

副産物の使用によるコンクリートの高付加価値化は可能か？

佐川, 康貴
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

<https://hdl.handle.net/2324/20229>

出版情報：建設物価. 1105, pp.32-25, 2011-11-01. 建設物価調査会
バージョン：
権利関係：

連載 素晴らしきコンクリート③

Wonderful Concrete

副産物の使用によるコンクリートの高付加価値化は可能か？

九州大学 大学院 工学研究院 建設デザイン部門 准教授 佐川康貴

はじめに

第2回では、「環境負荷低減に貢献・挑戦するコンクリート」と題し、セメントについては製造段階において環境に対するさまざまな配慮がなされていることについて述べた。また、骨材については副産物を起源とする代替骨材には多様な種類があり、今後のさらなる普及が期待されることについて述べた。

さて、この原稿を書いているのは9月の中旬、土木学会の全国大会が愛媛大学で開催された直後である。例年行われている年次学術講演会や研究討論会に加え、3月11日に発生した東日本大震災を踏まえたシンポジウムや、土木学会が2014年に創立100周年を迎えることから、学会の活性化に向けた記念討論会など、多数の行事が行われた。今回のテーマは、「今一度、土木の原点に～誇れる日本、住みよいまちへ～」であった。また、8月に早稲田大学で開催された日本建築学会大会のメインテーマは「いま、私たちにできること」であった。わが国を取り巻く環境が大きく変化する中で、技術者がどのように貢献すべきかを深く考え直す時と言えるであろう。

土木コンクリート分野でのリサイクル研究のトレンド

土木学会全国大会の話をもう少し続けたいと思う。コンクリート工学は第V部門に該当し、舗装工学と合わせて毎年、約600件の発表が行われている。コンクリート分野におけるリサイクルについては、「副産物利用・再生材料」や「リサイクル」、「再生コンクリート」といったセッションがある。

コンクリートに用いられる副産物について、最近どのような材料が着目されているのであろうか？過去5年分（2007年の第62回～2011年第66

回）の講演概要集CD（2010年からはDVD）を開き、「副産物利用・再生材料」と「リサイクル」の2つのセッションで、どのような副産物について研究発表が行われているか、その発表件数について調べた。

その結果が、表1である。なお、再生骨材の起源となるコンクリート廃材については、範囲外とした。もちろん、「副産物利用」と「リサイクル」以外にも副産物を用いたコンクリートに関する研究発表がなされていると推察される。材料が既にJIS化されている材料については、「どうやって使うか？」よりも、「それを使ったコンクリートのフレッシュ性状や強度、耐久性がどうなるか？」が重要であり、それらの内容に応じたセッションで発表がなされていると思われる。

最も件数が多かった材料は、フライアッシュおよび石炭灰であった。JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」の規格を満足しない品質の石炭灰を積極的に有効利用する研究に関する発表も見られた。次に発表件数が多かった材料は、高炉

表1 土木学会全国大会第V部門「副産物利用・再生材料」および「リサイクル」セッションでの発表件数（2007～2011年）

件数	材料
35件	フライアッシュ（石炭灰含む）
19件	高炉スラグ（微粉末、細骨材、粗骨材）
13件	都市ゴミ溶融スラグ
8件	ホタテ貝殻、廃瓦
6件	エコセメント、廃陶器、製鋼スラグ
5件	電気炉酸化スラグ、生コンスラッジ
4件	銅スラグ、下水汚泥溶融スラグ、砕石粉、粉殻灰
3件	廃タイヤ
2件	建設汚泥、浄水場汚泥、製紙スラッジ、廃ガラス、木材焼却灰
1件	下水汚泥焼却灰、シリカフェーム、廃石膏ボード、廃ALCパネル、廃プラスチック、ダム堆砂、浚渫土、木質廃材、サトウキビ残渣

スラグであった。高炉スラグは微粉末、細骨材、粗骨材のいずれも JIS に品質規格があり、粉体、粒体の両方での有効利用が可能な材料であることが特徴的な材料である。

全体を通じて、副産物使用率を高める研究は多いが、コンクリートの性能を向上させたり新たな性能や機能を付与したりするような研究は少ないように思われる。コンクリートの空隙構造を変化させたり、副産物に含まれる成分（鉄分など）を利用したりすることで、生物や藻類の付着を促すことは、従来のコンクリートから見ると新たな機能の付与、付加価値の向上であると言える。

一般に副産物使用率を高めると、元のコンクリートよりも性能（特に強度）が低下することが多い。強度の低下が無い（あるいは小さい）範囲で副産物の混合率を設定するのがこれまでの一般的な考え方であった。長いスパンで見た場合、副産物を用いたコンクリート構造物（または製品）が解体、撤去され、リサイクルされることが想定される。混合した副産物が将来のリサイクルの支障にならないような副産物の使用法も、今後考える必要がある。

副産物を用いながらコンクリートの性能を高めることは可能か？

小生の所属する建設材料システム工学研究室では、15年ほど前より、高炉スラグ微粉末6000を用い、塩害に対する耐久性を高める方法について研究している。

コンクリート構造物の塩害とは、コンクリート中に侵入した塩化物イオンにより内部の鉄筋が腐食し、コンクリートのひび割れや剥離を生じる劣化現象である。塩化物イオンの供給源の代表的なものは海水であるが、近年では海岸から離れた山間部や内陸部においても冬季に道路に散布される凍結防止剤（塩化ナトリウムや塩化カルシウム）

による塩害が多数報告されている。

コンクリート橋の上部工に用いられるような高強度のコンクリートは元々、塩分に対する抵抗性は高いが、構造物を長期間に渡り供用する場合や、過酷環境下に建設される構造物ではさらに高い耐久性が要求される。高炉セメントや高炉スラグ微粉末は、自身の持つ潜在水硬性によりコンクリートの水密性や耐海水性を向上させることは古くから知られている。

コンクリート用混和材として用いられる高炉スラグ微粉末の品質は JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に規定されており、比表面積（ cm^2/g ）により4000、6000、8000の3種類に分類されている。従来、一般的に用いられて来た高炉スラグ微粉末4000を用いた場合、コンクリート早期強度の発現性がやや遅れるという欠点を有しているため、早期強度が要求されるプレストレストコンクリート（PC）にはこれまで用いられてこなかった。

PCにおける耐久性の向上方法として、1997年より日本材料学会において、高炉スラグ微粉末6000を混和したコンクリートについて研究が実施された¹⁾。その結果、凍結防止剤および凍結融解に対する抵抗性を向上させる効果が確認された。

また当時、研究室（松下博通教授、鶴田浩章助教授）では、新日鐵高炉セメント(株)、(株)安部工業所（現 (株)安部日鋼工業）の3者で共同研究を実施した。一連の研究の中で、実規模のプレテンション方式のPC桁（スパン14.3m）を製作し、収縮およびクリープ特性²⁾、さらには載荷実験を行い耐荷性能に関する検討を行った³⁾（写真1）。

その結果、早強セメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換する場合、スラグを使用しない従来の配合に比べて水結合材比を5%低減させることで、PCに求められる初期強度を確保できることを明らかにした。また、収縮やクリープは特に大きな問題とはならないこと、PC桁の耐荷力は従来の配合の場合と同程度であることを確認した。さらに、スラグを用いることで塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、従来の配合と比べて1/5～1/6に低減できることを実験的に明らかにした。

実構造物への適用事例

(1) プレテンション方式 PC 橋への適用

当時、初めて実構造物に適用されたのが、熊本県発注の俵山4号橋⁴⁾であった（1999年12月竣



写真1 実規模 PC 桁の載荷実験状況

工)。なお、現在の橋名は、放ヶ内橋となっている。本橋は、山間部のバイパスに架かる橋梁であるため、凍結防止剤による塩害の抑制対策として、高炉スラグ微粉末6000を用いたコンクリートが採用された。

放ヶ内橋の現在の状況を写真2に示す。竣工から約10年後に曝露供試体（路面からの排水の流下部に設置）の圧縮強度および塩化物イオン濃度分布について調査を行った。

図1はコンクリート表面からの塩化物イオン濃度分布を示したものである。表面の領域で塩化物イオン濃度が高くなっていることから、冬季に凍結防止剤が散布されていることが裏づけられる。高炉スラグ微粉末6000を混和した配合（水結合材比35%）と従来の配合（水セメント比40%）を比較すると、スラグを混和した方が濃度が低く塩化物イオンの侵入が抑制されていることが分かる。Fickの拡散方程式の解に近似させた結果、見掛けの拡散係数は、スラグ無しが $0.11\text{cm}^2/\text{年}$ に対し、スラグ有りは約 $1/5$ の $0.020\text{cm}^2/\text{年}$ となり、両者の比は前述の既往結果と一致した。



写真2 現在の放ヶ内橋
(写真中央のジョイントに挟まれた部分)

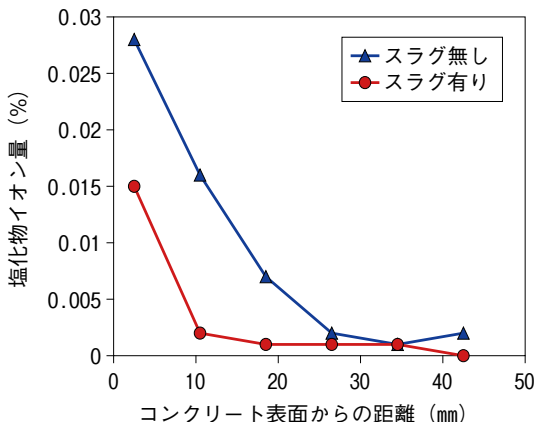


図1 塩化物イオン濃度分布

この高炉スラグ微粉末6000を用いた本技術は新技術情報提供システム NETIS にも登録 (QS-980177-V) されており、他にも多数の適用事例がある。

九州・沖縄地区における本技術を用いた最近の事例としては、九州自動車道 向佐野橋の架替え工事⁵⁾ や沖縄自動車道 億首川橋の架替え工事⁶⁾ における適用などがある。

(2) ポストテンション方式 PC 橋への展開

以上に示した事例は、製品工場で製造されるプレテンション方式の PC 桁を用いた橋梁に関するものであったが、近年では施工現場でコンクリートが打設されるポストテンション方式の PC 橋にも適用され始めている。

芦屋橋（福岡県発注）は海岸近くに架かる5径間連続 PC 箱桁橋（写真3）であり、塩害対策として上部工の一部に高炉スラグ微粉末6000を混和（セメントの50%を置換）したコンクリート（水結合材比41%）が採用された（2010年10月竣工）。コンクリート打設時に試料を採取し、20℃水中養生28日経過後に塩化物イオンの実効拡散係数を測定した結果、 $0.062\text{cm}^2/\text{年}$ となった。

また、この橋では、今後の維持管理において基



写真3 芦屋橋



写真4 曝露試験用供試体の設置状況

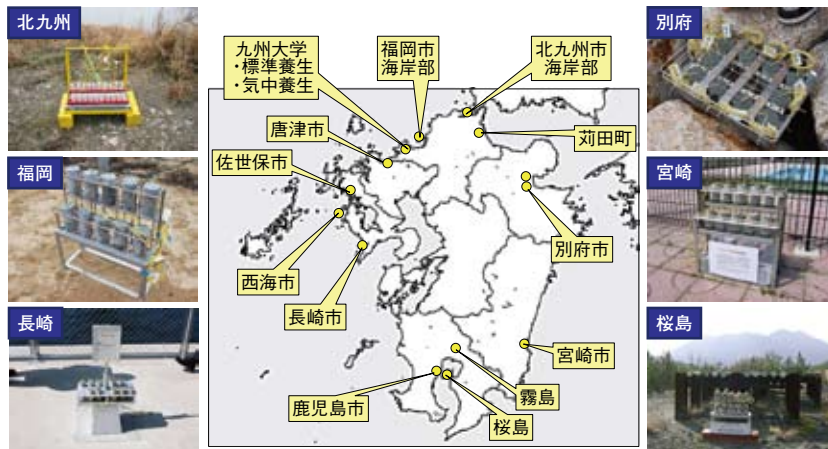


図2 コンクリート構造物劣化環境評価試験体曝露地

礎的データの収集を行うため、小生らの提案により、構造物と同じ配合で作製した逆T形の壁式コンクリート試験体（厚さ300mm、幅1100mm）および鉄筋埋設モルタル試験体（直径50mm×高さ100mm）（写真4）などを現地近くに設置した。モルタル試験体は、日本コンクリート工学協会（現在は工学会）九州支部「コンクリート構造物の劣化環境の定量的評価ならびに長期性能照査に関する研究委員会」（平成19～21年度、委員長：濱田秀則教授）において九州各地などに設置した試験体（図2）と同一の仕様である。今後定期的に調査を行い、実際の塩分浸透状況、塩化物イオン拡散係数、鉄筋腐食状況などの計測を行う予定である。

おわりに

今回は、冒頭で土木学会全国大会のセッション発表件数を基に、コンクリート分野でのリサイクル研究の状況について概観し、副産物使用率とコンクリートの性能を同時に向上させる方法はこのからの課題であることについて述べた。その上で、副産物を用いながらコンクリートの性能向上、高付加価値化を目指した事例の一つとして、セメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換し、副産物使用率を高めながら、コンクリートの塩害抵抗性も向上させる取り組みについて紹介した。

副産物を起源とする材料を使用した場合の問題点は、品質変動が大きい、コンクリートの品質が低下する、発生量が少量で発生地が分散している、運搬コストが高い等である。「ピンチはチャンスなり」とよく言われるように、副産物の問題点をプラスの方向に発想転換できる方法はないであ

うか。「そんな生易しい話ではない」と言われるのは承知であるが、副産物のそれぞれの特徴を認めながら、少量でも付加価値の高い材料として利用していくことが今後求められるのではないだろうか。

次回は、九州大学大学院人間環境学研究院 小山智幸准教授の担当です。

【参考文献】

- 1) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発，1998.3
- 2) 坂本賢次，松下博通，陶佳宏，江崎守：高耐久性PC桁の収縮・クリープ性状，第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.103-108，2000.10
- 3) 村井篤，江崎守，前田悦孝，松下博通：高炉スラグ微粉末を用いたプレテンションPC桁の性能確認，第11回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.81-86，2001.11
- 4) 石田裕一，江崎守，前田悦孝，坂本賢次，松下博通：高炉スラグ微粉末を用いた高耐久PC橋の設計・施工－熊本高森線俵山4号橋－，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.3，pp.45-51，2000
- 5) 福永靖雄，石塚純，田中正裕，吉村徹：高炉スラグ微粉末を用いた沖縄自動車道・億首川橋におけるリニューアル工事，コンクリート工学，Vol.47，No.2，pp.53-58，2009
- 6) 山本敏彦，今村壮宏，三浦泰博，藤木慶博：日交通量10万台区間におけるRC床版取替工事，コンクリート工学，Vol.49，No.3，pp.30-35，2011

本誌記事を読み、学習することは「土木学会」「建設コンサルタンツ協会」のCPD教育形態の「自己学習（学会誌等の購読）」に相当し、単位を取得できます。
※詳細は各団体により異なりますので、ご確認ください。