

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

吉野 玲^{*1}・鈴木 好幸^{*2}

本検討では、高炉セメントC種相当の結合材を用いた低炭素コンクリートに再生骨材を使用したコンクリートの実用化に向けて、実験を行った。実験シリーズⅠでは、室内実験において基本的な性状を確認し、実験シリーズⅡでは、3シーズンの実機実験を行った。その結果、骨材の組合せにかかわらず荷下ろし時に所要のフレッシュ性状が確保できることを確認した。また、圧縮強度は再生骨材の品質の影響を受けることを確認した。そのため、あらかじめ相対吸水率の指標を用いて性能を評価し、再生骨材の品質による影響を考慮した調合設計を行うことが望ましい。

キーワード：再生骨材コンクリート、高炉スラグ微粉末、再生骨材M、再生骨材L

1. はじめに

再生骨材は、コンクリート構造物を破砕した後、粒度調整などの過程を経て製造されている。この再資源化の過程で、大気に接する面が大きくなることから、CO₂を吸収・固定する速度が高くなり、コンクリート構造物よりもCO₂を吸収・固定するポテンシャルが高いと考えられている^{例えば1)}。また、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、M、Lの中では、付着モルタルが多いLに優位性があると考えられる。

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、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、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種相当の結合材を用いた低炭素コンクリートに再生骨材M単味または再生骨材L＋普通骨材を使用することで、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²⁾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、検討を行っ

た。本報では、実験シリーズⅠ、Ⅱとして検討を実施した結果を報告する。シリーズⅠでは、室内実験における基本的な性状を確認し、シリーズⅡでは、実用化に向けたデータ取得を目的に3シーズンの実機実験を行った。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の実用化に関する研究会」において実施したものである。

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)	

2. シリーズⅠ 室内試験による諸性状の確認

2.1 実験概要

シリーズⅠでは、室内実験において再生骨材の組合せの影響が及ぼすコンクリートの基礎的な性状を確認することを目的とした。

2.1.1 使用材料

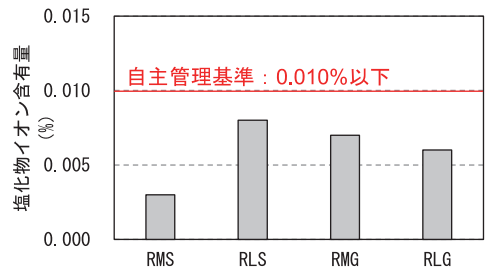
本実験における使用材料を表-2に示す。再生細骨材および再生粗骨材は、解体ガラを起源として製造されたものである(写真-1～写真-4)。このうち、本実験で使用した再生骨材Mの品質は、ばらつきの影響を考慮し、品質区分がJIS A 5022に区分されるものの、当該製造工場にて通常製造されている品質と比較して、絶乾密度が小さく、吸水率が大きい低品質のものを使

*1 構造・材料研究部 *2 脱炭素技術開発研究部

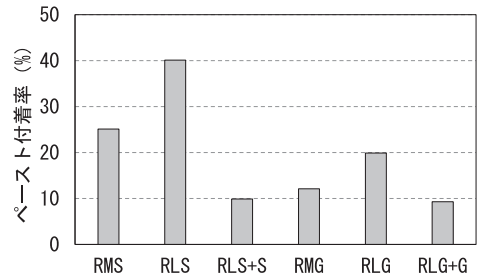
表－２ 使用材料

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
混和材	BF	高炉スラグ微粉末4000	密度：2.89 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%
化学 混和剤	Ad	AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物
	SP	高性能AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物

* 1 砕砂：山砂=70：30（質量比）



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



写真－１ RMS



写真－２ RLS



写真－３ RMG



写真－４ RLG

表－３ 調査

調査名 ^{*1}	W/B(%)	骨材の組合せ	目標スランブ (cm)	単位量(kg/m ³)									Ad/SP ^{*2} (B・%)	AE ^{*3}
				W	C	BF	S1/S2	RMS	RLS	G	RMG	RLG		
60MM18	60	MM	18	180	90	210	—	778	—	—	905	—	0.45	1.0A
60LL18		LL	18				350/257	—	221	455	—	417	0.70	2.0A
60ML18		ML	18				—	813	—				0.35	2.0A
50MM18	50	MM	18	180	108	252	—	728	—	—	—	—	0.40	1.0A
50ML18		ML	18					763	—	455	—	417	0.40	1.0A
40MM23	40	MM	23	170	128	298	—	714	—	—	889	—	0.35	0.5A
40LL23		LL	23				323/237	—	204	447	—	410	0.75	1.5A
40ML23		ML	23				—	749	—				0.50	1.0A
35MM23	35	MM	23	170	146	340	—	664	—	—	889	—	0.50	1.0A
35ML23		ML	23					698	—	447	—	410	0.625	2.0A
30MM23	30	MM	23	170	170	397	—	597	—	—	889	—	0.85	2.5A
30LL23		LL	23				272/200	—	172	447	—	410	0.95	5.0A
30ML23		ML	23				—	632	—				0.75	4.0A

*1 調査名：水結合材比・骨材組合せ・目標スランブ，*2 W/B=60%・50%：Ad（AE 減水剤(高性能タイプ)） 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%

用した。なお、再生骨材 M と L は、いずれも同一の原コンクリートから製造している。また、高炉スラグ微粉末（以下、BF）は JIS A 6206 に適合するせっこう添加タイプを使用した。

使用した再生骨材の塩化物イオン含有量試験結果を図－１に、ペースト付着率を図－２に示す。塩化物イオン含有量試験は JIS A 1154 に基づき測定し、ペースト付着率は塩酸融解により求めた。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。

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 試験項目および試験方法

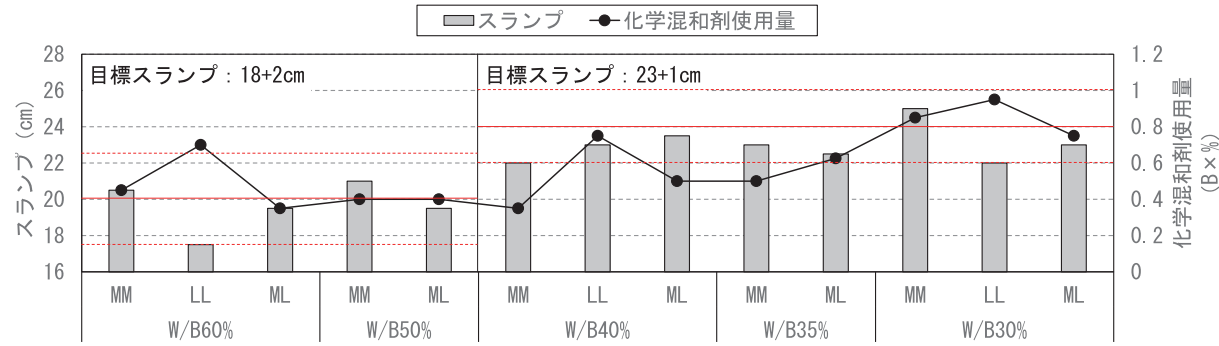
対象	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ コンクリート	スランブ	JIS A 1101	20±2.5cm ^{*1} 24±2.0cm ^{*2}
	空気量	JIS A 1128	5.0±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	—
	塩化物イオン含有量	JASS5T-502	0.30kg/m ³ 以下
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生
	アルカリシリカ反応性	ZKT-206	相対動弾性係数 ≥80%
	塩化物イオン量	JIS A 1154	—

*1 W/B=60%・50%

*2 W/B=40%・35%・30%, 23cm 超は材料分離のないこと

表－６ フレッシュコンクリート試験結果

調合名	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	塩化物含有量 (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		25	



図－３ スランブ試験結果と化学混和剤使用量

2. 1. 2 調合

本実験におけるコンクリートの調合を表－３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したもの（以下、ML 調合）の計3水準とした。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。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、目標スランブ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、スランブの管理値は(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. 1. 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。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性迅速試験を実施した。

2. 2 実験結果および考察

2. 2. 1 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に示す。全ての調合において、スランブ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ブ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 調合と比較して多いにもかかわらず、スランブが小さくなる傾向にあった。ML 調合は LL 調合ほどではないものの、MM 調合同程度の化学混和剤使用量の場合、スランブ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。試験後の状態の一例を写真－５～写真－８に示す。



写真-5 40MM23



写真-6 40LL23



写真-7 40ML23



写真-8 35MM23

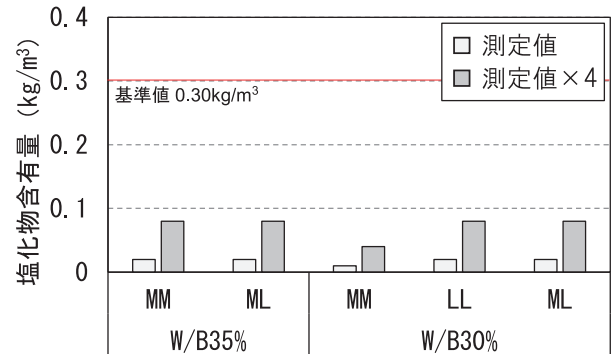


図-4 フレッシュコンクリートの塩化物含有量試験結果

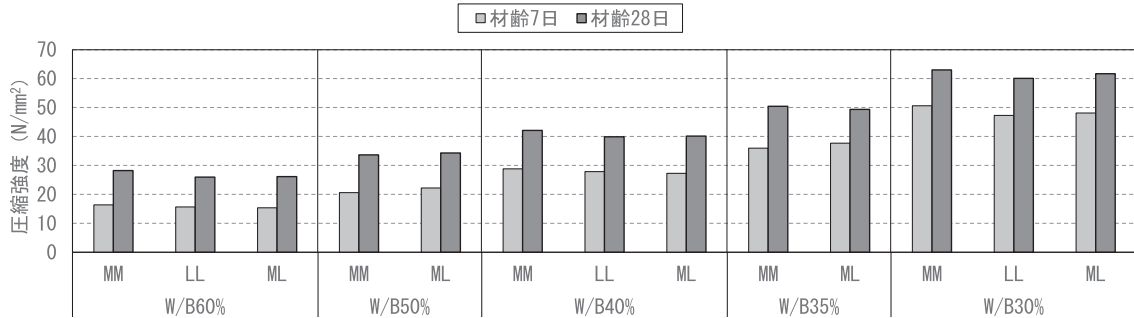


図-5 圧縮強度試験結果

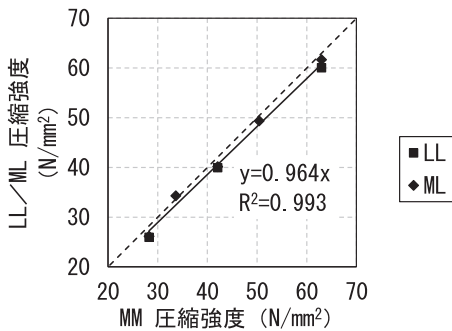


図-6 MM 調合と LL 調合・ML 調合の圧縮強度の比較

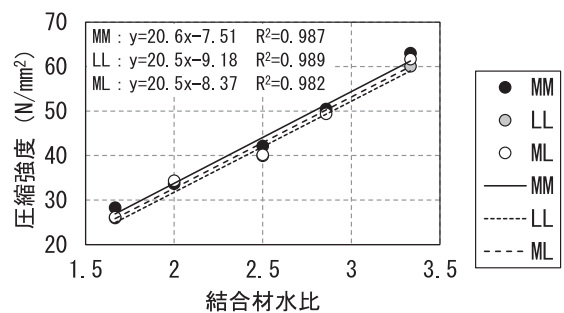


図-7 結合材水比と圧縮強度の関係

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-4に示す。W/B30%のMM調合の値が他の水準よりも小さかったものの、すべての水準において、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、図-4では、フレッシュ性状では評価することが困難である、再生骨材の原骨材の粒子に付着するセメントペーストに含まれる塩化物イオン量の影響を考慮するために、JIS A 5022 10.5に示されるように、測定値を4倍した値を示している。測定値を4倍した値であっても、いずれの調合も基準値である0.30kg/m³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。

2.2.2 硬化コンクリート試験結果

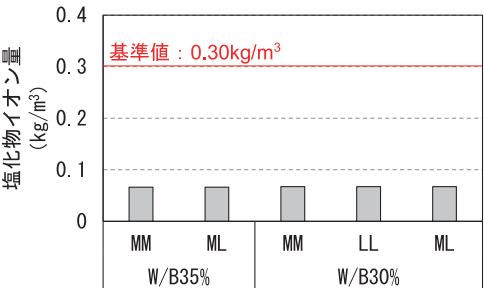
圧縮強度試験結果を図-5に、MM調合とLL調合また

はML調合との材齢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調合およびML調合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、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3)}と比較しても、近似式の傾きに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-7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、

表－7 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

MM 調合< ML 調合< LL 調合の順となっている．結合材の量は同一であることから，骨材量の影響と考えられ，骨材量が多い調合ほど，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/m³であり，骨材の組合せによる影響はみられなかった．また，図－4にて示したフレッシュコンクリートの塩化物含有量の測定値よりも大きい値となったが，フレッシュ性状における塩化物含有量測定時では測定が困難であった再生骨材の原骨材の粒子に付着するセメントペーストに含まれる塩化物イオン量の影響であると考えられる．

3. シリーズⅡ 実機試験による実用化に向けたデータ取得

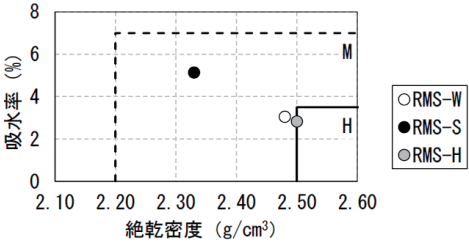
3.1 実験概要

シリーズⅡ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，3シーズン（冬期：W，標準期：S，夏期：H）の実機実験を実施した．現場適用を想定したフレッシュ性状の経時変化および構造体に打ち込まれたコンクリートの強度性状を確認した結果について報告する．

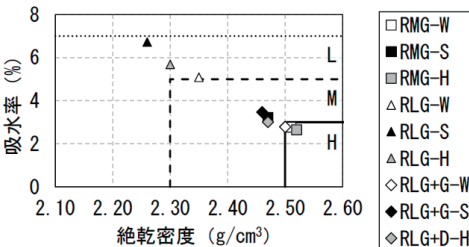
表－8 使用材料

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：2.33～2.5 g/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／東京都八王子産	絶乾密度：2.64～2.65 g/cm ³ 吸水率：0.68～0.72 %
再生粗骨材	RMG	再生骨材 M	絶乾密度：2.47～2.52 g/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：2.26～2.35 g/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
化学混和剤	AE	AE 剤	
	Ad	AE 減水剤 ¹⁾	—
	SP	高性能 AE 減水剤 ¹⁾	—

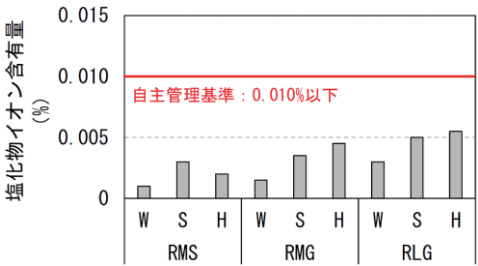
*1 夏期は遅延形，他は標準形を使用



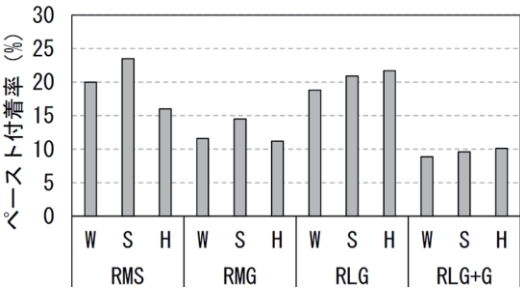
図－9 絶乾密度と吸水率の関係（再生細骨材）



図－10 絶乾密度と吸水率の関係（再生粗骨材）



図－11 塩化物イオン含有量試験結果



図－12 ペースト付着率測定結果

表－9 調査

調査記号 ^{*1}	W/B(%)	骨材の組合せ	打込み時期 (記号)	単位量 (kg/m ³)						AdSP ^{*2} (B・%)	AE ^{*3}	
				W	C	BF	RMS	G	RMG			RLG
55MM-W	55	MM	冬期 (W)	180	98	229	786	—	919	—	0.95	1.5A
55MM-S		MM	標準期 (S)				755		908		1.20	3.0A
55MM-H		MM	夏期 (H)				795		923		1.20	1.5A
55ML-W		ML	冬期 (W)	180	98	229	823	455	—	422	0.85	2.0A
55ML-S		ML	標準期 (S)				790			413	1.15	3.0A
55ML-H		ML	夏期 (H)				832			416	1.00	1.25A
40MM-W	40	MM	冬期 (W)	170	128	298	744	—	903	—	0.65	2.5A
40MM-S		MM	標準期 (S)				714		893		0.90	2.5A
40MM-H		MM	夏期 (H)				752		907		1.00	2.5A
40ML-W		ML	冬期 (W)	170	128	298	779	447	—	415	0.60	2.0A
40ML-S		ML	標準期 (S)				749			405	0.85	2.5A
40ML-H		ML	夏期 (H)				788			408	0.85	3.5A
30MM-W	30	MM	冬期 (W)	170	170	397	622	—	903	—	0.675	4.0A
30MM-S		MM	標準期 (S)				597		893		0.95	4.5A
30MM-H		MM	夏期 (H)				629		907		1.00	4.0A
30ML-W		ML	冬期 (W)	170	170	397	657	447	—	415	0.80	4.0A
30ML-S		ML	標準期 (S)				632			405	0.95	4.0A
30ML-H		ML	夏期 (H)				665			408	0.90	3.5A

*1 調査名：水結合材比・骨材組合せ・打込み時期 *2 W/B=55%：Ad (AE減水剤(高機能タイプ)) W/B=40%・30%：SP (高性能AE減水剤) , *3 空気量調整剤 1.0A=B×0.002%

3.1.1 使用材料

本実験における使用材料を表－8に示す。シリーズⅠでは、細骨材に再生細骨材Lを使用した。当該再生骨材製造工場の製造工程や設備を考慮して、実機実験では再生細骨材Mのみを使用した。再生粗骨材Mおよび再生粗骨材L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。使用した再生骨材の絶乾密度と吸水率の関係を図－9および図－10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。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とし、標準期と冬期は同一ロットのものを使用した。

シリーズⅡで使用した再生骨材の塩化物イオン含有量の試験結果を図－11に、ペースト付着率の測定結果を図－12に示す。塩化物イオン含有量試験はJIS A 1154に基づき測定し、ペースト付着率は塩酸融解により求めた。塩化物イオン含有量は、RMSで0.001～0.003%、RMGで0.002～0.005%、RLGで0.003～0.006%となり、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。

3.1.2 調査

実機実験における調査を表－9に示す。水結合材比は、設計基準強度18N/mm²以上45N/mm²以下を目標とし、シ

表－10 使用材料

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

表－11 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法	備考
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 経時0,30,60,90,120分に実施
	空気量	JIS A 1128	5.0±1.5% 経時0,30,60,90,120分に実施
	コンクリート 温度	JIS A 1156	経時0,30,60,90,120分に実施
	塩化物イオン 含有量	JASS5T-502	0.30kg/m ³ 以下 経時0分に実施
硬化 コンクリート	圧縮強度 (管理用供試体)	JIS A 1108	経時60分供試体採取 標準養生 試験材齢7,28,56,91日
	圧縮強度 (簡易樹熱養生)	-	経時60分供試体採取 試験材齢28,56,91日
	圧縮強度 (コア供試体)	JIS A 1107	経時60分供試体採取 試験材齢28,56,91日にコア採取
	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

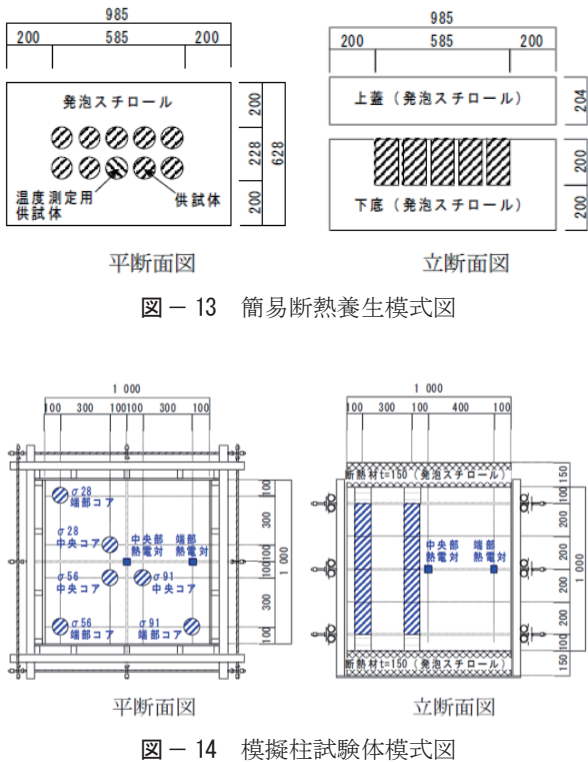
リーズⅠの結果を参考にして55%、40%および30%の3水準とした。骨材の組合せは、MM調査とML調査の2水準とした。また、再生粗骨材Lは砕石2005と混合して使用し、その容積混合率は50%とした。混合後の骨材の品質(計算値)を表－10に示す。粗骨材かさ容積は、W/B55%(目標スランプ18cm)の調査で0.570m³/m³、W/B40%・30%(目標スランプ23cm)の調査で0.560m³/m³として、骨材の組合せにかかわらず一定とした。化学混和剤は、実際の運搬時間を考慮し、経時60分でスランプが18±2.5cmまたは23±2.0cm、空気量が4.5±1.5%に収まるように使用量を調整した。

3. 1. 3 試験項目および試験方法

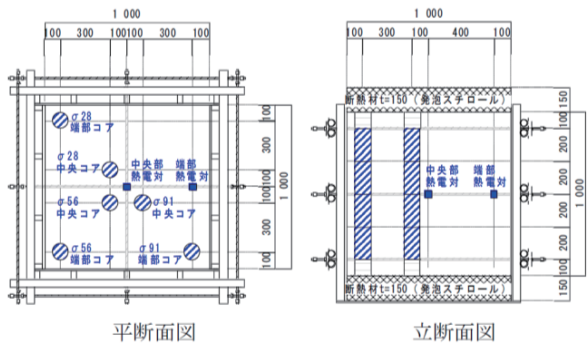
表－11に試験項目を示す。フレッシュコンクリートの塩化物含有量は、JIS A 5022の改正原案を参考にし、次のものを総和して求めた。

- 1) 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の量との積
- なお、本検討では、JIS A 1154により再生骨材の塩化物イオン含有量を求めていることから、2) および3) において4は乗じずに算出した。

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、標準養生と図－13に示す簡易断熱養生とした。また、コアは模擬柱試験体から採取したコア供試体とした。模擬柱試験体は、図－14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分を実施した。



図－13 簡易断熱養生模式図



図－14 模擬柱試験体模式図

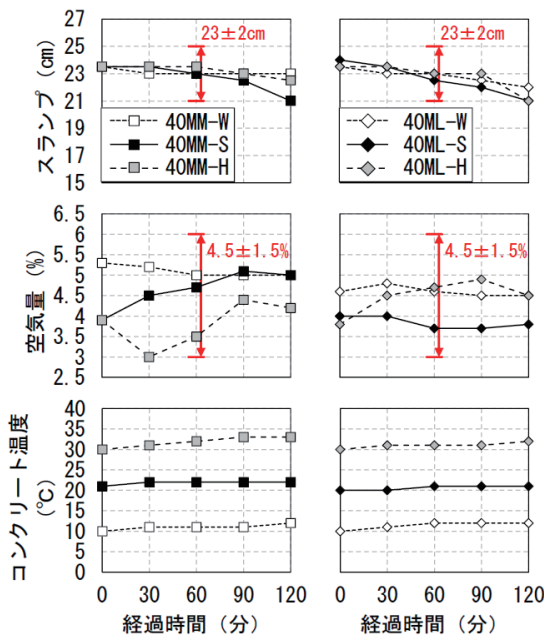
(1) アルカリシリカ反応性および塩化物イオン量

アルカリシリカ反応性はZKT-206、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W/B30%のMM調合およびML調合の2調合、計6調合とした。なお、ZKT-206は抑制対策の効果を確認する目的で実施した。

3. 2 実験結果

3. 2. 1 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュ性状の経時変化の一例として、W/B40%のMM調合およびML調合の試験結果を図－15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。空気量は、40MM-Hにおいてばらつきがみられたが、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%では経時90分まで、W/B30%では経時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。また、標準期（S）ではJISに示される範囲内で絶乾密度が小さく、吸水率が高い低品質の再生骨材を使用した。スランプおよび空気量ともに管理値内に収まり、品質の影響は小さいことを確認した。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



図－15 フレッシュコンクリートの経時変化の一例
(左：W/B40% MM調合、右：W/B40% ML調合)

レッシュ性状を確保できると考えられる。

塩化物含有量の試験結果を図-16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 の値がやや小さくなる傾向にあった。また、塩化物含有量においても、再生骨材の含水率および吸水率による影響は小さいことを確認した。

3.2.3 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果の一例として、W/B40% の MM 調合および W/B40% の ML 調合を図-17に示す。W/B40% の MM 調合において、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、W/B40% の ML 調合をみると、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 W/B40% の MM 調合よりも小さく、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-18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 日標準養生圧縮強度の関係を図-19に示す。シリーズ I 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。

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-20に示す。本検討における構造体強度補正值は、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、冬期や夏期では概ね同程度の値であった。標準期で使用した再生骨材は低品質であったことが、圧縮強度に差が生じた影響と考えられることから、4 章において、再生骨材の品質を指標とする再生骨材コンクリー

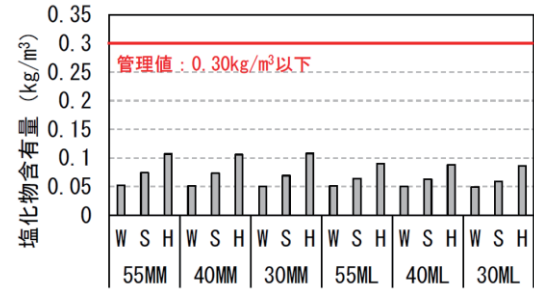


図-16 塩化物含有量試験結果

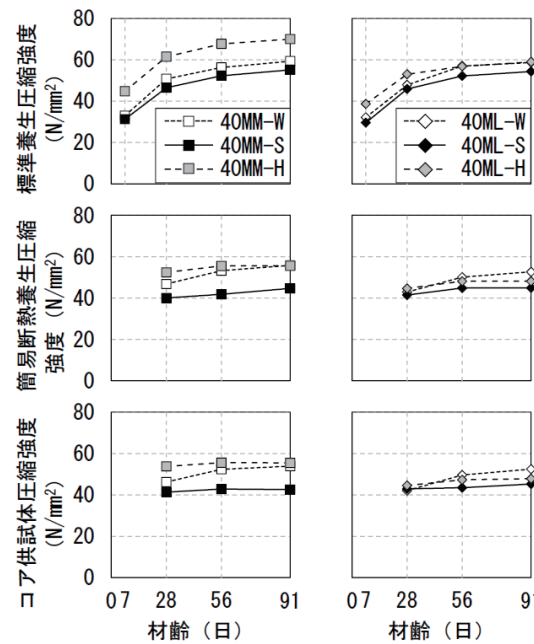


図-17 圧縮強度試験結果

(左: W/B40% MM 調合, 右: W/B40% ML 調合)

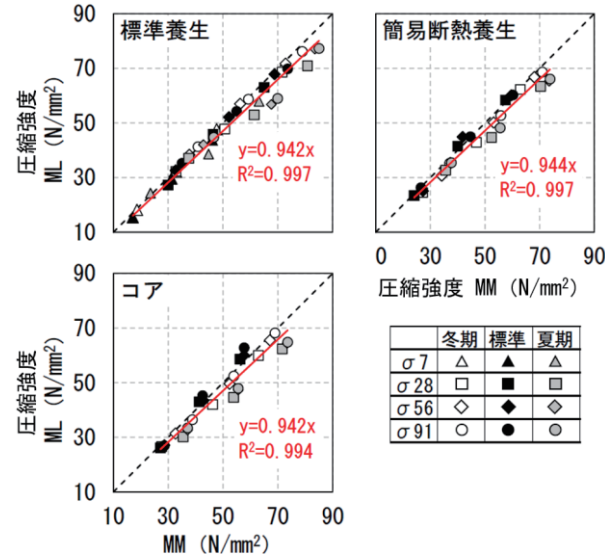


図-18 MM 調合と ML 調合の圧縮強度の比較

トの性能評価について検討を行った。

骨材の組合せや品質によって圧縮強度に差がみられ

たものの、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に示されている高炉セメント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 6N/mm^2 、 48N/mm^2 超の場合には 9N/mm^2 として設定できる可能性が示唆された。

3.2.4 アルカリシリカ反応性迅速試験結果

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-21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。2.2.2にて示したシリーズIの相対動弾性係数の結果は、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が、シリーズIIでは、冬期と標準期でML調合の方が大きく、同様の傾向にあったものの、夏期では逆の結果となった。また、JIS A 5022 附属書Cに倣って求めた各調合のアルカリ総量はW/B30%のMM調合で $3.77 \sim 3.93\text{kg/m}^3$ 、W/B30%のML調合で $3.45 \sim 3.59\text{kg/m}^3$ であったが、相対動弾性係数との明確な関係はみとめられなかった。

3.2.5 硬化コンクリートの塩化物イオン量

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-22に示す。塩化物イオン量は、MM調合で $0.04 \sim 0.09\text{kg/m}^3$ 、ML調合で $0.07 \sim 0.08\text{kg/m}^3$ となり、骨材の組合せによる影響は小さく、対象としたすべての調合で 0.30kg/m^3 を大きく下回った。

4. 相対吸収率を用いた圧縮強度の評価

「3.3 圧縮強度試験結果」で述べたように、打込み時期や骨材の組合せにより、圧縮強度に差がみられた。この理由として、使用した再生骨材の品質の影響が考えられる。圧縮強度が小さい結果となった標準期では、図-9および図-10に示すように、他の打込み時期と比較して低品質であったことが分かる。また、夏期において、MM調合とML調合の値に差がみられた理由としては、RMGとRLG+Gの品質の影響が考えられる。図-10より、冬期と標準期ではあまり両者の品質に差がみられないのに対し、夏期では絶乾密度および吸水率ともに差がみられていたことが確認できる。一方、再生骨

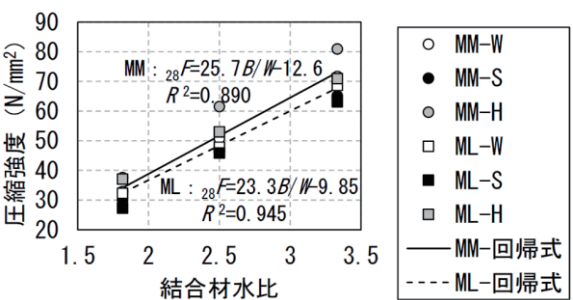


図-19 結合材水比と圧縮強度の関係（標水 28 日）

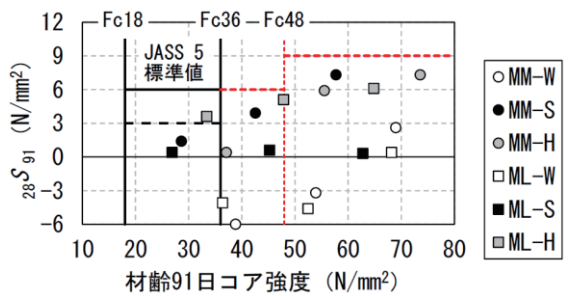


図-20 材齢 91 日コア強度と強度補正值 $_{28}S_{91}$ の関係

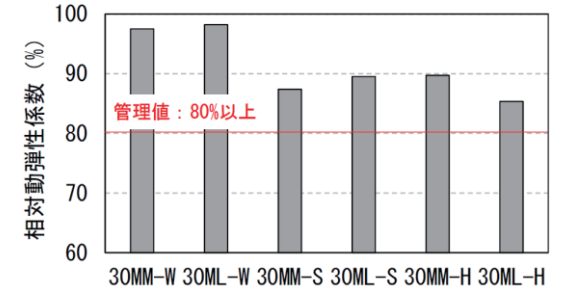


図-21 アルカリシリカ反応性迅速試験結果

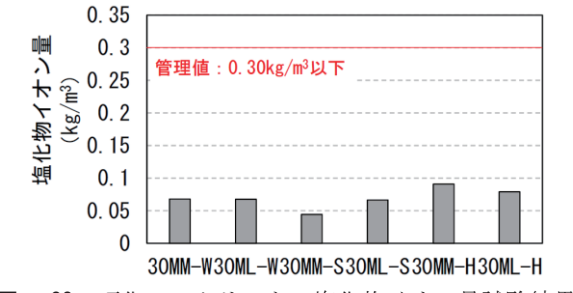


図-22 硬化コンクリートの塩化物イオン量試験結果

材の品質を指標として再生骨材コンクリートの性能を評価する方法としては、日本建築学会が発刊している「再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針（案）」⁴⁾に記載されている相対吸水率による方法がある。そこで、本検討においても同様に各打込み時期、各調合について式（1）により相対吸水率を算出し、標準養生では材齢 28 日、簡易断熱養生およびコアでは材齢 91 日の圧縮強度との関係について検討した。

$$Q_t = \frac{Q_v \times a + Q_r G \times b + Q_v N \times c + Q_r N \times d}{a + b + c + d} \quad (1)$$

ここに、 Q_t ：骨材の相対吸水率（％）

$Q_v G$ ：普通粗骨材の吸水率（％）

$Q_v N$ ：普通細骨材の吸水率（％）

$Q_r G$ ：再生粗骨材の吸水率（％）

$Q_r N$ ：再生細骨材の吸水率（％）

a, b, c, d ：各骨材の絶対容積（ L/m^3 ）

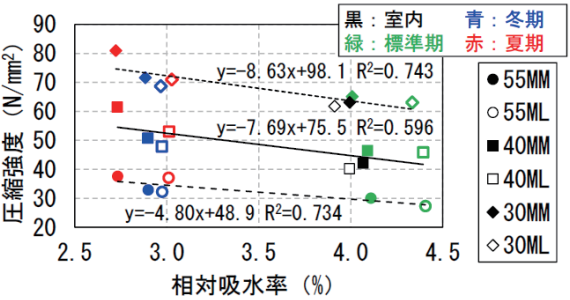
検討結果を図－23～図－25に示す。なお、図中にはシリーズⅠの結果も併せて示している。圧縮強度は、いずれの養生方法においても、相対吸水率の増加に伴って低下する傾向にあり、同一水結合材比であれば、骨材の組合せが異なる調合であっても、相対吸水率を用いて圧縮強度の評価ができると考えられる。

本検討における相対吸水率の差は、MM調合で2.72～4.11％、ML調合で2.98～4.41％とそれぞれ1.5％程度であった。W/Bによって異なるものの、標準養生圧縮強度では相対吸水率に1.5％程度の差があると、圧縮強度で7～13 N/mm^2 程度の差となり、その影響が大きいことが分かる。したがって、実際に呼び強度に対応する水結合材比を設定する場合、品質基準とする各骨材の吸水率の上限値から相対吸水率の上限値を算出し、圧縮強度の影響を考慮した調合設計を行うことが望ましい。

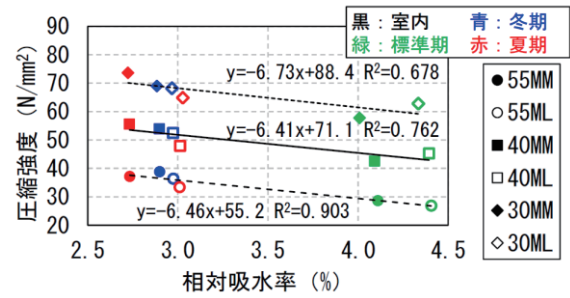
5. まとめ

本検討の範囲において得られた知見を以下に示す。

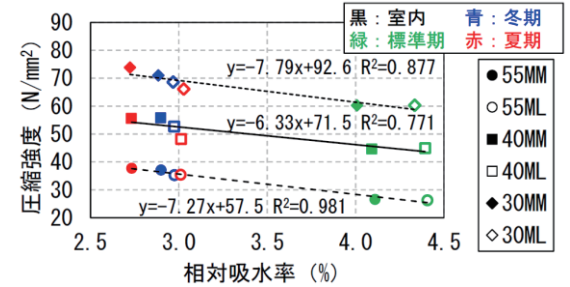
- (1) 再生骨材Mと、再生骨材Lと普通骨材を混合した骨材を使用したコンクリートは、適切な化学混和剤の使用量とすることで、目標とするフレッシュコンクリートの品質を得ることができた。
- (2) 再生骨材Mと、再生骨材Lと普通骨材を混合した骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は、ほぼ同程度であり、骨材の組合せによる影響は小さかった。
- (3) 再生骨材Mと、再生骨材Lと普通骨材を混合した骨材を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応性および塩化物イオン量は、いずれも所定の品質を満足し、骨材の組合せによる影響は小さかった。
- (4) 高炉スラグ微粉末高含有再生骨材コンクリートは、骨材の組合せにかかわらず、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、良好な荷下ろし時のフレッシュ性状を確保できた。
- (5) 所要の品質基準を満足した再生骨材を使用した高



図－23 相対吸水率と圧縮強度の関係（標準水中）



図－24 相対吸水率と圧縮強度の関係（簡易断熱養生）



図－25 相対吸水率と圧縮強度の関係（コア供試体）

炉スラグ微粉末再生骨材コンクリートの塩化物含有量は、基準値である0.30 kg/m^3 以下を十分に満足できた。

- (6) 高炉スラグ微粉末高含有再生骨材コンクリートの圧縮強度は、再生骨材の品質の影響を受けることを確認した。このため、あらかじめ相対吸水率等の方法により、品質の影響による圧縮強度の影響を考慮した調合設計を行うことが望ましい。

今後は、実用化に向けて、再生骨材の品質基準の設定や、所要の呼び強度を満足するための水結合材比の設定などを実施していく。また、品質の異なる再生骨材や各製造プロセスにおけるCO₂固定量を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) 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) 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
- 4) 日本建築学会：再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針（案），2014.10

Study on application of recycled aggregate concrete using high content of
ground granulated blast-furnace slag

Rei YOSHINO, Yoshiyuki SUZUKI

In this study, we conducted experiments on low-carbon concrete with recycled aggregate, similar to blast-furnace cement Class C, for practical use. In Series I, we confirmed the basic properties in laboratory experiments, and in Series II, we conducted three seasons of experiments on actual equipment. As a result, it was confirmed that the required fresh properties could be maintained regardless of the aggregate combination. It was also confirmed that the compressive strength is affected by the quality of the recycled aggregate. Therefore, it is desirable to evaluate the performance in advance using a water absorption index and to design the formulation considering the influence of the quality of the recycled aggregate.