

報告 高炉スラグ微粉末を大量に使用したモルタルの基礎性状に及ぼすアルカリ刺激材の影響

古川 雄太*1・山下 紘太郎*2・川又 篤*3・岸本 豪太*4

要旨: コンクリート分野においてカーボンニュートラル化が進む中, 本研究は高炉スラグ微粉末の分量が 80% 以上の範囲を対象に, モルタルの基礎性状に及ぼすアルカリ刺激材の影響を検討したものである。その結果, 消石灰および膨張材を用いることで, 流動性の向上が認められた一方, 再生微粉スラリーは流動性が低下する傾向であった。圧縮強度への影響は, 消石灰および膨張材を用いることで, 全体的にセメントと同等以上の圧縮強度であることを確認した。しかし, 再生微粉スラリーを用いたものは, セメントとの混合割合の違いによって, 圧縮強度への影響が大きく異なる傾向であった。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, アルカリ刺激材, 再生骨材, CO₂排出量, カーボンニュートラル

1. はじめに

2015 年 9 月「持続可能な開発目標 (SDGs)」が国連で採択され, 同年の 12 月には「パリ協定 (2°C 目標)」が採択されたことで, 世界的に環境配慮への取組みが加速している。国内の建設分野においては, 日本建設業連合会が「環境経営および個別 3 テーマの実現に向け, 業界内外のステークホルダーとの連携が必要な横断的な取組みの検討・実施体制の構築」をテーマに, 自主行動計画 (第 7 版) を定めている。3 つのテーマとは, 脱炭素社会, 循環型社会および自然共生社会を示している¹⁾。

コンクリート分野 (建築) においては, 2022 年に「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」²⁾が改正され, 環境配慮の取組みとして, 要求性能の 1 つに環境性が追加された。この環境性は, 資源循環性, 低炭素性および環境安全性であり, 中でも資源循環性および低炭素性は, コンクリートの材料構成によって達成される性能を 4 つの等級に分けている。

このような背景の中, 筆者らはコンクリートの使用材料に起因した CO₂ 排出量の削減を目標に CELBIC 研究会 (13 社共同研究) を発足し, 最大で CO₂ 排出量を約 63% 削減する低炭素型コンクリート (CELBIC) の開発^{3) 4)}を行い, 現場適用⁵⁾を進めてきた。その後, 更なる CO₂ 排出量の削減並びに資源循環性の寄与を目的に, CELBIC に再生骨材を併用した多角的な環境配慮型コンクリートの開発^{6) 7)}を進めてきた。

一方, 近年では, 高炉スラグ微粉末の分量が JIS R 5211 「高炉セメント」で規定されている C 種の 70% を超える範囲を対象にした研究も進められている。加えて, 高炉スラグ微粉末の潜在水硬性に寄与するセメント以外の材料 (以下, セメントも含めてアルカリ刺激材と略記) の

検討も進められているが, 高炉スラグ微粉末の分量やアルカリ刺激材の組合せは多岐に渡るため, これら使用材料の種類・分量が異なった場合のフレッシュ性状や圧縮強度への影響について不明確な点が多い。中でも, 高炉スラグ微粉末を高含有した領域におけるセメント以外のアルカリ刺激材の種類の違いが各種物性に及ぼす影響についての検討例が少なく, コンクリートのカーボンニュートラル化に向けて更なる知見の蓄積が望まれている。

そこで本報は, カーボンニュートラルコンクリートの発展への寄与を目的に, 結合材中の高炉スラグ微粉末の分量が 80%~95% の範囲を対象に, 知見の少ない消石灰, 膨張材および再生微粉スラリーをアルカリ刺激材として活用した場合のモルタルのフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響について検討を行った結果を報告する。

2. 実験概要

表-1 に使用材料を示す。アルカリ刺激材として, 普通ポルトランドセメント (C), 消石灰 (CH), 酸化カルシウムを主成分とする膨張材 (EX) および再生細骨材 M の製造過程で発生する再生微粉スラリー (RS) を使用した。なお, 再生微粉スラリーは, 計量値に応じて 4 つの異なる濃度のものを使用した。高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 に適合するせっこう添加タイプを使用した。細骨材は, 掛川産山砂 (KM) を使用し, 一部に再生細骨材 L (RL) を使用して比較検討した。高性能 AE 減水剤 (SP) はポリカルボン酸系を主成分とする通常のものを使用し, 空気量の調整のためにノニオン系の消泡剤 (DF) を用いた。

表-2 に実験の組合せを示す。BF の分量 (以下, BF 使用率または BF=80% 等と表記) は, 結合材の質量に対して 80%, 90% および 95% の 3 水準とし, アルカリ刺激材

*1 東急建設 (株) 技術研究所 建築基盤技術研究部 建築材料グループ (正会員)

*2 (株) 鴻池組 技術研究所 つくばテクノセンター 博士 (工学) (正会員)

*3 鉄建建設 (株) 建設技術総合センター 研究開発センター 博士 (工学) (正会員)

*4 東洋建設 (株) 総合技術研究所 研究統括部 (正会員)

表-1 使用材料

名称	記号	物性など
普通ポルトランドセメント	C	密度：3.15g/cm ³
消石灰	CH	密度：2.20g/cm ³
膨張材*1	EX	密度：3.16g/cm ³
再生微粉スラリー*2	RS	密度 濃度 5.3%：1.03g/cm ³ 濃度 10.2%：1.06g/cm ³ 濃度 18.7%：1.12g/cm ³ 濃度 29.8%：1.22g/cm ³
高炉スラグ微粉末 4000	BF	密度：2.89g/cm ³
掛川産山砂	KM	表乾密度：2.58g/cm ³ 吸水率：1.63% F.M.：2.60
再生細骨材 L	RL	表乾密度：2.22g/cm ³ 吸水率：12.9% F.M.：3.08
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系化合物
消泡剤	DF	ノニオン系界面活性剤

*1 主成分：酸化カルシウム

*2 濃度は固形分量を示す

は各々表-2 に示す割合で使用した。なお、RS は固形分を結合材として扱い、その他は練混ぜ水の一部として扱った。そのため、RS（固形分と水を含んだ状態）を計量する際に、所定の単位水量を超えないようにするため、濃度を変えて調整した。

表-3 に配（調）合を示す。水結合材比は 50%，単位水量は 280kg/m³ とし、SP は結合材（B=C+CH+RS+BF）×0.5wt% と一定にし、使用材料が流動性に及ぼす影響を把握した。なお、空気量の影響を可能な限り排除するため、消泡剤（DF）を一定量添加し、空気量を極力小さくした。ただし、-0.5～2.5%の空気量（質量法による実測値）であったことから、圧縮強度の検討においては、空気量 1%に対して圧縮強度が 5%変動すると仮定し、空気量 0%として補正した圧縮強度を用いた。

試験は、ミニスランプフロー（JISA 1171）、空気量（JISA 1116）および圧縮強度（JISA 1108）を行った。圧縮強度試験は、初期材齢の検討として 20℃封かん養生（以下、封かん養生）における材齢 2・4・7 日、その後の強度増進の検討として標準水中養生（以下、水中養生）における材齢 7・28・91 日で試験を実施した。

3. 実験結果

3.1 空気量

図-1 に空気量とミニスランプフローの関係を示す。空気量は、ミニスランプフローが大きいかほど小さい値を示した。これは一般的な傾向と同様に、流動性が高いほど空気が抜けやすかったためであり、使用材料の組合せによる流動性の違いが影響したと考えられる。なお、一部の空気量がマイナスであるが、質量法によって測定したため、試料採取時の材料構成のばらつきによって計算上マイナスの値を示したと考えられ、概ね空気量は 0%であったと考えられるが、測定値をそのまま表記した。

表-2 実験の組合せ

BF	結合材の割合(wt%)				細骨材の種類
	C	CH	EX	RS	
80	20	—	—	—	KM, RL
	—	20	—	—	KM
	15	—	5	—	KM
	17.5	—	—	2.5*1	KM
	15	—	—	5*2	KM
	10	—	—	10*3	KM
90	—	—	—	20*4	KM
	10	—	—	—	KM, RL
	—	10	—	—	KM
	5	—	5	—	KM
	7.5	—	—	2.5*1	KM
	5	—	—	5*2	KM
95	—	—	—	10*3	KM
	5	—	—	—	KM, RL
	—	5	—	—	KM
	—	—	5	—	KM
	2.5	—	—	2.5*1	KM
	—	—	—	5*2	KM

*1 濃度 5.3%

*2 濃度 10.2%

*3 濃度 18.7%

*4 濃度 29.8%

表-3 配（調）合

調合 No.	単位量 (kg/m ³)								混和剤(B×wt%)	
	W	C	CH	EX	RS	BF	KM	RL	SP	DF
1	280	112	—	—	—	448	1341	—	0.5	0.005
2	280	112	—	—	—	448	—	1143	0.5	0.005
3	280	—	112	—	—	448	1301	—	0.5	0.005
4	280	84	—	28	—	448	1341	—	0.5	0.005
5	280*2	98	—	—	14*1	448	1333	—	0.5	0.005
6	280*2	84	—	—	28*1	448	1329	—	0.5	0.005
7	280*2	56	—	—	56*1	448	1322	—	0.5	0.005
8	280*2	—	—	—	112*1	448	1316	—	0.5	0.005
9	280	56	—	—	—	504	1336	—	0.5	0.005
10	280	56	—	—	—	504	—	1140	0.5	0.005
11	280	—	56	—	—	504	1317	—	0.5	0.005
12	280	28	—	28	—	504	1337	—	0.5	0.005
13	280*2	42	—	—	14*1	504	1329	—	0.5	0.005
14	280*2	28	—	—	28*1	504	1325	—	0.5	0.005
15	280*2	—	—	—	56*1	504	1318	—	0.5	0.005
16	280	28	—	—	—	532	1334	—	0.5	0.005
17	280	28	—	—	—	532	—	1138	0.5	0.005
18	280	—	28	—	—	532	1325	—	0.5	0.005
19	280	—	—	28	—	532	1335	—	0.5	0.005
20	280*2	14	—	—	14*1	532	1327	—	0.5	0.005
21	280*2	—	—	—	28*1	532	1323	—	0.5	0.005

*1 固形分量を示す

*2 RS の固形分量を除いたものは単位水量として換算

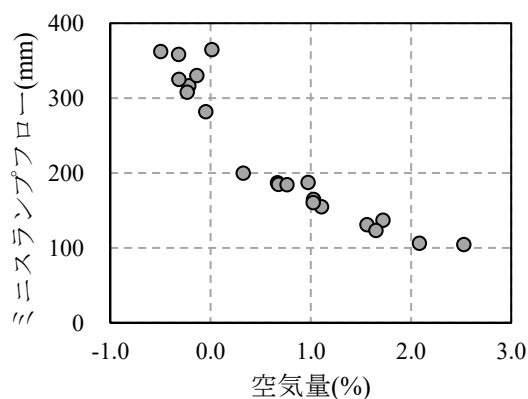


図-1 空気量とミニスランプフローの関係

3.2 ミニランプフロー

(1) 高炉スラグ微粉末の使用率の影響

図-2 にミニランプフロー試験結果 (BF 使用率の影響) を示す。これによると、BF 使用率が増えるに伴い、ミニランプフローは僅かに小さくなる傾向が認められた。これは、C よりも BF の比表面積が大きいため、BF 使用率が大きいほど混和剤の吸着量が増加したことが影響したためであると考えられる。

(2) 再生細骨材 L の影響

図-3 にミニランプフロー試験結果 (RL の影響) を示す。いずれの BF 使用率においても KM よりも RL の方が大きいミニランプフローとなっており、流動性の向上が認められた。これは、RL が KM に比べて大きい粗粒率であったことから、余剰ペースト量⁸⁾の違いが生じたことに起因していると考えられる。

(3) 消石灰の影響

図-4 にミニランプフロー試験結果 (CH の影響) を示す。BF=80%では、C と CH に大きな差はないが、BF=90%および 95%では CH を用いることでミニランプフローが大きくなる傾向が認められた。このため、CH を用いることで、同一の流動性を得るのに必要な単位水量の低減が可能となる。つまり、単位結合材量の低減の可能性もあり、より CO₂ 排出量の低減に繋がる可能性が示唆された。

(4) 膨張材の影響

図-5 にミニランプフロー試験結果 (EX の影響) を示す。全ての BF 使用率において流動性が向上する傾向であった。このため、CH 同様に、単位結合材量の低減の可能性もあり、より CO₂ 排出量の低減に繋がる可能性が示唆された。

(5) 再生微粉スラリーの影響

図-6 にミニランプフロー試験結果 (RS の影響) を示す。全体的な傾向として、RS を使用することで流動性の低下が認められ、RS の結合材に対する割合が大きくなるに伴い、その傾向が顕著であった。このため、CH や EX とは異なり、同一の流動性を得るのに必要な単位水量は増大する可能性があり、単位結合材量の増大に伴う CO₂ 排出量が増加する可能性が示された。

3.3 圧縮強度

(1) 高炉スラグ微粉末の使用率の影響

図-7 に封かん養生における圧縮強度試験結果 (BF 使用率の影響) を示す。圧縮強度は、材齢 2 日時点において、いずれの BF 使用率でもせき板の取外しの目安となる 5N/mm² を超えており、概ね同程度であった。その後、材齢 4 日で BF=80%は 15N/mm² 程度、BF=90%・95%は約 10N/mm² であり、BF 使用率に応じて強度差は開く傾向が認められた。BF=90%・95%は BF=80%に比べて材齢

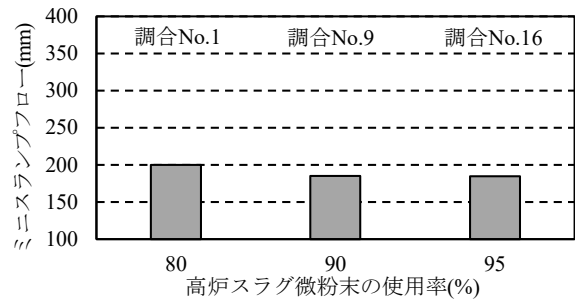


図-2 ミニランプフロー試験結果 (BF 使用率の影響)

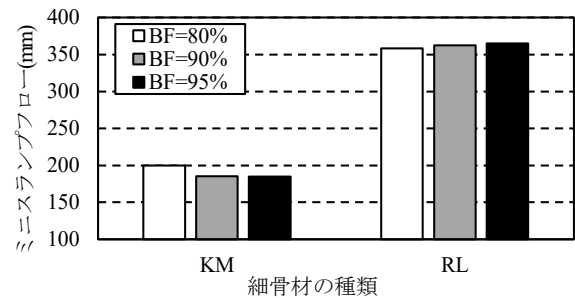


図-3 ミニランプフロー試験結果 (RL の影響)

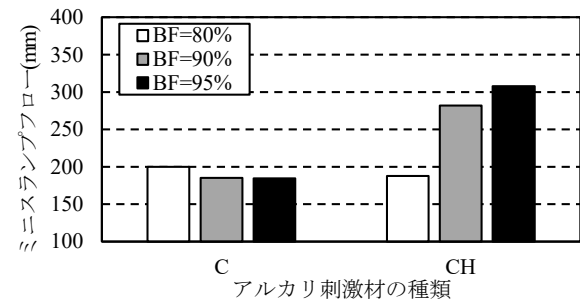


図-4 ミニランプフロー試験結果 (CH の影響)

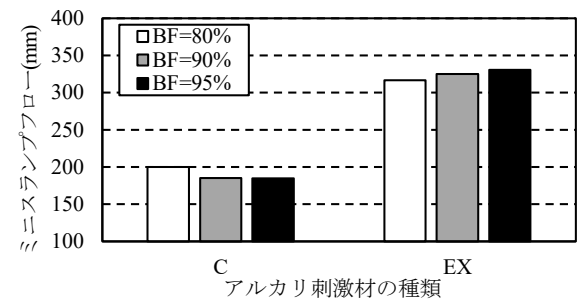


図-5 ミニランプフロー試験結果 (EX の影響)

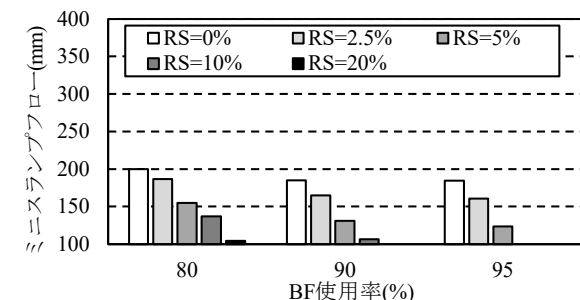


図-6 ミニランプフロー試験結果 (RS の影響)

の経過に伴う強度増加は小さい傾向であり、BF の潜在水硬性に必要なアルカリ量が少なかったことが影響したと推測される。

図-8 に水中養生における圧縮強度試験結果 (BF 使用率の影響) を示す。BF=80%を基準にみると、圧縮強度は材齢28日時点においてBF=90%および95%で約15N/mm²の低下が認められる結果であった。また、BF=90%・95%はBF=80%に比べて、封かん養生における材齢初期の傾向と同様に、材齢の経過に伴う強度増加が小さいため、十分な水分供給があっても潜在水硬性が十分に発揮されなかった可能性が考えられる。このことから、圧縮強度の確保の観点からは、水結合材比を下げるなどの対応が必要になる可能性が考えられ、これに伴うCO₂排出量の増加が懸念される。

(2) 再生細骨材 L の影響

図-9 に封かん養生における圧縮強度試験結果 (RL の影響) を示す。各材齢における圧縮強度はKM およびRL に大きな差はなく、今回の検討範囲では、材齢初期におけるRLによる圧縮強度への影響は認められなかった。

図-10 に水中養生における圧縮強度試験結果 (RL の影響) を示す。BF=90%・95%においては、封かん養生における傾向と同様に、RLによる圧縮強度への影響は認められなかった。一方、BF=80%では、材齢28日以降、明確にRLを用いることで強度低下の傾向が認められた。これは、再生粗骨材で検討を行った高橋らの研究⁹⁾による、材齢が大きくなるにつれ強度低下が顕著になる傾向と整合しており、圧縮強度の値が比較的大きいBF=80%の材齢28日以降で顕著に現れたと考えられる。よって、BF使用率および材齢、あるいは水結合材比によって圧縮強度の値は異なるが、ある一定の圧縮強度以上 (今回の検討範囲では約30N/mm²以上) になるとRLの影響による強度低下が顕著になるため、調査設計の段階で留意する必要があると考えられる。

(3) 消石灰の影響

図-11 に封かん養生における圧縮強度試験結果 (CH の影響) を示す。材齢2および4日時点における圧縮強度は、いずれのモルタルも同程度であり、CHによる影響は明確ではなかった。材齢7日においては、BF=80%のみ逆の傾向であるが、BF=90%および95%においては、CHを用いた方が大きい圧縮強度であった。

図-12 に水中養生における圧縮強度試験結果 (CH の影響) を示す。BF=80%においては、CとCHによる圧縮強度の違いに大きな差は認められなかった。しかし、BF=90%および95%においては、材齢28日以降明確にCHを用いることで圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。BFの水和のメカニズムは、pH12以上の強アルカリ環境で硬化 (潜在水硬性) が起こるとされている¹⁰⁾。

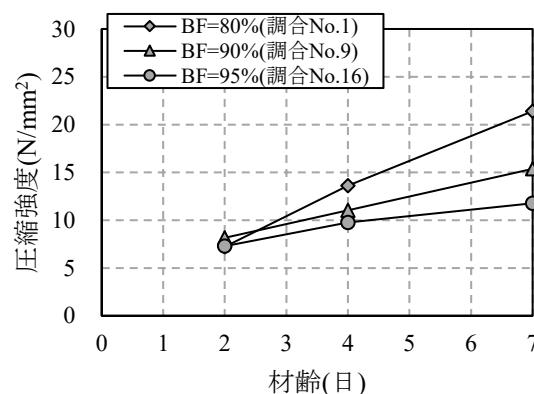


図-7 圧縮強度試験結果 (封かん養生—BF 使用率の影響)

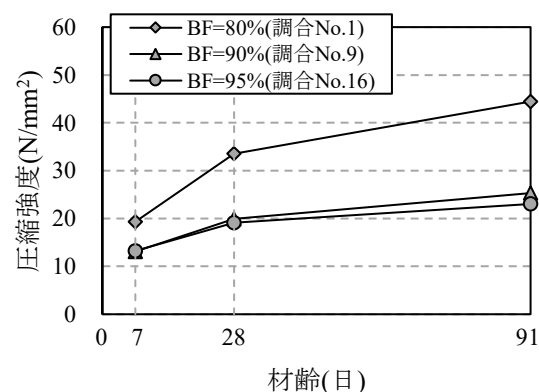


図-8 圧縮強度試験結果 (水中養生—BF 使用率の影響)

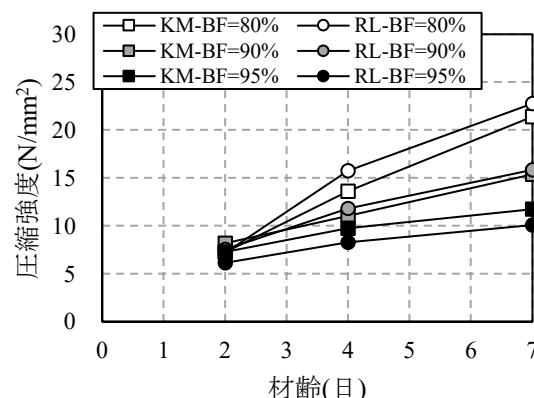


図-9 圧縮強度試験結果 (封かん養生—RL の影響)

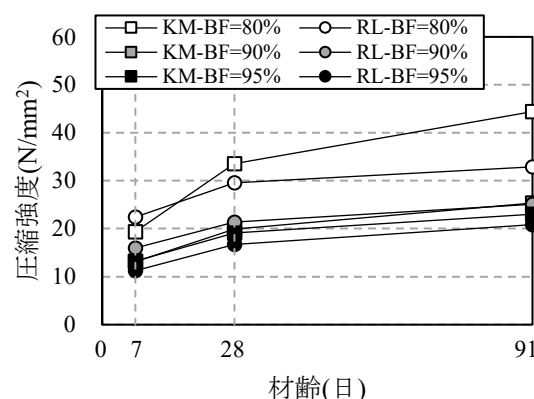


図-10 圧縮強度試験結果 (水中養生—RL の影響)

このため、BF 使用率 70%を超える範囲では、pH12 前後を確保するアルカリ刺激材の寄与が重要となるが、BF=80%では C と CH に差が無く、BF=90%以上では両者に差があり、CH を用いることで材齢 28 日以降の強度増進が大きくなったと推測される。ただし、本研究では、ペーストの pH の測定や水和生成物の分析などを行って、メカニズムの解明などは今後の研究課題である。

(4) 膨張材の影響

図-13 に封かん養生における圧縮強度試験結果 (EX の影響) を示す。材齢 2 日時点では、圧縮強度そのものが小さいこともあり EX の影響は明確には読み取れない。一方、材齢 4 日および 7 日では、C よりも EX を用いることで明確に圧縮強度が大きくなる傾向である。

図-14 に水中養生における圧縮強度試験結果 (EX の影響) を示す。封かん養生における材齢 4 日以降の傾向と同様に、材齢 7 日以降全ての材齢において EX を用いることで圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。これは、CH での傾向と同様にアルカリ性の寄与が影響していると考えられるが、その解明は今後の課題である。

(5) 再生微粉スラリーの影響

図-15 に封かん養生における圧縮強度試験結果 (RS の影響) を示す。各 BF 使用率のアルカリ刺激材として RS のみを使用したモルタルでは、材齢 7 日までにいずれも硬化が認められなかった。これは、BF の潜在水硬性に必要なアルカリ量が不足していたためと考えられる。一方、C と組み合わせた水準では、BF=80%においては、RS の使用率の増加に伴い強度の低下傾向が認められた。しかし、BF=90%では RS=2.5%よりも 5%、BF=95%では RS=0%よりも 2.5%の方が圧縮強度は大きくなる傾向であった。

図-16 に水中養生における圧縮強度試験結果 (RS の影響) を示す。なお、アルカリ刺激材として RS のみを使用した水準では、材齢 11 日以降に硬化が認められたため、材齢 28 日以降の試験値を参考値として図示した (養生方法は 20℃封かん養生を継続)。RS のみをアルカリ刺激材として用いた水準では、試験時の乾湿状態の違いの影響も考えられるが、BF=90%および 95%では C のみを使用したものよりも高い圧縮強度を示した。また、封かん養生同様に、C と組み合わせた水準では、BF=90%では RS=2.5%よりも 5%、BF=95%では RS=0%よりも 2.5%の方が圧縮強度は大きくなる傾向であった。

RS が圧縮強度に及ぼすメカニズムは不明であるが、今回の検討では、アルカリ刺激材として RS のみを使用しても、材齢 11 日以降に硬化が始まることを確認したため、アルカリ刺激材として活用できる可能性があると考えられる。

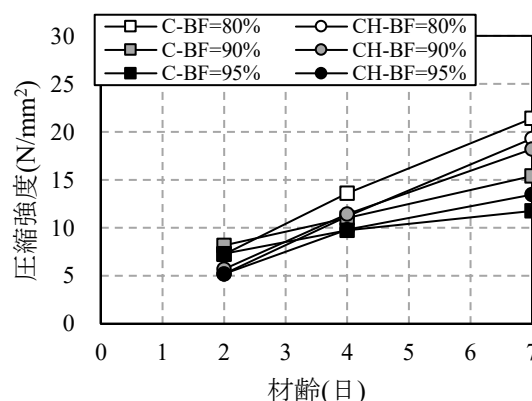


図-11 圧縮強度試験結果 (封かん養生—CH の影響)

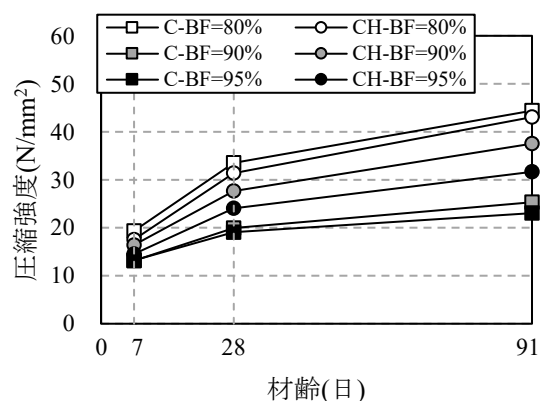


図-12 圧縮強度試験結果 (水中養生—CH の影響)

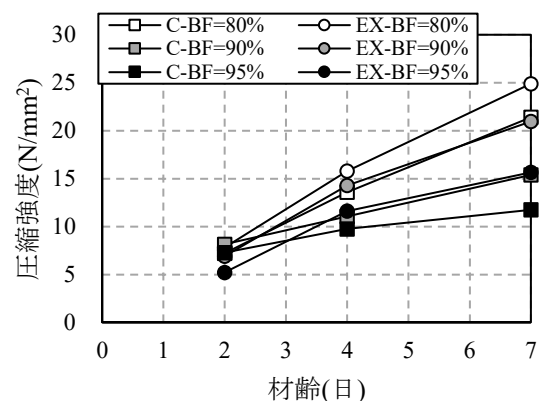


図-13 圧縮強度試験結果 (封かん養生—EX の影響)

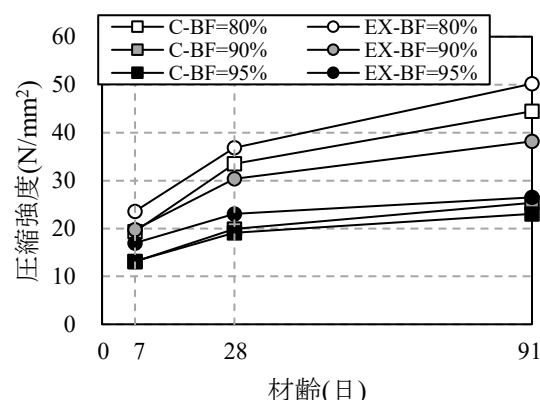


図-14 圧縮強度試験結果 (水中養生—EX の影響)

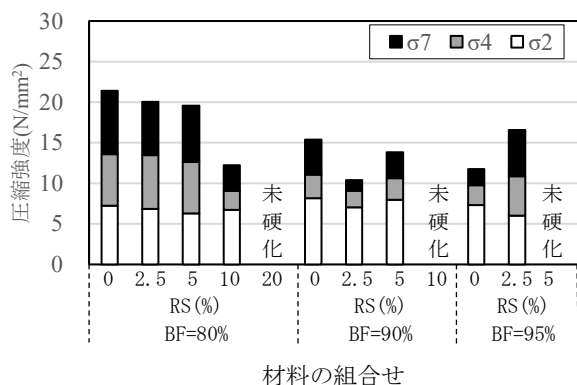


図-15 圧縮強度試験結果（封かん養生—RS の影響）

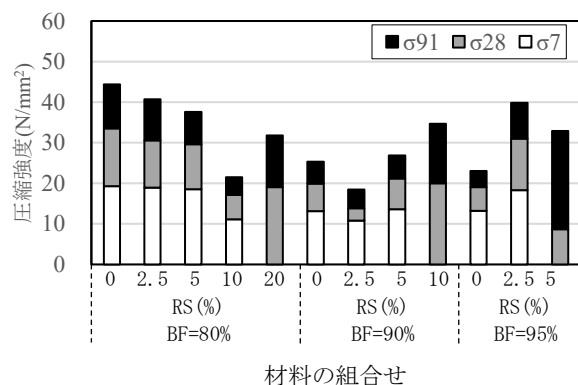


図-16 圧縮強度試験結果（水中養生—RS の影響）

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 再生細骨材 L を用いることで、流動性の増加が認められた。
- (2) 消石灰および膨張材を用いた場合、流動性の増加が認められた。
- (3) 再生微粉スラリーを用いた場合、流動性の低下が認められた。
- (4) 今回の強度範囲では、約 30N/mm² 以上で再生細骨材 L による圧縮強度の低下が認められた。
- (5) 初期材齢（材齢 7 日以内、封かん養生）において、消石灰を使用した場合、セメントを単体で使ったものと同等以上の圧縮強度であった。また、膨張材を使用した場合、材齢 4 日以降に強度増進が大きい傾向が認められた。一方、再生微粉スラリーを使用した場合、セメントとの混合割合によって強度発現性は異なり、単体で使った場合は、材齢 7 日時点で硬化が認められなかった。
- (6) 材齢 7 日以降（標準水中養生）においては、消石灰および膨張材を用いたものは、全体的に圧縮強度の増加傾向が認められた。また、再生微粉スラリーを用いたものは、単体で使ったものも材齢 11 日時点（20℃ 封かん養生）での硬化が認められたが、BF 使用率と再生微粉スラリーの使用割合の組合せによって、圧縮強度の大小関係は一様ではなかった。

本報では、主にアルカリ刺激材がモルタルに及ぼす影響について把握を行った。今後は、CCU 材料の検討を行い、コンクリートへの影響の把握を行うとともに、カーボンニュートラル・ネガティブコンクリートの実用化を目指す予定である。

謝辞

本研究は「再生骨材を用いた CELBIC（C 種クラス）の実用化に関する研究会」において実施したものである。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建設業連合会：建設業の環境自主行動計画第 7 版, pp.1-23, 2023.12
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, pp.178-183, 221-230, 2022.11
- 3) 村井克綺, 古川雄太, 金子樹, 新田稔, 河野政典, 山下紘太郎, 川又篤：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いた環境配慮型コンクリートの諸性状：日本建築学会技術報告集, 第 28 巻, 第 69 号, pp.550-555, 2022.6
- 4) 岸本豪太, 高橋祐一, 金子樹, 鈴木好幸, 野中英, 菌井孫文, 清水啓介：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いた環境配慮型コンクリートの調合設計および耐久性に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第 28 巻, 第 69 号, pp.568-573, 2022.6
- 5) 古川雄太：部位に応じて高炉スラグ微粉末の使用率を最適化した環境配慮型コンクリートの建物全体への適用事例, コンクリート工学 工事・プロジェクト記録, Vol.62, No.11, pp.953-957, 2024.11
- 6) 高橋祐一, 新田稔, 鈴木好幸, 松田信広：高炉スラグ微粉末を高含有した再生骨材コンクリートの実用化に向けた基礎検討, コンクリート工学, Vol.45, No.1, pp.934-939, 2023.7
- 7) 高橋祐一, 新田稔, 鈴木好幸, 松田信広：高炉スラグ微粉末を高含有した骨材の組合せが異なる再生骨材コンクリート M の実用化に向けた検討, コンクリート工学, Vol.46, No.1, pp.1099-1104, 2024.6
- 8) 寺西浩司ほか：細骨材および調合がコンクリートのワーカビリティに及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.707, pp.9-18, 2015.1
- 9) 高橋祐一, 梶田佳寛, 竹内博幸：再生骨材コンクリートの性質に影響を及ぼす要因の検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.659, 2011.1
- 10) セメント協会：エンサイクロペディア, pp.94-103, 1996