

氏名	まつ かわ とおる 松 川 徹
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工 第 167 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規程第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	ポーラスコンクリートの基礎的物性と水辺域への適用に関する研究
論文審査委員 (主 査)	教授 玉 井 元 治
(副主査)	教授 窪 田 敏 行
(副主査)	教授 佐 野 正 典

論文内容の要旨

近年、地球温暖化や生物種の激減など地球規模の環境悪化が進んでおり、かつて人類が経験したことのない課題への対応が求められている。これまで、コンクリートを用いて構築してきた我が国のインフラ整備も、自然環境の修復と再生をテーマとした「エコマテリアルの概念」が必要とされている。

このような背景の中、本論文ではエコマテリアルとして注目されるポーラスコンクリート (PoC) の発展を目指し、合理的施工のための基礎物性と生物共生型材料としての適用方法について研究している。

硬化体内に連続した空隙を有する PoC は、あらゆる分野のインフラ整備に使用され始めているが、製造時に均質性を保持し空隙を確保することが最大の課題となっている。本論文では、PoC の空隙確保のポイントを、骨材の充填状態と結合材性状の管理としている。また、連続空隙を持つ硬化体を製造するためのフレッシュな結合材の性状に関して、これまで詳細な管理手法が示されていないこと、実際に PoC を水辺域に適用した場合、この空隙がどのように機能しているのか未解明な部分が多いことを指摘している。

本論文の目的は、これらの解明を目指した以下の 4 点である。

- 1) PoC 空隙形成の主要因となる結合材のレオロジー特性を明らかにする。
- 2) PoC の諸機能と密接な関係にある空隙性状について解明し、これと PoC の応用的性質との関連性を示す。
- 3) 流水による PoC のウォッシュアウトに対する耐久性を検証する。
- 4) PoC を動植物の生息基盤材として活用するために、現場実験を通じて実態を把握し、その有効性を証明する。

第 1 章は、本研究の背景および目的について示している。

第 2 章は、固相 (骨材) と液相 (結合材) と気相 (空隙) から構成される PoC のメカニズムと、連続空隙を有するための条件につき示している。また、複雑な骨材の充填形式を、ガラス球を用いたモデル化により、立方格子と斜方格子の混合系で表現している。

第3章は、PoCの均質性確保と空隙形成の鍵となる結合材の流動挙動について、レオロジカルな視点から解明している。

セメントペーストである結合材のレオロジカルな流動挙動は、低せん断速度域では降伏値を持った擬可塑性流 (Pseudo-plastic Flow) を示すが、PoC打設時の振動締め固めのような高せん断速度域では、複雑な凝集系は破壊されニュートン流 (Newtonian Flow) 化することに着目し、その流動型式をビンガム流で近似している。高品質な PoC を製造するポイントは、打設時の振動締め固めにより結合材の流動挙動を一時的に分散系にし、気泡が抜け結合材が緻密化した直後にチクソトロピックな性質を利用して凝集系に戻すこととしている。このときの結合材の流動性状は、その見掛け粘度と振動加速度よりほぼ定まることから、結合材管理のための知見を得ている。

第4章は、PoCの連続空隙を画像解析し、その物性や動植物の棲息などに密接に関係する空隙性状に関する知見を得ている。

骨材に砕石とガラス球を用い、PoCを1mm間隔で連続的にスライスすることで、連続空隙の形状やサイズおよび推移状況を明確にしている。そして、PoCの平均空隙径は、骨材空隙に対する結合材充填率 (B/V) = 25%~45%の場合、骨材粒径の0.35~0.25倍程度としている。また空隙の形状は、P-round方式を用いて縦横比1:5程度の扁平なものが多いことを示している。

第5章は、PoCの強度および透水性と空隙性状との関係につき示している。特に、4号砕石 (20-30mm) を用いる場合は結合材が厚くなるが、フロー値と振動条件の管理から材料分離を防ぎ、B/V=30%以上で10N/mm²以上の圧縮強度を確保できることから、実用化は可能としている。

第6章は、PoCを水辺域に設置した場合のウォッシュアウトに対する耐久性につき論じている。

水頭差5cmで淡水または塩水を91日間透過させる促進実験では、圧縮強度や動弾性係数は基準値を満足している。また、主な溶脱物質のCa(OH)₂は、

セメントクリンカー鉱物中の珪酸カルシウム (3CaO·SiO₂、2CaO·SiO₂など) の量にほぼ比例するが、その溶脱は結合材表面のみに留まり早期に収束することを明確にしている。

ウォッシュアウト対策としては、透水係数を小さくすること、細粒物質や水分抑制による結合材の緻密化、低アルカリ化、ポゾラン反応によるCa(OH)₂の固定、中性化 (炭酸化) などが有効としている。

第7章は、PoCの現地植栽実験を通じて、各種PoCの空隙性状が植物の生育に及ぼす影響を調べ、植物の生育基盤としての適用条件を示している。

実験の結果、安定した緑化には平均空隙径が3mm程度 (5号砕石:13-20mm) 以上必要であり、骨材径が5mmを下回ると草の生えにくい材料として適用できるとしている。また、植物の根の太さや形状とその生育に必要な空隙径に関する知見より、適切な空隙管理によりPoCに所定の空隙を形成させることができ、目標とする植生が実現可能なことを示している。

第8章は、スプリット方式で製造するPoC積みブロックを対象とし、実際に河川に沈積する実験を通じて、PoCブロックの表面や空隙に付着した各種生物について調べている。

その結果、空隙を含め表面積の広いPoCブロックへの好気性従属栄養細菌の付着量は、浸水部で自然石以上に多量に認められ、これは付着菌類による水質浄化の可能性を示している。また、植物は水面から60-70cmの範囲やブロックの目地部分に多く繁茂することを示している。

第9章は、PoCを生物共生型材料として水辺域に適用する場合を想定し、河川や海浜における生物棲息場、水質浄化、都市河川のアメニティー化について示している。そして、空隙の空間スケールより、バクテリアから小動物、草本類など国が推し進めている多様性生物の棲息場として適応できる有効なインフラ整備用材料であることを明らかにしている。

第10章は、第2章から第9章までに得た知見を要約し結論としている。

論文審査結果の要旨

これまでコンクリートを用いて構築してきた我が国のインフラ整備は、主に人に対する利便性を追求してきたが、環境面の配慮が不十分であったことが各方面から指摘されている。そこで、21世紀のインフラ整備は、過去に破壊してきた自然環境の修復と再生をテーマとした「エコマテリアルの概念」が必要となってきた。

この概念を包括する材料として、硬化体内に連続した空隙を有し、水や空気を自由に通すポーラスコンクリート (Porous Concrete : 以下 PoC) が注目され、各方面のインフラ整備で使用され始めている。PoCの特徴は内部の連続空隙であるが、製造時にこの連続空隙を確保するための管理手法が最大の課題となっている。しかし、連続空隙の構成や骨材表面に薄く付着する結合材の性状については、未解明の部分が多い。

このような背景の中、本研究は、PoCの空隙確保をテーマとして結合材や空隙の性状を解明するもので、さらに生物共生型材料としての実践的な知見をとりまとめている。

本論文では、PoCの均質性確保と空隙形成のポイントを、骨材の充填状態と結合材の性状と製造時の管理手法としている。

本研究の特記すべき点は、振動締め固め下における結合材のレオロジー特性に着目し、現在不明な点の多い適切な製造方法、すなわち適正な配合条件と締固振動条件を把握したことで、その新規性が評価される。また、骨材の充填形式は、ガラス球を用いたモデル化により簡略的に表現している。

さらに特記すべきことは、PoCの空隙性状の具体化を試みたことで、これと物性、耐久性、動物の棲息、植物の根茎寸法などとの関係を用いて、現地実験による実践的な検証を行っている。

この研究の主な成果は、以下のとおりである。

1) PoCの空隙形成のポイントとして、打設時の結合材の流動挙動をレオロジーの視点から解明した。セメントペーストの流動挙動は、降伏値をもつ

た擬可塑性流 (Pseudo-plastic Flow) であるが、振動締め固めのような高せん断速度域では、セメント凝集系は一時的に破壊されニュートン流 (Newtonian Flow) 化する点に着目しており、結合材の流動性状の管理には、適切な振動加速度を与え、見掛けの粘度を制御する合理的な施工方法を示した。

2) PoCの物性や動植物の棲息などに密接に関係する連続空隙の大きさや形状について、p-round法などを用いた画像解析により解明した。そして、骨材径や結合材量と空隙性状に関する新たな知見を得た。

3) PoCを水辺域に設置した場合のウォッシュアウトに対する耐久性について、90日間水を連続的に透過させた促進実験により検証を行った。また、セメントクリンカー鉱物中の珪酸カルシウムなどから生成される Ca(OH)_2 の遊離は、結合材表面の中性化やボゾラン反応により早期に収束することを明確にした。

4) PoCへの植栽実験より、植物の根の太さや形状とその生育に必要な空隙径に関する知見を得た。また、PoCの河川への沈漬実験より、表面に付着する好気性従属栄養細菌が多量なことから、自然石と同等以上の水質浄化の可能性を示した。

これらの成果を総括すると、本研究から得られた施工段階の結合材管理に関する知見より、PoCの空隙形成が確実となり、このPoCを水辺域に適用すると、地球環境の負荷を低減し生物が共生できるエコマテリアルとして機能することを示している。このような技術を活かすことで、PoCは国が推し進めている多様性生物の棲息場として適応できる有効なインフラ整備用材料となることが期待できる。

以上、提出された論文の研究成果に対し、慎重に審査を行った結果、本研究で得られた知見は学術的および工学的にも有意義であり、博士(工学)の学位論文として十分に価値があることを認めた。