

論文 粒鉄を用いた超硬練り重量セメント硬化体の試験練り

村上 祐治^{*1}・望月 武^{*2}・横尾 正義^{*2}・天明 敏行^{*3}

要旨：港湾構造物などにおいて躯体を水中へ沈下・安定させる場合に、揚圧力による浮上がり防止の材料として、鉄鋼製造工程での副産物である粒鉄に着目し、これを使用した超硬練りの重量セメント硬化体 (*Cemented Heavy Slag*) の試験練りを実施した。その結果、使用する細骨材の種類や配合によって単位容積質量は変化するが、 $3.2\text{t/m}^3 \sim 3.7\text{t/m}^3$ 程度となることがわかった。また、粒鉄に存在する遊離石灰の水和などによる膨張を抑制するためには、粒鉄を蒸気エージング処理し、水セメント比を小さくすることが効果的であることを確認した。

キーワード：粒鉄, 重量セメント硬化体, 浮上がり防止材料, 超硬練り, エージング

1. はじめに

港湾構造物などでは、揚圧力による浮上りを防止する材料として通常コンクリートが使用されている。浮上がり防止材料は所要の単位容積質量が確保されていることが重要であり、一般のコンクリートよりも単位容積質量の大きい材料を用いれば構造物全体の大きさを小さくすることができ、施工時の仮設備用地などの縮小も含めて総合的にコストを縮減する可能性があると考えられる。そこで、鉄鋼製造工程での副産物で密度が約 5g/cm^3 の粒鉄に注目し、これを用いた重量セメント硬化体 (*Cemented Heavy Slag*) の試験練りを実施した。硬化体は設計上重量を極力大きくする目的と、施工上粒鉄の密度が大きいことから懸念される材料分離を低減し、汎用機械による合理化施工を行う目的で、単位水量を少なくした超硬練りとした。

試験練りでは、港湾構造物以外への適用の可能性も考慮して、より単位容積質量の大きい硬化体を製造する目的で、細骨材にコンク

リート用細骨材のほか、銅スラグを使用したセメント硬化体の基本的なフレッシュ特性と硬化特性を検討した。

また、粒鉄は製鋼スラグを破砕選別する前に磁選された材料であり、不安定な鉱物相からなるといわれる製鋼スラグの成分を有している¹⁾ため、セメント硬化体とした時には遊離石灰の水和反応などによる膨張破壊を起こすことが懸念された。そこで、蒸気エージングやフライアッシュの使用による膨張抑制効果などの検討を実施した。

2. 使用材料

2.1 使用材料一覧

試験練りに用いた使用材料一覧を表-1に示す。重量セメント硬化体は、粒鉄を粗骨材として用い、細骨材にはコンクリート用細骨材(粗砂・中砂)、銅スラグを用いた。

2.2 粒鉄について

粒鉄は鉄鋼製造工程での副産物である。製造プロセスを図-1に示す。

*1 (株)間組 技術環境本部技術研究所 工博 (正会員)

*2 新日本製鐵(株) 八幡製鐵所 設備部 土建技術グループ

*3 (株)間組 土木事業総本部ダム統括部 (正会員)

表-1 使用材料一覧

| 項目 | 仕様 |
|---------|---------------------------------------|
| セメント | 高炉セメント B 種 密度 3.2g/cm ³ |
| フライアッシュ | 荅北発電所産 密度 2.3g/cm ³ |
| 水 | つくば市水道水 |
| 粗骨材 | 粒鉄 新日鐵八幡製鐵所産 (粒径 70~5mm) |
| 細骨材 | コンクリート用粗砂・細砂 北九州産海砂 |
| | 銅スラグ 佐賀県産 |

高炉で作られた銑鉄の精練工程で生成する製鋼スラグ（溶銑予備処理スラグ，転炉スラグ等）を破砕プラントにて破砕する際に磁選回収される鉄分が粒鉄である。今回，セメント硬化体に用いたものは，この粒鉄を 5~70mm にふるい分けしたものである。

2.3 骨材試験結果

粒鉄と細骨材の物理試験結果を表-2 に，JISA1102 のふるいわけ試験による粒度分布を図-2 に示す。ふるいわけ試験によれば粒鉄の最大寸法は 40mm であった。

2.4 粒鉄のエージング処理

粒鉄の製造過程では，靱性を高めるために精練工程において生石灰などの副原料を混入する。このため遊離石灰の水和反応などにより膨張することが予想された。

転炉スラグを骨材として用いる場合にはエージング処理によりあらかじめ遊離石灰と水の促進反応を実施する必要があるが²⁾，粒鉄についても図-3 に示すような蒸気エージングにより前処理を施すことによる効果を確認することとした。

蒸気エージングを実施した粒鉄について JISA5015 付属書 2 による鉄鋼スラグの水浸膨張試験を実施した結果を図-4 に示す。粒鉄は，蒸気エージングによって膨張率を著しく抑制できることがわかった。

3. 試験ケース

試験練りは，未処理の粒鉄と蒸気エージング処理をした粒鉄について実施し，より単位容積質量の大きい硬化体の製造を試みるためにコンクリート用細骨材のほか，銅スラグを細骨材として用いた。

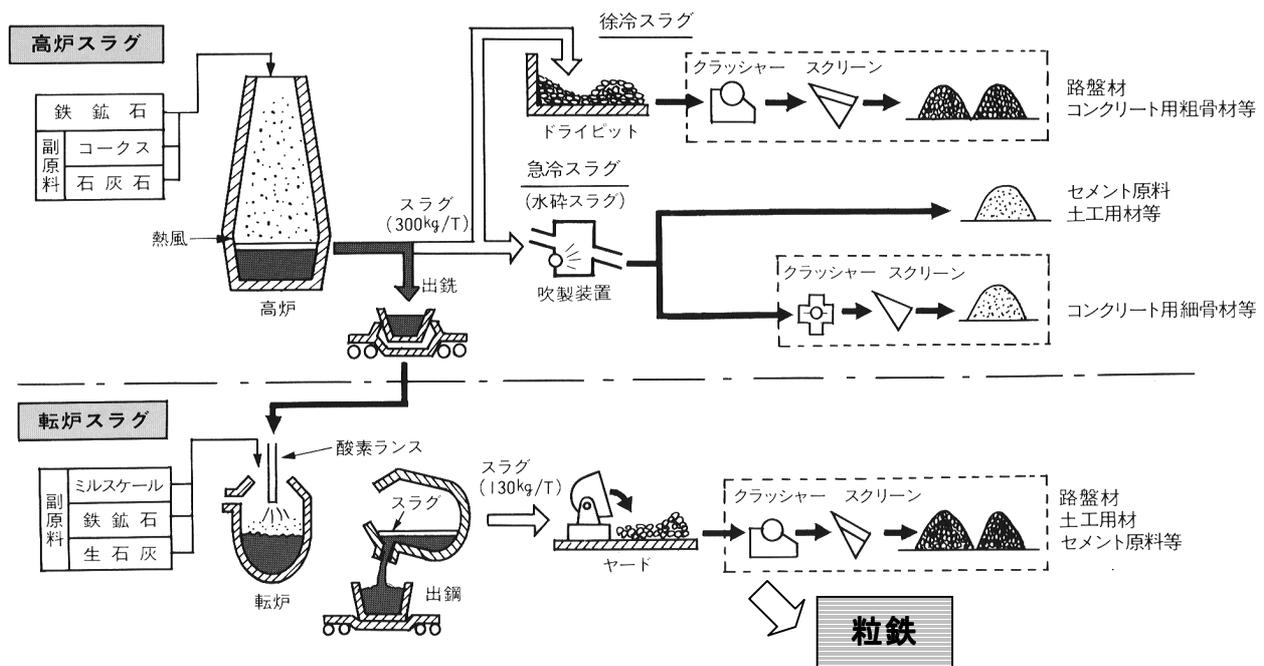


図-1 粒鉄の製造プロセス

表-2 粒鉄とコンクリート用細骨材の物理試験結果

| | | 粗骨材 | 細骨材 | | | | |
|-----------------|-----------------------------|--------|------------|------|---------------------|------|---------------------|
| | | 粒鉄 | コンクリート用細骨材 | | | 銅スラグ | |
| | | 70-5mm | 粗砂 | 細砂 | 粗+細 1:1 (容積比) | 銅スラグ | 銅+細 1:1 (容積比) |
| JIS A 1109・1110 | 絶乾密度 (g/cm ³) | 5.03 | 2.60 | 2.58 | 2.59 | 3.48 | 3.03 |
| JIS A 1109・1110 | 表乾密度 (g/cm ³) | 5.14 | 2.63 | 2.61 | 2.62 | 3.50 | 3.06 |
| JIS A 1109・1110 | 吸水率 (%) | 2.25 | 1.33 | 1.14 | 1.24 | 0.79 | 0.97 |
| JIS A 1104 | 単位容積質量 (g/cm ³) | 2.70 | | | 1.69 | 2.00 | 2.01 |
| JIS A 1104 | 実積率 (%) | 53.7 | | | 65.2 | 57.4 | 66.4 |
| | (振動法) _(20秒) (%) | 58.8 | | | 70.5 | 62.8 | 72.5 |
| JIS A 1103 | 微粒分量試験 (%) | 2.43 | 2.88 | 1.41 | 2.15 | 0.50 | 0.89 |
| JIS A 1102 | 粗粒率 | 6.71 | 3.54 | 1.79 | 2.67 | 3.64 | 2.85 |

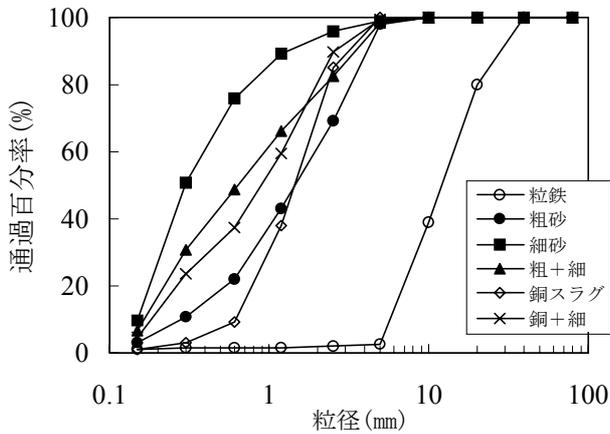


図-2 骨材の粒度曲線

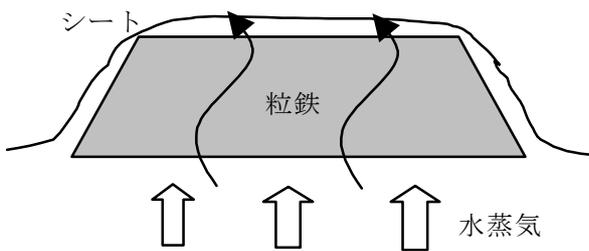


図-3 蒸気エージングの方法

また、粒鉄膨張時に発生する応力に対してセメント硬化体の強度によりひび割れの発生を抑制するために水セメント比と強度特性の関係を把握することを目的として、各ケースにおいて水セメント比の小さい富配合のケースと水セメント比の大きい貧配合のケースについて実施した。富配合のケースでは、通常

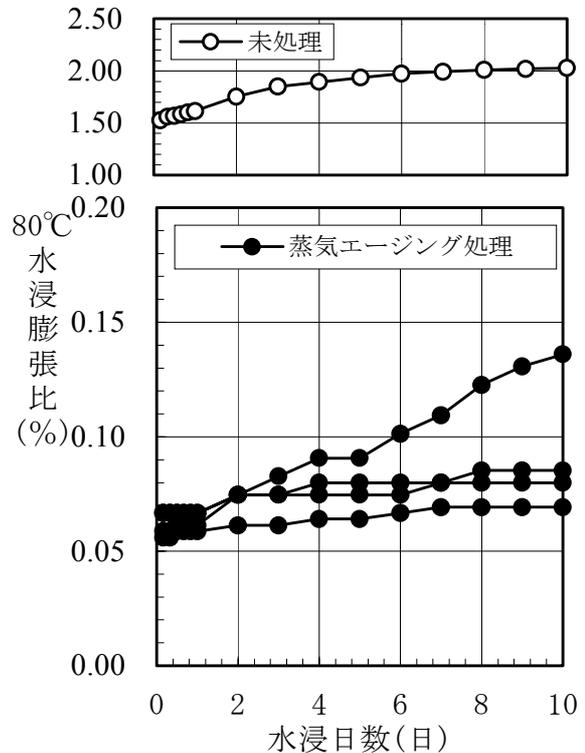


図-4 エージング時間別の水浸膨張試験結果

の置換えコンクリートと同程度の水セメント比を想定した W/C=65%とし、貧配合のケースでは、W/C=110%となるように 2 ケースを配合条件とした。

一方、転炉スラグを用いる場合にはフライアッシュを用いることにより膨張の抑制効果があることが確認されている²⁾ことから、フ

ライアッシュを混入したケースについても実施した。この場合の混入率は粒鉄に対する比率で定めた。

試験練りの実施ケースを表-3に示す。

表-3 試験練りケース

| 粒鉄の処理 | 細骨材 | フライアッシュ/粒鉄 (%) | 富配合 W/C=65% (50%)* | 貧配合 W/C=110% (172%)** |
|---------|-----------------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| 処理なし | コンクリート用粗・細砂 | 0 | ケース 1 | ケース 2 |
| | 銅スラグ ^g | 0 | ケース 3 | — |
| | 銅スラグ ^g +細砂 | 0 | — | ケース 4 |
| エーゼンシング | コンクリート用粗細砂 | 0 | ケース 5 | ケース 6 |
| | コンクリート用粗細砂 | 10 | ケース 7 | ケース 8 |
| | 銅スラグ ^g | 10 | ケース 9 | — |
| | 銅スラグ ^g | 15 | — | ケース 10 |

*ケース 3 は粉体量不足のため W/C=50%とした。

**ケース 10 は粉体量過大のため W/C=172%とした。

4. 試験方法

各配合ケースについて単位水量や細骨材率を適当に変化させて VC 試験を実施した。VC 値とは RCD 用コンクリートのコンシステンシーを示す値であり、標準容器を用いた振動台式コンシステンシー試験で得られる試験値を秒数で表したものである。

RCD 用コンクリートでは VC 値が 20 秒程度を目標値としている場合が多いため、20 秒を中心としてその前後 10 秒程度の VC 値の配

合を選定し、各ケースの基本配合とした。

各ケースの基本配合について、圧縮強度試験用に φ10×20cm の供試体を 3 本×2 材齢(7 日, 28 日)分採取した。また、粒鉄自体の膨張性とは別にセメント硬化体における膨張性確認の試験を行った。膨張性の確認は一定の材齢まで水中養生した後に 80℃の温水養生により実施した。

5. 試験結果

5.1 フレッシュ特性

(1)各ケースの基本配合

試験練りによって選定した各ケースの基本配合とフレッシュ試験の結果を表-4に示す。

(2)単位水量、細骨材率と VC 値

未処理の粒鉄とコンクリート用細骨材を用いたケース (ケース 1 およびケース 2) における単位水量と VC 値の関係を図-5に示す。各ケースともばらつきはあるが単位水量が増加すると VC 値が小さくなる傾向であった。

次に、VC 値が 20 秒付近となる単位水量で細骨材率を変化させて VC 値の変化を調べた。未処理の粒鉄とコンクリート用細骨材を用いたケース (ケース 1 およびケース 2) における細骨材率と VC 値の関係を図-6に示す。貧配合のケース 2 では明確でなかったが、富

表-4 基本配合とフレッシュ試験結果

| ケース | エーゼンシング処理 | W/C (%) | s/a (%) | F/G | 単位量(kg/m ³) | | | | | | 理論密度 (kg/m ³) | α | β | VC (秒) | 温度 (°C) | 空気量 (%) | 充填率 (%) | |
|-----|-----------|---------|---------|-----|-------------------------|------|-------------------|---------|------|-----|---------------------------|------|------|--------|---------|---------|---------|------|
| | | | | | コンクリート用砂 | | 銅スラグ ^g | フライアッシュ | 粒鉄 | | | | | | | | | |
| | | | | | 水 | セメント | | | | 粗砂 | | | | | | | | 細砂 |
| | | | | | W | C | S1 | S2 | Sc | F | G | | | | | | | |
| 1 | 未処理 | 65 | 40 | 0 | 130 | 200 | 415 | 412 | 0 | 0 | 2434 | 3591 | 1.48 | 1.54 | 15.1 | 21.0 | 1.5 | 97.3 |
| 2 | | 110 | 37 | 0 | 110 | 100 | 410 | 407 | 0 | 0 | 2727 | 3753 | 1.10 | 1.22 | 30.8 | 19.7 | 2.0 | 95.3 |
| 3 | | 50 | 40 | 0 | 150 | 300 | 0 | 0 | 1031 | 0 | 2271 | 3752 | 1.43 | 1.75 | 18.0 | 18.9 | 2.1 | 96.0 |
| 4 | | 110 | 37 | 0 | 110 | 100 | 0 | 407 | 545 | 0 | 2727 | 3889 | 1.21 | 1.22 | 33.8 | 20.0 | 1.4 | 93.2 |
| 5 | 処理 | 65 | 40 | 0 | 125 | 192 | 419 | 416 | 0 | 0 | 2409 | 3562 | — | — | 9.9 | 20.0 | — | 98.4 |
| 6 | | 110 | 37 | 0 | 110 | 100 | 410 | 407 | 0 | 0 | 2653 | 3679 | — | — | 34.8 | 22.5 | — | 97.5 |
| 7 | | 65 | 50 | 10 | 120 | 185 | 833 | 0 | 0 | 201 | 2011 | 3349 | — | — | 18.1 | 22.0 | — | 96.4 |
| 8 | | 110 | 50 | 10 | 110 | 100 | 872 | 0 | 0 | 211 | 2105 | 3398 | — | — | 14.7 | 22.0 | — | 98.8 |
| 9 | | 65 | 50 | 10 | 125 | 192 | 0 | 0 | 1099 | 198 | 1980 | 3595 | — | — | 15.3 | 22.0 | — | 98.4 |
| 10 | | 172 | 50 | 15 | 120 | 70 | 0 | 0 | 1006 | 314 | 2092 | 3602 | — | — | 22.3 | 22.0 | — | 97.9 |

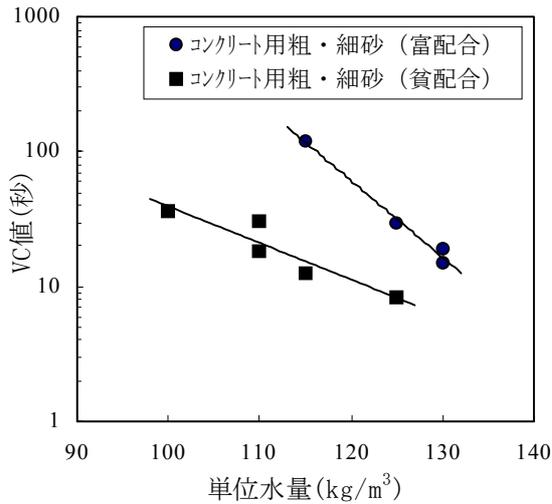


図-5 単位水量と VC 値

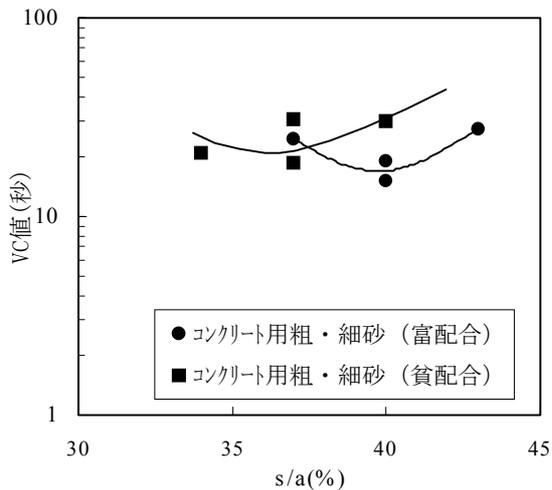


図-6 細骨材率と VC 値

配合のケース 1 では VC 値が最も小さくなる最適な細骨材率が明確に存在した。粒鉄は、密度が大きいことからわずかな表面水率の変動による補正水量が多く、ばらつきが生じやすい。このため、水セメント比の大きい貧配合、すなわち、粒鉄が多く単位セメント量や単位水量が少ない配合では VC 値が変動しやすいことが考えられる。

5.2 硬化特性

(1) 単位容積質量と圧縮強度

硬化した重量セメント硬化体の JISA1108 による単位容積質量と圧縮強度（材齢 7, 28 日）を図-7, 8 に示す。細骨材の種類と配合

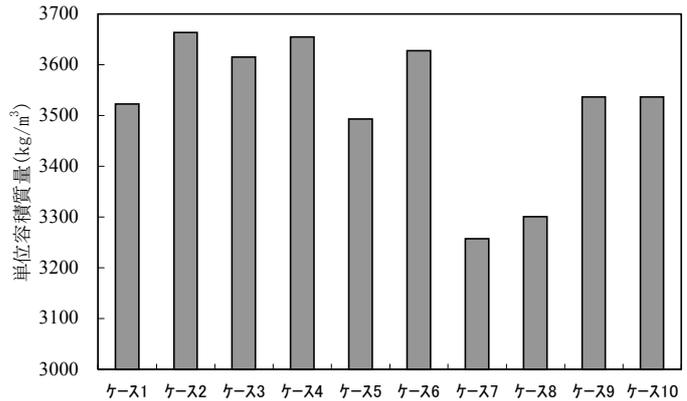


図-7 単位容積質量

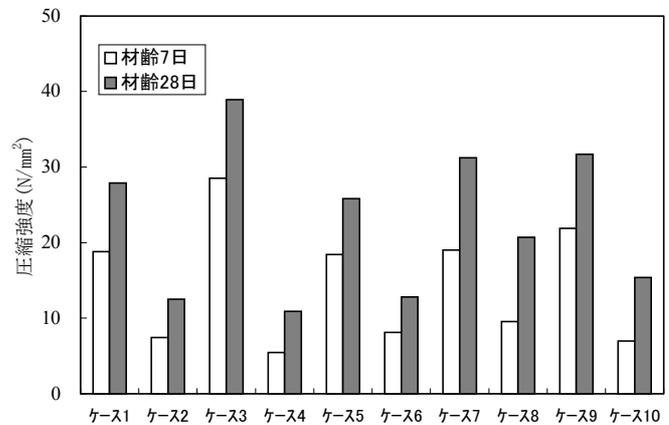


図-8 圧縮強度

によって単位容積質量は大きく異なり、およそ 3,200~3,700kg/m³であった。単位容積質量は、単位水量や単位セメント量が少なく粒鉄の単位量が大きくなる貧配合の方が富配合より大きく、密度の小さいフライアッシュを多く混入したものは小さい結果となった。

セメント水比と圧縮強度の関係を図-9 に示す。多少のばらつきはあるが、セメント水比が大きいほど圧縮強度が大きい傾向であった。ばらつきの原因には、フライアッシュを使用した配合において、一部がポゾラン反応を生じ、強度に寄与する影響も含んでいると考えられる。

(2) 膨張試験の結果

一定の期間 20℃で水中養生をした後に供試体の 80℃温水養生を開始し、供試体の観察

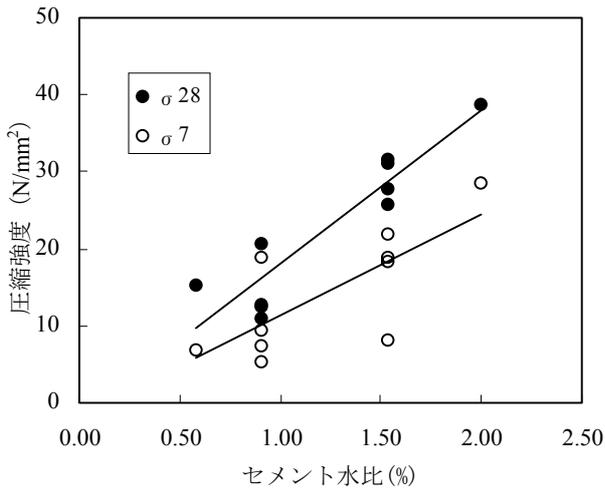


図-9 セメント水比と圧縮強度

を行った。膨張によるひび割れが発生したケースは、エージング処理をした粒鉄を用いたものでは貧配合でフライアッシュを混合しないケース6のみであり、エージング処理をしないケースでは銅スラグを用いた富配合のケース3のみが健全であった。

試験結果から、縦軸にフライアッシュの混入率を、横軸に材齢28日の圧縮強度をとり、ひび割れ発生の有無を整理したものを図-10に示す。粒鉄のエージング処理とフライアッシュの混入、および圧縮強度を大きくすることが膨張に対して有利であることがわかる。ただし、フライアッシュの使用は、単位容積質量を小さくしてしまうことから、粒鉄をエージング処理し、圧縮強度を大きくするために水セメント比を小さくすることが有利であると考えられる。

6. まとめ

粒鉄を用いた超硬練りセメント硬化体の試験練りを実施し、以下の知見が得られた。今後は試験施工を実施し、実構造物への適用を検討していく予定である。

(1) 単位水量が増加すると VC 値は減少し、富配合のケースで VC 値が最小となる細骨材率が明確に存在した。

(2) セメント水比と圧縮強度はほぼ比例関

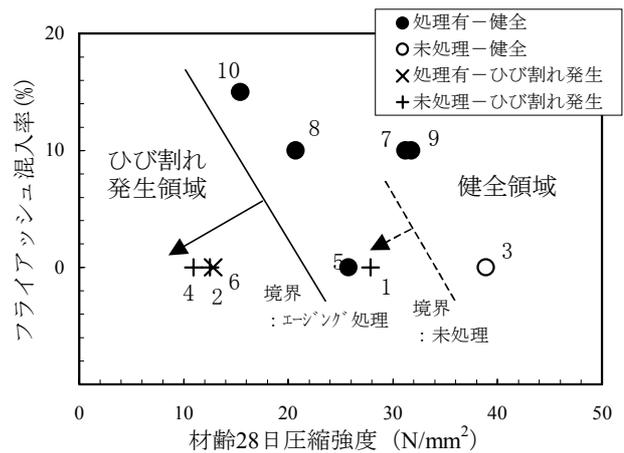


図-10 膨張性確認試験による結果の整理
(数字はケース名)

係にある。

(3) 用いる細骨材の種類や、水セメント比、フライアッシュの有無によって単位体積質量は大きく変化し、その範囲は $3.2\text{t/m}^3 \sim 3.7\text{t/m}^3$ 程度となる。同じ細骨材を用いた場合には、水セメント比が大きい貧配合の方が粒鉄の使用量が大きくなるため、単位容積質量が大きくなる。また、フライアッシュを使用しない方が大きくなる。

(4) 粒鉄の膨張によるひび割れ防止対策として、粒鉄をエージング処理し、水セメント比を小さくすることが有効である。

参考文献

- 1) 土木学会：平成11年版 コンクリート標準示方書 施工編，P.48 および P.52，2000.1
- 2) (株)沿岸環境開発資源利用センター：FS コンクリートの手引き，P13，1998.11