

半水石膏を用いた地盤改良について

佐田建設(株)試験品質グループ ○ 特別会員 井野 隆
(株)黒岩測量設計事務所 正会員 樋口 邦弘
群馬大学大学院 正会員 鶴飼 恵三

キーワード：地盤改良，半水石膏，廃石膏ボード，リサイクル

1. はじめに

建設廃棄物の 10%を占める建設汚泥は 2005 年における再資源化率が 74.5%と小さくしかも建設廃棄物の最終処分量の約 4 割を占めるなど建設汚泥の再生利用は更なる取組みが求められている。2006 年 6 月に策定された「建設汚泥再生利用に関するガイドライン」の中で“発生した建設汚泥を現場内で再生利用する場合並びに排出側工事と利用側工事の元請け業者が同一の場合には「自ら利用」の方策によることができる”とされ、その方策として“発生する建設汚泥を改良し、現場内で再生利用”することが挙げられる。

一方、建築物の解体で発生する廃石膏ボードは毎年増加し、2004 年で約 140 万トンに達し、今後、ひっ迫する管理型最終処分場での処分が求められることから、再資源化の促進が緊急な課題となっている。廃石膏ボードすなわち石膏（二水石膏）は、その粉を熱処理すると半水石膏となるが、水と反応するとともに二水石膏となり、固化する特性がある。この特性を再生利用に利用する一つの有力な方策として、半水石膏を地盤改良に用いることが考えられる¹⁾。

半水石膏を改良材として地盤改良した施工例として、群馬県内では 2 例が挙げられる。1 つの施工例は 2005 年に県道舗装改良工事における軟弱路床改良の試験施工²⁾（本編では“路床改良”と記述する）の例が最初である。さらに、2 つ目の施工例は、2006 年ため池の改修で発生する堤体の掘削土を半水石膏で改良し、この改良土を堤体施工位置で締固めて新たに堤体を再構築した施工例である。この施工例では室内配合試験を実施し³⁾、得られた配合量をもとに原位置における試験施工で確かめ、ため池の堤体の再築堤が行われた（本編では“築堤改良”と記述する）。

今回、群馬県内で実施されたこの二件の工事实施例における配合量決定と締固めの強度管理について述べ、当該改良土と長崎市内の河川改修における改良土（本編では“長崎市内の河川底泥土改良土”と記述する）について、それぞれフッ素（F）の溶出試験および硫化水素（H₂S）の測定を行った結果をまとめ報告する。

2. 廃石膏ボードの再資源化

2-1 廃石膏ボードから半水石膏へ

廃石膏ボードを破砕分離してできた粉末状の石膏（二水石膏）を 150℃前後で熱処理すると半水石膏ができる。この熱処理の一例を図-1 に示す。

半水石膏は水と反応して二水石膏に戻り、短時間で固化する特徴がある。その化学反応式を下記に示す。

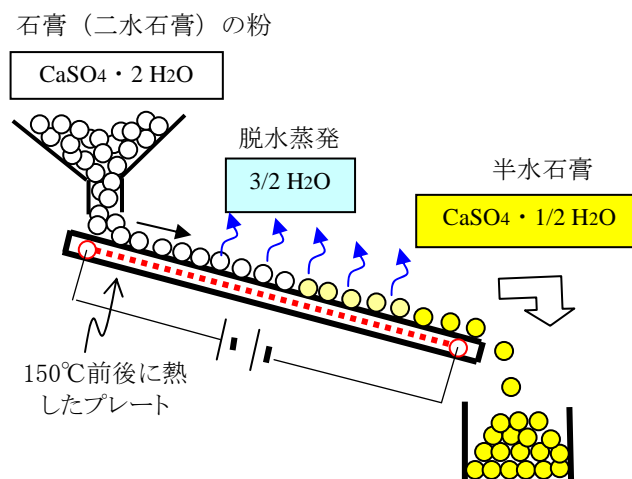
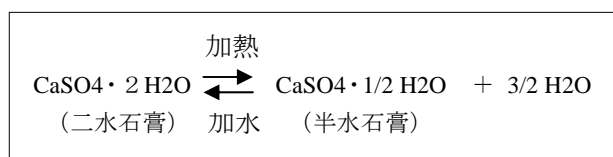


図-1 半水石膏化装置の一例

2-2 半水石膏と水の混合による固化状況

半水石膏に、水の分量を変えて混合した供試体を作成し一軸圧縮試験を行った。

図-2 では、半水石膏 1 に対する水の混合割合を（水/半水石膏）容積比および重量比で示す。以後、容積比および重量比と呼ぶ。図-2 に示すように容積比 0.5（重量比 0.75）においてほぼ均一な固化状態となり、一軸圧縮強度も約 $qu = 1100\text{kN/m}^2$ と最も大きくなった。容積比 0.3（重量比 0.45）では、水が不足して反応できない部分が発生し、不均一な状態となり強度は小さくなった。また逆に水の容積が大きくなると、反応に加わることができずに余った状態の水が、固化した二水石膏と共存するようになり、強度が小さくなった。容積比 1（重量比 1.5）の一軸圧縮試験後の供試体の状況を写真-1 に示す。

これらの状況から、地盤改良において土の含水比と半水石膏の混合量の関係が締固め時のトラフィカビリティの確保に大きく影響するものと言えよう。

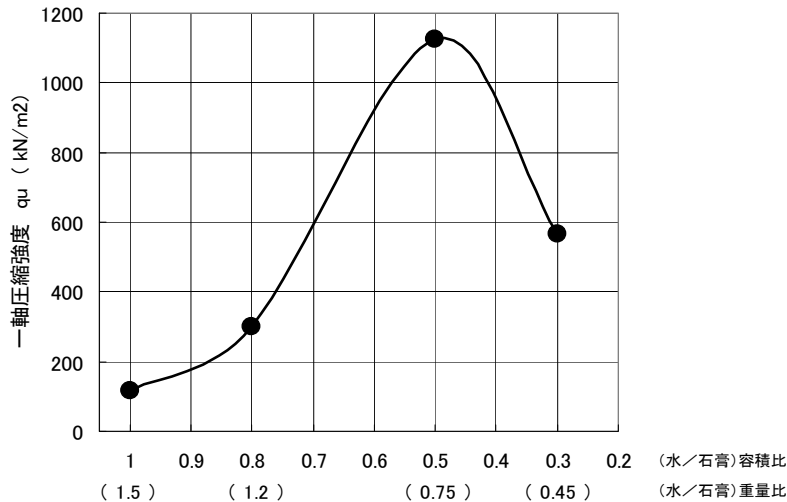


図-2 半水石膏の固化と一軸圧縮強度



写真-1 せん断後の供試体の状況
容積比 1 (重量比 1.5)

3. 路床改良の配合量と改良結果

対象の路床土は細粒分 50.3%で、自然含水比 35.2%の砂質シルトである。

現状の路床土 CBR 値は 0.7%と軟弱路床となることから、地盤改良による路床の安定処理を試験的に行う。

3-1 決定添加量と CBR 値

室内配合試験の条件は以下の通りとした。
路床設計 CBR 8 となる改良厚さと目標改良 CBR18.1%から必要添加量を決定した。

今回改良効果の検証として従来から改良材として用いられている生石灰と、今回、半水石膏+GR の 2 種類により室内配合を行った。その改良効果を図-3 に示す。

半水石膏+GR の“+GR”は石灰系固化材の添加を示す。今回、石灰系固化材“GR”を 20%加えた。

半水石膏のみの改良土の供試体を水深した場合、泥土化することがあり、地下水より下位にあたる固化した改良土から二水石膏の一部が溶出する可能性が懸念される。

半水石膏に石灰系固化剤を添加して、室内配合試験を行った結果、改良土を水浸した状態で放置しておいても、固化した供試体は水中で砕けて泥状になることはなく、このことから半水石膏に石灰系固化材を添加することで、固化した二水石膏が溶出することはないと判断される。

室内配合試験の結果から、必要添加量が生石灰で 121kg/m³、半水石膏+GR で 116kg/m³と、半水石膏+GR がわずかながら少ない添加量となった。なお、添加量 150kg/m³を超える添加量では半水石膏+GR の硬化強度が急増し、生石灰の 2 倍近い CBR 値を示していることが判る。

3-2 施工結果の検証

改良面の現場 CBR 試験と、改良全層の確認のためスウェーデン式サウンディング試験を実施し、施工後の改良効果を確認した。その結果を図-4 及び図-5 に示す。

① 現場 CBR 結果 (図-4 参照)

改良後 1, 3, 7 日経過の改良路床面でそれぞれ CBR 値を測定した。

1 日経過時点ではまだ両改良地盤ともに目標 CBR 強度に至らないが、3 日目に CBR 値 18.1%を満たすことができた。7 日経過でさらに強度増加が認められる。

なお、生石灰では 7 日データが 3 日に比して減少しているがこれは改良性状のバラツキが考えられる、

② サウンディング試験 (図-5 参照)

改良後 1, 3, 7 日と経過するに従い明らかな強度増加がみられる。

特に半水石膏改良の地盤ではその傾向が顕著で、改良全層 (70cm) がほぼ一様に強度増加している。

一方、生石灰改良地盤では増加傾向にバラツキが見られ、深度方向に強度増加が小さくなっている。

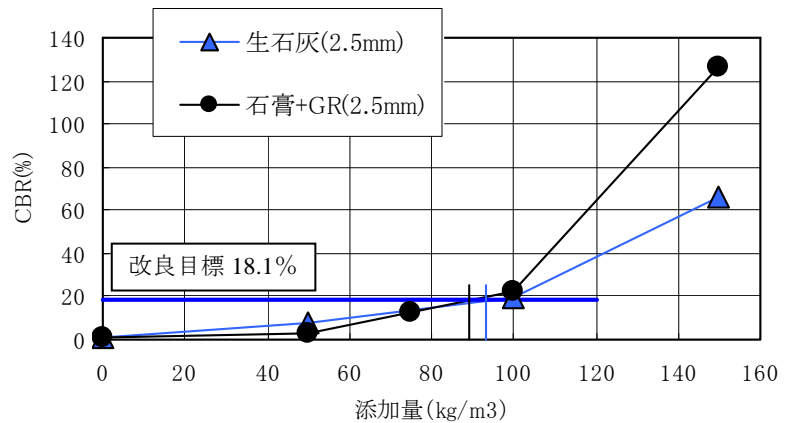


図-3 添加量と CBR 値の関係

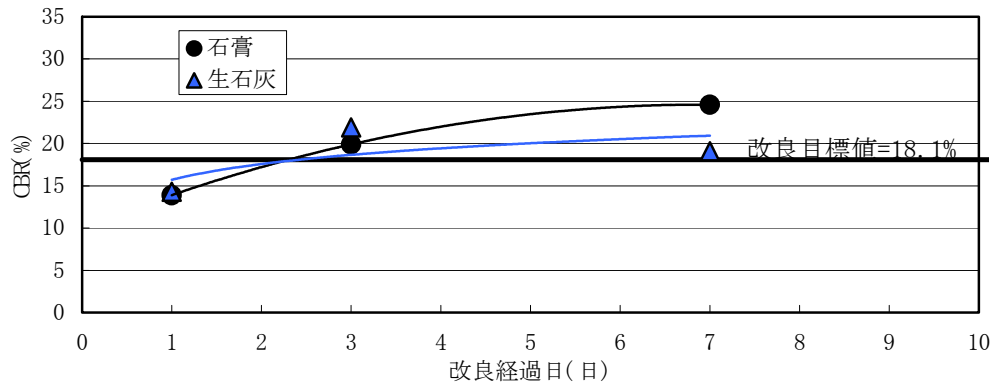


図-4 半水石膏および生石灰による改良経過日数と現場 CBR の関係

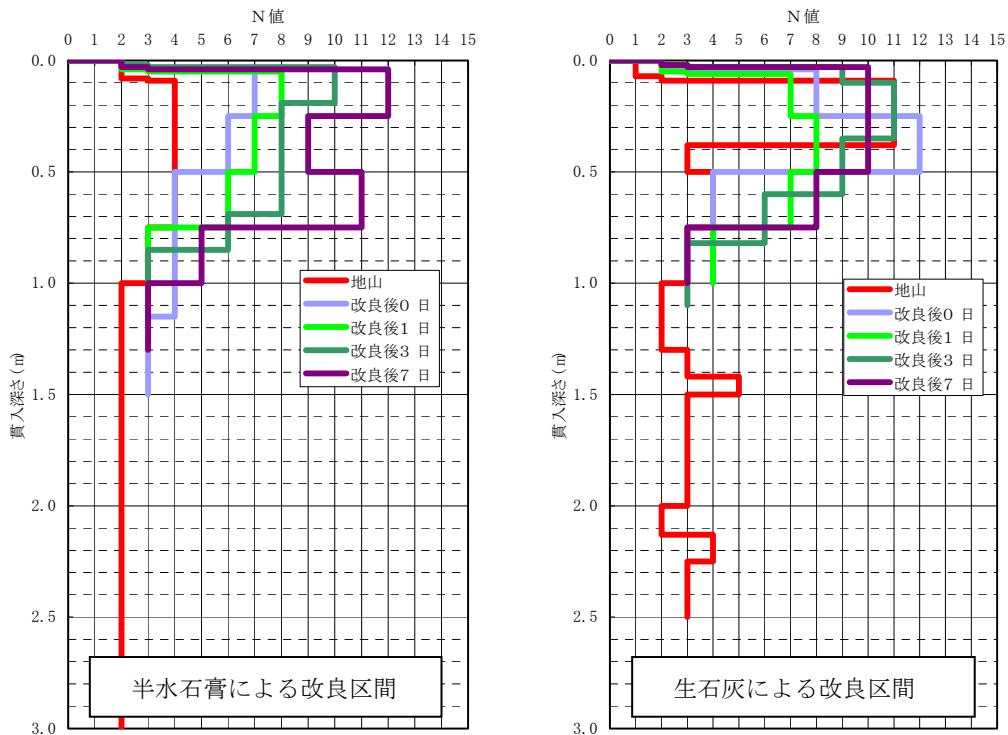


図-5 半水石膏と生石灰による深度方向の改良効果の比較

(スウェーデン式サウンディング試験による改良後の強度：換算 N 値による)

4. 築堤改良土の配合量と管理値

ため池改修において発生する堤体の掘削土は細粒分 59%で、含水比 58%と高含水比状態である。改修前の堤体土はコーン貫入抵抗値 $q_c=140\sim 320\text{kN/m}^2$ と極めて小さく軟弱な地盤であることから、この堤体から掘削した土は転圧が困難と判断し、掘削土を地盤改良して再生利用することとした。

4-1 配合量とコーン貫入抵抗値

仮置きした掘削土に対して朝から半水石膏を加えよく練り合わせ、その改良土を用いて午後から堤体盛土として転圧を行う 1 サイクルの施工工程を考え、室内配合試験の条件を以下の通りとした。

室内配合を行った改良土を用いて 4 時間後に締固めた供試体を用いてコーン貫入試験を行い、普通ブルドーザの走行可能に必要なコーン貫入抵抗値 $q_c \geq 500\text{kN/m}^2$ ⁴⁾ を確保できる配合量を選定する。

なお、半水石膏による改良土の不溶化方法として石灰系改良材を用いた。

これらの条件を基に実施した室内配合試験で得られる半水石膏の配合量（石灰系改良材を加えた総量）とコーン貫入抵抗値 q_c との関係を図-6 に示す。図-6 には配合量に併せて半水石膏：石灰系改良材の比を (6.5 : 3.5) または (7 : 3) として表示しており、以後この表示で説明する。

配合試験結果をまとめ、以下に示す。

配合量として、③ の 150kg/m^3 (6.5 : 3.5) が適するものと判断できる。

- ① 配合量 150kg/m^3 (7:3) では、配合から4時間を経過した後、改良土を締固めた状態でも q_c 値は 200kN/m^2 以下と小さく、しかも時間を経過しても強度増加はほとんど認められず、目標とする q_c 値 500kN/m^2 以上を満たすことができない。
- ② 配合量 150kg/m^3 (6.5:3.5) は、配合から4時間経過した後改良土を締固めると目標とする q_c 値 500kN/m^2 以上を満たすことができ、1日の中で配合から締固めまでの工程が可能となる。
- ③ 配合量 175kg/m^3 (7:3) は、配合から1時間後に改良土を締固めると、 q_c 値 700kN/m^2 前後の値が得られ、目標とする q_c 値 500kN/m^2 より大きな強度が発生する。また、土も乾燥気味となることから配合量が過多と言えよう。
- ④ 配合量 200kg/m^3 (7:3) では、さらに q_c 値が大きく、締固め等の施工性に問題が生じる可能性がある。

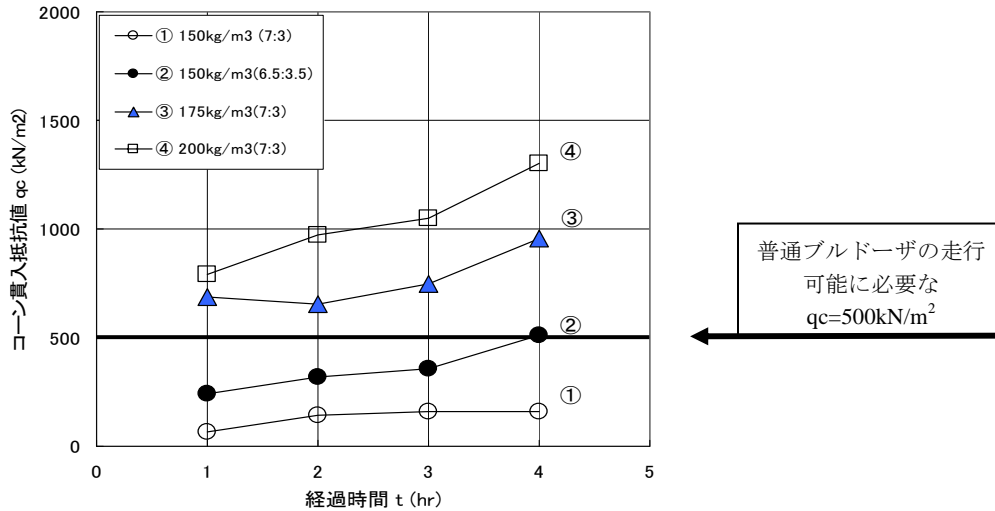


図-6 配合量とコーン貫入抵抗値 q_c との関係

4-2 改良土の三軸圧縮強度 (c' - ϕ') とコーン貫入抵抗値 q_c 値

(1) 室内土質試験結果

配合量 150kg/m^3 (6.5:3.5) で締固めた供試体を用いて圧密非排水(CU)三軸圧縮試験およびコーン貫入試験を行った。この試験値は以下のとおりである。

単位体積重量 $\gamma_t = 16.5 \text{ kN/m}^3$
 粘着力 $c' = 113.6 \text{ kN/m}^2$
 内部摩擦角 $\phi' = 37.5^\circ$
 コーン貫入抵抗値 $q_c = 759 \text{ kN/m}^2$

(2) 施工管理値の設定

この試験値をもとに改良土の土質定数として $c' = 100\text{kN/m}^2$, $\phi' = 35^\circ$ を採用し安定解析を行った結果、堤体の安全率は $F_s = 1.76$ となり、設計安全率 $F_s = 1.2$ を十分に満足することから、

改良土を用いた堤体の盛土施工管理値：コーン貫入抵抗値 $q_c = 760 \text{ kN/m}^2$ 以上を採用した。

(3) 施工管理の結果

改良土を 30cm の厚さで巻き出し転圧した築堤施工では、

現場で実測したコーン貫入抵抗値 $q_c = 997 \text{ kN/m}^2$ 以上 $\geq 760 \text{ kN/m}^2$ (管理値)

と、施工管理値を十分に満足する結果が得られた。

室内配合試験で得られる強度に比べ、現場で締固めた改良土はやや大きな強度が生じている傾向が確認されたことから、室内配合試験における配合量の決定に配慮が必要となろう。

5. 半水石膏を用いた改良土のフッ素 (F) の溶出試験および硫化水素 (H_2S) 測定

群馬県内のため池築堤改良土、および長崎市内の河川底泥土改良土の2カ所で実施した改良土のフッ素 (F) の溶出試験結果と硫化水素 (H_2S) の測定結果について述べる。

5-1 フッ素 (F) の溶出試験結果

今回、廃石膏ボードを熱処理して得られた半水石膏を用いた群馬県内のため池築堤の改良土および長崎市内の河川底泥土の改良土についてフッ素 (F) の溶出試験を行った。この結果を表-1 および表-2 に示す。この結果、長崎市内の

河川底泥土改良土においては、群馬県内のため池改良土に比べ、フッ素 (F) の測定値がやや多くなっているものの、いずれも基準値を下回っている。

表-1 群馬県内のため池築堤改良土のフッ素 (F) 溶出試験結果 (基準値：土壤汚染対策法による)

試料採取位置		測定値	基準値	計量方法
堤体 (ボーリング コア試料)	堤頂から 1.0m の深さ	0.2 mg/L	0.8 mg/L	JIS K 0102 34.1
	堤頂から 2.5m の深さ	0.1 mg/L 未満		
	堤頂から 4.5m の深さ	0.1 mg/L 未満		

表-2 長崎市内の河川底泥土改良土のフッ素 (F) 溶出試験結果 (基準値：土壤汚染対策法による)

試料採取位置		測定値	基準値	計量方法
河川改修区間	上流部	0.18 mg/L	0.8 mg/L	平成 15 年環境省告示第 18 号
	中流部	0.43 mg/L		
	下流部	0.70 mg/L		

5-2 硫化水素 (H₂S) の測定結果

(1) 半水石膏を用いる場合の注意点

各地の安定型最終処分場で硫化水素の発生事故が起きている。建設混合廃棄物や廃石膏ボード類も嫌気性の環境の下で、有機酸濃度が高く、かつ pH の中性化等の条件が加わると硫化水素が発生することが示されている⁵⁾。硫化水素の発生抑制方法として、鉄分の豊富な火山灰質土壌と鉄粉廃棄物が高い硫化物捕捉能力を有していることが研究で明らかとなっている⁶⁾ことから、鉄分を多く含む土に対する半水石膏を用いた土質改良そのものが硫化水素抑制工法となる。

(2) 群馬県内のため池築堤改良土の鉄分含有量と硫化水素抑制効果

堤体の掘削土は鉄分を 2.6~2.9% 含んでいる。湿潤密度 16.5kN/m³ の掘削土 1m³ の重量 1650kg 当たりに鉄分が最低でも 2.6% すなわち 42.9kg が含まれている。

半水石膏の配合量 (150kg×0.65=) 97.5kg に対し、半水石膏に対する鉄分含有量は (42.9÷97.5)×100=44% となる。

石膏ボード粉末に含鉄土壌を 10% 以上含むと硫化水素ガス濃度が 0 という研究結果⁶⁾があり、この研究結果を考慮すると、堤体掘削土に半水石膏を配合した改良土は硫化水素抑制効果を有すると言えよう。

(3) 群馬県内のため池築堤改良土の硫化水素 (H₂S) 測定結果

ため池の築堤改良土の内部では、池の水が堤体土の中を少しずつ下流に向かって流下しており、上記の硫化水素が発生した嫌気性環境とは異なっている。今回堤体に設置したボーリング孔の中からガスを吸引して室内で分析した測定値と、孔口でガス検知管を用いて測定した硫化水素 (H₂S) の濃度を表-3 に示す。いずれも測定限界以下であった。

表-3 群馬県内のため池築堤改良土の堤体内の硫化水素 (H₂S) の測定結果

測定日	測定深度 (m)	測定値 (ppm)	計量方法
平成 19 年 2 月 27 日	ボーリング孔内 (GL-3m)	0.001 未満	環境庁告示第 9 号 (昭和 47 年) ガスクロマトグラフ法
平成 19 年 7 月 26 日	ボーリング孔口 (GL-0m)	0.01 未満	ガス検知管を使用

注) 2 月 27 日の測定は、ボーリング孔内 GL-3m から孔内のガスを吸入し、室内でガスクロマトグラフ法により測定

(4) 長崎市内の河川底泥土改良土の硫化水素 (H₂S) 測定結果

長崎市内の河川底泥土の改良土における硫化水素 (H₂S) の測定結果を表-4 に示す。

表-4 長崎市内の河川底泥土の改良土の硫化水素 (H₂S) の測定結果 (測定は、ガス検知管を用いた)

試験位置		測定値 (平成 19 年) (ppm)		
		5 月 15 日	6 月 20 日	7 月 21 日
河川改修区間	上流部	0.02 未満	0.02 未満	0.02 未満
	中流部	0.02 未満	0.02	0.02 未満
	下流部	0.02 未満	0.15 (注)	0.02 未満

(注) 6 月 20 日の下流部における硫化水素 (H₂S) の異常値は、測定孔の底に蛙の死骸が混入していたことによるものと考えられる。

長崎市内の河川底泥土の改良土についても、蛙の死骸が混入していた特異な例を除き原位置における硫化水素 (H_2S) の発生はほとんど 0.02ppm 未満である。

なお、硫化水素 (H_2S) の基準値を以下に示す。

0.02 ~ 0.2	ppm	: 悪臭防止法に基づく大気濃度規制
0.03	ppm	: 人間で臭いがわかる濃度
3	ppm	: 不快臭
10	ppm	: 労働安全衛生規制値 (許容限界濃度)

6. おわりに

群馬県内において半水石膏を用いた地盤改良を行う機会を得た。道路改良では工事区間 400m の一部 40m 区間を利用しての改良実証施工で、県内初の試みもあって室内配合試験段階から手探り状態での開始となった。施工に当たっても効果の実証が確認されるまではやや不安視する面もあったが、ほぼ期待どおりの結果が得られることができた。また、老朽ため池は堤高 4.2m、堤長 20m、堤体積 700m³ の小規模な均一型フィルダムからなる。この築堤施工においても現地発生土の日々変わる含水比と半水石膏の配合量について微調整が必要だったことから、ため池の堤体築造においては現場における経験の積み重ねが求められよう。

安定型採取処分場で廃石膏ボードから硫化水素 (H_2S) の発生した事例があり、さらにフッ素 (F) の溶出が課題となっていることから、今回、廃石膏ボード再資源化研究会では、半水石膏を用いたこれまでの地盤改良箇所から硫化水素 (H_2S) の発生の有無とフッ素 (F) の溶出の有無を確認するため、群馬県内のため池築堤改良土において実施したボーリング孔内での硫化水素 (H_2S) の測定とボーリングコアによるフッ素 (F) の溶出試験を行い、また、山本芳弘氏から長崎市内の河川改修で実施された底泥土の改良土についての硫化水素 (H_2S) の測定結果とフッ素 (F) の溶出試験結果の提供を受け、これらの測定値を併せて平成 19 年 8 月 17 日群馬県桐生市で開かれた廃石膏ボード再資源化情報交換会において発表した⁷⁾。この結果、両改良土とも硫化水素 (H_2S) およびフッ素 (F) の測定値は基準値を満たしていた。本報告ではこの発表資料を併せまとめた。

今後は、同様な改良土についてのデータを蓄積し、これらの課題に取り組んでいくと共に、室内配合試験の段階で硫化水素 (H_2S) およびフッ素 (F) の測定を実施する必要がある。特に、硫化水素 (H_2S) の測定については供試体の養生方法等を含めた室内での測定方法の統一が望まれる。

参考文献

- 1) 鵜飼恵三：石膏ボード廃材から生成された石膏粉末の地盤改良材としての有効性。
- 2) 高橋和敏・樋口邦弘・鵜飼恵三・後藤両市：廃石膏ボードを再使用した地盤改良の試み，第 2 回地盤工学会関東支部研究発表会，pp39-41，2005 年 11 月。
- 3) 高橋重剛・樋口邦弘・関晴夫・鵜飼敬三：廃石膏ボードを用いた改良土によるため池改修の試み，第 57 回農業土木学会関東支部大会，pp.1-4，2006 年 10 月。
- 4) 土地改良事業設計指針「ため池整備」(社)農業土木学会，pp167，2006 年。
- 5) 小野雄策・田中信壽：建設廃棄物埋立における硫化水素ガス発生の可能性と管理方法に関する考察，廃棄物学会論文誌 Vol.14 No.5，pp248-257，2003 年。
- 6) 小野雄策・成岡朋弘・康躍恵・松山道太・佐藤茂夫：廃石膏ボードの埋立における環境影響—含鉄廃棄物および含鉄火山灰土壌による硫化水素発生抑制効果—，埼玉県環境科学国際センター報 第 4 号，平成 15 年。
- 7) 樋口邦弘・鵜飼敬三：廃石膏ボードを用いた改良土の施工例と計測結果，廃石膏ボード再資源化研究会—第 3 回廃石膏ボード再資源化情報交換会—，2007 年 8 月 17 日。