

論文 2層構造ポーラスコンクリートはりの曲げせん断性状

横井克則*1・天羽和夫*2・水口裕之*3

要旨: 近年, エココンクリートとして注目されているポーラスコンクリートの利用拡大を図るために, 鉄筋を用いて補強することを考えた。鉄筋の腐食性を考慮し, 本研究では鉄筋部に普通コンクリートを用いた2層構造とした。主筋比, せん断スパン比, 空隙率などを变化させた16体のRCはり試験体を用いて曲げせん断実験を行い, その破壊性状や力学的特性を調査した。その結果, 普通コンクリートにおける耐力算定方法に若干の配慮が必要なものの, ひび割れ発生荷重や終局荷重を予測できることがわかった。また, たわみに関しては, ポーラスコンクリートの弾性係数を考慮する必要があることを明らかにした。

キーワード: ポーラスコンクリート, RCはり, 曲げ, せん断, 2層構造

1. はじめに

近年, 地球的規模で環境問題が議論されるようになり, 従来のコンクリートに要求される性能は力学的方面からだけでなく, 環境保全や自然との調和を図る機能も求められている。土木学会においても, 1994年から土木学会地球環境委員会に土木建設業環境管理システム研究小委員会を設置し, 環境管理・監査等について広く調査研究を行い, コンクリートについては土木や建築の各種構造材料として利用され経済や文化の発展に大きな貢献をしてきているが, コンクリート構造物は便利や機能を追求するあまり, 緑や水辺の自然を破壊し生態系を脅かす存在となり, 今後は河川生態系の保全や環境に配慮したコンクリートの開発が必要不可欠としている。

これらのことから, 従来のコンクリートに微生物, 植物, 小動物等との接点を持たせるため, コンクリート分野でも生物環境の保全に貢献する資材として内部に連続した空隙を有するポーラスコンクリートが開発された。ポーラスコンクリートは連続した内部空隙に生物膜層が形成されることから水質浄化作用があり, また水や空気の循環が可能であることから透水・排水性

舗装, 吸音・防音壁, 海洋浄化工, 緑化コンクリート等に注目され実用化が進められている¹⁾。

本研究は, これら機能を有するポーラスコンクリートの利用拡大を図るために, 鉄筋で補強した利用を考えた。しかし, ポーラスコンクリートは空気や水を通しやすいことで, 鉄筋の腐食が考えられる。そこで, 鉄筋部には普通コンクリートを用い, それ以外はポーラスコンクリートを用いることで2層構造のRCはりを作製し, 曲げせん断実験を行い, 破壊性状や力学的特性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料とコンクリートの配合

主筋には, SD345のD6, D10, D13およびD16の4種類を使用した。これらの力学的特性について, ひずみゲージを用いた鉄筋の引張試験から求めた結果を表-1に示す。

表-1 鉄筋の特性

種類	公称断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D6	31.7	352.8	441.9	180000
D10	71.3	333.2	461.9	196000
D13	126.7	362.6	459.9	202000
D16	198.6	362.6	500.4	202000

*1 高知工業高等専門学校助教授 建設システム工学科 博(工学)(正会員)

*2 阿南工業高等専門学校教授 建設システム工学科 博(工学)(正会員)

*3 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

表-2 コンクリートの配合

コンクリートの種類	空隙率 (%)	最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
P1	15	15	27	—	132	489	—	1500
P2	20	20		—	109	403	—	
P3				—	108	400	—	1491
P4	25	15		—	86	318	—	1500
P5		20		—			—	—
N1	3	15	65	51	180	276	938	921
N2			55	49		328	880	938
N3			45	47		400	828	956

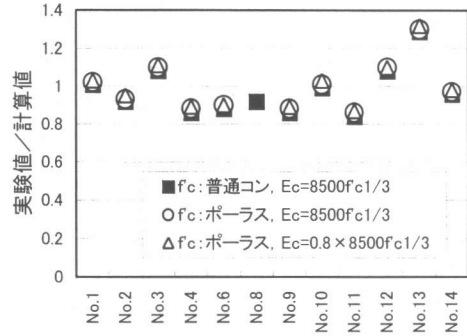
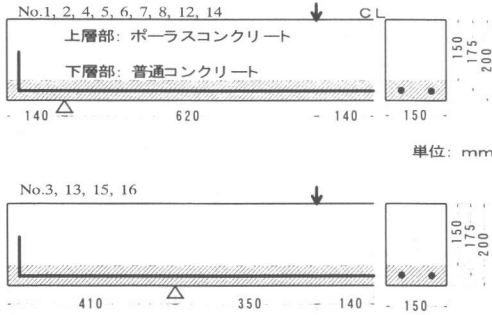


図-1 試験体

表-3 試験体の種類

試験体	a/d	主筋比 (%)	はり高さ (mm)	有効高さ (mm)	空隙率 (%)	骨材寸法 (mm)	コンクリート配合 (表-2)	
							上層	下層
No. 1	3.5	0.96 (2-D13)	200	175	15	15	P1	N1
No. 2					20		P2	
No. 3	2.0	20			P3			
No. 4	3.5				0.96 (2-D13)	P2		
No. 5		1.51 (2-D16)				普通コン	P4	
No. 6		0.54 (2-D10)	N1					
No. 7	2.0	0.96 (2-D13)	150	125	20	15	P4	N3
No. 8			3.5	0.21 (2-D6)			200	175
No. 9	2.0	0.96 (2-D13)			200	175		
No. 10			2.0	0.96 (2-D13)			200	175
No. 11	2.0	0.96 (2-D13)			200	175		
No. 12			3.5	0.21 (2-D6)			200	175
No. 13	2.0	0.96 (2-D13)			200	175		
No. 14			3.5	0.21 (2-D6)			200	175
No. 15	2.0	0.96 (2-D13)			200	175		
No. 16			2.0	0.96 (2-D13)			200	175

コンクリート用材料としては、普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)、最大寸法が 15mm と 20mm の海部川産碎石 (密度 2.68g/cm³) および那賀川産川砂 (密度 2.62g/cm³) を用いた。コンクリートの配合を表-2 に示す。配合は、ポーラスコンクリートでは水セメント比を 27% の一定として、骨材寸法 5~15mm と 10~20mm の骨材を用い、目標空隙率が 15, 20 および 25% になるように行った。空隙率測定は、JIS

A 1116 (空気量試験の重量法による方法) に基づいて行った。普通コンクリートは、水セメント比を 3 種類とした。コンクリートの強度は、φ10×20cm の円柱供試体から求めた。

2.2 試験体および載荷方法

はり試験体の高さは 200mm および 150mm の 2 種類とした。下縁から 50mm または 100mm まで主筋を囲むように普通コンクリートを打設

した後、その上に直ちにポーラスコンクリートを打設した。試験体の形状および寸法を図-1に示す。本実験では、主筋比、せん断スパン比（せん断スパン/有効高さ；以下 a/d ）、断面形状、ポーラスコンクリートの空隙率および最大骨材寸法を変化させた 15 体のポーラスコンクリートはりとは、比較用に、はり全体が普通コンクリートである 1 体を作製した。試験体の種類および諸特性を表-3に示す。今回の実験では、基本的な曲げ荷重実験のデータを得るために、全試験体ともにスターラップは配置しなかった。荷重は 2 点集中荷重とし、静的荷重をほぼ 2kN 間隔で一方向に単調に増加させ破壊に至らしめた。測定項目は、荷重荷重、はり中央部のたわみと主筋ひずみ、はり中央部上下縁のコン

クリートひずみとした。

3. 実験結果および考察

今回の実験結果を表-4にまとめて示し、以下、考察を行う。

3.1 ひび割れ状況

各試験体の最終ひび割れ状況を図-2に示す。ひび割れは、下層部の普通コンクリートにおいては目視でも確認できるが、上層部のポーラスコンクリート部では空隙により、ひび割れ幅が増大するまで、その状況が確認できなかった。No.1 や No.2 などにおいて、下層部と上層部との接合部で曲げひび割れが途切れているように見えるのはこのためである。しかし、荷重が進みひび割れが進展すると、曲げおよび斜めひび

表-4 実験結果

試験体	圧縮強度(kN/mm ²)		最終破壊形式	曲げひび割れ発生荷重(kN)	降伏荷重(kN)	斜めひび割れ発生荷重(kN)	終局荷重(kN)
	普通コン	ポーラス					
No.1	34.8	21.8	曲げ引張	11.4	47.9	—	49.6
No.2		16.3	曲げ引張	8.6	43.6	—	47.2
No.3			せん断	21.8	89.2	67.9	—
No.4		16.1	曲げ引張	9.9	40.9	—	44.8
No.5		16.3	せん断	10.9	—	41.1	—
No.6			曲げ引張	8.3	22.2	—	29.2
No.7		8.0	せん断	7.0	—	31.6	—
No.8		—	—	曲げ引張	15.0	43.5	—
No.9	64.3	15.9	曲げ引張	10.3	41.1	—	48.9
No.10			曲げ引張	7.8	46.0	—	46.0
No.11			せん断	12.8	68.5	55.0	—
No.12			曲げ引張	9.9	13.2	—	13.5
No.13	54.4	14.0	曲げ引張	15.7	27.4	—	25.5
No.14	43.1		曲げ引張	8.8	45.3	—	49.1
No.15	73.2		せん断	17.6	—	55.3	—
No.16	54.4	13.2	せん断	15.7	—	64.6	—

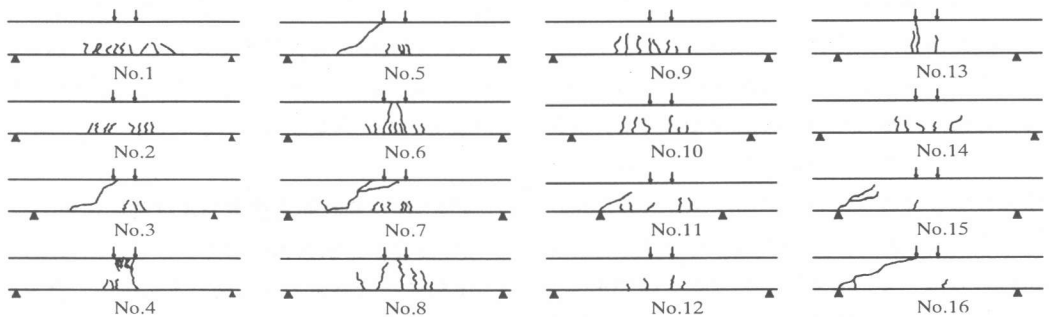


図-2 最終ひび割れ状況

割れともに、2層構造の下層部から上層部へのひび割れの連続性が見られ、上層部と下層部との一体化が確認できた。

最終破壊形式としては、主筋の曲げ降伏後に圧縮縁コンクリートが圧壊する曲げ引張破壊した試験体と、主筋の降伏前に顕著な斜めひび割れが発生し耐力が低下するせん断破壊を生じた試験体があった。

3.2 荷重とたわみの関係

空隙率と骨材寸法が異なる試験体における荷重とたわみの関係を図-3に示す。空隙率が15%のNo.1と20%のNo.2は、比較用のNo.8とほぼ同様な傾向を示したが、空隙率が大きい25%のNo.7および空隙率が20%でも骨材寸法が大きいNo.4は、同じ荷重におけるたわみが他のものより大きくなる傾向にあった。これは、上層部に空隙率や骨材寸法が大きいポーラスコンクリートを用いた場合には、はりの曲げ剛性が低下したことが考えられる。この理由として、このようなポーラスコンクリートの弾性係数は、同じ圧縮強度を持つ普通コンクリートの弾性係数に比べて、その値が小さいためと推測した。

これを明らかにするため、著者らが過去に実施した本実験と同じ条件を持つポーラスコンクリートと本実験で用いたコンクリートから求めた圧縮強度と弾性係数の関係を表-5に示す。計算値は一般的な普通コンクリートの圧縮強度と割線弾性係数の関係を示すとされている表中に示す式²⁾で計算し、実験値については圧縮試験時に円柱供試体の側面にひずみゲージを貼り求めた割線弾性係数で示した。その結果、実験値は計算値に比べて約20%低下していた。

以上のようにして求めた弾性係数を用いて、計算により荷重とたわみの関係を求めた。計算には、通常のRCはりのたわみ算定に用いられる弾性は理論において、曲げ剛性の算出に、はり軸方向の剛性変化を考慮する弾性荷重法を用いた方法³⁾で、実験結果と比較し図-4に示す。対象とした試験体はNo.4およびNo.7試験

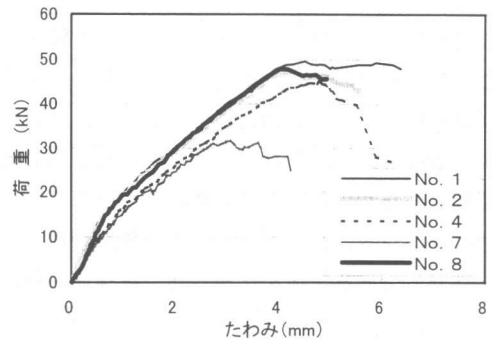


図-3 荷重とたわみの関係

表-5 弾性係数の比較

空隙率 (%)	骨材粒径 (mm)	圧縮強度 f_c (kN/mm ²)	①計算値 $8500f_c^{1/3}$ (kN/mm ²)	②実験値 割線弾性係数 (kN/mm ²)	②/①
20	20	14.1	2.05×10^4	1.74×10^4	0.85
25	15	8.0	1.70×10^4	1.34×10^4	0.79
25	20	11.5	1.92×10^4	1.53×10^4	0.80

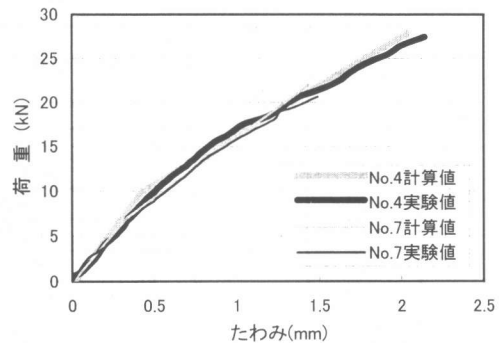


図-4 補正後の荷重とたわみの関係

体で、今回用いた弾性荷重法が簡易法でもあることから、たわみがあまり大きくない範囲を対象とした。その結果、若干の差異は見られるものの、概ね実験値と計算値の挙動が合っていた。しかし、ポーラスコンクリートの弾性係数については大きなばらつきが見られ今後の検討が望まれるが、本実験においては、普通コンクリートの圧縮強度と弾性係数の関係を示す一般式より求まる弾性係数から、20%程度低下させた値が適当であると判断された。

3.3 ひび割れ発生荷重および終局荷重

(1) 曲げひび割れ発生荷重

実験値と計算値の比を図-5に示す。計算値はコンクリートの引張応力を無視した弾性理論

に基づき求め³⁾、コンクリート強度には図中の黒丸は下層部の普通コンクリートの強度を用い、白丸は各試験体におけるポーラスコンクリートの強度を用いて計算した。実験値は、はり下縁部に貼ったひずみゲージの値と目視で判断した。

図より、前者はすべての試験体で実験値が計算値を大きく下回ったが、後者は比較的精度良く求めることができた。また、2層構造の普通コンクリート部を100mmまで高くしたNo.9においても同様な傾向がみられた。さらに、下層部の普通コンクリートの強度の変化についても、その影響は見られなかった。したがって、今回のように2層構造の場合の曲げひび割れ発生荷重は、上層部のコンクリート強度に影響を受けていると思われるが、この理由については、今後の検討課題とする。

(2) 降伏荷重

実験値と計算値の比を図-6に示す。計算値は、コンクリートの引張応力を無視し平面保持の仮定をもとに弾性解析する方法³⁾で行った。計算値におけるコンクリートの弾性係数には、下層部の普通コンクリートの弾性係数、上層部のポーラスコンクリートの弾性係数、さらに3.2で述べたようにポーラスコンクリートの弾性係数を80%にしたものについてそれぞれ計算を行った。実験値は主筋の降伏ひずみで求めた。

図より、No.13を除く試験体では、若干実験値が計算値より小さくなる傾向にあるものの、計算値は比較的精度良く求まった。また、比較用のNo.8と比べても、その値に差異はなかった。No.13については、図-2のひび割れ状況からも判断できるように、ひび割れ本数が少なくなり集中したことで、鉄筋のひずみに偏りが生じ、実験値が大きくなったと考えられる。また、コンクリートの弾性係数の違いによる影響については、その差は小さかった。

(3) 斜めひび割れ発生荷重

実験値と計算値の比を図-7に示す。計算値は著者らの既往の調査⁴⁾により、 a/d が2.5より小さい試験体については石橋らの式⁵⁾、2.5より

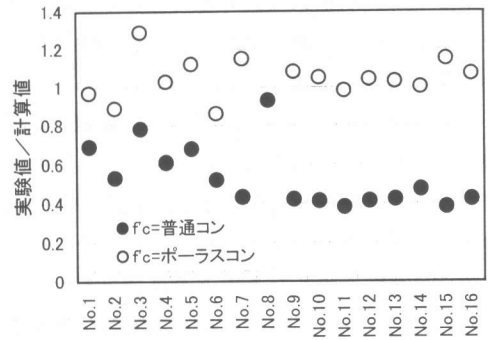


図-5 曲げひび割れ発生荷重

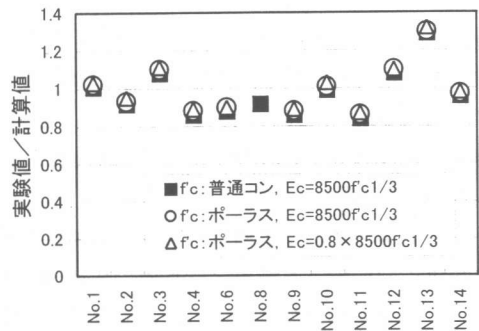


図-6 降伏荷重

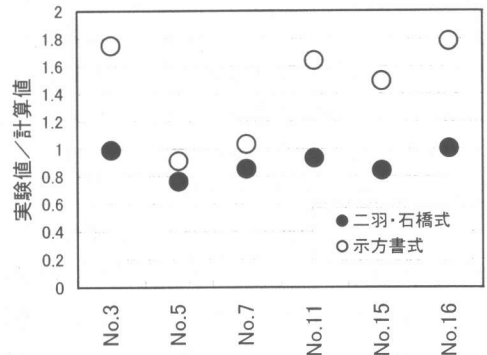


図-7 斜めひび割れ発生荷重

大きい試験体については二羽らの式⁶⁾を用いた。また、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕の算定式を用いた計算も行った。実験値については、ポーラスコンクリートの場合ひび割れ発生判定がたいへん困難なため、今回は目視と荷重-たわみ曲線から判断した。

図より、斜めひび割れが発生した試験体において、 a/d が2.0の試験体については、示方書式による計算値は実験値に比べて相当大きい結果

を示したが、石橋式で計算された結果は若干実験値が小さくなる傾向にあるが比較的精度が良い結果となった。次に、 a/d が大きい No.5 および No.7 については、二羽式で計算した場合、実験値が計算値に比べて若干小さくなった。示方書式は計算値を安全側に示す傾向にあり⁴⁾、示方書式で求めた計算値と比較すると、その比は実験値に比較的近くなることが確認できた。

総合的に判断すると、斜めひび割れ発生荷重を二羽式や石橋式で計算した場合、実験値は計算値よりも0~20%程度は低下すると考えられる。これは、ポーラスコンクリート部におけるせん断力に対する抵抗力が低下しているためと考えられるが、No.16 から得られた結果からは、空隙率や骨材寸法の影響は特に見られなかった。

(4) 終局荷重

最終破壊形式として曲げ破壊した試験体の終局荷重について、実験値と計算値の比を図-8に示す。終局耐力の算定には、平面保持を仮定し、コンクリートの圧縮応力分布を長方形に置き換えた等価応力ブロックを用いる方法³⁾で行った。なお、ポーラスコンクリートの等価応力ブロックについては今後検討の必要があると思われるが、今回は普通コンクリートと同様に用いた。コンクリート強度は、ポーラスコンクリートの強度を用いて計算を行った。

その結果、実験値と計算値は近い値を示しており、等価応力ブロックを用いる方法で終局荷重を算定することができた。しかし、低鉄筋比である No.6, No.13 および No.14 では、実験値が計算値に比べて若干大きくなる傾向にあった。

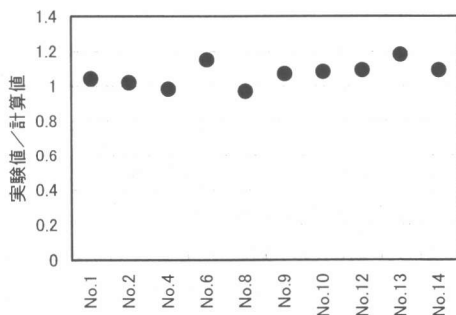


図-8 終局荷重

4. まとめ

2層構造にしたポーラスコンクリートはりの曲げせん断性状に関して実験的な検討を行い、得られた結果を以下に示す。

- (1) ひび割れ性状として、下層部から上層部へのひび割れの連続性が見られ、2層の一体化が確認できた。
- (2) 荷重とたわみの関係で、ポーラスコンクリートの空隙率や骨材寸法が大きい試験体においてはたわみが大きくなった。
- (3) 曲げひび割れ発生荷重は、その算定において上層部のコンクリート強度を用いる必要があった。また、斜めひび割れ発生荷重は、せん断スパン比に応じて、算定式の検討を必要とした。
- (4) 降伏荷重および終局荷重は、通常の平面保持を仮定する方法で比較的精度良く求まった。しかし、低鉄筋比の場合は、若干、実験値が計算値に比べて大きくなる傾向にあった。

参考文献

- 1) エココンクリート研究委員会編：エココンクリート研究委員会報告集，日本コンクリート工学協会，1995.11
- 2) 岡村 甫：鉄筋コンクリート工学，市ヶ谷出版社，2000.3
- 3) 日本材料学会編：建設材料実験，日本材料学会，2001.3
- 4) 横井克則，島 弘，水口裕之：RCせん断耐力算定式のFRPロッドで補強したはりに対する適用性，コンクリート工学年次論文集，Vol.14, No.2, pp.713-716, 1992.6
- 5) 石橋忠良，齊藤啓一，寺田年夫：RCはりの腹部に配置された軸方向鉄筋のせん断破壊性状に及ぼす影響について，セメント技術年報，Vol.40, pp.495-497, 1986
- 6) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村 甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.37, pp.167-176, 1986