

論文 竹筋で補強されたポーラスコンクリートの強度向上効果

遠藤 典男^{*1}・井上 健典^{*2}・松岡 保正^{*3}

要旨：ポーラスコンクリートはりの曲げ強度向上のため、主として PoC ブロックに対する補強材として竹を配置し、その有用性を検証する。竹の力学的特性 弾性係数、引張強度などを評価し、PoC へ配置する“竹筋”量を、はりが破壊する際の断面内応力状態が等価応力ブロックであると仮定し決定した。竹筋を PoC に配置するにあたり、PoC の空隙が多いことに起因する付着強度が不足するのではないかと考え、竹周囲をセメントペーストによりコーティングし、付着強度の増大を試みた。また、竹筋を配置した PoC の衝撃に対する抵抗力に関しても考察した。

キーワード：ポーラスコンクリート、竹筋補強、曲げ強度向上

1. はじめに

ポーラスコンクリート(以下 PoC)は、通常のコンクリートに比し空隙が多いことに起因し、圧縮強度、ひいては引張強度、曲げ強度が小さい。このため、植生目的のプランター等に適用されるブロックでは、運搬、設置時の衝撃による破壊 - 断面破断などの甚大な被害が対象 - も少なくないと考えられる。本研究では PoC に、補強材として竹を配置 以下竹筋と称する し、竹筋補強した PoC の曲げ強度に関し考察する。

コンクリート補強材としての竹は、日本国内で鉄材料の不足していた 1940 年代に一部実用化されていたが、安価で高品質の鉄筋が広く流通するに至り、コンクリート補強材として適用されることはなくなった。

また、建設材料としての竹は靱性が大きく、加工もし易いという利点がある。さらに、コンクリート補強材として鉄筋を配置し補強する手法では、ポーラスコンクリートのような多孔質かつ低強度な材料を補強するには、鉄筋の強度が大きすぎるとともに、植生を目的とするような湿潤な環境下に設置する場合には、鉄筋の発錆、腐食による劣化がはなはだしいものになる。

一方、中山間地の過疎化が顕著になり、管理が不十分となった竹林では、可視化が難しい地下茎から稈が著しい速さで生育し、竹林周辺に隣接する森林への拡大、あるいは住宅、構造物等の被害(竹害)が散見されるようになった。本研究では竹の駆除により廃棄物となる竹の有効利用として、PoC ブロックを補強する目的で、形成した竹をポーラスコンクリートに配置し、PoC はりの曲げ強度の向上を評価せんとしている。PoC の曲げ強度の評価に関しては、静的な曲げ試験に加え、衝撃力が作用した際の PoC の挙動を、簡単な衝撃実験を行い考察した。

竹筋量の算定に対しては、PoC はりが破壊する際の断面内応力状態が等価応力ブロックであると仮定し決定した。すなわち、圧縮応力作用下の PoC の終局破壊状態における応力状態を、長方形の矩形状態と仮定し、全圧縮応力度の総和と竹筋が破壊する引張力が等しいと仮定し、竹の断面積を算出した。また、PoC へ補強材として竹を用いる場合には付着強度が小さいと考え、竹筋周囲へセメントペーストをコーティングした補強材を配置し、竹のみで補強した場合と比較した。

*1 長野工業高等専門学校 環境都市工学科助教授 博士(工学) (正会員)

*2 長野工業高等専門学校 専攻科生産環境システム専攻

*3 長野工業高等専門学校 環境都市工学科教授

2. PoC に配置した竹に関する考察

2.1 竹筋の形成

本研究で竹筋として使用した竹は、長野市周辺部に自生するマダケ（日本国内に広く生息する）を使用した。直径 40～50mm 程度のものを長さ 400mm 程度に切断し、さらに竹主軸直角方向（周方向）を 6 分割し、所定の断面形状（長方形断面）に”かな”で形成した（写真 - 1 (b) 参照）。なお、PoC 補強材として使用した竹、および引張試験で使用した竹は全て、竹主軸方向でほぼ同一断面（約 7mm × 2mm）となるよう形成した。

実際の施工時には、写真 - 1 (a) に示すような節での突起を残したままで PoC へ配置することにより、加工も容易かつ付着強度が増加することになるが、本研究においては、竹筋配置の効果を検証するため、長さ方向の断面寸法は一定となるよう形成している。

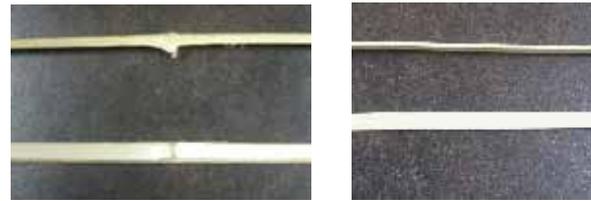
2.1 竹筋に対する考察

(1) 竹の単位体積重量および吸水率

今回使用した竹の単位体積重量および吸水率は、20mm × 30mm × 5mm 程度の小片に切断した後 JIS A 1109 - 1999（粗骨材の密度および吸水率試験方法）に準拠し測定した。その結果、単位体積重量： $\rho = 0.70 \text{ g/cm}^3$ 、吸水率： $Q = 44.8\%$ であった。吸水率が非常に大きな値を示していたため、PoC へ配置後に水中養生する際、竹の膨張による供試体への影響を危惧した。しかしながら、養生後 PoC はりを目視により観察した結果、特に著しい損傷等は確認されなかった。

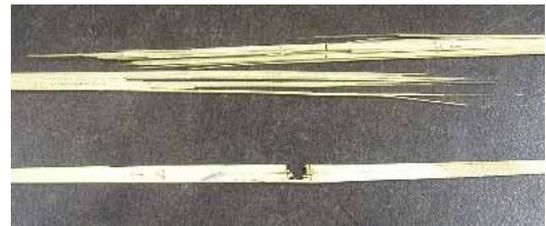
(2) 引張強度および静弾性係数

図 - 1 に竹主軸方向に対し引張試験を行なった結果を示す。竹は生育の過程で主軸に節を形成するが、本研究で対象とするコンクリート補強材として用いる場合には、節を含めての形成が必要となるため、節および節と節の間の部分（図中、節と節の間の部分を軸とし、以下節以外の部分を軸と記載した）の応力 - ひずみ関係を評価した。図 - 1 に示す竹の応力ひずみ関係から、軸、節とも応力 - ひずみ関係はほぼ線形



(a) 形成前 (b) 形成後

写真 - 1 竹の形成



上：軸部分の破断 下：節部分の破断

写真 - 2 竹の破断状況

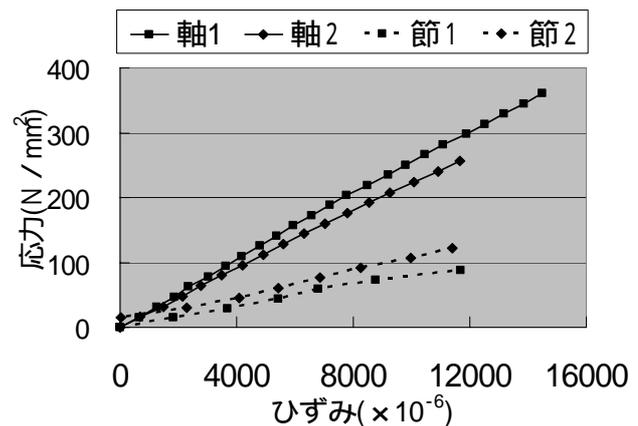


図 - 1 竹の応力 - ひずみ関係（引張試験）

関係であり、軸部分の弾性係数は 23.4 kN/mm^2 であり、節部分で 9.1 kN/mm^2 という結果が得られた。また、各々の引張強度は、軸部分で約 300 N/mm^2 、節部分では 100 N/mm^2 という結果が得られた。節部分では竹の繊維が不連続となっているため引張強度は小さいが、軸部分に比し節部分は竹軸方向の長さが短いこと、また PoC はりに配置した場合には、純引張力が作用することはないため、竹の節に対する特別な配慮はせず、軸、節とも同一断面に竹を形成した。写真 - 2 に示すように、節部分では節を境に破断しているのに対し、軸部分では竹繊維が竹の軸方向に均一に配されているが、繊維自身が均一

な強度ではないため，引張試験では竹の繊維の弱い部分から局部的に破断した状況が分かる。最後に，竹の動弾性係数の測定値は $E_{Db}=51.0\text{kN/mm}^2$ となり，静弾性係数の 2.2 倍であった。

3. PoC 供試体の形成および物理性情

表 - 1 に骨材の物理諸量を，表 - 2 に PoC の配合を示す。本配合における粗骨材は千曲川水系の川砂利(20-05)を用いた。PoC の目標空隙率を 15%，目標圧縮強度を 10N/mm^2 とした。PoC は手練で行い，圧縮試験用型枠（ $100\text{mm} \times 200\text{mm}$ ）へは 3 層に分けて詰め，各層毎，突き棒で十分締め固めを行なった。曲げ試験用の型枠（ $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ ）へも 3 層に分けて詰めしたが，型枠底部より約 7cm の第 2 層目となるように調節し，この層の上部へ補強用の竹筋を配置し，その後第 3 層目を詰めた。最後に，型枠表面で PoC の形成に関しては，十分突き棒で締め固めた後，突き棒の柄を回転させながら表面が平坦となるまで，転圧した。

空隙率の実測値 JCI エココンクリート研究委員会提案の「ポラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」の容積法に準拠 は連続空隙率が 16.6%，全空隙率は 17.4%と多少目標値を上回った。さらに，圧縮強度は 8.3N/mm^2 となり，目標値を下回る結果となった。圧縮強度の目標値をもとに，後に詳述する方法で竹筋量を決定している。ここで，目標値と実測地の差が生じているが，有意な差ではないと判断し，算出された竹筋量を配置して PoC はりを作成し，曲げ試験を行なった。なお，セメントペーストのフロー

表 - 1 骨材の物理諸量

密度 (g/cm^3)	単位容積質量 (kg/)	実積率 (%)	粗粒率	吸水率 (%)
2.62	1.74	67	6.7	0.7

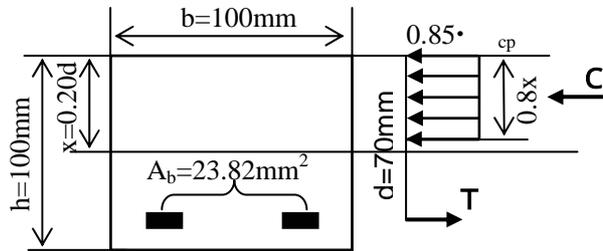


図 - 2 断面形状および応力状態の仮定

値は 200，PoC の動弾性係数測定 - JIS A 1127 の「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数試験方法」に準拠 - 結果は $E_{DP}=13.7\text{kN/mm}^2$ となった。

4. 竹筋量の決定および供試体の作成

4.1 竹筋量の決定

PoC に対する補強材として竹筋を配置するにあたり，PoC はりが破壊する際の断面の応力状態を図 - 2 に示す等価応力ブロックと仮定する。図中 b は断面幅， h は断面高さ， c_p は PoC の目標圧縮強度， A_b は竹筋の断面積である。なお，供試体の断面寸法は $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の直方体である。また，竹の引張強度を σ_b とすると，全引張力 T および全圧縮力 C は，各々次式で与えられることになる。

$$T = \sigma_b \cdot A_b \quad (1)$$

$$C = 0.85 \cdot c_p \cdot 0.8x \cdot b \quad (2)$$

表 - 2 PoC の配合

粗骨材 最大寸法 [mm]	水セメン ト比 [%]	P/G *1 [%]	V_a/V *2 [%]	単位量 [kg/m^3]		
				水 W	セメント C	粗骨材 G
20	30	23	15	92	308	1716

*1 P (セメントペースト： $W+C$) と G の重量百分率。

*2 V_a/V は目標空隙率 (空隙： V_a と全体積： V の体積百分率)。

いまここで、破壊時において全圧縮力と全引張力が等価であると仮定すると、式(1)、(2)より次式が得られる。

$$A_b = \frac{0.85\sigma_{cp} \cdot 0.8x \cdot b}{\sigma_b} \quad (3)$$

ここで、 $b=300\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $\sigma_{cp}=10\text{N}/\text{mm}^2$ を式(1)、(2)に代入し、さらに破壊時の断面における中立軸比を $k=0.20$ と仮定すると結局、必要竹筋量

$$A_b = \frac{0.68 \times 10 \times 0.20 \times 70 \times 100}{300} = 31.7\text{mm}^2 \quad (4)$$

が算出される。PoC の目標圧縮強度が得られない場合および竹筋形成時の誤差等を勘案し、本実験で使用する竹筋量は式(4)で得られた値の75%(24mm^2)程度とした。実際に PoC はりへ配置した竹筋の断面は、竹筋の表面積を増加させるために 1 本あたりの断面形状を $7.0\text{mm} \times 1.7\text{mm}$ 程度のものを 2 本配置 ($A_b=23.8\text{mm}^2$) した。

4.2 セメントペーストを塗布した竹筋

空隙の多い PoC へ補強材として竹を配置するにあたり、双方の付着強度が小さいと考え、竹筋周囲へセメントペーストをコーティング(以下セメントペーストコーティング竹筋とする)したものを PoC はりへ配置し、竹による補強のみの場合と比較を行なった。内径 20mm の塩化ビニル管を軸方向で 2 分割し半円筒断面の型枠の各々へセメントペーストを充填し、一方の中央へ所定の断面形状に形成した竹筋を静置し、双方を重ねて固定し硬化させることで、竹筋の周りにセメントペーストが塗布される。竹周囲のセメントペーストが硬化した後、PoC はりの所定の位置へ配置した。

5. 静的曲げ試験および衝撃試験の概要

静的な曲げ強度は JIS A 1106 「コンクリートの曲げ強度試験」に準拠した 2 点載荷純曲げ試験を行なった。供試体として以下の 3 種類の PoC はりに対し、各々 3 本ずつ曲げ試験を行なった。

- 1) 補強のない PoC はり(以下, beam-1)。
- 2) 竹筋のみで補強した PoC はり(以下, beam-2)。

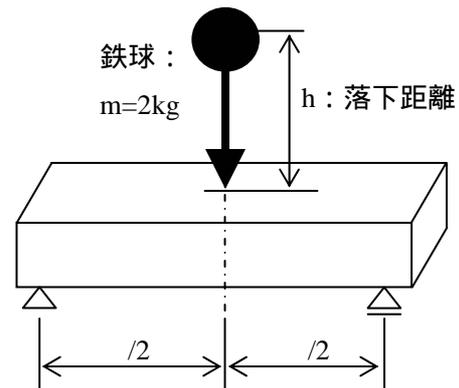


図 - 3 PoC の衝撃試験概要

3) セメントペーストでコーティングした竹筋で補強した PoC はり(以下, beam-3)。

なお、支点、載荷点および、ひび割れの有無を確認するための片側面に石膏を塗布した。

また、3 種類の PoC はりの各々 1 本に対し、図 - 3 に示す簡単な衝撃実験を行い、破壊時の状況を考察した。図 - 3 において、はり上部の高さ h (落下距離) から、2kg の鉄球をスパン中央部へ落下させ、衝撃力に対する抵抗性を評価した。なお、落下位置ははりの中央面から 10cm ピッチで増加させ、はり上縁部分が破壊するまで、実験を続行した (PoC 表面に亀裂が発生した後も落下距離は増加させ続けた)。

6. 実験結果および考察

静的曲げ強度試験を行った結果、写真 - 4 に beam-2 の破壊状況を、写真 - 5 に beam-3 の破壊状況を示す。なお、本研究では竹筋で補強したはりが、補強材の曲げに対する靱性が大きく、PoC 部分の損傷が甚大でも破断することがなかったため、はりの圧縮側の縁までひび割れが発生したときを破壊と定義し、実験を終了した。写真 - 4 のひび割れ幅に比し、写真 - 5 のひび割れ幅が小さいことがわかる。これは、竹筋とセメントペーストの付着面積、および竹筋の靱性の大きいことに起因していると考えられる。すなわち、beam-3 では、竹筋周囲のセメントペーストにより、PoC の亀裂が抑制されているため

と考えられる。同様の効果により、写真 - 4 において亀裂が拡大し、かぶり部の一部で PoC の剥落が確認されるが、写真 - 5 ではほとんど剥離は生じなかった。

図 - 3 に baem-1, baem-2, baem-3 の曲げ強度の比較を示す。竹筋補強した beam-2 の曲げ強度は beam-1 の 2 倍程度であった。beam-3 は beam-2 の曲げ強度に比し、18%ほど低下しているが、これは竹筋周囲のセメントペーストにより、竹本来の靱性の大きさが損なわれ、はり軸方向に生じる亀裂が拘束され、はり軸鉛直方向のひび割れ進展という形でエネルギーが解放されたためと考えられる。

写真 - 6 に beam-2 の衝撃試験による、(a)落下距離 40cm での損傷状況、(b)落下距離 90cm での破壊状況を示す。衝撃試験において、beam-1 は、落下距離 $h=30\text{cm}$ で完全に破断した。一方、beam-2 では $h=30\text{cm}$ 、beam-3 では $h=40\text{cm}$ で最初のひび割れが発生した。その後双方とも落下距離を大きくし衝撃実験を継続したが、beam-2、beam-3 とも $h=60\text{cm}$ でひび割れの生じたかぶり部分の一部が剥離し、落下距離が 90cm ではり中央部上面の PoC が破壊し、また竹筋の一部も損傷したため実験を終了した。衝撃実験においても静的曲げ試験の場合と同様に、beam-2 のひび割れ幅に比し beam-3 のひび割れ幅が小さい傾向にある。

最初のひび割れが発生した落下距離が beam-2、beam-3 で異なる点に関し、beam-3 が衝撃力に抵抗する際、竹筋周囲のコーティングされたセメ



写真 - 4 beam-2 の破壊状況



写真 - 5 beam-3 の破壊状況

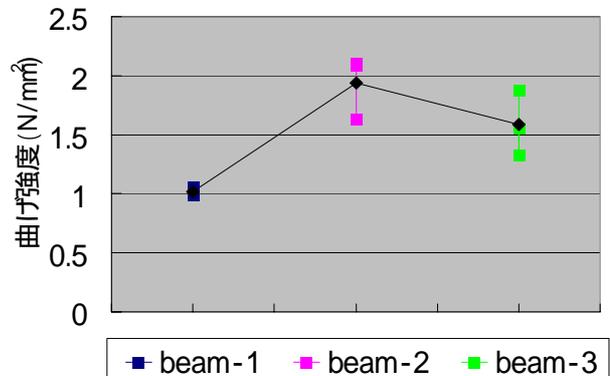


図 - 3 PoC はりの曲げ強度比較



(a) 落下距離 40cm での損傷状況



(b) 落下距離 90cm での破壊状況

写真 - 6 衝撃試験での破壊状況 (beam-2)

ントペーストにより竹筋の靱性が抑制されるとともに、この部分が衝撃力への抵抗に大きく寄与し、ここで生じたひび割れが PoC に伝達し、beam-2 に比し小さなエネルギーでも亀裂が発生したと考えられる。

7. おわりに

本研究で得られた結論を以下に示す。

PoC はりの破壊状態が等価応力ブロックであると仮定し、補強用の竹筋の断面積を決定したが、竹の引張剛性に比し曲げ剛性および曲げに対する靱性が大きいため、静的曲げ試験、衝撃試験とも PoC はりに大きな亀裂が生じた後も、竹筋に損傷は発生しているが、破断までは至らない。曲げ強度も、竹筋で補強したはりでは、補強していないはりの2倍となり、PoC ブロックを竹により補強することによる、耐久性の向上が期待できる。

セメントペーストにより竹をコーティングし PoC を補強する方法は、曲げ強度に関しては竹のみで補強する場合の2割程度低下し、また竹本来の靱性は低下させることになるが、ひび割れ幅を小さくする効果がある。

最後に本研究では、空隙率が大きく低強度の PoC を対象に竹筋補強を行い考察したが、竹筋と PoC の付着状況、はりの破壊状況、PoC と竹の弾性係数の比を鑑みると、空隙率が小さく高強度の PoC に対して補強した場合には、より有効な補強手段になり得ると思われる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、供試体作成、計測等にご協力頂いた卒業研究生の久保田豊氏(現 JR 東海)、青木友紀氏(現 岩手大学)、藤池昌樹氏(現 (株)中央工研)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 吉田知弘ほか: ポーラスコンクリートの空隙分布が曲げ強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26 No.1 pp.1437-1442, 2004.6
- 2) 日本コンクリート工学協会: ポーラスコンクリートの設計, 施工法の確立に関する研究委員会報告書, 2003.5
- 3) 熊谷, 中田, 榎谷: 鉄筋コンクリートばりの各種衝撃破壊実験について, 土木学会中部支部研究発表講演概要集, pp.63-64, 1998
- 4) 建設副産物リサイクル広報推進会議編著: 総合的建設副産物対策, 財団法人先端建設技術センター, 2000
- 5) 吉川弘道: 鉄筋コンクリートの解析と設計限界状態設計法の考え方と適用, 丸善, 1995
- 6) 烏居南康一ほか: 即脱ポーラスコンクリート製品研究開発事例, ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用事例に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.49-56, 2003.5