

論文 高品質再生骨材を使用したコンクリートの基本性状

黒田泰弘*¹・橋田浩*²・山崎庸行*³・立屋敷久志*⁴

要旨:岩種や強度の異なる原コンクリートから高品質な再生細・粗骨材を加熱すりもみ法により製造し、再生コンクリートを練り混ぜた。石灰岩碎石を原骨材に用いたケースでは、再生骨材製造時の加熱の際に、骨材自体が変質した可能性があり、再生コンクリートの諸性状に低下が認められたが、粘板岩碎石を原骨材に用いたケースでは、圧縮強度、ヤング係数、引張強度、長さ変化率、中性化速度、クリープ係数のいずれも通常の構造体コンクリートへの適用に関して、特に問題のないと考えられる結果が得られた。

キーワード:高品質再生骨材、加熱すりもみ、コンクリート、強度、耐久性

1. はじめに

都市部では最終処分場が逼迫している上、コンクリートがらの発生量の増大が今後も予想されることから、コンクリートがらの処分の問題がより深刻化している。また天然の骨材資源は枯渇し、良質な骨材の確保は年々困難となっている。このため、コンクリートがらから高品質な再生骨材を回収し、再度コンクリート構造体へ適用する技術の開発が一層求められている。

高品質な再生骨材の回収技術として、コンクリートがらを300℃程度に加熱後にすりもみ処理を行う加熱すりもみ法¹⁾が有望と考えられる。吸水率3%未満の高品質再生骨材が、再生細骨材においても歩留まりよく回収できるとされるためである。しかし、加熱すりもみ法で得た高品質再生骨材の構造体コンクリートへの適用性についてはまだ十分な検討はされていない。

本論文では、原コンクリートの岩種や強度、再生粗骨材の絶乾比重などを変えた再生コンクリートと、碎石コンクリートや砂利コンクリートとの比較実験を行い、高品質再生骨材の構造体コンクリートへの適用性を検討した結果につ

いて報告する。

2. 実験の概要

2.1 再生骨材

再生細・粗骨材は、粗骨材に粘板岩碎石、石灰岩碎石を、細骨材に海砂を使用した呼び強度24と48のコンクリートを用い、予察試験の結果²⁾をもとに絶乾密度2.5g/cm³あるいは2.6g/cm³を目標に製造した。再生骨材の製造プロセスは図-1に示すとおりである。得られた再生骨材の品質を原骨材の品質とともに表-1に示す。再生細・粗骨材の吸水率はいずれも3.0%未満であった。

2.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³, 比表面積3,380g/cm²)を使用した。

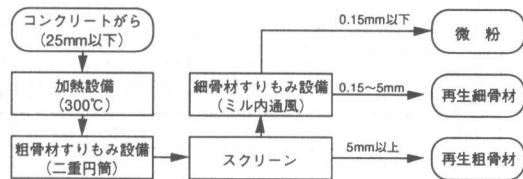


図-1 再生骨材の製造プロセス

- * 1 清水建設(株)技術研究所建築研究開発部施工技術グループ 工修(正会員)
- * 2 清水建設(株)技術研究所建築研究開発部施工技術グループ主任研究員 工修(正会員)
- * 3 清水建設(株)技術研究所建築研究開発部施工技術グループ部長 工修(正会員)
- * 4 三菱マテリアル(株)環境リサイクル事業センター事業化推進部課長代理(正会員)

骨材は前述の再生骨材とその原骨材の他に、比較用として、山砂利 YG (絶乾密度 2.55g/cm³, 吸水率 1.16%, 実積率 63.9%, FM6.93) および山砂 YS (絶乾密度 2.55g/cm³, 吸水率 1.00%, FM2.68) を使用した。また、混和剤は、普通強度用にリグニンスルホン酸系の AE 減水剤を、高強度用にポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

2. 3 調合

実験は普通強度を対象にした 9 調合と高強度を対象にした 9 調合の計 18 調合について検討を行うことにした。調合をフレッシュコンクリートの試験結果とともに表-2 に示す。

基本とした水セメント比 55.9% と 30.7% は、粘板岩碎石コンクリートを原コンクリートとする再生コンクリートの試し練りの結果より求めた呼び強度 24 (調合強度 30.9N/mm²) および呼び強度 48 (調合強度 66.8N/mm²) に対応する水セメント比である。なお、同一水セメント比での性状比較に加え、粘板岩碎石コンクリートに関しては圧縮強度を合わせる目的で、水セメン

ト比 62.7% および 41.5% の調合も練り混ぜた。

普通強度を対象としたコンクリートでは、スランプ 18.0cm, 空気量 4.5% を、高強度を対象としたコンクリートでは、スランプ 23.0cm, 空気量 3.0% を目標とし、調合条件を決めた。ただし、W/C = 41.5% の粘板岩碎石コンクリートの調合ではスランプ 21.0cm を目標とした。

2. 4 練混ぜ方法

練混ぜには容量 100l のパン型の強制練りミキサーを使用した。練混ぜ時間は普通強度の AE 減

表-1 原骨材および再生骨材の品質

記号	原材料	絶乾密度 (g/cm ³)		吸水率 (%)	実積率 (%)	F.M.
		目標	実測			
NG	粘板岩碎石	—	2.71	0.42	56.8	6.54
SG	石灰岩碎石	—	2.70	0.24	59.3	6.56
US	海砂	—	2.52	1.40	63.9	2.17
NL2.6G	NG, US を使用	2.6	2.61	1.62	61.3	6.57
NL2.5G	した呼び強度 24	2.5	2.49	2.86	63.1	6.60
NL2.5S	のコンクリート	2.5	2.48	2.73	69.3	2.86
NH2.6G	NG, US を使用	2.6	2.64	1.16	61.7	6.33
NH2.5G	した呼び強度 48	2.5	2.51	2.84	63.4	6.46
NH2.5S	のコンクリート	2.5	2.46	2.95	69.1	2.69
SL2.5G	SG, US を使用	2.5	2.46	2.82	65.0	6.44
SL2.5S	した呼び強度 24	2.5	2.46	2.77	67.9	2.37

表-2 調合およびフレッシュコンクリートの試験結果

記号	粗骨材の種類	細骨材の種類	粗骨材かさ容積	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (C×%)	高性能 AE 減水剤 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m ³)	温度 (°C)
					W	C	S	G						
NN1	NG	US	0.62	62.7	190	303	819	954	0.25	0	19.5	4.1	2.298	22.0
NN2	NG	US	0.65	55.9	185	331	758	1008	0.375	0	20.5	4.5	2.323	22.0
NL2.6N	NL2.6G	NL2.5S	0.62	55.9	176	315	762	1007	0.25	0	19.5	4.2	2.284	22.0
NL2.5N	NL2.5G	NL2.5S	0.62	55.9	176	315	734	1001	0.25	0	21.0	4.1	2.282	22.0
NH2.6N	NH2.6G	NH2.5S	0.62	55.9	176	315	754	1021	0.25	0	19.5	4.6	2.282	21.5
NH2.5N	NH2.5G	NH2.5S	0.62	55.9	176	315	754	986	0.25	0	20.0	4.3	2.268	21.0
SN	SG	US	0.62	55.9	185	331	760	997	0.375	0	22.0	4.8	2.289	21.5
SLN	SL2.5G	SL2.5S	0.62	55.9	176	315	698	1024	0.25	0	21.5	3.0	2.275	21.5
YN	YG	YS	0.62	55.9	172	308	748	1022	0.25	0	20.0	4.8	2.269	22.0
NH1	NG	US	0.60	41.5	165	398	865	931	0	2.0	22.0	2.5	2.400	22.5
NH2	NG	US	0.58	30.7	165	537	724	898	0	2.2	25.5	1.6	2.441	23.0
NL2.6H	NL2.6G	NL2.5S	0.58	30.7	165	537	714	942	0	1.6	23.5	2.2	2.399	23.5
NL2.5H	NL2.5G	NL2.5S	0.58	30.7	165	537	686	937	0	1.6	23.0	1.8	2.387	24.0
NH2.6H	NH2.6G	NH2.5S	0.58	30.7	165	537	704	955	0	1.6	23.0	2.4	2.395	23.5
NH2.5H	NH2.5G	NH2.5S	0.58	30.7	165	537	704	923	0	1.6	24.0	2.3	2.370	23.0
SH	SG	US	0.58	30.7	165	537	745	932	0	2.0	22.0	2.5	2.423	23.5
SLH	SL2.5G	SL2.5S	0.58	30.7	165	537	653	958	0	1.6	24.0	3.0	2.337	23.5
YH	YG	YS	0.58	30.7	165	537	681	957	0	1.4	22.5	2.2	2.386	23.0

水剤コンクリートで120秒、高強度の高性能AE減水剤コンクリートで180秒とした。

2. 5 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3に示す。再生コンクリートの骨材修正係数はいずれも0.1%程度であったので補正しなかった。また、クリープ試験はNN1, NL2.6N, NL2.5N, YNの4調合についてののみ実施した。

3. 実験結果および考察

3. 1 フレッシュコンクリート

表-2からわかるとおり、再生コンクリートでは、同一スランブを得るための単位水量や混和剤添加率が碎石コンクリートより大幅に減らせ、砂利コンクリートに近い調合となった。これは再生骨材の形状が、製造時のすりもみの際に丸くなったためと考えられる。

なお、普通強度を対象としたコンクリートで、NL2.5N, SN, SLNがスランブの目標範囲 $18 \pm 2.5\text{cm}$ を幾分上回ったが、状態に特に問題は認められなかったため、試験体は予定通り採取した。

3. 2 圧縮強度

図-2に普通強度を対象とした調合の圧縮強度試験結果を示す。再生コンクリートNL2.6N, NL2.5N, NH2.6N, NH2.5Nの圧縮強度は、同一水セメント比の粘板岩碎石コンクリートNN2より幾分小さくなった。しかし、山砂利コンクリートYNとの強度差はほとんど認められなかったことから、NN2との強度差は主に骨材形状の影響によるものと考えられる。また、SLNの圧縮強度はさらに小さかった。

図-3に高強度を対象とした調合の圧縮強度試験結果を示す。高強度域では、同一水セメント比の粘板岩碎石コンクリートNH2

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
単位容積質量	JIS A 1116
コンクリート温度	棒状温度計
圧縮強度	JIS A 1108
ヤング係数	JIS原案規準「コンクリートの静弾性係数試験方法(案)」
引張強度	JIS A 1113
長さ変化	JIS A 1129
促進中性化	日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート設計施工指針(案)・同解説」付1.
クリープ	JIS原案(載荷応力度比0.3とした)

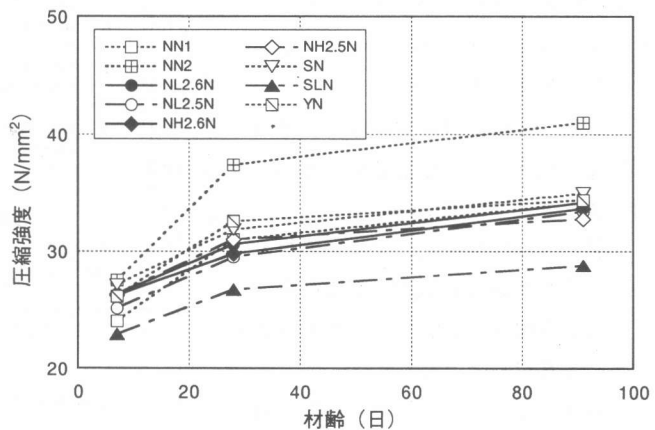


図-2 圧縮強度試験結果 (普通強度)

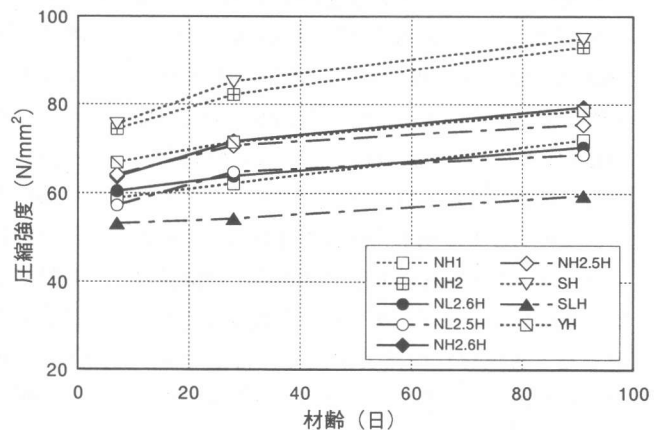


図-3 圧縮強度試験結果 (高強度)

との強度差が大きくなったばかりでなく、再生コンクリート間においても圧縮強度に差が認め

られるようになり、NL2.6H、NL2.5Hの圧縮強度が、NH2.6H、NH2.5Hの圧縮強度より低くなった。後者の場合、山砂利コンクリートYHとの強度差はほとんど認められないことから、原コンクリートの強度の違いが影響していると考えられる。つまり、NL2.6H、NL2.5Hの場合は、再生コンクリートの呼び強度が原コンクリートの呼び強度より高いケースであり、原コンクリートの強度が低いため強度が低下したと考えられる。NL2.6HとNL2.5Hの強度差が認められないことから、セメントペーストの付着量を少なくしてもその影響は残ると思われる。

また、SLHもSLNと同様に、他の調査と比べて低い強度であった。

3.3 ヤング係数

図-4に圧縮強度とヤング係数との関係をNew RC式およびRC規準式による曲線（いずれも比重を2.35として算定）とともに示す。

再生コンクリートのヤング係数は、原骨材を使用したコンクリートより幾分小さくなる傾向が認められた。また、再生粗骨材の絶乾比重が小さいNL2.5N、NH2.5N、NL2.5H、NH2.5Hの方が再生粗骨材の絶乾比重が大きいNL2.6N、NH2.6N、NL2.6H、NH2.6Hよりヤング係数は小さくなる傾向を示した。しかし、石灰岩碎石コンクリートを原コンクリートとしたSLN、SLHを除けば、再生コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係には原骨材を用いたコンクリートと大きな差はなかった。再生骨材の品質が高く、再生コンクリートの比重も一般のコンクリートと大差ないことによるものと考えられる。

なお、石灰岩碎石コンクリートから再生した再生骨材を用いたSLN、SLHはNew RC式およびRC規準式を大きく下回る結果を示したこと

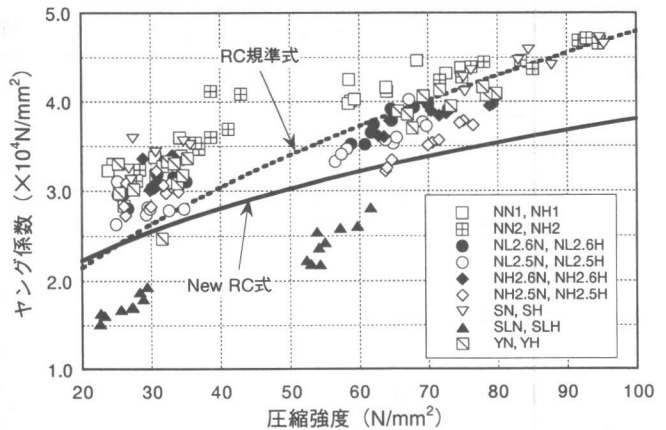


図-4 圧縮強度とヤング係数との関係

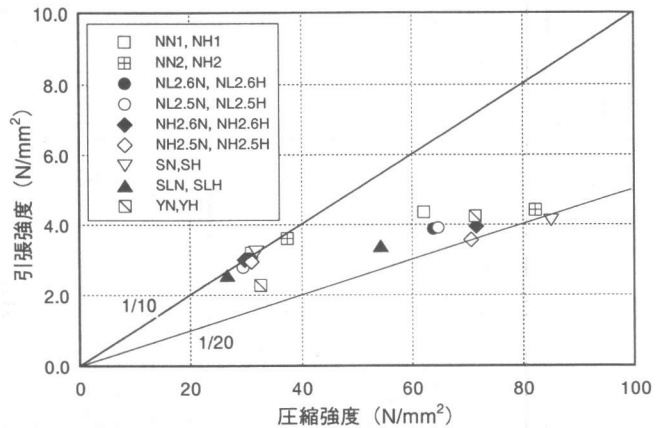


図-5 圧縮強度と引張強度との関係

から、一般の構造体への適用は難しいと考えられる。再生骨材製造時の加熱によって骨材自体が変質して、強度・ヤング係数が低下している可能性が考えられる。

3.4 引張強度

図-5に材齢28日における圧縮強度と引張強度との関係を示す。使用骨材の違いによる傾向は特に認められず、引張強度は普通強度域では圧縮強度の1/10程度であるが、高強度域になると、1/20に近づく結果となった。この結果は、既往の研究³⁾における一般のコンクリートの結果とも特に矛盾しないものと考えられる。

3.5 長さ変化率

図-6および図-7に、コンクリートの長さ変化率の試験結果を示す。石灰岩碎石コンク

リートから再生した再生骨材を用いたSLN, SLHを除けば, 今回試験した再生コンクリートの乾燥期間6ヶ月の長さ変化率は800 μ 以下であり, 特に問題のない結果と考えられる。これは再生細骨材, 再生粗骨材ともに品質が高く, セメントペーストの付着量が少なかったこと, および単位水量を原骨材を使用したコンクリートより減らせたことに起因すると考えられる。ただし, 再生骨材に付着するセメントペースト中には原骨材より多くの水分が含まれており, この水分も蒸発することから再生コンクリートの乾燥収縮はさらに進行すると思われる。なお, SLN, SLHで長さ変化率が大きいのは, 両者のヤング係数が小さいことも影響していると考えられる。

3.6 中性化

中性化の進行速度が次の \sqrt{t} 則によるとして, 13週までの促進中性化試験の結果から中性化速度係数Aを求めた。

$$x = A\sqrt{t} \quad (1)$$

ここで, x : 中性化深さ (mm)

A: 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{週}}$)

t: 中性化期間 (週)

材齢28日の圧縮強度と中性化速度係数との関係を図-8に示す。高強度を対象とした調査では13週までの段階では中性化の進行は認められなかったため, ここでは普通強度を対象とした9調査のみの結果を示す。

一般にコンクリートの中性化速度は水セメント比によって評価されている⁴⁾が, 今回のケースでは同一水セメント比でも中性化の進行速度に差が認められた。しかし, 図-8において骨材の種類に関わらず, 中性化速度係数と圧縮強度との間に比較的良い対

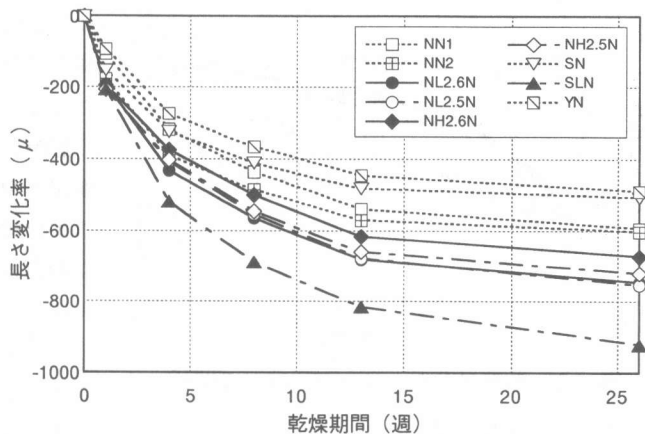


図-6 長さ変化率の試験結果 (普通強度)

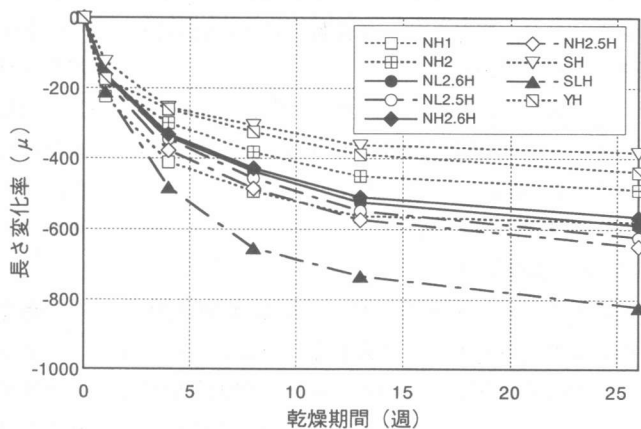


図-7 長さ変化率の試験結果 (高強度)

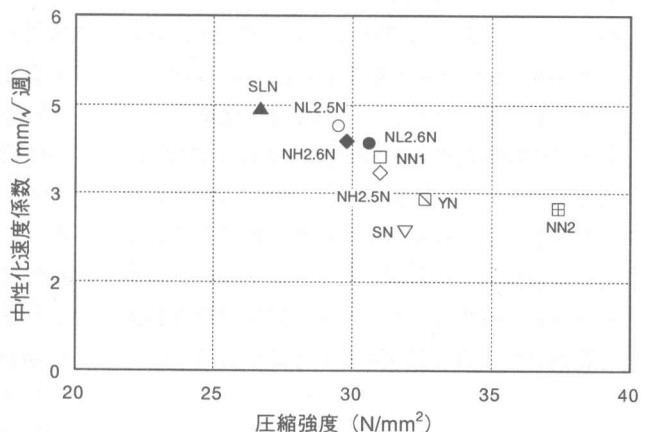


図-8 圧縮強度と中性化速度係数との関係

応が認められたことから, 圧縮強度を同等にすることで, 再生のコンクリートにおいても一般のコンクリートと同等の中性化に対する耐久性を確保できると考えられる。

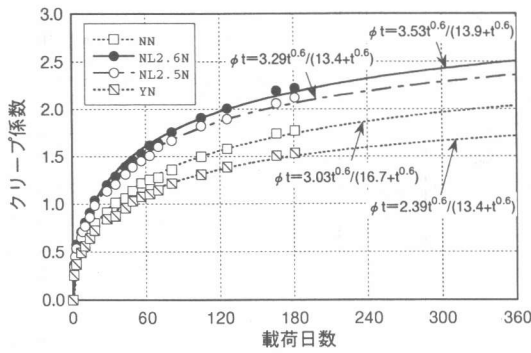


図-9 載荷日数とクリープ係数との関係

3.7 クリープ

図-9に載荷日数とクリープ係数との関係を示す。なお、終局クリープ係数を以下の式の回帰によって求めた⁵⁾。

$$\phi_t = \phi_u \times t^{0.6} / (C + t^{0.6}) \quad (2)$$

ここで、 ϕ_t : 載荷後t日におけるクリープ係数

ϕ_u : 終局クリープ係数

t: 載荷後の日数 (日)

C: 実験定数

再生コンクリートのクリープ係数はNL2.6Nの方がNL2.5Nよりやや大きく、セメントペーストの付着量が小さい方がクリープが大きい結果となった。終局クリープ係数の予測値はNL2.6Nで3.53、NL2.5Nで3.29、NN1で3.03、YNで2.39であり、NN1に対するNL2.5Nの割合は1.09、NL2.6Nの割合は1.17であった。プレストレストコンクリートの設計で使用するクリープ係数は載荷時材齢を28日とした場合、屋内で3.1⁶⁾という数値であり、NN1に対する割合や設計で取り扱う数値などから判断して、今回の数値程度であれば、再生コンクリートのクリープも一般のコンクリートと同等に取り扱える範囲にあるのではないかと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 粘板岩碎石および海砂を使用したコンクリートから再生した骨材を使用したケースでは、骨材形状が丸くなるため、調合が砂利コンク

リートに近くなり、単位水量や混和剤使用量を減らせたが、同一水セメント比の圧縮強度は小さくなった。また、付着するセメントペーストの影響によって、ヤング係数は低くなり、長さ変化率やクリープ係数は幾分大きくなったが、再生骨材の品質が高いため、碎石コンクリートや砂利コンクリートとの差は小さく、一般の構造体コンクリートへの適用については問題のないレベルであると考えられる。なお、再生コンクリートの中性化速度も圧縮強度によって評価できることがわかった。

(2) 石灰岩碎石および海砂を使用したコンクリートから再生した骨材を使用したケースでは、再生骨材製造時の加熱によって骨材自体が変質した可能性があり、再生コンクリートの品質が全体に低くなった。これが石灰岩碎石全般での傾向であるかどうかについては今後の検討が必要である。

<参考文献>

- 1) 古賀康男他：原子力発電所解体コンクリートからの骨材の分離技術，放射性廃棄物研究，Vol.3, No.2, pp.17-25, 1997.03
- 2) 立屋敷久志他：解体コンクリートからの高品質再生骨材の回収試験，コンクリート工学年次論文報告集，2000（投稿中）
- 3) 野口貴文・友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集No.472, pp.11-16, 1995.06
- 4) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，1963
- 5) D.E.Branson：Deformation of Concrete Structures, McGraw-Hill Inc., 1977
- 6) 土木学会：コンクリート構造物の限界状態設計法指針(案)，コンクリートライブラリー第52号，1983.11