

論文 原子力施設の廃止措置により発生する解体コンクリートの再利用法の確立

木村 博^{*1}・藤原 一成^{*2}・橋本 尚之^{*2}・坂詰 義幸^{*3}

要旨：原子力発電所の解体により大量のコンクリートが発生する。その多くは放射性廃棄物として扱う必要がない。本報は、原子力発電所起源の解体コンクリートから高品質の再生粗骨材を製造してこれを用いた再生コンクリートを製造し、フレッシュ性状、および材齢2年にわたる力学性状と耐久性能が普通コンクリートと同等であることを確認した。また、再生粗骨材の製造に伴い副産される低品位の細粒の再利用方法についてひとつの方策を示した。
キーワード：原子力発電所，廃止措置，解体コンクリート，再利用，スクリー磨砕，細粒

1. はじめに

日本原子力発電の東海発電所（昭和41年運転開始）は平成10年3月に運転を停止し、平成13年から廃止措置を行っている。これに伴い約16万トンの「放射性廃棄物として扱う必要のない」コンクリートが発生するが、廃棄物の抑制および資源の有効利用の観点から、これらのコンクリートを再利用するための研究を進めている。現在、スクリー磨砕法を用いた高品質再生粗骨材の製造技術を確立し、同時に副産される細粒を材料としたコンクリート2次製品の実用化に取り組んでおり、解体コンクリートの100%有効利用を目標にしている。原子力発電所のコンクリートは、一般の建築物と比べて大断面であり仕上げ材が少ないため、解体時に混入する不純物が少ないことを特徴とする。

図-1に本研究¹⁾²⁾の検討フローを示す。本論文は、そのうちの網掛け部分について報告する。

2. スクリー磨砕法とは

図-2にスクリー磨砕装置の概要、表-1にスクリー磨砕装置の諸元・仕様を示す。

スクリー磨砕法は、スクリー磨砕装置内に投入する40mm以下に破砕したコンクリート

同士を頻繁にすりもむことによって、表面部のモルタル分を剥離・磨砕し、骨材を破損させずに良質な再生骨材を製造する方法である。

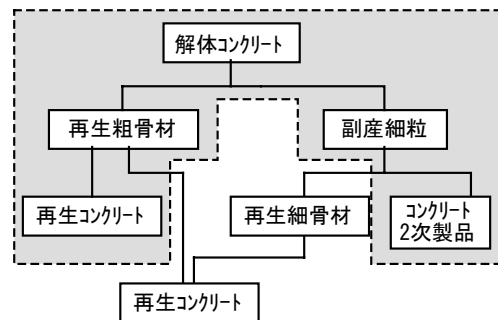


図-1 本研究のフローと本論文の範囲

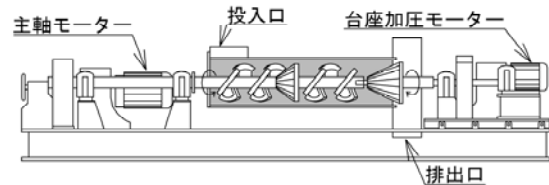


図-2 スクリー磨砕装置の概要

表-1 スクリー磨砕装置の諸元・仕様

項目	諸元・仕様
寸法	処理機本体：φ450mm×2,200mm
動力	スクリー部：75kW×4P×220V×50Hz コーン部：15kW×4P×220V×50Hz
回転数	100~130rpm（標準120rpm）
処理能力	30t/h（投入ペース）

*1 清水建設（株） エンジニアリング事業本部電力エネルギー本部 工修（正会員）

*2 日本原子力発電（株） 開発計画室 工修

*3 清水建設（株） エンジニアリング事業本部電力エネルギー本部課長 工修

スクリー磨砕法は、これまでの再生骨材の製造方法^{3)~5)}と異なり、処理回数を変えることによって、JIS規格を満足する高品質の再生骨材からコストや副産細粒の発生を抑えた低～中品質の再生骨材まで製造できる方法である。

3. 高品質再生粗骨材の評価

3.1 原コンクリートの品質

東海発電所タービン建屋から原コンクリートを採取した。表-2に原コンクリートの力学性状を示す。コンクリートの設計基準強度は 18N/mm^2 であり、原コンクリートは設計基準強度を満足していた。

原骨材の品質は、原コンクリートを5%の塩酸で溶解して原骨材を取り出し確認した。表-3に原骨材の品質を示す。粗骨材・細骨材ともに、絶乾密度・吸水率は現行のJISを満足した。

図-3に原粗骨材の粒度分布を示す。原粗骨材の粒度は、現行JISにおける最大寸法25mmの砂利の粒度分布からはずれた。

3.2 再生粗骨材の製造

あらかじめ40mm以下に破碎した原コンクリートをスクリー磨砕装置に投入し、磨砕処理した。排出された処理材は5mmのふるいでふるい、40~5mmの再生粗骨材と5mm以下のもの（以下、細粒と称する）に分級した。40~5mmの再生粗骨材は再び投入口に投入し、磨砕処理と分級を繰り返した。これを、3回まで繰り返し、1~3回までの各処理回数で再生粗骨材のサンプルを採取した。

図-3にスクリー磨砕3回処理された再生粗骨材の粒度分布を併記する。再生粗骨材の粒度は原粗骨材と同様であり、すりもみによって粒径が小さくなっていないことが確認された。

3.3 再生粗骨材の品質

1~3回処理を行った各処理回数の再生粗骨材について、図-4に処理回数と絶乾密度・吸水率、図-5に処理回数とモルタル付着率・再生粗骨材の回収率を示す。なお、モルタル付着率は原粗骨材の質量に対するモルタル質量比、回収率は、

表-2 原コンクリートの力学性状

圧縮強度			ヤング係数 (kN/mm^2)
平均 (N/mm^2)	標準偏差 (N/mm^2)	変動係数 (%)	
18.9	0.16	0.86	18.9

表-3 原骨材の品質

品質	骨材の種類	
	粗骨材	細骨材
絶乾密度(g/cm^3)	2.55	2.54
吸水率(%)	1.55	1.48

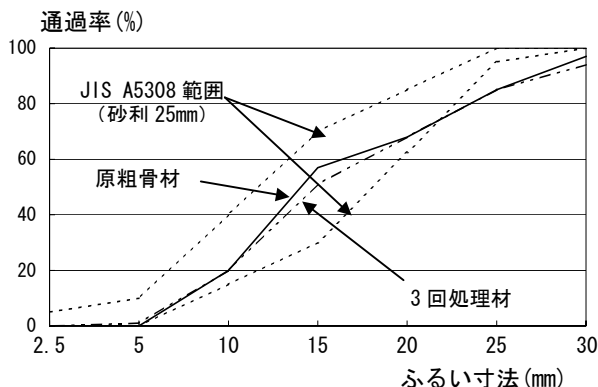


図-3 原粗骨材と3回処理材の粒度

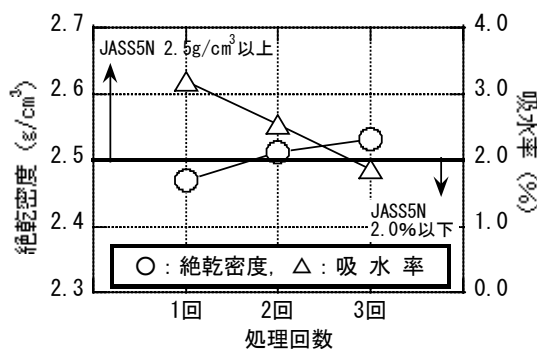


図-4 処理回数と絶乾密度・吸水率

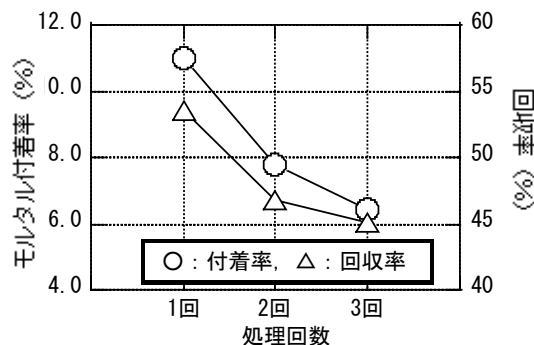


図-5 処理回数と付着率・回収率

原コンクリート質量に対する再生粗骨材の質量比を示す。

絶乾密度・吸水率は処理回数の増加に伴い品質が向上した。また、3回処理した再生粗骨材は

JIS・JASS5 だけでなく、JASS5N を満足した。

モルタル付着率は処理回数の増加に伴い減少した。これが再生粗骨材の品質向上に寄与していると考えられる。回収率は処理回数の増加に伴い減少した。JIS などの規定を満足する 3 回処理品での回収率は約 45%であった。

4. 再生粗骨材を用いたコンクリートの性能

4.1 実験概要

絶乾密度・吸水率が JIS などを満足したスクリー磨砕 3 回処理の再生粗骨材を、最大寸法 25mm の砂利の規格に粒度調整して再生コンクリートを製造し、各種性能を確認した。

4.2 使用材料および割合

表-4 に使用材料の一覧、表-5 にコンクリートの割合を示す。コンクリートは、スランプ 18 ±1.5cm, 空気量は 4.0+G±1.0%として再生コンクリートは骨材修正係数を考慮した。

再生コンクリートの割合は、あらかじめ室内実験で求めた粉体水比と圧縮強度の関係から所定の水粉体比(W/B)を設定した。また、再生コンクリートの性状を比較するため、同一水粉体比の普通コンクリートを製作した。コンクリートは再生・普通ともに実機プラントで練り混ぜた。

4.3 試験体

図-6 に試験体の形状を示す。試験体は、再生コンクリート・普通コンクリートともに、壁厚 1.5m のマスコンクリート試験体と壁厚 30cm の壁試験体を製作した。

4.4 温度履歴

コンクリート打設は平成 15 年 12 月 25 日に茨

城県ひたちなか市で実施した。図-7 に材齢 7 日までの試験体中心部の温度履歴を示す。マスコンクリート試験体・壁試験体ともに、再生コンクリートと普通コンクリートは同様の温度履歴

表-4 使用材料の一覧

使用材料	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm ³
フライアッシュ	碧南火力産 (JIS II 種) 密度 2.24g/cm ³
普通粗骨材	硬質砂岩砕石, 絶乾密度 2.71g/cm ³ , 吸水率 0.52%, 西茨城郡岩間町産
再生粗骨材	スクリー磨砕 3 回処理, 絶乾密度 2.52g/cm ³ , 吸水率 1.69%, 骨材修正係数 G=0.3%
細骨材	絶乾密度 2.53g/cm ³ , 吸水率 2.29% 陸砂, 茨城県那珂郡緒川村産
AE 減水剤	標準形 (I 種)
AE 助剤	フライアッシュ用 AE 剤 (I 種)

表-5 コンクリートの割合

粗骨材	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	F	G	S
再生	54	44.6	167	247	62	970	790
普通	54	48.3	176	261	65	938	834

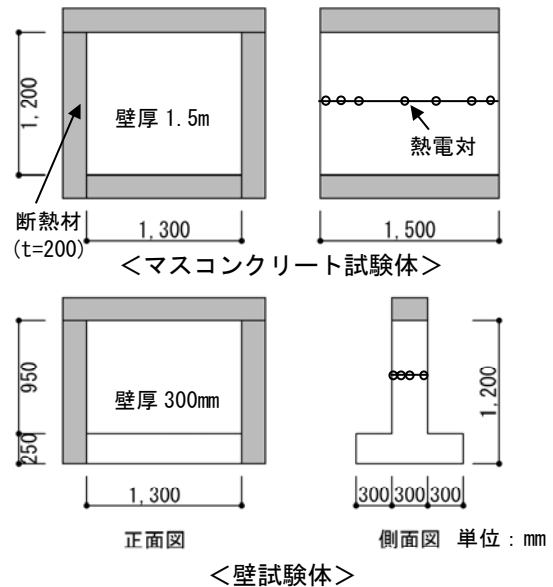


図-6 試験体の形状

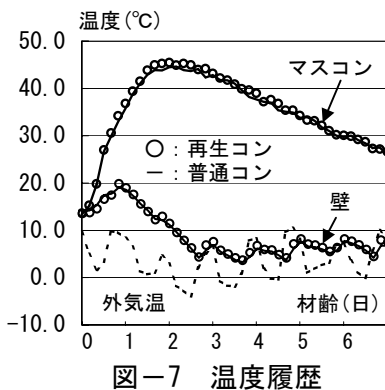


図-7 温度履歴

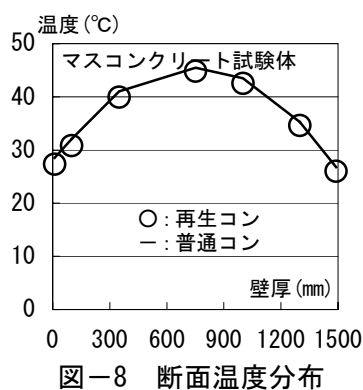


図-8 断面温度分布

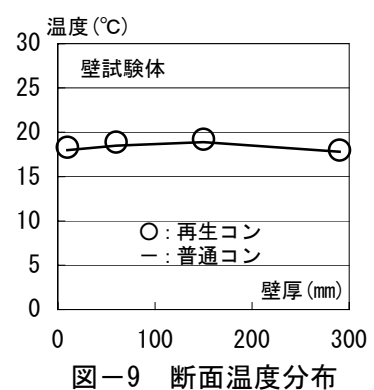


図-9 断面温度分布

を示した。また、マスコンクリート試験体は打設 2 日後に約 45℃、壁試験体は打設 1 日後に約 20℃の最高温度を示した。

図-8~9 に最高温度時の部材内部の温度分布を示す。マスコンクリート試験体・壁試験体とも、再生コンクリートは普通コンクリートと同様の温度分布を示している。このことから、再生コンクリートは普通コンクリートと同様の温度管理手法が適用できると考えられる。

4.5 力学性状

図-10 に再生コンクリートおよび普通コンクリートの材齢 2 年までの強度発現性状を示す。

再生コンクリートと普通コンクリートの材齢 28 日強度（標準養生供試体）は、それぞれ 35.2N/mm² と 31.5N/mm² であり、いずれも品質基準強度 $F_q=27\text{N/mm}^2$ を満足した。また、すべての材齢において、再生コンクリートの圧縮強度は普通コンクリートに対して同等以上であった。これは、再生コンクリートと普通コンクリートは同一の水粉体比としたが、砂利が起源の再生コンクリートは単位水量が削減できるなどコンクリートが密実になったものと推測された。

壁試験体はマスコンクリート試験体に比べて強度発現が遅延した。打設が冬期であり、低い外気温の影響を受けたためと考えられる。

図-11 にマスコンクリート試験体の断面方向における圧縮強度の分布を示す。再生コンクリート・普通コンクリートとも、全断面にわたり圧縮強度はほぼ同等であった。

(2)ヤング係数

図-12 に材齢 2 年までの再生コンクリートと

普通コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図には規準式⁶⁾による圧縮強度とヤング係数の関係を併記した。

再生コンクリートのヤング係数は、マスコンクリート試験体・壁試験体ともに、単位容積質量 $\gamma=2.3\text{t/m}^3$ とした規準式の中心付近に位置した。また、標準養生供試体のヤング係数は、単位容積質量 $\gamma=2.3\text{t/m}^3$ とした規準式よりも上方に位置した。普通コンクリートのヤング係数についても再生コンクリートと似た性状を示した。

4.6 耐久性

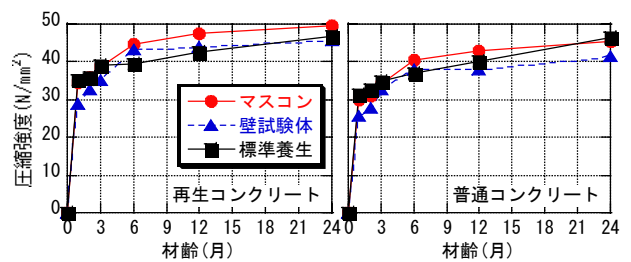


図-10 材齢 2 年までの強度発現性状

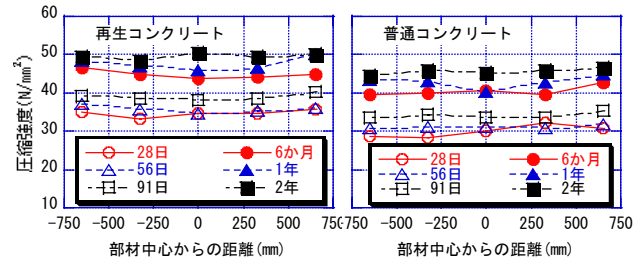


図-11 マスコンクリートの圧縮強度分布

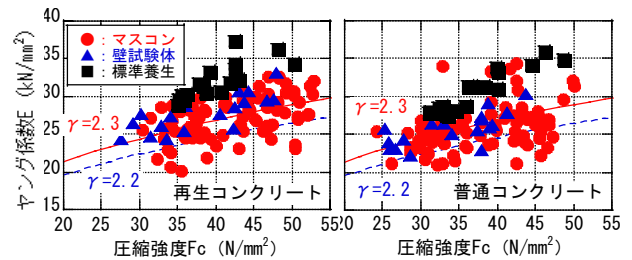


図-12 圧縮強度とヤング係数の関係

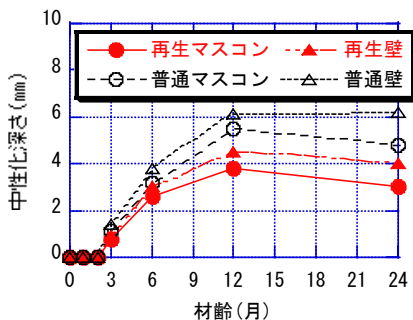


図-13 中性化深さの経時変化

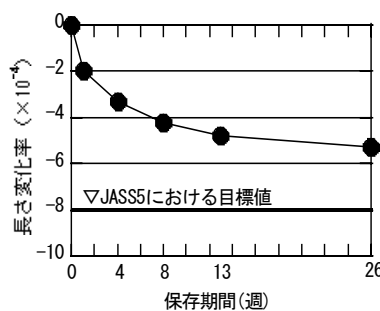


図-14 長さ変化率

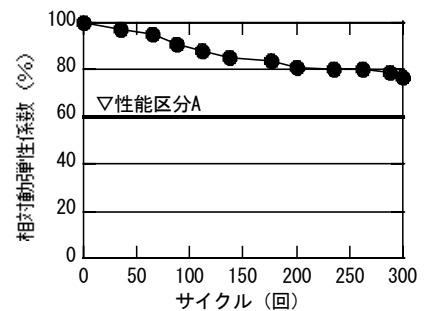


図-15 凍結融解抵抗性

(1) 中性化深さ

図-13 に中性化深さの経時変化を示す。

再生コンクリート・普通コンクリートともに、材齢 2 か月までは中性化は認められなかった。しかし、材齢 3 か月以降、少しずつ中性化が進行した。材齢 2 年の中性化深さは、再生コンクリートで 3.0~4.0mm、普通コンクリートで 4.8~6.2mm であった。このことから、再生コンクリートの中性化抵抗性は、普通コンクリートと同等以上であることを確認した。

東海発電所の粗骨材は粒形のよい砂利である。スクリー磨砕法により原粗骨材と同程度の品質になった再生粗骨材を用いることにより、普通コンクリートよりも単位水量が少なく、乾燥収縮の小さい緻密なコンクリートとなったことが、再生コンクリートの中性化が進行しなかった要因と推察される。

(2) 長さ変化

図-14 に再生コンクリートの長さ変化試験の結果を示す。保存期間 26 週における長さ変化率は 5.38×10^{-4} となった。この値は JASS5 に示された乾燥収縮に関する長さ変化率の目標値である 8×10^{-4} 以下を十分満足した。

(3) 凍結融解抵抗性

図-15 に再生コンクリートの凍結融解抵抗性を示す。300 サイクルにおける相対動弾性係数残存率は 76%を示した。この値は JASS5 における「性能区分 A」に示される品質を満足した。

5. 副産細粒の再利用

5.1 再利用の概要

スクリー磨砕法では、再生粗骨材の製造にともない 5 mm以下の細粒が副産される。スクリー磨砕処理を 3 回まで行った時に発生する副産細粒は、原コンクリートの質量に対して約 6 割になる。細粒は表-6 に示すように、絶乾密度などがコンクリート用骨材の基準を満足しない。しかし、廃棄物の発生抑制および資源の有効利用の観点から、細粒を有効に再利用する必要がある。そこで、細粒をコンクリート 2 次製品の

表-6 コンクリート 2 次製品の使用材料

	使用材料	記号	仕様など
セメント	エコセメント	EC	密度 3.17g/cm ³
	白色ポルトランドセメント	WC	密度 3.05 g/cm ³
骨材	細粒	Sr	絶乾密度 2.15 g/cm ³ スクリー磨砕 1~3 回処理
	砕石	G	絶乾密度 2.64 g/cm ³ 粒径 10mm, 秩父郡産
	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	練混ぜ水	W	上水道水

表-7 IL ブロックの調合 (基層部)

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
	W	C (EC)	Sr	G
26.7	160	600	700	869

表-8 その他の 2 次製品の調合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				SP
	W	C		Sr	
		EC	WC		
42.0	189	225	225	1611	C×1.0%

材料に適用して試作を行い、製品の製作性と施工性を確認した。

5.2 製作概要

(1) 製作したコンクリート 2 次製品

細粒を材料として、インターロッキングブロック (以下、IL ブロックと略記)、ベンチシート、植栽用プランター、ごみ箱 (以下、その他の 2 次製品) を製作した。

(2) 製作方法

IL ブロックは即時脱型法、その他の 2 次製品は流し込み法とし、各製品工場で作成した。

(3) 使用材料および調合

表-6 にコンクリート 2 次製品に使用した材料、表-7 に IL ブロックの調合 (基層部)、表-8 にその他の 2 次製品の調合を示す。

5.3 試験結果

(1) IL ブロック

写真-1 に製作した IL ブロックの外観を示す。IL ブロックに、欠け・ひび割れや寸法のくるいなどの不具合は認められなかった。

表-9 に IL ブロックの曲げ強度を示す。曲げ強度は規格値 5.0N/mm² 以上を満足した。

表-10 に IL ブロックのすべり抵抗性を示す。

20℃に補正したすべり抵抗値は規格値 60BPN 以上を満足した。施工性は、目地砂の充填性，舗装面の平坦度，目地の通りや切断加工性など従来の IL ブロックと遜色はなかった。

(2) その他の 2 次製品

写真-2 にその他の 2 次製品の外観を示す。その他の 2 次製品に不具合は認められなかった。

出荷時（材齢 14 日）の圧縮強度は 24.7N/mm² であり，品質管理強度 18N/mm² 以上を満足した。

施工性に関する不具合は認められなかった。

写真-3 にコンクリート 2 次製品の施工時および施工後の状況を示す。

これらのコンクリート 2 次製品は現在も暴露試験を行い，耐久性の確認を行っている。

6. まとめ

解体コンクリートをスクリー磨砕装置で処理することにより，原骨材と同等の品質の再生粗骨材を製造できた。また，この再生粗骨材を用いた再生コンクリートの諸性能は，普通コンクリートと同等の性能であることを確認した。さらに，再生粗骨材の製造時に副産される細粒の有効利用法に関するひとつの方策を提案した。

参考文献

- 1) 橋本尚之ほか：原子力施設の廃止措置により発生する解体コンクリートの再利用法の確立(その 1)(その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工)，pp.347-350，2004.8
- 2) 藤原一成ほか：原子力施設の廃止措置により発生する解体コンクリートの再利用法の確立(その 3)(その 4)，日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工)，pp.179-182，2005.9
- 3) 柳橋邦生ほか：高品質再生粗骨材の研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp.205-210，1999.6
- 4) 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技術の開発，コンクリート工学年次論文報告集，

表-9 IL ブロックの曲げ強度

平均曲げ強度 (N/mm ²)		規格値 (N/mm ²)
材齢7日	材齢28日	
6.52	6.96	5.0 以上

表-10 IL ブロックのすべり抵抗性

すべり抵抗値 (BPN)		C20補正値の規格値 (BPN)
試験値 (12.5℃)	20℃補正値C20	
77	72	60 以上



写真-1 製作した IL ブロックの外観



【ベンチシート】

【植栽用プランター】

写真-2 その他の二次製品の状況



【施工時】

【施工後】

写真-3 2 次製品の施工時及び施工後の状況

Vol.22, No.2, pp.1093-1098, 2000.6

- 5) 黒田泰弘ほか：高品質再生骨材を使用したコンクリートの基本性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.1105-1110，2000.6
- 6) (社)日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，(社)日本建築学会，p.170，2003