

論文 熱処理およびすりもみ法による高品質再生粗骨材の製造に関する研究

李 保群*¹・水口 裕之*²・上田 隆雄*³・岩津 正明*⁴

要旨：本研究は廃棄コンクリートから高品質の再生粗骨材を製造する方法について検討したものである。再生方法としては、熱処理およびすりもみ法を採用し、廃棄コンクリートの粗骨材種類、強度を変え、熱処理温度の影響について調べた。その結果、再生粗骨材の主な品質および回収率に熱処理温度および原粗骨材の品質が大きく影響し、廃棄コンクリートの圧縮強度の影響はあまり大きくなかった。500℃で処理した再生粗骨材の品質は原粗骨材の品質に近くなり、そのほとんどが JIS 基準値を満足するものとなった。

キーワード：廃棄コンクリート、再生粗骨材、熱処理、すりもみ、高品質

1. はじめに

高度成長期に建設されたコンクリート構造物が解体の時期を迎え、コンクリート廃材の発生量は今後急激に増大すると予想される。しかし、コンクリート廃材のリサイクル率は現在約 65%程度であり、しかもコンクリート用への再利用は少ないのが現状である。また、建設廃棄物処分場の確保が困難な状況にあり、天然骨材資源の枯渇も問題で、コンクリート廃材のリサイクル率の向上は社会的な要請となっている。

現在一般的に廃棄コンクリートからの再生材は品質が低く、路盤材としての用途がほとんどである。このため、リサイクル率を向上させ、再生骨材の用途をコンクリート用に拡大するため、高品質再生粗骨材を製造する方法として、非加熱のすりもみ法¹⁾や加熱のすりもみ法^{2)・4)}などに関する研究が行われている。

熱処理の目的はコンクリート塊に熱を加え、セメントペースト部分を脆弱化させて、骨材に付着しているモルタルやペーストを除去しやすくした上で、これをすりもみし、高品質の骨材を得ることである。しかし、廃棄コンクリート

に使用されている粗骨材の種類、強度などと最適な熱処理温度との関係については十分検討されているとはいえない。

セメント水和物の熱分析結果である TG/DTA 曲線図³⁾によると、セメント水和物の CSH などでは 25～220℃で熱分解し、水分が放出され、そのピーク温度は 119℃となっている。もう一つの水和物である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は 450～500℃で熱分解し、水分も放出されており、そのピーク温度は 485℃となっている。

そこで、本研究では粗骨材の種類および圧縮強度を変えたコンクリート廃材(以下原コンクリートという)を作製し、熱処理温度を無熱処理、250℃、500℃の3種に変え、熱処理およびすりもみ法を用いて再生骨材を製造し、水和物の熱分解による熱処理効果を調べた。また、再生粗骨材の品質および回収率に及ぼす原コンクリートの粗骨材種類や強度の違いの影響も検討した。

2. 実験概要

2. 1 実験要因とその水準

再生粗骨材の品質および回収率に影響を与え

*1 徳島大学大学院 工学研究科 生産開発工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 徳島大学講師 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*4 徳島大学 工学部建設工学科

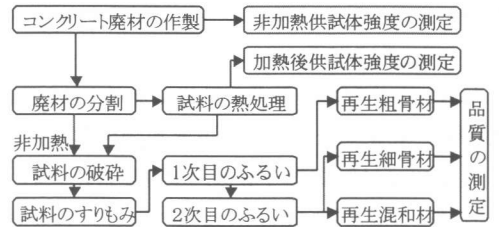
る要因を調べるため、表－１に示す実験要因とし、原コンクリートの粗骨材の種類を３種、熱処理温度を３種、原コンクリートの強度を３種、材齢を２種とし、表－１の組み合わせとした。

表－１ 実験要因とその水準

原コンクリートの粗骨材の種類	熱処理温度 (℃)	原コンクリートの強度 (N/mm ²)	材 齢 (日)
川砂利	無, 250, 500	30, 45, 60	35, 91
砂岩碎石	無, 250, 500	30	91
石灰岩碎石	無, 250, 500	30	91

2. 2 研究フロー

図－１に本研究のフローを示す。



図－１ 本研究のフロー

2. 3 コンクリート廃材(原コンクリート)の作製

(1) 原材料

原コンクリートの使用材料を表－２に、粗骨材の物理的性質を表－３に示す。

(2) 配合

原コンクリートの配合は、川砂利の場合は圧縮強度が 30N/mm²、45N/mm²と 60N/mm²となる水セメント比とし、それぞれ 0.68, 0.45 および 0.34 とした。砂岩碎石と石灰岩碎石の場合は圧縮強度が 30N/mm²となる水セメント比と

表－２ 原コンクリート用原材料

種 類	銘 柄・産 地
セメント	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³ 、ブレン値 3280cm ² /g
細骨材	川砂、徳島県那賀川産、表乾密度 2.64 g/cm ³ 、吸水率 1.57%
粗骨材	川砂利、徳島県那賀川産 砂岩碎石、徳島県鳴門市大麻町産 石灰岩碎石、高知県南国市奈路産
AE 減水剤	主成分：リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体
空気量調整剤	主成分：アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表－３ 原粗骨材の品質

品質項目	川砂利 (RA)	砂岩碎石 (SA)	石灰岩碎石 (LA)
最大寸法(mm)	20	20	20
粗粒率	6.79	6.71	6.54
表乾密度(g/cm ³)	2.62	2.56	2.70
絶乾密度(g/cm ³)	2.59	2.51	2.70
吸水率(%)	1.15	2.14	0.14
単位容積質量 (kg/m ³)	1650	1530	1660
実積率(%)	65.1	61.0	61.6

し、それぞれ 0.71 と 0.81 とした。スランプは 80 ±10mm とし、空気量は 5±1%とした。なお、各配合は試し練りを行い、その結果表－４に示すものとし、表に示した記号で表した。

(3) 供試体の作製

原コンクリートとして、φ150×300mm の円柱を作製し、圧縮強度試験用として、φ100×200mm の供試体を作製した。

(4) 養生

原コンクリートおよび圧縮強度試験用供試体は、材齢 28 日まで標準養生し、その後戸外に移し露天で材齢 35 日あるいは 91 日まで養生した。なお、原コンクリートを破碎する時には気乾状態とするために、所定材齢の 5 日前に実験室に移動させた。

2. 4 廃材の処理作業

表－４ 原コンクリートの配合

種 類	圧縮強度 (N/mm ²)	目 標 スランプ (mm)	目 標 空気量 (%)	W/C	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 減水剤 (ml/c·kg)	空気量 調整剤 (c×~%)
						W	C	S	G		
RA-30	30	80±10	5±1	0.68	47.8	160	239	901	954	2.06	0.003
RA-45	45	80±10	5±1	0.45	43.4	156	347	784	991	2.06	0.004
RA-60	60	80±10	5±1	0.34	38.0	179	526	607	960	3.50	0.039
SA-30	30	80±10	5±1	0.71	48.6	171	241	902	925	2.06	0.004
LA-30	30	80±10	5±1	0.81	50.6	173	214	947	946	2.06	0.002

(1) 廃材の分割

万能試験機で図-2に示すように廃材とする $\phi 150 \times 300\text{mm}$ の円柱を四分分割して、約 $75 \times 300\text{mm}$ の大きさの熱処理用試料とした。

(2) 試料の熱処理

試料の熱処理には図-2に示すように電気炉を用い、試料を炉内に2層にして並べ、図-3に示す手順で実施した。

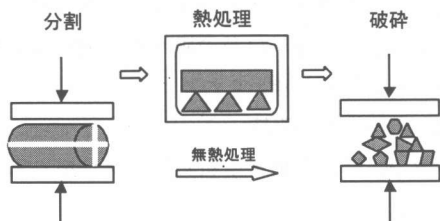


図-2 分割・熱処理・破砕

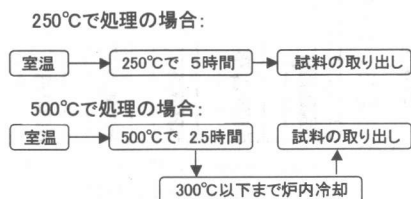


図-3 熱処理の方法

(3) 試料の破砕

万能試験機で試料を破砕し、30mmのふるいでふるってすりもみ用試料の寸法が30mm以下になるようにした。

(4) 試料のすりもみ

すりもみはロサンゼルス試験機を用い、12個の鉄ボールを入れ、1回の処理量は20kgとし、処理時間は30分として行った。

(5) 試料のふるい分け

5mmおよび0.15mmのふるいを用いてふるい分けを行った。まず、5mmのふるいでふるい、ふるいに残ったものを再生粗骨材とした。次に0.15mmのふるいで5mmのふるいを通るものをふるい、ふるいに残ったものを再生細骨材とした。

2. 5 再生粗骨材品質の測定

再生粗骨材の品質としては、粗粒率、粒度分

布、表乾密度、絶乾密度、吸水率、単位容積質量、実積率、洗い試験での微粒分通過率、モルタル付着率、破砕値および安定性としたが、本文では、表-5に示す8項目について考察する。

なお、洗い試験による微粒分通過率試験は、洗う回数を10回とした。

モルタル付着率の測定は立屋敷ら⁴⁾の試験方法と同様とし、2.5mmのふるいに残ったものでモルタル付着率を計算した。

表-5 再生粗骨材の品質項目と試験方法

番号	品質項目	試験方法
1	粗粒率	JIS A 1102
2	表乾密度	JIS A 1110
3	絶乾密度	JIS A 1110
4	吸水率	JIS A 1110
5	単位容積質量	JIS A 1104
6	実積率	JIS A 1104
7	洗い微粒分通過率	JIS A 1103
8	モルタル付着率	5%塩酸による

3. 実験結果と考察

3. 1 各要因の再生粗骨材品質への影響

(1) 絶乾密度・吸水率への影響

材齢91日の各種再生粗骨材の絶乾密度を図-4に示し、その吸水率を図-5に示す。

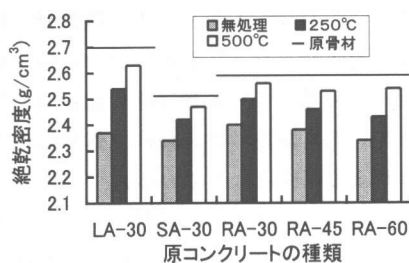


図-4 再生粗骨材の絶乾密度

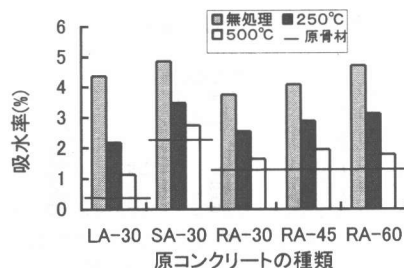


図-5 再生粗骨材の吸水率

図-4と図-5によると、全体的に見れば、原コンクリートの粗骨材種類と圧縮強度が異なっても、熱処理温度が高いほうが、再生粗骨材の絶乾密度は大きくなっており、吸水率は小さくなっている。

また、熱処理することで、無熱処理より密度は大きくなり、吸水率は小さくなるものの、原粗骨材より品質は低下している。ただし、処理温度の高いほうがその低下量は小さくなっている。

図-4と図-5において川砂利を用いた RA-30、RA-45 および RA-60 を比べると、無熱処理と 250℃の場合とも、原コンクリートの強度が高い方が、わずかではあるが、絶乾密度は低くなっている。また、原コンクリートの強度が高いほうが吸水率は大きくなっており、処理温度の低いほうがその差は大きくなっている。500℃の場合は、強度の違いによらず、再生粗骨材の絶乾密度と吸水率はほとんど変わっていない。

図-4と図-5において同一強度で粗骨材の種類を変えた LA-30、SA-30 および RA-30 を比べると、熱処理温度の違いにかかわらず、砂岩碎石コンクリートからの再生粗骨材の絶乾密度は一番小さくなっており、吸水率は一番大きくなっている。この順番は原骨材と同じ順番となっている。なお、この傾向は処理温度の高いほうがより明確となっている。

(2) モルタル付着率への影響

石灰岩碎石コンクリートからの再生粗骨材のモルタル付着率についてはデータが得られなかったので、他の再生粗骨材について材齢 91 日でのモルタル付着率を図-6 に示す。

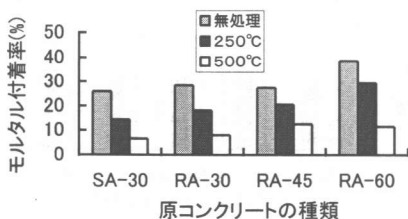


図-6 再生粗骨材のモルタル付着率

図-6によると、モルタル付着率に与える熱処理温度の影響は図-5に示した吸水率の場合と同じ傾向を示している。RA-30、RA-45 および RA-60 を図-5の場合と比較すると、原コンクリートの強度の影響についても、吸水率の場合とほぼ同じ傾向を示している。これに対して、SA-30 と RA-30 との関係は図-5の場合と反対になっている。これは、再生粗骨材の吸水率に影響を与える要因はモルタル付着量だけではなく、骨材自身の吸水率も大きな影響をあたえるためと考えられる。

(3) 実積率への影響

材齢 91 日の各種再生粗骨材の実積率を図-7 に示す。

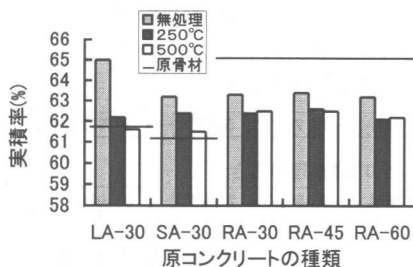


図-7 再生粗骨材の実積率

図-7によると、再生粗骨材の実積率は、無熱処理の場合より、熱処理の場合のほうが小さくなっているが、LA-30を除いてその差は大きくない。また、250℃と500℃との違いは小さい。

図-7において RA-30、RA-45 および RA-60 を比較すると、原コンクリートの強度や、熱処理温度が違って再生粗骨材の実積率に大差はなく、原粗骨材よりかなり小さくなっている。図-7において LA-30、SA-30 および RA-30 を比較すると、無熱処理の場合では、再生粗骨材の実積率は碎石の LA が、碎石の SA や川砂利の RA よりも大きくなっている。また、LA と SA は熱処理温度が高い方が原材料との差は小さくなっている。これはモルタルの除去による形状の変化によるものと考えられる。

(4) 粗粒率への影響

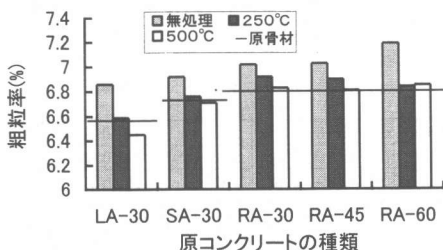


図-8 再生粗骨材の粗粒率

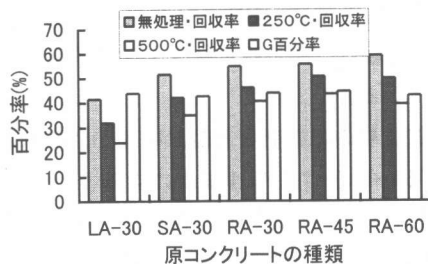


図-9 再生粗骨材の回収率

材齢 91 日の各種再生粗骨材の粗粒率を図-8 に示す。

図-8 によると、全体的に見れば、原コンクリートの粗骨材種類と強度の違いにかかわらず、熱処理温度が高いほうが、粗粒率は小さくなり、原骨材の粗粒率に近くなっている。

図-8 において RA-30, RA-45 および RA-60 を比較すると、無熱処理の場合では、原コンクリートの強度が高いほど、再生粗骨材の粗粒率は大きくなっているが、500°C の場合では、原コンクリートの強度の違いにかかわらず、各再生粗骨材の粗粒率はほぼ同じである。250°C の場合では、わずかではあるが、強度の高い方が小さく、原骨材の値に近くなっている。この傾向は熱処理温度による再生粗骨材のモルタル付着量の差と関係があると考えられる。すなわち、熱処理を行うことにより、原コンクリートの圧縮強度が違っていても、モルタル付着量が少なくなると、再生粗骨材の粗粒率は原骨材の粗粒率に近づいたものと考えられる。特に 500°C の場合にこの傾向がより明確に表れている。

3. 2 各要因の再生粗骨材回収率への影響

材齢 91 日の各種再生粗骨材の回収率を図-9 に示す。

なお、回収率および G 百分率は次式で求めたものを用いた。

$$\text{回収率}(\%) = \frac{\text{再生粗骨材の気乾質量}}{\text{処理前の原コンクリートの気乾質量}} \times 100$$

$$\text{G 百分率}(\%) = \frac{\text{原粗骨材の絶乾単位質量}}{\text{原コンクリートの理論絶乾単位質量}} \times 100$$

図-9 によると、全体的に見れば、原粗骨材

種類と原コンクリートの強度の違いにかかわらず、熱処理温度が高いほうが、再生粗骨材の回収率は小さくなっている。

図-9 において RA-30, RA-45 および RA-60 を比べると、強度の違いが回収率に与える影響は小さいが、熱処理したものは原コンクリート中の粗骨材の割合を示す G 百分率に近くなっている。特に 500°C の場合では、ほぼ同じ値となっている。図-9 において LA-30, SA-30 および RA-30 を比べると、回収率は、各熱処理温度とも LA-30, SA-30, RA-30 の順で大きくなっており、G 百分率の大小との相関は小さい。これより、回収率は原粗骨材の脆さや強度と密接な関係があると考えられる。すなわち、原粗骨材が脆く、弱い方が、再生粗骨材の製造過程に、原粗骨材自身が多く破碎され、その回収率が小さくなるものと思われる。

3. 3 再生粗骨材の品質と利用可能性

材齢 91 日の各種再生粗骨材の品質および JIS の基準値を表-6 に示す。

表-6 によると、無熱処理の場合は、各再生粗骨材の絶乾密度はすべて基準値を満足していない。吸水率はコンクリート用碎石の基準値およびコンクリート再生骨材(1種)の基準値を満足していないが、後者の2種の基準値は満足している。熱処理の場合では、絶乾密度は、250°C で処理した再生粗骨材では5種中1種が JIS 基準値を満足している。500°C で処理した再生粗骨材は5種中4種が基準値を満足している。吸水率では、250°C で処理した再生粗骨材は5種中3種がコンクリート用碎石およびコンクリー

ト再生骨材(1種)の基準値を満足しており、500℃で処理した再生粗骨材はすべて基準値を満足している。

再生粗骨材の絶乾密度と吸水率はJIS基準に合格するか否かは熱処理温度によるだけでなく、原粗骨材の品質と密接な関係がある。例えば、本研究での砂岩碎石の絶乾密度は2.51g/cm³であり、500℃でもJIS基準値を満足する品質の再生粗骨材を得られていない。

実積率と洗い微粒分通過率は、250℃と500℃で処理した再生粗骨材はすべてJIS基準値を満足している。

したがって、本研究の範囲では、500℃で処理して得られた粗骨材は元の品質にもよるが、JIS基準値を満足する品質の骨材とすることができる。一方、250℃で処理した場合は、原コンクリートの粗骨材の品質によって可否の両者に分かれている。

なお、この結果は、表-6に示す品質についてのみであり、強度、耐久性などその他の品質については、今後検討する必要がある。

4. まとめ

本実験結果をまとめると、次のようである。

(1) 再生粗骨材の主な品質である絶乾密度、吸水率および粗粒率には熱処理温度および原粗骨材の品質の影響が大きく、廃棄コンクリートの圧縮強度の影響はあまり大きくない。再生粗骨材の実積率には、いずれの要因も大きな影響を及ぼさない。

(2) 再生粗骨材の回収率には熱処理温度および原粗骨材の種類が大きく影響し、廃棄コンクリートの圧縮強度の影響はあまりない。

(3) 廃棄コンクリートの圧縮強度および原粗骨材の種類の違いにかかわらず、500℃で処理した再生粗骨材は250℃で処理したものより高い品質を示している。しかもそれらの品質は原粗骨材の品質により近く、そのほとんどがコンクリート用碎石のJIS基準値を満足している。

(4) 本研究で用いた川砂利では、500℃で

表-6 再生粗骨材の品質値と基準値

種類	処理温度 (℃)	粗粒率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	実積率 (%)	洗い微粒分通過率 (%)
LA-30	無処理	6.86	2.48	2.37	4.36	1540	65.0	0.82
	250	6.59	2.60	2.54	2.18	1580	62.2	0.84
	500	6.45	2.66	2.63	1.13	1620	61.6	0.70
SA-30	無処理	6.92	2.45	2.34	4.86	1480	63.2	0.88
	250	6.76	2.50	2.42	3.48	1510	62.4	0.83
	500	6.71	2.54	2.47	2.74	1520	61.5	0.62
RA-30	無処理	7.02	2.50	2.40	3.74	1520	63.3	0.70
	250	6.92	2.56	2.50	2.53	1560	62.4	0.59
	500	6.83	2.60	2.56	1.64	1600	62.5	0.34
RA-45	無処理	7.03	2.48	2.38	4.08	1510	63.4	0.70
	250	6.90	2.54	2.46	2.87	1540	62.6	0.48
	500	6.81	2.58	2.53	1.94	1580	62.5	0.26
RA-60	無処理	7.19	2.44	2.34	4.70	1480	63.2	0.53
	250	6.84	2.51	2.43	3.12	1510	62.1	0.40
	500	6.85	2.58	2.54	1.78	1580	62.2	0.28
基準と 限定値	基準 限定値			JIS 2.5 以上	JIS 3.0 以下		JIS 55 以上	JIS 1.0 以下

処理した再生粗骨材の品質が高く、回収率も大きい。石灰岩碎石の場合は、再生粗骨材の品質は高いが、回収率は低い。砂岩碎石の場合では、再生粗骨材の品質もやや低いし、回収率もやや低くなっている。

なお、これらの結果は、本研究で用いた指標によるもののみであり、強度、耐久性などその他の品質については今後研究する必要がある。

参考文献

- 1) 板谷英克他：P C 枕木廃材を再生粗骨材として利用するための基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp.157-162，1999
- 2) 島裕和他：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.1093-1098，2000
- 3) 小林一輔：10.4 熱分析試験と結果の読み方，コンクリート構造物の劣化診断法，pp100，森林出版，1998
- 4) 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，Vol.22，No.2，pp.1099-1104，2000