

## 論文 解体コンクリートからの高品質再生骨材の回収試験

立屋敷 久志\*1・岡本 雅道\*2・西村 祐介\*3・黒田 泰弘\*4

要旨： 砂利と山砂、碎石と海砂の組み合わせで調合した普通強度、高強度コンクリートを使用して、「加熱すりもみ法」による高品質再生骨材の回収試験を行い、骨材起源とコンクリート強度の違いが骨材回収技術に及ぼす影響を把握した。さらに、普通骨材に規定されている品質試験を実施して、JIS A 5005 及び JIS A 5308 の骨材規格値を満足する再生骨材が得られることを確認した。

キーワード：コンクリート塊、加熱すりもみ、再生骨材、碎石、海砂、モルタル付着率

## 1. はじめに

建設産業は、全産業の5割に相当する11億トンの資材を利用している一方で、産業全体の2割に相当する廃棄物を排出している<sup>1)</sup>。21世紀を迎えるに当たり、大量生産大量消費の消費型経済から資源循環型経済への転換を求められており、建設産業の方向性は極めて重要な位置づけとなっている。

このような状況の中で、高度成長期に建造された建造物が解体時期を迎え、コンクリート塊の発生量が増大した場合、路盤材以外の再利用用途の確立が必要となる。過去、十年以上コンクリート用骨材として再利用するための研究開発が行われてきたが<sup>2)</sup>、破碎粒度調整したコンクリート塊を使用したコンクリートの調配合や施工方法の開発が大半で、コンクリートの耐久性に課題があることが懸念されていた。

そこで、筆者らは、通常のレディーミクストコンクリートとして再利用を可能にするために、普通骨材と同等品質の高品質再生骨材の回収技術の開発を行っている<sup>3)</sup>。この技術はコンクリート塊を300℃程度で加熱して、セ

メントペースト部分を脆弱化した後、骨材を破碎しない程度の摩砕作用で骨材に付着したモルタルやセメントペーストを選択的に除去するもので、「加熱すりもみ法」と称している。

ここでは、コンクリートに使用された骨材の種類、コンクリート強度の違いが、高品質再生骨材の回収技術に及ぼす影響を把握することを目的とした。すりもみ処理の支配要因としては、①媒体量の適正化と②ミル回転数の制御がある。本報告では、ミル回転数を効率的と考えられる臨界速度の約70%一定で行い、媒体試料比をパラメーターとして、骨材品質及び回収率を検討した。さらに、普通骨材が有する基本的な物性を測定し、JIS同等品質であることを確認した。

## 2. 試験概要

「加熱すりもみ法」を活用した試験プラントを使って、元々の使用骨材として砂利/山砂と碎石(粘板岩、石灰岩)/海砂の3種類のコンクリート塊を試験体として、JIS A 5308, JIS A 5005 の骨材規格値を満足する再生骨材を回収できることを検討した。さらに、コンクリー

\*1 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)

\*2 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長

\*3 宇部三菱セメント研究所(株) 黒崎センター環境技術グループ主任研究員

\*4 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)

ト強度の違いが再生骨材の回収に及ぼす影響を2種類の高強度コンクリートを用いて検討した。試験水準を表-1に示す。

表-1 試験水準

| 原骨材の種類の影響 |      |     | コンクリート強度の影響 |
|-----------|------|-----|-------------|
| 粗骨材       |      | 細骨材 |             |
| 種類        | 岩質   | 種類  |             |
| 砂利        | 硬質砂岩 | 山砂  | 普通          |
| 碎石        | 粘板岩  | 海砂  | 普通          |
|           |      |     | 高強度         |
|           | 石灰岩  | 海砂  | 普通          |
|           |      |     | 高強度         |

## 2.1 試験体

### (1) 砂利と山砂起源の試験体コンクリート

千葉県富津市の砂採取現場における輸送設備を納めた現場打のボックスカルバートの解体コンクリートを使用した。ジャイアントブレイカーで粗破碎した後、ジョークラッシャーで50mmアンダーのコンクリート塊を調製した。

解体前にΦ10cmのコアを採取し、コンクリート強度と5%塩酸でペースト部分を溶解処理して骨材の品質と含有率を調査した。

対象構造物の概要を表-2に、コンクリート及び骨材の物性等を表-3、4に示す。

表-2 対象構造物の概要

|        |                                    |
|--------|------------------------------------|
| 発生場所   | 千葉県富津市                             |
| 構造物    | 砂採取現場のボックスカルバート(鉄筋コンクリート造)         |
| 竣工     | 1970年(約30年経過)                      |
| 呼び強度   | 210kg/cm <sup>2</sup>              |
| コンクリート | W/C: 60%<br>スランプ 12cm              |
| 使用骨材   | 粗骨材: 静岡県富士川産砂利<br>細骨材: 千葉県富津市高溝産山砂 |

表-3 コンクリートコアの物性試験結果

| 採取部位 | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数(×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 |
|------|--------------------------|--|-------|
| 床部   | 35.6                     | 29.7                                       | 0.19  |
| 壁部   | 28.0                     | 32.5                                       | 0.19  |
| 平均   | 31.8                     | 31.1                                       | 0.19  |

表-4 コンクリート塊中の骨材の含有率と骨材品質

|     | 岩質   | 絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率(%) | 含有率* |
|-----|------|--------------------------|--------|------|
| 粗骨材 | 硬質砂岩 | 2.62                     | 0.92   | 42.5 |
| 細骨材 | 砂岩   | 2.59                     | 1.56   | 42.7 |

\* 100℃乾燥状態での質量割合

### (2) 碎石と海砂起源の試験体コンクリート

碎石(粘板岩、石灰岩)と海砂の組み合わせで、コンクリート強度の異なるコンクリート試験体を作製した。コンクリートは30cmの板状に成型して35日間のシートをかけて養生を行い、強度発現を確認した後、ジャイアントブレイカーとジョークラッシャーを使って、最大寸法25mmのコンクリート塊に調製した。

試験体コンクリートの材料及びコンクリートの調査を表-5, 6, 7に示す。

表-5 使用骨材の品質

| 骨材の種類   | 岩質等  | 絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率(%) | 粗粒率  |
|---------|------|--------------------------|--------|------|
| 粗骨材(碎石) | 粘板岩  | 2.69                     | 0.40   | 6.60 |
|         | 石灰岩* | 2.69                     | 0.40   | 6.63 |
| 細骨材     | 海砂   | 2.53                     | 1.51   | 2.59 |

\* BS破砕値 23.1%

表-6 試験体コンクリートの仕様

| 記号  | 粗骨材 | 細骨材 | 呼び強度(N/mm <sup>2</sup> ) | 目標スランプ <sup>†</sup> (cm) | 目標空気量(%) |
|-----|-----|-----|--------------------------|--------------------------|----------|
| S-1 | 粘板岩 | 海砂  | 24                       | 18                       | 4.5      |
| S-2 | 粘板岩 | 海砂  | 48                       | 23                       | 4.5      |
| L-1 | 石灰岩 | 海砂  | 24                       | 18                       | 4.5      |
| L-2 | 石灰岩 | 海砂  | 48                       | 23                       | 4.5      |

表-7 試験体コンクリートの調査と圧縮強度

| 記号  | W/C(%) | 単体量(kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |     | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) |                    |
|-----|--------|-------------------------|------|-----|-----|--------------------------|--------------------|
|     |        | 水                       | セメント | 粗骨材 | 細骨材 | 標準 <sup>*</sup> 養生       | 封 <sup>**</sup> 養生 |
| S-1 | 54     | 185                     | 343  | 946 | 781 | 26.0                     | 26.9               |
| S-2 | 36     | 170                     | 473  | 945 | 771 | 53.1                     | 53.7               |
| L-1 | 54     | 185                     | 343  | 946 | 781 | 24.3                     | 27.8               |
| L-2 | 36     | 170                     | 473  | 945 | 771 | 63.5                     | 65.2               |

\* 材齢 28日 \*\* 材齢 35日

## 2.2 高品質再生骨材の回収方法

### (1) 高品質再生骨材回収設備の概要

加熱すりもみ法による処理能力約300kg/hの試験設備の仕様は、以下の通りである。システムフローと主要設備の外観を図-1、写真-1~3に示す。

充填型加熱設備  
熱風吹き込み方式

直径約0.5m

高さ約2.2m



写真-1 加熱設備

## 粗骨材回収設備

チューブミル

直径約 0.7m

長さ約 1.0m

最大 80mm 鋼球媒体

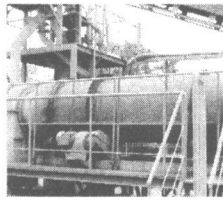


写真-2 粗骨材回収設備

## 細骨材回収設備

チューブミル

直径約 0.8m

長さ約 1.6m

最大 9mm 鋼球媒体

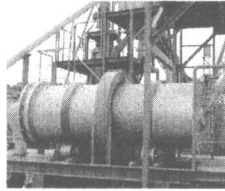


写真-3 細骨材回収設備

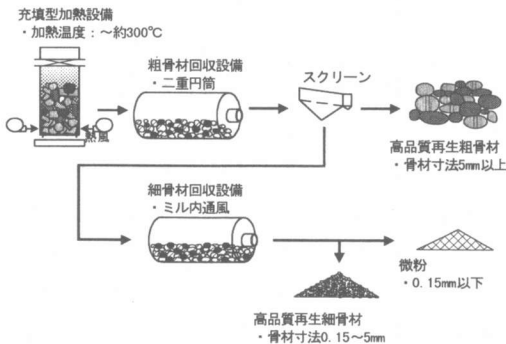


図-1 システムフロー

## 2.3 骨材回収方法

### (1) 加熱工程

2.1 に示したコンクリート塊をホイールローダ等で受入ホッパーに投入した。

定量供給機を用いて、充填型加熱設備の上部から連続投入して、下部から吹き込まれた熱風によってコンクリート塊を 300℃程度に加熱した。加熱されたコンクリート塊は、加熱設備底部のテーブルフィーダーから排出され、粗骨材回収設備に供給した。

### (2) 粗骨材の回収工程

チューブミル型の粗骨材回収設備で加熱処理したコンクリート塊をすりもみ処理した。二重円筒の内筒に施された 5mm メッシュから、モルタル部分を連続的に排出し、すりもみ効率の向上を図った。

運転条件は、媒体試料比をパラメーターに、ミル回転数は一定で運転した。5mm アンダー分

を細骨材回収設備に供給した。

### (3) 細骨材の回収工程

チューブミル型細骨材回収設備を用いて、粗骨材回収設備から排出された 5mm アンダーのモルタル塊から細骨材を回収した。すりもみ処理の際に発生した約 0.15mm 以下の微粉分はミル内通風により、系外へ排出して、集じん装置で捕集した。

運転条件は、粗骨材回収同様に、媒体試料比をパラメーターとしてミル回転数は一定で行った。また、ミル内風量約 10Nm<sup>3</sup>/minで行った。

## 2.4 骨材試験方法

運転が安定した状態で、約 20kg の骨材を採取し、必要量まで縮分し、以下の試験を実施した。

- ① 絶乾密度、吸水率 (JIS A 1109, JIS A 1110)
- ② 粒形判定実積率 (JIS A 1104)
- ③ 粒度 (JIS A 1102)
- ④ 微粒分量 (JIS A 1103)
- ⑥ BS 破碎値 (JIS A 1121)
- ⑦ 塩化物量 (JIS A 5002)
- ⑧ アルカリ骨材反応性

(JIS A 5308(附属書7), JIS A 1804)

- ⑨ 再生骨材中のモルタル及びセメント付着量

110℃で 24 時間乾燥した再生骨材をポリエチレン製の広口瓶に入れ、5% 塩酸溶液を再生骨材が充分浸漬するまで注入し、1 日 1 回以上の割合で攪拌し、残留モルタルを溶解させた。モルタル塊については、ハンマー等を用いて骨材を粉砕しないように破碎し、極力モルタル分を塩酸に溶解させた。5% 塩酸溶液は、試料からのガスの発生が減少したとき交換し (最低 1 日 1 回)、期間を 5 日間とした。

5 日間の塩酸溶解処理後水洗して、再生粗骨材の中で 5mm ふるいに留まるものを粗骨材量、再生細骨材の中で 5mm~0.15mm を細骨材量として、絶乾質量を測定した。

再生骨材のモルタル及びセメント付着量 (M) は、次の式によって計算した。

$$\text{付着量}\% (M) = (a - b / k \times 100) / a \times 100$$

- A : 再生骨材の質量 (絶乾状態)
- b : 塩酸処理後の骨材質量 (絶乾状態)
- k : 原骨材の 5% 塩酸不溶残分量 (%)

### 3. 試験結果及び考察

#### 3.1 再生粗骨材の回収結果

再生粗骨材の絶乾密度と吸水率の関係を図-2 に示す。絶乾密度と吸水率には一次の相関が認められ、再生粗骨材の品質を絶乾密度か吸水率のいずれかで評価できることが分かった。

原骨材の種類及びコンクリート強度の違いで、加熱すりもみ法による高品質再生骨材の回収条件に及ぼす影響を検討した。媒体試料比と絶乾密度の関係、回収率と絶乾密度の関係を図-3, 4 に示す。なお、ここで示した媒体試料比は媒体量を試験体コンクリート及び、5mm アンダーの投入速度で除したものと定義した。また、回収率は、再生骨材の回収量をコンクリート塊中の含有骨材量で除したものと定義した。

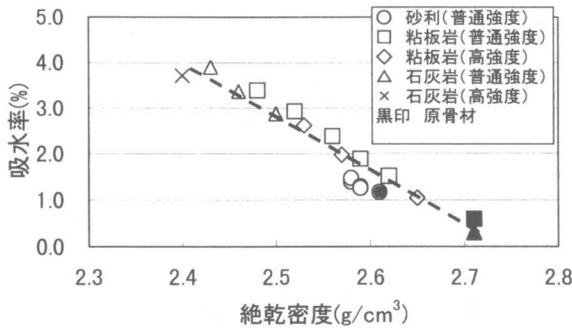


図-2 再生粗骨材の絶乾密度と吸水率の関係

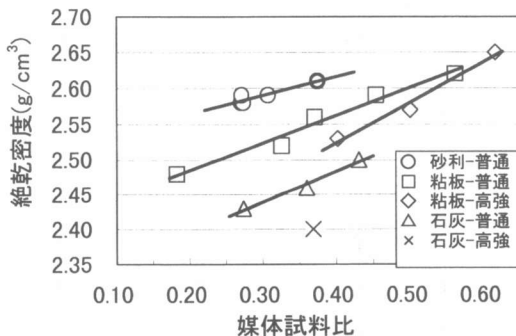


図-3 再生粗骨材回収における媒体試料と品質

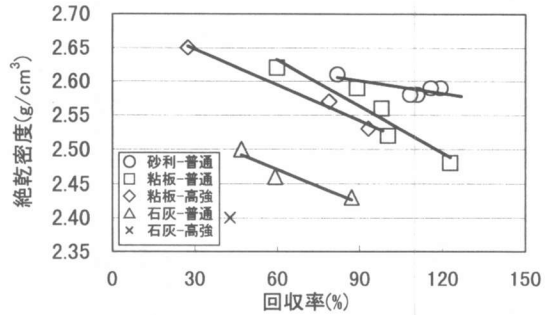


図-4 再生粗骨材の回収率と絶乾密度の関係

#### ①原骨材の種類の影響

砂利起源と碎石起源の再生粗骨材の回収において、媒体試料比の増大に伴い、再生骨材の絶乾密度は高くなることが分かった。

砂利起源の場合、今回試験した範囲の媒体試料比では、いずれも JIS を満足した。一方、粘板岩碎石の場合、媒体試料比 0.2~0.3、石灰岩碎石で 0.4 以上となった。砂利に比べ碎石は骨材表面の凹凸によるモルタルの付着力が強いために、媒体量を増大し、すりもみ作用を向上させる必要がある。

砂利と粘板岩の場合、絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  で高い回収率を示したが、石灰岩骨材起源のものは 40% 程度の回収率に留まった。今回使用した石灰岩碎石の BS 破砕値が大きいことから、骨材自体が破碎されやすいためと考えられる。

#### ②コンクリート強度の影響

粘板岩の普通強度と高強度コンクリートから回収した再生粗骨材の媒体試料比と絶乾密度の関係から(図-3)、JIS 品質を満足する再生粗骨材を回収するためには、媒体量の増大が必要であることが分かった。また、回収率では(図-4)、絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  近傍では、顕著な差ではないが、さらに品質を高めた場合には、高強度コンクリートでは回収率が低下する傾向にあった。

一方、石灰岩骨材を使用した高強度コンクリートの場合、モルタル部分だけでなく骨材部分も摩擦されてしまい(写真-4)、絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  を達成できなかった。

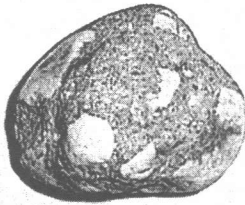


写真-4 石灰岩起源の再生粗骨材

### 3.2 再生細骨材の回収結果

再生細骨材の絶乾密度と吸水率の関係を図-5に示す。再生粗骨材と同様に、絶乾密度と吸水率には一次の相関が認められた。媒体試料比と絶乾密度の関係、回収率と絶乾密度の関係を図-6、7に示す。

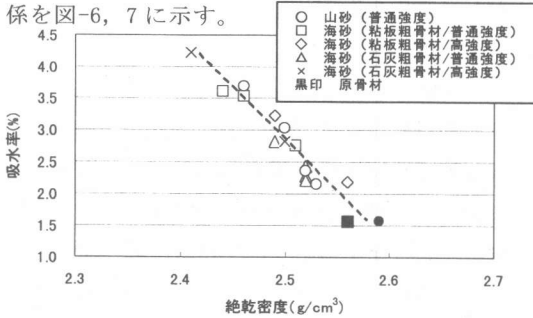


図-5 再生細骨材の絶乾密度と吸水率の関係

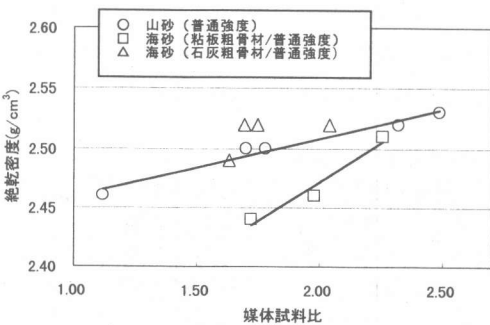


図-6 再生細骨材の回収における媒体試料比と品質

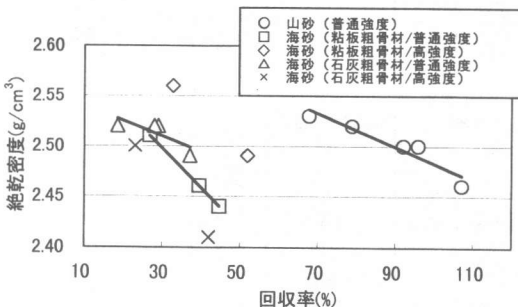


図-7 再生細骨材の回収率と絶乾密度の関係

#### ①原骨材の種類の影響

山砂及び海砂起源で、JIS 品質を満足する再生細骨材が回収可能であることが確認できた。

絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  で媒体試料比を比較すると(図-6)、山砂の場合 1.6 程度に対し、海砂の場合、粘板岩粗骨材では 2.0 以上、石灰岩粗骨材では、山砂同様の 1.6 程度となった。また、回収率では、山砂の 90%以上に対して、海砂では約 40%程度であった(図-7)。

これらの結果から、山砂に比べ、海砂起源の回収率が低くなることが分かった。原骨材である海砂の絶乾密度が  $2.53\text{g/cm}^3$  で比較的小さかったこと、貝殻や細粒分が多いことが低い回収率になった原因と考えている。

また、再生細骨材は、粗骨材の回収残さから回収するために、粗骨材の回収の影響を受ける。今回、粘板岩と石灰岩粗骨材では、回収率に 60%程度の差異があるにもかかわらず、細骨材の品質と回収率は大差ない結果となった。これは、今回使用した石灰岩が粉砕されて、微粉として排出されたためと考えられる。

#### ②コンクリート強度の影響

粗骨材に粘板岩を使用したもので、絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  の品質一定で比較すると、高強度コンクリートの方が、10~20%高い回収率になった。高強度の場合、再生粗骨材の回収時に破碎された粗骨材片が、細骨材に混入したためと考えられる。

#### (3)高品質再生骨材の品質

絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  以上で絶乾密度の異なる再生骨材の品質試験結果を表-8 と 9 に示す。

##### ①高品質再生粗骨材

高品質再生粗骨材の品質は、一部の粒度分布を除いて、JIS 規格値を満足した。また、砕石起源の再生粗骨材は、すりもみ処理により粒形が改善され、粒形判定実積率で約 6%増大した(原骨材: 57.8%)。

##### ②高品質再生細骨材

海砂起源の高品質再生細骨材の粒度分布を除いて、JIS 規格値を満足した。海砂起源の細骨材の粒度分布を図-8 に示す。

これによると、0.3～1.2mmの範囲が減少し、粗骨材の破砕片が混入して2.5～5mmの範囲が増大した不連続的な粒度になっている。コンクリート用骨材として使用する場合には、混合使用等が必要となる。また、モルタル及びペースト付着率を総プロの結果<sup>4)</sup>と比較しても著しく小さく、品質が高いことが分かる。

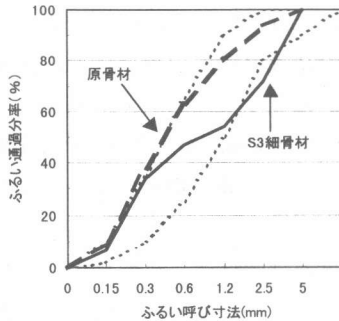


図-8 高品質再生細骨材(海砂起源)の粒度分布

4. まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

- ①加熱すりもみ法による高品質再生骨材の回収技術は、砂利及び碎石、山砂及び海砂起源の再生骨材に適用できることを確認した。
- ②碎石、海砂起源の再生骨材は、媒体量を増大し、すりもみ作用を高める必要がある。

③高強度コンクリートでは、媒体量を増大することで、加熱すりもみ法による骨材回収技術が適用できることを確認した。

④高品質再生骨材は、普通骨材の JIS 規格値を満足することを確認できた。また、碎石起源の場合、粗骨材の粒形が改善され、コンクリートのワーカビリティの向上が期待できる。

⑤今回使用した石灰岩碎石の場合、高品質再生粗骨材の回収率が低く、高強度コンクリートの場合、JIS 規格値を満足することができなかった。今後、加熱すりもみ法の石灰岩起源の再生骨材への適用性については、詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 廣瀬 輝:建設廃棄物の適正処理とリサイクル,建設改正廃棄物処理法関連講演会, pp3, (1998)
- 2) 例えば,建設省総合技術開発プロジェクト「建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発」
- 3) 立屋敷他:丸ビル解体コンクリートからの高品質骨材回収技術,日本建築学会学術講演概要集, pp125, (1998)
- 4) 友澤他:再生コンクリートの利用技術の開発研究推進会議平成8年度報告, pp59, (1997)

表-8 高品質再生粗骨材の骨材試験結果と JIS 規格値への適用性

| 原骨材の起源及びコンクリート強度 |                          | 砂利(普通強度)                |                         | 碎石(普通強度)                |             |        |        | 碎石(高強度)     |      | 適合性  |
|------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|--------|--------|-------------|------|------|
| 項目               | 試験方法                     | 規格値                     | G 1                     | G 2                     | G 3         | G 4    | G 5*   | G 6         | G 7  |      |
| 絶対密度             | JIS A 1110               | 2.5g/cm <sup>3</sup> 以上 | 2.53                    | 2.58                    | 2.52        | 2.59   | 2.50   | 2.53        | 2.63 | 適合   |
| 吸水率              | JIS A 1110               | 3.0%以下                  | 2.00                    | 1.33                    | 2.93        | 2.00   | 2.87   | 2.37        | 1.20 | 適合   |
| 粒形判定実積率          | JIS A 5005               | 55%以上                   | 64.2                    | 64.5                    | 62.2        | 60.8   | 63.0   | 60.5        | 61.6 | 適合   |
| 粒度               | JIS A 1102               | 標準粒度                    | 2505粒度                  | 2505粒度                  | 2005粒度      | 2005粒度 | 2005粒度 | 2005粒度      | 範囲外  | 一部適合 |
| 微粒子分量            | JIS A 1103               | 1.0%以下                  | 0.13                    | 0.11                    | 0.00        | 0.12   | —      | 0.10        | 0.01 | 適合   |
| 7軸砂利反応性          | JIS A 5308<br>JIS A 1804 | 無害                      | 無害<br>Sc: 60<br>Rc: 238 | 無害<br>Sc: 50<br>Rc: 139 | 無害<br>0.037 | —      | —      | 無害<br>0.036 | —    | 適合   |
| 1.95浮遊不純物量       | JIS A 5308               | 1.0%以下                  | 0.41                    | 0.21                    | 0.45        | 0.04   | —      | 0.00        | 0.00 | 適合   |
| BS破砕値            | JIS A 1121               | 40%以下                   | —                       | —                       | 10.9        | 5.5    | 24.1   | 17.0        | —    | 適合   |
| モルタル付着率(%)       | 本文記載                     | 無                       | 10.9                    | 5.5                     | 13.1        | 7.0    | —      | 16.3        | —    |      |

\* 石灰石碎石 - 測定値無し

表-9 高品質再生細骨材の骨材試験結果と JIS 規格値への適用性

| 原骨材の起源及びコンクリート強度 |                          | 山砂(普通強度)                |                         | 海砂(普通強度)                |             | 海砂(高強度) |             | 適合性  |
|------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|---------|-------------|------|
| 項目               | 試験方法                     | 規格値                     | S 1                     | S 2                     | S 3         | S 4*    | S 5         |      |
| 絶対密度             | JIS A 1109               | 2.5g/cm <sup>3</sup> 以上 | 2.51                    | 2.54                    | 2.52        | 2.51    | 2.53        | 適合   |
| 吸水率              | JIS A 1109               | 3.5%以下                  | 2.77                    | 2.31                    | 2.74        | 2.35    | 2.81        | 適合   |
| 粒形判定実積率          | JIS A 5005               | 53%以上                   | 61.5                    | 61.6                    | 61.5        | 63.0    | 60.7        | 適合   |
| 粒度               | JIS A 1102               | 標準粒度                    | 標準粒度                    | 標準粒度                    | 範囲外         | 範囲外     | 範囲外         | 一部適合 |
| 微粒子分量            | JIS A 1103               | 7.0%以下                  | 0.40                    | 0.48                    | 0.85        | 1.88    | 0.22        | 適合   |
| 塩化物量             | JIS A 5002               | 0.04%以下                 | 0.00                    | 0.00                    | 0.00        | —       | 0.00        | 適合   |
| 7軸砂利反応性          | JIS A 5308<br>JIS A 1804 | 無害                      | 無害<br>Sc: 13<br>Rc: 250 | 無害<br>Sc: 21<br>Rc: 232 | 無害<br>0.028 | —       | 無害<br>0.035 | 適合   |
| 1.95浮遊不純物量       | JIS A 5308               | 1.0%以下                  | 0.33                    | 0.10                    | 0.05        | —       | 0.05        | 適合   |
| ペースト付着率(%)       | 本文記載                     | 無                       | 11.5                    | 10.6                    | 3.01        | —       | —           |      |

\* 石灰石碎石 - 測定値無し