

論文 溶融方式の異なる溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用と磨砕の効果

横山 卓哉^{*1}・堺 孝司^{*2}・西本 祐三^{*3}・錦織 和紀郎^{*4}

要旨：近年，都市ごみや産業廃棄物の減容化，無害化のために，これらを高温で溶融処理することが一般的になりつつある。溶融処理は残滓としてスラグを発生させるが，これらの有効活用としてコンクリート用細骨材への適用が考えられる。本研究は，コンクリート用細骨材としての磨砕の効果を，溶融方式の異なる都市ごみおよび産業廃棄物等溶融スラグについて検討したものである。その結果，磨砕加工による溶融スラグの形状改善がコンクリートの単位水量を著しく低減させること，および溶融スラグの利用はコンクリートの強度を低下させるが，磨砕加工により改善されることなどが明らかになった。

キーワード：溶融スラグ，磨砕，細骨材，都市ごみ，産業廃棄物

1. はじめに

近年，都市ごみや産業廃棄物の減容化や無害化のために，これらを高温で溶融処理することが一般的になりつつある。溶融処理は残滓としてスラグを発生させるが，これらの有効活用としてコンクリート用細骨材への適用が考えられる。溶融スラグ（以下，スラグと略記）をコンクリート用細骨材として用いる場合，単位水量の増加¹⁾や強度低下²⁾等の問題が発生することが指摘されている。著者らは，これらの課題を踏まえ，表面溶融炉（非溶融物の表面を加熱して溶融する形式）より排出されたスラグに磨砕加工を施し，粒子の表面性状を改善することによるフレッシュおよび硬化コンクリートの基本的な特性への効果をスラグ置換率が40%以下の条件において検討し，磨砕加工はスラグのコンクリートへの適用を図る上での一つの有効な方法になり得ることを明らかにした³⁾。

本研究では，溶融方式の異なる都市ごみおよび産業廃棄物等溶融スラグ3種類を対象に，スラグ置換率を変化させて磨砕加工の効果をより詳細に検討することとした。

2. 実験概要

2.1 磨砕加工

磨砕加工に用いた機械の概要を図-1に示す。この機械はスラグの加工改善用に開発されたもので，高速回転するドラムの中にスラグを投入し，スラグ粒子を割ることなく，スラグが回転する際のスラグ同士との摩擦により粒子の形状および表面性状の改質を可能にするものである。

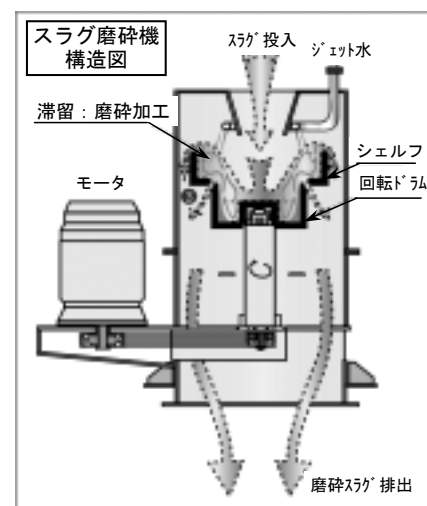


図-1 磨砕機の概要

*1 トーヨーエコマテリアル研究所（有） 工修（正会員）

*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博（正会員）

*3 開成工業（株）

*4 （株）テトラ テトラ総合技術研究所 工修（正会員）

2.2 使用材料

使用材料を表-1に、スラグの詳細および化学成分を表-2に示す。スラグAは産業廃棄物等溶融スラグ、スラグBおよびCは都市ゴミ溶融スラグで、スラグAについては破砕加工により粒度調整がなされているが、スラグB、Cについてはなされていない。スラグBについては、5mmふるいでふるい分けをする必要があった。

表-1 使用材料

| 材料 | 種類 | 備考 |
|------|--------------|----------------------------------------------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | 密度：3.16g/cm ³ |
| 練混ぜ水 | 水道水 | |
| 細骨材 | 砕砂 | 徳島県池田産（砂岩系） 密度：2.55g/cm ³ ，吸水率：2.24% |
| | スラグ | 表-5参照 |
| | 磨砕スラグ | スラグを磨砕機で磨砕加工（表-5参照） |
| 粗骨材 | 砕石 | 徳島県池田産（砂岩系） Gmax：20mm |
| 混和剤 | AE減水剤 | 高変性ポリオール複合体 |
| | AE剤 | 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤 |

2.3 コンクリートの製造および配合

コンクリートは、容量100リットルの強制二軸ミキサにより、最初にセメント、細骨材および粗骨材を10秒間空練りし、次に水と混和剤を加えて90秒間練混ぜて製造した。配合条件は、目標スランプを8±2.5cm、目標空気量を4.5±1.0%とし、水セメント比W/Cは50%、細骨材率s/aは42%の一定とした。また、スラグ置換率は、溶融スラグの場合0～50%、磨砕スラグの場合0～100%とした。前者の場合スラグ置換率の上限を50%としたのは、それ以上の条件ではコンクリートの状態が悪かったことによる。表-3にコンクリートの配合一覧を示す。

2.4 検討項目

本研究では、スラグの膨張率、重金属含有量・溶出試験、骨材、フレッシュおよび硬化コンクリートに関する各種試験をJIS等に定められる方法に従い実施し、養生は標準養生とした。スラグBに関しては、スラグ中に含まれる針状物（3mm以上）を採取し、全質量に対する針状物の割合を算出した。

表-2 スラグの詳細および化学成分（単位：%）

| 溶融方式 | スラグ種別 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Fe ₂ O ₃ | 金属Al |
|------|--------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------------------|------------------|--------------------------------|-------|
| 表面溶融 | スラグA | 51.00 | 10.94 | 18.80 | 1.28 | 3.79 | 3.17 | 11.29 | 0.03 |
| | スラグA磨砕 | 46.84 | 10.86 | 22.32 | 1.63 | 3.07 | 2.15 | 12.84 | 0.02 |
| ガス化 | スラグB | 37.01 | 17.53 | 28.83 | 3.57 | 4.76 | 1.34 | 5.62 | <0.01 |
| | スラグB磨砕 | 37.29 | 19.00 | 28.36 | 3.78 | 4.81 | 1.37 | 5.97 | <0.01 |
| プラズマ | スラグC | 42.90 | 20.34 | 25.26 | 3.90 | 2.70 | 0.92 | 3.53 | <0.01 |
| | スラグC磨砕 | 42.84 | 20.78 | 25.38 | 3.93 | 3.13 | 1.08 | 3.79 | 0.04 |

表-3 コンクリートの配合

| No. | スラグ種別 | スラグ置換率 (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | AE減水剤 (C×%) | AE剤 (C×%) | スランプ (cm) | 空気量 (%) |
|-----|--------|------------|---------|---------|--------------------------|------|-----|-----|-------|-------------|-----------|-----------|---------|
| | | | | | 水 | セメント | 砕砂 | スラグ | 粗骨材 | | | | |
| 1 | — | 0 | 50 | 42 | 171 | 342 | 724 | 0 | 1,005 | 1.75 | 0.17 | 9.9 | 5.2 |
| 2 | スラグA | 25 | | | 169 | 338 | 583 | 194 | 1,010 | 1.75 | 0.19 | 10.2 | 5.0 |
| 3 | スラグB | | | | 171 | 342 | 556 | 185 | 1,005 | 1.75 | 0.16 | 9.0 | 5.5 |
| 4 | スラグC | | | | 175 | 350 | 546 | 182 | 995 | 1.75 | 0.12 | 10.5 | 5.5 |
| 5 | スラグA磨砕 | 25 | | | 169 | 338 | 557 | 186 | 1,010 | 1.75 | 0.13 | 8.9 | 3.7 |
| 6 | スラグB磨砕 | | | | 169 | 338 | 560 | 187 | 1,010 | 1.75 | 0.15 | 9.0 | 3.5 |
| 7 | スラグC磨砕 | | | | 169 | 338 | 555 | 185 | 1,010 | 1.75 | 0.15 | 10.5 | 4.8 |
| 8 | スラグA | 50 | | | 169 | 338 | 380 | 380 | 1,010 | 1.75 | 0.08 | 9.4 | 4.4 |
| 9 | スラグB | | | | 173 | 346 | 378 | 378 | 1,000 | 1.75 | 0.11 | 8.7 | 4.8 |
| 10 | スラグC | | | | 175 | 350 | 370 | 370 | 995 | 1.60 | 0.00 | 9.2 | 4.8 |
| 11 | スラグA磨砕 | 50 | | | 164 | 328 | 385 | 385 | 1,022 | 1.75 | 0.18 | 8.9 | 4.5 |
| 12 | スラグB磨砕 | | | | 164 | 328 | 388 | 388 | 1,022 | 1.75 | 0.20 | 7.6 | 3.8 |
| 13 | スラグC磨砕 | | | | 160 | 320 | 385 | 385 | 1,032 | 1.75 | 0.17 | 7.5 | 5.5 |
| 14 | スラグA磨砕 | 75 | | | 157 | 314 | 200 | 600 | 1,039 | 1.75 | 0.20 | 9.4 | 4.7 |
| 15 | スラグB磨砕 | | | | 157 | 314 | 203 | 608 | 1,039 | 1.75 | 0.24 | 9.1 | 4.7 |
| 16 | スラグC磨砕 | | | | 158 | 316 | 197 | 591 | 1,037 | 1.75 | 0.09 | 8.4 | 5.4 |
| 17 | スラグA磨砕 | 100 | | | 153 | 306 | 0 | 826 | 1,048 | 1.75 | 0.07 | 9.3 | 5.3 |
| 18 | スラグB磨砕 | | | | 153 | 306 | 0 | 841 | 1,048 | 1.75 | 0.28 | 7.3 | 3.7 |
| 19 | スラグC磨砕 | | | | 154 | 308 | 0 | 810 | 1,046 | 1.72 | 0.00 | 7.3 | 5.4 |

3. 実験結果および考察

3.1 スラグのアルカリシリカ反応性

化学法によるスラグのアルカリシリカ反応性試験の結果、いずれのスラグも無害であった。

3.2 スラグの膨張率

スラグ中の金属アルミニウム等に起因する水素ガス発生による膨張率試験を TR A 0016 : 2002 により実施したが、いずれのスラグとも膨張は確認されなかった。

3.3 スラグの重金属含有量・溶出

表-4に、スラグの重金属含有量および溶出試験結果を示す。いずれのスラグも基準値以下ではあるが、スラグ A および B は鉛が比較的多く、スラグ C は極めて少ない結果となっている。

3.4 スラグ粒子の形態

スラグ粒子の顕微鏡写真を写真-1, 2, 3 に示す。写真より、いずれのスラグとも鋭利な角張りを有しているが、破碎処理を施したスラグ A では若干角張りが少なくなっている。一方、磨砕加工を施したスラグでは、いずれのスラグも角張りが取れ、粒子は丸みを帯びてきている。これは、磨砕が粒子を割ることなく、スラグ同士の摩擦により加工することによる。また表面性状を比較すると、磨砕前スラグは光沢があるのに対し、磨砕スラグの表面は曇りガラスのよ

うに光沢が失われている。このことは、磨砕によりスラグ表面が付着性を増すように改質されたことを意味する。なお、スラグ B は針状物が約 2.2%含まれていた。

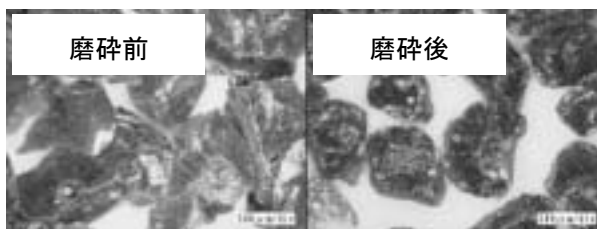


写真-1 スラグ A の形態 (粒径 ; 0.6~1.2mm)

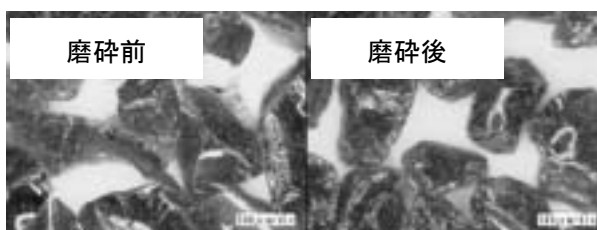


写真-2 スラグ B の形態 (粒径 ; 0.6~1.2mm)

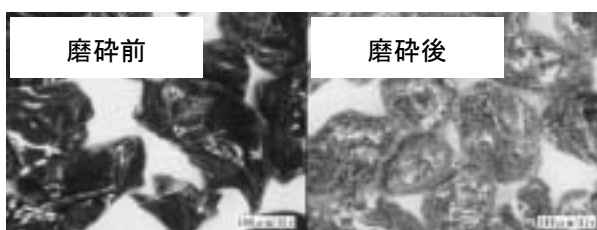


写真-3 スラグ C の形態 (粒径 ; 0.6~1.2mm)

表-4 スラグの重金属含有量・溶出試験

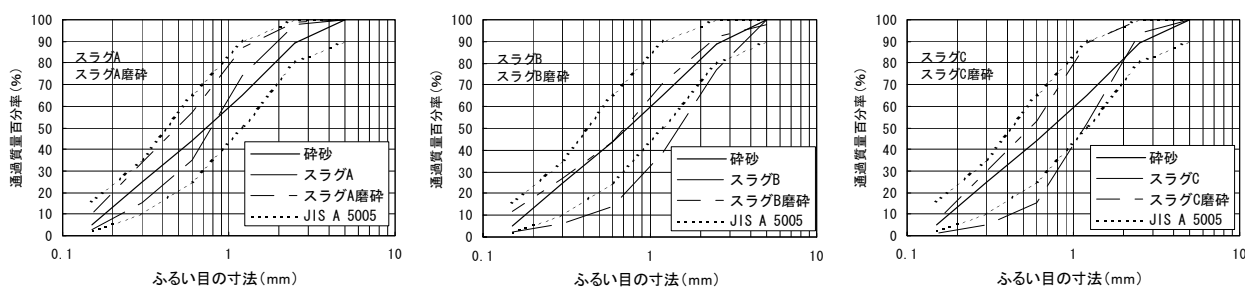
| 項目 | 単位 | スラグ種別 | | | | | | 基準値 | |
|-----|-------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| | | スラグA | スラグA磨砕 | スラグB | スラグB磨砕 | スラグC | スラグC磨砕 | | |
| 含有量 | mg/kg | Cd | <0.1 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 150mg/kg以下 |
| | | Pb | 83 | 98 | 95 | 112 | 4 | 4 | 150mg/kg以下 |
| | | Cr ⁺⁶ | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | 250mg/kg以下 |
| | | As | 0.6 | 0.7 | <0.1 | <0.1 | 1.1 | 1.5 | 150mg/kg以下 |
| | | Se | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 150mg/kg以下 |
| | | T-Hg | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 15mg/kg以下 |
| | | F | 13 | 22 | <5 | 7 | 51 | 82 | 4,000mg/kg以下 |
| | | B | 169 | 379 | 228 | 335 | 291 | 382 | 4,000mg/kg以下 |
| 溶出量 | mg/l | Cd | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.01mg/l以下 |
| | | Pb | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | 0.01mg/l以下 |
| | | Cr ⁺⁶ | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | 0.05mg/l以下 |
| | | As | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.01mg/l以下 |
| | | Se | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.01mg/l以下 |
| | | T-Hg | <0.0005 | <0.0005 | <0.0005 | <0.0005 | <0.0005 | <0.0005 | 0.0005mg/l以下 |
| | | F | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.8mg/l以下 |
| | | B | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 1mg/l以下 |

(備考) ア) 含有量基準の試験方法は、「土壌含有量調査に係る測定方法」(平成15年環境省告示第19号)に準じるものとする。

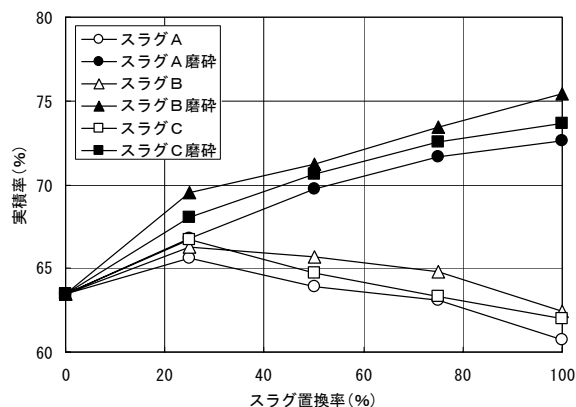
イ) 溶出基準の試験方法は、「土壌の汚染に係る環境基準について」(平成3年環境庁告示第46号)に定める方法に準じるものとする。

表－5 細骨材の骨材試験結果

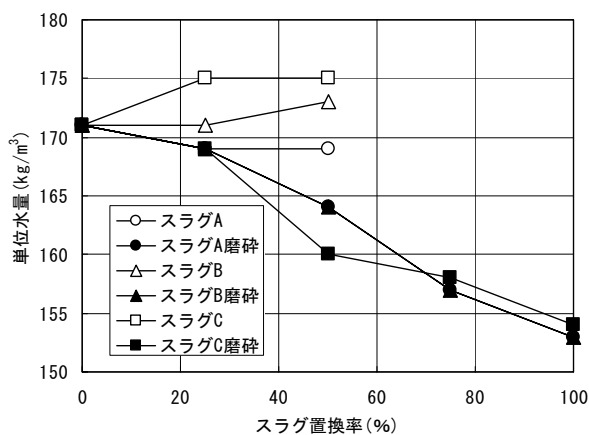
| 骨材種別 | 密度 (g/cm ³) | | 吸水率 (%) | 単位容積質量 (kg/l) | 実積率 (%) | 微粒分量 (%) | 粒形判定実積率 (%) | 粗粒率 |
|--------|-------------------------|------|---------|---------------|---------|----------|-------------|------|
| | 絶乾 | 表乾 | | | | | | |
| 砕砂 | 2.50 | 2.55 | 2.24 | 1.59 | 63.5 | 3.6 | 55.3 | 2.72 |
| スラグA | 2.77 | 2.79 | 0.62 | 1.68 | 60.8 | 0.5 | 57.9 | 2.75 |
| スラグA磨砕 | 2.78 | 2.79 | 0.60 | 2.02 | 72.6 | 7.4 | 60.8 | 2.13 |
| スラグB | 2.80 | 2.82 | 0.87 | 1.75 | 62.4 | 0.8 | 56.8 | 3.62 |
| スラグB磨砕 | 2.82 | 2.84 | 0.47 | 2.13 | 75.4 | 8.7 | 60.6 | 2.56 |
| スラグC | 2.70 | 2.72 | 1.02 | 1.67 | 62.0 | 0.2 | 58.6 | 3.33 |
| スラグC磨砕 | 2.72 | 2.74 | 0.63 | 2.00 | 73.7 | 9.1 | 61.6 | 2.21 |



図－2 細骨材の粒度分布



図－3 スラグ置換率と実積率の関係



図－4 スラグ置換率と単位水量の関係

3.5 骨材・スラグの物理特性

細骨材の骨材試験結果を表－5に、細骨材の粒度分布を図－2に示す。何れのスラグとも密度は砕砂の密度より大きい。磨砕をしていないスラグの粒形判定実積率は砕砂のそれよりやや大きい程度であるが、磨砕スラグの粒形判定実積率は60.6～61.6%とかなり大きく、磨砕加工による粒形改善の効果が顕著である。砕砂とスラグの混合砂のスラグ置換率と実積率の関係を図－3に示す。磨砕をしていないスラグの場合はスラグ置換率が25%の条件で実積率が最大となり、スラグ置換率が25%以上の場合はスラグ置換率の増大に伴い実積率が低下するのに対し、磨砕スラグの場合はスラグ置換率の増大に伴い実積率は単調増加する結果となった。

3.6 フレッシュコンクリートの特性

(1) 単位水量

図－4に、スラグ置換率と単位水量の関係を示す。磨砕をしていないスラグを用いた場合の単位水量は砕砂のみの場合とほぼ同等あるいは増加するのに対し、磨砕スラグの場合にはいずれも減少する。またスラグ置換率の増加に伴い

単位水量はほぼ直線的に減少している。

このように、磨砕加工による粒子形状の改善は、いずれの溶融方式においてもスラグ置換率 100%で単位水量を約 18kg/m^3 程度低減させる効果のあることがわかった。

(2) ブリーディング

図-5に、スラグ置換率とブリーディング量の関係を示す。磨砕をしていないスラグを用いた場合はスラグ置換率の増大に伴いブリーディングは増加する傾向にあるが、磨砕スラグの場合はスラグ置換率によらずブリーディング量はほぼ一定である。これは、磨砕加工による単位水量低減と微粒分量の増加や凹凸表面積の増加による保水の効果と考えられる。

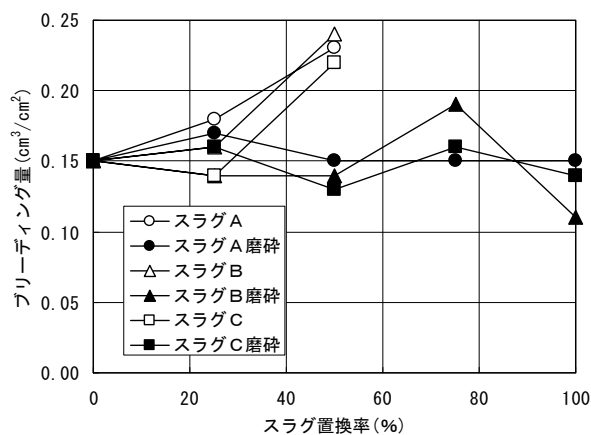


図-5 スラグ置換率とブリーディング量の関係

3.7 硬化コンクリートの特性

(1) 圧縮強度

図-6に、スラグ置換率と圧縮強度の関係を示す。磨砕をしていないスラグを用いた場合の圧縮強度は、スラグ B およびスラグ C においてスラグ置換率 25%の条件で砕砂のみと同等かやや低下、スラグ置換率 50%の条件で砕砂のみに比べて低下しており、スラグ A はスラグ置換率 25%においても明らかな強度低下がみられる。一方、磨砕スラグを用いた場合には、スラグ置換率 75%までの範囲内において圧縮強度は砕砂のみと同等か増加している。これは、磨砕加工に

より増加した微粒分の充填効果、単位水量の低減およびそれらの効果に伴うブリーディングの抑制などに起因していると考えられる。しかし、スラグ置換率 100%の条件においては強度発現性に著しいばらつきがみられる。この原因は不明である。

何れにしても、磨砕によるスラグの表面性状の改善や粒度構成が複合体としてのコンクリートの性状を改善し、結果として強度改善に寄与する領域が存在すると考えられるが、スラグ置換率を極端に増大させる場合には安定的なコンクリートを期待する上で注意が必要である。

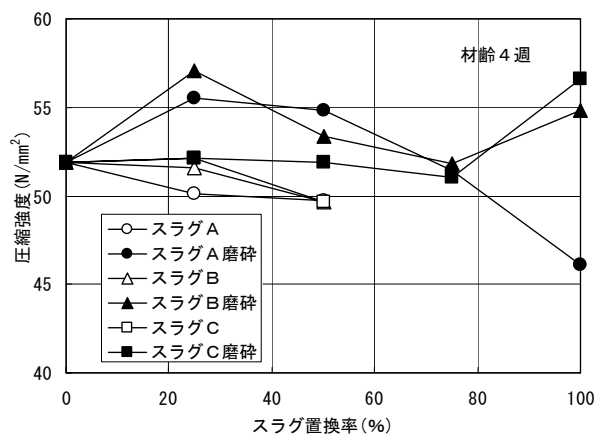


図-6 スラグ置換率と圧縮強度の関係

(2) 引張強度

図-7に、スラグ置換率と引張強度（割裂試験による）の関係を示す。圧縮強度の場合に比べてスラグ置換率の影響が顕著であることが判る。まずスラグ A の場合では、スラグ置換率が 25%の条件で既に砕砂のみの場合と比較して引張強度が低下しており、スラグ A 磨砕の場合においてもスラグ置換率が 50%となると引張強度の低下がみられ、スラグ置換率の増大に伴い引張強度の低下は顕著になる。一方、スラグ B およびスラグ C の場合では、スラグ置換率 50%の条件で強度が低下し、スラグ B 磨砕およびスラグ C 磨砕の場合においても、スラグ置換率が 75%以上となると引張強度の低下傾向が確認できる。スラグ置換による引張強度の低下傾向が磨砕

スラグの場合に若干緩和されるのは、スラグ表面のひび割れや角張りに起因した強度上の弱点が、磨砕により改善されたことによると考えられるが、全体として引張強度の低下率は圧縮強度と比して著しく大きくなるといえる。

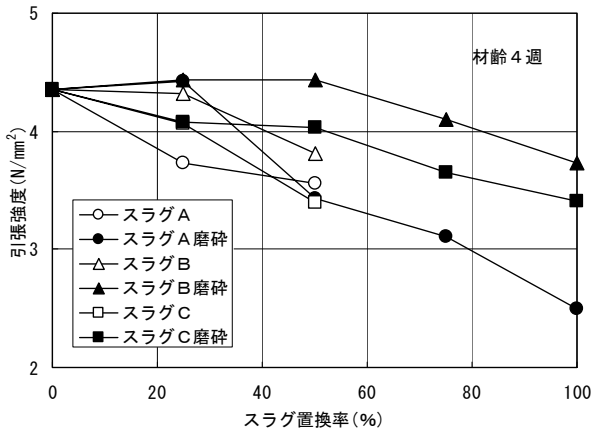


図-7 スラグ置換率と引張強度の関係

(3) 静弾性係数

図-8 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示すが、スラグ種別やスラグ置換率の影響はみられない。参考のため、同図には土木学会標準示方書の静弾性係数も示す。

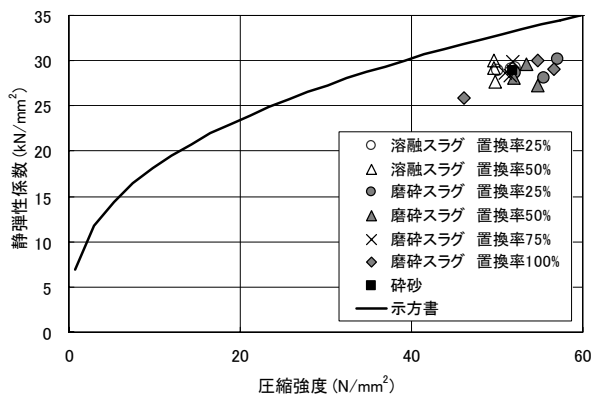


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

4. 結論

本研究で得られた主な結果をまとめると、以下の通りである。

(1) 磨砕加工は、スラグの形状と表面性状を改善する。

- (2) 磨砕加工は、スラグ置換率の増大に伴い、コンクリートの単位水量を著しく低減する。
- (3) 磨砕加工によるスラグ表面の改質および単位水量の低減は、ブリーディングを著しく抑制する。
- (4) 磨砕加工は、スラグ置換率が75%程度までの範囲で、砕砂のみを用いたコンクリートと同等程度以上の圧縮強度を得ることができる。
- (5) 磨砕加工は、スラグを用いたコンクリートの引張強度低下を抑制する傾向はあるが、スラグ置換率増加に伴う低下率は圧縮強度と比して著しい。
- (6) 本研究で用いた3種類のスラグは、コンクリートの各種特性にそれぞれ異なった影響を及ぼす。

謝辞

本研究を実施するに当たり、松家氏、小野寺氏をはじめとする香川大学学生諸氏の協力を得た。また、福祉商事(株)関氏には磨砕作業の協力を得た。本研究の一部は、文部科学省研究補助金(基礎研究(B)(2)研究課題15360231研究代表者: 堺孝司)の助成により行った。ここに記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 北辻政文, 藤居宏一: ごみ熔融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質, 農業土木学会論文集, No.200, pp.223-231, 1999.4
- 2) 松山哲也, 堺孝司, 吉田秀典, 高木茂: 都市ごみ熔融スラグを用いたコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.73-78, 2001.6
- 3) 錦織和紀郎, 堺孝司, 松家武樹, 藤森俊光: コンクリート用細骨材としての熔融スラグの磨砕の効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.69-74, 2004.6