

# 論文 制御型低強度材料として焼却灰を利用した場合の基礎的性状に関する研究

徳永 弘和 \*1・添田 政司 \*2・大和 竹史 \*3

**要旨：**本研究では、材齢 28 日圧縮強度が  $8.3\text{N/mm}^2$  以下になるように制御されたセメント系スラリー材料と定義されている制御型低強度材料に着目し、埋立廃棄物の中で大きな割合を占めている焼却灰の有効利用を目的として、制御型低強度材料として焼却灰を利用し、石炭灰を代替材として用いた場合の基礎的性状について検討を行った。その結果、高炉スラグ微粉末の置換率 90%、石炭灰を焼却灰の容積に対して 50%置換することで、流動性、圧縮強度を満足することができた。

**キーワード：**制御型低強度材料、焼却灰、重金属類、石炭灰、流動性、圧縮強度

## 1. はじめに

一般廃棄物を焼却処理に伴い発生する焼却灰は、年々増加傾向にあり、焼却灰中には重金属が含まれているため、処理・処分に規制がかけられている。その処理技術として我が国では特に熔融法が適用されており、エコセメント、熔融スラグ等の有効利用が推進されているが利用用途は限られているのが現状である。また、廃棄物の埋立処分に対する環境保全の面から埋立地の建設や確保が非常に困難な状況になっている。このため、埋立地の延命化対策と廃棄物の有効利用の観点から、埋立廃棄物の中で大きな割合を占めている焼却灰の再利用化を図る必要がある。

一方、石炭灰はセメント原料をや混和材料等に有効利用され、同時に様々な研究がなされている。近年、JIS 規格のフライアッシュだけでなく、規格外のフライアッシュの利用も盛んに行われている。また、石炭灰を多量に使用するため細骨材の代替材としての利用も行われている<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、米国の ACI 229 委員会で「材齢 28 日の圧縮強度が  $8.3\text{N/mm}^2$  以下になるように制御されたセメント系スラリー材料<sup>2)</sup>」と定義されている埋戻し材である制御型低強度材料 (CLSM) に着目した。この材料の主な特徴は流動性および自己充てん性を有しており打設が容易で

施工の省力化が可能である。また、自己硬化性を持ち、施工後の沈下が少ない等が挙げられる。この材料の特性を生かし、焼却灰の有効利用を目的とし、制御型低強度材料として焼却灰を利用し、石炭灰を代替材として用いた場合のフレッシュ性状および圧縮強度などの基礎的性状について検討した。

## 2. 焼却灰の物理的・化学的性状

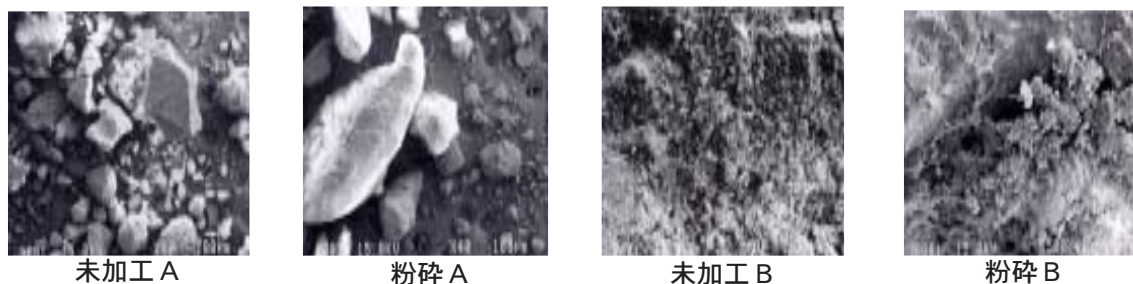
本研究では発生場所の異なる 2 種類の焼却灰 A および B を使用した。焼却灰は無機系のリン酸系重金属固定剤で処理されたものを使用し、現場で  $4.75\text{mm}$  のふるいを通したものをを用いた。焼却灰 B は焼却処理後水洗処理を施した。また、焼却灰 A および B は加工を全くしない未加工の焼却灰（以下：未加工 A、未加工 B）と粉砕加工した焼却灰（以下：粉砕 A、粉砕 B）として検討を行った。なお、粉砕加工は、効率的に処理できる風力を利用した風力式粉砕装置を用いた<sup>3)</sup>。

本研究で用いた焼却灰の走査型電子顕微鏡 (SEM 像) を写真-1 に、焼却灰の粒度分布を図-1 に示す。写真-1 より、いずれの焼却灰も粒子形状が悪く、表面に細かな凹凸が多く見られることが確認できた。また、図-1 より未加工 A および未加工 B においては、粒径  $0.6\text{mm} \sim 2.36\text{mm}$  の部分が多く、粉砕加工した粉砕 A および粉砕 B は粒径

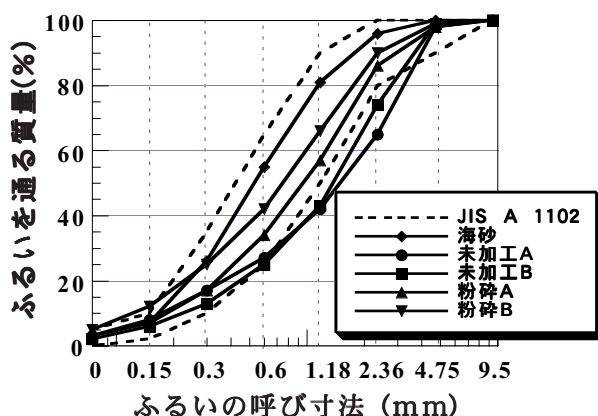
\*1 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 修士 (工学) (正会員)

\*2 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学専攻 助教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 教授 博士 (工学) (正会員)



写真－１ 焼却灰の電子顕微鏡写真



図－１ 焼却灰の粒度分布

0.15mm以下の細粒分が多く、JIS A 1102に規定されている細骨材の粒度範囲を若干はずれたものの、概ね近い粒度分布を示した。

表－1に焼却灰の物理的特性を示す。海砂と比較して、いずれの焼却灰においても密度は小さくなり、吸水率は高い値を示した。また、コンクリート標準示方書に規定されている細骨材の規定を満足できなかった。特に水洗処理を施した未加工Bは吸水率が高い値を示した。また、焼却灰を粉碎することで密度は若干大きくなり、吸水率も低い値を示した。実積率は各焼却灰においてばらつきを示している。

表-2に環境庁告示46号法に準じて行った重金属溶出試験結果を示す。重金属溶出量は、焼却灰Aは重金属固定化処理を施しているが、六価クロムに関しては若干土壤環境基準を満足できなかった。その

表－２ 重金属溶出量

(単位：mg/L)

| 分析項目             | 重金属溶出量  |         | 土壤環境基準 |
|------------------|---------|---------|--------|
|                  | 焼却灰 A   | 焼却灰 B   |        |
| Cd               | <0.005  | <0.005  | 0.01   |
| Cr <sup>6+</sup> | 0.06    | <0.02   | 0.05   |
| T-Hg             | <0.0005 | <0.0005 | 0.0005 |
| Se               | <0.005  | <0.005  | 0.01   |
| Pb               | <0.005  | <0.005  | 0.01   |
| As               | <0.005  | <0.005  | 0.01   |

他については基準値を満足した。焼却灰Bは、全ての項目において土壤環境基準の基準値を満足した。

### 3. 実験概要

#### 3.1 使用材料

結合材として普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>，略号：C），混和材として高炉スラグ微粉末（密度：2.91g/cm<sup>3</sup>，比表面積3950cm<sup>2</sup>/g，略号：BS），細骨材として海砂および未加工A，粉碎Aおよび水洗処理を施した未加工B，粉碎B（略号：S）を使用した。混和剤として高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系，略号：SP）および起泡剤（略号：FF）を使用した。また、細骨材の代替材として、JIS II種フライアッシュ（細粉，略号：FA）およびJIS規格外のフライアッシュ（原粉，略号NFA）を使用した。表-3に使用したフライアッシュの物理化学的性質を示す。

#### 3.2 配合

表-4に配合の一例を示す。水結合材比は全配合

表-1 焼却灰の物理的特性

| 試験項目   | 単位    | 試験方法       | 試料   |       |      |       |      | 規定値  |
|--------|-------|------------|------|-------|------|-------|------|------|
|        |       |            | 海砂   | 焼却灰   |      |       |      |      |
|        |       |            |      | 未加工A  | 粉碎A  | 未加工B  | 粉碎B  |      |
| 密度     | g/cm³ | JIS A 1109 | 2.59 | 1.81  | 2.19 | 1.78  | 2.12 | ≥2.5 |
| 吸水率    | %     | JIS A 1109 | 1.01 | 15.81 | 8.97 | 31.34 | 8.97 | ≤3.0 |
| 粗粒率    | F.M.  | JIS A 1102 | 2.35 | 3.42  | 3.01 | 3.41  | 2.65 | －    |
| 実積率    | %     | JIS A 1104 | 68.0 | 55.9  | 60.8 | 74.3  | 63.4 | －    |
| 単位容積質量 | kg/L  | JIS A 1104 | 1.74 | 0.87  | 1.22 | 1.01  | 1.23 | －    |

表－3 フライアッシュの物理化学的性質

| 種類     | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | SiO <sub>2</sub><br>(%) | 強熱減量<br>(%) | 比表面積<br>(cm <sup>2</sup> /g) | フロー値比<br>(%) | 活性度指数(%) |       |
|--------|----------------------------|-------------------------|-------------|------------------------------|--------------|----------|-------|
|        |                            |                         |             |                              |              | 材齢28日    | 材齢91日 |
| FA 細粉  | 2.41                       | 53.3                    | 1.0         | 4100                         | 106          | 85       | 94    |
| NFA 原粉 | 2.34                       | 57.0                    | 0.5         | 3050                         | 105          | 78       | 86    |
| JIS規格値 | 1.95以上                     | 45以上                    | 5以下         | 2500以上                       | 95以上         | 80以上     | 90以上  |

表－4 配合の一例

| 種類     | 石炭灰    | BS置換率<br>(%) | W/B<br>(%) | 空気量<br>(%) | FA置換率<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |     | SP<br>(B×%) |      |      |
|--------|--------|--------------|------------|------------|--------------|--------------------------|-----|-----|------|-----|-------------|------|------|
|        |        |              |            |            |              | W                        | B   |     | S    | FA  |             |      |      |
|        |        |              |            |            |              |                          | C   | BS  |      |     |             |      |      |
| 基本（海砂） | 無混和    | 0            | 70         | 30±2       | -            | 212                      | 303 | 0   | 1016 | -   | 1.5         | 0.75 |      |
| 海砂     | 細粉(FA) | 90           | 70         | 20±2       | 50           | 225                      | 35  | 287 | 603  | 561 | 1.2         | 0.75 |      |
|        | 細粉(FA) | 90           | 70         | 40±2       | 50           | 169                      | 26  | 215 | 452  | 420 | 1.2         | 0.75 |      |
| 焼却灰    | 海砂     | 細粉(FA)       | 90         | 70         | 30±2         | 50                       | 197 | 30  | 251  | 527 | 491         | 1.2  | 0.75 |
|        | 未加工A   | 細粉(FA)       | 90         | 70         |              | 50                       | 197 | 30  | 251  | 368 | 491         | 1.5  | 0.75 |
|        | 未加工B   | 細粉(FA)       | 90         | 70         |              | 50                       | 197 | 30  | 251  | 362 | 491         | 1.5  | 0.75 |
|        | 粉碎A    | 細粉(FA)       | 90         | 70         |              | 50                       | 197 | 30  | 251  | 446 | 491         | 1.5  | 0.75 |
|        | 粉碎B    | 細粉(FA)       | 90         | 70         |              | 50                       | 197 | 30  | 251  | 432 | 491         | 1.2  | 0.75 |

とも70%とした。目標空気量は、流動性が増加し、材料分離や圧縮強度の増加を抑制させるため、目標空気量を起泡剤を使用して、30±2%に設定した。配合選定を以下の手順で行った。1. 結合材の検討は、海砂を使用し、基本配合のセメントに対して高炉スラグ微粉末を置換させた。2. 細骨材の検討は、未加工焼却灰Aを使用し、細骨材の代替材としてフライアッシュを用いた。3. 流動性の設定は、海砂と4種類の焼却灰を使用し、細骨材の代替材の細粉は一定とし、SP添加率を変化させた。4. 目標空気量の確認は、海砂と4種類の焼却灰を用いて、細骨材の代替材の細粉は一定とし、目標空気量を変化させ

た。5. 上記の検討を基に最適な制御型低強度材料としての配合を選定し、海砂と4種類の焼却灰を用いて、細骨材の代替材として細粉と原粉を使用した場合のフレッシュ性状および圧縮強度、塩化物イオン量を検討した。その配合選定のフロー図を図-2に示す。

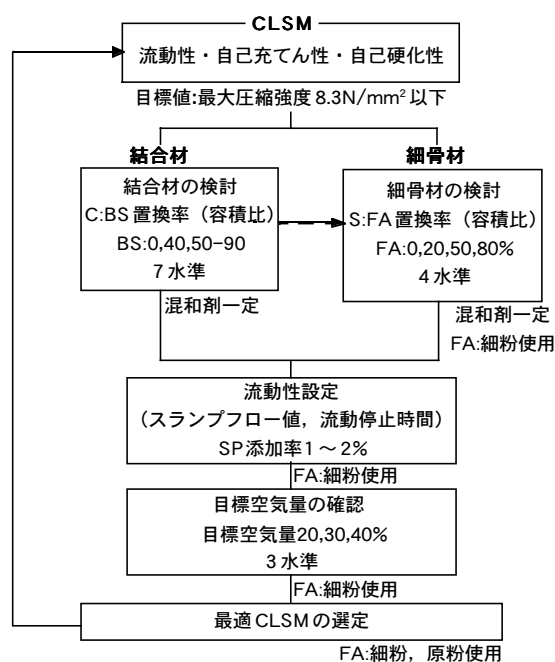
### 3.3 練混ぜ方法および供試体作製方法

モルタルの練混ぜの方法は、練り鉢に普通セメント、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを投入し、低速で空練り30秒間行い、所定の水と混和剤を30秒間で投入し、高速で3分間練混ぜる。その後、細骨材を30秒間で投入し練混ぜ時間を調整し、所定の空気量が得られるまで高速で練混ぜを行った。

供試体はφ5cm×10cmの供試体成型用型枠を用いて、振動を与えずに打設を行った。打設後24時間で脱型し所定の材齢まで水中養生(20±1℃)を行った。

### 3.4 試験方法

スランプフロー試験は、JIS R 5201で規定されているフローコーンに試料を詰め、引き上げ後打撃を与えない状態でモルタル試料の直径を測定した。また、同時に停止時間を測定した。空気量試験はJIS A 1116に準じて質量法により行った。圧縮強度試験はJIS A 1108に従って行った。塩化物イオン量測定はJCI-SC4の「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」の硝酸銀滴定法により行った。



図－2 配合選定のフロー図

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 結合材の検討

図-3に混和剤一定、細骨材に海砂を使用した場合のBS置換率の影響での流動性を示す。高炉スラグ微粉末の置換率が増加すると、流動性も増加する傾向にある。この要因として、高炉スラグ微粉末を用いると、セメントよりも密度が小さいため、粉体としての質量が増加すること、セメントよりも比表面積が大きいことが考えられる。また、高炉スラグ微粉末の置換率が60%以上では流動性に変化が見られないことが分かる。

図-4に混和剤一定、細骨材に海砂を使用した場合のBS置換率の影響での圧縮強度を示す。圧縮強度は、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに伴い、セメント混入量が減少するため圧縮強度は低下した。この結果から、流動性が最も大きく、圧縮強度が最も小さい、置換率90%を本実験での結合材の設定値とした。

##### 4.2 細骨材の検討

図-5に未加工Aを使用した場合の細骨材に対するFA置換率検討の流動性を示す。フライアッシュを細骨材の代替材として使用すると、フライアッシュの置換率が50%までは流動性は増加するが、置換率80%では大きく流動性が低下した。この要因として、細骨材の代替材としてのフライアッシュの置換率が80%と粉体量が著しく多いため、フライアッシュが練混ぜ水を吸水したため流動性の低下を示したものと思われる。この結果から、本実験での細骨材の代替材としてのフライアッシュ置換率は流動性が得られた50%を設定値とした。

##### 4.3 目標スランプフロー、流動停止時間の設定

図-6に各種焼却灰を用いた場合のSP添加率とスランプフロー値の関係を示す。なお、黒塗りは材料分離が生じたもの示す。焼却灰の種類に関わらずいずれもSP添加率が増加するとスランプフロー値は大きくなるが、スランプフロー値300mm以上になると材料分離が生じた。この材料分離は、焼却灰の種類に関わらずSP添加率2%を超えると生じた。このことから、本実験での目標スランプフロー値の上限値を300mmとし、下限値については流動性が

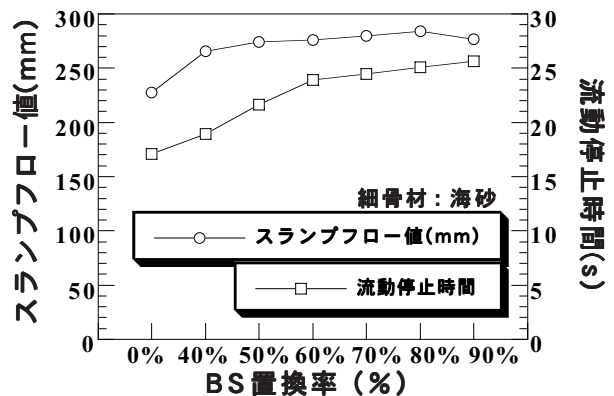


図-3 BS置換率の影響での流動性（海砂）

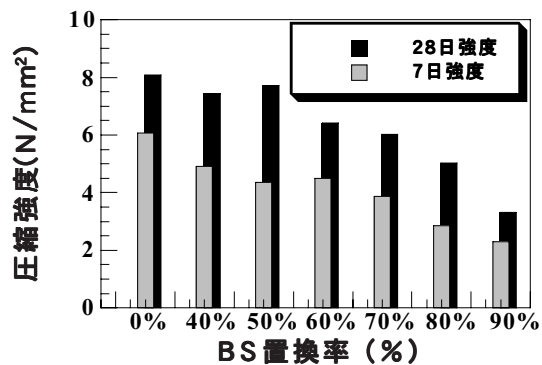


図-4 BS置換率の影響での圧縮強度（海砂）

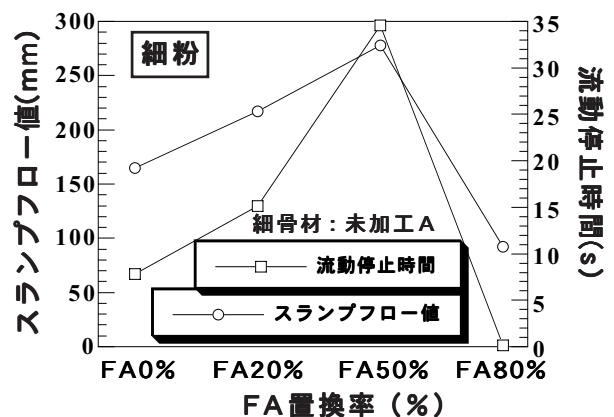


図-5 FA置換率検討の流動性（未加工A）

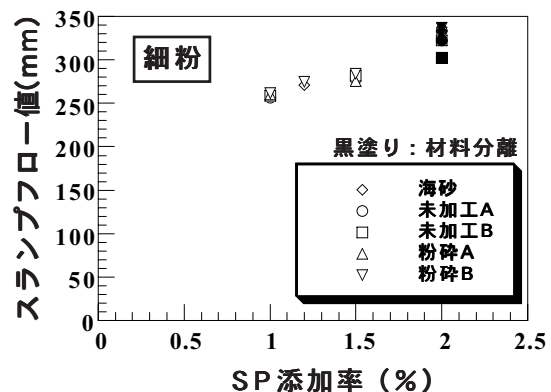


図-6 各種焼却灰を用いた場合のSP添加率とスランプフロー値の関係



得られる範囲が250mm以上必要となるため、その平均的な値として  $280 \pm 20\text{mm}$  に設定した。

図-7に各種焼却灰を用いた場合の流動性を示す。焼却灰の種類に関わらずいずれもスランプフロー値の増加に伴い、流動停止時間も増加した。スランプフロー値が300mm以上では材料分離が確認されているため、流動停止時間はばらつきが見られる。そのため、流動停止時間の上限値を55秒とし、本実験での目標流動停止時間を26～55秒の範囲に設定した。

図-8に各種焼却灰を用いた場合の圧縮強度を示す。焼却灰の種類に関わらずいずれもSP添加率の増加に伴い、圧縮強度は増加する傾向にある。この要因として、SP添加率が増加すると流動性が増加し、モルタルが緻密化したためと考えられる。また、海砂と比較すると、いずれの場合も圧縮強度は低下した。この要因として、図-1および写真-1より、焼却灰は高い吸水率を有しており、粒度分布や粒子形状が悪いことから強度が低下したと考えられる。また、焼却灰AとBを比較すると、若干水洗処理を施した焼却灰Bが強度増加が見られた。このことから、焼却灰の種類によって若干強度変化が見られたが、細骨材の種類に関わらず、SP添加率が増加すると強度増加が見られるため、流動性が得られる範囲でなるべく少なくする必要がある。

#### 4.4 目標空気量の確認

図-9に目標空気量と流動性の関係を示す。空気量30%では、焼却灰の種類に関わらずいずれもスランプフロー値および流動停止時間は、材料分離が見られなかった。しかし、空気量20%、40%ではいずれの場合も材料分離が生じた。

図-10に目標空気量と圧縮強度の関係を示す。焼却灰の種類に関わらずいずれも空気量が大きくなるに従って、圧縮強度は低下する傾向にある。この要因として、空気量が増加するとモルタル中の空隙が増加するためと考えられる。また、空気量20%では、目標最大圧縮強度  $8.3\text{N/mm}^2$  を満足できなかった。このことから、空気量20%では、最大圧縮強度を満足できず、材料分離も生じた。空気量40%では、圧縮強度は満足する結果が得られたが、材料

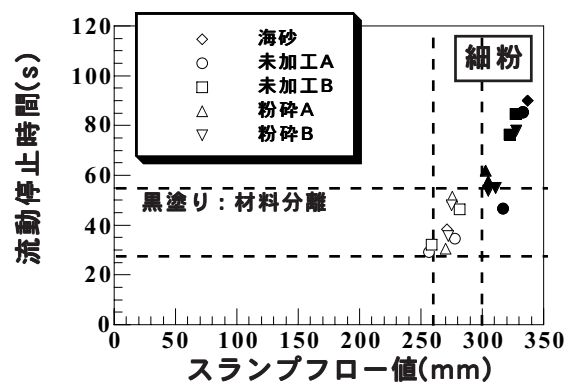


図-7 各種焼却灰を用いた場合の流動性

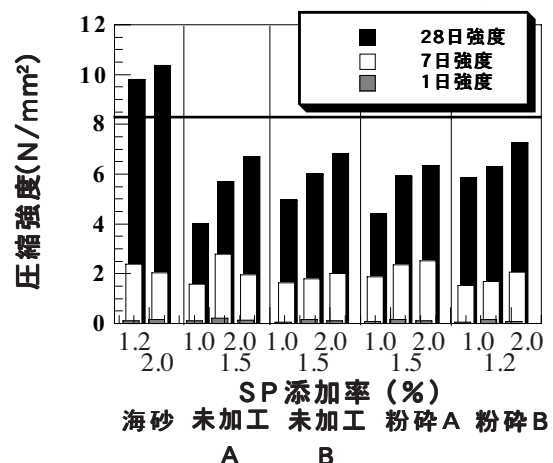


図-8 各種焼却灰を用いた場合の圧縮強度

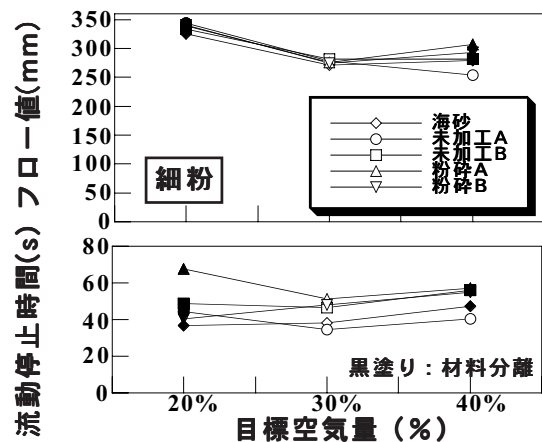


図-9 目標空気量と流動性の関係

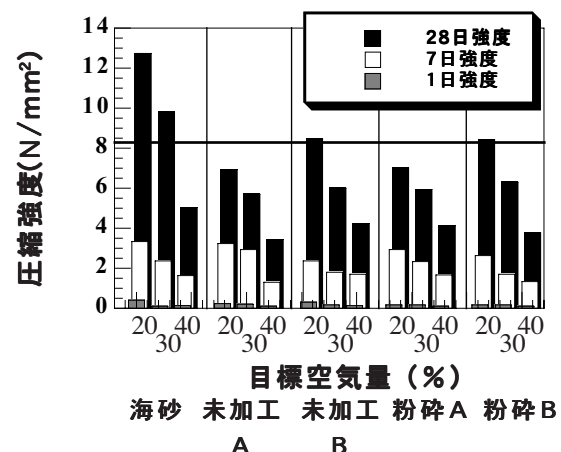


図-10 目標空気量と圧縮強度の関係

分離が生じた。そのため、本実験での目標空気量を30%にすることが確認できた。

4.5 最適制御型低強度材料の検討

図-11に最適制御型低強度材料の圧縮強度を示す。焼却灰の種類に関わらずいずれも材齢の経過と共に強度は増加した。また、目標最大圧縮強度8.3N/mm<sup>2</sup>を満足する結果が得られた。海砂と比較すると、いずれの場合も圧縮強度は低下した。この要因として、図-1および写真-1より、焼却灰は高い吸水率を有しており、粒度分布や粒子形状が悪いことから強度が低下したと考えられる。また、焼却灰AとBを比較すると、若干水洗処理を施した焼却灰Bの強度増加が見られた。未加工と粉碎を比較すると、粉碎した焼却灰が粒度分布が良いため、若干増加した。細粉と原粉を比較すると、両者に顕著な差は確認できなかった。

表-5に塩化物イオン量の測定結果を示す。焼却灰Aおよび水洗処理を施した焼却灰B共に、細骨材中の塩化物イオン許容量を満足できなかった。また、焼却灰A、Bを混入したモルタルにおいては、水洗処理を施した焼却灰Bについては、塩化物イオン量の規定値を満足した。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

1) 結合材の検討では、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従って、流動性は増加し、圧縮強度は低下した。

2) 細骨材の検討では、焼却灰は粒度分布および粒子形状が悪く、高い吸水率を有しており、流動性が低下するため、フライアッシュを細骨材の代替材として使用すると流動性は増加するが、フライアッシュの置換率が80%では流動性が大きく低下した。

3) 流動性の設定では、SP添加率が増加するに従って流動性は増加するが、SP添加率が2%を超えると材料分離が生じた。また、圧縮強度はSP添加率の増加に伴い大きくなる。

4) 目標空気量確認では、空気量20%および40%において材料分離が生じたため、本実験での目標空気量を30%にすることが確認できた。

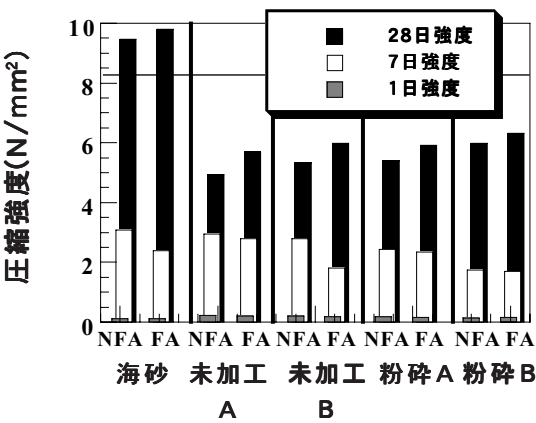


図-11 最適 CLSM の圧縮強度

表-5 塩化物イオン量

| 種類   |           | Cl <sup>-</sup> 量※<br>(%) | モルタル中のCl <sup>-</sup> 量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|-----------|---------------------------|-------------------------------------------------|
| 規格値  | コンクリート示方書 | 0.04                      | 0.3                                             |
| 焼却灰  | 焼却灰A      | 0.31                      | -                                               |
|      | 焼却灰B      | 0.07                      | -                                               |
| モルタル | 海砂        | -                         | 0.09                                            |
|      | 未加工A      | -                         | 0.68                                            |
|      | 粉碎A       | -                         | 0.66                                            |
|      | 未加工B      | -                         | 0.17                                            |
|      | 粉碎B       | -                         | 0.20                                            |

※NaCl 換算値

5) 制御型低強度材料として焼却灰を用いた場合でも、流動性は十分確保でき、目標最大圧縮強度8.3N/mm<sup>2</sup>以下を満足する結果が得られた。また、焼却灰を水洗処理することで塩化物イオン量の規定値を満足した。そのため、配管工事の埋戻し材や構造物の裏込め材として十分利用可能である。

謝辞

本研究は文部省科学研究費補助金の基盤研究(c)(2)(課題番号:15560398, 研究代表者:添田政司)によって実施されたものである。

参考文献

1) 河野ほか：ハイボリュームフライアッシュコンクリートの特性, セメント・コンクリート, No.593, pp.10-17, 1996

2) W.S.Adaska : Contorolled Low-Strength Materials, Concrete International, ACI, Vol.19, No.4, pp.41-43, 1997

3) 佐藤嘉昭ほか：粉碎処理した鋳物ダストのコンクリート用混和材としての有効利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1439-1444, 2003