

# 論文 骨材回収型コンクリート構造部材の曲げ耐力に関する研究

辻 埜 真人<sup>\*1</sup>・野口 貴文<sup>\*2</sup>・丸山 一平<sup>\*3</sup>・兼松 学<sup>\*4</sup>

**要旨:** リサイクルの必要性が叫ばれる中, 本研究では廃コンクリート塊を必要最小限の環境負荷で構造用コンクリート骨材としてリサイクルする技術の確立を目的としている。本論文では, 骨材回収に有効と実証された油脂系表面改質処理を施した骨材を用いたコンクリートの材料特性を把握し, RC 梁の曲げ特性を把握することで実構造物への適用が可能であるかを検討した。その結果, 材料特性は, 既存の回帰式を適用することが可能であり, 曲げ特性に関しては, 普通砕石コンクリートと比べ耐力はほぼ同等で, 曲げひび割れ抵抗性についても十分実用に耐えうる範囲であり, 実構造物への適用の可能性を見出せた。

**キーワード:** 循環型生産システム, 骨材回収, 表面改質処理, 再生粗骨材, RC 梁曲げ特性

## 1. はじめに

環境に対する意識が一層高まり, リサイクルが大きく叫ばれる中, 高品質再生骨材が普及に向け JIS 化されるなど, コンクリートを取り巻くリサイクルシステムは大きく前進しつつあるが, 循環型社会を形成する上で, 現在の加熱すりもみ式再生処理などの高度処理技術を要する逆工程には, エネルギーやコストの削減, 微粉末の処理など<sup>1),2)</sup>依然として課題も多く, この逆工程の省力化がクローズドループを容易に達成するための必須項目であるといえる。本研究では, この点に着目し, コンクリートのリサイクルを容易にする技術の確立を目的としている。

本研究の骨材回収型リサイクルコンクリート<sup>3)</sup>に導入する技術は, 骨材に表面改質処理剤を塗

布するという簡便な作業を骨材製造工程に加え, 力学的性質を損なうことなく, 骨材の剥離効果を高めることで骨材回収率を上昇させ, また高吸水率を示す再生骨材においては, 吸水率を低減することによる性能改善をも可能にするものである。

本論文では, 普通骨材および再生骨材(中品質・低品質)において表面改質処理技術を導入し, RC 梁曲げ試験により, 構造用コンクリート骨材として利用可能であるかを検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験水準および使用材料

#### (1) 実験水準

本研究の実験水準は, 表-1 に示す通りの計

表-1 実験水準

粗骨材種類	表面処理方法	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (g/m <sup>3</sup> )
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
普通	無処理(N) & 油脂(O)	60	175	292	891	925	250ml/C=100kg(AE減水剤)
		40	165	413	790	1004	C×0.7%(高性能AE減水剤)
		60	165	275	870	982	250ml/C=100kg(AE減水剤)
		40	155	388	772	1067	C×0.7%(高性能AE減水剤)
再生	中品質(M) & 低品質(L)	60	175	292	844	906	250ml/C=100kg(AE減水剤)
		40	165	413	743	981	C×0.7%(高性能AE減水剤)
		60	185	308	826	883	250ml/C=100kg(AE減水剤)
		40	175	438	725	950	C×0.7%(高性能AE減水剤)

\*1 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 工修 (正会員)

\*2 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 助教授 博(工) (正会員)

\*3 名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻 助教授 博(工) (正会員)

\*4 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 助手 博(工) (正会員)

16 水準とした。以降凡例としては、表中カッコ内の記号を用い、次のように表す。

砕石・(無処理・)水セメント比 60% ⇒ C-(N)-60

## (2) 骨材

普通骨材コンクリートには、砕石（青梅産）および川砂利（富士川産）を使用した。また、再生骨材コンクリートには、中品質および低品質を用いた。品質に関しては、以下の通りである。中品質とは、ジョークラッシュおよび、コーンクラッシュで破砕処理後、スクリー摩砕にかけ、その後粒度調整を行い JIS の標準粒度分布範囲に収めた骨材である。それに対し低品質とは、破砕のみでスクリー摩砕および粒度調整を行っていない再生粗骨材である。使用粗骨材の主な性質を表-2 に示す。細骨材には、大井川水系陸砂（表乾密度:2.59g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:0.59%, 粗粒率:2.66）を使用した。なお表面改質処理骨材は、原骨材を一定期間気中乾燥後に溶液を塗布し、十分に乾燥させ、打設時にはそのまま表乾とせず利用した。

## (3) 表面改質処理剤

使用した表面改質処理剤は、合板・木製型枠用の水溶性剥離剤を原料とする鉱物油・油脂などを主成分とした水溶性エマルジョン溶液であり、剥離効果などに一定の評価を得ているものである<sup>4)</sup>。塗布方法は、濃度を一定とした溶液の散水・乾燥を繰り返すことにより実施し、塗布回数は、安定した塗膜が確保されるように4回とした<sup>4),5)</sup>。

なお油脂を施した再生粗骨材の吸水率は、塗布処理により、中品質は4.80%から3.78%に、低品質は5.48%から3.53%となり、低減効果が確認された。

## 2.2 RC 梁曲げ試験体および載荷概要

試験体概要および載荷概要を図-1 に示す。試験体は、曲げ降伏がせん断ひび割れ発生に先行して起きるように引張鉄筋比を0.950%、せん断補強筋比を0.317%とし、主筋は3-D13を、補強筋にはD-6を100mm間隔でそれぞれ配筋した。それぞれの特性を表-3 に示す。

載荷はひび割れ発生時（荷重-たわみ曲線において剛性が低下した時）までは連続加力とし、それ以後は、降伏荷重まで10kNごとにひび割れ性状の確認のため載荷を段階的に行った。また、ひび割れ幅の計測には、パイ型変位形を用い、等曲げ区間に100mmの間隔で配置した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 材料試験

#### (1) コンクリート

載荷材齢時の圧縮強度試験、静弾性係数試験および割裂引張強度試験を JIS A 1108, JIS A 1149 および JIS A 1113 に準じて行った。結果を図-2 に、また圧縮強度と割裂引張強度試験の関係を図-3 に示す。

表面改質処理を施したことによる一番の懸念事項は、剥離作用による著しい強度低下や強度のバラつきである。また設計において現在利用されている圧縮強度による各種物性推定式などが利用できないことは、表面改質処理骨材の普及への大きな障害になるため普通骨材と同等の強度特性を有しているか比較検討した。

表-2 使用骨材の性質

粗骨材種類	吸水率 (%)	ペースト混入率 (%)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	実積率 (%)
砕石(C)	0.60	-	2.64	61.1
川砂利(R)	0.69	-	2.62	65.2
中品質(M)	4.80	13.6	2.36	64.1
低品質(L)	5.48	36.4	2.33	60.5

表-3 鉄筋の力学特性

鉄筋種類	使用部	ヤング係数 (×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪度 (×10 <sup>-6</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D13(SD345)	曲げ主筋	1.83	354	2204	537
D6(SD345)	せん断補強筋	1.66	377	4283	555

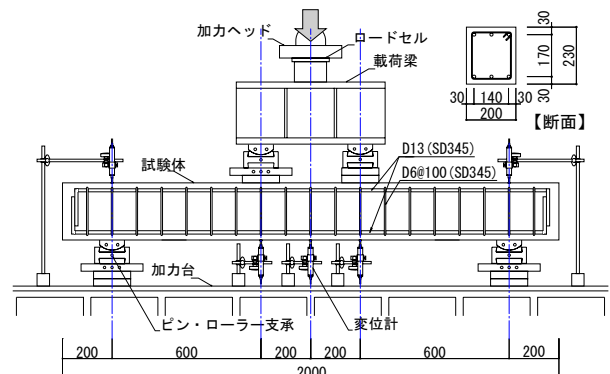


図-1 試験体概要および載荷概要図

図-2に示した結果より、W/C=60%において油脂系を施したものについては、表乾としなかったことに起因すると考えられる圧縮強度の増加が見られており、表面改質処理の問題はなく、十分な圧縮強度を得ることが可能であると判断できる。また静弾性係数についても同等の結果が得られ、表面改質処理骨材を用いた場合においても、材料段階で、既存の手法と同様の構造設計が可能であると言える。次に、W/C=40%においては、川砂利、つまり実積率の高い骨材を用いた場合には、圧縮強度が低下する傾向が見られたが、60N/mm<sup>2</sup>程度の強度を確保できることから大きな問題にはならないと考えられる。再生骨材においても普通砕石と同様の傾向を示しており、表面改質処理再生骨材も既存の推定式等を利用することが可能であり、構造材料としての適応性を見出せたといえる。

また、本実験で行った試験体数は各水準3体であるが、R-O-40のみ、平均値より5%程度圧縮強度が低下した試験体があったが、それ以外の水準に関しては、強度のバラツキは全て3%以内にとまっており、品質管理上の問題はないと言える。

一方、表面改質処理を施したコンクリートの割裂引張強度は、圧縮強度の値に関わらず、剥離作用により著しく低下することが懸念され、検討を行う必要がある。図-3に示すように、圧縮強度に比べ、割裂引張強度が著しく低下を招いた試験体は見られず、既往の回帰式<sup>6)</sup>ともよく整合しており、表面改質処理骨材も既存の汎用式を用いることが可能であると言える。

## (2) 剥離効果 (骨材回収性能)

剥離効果と表面改質処理による骨材回収性能を確認するため、割裂引張試験後の試験体を用いて、田村らの手法<sup>5),7)</sup>に基づく骨材面積比率算出による画像解析を行った。破断面の骨材のうち骨材が割れた面(再生骨材においては旧モルタルが割れた面を含む)とコーティング面で剥がれたものの比率を求めることで剥離効果を確認した。再生骨材コンクリートには、酸化鉄を

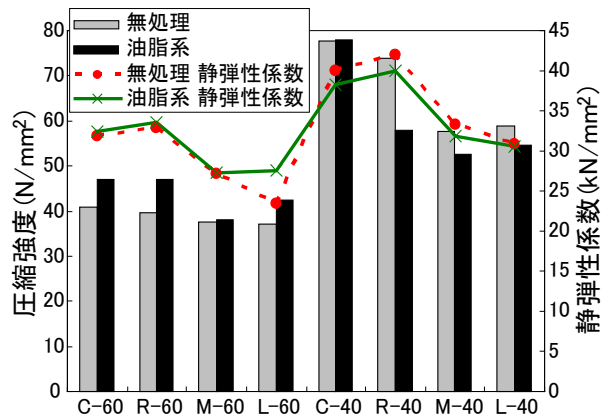


図-2 圧縮強度および静弾性係数

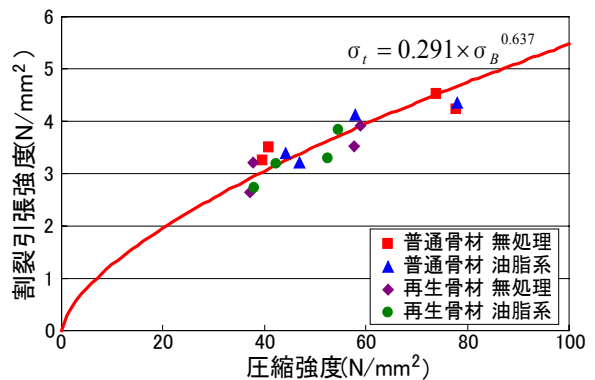


図-3 圧縮強度と割裂引張強度

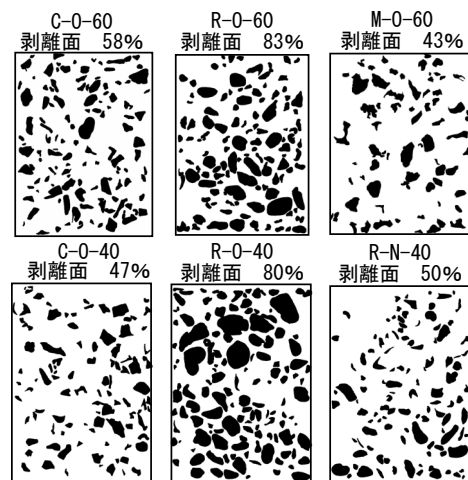


図-4 剥離性に関する画像解析結果

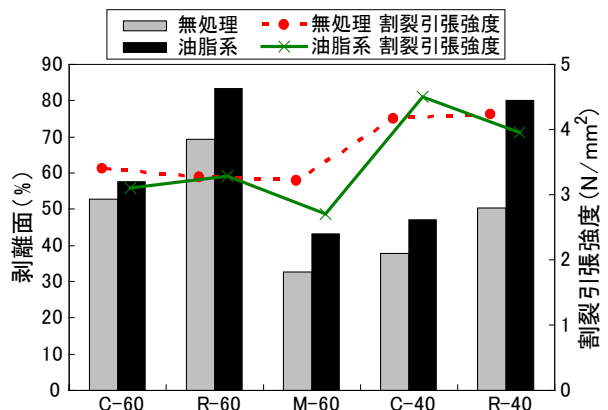


図-5 剥離率と割裂引張強度の関係

主成分とする赤色顔料をセメント質量に対し3%コンクリートに混ぜて試験体を作成した。画像解析結果の一例を図-4に、剥離率の結果を図-5に示す。なお実験水準は、図-5に示したもののみである。

実積率が低く、形状が角張っている砕石を用いた場合には、剥離効果は小さく、粒形が良く表面が滑らかな川砂利では、非常に高い剥離効果をもたらすことが伺える。これは、界面部に応力が生じた際、川砂利ではひび割れの進展が妨げられないためであると考えられる。このような状態では、割裂引張強度の大幅な低下が懸念されるが、前項で示したように実積率の大きな骨材においても強度確保が可能であり、実用上は問題にならない程度であった。一方、中品質骨材においては、旧モルタルの低強度部が弱点となるため剥離効果はそれほど高くはないものの、剥離面積率が10%以上高くなる結果が得られ、表面改質処理剤の適用が有効であることが示された。

今回の実験結果では、同一骨材間においても剥離面積率と割裂引張強度との相関関係は明確には見られなかったが、剥離作用が強度に与える影響は大いにあると考えられ、粒形の影響も考慮して剥離メカニズムを明確にすることが今後の検討課題である。また、本実験における塗布量より、さらに塗布回数を増やすことで、より高い剥離効果が得られるか現在検討中である。

### 3.2 RC 梁曲げ試験

#### (1) ひび割れ発生曲げモーメント

ひび割れ発生曲げモーメントの実験値および平面保持を仮定し、コンクリートの載荷材齢における強度を代入して求めた計算値を図-6に

示す。

図-6に示すように、表面改質処理を施したW/C=40%の普通骨材においては、剥離作用に起因すると考えられるひび割れ発生曲げモーメントの低下がみられるが、その他の水準においては表面改質処理による低下は見られない。また、計算値と表面改質処理骨材を用いたRC梁の実験値がほぼ同等であることから、ひび割れ発生曲げモーメントの予測は既往の設計式を用いることが可能であると言える。

#### (2) ひび割れ性状

長期許容応力度に対する曲げひび割れ抵抗性を検討するため、降伏耐力（荷重が一時的に減少する直前の耐力）の60%に当たる耐力において最大ひび割れ幅および最大ひび割れ間隔を測定した。それぞれの結果を図-7および図-8に、またそのときのたわみ量を図-9に示す。

最大ひび割れ幅は、界面剥離効果の影響を受け表面改質処理を施した普通骨材においてやや大きい。しかし、最大ひび割れ間隔に関しては、普通骨材においては界面剥離効果の明確な影響は確認できず、再生骨材においては表面改質処

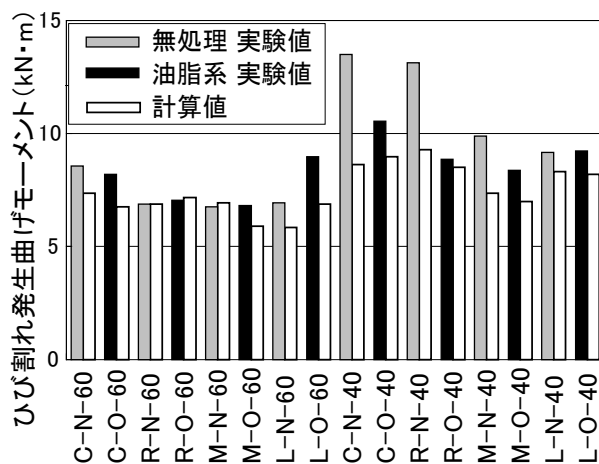


図-6 ひび割れ発生曲げモーメント

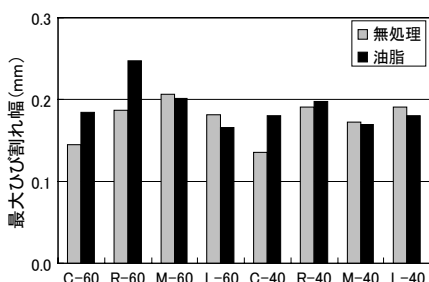


図-7 最大ひび割れ幅

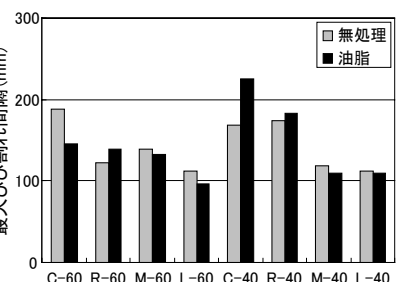


図-8 最大ひび割れ間隔

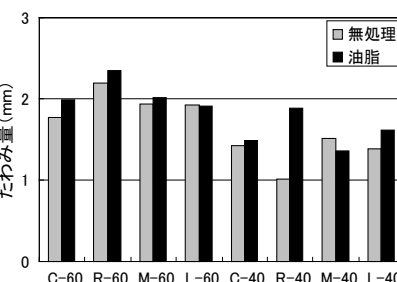


図-9 たわみ量

理を施した場合に若干ひび割れ間隔が小さくなることが確認できた。このように、ひび割れ密度の観点から見ると、表面改質処理は耐久性上の問題を生じさせる可能性があるが、日本建築学会・ひび割れ対策指針<sup>8)</sup>に示されている最大ひび割れ制御目標値 0.3mm 以下を全ての水準で大きく下回っており、本研究と同程度の鉄筋径を用いた場合には大きな問題にならないと考えられる。またひび割れ追従性の良い仕上材との併用により十分実用に耐えうると言える。

さらに、上記のようなひび割れ性状によって、表面改質処理を施した場合はたわみ量が若干大きくなっているが、その程度は小さい。また、全体的に水セメント比を小さくすることでたわみ量を減少させることが可能であるため、変形性能を要する場所においては、低水セメント比とすることで対応が可能であると言える。

### (3) 塑性域における曲げ性状

各水準の荷重-たわみ曲線を図-10に示す。なお、試験体は全て曲げ引張破壊であった。

降伏耐力および終局耐力に関しては、表面改質処理による影響はなく、全ての水準でほぼ同等の結果が得られた。また、無処理再生骨材を用いた場合において、普通骨材を用いたコンクリートと大きな差は見られず、向井や佐藤らが示した曲げ性状の結果<sup>9),10),11)</sup>と同様であった。本実験では、普通骨材・再生骨材を問わず、表面改質処理を施しても同等の耐力が得られ、終局時のコンクリートの圧縮縁ひずみは全水準でおよそ  $3500\mu$  と一定であった。従って、全て

の水準において終局時までには理論が適用可能であり、コンクリートの圧縮縁ひずみを  $3500\mu$  と仮定することで、終局耐力を予測することが可能である。このことより、油脂系表面改質処理骨材を用いたコンクリートのRC構造体としての利用性が見出せたと言え、リサイクルに資することを考慮すれば、表面改質処理は非常に有効な手段であると言える。

降伏後の変形特性として、図-11に示す靱性率（終局時のたわみ量を降伏時のたわみ量で除した値：終局時のたわみ量は、最大耐力時のたわみ量）を求めた。無処理と油脂系において、全ての水準で概ね同程度であり、表面改質処理による傾向の違いは見られず、降伏後の変形性能についても問題ないと言える。

また本実験において、表面改質処理骨材コンクリートは降伏後から終局時にかけて、ひび割れが多く発生した。この降伏後のひび割れ特性は、構造物解体時の骨材回収の観点において有効となる可能性があり、今後検討する予定である。

以上、RC梁において再生骨材を含む表面改質処理骨材コンクリートと普通骨材コンクリート

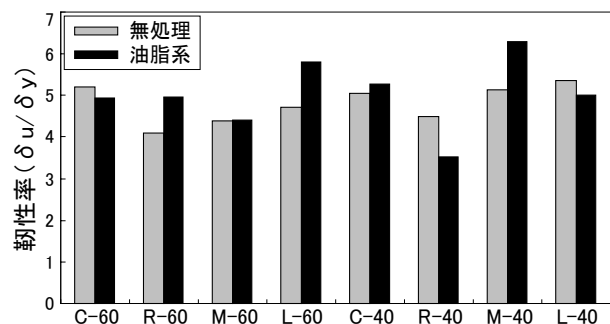


図-11 靱性率

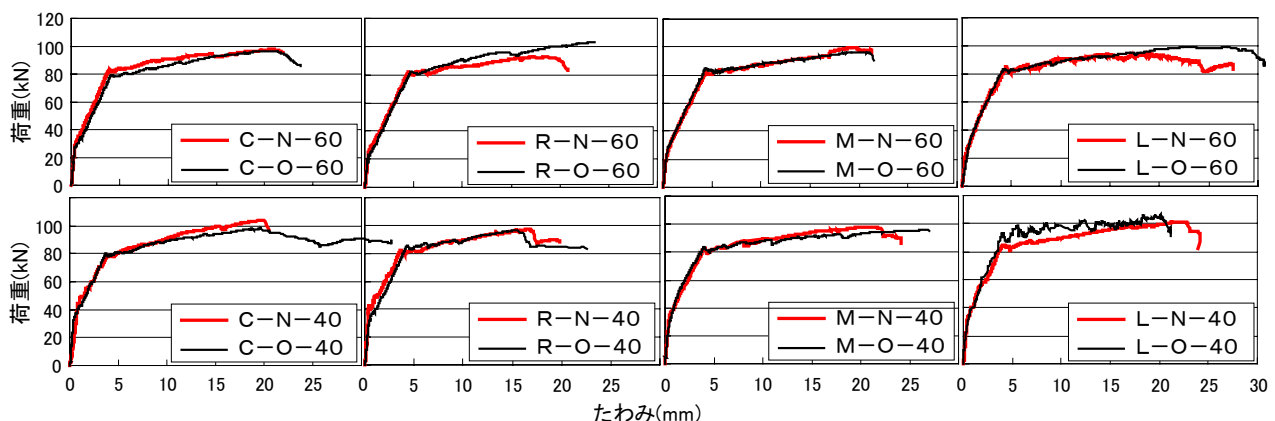


図-10 荷重-たわみ曲線

は、耐力・ひび割れともにほぼ同様の性能を有し、実用上問題になるとは考えにくい。設計において、鉄筋比を釣合鉄筋比以下とすることで、鉄筋降伏を先行させるようにすれば、表面改質処理骨材は構造材料として十分利用可能である。

#### 4. まとめ

油脂系表面改質処理骨材を用いたコンクリートの材料特性および RC 梁曲げ特性の検討を実験的に行い、以下の知見を得た。

- 1) 表面改質処理骨材コンクリートの力学的性質に関しても、既存の回帰式を適用することが可能である。また本研究の範囲では、表面改質処理骨材コンクリートは、品質のバラつきも少なく、管理が容易であるとの結果が得られた。
- 2) 剥離作用は、実積率の高い骨材においてより効果的であり、再生骨材においても有効である。
- 3) 油脂系表面改質処理剤を用いることで、ひび割れに対する性能が若干低下するが、最大ひび割れ幅が 0.3mm 以下であることから、本研究と同程度の鉄筋径を用いた場合には大きな問題になるとは考えにくく、ひび割れ追従性の良い仕上材との併用により、構造部材への実用に十分耐えうると考えられる。
- 4) 表面改質処理骨材を用いた RC 梁の曲げ耐力は、普通粗骨材コンクリートとほぼ同等の性能を示し、ひび割れ発生荷重の予測も可能であり、コンクリートの圧縮縁ひずみを  $3500\mu$  と仮定することで終局耐力を予測することができる。

以上の結果から表面改質処理を施した骨材は構造材料として十分利用可能であることが示された。

#### 謝辞

本研究は、平成 15-16 年度環境省廃棄物処理等科学研究費補助金「解体コンクリートの次世代再生化技術の開発」（研究代表者：野口貴文）の支援を得たものである。ここに関係各位に感謝の意を表します。

また、ご指導いただいた首都大学東京助手田

村雅紀氏および東京大学助手楠原文雄氏に心より感謝します。

#### 参考文献

- 1) 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.67-72，2001
- 2) コンクリートリサイクルシステムの普及に向けての提言：コンクリート再生材高度利用研究会活動報告書，2005.9
- 3) 田村雅紀ほか：骨材回収型リサイクル指向コンクリートの開発，セメントコンクリート論文集，No.51，pp.494-499，1997
- 4) 辻埜真人ほか：低品質再生粗骨材の改質処理による構造体への適用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1321-1326，2005
- 5) 辻大二郎ほか：低品質再生骨材の改質処理による構造体への適用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1251-1256，2002
- 6) 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の関係，日本建築学会構造系論文集，No.472，pp.11-16，1995.6
- 7) 田村雅紀ほか：骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1353-1358，2002
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策（設計・施工）指針・同解説
- 9) 向井毅ほか：再生骨材コンクリートの構造部材への利用に関する基礎的検討，セメント技術年報，No.33，PP.208-211，1979
- 10) 佐藤良一ほか：低品質再生粗骨材を用いた RC 部材の力学特性，セメントコンクリート論文集，No.53，PP.573-580，1999
- 11) 西浦範昭ほか：再生コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはり部材に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，VOL.20，No.2，PP.1081-1086，1998