

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289137

研究課題名（和文）補修後のRC部材に生じる再劣化の機構解明と維持管理体系への応用

研究課題名（英文）Clarification of mechanism of re-deterioration caused in RC after repair and application to maintenance management system

研究代表者

宮里 心一（MIYAZATO, SHINICHI）

金沢工業大学・環境・建築学部・教授

研究者番号：60302949

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,100,000円

研究成果の概要（和文）：紫外線環境下におけるシラン系表面含浸工法による補修効果に関して、遮水性は20年間に亘り保持される。一方、遮塩性は10年間に亘り保持されるが、20年目には低下する。ただし、再塗布により回復する。

また、型枠面では切断面と比較して、塩化物イオンは吸着しやすい。ただし、高強度のコンクリートでは、その差は小さくなる。

さらに、PC桁を断面修復する際、段階的な修復で、プレストレス力の再分配が生じ、断面はつり時のプレストレス力の減少は抑制する。これにより既設コンクリートの応力増加負担が低減し、補修部のひび割れ発生荷重は増加する。この耐荷挙動は、3次元非線形有限要素解析手法によって検証できる。

研究成果の概要（英文）：The effect of the repair with silane-type surface penetrant material under an environment of ultraviolet rays was investigated. A low water permeability was kept for 20 years. On the other hand, a low chloride permeability was kept for 10 years but decreased at 20th year. However, it could be recovered by second application.

Secondly, it is easy to adsorb chloride ions on a formwork plane compared with a cut plane. However, the difference decreased in a concrete with high strength.

Further, when PC beams repaired a section, a step-by-step restoration distributed the pre-stress to several-time. Therefore, the pre-stress did not decrease when a section was cut down. As a result, the load of the stress increment of the existing concrete decreased, and the crack occurrence load of the repair part became large.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：鉄筋コンクリート プレストレストコンクリート 表面含浸工法 断面修復工法 再劣化 遮水性 遮塩性 力学性能

1. 研究開始当初の背景

市民生活の安全を守るため、老朽化した鉄筋コンクリート(RC)は補修される。しかしながら、一部で短期間に再劣化する。この補修部を対象にした再劣化の経時変化を評価した研究は極めて少ない。加えて、材料劣化に起因する耐久性のみならず、剛性と耐力に関連する使用性や安全性も、補修設計において考慮した検討はない。

2. 研究の目的

本研究では、補修後の再劣化に着目し、耐荷性も対象に含めた維持管理の合理化を図った。特に、実用性の高い補修工法に注目し、予防保全を代表してシラン系表面含浸工法を、一方事後保全を代表してプレレストコンクリート(PC)への断面修復工法について検討した。そのため、次記のA~Cを検討した。

研究A: シラン系表面含浸材を塗布したモルタル供試体に対して、2、5、10、20年相当の耐候性試験や乾湿繰返し試験を行った後、透水量と塩分浸透深さを測定し、遮水性と遮塩性について評価した。また、再塗布の効果についても評価した。

研究B: PCや断面修復工法に用いるコンクリートの強度が塩分浸透抵抗性に及ぼす影響を評価した。また、切断面と型枠面の影響を比較した。

研究C: 段階的な断面修復を行うことで既設コンクリートへの応力増加負担を低減させる方法を提案し、曲げ荷重試験による実験と、3次元非線形有限要素解析による検証を実施した。

3. 研究の方法

(1)研究A(実験)

アルキルアルコキシシランを主成分とした表面含浸材を塗布した。表1に実験ケースを示す。

表1 研究Aの実験ケース

W/C (%)	含浸材塗布	含浸深さ(mm)
50	無	
40	有	3.34
50		3.39
65		3.78

厚さ30mmのモルタル供試体へ紫外線を照射できるように改良された促進耐候性試験機を用いた。ここで、試験サイクルはJIS A 1415に、また試験環境はJIS K 5600-7-7に準拠した。なお、35日に亘る耐候性試験が、1年間に亘り銚子市の実環境下へ暴露したことに相当する。耐候性試験後、JSCE-K571に準拠した透水試験と、塩分浸漬試験を行った。

(2)研究B(実験)

3水準の圧縮強度(高=H、中=M、低=L)のコンクリートにおける、型枠面(M)と切断面(C)を暴露面とし、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に3ヶ月間に亘り浸漬した。その後、JIS A 1154に準じて全塩化物イオン濃度を計測した。

(3)研究C(実験と解析)

図1に試験体形状を、図2に断面修復の分割図を、および表2に実験ケースを示す。実験パラメータは、断面修復の有無と断面はつりの分割数であり、それぞれシリーズ1とシリーズ2に分類した。なお、シリーズ2は非腐食試験体に対して段階的な断面修復を適用したものであり、パラメータは対象断面を一度にはつり出す場合と、2分割で補修する場合の2水準である。また、鋼材が上下段に2本ずつ配筋されているため、補修対象となる下段での分割方向は、はり軸方向および奥行方向となる。シリーズ1における断面修復は図1(a)に示す腐食領域を対象とし、はり軸方向に2分割、奥行方向に2分割の計4分割、シリーズ2では図1(b)に示すはつり領域を対象とし、P_2試験体では奥行方向に2分割で

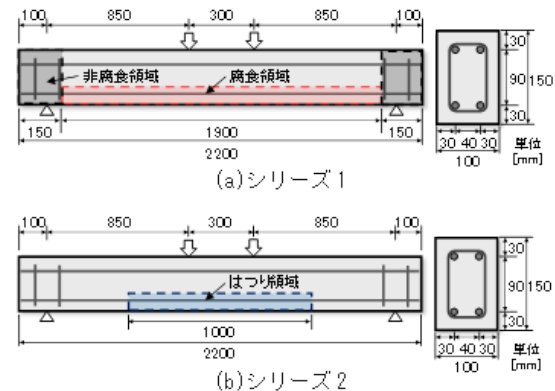


図1 試験体形状

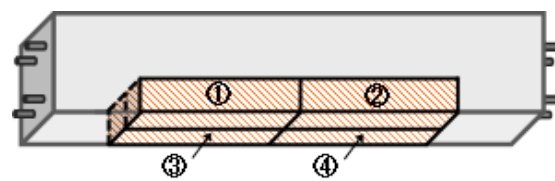


図2 断面修復の分割図

表2 研究Cの実験ケース

試験体名		断面修復の有無	断面はつりの分割数
シリーズ1	N	無し	-
	C-0y		-
	P-0y		4
シリーズ2	P_All	有り	1
	P_2		2

断面修復を行った。4分割の場合には図2の
 - - - の順番で、2分割の場合は、
 - - の順で施工を行った。このように
 奥行方向に一部の硬化コンクリートを残す
 ことで、補修の際の応力解放を抑制するこ
 とを意図した。なお、断面修復材にはポリ
 アクリル酸エステル(PAE)系ポリマーセ
 メントモルタルを用いた。

荷重は、等曲げ区間長 300mm、支点間
 長 2000mm の単純支持・2点集中荷重の
 荷重制御による曲げ荷重とした。計測項
 目は、荷重荷重、中央・支点変位、コン
 クリートのひずみである。コンクリートの
 ひずみは、上面は梁中央に1か所、下面
 は等曲げ区間内に6か所ひずみゲージを
 貼付して計測した。

解析には、研究分担者の高橋が自作の3
 次元非線形有限要素プログラムを用いた。
 図3に解析メッシュを示す。鋼板、既設
 および修復コンクリートには20節
 点8積分点の6面体要素を用いた。荷
 重板へのプレストレス導入を防ぐため、
 荷重板と供試体の間に16節
 点4積分点の平面接合要素を挿入し、
 せん断ずれに対する剛性を極めて小さく
 した。はり端部はコンクリートと同弾性
 係数の鋼材とし、プレストレス導入時
 の局所破壊を防いだ。ここで、実験供
 試体のPC鋼材は3本より線だが、これ
 を1本のトラス要素でモデル化した。よ
 り線とコンクリート間はバネ要素で結
 合し付着を直接考慮した。PC鋼材より
 上に位置する断面修復部上縁を再現す
 ると、厚さの薄い要素が修復部に含ま
 れて極端な要素寸法差となる。これを
 避けるため、解析の修復領域はかぶり
 と等しくした。

プレストレスは、PC鋼材へ与えた初期
 ひずみから算出された内力をコンクリ
 ートへ外力として与えることで導入し、
 導入時の境界条件は単純はりとした。
 また、断面修復は、はつりと修復工程
 に分けて実施した。はつり工程では
 修復部を弾性係数が 10^{-10}N/mm^2
 という極めて柔なコンクリートに置換
 して応力-ひずみ履歴を消去し、釣合
 い計算を行った。修復工程では再度、
 修復部を修復コンクリートに置換して
 応力-ひずみ履歴を消去した。はつり
 と修復工程の釣合い計算はプレスト
 レス導入時の節点力、応力の下で行っ
 た。この手順を修復回数に亘り繰り返
 した後、荷重した。荷重過程では全
 修復工程終了時の応力を初期応力と
 して釣合い計算を行った。



図3 有限要素メッシュ(シリーズ2)

4. 研究成果

(1) 研究A(実験)

図5に遮水性の経時変化を示す。これによ
 れば、水セメント比が50%の無塗布の場
 合と比較した場合、全てのケースにおい
 て20年が経過しても約70%以上の遮水
 性を有していることが確認できた。

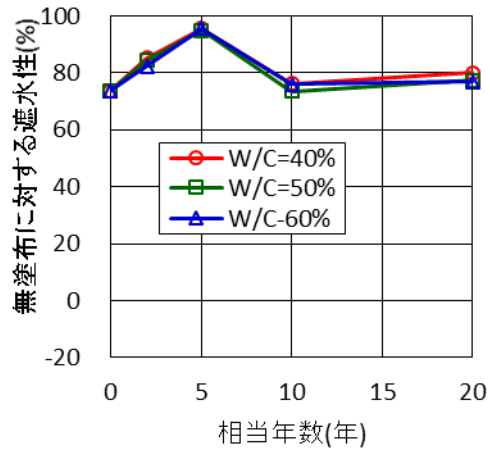


図5 紫外線環境下の遮水性の経時変化

図6に遮塩性の経時変化を示す。これによ
 れば、遮塩性は、10年から20年にかけて、
 およそ30%まで低下することを確認でき
 た。

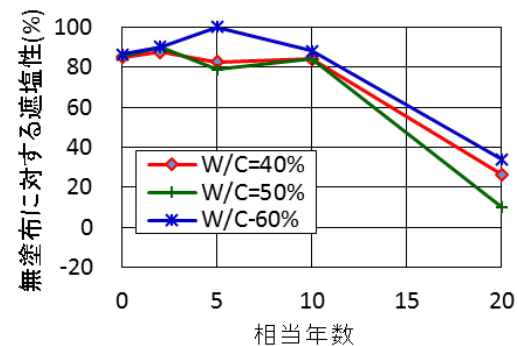


図6 紫外線環境下の遮塩性の経時変化

表3に再塗布直後の含浸深さを示す。これ
 によると、再塗布による含浸深さは7mm
 ~10mm程度になることを確認できた。
 また、表4に再塗布後の遮水性を、表5に
 再塗布後の遮塩性を示す。これらによ
 れば、再塗布により物質透過抵抗性は
 回復することを確認できた。

表3 再塗布直後の含浸深さ(mm)

W/C (%)	再塗布の時期	
	10年目	20年目
40	9.8	10.6
50	9.1	7.4
65	9.8	7.9

表4 再塗布直後の遮水性(%)

W/C (%)	再塗布の時期	
	10年目	20年目
40	23	18
50	39	20
65	21	15

表5 再塗布直後の遮塩性(%)

W/C (%)	再塗布の時期	
	10年目	20年目
40	100	100
50	100	100
65	100	100

(2)研究B(実験)

塩化物イオン濃度の分布から、Fickの拡散方程式を用いて、塩化物イオンの拡散係数を求めた。結果を図6に示す。これによれば、拡散係数は、W/Cが低いほど低減し、また型枠面より切断面において大きいことを確認できた。なお、中・高強度コンクリートでは、型枠面と切断面の拡散係数の差が小さく、低強度では差が大きくなった。塩化物イオンは、モルタル分と粗骨材間において浸透しやすい傾向があり、その粗骨材とモルタル分の一体性は、ブリーディングや収縮に起因するため、W/Cが高いLの切断面では、特に影響を受けたと考えられる。

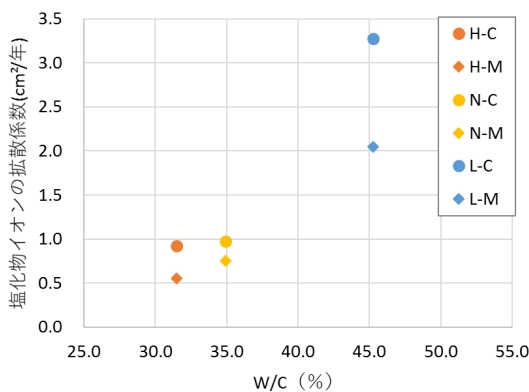


図6 塩化物イオン拡散係数とW/C

(3)研究C(実験と解析)

図7にシリーズ1およびシリーズ2のコンクリート断面におけるプレストレス力導入時と断面修復時に生じたひずみ増分分布を示す。これによれば、プレストレス力導入時には断面内の圧縮ひずみは149μと一様に作用していたが、P-0y試験体の断面修復時には、断面はつりに伴うプレストレス力の再分配により、既設部の上縁で-40μ、下縁で137μの圧縮ひずみが生じた。また、最初に補修した部分の上縁で圧縮ひずみは61μ、下縁で75μとなり、分割補修をすることで、補修部

においてもプレストレス力の再分配が生じた。一度に補修を行うP_All試験体では、補修によって既設部の上縁で-169μ、下縁で260μの圧縮ひずみが発生したのに対し、奥行き方向に2分割して断面修復を行ったP_2試験体では、既設部の上縁で圧縮ひずみが-94μ、下縁で207μとなり、断面修復を2分割することで既設コンクリートの変形が抑制された。このことから、断面はつりの分割数を増やすことでプレストレス力の再分配に伴う既設コンクリートの変形を更に抑制できるものと考えられる。以上のことから、断面修復の際に、一度にはつり出す場合は補修部のプレストレス力は解放され無応力状態となるが、段階的な断面修復を行うことによって、補修部の断面はつりに伴うプレストレス力減少の抑制ならびに、既設コンクリートへの応力増加負担を低減できることが示された。

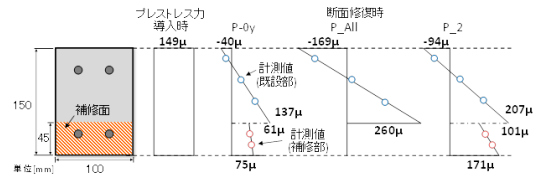


図7 コンクリート断面のひずみ分布 (圧縮が正)

図8に各試験体の破壊ひび割れ性状を示す。N試験体では、はり下縁に概ね等間隔で曲げひび割れが発生、進展し、載荷点付近のはり上縁の圧壊による曲げ引張破壊に至った。一方、C-0y試験体ではN試験体同様、概ね等間隔で曲げひび割れが発生したが、曲げひび割れがはり上縁まで達せず、PC鋼材の破断により破壊に至った。また、P-0y試験体に関しては、載荷の際に破裂音とともに荷重が低下する現象が数回観察されたのちに載荷を終了した。試験終了後に鋼材をはつり出したところ、鋼材破断が確認できなかったため、補

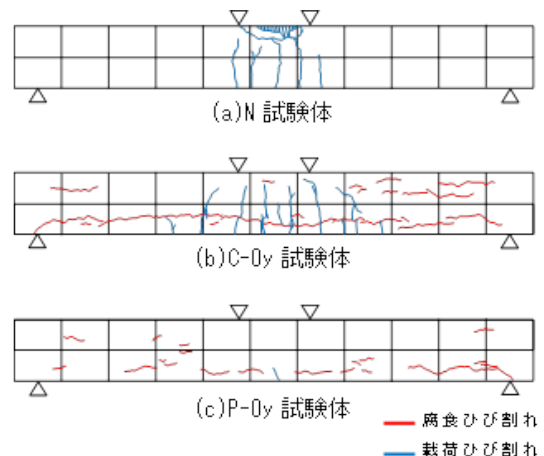


図8 ひび割れ状況(シリーズ1)

修材と鋼材のすべりが生じたものと推察される。

図9に荷重と中央変位の関係を示す。なお、図中に示す破線は曲げ耐力の計算値であり、C-0y 試験体では鋼材破断箇所における腐食率、P-0y 試験体では最大腐食率を用いて算出している。これによれば、全ての試験体において初期剛性が概ね同程度の結果となった。これは曲げひび割れ発生前は、腐食の有無にかかわらず、PC 部材が弾性体として振る舞うためである。曲げひび割れ発生後の部材剛性は、曲げひび割れ発生荷重が低下するほど小さくなる結果となった。この原因としては、腐食による鋼材比の減少のほかに、腐食ひび割れの発生による付着の低下の影響が考えられる。

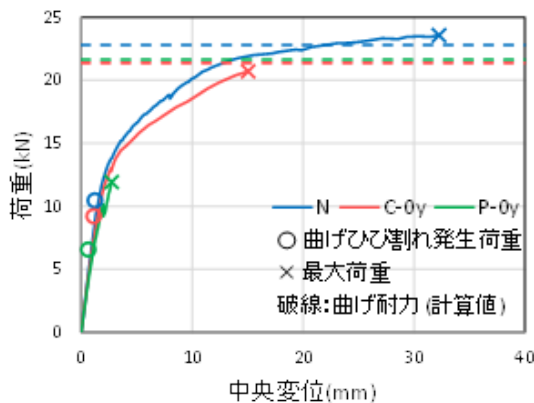


図9 荷重中央変位(シリーズ1)

図10にシリーズ1における曲げひび割れ発生荷重および最大荷重を示す。これによれば、鋼材腐食に伴い、曲げひび割れ発生荷重および曲げ耐力がともに低下していることがわかる。また、その低下量は腐食量を考慮することでおおむね計算可能であるといえる。一方、断面修復を適用すると断面修復材に導入されるプレストレス力は分割法を用いても比較的小さいことに加え、補修部での

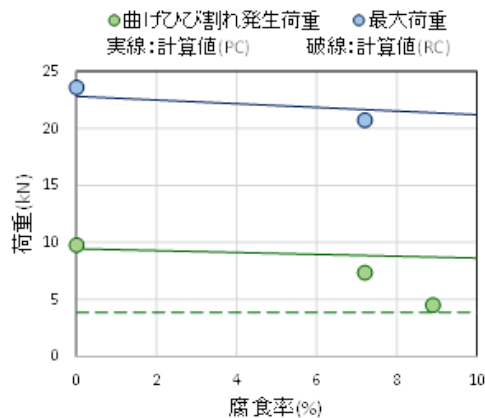


図10 曲げひび割れ発生荷重・最大荷重と質量減少率の関係(シリーズ1)

継ぎ目で曲げひび割れが発生したことから、曲げひび割れ発生荷重は顕著に低下した。しかしながら、RC 断面とした場合の計算値よりは僅かに上回っており、このことから、分割法を用いることで、一度にはつり出す場合と比べ、ある程度プレストレス力の減少を抑制できると考えられる。

さらに、解析も含めて検証した。シリーズ1およびシリーズ2の荷重-変位関係を図11、図12に示す。断面修復の無い供試体Nでは、解析における荷重-変位関係と曲げひび割れ発生荷重は実験に良く一致した。断面修復が無く腐食を有するC-0y に対しては、解析と実験の荷重-変位関係は良く一致したが、解析では破断が生じずに最大荷重時の変位を過大評価する結果となった。これは、3本より線を1断面のトラスとしたため、より線断面内の腐食の偏りによる素線1本の破断を表現できなかったためと考えられる。また、腐食を有し4段階の修復が適用されたP-0yでは、実験で破裂音の観測等により载荷を中断しており、最大荷重および破壊モードの実験値は不明である。そこで解析値を供試体Nの実験値と比べると、最大荷重は等しくなるが、第2降伏点付近の変位15mmまでは荷重-変位関係がNとC-0yの間にあり、解析結果は断面減少率に対して妥当な結果であると言える。さらに、鋼材が健全で断面修復が1段階のP_AIIと2段階のP_2の荷重-変位関係

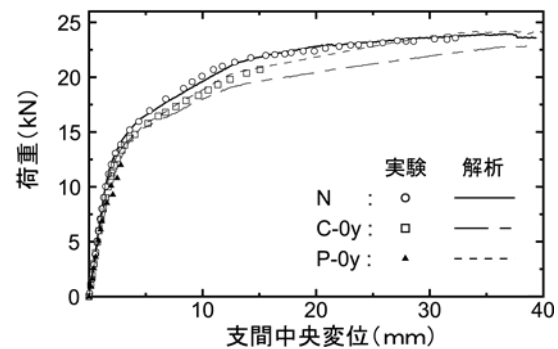


図11 荷重-変位関係(シリーズ1)

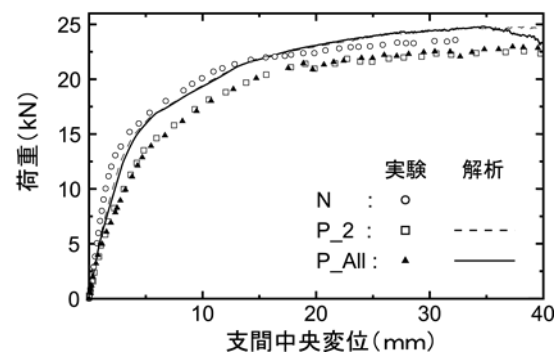


図12 荷重-変位関係(シリーズ2)

は、実験でほぼ一致しており修復段階の数の影響は見られない。解析においてもこれらの荷重-変位関係はほぼ一致し、初期剛性も断面修復無しの供試体 N に比べて低下しており、定性的に実験を検証できている。

断面修復が施された供試体のコンクリート断面ひずみ分布を図 13 に示す。実験では、支間中央から 300mm のせん断スパン内 (P-0y)、支間中央から 100mm の等曲げスパン内 (P_All、P_2) においてコンクリート表面の部材軸方向ひずみが計測されており、ほぼ同位置の解析値と比較した。いずれの計測位置も、各供試体で 1 番目の修復を行う領域 (領域) に存在する。なお、修復時のひずみ値はプレストレス導入後からの増分値である。プレストレス導入直後のひずみ分布は実験ではほぼ一様だが、P-0y の場合、腐食によるプレストレスロスのため実験値より小さくなり分布が生じる。なお、腐食の無い供試体で実験値と解析値が一致することは確認済みである。修復領域を 4 回で修復した P-0y と 2 回で修復した P_2 では、実験と同様に計測位置を修復した後に圧縮ひずみが発生しており、解析は他の領域の修復に伴う応力の再分配を検証できている。全修復工程が終了時のひずみ分布を実験と解析で比較すると、修復が 2 段階の供試体 P_2 の修復部のひずみ以外は概ね一致する結果となった。

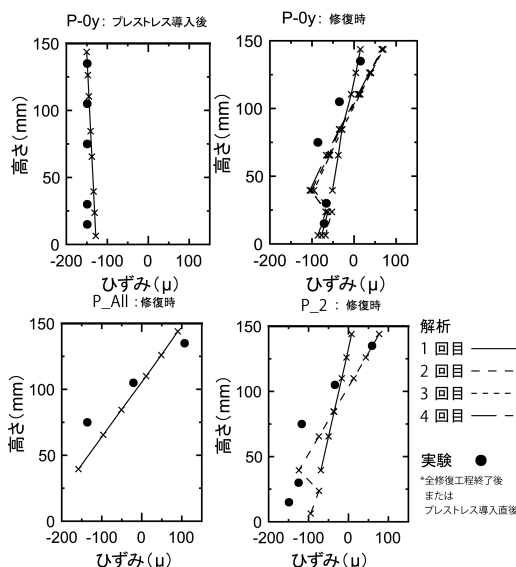


図 13 コンクリート断面ひずみ分布
(修復時はプレストレス導入後からの増分)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

高橋良輔、田中泰司、宮里心一：段階的な断面修復を施した PC はりの曲げ破壊挙動に対する非線形有限要素解析、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、16 巻、317-322、2016、査読有

番場俊介、田中泰司、下村匠：補修の有無がプレテンション PC 部材の構造性能に及ぼす影響、プレストレストコンクリート工学会第 24 回シンポジウム論文集、24 巻、729-734、2015、査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

石井一騎、宮里心一：乾湿繰返し作用がコンクリート用表面含浸材の遮塩性に及ぼす影響、土木学会中部支部研究発表会、2016、豊田工業高等専門学校 (愛知県豊田市)

宮崎悠太、宮里心一：紫外線がシラン系含浸材により予防保全されたモルタルの物質透過遮断性に及ぼす影響、第 1 回材料 WEEK 若手学生研究発表会、2015、京都テルサ (京都府京都市)

番場俊介、田中泰司：補修したプレテンション PC 部材の構造性能評価、第 70 回土木学会年次学術講演会、2015、岡山大学 (岡山県岡山市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮里 心一 (MIYAZATO, Shinichi)
金沢工業大学・環境・建築学部・教授
研究者番号：60302949

(2) 研究分担者

高橋 良輔 (TAKAHASHI, Ryosuke)
秋田大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：10371783

田中 泰司 (TANAKA, Yasushi)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：40377221

伊藤 始 (ITOU, Hajime)
富山県立大学・工学部・教授
研究者番号：10553133