

報告 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

高橋 祐一*1・新田 稔*2・鈴木 好幸*3・松田 信広*4

要旨：再生骨材や路盤材等は、構造物の供用期間中に加え、再資源化の過程で CO₂ を吸収・固定している。再生骨材のうち再生骨材 L は、M と比較して低品質ではあるものの、付着モルタルが多いことから、CO₂ 固定量は多くなると考えられる。そこで、本研究では、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を目指し、室内実験において基本的な性状を確認した。その結果、骨材の組合せの影響は小さく、良好なフレッシュ性状および強度発現性を示した。さらに、再生骨材を使用することで、CO₂ 削減量を 8.4～18.8 kg-CO₂/m³ 増加できる可能性が示唆された。

キーワード：高炉スラグ微粉末、再生骨材コンクリート、再生骨材 M、再生骨材 L、再生 M2 種

1. はじめに

コンクリート構造物は供用期間中に大気に接している表面が炭酸化することで二酸化炭素 (CO₂) を吸収・固定している。供用を終えたコンクリート構造物は、解体され、破碎、粒度調整などの再資源化の過程を経て、コンクリート用の再生骨材や道路舗装用の路盤材として再利用されている。この再資源化の過程では、新しく大気に接する面が大きくなることから、さらに CO₂ を吸収・固定すると考えられている。

再生骨材の CO₂ の固定量については、それを評価している事例が少ないものの、既往の研究¹⁾によると、各品質区分における二酸化炭素の固定量が表-1 のように示されている。このことから、高炉スラグ微粉末 (BF) の使用率 (BF 使用率) を 70%としたコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに対して CO₂ 削減効果を 63%²⁾としているが、再生骨材を使用することでさらに削減効果を高めることが期待できる。

一方、構造物に使用することができる再生骨材コンクリートは、再生骨材 M または H とされている。このうち、再生骨材 M については、2018 年に改正された JIS A 5022「再生骨材コンクリート M」により、従来の再生骨材 M の品質を満足した骨材に加えて、品質基準を満足した「再生骨材 L+普通骨材」を使用することが可能となった。再生骨材 L は、付着モルタルが多いことから、M と比較して低品質ではあるものの、CO₂ 固定量は多くなるものと考えられる。

そこで、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を使用し、2022 年 11 月に改定された

JASS 5 に示されている資源循環性と低炭素性³⁾を兼ね備えた高炉スラグ高含有再生骨材コンクリートの実用化を目指し、室内実験において基本的な性状について検討を行った。本報では、その結果について報告する。なお、本研究は表-2 に示す 13 社で構成された「再生骨材を用いた CELBIC の実用化に関する研究会」において実施したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験における使用材料を表-3 に示す。再生細骨材および再生粗骨材は、解体ガラを起源として製造されたものである (写真-1～写真-4)。このうち、本実験で使用した再生骨材 M は、品質のばらつきの影響を考慮し、当該製造工場にて通常製造されている品質と比較して、低いものを使用した。なお、再生骨材 M と L は、いずれ

表-1 品質区分別 CO₂ 固定量測定結果¹⁾

品質区分	CO ₂ 固定量(kg-CO ₂ /t) ¹⁾		
	粗骨材	細骨材	微粉
再生骨材 H (機械的方法)	1.94	6.14	62.9
再生骨材 H (熱的方法)	1.26	4.03	55.5
再生骨材 M	4.09	14.1	—
再生骨材 L	6.41	25.6	—

*1 再生骨材等の保管期間内に固定された量
(保管期間の前後に測定した値の差分によって算出)

表-2 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 五洋建設 (株) 技術研究所建築技術開発部専門部長 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) 浅沼組 東京本店建築部品質管理室課長 (正会員)

*3 (株) 安藤・間 建設本部技術研究所脱炭素技術開発部担当課長 博士 (工学) (正会員)

*4 (株) 東京テクノ 生産技術統括本部長 (正会員)

表-3 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
普通細骨材 ^{*1}	S1	砕砂／東京都八王子産	絶乾密度：2.62 g/cm ³ 吸水率：0.99%
	S2	山砂／千葉県富津産	絶乾密度：2.54 g/cm ³ 吸水率：1.72%
再生細骨材	RMS	再生骨材 M	絶乾密度：2.33 g/cm ³ 吸水率：4.99% 微粒分量：4.9%
	RLS	再生骨材 L	絶乾密度：1.98 g/cm ³ 吸水率：12.28% 微粒分量：3.7%
普通粗骨材	G	砕石／東京都八王子産	絶乾密度：2.65 g/cm ³ 吸水率：0.66%
再生粗骨材	RMG	再生骨材 M	絶乾密度：2.46 g/cm ³ 吸水率：3.30% 微粒分量：0.1%
	RLG	再生骨材 L	絶乾密度：2.31 g/cm ³ 吸水率：5.51% 微粒分量：0.7%
混和材	BF	高炉スラグ微粉末 4000	密度：2.89 g/cm ³
化学混和剤	Ad	AE 減水剤	—
	SP	高性能 AE 減水剤	—

*1 砕砂：山砂=70：30（質量比）

も同一の原コンクリートから製造している。また、再生骨材 L の普通骨材に対する混合割合（容積比）は、粗骨材で 50%，細骨材で 30%とした。混合後の品質（計算値）を表-4 に示す。また、BF は JIS A 6206 に適合するせっこう添加タイプを使用した。

2.2 調合

本実験におけるコンクリートの調合を表-5 に示す。水結合材比は 60%～30%の 5 水準とした。骨材の組合せは、細骨材と粗骨材ともに再生骨材 M を単独で使用したもの（以下、MM 調合）、細骨材と粗骨材に再生骨材 L と普通骨材を混合して使用したもの（以下、LL 調合）、細骨材に再生骨材 M を粗骨材に再生骨材 L と普通骨材を混合して使用したもの（以下、ML 調合）の計 3 水準とした。なお、再生骨材は 24 時間以上プレウェッティングを行い表乾状態で使用した。粗骨材かさ容積は、目標スランプ 18cm の調合で 0.570m³/m³、23cm の調合で 0.560m³/m³ として、骨材の組合せにかかわらず一定とした。また、運搬によるロスを見込んで、スランプの管理値は (18+2) ±2.5cm または (23+1) ±2.0cm、空気量の管理値は、(4.5+0.5) ±1.5%とした。

2.3 練混ぜ

練混ぜは 60L 強制二軸練りミキサーを使用し、材料を一括で投入して空練りを 15 秒行い、注水後、W/B30%の調合で 120 秒、他は 90 秒練り混ぜて排出した。

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-6 に示す。再生骨材に対しては、塩化物イオン含有量およびペースト付着率を確認した。フレッシュコンクリートの塩化物含有量は、W/B35%および W/B30%の調合に対してのみ実施した。



写真-1 RMS



写真-2 RLS



写真-3 RMG



写真-4 RLG

表-4 再生骨材 L と普通骨材を混合した骨材の品質

名称	混合比率（容積比）	物性（計算値）
再生細骨材	S1：S2：RLS=40：30：30	絶乾密度：2.40 g/cm ³ 吸水率：4.01%
再生粗骨材	G：RLG=50：50	絶乾密度：2.55 g/cm ³ 吸水率：2.92%

表-5 調合

調合名 ^{*1}	W/B (%)	単位量(kg/m ³)									Ad/SP ^{*2} (B×%)	AE ^{*3}
		W	C	BF	S1/S2	RMS	RLS	G	RMG	RLG		
60MM18	60	180	90	210	—	778	—	—	905	—	0.45	1.0A
60LL18					350/257	—	221	—	455	—	0.70	2.0A
60ML18					—	813	—	—	—	417	0.35	2.0A
50MM18	50	180	108	252	—	728	—	—	—	—	0.40	1.0A
50ML18					—	763	—	455	—	417	0.40	1.0A
40MM23					—	714	—	—	889	—	0.35	0.5A
40LL23	40	170	128	298	323/237	—	204	—	—	410	0.75	1.5A
40ML23					—	749	—	447	—	—	0.50	1.0A
35MM23	35	170	146	340	—	664	—	—	889	—	0.50	1.0A
35ML23					—	698	—	447	—	410	0.625	2.0A
30MM23	30	170	170	397	—	597	—	—	889	—	0.85	2.5A
30LL23					272/200	—	172	—	—	410	0.95	5.0A
30ML23					—	632	—	447	—	—	0.75	4.0A

*1 調合名：水結合材比・骨材組合せ・目標スランプ

*2 W/B=60%・50%：Ad（AE 減水剤(高機能タイプ)）

W/B=40%・35%・30%：SP（高性能 AE 減水剤）

*3 空気量調整剤 1.0A=B×0.002%

表-6 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法	備考
再生骨材	塩化物イオン含有量	JIS A 1154	0.010%以下
	ペースト付着率	塩酸溶解	—
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101	20±2.5cm ^{*1} 24±2.0cm ^{*2}
	空気量	JIS A 1128	5.0±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	—
	塩化物含有量	JASS5T-502	0.30kg/m ³ 以下
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生
	アルカリシリカ反応性	ZKT-206	相対動弾性係数≥80%
	塩化物イオン量	JIS A 1154	—

*1 W/B=60%・50%

*2 W/B=40%・35%・30%，23cm 超は材料分離のないこと

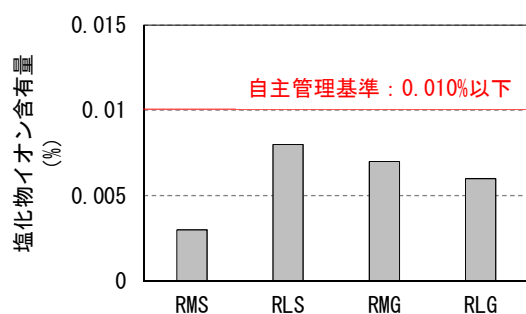


図-1 再生骨材の塩化物イオン含有量試験結果

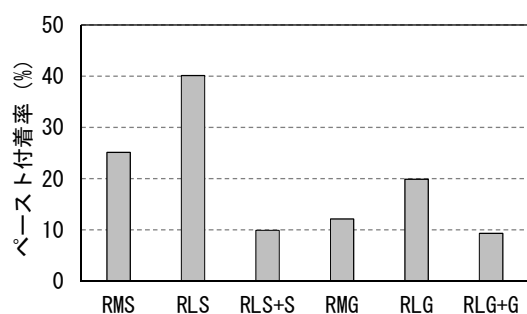


図-2 ペースト付着率

表-7 フレッシュコンクリート試験結果

調合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	塩化物含有量 (kg/m³)
60MM18	20.5	4.6	25	—
60LL18	17.5	5.1	26	—
60ML18	19.5	4.8	25	—
50MM18	21.0	5.1	25	—
50ML18	19.5	5.9	25	—
40MM23	22.0	5.1	25	—
40LL23	23.0	5.6	26	—
40ML23	23.5	5.9	26	—
35MM23	23.0	5.2	25	0.02
35ML23	22.5	5.5	26	0.02
30MM23	25.0	4.9	24	0.01
30LL23	22.0	4.2	25	0.02
30ML23	23.0	4.5	25	0.02



写真-5 40MM23



写真-6 40LL23



写真-7 40ML23



写真-8 35MM23

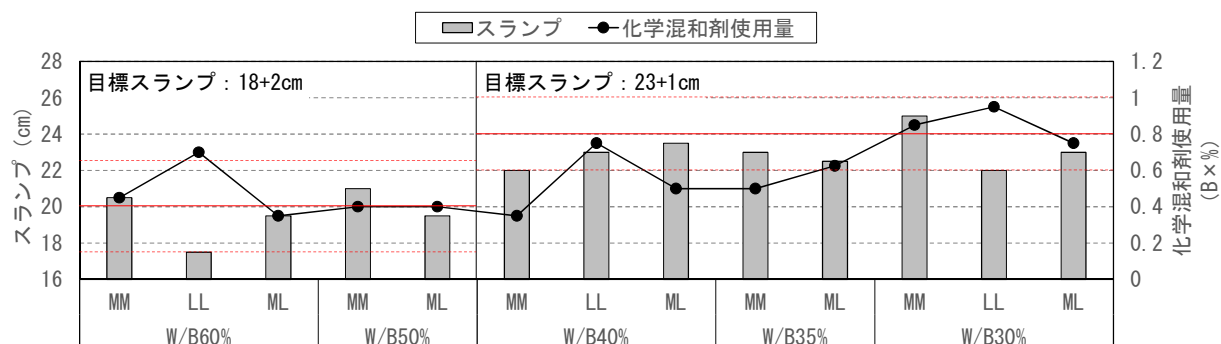


図-3 スランプ試験結果と化学混和剤使用量

硬化コンクリートに対しては、圧縮強度試験の他、W/B35%および W/B30%の調合で塩化物イオン量を、W/B30%の調合でアルカリシリカ反応性迅速試験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 再生骨材試験結果

再生骨材の塩化物イオン試験結果を図-1 に、ペースト付着率を図-2 に示す。細骨材の塩化物イオンは、RLSの方が大きい結果となったものの、粗骨材では、RMGとRLGに大きな差はみられなかった。なお、いずれも自主管理値である 0.010%以下を満足した。一方、ペース

ト付着率は、RLSおよびRLGともに、RMSおよびRMGのそれぞれ 1.6 倍程度であった。再生骨材 L と普通骨材を混合した場合のペースト付着率をみると、細骨材で 9.9%、粗骨材で 9.3%となり、RMS および RMG よりも小さい値となった。これは、再生細骨材の混合率が 30%と小さいことや、本実験で使用した RLG の品質が再生粗骨材 M の品質に近かったことが理由として挙げられる。

3.2 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-7 に、試験後の状態の一例を写真-5～写真-8 に示す。全ての調合において、スランプおよび空気量ともに管理値内に収まった。各調合におけるスランプ試験結果と化学混和剤使

用量を図-3に示す。骨材の組合せによる影響をみると、LL 調合では、化学混和剤の使用量が MM と比較して多いにもかかわらず、スランプが小さくなる傾向にあった。ML 調合は LL ほどではないものの、同程度の化学混和剤使用量では、スランプが小さくなる傾向にあった。これらの理由として、RMG は製造時に磨砕処理を行っていることから、角が取れており、RLG と比較して粒形がよく、実積率が大きい ($61.8\% > 59.8\%$) が考えられる。

塩化物含有量の試験結果を図-4に示す。30MM23 の値が他より小さかったものの、ほぼ同等の値となり、骨材の組合せによる影響はみられなかった。また、試験を実施した全ての調合で、測定値および JIS A 5022 10.5 に示されているように測定値を4倍した値であっても基準値である 0.30kg/m^3 を十分に下回った。以上より、適切な化学混和剤の使用量とすることで、目標とするフレッシュコンクリートの品質が得られることを確認した。



図-4 塩化物含有量試験結果

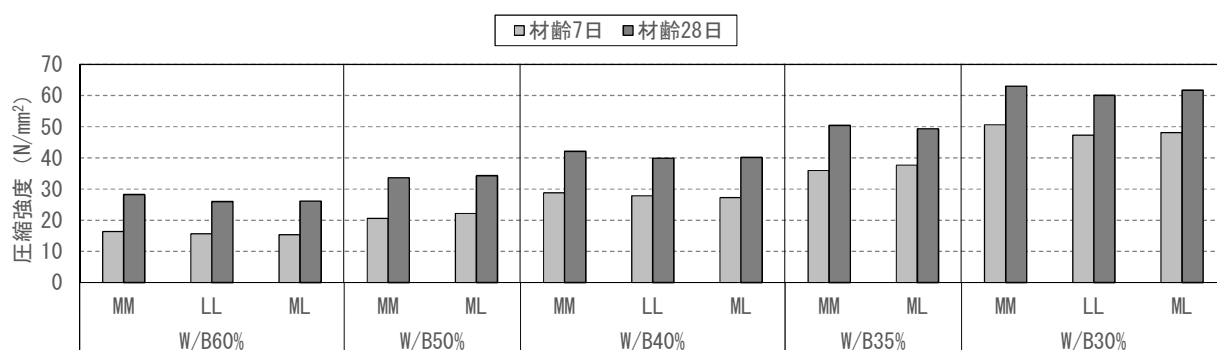


図-5 圧縮強度試験結果

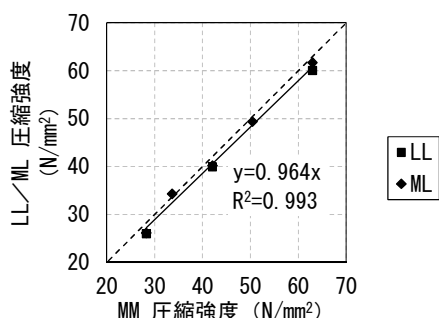


図-6 調合 MM と LL・ML の圧縮強度の比較

3.3 硬化コンクリート試験結果

圧縮強度試験結果を図-5に、MM 調合と LL または ML との材齢 28 日圧縮強度の比較を図-6に示す。材齢 28 日における圧縮強度は MM 調合と比較すると、LL および ML とともにやや小さいものの、その差は平均で 4% 程度であり、ほとんど同程度の値が得られた。結合材水比と材齢 28 日圧縮強度の関係を図-7に示す。本実験の範囲において、MM, LL および ML いずれの調合においても、結合材水比の増加に伴って、圧縮強度が増加しており、頭打ちとなるような傾向はみられなかった。また、両者の関係から求めた近似式の傾きは、骨材の組合せが異なっても概ね同等であった。また、BF 使用率を 70% として普通骨材のみを使用した既往の研究(例えば 4))と比較しても、近似式の傾きは大きな差はみられなかった。

W/B30%の各調合を対象に実施したアルカリシリカ反応迅速試験結果を表-8に示す。相対動弾性係数は、いずれの調合においても 80%以上となり「反応性なし(A)」と判定された。相対動弾性係数の値を比較すると、MM < ML < LL の順となっている。結合材の量は同一であることから、骨材の組合せの影響と考えられ、骨材全体に対する再生骨材の使用量の割合が高い調合ほど、相対動弾性係数が小さくなる傾向にあった。

W/B35%および 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-8に示す。各調合における硬化コンクリートの塩化物イオン量は、 0.07kg/m^3 であり、フレッシュコンクリートの塩化物

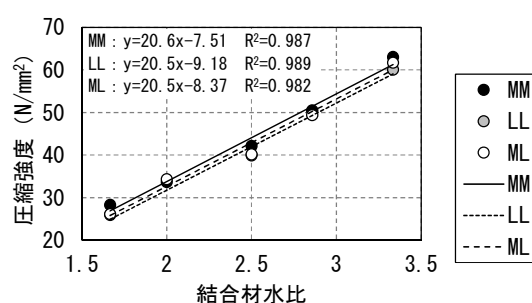


図-7 結合材水比と圧縮強度の関係

表-8 アルカリシリカ反応迅速試験結果

調査名	一次共鳴振動数(Hz)		相対動弾性係数(%)		
	煮沸前	煮沸後		平均	差
30MM23	9513	8818	85.9	87.5	-1.6
	9576	8995	88.2		0.7
	9344	8783	88.4		0.9
30LL23	9333	8957	92.1	92.3	-0.2
	9406	9077	93.1		0.8
	9311	8923	91.8		-0.5
30ML23	9554	9052	89.8	90.4	-0.6
	9562	9169	91.9		1.5
	9511	9004	89.6		-0.8

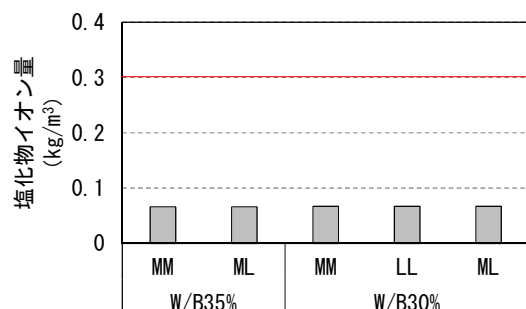


図-8 硬化コンクリートの塩化物イオン量試験結果

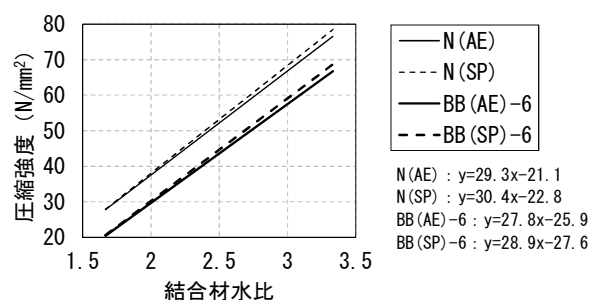


図-9 強度算定式

含有量と同様に骨材の組合せによる影響はみられなかった。

4. CO₂ 削減効果の試算

4.1 呼び強度に対応する水結合材比の算定

CO₂ 削減効果を試算するにあたり、呼び強度 24～45 に対応する水結合材比を算出した。なお、これまで当該生コン工場において、通常の品質の再生骨材を用いて実施した実験では、再生細・粗骨材コンクリートと普通骨材を用いたコンクリートの強度には、大きな差がみられていない⁵⁾。このことから、BF 高含有再生骨材コンクリートの水結合材比は、文献 4) に示されている普通骨材を用いたコンクリートと同様に算出できると仮定し、当該生コン工場の高炉セメント B 種の強度算定式から 6N/mm² 切片をマイナス側に平行移動した式を用いた(図-9)。また、比較用の普通コンクリートは、普通ポルトランドセメントの強度算定式を用いた。標準偏差は呼び

表-9 呼び強度に対応する水結合材比

	呼び強度に対応する水結合材比(%)							
	24	27	30	33	36	39	42	45
普通コン	58.4	54.7	51.3	48.7	46.0	43.6	41.5	39.5
MM								
LL	50.6	48.1	45.4	43.0	40.8	38.8	37.0	35.4
ML								

表-10 調査条件

項目	条件
単位粗骨材かさ容積	0.570m ³ /m ³ (スランブ 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-11 各材料の CO₂ 排出量原単位⁶⁾

材料	CO ₂ 排出量原単位 (kg-CO ₂ /t)
普通ポルトランドセメント	772
高炉スラグ微粉末	35.6
砕石 (再生粗骨材)	3.90
砕砂 (再生細骨材)	3.90
砂	4.90

表-12 試算結果

呼び強度	CO ₂ 排出量/再生骨材による削減量(kg-CO ₂ /m ³)				CO ₂ 削減効果 (%)		
	普通	MM	LL	ML	MM	LL	ML
24	245.0	81.6 / 17.1	89.7 / 9.0	80.2 / 18.5	66.7	63.4	67.3
27	261.2	80.4 / 17.3	88.8 / 9.0	79.0 / 18.8	69.2	66.0	69.7
30	278.1	85.9 / 17.0	94.0 / 8.9	84.4 / 18.5	69.1	66.2	69.6
33	276.6	92.0 / 16.9	99.9 / 9.0	90.6 / 18.3	66.7	63.9	67.3
36	292.8	97.4 / 16.6	105.2 / 8.9	96.0 / 18.0	66.7	64.1	67.2
39	308.1	102.8 / 16.3	110.4 / 8.7	101.4 / 17.7	66.6	64.2	67.1
42	323.5	108.9 / 16.0	116.4 / 8.6	107.5 / 17.4	66.3	64.0	66.8
45	338.9	114.3 / 15.7	121.6 / 8.4	112.9 / 17.2	66.3	64.1	66.7
平均	290.5	95.4 / 16.6	103.2 / 8.8	94.0 / 18.1	67.2	66.2	67.7

強度の 10% とし、調査強度は式(1)および式(2)を満足するように定めた。

$$F = SL + 2\sigma \quad (1)$$

$$F = 0.85SL + 3\sigma \quad (2)$$

ここに、 F : 調査強度 (N/mm²)

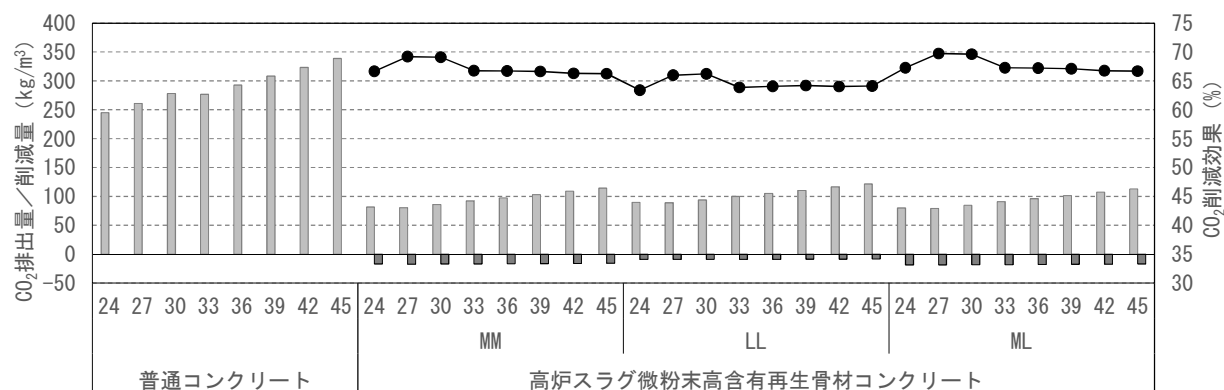
SL : 呼び強度 (N/mm²)

σ : 標準偏差 (N/mm²)

図-9 の強度算定式から求めた呼び強度に対応する水結合材比を表-9 に示す。

4.2 材料に由来する CO₂ 排出量の算定と削減効果の試算

材料に由来する CO₂ 排出量の算定に用いた調査は、表-10 に示す条件にて設定した。また、CO₂ 排出量の算定に用いた各材料の CO₂ 排出量原単位は表-11 に示す通



図－10 試算結果

りとし、再生骨材の CO₂ 固定量は表－1 に示す値を用いた。なお、再生骨材の製造に係る CO₂ 排出量は、砕石および砕砂と同一の値を用いて算定した。

各調査における CO₂ 排出量と再生骨材による CO₂ 削減効果の試算結果を表－12 および図－10 に示す。コンクリート材料に由来する CO₂ 排出量は、普通コンクリート ≧ LL > ML ≧ MM の順に大きい結果となった。一方、再生骨材を使用することによる CO₂ 削減量をみると、MM で 15.7～17.3 kg-CO₂/m³、LL で 8.4～9.0 kg-CO₂/m³、ML で 17.2～18.8 kg-CO₂/m³ であった。骨材の組合せにより異なるものの、再生骨材を使用することで CO₂ 削減量を増加できる可能性が示唆された。このうち、LL の CO₂ 削減効果が小さくなった理由としては、再生骨材 L の CO₂ 固定量は、M と比較して大きいと考えられるものの、混合率の上限が細骨材で 30%、粗骨材で 50%とした影響が挙げられる。

5. まとめ

本検討の範囲において得られた知見を以下に示す。

- 1) 再生骨材 M と、再生骨材 L と普通骨材を混合した骨材を使用したコンクリートは、適切な化学混和剤の使用量とすることで、目標とするフレッシュコンクリートの品質を得ることができる。
- 2) 再生骨材 M と、再生骨材 L と普通骨材を混合した骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は、ほぼ同程度であり、骨材の組合せによる影響は小さい。
- 3) 再生骨材 M と、再生骨材 L と普通骨材を混合した骨材を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応性および塩化物イオン量は、いずれも所定の品質を満足し、骨材の組合せによる影響は小さい。
- 4) JIS A 5022 の範囲において、混合率の影響で再生骨材 L と普通骨材を混合した細骨材および粗骨材を使用したコンクリートの CO₂ 削減効果は、再生骨材 M を使

用したコンクリートと比較して小さい。しかし、再生骨材 M または粗骨材のみ再生骨材 L と普通骨材を混合した骨材を使用したコンクリートでは、15.7～18.8 kg-CO₂/m³ の CO₂ 削減効果が期待できる。

本検討では、供用期間中に固定した CO₂ は含んでいないため、実際の CO₂ 削減効果はさらに大きいものと考えられる。今後は、実用化を目指して実機実験を実施するとともに、品質やロットの異なる再生骨材 CO₂ 固定量や CO₂ 固定量のポテンシャルについて、確認していく予定である。

参考文献

- 1) 長濱庸介，神田太朗，角湯克典：コンクリート用再生骨材等の再資源化の過程における二酸化炭素固定量，土木技術資料，pp.26-29，2014.7
- 2) 河野政典，住学，高橋祐一，唐沢智之，古川雄太，金子樹：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状その 18 本研究のまとめ，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.485-486，2020.9
- 3) 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
- 4) 高橋祐一，鈴木好幸，野中英，菌井孫文，安田正雪，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コンクリートの性状その 9 実機実験の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.467-468，2020.9
- 5) 高橋祐一，竹内博幸：複数の生コン工場で製造した再生骨材コンクリートの強度性状に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol41，No.1，pp.1499-1504，2019.7
- 6) 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