

圧着 PC 梁の荷重－変形関係と損傷状況との関連に関する実験的検討

大阪工業大学大学院 正会員 ○吉田由美子
 大阪工業大学 教授・工博 同 中塚 侑
 清水建設(株)設計本部 同 巽 英明

1. はじめに

わが国のプレストレストコンクリート(以下 PC と略記)建築構造の設計法は、1961 年に日本建築学会から「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」が提案されて以来、主に耐力面に注目する終局強度設計法が踏襲されている状況である。それ故、性能評価型設計法に不可欠な基礎知見である、PC 梁、柱部材および柱梁接合部などの構造要素の荷重－変形関係、同関係と圧縮コンクリートひずみやひび割れ等の損傷度との関連に関するデータが現状では極めて不十分であり、

本研究は、PC 構造の性能評価型設計法の確立に必要な、PC 梁の荷重－部材角関係とひび割れ幅、残留ひび割れ幅、ひび割れ総長さ、残留変形などとの関係を、PC 鋼材および普通鉄筋などと関連する付着特性の影響を考慮して調べようとするものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

表 1 に試験体の概要を一覧表にして示す。試験体は図 1 に示すように、断面が $B \times D = 200 \times 450$ で、シアスパン比が 3 である、異形および丸形 PC 鋼棒による圧着型プレキャスト PC 梁 (D-PC および R-PC 梁) ならびに比較用の一体型 RC 梁の 3 体である。PC 鋼材量と鉄筋量は梁の曲げ耐力がほぼ同じになるように選び、また丸形 PC 鋼棒は特注の A 種 1 号とした。

表 1 試験体概要一覧

試験体名	断面寸法 B×D (mm)	鉄筋・鋼材位置		接合形式	鉄筋・PC鋼材		有効 緊張応力 N/mm ²
		鉄筋 d _r (mm)	PC鋼棒 d _p (mm)		鉄筋	PC鋼材	
RC	200×450	362/410		一体型	SD345	4-D19	
D-PC		417	350	PCa梁 圧着型	異形鋼	C種1号D22	0.45σ _{py}
R-PC					丸鋼	A種1号φ26	0.61σ _{py}

2.2 試験体の製作

各試験体の配筋図を図 1 に示す。圧着型試験体は、別々に製作した梁部とスタブ部を、スペーサーを用いて目地厚さが 20mm となるように逆 T 型に組み上げ、充填確認のために硬質透明プラスチック板を型枠として、圧着目地部に目地モルタルをグラウトポンプによって圧入した。PC 鋼材に対するグラウトは、試験体上部に位置する梁先端部から流動性の高いグラウト材をゆっくりと流し込み充填した。PC 鋼棒への緊張力の導入は、目地モルタル強度が 50N/mm² 程度になった材齢 14 日で 2 台の 500kN ジャッキを用いて 2 本同時に行った。載荷直前のプレストレスの有効緊張応力は表 1 に示すように異なるが導入緊張力はほぼ同程度である。

2.3 使用材料

試験体を使用したコンクリート、PC

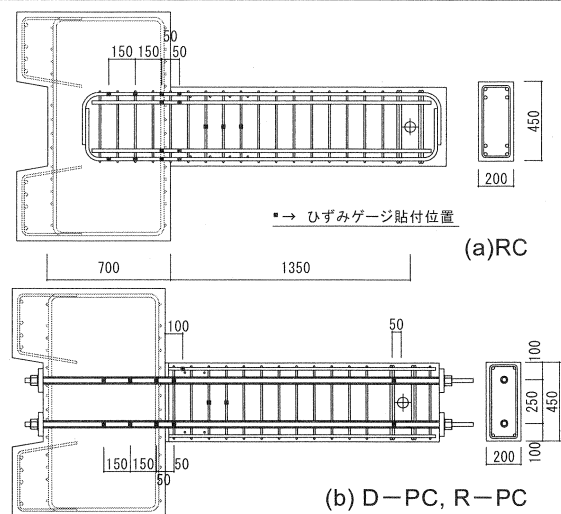


図 1 配筋及びゲージ貼付図

鋼材、目地モルタルおよびグラウト材の力学的特性を表2に示す。目地モルタルはコンクリートより強度が高くなることを目標としたが、R-PC試験体では若干低い値となった。

2.4 荷重および測定方法

表2 使用材料一覧

	コンクリート			目地材(モルタル)			グラウト材(セメントペースト)			普通鉄筋, PC鋼材		
	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²	降伏応力 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²
RC	57.4	6.52	3.48E+04							376	599	1.98E+05
D-PC	55.9	6.61	3.35E+04	76.3	7.79	2.98E+04	55.6	5.44	2.33E+04	1210	1310	2.00E+05
R-PC	69.0	8.84	3.55E+04	67.6	9.22	2.98E+04	57.3	4.63	1.43E+04	881	1020	2.00E+05

図2に荷重方法を示す。逆T形に反力床に

固定した試験体の梁先端部をストローク500mmの500kNジャッキで押し引きすることによって荷重した。荷重は、各試験体とも設定変形部材角 (R=0.5%,0.7%,1.0%,1.3%,2.0%, 3.3%) において3回ずつ正負交番繰り返し荷重を行った。測定は以下の項目について行った。①荷重点変位、②塑性ヒンジ領域での圧縮および伸び変形(RC試験体では3区間、D-PCおよびR-PC試験体では2区間。区間長については図3参照)、③PC梁の圧着面におけるひび割れ開口幅、④梁-柱スタブ接合面におけるずれ変形、⑤RC試験体の主筋ひずみ、およびPC試験体の鋼材ひずみ(図1中に示す位置にひずみゲージを貼付)。また、本実験では測定精度が0.01mmの高性能の顕微鏡を用いてひび割れ幅を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-部材角関係

図4(次ページ)は、各試験体の荷重-部材角(P-R)関係のRによる推移状態が分かるように各R時のP-R関係として示したものである。なおRC試験体では、初荷重時に操作ミスでR=1.0%近くまで荷重したために、R=0.5%のグラフは参考図である。図4によれば次の様なことがわかる。①RC試験体：両PC試験体と比べ、いずれのRおよび繰り返し荷重時においてもループ面積は大きく、エネルギー吸収性に優れている。また、R=2.0および3.3%のループでは明確なスリップ性状を示すが、これは梁・スタブ境界面で生じたフルデブスクラックに起因するずれ変形によるものである。②D-PC試験体：R=1.3%の荷重階では、異形鋼材ひずみがかく僅かその降伏ひずみを越えるが、R=1.3%以下のループはPC部材特有の高復元性を示すS字形を描いている。これに対し、鋼材降伏が進展するR=2.0%以降では第1サイクル時に残留変形を生じて若干の面積をもつループを示すが、第2, 第3サイクルは原点指向型のS字形のループとなった。③R-PC試験体：付着性能が低い本試験体では、R=3.3%時においても僅かに降伏ひずみを越える程度であるので、それ以前のいずれの荷重階においても、原点指向型の履歴性状を示した。

3.2 等価粘性減衰定数 (heq)

図5は等価粘性減衰定数 (heq) と部材角との関係を示したものである。同図より、以下の様なことが分かる。①RC試験体のheqはRの増大に対して増加する。これは、普通鉄筋の降伏ひずみが小さ

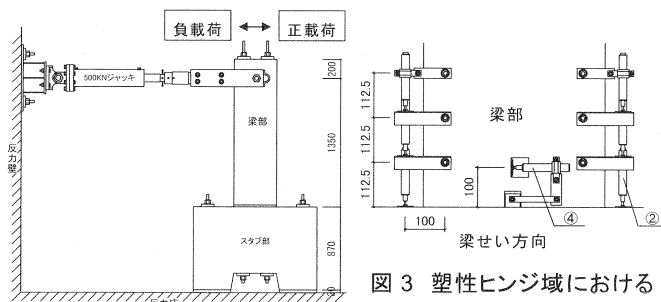


図2 荷重方法

図3 塑性ヒンジ域における測定器具設置図

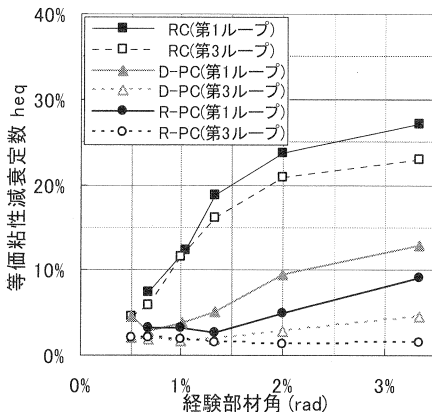


図5 等価粘性減衰定数-部材角関係

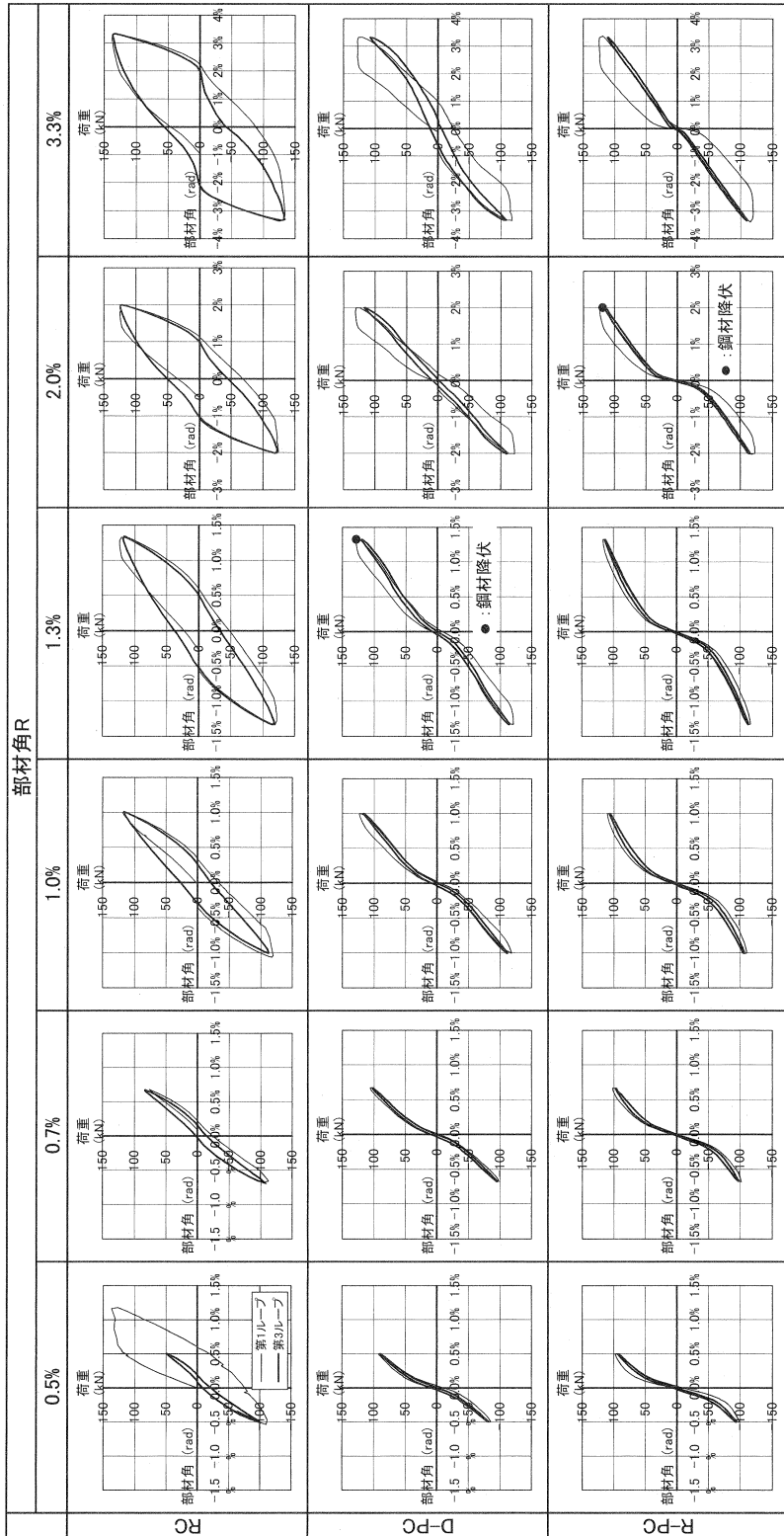


図4 荷重(P)一部材角(R)関係

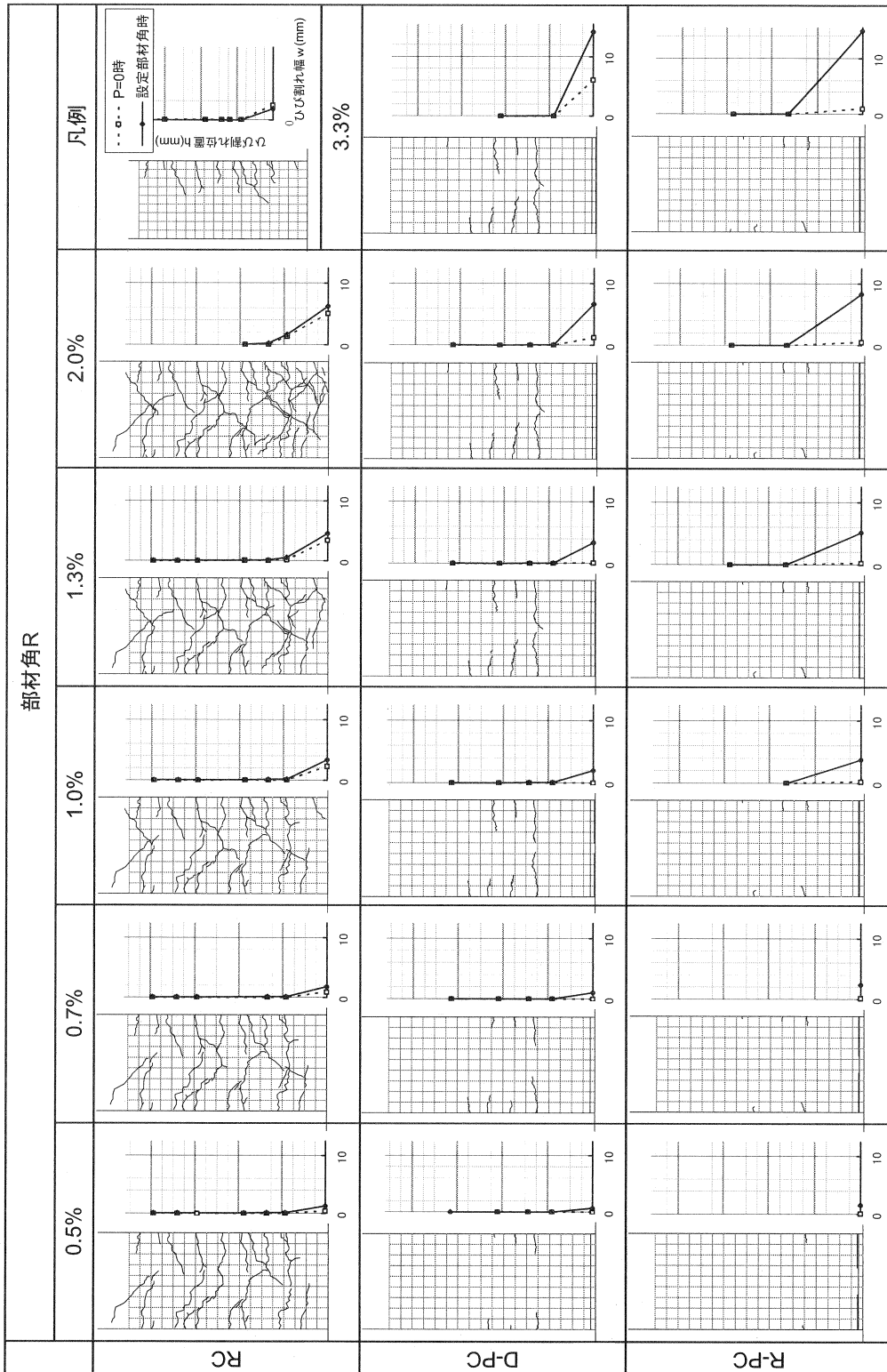


図6 ひび割れ状況とひび割れ幅

いので、繰り返し荷重下では引張-圧縮の塑性繰り返しひずみ履歴をうけてエネルギーを吸収するためである。これに対し PC 試験体は、小さい部材角時では鋼棒が降伏しないため、鋼棒によるエネルギー吸収が生じず heq は小さい。鋼材降伏が起こる変形域に達すると第 1 ループでは大きな heq を示すが、同じ荷重階における第 2, 第 3 ループでは PC 鋼材は第 1 ループより大きなひずみを受けずに弾性材として挙動するため、履歴ループはエネルギー吸収の少ない原点指向型のものとなる。②鋼棒、コンクリートがほぼ弾性域にある $R=0.7, 1.0\%$ 時では D-PC と R-PC 試験体の heq には大きな差は見られない。これに対し、付着性能がよい異形鋼棒に降伏が起こる $R \geq 1.3\%$ の第 1 ループでは、D-PC 試験体の heq の方が R-PC 試験体のそれよりも大きな値を示すが、 $R=3.3\%$ の大変形においても高々 10% 程度で、また第 3 ループでのそれは数%に過ぎないなど、文献²⁾と同様の結果を示した。

3.3 ひび割れ状況およびひび割れ幅の集中性

図 6 は、曲げひび割れ状況とひび割れ幅が部材角 R によってどのように推移するかを示すために、各 R での曲げひび割れ状況と各位置でのひび割れ幅を併記したものである。ひび割れ幅図の実線、点線はそれぞれ設定部材角時および除荷後荷重零時を示している。同図によれば、ひび割れ間隔は、RC 試験体で約 100mm、R-PC は約 200 mm、D-PC 試験体は R-PC より若干狭い程度となり、鋼材の付着特性の影響が明確であった。また、PC 試験体では目地部の開口のみが顕著であるのに対し、RC 試験体ではひび割れが分散しひび割れ開口も PC 試験体のそれに比べ小さいものであった。

3.4 最大ひび割れ幅-部材角関係

図 7 は、荷重してから除荷するまでの過程における最大ひび割れ幅(柱梁境界面)の推移を $R=1.0\%$ を例にとって示したものである。いずれの試験体も部材角の増大に従ってひび割れ幅は増大するが、RC 試験体では $R=0.7\%$ 程度以降において増加率が大きくなり、除荷点以降は直線的にひび割れ幅は減少した。また、第 3 ループでも同様の傾向を示すが繰り返し荷重によるひび割れ幅の増加は第 1 ループに比べて小さいものであった。PC 試験体では鋼材が弾性であるため、ひび割れ幅は荷重および除荷過程でほぼ同じ曲線を示したが、その勾配は付着性能が低い R-PC 試験体のほうが大きかった。

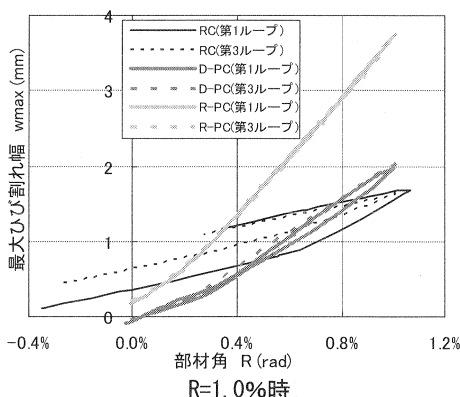


図 7 部材角 R の変化による最大ひび割れ幅

3.5 残留ひび割れ幅および残留ひび割れ幅率

図 8 (a) は、各所定荷重階(R_{max})時における最大曲げひび割れ幅 w_{max} および除荷時残留ひび割れ幅 w_R を、また同図 (b) は、 w_R と w_{max} との比を縦軸に、荷重ステップの R を横軸にとって示したものである。同図によれば、次のようなことが分かる。①荷重時の w_{max} は、RC よりも D-PC、R-PC の方が大きい。②D-PC 試験体では、部材角 $R=1.3\%$ 付近になると異形鋼棒の降伏によって残留ひび割れ幅が増大し始めた。ひび割れ性状におけるこれらの現象は、鋼材の付着性能とプレストレスに関係していると推測される。すなわち、付着性能が良好でない場合、良好な場合比較して部材変形(R)の増分に対する鋼材ひずみの増分が小さくなるため、鋼材降伏時 R が大きくなる。また、鋼材降伏は塑性ひずみを生じるため、RC では塑性ひずみに対応する分だけひび割れ幅は戻らず残留する。さらに PC では降伏による塑性ひずみの発生によって有効緊張力が減少して復元性が劣化することなどに関係すると推測される。

3.6 残留ひび割れ幅と残留変形との相関性

図 9 は、各荷重ステップにおける残留ひび割れ幅および残留変形をそれぞれ縦軸および横軸にとって、両者の相関性を検討したものである。同図によれば、RC、D-PC、ならびに数値は小さいものの R-PC において

も、両者はほぼ比例関係を示しており、残留ひび割れ幅と残留変形には良い相関性があることが分かる。

3.7 ひび割れ総長さ

図10は、正負の各載荷部材角Rにおける、柱・梁接合面から2Dの区間に生じた梁のひび割れの総長さを示したものである。同図によればRCでは、主筋降伏後も、せん断ひび割れの増加により、Rの増大とともにひび割れ総長さは増加する傾向が見られ、R=2.0%時には4m近くにもなった。これに対し、D-PCでは鋼材降伏が生ずる以前ではRの増加に対して増大する傾向は見られるが、その増加率はRCに比べ格段に小さい。また、鋼材降伏後の総長さは収束する傾向がみられ、これは降伏後の小さな荷重増加に対し、新たな曲げひび割れが進展しなかったことを示唆している。また、R-PCはRの増大に対して殆ど総長さは増加しないが、これは付着による曲げひび割れの発生が非常に少ないことを示していると考えられる。

4. まとめ

- (1) 各試験体の履歴ループはRCでは紡錘型、PCではS字型を、またそれらの等価粘性減衰定数も既往の実験とほぼ同様の結果を示した。
- (2) ひび割れ間隔は鋼材の付着特性に大きく影響される。また、残留ひび割れ幅率一部材角関係は鋼材の形状、プレストレス力、鋼材降伏の影響を受けた。さらに、ひび割れ総長さは、鋼材の付着性能やプレストレスの有無により、RC試験体とPC試験体とでは非常に大きな差が生じた。
- (3) 残留ひび割れ幅と残留変形との間には比例関係がみられた。

[謝辞]

本研究に対しプレストレスト・コンクリート建設業協会の研究助成を賜った。また、試験体製作については㈱ピーエス三菱、鋼材については高周波熱錬㈱の多大なる御援助をいただいた。記して謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 中塚 侑: PC 建築構造の性能評価型設計法に向けての取り組み、プレストレストコンクリート Vol.47、No.4、pp.20-33、2005
- 2) 中塚 侑、阿波野 昌幸: 接合形式(圧着型・一体型)とPC鋼材種(丸形・異形)の異なる肩持PC梁の耐荷・変形機構と力学性能に関する実験的考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.3、pp.97-110、2000

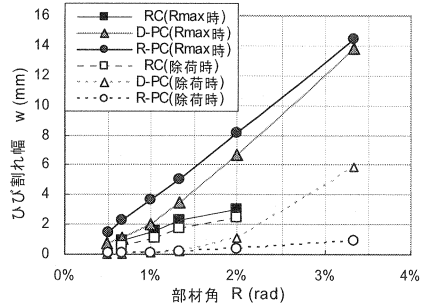


図8(a) 各載荷ステップの最大ひび割れ幅と残留ひび割れ幅

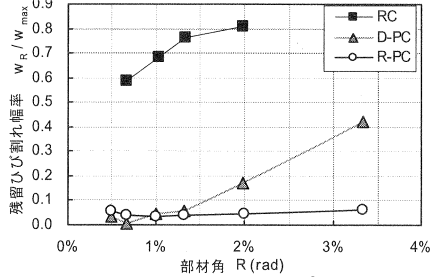


図8(b) 各載荷ステップの残留ひび割れ幅率

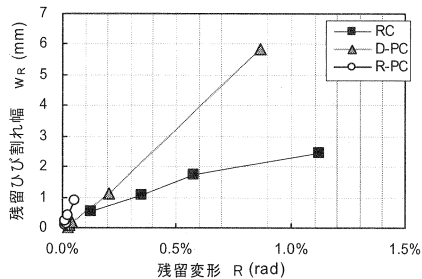


図9 残留変形と残留ひび割れ幅

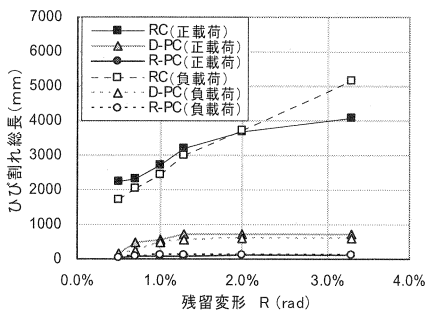


図10 ひび割れ総長一部材角関係