

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04653

研究課題名(和文) ASRが生じたPC部材の構造性能評価に資する劣化状態の定量化に関する研究

研究課題名(英文) Study on quantification of ASR deterioration for structural performance evaluation of PC members

研究代表者

上田 尚史 (UEDA, Naoshi)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：20422785

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、プレストレストコンクリート部材を対象として、ASR膨張の異方性やそれに伴う材料劣化を定量化するとともに、漏洩磁束法によりプレストレスの低下挙動を明らかにすることを目的として、各種の検討を行った。その結果、1：ASRによる力学特性の低下傾向は反応性骨材の種類により異なり、供試体内部のひび割れが影響していることを明らかにした。2：PC部材の膨張の抑制効果と異方性を明らかにした。3：研究代表者が提案している1軸のASR膨張モデルを多軸拘束時の膨張挙動が評価可能なモデルへと拡張した。4：PC鋼材中の局所的な緊張力の大きさおよび緊張力の変化を漏洩磁束法により評価できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内に多数存在するプレストレストコンクリート橋では、ASRによる劣化が確認されている。それら構造物の安全性を明らかにするとともに、限られた予算内において合理的に維持管理していくことが必要である。この研究課題ではASRによる膨張の異方性や劣化のメカニズムを明らかにするとともに、シミュレーションにより性能を評価するためのモデルを構築した。また、実際の構造物の劣化状態を把握するための方法として、非破壊試験の一つである漏洩磁束法が有効になり得ることを明らかにした。今後、この研究課題で得られた成果を構造物の維持管理の場に応用することで、より有効性のある対策につながると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, various investigations were conducted on Prestressed Concrete (PC) members in order to quantify the anisotropic expansive behavior and the material degradation due to ASR, as well as to clarify the prestress loss behavior by Magnetic Flux Leakage method. As a result, the following results were obtained.

1: Material degradation and fracture behavior due to ASR were depended on the type of reactive aggregate and affected by the cracks generated inside the specimen due to the expansion. 2: ASR expansion test under the restraints by prestressing tendon and prestress was conducted. The expansive strain decreased by their restraint level and the anisotropic expansion obtained. 3: The expansion model of concrete subjected to multiaxial restraint was extended from the uniaxial ASR expansion model. 4: The applicability of Magnetic Flux Leakage method was shown for the evaluation of local tensile force changes in prestressing tendon.

研究分野：コンクリート構造学

キーワード：ASR膨張 材料劣化 圧縮破壊エネルギー 異方性 漏洩磁束法 プレストレスロス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

従来、アルカリシリカ反応 (ASR) により劣化したコンクリート構造物に対しては、点検結果や構造実験の結果を参考にして、補修・補強・更新等の判断が行われている。しかし、そこでの判断は必ずしも当該構造物の構造性能に基づいたものではないため、対策の妥当性や合理性については議論の余地がある。とりわけ、ASR による膨張の異方性やひび割れに伴う材料劣化の程度、膨張による内部応力状態等は個々の構造物により異なるため、それらを適切に評価した上で構造性能を把握することが求められる。すなわち、ASR 劣化構造物の性能を精度良く評価するためには、「現在の状態 (劣化状態、応力状態) の把握」と、「任意時刻における劣化状態の予測と構造性能を評価するシミュレーション技術」が必要である。

本研究で対象とするプレストレストコンクリート (PC) 構造は、鉄筋コンクリート (RC) 構造と比較して耐久性や安全性が高いことから、全国の市町村の橋梁において数多く採用されている。近年、5年に1度の点検により、それらの PC 部材において ASR 劣化が報告されている。とりわけ、PC 構造の中でもプレストレスを PC 鋼材とコンクリートの付着力により担保しているプレテンション PC 部材においては、軸方向のひび割れに伴うプレストレスの低下が懸念されている。PC 構造の性能はプレストレスに大きく影響を受けるため、軸方向ひび割れを生じた PC 部材では構造性能が低下している可能性がある。このような劣化部材は、特に市町村の管理下に数多く存在していることから、維持管理業務において対策の優先度を決定しなければならない状況にある。その判断材料を提供する手段として、精度の高い構造性能評価法が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、ASR により劣化した PC 部材の構造性能を適切に把握することを目的としている。そのために、ASR が生じた PC 部材の劣化進展と将来にわたる構造性能の変化を、シミュレーションと非破壊試験を統合した予測システムを構築することを目指している。この目的を達成するために、異方的な膨張挙動、異方的な膨張に伴う材料劣化を実験的に定量化するとともに、漏洩磁束法によりプレストレス力の低下挙動を明らかにする必要がある。そこで、下記の4点に着目して検討を進めた。

目的1：異なる産地の反応性骨材を用いたコンクリートの ASR 膨張に伴う材料劣化の把握

ASR 膨張によりコンクリートの力学特性が低下することは知られているが、その要因は必ずしも明確ではなく、また、膨張による劣化傾向も定性的に示されているのみである。そこで、膨張挙動の異なる ASR 劣化に対する各種の力学性能の低下を把握することで、ASR による劣化を定量的に評価する。

目的2：拘束を受けるコンクリートの異方的な ASR 膨張挙動の把握

ASR 膨張は鋼材等の拘束により膨張が抑制され、異方性のある膨張挙動を呈することが知られている。そこで、プレストレス力や鋼材などにより3次的に拘束の程度が異なる供試体の ASR 膨張試験を行い、膨張の異方性の把握を試みる。

目的3：非破壊試験を用いた ASR 劣化によるプレストレス力の低下挙動の把握

ASR 劣化が生じた PC 部材におけるプレストレスを把握することが重要である。そこで、非破壊試験の1つである漏洩磁束法を用いたプレストレス力の評価の可能性について検討を行う。

目的4：拘束下の ASR 膨張挙動を評価可能な膨張モデルの構築

実構造物におけるコンクリートは、鉄筋やプレストレスで拘束されており、その拘束の程度も均一ではない。シミュレーションにより実構造物の挙動を評価するためには、拘束による膨張の異方性を適切に評価する必要がある。これまでに、研究代表者は1軸拘束下の膨張を評価可能な ASR 膨張モデル<sup>1)</sup>を提案している。本研究では、当該モデルを多軸拘束下の膨張挙動が評価できるように拡張する。

### 3. 研究の方法

(1) 異なる反応性骨材を用いたコンクリートの ASR 膨張と材料劣化に関する実験

実験には、100×100×200mmの角柱供試体を用いた。反応性骨材として、大分産、仙台産および北海道産の粗骨材 (いずれも安山岩) を使用し、反応性骨材の違いによる膨張挙動と膨張後の力学特性について検討した。なお、粗骨材の最大寸法は、大分産、仙台産は20mmであり、北海道産は10mmとした。コンクリート中の等価アルカリ量 (Na<sub>2</sub>O 等量) は5 kg/m<sup>3</sup>とした。供試体は、ASR 膨張を促進させるために、40℃の恒温槽にて湿布養生を行った。

膨張量の測定には、デジタルインジケータ (計測精度 0.0005mm) を用いた。所定の膨張に達した段階で、圧縮荷重試験を行った。圧縮荷重試験には、アムスラー型の万能試験機 (容量 2000kN) を用いた。荷重は、最大荷重に達するまでは静的に加力し、最大荷重後は、漸増繰返し荷重をすることで圧縮強度以降のポストピーク領域まで荷重した。なお、荷重板と供試体が離れないよう、除荷時の最小応力は0.5MPaとした。一部の供試体では、摩擦を除去することを目的として供試体と荷重板の間にテフロンシートを挿入した。圧縮荷重試験から得られた応力 - ひずみ関係から、静弾性係数、圧縮強度、圧縮破壊エネルギー、塑性ひずみならびに除荷剛性を求めて整理し

た。なお、塑性ひずみは、除荷時の最小応力点のひずみ、除荷剛性は除荷開始点と最小応力点を直線で結んだ際の傾きと定義した。

### (2) 拘束を受けるコンクリートの異方的な ASR 膨張挙動の把握

種々の拘束条件下での膨張挙動の把握を目的として プレテンション PC 部材、 ポストテンション PC 部材、 鉄筋による多軸拘束試験体、 とした実験を行った。

#### プレテンション PC 部材

本実験では、北海道産の安山岩（骨材寸法 20mm）を用いた。コンクリート中の等価アルカリリ量（ $\text{Na}_2\text{O}$  等量）は  $5 \text{ kg/m}^3$  とした。供試体は、幅×高さ×全長を  $100 \times 100 \times 1800 \text{ mm}$  とし、断面中央にねじ筋鉄筋 D19 を 1 本配置した。実験ではプレストレスの大きさを 0、3、 $6 \text{ N/mm}^2$  の 3 ケースとした。また、非反応性骨材を用いた供試体も同時に作製した。供試体は、ASR 膨張を促進させるために、40 の恒温槽にて湿布養生を行った。鋼材にはひずみゲージを貼付するとともに、端部から 50mm の位置を起点とし、検長 100mm によりコンタクトゲージ（最小メモリ 1/100mm）を用いて長さ変化を測定した。

#### ポストテンション PC 部材

寸法  $150 \times 150 \times 350 \text{ mm}$  で、断面中心に 31mm の円孔のある供試体を用いた。反応性骨材として宮城県産の安山岩を粗骨材として使用し、コンクリート中の等価アルカリリ量（ $\text{Na}_2\text{O}$  等量）は  $5 \text{ kg/m}^3$  とした。供試体を打設後、25mm の PC 鋼棒を円孔に通して、端部の鋼板を介してプレストレスを導入した。導入プレストレスは、0、1 および  $3 \text{ N/mm}^2$  とした。また、非反応性骨材を用いた供試体も同時に作製した。供試体は、湿布で覆った状態で屋外にて暴露した。

膨張の異方性を把握するために、プレストレス導入軸とそれに直交する軸のひずみを測定した。コンクリートひずみは、供試体側面に貼付した測定用ゲージを基にコンタクトゲージ（最小メモリ 1/100mm）を用いて長さ変化を測定し求めた。また、 $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  の円柱供試体の膨張ひずみも計測した。実験は各ケースに対して 3 体行った。各ケースの 1 体に対して、端部にロードセルを設置し、荷重の経時変化を測定した（図 1）。

#### 鉄筋による多軸拘束試験体

$150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  の立方供試体を用い、図 2 のように鉄筋を配置することで、2 軸ならびに 3 軸の拘束を与えた。鉄筋に D10、D13、D16 を用いることで、鉄筋比として 0.63~2.54% 程度の拘束を与えた。反応性骨材として北海道産と新潟産の安山岩を粗骨材として使用した。コンクリート中の等価アルカリリ量（ $\text{Na}_2\text{O}$  等量）は  $5 \text{ kg/m}^3$  とした。供試体は、ASR 膨張を促進させるために、40 の恒温槽にて湿布養生を行った。

膨張の異方性を把握するために、各軸方向のコンクリートひずみと内部の鉄筋ひずみを測定した。コンクリートひずみは、供試体側面に貼付した測定用ゲージを基にコンタクトゲージ（最小メモリ 1/100mm）を用いて長さ変化を測定し求めた。鉄筋ひずみは異形鉄筋表面に貼付したひずみゲージにより測定した。



図 1 ポストテンション PC 部材  
（端部のオレンジ色のものがロードセル）

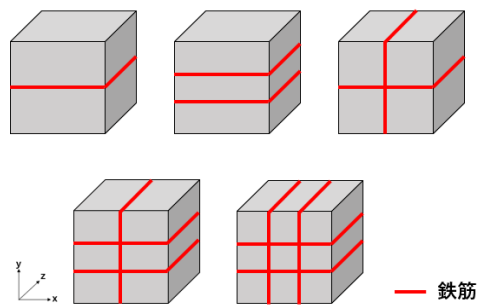


図 2 鉄筋の配置パターンの例

### (3) 非破壊試験を用いた ASR 劣化によるプレストレス力の低下挙動の把握

図 3 に示すコンクリート供試体を用いて、PC 鋼材に付与した緊張力を部分的に変化させ、漏洩磁束法の測定結果がどのような影響を受けるかについて検討した。供試体の寸法は  $400 \times 2000 \times 450 \text{ mm}$  とし、鋼棒からコンクリート表面までのかぶり厚は 150mm とした。

漏洩磁束法による計測として、図 3 に示すように 550mm と 1450mm の位置で永久磁石の磁極の片側を鋼棒に対して垂直に近づけることで着磁した。磁束密度の測定は、コンクリート表面における鋼棒直上で行った。センターホールジャッキを用いて PC 鋼棒全体に約 230kN の引張力を導

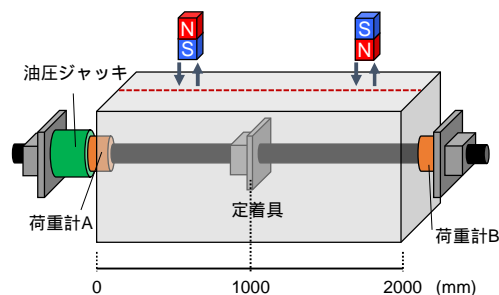


図 3 漏洩磁束法によるプレストレス評価の実験概要

入した後、供試体中央の定着具を定着させ着磁および測定を行った。その後、ジャッキを解放することで0~1000mmの範囲で緊張力を減少させた。このとき、1000~2000mmの範囲では定着により緊張力を概ね一定に保持した。磁束密度の測定は、0~1000mmの範囲で緊張力が約20kN程度減少することを行った。

#### (4) 拘束下のASR膨張挙動を評価可能な解析モデルの構築

巨視的なASR膨張挙動を予測するための既往のモデルとして、Sauma<sup>2)</sup>、Seignol et al.<sup>3)</sup>のモデルを取り上げた。これらのモデルはASR膨張の異方性を考慮できるモデルであり、膨張挙動が主軸3方向に互いに依存しているモデルである。そこで、これらのモデルの特徴を分析するとともに、膨張の異方性に及ぼす影響を明確にした。また、これらのモデルを参考として、既往の膨張モデル<sup>1)</sup>の拡張を行った。既往の膨張モデル<sup>1)</sup>は、自由膨張ひずみを入力値として1軸拘束下の膨張挙動を評価可能なものであるが、各軸に対しては独立したモデルであるという特徴がある。本モデルを多軸膨張モデルに拡張するにあたり、パラメータの再設定と入力すべき膨張ひずみの検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) ASR劣化したコンクリートの圧縮破壊進展挙動

ASR膨張挙動の異なるコンクリートの力学特性として、圧縮破壊進展挙動を明らかにした。図4のように、使用した骨材により膨張挙動が異なる供試体に対して圧縮荷重試験を行った。その結果を図5に示す。ここでは、特にポストピーク領域における圧縮破壊進展挙動に着目し、ASR劣化したコンクリートの圧縮破壊エネルギーを評価した。

図5より、ASR劣化したコンクリートの破壊エネルギーは膨張ひずみの大きさを大きく低下させることはないことが確認された。また北海道産の骨材を用いた場合には、若干増加する傾向が認められた。ただし、応力-ひずみ関係からは、軟化勾配が急になる傾向が認められた。この結果は、ASR劣化が生じると弾性係数が大きく低下するため、破壊時に開放される弾性エネルギーは大きくなる。そのため、圧縮破壊エネルギーが大きくなったといえる。また、ASR劣化したコンクリートの力学特性は使用骨材の種類により異なることが明らかになり、その要因は、膨張により生じたひび割れの影響を受けることが推察された。以上の結果から、ASR劣化したコンクリート構造物を対象としたシミュレーションにおいては、軟化挙動のモデル化において圧縮破壊エネルギーを適切に評価することが重要であることを明らかにした。

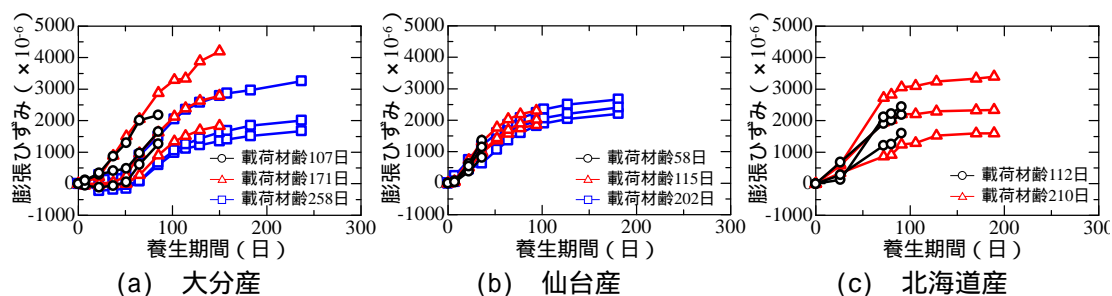


図4 膨張ひずみの履歴

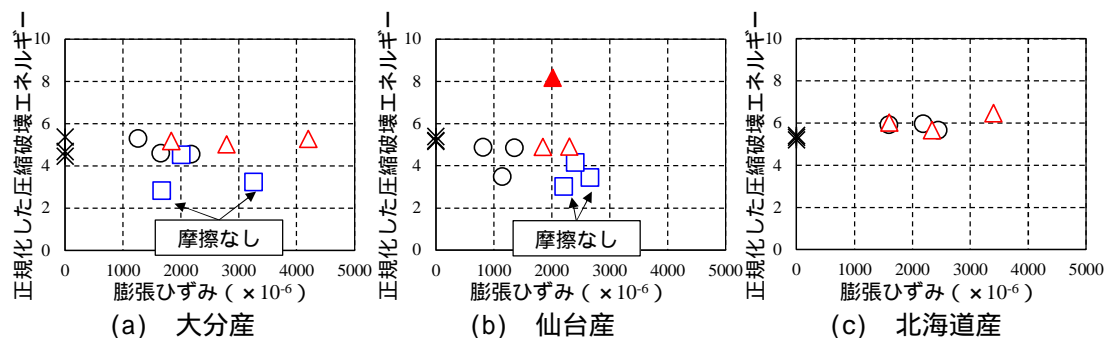


図5 正規化した圧縮破壊エネルギー（プロットの色は図3に対応）

#### (2) ポストテンションPC部材の膨張挙動

3(2)で述べた実験のうち、ポストテンションPC部材に関する実験の結果の概要を述べる。実験では、無拘束のASR膨張(自由膨張ひずみ)を、円柱供試体と角柱供試体で測定した。その結果、わずかに差はあるものの、現時点でおよそ2000 $\mu$ の膨張ひずみが得られた。角柱供試体では、膨張の計測方向(軸方向、軸直角方向)に対して、自由膨張ひずみに差は認められず、等方的な膨張が確認された。

一方、図6に示すように、鋼材ならびにプレストレスにより拘束を受ける場合には、拘束の程度により膨張が抑制される結果が得られた。拘束のある軸方向の膨張量については、プレストレス力が大きくなるにしたがって小さくなる結果となった。一方、拘束軸に対して直交方向の膨張

量については、拘束の大きさによらず概ね同程度の膨張量となった。すなわち、既往の研究で指摘されているような「expansion transfer (膨張が抑制された場合にはそれに直交する方向の膨張が増加する)」とは異なる結果が得られた。この点については、更なる検証が必要であると考えている。なお、プレストレス力の経時変化に着目すると、クリープの影響により一度は低下するものの膨張が生じることで増加に転じる傾向が認められた。

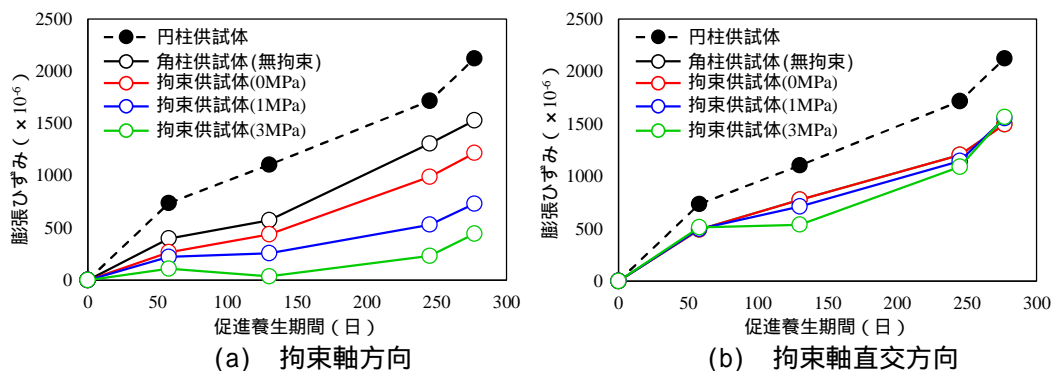


図6 ポストテンション PC 供試体の膨張ひずみ

### (3) 漏洩磁束法による PC 鋼材の緊張力評価

測定結果を図 7 に示す。ここで、凡例の数字は図 3 中の荷重計 A の値を示している。緊張力が変動した 0 ~ 1000mm の範囲では、緊張力の変動に伴い測定磁束密度の絶対値が減少した。一方、緊張力の変化が比較的小さい 1000 ~ 2000mm の範囲では、測定磁束密度のグラフ形状がほとんど変化しないことが確認できた。

図 7 の測定磁束密度における最大値と最小値の絶対値をピーク値( $\mu T$ )と定義し、0 ~ 1000mm におけるピーク値と 1000 ~ 2000mm におけるピーク値と緊張力の関係を図 8 に示す。0 ~ 1000mm の範囲におけるピーク値は減少しているが、1000 ~ 2000mm におけるピーク値はほぼ変化していない。このことから、同一鋼材中の局所的な緊張力の変化であっても、着磁範囲内のピーク値の変化に着目することで捉えることができる可能性が示唆された。

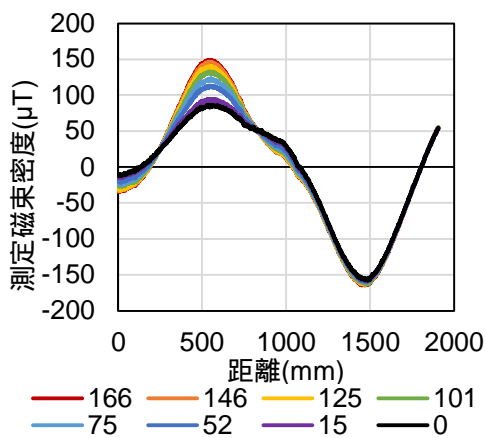


図7 緊張力減少過程における測定結果

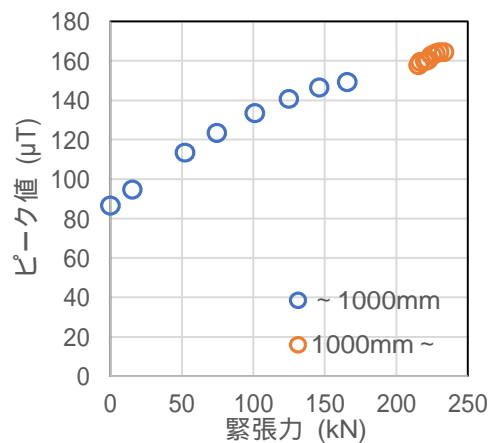


図8 各緊張力におけるピーク値

### (4) 多軸拘束の影響を考慮可能な ASR 膨張モデル

既往の研究<sup>2, 3)</sup>では、潜在的な膨張量(自由膨張ひずみに相当)に対して拘束の影響を考慮しており、主軸 3 方向の自由膨張ひずみは拘束に依存した値としていること、ただしそれらの和(体積ひずみ)は一定としている。この考え方を既往のモデル<sup>1)</sup>に導入することで、多軸拘束の影響を考慮可能なモデルへと拡張した。このとき、自由膨張ひずみの大きさそのものが拘束の程度により低下するため、モデルのパラメータの修正が必要となるが、数値実験の結果、従来のモデルのパラメータを用いても、拘束下の挙動を概ね妥当に評価できることを確認した。

### 参考文献

- 1) 上田ら：アルカリ骨材反応による RC 部材の膨張予測解析，土木学会論文集 E，Vol63，No.4，532-548，2007.
- 2) Victor E. Sauma：Numerical Modeling of AAR，CRC Press，2013.
- 3) J.-F. Seignol, et al.：A macroscopic chemo-mechanical model aimed at re-assessment of delayed-ettringite-formation affected concrete structures，Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Computational Techniques in Concrete Structures，Jeju，Korea，2009，pp.422-440.

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 上田尚史、柴田亜美、董元翔	4. 巻 22
2. 論文標題 ASR劣化したコンクリートの圧縮破壊進展挙動に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 203-208
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 上田尚史、武居凜太郎、三木朋広、寺澤広基	4. 巻 45
2. 論文標題 ASR劣化の違いがRCはりのせん断圧縮破壊に及ぼす影響に関する基礎的研究	5. 発行年 2023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 925-930
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 寺澤広基、福本晃太、鎌田敏郎	4. 巻 45
2. 論文標題 漏洩磁束法を用いたPC鋼材の局所的な緊張力評価に関する検討	5. 発行年 2023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 1408-1413
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0件

〔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	寺澤 広基  (TERASAWA Koki)  (50750246)	大阪大学・大学院工学研究科・助教    (14401)	

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