

竹筋補強によるポーラスコンクリートの曲げ強度向上に関する考察

遠藤典男^{*1}・近藤遊^{*2}・小林清^{*3}・松岡保正^{*4}

Considering of Bending Strength on Porous Concrete Reinforced by Bamboo

ENDO H Norio, KONDO H Yu,
KOBAYASHI Kiyoshi and MATSUOKA Yasumasa

Porous concrete (call PoC) involved a lot of void, so these concrete are used as plant base and purification water and acoustic absorption panels and so on. But PoC is low strength due to involve in many void.

The other hand, because stems of bamboo to grow underground damages infrastructure and houses among in mid-mountains area. Therefore, it is necessary that bad bamboo are exterminated, as a result exterminated bamboo becomes waste.

In this study, applying to bamboo, which dealt as waste, on the purpose of reinforcing porous concrete, and making bending strength of PoC beam improve.

キーワード：ポーラスコンクリート，竹筋補強，曲げ強度

1. 諸 言

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、植生基盤、水質浄化を目的とし、護岸の近自然化工事^{1), 2)}や水質浄化材として適用されつつある。一方、空隙率が多いため強度に関しては、引張強度、曲げ強度はもとより圧縮強度が一般のコンクリートに比し著しく小さい。このため、植生目的のプランターや護岸工事、集水枡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、建設材料として竹を使用する場合、靱性が大きく、加工もし易いという利点がある。さら

に、一般的な鉄筋コンクリートのように、補強材として鉄筋を配置した場合、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、鉄筋の弾性係数、強度が大きすぎるとともに、水質浄化、植生基盤を目的とするような湿潤環境下に設置した場合、鉄筋の発錆、腐食による劣化が著しくなると予想される。

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 製 2 次製品を補強する目的とする。すなわち、形成した竹をポーラスコンクリートに配置(以下、竹筋)し、PoC はりの曲げ強度の向上を評価せんとしている。先に著者らは、竹筋補強した PoC はりの力学的性状を評価³⁾しており、静的曲げ試験により耐荷力の向上を確認した。また衝撃荷重が作用した際には、竹の有する靱性により、はりの破断に対する抵抗性が向上し、竹筋補強の有効性を検証した。このため本報告では、空隙率の変化に伴う PoC の曲げ強度を、竹筋補強の有無で比較検討する。なお補強材として配置する竹の断面積算定に対しては、PoC はりの終局状態、竹筋との付着状態等

*1 環境都市工学科准教授

*2 平成 20 年度卒業研究生

*3 技術室第二技術班

*4 環境都市工学科教授

原稿受付 2009 年 5 月 20 日

の先行実験結果，および竹筋の形成，竹筋と PoC の動弾性係数を勘案して決定した．

2．竹筋補強した PoC はりの作成

2 - 1 使用材料

骨材は，PoC 中に竹を配置すること，および PoC 製 2 次製品が補強対象であることを考慮し，比較的少ないエネルギーで締め固めが可能となるよう，大小の粒径が混在する千曲川水系の川砂利(20-05)を使用した．粗骨材の物性値を表 1 に示す．

一方，本研究で竹筋として使用した竹は，長野県東筑摩郡に生ずるマダケ（日本国内に広く生息する）を使用した．直径 40～50mm 程度，厚さが 4mm 程度のを，まず長さ 400mm 程度に切断し竹主軸直角方向（周方向）を 6 分割し，に所定の断面形状にかんんで形成した（写真 - 1 (a), (b) 参照）．なお，PoC 補強材として使用した竹の断面形状は，後述する竹筋量の算定結果に従い，厚さ 3mm 幅 6mm 程度となるよう形成した．

使用した竹の物性値を表 2 に示す．竹の物性値は以下の方法で測定した．まず，密度と吸水率は，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）に準拠して測定した．ここで，吸水率が 44.8% と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，竹の膨張による周辺の PoC 部分への影響を危惧したが，養生後のはりの性状を目視により観察が，PoC 部分において顕著な損傷等は確認されなかった．

次に，引張強度と弾性係数に関して言及する．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）の竹主軸方向に対し引張試験を行い，応力 - ひずみ関係から静弾性係数を算出した．図 1 に示す竹の応力ひずみ関係を示す．同図において軸，節とも応力 - ひずみ関係はほぼ線形関係であり，個体差は生じるものの軸部分の弾性係数は 25 kN/mm² 程度，節部分は 10kN/mm² 程度であった．また，軸部分に比し節部分の静弾性係数は小さく，また個体差は大きくなっているが，これは節部分では竹の繊維が不連続になっていることが要因と考えられる．しかしながら，PoC はりに竹を配置するにあたり，軸部分に比し節部分は竹軸方向の長さが短いこと，また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，



(a) 形成前 (b) 形成後

写真 1 竹の形成

表 1 粗骨材の物性値

絶乾密度(g/cm ³)	2.57
表乾密度(g/cm ³)	2.61
吸水率(%)	1.56
単位容積質量(kg/)	1.70
実積率(%)	66.1
粗粒率	6.7

表 2 竹の物性値

密度(g/cm ³)	0.70
吸水率(%)	44.8
静弾性係数：軸(kN/mm ²)	25
静弾性係数：節(kN/mm ²)	10
動弾性係数(kN/mm ²)	15
引張強度：軸(N/mm ²)	300
引張強度：節(N/mm ²)	100

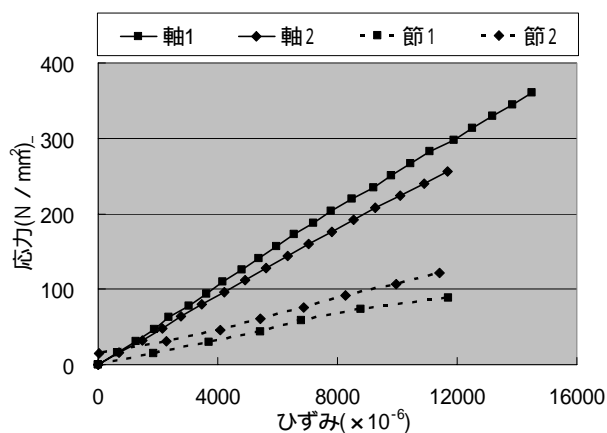


図 1 竹の応力 - ひずみ関係（引張試験）

軸，節とも同一断面に竹を形成した．

最後に，竹の静弾性係数の測定は容易であるが，PoC の静弾性係数は容易ではなく，また補強した PoC はりに作用する応力は比較的小さいと考えられ，竹筋量の決定に先立ち，竹，PoC の動弾性係数を測定し両者を比較した．竹の動弾性係数測定は参考文献 5) の「はりの振動実験 - ヤング係数の測定」に準じて，長さ 350mm 程度，10mm × 3mm 程度の断面を有する供試片を用いて測定した結果，15kN/mm² 程度となった．また，PoC の動弾性係数は JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾

表3 PoCの配合

粗骨材最大寸法 [mm]	水セメント比 [%]	P / G *1 [%]	Va / V*2 [%]	単位量 [kg/m³]		
				W	C	G
20	30	30	10	118	392	1700
20	30	23	15	90	301	1700
20	30	17	20	67	222	1700
20	30	11	25	43	144	1700

*1 全体積(V)に対する空隙体積(Va)の体積割合(空隙率)

*2 粗骨材質量(G)に対するセメントペースト(P)の質量割合

性係数試験方法」に準拠して測定した結果、空隙率が10%、15%、20%の平均値は1.9kN/mm²程度であり、空隙率の変化に伴う動弾性係数の相違は比較的小さかった。なお、各空隙率におけるPoCの動弾性係数の平均値と、各空隙率の測定値の平均との差は最大でも10%となった。

最後に、竹の動弾性係数はPoCの動弾性係数の8倍程度となり、一般的鉄筋コンクリートのコンクリートと鉄筋の弾性係数の比と同程度であった。

2-2 配合および供試体作成

表3にPoCの配合を示す。空隙率の変化による竹筋補強効果を評価するため、粗骨材量を一定とし、セメントペースト量を変化させることにより目標空隙率を変化させた。なお、空隙率15%にける目標圧縮強度を10N/mm²とし、またセメントペーストのフロー値は200であった。表3の配合により試し練を行った結果、空隙率が25%の供試体は空隙が多すぎ、PoCの強度が小さすぎ竹筋補強の効果が検証できないと考え、以下では空隙率が10,15,20%のPoCに対して考察を行なう。

供試体作成に関しては、PoCは手練で行い圧縮試験用型枠(100mm×200mm)へは3層に分けて打設し、各層毎、突き棒で十分締め固めを行なった。また曲げ試験用の型枠(100mm×100mm×400mm)へも3層に分けて打設した。竹筋配置位置は、型枠底部より約70mm程度のところが第2層目となるようにPoCの打設量を調節し、この層の上部へ補強用の竹筋を配置し、第3層目を形枠上部まで打設した(有効高さ70mm、かぶり30mm)。最後に、型枠表面において突き棒で十分締め固めた後、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。

空隙率の測定に関しては、参考文献4)の「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法」に準拠して計測した後、圧縮強度を測定した。図2に実測した全空隙率と圧縮強度の関係を示す。同図において、実測した空隙率はいずれの配合においても目標空隙率を上回っているが、これは空隙率を測定した供試体が圧縮試験用の円柱供試体を用いており、供試体底

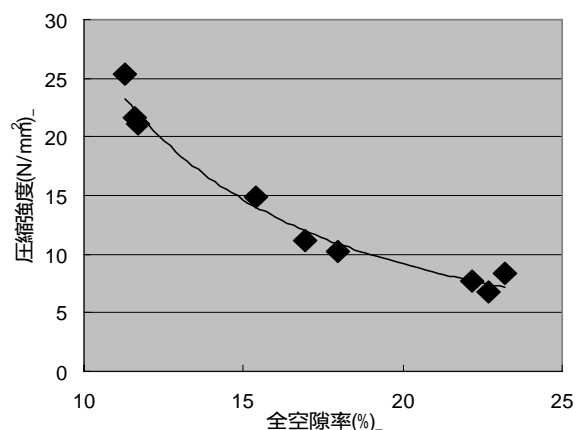


図2 全空隙率と圧縮強度の関係

部の締め固めが不十分で、比較的大きな空隙率が存在していたことが原因と考えられる。しかしながら目標空隙率と実測空隙率が、各配合とも1~2%の差であり、有為な差とは思われない。一方、圧縮強度を測定した結果は、空隙率が10%における平均圧縮強度は22.7 N/mm²、15%では12.1 N/mm²、20%では7.6 N/mm²となり、配合時に仮定した、空隙率が15%における圧縮強度が10 N/mm²を上回ったため、表3の配合によりPoCはりを作成し、特に配合の修正などは行なわなかった。

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等価応力ブロックと仮定し終局強度設計法に基づいて竹筋の断面積を決定した。すなわち竹の引張強度： f_b 、PoCの圧縮強度： f_{cp} 、中立軸比： k 、有効高さ： d 、断面幅： b とすると、竹筋量： A_b は次式で決定される。

$$A_b = 0.68 \times f_{cp} \times k \times b \times d / f_b$$

ここで、空隙率が15%のPoCはりに配置する竹筋量を決定すると、 $f_b = 300 \text{ N/mm}^2$ 、 $f_{cp} = 10 \text{ N/mm}^2$ 、 $b = 100 \text{ mm}$ 、 $d = 70 \text{ mm}$ であり、中立軸比を $k = 0.25$ と仮定すると、必要竹筋量 A_b は以下のように与えられる。

$$A_b = 0.68 \times 10 \times 0.25 \times 100 \times 70 / 300 = 40 \text{ mm}^2$$

試作したはりにおいて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考慮し、

本実験で使用する竹筋量は上式で得られた値の90%(36mm²)程度とした。なお、上記竹筋量は空隙率が15%のPoCはりに対して算出した値であるが、竹筋補強効果を検証するため空隙率が10%,20%に対しても同一の竹筋量を配置し、比較検討を行なった。実際にPoCはりへ配置した竹筋の断面は、厚さ3mm×幅6mm程度のものを2本配置($A_b = 36\text{mm}^2$)した。なおPoCの有効断面積： $(b \cdot d)$ と竹筋面積 A_b の比： $(A_b / (b \cdot d))$ を竹筋比 p とすると、 $p = 0.5\%$ であった。

3. 曲げ試験結果

PoCはりの曲げ試験は、JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験」に準拠した2点荷重純曲げ試験を行なった。供試体として、空隙率が10,15,20%の3種類のPoCはりに対し、竹筋補強を行なったはり、補強を行わないはり、各々3本ずつの曲げ試験を行なった。なお、材齢は竹筋補強したPoCはり、補強無のPoCはりのいずれも28日とし、また先述したように、竹筋は6mm×3mmの断面を有する竹を2本配置した。

図3に空隙率と補強の有無によるPoCはりの耐力の関係を示す。同図において各空隙のPoCはりとも、補強を行わないPoCはりに比し、竹筋補強を行なったPoCはりの耐力は、10%で1.4倍、15%で1.8倍、20%で2倍程度であり、空隙率が小さくなり補強無の耐力が大きくなるほど、補強の効果が小さくなることが判る。これは、PoCの空隙率が大きいほど圧縮、引張強度とも小さくなるため、曲げ脆性破壊に対する竹筋補強効果が大きいと考えられる。また、空隙率が15%のPoCの圧縮強度から、配置する竹筋量を算定しており、10%の竹筋補強PoCはりでは、計算上は竹筋量が不足し荷重中の竹の破断も予想されたが、ひび割れ時点における竹は破断することもなく、その後も曲げに対する耐力を有していた。なお、竹筋補強PoCはりのひび割れ発生後の耐力は、作成したすべてのはりで曲げ強度の半分から1/3程度の耐力を有していた。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に記す。

- 1)空隙率が大きくなり補強を行わないPoCはり

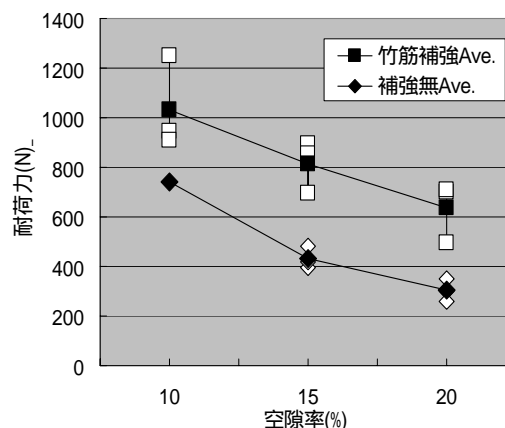


図3 空隙率とPoCはりの耐力の関係

の曲げ強度が小さいほど、竹筋を配置することによる補強効果が大きくなる。

2)竹筋補強PoCはりとは、一般的なRC構造と同様に、補強材の竹とPoC部分が一体となり外力に抵抗し、ひび割れ発生までの荷重-変位関係は線形性を示す。

本報告では、竹の引張試験により得られるヤング係数を基に配置する竹筋量を決定し、曲げ試験を行なった結果に関し言及するにとどまった。しかしながら、ひび割れ発生後のPoCはりの挙動は竹自身の曲げ剛性に強く依存することも確認しており、曲げ試験により得られる竹のヤング係数も評価し、配置する竹筋量を検討する必要があると考えられ、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 町田庄三 他：ポラスコンクリートの製造とこれからがわかる本、セメントジャーナル社(2001.9)
- 2) 海野巖 他：ポラスコンクリート河川護岸工法の手引き、山海堂(2001.4)
- 3) 遠藤、井上、松岡：竹筋で補強されたポラスコンクリートの強度向上効果、コンクリート工学年次論文集、第29巻、pp.319-324(2007.7)
- 4) 日本コンクリート工学協会：ポ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、(社)日本コンクリート工学協会(2003.5)
- 5) 土木学会編：構造実験指導書、(社)土木学会(2000.2)