

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630208

研究課題名(和文) 複数回の補修を経たコンクリート部材の性能変化と延命化限界の解明

研究課題名(英文) Performance recovery and life extension of deteriorated reinforced concrete members by repeated applications of repair

研究代表者

横田 弘 (YOKOTA, Hiroshi)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：50344312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：塩害を受けたコンクリート構造物に対して、電気化学的脱塩あるいは断面修復による補修を複数回実施し、補修による性能の回復効果およびそれに伴って副次的に生じる影響(副作用)について実験的に検討した。脱塩では、累積通電時間にほぼ比例して鉄筋近傍のセメント水和物の分子鎖の分断が生じて局所的な強度低下が生じ、それが付着性能の低下につながることを明らかにした。断面修復では、本研究の範囲では複数回の補修による悪影響は認められず、劣化部分を除去して短繊維を混入した高耐久モルタルを用いて断面修復を施すことで、性能がほぼ回復できることを示した。このように、延命化の限界を考慮した補修計画の立案に貢献できる成果を導いた。

研究成果の概要(英文)：This research focused on the performance recovery and life extension of deteriorated concrete members with repeated applications of electrochemical chloride extraction or section repair using fiber reinforced polymer cement mortar. These repair techniques are applicable for performance recovery, but may simultaneously provide detrimental effects on the micro structure of cement hydrate products. It was found from this experimental study that the repeated applications are beneficial for performance recovery and the detrimental effects are not so severely significant as those provided by the single application. Accordingly, it was concluded that the multiple applications of repair may have some limitations to realize the life extension because they accumulate local damages in cement hydration products.

研究分野：維持管理工学

キーワード：維持管理 補修 延命化技術 再劣化 構造性能

## 1. 研究開始当初の背景

中央自動車道笹子トンネルでの天井板崩落事故を契機に社会基盤施設の維持管理の確実な実施が求められている。その一環として、国土交通省は、「社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置」をとりまとめ、平成 25 年を社会資本のメンテナンス元年と位置付け、種々の行政施策を進めてきた。その要点は、施設の定期的な点検を義務付け、不具合を早期に把握して予防保全的な措置を行うことにある。そして、膨大な社会基盤施設のストックに対して、その機能および性能を維持してできる限りの延命化を図り、老朽化した施設の更新に必要なコストの縮減を図ることも求めている。

効率的な延命化のためには、劣化や変状が軽微な段階で予防的な補修を繰り返すことが必要である。概念的には、補修を繰り返すことで施設の物理的な寿命が永久的に伸びることにはなるが、はたしてそれは本当であろうか。人間が病気になって薬を処方された場合、病気そのものへの効果はあるが、同時に程度の差はあれ副作用が必ずある。社会基盤施設でも同様で、補修により生じる副作用が補修そのものの効果を打ち消し、複数回の補修を継続しても延命化がまったく期待できない事態に陥ることが懸念される。つまり、補修を繰り返すことによる延命化には限界があることが想定される。これまで実施されている研究は、1 回限りの補修で得られる効果や補修後の効果の持続性に関するものがほとんどであるため、補修を繰り返し行うことの影響について明らかにする必要がある。そのことが、社会基盤施設の延命化を目的とする補修計画の立案に有用であるとともに、補修効果を確実にするための補修設計・施工法の検討においても不可欠となる。

## 2. 研究の目的

本研究は、社会基盤施設の代表であるコンクリート構造物において、塩化物イオンによって内部鉄筋の腐食が生じて性能が失われていく劣化現象である「塩害」を対象とする。塩害の進行程度に応じて繰り返して補修を行い、それによる性能回復効果（補修効果）とともに、同時に生じると考えられる副作用の程度を明らかにする。そして、副作用によって補修の効果が得られにくくなる補修の限界、つまり延命化の限界について考察することを研究の目的とする。

コンクリートの塩害を対象とした補修には多種多様な方法が用いられているが、本研究では、次の代表的な 2 種類の補修工法を抽出し、詳細に検討する。

### (1) 脱塩による補修

コンクリート構造物内部の鉄筋を陰極、外部に設置した溶液を陽極として直流電流を通電し、電気的駆動力によって陰イオンである塩化物イオンを外部に排出し、塩害の進行

を抑制する。

### (2) 断面修復による補修

劣化した部分を除去し、その後にポリマーセメントモルタル（コンクリート）等の高耐久な材料を用いて埋め戻し、構造物の断面を修復することで、塩害によって低下した構造物の耐荷力等の力学性能を回復させる。

このように、最終的には、塩害に対する補修を繰り返すことの性能回復効果への限界を具体的に提示することで、施設のライフサイクルマネジメントの合理的な運用に資する情報を提供し、より効果的・合理的な維持管理社会の実現に貢献するための端緒とすることも目的とする。

## 3. 研究の方法

研究では、モルタルあるいはコンクリート製の試験体を対象とした実験により、補修効果を定量化した。脱塩と断面修復では両者を補修の適用時期や目的が異なるため、それぞれで最適の実験プログラムを立案し、研究を進めた。

### (1) 脱塩による補修

脱塩の目的は、内部の塩化物イオンを除去し、鉄筋が腐食することを防ぐことである。そのため、補修効果としては除去できる塩化物イオン量、副作用としてはセメント水和物への局所的な影響およびそれに伴う力学特性の低下に着目して実験を行った。

セメント水和物への影響については、水セメント比 0.4 および 0.5 のモルタルおよびコンクリートに異なる濃度の塩化物イオンを含有させた後、電流密度を 1.0 あるいは 2.0A/m<sup>2</sup> の 2 水準に設定して直流電流を通電した。通電時間は最大で 2 か月とした。また、2 か月間継続的に電流を付与した場合と、1 か月の通電後に 2 週間の乾混練返しによって塩化物イオンを再度試験体に浸入させて、さらに 1 か月の通電を行った場合を比較して考察した。これ以外にも通電と休止の時間の組合せを複数変化させたケースも検討した。

力学特性の低下については、コンクリートを用いて 100mm × 100mm × 100mm の立方体試験体を作製し、断面の中央に直径 10mm の異形鉄筋を埋め込むことで、鉄筋コンクリート部材を再現した。実験では、所定の脱塩処理の後に、セメント水和物の物理化学的性状の変化、およびコンクリート構造物としての力学性能の変化について詳細な分析を行った。試験項目は、排出した、あるいはコンクリート中に残存する塩化物イオンの量の測定、アルカリ量の測定、XRD (X 線回折) EDS (エネルギー分散 X 線分光法)、TG-DTA (示差熱重量同時測定法) によるセメント水和物の同定、Vickers 硬さ測定による水和物の硬度（緻密さ）の評価、引き抜き試験による鉄筋とコンクリート間の付着性状の評価を行い、補修工法の効果と同時にもたらされる副作用の影

響について明らかにすることを試みた。

## (2) 断面修復による補修

断面修復の目的は、鉄筋腐食によって構造物の性能（耐荷力や変形量）等がある程度低下した段階で、これら劣化部を除去し新たに断面を修復して喪失した性能を回復させるものである。そのため、性能の低下量と回復量を定量化することを目的として実験を行った。

幅 100mm、高さ 150mm、長さ 900mm の鉄筋コンクリートはりを作製し、直径 10mm の異形棒鋼 2 本を主鉄筋として、また直径 6mm の異形棒鋼をせん断補強鉄筋として 90mm 間隔で配置した。研究期間の制約から、この研究では電気化学的に鉄筋腐食を促進させる手法（電食法）を採用し、所定の鉄筋腐食が生じるまで、直流電流を通電した。したがって、自然に生じる鉄筋腐食との相違について今後検討を進める必要がある。目標とする腐食量は、腐食による鉄筋質量減少量（断面積減少量と等価）で、腐食レベル A が 0（健全）、腐食レベル B が 10%以下、腐食レベル C が 18%以下、腐食レベル D が 25%以下となるように設定した。

その後、母材のコンクリートを表面より 10mm の深さ（鉄筋かぶりの約 1/2）まで、主鉄筋がほぼ完全に露出するまで、主鉄筋を超えてさらに 20mm の深さまで除去し、母材コンクリートとほぼ同程度の圧縮強度のポリマーセメントモルタル（PCM）を除去部分に吹付けることで断面修復した。今回は腐食した鉄筋を交換せず、鉄筋とコンクリートの付着低下をある程度補償する目的で短繊維を混入した PCM を用いた。用いた PCM は 3 種類で、NF（短繊維なし）、PE（長さ 9mm のポリエチレン短繊維）、RN（長さ 20mm のリサイクルナイロン短繊維）とした。いずれの短繊維も予備実験で得られた最適分量を混入した。所定の補修を行った後、4 点曲げ荷重試験を行い、荷重 - 変形関係等を測定した。

## 4. 研究成果

### (1) 脱塩による補修

図-1 に結果の一例を示すように、脱塩を行うことにより、全塩化物イオンおよび可溶性塩化物イオンのいずれも顕著に低減されることが確認された。同図では 3 通りの方法で脱塩を行っているが、脱塩を行っていない休止期間に外部からの塩化物イオンの浸入はない。このように、連続して電流を付加するよりも、空白期間を設けて断続的に実施する方が同じ印加電流量で比較すると脱塩の効果が高いという結果が得られた。また、脱塩効果は、初期にコンクリート中に含まれる塩化物イオン量および電流密度により大きな違いが生じることも明らかになった。

図-2 は、脱塩を 2 回実施した結果除去された塩化物イオン量を示している。実験では、約 1 か月の休止期間中に外部から再度コンク

リート中に塩化物イオンを浸入させたが、どのくらいの量が浸入したかは計測できていない。しかし、個別に実施した他の実験結果を考慮すると、2 回の脱塩で鉄筋近傍の塩化物イオンの 45 ~ 70% を除去することが可能であった。

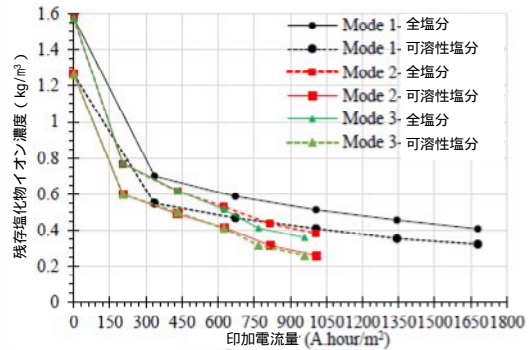


図-1 鉄筋近傍位置での塩化物イオン濃度と印加電流量の関係 (Mode 1: 連続通電、Mode 2: 5 日通電+2 日休止、Mode 3: 2 日通電+2 日休止)

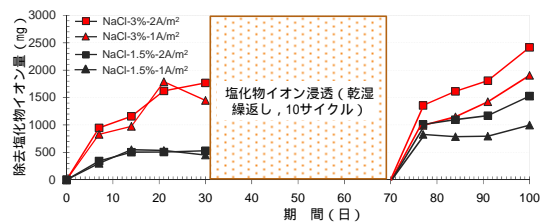


図-2 2 回の脱塩処理による除去塩化物イオン量の経時変化

脱塩によって電流が印加されることによる各種セメント水和物、特に C-S-H（カルシウムシリケート化合物）への影響について新たな知見を得た。普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュセメントでは脱塩処理時間にほぼ比例して Portlandite（ポルトランドライト；水酸化カルシウム鉱物）の量が增大した。また、脱塩処理が終了して少しの間不安定なゲル相が生じることも確認できた。さらに、脱塩において多かれ少なかれ C-S-H の変質と分断が避けられず、C-S-H 鎖の分断は、脱塩処理時間におおむね比例して生じることも明らかになった。これらのことから、脱塩の効果を保ちつつ電流あるいは印加電流量を低減し、後述する副作用を低減できる可能性があることが分かった。印加電流量を減らす方法として、断続的に電流を付与方法の有効性について、電流印加時間と電流停止時間の組合せを因子として検討した。その結果、断続的な脱塩処理は、印加電流量を同じとする連続脱塩処理に比べて塩化物イオン除去により大きな効果を有し、累積印加電流量が 800 ~ 900 A·h/m<sup>2</sup> を超えるとセメント固化体は不安定となり、C-S-H 鎖の分断が始まるという結果が得られた。図-3 は深さ 2 ~ 3 cm の位置での Portlandite 量の印

加電流ごとの変化を示したものであるが、他の箇所と異なり、この位置では脱塩により Portlandite 量の減少が認められた。これは上述の理由による。このように、複数回の脱塩は、1 回だけの脱塩を長期間実施するよりも、短期間の脱塩を繰り返すことで副作用をある程度抑えることができる。これらを基に、脱塩期間を3ステージに分割し、各ステージで最適と考えられる電流付与と電流遮断の日数の目安を提示し、これを繰り返すことで副作用の少ない脱塩処理を可能とする方法を提案した。

一方、脱塩を繰り返すことで鉄筋（陰極）近傍でのアルカリイオンの濃度が高くなり、将来アルカリシリカ反応による劣化を助長する危険性があることも明らかにした。また、鉄筋付近のセメント水和物では、Vickers 硬さが著しく低下した（図-4）。したがって、複数回の脱塩処理の実施により、鉄筋付近ではセメント水和物の組織が乱れ、組織の緻密化が損なわれる可能性が高いことが分かった。

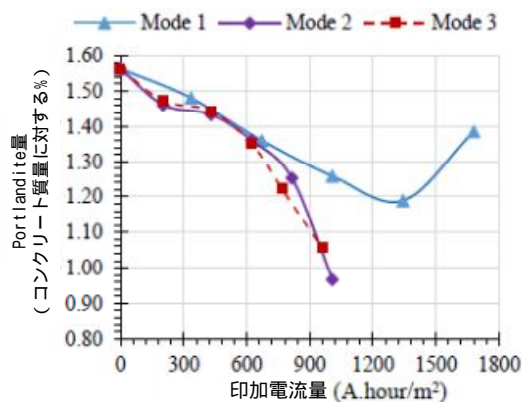


図-3 印加電流量と Portlandite 量の関係

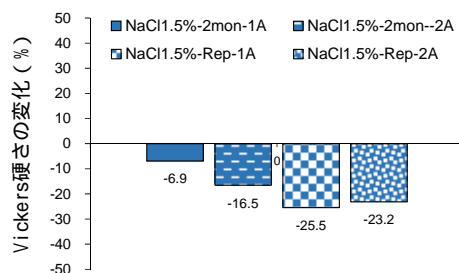


図-4 鉄筋位置近傍での Vickers 硬さの変化

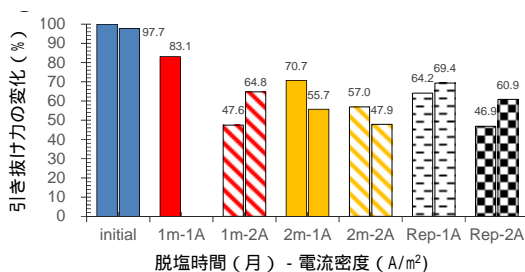


図-5 鉄筋のコンクリートからの引き抜け力（付着力）の低下

セメント水和物の緻密化が損なわれることにより、鉄筋とコンクリートの付着性状に影響が出ることが懸念される。図-5は、鉄筋のコンクリートからの引き抜け力（付着力）を示すが、50%程度にまで付着力が低減している。これは、構造物の耐荷力等に大きな影響を与えることになり、脱塩の大きな副作用として懸念すべきことであろう。

脱塩処理を繰り返すことで、鉄筋位置近傍のセメント水和物の組織構造が乱れ、C-S-Hが分解し、水和物の緻密さが損なわれる傾向があることが明らかになった。これに対して、脱塩処理を一度に時間をかけて実施するよりも、同時間を複数回に分割して実施することで塩化物イオン除去効果が高く、セメント水和物への影響も小さくできるということを明らかにした。この分割処理は、今回新たに得られた知見である。しかし、影響を低減できたとしてもいくらかの副作用は蓄積することになる。そして、複数回の脱塩処理を繰り返すことによる延命化には限界が存在すると結論づけられる。

## (2) 断面修復による補修

腐食レベル A~D の塩害を再現した鉄筋コンクリートはり試験体に所定の補修法を適用して得られた耐荷力を図-6に示す。この図は、健全な試験体（腐食レベル A、補修なし）の耐荷力と比較した耐荷力の変化を示している。腐食レベルが B、C、D と進行するにつれて、耐荷力は 3.4%、11.1%、27.6% 低下した。これに対して断面修復補修を施した場合、健全な試験体に PE を適用すると耐荷力は約 11% 回復した。実際にはこのような補修は行われることは少ないが、PE-PCM にはこの程度の耐荷力回復効果が期待できると考えられる。腐食レベル B ではどの補修方法でもおおむね耐荷力は健全な状態を維持するか、約 9% 耐荷力の向上が認められる結果が得られた。しかし、腐食レベル C では RN を除いて補修の効果はほとんど期待できず、腐食レベル D でも同様にすべての場合で補修効果が期待できないという結果が得られた。

今回の研究では、腐食が進行した鉄筋を取り換えていないために、事前の予想どおり、このような結果が得られたわけである。しかし、鉄筋の腐食による質量減少が 10% 程度以下の場合には、鉄筋を交換しなくても、かぶり部分を完全に除去して短繊維補強 PCM を補修材として適用することで性能回復の効果が得られることが分かった。また、かぶりの半分程度を除去した場合でも、PE 短繊維混入 PCM では短期的な力学性能回復効果が期待できる場合もある。一方、鉄筋腐食量が 18% を超える場合には、このような補修を施しても力学性能が回復しない。言い換えれば、このような工法で補修を行う場合には、腐食レベルが B の範囲内で実施することが、補修効果を確実にするために不可欠であることが結論づけられる。

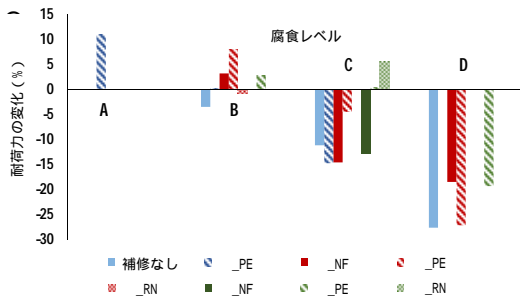


図-6 補修による耐荷力の変化

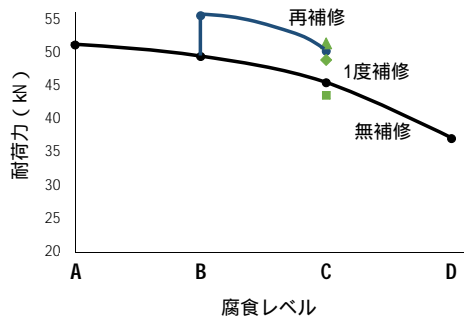


図-7 複数回の補修による耐荷力回復効果

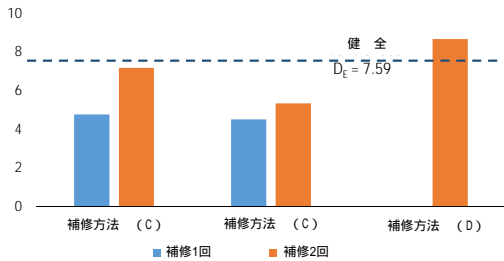


図-8 エネルギー吸収能力の比較

図-7 は、PE-PCM を用いて補修を行った場合の、補修による耐荷力の変化を示す。黒い実線で示す「無補修」は、各腐食レベルに対応する残存耐荷力であり、腐食が顕著になるにつれて、耐荷力が失われている。ここで、腐食レベルBまで腐食が進行した後、所定の方法で補修を行い、再度腐食レベルCまで腐食を進行させた結果を示している。緑色のマーカーは、腐食レベルCに到達した際にここで初めて3通りの方法で補修を行った場合の耐力の変化を示している。結果を見る限りにおいて、複数回の補修による大きな影響は見いだせなかった。鉄筋の腐食は、周辺コンクリートの性質によって影響を受けることが知られており、一度補修を施した後に再度腐食が進行した場合には、コンクリートの状態が新規の状況とは異なっていることから、鉄筋の腐食がより一様に進行することが想定され、耐荷力に与える悪影響も緩和される傾向にある。このことと、補修によるわずかな局所的ダメージが相殺され、はりの耐荷力に大きく差異が生じなかったものと考えている。

図-8 に示すエネルギー吸収能力は補修を2回施した方が大きくなっており、上述の影響

がより顕著に現れたものと言える。

以上のように、補修後に再劣化して補修前と同等の腐食レベルを示す場合には、ほぼ同程度の力学性能が得られることが確認され、複数回の補修による性能回復効果および延命化の限界を見出すことはできなかった。実験で用いた促進劣化の状況下では、複数回の補修による悪影響は認められなかったが、実際の塩害のように外部から塩化物イオンが浸入して腐食が進行するような場合においても同様の結果が得られるのかということについて、今後検証していく必要がある。また、劣化部分を除去して断面修復を施す場合には、かぶり部分の除去の程度に応じて補修効果が変化する結果となり、補修計画の際に検討すべきことである。

また今回の研究を通して、リサイクルナイロン繊維（廃棄漁網をリサイクルした短繊維）を断面修復材の一部として活用できる可能性があることが分かり、従来他の合成繊維を用いる場合に比べてより高い変形性能を期待できる場合があることが始めて明らかとなった。さらにリサイクルナイロン繊維の活用方策について、新たに科学研究費にて研究を展開していく予定である。

### (3) まとめ

今回実施した研究の範囲で、補修工法によっては複数回繰り返すことで補修による悪影響（副作用）が局所的に蓄積し、そのことで性能回復効果が徐々に消失し、延命化に限界が現れてくる可能性が高いことがわかった。今後さらに検討パラメータを増やして、検討を進めていく必要がある。また、新たな補修材料の可能性についても今回見い出せたので、これについても研究を展開していくことにしている。

### 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 5件)

S. Orasutthikul, D. Unno & H. Yokota: Effectiveness of recycled nylon fiber from waste fishing net with respect to fiber reinforced mortar, Construction and Building Materials, 146, 2017, 594-602, 査読有, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.134

S. Orasutthikul, D. Unno, H. Yokota & K. Hashimoto: Effectiveness of recycled nylon fibers as reinforcing material in mortar, Journal of Asian Concrete Federation, 2(2), 2016, 102-109, 査読有, DOI: 10.18702/acf.2016.12.2.2.102

海野太貴, S. Orasutthikul, 横田弘, 橋本勝文: 漁網を利用したリサイクルナイロン繊維のモルタル補強材としての

有効性, コンクリート工学年次論文集, 38(1), 2016, 1857-1862, 査読有.

V. Chheang, T.H.Y. Nguyen, H. Yokota & K. Hashimoto: Physical and chemical changes of mortar induced by repeated electrochemical chloride extraction, Cement Science and Concrete Technology, 69, 2016, 403-410, 査読有, DOI: 10.14250/cement.69.403  
T.H.Y. Nguyen, H. Yokota & K. Hashimoto: Effects of electrochemical chloride extraction on hydrated products of various cement paste systems, Journal of Advanced Concrete Technology, 13, 2015, 564-582, 査読有, DOI: 10.3151/jact.13.564

[学会発表](計14件)

T.H.Y. Nguyen: Effects of electrical current application on calcium silicate hydration in various cement pastes, 7th International Conference of Asian Concrete Federation, 2016年11月1日, Hanoi (Vietnam).

海野太貴: 混入条件の違いによるリサイクルナイロン繊維のモルタル補強効果に関する検討, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016年9月7日, 東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市).

S. Orasutthikul: Effectiveness of recycled nylon fibers in mortar comparing with recycled PET and PVA fibers, 4th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, SCMT 4, 2016年8月8日, Las Vegas (USA).

T.H.Y. Nguyen: Efficiency of chloride extraction from reinforced concrete with intermittent applications, 2nd International Conference on Concrete Sustainability, ICCS 16, 2016年6月13日, Madrid (Spain).

T.H.Y. Nguyen: Effects of electrochemical chloride extraction on microstructure of various cement paste systems, 4th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2015, 2015年10月5日, Leipzig (Germany).

T.H.Y. Nguyen: The alteration of cement products due to the application of electrochemical chloride extraction, 5th International Conference on Construction Materials, 2015年8月19日, Whistler (Canada).

V. Chheang: Physical and chemical changes of mortar induced by repeated electrochemical chloride extraction, 第69回セメント技術大会, 2015年5月

12日, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)

[その他]

ホームページ等

<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/lifetime/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横田 弘 (YOKOTA, Hiroshi)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 50344312

(2) 研究分担者

橋本 勝文 (HASHIMOTO, Katsufumi)  
京都大学・大学院工学研究科・特定講師  
研究者番号: 30609748

(3) 連携研究者

佐藤 靖彦 (SATO, Yasuhiko)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 60261327