

論文 フライアッシュ IV 種のプレキャストコンクリート製品への利用に関する基礎的研究

北辻 政文*1・中 洗乃*2

要旨：福島県浜通りは石炭火力発電所が多く、わが国で最大量の 120 万 t/年以上のフライアッシュが発生している。本研究では、有効利用率が小さい JIS フライアッシュ IV 種を、工期の短縮や合理施工の観点から優れているプレキャストコンクリート製品に利用するため、フレッシュコンクリート試験、圧縮強度試験、凍結融解試験により、配合を検討した。研究の結果、フライアッシュ IV 種を利用したプレキャストコンクリート製品は、内割 10%、外割 10% の場合、強度および耐久性等の品質基準をいずれも満足し、普通コンクリートと同等の品質を有することが明らかとなった。

キーワード：JIS フライアッシュ IV 種、プレキャストコンクリート製品、圧縮強度、AE 剤、耐凍性

1. はじめに

福島県の浜通り地区には首都圏および東北地方の電力供給源として石炭火力発電所が多数建設されている。とくに 2011 年の東日本大震災の影響から原子力発電所が停止し、それ以降、安定的な電力供給源として石炭火力発電への期待は大きいものになっている。石炭火力発電所では石炭(微粉炭)が燃やされるため大量の石炭灰が発生しており、その量は浜通りだけでも約 120 万 t/年を超えている。石炭灰にはフライアッシュ(以下 FA と記す)とクリンカーアッシュがあり、その発生割合は概ね 9:1 程度である。

FA は、コンクリート用混和材として I～IV 種まで日本工業規格(JISA 6201)が設けられており、利用が期待されている。とくに、FA コンクリートは、融雪剤が撒かれる寒冷地や海岸構造物において耐塩害性の向上やアルカリシリカ反応対策の一つとして利用が期待されている。さらに CO₂ の排出量の低減対策としても注目されている。しかし、コンクリート用混和材として積極的に利用されているのは、フライアッシュ II 種(以下 FA (II) と記す)のみであり、II 種より発生量の多いフライアッシュ IV 種(以下 FA (IV) と記す)のみはほとんど活用されていないのが現状である。これまで FA (IV) 相当品のコンクリートへ利用は、分級せずに原粉としてアッシュクリート¹⁾、Neo Ash クリート²⁾、FS コンクリート³⁾等へ利用されてきた。FA (IV) は安定的に供給されることから貴重な地域資源ととらえることができるが、その有効利用の大半はコンクリート原料である粘土の代替であり、FA (IV) の特性を活かした高度な有効利用とはいえない。そこで本研究では、FA (IV) のコンクリート用混和材としての有効利用について特にプレキャストコンクリート製品(以下 PCa 製品と記す)への適用について研究を行

った。

公共工事においては、工期の短縮や合理施工の観点から PCa 製品の利用割合が増えており、今後も PCa 製品の利用拡大が見込まれている。とくに気象条件の厳しい東北地方においては、低温期の現場打設コンクリート施工に比べて、PCa 製品による施工は冬季のコンクリートの強度発現不足を気にすることなく利用でき、大幅な工期の短縮となる。しかし、PCa 製品への FA の利用に関する研究⁴⁾は少ない。そこで、本研究では、東北電力原町火力産 FA (IV) を PCa 製品へ活用することを目的とする。本研究により PCa 製品の材料として活用できれば、将来的にも十分な性能を確保され、安定された利用が見込まれる。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) FA

実験は福島県の 4 カ所の PCa 製品工場(A～D)で実施した。使用した FA (IV) を写真-1 に、品質を表-1 に示す。外観上灰白色を呈し FA (II) と変わらない。顕微鏡写真では FA 特有の球形粒子も認められる。品質試験結果においても大きな問題点となる点は 1 つもなく、JIS 規格(コンクリート用 FA)の IV 種の規定値を全て満足している。また、FA (II) の規定値と比較しても比表面積

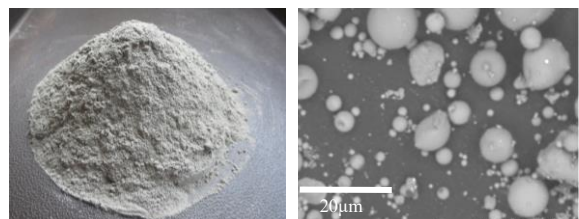


写真-1 FA (IV)

*1 宮城大学 食産業学群 教授 博 (農) (正会員)

*2 宮城大学 食産業学群

表-1 FA (IV) の品質

試験項目	試験値												JIS 規格値		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	II種	IV種	
二酸化けい素(%)	60.7	50.7	61.0	60.1	59.7	59.3	57.5	57.9	58.7	63.1	69.8	63.4	45.0 以上		
湿分(%)	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.0 以下		
強熱減量(%)	2.0	2.0	2.2	2.1	2.2	2.1	2.2	2.0	2.6	2.5	2.9	2.6	5.0 以下		
密度(g/cm ³)	2.12	2.12	2.11	2.13	2.17	2.13	2.19	2.22	2.22	2.17	2.12	2.15	1.95 以上		
粉末度	45 μ 残分(%)	21	23	20	18	17	19	17	27	26	25	27	28	40 以下	70 以下
	比表面積(cm ² /g)	2110	2080	2230	2310	2530	2460	2490	2580	2800	3080	3030	2960	2500 以上	1500 以上
フロー比值(%)	99	99	101	102	103	101	102	101	103	104	99	100	95 以上	75 以上	
活性度指数(%)	材齢 28 日	76	76	76	79	80	78	79	79	80	79	77	80 以上	60 以上	
	材齢 91 日	86	84	88	91	92	89	91	91	93	93	91	90	90 以上	70 以上

および材齢 28 日活性度指数を除けばすべての項目において満足していることから品質はII種相当と判断できる。

(2) その他のコンクリート材料

その他の材料は、それぞれの工場で使用されている材料を用いた。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³、比表面積 3,280cm²/g)、細骨材と粗骨材は表-2、表-3 に示す材料を用いた。混和剤にはポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能 AE 減水剤と樹脂酸塩を主成分とする AE 剤を用いた。

2.2 実験方法

先ず A 工場において、室内試験を行い、FA コンクリートの基本性能を確認し、次に 4 工場の実機を用いて PCa 製品を作製した。一般に PCa 製品には早強性が求められ、早期強度が小さい FA コンクリートは使われるケースは少ない。そこで、本研究では、混合割合を内割のみならず早期強度発現を高めるために外割も検討した。すなわち細骨材の代替として用いたのである。具体的な FA の混合量は内割 0~30% の 4 水準、外割 20% および内外割 20% (内割 10%, 外割 10%) の 1 水準とした。A 工場で行った実験の 6 配合を表-4 に示す。⑤と⑥の配合では、外割を使用した。⑤の場合、セメント量は普通コンクリートと同量であるため強度低下を抑えることができ

表-2 各工場 で用いた細骨材の物性

		A	B	C	D
粗粒率		2.90	2.90	2.84	2.95
密度 (cm ³ /g)	表乾	2.63	2.58	2.63	2.63
	絶乾	2.59	2.55	2.59	2.60
吸水率 (%)		1.82	1.04	1.61	1.09
微粒分量 (%)		3.30	1.13	3.18	2.50

表-3 各工場 で用いた粗骨材の物性

		A	B	C	D
粗粒率		6.60	6.70	6.97	6.66
密度(g/cm ³)	表乾	2.71	2.76	2.86	2.67
	絶乾	2.68	2.73	2.82	2.66
吸水率 (%)		0.89	1.03	1.56	0.60
微粒分量 (%)		0.40	0.48	1.38	0.50
単位容積質量(kg/L)		1.64	1.64	1.65	1.63
実積率 (%)		61.4	60.0	58.6	61.2

ると考えられる。とくに冬場の FA を用いた PCa 製品の製造時に有効である。

後述する A 工場での室内試験結果から、セメントの内割 10%、外割 10% の配合が PCa 製品に適していると判断し、実機による実験を行った。

各工場での試験練りの配合を表-5 に示す。配合設計では PCa 製品工場 で用いられる配合を基準とし、A 工場から順に、出荷材齢である 14 日の設計基準強度はそれぞれ 30、30、30、および 24N/mm² である。またフレッシュ

表-4 A 工場での試験練りコンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状試験結果

配合名	水結合材比 W/ (C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
			水 W	結合材 B		細骨材 S		粗骨材 G	高性能 AE 減水剤 AD (%)	AE 剤 AE
				普通ポルトランドセメント C	フライアッシュ FA(IV)	砂 SS	フライアッシュ FA(IV)			
FA0/0	42.6	40.0	145	340	—	731	—	1129	B×0.65	2A*
FA10/0		38.0		306	34	689	—	1156		15A
FA20/0		37.9		272	68	681	—	1149		18A
FA30/0		38.0		238	102	676	—	1139		23A
FA0/20	35.5	38.0		340	—	607	68	1167		20A
A10/10	38.8	37.8		306	34	646	34	1156		15A

*1A=B×0.001%

表-5 試験練りコンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状試験結果

配合名	水結合材比 W/ (C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)								フレッシュコンクリートの性状	
			水 W	結合材 B		細骨材 S		粗骨材 G	高性能AE 減水剤 AD (%)	AE剤 AE	スランブ SL (cm)	空気量 Air (%)
				普通ポルト ランド セメント C	フライ アッシュ FA(IV)	砂 SS	フライ アッシュ FA(IV)					
A工場	38.8	37.8	145	306	34	646	34	1156	B×0.65	15A*	11.5	4.0
B工場	40.3	38.0	142	317	35	637	35	1190	B×0.65	15A	7.0	3.7
C工場	39.0	33.6	156	360	40	531	40	1242	B×0.65	20A	9.0	5.0
D工場	47.1	41.3	155	297	33	703	33	1071	B×0.65	20A	10.0	5.9

*1A=B×0.001%

コンクリート試験では、各工場の通常業務で管理している目標空気 5±1.5%，目標スランブ 8cm±2.5cm および 12±2.5cm とした。

試験練りの試験項目は、圧縮強度試験（JIS A 1108）、凍結融解試験（JIS A 1148）、PCa 製品の曲げ耐力試験（JIS A 5372 推奨仕様 5-3）である。

圧縮強度試験の供試体は Φ10×20cm の円柱供試体とし、凍結融解試験用は 10×10×40cm の角柱供試体とした。いずれの供試体も、コンクリートを型枠に詰め、型枠のまま蒸気養生を行った。

コンクリートの練混ぜ方法は、セメントと細骨材を 10 秒間の空練り後、練り混ぜ水を注入し 60 秒間練り、粗骨材を投入して 60 秒間の本練りを行った。

蒸気養生は、通常工場で行われている前置き 2 時間、最高温度 65℃、保持 2.0 時間を目標とし約 24 時間後に脱型して、試験材齢まで屋外気中養生を行った。

3. 試験結果と考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

練上がり後のフレッシュコンクリートの性状結果はいずれも目標範囲内であった。

ここで FA を用いたコンクリートでは、FA に含まれる未燃カーボンが AE 剤を吸着してコンクリートへの空気の連行を妨げられること⁹⁾が知られており、AE 剤の使用量の決定に苦慮している。

そこで、試験前に AE 剤の使用量を決定する簡易法として、ポリマーセメントモルタル試験の空気量試験（JIS A 1171 準拠、写真-2）を行った。コンクリートの目標空気量を 4-6% とし、空気は粗骨材には含まれずモルタル内部に全て存在すると仮定してモルタル容積に対する空気量を算出するとおよそ 7-10% となる。すなわち変動の大きい FA コンクリートの空気量の調整を、モルタルのみで事前に行い AE 剤の添加量を決定し、その後コンクリートに適用するものである。これによりコンクリート

の空気量の調整が容易になる⁹⁾。図-1 にモルタル空気量とコンクリート空気量の試験結果を示す。両者には高い相関が認められた。モルタルは、モルタルミキサを用いてコンクリート配合のモルタル部分のみを計量、練り混ぜて作製した。

3.2 FA を用いたコンクリートの性質

(1) 圧縮強度試験結果

図-2 に A 工場での室内試験における圧縮強度試験結果を示す。PCa 製品では、脱型時（材齢 1 日）の強度が



写真-2 モルタルエアメータの外観

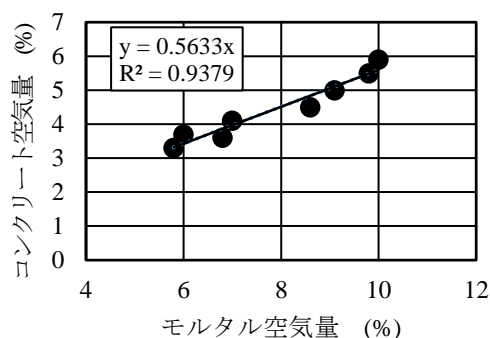


図-1 モルタル空気量とコンクリート空気量の関係

12N/mm², 出荷可能材齢(材齢14日)の強度が30N/mm²を目標としているが、いずれの配合のコンクリートもすべて目標値を満足した。

しかしFAの内割では、置換率が大きくなるほど、強度低下も大きかった。とくにFA30/0では、普通コンクリート(FA0/0)に比べて、約30%低下した。

これに対して外割添加の場合は大きく改善され、FA0/20ではFA0/0よりも1日強度は大きかった。1日強度が小さいと脱型の際に製品が欠け、ひび割れが起こる危険性が高い。

また、蒸気養生の場合、ポズラン反応がおこることも期待されたが、今回はFA添加による強度増進効果は確認できなかった。

図-3に各工場における圧縮強度試験結果を示す。出荷材齢である14日強度は、A工場から順に、それぞれ45.7, 41.8, 37.1, および25.1N/mm²であった。いずれも設計基準強度を満足していることが分かる。一般的にフライアッシュを用いると初期強度が小さいことが知られている⁸⁾。しかし、今回は内割10%、外割10%の配合としたことから問題

となる強度低下は認められなかった。

ただし、D工場のコンクリートの強度は、設計基準強度に対する安全率が小さく、強度発現が小さかった。これは冬季にPCa製品を作製したことから、脱型後の養生(屋外気中)の外気温が低かったことによると考えられる。この点は、今後検討すべき事項であり、冬季製造においても各工場において一般的に設定されている安全率を20%程度確保できる配合が求められる。

(2) 凍結融解試験結果

寒冷地のコンクリートは凍結融解作用により、スケーリングやポップアウトなどの劣化を生じることが多い。そのため、耐凍害性能が高いことは不可欠な条件⁹⁾である。凍結融解試験を行うに際し、供試体は蒸気養生終了後、材齢14日まで製品と同一養生(気中)を行い、その後14日間標準養生を行い、材齢28日から試験に供した。

凍結融解試験結果を図-4に示す。ここで、乾燥した供試体を用いてそのまま凍結融解試験を試験行くと、試験中に水和反応が促進されて動弾性係数が増加することから、凍結融解作用による動弾性係数の低下だけをみるのが難しくなる。そこで試験前に14日間の水中養生を行うことで、乾燥により一時低下した水和反応を再び促進し、試験中の動弾性係数の増加を防ぐことができた。

一般的に劣化判定基準として300サイクル終了時の相対動弾性係数60%が用いられるが、PCa製品水路のように小断面の場合の判定基準は、85%となる。図-4からすべてのコンクリートにおいて、試験終了時相対動弾性係数は、劣化判定基準を上回る結果が得られ、コンクリー

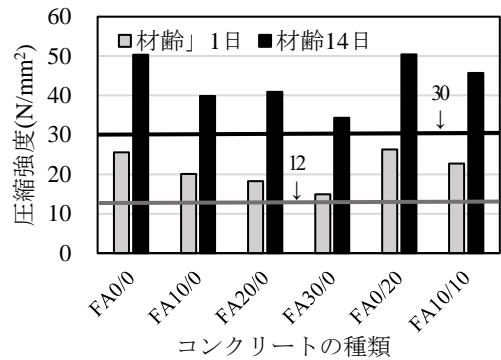


図-2 A工場の圧縮強度試験結果

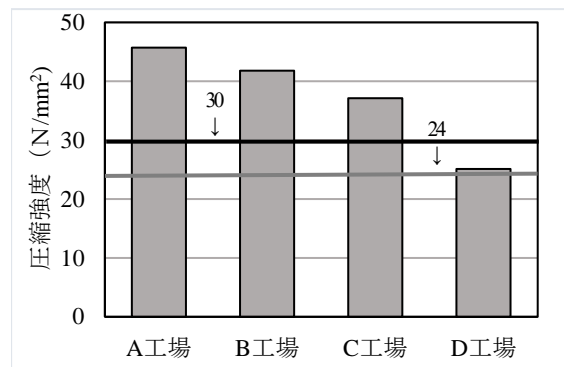


図-3 各工場の圧縮強度試験結果

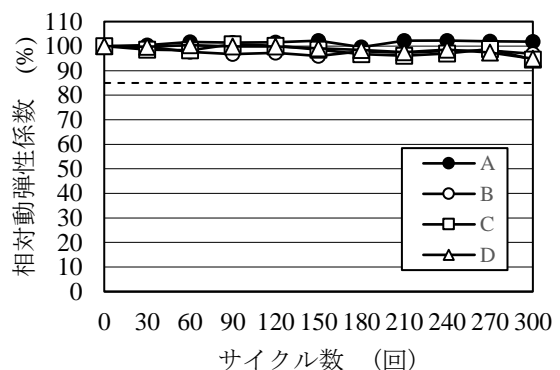


図-4 凍結融解試験結果

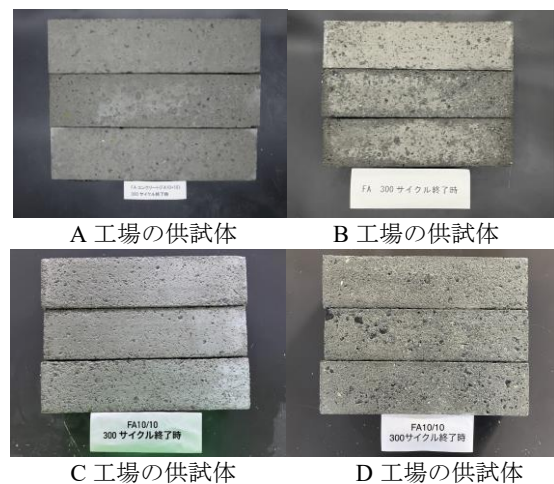


写真-3 試験終了時の供試体の外観

トの凍結融解抵抗性が高いことを確認できた。

試験終了時の供試体の状況を写真-3に示す。供試体にはいずれも大きなひび割れや欠損は見られないものの、全体的に若干の表面剥離が見られた。しかし、その質量減少率は0.5～2.3%と小さく、一般的な判定基準である3%以下を大きく下回り、良好であると判断される¹⁰⁾。

4. PCa製品の試作

4.1 材料および試験方法

前章までの試験が良好な結果であったので、引き続き、PCa製品工場の実機を用いて流し込み法によりPCa製品をFA内割10%外割10%の配合を用いて作製し、実用の可能性について検討した。

試作したPCa製品は、A工場では落ち蓋式U型側溝30-300の本体および蓋、B工場では同3種400A、C工場ではL型擁壁1500、D工場では護岸ブロックを作製した。コンクリートの養生は各工場で行われている蒸気養生（最高温度：65℃）である。いずれの供試体も型枠にコンクリートを詰め、テーブルパイププレートを用いて60秒間締め固めて、型枠のまま蒸気養生を行った。約24時間後に脱型し、試験材齢（14日）まで屋外で気中養生とした。試験項目は、外観評価と製品の曲げ耐力試験（JIS A 5363）である。

写真-4に、一例として、B工場におけるU型側溝30-300の本体の試作状況を示す。ミキサで練り上げられたフレッシュコンクリートが型枠に投入され、テーブルパイププレートで1～2分間締め固められる。その後打設面を鏝で仕上げをする。その後、蒸気養生室に移動し、前置き時間を2時間以上取り、最高温度65℃まで熱を加え、翌日脱型される。

出来上がった製品の一例として、B工場における落ち蓋式U型側溝3種400A、C工場におけるL型擁壁、D工場における護岸ブロックを写真-5に示す。あばた、色むら等も見られず、製品の外観評価は良好であった。

4.2 試験結果

(1) 製品による曲げ耐力試験結果

PCa製品の曲げ耐力試験は材齢14日で行った。ひび割れ耐力はそれぞれ、A工場の落ち蓋式U型側溝30-300の本体が72kN/2m、蓋が27kN/0.5m、B工場の落ち蓋式U型側溝3種400Aの本体が56kN/2m、蓋が28kN/m、C工場のL型擁壁1500が19.2kN/2mである。D工場の護岸ブロックは、無筋であるので試験は行っていない。

一例として、B工場における落ち蓋式U型側溝3種400Aの曲げ耐力試験の状況を写真-6に示す。試験はそれぞれ2本ずつ実施し、いずれも目標耐力まで荷重を架け、ひび割れが発生しないことを確認した。



写真-4 PCa製品の作製状況



落ち蓋式U型側溝 3種400A



L型擁壁



護岸ブロック

写真-5 PCa製品の外観



写真-6 PCa製品の曲げ試験状況

(2) PCa 製品の公共工事への利用

福島県双葉郡浪江町の公共工事において、A工場試作した落ち蓋式U型側溝 30-300の本体5本(10m)および蓋20枚を敷設した(写真-7)。その際FAが混入されていることがわかるように「FA」と水色のペンキで明記した。今後も継続して観察し、FA(IV)を使用したPCa製品の実用化へ向けて、さらに長期の強度データ等を蓄積する予定である。



写真-7 PCa製品の設置状況

5 まとめ

FA(IV)を用いたPCa製品に関する研究を行い、以下のことが明らかになった。

- 1) FA(IV)の外観は、FA(II)と同様で、その品質も概ねFA(II)のJIS規格値を満足する。
- 2) モルタルの空気量とコンクリートの空気量には高い相関が認められ、モルタルの空気量試験によりAE剤の添加量を決定すれば、FAコンクリートの空気量を容易に決定できることが示唆された。
- 3) FA(IV)の内割量を増やすとコンクリートの強度は低下する。内割30%の場合、約30%低下した。
- 4) FA(IV)を用いたPCa製品にはあばた、色むら等も見られず、外観評価は良好であった。
- 5) FA(IV)を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、適正な空気量(4~6%)を確保できれば、普通コンクリートと同等で高い。
- 6) FA(IV)を用いた配合の検討をした結果、FA(IV)をセメントの内割10%、外割10%の併用を行えば、強度および耐久性において問題なく、PCa製品へ適用可能であることが明らかとなった。

謝辞

本研究は日本大学工学部、東北電力株式会社、東北発電工業株式会社および宮城大学の共同研究(2021~2022年度)の一部として行われたものである。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 福留和人, 長瀧重義, 坂本守他: 最適含水比付近で練り混ぜたフライアッシュセメント混合物の振動締固め特性に関する研究, 土木学会論文集,

No.627/V-4, pp. 55-66, 1998.8.

- 2) 斉藤直, 浜田純夫, 松尾栄治他: 金属スラグを骨材とした石炭灰コンクリートの特性と配合設計手法, 土木学会論文集, No.693/VI-53, pp.187-204, 2000.12.
- 3) FS コンクリート利用手引書, 沿岸環境開発資源利用センター, 2000.
- 4) 例えば富山潤, 須田裕哉, 佐伯竜彦, 佐藤道生: 蒸気養生を受けるフライアッシュコンクリートの強度発現特性に関する基礎研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, 359-366, 2012
- 5) 須藤祐末, 佐藤募昭, 清原千鶴, 大谷俊浩: 石炭灰の未燃炭素がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 材料施工, pp.25-26, 2004.8
- 6) 榎本由香利, 出光隆, 山崎竹博, 渡辺明: モルタルを用いた高性能AE減水剤の性能評価試験に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.85-90, 2001
- 7) 本田悟, 古賀一八: フライアッシュを使用したセメント硬化体のポゾラン反応および細孔構造に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.141-146, 2018
- 8) 平野利光, 畑元浩樹: 石炭灰の利用(その2), 電力土木, No.254, pp.69-75, 1994.11
- 9) 北辻政文, 丹野恒紀, 吉田修栄, 遠藤孝夫: 再生骨材Mのプレキャストコンクリート製品への利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1469-1475, 2010
- 10) 竹田宣典, 十河茂幸: 凍結融解と中性化の複合分化作用を受けるコンクリート耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.735-740, 2002