

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420558

研究課題名(和文) 異種の副産物粉体と再生骨材を複合混合した低炭素コンクリートの高性能化

研究課題名(英文) A study for improving the performance of low-carbon concrete with by-product powder and recycled aggregate

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・教授

研究者番号：60336948

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)：フライアッシュ、高炉スラグ微粉末の混和材と再生細骨材を複合混合したときの力学性状および耐久性状を検討した結果、細孔量と圧縮強度および乾燥収縮率の関係において、 $2\mu\text{m}$ 以下の細孔量で評価すると圧縮強度および乾燥収縮率ともに良好な線形関係が確認でき、再生細骨材と混和材を複合混合しても $2\mu\text{m}$ 以下の細孔量で評価できることが示唆された。

フライアッシュと再生骨材を複合混合したコンクリートの圧縮クリープ性状を検討した結果、フライアッシュを混合することによって、再生コンクリートの無載荷ひずみとクリープひずみを抑制することができ、既往のクリープ予測式に補正係数を適用すれば評価できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In the present, recycled aggregate attain the practical level as a recycled material. So, case study of using recycled aggregate is increased to use for the building structure. However, recycled aggregate has some issues to prevail using as building structures. The purpose of this study is to improve strength and suppress drying shrinkage and creep property by mixing fly ash in concrete with recycled aggregate. As a result, the compressive strength and drying shrinkage were improved by using blast furnace slag. The compressive strength and drying shrinkage were evaluated by pore volume of under the $2\mu\text{m}$. By mixing fly ash, creep coefficient of concrete with recycled aggregate could be suppressed more than ordinary concrete.

研究分野：建築材料・施工

キーワード：再生骨材 フライアッシュ 砕石粉 砕砂 流動性 クリープ 外割混合 最適調合

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東日本大震災を受けて、今後、スマート・レジリエント・シティの早急なる構築と同時に、国土強靱化に資する建設材料の開発が、現在の我が国の喫緊の課題の一つであると申請者らは思慮している。さらに、原子力発電の停止に伴う火力発電の需要の高まりから生じる膨大なフライアッシュの処理が重大な問題となりつつあり、今後積極的に産業副産物を大量混合した環境負荷の少ない低炭素コンクリートを使用して国土強靱化を図る必要がある。しかしながら、このようなコンクリートは、強度性状・耐久性性状に多くの問題を抱え、低炭素コンクリートの使用を消極的にしている。

2. 研究の目的

(1) フライアッシュ、高炉スラグ微粉末の混和材と再生細骨材を複合混合したときの力学性状および耐久性性状を検討した。再生骨材を用いて高強度、高耐久の実現と混和材を比較的大量に混入した時の効果を検証するために W/B = 30% に設定し、品質の異なる再生細骨材と各種混和材との組み合わせ、混和材の混入率の違いによる影響も検討した。

(2) フライアッシュを混合した再生コンクリートの圧縮クリープ性状を明らかにし、既往の予測式を用い、フライアッシュと再生骨材を併用した場合の圧縮クリープ性状の予測値精度を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 副産物粉体と再生骨材を複合混合した低炭素コンクリートの力学・収縮性状

表-1 に使用材料(1)を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材として標準砂と再生細骨材 M 種 (JIS A 5022), 再生細骨材 L 種 (JIS A 5023) を使用した。フライアッシュは JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」 種に適合するものを使用し、高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206 「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に規定される 4000 級に適合するものを使用した。表-2 に調合(1)を示す。3 シリーズに対してフライアッシュを内割で 10%、20%、30% 混入した調合を FA10、FA20、FA30 とし、高炉スラグ微粉末を内割で 10%、20%、30% 混入したものを BS10、BS20、BS30 とした。単位水量は 170kg/m³、単位セメント量は混和材無混合で 567kg/m³ とした。なお、実験はコンクリートから粗骨材を除いたモルタルで行った。目標モルタルフローは 18±2cm、目標空気量は 6.2±1.5% とし、測定項目は圧縮強度、乾燥収縮率、細孔容積とした。圧縮強度は 50×100mm の円柱供試体を用い、脱型は材齢 1 日に行い、その後 20±1 の環境下で水中養生とした。乾燥収縮率は JIS R 5021 に規定する 40×40×160mm の供試体用角柱型枠を使用し、材齢 91 日まで測定した。基長の測定後は温度 20±1.0、相対湿度 60±5.0% の恒温恒湿室で養生し、所定の材齢で長さ変化を測定した。また、細孔容積測定は材齢 28 日の圧縮試験後

の供試体を破砕して、アセトンを用いて水とを停止した後に D-dry 乾燥を行い、水銀圧入ポロシメータによって 6nm~90µm までの細孔容積を測定した。

表-1 使用材料(1)

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	上水道水	—	W
細骨材	標準砂	絶対密度 2.57g/cm ³	NS
		吸水率 1.26%	
		実積率 62.4%	
		粗粒率 2.60	
	再生細骨材 M (JIS A 5022)	絶対密度 2.21g/cm ³	MS
		吸水率 6.55%	
		実積率 63.8%	
		粗粒率 3.03	
	再生細骨材 L (JIS A 5023)	絶対密度 1.96g/cm ³	LS
		吸水率 11.1%	
		実積率 73.7%	
		粗粒率 3.21	
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	密度 2.95g/cm ³	BS
		比表面積 3970cm ² /g	
	フライアッシュ (JIS 種適合品)	密度 2.25g/cm ³	FA
		強熱減量 2.25%	
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	AD1
	AE剤	アルキルエーテル系	AD2

表-2 調合(1)

調合記号	W/C	W/B	単位質量 (kg/m ³)						
	(%)	(%)	W	C	FA	BS	S	G	
N	30.0	30	170	567	0	0	700	945	
M							643		
L							630		
N+FA10	33.3	30	170	510	57	0	692	934	
M+FA10							623		
L+FA10							580		
N+FA20	37.5	30	170	453	113	0	683	923	
M+FA20							628		
L+FA20							615		
N+FA30	42.9	30	170	397	170	0	675	912	
M+FA30							621		
L+FA30							608		
N+BS10	33.3	30	170	510	0	57	698	943	
M+BS10							628		
L+BS10							585		
N+BS20	37.5	30	170	453	0	113	696	940	
M+BS20							640		
L+BS20							627		
N+BS30	42.9	30	170	397	0	170	694	938	
M+BS30							638		
L+BS30							625		

(2) 副産物粉体と再生骨材を複合混合した低炭素コンクリートのクリープ特性

表-3 に使用材料(2)を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材として海砂と品質の異なる再生細骨材 (JIS A 5022 の M 規格、JIS A 5023 の L 規格のもの)、粗骨材として碎石と品質の異なる再生粗骨材 (JIS A 5022 の M 規格、JIS A 5023 の L 規格のもの) を使用した。フライアッシュは JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」 に規定される 種に適合するものを使用した。表-4 に調合(2)を示す。本実験の調合は単位水量を 180kg/m³、単位セメント量を 327kg/m³

で水セメント比を 55%と一定とした。フライアッシュを細骨材代替とする外割混合でコンクリート容積に対して5%とし、計4調合で実験を行った。クリープ試験は、JIS A 1157「コンクリートの圧縮クリープ試験方法」に準じひずみを測定した。試験体は材齢1日で脱型し、7日間20℃の水中で養生した後、クリープ試験を行う恒温室で気中養生した。この恒温室は湿度を厳密に管理することができなかったため、一定の湿度でクリープ試験を行うことができなかった。クリープ試験は分離式油圧ジャッキを用いた載荷装置を使用し、試験体を縦に3本ずつ重ねて設置した。載荷荷重は、材齢28日の圧縮強度の最大荷重の1/3とし、材齢28日より載荷を開始した。載荷荷重を決定するために100×200mmの円柱型枠を使用した圧縮強度試験用供試体を作製し、圧縮強度を測定した。圧縮強度試験用供試体はクリープ試験を行う恒温室で気中養生した。

表-3 使用材料(2)

項目	種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 [g/cm ³]
水	上水道水	-
細骨材	海砂 (北九州市岩屋沖)	絶対密度 2.59[g/cm ³], 吸水率 0.76%, 粗粒率 2.4, 実積率 61.2%
	再生細骨材M種 (JIS A 5022)	絶対密度 2.28[g/cm ³], 吸水率 5.93%, 粗粒率 2.6, 実積率 56.3%, 付着モルタル率 21.7%
	再生細骨材L種 (JIS A 5023)	絶対密度 2.01[g/cm ³], 吸水率 12.4%, 粗粒率 2.2, 実積率 52.5%, 付着モルタル率 43.4%
粗骨材	砕石 (岡垣町上堀)	絶対密度 2.69[g/cm ³], 吸水率 1.41%, 粗粒率 6.9, 実積率 56.7%
	再生粗骨材M種 (JIS A 5022)	絶対密度 2.45[g/cm ³], 吸水率 2.94%, 粗粒率 6.6, 実積率 58.2%, 付着モルタル率 13.98%
	再生粗骨材L種 (JIS A 5023)	絶対密度 2.30[g/cm ³], 吸水率 6.72%, 粗粒率 6.5, 実積率 55.1%, 付着モルタル率 42.38%
混和剤	AE減水剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
混和材	フライアッシュ (JIS 種適合品)	密度 2.27[g/cm ³], 強熱減量 1.96%, 比表面積 4150 [g/cm ²]

表-4 調合(2)

調合記号	W/C	W/B	単位質量 (kg/m ³)				
	(%)	(%)	W	C	FA	S	G
NN-FA	55	41	180	327	112	715	945
MM-FA					112	621	917
LL-FA					112	621	841
ML-FA					112	579	917
NN	55	55	180	327	0	832	945
MM					0	749	870
LL					0	698	885
ML					0	698	870

4. 研究成果

(1)副産物粉体と再生骨材を複合混合した低炭素コンクリートの力学・収縮性状

図-1に材齢28日および91日における混和材混入率と圧縮強度の関係を示す。FAシリーズにおいて、標準砂を用いたもので比較すると材齢28日および材齢91日ともに混入率10%で強度が増進し、その後混入率の増加とともに圧縮強度は低下した。その減少率は材齢28日より材齢91日のほうが小さかった。再生細骨材を用いたもので比較すると材齢28日ではフライアッシュを混入することで強度が低下した。しかし、材齢91日では無

混入のものと同等の強度を示した。これはフライアッシュ混入によるポゾラン反応によって強度が増進した結果と考えられる。従って、W/C=42.9以下のときフライアッシュを内割混入してもポゾラン反応に必要なセメント量が確保でき圧縮強度が改善できた。BSシリーズにおいて、標準砂を用いた調合と比較すると材齢28日および91日で高炉スラグ微粉末の混入率の増加とともに圧縮強度は増加した。再生細骨材M種を使ったものでは混入率10%および20%で強度が増進し、混入率30%で低下した。しかし、どの混入率でも無混入のものより高い圧縮強度を示す結果となった。Fシリーズ、BSシリーズともに0~30%までの混入率の変化よりも細骨材の品質の違いによる圧縮強度の低減の方が大きかった。特にM種とL種間の差が大きくなることが確認された。

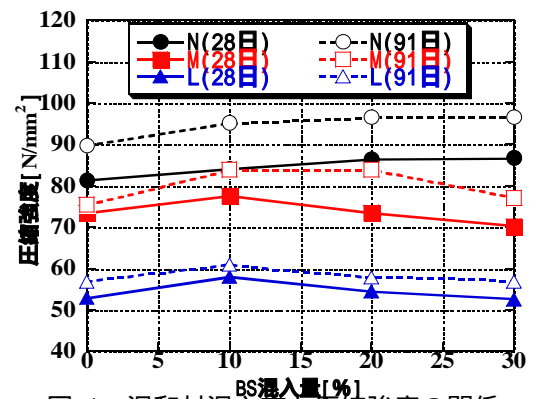
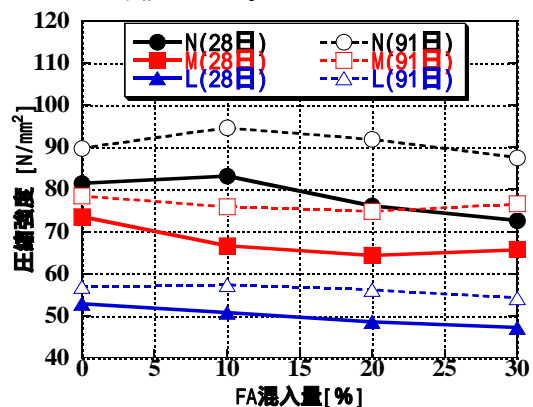


図-1 混和材混入率と圧縮強度の関係

図-2にFAシリーズ、BSシリーズにおける乾燥収縮率の経時変化を示す。FAシリーズにおいて、標準砂を用いたもので比較するとN+FA10はNと同様な収縮率を示したが、以降混入率が増加すると収縮率は増加した。再生細骨材M種を用いたもので比較すると混入率10%、20%では無混入と同等の収縮率を示したが、M+FA30では無混入よりも収縮率が低減した。LシリーズもMシリーズ同様にL+FA10で無混入より収縮率が増進し、L+FA30は無混入より収縮率が抑制された。BSシリーズにおいて標準砂を用いたもので比較すると高炉スラグ微粉末の混入率に関わらず無混入のものと同等の収縮率を示した。しかし、Mシリーズ、Lシリーズでは高炉スラグ微粉末を

混入することで乾燥収縮が低減された。この結果より、再生細骨材を用いたモルタルにおいてフライアッシュ 30%内割,または高炉スラグ微粉末の内割によって乾燥収縮を抑制する可能性が示された。Fシリーズ,BSシリーズともに再生細骨材の品質の低下による収縮率の変動は,混和材混入率の違いによる変動より大きくなり,再生細骨材の品質毎にある程度の集団を形成することが窺えた。Fシリーズより BSシリーズの方が収縮率は小さくなったが,無混合より大きな収縮率の改善は確認されなかった。

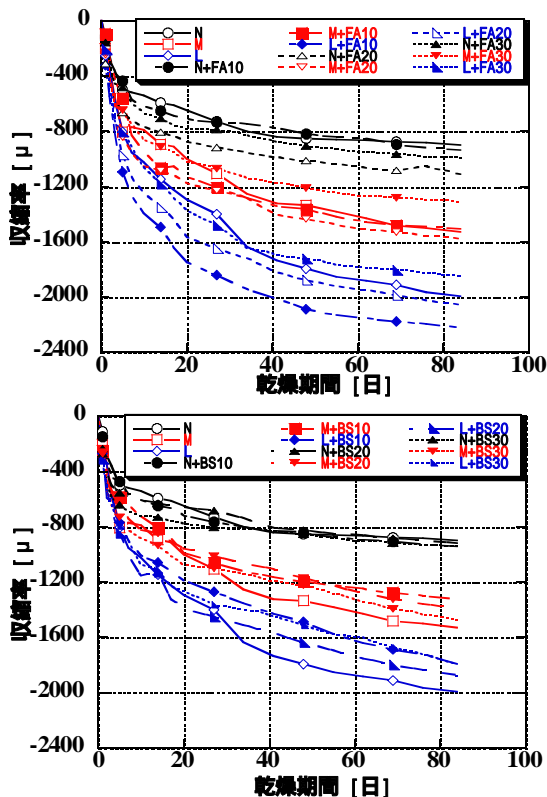


図-2 乾燥収縮の経時変化

図-3に材齢28日における $2\mu\text{m}$ 以下の細孔量と圧縮強度の関係を示す。羽原らは水セメント比40%以下の場合,遷移帯がほとんど形成されないためより小径まで含めた細孔空隙量と強度の相関が高いことを報告している。本実験では $2\mu\text{m}$ 以下の細孔量の増加とともに圧縮強度は低下する傾向を示し,その関係は直線的な対応を示し,決定係数は0.94と高い値を示した。従って,再生細骨材を用いたものおよび混和材を内割混入したものでも,再生細骨材の品質,混和材の種類および混入率に関わらず $2\mu\text{m}$ 以下の細孔量で圧縮強度を評価可能であることが示唆された。図-4に材齢28日における $2\mu\text{m}$ 以下の細孔量と乾燥収縮率の関係を示す。 $2\mu\text{m}$ 以下の細孔量と乾燥収縮率の関係も圧縮強度と同様細孔量の増加とともに収縮率も増加して直線関係を示し,その時の決定係数は0.93となった。従って,高強度における再生細骨材および混和材を内割混入したモルタルは $2\mu\text{m}$

以下の細孔量で乾燥収縮率を評価できる可能性が示唆された。

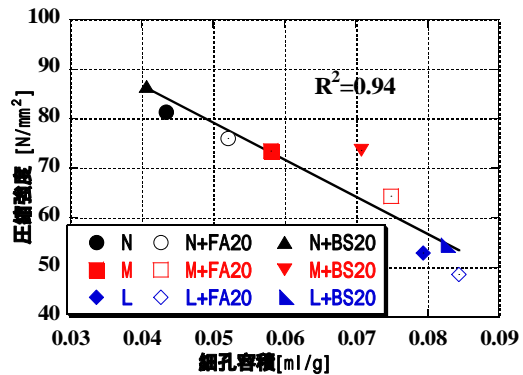


図-3 $2\mu\text{m}$ 以下の細孔量と圧縮強度の関係

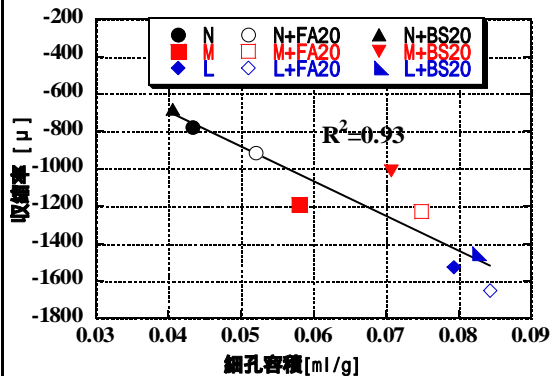


図-4 $2\mu\text{m}$ 以下の細孔量と乾燥収縮の関係

(2) 副産物粉体と再生骨材を複合混合した低炭素コンクリートのクリープ特性

クリープひずみの経時変化を図-5に示す。クリープひずみは使用した骨材の品質の低下に伴い増加する傾向を示し,LL-FAのひずみがML-FAのひずみよりも大きな値を示した。また,LL-FAと比較しML-FAのクリープひずみが大きく上回っていることから,クリープひずみにおいても使用した細骨材の品質に影響を受けることが確認できた。

フライアッシュ無混入と比較すると,すべての調査において,無混入より大きく下回る値となった。これより,使用した骨材の品質によらず,フライアッシュを混合することでクリープひずみの増大を抑制できる可能性が示された。

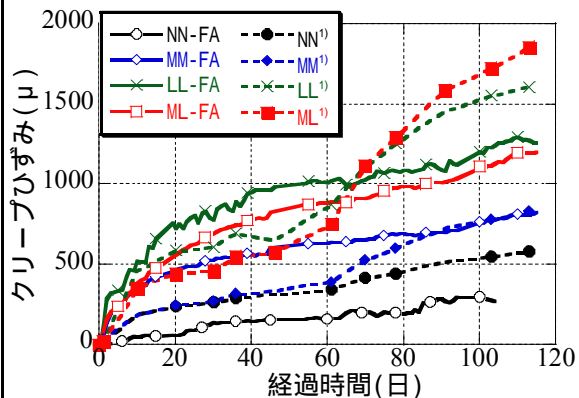


図-5 クリープひずみ

本研究では、予測式に含まれる要因が多く、調合ごとに係数を細かく設定できる日本建築学会による予測式(AIJ式)を用い、実測値と予測値との対応について検討した。また、予測式から得られた予測値が実測値からどの程度乖離しているかを示す RMSE 値を用いて数値予測問題における予測精度の評価を行った。AIJ式による予測値と実測値を図-6に示す。再生骨材を使用した3調合に関しては過小評価する傾向にあるが、普通骨材を使用した NN-FA は過大評価する傾向を示した。NN-FA は、フライアッシュを外割混合したことによりクリープひずみが抑制されたため過大評価されたと考えられる。また、MM-FA は RMSE 値が 12.80 となり、本研究においては最高評価となった。しかし、AIJ式には骨材の状態や品質に関わる数値は使用されおらず、予測値は使用した骨材から受ける影響は加味されていない。また、予測式では本研究のように混和材を混合した際の影響もほとんどないため、調合ごとに予測値にほとんど差がないことが確認できた。

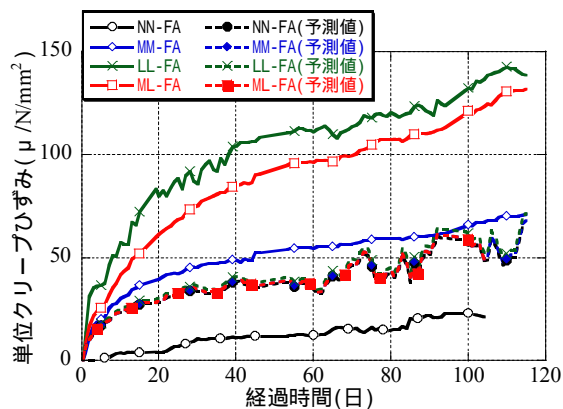
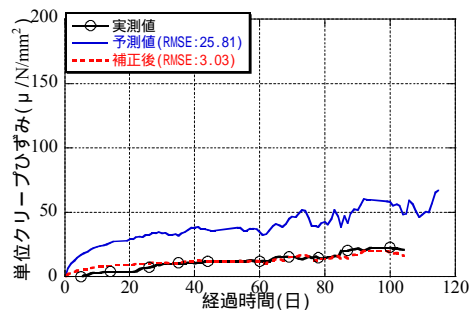


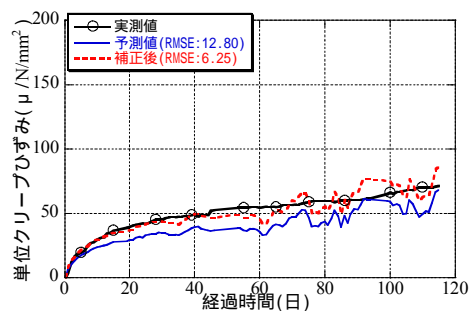
図-6 AIJ 予測値と実験値

本研究では、再生骨材を使用し、更にフライアッシュを混合しているため、予測値を実測値に適合させるための補正係数を検討した。図-7に各調合における実験値と AIJ 式による予測値、および補正後の予測値を示す。クリープ試験を行った恒温室の湿度が一定ではなかった影響で、予測値にばらつきがあるように見受けられる。NN-FA の補正係数は 0.34 で RMSE 値が 3.03、MM-FA は 1.27 で RMSE 値が 6.25、LL-FA は 2.44 で RMSE 値が 13.23、ML-FA は 2.24 で RMSE 値が 11.37 となった。AIJ 式においては、フライアッシュを混合した再生コンクリートの予測値を算出する場合は、再生コンクリートの際に使用する補正係数だけでなく、新たな補正係数を用いることでより正確に予測値を算出できる可能性が示された。無混合と比較すると、フライアッシュを混合すると補正係数の値は小さくなった。また、フライアッシュを混合した調合の方が RMSE 値が小さくなり、補正係数使用後の適合度が上がる結果となっている。これより、フライアッシュを混合することで、

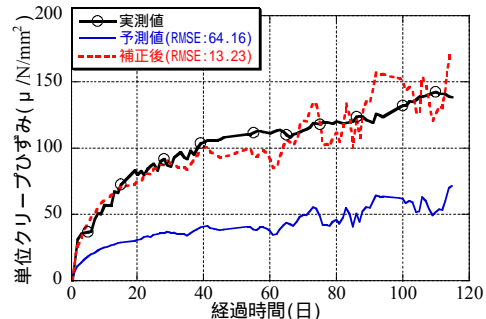
再生コンクリートのクリープひずみは抑制されるため、補正係数を使用し AIJ 式での予測値の適合度を上げることができる可能性が示された。



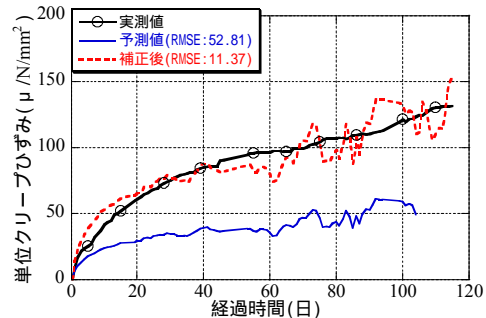
() NN-FA



() MM-FA



() LL-FA



() ML-FA

図-7 補正後の AIJ 予測値と実験値

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 13 件)

河野江真, 高巢幸二, 小山田英弘, 陶山裕樹: 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 6 庄

縮クリープ性状,日本建築学会学術講演梗概集,査読無,A-1,2016,pp.409-410
高巢幸二,小山田英弘,陶山裕樹,河野江真: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5 天然細骨材と再生細骨材の混合割合の影響,日本建築学会学術講演梗概集,査読無,A-1,2016,pp.407-408
入江輝,高巢幸二,小山田英弘,陶山裕樹,高木祐希:粉体を混合したモルタルの流動特性に関する基礎的研究 その2 細骨材の違いと碎石粉による影響,日本建築学会学術講演梗概集,査読無,A-1,2016,pp.239-240
高木祐希,高巢幸二,小山田英弘,陶山裕樹,入江輝:粉体を混合したモルタルの流動特性に関する基礎的研究 その1 粉体の特性による流動性予測,日本建築学会学術講演梗概集,査読無,A-1,2016,pp.237-238
Akira Irie, Takasu Koji, Koyamada Hidehiro, Suyama Hiroki: Study on properties of high fluidly concrete with three kinds of powder, The fourth International Conference on Sustainable Construction Materials & Technology(SCMT4), 査読有,2016,pp.1-7
竹川翔馬,高巢幸二,小山田英弘,陶山裕樹:品質の異なる再生骨材を組み合わせ使用したコンクリートの力学性状および収縮性状,コンクリート工学年次論文集,査読有,No.38,2016,pp.1803-1808
河野江真,高巢幸二,小山田英弘,陶山裕樹,小山智幸,伊藤是清:フライアッシュ外割混合コンクリートの圧縮クリープ特性に関する研究,日本建築学会学術講演梗概集,査読無,A-1,2015,pp.647-648
河野江真,高巢幸二,小山田英弘,陶山裕樹,小山智幸,伊藤是清:フライアッシュ外割混合コンクリートの圧縮クリープ特性に関する研究,日本建築学会学術講演梗概集,査読無,A-1,2015,pp.647-648
入江輝,高巢幸二,小山田英弘,陶山裕樹:粉体を複合混合した高流動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,査読無,A-1,2015,pp.265-266
高巢幸二,小山田英弘,陶山裕樹:混和材の外割混入率が硬化体の強度増進と発現時期に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集,査読有,No.37,2015,pp.235-240
吉田愛,高巢幸二,陶山裕樹,小山田英弘,新村祐太: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5 総水量と細孔容積による物性評価,日本建築学会学術講演梗概集,査読無,A-1,2014,pp.169-170
竹川翔馬,高巢幸二,陶山裕樹,小山田

英弘,吉田愛:再生骨材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4 フレッシュ性状および圧縮強度,日本建築学会学術講演梗概集,査読無,A-1,2014,pp.167-168

Yoichi NAGATA, Koji TAKASU, Hiroki SUYAMA, Hidehiro KOYAMADA: A STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES AND HYDRATION REACTION OF THE CONCRETE WITH FLY ASH AS A PART OF THE FINE AGGREGATE, 39th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 査読有,2014,pp.373-379

〔学会発表〕(計4件)

高巢幸二:コンクリート建物における維持管理の重要性,北九州市における計画的維持管理に関する講演会(招待講演),2017年2月20日,北九州市男女共同参画センター(福岡県・北九州市)

高巢幸二: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5天然細骨材と再生細骨材の混合割合の影響,日本建築学会学術講演会,2016年8月26日,福岡大学(福岡県・福岡市)

高巢幸二:混和材の外割混入率が硬化体の強度増進と発現時期に及ぼす影響,日本コンクリート工学会年次大会2015(千葉),2015年7月15日,幕張メッセ(千葉県・千葉市)

高巢幸二:再生骨材と副産物粉体を複合混合した低炭素コンクリートの特性,再生骨材コンクリート普及連絡協議会(招待講演),2014年11月21日,弘済会館(東京都・千代田区)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.kitakyu-u.ac.jp/env/subject/d-design/Koji_Takasu/index.html

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・教授

研究者番号:60336948

(2)研究分担者

陶山 裕樹 (SUYAMA HIROKI)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号:20507876

小山田 英弘 (KOYAMADA HIDEHIRO)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号:80233625

(3)研究協力者

三根 直人 (MINE NAOTO)

Universiti Tunku Abdul Rahman, Malaysia
SHL Professor

Kwan Wai Hoe (Kwan Wai Hoe)

Universiti Tunku Abdul Rahman, Malaysia
Assistant Professor