

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：35403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820241

研究課題名(和文) 透水・脱水工法を行ったコンクリートの中性化予測モデルに関する基礎的研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on Carbonation Prediction Model of Concrete by Dewatering Methods

研究代表者

坂本 英輔 (SAKAMOTO, Eisuke)

広島工業大学・工学部・助教

研究者番号：40583539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、真空脱水処理コンクリートおよび透水性型枠コンクリートそれぞれについて実大供試体を作製し、そこから採取した 50mmコア供試体を用いて、密度試験、圧縮強度試験、配合推定および促進中性化試験を行った。その結果、真空脱水処理コンクリートおよび透水性型枠コンクリートそれぞれについて、密度分布、圧縮強度分布、推定水セメント比分布および中性化特性を把握するとともに、推定水セメント比と中性化速度係数との間には強い相関関係があることを明らかにすることにより、中性化予測モデルを構築できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the large size specimens for each of the vacuum dewatered concrete and the concrete using permeable form were manufactured. And the density test, the compressive strength test, the estimation of mix proportion and the accelerated carbonation test were carried out using the 50mm core specimens obtained from each the large size specimen. As a result, the density distribution, the compressive strength distribution, the estimated water cement ratio and the carbonation properties for each of the vacuum dewatered concrete and the concrete using permeable form were clarified. Also the possibility of constructing the carbonation prediction model of concrete by dewatering methods was shown by clarifying that the estimated water cement ratio has a high correlation with the carbonation rate ratio.

研究分野：工学

キーワード：コンクリート 水セメント比 真空脱水処理工法 透水性型枠工法 促進中性化試験

1. 研究開始当初の背景

近年、産業廃棄物や地球温暖化をはじめとした様々な環境問題、少子・高齢化や経済の減速傾向に伴う社会資本に対する投資の減退といった社会問題が起こっている。このような地球規模での環境・社会問題を背景に、現在、建築・土木構造物の主要な構造材料として広く利用されている鉄筋コンクリートに関しては、高耐久な鉄筋コンクリート構造物に対する要求が高まっている。日本建築学会 JASS5 では、コンクリート構造物の計画供用期間の級に応じて耐久設計基準強度を定めることにより、コンクリートの耐久性を確保している。その耐久設計基準強度の策定にあたり、信頼設計に基づいて所要の中性化速度係数を求め、それに対応する所要の水セメント比を和泉式により求めて耐久設計基準強度が定められた経緯^①があることから、コンクリートの中性化特性を把握することは重要であるといえる。

一方、通常のコンクリートでは、従来と変わらず十分なワーカビリティを得るといふ施工上の要求からある一定の単位水量が必要となり、セメントの水和反応に必要な水量以上の水（余剰水）を使用している。この余剰水は、コンクリートの表面・内部強度の低下、乾燥収縮の増大、耐久性の低下など、コンクリートの性能を低下させる要因の一つとなっている。この問題を解決するために、施工時にコンクリート内部の欠陥となる余剰水の挙動を制御し、余剰水を人為的にある方向へある量だけ抜く、真空脱水処理工法、透水性型枠工法などの透水・脱水工法が提案・実用されている。同工法によって得られるコンクリートは、透水・脱水面からの品質改善効果が連続的に変化し、最も耐久性が必要である表層での品質改善効果が最大となることから、材料の持つ潜在能力を最大限に活かし切ることが可能であり、生産効率と環境負荷を考慮すれば極めて有効な手法であるといえる。畑中ら（応募者を含む）^②は、真空脱水コンクリートの圧縮強度分布と密度分布の間に相関性が見られることに着目し、土質工学で用いられる圧密理論をフレッシュコンクリートに適用して、真空脱水処理による品質改善効果を定量的に推定する手法を提案し、一連の基礎実験によって例証している。その後、応募者は、真空脱水コンクリートのみではなく、各種透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムを系統的に捉えるための統一化理論の構築を目指し、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性の解明、およびこれに基づいた各種透水・脱水工法による品質改善効果の推定手法の提案を試み、改良型透水・脱水モデルを提案した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、透水・脱水工法を行ったコンクリートについて、これまでに応募者が

提案した改良型透水・脱水モデル^③を拡張し、その中性化を予測するモデルを構築することである。コンクリートの中性化については、国内外で数多くの研究が行われているが、透水・脱水コンクリートに関する報告は少なく、その予測モデルに関してはほとんどない。そこで、応募者がこれまでに提案した、コンクリートの圧密特性に着目した改良型透水・脱水モデルを拡張し、中性化の予測モデルを提案する。

3. 研究の方法

(1) 真空脱水処理コンクリート

要因と実験水準およびコンクリートの調合表を、それぞれ表1および表2に示す。図1に供試体の概要を示す。実大供試体は、510×510×高さ310mmのプラスチック製型枠にコンクリートを打ち込んで作製した。コンクリートの練り混ぜには、強制二軸ミキサを用いた。いずれの実大供試体も、1層で打込み、棒状バイブレータを用いて、10秒間締固めを行った。真空脱水処理を行う供試体については、ブリーディングほぼ終了時に、5分間の真空脱水処理を行った。また、実大供試体打込み時に、促進中性化試験に一般的に用いられる100×100×400mmの角柱供試体も作製した。すべての実大供試体を材齢3日で脱型した後、材齢28日まで養生水槽で水中養生とした。

材齢28日で実大供試体を養生水槽から取り出し、コアドリルを用いて実大供試体1体につき、合計25本のコア供試体（φ50×180mm）を採取した。既往の研究によれば、真空脱水処理による品質改善効果（反発度や圧縮強度など）は、脱水マットの端部まで及ぶが、脱水口から離れると効果が減少する場合もあることが明らかになっている。そこで、各水準のコア供試体の脱水口からの距離の合計がおおよそ同じになるように、コア採取位置を決めた（図1(b)参照）。なお、採取後のコア供試体は、20℃の気中養生とした。

密度・圧縮強度試験用のコア供試体は、材齢28日でコンクリートカッターを用いて長さ50mmの上中下層の3層にカットし、カット面を研磨してφ50×50mmコア供試体に整形した。材齢56日でφ50×50mmコア供試体の、気中質量、直径および長さを計測し、密度を算出した後、圧縮強度試験を実施した。圧縮強度はh/dの補正を行った。

促進中性化試験用のコア供試体は、材齢52～55日の間に、打ち込み面以外をエポキシ樹脂でシールした。材齢56日で温度20±2℃、相対湿度60±5%、CO₂濃度5±0.2%の環境条件の促進中性化試験装置に入れ、促進中性化試験を行った。促進中性化開始後の材齢が、1、4、12、24、36および48週で該当のコア供試体を取り出して割裂し、割裂面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。

水セメント比分析用のコア供試体は、上層

から3mmずつ3層にスライスした。各層の表乾質量、絶乾質量、容積を計測した後、105 μ フルイを全通する程度に微粉碎し、セメント協会法による硬化コンクリートの配合推定に準拠し、配合推定を行った。

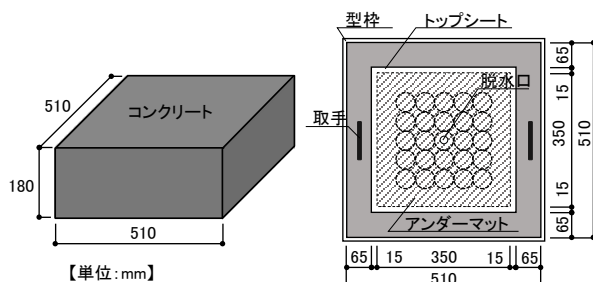
表1 要因と実験水準(真空脱水処理)

要因	実験水準
真空脱水処理	有, 無(無処理)
水セメント比 (%)	50, 60, 70

表2 調合表

W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	目標値		単位質量(kg/m ³)			
			SL (cm)	Air (%)	W	C	S	G
50					168	337		
60	50	13	18.0	4.0	180	300	894	928
70					189	271		

[註] W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, G_{max}: 粗骨材の最大寸法, SL: スランブ, Air: 空気量, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材



(a) 実大供試体



(b) コア供試体の採取位置

図1 供試体の概要(真空脱水処理)

(2) 透水性型枠コンクリート

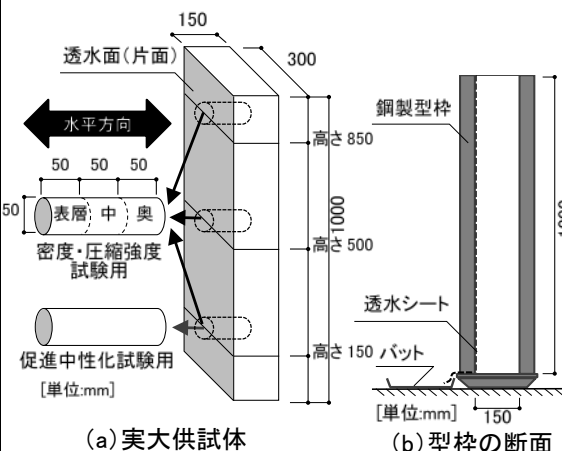
表3に要因と実験水準を示す。なお、コンクリートの調合は表2と同様である。

図2に供試体の概要を示す。図2(a)に示すとおり、実大供試体の寸法は、幅300×高さ150×高さ1000mmの壁状とし、型枠には鋼製型枠を用いた。透水性型枠を使用した実大供試体については、透水シートを1面に貼付した(図2(b)参照)。透水性型枠からの排水は型枠最下部のみとし、それ以外の型枠接合部はシリコン樹脂にて漏水防止を施した。また、実大供試体打込み時に、促進中性化試験に一般的に用いられる100×100×400mmの角柱供試体も作製した。

コンクリートの練り混ぜには、強制二軸ミ

表3 要因と実験水準(透水性型枠)

要因	実験水準
透水性型枠	有, 無(無処理)
水セメント比 (%)	50, 60, 70



(a) 実大供試体

(b) 型枠の断面

φ50×150mm コア供試体



(c) コア供試体の採取位置

図2 供試体の概要(透水性型枠)

キサを用いた。いずれの実大供試体も、コンクリートを鋼製型枠に2層で打込み、棒状バイブレータを用いて、高さ約250mm、500mmおよび750mmの位置で12秒間締め固めを行った。

材齢3日で脱型した後、材齢28日まで養生水槽で水中養生とした。材齢23~28日の間に、図2(a)および図2(c)に示すとおり、実大供試体の高さ150mmの位置で水平方向に、密度・圧縮強度試験用3本、水セメント比分析用4本、促進中性化試験用18本(6材齢×3本ずつ)の合計25本のコア供試体(φ50×長さ150mm)をコアドリルを用いて採取した。また、実大供試体の高さ500mmおよび850mmの位置では、それぞれ密度・圧縮強度試験用3本および水セメント比分析用4本を採取した。なお、各水準でのコア供試体の採取位置の影響を除くため、各試験に用いるコア供試体は図2(c)に示す位置とした。

密度・圧縮強度試験の手順は、真空脱水処理工法と同様である。

促進中性化試験用のコア供試体は、材齢51~53日の間に、型枠の一方あるいは透水性型枠面以外をエポキシ樹脂でシールした。促進中性化試験の材齢が4週、12週および24週(36週、48週および64週は今後実施予定)に真空脱水処理工法と同様に中性化深さを

測定した。

水セメント比分析の手順は、真空脱水処理工法と同様である。

4. 研究成果

(1) 密度および圧縮強度分布

①真空脱水処理コンクリート

図3に、 $\phi 50 \times 50 \text{mm}$ コア供試体の結果を示す。図3(a)の密度分布によれば、水セメント比によらず、無処理は上層ほど密度が小さくなり、真空脱水処理は上層ほど密度が大きくなっている。また、真空脱水処理の各層の密度は、無処理より大きくなっている。図3(b)の圧縮強度分布によれば、バラツキはあるものの、真空脱水処理の各層の圧縮強度は、無処理のそれより大きくなっている。この理由は、無処理はブリーディング現象の影響で上層ほど密度が小さくなるとともに、水セメント比が大きくなり、硬化後の圧縮強度が低下する。それに対し、真空脱水処理では、圧密現象により余剰水が絞り出されることにより密度が大きくなるとともに、水セメント比が低下するため、圧縮強度が大きくなると考えられる。

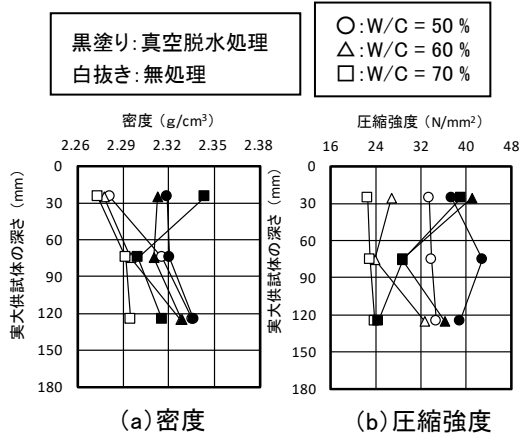


図3 強度分布(真空脱水処理)

②透水性型枠コンクリート

図4に、 $\phi 50 \times 50 \text{mm}$ コア供試体の結果を示す。図4(b)の密度分布は、実大供試体の高さ150mmの位置での型枠あるいは透水性型枠からの厚さ方向への密度をプロットしている(図2(a)参照)。バラツキはあるものの、透水性型枠の密度は、概ね無処理より大きくなっている。図4(b)の圧縮強度分布によれば、水セメント比が小さいほど圧縮強度が大きくなっており、透水性型枠の圧縮強度は無処理より大きくなっている。また、水セメント比によらず、無処理と透水性型枠との圧縮強度の差は、透水性型枠近傍ほど大きくなっている。以上のような密度分布および圧縮強度分布の全体的な傾向は、透水性型枠の使用により、余剰水が排水され、透水性型枠近傍ほど、水セメント比が低下したためと考えられる。

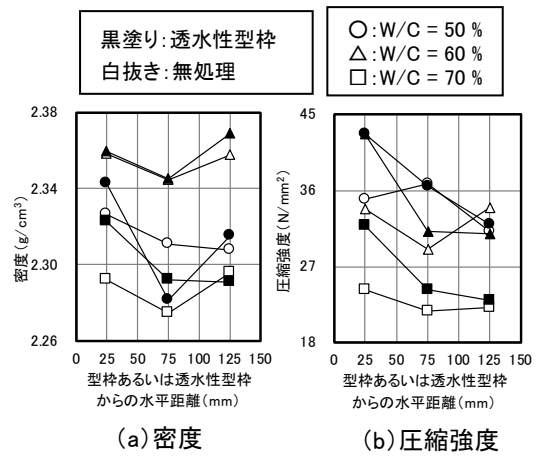


図4 強度分布(透水性型枠)

(2) 中性化深さおよび中性化速度係数

①真空脱水処理コンクリート

図5に、中性化深さと促進中性化期間の平方根の関係を示す。同図によれば、真空脱水処理の有無によらず、水セメント比が大きいほど、中性化深さは大きくなっている。また、真空脱水処理の効果に関しては、水セメント比によらず、真空脱水処理されたコア供試体の中性化深さは、無処理のそれより小さくなっている。

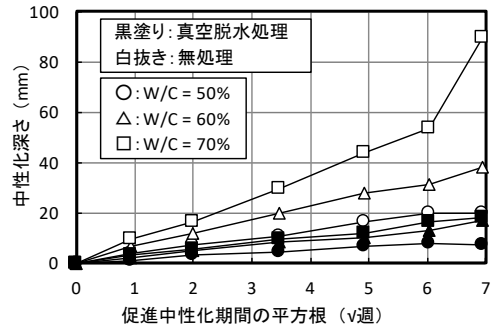


図5 中性化深さ(真空脱水処理)

図6に、真空脱水処理による品質改善効果を示す。ここでは、無処理コア供試体の中性化速度係数を真空脱水処理されたコア供試体のそれで除したものを品質改善効果と定義した。品質改善効果が1より大きいほど、真空脱水処理による改善効果が大きいことを示す。同図によれば、促進中性化期間によらず、水セメント比が大きいほど、真空脱水処理による品質改善効果が大きいことが分かる。

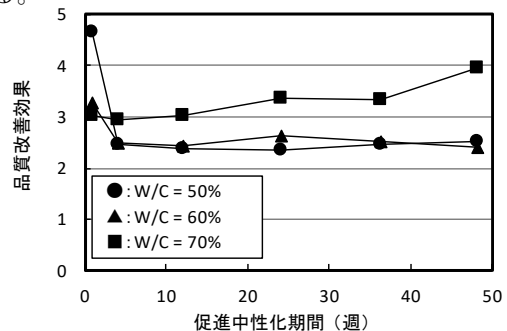


図6 真空脱水処理による品質改善効果

②透水性型枠コンクリート

図7に、中性化深さと促進中性化期間の平方根の関係を示す。透水性型枠の中性化深さは、無処理に比べて極端に小さくなっており、W/C=50%および W/C=60%では中性化していない。W/C=70%では、透水性型枠を使用した場合でも中性化しているが、促進中性化材齢24週(4.90√週)における中性化速度係数は、無処理では7.27 mm/√週、透水性型枠では0.20 mm/√週であり、品質改善効果は約36倍となった。

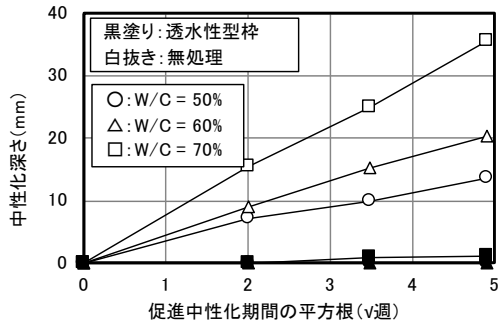


図7 中性化深さ(透水性型枠)

(3) 推定水セメント比

①真空脱水処理コンクリート

図8に、実大供試体の深さと調査推定により求めた推定水セメント比の関係を示す。真空脱水処理を行うことにより、無処理に比べて推定水セメント比が低下しており、その差は、概ね上層ほど大きくなっている。予想に反し、真空脱水における深さ方向の推定水セメント比分布は緩やかで、さらに深い位置での分析が必要であったと思われる。

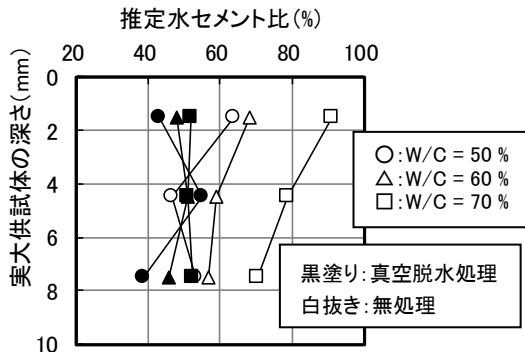


図8 推定水セメント比分布(真空脱水処理)

②透水性型枠コンクリート

図9に、実大供試体の型枠あるいは透水性型枠からの水平距離と調査推定により求めた推定水セメント比の関係を示す。透水性型枠を使用することにより、透水性型枠面直近では、水セメント比によらず、推定水セメント比が30%を下回った。また、透水性型枠と無処理の推定水セメント比の差は、概ね表層ほど大きくなっている。このことから、(2)節②における中性化深さおよび中性化速度係数における結果は、透水性型枠を使用すると、極表層部に水セメント比の極めて小さな

層が形成されたためと考えられる。

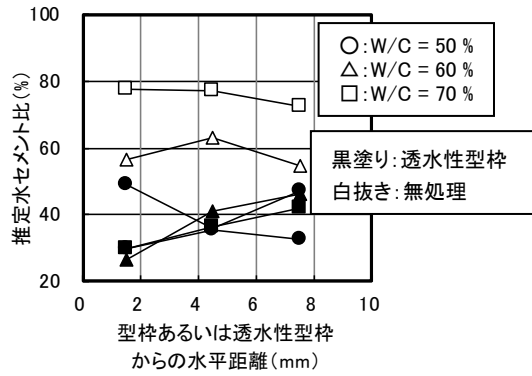


図9 推定水セメント比分布(透水性型枠)

(4) 推定水セメント比と中性化速度係数

図10に、推定水セメント比と中性化速度係数の関係を示す。同図より、真空脱水処理、透水性型枠ともに、推定水セメント比と中性化速度係数との間には強い相関関係があることが分かる。

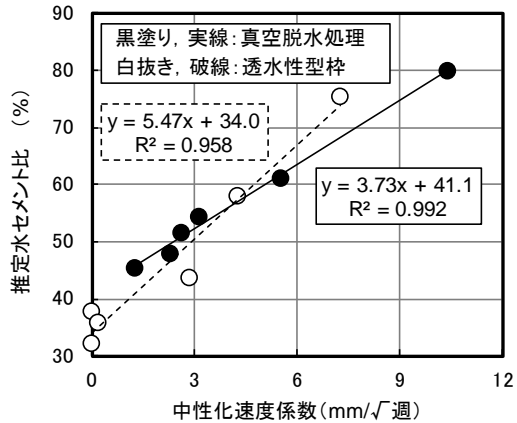


図10 推定水セメント比と中性化速度係数の関係

以上のように、現時点では、真空脱水処理においては、より深い位置での調査推定を行っていなかったこと、また透水性型枠を使用したコンクリートにおいては、水セメント比によらず、ほとんど中性化しなかったことから、中性化予測モデルを提案するに至らなかった。しかし、真空脱水処理コンクリートおよび透水性型枠コンクリートそれぞれについて、密度分布、圧縮強度分布、推定水セメント比分布および中性化特性を把握するとともに、推定水セメント比と中性化速度係数との間には強い相関関係があることを明らかにすることにより、中性化予測モデルを構築できる可能性を示した。

<引用文献>

- ①日本建築学会、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009、2009、丸善株式会社、pp.172-176
- ②畑中重光、服部宏己、坂本英輔、三島直生、圧密理論を適用した真空脱水コンクリート中の圧縮強度分布の発生メカニズムに関する

る研究、日本建築学会構造系論文集、No. 596、2005、pp. 1-8

- ③坂本英輔、畑中重光、三島直生、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、Vol. 73、No. 627、2008、pp. 693-700

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- ①信東 隆裕、坂本 英輔、透水性型枠を使用したコンクリートの圧縮強度および中性化深さに関する基礎的研究、2017年度大会(中国) 学術講演梗概集、査読無、2017、掲載決定
- ②信東 隆裕、坂本 英輔、透水性型枠を使用したコンクリートの圧縮強度および中性化深さに関する一考察、2016年度日本建築学会中国支部研究報告集、査読無、2017、pp. 33-36
- ③坂本 英輔、真空脱水コンクリートの中性化特性に関する一考察、2016年度大会(九州) 学術講演梗概集、査読無、2016、pp. 355-356
- ④坂本 英輔、真空脱水コンクリートの中性化に関する一考察、2015年度日本建築学会中国支部研究報告集、査読無、2016、pp. 21-24
- ⑤坂本 英輔、和藤 浩、三島 直生、畑中 重光、EPMAによる12年間屋外暴露された真空脱水コンクリートの面分析、2015年度大会(関東) 学術講演梗概集、査読無、2015、pp. 751-752
- ⑥坂本 英輔、和藤 浩、三島 直生、畑中 重光、12年間屋外暴露した真空脱水コンクリートの中性化特性に関する実験的研究、2014年度日本建築学会中国支部研究報告集、査読無、2015、pp. 77-80

〔学会発表〕(計5件)

- ①信東 隆裕、透水性型枠を使用したコンクリートの圧縮強度および中性化深さに関する一考察、日本建築学会中国支部、2017年3月5日、島根大学松江キャンパス(島根県・松江市)
- ②坂本 英輔、真空脱水コンクリートの中性化特性に関する一考察、日本建築学会、2016年8月25日、福岡大学大隈キャンパス(福岡県・福岡市)
- ③坂本 英輔、真空脱水コンクリートの中性化に関する一考察、日本建築学会中国支部、2016年3月6日、近畿大学工学部(広島県・東広島市)
- ④坂本 英輔、EPMAによる12年間屋外暴露された真空脱水コンクリートの面分析、日本建築学会、2015年9月4日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)
- ⑤坂本 英輔、12年間屋外暴露した真空脱水コンクリートの中性化特性に関する実験的研究、日本建築学会中国支部、2015年3月

8日、米子工業高等専門学校(鳥取県・米子市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 英輔(SAKAMOTO, Eisuke)

広島工業大学・工学部建築工学科・助教

研究者番号: 40583539