

報告 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

高橋 祐一*1・新田 稔*2・鈴木 好幸*3・松田 信広*4

要旨：再生骨材は再資源化の過程で CO₂ を吸収・固定化している。再生骨材の性能を CO₂ 固定量の観点からみると、付着モルタルが多い再生骨材 L に優位性があると考えられる。本検討では、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コンクリートの実用化に向けて、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、荷卸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等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：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、相対吸水率

1. はじめに

再生骨材は、コンクリート構造物を破碎した後、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、さらに CO₂ を吸収・固定すると考えられている^{例え1)}。このように再生骨材の性能を 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。

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、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²⁾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。

そこで、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、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。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。なお、本研究は表-1 に示す 13 社で構成された

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
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／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
化学混和剤	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

*1 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）（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 再生粗骨材 L と砕石 2005 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%

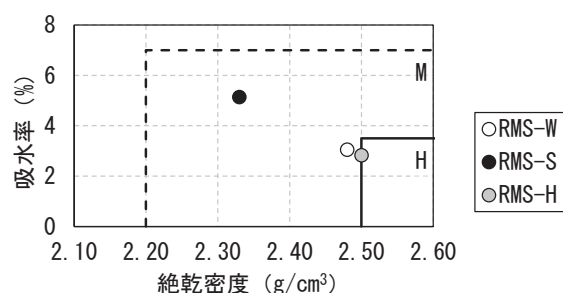


図-1 絶乾密度と吸水率の関係 (再生細骨材)

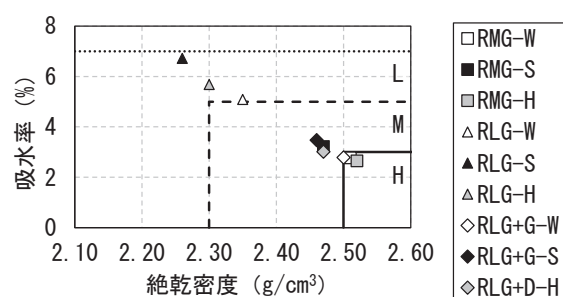


図-2 絶乾密度と吸水率の関係 (再生粗骨材)

「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。

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。室内実験²⁾では、細骨材に再生細骨材 L を使用したが、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。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-3 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。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。

2.2 調合

実機実験における調合を表-4 に示す。水結合材比は、呼び強度 21 以上でかつ 42 を超える範囲を確保できるよ

表-4 調合

打込み時期	調合記号 ^{*1}	W/B (%)	単位量(kg/m ³)							Ad/SP ^{*2} (B×%)	AE ^{*3}
			W	C	BF	RMS	G	RMG	RLG		
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	455	—	422	0.85	2.0A
標準期	55ML-S					790		—		1.15	3.0A
夏期	55ML-H					832		—		1.00	1.25A
冬期	40ML-W	40	170	128	298	779	447	—	415	0.60	2.0A
標準期	40ML-S					749		—		0.85	2.5A
夏期	40ML-H					788		—		0.85	3.5A
冬期	30ML-W	30	170	170	397	657	447	—	415	0.80	4.0A
標準期	30ML-S					632		—		0.95	4.0A
夏期	30ML-H					665		—		0.90	3.5A

*1 調合記号: 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%

うに、室内実験結果²⁾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、細骨材および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), 細骨材に再生骨材 M, 粗骨材に再生骨材 L と砕石 2005 を混合して使用したもの (以下, ML 調合) の計 2 水準とした。粗骨材かさ容積は、目標スランブ 18cm (W/B55%) の調合で 0.570m³/m³, 23cm (W/B40%・30%) 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。化学混和剤は、実際の運搬時間を考慮し、経時 60 分でスランブが 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

(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、スランブ (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 (JASS 5T-502) とし、経時 0 分, 30 分, 60

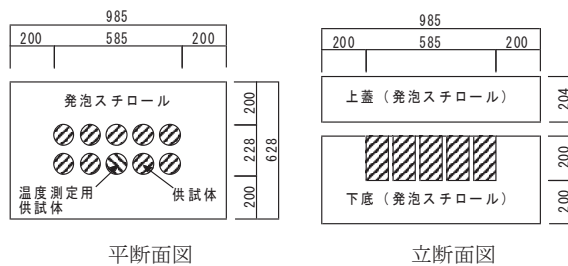


図-3 簡易断熱養生模式図

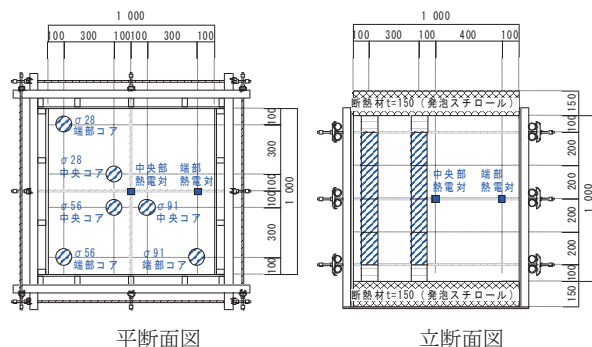


図-4 模擬柱試験体模式図

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 の改正原案を参考にして、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。

(3) 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-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-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。

(4) 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 30MM および 30ML

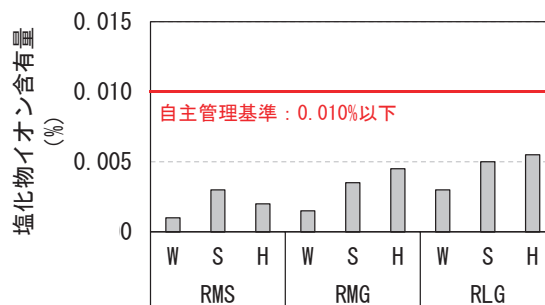


図-5 塩化物イオン含有量試験結果

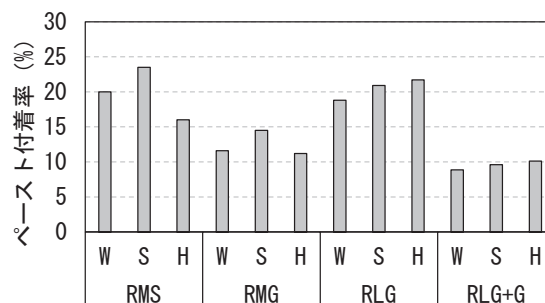


図-6 ペースト付着率測定結果

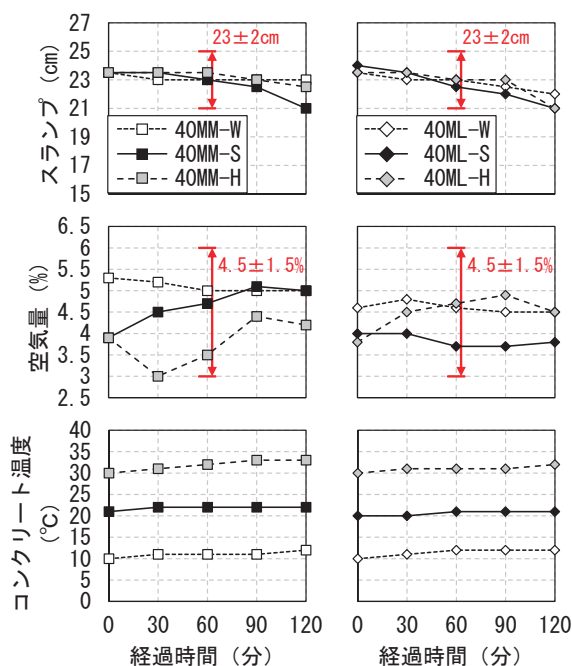


図-7 フレッシュコンクリートの経時変化の一例 (40MM・40ML)

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. 実験結果

3.1 再生骨材試験結果

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

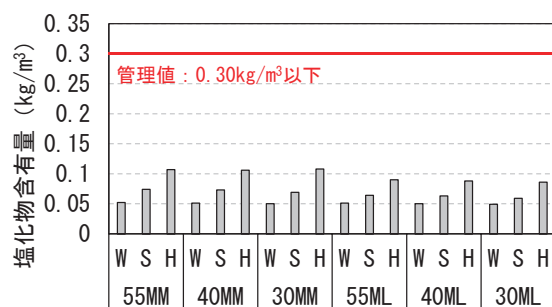


図-8 塩化物含有量試験結果

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。

3.2 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，40MM および 40ML の試験結果を図-7 に示す。スランブ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。スランブ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，スランブ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切な運搬時のスランブ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。

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 と ML 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。

3.3 圧縮強度試験結果

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，

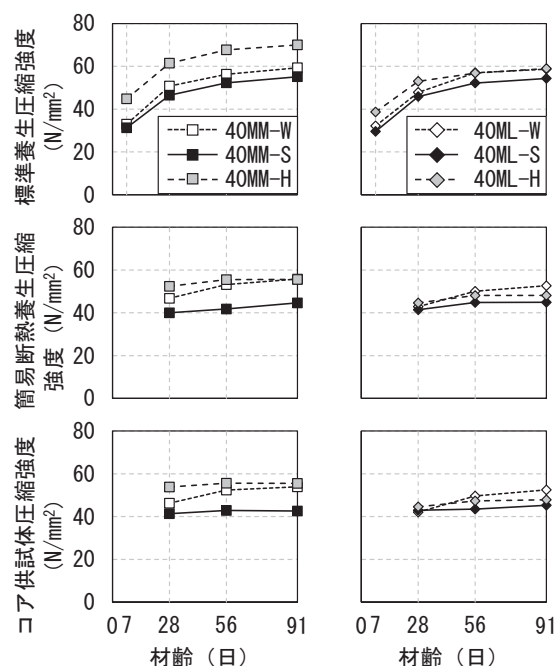


図-9 圧縮強度試験結果の一例 (40MM・40ML)

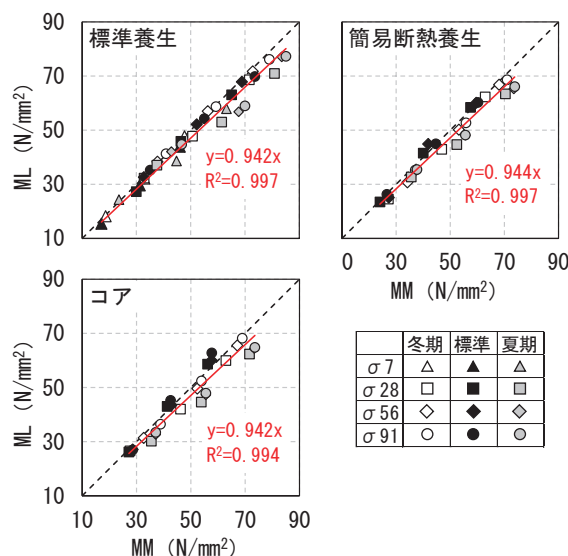


図-10 調合 MM と ML の圧縮強度の比較

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 $2\sim4\text{N/mm}^2$ 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 の圧縮強度よりも MM 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

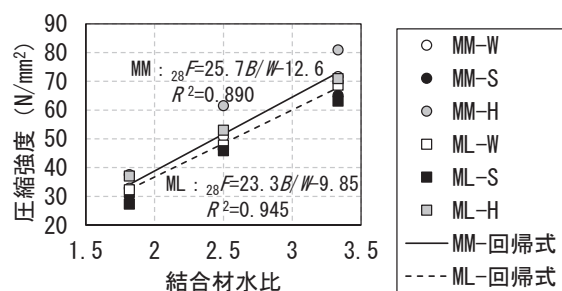


図-11 結合材水比と圧縮強度の関係（標水 28 日）

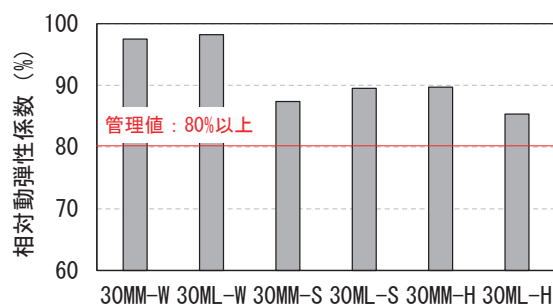


図-13 アルカリシリカ反応性迅速試験結果

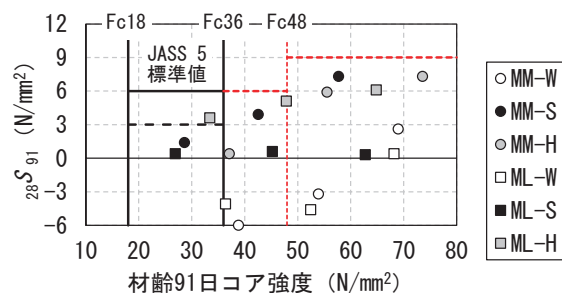


図-12 材齢 91 日コア強度と構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の関係

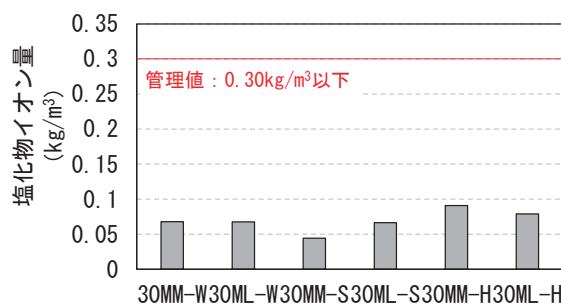


図-14 硬化コンクリートの塩化物イオン量試験結果

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-11 に示す。既報²⁾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。

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。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 5³⁾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 以下の場合は 6N/mm^2 、 48N/mm^2 超の場合は 9N/mm^2 として設定できる可能性が示唆された。

3.4 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-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²⁾。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。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 30MM で $3.77\sim3.93\text{kg/m}^3$ 、30ML で $3.45\sim3.59\text{kg/m}^3$ 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。

3.5 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-14 に示す。塩化物イオン量は、MM 調合で $0.04\sim0.09\text{kg/m}^3$ 、ML 調合で $0.07\sim0.08\text{kg/m}^3$ 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. 相対吸水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-1 および図-2 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-2 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

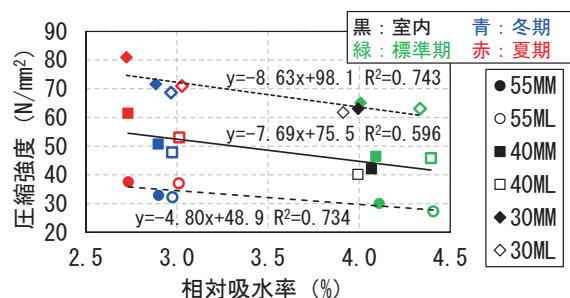


図-15 相対吸水率と圧縮強度の関係（標準養生）

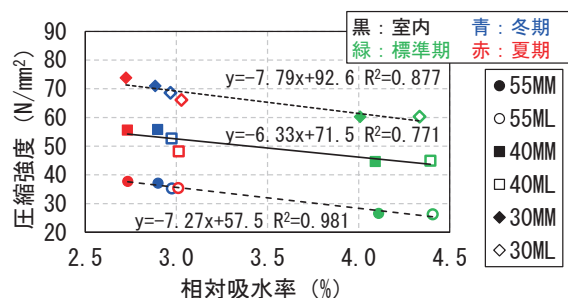


図-17 相対吸水率と圧縮強度の関係（コア供試体）

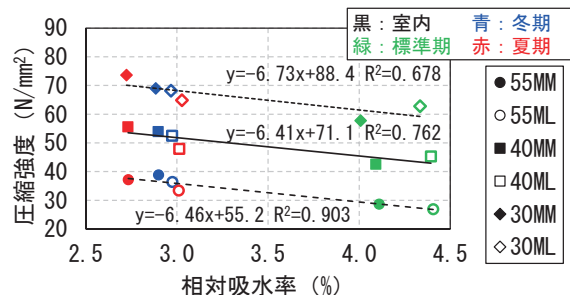


図-16 相対吸水率と圧縮強度の関係（簡易断熱養生）

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。

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

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/m³）

検討結果を図-15～図-17に示す。なお、図中には既報の室内実験の結果²⁾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7～13N/mm²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査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) 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) 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塩化物含有量は、基準値である0.30kg/m³以下を十分に満足できる。
- 3) 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査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) 高橋祐一, 新田稔, 鈴木好幸, 松田信広: 高炉スラグ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, コンクリート工学年次論文集, Vol45, No.1, pp.934-939, 2023.7
- 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) 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