

# 再生石膏を用いた石炭灰混合材料の重金属類抑制効果の検討

福岡大学大学院 学生会員 梅田真志

福岡大学工学部 正会員 佐藤研一 藤川拓朗 古賀千佳嗣

**1.はじめに** 火力発電所から副次的に生成される石炭灰の有効利用が求められている昨今、電力会社や大学、建設会社を中心に石炭灰混合材料の開発が進められている。しかし、この材料は周辺環境への影響や長期耐久性が保証されていないことが足かせとなり、公共工事等において定常的に活用されるまでには至っていないのが現状<sup>1)</sup>である。また、石炭灰中にはその種類によって重金属類が存在しており、石炭灰混合材料を用いる際には重金属類が土壌中で基準値を超過しないよう適切な処理を施すことが重要である<sup>2)</sup>。石炭灰混合材料から溶出される重金属類を抑制することができれば、今後さらなる有効利用に繋がると考えられる。そこで本検討では重金属類抑制効果があるとされている再生二水石膏<sup>3)</sup>を用いて石炭灰中に含まれる重金属類の溶出抑制効果及び適正添加量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** 実験には、石炭灰 D(JIS 灰)を、固化材には高炉セメント B 種を用いた。また添加剤として再生二水石(以下、石膏と記す)を使用し、これらを混ぜ合わせて供試体作製した。ここで石炭灰混合材料とは、石炭灰・セメント・水、必要に応じて石膏を混ぜたものと定義する。

**2-2 実験方法** 試料の力学特性は、一軸圧縮試験(JIS A 1216)と針貫入試験(JIS S 3008)

を用いて評価を行った。表-1 に石炭灰 D の物理特性を、表-2 に供試体の配合条件を示す。供試体の作製において、石炭灰 D(JIS 灰)の含水比を最適含水比となるように調整した。図-1 に突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)で求めた石炭灰 D の締固め曲線を示す。試験によって得られた最適含水比( $w=32\%$ )を基準に供試体の含水比の調整をした。セメント(C)と石膏を石炭灰(ash)の乾燥質量に対し外割り配合で添加している。供試体の目標強度を石膏添加率 0%において  $q_{0.28}=1000\text{kN/m}^2$  となるように予備実験を経て配合条件を設定した。供試体の打設は、含水比を調整した石炭灰にセメントを加え、5 分間ホバートミキサーにて攪拌を行い、さらに石膏を加えて 5 分間の攪拌を行った。その後、安定処理土の突固めによる土の締固め試験方法(JIS A 1210)に準じて供試体の作製を行った。供試体は翌日に整形し、翌々日に脱型をした。養生は脱型した供試体をラップで包み、 $20^\circ\text{C}$ 一定の恒温室内にて気中養生で行っている。また、石膏添加による石炭灰混合材料の溶出特性の把握を行うために、平成 3 年環境庁告示 46 号法試験(以下、環告 46 号試験)を行っている。F(フッ素)はイオンクロマトグラフィー、B(ボウ素)は ICP プラズマ発光分析装置、 $\text{Cr}^{6+}$ (六価クロム)は分光光度計を用いてそれぞれ測定した。

## 3. 実験結果及び考察

**3-1 一軸圧縮試験による石炭灰混合材料の力学特性の把握** 図-2 に養生 7 日及び養生 28 日における石炭灰混合材料の一軸圧縮試験結果を示す。石膏を添加した石炭灰混合材料は石膏を添加していないものと比べ、一軸圧縮強さが増加している傾向にあることが分かる。図-3 に石膏添加率と一軸圧縮強さの関係を示す。この結果から、石膏を添加している条件では養生 7 日から養生 28 日で強度がおおよそ 2 倍になっていることが分かる。また、図-4 に示す石膏添加率と変形係数の関係から、石膏添加率の増加に伴い剛性が高くなっていることが分かる。これらのことから、石膏を添加していない石炭灰混合材料に比べ、石膏を添加した石炭灰混合材料は強度が増加し、また、石膏添加率の増加に伴い剛性が高くなることが明らかとなった。図-5 に石膏添加率と含水比の関係、図-6 に石膏添加率

表-1 試料の物理特性

| 試料                       | 石炭灰D  |
|--------------------------|-------|
| 土粒子密度( $\text{g/cm}^3$ ) | 2.347 |
| 含水比(%)                   | 0     |
| 液性限界(%)                  | N.P.  |
| 塑性限界(%)                  | N.P.  |

表-2 供試体の配合条件

|       | セメント<br>添加率<br>C(%) | 最適<br>含水比<br>w(%) | 石膏<br>添加率<br>(%) | 養生日数<br>(日) |
|-------|---------------------|-------------------|------------------|-------------|
| Case1 | 3                   | 32                | 0                | 7, 28       |
| Case2 |                     |                   | 3                |             |
| Case3 |                     |                   | 5                |             |
| Case4 |                     |                   | 7                |             |

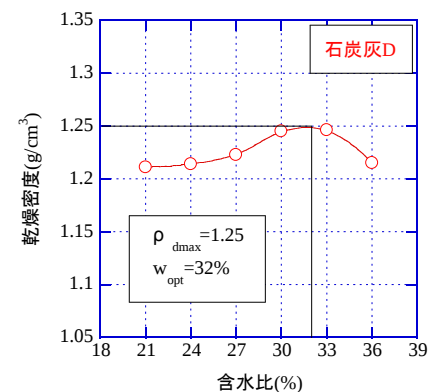
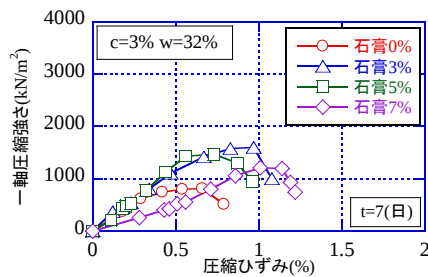
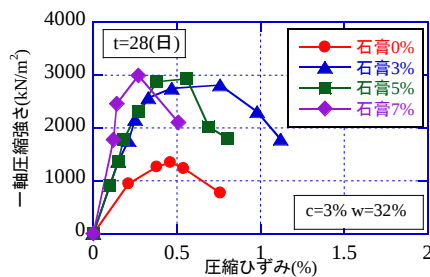


図-1 締固め曲線



(a) 養生 7 日



(b) 養生 28 日

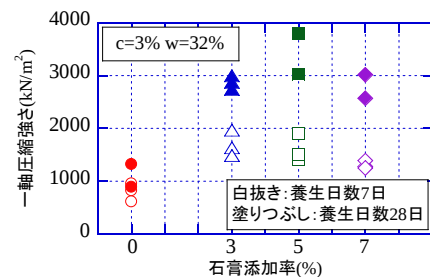


図-3 石膏添加率と一軸圧縮強さの関係

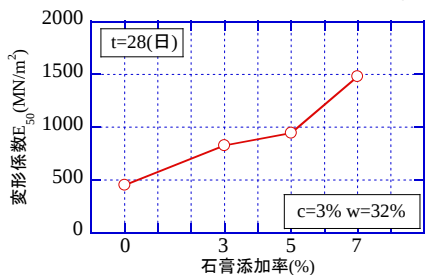


図-4 石膏添加率と  $E_{50}$  の関係

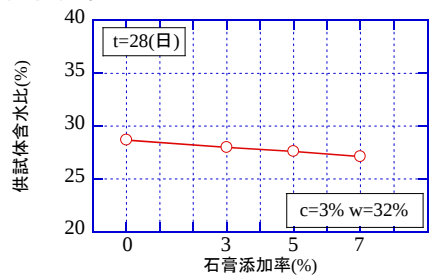


図-5 石膏添加率と含水比の関係

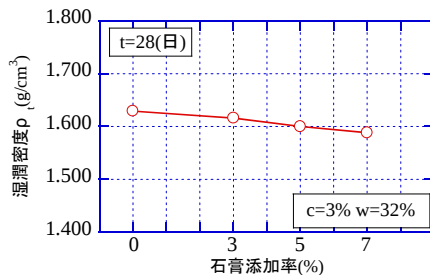


図-6 石膏添加率と密度の関係

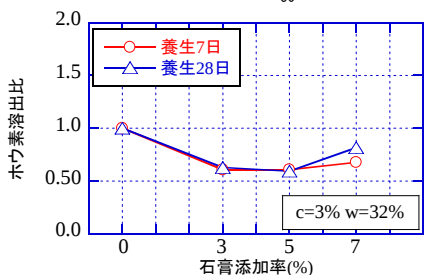


図-7 ハウ素溶出結果

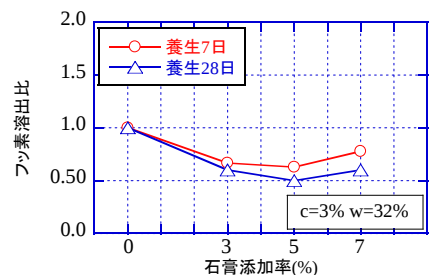


図-8 フッ素溶出結果

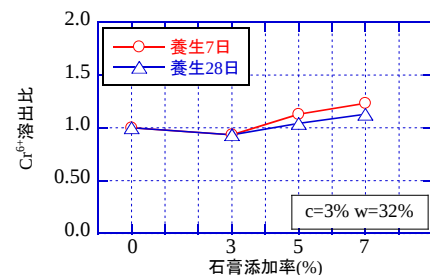


図-9 六価クロム溶出結果

と密度の関係を示す。石膏添加率の増加に伴い含水比、密度のどちらも僅かではあるが減少している。しかしながら減少幅は非常に小さいことから、供試体の強度や剛性にはあまり影響していないと考えられる。これらのことから石炭灰混合材料は、石膏を添加したことにより供試体内にエトリンガイト等の水和物が生成され、緻密化されたことにより強度が増加したと考えられる<sup>4)</sup>。

**3-2 環告 46号試験による石炭灰混合材料の溶出特性の把握** 図-7～図-9に環告 46号試験によって得られたハウ素、フッ素、六価クロムの溶出試験結果を示す。なお、今回得られた結果から石膏添加率 0%のときの溶出量で正規化したものを溶出比として整理を行っている。ハウ素とフッ素の溶出結果より、石膏添加率 0%に比べ石膏を添加した条件では溶出量は減少していることがわかる。この要因として、石膏を添加したことによりセメントの水和物であるエトリンガイトやモノサルフェートへの固定やカルシウムシリケート水和物(CSH)への表面吸着によって、ハウ素及びフッ素が水和物中に固定化されたためであると考えられる。しかしながら六価クロムは、石膏添加率 3%で溶出量は減少しているものの、石膏添加率の増加に伴い六価クロムの溶出量が増加している結果となった。この要因として、今回の配合ではセメント添加率が 3%であったこと、設定含水比が最適含水比であったこと等から、六価クロムの溶出抑制に必要なセメント量及び水分量が不足していたのではないかと考えられる。そのため、今後は石膏添加量や供試体含水比を変化させる等の詳細な検討が必要である。

**4. まとめ** 1) 再生石膏の添加に伴い、石炭灰混合材料の一軸圧縮強さは増加し、剛性が高くなることが明らかとなった。2) 溶出試験結果より石膏を添加することによってハウ素及びフッ素の溶出抑制効果が認められた。六価クロムについては今回の配合では溶出量を抑制できなかったことから、今後さらなる検討が必要である。

【参考文献】 1) (公)土木学会：石炭灰有効利用技術について－循環型社会を目指して－，第 58 回土木学会全国大会・研究討論会，報告書，p.29, 2003. 2) 桐生和明・梅村靖弘：高炉スラグを利用した汚染土壌中の六価クロム溶出抑制に関する研究，土木学会第 60 回年次学術講演会，3-372, pp.743-744, 2005. 3) (財)石炭エネルギーセンター，石炭灰混合材料有効利用ガイドライン(震災復興編)，pp.1-13, 2015. 4) 武藤優・矢島寿：一半水石膏を利用した流動性処理土の検討，土木学会第 65 回年次学術講演会，Ⅲ-218, pp.435-436, 2010.