

最近の骨材事情と廃コンクリートのリサイクル

STATE OF THE ART REPORT ON AGGREGATE FOR CONCRETE AND CONCRETE RECYCLING

名和 豊春
by Toyoharu NAWA

1. はじめに

砂利、碎石に代表される骨材は、建設資材の一つとして社会資本の整備のために欠かせないものであり、我国で年間の資源投資量の約1/4を占め、毎年約8~9億トンもの膨大な量が消費されている。その用途は大きくコンクリート用と道路・鉄道用とに分けられ、コンクリート用として毎年5~6億トンもの骨材が消費されている。

一方、前世紀での大量消費・大量廃棄による地球規模の環境破壊を防止あるいは修復するために、今世紀においては、地球環境保全や省資源・省エネルギーなどの持続的発展が重要なキーワードとなってきた。

コンクリート用骨材は、コンクリート中の容積の約70%を占め、コンクリートの性質に多大な影響を及ぼす。さらに、碎石・砕砂の製造は一面では森林の破壊に繋がるように、骨材の生産方法そのものが環境破壊に直接関連する問題であり、21世紀の社会的要請にかなった状態での骨材の生産システムの開発・進展が早急に必要となっているといえる。

骨材以外のセメント、水、混和材料などの構成材料に関しては、高強度用ビーライト系セメントやエコセメント開発、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤の開発およびスラッジ水の有効利用など技術が飛躍的に進歩しているのに対し、骨材の生産技術については最近まで革新的な進歩が見られなかった。

本稿ではこうした状況を踏まえ、コンクリート用骨材の現状と課題、特に廃棄コンクリートからの再生骨材に着目して解説する。

2. コンクリート用骨材の現状

コンクリート用骨材としては、主に砂利・砂（河川・陸・山・海）、碎石・砕砂、高炉スラグ碎石および砕砂、フェロニッケル砕砂などの普通骨材と、膨張頁岩などを焼成して製造される人工軽量骨材が使用されている。

・北海道大学教授 大学院工学科環境循環システム専攻資源システム工学研究室(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

舗装のアスファルト合材や路盤材、鉄道のバラストなどの骨材を含めた全骨材の年間生産量の推移を図1に示す。1960年代までは、良質な河川産骨材がコンクリート用骨材として供給されていたが、河床からの採掘は当然河床の低下をもたらし、その波及効果として堤防根固めの消失・橋脚の洗掘などの問題や河川環境の劣化を引き起こしたために採掘が厳しく制限され、1963年をピークに減少し続け、1990年代になると総生産量の3~5%になっている。河川産骨材の枯渇に伴い、天然骨材の採取地は山、陸、海へと変化し、現在では海産骨材および山陸産骨材は、それぞれ総生産量の10%および30%程度になってきている。

碎石・砕砂は当初、道路・鉄道用の資材として生産が開始されたが、1961年にコンクリート用粗骨材として碎石のJISが制定され、1980年に砕砂のJIS規格が追加されるに及んで、コンクリート用骨材としての需要が急激に増大し、現在では総生産量の55%を超える状況となっている。

このような良質骨材の供給状況悪化に伴い、現在、骨材の輸入やスラグ系骨材の利用も検討されている。砂の輸入は、1988年頃から実施され始め、その後100~300万トン台で推移してきたが、2001年以降は400万トン台に増大してきている。しかし、輸入相手国は中国が50%以上を占めており、中国の建設ラッシュを考慮すると輸入量の大幅な増加は期待できないものと考えられる。

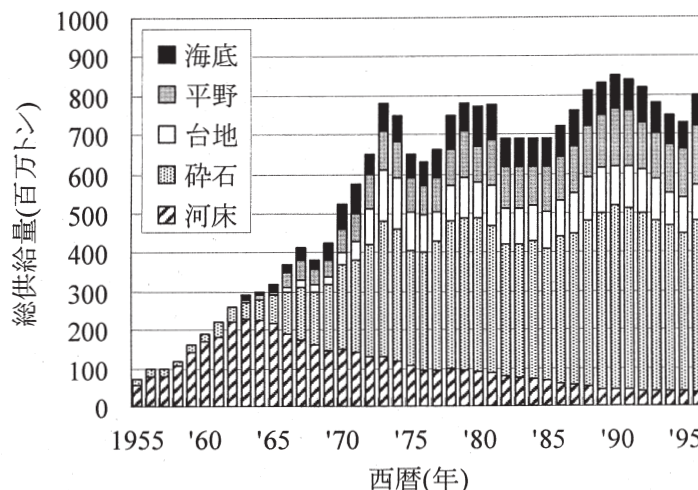


図1 骨材の総供給量の推移¹⁾

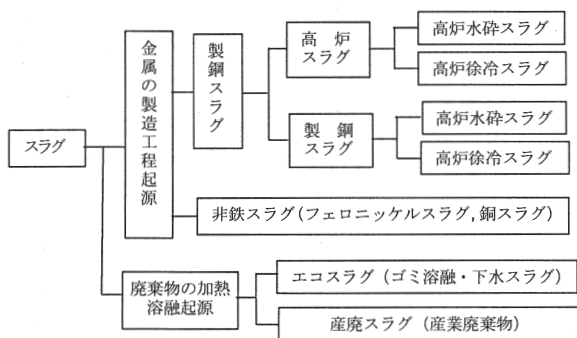


図2 スラグの分類

他方、スラグ系骨材は、鉄鋼・非鉄鋼の製造工程から副産されるスラグ（図2）を粉砕・整粒するものであり、数種のスラグ系骨材の品質がJISとして規格化され、実用化されてきている。我国では年間で高炉スラグが2300～2400万トン、転炉スラグが900～1000万トン、電気炉スラグが300～350万トン生産され、総量として年間3500～3700万トンの製鋼スラグが生産されている。また非鉄スラグとして、フェロニッケルスラグ、銅スラグが、それぞれ年間200万トンづつ生産されている。

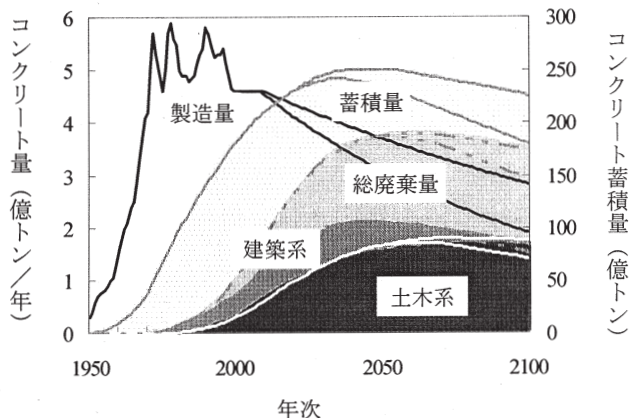
しかし、現在のスラグ系骨材の利用状況は、高炉徐冷スラグ粗骨材、高炉水砕スラグ細骨材、フェロニッケルスラグ細骨材、銅スラグ細骨材で、それぞれ33万トン、230万トン、8万トン、6万トンであり、セメント原料としての高炉水砕スラグの使用量約1400万トンに比べ著しく少ない。また、全てのスラグ系骨材をコンクリート用骨材として使用しても総骨材量の5%程度であり骨材の安定供給に貢献するとは言いがたい。

コンクリート構造物は、建替えの早い、遅いはあるものの必ず作り替えなければならない。このことから、将来の骨材の需要は今までに建設に消費した骨材量とほぼ同等になると推定される。したがって、未開発の骨材資源が枯渇した現在では、今後の需要を満たす骨材量を将来どのようにして確保していくかが大きな社会問題となると言っても過言ではない。

3. これから求められる骨材

骨材の変遷は大きく3つに区分することができる。第一段階は、良質な河川産骨材であり、骨材を在るがまま受け入れていた段階である。この段階では未開発の骨材資源が減少とともに、骨材資源も枯渇する。

第二段階は、第一段階の河川産骨材が枯渇して使

図3 コンクリート廃棄物の推移²⁾

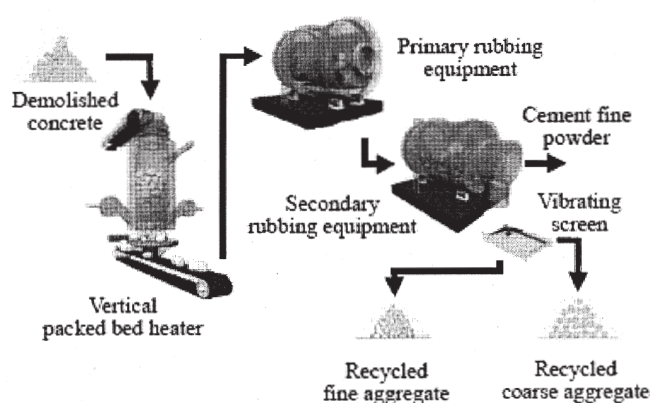
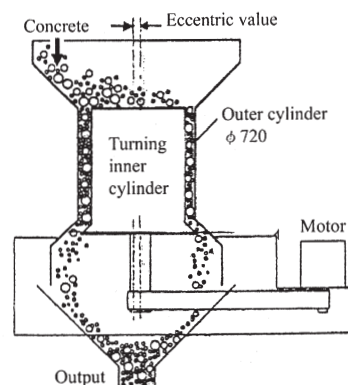
用され始めた玉砕、碎石、砕砂、海砂、スラグ系骨材などである。碎石・砕砂の資源としては各種の岩種があり、相当量の資源が期待される。しかし、現時点での目標とする品質基準は天然の河川産骨材であり、新しい骨材の創造ではなく、あくまでも天然の河川産骨材の代替品であり、環境破壊の影響を考慮すると、遠からず資源の枯渇が問題となるといえる。

第三段階は、構造物の要求性能から出発して、コンクリートの性能を設定し、それに適合するような品質の骨材を開発、製造する段階であり、現在では高性能人工軽量骨材が相当する。骨材は天然資源であり、天から賦与されたものという観念が強いためか、普通骨材にこのような概念を適用するものは少ないようである。しかし、最近では関西の海砂の代替として石灰石骨材を大量に使用する場合に、微粒部分の考え方が従来の骨材と異なるとか、砕砂100%でも使用できる粒度・粒形改善生産システムが提案実用化されるようになってきており、少しずつ第三段階への移行が進みつつある。

なお、第三段階の骨材は、高品質（高強度）である必要はなく、例えば低品質の骨材を有効利用することも含まれる。しかし、我国の骨材に対する意識は過去の良質な河川骨材が基準となっているためか、低品質骨材の適材適所への利用は余り普及していないといえ、意識の改革が必要である。最近では都市ごみの焼却灰の減容化を目的とした溶融スラグも骨材として使用する動きがあり、このような環境負荷低減型骨材の使用も必要となろう。

以上の考察から、今後の骨材の向かうべき方向としては以下のようなものが考えられる。

- ① 低品質骨材の有効利用
- ② 異種骨材の混合使用
- ③ 廃棄物・副産物を利用した再生骨材の利用

図4 加熱すりもみ法³⁾図5 機械すりもみ法⁴⁾

4. コンクリート塊からの再生骨材の現状と課題

建設副産物としてのコンクリート塊の排出量は2000年で3500万トンであり、2020年には高度成長期に作られたコンクリート建造物の経過年数が50年を越え、図3に示すように廃棄コンクリートの排出量が今後は益々増大することが予想される。これらの処理は、埋立処分場の枯渇が叫ばれる現在、深刻な社会問題の一つとなっているが、観点を変えれば良質な天然骨材を内包する資源であり、天然骨材減産の補填を可能とする“Urban Mine(都市域鉱山)”といえる。

他方、2000年のコンクリート廃棄物のリサイクル率は96%と著しく高い。しかし、その主な用途は道路の路盤材であり、昨今の道路事情から需要は低減する方向にある。したがって、折角形成されたリサイクルシステムではあるが、今後はコンクリート用骨材として活用するよう、方向を転換する必要がある。

再生骨材のコンクリート用骨材への利用を考えると、廃棄すべき元のコンクリートが良質の河川産骨材を使用していることから、砂利と砂の品質を基準としてその品質を云々することが多い。事実、1986年のJASS 5では、密度および吸水率が普通骨材と同等の品質基準を満たす高品質再生骨材が使用できることになり、今年3月制定の「JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H」でも高品質再生骨材が規定された。しかし、これらの品質基準を満足するためには、骨材に付着しているモルタル分やペースト分を十分に排除するために図4および図5に示すような高度処理が必要であり、多くのエネルギーを費やし、かつ不要となる微粉分を大量に発生させるなどの問題点が指摘されている。

微粉分の発生量を極力抑え、かつ消費エネルギーもできるだけ低減した、モルタルおよびペースト付着分が多い再生骨材の使用を促進させるために

2000年に「TR A 0006 再生コンクリート」が制定された。しかしながら、ここで規定するような低品質再生骨材を用いた再生コンクリートは非構造用の簡易コンクリートにしか適当できないことや、生コンのJIS認定の範囲外であることから需要を喚起するに至っていない。

したがって、JIS A 5021とTR A 0006の中間に位置する中程度処理再生骨材の構造用コンクリートへの適用が、再生骨材の大規模需要を喚起できるか否かの鍵を握っているといえる。

土木学会コンクリート委員会では中程度処理再生骨材の鉄筋コンクリート構造物への適用を可能とする設計指針の作成に努め、解体される構造物のコンクリート品質が特定できる場合には、中程度処理再生骨材も構造用コンクリートに適用できることを示した。今年6月に指針を発刊しているが、再生骨材にモルタルやペーストがある程度付着したままのものを使用するのであるから、凍結融解抵抗性や乾燥収縮などが通常のコンクリートに比べ若干劣ることは避けられないと記載されている。

確かに、年数を経たコンクリート構造物では表層部のモルタルやペーストは劣化を受けているため品質が低下している。しかし、内部コンクリートは表層部とは異なり、劣化を受けていない。したがって、コンクリート構造物の解体技術が向上して、健全なコンクリート塊を採取することができるならば、中程度処理の再生骨材でも十分に構造用コンクリートに適用できるものと考えられる。

上述のように、コンクリート構造物の解体工程での選別は、重要ではあるが、手作業が多く、工程も煩雑となるため、これを実施するためには慎重な施工計画と監督とが必要になる。最近では、比重選別および磁力選別機を組み合わせ、各種の廃棄物が混在した建設廃材を機械的に選別できるシステムも開発されており、一層の発展が望まれる。

表1 アトリッションミルを用いた再生粗骨材の性状⁵⁾

再生骨材の 記 号	原粗骨 材の 種 類	最大 寸法 (mm)	原コンク リートの 呼び強度	再生骨材 回 収 率 (%) ¹⁾	原粗骨材 回収率 (%) ²⁾	付着モル タル率 (%)	絶乾密 度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
G24A	砂利	25	24	79.5	63.7	19.9	2.52	2.41
G24B				111.0	79.8	28.2	2.41	4.34
G40A			40	78.5	63.5	19.2	2.52	2.43
G40B				114.6	79.1	31.0	2.41	4.07
C40A	碎石	20	40	82.0	61.7	24.8	2.49	3.79
C40B				113.7	71.6	37.0	2.38	5.71

注1) 再生粗骨材回収率=再生粗骨材量/原コンクリートに含まれる粗骨材量(重量比率)

注2) 原粗骨材回収率=再生骨材中の粗骨材量/原コンクリートに含まれる粗骨材量(重量比率)

注3) JASS 5の品質基準値: 絶対密度 2.5 g/cm³ 以上, 吸水率 3%以下

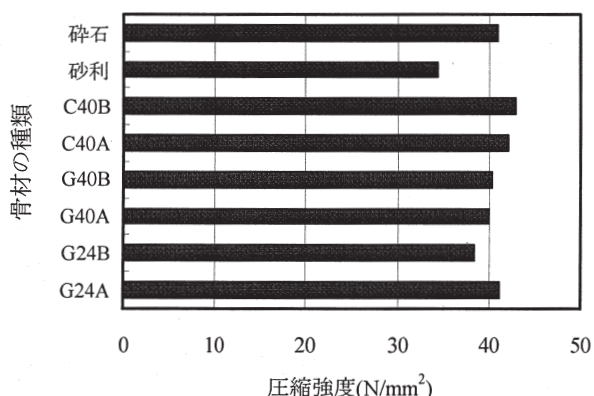


図6 コンクリートの強度発現 (W/C=50%、材齢28日)⁵⁾

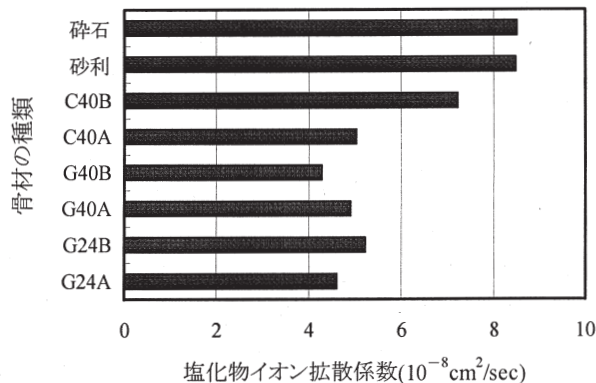


図7 塩化物イオンの実効拡散係数 (W/C=50%)⁵⁾

以上述べてきた再生骨材の製造方法は、いずれも再生骨材を上質の河川産骨材の代替品として見た場合のものであり第二世代の骨材といえる。

これに対し、第三世代では構造物の要求性能から出発して、それに適合するような品質の骨材を開発、製造する段階である。例えば、再生骨材が今後長期的に骨材資源として利用され続けるためには、再生コンクリートから繰返し再生骨材を回収できることが基本となる。数回のリサイクルを可能とするためには骨材自体を損傷させないで単体分離することが望ましいが、モルタル分やペースト分を数%以内まで剥離する高度処理では骨材自体の累積損傷が増大するため実現は難しいと考えられる。このため、著者らは付着モルタル分を残存する中程度処理において、骨材形状の改善を図り、再生粗骨材を高性能化することを試みた。粉砕ミルには鋼製ボールやロッドを用いない自生ミルの一種であるアトリッションミルを用いた。

表1に再生粗骨材の各性状を示す。表中の原粗骨材とは原コンクリート中に含まれていた粗骨材を示すもので、得られた再生粗骨材の原粗骨材に対する質量比率を再生骨材回収率とし、再生粗骨材中の原粗骨材含有率(質量比率)を原粗骨材回収率とする。また表中に示す再生骨材の記号の末尾A,Bはミル条件を示すもので、ミル条件Aは高度処理であり、ミ

ル条件Bが中程度処理である。ミル条件Bの中程度処理では、原コンクリートの強度や原粗骨材の種類に拘らず、モルタル付着率が28~37%と高いため再生骨材回収率は100%を超え原コンクリートに含まれる粗骨材量以上の再生骨材を製造できた。なお、ミル条件Bの中程度処理での原粗骨材回収率は70~80%程度であり、再生骨材量としては原コンクリート中の粗骨材量より多く回収されるものの全ての原粗骨材を回収することはできなかった。他方、高度処理ではモルタル付着率は19~25%と少し低く、かつ再生粗骨材回収率および原粗骨材回収率ともに、それぞれ80%前後および63%前後とミル条件Bより低く、明らかに再生骨材の製造過程で原粗骨材が粉砕され回収できなくなることが分かる。

また、高度処理再生骨材は碎石起源のものを除き、JASS 5の品質規定を満たすが、中程度処理の再生粗骨材は付着モルタルが多いため、その絶乾密度と吸水率はJASS 5の品質規定を満たさなかった。

図6に、材齢28日での再生コンクリートの圧縮強度の測定結果例を示す。従来は再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、原粗骨材を用いた基準強度より低下することが数多く報告されているが、図より、砂利起源および碎石起源の再生骨材ともに、再生コンクリートの圧縮強度は、元の砂利や碎石を用いた基準コンクリートの値を上回るのが認められ

た。

コンクリートの圧縮強度は①粗骨材母岩の強度、②骨材表面性状、③骨材とペーストの脆弱な界面(遷移帯)の性状に依存する。呼び強度 24 のコンクリートの材齢 28 日強度は約 30MPa であり、砂利の母岩強度より低いと推察される。再生骨材を用いた場合にコンクリートの圧縮強度が増大する理由としては、骨材表面に付着したモルタルの表面性状および遷移帯性状の変化が原因ではないかと考えられる。

遷移帯性状が改善されるのであれば、遷移帯を通して移動すると考えられている塩化物イオンの浸透性についても改善されることが予想される。事実図 7 に示すように再生コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数の測定結果は再生骨材を用いたほうが小さく予想とよく一致する。

以上の結果は、処理方法いかんでは、中程度処理再生骨材でも普通骨材と同様の品質を有するものが製造できる可能性を示している。したがって、コンクリートの要求性能を主体に材料設計を行なうならば、新規の材料開発を実施しているのと同様であると見なせ、その様な材料設計思想が確立できれば再生骨材の普及に大きく貢献できると考えられる。

5. おわりに

我国では 160ha/年の速度で砂浜がなくなっており、大きな環境問題となっている。砂浜の喪失高さを 10m とすると、一年間あたりの喪失量は 1600 万 m^3 である。しかし、コンクリート用骨材の年間需要は 5~6 億トンであり、約 2 億 m^3 に相当する。この

東京ドーム約 150 杯分の骨材をいったい何処から持ってくるかは大きな問題である。したがって、たった 5%にしかならない量でも、全国の砂浜の約 1/2 を保全できる量であり、かつ東京ドーム 7 個分の山を消失させなくて済むのである。その意味では、各種のリサイクル骨材を天然起源骨材と混合使用するなどして広い範囲で多量に使用することや、廃棄コンクリート中の骨材を再生骨材として使用するなどの持続的生産システムを確立することが、コンクリートおよび骨材産業に携わる者の必須の課題と考える。本稿がそのために役立つならば幸いである。

参考文献

- 1) 清水昭之: 材料-骨材, コンクリート工学, Vol.39, No.1, pp.55-60, 2001
- 2) 日本学術振興協会、建設材料第 76 委員会: ライフサイクルコストを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発, p.27, 2002
- 3) 島裕和ほか: 加熱すりもみ法によるコンクリート塊からの高品質骨材回収の LCA 評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No.2, pp.67-76, 2002
- 4) 小島正朗, 米澤敏男ほか: 高品質再生骨材を用いた再生コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No.1, pp.1123-1128, 2000
- 5) 名和豊春, 西田法文, 恒川昌美, 板谷昭雄: 湿式選別法により製造した再生骨材を用いたコンクリートの性状, 資源・素材学会春季大会講演集 (II) 素材編, pp.171-172, 2005

(2005年11月28日受付 2006年2月28日受理)