

## 論文 竹筋で補強されたポーラスコンクリートはりの曲げ挙動解析

遠藤 典男<sup>\*1</sup>・猪瀬 大幸<sup>\*2</sup>・松岡 保正<sup>\*3</sup>

**要旨**：ポーラスコンクリート (PoC) 製 2 次製品の補強を目的とし、竹で補強した PoC はりに曲げが作用した場合の挙動を検証した。PoC 製のはりを竹で補強するにあたり、はりが破壊する終局時の応力状態を基に配置する竹の量を決定した。PoC の空隙率、配置する竹の量、および 1 本あたりの竹の断面積を変化させ、耐荷力、荷重-鉛直変位関係、ひび割れ幅を評価した。その結果、竹筋補強 PoC はりは、ひび割れ発生までの荷重-変位関係は線形性を示し、ひび割れ発生後は耐荷力が減少する。また、ひび割れ発生後の挙動は、配置する竹自体の剛性に強く依存することがわかった。

**キーワード**：ポーラスコンクリート、竹筋補強、耐荷力、ひび割れ幅

### 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、植生基盤、水質浄化を目的とし、護岸の近自然化工事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面に関して、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とになる。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 PoC 製ブロックでは、運搬、設置時の衝撃による、断面破断などの甚大な被害も予想される。

コンクリート補強材としての竹は、1940 年代に一部実用化が試みられたが、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、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鉄筋で補強するには、鉄筋の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する場合には、鉄筋の発錆、腐食による劣化は著しいものとなるのが容易に想像できる。

一方、中山間地の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。また近年では、自治体で筍を特産物とするなど竹林保全に対する行政処置もとられているが、十分な管理が施されているとは考えられない。

そこで先に著者らは、PoC 製 2 次製品<sup>1)</sup> の補強を目的とし、焼却処分されるような竹を有効利用するため、補強材としてポーラスコンクリートに配置 (以下、竹筋) するにあたり、はりが破壊する際の断面の応力状態を等

価応力ブロックであると仮定し、配置する竹の量を決定した。竹筋補強した PoC はりの曲げに対する耐荷力向上、ひび割れ幅の抑制、および衝撃力が作用した場合の性状に対して検証<sup>2)</sup> した。竹筋を配置した PoC はりは、補強しないはりに比し、耐荷力は 2 倍程度増加した。補強する竹筋周囲をセメントペーストでコーティングすることにより、耐荷力はやや減少するが、ひび割れ幅は小さくなる。竹により PoC はりを補強することで衝撃力が作用した場合でも、局所的な損傷は生じるが、破断等の重篤な破壊は避けられることがわかった。

ここで、竹筋補強された PoC 製 2 次製品の実用化に関しては、まず砂防ダムなどの既存コンクリート構造物表面の緑化を目的として、パネル状の製品を作製し、構造物表面へ接着することを考えている。既存構造物表面に接着するにあたり、形状寸法と空隙率、およびこれら起因する自重に対する施工時の配慮が必要であり、耐荷力を評価する必要がある。また、水棲生物のハビタット空間創出を目的とし、木工沈床等の河川に設置される構造物の一部として、木材に代わり竹筋補強 PoC はりを組み合わせた枠状の構造物を作製し、その内部に石材、土砂などを充填する。このような流水中に設置する構造物に対しては、流失防止のために送流力と自重との関係や衝突物に抵抗するための竹筋補強位置の設定と強度評価が必要と思われる。このように竹筋補強された PoC 製 2 次製品を実用化する場合に、耐荷力および、破壊性状に対する評価が必要と考えられる。

以上のことを鑑みて、本報告では、竹筋量の決定に関しては前報告と同様の手法により算定し、PoC の空隙率、竹筋量、および竹 1 本あたりの断面積を変化させ PoC はりの曲げに対する耐荷力を検証するとともに、ひび割れ発生後の挙動を考察する。

\*1 長野工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (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. 竹筋補強した PoC はりの作製

### 2.1 使用材料

使用した粗骨材は、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、長野県東筑摩郡に自生するマダケ（日本国内に広く生息する）を十分自然乾燥させて使用した。竹筋の形成は、直径 40～50mm 程度、厚さが 4mm 程度のもを、まず長さ 400mm 程度に切断し竹主軸直角方向（周方向）を 6～8 分割し、所定の断面形状（長方形断面）にカッターとかんなで形成した。PoC の補強材として使用した竹の断面形状は全て、厚さが 3mm 程度となるよう形成し、断面幅を 6mm と 9mm に変化させるとともに、配置する本数を変えることで竹筋量を変化させた。なお、竹筋の配置に関しては、竹の形成後において弱軸断面となるよう PoC へ配置した。これは、強軸断面では竹の靱性が著しく低下するため、曲げ試験において変形が大きくなった場合には竹の損傷が危惧され、補強材として十分機能し得ないと考えたためである。

使用した竹の物性値を表-2 に示す。竹の引張強度は 300N/mm<sup>2</sup> と杉、ひのき、ケヤキなどの構造材料として使用される木材の引張強度（100N/mm<sup>2</sup> 程度）に比し大きな値となった。PoC の補強材として竹と配置するに際して、竹の弾性係数を計測した。PoC の静弾性係数の測定は難しいため、補強する竹と PoC を動弾性係数で比較することとし、竹に関しては静弾性係数と動弾性係数を測定した。同表に示すように、竹の静弾性係数は動弾性係数の 1.5 倍程度となった。

### 2.2 配合および PoC の物性

表-3 に PoC の配合を示す。空隙率の変化による竹筋補強 PoC はりの補強効果を検証するため、同表に示す配合により圧縮供試体を作製し、全空隙率と圧縮強度を測定した。ここで、空隙率が 10%未満の配合では PoC の特性である十分な空隙を確保できない、また空隙率が 20%

表-1 粗骨材の物性値

絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.57
表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.61
吸水率 (%)	1.56
単位容積質量 (kg/ℓ)	1.70
実積率 (%)	65.1
粗粒率	6.7

表-2 竹の物性値

乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.70
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	300
静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	25
動弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	15

を超える配合では、使用骨材に起因し十分な強度が得られないとの理由により、表中に示す 3 種類の配合により PoC を作製した。使用した粗骨材の物性値等を鑑み、空隙率 15%にける PoC の目標圧縮強度を 10N/mm<sup>2</sup> と仮定した。なお、セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、セメントペーストのフロー値は 160、セメントペーストの圧縮強度は 55N/mm<sup>2</sup> であった。

ここで、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。一方、実用品の作製時に竹筋で PoC を補強する場合、節の突起を残したままで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。したがって、実用化された製品では、さらに大きな付着強度が得られることになるが、本研究で実施する曲げ実験で付着性能を評価することにより、実用品に対する付着性能も検証できると考える。

供試体作製に関しては、PoC は手練りで行い圧縮試験用型枠（φ100mm×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、各層毎突き棒で十分締め固めを行った。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

表-3 PoC の配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	P/G <sup>*1</sup> (%)	Va/V <sup>*2</sup> (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		
				水 W	セメント C	粗骨材 G
20	30	30.8	10	121	403	1700
20	30	24.6	15	97	322	1700
20	30	18.4	20	72	241	1700

\*1 粗骨材質量(G)に対するセメントペースト(P)の質量割合

\*2 全体積(V)に対する空隙体積(Va)の体積割合（空隙率）

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）。最後の3層目を突き棒で締め固めを行なった後に、表面仕上げとして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するとともに、PoC表面に木製の平板を載せ、平板上を十分木槌で叩いて、締め固めと表面の平滑化を行なった。空隙率の測定に関しては、参考文献3)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-1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圧縮試験用円柱供試体底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、PoCの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/mm<sup>2</sup>、15%では12.1 N/mm<sup>2</sup>、20%では7.6 N/mm<sup>2</sup>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/mm<sup>2</sup>を上回ったため、表-3の配合で竹筋補強PoCはり試験体を作製した。

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性係数試験方法」に準拠して測定した。空隙率の変化に伴う動弾性係数の相違は比較的小さく、10%、15%、20%のいずれの場合においても2kN/mm<sup>2</sup>程度であった。

### 2.3 竹筋量の決定と供試体の種類

PoCの要求強度が小さいため、竹で補強されたPoCはりの応力レベルも小さいことになる。このため、PoCを竹で補強するにあたり、初期接線弾性係数とほぼ等しい両者の動弾性係数を比較し、竹の有用性を検証する。前述したように、PoCの動弾性係数は2kN/mm<sup>2</sup>程度、竹の動弾性係数は15kN/mm<sup>2</sup>程度と7倍程度となっており、RCのコンクリートと鉄筋の静弾性係数の比が15程度であることを考えると、竹はPoCの補強材料として妥当なものと考えられる。

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し、終局状態における力の釣り合い<sup>4)</sup>を基に竹筋の断面積を決定した。すなわち竹の引張強度： $\sigma_b$ 、PoCの圧縮強度： $\sigma_{cp}$ 、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。

$$A_b = 0.68 \times \sigma_{cp} \times k \times b \times d / \sigma_b \quad (1)$$

ここで、図-1に示す空隙と圧縮強度の関係を鑑み、空隙率が15%のPoCはりに配置する竹筋量を決定すると、 $\sigma_b = 300 \text{ N/mm}^2$ 、 $\sigma_{cp} = 10 \text{ N/mm}^2$ 、 $b = 100 \text{ mm}$ 、 $d = 70 \text{ mm}$ であり、中立軸比を $k = 0.25$ と仮定すると、必要竹筋量

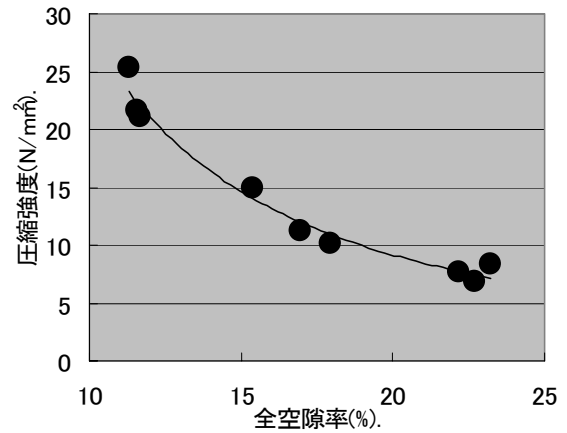


図-1 全空隙率と圧縮強度の関係

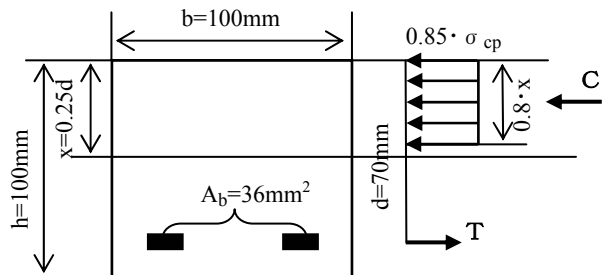


図-2 断面形状および応力状態の仮定

表-4 竹筋補強された試験体の種類

試験体	空隙率(%)	竹筋断面 (mm×mm)	配置本数	竹筋断面積(mm <sup>2</sup> )
V10B364	10	3×6	4	72
V15B362	15	3×6	2	36
V20B361	20	3×6	1	18
V15B363	15	3×6	3	54
V15B392	15	3×9	2	54

$A_b$ は以下のように与えられる。

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

PoCの空隙率の変動、目標圧縮強度が得られない場合、竹筋の形成時の誤差、個体差等を考慮し、本実験では上式で得られた値の90%(36mm<sup>2</sup>)を釣り合い竹筋量として配置した。以下同様に、各空隙率に対して配置する竹筋量を算出すると以下ようになる。

空隙率10%： $\sigma_{cp} = 20 \text{ N/mm}^2$ と仮定すると $A_b \div 80 \text{ mm}^2$   
 空隙率20%： $\sigma_{cp} = 5 \text{ N/mm}^2$ と仮定すると $A_b \div 20 \text{ mm}^2$   
 空隙率が15%の場合と同様に算出された竹筋量の90%を釣り合い竹筋量—空隙率が10%の場合72mm<sup>2</sup>、空隙率が20%の場合18mm<sup>2</sup>—とし試験体に配置した。

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 $p_b$ とすると、空隙率が10%において、 $p_b \div 1.03\%$ 、15%において $p_b \div 0.51\%$ 、20%において $p_b \div 0.26\%$ であった。

表-4に竹筋補強した試験体の種類を示す。試験体と

して、空隙率が 10, 15, 20%の 3 種類の PoC はりに対し、前述の計算により算出された釣り合い竹筋量を配置した 3 種類の PoC はり、および空隙率が 15%において、竹筋の断面積と竹筋量が PoC はりに与える影響を評価するため、5 種類の試験体を作製した。以下に各試験体に配置した竹筋量を記す。

- ・V10B364:空隙率 10%における釣り合い竹筋量を配置。
- ・V15B362:空隙率 15%における釣り合い竹筋量を配置。
- ・V20B361:空隙率 20%における釣り合い竹筋量を配置。
- ・V15B363: 1 本あたりの竹筋断面の変化による曲げに対する挙動を評価するため、6mm×3mm の竹筋を 3 本配置。
- ・V15B392: V15B363 と同一竹筋量を配置し比較するため、9mm×3mm の竹筋を 2 本配置。

ここで、当初 V15B362 に配置した竹筋 1 本あたりの断面積を 6mm×3mm とし、これを基準として竹筋断面の変化が、曲げ作用下のはりの挙動に与える影響について評価を行う予定であった。しかしながら、採取した竹の源断面厚さが 4~5mm 程度で、源断面より切り出した円弧状の断面を、仮定した 3mm 厚さの矩形断面に加工することは非常に難しいこと、また同様の理由により、幅を 6mm の倍となる 12mm とすることも難しいと判断した。このため、V15B363 と V15B392 により、1 本あたりの竹筋断面の変化により曲げに対する挙動を比較するとともに、V15B362 に比し、竹筋量が 50%増加した場合に対しても比較した。

### 3. 曲げ試験結果

#### 3.1 竹筋算定方法の検証

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、表-4 に記した竹筋補強された PoC はりの 2 点載荷純曲げ試験を行なった。曲げ試験を行なうに際して、試験体の支点部分と載荷点部分に石膏を塗布するとともに、はりの片側面においてもひび割れ確認のため、石膏を塗布した。さらに、ひび割れ発生時におけるはり底部での骨材の剥離を防止するため、試験体底部に紙（和紙）を澱粉糊で接着した。

図-3 に、2.3 で決定した各空隙率に対する釣り合い竹筋量を配置した PoC はりの耐荷力、および補強無の PoC はりの耐荷力を示す。各空隙率における補強無の PoC はりに対する、補強後の PoC はりの増加率は、10% (V10B364) で 1.4 倍、15% (V15B362) で 1.9 倍、20% (V20B361) で 2.2 倍となった。空隙率が 10%の耐荷力増加がやや小さいが、補強無の PoC はりの強度が比較的大きいため、竹筋補強効果が小さいことが要因として考えられる。したがって、PoC に対して竹筋により補強を行なう場合、空隙率が大きく、強度が小さい PoC に対して適用するほうが大きな効果が得られると考えられる。

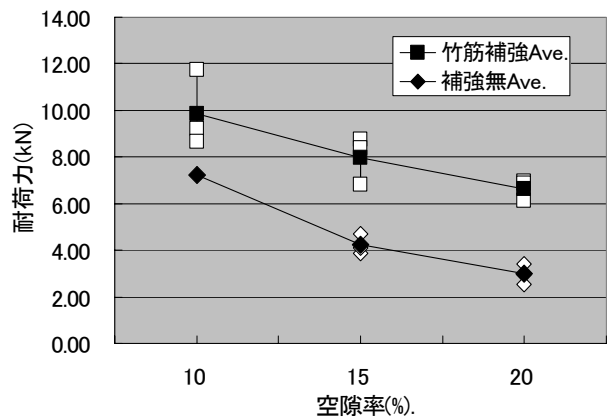


図-3 釣り合い竹筋量を配置した PoC はりの耐荷力

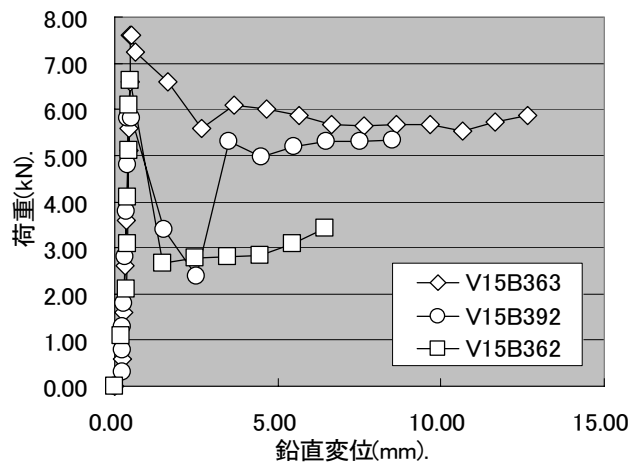


図-4 荷重-鉛直変位関係

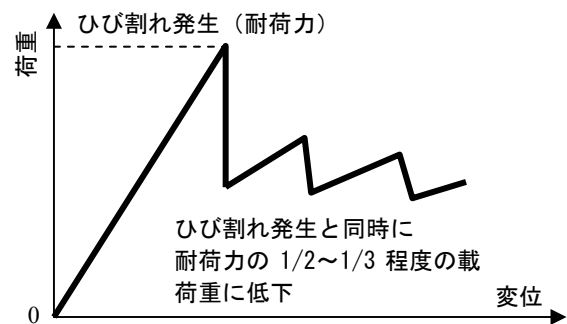


図-5 竹筋補強 PoC はりの荷重-変位関係概略図

#### 3.2 竹筋断面と竹筋量が PoC はりの挙動に与える影響

図-4 において、竹筋の変化に伴う PoC はりの荷重と鉛直変位の関係を評価するため、空隙率が 15%の竹筋補強した PoC はり、V15B363, V15B392, V15B362 の荷重-変位関係を示す。載荷実験はひび割れがはり上部に達した時点で終了した。ここで、竹筋補強した PoC はりの荷重と変位関係は、図-5 に示すように、ひび割れ発生までは、荷重と変位の関係が線形関係にあり、ひび割れ発生とともに荷重は 1/2 から 1/3 程度まで減少する。その後も載荷を続けると、ひび割れの進展が見られないまま一時的に荷重は増加するが、ひび割れが進展すると同時に、載荷重が減少することになる。図-4 において計

測した荷重と変位は、後述のひび割れ幅を計測するために、ひび割れが確認された時点から、鉛直変位が 1mm 増加する毎の荷重をプロットしているため、厳密な荷重と鉛直変位の関係ではないが、荷重－鉛直変位関係の傾向は表現できていると考えられる。3 種類の試験体ともひび割れ発生まではほぼ線形挙動を示しており、竹筋量が少ない V15B362 の試験体も他の 2 種類の試験体と同程度の耐力力を有している。なお、図示した V15B363 の耐力力は 7.24kN、V15B392 は 5.80kN、V15B362 は 6.60kN であった。

一方、ひび割れ発生後において、竹筋量を増加させた試験体 V15B363、V15B392 は最大荷重の 75% 程度の載荷重のまま変位のみが増加している。これに対し、終局釣合いより算出された竹筋量を配置した V15B362 試験体は、最大荷重の半分程度の載荷重で変位が増加している。このことから、ひび割れ発生後においては、竹筋補強された PoC はりの剛性は、竹の剛性に強く依存していると考えられる。また、試験体 V15B362 は、図示した他の試験体より鉛直変位が小さい段階で、PoC はり上部までひび割れが達しており、竹筋量を増加させることでひび割れの進展を抑制できると思われる。ここで、試験体 V15B392 において、最大荷重に達した後、ひび割れの発生に伴い、一時的に載荷重が減少し、その後、載荷重の増加が見られる。これは、試験体の個体差であり、同種の他の試験体では、このような現象は確認されなかった。

なお、図-4 および、図-7 は 3 種類の試験体のうち代表的な 1 本を選択しその挙動を図示したものである。

図-6 に、図-4 で示した 3 種類の竹筋補強 PoC 是りの耐力力を示す。図中、□が各試験体の耐力力であり、■が同種の試験体の耐力力平均値である。また、◆は補強無の PoC の曲げ強度の平均値である。V15B362 に比し竹筋量を 50% 増加させた他の試験体の耐力力は同程度であり、したがって竹筋量を増加させることによる著しい耐力力の向上は期待できないことがわかる。V15B363、V15B392 において、測定値のバラツキが大きい。これは、PoC 中に竹筋を配置することに伴い締め固めが不十分になる場合が生じており、竹筋の本数を多くすることにより、また 1 本の断面積が大きい竹筋を配置することにより、締め固め時のバラツキが大きくなり、測定結果に影響を及ぼしたと思われる。

写真-1 は試験体 V15B363 において、ひび割れが PoC はり上部まで達した状態を撮影したものである。後述のひび割れ幅測定は、鉛直変位が 1mm 増加する毎に、はりの写真撮影を行い、はり高さを基準にして、はり底部のひび割れ幅を測定した。なお、同写真における載荷重は 4.6kN である。また、写真より PoC は多くの空隙を有

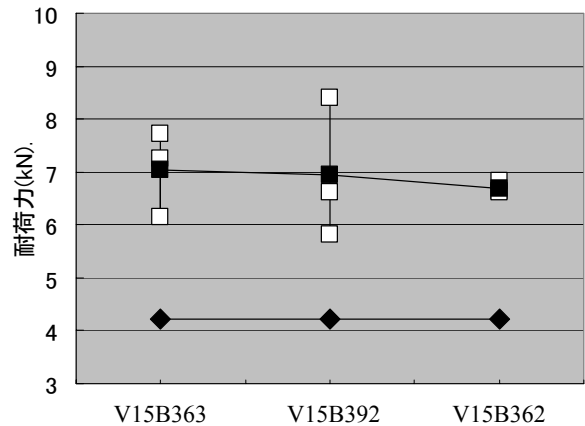


図-6 竹筋種の変化による PoC 是りの耐力力

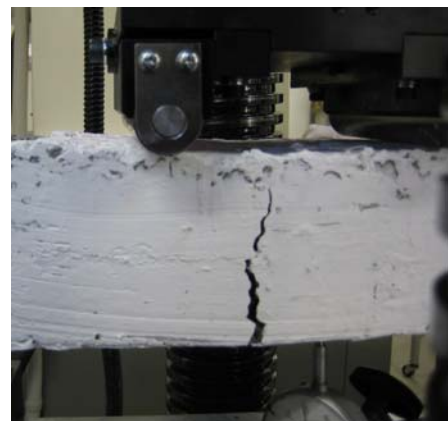


写真-1 ひび割れ状況 (試験体 : V15B363, P=4.6kN)

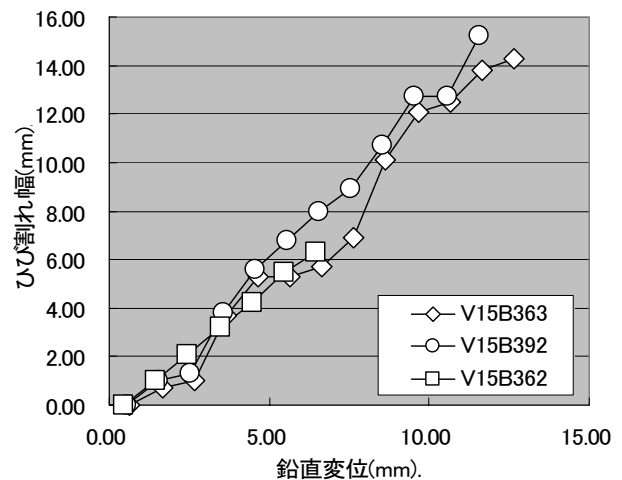


図-7 鉛直変位－ひび割れ幅関係

してはいるが、付着強度の向上を図るため大小粒径が混在する川砂利を骨材として用い、また竹筋配置位置近くで十分に締め固めた。このため、曲げに対する竹筋補強 PoC の挙動は、ひび割れ発生後においても補強材である竹筋と PoC が一体となり載荷重に抵抗し得たと考える。

図-7 にひび割れ発生後の、鉛直変位とひび割れ幅の関係を示す。同図において、図-4 でも示されているように、3 種類の試験体においてひび割れが発生する鉛直

変位は約 0.5mm と同程度であった。また、前述したように竹筋配置量が少ない試験体 V15B362 は鉛直変位が小さい段階でひび割れが PoC はり上部まで達したため、載荷実験を終了した。V15B363 と V15B392 試験体を比較すると、前者に比し後者の、同一変位でのひび割れ幅が大きいことがわかる。これは、通常の RC と同様の理由で、補強材の断面積が大きいほど、ひび割れ幅が大きくなるためと考えられる。しかしながら、竹筋の場合、ひび割れ発生後の剛性が竹筋自体の剛性に依存するため、極端に断面積の小さな竹筋を配置すると、ひび割れ発生後の剛性低下が懸念され、今後検討が必要と思われる。

## 8. 結論

本研究で得られた、竹筋補強された PoC はりの曲げ挙動に関する知見を以下に記す。

1) 竹筋補強 PoC はりは、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。本文では PoC と竹の強度により終局状態を基に提起した、釣り合い竹筋量以上の竹筋を配置した場合でも耐荷力の向上は望めない。

2) 竹筋補強 PoC はりのひび割れ発生後においては、配置する竹筋量が多いほど耐荷力が大きくなる。このため、ひび割れ発生後の挙動は、竹筋自体の剛性に強く依存している。

本文で得られた知見から、最大荷重（ひび割れ荷重）に達した後の竹筋補強 PoC はりの曲げ挙動が、配置する

竹筋の靱性に依存することから、本研究で配置したような矩形断面に比し、同一断面積で大きな剛性が得られる円弧状断面を有する竹（源断面から切り出したままの竹）を配置し、曲げ挙動を評価する必要があると考えられる。また、湿潤環境下、あるいは寒冷環境下での竹の強度や劣化状況、および竹筋補強 PoC の曲げ強度等も問題となる。以上のような実用化に際しての種々の問題に対しても今後の課題としたい。

## 参考文献

- 1) 鳥居南康一ほか：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
- 2) 遠藤，井上，松岡：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，コンクリート工学年次論文集，第 29 巻，pp.319-324，2007.7
- 3) 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，(社)日本コンクリート工学協会，2003.5
- 4) 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
- 5) 町田庄三 他：ポーラスコンクリートの製造とこれからわかる本，セメントジャーナル社，2001.9
- 6) 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