

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月24日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560527

研究課題名（和文） 廃石膏ボードの地盤改良材への適用と環境影響評価に関する研究

研究課題名（英文） Material Characteristics and Leaching Behaviour of Recycled Bassanite as Soil improvement Effects from Waste Plaster Boards

研究代表者

佐藤 研一 (SATO KENICHI)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：20235336

研究成果の概要（和文）：

廃石膏ボードから得られる二水石膏を焼成処理して得られる半水石膏（再生半水石膏）は、水を加えると固化する性質を有している。この特徴を利用した地盤改良材としての有効利用技術の研究が進められている。本研究では、再生半水石膏を用いた地盤改良材の開発を目的として、実地盤への適用性の検討を行う。そして、実地盤に適用する際の利用マニュアルの作成を目標に実験的検討を行った結果について報告する。

研究成果の概要（英文）：

The recycling process of leftover gypsum boards from new construction and demolition sites currently requires intermediate treatment. The boards are separated into their paper and gypsum components and the non-recyclable components are discarded into controlled landfills. However, problems such as landfill capacity shortage and the refusal of privately owned landfills to accept such materials have made the recycling of discarded gypsum an urgent challenge. Bassanite produced by heat-treating the dihydrate gypsum obtained from discarded gypsum boards, solidifies when water is added. Therefore, research is underway into the exploitation of this characteristic of bassanite for the development of a soil improvement material. In this study, we investigate the applicability of recycled bassanite as a material for soil improvement using existing soil.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：再生半水石膏・土質改良・高含水比泥土・改良強度特性・フッ素・溶出特性・硫化水素

## 1. 研究開始当初の背景

現在、新築・解体現場から排出される廃石膏ボードは、紙と石膏に分離・中間処理、リサイクルが出来ないものについては管理型最終処分場へと処分することが義務付けられている。しかし、処分場の容量不足や民間処分場の受入拒否などの問題から、廃石膏の有効利用が急務とされている。

## 2. 研究の目的

廃石膏ボードから得られる二水石膏を焼

成処理して得られる半水石膏（再生半水石膏）は、水を加えると固化する性質を有している。この特徴を利用した地盤改良材としての有効利用技術について、図-1のフローチャートに従い、再生半水石膏による地盤改良材の開発を目的とし、実地盤への適用性についての検討を行う。本報告では、実地盤に適用する際の利用マニュアルの作成を目標に実験的検討を行った結果について報告する。

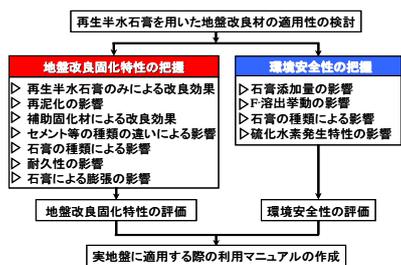


図-1 本研究のフローチャート

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験に用いた試料

##### ① 再生半水石膏

固化材としてIH式半水化装置(130℃～160℃で一定加熱)で焼成されたβ型再生半水石膏を使用した。また、廃石膏の種類、破碎方法の違いに着目して検討を行うため、新築系廃石膏、解体系廃石膏、そして新築、解体をミックスしたものを間接加熱キルンで焼成した再生半水石膏も用いている。さらに、IH式焼成方式で焼成した焼成直後、分級機直後、ミル直後の再生半水石膏を使用した。

##### ② 土質材料

石膏の種類による影響についての検討では、粒度調整されたカオリン粘土を用いた。その他の検討では、まさ土、脱水ケーキ及び福岡市内の現場で採取した海成の博多粘土を2mmふるいにて粒度調整したものを使用した。図-2に実験に用いた試料の粒径加積曲線を、表-1に物理特性を示す。図-2及び表-1より、博多粘土、脱水ケーキ及び再生半水石膏はシルト分で構成されていることが分かる。一方、まさ土は粒径幅が広く、粒度分布の良い試料であることがわかる。さらに、博多粘土は高有機質土であることがわかる。

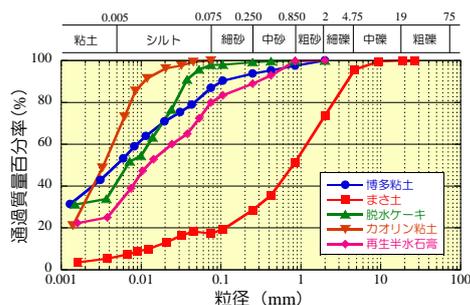


図-2 実験に用いた試料の粒径加積曲線

表-1 物理特性

	博多粘土	まさ土	脱水ケーキ	カオリン粘土	IH式再生半水石膏	石灰灰
粒子密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.737	2.721	2.62	2.731	2.951	2.263
細粒分含有率 $F_c$ (%)	86.90	17.40	100.00	100.0	80.0	97.2
液性限界 $w_L$ (%)	79.65	44.9	58.54	52.1	-	-
塑性限界 $w_p$ (%)	30.94	33.79	37.56	22.6	-	-
塑性指数 $I_p$	48.71	11.11	21.0	29.5	-	-
強熱減量(%)	9.79	-	18.4	3.11	-	-
pH	8.08	-	-	-	7.46	9.93
F(mg/l)	1.21	-	-	-	5.94	3.41

##### ③ 補助固化材

これまでの研究から再生半水石膏のみによる地盤改良効果は小さいことがわかってい

る。そこで本研究では、再生半水石膏の改良を補助する固化材として高炉セメントB種及び生石灰を用いた。

#### (2) 環境安全性の把握

地盤改良固化特性の把握で用いた試料を使用した。全ての検討内容においてイオンクロマトグラフによりふっ素(F)溶出濃度を測定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 地盤改良固化特性の把握

###### ① 再生半水石膏による地盤改良

表-2に再泥化特性を検討した配合条件を、表-3に再生半水石膏のみに着目した配合条件を示す。

表-2 配合条件(再泥化)

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 $t_c$ (day)
脱水ケーキ	$W_{opt}=26.7$	0	7
	$W_{opt}=30.9$	200	
	$W_{opt}=30.9$	280	
博多粘土	65%	75, 100, 150	

表-3 配合条件(再生半水石膏)

土質試料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 $t_c$ (day)
博多粘土	65	50	3
	70		
	75		
	80		
	85		
	90		
	95		
	100		

供試体については、博多粘土は安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法(JGS0821-2000)に準じて、まさ土及び脱水ケーキは、含水比を最適含水比に調整し、締固め試験結果から締固め密度 $D(\rho_d/\rho_{dmax})=95\%$ とし、直径 $\phi=5$ cm、高さ $h=10$ cmのモールドに5層で突き固めて作製したものについて一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った。また、再泥化による影響については、供試体作製後7日間気中養生を行った後、蒸留水(1500g)に供試体を水浸させ、1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240分、1日、7日後に観察、記録し、表-4に示す再泥化区分に従い分類を行った。

表-4 再泥化区分

区分	1	2	3	4	5	6
形状						
状態	変化なし	角が崩れる程度	周囲のひび割れが顕著	再泥化開始	半分が再泥化	完全に再泥化

ここで各々の固化材の添加量については、乾燥土1m<sup>3</sup>に対する質量比を示している。図-3に再生半水石膏添加量と一軸圧縮試験強さの関係を示す。図に示すように脱水ケーキは強熱減量が18.4%と高有機質土であるにも関わらず、石膏添加量が増加するにつれて強度

が増加し、一般盛土材としての目目標強度 ( $q_u: 100\text{kN/m}^2$ ) を満足していることがわかる。一方で、博多粘土は、建設汚泥 ( $q_u: 50\text{kN/m}^2$ ) と判断される強度を示した。以上より、再生半水石膏を地盤改良材として粘性土に用いる際は、含水比の影響が大きく、強度発現が含水比に依存し、さらに土質試料の違いと固化材混合方法の違いにより固化特性が異なることが明らかとなった。

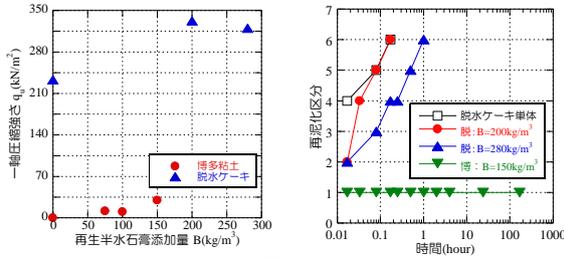


図-3 再生半水石膏添加量と一軸圧縮強さの関係 図-4 再泥化試験結果

よって、施工前の段階で土の性状を把握し、室内試験によって配合量を決定する必要があると示唆される。図-4 に再泥化試験結果を示す。脱水ケーキ単体では、水浸直後に再泥化が開始し、水浸 10 分後には完全に再泥化していることがわかる。また、再生半水石膏のみ添加した脱水ケーキは水浸直後に角が崩れ、水浸 1 日後までには再泥化している。これに対し、高含水比の博多粘土に再生半水石膏を用いた場合は再泥化が起こっていないことがわかる。これは、再生半水石膏による混合・改良方法の違いが大きく寄与していると考えられる。図-5 に含水比と一軸圧縮強さの関係を示す。

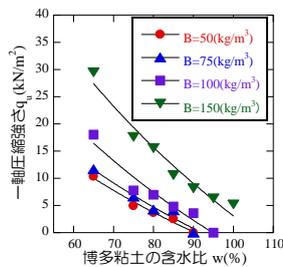


図-5 含水比と一軸圧縮強さの関係

図に示すように、博多粘土の含水比の増加及び再生半水石膏添加量の減少に伴い、一軸圧縮強さが低下していることがわかる。また、全ての条件において再生半水石膏の凝結硬化作用のみでは、汚泥と判断される  $q_u=50\text{kN/m}^2$  以下の強度の発現しか得られないことがわかる。特に  $w=100\%$  の条件において、再生半水石膏の凝結硬化作用が発揮したものは、添加量  $150\text{kg/m}^3$  の場合のみであり、再生半水石膏による凝結硬化は、対象土の含水比に大きく依存しており、高含水比粘性土を改良する限界含水比が存在することがわかる。また、石膏硬化体の強度に最も影響す

る因子は含有水分であることが報告されているため、再生半水石膏を地盤改良材として使用する際には、現地土壌の含水比を考慮した上で、再生半水石膏の配合量の検討を行う必要があることが挙げられる。

## ② 補助固化材による改良効果

表-5 に補助固化材として高炉セメント B 種を混入させた配合表を示す。図-6 に養生 7 日での補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。

表-5 配合条件(再生半水石膏+高炉セメント B 種)

土質材料	含水比 $w$ (%)	再生半水石膏 B ( $\text{kg/m}^3$ )	高炉セメント B 種 $B_c$ ( $\text{kg/m}^3$ )	養生日数 $t_c$ (day)
博多粘土	100	75	35	7
			45	
			55	
			65	
			75	
博多粘土	120	150	35	7
			45	

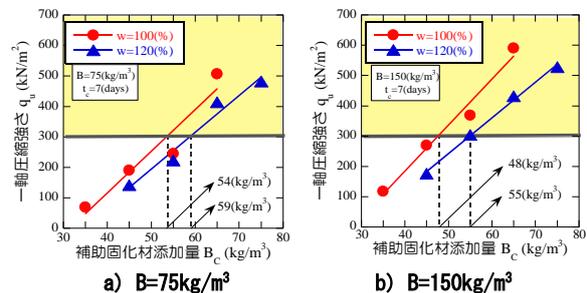


図-6 補助固化材添加量と一軸圧縮強さの関係(養生 7 日)

図中の色枠は浅層混合処理工法の要求強度である  $300\text{kN/m}^2$  以上を示している。いずれの条件ともに、補助固化材添加量が増加するにつれて大きな強度発現を呈していることが分かる。これは、再生半水石膏のみの強度発現と比較しても明らかである。また、全ての条件において補助固化材添加量と一軸圧縮強さの相関性が良く、目標強度である  $300\text{kN/m}^2$  を満足する補助固化材の最低添加量を近似式を用いて推測することができる。図中に要求強度を満足する補助固化材の最低添加量の検討結果を示す。含水比に着目すると、含水比の増加に伴い要求強度に必要な最低添加量が増加していることがわかる。これは、水セメント比 (W/C) の関係によるものと考えられ、近似式を利用して要求値を満足する W/C を導出するとほぼ 13~15 以下であった。次に、再生半水石膏添加量に着目し、(a), (b) を比較すると、再生半水石膏添加量が増加するに伴って図中に示す要求強度を満足する補助固化材最低添加量が減少していることがわかる。これは、再生半水石膏の凝結硬化作用が改良効果に働いたためであると考えられる。実施工を想定した場合、再生半水石膏を添加することで要求強度に必要なセメント量を減少することが可能になると考えられる。

## ③ セメント等の種類の違いが力学特性に

及ぼす影響

表-6 に補助固化材の種類の違いに着目した配合表を示す。本検討では、一軸圧縮試験により行っている。

表-6 配合条件(補助固化材の種類の違い)

土質試料	含水比 w(%)	固化材 再生半水石膏 添加量 B(kg/m <sup>3</sup> )	補助固化材 生石灰/高炉セメントB種 添加量 Ca/Bc(kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 t <sub>c</sub> (day)
博多粘土	100	0, 100, 200	100	3, 7, 14, 28,

コーン指数試験の供試体は、モールド(直径φ=100mm, 高さ h=126mm)に入れ、各層突固め40回、3層に分けて打設した。また、モールド内に突固める際には、一軸圧縮試験結果と同様の締固め度 D=95%になるように、タンピング法にて供試体を作製した。図-7(a), (b)にそれぞれ生石灰、高炉セメントB種添加量100kg/m<sup>3</sup>における養生日数と一軸圧縮強さの関係(凡例は、B:再生半水石膏、Ca:生石灰、Bc:高炉セメントB種)を示す。

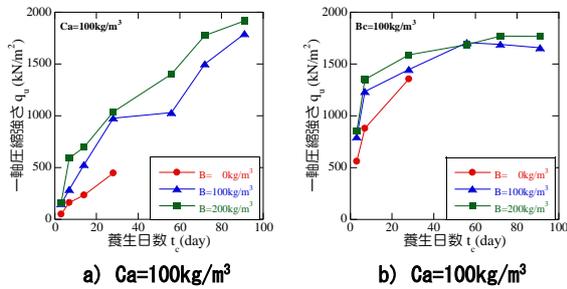


図-7 養生日数と一軸圧縮強さの関係

養生日数に伴い一軸圧縮強さは増加しており、3ヶ月に及ぶ長期養生後も安定した強度発現が認められる為、再生半水石膏を混合した改良土は長期的にも安定した強度が得られる事が判明した。また、補助固化材の種類の違いに着目すると、生石灰混合による改良土は、長期に伴って一軸強度が一定値に落ち着かず増進している。これは、生石灰の特徴であるポズラン反応が原因とみられる。一方、高炉セメントB種は、養生3日後から急な強度増加を示すが、56日を越えると強度増加が一定値に落ち着く傾向を示している。したがって、早期に軟弱地盤のトラフィカビリティーの改善を図る場合に、高炉セメントB種は有効であると言える。

④ 再生半水石膏地盤改良土の耐久性の影響

配合条件を表-7に示す。

表-7 配合条件(耐久性の検討)

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m <sup>3</sup> )	高炉セメントB種 Bc (kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 t <sub>c</sub> (days)
博多粘土	100	100	50	7
		200		

実験手順については、ASTM D-4843(Wetting and Drying Test of Soil Wastes)に従った。

実験条件を表-8に示す。

表-8 乾湿繰返し試験の実験条件

供試体サイズ	φ50mm×h100mm	
暴露条件	乾燥過程	湿潤過程
温度・時間	60℃一定で24時間炉乾	純水に23時間浸漬
液固比	—	10
サイクル数	15	
pH	5.8~6.3	

所定のサイクル数を終えた供試体について、一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行い、改良土の耐久性の評価を行った。また、乾湿繰返し試験を行う前に、改良土の長期養生時の強度特性の検討を行った。図-8の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。再生半水石膏とセメントによる改良土は56日以降安定した強度を保っていることがわかる。そこで、改良土の耐久性について乾湿繰返し試験を行った。図-9、図-10に乾湿両条件ともに、乾湿繰返し作用を受けることによって体積または質量の収縮・膨張を繰り返す傾向が見られる。しかし膨張比については、日数が経過するにつれて一定の値に推移していることから、長期的には体積変化はあまり変動せず一定値に収束していくことが予想される。

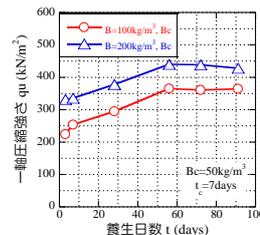


図-8 養生日数と一軸圧縮強さの関係

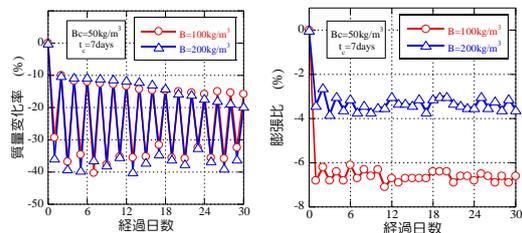


図-9 乾湿繰返しに伴う質量変化

図-10 乾湿繰返しに伴う体積変化

また、再生半水石膏添加量に着目すると、添加量が多い条件のものが膨張比は低い傾向を示していることがわかる。これは、再生半水石膏の添加による固結力の増加により、膨張に対する引張抵抗力が生じたためであると考えられる。図-11に所定の乾湿繰返しサイクル後と一軸圧縮強さの関係を示す。

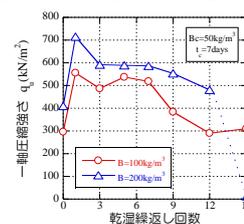


図-11 乾湿繰返し回数と一軸圧縮強さの関係

図に示すように、全ての条件において養生 7 日の値と比較して乾湿繰返し後初期に大きな強度発現が見られる。これは、乾燥による収縮と高温養生による安定処理効果に起因していると考えられる。その後、乾湿繰返しサイクルを重ねるにつれて一軸圧縮強さが低下していることがわかる。しかし、15 サイクルにおいても 300 kN/m<sup>2</sup> の強度を有していることが分かる。また、乾湿繰返しに伴う強度低下は乾燥過程において間隙中の水分が脱水し、乾燥収縮により土粒子の結合（サクシオン）が切れクラックが発生し、乾湿繰返しにより強度が低下したことが要因である。

## (2) 環境安全性の把握

### ① 石膏添加量の影響

表-5 に配合条件を示す。試料は、一軸圧縮試験後の破壊断片を回収したものを使用し、環告 46 号法試験に準拠した方法で溶出試験を行った。図-12 に養生 7 日における補助固化工材添加量、F 溶出濃度及び pH の関係を示す。

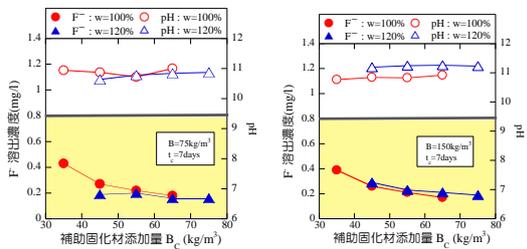


図-12 補助固化工材添加量と F 溶出濃度と pH の関係(養生 7 日)

色枠は F の土壤環境基準値を示している。pH に着目するといずれの条件でも高炉セメント B 種の添加により 10~12 のアルカリ性を示していることがわかる。F 溶出濃度に着目すると、全ての条件においてセメント添加量が増加するにつれ、漸次低下していることがわかる。これはセメント水和物の生成により F が固定されたためであると考えられる。

### ② 補助固化工材の種類による影響

表-6 に配合条件を示す。試料は、一軸圧縮試験後の破壊断片を回収したものを使用し、環告 46 号法試験に準拠した方法で溶出試験を行った。図-13 に補助固化工材である生石灰と高炉セメント B 種を用いた改良土における、養生日数とふっ素溶出濃度の関係を示す。pH に着目すると、改良土は両補助固化工材を用いる事により、強アルカリ性を示している事が分かる。

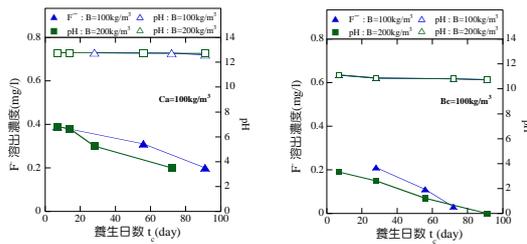


図-13 養生日数とふっ素溶出濃度、pH の関係

したがって、再生半水石膏と補助固化工材を地盤改良材として実地盤へ用いた場合、アルカリ環境下の為、硫化水素は発生し難くなると考えられる。また、生石灰を添加した方が、高炉セメント B 種と比較して高い pH を示している。これは、酸化カルシウムが水溶液となった時、水酸化カルシウムとなり強塩基性を呈する為だと考えられ、高炉セメント B 種より生石灰の方が酸化カルシウムの含有量が多い為、高い pH を示していると考えられる。ふっ素溶出濃度に着目すると、補助固化工材の種類の違いに関係なく養生日数が経過するにつれて溶出濃度が低下しており、いずれも土壤環境基準値である 0.8mg/L 以下を示している事が分かる。これは、生石灰の場合、水と反応して消石灰となった後、土中の粘土鉱物と結びつき、エトリンガイトが生成される事によってふっ素が固定され、溶出を抑制した為であると考えられる。高炉セメント B 種の場合も、含有している生石灰によって同じ効果が働いたと考えられる。

### ③ 実地盤を想定した際の F 溶出挙動の影響

本検討では、施工される処理土の周辺地盤を想定したまさ土による F 吸着特性に着目した。表-9 に実験条件を示す。

表-9 カラム試験の実験条件

Case No	土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏 B (kg/m <sup>3</sup> )	高炉セメント B 種 B <sub>c</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 t <sub>c</sub> (day)	覆土
1	博多粘土	100	100	50	7	なし
2			200			まさ土
3			0	なし		
4			0	まさ土		
5	まさ土	初期含水比	0	0	0	

供試体は、廃棄物資源循環学会標準試験(草案)の規格に従い、125g のランマーを落下高さ約 20cm、落下回数 3 回として充填高さが 30±5cm になるように 5 層に分けて狭径カラムに突き固めて作製した。溶媒には、pH5.8~6.3 に設定した蒸留水を用い、試料を通過する流出液の速度はポンプを用い上向流で 12mL/h になるように調整した。また、採水は所定の採水条件に従った。図-14 にカラム試験による pH と L/S の関係、図-15 に累積 F 溶出濃度と L/S の関係を示す。Case No. 1, 3 の覆土なしの条件では、高炉セメント B 種を添加した影響からアルカリ性を示していることがわかる。しかし、Case No. 2, 4 の覆土ありの条件に着目すると、Case No. 5 のまさ土のみの条件と同様に溶媒の pH の中性を保っていることがわかる。

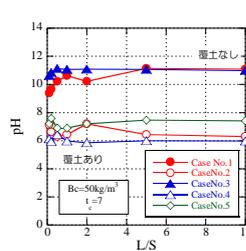


図-14 pH と L/S の関係

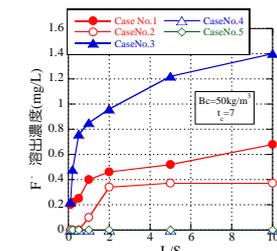


図-15 累積 F 溶出量と L/S の関係

次に図-15のF溶出濃度に注目すると、Case No. 2, 4の覆土ありの条件でのF溶出濃度は、Case No. 1, 3の覆土なしの条件と比べて著しく低下していることがわかる。これらは、まさ土の吸着効果によるものと考えられる。実地盤への適用を想定した場合、改良土表面からはFの溶出や、pHの低下が予想されるが、透水性が低い場合改良土内部のアルカリ分や重金属等は溶出しにくいことが考えられる。そのため、今回比較的溶出しやすい条件を想定した検討結果において環境的に安全な結果が得られたことから、実地盤への適用を想定した場合、改良土表面からはふっ素の溶出や、pHの低下が予想されるが、透水性が低い場合、移流による改良土内部のアルカリ分や重金属等は溶出しにくいことが考えられる。今後、拡散による溶出について評価していく事も重要である。

#### ④ 硫化水素発生特性の影響

表-7に配合条件を示す。4-(1)-④で得られた一軸圧縮試験後の破壊断片を2mmふるいにて通過させたものについて硫化水素ガス発生試験を行った。表-10に硫化水素発生試験の結果を示す。表に示すように硫化水素ガスはほとんど発生していないことがわかる。

表-10 硫化水素発生試験結果

土質材料	含水比 w(%)	高炉セメントB種 Bc(kg/m <sup>3</sup> )	再生半水石膏添加量 B(kg/m <sup>3</sup> )	サイクル数 C(time)	硫化水素ガス (ppm)
博多粘土	100	50	100	1	0
				3	0
				5	0
				7	0.2
				9	0.2
				12	0.1
				15	0
			200	1	0
				3	0
				5	0
				7	0.1
				9	0.3
				12	0.1
				15	0.1

これは、博多粘土の場合、微粒子なので比表面積が大きく土中の酸化物と硫化水素が反応して硫化物として固定されたためであると考えられる。以上の結果を踏まえ、ヨウ素滴定試験を行い、硫化物を確認した。図-16に硫化物とサイクル数の関係を示す。図に示すように初期値とサイクル経過後での値を比較すると倍以上の差がないことから硫化物は発生していないと考えられる。また、サイクル数が増加するにつれて値は低くなっているが、これは元々の博多粘土中に硫化物

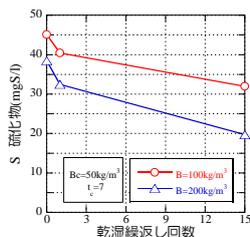


図-16 硫化物とサイクル数の関係

が含有されており、乾湿繰返し試験の際に硫

化物を含む微粒子が剥離したためであると考えられる。

#### (3) 結論

地盤改良固化特性の評価：再生半水石膏を用いた地盤改良材は、石膏単体では大きな強度発現は得られないが、補助固化材としてセメントあるいは生石灰等を添加することで、長期的に安定した強度を保つ改良土となる。

環境安全性の評価：再生半水石膏からのF及び硫化水素は、セメント等の補助固化材を添加することで抑制できる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 22 件)

- ① 吉田英史, 佐藤研一, 藤川 拓朗, 押方利郎, 大山勝寿:再生半水石膏を用いた軟弱地盤改良効果の力学特性と環境安全性の検討, 第9回環境地盤シンポジウム, 査読有, 2011年10月6日, 京都大学.
- ② Kenichi Sato and Toshiro Oshikata: Mechanical and Leaching Characteristics of Soil Materials Improvement with Bassanaite, Proceedings of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics (6ICEG), 査読有, 2010年11月8日, インド
- ③ 佐藤研一, 吉田英史, 押方利郎, 武下俊宏, 大山勝久:再生半水石膏を用いた地盤改良効果と環境安全性の検討, 日本材料学会, 第9回地盤改良シンポジウム論文集, 査読有, 2010年11月18日, 福井県民ホール
- ④ 伊藤恵輔, 佐藤研一, 押方利郎, 大山勝久:廃石膏ボードから得られる半水石膏の地盤改良材への適用性の検討, 地盤工学会, 第8回環境地盤工学シンポジウム論文集, 査読有, 2009年7月16日, 秋田県立大学.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

佐藤 研一 (SATO KENICHI)  
福岡大学・工学部・教授  
研究者番号: 20235336

##### (2) 研究分担者

押方 利郎 (OSHIKATA TOSHIRO)  
福岡大学・研究推進部・教授  
研究者番号: 60465713

##### (3) 連携研究者 なし