

エージング処理及びロットの違いが製鋼スラグ路盤材の要求品質に与える影響

福岡大学工学部 学生会員 嶋村 淳平 堀 哲巳
 福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 藤川 拓朗 古賀 千佳嗣
 日鉄住金スラグ製品(株) 柳 正人

1. はじめに 鉄鋼生産の副産物である製鋼スラグは、砂や砂利と同様の粒状材料として扱うことができ、天然砂と比べて単位体積重量やせん断抵抗角が大きいという特性を有している¹⁾。さらにその特性を活かし、古くより路盤材や埋戻し材等の道路用、土木用途に利材化されてきた²⁾。鉄鋼スラグ全体では、年間約 4000 万トン生成されており、そのうち製鋼スラグは 35%の約 1400 万トンを占めている。しかしながら、アルカリ性であることや高炉スラグに比べ、遊離石灰(free-CaO)やマグネシア(MgO)を多く含み、膨張する性質を有していることから課題も存在し、路盤材料への適用拡大に向けてロットの違いやエージングの有無が路盤材料の品質に与える影響を把握する必要がある³⁾。そこで本報告では、1) エージングの有無が材料の膨張性に与える影響、2) ロットの違いとエージングの有無が路盤材料の要求品質と環境安全性に及ぼす影響に着目し、検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料 本実験では、製造日の異なる 3 種類の製鋼スラグ(スラグ A:平成 29 年 6 月, スラグ B:平成 30 年 7 月, スラグ C:平成 30 年 10 月)を用いた。また、製鋼スラグは材料の膨張性を配慮してエージング処理を施していないもの(以下、未エージング材)と蒸気エージング処理を施したもの(以下、蒸気エージング材)を用いた。写真-1 にそれぞれの試料の外観、図-1 に製鋼スラグの粒径加積曲線、表-1 に製鋼スラグの物理特性を示す。

2-2 実験方法 エージングの有無が膨張性に与える影響について検討するために、JIS A 5015 道路用鉄鋼スラグ附属書 B(道路用鉄鋼スラグの水浸膨張試験方法)に準拠し、スラグ A において水浸膨張試験を行った。養生方法は、80±3℃に到達後 6 時間保持した後、養生装置内で放冷する操作を 1 回/日、10 日間繰り返した。次にロットの違いが路盤材の品質に及ぼす影響を把握するためにスラグ A, B, C において修正 CBR 試験を実施した。表-2 に修正 CBR 試験の実験条件を示す。また、溶出特性を明らかにするために、同様にスラグ A, B, C において平成 3 年環境庁告示第 46 号試験(以下、環告 46 号法試験)を実施した。

3. 実験結果及び考察

3-1 膨張性の検討 図-2 に水浸温度 80℃の条件下での水浸膨張試験結果を示す。未エージング材に関しては時間の経過とともに水浸膨張比は増加傾向であり、10 日目には 4.0%を超える値を示している。一方、蒸気エージング材に関しては未エージング材と同様に増加傾向を示すものの、その変化量は小さく、10 日目においても 0.5%程度までしか増加することはなかった。これは蒸気エージングを施すことにより、事前にスラグ中に残存する遊離石灰を水と反応させ膨張を促進させたことに起因している。よって水浸膨張試験においては既に水との反応が収束しており、未エージング材と比べて膨張量が少ない結果を呈したと考えられる。また、今回検討を行ったスラグ A の蒸気エージング材は、水浸膨張比が 1.0%以下であることから、路盤材としての要求性能を有していることが示された^{4),5)}。



(a)未エージング材 (b)蒸気エージング材
写真-1 スラグ B の外観

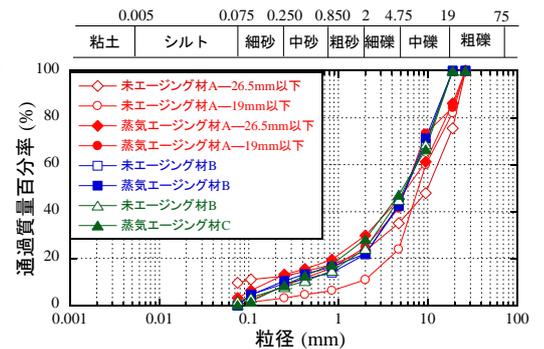


図-1 製鋼スラグの粒径加積曲線

表-1 物理特性

土質試料		粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'
スラグ A (d=19mm以下)	未エージング材 A	3.218	5.6	1.7
	蒸気エージング材 A	3.134	21.6	3.0
スラグ B (d=19mm以下)	未エージング材 B	3.585	24.7	3.5
	蒸気エージング材 B	3.460	32.0	4.8
スラグ C (d=19mm以下)	未エージング材 C	3.585	19.6	2.4
	蒸気エージング材 C	3.527	25.5	2.2

表-2 実験条件(修正 CBR 試験)

土質試料	含水比 w (%)	突き固め回数 (回)	最大粒径 d (mm)
スラグ A	最適含水比	17	19.5
スラグ B		42	
スラグ C		92	

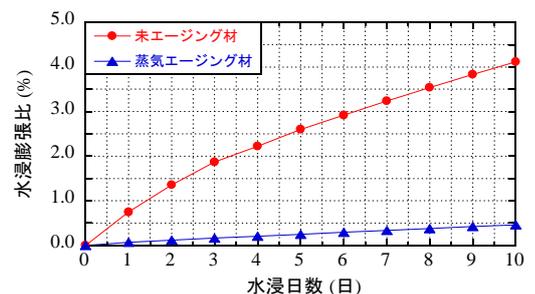
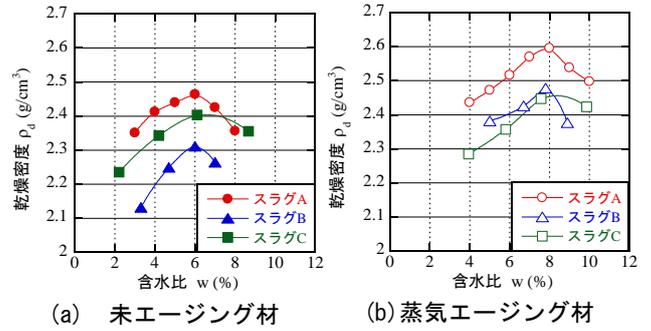
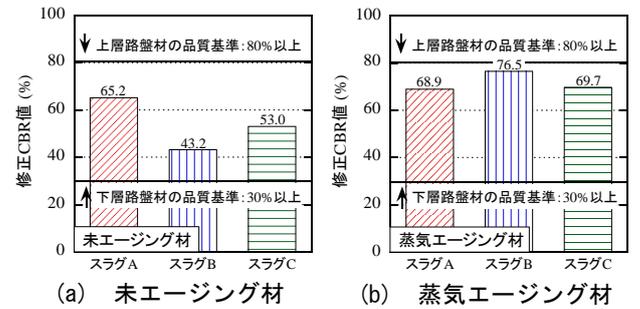


図-2 水浸膨張試験結果

3-2 路盤材としての性能評価 図-3(a), (b)にスラグの締固め曲線を示す。未エージング材よりも蒸気エージング材の方が、最大乾燥密度及び最適含水比が高い値を示している。これは、未エージング材に比べ蒸気エージング材の方が、砂分に相当する粒径を多く含んでいることから粒径幅が広くなり、締固め特性が改善されたことによるものと考えられる。また、エージングの有無に関わらず、スラグ A の最大乾燥密度はその他のスラグよりも高い値を示した。最適含水比については未エージング材が 6.0~6.1%、蒸気エージング材が 7.5~8.0%を示しており、最大乾燥密度については未エージング材が 2.31~2.46g/cm³、蒸気エージング材が 2.45~2.60g/cm³ 程度の変化を示している。これらの結果から、スラグのロットの違いはエージングの有無に関わらず、最大乾燥密度に影響を及ぼし、最適含水比には影響を及ぼさないことが明らかとなった。図-4(a), (b)に締固め度 95%における修正 CBR 値を示す。未エージング材に関しては、最大乾燥密度が大きいものほど修正 CBR 値が大きくなるような傾向が見られた。一方、蒸気エージング材に関しては上層路盤材の品質基準である 80%以上を



(a) 未エージング材 (b) 蒸気エージング材
 図-3 締固め曲線



(a) 未エージング材 (b) 蒸気エージング材
 図-4 締固め度 95%における修正 CBR 値

満たさなかったものの、未エージング材よりも比較的高い値を示した。これは蒸気エージング材の方が僅かながら粒径幅の広い試料で乾燥密度も高いため、修正 CBR 値が大きくなったと考えられる。以上より、ロットの違いは未エージング材の修正 CBR 値に影響を及ぼし、蒸気エージング材は未エージング材よりも高い修正 CBR 値を得ることが確認できた。また、ロットの違い及びエージングの有無に関わらず、締固め度 95%における修正 CBR 値がすべて 30%以上であることから、下層路盤材としての品質を満足することが示唆された。水温 20℃の条件下での吸水膨張試験については、いずれの条件においても変位が見られず、膨張を確認することはできなかった。

表-3 溶出試験結果

試料	pH	Cd	Pb	Cr(VI)	As	Se	F	B
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
土壤環境基準		0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.80	1.00
スラグA	未エージング材A	12.74	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	蒸気エージング材A	12.73	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.13
スラグB	未エージング材B	12.58	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.23	0.03
	蒸気エージング材B	12.68	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.09	0.13
スラグC	未エージング材C	12.67	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.03
	蒸気エージング材C	12.66	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.12

3-3 環境安全性評価 表-3に溶出試験結果(環告 46 号法試験)を示す。すべてのスラグに B (ホウ素)の溶出が見られ、スラグ B においては F(フッ素)の溶出が見られたが、いずれも土壤環境基準値以下であった。また、すべてのスラグにおいて pH が 12.5 以上のアルカリ性を示すことが分かった。以上のことから、環境安全性の面に関しては、ロットの違い及びエージングの有無にかかわらずアルカリ性を呈するものの土壤環境基準値を全て満たす結果が得られた。

4. まとめ 本検討により得られた知見を以下に示す。

- 1) 蒸気エージングを施すことにより事前にスラグ中に残存する遊離石灰を水と反応させ膨張を促進させることができ、蒸気エージング材は水浸膨張比が 1.0%以下であることから、路盤材としての要求性能を有していることが示された。
- 2) 未エージング材は、ロットの違いにより修正 CBR 値に影響を及ぼすが、下層路盤材としての品質を満足することが示唆された。
- 3) 蒸気エージング材は、ロットの違いにかかわらず安定した修正 CBR 値を示し、未エージング材と同様、下層路盤材としての品質を満足することが示唆された。
- 4) ロットの違い及びエージングの有無にかかわらず、すべてのスラグはアルカリ性を呈したが、調査項目すべてにおいて土壤環境基準を満たす結果が得られた。今後は、未エージング材の有効的な利用方法を確立するために、粒径や養生日数に着目した膨張性の検討及びエージングの有無が自硬性に与える影響について検討していく。

【参考文献】1) 本田秀樹・鈴木操：海水環境における製鋼スラグの長期透水性，第 51 回地盤工学研究発表会，pp.587-588，2016. 2) 市原明恵：製鋼スラグの加圧式蒸気エージング設備，Sanyo Technical Report Vol.17 No.1，2010. 3) 菊池喜昭：産業副産物・災害廃棄物の地盤工学的利用，地盤工学会誌，Vol.65，No.6，Ser.No713，2017. 4) 一般財団法人 土木研究センター 鉄鋼スラグ路盤設計施工指針作成委員会：鉄鋼スラグ路盤設計施工指針，pp.35-54，2015. 5) JIS A 5015 道路用鉄鋼スラグ(2018)