

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

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

○鈴木 好幸*1, 高橋 祐一*2, 新田 稔*3, 松田 信広*4

Yoshiyuki SUZUKI, Yuichi TAKAHASHI, Minoru NITTA, Nobuhiro MATSUDA

Recycled aggregate and roadbed materials absorb and fix CO₂ not only during the service life of the structure but also during the recycling process. Among the recycled aggregates, recycled aggregate L, although of lower quality than M, is expected to fix a larger amount of CO₂ because of the large amount of adhered mortar. Therefore, in this study, we aimed at the practical use of recycled aggregate concrete with high blast furnace slag fine powder content in low-carbon concrete equivalent to blast furnace cement Class C. We confirmed the basic properties of the concrete in laboratory experiments. The results showed that the influence of the combination of aggregates was small, and good fresh properties and strength development were obtained.

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 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、破砕、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。現在のがれき類のリサイクル材の用途は、道路の基礎で使用される再生砕石（路盤材）での利用割合が多いが、今後、日本では道路の延伸が多くは見込めないため、他用途への需給バランスの改善のため再生骨材の利用促進が期待されている。

再生骨材コンクリートを構造物に使用するためには、再生骨材 M または H の規格に示されている品質を満足する再生骨材を使用する必要がある。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。しかし、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使用する場合、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、JIS A 5022 附属書 C に示されており、その一つとして JIS A 6206 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いえる。

このような背景のもと、表-1 に示す建設会社 12 社と生コン工場 1 社の共同研究会（BFCCU 研究会, BFCCU: Blast Furnace slag+Carbon dioxide Capture and Utilization）が発足され、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

*1 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部担当課長 博士 (工学)

*2 五洋建設 (株) 技術研究所建築技術開発部建築グループ長 博士 (工学)

*3 (株) 浅沼組 東京本店建築部品質管理室課長

*4 (株) 東京テクノ 生産技術統括本部長 博士 (工学)

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)	

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
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	碎石／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）

に再生骨材 M を単独または再生骨材 L＋普通骨材の組合せで使用した「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が進められてきた。本報告は、その研究成果のうち、室内実験における基本的な性状についての検討結果について報告する。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本実験における使用材料を表-2 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、いずれも



写真-1 RMS



写真-2 RLS



写真-3 RMG



写真-4 RLG

表-3 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-4 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					—	778	—	—	905	—	0.45	1.0A
60LL18	60	180	90	210	350/257	—	221	—	—	—	0.70	2.0A
60ML18					—	813	—	455	—	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	—	—	—	0.75	1.5A
40ML23					—	749	—	447	—	410	0.50	1.0A
35MM23	35	170	146	340	—	664	—	—	889	—	0.50	1.0A
35ML23					—	698	—	447	—	410	0.625	2.0A
30MM23					—	597	—	—	889	—	0.85	2.5A
30LL23	30	170	170	397	272/200	—	172	—	—	—	0.95	5.0A
30ML23					—	632	—	447	—	410	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%

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-3 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 調合と練り混ぜ

本実験におけるコンクリートの調合を表-4

表－5 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	—
	長さ変化	円柱供試体埋込みひずみゲージ法	文献 1) 参照

*1 W/B=60%・50%

*2 W/B=40%・35%・30%, 23cm 超は材料分離のないこと

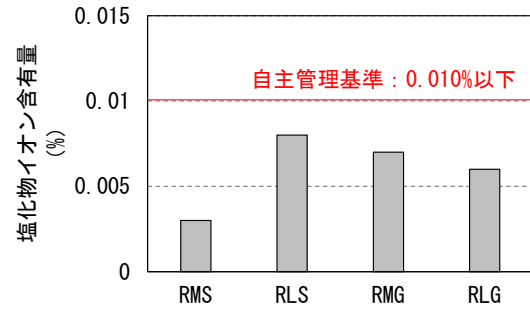
に示す。水結合材比は 30%～60%の 5 水準とした。骨材の組合せは、細骨材と粗骨材ともに再生骨材 M を単独で使用したもの(以下, MM 調合)、細骨材と粗骨材に再生骨材 L と普通骨材を混合して使用したもの(以下, LL 調合)、細骨材に再生骨材 M を粗骨材に再生骨材 L と普通骨材を混合して使用したもの(以下, ML 調合)の計 3 水準とした。なお、再生骨材は 24 時間以上プレウエッティングを行い表乾状態で使用した。粗骨材かさ容積は、目標スランプ 18cm の調合で 0.570m³/m³, 23cm の調合で 0.560m³/m³として、骨材の組合せにかかわらず一定とした。また、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。

練混ぜは 60L 強制二軸練りミキサを使用し、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。

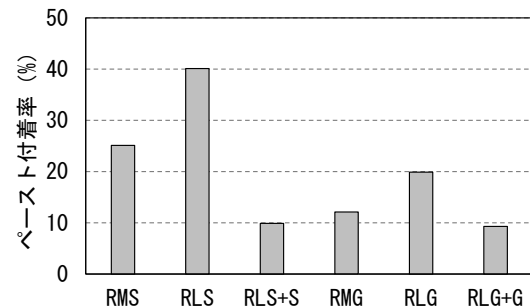
2. 3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表－5 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。

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



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

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－6

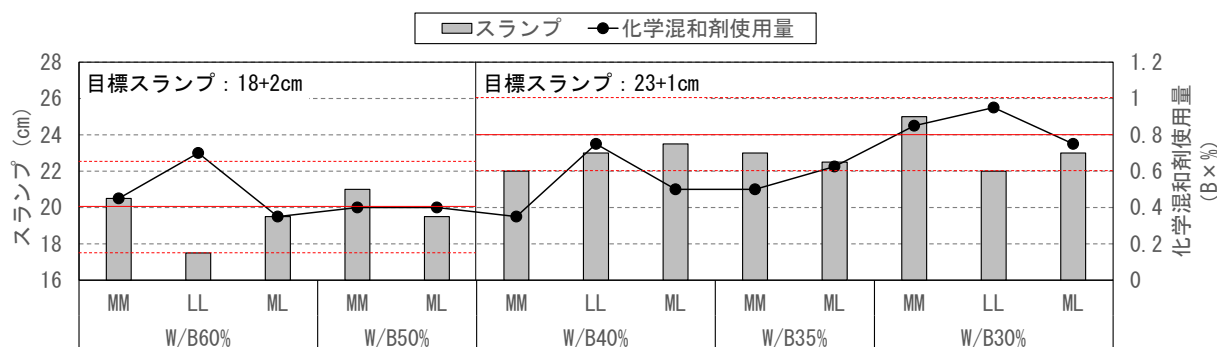


図-3 スランプ試験結果と化学混和剤使用量

に、試験後の状態の一例を写真-5～写真-8 に

表-6 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 (kg/m ³)
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

な化学混和剤の使用量とすることで、目標とす



写真-5 40MM23



写真-6 40LL23



写真-7 40ML23



写真-8 35MM23

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%)ことが考えられる。

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/m³を十分に下回った。以上より、適切

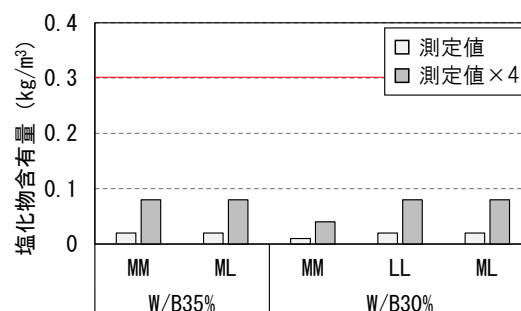


図-4 塩化物含有量試験結果

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。

3. 3 硬化コンクリート試験結果

(1) 圧縮強度

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

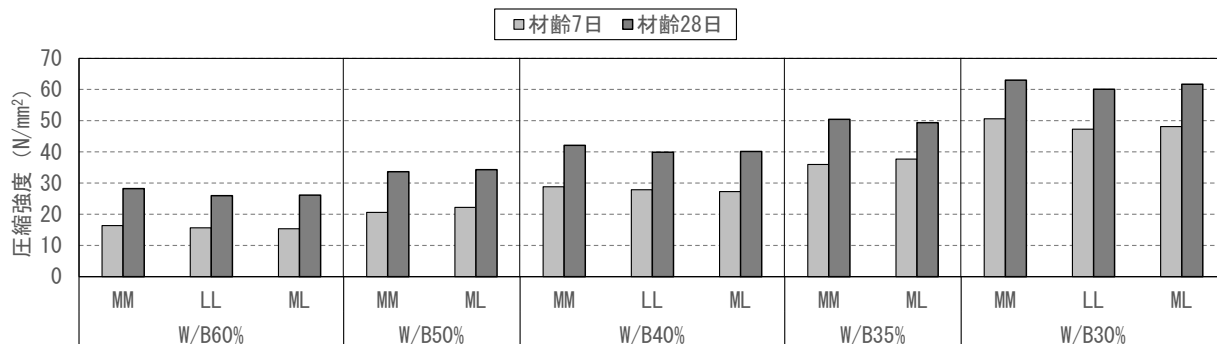


図-5 圧縮強度試験結果

いものの、その差は平均で4%程度であり、ほぼシリカ反応迅速試験結果を表-7に示す。相対動

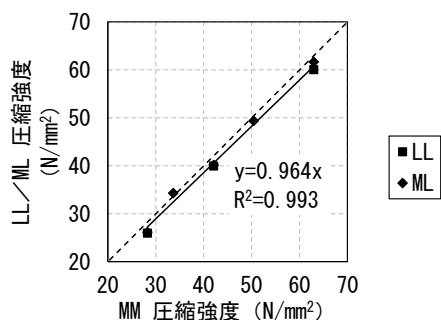


図-6 調合 MM と LL・ML の圧縮強度の比較

表-7 アルカリシリカ反応迅速試験結果

調合名	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

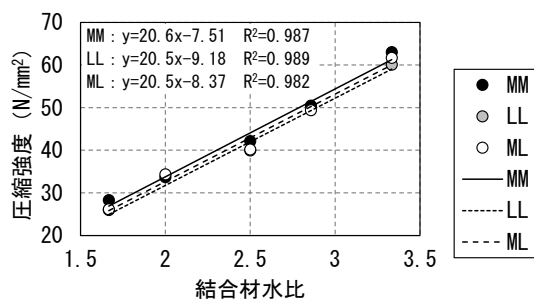


図-7 結合材水比と圧縮強度の関係

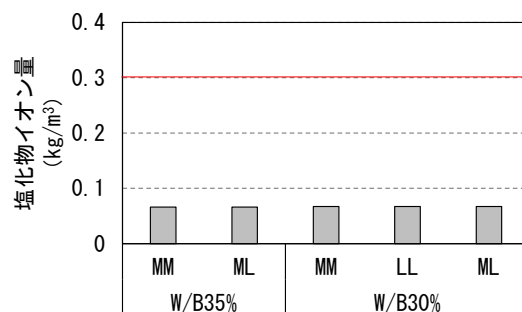


図-8 硬化コンクリートの塩化物イオン量試験結果

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2)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。

(2) アルカリシリカ反応性

W/B30%の各調合を対象に実施したアルカリ

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。

(3) 塩化物含有量

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含有量と同様

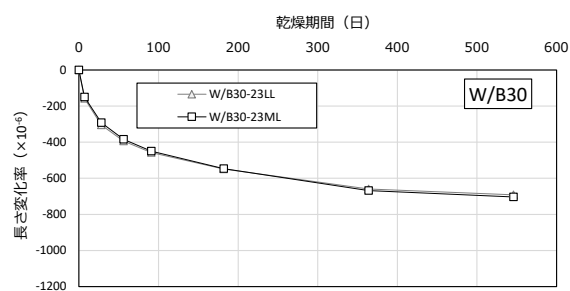


図-9 長さ変化試験結果 (W/B30%)

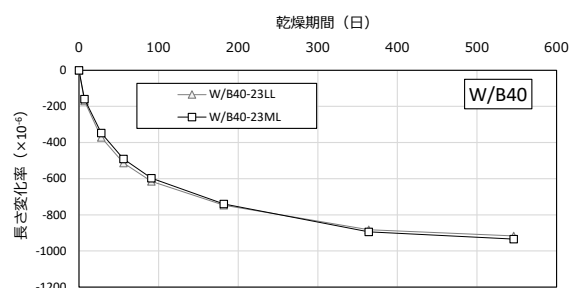


図-10 長さ変化試験結果 (W/B40%)

に骨材の組合せによる影響はみられなかった。

(4) 長さ変化

各水結合材比の乾燥期間と長さ変化率の関係を図-9～図-12に示す。長さ変化率の全体的な傾向として、再生骨材を使用した調合 MM, LL および ML は、水結合材水比ごとに大小があるものの、再生骨材の品質による長さ変化率への影響は小さい結果であった。乾燥期間 182 日において、W/B30%では 550μ 程度、W/B40%, 50% および 60%では $650\mu \sim 750\mu$ 程度となっており、いずれの組合せにおいても 800μ を下回っていた。その後、乾燥期間 546 日まで計測を継続し、長期にわたり乾燥収縮による長さ変化率が徐々に緩やかに推移している様子が確認された。

4. 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。

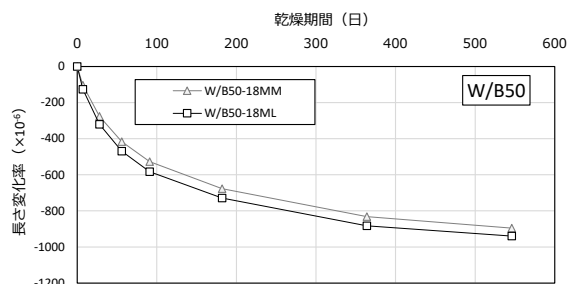


図-11 長さ変化試験結果 (W/B50%)

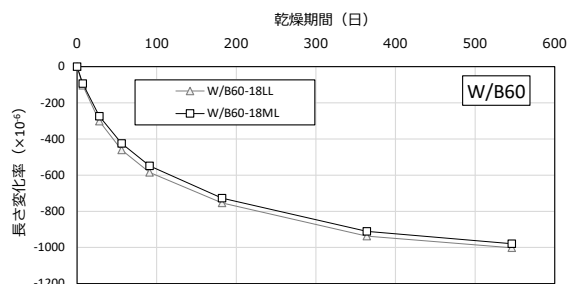


図-12 長さ変化試験結果 (W/B60%)

- 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) 乾燥収縮による長さ変化率は、再生骨材の組合せによる影響は小さく、全ての組合せで乾燥期間 182 日において 800μ を下回っていた。

参考文献

- 1) 関田徹志, 百瀬晴基, 今本啓一, 三橋博三: 乾燥収縮試験法の省力化に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.628, pp.851~857, 2008.6
- 2) 高橋祐一, 鈴木好幸, 野中英, 藺井孫文, 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