

再生石膏粉を用いて改良した路盤材及び改良土の

膨張メカニズムとその対策に関する研究

藤川 拓朗

福岡大学工学部社会デザイン工学科

建築物等の解体工事に伴い発生する廃石膏ボードは、中間処理を経て再生石膏粉としてリサイクルが進められている。しかしながら、路盤材や盛土材等として利用した際の膨張特性について不明な点が多く、地盤材料としての有効利用はあまり進んでいない。そこで本研究では、再生石膏粉を用いた地盤材料の膨張特性について検討を行い、膨張メカニズムの解明と対策について検討を行った。

1. はじめに

建築物等の解体工事に伴い発生する廃石膏ボードは、中間処理を経て再生石膏粉としてリサイクルが進められているものの、地盤改良材や石膏ボードメーカーでの有効利用はあまり進んでいない¹⁾。筆者はこれまで再生石膏粉の地盤工学的利用に関する研究を行っており、再生石膏粉の改良効果や環境安全性について明らかにしてきた²⁾。しかしながら、路盤材や盛土材等の地盤材料として利用した際の課題が残されており、特に、石膏改良にともなう材料の膨張特性を明らかにし、その対策を提示することが有効利用を推進していくためにも急務である。そこで、本研究ではヒアリング調査をもとに膨張が生じた事例として、①再生石膏粉由来の人工石粉を粒度調整材として用いた再生路盤材、②再生石膏粉を用いて軟弱地盤を改良した改良土に着目し、これらの膨張特性について検討を行った。



図1 再生路盤材の定義

2. 実験概要

① Case1(人工石粉を RC40 に混入した再生路盤材)における膨張特性

本研究における再生路盤材とは、図1に示すようにRC40（再生砕石）に人工石粉を粒度調整材として添加させて混合した材料である。この内、人工石粉は、表1に示すように、建設発生土の洗砂における濁水処理に伴って発生する脱水ケーキを母材とし、セメント系固化材と半水石膏粉を混合させて作製している。実際に路盤の膨張が発生した過去のヒアリングによれば、いずれも水はけが悪い地盤（嫌氣的・還元状態）で、施工後4ヶ月以上が経過して路盤で起こっていることであった。現場で使用した路盤材は、再生ク

表1 人工石粉作製条件

石粉名	配合			
	母材	セメント系 固化材 (%)	再生 半水石膏 (%)	再生 二水石膏 (%)
人工石粉A	脱水ケーキ	10		
人工石粉B		5	5	
人工石粉C		5		5
人工石粉D		3	7	
人工石粉E		3		7

ラッシュラン(RC40)と粒度調整材として人工石粉を加えており、この人工石粉の一部に再生半水石膏粉が使用されているということであった(再生石膏粉は通常、再生二水石膏の状態で製造され、再生半水石膏は再生二水石膏を150～180℃で加熱することで得られるものであり、水を加えると固まる性

表 2 再生路盤材の作製条件及び浸漬条件

路盤材	人工石粉の種類	人工石粉添加量 (%)	浸漬条件
RC40	人工石粉A 人工石粉B 人工石粉C 人工石粉D 人工石粉E	7	・水浸4ヶ月 ・水浸2ヶ月 → 硫酸塩溶媒2ヶ月

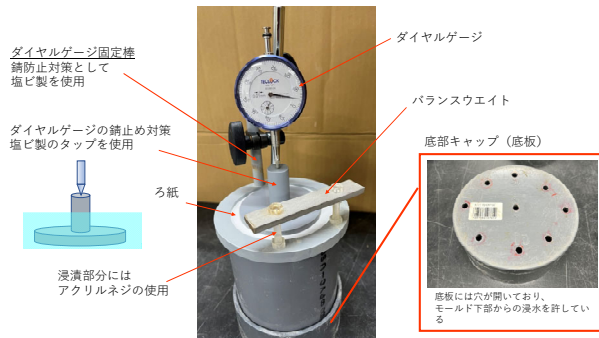


図 2 吸水膨張試験に用いたモールド

質を有する)。

そこで、今回の検討においては、セメント系固化材や再生半水石膏の割合を変化させた検討を行い、再生路盤材の膨張特性に与える影響因子や添加率に着目している。なお比較のため、再生二水石膏を用いた検討も行っている。表 2 は、再生路盤材の作製条件と浸漬条件を示したものであり、5 種類の人工石粉 A～E を RC40 の湿潤質量に対して 7% 添加して再生路盤材を作製している。具体的には、RC40 と人工石粉を十分混合した後、D=100mm, H=127mm の塩ビ製モールドに 1Ec ($\approx 550\text{kJ/m}^3$) の締固めエネルギー³⁾で突き固めて供試体を作製した。供試体作製後、水道水に 4 ヶ月水浸させる条件と水道水に 2 ヶ月

水浸させた後に 1% の硫酸塩溶媒に 2 ヶ月浸漬させる 2 パターンの浸漬試験を行い、膨張量の測定を行った。膨張量の測定においては、硫酸塩による防錆対策として、図 2 に示す装置を用いて行った。また、4 ヶ月という浸漬条件は、実際の路盤材において施工後 4 ヶ月後に膨張が発生したというヒアリング結果を踏まえたものである。また、硫酸塩溶媒に浸漬させた理由は、図 3 に示すモノサルフェートからエトリンガイトへの再転化による膨張メカニズムの再現を考慮している。

② Case2(再生石膏粉を用いた改良地盤)における膨張特性

市販の木節粘土に水を加え、図 4 に示すようにコーン指数が $q_c=200\text{kN/m}^2$ となるように含水比を調整し、模擬泥土を作製した。この模擬泥土に、表 3 に示す条件で再生半水石膏と高炉セメントを混合し、①に示す供試体作製方法と同じ条件で突

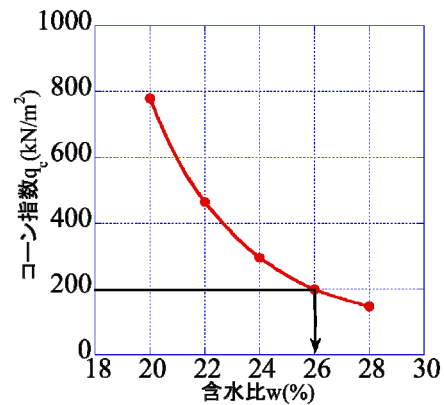


図 4 コーン指数と含水比の関係

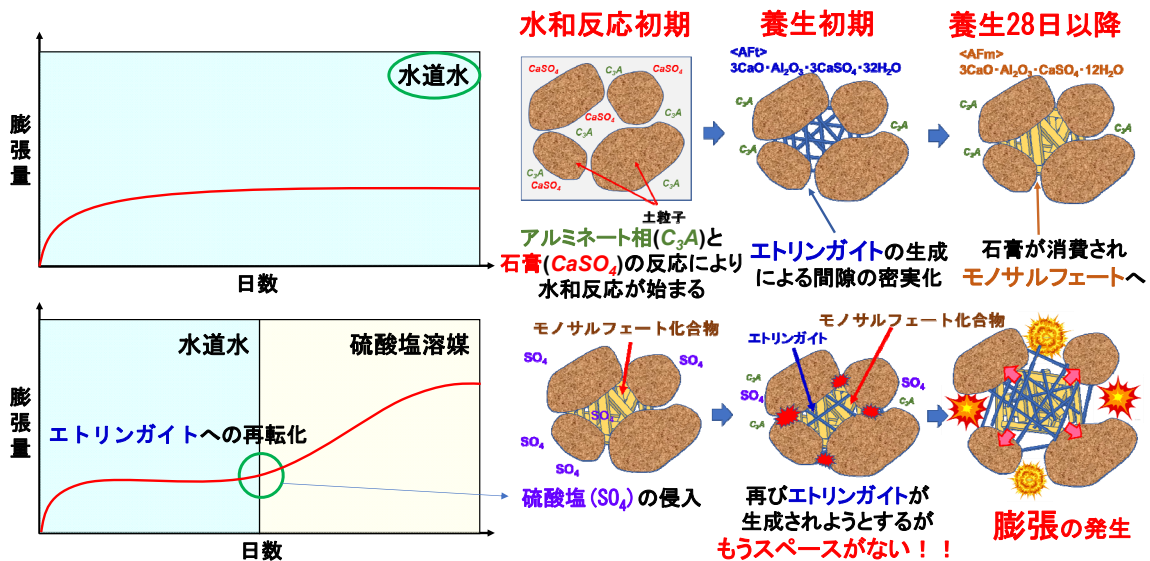


図 3 本研究で考える再生石膏粉を用いた再生路盤材の膨張メカニズム

表 3 改良土の作製条件及び浸漬条件

土質材料	再生半水石膏 (kg/m ³)	高炉セメントB (kg/m ³)	養生日数 (日)	解きほぐし	浸漬条件
模擬泥土 (w=21.5%)	150 300 450	10 30	7	有 無	・水浸4ヶ月 ・水浸1ヶ月 → 硫酸塩3ヶ月



写真1 吸水膨張試験(膨張量の測定)の様子

き固めて供試体を作製した。供試体作製後、養生7日後に間隙中への水の浸透を促すべく、解きほぐして(粗破碎して)再度締め固め、1ヶ月水浸、その後、1%の硫酸塩溶媒に3ヶ月浸漬させ、膨張量の測定を行った。膨張量の測定の様子を写真1に示す。測定方法については、再生路盤材における方法と同様である。なお、影響因子としてセメントの添加量が膨張量に与える影響に着目した。

3. 実験結果及び考察

3-1 再生路盤材の膨張特性

図5にRC40と混合させる人工石粉単体の力学特性を把握すべく、1Ecの締固めエネルギーで突き固めて作製した供試体の一軸圧縮試験結果を示す。セメント系固化材のみの場合、養生日数の増加に伴い一軸圧縮強度も増加する傾向にあるが、再生石膏を置換することにより一軸圧縮強さは低下し、養生に伴う強度増加も収束する傾向にあることが分かる。なお、半水石膏と二水石膏の改良効果に突出した違いは見られなかった。図6に変形係数と一軸圧縮強さの関係を示す。両者には相関性が見られ、セメント安定処理土(深層混合処理工法)と同程度の剛性を有する材料であることが分かる。また、剛性についても石膏の種類や添加率の影響は見られないことが分かる。

このような力学特性を有する人工石粉をRC40と混合して作製した再生路盤材の膨張特性について把握すべく、図7(a)水浸4ヶ月、(b)水浸2ヶ月後に1%の硫酸塩溶媒に2ヶ月浸漬させた再生路盤材の吸水膨張試験結果を示す。(a)水浸4ヶ月においては、浸漬初期に膨張が発生

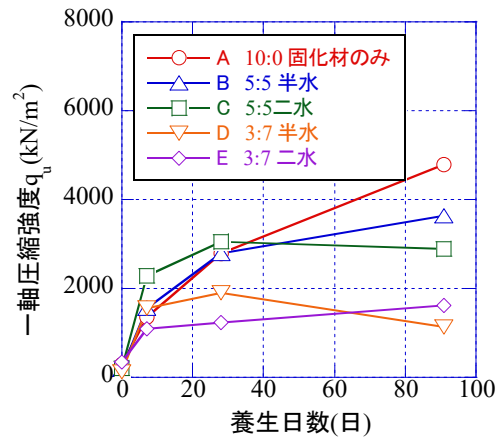


図5 人工石粉単体の力学特性

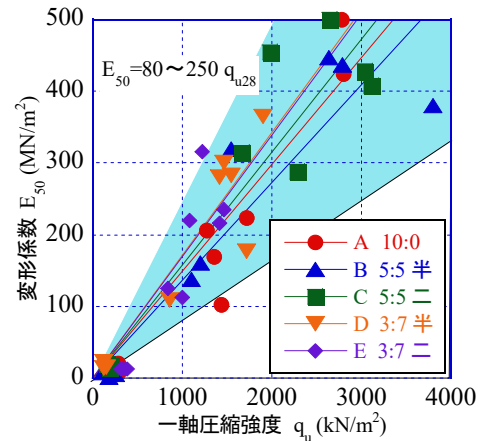
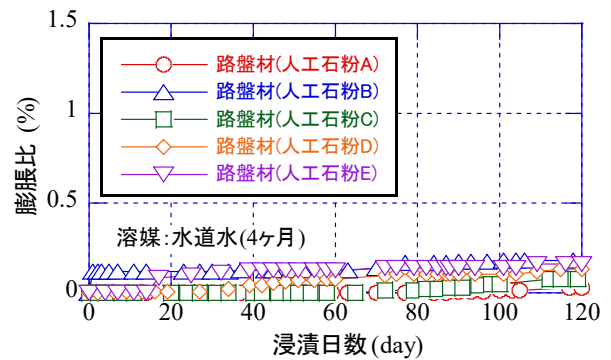
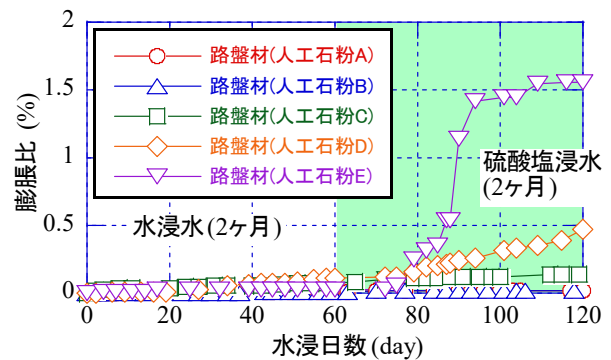


図6 変形係数と一軸圧縮強さの関係



(a) 水浸4ヶ月



(b) 水浸2ヶ月後、硫酸塩2ヶ月

図7 再生路盤材の吸水膨張試験結果

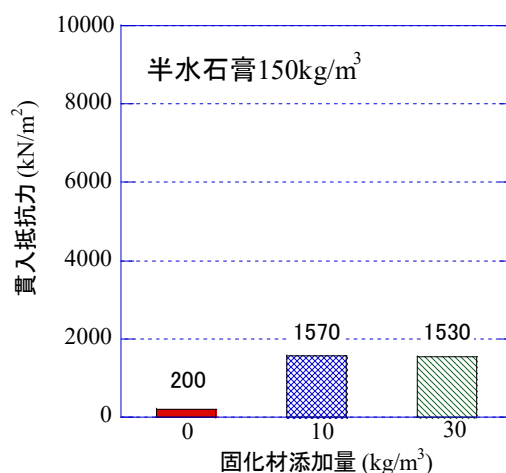
し、その後は一定した値で推移しており膨張の発生は見られていない。一方、(b)水浸2ヶ月後に硫酸塩溶媒に浸漬させた条件においては、路盤材(人工石粉D) (固化材 3%+再生半水石膏 7%) 及び路盤材(人工石粉E) (固化材 3%+再生二水石膏 7%)の条件において、膨張比(膨張量を供試体高さで除して百分率で表したも)の増加が顕著に見られた。これは、硫酸塩の浸入により再びモノサルフェートがエトリンガイトに転化され、初期のエトリンガイトの生成において密実化した間隙内にさらにエトリンガイトが生成されたことに伴う膨張によるものと考えられる(図-3 参照)。浸漬100日において膨張比は1%程度であり、これは路盤用鉄鋼スラグの施工後の路盤膨張によるトラブル(クレーム)が発生した膨張率⁴⁾に相当する。よって、再生石膏粉を由来とした人工石粉を粒度調整材として利用する場合、再生石膏粉の添加率や周辺環境(硫酸イオンが存在する地盤等)には留意が必要である。写真2は、浸漬試験終了後の供試体の様子を示したものであり、路盤材(人工石粉E)の条件においては、路盤材の盛り上がりが目視でも確認できることが分かる。



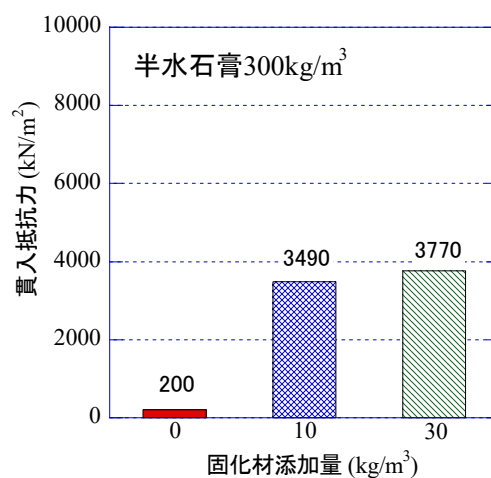
写真2 浸漬試験終了後(4ヶ月後)の供試体の様子

3-2 改良土の膨張特性

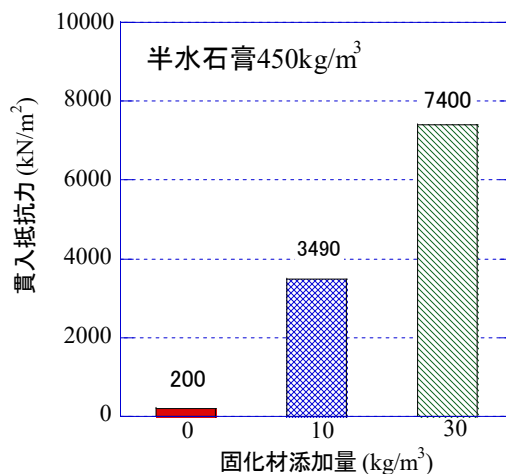
図8(a)～(c)に浸漬前(養生7日)に実施したコーン指数試験結果を示す。改良前のコーン指数は $q_c=200\text{kN/m}^2$ (土質区分では第4種建設発生土に区分)であったのに対し、再生半水石膏と固化材を用いて改良することでいずれの条件においてもコーン指数の増加が見られ、高い改良効果(土質区分では第2種改良土に区分)が得られることが分かる。さらに、固化材添加量の増加に伴い、コーン指数は増加傾向にあることが分かる。



(a) 半水石膏 150kg/m³



(b) 半水石膏 300kg/m³



(c) 半水石膏 450kg/m³

図8 再生半水石膏と固化材による改良効果(コーン指数試験結果)

図9は、再生半水石膏添加量 $B=300\text{kg/m}^3$ における浸漬日数と膨張比の結果を示したものであり、浸漬試験を行う前の供試体の違い(破碎の有無)に着目した結果である。破碎無しの条件

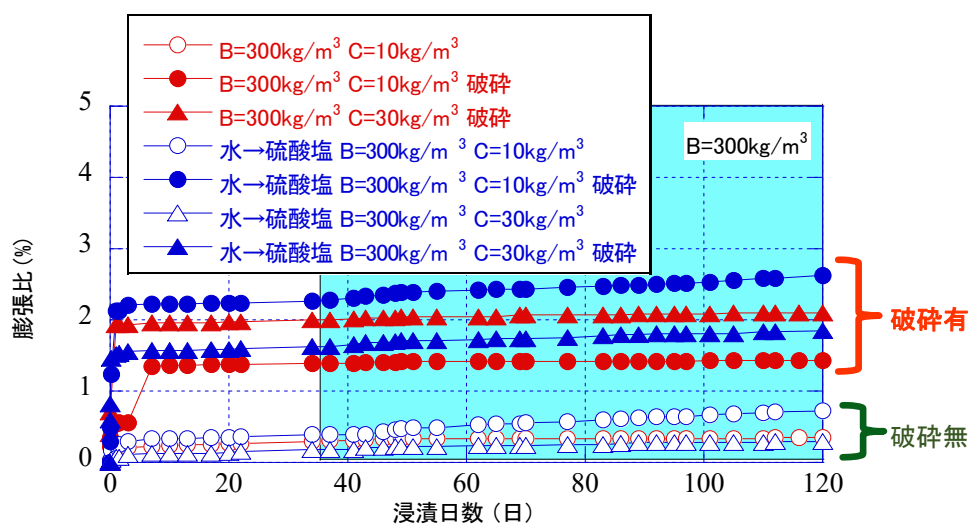
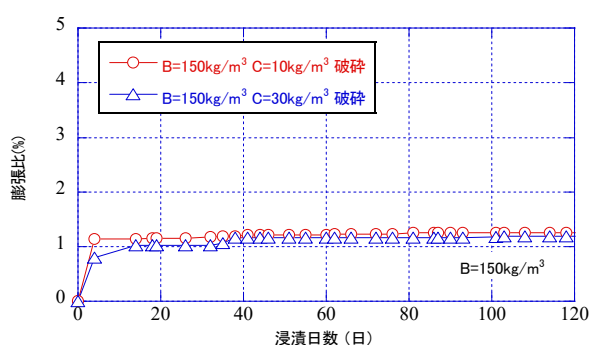
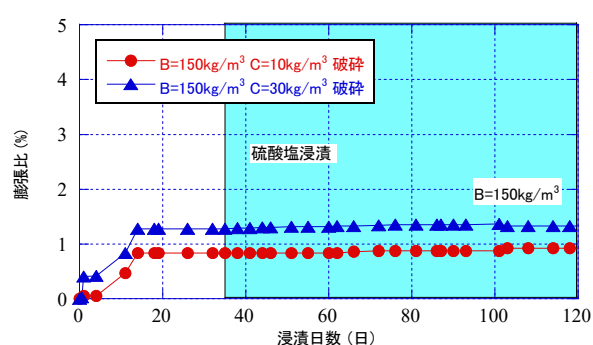


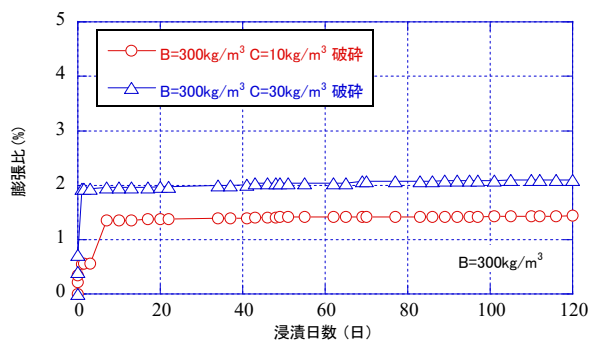
図9 破碎の有無に着目した浸漬日数と膨張比の関係 ($B=300\text{kg/m}^3$, $C=10, 30\text{kg/m}^3$)



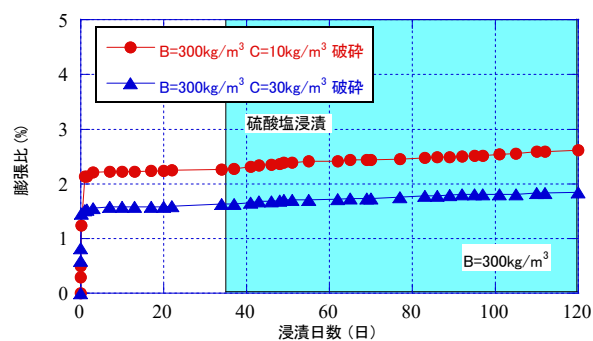
(a) $B=150\text{kg/m}^3$ 水浸4ヶ月



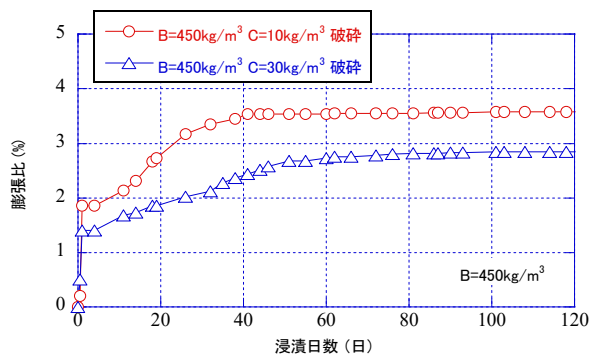
(b) $B=150\text{kg/m}^3$ 水浸1ヶ月後硫酸塩3ヶ月



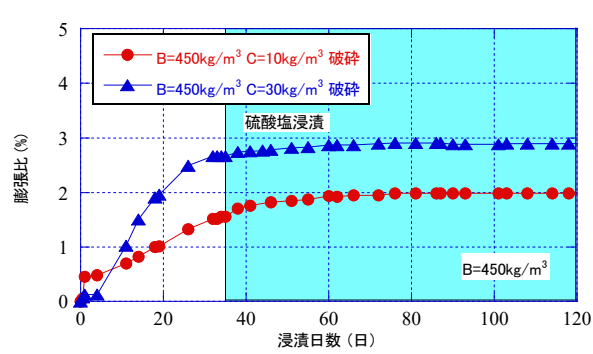
(c) $B=300\text{kg/m}^3$ 水浸4ヶ月



(d) $B=300\text{kg/m}^3$ 水浸1ヶ月後硫酸塩3ヶ月



(e) $B=450\text{kg/m}^3$ 水浸4ヶ月



(f) $B=450\text{kg/m}^3$ 水浸1ヶ月後硫酸塩3ヶ月

図10 浸漬日数と膨張比の関係 (全条件：破碎あり)

において膨張比はいずれの固化材添加量においても1%未満であるが、破碎有り（塊状の供試体を一度解砕した後に再度締固めを行い、意図的に間隙をつくり透水性を高めたもの）の条件では、1.5～2.5%の膨張比が見られた。このことより、水が侵入しやすい条件ほど粒子との接触面積が増え反応が促進し、膨張量は大きくなることが分かる。溶媒の違いに着目すると、水浸に比べ水浸後に硫酸塩溶媒に浸漬した条件の方が僅かではあるが膨張比は増加する傾向にあることが分かる。また、破碎無しの条件において固化材添加量が多い方が膨張比は小さいことから、改良効果による拘束効果が働いていると考えられる。このことは、固化材添加量を調整することで膨張量のある程度抑制できることを示唆している。

図10に破碎ありの全条件における浸漬日数と膨張率の関係を示す。3-1で得られた浸漬実験とは異なり、改良土の場合は溶媒の種類に関係なく浸漬直後から著しい膨張を引き起こすことが判明した。また、再生半水石膏の添加量が増加する程、膨張率も増加する傾向にあり、最大で3.5%程度の膨張が見られた。水浸1ヶ月経過後に硫酸塩溶媒に浸漬させたが、その後の著しい膨張の発生が見られないことから、エトリンガイトの再転化ではない別の要因も考えられる。そのため、改良土の膨張メカニズムについては、今後、SEMやXRDによる観察も検討する必要がある。

3-3 膨張抑制対策と今後の課題

再生路盤材の粒度調整材として再生石膏粉を混入した人工石粉を使用する場合、条件によっては膨張を引き起こす可能性がある（今回の条件では、人工石粉7%（固化材：再生二水石膏＝3：7）ことが明らかとなった。特に、路盤材として適用する地盤に硫酸塩の存在がある場合、再生石膏粉の添加率によってはエトリンガイトの再転化を引き起こし、施工後4ヶ月以降に著しい膨張が生じる可能性がある。そのため、硫酸塩の存在が考えられる場所での利用を避けるか、あるいは、硫酸塩と接触しないような対策が必要である。硫酸塩土壌は九州をはじめ全国に存在し、コンクリートに化学的に作用し、住宅基礎のひび割れ、脆弱化、スケーリングなどの硫酸塩劣化が問題となっている。また、嫌気的環境中の硫酸塩還元菌の存在や、黄鉄鉱、白鉄鉱、磁硫鉄鉱、グレイガイトなど地盤に含まれる硫化物の酸化も膨張を引き起こす因子となり得るため、注意が必要である。

また、再生石膏粉を改良土として利用する場合、石膏添加量が多い（今回の条件では $B=150\text{g/cm}^3$ 以上）と溶媒の種類に関係なく水との接触により膨張を引き起こすことが明らかとなった。そのため、地下水や降雨との接触を避けた条件での使用に限られる。

このように土壌に硫酸イオンが存在する事例は多いことから、再生石膏をリサイクルする上で対策案の検討も引き続き重要な課題である。

4. まとめ

1) Case1 路盤材の膨張特性について

- ・再生石膏粉を用いた再生路盤材の膨張特性は、硫酸塩溶媒において1.5%程度の膨張が生じ、これはエトリンガイトの再転化によるものと考えられる。

2) Case2 改良土の膨張特性について

- ・再生半水石膏を用いた改良土は、解きほぐした状態で使用した場合、1.0～3.5%程度の膨張が生じることが分かった。
- ・再生半水石膏の添加量の増加に伴い膨張量も増加するが、固化材添加量を調整することで膨張量を抑制することが可能と考えられる。
- ・浸漬条件の違いが膨張量に与える差異は見られなかった。また、いずれの条件も浸漬初期に膨張が見られることから再生路盤材の膨張挙動とはメカニズムが異なる可能性がある。この点については、引き続き原因の究明が必要である。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、一般社団法人九州建設技術管理協会より令和3年度建設技術開発助成を受けました。末筆ながらここに記し謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) 国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター：再生石膏粉の有効利用ガイドライン（第一版），2019.
- 2) 例えば、松尾典映・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣：解体・新築系廃石膏ボードの混合率に着目した再生半水石膏による地盤改良固化特性の影響，第49回地盤工学研究発表会，pp.537-538, 2014.
- 3) 公益社団法人 地盤工学会：土質試験基本と手引き 第3回改訂版，p.79, 2022.
- 4) 安藤和彦・寺田 剛・坂 修平：鉄鋼スラグ路盤設計施工指針の発刊～鉄鋼スラグの水浸膨張比の規格値検討～，土木技術資料 57-11，pp.52-55, 2015.