論文　ポーラスコンクリート複合版の力学挙動

伊藤　雄輔[*1]・国枝　稔[*2]・古川　浩司[*3]・六郷　恵哲[*4]

要旨:環境負荷低減を実現させながら力学的な性能をも満足する部材の開発を試みるために，ポーラスコンクリートを RC 部材ならびに PC 部材と合成した複合版を作製し，破壊性状や力学性能について検討を行った。その結果，適切なプレストレスを導入することにより，RC 複合版に比べ，ひび割れ発生荷重ならびに最大荷重が高い，優れた力学性能を持つ PC 複合版が得られることが明らかとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート，RC・PC 部材，複合部材，施工性，力学特性

1. はじめに

ポーラスコンクリートは，連続空隙を有する多孔質なコンクリートであり，透水性や通気性に優れ，吸音性や水質浄化作用に富み，また動植物の生態系にやさしいなど，多機能を有する材料である。

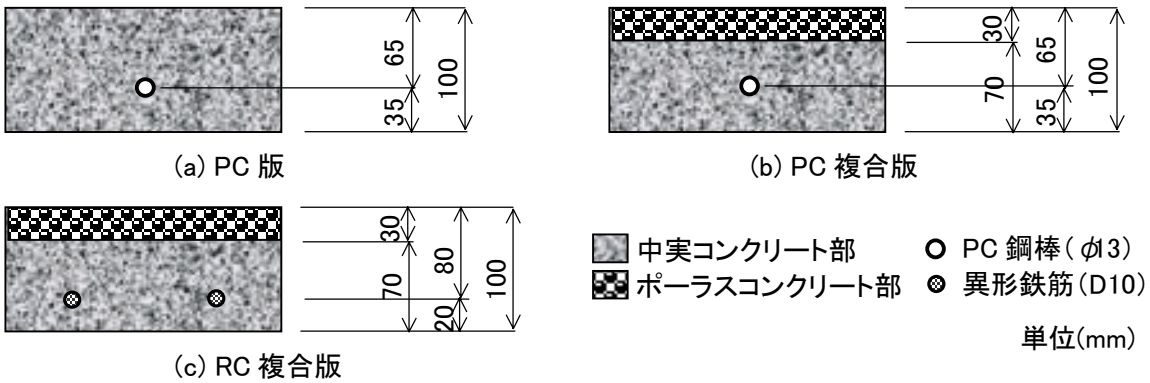
しかし環境負荷低減型コンクリートの一つであるポーラスコンクリートの力学性能は，通常のコンクリートを用いた部材のそれに比べ劣るため，構造部材としての適用は困難である場合が多い。ポーラスコンクリートの利用拡大を目的として，RC 部材とポーラスコンクリートを組み合わせた複合部材として，その力学性能の向上を試みる研究[1),2),3)]がなされている。

一般にプレストレストコンクリートは，ひび割れが発生しにくく耐久性に優れている。本研究においては，環境負荷低減を実現させながら力学的な性能をも満足する部材の開発を試みるために，ポーラスコンクリートを RC 部材ならびに PC 部材と合成した複合版（以後，RC 複合版，PC 複合版と呼ぶ）を作製し，破壊性状や力学特性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

ポーラスコンクリート複合版の寸法は，幅 200×高さ 100×長さ 1700mm とした。供試体は，**図－1** ならびに**表－1** に示すように PC 版が 2 ケ



図－1　供試体の種類

*1 岐阜大学工学部　土木工学科　(正会員)
*2 岐阜大学助手　工学部土木工学科　工博　(正会員)
*3 岐阜大学大学院　工学研究科生産開発システム工学専攻　工修　(正会員)
*4 岐阜大学教授　工学部土木工学科　工博　(正会員)

表－1 供試体の種類

呼　　称	種 別	中実 コンクリート部	ポーラスコンクリート部	使 用 鋼 材	導入プレストレス力(kN)
PC140-普通 CON	PC 版	普通コンクリート	なし	PC 鋼棒 φ13	140
PC140-軽量 CON		軽量コンクリート			
PC140-普通 CON+普通 PO	PC 複合版	普通コンクリート	普通ポーラスコンクリート		
PC70-普通 CON+普通 PO					70
PC140-普通 CON+軽量 PO			軽量ポーラスコンクリート		140
PC140-軽量 CON+軽量 PO		軽量コンクリート	軽量ポーラスコンクリート		
RC-普通 CON+普通 PO	RC 複合版	普通コンクリート	普通ポーラスコンクリート	鉄筋 D10	なし
RC-軽量 CON+軽量 PO		軽量コンクリート	軽量ポーラスコンクリート		

表－2 コンクリートの示方配合と実測スランプ値

	W/C (%)	単位量(kg/m^3)						実測スランプ 値(cm)
		W	C	S*1	G_1*2	G_2*3	Ad*4	
普通コンクリート	50.0	170	340	768	1002	—	1.65	11.0
軽量コンクリート	48.7	166	341	789	—	312	1.72	3.4
普通ポーラスコンクリート	32.8	134	409	—	1605*5	—	—	—
軽量ポーラスコンクリート	32.0	90	281	—	—	468	—	—
硬練りモルタル	45.0	229	508	1526	—	—	—	—

＊1 細骨材(川砂，粗粒率 2.77，密度 2.59 g/cm^3)
＊2 普通粗骨材(玉砂利，密度 2.61 g/cm^3，吸水率 1.49%，最大寸法 15mm)
＊3 軽量粗骨材(密度 0.81 g/cm^3，吸水率 1.80%，粒径 5～10mm)，＊4 AE 減水剤
＊5 粒径 5～10mm にふるい分けた粗骨材を使用

表－3 軽量骨材の物性値

項　　目	試験値	基準値	試験方法
絶乾密度(kg/L)	0.81	0.85±0.1	JIS A 1135
表乾密度(kg/L)	0.82	—	JIS A 1135
24 時間吸水率(%)	1.8	5 以下	JIS A 1135
単位容積質量(kg/L)	0.49	—	JIS A 1104
実積率(%)	61.0	60 以上	JIS A 5002

ース，PC 複合版が 4 ケース，RC 複合版が 2 ケースとし，それぞれ 1 体ずつ作製した。複合版の部材構成は，ポーラスコンクリート 30mm，中実コンクリート 70mm とした。これは既往の研究 [3]において，曲げ破壊性状の観点から，ポーラスコンクリートと中実コンクリートの層厚の比が最大荷重に及ぼす影響は小さいこと，すなわち中立軸より引張側のコンクリートの性質が部材の曲げ破壊時の最大荷重に及ぼす影響は小さいことが把握できたため，本検討では複合版の部材厚比を一定とした。

中実コンクリートとして使用したコンクリートは，普通コンクリート，軽量コンクリートの 2 種類とした。ポーラスコンクリートとして普通ポーラスコンクリート，軽量ポーラスコンクリートを使用した。中実コンクリートとポーラスコンクリートの間に硬練りモルタルを使用した。これらのコンクリートの示方配合と実測スランプ値を**表－2** に示す。軽量骨材の物性値を**表－3** に，各コンクリートの強度ならびに物性試験結果を**表－4** に示す。強度試験用供試体は，圧縮強度用 φ10×20cm，引張強度用 φ15×15cm とし，それぞれ JIS A 1108，JIS A 1113 に準拠した。弾性係数は，圧縮試験時に円柱供試体にコンプレッソメーターを取り付けて求めた割線弾性係数で示した。空隙率の測定は，「ポーラスコ

表－4 強度ならびに物性試験結果

コンクリートの種類	目標空隙率（%）	空隙率（%）	強度（MPa）		弾性係数（GPa）
			圧縮	引張	
普通コンクリート	—	—	47.1	3.4	31.4
軽量コンクリート	—	—	41.0	2.8	18.7
普通ポーラスコンクリート	20.0	12.1	19.4	2.6	30.1
軽量ポーラスコンクリート	22.0	25.0	3.3	0.9	5.9

ンクリートの空隙率試験方法（案）[4]」の容積法に準じて行った。ポーラスコンクリートの空隙率が目標値と差が生じた原因として，普通ポーラスコンクリートは骨材の表面水の影響によってセメントの流動性が上がり，目詰まりを起こしたために空隙が減少しと思われる。

PC 版ならびに PC 複合版にはアンボンド PC 鋼棒 φ13（C 種 1 号 SWPR 1080/1230）を使用し，部材下縁から 35mm の位置に 1 本配置した。RC 複合版には異形鉄筋 D10（SD295A）を使用し，下縁から 20mm の位置に 2 本配置し，鉄筋量を 0.89%とした。本実験においては，基本的な曲げ載荷試験を行うため，スターラップは配置していない。

2.2 供試体の作製方法

使用性ならびに力学性状の観点から，ポーラスコンクリートの仕上げ面はできるだけ平滑とすることが望ましい。そのためにポーラスコンクリート表面が型枠底面に接するように上下逆向きに供試体を作製した。二層構造のポーラスコンクリート複合版を作製する場合，各層の境界部には十分な付着性状を付与しつつ，各層はそれぞれ所定の厚さになるよう作製する必要がある。PC 複合版ならびに RC 複合版では，まずポーラスコンクリートを所定の厚さ（30mm）に敷ならし，突き棒（35×35mm の接触面）により十分に締固めを行った。その後，ポーラスコンクリートの空隙部分にセメントペーストが流入するのを防ぐために，ポーラスコンクリート上部の空隙を埋める程度（厚さ数 mm）に硬練りモルタルを敷き均した。その後普通コンクリートまたは軽量コンクリートを敷ならし，ハンドバイブレーターにて締固めを行った。PC 版では，普通コンクリートまたは軽量コンクリートを型枠に詰め，棒状バイブレーターにて締固めを行った。

材齢 2 日ですべての供試体の脱型を行った。その後湿布養生を行い，材齢 46 日で載荷試験を行った。なお PC 版ならびに PC 複合版のプレストレスの導入は載荷試験直前に行った。RC 複合版についても同様に材齢 46 日にて載荷試験を実施した。すべての供試体の載荷は，供試体の上下を反転（打設面を下面，型枠面を上面）させ実施した。

PC 版ならびに PC 複合版の導入プレストレス力は，鋼材の耐力 165kN（132.7mm^2 × 1243N/mm^2）の 85%である 140kN を目標に導入した。ただし，1 ケースにおいてはその 1/2 の 70kN を導入プレストレスとした。プレストレス導入は，センターホールジャッキを用いて片引きにて行い，またはり中央部上下縁の表面にひずみゲージを貼り，ひずみの値を計測しながら緊張を行った。

2.3 載荷試験方法

モーメントスパン 300mm，せん断スパン 600mm の 4 点曲げ載荷試験を行い，荷重と載荷点変位を計測した。載荷点ローラーと供試体との間には，厚さ 5mm のゴム板を敷いた。なお，ひび割れ状況の観察を容易にするため，ポーラスコンクリート側面部分に予め石膏を薄く塗った。

3. 実験結果と考察

3.1 供試体のひび割れ状況

載荷試験後の各ケースのひび割れ状況を**写真－1** に示す。PC 版ならびに PC 複合版には，モーメントスパン（300mm）内の供試体下縁部分

に 2～5 箇所のひび割れが発生した。荷重除荷後には，プレストレスによる復元力により，供試体側面のひび割れは閉じ，目視による確認は困難であった。

RC 複合版では，供試体スパン中央部約 800mm の範囲にわたりそれぞれ 10 箇所にひび割れが発生した。PC 版ならびに PC 複合版と異なり，荷重除荷後もひび割れが目視でき，また下縁から発生したひび割れが上縁にまで達した。全てのケースにおいて，中実コンクリートとポーラスコンクリートの境界部には付着ひび割れが観察されず，本研究で用いた打設方法によって層間には十分な付着が確保されていた。

3.2 破壊性状

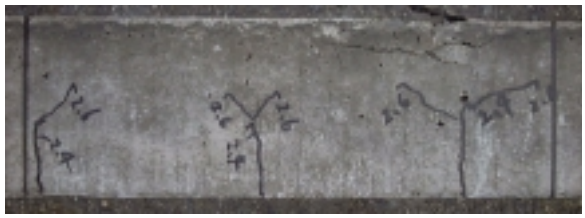
(1) 使用鋼材の違いによる影響

PC 版ならびに PC 複合版の曲げ載荷試験の結果，スパン中央にひび割れが発生しひび割れが進行する間も荷重は伸び続け，最終的に供試体上縁のコンクリート部で圧縮破壊を起こした。荷重除荷後は変位がほぼゼロとなった。また，RC 複合版の場合は，ひび割れが進行後，鉄筋が降伏した後にポーラスコンクリートが圧縮破壊した。曲げ載荷試験から得られた，各供試体のひび割れ発生荷重，最大荷重ならびに除荷後変位を**表－5** に示す。

使用鋼材の違いによる影響をみるために，対象となる 6 ケースの荷重－変位曲線を**図－2(a)** に示した。本研究で用いた鋼材量の場合，PC 版ならびに PC 複合版は，RC 複合版に比べて 2 倍程度の最大荷重となり，終局時の変位は小さくなった。PC 版ならびに PC 複合版では，プレストレスの効果によりひび割れ発生荷重が大きくなるため，RC 複合版に比べて利用荷重範囲が増加することがわかる。

(2) 中実コンクリート部の違いによる影響

中実コンクリート部の違いによる影響をみるために，対象となる 4 ケースの荷重－変位曲線を**図－2(b)** に示した。軽量コンクリートを使用した場合は普通コンクリートを使用した場合に比べて，最大荷重は 1 割程度しか低下しなかっ



(a) PC140-普通 CON

(b) PC140-軽量 CON

(c) PC140-普通 CON+普通 PO

(d) PC70-普通 CON+普通 PO

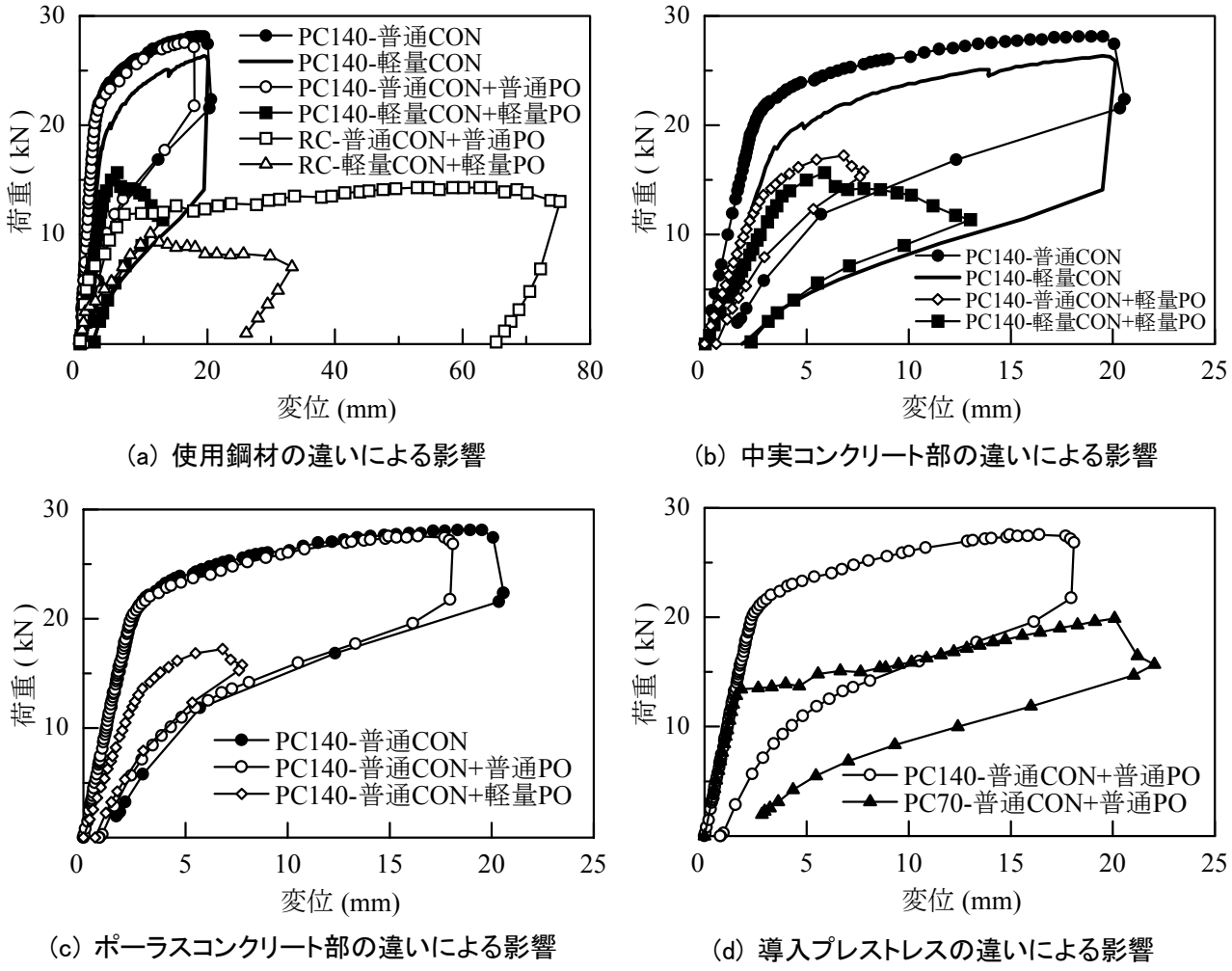
(e) PC140-普通 CON+軽量 PO

(f) PC140-軽量 CON+軽量 PO

(g) RC-普通 CON+普通 PO

(h) RC-軽量 CON+軽量 PO

写真－1 供試体のひび割れ状況



(a) 使用鋼材の違いによる影響

(b) 中実コンクリート部の違いによる影響

(c) ポーラスコンクリート部の違いによる影響

(d) 導入プレストレスの違いによる影響

図－2 荷重－変位曲線

表－5 曲げ載荷試験の結果

呼　　称	ひび割れ発生荷重(kN)	最大荷重(kN)	除荷後変位(mm)
PC140-普通 CON	20	28.2	1.1
PC140-軽量 CON	18	26.4	1.8
PC140-普通 CON+普通 PO	20	27.5	0.8
PC70-普通 CON+普通 PO	13	19.9	1.7
PC140-普通 CON+軽量 PO	14	17.2	0.5
PC140-軽量 CON+軽量 PO	13	15.8	2.2
RC-普通 CON+普通 PO	5	14.3	65.3
RC-軽量 CON+軽量 PO	3	10.1	25.0

た。したがって,部材の軽量化を目的とすると,引張鉄筋の降伏により生じる曲げ破壊の場合,中実部に軽量コンクリートを使用することは有効と思われる。

(3) ポーラスコンクリート部の違いによる影響

ポーラスコンクリート部の違いによる影響をみるために，対象となる 3 ケースの荷重－変位曲線を図－2(c)に示した。ポーラスコンクリート部に，普通ポーラスコンクリートを使用した PC 複合版と普通コンクリートを使用した PC 版の荷重－変位曲線はほぼ類似している。普通ポーラスコンクリートでは目詰まりを起こしてお

り力学挙動が普通コンクリートに近いことも，この類似した原因の一つと考えられる。しかし軽量ポーラスコンクリートを使用した場合は，他の 2 ケースに比べて，ひび割れ発生荷重が 3 割減少し，最大荷重が 4 割程度低下した。またひび割れ発生後間もなく最大荷重を示し，その後は軽量骨材の破壊が進行し荷重が減少すると共にポーラスコンクリート部の圧壊が生じた。本実験結果から判断すると，引張域に比べ圧縮域の弾性係数が極端に小さい部材においては中立軸が下がるために，圧縮強度の小さい軽量ポーラスコンクリートを圧縮域に使用すると，PC 複合版の力学特性が劣ると考えられる。なお，軽量ポーラスコンクリートの強度改善については別途検討している。

(4) 導入プレストレスの違いによる影響

導入プレストレスの違いによる影響をみるために，対象となる 2 ケースの荷重－変位曲線を**図－2(d)**に示した。導入プレストレス力を 70kN にした場合は 140kN の場合に比べ，ひび割れ発生荷重ならびに最大荷重が 3 割減少したが，ひび割れ発生まではほぼ同じ荷重－変位曲線を示し，破壊形態としては上縁部の圧縮破壊であった。なお，除荷後に残留変位が生じていないことから，鋼材は降伏していないものと考えられる。このことから，PC 複合版として適切なプレストレスを導入すれば，大きな荷重まで弾性挙動を示す優れた部材を得られるものと考えられる。

4. 結論

本研究では，各種コンクリートを使用したポーラスコンクリート PC，RC 複合版を作製し，曲げ破壊性状ならびにひび割れ状況について検討し，以下の結論を得た。

(1) 適切なプレストレスを導入した PC 複合版では，RC 複合版に比べ大きなひび割れ発生荷重ならびに最大荷重が得られた。PC 複合版において導入プレストレス量を 1/2 とすると，ひび割れ発生荷重ならびに最大荷重は約 7 割となった。

(2) PC 複合版の中実コンクリート部に，軽量コンクリートを使用した場合，普通コンクリートを使用した場合よりも若干耐力は劣るものの，ほぼ類似した破壊性状となった。

(3) 軽量ポーラスコンクリートを用いた PC 複合版では，軽量ポーラスコンクリートの強度が小さかったために，ひび割れ発生後に軽量骨材の破壊が著しく耐力が小さくなった。

以上より，ポーラスコンクリートを構造部材として利用する上では，PC 部材と複合させて用いることが有効なことを明らかにした。ポーラスコンクリート部には強度の大きい骨材を使用する必要があると考えられる。

謝辞

本研究は，「岐阜県研究開発財団 RSP 事業可能性試験テーマ，課題名：リサイクル材を用いたポーラスコンクリート版の開発」の一部として実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 横井克則，天羽和夫，水口裕之：2 層構造ポーラスコンクリートはりの曲げせん断性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.151-156，2001.7
2) 古川浩司，国枝稔，鎌田敏郎，六郷恵哲，遠藤友紀雄：ポーラスコンクリートを用いた RC 複合版の作製方法に関する基礎的研究，土木学会第 56 回年次学術講演会第 5 部，pp.464-465，2001.10
3) 古川浩司，伊藤雄輔，国枝稔，鎌田敏郎，六郷恵哲，遠藤友紀雄：ポーラスコンクリートを用いた RC 複合版の作製方法と力学性能，第 16 号中部セメントコンクリート工学論文集，pp.63-68，2001.11
4) 日本コンクリート工学協会：エココンクリート研究委員会報告書，1995