

# 再生半水石膏を用いた地盤改良材の耐久性に関する研究

廃石膏ボードリサイクル（課題番号：127004）

研究期間：平成 24 年 7 月 26 日～平成 27 年 3 月 31 日

研究代表者：佐藤研一 研究員：樋口壯太郎

土木学会西部支部研究発表会 2013年3月

## 新築系再生半水石膏の混合率の違いが 軟弱地盤改良効果に及ぼす影響

福岡大学 学生会員 松尾典映

福岡大学 正会員 佐藤研一 藤川拓朗 古賀千佳嗣



写真-1 新築系石膏



写真-2 解体系石膏

### 1. はじめに

廃石膏ボードの埋立処分は処分後における硫化水素発生問題が顕著化したため、中間処理後管理型処分場への処分が義務化されている<sup>1)</sup>。また、石膏ボード工業会の資料<sup>2)</sup>によると、廃石膏ボードの総排出量は、今後増加すると見込まれている。しかし、廃石膏ボードのリサイクル実績不足が指摘されており、リサイクル技術開発および用途開発は急務な課題とされている。廃石膏ボードには、新築工事現場などで発生する新築系廃石膏ボード(写真-1)及び建築物の解体時に発生する解体系廃石膏ボード(写真-2)が中間処理施設に持ち込まれている。著者らはこれまでに、廃石膏ボードから焼成処理して製造される再生半水石膏を軟弱地盤改良材として有効利用する技術の研究<sup>3)</sup>を行っている。現在中間処理施設では、新築系及び解体系石膏を区別せず廃石膏ボードを同時に破碎焼成処理している。そこで、本研究では特に品質が安定している新築系廃石膏ボードに着目し、解体系再生半水石膏に一定割合で新築系再生半水石膏を混合した再生半水石膏による軟弱地盤改良効果の検討を行った結果について報告する。

### 2. 地盤改良固化特性の把握

#### 2-1 実験に用いた試料

実験には、間接加熱キルンで焼成処理された新築系再生半水石膏及び解体系再生半水石膏の2種類を使用した。土質材料としてカオリン粘土を用いた。また、これまでの研究<sup>3)</sup>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分かっている。そこで改良効果を補助する固化材として高炉セメントB種を用いた。図-1及び表-1に実験に用いた土質材料の粒径加積曲線と物理特性を示す。

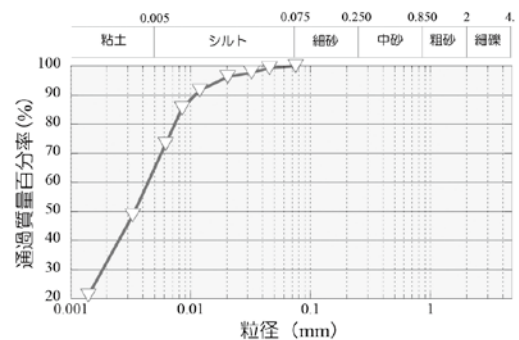


図-1 粒径加積曲線(カオリン粘土)

表-1 物理特性

	カオリン粘土
自然含水比 $w$ (%)	0
粒子密度 $\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	2.731
細粒分含有率 $F_c$ (%)	100.0
液性限界 $w_L$ (%)	52.10
塑性限界 $w_P$ (%)	22.60
塑性指数 $I_P$	29.46
強熱減量(%)	3.11

2-2検討内容

改良土の力学特性は、一軸圧縮試験(JISA 1216)より評価した。表-2に再生半水石膏の配合条件を示す。今回の検討では、解体系再生半水石膏に対する新築系再生半水石膏の混合率を $N=0, 50, 100\%$ の3種類とし、再生半水石膏の品質の違いが軟弱地盤改良効果に及ぼす影響について着目した。供試体の作成については、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法<sup>4)</sup>(JGS0821-2000)に準じて、直径 $\phi=5$ (cm)×高さ $h=10$ (cm)の塩ビ製モールドに入れ3層に分けてタンピング法により打設した。供試体は翌日整形、翌々日に脱型し、供試体をラップに包み $20^\circ C$ 一定の恒温室内で所定日数養生させ、一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った。ここで各添加量は、乾燥土 $1 m^3$ に対する質量比である。また、表-3に今回タンピング法にて作製した新築系石膏混合率 $N=50\%$ における供試体の湿潤及び乾燥密度を示す。各条件において、供試体密度はほぼ一定の密度で作製され、さらに再生半水石膏の混合量の増加及び含水比の低下に伴い、密な供試体になっていることが分かる。また、今回の全ての実験結果を養生日数 $t_c=7$ daysの条件を用いて考察を行った。

表-2 配合条件

Case	石膏の種類	再生半水石膏 $B$ ( $kg/m^3$ )	設定含水比 $W$ (%)	新築系石膏混合率 $N$ (%)	補助固化工材 $B_c$ ( $kg/m^3$ )	養生日数 $t_c$ (days)
1	新築系	100	80	0	50	7
		200	100			
2	解体系	100	100	50	50	7
		300	120	100		

表-3 湿潤密度及び乾燥密度

新築系石膏混合率 $N$ (%)	設定含水比 $W$ (%)	再生半水石膏 $B$ ( $kg/m^3$ )	湿潤密度 $\rho_t$ ( $g/cm^3$ )	乾燥密度 $\rho_d$ ( $g/cm^3$ )
50	80	100	1.557	0.939
		200	1.597	0.993
	100	100	1.514	0.840
		200	1.550	0.889
		300	1.565	0.939
		120	300	1.531

3. 結果及び考察

図-2に含水比 $w=100\%$ 、再生半水石膏添加量 $B=100kg/m^3$ に対する新築系石膏混合率 $N=0, 50, 100\%$ における一軸圧縮試験結果を示す。改良土の力学特性は、新築系石膏混合率が増加するほど最大圧縮応力は増加していることが分かる。また、改良土の一軸圧縮挙動は明確なピーク

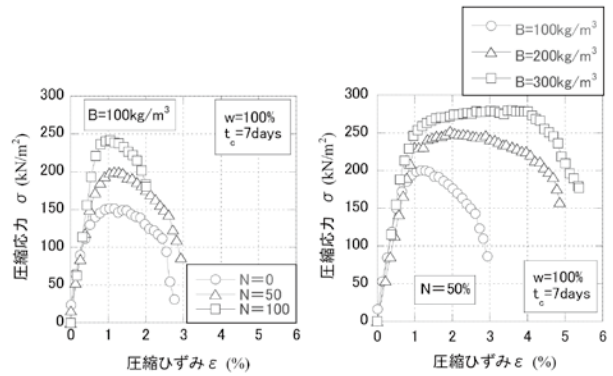


図-2 一軸圧縮試験結果 (B=100kg/m³ w=100%t=7)

図-3 一軸圧縮試験結果 (N=50%w=100%t=7)

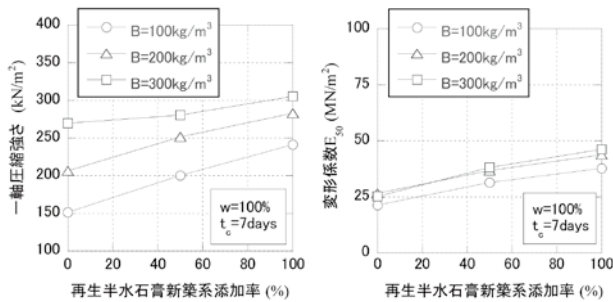


図-4 新築系石膏の混合率と一軸圧縮強さの関係

図-5 新築系石膏の混合率と変形係数の関係

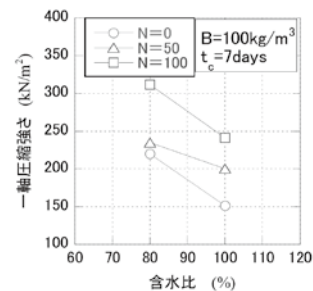


図-6 含水率と一軸圧強さの関係

強度を示し、新築系石膏混合率の増加に伴いピーク強度も大きくなっている。解体系石膏ボードは、建築物の一部として長期間使用され、建築物の解体時に発生することから、石膏ボード単体として排出されず、ビニールクロスやモルタル、木くず、金属くずなどを伴って排出される。また、倉倉ら<sup>5)</sup>の報告によると解体系石膏ボードは製造年数の違いにより品質は大きなバラつきがあると報告されている。このことから新築系石膏混合率による最大圧縮応力の違いは、解体系石膏に含まれる不純物や品質が発現強度を阻害し、新築系石膏混合率の増加に伴って再生半水石膏の改良効果が増加したと考察できる。図-3に再生半水石膏添加量に着目した含水比 $w=100\%$ 及び新築系石膏混合率 $N=50\%$ における一軸圧縮試験結果を示す。一軸圧縮強さは再生半水石膏添加量の増加に伴い大きくなっている。しかしながら、再生半水石膏添加量が増加するに伴いピーク強度が見られず延性的な挙動を示している。図-4に新

築系石膏混合率と一軸圧縮強さの関係を示す。全ての条件において、新築系石膏混合率が増加するに伴い一軸圧縮強さは増加している。さらに、再生半水石膏添加量が増加するに伴い一軸圧縮強さは大きくなっている。しかしながら、再生半水石膏添加量の増加に伴い、新築系石膏の混合率による一軸圧縮強さの増加傾向は小さくなっている。このことは表-2に示すように、再生半水石膏添加量の増加に伴う供試体密度の増加は、改良土の強度増加に繋がらないことを意味している。これは再生半水石膏添加量及び新築系石膏混合率の増加に伴う吸水性の向上により、混合時固化効果が働き供試体の不均一性を引き起こしたことが一つの要因として考えられる。図-5に新築系石膏混合率と変形係数 $E_{50}$ の関係を示す。多少バラつきは見られるものの、新築系石膏混合率が増加するに伴い変形係数も増加している。このことから、再生半水石膏によって改良された材料では、再生半水石膏添加量の増加、新築系廃石膏添加率の増加に伴い、初期剛性も上昇することが分かる。図-6に再生半水石膏添加量 $B=100\text{kg/m}^3$ における粘土の初期含水比と一軸圧縮強さの関係を示す。全ての条件において含水比が増加するに伴い、一軸圧縮強さは低下している。また、新築系石膏混合率が増加するに伴い、一軸圧縮強さは大きいことが分かる。このことから、再生半水石膏による改良土の強度は、新築系の混合率に関係なく対象土の設定含水比に大きく依存することが示された。

#### 4. まとめ

- 1) 新築系石膏の混合率が増加するに伴い、改良土の一軸圧縮強さ及び変形係数は増加する。
- 2) 軟弱粘土改良に伴う再生半水石膏混合量及び新築系石膏混合率の増加は、石膏による初期固化効果の影響が見られることから材料特性の把握には工夫が必要である。

#### 参考文献

- 1) 廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱いについて(通知)(環廃産発第060601001号平成18年6月1日)。
- 2) 廃石膏ボードの対応策について(社団法人石膏ボード工業会2010年5月)。
- 3) 吉田ら:再生半水石膏による地盤改良材の力学特性と環境安全性について,第22回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集,pp.207-208,2011。
- 4) 地盤工学会:土質試験の方法と解説-第一回改正版-安定処理土の締固めをしない供試体作製,PP.308-316,2000。
- 5) 肴倉ら:廃石膏ボード20試料の微量元素組成と溶出

特性の類型化,第9回環境地盤工学シンポジウム論文集,pp.159-162,2011。

第48回地盤工学研究発表会(富山)2013年7月

### 再生半水石膏の品質が 軟弱地盤改良効果に及ぼす影響

福岡大学大学院 学生会員 ○松尾典映  
福岡大学工学部  
国際会員 佐藤研一 藤川拓朗 古賀千佳嗣

#### 1. はじめに

廃石膏ボードの埋立破棄処分は、処分場内の硫化水素発生問題が顕在化したため、紙と石膏を分離する中間処理後、管理型処分場への廃棄が義務化されている<sup>1)</sup>。また、石膏ボード工業会の資料<sup>2)</sup>によると、廃石膏ボードの総排出量は、今後さらに増加することと見込まれている。そのため、リサイクル技術および用途開発は急務な課題とされている。廃石膏ボードは、新築工事現場などで発生する新築系廃石膏ボード(写真-1)及び建築物の解体時に発生する解体系廃石膏ボード(写真-2)が中間処理施設に持ち込まれている。現在、再生半水石膏の中間処理施設では、新築系及び解体系廃石膏ボードを区別せず同時に破碎・焼成処理している。そのため、生産される再生半水石膏は新築系及び解体系廃石膏ボードの混合率の割合によって品質が一定に保たれていないなどの問題が考えられる。そこで、本研究では再生半水石膏の品質の違いが改良土の力学特性に及ぼす影響について検討を行った。検討では、特に品質が安定している新築系廃石膏ボードに着目し、解体系再生半水石膏に一定割合で新築系再生半水石膏を混合した再生半水石膏による軟弱地盤改良効果の検討を行った結果について報告する。



写真-1 新築系廃石膏



写真-2 解体系廃石膏

#### 2. 実験概要

##### 2-1 実験試料

実験には、間接加熱キルンで焼成処理された新築系再生半水石膏及び解体系再生半水石膏、現在生産されている通常再生半水石膏(以下、通常石膏)の3種類を使用し

た。土質材料として、カオリン粘土を用いた。また、これまでの研究<sup>3)</sup>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分かっている。そこで改良効果を補助する固化材として高炉セメントB種を用いた。

## 2-2実験方法

表-1に再生半水石膏の配合条件を示す。今回の検討では、再生半水石膏混合率を $B=100, 200, 300\text{kg/m}^3$ の3種類、解体系再生半水石膏に対する新築系再生半水石膏の混合率を $N=0, 25, 50, 75, 100\%$ の5種類とし、再生半水石膏の混合率及び品質の違いが軟弱地盤改良効果に及ぼす影響について着目した。また、通常石膏を比較対象として用いた。供試体の作製法については、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法<sup>4)</sup>(JGS 0821-2000)に準じて、直径 $\phi=5\text{cm}$ ×高さ $h=10\text{cm}$ の塩ビ製モールドに入れ、3層に分けてタンピング法により打設した。供試体は翌日整形、翌々日に脱型し、供試体をラップに包み $20^\circ\text{C}$ 一定の恒温室内で所定日数養生させ、一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った。ここで各混合量は、乾燥土 $1\text{m}^3$ に対する質量比である。

表-1 配合条件

石膏の種類	設定含水比 W (%)	再生半水石膏 混合量 B ( $\text{kg/m}^3$ )	他種石膏 混合率 (%)	補助固化材 混合量 $B_c$ ( $\text{kg/m}^3$ )	養生日数 $t_c$ (day)
新築系石膏	80	100	0	50	7
	100	200	25		
解体系石膏	100	300	50		
	120		75		
通常石膏	120	100	100		
	80	0	0		
	100	100			
	120	200			
		300			

## 3. 実験結果及び考察

### 3-1通常石膏による改良効果

図-1に含水比 $w=100\%$ 、養生日数 $t_c=7\text{day}$ の通常石膏の一軸圧縮試験結果を示す。再生半水石膏混合量が増加すると、せん断に伴う圧縮応力が増加していることが分かる。また、再生半水石膏を混合しない $B=0\text{kg/m}^3$ と、混合させた $B=100, 200, 300\text{kg/m}^3$ では明らかに一軸圧縮挙動が異なっている。 $B=0\text{kg/m}^3$ では、圧縮ひずみ1%程度で明確なピーク強度を示し破壊に至っている。一方、 $B=100, 200, 300\text{kg/m}^3$ では、 $B=0\text{kg/m}^3$ より大きい最大圧縮応力を示し、再生半水石膏混合量が増加するに伴い、大きなピーク強度を示す傾向にある。また、石膏混合量の増加に伴い、ピーク強度を示す圧縮ひずみが大きくなる傾向を示している。図-2に再生

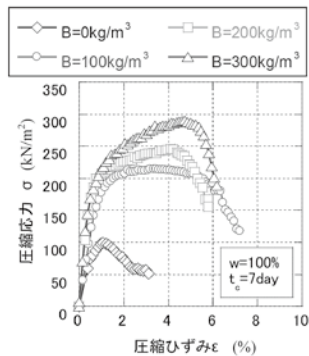


図-1 通常出荷再生半水石膏の一軸圧縮試験結果

半水石膏混合量と一軸圧縮強さの関係を示す。再生半水石膏混合量が増加するに伴い、一軸圧縮強さは増加していることが分かる。セメントのみの改良土 $B=0\text{kg/m}^3$ と石膏混合改良土 $B=100\text{kg/m}^3$ では約2倍の強度増加を示し、石膏混合に伴う改良効果が大きいことが分かる。また、再生半水石膏混合量の増加に伴い段階的に一軸圧縮強さが増加している。このことから、セメントのみの改良土に石膏を混合させることにより、養生日数が短い段階において高い固化作用をもたらすことが分かる。これは、再生半水石膏が持つ高い吸水性が一つの要因として挙げられる。図-3に再生半水石膏混合量と一軸圧縮試験時の含水比の関係を示す。再生半水石膏混合量の増加に伴い、一軸圧縮試験時の含水比は減少効果にあることが分かる。これは、再生半水石膏は吸水性が良いため、固化作用がセメント系固化材の固化作用より急速に促進されると考えられる。このことから、再生半水石膏の混合は、粘性土の改良において早期固化作用が期待でき、短期間に強度発現が望める材料であることが分かる。

### 3-2新築系石膏による改良効果

図-4に含水比 $w=100\%$ 、再生半水石膏混合量 $B=100\text{kg/m}^3$ に対する新築系石膏混合率 $N=0, 25, 50, 75, 100\%$ における一軸圧縮試験結果を示す。改良土の力学特性は、新築系石膏混合率が増加すると、せん断に伴う圧縮応力は増加していることが分かる。また、改良土の一軸圧縮挙動は明確なピーク強度を示し、新築系石膏混合率の増加に伴いピーク強度も大きくなっている。解体系廃石膏ボードは、建築物の一部として長期間使用され、建築物の解体時に発生することから、石膏ボード単体として排出されず、ビニールクロスやモルタル、木くず、金属くずなどを伴って排出される。また、倉倉ら<sup>5)</sup>は、解体系石膏ボードは製造年数の違いにより、品質は大きなバラつきがあると報告している。つまり、製造技術及び施工管理などの点から、製造年数が古くなるほど、品質が悪いと言える。また、品質が悪いとされる年代の廃石膏ボード排出量は、建設物の老朽化による取り壊しから増加が予想される。このことから、新築系石膏混合率による最大圧縮応力の違いは、解体系石膏に含まれる不純物や品質が半水化を妨げ、改良効果を阻害し、新築系石膏混合率の増加に伴って一軸圧縮強さが増加したと考えられる。図-5に新築系石膏混合率と一軸圧縮強さの関係を示す。また、図中に通常石膏の一軸圧縮強さをそれぞれ点線で示している。石膏混合量が増加しても全ての条件において、新築系石膏混合率が増加するに伴い一軸圧縮強さは増加している。また、再生半水石膏混合量が増加するに伴い一軸圧縮強さは大きくなっている。しかしながら、再生半水石膏混合量の増加に伴い、新築系石膏の混合率による一軸圧縮強さの増加傾向は小さくなっている。これは、3-1で述べた石膏混合に伴う吸水性の向上によって引き起こされる早期固化作用に

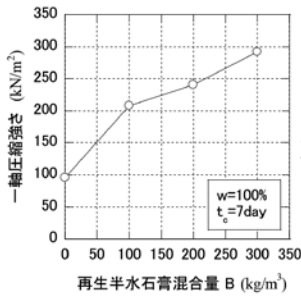


図-2 通常再生半水石膏の混合率と一軸圧縮強さの関係

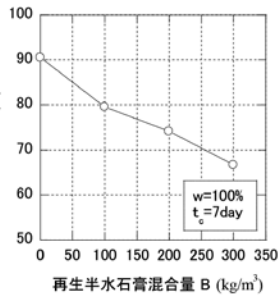


図-3 通常再生半水石膏の混合率と含水比の関係

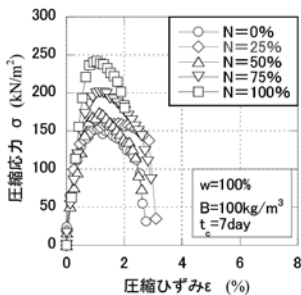


図-4 一軸圧縮試験結果 (B=100kg/m³ w=100%tc=7day)

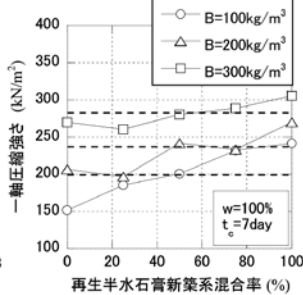


図-5 新築系石膏の混合率と一軸圧縮強さの関係

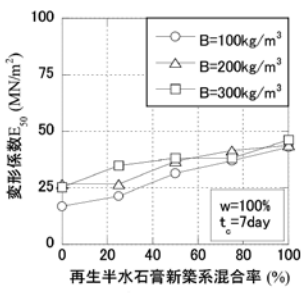


図-6 新築系石膏の混合率と変形係数の関係

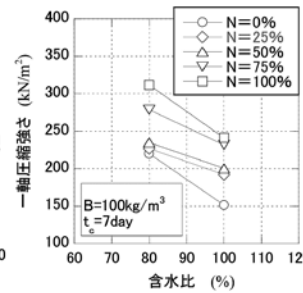


図-7 含水比と一軸圧縮強さの関係

より、供試体の打設時に生じた供試体密度の不均一性が一つの要因として考えられる。次に、通常石膏を各条件と比較すると、いずれの石膏混合量においても、新築系石膏混合率50%と同程度の強度を示していることが分かる。一般的に、中間処理施設に持ち込まれる廃石膏ボードの新築系の割合が1～2割程度と考えると、通常石膏の品質が良いことが分かる。このような強度特性を示した要因として、各々の再生半水石膏の焼成時に生じる半水化率の違いが大きいと考えられる。このことから、再生半水石膏の地盤改良効果は、焼成処理の不純物の撤去と、しっかりとした焼成処理による半水化が重要であると考えられる。図-6に新築系石膏混合率と変形係数  $E_{50}$  (MN/m<sup>2</sup>) の関係を示す。多少バラつきは見られるものの、新築系石膏混合率が増加するに伴い変形係数も増加している。このことから、再生半水石膏によって改良された材料では、再生半水石膏混合量の増加、新築系廃石膏混合率の増加に伴い、初期剛性も上昇することが分かる。図-7に再生半水石膏混合量  $B=100\text{kg/m}^3$  におけるカオリン粘土の初期含水比と一軸圧縮強さの関係を示す。全ての条件において含水比が増加するに伴い、一軸

圧縮強さは低下している。また、新築系石膏混合率が増加するに伴い、一軸圧縮強さは大きいことが分かる。このことから、再生半水石膏による改良土の強度は、新築系石膏の混合率に関係なく対象土の初期含水比に大きく依存することが示された。

#### 4. まとめ

- 1) 再生半水石膏とセメントによる改良はセメント系固化材のみと比べ、早期固化作用があるため、短時間に強度発現を必要とする際に有効である。
- 2) 新築系石膏の混合率が増加するに伴い、改良土の一軸圧縮強さ及び変形係数は増加する。
- 3) 通常石膏は新築系石膏混合率約50%と同程度の改良効果であり、再生半水石膏の品質は焼成時の半水化率が重要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱いについて(通知)(環産発第060601001号平成18年6月1日)。
- 2) 廃石膏ボードの対応策について(社団法人石膏ボード工業会2010年5月)。
- 3) 吉田ら:再生半水石膏による地盤改良材の力学特性と環境安全性について,第22回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集,pp.207-208,2011。
- 4) 地盤工学会:土質試験の方法と解説-第一回改正版-安定処理土の締固めをしない供試体作製,PP.308-316,2000。
- 5) 倉倉ら:廃石膏ボード20試料の微量元素組成と溶出特性の類型化,第9回環境地盤工学シンポジウム論文集,pp.159-162,2011。

第24回廃棄物資源循環学研究発表会講演論文集 2013年11月

## 解体・新築系廃石膏ボード混合率を考慮した再生半水石膏の地盤改良効果とフッ素溶出特性

○(学)松尾典映<sup>1)</sup>、(正)佐藤研一<sup>2)</sup>、(正)藤川拓朗<sup>2)</sup>、(正)古賀千佳嗣<sup>2)</sup>

1)福岡大学大学院、2)福岡大学

【キーワード】再生半水石膏一軸圧縮試験フッ素

### 1. はじめに

廃石膏ボードには、新築系廃石膏ボード(写真-1)及び解体系廃石膏ボード(写真-2)の2種類がある。一般的に、中間処理施設に持ち込まれる廃石膏ボードの割合は『新築系廃石膏ボード：解体系廃石膏ボード=2：8』と言われているが、その量は中間処理施設によって日々変動している。現在、中間処理施設では新築系及び解体系廃石膏ボードを区別せず同時に破碎・焼成処理し、半水石膏及び二水石膏の製造を行っている。また近年の石膏ボードはその品質が向上し、解体系廃石膏ボードと比較すると再生製品からのフッ素含有量も低下しているという研究事例も発表されている<sup>1)</sup>。そこで、本研究では特に品質が安定している新築系廃石膏ボードに着目し、解体系再生半水石膏に一定割合で新築系再生半水石膏を混合させた、再生半水石膏による軟弱地盤改良効果とフッ素溶出特性について報告する。



写真-1 新築系廃石膏



写真-2 解体系廃石膏

## 2. 地盤改良固化特性の把握

### 2-1 実験に用いた試料

実験には、間接加熱キルン方式で焼成処理された新築系再生半水石膏及び解体系再生半水石膏、現在中間処理施設にて生産されている再生半水石膏(以下、通常石膏)の3種類を使用した。また、土質材料としてカオリン粘土を用いた。これまでの研究<sup>2)</sup>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分かっている。そこで改良効果を補助する固化材として高炉セメントB種を用いた。凡例の記号はそれぞれ、w：設定含水比、B：再生半水石膏添加量、N：新築系再生半水石膏混合率、D：解体系再生半水石膏混合率、B<sub>C</sub>：補助固化材添加量、t<sub>c</sub>：養生日数、F<sup>-</sup>：フッ素溶出濃度を示している。

### 2-2 検討内容

改良土の力学特性は、一軸圧縮試験(JISA 1216)より評価した。表-1に解体系及び新築系再生半水石膏混合率に着目した配合条件、表-2に通常石膏を使用した配合条件を示す。今回の検討では、解体系再生半水石膏に対する新築系再生半水石膏混合率をN=0、25、50、75、100%の5種類とし、再生半水石膏の品質の違いが軟弱地盤改良効果に及ぼす影響について着目した。ここで各添加量は、乾燥土1m<sup>3</sup>に対する配合量を示している。供試体の作製法については、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法<sup>3)</sup>(JGS 0821-2000)に準じて、直径φ=5(cm)×高さh=10(cm)の塩ビ製モールドに入れ3層に分けてタンピング法により打設した。供試体は翌日整形、翌々日に脱型し、供試体をラップに包み20℃一定の恒温室内で所定日数養生させた。さらに、再生半水石膏改良土からのフッ素溶出特性の検討では、環境庁告示46号法試験に準拠した方法で行った。得られた検液は、イオンクロマトグラフ(ダイオネクス社製 ICS-1000)によるフッ素溶出量の測定を行った。溶出試験の試料は、一軸圧縮試験後の破壊断片を回収したものを使用した。

表-1 解体系及び新築系再生半水石膏混合率に着目した配合条件

石膏の種類	新築系石膏混合率N (%)	再生半水石膏添加量 B (kg/m <sup>3</sup> )	設定含水比 W (%)	補助固化材添加量 B <sub>C</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 t <sub>c</sub> (day)
新築系石膏	0	100	80	50	7
	25				14
	50				28
解体系石膏	75	100	100	50	54
	100				91

表-2 通常再生半水石膏を使用した配合条件

石膏の種類	設定含水比 W (%)	再生半水石膏添加量 B (kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 t <sub>c</sub> (day)	補助固化材添加量 B <sub>C</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
通常石膏	80	0	7	50
		100	14	
		100	28	
		200	54	

## 3. 実験結果及び考察

### 3-1 力学特性

図-1に一軸圧縮試験結果、図-2に一軸圧縮強さと新築系再生半水石膏混合率Nの関係を示す。改良土の力学特性は、新築系再生半水石膏混合率が増加するほど一軸圧縮強さは増加していることが分かる。N=0%と100%では、約100kN/m<sup>2</sup>ほど一軸圧縮強さに違いが見られ、新築系及び解体系再生半水石膏の混合率の違いは地盤改良効果に影響を与えることが分かる。さらに、再生半水石膏添加量が増加するに伴い、一軸圧縮強さの差も増加していることが分かる。一般に、解体系廃石膏ボードは、建築物の一部として長期間使用され、建築物の解体時に発生することから、石膏ボード単体として排出さ

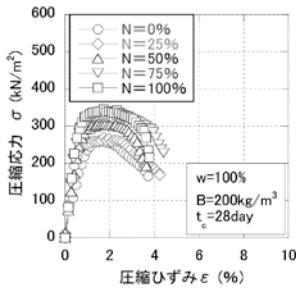


図-1 一軸圧縮試験結果

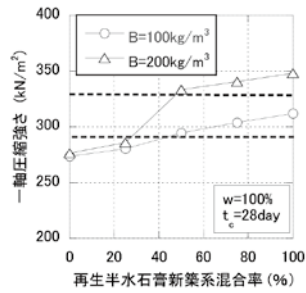


図-2 一軸圧縮強さと新築系再生半水石膏混合率の関係

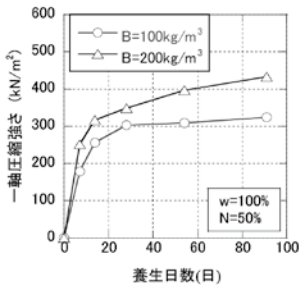


図-3 一軸圧縮強さと養生日数の関係 (N=50%)

表-3 各再生半水石膏単体におけるフッ素溶出濃度

	フッ素溶出濃度 (mg/l)
新築系石膏	4.7
解体系石膏	12.0
通常石膏	8.0

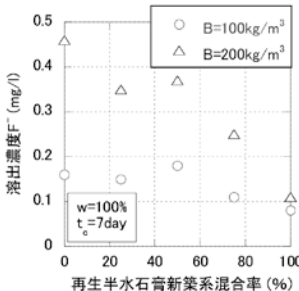


図-4 フッ素溶出濃度と新築系再生半水石膏混合率の関係

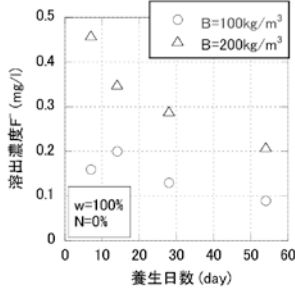


図-5 フッ素溶出濃度と養生日数の関係

れず、ビニールクロスやモルタル、木くず、金属くずなどを伴って排出される。また、肴倉ら<sup>1)</sup>の報告によると解体系廃石膏ボードは製造年数の違いにより品質に大きなバラつきがあると報告されている。このことから新築系再生半水石膏混合率による一軸圧縮強さの違いは、解体系再生半水石膏に含まれる不純物や経過年数による石膏ボードの品質が、発現強度を阻害した点にあると考えられる。次に、図-2に点線で示されている通常石膏の一軸圧縮強さとの関係を見ると、通常石膏の一軸圧縮強さは、新築系再生半水石膏混合率N=50%と同程度の強度を有していることが分かる。今回の検討では、解体系及び新築系廃石膏ボードを各々破碎焼成処理した半水石膏を混合配合し実験を行っている。図-2に示す通常石膏による改良効果がN=50%程度を示した理由の1つに、各廃石膏ボードの焼成前の混合と、焼成後の混合の違いが挙げられる。焼成前の混合により、解体系の不純物が少なくなることや、焼成時の不純物の燃焼状況の変化等

が再生半水石膏の性状に影響を与えたことが考えられる。図-3にN=50%における一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。全ての条件において養生日数が増加するに伴い、一軸圧縮強さは増加している。特に、養生14日までに急激な強度増加を示し、その後は緩やかな強度増加を示している。また、再生半水石膏添加量B=100kg/m<sup>3</sup>では、養生28日以降はほぼ一軸圧縮強さの増加は見られず、一定値に収束していることが分かる。これに対し、B=200kg/m<sup>3</sup>では、養生28日以降も一軸圧縮強さの増加が見られることから、再生半水石膏添加量を増加するほど長期安定性も見込まれると考えられる。

### 3-2 フッ素溶出特性

表-3に各再生半水石膏単体におけるフッ素溶出濃度F<sup>-</sup>、図-4に各改良土におけるフッ素溶出濃度F<sup>-</sup>と新築系再生半水石膏混合率Nの関係を示している。全ての再生半水石膏単体試料においてフッ素溶出濃度F<sup>-</sup>は大幅に土壤環境基準である0.8mg/lの規定を超え、特に解体系再生半水石膏は溶出量が大きいことが分かる。しかしながら、再生半水石膏と高炉セメントB種による改良土からは、全ての条件において、0.8mg/l以下を示している。更に新築系石膏混合率が増加するに伴い、フッ素溶出濃度F<sup>-</sup>は減少している。これは、解体系再生半水石膏のみを地盤改良材として利用するよりも、新築系再生半水石膏を混合する方が、より地盤環境面で安全なることを示唆している。また、再生半水石膏及びセメントによって形成されるエトリンガイトにフッ素が固定され、フッ素の溶出を抑制したと考えられる<sup>4)</sup>。図-5にN=0%におけるフッ素溶出濃度F<sup>-</sup>と養生日数の関係を示す。養生日数が増加するに伴いフッ素溶出濃度F<sup>-</sup>は減少傾向が見られる。これは養生によって、生成されたエトリンガイトの更なるフッ素固定化が進んだことが考えられ、長期的な安全性も見込まれると考えられる。

## 4. まとめ

- 1) 新築系再生半水石膏混合率の増加に伴い一軸圧縮強さが増加し、解体系及び新築系再生半水石膏混合率の違いが地盤改良効果に影響を与えることが確認できた。
- 2) 再生半水石膏とセメントによる地盤改良効果は、強度的に長期安定性が見込めることが示された。
- 3) 新築系再生半水石膏混合率の増加に伴い、フッ素溶出濃度F<sup>-</sup>は減少することが示された。さらに、再生半水石膏とセメントを混合することで、フッ素溶出濃度F<sup>-</sup>は土壤環境基準を満足することが示された。今回の検討から、再生半水石膏の品質を安定させためには中間処理施設にて新築系及び解体系廃石膏ボードの混合率に基準を設け、焼成処理することが強度面・安全面からも必要だということが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 肴倉ら,「廃石膏ボード20試料の微量元素組成と溶出特性の類型化」,第9回環境地盤工学シンポジウム,pp.159-162,2011.10.
- 2) 吉田ら,「再生半水石膏による地盤改良材の力学特性と環境安全性について」,第22回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集,pp.207-208,2011.
- 3) 地盤工学会,土質試験の方法と解説—第一回改正版—,「安定処理土の締固めをしない供試体作製」,PP.308-316.
- 4) 亀井ら,半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす養生期間の影響,地盤工学ジャーナル,vol.4,No.1,pp.99-105

*7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Environment in Asia* 2013年11月

Sato, Hiyama, Omine, Hayashi and Matsubara (Eds)

©2013 Kyushu Branch of the JGS, ISBN: 978-4-904777-17-6

### Effect of Quality of Recycled Bassanite on Soft Ground Improvement

N. Matsuo, K.Sato, T. Fujikawa, and C. Koga

*Keywords* : Recycled bassanite, Ground Improvement, Unconfined compression test,

## 1 INTRODUCTION

It is considered that in the future, the cost of processing waste gypsum boards will increase greatly due to the shift from stable disposal facilities to managed-type disposal facilities, and the quantity of building waste associated with renewal of housing and social capital stock.

Therefore, the development of recycling and reuse technologies for waste gypsum boards from building sites is an urgent task. Kamei et al (2013) and the author have investigated the use of regenerated bassanite obtained by calcinating gypsum separated from waste plasterboard as a geotechnical material. The results indicated that there is an improvement effect soon after mixing into comparatively highwaste-content soil materials.



(a) New construction site (b) Demolition sites

Photo 1 Waste gypsum boards

At the present moment, two kinds of waste gypsum boards are brought into the intermediate treatment facilities. Photo 1 shows the waste gypsum boards from the new construction site and the waste gypsum boards from demolition sites. The ratio of the waste gypsum boards from the new construction site and the demolition sites is 2 : 8 at intermediate treatment facilities. The two kinds of waste gypsum boards delivered to intermediate treatment facilities, paper and dihydrate gypsum were reused after treatment. Especially, the dihydrate gypsum becomes recycled bassanite by heat-processed. However, the quality of recycled bassanite is influenced by the mixing ratio of two type dihydrate gypsum obtained from the two type waste gypsum boards.

Therefore, the purpose of this study is to investigate the effect of the quality of recycled bassanite on soil improvement by recycled bassanite.

## 2 TESTING PROCEDURE

### 2.1 Experiment samples

There recycled bassanites are calcinated by the indirect calcinating method (Photo 2).

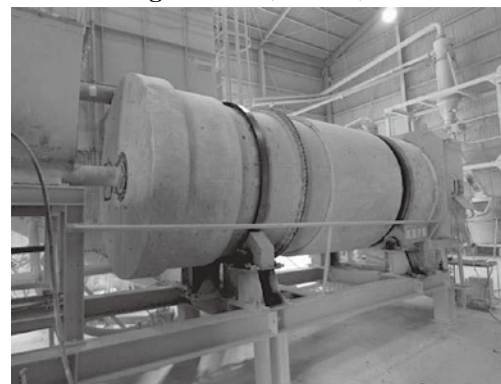


Photo 2 Indirect calcinating method





Photo 3 Recycled bassanite

Two types of recycled bassanities were used for this research. Photo 3 shows the recycled bassanite. New recycled bassanite (NRB) is produced by waste gypsum boards from new construction site. Old recycled bassanite (ORB) is produced by waste gypsum boards from demolition site. This study used NRB and ORB, Kaolin clay and Blast furnace slag cement Type-B.

### 2.2 Samples and testing conditions

In this study, the soil improvement solidification characteristics were evaluated by unconfined compression tests. There tests were carried out to investigate the effect of the mixing ratio of NRB on strength and deformation characteristics of improved soil by recycled bassanite. Testing conditions are described in Table 1. The ratio of NRB used in the present study were 0%, 25%, 50%, 75% and 100%. The test specimens were prepared with the practice for making and curing stabilized soil specimens without compaction (JGS0821-2000). The samples were placed in the molds in three layers to remove any bubbles from within the soil matrix. The molds were placed in polyethylene box and kept in a controlled room at a temperature 20°C for 24h.

Table 1 Testing Condition

Recycled bassanite	Water content w (%)	Amount of recycled bassanite B (kg/m <sup>3</sup> )	NRB mixing ratio N (%)	Amount of cement B <sub>c</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Curing period t <sub>c</sub> (day)
NRB	100	200	0	50	7
			25		14
			50		14
ORB			75		28
			100		28

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows the results of unconfined compression tests. Figure 2 shows the relations of unconfined compressive strength and mixing ratio of NRB. Unconfined compressive strength was increased in accordance with the increase of the mixing ratio of NRB. Difference of unconfined compressive strength between N=0% and 100% are difference in about 100kN/m<sup>2</sup>. Generally, the waste gypsum boards from demolition site are exhausted with a plastic cross and metal pieces. Therefore, many impurities are mixed with ORB at the time of production. These data indicate that the quality of the recycled bassanite has a big influence on the strength difference of each improved soil. As for the quality of recycled bassanite, it was cleared that the mixing ratio of two kinds of waste gypsum boards before heat-processed in intermediate treatment facility greatly influenced it.

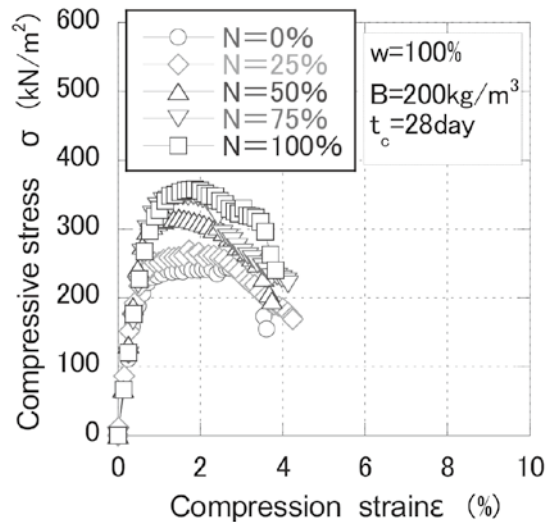


Figure 1 Results of unconfined compression test

土木学会西部支部研究発表会 2014年3月

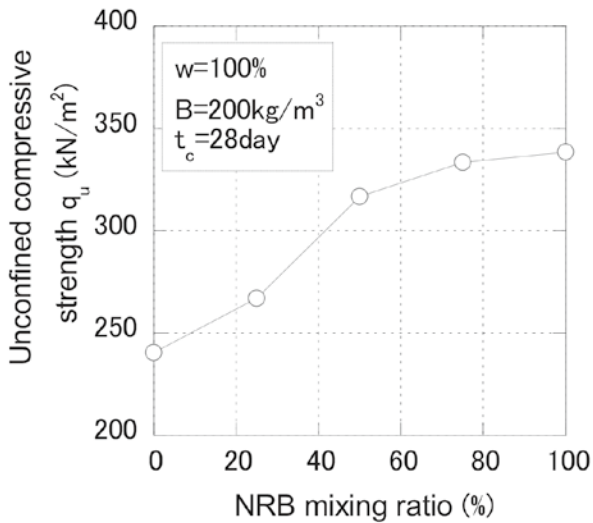


Figure 2 Relations of unconfined compressive strength and NRB mixing ratio

## 5 CONCLUSIONS

The ground improvement effect by recycled bassanite is influenced by the mixing ratio of NRB. It is necessary to control a mixed ratio of waste dihydrate gypsum from new construction site and demolition site constantly in order to keep the quality of recycled bassanite.

## REFERENCES

Kamei Takeshi et al. (2013) : *Durability of soft clay soil stabilized with recycled Bassanite and furnace cement mixtures*, SOILS AND FOUNDATIONS Vol. 53, Soils and foundations, 155-165.

## 再生半水石膏による路床・路盤材の改良効果に関する実験的検討

福岡大学工学部 学生会員 新翔一郎 松尾典映  
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

2006年6月1日に廃石膏ボードは、安定型最終処分場への搬入が全面的に禁止<sup>1)</sup>された。以来、廃石膏ボードはボード紙と廃石膏に分離され中間処理した後に、管理型最終処分場で処分されることが義務づけられている。一方、廃石膏ボードの年間排出量は高度成長期の建造物のリニューアルに伴って年々増加傾向<sup>2)</sup>にある。その為、処分コストの増加や処分場の逼迫といった問題点があげられ、廃石膏ボードの有効利用の確立が急務とされている。そこで本研究では、中性固化材として知られている再生半水石膏を、軟弱な路床・路盤材の改良材として用いることを目的としている。本報告では、軟弱でかつ細粒分の多い粘性土(写真-1)に再生半水石膏を添加混合し、路床土の改良工事への利用の可能性について修正CBR試験による検討を行なった。特に再生半水石膏による改良土の膨張に着目して検討した結果について報告する。

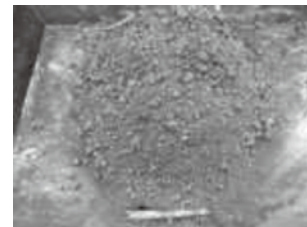


写真-1 粘性土の写真

### 2. 実験概要

#### 2-1 実験に用いた試料

土質材料には、13mm以下に粒度調整した細粒分含有率が60%を超えている粘性土を用いた。固化材には、間接焼成方式で加熱処理された再生半水石膏を用いた。表-1に粘性土の物理特性、図-1に粒径加積曲線を示す。

表-1 粘性土の物理特性

	粘性土
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.791
自然含水比 $w$ (%)	35.9
最適含水比 $w_{opt}$ (%)	21.5
細粒分含有率 $F_c$ (%)	64.2
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.62

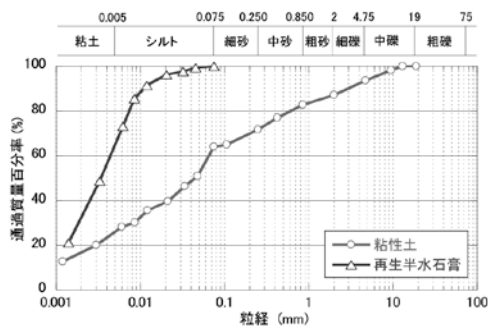


図-1 粒径加積曲線

### 2-2 実験手順

表-2に修正CBR試験に用いた試料の配合条件を示す。

絶乾状態の粘性土に再生半水石膏を所定量添加し、締固め試験(E-a法)を行った。締固め試験結果より得られた最適含水比に試料を調節した後、JISA 1211<sup>3)</sup>に基づき供試体を作製し、水道水を使用し吸水膨張試験を行った。その後、吸水膨張試験終了後の供試体を用い、貫入試験を実施した。

表-2 配合条件

粘性土に対する 再生半水石膏混合量B(kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 t(day)	締固め回数 (回)
0	0	17
100		42
150		92
200		

## 3. 実験結果及び考察

### 3-1 改良した路床・路盤材の膨張量について

表-3及び図-2に締固め試験結果を示す。水・再生半水石膏比(以下W/B)は、水の質量を絶乾状態の再生半水石膏の質量で除して算出した。再生半水石膏の添加

表-3 締固め試験結果

再生半水石膏混合量 B(kg/m <sup>3</sup> )	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	最適含水比 $w_{opt}$ (%)	水・再生半水石膏比 w/B(%)
0	1.62	21.5	-
100	1.52	21.9	370.0
150	1.58	24.9	249.5
200	1.54	27.2	213.1

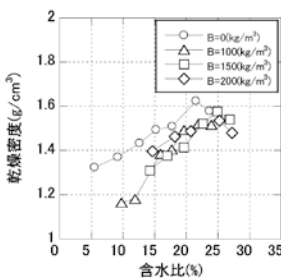


図-2 締固め試験結果

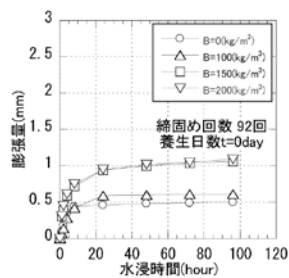


図-3 水浸時間と供試体膨張量の関係

表-4 路床の状態と膨張比の関係<sup>4)</sup>

路床の状態	膨張比(%)
良好な状態	1以下
通常の状態	2以下
不良な状態	3以下
腐食土	7~20

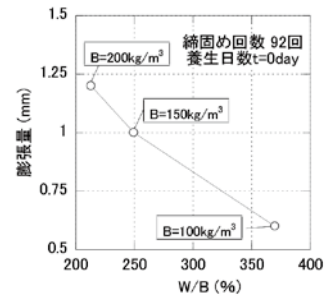


図-4 膨張量とW/Bの関係

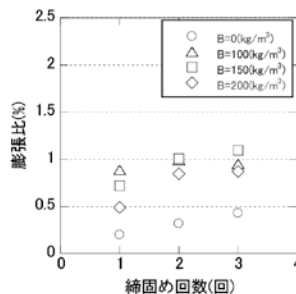


図-5 96時間水浸後の膨張比と締固め回数の関係

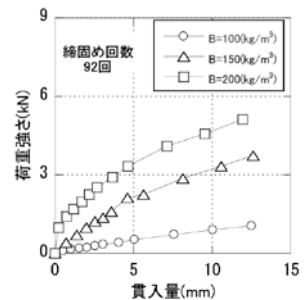


図-6 締固め回数92回による荷重強さと変位量の関係

量が増加するに伴い、最適含水比も増加していることが分かる。このことから再生半水石膏は吸水性が高いことが分かる。一方、最大乾燥密度は、粘性土のみと再生半水石膏を添加したものを比べると再生半水石膏を添加したものは低い値を示している。これは細粒分含有率が非常に高い再生半水石膏による影響だと考えられる。図-3に水浸時間と供試体膨張量の関係を示す。供試体膨張量は、再生半水石膏による添加量が増加する程、わずかではあるが増加傾向にあることが分かる。図-4に膨張量とW/Bの関係を示す。W/Bの減少に伴い膨張量は増加している。従って、膨張量は再生半水石膏の添加量のみに影響されるのではなく、W/Bにも影響されることが考えられる。次に、既定されている水浸時間96時間において、再生半水石膏の添加量に関わらず、供試体膨張量はほぼ一定になりつつある。このことから、再生半水石膏の添加量を増加させたとしても、長期間にわたり膨張する恐れがないことが考えられる。表-4に路床の状態と膨張比の関係<sup>4)</sup>、図-5に96時間水浸後の膨張比と締固め回数の関係を示す。図-5より再生半水石膏の添加によって膨張比が増加していることがわかる。また全条件において、膨張比は2%以下を示しており、水浸96時間内において路床に使用するには良好もしくは通常の状態であることが分かる。再生半水石膏による路床改良直後であれば、路床土の膨張量は小さいと考えられる。今後は、膨張量とW/Bの関係性、再生半水石膏の長期膨張特性を検討していく予定である。

### 3-2 改良した粘性土の強度特性

図-6に締固め回数92回による荷重強さと変位量の間

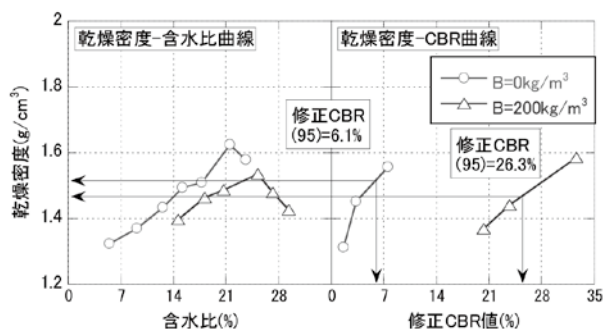


図-7 再生半水石膏添加量B=0、200(kg/m<sup>3</sup>)における修正CBR試験結果

表-5 再生半水石膏添加量と修正95%CBR値の関係

再生半水石膏添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	修正95%CBR値 (%)
0	6.1
100	7.0
150	20.0
200	26.3

係を示す。再生半水石膏添加量が増加するに伴い荷重強さは増加傾向にあることが分かる。その一方で、表-3に示した締固め試験結果から分かるように、再生半水石膏添加量の添加に伴い最大乾燥密度が減少する傾向を示していることから、これは、再生半水石膏の固化作用によるものと考えられる。図-7に再生半水石膏添加量B=0、200kg/m<sup>3</sup>における修正CBR試験結果を示す。再生半水石膏添加量B=0kg/m<sup>3</sup>の際、修正95% CBR値は6.1%、B=200kg/m<sup>3</sup>では修正95% CBR値は26.3%を示している。このことから、再生半水石膏を添加することで修正CBR値が増加することが分かり、現場施工において再生半水石膏を混合直後から改良効果が得られることが考えられる。さらに、路盤材に要求される修正CBR値より、粘性土のみでは路床路盤材として使用できないという結果を得られた。しかし、再生半水石膏を添加することで下層路盤のコンクリート舗装から路床まで使用できる<sup>5)</sup>ことが示された。表-5に再生半水石膏添加量と修正95%CBR値の関係を示す。再生半水石膏添加量の増加に伴い、修正95%CBR値は増加していることが分かる。しかし、再生半水石膏添加量B=0kg/m<sup>3</sup>、B=100kg/m<sup>3</sup>の修正95% CBR値を比較すると、ほぼ同程度であることが分かる。このことから、再生半水石膏を100kg/m<sup>3</sup>程度添加させたとしても十分な改良効果を得ることができないことが考えられる。一方、B=150kg/m<sup>3</sup>、B=200kg/m<sup>3</sup>では大幅に修正95% CBR値が増加していることから、再生半水石膏を路床路盤材として使用するためには、一定量以上の添加量が必要であり、適切な配合量を把握する必要があると考えられる。今回、細粒分含有率の高い粘性土に再生半水石膏を添加することにより、路盤材料

に利用できる改良効果を発揮させることが確認出来た。今後は更なる添加量の違い、再泥化や長期的な耐久性について検討していく予定である。

#### 4. まとめ

- (1) 再生半水石膏の膨張量は、石膏添加量及びW/Bに影響されることが明らかとなった。
- (2) 再生半水石膏添加量の増加に伴い、粘性土は改良され荷重強さは増加傾向を示すことが明らかとなった。このことから、再生半水石膏の固化作用が確認できた。
- (3) 再生半水石膏添加量により得られる修正95%CBR値は変動するため、適切な添加量を把握する必要があることが示された。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人石膏ボード工業会, ホームページ<http://www.gypsumboard-a.or.jp>
- 2) 亀井ら:半水石膏の地盤改良材としての有効利用, 地盤工学ジャーナル, vol.2, No.3, pp.245-252, 2007.
- 3) 社団法人地盤工学会:「土質試験の方法と解説」, p280, 2000.
- 4) 社団法人地盤工学会:「土質試験 基本と手引き」, p83, 2010.
- 5) 日本道路協会, セメントコンクリート舗装要綱(第19版), pp.11-14, 1993.

土木学会西部支部研究発表会 2014年3月

#### 廃石膏ボードの製造年月日の違いに着目したフッ素溶出特性

福岡大学 学生会員 松尾典映 新翔一郎  
 福岡大学 正会員 佐藤研一 藤川拓朗 古賀千佳嗣  
 国立環境研究所 正会員 肴倉宏史

#### 1. はじめに

現在、新築・解体現場から排出される廃石膏ボード(写真-1)は、紙と石膏に分離し、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<sup>1)</sup>。そのため、日本各地で廃石膏ボードを中間処理し、リサイクルする動きが見られている。しかし、廃石膏ボードから処理された再生二水石膏、さらに焼成処理された再生半水石膏にはフッ素が多く含有していることが指摘<sup>2)</sup>されている。したがって、土壤

の地盤改良等へこれらの材料を利用する場合には溶出特性を十分に把握しておく必要がある。そこで本報告では、排出される廃石膏ボードの製造年月日の違いによってフッ素及び重金属類等による環境安全性が異なる可能性が考えられることから、製造ロット番号が読みとり可能な廃石膏ボードを収集して、紙と分離された再生二水石膏の環境安全性に対する検討を行った結果について報告する。



写真-1 廃石膏ボード

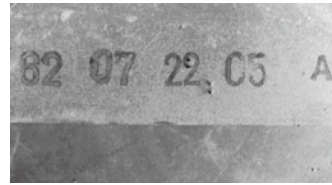


写真-2 廃石膏ボード記載  
(製造ロット番号記載)

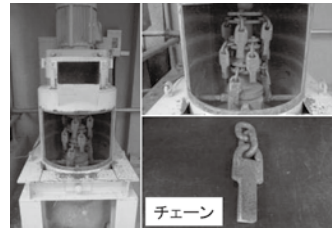


写真-3 回転式解砕混合混練機

表-1 実験に用いた廃石膏ボードの照査結果

試料名	西暦(年)	製造会社
57-1	1982	A
59-1	1984	B
59-2	1984	A
60-1	1984	A
62-1	1984	A
62-2	1987	A
63-1	1988	A
01-1	2001	A
01-2	1989	A
02-1	1982	A
02-2	-	A
03-1	1991	A
03-2	-	A
04-1	1992	A
04-2	1992	A
04-3	-	A
05-1	-	A
05-2	-	A
05-3	-	A
05-4	-	A
05-5	-	A
06-1	-	A
06-2	1994	A
06-3	1994	A
08-1	-	A
08-2	-	A
09-1	1997	A
10-1	1998	A
10-2	-	A
10-3	-	B
11-1	1999	A

## 2. 石膏全体の需要と供給状況

日本での石膏の年間消費量(2003)は8000～10000千t程度であり、その半数は石膏ボード原料として使用<sup>3)</sup>されている。図-1に日本における石膏の供給の推移<sup>4)</sup>、図-2に副生石膏と天然石膏の供給量の推移<sup>4)</sup>を示す。石膏の供給は1987年から1990年にかけて、急増している。これは、主に石膏ボードの需要が伸びたことが考えられる。このため国内の石膏の供給が追いつかなくなり、この頃から天然石膏の国外からの輸入量が増加している。一方、国産の副生石膏の変動は少なく、1980年以降5000～6000千tで安定している。しかしその内訳についてはリン酸石膏の供給量は年々減少し続けるのに対し、脱硫石膏の供給量は1986年以降増加傾向を持続しており、全体の構成比率は変化してきている。

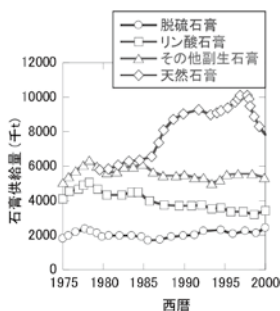


図-1 日本の石膏供給量の推移<sup>4)</sup>

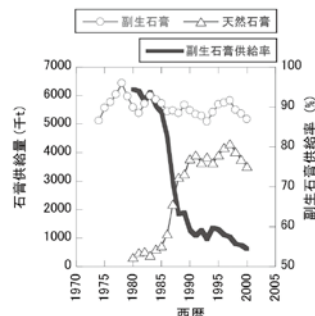


図-2 化学石膏と天然石膏の供給量の推移<sup>4)</sup>

## 3. 実験概要

### 3-1 実験試料

2009年12月から2010年2月にかけて、稼働中の廃石膏

ボード资源化施設へ搬入された廃石膏ボードを無造作に抽出し、一辺約50cmの大きさに分割して採取した。各廃石膏ボードには写真-2に示す製造ロット番号が記載されている。本検討では、製造ロット番号が異なる31種類の廃石膏ボードを得ることが出来た。さらに、製造ロット番号31種類のうち16種類について製造年月日を把握することが出来た。表-1に実験に用いた各廃石膏ボードの照査結果を示す。また、採取した廃石膏ボードは、手作業で紙と石膏に分離した後に、回転式破砕混合混練機(写真-3)による粉砕、更に2mmのふるいによって夾雑物を取り除いた再生二水石膏を実験に用いた。

### 3-2 実験方法

本検討では、環境庁告示46号法試験に準拠した方法で再生二水石膏の溶出特性の把握を行った。各再生二水石膏は液固比(L/S=液体mL:試料重量g)が10となるように混合し、6時間平行振とう後、遠心分離による上澄み液を濾過し、検液とした。フッ素溶出量の測定は、イオンクロマトグラフ(ダイオネクス社製 ICS-1000)により行った。

## 4. 実験結果及び考察

図-3に各廃石膏ボードにおけるフッ素溶出濃度の結果を示す。フッ素溶出濃度の差は、最大で約21mg/Lと大きく異なり、製造ロット番号が異なる再生二水石膏の種類によって溶出濃度が異なっていることが分かる。この要因として、石膏を製造する際のリン酸石膏の有無が考えられる。肴倉ら<sup>5)</sup>は、リン酸の含有量が増加するほどフッ素の溶出濃度は増加し、強い関係性があると報告している。更に、2章で述べているように、現在、石膏

の原料において副生石膏の供給量のうち、リン酸石膏の供給量が減少していることが分かる。従って、石膏ボードの原料としてリン酸石膏の生産量が減少し始めた1986年代以降に製造された石膏ボードのフッ素溶出濃度は減少していると考えられる。さらに、天然石膏の供給量増加も要因として考えられる。一般的に、天然石膏は副生石膏と異なりフッ素は含有していない。この天然石膏が1980年代以降にかけて急激に供給量が増加し、2000年では天然石膏供給率が50%弱にもおよぶことから、フッ素の溶出原因である副生石膏の供給率が減少していることが要因として考えられる。図-4に製造年月日とフッ素溶出濃度の関係、図-5に製造年月日とpHの関係を示す。また、肴倉ら<sup>4)</sup>が行った実験データも図中に示している。再生二水石膏中のフッ素溶出濃度は製造年月日の経過と共に減少していることが分かる。これは、石膏の原材料である副生石膏に関係すると考えられる。更にpHに着目すると、全条件において中性の値を示している。したがって、再生二水石膏のpHは石膏ボードの製造年月日にほぼ関係なく中性域にあることが示された。一般的に、フッ素溶出濃度はpHに左右されると報告されている<sup>5)</sup>。今回実験に用いた再生二水石膏のpHが同程度であることから、フッ素溶出濃度の違いは製造年月日の影響であることが確認出来た。さらに、2つの機関が行った再生二水石膏のフッ素溶出濃度及びpHの挙動はほぼ同程度の傾向を示していることから、石膏ボードの製造年月日は再生石膏の品質に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

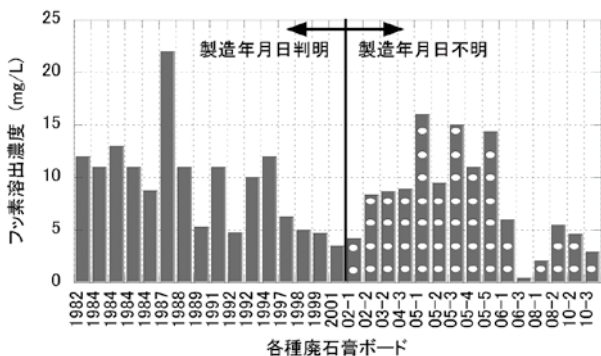


図-3 各廃石膏ボードにおけるフッ素溶出濃度の結果

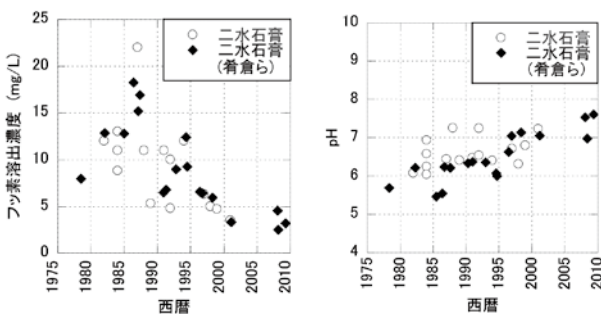


図-4 製造年月日とフッ素溶出濃度の関係

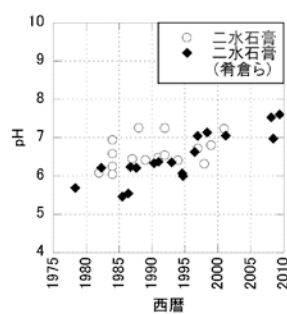


図-5 製造年月日とpHの関係

## 5. まとめ

- 1) 製造年月日の経過に伴い、再生二水石膏のフッ素溶出濃度は減少傾向を示す。
- 2) フッ素溶出濃度の減少は、石膏ボードの原材料である天然石膏の供給量の増加、リン酸石膏の供給量の減少が原因と考えられる。
- 3) pHが製造年月日に関係なく中性域を示し、製造年月日が再生石膏の品質に影響を及ぼすことが示された。

## 謝辞

研究促進にご協力頂きました社団法人石膏ボード工業会ならびに貴重な試料をご提供頂いた皆様に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 廃石膏ボードの対応策について(社団法人石膏ボード工業会2010年5月)。
- 2) 吉田ら:再生半水石膏による地盤改良材の力学特性と環境安全性について,第22回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集,pp.207-208,2011。
- 3) 一般社団法人石膏ボード工業会HP,原料統計
- 4) 財団法人電力中央研究所,「石膏ボード廃棄物のリサイクルに関する現状調査・分析-脱硫石膏需要に及ぼす今後の影響推定-」,調査報告:V04019,pp.2,2005。
- 5) 肴倉ら:廃石膏ボード20試料の微量元素組成と溶出特性の類型化,第9回環境地盤工学シンポジウム論文集,pp.159-162,2011。

第49回地盤工学研究発表会(北九州)2014年7月

## 解体・新築系廃石膏ボード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

廃石膏ボード再生半水石膏一軸圧縮試験

福岡大学大学院 学生会員 ○松尾典映

福岡大学工学部 国際会員 佐藤研一 藤川拓朗 古賀千佳嗣

## 1. はじめに

廃石膏ボードの埋立破棄処分は、処分場内の硫化水素発生問題が顕在化したため、紙と石膏を分離する中間処理後、管理型処分場への廃棄が義務化されている<sup>1)</sup>。また、石膏ボード工業会の資料<sup>2)</sup>によると、廃石膏ボードの総排出量は、今後さらに増加することと見込まれている。従って、リサイクル技術開発および用途開発は急務

な課題とされている。廃石膏ボードは、新築工事現場などで発生する新築系廃石膏ボード(写真-1)及び建築物の解体時に発生する解体系廃石膏ボード(写真-2)が中間処理施設に持ち込まれている。現在再生半水石膏の中間処理施設では、新築系及び解体系石膏ボードを区別せず同時に破碎・焼成処理している。そのため、生産される再生半水石膏は新築系及び解体系石膏ボードの混合率の割合によって品質が一定に保たれていないなどの問題が考えられる。そこで、本研究では再生半水石膏の品質の違いが改良土の力学特性に及ぼす影響について検討を行った。検討では、特に品質が安定している新築系廃石膏ボードに着目し、解体系再生半水石膏に一定割合で新築系再生半水石膏を混合した再生半水石膏による軟弱地盤改良効果の検討を行った結果について報告する。



写真-1 新築系廃石膏ボード 写真-2 解体系廃石膏ボード

## 2. 実験概要

### 2-1 実験に用いた試料

実験には、間接焼成方式及びIH焼成方式で焼成処理された新築系再生半水石膏及び解体系再生半水石膏、現在中間処理施設にて生産されている再生半水石膏(以下、通常石膏)の6種類を使用した。また、土質材料としてカオリン粘土を用いた。これまでの研究<sup>3)</sup>から再生半水石膏のみによる地盤改良効果はセメント改良ほど得られないことが分かっている。そこで改良効果を補助する固化材として高炉セメントB種を用いた。凡例の記号はそれぞれ、w：設定含水比、B：再生半水石膏添加量、N：新築系再生半水石膏混合率、D：解体系再生半水石膏混合率、B<sub>C</sub>：補助固化材添加量、t<sub>c</sub>：養生日数を示している。

### 2-2 検討内容

改良土の力学特性は、一軸圧縮試験(JISA1216)より評価した。表-1に解体系及び新築系再生半水石膏混合率に着目した配合条件を示す。今回の検討では、解体系再生半水石膏に対する新築系再生半水石膏混合率をN=0、25、50、75、100%の5種類とし、再生半水石膏の品質の違いが軟弱地盤改良効果に及ぼす影響について着目した。供試体の作製方法については、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法<sup>4)</sup>(JGS0821-2000)に準じて、直径φ=5(cm)×高さh=10(cm)の塩ビ製モールドに入れ3層に分けてタンピング法により打設した。供試

体は翌日整形、翌々日に脱型し、供試体をラップに包み20℃一定の恒温室で所定日数養生させた。

表-1 解体系及び新築系再生半水石膏混合率に着目した配合条件

焼成方式	石膏の種類	設定含水比 W (%)	再生半水石膏混合量 B (kg/m <sup>3</sup> )	新築系石膏混合率 N (%)	補助固化材混合量 B <sub>C</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 t <sub>c</sub> (day)
間接焼成方式 IH焼成方式	新築系石膏	100	100 (200)	0	50	7
	解体系石膏			25		14
				50		28
				75		56
通常石膏		100	-		183	
						364

## 3. 実験結果及び考察

図-1に一軸圧縮試験結果、図-2に一軸圧縮強さと新築系再生半水石膏混合率Nの関係を示す。どちらの焼成方式においても、改良土の力学特性は、新築系再生半水石膏混合率が増加するほど一軸圧縮強さは増加していることが分かる。N=0%と100%では、焼成方法に関係なく、約70～100kN/m<sup>2</sup>ほど一軸圧縮強さに違いが見られ、新築系及び解体系再生半水石膏の混合率の違いは地盤改良効果に影響を与えることが分かる。また、間接焼成方式では、再生半水石膏添加量が増加するに伴い、一軸圧縮強さの差も増加していることが分かる。一般に、解体系廃石膏ボードは、建築物の一部として長期間使用され、建築物の解体時に発生することから、石膏ボード単体として排出されず、ビニールクロスやモルタル、木くず、金属くずなどを伴って排出される。このことから

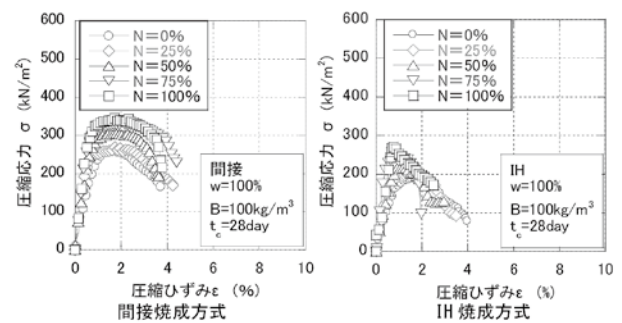


図-1 一軸圧縮試験結果

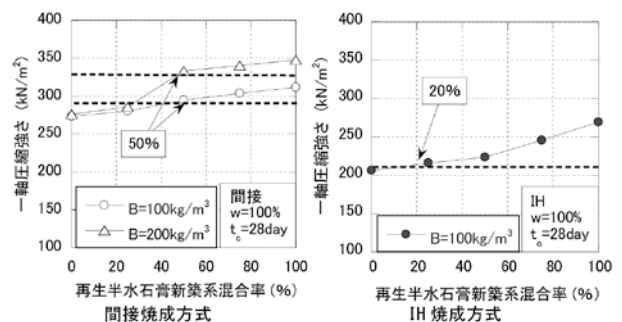


図-2 一軸圧縮強さと新築系再生半水石膏混合率の関係

新築系再生半水石膏混合率による一軸圧縮強さの違いは、解体系再生半水石膏に含まれる不純物や経過年数による石膏ボードの品質が、発現強度を阻害した点にあると考えられる。また焼成方式の違いに着目すると、間接焼成方式がIH焼成方式に比べ、解体系のみでの改良による一軸圧縮強さが大きい。しかし、新築系再生半水石膏混合に伴う強度増加率は、IH焼成方式の方が大きいことが分かる。このような強度発現挙動の違いが見られた理由は、中間処理工場に持ち込まれている廃石膏ボード、焼成温度、焼成時間といった様々な要因が考えられる。しかし、いずれの焼成方式においても新築系の混合率が改良効果に影響を及ぼすことが示された。次に、図-2に点線で示されている通常石膏の一軸圧縮強さとの関係を見ると、通常石膏の一軸圧縮強さは、間接焼成方式では新築系再生半水石膏混合率N=50%、IH焼成方式では新築系再生半水石膏混合率N=20%と同程度の強度を有していることが分かる。今回、通常出荷されている再生半水石膏による改良強度との差が生じた原因は、各廃石膏ボードの焼成前の混合と、焼成後の混合の違いが

挙げられる。焼成前の混合により、焼成時の不純物の燃焼状況の変化等が再生半水石膏の性状に影響を与えたことが考えられる。また、中間処理施設に持ち込まれる廃石膏ボードの割合は『新築系廃石膏ボード：解体系廃石膏ボード=2：8』と言われていることから、IH焼成方式での通常石膏が新築系再生半水石膏混合率N=20%とほぼ同程度というのは、廃石膏ボード排出割合にそったものだとも考えられる。図-3に新築系石膏混合率と変形係数E50の関係を示す。多少バラつきは見られるものの、新築系石膏混合率が増加するに伴い変形係数も増加している。このことから、再生半水石膏によって改良された材料では、再生半水石膏添加量の増加、新築系廃石膏混合率の増加に伴い、初期剛性も上昇することが分かる。また、焼成方式の違いに着目すると、間接及びIH焼成方式の変形係数は同程度を示していることが分かる。図-4に新築系再生半水石膏混合率Nと一軸圧縮試験終了後の供試体含水比の関係を示す。全ての条件において新築系再生半水石膏混合率Nに伴う含水比の増加は見られず、焼成方式における違いも見られない。また、設定含水比100%から、再生半水石膏添加量増加に伴い一軸圧縮試験終了後の含水比は減少している。このことから、再生半水石膏が気中養生中に一定の水分量による水和反応をおこしていることが確認でき、また一軸圧縮試験終了後の含水比は、新築系再生半水石膏混合率に関係なく再生半水石膏添加量に大きく依存することが示された。図-5に間接焼成方式N=50%、IH焼成方式N=25%における一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。ここでのNは、図-2にて各焼成方式における通常石膏の圧縮応力が交わった新築系再生半水石膏混合率に近い値を記載している。全ての条件において養生日数が増加するに伴い、一軸圧縮強さは増加している。また、養生28日までに急激な強度増加を示した後、緩やかな強度増加を示し、100日以降一定値に収束していることが分かる。さらに、この傾向は他の再生半水石膏混合率においても同様な傾向を示しており、強度面では長期安定性が確認できた。

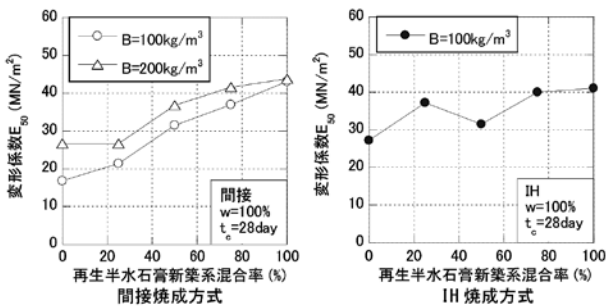


図-3 新築系石膏混合率と変形係数E50

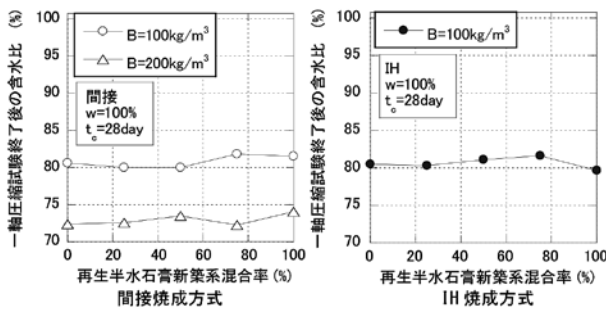


図-4 新築系再生半水石膏混合率Nと一軸圧縮試験終了後の含水比の関係

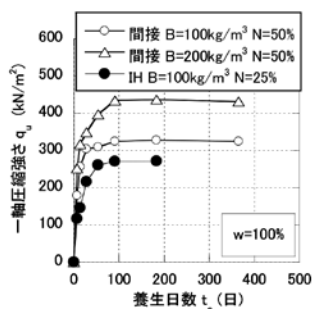


図-5 一軸圧縮強さと養生日数の関係

#### 4. まとめ

- 1) 新築系再生半水石膏混合率の増加に伴い一軸圧縮強さが増加し、解体系及び新築系再生半水石膏混合率の違いが地盤改良効果に影響を与えることが確認できた。
- 2) 再生半水石膏とセメントによる地盤改良効果は、強度的に長期強度安定性が見込めることが示された。今回の検討から、再生半水石膏の品質を安定させる為には中間処理施設にて新築系及び解体系廃石膏ボードの混合率に基準を設け、焼成処理することが強度面からも必要だということが明らかとなった。



参考文献

- 1) 廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱いについて(通知)(環産産発第060601001号平成18年6月1日)
- 2) 廃石膏ボードの対応策について(社団法人石膏ボード工業会2010年5月)
- 3) 吉田ら,「再生半水石膏による地盤改良材の力学特性と環境安全性について」, 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集,pp.207-208,2011.
- 4) 地盤工学会, 土質試験の方法と解説- 第一回改正版-, 「安定処理土の締固めをしない供試体作製」, pp.308-316, 2010.

土木学会第69回年次学術講演会 2014年9月

再生半水石膏を用いた改良土の再泥化特性

福岡大学大学院 学生会員 ○松尾典映  
 福岡大学工学部 正会員 佐藤研一 藤川拓朗 古賀千佳嗣

キーワード 廃石膏ボード, 再生半水石膏, 再泥化試験, 一軸圧縮試験

1. はじめに

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・中間処理し、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<sup>1)</sup>。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。廃石膏ボードから得られる再生二水石膏を焼成処理して得られる再生半水石膏は、水を加えると固化する性質を有している。著者らはこれまでにこの特性を利用し、地盤改良材としての有効利用技術の研究<sup>2)</sup>を進めている。しかし、再生半水石膏は水溶性の特性<sup>3)</sup>を有しているため、地盤改良材として用いた際に地下水や雨水による影響を受け、固化作用を失ってしまう恐れが考えられる。そこで本研究では、再生半水石膏の再泥化特性を把握するために実験的検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験試料

実験には、間接焼成方式で焼成処理された再生半水石膏を使用した。また、土質材料としてカオリン粘土を用いた。これまでの研究<sup>2)</sup>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分かっている。そこで改良効

果を補助する固化材として高炉セメントB種を用いた。ここで表、図中の凡例の記号はそれぞれ、w：設定含水比、B：再生半水石膏添加量、B<sub>C</sub>：補助固化材添加量、t<sub>c</sub>：養生日数を示している。

2-2 実験試料

表-1に配合条件を示す。供試体の作製方法については、安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法<sup>4)</sup>(JGS0 821-2000)に準じて、直径f=5cm×高さh=10cmの塩ビ製モールドに入れ3層に分けてタッピング法により打設した。また、再泥化による影響については供試体作製後所定日数気中養生を行った後、水道水を用い、供試体を水浸(L/S=5)させる。再生半水石膏により改良された供試体の水浸時の様子を写真-1に示す。なお測定時間は、1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240分後、1, 2, 3, 7日後とし、その後は一定の間隔ごとに観察・記録し、表-2に示す再泥化区分に従い分類を行った。また、改良土の力学特性は、一軸圧縮試験(JISA 1216)より評価した。

表-1 配合条件

土質材料	含水比 w (%)	再生半水石膏添加量 B (kg/m <sup>3</sup> )	高炉セメントB種添加量 B <sub>C</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	養生日数 t <sub>c</sub> (day)
カオリン粘土	100	100	0	1
		200	25	7
			50	28

表-2 再泥化区分

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



写真-1 水浸時の様子

3. 実験結果

3-1 再生半水石膏改良土の再泥化特性

表-3に再生半水石膏添加量B=200kg/m<sup>3</sup>、養生日数t<sub>c</sub>=7day、補助固化材添加量B<sub>C</sub>=0kg/m<sup>3</sup>における供試体の水浸時経時変化、図-1に再生半水石膏を添加した養生日数t<sub>c</sub>=7,28dayの供試体における再泥化試験結果を示す。再生半水石膏のみを用いて改良を行った供試体は、供試体水浸直後から供試体の角が崩れはじめ水浸2時間までには完全に再泥化に至ることが分かる。また、水浸までの供試体の気中養生日数の増加に伴い、再泥化進行が異なっているが、両条件とも最終的に完全に再泥化するまでの水浸時間が同じであることが分かる。このことより、実地盤への地盤改良を想定した際に再生半水石膏による改良は再泥化抑制を行うことが難しく、地下水等の影響を受ける場所における改良には十分な注意が必要であることを示している。また、水溶性の再生半水石膏添加量B=100kg/m<sup>3</sup>及び養生日数t<sub>c</sub>=1dayについては、脱型時に供試体が自立せず再泥化試験を行えていない。

再生半水石膏を用いた地盤改良では、対象地盤の含水比と再生半水石膏添加量等に十分な注意を払う必要があると考える。

表-3 水浸時経時変化(B=200kg/m<sup>3</sup>w=100%t<sub>c</sub>=7dayBc=0kg/m<sup>3</sup>)

水浸時間	15min	30min	1hour	2hour	4hour
再泥化試験の様子					
再泥化区分	4	4	5	6	6

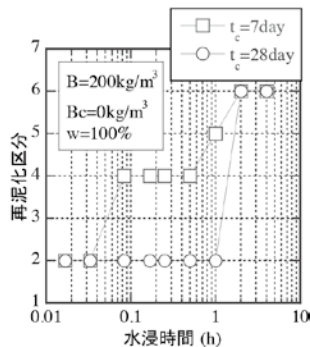


図-1 再生半水石膏を添加した再泥化試験結果

3-2再生半水石膏に補助固化材を添加した再泥化特性

表-4に再生半水石膏添加量B=200kg/m<sup>3</sup>、養生日数t<sub>c</sub>=1day、補助固化材添加量Bc=25kg/m<sup>3</sup>における供試体の水浸時経時変化、図-2に再生半水石膏添加量B=100kg/m<sup>3</sup>を添加した供試体における再泥化試験結果、図-3に再生半水石膏添加量B=200kg/m<sup>3</sup>を添加した供試体における再泥化試験結果を示す。再生半水石膏と高炉セメントB種により改良した材料では、気中養生日数t<sub>c</sub>=1dayにおいて周囲にひび割れが見られるものもあったが、水浸91日後でも完全な再泥化は見られなかった。さらに、補助固化材添加率の増加及び気中養生の経過に伴い供試体表面のひび割れが抑制され、供試体に変化が見られなかった。したがって、補助固化材として高炉セメントB種を添加、及び気中養生日数を増加することにより長期的に再泥化抑制が可能であることが示され、本条件においては高炉セメントB種を25kg/m<sup>3</sup>添加することで十分な再泥化抑制の効果を得られることが示された。図-4に全条件における気中養生日数と一軸圧縮試験の関係、図-5に再泥化区分と図-4より得られた一軸圧縮強さの関係を示す。ここで、供試体が完全な再泥化に至っている、あるいはひび割れを伴っている一軸圧縮強度の範囲を図-5中にハッチングにて示している。再生半水石膏及び補助固化材添加量の増加及び気中養生日数の経過に伴い、強度増加していることが分かる。図-5に示す完全な再泥化に至っている、あるいはひび割れを伴っている一軸圧縮強度は、約50kN/m<sup>2</sup>内であることが分かる。この強度は、標準仕様のダンプトラッ

クに建設汚泥を山積み到来ず、また、その上を人が歩けない強度である<sup>5)</sup>。このような状態で改良された地盤は、地下水・雨水等の影響を受けると再泥化する恐れが考えられ、一旦、この状態以上の強度を持つと再泥化抑制の効果を持つ可能性が考えられる。しかし、再泥化に対する影響は強度のみが影響しているとは一概には言えず、今後は再泥化に関する影響因子として強度以外のアプローチを考える必要がある。

表-4 水浸時経時変化(B=200kg/m<sup>3</sup>w=100%t=1dayBc=25kg/m<sup>3</sup>)

水浸時間	1day	7day	28day	54day	91day
再泥化試験の様子					
再泥化区分	3	3	3	3	3

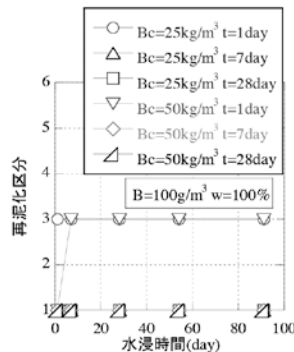


図-2 B=100kg/m<sup>3</sup>を添加した再泥化試験結果

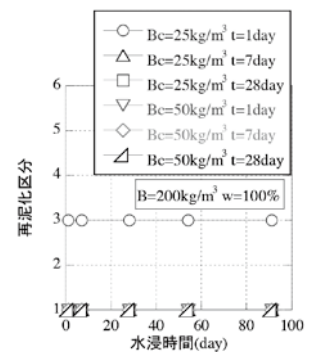


図-3 B=200kg/m<sup>3</sup>を添加した再泥化試験結果

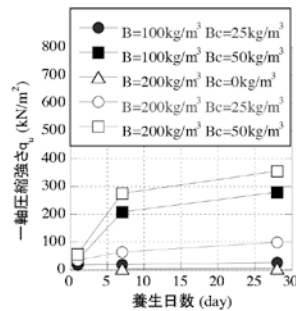


図-4 一軸圧縮試験と養生日数の関係

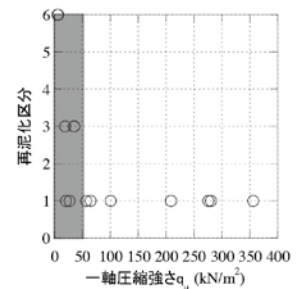


図-5 再泥化区分と一軸圧縮強度の関係

4. まとめ

- 1) 固化材として再生半水石膏のみを添加した改良土では、再泥化抑制を行うことが難しいことが示された。
- 2) 今回の検討では、補助固化材として高炉セメントB種を25kg/m<sup>3</sup>添加することで再泥化抑制の効果を得られた。
- 3) 一軸圧縮強度は約50kN/m<sup>2</sup>内にある時は、再泥化する可能性が高い恐れがあることが示された。

## 参考文献

- 1) 社団法人石膏ボード工業会ホームページ: <http://www.gypsumboard-a.or.jp/>
- 2) 吉田ら: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回環境地盤工学シンポジウム,2011.
- 3) 例えば亀井ら:半水石膏の地盤改良材としての有効利用,地盤工学ジャーナル,vol.2,No.3,pp.245-252,2007.
- 4) 地盤工学会,土質試験の方法と解説 - 第一回改正版 - 「安定処理土の締固めをしない供試体作製」,PP.308-316,2000.5) 独立行政法人土木研究所,建設汚泥再生利用マニュアル,p.14,2008.

第11回地盤改良シンポジウム論文集 2014年11月

## 製造年月日に着目した再生二水石膏の溶出特性

○松尾典映<sup>1</sup>・佐藤研一<sup>2</sup>・藤川拓朗<sup>2</sup>・古賀千佳嗣<sup>2</sup>・  
倉倉宏史<sup>3</sup>・市川 學<sup>4</sup>・太田敏則<sup>4</sup>

<sup>1</sup>福岡大学大学院・<sup>2</sup>福岡大学工学部・<sup>3</sup>国立環境研究所・  
<sup>4</sup>石膏再生協同組合

### 1. はじめに

現在、新築・解体系現場から排出される廃石膏ボード(写真-1)は、紙と石膏に分離し、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<sup>1)</sup>。このため、日本各地で廃石膏ボードを中間処理した後、紙と石膏をリサイクルする動きが見られている。しかし、廃石膏ボードから処理された再生二水石膏、さらに焼成処理された再生半水石膏には土壌環境基準を超えるフッ素が多く含有していることが指摘<sup>2)</sup>されている。したがって、土壌の地盤改良等へこれらの材料を利用する場合には溶出特性を十分に把握しておく必要がある。また、排出される廃石膏ボードの製造年月日の違いによってフッ素及び重金属類等による環境安全性が異なる可能性が考えられる<sup>3)</sup>。そこで、製造ロット番号が読みとり可能な廃石膏ボード(写真-2)を収集して、紙と分離された再生二水石膏の環境安全性に対する検討を行った結果について報告する。さらに、二水石膏を地盤改良材として用いた場合、土質材料の吸着効果の有効性を検討するため、まさ土、関東ローム、農地の土の3種類を用いた溶出・吸着特性の検討結果について報告する。



写真-1 排出された廃石膏ボード

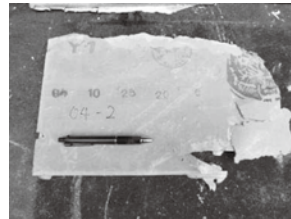


写真-2 収集した廃石膏ボードの一部

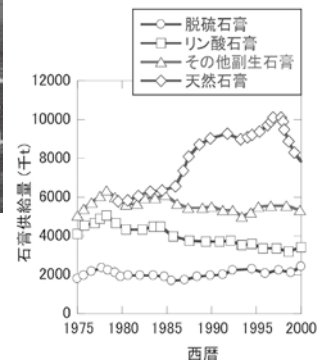


図-1 日本の石膏供給量の推移<sup>4)</sup>

## 2. 石膏全体の需要と供給状況

日本での石膏の年間消費量(2003)は8000～10000千t程度であり、その半数は石膏ボード原料として使用<sup>4)</sup>されている。図-1に日本における石膏の供給の推移<sup>5)</sup>を示す。石膏の供給は1987年から1990年にかけて、急増している。これは、主に石膏ボードの需要が伸びたことが考えられる。このため国内の石膏の供給が追いつかなくなり、この頃から天然石膏の国外からの輸入量が増加している。一方、国産の副生石膏の変動は少なく、1980年以降5000～6000千tで安定している。しかしその内訳について、リン酸石膏の供給量は年々減少し続けるのに対し、脱硫酸石膏の供給量は1986年以降増加傾向を持続しており、副生石膏の供給量構成比率は変化してきている。

## 3. 実験概要

### 3-1 廃石膏ボード

2009年12月から2010年2月にかけて、稼働中の廃石膏ボード中間処理施設へ搬入された廃石膏ボードを無造作に抽出し、一辺約50cmの大きさに分割して採取した。一般的に、各廃石膏ボードには写真-3に示す製造ロット番号が記載されている。

今回、製造ロット番号が異なる31種類の廃石膏ボードを得ることが出来た。

さらにその31種類のうち16種類について製造年月日を把握することが出来た。また、採取した廃石膏ボードは、手作業で紙と石膏に分離した後に、回転式破碎混合

混練機(写真-4)による粉碎<sup>6)</sup>、更に2mmのふるいによって夾雑物を取り除き再生二水石膏を作製し実験に用いた。表-1に実験に用いた各廃石膏ボードの照査結果を示す。

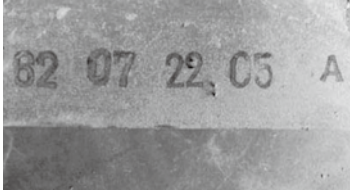


写真-3 廃石膏ボード記載  
(製造ロット番号記載)

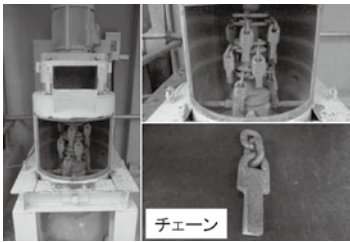


写真-4 回転式解砕混合混練機<sup>5)</sup>

表-1 実験に用いた廃石膏ボードの照査結果

試料名	西暦(年)	製造会社
57-1	1982	A
59-1	1984	B
59-2	1984	A
60-1	1984	A
62-1	1984	A
62-2	1987	A
63-1	1988	A
01-1	2001	A
01-2	1989	A
02-1	-	A
02-2	-	A
03-1	1991	A
03-2	-	A
04-1	1992	A
04-2	1992	A
04-3	-	A
05-1	-	A
05-2	-	A
05-3	-	A
05-4	-	A
05-5	-	A
06-1	-	A
06-2	1994	A
06-3	-	A
08-1	-	A
08-2	-	A
09-1	1997	A
10-1	1998	A
10-2	-	A
10-3	-	B
11-1	1999	A

表-2 物理特性

土質材料	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	自然含水比 (%)	細粒分含有率 (%)
まさ土	2.789	18.9	64
関東ローム	2.595	15.6	46
農地の土	2.685	26.2	71

### 3-3 フッ素含有量の検討

本検討では、環境庁告示19号法試験に準拠した方法で再生二水石膏のフッ素含有量の把握を行った。ここで、用いた再生二水石膏は、製造年月日が判明した16種類である。2mm以下に粒度調整した再生二水石膏は、1Nの塩酸と重量体積比3%の割合で混合した。2時間平行振とう後、遠心分離による上澄み液を濾過し、検液とした。フッ素の含有量の測定は、蒸留後、ランタン・アリザリンコンプレキソン吸光光度法を用いて行った。

### 3-4 混合材料の溶出・吸着特性の検討

本検討では、環境庁告示46号法試験に準拠した方法で再生二水石膏を地盤改良材として用いる場合のフッ素の溶出・吸着特性の把握を行った。表-3に再生二水石膏の添加量と検討に用いた土質材料を示す。各再生二水石膏と再生二水石膏混合材料は液固比が10となるように混合し、6時間平行振とう後、遠心分離による上澄み液を濾過し、検液とした。フッ素溶出量の測定は、イオンクロマトグラフ(ダイオネクス社製ICS-1000)により行った。さらに、再生二水石膏の添加量の影響を把握するために、各土質材料の乾燥質量に対し再生二水石膏の添加量を10%に設定し実験を行った。

表-3 土質材料の違いによる溶出・吸着特性の把握

二水石膏	石膏の添加率 (%)	土質材料	養生日数 (day)
製造年数が判明した16種類	0 10	まさ土 関東ローム 農地の土	1

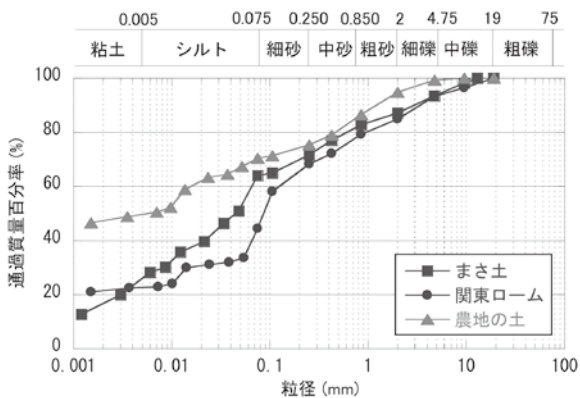


図-2 粒径加積曲線

### 3-2 土質材料

土質材料の違いによるフッ素の溶出・吸着特性を把握するため、まさ土、関東ローム、農地の土の3種類を用いて再生二水石膏と混合し、再生二水石膏混合材料を作製した。図-2に各土質材料の粒径加積曲線、表-2に各土質材料の物理特性を示す。

## 4. 実験結果及び考察

### 4-1 製造年月日の異なる廃石膏ボードから作製した再生二水石膏のフッ素含有量及び溶出特性

図-3に各再生二水石膏の含有量試験結果を示す。フッ素含有量の差は、最大で約5400mg/kgと大きく異なり、製造ロット番号が異なる再生二水石膏の種類によって含有量が大きく異なっていることが分かる。さらに、多少のバラツキはあるものの、製造年月日の経過とともにフッ素含有量が減少していることが確認できる。この要因として、石膏を製造する際のリン酸石膏の

有無が考えられる。肴倉<sup>3)</sup>は、リン酸の含有量が増加するほどフッ素の溶出濃度は増加し、強い関係性があると報告している。さらに、2.で述べたように、現在、石膏の原料において副生石膏の供給量のうち、リン酸石膏の供給量が減少している。このことより、石膏ボードの原料としてリン酸石膏の生産量が減少し始めた1986年代以降に製造された石膏ボードのフッ素含有量は減少していると考えられる。さらに、天然石膏の供給量増加も要因として考えられる。一般的に、天然石膏は副生石膏と異なりフッ素は含有していない。この天然石膏が1980年代以降にかけて急激に供給量が増加し、2000年では天然石膏供給率が50%弱にもおよぶことから、フッ素の溶出原因である副生石膏の供給率が減少していることも要因として考えられる。

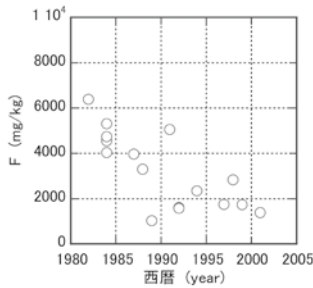


図-3 再生二水石膏のフッ素含有量

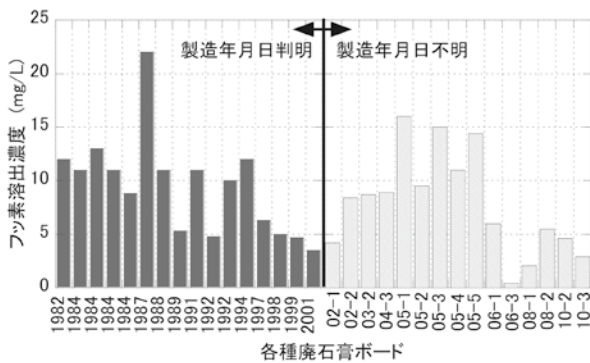


図-4 各再生二水石膏のフッ素溶出濃度

図-4に各再生二水石膏のフッ素溶出濃度、図-5に製造年月日とフッ素溶出濃度の関係、図-6に製造年月日とpHの関係を示す。また、図-4, 5にて示している製造年月日が判明しているフッ素溶出濃度は同様の結果であり、図-5, 6には肴倉<sup>3)</sup>が行った実験データも図中に示している。製造年月日の違いによる各再生二水石膏のフッ素溶出濃度の差は、最大で約21.8mg/Lと大きく異なり、製造ロット番号が異なる再生二水石膏の種類によって溶出濃度が異なっていることが分かる。さらに、再生二水石膏中のフッ素溶出濃度は製造年月日の経過と共に減少していることが分かる。これは、含有量と同様に石膏の原材料である副生石膏に関係すると考えられる。更にpHに着目すると、全条件において中性の値

を示している。したがって、再生二水石膏のpHは石膏ボードの製造年月日にほぼ関係なく中性域にあることが示された。一般的に、フッ素溶出濃度はpHに左右されると報告されている<sup>3)</sup>。今回実験に用いた再生二水石膏のpHが緩やかな増加傾向にあるが水道水基準値(pH:5.8~8.6)以内であり中性域にあることから、フッ素溶出濃度の違いは製造年月日の影響であることが示唆できる。また、肴倉<sup>3)</sup>の示した再生二水石膏のフッ素溶出濃度及びpHの挙動は、今回の結果とほぼ同程度の傾向を示していることから、石膏ボードの製造年月日は、再生石膏のフッ素含有量・溶出量に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

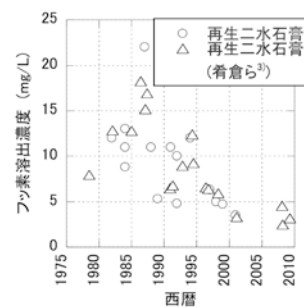


図-5 製造年月日とフッ素溶出濃度の関係

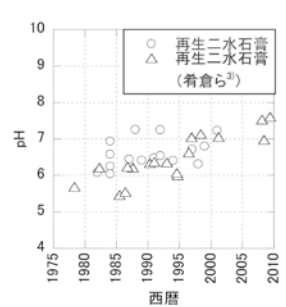


図-6 製造年月日とpHの関係

#### 4-2 再生二水石膏混合材料の溶出・吸着特性

図-7に再生二水石膏と再生二水石膏混合材料のフッ素溶出特性を示す。各土質材料と混合することによって溶出するフッ素溶出量は、土質材料に関係なく、製造年月日の経過に伴って減少していることが分かる。そこで、各土質材料のフッ素溶出・吸着特性の違いを見るために、図-8にまさ土、関東ローム、農地で採取された土と再生二水石膏を混合したフッ素溶出試験結果を示す。これらの結果を見ると、まさ土に対して、関東ロームと農地の土は1/10程度と少なく、ほぼ全ての条件において土壤環境基準0.8mg/lを満足していることが分かる。図-2に示す粒度分布をみると、農地の土及びまさ土においてほぼ同程度の高い細粒分含有率を示している。しかし、フッ素溶出量はまさ土を混合した再生二水石膏混合材料が非常に高い数値を示していることが分かる。つまり、フッ素の溶出・吸着特性が異なった理由として、細粒分含有率には大きく影響されず、各土質材料に含まれる鉱物組成の違いが結果に現れたと考えられる。このような結果は、再生石膏を地盤改良材等へ利用する場合、利用対象地盤の違いを考慮する必要があることを示唆している。図-9にまさ土、関東ローム、農地で採取された土を混合した再生二水石膏混合材のpH測定結果を示す。混合材料のpHは、土質材料の違いによって若干異なるものの、いずれの製造年月日に関係なく、ほぼ中性域にあり一定値を示している。また、溶出濃度が低かつ

たまさ土では、pHが弱酸性域にあることから、フッ素溶出特性は、土質材料の持つ鉱物組成の違いによる粘土鉱物やpHなどに依存していると考えられ、今後のさらなる検討が必要と思われる。

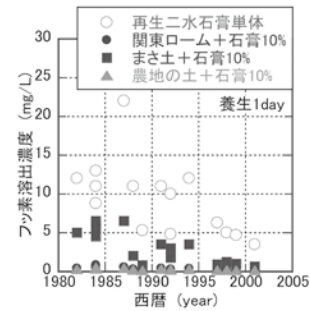


図-7 再生二水石膏と再生二水石膏混合材のフッ素溶出特性

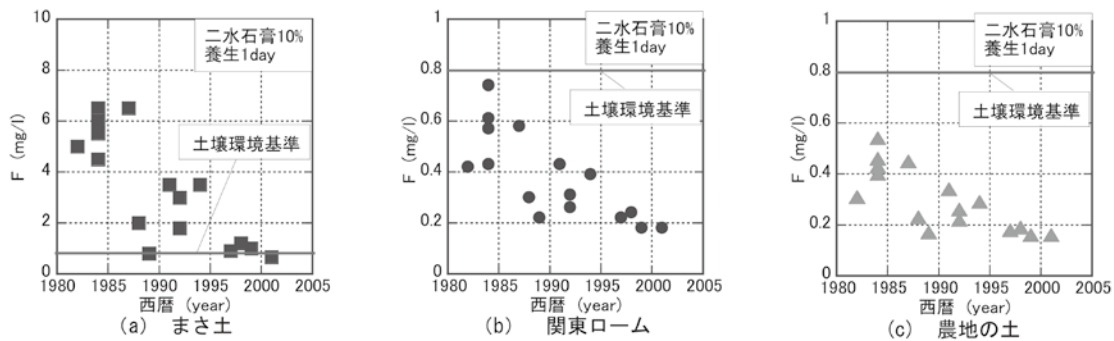


図-8 再生二水石膏混合材料のフッ素の吸着・溶出特性

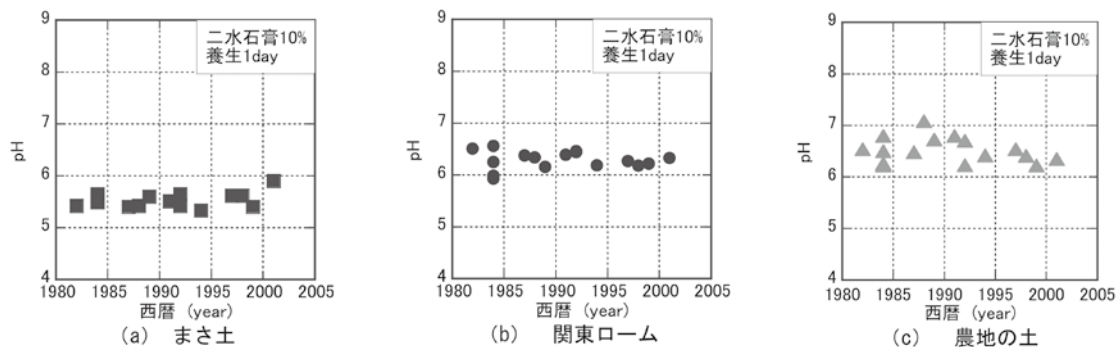


図-9 再生二水石膏混合材料のフッ素の吸着・溶出特性

#### 4-3 再生二水石膏のフッ素溶出量から見た再生二水石膏混合材料のフッ素溶出・吸着特性

図-10にたまさ土、関東ローム、農地から採取した土を混合した再生二水石膏混合材料と再生二水石膏のフッ素溶環境安全評価を示す。図中の実線は、フッ素土壌環境基準値0.8mg/lを示している。再生二水石膏単体のフッ素溶出濃度が高いほど、各土質材料を混合した再生二水石膏混合材料でのフッ素溶出濃度は高くなる傾向を示している。ここで、フッ素土壌環境基準値0.8mg/lに着目すると、関東ローム及び農地の土を混合した再生二水石膏混合材料では、0.8mg/lを満足していることが分かる。一方、たまさ土を混合した再生二水石膏混合材料では、0.8mg/lを大きく上回っていることが分かる。つまり、関東ローム及び農地の土は高いフッ素吸着効果を示していることが明らかとなった。また、本検討で得られた再

生二水石膏単体での最大フッ素溶出濃度は21.8mg/lであり、関東ローム及び農地の土は21.8mg/l未満のフッ素の溶出に対して安全に地盤改良材として使用できることが考えられる。したがって、同じ再生石膏を地盤改良材として用いたとしても、使用する土質材料によってフッ素の吸着効果に大きな影響を与えることが示唆される。図-11にたまさ土、関東ローム、農地から採取した土を混合した再生二水石膏混合材料と再生二水石膏のpHを示す。わずかながらではあるが、関東ローム及び農地の土に比べたまさ土を混合した再生二水石膏混合材料は、酸性を示している。また、たまさ土を混合した再生二水石膏混合材料において、非常に高いフッ素溶出濃度を示している。このことから、pHとフッ素溶出・吸着効果の関係において酸性域にあるほどフッ素を吸着しにくい環境にあることが考えられる。

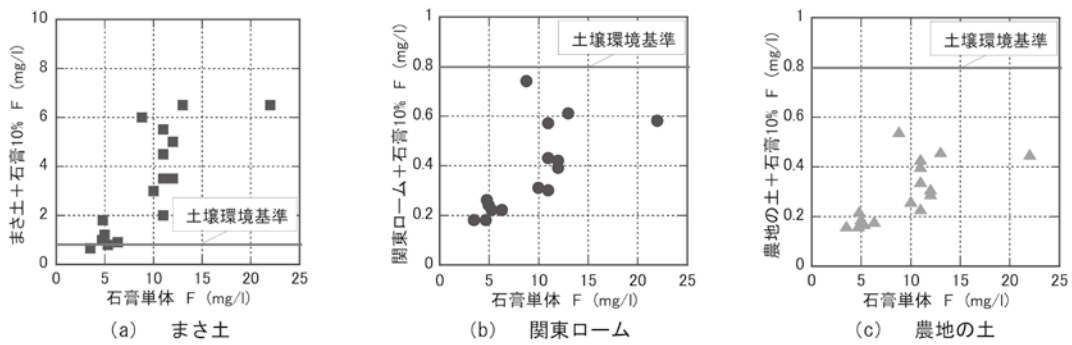


図-10 再生二水石膏と再生二水石膏混合材料のフッ素溶出量の比較

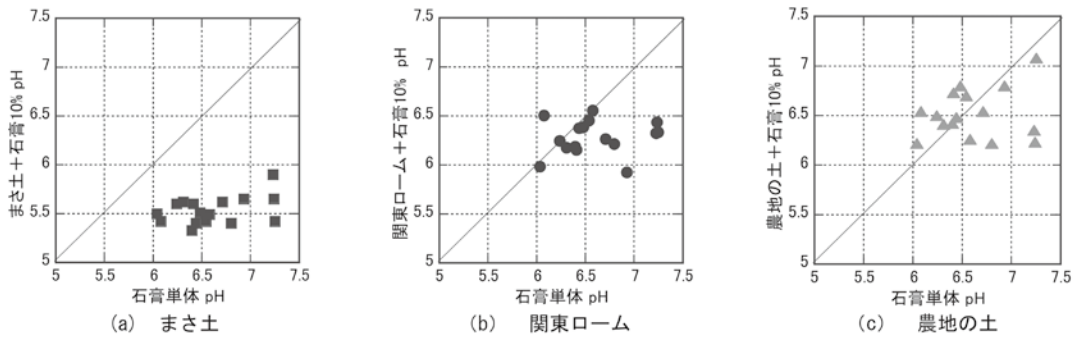


図-11 再生二水石膏と再生二水石膏混合材料のpH の関係

## 5. まとめ

- 1) 製造年月日の経過に伴い、再生二水石膏のフッ素含有量及びフッ素溶出濃度は減少傾向を示す。
- 2) フッ素溶出濃度の減少は、石膏ボードの原材料である天然石膏の供給量の増加、リン酸石膏の供給量の減少が原因と考えられる。
- 3) 再生二水石膏を混合する土質材料の違いによって、フッ素の溶出・吸着特性が大きく影響を受けることが明らかとなった。また、本検討において、関東ロームと農地の土が特に大きなフッ素吸着効果を示した。今後は、土質材料を構成している粘土鉱物等を把握し、フッ素の溶出・吸着特性の影響因子を検討する必要がある。

## 【参考文献】

- 1) 廃石膏ボードの対応策について(社団法人石膏ボード工業会 2010年5月)。
- 2) 吉田ら: 再生半水石膏による地盤改良材の力学特性と環境安全性について, 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, pp.207-208, 2011.
- 3) 肴倉ら: 廃石膏ボード20試料の微量元素組成と溶出特性の類型化, 第9回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp.159-162, 2011.

- 4) 一般社団法人石膏ボード工業会HP, 原料統計
- 5) 財団法人電力中央研究所, 「石膏ボード廃棄物のリサイクルに関する現状調査・分析 - 脱硫石膏需要に及ぼす今後の影響推定 -」, 調査報告: V04019, pp.2, 2005.
- 6) 例えば 中島ら: 回転式破碎混合(ツイスター)工法の地盤環境分野への適用について, 第7回地盤改良シンポジウム論文集, pp.159-162, 2006.

土木学会西部支部研究発表会 2015年3月

## 土質材料の違いが再生二水石膏のフッ素溶出特性に与える影響

福岡大学大学院 学生会員 松尾典映  
 福岡大学工学部 正会員 佐藤研一 藤川拓朗 古賀千佳嗣  
 国立環境研究所 正会員 肴倉宏史  
 石膏再生協同組合 非会員 市川學 太田敏則

### 1. はじめに

現在、日本において循環型社会の形成や最終処分場の残余容量の延命化から産業廃棄物である廃石膏ボードのリサイクルが求められている。その為、廃石膏ボードを中間処理し、その過程に製造される再生石膏の普及が進

められている。しかし、その普及が進まない要因の1つとして廃石膏ボードに含有しているフッ素が地盤内に溶出する恐れがあることが挙げられる<sup>1, 2)</sup>。したがって、再生石膏から溶出するフッ素が地盤に与える影響を把握することは、廃石膏ボードのリサイクルを促進させていく上で重要な課題である。本研究では、廃石膏ボードから製造される再生二水石膏を粒状化させ、農業用地盤改良資材として実用化することを目的にしている。そこで、全国の農地への利用を考慮して、産地の異なる4種類の農地の土質材料を用い、農業用地盤改良資材としての環境安全性の検討を行った。各土質材料と再生二水石膏との混合時におけるフッ素溶出特性について、廃石膏ボードの製造年に着目して検討した結果について報告する。

## 2. 実験概要

### 2-1 実験試料

著者らのこれまでの研究<sup>3)</sup>と肴倉ら<sup>1)</sup>の報告によると、廃石膏ボードのフッ素含有量は製造年によって異なることが明らかになっている。その傾向は廃石膏ボードの製造年の経過に伴って、フッ素含有量は減少傾向を示すことが確認されている。そのため、廃石膏ボードのフッ素含有量の影響を考慮するために製造年(1982～2001年の期間に製造された廃石膏ボード)が異なる16種類の廃石膏ボードを用いた。各々の廃石膏ボードは、手作業で紙と石膏に分離した後に、回転式破碎混合混練機<sup>4)</sup>による粉碎、更に2mmのふるいによって夾雑物を取り除いた再生二水石膏を実験に用いている。また、今回は九州と関東の土質材料の違いによるフッ素の溶出・吸着特性を把握するため、4種類の農地の土(以降、農地A, B, C, Dとする)と再生二水石膏を混合し、再生二水石膏混合試料を作製した。表-1に4つの土質材料の写真、表-2に各土質材料の物理特性を示す。強熱減量に着目すると、農地A, Bに対して農地C, Dは高い値を示していることから、有機物の含有量が高いことが分かる。

表-1 4つの土質材料の写真

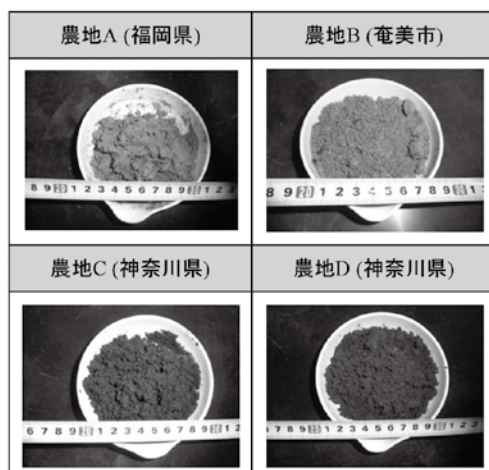


表-2 各土質材料の物理特性

土質材料	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	自然含水比 (%)	細粒含有率 (%)	強熱減量 (750°C)(%)	pH
農地A(福岡県)	2.79	18.90	64	6.8	5.49
農地B(奄美市)	2.66	14.50	23	7.5	6.61
農地C(神奈川県)	2.60	15.60	46	14.9	6.86
農地D(神奈川県)	2.69	26.20	71	15.6	6.93

### 2-2 実験方法

本検討では、土質材料の違いが再生二水石膏混合試料のフッ素溶出特性に及ぼす影響を把握するため、平成30年環境庁告示46号法試験(以下、環告46号試験)に準拠した方法で行った。ここで、再生二水石膏混合試料は、再生二水石膏を各土質材料の絶乾質量に対し10%添加している。この再生半水石膏添加率10%とは、農業用地において100年間再生二水石膏を農業用地盤改良資材として利用し続けた際の試算である<sup>5)</sup>。再生二水石膏単体及び再生二水石膏混合試料を液個比が10となるように混合し、6時間平行振とう後、遠心分離による上澄み液を濾過し、検液とした。フッ素の測定には、イオンクロマトグラフ(ダイオネクス社製 ICS-1000)により行った。

## 3. 実験結果及び考察

図-1に各土質材料を混合した再生二水石膏混合試料におけるフッ素溶出濃度と製造年の関係を示す。図中の実線は、フッ素土壌環境基準値0.8mg/lを示している。ここで、農地における重金属類の環境安全基準は土壌環境基準とは異なり、フッ素の項目は除外されている。しかし、多量にフッ素を含む化学肥料を使用したことが原因により、地下水や他の土壌へのフッ素汚染被害が深刻な問題として挙げられている<sup>6)</sup>。そのため、産業廃棄物である再生二水石膏を新たな農業用地盤改良資材として利用するためには、再生二水石膏から溶出するフッ素が周辺環境に影響を与えない安全な材料であることが求められる<sup>5)</sup>。したがって、本検討では「人の健康の保護及び生活環境の保全のうえで維持されることが望ましい基準」である土壌環境基準を用いて考察する。全条件において廃石膏ボードの製造年代の経過に伴い、フッ素溶出量は減少していることが分かる。この傾向はこれまでの研究成果<sup>1, 3)</sup>と同様な傾向を示しており、これは石膏ボードの原材料として使用されるリン酸石膏の減少が要因の1つとして考えられている。また、土質材料の違いがフッ素吸着効果に及ぼす影響に着目すると、農地C, Dではフッ素土壌環境基準である0.8mg/lを満足する結果となっている。一方、農地A, Bではほとんどの条件において土壌環境基準を満足していない。つまり、同一の再生二水石膏を用いたとしても対象とする土壌によってフッ素溶出挙動は大きく異なることが明らかとなった。ここで、土壌によってフッ素溶出挙動が異なる要因を把



握するため、各土質材料の細粒分含有率について着目し整理を行った。図-2に土質材料の細粒分含有率と再生二水石膏混合試料のフッ素溶出濃度の関係を示す。フッ素溶出濃度は細粒分含有率に関係なく、溶出していることが分かる。既存の研究では、細粒分に重金属類は吸着すると報告<sup>7)</sup>されており、その特性は汚染土壌における浄化技術対策として幅広く用いられている。しかし、細粒分含有率とフッ素吸着効果に一義的な関係は見られなかった。次に、図-3に土質材料の強熱減量と再生二水石膏混合試料のフッ素溶出濃度の関係を示す。強熱減量の増加に伴い、フッ素溶出濃度は減少していることが分かる。さらに、製造年が異なっても、同様な傾向を示している。このことから、本検討において各土質材料の強熱減量にフッ素溶出濃度が影響されていることから、土質材料に含有している有機物がフッ素を吸着し、フッ素溶出抑制効果を発揮したと考えられる。したがって、再生二水石膏混合試料から溶出するフッ素の挙動は、対象となる農地の土の細粒分含有率よりも強熱減量が重要と

示唆される。今後は、有機物の中でも特に吸着効果に寄与している粘土鉱物(例えば、アロフェンやイモゴライト等)を同定していく必要があると考える。

#### 4. まとめ

- 1) 再生二水石膏混合試料から溶出するフッ素溶出挙動は、製造年の経過に伴い減少することが明らかとなった。
- 2) 土質材料の違いによってフッ素吸着効果は異なり、土質材料の細粒分含有率よりも強熱減量に大きく影響を受けることが示された。
- 3) 土質材料によっては、再生二水石膏と土質材料を混合することにより溶出するフッ素が土壌環境基準を満足することが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) 肴倉ら：廃石膏ボード20試料の微量元素組成と溶出特性の類型化,第9回環境地盤工学シンポジウム論文集,pp.159-162,2011.
- 2) 亀井ら：高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.91-98, 2009.
- 3) 松尾ら:製造年月日に着目した再生二水石膏の溶出特性, 第11回地盤改良シンポジウム論文集, pp.109-112, 2014.
- 4) 中島ら：回転式破碎混合工法の地盤環境分野への適用について,第7回地盤改良シンポジウム論文集, pp.159-162, 2006.
- 5) 石膏再生協同組合：再生石膏を用いた農業用土壌改良資材の環境安全品質ガイドライン(試行版第三版), 平成25年
- 6) 結田ら：肥料起源フッ素の畑地における土壌蓄積と地下水浸への浸透-林地、水田との比較-,日本土壌肥料学会, p308,2000.
- 7) 伊藤ら：湿式分級洗浄及び天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討, 日本原子力学会和文論文誌,11巻4号,pp.225-271,2013.

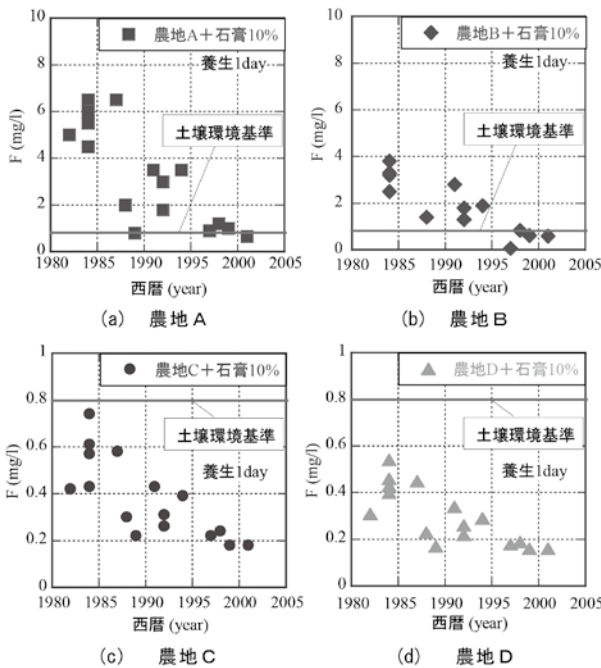


図-1 再生二水石膏混合試料のフッ素溶出濃度

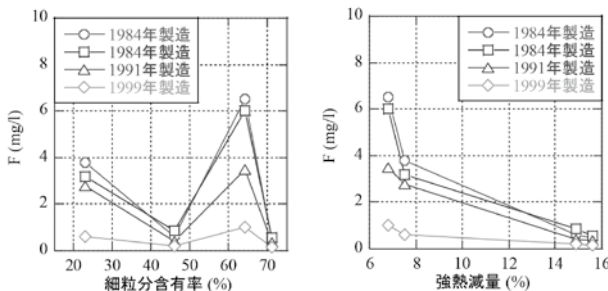


図-2 細粒分含有率とフッ素溶出濃度の関係

図-3 強熱減量とフッ素溶出濃度の関係

#### <研究成果>

1. 松尾典映・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣：新築系再生半水石膏の混合率の違いが軟弱地盤改良効果に及ぼす影響, 平成24年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.549-550, 2013, 3月.
2. 松尾典映・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣：再生

- 半水石膏の品質が軟弱地盤改良効果に及ぼす影響,第48回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.635-636, 2013, 7月.
3. 松尾典映・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣: 解体・新築系石膏ボード混合率を考慮した再生半水石膏の地盤改良効果とフッ素溶出特性, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会, pp.245-246, 2013, 10月.
  4. N. Matsuo, K. sato, T. Fujikawa and C. Koga: Effect of Quality of Recycled Bassanaite on Soft Ground Improvement, 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Environment in Asia, pp.205-206, 2013, 11.
  5. 新 翔一郎・松尾典映・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣・肴倉宏史: 再生半水石膏による路床・路盤材の改良効果に関する実験的検討, 平成25年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.417-418, 2014, 3月.
  6. 松尾典映・新 翔一郎・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣・肴倉宏史: 廃石膏ボードの製造年月日の違いに着目したフッ素溶出特性, 平成25年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.419-420, 2014, 3月.
  7. 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, 第49回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.537-538, 2014, 7月.
  8. 松尾典映・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣: 再生半水石膏を用いた改良土の再泥化特性, 土木学会第69回年次学術講演会概要集, pp.633-634, 2014, 9.
  9. 松尾典映・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣・肴倉宏史・市川 學・太田敏則: 製造年月日に着目した再生二水石膏の溶出特性, 第11回地盤改良シンポジウム論文集, pp.109-112, 2014, 11月.
  10. 松尾典映・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣・肴倉宏史・市川 學・太田敏則: 土質材料の違いが再生二水石膏のフッ素溶出特性に与える影響, 平成26年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.345-346, 2015, 3月