

## 建築分野の資源有効利用技術

### Technologies for Effective Use of Resources in Building Engineering

閑田 徹志 依田 和久

#### I. はじめに

サステナブルな社会インフラの実現に向け、資源の有効利用が必須であり、特に資源投入量が膨大な建築分野で、再生材などの非バージン資源の有効利用を進めることでその実現に大きく寄与できる。以下では建築分野での資源有効利用状況の概観と具体的な有効利用技術の事例について述べる。

当社では建設工事において4大資材と言われるセメント・コンクリート、鋼材、砕石、アスファルトを年間約750万t使用しており(2013年度実績)、そのうち最大の使用量を占めるのがセメント・コンクリートである(Fig.1)。当社で使用するレディーミクストコンクリートはおよそ年間230万m<sup>3</sup>であり<sup>1)</sup>、土木、建築の請負金額の比率から推定すると、建築工事だけで160万m<sup>3</sup>が消費される。このことから、実に370万tの膨大な資源投入が必要になる計算である。

当社では「鹿島環境ビジョン：トリプルゼロ」を掲げ、2030年には主要資材での再生材利用率60%以上を目指している。現状の会社全体における主要資材に占める再生材の使用量と使用率をFig.2に示すが、セメント・コンクリートでは再生材の使用量が85万t程度と多いにも関わらず使用率は20%以下で、資材全体に対する再生材の使用率向上には、この材料種別における再生材利用拡大が鍵となる。前記環境ビジョンにおける目標の達成に向け、建築用コンクリートでの再生材利用による資源有効利用技術について以下に述べる。

#### II. コンクリートにおける資源有効利用技術の概要

コンクリートの主たる原材料は、セメントなどの結合材、骨材、水である。これら3つの主要構成材料について、現状で使用可能な

再生材の一覧をTable 1にまとめる。結合材には多くの再生材を含む材料が存在するが<sup>2)</sup>、一般建築物のRC部に利用できるものは限られている。Table 1の結合材のうち、エコセメントは関東地区で都市ごみ焼却灰を原料として製造されプレキャスト製品に多く用いられているが、鉄筋の腐食に対する保護性能に課題があるため、公共工事標準仕様書やJASS 5で使用できるセメントの種類から除外されており、一般建築のRC部材には使用しない。

高炉セメントは再生材を利用した結合材として重要で、製鉄高炉から算出される副産物である高炉スラグ微粉末をセメント工場でブレミックスしたセメントである。高炉セメントB種は高炉スラグ微粉末を40%程度使用したものであるが、地域を問わず流通体制が整備され、経済性の観点からも汎用的な利用が可能な材料となっている。ただし、高炉セメントB種を用いたコンクリートは、ひび割れ抵抗性や耐久性に課題があり、地下部材に限定した利用となっている。これらの短所を改善した高炉スラグ微粉末によるコンクリート(以下高炉スラグコンクリート)が最近開発され、高炉スラグの利用拡大に寄与することが期待される。これらの新しい高炉スラグコンクリートについては次章で概説する。

Table 1の結合材のうち、フライアッシュも今後の利用拡大が期待される再生材である。フライアッシュは石炭火力発電所から排出される石炭灰を精製して製造するが、東日本大震災以降の石炭火力発電所の増加から石炭灰の排出量の増大傾向が続き、石炭灰の埋立て処分量を削減するためにも、コンクリートへのフライアッシュ利用は喫緊の課題である。しかし、フライアッシュは、長年にわたる研究開発の努力にも関わらず、フレッシュ時の性状が不安定となる問題があり、この点の改善が普及への鍵となる。

このほか、結合材に用いる再生材としてはシリカフェームが高強

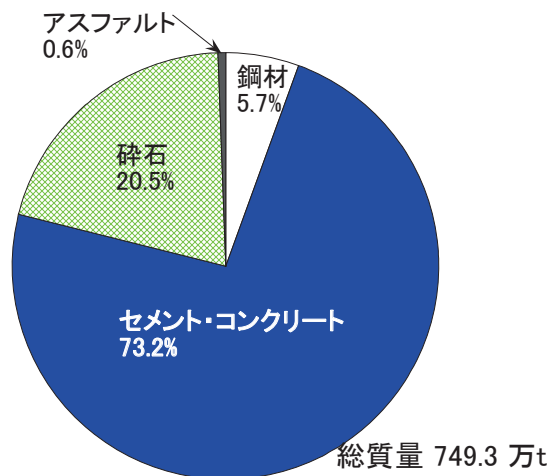


Fig.1 主要資材の総使用量と種類別内訳<sup>1)</sup>  
(Usage Amount of Major Construction Materials in Kajima)

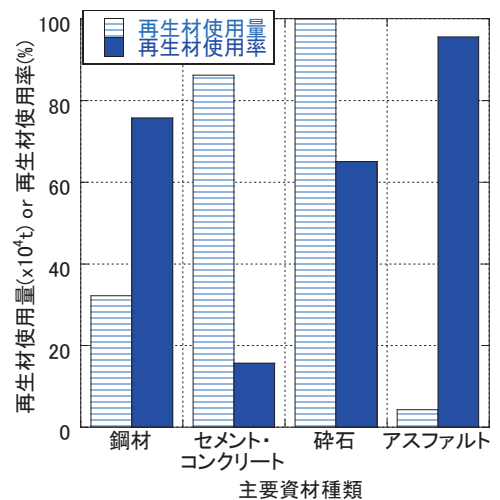


Fig.2 再生材の使用量と使用率<sup>2)</sup>  
(Recycle Material Usage Amount)

Table 1 コンクリートに使用される廃棄物起源材料  
(Concrete Constitutive Materials Originated from Waste)

材料		起源	規格	流通	備考
結合材	エコセメント	都市ごみ焼却灰が起源	JIS R 5214	○	耐久性の問題から一般建築物のRC部材には使用しない、ブロックなどプレキャスト製品向けが主体
	高炉スラグ微粉末	製鉄高炉の副産物が起源	JIS A 6206	○	最近流通が一般化しつつあるが、生コン工場の設備の問題から使用できる条件は限定的
	高炉セメント	高炉スラグ微粉末を含むセメント	JIS R 5211	◎ (ほぼ全ての生コン工場で日常的に利用可能)	高炉スラグ微粉末を40%程度使用した高炉セメントB種は再生材を含む結合材として最も一般的
	フライアッシュ	火力発電所の石炭灰が起源	JIS A 6201	○	最近流通が一般化しつつあるが、生コン工場の設備の問題から使用できる条件は限定的
	フライアッシュセメント	フライアッシュを含むセメント	JIS R 5211	○	
	シリカフューム	シリコン工場の副産物が起源	JIS A 6207	○ (高強度コンクリート用)	100N/mm <sup>2</sup> を超える超高強度コンで不可欠な材料
	シリカフュームセメント	シリカフュームを含むセメント			
	スラッジ再生セメント	戻りコンクリートが起源	GBRC ○○	△ (使用できる条件は限定的)	セメントに添加する混和材として使用
骨材	再生骨材	解体コンクリート塊	JIS A 5021 JIS A 5022 JIS A 5023		最近流通が一般化しつつある
	高炉スラグ骨材	製鉄高炉の副産物	JIS A 5011-1		
	フェロニッケルスラグ骨材	ステンレス鋼等の原料であるフェロニッケル精製の副産物	JIS A 5011-2	△ (使用できる条件は限定的)	工事立地、生コン工場設備など条件が整わないと使用が難しい
	銅スラグ骨材	銅精製の副産物	JIS A 5011-3		
	電気炉酸化スラグ骨材	製鉄用など電気炉の副産物	JIS A 5011-4		
	回収骨材	戻りコンクリート	JISA 5308	◎ (生コン工場内で発生)	通常の骨材に混合して使用、置換率の最大は20%
水	回収水	生コン工場でミキサー車の洗浄等により発生する排水	JIS A 5308 附属書C	◎ (生コン工場内で発生)	日常的に生コン製造に使用

\*◎汎用品として流通、○地域を問わず入手可、△条件により入手可

度コンクリートに多く使用されているが、輸入品であることから経済性の問題があり、普通強度域のコンクリートへ適用を拡大する機運に乏しく、使用量を大きく増加させることは難しいと考えられる。

結合材に関する最近の研究開発成果として、戻りコンクリートを原料とした再生セメントがあり<sup>3)</sup>、年間 200 万 m<sup>3</sup> に達するとされる工事に使用せずに廃棄される生コンを有効利用する技術として注目される。

骨材についても Table 1 に示す多くの再生材が存在する。しかし、結合材と同様に流通や経済性が壁となり、日常的に利用する状況とはなっていない。この中で、再生骨材は、最近の建築工事が既存建築物の解体を伴うことが多いため、解体コンクリート塊の有効利用の観点から重要である。再生骨材技術についてはその概要について後述する。

### Ⅲ. 建築工用コンクリートへの利用拡大が期待される再生材に関する最近の研究成果

#### 1. 高炉スラグコンクリート

代表的な低炭素セメントである高炉セメント B 種を用いたコンクリートは、乾燥収縮や温度によるひび割れへの抵抗性や Fc60N/mm<sup>2</sup> のような高強度領域での強度発現性に課題があり、用途や強度範囲に制約があった。これらの課題を解決した高炉スラグを使用したコンクリート（以下高炉スラグコンクリート）を開発した。これらは高炉スラグ微粉末の置換率が 65% 程度（高炉セメント C 種相当）の ECM コンクリート、40% 程度（同 B 種相当）の KKC コンクリート、25% 程度（同 A 種相当）の BLS コンクリートであり、それぞれ特徴を生かした用途にて実用化している。

##### (1) ECM コンクリート<sup>4)</sup>

ECM コンクリートは高炉スラグ微粉末を 65% 程度（高炉セメント C 種相当）含む結合材を用いた低環境負荷材料であり、セメント使

用量を 30% 程度に抑えることができる。このため Fig. 3 に示すとおり CO<sub>2</sub> 排出量を普通コンクリートよりも約 60% 低減できる。技術の概要は以下のとおりである。

- ・ Fig. 4 に ECM コンクリートを壁状部材とした温度ひび割れ解析モデルを、Fig. 5 にコンクリートの応力解析結果を示す。低発熱性のため温度ひび割れ抵抗性に優れており、マスコンクリートに適しているほか、場所打ち杭にも使用可能。
- ・ 専用の AE 減水剤を開発することで流動性の経時変化を抑制し、スランプ 15~21 cm、呼び強度 36 程度まで対応可能。
- ・ 構造体強度補正值 (<sub>28</sub>S<sub>91</sub> 値) は、高炉セメント B 種コンクリートと同等以下の値を採用可能。

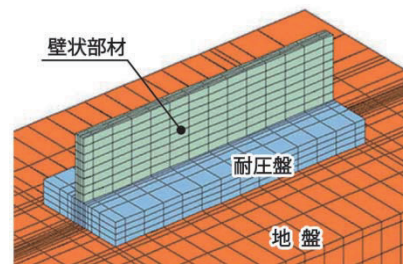
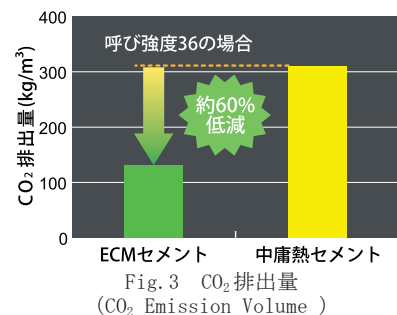


Fig. 4 温度ひび割れ解析モデル (Thermal Cracking Analysis Model)

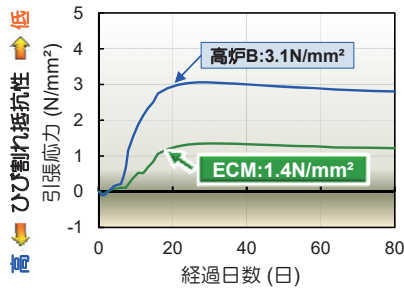


Fig. 5 ECM コンクリートの応力解析結果  
(Stress Analysis of ECM Concrete)

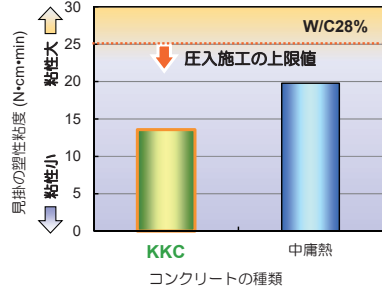


Fig. 6 KKC コンクリートの粘性  
(Plastic Viscosity of KKC Concrete)

・コンクリート品質について第三者評価機関である(一財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明(GBRC 第13-11号改)を取得し、通常のレディーミクストコンクリートと同様に使用可能。

既に東京、大阪で公共工事1件を含む4件の実績(適用数量17,500 m<sup>3</sup>、仮設を除く)がある。今後、マスコンクリートの用途を中心に一般的な中熟熱セメントコンクリート代替技術として全国レベルで普及が見込まれている。なお、ECMコンクリートはNEDOプロジェクト「エネルギー・CO<sub>2</sub> ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステムの研究開発」の成果物である。

(2) KKC コンクリート<sup>5)</sup>

KKCコンクリートは高炉スラグ微粉末を40%程度(高炉セメントB種相当)含む結合材を用いたものであり、CO<sub>2</sub>排出量を約40%低減可能な環境配慮型CFT充填コンクリートである。スランプフロー65cmのものをPhoto 1に示す。技術の概要は以下のとおりである。

- ・Fc60N/mm<sup>2</sup>クラスの一般的な中熟熱ポルトランドセメントコンクリートに対してCO<sub>2</sub>排出量を約40%削減。
- ・普通ポルトランドセメントに粗粒の高炉スラグと石灰系混和材をブレンドすることにより、Fig. 6に示すとおりコンクリートの粘性(見掛の塑性粘度)が中熟熱セメントを用いたものに比べ低減し、ポンプ工法を用いた圧入時に優れた施工性を確保。
- ・高炉セメントB種に比べ高強度領域での強度発現性が優れるため、CFT充填コンクリートとして使用頻度の高い設計基準強度(Fc)36~60N/mm<sup>2</sup>まで対応可能。
- ・建築基準法への適合を証明するため国土交通大臣認定をレディーミクストコンクリート工場(都内3工場)と共同で取得。

既にFc60N/mm<sup>2</sup>の2物件を含む5件の適用実績(1,315m<sup>3</sup>)がある。今後、CFT構造の需要が最も高い都内を中心にさらなる適用が見込まれている。



Photo 1 KKC コンクリート (スランプフロー65cm)  
(KKC Concrete, Slump Flow 65cm)

(3) BLS コンクリート<sup>6)</sup>

BLSコンクリートは高炉スラグ微粉末を20%程度(高炉セメントA種相当)含む結合材を用いたものである。技術の概要は以下のとおりである。

- ・Fig. 7に示すとおり、普通コンクリートよりも高い収縮ひび割れ抵抗性を有し、膨張コンクリートの代替技術として利用可能。
- ・中性化抵抗性に優れる高炉セメントA種相当であるため普通コンクリートと同様に適用部位を選ばず、地下躯体のほか地上躯体にも適用可能。
- ・コンクリート品質について第三者評価機関である(一財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明(GBRC 第14-33号)を取得し、通常のレディーミクストコンクリートと同様に使用可能。

既にCFT造事務所ビル(Photo 2)のデッキスラブに1,430m<sup>3</sup>適用し、ひび割れが無く良好な出来形が得られた実績があるが、今後レディーミクストコンクリート工場の出荷体制の整備により、都内を中心にさらなる適用が見込まれている。

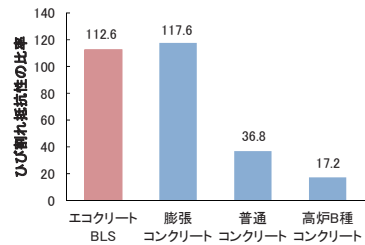


Fig. 7 ひび割れ抵抗性の比率  
(Ratio of Crack Resistance)



Photo 2 デッキスラブに適用したBLSコンクリート  
(BLS Concrete for Deck Slab)

2. 再生骨材コンクリート<sup>7)</sup>

都市再開発などに伴い発生する大量のコンクリート塊のリサイクル用途として、需要が減少している道路用路盤材料に代わり、コンクリート用再生骨材への期待が高まっている。再生骨材として普及

を図るためには、使用量の多い上部躯体（柱・壁・梁・床など）への適用拡大が不可欠となる。再生骨材において細骨材は粗骨材に比べ製造することが難しいが、粗骨材だけでなく細骨材も再生骨材を用いることができれば省資源効果が一層高まる。このため、製造処理エネルギーと副産物の発生を抑えた「中品質再生細骨材」を構造体に用いる技術、および当社独自のロータリードラムミル方式により原子力発電所の工事にも適用可能な「高品質再生細骨材」を製造する技術の2つを開発した。これらの技術を盛り込んだリサイクルシステムの概要を Fig. 8 に示す。また、各技術の概要は以下のとおりである。

- ・「高品質再生細骨材（再生細骨材H）」は、当社が開発したロータリードラムミル方式を用いることで、原子力発電所施設の工事に適用される JASS 5N の規格値を満足。適用例を Photo 3 に示す。
- ・「中品質再生細骨材（再生細骨材M）」は構造用コンクリートに使用することが可能な各種性能を実現。適用例を Photo 4, 5 に示す。
- ・ひび割れ抵抗性：膨張材を使用した再生骨材コンクリートの材料的特性を把握することで、乾燥によるひび割れへの懸念が大きい上部躯体への適用を実現。
- ・ポンプ圧送性：骨材の吸水性状を把握し、適切な対策を施すことにより、施工性を改善。

構造用再生骨材コンクリートは、大臣認定を生コン工場と共同で取得することにより5件の適用実績（3,050m<sup>3</sup>）がある。今後、コストと要求性能が合致した物件への新たな適用が見込まれる。ただし、再生骨材コンクリートを供給可能な生コン工場の数が少ないことが課題であり、東京オリンピック関連工事を契機に工場の整備が期待される。

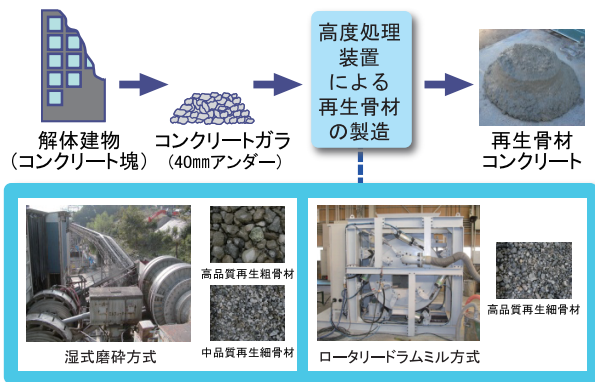


Fig. 8 リサイクルシステムの概要  
(Summary of Recycling System)



Photo 3 柱・壁 (再生細骨材H)  
(Appearance of Pillar and Wall)



Photo 4 床 (再生細骨材M)  
(Appearance of Floor)



Photo 5 外構擁壁 (再生細骨材M)  
(Appearance of Outward Wall)

#### IV. おわりに

持続可能な社会インフラ建設の実現に向け、資源投入量が膨大な建築分野における資源有効利用状況を概観し、再生材活用の現状と再生材利用に資する新技術についてコンクリートを中心に説明した。建築工事での使用量が膨大なコンクリートは、再生材利用の余地が大きく、資源循環の達成や環境負荷低減に大きな貢献が可能な材料であり、今後も研究開発を継続していく計画である。

#### 参考文献

- 1) 鹿島建設；コーポレートレポート2014.
- 2) コンクリート工学協会；コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書，2010.
- 3) 大川憲，青木真一，百瀬晴基，閑田徹志，笠井哲郎；乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を併用したクリーンカーフリーコンクリートに関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，80(710)，2015，pp. 539-549.
- 4) 田中秀樹，閑田徹志，依田和久，全振煥，稲葉洋平，百瀬晴基，石関浩輔，齊藤和秀；高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの実構造物への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集（材料施工），2015，pp. 537-538.
- 5) 笠井浩，依田和久，全振煥；環境配慮型 CFT 充填用「KKC コンクリート」の計画と管理，建築技術，No. 788，2015. 9，pp. 56-63.
- 6) 建物地上部に使える，鹿島の新しい環境配慮型コンクリート「エコクリート®BLS」を開発  
<http://www.kajima.co.jp/news/press/201606/8a1-j.htm>  
(2016年6月8日プレスリリース)
- 7) 閑田徹志，依田和久；鹿島技術研究所新研究棟に適用した新しいコンクリート技術，コンクリート工学，2012. 4.