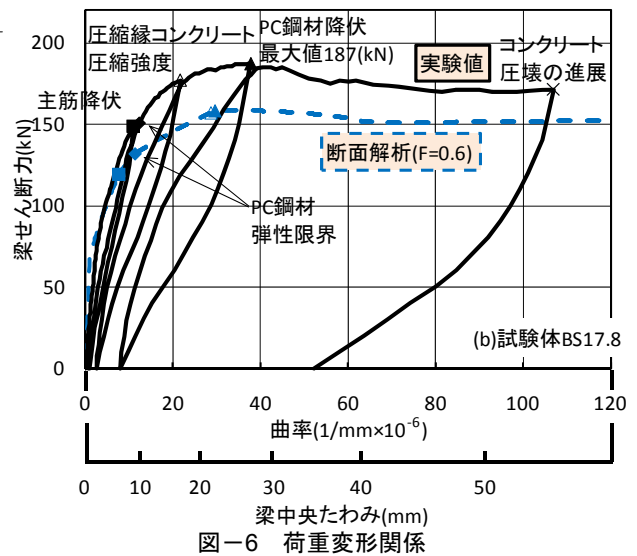
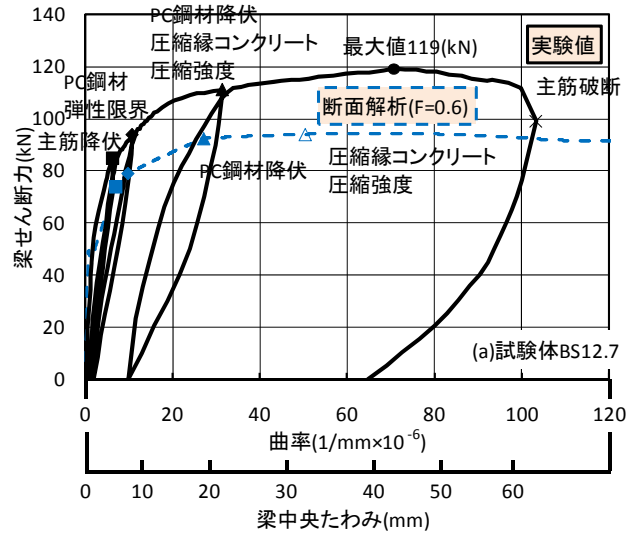


図-6 荷重変形関係

況でもある主筋降伏、PC鋼材弾性限界及び降伏、圧縮縁コンクリート圧縮強度等とした。ただし、上記事象の直後に別の事象が生じた場合は、ひび割れ幅、残留変形等は同程度と考え除荷しなかった。ここで、圧縮縁コンクリート圧縮強度は、圧縮縁から20(mm)、及び40(mm)の位置に貼付したコンクリートゲージの出力から算出したコンクリート圧縮縁のひずみが、材料試験による圧縮強度時ひずみに達した時とした。また、荷重ピーク及び除荷時に引張側主筋位置におけるコンクリートのひび割れ幅を、クラック・スケールを用いて測定した。

4.2 実験結果

(1) 荷重変形関係

梁せん断力-曲率及び梁中央たわみ関係を図-6に示す。曲率は純曲げ区間の曲率分布を矩形とし、梁中央及び荷重点のたわみから算出した。また、後に検討するひずみ適合係数¹⁾を用いた平面保持を仮定した断面解析の結果を併せて示す。各試験体の最大耐力は試験体BS12.7で119(kN)、試験体BS17.8で187(kN)となり、PC鋼材をφ12.7からφ17.8に変化させることで最大耐力が57%上

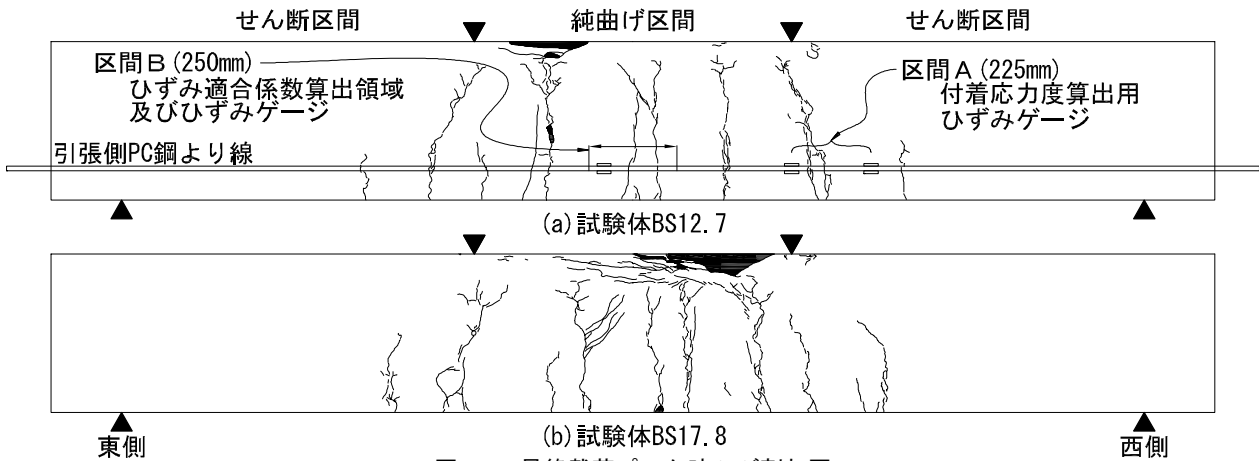


図-7 最終載荷ピーク時ひび割れ図

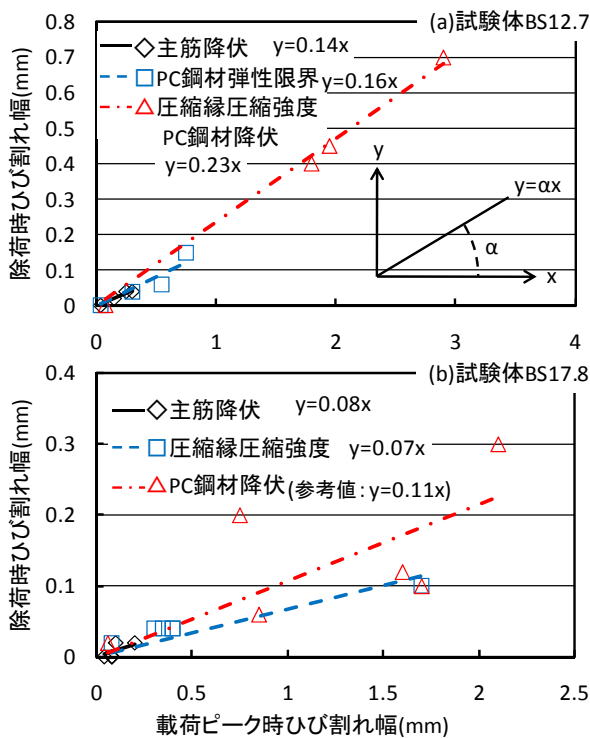


図-8 載荷ピーク時-除荷時ひび割れ幅関係

昇した。試験体 BS17.8 では PC 鋼材降伏と同時に最大耐力を迎えたが、試験体 BS12.7 では PC 鋼材降伏後のコンクリート圧壊によって最大耐力が決定した。

(2) ひび割れ幅

最終載荷ピーク時のひび割れ状況を図-7 に示す。両試験体とも純曲げ区間には曲げひび割れが進展しており、圧縮縁からの距離が試験体 BS12.7 で約 50(mm)、試験体 BS17.8 で約 80(mm)までひび割れが進展した。また、ひび割れは梁中央から 750(mm)の区間に生じ、これは試験体での違いは見られなかった。試験体 BS17.8 は圧縮縁コンクリートの損傷が大きく、かぶりコンクリートの剥落が顕著に見られた。それに対し、試験体 BS12.7 は圧縮側コンクリートの損傷が少なかった。これは、最終載荷ピークが試験体 BS12.7 は主筋破断で決まり、圧縮側コンクリートの圧壊が進展しなかったためと考えられる。

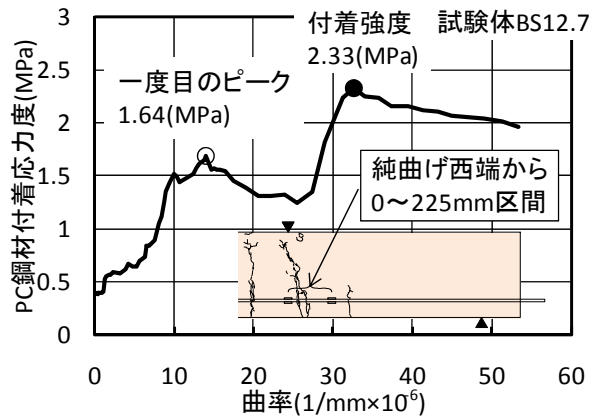


図-9 試験体 BS12.7 の付着応力度

純曲げ区間の全ひび割れについての載荷ピーク時-除荷時ひび割れ幅関係を図-8 に示す。各事象発生時の最小二乗法による回帰直線を併せて示す。載荷ピーク時のひび割れ幅に対する除荷時のひび割れ幅の比(回帰直線の傾き α)は、主筋降伏時において試験体 BS12.7 が 0.14 であったのに対して、プレストレスレベルが 2 倍の試験体 BS17.8 では 0.08 であり、約半分であった。試験体 BS17.8 の PC 鋼材降伏時の測定値が分散したが、それ以外の事象発生時では試験体 BS17.8 の残留ひび割れ幅は、試験体 BS12.7 の半分程度であった。

(3) PC 鋼材付着

試験体 BS12.7 の純曲げ区間西端からせん断区間へ 225(mm)入った領域(図-7 区間 A)における PC 鋼より線の平均的な付着応力度-曲率の関係を図-9 に示す。付着応力度は当該領域における PC 鋼材の応力度差を PC 鋼より線の表面周長で除して算出した。付着応力度は一度 1.64(MPa)でピークを迎え、その後最大付着応力度 2.33(MPa)に達した後低下した。梁部材の最大耐力に達する前に付着応力度が低下したことから、2.33(MPa)は付着強度と判断できる。しかし、PC 鋼より線の引き抜き実験より求められた付着強度評価式²⁾による付着強度は 4.33(MPa)となり、曲げモーメントとせん断力を受ける本論の付着強度 2.33(MPa)は、この半分程度と小さかった。

表-4 各種限界状態を規定する損傷状況³⁾

各種限界状態	具体的な損傷状況						残留変形角	残留ひび割れ幅
	プレストレス率 λ	普通鉄筋	PC鋼材		コンクリート			
			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1	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		1/400程度以下	0.2~1mm程度以下
修復限界2	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		-	-

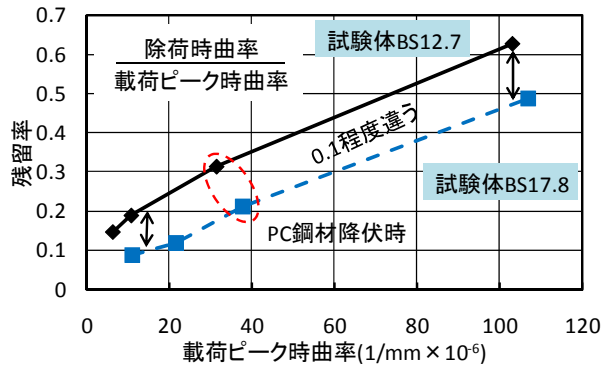


図-10 梁部材純曲げ区間における残留率

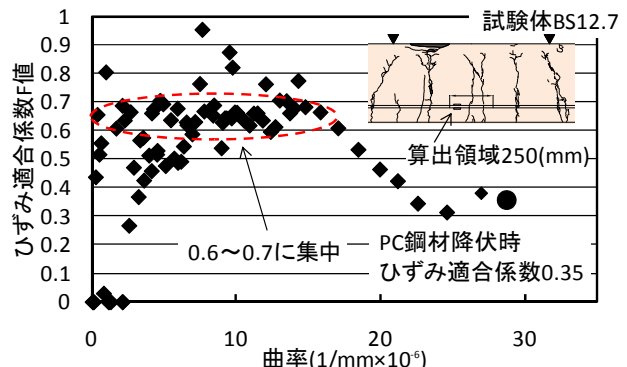


図-11 試験体 BS12.7 のひずみ適合係数の推移

(4) 残留変形

純曲げ区間の各載荷ピーク時の曲率に対する除荷時の曲率の比(以降、残留率と呼ぶ)と、載荷ピーク時の曲率関係を図-10に示す。残留率はPC鋼材降伏時で試験体BS12.7が0.31、試験体BS17.8が0.21となり、載荷全体を通じて試験体BS12.7の方が試験体BS17.8に比べ、残留率が0.1程度大きくなった。これは、試験体BS17.8のプレストレスレベルが、試験体BS12.7より3.7%大きいことが影響していると考えられる。

(5) ひずみ適合係数

PC鋼材の付着性状を示すひずみ適合係数F値¹⁾は式(1)で表わされる。

$$F = \frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta \varepsilon_{cp}} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_p$: 部材断面のPC鋼材ひずみ増分、 $\Delta \varepsilon_{cp}$: 同断面のPC鋼材位置におけるコンクリートひずみ増分である。PC鋼より線に貼付したひずみゲージの出力から $\Delta \varepsilon_p$ を算出し、PC鋼材位置のコンクリートに取り付けた変位計の出力から $\Delta \varepsilon_{cp}$ を算出した。試験体BS12.7の純曲げ区間内の中央250(mm)位置(図-7区間B)における平均的なひずみ適合係数-曲率関係を図-11に示す。試験体BS17.8では当該領域内のひずみゲージの出力が信頼できなかったため、ひずみ適合係数を算出できなかった。PC鋼より線降伏時にはひずみ適合係数は0.35となるが、降伏前は0.6~0.7の一定値となった。降伏前のひずみ適合係数が一定だったことから、平面保持を仮定し

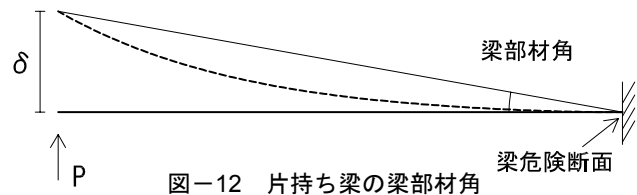


図-12 片持ち梁の梁部材角

た断面解析ではひずみ適合係数を0.6の一定値として計算した。解析結果を図-6に破線で示す。主筋降伏までは断面解析が実験を良好に再現できたが、それ以降は耐力が乖離していき、最大耐力で比較すると20%程度断面解析の方が小さくなった。

(6) 各種限界状態

各種限界状態を規定する損傷状況の提案例³⁾を表-4に示す。提案例における残留変形角は、図-12のように、片持ち梁端部に荷重がかかる状態の梁部材角で規定しており、この場合、一般に損傷は梁危険断面が最も激しい。また、本論試験体は純曲げ区間に損傷が集中した。そのため、片持ち梁の梁危険断面における曲率と、試験体の純曲げ区間における曲率は、「最も損傷が激しい部分における曲率」という意味では同等と考えられる。ただし、本論では純曲げ区間の平均曲率を用いているため、試験体で観察されたようなコンクリートの圧縮損傷の偏在等は考慮できず、当該曲率を過小に評価していると考えられる。片持ち梁の除荷時の曲率分布を三角形と仮定して、提案例の残留変形角1/400、1/200を、曲率5.0、10.0(1/mm $\times 10^{-6}$)にそれぞれ変換し、残留変形角を純曲げ区間における平均曲率で検討した。また、PC鋼材の損傷

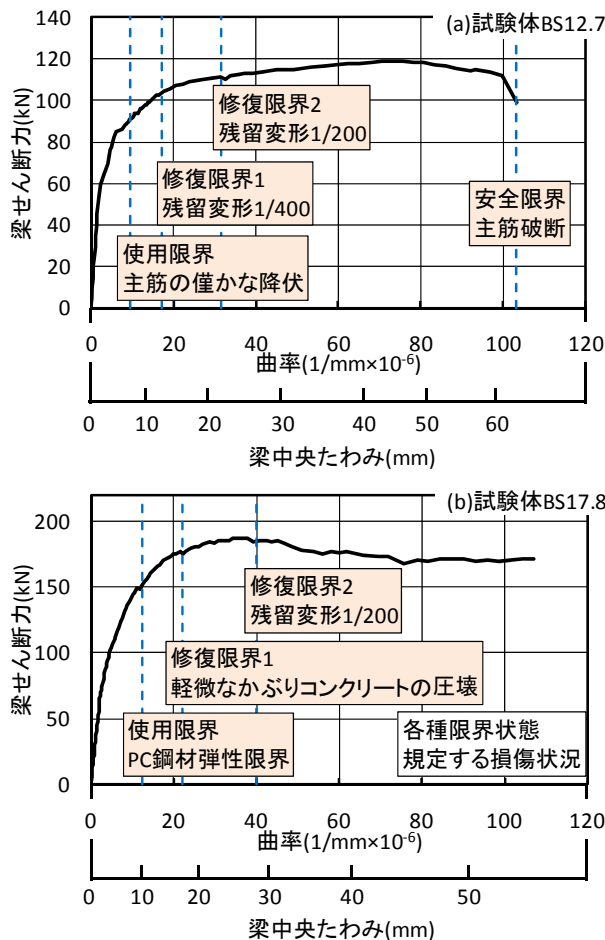


図-13 各種限界状態

状況は「付着が良い」で検討した。

各種限界状態、及び純曲げ区間における各部材の損傷状況を図-13、表-5に示す。圧縮側コンクリートの損傷状況は“軽微なかぶりコンクリートの圧壊”を圧縮ひび割れ発生で、“コアコンクリート部分が健全であること”をかぶりコンクリートの剥落で判断した。使用限界が“主筋の僅かな降伏”，あるいは“PC鋼材弾性限界”で、2つの修復限界のほとんどが残留変形で決まり、文献4)の十字形部分架構梁部材の結果に類似した。試験体BS17.8の修復限界1が“軽微なかぶりコンクリートの圧壊”で決まったのは文献4)に比べて、コンクリートの圧縮強度が低い、あるいはプレストレスレベルが大きいことが一因と考えられる。また、コンクリート圧縮強度が文献4)に比べて低かったが、使用限界は圧縮側コンクリートの損傷では決まらなかった。

試験体BS17.8では、コアコンクリートの損傷や耐力の大幅な低下が確認できないため、安全限界には到達しなかったと判断した。

5. まとめ

ゲージ養生試験、及び荷重試験より以下の知見を得た。

- 1) 今回検討したPC鋼より線の養生方法の中では、素

表-5 各事象発生点

	各種限界状態を規定する損傷状況	曲率(1/mm × 10 ⁻⁶)	
		試験体BS12.7	試験体BS17.8
コンクリート	0.9σ _B	22.2	13.9
	軽微なかぶりコンクリートの圧壊	70.7	22.1
	コアコンクリートが健全であること	93.2	71.7
	コアコンクリートに損傷	—	—
主筋	降伏ひずみε _y 到達	6.3	10.9
	僅かな降伏(2ε _y 到達)	9.4	28.7
	座屈・破断	103.2	—
PC鋼材	弾性限界	10.7	12.4
	降伏	31.4	37.7
残留変形角	1/400	17.0	28.2
	1/200	31.7	40.1
残留ひび割れ幅	0.2mm	12.6	24.9
	1mm	33.3	57.6
	2mm	39.5	87.4

※色つき：各試験体の各種限界状態を規定した損傷状況

線一本に養生を二層行った上からPC鋼より線全体に二層巻きつけた養生方法Fが最も良好な結果を示した。また、グラウトの水分からの養生が重要である。

- 2) プレストレスレベルが2倍の試験体BS17.8の残留ひび割れ幅は、試験体BS12.7の半分程度だった。
- 3) プレストレス率λが0.75である試験体BS12.7の純曲げ区間におけるひずみ適合係数は0.6~0.7と一定値を取った後、PC鋼材降伏時には0.35になった。
- 4) 両試験体の各種限界状態は使用限界が“主筋の僅かな降伏”，あるいは“PC鋼材弾性限界”で、修復限界のほとんどが残留変形角で決まった。これは、文献4)の十字形部分架構梁部材の結果に類似した。

謝辞

本研究の一部はJSPS科学研究費補助金・基盤研究Cにより行った。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 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, vol26, No.1, pp.10-16, 1984
- 2) 是永健好, 渡辺英義: PC鋼より線とグラウト材の付着特性評価, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp.1083-1084, 1999.9
- 3) 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技術を有効利用した建物例, 日本建築学会大会PD資料, 2007.8
- 4) 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2009梗概集, pp.22-23, 2009.11