

## 製鋼スラグを混合した石炭灰混合材料の一軸圧縮強度特性

福岡大学大学院  
福岡大学工学部  
日鉄スラグ製品(株)  
福島エコクリート(株)

学生会員 嶋村 淳平  
正会員 佐藤 研一 藤川 拓朗 古賀 千佳嗣  
柳 正人  
堀川 剛利 門馬 怜史 太田 竜聖

1. はじめに 製鉄所から副次的に発生する製鋼スラグは、年間約 1400 万トン生成されている。同様に、火力発電所から副次的に発生する石炭灰も年間 1200 万トン発生しており、これら排出量の多い副産物は、定常的な有効利用を推進する必要がある。現在、石炭灰を用いたリサイクル材である石炭灰混合材料は、主に下層路盤材としての利用が進められている。しかしながら、利用用途の拡大に向け、今後は上層路盤材や土木資材への適用など更なる検討が求められている。そこで本研究では、石炭灰混合材料の骨格構造の強化や石炭灰の重金属等溶出抑制効果、CBR 値やすり減り減量値の改善を目的として、石炭灰混合材料に製鋼スラグを混合した石炭灰・製鋼スラグ混合材料(破砕材)の開発を行っている。本研究では、図-1 に従い、破砕後の石炭灰・製鋼スラグ混合破砕材の品質を向上させることを目的として、破砕前の石炭灰・製鋼スラグ混合材料の強度の評価を行っている。ここでは、一軸圧縮試験を用いて、1) 製鋼スラグの混合割合による影響、2) 養生温度の違いによる影響について検討した結果を報告する。

## 2. 実験概要

2-1 実験試料 本実験には、製鉄所から発生する製鋼スラグ、火力発電所から発生する石炭灰(原粉)及び固化材として高炉セメント B 種(以下 BB)、早強ポルトランドセメント(以下 H)の 2 種類を用いた。なお、製鋼スラグは 4.75mm 以下に粒度を調整し、材料の膨張性を配慮して蒸気エージング処理を施したものを使用している。表-1 に物理特性、表-2 に配合条件を示す。本検討では、製鋼スラグを石炭灰の一部として使用することを考慮し、製鋼スラグを石炭灰に対して内割で 10~30%混合している。

2-2 供試体作製方法及び実験方法 表-3 に製鋼スラグの混合割合による影響における実験条件、表-4 に養生温度の違いによる影響における実験条件を示す。試料は、表-2 の配合条件に準じて混合し、ホバートミキサーにて攪拌を行っている。攪拌後、直径 $\phi$ =5cm、高さ h=10cm の塩ビ製モールドに 1.5kg ランマーを用いて 3 層 12 回突き固めて打設を行った。図-2 に養生条件を示す。脱型後、図-2 に示す養生条件に従い 2 日間、湿度 90%で

加熱加湿・気中養生を行った(方法 A)。また、現在の石炭灰混合材料は加熱加湿養生温度 50~60℃で作製しているが、今回は養生温度が圧縮強度に及ぼす影響も検討するため、石炭灰:製鋼スラグ=10:0 と 7:3 において養生温度 20℃での検討も行っている(方法 B)。加熱加湿・気中養生後、規定の養生日数まで 20℃一定の恒温室内で養生させ、一軸圧縮試験(JIS A 1211)を行った。

## 3. 実験結果及び考察

3-1 製鋼スラグの混合割合による影響 図-3 (a), (b) に一軸圧縮試験結果を示す。養生日数および固化材の種類にかかわらず、石炭灰:製鋼スラグ=10:0(石炭灰単体)より製鋼スラグを混合した条件

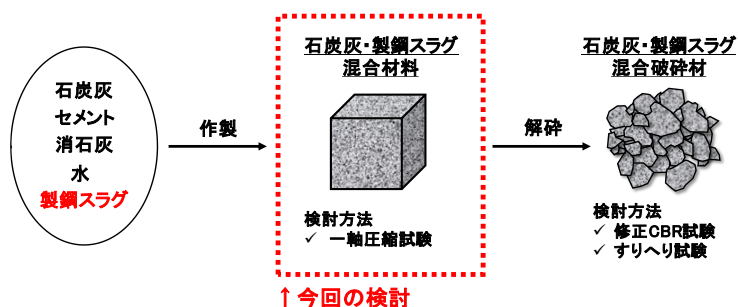


図-1 石炭灰・製鋼スラグ混合材料の製造過程

表-1 物理特性

| 土質試料  | 粒子密度<br>$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 自然含水比<br>$w_0$ (%) | 細粒分含有率<br>Fc (%) |
|-------|---------------------------------------|--------------------|------------------|
| 製鋼スラグ | 3.536                                 | 1.8                | 1.2              |
| 石炭灰   | 2.188                                 | 0.5                | 85.0             |

表-2 配合条件

| 石炭灰:製鋼スラグ | 石炭灰<br>(%) | 製鋼スラグ<br>(%) | セメント<br>(%) | 水<br>(%) | 消石灰<br>(%) |
|-----------|------------|--------------|-------------|----------|------------|
| 10:0      | 100        | 0            | 25          | 24.2     | 3          |
| 9:1       | 90         | 10           |             |          |            |
| 8:2       | 80         | 20           |             |          |            |
| 7:3       | 70         | 30           |             |          |            |

※セメント、消石灰は石炭灰と製鋼スラグに対する質量比

※水は石炭灰、製鋼スラグおよびセメントに対する質量比

表-3 実験条件(製鋼スラグの混合割合)

| セメントの種類 | 混合割合<br>石炭灰:製鋼スラグ | 養生方法 | 養生日数<br>t (day) |
|---------|-------------------|------|-----------------|
| BB<br>H | 10:0              | 方法A  | 2               |
|         | 9:1               |      | 7               |
|         | 8:2               |      | 28              |
|         | 7:3               |      |                 |

表-4 実験条件(養生温度の違い)

| セメントの種類 | 混合割合<br>石炭灰:製鋼スラグ | 養生方法 | 養生日数<br>t (day) |
|---------|-------------------|------|-----------------|
| BB<br>H | 10:0              | 方法A  | 2               |
|         | 7:3               | 方法B  | 7<br>28         |

の方がいずれも強度増加を示していることが分かる。また、製鋼スラグの混合割合に着目すると、石炭灰：製鋼スラグ=7:3 で最も大きな値を示している。これは、製鋼スラグの水硬性による固化効果に加え、石炭灰より粒径が大きい製鋼スラグを混合することによる混合材料の粒度改善効果が起因していると考えられる。石炭灰：製鋼スラグ=7:3 においては、固化材の違いに関わらず、養生日数 2 日で  $20\text{MN/m}^2$  を超え、破碎前の固化材料として十分な強度を有していることが明らかとなった。その他の混合割合においても、養生日数 2 日では石炭灰：製鋼スラグ=7:3 ほどの強度が得られなかったが、養生日数 28 日において固化材の違いに関わらず、石炭灰：製鋼スラグ=7:3 と同等の強度が得られたことから、破碎後、十分な養生期間を確保することで高強度な混合材料を作製することができると考えられる。また、固化材の違いに着目すると、H はいずれの養生日数においても BB より大きな値を示しており、多くの条件で  $20\text{MN/m}^2$  を超える値を示していることが分かる。H はセメント構成化合物の中でも、エーライトの含有量が多く、比表面積も大きいことから硬化の発現が早く、初期の強度発現が大きい<sup>2)</sup>。これより、H の方が早期から大きな強度を示したと考えられる。以上の結果より、製鋼スラグの混合割合が増加するほど、圧縮強度も増加傾向を示し、今回の試験条件では、石炭灰：製鋼スラグ=7:3 で最も強度が大きくなることが明らかとなった。

**3-2 養生温度の違いによる影響** 図-4(a), (b)に一軸圧縮試験結果を示す。本検討では、混合割合で

最も強度が得られた石炭灰：製鋼スラグ=7:3 および比較対象として石炭灰：製鋼スラグ=10:0(石炭灰単体)の 2 条件で検討を行った。いずれの条件も、養生温度  $20^\circ\text{C}$ (方法 B)では初期強度が小さいものの、養生日数の増加に伴い一軸圧縮強度は大きく増加していることが分かる。また、石炭灰：製鋼スラグ=7:3 に着目すると、BB では養生 28 日でも、養生温度  $50^\circ\text{C}$ (方法 A)の養生 2 日より低い値を示したが、H を用いることで、養生 7 日以降に  $20\text{MN/m}^2$  を超えるほどの強度が得られている。これらの結果より、加熱加湿養生の  $50^\circ\text{C}$ より低い養生温度でも、養生日数を増加させることで大きな強度増加が得られ、石炭灰：製鋼スラグ=7:3 においては、養生温度  $20^\circ\text{C}$ でも H を用いることで  $20\text{MN/m}^2$  を超える高強度な混合材料となることが示された。

**4. まとめ及び今後の課題** 1) 製鋼スラグを石炭灰混合材料に混合することで、強度の改善が図られ、石炭灰：製鋼スラグ=7:3 において強度が最も大きくなることが明らかとなった。2) 石炭灰：製鋼スラグ=7:3 では、養生温度  $20^\circ\text{C}$ においても H を使用することで加熱加湿養生を用いた BB と同程度の十分な強度が得られることが明らかとなった。今後は、破碎後の石炭灰・製鋼スラグ混合破碎材において、修正 CBR 試験やすりへり試験を行い、路盤材や盛土材としての性能評価を行う必要がある。

**【参考文献】** 1) 大原ら：ポストミックス方式による石炭灰・製鋼スラグ混合材料の上層路盤材としての性能評価，令和元年度土木学会西部支部研究発表会，III-071，pp.411-412，2020。 2) 國府ら：コンクリート工学(I)施工，pp.23-184，2010。

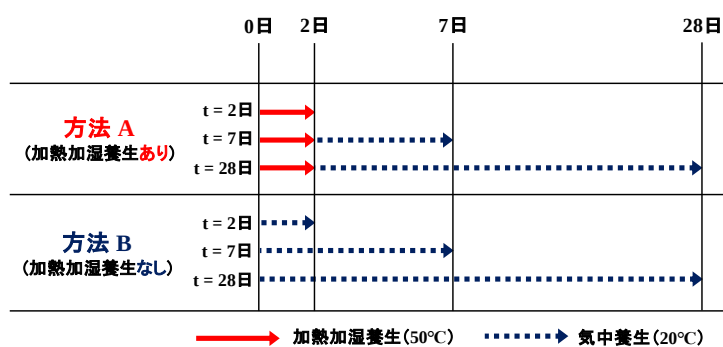


図-2 養生条件

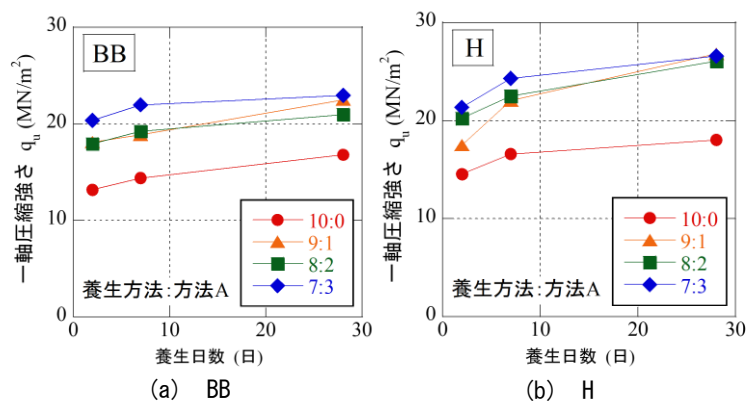


図-3 製鋼スラグの混合割合による影響

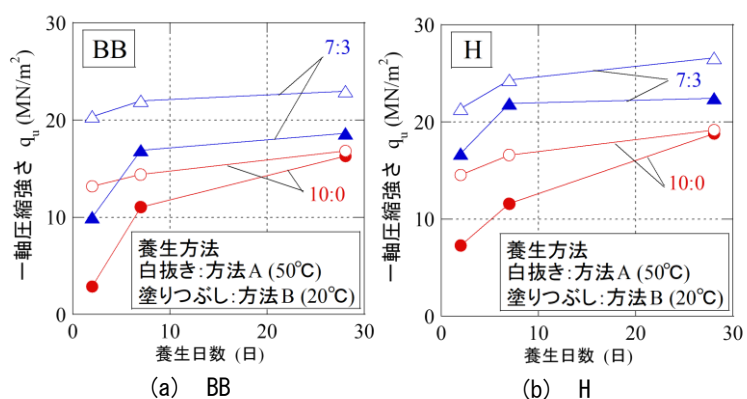


図-4 養生温度の違いによる影響