

転炉スラグの膨張特性を利用した地盤改良効果に関する 実験的考察

CONSIDERATION ON THE GROUND IMPROVEMENT EFFECT THAT UTILIZES EXPANSION
CHARACTERISTICS OF THE STEELMAKING SLAG

田辺和康*・吉澤千秋**・小泉公志郎**・須藤達也***・渡辺哲哉***

by Kazuyasu TANABE, Chiaki YOSHIZAWA, koushirou KOIZUMI, Tatsuya SUTO and Tetsuya WATANABE

1. はじめに

鉄鋼スラグは図1に示すように製鉄工程で発生する副産物である。鉄鋼スラグは、高炉で鉄鉱石を溶解、還元する際に発生する高炉スラグと次の鉄を精錬する製鋼段階で発生する転炉スラグに大別される。高炉スラグは、鉄鉱石に含まれるシリカ(SiO₂)などの鉄以外の成分や還元材として使われるコークスの灰分が原材料の石灰石と結合したものである。転炉スラグは、高炉で生まれた銑鉄を靱性、加工性の高い鋼にする製鋼工程で生成される。生石灰(CaO)などの副原料を加え、酸素を吹き込み、製鉄に含まれる炭素(C)、リン(P)、イオウ(S)を取り除き、粘り強い鋼に精錬するとき生まれた酸化物が転炉スラグである。本研究で用いた鉄鋼スラグは転炉スラグであり、粗鋼1tあたり、約110~120kg生成される。破碎された転炉スラグはかみ合わせが良く、大きな支持力が期待できることから、路盤材に用いられる。また、せん断抵抗角が大きく粒子密度と単位体積質量が大きいことから、土木用材、地盤改良材としても使用されている。しかし、転炉スラグに含まれるfree-CaOやfree-MgOは、水とするとCa(OH)₂やMg(OH)₂を生成するため、これが体積膨張を生じ、有効利用の妨げになっている。現在、転炉スラグは路盤材や人工石の骨材に使われているが、これらはfree-CaOやfree-MgOの少ない転炉スラグを選別し、さらに蒸気エージングにより予め、消和させてから使用している。この蒸気エージングは、転炉スラグ中に含まれるfree-CaOを水と反応させ、Ca(OH)₂を予め生成させることで安定化させる処理方法である。しかし、蒸気エージングを行ってもfree-CaOの全てが反応することはほとんど無く、転炉スラグにfree-CaOが残存することは避けられない。したがって、蒸気エージングでは膨張が緩和されるだけで、膨張が避けられるとは言えない状況にある。この問題を解決することは余剰である転炉スラグの利材化に大きく貢献する。資源

を有効利用することは循環型社会を構築する上で大切であり、転炉スラグのfree-CaOによる膨張の心配が払拭できれば、より多くの転炉スラグが路盤材や人工石等に有効利用が可能と考えられる。筆者らは未エージングの転炉スラグを用いて、その膨張特性や地盤改良特性について検討を行っており、有効利用を目的として取り組んでいる¹⁾。本報では、転炉スラグの膨張問題を地盤改良技術の視点から検討した結果について報告する。

2. 転炉スラグの特性と膨張現象について

2. 1 転炉スラグの特性

転炉スラグは、図2に示すような特性がある。①と②はCaOの残存による影響で、③はFeOを含有した骨材であり、以下のことが一般に知られている。

- ① free-CaO および free-MgO
 - ・高アルカリ性を呈していることが問題。
 - ・長期的に膨張することが問題。
 - ・遊離Ca²⁺によるポズラン反応が期待できる。
- ② β -2CaO・SiO₂
 - ・ポルトランドセメントの主要な組成化合物を有しており、水和が期待できる。
- ③ 天然骨材と同等
 - ・内部摩擦角と、骨材と骨材のかみ合わせによる力学的な改良効果を期待することができる。
 - ・高密度な材料であり、現場密度を高めて安定化を図ることができる。

このような特性を有しているが、未エージングの転炉スラグを利用することで、free-CaO および free-MgO の含有量は高くなり、その影響を受けて①と②の化学的な地盤改良効果はより促進できるものと考えている。

2. 2 転炉スラグの膨張現象

膨張現象は図2の②に示すように、free-CaO が水と反応してCa(OH)₂となる過程で膨張現象が長期間にわたり起こることが知られている。したがって、転炉スラグを利用する場合は、膨張の安定化を図ることが必要である。わが国では、図3に示すような方法により転炉スラグの安定化が図られている。転炉スラグを処理剤で改質する方法とエージング処理による方法に分けられるが、これらの方法によると、

*福山大学工学部 (〒729-0292 広島県福山市東村町字三蔵)、**日本大学理工学部、*** J F E ミネラル株式会社技術研究所

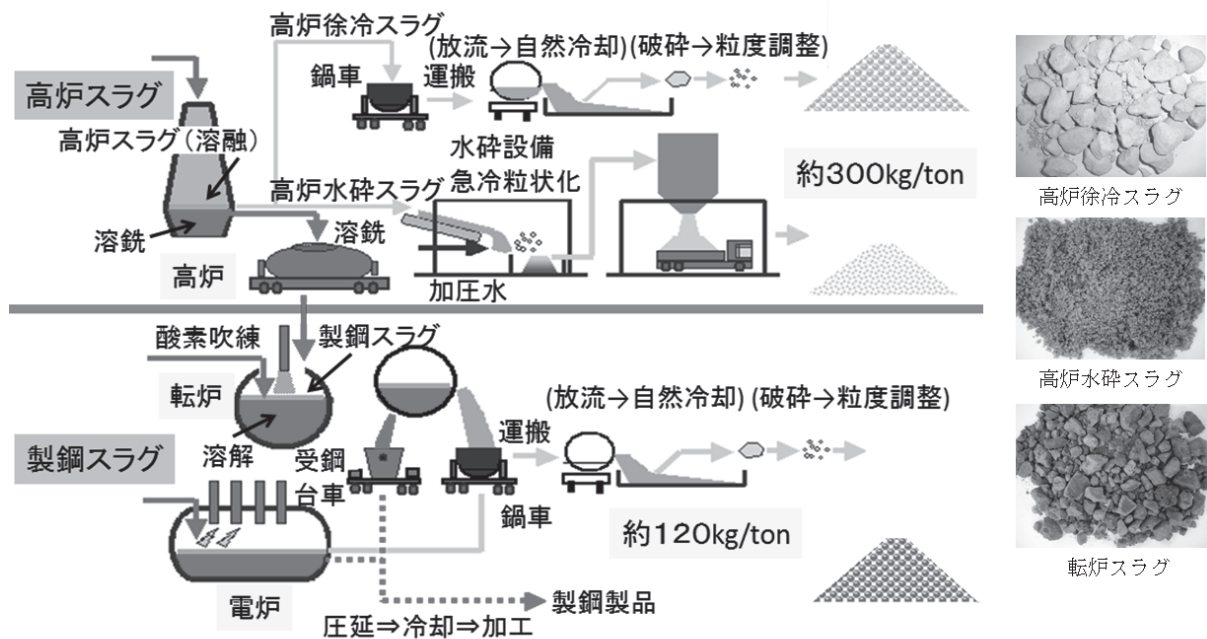


図1 鉄鋼スラグができるまで²⁾

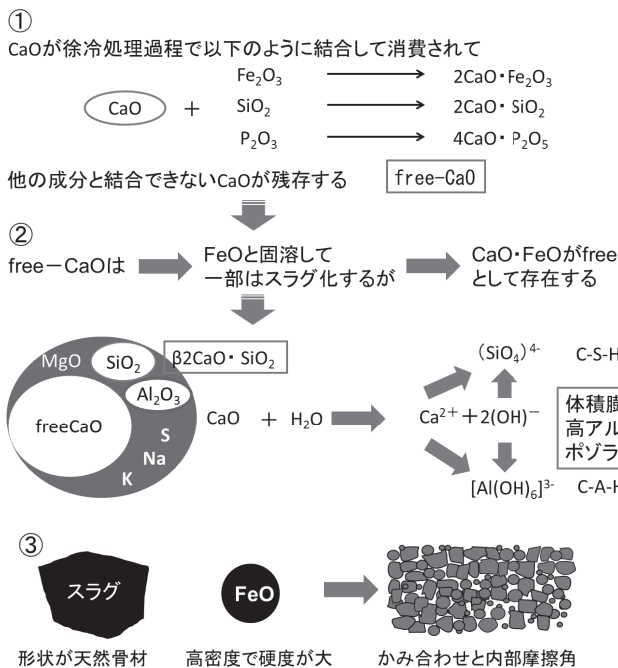


図2 転炉スラグの工学特性

- スラグの改質処理方法 → 膨張抑制処理剤 (処理コストが高い)
- エージング処理方法
 - 自然エージング (6ヶ月以上を要す)
 - 蒸気エージング (実用化されているがコスト高)
 - 温水エージング (実用化されていない)
 - 加圧エージング (施設が大規模で設備費が高い)

図3 転炉スラグの膨張抑制方法

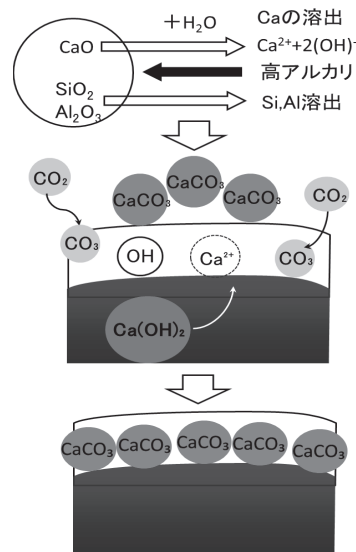


図4 転炉スラグのエージングメカニズム

コスト高となり、処理時間を要することが問題となっている。図4はエージング処理によるメカニズムを示すもので、酸化マグネシウムは除外している。

エージングは、free-CaOと水との反応でCa(OH)₂を生成させることにより、エージング期間中に膨張させて安定化させる処理方法である。また、屋外のエージングは、free-CaOが水と反応してCa(OH)₂が生成され、さらにその一部が空気中のCO₂と反応して図4のように炭酸化カルシウムとなり、安定化することによって膨張の抑制が図られる。しかし、エージング処理が不十分な場合、free-CaOが残存する限り、再

表 1 試験項目別概要

試験項目	試験方法	試験対象試料 (○は実施している)		
		転炉スラグ	改良対象土	転炉スラグ複合土
化学成分	蛍光X線分析	○	○	—
鉱物組成	X線回折分析	○	—	—
粒度分布	JIS A 1204準拠	○	○	—
自然含水比	JIS A 1203準拠	—	○	—
土粒子密度	JIS A 1202準拠	—	○	—
液性限界	JIS A 1205準拠	—	○	—
塑性限界	JIS A 1205準拠	—	○	—
塑性指数	JIS A 1205準拠	—	○	—
強熱減量	JIS A 1226準拠	—	○	—
締固め試験	JIS A 1210準拠	—	—	○
80°C水浸膨張試験	JIS A 5015準拠	○	—	—
CBR	JIS A 1211準拠	—	—	○

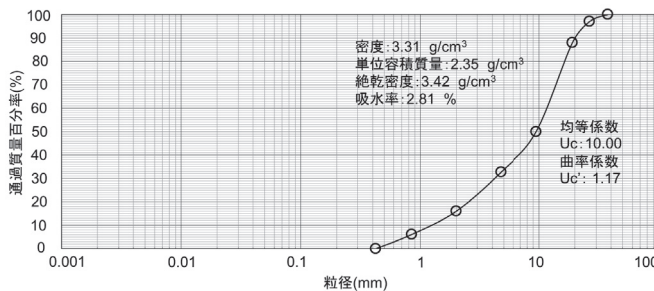


図5 転炉スラグの粒径加積曲線

表 2 転炉スラグの化学組成

成分	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂
転炉スラグ	44.00	11.60	27.40	0.04	3.99	2.87	0.09	2.09	3.06	0.43

び膨張が始まることになる。本報では、先にも述べているように未エージングの転炉スラグを使用する目的は、石灰安定処理工法における強度発現機構をイメージして取り組んでいる。転炉スラグ中の free-CaO と対象土の粘土やシルトの間で起こるポズラン反応を活発にできれば長期間にわたり反応が期待でき、膨張の安定化が図れるものと考えている。また、転炉スラグは礫と砂からなる骨材であり、適量の骨材が混入することでコンクリートのような高強度の地盤改良が期待できると思われる。

転炉スラグの膨張問題は、free-CaO の水和によって Mg(OH)₂ が生成することがあるが、free-CaO による膨張に比べると小さいため、本論では検討を行っていない。

3. 試験概要

3.1 用いた試料

対象試料の所在は、転炉スラグは J F E スチール西日本製鉄所福山工場、黒ぼく土は広島県神石郡、まさ土は広島県広島市、赤土は沖縄県宜野座村、シラスは鹿児島県鹿児島市。火山灰については、桜島火山灰は鹿児島県鹿児島市、新燃岳火山灰は宮崎県高原町に降り積った火山灰をサンプリングしている。

3.2 試験手順

対象試料の物理化学的特性の検討を行う。次に、締固め試験より得られた最適含水比と最大乾燥

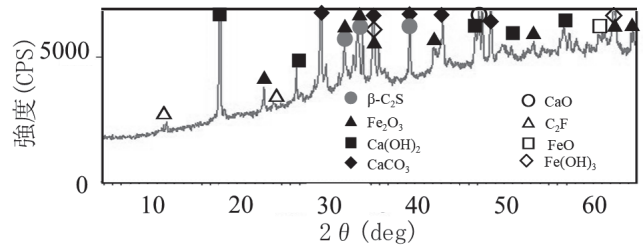


図6 転炉スラグの X 線回折

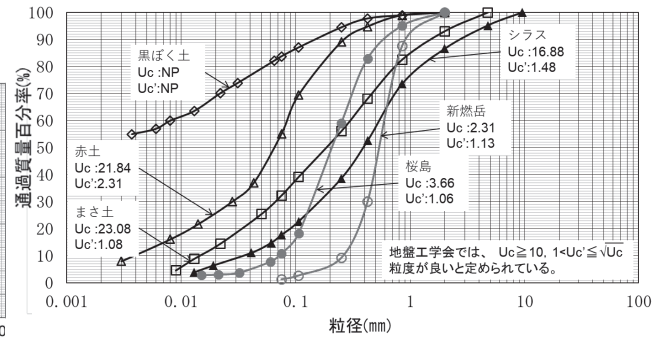


図7 粒径加積曲線

密度を配合基準として、容積換算により配合設計を行う。転炉スラグ改良土の膨張特性については、80°Cの水浸養生を 20 日間として、CBR 試験はその養生後の試料を用いて検討を行った。

3.3 試験項目

試験項目に対する試験方法と対象試料条件を表 1 にとりまとめて示す。

4. 得られた結果と考察

4.1 転炉スラグの物理化学特性

JFE スチール西日本製鉄所福山地区製の未エージング転炉スラグ 30~0mm を使用した。図 5 はふるい分析試験より求めた粒径加積曲線の結果を示す。用いた転炉スラグは砂混じり礫 (G-S) に分類され、連続した粒度分布で均等な曲率を示していることから、粒度分布の良い材料であることが認められた。また、密度が 3.31g/cm³ と高く、その影響を受けて単位容積質量と絶対乾密度が大きな値を示し、JIS A 5031 規格を満たす材料でもある。

転炉スラグの鉱物組成を X 線回折により同定した結果を図 6 に示す³⁾。これより Ca(OH)₂ および CaO のピークが認められた。Ca(OH)₂ は転炉スラグの生成時には CaO として存在し、これが冷却時の散水により Ca(OH)₂ に消和したものであると考えられる。したがって本試料は Ca(OH)₂ のピークの大きさから見て、free-CaO を多く含むものであると推察される。Fe₂O₃ は、その一部が 2CaO・Fe₂O₃ (C₂F) としての存在

表3 対象土の物理特性

物理的性質	広島 黒ぼく土	広島 まさ土	沖縄 赤土	鹿児島 シラス	桜島 火山灰	新燃岳 火山灰	転炉 スラグ
自然含水比 (%)	18.39	1.39	13.11	2.71	0.57	0.31	2.09
土粒子密度 (g/cm ³)	2.26	2.62	2.64	2.50	2.71	2.51	3.36
液性限界 (%)	110.1	51.3	57.1	NP	NP	NP	—
塑性限界 (%)	82.2	29.2	28.1	NP	NP	NP	—
塑性指数 (%)	27.9	22.2	29.0	NP	NP	NP	—
強熱減量 (%)	32.43	2.07	7.93	1.74	0.5	0.6	—

表4 対象土の化学組成

試料名	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂
黒ぼく土	1.78	47.9	19.4	0.59	1.26	21.2	0.507	0.435	2.21
まさ土	2.15	52.9	9.54	2.36	0.632	25.6	0.008	0.215	0.736
赤土	1.53	64.8	6.57	0.08	0.674	16.0	5.722	0.012	0.852
シラス	3.51	63.8	6.07	3.01	0.476	14.2	0.061	0.198	0.526
桜島火山灰	6.79	59.7	7.52	2.85	3.58	16.1	0.447	0.136	0.873
新燃岳火山灰	11.4	46.3	11.4	3.83	2.07	15.4	0.102	0.222	0.91

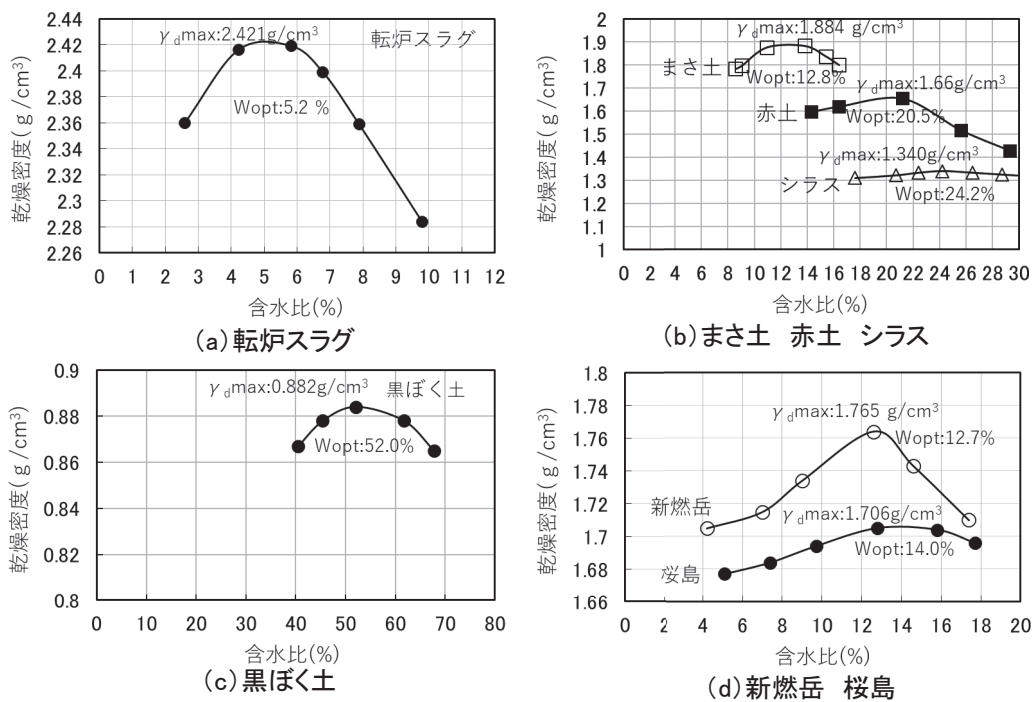


図8 突き固めによる締固め曲線

が認められる。これは転炉スラグが精錬後の熔融状態からヤードに流し込み冷却する工程の間にFe₂O₃がCaOと結びついたことで生成したものと考えられる。転炉スラグの化学組成を表2に示す。これより、CaOの含有率が44.0%と多量に含まれていることがわかる。Fe₂O₃やSiO₂, Al₂O₃は、銑鉄を精錬する際、銑鉄中のFe(鉄), Si(シリコン), Al(アルミニウム)が酸素吹きにより酸化されたものと推察される。また、一般にMgOはCaOと同様に水和によりMg(OH)₂が生成し、膨張することが考えられる。しかし、本試料に含まれるMgOの含有率が約4%と少なく、free-MgOによる膨張への寄与は極めて少ないと考えられる。

4. 2 対象土の物理化学的特性

(1) 粒度特性

図7に粒度試験結果を示す。黒ぼく土は細粒分を多く含みシルトと粘土からなる試料で、その他の試料については細礫からシルト、粗砂から粘土と広い範囲から分布しおり締め固まりやすい試料である。工学的分類体系によると黒ぼく土は有機質粘土(OH)、まさ土は細粒分質粘土(SF)、赤土は粘土(CH)、シラスは細粒分礫まじり砂(S-FG)、桜島火山灰は砂(S)で新燃岳火山灰は細粒分質砂(SF)に分類される。

(2) 物理特性

表3には物理特性の結果を示す。黒ぼく土は、腐食

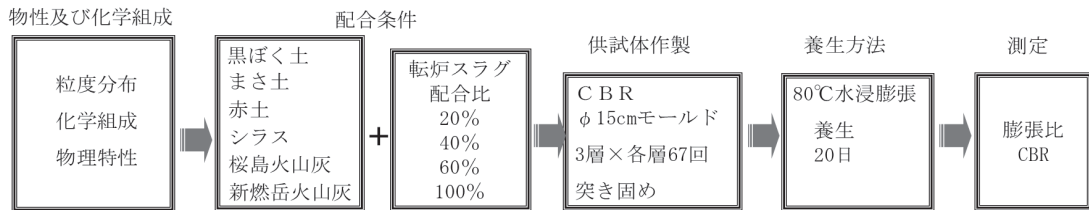


図9 試験の流れ

に富み粘性土の影響を受けて液性限界と強熱減量値が高く、軟弱であることから特殊土とされている。まさ土と赤土の物理特性は一般土に近い結果を示しているが、まさ土は土粒子破碎と降雨浸食を受けやすい土質で、沖縄の赤土は粘土質であるが粘着力が弱く降雨浸食で赤土が流出しサンゴ礁などの自然環境に悪影響を及ぼしており、両試料は特殊土として扱われている。また、シラスはマグマが急に冷え固まってできた火山ガラスの堆積物で、粒子破碎を生じやすく降雨浸食を受けやすいことから特殊土とされ、火山灰は粒径が $2\mu\text{m}$ 以下の火山噴出物と定義されている。これら3試料のコンシステンシーはいずれもNPの結果で、砂質土的な特性を有する試料である。

(3) 化学特性

表4は対象土の化学組成を示す。一般的に、土中に多く含まれている主な元素は酸素、ケイ素、アルミニウム、鉄などが順に含有されるが、対象試料も同様な傾向を示している。また、水に溶けやすい酸化カルシウムとケイ酸、水に溶けにくい酸化鉄と酸化アルミニウムを各々総和して比較すると、赤土とシラスおよび桜島火山灰のグループに、黒ぼく土とまさ土および新燃岳のグループに分類される。よって、この化学組成の影響が膨張特性とCBR特性に影響するものと考えている。

(4) 締固め特性

図8は突き固めによる締固め試験結果を示す。図8(a)は転炉スラグの締固め曲線(JIS A 1210 E-c法に準拠)の結果で、最大乾燥密度が大きく最適含水比は低い。図8(b)、(c)、(d)は対象土の締固め曲線(JIS A 1210 A-a法に準拠)を示す。まさ土と赤土の物理特性はよく似た傾向を示すが、赤土はまさ土と比べて最大乾燥密度が小さく最適含水比は高い。シラスの締固め曲線は平滑である。黒ぼく土は他の試料とは異なり、最大乾燥密度は $0.882\text{g}/\text{cm}^3$ と小さく最適含水比は52.0%と高い。また、火山灰の最適含水比は13%前後であるが、最大乾燥密度は新燃岳の方が桜島より高いことが特徴である。締固め曲線から得られた最適含水比は、後述する3.3の実験方法の配合設計に適用する。

4. 3 転炉スラグに対象土を複合した膨張特性とCBR特性の検討

(1) 試験方法

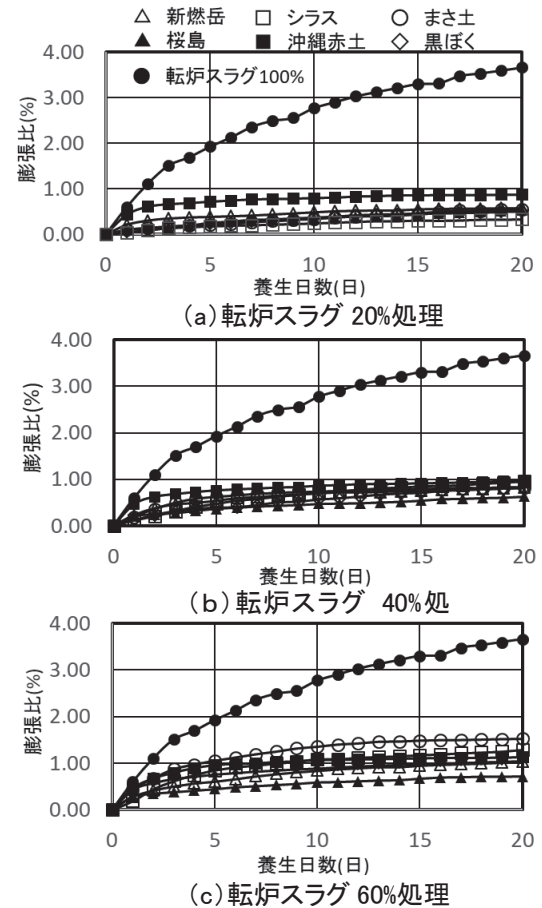


図10 膨張比と養生日数の関係

図9に示す実験の流れに沿って、転炉スラグ複合土の膨張特性とCBR特性の検討を行った。試料は特殊土の4試料と火山灰の2試料を対象土とした。未エージングの転炉スラグの添加量は容積換算(150mm×125mmのCBRモールド)で20%、40%、60%の配合とした。

供試体の作製は、締固め曲線で得られた最適含水比を配合設計条件として、突き固めエネルギーはJISA1211のCBR試験に準拠し3層67回とした。養生方法は、80°Cの6時間を1サイクルとした水浸養生である。膨張特性については20日間の養生について、CBR特性は20日養生後の試料を用いて検討を行った。

(2) 膨張特性

膨張比と養生日数の関係を図10に示す。JIS A5015道路用スラグによる転炉スラグ路盤材では、大気エージング6ヶ月以上の養生に対して、10日間の80

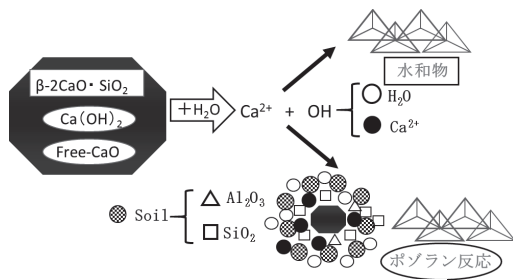


図 11 水和物とポゾラン反応

℃水浸膨張比が1.5%以下と規定されている。本報では、この基準を満たすことを要件としている。

転炉スラグ100%の膨張比について見ると、10日養生で2.8%、20日養生では3.6%と膨張の収まる様子は見られない。一方、転炉スラグで地盤改良した結果について見ると、図11に示すような水和とポゾラン反応に伴う改良効果が膨張現象を緩和して、膨張比1.5%以下の規定を満たしている。図10 (a)は転炉スラグ20%配合処理、図10 (b)は40%配合処理、図10 (c)は60%配合処理したものである。対象土別に膨張特性の傾向を見ると、火山灰試料の膨張抑制効果が顕著に現れており、赤土<まさ土<シラス≦黒ぼく土<新燃岳<桜島の順に処理効果が認められた。また、各試料とも転炉スラグの配合割合が増加するに伴い膨張比は高くなる傾向を示している。

転炉スラグに含まれる free-CaO の膨張はこれが水和し、体積の大きい $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が生成することが原因である。転炉スラグと土を混合することで、膨張の抑制は土の間隙に吸収されること、非晶質のケイ酸と反応し、C-S-H を生成させることで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を消費することにより膨張が吸収されると考えられる。

(3) CBR特性

CBR 特性については、図 11 に示す転炉スラグによる地盤改良メカニズムをイメージして検討を行った。転炉スラグが水と接触すると、 OH^- と Ca^{2+} が間隙中に遊離して土中はアルカリ状態となり、初期では $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ による水和物を生成する。同時並行して、転炉中の free-CaO が土を構成しているガラス質の SiO_2 と Al_2O_3 を溶解してイオン化が起こり、中長期的にポゾラン反応が促進されるものと考えている。図12はCBRと転炉スラグ配合量の関係を示す。転炉スラグの配合割合が増加するに伴ってCBRは上昇している。配合割合20%試料までのCBRは、水和反応とポゾラン反応による化学的な影響と密度改善により高まっていると考える。また、配合割合40%以上の試料については、内部摩擦角と骨材とのかみ合わせ、および高密度による物理的な影響も含まれて、CBRは高まっていると思われる。CBRを対象土別に見ると、赤土と黒ぼく<シラスとまさ土<新燃岳火山灰<桜島火山灰の順に地盤改良効果が認められた。

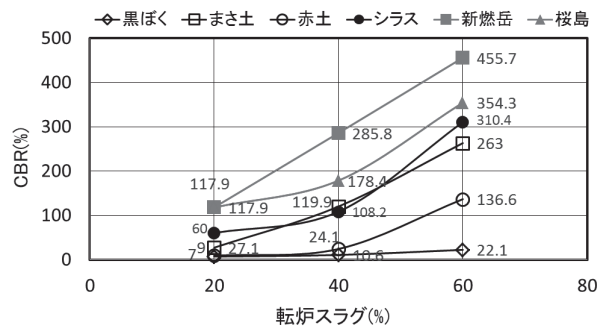


図 12 CBRと転炉スラグ配合量の関係

火山灰とシラスは非晶質の SiO_2 を多く含むため、転炉スラグに含まれるfree-CaOと反応し、C-S-Hが多く生成する。その結果、膨張が抑制され、支持力も向上すると考えられる。一方、赤土や黒ぼくは非晶質の SiO_2 が極めて少ないため、転炉スラグ中のfree-CaOの多くが未反応の状態に残存する。その結果、膨張の抑制効果が小さく、支持力も小さいことが考えられる。

4. おわりに

本研究では、転炉スラグの膨張問題の解決策として、未エージングの転炉スラグを地盤改良材に有効活用することを目的として検討した結果、以下のことが明らかとなった。

転炉スラグによる地盤改良メカニズムの特長は、 CaO と Fe_2O_3 を主成分とした人工骨材を容積換算で大量に配合して地盤の安定化を図ることである。したがって、物理的には内部摩擦角と骨材とのかみ合わせおよび高密度の影響を受けて処理直後から改良効果に期待できる。また、化学的には転炉スラグ中の水和物と遊離 Ca^{2+} の溶出に伴う土粒子とのポゾラン反応で地盤改良が図れる。

この地盤改良の反応が継続する限り、安定的な膨張抑制が長期に亘って果たせることを結論とする。

今後の課題としては、化学的な反応メカニズムを明らかとすることが必要で、検討中である。

参考文献

- 1) 田辺和康・吉澤千秋・鈴木 操・林 正宏：製鋼スラグを用いた地盤改良技術への取り組み、地盤工学会誌、第63巻、第8号、pp. 8-11 (2015)
- 2) 田辺和康・中嶋志拓・吉澤千秋・牧平暢之・藤木貴志・久保隆：製鋼スラグを用いた黒ぼく土の地盤改良、第57回地盤工学シンポジウム、pp. 41-46 (2012)
- 3) 田辺和康・吉澤千秋・牧平暢之・藤木貴志・山田幹雄・佐野博昭：製鋼スラグを用いた林道整備の開発、地盤工学会誌、第60巻、第11号、pp. 16-19 (2012)

(2018年4月13日受付 2018年6月28日受理)