

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760367

研究課題名(和文)複合劣化が生じたRC部材への補修補強における震災後の修復性を考慮した耐久性評価

研究課題名(英文)Durability evaluation of retrofitted RC members exposed to composite deterioration for reparability after earthquake disaster

研究代表者

子田 康弘(KODA, Yasuhiro)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：40328696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コンクリートとシート間の付着特性、およびシート補強を実施したRC部材の耐荷特性の把握からシート補強RC部材の耐久性能の評価を行った。その結果、温度サイクルを受けるシートのせん断付着特性より、炭素繊維シートは、全ての条件でせん断付着強度とせん断付着応力が低下する傾向であり、このうち低温環境でその傾向が顕著となった。また、シートによるRC部材の曲げ耐荷挙動は、凍結環境下と常温環境下で明確な違いは認められなかった。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to evaluate the durability of the bond strength between CFRP sheet and concrete and strengthening of flexural capacity of RC beams with CFRP sheet. As the results of experiments, it was found that the bond strength decreased under a high constant temperature or a high and a low cyclic temperature. The bond strength degradation in the case of the constant temperature depends primarily on the deterioration of the bonding strength of the epoxy resin adhesive. Also, flexural behavior of RC beams has not observed a clear difference under the frozen environment and ordinary temperature environment.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：連続繊維シート 環境温度 付着強度 曲げ補強効果

### 1. 研究開始当初の背景

近年、高度成長期に建設された構造物の一斉老朽化、建設投資額の減少といった社会基盤施設を取り巻く社会情勢の変化に加えて、鉄筋コンクリート(以下 RC)構造物では劣化が深刻な問題として顕在化しつつある。これより、今後十数年のうちに、維持管理上、迅速かつ効果的な補修補強の対応が求められる劣化が進行した RC 構造物の急増が予想される。一方、東日本大震災では支承部やその周辺が損傷した道路橋が少なからずあり、通行止めを余儀なくされ、交通解放までに時間を要したケースが散見された。このような状況を鑑みると、現在は劣化により性能が著しく低下した RC 構造物が点的なため更新という選択肢も採用できる。しかし、今後はこの種の RC 構造物が増加し更新が困難になり、補修補強による延命化という事後保全対応が増えると考えられる。これに加えて、東日本大震災後の教訓より上述の補修補強の目的に加え、偶発荷重による損傷の程度が小さくなるような対処によって被災後早期に交通解放が可能なような修復性を持つ劣化した構造物の補修補強という考え方も今後必要になると考える。

劣化した RC 構造物の補修補強は、劣化状態により種々の選択しがある。補強が目的の場合は、外力を分担する新たな材料を構造物に追加する。このうち連続繊維シート(以下シート)は、コンクリート表面に接着するタイプの材料でシートを用いた補修補強設計指針は確立されてはいるが、設計指針は予防保全を目的とし耐荷性が補強効果の評価になる。しかし、補修補強後の安全性等の経時的抵抗性、すなわち耐久性の評価は端緒に終わったばかりであり、耐久性の評価がない限り偶発荷重が構造物の損傷に及ぼす影響は明確にはならず修復性の評価もできない。

### 2. 研究の目的

本研究では、シートを接着させたコンクリート供試体による付着特性、およびシート補強を実施した RC 部材の耐荷特性の把握からシート補強 RC 部材の耐久性能の評価を目的とした。具体的には、本学所有の大型環境試験装置を使用し、凍害が主となる環境を想定した作用を RC 供試体に与え、この環境温度を与えた後のシートを接着させたコンクリートのせん断付着特性の評価と、凍結環境を保持した状態におけるシート RC 部材の曲げ載荷試験を行い、凍結環境下におけるシートによる曲げ補強効果を検討した。

### 3. 研究の方法

(1) 温度変化が連続繊維シートとコンクリート間のせん断付着特性に及ぼす影響

実験条件を表-1 に示す。まず、使用したシートは、炭素繊維(以下、C)とアラミド繊維(以下、A)である。温度条件は、温度範囲を -20 ~ 20 (以下、低温)、0 ~ 40 (以下、

表-1 実験条件 1

|        |                         |
|--------|-------------------------|
| 使用シート  | 炭素繊維、アラミド繊維             |
| 温度条件   | 20 ~ -20、0 ~ 40、20 ~ 60 |
| 温度サイクル | 1日1.5サイクル、60サイクルまで      |

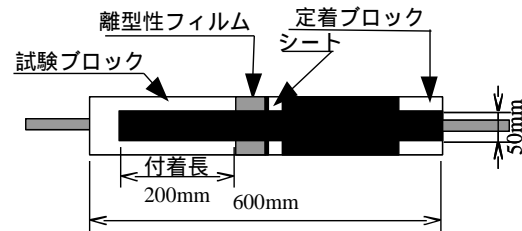


図-1 供試体形状

常温)、20 ~ 60 (以下、高温)の3条件とし、温度サイクルを1日1.5サイクルで60サイクルまで実施した。使用したコンクリートは、水セメント比64.8%であり、試験開始材齢(材齢33日)の圧縮強度が28.6MPaであった。シートの物性値は、線膨張係数がCで  $0 \times 10^{-6}/$ 、Aで  $-2.0 \times 10^{-6}/$  と、コンクリートの  $10 \times 10^{-6}/$  (計算用値)とは異なるため接着面で温度変化によるひずみ差が生じるものと考えられる。

図-1 に供試体形状を示す。供試体は、土木学会の「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法」<sup>1)</sup>に準拠した。図より、供試体寸法は、幅100mm、高さ100mm、長さ600mmであり、供試体中央にノッチを設けた試験ブロックと定着ブロックからなる形状で、シートは供試体両側面に接着する。シートの寸法は、幅50mm、長さ550mmであり、付着長は200mmになる。温度サイクルは、シートを室温20の一定温度下で接着し養生した後、温度可変型の恒温槽で与えた。せん断付着試験は、載荷フレームに引張治具を介し油圧ジャッキとともに固定し供試体へ引張力を載荷する方法で行った。なお、この試験は30サイクル毎に室温20下で行った。計測項目は、ロードセルによる荷重と高感度変位計によるノッチの開口変位、およびひずみゲージによるシートのひずみであり、ゲージは付着長区間に20mm間隔で貼り付けた。

### (2) 大型環境試験装置を活用したシート補強 RC 部材の曲げ補強効果

#### 万能載荷試験装置の概要

写真-1 に、本研究課題で開発した環境温度制御式万能載荷試験装置の概要を示す。また、写真-2 には本試験装置の載荷部を示す。本装置は、当研究室所有の大型環境試験装置と、載荷フレームと油圧ジャッキを組立てた台車形式の供試体設置架台を合わせることで、環境温度制御式の万能載荷試験装置とする仕組みである。大型環境試験装置の仕様は、内装耐塩害仕様の温度制御型恒温恒湿室であり、制御可能な温度範囲が-30 ~ +80、湿度範囲が40% ~ 90%である。万能載荷試験機の仕様は、まず載荷能力として、静的載荷が最大200kN、疲労載荷が最大50kNである。

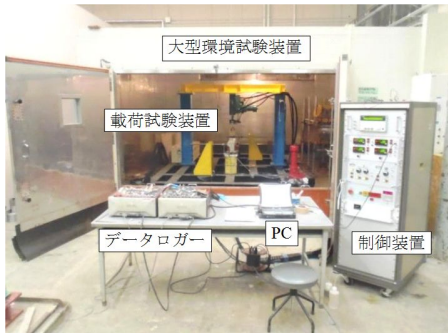


写真-1 環境温度制御式万能載荷試験装置

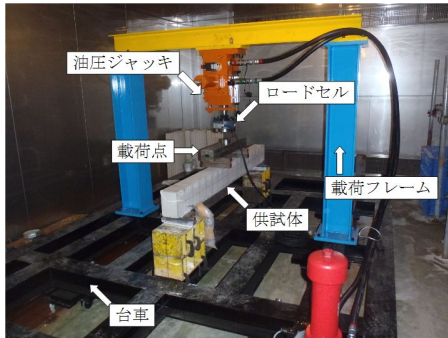


写真-2 試験装置載荷部

次に、疲労載荷における最大周波数と最大ストロークは、5Hzの±10mmである。載荷フレームは2本柱構造で、載荷可能な供試体の最大寸法は、大凡、はり供試体でスパン3000mm、はり高さ400mm、版状供試体で幅1000mm(4辺支持)である。荷重検出は、油圧ジャッキに設置されたロードセルによって検出される。

実験方法

図-2に、実験に使用したRCはり供試体の概要を示す。この供試体は、「続・材料劣化を生じた、コンクリート構造物の構造性能」<sup>2)</sup>に示されている「ベンチマークテスト」(以下BMT)で使用されたRCはり供試体と同じ仕様である。BMTにおけるRCはり供試体は様々な材料劣化が構造物の構造性能に及ぼす影響を評価するため、実験結果の信頼性および再現性を高めるため考案された供試体であり、共通試験用に位置付けられている。これに準拠することで種々の劣化機構で劣化したRCはりとの統一的な整理あるいは考察が可能になると考え、これを採用したものである。図より、供試体寸法は、長さが1800mm、幅が110mm、高さが165mmであり、主鉄筋にはD10(SD345)を3本使用しており、有効高さは140mmである。また、破壊モードを曲げ破壊に制御するため、スターラップとしてD6(SD295A)を80mm間隔で配置している。

表-2に、実験条件を示す。表より、実験条件は、温度条件を常温と低温(-10℃)の2条

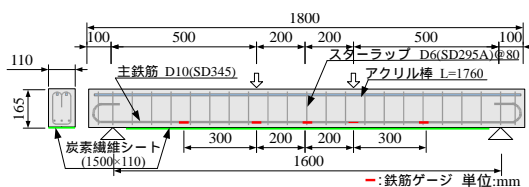


図-2 RCはり供試体の概要

表-2 実験条件2

| 供試体名 | 静的載荷 | 常温 | 低温 | シート補強 |
|------|------|----|----|-------|
| N-RC |      |    |    |       |
| L-RC |      |    |    |       |
| N-CF |      |    |    |       |
| L-CF |      |    |    |       |

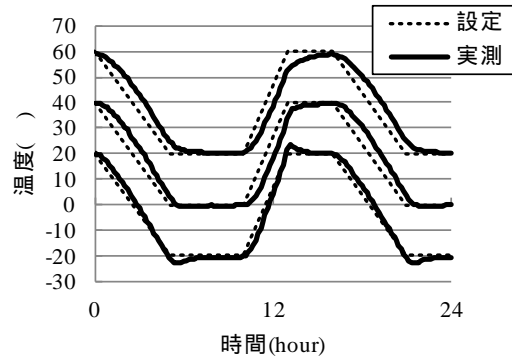


図-3 供試体の温度変化

件とシートによる曲げ補強の有無を組み合わせた4条件を設定した。供試体名に関しては、常温をN、低温をL、シート無補強の供試体をRC、シート補強を施した供試体をCFとした。使用したコンクリートは、水セメント比が64.3%であり、試験開始材齢(62日)の圧縮強度は、27.3MPaであった。計測項目は、載荷荷重とはり中央の変位、および主鉄筋とシートのひずみである。ひずみゲージの貼付間隔は、鉄筋が供試体中央と中央より200mmと300mmの位置(図-2参照)であり、シートは供試体中央より40mm間隔で端部までとした。なお、シートの寸法は、幅110mm、長さ1500mm(図-2参照)で1層接着した。載荷方法は、スパン長を1600mm、等曲げ区間400mmとする静的対称2点曲げ載荷方式とした。また、低温条件は、予め環境試験装置に静置し供試体温度を設定温度に合わせた後、載荷試験を行った。

4. 研究成果

(1) 温度変化が連続繊維シートとコンクリート間のせん断付着特性に及ぼす影響

図-3に供試体作製時に予め埋設した熱電対による接着面付近の温度サイクルによる温度変化を示す。図より、供試体の温度は、設定温度履歴を概ね満足していることがわかる。

図-4に、載荷試験結果の一例として低温の荷重-開口変位関係を示す。図より、荷重10kNを超えたところで開口変位が増加しているが、これはノッチ位置で2つのブロックに分かれたためであり、これ以降シートが荷重を分担し再び荷重は増加した。シートのはく離は、大凡Cが変位0.6mm、Aが変位0.4mmよりノッチ側から端部に向けて始まり、はく離発生後は荷重の増加に対する開口変位の増加量が大きくなる傾向であった。最大荷重 $P_{max}$ は、0サイクルがC、Aとも約20kNであっ

たが、温度サイクルの増加とともに最大荷重が低下した。

図-5に、せん断付着強度と温度サイクルの関係を示す。図中のせん断付着強度は、式(1)により求めた<sup>1)</sup>。

$$\tilde{\tau}_u = \frac{P_{max}}{2b \cdot l} \quad - (1)$$

ここに、 $\tilde{\tau}_u$ :せん断付着強度(MPa),  $P_{max}$ :最大荷重(N),  $b$ :シート幅(mm),  $l$ :有効付着長(mm)<sup>1)</sup>でCが40mm, Aが60mmである。

図より、まず、0サイクル時(初期値)は、Cが4.87MPa, Aが3.47MPaである。図中の回歸直線に着目すると、低温はCとA共に温度サイクル数の増加とともにせん断付着強度は低下傾向を示したが、常温ではCで低下する傾向であったが、Aは変化がなく、常温よりは低温という比較的厳しい温度環境の方が付着強度は経年的に低下する可能性が示された。

図-6に、シートのひずみ分布に基づく荷重ステップ毎のはく離過程のせん断付着応力の最大値を示す。最大値は式(2)<sup>3)</sup>により算出し、サイクル毎の傾向の評価を行った。

$$t(x) = E_{cf} \cdot t_{cf} \cdot \left( \frac{e_{cf}(x_{n+1}) - e_{cf}(x_{n-1})}{2\Delta x} \right) \quad - (2)$$

ここに、 $t(x)$ :せん断付着応力(MPa),  $E_{cf}$ :シートのヤング率(GPa),  $t_{cf}$ :シート厚(mm),  $x$ :ゲージの間隔(mm),  $e_{cf}(x_n)$ :シートひずみ測定位置のひずみ( $\mu$ )である。

図より、変動係数で12%~17%のばらつきがあるものの、これを踏まえて評価するとCの低温と常温の60サイクル時のせん断付着応力は、0サイクル時よりも低下していると考えられる。これに対して、Aはばらつきを考慮すると低温にせん断付着応力の低下傾向が認められる。以上より、本実験の範囲内では、低温はCとA、常温はCで温度変化の影響が表れたと考えられた。

以上より、本研究の範囲内では、温度サイクルを受けるシートのせん断付着特性は、シートの種類によって異なる傾向を示した。そして、Cの場合は、全ての条件でせん断付着強度とせん断付着応力が低下する傾向を示し、このうち、低温環境でその傾向が顕著となった。Aの場合は、低温環境で低下傾向が認められた。また、シートの種類と温度変化の条件によっては、温度サイクルの繰り返しが接着界面におけるシートとコンクリート間の付着性能を低下させる可能性が示唆された。

## (2)大型環境試験装置を活用したシート補強RC部材の曲げ補強効果

図-7に、N-RC, L-RC, N-CF, L-CFの荷重-変位関係を示す。図中には文献2)の実験結果(BMT:  $f'_c=31\text{MPa}$ )を比較のため示す。図より、N-RCは荷重36.0kN, 変位6.43mm, L-RCは荷重38.2kN, 変位7.45mmのとき主鉄筋が降伏

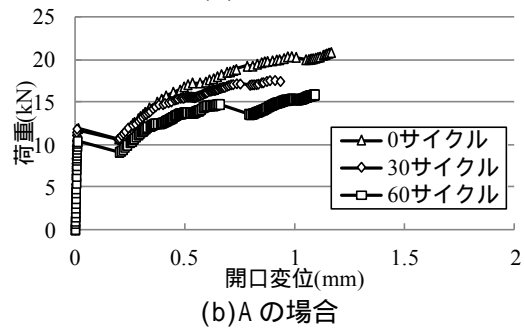
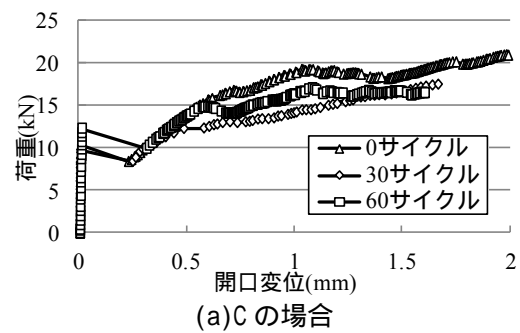


図-4 荷重-開口変位関係(低温)

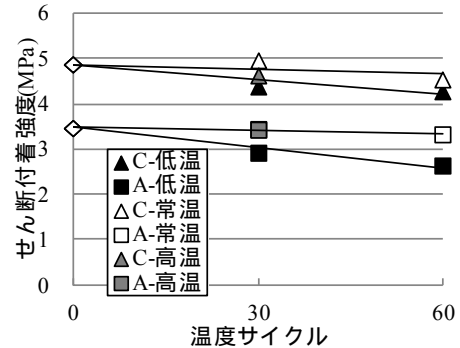


図-5 せん断付着強度の変化

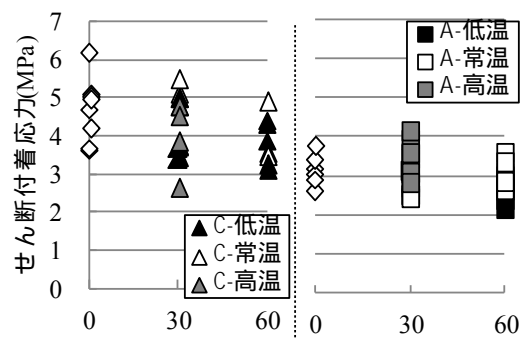


図-6 シートはく離過程のせん断付着応力

し、その後降伏時の荷重を保持したまま変位が推移し、上縁コンクリートの圧壊で終局状態に至るという曲げ破壊を示した。BMTと比較すると主鉄筋が降伏するまでの曲げ剛性は同様であった。一方で、N-CFは荷重42.1kN, 変位8.00mm、L-CFは荷重42.1kN, 変位7.63mmのとき主鉄筋が降伏し、その後も荷重が増加しながら、変位も増加した。シート補強した供試体の終局は、下縁に接着したシートの破断により決まり、破断した直後に、シートが

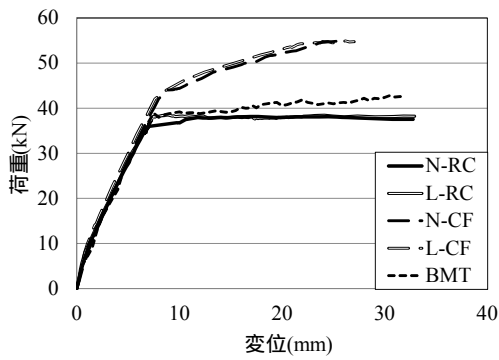
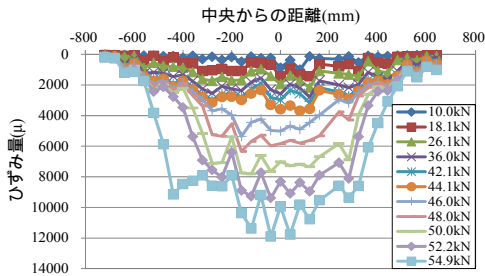
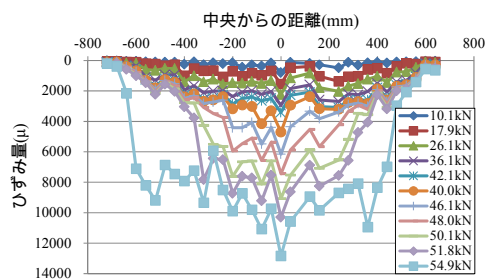


図-7 荷重-中央変位関係



(a)N-CF



(b)L-CF

図-8 シートのひずみ分布

分担していた力が RC 供試体に加わり急激に曲げ破壊が生じた。

各供試体の最大荷重は、N-RC が 38.2kN、L-RC が 38.5kN であり、これに対して、N-CF は 54.9kN、L-CF は 54.9kN であった。最大荷重より、シートによる補強効果を認めることができた。一方で、無補強供試体、シート補強供試体それぞれにおいて、常温環境下と低温環境下という温度環境の違いの影響は認められなかった。また、無補強供試体は、若干ではあるが降伏時の荷重および変位は常温と低温で差が生じ L-RCの方が両者とも  $f_c$  が高い BMT に近い値となった。これはばらつきの範囲とも考えられるが、既往の研究<sup>4)</sup>では低温下において耐力、じん性が常温よりも向上すると報告されていることから、今後疲労挙動とともにこれら进行评估する予定である。

図-8 にシートのひずみ分布を示す。図より、常温環境、低温環境ともにシートのひずみ分布は、主鉄筋が降伏するまではシートに生じるひずみは曲げひび割れ位置を起点に大きくなる傾向であったが、主鉄筋が降伏した以降は、シートのひずみが顕著に増加している。これは、主鉄筋の降伏によって、シートが主

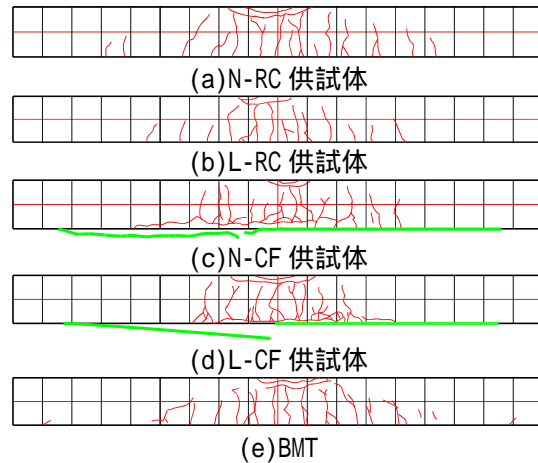


図-9 供試体の曲げ破壊状況

に下縁の引張力を分担しているためである。なお、本研究で使用した炭素繊維シートの破断ひずみは概ね 14000  $\mu$  であることから、シート補強供試体は曲げ区間におけるシートの破断による破壊が確認された。

図-9 に、曲げ破壊時のひび割れ状況を示す。図より、無補強供試体とシート補強供試体の曲げひび割れの進展状況といった曲げによる破壊状況は、BMT と同様であった。これより、本供試体は、BMT の供試体性能とほぼ同等であることが確認された。

以上より、静的荷重試験による RC 部材の曲げ耐荷挙動は、既往の研究とほぼ同等の結果が得られ、本荷重試験装置の性能を確認することができた。そして、本実験の範囲内では、常温と低温という温度環境は、静的荷重による RC はりとシート補強 RC はりの曲げ耐荷挙動に対して明確な違いは認められなかった。本荷重試験装置を大型環境試験装置内に設置することにより、今後は、任意の温度条件下における RC 部材の静的荷重試験のみならず、疲労荷重試験によっても低温環境下における凍結の影響や材料物性が RC 部材の耐荷挙動に及ぼす影響を評価できることが確認された。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー-101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，2009
- 3) 上原子晶久他：連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析，土木学会論文集，No.634/V-45，pp197-208，1999
- 4) 後藤幸正，三浦尚：極低温下における鉄筋コンクリート部材の性質に関する研究，土木学会論文報告集，第 285 号，pp.121-134，1979

## 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 2 件)

- (1) 岩城一郎, 子田康弘, 石川雅美, 小山田桂夫: 東北地方におけるブリッジマネジメント支援ツールの構築, コンクリート工学論文集, 第 24 巻第 3 号, pp.75-87, 2013(査読有)
- (2) 子田康弘, 上原子晶久, 岩城一郎: 連続繊維シートとコンクリート間のせん断付着特性に及ぼす温度変化の影響, 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, 第 12 巻, pp.17-22, 2012(査読有)

[学会発表](計 2 件)

- (1) 横山友康, 皆川翔平, 子田康弘, 岩城一郎: 環境温度と含水状態がコンクリートの耐疲労性に及ぼす影響, 平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会, V-32, 2014 年 3 月, 八戸工業大学
- (2) 皆川翔平, 宮田祥平, 子田康弘, 岩城一郎: 任意の温度条件下における RC 部材の万能載荷試験方法の考案, 平成 24 年度土木学会東北支部技術研究発表会, V-22, 2013 年 3 月, 東北大学

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

子田 康弘 (KODA, Yasuhiro)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号: 4 0 3 2 8 6 9 6