

# 論文 細骨材としてシラスを使用したモルタルの材料特性に関する基礎的研究

渡部 憲<sup>\*1</sup>・新留 昌泰<sup>\*2</sup>・丸矢 一夫<sup>\*3</sup>

**要旨：**本研究では、コンクリート二次製品として内・外装用パネルをターゲットとし、セメントに白色セメントを使用したシラス細骨材モルタルの調合、強度特性、長期性状等について検討を行った。その結果、白色セメントシラスモルタルの28日圧縮強度－セメント水比関係は一般的なコンクリートと同様に直線関係にある、白色セメントシラスモルタルの圧縮強度、ヤング係数発現について、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]に示される既往式をベースとした推定式の材料定数を明らかにした等の知見が得られた。

**キーワード：**白色セメント、シラス、モルタル、調合、圧縮強度

## 1. はじめに

現在、生産活動を実施するにあたり、地球環境問題に対する取り組みは、避けることができない。コンクリートの分野においても、天然骨材採取に伴う環境破壊や天然骨材資源の枯渇問題から、再生骨材コンクリートの研究が活発に実施されている。

このような背景の中、コンクリート用骨材の代替材料について検討していくことは重要な課題であると思われる。武若等は、南九州に大量に存在するシラスをコンクリート用細骨材の代替材料とし、その適用性について一連の検討を行い、シラスコンクリートの調合、強度特性等を明らかにし<sup>例え1,2)</sup>、橋脚基礎コンクリートへの適用事例も報告している<sup>3)</sup>。また、角等は、細骨材にシラス、粗骨材に火山礫を使用したコンクリートに関する研究成果としてコンクリート強度推定式等を提案している<sup>4)</sup>。

以上のように、コンクリート用細骨材の代替材料として、シラス使用の可能性は有望であり、構造部材用コンクリートへの使用のみでなく、様々な使用方法が考えられる。

そこで本研究では、コンクリート二次製品として内・外装用パネルをターゲットとし、セメ

ントに白色セメントを使用したシラス細骨材モルタルの調合、強度特性、長期性状等について検討を行った。

## 2. 実験方法

実験概要の一覧を表-1に示す。検討項目は、フレッシュ性状、28日強度、強度発現および収縮特性である。なお、実際には各種養生方法が考えられるが、本試験では、基礎的性質を把握するため標準養生を基本とした。また、目標フロー値は試し練りにより決定した。

表中の細骨材について、(8)は8mmアンダーシラス(8mmふるいを通したもの、表乾密度：2.08g/cm<sup>3</sup>、吸水率：7.7%、粗粒率：1.49)、(2)は2mmアンダーシラス(2mmふるいを通したもの、表乾密度：2.17g/cm<sup>3</sup>、吸水率：4.6%、粗粒率：1.21)および(天然)は砕砂(表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.46%、粗粒率：3.03)と山砂(表乾密度：2.56g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.78%、粗粒率：1.79)を質量比7：3の割合で混合した天然細骨材であり、(8')は8mmアンダーシラスから0.15mmアンダーを取り除いたシラスである。なお、シラスはいずれも霧島産である。また、セメントについて、

\*1 東海大学 工学部建築学科講師 工博 (正会員)

\*2 (株)高千穂 (非会員)

\*3 (株)高千穂 研究開発室 (非会員)

表－１ 実験概要

| 試験体名                | 細骨材種類 | セメント種類 | 混和剤種類 | 水セメント比<br>W/C (%) | 細骨材セメント比<br>S/C | 目標フロー値<br>(mm) | 検討項目        |           |             |           |            |       |      |    |    |   |   |
|---------------------|-------|--------|-------|-------------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|-------------|-----------|------------|-------|------|----|----|---|---|
|                     |       |        |       |                   |                 |                | フレッシュ試験     |           |             |           |            | 硬化後試験 |      |    |    |   |   |
|                     |       |        |       |                   |                 |                | 50ℓモルタルミキサー |           | 500ℓパン型ミキサー |           |            | 28日強度 | 強度発現 | 収縮 |    |   |   |
|                     |       |        |       |                   |                 |                | フロー<br>(mm) | 温度<br>(℃) | フロー<br>(mm) | 温度<br>(℃) | 空気量<br>(%) |       |      | 角柱 | 平板 |   |   |
| 8-WH-P-W/C40-150    | 8     | WH     | P     | 40                | 0.72            | 150            | ○           | ○         | —           | —         | —          | ●     | —    | —  | —  |   |   |
| 8-WH-P-W/C40-180    |       |        |       |                   | 0.53            | 180            | ○           | ○         | ○           | ○         | ○          | ○     | ○    | —  |    |   |   |
| 8-WH-P-W/C40-210    |       |        |       |                   | 0.35            | 210            | ○           | ○         | —           | —         | —          | ●     | —    | —  | —  |   |   |
| 8-WH-P-W/C50-150    |       |        |       |                   | 1.14            | 150            | ○           | ○         | —           | —         | —          | ●     | —    | —  | —  |   |   |
| 8-WH-P-W/C50-180    |       |        |       |                   | 0.92            | 180            | ○           | ○         | ○           | ○         | ○          | ○     | ○    | ○  | ○  |   |   |
| 8'-WH-P-W/C50-(180) | 8'    | N      |       | 50                | 0.92            | (180)          | —           | —         | ○           | ○         | ○          | ○     | ○    | ○  | —  |   |   |
| 8-N-P-W/C50-(180)   |       |        |       |                   | 0.92            | (180)          | —           | —         | ○           | ○         | ○          | ○     | ○    | ○  | —  |   |   |
| 8-WH-P-W/C50-210    |       |        |       |                   | 0.69            | 210            | ○           | ○         | —           | —         | —          | ●     | —    | —  | —  |   |   |
| 8-WH-P-W/C60-150    |       |        |       |                   | 1.50            | 150            | ○           | ○         | —           | —         | —          | ●     | —    | —  | —  |   |   |
| 8-WH-P-W/C60-180    |       |        |       |                   | 1.30            | 180            | ○           | ○         | ○           | ○         | ○          | ○     | ○    | ○  | —  |   |   |
| 8-WH-P-W/C60-210    | 8     | WH     | AE    | 60                | 1.10            | 210            | ○           | ○         | —           | —         | —          | ●     | —    | —  | —  |   |   |
| 8-WH-AE-W/C40-180   |       |        |       |                   | 40              | 0.78           | 180         | ○         | ○           | —         | —          | —     | ●    | —  | —  | — |   |
| 8-WH-AE-W/C40-210   |       |        |       |                   |                 | 0.71           | 210         | ○         | ○           | —         | —          | —     | ●    | —  | —  | — |   |
| 8-WH-AE-W/C50-180   |       |        |       | 50                |                 | 1.16           | 180         | ○         | ○           | ○         | ○          | ○     | ○    | —  | ○  | — |   |
| 8-WH-AE-W/C50-210   |       |        |       |                   | 1.03            | 210            | ○           | ○         | —           | —         | —          | ●     | —    | —  | —  |   |   |
| 8-WH-AE-W/C60-180   |       |        |       |                   | 60              | 1.48           | 180         | ○         | ○           | —         | —          | —     | ●    | —  | —  | — |   |
| 8-WH-AE-W/C60-210   |       |        | 1.35  | 210               |                 | ○              | ○           | —         | —           | —         | ●          | —     | —    | —  |    |   |   |
| 2-WH-P-W/C40-150    |       |        | 2     | WH                |                 | P              | 40          | 0.69      | 150         | ○         | ○          | —     | —    | —  | —  | — | — |
| 2-WH-P-W/C40-180    |       |        |       |                   | 0.51            |                |             | 180       | ○           | ○         | —          | —     | —    | ●  | —  | — | — |
| 2-WH-P-W/C40-210    |       |        |       |                   | 0.32            |                |             | 210       | ○           | ○         | —          | —     | —    | —  | —  | — | — |
| 2-WH-P-W/C40-240    | 0.14  | 240    |       |                   | ○               |                |             | ○         | —           | —         | —          | ●     | —    | —  | —  |   |   |
| 2-WH-P-W/C50-150    | 50    | 1.06   |       |                   | 150             |                | ○           | ○         | —           | —         | —          | —     | —    | —  | —  |   |   |
| 2-WH-P-W/C50-180    |       | 0.92   |       |                   | 180             |                | ○           | ○         | ○           | ○         | ○          | ○     | ○    | ○  | —  |   |   |
| 2-WH-P-W/C50-210    |       | 0.78   |       |                   | 210             |                | ○           | ○         | —           | —         | —          | —     | —    | —  | —  |   |   |
| 2-WH-P-W/C50-240    |       | 0.64   |       |                   | 240             |                | ○           | ○         | —           | —         | —          | ●     | —    | —  | —  |   |   |
| 2-WH-P-W/C60-150    |       | 60     |       |                   | 1.34            |                | 150         | ○         | ○           | —         | —          | —     | —    | —  | —  | — |   |
| 2-WH-P-W/C60-180    |       |        |       |                   | 1.19            |                | 180         | ○         | ○           | —         | —          | —     | ●    | —  | —  | — |   |
| 2-WH-P-W/C60-210    |       |        |       |                   | 1.03            |                | 210         | ○         | ○           | —         | —          | —     | —    | —  | —  | — |   |
| 2-WH-P-W/C60-240    | AE    | 40     |       |                   | 0.88            |                | 240         | ○         | ○           | —         | —          | —     | ●    | —  | —  | — |   |
| 2-WH-AE-W/C40-180   |       |        |       |                   | 0.75            |                | 180         | ○         | ○           | —         | —          | —     | —    | —  | —  | — |   |
| 2-WH-AE-W/C50-180   |       |        |       |                   | 1.04            |                |             | ○         | ○           | —         | —          | —     | ●    | —  | —  | — |   |
| 2-WH-AE-W/C60-180   |       |        |       |                   | 1.34            |                |             | ○         | ○           | —         | —          | —     | —    | —  | —  | — |   |
| 天然-WH-P-W/C50-(180) | 天然    | P      | 50    | 1.15              | (180)           | —              |             | —         | ○           | ○         | ○          | ○     | ○    | ○  |    |   |   |

(WH) は白色セメント（密度：3.05g/cm<sup>3</sup>，28日圧縮強さ：64.0N/mm<sup>2</sup>），（N）は普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>，28日圧縮強さ：61.7N/mm<sup>2</sup>）である。さらに、混和剤について、（P）はプレーンモルタル，（AE）は高性能AE減水剤をセメント質量に対して、1%添加したものである。目標フロー値について、（）内はベースモルタル（8mmアンダーシラス，白色セメントを使用した水セメント比=50%のプレーンモルタル）のフロー値である。なお、検討項目の丸印は実施項目であり、強度試験の●は40×40×160mm試験体を、○は40×40×160mm，100φ×200mm試験体を使用した。

## 2.1 フレッシュ試験

練り混ぜは、50ℓモルタルミキサーおよび500ℓパン型ミキサーを使用し、フロー、モルタル温度および空気量（圧力法：10ℓ容器を使用，骨材修正係数は考慮せず）を計測した。練り混ぜ方法は、1）細骨材およびセメントをミキサー

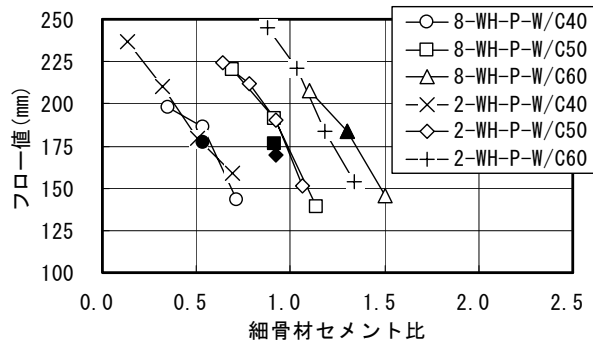
に投入し、30秒間空練り，2）水を加え，1分間練り混ぜた後，かき落とし，3）さらに2分間練り混ぜることとした。なお，各モルタルの練り混ぜ量は必要量により相違する。

## 2.2 28日強度試験

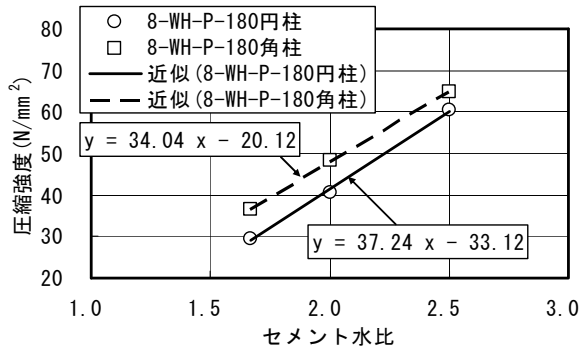
モルタル打設後1日で脱型し，材齢28日まで標準養生した40×40×160mm角柱および100φ×200mm円柱試験体の圧縮強度試験を行った。計測項目は，圧縮強度（全試験体），ヤング係数およびポアソン比（円柱試験体のみ）である。載荷は2000kN耐圧試験機を使用し，ロードセルにより荷重を，コンプレッソメーターにより縦および横ひずみを計測した。各計測データは，データロガーを使用して取込んだ。なお，角柱試験体の圧縮載荷はJIS R 5210-1997「セメントの物理試験方法」に準じて行った。

## 2.3 強度発現試験

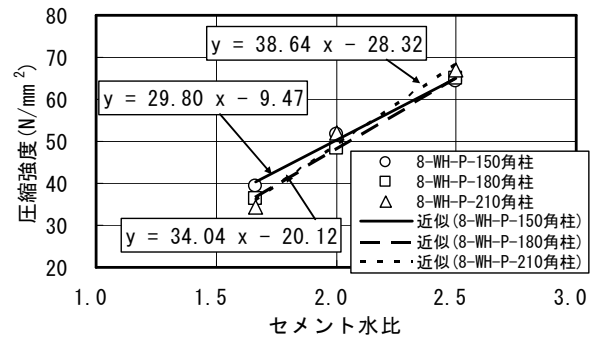
モルタル打設後1日で脱型し，所定材齢（1，4，13週（一部1，2年），（現時点で



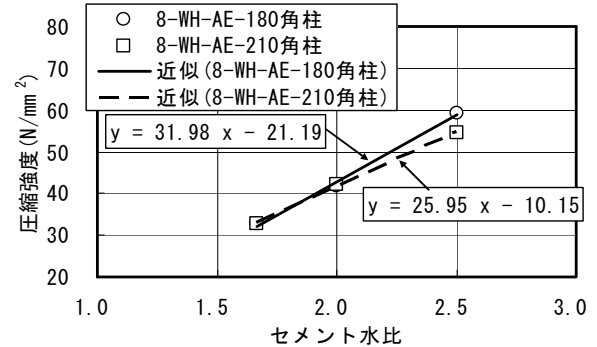
図－１ フロー値－細骨材セメント比関係



図－２ 28日圧縮強度－セメント水比関係  
(試験体形状の影響)



(a) プレーンモルタル



(b) 高性能AE減水剤モルタル

図－３ 28日圧縮強度－セメント水比関係  
(目標フロー値の影響)

得られている結果は、材齢4週までの結果である) ) まで標準養生した100φ×200mm円柱試験体の圧縮強度試験を行った。計測項目は、圧縮強度、ヤング係数およびポアソン比である。載荷・計測方法は前述の通りである。

## 2.4 収縮試験

モルタル打設後1日で脱型し、その後標準養生とし、材齢7日で恒温恒湿室(20℃, 60% RH)内に設置した(乾燥開始材齢7日)。試験体は100×100×400mm角柱および300×300×60mm平板試験体である。計測は、試験体内部中央に埋め込みゲージ(検長100mm)を設置し、収縮ひずみを計測した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 フレッシュ試験結果

図－1に、8mmアンダーシラスおよび2mmアンダーシラス、白色セメントを使用したプレーンモルタルのフロー値(5ℓモルタルミキサー使用)－細骨材セメント比(S/C)関係を示す。なお、図中の黒塗り印は、50ℓパン型ミキサーを使用した場合の結果である。図によれ

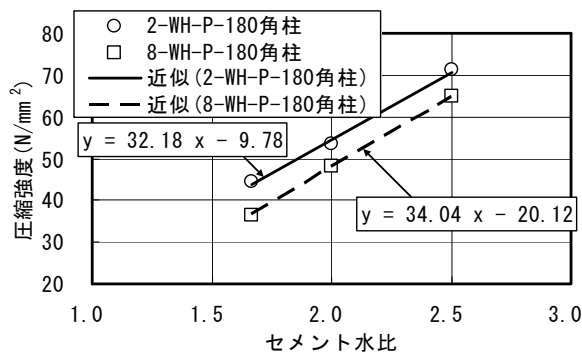
ば、水セメント比(W/C)、細骨材種類の相違に係わらず、一般的な傾向と同様、S/Cの増加に伴いフロー値は低下しており、その低下傾向は、本研究の範囲においてはほぼ直線的となっている。なお、同一調合においてミキサー種類の影響を見ると、フロー値は、5ℓモルタルミキサー使用>50ℓパン型ミキサー使用となる。

### 3.2 28日強度試験結果

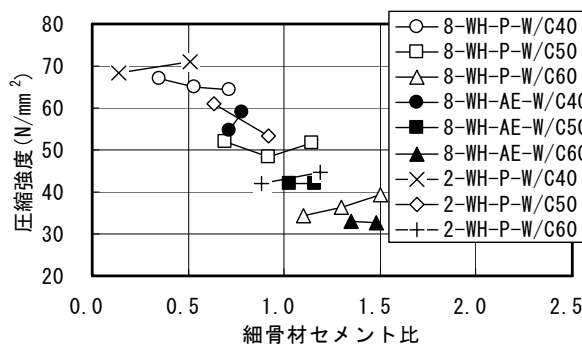
#### (1) 強度とセメント水比

図－2に、8mmアンダーシラス、白色セメントを使用したプレーンモルタル(目標フロー値=180mm)の28日圧縮強度( $f_{c28}$ )－セメント水比(C/W)関係を試験体形状別に示す。図によれば、いずれのC/Wにおいても $f_{c28}$ は、角柱試験体>円柱試験体となることを確認した。

図－3に、8mmアンダーシラス、白色セメントを使用したプレーンモルタルおよび高性能AE減水剤モルタルの $f_{c28}$ (角柱)－C/W関係を目標フロー値別に示す。図によれば、同一C/Wにおいて $f_{c28}$ は、プレーンモルタル>高性能AE減水剤モルタルとなることを確認したが、これ



図－4 28日圧縮強度－セメント水比関係  
(使用骨材の影響)



図－5 28日圧縮強度－細骨材セメント比関係

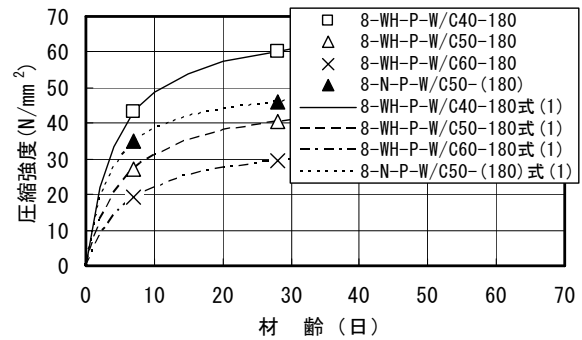
は、高性能AE減水剤モルタルの空気量が過大となったためと考える（空気量を計測した8-WH-AE-W/C50-180で、空気量=8.0%であった）。

図－4に、8 mmアンダーシラスおよび2 mmアンダーシラス、白色セメントを使用したプレーンモルタル（目標フロー値=180mm）の $f_{c28}$ （角柱）－C/W関係を示す。図によれば、同一C/Wの場合、 $f_{c28}$ は、2 mmアンダーシラス使用＞8 mmアンダーシラス使用となっている。

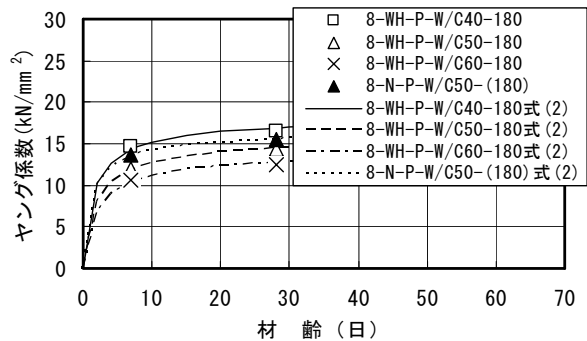
以上、図－2～4より、試験体形状、目標フロー値、骨材種類の相違、高性能AE減水剤使用の有・無に係わらず、白色セメントシラスモルタルの $f_{c28}$ －C/W関係は一般的なコンクリートと同様に直線関係にあることがわかる。

## (2) 強度と細骨材セメント比

図－5に、8 mmアンダーシラスおよび2 mmアンダーシラス、白色セメントを使用したモルタルの $f_{c28}$ （角柱）－S/C関係をW/C別に示す。W/Cが同一の場合、骨材種類に係わらず、 $f_{c28}$ に大きな変動は確認できない。このことから、実使用に際し、シラスモルタルのフロー値を、本研究の範囲において、シラスの混入量により調



(a) 圧縮強度



(b) ヤング係数

図－6 強度発現（水セメント比の影響）

整しても $f_{c28}$ に大きな影響を与えない。

## 3.3 強度発現試験結果

図－6に、円柱試験体より得られた、水セメント比の異なる8 mmアンダーシラス、白色セメントを使用したプレーンモルタル（目標フロー値=180mm）の圧縮強度（ $f_c$ ）－材齢関係およびヤング係数（E）－材齢関係を示す。また、図－6，7中に以下の土木学会式<sup>5)</sup>をベースとした推定式より算出した $f_c$ およびEを示す。

$$f_c(t) = f_c(28) \cdot t / (\alpha \cdot t + \beta) \quad (1)$$

$$E(t) = \gamma \cdot \sqrt{f_c(t)} \quad (2)$$

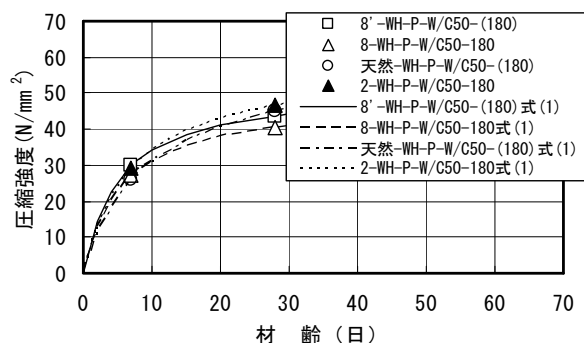
ここに、 $t$ は材齢（日）、 $f_c(28)$ は28日圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $\alpha$ ,  $\beta$ および $\gamma$ は、材料定数。

現時点では、材齢28日までの試験結果であるが、土木学会式をベースとした推定式の $\alpha$ ,  $\beta$ および $\gamma$ は、表－2に示す通りである。

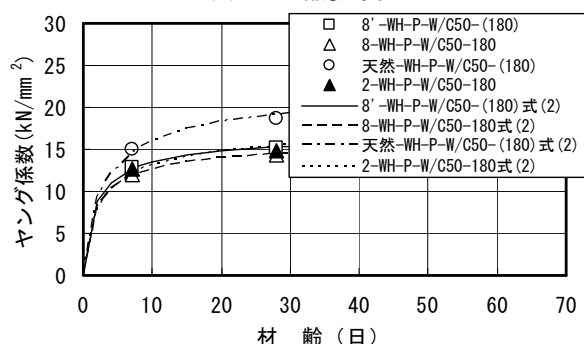
セメント種類の影響について注目すると（8-WH-P-W/C50-180, 8-N-P-W/C50-(180)），いずれの材齢においても、 $f_c$ , Eとも普通ポルトランドセメント使用＞白色セメント使用となっている。しかしながら、その差は材齢の進行に伴い

表－2 材料定数一覧

| 試験体名                | 推定式(1)および(2)の材料定数 |         |          |
|---------------------|-------------------|---------|----------|
|                     | $\alpha$          | $\beta$ | $\gamma$ |
| 8-WH-P-W/C40-180    | 0.8670            | 3.7247  | 2180.0   |
| 8-WH-P-W/C50-180    | 0.8352            | 4.6150  | 2276.1   |
| 8-WH-P-W/C60-180    | 0.8202            | 5.0332  | 2356.2   |
| 8-N-P-W/C50-(180)   | 0.8940            | 2.9685  | 2293.7   |
| 8'-WH-P-W/C50-(180) | 0.8445            | 4.3535  | 2314.5   |
| 天然-WH-P-W/C50-(180) | 0.7542            | 6.8829  | 2860.1   |
| 2-WH-P-W/C50-180    | 0.8043            | 5.4790  | 2249.1   |



(a) 圧縮強度



(b) ヤング係数

図－7 強度発現（骨材種類の影響）

小さくなっている。

図－7に、円柱試験体より得られた、8 mmアンダーシラス、8 mmアンダーシラスから0.15mmアンダーをカットしたシラス、2 mmアンダーシラスおよび天然骨材、白色セメントを使用したプレーンモルタル（W/C=50%，目標フロー値=180mm）の $f_c$ －材齢関係およびE－材齢関係を示す。 $f_c$ に注目すると、材齢に係わらず、骨材種類の相違による影響は多少あるものの、大きな差異はない。しかし、Eでは、天然骨材使用の結果のみが他の結果と比較して大きくなっている。武若等によれば、シラスを混和材とし、セメントと所定量置換して使用したモルタルにおいて長期に渡って強度増進が見込まれるとしているが<sup>3)</sup>、その影響は文献から読み取ると1年後程度以降であり（文献では、3年

経過すると普通ポルトランドセメントのみ場合の結果を上回るとしている）、本研究では、その材齢に達していない。今後、結果が得られ次第、報告する予定である。なお、土木学会式をベースとした推定式の $\alpha$ 、 $\beta$ および $\gamma$ は、表－2に示す通りである。

### 3. 4収縮試験結果

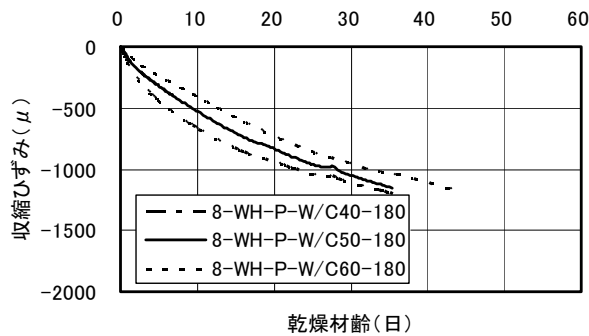
図－8に、収縮ひずみの経時変化を示す。

図－8 (a)に、8 mmアンダーシラス、白色セメントを使用したプレーンモルタル（目標フロー値=180mm）の収縮ひずみの経時変化をW/C別に示す。乾燥材齢28日の収縮ひずみはW/C=40%>W/C=50%>W/C=60%となっている。

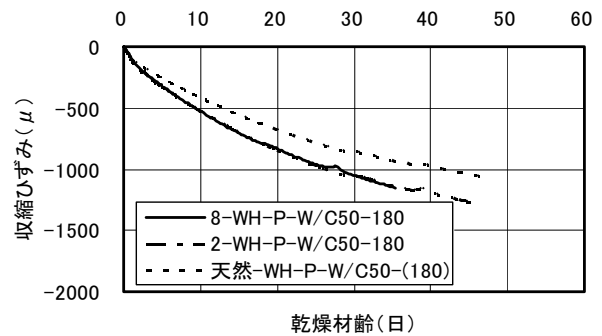
図－8 (b)に、8 mmアンダーシラス、白色セメントおよび普通ポルトランドセメントを使用したプレーンモルタルおよび高性能AE減水剤を添加したモルタル（目標フロー値=180mm）の収縮ひずみの経時変化を示す。まず、混和剤の影響について、乾燥材齢28日の収縮ひずみは、プレーンモルタル>高性能AE減水剤モルタルとなっている。高性能AE減水剤を添加し、単位細骨材量を増加させることにより、収縮ひずみの低減が可能であることがわかる。次に、セメント種類の影響について、乾燥材齢28日の収縮ひずみは、普通ポルトランドセメント使用>白色セメント使用となっており、シラスモルタルの収縮ひずみ低減に対して白色セメントの使用は有効である。

図－8 (c)に、8 mmアンダーシラス、2 mmアンダーシラスおよび天然骨材、白色セメントを使用したプレーンモルタル（W/C=50%，目標フロー値=180mm）の収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥材齢28日の収縮ひずみは、天然骨材使用<8 mmアンダーシラス使用≒2 mmアンダーシラス使用となっている。シラスを使用した場合、天然骨材を使用した場合と比較して、収縮性状は劣る。

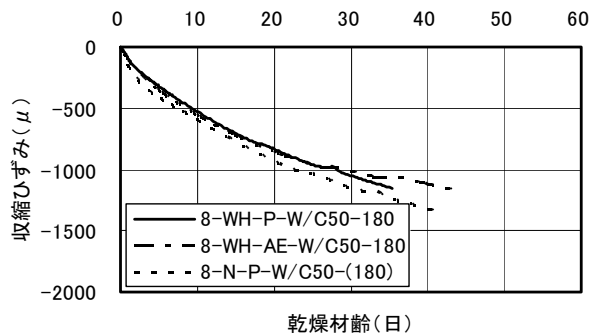
図－8 (d)に、8 mmアンダーシラス、天然骨材、白色セメントを使用したプレーンモルタル（W/C=50%，目標フロー値=180mm）の収縮ひ



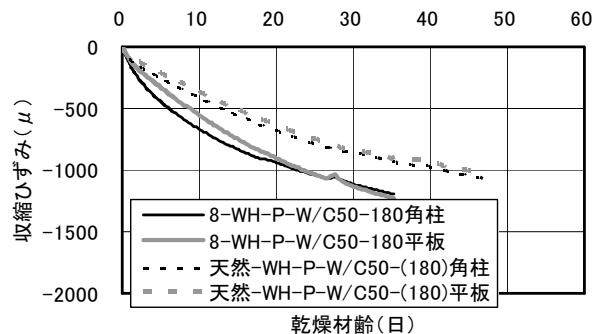
(a) 水セメント比の影響 (角柱)



(c) 骨材種類の影響 (角柱)



(b) 混和剤, セメント種類の影響 (角柱)



(d) 試験体形状の影響

図-8 収縮ひずみの経時変化

ずみの経時変化を試験体形状別に示す。骨材種類に係わらず現時点までの収縮ひずみは、角柱試験体≒平板試験体となっている。CEB-FIP Model Code 1990<sup>6)</sup>によれば、コンクリートの収縮ひずみは、 $h = (2 \times \text{部材断面積}) / (\text{大気に接する部材周長})$ が同じ場合、算出される収縮ひずみも同値となる。本研究では平板と角柱の $h$ が同値となるように寸法を設定しており、現時点までの結果は白色セメントシラスモルタルについてもコンクリートと同様の傾向である。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- (1) 白色セメントシラスモルタルの28日圧縮強度－セメント水比関係は一般的なコンクリートと同様に直線関係にある。
- (2) 水セメント比が同一の場合、細骨材セメント比が相違しても白色セメントシラスモルタルの28日圧縮強度は大きく変動しない。
- (3) 白色セメントシラスモルタルの圧縮強度およびヤング係数発現について、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]に示される

既往式をベースとした推定式の方法定数を明らかにした。

#### 謝 辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た、東海大学学生の今野美奈子嬢および関美寿々嬢に謝意を表します。なお、本研究の一部は科学研究費補助金(若手研究(B) 課題番号: 17760462, 代表者: 渡部憲)の助成を受けて行われた。また、一部は東海大学工学部2006年度学部等研究教育補助金(代表者: 渡部憲)の助成を受けて行われた。

#### 参考文献

- 1) 武若耕司, 松本進, 川俣孝治: しらすのコンクリート用細骨材への利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.7-12, 1987.6
- 2) 川俣孝治, 武若耕司, 松本進: しらすを細骨材として用いたコンクリートの実用性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.577-582, 1988.6
- 3) 武若耕司: シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状, コンクリート工学, Vol.42, No.3, pp.38-47, 2004.3
- 4) 角徹三, 堀誠治: 粗・細骨材に火山灰を使用したコンクリートの強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.59-64, 1989.6
- 5) 土木学会: 平成8年制定 コンクリート標準示方書[施工編], pp.190-191, 1996
- 6) CEB:CEB-FIP MODEL CODE1990, Thomas Telford, pp.53-58, 1990