

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検討

川又 篤^{*1}・唐沢 智之^{*2}

概 要

再生骨材は、構造物解体後の再資源化の過程において CO₂ を吸収・固定している。高炉セメント C 種相当の低炭素コンクリートに再生骨材を使用することで、低炭素性と資源循環性を兼ね備えたコンクリートの製造が可能となる。本研究では、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て実機実験を実施し、フレッシュ性状や圧縮強度等を確認した。また、再生骨材の実製造過程における CO₂ 固定量を把握し、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材料由来の CO₂ 排出量および削減効果を試算した。その結果、普通コンクリートと比べて 65～72%の CO₂削減効果が期待できることが示された。

キーワード：低炭素コンクリート，再生骨材，実機実験，CO₂排出量

STUDY ON PRACTICAL APPLICATION OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE USING HIGH CONTENT OF GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG

Atsushi KAWAMATA^{*1}, Tomoyuki KARASAWA^{*2}

Abstract

Recycled aggregates absorb and fix CO₂ during the recycling process after demolition of a structure. The use of recycled aggregates in low-carbon concrete that is equivalent to portland blast-furnace slag cement Class C makes it possible to create concrete with low-carbon and resource recycling properties. In this study, we conducted practical plant tests with the purpose of practical application of recycled aggregate concrete using high content of ground granulated blast-furnace slag, and confirmed fresh concrete properties and compressive strength, etc. We also identified the CO₂ fixed amount in the actual manufacturing process of recycled aggregates and calculated the material-derived CO₂ emissions and reduction effect of recycled aggregate concrete using high content of ground granulated blast-furnace slag. The results indicated that, compared to conventional concrete, recycled aggregate concrete using high content of ground granulated blast-furnace slag is expected to have a 65-72% CO₂ emission reduction effect.

Keywords: Low-carbon concrete, Recycled aggregates, Practical plant tests, CO₂ emissions

^{*1} Senior Principal Researcher, Material Group, Research & Development Center

^{*2} Manager, Material Group, Research & Development Center

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検討

川又 篤^{*1}・唐沢 智之^{*2}

1. はじめに

解体したコンクリートから製造される再生骨材は、再資源化の過程で付着モルタルへCO₂が吸収・固定化されると考えられており、リサイクル材料かつCCU材料としてコンクリート用骨材へのさらなる利用が期待される。再生骨材のCO₂固定量を評価した事例は少ないものの、再生骨材の性能をCO₂固定量の観点からみると、再生骨材Hと比べ、付着モルタルが多い再生骨材MおよびLに優位性があると考えられる^{例えは1)}。

一方、出所を特定しない原コンクリートから製造した再生骨材を用いたコンクリートを構造物に使用するためには、アルカリシリカ反応性に対する対策が重要な管理項目の一つとなる。再生骨材コンクリートMのアルカリシリカ反応抑制対策は、JISA5022附属書Cに示されており、その一つとしてJISA6206に適合する高炉スラグ微粉末を質量比で50%以上用いて、かつ、アルカリ総量を4.2kg/m³以下にすることが示されている。このことから、高炉スラグ微粉末を高含有した再生骨材コンクリートは、低炭素性および資源循環性²⁾を確保しつつ、アルカリシリカ反応を抑制する対策をとることが可能であると考えられる。

このような背景のもと、本研究では、セメントの70%を高炉スラグ微粉末で置き換えた高炉セメントC種相当の低炭素コンクリートに、再生骨材Mを単独、または再生骨材L+普通骨材を使用した「高炉スラグ微粉末高含有再生骨材コンクリート」の実用化に向けた検討を進めてきた。既報³⁾では、本コンクリートの基礎的な性状を確認する室内実験を実施し、骨材の組合せがフレッシュ性状や硬化性状に及ぼす影響は小さいこと、再生

骨材を使用することでCO₂削減効果が大きくなる可能性があることを確認した。本検討では、高炉スラグ高含有再生骨材コンクリートの実用化に向けて必要なデータを取得することを目的として実機実験を実施した。本報では、現場適用を想定したフレッシュ性状の経時変化、構造体に打ち込まれたコンクリートの強度性状、および高炉スラグ高含有再生骨材コンクリートのCO₂削減効果について報告する。

なお、本研究は表-1に示す13社で構成された「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り、本報は、文献^{4)~6)}を再構成し、加筆したものである。

2. 実機実験概要

2.1 使用材料および実験の組合せ

実験に使用した材料を表-2に、実験の組合せを表-3に示す。結合材は普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末(以下、BF)を質量比で70%使用した高炉セメントC種相当とし、細骨材には再生細骨材M(以下、RMS)、粗骨材には再生粗骨材M(以下、RMG)および再生粗骨材L(以下、RLG)に普通粗骨材の砕石2005(以下、G)を容積比で50%混合したものの2種類を使用した。水結合材比(W/B)は55%、40%および30%の3水準とした。打込み時期は、冬期(W)、標準

表-1 共同研究への参加会社

青木あすなろ建設	○浅沼組	○安藤ハザマ
奥村組	熊谷組	鴻池組
◎五洋建設	鉄建建設	東急建設
東京テクノ	東洋建設	長谷工コーポレーション
矢作建設工業	(五十音順 ◎:主査, ○:幹事)	

*1 研究開発センター 材料グループ 主幹研究員

*2 研究開発センター 材料グループ グループリーダー

期 (S) および夏期 (H) の 3 シーズンとし、それぞれのシーズンにおけるフレッシュコンクリート試験時の外気温の平均値は、約 9℃、約 18℃および約 31℃であった。

室内実験³⁾では、細骨材に再生細骨材 L (以下、RLS) も使用したが、当該再生骨材製造工場の製造工程や設備を考慮して、実機実験では RMS のみを使用した。再生骨材は、品質のばらつきの影響を確認するため、標準期は品質区分が同じ M または L に区分されるものの、他の打込み時期よりも絶乾密度が小さく、吸水率が大きい低品質のものを使用した。BF は、JIS A 6206 に適合するせっこう添加タイプとし、標準期と冬期は同一ロットを使用した。

RLG と G を混合した骨材の品質 (計算値) を表-4 に、使用した再生骨材の絶乾密度と吸水率の関係を図-1 および図-2 に示す。なお、再生骨材は 24 時間以上プレウェッティングをした後に使用した。

2.2 調査

実機実験における調査を表-5 に示す。目標とする呼び強度は 21 以上でかつ 42 を超える範囲を確保できるように 21、36、および 55 程度とし、室内実験結果³⁾を参考にして、それぞれの水結合材比を 55%、40%および 30%の 3 水準に設定した。骨材の組合せは、細骨材に RMS、粗骨材に RMG を単独で使用したもの (以下、MM 調査)、細骨材に RMS、粗骨材に RLG と G を混合して使用したもの (以下、ML 調査) の計 2 水準とした。粗骨材かさ容積は、目標スランプ 18cm (W/B55%) の調査で 0.570m³/m³、23cm (W/B40%、W/B30%) の調査で 0.560m³/m³ として、骨材の組合せにかかわらず一定とした。化学混和剤は、実際の運搬時間を考慮し、経時 60 分でスランプが 18±2.5cm または 23±2.0cm、空気量が 4.5±1.5%に収まるように使用量を調整した。

2.3 練混ぜ

練混ぜは強制二軸練りミキサ (3.3m³) にて実施し、練混ぜ量は 1.5m³×2 バッチ=3.0m³ とした。W/B55%および W/B40%では、材料を一括で投入

表-2 使用材料

名称	記号	銘柄／産地	物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度：3.15 g/cm ³
再生細骨材	RMS	再生骨材 M	絶乾密度：2.33～2.50g/cm ³ 吸水率：2.83～5.14% 微粒分量：1.1～5.0%
普通粗骨材	G	碎石 2005／東京都八王子産	絶乾密度：2.64～2.65g/cm ³ 吸水率：0.68～0.72%
再生粗骨材	RMG	再生骨材 M	絶乾密度：2.47～2.52g/cm ³ 吸水率：2.65～3.22% 微粒分量：0.1～0.4%
	RLG	再生骨材 L	絶乾密度：2.26～2.35g/cm ³ 吸水率：5.09～6.72% 微粒分量：0.2～0.6%
混和材	BF	高炉スラグ微粉末 4000	密度：2.89 g/cm ³ せっこう添加品
化学混和剤	Ad	AE 減水剤 (高機能タイプ)*1	ポリカルボン酸系化合物
	SP	高性能 AE 減水剤*1	ポリカルボン酸系化合物 (高炉スラグ高含有用)

*1 夏期は遅延形、他は標準形を使用

表-3 実験の組合せ

結合材	W/B(%)	細骨材	粗骨材	打込み時期
C+BF (質量比 30:70)	55	RMS	RMG	冬期(W)
	40		RLG+G	標準期(S)
	30		(容積比 50 : 50)	夏期(H)

表-4 再生粗骨材 L と碎石を混合した骨材品質

名称	混合比率 (容積比)	物性 (計算値)
再生粗骨材	RLG : G=50 : 50	絶乾密度：2.46～2.50g/cm ³ 吸水率：2.78～3.47%

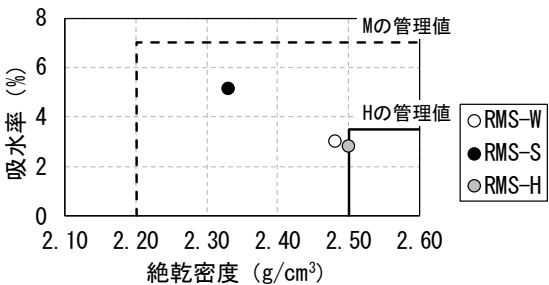


図-1 絶乾密度と吸水率の関係 (再生細骨材)

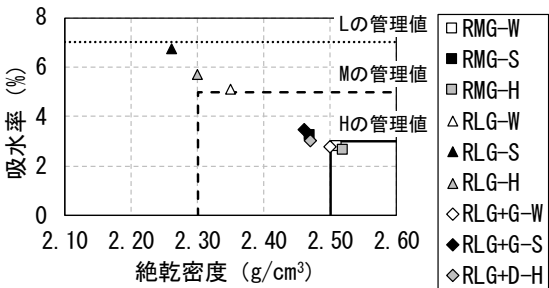


図-2 絶乾密度と吸水率の関係 (再生粗骨材)

し、それぞれ 30 秒間または 60 秒間練り混ぜた。W/B30%では、モルタルを 90 秒間練り混ぜた後、粗骨材を投入してさらに 60～120 秒間練り混ぜ

た。各バッチのコンクリートはアジテータ車で混合し、各試験に供した。

2.4 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表一6に示す。

(1) 再生骨材

再生骨材を対象とした試験は、塩化物イオン含有量 (JIS A 1154) とペースト付着率 (塩酸溶解) を実施した。

(2) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリート試験は、スランプ、空気量、コンクリート温度、塩化物含有量とし、経時0分、30分、60分、90分および120分で実施した。

ここで、塩化物含有量は、JIS A 5022 を参考にし、次のものを総和して求めた。

- 1) JASS5T-502 により求めたフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度と調合設計に用いた単位水量との積
- 2) 再生骨材 M の塩化物量 (本検討では塩化物イオン含有量) と調合設計に用いた再生骨材 M の単位量との積
- 3) 再生骨材 L の塩化物量 (本検討では塩化物イオン含有量) と調合設計に用いた再生骨材 L の単位量との積

なお、本検討では、再生骨材の塩化物イオン含有量は JIS A 1154 により求めている。

(3) 硬化コンクリート

①圧縮強度

圧縮強度試験は、管理用供試体 (JIS A 1108) とコア (JIS A 1107) で実施した。管理用供試体は、標準養生 (材齢 7, 28, 56, 91 日) と図一3に示す簡易断熱養生 (材齢 28, 56, 91 日) とした。また、コアは模擬柱試験体から採取したコア供試体 (材齢 28, 56, 91 日) とした。模擬柱試験体は、図一4に示すように 1000mm×1000mm×1000mm のブロックとし、コアは各材齢において中央部および端部から 2 本ずつ採取して、上下端を除いて約 200mm 間隔で切断した 8 本とした。なお、管理用供試体の採取と模擬柱試験体の打込みは、経時 60 分 to 実施した。

表一5 調合

打込み時期	調合記号*1	W/B (%)	単位量(kg/m³)						Ad/SP*2 (B×%)	AE*3
			W	C	BF	RMS	G	RMG		
冬期	55MM-W	55	180	98	229	786	—	919	0.95	1.5A
標準期	55MM-S					755		908	1.20	3.0A
夏期	55MM-H					795		923	1.20	1.5A
冬期	40MM-W	40	170	128	298	744	—	903	0.65	2.5A
標準期	40MM-S					714		893	0.90	2.5A
夏期	40MM-H					752		907	0.95	2.5A
冬期	30MM-W	30	170	170	397	622	—	903	0.675	4.0A
標準期	30MM-S					597		893	0.95	4.5A
夏期	30MM-H					629		907	1.00	4.0A
冬期	55ML-W	55	180	98	229	823	—	422	0.85	2.0A
標準期	55ML-S					790		413	1.15	3.0A
夏期	55ML-H					832		416	1.00	1.25A
冬期	40ML-W	40	170	128	298	779	—	415	0.60	2.0A
標準期	40ML-S					749		405	0.85	2.5A
夏期	40ML-H					788		408	0.85	3.5A
冬期	30ML-W	30	170	170	397	657	—	415	0.80	4.0A
標準期	30ML-S					632		405	0.95	4.0A
夏期	30ML-H					665		408	0.90	3.5A

*1 調合記号：水結合材比・骨材組合せ一打込み時期

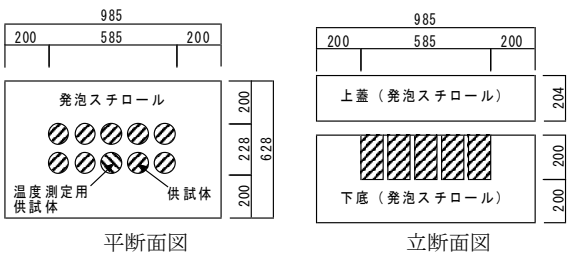
*2 W/B=55%：Ad (AE 減水剤(高性能タイプ))

W/B=40%・30%：SP (高性能 AE 減水剤)

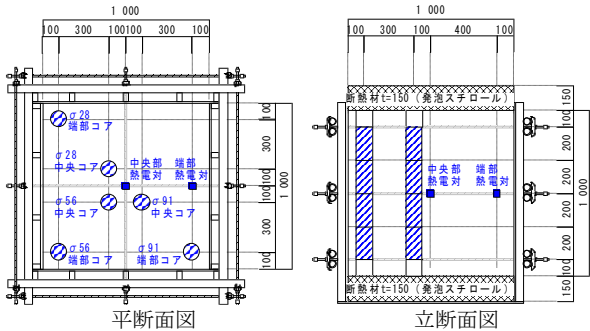
*3 空気量調整剤 1.0A=B×0.002%

表一6 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法
再生骨材	塩化物イオン含有量	JIS A 1154
	ペースト付着率	塩酸溶解(塩酸濃度 5%, 約 1kg×2 回平均)
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	塩化物含有量	JASS5T-502
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108, 1107
	アルカリシリカ反応性	JIS A 5022 附属書 E
	塩化物イオン量	JIS A 1154



図一3 簡易断熱養生模式図



図一4 模擬柱試験体模式図

②アルカリシリカ反応性および塩化物イオン量

アルカリシリカ反応性は JIS A 5022 附属書 E (アルカリシリカ反応性迅速試験), 塩化物イオン量は JIS A 1154 に従って実施した。試験対象は, 各打込み時期において水結合材比が最も小さい 30MM および 30ML の 2 調合, 計 6 調合とした。なお, アルカリシリカ反応性迅速試験は抑制対策の効果を確認する目的で実施した。

3. 実機実験結果

3.1 再生骨材

再生骨材の塩化物イオン含有量の試験結果を図-5 に, ペースト付着率の測定結果を図-6 に示す。塩化物イオン含有量は, 自主管理基準である 0.010%以下を十分に満足した。なお, この自主管理基準は, JIS A 5022 附属書 A にて規定されている 0.04% (NaCl 換算) よりも厳しい値として設定している。ペースト付着率は RMS, RLG, RMG の順に小さくなった。RMG と RLG を比較すると, 付着ペースト率では RLG が大きくなっているものの, 塩化物イオン含有量の値には差があまりみられなかった。

3.2 フレッシュコンクリート

フレッシュ性状の経時変化の一例として, 40MM および 40ML の試験結果を図-7 に示す。スランプおよび空気量ともに, 現場での荷卸しを想定した経時 60 分で管理値内に収まった。スランプは時間の経過とともに低下する傾向にあったものの, コンクリート温度が高い夏期においても, 経時 120 分まで管理値内に収まった。空気量については, 40MM-S および 40MM-H において攪拌による巻込みと思われる空気量の増加傾向が見られたが, 経時 120 分まで管理値内に収まった。なお, 結果は示していないが, W/B55%では AE 減水剤を使用していることもあり経時 90 分まで, W/B30%では W/B40%と同様に高性能 AE 減水剤を使用しているため経時 120 分まで, スランプおよび空気量ともに管理値内に収まった。以上のことから, 高炉スラグ微粉末を高含有した再生骨材コンクリートでも, 運搬時間を考慮して適

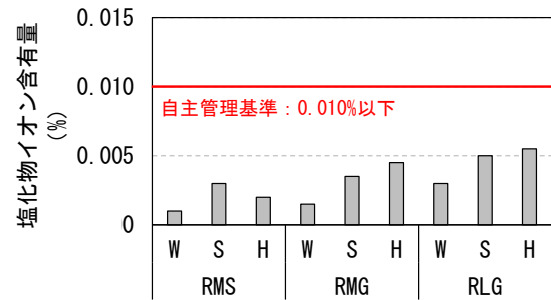


図-5 再生骨材の塩化物イオン含有量試験結果

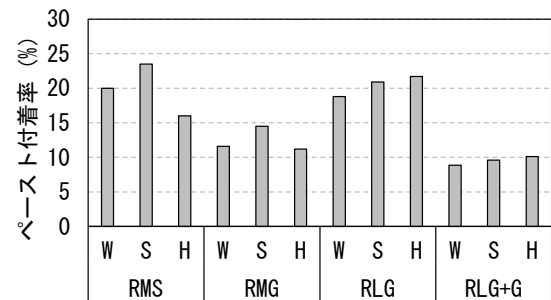


図-6 ペースト付着率測定結果

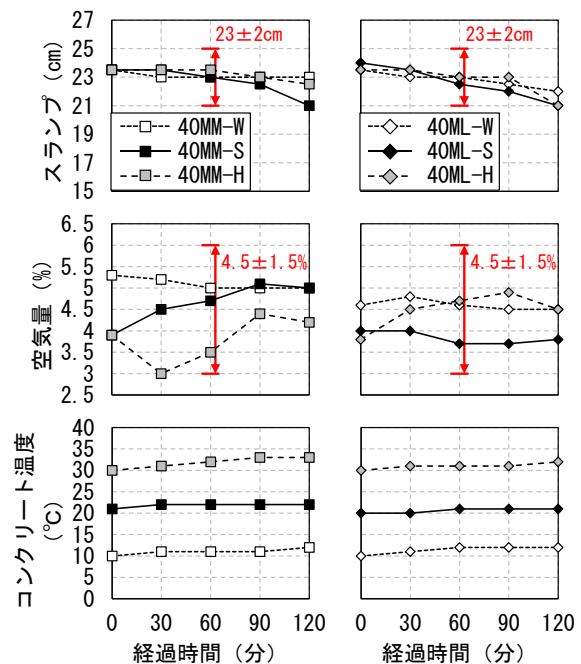


図-7 フレッシュコンクリートの経時変化の一例 (40MM, 40ML)

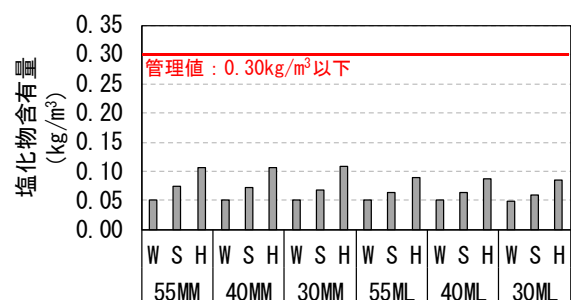


図-8 塩化物含有量試験結果

切な運搬時のスランプの低下を見込むことで、良好な荷卸し時のフレッシュ性状を確保できると考えられる。

フレッシュコンクリートの塩化物含有量の試験結果を図-8に示す。MM 調合および ML 調合ともに、夏期の値が大きくなる傾向にあった。これは、再生粗骨材の塩化物イオン含有量が他の時期と比較してやや大きいことが影響したと考えられる。しかし、いずれの調合も管理値である 0.30kg/m^3 以下を十分に満足した。MM 調合と ML 調合を比較すると、再生骨材の使用量が少ない ML 調合の値がやや小さくなる傾向にあった。

3.3 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験結果の一例として、40MM および 40ML を図-9に示す。40MM において、打込み時期による違いをみると、標準養生では冬期と標準期の差が小さく、夏期ではこれらに比べて 10N/mm^2 程度大きくなった。簡易断熱養生およびコア供試体の材齢 91 日の値をみると、冬期と夏期では同程度、標準期ではこれらと比較して 10N/mm^2 程度小さくなっており、養生方法により異なる傾向がみられた。一方、40ML をみると、標準養生では冬期と夏期に比べて標準期が $2\sim 4\text{N/mm}^2$ 程度小さくなった。簡易断熱養生およびコア供試体の材齢 91 日の値をみると、冬期、夏期、標準期の順に小さくなった。打込み時期による差は 40MM よりも小さく、傾向が少し異なる結果であった。なお、これらは W/B55% および W/B30% についても同様であった。

MM 調合と ML 調合の圧縮強度の比較を図-10に示す。各養生において、ML 調合の圧縮強度よりも MM 調合の方が大きくなる傾向にあった。しかし、夏期を除いた冬期と標準期でみると、ほぼ同等の結果であった。

結合材水比と材齢 28 日の標準養生の圧縮強度の関係を図-11に示す。既報³⁾の室内実験と同様に、結合材水比の増加に伴って、圧縮強度が大きくなっており、頭打ちとなる傾向はみられなかった。

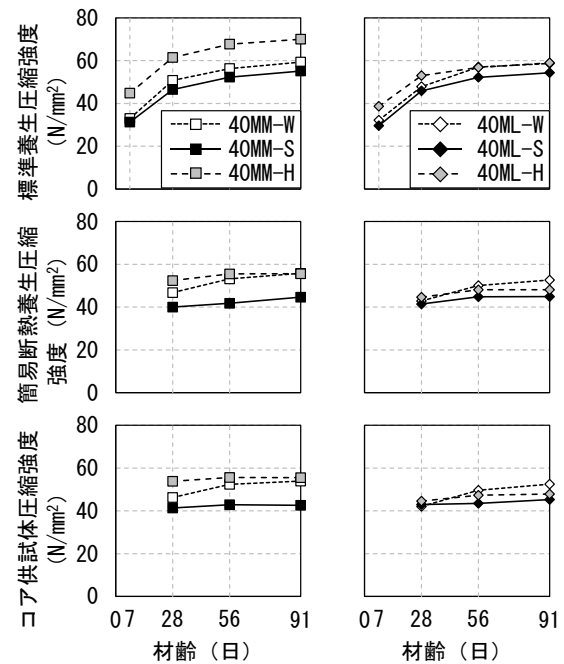


図-9 圧縮強度試験結果の一例
(40MM, 40ML)

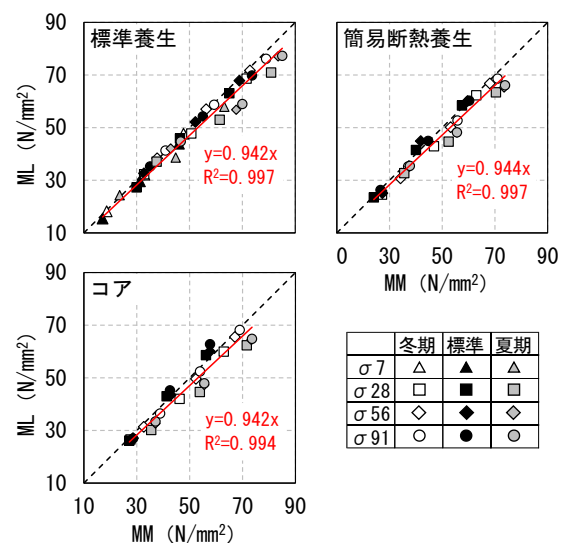


図-10 MM 調合と ML 調合の圧縮強度の比較

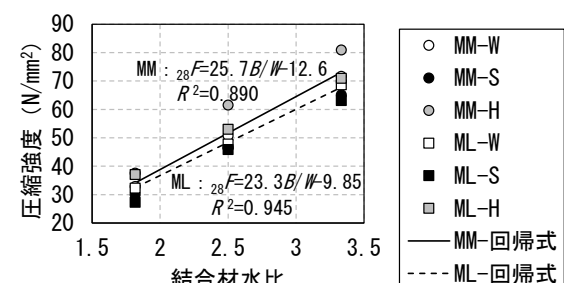


図-11 結合材水比と圧縮強度の関係
(標準養生, 材齢 28 日)

材齢 91 日のコア強度と構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の関係を図-12に示す。構造体強度補正值は、材

齢28日の標準養生の圧縮強度と材齢91日のコア供試体の圧縮強度の差から算出した。なお、図中には JASS 5²⁾および高炉指針⁷⁾に示されている S 値を表記した。本検討における構造体強度補正値は、冬期<標準期≒夏期となる結果であった。骨材の組合せによる影響をみると、標準期において MM 調合が大きくなっているものの、冬期や夏期では概ね同程度の値であった。この結果から、本検討における高炉スラグ微粉末高含有再生骨材コンクリートの $_{28}S_{91}$ は、設計基準強度 36N/mm^2 以下の場合、JASS 5 に示される高炉セメント C 種相当と同様に 3N/mm^2 または 6N/mm^2 として設定できることを確認した。また、設計基準強度 36N/mm^2 を超え 48N/mm^2 以下の場合には高炉指針に示される 9N/mm^2 以下となり、 48N/mm^2 を超える場合においても 9N/mm^2 に設定できる可能性が示唆された。

(2) アルカリシリカ反応性

各打込み時期において、W/B30%の調合を対象に実施したアルカリシリカ反応性迅速試験結果を図-13に示す。相対動弾性係数は、対象としたすべての調合において80%以上となり、「反応性なし(A)」の結果であった。相対動弾性係数の値をみると、室内実験では、骨材全体に対する再生骨材の使用量の割合が高いほど小さくなる傾向にあった³⁾。実機実験では、冬期と標準期で ML の方が大きく、同様の傾向にあったものの、夏期では逆の結果となった。

実機実験における調合のアルカリ総量の算出結果を図-14に示す。アルカリ総量は、JIS A 5022 附属書 C に倣って各使用材料の全アルカリ量の総和で求めた。アルカリ総量の内訳をみると、その大部分が再生骨材由来となっている。再生骨材の全アルカリ量は、セメントペーストに含まれる水量をゼロとし、かつ、原コンクリートに用いたセメントのアルカリ量を過去の最大値と仮定して求めており、抑制対策として安全側となるように配慮されている。本実験における調合のアルカリ総量は、いずれの調合においても JIS A 5022 の管理値である 4.2kg/m^3 以下を満足している。一

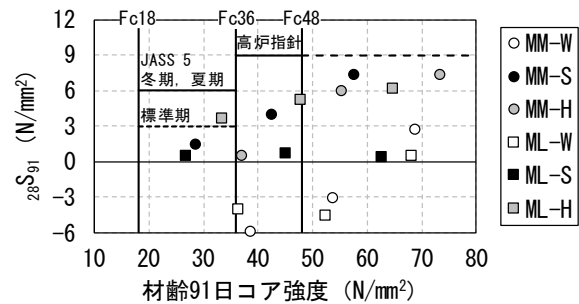


図-12 材齢91日コア強度と構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$ の関係

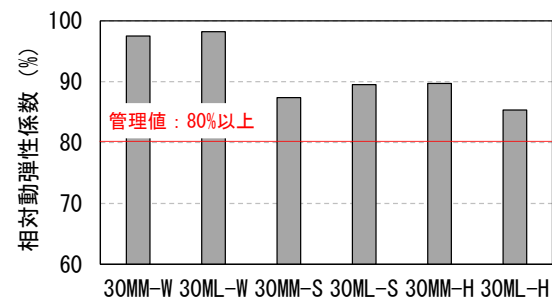


図-13 アルカリシリカ反応性迅速試験結果

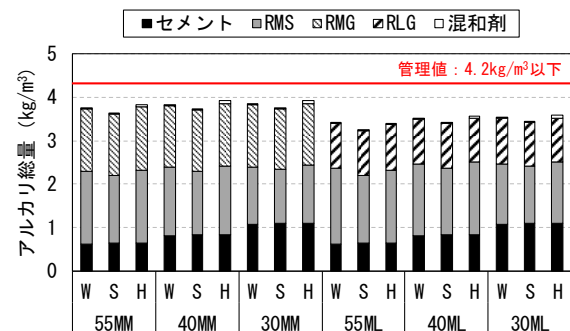


図-14 アルカリ総量算定結果

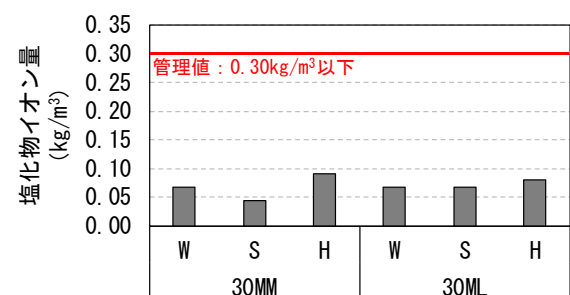


図-15 塩化物イオン量試験結果

方、骨材の組合せの違いを比較すると、再生骨材の使用量が多い MM 調合の方が ML 調合よりも大きい。水結合材比の影響をみると、水結合材比が小さくなるにつれてアルカリ総量が大きくなる傾向にあるものの、その差は小さい。

(3) 塩化物イオン量

各打込み時期において、W/B30%の調合を対象

に実施した硬化コンクリートの塩化物イオン量の試験結果を図-15に示す。塩化物イオン量は、すべての調合で管理値である0.30kg/m³を大きく下回った。この結果をみると、骨材の組合せによる影響は小さいと考えられる。また、図-8に示すフレッシュコンクリートの塩化物含有量との関係をみると、概ね同等の値となっていることが確認できた。

4. CO₂ 排出量および削減効果の検討

4.1 概要

高炉スラグ微粉末を用いた再生骨材コンクリートの材料由来のCO₂ 排出量および削減効果を検討するにあたり、各呼び強度での水結合材比を設定するために、実機実験における圧縮強度試験結果から強度算定式を求めた。さらに、再生骨材の実製造過程におけるCO₂ 固定量を把握した。

4.2 強度算定式の検討

結合材水比と材齢 28 日の標準養生の圧縮強度の関係を図-16に示す。図には、実験を実施した工場が保有している高炉セメント B 種の強度算定式も合わせて示している。3 シーズンにおける圧縮強度結果の回帰式は、工場保有の強度算定式と概ね同様の傾向を示しており、傾きにも大きな差はみられなかった。

このことから、強度算定式は、実験結果による回帰式をもとに、全体を包括できるように必要な範囲で回帰式を負側に平行移動した（切片を減じた）式を用いることで、適切な強度設計ができるように設定した。設定した強度算定式および回帰式を負側に平行移動した量を表-7に示す。

4.3 再生骨材の実製造過程におけるCO₂ 固定量

本検討では、再生骨材の実製造過程におけるCO₂ 固定量を把握するため、実工場における再生骨材の製造からコンクリートへ使用されるまでの工場内保管期間中に再生骨材が吸収・固定化するCO₂ 量を確認した。

原コンクリートには、調合および使用材料が既知である3体のコンクリートブロックを使用した。コンクリートブロックが製作されてから再生骨

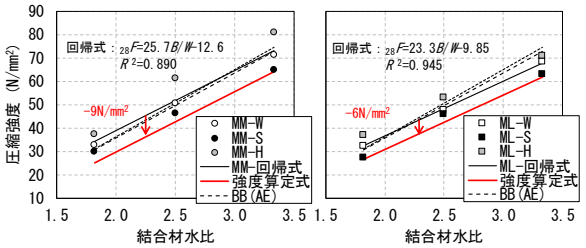


図-16 結合材水比と圧縮強度の関係
(標準養生，材齢 28 日)

表-7 強度算定式と平行移動量

調合	強度算定式	平行移動量(N/mm ²)
MM	F=25.7B/W-21.6	-9
ML	F=23.3B/W-15.9	-6

表-8 再生骨材のCO₂ 固定量

種類	CO ₂ 固定量(kg-CO ₂ /t) ()内は保管中の値				
	製造直後	保管1週	保管4週	文献1) 参考*1	文献8) 参考*2
RLS	-0.1	10.5 (10.6)	41.8 (41.9)	(25.6)	32.6
RLG	1.7	3.6 (1.9)	11.7 (10.0)	(6.41)	12.7
RMS	9.7	12.9 (3.2)	19.9 (10.2)	(14.1)	—
RMG	0.1	6.8 (6.7)	10.2 (10.1)	(4.09)	—

*1 保管のみ（室内，乾湿繰返し4週）
*2 製造～保管4週（屋根付き屋外，水噴霧1日1回）

材に再資源化されるまでは屋内に保管されており，その保管期間は約1～6カ月と比較的短いため，内部までの炭酸化はほとんどしていないものと推察される。

コンクリートブロックを実工場で破砕・磨砕を行い再資源化された再生骨材は，屋根が設置してある屋外で保管し，実際の保管時と同様の湿潤管理を再現するため，1日1回程度，骨材表面が湿る程度まで散水を行った。

CO₂ 固定量は，示差熱重量分析（TG-DTA），TOC 装置による無機炭素（TOC-IC）の定量によってCO₂ 含有量を測定し，原コンクリートとの差分によって算出した。再生骨材のCO₂ 固定量を表-8に示す。結果はTG-DTAとTOC-ICで同じ傾向を示したため，それぞれの平均値としている。測定結果から，RLSの固定量が41.8kg-CO₂/tと最も大きくなった。品質区分で比較すると，再生骨材Lの固定量の方がMよりも大きくなる傾向となった。また，再生骨材保管中におけるCO₂ 固定量が，全固定量の大部分を占めていることが確

認められた。表中には、既往の文献 1), 8)における参考値を示すが、再資源化を模擬した室内試験による保管のみの結果である文献 1)と比較すると RMSを除いて本検討結果の方が大きい値であり、実際の処理工場の結果である文献 8)と比較すると、RLS では本結果の方が大きく、RLG では同程度であった。

原コンクリートの特性や製造方法により CO₂ 固定量は異なるものと推察されるが、実際の再生骨材の製造過程において、既往文献や本検討で示した程度の水準での CO₂ 固定量が得られているものと評価できる。

4.4 CO₂ 排出量および削減効果の試算結果

コンクリート材料に由来する CO₂ 排出量を算定した。算定にあたって、水結合材比は表-7 に示した強度算定式を用いて算出した。今回の算定では、材齢 28 日の圧縮強度から設定した式を採用した。標準偏差は呼び強度の 10%とし、調合強度は式(1)および式(2)を満足するように定めた。

$$F=SL+2\sigma \tag{1}$$

$$F=0.85SL+3\sigma \tag{2}$$

ここに、F：調合強度 (N/mm²)

SL：呼び強度 (N/mm²)

σ：標準偏差 (N/mm²)

調合条件を表-9 に、各材料の CO₂ 排出量原単位を表-10 に示す。再生骨材の CO₂ 固定量には、表-8 に示す本検討で得られた保管 4 週の値を用いた。

材料由来の CO₂ 排出量、再生骨材による CO₂ 削減量、および高炉スラグ微粉末を高含有した再生

骨材コンクリートにおける CO₂ 削減効果を表-11 および図-17 に示す。普通コンクリートに対する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 CO₂ 削減効果は、再生骨材の組み合わせや呼び強度にもよるが、65～72%程度期待できることが示された。CO₂ 排出量の削減には、高炉スラグ微粉末を高含有したことによる効果が大きく、高含有により 150～200kg-CO₂/m³ 程度の CO₂ 排出量が削減された。さらに再生骨材を使用することにより、19～25kg-CO₂/m³ 程度の CO₂ 排出量が削減された。なお、再生骨材による CO₂ 削減量は、MM 調合の方が 4kg-CO₂/m³ 程度が大きくなる結果となった。

表-9 調合条件

項目	条件
単位粗骨材かさ容積	0.570m ³ /m ³ (スランプ 18cm)
化学混和剤	W/B ≤ 50% : 高性能 AE 減水剤 W/B > 50% : AE 減水剤
単位水量	W/B ≤ 50% : 170kg/m ³ W/B > 50% : 180kg/m ³

表-10 各材料の CO₂ 排出量原単位 ⁷⁾

材料	CO ₂ 排出量原単位(kg-CO ₂ /t)
普通ボルトランドセメント	772
高炉スラグ微粉末	35.6
碎石	3.90
砕砂	3.90
砂	4.90

表-11 CO₂ 排出量および削減効果の試算結果

呼び強度	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /m ³) (再生骨材による削減量(kg-CO ₂ /m ³))			CO ₂ 削減効果 (%)	
	普通	MM	ML	MM	ML
24	245.0	74.1(-24.6)	75.4(-20.8)	69.8	69.2
27	261.2	73.9(-24.9)	76.8(-21.0)	71.7	70.6
30	278.1	80.1(-24.5)	83.9(-20.6)	71.2	69.8
33	276.6	87.2(-24.3)	91.1(-20.4)	68.5	67.1
36	292.8	93.5(-23.9)	97.5(-20.0)	68.1	66.7
39	308.1	99.8(-23.5)	104.7(-19.6)	67.6	66.0
42	323.5	106.1(-23.2)	111.8(-19.2)	67.2	65.4
45	338.9	112.4(-22.8)	119.1(-18.7)	66.8	64.9

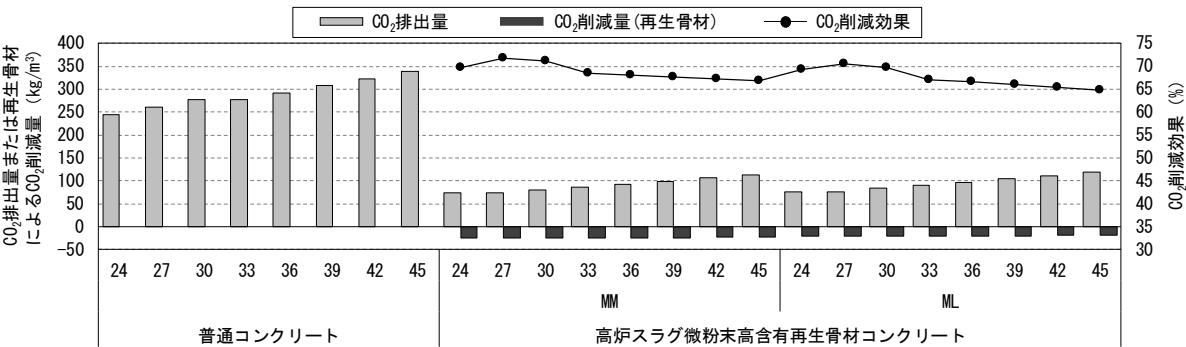


図-17 CO₂ 排出量および削減効果の試算結果

5. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- 1) 高炉スラグ微粉末高含有再生骨材コンクリートは、骨材の組合せにかかわらず、運搬時間を考慮し、運搬時のスランプの低下を適切に見込むことで、良好な荷卸し時のフレッシュ性状を確保できる。
- 2) 圧縮強度は、いずれの養生方法においても、標準期の値が冬期および夏期に比べ小さい傾向にある。また、打込み時期による圧縮強度差は、骨材の組合せにより異なる傾向にある。
- 3) MM 調合と ML 調合の圧縮強度の関係は、いずれの養生方法においても、夏期は MM 調合の圧縮強度が高いものの、冬期および標準期では概ね同等な傾向にある。
- 4) 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ は、 F_c36N/mm^2 以下において JASS 5 に示される高炉セメント C 種相当の値を設定可能であると評価することができる。
- 5) 対象とした調合におけるアルカリシリカ反応迅速試験の結果は「反応性なし」であり、また、JIS A 5022 附属書 C に従って算出したアルカリ総量はすべての調合で管理値である $4.2kg/m^3$ 以下を満足する。
- 6) 所要の品質基準を満足した再生骨材を使用した高炉スラグ高含有再生骨材コンクリートのフレッシュコンクリートでの塩化物含有量、硬化コンクリートでの塩化物イオン量は、ともに管理値である $0.30kg/m^3$ 以下を十分に満足する。
- 7) 再生骨材の CO_2 固定量は、再生骨材 M よりも再生骨材 L の方が大きく、その大部分が保管時に固定される傾向にある。
- 8) 高炉スラグ微粉末を高含有した再生骨材コンクリートは、65～72%の CO_2 削減効果が期待できると評価することができる。

謝辞

本研究の実施にあたり、武蔵野土木工業、日本シーカおよび三協 Mirai のご協力をいただきました。関係各位に謝意を表し、ここに記します。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：社会資本等の維持管理効率化・高度化のための情報蓄積・利活用技術の開発，第5章 ライフサイクルをととした CO_2 収支量の定量的把握手法の開発，国総研プロジェクト研究報告 第63，pp.53-58，2019
- 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，2022.11
- 3) 川又篤，唐澤智之：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基礎的性状，鉄建技術報告，No.37，2024.3
- 4) 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，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.1099-1104，2024.6
- 5) 岸本豪太ほか：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性状 その4～その9，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.349-360，2024.8
- 6) 鈴木好幸ほか：再生骨材の実製造プロセスにおける CO_2 固定量に関する研究 その1～その2，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.361-364，2024.8
- 7) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針（案）・同解説，2017.9
- 8) 松田信広，伊代田岳史：再生骨材コンクリートによる CO_2 削減効果の可能性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.1093-1098，2024.6