

博士論文

Ground Improvement Design Using Recycled Bassanite

再生半水石膏を用いた地盤改良に関する実務設計法の提案

平成 26 年 3 月

群馬大学大学院工学研究科

環境創生工学領域

小林 正樹

目次

1. はじめに	1
1.1 背景と目的	1
1.2 構成と概要	4
1.3 石膏の特性	4
第1章の参考文献	6
2. 廃石膏ボード再資源化に向けた過去の研究事例	7
2.1 蓬萊・亀井らの研究	7
2.1.1 再生半水石膏製造装置の開発	7
2.1.2 MCクレーを用いた基礎研究	8
2.2 鶴飼・樋口・アーメドらの研究	10
2.2.1 谷埋め盛土（太田市工業団地造成地）の事例	10
2.2.2 ため池（群馬県月夜野）の事例	21
2.3 その他、全国での事例の紹介	23
第2章の参考文献	24
3. 廃石膏ボードを用いた半水石膏の高含水汚泥改良材としての施工	25
3.1 はじめに	25
3.2 改修方法と堤体の改修断面形状	26
3.3 掘削土の物理特性と土質改良材料	26
3.4 室内配合試験	26
3.5 施工後の腹付け盛土の安定性	29
3.6 改良土の電子顕微鏡（SEM）と回折X線分析装置（XRD）による分析	30
3.7 強度発現メカニズムの解析	33
3.7.1 実験方法	33
3.7.2 実験結果と分析	36
3.8 まとめ	44
第3章の参考文献	45

4. 廃石膏ボードを用いた再生半水石膏の路床改良材としての施工	46
4.1 再生半水石膏の路床改良材としての利用【桐生での施工】	46
4.1.1 概要	46
4.1.2 土の性質	46
4.1.3 改良材の添加率の決定	47
4.1.4 環境試験結果	49
4.1.5 現場施工	49
4.2 再生半水石膏の路床改良材としての利用【富岡での施工】	50
4.2.1 概要	50
4.2.2 土の性質	50
4.2.3 改良材の添加率の決定	51
4.2.4 環境試験結果	53
4.2.5 現場施工	53
4.3 まとめ	54
第4章の参考文献	55
5. 再生半水石膏を用いた路床改良に関する実務設計法の提案	56
5.1 改良材の性質	56
5.2 改良材配合量の決定方法	59
5.3 改良された路床土の環境試験方法	62
5.4 路床改良に関する新たな実務設計法の提案まとめ	64
5.4.1 推奨される改良材の性質	64
5.4.2 推奨される改良材配合量の決定方法	64
5.4.3 推奨される路床改良土の環境試験方法	65
第5章の参考文献	66
6. 廃石膏ボード再資源化の今後の展開と開発	67
6.1 再生半水石膏を混合した培養土に対する植物の栽培実験	67
6.1.1 目的	67
6.1.2 実験方法	67
6.1.3 実験結果と考察	68
6.2 エネルギー軽減型地盤改良材の試行	70
6.2.1 実験方法	70
6.2.2 実験結果	73
第6章の参考文献	75

7. 総括および今後の展望	76
7.1 本論文の総括	76
7.2 今後の展望	78
謝 辞	79
本論文に関する発表論文	80

1. まえがき

1.1 背景と目的

石膏ボードはアメリカで発明された石膏を芯材としてその両面を石膏ボード用原紙で被覆成型した建築用内装材料で、防火性、寸法安定性、遮音性に優れ、加工も容易であり、経済的にも安価な材料である。このような特性と高度成長期の住宅需要に支えられて、石膏ボードは広く普及しており、その後もその生産量は増大の一途を辿っている。日本における 2011 年の石膏ボード生産量は、年間 4.7 億 m² に達しており、その原料となる石膏は、主に国内の副産石膏を使用し、ボード用原紙には大部分をダンボールや新聞紙等の回収古紙を使用している。¹⁾ 石膏ボードは、建築資材としてその特徴を生かし、建築物の安全性と居住性向上に貢献するとともに、原料として他産業の副産品を大量に使用することにより、地球環境保護に貢献している材料と考えられてきた。



写真 1-1 廃石膏ボード

一方、日本の一般家屋の平均耐用年数は、欧米の約 100 年にくらべて 30 年程度と極めて短く、しかも木造建築が中心となることから、耐用年数が過ぎた家屋の解体時には大量の廃木材が発生することになる。なかでも、内壁や天井の建築資材として普及してきた石膏ボードに関しても耐用年数を過ぎた家屋の解体により、石膏ボード廃材（以下、廃石膏ボード）の発生量が増加してきている。廃石膏ボードの状況を写真 1-1 に示す。

その結果、廃石膏ボード排出量は、2025 年には 200 万トンに急増するという推計が報告されている。また全国の都道府県においても、最終処分場不足が懸念されているため、今後は廃石膏ボードの適切な有効利用方法の開発と最終処分量の最小化に努める必要がある。

廃石膏ボードは、建設リサイクル法で特定建設資材廃棄物として今現在まだ指定を受けていないことから、再利用や再資源化はほとんど実施されていないのが実情である。このことは廃石膏

ボードの発生量が、コンクリート塊、アスファルト屑、廃木材の発生量にくらべると、1/20 程度の約 120 万トンと少ないために行政の対応が遅れたことに起因していると考えられる。

これまでの廃石膏ボードに関わる行政の対応は、平成 13 年環境省通達により、紙を取り除いた石膏は安定型最終処分場への処分が可能となった。これまでは廃石膏ボードを最終処分する場合、土中に生息する硫酸塩還元菌の影響を受けて有害な硫化水素を発生させるとの知見から、廃石膏ボードは管理型の最終処分場に処分することが義務付けられていた。この硫化水素の発生要因として、硫酸塩還元菌の代謝を司る糖質（紙：セルロース）に起因することが明らかとなり、石膏ボードから紙を取り除いたものからは有害な硫化水素の発生は無いものと考えられた。これらの科学的知見により、紙を取り除いた石膏粉に関しては安定型の最終処分場への処分が可能となった。

この環境省通達により中間処理業では、管理型の処分費用を頂いて廃石膏ボードを引き取り、石膏粉と紙とを分別処理し、石膏粉は処分費が安価な安定型最終処分地へ、紙は管理型の最終処分地への最終処分を行うことにより処分費の差益を得る新たなビジネスが生まれた。この事実上の規制緩和によって廃石膏ボードの中間処理業者が増加し、紙と石膏粉とを分別する専用の機器が開発されるに至った。これらのことが経済面から廃石膏ボードの再利用の研究の必要性を阻害する要因になっていたものと考えられる。

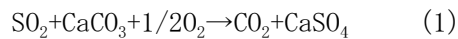
その後、紙を取り除いた石膏粉からも有害な硫化水素の発生の可能性があることが科学的知見により明らかとなった。これを受けて環境省は、平成 18 年通達により、廃石膏ボードの安定型最終処分の全面禁止を打ち出した。この環境省通達により、安定型と管理型の処分費の差益を得るビジネスモデルが成り立たなくなった。

さらに、廃石膏ボードの発生量が今後増加するとの予測から、処分費の高騰を招くとともに、全国自治体の管理型最終処分場が飽和状態に近づくなどの社会問題に発展している。これらのことから、廃石膏ボードのリサイクル化が急務であり、廃石膏ボードの再資源化に向けての取り組みを活発化させている。

最近の行政の動きとして、平成 23 年 4 月国土交通省より『廃石膏ボード現場分別解体マニュアル』【試行版】が作成されている。²⁾ これは廃石膏ボードのリサイクル化を促進するために廃石膏ボードを特定建設資材に指定するための準備処置と位置付けられる。実際に解体工事を実施する建設業者を対象に、廃石膏ボードのリサイクルを前提とした解体・分別・搬出・運搬などの標準的な手順を示している。このようにして行政においても廃石膏ボードの再資源化に関するマニュアルや法律の整備が徐々にではあるが進められている。

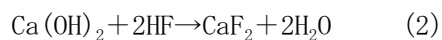
廃石膏ボードの再資源化の用途としては、その発生量の多さから建設資材や土木資材へのリサイクルが望まれる所である。石膏粉（二水石膏）の状態ですりつぶし、粘土や軟弱地盤への含水比調整用としての添加や加熱処理を施して水硬化性のある半水石膏に加工して土壌の改良材としての実施例も少なくない。廃石膏ボードの中間処理業者を対象とした再生石膏（二水石膏）を加熱処理して水硬化性の半水石膏を製造する小型の装置の開発も進んでいる。さらに、再生石膏をさらに高温に加熱処理を施し、無水石膏を生産する装置の開発も始まっている。また、セメントの硬化遅延剤としてⅡ型の無水石膏が用いられているが、Ⅱ型の無水石膏に加工した再生石膏を、粒度調整を施して実際のセメントに添加する試みも行われている。

現在では、石膏ボード石膏ボード生産量 500 万トンのうち、約半数の 250 万トンが化学石膏と呼ばれる排煙脱硫石膏として供給され、残りの半数は石膏鉱石として海外から輸入されている。排煙脱硫石膏は、専ら火力発電所等の工場化石燃料を燃焼させたときに発生する有害な硫黄酸化物（一酸化硫黄：SO，二酸化硫黄：SO₂，三酸化硫黄：SO₃等）を除去するために、石灰石（CaCO₃）を水に混濁させた石灰石スラリーを排ガスと接触させ、式（1）に示す化学反応（石灰－石膏法）で生成することが知られている。³⁾



このように、石膏ボードが急速に普及してきた背景には、副産物を原料として安い原価で製造され比較的安価に販売されていることが挙げられる。このことから、コスト面で廃石膏ボードから再び石膏ボードへのリサイクル化を阻害させている要因の1つでもあると考えられる。

さらに、廃石膏から製造された再生石膏を土壌の改良材として適用する場合、その製造由来から石膏に含まれるフッ素の溶出量に注意が必要である。これは排煙脱硫石膏にフッ化カルシウム：CaF₂が含まれることに起因する。フッ化カルシウムは、石炭焚きの火力発電所などの排煙中に含まれるフッ化水素：HF と脱硫のために排煙中に添加される消石灰とが、式（2）に示す化学反応で生成し排煙脱硫石膏に混入するためであると考えられる。



フッ素（F）は周期表のハロゲン族に属し、最も電気陰性度の強い物質である。工業的には、これらの特徴から耐付着性、耐酸性、耐熱性、耐薬品性に優れる PTFE（ポリテトラフルオロエタン、商標名フロン）やフッ素ゴム等が知られている。フッ素の人体への有用性は、虫歯予防として昔から知られており、北米やオーストラリア等では水道水に 1～1.5mg/L のフッ素化合物を添加している。これは歯の主成分であるハイドロキシアパタイト（水酸磷灰石 Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂）が耐酸性の高いフルオロアパタイト（フッ素磷灰石、Ca₅(PO₄)₃F）になることに起因する。フッ素の人体への有害性は、フッ素の過剰摂取により歯が白く濁る白斑歯や骨硬化症、関節の痛み、関節炎等の健康被害を招くことが知られている。これら人体への健康被害を回避するために、日本のフッ素溶出に関する土壌の環境基準は、0.8mg/L と非常に厳しい規制値となっている。

本研究では、廃石膏ボードを地盤改良材として大量に再資源化する道を開くと共に、循環型社会構築を目指し、また環境面と産業面において大きな社会的貢献となることを目的として、廃石膏ボード再生半水石膏を用いた地盤改良材に関する実務設計法の提案に関する研究を行った。また、他の実用的で経済的な再利用方法についても検討を行った。

1.2 構成と概要

本研究では、循環型社会の構築に貢献するため、廃石膏ボードから製造した再生半水石膏を用いて土壌の改良材として適用した場合の地盤工学的有効性を明らかにしている。具体的には、高含水比の軟弱地盤に再生半水石膏を適用した場合の一軸圧縮強さなどの力学的特性が改善されることを示し、強度発現のメカニズムを明らかにしている。実際に廃石膏ボードから製造した再生半水石膏を用いて試験施工を行った群馬県内の工事を題材にして研究を行った。

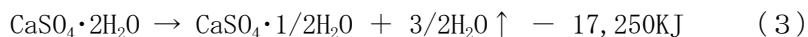
また、再生半水石膏を土壌の改良材として適用した場合にフッ素等の有害物質の溶出が土壌環境基準を超える場合があるが、本研究では環境工学的側面より再生半水石膏に含まれるフッ素の不溶化技術の有効性を検証している。具体的には再生半水石膏由来で含有しているフッ素の不溶化に関して、再生半水石膏にアルミナ (Al_2O_3) や酸化カルシウム (CaO) を添加して高 pH 環境下でエトリンガイトを生成させ、このエトリンガイトによるフッ素イオンの置換反応がフッ素不溶化に有効であることを示している。そして、このエトリンガイトを安価に生成させるために、廃棄物である廃石膏ボードと工業的副産物である高炉スラグ、現在多くの産業廃棄物を原料としているセメントとの組み合わせで地盤改良材を製造し使用する技術開発を行い、土壌改良材として活用できることを明らかにしている。

更には、群馬県の県道路床改良をターゲットとした再生半水石膏を用いた地盤改良材に関する新たな実務設計法の提案について取りまとめている。

1.3 石膏の特性

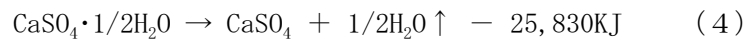
石膏とは、硫酸カルシウム ($CaSO_4$) の化学組成をもつ鉱物の総称であり、結晶水の数によって二水石膏 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$: 硫酸カルシウム 2 水和物)、半水石膏 ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$: 硫酸カルシウム 1/2 水和物)、無水石膏 ($CaSO_4$: 硫酸カルシウム) の 3 種類に大別される。また、半水石膏は α 型と β 型に、無水石膏は I 型, II 型, III 型に分類することができる。無水石膏の III 型は 2 種類あり、それぞれ α 型と β 型と呼ばれる。したがって石膏は、結晶水の数とその結晶構造の違いから 7 種類に分けられる。³⁾

二水石膏は、自然界において非常に安定しており、化学的には水とほとんど反応しない。この二水石膏を 120~180°C の温度条件の下、加熱処理することにより、結晶水が脱水して、水硬性を有する半水石膏が生成される。その熱化学式 (3) を以下に示す。なお、右辺のマイナス表示は吸熱反応を表している。



この半水石膏には、先述したように結晶構造の違いにより α 型と β 型に細分できる。これら半水石膏は、水を加えると水和反応を起こし二水石膏に変化するが、その際に短時間で硬化するという性質をもっている。 α 型は緻密な構造で粒子密度が高く、水硬時の強度が β 型より大きいことなどから医療用等に用いられている。一方、 β 型はポーラスな材料で空隙があることから粒子密度が α 型より小さく、石膏ボード等の建築資材として利用されている。これらの半水石膏を 180°C 以上で加熱することにより、全ての結晶水が取れた無水石膏が生成される。その熱化学式

(4) を以下に示す。



無水石膏には、先述したように I 型，II 型，および III 型がある。III 型の無水石膏は 180～350℃で加熱脱水することにより生成されるが，常温において大気中に放置すると空気中の湿気を吸い半水石膏へと戻る性質がある。一方，II 型の無水石膏は，350～1000℃にて加熱脱水することによって得られ，加水しても簡単に半水石膏へは戻らないことから，別名不活性無水石膏と呼ばれる。I 型は，高温無水石膏と呼ばれ，1100℃以上の高温下において生成される。II 型の無水石膏を写真 1-2 に示す。



写真 1-2 II 型無水石膏粉末

第1章の参考文献

- 1) 公益社団法人地盤工学会関東支部：地盤改良材を中心とした廃石膏ボードの再資源化，pp. 14-19，2013.
- 2) 一般社団法人石膏ボード工業会：廃石膏ボードの再資源化について，pp. 16-21，2011.
- 3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課：平成 22 年度 廃石膏ボードの再資源化促進に係る実態調査，pp. 5-14，2010.

2. 廃石膏ボード再資源化に向けた過去の研究事例

廃石膏ボードの再資源化用途として特にリサイクル石膏の大量消費が期待できる地盤改良材としての研究例を以下に挙げる。

2.1 蓬萊・亀井らの研究

2.1.1 再生半水石膏製造装置の開発

蓬萊らは、廃石膏から半水石膏を生産するシステムを研究し、一度に大量の半水石膏を短時間で生産するシステムを開発した。¹⁾ 半水石膏生産システムは、二水石膏である廃石膏を供給フィーダでロータリーキルンへ定量供給し、加熱温度を一次沸点の130℃から二次沸点の180℃の間で管理することによって、半水石膏を短時間に効率よく製造する一連の装置である。ロータリーキルンは、直径1.3m、全長5mであり、被加熱物が進む方向に対して2° 傾斜している。被加熱物は、ロータリーキルンの回転に伴い傾斜角に応じて転がりながら内部を進んでいく。焼成中のロータリーキルンを写真2-1に示す。



写真2-1 焼成中のロータリーキルン

ロータリーキルンは、バーナ火炎を直接ロータリーキルン内部に導入している。バーナ火炎の長さは0.5～1.5m 程度であり、このバーナ火炎が形成される領域では、石膏はバーナ火炎からの輻射伝熱によって予熱される。一方、ロータリーキルンの投入側から1.5m 進んだ地点から先は火炎が存在しない領域となる。この領域では、掻き揚げフライトを取付け石膏を均一に分散させ、熱風（燃焼ガス）との接触面積が増加するように工夫している。加熱を続けると、石膏は100℃を超え125～130℃で一次沸騰が始まる。このとき、結晶水の沸騰による気化潜熱と石膏粒子に流れ込む熱量とがバランスするために、さらに加熱しても石膏温度は上昇せず、内部からの圧力が上昇し、水分は急激に脱離していく。そこでシステムのバーナ燃焼量の制御には、燃焼排ガスのフィードバック制御を採用している。また、ロータリーキルン出口排ガス温度を80～180℃の範囲に設定することで、石膏の結晶水量、すなわち半水石膏と無水石膏との割合をコントロールできる。具体的には、対象とする石膏において、二水石膏の割合が少ない（無水石膏の割合が多い）場合には排ガス温度の設定値を下げ、逆に二水石膏の割合が多い（無水石膏の割合が少ない）場合に

は排ガス設定温度を上げることでコントロール可能となる。熱交換の方法は、被加熱材料と熱媒体である熱風を同一方向に流しながら行うパラレルフロー方式を採用している。この方式では、材料温度よりも排ガス温度の方が高くなるため、ロータリーキルン内で飛散した石膏の微粒子は瞬時に排ガス温度となり、バグフィルタへ排ガスとともに流れていく。排ガス温度が180℃を超えると石膏の二次沸騰が始まり、Ⅲ型の無水石膏となることから、排ガス温度は180℃を超えない範囲で制御することが望ましいとされている。

2.1.2 MCクレーを用いた基礎研究

亀井らは、豊浦珪砂やMCクレー（写真 2-2 成分調整された粘土）を母材に使用して、再生半水石膏の地盤改良材としての有効性を検討するため、各材料に添加し締め固めた試料に対し一軸圧縮試験を行い、最適含水比や最大乾燥密度に代表される締め固め特性や一軸圧縮特性と半水石膏添加率との関係を研究している。²⁾ 研究では半水石膏を添加することにより、豊浦珪砂の締め固め曲線は低乾燥密度・高含水比側にシフトし、MCクレーの締め固め曲線は、高乾燥密度・低含水比側にシフトすることを明らかにしている。さらに、締め固め豊浦珪砂の一軸圧縮強さは、半水石膏添加率が10%程度までは半水石膏を添加しない場合よりも小さいものの、添加率を増加させることによって徐々に増加する傾向を示した。一方、締め固めたMCクレーの一軸圧縮強さは半水石膏の添加によってある程度改善できることが明らかとなった。締め固めた豊浦珪砂の一軸圧縮強さは、半水石膏添加率の違いによらず含水比の増加に伴って減少し、両者に高い相関関係が認められた。一方、締め固めたMCクレーの一軸圧縮強さは、一般の土の場合と同様に含水比の増加に伴って締め固め曲線の乾燥側では直線的に増加し、湿潤側では急激に低下した。このような関係は半水石膏添加率の違いによらず認められた。これらのことから、廃石膏ボードから再生した半水石膏は地盤改良材として十分適応が可能であると述べられている。

亀井らは、廃石膏ボードから製造した半水石膏を混入したセメント改良処理土の一軸圧縮特性について検討するため、高含水比であるため多量の安定材の添加を必要とする軟弱地盤の改良材としての有効性を研究している。³⁾ その結果、半水石膏混入率の増大に伴ってセメント改良処理土の一軸圧縮強さは、直線的に増加していく傾向が認められた。半水石膏混入率の増大に伴って、含水比が直線的に減少するとともに、乾燥密度が直線的に増大することを明らかにした。また、含水比と乾燥密度は半水石膏混入率と極めて高い相関性をもつことを明らかにしている。これらのことから、廃石膏ボードから再生した半水石膏は軟弱地盤の地盤改良材として十分適応が可能であると述べられている。

亀井らは、廃石膏ボードから再生した半水石膏の速硬性に着目し、半水石膏を利用したセメント改良処理土の一軸圧縮強さに及ぼす養生期間の影響を研究している。⁴⁾ 研究条件として、対象土を含水比140%程度の超軟弱地盤とし、半水石膏添加率を0%、20%、40%とし、また、養生日数は1日、3日、7日、28日と設定した。研究結果では、養生日数7日までの場合では、一軸圧縮強さが添加率の増加に伴って増加し、半水石膏を混入した検体は短期の養生期間における強度増加が著しいことを実証している。また、養生日数28日においても、添加率40%の場合に最も大きな強度が得られた。このことは、軟弱地盤における施工に際して半水石膏を適用した場合、トラフィカビリティーの改善と施工期間の短縮に極めて有効であると述べている。

亀井らは、セメント安定処理土の一軸圧縮強さが半水石膏添加率と密接な関係にあることから、その原因として半水石膏の添加に伴うエトリンガイトの生成量の増加を指摘している。エトリンガイトの生成の化学反応式によれば、既往の配合ではアルミナ成分の欠如が明らかになった。⁵⁾ 検体の配合例におけるアルミナ成分の不足を補うため、新たにリサイクル材でアルミナ成分の比較的豊富な石炭灰の混合を試みた。その結果、石炭灰を混合した場合には、半水石膏添加率の増加に伴って強度変形特性がさらに改善されることが明らかになった。また、電子顕微鏡を用いて検体内部の構造観察を行い、半水石膏と石炭灰の添加率の違いによってエトリンガイトの生成割合が変化していく過程を視覚的な観点から検証している。これらのことから、半水石膏の添加と石炭灰の添加がエトリンガイトの生成が構造強度に影響を与え、セメント改良処理土の強度に大きく関与していると述べている。



写真 2-2 成分調整済粘土試料 (MC-clay)

2.2 鶴飼・樋口・アーメドらの研究

2.2.1 谷埋め盛土（太田市工業団地造成地）の事例

鶴飼らは、群馬県太田市工業団地造成現場で再生半水石膏と高炉セメントを用い軟弱粘性土の改良工事を行った。⁶⁾、⁸⁾ 現場は谷埋め盛土予定箇所の浅層に軟弱な粘性土が存在し、そのまま盛土を行うと、地震時に軟弱層に沿って滑りが生じると予想されたため対策されることになった。造成現場の航空写真を写真 2-3 に、盛土部の断面図を図 2-1 示す。



写真 2-3 造成現場の航空写真

谷埋盛土部A（縦断面図）

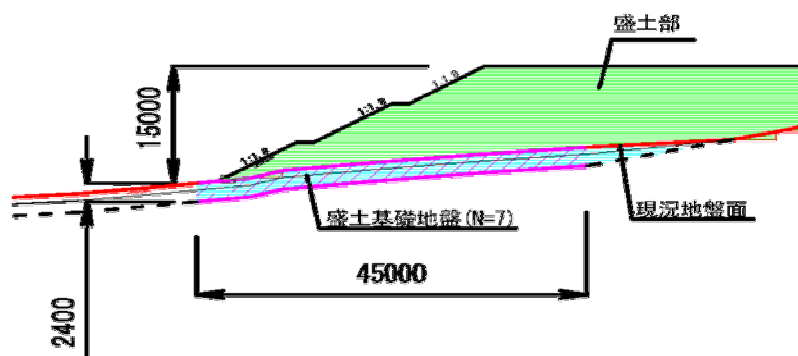


図 2-1 盛土部の断面図

A 盛土箇所の現地盤の堆積土は礫混じり粘性土で、厚さは 2.4m、平均N値は 7 であった。施工後の状態を想定して盛土の安定解析を行った。設計水平震度を 0.2 とし、許容安全率は常時に 1.5、地震時に 1.0 とした。この結果、盛土基礎地盤で 130kN/m^2 の一軸圧縮強度が必要であるという結果が得られた。現地盤はこの強度を満足しないため、地盤改良を行うこととした。現場施工の精度を考慮して、室内試験で得られる一軸圧縮強さの基準を 260kN/m^2 ($=130 \times 2$) と設定した。B 盛土箇所についても同様な検討を行った結果、室内試験で得られる一軸圧縮強さが 260kN/m^2 であれば満足されることがわかった。

土試料の採取から一軸圧縮試験を実施するまでのプロセスを写真 2-4 に示す。土試料採取時に深さに応じて土層と土質が変化していたため、最も軟弱と思われた深さ 2.5m と 4.5m の地点から

2種類の粘性土を採取し、それらを混合して実験に使用した。平均含水比は、上部で42%、下部で45%であった。塑性指数 I_p は、上部が38、下部が33である。



写真 2-4 土試料の採取から一軸圧縮試験を実施するまでのプロセス

再生半水石膏における半水石膏の混合割合は80%であった。再生半水石膏の粒度試験結果を図2-2に示す。粒度は、砂とほぼ同じである。

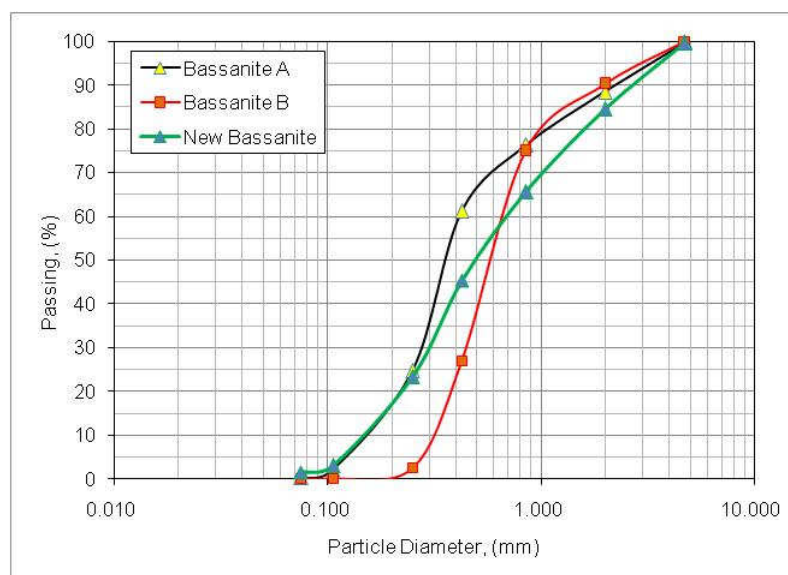


図 2-2 使用した再生半水石膏の粒度分布曲線

半水石膏による改良土の強度増加促進と有害物質の溶出を低減させる目的で、半水石膏に加えてセメントを改良材として用いた。セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を用いて実験を行ったが、実際の施工では、六価クロムの溶出を抑えるため高炉セメントB種を使用した。

次に、一軸圧縮試験で使用した供試体を用いて改良土が以下の環境基準値を満たすかどうか、確認を行った。フッ素：溶出試験で0.8mg/L以下、ホウ素：溶出試験で1.0mg/L以下、六価クロム：溶出試験で0.05mg/L以下、硫化水素：敷地境界で0.2-0.02ppm以下。フッ素、ホウ素、六価クロムは、土壤汚染対策法施行規則に定められる溶出量測定方法により行った。硫化水素の検出については、検知管による測定方法を独自に考案して行った。その方法を以下の写真2-5に示す。



(左上) ① テドラーバッグに一軸試験使用後の試料を入れて、脱気する。

(右上) ② テドラーバッグに200mLの空気を入れる



(左上) ③ ②の状態を一日放置する

(右上) ④ 検知管を使って内部の硫化水素ガスの濃度を測定する

写真 2-5 一軸圧縮供試体からの硫化水素の発生を検出する方法

一軸圧縮試験の結果と事前に行った予備試験結果(半水石膏を0-10%まで、セメントを0-3%まで、それぞれ4段階に変化させた)より、現場での配合比を、土の重量に対して、高炉セメントB種を2.5%、80%以上の純度を持つ半水石膏を4%と決定した。この配合比で現場において試験施工、続いて実施工を行い、圧縮強さは満足の行く結果となった。

環境試験の結果から、ホウ素、六価クロムについては、基準値以内に十分収まることがわかった。硫化水素については、試験結果と現場の状況から見て、基準値以上の量が発生する環境には無いと判断された。フッ素については、ほぼ基準値に近い値が得られた。なお普通ポルトランドセメントを用いた実験も行ったが、六価クロムの溶出量が基準値を超える場合が見られたため、実施工では高炉セメントを使用した。

環境試験については、フッ素の溶出量が基準値に近い値を示したことが問題となった。現在の溶出試験の方法は、固化した改良土を砕いて試験をすることになっており、現実的でないと考えた。このため、一軸圧縮試験後の供試体を蒸留水に浸漬させて溶出量を測定する方法も実施した。その結果、溶出量は基準値以内に十分収まることがわかった。

なお、再生半水石膏を現場施工に用いる場合のコストについても考察を行い、問題点を把握することができた。実用化のためには、強度と環境安全性に加えて経済性も重要な要素となる。

(1) 強度試験結果

施工現場での再生半水石膏の添加割合を推定するために、本試験を行う前に以下のような予備試験を実施した。

- ① 再生半水石膏の割合(湿潤土に対する重量比)を0.0、5.0、7.5、10.0%の4種類。
- ② セメントの割合(湿潤土に対する重量比)を0.0、1.5、2.25、3.0%の4種類。
- ③ セメントは、高炉セメント、普通ポルトランドセメントの2種類。
- ④ 養生日数は0、1、3、7、14、28の6種類。
- ⑤ 同じケースで供試体を3本作成。

以上の条件で予備試験を行った。予備試験の結果は以下のようである。

- ① 予備試験段階のため、試料の作成方法が不慣れであったことと、再生半水石膏に含まれる純粋な半水石膏の割合が70%と低かったことから、一軸圧縮強さが小さい結果となった。
- ② 再生半水石膏の割合が多いと粉のまま残留する可能性があること、および経済的観点から、本試験での再生半水石膏の割合を5%と決定した。
- ③ 普通ポルトランドセメントを用いたケースでは、六価クロムの溶出量が基準値を超える結果があった。

以上の結果を踏まえて、純粋な半水石膏の割合が80%の再生半水石膏5%と高炉セメント2.25%で改良した粘土の一軸圧縮強さが約250 kN/m²となることを確認したうえで、本試験を実施した。

この試験の目的は、施工現場で粘土に混合する再生半水石膏とセメントの配合割合を決定することである。また、決定した配合割合で改良した粘土が環境基準を満たすことを確認することである。

本試験の条件を以下に示す。

- ① 再生半水石膏の割合（湿潤土に対する重量比）を5%とする。
- ② セメントの割合（湿潤土に対する重量比）を0, 1.5, 2.25, 3.0%の4種類。
- ③ セメントは高炉セメントと普通ポルトランドセメントの2種類。ただし，強度特性を比較するために普通ポルトランドセメントをあえて使用した。
- ④ 養生日数は0, 1, 3, 7, 14, 28の6種類。
- ⑤ 同じケースで供試体を3本作成。

本試験における一軸圧縮試験の結果を図2-3および図2-4に示す。

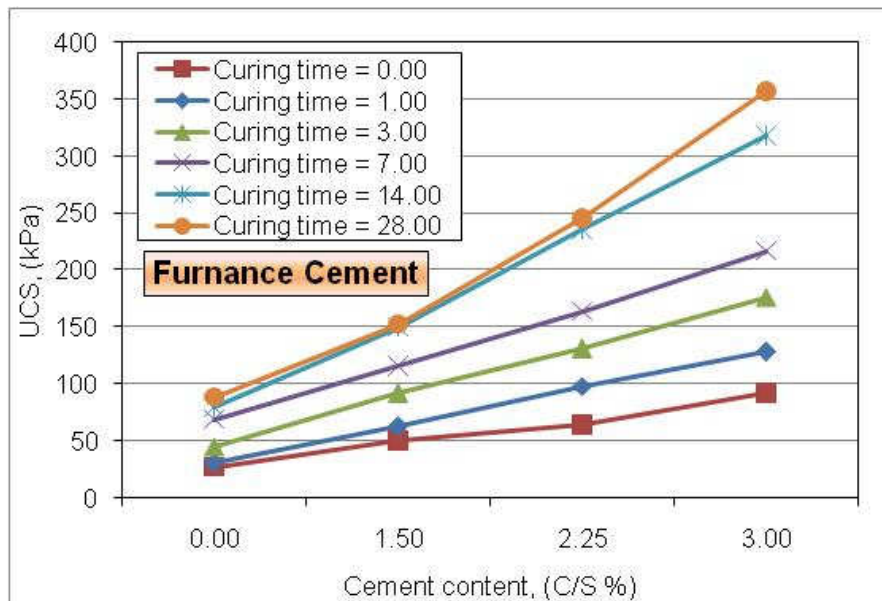


図2-3 高炉セメントを用いた場合の一軸圧縮強さとセメント重量比の関係

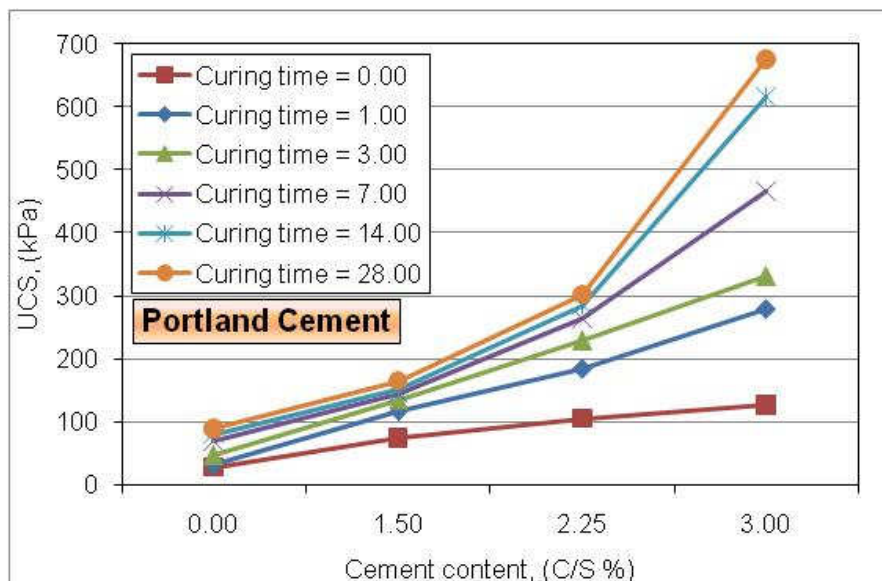


図2-4 普通ポルトランドセメントを用いた場合の一軸圧縮強さとセメント重量比の関係

結果は次の通りである。

- ① 本研究で対象とした粘土については、普通ポルトランドセメントを用いた場合のほうが、高炉セメントを用いた場合より、強度がより大きくなった。ただし、粘土の種類が異なると、逆の結果が得られる可能性がある。
- ② 養生期間が3日くらいまでは、セメント重量比と強度の間には直線的な関係があるが、その後の養生期間では、セメントの混合割合が大きくなると強度は急激に大きくなる。
- ③ セメント重量比が0%のときの結果から、再生半水石膏の強度への寄与率はセメントに比べて小さいことがわかった。

この結果を踏まえて、施工現場での配合割合を、高炉セメント2.5%、再生半水石膏4%に決定した。この配合に基づいて粘土の改良土を作成して、一軸試験と環境試験を行い、必要な条件を満足することを確認した。

(2) 環境試験結果

一軸圧縮試験で使用した供試体を用いて改良土が以下の環境基準値を満たすかどうか、確認を行った。

フッ素：溶出試験で0.8mg/L以下、ホウ素：溶出試験で1.0mg/L以下、六価クロム：0.05mg/L以下、硫化水素：敷地境界で0.2-0.02ppm以下

フッ素、ホウ素、六価クロムは、土壤汚染対策法施行規則に定められる溶出量測定方法により行った。硫化水素の検出については、検知管による測定方法を独自に考案して行った(図2参照)。

予備試験と本試験を対象にして環境試験を行った。本試験における環境試験の結果は以下の通りである。

- ① すでに述べたように普通ポルトランドセメントを用いたケースでは、六価クロムの溶出量が基準値を超える場合が見られた。六価クロムに関しては社会の関心が大変高いため、安全性を考慮して高炉セメントを採用することとした。
- ② ホウ素の溶出量は基準値の1/10以下となることが確認された。
- ③ 硫化水素発生の有無については、すでに説明したように室内での検出方法を独自に考案した。一軸試験で使用された供試体(体積約200mL)をテドラーバッグに入れ、200mLの空気を注入し、24時間後検知管で吸入して0.1ppm以下であることを確認した。
- ④ フッ素の溶出量については、大部分が基準値0.8mg/Lを満たすが、一部に基準値を満たさないケースが見られた。結果については、この後に説明する。なお、自然の粘土に0.5mg/Lのフッ素が含まれており、基準値を満たさないケースでは自然由来のフッ素の影響が大きいのではないかと考えられた。

フッ素の溶出量に関する環境試験結果を表2-1に示す。考察結果を以下に示す。

- ① 養生日数が増加すると溶出量は減少する。養生日数が28日を超えると基準値を満たす。これは、改良土の内部で化学反応が養生とともに進むためと思われる。
- ② 普通ポルトランドセメントのほうが高炉セメントより溶出量が少ない。
- ③ 自然由来のフッ素の量が多いため、この影響が大きいと考えられる。

表 2-1 フッ素の溶出量 (単位 mg/L)

養生日数	再生半水 石膏のみ	高炉セメント重量比			普通ポルトランドセメント重量比		
		1.5%	2.25%	3.0%	1.5%	2.25%	3.0%
1日	0.4	0.9	0.9	1.2	1.2	0.7	0.7
14日	0.5	0.8	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
28日	0.5	0.7	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7

このように、フッ素の溶出については、長期的な問題は無いものの、養生日数が少ない期間には基準値を超えるケースもあることがわかった。この問題をさらに詳細に検討した。その結果を以下に示す。

フッ素の溶出試験は、土壤汚染に係る環境基準に基づいて行われている。この試験法では、土塊を粗砕して 2mm 以下の土壌を用意し、これに中性の純水を加え、6 時間ほど振動させた後に溶出試験を行うように規定されている。しかしながら、このような粗砕された状態は固化した改良土では起こりえないので、この試験結果を現実として認識するのは問題があると考えられる。現在、改良土に適した試験法は存在しないので、現場の改良土にふさわしい実用的な試験法を今後考案する必要があるとしている。このような理由から、次のような新たな試験を実施した。

地盤改良の施工後に改良土（粘性土では内部への浸透は起こりにくい）の上を雨水や、少量の地下水が一部流れる可能性がある。現実にはこれに対する安全性を確かめればよいと考えられる。このような状態に対応しうる試験法としてタンクリーチング試験がある。これは、試料の重量の 10 倍の水に試料を静置して溶出量を測定する試験法である。これを実施した。適切な大きさの容器がなかったため、写真 2-6 のような小さな容器を用いて行った。その結果、現場配合土（高炉セメント 2.5%、再生半水石膏 4%）に対して、一週間後の溶出量は 0.15mg/L になり、基準値よりかなり小さな値となった。



写真 2-6 施工現場の実態を想定して実施したフッ素の溶出試験

なお、参考として、改良土の pH 試験を行った。その結果を図 2-5 に示す。石膏のみ（セメントがゼロ）のとき、改良土の pH は 6-7（中性）であり、セメントが 1.5%以上になると pH は 12 程度（強アルカリ）になることがわかった。

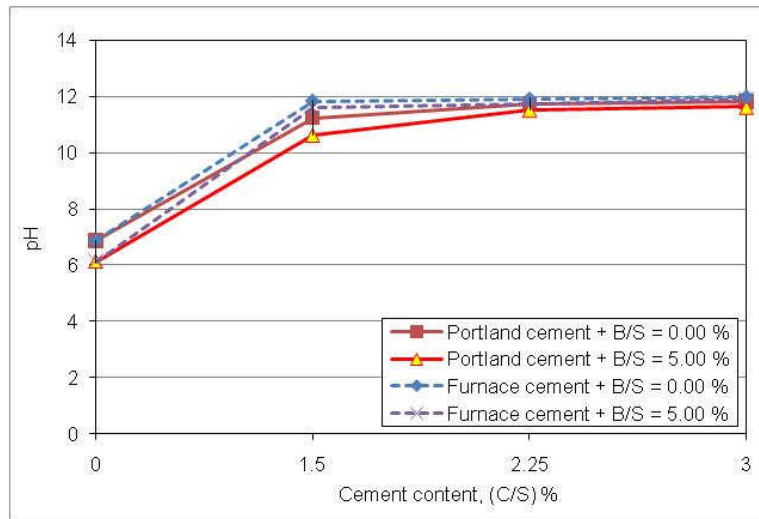


図 2-5 改良土の pH 試験の結果

次に実際の施工に先だって、試験施工を行った。その様子を写真 2-7 に示す。配合設計から決定した配合比である再生半水石膏 4%、高炉セメント 2.5%の割合で実際の施工と同じ重機を使用して土と混合し、ブルドーザで転圧した。転圧後に現場コーン貫入試験により強度を測定した。



写真 2-7 試験施工の様子とコーン貫入試験による強度測定

図 2-6 にコーン貫入試験の結果から換算された一軸圧縮強さと転圧後の経過時間との関係を示す。これより 2 時間後には設計基準強度をクリアしていることがわかる。このように基準強度をはるかに超える強度が現場で得られる理由は、室内試験では、実際の地盤中の特に軟弱な箇所から試料を採取して実験に使用したためである。すなわち実際の軟弱層には、より含水比が低い箇所や礫を含む部分が相当含まれており、実際の施工ではそれらの箇所まで含めて改良されるためである。

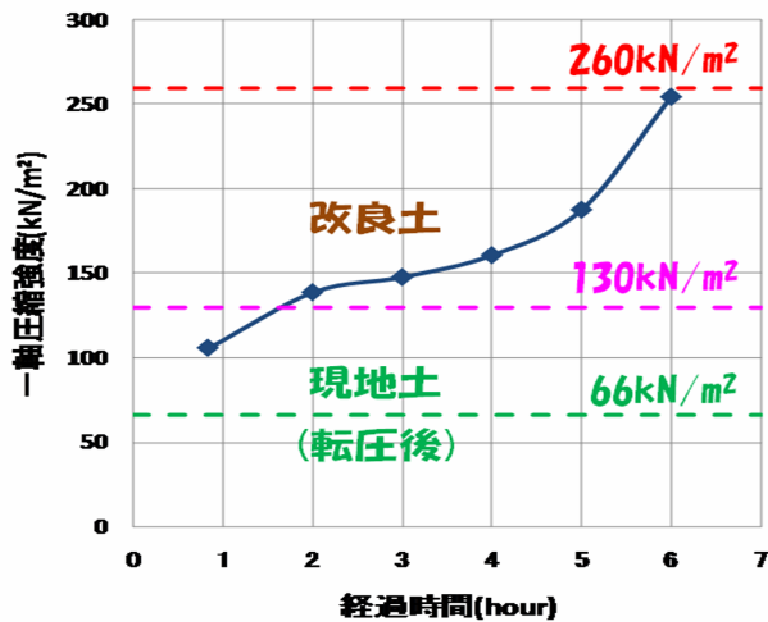


図 2-6 コーン貫入試験から換算された一軸圧縮強さと経過時間の関係

試験施工の良好な結果を踏まえ、実施工を行った。盛土部Aの箇所の施工前の状況を写真 2-8 に示す。軟弱層は掘削されて、ここより高い箇所に移され、そこで改良材が混合攪拌された。それを図 4 の場所に戻して転圧された。



写真 2-8 施工前の施工箇所

実施工での攪拌の様子を写真 2-9 に示す。混合攪拌と並行して、攪拌が完了した改良土を順次埋戻し場所へ移動し、転圧を行った。それらの様子を写真 2-10 に示す。転圧の厚さは 30cm であり転圧回数は片道計 6 回である。転圧終了の 1 時間後にコーン貫入試験が行われた。結果を図 2-7 に示す。強度は一軸圧縮強さに換算されている。各層において設計基準強度を満足しており、十分な改良効果が得られていることがわかる。



写真 2-9 実施工での混合攪拌の様子



写真 2-10 実施工での転圧の様子

各層ごとの強度試験結果

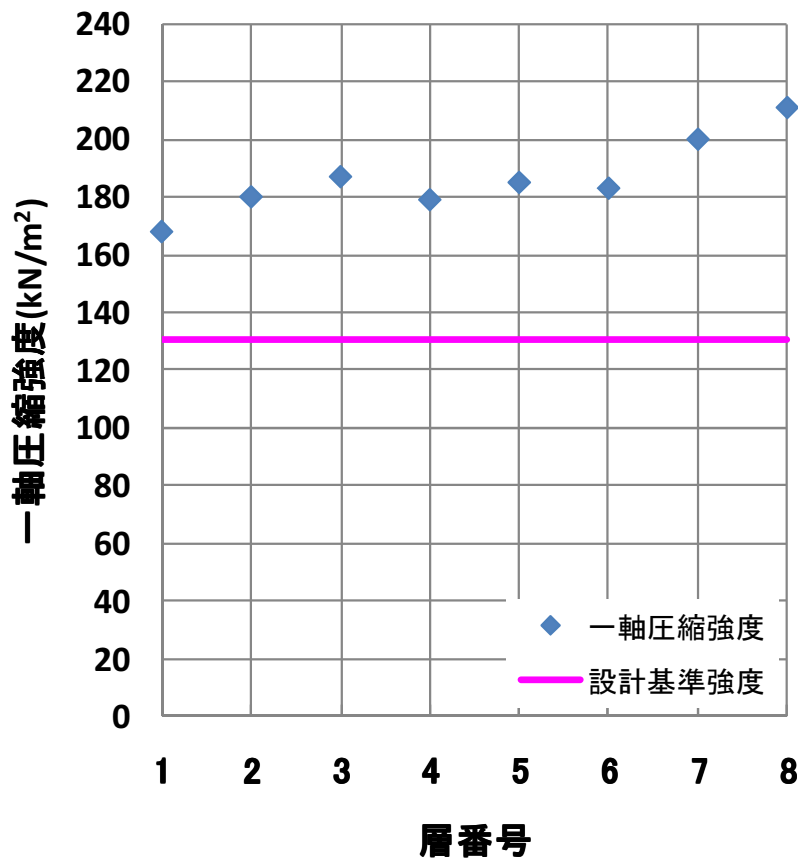


図 2-7 転圧 1 時間後に行われたコーン貫入試験結果から換算された一軸圧縮強さ

なお、施工完了後に、盛土下から浸み出している地下水を後日採取して、環境試験を実施した。フッ素の溶出試験の結果は、0.2mg/L 未満となり、環境基準を十分に満足した。

再生半水石膏を普及させるには、強度性能と環境安全性に加えて、経済性の観点を考慮する必要がある。残念なことであるが、社会的に有意義であってもコストが合わない、役所も建設会社も受け入れてくれないという現実が時々見られる。再生半水石膏を安くするには、解体現場からの廃石膏ボードの収集⇒石膏粉と紙の分離⇒再生石膏の半水化、の過程を一つの業者で請け負うシステムにするなどして価格を下げる努力が必要である。それぞれの過程で利益を出そうとする仕組みでは割高になる。また、輸送コストを減らすために廃石膏ボードを地域内で処理する地産地消のシステムを作る必要がある。

今回の試験の課題などが以下のように示された。

- ① 実際の施工現場を対象にして、再生半水石膏を軟弱粘土地盤の改良に用い、良好な結果を得た。再生半水石膏を利用した軟弱粘土地盤の改良に関して、設計から施工に至るまでの環境安全性を考慮した建設システムを構築することができた。
- ② 再生半水石膏で改良された地盤に適した合理的な溶出試験方法と環境基準値を検討し、提案する必要がある。

③ 再生半水石膏の使用を普及させるには強度性能や環境安全性のみならず経済性も重要な要素となるので、廃石膏ボードの排出から地盤改良における利用に至るまでの一貫した流通システムを構築し、再生半水石膏をより安く供給する体制を作る必要がある。

2.2.2 ため池（群馬県月夜野）の事例

樋口らは、群馬県北部の老朽ため池で再生半水石膏を用い改良工事を行った。^{7)、8)} このため池は、漏水により堤体のほぼ中央が大きく崩壊し陥没し、堤体天端も沈下しその形状がわずかに認めら程度にまで破壊されており、土壌改良工事を行い、堤体を再構築する工事となった。堤体変状の状況を写真 2-11 と図 2-8 に示す。



写真 2-11 堤体変状の状況

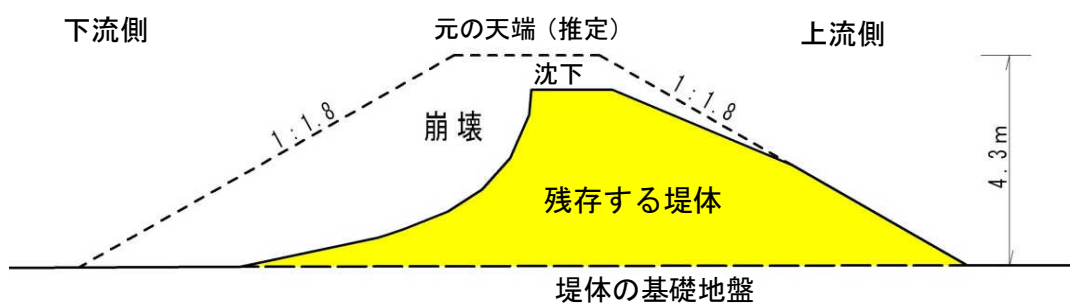


図 2-8 堤体中央部の斜面崩壊と残存する堤体の状況

改良工事は、堤体および池底に堆積した堆積土を掘削して発生した土砂を外部に搬出することなく、発生した含水比の高い土砂を締め固めることができる状態に改良し、得られた改良土で築堤する「自ら利用」を採用した。工期の短縮も考慮し、安定剤として生石灰系改良材を採用し、

再生半水石膏と生石灰系改良材の組み合わせで添加を行った。室内配合試験では、土質改良材の配合量の選定と締固めた改良土の強度、改良土の水浸から推察される石膏の溶出の有無の検討を行った。現場施工では、 1m^3 当たりの配合量 150kg 、再生半水石膏： $150\text{kg} \times 0.65 = 97.5\text{kg}$ 、生石灰系改良材： $150\text{kg} \times 0.35 = 52.5\text{kg}$ を採用した。実施工中の状況を写真 2-12 に示す。施工後、環境モニタリングとして堤体から採取したコアのフッ素溶出試験で基準値 0.8mg/L 以下を確認した。また、ボーリング孔を用いた土質改良土の硫化水素の測定でも硫化水素の発生は認められず、環境影響にも問題がなかったと述べられている。



写真 2-12 施工中の堤体

2.3 その他、全国での事例紹介

佐藤らは、「ふくおか石膏ボードリサイクル研究会」を設立し、福岡における廃石膏ボードのリサイクルに関する研究をスタートさせている。研究体制は、福岡大学工学部、資源循環・環境制御システム研究所、大牟田産学連携室が地盤改良効果と環境影響評価、硫化水素の発生メカニズムと抑制対策、焼成技術、フッ素不溶化技術と分別解体方法の開発を大学として分担研究している。これに研究会メンバーである民間企業4社が再生半水石膏の試料提供、施工性・経済性の検討を行うという体制で研究を進めている。このように大学と民間が産学連携で進めることにより、リサイクルの現状と課題を的確に捉えながら研究しており、大きな特徴となっている。

後藤らは、鹿児島で土木建築工事において再生半水石膏を土質に応じた改良材と同時使用し始めている。再生半水石膏の品質基準を統一し品質保証できる工業製品となり、配合試験、環境試験の方法の確立や効率的な物流が確立しコストが低減すればより幅広く土木分野、建築分野で使用できる可能性がある」と述べられている。

山本らは、株式会社グリーンアローズ中部を設立し、中部地区における廃石膏ボードの適正処理・再資源化を推進し、資源循環型社会の実現の思想から平成22年より再生石膏粉を利用した地盤改良材の製造を開始している。施設内での処理状況を写真2-13に示す。この地盤改良材は廃石膏ボードの二水石膏粉をそのまま使用しているため、六価クロムとフッ素等の有害成分の溶出を止めるための添加剤を配合して地盤改良材自体で環境基準を超えることのないよう対処している。



写真 2-13 株式会社グリーンアローズ中部 処理状況（写真上下）

第2章の参考文献

- 1) 蓬萊秀人, 亀井健史, 小川靖弘, 志比俊秀: 半水石膏生産システムの開発とその地盤工学的意義－石膏ボードの再生－, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.2, pp.133-142, 2008.
- 2) 亀井健史, 加藤孝明, 珠玖隆行: 半水石膏の地盤改良材としての有効利用－廃石膏ボードの再利用－, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.245-252, 2007.
- 3) 亀井健史, 珠玖隆行: 廃石膏ボードから再生した半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.237-244, 2007.
- 4) 亀井健史, 小川靖弘, 志比俊秀: 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－廃石膏ボードの有効利用－, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.99-105, 2009.
- 5) 亀井健史, 小川靖弘, 志比俊秀: 半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の強度変形特性とその内部構造－ハイブリット型地盤材料の創出－, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.1, pp.35-43, 2010.
- 6) Ahmed A, Ugai K, & Kamei T: Laboratory and field evaluations of recycled gypsum as a stabilizer agent in embankment construction, Journal of Soils and Foundations, Vol.15, No.6, pp.975-990, 2011.
- 7) Ahmed A, Ugai K, : Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum, Journal of Cold Regions Science and Technology, Vol.66, pp.84-92, 2011.
- 8) 公益社団法人地盤工学会関東支部: 地盤改良材を中心とした廃石膏ボードの再資源化, pp.23-55, pp.77-87, 2013.

3. 廃石膏ボードを用いた半水石膏の高含水汚泥改良材としての施工

3.1 はじめに

廃石膏ボードを粉砕し加熱処理して製造される半水石膏を、農業用ため池の底に厚く堆積した高含水比の汚泥の改良材として使用し、堤体改良材として利用したので報告する。

群馬県内の農業用ため池の堤体から漏水が発生したため、その対策として改修工事を行うこととなった。堤体の現状を写真 3-1 に示す。また、堤体のり尻からの湧水状況を写真 3-2 に示す。

改良材は、再生半水石膏に高炉セメントを重量比 1 : 1 で混合したものをを用いた。¹⁾、²⁾ 底泥の含水比は 150~180%を示した。改良した底泥を堤体腹付盛土として活用するために、施工時の力学的安全性、施工後の盛土の安定性および環境安全性を確認した。



写真 3-1 堤体の下流側のり面



写真 3-2 堤体のり尻から湧水状況

3.2 改修方法と堤体の改修断面形状

老朽ため池の堤体の止水対策として一般的には傾斜コア型の遮水を用いるが、周辺に良質な土質材料が見当たらないことから、

- ① 遮水材として、ベントナイトシートを採用する。
- ② 堤体の掘削は最小限とする。
- ③ ベントナイトシートの保護と前面の抑えを目的として、掘削土をリサイクル石膏で改良した土を堤体改修資材として用いる。
- ④ 改良後の上流側堤体のり面勾配を現状より安定した1:2.0勾配とする。

3.3 掘削土の物理特性と土質改良材料

今回の改修は堤体からの漏水と基礎地盤内の砂質土層からの漏水を防止することを目的としていることから、上流側の堤体のり面の整形に伴い発生する堤体土と池底に堆積した高含水比堆積土の掘削土が土質改良の対象土となる。

基礎地盤の粘性土は含水比が $w_n=112\%$ と高く、池底の高含水比堆積土 $w_n=154.5\%$ と同様に含水比が高く、掘削時に高含水比堆積土と混合される可能性が高いことから、この基礎地盤の粘性土の配合量は高含水比堆積土の配合量と同じとした。池底土の含水比は138.6~166.4%の平均値である。池底土の粒度分布は最大粒径9.5mmであり、その構成は、礫分1.6%、砂分24.1%、細粒分74.3%（シルト分55.4%、粘土分18.9%）、土粒子の密度は 2.46g/cm^3 である。

池底土の地盤材料としての分類は、高有機質土の黒泥（Mk）に分類される。土の強熱減量試験方法によれば、乾燥した土の中に含まれる有機物の重量比は18.5%であった。

3.4 室内配合試験

改良材として、廃石膏ボードから生成した半水石膏を用い、添加する安定処理材として高炉セメントB種を使用する。高炉セメントB種は CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 の三成分の合計が全体の約90%を占める材料である。

半水石膏に高炉セメントB種を添加することでフッ素不溶化が可能と判断し、しかも価格的にも安価であることから今回の試験施工では安定処理材として高炉セメントB種を使用した。ただし、六価クロムの発生が基準値以下であることの確認が必要である。³⁾

(1) 室内配合試験の条件

- ① 土質改良材を、半水石膏と高炉セメントB種とする。
- ② 池底土（高含水比堆積土）について室内配合試験を行ない、土質改良材の配合量と配合量における半水石膏と高炉セメントB種の添加率を選定する。
- ③ この添加率で堤体土の土質改良材の配合量を選定する。
- ④ 池底土を考慮すると、池底土に土質改良材を配合したのち1日後に堤体の締固めによる盛土の可能性もあることから、室内配合試験においても土と混合したのち2時間後、6時間後、および24時間後に締固め、この供試体でコーン貫入抵抗値 q_c を測定する。
- ⑤ コーン貫入抵抗値の基準を $q_c \geq 500\text{kN/m}^2$ として配合量を決定する。

(2) 池底土の配合量の選定

池底土に土質改良材を配合した後 24 時間後に締固めた供試体におけるコーン貫入抵抗値 $q_c \geq 500\text{kN/m}^2$ を満足する土質改良材の配合量および半水石膏 (B) と高炉セメント B 種 (C) の割合は、配合量 22.5% (297.0kg/m^3) B : C = 1 : 1, 配合量 30.0% (396.0kg/m^3) B : C = 2 : 1, および配合量 30.0% (396.0kg/m^3) B : C = 1 : 1 の 3 種類のみとなる。この結果から添加率を B : C = 1 : 1 とし、池底土堆積物を排水処理によって含水比を低下させ 24 時間後のコーン貫入抵抗値 q_c を考慮し、添加率を B : C = 1 : 1 とした場合の 24 時間後に締固めた供試体の改良材混合率とコーン貫入抵抗値 q_c との関係を図 3-1 に示す。自然含水比 $w_n \approx 150\%$ における半水石膏 (B) と高炉セメント B 種 (C) との添加率を B : C = 1 : 1 とし、混合してから 24 時間後に締固めた状態から、土質改良材の配合率 20.2% (土 1m^3 当たりの配合量 267kg/m^3)、半水石膏 (B) = 133.5kg/m^3 , 高炉セメント B 種 (C) = 133.5kg/m^3 を採用した。この配合量で実施した圧密非排水 (CU) 三軸圧縮試験の結果、粘着力 $c' = 57.7\text{kN/m}^2$, 内部摩擦角 $\phi' = 14.2^\circ$ が得られ、この強度を用いた堤体のり面は安全率 $F_s = 1.31$ を確保している。なおこの結果から含水比を低下させると土質改良材の必要配合量が低下する傾向が認められた。このことから、現地において排水処理が可能であれば含水比を低下させ、土質改良材の配合量を低減できる可能性がある。⁴⁾

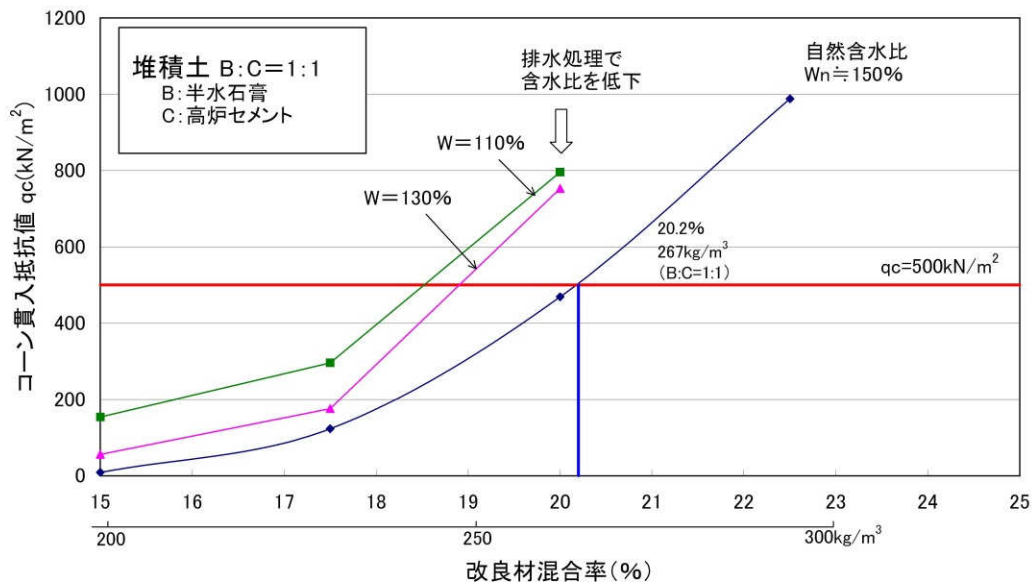


図 3-1 池底土（高含水比堆積土）の土質改良材の配合率とコーン貫入抵抗値の関係

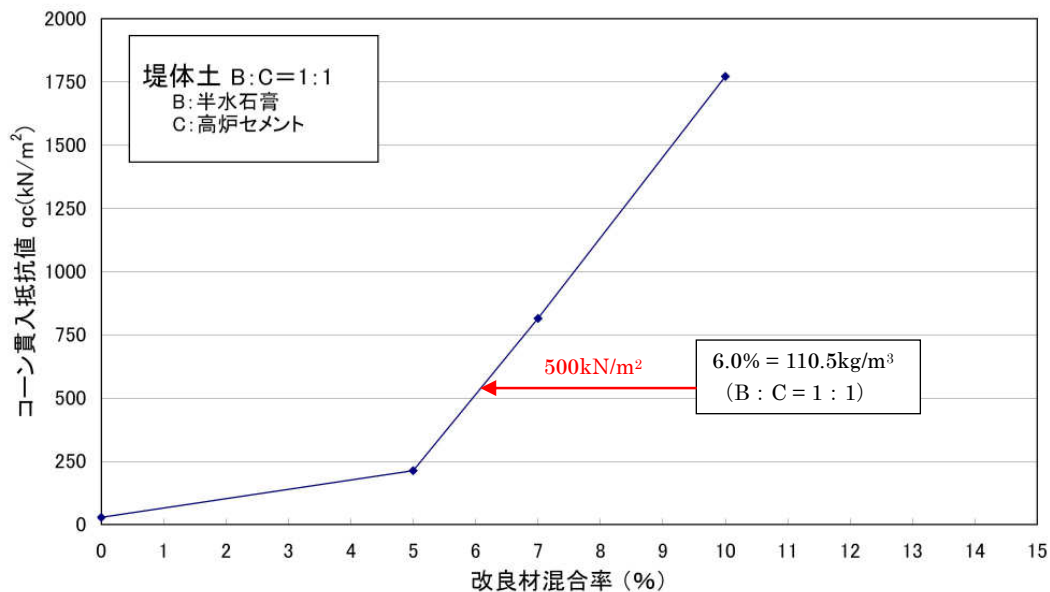


図 3-2 堤体土の土質改良材の混合率とコーン貫入抵抗値の関係

(3) 堤体土の配合量の選定

堤体土の土質改良材の混合率とコーン貫入抵抗値との関係を図 3-2 に示す。この図から、土質改良材の配合率 6.0% (土 1m³ 当たりの配合量 110.5kg/m³)、半水石膏 (B) =55.3kg/m³、高炉セメント B 種 (C) =55.3kg/m³ を採用した。

(4) 再生半水石膏の性質

改良材として使用した再生半水石膏の成分は、半水石膏 92.6%、二水石膏 5.3%、無水石膏 2.1% であり、水と反応性のある半水と無水が全体の 95% を占めており、良質なものであった。

(5) 室内配合試験の供試体を用いたフッ素とホウ素、六価クロムの測定値

池底土は現地盤でフッ素 0.1~0.4mg/L であった。この土質改良土 (B:C=1:1) ではフッ素が 0.12~0.18 と基準値 0.8mg/L 以下を示す。堤体土の場合は現地盤のフッ素が 0.1mg/L 未満であり、土質改良土で 0.47~0.02mg/L とこの場合も基準値以下である。六価クロムの溶出試験結果は池底土と堤体土の土質改良土すべて 0.01mg/L 以下の測定値であり、いずれの場合も環境規準を満たすことが解った。表中、B は再生半水石膏、C は高炉セメントの略称である。なお、もとの池底土に含まれるフッ素の含有量は 39mg/kg であった。

(6) 硫化水素の発生有無について

テトラバックに土質改良土の供試体を入れ、窒素ガスを注入し 24 時間後検知管で吸引して 0.1ppm 以下であることを確認した。

3.5 施工後の腹付け盛土の安定性

施工後の盛土の安定性を調査測定した。池底土と改良材を混合して7日経過後の一軸圧縮強さを求めて、腹付盛土の簡易な安定計算を行った。図3-3に一軸圧縮強さ、養生日数及び添加率の関係を示す。添加率15.0%、7日経過後の一軸圧縮強さ400kN/m²のケースを安全側とみなして、試計算を行った。この一軸圧縮強さに対応する非排水せん断強さ $c_u=200$ kN/m²となる。

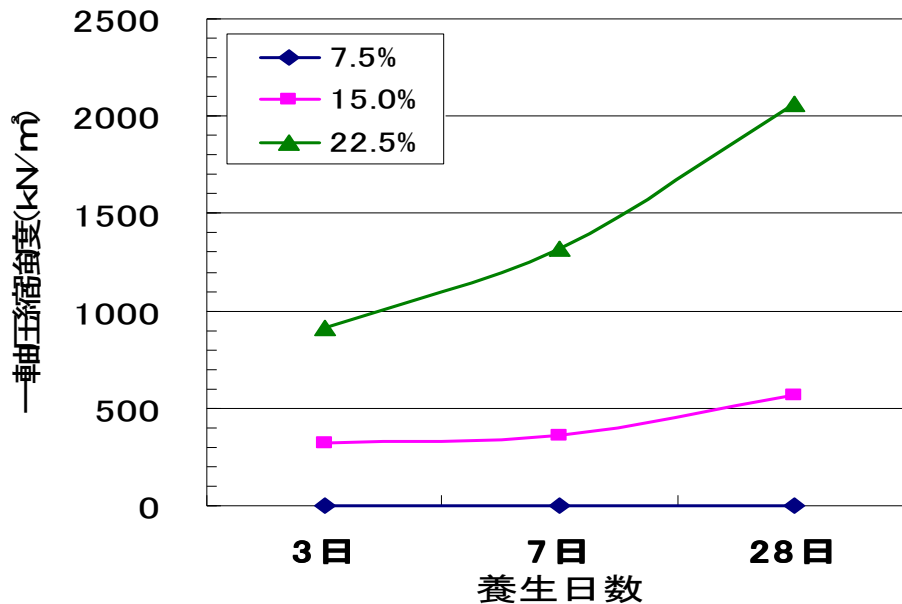


図3-3 一軸圧縮強さと養生日数の関係

腹付盛土の安定計算は、無限長斜面を仮定して行った。水平震度係数を K_h と表示すると、安全率の計算式は、以下のように導かれる。

$$F = c_u / \{ \gamma H \cos \beta (\sin \beta + K_h \cos \beta) \}$$

盛土の勾配は1:2 (26.6°)、最大深さは1.5mである。添加率15.0%で締め固めた土の単位重量 $\gamma=13.2$ kN/m³となった。 $K_h=0.2$ または0.5として、以上の数値を代入すると、地震時安全率は各々18または12.6になり、十分な堤体安定性が得られるのがわかった。

腹付盛土は、完成(湛水)後にその大部分が浸水する。改良土の浸水後の強度を調べるために、気中養生を3, 7, 28日行った供試体をさらに水中で4, 7, 15, 30日養生を行い、一軸圧縮試験を行った。その結果、浸水後も改良土の強度は漸増する傾向を示し、安全性が確認された。半水石膏:高炉セメントが1:1、添加率15%のケースで、空気中で28日養生した後に、水中養生を行った場合、2日目に強度が下がった。これは水を吸収したことにより強度が少し弱くなったためと思われる。

3.6 改良土の電子顕微鏡 (SEM) と回折 X 線分析装置 (XRD) による分析

今回、土壌改良材がどのような作用で強度発現したかを調査した。ため池現場で採取した池底土を電子顕微鏡 (SEM) と回折 X 線分析装置 (XRD) を使い、土壌粒子や固化に影響を及ぼす鉱物の状態を分析した。

下図は池底土と改良材を混合して 7 日経過後の改良土を XRD で測定した結果である。図 3-4 が改良前の原土の XRD チャートであり、図 3-5 が改良後の XRD チャートである。改良後ではエトリンガイトやカルサイト等の鉱物ピークが比較的強く測定され、エトリンガイト等の鉱物生成が確認できた。エトリンガイトは、初期の圧縮強さに最も寄与するセメント鉱物の一つである。

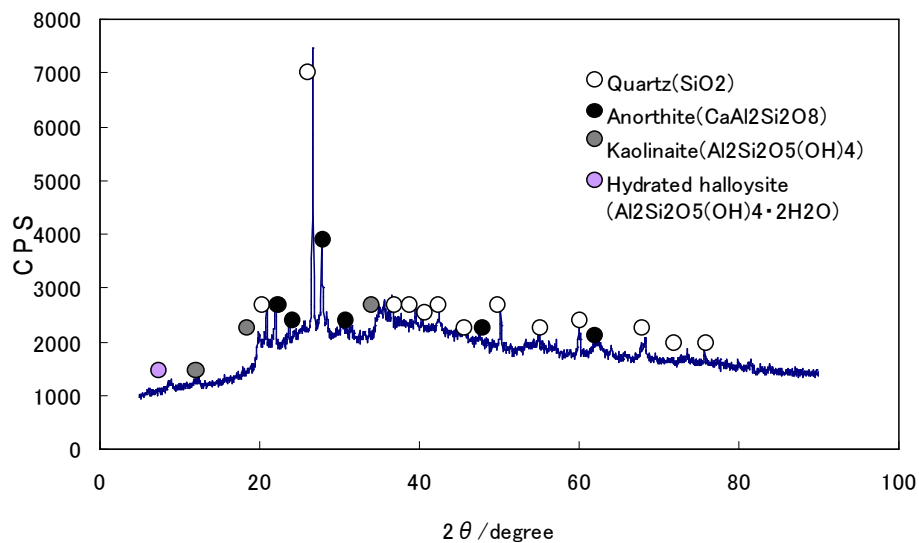


図 3-4 改良前原土の XRD

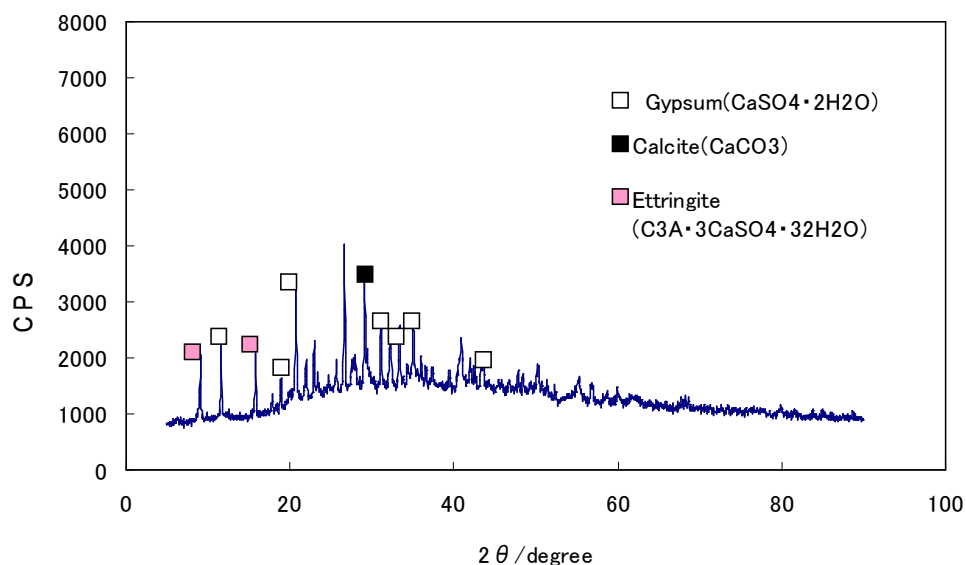


図 3-5 改良土の XRD

また、同様の結果が SEM 観察でも確認できた。下に XRD 測定を行った試料を SEM で撮影した写真を示す。写真 3-3 が改良前の原土の写真であり、写真 3-4 が改良後の写真である。矢印にある芯状の結晶がエトリンガイトの鉱物である。改良土試料中のいたる箇所にこのエトリンガイト鉱物の結晶が確認され、エトリンガイトの緻密な結晶構造が改良土の圧縮強さの改善に寄与したのが確認できた。

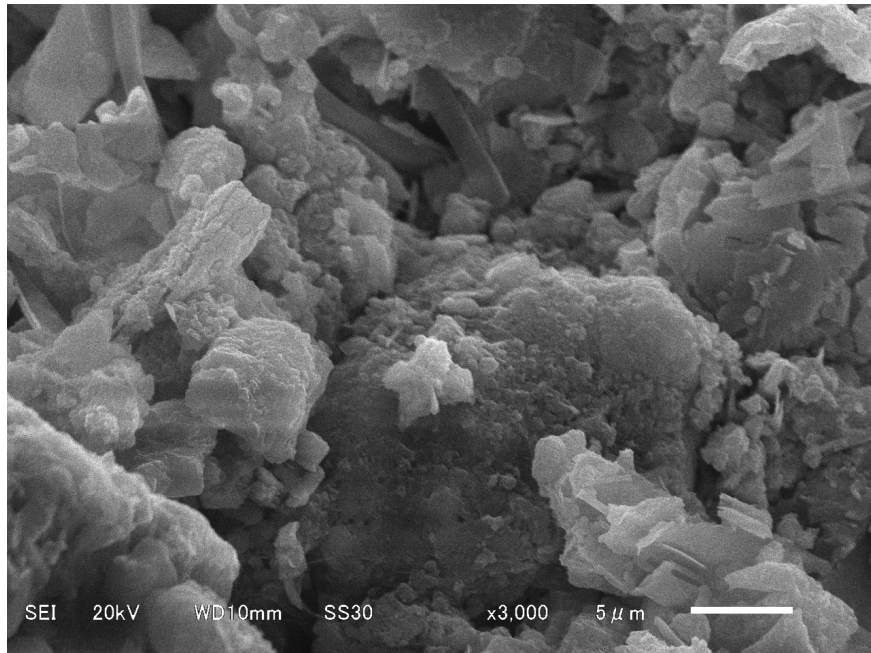


写真 3-3 改良前原土の SEM 写真

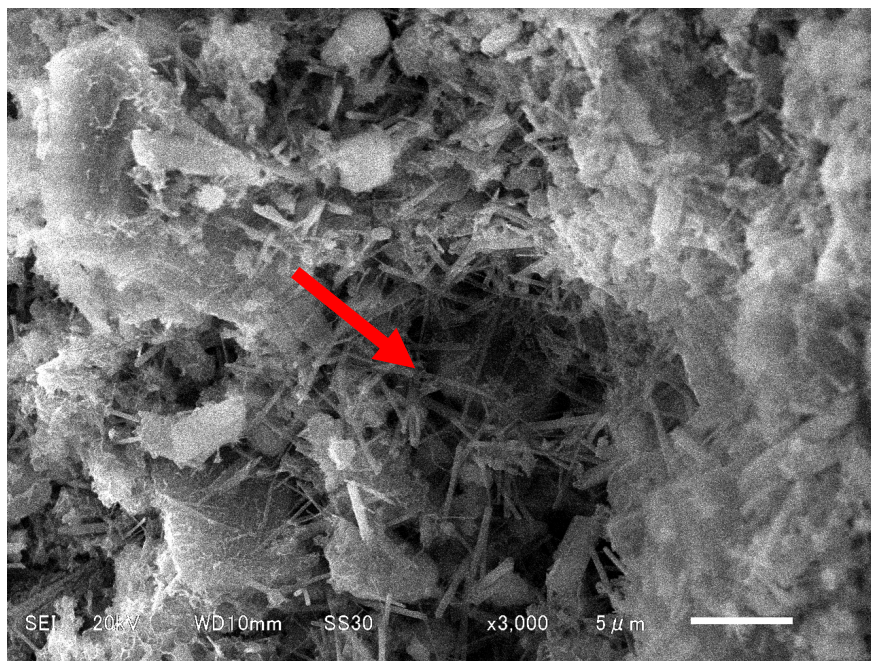


写真 3-4 改良土の SEM 写真

エトリンガイトのメインピーク X線強度と一軸圧縮強度の関係を図 3-6 に示す。現場採取の改良土を材令ごとに XRD の測定を行ってそのデータをまとめたものである。主にエトリンガイト ($C3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)、カルサイト ($CaCO_3$)、石膏 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) の結晶が含まれていることが分かったが、一軸圧縮強度との相関性があるのは、エトリンガイトだけであることが分かった。エトリンガイトのメインピーク高さが高いほど一軸圧縮強さも増すことが認められ、エトリンガイト生成と一軸圧縮強さの関係に一定の相関があることが確認できた。

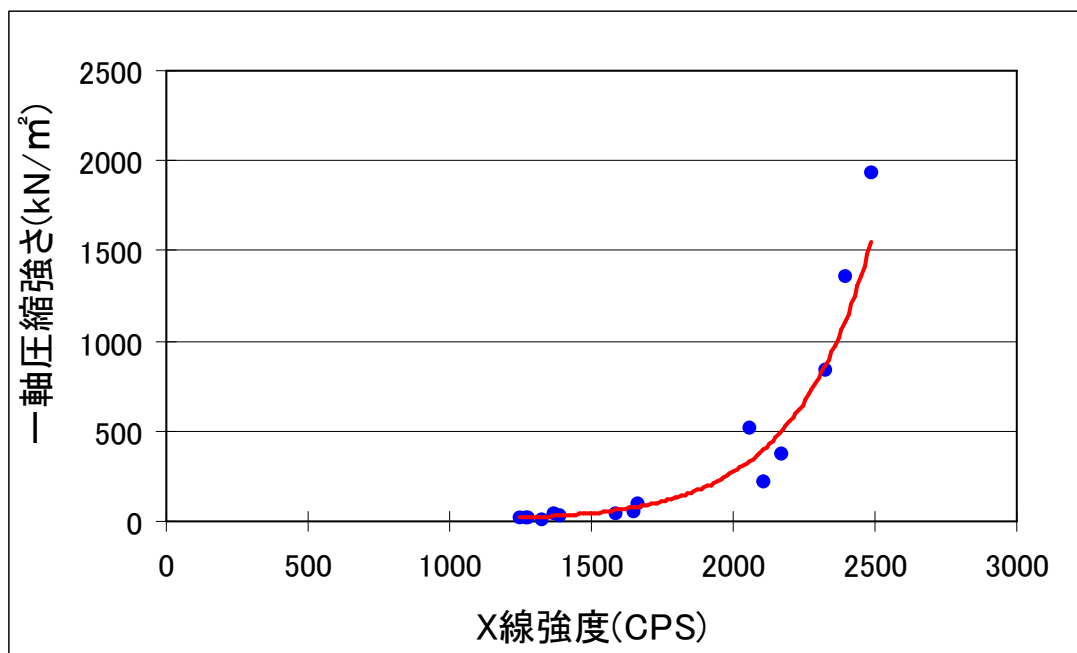


図 3-6 エトリンガイトのメインピーク X線強度と一軸圧縮強度の関係

3.7 強度発現メカニズムの解析

3.7.1 実験方法

同じ溜池堤防改修工事現場から採取した土壌サンプルを使用して、強度発現メカニズムを調査した。今回の土壌サンプルの初期含水比は平均値で 163%であり、採取サンプル間のバラツキは±2%以内であった。図 3-1 に本試験で使用した土壌サンプルの粒度分布曲線を示す。この土壌サンプルは、土壌分類体系 (USCS) によると高い可塑性を持つ粘土土壌 (CH) として分類することができる。

土壌サンプルの物理的性質を表 3-1 に、化学組成を表 3-2 にそれぞれ示す。

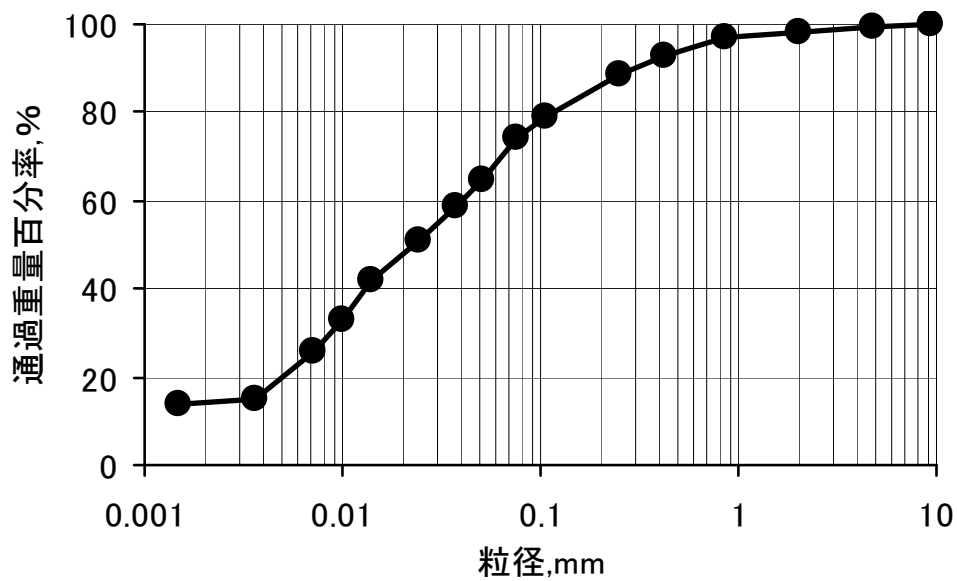


図 3-7 地盤の粒度分布曲線

表 3-1 土壌の物理的性質

	測定値		測定値
液性限界, LL%	100	塑性限界, PL %	61.5
塑性指数, %	38.5	比重, G_s	2.46
粒子サイズ, % (2-75mm)	1.60	粒子サイズ, % (0.075 - 2mm)	24.1
粒子サイズ, % (0.005-0.075mm)	55.4	粒子サイズ, % (< 0.005 mm)	18.9

表 3-2 土壌の化学組成

成分	含有,%	成分	含有,%
SiO ₂	48	Al ₂ O ₃	20
Fe ₂ O ₃	8	CaO	3
K ₂ O	1	SO ₃	1

再生半水石膏の基となる廃石膏ボードは、群馬県内の産業廃棄物処分会社から提供を受けた。廃石膏ボードを乾燥後粉砕し、紙、塗料、木材、ガラス等の異物を除去した。精製した廃石膏粉は 150℃の温度で過熱し、半水石膏として再生半水石膏を試製した。再生半水石膏に高炉セメントと生石灰を混合して地盤改良材を試製した。再生半水石膏に対する混合比（重量比）は、高炉セメントと生石灰のいずれについても、1:1、2:1 および 3:1 の 3 種類とし、添加量は 0~22.5% の範囲で 4 つの異なる配合を設定し試験を行った。再生半水石膏に高炉セメントや生石灰を混合した目的は、地盤改良材として使用した場合に石膏中の微量有害物質の溶出を抑制し、硫化水素の発生を抑制するためと地盤改良強度を増加させるためである。^{5)、6)、7)}

試験で用いた高炉セメントの種類は、B 種である。高炉セメントは普通ポルトランドセメントに製鉄所より副産物として発生する高炉水砕スラグ粉末を混合して製造される。B 種には JIS R5211 に準じて 30~60% の高炉スラグが含まれる。使用した高炉セメント B 種の化学組成を表 3-3 に示す。

表 3-3 高炉セメント B 種の化学組成

Element	Content	Element	Content
SiO ₂	23.3%	Al ₂ O ₃	8.7%
Fe ₂ O ₃	1.9%	CaO	54.1%
MgO	3.7%	SO ₃	2.0%
Na ₂ O	0.26%	K ₂ O	0.42%
TiO	0.69%	P ₂ O ₅	0.08%
MnO	0.28%	Cl ⁻	0.01%

生石灰は、地盤改良材として一般的に広く使用されている市販の生石灰を使用した。その化学組成を表 3-4 に示す。

表 3-4 生石灰の化学組成

成分	含有,%	成分	含有,%
SiO ₂	23.3	Al ₂ O ₃	8.7
Fe ₂ O ₃	1.9	CaO	54.1
MgO	3.7	SO ₃	2.0
Na ₂ O	0.26	K ₂ O	0.42
TiO	0.69	P ₂ O ₅	0.08
MnO	0.28	Cl	0.01

試料調整は、均質なサンプルを得るために土壌サンプルに改良材（再生半水石膏、高炉セメント、生石灰）を添加し、一定時間自動ミキサーで混合して行った。その後、試料は直径 50mm、高さ 100 mm の金属性円筒型枠に詰め成型を行った。各試験体は、静的載荷方法で圧縮された後、温度 20±1℃で 24 時間養生した。その後、各サンプルは型枠から脱型後、恒温室（温度 20±1℃、湿度 90%以上）で材令まで養生保管した。各改良土サンプルは 3 日、7 日および 28 日の材令で試験を行った。まず、一軸圧縮試験を行い、SEM 観察と XRD 測定を行った。一軸圧縮試験は地盤改良度合いを評価するために使用される最も重要な項目である。一軸圧縮試験は、J I S 法（JIS A 1216 1998）に基づき行った。各改良土サンプルは、一軸圧縮試験の後に SEM 観察を行い、最後に XRD により測定を行った。

3.7.2 実験結果と分析

各添加量の改良材の一軸圧縮強さをそれぞれ図 3-8 および図 3-9 に示す。

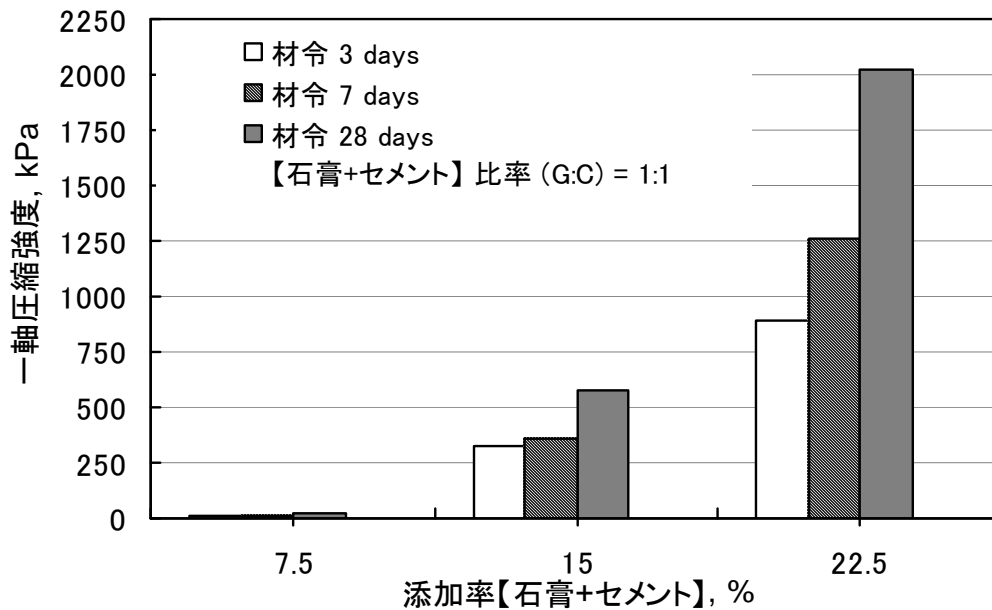


図 3-8 【石膏+セメント】改良材使用の改良土の一軸圧縮強さ

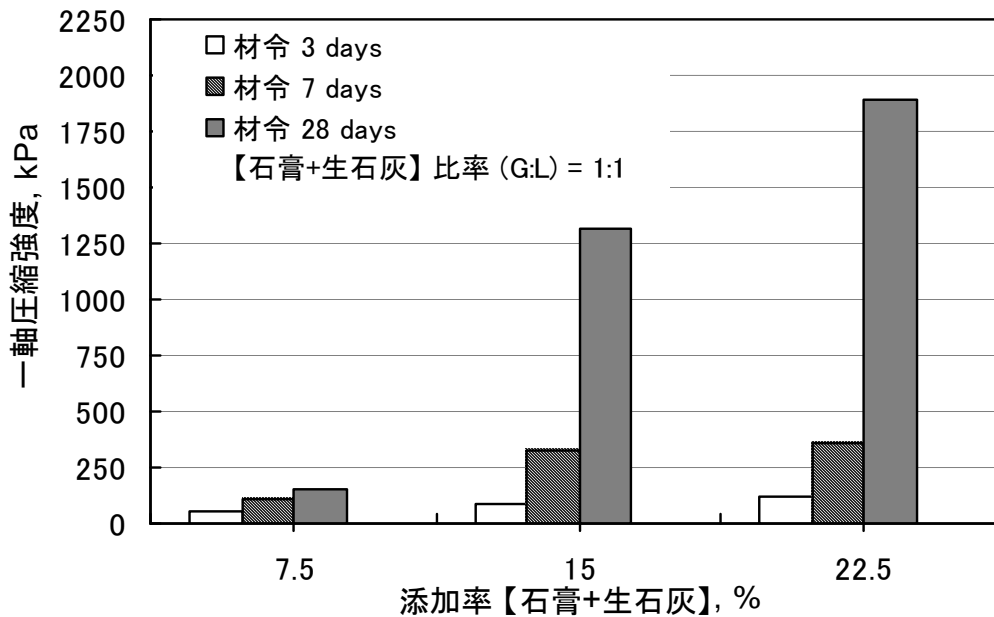


図 3-9 【石膏+生石灰】改良材使用の改良土の一軸圧縮強さ

グラフより、高炉セメントおよび生石灰のいずれの改良材にも添加材を増量することにより、圧縮強さが向上する結果となった。【石膏+セメント】改良材を使用した場合の圧縮強さは、すべての材令において添加比率を増加するに伴って徐々に増加傾向であった。【石膏+生石灰】改良材の場合には、材令 7 日までは徐々に圧縮強さが増加する傾向であったが、材令 28 日では圧縮強さが急激に増加する結果となった。その傾向は改良材添加量が少ないサンプルに比べ、添加量が多

いサンプルが顕著となり、強度が増加する結果となった。また、図 3-10 ように改良材を同一の 7.5% 添加率で比較した場合、【石膏+生石灰】改良材は、【石膏+セメント】改良材に比べ、圧縮強さの増加が大きくなることがわかった。それは、【石膏+生石灰】改良材が、【石膏+セメント】改良材に比べ、サンプル土壌から水分を吸収する性能が高いことに起因すると考える。これは生石灰が湿った土壌に添加されたときに起こる発熱反応と関係があり、最終的には土壌中の水分含有量を減少させる働きがあるためである。

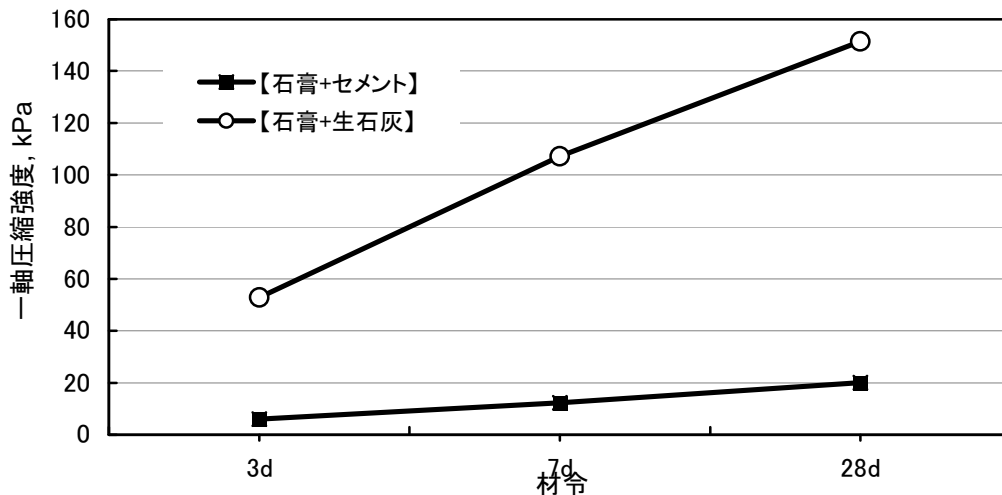


図 3-10 改良材の違いによる一軸圧縮強さ (添加量 7.5%、混合比 1:1)

再生半水石膏を含水率が100%を超える軟弱地盤への改良材としてセメントや生石灰と同時に使用することは、相互作用により極めて有効な地盤改良材となる可能性があると考えられる。再生半水石膏を地盤改良材として使用した場合の圧縮強さの増加要因は次に起因すると考えられる。

まず第一段階として、圧縮強さに影響を及ぼす土壌中の水を吸収する石膏の潜在的な働きである。これは廃石膏をリサイクルして製造される硫酸カルシウム半水和物 ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) は、硫酸カルシウム水和物 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) を加熱することによって失われた結晶水を回復しようとする作用があるためである。第二段階として石膏の主成分であるカルシウムが再生半水石膏にも豊富に存在し、カルシウム (Ca^{2+}) は、2つの正電荷を持ち、粘土粒子はその表面に負電荷を持っているので、粘土粒子の表面から2電荷を集める。その結果、カルシウムと粘土粒子間の電荷交換プロセスが発生し、カルシウムと粘土粒子が結合される。この現象は凝集と呼ばれ、土壌粒子間の空隙が減少し、土壌粒子間の結合も同様に増加して、地盤自体の圧縮強さも増加させる。第三段階として、再生半水石膏と高炉セメントなどは土壌と混合されたときにいくつかの化学反応を起こす。これらの反応はエトリングサイト ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}26\text{H}_2\text{O}$)、カルサイト (CaCO_3) などの化合物を生成させ、土壌粒子間の強度を増加させる^{3,4)}。

図 3-11 に材令 28 日での再生半水石膏と高炉セメントおよび生石灰の混合比と地盤改良土の圧縮強さの関係を示す。このグラフから、【石膏+セメント】改良材を使用した場合、石膏比率の増加が圧縮強さの低下を発生させることがわかる。また、【石膏+生石灰】改良材の場合、すべての

水準において混合比率を変化させても圧縮強さに与える影響が少ない結果となった。

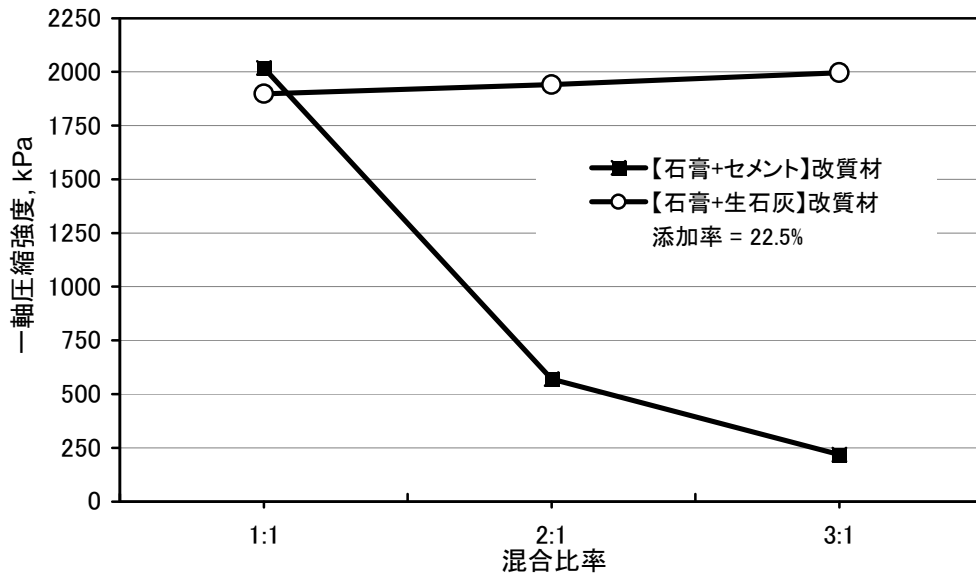
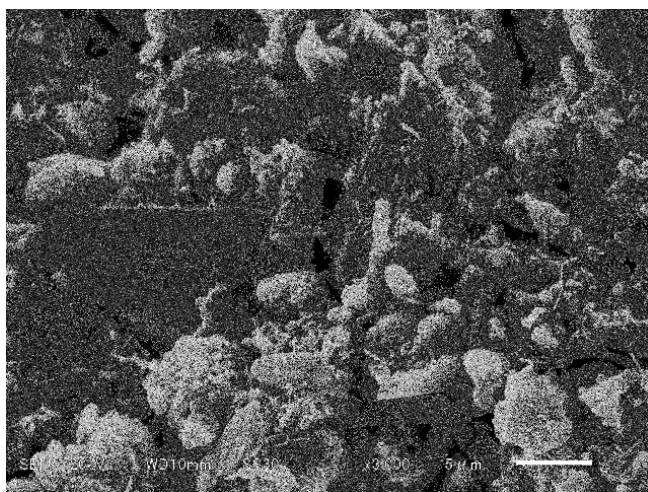
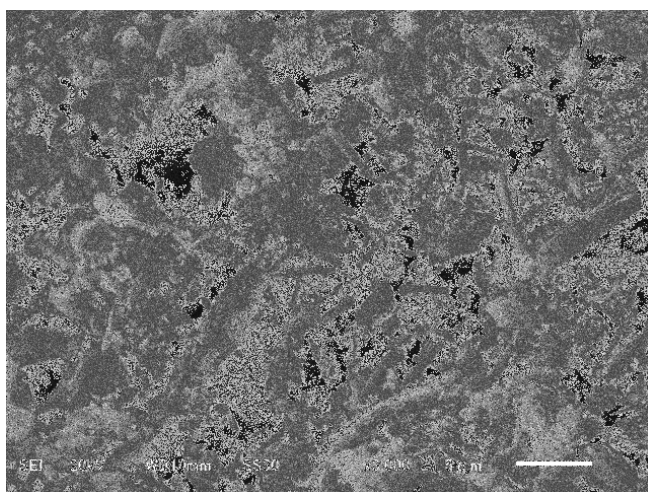


図 3-11 改良材、混合比率の違いによる一軸圧縮強さ (材令 28 日)

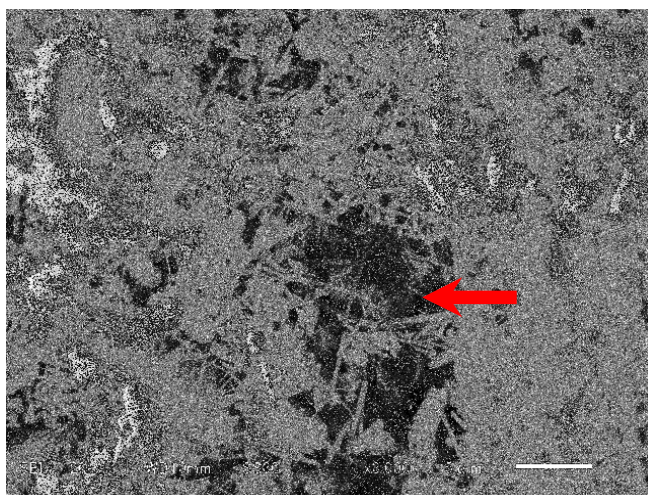
図 3-12 と図 3-13 に、それぞれ再生半水石膏と生石灰および高炉セメントで改良した土壌の SEM 画像を示す。図中の矢印がエトリンタイトであり、地盤改良材添加率が増量するに伴ってエトリンタイトの生成も増加しているのが判る。このことから、改良材を増量または養生時間を増加することは、エトリンタイトの生成を増加させ、圧縮強さの増加に大きな影響を与える。これは一軸圧縮試験結果で得られた結果と一致する。



A 【石膏+セメント】添加量 7.5%

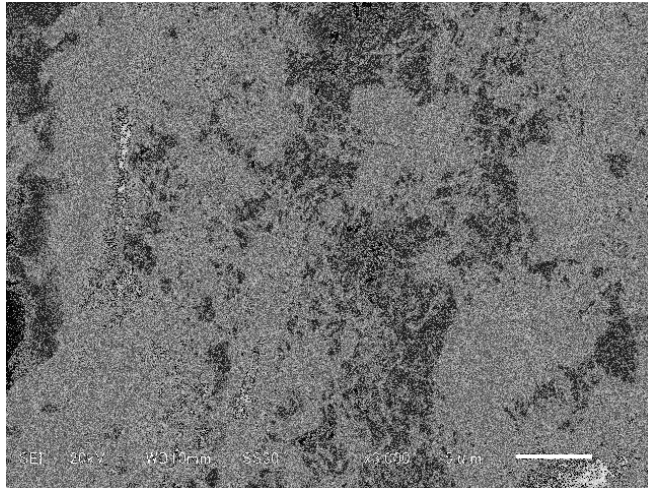


B 【石膏+セメント】添加量 15%

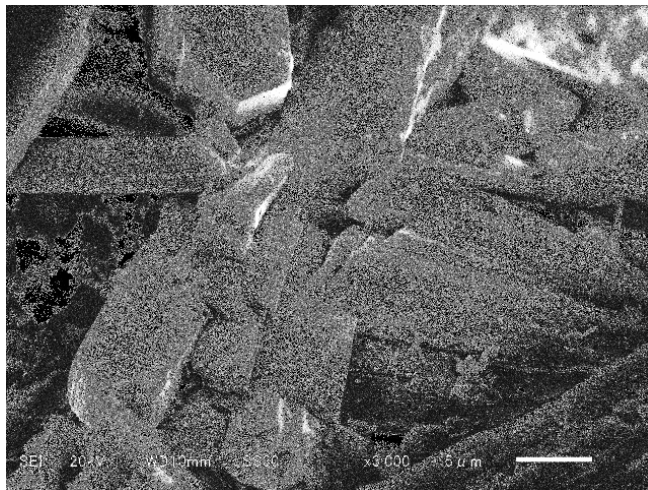


C 【石膏+セメント】添加量 22.5%

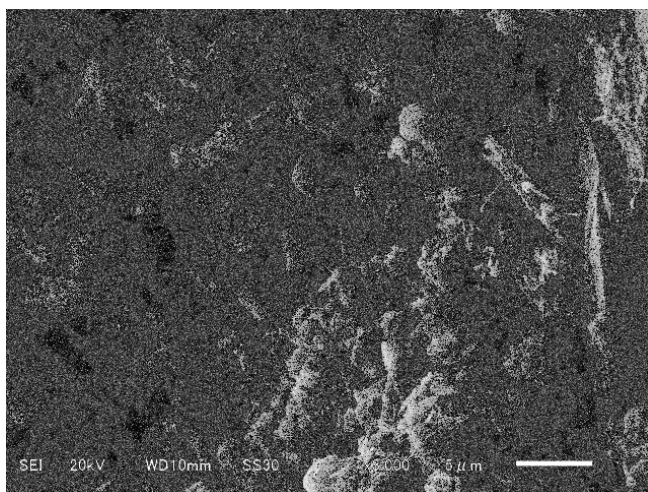
図 3-12 土壌の SEM 画像【石膏+セメント】改良材添加率 7.5~22.5% (材令 7 日)



A 【石膏+生石灰】添加量 7.5%



B 【石膏+生石灰】添加量 15%



C 【石膏+生石灰】添加量 22.5%

図 3-13 地盤の SEM 画像 【石膏+石灰】改良材添加率 7.5~22.5% (材令 7 日)

再生半水石膏と高炉セメントで改良した土壌のX線回折チャートを図3-13に示す。

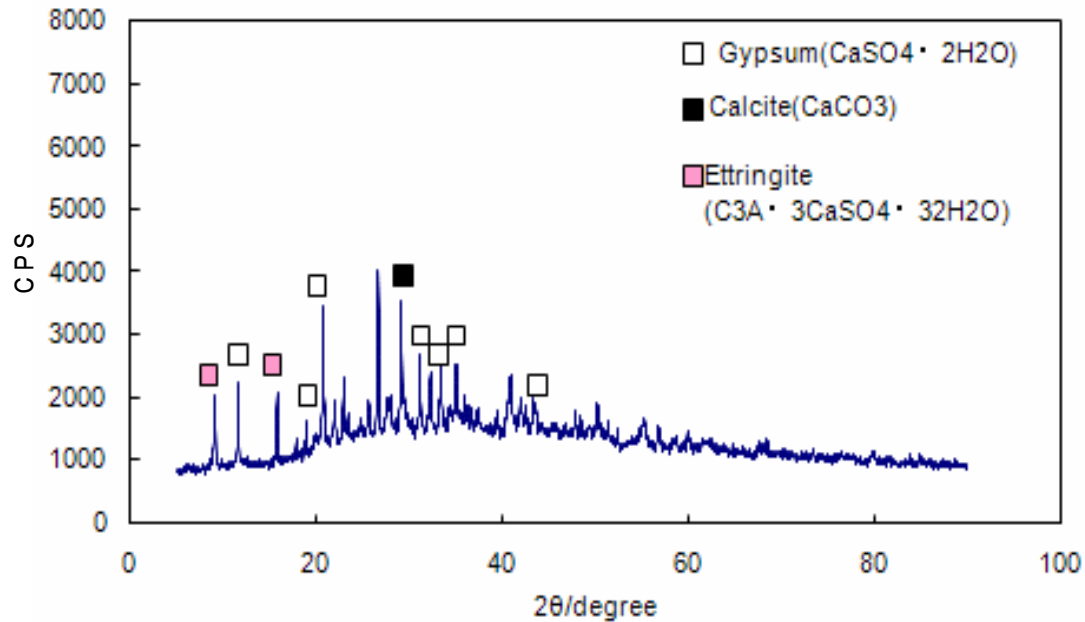


図3-13 地盤のXRD【石膏+セメント】(混合比1:1、添加量22.5%、材令7日)

X線回折(XRD)および電子顕微鏡(SEM)の結果より、この再生半水石膏を使用した改良材による改良土壌中には、エトリンガイト、カルサイトや他のセメント鉱物の存在が確認できた。これにより、土壌中でのセメント鉱物の生成が改良土壌の圧縮強さの改善に寄与すると考えられる。⁸⁾
⁹⁾これは改良材中の高カルシウム含有に起因するためと考えられる。また、石膏に硫酸イオンが存在しているため、高炉セメントや生石灰を加えることによりセメント鉱物生成が活発になったとも考えられる。エトリンガイトは、初期の圧縮強さに最も関係があるセメント鉱物の一つである。したがって、本研究では、XRDによるエトリンガイトのピーク強度が、改良土壌の圧縮強さの増加に影響を与えると考えた。改良土壌中の改良材の添加量と材令28日のエトリンガイトのピーク強度の関係を、それぞれ図3-13に示す。

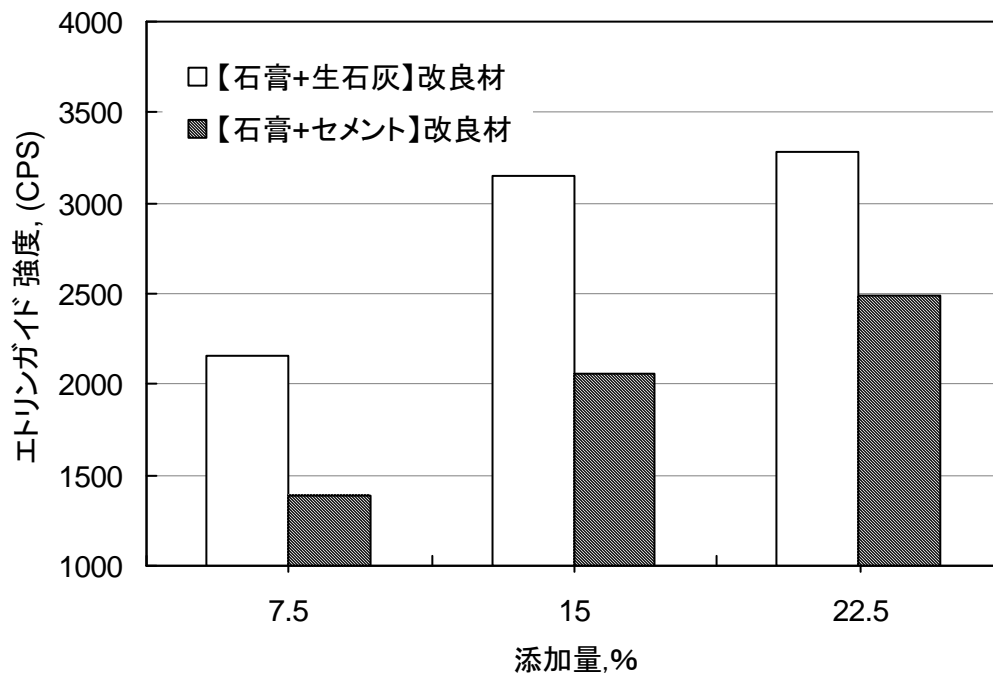


図 3-14 エトリンガイトのピーク強度と改良材添加量の関係（混合比率 1:1、材令 28 日）

図 3-14 は、エトリンガイトのピーク強度が改良土壌中の添加量の増加とともに増加し、2 種類の改良材でも同様の傾向が現れることを示す。また、【石膏+生石灰】改良材は、【石膏+セメント】改良材に比べてエトリンガイトの生成が増加する結果となった。この現象についても、エトリンガイトの生成を高めるのは改良土壌中のカルシウム含有量に起因すると考える。

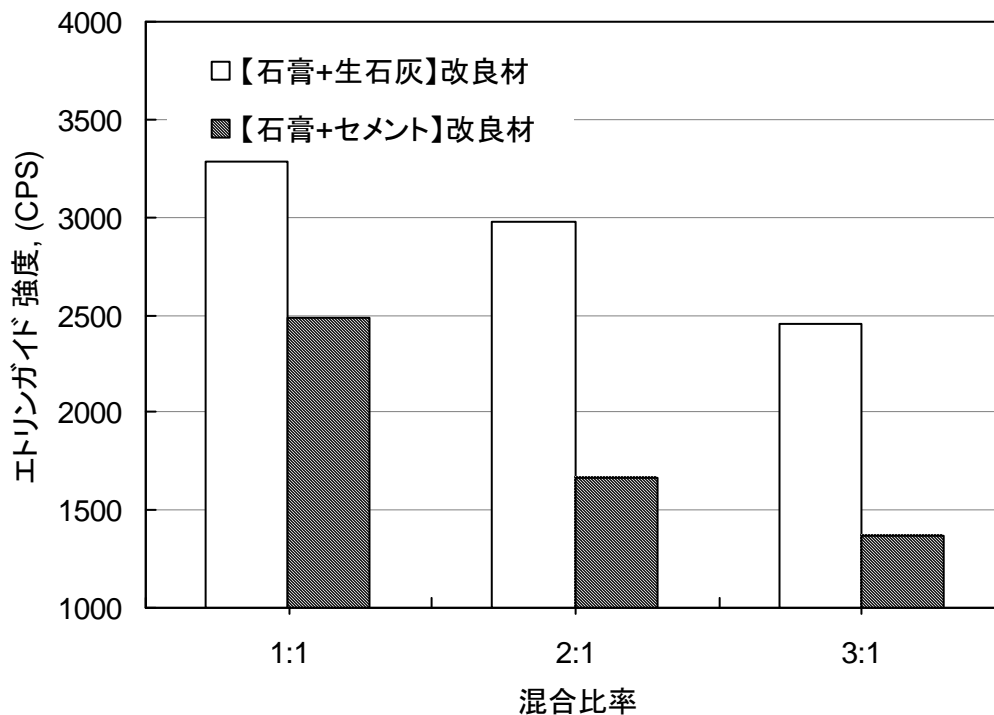


図 3-15 エトリンガイトのピーク強度と改良材混合比率の関係 (添加量 22.5%、材令 28 日)

図 3-15 では、再生半水石膏の混合比率を増加した場合、エトリンガイトの生成が少なくなることを示している。【石膏+セメント】改良材の場合では混合比率が 1:1→2:1, 1:1→3:1 と再生半水石膏が増加するとエトリンガイトのピーク強度は、それぞれマイナス 33%、マイナス 45%となった^{3),5)}。これらの傾向は、一軸圧縮試験で得られた結果とも一致している。【石膏+生石灰】改良材の場合では、混合比率を増加してもエトリンガイトのピーク強度の低下は小さく、混合比率が 1:1 から 2:1 へ増加することによって、【石膏+セメント】改良材のエトリンガイトのピーク強度は 33%減少したが、【石膏+生石灰】改良材の場合では 9%しか減少しなかった。この結果より、再生半水石膏は、生石灰やセメントよりも多くのカルシウム成分を含有し、結果的に改良土壌中のカルシウム成分の増加がエトリンガイトの生成を高めていると考えられる^{4),6),7)}。また、【石膏+生石灰】改良材の場合の圧縮強さの向上は、エトリンガイト等のセメント鉱物の生成に影響されるだけでなく、地盤中の水分の脱水にも影響があると考えられる。炭酸カルシウムとなる生石灰が、改良土壌中で硬化材料として知られる水酸化カルシウムに変化し、大気中の炭素と反応して炭酸カルシウムを生成し、圧縮強さが改善されたと考えられる。生石灰単体の化学反応も圧縮強さに影響する可能性が高いと推測される。

3.8 まとめ

廃石膏ボードから再生される半水石膏の農業用ため池堤体改修資材への適用性をより明らかにするために現場施工試験を行った。施工時、完成後および湛水後の堤体の力学的安定性に問題ないことを確認し、フッ素、ホウ素および六価クロムに関する溶出試験を行い、環境安全性をも問題ないことを確認した。

一方、廃石膏ボードから製造できる再生半水石膏が地盤改良材として利用が可能であることから、強度発現のメカニズムを調査した。XRD と SEM 観察から改良土中のいたる箇所にエトリンサイト鉱物の結晶が確認された。エトリンサイトの生成量が多いほど、一軸圧縮強さも増すことが認められ、エトリンサイトの緻密な結晶構造が改良土の圧縮強さの改善に寄与したのが確認できた。エトリンサイト生成と一軸圧縮強さも一定の相関があることからエトリンサイトの生成がイ一軸圧縮強さに重要な役割をはたしていると考えられる。SEM と XRD の結果では、エトリンサイト鉱物とカルサイト鉱物の生成が確認された。特にエトリンサイト鉱物の生成については改良材の添加量と養生時間の増加に比例する傾向であり、ほぼ一軸圧縮試験結果と一致した。

軟弱地盤を改良するために再生半水石膏を有効に使用するためには、改良土の強度に良い影響をあたえるエトリンサイト鉱物を効率よく生成させることが必要であることがわかった。^{10)、11)}

ため池停滞改修工事については、今後も施工後の環境安全性については経過観察していく必要がある。このため池から出水される水を採取して定期的にフッ素、ホウ素および六価クロムの溶出試験を行い実データの蓄積を行なう事がより確実にこの再資源化システムを拡大させることとなる。

第3章の参考文献

- 1) 亀井健史, 加藤孝明, 珠玖隆行: 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.
- 2) 松崎祐太, 吉田英史, 佐藤研一, 藤川拓朗, 他: 平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会, 再生半水石膏による軟弱地盤改良技術の検討, pp. 353-354, 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, 2000.
- 4) 森 雅人, 高橋 弘, 熊倉宏治: 繊維質処理土の乾湿繰返し試験による耐久性に関する実験的研究, 資源と素材, Vol. 121, pp. 37-43, 2005.
- 5) 亀井健史, 蓬莱秀人: 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.
- 6) 亀井健史, 珠玖隆行: 廃石膏ボードから再生した半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ, 地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No. 3, pp. 237-244, 2007.
- 7) 亀井健史, 蓬莱秀人, 鶴飼恵三: 半水石膏・石炭灰・高炉セメントB種を用いた安定処理土中のフッ素・六価クロム・ホウ素の不溶化, 地盤工学ジャーナル, Vol. 5, No. 3, pp. 449-461, 2010.
- 8) A. Ahmed, K. Ugai: Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum, Journal of Cold Regions Science and Technology, vol. 66, pp. 84-92, 2011.
- 9) A. Ahmed, K. Ugai, T. Kamei: Laboratory and field evaluations of recycled gypsum as a stabilizer agent in embankment construction, Journal of Soils and Foundations, Vol. 51, pp. 975-990, 2011.
- 10) Masaki Kobayashi, Aly Ahmed and Keizo Ugai: Improvement Properties of Cohesion-less Soil Using Recycled Bassanite, Journal of Civil Engineering and Architecture, USA, vol. 7, No. 12, pp. 1566-1573, 2013.
- 11) 小林正樹, 鶴飼恵三, Aly Ahmed: 廃セッコウボードを利用した土壌改良材の評価, Journal of the Society of Inorganic Materials Japan, 3月号掲載決定, 2013.

4. 廃石膏ボードを用いた再生半水石膏の路床改良材としての施工

4.1 再生半水石膏の路床改良材としての利用【A地点での施工】

4.1.1 概要

群馬県内の県道の一部（A地点）で試験的に路床改良工事に再生半水石膏を使用することになった。その研究成果と施工内容を報告する。改良路体の大きさは、幅 7m、長さ 70m、厚さ 0.9m である。

アスファルト道路の深さ方向の構成は、表面から約 10cm 厚さのアスファルト舗装、約 30cm 厚さの碎石から成る路盤、約 100cm 厚さの地盤から成る路床、の 3 層構造である。それぞれの厚さは、道路の重要性、交通量、路床の強度などから決定される。このうち路床は、道路下の地盤が軟弱な場合には、良質な砂による置き換えや軟弱粘土の改良により、補強されることが多い。砂で置き換える場合には、軟弱粘土を搬出し、処分しなければならない、場所と費用の確保が問題となるため、軟弱地盤をそのまま現地で改良して再使用する方法が最も望ましい。今回は廃石膏ボードから製造した再生半水石膏と高炉セメントを使用した施工を行った。^{1)、2)}

4.1.2 土壌の性質

路床に対応する改良前の土壌の粒度分布を図 4-1 に示す。最大粒径は 37.5mm であり、その構成は、礫分 16.0%、砂分 31.3%、細粒分 52.7%（シルト分 29.1%、粘土分 23.6%）である。自然含水比は、採取場所で変化するが、35.0%前後であった。土粒子の密度は 2.74g/cm³ である。液性限界は 52.4%、塑性限界は 26.0%、塑性指数は 26.4% であり、砂礫質粘土（CHSG）に分類される。土壌の湿潤密度は 1.885g/cm³ である。

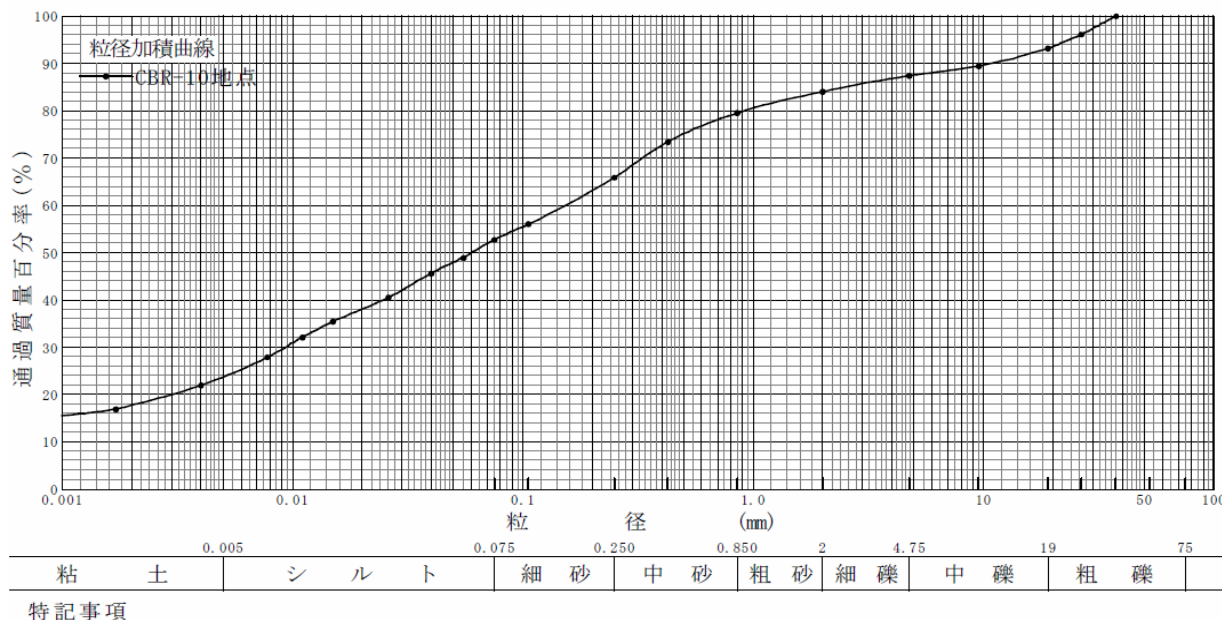


図 4-1 土の粒度分布曲線

4.1.3 改良材の添加率の決定

改良材として再生半水石膏と高炉セメントB種を1:1で混合したものを使用した。目標CBR値を16.9%として添加量を変えて、CBR試験を行った。供試体は、安定処理土の突固めによる作成方法に準拠して作成し、3日間空气中養生、4日間水中養生を行い、CBR試験に供した。試験結果を図4-2に示す。

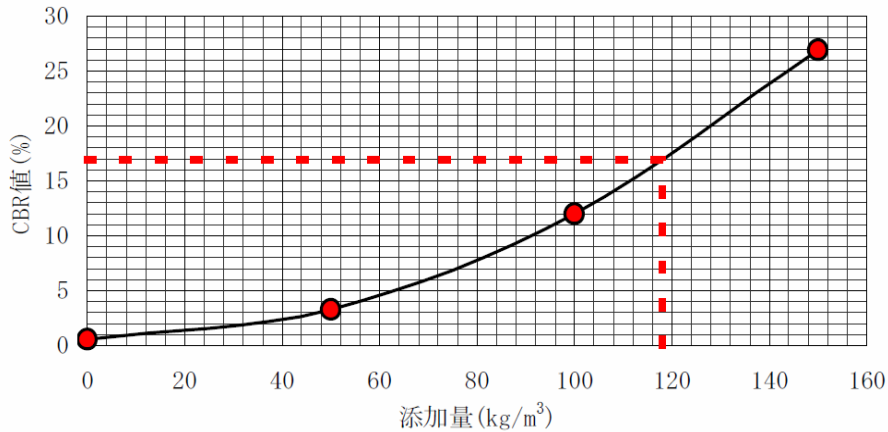


図4-2 CBR 値と改良材添加量との関係

この結果より改良目標CBR=16.9%に対する必要添加量を118kg/m³と決定した。現場での添加量は、これに割増率30%を加えて153kg/m³として行った。CBR試験前の養生期間における供試体の圧縮、膨張を測定した結果を図4-3に示す。空气中養生の3日間には小さな収縮が生じ、浸水養生の4日間には最大で0.2%の膨張ひずみが生じた。

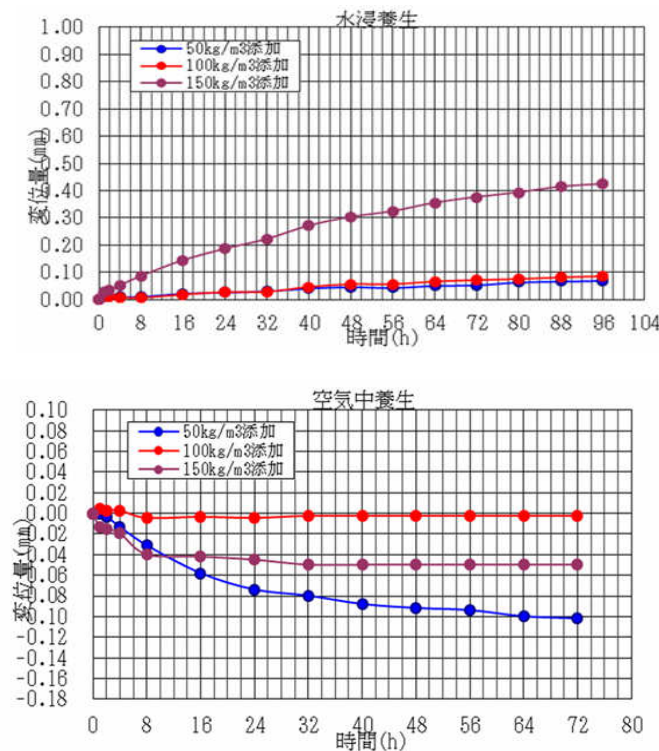


図4-3 CBR試験前の養生期間における膨張収縮変置測定結果

次に、CBR試験用供試体を上記と同じ添加量で再度作成し、脱型後3等分した。その1つを3日間空气中に養生、続いて4日間水中養生して一軸圧縮試験用に整形し、強度を求めた。圧縮応力と圧縮ひずみの関係を図4-4に、一軸圧縮強さと添加量との関係を図4-5に示す。なお供試体が硬かったため整形時の攪乱で強度が落ちた可能性がある。

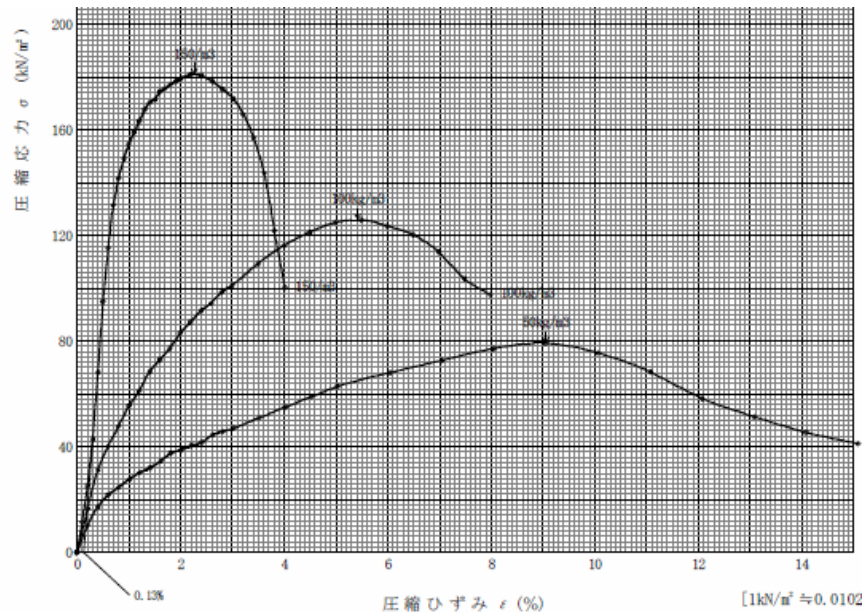


図 4-4 圧縮応力と圧縮ひずみの関係

図 5-5 より添加量が多いほど強度は大きく、またピーク強度に達する圧縮ひずみの大きさは小さくなり、そして変形は脆性的であることがわかる。

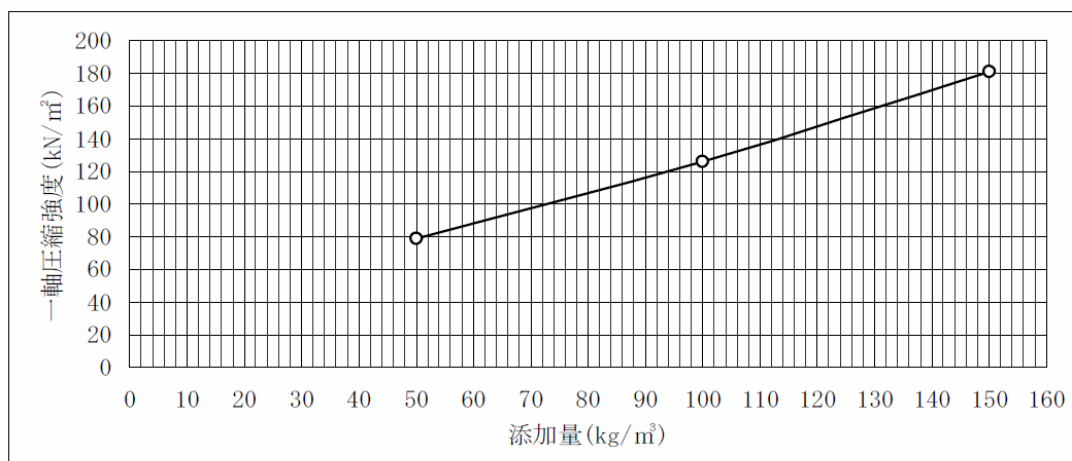


図 4-5 一軸圧縮強さと改良材添加量との関係

CBR試験結果では、曲線が凹型であるのに対し、一軸圧縮強さは直線的に増加している。この理由は、CBR試験では、載荷ピストンの沈下量が2.5mmと一定であるため、見かけのヤング

率が小さい（つまり強度が小さい）供試体ほど、CBR値が小さくなってしまいうためであると考えられる。³⁾、⁴⁾

4.1.4 環境試験結果

配合試験を行った，添加量 153 kg/m^3 の試料について，環境試験である土壌溶出試験を行った。フッ素が 0.58 mg/L ，六価クロムが 0.02 mg/L ，であり，環境規準を全て満たす結果となった。

4.1.5 現場施工

室内試験結果に基づき，現場で道路路床の地盤改良工事を実施した。写真 4-1 に土と添加材を攪拌と混合している様子を示す。攪拌と混合はバックホウとスタビライザーの 2 種類を用いてそれぞれ行われた。



写真 4-1 土と改良材を混合している様子

現場 CBR 試験は，バックホウ混合ヤード 2 箇所，スタビライザー混合ヤード 2 箇所の計 4 箇所で行われた。バックホウ混合ヤードでは，転圧後の養生期間が 1 日と 2 日で目標 CBR 値を超えて路盤施工が可能となった。スタビライザー混合ヤードでは，バックホウに比べ均一な攪拌が行われたことから，転圧終了直後と 2 時間後に路盤施工が可能になった。このような改良土では 7 日，28 日・・・と時間が経過すると強度が著しく大きくなるため，目標 CBR 値よりはるかに大きな値を持つ路床が形成されることになる。⁵⁾ このことは裏を返せば，改良材の配合量が過大であることも示唆している。経済性の観点から検討が必要である。

4.2 再生半水石膏の路床改良材としての利用【B地点での施工】

4.2.1 概要

A地点の路床改良試験施工と同じく、群馬県内の県道の一部（B地点）で試験的に路床改良工事に再生半水石膏を使用することになった。改良路体の大きさは、幅 5m、長さ 30m、厚さ 0.56m である。A地点と同構造の道路であり、試験的アスファルト道路の深さ方向の構成は、表面から、約 10cm 厚さのアスファルト舗装、約 30cm 厚さの砕石から成る路盤、約 100cm 厚さの地盤から成る路床、の 3 層構造である。

4.2.2 土の性質

路床に対応する改良前の土壌の粒度分布を図 4-6 に示す。最大粒径は 4.75mm であり、その構成は、礫分 0.2%、砂分 3.8%、細粒分 96.0%（シルト分 38.7%、粘土分 57.3%）である。自然含水比は、採取場所で変化するが、65.0%前後であった。土壌粒子の密度は 2.69g/cm³ である。液性限界は 81.9%、塑性限界は 41.3%、塑性指数は 40.6%であり、シルト（高液性限界）（MH）に分類される。土壌の湿潤密度は 1.644g/cm³ である。

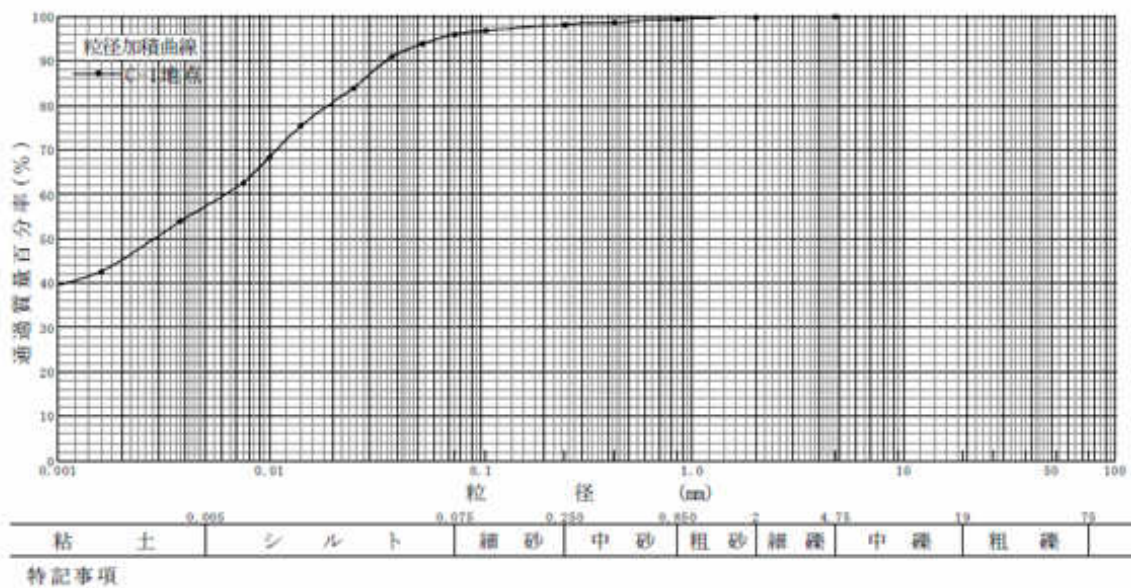


図 4-6 土壌の粒度分布

4.2.3 改良材の添加率の決定

改良材として半水石膏と高炉セメントを 1:1 に混合して使用した。目標 CBR 値を 10.8% とし、添加量を変えて、CBR 試験を行った。供試体は、安定処理土の突固めによる作成方法に準拠して作成し、4.5kg ランマーで 3 層 67 回突固めた後、3 日間空气中養生、4 日間水中養生を行い、CBR 試験に供した。試験結果を図 4-7 に示す。

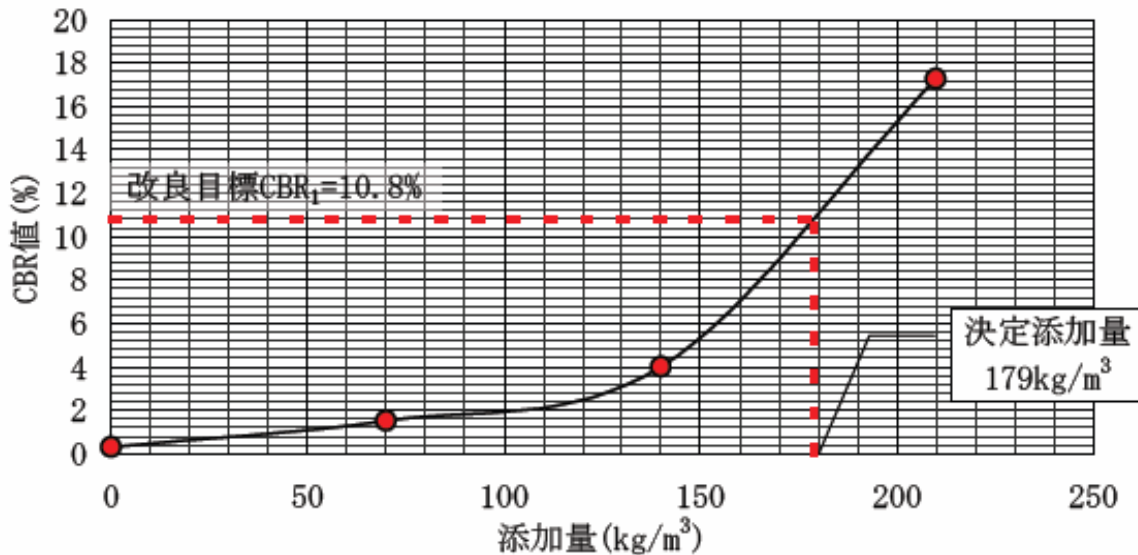


図 4-7 CBR 値と改良材添加量との関係

この結果より改良目標 CBR = 10.8% に対する必要添加量を 179kg/m³ と決定した。現場での添加量は、これに割増率 50% を加えて 269 kg/m³ とした。

次に、CBR 試験用供試体を上記と同じ添加量で再度作成し、脱型後 3 等分した。その 1 つを 3 日間空气中に養生、続いて 4 日間水中養生して一軸圧縮試験用に整形し、強度を求めた。圧縮応力と圧縮ひずみの関係を図 4-8 に、一軸圧縮強度と添加量との関係を図 4-9 に示す。なお供試体が硬かったため整形時の攪乱で強度が落ちた可能性がある。添加量 210kg/m³ のときの一軸圧縮強さが小さい (図 4-7) のは、そのため考える。

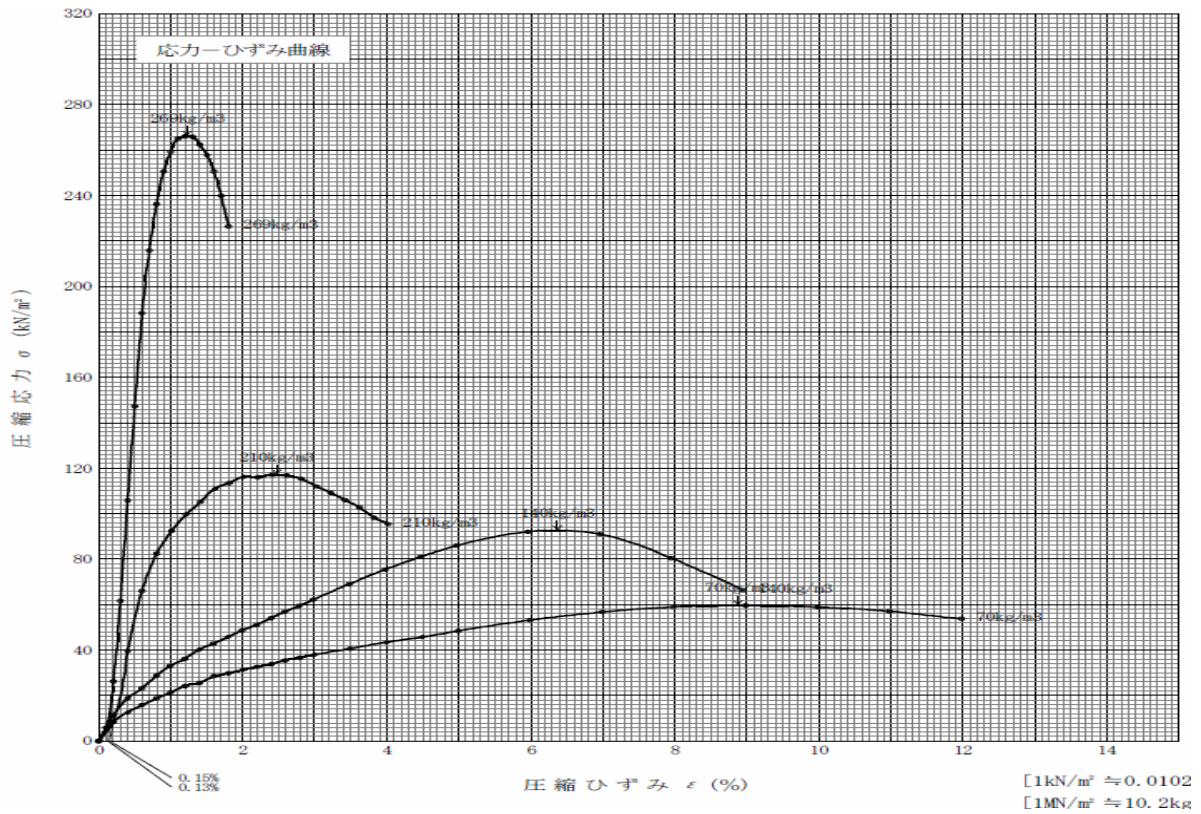


図 4-8 圧縮応力と圧縮ひずみの関係

図 4-8 より添加量が多いほど強度は大きく、またピーク強度に達する圧縮ひずみの大きさは小さくなり、そして変形は脆性的であることがわかる。

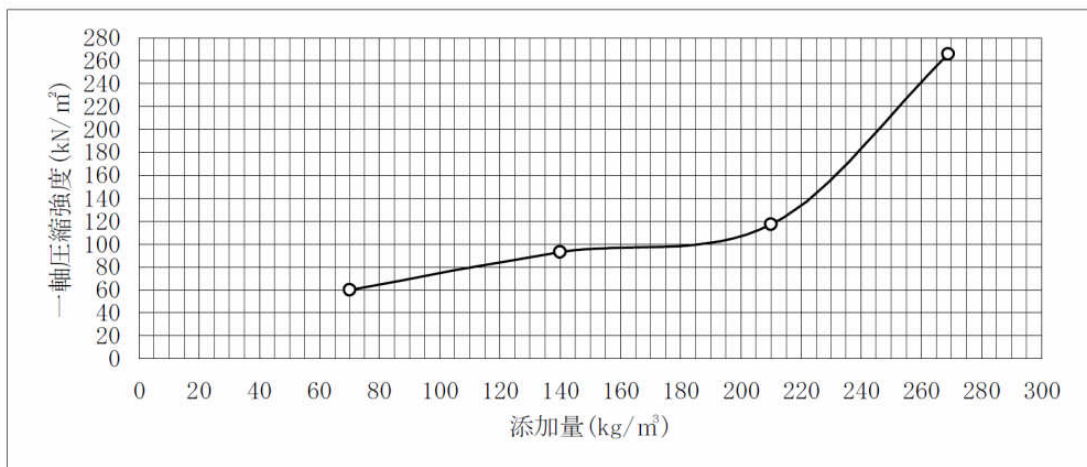


図 4-9 一軸圧縮強さと改良材添加量との関係

4.2.4 環境試験結果

配合試験で作成した改良土，添加量 210 kg/m^3 の試料について，溶出試験を行い環境測定を行った。フッ素が 0.33mg/L ，六価クロムが 0.02mg/L ，と全て環境規準を満たすことがわかった。なお，室内配合試験でのフッ素の溶出量が少ない為，現場での添加量 269 kg/m^3 の場合に対する溶出試験は行わなかった。

4.2.5 現場施工

室内試験結果に基づき，現場で道路路床の地盤改良工事を実施した。土壌と改良材はバックホウで混合した。写真 4-2 に改良材を混合した後の現場での締固めの様子を示す。



写真 4-2 施工写真 改良後の転圧状況

現場での締固め終了直後から 2 箇所において，現場 CBR 試験を行った。現場 CBR 値と養生日数の関係を図 4-10 に示す。この図より，転圧後 2 日間を経過することで目標 CBR 値を越えることがわかった。

(工事においては，途中で設計変更が行われ，目標 CBR 値が変更されたため，ここでの記述は参考資料と考えたほうが良い)

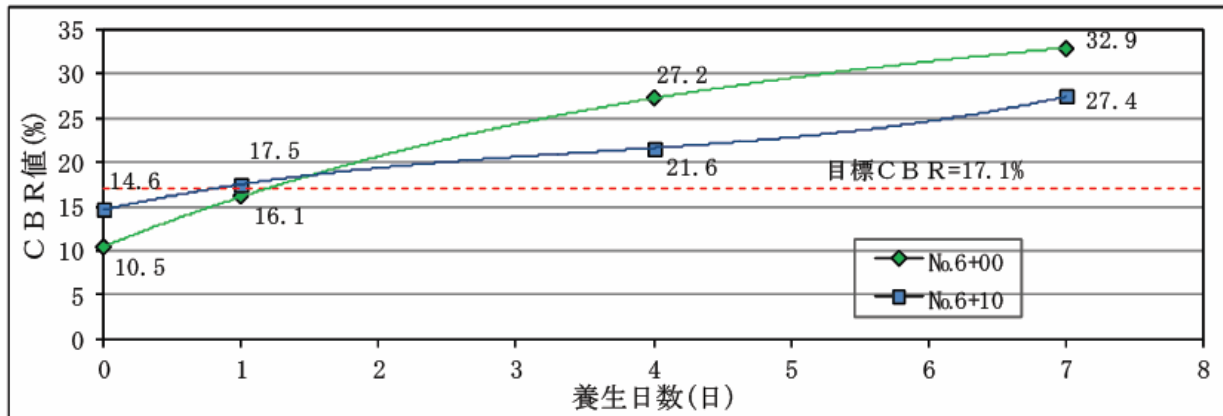


図 4-10 現場CBR値と養生日数の関係

4.3 まとめ

群馬県内、2箇所の道路で試験的に路床改良工事に廃石膏ボードから製造した再生半水石膏を使用した。実際の軟弱粘土を路床改良する場合でも力学的、環境的にも全く問題なく適応でき、再生半水石膏と高炉セメントの混合改良材が極めて有効であることが示された。軟弱な路床を砂で置き換えるより環境的に優れているし、経済的にも砂より安価な可能性が高い。再生半水石膏の価格がセメントより安くなれば、需要が期待できると考えられる。

第4章の参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社 : NEXCO 試験方法 第1編 土質関係試験方法, pp. 23-36, 2009.
- 2) 日本道路協会 : 舗装設計便覧, pp. 60-84, 2006.
- 3) 志比利秀, 亀井健史 : 二水石膏添加が締固め土の締固め特性と CBR 値に及ぼす影響—廃石膏ボードの有効利用—, 地盤と建設, Vol. 28, No. 1, pp. 39-45, 2011.
- 4) 志比利秀, 亀井健史, 神庭崇彰 : 廃石膏を混入した締固め土の一軸圧縮特性, 地盤と建設, Vol. 28, No. 1, pp. 47-53, 2011.
- 5) 亀井健史, 志比利秀, 塚本真希, 伊藤哲男, 出口宗浩 : 半水石膏を添加した締固め土の締固め特性と CBR 値—廃石膏ボードのリサイクル—, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 68, No. 3, pp. 466-474, 2012.

5. 再生半水石膏を用いた路床改良に関する実務設計法の提案

本章では、従来の廃石膏ボード再資源化研究の成果に基づき、廃石膏ボード再資源化の実用化が最も進んでいる軟弱な道路路床の改良工事を対象にして、実務設計法の提案を行う。現在、設計が進行中である群馬県内の県道路床工事のうちC地点の施工を用いて説明する。

設計法の提案を行う前に、廃石膏ボードを再資源化する必要性について述べる。リサイクルできない廃石膏ボードは管理型処分場へ廃棄することが義務付けられている。たとえば群馬県には、廃石膏ボードを受け入れる管理型処分場は無いため、リサイクルできなければ他都道府県へ移送排出する必要があるが、他都道府県への排出は県内処理の原則から好ましい事ではない。また、他都道府県へ排出する際には、運搬経費がかかるうえ、処分費が他都道府県の業者に支払われるため、多額の資金が群馬県から外へ流出することになる。この金額は数億円に達すると予測され、群馬県にとっては大きな損失となる。群馬県内でリサイクルまたは再資源化できれば、金銭的資金面、人的雇用面で損失が少なくなり、再資源化できなければ損失が生じる。また再資源化することで廃石膏ボードに付加価値が生じるため、不法投棄の抑制にもつながる。

5.1 改良材の性質

①地盤改良材として高炉セメントと再生半水石膏の混合物を利用する。

解説：高炉セメントは一般に市販されているB種を使用する。高炉セメントを用いる理由は、普通ポルトランドセメントに比べて、六価クロムの溶出を抑制できるからである。これは、過去の研究事例と本論文の現場施工環境試験結果からも実証済みである。

②再生半水石膏は、廃石膏ボードを市販の分離機で加工し、廃ボード紙を取り除いたものとする。

解説：6.2.2の研究結果で示したように、紙が混入すると改良材としての強度発現性能に支障が発生する恐れがある。

③再生半水石膏の粒度分布は、2.2.1で示した粒度分布曲線より細粒側とし、半水化率は90%以上を原則とする。

解説：本論文の研究で使用した粒度分布よりも細粒側であれば、改良材としての性能に問題がない。また、2.2.1の事例で示したように半水化率が80%以上の場合も可能であるが、その場合には数値を明記し、改良材としての配合を見直すことを推奨する説明が必要である。なお6.2で示したように、将来的には再生二水石膏（半水化していないもの）を利用することも可能ではあるが、そのためには詳細な検証実験を今後行う必要がある。

④高炉セメントと再生半水石膏の混合重量比率は1:1とする。

解説：再生半水石膏の消費を拡大する観点からは再生半水石膏の割合を増量することが望ましいが、改良材としての強度発現性能に問題が出る恐れがある。これ以外の比率にするときは理由を記述する必要があるが、フッ素の溶出量が多いと予想される場合は、高炉セ

メントの混合比率を50%以上にすることも可能である。

以上に示した改良材の性質について、C地点を例にして説明する。
C地点の状況を写真5-1に示す。



写真 5-1 C地点の様子

C地点路床の改良に用いる予定の再生半水石膏の粒度曲線を図5-1に示す。これは、2.2.1で示した過去の事例データを同じ図中に示したものである。粒度を比較するとC地点のほうが過去の事例より細粒側にあるので、品質は問題ないと言える。

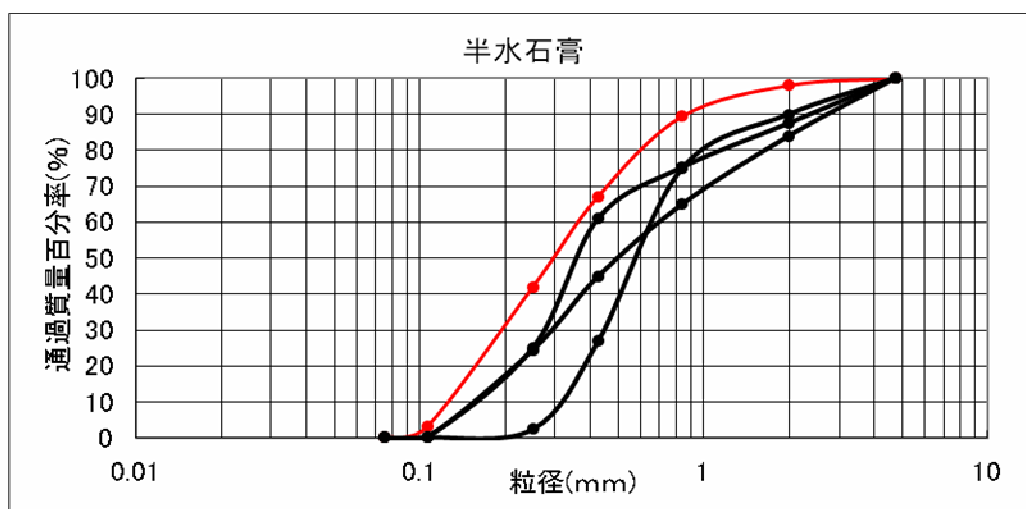


図 5-1 再生半水石膏の粒度曲線（赤がC地点の路床改良に使用予定、黒が過去の事例）
再生半水石膏を簡易法（以下に示す「半水石膏分析方法」）により分析した。その結果、

半水石膏と無水石膏の合計が 95%，その他が 5%となった。これより半水化率は 90%以上になることがわかった。

【チヨダウーテ（株）の「半水石膏分析方法」】

1. 試料のサンプリング

焼石膏をボールミル粉碎直後及びミキサーにできるだけ近い箇所採取する。採取した焼石膏はファスナー付きのビニール袋に入れ、中の空気をできるだけ抜いてから密封する等して、空気に触れないように保存する。

焼石膏の可溶性無水石膏によって、水分が急速に吸水されるので、サンプリングの直後に焼石膏分析試験は実施する。

2. 焼石膏分析

1) 湿気養生による増量の測定 H_u

可溶性無水石膏は、吸湿して半水石膏になる。

① 磁性ルツボに、約 5 g の試料を 0.1 mg まで秤量する。 W1

② 水を張ったデシケーター中に 5 時間置く。

③ 40℃の熱風循環乾燥器で 24 時間以上乾燥後重量を量る。 W2

④ $H_u = (W_2 - W_1) / W_1$

2) 水和水測定 H_w

可溶性無水石膏及び半水石膏は、短時間に二水石膏になる。

① 磁性ルツボに、約 1 g の試料を 0.1 mg まで秤量する。 W3

② 磁性ルツボに水を入れ、4 時間放置後、40℃の熱風循環乾燥器で 24 時間以上乾燥後重量を量る。 W4

③ $H_w = (W_4 - W_3) / W_3$

3) 化合水（結晶水測定） C_w

半水石膏及び二水石膏を 500℃で焼くと、無水石膏になる。

① 磁性ルツボに、約 1 g の試料を 0.1 mg まで秤量する。 W5

② 500℃の電気炉で 2 時間焼成後重量を量る。 W6

③ $C_w = (W_5 - W_6) / W_5$

4) 水和水測定 H_{sw}

Ⅱ型石膏も長時間水に浸すとⅢ型石膏、半水石膏と共に二水石膏になる。

① 磁性ルツボに、約 1 g の試料を 0.1 mg まで秤量する。 W7

② 磁性ルツボに水を入れ、72 時間放置後、40℃の熱風循環乾燥器で 24 時間以上乾燥後重量を量る。 W8

③ $H_{sw} = (W_8 - W_7) / W_7$

3. 水和塩の計算

- | | |
|--|------|
| 1) 可溶性無水石膏 (Ⅲ-無水石膏) | ⅢG0 |
| $\text{ⅢG0} = \text{Hu} / 0.0662$ | |
| 2) 半水石膏 | G1/2 |
| $\text{G1/2} = (\text{Hw} - 3.998 \times \text{Hu}) / 0.1862$ | |
| 3) 二水石膏 | G2 |
| $\text{G2} = (\text{Cw} - 0.3336 \times \text{Hw} + 1.3333 \times \text{Hu}) / 0.2092$ | |
| 4) Ⅱ-無水石膏 | ⅡG0 |
| $\text{ⅡG0} = (\text{Hsw} - \text{Hw}) / 0.2647$ | |

5.2 改良材配合量の決定方法

①高炉セメントと半水石膏の混合材料で改良された路床土のCBR試験の方法や試験結果の活用方法については、通常的路床改良の場合と同じように、「舗装設計便覧」や「舗装施工便覧」のような道路舗装のための基準類に従う。^{1), 2)}

解説：「舗装設計便覧」には、循環型社会資本の形成を目指す観点から、再生材の使用促進に努めることや、他の建設産業や他産業の発生材・再生資源などの利用を勧めている。このことは廃石膏ボード再資源化の理念に通じるものである。²⁾

②改良土の強度がCBR試験後も大幅に増加することを考慮し、また現行の舗装設計基準を尊重して、現場での割増率を低減する方法を新たに考案した。³⁾

解説：路床土の設計では、目標設計CBR値を決めて、これに対応する混合材料の配合率をCBR試験より決定する。現場では、これに「舗装施工便覧」で定められた割増率をかけて現場配合量を決定する。改良後の路床の強度を確認するために、路床締め固め後に現場CBR試験を行って、目標CBRが達成されていることを確認する。ところで、改良土のCBR試験では、改良土を突き固めた後3日間空中養生を行い、引き続き4日間水中養生を行うことが規定されている。すなわち改良土は7日間養生後にCBR試験を行うことになっている。2.2.1に示した改良土の一軸圧縮強さの試験結果より、当然ながら養生日数が増加すると改良土の強度は無視できないほど大きくなる。また現場の施工では、配合率の割り増しを行うため、4.2.5の図に示したように改良路床の締め固め後の数日以内に現場CBR値は目標CBR値を越え、その後も増加している。一方、道路の設計では設計期間(耐用年数)を10年以上にすることが多いため、施工後1年ほど経つと現位置のCBR値は、設計値以上に達していることは確実である。これは安全側であるが、過大とも言える。これを避けるために、目標CBR値を14日または28日養生後に試験をして決定することも考えられる。

以上に示した改良材配合量の決定方法に関してC地点を例にして説明する。

C地点の深度 1.10m-1.30mにおいてC B R 試験用に土試料を採取した。土質試験結果は以下のようなものである。土質は火山灰質である。

自然含水比：wn 80.8%

粒 度：礫分 16.1%，砂分 38.8%，シルト粘土分 45.1%，

最大粒径 26.5mm，50%粒径 0.12mm

分類名：粘性土質礫質砂

締め固めた土の平均 C B R 値は，0.5%であった。

C B R 値と添加量の関係を図 5-2 に示す。

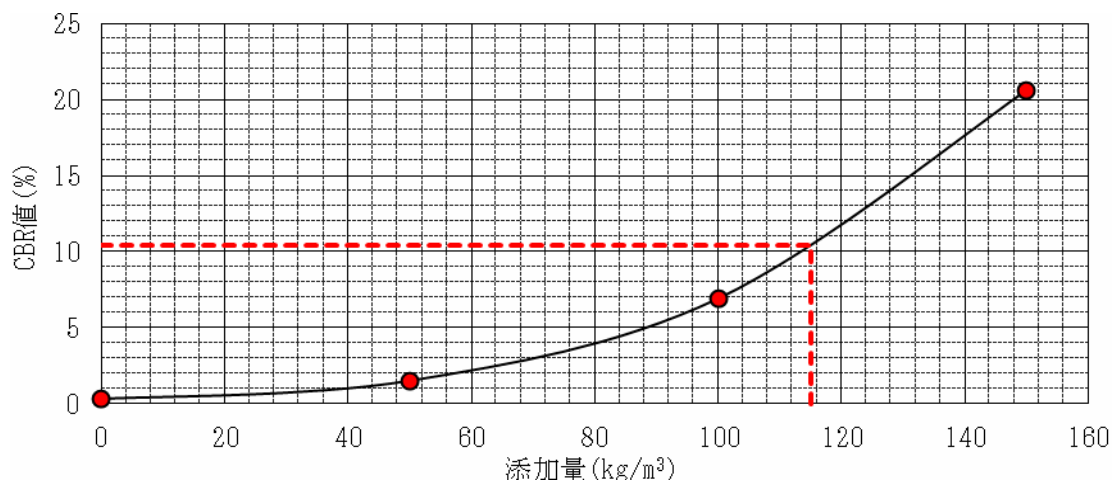


図 5-2 C B R 値と添加量の関係

事前に与えられた目標 C B R 値は，10.4%であるので，必要添加量は 115kg/m^3 と決定される。

ところで現場添加量は，この室内配合決定添加量に下表 5-1 の割増率を掛けて決定される。²⁾ このケースでは，現場添加量は，室内配合決定添加量の 1.4 倍の $115\text{kg/m}^3 \times 1.4 = 161\text{kg/m}^3$ となる。

すでに述べたようにこのような過大な現場添加量を用いることが，過大な現場 C B R 値を生じる主な原因である。

表 5-1 固化材添加量の割増

処理厚 (cm)	50 未満	50 以上	
		砂質土	粘性土
土の種類	全対象土	砂質土	粘性土
割増率 (%)	15~20	20~40	30~50

このような過大な現場添加量を合理的な根拠に基づいて、少しでも低減（節約）することを考えよう。そのためにセメントを主体とした改良土の強度が養生日数とともに増大する性質を利用する。たとえば図 2-3 に示されるように改良土の 28 日経過後の一軸圧縮強さは、7 日経過のものに比べ、10%以上強度が増している。一方、図 4-2 と図 4-5 を比較すればわかるように一軸圧縮強さが増加すると CBR 値も増加する。両者の関係を図 5-3 と図 5-4 に示す。

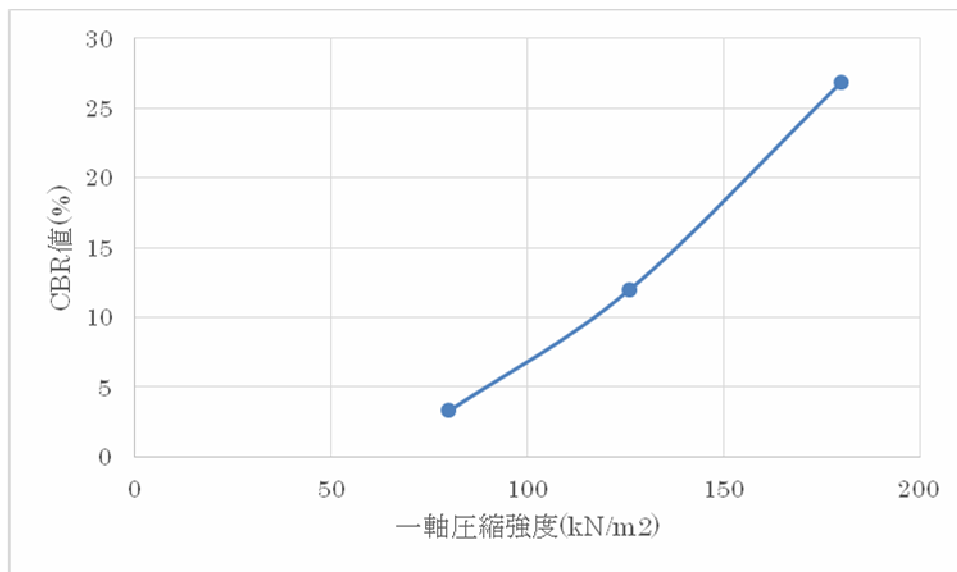


図 5-3 A 地点における CBR 値と一軸圧縮強さとの関係（目標 CBR 値は 16.9%）

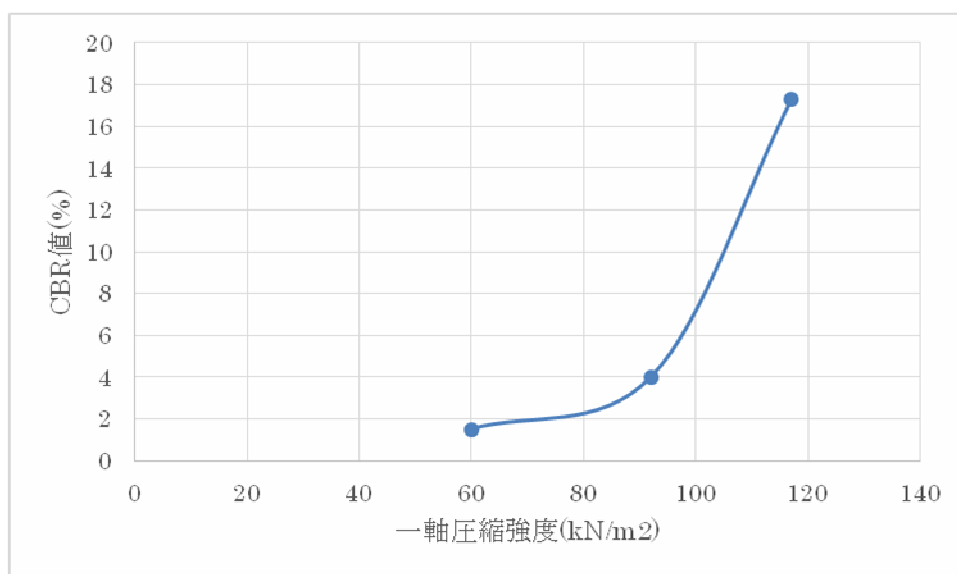


図 5-4 B 地点における CBR 値と一軸圧縮強さとの関係（目標 CBR 値は 10.8%）

次に実際に養生日数の増加に伴う C B R 値の変化を試験した結果を表 5-2 に示す。28 日養生の C B R 値は 7 日養生値に比べ絶対値で 0.8%の増加となる結果であった。

表 5-2 28 日養生での C B R 値

サンプル名	養生日数	CBR 値
添加量 100kg/m ³ (B : C = 1 : 1)	7 日養生	7.3%
	28 日養生	8.1%

この結果を基に現場添加量の試算を行うと、C B R 値（絶対値）0.8%の変化に対して添加量は 3kg/m³ 程度削減できるので、28 日経過後の路床の強度を設計値に設定すれば、改良材の現場添加量を 4.2 (=3*1.4) kg/m³ 程度節約できることになる。

もし改良すべき路床の体積が 500m³ であれば 2,100kg の節約となる。改良材の価格を 8 円/kg とすれば 1.68 万円の節約となり、フッ素の溶出試験など再生半水石膏を使用することで新たに加わる経費の追加費用に充当することができる。一般に再生半水石膏のようなりサイクル材を利用すると環境試験など追加の経費が増加して、経済的な負担が増加すると言われている。しかし、上述のように合理的な考え方を導入することで、経済的な負担を軽減することができ、環境面と経済面で従来の工法よりも効果の優れた再生材利用方法を考案することが可能となる。

5.3 改良された路床土の環境試験の方法

①改良された路床土の環境試験として六価クロムの溶出試験とフッ素の溶出試験を行う。

解説：硫化水素の検出試験は行わない。強アルカリ下では、硫化水素発生の原因となる硫酸塩還元菌が活性化しないと言われているためである。2.2.1 に示したようにセメントで改良されているため、改良土の pH は 11 を超える結果となる。また、セメントを用いているため六価クロムの溶出試験を行う。再生半水石膏を用いているためフッ素の溶出試験も行う。

②タンクリーチング試験による溶出試験を実施する。

解説：地盤改良の施工後に改良土（粘性土では内部への浸透は起こりにくい）の上を雨水や、少量の地下水が一部流れる可能性がある。現実にはこれに対する安全性を確かめれば良いと考える。このような状態に対応する試験法としてタンクリーチング試験がある。図 5-5 にタンクリーチング試験を示す。これは試料の 10 倍の純水の中に試料を静置して溶出量を測定する試験である。2.2.1 で示したように、現場の土壌そのものに従来からフッ素が多量に含まれるケースがあるため、土塊を粉砕して行われる現行の溶出試験をそのまま適用すると基準値を超える危険性も考えられる。しかしながら、このような粉砕された状態は固化した改良土では起こりえないので、現場の改良土にふさわしい合理的で、実用的な溶出試験方法を考案する必要があると考える。

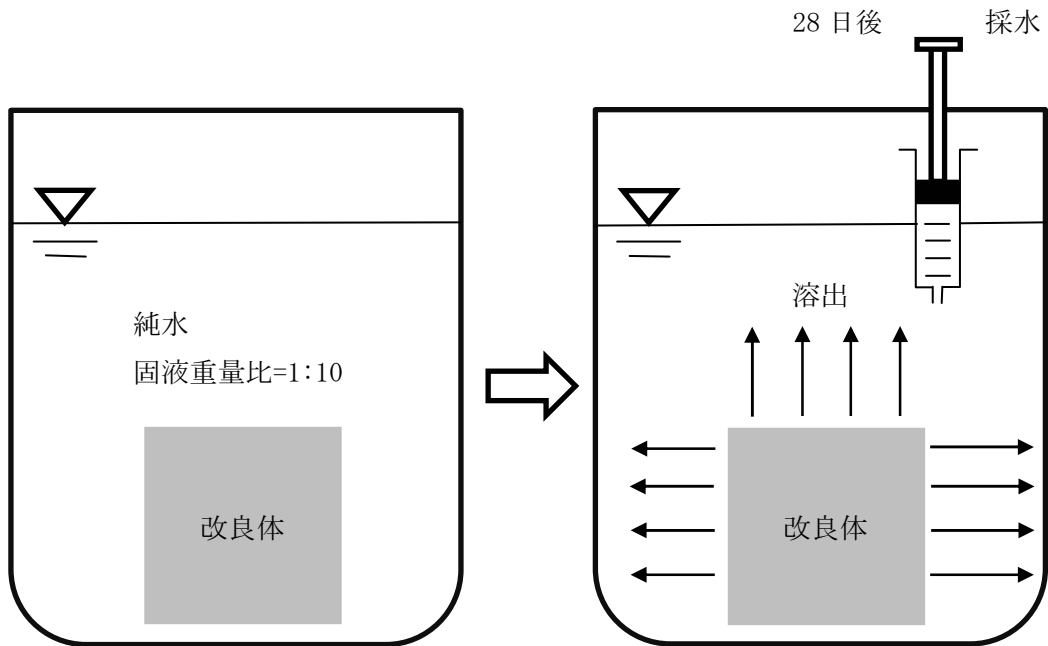


図 5-5 タンクリーチング試験

以上より、フッ素の溶出試験は通常行われる溶出試験とタンクリーチング試験の 2 種類を行い、タンクリーチング試験の結果が基準値以内であれば、実用上は問題が無いと判定する。もし通常の溶出試験の結果が基準値を超えた場合は、改良土の施工後に、現場周辺で地下水の浸出がないかを確認し、浸出がある場合はそれを採水して含有量試験を行い、安全性を確認する。もしくは、改良材中の再生半水石膏の混合率を 50%より低くして、セメントの割合を増やすことも考えられるが、この場合は配合設計のやり直しにつながるもので、実用上好ましくない。

以上に示した改良された路床土の環境試験方法についてC地点について説明する。

所定の養生日数を経過した改良試料土に対し、環境庁告示 18 号法に基づき実施した六価クロムおよびフッ素の溶出試験を実施した。結果を表 5-3 に示す。六価クロムおよびフッ素の溶出量はともに環境基準を満たしている。

表 5-3 クロムおよびフッ素の溶出試験結果

サンプル名	種類	溶出量	環境基準	評価
添加量 150kg/m ³ (B : C=1 : 1)	六価クロム	<0.005mg/L	0.05mg/L 以下	OK
	フッ素	0.46mg/L	0.8mg/L 以下	OK

同じ改良試料土に対してタンクリーチング試験を実施した。28 日経過後の溶媒水中の六価クロムとフッ素の溶出量（含有量）結果を表 5-4 に示す。この場合も両者ともに環境基準を十分満たしている。

表 5-4 クロムおよびフッ素のタンクリーチング試験結果

サンプル名	種類	溶出量	環境基準	評価
添加量 150kg/m ³ (B : C = 1 : 1)	六価クロム	<0.005mg/L	0.05mg/L 以下	OK
	フッ素	0.10mg/L	0.8mg/L 以下	OK

5.4 路床改良に関する新たな実務設計法の提案まとめ

5.4.1 推奨される改良材の性質

①路床改良材として高炉セメントB種と再生半水石膏を使用し、高炉セメントと再生半水石膏の混合重量比率は1 : 1とする。

②再生半水石膏は、廃石膏ボードを市販の分離機で加工し、廃ボード紙を取り除いたものとする。

③再生半水石膏の粒度分布は、図 5-1 で示した粒度分布曲線より細粒側であるとする。

④半水化率（半水石膏と無水石膏の重量百分率）は 90%以上とする。半水化率の分析方法は「半水石膏分析方法」を用いる。

5.4.2 推奨される改良材配合量の決定方法

①改良された路床土の C B R 試験の方法や試験結果の活用は、通常的路床改良と同じように関連する舗装基準類に沿って行う。

②改良された路床土の設計では、目標設計 C B R 値を決めて、これに対応する（これを満たす）改良材の配合量 H1 を C B R 試験により決定する。現場では、これに「舗装施工便覧」に定められた割増率 β を掛けて現場配合量 H2 を決定する。

③改良された路床土の強度が過大にならないよう、かつ経済性を考慮して、現場配合量を低減側に修正する。修正方法は以下のようなものである。締め固め 28 日経過後の CBR 値と 7 日経過後の CBR 値（通常の CBR 値）との比を α とする。CBR 値と改良材添加量の曲線において（目標設計 CBR 値 $\times \alpha$ ）の CBR 値に対応する添加量 H_3 を求める。 $H_3 - H_1$ が修正される低減量である。これに β を掛けた $(H_3 - H_1) \times \beta$ が最初に算出された現場配合量 H_2 から差し引いても良い低減量になる。概念図を図 5-6 に示す。

α の値は過去の実績結果をもとに低めに決定する。

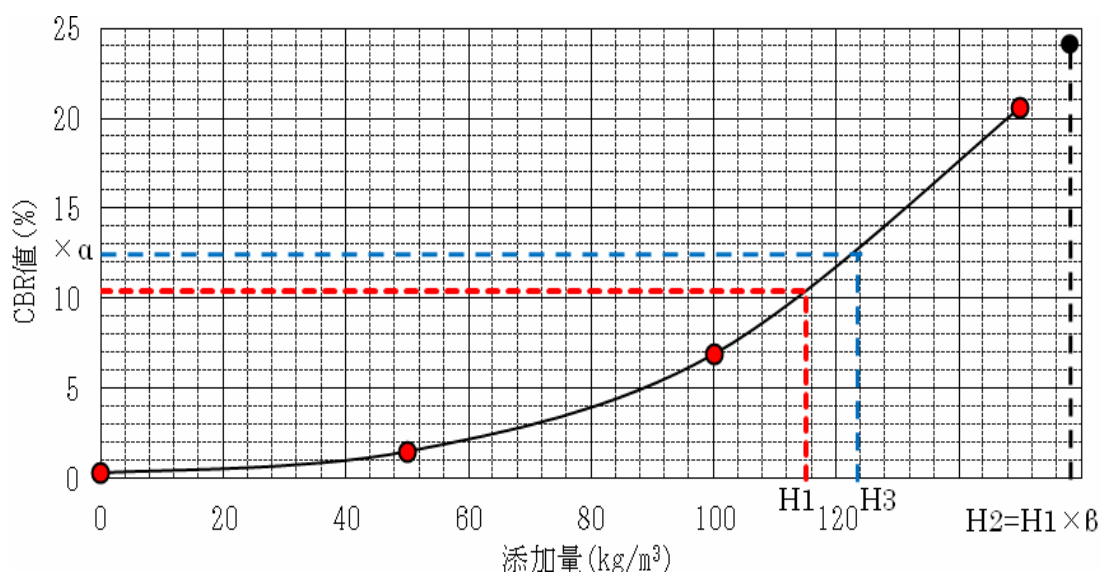


図 5-6 CBR 値の 28 日強さを考慮する場合の現場配合量の低減修正方法

5.4.3 推奨される路床改良土の環境試験方法

①改良された路床土の環境試験として六価クロムの溶出試験とフッ素の溶出試験を行う。これらは環境庁告示 18 号法に基づいた試験方法で行う。溶出量が環境基準値以下であることを確認する。

②フッ素の溶出については、タンクリーチング試験を併せて行う。CBR 試験終了後の供試体から直径 5cm、長さ 10cm ほどの土塊を採取し、その重量の約 10 倍の純水に浸水させる。水浸 28 日後に溶媒水を採水し、フッ素の濃度測定を行い、濃度が環境基準値以下であることを確認する。タンクリーチング試験によるフッ素濃度が基準値以下であれば、路床改良の施工は妨げられないものとする。

第5章の参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：「舗装施工便覧」，平成18年版，2006.
- 2) 社団法人日本道路協会：「舗装設計便覧」，平成18年2月，2006.
- 3) 社団法人日本道路協会：「舗装の構造に関する技術基準・同解説」，平成13年7月，2001.

6. 廃石膏ボード再資源化の今後の展開と開発

6.1 再生半水石膏を混合した培養土に対する植物の栽培実験

6.1.1 目的

廃石膏ボードより製造される再生半水石膏は土を硬化する性質があるので、土壌の改良材として検討を行った。土壌に用いる場合、植物の生育にどのような影響があるかを事前に確認しておくことが大切である。このようなことを目的に、再生半水石膏などを混合した市販の農業用培養土に対して植物（ライ麦）の種を播き（2月）、園芸農家のビニールハウス内で1ヶ月間生育状況を観察した。比較のために、高炉セメントまたは生石灰、及びこれらの混合材を添加した場合の試験も行った。^{1)、2)}

6.1.2 実験方法

添加率と配合比を表6-1に示す。全部で19種類の植生基盤を作成し生育を観察した。Bは再生半水石膏、Cは高炉セメント、Lは生石灰を表す。改良材の添加率は土に対する重量比2.5%、5.0%の2ケースを想定し、比較対照として、何も混合しない土壌のみの場合も行った。培養土の含水比は63%であった。

表6-1 配合表

ケース		添加率 (%)
①	土のみ (2ケース)	0.0
②	半水石膏のみ	2.5
③		5.0
④	セメントのみ	2.5
⑤		5.0
⑥	石灰のみ	2.5
⑦		5.0
⑧	B:C=1 : 1	2.5
⑨		5.0
⑩	B:C=2 : 1	2.5
⑪		5.0
⑫	B:C=3 : 1	2.5
⑬		5.0
⑭	B:L=1 : 1	2.5
⑮		5.0
⑯	B:L=2 : 1	2.5
⑰		5.0
⑱	B:L=3 : 1	2.5
⑲		5.0

6.1.3 実験結果と考察

植物の平均的な成長高さを経時的に観察した。ここでは、土壌のみ、再生半水石膏のみ 5%、セメントのみ 5%、生石灰のみ 5%、B:C=1:1 で 5%、B:L=1:1 で 5%、の 6 ケースについて成長高さの変化を図 6-1 で示す。

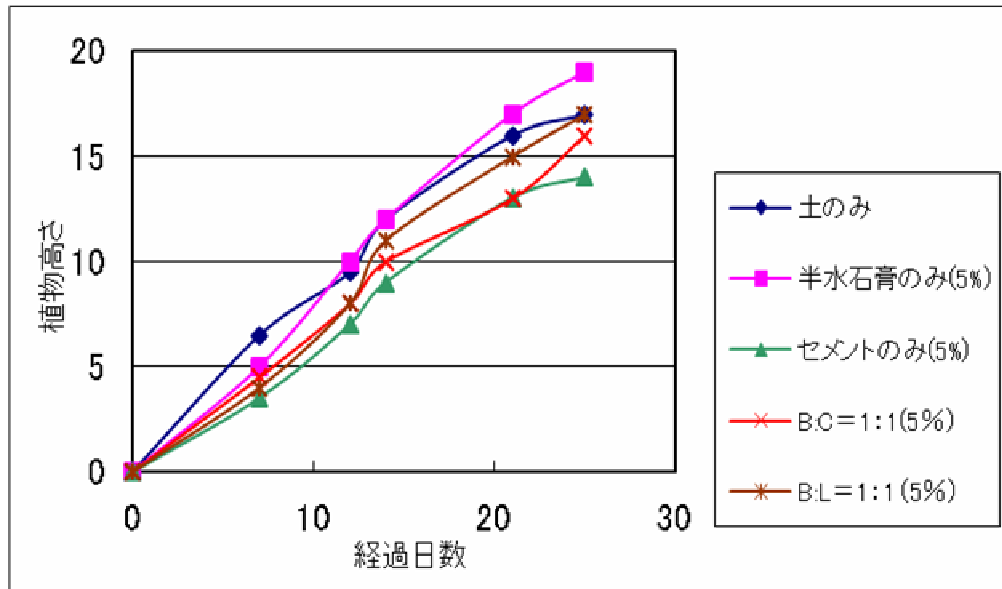


図 6-1 植物の成長高さと播種後の経過日数との関係

次に実験の様子や生育状況の写真 6-1～6-4 を示す。

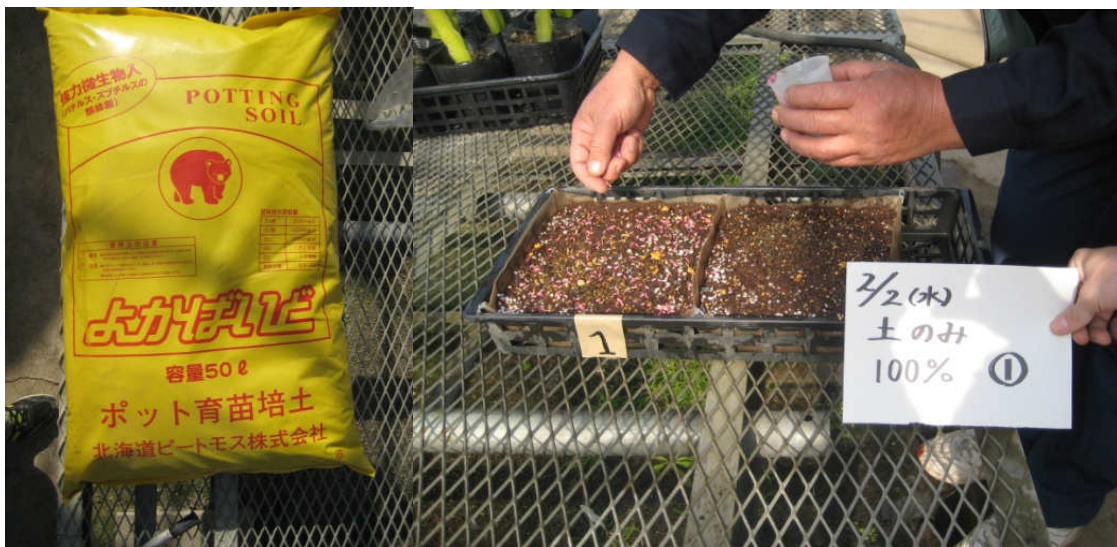


写真 6-1 用いた培養土

写真 6-2 種まきの様子



写真 6-3 植物が生育している様子 (真上から) 写真 6-4 植物が生育している様子 (横から)

生育状況より、再生半水石膏 5%のみを土壌に加えたとき悪い影響は無く、時間が経つと土壌のみの場合より、成長が良くなることがわかる。セメント 5%のみを土壌に加えたときの成長が最も悪い。しかしながら、いずれの場合も植物は時間に比例して成長している。今回の実験では、土壌を締め固めていないため、改良した土壌があまり硬くなっていない。このため改良材の影響が小さ目になっていると考えられる。^{2)、3)}

以上より、再生半水石膏を土壌の改良材として使用した場合でも、植物の成長に問題となる影響はないと考えられる。

6.2 エネルギー軽減型地盤改良材の試行

半水石膏を製造する際には、紙と石膏部分に分ける作業と、二水石膏を細粒化し加熱処理する工程とがあり、多くのエネルギーを使用している。そのエネルギーを軽減することを目的とし試験を行った。

第一に半水石膏の代わりに二水石膏を使用する。二水石膏を使用しても影響がなければ、半水石膏を生成する際の加熱処理の工程を省くことが出来る。

第二に石膏と紙部分を一緒に混合する。石膏ボードの表面についている紙（石膏ボード重量の5%）を混合しても影響がなければ廃石膏ボードから半水石膏を生成する際の紙部分と石膏部分に分ける作業を省くことが出来る。^{4)、5)}

また、各種の土試料への適合性を検討するため、膨張性のある土試料を使用し、半水石膏は膨張現象に対してどのような影響があるのかを検証した。

ため池での浸水崩壊試験中に水槽の水が濁っているものとそうでないものがあり、供試体が浸水により侵食されていることに気づいた。そこで含水比、重量、軸方向変位から水溶性、軸方向の膨張性を検証した。以下にそれぞれの試験目的を示す。

- ・半水石膏と二水石膏を改良材としたときの強度への影響（MC-clay を土試料）
- ・半水石膏と紙を混合したときの強度への影響（MC-clay を土試料とし、紙の分量は半水石膏の重量の5%を添加）
- ・半水石膏の量を変化させた改良土の膨張性への影響（ベントナイトを土試料）
- ・改良材の条件の違いによる浸水条件での水溶性への影響

以前の研究により疑問点が挙がった上記の課題を研究するため、人工粘土（MC-clay・ベントナイト）を用いて粘性土を土試料とした、一軸圧縮試験・膨張試験を行い、水溶性については、浸水崩壊試験の結果より検証をした。⁶⁾

6.2.1 実験方法

表 6-2 の 6 ケースについて一軸圧縮試験（MC-clay を土試料）を行った。

表 6-3 の 15 ケースについて一軸圧縮試験（MC-clay を土試料）を行った。

表 6-4 のケースについて膨張試験（ベントナイトを土試料）を行った。

表 6-5 の 42 ケースについて浸水崩壊試験の分析を行った。

表 6-2 一軸圧縮試験（MC-clay を土試料）

改良材 添加率	改良材比	気中養生時間（日）
	二水石膏(G)：高炉セメント(C)	
15%	1：1	3, 7, 28
22.5%	1：1	3, 7, 28

表 6-3 一軸圧縮試験 (MC-clay を土試料)

改良材 添加率	改良材比 半水石膏(B) : 高炉セメント(C)	気中養生時間 (日)
7.5%	1 : 1	3, 7, 28
15%	1 : 1	3, 7, 28
	2 : 1	3, 7, 28
	3 : 1	3, 7, 28
22.5%	1 : 1	3, 7, 28

表 6-4 膨張試験 (ベントナイトを土試料)

改良材	改良材 添加率 (%)	改良材比 半水石膏(B) : 高炉セメント(C)
B	3, 6, 9	—
B:C	6	1 : 1
	3, 6, 9, 12	2 : 1
	6	4 : 1
	6	8 : 1
	6	16 : 1

表 6-5 浸水崩壊試験

改良剤添加率	改良材比 半水石膏(B) : 高炉セメント(C)	気中養生日数 (日)	浸水日数 (日)
7.5%	1 : 1	28	0. 4. 7. 15. 30. 60
15%	1 : 1	3. 7. 28	
	2 : 1	28	
	3 : 1	28	
22.5%	1 : 1	28	

浸水崩壊試験方法を写真 6-5 に示す。気温 20℃に保たれた恒温室に所定の気中養生日数に達するまで養生する。縦 30cm，横 20cm の水槽に供試体を浸水し，浸水日数 0，4，7，15，30，60 日ごとに，各供試体の同じ位置で高さを測り，供試体の重量，試験後の供試体の含水比を測る。



写真 6-5 浸水崩壊試験状況

6.2.2 実験結果

半水石膏の代わりに二水石膏〔CaSO₄・2H₂O〕を使用し、二水石膏と半水石膏の比較を行った。図6-2に一軸圧縮試験結果を示す。

3日間気中養生では、半水石膏を使用した強度と二水石膏を使用した強度の差は添加率15%、22.5%の場合も変化は見られなかったが、気中養生日数の増加とともに差が見られてきた。半水石膏の強度を100%とすると、28日気中養生後では約70%の強度を発揮することがわかった。半水石膏を改良材とした改良土では気中養生期間が増加するにつれて二水石膏を改良材とした改良土よりも強度増加をしやすいことがわかった。

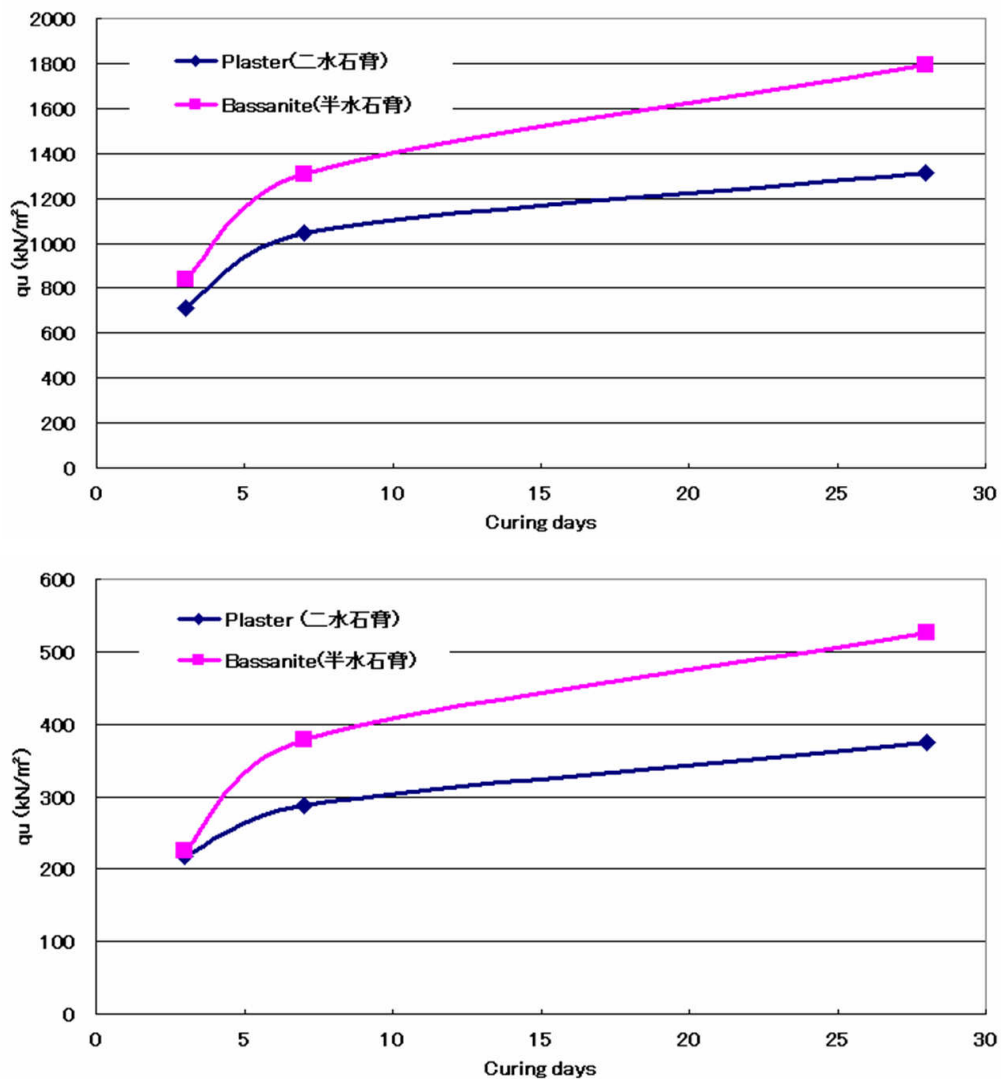


図6-2 一軸圧縮試験結果 改良材比1：1（上：添加率15% 下：添加率22.5%）

次に紙を添加した場合の結果を示す。一般的に使用する石膏ボードの紙部分の量は石膏部分に対する重量比として、5%であったため添加する半水石膏の量の5%を混合した。紙を混合しないものと混合した一軸圧縮試験結果の比較図 6-3 より、混合した場合すべてにおいて強度は低下することが確認できた。添加率15%のみ改良材比を変えて試験をしたところ、半水石膏の比率が増加すると強度も著しく低下し、改良材比3:1の場合では28日間気中養生後の強度を比較すると1/5程度の結果となった。紙は強度に影響を及ぼすが、改良材比1:1, 改良材添加率も15%以上加えることで、使用できることが確認できた。

今回の実験は試験的実験のため、溶出試験は行わなかった。紙を混合したことで有機物が混入し、環境的に何らかの影響が出ることも考えられるため、強度では有効性があると確認できたが環境面で安全であるかの検証は今後の課題とする。

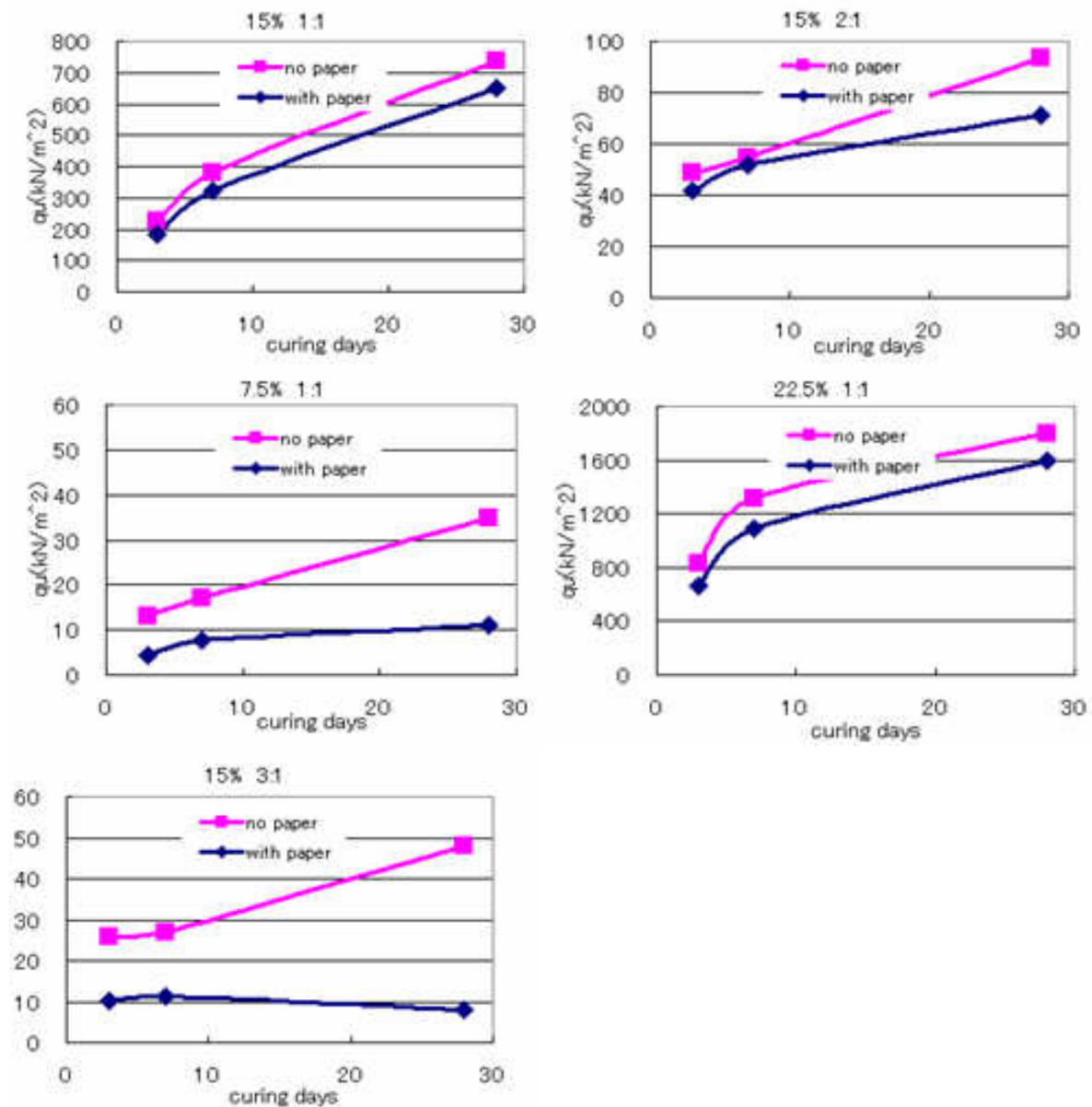


図 6-3 一軸圧縮試験結果 紙の有無の比較

第6章の参考文献

- 1) 相良昌男, 中村正博, 阪本広行: 普通ポルトランドセメントを用いた改良土の植生への影響について, フジタ技研研究所報, Vol. 30, 1994.
- 2) 内田晃一, 大森啓至, 橋本真幸, 他: 農業基幹施設整備を目的としたエコセメント固化材の地盤改良への適用, 太平洋セメント研究報告, Vol. 138, pp. 43-55, 2000.
- 3) 亀井健史, 小林立樹, 志比利秀, 松田哲夫, 大内浩之: 半水石膏を利用した締固め土の強度特性に及ぼす養生条件の影響, 土木構造・材料論文集, No. 25, pp. 138-145, 2009.
- 4) 志比利秀, 亀井健史, 神庭崇彰: 廃石膏を混入した締固め土の一軸圧縮特性, 地盤と建設, Vol. 28, No. 1, pp. 47-53, 2011.
- 5) 志比利秀, 亀井健史: 二水石膏添加が締固め土の締固め特性と CBR 値に及ぼす影響—廃石膏ボードの有効利用—, 地盤と建設, Vol. 28, No. 1, pp. 39-45, 2011.
- 6) 山陽クレー工業株式会社: ホームページ, MC クレー分析データ表, 2012.

7. 総括および今後の展望

7.1 本論文の総括

廃石膏ボードの年排出量は年々増加する傾向であり、30年後には250万トンになると予測されており、廃石膏ボードの大量廃棄時代が来ることが予想される。ところが廃石膏ボードは製品に使われている成分により、一定の条件下では硫化水素が発生するという性質があることから、平成18年6月に安定型処分場への持ち込みが全面禁止となり、石膏ボード製品への再利用や一部の建設土木資材等への利用があるのみであり、大部分は管理型処分場への埋立処分のみ現状である。このことは、循環型社会形成の重要な考えである最終処分量の削減に対する大きな障害を作り、他方では処分費用の高騰による不法投棄の恐れを増大させている。

再資源化が進展していない主な理由は、①用途に対する品質保証が未整備なこと、②石膏ボード自体に微量の有害物質が含まれていることから廃石膏ボードを再利用すると環境汚染が懸念されること、③利用の際に有害物質の発生を防止する技術検証がなされていないこと、④利用に関しての再資源化システムの構築が遅れていることである。即ち、地盤改良等で利用する場合の技術面と安全面の検証がなされていないためである。廃石膏ボードの持続可能なシステムフロー形成は緊急の課題となっている。そこで本研究論文では廃石膏ボードリサイクルの基盤構築を目指して廃石膏ボードを地盤改良材として再資源化する技術の開発を地盤工学的側面と環境工学的側面から検討し、実際の地盤改良工事に適応させた研究をおこなった。

地盤工学的側面からは、実際の地盤改良現場の高含水土壌を試験材料として、これに廃石膏ボードから製造した再生半水石膏とB種高炉セメントおよび生石灰を添加して改良土の供試体を作成して各種力学特性の評価を行った。その結果、再生半水石膏とB種高炉セメントとの組み合わせが総合的に良い結果となり、一軸圧縮強さの改善が認められた。一軸圧縮強さは半水石膏の添加量を増量させるほどその強度は増加し、これは対象土壌の含水量が高含水になれば顕著な現象となる結果となった。このことは、B種高炉セメントの含有成分であるアルミナ分と酸化カルシウムが石膏分と反応してエトリンサイト鉱物を生成したことが要因である。環境工学的な側面からは、廃石膏ボードに含まれるフッ素化合物の溶出量を抑制させる検証を行った。廃石膏ボードに含まれるフッ素化合物は大部分がフッ化カルシウムである。廃石膏ボードから製造した再生半水石膏を地盤改良材として使用する場合、このフッ化カルシウムが溶出して土壌環境基準を超過する場合がある。本研究では、再生半水石膏とB種高炉セメントを配合して地盤改良材とすることにより、フッ素化合物の溶出抑制に効果があると考え現場施工でもモニタリングを行った。

本研究では改良土壌中に生成するエトリンサイト鉱物を回折X線分析や電子顕微鏡(SEM)などにより、この鉱物が改良土壌の強度増大とフッ素化合物の溶出抑制や、硫化水素ガスの発生抑制に効果があることが解明できた。即ち、廃石膏ボードより製造した再生半水石膏を地盤改良材として適用させる場合、このエトリンサイト鉱物の生成を増加させることが地盤工学的にも環境工学的にも有効であることを明らかにした。

一方、本研究では地盤改良工事の設計変更と実際の工事に関する地産地消の再生半水石膏を用いた地盤改良材に関する実務設計法を検討し提案した。従来の設計方法に一部分だけ合理的な考え方を導入することで、経済的な負担を軽減することができ、環境面と経済面で従来の工法よりも効果の優れた再生材利用方法を考案することが可能となる。再生半水石膏を路床改良材として

使用する場合も通常の改良工事の場合と同じように、道路舗装のための基準類に従いながら、『循環型社会資本の形成を目指す観点から、再生材の使用促進に努めることや、他の建設産業や他産業の発生材・再生資源などの利用を勧める』思想を導入し、設計変更をおこなう。今回提案した合理的な考え方を導入することで、経済的な負担を軽減することができ、環境面と経済面で従来の工法よりも効果の優れた再生材利用方法を考案することが可能となる。即ち、地盤工学的性能と環境工学的安全性を確保しながら、既存製品と同等程度以下のコストになることが可能である。

また、コスト増加の要因として循環資源に共通する輸送費用の問題があるが、廃石膏ボードの最適なりサイクルシステムを構築するためには地産地消の地域循環圏を構築しシステム設計を行うことが必要である。他都道府県へ流出する資金を群馬県内で活用することにより、県内での金銭的資金面、人的雇用面で損失が少なくなる。これは、廃石膏ボードの付加価値が上昇するため、不法投棄の抑制にもつながる。

さらに産業界でも、ビジネス（産業）として事業を推し進める体制を構築し、行政を含めたユーザー側も使用を推し進める体制作りを今後は共同して進めなければならない。

7.2 今後の展望

本論文では、廃石膏ボードから再生した半水石膏を用いた新しい地盤材料の力学的性質やその環境への影響を解明することにより、半水石膏の地盤材料あるいは地盤改良材としての適用性と有効性について研究を行い取りまとめた。今回の成果により、廃石膏ボードから再生した半水石膏（二水石膏を含む）の地盤工学および地盤環境工学の両観点からの有効利用方法が、かなり解明されてきた。なお、今回行った分析結果では、土からの重金属等の溶出試験基準を満足している結果が得られたが、対象とする原位置の土、新たに使用する地盤材料さらには施工現場の環境によっては重金属が溶出する可能性は否定できない。したがって、実際に廃石膏を用いる際にはその都度重金属の溶出試験を実施し、その値が土壌環境基準値を満足しているか否かを確認することは必要不可欠である。

最後に廃石膏ボードの発生は年々増加の一途をたどっており、管理型最終処分場不足の現状を考えると廃石膏の有効利用は、現代社会が早急に解決しなければならない極めて重要なテーマである。今後も廃石膏ボードを利用した再生半水石膏の軟弱地盤や路床改良への適用と新たな廃石膏ボード再資源化に関する多くの研究がされることを期待したい。

謝 辞

群馬大学理工学研究院環境創生部門の鶴飼教授におかれましては、指導教官として色々ご指導ご鞭撻を受け賜り誠に有難う御座いました。お陰を持ちまして廃石膏ボードのリサイクルに関して、大変意義のある研究を行うことができましたことを心からお礼申し上げます。

ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

群馬大学大学院理工学府社会環境デザイン工学専攻地盤工学研究室の若井教授におかれましては、本博士論文審査委員会の主査を務めて頂きましたことを心からお礼申し上げます。

ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

群馬大学大学院理工学府社会環境デザイン工学専攻流域環境学研究室の清水教授におかれましては、本博士論文審査委員会の副査を務めて頂きましたことを心からお礼申し上げます。

ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

群馬大学大学院理工学府社会環境デザイン工学専攻環境工学研究室の渡邊教授におかれましては、本博士論文審査委員会の副査を務めて頂きましたことを心からお礼申し上げます。

ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

群馬大学大学院理工学府社会環境デザイン工学専攻地盤工学研究室の鶴崎准教授におかれましては、本博士論文審査委員会の副査を務めて頂きましたことを心からお礼申し上げます。

ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

株式会社黒岩測量設計事務所の樋口邦弘様におかれましては、現場試験施工での共同研究をはじめ、廃石膏ボードのリサイクルに関する研究にご理解をいただき、多大なご協力を頂きました。

ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

株式会社デイ・シイの関係各位におかれましては、学費などの資金援助をはじめ、廃石膏ボードのリサイクルに関する研究にご理解をいただき、小生の日常業務に全面的なご配慮を頂きました。

ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

本研究に関する発表論文

1. Masaki Kobayashi, Aly Ahmed and Keizo Ugai : Improvement Properties of Cohesion less Soil Using Recycled Bassanite, Journal of Civil Engineering and Architecture, USA, vol. 7, No.12, pp.1566-1573, 2013.

2. 小林正樹, 鶴飼恵三, Aly Ahmed : 廃セッコウボードを利用した土壌改良材の評価, Journal of the Society of Inorganic Materials Japan, 3月号掲載決定, 2013.