

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760424

研究課題名（和文） 再生材料を複合混合したコンクリートの強度・耐久特性と高機能化を指向した最適調合

研究課題名（英文） A study on properties and the optimum mix proportion of concrete with fly ash, recycle aggregate and eco cement

研究代表者

高巢 幸二 (TAKASU KOJI)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：60336948

研究成果の概要（和文）：普通エコセメント，フライアッシュおよび再生骨材 M を使用したコンクリートの強度特性について検討を行った結果，普通エコセメントを使用したコンクリートにおける強度特性の傾向は，多くの場合で一般的なコンクリートと同様であった。一方で，再生骨材 M に起因する強度低下は，圧縮強度が 60N/mm² 以下の領域で比較的小規模に，60N/mm² を超える領域で顕著にあらわれた。副産物系粉体のような微粉末を外割混合するとマトリクスが緻密化されることである程度の ASR 抑制効果が期待できるものの，ポズラン反応を有するフライアッシュによる ASR 抑制効果の方が大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In late years, the opportunities to use the materials which were made from by-products increase in the concrete industry all over the world. In such background, we pay attention to eco-cement, fly ash and recycled aggregate. In this study reports the results of the experiments designed to clarify the strength properties of the concrete used these materials. At the water-cement ratio of 0.65 – 0.20, the compressive strength of eco-cement concrete dropped by mixing recycled aggregate class M. This drop was relatively small at the compressive strength less than 60N/mm², and was remarkable at the compressive strength more than 60N/mm²: lower limit of ultra-high strength concrete.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：建築材料学・施工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：再生骨材，エコセメント，フライアッシュ，外割混合，アルカリ骨材反応

1. 研究開始当初の背景

現在、再生骨材は様々な研究者によって研究が進められており、再生骨材の JIS 化の段階まで至っている。コンクリートの再資源化工場の多くで再生骨材 H の生産に挑戦しているが、吸水率の基準を満たすことが難しく、結果として再生骨材の生産を諦め、従来通り

路盤材として出荷している工場が多い。特に北部九州地区で再生骨材 H を製造している工場は、ほとんど見受けられない。吸水率の高い骨材を使用するとコンクリートの強度発現性状、及び耐久性性状に影響を及ぼしてしまうが、再生材料をコンクリートに使用するには、再生骨材 M、再生骨材 L のような低品質

の骨材を、強度・耐久性の低下を招かず容易に使用できるコンクリートを開発する必要がある。また、フライアッシュが微粒分を多量に含むことからコンクリートの組織が緻密化し、アルカリシリカ反応（ASR）抑制効果を示すとともに養生条件に左右されない強度発現性状を示すことを確認している。この理由は種々の要因が考えられるが、フライアッシュを外割混合したコンクリート中の水分移動の抑制に起因する仮説（図2）が考えられ、この検証が必要である。この効果を利用すれば吸水率の高い再生骨材を使用しても強度低下が生じにくくなる可能性がある。フライアッシュを大量に混合したコンクリートの強度発現性状、及び高耐久性性状を利用して、低品質な再生骨材が構造用コンクリートに使用可能となれば、再生材料の利用促進が加速されると考える。

2. 研究の目的

(1) 普通エコセメント、フライアッシュおよび再生骨材 M を使用したコンクリートの強度特性について、水セメント比の条件を変化させた各種実験を行うことで、超高強度コンクリートの領域における特性までを明らかにした。

(2) FA の外割混合による ASR 抑制についてポゾラン反応以外のペーストの緻密化による微粉末効果の影響を検討し、ポゾラン反応によるものと微粉末効果によるものとがどの程度影響しているか把握することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 再生材料を複合混合したコンクリートの超高強度領域までの強度特性

今回の実験で使用した材料の物性を表-1 に示す。セメントには普通エコセメント（JIS R 5214）、骨材には天然骨材と再生骨材を使用した。再生骨材の品質は、細骨材および粗骨材ともに JIS A 5022 に規定されるコンクリート用再生骨材 M に適合するものであった。フライアッシュには JIS A 6201 の II 種に適合するものを使用した。

調合(1)を表-2 に示す。幅広い強度域での強度特性を明らかにする観点から、水セメント比を 55%、40%、25%および 20%に設定した。NN シリーズは海砂と碎石を組み合わせたもの、RN シリーズは海砂と再生粗骨材 M を組み合わせたもの、RR シリーズは再生細骨材 M と再生粗骨材 M を組み合わせたものを意味する。これらの 3 つのシリーズに対して、それぞれフライアッシュ 200kg/m³ を細骨材と置換することで外割混合した。

試料の練混ぜには、オムニミキサーを使用した。水セメント比が 55%および 40%の試料は目標スランブを 18.0±2.5cm、水セメン

ト比が 25%および 20%の試料は目標スランブフローを 60±10cm に設定し、両者とも目標空気を 3.0±1.0%に設定した。試料はφ100×200mm の簡易型枠に打設され、材齢 1 日に脱型、その後試験材齢まで標準養生された。

表-1 使用材料(1)

項目/記号	種類	主な物性
セメント/C	普通エコセメント	密度 3.15g/cm ³
水/W	上水道水	—
細骨材/S	海砂 北九州市岩屋沖産	絶乾密度 2.54g/cm ³ 吸水率 1.55% 粗粒率 2.57
	再生細骨材 M	絶乾密度 2.20g/cm ³ 吸水率 4.43% 粗粒率 2.90
粗骨材/G	碎石 岡垣町上畑産	絶乾密度 2.72g/cm ³ 吸水率 1.69% 実積率 62.2% 絶乾密度 2.81g/cm ³ 吸水率 1.06% 実積率 57.62%
	再生粗骨材 M	絶乾密度 2.44g/cm ³ 吸水率 3.64% 実積率 59.4%
混和材/F	フライアッシュ	密度 2.17 g/cm ³ 強熱減量 2.32% 比表面積 3,470cm ² /g 密度 2.21 g/cm ³ 強熱減量 1.40% 比表面積 3,410cm ² /g
化学混和剤 /AD	高性能 AE 減水剤 標準型 I 種	ポリカルボン酸 エーテル系

表-2 調合(1)

記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					AD (C+F)%
		W	C	F	S	G	
NN55-55	55	180	327	0	636	1154	0
RN55-55					683	971	0
RR55-55					601	971	0
NN55-33				200	410	1154	0.4
RN55-33					457	971	0.4
RR55-33					402	971	0.3
NN40-40	40	170	425	0	699	1068	0.3
RN40-40					742	898	0.4
RR40-40					653	898	0.3
NN40-27				200	472	1068	0.4
RN40-27					516	898	0.5
RR40-27					454	898	0.4
NN25-25	25	165	660	0	596	971	0.8
RN25-25					570	869	0.7
RR25-25					493	869	0.5
NN25-19				200	366	971	1.5
RN25-19					340	869	1.5
RR25-19					294	869	1.3
NN20-20	20	165	825	0	425	1034	1.4
RN20-20					467	869	1.1
RR20-20					411	869	0.9
NN20-16				200	198	1034	2.7
RN20-16					241	869	2.5
RR20-16					212	869	2.5

(2) 副産物系粉体の外割混合がコンクリートのアルカリシリカ反応に及ぼす影響

表-3 に使用材料、表-4 に調合(2)を示す。単位セメント量が多いほど ASR による膨張が

顕著であったので、全ての調合は、単位水量を 185kg/m³、単位セメント量を 515kg/m³ の水セメント比 36%で一定とした。混和材を混合した調合では、細骨材を 5, 10, 20%で体積置換した 6 調合、混和材無混合の調合が 1 調合、合計 7 調合とした。また、各調合には等価 Na2O 量で 2.40kg/m³ の粒状水酸化ナトリウムをあと添加法で添加した。目標空気量は全ての調合で 4.5±1.5%となるように計画した。

表-3 使用材料(2)

項目	種類	物性	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³	C
水	上水道	—	W
細骨材	海砂 (北九州市岩屋沖産)	絶乾密度 2.54g/cm ³ 吸水率 1.55% 実積率 60.3% 粗粒率 2.7	S
粗骨材	反応性砕石 (安山岩)	絶乾密度 2.68g/cm ³ 吸水率 2.14% 実積率 60.7% 粗粒率 6.8	G
混和材	フライアッシュ (JIS II 種適合品)	密度 2.25g/cm ³ 強熱減量 2.22% 比表面積 3410cm ² /g フロー値比 106% 活性度指数(28日) 82% 活性度指数(91日) 97%	FA
	石灰石微粉末 (福岡県田川産)	密度 2.71g/cm ³ 比表面積 3470cm ² /g	LP
混和剤	高性能減水剤 標準形	ポリカルボン酸エーテル系 密度 1.06g/cm ³	AD
アルカリ調整剤	水酸化ナトリウム	—	—

表-4 調合(2)

調合記号	W/C (%)	W/B (%)	単位質量 (kg/m ³)					
			W	C	FA	LP	S	G
36-0	36	36			0		669	
FA36-5		30			111		540	
FA36-10		25			221	0	411	
FA36-20	36	19	185	515	442		153	998
LP36-5		28			0	139	540	
LP36-10		23			0	277	411	
LP36-15		17			0	554	153	

4. 研究成果

(1) 再生材料を複合混合したコンクリートの超高強度領域までの強度特性

① 経時変化

圧縮強度の経時変化を図-1 に示す。すべての試料において材齢の経過にともなう圧縮強度の増進が確認された。その上で、全体的に NN シリーズ、RN シリーズ、RR シリーズの順に圧縮強度が低くなる傾向が確認された。この傾向は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに再生骨材を混入した場合の強度特性について報告した多くの論文、および水セメント比を 65%とした既報と同様であった。このことから、普通エコセメントを使用したコンクリートにおいて

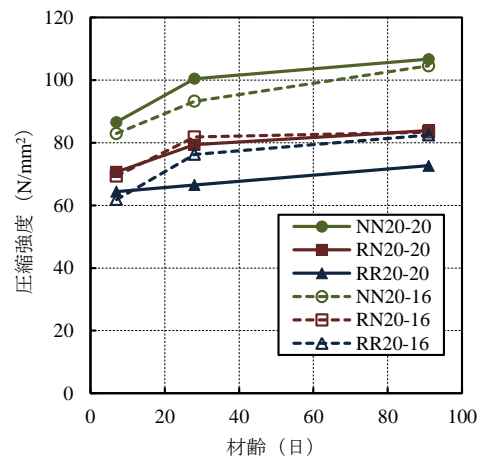
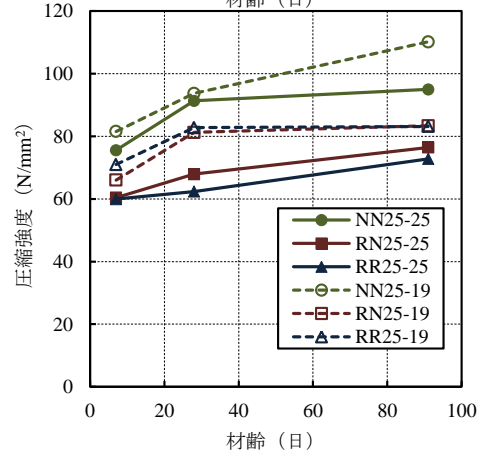
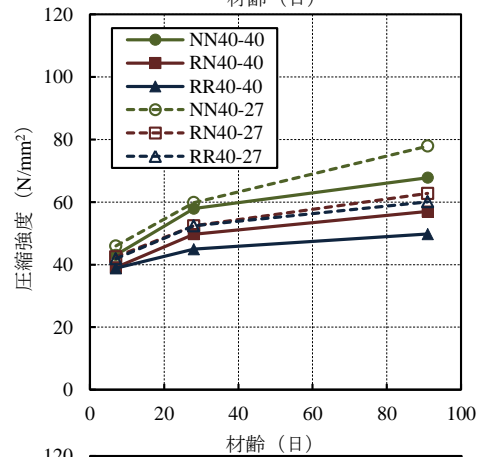
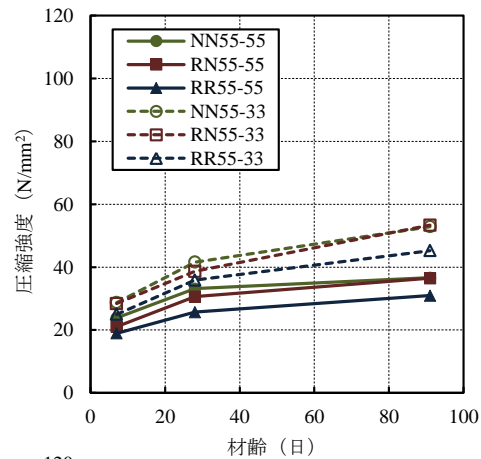


図-1 圧縮強度の経時変化

も、水セメント比が65%から20%の範囲で、一般的なコンクリートと同様に、再生骨材 M が混入することによって圧縮強度が低下することが示された。

また、フライアッシュを細骨材代替として外割混合した試料は、同水セメント比かつ同じ骨材の組み合わせにおいて、セメント単味の試料より圧縮強度が高くなる傾向が確認された。一般的なコンクリートにおいて、フライアッシュを外割混合することで圧縮強度が増加することが、多くの論文で報告されている。普通エコセメントを使用した今回の実験結果においては、水セメント比が比較的高い55%でフライアッシュを外割混合することによる強度増加が顕著にあらわれた。特に、普通骨材を使用した NN55-55 より再生骨材 M を使用した RR55-33 の方が高い圧縮強度を示すほどであった。

一方で水セメント比が20%の場合、フライアッシュを外割混合しても圧縮強度が増加せず、逆にセメント単味の試料より圧縮強度が低くなった。この逆転現象は、コンクリート中の粉体量が過大になったことで生じたと考えられる。今回の実験において単位粉体量が最大となった NN20-16 は、粉体成分が1,025kg/m³に達した。今回の実験で使用した高性能 AE 減水剤とミキサーの組み合わせでは、同試料を十分に攪拌できなかったことが考えられる。以下の考察では、NN20-16, RN20-16 および RR20-16 の実験結果を除外した。

② 再生骨材を使用することによる強度低下

RN シリーズの圧縮強度を NN シリーズと比較したものを図-2 に示す。同図における近似式は、セメント単味の試料における関係をあらわしたものである。60N/mm² を境界にして圧縮強度の傾向が異なった前述の実験結果を反映させるため、NN シリーズの強度が60N/mm² 以下の場合と60N/mm² を超える場合に分けて近似式を求めた。本論文の実験結果から、原コンクリートの圧縮強度が60N/mm² を超えると、再生粗骨材 M が混入することによる圧縮強度の低下が増大することが示される。こうした傾向は、セメント単味とフライアッシュを外割混合した試料に共通して確認された。

RR シリーズの圧縮強度を NN シリーズと比較したものを図-3 に示す。同図における近似式も、図-2 と同様に、セメント単味の試料における関係をあらわしたものであり、60N/mm² によって場合分けをしたうえで求められたものである。圧縮強度が60N/mm² を超える領域で、再生粗骨材 M と再生細骨材 M がコンクリートの圧縮強度に与える負の影響が増大したことが示された。その一方で、フライアッシュを外割混合した RR シリーズは、全体的にセメント単味の近似式の上側に分

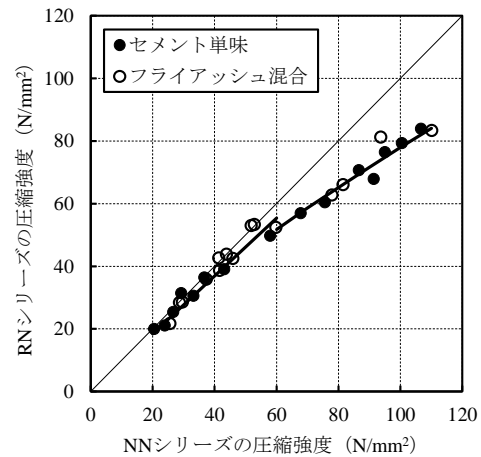


図-2 圧縮強度の比較 (NN-RN)

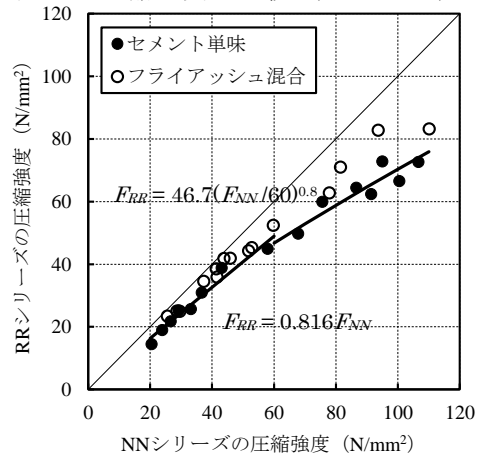


図-3 圧縮強度の比較 (NN-RR)

布した。このことから、再生粗骨材 M と再生細骨材 M を使用することによる圧縮強度の低下が、セメント単味の試料より緩和されたことが示される。この強度低下緩和の傾向は、圧縮強度が高いほど、特に NN シリーズの圧縮強度が60N/mm² を超える領域において顕著にあらわれた。

(2) 副産物系粉体の外割混合がコンクリートのアルカリシリカ反応に及ぼす影響

① 膨張率の経時変化

図-4 に膨張率の経時変化を示す。混和材無混合の 36-0 は本研究の材齢内において直線的な膨張傾向を示し、JCI AAR-3 の反応性基準である0.1%の膨張率4)を超えており、「無害でない」と判定された。LP を外割混合した供試体は36-0 と比べ、低い膨張率の値を推移し、ポゾラン活性を有しない混和材でも微粉末を外割混合することである程度の ASR 抑制効果があることが推察される。FA を外割混合した供試体は、混合量が多くなるにつれて、36-0 との膨張率の差が顕著になる傾向を示し、材齢154日で膨張がほぼ停止した。単位セメント量を多くしても FA を外割混合することで ASR の抑制効果を確認することができ、その抑制効果は混合量が増えるほど大きくなる傾向を示した。また、膨張開始材齢に注目すると、36-0 と LP を混合した供試体

は材齢 28 日から膨張を開始したが、FA を 5% と 10% 混合した供試体は材齢 56 日、20% 混合した供試体は材齢 91 日から膨張を開始した。このことからポズラン活性を有する粉体を外割混合することにより、膨張開始材齢が遅れることが窺える。

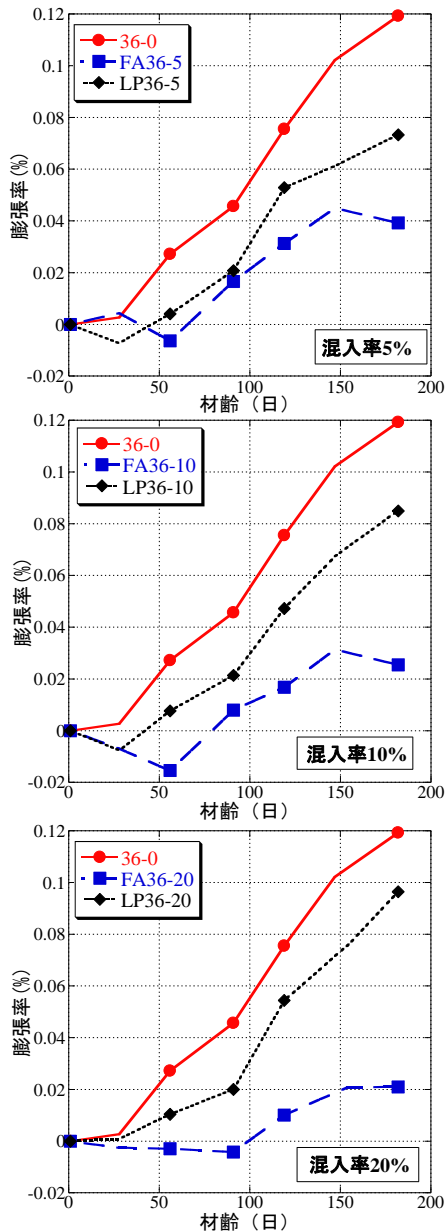


図-4 膨張率の経時変化

②水酸化カルシウム含有率の経時変化

図-5 にモルタル部分の水酸化カルシウム含有率の経時変化を示す。材齢 28 日において、36-0 と LP を外割混合した供試体を比較すると、LP を混入した供試体の方が低い水酸化カルシウム含有率を示した。これは LP を細骨材の代替として混入しているためである。次に同じ混入量の FA と LP の供試体を比較すると、FA を外割混合した供試体の方が低い水酸化カルシウム含有率を示した。この

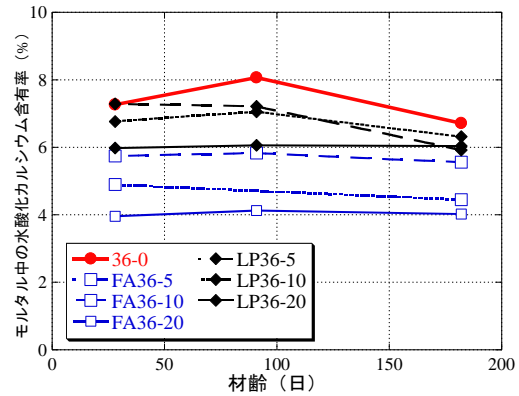


図-5 水酸化カルシウム含有率の経時変化

差は、圧縮強度の試験結果と同様に、ポズラン反応により水酸化カルシウムが消費されたことが原因と考えられる。材齢 182 日までにおいて比較的高い膨張率を示した 36-0 と LP を外割混合した供試体の水酸化カルシウム含有率は、材齢 91 日以降において最大 1.4% の減少傾向を示した。これに対して FA を外割混合した供試体の水酸化カルシウム含有率はほとんど変化しなかった。従って FA を外割混合した供試体では ASR による水酸化カルシウムの消費がほとんど生じていないと考えられる。ただし、今回の結果において材齢の進行に伴うポズラン反応による水酸化カルシウムの消費も確認されなかった。これは、供試体の養生方法を 40℃封緘としたため材齢初期段階からポズラン反応が生じ、長期材齢においてポズラン反応が顕著に表れなかったことが一つの要因と考えられる。

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 17 件)

- ① 菅祐亮, 高巢幸二, 陶山裕樹, 小山田英弘, 松藤泰典: 品質の異なる再生骨材を使用したコンクリートの諸特性に関する研究 その 1 再生粗骨材と再生細骨材混合組合せの影響, 日本建築学会研究報告九州支部(大分), 査読無, No. 52. 1, 2013, pp129-132
- ② 内村謙太, 高巢幸二, 陶山裕樹, 小山田英弘, 松藤泰典: 副産物系粉体を外割混合した三成分系コンクリートの諸特性に関する研究 その 1 フライアッシュと高炉スラグ微粉末の混入割合の影響, 日本建築学会研究報告九州支部(大分), 査読無, No. 52. 1, 2013, pp13-16
- ③ 菅祐亮, 松藤泰典, 高巢幸二, 陶山裕樹: 再生材料を複合混合したコンクリートの諸性状に関する研究 その 3 再生骨材の影響を考慮した強度予測式, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 査読無,

- A-1, 2012, pp851-852
- ④ 内村謙太、松藤泰典、陶山裕樹、高巢幸二：コンクリートの粉体水比強度則仮説その2 三成分系コンクリートにおける検討，日本建築学会学術講演梗概集（東海），査読無，A-1，2012，pp549-550
 - ⑤ 松藤泰典、陶山裕樹、高巢幸二：コンクリートの粉体水比強度則仮説 その1 概念とフライアッシュコンクリートにおける検討，日本建築学会学術講演梗概集（東海），査読無，A-1，2012，pp574-575
 - ⑥ Hiroki SUYAMA、Koji TAKASU、Yasunori MATSUFUJI：THE STRENGTH PROPERTIES OF THE CONCRETE USED ECO-CEMENT, FLY ASH AND RECYCLED AGGREGATE，37th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 査読有，2012，pp391-398
 - ⑦ 陶山裕樹、高巢幸二、松藤泰典：フライアッシュと再生骨材を混合したエコセメントコンクリートの超高強度領域までの強度特性，コンクリート工学年次論文集，査読有，No. 34，2012，pp1498-1503
 - ⑧ 高巢幸二、陶山裕樹、松藤泰典：副産物系粉体の外割混合がコンクリートのアルカリシリカ反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，査読有，No. 34，2012，pp940-945
 - ⑨ 西本智雄、高巢幸二、松藤泰典、真子大樹：副産物系粉体を外割混合したコンクリートのASR抑制効果に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集（関東），査読無，A-1，2011，pp609-610
 - ⑩ 西本智雄、高巢幸二、松藤泰典、真子大樹：副産物系粉体を外割混合したコンクリートのASR抑制効果に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集（関東），査読無，A-1，2011，pp609-610
 - ⑪ 田中秀明、高巢幸二、松藤泰典、高原克佳：再生材料を複合混合したコンクリートの諸特性に関する研究 その2 力学特性とマイクロクラックによる破壊性状の観察，日本建築学会学術講演梗概集（関東），査読無，A-1，2011，pp263-264
 - ⑫ 高原克佳、高巢幸二、松藤泰典、田中秀明：再生材料を複合混合したコンクリートの諸性状に関する研究 その1 エコセメントと再生骨材の影響，日本建築学会学術講演梗概集（関東），査読無，A-1，2011，pp261-262
 - ⑬ 高巢幸二、松藤泰典：フライアッシュを外割大量混合したコンクリートの力学性状と強度推定，混和剤を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム論文集，査読有，2011，pp13-20
 - ⑭ 田中秀明、高巢幸二、松藤泰典、松尾一輝：フライアッシュを外割混合した再生

- 骨材コンクリートの力学性状に関する研究その5 エコセメントを使用した高強度領域，日本建築学会学術講演梗概集（北陸），査読無，A-1，2010，pp1075-1076
- ⑮ 松尾一輝、高巢幸二、松藤泰典、田中秀明：フライアッシュを外割混合した高強度エコセメントコンクリートの諸特性に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集（北陸），査読無，A-1，2010，pp743-744
 - ⑯ 石山貴英、高巢幸二、松藤泰典：フライアッシュ外割混合コンクリートのASR抑制に関する一考察，日本建築学会学術講演梗概集（北陸），査読無，A-1，2010，pp741-742
 - ⑰ 高巢幸二、松藤泰典：コンクリートの力学特性を考慮した環境負荷物質排出量と建物の環境影響評価，コンクリート工学年次論文集，査読有，No. 32，2010，pp1799-1804

〔学会発表〕（計4件）

- ① 高巢幸二：副産物系粉体の外割混合がコンクリートのアルカリシリカ反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次大会2012（広島），2012年7月，広島国際会議場
- ② 高巢幸二：副産物系粉体の外割混合がコンクリートのアルカリシリカ反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次大会2012（広島），2012年7月，広島国際会議場
- ③ 高巢幸二：フライアッシュを外割大量混合したコンクリートの力学性状と強度推定，混和剤を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム，2011年12月，発明会館
- ④ 高巢幸二：コンクリートの力学特性を考慮した環境負荷物質排出量と建物の環境影響評価，コンクリート工学年次大会2010（さいたま），2010年7月，大宮ソニックシティ

〔その他〕

ホームページ等

<http://esd.env.kitakyu-u.ac.jp/takasu>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高巢 幸二 (TAKASU KOJI)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授
研究者番号：60336948