

論文 再生骨材のアルカリ量の測定方法

鈴木 康範^{*1}・近藤 英彦^{*2}・辻 幸和^{*3}・河野 広隆^{*4}

要旨：再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応抑制対策として、アルカリ総量規制もあり得る。その際、再生骨材から出るアルカリ量の把握が必要となる。そこで、有姿の再生骨材を希塩酸によって溶解し、その抽出液のアルカリ金属イオンを測定する方法を検討し、提案した。この方法の精度を検証したところ、原骨材自体からのアルカリ溶出量が少ない通常の再生骨材では、測定誤差は実用上支障のない範囲であった。一方、原骨材自体からのアルカリ溶出量が極めて多い再生骨材では、設定したアルカリ量に対して高い測定値を与えることが判明した。

キーワード：再生骨材, アルカリ量, 測定方法, 付着セメントペースト

1. はじめに

コンクリート構造物を解体したコンクリート塊は、我が国において年間 3500 万t近くと膨大な量が発生している。その再利用率は 96%を超えている。しかし、用途は舗装用の路盤材および埋戻し材・裏込め材が主なものであり、コンクリート構造物にはほとんど使用されていない。そのような観点から、コンクリート塊のコンクリートへのリサイクルを本格的に進めるために、再生骨材に関するJISが制定されている^{1), 2), 3)}。JISによれば、アルカリシリカ反応性が無害でない再生骨材Mを用いる場合は、アルカリ総量規制によってもアルカリシリカ反応の抑制対策が採れる³⁾。

本論文は、塩酸によって付着セメントペーストを溶解して抽出した Na_2O および K_2O のアルカリ金属イオンを原子吸光光度法によって定量分析する方法⁴⁾を基に、試料の最大径、アルカリ抽出溶媒液である塩酸の濃度、および試料の質量と塩酸の体積比を検討して、再生骨材のアルカリ量の測定に適した方法を提案した。そしてこの測定方法を、塩酸による原骨材自体からのア

ルカリ溶出量が異なる再生骨材を用いた場合および付着セメントペースト中のアルカリ量が異なる場合についてそれぞれ適用し、その測定精度を検討した。

2. 再生骨材のアルカリ量の測定方法の検討手順

2.1 実験概要

表-1に検討項目と実験条件を示す。

シリーズ1では、試製造された再生骨材⁵⁾の最大径、アルカリ抽出溶媒液である塩酸の濃度および再生骨材と塩酸の体積比を変えて、再生骨材のアルカリ量の測定方法について予備的な検討を行った。シリーズ2では、円柱供試体を粉碎した最大径 0.15mmの再生骨材のアルカリ量を測定するとともに、原骨材についても同様にアルカリ量を測定し、原骨材自体から溶出するアルカリ量を補正することを試みた。これは、最大径 0.15mmの試料は測定時の簡便性、迅速化に優れるので、骨材自体からのアルカリ量を測定し補正する方法の可否を先ず検討したためである。シリーズ3では、円柱供試体を粉碎した再生骨材を有姿（最大径 5mmまたは 20mm）の

*1 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所 グループリーダー 工博（正会員）

*2 （株）中研コンサルタント 関東支店 技術部 材料調査課（正会員）

*3 群馬大学工学部 建設工学科 教授 工博（正会員）

*4 京都大学 大学院工学研究科 教授 工博（正会員）

まま、塩酸によって付着セメントペーストを溶解し、アルカリ量を測定する方法を検討した。シリーズ4では、原骨材自体からのアルカリ溶出量が極めて多い骨材によって作製した円柱供試体からの試料を用いて、付着セメントペースト中のアルカリ量が異なる場合についてシリーズ3で提案したアルカリ量の測定方法の適用性を検討した。

2.2 実験方法

シリーズ1では、ロッドミル法によって試製造された再生骨材を105℃で乾燥し、その後ジョークラッシャーを用いて粉砕した最大径5mmと、さらに振動ミルを用いて粉砕した最大径0.15mmを試料とした。その試料を用いて表1に示す条件で、原子吸光光度法でアルカリ金属イオンを定量分析するとともに、不溶残分を測定した。一方、原骨材についても最大径0.15mmとして同様な試験を行った。

シリーズ2では、コンクリート供試体を注意深く微粉砕した最大径0.15mmの試料を用いた。これは、製造された再生骨材は製造時に発生する微粉分の損失によって再生骨材のアルカリ量が変わるので、その影響を避けるためである。以降のシリーズでも、最大径以外の要因は同様である。すなわち、円柱供試体(φ100mm×200mm)1本分のコンクリートを練り上げ、ブリキ製軽量型枠に全量投入して成形し、ポリ塩化ビニリデンフィルムによって上面を密封し、軽量型枠ごと60℃恒温槽内で4日間促進養生した。その後、脱型したコンクリートを粗粉砕し105℃で48時間乾燥し、ジョークラッシ

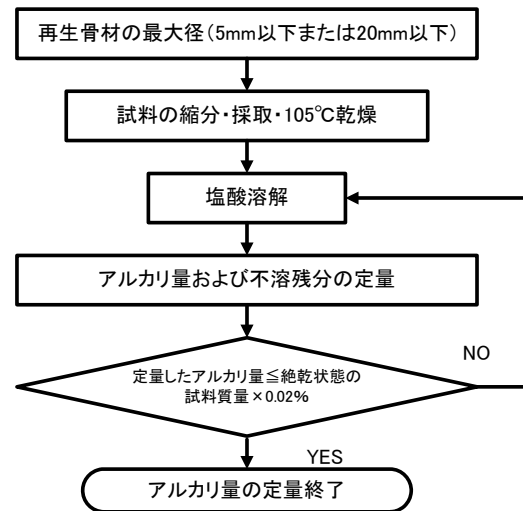


図-1 アルカリ量の測定手順

表-1 実験条件

シリーズ	No.	試料の最大径(mm)	塩酸濃度(mol/l)	試料の質量と塩酸の体積比*	処理時間	再生骨材中の原骨材の種類
1	(1)	0.15	0.11	1:250(1)	20分	G1, S1
	(2)	0.15	0.11	1:250(1)	20分	原粗骨材 G1 原細骨材 S1
	(3)	5	0.11	1:10(50)	20分	G1, S1
	(4)	5	0.11	1:20(25)	20分	G1, S1
	(5)	5	5.7	1:10(50)	20分	G1
2	(1)	0.15	0.11	1:250(1)	20分	G2, G3, S2
3	(1)	5	0.11	1:65(100)	約24時間/回 ×2~3回	G2, G3, S2
	(2)	5	5.7	1:5(100)	3時間	G2, G3, S2
	(3)	20	0.11	1:65(500)	約24時間/回 ×2~3回	G3, S2
4	(1)	5	0.11	1:65(100)	約24時間/回 ×2~3回	G1, S1

*括弧内は試料の質量(g)を示す。

表-2 使用材料

種類	物性等
普通ポルトランドセメント	密度: 3.17g/cm ³ , R ₂ O量: 0.61% (シリーズ1)
	密度: 3.15g/cm ³ , R ₂ O量: 0.32% (シリーズ2, 3)
	密度: 3.15g/cm ³ , R ₂ O量: 0.42% (シリーズ4)
細骨材	S1, 密度: 2.69g/cm ³ , R ₂ O量: 0.09% (シリーズ1, 4)
	S2, 密度: 2.58g/cm ³ , R ₂ O量: 0.42% (シリーズ2, 3)
粗骨材	G1, 密度: 2.70g/cm ³ , R ₂ O量: 0.17% (シリーズ1, 4)
	G2, 密度: 2.53g/cm ³ , R ₂ O量: 0.05% (シリーズ2, 3)
	G3, 密度: 2.65g/cm ³ , R ₂ O量: 0.23% (シリーズ2, 3)
AE減水剤	R ₂ O量: 3.4% (第1-4シリーズ)

表-3 コンクリート配合およびアルカリ量

シリーズ	単位量 (kg/m ³)						原骨材の種類
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	アルカリ量	
1	176	320	839	989	1.28	6.0	G1, S1
2, 3	176	320	804	925	1.28	6.0	G2, S2
	176	320	804	969	1.28	6.0	G3, S2
4	176	320	838	988	1.28	2.0, 4.0, 6.0	G1, S1

ヤーおよび振動ミルを用いて最大径 0.15mm に微粉碎し分析用試料とした。その試料を用いて表-1に示す条件でアルカリ金属イオンを定量分析するとともに、不溶残分を測定した。原骨材については、塩酸濃度を 0.11mol/l または 5.7mol/l として再生骨材から付着セメントペーストを溶解させた上で、再生骨材と同様な分析を行った。

シリーズ3では、図-1に示す手順によって、表-1に示す条件でアルカリ金属イオンを塩酸によって抽出し、抽出液のアルカリ金属イオン量が絶乾状態の試料質量の 0.02%以下となるまで繰返し、定量分析した。抽出の繰返し回数は最大3回であり、試験に要した時間は1試料について最長6日間程度である。試料の最大径は、細骨材相当として5mmおよび粗骨材相当として20mmの2種類とした。コンクリート供試体の作製方法はシリーズ2と同一であるが、ジョークラッシャーを用いて、所定の最大径に粉碎した。

シリーズ4では、アルカリシリカ反応性が極めて高く、塩酸による骨材自体からのアルカリ溶出量も極端に多い骨材を用いて、再生骨材コンクリートのアルカリ量を 2.0, 4.0, 6.0kg/m³の3水準に変化させてコンクリート供試体を作製した。再生骨材コンクリートのアルカリ量は、水酸化ナトリウムによって調整した。そのコンクリート供試体はシリーズ2と同じ促進養生を行い、最大径を5mmとし、シリーズ3で提案した条件でアルカリ金属イオンを定量分析した。促進養生においてアルカリシリカ反応を少しでも進行させるように、養生期間は4日から7日へ延長した。なお、2.0, 4.0, 6.0kg/m³の原コンクリートのアルカリ量に相当する単位水量中の

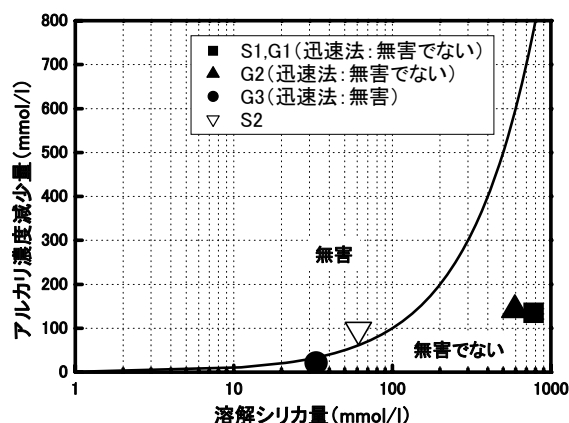


図-2 アルカリシリカ反応性(化学法)の試験結果
※化学法で「無害でない」と判定された骨材は、迅速法の結果も示す

アルカリ金属イオン濃度となるように、調整した水酸化ナトリウム溶液または蒸留水に原骨材を浸漬し、供試体と同じ促進養生・分析条件によって、原骨材から溶出するアルカリ金属イオンを定量分析した。

2.3 使用材料および配合

使用材料を表-2に示す。また、コンクリートの配合およびアルカリ量を表-3に示す。配合は水セメント比を55%、細骨材率を46%、単位水量を176kg/m³、単位セメント量を320kg/m³、空気を4.5%に統一した。骨材は細骨材を2種類、粗骨材を3種類用いており、それらのアルカリシリカ反応性を図-2に示す。

3. 実験結果

3.1 シリーズ1

図-3に再生骨材のアルカリ量の測定値に及ぼす諸要因の影響を示す。最大径0.15mmの試料は、最大径5mmの試料と比較して再生骨材のアルカリ量が多くなっている。原骨材自体から溶出するアルカリ量に着目すると、粗骨材ではそ

の割合が特に多く、無視できない。最大径 5mm の再生粗骨材の試料について塩酸の濃度を 0.11mol/l から 5.7mol/l に高めると、そのアルカリ量は増加するが、原骨材から溶出するアルカリ量を増加させている可能性がある。なお、試料の質量と塩酸の体積比が再生骨材のアルカリ量に及ぼす影響は比較的小さい。

再生骨材の不溶残分、原骨材の不溶残分および設定したセメントペーストのアルカリ量から、式(1)によって再生骨材に対するアルカリ量の質量割合（以下、アルカリ量設計値）を求めた。ここで、アルカリ金属イオンはセメントペースト中のみ存在すると仮定し、セメントペーストのアルカリ量は、セメントペースト部分から水分蒸発が無い場合と単位水量のうち単位セメント量の 40% に相当する水分が結合水としてコンクリートに固定され、残りが全て蒸発した場合との 2 通りを設定した。なお、再生骨材の製造時に原粗骨材が破碎され再生細骨材に混入すること、および再生粗骨材には原粗骨材以外にセメントペーストと共に原細骨材が付着していることを考慮して、原骨材の不溶残分は原粗骨材および原細骨材の不溶残分の平均値を用いた。

$$A_{ra} = (1 - I_{ra}/I_a) \times A_p \quad (1)$$

ここで、 A_{ra} : 再生骨材のアルカリ量設計値 (wt%)

I_{ra} : 再生骨材の不溶残分 (wt%)

I_a : 原骨材の不溶残分 (wt%)

A_p : 設定したセメントペースト中のアルカリ量 (wt%)

上述のごとく求めた再生骨材のアルカリ量設計値は図-3中に示したが、測定値は設計値よりかなり小さくなった。これは、再生骨材のアルカリ量を算定する際の仮定にも問題があるものの、再生骨材の製造時における微粉分の損失などの影響も大きいと考えられた。

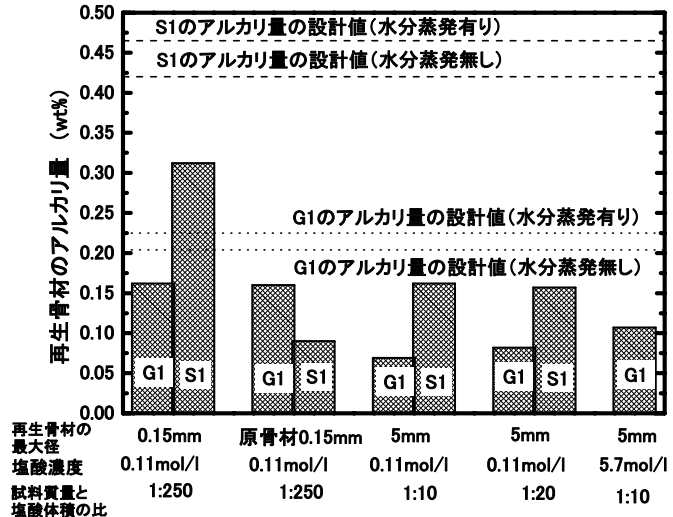


図-3 再生骨材のアルカリ量測定値に及ぼす実験条件の影響

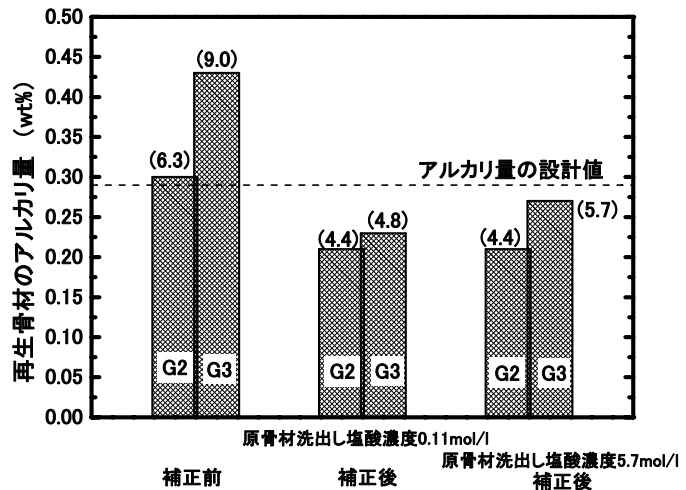


図-4 シリーズ2の再生骨材のアルカリ量の測定結果
図中の括弧内の数値はアルカリ量の単位量換算値(kg/m³)

3.2 シリーズ2

シリーズ2における再生骨材のアルカリ量の測定値と設計値を図-4に示す。ここで示す再生骨材のアルカリ量設計値 (wt%) は、練混ぜ時において設定したコンクリート供試体のアルカリ量を 105°C で乾燥したコンクリート供試体の質量で除したものであり、シリーズ2以降では同一の定義である。なお、アルカリ量を単位量に換算する場合、練混ぜ時におけるコンクリート供試体の体積で除して求めた。

アルカリ含有量が少ない原骨材 G2 を用いた再生骨材では、測定値と設計値がほぼ一致した。一方、アルカリ含有量が多い原骨材 G3 を用いた

再生骨材では、アルカリ量の測定値が設計値より大きくなった。これは、試料を最大径 0.15mm としたために、原骨材 G3 からアルカリ金属イオンの溶出が増加したと考えられる。また、再生骨材から原骨材を洗い出す際の塩酸濃度は、原骨材のアルカリ含有量が多い場合アルカリ量の測定値を大きくするが、原骨材のアルカリ含有量が少ない場合に影響がなかった。

塩酸で洗い出した原骨材を最大径 0.15mm としてアルカリ溶出量を求め、再生骨材のアルカリ量を補正しても、測定値と設計値との誤差はやや大きい。すなわち、最大径 0.15mm の再生骨材ではアルカリ量の測定精度に問題があり、原骨材を塩酸によってセメントペーストを取り除いた上でアルカリ溶出量を測定し補正しても、精度は改善できない。

3.3 シリーズ 3

シリーズ 3 における再生骨材のアルカリ量の測定値と設計値を図 5 に示す。最大径 5mm の試料では、原骨材のアルカリ含有量にかかわらず、測定値は設計値にほぼ近い。また、塩酸濃度が 5.7mol/l より 0.11mol/l と薄いと、処理時間がかかるものの原骨材からの溶出が抑制されるので、測定値は設計値により近くなった。最大径 20mm の試料では、原骨材のアルカリ含有量が多い再生骨材のみを対象とし塩酸濃度が 0.11mol/l の場合しか測定していないが、測定値は設計値にほぼ等しかった。

したがって、再生骨材のアルカリ量の測定方法として、絶乾状態の有姿の試料を用いてアルカリ金属イオンを 0.11mol/l の希塩酸によって抽出し、抽出液のアルカリ金属イオン量が試料質量の 0.02% 以下となるまで繰返し、定量分析する方法が適切といえる。なお、この方法は骨材の有姿の試料を用いるので、塩酸によって溶出する原骨材中のアルカリ金属イオン量を補正す

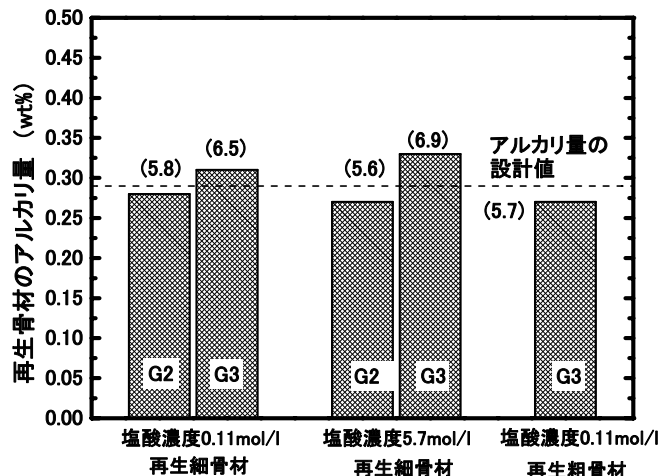


図 5 シリーズ 3 の再生骨材のアルカリ量の測定結果
図中の括弧内の数値はアルカリ量の単位換算値(kg/m³)

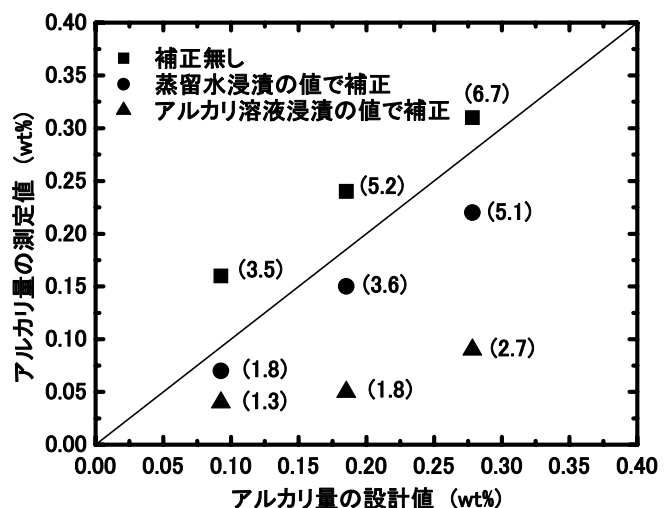


図 6 シリーズ 4 のアルカリ量の測定結果
図中の括弧内の数値はアルカリ量の単位換算値(kg/m³)

る必要がない。

3.3 シリーズ 4

シリーズ 4 における再生骨材のアルカリ量の測定値と設計値を図 6 に示す。測定値は設計値よりも大きくなっており、細骨材相当の最大径 5mm の試料を用いても、アルカリ金属イオンが溶出しやすい原骨材の場合にはその影響が現れる。再生骨材のアルカリ量が多い方が設計値との誤差が少なくなっている。再生骨材のアルカリ量が多いと、アルカリシリカ反応が進みアルカリシリカゲルの生成量が多くなるが、0.11mol/l の希塩酸では SiO₂ の網目構造中に存在するアルカリ金属イオンの全量が溶出しない⁶⁾。したがって、原骨材からアルカリ金属イオンが

溶出したにもかかわらず、アルカリ量の測定値と設計値の差が小さくなったと解釈できる。

また、図-6中には原骨材からの溶出量を測定して補正した値も示してある。蒸留水に浸漬した後供試体と同じ促進養生を行い、原骨材からのアルカリ金属イオンの溶出量を測定して補正した場合には、原コンクリートのアルカリ量が 2.0kg/m^3 では測定値が設計値に近いが、原コンクリートのアルカリ量が増加するに従い、測定値は設計値より小さくなる。また、水酸化ナトリウム溶液に浸漬した後供試体と同じ促進養生を行い、原骨材からのアルカリ金属イオンの溶出量を測定して補正した場合には、測定値が設計値を大幅に下回る。アルカリ溶液は原骨材のアルカリシリカ反応が進行して生成されたアルカリシリカゲルをSi共々溶解する⁶⁾ので、原骨材からアルカリ金属イオンを溶出させる。しかも、原骨材の表面がアルカリ溶液に接触する割合は、コンクリート中よりも水酸化ナトリウム溶液中の方が大きい。したがって、原骨材からのアルカリ金属イオンの溶出が一層促進され、アルカリ量の補正量がコンクリート中よりも過大となり、設計値と補正した測定値の誤差が大きくなったと思われる。すなわち、原骨材からのアルカリ金属イオンの溶出量が極めて多い場合、コンクリート中でのその溶出量を正確に測定することは極めて困難である。したがって、本論で提案したアルカリ量の測定方法を原骨材からのアルカリ金属イオンの溶出量が極めて多い再生骨材に適用すると、設計値よりやや大きな測定値を与えることを考慮する必要がある。ただし、測定値はアルカリシリカ反応抑制対策上では安全側の誤差を与える。

4. まとめ

本研究は、再生骨材コンクリートのアルカリの総量規制を行う上で必要な再生骨材のアルカリ量の測定方法を提案することを目的として行ったものであり、得られた知見を以下に示す。

(1) 最大径 0.15mm の試料では、再生骨材のアル

カリ量の測定精度が不十分であり、原骨材を塩酸によってセメントペーストを取り除いた上でアルカリ溶出量を測定し補正しても、その精度を改善できない。

- (2) 再生骨材のアルカリ量の測定方法として、絶乾状態の有姿の試料を用いてアルカリ金属イオンを 0.11mol/l の希塩酸によって抽出し、抽出液のアルカリ金属イオン量が試料質量の 0.02% 以下となるまで繰返し、定量分析する方法が、測定精度上適切といえる。
- (3) 提案した測定方法によっても、原骨材からのアルカリ金属イオンの溶出量が極めて多い再生骨材ではアルカリ量の設計値に対して大きな測定値を与えるので注意が必要である。ただし、その測定値はアルカリシリカ反応抑制対策上では安全側の誤差を与える。

謝辞

本研究は、経済産業省の委託を受けた(社)日本コンクリート工学協会における「再生骨材標準化委員会」(委員長:町田篤彦埼玉大学教授)の活動の一環として行われたものである。ここに付記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) JIS A 5021 (コンクリート用再生骨材 H) : (財)日本規格協会, 2005.3
- 2) JIS A 5023 (再生骨材 L を用いたコンクリート) : (財)日本規格協会, 2006.3
- 3) JIS A 5022 (再生骨材 M を用いたコンクリート) : (財)日本規格協会, 2007.3
- 4) (社)セメント協会:コンクリート専門委員会報告 F-18, pp.356-362, 1967.9
- 5) (社)土木学会:電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針(案), pp.101-102, 2005.6
- 6) 横山速一・井上 正:模擬ガラス固化体による高レベルガラス固化体の健全性評価 その2, 電力中央研究所報告 282022, pp.1-6, 1982.11