

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360244

研究課題名(和文)性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準・品質保証体制の確立とその応用

研究課題名(英文) Establishment and application of construction standard and quality assurance system for porous concrete considering performance-based design

研究代表者

畑中 重光 (HATANAKA, Shigemitsu)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00183088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,500,000円、(間接経費) 4,650,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、ポーラスコンクリートの施工標準の策定および品質保証体制の確立にある。施工標準の策定に向けた提案を行うとともに、耐久性に関して凍結防止剤による化学劣化および車両走行による摩耗に関して実験的な検討を行った。品質保証体制については、試験体の採取方法、空隙率および透水性の試験方法、養生方法などに関する検討を進めた。また、環境対応分野への適用に加え、防災分野への適用として、ゲリラ豪雨対策舗装による水流制御技術の開発も行った。

研究成果の概要(英文)：Purposes of the present study are to propose a construction standard and to establish a quality control system for porous concrete. In addition to a proposal of construction standard, durability of porous concrete was examined, i.e. the effects of chemical degradation by deicing salt (CaCl₂) and wearing by run of car were investigated. In order to realize a quality assurance system, coring method of specimen, measuring method of void ratio and permeability, and curing method were experimentally investigated. Further, as its application to disaster prevention field, porous concrete drain pavement was developed for mitigating a flood in cities.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：ポーラスコンクリート 施工標準 品質保証 都市水害対策 性能設計 透水性 寸法効果 化学劣化

1. 研究開始当初の背景

ポーラスコンクリートは、その内部に多数の連続空隙をもつことにより、普通コンクリートにはない多くの有用な性質を持つ。既に、一部では実用化され、また透水性舗装や植生基盤などへの適用性に関する研究成果も報告されている。近年では、都心部のゲリラ豪雨など都市型水害に対する対策としても、排水性の極めて高いポーラスコンクリートが注目されつつある。

しかし現時点では、ポーラスコンクリートは普通コンクリートと比較すると研究報告も圧倒的に少なく、耐久性評価や品質管理方法などに関してはいまだに十分な研究成果が蓄積されているとはいえない。このことが、安定的なポーラスコンクリートの生産に不可欠な施工標準および品質保証のための規準類の整備が遅れている最大の原因となっており、同時に、ポーラスコンクリートの健全な普及を妨げている。

2. 研究の目的

本研究では、ポーラスコンクリートの性能設計の実現と、その施工標準および品質保証体制の確立を目的としている。

適用分野は、これまでの環境負荷低減分野、生物共生分野に加え、新たに都市水害対策などの防災分野も対象とし、各分野におけるポーラスコンクリートの性能設計を実現するための基盤を構築する。

3. 研究の方法

本研究ではまず、ポーラスコンクリートの施工標準の整備に向けて、最も問題となる締固め等の施工方法の管理手法に関する検討を進めた。また、強度および耐久性に大きく影響する材齢初期の養生方法に関する検討も並行して進めた。

次に、品質保証体制の構築に向けて、ポーラスコンクリートに特有な、供試体の採取方法、空隙率および透水係数の評価方法などに関して、その妥当性の確認と改善手法の提案を行った。

続いて、研究報告の少ない耐久性に関して、凍結防止剤による化学劣化、車両走行による耐摩耗・剥脱性、乾燥収縮、凍結融解抵抗性などに関する定量的な評価を行った。

最後に、都市水害対策舗装の開発およびその有効性の検証を行った。

4. 研究成果

(1) 施工標準の整備に向けた研究

① 振動締固め効果の定量化

フレッシュポーラスコンクリートの敷均し後の振動締固めについては、どの程度行えば目標とする設計空隙率となるかは不明であり、施工者は過去の実績からその方法および程度を決定している。そこで本研究では、実施工を想定したスラブ供試体を作成し、振動機の起振力、振動時間、調合要因などがポ

ーラスコンクリートの空隙率およびペーストの垂れに及ぼす影響の把握を試みた。

写真-1 に本実験で使用した起振力の異なる振動機を、図-1 に実験の結果得られたポーラスコンクリートの締固め率と振動締固めエネルギーの関係の例を示す。これらの結果からは、振動エネルギーにより、締固めの効果を定量的に評価することができ、施工管理への応用も十分に可能であるとの結論を得た。



写真-1 ポーラスコンクリート用振動・仕上げ機（数値は起振力を示す）

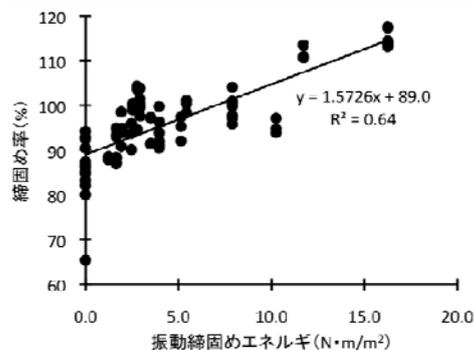


図-1 空隙率/設計空隙率と振動締固めエネルギーの関係

図-2 には、起振力 2.8 kN の振動機を用いて、200mm 厚のポーラスコンクリートスラブを締め固めたときの、底面の垂れの様子の例を示す。このように、たれが生じる条件を特定し、適切な振動エネルギーの範囲を決定することで、より確実な施工が可能となる。

画面の寸法：75×75mm、枠内の数値：ペーストの面積率

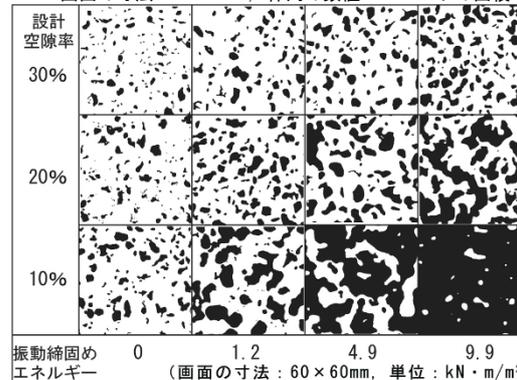


図-2 底面のセメントペーストの垂れの様子（ペーストフロー値：190）

② 初期の養生方法の影響

ポーラスコンクリートに対しても普通コンクリートと同様に、強度および耐久性を確

保するためには水中養生の継続が有効とされているが、実施工を考えると、散水養生やシート養生が限界である。しかし、これらの養生の効果は不明であった。このため本研究では、材齢初期の養生条件がポラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を把握するための実験を行った。

図-3に、実験結果の例を示す。夏季において、散水等を行わないと、標準水中養生に対して75%程度まで圧縮強度が低下する。これに対して、初期材齢(3~7日)に散水養生を行うことで、標準水中養生の90%弱の強度発現が期待できる。また、夏季において最初の3日間に散水養生等を行わないと、その後の散水養生による圧縮強度の回復は期待できないことなどが明らかとなった。

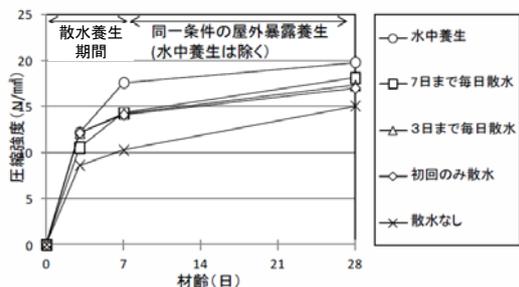


図-3 養生期間が圧縮強度発現に及ぼす影響の例(夏季)

(2) 品質保証体制の構築に向けた研究

① 供試体の採取方法

ポラスコンクリートの品質管理試験方法として一般に行われている空隙率、透水係数および圧縮強度の測定に対しては、普通コンクリートと同じφ100×200(mm)の円柱供試体が多く用いられてきた。しかし、小型の円柱型枠にポラスコンクリートを打設して作製される円柱供試体では、実際に施工されたものと比較して、締め固めが異なること、および型枠面の壁効果があることなどの相違点が避けられず、正確な品質評価となっていない可能性がある。図-4に、ポラスコンクリートの実大舗道施工実験により得られた、円柱供試体とコア供試体の空隙率の比較を示す。ここで、コア供試体とは写真-1(a)の振動機を使用して施工した舗道から直接採取した供試体であり、円柱供試体は舗道を施工したものと同一フレッシュポラスコンクリートを円柱型枠に突き棒による突固めで打ち込んだ供試体を指す。図から明らかなように、ポラスコンクリートは締め固めにより空隙率が大きく変化する特性があるため、コア供試体の空隙率は振動締め固めエネルギーにより大きく変動している。これに対して円柱供試体はコア供試体の空隙率と近いものも見られるが、設計空隙率にかかわらず特定のコア供試体と対応しているわけではなく、実施工されたポラスコンクリートの特性を必ずしも表しているとは言えない。

この問題に対する現状の最良の対策は、現場で採取されたコア供試体を用いて品質評

価を行うことであるとの結論を得た。

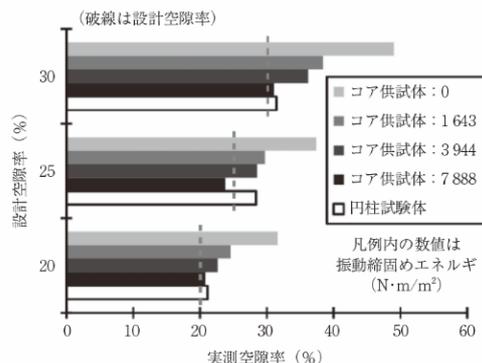


図-4 円柱供試体とコア供試体の空隙率の比較

② 空隙率の測定方法

空隙率はポラスコンクリートの各種の性能に大きな影響を与える特に重要な物性値である。空隙率は、これまで主に日本コンクリート工学会の研究委員会で提案された方法を用いて評価されてきたが、実務上では精度や所要時間などの点に問題があった。そこで本研究では、通常よりも測定範囲の広いコンクリート用エアメータおよび専用のゴム製アダプタ(図-5参照)を用いた、より迅速かつ簡易で実用的なポラスコンクリートの空隙率の測定方法を提案し、その適用性の検証を行った。その結果、本提案手法により、独立空隙を除く連続空隙率を迅速かつ精度良く測定できることが明らかとなった。

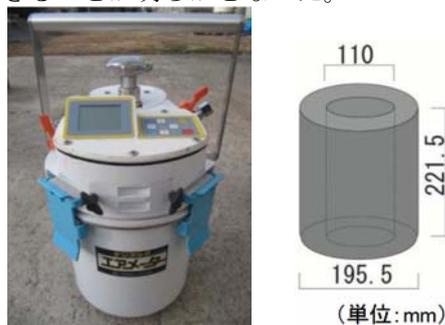


図-5 空隙率測定に用いた広レンジエアメータ(左)およびゴム製アダプタ(右)

③ 透水試験方法

ポラスコンクリートの透水係数の測定方法としては、日本コンクリート工学会より定水位透水試験方法の案が示されており、既に多くの研究成果が報告されているが、その妥当性に関しては十分に検討されていなかった。本研究では、透水試験結果に及ぼす測定条件の影響を明らかにすることを目的として、6号砕石を用いたポラスコンクリートに対して、供試体の壁効果、水位差、および試験体高さを要因とした実験を行った。その結果、図-6に示すように、流速と動水勾配の関係は線形ではなく、式(1)に示すような乗累関数で近似されることを確認し、その際に決定される非線形の透水係数を、空隙率のみによって推定できる式(2)を提案した。

$$v = k'' \cdot i^{0.312} \quad (1)$$

$$k'' = 0.126v_r - 1.7 \quad (2)$$

ここに、 v ：流速(cm/s)、 k'' ：非線形透水係数(cm/s)、 v_r ：空隙率(%)

非線形の透水係数を導入することで初めて、測定時の水位差および供試体高さに影響されずに透水係数を決定することができる。

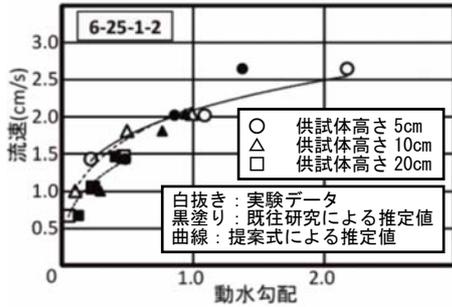


図-6 ポーラスコンクリートの流速と動水勾配の関係の例

(3) 耐久性に関する研究

① 凍結防止剤 (CaCl₂) による化学劣化

冬季の積雪や路面凍結による事故防止を目的に、塩化カルシウム系の凍結防止剤の散布が広く行われている。ポーラスコンクリートを舗装材料として用いる場合には、この塩化カルシウムに対する化学抵抗性を把握しておくことは非常に重要である。本研究では、ポーラスコンクリートおよびその結合材であるセメントペーストの、塩化カルシウムによる劣化メカニズムの把握とその抑制対策に関して実験的な検討を行った。写真-2に塩化カルシウム水溶液に浸漬したポーラスコンクリートの崩壊状況の例を、図-7に、塩化カルシウム水溶液に浸漬したポーラスコンクリートの圧縮強度の推移の例を示す。実験の結果からは、養生が不十分な場合およびW/Cが25%以上の普通ポルトランドセメントを用いた場合には、塩化カルシウム水溶液による化学劣化によりポーラスコンクリート硬化体が崩壊する恐れがあるのに対し、普通ポルトランドセメントを用いたW/C=20%程度の低水セメント比の調合で十分に水中養生を行った場合、もしくは高炉セメントを使用した場合には塩化カルシウム水溶液による化学劣化に対する抵抗性が期待できることが明らかとなった。

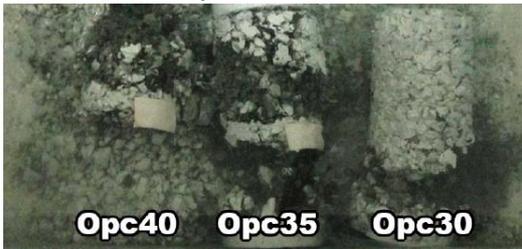


写真-2 塩化カルシウム水溶液に56日間浸漬したポーラスコンクリートの崩壊状況(普通ポルトランドセメント使用、数字はW/Cを示す)

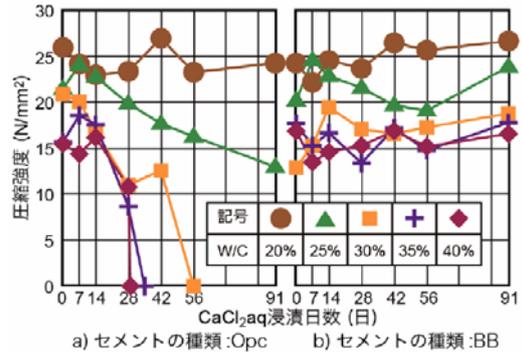


図-7 塩化カルシウム水溶液に浸漬したポーラスコンクリートの圧縮強度の推移 (Opc: 普通ポルトランドセメント、BB: 高炉セメント)

② 車両走行による耐摩耗・剥脱性

ポーラスコンクリートは、舗装等の表層材料として使われることから、車両走行時のタイヤによる摩耗・剥脱が発生することが懸念される。しかし、ポーラスコンクリートの摩耗・剥脱に対する耐久性に関しては、研究報告自体が少なく、現時点では不明な点が多い。本研究では、ポーラスコンクリートの摩耗・剥脱に対する耐久性の評価を行うことを目的として、調合の異なるポーラスコンクリート、普通コンクリートおよびアスファルトを対象とした回転ラベリング試験(写真-3参照)を行った。タイヤチェーンを使用した実験結果からは、図-8に示すように、ポーラスコンクリートの摩耗深さは普通コンクリートと同程度であり、アスファルトと比べると耐摩耗性が非常に高いことがわかった。

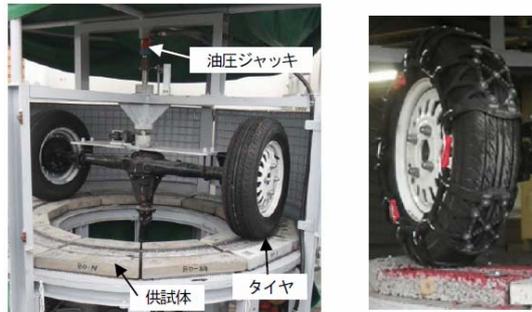


写真-3 回転ラベリング試験装置(左)およびタイヤチェーン(右)

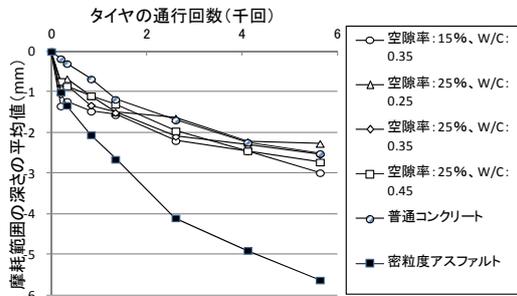


図-8 摩耗深さの平均値とタイヤの通行回数(千回)の関係の例

③ 乾燥収縮特性

ポーラスコンクリートの耐久性等に大きく影響すると考えられる乾燥収縮特性に関

しては、研究報告自体が少なく、不明な点が多い。本研究では、広範囲な調合および使用材料を用いたポーラスコンクリートの乾燥収縮試験を行うとともに、得られた結果に基づく汎用性の高い理論モデルの構築を試みた。図-9に、ポーラスコンクリートの乾燥収縮試験結果の一例として、骨材種類の影響を示す。実験結果からは、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率は、締固め程度の影響をほとんど受けないこと、骨材粒形が小さいほど乾燥収縮率が大きくなることなどが明らかとなり、また、実験結果に基づき提案した幾何学モデルによる乾燥収縮予測式は、定量的にほぼ良好な推定制度が得られることを確認した。

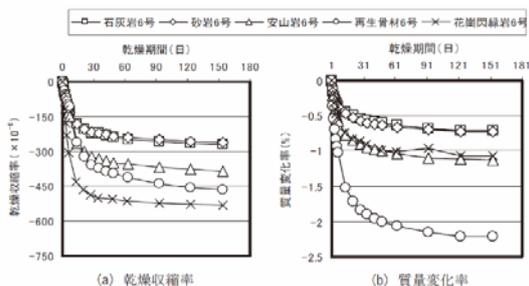


図-9 乾燥収縮率と質量変化率に及ぼす骨材種類の影響

④ 凍結融解抵抗性

粒径0.6~1.2mmの骨材を使用して製造したポーラスコンクリートは、優れた保水性能や揚水性能を有するが、一方で、冬期における凍害劣化を引き起こす可能性がある。そこで本研究では、小粒径ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎実験を行い、結合材強度や骨材粒径が及ぼす影響などについて検討した。その結果、設計空隙率20%以下の小粒径ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性は一般的なポーラスコンクリートよりも大きいが、設計空隙率が30%になると、図-10に示すように供試体底部に内部空隙の飽水に起因すると思われる劣化が集中して生じる恐れがあることが明らかとなった。

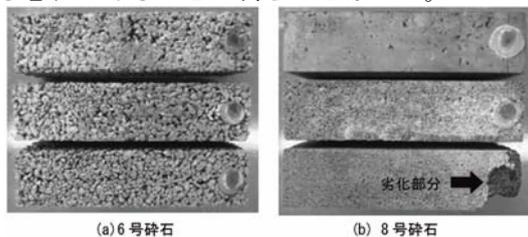


図-10 凍結融解 300 サイクル終了後の供試体の例（設計空隙率：上から10, 20, 30%）

⑤ 保水・揚水性

小粒形骨材を用いることにより、ポーラスコンクリートに保水性や揚水性を持たせることが可能である。しかし、これらの性能の長期的な変動に関しては不明な点が多い。本研究では材齢1週と材齢4か月における各性能の変化に関して実験的な検討を行った。その結果、供試体材齢が長くなると保水性能は

低下する傾向が、また、揚水性能は向上する傾向が見られた。

(4) 都市水害対策舗装の開発研究

近年、ゲリラ豪雨など都市部での水害による被害が増加傾向にあり、このような水害を防止または低減する総合治水対策を考慮した都市づくりが求められている。本研究では、高い透水性を有するポーラスコンクリートにより路面または床面を形成することで、その内部での雨水の貯水・排水を可能とし、雨水の流出遅延効果と流出量の低減効果を付与できる工法を提案した。図-11に、本工法による舗装の一例を示す。本工法は、舗装自体に貯水および雨水の流出遅延効果を持たせることができるため、施工面積さえ十分に確保できれば、貯水池や地下の貯水槽などを建設する必要がなく、また、透水性舗装としての機能もあるため、都市における快適性改善と、降雨を現地地盤へ浸透させることによる地下水脈の回復効果など、総合的な環境改善効果が期待でき、都市型水害対策として極めて有効であると考えられる。

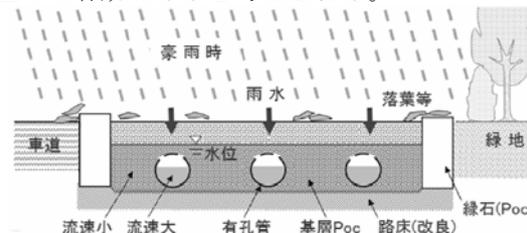


図-11 地盤内で貯水・排水を行う工法の一例（歩道）

また、治水計画や舗装の設計に必要な水平方向の透水性に関しては研究が皆無であり、評価方法から検討が必要であった。そこで本研究では、図-12に示すような水平方向透水試験装置を開発し、ポーラスコンクリートの水平方向の透水性の定量化に向けた検討を行った。その結果、ポーラスコンクリート内部の水の流動挙動および透水性の評価方法に関する基礎的な知見が得られた。

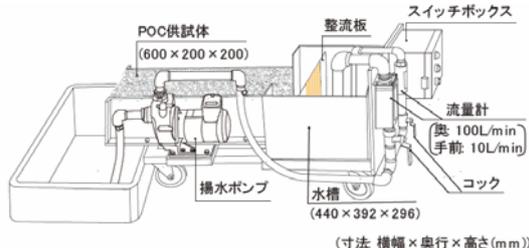


図-12 水平方向透水試験装置

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 10 件）

- ① 内田寿久、畑中重光、三島直生、前川明弘：塩化カルシウム水溶液によるセメントペースト硬化体の劣化とそのメカニズム

- ムに関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 36、2014. 7 (掲載決定)
- ② 夏目実穂、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの透水試験結果に及ぼす測定条件の影響に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 36、2014. 7 (掲載決定)
- ③ 馬永寿、三島直生、畑中重光：ラベリング試験機による舗装用ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性の評価に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 36、2014. 7 (掲載決定)
- ④ 内田寿久、畑中重光、三島直生：塩化カルシウム水溶液によるポーラスコンクリートおよびその結合材の劣化に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol. 79(697)、pp. 341-347、2014. 3
- ⑤ 内田寿久、畑中重光、三島直生、前川明弘：塩化カルシウム水溶液によるセメントペースト硬化体の劣化に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 35(1)、pp. 733-738、2013. 7
- ⑥ 夏目実穂、内田寿久、三島直生、畑中重光：フレッシュコンクリート用エアメータを使用したポーラスコンクリートの簡易な空隙率の測定方法の提案、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 35(1)、pp. 1447-1452、2013. 7
- ⑦ Chieko Gomi, Yasuhisa Kuzuha; Simulation of a Daily Precipitation Time Series Using a Stochastic Model with Filtering, Open Journal of Modern Hydrology, 査読有, pp. 206-213, 2013. 3
- ⑧ 森鼻泰大、中川武志、三島直生、畑中重光：実施工における振動締固めがポーラスコンクリートの空隙率および諸特性に与える影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 33(1)、pp. 1481-1486、2011. 7
- ⑨ 張茂剛、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性とその幾何学モデルに関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol. 76(665)、pp. 1205-1212、2011. 7
- ⑩ 畑中重光、三島直生、森鼻泰大、中川武志：ポーラスコンクリートの施工標準(案)の作成に向けて、コンクリート工学、査読有、Vol. 49(4)、pp. 30-37、2011. 4

[学会発表] (計 17 件)

- ① 畑中重光：都市型水害の減災に資する地盤内の水流制御技術の開発研究：その1: 水流の制御に関する基礎的研究、日本建築学会大会、2013年8月30日、北海道大学 (北海道札幌市)
- ② 中川武志：都市型水害の減災に資する地盤内の水流制御技術の開発研究：その2: 水害対策法の提案、日本建築学会大会、2013年8月30日、北海道大学 (北海道札幌市)

- 市)
- ③ 馬永寿：ポーラスコンクリート舗装内の水平方向透水挙動に関する実験的研究：その1: 実験概要および水位の分布、日本建築学会大会、2013年8月30日、北海道大学 (北海道札幌市)
- ④ 夏目実穂：ポーラスコンクリート舗装内の水平方向透水挙動に関する実験的研究：その2: 流量および流速分布、日本建築学会大会、2013年8月30日、北海道大学 (北海道札幌市)
- ⑤ 坂本英輔：養生条件がポーラスコンクリートの保水・揚水・透水性能に及ぼす影響、日本建築学会大会、2013年8月30日、北海道大学 (北海道札幌市)
- ⑥ 坂本英輔：ポーラスコンクリートの保水・揚水・透水性能に関する基礎的研究、日本建築学会大会、2012年9月12日、名古屋大学 (愛知県名古屋市)
- ⑦ 三島直生：初期養生方法がポーラスコンクリートの圧縮強度発現に与える影響に関する実験的研究、日本建築学会大会、2011年8月23日、早稲田大学 (東京都新宿区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

畑中 重光 (HATANAKA, Shigemitsu)
三重大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00183088

(2) 研究分担者

三島 直生 (MISHIMA, Naoki)
三重大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30335145

坂本 英輔 (SAKAMOTO, Eisuke)
舞鶴工業高等専門学校・建設システム工学
科・講師
研究者番号：40583539

葛葉 泰久 (KUZUHA, Yasuhisa)
三重大学・大学院生物資源学研究所・教授
研究者番号：50373220

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

中川 武志 (NAKAGAWA, Takeshi)
株式会社川島工業・取締役

内田 寿久 (UCHIDA, Toshihisa)
株式会社安芸生コン工場・工場長兼品質管理責任者

前川明弘 (MAEGAWA, Akihiro)
三重県工業研究所・主幹研究員