

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 26 日現在

機関番号：32665
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2014～2016
課題番号：26820186
研究課題名(和文) 損傷した実構造物コンクリートのひび割れ面積比による塩分浸透特性評価法の構築

研究課題名(英文) The Formulation of the Chloride Ion Penetration Assessment Method through the Crack Area Ratio of Concrete in Damaged Existing Structures

研究代表者
齊藤 準平 (SAITO, Junpei)
日本大学・理工学部・助教

研究者番号：20349955
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)： ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性評価法の構築を目指し、ひび割れとひび割れ周辺のコンクリートについて様々な因子の影響に関する実構造物サイズの供試体を用いた塩分浸透試験を行い、以下の結果を得た。

ひび割れ幅の違いの条件では、ひび割れ幅の増加に伴い塩分濃度が増加することとその定量的な関係の取得、実構造物の損傷形態を想定したひび割れへの塩分の侵入する方向の違いでは、侵入方向の増加に伴い塩分濃度が増加することとその定量的な関係の取得、実構造物の損傷形態を想定した加力による損傷の影響では、加力による損傷によって塩分浸透速度が高くなることと加力方向と塩分浸透方向の間に異方性があること。

研究成果の概要(英文)： Existing structure-sized specimens, pertaining to several influential factors for cracked and peripherally cracked concrete, were submerged in salt water, which gave the following results.

Under the conditions for the difference in the crack width, chloride ion concentration increased along with the increase in crack width, and it also acquired a quantitative relation. With the difference in the salt penetration direction to the crack for the existing structure's anticipated type of damage, there was an increase in chloride ion concentration along with the increase in penetration directions, and it also acquired a quantitative relation. With the influence of the damage through compressive stress for the anticipated type of damage for the existing structure, the salt penetration speed increased due to the damage from the compressive stress, and it showed anisotropy in the relationship between the compressive stress direction and the salt penetration direction.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：ひび割れ 塩分浸透 コンクリート

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、多くの鉄筋コンクリート構造物は、長年の荷重による疲労損傷と、多くの劣化・損傷コンクリートの原因とされる塩害とが複合的に作用し合い、著しい鉄筋腐食によって構造的な機能を失う危機を迎えている。さらに今後は、維持管理に必要な膨大な数のコンクリート構造物の増加、維持管理に対処できる技術者の減少、維持管理財源の逼迫等、現存の構造物の維持管理が非常に困難な時代になると予想される。

(2) 土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書と略称する）は、ひび割れを有するコンクリートの鋼材腐食の照査を、ひび割れ幅等から算定式によって求めた塩分浸透特性と鋼材腐食限界濃度とを簡易的に比較する方法を提示し、その解消を図っている。しかし、示方書に示す塩分浸透特性（特性値として、「ひび割れの影響を考慮した拡散係数 (D_{cr})」が扱われる）の算定式は、精度や適用条件の汎用性が、未だ高いとはいえない。示方書の D_{cr} の算定式は、精度向上を主眼に改善に向け変遷してきたが、算定式が二転三転し、著しい改善は見られない。また、それだけでなく、算定式の対象部材は、ひび割れ幅とひび割れ間隔が明確なはり部材に限定されたままで、実用性が求められている。

2. 研究の目的

示方書の D_{cr} の算定式は、ひび割れ間隔の濃度分布を平均化しているもので、実構造物を対象とした場合には、ひび割れ付近の実際に塩分濃度が高い範囲では危険側に評価されてしまうという課題を持っている。また、当該算定式の適用条件の汎用性についても、実構造物を想定した式の実用性が求められているという課題を持っている。

本研究は、ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性評価法のための構築を目指し、その塩分浸透特性を明らかにすべく、ひび割れとひび割れ周辺の部材コンクリートの領域について実構造物サイズの供試体を用いた塩分浸せき試験を実施し、ひび割れに対する様々な因子の影響について、当該研究期間において以下の(1)、(2)についての実験的検討を行うことを目的とした。

(1) 実構造物の損傷形態を想定したひび割れに塩分が侵入する際のひび割れ幅の違い〔実験①〕および侵入方向の数の違い〔実験②〕が塩分浸透特性に及ぼす影響

(2) 実構造物の損傷形態を想定した加力による損傷の有無の影響〔実験③〕が塩分浸透特性に及ぼす影響

3. 研究の方法

本研究は、研究目的の達成のために、それに適したひび割れ周辺の実構造物サイズの供試体を用いた塩分浸漬実験を実施する。具体的には、材料の配合設計、供試体の作製、設定したひび割れ幅の供試体への加工処置、塩分浸漬実験、および供試体の塩分濃度分析を行う。それに際し、併せて関連検討項目である、実構造物の損傷形態を想定した塩分が侵入するひび割れ方向の数の違い、加力の有無の違いなどの影響を検討するために、供試体にそれら処理を施す。

(1) 供試体の作製

材料はモルタル（水セメント比=55%、細骨材とセメントの容積比=400vol%）を用いる。供試体の形状は、塩分浸透面が100mm×100mm、浸透方向が80mmとなる直方体〔実験①〕および一辺が100mmとなる立方体〔実験②、③〕とする（ひび割れ周辺の実構造物サイズ供試体となる）。塩分浸透面以外は、エポキシ樹脂を塗布する。

(2) 供試体のひび割れ加工と加力付与

アクリル板と供試体（塩分浸透面）との間にひび割れ幅を保持する。実験①の場合、ひび割れ幅（0.1mm、0.2mm、0.4mm）保持後、塩分侵入ひび割れの方向の数を4面設ける。実験②の場合、ひび割れ幅（0.2mm）保持後、塩分侵入ひび割れの方向の数の違い（1～4面）を設ける。実験③の場合、ひび割れ幅保持の前に、予め供試体に加力を付与し損傷を与え、ひび割れ幅（0.2mm）保持後、塩分侵入ひび割れの方向を4面設ける。

(3) 塩分浸漬実験（JSCE G 572 に準ずる）〔実験①、②、③〕

一定塩分濃度水溶液中に浸漬する（規準に準じ、10%濃度のNaCl水溶液に91日浸漬する）。

(4) 塩分濃度分析〔実験①、②、③〕

電位差滴定法を用い、ひび割れ加工供試体の塩分浸透速度（ひび割れからの塩分浸透速度）を計測する。この際、ひび割れ加工の無い場合は、コンクリート表面から浸透した塩分浸透速度となる。

4. 研究成果

(1) 実構造物の損傷形態を想定したひび割れに塩分が侵入する際のひび割れ幅の違い [実験①] および侵入方向の数の違い [実験②] ①ひび割れ幅や塩分侵入ひび割れ面数と塩化物イオン濃度の定量的な関係

図1は、ひび割れ面積と塩化物イオン(Cl⁻)濃度の関係である。右軸に併記した α は、研究代表者の構想する提案式のひび割れ幅の影響を考慮する係数 α である。実験では、 α はひび割れが有るときの塩分濃度をひび割れがない時(開放された時)の塩分濃度で除して求め、 $\alpha=1$ のときはひび割れ幅の影響を受けないことを意味する。

ひび割れ幅や塩分侵入ひび割れ面数と塩化物イオン濃度の定量的な関係の検討には、傾向がより容易に理解できることから、ひび割れ幅とひび割れ長さや塩分侵入ひび割れ面数を乗じたひび割れ面積で整理した。図1より、全体的な傾向として、塩化物イオン濃度は、ひび割れ面積の増加に伴い最小値($\alpha=0.59$)から換算したひび割れ幅で0.8mmのひび割れ面積まで増加($\alpha=0.93$ (最大値))し、その後はひび割れ面積が増加しても横ばいになる頭打ち現象の傾向が認められた。その傾向を、ひび割れの透水量の計算式において、ひび割れ幅が透水量の素因になることからそのべき乗などで構成されていることを参考に、同じくひび割れ面積比と α の関係においても、本実験において塩分浸透面へのひび割れを介した塩分の侵入の容易さ、すなわちひび割れ面積比が α の素因になることに基づき、図1において透水量の計算式と同様にべき乗近似した。検討すると、 α は塩分侵入ひび割れ面が1面のときに換算したひび割れ幅が0.05mmの時 $\alpha=0.62$ 、0.1mmの時 $\alpha=0.66$ 、0.2mmの時 $\alpha=0.70$ 、0.4mmの時 $\alpha=0.75$ 、0.8mmの時 $\alpha=0.79$ になることが確認され、最終的にひび割れ幅が10mmで $\alpha=1.0$ に収束、すなわちこのひび

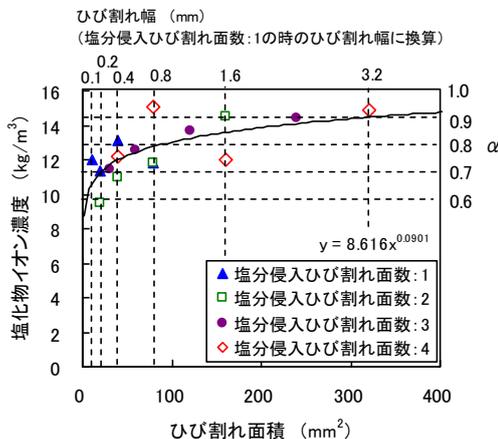


図1 ひび割れ面積とCl濃度の関係

割れ幅以上ではひび割れ幅(ひび割れ面積)の大きさの違いの影響を受けないことが推測された。

以上より、塩分浸透影響範囲を考慮したコンクリート面積の設定に関しては、ひび割れ面積に応じて α が変化するため、それに対応した値を設定し用いるのが適切と考えられる。しかし、一方で簡便な評価のために用いることを考えるならば、少なくとも α の最大値としては1.0を上限值とするのが妥当と考えられる。

②ひび割れの各深さ位置のひび割れ幅と塩化物イオン濃度の定量的な関係

図2は、ひび割れの各深さ位置における塩分侵入方向1方向のひび割れ幅に換算したひび割れ幅 w_{cr}^* と α の関係である。図のm部はひび割れ深部、n部はひび割れ開口部付近のCl⁻濃度で、nとmのデータはべき乗近似した。 w_{cr}^* の計算方法は、ひび割れ幅(0.2mm)とひび割れ長さの合計(塩分侵入方向1方向の場合100mm、4方向の場合400mm)の積を、塩分侵入方向1方向の場合のひび割れ長さ100mmで除した。

図2より、 α は開放面からの距離に関わらず、 w_{cr}^* の増加に伴い増加することがわかる。全体的な α の傾向をデータ数の多いm部から検討すると、 $w_{cr}^*=0.8$ mmまで増加($\alpha=0.85$)し、その後は w_{cr}^* が増加してもほぼ横ばいになる頭打ち現象の傾向があることがわかる。近似線から α を検討すると、 $w_{cr}^*=0.05$ mmではn部で $\alpha=0.67$ 、m部で $\alpha=0.61$ 、 $w_{cr}^*=0.2$ mmではn部で $\alpha=0.80$ 、m部で $\alpha=0.71$ 、 $w_{cr}^*=0.8$ mmではn部で $\alpha=0.95$ 、m部で $\alpha=0.81$ になり、 α が1.0となるのは、n部では $w_{cr}^*=1.2$ mm、m部では $w_{cr}^*=7$ mmと計算できる。

以上より、任意のひび割れ幅で複数方向からひび割れに塩分が侵入するコンクリートの塩分浸透特性の評価のために、 w_{cr}^* の値から α を求め、研究代表者が構想する提案式に適用することが可能になると思われる。

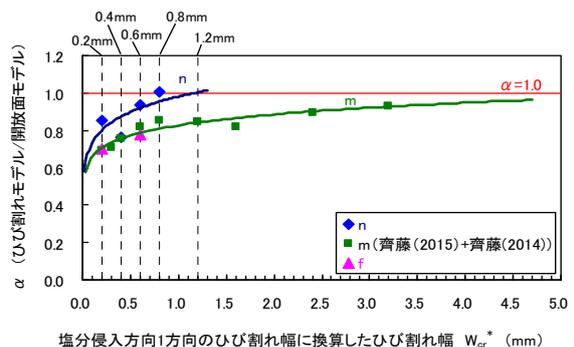


図2 塩分侵入方向1方向のひび割れ幅に換算したひび割れ幅 w_{cr}^* と α の関係

ただし、ひび割れからのコンクリートへの塩分浸透特性は未だ不明な点が多いのも事実であり、すべてのひび割れ条件に w_{cr}^* から α を求め提案式に適用するには、さらに検討の余地がある。とはいえ、その提案式ではひび割れ開口部からの距離に応じて α の値が変化する本研究結果を適用することによって、任意のかぶりにおける α の値が設定できるようになることから、当該方針はデータの蓄積によって精度の高い評価ができるようになる可能性を十分に有していると考えられる。

(2) 実構造物の損傷形態を想定した加力による損傷の影響 [実験③]

図3は、塩分浸透面から垂直方向（加力方向）に浸透した Cl^- 濃度分布である。

図3より、応力付与の影響を同じひび割れ幅の条件で検討すると、塩分浸透面に近い表面付近では、圧縮応力付与（D30-6CR（圧縮強度比30%、100万回の繰り返し载荷）、D55-6CR（圧縮強度比55%、100万回の繰り返し载荷））の Cl^- 濃度は、応力無付与（NL-CR）より低く、応力付与に伴う材料の損傷の影響が認められなかった。一方、コンクリート内部では、圧縮応力付与の Cl^- 濃度が、応力無付与より高くなる傾向、すなわち圧縮応力付与による塩分浸透特性へのマイナスの影響が表れた。塩分浸透面に近いエリアの塩分浸透の挙動にコンクリート内部のようなマイナスの影響が表れなかった理由として、クリープによる荷重面付近の組織の緻密化なども考えられるが、本実験では根拠となるデータが取得できず断定できない。これについては、当初予想しなかった実験結果として、実験方法の改善対応を行うこととする。

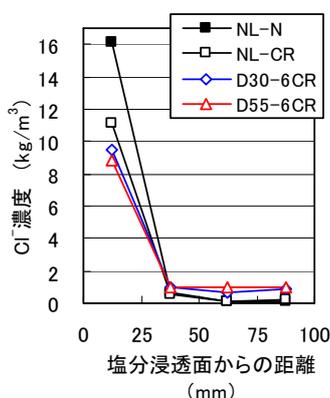


図3 塩分浸透面から垂直方向への Cl^- 濃度分布

(3) 実構造物の損傷形態を想定した加力による損傷の影響 [実験③] の当初予想しなかった実験結果における試験改善に伴う新たな知

見

[実験③] における予想しなかった実験結果の原因を既往研究より調査し、荷重面と供試体の端面摩擦と推測した。端面摩擦の軽減のためにテフロンシートを荷重面と供試体の境界に挟み、再実験を行った。なお、本再実験では、ひび割れの加工を施さずに応力付与の影響のみに着目した。また、新たな条件として、応力付与方向の塩分浸透試験に加えて応力付与直角方向の塩分浸透試験を追加した。さらに、本再実験は PRC はり下縁部のひび割れ周囲のコンクリートがプレストレスによって繰り返し圧縮応力付与を作用されたものとする具体的な実現象を想定した実験に移行している。

① 塩分浸透特性に及ぼす応力付与方向と浸透方向の関係の影響

図4は、応力付与方向から浸透した Cl^- 、図5は、応力付与直角方向から浸透した Cl^- である。応力付与したもの（100-30、10000-30、1000000-30（繰り返し応力付与回数（回）-付与応力の大きさ（圧縮強度比（%））を表す）（タイプ PRC）に加え、比較のために応力付与しないもの（タイプ N）の値を併記した。

図4より、応力付与方向からの塩分浸透においては、タイプ PRC はタイプ N より Cl^- が高くなる傾向を示すことが確認された。これは、圧縮応力付与によってコンクリート内部に損傷が生じたことによる影響と考えられる。実際の PRC はりにおけるひび割れに侵入した塩分のひび割れ直角方向のコンクリートへの浸透においては、この結果はプレストレスによる圧縮応力の繰り返し付与がマイナスに影響することを示唆するものといえる。なお、荷重面に近い領域（断面 A）の Cl^- がほかの断面と比べて低くなったが、これは本実験において荷重板と供試体の境界部における端面摩擦の影響をテフロンシートによって除く処置をとり、それにより概ねその影響を除くことができたが、完全には取り除けなかった一部がその端面付近のコンクリートの応力付与直角方向への変形を拘束したためと考えられる。

図5より、応力付与直角方向からの塩分浸透においては、タイプ PRC はタイプ N よりも Cl^- が低くなる傾向が認められた。これは、圧縮応力付与によってコンクリート内部に生じた損傷の影響よりも、応力付与による材料の緻密化の影響が大きく作用したと考えられる。実際の PRC はりにおける梁表面からコンクリートへの塩分浸透においては、この結果はプレストレスによる圧縮応力の繰り返し付与がプラスに影響することを示唆するものといえ

る。なお、図4で見られた載荷面に近い領域(断面A)の Cl^- がほかの断面と比べて低くなった傾向は図5では見られないが、これは端面摩擦による拘束の影響が応力付与方向のコンクリートの緻密化の要因となる圧縮変形に寄与しなかったためと考えらる。

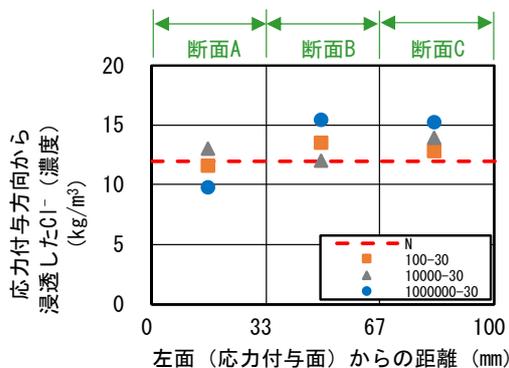


図4 応力付与方向から浸透した Cl^- (圧縮強度比=30%)

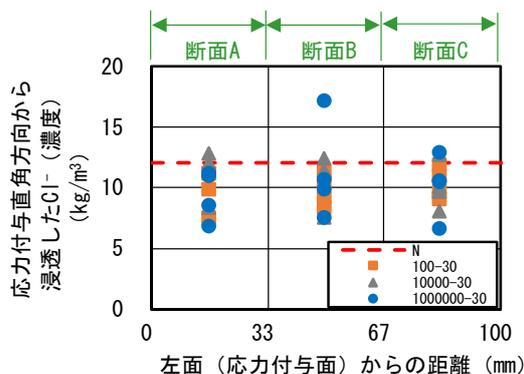


図5 応力付与直角方向から浸透した Cl^- (圧縮強度比=30%)

②塩化物イオン濃度と残留ひずみの関係

応力付与による部材の損傷の影響を検討するため、供試体に与えられた損傷の指評を残留ひずみとして、 Cl^- と残留ひずみの関係を整理した。図6は、応力付与方向から浸透した Cl^- と応力付与方向の残留ひずみの関係である。図7は、応力付与直角方向から浸透した Cl^- と応力付与方向の残留ひずみの関係である。図には、全データの近似線を示し、タイプNを併記した。図7には、それに追加して残留ひずみが大きく損傷の影響が著しいと考えられる応力付与の繰り返し回数をもっとも多い1000000回のデータ(1000000-30)についても近似線を示した。

図6より、応力付与による損傷が応力付与方向すなわちひび割れから侵入した塩分のひび割れ直角方向のコンクリートへの浸透を早めること、応力付与方向から浸透する Cl^- と残留ひずみの関係には残留ひずみが0のときに応力付与の影響が無く、残留ひずみの増加

に伴い Cl^- が増加するという正の相関があることがわかった。

図7より、応力付与直角方向からの Cl^- の浸透には、繰り返し圧縮応力付与による材料の緻密化と損傷の影響が複合して影響していると考えられ、今回の実験結果を整理したその関係は、材料の緻密化の影響がタイプNよりもマイナス分の切片を示し、損傷の影響が残留ひずみの増加に伴う Cl^- の増大となる傾きを示す一次式として表されることがわかった。

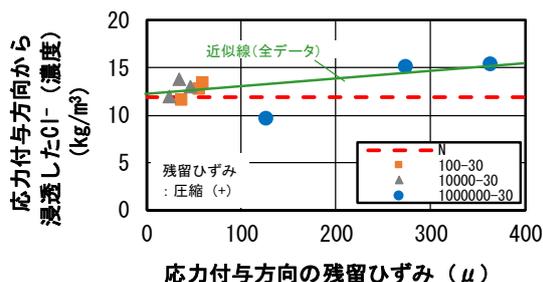


図6 応力付与方向から浸透した Cl^- と残留ひずみの関係 (圧縮強度比=30%)

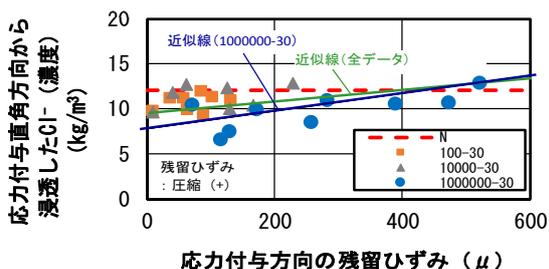


図7 応力付与直角方向から浸透した Cl^- と残留ひずみの関係 (圧縮強度比=30%)

(4)得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究は、ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性評価法の構築を目指し、その塩分浸透特性を明確にすべく、ひび割れとひび割れ周辺の部材コンクリートの領域について実構造物サイズの供試体を用いた塩分浸せき試験を実施し、ひび割れに対する様々な因子の影響について実験的検討を行ったものである。

特にひび割れ幅だけでなくそれに追加してひび割れからの塩分侵入方向の数に着目した実験データとその得られた知見は、国内外のコンクリート構造物において常に問題視される損傷劣化の主要因といえる塩害とひび割れの複合劣化のメカニズムを解明するための貴重なデータであり、この成果は国内外に対し発信すべき結果であると考えられる。

また、PRC部材を想定した塩分浸透特性に及ぼす応力付与の影響に関するデータとその

得られた知見は、既往研究がほとんどない当該分野において、各研究者への参考研究となることを踏まえ、国内外に最も広く発信すべき結果であると考え。それと同時に今後のデータの更なる蓄積は、土木学会コンクリート標準示方書における、ひび割れを有するコンクリートの鋼材腐食の照査において、今後の算定式の精度と実用性向上のための将来的な改訂への良好な影響を与えるものと考え。

さらに、この成果が今後増大する診断を要する構造物に対して JR や NEXCO のように最新の診断体制のとれない財源の逼迫した小さな自治体に用いられることによって、住民に安全に使用される社会基盤の維持に貢献できる大きな可能性を有していると考えれば、この研究成果の波及効果や意義は非常に大きい。

(5) 今後の展望

本研究によって、ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性の解明が着実に進展した。今後は、これまでの条件と異なる条件において引き続き実験を遂行し、更なるデータの蓄積とそのデータの検討からこれまでの知見の妥当性の定着と新たな知見の習得を目指す。特に、PRC はりを想定した応力付与の塩分浸透特性への影響については、実験で得られた結果が極めて重要な知見に繋がることから、より注力して取り組むテーマとなる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 齊藤 準平、下邊 悟、塩分浸せき試験を用いた PRC はりのひび割れ領域部の塩分浸透に関する検討、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、査読有、25 巻、2016、pp. 187-192
- ② 齊藤 準平、下邊 悟、ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透に及ぼすひび割れと圧縮応力の複合的な影響に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、38 巻、2016、pp. 933-938
- ③ 齊藤 準平、下邊 悟、ひび割れを有するコンクリートのひび割れからコンクリートへの塩分浸透に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、37 巻、2015、pp. 751-756
- ④ 齊藤 準平、下邊 悟、ひび割れを有するコンクリートのひび割れ垂直方向への塩分

浸透に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、36 巻、2014、pp. 940-945

- ⑤ 齊藤 準平、下邊 悟、ひび割れを有するコンクリートの拡散係数評価式への塩分浸透影響範囲の適用効果、日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル、査読有、No. 132、2014、pp. 10-20

[学会発表] (計 6 件)

- ① 古都 貴大 (齊藤 準平)、電気泳動法を用いた PRC はりのひび割れと圧縮応力付与による塩分浸透への複合的影響、第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会、2017/03/07、埼玉大学(埼玉県さいたま市)
- ② 名塚 雅義 (齊藤 準平)、ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性に関する基礎的研究-塩分浸透特性に及ぼす圧縮応力付与の影響-、第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会、2016/03/14、東京都市大学世田谷キャンパス (東京都世田谷区)
- ③ 齊藤 準平、直交ひび割れを有するモルタルのひび割れからの塩分浸透、土木学会第 70 回年次学術講演会、2015/09/16、岡山大学津島キャンパス (岡山県岡山市)
- ④ 宮澤 啓佑 (齊藤 準平)、ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性に関する基礎的研究-ひび割れ近傍の濃度分布について-、第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会、2015/03/05、東海大学湘南キャンパス (神奈川県平塚市)
- ⑤ 齊藤 準平、ひび割れを有するコンクリートのひび割れ面からの塩分浸透分布、第 58 回日本大学理工学部学術講演会 (土木系部会)、2014/12/06、日本大学理工学部駿河台キャンパス (東京都千代田区)
- ⑥ 小野 亮 (齊藤 準平)、ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透範囲と拡散係数評価式へのその適用、第 69 回土木学会年次学術講演会、2014/09/10、大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 準平 (SAITO, Junpei)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：20349955