

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420555

研究課題名(和文) 促進中性化試験による混和材混入コンクリートの中性化抵抗性評価の妥当性に関する研究

研究課題名(英文) Study on the validity of accelerated carbonation test for the concrete containing mineral admixture

研究代表者

大谷 俊浩 (Otani, Toshihiro)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：00315318

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フライアッシュ(FA)および高炉スラグ微粉末(BFS)を用いたコンクリートの中性化抵抗性を適切に評価するために、養生方法および期間を変化させて促進中性化試験および細孔径分布の測定を行い、細孔構造の変化と中性化速度係数の関係について検討した。その結果、養生期間が長くなるほど、FAおよびBFSを混和することで組織がより緻密化するものの、無混和およびFAはそれに応じた中性化速度の低下を示さなかった。また、養生環境として劣悪な40℃気中養生と乾湿繰り返し養生を行ったものは、組織の粗大化による中性化速度係数の増加が認められ、BFSは置換率が高いほど中性化速度係数が増加することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this is to clarify the adequate evaluation of the carbonation resistance for the concrete containing mineral admixture such as fly-ash or blast furnace slag, the accelerated carbonation test and the pore distribution test were done by various curing periods and curing methods. As a results, the carbonation rate of plain concrete and fly-ash concrete were constant, although the pore volume become small by long curing. And the carbonation rate of every concrete was fast, in case of curing that the air dried at 40 degrees Celsius or the wet-dry-cycle. The larger the containing ratio of blast furnace slag, the faster the carbonation rate.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：中性化 フライアッシュ 高炉スラグ微粉末 強度 細孔径分布

1. 研究開始当初の背景

産業副産物である石炭火力発電所で発生するフライアッシュや製鉄所で発生する高炉スラグ微粉末は、コンクリート用混和材として利用されている。これらはそれぞれポゾラン反応と潜在水硬性を有し、ポルトランドセメントと同様に水硬性を有している。しかしながら、これらの反応は普通ポルトランドセメントに比べてゆっくりとしたものであり、長期的に組織が緻密化し、強度が増進していく特徴を有している。

コンクリートの中性化は、コンクリート構造物の耐久性を決める要素の一つである。通常、コンクリートの中性化性状は、促進試験によって評価されているが、これらのゆっくり反応する混和材を使用したコンクリートの中性化抵抗性の評価方法として、現状の促進試験が妥当であるか疑問が残る。環境問題を考えると、これらの混和材を積極的に活用しなければならないが、そのためにはこれらの混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性を的確に評価する必要がある。

2. 研究の目的

上記のように、混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性を的確に評価するには、これら混和材の反応の進行と中性化の進行の関係を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、促進中性化試験における養生方法および養生期間の違いが加熱改質フライアッシュ(以下、MFA)および高炉スラグ微粉末(以下、BFS)を混和したコンクリートの中性化抵抗性に及ぼす影響を明らかにするために、促進中性化試験、圧縮強度試験および細孔径分布の測定を行った。実験は2シリーズとし、混和材種類ごとに実験を実施した。

3. 研究の方法

(1) 使用材料および調合

表-1 および表-2 に使用材料、表-3 および表-4 に調合を示す。基準のプレーンコンクリートの調合を水セメント比(以下 W/C) 45、55および65%とした。MFAを混和した調合は、置換率を10%および20%とし、基準コンクリートと材齢28日の強度が同一となるようにMFAの強度寄与率kを0.3とした。BFSを混和した調合は、置換率をセメントの内割り置換で27%および42%とした。目標スランプ $18 \pm 2.5$ cmを得るために、AE減水剤使用量を一定とし、単位水量で調整した。また、目標空気量は $4.5 \pm 1.5$ %とし、空気量調整剤で調整した。

(2) 供試体作製および試験方法

コンクリートの練混ぜは、強制二軸ミキサを用い、60秒間行った。打設後、材齢1日で脱型を行い、それぞれの養生を開始した。

促進中性化開始までの養生方法は、20水中、40気中および乾湿繰返し養生の3条件とした。乾湿繰返し養生は、図-1に示すように、40・35%R.H.と10・99%R.H.の環境

を交互に行った。養生方法の影響については、W/C'およびW/B55%のシリーズで行った。養生期間の影響については、20水中養生で行い、養生期間を7日、28日および1年とした。

表-1 使用材料 (MFA シリーズ)

種類	記号	使用材料および物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度:3.15g/cm <sup>3</sup>
フライアッシュ	MFA	加熱改質フライアッシュ 強熱減量:0.95%、密度:2.16g/cm <sup>3</sup> 、 活性度指数:81%(28日)、91%(91日)
細骨材	S	山砂 表乾密度:2.64g/cm <sup>3</sup> 、 吸水率:2.61%
粗骨材	G	碎石 表乾密度:2.61g/cm <sup>3</sup> 、実積率: 61.2%、吸水率:0.77%

表-2 使用材料 (BFS シリーズ)

種類	記号	使用材料および物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm <sup>3</sup>
高炉スラグ微粉末	BFS	高炉スラグ微粉末 4000 密度:2.91g/cm <sup>3</sup> 、比表面積: 4180cm <sup>2</sup> /g、強熱減量:0.09%、 二酸化ケイ素:34.6%
細骨材	S	山砂 表乾密度:2.61g/cm <sup>3</sup> 、 吸水率:2.61%
粗骨材	G	碎石 表乾密度:2.64g/cm <sup>3</sup> 、実積率: 61.9%、吸水率:0.76%

表-3 調合 (MFA シリーズ)

調合	W/C (%)	W/C' (%)	MFA /B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AD (B x %)	AE (A)
				C	MFA	W	S	G		
45-0	45.0	45.0	0	404	0	182	796	898	0.90	4.0
45-20	48.5	45.0	20	375	94	182	707	898	0.90	7.0
55-0	55.0	55.0	0	333	0	183	851	898	0.25	1.5
55-10	57.0	55.0	10	316	35	180	830	898	0.25	1.5
55-20	59.2	55.0	20	301	75	178	801	898	0.25	2.5
65-0	65.0	65.0	0	285	0	185	887	898	0.25	1.0
65-20	70.0	65.0	20	256	64	179	848	898	0.25	2.0

B=C+MFA、C'=C+k×MFA、A: B×0.001%、  
AD: AE 減水剤 W/C'45%は高機能タイプを使用)、  
AE: 空気量調整剤

表-4 調合 (BFS シリーズ)

調合	W/C (%)	W/B (%)	BFS /B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AD (B x %)	AE (A)
				C	BFS	W	S	G		
45-42	77.7	45.0	42	224	162	174	820	898	0.9	4.0
55-0	55.0	55.0	0	333	0	183	851	898	1.0	1.0
55-27	75.3	55.0	27	243	90	183	846	898	1.0	1.0
55-42	94.7	55.0	42	189	137	179	859	898	1.0	2.0
65-42	111.7	65.0	42	162	117	181	893	898	1.0	1.5

B=C+BFS、A: B × 0.001%、AD: AE 減水剤  
(W/B45%は高機能タイプを使用)、AE: 空気量調整剤

促進中性化試験条件は温度 20、CO<sub>2</sub> 濃度 5%とし、所定の材齢まで各養生を行った後、20・60%R.H.の恒温恒湿室内で28日間乾燥した後に実施した。なお、供試体数は各水準で2体とし、両側面からの中性化の進行を測

定するように、打設面と底面をアルミテープでシールした。中性化深さの測定は、定期的に供試体を割裂し、その切断面にフェノールフタレイン 1%溶液を吹きかけ、表面から呈色領域までの深さをノギスで測定した。

細孔径分布の測定は、水銀圧入法で行い、圧縮強度試験後の供試体中心部から採取し、アセトンで水和の進行を停止させた小片を試料とした。

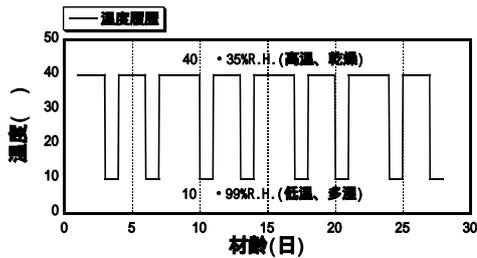


図-1 乾湿繰返し養生条件

#### 4. 研究成果

##### (1) 養生方法の影響

###### 圧縮強度

図-2 に材齢 28 日の圧縮強度と混和材置換率の関係を示す。MFA について各養生方法で比較すると、MFA の混和に関わらず、20 水中 > 40 気中 > 乾湿繰返しの順に大きく、40 気中と乾湿繰返しには大きな差はなかったが、水中より 2 割程度低い値となった。また、20 水中では MFA 10%が他の調査に比べて 10%程度高い圧縮強度を示したが、その他の養生方法では同程度になり、今回検討した養生条件では MFA 混和が強度発現性に及ぼす影響は認められなかった。

BFS については、圧縮強度は水中養生に比べて 40 気中および乾湿繰返し養生を行ったもので大きな低下をみせ、また、その低下の割合は、BFS 置換率が高いものほど大きくなった。

###### 細孔径分布

図-3 に全細孔量と混和材置換率の関係を示す。いずれの混和材においても 20 水中養生に比べて、40 気中および乾湿繰返し養生は細孔量が多く粗い組織となっていることがわかる。各混和材置換率との関係では、ばらつきが大きく、明確な傾向はみられなかった。

###### 中性化速度係数

図-4 に中性化速度係数と混和材置換率の関係を示す。いずれの混和材においても、20 水中に比べて、40 気中および乾湿繰返しは、中性化速度係数が 2 倍程度の値を示した。また、40 気中養生は乾湿繰返し養生に比べて同等以上の値を示していることがわかる。圧縮強度および細孔量では乾湿繰返し養生よりも 40 気中養生の方が組織が緻密である結果が得られたが、中性化の進行では組織が緻密な 40 気中養生の方が速い結果

が得られた。

MFA の影響については、MFA20%は基準より若干、中性化速度係数が大きな値を示しているが、MFA10%は同等か若干小さな値を示し、このような厳しい環境で養生した場合でも MFA コンクリートの中性化抵抗性に問題は生じないものと思われる。BFS の影響については、置換率の増加とともに、中性化速度係数は直線的に増加することがわかる。

図-5 に中性化速度係数と材齢 28 日の圧縮強度および全細孔量の関係を示す。同一強度で比較した場合、乾湿繰返し養生よりも 40 気中養生の方が中性化速度係数が大きいことがわかる。これは、養生方法の違いによる含水状態の差異によるもの、つまり定期的に水分の供給がある乾湿繰返し養生よりも 40 気中養生の方が含水率が低く、炭酸ガスが浸透しやすい状況になっていたことが原因と考えられる。また、中性化速度係数と材齢 28 日圧縮強度の関係は、養生条件により異なるが、同一養生条件であればいずれの混和材においても、それらの置換率に関わらず一つの曲線で表わすことができると考えられ、BFS コンクリートおよび CfFA コンクリートの中性化抵抗性は強度を同一であれば無混和のコンクリートと同等になるものと考えられる。

全細孔量との関係では、ばらつきが大きいですが、全細孔量が多いほど中性化速度係数が増加する傾向を示した。

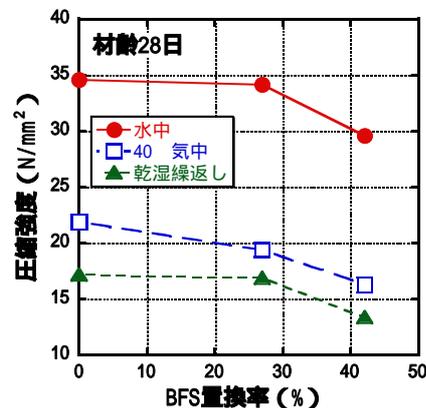
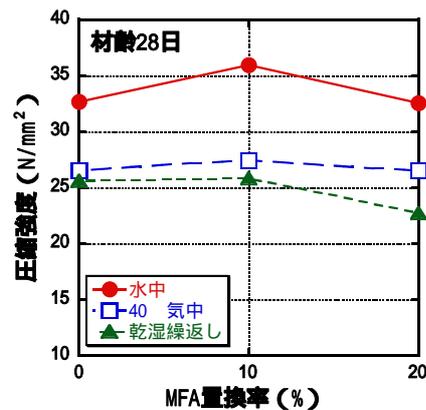


図-2 圧縮強度と混和材置換率の関係

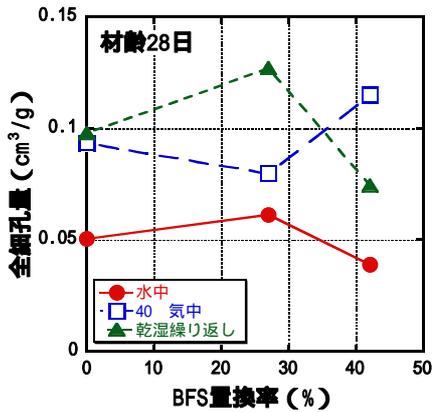
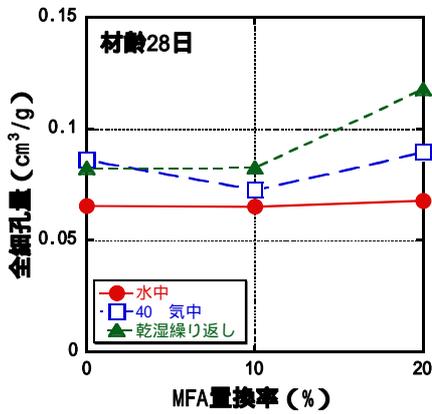


図-3 全細孔量と混和材置換率の関係

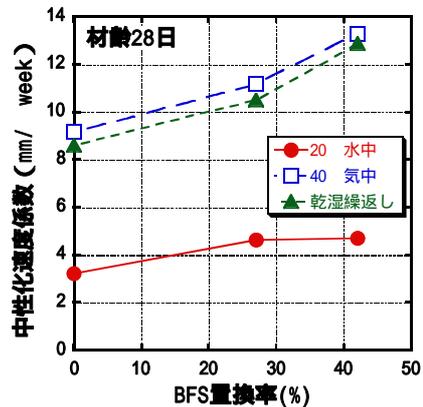
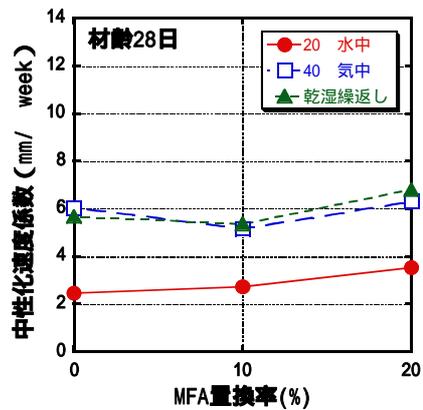


図-4 中性化速度係数と混和材置換率の関係

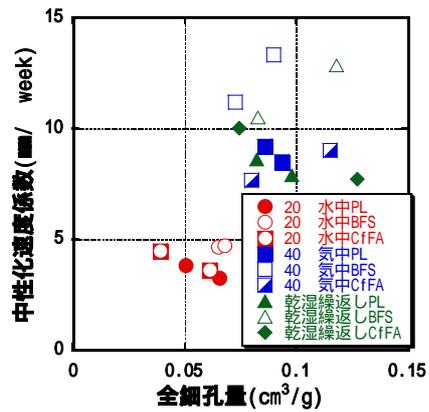
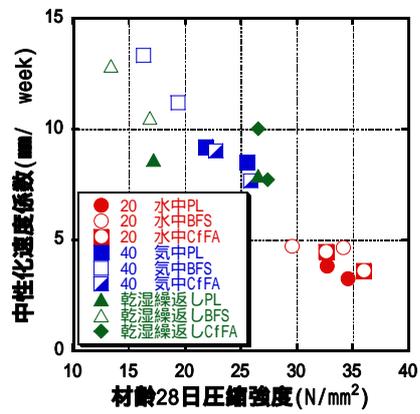


図-5 中性化速度係数と材齢 28 日圧縮強度および全細孔量の関係

## (2) 養生期間の影響 圧縮強度試験結果

図-6 に圧縮強度の経時変化を示す。MFA については、材齢 28 日における圧縮強度は各 W/C ' ごとに同程度であったが、材齢 1 年において、いずれも MFA を混和した調合の強度の増進が大きかった。BFS については、W/B55% の水準において、材齢 28 日の強度が BFS 置換率 42% でやや小さな値を示したが、MFA と同様に、材齢 28 日以降の強度増進が大きい結果を示した。

### 細孔径分布測定結果

図-7 に全細孔量の経時変化を示す。MFA については、ばらつきがあるものも認められるが、前養生材齢の増加とともに全細孔量は減少し、その低下割合に MFA 置換率の影響はみられなかった。BFS については、ばらつきが大きい、前養生材齢の増加とともに全細孔量は減少した。

### 促進中性化試験結果

図-8 に中性化速度係数の推移を示す。MFA については、W/C ' 45% では前養生材齢の増加とともに中性化速度係数が若干減少しているが、その他の調合では低下せず、モルタルの結果と異なる傾向を示した。BFS について、材齢 7 日の中性化速度係数は MFA シリーズよりも大きな値を示し、材齢の進行とともに大きな低下を示した。

図-9 および図-10 に中性化速度係数と圧縮強度および全細孔径量との関係を示す。MFA に

については、材齢の進行とともに圧縮強度の増進および細孔組織の緻密化が進行するものの、中性化速度係数に大きな変化がみられなかったため、これらの関係に相関性は認められなかった。したがって、MFA コンクリートの中性化の進行は組織構造以外の影響が大きく関与していると推察される。一方、BFS については、ばらつきがあるもののこれらの関係に相関性が認められ、中性化の進行に組織構造が影響が大きく関与しているものと思われる。

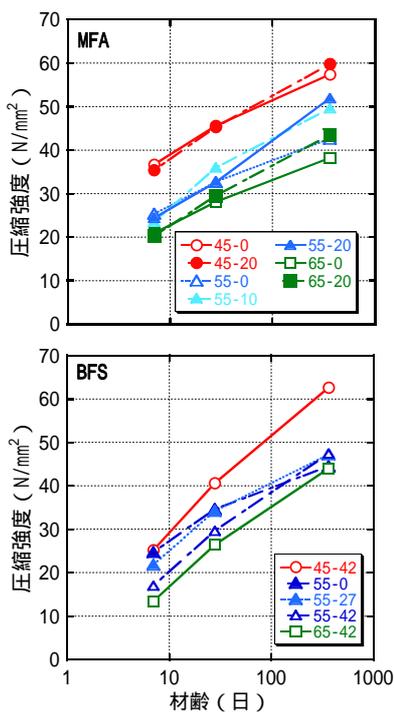


図-6 圧縮強度の経時変化

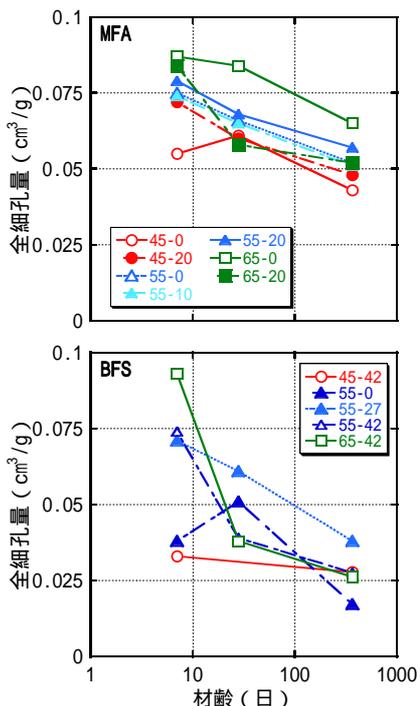


図-7 全細孔量の経時変化

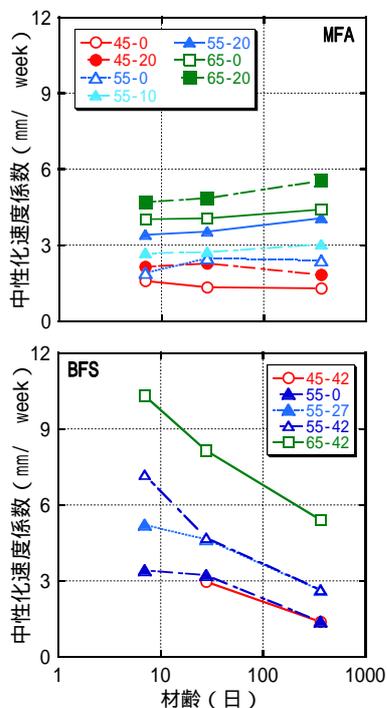


図-8 中性化速度係数の推移

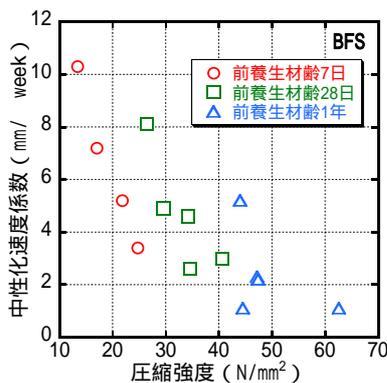
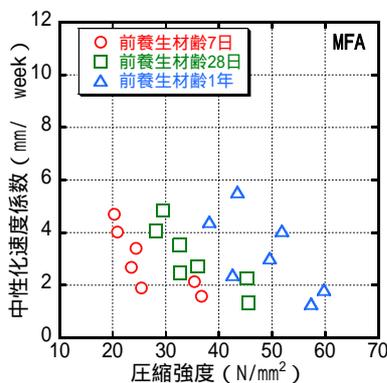


図-9 中性化速度係数と圧縮強度の関係

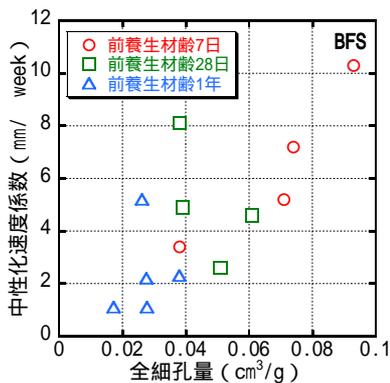
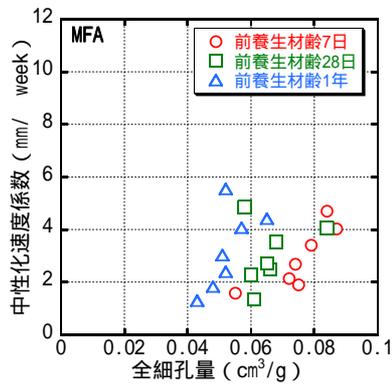


図-10 中性化速度係数と全細孔量の関係

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1件)

太谷俊浩、伊藤七恵、佐藤嘉昭、吉川悟史、加熱改質フライアッシュコンクリートの促進中性化速度に及ぼす養生材齢の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No.1、2016、141-146

〔学会発表〕(計5件)

太谷俊浩、高炉スラグ微粉末混和コンクリートの中性化特性に及ぼす養生条件の影響に関する研究、日本建築学会研究報告九州支部、2017年3月5日、長崎大学(長崎県長崎市)

太谷俊浩、養生期間の違いが改質フライアッシュコンクリートの中性化抵抗性に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会大会学術講演会、2016年8月24~26日、福岡大学(福岡県福岡市)

太谷俊浩、加熱改質フライアッシュコンクリートの中性化特性に及ぼす前養生期間の影響に関する研究、日本建築学会研究報告九州支部、2016年3月6日、琉球大学(沖縄県西原町)

太谷俊浩、養生方法の違いが改質フライアッシュコンクリートの中性化抵抗性に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会大会学術講演会、2015年9月4~6日、東海大学(神

奈川県平塚市)

山中優貴、初期の養生が不十分な場合における改質フライアッシュコンクリートの中性化特性に関する研究、日本建築学会研究報告九州支部、2015年3月1日、熊本県立大学(熊本県熊本市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.arch.oita-u.ac.jp/a-zai/concrete.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

太谷 俊浩 (OTANI, Toshihiro)

大分大学工学部福祉環境工学科建築コース・准教授

研究者番号: 00315318

(2)研究分担者

( )

研究者番号:

(3)連携研究者

( )

研究者番号:

(4)研究協力者

佐藤 嘉昭 (SATO, Yoshiaki)

伊藤 七恵 (ITO, Nanae)

吉川 悟史 (YOSHIKAWA, Satoshi)

山中 優貴 (YAMANAKA, Yuki)