

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06648

研究課題名(和文)加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの細孔構造変化と耐凍害性に関する研究

研究課題名(英文) Study on the pore distribution and the frost damage resistance of concrete containing modified fly-ash

研究代表者

大谷 俊浩 (Otani, Toshihiro)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：00315318

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は加熱改質フライアッシュ(MFA)を混和したコンクリートのフレッシュ性状の経時変化と組織構造の変化が耐凍害性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、フレッシュ時の経過時間を変化させた供試体や1年間の長期養生した供試体による凍結融解試験、圧縮強度試験、気泡測定および細孔径分布測定を行った。

その結果、MFAコンクリートは基準コンクリートとエアロスおよび耐凍害性が同等であり、気泡間隔係数が $300\mu\text{m}$ 以下であれば比較的良好な耐凍害性を有すること、また、ポゾラン反応の組織の緻密化の影響については、材齢1年では見られず、圧縮強度が 35N/mm^2 以上で優れた耐凍害性を有することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、建設業界における環境負荷低減策として、構造物の長寿命化および産業副産物等の有効活用が求められ、石炭火力発電所で発生するフライアッシュの活用が期待されている。フライアッシュはポゾラン活性を有し、コンクリートの長期的な組織の緻密化や化学抵抗性などが向上する優れた材料であることは周知されているが、本研究の課題は十分に明らかにされていなかった。本研究の成果によって、フライアッシュのさらなる活用の促進が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the influence of air loss on fresh stage and change of pore distribution by long term curing on the frost damage resistance of concrete containing modified fly ash (MFA), freeze-thaw test, compressive strength test, measurement of an air void spacing factor and a pore size distribution with specimen of each stage. The test results showed that MFA concrete had same the freeze-thaw resistance to plane concrete, and a concrete of which air void spacing factor of under $300\mu\text{m}$ had high freeze-thaw resistance, regardless with or without of MFA. Furthermore, a densifying the pore structure by pozzolanic reaction of MFA at the age of 1year had no influence on freeze-thaw resistance, and a concrete of which compressive strength of over 35N/mm^2 had high freeze-thaw resistance, regardless with or without of MFA.

研究分野：建築材料

キーワード：フライアッシュ コンクリート 耐凍害性 ポゾラン反応 空気量 細孔量 気泡間隔係数

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

著者らが開発した加熱改質フライアッシュ (Modified Fly Ash, 以下 MFA) は、加熱改質処理により未燃炭素を強熱減量値で 1%以下に低減させたものである¹⁾。そのため、AE 剤の吸着による影響が小さく、MFA を混和したコンクリート (以下 MFA コンクリート) の経時によるスランブの低下量は普通コンクリートと同程度であること、加熱改質前のフライアッシュ原粉と比較して空気量の経時変化が小さいことが明らかとなっている²⁾。

フライアッシュ (以下 FA) を混和したコンクリートは、長期間にわたる FA のポズラン反応によって組織が緻密化するため、長期的な強度の増進や劣化因子の侵入を抑制することで耐久性の向上が期待できるが、耐凍害性に関して、初期強度が低いことや未燃炭素が AE 剤を吸着することで空気量が低下する問題が存在する。

FA コンクリートの耐凍害性に関して、強熱減量の大きな FA を用いた場合、フレッシュ時の経時に伴う空気量の低下量が大きく、気泡間隔係数が大きくなる傾向があり、空気量の低下が小さい場合でも耐凍害性が低下する場合がある^{3,4)} ことなどが指摘されている。

2. 研究の目的

上記の MFA はフレッシュ時の空気量の経時変化が小さく、耐凍害性に及ぼす影響も小さいと考えられるが、MFA コンクリートのフレッシュ性状の経時変化が耐凍害性に及ぼす影響は明らかになっていない。また、FA のポズラン反応による長期組織の緻密化の影響や膨張材と FA を併用した場合の耐凍害性については十分な検討がされていない。

そこで、本研究では MFA コンクリートの耐凍害性を明らかにすることを目的に、2つの実験を実施した。実験 1 では FA および MFA と膨張材を併用したコンクリートの特性を明らかにすることを目的とし、実験 2 ではフレッシュ性状の経時変化およびポズラン反応による組織の緻密化が耐凍害性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした実験を行った。

3. 研究の方法

(1) 実験 1 (膨張材の影響)

表-1 に使用材料、表-2 に混和材の物性を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。FA は、製造工場の異なる MFA2 種類と加熱改質前の原粉 1 種類の計 3 種類を使用した。膨張材は低添加型タイプの石灰系のものを使用した。

表-3 に調合を示す。基準コンクリートの水セメント比は 50%とし、FA コンクリートは FA の強度寄与率を 0.3 に設定し、基準コンクリートと材齢 28 日強度が同等となるようにした。FA 置換率は 0, 15, 20, 25%とし、膨張材はセメントの内割りで 0, 15, 20kg/m³ 添加した。

シリーズ 1 における目標スランブは 12±1.5cm, 目標空気量は 5±1%とし、所要のフレッシュ性状が得られるよう、単位水量および混和剤を調整した。シリーズ 2 においては、単位水量はシリーズ 1 と同一で、混和剤添加率は一定とし、所要の空気量が得られるよう AE 剤の使用量を調整した。コンクリートの打設は、シリーズ 1 は夏期 (2017 年 8 月) に、シリーズ 2 は標準期 (2017 年 11 月) に屋外に開放された実験室で行った。

表-1 使用材料

種別	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 ³
混和材	-	表-2 参照
水	W	上水道水
細骨材	S	山砂 表乾密度:2.61g/cm ³ 吸水率:2.61%
粗骨材	G	硬質砂岩碎石 表乾密度:2.64g/cm ³ 吸水率:0.76%
AE 減水剤	AD	リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩 ポリカルボン酸系化合物(高性能タイプ)

表-2 混和材の物性

種類	記号	SiO ₂ (%)	lg.loss (%)	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	活性度	
						σ ₂₈	σ ₉₁
膨張材	EX	-	1.2	3610	3.16	-	-
フライアッシュ	FA1	54.45	4.1	4393	2.29	90	101
	MFA1	57.77	0.7	4068	2.32	88	96
	MFA2	61.03	0.4	2873	2.05	80	90

表-3 調合表

No.	記号	FA/B (%)	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
						W	C	FA	EX	S	G
1	N	0	50.0	50.0	46.0	158	316	0	0	831	987
2	MFA1-20	20	53.8	43.0	45.2	150	279	70	0	804	987
3	MFA1-15	15	52.6	44.8	45.3	153	291	51	0	807	987
4	N-EX20	0	53.4	50.0	46.0	158	296	0	20	831	987
5	MFA1-20-EX15	20	56.7	43.0	44.7	153	270	71	15	790	987
6	MFA1-20-EX20	20	57.7	43.0	44.7	153	265	71	20	790	987
7	FA1-20-EX20	20	57.7	43.0	44.0	158	274	73	20	765	987
8	MFA2-20-EX20	20	57.7	43.0	43.6	158	274	73	20	755	987
9	MFA1-25-EX20	25	59.3	41.3	44.1	153	258	93	20	771	987

(2) 実験 2 (フレッシュ性状の経過時変化およびポズラン反応による組織の緻密化の影響)

表-4 に使用材料を示す。AE 減水剤は高性能タイプを使用した。空気量調整剤は、普通コンクリートで一般的に使用されているアルキルエーテル系の 2 種類を使用した。AE_A は AE_B に比べて少量で空気を連行できる特徴を有している。

表-5 に調合表を示す。調合は材齢 28 日強度が同等となるように MFA の強度寄与率 k を考慮した換算水セメント比 (W/C') を 55% とし、k は 0.3 とした。FA 置換率は結合材に対する質量比で 20% とした。AE 減水剤の使用量は一定とし、スランプ値が 20 ± 1.0 cm、空気量が 5.5 ± 0.5% および 7.0 ± 0.5% となるように単位水量および空気量調整剤の量を調整した。

コンクリートの練混ぜおよびフレッシュ性状の経時変化は、夏期に室内気温 30℃ 程度の実験室内で行った。フレッシュ性状の経時変化は、目標空気量 7.0% の水準において実施した。

表-4 使用材料

種別	記号	使用材料および物性
セメント	PL	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm ³
フライアッシュ	MFA	加熱改質フライアッシュ 強熱減量: 0.72%, 比表面積: 4068cm ² /cm ³ , 密度: 2.32g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S	山砂 表乾密度: 2.61g/cm ³ , 吸水率: 2.61%, 実積率: 56.9%, 粗粒率: 2.65
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 表乾密度: 2.63g/cm ³ , 吸水率: 0.92%, 実積率: 58.9%, 粗粒率: 6.81
AE 減水剤	AD	リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩ポリカルボン酸系化合物(高性能タイプ)
空気量調整剤	AE _A	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	AE _B	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-5 調合表

No.	記号	MFA/B (%)	W/C' (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AD (B × %)	AE 剤量*1
						W	C	FA	S	G		
1	PL5.5A	0	55.0	55.0	48.6	183	333	0	840	894	0.8	4.5A
2	PL7.0A	0	55.0	55.0	48.6	183	333	0	840	894	0.8	6.5A
3	MFA20-5.5A	20	55.0	47.3	47.2	178	301	75	794	894	0.8	5.0A
4	MFA20-7.0A	20	55.0	47.3	47.2	178	301	75	794	894	0.8	7.0A
5	MFA20-5.5B	20	55.0	47.3	47.2	178	301	75	794	894	0.8	5.0A
6	MFA20-7.0B	20	55.0	47.3	47.2	178	301	75	794	894	0.8	7.0A

*1: 空気量調整剤 (1A=B×0.001%), W/C'=(C+k*FA)

4. 研究成果

(1) 実験 1

①フレッシュ性状

シリーズ 2 におけるスランプロスおよび空気量の減少量を図-1 に示す。図より、スランプ値の低下量は MFA を用いた場合には同等か 1~3cm 小さくなった。空気量の減少量は MFA では平均で 0.3% 程度小さくなったが大きな差は見られなかった。しかしながら、FA では経時に伴い空気量の減少量も大きくなる傾向を示し、64 分経過時では 1.5% 程度差が見られた。これは既往の文献の傾向と同様であり³⁾、強熱減量が JIS II 種の範囲内であっても、強熱減量が大きい場合には、初期の空気量を確保しても空気量のロスが大きくなるため配慮が必要であることがわかる。

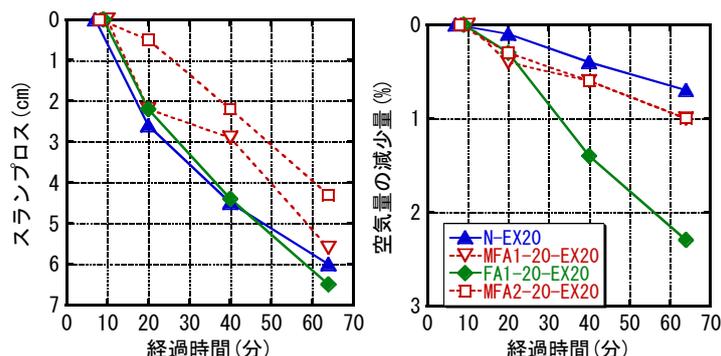


図-1 スランプロスおよび空気量の減少量 (シリーズ 1)

②硬化体の性状

図-2 に圧縮強度の試験結果を示す。シリーズ 1 において、図中の点線は N および N-EX20 について、材齢 28 日における圧縮強度の値を示したものである。膨張材の有無でそれぞれ比較すると、FA 種類や置換率によってばらつきはあるものの、ほぼ同等となっており、膨張材を用いた場合でも FA の強度寄与率を考慮することによって配 (調) 合設計が可能であることがわかる。

シリーズ 2 には、いずれの調合についても注水後 64 分の圧縮強度が増加している。これは、一般に空気量 1% の減少で圧縮強度は 4~6% 増加すると言われており、空気量の減少による影響と考えられる。ただし、N-EX や FA1-EX では強度の増加率が大きく、今後、硬化体組織の空隙の状況について確認する必要があると思われる。

図-3 にシリーズ 2 における耐久性指数を示す。64 分経過時のコンクリートで耐久性指数が低下する傾向にあり、特に FA 原粉では 20% を下回っており低下が著しい。その他の調合では 5~

10%程度低下した。

図-4に気泡間隔係数の測定結果を示す。気泡間隔係数は0.2~0.3mm程度の範囲内にあり、シリーズ1ではMFAを用いた場合に膨張材の有無に関わらず0.05mm程度大きくなっている。また、シリーズ2ではN-EX20を除き64分経過の方が気泡間隔係数は大きくなる傾向にある。

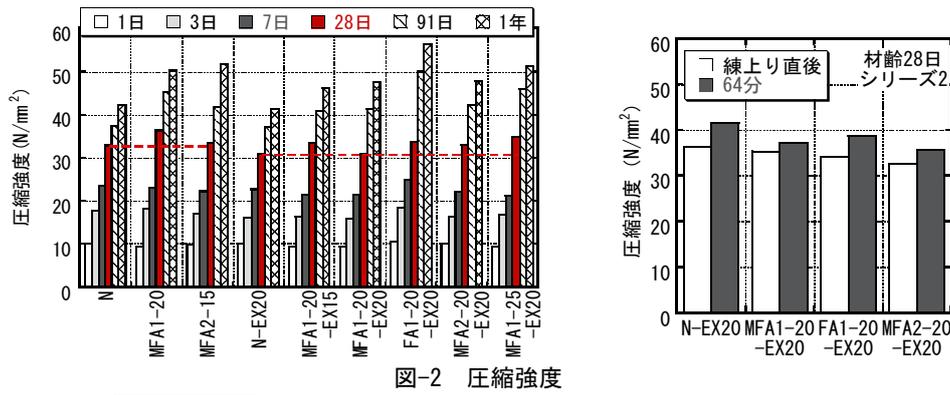


図-2 圧縮強度

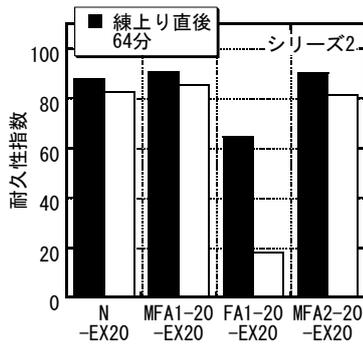


図-3 耐久性指数

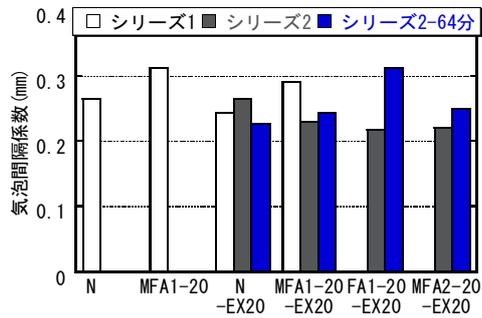


図-4 気泡間隔係数の測定結果

③ 耐久性指数と各影響因子の関係

図-5に耐久性指数とフレッシュ時および硬化後の空気量ならびに気泡間隔係数との関係を示す。なお、図中の塗りつぶしのマーカーは経時変化後(64分)のコンクリートを示している。

図より、空気量と耐久性指数との関係について、フレッシュ時および硬化後の空気量の低下とともに耐久性指数は低下する傾向を示している。気泡間隔係数は0.2~0.3mm程度の範囲に分布しているが、FA1を除くと同範囲においては気泡間隔係数による明確な影響は認められなかった。より広範囲においてさらにデータを蓄積する必要があると考えられる。また、膨張材およびMFAの有無による影響は認められないが、経時変化後のコンクリートでは気泡間隔係数は同等であっても耐久性指数は5~10%ほど小さな値を示した。FA1については、気泡間隔係数が0.25mm以下であってもMFA1に比べて耐久性指数が小さくなっており、未燃分が含まれるFAを用いたコンクリートは気泡間隔係数が同等の値の場合でも耐久性指数が低くなるという既往の研究⁴⁾と同様の傾向を示した。

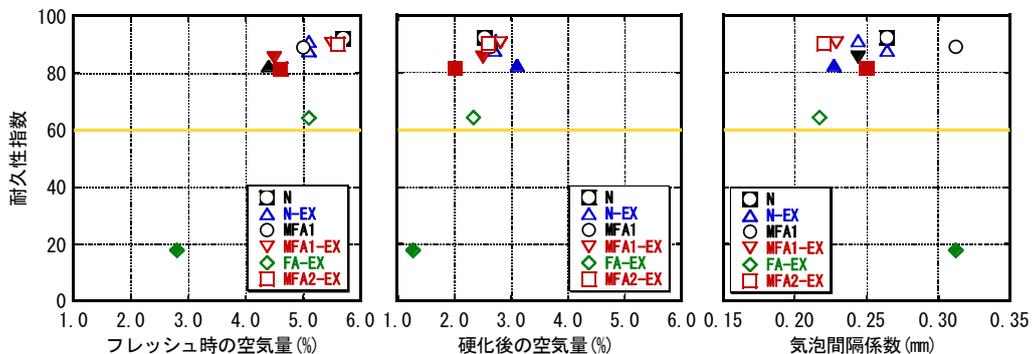


図-5 耐久性指数と各影響因子の関係

(2) 実験 2

① フレッシュ性状

表-6にフレッシュ性状試験結果を示す。スランプ値は時間が経過するにつれて減少したが、調合による大きな差はみられなかった。空気量は時間が経過するにつれて減少しており、MFAコンクリートは、PLに比べて、空気減少量が多かった。目標空気量7.0%(以下7.0%)の60分経過後と目標空気量5.5%(以下5.5%)の練上がり時の空気量は、同等の値を示した。

表-6 フレッシュ性状試験結果

No	記号	経過時間(分)	コンクリート温度(°C)	スランプ(cm)	空気量(%)
1	PL5.5A	0	30.0	19.5	5.0
2	PL7.0A	0/20/40/60	31.0/31.0/31.0/30.5	20.8/18.5/13.9/9.3	6.9/6.2/5.8/5.5
3	MFA20-5.5A	0	30.5	19.8	5.1
4	MFA20-7.0A	0/20/40/60	32.0/31.5/32.0/31.0	21.0/17.5/14.1/9.2	7.0/6.3/5.6/4.9
5	MFA20-5.5B	0	31.0	20.0	5.3
6	MFA20-7.0B	0/20/40/60	32.0/32.0/31.5/31.5	19.6/16.8/10.8/6.5	6.9/6.6/6.1/5.1

②硬化体の性状

図-6 に硬化体の各種試験結果を示す。圧縮強度はすべての調合において材齢 1 年で増進し、材齢 28 日に対する強度増進割合はプレーンコンクリートでは平均で 2 割程度なのに対し、MFA コンクリートは 4 割以上であった。

気泡間隔係数は材齢 1 年において、MFA20-5.5B を除き、すべての調合で若干の増加がみられたが、材齢の進行による気泡組織の変化は小さいと考えられる。

全細孔量は材齢の経過によって全体的に減少する傾向がみられた。

耐久性指数は材齢 1 年において、すべての調合で耐久性指数の増加がみられた。したがって、フライアッシュのポゾラン反応による組織の緻密化が耐凍害性に対して悪影響を及ぼすことはないと考えられる。

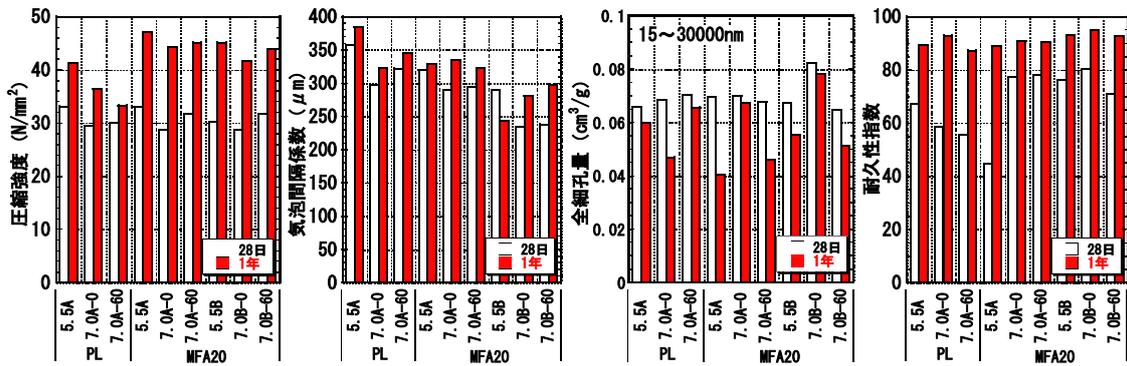


図-6 硬化体の各種試験結果

③耐久性指数と各影響因子の関係

図-7 に耐久性指数と各要因との関係を示す。気泡間隔係数が増加するほど、耐久性指数が減少傾向にあるが、ばらつきが大きく、気泡間隔係数のみで耐久性指数を評価することが難しいことがわかる。一方、15~30000nm の範囲の全細孔量および耐久性指数と圧縮強度の関係には相関性がみられ、全細孔量が少ないほど、また圧縮強度が高いほど、耐久性指数が増加しており、圧縮強度が 35N/mm² 以上で優れた耐凍害性を有していることがわかる。

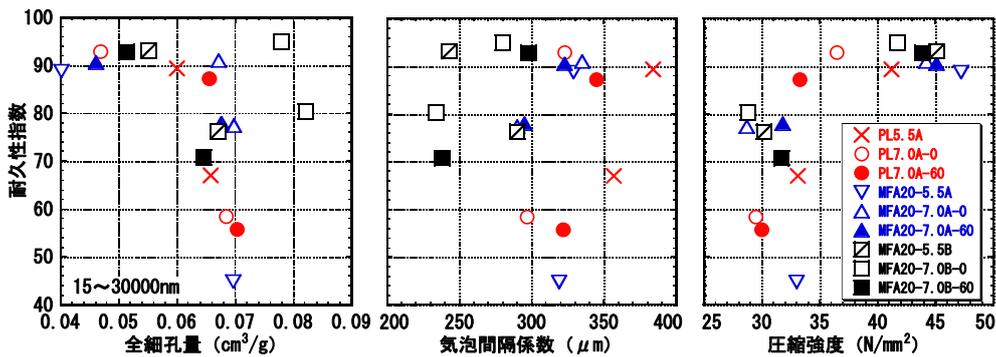


図-7 耐久性指数と各要因との関係

参考文献

- 1) 伊藤七恵, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 大谷俊浩: 高品質フライアッシュを用いたコンクリートの調合設計に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 167-172, 2011. 7
- 2) 上田賢司ほか: フライアッシュを混和したフレッシュコンクリートのスランプおよび空気量の経時変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 85-86, 2015. 9
- 3) 千歩修, 浜幸雄, : フライアッシュコンクリートの空気連行性・気泡組織と耐凍害性, 日本建築学会構造系論文集, 第 67 巻, 第 558 号, pp. 1-6, 2002. 8
- 4) 千歩修, 劉宏涛: フライアッシュコンクリートの静置による気泡組織・耐凍害性の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 963 - 964, 2004. 7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 秋吉善忠, 大谷俊浩, 佐藤嘉昭, 上田賢司	4. 巻 41
2. 論文標題 膨張材と加熱改質フライアッシュを併用したコンクリートの特性に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 185-190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 大谷俊浩, 秋吉善忠, 佐藤嘉昭, 日高幸治	4. 巻 41
2. 論文標題 フレッシュ時の経時変化が加熱改質フライアッシュコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 827-832
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 日高健吾
2. 発表標題 各種混和材を用いたコンクリートの基礎物性および耐凍害性に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大谷俊浩
2. 発表標題 膨張材と混和材を併用したコンクリートのフレッシュ性状の経時変化に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日高健吾
2. 発表標題 フレッシュ時の空気量ロスがフライアッシュコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷俊浩
2. 発表標題 混和材が膨張材コンクリートのフレッシュ性状の経時変化に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日高健吾
2. 発表標題 膨張材コンクリートの耐凍害性に及ぼすフライアッシュの影響に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大谷俊浩
2. 発表標題 加熱改質フライアッシュコンクリートのフレッシュ性状の経時変化が耐凍害性に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷俊浩
2. 発表標題 養生期間の違いがフライアッシュコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大谷俊浩
2. 発表標題 フライアッシュコンクリートの耐凍害性に及ぼす養生期間の影響に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	日高 健吾 (Hidaka Kengo)	大分大学・工学研究科・大学院生 (17501)	