

高炉スラグ微粉末を使用した再生骨材コンクリートの 開発

Recycled Concrete Aggregate Incorporating Blast Furnace Slag

伊藤 淳* 河野政典**

要 旨

解体コンクリート塊から製造された再生骨材は、構造物解体後の再資源化の過程において CO₂ を吸収し、固定化している。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。本開発では、セメントの 70%を高炉スラグ微粉末に置き換えた再生骨材コンクリートの実用化に向けた実機実験を実施し、フレッシュ性状や圧縮強度などの品質を確認した。さらに、同再生骨材コンクリートの材料由来の CO₂ 排出量と削減効果を試算した。その結果、フレッシュ性状および所要の品質基準を十分満足した。また、普通コンクリートと比べて 65~71%の CO₂ 削減効果が期待できることを確認した。

キーワード：再生骨材、高炉スラグ微粉末、環境配慮型コンクリート、CO₂ 排出量

1. まえがき

持続可能な社会の実現に向け、全産業において資源の再利用や二酸化炭素(以下、CO₂)の排出量を抑えた活動が求められている。これまで、著者らは、コンクリート工事における資源の有効活用と環境負荷の軽減を図るため、再生骨材を用いたコンクリートを場所打ち杭や基礎スラブ・フーチングに、高炉スラグ微粉末(以下、BF)を高含有したコンクリートを基礎・地中梁に適用してきた。

昨今では、カーボンニュートラルの実現に向けて、コンクリートや他の材料にCO₂を吸収・固定化させる技術開発が進められている^{2) 3)}。再生骨材は、コンクリート構造物の解体、破碎、粒度調整などの過程を経て製造される。この過程で新しく大気に接する表面積が増えることから、CO₂の吸収・固定化が進むと考えられている。再生骨材は、コンクリート用骨材としてのリサイクル材料のみならず、CO₂回収材としての利用も期待されている。この再生骨材を、セメントの70%をBF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使用し、再生骨材におけるCO₂の吸収・固定量を評価することで、さらにCO₂削減効果が高まると期待できる。BFおよび再生骨材を使用したコンクリートは、2022年11月に改定された日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS 5)に示されている資源循環性と低炭素性⁴⁾を兼ね備えたコンクリートである。一方、再生骨材を用いたコンクリート

を構造物に適用するためには、フレッシュコンクリートの性状や圧縮強度だけでなく、「再生骨材およびコンクリートの塩化物量管理」や「アルカリシリカ反応への対策」等の再生骨材コンクリートとしての品質管理が重要となる。

今回、BFを用いた再生骨材コンクリートの実用化を目指し、基本的な性状について検討するため、BFを使用した再生骨材コンクリートの実機実験を行った。また、実機実験の結果に基づき、呼び強度 24~42 の範囲についてCO₂排出量を算定した。

本報では、それらの結果について報告する。なお、本開発は表-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。

2. 実機実験

2.1 実験計画

再生骨材の種類と特徴を表-2に示す。再生骨材は、製造過程で骨材に付着しているモルタルを取り除く量によってその品質が決まり、再生骨材 H、M、L の 3 クラ

表-1 研究会の参加企業

| | | |
|----------|--------|--------------|
| 青木あすなる建設 | ○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 |

*技術本部技術研究所建築研究グループ **技術本部技術研究所企画・管理グループ

スに分類される。本実験では、JIS A 5022 附属書 A に適合するコンクリート用再生骨材 M(以下、再生骨材 M) および JIS A 5023 附属書 A に適合するコンクリート用再生骨材 L(以下、再生骨材 L)を、普通骨材と混合して用いた。

一方、出所が不特定である再生骨材を用いたコンクリートを構造物に使用する場合、アルカリシリカ反応性への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のアルカリシリカ反応の抑制対策は JIS A 5022 附属書 C に示されており、その一つとしてポルトランドセメントを使用する場合は、JIS A 6206 に適合する BF を質量比で 50%以上用いることに加えて、コンクリート中のアルカリ総量を 4.2kg/m³以下にすることが示されている。本実験では、結合材として普通ポルトランドセメント(以下、C)に BF を質量比で 70%使用した高炉セメント C 種相当を用いた。本結合材の使用により、アルカリシリカ反応の抑制対策となると考えられる。

実験の組合せ条件を表-3 に示す。水結合材比(W/B)は、呼び強度 21 から 42 を満足するように 55%、40%、30%の 3 水準とした。再生骨材の組合せを実験要因の一つとし、再生骨材 M の細骨材(以下、RMS)と再生骨材 M の粗骨材(以下、RMG)の組合せ、RMS と再生骨材 L の粗骨材(以下、RLG)に普通粗骨材の碎石 2005(以下、G)を容積比で 50%混合した組合せの 2 水準とした。打込み時期は、冬期(W)、標準期(S)、夏期(H)の 3 シーズンとした。

2.2 コンクリートの調合および使用材料

コンクリートの調合および使用材料を表-4 に示す。RMS と RMG の組合せを MM 調合、RMS と RLG に G を混合した組合せを ML 調合と称す。粗骨材かさ容積は、W/B55%で 0.570m³/m³、W/B40%および W/B30%で 0.560m³/m³として、骨材の組合せに関わらず一定とした。

BF は、JIS A 6206 に適合するせっこう添加タイプとし、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。化学混和剤は、W/B55%で AE 減水剤を、W/B40%と W/B30%で高性能 AE 減水剤を使用した。また、化学混和剤の使用量は、実際の運搬時間を考慮し、経時 60 分でスランプの管理値 18±2.5cm または 23±2.0cm、空気量の管理値 4.5±1.5%に収まるよう調整した。

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。フレッシュコンクリート試験は、スランプ、空気量、コンクリート温度を練上がり直後、経過 30、60、90、120 分に測定した。塩化物量は経時 60 分のみ測定した。フレッシュコンクリートの塩化物量は、JIS A 5022 を参考にして、以下に示す項目の総和とした。

- i. 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

表-2 再生骨材の種類と特徴

| 種類 | 特徴 | 適用部位 |
|-------------------------------|--|---------------------------|
| 再生骨材 H JIS A 5021 | 加熱擦り揉み処理等により付着モルタルはほとんどない。普通骨材と同様の取扱いができて適用範囲は広いが、製造時のエネルギー消費が大きく、コストが高い。 | 普通骨材と同じ (制限なし) |
| 再生骨材 M JIS A 5022 附属書 A | 擦り揉み等により付着モルタルはある程度除去される。H と L の中間の品質で、コストは H より安い。 | 杭、基礎、乾燥収縮・凍結融解の影響を受けにくい部位 |
| 再生骨材 L JIS A 5023 附属書 A | 破碎・分級するだけで付着モルタルは除去されない。製造時の副産物の発生が少なく製造コストも最も安い。品質の面から再生骨材 L のみでは RC 造の構造体には使用できない。 | 捨てコン等の高い強度や耐久性を要求されない部位 |

表-3 実験の組合せ条件

| 結合材 | W/B (%) | 再生骨材 | | 打込み時期 |
|--------------------------|---------|--------|----------------------------|--------|
| | | 細骨材 | 粗骨材 | |
| 普通セメント+BF (質量比 30:70) | 55 | 再生骨材 M | 再生骨材 M | 冬期(W) |
| | 40 | | 再生骨材 L+普通骨材 (容積比 50:50) | 標準期(S) |
| | 30 | | | 夏期(H) |

表-4 コンクリートの調合および使用材料

| 打込み時期 | 調合 ^{*1} 記号 | W/B (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | Ad/SP ² (B×%) | AE ^{*3} | |
|---------|---------------------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------------|------------------|-------|
| | | | W | C | BF | RMS | G | RMG | | | RLG |
| 標準期 (S) | 55MM-S | 55 | 180 | 98 | 229 | 755 | — | 908 | — | 1.2 | 3.0A |
| | 40MM-S | 40 | 170 | 128 | 298 | 714 | — | 893 | — | 0.9 | 2.5A |
| | 30MM-S | 30 | 170 | 170 | 397 | 597 | — | 893 | — | 0.95 | 4.5A |
| | 55ML-S | 55 | 180 | 98 | 229 | 790 | 455 | — | 413 | 1.15 | 3.0A |
| | 40ML-S | 40 | 170 | 128 | 298 | 749 | 447 | — | 405 | 0.85 | 2.5A |
| | 30ML-S | 30 | 170 | 170 | 397 | 632 | 447 | — | 405 | 0.95 | 4.0A |
| 夏期 (H) | 55MM-H | 55 | 180 | 98 | 229 | 795 | — | 923 | — | 1.2 | 1.5A |
| | 40MM-H | 40 | 170 | 128 | 298 | 752 | — | 907 | — | 0.95 | 2.5A |
| | 30MM-H | 30 | 170 | 170 | 397 | 629 | — | 907 | — | 1 | 4.0A |
| | 55ML-H | 55 | 180 | 98 | 229 | 832 | 455 | — | 416 | 1 | 1.25A |
| | 40ML-H | 40 | 170 | 128 | 298 | 788 | 447 | — | 408 | 0.85 | 3.5A |
| | 30ML-H | 30 | 170 | 170 | 397 | 665 | 447 | — | 408 | 0.9 | 3.5A |
| 冬期 (W) | 55MM-W | 55 | 180 | 98 | 229 | 786 | — | 919 | — | 0.95 | 1.5A |
| | 40MM-W | 40 | 170 | 128 | 298 | 744 | — | 903 | — | 0.65 | 2.5A |
| | 30MM-W | 30 | 170 | 170 | 397 | 622 | — | 903 | — | 0.675 | 4.0A |
| | 55ML-W | 55 | 180 | 98 | 229 | 823 | 455 | — | 422 | 0.85 | 2.0A |
| | 40ML-W | 40 | 170 | 128 | 298 | 779 | 447 | — | 415 | 0.6 | 2.0A |
| | 30ML-W | 30 | 170 | 170 | 397 | 657 | 447 | — | 415 | 0.8 | 4.0A |

C: 普通ポルトランドセメント(密度 3.15 g/cm³)
 BF: 高炉スラグ微粉末 4000(密度 2.89 g/cm³せっこう添加品)
 RMS: 再生骨材 M の細骨材(絶対密度 2.47~2.52g/cm³、吸水率 2.65~3.22%、微粒分量 0.1~0.4%)
 G: 碎石 2005(絶対密度 2.64~2.65g/cm³、吸水率 0.68~0.72%)
 RMG: 再生骨材 M の粗骨材(絶対密度 2.47~2.52g/cm³、吸水率 2.65~3.22%、微粒分量 0.1~0.4%)
 RLG: 再生骨材 L の粗骨材(絶対密度 2.26~2.35g/cm³、吸水率 5.09~6.72%、微粒分量 0.2~0.6%)
 Ad: AE 減水剤(高機能タイプ)ポリカルボン酸系化合物
 SP: 高性能 AE 減水剤(高炉スラグ高含有用)ポリカルボン酸系化合物

*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、W/B=40%および 30%: SP
 夏期は遅延形、標準期および冬期は標準形を使用
 *3 空気量調整剤 1.0A=B×0.002%

- ii. 再生骨材 M の塩化物量(ここでは塩化物イオン量)と調合設計に用いた再生骨材 M の単位量との積
 - iii. 再生骨材 L の塩化物量(ここでは塩化物イオン量)と調合設計に用いた再生骨材 L の単位量との積
- なお、再生骨材の塩化物イオン量は JIS A 1154 により求めた。

圧縮強度試験は、標準養生および簡易断熱養生の供試体とコア供試体で実施した。簡易断熱養生は、発泡スチロール製の簡易断熱養生槽に材齢7日までで存置し、試験材齢まで封かん養生とした。また、コア供試体は、模擬柱試験体1000×1000×1000mmのブロックから採取し、中央部および端部から2本ずつ、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、練上がりから60分後に実施した。

BFの使用率を70%とし、アルカリシリカ反応の抑制対策とする際、再生骨材の付着ペーストやアルカリシリカゲルの存在により、コンクリートのアルカリ量が増加すると予想されるため、JIS A 5022 附属書 E のアルカリシリカ反応性迅速試験を実施した。また、再生骨材には、セメントの水和により固定された塩化物イオンと可溶性の塩化物イオンが混在しており、固定および可溶性の塩化物イオンを合わせた全塩化物イオン量(全塩分量)を把握するため、硬化コンクリート中の塩化物イオン量は、JIS A 1154 の試験方法に従って測定した。測定対象は、各打込み時期において水結合材比が最も小さい30MMと30MLの2調合および3シーズンの計6調合とした。なお、アルカリシリカ反応性迅速試験は、実適用の際の品質管理の一つとして実施するものである。

2.4 実験結果

a. 再生骨材

再生骨材の塩化物量の試験結果を図-1に、ペースト付着率の測定結果を図-2に示す。NaCl換算の塩化物量は、自主管理基準である0.010%以下を十分に満足した。なお、自主管理基準は、JIS A 5022 附属書 A の規定値0.04%よりも厳しい値を設定している。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、塩化物量の値には差は殆ど見られなかった。

b. 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-3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過60分において管理値を満足した。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、経過120分まで管理値を満足した。空気量は、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、経過120分まで管理値内となった。なお、結果を示していないが、W/B55%は経過90分まで、W/B30%とW/B40%は経過120分まで、スランブおよび空気量ともに管理値を満足した。

フレッシュコンクリートの塩化物量の試験結果を図-4に示す。MM調合およびML調合ともに、夏期の値が

表-5 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 | 塩化物量 | JIS A 1154 管理値: NaCl換算で0.010%以下 |
| | 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 | スランブ | JIS A 1101: 運搬時間を考慮し、練り混ぜから60分後を管理値とし、W/B55%で18±2.5cm、W/B40%およびW/B30%で23±2.0cmとした |
| | 空気量 | JIS A 1128 管理値: 4.5±1.5% |
| | コンクリート温度 | JIS A 1156 |
| 硬化コンクリート | 塩化物量 | JASS5T-502 管理値: 塩化物イオン量で0.30kg/m ³ 以下 |
| | 圧縮強度 | JIS A 1108、1107 ・標準養生(材齢7、28、56、91日) ・簡易断熱養生(材齢28、56、91日) ・コア供試体(材齢28、56、91日) |
| | アルカリシリカ反応性 | JIS A 5022 附属書 E アルカリシリカ反応性迅速試験 管理値: 80%以上 |
| | 塩化物量 | JIS A 1154 水結合材比が最も小さい30MMおよび30MLの2調合を対象 管理値: 塩化物イオン量で0.30kg/m ³ 以下 |

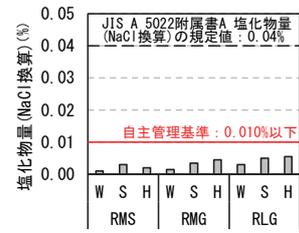


図-1 再生骨材の塩化物量の試験結果

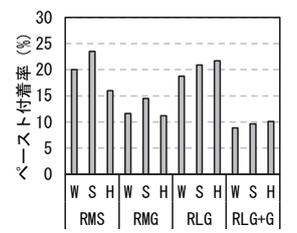


図-2 ペースト付着率の測定結果

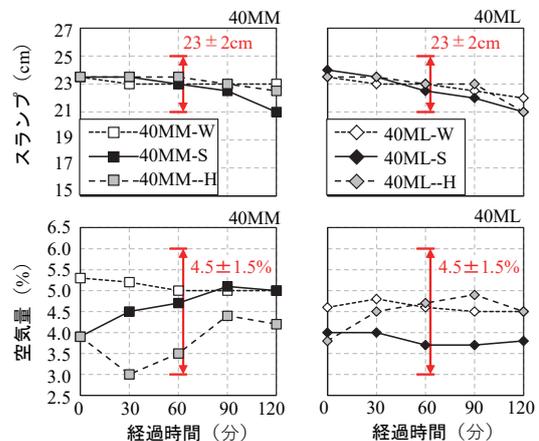


図-3 フレッシュコンクリートの経時変化の一例(40MM、40ML)

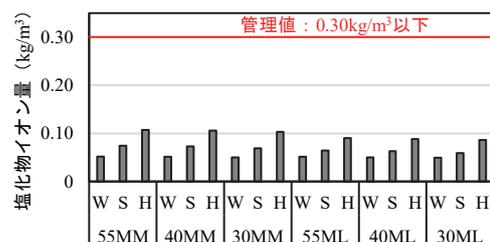


図-4 フレッシュコンクリートの塩化物量の試験結果

大きくなる傾向が見られた。これは、再生粗骨材の塩化物量が標準期や冬期と比較して、やや大きいことが影響したと考えられる。しかし、いずれの調査も管理値である 0.30kg/m^3 以下を十分に満足した。MM 調査と ML 調査を比較すると、再生骨材の使用量が少ない ML 調査の値がやや小さくなる傾向が見られた。

c. 硬化コンクリート

MM 調査と ML 調査の圧縮強度の比較を図-5に示す。各養生において、ML 調査の圧縮強度よりも MM 調査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。材齢 91 日のコア供試体の圧縮強度と構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の関係を図-6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 5⁴⁾および高炉指針⁵⁾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に着目すると、標準期において MM 調査の方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、本実験における BF を使用した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 種相当と同様に構造体強度補正值を 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。

アルカリシリカ反応性迅速試験結果を図-7に示す。相対動弾性係数は、対象としたすべての調査において 80%以上となり、「反応性なし(A)」の結果であった。

各打込み時期において、W/B30%の調査を対象に実施した硬化コンクリートの塩化物量の試験結果を図-8に示す。塩化物イオン量は、すべての調査で管理値である 0.30kg/m^3 を大きく下回り、骨材の組合せによる影響は小さいと考えられる。

各調査のアルカリ総量を確認するため、JISA 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算出した。アルカリ総量算定結果を図-9に示す。アルカリ総量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、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おり、抑制対策の評価として安全側の数値を採用した。本実験における各調査のアルカリ総量は、JIS A 5022 の管理値である 4.2kg/m^3 以下を満足した。また、再生骨材の使用量が多い MM 調査の方が ML 調査よりもアルカリ総量が大きく、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が、その差は小さいことを確認した。

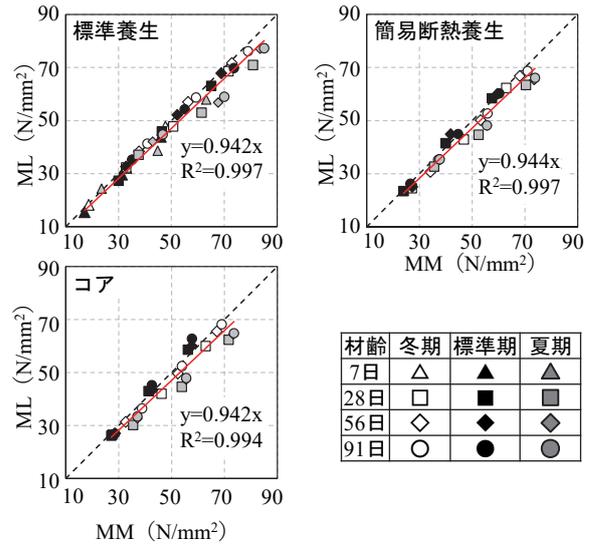


図-5 MM 調査と ML 調査の圧縮強度の比較

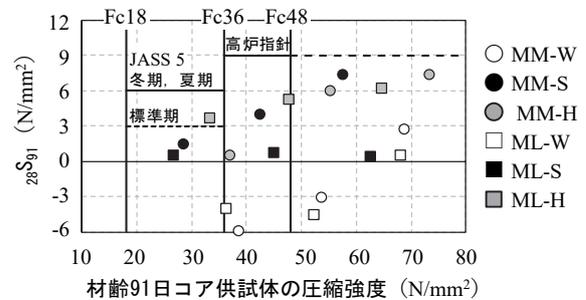


図-6 材齢 91 日のコア供試体の圧縮強度と構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の関係

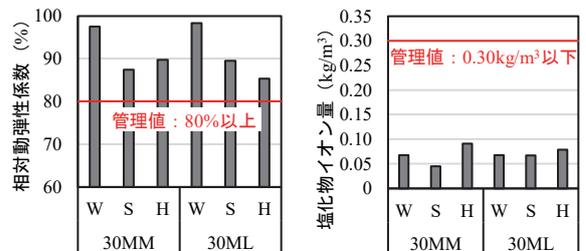


図-7 アルカリシリカ反応性迅速試験の結果

図-8 硬化コンクリートの塩化物量の試験結果

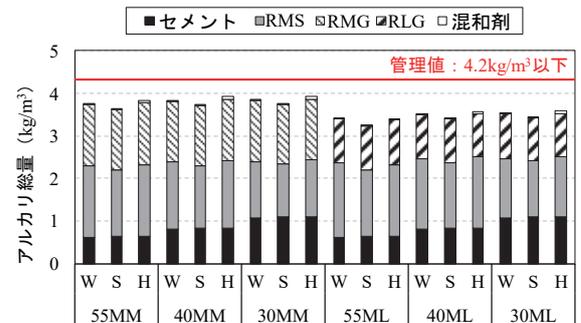


図-9 アルカリ総量算定の結果

3. CO₂ 排出量および削減効果の検討

3.1 呼び強度に対応する水結合材比の算定

BF 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、材齢 28 日の圧縮強度の実験結果に基づき、呼び強度 24 から 42 に対応する結合材水比 (B/W) を算出した。B/W と圧縮強度の一例を図-10 に示す。B/W の算定式には、実験データの回帰式をもとに、データ全体を包括できるように負側に平行移動した式を用いた。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。

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

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

F : 調合強度 (N/mm²)、SL : 呼び強度 (N/mm²)

σ : 標準偏差 (N/mm²)

3.2 CO₂ 排出量の算定と削減効果の試算

CO₂ 排出量の算定に用いた調合条件を表-6 に示す。また、各材料の CO₂ 排出量原単位を表-7 に、再生骨材の CO₂ 固定量を表-8 に示す。

材料由来の CO₂ 排出量、再生骨材による CO₂ 削減量、および BF を使用した再生骨材コンクリートにおける CO₂ 削減効果と呼び強度ごとに表-9 および図-11 に示す。普通コンクリートと比較して BF を使用した再生骨材コンクリートの CO₂ 削減効果は、再生骨材の組合せや呼び強度にも拠るが、65~71%程度期待できることが示された。CO₂ 排出量の削減には、BF を使用したことによる効果が大きく、169~217kg-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、18~24kg-CO₂/m³ 程度の CO₂ 排出量が削減された。

4. まとめ

本開発では、セメントの 70%を BF に置き換え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

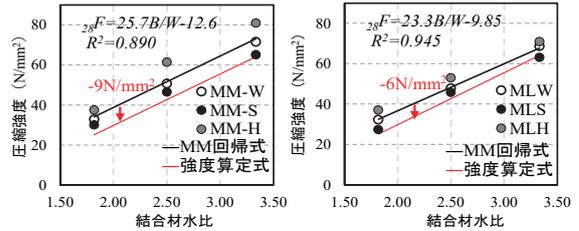


図-10 結合材水比 (B/W) と圧縮強度の一例 (標準養生、材齢 28 日)

表-6 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-7 各材料の CO₂ 排出量原単位⁵⁾

| 材料 | CO ₂ 排出量原単位 (kg-CO ₂ /t) |
|----|--|
| C | 772 |
| BF | 35.6 |
| 砕石 | 3.90 |
| 砕砂 | 3.90 |
| 砂 | 4.90 |

表-8 再生骨材の CO₂ 固定量⁶⁾

| 種類 | CO ₂ 固定量 (kg-CO ₂ /t) |
|-----|---|
| RLS | 41.8 |
| RLG | 11.7 |
| RMS | 19.9 |
| RMG | 10.2 |

C : 普通ポルトランドセメント

再生骨材の製造時と保管 4 週間 (屋外に存置、1 日 1 回散水)

表-9 CO₂ 排出量および削減効果の試算結果

| 呼び強度 | W/B (%) | | | CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³) [再生骨材による削減量] | | | CO ₂ 削減効果 (%) | |
|------|---------|------|------|--|-------------|-------------|--------------------------|------|
| | 普通 | MM | ML | 普通 | MM | ML | MM | ML |
| 24 | 58.4 | 50.7 | 51.9 | 245.0 | 74.1[24.6] | 75.4[20.8] | 69.8 | 69.2 |
| 27 | 54.7 | 47.5 | 48.2 | 261.2 | 73.9[24.9] | 76.8[21.0] | 71.7 | 70.6 |
| 30 | 51.3 | 44.6 | 44.9 | 278.1 | 80.1[24.5] | 83.9[20.6] | 71.2 | 69.8 |
| 33 | 48.7 | 41.9 | 42.0 | 276.6 | 87.2[24.3] | 91.1[20.4] | 68.5 | 67.1 |
| 36 | 45.9 | 39.6 | 39.4 | 292.8 | 93.5[23.9] | 97.5[20.0] | 68.1 | 66.7 |
| 40 | 43.6 | 36.9 | 37.1 | 308.1 | 101.7[23.4] | 107.3[19.5] | 67.0 | 65.2 |
| 42 | 41.5 | 35.6 | 35.1 | 323.5 | 106.1[23.2] | 111.8[19.2] | 66.8 | 65.4 |

※普通コンクリートの W/B は、生コン工場の調査表を参考にした

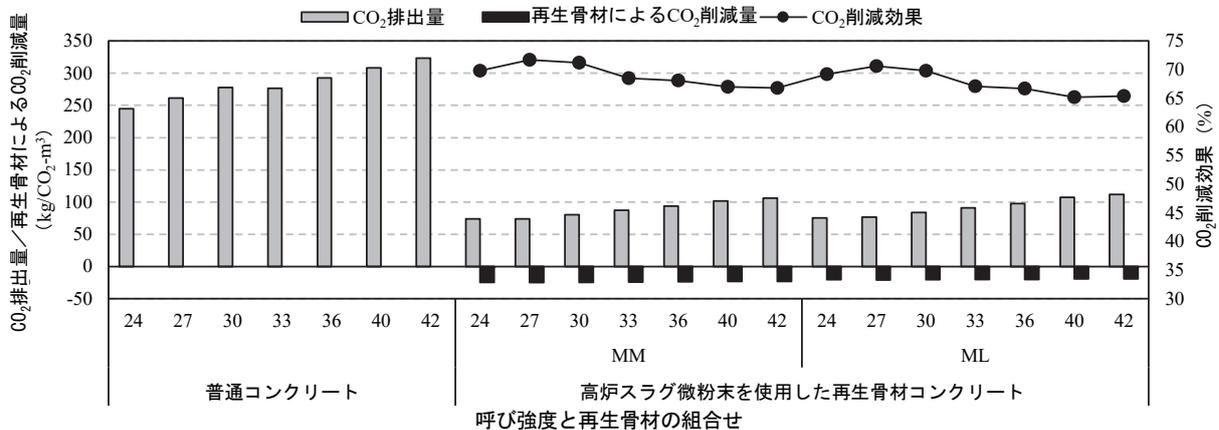


図-11 CO₂ 排出量と再生骨材の CO₂ 固定量および再生骨材コンクリートの CO₂ 削減効果

材コンクリートにおける材料由来のCO₂排出量および削減効果を試算した。その結果から得られた知見を以下に示す。

- i. フレッシュ性状は、再生骨材の組合せにかかわらず、運搬時のスランプの低下などを適切に見込むことで、良好なフレッシュ性状を確保できる
- ii. アルカリシリカ反応性迅速試験の結果は「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W/B30%までの範囲であれば管理値である4.2kg/m³以下を満足する
- iii. フレッシュコンクリートと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/m³以下を十分に満足する
- iv. 設計基準強度36N/mm²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/mm²または6N/mm²として設定でき、また、設計基準強度36N/mm²を超え48N/mm²以下の場合には高炉指針に示される9N/mm²以下となり、48N/mm²を超える場合においても9N/mm²に設定できる可能性が示唆された
- v. セメントの70%を高炉スラグ微粉末に置き換えた再生骨材コンクリートは、65～71%のCO₂削減効果が期待できる

5. あとがき

再生骨材を用いたコンクリートは、JIS A 5022 の規格があるものの、建築基準法上、構造躯体に使用する材料規格に認められていない。また、再生骨材 M を用いたコンクリートは、塩化物量やアルカリシリカ反応などの慎重な管理が必要である。開発したコンクリートは、再生骨材コンクリートの規格を十分に満足する結果であり、実験結果に基づき定めた再生骨材コンクリートの製造・品質管理基準により、生コン工場と共同で第三者機関の建築材料の性能評価を受け、国土交通大臣認定(MCON-4754・4755)を取得した。

大臣認定を取得した再生骨材コンクリートの適用範囲を表-10 に示す。設計基準強度は、普通コンクリートの強度範囲である18～42N/mm²とし、BF 使用率は60～70%の高炉セメントC種相当である。また、適用例として、場所打ち杭や基礎および居室に接しない地下躯体、CFT造の鋼管充填コンクリート等に適用することが可能である。

今後は、コンクリート塊のリサイクルの一層の推進を図るとともに、持続可能な社会の実現を目指し、CO₂削減に寄与するコンクリートの研究を進めていきたい。

表-10 高炉スラグ微粉末を使用した再生骨材コンクリートの適用範囲

| 項目 | 適用範囲 |
|-------------|--|
| BFの種類 | 高炉スラグ微粉末 4000 (JIS A 6206) |
| BFの使用率 | 70%(高炉セメントC種相当) |
| 再生骨材の品質と組合せ | ・再生細骨材 M、 ・再生粗骨材 M 2005 ・再生細骨材 M、 ・再生粗骨材 L 2005 + 砕石 2005 |
| 設計基準強度 | 管理材齢 28 日：18～42N/mm ² 管理材齢 56 日：18～45N/mm ² |
| スランプ | 15cm・18cm・21cm・23cm (呼び強度に応じて設定) |
| スランプフロー | 45cm・50cm・55cm・60cm (呼び強度に応じて設定) |

【参考文献】

- 1) 河野政典、伊藤 淳、「カーボンニュートラルの実現に向けた取り組み、環境に配慮したコンクリートの実適用」、土木施工、pp101-104、2024.11
- 2) 松田信広、伊代田岳史、「再生骨材コンクリートによるCO₂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
- 3) 黒田泰弘、菊地俊文、「コンクリート塊による二酸化炭素の固定化に関する研究」、清水建設研究報告、第86号、pp.29-36、2007
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 吉野 玲、鈴木好幸、伊藤 淳、野中 英、「再生骨材の製造工程におけるCO₂固定量に関する研究」、コンクリート工学年次論文集、Vol.47、No.1、pp.810-815、2025.7