

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2013～2015

課題番号：25303004

研究課題名(和文) モンゴル産フライアッシュの有効利用に関する総合的調査

研究課題名(英文) Comprehensive Survey on Effective Utilization of Mongolian Fly Ash

研究代表者

プシュパラル ディニル (Pushpalal, Dinil)

東北大学・国際文化研究科・教授

研究者番号：10361148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、建設業においてモンゴル産フライアッシュの利用可能性を調査することを目的とした。その結果、フライアッシュを混和材として使用したコンクリートの圧縮強度特性が明確でないことがわかった。レンガ製造において強度及び二酸化炭素排出量の両方を考慮した場合、高炉セメントを使用し、セメント：水酸化カルシウム比=1:0.7の配合が最も優れていることを明らかにした。コンクリートにおいてAnhydriteを含むフライアッシュを混和材として使用した場合、圧縮強度はAnhydriteを含まないフライアッシュを混和材として使用した場合よりも、全ての材齢において高い強度を示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to investigate the possibility of utilization of Mongolian fly ash in the construction industry. We have conducted the following studies under this research: 1. Interviews in Ulaanbaatar to understand current conditions of usage and the inhibition factors of dissemination of use of fly ash. 2. Research on the optimal mix proportion for fly ash brick industry 3. Experiments to find effect of anhydrite in fly ash in giving a high compressive strength. We have obtained the following results: 1. We have found that non-uniformity of fly ash and radioactivity of fly ash inhibit the usage. 2. Utilization of slag cement with the cement to calcium hydroxide ratio is 1.43 gives the optimum blend with the highest compressive strength and the lowest CO2 emissions. 3. Fly ash with anhydrite gives the higher strength than fly ash without anhydrite at all ages. It has found that this optimum content of anhydrite in fly ash would be 1.5-2.5kg/m³ of concrete.

研究分野：工学・環境材料

キーワード：フライアッシュ モンゴル 圧縮強度 Class C Anhydrite れんが コンクリート 環境負荷

1. 研究開始当初の背景

モンゴルは豊かな鉱物資源を有し、石炭、銅、モリブデン、スズ、タングステン及び金は世界の工業生産の大部分を占め、タバントルゴイ地区には世界最大の未開発コークス炭鉱がある。膨大な石炭埋蔵量をほこるモンゴルは、エネルギーを石炭火力発電に依存しており、4基の石炭火力発電所が供給するエネルギーが首都のほぼ全域をカバーしており、現在5基目のプラントが建設予定である。

しかし、大量の石炭の使用によって、副産物であるフライアッシュが大量に排出されている。しかし、これらのフライアッシュは適切な処理がなされず、ウランバートル郊外の灰捨て場に廃棄されている。これらのフライアッシュによる近隣住民の健康被害や環境汚染が指摘されており、フライアッシュの有効利用法を開発することは重要な課題である。

2. 研究の目的

モンゴルでは一次エネルギー供給量の約70%が石炭に依存しており、2009年のモンゴルの石炭消費量は5,424百万トンであり、当該量の石炭の燃焼によって1,627百万トンのフライアッシュが排出されたと見積られる。一方、モンゴルでは急成長が続く建設産業でフライアッシュを有効利用した経験がほとんどない。

本研究は、建設業においてモンゴル産フライアッシュの利用可能性を調査することを目的とする。本研究はフライアッシュの利用に対する意識調査の社会学的的手法及びライフサイクルアセスメントをはじめとする環境科学的手法、フライアッシュの化学的・物理的特性試験をはじめとする材料工学的手法を綿密に融合させた学際的研究である。特にモンゴルのフライアッシュを建築産業に適用し、フライアッシュの使用を促進させることに焦点を当てる。

3. 研究の方法

3.1 フライアッシュの有効利用に関する現地調査

3.1.1 目的

現行のモンゴル国におけるフライアッシュの廃棄量を減少させる取り組みや有効利用方法について調査・分析した。モンゴル国では一部排出されたフライアッシュをコンクリート混和材として利用した実用例はあるが、学術的検討が少なく、フライアッシュの使用を控えるレディーミクストコンクリート会社も存在し、フライアッシュの有効利用促進の為には現場の状況を把握し、原因を探る必要がある。そこで、第四火力発電所並びに、各レディーミクストコンクリート会社にインタビューを実施し、フライアッシュの利用実態の把握や普及の阻害要因を明らかにした。

3.1.2 調査方法

インタビュー対象者は第四火力発電所並びに、各レディーミクストコンクリート会社の責任者であり、計5名に実施した。インタビューの方法として、半構造化インタビューを採用した。半構造化インタビューを採用した理由は、可能な限り自然な会話のなかから使用者の意図、利用した感想等を引き出すことを目的としたためである。

対象者へのインタビュー時間は60分から120分程度であり、各企業へ赴き個別に実施した。また、事前にモンゴル語のインタビューガイドラインを作成し、それに基づいてモンゴル語でインタビューを実施した。インタビュー後、新たに質問があった場合はその場でモンゴル語によるインタビューを行った。さらに帰宅後、ボイスレコーダーで録音したインタビュー結果を聞き直し、聞き逃しがないかの確認も合わせて行った。

解析方法として、各種質問内容をコード化し、類似するコードを類型化した。類型化後、内容分析を実施した。

3.1.3 結果

第四火力発電所から排出されるフライアッシュの特性に変動が生じる原因は選炭していない石炭、並びにボイラーに不向きな石炭を使用しているからである。

フライアッシュの供給元である第四火力発電所からはフライアッシュの品質に関する情報提供がされず、フライアッシュの使用方法に関する基準なども存在しない。そのため、混和材として使用するフライアッシュによってコンクリートの強度や品質に違いが生じ、普及の障害となっている。フライアッシュコンクリートを販売する場合、放射能に関して国が定めた基準を満たす必要がある。

3.2 フライアッシュを混和材として使用したレンガを製造するための最適条件

3.2.1 目的

焼成粘土レンガの代替原料として、石炭灰を大量に用いたレンガの導入が考えられる。石炭灰の利用は、レンガ製造に伴う環境問題の規模を削減し、さらに、粘土のような伝統的な原料の保全に繋がることになるであろう。よって、二酸化炭素の排出量を可能な限り抑えながら、フライアッシュを最大限に利用できる配合を見出し、圧縮強度と二酸化炭素排出量の間で適切なバランスを持つ配合を明らかにした。

表1 レンガ製造で用いた配合

Mix type	Cement	Ca(OH) ₂	Fly Ash	Sand	Water	Na ₂ SO ₄
P-0	100	70	500	330	125	12
S-0	100	70	500	330	125	12
S-1	85	85	500	330	125	12
S-2	70	100	500	330	125	12
S-3	35	135	500	330	125	12
S-4	0	170	500	330	125	12

3.2.2 実験方法

レンガ製造で用いた配合を表1に示す。本研究で使用したセメントは市販されている普通ポルトランドセメント及び高炉セメント(B種)である。

表2 フライアッシュの化学成分

Chemical composition (Wt%)				LOI
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	
53.8	28.0	4.3	6.2	1.4

表3 各供試体の平均圧縮強度及び見かけの二酸化炭素排出量

Mix Type	Compressive Strength (MPa)	Apparent CO ₂ Emission (g)	Emission / Strength Factor (g / MPa)
P-0	30.4	132	4.35
S-0	27.4	100	3.67
S-1	21.5	104	4.86
S-2	18.0	108	6.02
S-3	18.0	118	6.54
S-4	8.2	127	15.51

フライアッシュの化学成分を表2に示す。全ての配合において、バインダー(普通ポルトランドセメント或いは高炉セメント及び、水酸化カルシウム)の合計量は一定とした。なお、配合設計の際は、高炉セメントを水酸化カルシウムで置換し、他の材料は一定とした。水酸化カルシウムはポゾラン反応を促進するとともに、バインダーとしての働きもあるため混入した。さらに、発展途上国では水酸化カルシウムは高炉セメントよりも安価であり、フライアッシュレンガ産業で広く使用されている。

レンガの練り混ぜではパドルミキサーを用い、練り混ぜ後、金型に入れ、圧縮成形により直径50mm、高さ100mmの供試体を作成した。次いで、供試体は8時間、80°C-90%の相対湿度で蒸気養生した。

3.2.3 結果

表3に6本の供試体の平均圧縮強度及び他の結果を示した。「見かけの二酸化炭素排出量」は、セメント及び水酸化カルシウムのみでの排出量から計算されたものであり、他の原料による比較的少量の二酸化炭素排出量は無視している。見かけの二酸化炭素排出量を計算するために、二酸化炭素の排出係数としてポルトランドセメントには0.798 g/g、高炉セメントには0.481 g/g、水酸化カルシウムには0.748 g/gを用いた。当然のことながら、全ての混合比に関して、強度はセメントの混合量が増えるに従って増加している。図1に圧縮強度及び排出量 / 強度の係数の関係を示す。供試体S-0は排出量 / 強度の係数が最も低く、レンガ製造においては最も環境配慮型であることが示された。

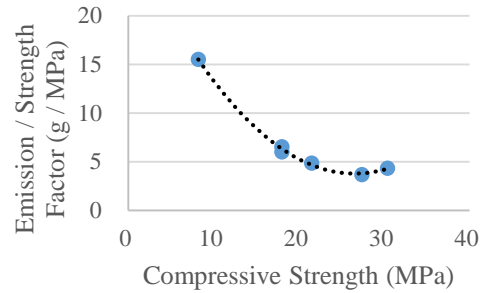


図1 圧縮強度及び排出量 / 強度の係数の関係

3.3 モンゴル産高カルシウムフライアッシュを混和材として使用したコンクリートの圧縮強度特性に関する検討

3.3.1 目的

建築ラッシュが進むモンゴル国においてフライアッシュの使用をさらに促進させるため、第四火力発電所から採取した品質の異なる4種類のフライアッシュを混和材として使用し、コンクリートの圧縮強度特性に与える影響について検討した。

さらに、硫酸カルシウムの有無が圧縮強度に与える影響について考察した後、硫酸カルシウムを有する場合について検討を深め、最も高い圧縮強度を実現するための硫酸カルシウムの量についての解明を試みた。

3.3.2 実験方法

本研究の使用材料を表4に示す。使用したセメントの化学組成を表5に示す。表6にボーグ式によって算出した鉱物組成の結果を示す。細骨材は粒径5mm以下、また粗骨材は粒径20mm以下にふるい分けした後、使用した。

表4 使用材料

種類	名称	品質
セメント	42.5 普通セメント	密度 3.00g/cm ³
細骨材	Bayan Sumber Bogd (モンゴル産)	密度 2.60g/cm ³
		粗粒率 3.10
粗骨材	Bayan Tortsog Khairhan (モンゴル産)	密度 2.65g/cm ³
		粗粒率 3.01
高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	—

表5 セメントの化学組成

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)	不溶残分 (%)	合計 (%)
16.5	7.6	2.3	54.3	3.0	9.1	97.2

表6 セメントの鉱物組成

C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	CaSO ₄ (%)	f-CaO (%)	合計 (%)
41.7	15.8	16.2	7.0	5.8	0.5	87

表7 フライアッシュの組成

項目 / 種類	FA-1	FA-2	FA-3	FA-4	
密度(g/cm ³)	2.5	2.6	2.5	2.5	
湿分(%)	0.0	0.2	0.1	0.1	
不溶残分(%)	48.6	38.6	56.6	64.6	
平均粒径(μm)	35.9	18.4	19.8	8.1	
比表面積(cm ² /cm ³)	15,409	31,441	26,096	45,943	
化学組成(wt%)	SiO ₂	43.4	38.1	47.2	53.1
	Al ₂ O ₃	12.4	11.7	14.2	14.4
	Fe ₂ O ₃	7.1	7.3	12.0	12.8
	CaO	23.8	27.9	18.6	13.2
	SO ₃	4.2	5.2	1.2	1.2
	MgO	4.6	5.2	2.2	1.6
	Na ₂ O	0.9	1.2	0.6	0.4
K ₂ O	1.1	0.9	1.1	1.4	
強熱減量(%)	0.8	0.8	1.5	0.5	
合計(%)	99.0	98.4	98.8	98.8	

本研究で使用したフライアッシュはモンゴルの Shivee-Ovoo 炭鉱の石炭からのフライアッシュ (FA-1, FA-2), Baganoor 炭鉱の石炭からのフライアッシュ (FA-3, FA-4) の計 4 種類、すべて原粉を使用した。表 7 にフライアッシュの特性を示す。表 8 にリートベルト解析によるフライアッシュの鉱物組成の定量結果を示す。基準コンクリート及びフライアッシュコンクリートの調合を表 9 (a) 及び(b)に示す。コンクリートの調合は水結合材比 46%の一定とし、セメントの重量に対するフライアッシュの置換率は最大 40%とした。目標スランプは 200±20mm とした。

コンクリートの練混ぜには水平一軸型ミキサを用い、練り混ぜ後、供試体は φ10×20cm 円柱形型枠に成形した。基準コンクリート、フライアッシュコンクリートは共に打設後 2 日で供試体を脱型し、水槽内に静置し、所定の材齢まで 20±2°C の水中にて養生を行い、圧縮強度試験を実施した。

3.3.3 結果

図 2 (a),(b),(c)にそれぞれ各種フライアッシュ置換率 10%, 20%, 40%の圧縮強度試験結果を示す。FA-1 フライアッシュについては、フライアッシュ置換率 20%までは、材齢 3 日の段階で Normal の強度を上回り、中でも置換率 20%ではいずれの材齢においても最も高い強度を示した。FA-2 フライアッシュについては置換率 10%でいずれの材齢においても最も高い強度を示したが、置換率 20%では、FA-1 フライアッシュの強度を下回りかつ、材齢 3 日では Normal の強度を下回った反面、7 日以降は上回った。材齢初期から強度が高くなった理由として、フライアッシュに含有された Anhydrite とポズラン反応に起因すると推測される。

同様に FA-3, FA-4 フライアッシュの場合は FA-1, FA-2 フライアッシュの場合と比較し、各材齢における強度が低くなる傾向を示した。この理由として、FA-3, FA-4 フライアッシュには Anhydrite が存在せず、ポズラン反応のみであったためと考えられる。

$$W_{Anhydrite} = FA \times (\%Anhydrite) \quad (1)$$

$W_{Anhydrite}$: コンクリート 1m³ 当たりの Anhydrite 量 (kg/m³)

FA : コンクリート 1m³ 当たりのフライアッシュ量 (kg/m³)

%Anhydrite : フライアッシュの Anhydrite 重量パーセント(wt%)

上記の実験結果を踏まえ、コンクリート 1m³ に含まれるフライアッシュの Anhydrite 量の合計値と圧縮強度について考察を行う。コンクリート 1m³ 中のフライアッシュの Anhydrite 量は式(1)によって算出する。図-3(a)に FA-1, 図-3(b)に FA-2 フライアッシュについて式(1)によって求めた Anhydrite 量と各材齢における圧縮強度及びフライアッシュの置換率の関係を示す。FA-1 フライアッシュの場合、フライアッシュ置換率 10%ではコンクリート 1m³ 当たり Anhydrite は 1kg/m³ 含まれている。同様に置換率 20%では 2kg/m³, 置換率 40%では 4kg/m³ であり、FA-2 フライアッシュの場合、フライアッシュ置換率 10%ではコンクリート 1m³ 当たり Anhydrite は 2kg/m³ 含まれており、置換率 20%では 4kg/m³ であった。また、各図に 2 次関数によって回帰分析を行った結果、得られた回帰曲線を併記する。

いずれにおいても、得られた頂点は 1.5~2.5kg/m³ に位置していることがわかる。

表8 フライアッシュの鉱物組成の定量結果

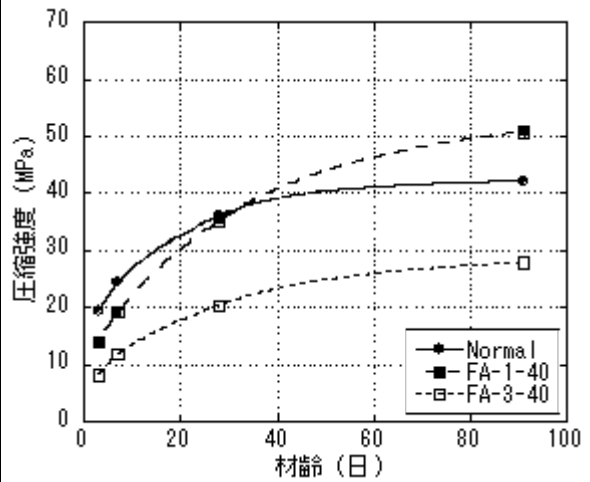
項目 / 種類	FA-1	FA-2	FA-3	FA-4	
鉱物割合(wt%)	Quartz	13.4	8.4	18.4	21.2
	Hematite	4.5	3.6	1.7	1.6
	Magnetite	-	-	1.8	3.3
	Lime	0.7	1.9	-	-
	Akermanite	8.7	-	6.0	-
	Merwinite	-	6.9	-	-
	Anhydrite	2.8	5.7	-	-
	Glass Phase	67.1	72.7	70.6	73.4

表9 (a) コンクリートの調合

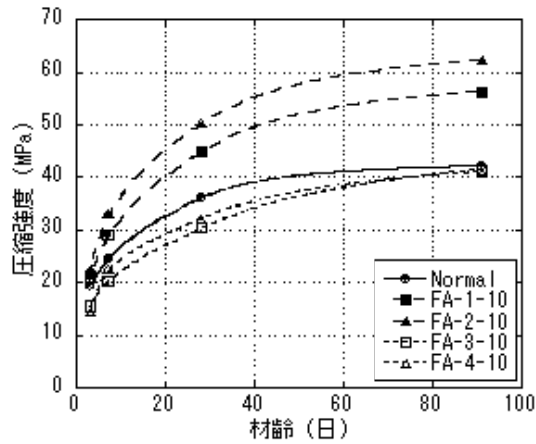
No	FA	W/(C+FA) (%)	FA/(C+FA) (%)	s/a (%)
Normal	-	46	0	53
FA-1-10	FA-1		10	
FA-1-20	FA-1		20	
FA-1-40	FA-1		40	
FA-2-10	FA-2		10	
FA-2-20	FA-2		20	
FA-3-10	FA-3		10	
FA-3-20	FA-3		20	
FA-3-40	FA-3		40	
FA-4-10	FA-4		10	
FA-4-20	FA-4		20	

表 9 (b) コンクリートの調査

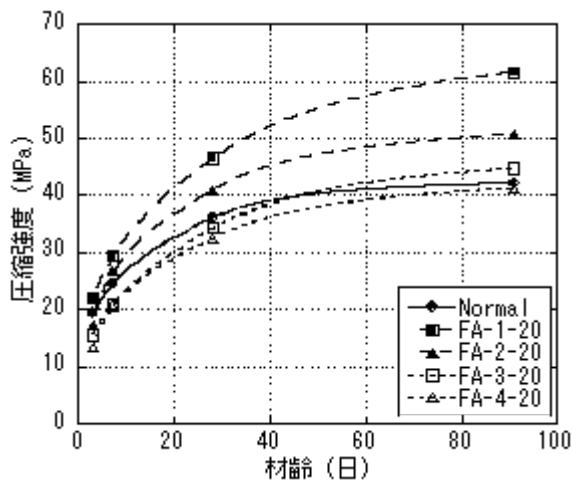
No	単位量 (kg/m ³)					実測スランプ (mm)
	W	C	FA	S	G	
Normal	164	356	0	1001	878	200
FA-1-10	164	320	36	999	878	225
FA-1-20	163	284	71	996	875	210
FA-1-40	162	212	141	991	871	205
FA-2-10	164	320	36	999	878	230
FA-2-20	164	284	71	997	876	225
FA-3-10	164	320	36	999	878	210
FA-3-20	163	284	71	996	876	205
FA-3-40	163	212	141	992	871	190
FA-4-10	164	320	36	999	878	215
FA-4-20	163	284	71	997	876	220



(C) フライアッシュ置換率40%

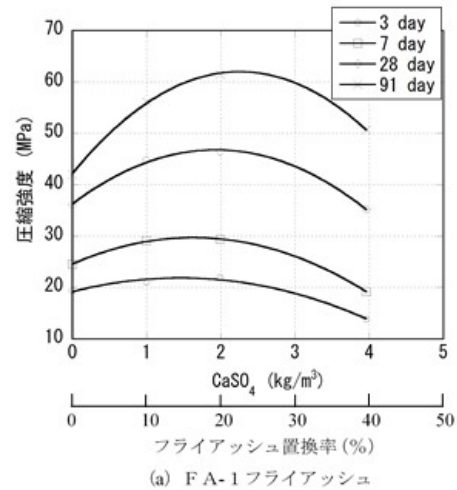


(a) フライアッシュ置換率10%

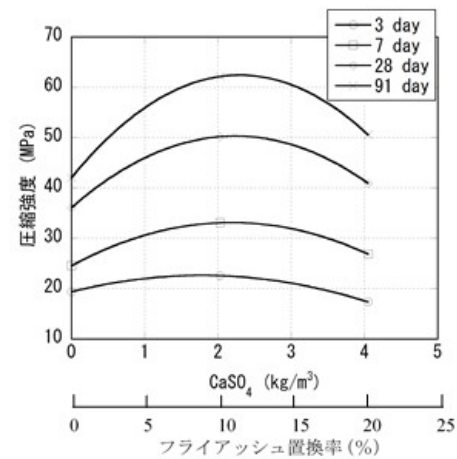


(b) フライアッシュ置換率20%

図-2 圧縮強度試験結果



(a) FA-1フライアッシュ



(b) FA-2フライアッシュ

図-3 Anhydrite量と圧縮強度の関係

図-2 圧縮強度試験結果

4. 研究成果

- ①排出されるフライアッシュの特性が均一ではないこと及び放射性物質を含有していること、フライアッシュの使用に関する示方書等の基準が存在せず、フライアッシュを混和材として使用したコンクリートの圧縮強度特性が明確でないことがわかった。
- ②強度及び二酸化炭素排出量の両方を考慮した場合、高炉セメントを使用し、セメント：水酸化カルシウム比=1:0.7の配合が最も優れていることを明らかにした。
- ③Anhydriteを含むフライアッシュを混和材として使用した場合、圧縮強度はAnhydriteを含まないフライアッシュを混和材として使用した場合よりも、全ての材齢において高い強度を示し、そのAnhydriteの最適量はコンクリート1m³当たり1.5~2.5kgであった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- (1) 鹿島大雄, 鈴木敦詞, プシュパラル ディニル, モンゴル産高カルシウムフライアッシュを使用したコンクリートの強度特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.121-126, 2015, (査読あり)
- (2) Hiroo Kashima, Atsushi Suzuki, Dinil Pushpalal, O. Batmunkh, Study on Strength Properties of Concrete Using High Calcium Mongolian Fly Ash, Proceedings of the 14th Annual Concrete Conference, Ulaanbaatar, Mongolia, pp.10-15, 2015. (査読あり)
- (3) Atsushi Suzuki, Hiroo Kashima, Dinil Pushpalal, O. Batmunkh, Prediction Model for Compressive Strength of Fly Ash Concrete, Proceedings of the 14th Annual Concrete Conference, Ulaanbaatar, Mongolia, pp.16-20, 2015. (査読あり)
- (4) Dinil Pushpalal, Hiroo Kashima, Atsushi Suzuki, O. Batmunkh, G. Oyunbold, Mix Proportioning with Mongolian Fly Ash, Proceedings of the 13th Annual Concrete Conference, School of Technology in Darkhan-Uul Aimag, Mongolian University Science and Technology, Mongolia, ISBN: 978-99973-824-1-2, pp. 145-152, 2014. (査読あり)
- (5) Dinil Pushpalal, O. Batmunkh, S. Munkhbaatar, G. Oyunbold, Hiroo Kashima, Making Concrete Stronger and Greener with Mongolian Fly Ash (Part 1), Proceedings of the 12th Annual Concrete Conference, Ulaanbaatar, Mongolia, ISBN: 978-99973-824-1-2, pp. 118-128, 2013. (査読あり)

〔学会発表〕(計3件)

- (1) 鈴木敦詞, 鹿島大雄, プシュパラル ディニル, モンゴル産フライアッシュを混和したコンクリートの強度発現予測式, 日本建築学会東北支部研究報告集 構造系, Vol.78, pp.153-156, 2015年6月21日, 山形大学(山形)
- (2) 鹿島大雄, 鈴木敦詞, プシュパラル ディニル, モンゴル産フライアッシュを混和したコンクリートの強度発現特性 その1 モンゴル産フライアッシュの性質と実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (頁:71-72), 2015年9月4日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県)
- (3) 鈴木敦詞, 鹿島大雄, プシュパラル ディニル, モンゴル産フライアッシュを混和したコンクリートの強度発現特性 その2 圧縮強度試験結果と強度予測式の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (頁:73-74), 2015年9月4日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕(計0件)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
プシュパラル ディニル (Pushpalal Dinil)
東北大学・大学院国際文化研究科・教授
研究者番号: 10361148
- (2) 連携研究者
松本 年史 (Matsumoto Toshifumi)
共立女子大学・家政学部・教授
研究者番号: 70316454

齋藤 潔 (Saito Kiyoshi)
桐蔭横浜大学・医用工学部・教授
研究者番号: 90225699