

令和 3 年 5 月 15 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06539

研究課題名(和文) ひび割れとプレストレスの複合的影響を考慮したPRC部材の塩分浸透特性評価法の構築

研究課題名(英文) Construction of salt permeation characterization method for PRC members considering the combined effects of cracks and prestress

研究代表者

齊藤 準平 (SAITO, Junpei)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：20349955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：PRC構造の塩分浸透特性評価法の構築のため、その特性を明確にすべく、ひび割れとひび割れ周辺のモデル供試体への電気泳動試験を通じて、ひび割れや圧縮応力付与が塩分浸透抵抗性に及ぼす影響に関して、次の結果を得た。

(1)ひび割れ幅の増加に伴い塩分浸透抵抗性が低下することがわかり、その定量的関係を取得した。(2)圧縮応力の大きさによって塩分浸透抵抗性に優位と不利に働く境界がありそれは弾性限度であること、弾性限度内においては圧縮応力の増加に伴い塩分浸透抵抗性が向上することがわかり、その定量的関係を取得した。(3)ひび割れによる負の影響は弾性限度の圧縮応力付与による優位な影響よりも大きいことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

長大橋に不可欠な構造で全橋梁の3割に適用されているPRC部材において、ひび割れと圧縮応力付与の影響を受けるコンクリートの塩分浸透特性の評価式の構築は、構造機能の持続のための鋼材腐食の原因である部材内の塩分評価のために極めて重要であり、示方書の算出式の将来的な改定への良好な影響が予想される。さらに、最新の診断体制(財源、技術、専門技術者等)のない予算の切迫した地方自治体で、構築を目指す本評価法が実構造物に低予算で用いることができれば、安全な社会基盤の維持・提供と長期供用に貢献することができると考えられる。このように、本研究の社会的な波及効果は極めて大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Aiming at the construction of a salt permeation characterization method for the PRC structure, a migration test was conducted on the cracks and model specimens around the cracks. As a result, the following results were obtained on the effects of cracking and compressive stress on salt permeation resistance.

(1) It was clarified that the salt permeation resistance decreased as the crack width increased, and the quantitative relationship was obtained. (2) It is clear that the degree of compressive stress has a boundary (elastic limit) that works favorably and disadvantageously in salt permeation resistance, and that salt permeation resistance improves as the compressive stress increases within the elastic limit. And the quantitative relationship was obtained. (3) It was clarified that the negative effect of cracking is larger than the dominant effect of applying compressive stress at the elastic limit.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：PRC構造 塩害 拡散係数 ひび割れ 圧縮応力付与 塩化物イオン 電気泳動試験

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、多くのコンクリート構造物は塩害作用による著しい鋼材腐食によって構造的な機能を失う危機を迎えている。今後は、維持管理の必要な膨大な数のコンクリート構造物の増加、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) プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) は、長大橋に不可欠な構造で、全橋梁の3割に適用されている。構造機能の持続には鋼材腐食の原因である部材内の塩分評価が極めて重要となるが、PRC 構造はプレストレスによる、腐食を早めるひび割れの影響と圧縮応力の繰返し付与の影響が複雑に影響し合うため、それら影響を考慮した評価式でなければ正しい診断はできない。

(3) 土木学会コンクリート標準示方書は、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、算定式の対象構造は鉄筋コンクリート構造に限定されており、プレレストコンクリート (PC, PRC 構造) への実用性が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、PRC 構造にひび割れや圧縮応力の付与が作用した時の未解明な塩分浸透特性を、超短期間に定量評価 (拡散係数) できる申請者独自の方法を適用した電気泳動法を用いて、定量的に明らかにし、適切に評価できる式の構築を目指す。

次の(1)～(3)の研究から、各因子 (ひび割れ、応力付与) の各々および複合的に作用した時の拡散係数と各因子との相関関係を明らかにし、その結果を基に評価式の構築への展開を研究する。(1) ひび割れが塩分浸透特性に及ぼす影響を、拡散係数から明らかにする [研究 1]。(2) コンクリートへの圧縮応力付与が塩分浸透特性に及ぼす影響を、拡散係数から明らかにする [研究 2]。(3) 各因子の複合作用が塩分浸透特性へ及ぼす影響を、圧縮応力付与の後、ひび割れを設置した各供試体の拡散係数から、明らかにする [研究 3]。

3. 研究の方法

本研究は、PRC はりにおける、ひび割れが発生し、且つプレストレス導入の影響が大きい梁下縁部をモデル化し、電気泳動試験 (JSCE-G571) を実施する。研究 1 はひび割れの影響を、研究 2 は圧縮応力付与の影響を、研究 3 はひび割れと圧縮応力付与の複合作用の影響を検討する。

(1) PRC はりの塩分浸透抵抗性に及ぼすひび割れの影響 [研究 1]

ひび割れとその周辺のコンクリートを対象として、供試体 (タイプ RC) とアクリルブロックとの間にひび割れを想定した一定間隔の空隙 (人工ひび割れ) を設けてモデル化する (ひび割れのみの影響の場合はアクリルブロックのみ (タイプ A)) (図 1, 2, 表 1 参照)。モデルの条件はひび割れ幅 w_{cr} の違い (0.1mm, 0.2mm) とし、条件比較のためにひび割れないコンクリートのみ (タイプ N) を同時に設定した。研究 2, 3 の先行的な研究を踏まえ、圧縮応力付与の影響 (圧縮強度比 55%, 1 万回の繰返し応力付与) を考慮した供試体 (タイプ PRC) も条件に加えた。供試体の配合は、水セメント比 (W/C) を 55% とし、細骨材のセメントに対する容積比 (S/C) を 400vol% とする、モルタルを材料とした。研究 1 の材料の圧縮強度は 40.5N/mm² であった。

(2) PRC はりの塩分浸透抵抗性に及ぼす圧縮応力付与の影響 [研究 2]

プレストレスの影響に関する試験条件 (表 2) は、プレストレスが導入され静的に導入状態が継続される状態 (静的導入継続状態) と、活荷重による引張応力によってプレストレスが損失す

ることと荷重通過後にプレストレスが再導入されることが繰返し生じ、さらに活荷重による引張応力によってプレストレスが損失している状態（繰返し作用後損失状態）を設定した。プレストレスは、圧縮強度に対するプレストレスの割合を圧縮強度比（ f'_c 比）と定義し、プレストレス無しの f'_c 比=0%から一般に扱われる f'_c 比=30%までと、最大で f'_c 比=50%まで追加設定した。繰返し作用後損失状態の繰返し応力付与は、作用回数を 100 万回とし、上限応力は f'_c 比、下限応力は上限応力の 10%とし、作用周波数は 0.9Hz とした。配合は、研究 1 と同一とした。

静的導入継続状態（図 3）は、プレストレス導入した状態でプレストレス導入方向の垂直方向に塩分浸透をさせて電気泳動試験を行った。プレストレスは、2本の PC 鋼棒の緊張によって鋼製フレームを介して、ナットを締めて導入する。プレストレスの大きさは、各 PC 鋼棒に設置したワッシャー型ロードセルにて管理した。繰返し作用後損失状態は、疲労試験機による繰返し導入後にプレストレスが完全に除かれた状態で、中央部から 1 辺 40mm の立方体を 2 個切り出し、プレストレス導入方向とその垂直方向の 2 方向を塩分浸透方向とした電気泳動試験を行った。

(3) RC 通りの塩分浸透抵抗性及びすび割れと圧縮応力付与の複合的影響 [研究 3]

ひび割れと圧縮応力付与の複合作用の影響に関する試験条件には、プレストレス（ f'_c 比=30%）を繰返し導入（100 万回）されたのちプレストレスが導入されていない状態（A）とその状態（A）にひび割れ幅 0.1mm の人工ひび割れを施した状態（B）の差からひび割れの存在の影響を求め、プレストレスを再導入した状態（C）と f'_c 比=0%の状態の差から応力付与の影響を求めた。

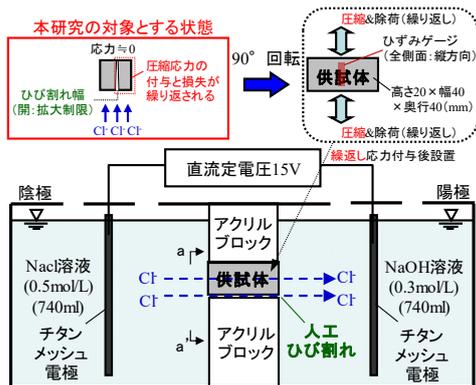
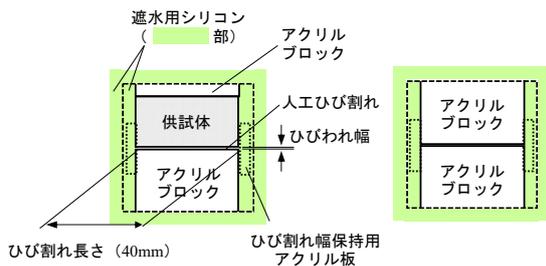


図 1 実験概要（電気泳動実験装置の概念）



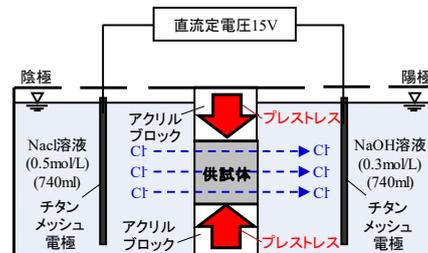
(a) タイプ PRC, RC (b) タイプ A
図 2 電気泳動装置のモデル化部 (a-a' view)

表 1 各モデルの実験条件

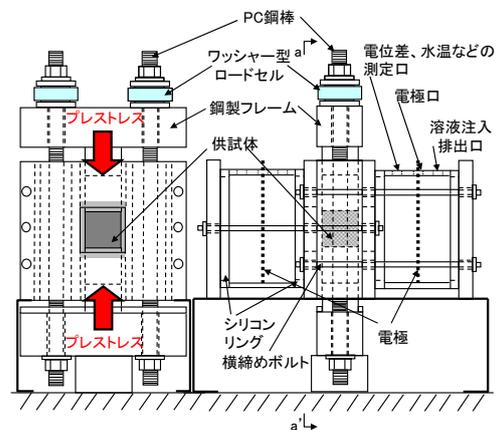
タイプ	モデル名	構成	供試体への圧縮応力付与	ひび割れ幅 w_{cr} (mm)
PRC	PRC-N	上部: 供試体 (モルタル)	有り	無し
	PRC-0.1			0.1
	PRC-0.2			0.2
RC	RC-N	下部: アクリル ブロック	無し	無し
	RC-0.1			0.1
	RC-0.2			0.2
A	A-0.1	上部・下部: アクリル ブロック	-	0.1
	A-0.2			0.2

表 2 試験条件

プレストレスに関する試験条件			圧縮強度 (f'_c) (N/mm ²)
プレストレスの作用状態	プレストレス (圧縮強度比 (f'_c 比)) (%)	繰返し作用回数	
静的導入継続状態	0, 10, 20, 30, 40, 50	-	44.14
繰返し作用後損失状態	0, 10, 20, 30	100万回	46.86



(a) 電気泳動試験模式図



断面図 (a-a' 断面) 側面図

(b) 電気泳動試験装置

図 3 静的導入継続状態概要図

なお、ひび割れ幅の加工は研究1と、圧縮応力の繰返し付与は研究2と同様に行い、供試体は研究1, 2と同じ配合とした。

4. 研究成果

(1) PRC はりの塩分浸透抵抗性に及ぼすひび割れの影響 [研究1]

各条件の実効拡散係数 D_e とひび割れ幅の関係 (図4) より、同一構造形式で比較すると、ひび割れ幅 $w_{cr}=0.2\text{mm}$, 0.1mm , 無しの順に塩分浸透が速いこと、同一ひび割れ幅で比較すると、いずれの w_{cr} でもタイプ PRC が RC よりも塩分浸透が速くなっていること、等の知見が得られた。タイプ PRC と RC のひび割れ有りにおいて、ひび割れ無しに比べて塩分浸透が速い理由は、ひび割れの存在によること、タイプ PRC が RC より塩分浸透が速いのは、圧縮応力付与に伴う材料の損傷の影響によること、が考えられる。

ひび割れ幅の拡大による D_e の割合を整理すると、圧縮応力付与の影響よりもひび割れ幅の拡大の影響の方が大きいという知見が得られた (PRC-N に対して PRC-0.1 が 1.50 倍, PRC-0.2 が 2.13 倍大きく, RC-N に対して RC-0.1 が 1.33 倍, RC-0.2 が 1.85 倍大きい。同一ひび割れ幅同士ではタイプ PRC が RC より 1.13~1.31 倍大きい)。

図5に示す、タイプ PRC の実効拡散係数による複合条件の影響割合より、単独条件の和と複合条件は概ね近似することが確認でき、複合条件の各因子の影響割合は単独条件の各因子の影響割合に相当し、材料の影響 (D_{Nm}) とひび割れの影響 (D_{crm}) に圧縮応力付与に伴う材料の損傷の影響 (D_{comm}) の和として構成されるという知見が得られた。

(2) PRC はりの塩分浸透抵抗性に及ぼす圧縮応力付与の影響 [研究2]

静的導入継続状態において、実効拡散係数 D_e とプレストレスの関係 (図6(a)) から、プレストレスが小さい場合はプレストレスの増加に伴う D_e の低下の傾向、すなわちプレストレスの導入が塩分浸透抵抗性を向上させる傾向があることがわかった。これは、プ

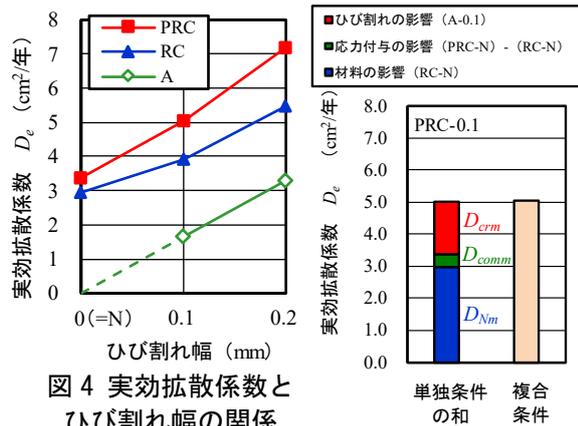


図4 実効拡散係数とひび割れ幅の関係

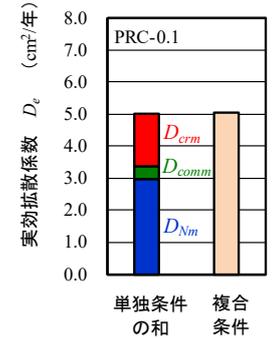
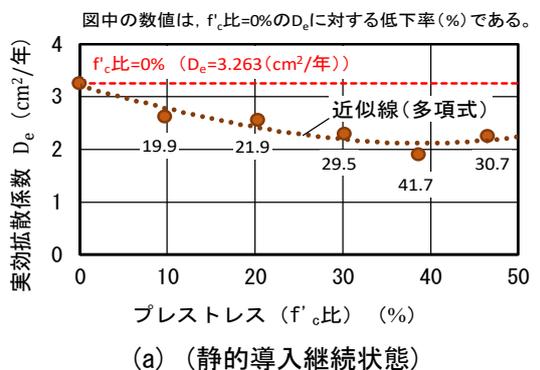
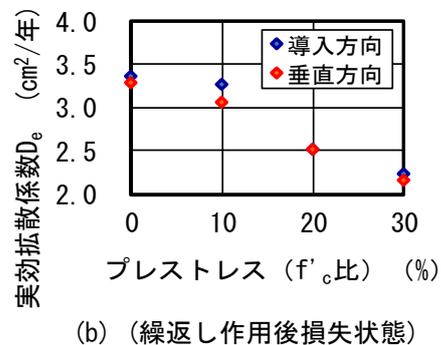


図5 実効拡散係数における複合条件の影響



(a) (静的導入継続状態)



(b) (繰返し作用後損失状態)

図6 実効拡散係数とプレストレスの関係

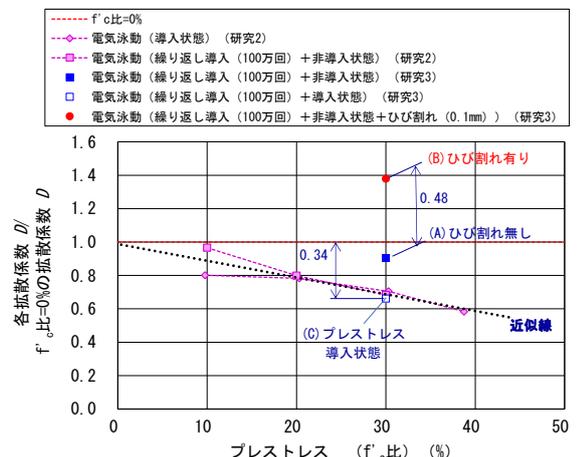


図7 各拡散係数/ f'_{c} 比=0%の拡散係数

プレストレスによる内部空隙率の減少に伴う浸透抵抗性の向上に伴うものと考えられる。また、プレストレスが f'_{cr} 比=40%の場合をピークにそれ以上では塩分浸透抵抗性が減少することが確認され、プレストレスが f'_{cr} 比=30%と 50%の間に塩分浸透抵抗性へのプレストレスによる優位な影響の変換点があることが推測された。この変換点はプレストレスが骨材とモルタルの界面部のボンドクラックやマトリックスクラックなど内部構造に微細ひび割れを発生させ、物質の移動経路が短絡化されたものと考えられ、変換点より小さい圧縮強度比が弾性限度内に相当することが推測される。

繰返し作用後損失状態において、実効拡散係数と繰返し導入されたプレストレスの関係（図 6(b)）より、拡散係数は塩分浸透方向の違いに関わらず、 f'_{cr} 比が大きいほど低下することが確認された。プレストレスを導入することにより内部空隙率の減少に伴う浸透抵抗性の向上に起因する供試体内部の緻密化の影響で塩分浸透抵抗性に優位に働いたと推測できる。

(3) RC はりの塩分浸透抵抗性に及ぼすひび割れと圧縮応力付与の複合的影響 [研究 3]

研究 2, 3 の各条件の拡散係数を f'_{cr} 比=0%の拡散係数で除して正規化した結果（図 7）から、プレストレスによる圧縮応力付与の影響とひび割れの存在の影響の程度について検討すると、ひび割れが発生する場合はひび割れが無い場合に比べ 48%増加し、圧縮応力付与した場合は無い場合より 34%低下し、塩分浸透抵抗性に対する影響度合いは繰返し圧縮応力付与による効果よりもひび割れが開くことによる負の影響の方が大きいことがわかった。これは、言い換えればプレストレスは、ひび割れを閉じる方向に作用することは大きな効果があること、それに加え圧縮応力付与の効果も得られるという塩分浸透抵抗性に対する構造的優位性を保持していること、を示唆する結果であったといえる。

(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

ひび割れ幅の増加に伴い塩分浸透抵抗性が低下することに加えて、圧縮応力の大きさによって塩分浸透抵抗性に優位と不利に働く境界がありそれは弾性限度であること、弾性限度内においては圧縮応力の増加に伴い塩分浸透抵抗性が向上すること、などの得られた知見やその裏付けデータは、既往研究がほとんどない当該分野において、国内外のプレストレス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ならびに応力付与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。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、今後の算定式のプレストレスコンクリートへの展開と実用性の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られる。

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、PRC 構造の塩分浸透特性の解明が着実に進展した。今後は、プレストレスコンクリート構造の特徴である、圧縮応力の繰返し付与の影響に関し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、圧縮応力の繰返し付与回数の増加によって塩分浸透抵抗性がどのように変化するのか、限界があるのかといった未解明な部分の解明に取り組む予定である。実験で得られた結果が実構造物の長期使用時の維持管理の適切なタイミングを導くための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8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 齊藤 準平, 立石 一洋, 佐藤 元紀	4. 巻 42
2. 論文標題 プレストレスの繰り返し作用を受けるコンクリートの見掛けの拡散係数	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 569-574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 齊藤 準平, 立石 一洋, 川崎 悠平, 中山 昂大	4. 巻 29
2. 論文標題 プレストレスを受けるコンクリートの拡散係数による塩分浸透抵抗性の評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 393-398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 齊藤 準平, 浅見 公一, 手島 敏史, 加藤 凌也	4. 巻 41
2. 論文標題 コンクリートの塩分浸透抵抗性に及ぼすプレストレス導入の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 713~718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 齊藤 準平, 浅見 公一, 手島 敏史, 渡部 拓大	4. 巻 28
2. 論文標題 静的および動的にプレストレスが作用したコンクリートの塩分浸透抵抗性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 163~168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 齊藤 準平	4. 巻 40
2. 論文標題 P R C はり下縁におけるプレストレスと荷重作用による応力付与の繰り返しがコンクリートの塩分浸透特性に及ぼす影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 705 ~ 710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 齊藤 準平	4. 巻 27
2. 論文標題 繰り返し圧縮応力付与に伴うコンクリートのひずみ分布と塩分濃度分布	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 253 ~ 258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 齊藤 準平, 下邊 悟	4. 巻 39
2. 論文標題 電気泳動法を用いたPRCはりのひび割れ領域部における塩分浸透特性に関する実験的検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 679-684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 齊藤 準平, 下邊 悟	4. 巻 26
2. 論文標題 繰り返し荷重下におけるコンクリートの塩分浸透特性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 93-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 浅見 公一, 齊藤 準平
2. 発表標題 PRC はりにおける塩化物イオンの実効拡散係数に関するプレストレスの影響
3. 学会等名 土木学会 第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤 準平
2. 発表標題 疲労損傷したコンクリートの弾性波速度と塩害劣化進行度の関係に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会 第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中山 昂大, 川崎 悠平, 齊藤 準平
2. 発表標題 PRCはりの塩分浸透抵抗性に与えるプレストレスの作用に関する電気泳動試験による実験的検討
3. 学会等名 土木学会関東支部 第47回技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤 準平
2. 発表標題 圧縮応力付与時のコンクリートのひずみ分布に及ぼす減摩材厚の影響
3. 学会等名 土木学会 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡部 拓大, 森本 慶, 江森 紀仁, 齊藤 準平
2. 発表標題 繰り返し荷重下のコンクリートにおける塩分浸透特性に関する実験的研究 - 塩水浸せき試験によるはり下縁部からの塩分浸透に着目して -
3. 学会等名 第46回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅見 公一, 手島 敏史, 加藤 凌也, 齊藤 準平
2. 発表標題 プレストレス導入状態下のコンクリートにおける実効拡散係数に関する実験的研究 - 電気泳動試験によるはり下縁部からの塩分浸透に着目して -
3. 学会等名 第46回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤 準平, 下邊 悟
2. 発表標題 P R C はりのひび割れ領域部のコンクリートにおける塩分浸透方向とその特性に関する検討
3. 学会等名 土木学会全国大会 第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竜 岳弘, 相澤 悠, 杉山 崇斗, 齊藤 準平
2. 発表標題 繰り返し荷重下におけるPRC道路橋の塩分浸透特性に関する研究 - 塩分浸せき試験によるはり下縁部からの塩分浸透に着目して -
3. 学会等名 第45回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 相澤 悠, 竜 岳弘, 杉山 崇斗, 齊藤 準平
2. 発表標題 繰り返し荷重下におけるPRC道路橋の塩分浸透特性に関する研究 -電気泳動試験によるはり下縁部からの塩分浸透に着目して-
3. 学会等名 第45回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------