

## 論文 木炭を混入したポーラスコンクリートの諸特性

遠藤 典男<sup>\*1</sup>・井上 健典<sup>\*2</sup>・松岡 保正<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究はポーラスコンクリートの粗骨材の一部を木炭に置換することによる、強度評価と環境負荷低減効果の中でも水質浄化機能を検証した。圧縮、引張、曲げ強度とも木炭自身の低強度に起因し置換率が大きくなるに伴い、ポーラスコンクリートの強度も低下することになるが、強度は木炭粒径よりもセメントペーストの体積に影響を受けることが分かった。水質浄化機能に関しては COD を測定することにより評価を行なったが、閉鎖系という条件下において、木炭表面にセメントペーストが付着する等の要因があったものの、水質浄化機能も向上することがわかった。

**キーワード**：ポーラスコンクリート、木炭置換、強度特性、水質浄化機能

### 1. はじめに

木炭の水質浄化機能、マイクロハビタット創出効果および植生基盤としての有用性は周知の通りである。一方、ポーラスコンクリート（以下 PoC と記す）は、一般的なコンクリートの配合に較べ極めて多量の粗骨材を、僅かな高強度のセメントペーストで接着したものであり、多くの空隙を有するコンクリートである。この空隙の多さを利用し断熱・遮音・透水性舗装など種々の分野への適用が期待される。また、コンクリートの強度に寄与するセメントペーストの配合が少量なため、PoC の要求強度は小さいことが多い。

コンクリート中に植物より生成される炭を混入する研究は既に行なわれており、一般的なコンクリートに竹炭、あるいは木炭粉を混入し、その特性を考察している<sup>1)2)</sup>。また、著者らも PoC 中に木炭（市販の燃料用木炭）を混入するにあたり、骨格材（粗骨材と木炭）の体積割合を一定としたうえで、木炭を置換しない PoC および粗骨材の一部を木炭へ置換した割合を種々変化させた PoC の圧縮強度、空隙率、硬化後の性状に対する評価を行なった<sup>3)4)</sup>。

以上のことを勘案し、PoC に木炭を混入することにより、環境負荷低減効果が向上するのではないかと考え本研究では、PoC の骨格材である粗骨材の一部を木炭に置換し、まず PoC の硬化性状および強度特性を評価する。また、PoC 自体にも水質浄化機能は有していることは既知であるが、木炭を混入した PoC の環境負荷低減効果を検証するために、水質浄化機能に関して考察を行なった。すなわち、閉鎖系において市販の食器洗い洗剤を水溶させた溶液中に、一般的な PoC を配置した場合と、木炭を混入した PoC を配置した場合について、化学的酸素要求量（以下 COD）の経時変化を計測する。

### 2. 木炭置換に関する考察

先述したように、本研究の予備実験的な位置付けとして、水セメント比を 30%、空隙率を 25%、セメントペーストと粗骨材の質量割合を 25%（木炭置換を行なわない場合）とし、骨材として川砂利（20-05）および粒径 25mm 程度の市販の燃料用木炭を用い、木炭を置換しない PoC、および置換率を 10~50%まで 10%ピッチで変化させた PoC の圧縮強度、空隙率、硬化後の性状に対する評価を行なった。木炭の置換率と圧縮強度の関係については、木炭置換率が増加するのに伴い、圧縮強度も低下する。すなわち、木炭置換を行なわない場合の圧縮強度が約 10N/mm<sup>2</sup>であったのに対し、粗骨材の 10%を木炭に置換した場合の圧縮強度は約 30%低下し、20%を木炭に置換した場合の圧縮強度は 60%程度低下した。粗骨材を 30%以上木炭へ置換した場合の圧縮強度は、木炭への置換を行なわない場合の圧縮強度の 2 割程度であり、PoC としての機能を維持できない、あるいは構造物として成立し得ないとの結果が得られている。

次に硬化後の PoC の性状に関しては、置換率が 20%までの PoC 表面において、目視で木炭を確認できる面積は僅かであり、また木炭表面に多くのセメントペースト付着が確認された。置換率が 30%を越えると目視でも木炭を確認できるようになり、表面および内部空隙においても多くの木炭の露出が確認できた。

一方、木炭の性状を勘案すると予想できることではあるが、木炭置換率が増加するのに伴い全空隙率も増加し、置換率 50%では、置換しない場合よりも 12%ほど増加する。また、木炭の吸水率が大きいと連続空隙率と全空隙率との差は、木炭置換しない場合には 1%程度であったものが、置換率が 20%までは 2%程度、置換率が 40%までは 4%となった。

\*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 (現 JR 東日本)

\*3 長野工業高等専門学校 環境都市工学科教授

そこで、本研究においては PoC の圧縮強度が著しく低下しないと考えられる粗骨材から木炭への置換率が 10% において、木炭の粒径を 10mm, 20mm および空隙率を 15%, 20% と変化させた場合の PoC の強度特性—圧縮, 引張, 曲げ強度—と硬化後の性状に対して考察する。

ここで木炭は原料となる木材と生成時の含水量などに起因した不確定性要因, すなわち木材の種類, 乾燥の程度および乾燥収縮による亀裂の有無あるいは多少, さらに木炭作成時の温度や状況等でその力学的特性が異なるため, 木炭自体の強度を定性的に評価することは難しい。このため粗骨材を木炭に置換するにあたり次のような仮定を行った。

1) 木炭部分の強度は小さく, PoC の強度には寄与しないと考えられるが, 配合計算において, 木炭は PoC の骨格材の一部と位置付けた。したがって, 空隙体積:  $V_a$  は PoC の骨格材とセメントペーストの間隙部分の体積のみを考え, 木炭の生成に起因する亀裂等の空隙は無視した。このため, 粗骨材の木炭への置換の有無に関係なく全体積:  $V$  に対する  $V_a$  の割合である空隙率:  $(V_a/V)$  を一定とした。なお, 全空隙は上述の空隙体積に木炭の亀裂を含んだ空隙体積とする。

2) 粗骨材を木炭で置換しない場合 (木炭置換率: 0%) を基準として配合計算した後, 粗骨材と木炭の総体積, すなわち全体積:  $V$  に対する粗骨材と木炭の体積が変化しないよう, 置換率は体積百分率により算定した。

### 3. 粗骨材と木炭の物性値

表-1 に粗骨材の, 表-2 に木炭の物理諸量を示す。表-2 に示す木炭の各物性値は, JIS に規定される骨材の物性値の測定方法と同様の方法により評価した。本研究で取り扱う粗骨材を木炭へ置換した PoC は強度が小さいと考えられるため, より密実に粗骨材を配し強度向上を目指したいとの理由から多様な粒径が混在している千曲川水系の川砂利 (粒径 20-05) を用いた。

表-1 粗骨材の物理諸量

最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)
20	2.62	1.3	6.70	66.0

表-2 木炭の物理諸量

木炭径 (mm)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	実積率 (%)
10	0.83	1.09	29.0	64.0
20	0.83	1.09	29.0	61.7

表-1, 2 より粗骨材と木炭の複合材料としての実積率は, 配合 2, 4 は 65.8%, 配合 3, 5 は 65.6% である (粗骨材, 木炭各々の実積率と配合割合により算出)。木炭置換率が 10% と小さいため, 木炭径による実積率の相違は僅かであった。

木炭の粒径に関しては, 木炭が適度に分散していたほうが強度の向上が望めると考え, 粗骨材最大寸法と同程度の寸法である 20mm と, その半分である 10mm の 2 種類を設定した。木炭の形成に関しては, 50mm×50mm×(60~70mm) 程度の形状寸法を有する市販の燃料用木炭 (マレーシア産マングローブを原料とする炭) を, ハンマーにより粉碎した後, 粒径が 10mm の木炭は 15mm ふるいをすべて通過し, 10mm ふるいに残留したものを使用し, 粒径が 20mm の木炭は 25mm ふるいをすべて通過し, 20mm ふるいに残留したものを使用している。

表乾密度は当初 1 より小さいと考えていたが, 測定の結果 1.09 と吸水率が大きいため絶乾密度の 0.83 よりも大きな値となった。

### 4. 配合

表-3 に木炭を混入した PoC の仕方配合を示す。各配合とも結合材であるセメントペーストの水セメント比:

表-3 木炭を混入したポーラスコンクリートの配合

配合 番号	置換率 (%)	木炭径 (mm)	$V_a/V$ *1 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				$P/(G+Co)$ *2 (%)
					水 $W$	セメント $C$	粗骨材 $G$	木炭 $Co$	
1	0	—	15	30	92	307	1716	0	23.3
2	10	10	15	30	93	310	1544	54	25.2
3	10	20	15	30	95	317	1544	54	25.8
4	10	10	20	30	70	233	1544	54	19.0
5	10	20	20	30	71	237	1544	54	19.3

\*1 配合時に仮定した空隙率

\*2  $P/(G+Co)$  はセメントペースト (:  $P$ ) と骨格材 (粗骨材と木炭:  $G+Co$ ) の質量割合

(W/C) を 30%と一定にした。セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm<sup>3</sup>）を用いた。木炭の混入に際して、木炭の有無による相違を検証するため、置換率 0%（木炭混入なし）と置換率 10%のものを設定した。また、配合設計時の目標空隙率：(Va/V) を 15%、20%（体積百分率）と変化させた。置換率 0%の配合 1 において、セメントペースト質量：P と骨格材（粗骨材：G と木炭：Co）の質量割合  $P/(G+Co)$  は 23.3%であり、目標圧縮強度を 10(N/mm<sup>2</sup>)と仮定した。ここで、表-3 に示す配合におけるセメントペーストのフロー値（15 打）は 200 であり、写真-1 に示す硬化後の供試体性状および木炭、骨材の状況を勘案するに、良好な状態と思われる。

### 5. 供試体の作成および硬化後の性状

供試体の作成は、木炭の損傷を考慮し手練りにて練り混ぜを行ない、3層に分けて打設した。ここで、今回使用した木炭 10と骨材 90のみを傾胴型ミキサー（容量 50l）で 5 分ほど練り混ぜを行い、木炭の性状を調べた結果、隅角部のすりへりが確認された程度で、目立った損傷は無かったことから、木炭を混入した PoC も機械による練り混ぜが可能だと思われる。

圧縮、引張試験用供試体（φ100mm×200 mm）の締め固め方法に関しては、各層毎突き棒で十分締め固めた後、「骨材の単位体積質量および実積率試験方法」における骨材の締め固め方法であるジッキングの手法を参考にし、各層とも型枠底部を 3cm 程度持ち上げて落下させる作業を 20 回行なった。締め固めが終了した後、PoC を型枠上部へ 4.5cm 盛り上げて打設し、硬化後、コンクリートカッターで所定の長さまで切断した。

曲げ試験用供試体（100mm×100mm×400mm）の締め固めに関しては、各層毎突き棒で十分締め固めた後、上部表面では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。

写真-1 (1)～(5)に表-3 に示す各配合で作成した円柱供試体を示す。写真-1 (2), (3)では配合設計時の空隙率を 15%と仮定しているため、単位ペースト量が多く、供試体表面において木炭部分を確認できる場所は少なく、木炭置換をしない同写真(1)とほぼ同様の性状であった。また同写真において(2)では粒径が 10mm, (3)では 20mm であり、写真から性状の相違は確認できず、粒径の相違よりもセメントペーストの体積に、より表面性状が依存することがわかる。一方、同写真(2), (3)と(4), (5)を比較すると、後者は配合時の空隙率を 20%と仮定したため単位ペースト量が前者に較べ少ないため、(2)よりも多くの木炭を確認できる。



(1) 配合 1



(2) 配合 2



(3) 配合 3



(4) 配合 4



(5) 配合 5

写真-1 各配合における PoC 供試体の性状

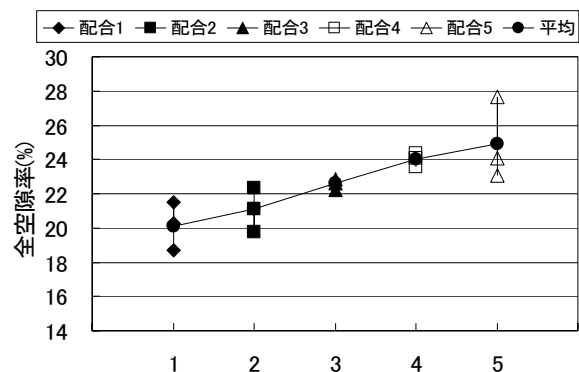


図-1 全空隙率

図-1 に全空隙率を示す。縦軸に全空隙率(%), 横軸に表-3 に示す各配合番号を示す（以下、図-2～5 において縦軸が測定項目、横軸は配合番号である）。配合 1 において、配合計算の際に仮定した全空隙率の 15%に比

し、5%ほど大きな値となってしまった。これは、供試体をコンクリートカッターで切断する際の、一部切断面の粗骨材剥離の影響、および配合計算時では考慮しなかった木炭の亀裂の影響と考えられるが、後述する配合1の圧縮強度が、当初予定した10N/mm<sup>2</sup>程度を確保できたため、配合の変更は行なわなかった。全空隙率に関しては、配合2と3、および配合4と5を比較すると分かるように、セメントペースト体積が同程度でも木炭粒径が大きいほど、全空隙率は大きくなる傾向にある。連続空隙率は各配合とも、全空隙率よりも2~3%程度小さく、木炭径、置換率による差異はほとんどなかった。

図-2に「JIS A 1127 共鳴振動法によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数および動ポアソン比試験方法」により測定した、各配合の動弾性係数を示す。配合1~3においては木炭置換による動弾性率の相違はほとんど見られなかった。これは写真-1でも確認できる木炭表面へのセメントペースト付着状況の相違が要因の一つと考えられる。また、配合5は配合4に比し木炭の粒形が大きく、また配合3に比しセメントペースト体積が少ないことの2つの要因から、動弾性係数が小さな値を示したと思われる。

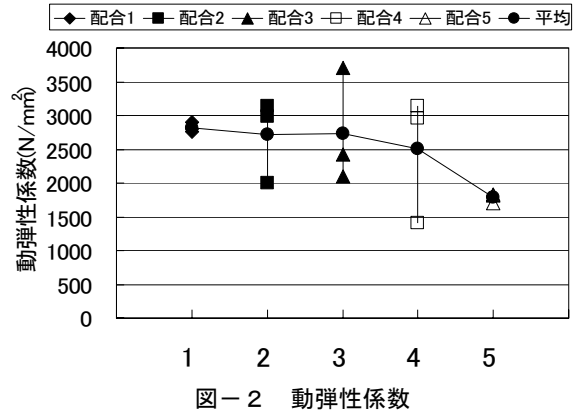


図-2 動弾性係数

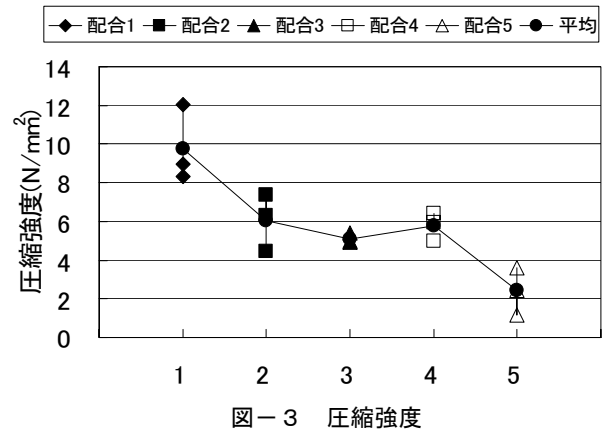


図-3 圧縮強度

## 6. 強度

PoCの圧縮強度に対しては「JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法」に、引張強度に対しては「JIS A 1113 コンクリートの割裂引張試験方法」に、曲げ強度に対しては「JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法」により強度評価を行った。なお、圧縮試験時には供試体底面と載荷面の双方をペーストキャッピングした後、さらにアンポンドキャッピングを行なった。曲げ試験時には、支点部と載荷部は石膏を塗布した。

図-3に各配合の圧縮強度を示す。表-3において、配合時に仮定した空隙率よりも実測した空隙率（3本の供試体の平均値）のほうが大きい値となった。このため、圧縮強度の目標値を10N/mm<sup>2</sup>としたが、配合1においてはほぼ目標とした圧縮強度が得られたが、木炭置換を行なった配合2~4では目標圧縮強度の6割程度であった。ここで、配合5において圧縮強度は著しく小さなものとなってしまったが、これは木炭置換率が同じではあるが、セメントペーストが少量であるところへ、20mmの径の木炭が混入されることによる大きな脆弱部分が存在したことが要因であると考えられる。一方、配合3では木炭径が20mmではあるが、表-3でも確認できるようにセメントペーストの体積が配合5に比し多かった（3割程度）ため、圧縮強度の低下は小さかったと思われる。配合2と配合4においては、圧縮強度はほぼ同程度であり、木炭の粒径が小さく局部的な脆性部分が小さいこと

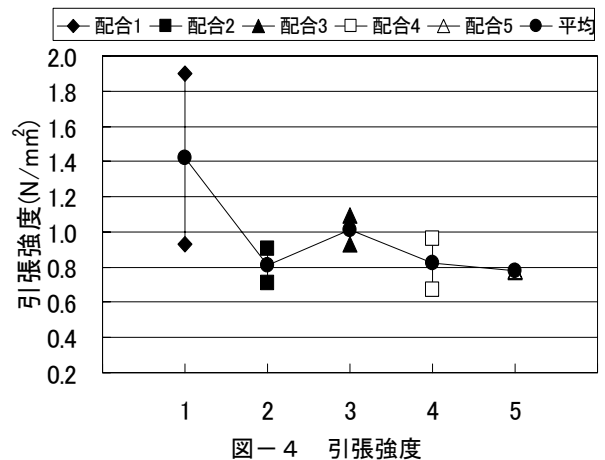


図-4 引張強度

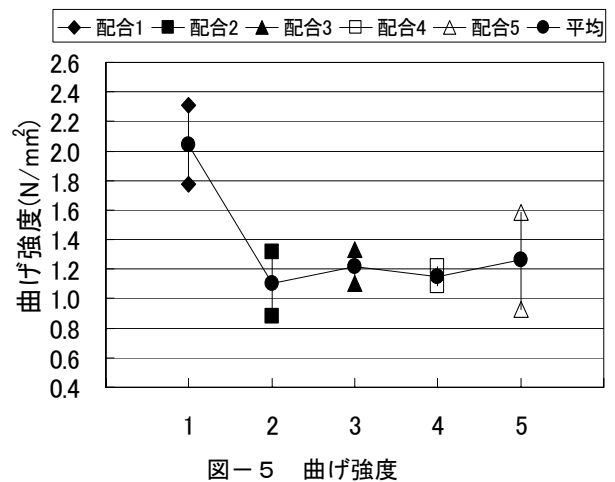


図-5 曲げ強度

で、圧縮強度の低下が抑制されていると考えられる。以上のことから木炭粒径、すなわち脆性部分の大きさに比し、セメントペーストの体積に圧縮強度の依存度が高いと考えられる。

図-4に引張強度、図-5に曲げ強度を示す。両強度とも配合1の強度に比し、配合2~5の強度低下割合は6割程度であった。配合5の圧縮強度は他の木炭置換を行った配合に比し著しく低下していたが、引張、曲げ強度は同程度の強度であった。これは、セメントペースト体積と木炭径の変動が圧縮強度よりも引張、曲げ強度に与える影響が小さいためと考えられる。

### 7. 水質浄化機能の検証

写真-2, 3に水質浄化機能評価状況を示す。水質浄化機能評価に対しては、後述する溶液の性質を鑑みてCOD(酸化剤として過マンガン酸カリウムを用いた酸化還元滴定法：法定測定法)を指標とした。実験方法を概説すると、3リットル入りの容器に、食器洗い用合成洗剤(中性洗剤：界面活性剤として脂肪酸アルカノールアミド、アルキルエーテル硫酸エステルナトリウム、ポリオキシエチレンアルキルエーテル)を0.75%の濃度で混合した溶液を2.30入れる。この溶液中に表-3に示した配合1, 2, 3により作成されたPoCブロック(直径100mm, 高さ60mm程度)の円柱状ブロック：写真-4参照)の3種類のブロックを静置した溶液、およびPoCブロックを入れず溶液のみものを用意し、CODの経時変化を計測した。ここで写真-3に示すように、容器上部に溶液を攪拌する装置を設け、1分間に100回転の速度で回転させ、実験期間中継続して溶液を循環させた。

図-6にCODの経時変化を示す。同図において縦軸がCODの値(ppm)であり、横軸が経過時間(日)である。ここで、7日経過後に全ての溶液でCODが増加に転じたため、6日経過後までの結果を図示した。図中、配合1のブロックを静置した溶液のCODの値を◆で示す。以下同様に、配合2を■で、配合3を▲で示し、溶液のみもののCODの値を○で示す。CODの測定法は国内におけるCODの法定試験である過マンガン酸カリウム(KMnO<sub>4</sub>)による方法(COD<sub>Mn</sub>)を用いた。試験用溶液を作成直後の初期CODの値は約120ppmだったのに対し、1日経過時点での3種類のPoCブロックを静置した溶液のCODの値は約90ppmと、約25%低下している。PoC自体にも水質浄化機能を有していることは周知であるが、10%木炭に置換したのみでは、閉鎖系において極端な水質浄化機能の向上は見られなかった。しかしながら、6日経過時点では図-6に示されているように木炭径が10mmのPoCを静置した溶液は、木炭を混入しないPoCを静置したものに比し、8%程度水質浄化機能の向上が見



写真-2 水質浄化機能評価状況



写真-3 (左) 水質浄化機能評価状況  
(木炭径10mm)

写真-4 (右) COD測定用溶液中に設置したPoCブロック(木炭径20mm)

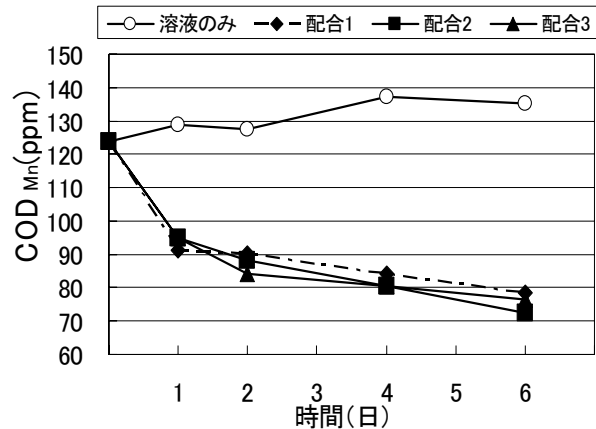


図-6 CODの経時変化

られ、木炭置換率が10%であること、PoCブロック作成時に木炭表面の一部に結合材であるセメントペーストが付着してしまうことなどを勘案すると、得られた結果は木炭混入により、PoCの水質浄化機能の向上が期待できると思われる。さらに、PoCブロックを静置しない溶液のみもの(図中○)のCODは経時変化に伴い上昇傾向を示しているが、これは7月初旬から中旬にかけて実験を行っており、また冷房設備のない実験室内で測定を行ったため、室温が常時30℃程度まで上昇し、これにより溶液が蒸発しCODも上昇したものと思われる。

### 8. 結論

木炭をPoCに配合し、圧縮強度および水質浄化機能に

関して考察した。得られた知見を以下に示す。

圧縮強度は木炭粒径，すなわち脆性部分の大きさよりも配合するセメントペースト体積に依存する。一方，セメントペースト体積，木炭粒径の相違による引張，曲げ強度の変動は比較的少ない。なお，粗骨材最大寸法を基準に木炭の粒径を決定したが，さらに小さな木炭粒径を設定する，あるいはセメントペースト体積を増加させることにより強度向上が計れると思われるが，木炭表面にセメントペーストの付着が著しく多量になると思われ，木炭混入の利点を損なうことも考えられる。

水質浄化機能に関しては，閉鎖系（実験室内）での評価ではあるものの，10%の木炭置換率で置換率と同程度の優位性が示された。なお，木炭を混入した PoC を開放系へ設置するにあたり，微生物の生息環境に対する木炭の有用性を検証することにより，環境負荷低減効果が期待できるのではと思われる。

最後に，木炭置換を行なった PoC の再利用および後処理に関しては，コンクリートと木炭の複合物であるため，一般的なコンクリート廃棄物の処理過程では対応でき

ない。このため，供用終了の際には木炭の処理に対する検討が必要と考えられ，今後の課題としたい。

#### 参考文献

- 1) 迫田恵三，渡邊晋也，梅澤智美：竹炭とセメントを用いた多孔質な複合材料の性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1497-1502，2004.6
- 2) 山田雅裕，今井洋一，前田谷安文，荻原伸彦：木炭微粉末を混合したコンクリートの性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1491-1496，2004.6
- 3) 遠藤典男，松岡保正，酒井穂泉：木炭を混入したポーラスコンクリートの力学的特性，平成 17 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.513-514，2006.3
- 4) 遠藤典男，松岡保正：木炭を混入したポーラスコンクリートの力学的特性について，長野工業高等専門学校紀要第 40 号，pp.25-28，2006.7