

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360189

研究課題名(和文) 材料間の界面特性に着目したRC構造物の耐久性と構造性能の統合的評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of an integrated evaluation method for the durability and structural performance of RC structures focusing on material interface characteristics

研究代表者

加藤 佳孝 (KATO, YOSHITAKA)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：80272516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円、(間接経費) 4,440,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、材料間の界面に着目して、RC構造物中の構成材料の時間依存性挙動と各材料間の相互作用を考慮したRC構造物の耐久性と構造性能の統合的評価手法の開発を行った。その結果、既存の各種界面を考慮したモデルに、環境外力やコンクリートの非均質性、コンクリートの時間依存性挙動を組み込むことで、個々の要素を結びつける理論を構築した。また、ケーススタディーとして、劣化した構造物を対象とした実験を行い、定性的にはあるが、構築した理論を用いた評価が可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, an integrated method for evaluating structural performance and durability of RC structures focusing on the interface between materials was developed considering the time-dependent behaviors of the RC structure's constituent materials and the material interaction. As a result, a theory linking individual elements was created by incorporating external environmental force, the non-homogeneity of the concrete, and the time-dependent behavior of the concrete considering various interface surfaces. Furthermore, it was confirmed that qualitative evaluation using this theory is possible by performing experiments on deteriorated structure as a case study.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：界面特性 耐久性 構造性能 コンクリート構造物

1. 研究開始当初の背景

既存コンクリート構造物の性能評価に関する研究は数多く存在しているが、未だに残された課題として、I.材料非均質性が耐久性・構造性能に与える影響の評価、II.施工が耐久性・構造性能に及ぼす影響の評価、III.環境外力の取扱い、IV.耐久性と材料劣化の結果生じる構造性能低下の統一的評価、V.対策後の耐久性・構造性能の評価、が挙げられる。これら課題の共通点は、鉄筋コンクリート構造物（以下、RC 構造物）が複合材料であること、およびほとんどの場合、現場で製造されることである。工場製品や単一材料との決定的な違いは、構成材料間の界面（セメントペーストと骨材、モルタルと骨材、コンクリートと鉄筋、母材コンクリートと補修・補強材料など）やコンクリートと型枠、コンクリートと外部環境、コンクリートとひび割れ、などの界面が多く存在すること、製造時に材料分離すること、時間依存性挙動を有することである。なお本研究では、前記の界面を総称して、「材料間の界面」と称す。従来の既存 RC 構造物の性能評価や設計では、これらの課題を認識しつつも、取り扱いの簡便さから、RC 構造物を均質材料と仮定しており、これが、現実の世界の RC 構造物の耐久性・構造性能評価の精度低下の根本原因となっている。研究代表者らは、これらの問題点に着目し、材料分離を考慮した骨材界面特性と物質移動の関係のモデル化、材料非均質性を考慮した塩害劣化モデルの構築、局所的な鉄筋腐食を考慮した RC 部材の構造性能評価などの検討を実施してきている。これまでに研究代表者らが実施した研究成果と既往の研究を統合することにより、現時点でも、RC 構造物の耐久性と構造性能の統一的評価はある程度可能である。しかし、個別の要素技術の深化、ならびに現時点では仮定でしかない個々の要素を結びつける理論の構築は、既存構造物の性能評価を困難にさせている根本原因を解決するためにも必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、「材料間の界面」を切り口として、RC 構造物中の構成要素（コンクリート構成材料、対策材料）の材料・力学的性質の時間依存性挙動と、各材料間の相互作用を考慮した RC 構造物の耐久性と構造性能の統一的評価手法を構築することを目的とし、次の5つのサブテーマに分けて検討した。①配合・施工条件を考慮した材料間の界面形成モデル、②材料間の界面特性を考慮した RC 構造物の力学モデル、③塩害劣化を想定した材料間の界面特性のモデル化、④各種対策工法とコンクリート界面特性のモデル化、上記4つのサブテーマに基づき、⑤耐久性と構造性能の統一的評価手法を構築する。

3. 研究の方法

①配合・施工条件を考慮した材料間の界面形成モデル

型枠界面に生じるブリーディング水の挙動を検討した。実験では、型枠形状および寸法を変化させ、発生したブリーディング量を評価した。打込み高さおよびブリーディング量が表層コンクリートの品質変動に及ぼす影響について、表層透気係数を用いて評価した。また、骨材とマトリックスの界面を評価するために、塩分混入した再生骨材がコンクリートの性状に及ぼす影響を評価した。骨材界面の品質に関して、一般的な練混ぜ方法と材料分離低減効果のある分割練混ぜを実施し、骨材界面の微小硬度の測定から比較した。施工に伴う材料分離として、鉄筋間をコンクリートが通過する場合を想定し、4種類の鉄筋間隔を設け、表層透気係数から、かぶりコンクリートの品質を評価した。材料分離の低減方法として、再振動締固めを実施し、表面欠陥低減効果および中性化促進試験から、品質向上程度を調査した。最後に、養生条件および期間が中性化抵抗性に及ぼす影響を評価した。

②材料間の界面特性を考慮した RC 構造物の力学モデル

一軸引張試験を実施し、樹脂注入前後の構造物の応答を評価した。所定のひび割れを導入後、樹脂を注入し、修復した後再度一軸引張試験を実施した。

③塩害劣化を想定した材料間の界面特性のモデル化

セメント硬化体中の塩分の存在量や存在状態が、セメント硬化体の塩分浸透性に及ぼす影響を把握することを目的として、濃度を変えた NaCl 溶液に浸せきさせ、自由塩化物および固定塩化物量を変化させた供試体を用いて電気泳動試験を行った。また、毛管水の水分の移動速度と塩化物イオンの浸透状況にも大きな影響を及ぼすことが予想されるコンクリート内部の含水状態の影響に着目し、飽水状態および絶乾状態のモルタルの吸水作用による水分移動が、塩化物イオンの浸透特性に及ぼす影響に関して検討した。暴露試験を実施し、コンクリートの見かけの拡散係数および表面塩化物イオンの時間依存性について検討した。

④各種対策工法とコンクリート界面特性のモデル化

対策工法として、近年適用数が増えているけい酸塩系表面含浸材を選択し、含浸材の改質効果を理解するために、コンクリート中への浸透機構および改質効果について実験的に検討した。さらに、含浸材を塗布したコンクリートの中性化進行に関する検討から、水酸化カルシウム量の影響および改質深さについて考察した。

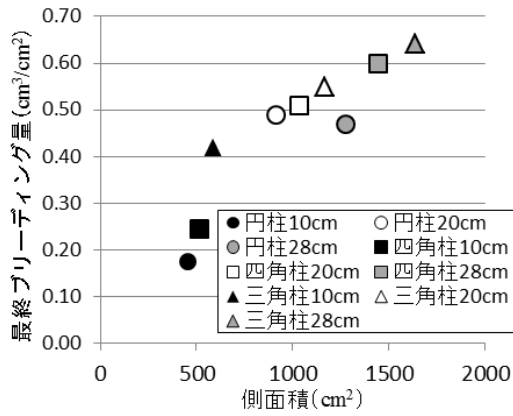


図-1 型枠側面積と最終ブリーディング量

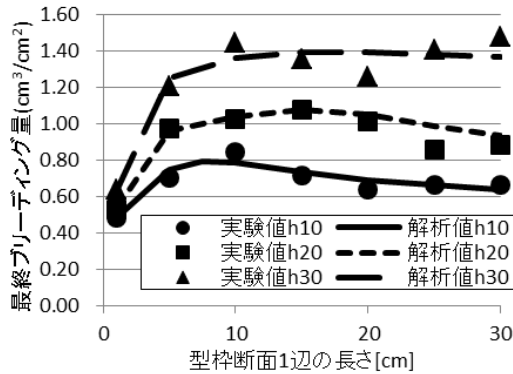


図-2 型枠断面寸法と最終ブリーディング量

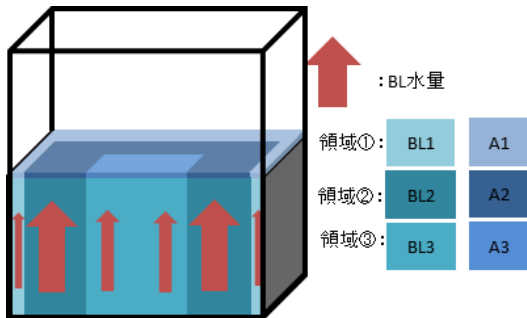


図-3 3層の概念図

⑤ 耐久性と構造性能の統一的評価手法

実構造物を想定したケーススタディとして、RC 部材中で鉄筋腐食が進行しているときの疲労現象を対象に検討を行った。

4. 研究成果

(1) 配合・施工条件を考慮した材料間の界面形成モデル

型枠界面がコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響に関しては、表層コンクリートが脆弱になる原因と考えられているブリーディングに着目した。図-1 に示すように、型枠の側面積と最終ブリーディング量には相関関係が見られた。さらに、型枠形状を一定として、型枠寸法を変化させた場合のブリーディング量の結果(図-2) から、ブリーディング水が(a)型枠極近傍の低速領域、(b)型枠極近傍から3~4cm程度的高速領域、(c)内部の標準的な速度領域の3層に分けられる可能性

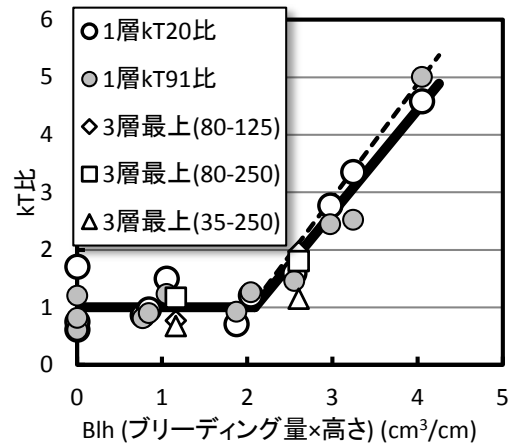


図-4 ブリーディング指標と表層透気係数比

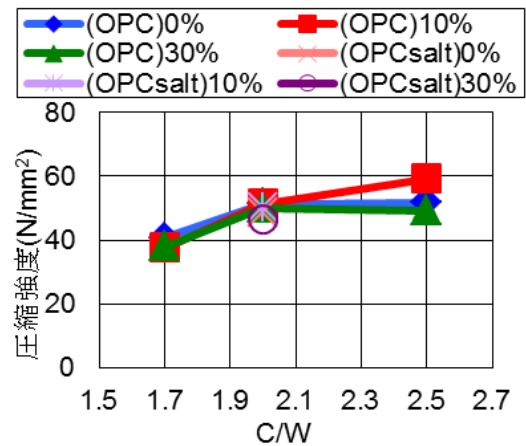


図-5 塩分含有再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度

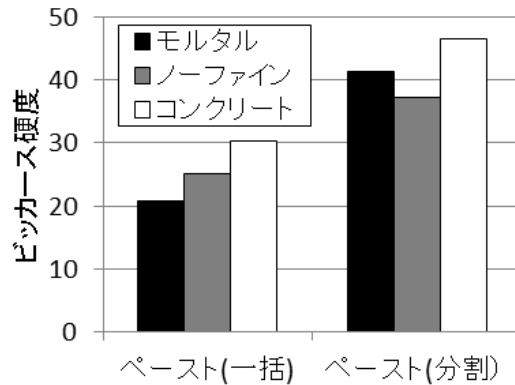


図-6 練混ぜ方法の違いとビッカース硬度

があることを示せた(図-3)。さらに、部材高さやブリーディングの影響が、表層コンクリートの品質に及ぼす影響を検討した結果、図-4 に示すように、ブリーディング指標が2.0付近から物質透過性が高くなることが明らかとなった。また、骨材とマトリックス界面の影響として、塩分を含有する再生骨材コンクリートの圧縮強度を検討した結果、図-5 に示すように、置換率30%までは大きな影響がないことが分かった。練混ぜ方法が骨材とマトリックス界面に及ぼす影響を検討した結

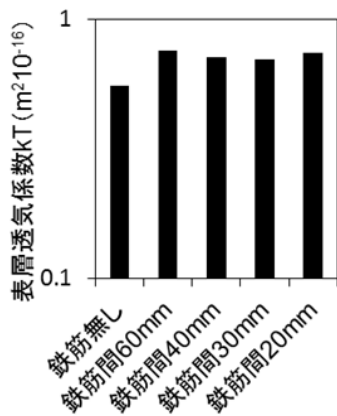


図-7 鉄筋間隔と表層透気係数

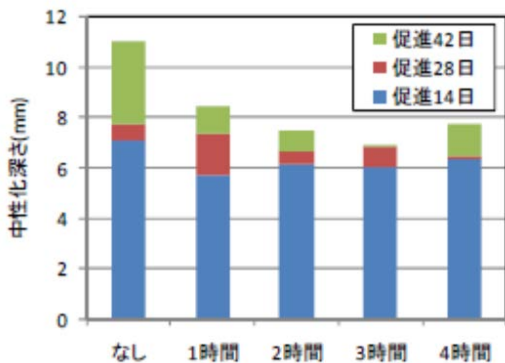


図-8 中性化試験結果

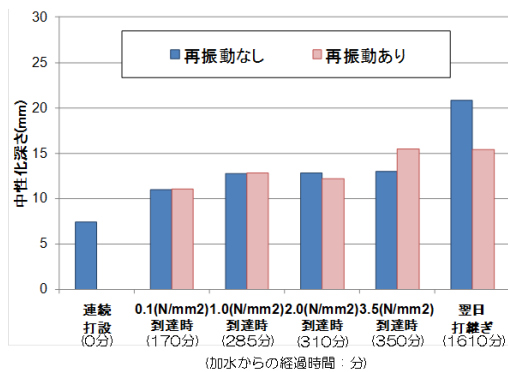


図-9 再振動によるコールドジョイント抑制効果

果、図-6 に示すように、通常の練混ぜ方法よりも分割練混ぜのほうがばらつきは小さく、硬度が高くなる結果を得た。

鉄筋間の通過に伴うコンクリート品質の変動を検討したが、図-7 に示すように、コンクリートの透気性はほとんど変わらない結果となった。さらに、図-8 および図-9 から、型枠界面の表層コンクリートは、再振動締固めによってコールドジョイントをはじめとした初期欠陥の発生を抑制でき、耐久性も向上することが明らかとなった。図-10 に示すように、養生方法は中性化の進行に大きな影響を与えることがわかった。これらの結果から、施工による品質変動の要因とその改善方法を検討できた。

(2) 材料間の界面特性を考慮した RC 構造物の力学モデル

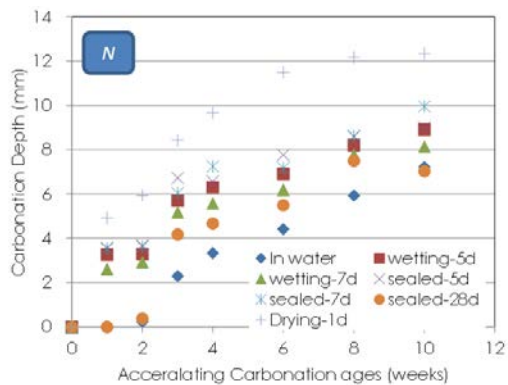


図-10 養生と中性化試験結果

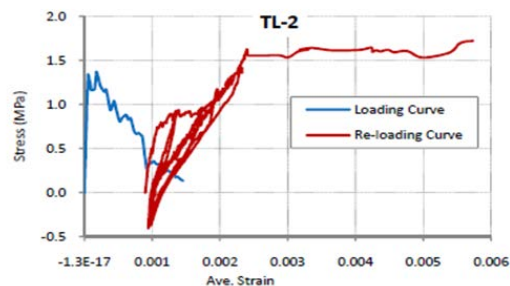


図-11 樹脂注入前後の応力-ひずみ曲線の例

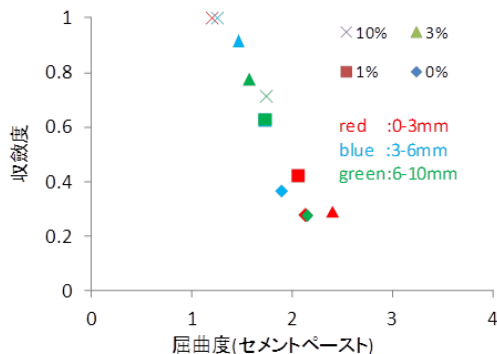


図-12 屈曲率と収斂度の関係

鉄筋とコンクリートの付着特性を検討するために、両引き試験を行った。ひび割れ後の試験体に樹脂を注入による修復を行った後、载荷を実施し、樹脂注入後の付着特性も検討した。その結果、図-11 に示すように、樹脂注入を行った場合と、注入していない場合は、似た応答を示したが、樹脂注入のピーク値が大きくなった。

(3) 塩害劣化を想定した材料間の界面特性のモデル化

高塩分濃度ほど、図-12 に示すように屈曲度が小、収斂度が大きくなり、その結果、実効拡散係数が大きくなった。図-13 および図-14 の結果から、塩分浸透は移流、拡散、固定・吸着、蒸気拡散等の相互作用であり、それぞれの現象が主として生じる細孔空隙範囲が異なっている可能性があることが分かった。また、図-15 および図-16 に示すように、見か

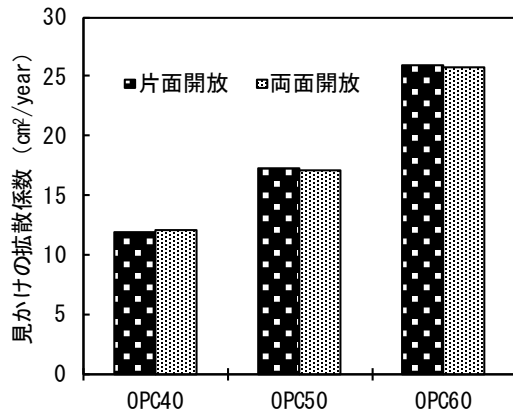


図-13 吸水7日目における見かけの拡散係数 (飽水状態から吸水を開始した場合)

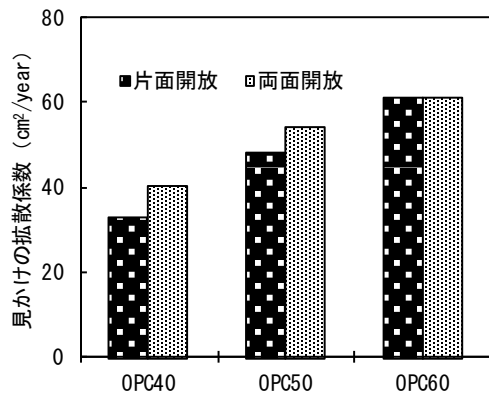


図-14 吸水7日目における見かけの拡散係数 (絶乾状態から吸水を開始した場合)

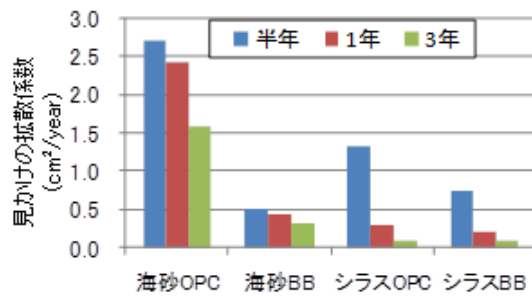


図-15 見かけの拡散係数 (干満帯,W/C50%)

けの塩化物イオン拡散係数の時間依存性だけでなく、表面塩化物イオン濃度の時間依存性についても留意する必要があることが示された。

(4) 各種対策工法とコンクリート界面特性のモデル化

含浸材の浸透機構は、本実験の範囲内では、濃度拡散による浸透と推察された。また、含浸材塗布による改質効果は、W/C、混和材、補助材の使用 (図-17) によって変化することから、水酸化カルシウム量によって改質効果が変化することが分かった。

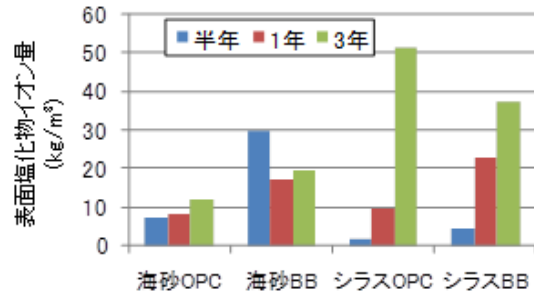


図-16 表面塩化物イオン濃度 (干満帯,W/C50%)

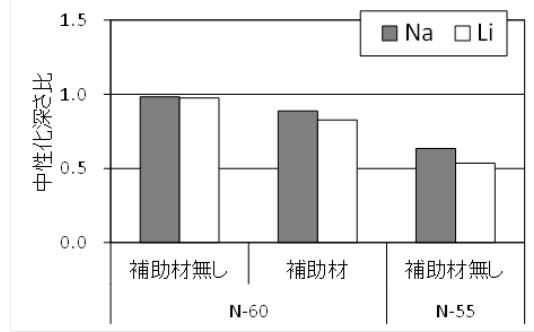


図-17 中性化深さ比 (OPC,中性化期間 56 日)

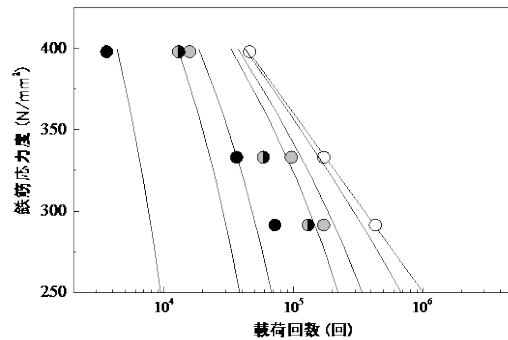


図-18 腐食を考慮した疲労モデル計算結果

(5) 耐久性と構造性能の統一的評価手法

腐食した RC 梁の疲労試験から、本研究で得られた知見を用いて考察を行った。図-18 に示すように、定性的な傾向を推定することは可能であったが、定量的な評価手法の確立までには至らず、今後の検討課題である。

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 32 件)

- ① 小林 荘太, 三田勝也, 加藤佳孝, セメント硬化体の空隙構造が実効拡散係数に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013, pp.877-882
- ② 染谷 望, 加藤佳孝, 塗布後の養生方法が表面含浸材の改質効果に及ぼす影響の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013, pp.1687-1692
- ③ 三田勝也, 加藤佳孝, プリーディング水

の発生機構に型枠断面寸法が及ぼす影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013, pp.1207-1212

- ④ 久徳貢大, 山口明伸, 武若耕司, 秋元新一, ひび割れを有するモルタルの塩化物イオン浸透特性とひび割れ部における拡散係数の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013, pp.853-858
- ⑤ E. Kato, Y. Kawabata, M. Iwanami, Corrosion behavior of steel bars in reinforced concrete slabs repaired by partial patching, Concrete Solutions 2014
- ⑥ 加藤佳孝, 早川健司, 表面透気試験を用いた中性化に伴う鋼材腐食の耐久性設計と検査の連携に関する一考察, 土木学会論文集E2, Vol.68, No.4, 2012, pp.410-421
- ⑦ T. Iyoda, E. Toyomura, Study on the Prediction of Curing Period for meeting required Concrete Durability, The 5th ACF International conference, Vol.5, 2012, 0072
- ⑧ 小池賢太郎, 山口明伸, 武若耕司, モルタル中の水分移動が塩分浸透に及ぼす影響, 土木学会コンクリート技術シリーズコンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術に関するシンポジウム, No.99, 2012, pp.333-338
- ⑨ 早川健司, 加藤佳孝, 材料分離がコンクリートの表層透気性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011, pp.647-652

〔学会発表〕(計 49 件)

- ① 岡崎慎一郎, 鉄筋腐食が進行する RC はりの疲労特性に関する実験的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.9, 大阪大学
- ② 樫村康介, 振動締固めに伴う材料分離がコンクリートの品質に与える影響, 土木学会関東支部第 40 回技術研究発表会講演概要集, V-38, 2013.3, 宇都宮大学
- ③ 加藤裕二, 分割練混ぜ方法における骨材界面の品質に関する検討, 土木学会関東支部第 39 回技術研究発表会講演概要集, 2012.3, 関東学院大学
- ④ 壽 祐太郎, コンクリートの見かけの塩化物イオン拡散係数と表面塩化物イオン濃度の関係に関する一考察, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 2011.9, 愛媛大学
- ⑤ 藪崎陽平, 再振動締固めによるコンクリートのコールドジョイント抑制効果の検討, 土木学会関東支部第 39 回技術研究発表会講演概要集, 2012.3, 関東学院大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

加藤 佳孝 (KATO, Yoshitaka)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 80272516

(2)研究分担者

山口 明伸 (YAMAGUCHI, Toshinobu)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号 : 50305158

牧 剛史 (MAKI, Takeshi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号 : 60292645

伊代田 岳史 (IYODA, Takeshi)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号 : 20549349

加藤 絵万 (KATO, Ema)

(独)港湾空港技術研究所・構造研究チーム・チームリーダー

研究者番号 : 90371765

(3)連携研究者

三田 勝也 (MITA, Katsuya)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号 : 50579795