

# 論文 物理選別処理した都市ごみ焼却灰の骨材への適用性に関する実験的研究

田浦 靖知\*1・添田 政司\*2・大和 竹史\*3

**要旨：**本研究では、湿式物理選別処理により粒径13mm以下に調整された都市ごみ焼却灰のうち、粒径5mm以下をコンクリート用細骨材として、粒径2.5～5mmおよび5mm以上をポーラスコンクリートの粗骨材として、それぞれの利用を試みた。その結果、焼却灰に水洗処理を施し、細骨材容積に対する10%程度の置換であれば十分に利用可能であることが明らかとなった。一方、ポーラスコンクリートの粗骨材として用いると著しい強度低下を示した。

**キーワード：**湿式物理選別処理、都市ごみ焼却灰、細骨材、粗骨材

## 1. はじめに

家庭等から排出される都市ごみは焼却等の中間処理の後に埋立処分されているが、近年、最終処分場の逼迫、廃棄物処理施設の立地が困難である等の廃棄物処理問題が顕在化しているため、都市ごみの発生抑制や焼却灰の減容化、再資源化への取り組みが喫緊の課題となっている。

しかし、焼却灰には重金属類等の有害物質が含まれるため、有効利用に際して何らかの処理が必要となる。その処理技術として、物理選別法と溶融法が広く知られているが、我が国では特に溶融法が適用されており、エコセメント、溶融スラグ等の有効利用が推進されている。一方、欧米諸国では物理選別法が適用されており、すでに物理選別処理された都市ごみ焼却灰が路盤材、埋戻し材等の土木資材として有効利用されている<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、湿式物理選別法により処理された焼却灰の骨材としての有効利用の可能性を明らかにすることを目的として、湿式物理選別処理により粒径13mm以下に調整された焼却灰のうち、粒径5mm以下の焼却灰をコンクリート用細骨材として、粒径2.5～5mmおよび5mm以上の焼却灰をポーラスコンクリートの粗骨材として、それぞれの適用を試みた。

## 2. 焼却灰の物理的および化学的性状

湿式物理選別処理によって、原料となる焼却灰は鉄、非鉄金属、未燃物、粒径80mm以上の粗粒焼却灰および粒径13mm以下の細粒焼却灰に選別される<sup>1)</sup>。本研究では、全連続式ストーカ炉(焼却温度：800℃以上、焼却能力：810～1,500トン/日)で焼却された都市ごみ焼却灰に湿式物理選別処理を施した後、リン酸系重金属固定剤により重金属固定化処理した細粒焼却灰を対象とした。図-1に細粒焼却灰の粒度分布を示す。細粒焼却灰を5mmふるいで篩うと、粒径5mm以上が約4割、粒径5mm以下が約6割であった。ま

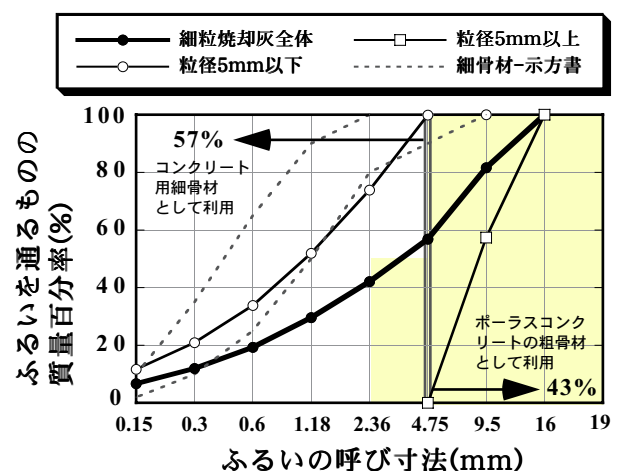


図-1 細粒焼却灰の粒度分布

\*1 (株)安部工業所 九州支店工務部工事課 修士(工学) (正会員)

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

\*3 福岡大学教授 工学部土木工学科 博士(工学) (正会員)

た、粒径5mm以下に篩った細粒焼却灰は、コンクリート標準示方書に規定された細骨材の粒度範囲を若干はずれるものの、概ね近い粒度分布を示した。

表-1にJIS K 0101, 0102に準じて測定した細粒焼却灰の化学組成を、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それぞれ示す。細粒焼却灰の主成分はカルシウムと酸不溶解分であり、無機物を多く含む土壌に近い化学組成を示した。また、細粒焼却灰の重金属溶出量は、重金属固定化処理しているため、すべての重金属において土壌環境基準の基準値を満足した。

### 3. コンクリート用細骨材としての適用

#### 3.1 使用材料

表-3にコンクリートの使用材料を示す。焼却灰には、粒径5mm以下に篩った焼却灰（以下、水洗前）と、その焼却灰に水洗処理を施した焼却灰（以下、水洗後）を表乾状態で用いた。水洗処理は、容器に液固比が3となるように焼却灰と水道水を入れ、ハンドミキサーで10分間攪拌した後、1日放置し、放置後に吸引濾過を行った。

#### 3.2 配合および練混ぜ方法

表-4にコンクリートの配合表を示す。コンクリートの配合は水セメント比を50%で一定とし、各焼却灰を海砂の容積に対して、10, 20, 30および50%の割合で海砂と代替した。

練混ぜには、二軸強制練りミキサーを用い、セメント、粗骨材および予め海砂と焼却灰を混ぜておいた細骨材を60秒間空練りした後、所定の水と高性能AE減水剤およびAE剤を投入し、120秒間練混ぜた。また、コンクリートのスランプは8±1.5cm、空気量は5±1%に調整した。

#### 3.3 試験項目および方法

表-5に試験項目およびその試験方法を示す。圧縮強度試験は、材齢7日、28日、91日に行った。凍結融解試験および中性化促進試験には、材齢28日まで水中養生を行った10×10×40cmの角柱供試体を用いた。重金属溶出試験は、圧縮強度試験後の供試体を粒径0.5～5mmに破碎し

表-1 焼却灰の化学組成

(単位：%)

| CaO  | ig.loss*1 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | Cu  | Cl   | 強熱減量*2 |
|------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|------|--------|
| 12.1 | 45.85     | 3.28                           | 1.4                            | 0.9 | 0.6 | 0.3> | 9.5    |

\*1：主にSiO<sub>2</sub>

\*2：600℃, 6時間

表-2 焼却灰の重金属溶出試験結果

(単位：mg/L)

| 種類     | Cd    | Pb    | Se    | Cr <sup>6+</sup> | As    | T-Hg    |
|--------|-------|-------|-------|------------------|-------|---------|
| 細粒焼却灰  | 0.01> | 0.01> | 0.01> | 0.05>            | 0.01> | 0.0005> |
| 土壌環境基準 | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.05             | 0.01  | 0.0005  |

表-3 コンクリートの使用材料

| 材料  | 種類           | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率<br>(%) | 粗粒率<br>(F.M.) | 略号   |
|-----|--------------|----------------------------|------------|---------------|------|
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント | 3.16                       | -          | -             | C    |
| 細骨材 | 海砂           | 2.58                       | 1.40       | 2.34          | S    |
|     | 焼却灰          | 水洗前                        | 1.92       | 17.10         | 3.02 |
|     |              | 水洗後                        | 2.03       | 15.00         | 2.99 |
| 粗骨材 | 砕石2005       | 2.83                       | 0.60       | 6.47          | G    |
| 混和剤 | 高性能AE減水剤     | ホリカルボン酸系                   |            |               |      |
|     | AE剤          | アルキルアルスルホン酸系               |            |               |      |

表-4 コンクリートの配合表

| 細骨材の種類 | 置換率<br>(%) | W/C<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |      | (C×%) |       |
|--------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|-------|-------|
|        |            |            | W                        | C   | S   | BA  | G    | SP    | AE    |
| 無混和    | 0          | 50         | 170                      | 340 | 760 | 0   | 1066 | 0.2   | 0.001 |
| 水洗前    | 10         | 50         | 170                      | 340 | 687 | 57  | 1062 | 0.3   | 0.001 |
|        | 20         |            |                          |     | 612 | 114 | 1060 | 0.3   | 0.002 |
|        | 30         |            |                          |     | 538 | 172 | 1056 | 0.3   | 0.002 |
|        | 50         |            |                          |     | 388 | 290 | 1049 | 0.6   | 0.003 |
| 水洗後    | 10         | 50         | 170                      | 340 | 687 | 60  | 1062 | 0.3   | 0.002 |
|        | 20         |            |                          |     | 612 | 121 | 1060 | 0.3   | 0.002 |
|        | 30         |            |                          |     | 538 | 182 | 1056 | 0.3   | 0.002 |
|        | 50         |            |                          |     | 388 | 306 | 1049 | 0.6   | 0.003 |

表-5 試験項目及び試験方法

| 項目        | 試験方法                                                                                             |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 膨張量測定     | コンクリートを5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタルを供試体（φ5×10cm）として、コンクリートの作製後から12時間後までにおける膨張量をレーザー変位計およびデタロガーを用いて測定 |
| 圧縮強度試験    | 所定の材齢まで水中養生を行ったφ10×20cmの円柱供試体をJIS A 1108に準拠し試験                                                   |
| 細孔径分布測定   | 圧縮強度試験後の供試体を粉碎し、水銀圧入式ポロシメータにより測定                                                                 |
| 凍結融解促進試験  | 温度-18～5℃の条件で水中凍結融解試験をJIS A 1148に準拠し試験                                                            |
| 中性化促進試験   | 温度40℃, 湿度40%, CO <sub>2</sub> 濃度10%の条件下で試験                                                       |
| 中性化深さ測定   | 所定の期間に供試体を割裂した後、割裂面にフェノールフタレイン1%溶液を吹き付け、非変色域をノギスを用いて測定                                           |
| 塩化物イオン量測定 | 細骨材：JSCE-C 502に準拠し測定<br>コンクリート：圧縮強度試験後の供試体を粉碎し、JCI-SC4に準拠し測定                                     |
| 重金属溶出試験   | 圧縮強度試験後の供試体を粉碎し、鉛の溶出試験を環境庁告示46号法に準拠し試験                                                           |

て溶出試験を行い、溶出液中の鉛の測定を原子吸光光度計により行った。

### 3.4 結果および考察

#### (1) 膨張特性

図-2にコンクリートの作製から12時間後まで測定した膨張量の経時変化を示す。無混和のものは収縮したが、焼却灰を混入したものは、水洗前および水洗後ともに置換率の増加に伴って膨張する傾向にあった。さらに、一度収縮した後に膨張し、約4～5時間で安定するといった膨張挙動を示した。膨張の原因としては、焼却灰中にアルミニウム、カルシウム、マグネシウムが含まれることによる硬化過程の異常膨張等が考えられる。

#### (2) 強度特性

図-3にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度は、無混和のものが最も大きく、焼却灰を混入したものは、水洗前および水洗後ともに置換率の増加に伴って低下した。

図-4は、材齢28日における圧縮強度試験後の供試体を粉砕して測定した細孔径分布を示したものである。全細孔量は、無混和のものが最も小さく、焼却灰を混入したものは、水洗前および水洗後ともに置換率の増加に伴って増加する傾向にあり、焼却灰の混入によってコンクリートの細孔構造がポーラス化することが明らかとなった。これは、焼却灰の全細孔量（水洗前：0.137cc/g、水洗後：0.107cc/g）が海砂の全細孔量（0.022cc/g）に比べ非常に大きいことによるものと考えられる。したがって、コンクリートの圧縮強度の低下は、この細孔構造のポーラス化が直接的な原因と考えられ、その他の要因として、焼却灰が多孔質な構造を有することから弱いと推測される焼却灰自体の強度や硬化過程における膨張等が影響したものと考えられる。

#### (3) 中性化

図-5は、コンクリートの中性化深さと促進試験期間の平方根との関係を示したものである。焼却灰を混入したコンクリートの中性化深さは、水洗前および水洗後ともに置換率の増加に伴って増大し、焼却灰の混入によって中性化が促進される

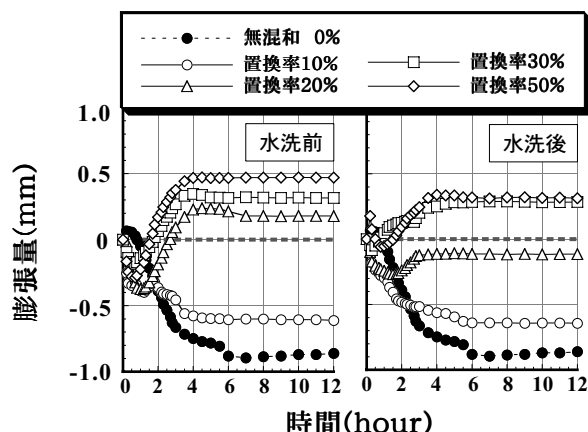


図-2 コンクリートの膨張量の経時変化

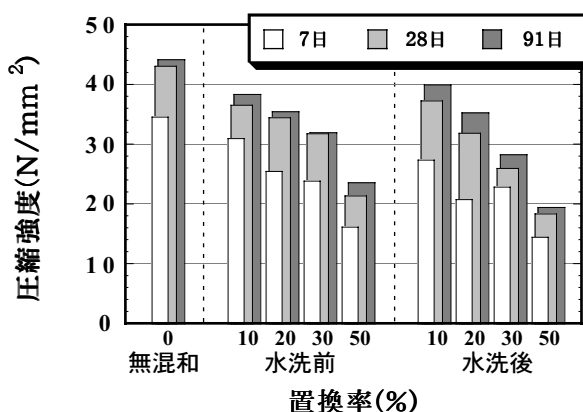


図-3 コンクリートの圧縮強度試験結果

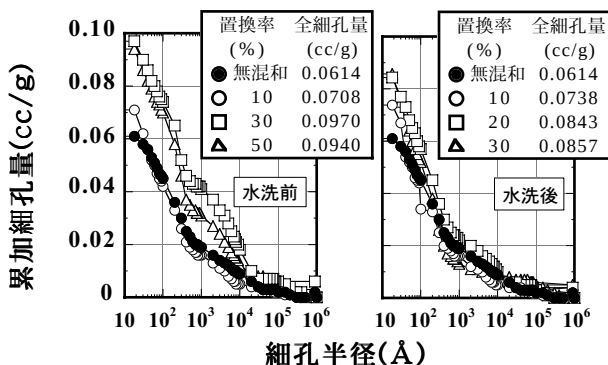


図-4 コンクリートの細孔径分布

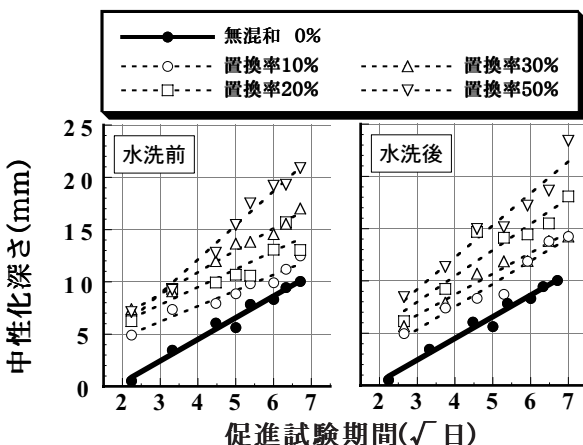


図-5 中性化深さと試験期間の平方根の関係

ことが明らかとなった。これは、細孔構造のポーラス化によってCO<sub>2</sub>ガスが浸透しやすい状態になったことに起因したものと考えられる。

#### (4) 凍結融解抵抗性

図-6は、凍結融解サイクル数と相対動弾性係数および質量減少率の関係を示したものである。細骨材の種類および置換率に関係なく、相対動弾性係数に大きな低下は認められず、凍結融解300サイクルにおける耐久性指数もすべて90%以上の値を示した。また、質量減少率についても5%以上の値を示すコンクリートはなかった。以上の結果より、焼却灰を混入しても、無混和のコンクリートと同様に5%程度の空気を連行すれば、凍結融解抵抗性は良好である。

#### (5) 塩化物イオン量および鉛の溶出特性

表-6に塩化物イオン量および鉛の溶出量の測定結果を示す。水洗前の焼却灰は多くの塩化物イオンを含有しており、水洗処理を施しても、細骨材中の塩化物イオン許容量を満足することはできなかった。そのため、焼却灰を混入したコンクリート中の塩化物イオン量は、置換率の増加に伴って増加した。しかしながら、水洗後の焼却灰を置換率10%で混入したものは、コンクリート中の塩化物イオン量の規定値を満足した。

焼却灰の鉛の溶出量は、重金属固定化処理を施しているため、土壤環境基準を満足した。さらに、焼却灰を混入したコンクリートもすべての置換率において土壤環境基準を満足しており、重金属溶出の観点からは問題はないと考えられる。

### 4. ポーラスコンクリートの粗骨材としての適用

#### 4.1 使用材料および配合

表-7にポーラスコンクリートの使用材料を示す。シリカフェュームはペーストへの粘性の付与および強度増進を目的に使用した。粗骨材には、湿式物理選別処理により粒径13mm以下に調整された焼却灰のうち、粒径5～13mmの焼却灰を6号焼却灰として、粒径2.5～5mmの焼却灰を7号焼却灰として用い、さらに、6号碎石および7号碎石をそれぞれ表乾状態で用いた。

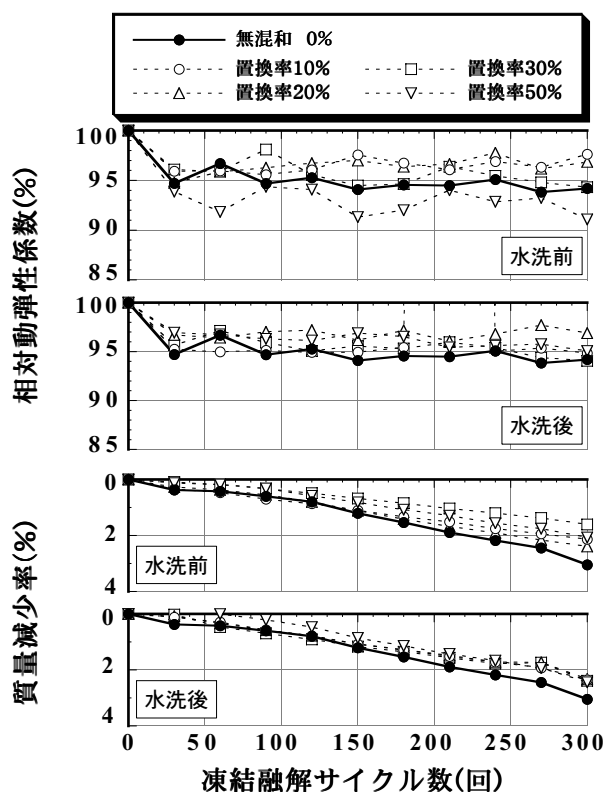


図-6 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数及び質量減少率の関係

表-6 塩化物イオン量及び鉛の溶出量

| 種 類                    | 置換率<br>(%) | Cl <sup>-</sup> 量*<br>(%) | コンクリート中<br>のCl <sup>-</sup> 量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 鉛の<br>溶出量<br>(mg/L) |
|------------------------|------------|---------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|
| 規格値                    | コンクリート示方書  | 0.04                      | 0.30                                                  | -                   |
|                        | 土壤環境基準     | -                         | -                                                     | 0.01                |
| 焼却灰                    | 水洗前        | -                         | 0.64                                                  | 0.01>               |
|                        | 水洗後        | -                         | 0.11                                                  | 0.01>               |
| コン<br>ク<br>リ<br>ー<br>ト | 無混和        | 0                         | -                                                     | 0.08                |
|                        | 水洗前        | 10                        | -                                                     | 0.87                |
|                        |            | 30                        | -                                                     | 1.47                |
|                        |            | 50                        | -                                                     | 2.71                |
|                        | 水洗後        | 10                        | -                                                     | 0.21                |
|                        |            | 30                        | -                                                     | 0.76                |
|                        |            | 50                        | -                                                     | 0.85                |
|                        |            |                           |                                                       | 0.01>               |

\*NaCl 換算値

表-7 ポーラスコンクリートの使用材料

| 材 料 | 概 要                                  | 略号 |
|-----|--------------------------------------|----|
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm <sup>3</sup> | C  |
| 混和材 | シリカフェューム 密度2.09g/cm <sup>3</sup>     | SF |
| 混和剤 | 高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系                    | SP |
| 粗骨材 | 6号 焼却灰                               | BA |
|     | 粒径5～13mm 密度2.18g/cm <sup>3</sup>     |    |
|     | 吸水率7.05% 実積率57.4%                    |    |
|     | 7号 焼却灰                               |    |
|     | 粒径2.5～5mm 密度2.23g/cm <sup>3</sup>    | G  |
|     | 吸水率10.6% 実積率51.2%                    |    |
|     | 6号 碎石                                |    |
|     | 粒径5～13mm 密度2.81g/cm <sup>3</sup>     |    |
|     | 吸水率0.71% 実積率57.9%                    | G  |
|     | 7号 碎石                                |    |
|     | 粒径2.5～5mm 密度2.75g/cm <sup>3</sup>    |    |
|     | 吸水率1.63% 実積率60.0%                    |    |



表-8 ポーラスコンクリートの配合表

| 粗骨材の種類    | W/P* | 充填率 (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |      |      | (P×%) |
|-----------|------|---------|--------------------------|-----|----|------|------|-------|
|           |      |         | W                        | C   | SF | G    | BA   |       |
| 6号<br>碎石  | 25   | 40      | 72                       | 258 | 29 | 1626 | -    | 1.0   |
|           |      | 50      | 90                       | 323 | 36 | 1626 | -    | 0.9   |
| 7号<br>碎石  | 25   | 40      | 68                       | 245 | 27 | 1652 | -    | 1.0   |
|           |      | 50      | 85                       | 307 | 34 | 1652 | -    | 1.0   |
| 6号<br>焼却灰 | 25   | 40      | 73                       | 261 | 29 | -    | 1253 | 1.0   |
|           |      | 50      | 91                       | 327 | 36 | -    | 1253 | 0.9   |
| 7号<br>焼却灰 | 25   | 40      | 83                       | 299 | 33 | -    | 1143 | 1.0   |
|           |      | 50      | 104                      | 374 | 42 | -    | 1143 | 1.3   |

\*P：結合材 (=W+C+Sf)

表-8にポーラスコンクリートの配合表を示す。ポーラスコンクリートの配合は、水結合材比を25%で一定とし、結合材の充填率を40および50%とした。また、シリカフュームはセメント質量の内割で20%混入し、高性能AE減水剤によりペーストフロー値を200±10mmに調整した。

#### 4.2 練混ぜおよび供試体作製方法

練混ぜ方法には、セメントとシリカフュームをモルタルミキサにより4分間空練りした後、所定の水と高性能AE減水剤を投入し5分間練混ぜ、出来上がったフレッシュペーストと粗骨材を可傾式ミキサで1分間練混ぜる分離方式を用いた。

供試体の締固めには、突き棒は用いず、円柱供試体は3層、芝の生育試験用供試体は2層、各層毎に5秒間の振動機による振動締固めを行った。

#### 4.3 試験方法

##### (1) 空隙率測定

フレッシュ時における空隙率は、JIS A 1116に準じて空気量を測定、これより空隙率を求めた。

硬化時における空隙率の測定は、φ10×20cmの円柱供試体を用いて、ポーラスコンクリートの空隙率測定方法（案）<sup>2)</sup>に準じて行った。

##### (2) 透水試験

透水試験は、材齢28日まで水中養生を行ったφ10×20cmの円柱供試体を用いて、ポーラスコンクリートの透水試験方法（案）<sup>2)</sup>に準じて定水位透水試験を行った。

##### (3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、所定の材齢まで水中養生を行ったφ10×20cmの円柱供試体に両面キャッピングを施した後、JIS A 1108に準じて行った。

表-9 空隙率及び透水係数の測定結果

| 粗骨材の種類    | 充填率 (%) | 空隙率(%) |        |      | 透水係数 (cm/s) |
|-----------|---------|--------|--------|------|-------------|
|           |         | 目標     | フレッシュ時 | 硬化時  |             |
| 6号<br>碎石  | 40      | 25.3   | 27.3   | 24.8 | 5.90        |
|           | 50      | 21.1   | 21.3   | 20.8 | 2.90        |
| 7号<br>碎石  | 40      | 24.0   | 27.5   | 26.6 | 1.05        |
|           | 50      | 20.0   | 23.6   | 21.2 | 0.51        |
| 6号<br>焼却灰 | 40      | 25.6   | 33.0   | 27.4 | 8.24        |
|           | 50      | 21.3   | 29.6   | 23.4 | 5.70        |
| 7号<br>焼却灰 | 40      | 29.3   | 33.4   | 31.1 | 2.36        |
|           | 50      | 24.4   | 33.2   | 24.7 | 1.54        |

#### (4) 芝の生育試験

芝の生育試験には、上面φ15cm、底面φ9cm、高さ14cmの植生用ポット型に成型したポーラスコンクリートを供試体として用いた。アルカリ分の溶出を考慮して材齢28日まで水中養生を行った後、供試体に培養土を充填し、さらに芝（エバーグリーンローングラス）の種を混ぜ込んだ培養土を覆土厚が4cmになるように投入することにより播種を行った。播種後、供試体を室内の日中ガラス越しに太陽が当たる窓際に設置し、1日1回散水を行った。さらに、比較のため、土壌（培養土）のみと焼却灰のみにも播種を行い、芝の生育状況を観察した。

#### 4.4 実験結果および考察

##### (1) 空隙性状および透水性

表-9にポーラスコンクリートの空隙率および透水係数の測定結果を示す。フレッシュ時の空隙率が大きな値を示したが、目標空隙率と硬化時の空隙率はほぼ同程度であり、配合どおりのポーラスコンクリートが製造できた。

焼却灰を用いたポーラスコンクリートの透水係数は、碎石を用いたものと同様に、空隙率および使用骨材の粒径等に依存した結果となり、焼却灰の使用がポーラスコンクリートの透水性に及ぼす影響は認められなかった。

##### (2) 強度特性

図-7にポーラスコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度は、碎石、焼却灰のどちらを用いても、材齢および充填率の増加に伴って増加する傾向にあったが、焼却灰を用いると著しく低下した。ポーラスコンクリートの圧縮強

度は、主に空隙率、結合材の強度や量、粗骨材自体の強度や粒径等に依存する<sup>2)</sup>。焼却灰は、碎石に比べて多孔質な構造を有しており、骨材自体としての強度を持っていない。したがって、焼却灰自体の強度が著しい強度低下を示した原因として考えられる。

### (3) 芝の生育試験

図-8に芝の生育長さの測定結果を示す。碎石、焼却灰のどちらを用いても、芝は播種から10日前後で発芽し、芝の生育長さに大きな違いは認められなかった。また、焼却灰に播種したものに遅れながらも芝の成長が認められたことから、焼却灰の使用が芝の生育に及ぼす影響は小さく、芝の生長は、碎石を用いたポーラスコンクリートと同様に、空隙率、空隙径および粗骨材の粒径等に依存するものと思われる。

## 5 まとめ

本実験的研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 焼却灰を混入したコンクリートは、硬化過程において置換率の増加に伴う膨張挙動を示す。
- (2) 焼却灰の混入によってコンクリートの細孔構造がポーラス化するため、置換率の増加に伴って圧縮強度が低下し、さらに、中性化が促進される。
- (3) 焼却灰を混入したコンクリートの凍結融解抵抗性は、無混和コンクリートと同様、5%程度の空気を連行すれば良好である。
- (4) 焼却灰を混入したコンクリートの鉛の溶出量は土壌環境基準を満足し、重金属溶出の観点からは問題がないと推測されるが、コンクリート中の塩化物イオン量は置換率の増加に伴って増大する。
- (5) 粗骨材としての焼却灰の使用がポーラスコンクリートの空隙性状、透水性および植生基盤として用いた芝の生育に及ぼす影響は認められなかった。
- (6) 焼却灰をポーラスコンクリートの粗骨材として用いると、圧縮強度が著しく低下した。

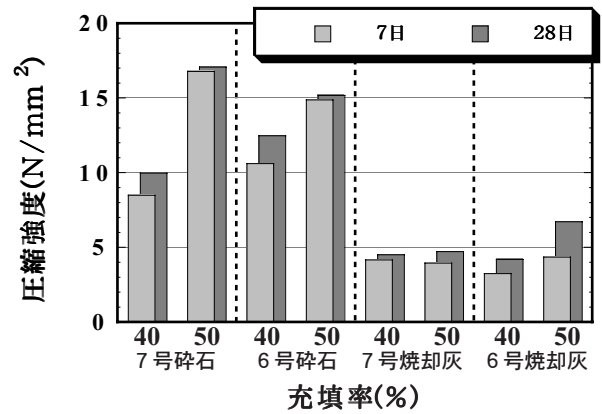


図-7 ポーラスコンクリートの圧縮強度試験結果

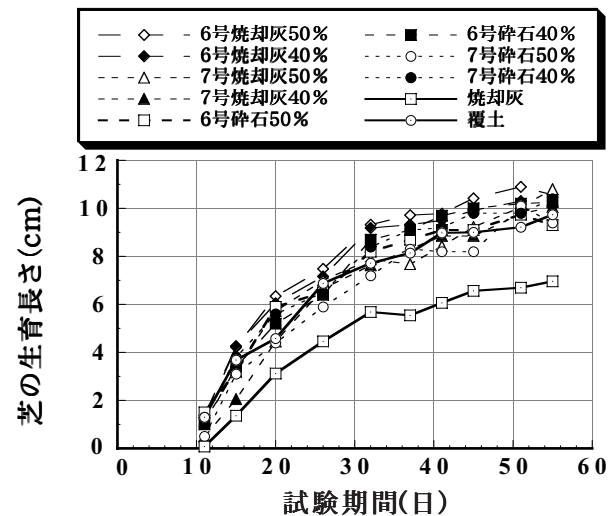


図-8 芝の生育長さ

以上の結果より、本実験的研究で用いた湿式物理選別法により処理された焼却灰は、水洗処理を施し、細骨材容積に対する10%程度の置換であれば、コンクリート用細骨材として十分に利用可能であると考えられるが、ポーラスコンクリートの粗骨材として用いると、圧縮強度が著しく低下するため、強度確保のための対策が必要である。

## 参考文献

- 1) 花嶋正孝, 島岡隆行, 福田貞夫, 矢代武基, 平尾孝典: 物理選別処理による一般廃棄物焼却灰の有効利用について, 第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.410-412, 1998
- 2) 岡本享久, 安田 登, 増井直樹, 佐藤文則: ポーラスコンクリートの製造・物性・試験方法, コンクリート工学, Vol.36, No.3, pp.52-62, 1998.3