

# コンクリート資源循環システムの開発・実用化

黒田 泰弘 橋田 浩 山崎 庸行 坂詰 義幸  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (エンジニアリング事業本部)

## Closed-Loop Concrete System

by Yasuhiro Kuroda, Hiroshi Hashida, Nobuyuki Yamazaki and Yoshiyuki Sakazume

### Abstract

The amount of concrete waste, which is discharged from demolition work of reinforced concrete structures, is increasing rapidly. It is very important to promote recycling of concrete waste. The use of concrete rubble for road sub-base is a very popular way, but not efficient enough to solve these problems. Therefore, a new concrete recycling system (closed-loop concrete system) has been established, which can provide complete recycling of concrete waste. The recyclability of aggregate samples from the demolished concrete was evaluated by some tests. After confirming the recyclability, recycled aggregate were produced from the demolished concrete by the heating and rubbing method. Based on the test results at concrete mixing plant, the mix proportion of the concrete was determined for construction of a building. The quality of this concrete, which was produced and placed by the same method as ordinary concrete, was satisfied with all the specified requirements. Consequently, this system showed validity on the whole concrete recycling from demolition to construction.

### 概要

資源循環型社会の構築に向けて、建設業の果たすべき役割は大きい。特に、建設廃棄物の中でも排出量の大きいコンクリートのリサイクルの推進は非常に重要である。一般に、解体コンクリートは路盤材として再利用されているが、数年後にはその発生量が路盤材需要を上回るとの予想もあり、最終処分場が逼迫する中での解体コンクリートの処理問題は極めて深刻である。他方、建設活動に伴う骨材需要は膨大であり、骨材資源の枯渇も進んでいる。

筆者らは、こうした問題を解決することを目的に、解体コンクリートを建物の構造材料として100%リサイクルする「コンクリート資源循環システム」を開発した。本論文ではシステムの概要とその検証のために行った実工事での検討結果について示す。事前調査で解体コンクリートのリサイクルの適性を評価し、加熱すりもみ法によってJIS規格をもとに定めた品質基準を満足する構造用再生骨材を製造した。さらに、実機での試験練りを行い、実施工の調合を選定して、構造用再生骨材コンクリートを新規の建物に適用し、構造用再生骨材コンクリートが一般のコンクリートと変わることなく施工でき、品質にも問題ないことを確認した。

### § 1. はじめに

21世紀は「環境の時代」といわれており、資源循環型社会の構築に向けて、建設業の果たすべき役割は大きい。特に、建設廃棄物の中でも排出量の大きいコンクリートのリサイクルの推進は非常に重要である。

一般に、解体コンクリートは路盤材として再利用されているが、数年後にはその発生量が図-1に示す<sup>1)</sup>ように路盤材需要を上回るとの予想もあり、図-2に示す<sup>2)</sup>ように最終処分場が逼迫する中で

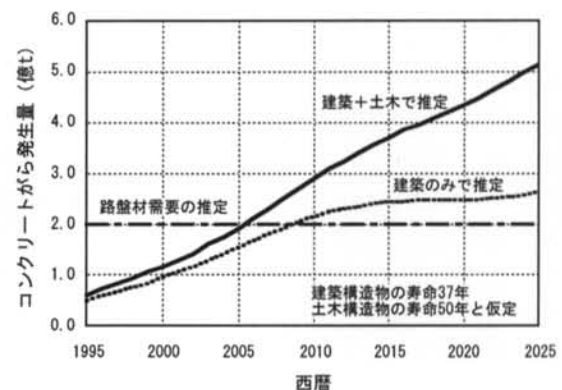


図-1 コンクリートがらの発生量予測<sup>1)</sup>

の解体コンクリートの処理問題は極めて深刻である。他方、建設活動に伴う骨材需要は年間約8億トン<sup>3)</sup>と膨大であり、骨材採取が周辺環境に与える影響も大きく、骨材資源の枯渇も進んでいる。したがって、解体コンクリートを再びコンクリートの分野で再利用する技術の開発が急務である。

筆者らは、こうした問題を解決することを目的に、「コンクリート資源循環システム」の開発に取り組んできた。このシステムでは、モルタルやセメント分をできるかぎり除去した構造用再生骨材を回収する。回収した再生粗骨材、再生細骨材は、ともに元の骨材とほぼ同等の品質を有しているため、元の骨材と同じ用途、すなわち構造体コンクリートへの適用が可能となる。

本論文では、「コンクリート資源循環システム」の概要とその検証のために行った実工事での検討結果について記述する。

## § 2. コンクリート資源循環システムの提案

### 2.1 再生骨材の製造技術

解体コンクリートから再生した再生骨材のコンクリート分野での適用は、捨てコンや均しコンなどへの利用を除き、ほとんど進んでいないのが現状である。従来の破碎・分級しただけの再生骨材では、再生骨材の品質が低い<sup>4)</sup>ために、用途が低品質のコンクリートに限定されてしまうといった問題があるためである。

一方、比重選別<sup>5)</sup>を行ったり、機械的なすりもみ<sup>6)</sup>を行えば、再生粗骨材の品質は向上し、構造体コンクリートへの適用は可能なものの、残りの細粒分は処分しなければならないといった問題が残っていた。しかし、**図-3**に示すような加熱すりもみ法<sup>7)</sup>によって、破碎したがらを約300℃に加熱して、中に含まれるセメント水和物を脆弱化した後、機械的なすりもみを行えば、セメント分を選択的に除去することが可能であり、再生粗骨材だけでなく、再生細骨材も含めて、品質の向上を図れる。

筆者らも、加熱すりもみ法で得られた構造用再生骨材を用いてコンクリートを練り混ぜ、強度や耐久性に関する試験を行って、一般の建築構造に適用できることを確認した<sup>8)</sup>。

また、加熱すりもみ法による製造費に関しては、関東圏において年間100万トンの解体コンクリートの処理を5カ所で行った場合を想定して行った試算結果が示されており<sup>9)</sup>、解体コンクリートが1トン当たり約4000円と試算されている。これを積算

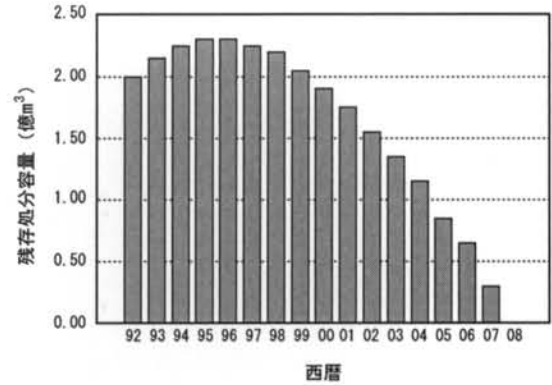


図-2 最終処分場の残存処分容量の予測<sup>2)</sup>

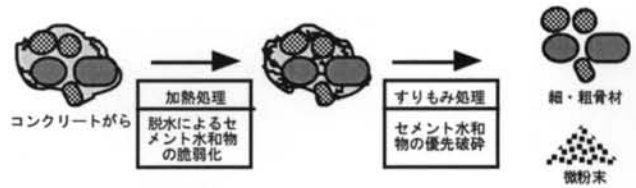


図-3 加熱すりもみ法の概念<sup>7)</sup>

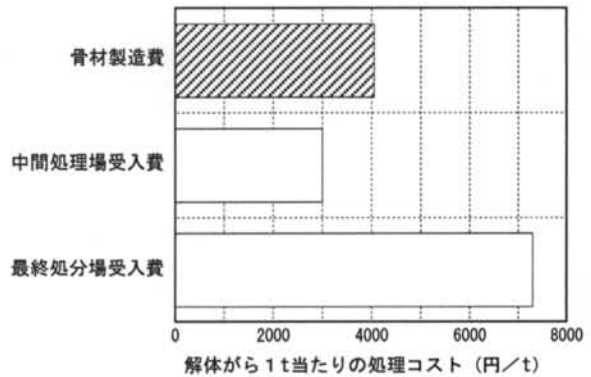


図-4 コスト試算例<sup>9), 10)</sup>

資料<sup>10)</sup>による中間処理場の受入費および最終処分費と比較すれば、**図-4**のようになり、両者の中間に位置する。

なお、この製造費には、構造用再生骨材の販売収入は含まれていないため、これを考慮すれば、中間処理場の受入費と構造用再生骨材の製造費は大差なくなると考えられ、経済的にも一応の見通しは得られている。

そこで、この製造技術を組み込んだ**図-5**に示すコンクリート資源循環システムを提案した。

### 2.2 コンクリート資源循環システムの概要

コンクリート資源循環システムは、コンクリート造の解体建物から、高品質の再生細骨材、再生粗骨材および微粉末を回収し、再生細・粗骨材は構造用

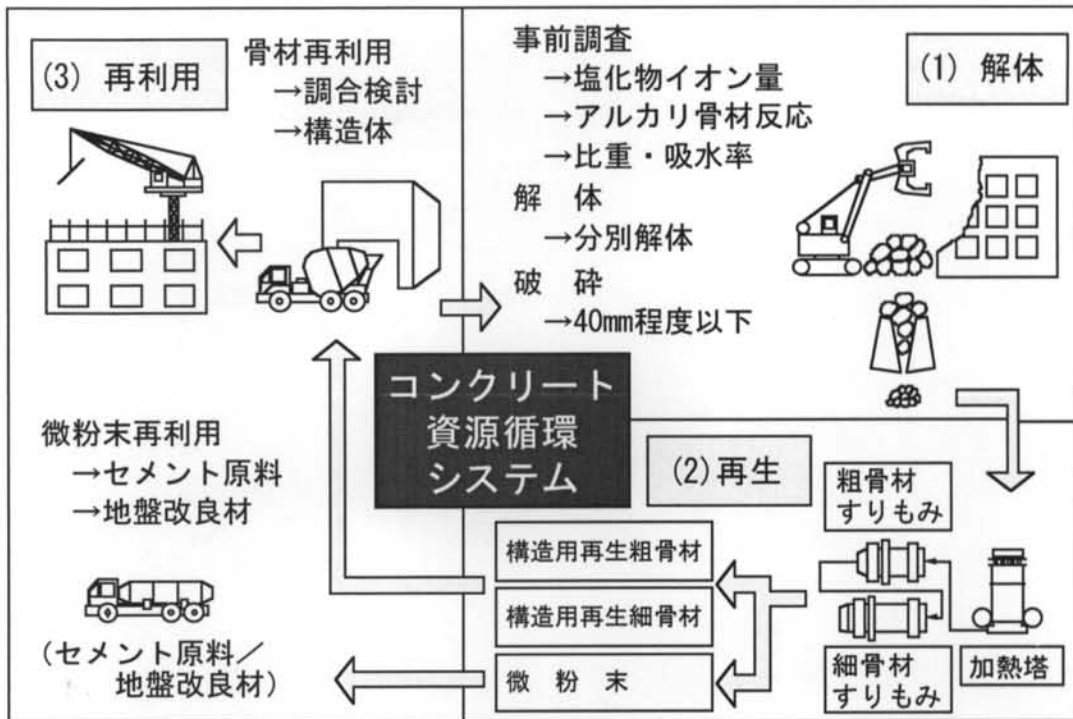


図-5 コンクリート資源循環システム

骨材として、微粉末はセメント原料あるいは地盤改良材として、新規の建物に利用するもので、解体コンクリートを100%再利用するだけでなく、繰り返し再利用することをコンセプトとしたものである。

適用の際の手順は次のとおりである。

(1) 事前調査：建物解体前に、コンクリートの塩化物量や骨材のアルカリ骨材反応性の有無ならびに密度・吸水率などを調査し、当該コンクリートのリサイクルへの適否を判定する。

(2) 解体・破砕：建物を分別解体し、夾雑物をできる限り取り除き、解体コンクリートがらを40mm程度以下に破砕する。

(3) 骨材製造：破砕したがらを再生骨材製造プラントで、加熱すりもみ法によりJIS規格を満足する構造用再生骨材と微粉末とに分離する。

(4) 微粉末再利用：微粉末はセメントの成分を主体としているため、セメント原料や地盤改良材などに再利用する。

(5) 骨材再利用：構造用再生骨材は、コンクリートの製造に必要な密度や粒度分布などの特性を確認後、要求品質に応じた調合の選定を行い、一般のコンクリートと同様の方法で、建築構造物に打設する。

なお、資源循環のリサイクルの環を回すには、①事前調査におけるリサイクルの適否の判定、②JIS規格を満足する品質の構造用再生骨材の製造、③微粉末の再利用用途の開発、④安定した品質の構造用再生骨材コンクリートの製造および施工等が重要で

あり、実工事においてこれらを検証することにした。

### § 3. 適用工事

#### 3.1 解体工事

リサイクルにあたっては、以下の施設の解体コンクリートを用いた。

##### <A 施設>

- ・所在地：東京都調布市
- ・用途：研究所
- ・建設年：昭和35年
- ・構造・規模：RC造4階（1部SRC造）
- ・建築面積：約2,700m<sup>2</sup>、延床面積：約9,100m<sup>2</sup>

##### <B 施設>

- ・所在地：福岡県北九州市
- ・用途：倉庫（工場内）
- ・建設年：昭和63年
- ・構造：鉄筋コンクリート（テント倉庫基礎）
- ・建築面積：約4000m<sup>2</sup>

外観の目視観察では、いずれも特に問題となるような劣化症状は認められず、健全であった。A施設の外観を写真-1に、B施設で対象としたコンクリート基礎の外観を写真-2に示す。

#### 3.2 新築工事

前述の解体物件より回収した構造用再生骨材は、

当技術研究所の音響実験棟増改築工事に適用した。  
施設の概要を以下に示す。

- ・所在地：東京都江東区
- ・用途：研究所
- ・構造・規模：RC造3階
- ・建築面積：約350m<sup>2</sup>、延床面積：約660m<sup>2</sup>



写真-1 A施設の外観



写真-2 B施設のコンクリート基礎の外観

1~2階立上がり部分にA施設より回収した構造用再生骨材を、3階立上がり部分にB施設より回収した構造用再生骨材を一般の骨材と混合して使用した。

### 3.3 解体・新築工程

表-1に解体工事、骨材製造および建築工事の工程を示す。なお、B施設の解体はA施設より前に行われており、B施設からの構造用再生骨材製造は、骨材の回収試験を兼ねて行った。

## § 4. 事前調査および解体

### 4.1 原コンクリート調査

解体建物に使用されていたコンクリートの調査結果を表-2に示す。

A施設は、立地条件が海岸から1km以上離れており、建設年代も古いことから、塩化物イオン量の調査は簡易法で行った<sup>11)</sup>。一方、B施設は海岸近くにあり、建設年代および立地から、海砂の使用が予想されたため、JCI-SC5法による塩化物イオン量の調査を行った。試験結果より、いずれの施設も塩化物量の問題はないことが確認できた。

### 4.2 原骨材調査

原骨材はコンクリートがらを25mm程度以下に小割りした後、5%塩酸溶液でセメント分を溶解して取り出した<sup>12)</sup>。塩酸溶解処理後、5mmふるいに留まるものを原粗骨材、5~0.15mmのものを原細骨材として各種の試験を行った。原骨材の調査結果を表-3に示す。

アルカリシリカ反応性の試験は、粗骨材は化学法(JIS A 5308 附属書7)で行った。一方、細骨材は粗骨材より表面積が大きいため塩酸溶解による影響

|                        | 2000年 |        |      |     |     | 2001年 |            |            |            |           |    |    |    |    |
|------------------------|-------|--------|------|-----|-----|-------|------------|------------|------------|-----------|----|----|----|----|
|                        | 8月    | 9月     | 10月  | 11月 | 12月 | 1月    | 2月         | 3月         | 4月         | 5月        | 6月 | 7月 | 8月 |    |
| A施設解体工事<br>(東京都調布市)    | 着工    | 調査     | がら搬出 |     |     |       |            |            |            |           |    |    |    | 竣工 |
| 骨材製造<br>(福岡県北九州市)      | B施設   |        | 輸送   | A施設 | 輸送  |       |            |            |            |           |    |    |    |    |
| 音響実験棟増改築工事<br>(東京都江東区) |       | 確認申請提出 | 着工   | 実機  |     |       | 1F<br>2/27 | 2F<br>3/22 | 3F<br>4/19 | 3F<br>5/9 |    |    |    |    |
|                        |       |        |      |     |     |       | 調査検討       |            | 打設         |           |    |    |    |    |

表-1 工程表

| 施設 | コア強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 絶対乾密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 推定W/C*<br>(%) | 塩化物量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|----|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------|------------------------------|
| A  | 22.4                         | 23.6                           | 2.22                          | 65.0          | 検出範囲外**                      |
| B  | —                            | —                              | 2.17                          | —             | 0.27                         |

\*セメント協会法 (F-18) による      \*\*文献6) の方法による

表-2 原コンクリートの調査結果

| 施設 | 種別  | 絶乾密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率<br>(%) | 粗粒率  | アルカリシリカ反応性 |                                       |
|----|-----|------------------------------|------------|------|------------|---------------------------------------|
| A  | 粗骨材 | 川砂利                          | 2.61       | 0.94 | 6.70       | JIS A 5308<br>無害<br>(So: 36, Rc: 44)  |
|    | 細骨材 | 川砂                           | 2.57       | 1.29 | 3.13       | JIS A 1804<br>無害<br>(相対動弾性係数86.6%)    |
| B  | 粗骨材 | 碎石                           | 2.66       | 1.24 | —          | JIS A 5308*<br>無害<br>(So: 21, Rc: 67) |
|    | 細骨材 | 海砂                           | 2.54       | 2.06 | —          | JIS A 5308*<br>無害<br>(So: 15, Rc: 73) |

\*製品の品質管理試験結果で代用

表-3 原骨材の調査結果

| 施設 | ふるいを通るものの質量百分率 (%) |      |      |      |     | 含水率<br>(%) | 夾雑物の<br>割合<br>(%) |
|----|--------------------|------|------|------|-----|------------|-------------------|
|    | 50mm               | 40mm | 20mm | 10mm | 5mm |            |                   |
| A  | 100                | 97   | 71   | 46   | 32  | 10.4       | 0.5               |
| B  | 100                | 98   | 50   | 24   | 14  | 7.2        | 0                 |

表-4 がらの品質

を受けやすく、境界線領域にある無害の骨材を無害でないと評価してしまう恐れが高くなるため、迅速法 (JIS A 1308) で行った。なお、B 施設のコンクリートは、昭和 61 年の規制<sup>13)</sup>以降の昭和 63 年の建設であることから、製品の品質管理試験結果で代用することにした。

A 施設は川砂利、川砂の組合せであり、B 施設は碎石・海砂の組合せであった。粗骨材の吸水率はいずれも 1.5%以下であり、細骨材の吸水率はいずれも 2.5%以下であることから、JIS A 5308 (粗骨材の吸水率 3.0%以下、細骨材の吸水率 3.5%以下) に対して十分に余裕があり、アルカリシリカ反応性も無害と判定されたため、リサイクルの適性には問題ないと判断された。

#### 4.3 解体および破碎

A 施設では、造作物・仕上げ材・設備を分別解体し、搬出した後、解体は圧碎工法と転倒工法の併用作業によって行った。解体したコンクリートがらは更に小割りして鉄筋を除去した後、移動式破碎機 (ジョークラッシャ) で 40mm 程度以下に破碎した。なお、夾雑物の混入は、製造される構造用再生骨材の品質に影響するばかりでなく、再生骨材製造プラントの運転にも支障を来すため、破碎時にもできるかぎり除去した。

一方、B 施設では、油圧プレーカを用いて解体を行った。人頭大の解体がらを中間処理工場に輸送し

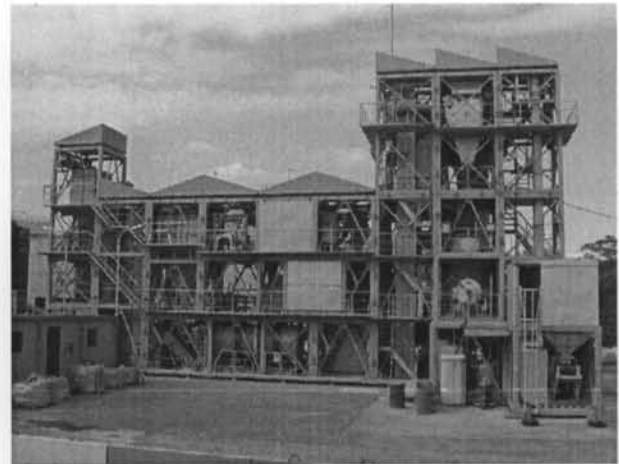


写真-3 再生骨材製造プラント (NEDO 研究資産)

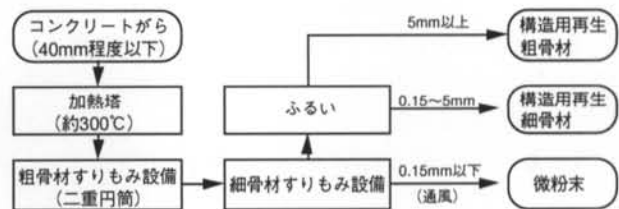


図-6 再生骨材製造プラント

て小割した後、13mm のふるいで土砂および細粒分を除去し、破碎機 (ジョークラッシャ) で 40mm 程度以下に破碎した。

#### 4.4 破碎したがらの品質

再生骨材製造プラントへ輸送したコンクリートがらの品質を表-4に示す。

破碎したがらの品質は、いずれもプラントの受入基準 (50mm 程度以下、水が滴らない、夾雑物がほとんど含まれない) を満足していた。なお、A 施設ではふるいを通さなかったため、全体的に粒径が細かく、5mm 以下の細粒分も 32%と多かった。

### § 5. 構造用再生骨材の製造

#### 5.1 製造方法

構造用再生骨材の製造は移設型の加熱すりもみ法によるパイロットプラント<sup>14)</sup>で行った。使用した再生骨材製造プラントを写真-3に、製造プロセスを図-6に示す。

再生骨材製造プラントに受け入れた 40mm 程度以下のコンクリートがらは加熱設備内で約 300℃に加熱した後、二重円筒型の粗骨材すりもみ設備へと投入し、媒体である鉄球とともに回転させることで、

主にモルタル分をすりもんだ。この際、すりもみによって生じた細粒は、すりもみの効果を上げるため二重円筒の内側（4mm のメッシュ）から外側へと排出した。

次にすりもみの終わった粗骨材と除去した細粒を再び合併し、細骨材すりもみ設備へ投入し、このなかで、媒体を鉄球から粗骨材に変えてセメント分をすりもみ、最終的に 5mm ふるいにより、構造用再生粗骨材と構造用再生細骨材に分級した。なお、すりもみの効率を上げるために、微粉末（0.15mm 程度以下の粉末）は発生した時点で通風により順次回収した。

## 5.2 製造管理

構造用再生骨材の製造にあたっては、JIS A 5308 および JIS A 5005 を基に品質の管理基準を定め、管理基準を満足するよう骨材の製造を行った。管理基準は、構造用再生細骨材は絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  以上（JIS の数字の丸め方に基づくと  $2.45\text{g/cm}^3$  が下限）、吸水率 3.5% 以下とし、構造用再生粗骨材は絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  以上、吸水率 3.0% 以下とした。

構造用再生骨材の製造時の生産ロット（1 回/日）ごとの絶乾密度および吸水率の品質変動を図-7 および図-8 に示す。A 施設のがら約 1200 トン、B 施設のがら約 400 トンを処理した結果である。構造用再生細・粗骨材の絶乾密度および吸水率は管理基準を満足するように製造可能であることが検証できた。なお、今回の構造用再生骨材の製造では、処理速度 3~7t/h、がらの加熱温度  $300\pm 15^\circ\text{C}$ 、粗骨材すりもみ設備の回転数は臨界速度を 55~80%、細骨材すりもみ設備の回転数を臨界速度の 60~85% とした。

## 5.3 構造用再生骨材の品質

構造用再生骨材の品質の一覧を表-5 に、粒度分布を図-9 に、写真を写真-4、写真-5 に示す。

構造用再生骨材の品質は、いずれも JIS A 5308 および JIS A 5005 をもとに定めた管理基準を満足していることを確認した。施設 A の構造用骨材の方が全体的に密度が小さく、吸水率や 1.95 浮遊不純物量は幾分大きかった。また、粒形判定実積率は碎石・海砂を使用した施設 B の方が幾分小さいものの、すりもみ処理を行っているため、比較的大きな値を示した。

粒度分布では細骨材で 2.5~5.0mm の割合が多く、本来粗骨材に入るべき 5.0mm 以下の粒子が混入していると考えられた。ふるいの寸法を 5mm より小さくすることでこの問題は解消できると思われる。

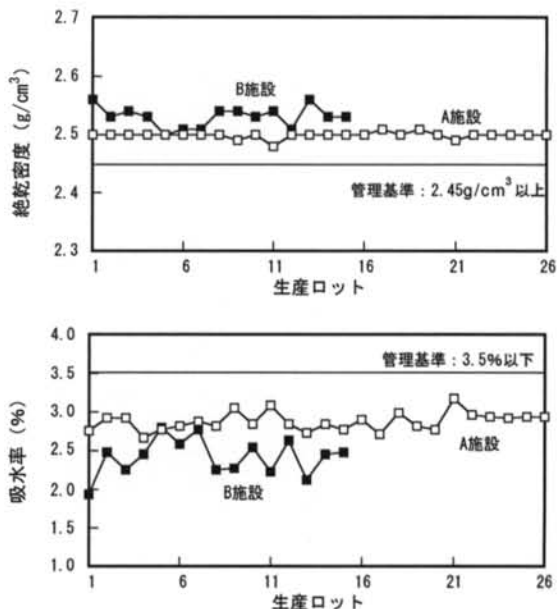


図-7 細骨材の品質変動

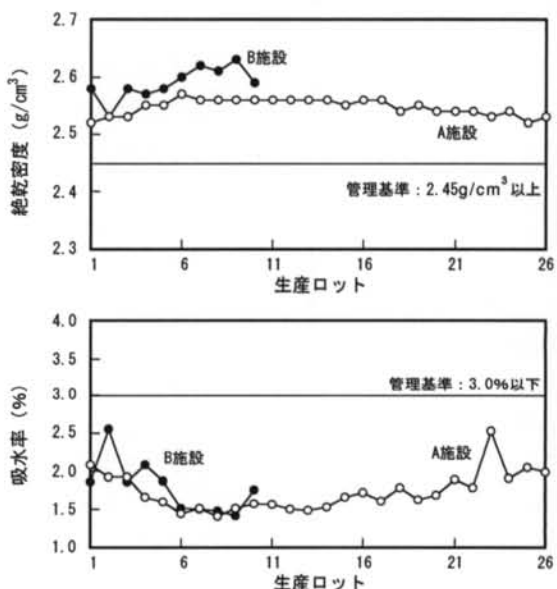


図-8 粗骨材の品質変動

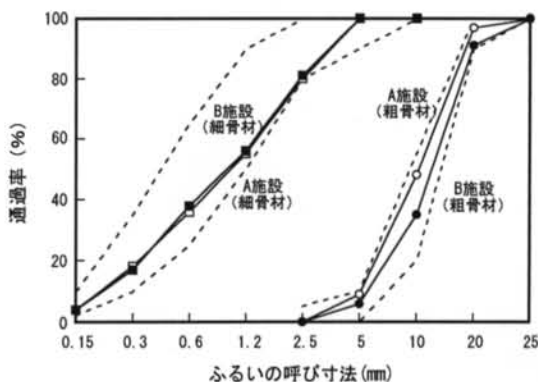


図-9 細・粗骨材の粒度分布

なお、構造用再生骨材の回収率（コンクリートがらに対する質量比）は平均でA施設が粗骨材 27%、細骨材 34%、B施設が粗骨材 37%、細骨材 24%であった。A、B施設とも骨材全体の回収率は約 60%（残りの約 40%が微粉末）であり、これまでの実績<sup>例えは14)</sup>と比較すると、幾分低めの値であった。

## § 6. 微粉末の再利用に関する検討

### 6.1 微粉末の物理的性質

資源循環の観点からセメント成分を主体とする微粉末はセメント原料として再利用するのが適当と考えられる。しかし、セメント製造を行うには、セメント工場への輸送費用および受入費用が発生し、高額のコストがかかる。そこで、微粉末の用途開発として、地盤改良材としての適用性の検討を行うことにした。

構造用再生骨材の製造の際に副産物として得られた微粉末の品質を表-6に示す。微粉末は 150 $\mu$ mの残分が 10%以上あるものの、比表面積が普通ポルトランドセメントより大きく、全体としては非常に細かいことがわかった。また、環境庁告示第 46号「土壌の汚染に係る環境基準について」の試験方法に準じて行った六価クロムの溶出試験結果は普通ポルトランドセメントに比較して非常に小さく、同告示の環境基準である 0.05ppm 以下であった。

### 6.2 地盤改良材としての適用性の検討

施設の骨材製造時に副産物として得られた微粉末を W/B=100%のスラリーとして、含水比を 20%に調整した豊浦産標準砂に単位体積当たり 200kg/m<sup>3</sup>混合し、一軸圧縮強さを調べた結果を図-10に示す。一軸圧縮強さは、普通ポルトランドセメントを混合した場合と比較して 1/10 程度と小さいものの、残土と汚泥とを区別するための判定指標<sup>15)</sup>である 49kN/m<sup>2</sup>を十分に上回るものであり、軟弱な建設発生土の再利用を可能にする強度発現が認められた。したがって、地盤改良材として適用できる可能性があることが確認できた。

## § 7. 実機実験

### 7.1 実験概要

一般の JIS 工場の実機ミキサを用いて構造用再生骨材コンクリートの練混ぜを行い、フレッシュコンの経時変化を調べた。また、供試体の水中養生を 5、

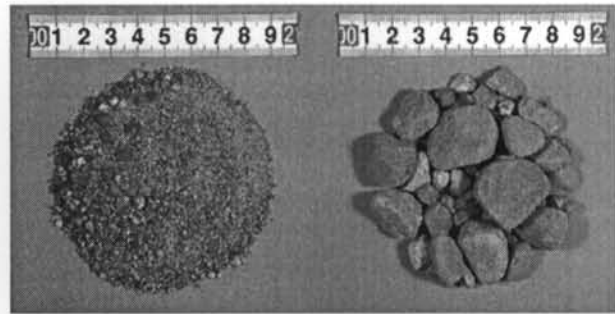


写真-4 施設 A 骨材 (左:細骨材、右:粗骨材)

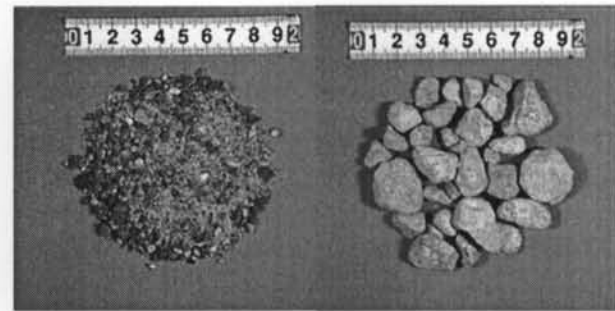


写真-5 施設 B 骨材 (左:細骨材、右:粗骨材)

| 管理項目                      | 構造用再生細骨材              |                      |                      | 構造用再生粗骨材             |                      |                     |
|---------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
|                           | 施設A                   | 施設B                  | 管理基準*                | 施設A                  | 施設B                  | 管理基準*               |
| 絶対密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.50                  | 2.53                 | 2.5 以上 <sup>A</sup>  | 2.55                 | 2.59                 | 2.5 以上 <sup>A</sup> |
| 吸水率 (%)                   | 2.88                  | 2.45                 | 3.5 以下 <sup>A</sup>  | 1.67                 | 1.78                 | 3.0 以下 <sup>A</sup> |
| 粒径判定実積率 (%)               | 61.0                  | 59.8                 | 53 以上 <sup>A</sup>   | 65.0                 | 63.0                 | 55 以上 <sup>A</sup>  |
| 粒度分布                      | 標準粒度                  | 標準粒度                 | 標準粒度                 | 標準粒度                 | 標準粒度                 | 標準粒度 <sup>A</sup>   |
| 粗粒率                       | 3.07                  | 3.04                 | —                    | 6.46                 | 6.68                 | —                   |
| 微粉分量 (%)                  | 0.29                  | 0.56                 | 7.0 以下 <sup>A</sup>  | 0.01                 | 0.28                 | 1.0 以下 <sup>A</sup> |
| 塩化物量 (%)                  | 0.003                 | 0.007                | 0.04 以下 <sup>A</sup> | —                    | —                    | —                   |
| 7日加水反応性 (mmol/L)          | 無害<br>Sc:26<br>Rc:136 | 無害<br>Sc:15<br>Rc:73 | —                    | 無害<br>Sc:35<br>Rc:78 | 無害<br>Sc:21<br>Rc:67 | —                   |
| 1.95浮遊不純物量 (%)            | 0.3                   | 0.05                 | 0.5 以下 <sup>A</sup>  | 0.3                  | 0.01                 | 0.5 以下 <sup>A</sup> |

\* JIS規格をもとに定めた管理基準 (AはJIS A 5308、BはJIS A 5005による)

表-5 骨材の品質一覧

| 種類           | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) | 150 $\mu$ m残分 (%) | 90 $\mu$ m残分 (%) | 六価クロム (ppm) |
|--------------|-------------------------|---------------------------|-------------------|------------------|-------------|
| A施設の微粉末      | 2.43                    | 5,930                     | 13.6              | 27.8             | 0.033       |
| B施設の微粉末      | 2.49                    | 6,120                     | 15.1              | 25.2             | 検出せず        |
| 普通ポルトランドセメント | 3.16                    | 3,430                     | 0                 | 1.4              | 0.299       |

表-6 微粉末の品質

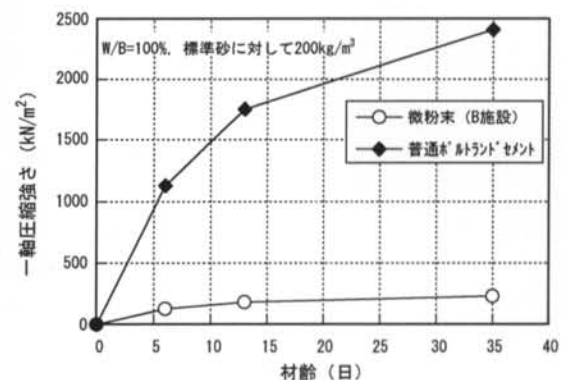


図-10 一軸圧縮強さ

10, 20°Cの3水準で行い、材齢28日の圧縮強度試験を行った。

コンクリートの調合条件を表-7に、使用材料の一覧を表-8に、用いた調合を表-9に示す。なお、R1~R3の調合ではA施設より回収した構造用再生細・粗骨材をそれぞれ単独で使用したのに対し、M1~M3調合ではB施設より回収した構造用再生骨材を普通骨材(山砂および砕石)と4:6の割合で混合して使用した。なお、M1~M3調合では単位水量を170kg/m<sup>3</sup>以下とするために、AE減水剤は一般のものより高い減水率のものを使用した。

## 7.2 実験結果

### 1) フレッシュコンクリート

スランブおよび空気量の経時変化を図-11、図-12に示す。なお、R1~R3調合の空気量は、骨材修正係数を0.3%として算出した。

R1~R3調合ではスランブ、空気量の変化は小さ

| 設計基準強度              | 温度補正值                   | 単位水量                    | スランブ | 空気量  |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|------|------|
| 21N/mm <sup>2</sup> | 0.3, 6N/mm <sup>2</sup> | 170kg/m <sup>3</sup> 以下 | 18cm | 4.5% |

表-7 コンクリートの調合条件

| 名称   | 記号    | 品質ほか  |
|------|-------|---|
| セメント | C     | 普通ポルトランドセメント<br>密度3.16g/cm <sup>3</sup> 、比表面積3,300cm <sup>2</sup> /g                    |
| 水    | W     | 工業用水  |
| 細骨材  | RSA   | 構造用再生細骨材(A施設のがらより製造)<br>表乾密度2.57g/cm <sup>3</sup> 、吸水率2.84%、FM3.04                      |
|      | RSB   | 構造用再生細骨材(B施設のがらより製造)<br>表乾密度2.59g/cm <sup>3</sup> 、吸水率2.53%、FM3.03                      |
|      | OS    | 千葉県市原市万田野産山砂<br>表乾密度2.59g/cm <sup>3</sup> 、吸水率2.37%、FM2.15                              |
| 粗骨材  | RGA   | 構造用再生粗骨材(A施設のがらより製造)<br>最大寸法20mm 実積率64.4%<br>表乾密度2.59g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.92%、FM6.47 |
|      | RGB   | 構造用再生粗骨材(B施設のがらより製造)<br>最大寸法20mm 実積率64.1%<br>表乾密度2.64g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.51%、FM6.71 |
|      | OG    | 北海道十勝郡岩手産砕石2005 実積率62.2%<br>表乾密度2.70g/cm <sup>3</sup> 、吸水率0.56%、FM6.55                  |
| 混和剤  | No.70 | AE減水剤   |
|      | 78H   | AE減水剤(高減水品)   |

表-8 使用材料の一覧

| 記号 | 骨材の組合せ           | 粗骨材<br>嵩容積 | W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |       |       | AE減水剤*<br>(%) |
|----|------------------|------------|------------|------------|--------------------------|-----|-------|-------|---------------|
|    |                  |            |            |            | C                        | W   | S     | G     |               |
| R1 | RSA<br>RGA       | 0.60       | 53.9       | 44.3       | 306                      | 165 | 789   | 1000  | 0.25          |
| R2 |                  | 0.60       | 49.0       | 43.1       | 343                      | 168 | 750   | 1000  | 0.25          |
| R3 |                  | 0.60       | 44.0       | 41.0       | 393                      | 173 | 699   | 1000  | 0.25          |
| M1 | RSB+OS<br>RGA+OG | 0.57       | 57.1       | 49.6       | 298                      | 170 | 876** | 949** | 1.5           |
| M2 |                  | 0.57       | 53.1       | 49.1       | 321                      | 170 | 858** | 949** | 1.5           |
| M3 |                  | 0.57       | 49.7       | 48.6       | 342                      | 170 | 840** | 949** | 1.5           |

\*AE減水剤はR調合ではNo.70、M調合では78Hを使用  
\*\*構造用再生骨材と普通骨材を4:6の割合で混合使用

表-9 実機実験の調合

かったが、スランブの形状がやや粗々しく、単位粗骨材量が多く感じられた。一方、M1~M3調合ではスランブ形状は良好であったが、水セメント比が高く、単位セメント量の少ないM1調合において、90分後のスランブが、13.5cmまで低下し、スランブロスが大きくなる傾向が認められた。

### 2) 圧縮強度

セメント水比と材齢28日の標準養生強度との関係を図-13に示す。

構造用再生骨材コンクリートにおけるセメント水比と圧縮強度との関係は工場の実績による関係と大差なかった。関係式を以下に示す。

$$R \text{ 調合: } \sigma_{28} = -14.1 + 24.8C/W \quad (1)$$

$$M \text{ 調合: } \sigma_{28} = -6.1 + 15.1C/W \quad (2)$$

$$\text{工場式: } \sigma_{28} = -16.9 + 26.2C/W \quad (3)$$

また、圧縮強度とヤング係数との関係を図-14に示す。圧縮強度に対するヤング係数の割合は、R調合よりM調合が幾分大きいものの、大差なかった。また建築学会式( $\gamma=2.3$ )と比較すると、同等か、幾分高い程度であった。

### 3) 養生温度の影響

各温度で養生した供試体の強度と20°Cで養生した供試体の圧縮強度の差を養生温度別に図-15に

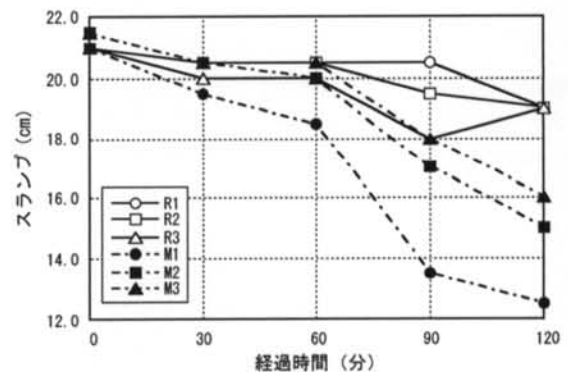


図-11 スランブフローの経時変化

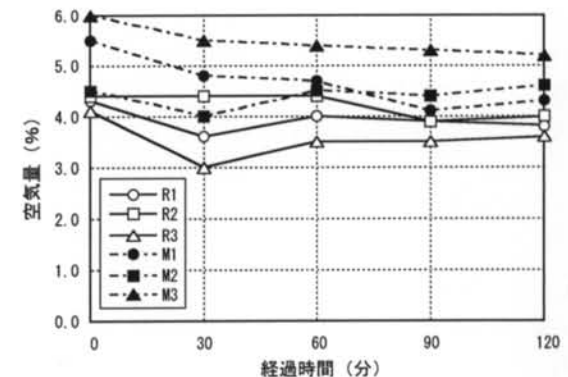


図-12 空気量の経時変化



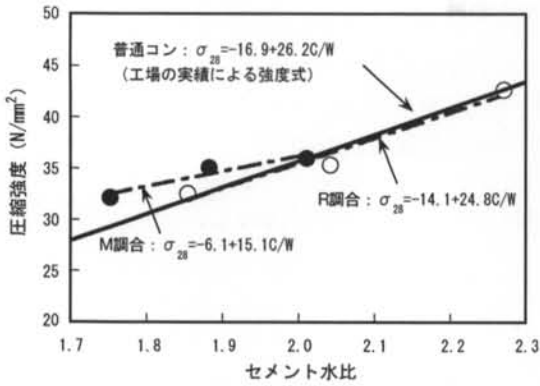


図-13 セメント水比と圧縮強度との関係

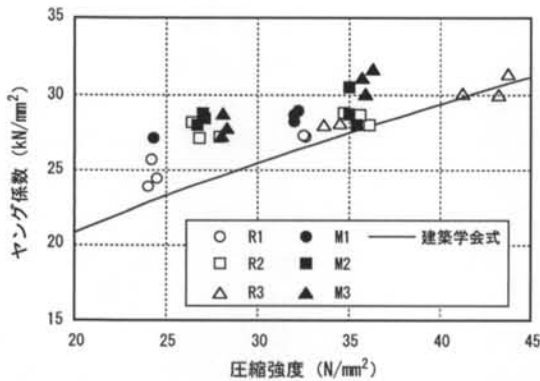


図-14 セメント水比と圧縮強度との関係

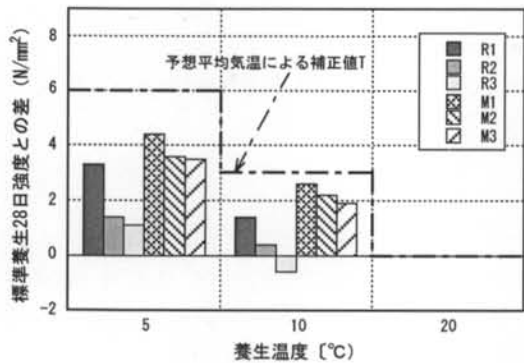


図-15 養生温度の影響

示す。

養生温度 10°Cおよび 5°Cの結果より、JASS5 の予想平均気温による補正值 T は、予想平均気温が 8°C以上 16°C未満の場合、および 3°C以上 8°C未満の場合ともに、安全側の数値であることを確認した。

#### 4) 調合の選定

調合強度は次の 2 式を満足するように定めた。

$$F_{28} = 0.85 (F_c + \Delta F + T) + 3\sigma \quad (4)$$

$$F_{28} = F_c + \Delta F + T + 2\sigma \quad (5)$$

ここで、 $F_{28}$  : 調合強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$F_c$  : 設計基準強度 (N/mm<sup>2</sup>)

| 調合 | 骨材の組合せ         | 呼び強度 | W/C (%) | s/a (%) | 単位置 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |       |       | AE減水剤* (%) |
|----|----------------|------|---------|---------|--------------------------|-----|-------|-------|------------|
|    |                |      |         |         | C                        | W   | RS    | RG    |            |
| R  | RSA, RGA       | 30   | 49.0    | 46.0    | 343                      | 168 | 802   | 951   | 0.25       |
| M  | RSB+OS, RGA+OG | 27   | 53.1    | 49.1    | 321                      | 170 | 858** | 949** | 1.5        |

\*AE減水剤はR調合ではNo. 70、M調合では78Hを使用

\*\*構造用再生骨材と普通骨材を4:6の割合で混合使用

表-10 選定した調合

$\Delta F$  : 構造体コンクリートの強度と供試体の強度の差を考慮した割増し ( $\Delta F = 3\text{N/mm}^2$ )

T : 予想平均気温による圧縮強度の補正值

$\sigma$  : 標準偏差 (N/mm<sup>2</sup>)

標準偏差を  $0.1 \times (F_c + \Delta F + T)$  と設定すると、(4) (5) 式より、調合強度は  $F_{28} = 36.0\text{N/mm}^2$  ( $T = 6\text{N/mm}^2$ )、 $F_{28} = 32.4\text{N/mm}^2$  ( $T = 3\text{N/mm}^2$ ) となる。

R 調合では、(1) 式よりセメント水比を算定すると  $C/W = 2.02$  となり、これより水セメント比を求め、安全側に数字を丸め  $W/C = 49.0\%$  と設定した。なお、実施工では施工性を考慮して細骨材率を幾分上げることとした。

一方、M 調合では、実験に得られた関係式 (2) ではなく、工場の実績による関係式 (3) を採用した。ただし、 $T = 0\text{N/mm}^2$  に相当する調合では、実験結果より施工時にスランプロスが大きくなることが予想されるため、水セメント比は  $T = 3\text{N/mm}^2$  に相当する  $W/C = 53.1\%$  に設定した。

最終的に選定した調合を表-10 に示す。

## § 8. 構造用再生骨材コンクリートの施工

### 8.1 フレッシュコンクリート

構造用再生骨材コンクリートの打込み日、調合の種類、数量は以下の通りである。

- ・ 1 階 : 平成 13 年 2 月 27 日 調合 R 180m<sup>3</sup>
- ・ 2 階 : 平成 13 年 3 月 22 日 調合 R 134m<sup>3</sup>
- ・ 3 階 : 平成 13 年 4 月 19 日 調合 M 125m<sup>3</sup>
- 平成 13 年 5 月 9 日 調合 M 40m<sup>3</sup>

荷卸時におけるスランプ、空気量の試験結果を図-16、図-17 に示す。荷卸時のスランプは  $18.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は  $4.5 \pm 1.5\%$  の範囲にあり、いずれも管理値を満足していた。

### 8.2 施工状況

理論吐出量  $30 \sim 66\text{m}^3/\text{h}$  でポンプ圧送した際の圧送前後のスランプ、空気量の変化を図-18、図-19

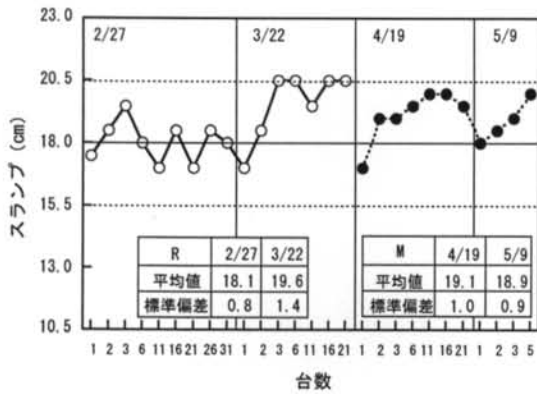


図-16 スランプ試験結果

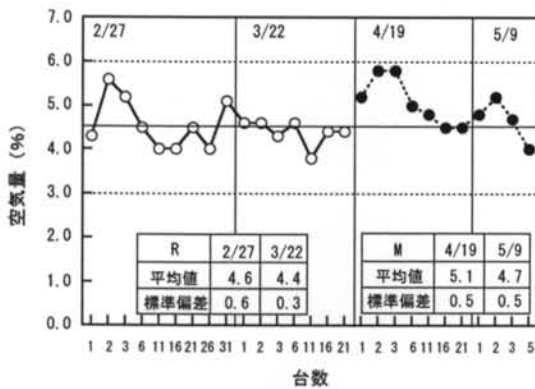


図-17 空気量試験結果

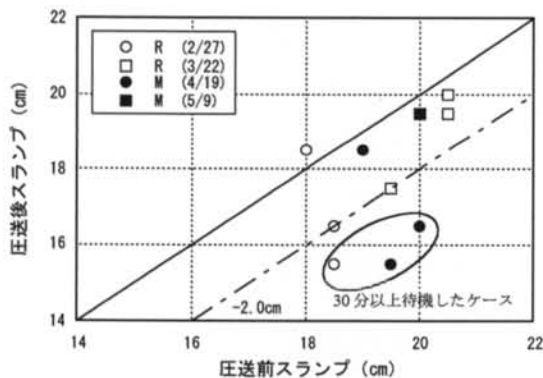


図-18 圧送前後のスランプ変化

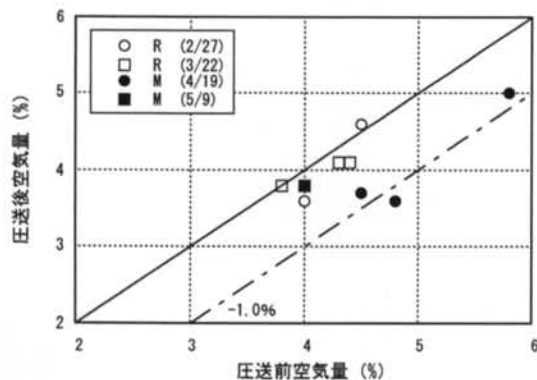


図-19 圧送前後の空気量変化

に示す。30分以上待機して圧送したものでスランプロスは何分大きかったものの、全体的には、スランプ、空気量とも JASS 5 で示されている普通コンクリートの品質変化の限度（スランプ 2.0cm、空気量 1.0%）内に概ね収まっていた。

なお、施工状況は仕上げ性も含めて良好であり、通常のコンクリートと同様に施工できた。竣工時の音響実験棟の外観を写真-6に示す

### 8.3 圧縮強度

材齢 28 日の荷卸し時における標準養生強度の試験結果を図-20に、材齢 28 日の現水養生強度の試験結果を図-21に示す。

いずれの打込み日においても、材齢 28 日の標準養生強度は管理強度を上回っており、材齢 28 日の現場水中養生強度は品質基準強度 ( $F_c + \Delta F$ ) を上回っていた。

建物の打込みに合わせて、図-22に示す柱を模擬した試験体 (60cm×60cm、高さ 1m) を打ち込み、材齢 28 日と材齢 91 日にコア強度試験を行った。試験結果を図-23および図-24に示す。

R 調合の材齢 91 日のコア強度は、平均 46.6N/mm<sup>2</sup>、標準偏差 4.45N/mm<sup>2</sup>であり、M 調合のコア強度は平均 37.5N/mm<sup>2</sup>、標準偏差 2.81N/mm<sup>2</sup>であった。M 調合の方が R 調合よりばらつきは小さかった。

なお、いずれのコア強度も設計基準強度を大きく上回っており、所要の強度を十分満足していることが確認できた。

### 8.4 耐久性

建物の打込みに合わせて、長さ変化率試験 (JIS A 1129) および凍結融解抵抗性試験 (JIS A 6204 附属書 2) の供試体を採取した。試験結果を図-24および図-25に示す。



写真-6 音響実験棟

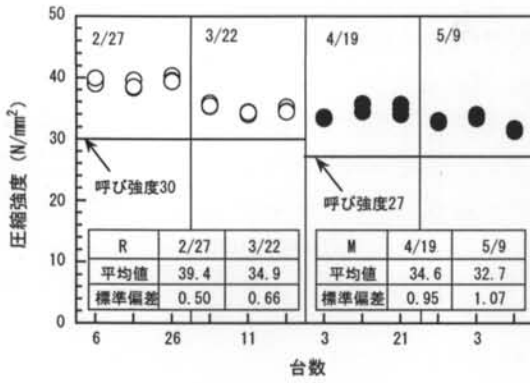


図-20 材齢 28 日の標準養生強度

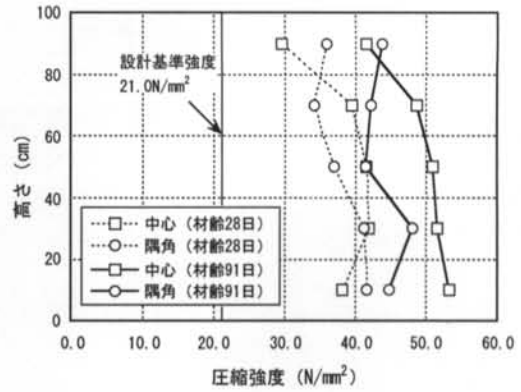


図-23 コア強度 (R 調査)

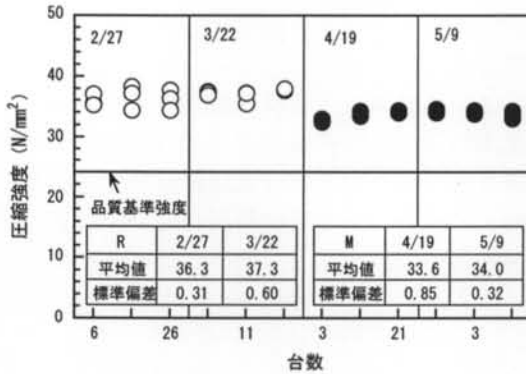


図-21 材齢 28 日の現水養生強度

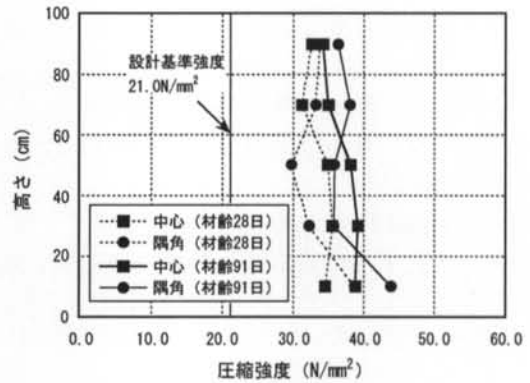


図-24 コア強度 (M 調査)

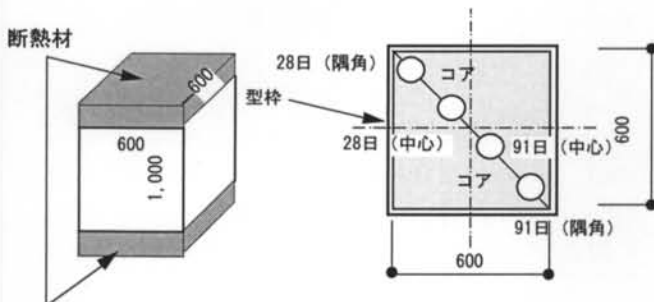


図-22 模擬試験体の概要

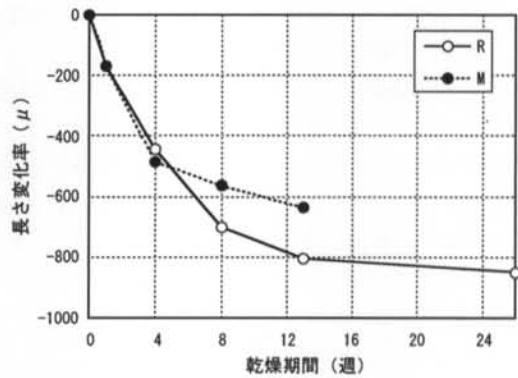


図-25 乾燥収縮試験結果

長さ変化率は M 調査より R 調査で大きく、6 ヶ月で  $850 \mu$  に達していたが、一般のコンクリートの範囲にあると考えられる。また、300 サイクル終了時点での相対動弾性係数も R 調査で幾分小さくなったが、いずれの調査も 60% を超え、JASS 5 の耐凍害性の性能区分 A に属し、凍結融解抵抗性には問題ないことがわかった。

したがって、JIS 規格を満足する構造用再生骨材を使用すれば、耐久性についても問題はないと考えられる。

なお、当該建物および試験体に関しては、今後長期的なモニタリングを行い、ひび割れや中性化などの耐久性関連のデータの蓄積を行う予定である。

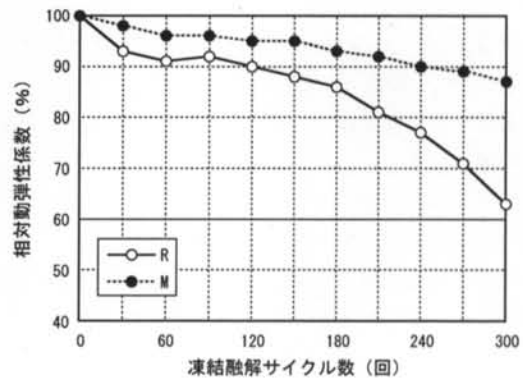


図-26 凍結融解試験結果

## § 9. まとめ

コンクリート造の解体建物から、高品質の再生細骨材、再生粗骨材および微粉末を回収し、再生細・粗骨材は JIS 規格を満足する品質の構造用骨材として、微粉末はセメント原料あるいは地盤改良材として、新規の建物に利用するコンクリート資源循環システムを提案した。

本システムの検証を目的に、実際の建築工事に適用し、得られた主な結果を以下に示す。

(1) 事前調査によって、解体コンクリートのリサイクルへの適性を確認できることが検証できた。

(2) 加熱すりもみ法によって、JIS 規格を満足する構造用再生骨材を安定して製造できることが確認できた。

(3) 構造用再生骨材の製造の際に副産物として得られる微粉末は、地盤改良材としても適用できる可能性があることがわかった。

(4) 構造用再生骨材を用いて実機実験を行い、所要の品質を満足する構造用再生骨材コンクリートの調合設計を行うことができた。

(5) 構造用再生骨材コンクリートは通常の方法で

製造・施工でき、一般のコンクリートとほぼ同等の品質を有することを確認できた。

今後、高度成長期に建てられた建物が役目を終え、大量の解体コンクリートが発生することが予想される。コンクリート資源循環システムはこうした解体コンクリートの再利用問題の有力な解決策の一つであり、普及にあたっては、実績作りとともに、社会的コンセンサス、法体系・基準の整備などが必要と考えられる。

## 謝辞

本システムの開発は東京電力（株）と共同で行いました。また、開発を進めるにあたっては、北海道大学友澤教授にご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。

さらに、構造用再生骨材の製造には、新エネルギー・産業技術総合開発機構が平成 10 年度から取り組んできた「廃コンクリート等建材リサイクル技術の開発」の成果である研究資産を用い、三菱マテリアル（株）の協力を得ました。ここに厚く御礼を申し上げます。

## <参考文献>

- 1) (財) 原子力発電技術機構：軽水炉等改良技術確証試験 実用発電用原子炉は色設備確証試験に関する調査報告書 (2/6) 平成 10 年度, pp. 104-120, 1999
- 2) (財) 先端建設技術センター：建設リサイクル推進懇談会低減, 1996
- 3) 工藤勝弘：骨材産業の現状と今後の課題, セメント・コンクリート, pp. 14-25, 1998. 08
- 4) 国土開発技術研究センター：再生コンクリートの利用技術の開発, 平成 8 年度報告書, 1997
- 5) 森 富雄他：再生粗骨材コンクリートの実躯体への適用, GBRC, Vol. 25, No. 1, pp. 27-33, 2000
- 6) 小島正朗他：高品質再生粗骨材を用いた再生コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol. 22-2, pp. 1123-1128, 2000
- 7) 古賀康男他：原子力発電所解体コンクリートからの骨材の分離技術, 放射性廃棄物研究 16, No. 2, pp. 17-25, 1996
- 8) 黒田泰弘他：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集 Vol. 22-2, pp. 1105-1110, 2000
- 9) 岡本雅道他：高品質骨材回収技術の開発, 資源処理技術, pp. 203-204, 1998
- 10) (財) 経済調査会：月刊 積算資料, p. 783, 2001. 08
- 11) 太田達見他：コンクリート中の塩化物量簡易測定法に関する実験的研究, コンクリート工学論文集 Vol. 23-2, pp. 535-540, 2001
- 12) 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集, pp. 1099-1104, 2000. 06
- 13) 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の開発, コンクリート工学年次論文集 Vol. 22-2, pp. 1093-1098, 2000
- 14) 建設省住宅局建築指導課長通達：コンクリートの耐久性確保に係る措置について, 1986. 06
- 15) 厚生省生活衛生局水道環境部産業廃棄物対策室監修：建設廃棄物処理ガイドライン, ぎょうせい, 1990