

# 論文 減圧工法による再生骨材コンクリートの品質向上

今本 啓一<sup>\*1</sup>・大橋 潤一<sup>\*2</sup>・西尾 篤志<sup>\*3</sup>・田村 博<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究は、再生骨材とセメントペーストとの界面を強化することにより、再生骨材コンクリートの品質を向上させる工法を提案するものである。この工法「**減圧工法**」は、ミキシングが終了したフレッシュコンクリートを、容器内で所定圧力まで減圧した後に瞬時に大気圧に復圧し、セメントペーストを骨材に圧着させるものである。本工法を用い、再生骨材及び普通骨材コンクリートについて、強度性状、耐久性状に関する実験を行った結果、通常の製造方法と比較して圧縮強度を約20%増大させるとともに、中性化抵抗性及びクリープ等にも良好な影響を及ぼし、コンクリートの品質を向上させることを実験的に確認した。

**キーワード:** 減圧工法, 再生骨材, 骨材界面, 圧縮強度, 耐久性

## 1. はじめに

再生骨材をコンクリートに適用する上での問題点の一つは、骨材の吸水率が普通骨材と比較して大きく、品質が劣るため、それを用いたコンクリートの性能が低下することにある。再生骨材コンクリートの品質を向上させる手法として、再生骨材自体の品質を向上させる方法<sup>1)</sup>、高性能 AE 減水剤の使用によりマトリックスの性能を向上させる方法<sup>2)</sup>等が報告されている。これらに対し、本研究は、コンクリートの弱点の一つとされている骨材・ペースト界面の構造<sup>3)</sup>を強化することにより、コンクリートの性能を向上させる方法「**減圧工法**」を提案するものである。本稿はその効果を実験的に検証した結果を報告する。

## 2. 減圧工法

村田らは、高炉スラグ骨材コンクリートを減圧ミキサにより製造し、その効果を報告している<sup>4)</sup>。この工法は、コンクリートを練り混ぜる過程でミキサ内の圧力を減じ、所定の圧力になった時点で瞬時に復圧し、骨材とペーストを圧着させるものである。本研究で提案する減圧工法は、減圧・復圧するという点でこの工法と共通しているが、減

圧過程においてミキシングを行わない点で異なっている。減圧過程においてミキシングを省略可能とすることにより、本工法を実機へ適用することが比較的容易になると考えられる。本工法が、容器内のコンクリートに対して、ほぼ一様に作用することは実験により確認している<sup>7)</sup>。減圧工法において、コンクリートに付与する圧力履歴及び骨材・ペースト界面の変化を模式的に**図-1**に示す。なお、図中の減圧度 130mmHg は、既往の研究<sup>4)</sup>を参考に、実用的な範囲内の減圧時間(約1~2分)で且つ強度等物性改善効果が得られる目標値として設定した。

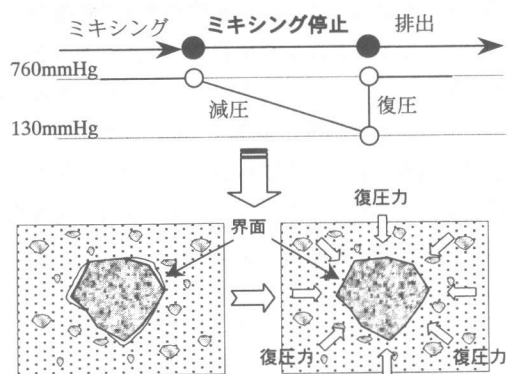


図-1 圧力履歴及び骨材・ペースト界面の変化

\*1 東急建設(株)技術研究所 建築研究室 工修 (正会員)  
 \*2 同上 土木研究室 (正会員)  
 \*3 (財)日本建築総合試験所 材料試験室  
 \*4 同上 室長 工博 (正会員)

### 3. 界面の構造

普通粗骨材を配置した容器に、水セメント比50%のペーストを静かに注いでそのまま硬化させた供試体及びペーストを注いだ後に130mmHgまで減圧し、瞬時に復圧して作製した供試体を、材齢14日で鉛直方向に切断して表面を研磨し、電子顕微鏡で観察した。これを図-2に示す。

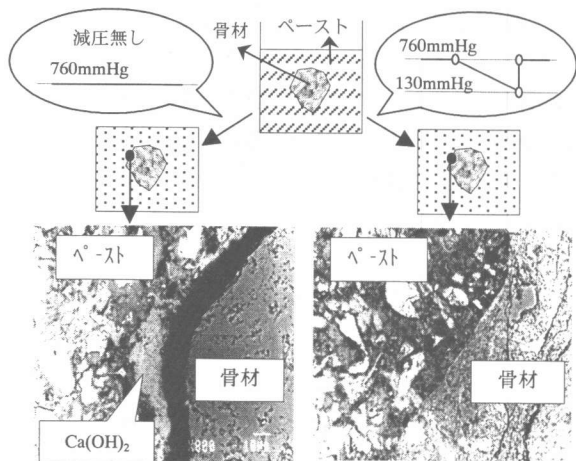


図-2 研磨面の背面反射電子像

図は骨材全周において観察される像の代表的な部分を示したものである。減圧していない供試体ではその界面が約10 $\mu$ m程度剥離しているのに対し、減圧した供試体の骨材・ペースト界面はほぼ完全に接着している。骨材・ペースト界面が剥離した原因として、ペーストの収縮、または供試体の切断・研磨による外力の影響が考えられるが、このような界面の脆弱な構造が、減圧することにより強化されていることを示していると考えられる。但し、本供試体の構成は一般のコンクリートとは異なるため、後述するコンクリートにおける性状変化のメカニズムについては、さらに定量的な検討が必要であると考えられる。

### 4. 再生粗骨材コンクリートへの適用性

#### 4.1 実験概要

##### (1) 使用材料

使用材料、調合条件を表-1, 2に示す。

再生粗骨材は、W/C60%、気中養生材齢28日強度32N/mm<sup>2</sup>の原コンクリートブロックを予め製

造し、これをパクラで30cm程度に破碎したものを破砕機に投入して製造した。

表-1 使用材料

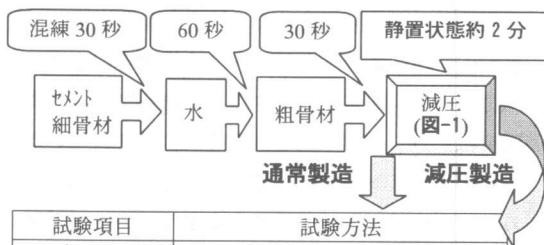
材料	物性
セメント	普通ポルトランドセメント 比重3.16
普通粗骨材	硬質砂岩碎石 比重2.64 吸水率0.64% 実積率59%
再生粗骨材	比重2.43 吸水率6.42% 実積率60% モルタル付着率40.8%
細骨材	川砂 比重2.60 吸水率1.98%
水	水道水
混和剤	リガコンスルフォン酸ポリアル複合体

表-2 調合条件

使用粗骨材	スランプ cm	空気量 %	W/C %	W kg/m <sup>3</sup>	s/a %
普通骨材	18	4.5	60	175	49.0
再生骨材	±2.5	±1.5			

#### (2) コンクリートの製造及び試験項目

コンクリートの製造手順及び試験項目・方法を図-3に示す。コンクリートの練混ぜ及び減圧は、容量0.1m<sup>3</sup>の強制二軸型ミキサを用い、1バッチの練混ぜ量を0.06m<sup>3</sup>とした。



試験項目	試験方法
スランプ、空気量	JIS A 1101, 1128
圧縮強度	JIS A 1108
割裂引張強度	JIS A 1113(供試体φ10×10)
ヤング係数	JIS 原案
収縮	試験体：φ10×20, 乾燥開始材齢：7日, 測定：埋込型歪み計
圧縮クリープ	試験体：φ10×20, 載荷材齢：7日, 載荷応力：7日強度の1/3, 測定：埋込型歪み計
凍結融解	JIS A 6204 付2(供試体：φ10×20)
中性化	文献(8) (供試体：φ10×20)
その他	アジテート及びバイプレータの影響

図-3 コンクリートの製造及び試験項目・方法

#### 4.2. 試験結果及び結果の検討

上記各試験項目に関して、減圧の有無による比較を行った結果を以下に記述する。

(1) フレッシュ性状

フレッシュコンクリート試験結果を表-3 に示す。表に示すように、普通骨材及び再生骨材コンクリートとも、減圧によりスランプ及び空気量が2.0cm 及び 1~2%程度それぞれ低下する。これは減圧による抜気効果等によるものと考えられる。

表-3 フレッシュコンクリート試験結果

使用粗骨材	製造方法	スランプ cm	空気量 %	C.T. ℃
普通骨材	通常	20.0	5.7	25.0
	減圧	18.0	3.7	25.0
再生骨材	通常	20.0	5.3	25.0
	減圧	18.0	4.3	25.0

(2) 圧縮強度、割裂引張強度及びヤング係数

(2)-1 圧縮強度及び割裂引張強度

標準水中養生したコンクリートの圧縮強度の発現を図-4 に示す。

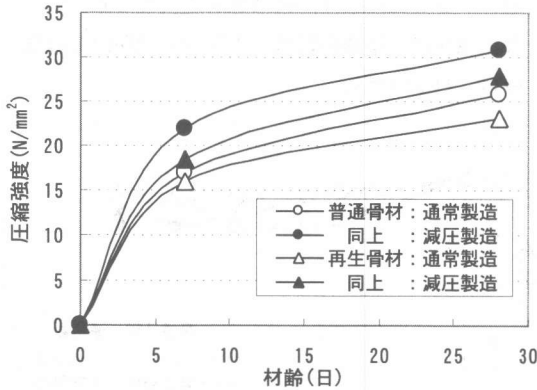


図-4 コンクリートの圧縮強度発現

図に示すように、通常製造において、再生骨材を用いたコンクリートの強度は、普通骨材（硬質砂岩砕石）を用いたコンクリートの強度を、材齢28日の時点で10%程度下回るが、減圧工法で製造することにより、普通骨材コンクリートを上回る強度に回復することが認められる。本実験においては、普通骨材及び再生骨材コンクリートとも、減圧により、圧縮強度がそれぞれ20%程度増大する結果となった。

なお、表-3 に示すように、減圧によりコンクリートの空気量が若干低下するため、マトリックス

ペーストの緻密化によってコンクリートの強度が増大することも考えられる。これについては既往の研究においてW/C50%のセメントペーストを用いた実験を行い、セメントペーストのみでは減圧による強度上昇はほとんど見られないことを確認している<sup>6)</sup>。このことから、減圧工法によるコンクリート強度増大は、主として骨材・ペースト界面構造の強化によるものと推察される。

表-4 に示すように、割裂引張強度は、普通骨材及び再生骨材コンクリートにおいて、減圧工法によりそれぞれ約10及び30%増大している。

表-4 割裂引張強度試験結果

使用粗骨材	製造方法	標準水中養生材齢14日 割裂引張強度 N/mm <sup>2</sup>
普通骨材	通常	2.40(100)*
	減圧	2.66(111)*
再生骨材	通常	1.78(100)*
	減圧	2.39(134)*

\*括弧内は、通常製造の強度を100とした場合の強度比

(2)-2 ヤング係数

再生骨材を用いた減圧製造コンクリートのヤング係数を、建築学会RC規準式によって評価した結果を図-5 に示す。図には、既往の試験結果<sup>6),7)</sup>も併せて示している。但し既往の試験結果は、減圧時にミキシングを行っているものである。図に示すように、減圧工法により製造したコンクリートのヤング係数は、建築学会RC規準式により概ね評価することができる。

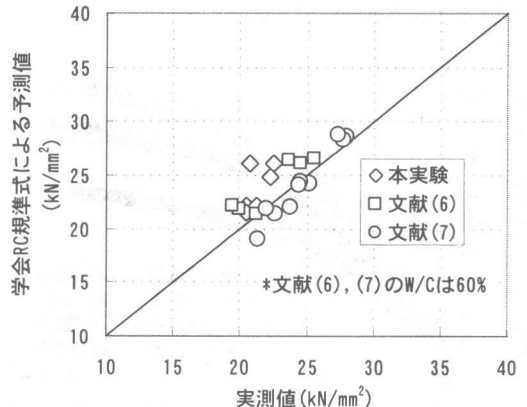


図-5 RC規準式によるヤング係数の評価

### (3) 収縮及び圧縮クリープ

#### (3)-1 収縮

コンクリートの収縮ひずみの変化を図-6に示す。なお、試験体は乾燥開始まで標準水中養生し、上下端面をアルミ箔テープによりシールした。収縮ひずみは20℃、60%R.H.の恒温室において測定した。図中の値は試験体2本の平均値である。図に示すように、材齢約100日の再生骨材コンクリートの収縮ひずみは普通骨材コンクリートよりも20%程度大きく、また減圧工法が収縮ひずみに及ぼす影響は、本実験の範囲内では認められない。

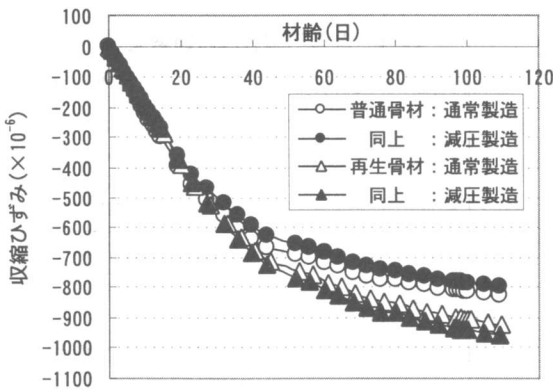


図-6 収縮ひずみの変化

#### (3)-2 圧縮クリープ

単位応力度あたりのクリープひずみの変化を図-7に示す。なお、試験体は荷重までは標準水中養生し、クリープひずみは収縮ひずみ試験体と同一の環境条件下において測定した。図に示す値は試験体2本の平均値である。

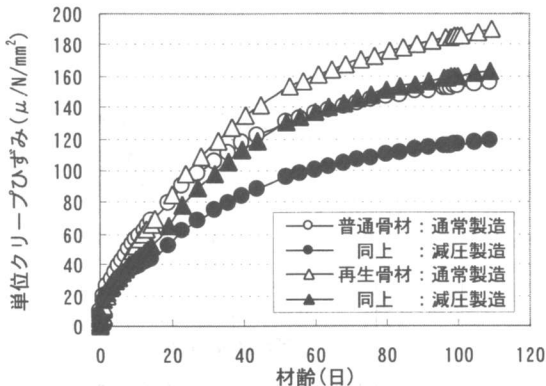


図-7 クリープひずみの変化

図に示すように、通常の製造方法において比較した場合、再生骨材コンクリートの単位クリープひずみは、材齢約100日の時点で、普通骨材コンクリートよりも20%程度大きい。しかしながら、再生骨材コンクリートを減圧工法によって製造することにより、単位クリープひずみは通常製造した普通骨材コンクリートとほぼ同程度となる。なお、普通骨材コンクリートを減圧工法で製造することにより、単位クリープひずみはさらに25%程度低減される。

### (4) 凍結融解抵抗性

凍結融解による耐久性指数の経時変化を図-8に示す。

図に示すように、通常製造した再生骨材及び普通骨材コンクリートとも、300サイクル終了時における耐久性指数が80以上であり、適量の空気を連行することにより、凍結融解抵抗性を確保できる。減圧による悪影響は、本実験の範囲内では見受けられなかった。

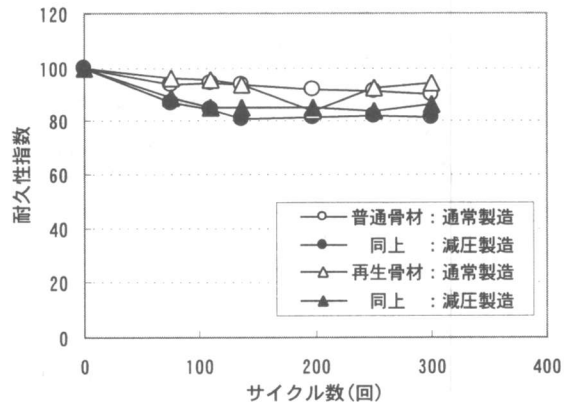


図-8 耐久性指数の変化

### (5) 中性化

材齢13週におけるコンクリート中性化深さの測定結果を表-5に示す。中性化深さは、φ10×20cm試験体を縦方向に割裂し、図-9中の点線位置における中性化深さ(22ヶ所)を平均して求めた。

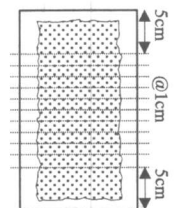


図-9 測定位置

表-5 中性化深さの測定結果

使用粗骨材	製造方法	材齢 13 週中性化深さ mm
普通骨材	通常	13.1(1.9)*
	減圧	10.0(1.3)*
再生骨材	通常	14.3(2.3)*
	減圧	9.4(1.9)*

\*括弧内は、測定値の標準偏差

表に示すように、通常製造におけるコンクリートの中性化深さは、再生骨材コンクリートが普通骨材コンクリートより若干大きい。しかしながら再生骨材コンクリートを減圧製造することにより、中性化抵抗性は約 30%改善される。普通骨材コンクリートも、減圧製造により、中性化抵抗性が約 20%改善される。本工法は、水セメント比を小さくしてコンクリートの組織を密実とした場合と同様の効果を有するものと考えられる。

(6) アジテート及びバイブレータの影響

アジテートやバイブレータによる振動が、減圧工法によって一旦は強化された骨材・ペースト界面に悪影響を与えることが考えられる。そこで、アジテート及びバイブレータの使用が、減圧製造コンクリートの強度に及ぼす影響を検証した。

(6)-1. 減圧工法に及ぼすアジテートの影響

減圧製造したコンクリート約 0.06 m<sup>3</sup> を傾胴型ミキサ(容量 0.1m<sup>3</sup>)において、2r.p.m.で 90~120 分間アジテートした。材齢 28 日圧縮強度の変化を表-6 に示す。図に示すように、コンクリートの圧縮強度はアジテートによって変化せず、減圧工法の効果が維持されることが確認された。

(6)-2. 減圧工法に及ぼすバイブレータの影響

減圧製造したコンクリートについて、突き棒により JIS A 1132 に準じて作製した試験体の強度と、型枠に詰めたコンクリートを約 5 秒間バイブレータによって締固めて作製した試験体の材齢 28 日強度結果を表-7 に示す。表に示すように、コンクリートの圧縮強度は、バイブレータによる振動を与えても、ほとんど変化しない。本実験の範囲内では、バイブレータの使用は減圧製造したコンクリートに悪影響を及ぼさないことが確認された。

表-6 アジテートによる圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)の変化

使用粗骨材	アジテート時間(分)				
	0	30	60	90	120
普通骨材	30.7 (100)	-	29.3 (95)	30.9 (101)	-
再生骨材	28.8 (100)	28.6 (99)	-	-	26.6 (92)

\*括弧内は、アジテート 0 分時の強度を 100 とした場合の比

表-7 振動締固めによる圧縮強度の変化

使用粗骨材	締固め方法	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>
普通骨材	突き棒	30.7(100)*
	バイブレータ	31.6(103)*
再生骨材	突き棒	27.9(100)*
	バイブレータ	29.9(107)*

\*括弧内は、突き棒で作製した試験体強度を 100 とした場合の比

5. 既存建造物より製造した再生細・粗骨材コンクリートへの適用性と収縮低減剤の効果

4. では、試験的に製造した再生粗骨材を対象とし、減圧工法の適用性を検討した。ここでは、約 10 年間供用した PC 枕木を破砕して製造した再生粗骨材及び市中再生骨材プラントで製造されている再生細骨材を対象とした場合の、減圧工法の適用性及び収縮低減剤の効果について検討した。

5.1 実験概要

(1) 使用材料及び調査条件

使用材料及び調査条件を表-8、9 に示す。

表-8 使用材料(その他の材料は表-1 参照)

材料	物性		
再生粗骨材	比重 2.42	吸水率 8.50%	粗粒率 6.60
再生細骨材	比重 2.43	吸水率 5.62%	
収縮低減剤	アルキレンオキシド付加物収縮低減剤		

表-9 調査条件

骨材の組合せ	W/C %	W Kg/m <sup>3</sup>	s/a %	収縮低減剤* kg/m <sup>3</sup>
普通細・粗骨材	55.0	175	44.0	0
再生細・粗骨材				0
再生細・粗骨材				6

\*収縮低減剤は内割で使用

5.2 製造方法

再生細・粗骨材コンクリートの練混ぜ・減圧は容量 0.1m<sup>3</sup> の傾胴型ミキサを用い、1 バッチの練混ぜ量を 0.06 m<sup>3</sup> とした。製造手順を図-10 に示す。

(普通細・粗骨材コンクリートは図-3 参照)



図-10 コンクリートの製造手順

### 5.3 試験結果及び結果の検討

#### (1) フレッシュ性状

フレッシュ性状を表-10に示す。

表-10 フレッシュコンクリート試験結果

骨材の組合せ	製造方法	スランブ cm	空気量 %	C.T.
普通細・粗骨材	通常	19.0	3.2	26.0
再生細・粗骨材	通常	18.0	8.4	25.0
	減圧	14.5	5.2	25.0
再生細・粗骨材 + 収縮低減剤	通常	9.0	3.4	24.0
	減圧	10.0	3.5	24.0

#### (1) 圧縮強度

圧縮強度の発現を図-11に示す。図に示すように、通常製造した再生細・粗骨材コンクリートの圧縮強度は、普通骨材コンクリートの強度を35%程度下回っているが、減圧工法によってほぼ同程度の強度に回復する。このように、本減圧工法は既存建造物より製造された再生細・粗骨材コンクリートにも十分適用可能であると考えられる。

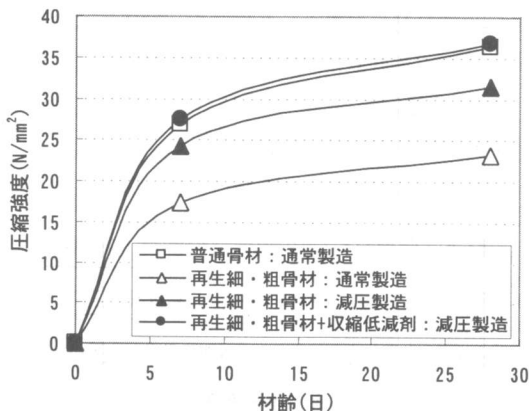


図-11 コンクリートの圧縮強度発現

#### (2) 収縮

収縮ひずみの変化を図-12に示す。試験環境及び測定方法は3.と同様であり、図中の値は試験体3本の平均値である。

図に示すように、収縮低減剤の使用により、材齢約75日の時点で、コンクリートの収縮ひずみは20%程度低減されている。減圧工法と収縮低減剤を適切に組み合わせることにより、普通骨材を用いたコンクリートと同程度の品質を有する再生骨材コンクリートの製造が可能になるものと考えられる。

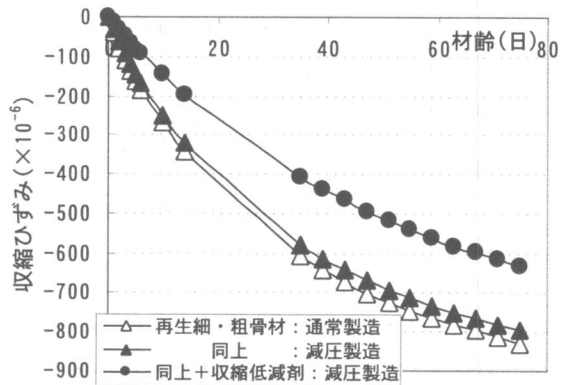


図-12 収縮ひずみの変化

### 6. まとめ

減圧工法の効果を表-11にまとめる。

表-11 減圧工法の効果

項目	効果
圧縮強度	20~35%程度増大
収縮	顕著な変化無し。
クリープ	20~25%程度低減
凍結融解	顕著な変化無し
中性化	30%程度低減
その他：アジテート、パイブレタの悪影響なし	

本研究で提案する減圧工法により、過大な富調合とすることなく、再生骨材コンクリートの品質を、普通骨材(硬質砂岩碎石)コンクリートとほぼ同程度にまで改善できることを示した。本工法により、再生骨材の利用範囲を拡大できるものと考えられる。収縮性状については、収縮低減剤を併用することにより、普通骨材コンクリートと同等もしくはそれ以上に低減することが可能になるものと思われる。

#### 参考文献

- 例えば、石倉 武他 6名, 高品質再生骨材製造技術に関する開発 [II] (その1~5), 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.697~706, (1998)
- 南波 篤志・阿部 道彦他: 再生コンクリートの品質改善に関する研究 コンクリート工学年次論文報告集 No.2, pp.65-70, 1995
- 内川 浩, セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, vol.33, No.9, pp.5~17, (1995)
- 村田 二郎ほか, 減圧ミキサーによって練り混ぜた高炉スラグ骨材コンクリートの諸性質に関する研究, コンクリート工学論文集, 第2巻第1号, pp.45~55, (1991)
- 今本 啓一, 他 3名, 減圧工法による再生骨材コンクリートの品質向上, セメント技術大会講演要旨, 第53回, (1999), 投稿予定
- 今本 啓一, 他 3名, 真空ミキシングによる再生粗骨材コンクリートの品質向上, セメント技術大会講演要旨, 第52回, pp.398~399, (1998)
- 西尾 篤志ほか, 再生粗骨材を用いた真空ミキシングコンクリート, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1047~1048, (1997)
- 日本建築学会, 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案) 同解説 付録1(1991)