

# 論文 ガラス繊維補強コンクリートのリサイクルに関する基礎的研究

竹内 好雄\*1・西堀 真治\*2

**要旨:** ガラス繊維補強コンクリートのリサイクル性を確認するため、その破砕性及び破砕物をガラス繊維補強コンクリートまたはコンクリートに添加した場合の諸特性を調査した。ガラス繊維補強コンクリートの破砕は容易であるが、破砕の過程において多くの微粉末が発生することがわかった。そのため、再生細骨材と再生微粉の再利用の検討を行い、適切な配合設計を行えば再利用が可能であることがわかった。

**キーワード:** ガラス繊維補強コンクリート, リサイクル, 再生骨材, 細骨材, 微粉

## 1. はじめに

コンクリート構造物の老朽化に伴う解体・更新需要の増加により、コンクリート塊の発生量は年々増加傾向にある。コンクリート塊の大部分は路盤材として再利用されているが、各種の方法で骨材を取り出した再生骨材の活用が進んでおり、JIS A 5021が制定されている。一方で、ガラス繊維補強コンクリート(以下GRC)も建築物の内外装材として多く使用されており、建築物の建て替え時にそのリサイクルが問題となってきた。しかしながら、GRCのリサイクルに関しては全く調査報告が無く、再利用の可能性があるのかどうかすらわからないというのが現状であった。

そこで、長期間屋外で供用されたGRCを想定して、促進養生によって作成した試験体の破砕性を確認し、得られた再生細骨材と再生微粉を添加したGRCまたはコンクリートの曲げや圧縮などの諸特性を調査し、配合設計や置換率決定のための基礎的な研究を行った。

## 2. GRCの破砕性

### 2.1 原GRCの作成

本研究で粉砕を行った原GRCの配合を表-1に示す。原GRCは、屋外暴露25年に相当するGRCパネルを想定することとした。そのため破砕試験用試験片は、ガラス繊維含有率を5wt%、カット長を31mmに調整したダイレクトスプレー法により、厚さ40mmのGRCを成形し、そのGRCから100×100mmの寸法で切り出し、材齢28日より80℃の温水に10日間浸漬することで促進養生を行って作成した。GRCの場合、80℃温水浸漬1日で東京の屋外暴露2.5年に相当するといわれている<sup>1)</sup>。

### 2.2 原GRCの破砕

本研究ではGRCの破砕にジョークラッシャーを用いた。写真-1にその全体写真を示す。

原GRC試験片をジョークラッシャーの歯間隔を15mmにして粉砕を一回行い、5mmのふるいを通したところ、

表-1 原GRCの配合(質量部)

| セメント | 珪砂6号 | 高性能AE減水剤 | 水  | ガラス繊維 |
|------|------|----------|----|-------|
| 100  | 80   | 0.7      | 34 | 10.7  |



写真-1 ジョークラッシャー

約20%がふるいを通過した。この通過した20%の粉砕品のふるいわけ試験結果を表-2に示す。ジョークラッシャーの歯間隔が15mmにもかかわらず、5mm以下の破砕品の約半分は1.2mm以下であった。また、破砕品に含まれるガラス繊維の状態を観察したが、同様に細かく破砕されていた。表-3に補強繊維の弾性率を示すが、ガラス繊維は、その高い弾性率により、繊維自体も破断されやすく、そのガラス繊維を補強繊維として使用しているGRC

\*1 日本電気硝子(株) ガラス繊維事業部技術部担当課長 (正会員)

\*2 日本電気硝子(株) ガラス繊維事業部技術部担当課長

は、繊維補強コンクリートの中でも特に破碎処理しやすい材料と思われる。また、ガラス繊維の主成分の約60%は骨材と同じ酸化珪素であり、繊維質を分離する必要はないと思われる。逆に弾性率の低い有機繊維を用いた繊維補強コンクリートの場合、繊維が破断されにくくなるため、繊維が破碎モルタルを架橋したり、元の長さのまま残存するなど十分な破碎ができない可能性も考えられる。また、有機質であるため、分離の必要があると思われる。

表-2 一回破碎した破碎品の粒度分布

| 破碎品粒度 | 5~2.5 | 2.5~1.2 | 1.2~0.15 | 0.15~ |
|-------|-------|---------|----------|-------|
| 割合(%) | 26    | 18      | 34       | 15    |

表-3 各種繊維の弾性率

| 繊維の種類    | ガラス | PVA | PP | ナイロン |
|----------|-----|-----|----|------|
| 弾性率(GPa) | 74  | 37  | 15 | 4    |

### 2.3 破碎品の品質

ジョークラッシャーの歯間隔を15~1mmの範囲で調整し、原GRC試験片の破碎を行い、破碎品を採取してふるい分けを行った。5mmふるいに残ったものについては破碎を繰り返し、通過したものについては0.15mmふるいをかけ、5~0.15mmの粒度範囲内の破碎品と0.15mm以下の破碎品にわけて採取した。得られた5~0.15mmの破碎品の粒度分布は、JIS A 1102のふるい分け試験方法に準じて測定を行い、密度及び吸水率は、JIS A 1109の細骨材の密度及び吸水率試験方法に準じて測定を行った。表-4に破碎品の密度及び吸水率を、図-1に破碎品の粒度分布を示す。本研究では5~0.15mmの破碎品を再生細骨材、0.15mm以下の破碎品を再生微粉として取り扱った。

原GRCに使用した珪砂6号の粒径範囲は0.2~0.6mmであり、本研究で細骨材と定義している再生細骨材は、セメントと珪砂の比率がほぼ5:4のモルタルにガラス繊維が含まれている複合体であって、珪砂が取り出されていないわけではない。また、ジョークラッシャーのみを使って粉碎を行ったため、珪砂が粉碎されている確率は極めて低く、再生微粉の主成分はセメントと思われる。

表-4 再生細骨材の品質

| 項目                       | 規定値   | 測定値  |
|--------------------------|-------|------|
| 表乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | —     | 2.28 |
| 絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.5以上 | 2.05 |
| 吸水率(%)                   | 3.0以下 | 11.1 |
| 粗粒率                      | —     | 3.12 |

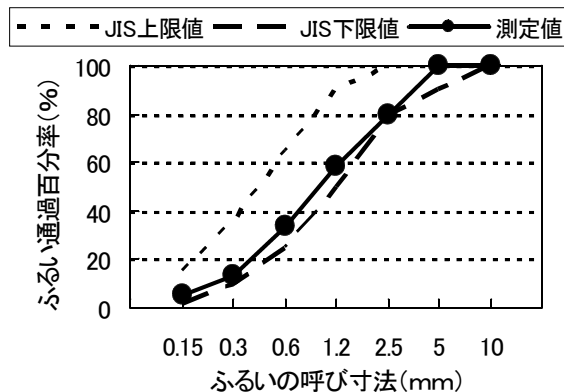


図-1 再生細骨材の粒度分布

### 3. GRCへの添加

GRCを破碎して得られる再生細骨材と粒径が0.15mm以下の再生微粉の内、再生微粉のリサイクル性を確認するため、ミキサー内でモルタルと繊維を混練成形するプレミックスGRCに添加した時のフレッシュ性状や硬化後の特性を調べた。再生微粉の添加方法は、セメントの質量に対して置換を行なうセメント置換と、細骨材の質量に対して置換を行なう細骨材置換の2つを採用した。

#### 3.1 GRCの評価方法

本研究において再生微粉を添加したGRCの評価に用いた試験方法を下記に示す。

##### (1) フロー値

ガラス繊維を添加する前のモルタルのフロー値は、内径55×高さ50mmのフローコーンにモルタルを充填し、コーンを持ち上げた時に広がったモルタルの最大直径とそれに直交する直径を測定し、平均値を求めた。ガラス繊維を添加した後のGRCモルタルのフロー値は、JIS R 5201に準じて測定を行った。

##### (2) 比重と空気量

混練直後のGRCモルタルの空気量をJIS A 1128に準じて測定を行った。GRC生比重は、まだ固まらないGRCモルタルそのものの、気乾比重は、材齢28日での曲げ試験体の体積と質量から求めた。

##### (3) 曲げ試験

GRCの曲げ試験は、日本GRC工業会の定める次の条件で測定を行った。試験体寸法=275×50×15mm、曲げスパン=225mm、載荷速度=2mm/分、載荷方式=中央集中載荷、n数=6。試験体は、材齢28日まで20℃、60%RHの条件で養生を行った。

##### (4) 温水浸漬促進試験

材齢28日から70℃の温水に試験体を浸漬して、促進試験を行なった。浸漬後、(3)と同じ条件で曲げ試験を行い、耐久性を評価した。GRCの場合、70℃温水浸漬1日で東京の屋外暴露1年に相当するといわれている<sup>1)</sup>。

### (5) 長さ変化率試験

長さ変化率は、JIS A 1129に準じて測定を行った。ただし試験体寸法は250×50×10mmとし、基長は200mmとした。打設から24時間後に脱型を行い、基長測定後から20℃、60%RHの条件で試験体を養生した。

### (6) 凍結融解試験

凍結融解試験方法は、JIS A 6204の付随書2に準じた水中凍結水中融解法を採用した。ただし、耐久性評価は相対動弾性係数ではなく、各サイクルごとに曲げ試験を行い、曲げ弾性率の保持率と外観観察により行なった。

- ・試験方法：水中凍結水中融解法(-18℃～+5℃×300回)
- ・試験体寸法：200×45×10mm
- ・試験体投入方法：試験体は、材齢28日まで20℃、60%RHの養生室で保管し、図-2のように80×80×400mmのコンクリート角柱に試験体を貼り付け、温度管理用ダミーコンクリートと同じ寸法の100×100×400mmの試験体角柱を作製した。この角柱を試験体容器に入れ、凍結融解試験機に投入した。
- ・試験体の取り出し：100サイクルごとに試験体角柱を取り出し、所定の試験体を外し、20℃、60%RHの養生室で1週間保管し、曲げ試験を行なった。
- ・曲げ試験：材齢28日と所定のサイクルを終了した試験体に対し、n=5で、スパン160mm、载荷速度2mm/分の中央集中载荷曲げ試験を行い、曲げ弾性率を測定した。

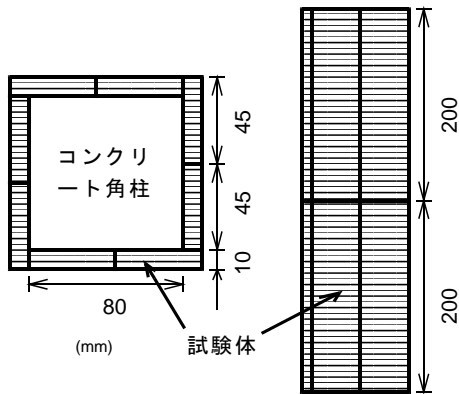


図-2 凍結融解試験体

## 3.2 セメント置換

### (1) まだ固まらないGRCの特性と気乾比重

再生微粉をGRCのセメントと置換した場合のGRC配合及びまだ固まらないGRCの特性と気乾比重を表-5に示す。また再生微粉の置換率と各フロー値の関係を図-3に示す。

再生微粉の置換率が高くなると、各比重は小さくなった。これは、再生微粉の密度がセメントより小さいためと思われる。また、フロー値も低下したが、再生微粉の粒度と吸水率の影響と思われる。

表-5 フレッシュGRCの特性と気乾比重

| No.      | 1                | 2    | 3    | 4    |
|----------|------------------|------|------|------|
| OPC      | 100              | 90   | 80   | 70   |
| 再生微粉     | 0                | 10   | 20   | 30   |
| 珪砂5号     | 100              |      |      |      |
| 高性能AE減水剤 | 0.6              |      |      |      |
| 水        | 32               |      |      |      |
| ARG      | 7.0(対モルタル3.0wt%) |      |      |      |
| GRC生比重   | 2.15             | 2.14 | 2.09 | 2.05 |
| GRC気乾比重  | 2.10             | 2.06 | 2.05 | 2.02 |
| 空気量(%)   | 7.4              | 8.0  | 8.2  | 6.7  |

OPC：普通ポルトランドセメント

ARG：耐アルカリガラス繊維(19mm)

高性能AE減水剤：ポリカルボン酸系

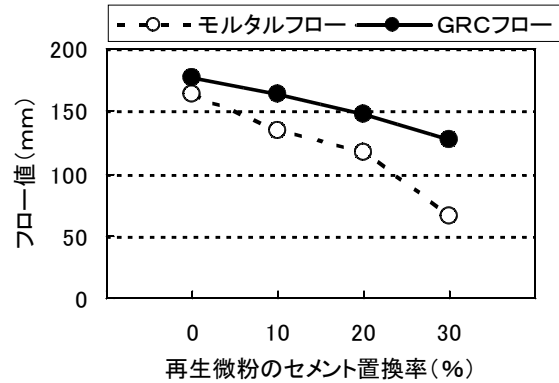


図-3 再生微粉のセメント置換率とフロー値の関係

### (2) 曲げ強度特性

図-4に耐久性を含めた曲げ試験結果を示す。材齢28日と温水浸漬後の曲げ強度は、再生微粉のセメント置換率とともに低下した。これは、再生微粉の活性度指数の低さ、セメント（結合材）量の減少と比重の低下が影響していると思われる。

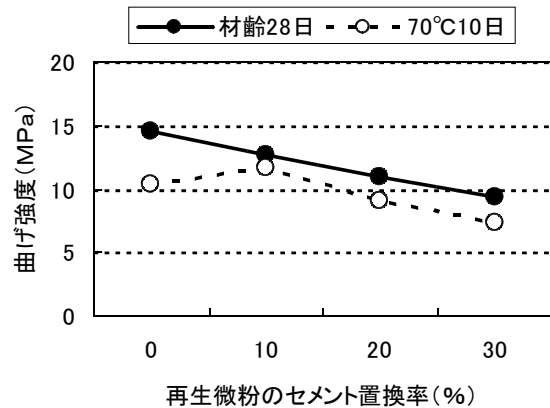


図-4 再生微粉のセメント置換率と曲げ強度の関係

### (3) 長さ変化率

図-5に長さ変化率の結果を示す。長さ変化率には、大きな違いは見られず、また、置換率が高いほど長さ変化率が大きいといった傾向も見られなかった。したがって、この範囲のセメント置換であれば、長さ変化率の変化に対して特段の対策をする必要はないと思われる。

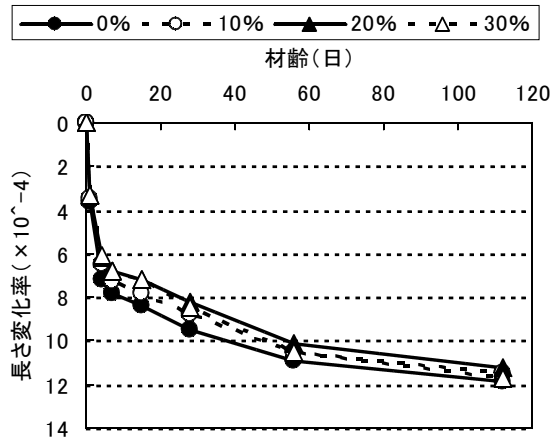


図-5 再生微粉のセメント置換率と長さ変化率の関係

### 3.3 細骨材置換

#### (1) まだ固まらないGRCの特性と気乾比重

再生微粉をGRCの細骨材と置換した場合の、GRC配合及びまだ固まらないGRCの特性と気乾比重を表-6に示す。フロー値の大幅な低下が認められたため、高性能AE減水剤の添加により各配合でモルタルフロー値の調整を行った。再生微粉の細骨材置換率、混和剤の添加量と各フロー値の関係を図-6に示す。

細骨材置換においても置換率とともに各比重は低下した。置換率が高い場合に、混和剤量を増加することで同等のモルタルフロー値を得られたが、GRCモルタルのフロー値は大きくなった。これは、再生微粉が細骨材と置換されることでGRC全体の粉体割合が増し、GRCモルタルのチキソトロピー性が上がったためと思われる。ただし置換率60%以上では、今回使用した混和剤の使用範囲を超えるため、材料分離が生じた。そのためモルタルフロー値を一定にする調整を行う場合、置換率は、40%以下が望ましいと思われる。

モルタルフローはコンクリートスランブと同様に外力を与えない変形性を示す指標であるが、GRCモルタルフローは振動を与えた時の変形性を示す指標である。GRCにおいて実際に必要な作業性はGRCモルタルフローであり、これを指標としてフロー値の調整を行う場合は、分離の原因となる混和剤の添加量を減らせるため、置換比率はもう少し上げられると思われる。

表-6 フレッシュGRCの特性と気乾比重

| No.      | 1                | 2    | 3    | 4      |
|----------|------------------|------|------|--------|
| OPC      | 100              | 100  | 100  | 100    |
| 再生微粉     | 0                | 20   | 40   | 60     |
| 珪砂5号     | 100              | 80   | 60   | 40     |
| 高性能AE減水剤 | 0.6              | 1.0  | 1.9  | 4.3    |
| 水        | 32               |      |      |        |
| ARG      | 7.0(対モルタル3.0wt%) |      |      |        |
| GRC生比重   | 2.14             | 2.08 | 2.05 | 1.98   |
| GRC気乾比重  | 2.12             | 2.06 | 2.02 | 1.97   |
| 空気量(%)   | 8.5              | 10.0 | 9.4  | 10.0以上 |

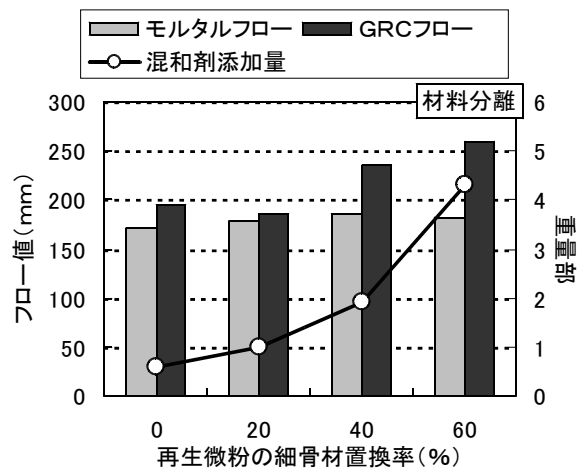


図-6 再生微粉の細骨材置換率とフロー値の関係

#### (2) 曲げ試験結果

図-7に耐久性を含めた曲げ試験結果を示す。材齢28日と温水浸漬後の曲げ強度は、再生微粉の細骨材置換率とともに高くなる傾向を示した。

粉砕の方法から再生微粉の成分はそのほとんどがセメントと思われるが、3.2.(2)で述べた通りセメント置換した場合はその曲げ強度が低下していることから、セメントとして100%置換することは出来ない。一方で、細骨材置換の場合は置換率と共に強度が上がっている。これらのことから、再生微粉中に未水和のセメント分が含まれている可能性があり、強度向上に寄与していると思われる。コンクリートを回転式遠心破砕装置で破砕した再生微粉の研究<sup>2), 3)</sup>で用いられている再生微粉のJIS A 6206で規定されている活性度指数は36%, 46%と示されている。この微粉には、骨材とセメント成分がほぼ同量ずつ含まれているとされているが、本研究の再生微粉は、その破砕方法からセメント分が主成分と思われ、また原GRCの単位セメント量の多さなどから、活性化指数はもっと高いものと思われる。

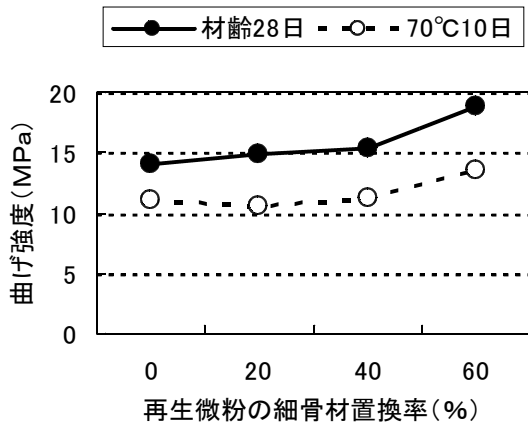


図-7 再生微粉の細骨材置換率と曲げ強度の関係

(3) 長さ変化率試験結果

図-8に長さ変化率の結果を示す。長さ変化率は細骨材置換率とともに大きくなる傾向を示し、特に自己収縮の影響が大きいと考えられる材齢7日までに大きな違いが見られた。曲げ試験結果で述べたことと同様に、再生微粉内に含まれている未水和セメント成分と総粉体量の増加のためと思われる。

無置換のものと比較して50%も大きな値を示しているため、製品のひび割れや反りなどの不具合が懸念され、長さ変化率に対する対策が必要と思われる。

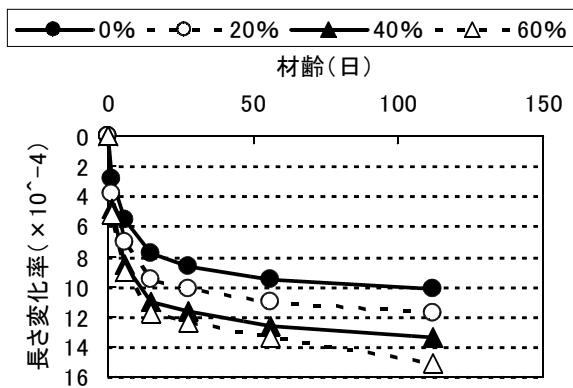


図-8 再生微粉の細骨材置換率と長さ変化率の関係

3.4 凍結融解試験結果(セメント置換, 細骨材置換)

3.2及び3.3の検討結果を基に、再生微粉をセメント置換及び細骨材置換したGRCの耐凍結融解性能を評価した。GRC配合及び空気量と試験体の外観観察結果を表-7に示す。

再生微粉を細骨材またはセメントに置換すると、スケールリングが発生しやすい傾向を示した。ただし再生微粉を細骨材に30%或いは40%置換した場合は、置換しない場合よりスケールリングの発生が少なかった。

表-7 凍結融解試験結果

| No.             | 9                | 10  | 11  | 12  | 13  | 14     |
|-----------------|------------------|-----|-----|-----|-----|--------|
| 置換方法            | 細骨材置換            |     |     |     |     | セメント置換 |
| OPC             | 100              | 100 | 100 | 100 | 100 | 90     |
| 再生微粉            | 0                | 10  | 20  | 30  | 40  | 10     |
| 珪砂5号            | 100              | 90  | 80  | 70  | 60  | 100    |
| 高性能AE減水剤        | 0.6              | 0.9 | 1.3 | 1.6 | 1.9 | 0.6    |
| 水               | 32               |     |     |     |     |        |
| ARG             | 7.0(対モルタル3.0wt%) |     |     |     |     |        |
| 空気量(%)          | 8.0              | 7.6 | 8.4 | 9.0 | 9.0 | 7.2    |
| 外観(スケールリング)観察結果 | 200              | 100 | 100 | 300 | 300 | 100    |

100：100サイクルよりスケールリング多数発生  
200：200サイクルよりスケールリング多数発生  
300：300サイクルでスケールリング若干発生

図-9に各サイクルでの曲げ弾性率保持率を示す。再生微粉を細骨材に置換した場合、曲げ弾性率保持率は置換率が10%と20%では低下したが、30%と40%では向上した。この傾向はスケールリングの発生傾向と同じであり、曲げ弾性率保持率とスケールリングの発生には相関があると思われる。スケールリングは試験体表面に発生する剥がれであるが、それと似た変化が試験体内部でも微視的に起こっていると思われる、そのことが曲げ弾性率の低下を引き起こしていると思われる。

置換率が30%と40%で凍結融解性能が向上したのは、フロー値の調整のため増量した高性能AE減水剤のAE効果と思われる。再生微粉をセメントに置換した場合は、曲げ弾性率保持率は低下した。これらのことから再生微粉をGRCに混入した場合、耐凍結融解性能は低下すると思われる。ただし適切なAE剤を適量添加するなど、一定量以上のエントレインドエアを確保できれば、耐凍結融解性能が改善できると思われる。

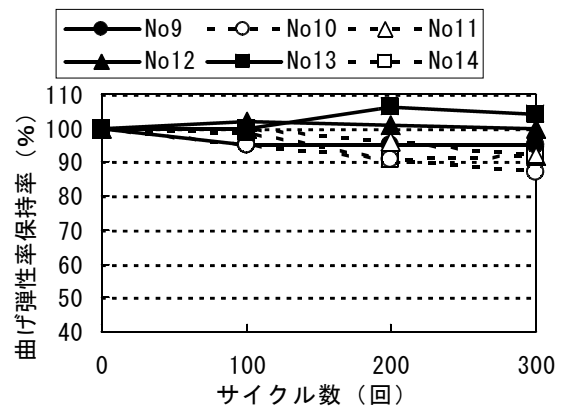


図-9 曲げ弾性率保持率

表-8 コンクリート配合とまだ固まらないコンクリート特性

| No.                         | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |     |
|-----------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 水セメント比(%)                   | 42.7  |      |      |      |      | 47.8 |      |      |      |      | 52.6 |      |      |      |      |     |
| セメント水比                      | 2.34  |      |      |      |      | 2.09 |      |      |      |      | 1.9  |      |      |      |      |     |
| 再生細骨材置換率(%)                 | 0     | 20   | 40   | 60   | 100  | 0    | 20   | 40   | 60   | 100  | 0    | 20   | 40   | 60   | 100  |     |
| 細骨材率(%)                     | 47.1  | 47.8 | 48.4 | 49   | 50.2 | 47.1 | 47.8 | 48.4 | 49   | 50.2 | 47.1 | 47.8 | 48.4 | 49   | 50.2 |     |
| 単位量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 水     | 190  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|                             | セメント  | 445  |      |      |      |      | 398  |      |      |      |      | 361  |      |      |      |     |
|                             | 細骨材   | 764  | 611  | 458  | 306  | 0    | 783  | 626  | 470  | 313  | 0    | 796  | 637  | 478  | 318  | 0   |
|                             | 再生細骨材 | 0    | 153  | 306  | 458  | 764  | 0    | 157  | 313  | 470  | 783  | 0    | 159  | 318  | 478  | 796 |
|                             | 粗骨材   | 891  |      |      |      |      | 913  |      |      |      |      | 930  |      |      |      |     |
| 混和剤(対セメント%)                 | 0     | 0    | 0.17 | 0.17 | 0.22 | 0    | 0    | 0.13 | 0.13 | 0.25 | 0    | 0    | 0.14 | 0.14 | 0.24 |     |
| 空気量(%)                      | 0.9   | 1.3  | 2.7  | 1.8  | 2.8  | 1    | 1.3  | 1.7  | 2    | 2.7  | 0.8  | 1.2  | 2.7  | 2.3  | 3    |     |
| スランプ(cm)                    | 19.5  | 19   | 18.5 | 19.5 | 18   | 19   | 18.5 | 19   | 18   | 18   | 20   | 20   | 18   | 18   | 20   |     |

混和剤：高性能AE減水剤

#### 4. コンクリートへの添加

##### 4.1 まだ固まらないコンクリートの特性

再生細骨材を細骨材置換で添加したコンクリートの配合及びまだ固まらないコンクリート特性を表-8に示す。目標スランプを18.0cmとし、混和剤の添加量によってスランプを調整した。

再生細骨材の置換率が大きくなると、目標スランプを得るために混和剤の添加量を増加する必要がある。また、混和剤の添加量に比例して空気量が増加した。

##### 4.2 圧縮強度試験

セメント水比と圧縮強度の関係を図-10に示す。再生細骨材置換率が40%以下であると、セメント水比と圧縮強度は高い相関性を示した。しかし60%以上になると、その相関性は低下し、100%置換ではセメント水比が2.09と2.34の圧縮強度が大きく低下した。

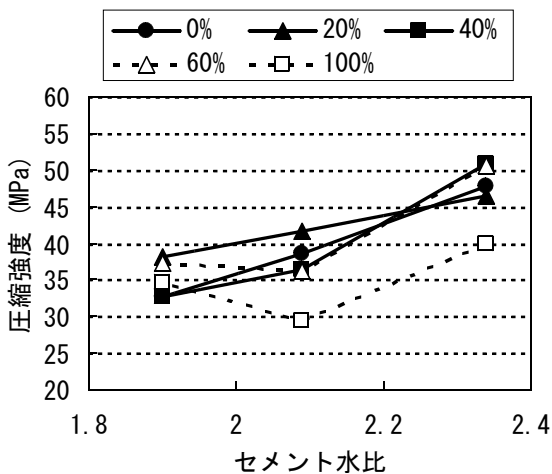


図-10 セメント水比と圧縮強度の関係

#### 5. まとめ

(1)再生微粉をセメント置換したGRCの比重、フロー値と曲げ強度は、低下傾向を示した。再生微粉をセメント置換する場合、10%までなら、若干の調整で、置換前のGRCとほぼ同等の特性が得られると思われる。

(2)再生微粉を細骨材置換したGRCの曲げ強度は、高くなる傾向を示し、長さ変化率は、大きくなる傾向を示した。再生微粉の中に、未水和のセメント分が存在する可能性が高い。ただし置換率が大きくなると、流動性が低下するために大幅な混和剤の添加が必要になり、材料分離しやすくなる。そのため置換率は、40%以下が望ましいと思われる。

(3)再生微粉をいずれの置換方法でGRCに混入した場合でも、GRCの耐凍結融解性能は低下する。混和剤の添加等により、適切なエントレインドエアを確保できれば、耐凍結融解性能は改善できると思われる。

(4)再生細骨材をコンクリートの細骨材に置換する場合、同等のスランプ値を得るためには、混和剤などで調整する必要がある。セメント水比と圧縮強度の相関関係から、再生細骨材置換率は40%以下が望ましい。

#### 参考文献

- 1) Litherland, D.R., Oakley, D.R. and Proctor, B.A., The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites, Cement and Concrete research, volume 11, pp.455-466, 1981
- 2) 桜井邦昭ほか, 再生微粉の多量混入がコンクリートの諸性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.2, pp.373-378, 2007
- 3) 桜井邦昭ほか, 回転式遠心破塊装置により製造した再生骨材, 微粉を混和したコンクリートの品質, コンクリート工学年次論文集, vol.30, No.2, pp.373-378, 2008