

論文 連続繊維補強ポーラスコンクリートはりの実験的研究

天羽和夫^{*1}・横井克則^{*2}・水口裕之^{*3}・河野 清^{*4}

要旨：透水性、吸音性、水質浄化などの機能を有するポーラスコンクリートを構造用材料として利用するため、連続繊維補強材を主筋とするポーラスコンクリートはりを作製し、曲げせん断試験を行った。実験条件は主筋の種類、ポーラスコンクリートの空隙率およびせん断スパン比を変化させた。その結果、曲げ圧縮破壊した場合の終局耐力は、土木学会の算定式の値に比べて60%程度となる。原因としては、ポーラスコンクリートの終局ひずみが普通コンクリートに比べて小さいことが考えられ、小さな終局ひずみを用いること実験値に近くなる可能性が示された。

キーワード：ポーラスコンクリートはり、連続繊維補強材、曲げ圧縮耐力、終局ひずみ

1. はじめに

コンクリートは、強度、耐久性に優れ、施工性が容易で経済的な材料であることなどから構造用材料として鋼と共に重要な役割を果たしている。しかし、近年地球的規模で環境問題が議論されるようなり、これまでのように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。その一つに、内部に連続した空隙を有するポーラスコンクリートが、水や空気の循環が可能なため注目され、透水性舗装[1]、吸音・防音壁[2]、海洋浄化工[3]、緑化コンクリート[4]などに実用化が試みられている。一方、高強度、高耐食性、軽量など優れた特性を持つ連続繊維補強材は、従来から用いられてきた鉄筋やP C鋼材にない特性を有し、土木・建築分野での構造用材料とする研究が盛んに行われている。

本研究は、ポーラスコンクリートを構造用材料として利用するための基礎的資料を得ることを目的として、通常のコンクリートの補強に使用されている鉄筋をポーラスコンクリートに使用すると空気や水を通しやすいことから腐食するという問題点があるため、主筋に連続繊維補強材の適用を考えポーラスコンクリートはりを作製し、曲げせん断試験を実施して破壊性状や力学的特性などについて検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリートの配合

主筋はアラミド繊維ロッド、炭素繊維ロッドおよび比較用の鉄筋の3種類とした。今回の実験では、せん断破壊を防止するためせん断補強筋には鉄筋を使用した。補強筋の力学的特性を表-1に示す。

表-1 補強筋の特性

名 称		直 径 , cm	断面 積 , cm ²	降伏 強 度 , MPa	引張 強 度 , MPa	弾性 係 数 , GPa
主 筋	アラミド	1.27	1.27	—	1390	69
	炭 素	1.25	0.76	—	1860	137
	鉄 筋	D13	1.27	370	530	199
	スターラフ [®]	鉄 筋	D6	0.32	370	520

* 1 阿南工業高等専門学校助教授 建設システム工学科（正会員）

* 2 高知工業高等専門学校助手 土木工学科、工修（正会員）

* 3 徳島大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

* 4 徳島大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

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、徳島県那賀川産の比重2.62、F.M.=2.80の川砂、および高知県産の比重2.68、最大寸法15mm、F.M.=5.71の石灰石碎石を用いた。

コンクリートの配合は、ポーラスコンクリートでは水セメント比を26%の一定とし、空隙率（JIS A 1116：空気量試験の重量法による試験方法に準じて測定）が15%で目標圧縮強度30MPa、および20%で目標圧縮強度20MPaになるように行

った。また、普通コンクリートは水セメント比を65%とし、目標圧縮強度30MPaになるようにした。

2.2 供試体および載荷方法

供試体は、表-2に示すように主筋の種類とポーラスコンクリートの空隙率を変化させたものとし、比較用として普通コンクリートの供試体も作製した。供試体の形状および寸法は図-1に示すように、スターラップ比は0.35%、スターラップ間隔は12cmの一定とした。

載荷はせん断スパン比（ a/d ）を3.4および2.0とした対称2点載荷とし、静的荷重をほぼ1kN間隔で一方向に単調に増加させた。なお、供試体の支点部は破壊が拘束されないように両側とも水平移動端とした。

測定項目としては載荷荷重、主筋のひずみ、せん断補強鉄筋のひずみ、コンクリート上下縁ひずみおよびはり中央のたわみとした。ひびわれの発生および進展は目視で観察し、発生荷重および進展状況を記録した。

3. 実験結果および考察

3.1 ひびわれ状況および最終破壊状況

アラミド繊維ロッドを用いた代表的な供試体のひびわれ状況および最終破壊状況を図-2に示す。普通コンクリートの供試体に比べてポーラスコンクリートの供試体が、またポーラスコンクリートはりでは空隙率の大きい供試体ほど、ひびわれは集中する傾向となっている。ひびわれの分散性が悪くなる理由として、ポーラスコンクリートと連続繊維補強材との付着力が小さいこと

表-2 供試体の種類および諸特性

No	供試体名	主筋	主筋比,%	スターラップ	空隙率,%	a/d	耐力比(Vd/Mud)	予測破壊形式
1	A-0-1	アラミド	1.00	鉄筋	0.2	3.5	1.23	曲げ圧縮
2	A-15-0			なし	14.3		0.51	せん断
3	A-15-1			鉄筋	14.5		1.30	曲げ圧縮
4	A-15-2			なし	14.8	2.0	0.90	せん断
5	A-20-0			鉄筋	19.8	3.5	0.58	
6	A-20-1			なし	19.7		1.52	曲げ圧縮
7	C-15-1	炭素	0.60	鉄筋	14.6	3.5	1.30	曲げ圧縮
8	C-15-2			なし	14.8	2.0	0.87	せん断
9	S-0-1			鉄筋	0.2	3.5	2.32	曲げ引張
10	S-15-1			なし	14.7	2.32		

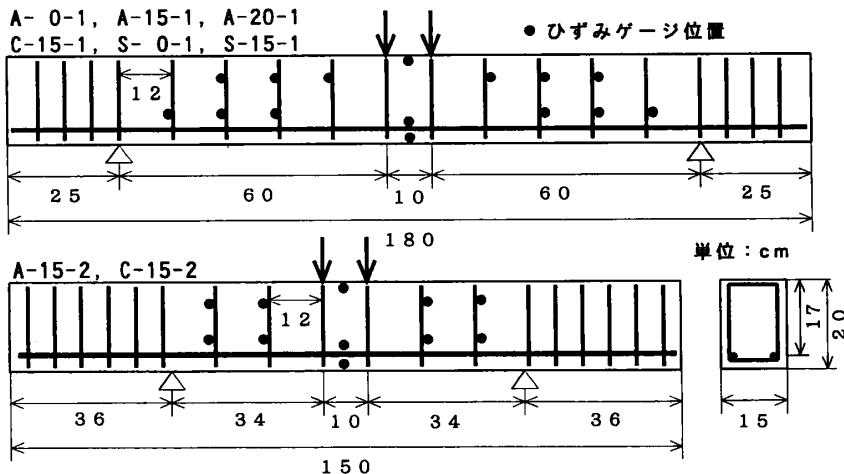


図-1 供 試 体

が考えられるが、これに関する研究はみられず今後の検討課題と思われる。

最終的な破壊状況としては、 a/d が 3.4 の場合にはスターラップを用いない供試体ではせん断破壊、鉄筋を主筋とした供試体では曲げ引張破壊、連続繊維補強材を用いた供試体では曲げ圧縮破壊となり、従来の耐力算定式による予測破壊形式となっている。しかし、 a/d が 2.0 の場合には表-2 に示すように、予測破壊形式はせん断破壊形式であるが曲げ圧縮破壊となっている。これは、ポーラスコンクリートを用いたばかりの場合、これまでの算定式から予測される破壊形式が、異なる可能性があることが考えられる。なお、最終破壊形式を判定するための曲げ耐力は土木学会の算定式[5]を用い、せん断耐力についても土木学会の算定式[5]である斜めひび割れ発生荷重 (V_c) とトラス理論から求める (V_s) との和で計算した。ただし、せん断耐力の V_c の算定は、著者らの研究[6]により、 a/d が 3.4 の供試体は二羽式[7]、 a/d が 2.0 の供試体は石橋式[8]を基本式とし、これに連続繊維補強材の剛性を考慮した換算断面を適用する辻らの方法[9]で求めた。

3. 2 荷重とたわみとの関係

図-3 は、アラミド繊維を用いたばかりの荷重と中央のたわみとの関係を示したものである。終局時のたわみ量は、空隙率の大きい供試体ほど小さくなる傾向がみられる。また、連続繊維補強材を用いた場合は、終局状態で鉄筋が降伏域となり変位のみが増加する鉄筋コンクリートはりのような挙動を示さず、荷重の増加とともに変位が増加している。これは、今回の荷重範囲では、連続繊維補強材が弾性範囲にあるためと考えられる。

3. 3 ひびわれ発生荷重および終局荷重

曲げひびわれ発生荷重、斜めひびわれ発生荷重および破壊耐力の実験値と算定値をまとめて表-3 に示す。

(1) 曲げひびわれ発生荷重

本実験における曲げひびわれ発生荷重の算定値には、従来から用いられている弾性理論を用いて求めた。曲げひびわれの発生荷重は、発生と同時に生じる荷重の低下およびたわみの増加量の変化から、比較的容易に知ることができた。

算定値と実験値を比較すると、その比は 1 体の供試体を除きほぼ 1.0 前後となっており、ポーラスコンクリートはりにおいても従来の弾性理論が適用できると思われる。なお、A-20-0 の供試体の実験値が算定値に比べて 0.61 と小さくなった理由は、ポーラスコンクリートでは不均一になり

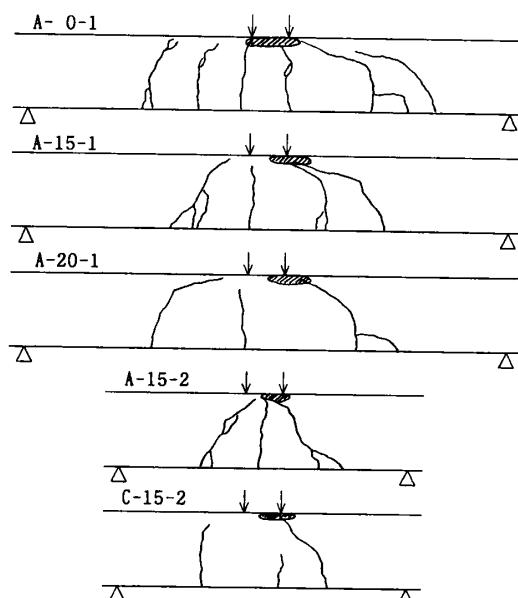


図-2 ひび割れ状況

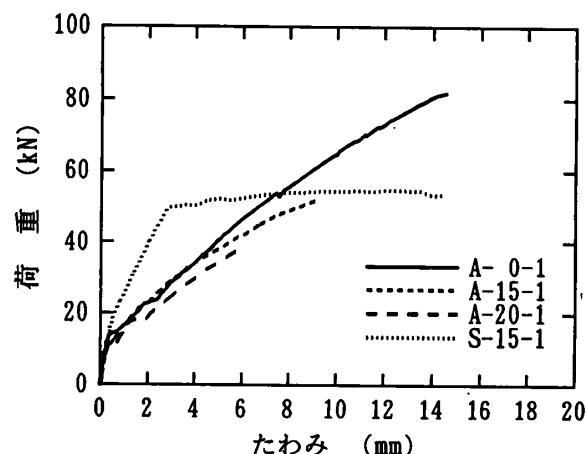


図-3 荷重-たわみ関係

表-3 実験結果

供試体 名 称	f'c MPa	fb MPa	曲げひび割れ発生, kN			斜めひび割れ発生, kN			終局荷重, kN			最終破壊 形 式
			実験値	計算値	比	実験値	計算値	比	実験値	計算値	比	
A-0-1	33	4.4	14.2	14.8	0.96	41.2	40.5	1.02	81.7	80.1	1.02	曲げ圧縮
A-15-0	31	3.6	11.8	12.1	0.98	35.3	39.7	0.89	—	—	—	せん断
A-15-1	28	4.0	12.3	13.1	0.94	35.3	40.4	0.87	52.0	76.0	0.68	曲げ圧縮
A-15-2	28	4.3	15.1	14.1	1.07	66.6	56.6	1.18	82.1	127	0.65	曲げ圧縮
A-20-0	22	3.7	7.4	12.2	0.61	29.4	35.1	0.84	—	—	—	せん断
A-20-1	22	3.4	10.9	11.4	0.96	29.4	35.4	0.83	39.1	61.7	0.63	曲げ圧縮
C-15-1	28	3.9	13.7	13.0	1.05	35.3	40.7	0.87	52.0	69.8	0.74	曲げ圧縮
C-15-2	28	4.3	16.8	14.1	1.19	51.0	60.1	0.85	79.4	135	0.59	曲げ圧縮
S-0-1	30	4.2	12.8	14.0	0.91	—	—	—	54.2	49.4	1.10	曲げ引張
S-15-1	31	3.9	13.7	12.9	1.06	—	—	—	49.8	49.5	1.01	曲げ引張

やすく、施工性が悪いために均等質な品質が得られにくく、強度にバラツキがみられたことが一因と考えられる。

(2) 斜めひびわれ発生荷重 (Vc)

Vc算定には著者ら[6]の研究結果から、a/dが3.4の供試体は二羽ら[7]の式(式(1))、a/dが2.0の供試体は石橋ら[8]の式(式(2))を用いることとし、主筋が連続繊維補強材の場合には、辻ら[9]が提案した主筋の弾性係数を考慮し、主筋断面積に連続繊維補強材と鉄筋の弾性係数の比を乗じた値を換算断面積(式(3))として、式(1)および式(2)に適用する方法を用いた。

$$Vc = 0.20(p_w \cdot f'_c)^{1/3} \cdot d^{-1/4} [0.75 + 1.4/(a/d)] \cdot b \cdot d \quad (1)$$

ここに、Vc:斜めひびわれ発生荷重(N)、p_w:主筋比、f'_c:コンクリートの圧縮強度(MPa)、d:有効高さ(mm)、a:せん断スパン(mm)、b:幅(mm)である。

$$Vc = 3.58 \cdot f'_c^{1/3} \cdot (a/d)^{-1.166} \cdot \beta_p \cdot \beta_d \cdot b \cdot d \quad (2)$$

ここに、 $\beta_d: (100/d)^{1/4}$ 、 $\beta_p: (100 \cdot p_w)^{1/3}$ 、f'_c:コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)、d:有効高さ(cm)、a:せん断スパン(cm)、b:幅(cm)、である。

$$A_n = A(E_i/E_n) \quad (3)$$

ここに、A_n:換算断面積、A:主筋の断面積、E_i:連続繊維補強材の弾性係数、E_n:鉄筋の弾性係数である。

また、実験値は、斜めひびわれ発生の判定が難しいため、目視とスターラップに貼ったひずみゲージの値が大きく変化し始めた荷重とした。実験値と算定値を示す表-3から、ポーラスコンクリートはりの斜めひびわれ発生荷重は、1体の供試体を除き、算定値の0.83~0.89と連続繊維補強材を用いた普通コンクリートはり(A-0-1)の値よりやや小さくなっている。斜めひびわれに大きく影響すると考えられるポーラスコンクリートの引張強度は、著者ら[10]と玉井ら[11]の研究から強度比(f_s/f'_c)が普通コンクリートと同じか、それ以上の値となることが報告されている。このことから考えると本実験は逆の結果を示しているが、ポーラスコンクリートに関する報告は

少なく、強度特性を含めた研究の蓄積が望まれる。

(3) 終局耐力

曲げ終局耐力については、平面保持を仮定した鉄筋コンクリートと同様な方法で求めた[5]。連続繊維補強材で補強したポーラスコンクリートのはりは曲げ圧縮破壊を起こし、実験値が算定値よりかなり小さくなっている。しかし、普通コンクリートを用いたはりA-0-1は、同じ曲げ圧縮破壊を起こしたにも関わらず、実験値と算定値はほぼ同じとなっている。この原因として、荷重-ひずみ関係を示す図-4からみられるようにポーラスコンクリートのはりでは、はり中央上側のひずみが約1,000~1,500 μ で荷重が低下し始めている。そこで、今回用いた空隙率15%のポーラスコンクリート($\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体)の圧縮試験を行い、応力-ひずみ曲線を求めた結果、図-5にみられるように、ポーラスコンクリートでは、ひずみが1,200 μ 付近から荷重が下降傾向となっている。

そこで、示方書の曲げ耐力算定式に用いるコンクリートの設計用値を図-6に示すように、 $\epsilon'_o = 0.12\%$ (A点)、 $\epsilon'_{cu} = 0.15\%$ (B点)と算定した。その結果、表-4にみられるように実験値と算定値の比が1近くとなっている。しかし、ポーラスコンクリートの応力-ひずみ曲線を求めた供試体の数は20体であり、バラツキもみられたので今後更に詳しい検討を要すると考えられる。

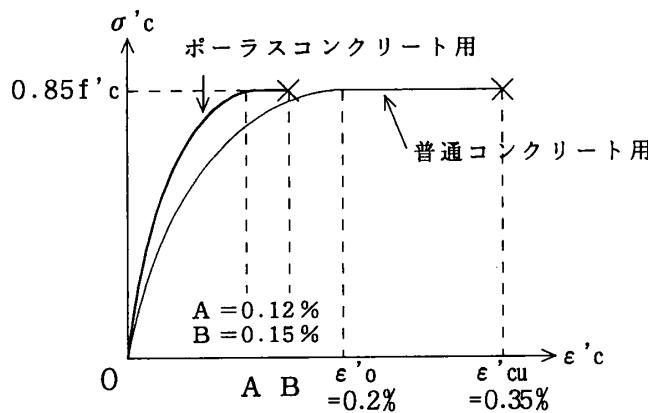


図-6 設計用の応力-ひずみ曲線

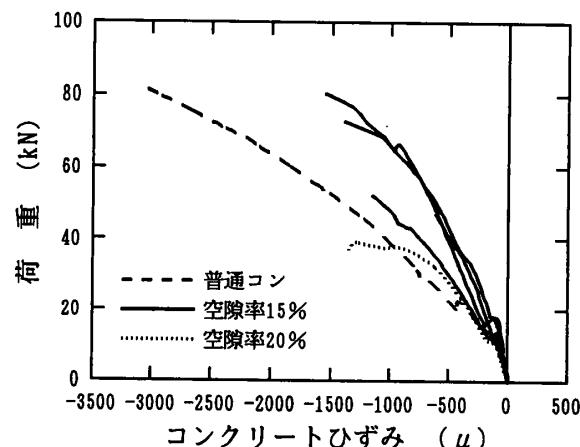


図-4 圧縮部コンクリートのひずみ

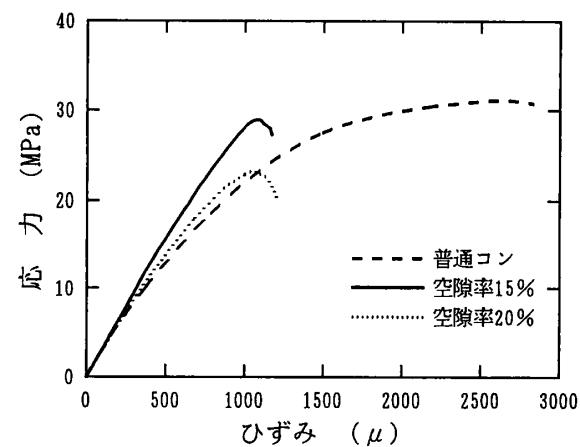


図-5 圧縮強度試験結果

表-4 終局ひずみ考慮後の耐力比

供試体 名 称	終局荷重, kN		
	実験値	計算値	比
A-15-1	52.0	52.7	0.99
A-15-2	82.1	87.4	0.94
A-20-1	39.1	43.1	0.91
C-15-1	52.0	53.3	0.98
C-15-2	79.4	93.9	0.85

また、ポーラスコンクリートに鉄筋を用いたはり（S-15-1）については、予測計算通り曲げ引張破壊し、実験値と算定値の比もほぼ1近くになっている。

4.まとめ

連続繊維補強材を用い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) 連続繊維補強材で補強したポーラスコンクリートはりのひびわれ発生荷重は、曲げひびわれに対してはこれまでの算定式で精度よく求めることができるが、斜めひびわれについては算定値の0.85程度になる。

(2) ポーラスコンクリートはりの破壊形式は、せん断スパン比によっては、これまでの普通コンクリートはりに適用されている設計計算から予測される破壊形式と異なる可能性がある。

(3) ポーラスコンクリートはりの曲げ圧縮耐力は、土木学会の $\varepsilon'_{\text{o}} = 0.2\%$ 、 $\varepsilon'_{\text{cu}} = 0.35\%$ とする普通コンクリートの応力-ひずみ曲線を用いた算定値に比べて、0.6程度とかなり小さくなる。これは、ポーラスコンクリートの終局ひずみの値が普通コンクリートに比べて小さくなると考えられ、これを考慮した算定値を求める実験値と良く一致した。

謝辞：使用材料の石灰石砕石は東洋電化工業(株)、アラミド繊維ロッドは三井建設(株)、炭素繊維ロッドは東京製綱(株)からご提供いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村純平・三浦裕二：鋼繊維で補強した透水性コンクリート舗装に関する実験的研究、土木学会論文集、No. 453、pp. 171-179、1992.9
- 2) 玉井元治・田中光徳：軽石を用いたまぶしコンクリートの吸音特性、セメント・コンクリート論文集、No. 46、pp. 892-897、1992
- 3) 玉井元治ほか：ポーラスコンクリートへの海洋生物付着に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 44、pp. 708-713、1990
- 4) 柳橋邦生ほか：緑化コンクリートの研究、コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム論文報告集、pp. 29-36、1993.9
- 5) 土木学会編：コンクリート標準示方書（平成3年版）設計編、土木学会、1991
- 6) 横井克則ほか：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応性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 713-716、1992
- 7) 二羽淳一郎ほか：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、2/V-5、pp. 167-176、1986
- 8) 石橋忠良ほか：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
- 9) 辻幸和ほか：FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 10、No. 2、pp. 547-552、1988
- 10) 河野清ほか：魚礁用超硬練りコンクリートに対する配合条件の影響、セメント・コンクリート論文集、No. 46、pp. 446-451、1992
- 11) Tamai, M : Properties of No-Fines Concrete Containing Silica Fume, ACI SP-114, pp. 799-814, 1989.6