

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01406

研究課題名（和文）既設コンクリート構造物の性能予測解析プラットフォームの開発

研究課題名（英文）Development of a platform for numerical analysis of the performance of existing concrete structures

研究代表者

斉藤 成彦（Saito, Shigehiko）

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：00324179

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：劣化した構造物に対して適切な時期に効果的な対策を施すためには、構造物が保有する性能を正確に把握し、供用中の性能の経時変化を合理的に予測できる必要がある。数値シミュレーション技術を用いて既設構造物の性能予測を実施するには、微視的な構成材料の時間的な変化を巨視的な構造特性に結び付ける必要があるが、両者を統合するような研究事例は極めて少ない。本研究では、時間軸上で複雑な挙動を示すコンクリート構造物を対象に、構成材料の微視的な物理化学現象をモデル化した材料解析を構造物の巨視的な応答解析に統合させることで、既設構造物のライフタイムシミュレーションに活用できる先進的な構造解析プラットフォームの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造物の健全性評価は、外観目視の結果に基づき簡易で対処療法的に行っているのが現状である。このような診断は1次スクリーニングとしての意義はあるが、対策を施す構造物の優先度を的確に決定するためには、構造性能を正確に把握する必要がある。構造性能の把握には、構造物を構成する材料の時間依存特性や劣化過程の把握（材料挙動の評価）と、それを反映させた構造物の耐荷挙動の把握（構造応答の評価）が必要となるが、基礎的研究が中心となっている。本研究は、これらの材料挙動の評価と構造応答の評価に関する知見を有機的かつシームレスに統合するための構造解析プラットフォームの開発を目的としており、学術的・社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：There is a need to develop a reliable method for assessing the performance sustained by deteriorated concrete structures. A numerical simulation is one of the useful and comprehensively understanding approaches for such the performance assessment of existing structures. In this research, based on the micro- and meso-scale analyses of concrete, then the platform for structural analysis was developed to evaluate the performance of deteriorated existing concrete structures. This research presented numerical assessment of existing concrete structures to investigate the effects of steel corrosion in detail. Strength of prestressed concrete beams with corroded tendons was investigated through laboratory experiments. Post-tensioned prestressed concrete beams with two tendons were damaged by an accelerated galvanic corrosion test, where the tendons corroded uniformly or locally. Load carrying capacity and fracture behavior of corroded PC beams were evaluated based on bending tests.

研究分野：構造工学・維持管理工学、コンクリート構造学

キーワード：コンクリート構造物 材料劣化 鋼材腐食 数値解析 RBSM プレストレストコンクリート

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の維持管理に関する研究は、点検技術の開発（目視点検の補助的・代替的役割）、材料の劣化機構の解明（劣化原因の推定）、劣化部材の耐荷力評価（現有性能と破壊過程の把握）、対策技術の開発（補修・補強の高度化）に大別される。このうち、点検技術と対策技術の開発は維持管理の入口と出口にあたり、実務レベルでの早急な対応が必要なことから、企業を含めた研究開発が活発に行われている。一方、このインプットとアウトプットを結ぶ役割にあたるのが「構造物の性能評価（健全性の把握）」になるが、精度の高い評価技術の開発は未だ研究途上にあり、構造性能の定量的な把握は回避され、外観目視の結果に基づいた簡易で対処療法的な診断を行っているのが現状である。このような診断は1次的なスクリーニングとしての機能は有するが、今後膨大な数の構造物が老朽化する中で、対策を施す構造物の優先度を的確に決定するためには、「構造物が現在保有する性能は一体いくらなのか？」という問いに正確に答える必要がある。既設コンクリート構造物の性能評価を正確に行うためには、構造物を構成する材料の時間依存特性や劣化過程の把握（材料挙動の評価）と、それを反映させた構造物の耐荷挙動の把握（構造応答の評価）が必要となるが、扱う物理化学現象の範囲の広さや複雑さから、研究対象が細分化され、基礎的研究が中心となっている。したがって、これらの材料挙動の評価と構造応答の評価に関する知見を有機的かつシームレスに統合するための構造解析プラットフォームの開発が必要である。

### 2. 研究の目的

社会基盤施設の老朽化が深刻になる中で、劣化の生じた構造物に対して適切な時期に効果的な対策を施すためには、既設構造物が保有する性能を正確に把握し、供用中の性能の経時変化を合理的に予測できる手法の開発が切望されている。ICTが急速に発展する中、数値シミュレーション技術は革新のコアであり、供用下にある構造物の性能の経時的な変化を定量的に評価できる技術として期待されている。一方、構造物の長期的な性能を把握するには、微視的な構成材料の時間的な変化を巨視的な構造特性に結び付ける必要があるが、両者を統合するような研究事例は極めて少ない。そこで本研究では、時間軸上で複雑な挙動を示すコンクリート構造物を対象に、構成材料の微視的な物理化学現象をモデル化した材料解析を構造物の巨視的な応答解析に統合させることで、既設構造物のライフタイムシミュレーションに活用できる先進的な構造解析プラットフォームの開発を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、(a)ミクロスケールでの（物理化学的）材料解析、(b)メソスケールでの材料（損傷）解析、(c)マクロスケールでの構造（耐荷力）解析の3つのスケールでのモデル化とその統合により、コンクリート構造物の長期的な性能を予測するための構造解析プラットフォームを開発する。それぞれのスケールでの研究開発目標は、以下のとおりである。

#### (a) ミクロスケールでの（物理化学的）材料解析

本研究では、セメント化学を専門とする研究分担者とともに、ミクロな空隙構造におけるイオン移動に及ぼす電気的作用と、C-S-Hの組成変化に伴う空隙構造の変質に着目し、空隙構造の詳細なモデル化について検討を開始する。これにより、空隙構造の変化を考慮した移流拡散現象としての物質移動解析が可能となり、コンクリート中の劣化因子の空間分布の予測を行う。この予測値は、メソスケール材料解析におけるコンクリートの時間依存変形の算出に用い、損傷（ひび割れ）分布を同定する。また、鉄筋のマクロセル・ミクロセル腐食解析にも用いることで、鉄筋の腐食分布を推定する。このミクロスケール材料解析は、構造解析プラットフォームが時間軸を連続的に扱うための基本ユニットとなる。なお、本研究の範囲では、まず構造性能への影響が最も大きい塩化物イオンの移動を主対象とし、研究分担者には、空隙構造の経時変化が塩化物イオンの移動に及ぼす影響について検討を行ってもらう。

#### (b) メソスケールでの材料（損傷）解析

鉄筋の損傷については、劣化因子の到達をトリガーとした腐食電流密度に基づく電気化学的モデルの構築を進める。ミクロスケール材料解析より算出した鉄筋周辺での水分、塩化物イオン分布等により、鉄筋表面でのミクロセル・マクロセルモデルにより腐食電流密度を算出する。これにより、劣化因子の侵入過程を考慮した鉄筋の詳細な腐食分布が求まり、マクロスケール構造解析のインプットとして活用される。

#### (c) マクロスケールでの構造（耐荷力）解析

本研究では、ミクロ・メソスケールでの材料解析を統合させることにより、材料特性および材料損傷の経時変化を考慮した構造物のライフタイムシミュレーションのための構造解析プラットフォームの構築に取り組む。メソスケール材料解析より、ASRや凍害等により損傷の生じたコンクリートの力学特性に関する情報を得て、マクロスケールでの平均的な力学特性をモデル化する。同様に、塩害等により腐食した鉄筋の腐食分布に関する情報を得て、マクロスケール解析における鉄筋の断面積分布を設定する。これらは、ミクロスケール材料解析における構造物周辺

の環境条件の影響やコンクリートの組成の影響等を取り込んだものであるため、時間軸上で変化する構造性能の予測が可能となる。

#### 4. 研究成果

##### (1) モルタル中の塩化物イオン浸透に関する基礎的実験

モルタル供試体中の飽和度によって生じる移流拡散現象が塩化物イオン拡散係数および表面塩化物イオン量に及ぼす影響について明らかにすることを目的に、拡散現象が支配的な場合と移流拡散現象が生じる場合について、塩化物イオンの浸透特性を飽和度の異なるモルタル供試体を用いた実験を行い、塩化物イオン拡散係数および表面塩化物イオン量を求めた。

飽和供試体について、供試体内部の全塩化物イオン量分布を浸漬期間ごとに図-1 に示す。実測値を●および△で示すとともに、実測値に基づき求められた回帰曲線を合わせて示した。

水セメント比 40%および 60%のどちらの条件においても回帰曲線は実測値の濃度分布と一致しており、飽和状態の供試体は供試体内の空隙を満たしている水分中を塩化物イオンが拡散し、Fick の法則に従う拡散現象により塩化物イオンが浸透したことが確認できた。

水セメント比ごとの比較では、両水セメント比ともに浸漬期間が長くなると表面付近の全塩化物イオン量が大きくなった。水セメント比 40%の方が表面付近の全塩化物イオン量の増加量が大きくなる結果になった。浸漬期間ごとの比較では、水セメント比 60%の方がより深い位置まで塩化物イオンが浸透しており、水セメント比が大きい場合は空隙量が多くなるため、浸透しやすくなることが確認できた。

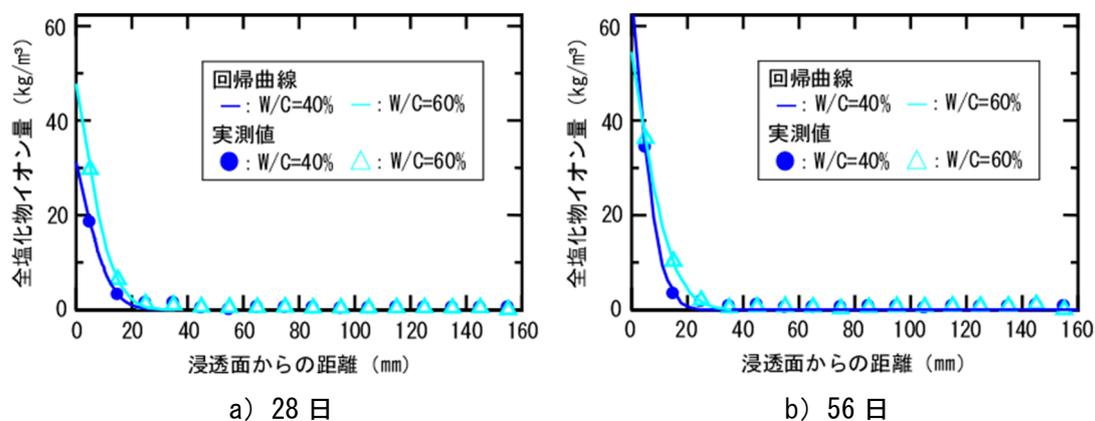


図-1 全塩化物イオン量分布（飽和供試体）

絶乾供試体について、供試体内部の塩化物イオン量分布を浸漬期間ごとに図-2 に示す。実測値を●および△で示すとともに、実測値に基づき求められた回帰曲線を合わせて示した。

水セメント比 40%および 60%のどちらの条件においても絶乾状態から浸透試験を開始した供試体の結果は、飽和状態から浸透試験を開始した供試体の結果とは異なる傾向を示している。飽和状態の供試体よりも深い位置まで塩化物イオンが浸透しており、浸透した全塩化物イオン量も多い。絶乾状態から浸透試験を開始した供試体は、実測値と Fick の拡散方程式の解による回帰曲線との間にずれが生じている。また、飽和度分布において飽和度が急激に低下する気液界面の位置が、全塩化物イオン量分布において全塩化物イオン量が急激に低下している位置と同程度の位置で発生していることが確認できた。飽和状態の供試体では供試体内部の空隙に満たされた水分中を塩化物イオンが拡散現象によって浸透したのに対し、絶乾状態の供試体では供試

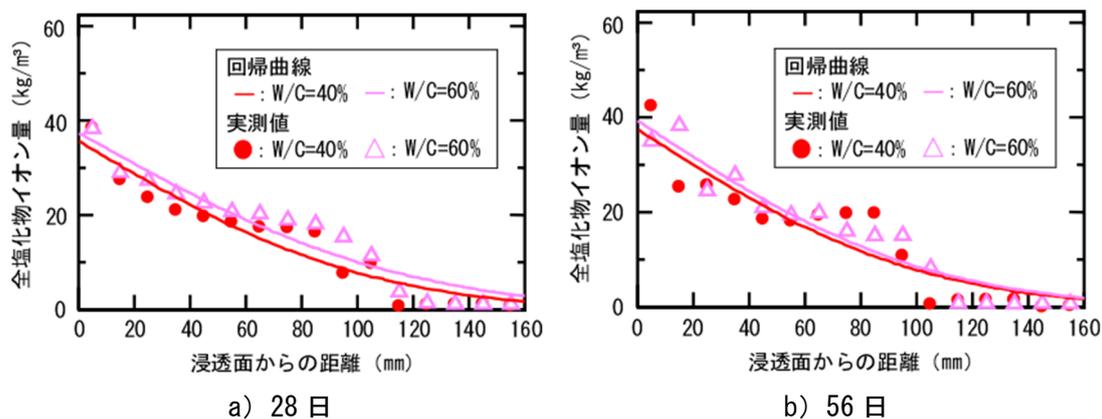


図-2 全塩化物イオン量分布（絶乾供試体）

体内部へ水分の移流現象に伴って塩化物イオンが浸透したと考えることができる。

(2) 鋼材腐食の生じた実規模 PC 桁の耐荷性状評価

プレストレストコンクリート (PC) 構造物は、プレストレスの導入によるひび割れ抑制効果によって耐久性に優れた構造形式とされているが、海水飛沫や凍結防止剤散布等を要因とした塩害劣化により、鋼材腐食の生じたものが確認されている。PC 構造物を合理的に維持管理するために、ひび割れ損傷や鋼材腐食の生じた PC 桁の性能を詳細に把握する手法として数値解析技術の利用が期待されているが、PC 鋼材の腐食の影響は、腐食位置と量、構造諸元等によって異なることから、さらなる知見の蓄積が必要である。本研究で開発を行った構造解析プラットフォームの検証として、実規模 PC 桁を対象に、PC 鋼材の腐食性状が桁の耐荷性状に及ぼす影響について解析的に検討を行った。

本研究の解析対象は、図-3 に示す供用開始後 50 年以上経過していることを想定したポストテンション方式 PC 桁で、上縁定着を含む PC 鋼材 13 本が曲線的に配置されている。軸方向鉄筋およびスターラップは SR235、PC 鋼材は SWPR1N (12φ5) とし、導入プレストレスは 1167N/mm<sup>2</sup> とした。

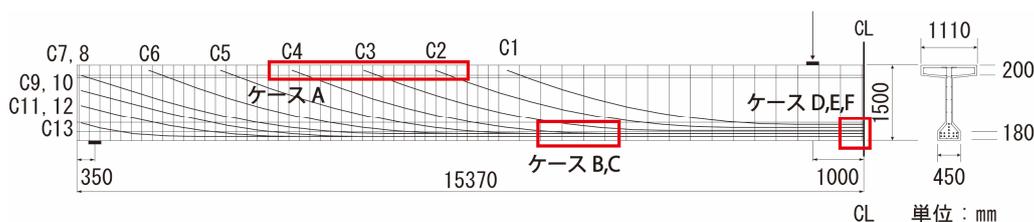
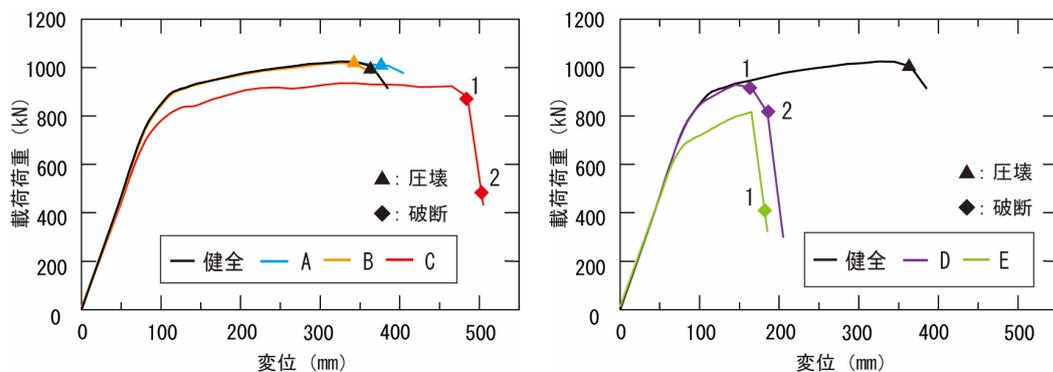


図-3 PC 桁試験体概要

図-4 に健全およびケース A~E の荷重-変位関係を示す。健全な桁は、スパン中央の PC 鋼材が降伏した後上縁コンクリートの圧壊により破壊に至った。上縁定着部での破断を想定したケース A は、破断に伴う応力開放 (プレストレス消失) の影響は定着部付近の局所的な範囲に限定されるため、健全な場合とほぼ同様の耐荷性状を示した。せん断スパン内で局所的に腐食が生じたことを想定した場合でも、腐食量が小さいケース B ではプレストレス消失の影響はスパン中央まで及ばず、健全な場合と同様の耐荷性状を示した。これより、グラウトが十分に充填されている場合には、PC 鋼材の定着部での破断やせん断スパン内の小規模な腐食は耐荷力へ及ぼす影響が小さいことが分かった。せん断スパン内での腐食が大きく PC 鋼材が破断してしまっていることを想定したケース C では、腐食を想定した位置で PC 鋼材が降伏し、最大荷重が健全な場合より約 10% 低下した。健全な PC 鋼材 (C2) が破断に至り、その後 C1 以外の健全な鋼材が一斉に破断に至り、急激な荷重低下を示した。スパン中央で比較的小さい腐食が生じていることを想定したケース D は、鋼材が降伏した後、腐食が生じている 4 本の鋼材 (C5, C7, C9, C11) がスパン中央で早期に破断したことにより破壊に至った。スパン中央で 4 本の PC 鋼材が腐食により破断してしまっていることを想定したケース E は、PC 鋼材 (C3, C4, C13) が降伏した後、スパン中央で健全な PC 鋼材が一斉に破断し、急激な荷重低下を示した。ケース D, E のようにスパン中央に腐食が生じた場合は、耐荷力への影響は大きく、腐食の生じていない健全な PC 鋼材の破断を伴う急激な破壊を示すことが確認できた。



a) 定着部、せん断スパン内腐食

b) スパン中央腐食

図-4 荷重-変位関係 (解析結果)

(3) 電食促進試験による腐食性状が異なる PC はり部材の耐荷挙動の評価

本研究では、断面内の PC 鋼材の腐食性状が耐荷挙動に及ぼす影響について更なるデータを蓄積するために、断面内に PC 鋼材を 2 本配置し、腐食性状を変化させたうえで載荷試験を行い、

曲げ耐荷挙動の評価を行った。

本研究に用いた試験体の概要を図-5に示す。試験体は、上部から190mmの位置にPC鋼より線SWPR7BL（7本よりφ12.7mm）を2本配置したポストテンション式PCはりである。スターラップを配置するため、上部（圧縮側）に鉄筋（D6）、下部（引張側）に木材（φ10mm）を計4本配置し、鉄筋およびスターラップは試験体端部の定着装置とともに合成塗料を塗布することで絶縁を図った。実験の検討パラメーターは、腐食性状（一様腐食と局所腐食）、および局所腐食の範囲を区間350mmと区間100mmとした。試験体Aは、一方のPC鋼材のみを局所腐食（区間350mm）させたものを2体作製した。試験体Fは、Aと同様に一方のPC鋼材のみを局所腐食させたが、局所腐食の範囲を100mmと小さく限定した。試験体Gは、一方のPC鋼材を局所腐食（区間100mm）させ、もう一方のPC鋼材を試験体全域にわたって一様に腐食させたもので2体作製した。

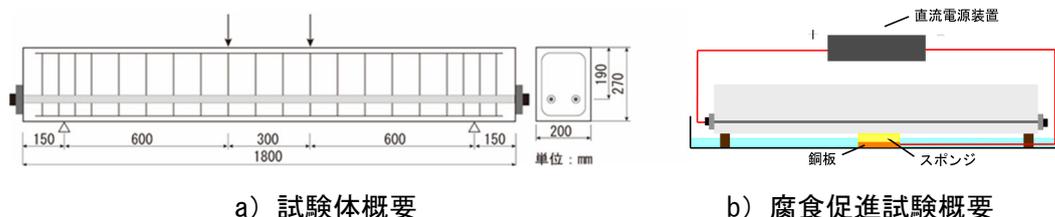


図-5 実験概要

静的載荷試験より得られた荷重-変位関係を図-6に示す。健全な試験体S、および試験体A1（局所腐食）では、A1の重量減少率が小さかったことからSと同程度の最大荷重となり、鋼材の破断は生じず、コンクリート上部の圧壊による曲げ破壊を示した。一方、局所腐食で腐食量が大きくなった試験体A2とFでは、区間最大の重量減少率が同程度であったため最大荷重も同程度となり、健全な試験体と比べて大きく耐荷力が低下した。両試験体とも載荷中にPC鋼材の素線が連続的に破断を生じた。試験体A2、FともにPC鋼より線の芯線に腐食は見られなかったが、試験体Fでは載荷後に芯線が破断していることを確認した。これは、試験体A2に比べて腐食範囲を限定したことで、素線最大の重量減少率が大きくより局所的に鋼材が引っ張られ芯線まで破断に至ったと考えられる。局所腐食と一様腐食を混在させた試験体G1、G2では、G2の素線最大の重量減少率が大きかったため、G2の方が早期にPC鋼材の破断が生じ、荷重が低下する結果となった。試験体G1は、腐食の大きいB面（一様）側にのみ鋼材の破断を確認したのに対し、スパン中央で2本のPC鋼材の最大重量減少率が比較的大きかったG2では、2本のPC鋼材の両方に鋼材の破断を確認した。これより、局所腐食と一様腐食を混在させた場合でも、腐食性状の僅かな違いにより破壊性状が異なることが分かった。

実験結果より、スパン中央で局所的に腐食を生じさせた場合には、腐食区間の素線最大の重量減少率が20%以上になると載荷中に素線の連続的な破断を生じ、耐力が大きく低下することが確認できた。局所腐食と一様腐食を混在させた場合には、腐食性状によらず素線の最大重量減少率が耐荷挙動に影響を与えることが分かった。断面内に複数のPC鋼材を配置した場合には、素線最大重量減少率に基づき、2本のPC鋼材の重量減少率を平均したもの（総断面積の減少率）が最大となる断面で耐力を算定した結果、素線最大の重量減少率が30%を超えると簡易な算定方法では耐力の評価が難しいことが確認できた。これは、載荷試験後に破断したPC鋼より線の重量減少率を精度よく測定することが難しいことにも原因があると考えられる。

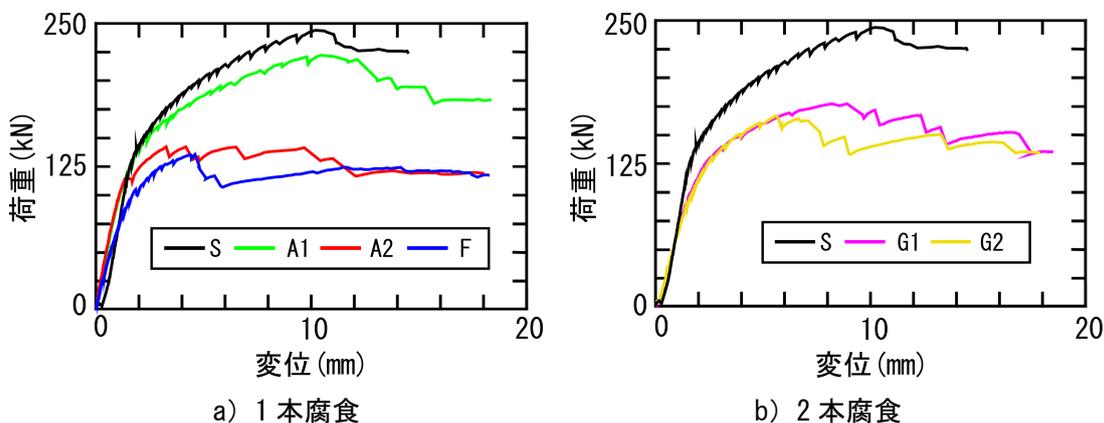


図-6 荷重-変位関係（実験結果）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 中山 岳彦, 斉藤 成彦, 佐藤 賢之介	4. 巻 79
2. 論文標題 せん断力を受ける杭基礎フーチングの耐荷挙動に関する解析的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-00258	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 繁田昂治朗, 斉藤成彦, 佐藤賢之介	4. 巻 31
2. 論文標題 外ケーブル補強を施したPC桁の数値解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第31回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	6. 最初と最後の頁 477-482
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 中山 岳彦, 斉藤 成彦, 佐藤 賢之介	4. 巻 68A
2. 論文標題 数値解析による杭基礎フーチングのせん断破壊挙動の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 685 ~ 692
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.68A.685	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kojiro Shigata, Shigehiko Saito, Kennosuke Sato
2. 発表標題 Numerical Analysis of Prestressed Concrete Girders Strengthened by External Tendons
3. 学会等名 International Conference on Regeneration and Conservation of Structures (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴山 大明、斉藤 成彦、佐藤 賢之介
2. 発表標題 数値解析を用いた鋼材腐食の生じたPCはりの耐荷性状評価
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 繁田 昂治朗、斉藤 成彦、佐藤 賢之介
2. 発表標題 外ケーブル補強を施したPC桁の数値解析
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2021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
研究分担者	佐藤 賢之介  (Sato Kennosuke)  (20821606)	山梨大学・大学院総合研究部・助教   (13501)	

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
---------	---------