

焼石膏—高分子剤—微粉末スラグを用いた 土質安定処理に関する基礎研究

Fundamental Study on Soil Stabilization by Using Gypsum-Polymer-Slag

渡邊賢二*・富田武満**・田辺和康***・大澤誠司****

by Kenji WATANABE, Takemitsu TOMITA, Kazuyasu TANABE, Seiji OOSAWA

1. はじめに

軟弱な粘性土地盤や建設汚泥に対しては、セメント系及び石灰系の改良材を用いて土質を安定処理し、盛土材料や埋戻し材料等への有効利用が進められてきた。また、国土交通省は建設汚泥のリサイクルの推進に向けた基本的な考え方、目標、具体策等を定めた「建設リサイクル推進計画'97」を策定し、リサイクル率の向上を図っている。しかし、現状のリサイクル率は極めて低い状況にある。この原因のひとつとして「強アルカリ性」問題が挙げられる。近年、有効利用先によっては、pH を中性域で処理する工事例が増加傾向にあり、中性固化処理技術の発展が期待されている。

中性固化処理の研究事例として、勝又ら^{1),2)}は一年草の雑草である「ケナフ」を特殊加工した固化材を開発し、高塑性の底泥を有効利用できるまでに改良している。小寺ら^{3),4),5)}及び柴田ら⁶⁾は焼石膏を主材とし、それに水硬性材料等を配合した材料の改良効果について検討を行っている。また、鍋島ら⁷⁾や山田⁸⁾はセメント改良土を炭酸化することにより中性化する研究を行っている。筆者ら⁹⁾は石膏系改良材を用いて、地盤改良効果について検討を行った。得られた結果を要約すると、汚泥の粒状化には高分子剤の凝集効果が重要、石膏系材料単味では土質改良が不可能である、セメント系固化材のような強度発現は得られない、pH は強アルカリ状態を示さないこと等が明らかとなっている。問題となるのは、処理土の強度特性にあり、実用に供するまでの改良効果を得るには第3物質の配合が重要なポイントとなった。

このような背景から本研究では、まず処理土のトラフィカビリティーの改善に着目して造粒化実験を行った後、処理土の工学的な基礎特性について検討を行った。また、強度発現を図ることを目的として、第3物質は微粉末スラグを添加して検討を行った。

*福山大学大学院 工学研究科博士課程、**福山大学 工学部建設環境工学科、***福山大学 助教授 工学部建設環境工学科、****石原産業(株)四日市工場 環境商品開発部(〒510-0842)

2. 用いた試料

2.1 対象土の物理化学特性

対象土の選定にあたっては、基礎的な処理効果を追跡するために、有機物を含まない粉体状の無機質シルト(以下、尾道シルトと称す)を用いた。図1に尾道シルトの粒径加積曲線を示す。

粒度分布特性についてみると、細砂分が0.3%、シルト分が53.7%、粘土分が46%である。尾道シルトの化学組成を蛍光X線分析装置によって調べ、その

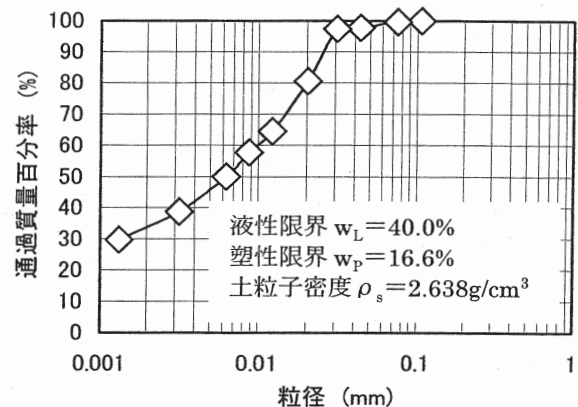


図1 尾道シルトの粒径加積曲線

表1 尾道シルトの化学組成

化学成分 (mass%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO
79	13	3.7	2.1	0.87	0.23

結果を表1に示す。シリカを主成分としてアルミナ及び酸化カリウムと酸化第二鉄を含み、酸化ナトリウムや酸化カルシウムを少量含有する試料である。一般土と比較して、シリカが多くアルミナが少なく、カリウム分が意外と多いことが特徴である。強熱減量値(Li)は3.0%と低く、無機質土である。pH値は5.87と酸性側にふれている試料でもある。

2.2 処理材の特性

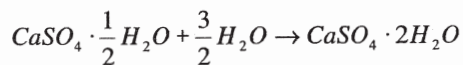
中性固化材としては、焼石膏を主材にして高分子剤を用いた。また、強度改善を図るために第3物質

として微粉末スラグ(以下、スラグと称す)を用いた。それらの特性と選定理由について以下に示す。

(1) 焼石膏

焼石膏(半水石膏)はそれ自体の結晶系に相違はないが、 α 型と β 型の2種に大別されている。これらが水中で転移すると、それぞれの結晶系は異なる。 α 型の結晶系は形が整って緻密となるのに対して、 β 型はほとんど二水石膏のままで水が抜けたポーラスな状態となる。また、 α 型は少ない水で攪拌できるため高密度となり高強度となるのに対して、 β 型は多くの水が必要となるため低密度となり、比較的強度となる特徴がある。一見すれば α 型を用いる方が良いと思われるが、本研究では β 型を採用した。なぜなら、軟弱地盤は高含水比状態で排出されることが多いため、土質安定処理には β 型の方が適応している。そこで、予備実験として、高含水比試料を作製し、焼石膏の α 型と β 型の処理特性について検討した結果、強度差はあまり認められず、むしろ β 型の方が高強度を示す結果を得ている。また、国内では β 型製造量が圧倒的に多いことも採用した一因である。

焼石膏の水和反応式を示すと以下ようになる。



このように焼石膏は1分子中 $3/2\text{H}_2\text{O}$ の水を吸収する能力が潜在しており、自硬性がある。しかし、土質安定材としての処理効果を期待するには不十分であると思われる。そこで、第3物質として水硬性を有するスラグを使用した。

(2) 高分子剤

高分子剤(ポリマー)は、凝集効果により汚濁中の微粒子を結合させて見かけの粒径を大きくし、団粒物を得ることができる。また、高分子剤はイオン性の架橋効果により、働く分子の広がりや同符号電荷粒子との反発に影響を与える。したがって、直接凝集効果に影響を受けることから、被凝集物のpHに対応した高分子剤の選択が重要となる。適正pHによる高分子剤の使用分類はノニオン型、アニオン型及びカチオン型の3種に大別されている。それらの関係を表2に示す。

これら3種のポリマーのうち、アニオン型が最も安価であり、地盤改良の分野で使用されていることから、本研究ではアニオン型を採用する。

(3) スラグ

スラグの化学組成を表3に示す。スラグの水硬性の活性を定量化する方法として塩基度 $\{(\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO})/\text{SiO}_2\}$ があるが、その値は2.01と通常のものと比較してやや大きい。また、比表面

表2 高分子剤の種類と適正pH

ポリマー	適正pH
ノニオン	弱酸性～中性
アニオン	弱酸性～アルカリ性
カチオン	強酸性～中性

表3 スラグの化学組成

化学成分 (mass%)					
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃
44	32	15	5.3	0.90	0.60

積は $5550\text{cm}^2/\text{g}$ で微粒である。

3. 中性固化材による造粒化実験

処理土の有効利用を図るためには、造粒化させた方がトラフィカビリティーの向上にも繋がり、種々のメリットがある。そこで、焼石膏と高分子剤を用いて造粒化実験を行った。

3.1 実験方法

用いた試料は、尾道シルトの初期含水比を $0.8w_L(w=32\%)$ 、 $1.0w_L(w=40\%)$ 及び $1.2w_L(w=48\%)$ の3種に調整したものを対象土とした。これらの対象土に焼石膏と高分子剤の配合を表4に示す割合で変化させて検討を行った。なお、攪拌時間は造粒化した試料の破壊を懸念して90秒で統一した。

3.2 実験結果

処理材混合後、処理土の状態について目視評価を行った。表4にその結果を示す。凝集化と団塊化の区別は不明瞭であるが、処理後の試料土の性状に着目して決定した。凝集物は処理後容器を逆さまにすると試料土が全て滑り落ちた(滑りがある)のに対して、団塊物は容器内や攪拌羽根に試料土が強くこびりついていて(滑りがなく付着力あり)ことから判断した。

(1) 焼石膏単味処理

処理効果を示した初期含水比別の焼石膏添加量は、 $0.8w_L$ 試料が $35\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1.0w_L$ 試料が $105\text{kg}/\text{m}^3$ であった。 $1.2w_L$ 試料については $140\text{kg}/\text{m}^3$ 添加においても変化が認められなかった。写真1をみると、初期含水比が低い試料のものほど焼石膏添加による処理効果が顕著に表れている。

(2) 高分子剤単味処理

凝集効果を示した初期含水比別の高分子剤添加量は、 $0.8w_L$ 試料が $0.18\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1.0w_L$ 試料が $0.53\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1.2w_L$ 試料が $1.05\text{kg}/\text{m}^3$ となり、初期含水比の低い試料ほど少量の添加で凝集効果が得られることが明らかとなった。初期含水比の影響がみられない造粒化に要する高分子剤添加量は $1.40\text{kg}/\text{m}^3$ である。写真2に示すように、初期含水比が低い試

料のものほど粒子径が大きくなる傾向が認められた。ここで、対象土の初期含水比を $1.3w_L \sim 2.0w_L$ と高く調整して、高分子剤添加量を 1.40kg/m^3 とした場合の処理状況を観察した結果、造粒化した試料は認められなかった。したがって、 1.40kg/m^3 で造粒化する含水比の範囲は $w \leq 1.2w_L$ であることが判明した。

(3) 複合処理

複合処理においては、初期含水比が低い試料は焼石膏による団粒形成効果が現れ、大きな団塊物を得る結果となった。一方、初期含水比が高い試料は造粒化に近い性状を示し、凝集効果が確認できた。写真3は高分子剤と焼石膏を同時に添加した処理土の性状を示すが、造粒化は認められなかった。これは、土壤中で高分子剤が広がる前に焼石膏の水和が速く進行したのではないかと推察される。以上の結果から、この処理手順では、造粒化が得られないことが明らかとなった。

そこで、高分子剤添加量を 1.05kg/m^3 とし、攪拌し、凝集物を得た後、直ちに焼石膏を $35 \sim 140\text{kg/m}^3$ 添加して攪拌した。 $0.8w_L \sim 1.2w_L$ の範囲で試験を行ったが、これらの処理土のうち造粒化した配合パターンは認められなかった。一方、高分子剤 1.40kg/m^3 添加処理後、直ちに焼石膏を $35 \sim 140\text{kg/m}^3$ 添加して攪拌した結果、処理土は造粒化したままであった。

これらの結果から、造粒物を得るには対象土の含水比と高分子剤の添加量及び焼石膏の処理手順が重要であることが明らかとなった。

4. 中性固化材を用いた処理土の物理化学特性

4.1 実験方法

(1) 配合条件

表5に処理材の配合表を示す。高分子剤の添加量は、処理土が造粒化するに要する最少添加量 1.40kg/m^3 を一定条件とした。焼石膏の添加量は対象土 1m^3 当たり 100kg/m^3 、 150kg/m^3 及び 200kg/m^3 の3パターンとした。スラグの添加量は焼石膏添加量に対してそれぞれ0%、20%、40%及び60%として検討を行った。

(2) 処理材添加手順と実験の流れ

図2に実験の流れをフローチャートで示す。まず、対象土の初期含水比を $1.0w_L$ 、 $1.2w_L$ の2種に調整した。処理材添加手順は、松岡^{10),11),12)}が示した図3のモデルに従って行った。

表4 造粒化実験の配合表と判定

処理材	設定含水比	添加量 (kg/m ³)	目視評価		
			0.8w _L	1.0w _L	1.2w _L
G 単味処理	0.8w _L 1.0w _L 1.2w _L	35	△	×	×
		70	△	×	×
		105	△	△	×
		140	△	△	×
P 単味処理	0.8w _L 1.0w _L 1.2w _L	0.18	○	×	×
		0.35	○	×	×
		0.53	○	○	×
		0.70	○	○	×
		1.05	○	○	○
		1.40	◎	◎	◎
		2.10	◎	◎	◎
複合処理 I G+P P=G×0.5%	0.8w _L 1.0w _L 1.2w _L	G35+P0.18	△	×	×
		G70+P0.35	△	×	×
		G105+P0.53	△	△	×
		G140+P0.70	△	△	×
複合処理 II G+P P=G×1.0%	0.8w _L 1.0w _L 1.2w _L	G35+P0.35	△	×	×
		G70+P0.70	△	×	×
		G105+P1.05	△	△	○
		G140+P1.40	△	○	○
複合処理 III G+P P=G×1.5%	0.8w _L 1.0w _L 1.2w _L	G35+P0.53	△	×	×
		G70+P1.05	△	○	○
		G105+P1.58	△	○	○
		G140+P2.10	△	○	○

G: 焼石膏、P: 高分子剤、複合処理: GとPを同時に添加
◎: 造粒化、○: 凝集化、△: 団塊化、×: 変化なし

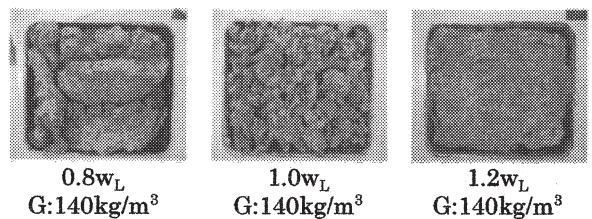


写真1 焼石膏単味処理

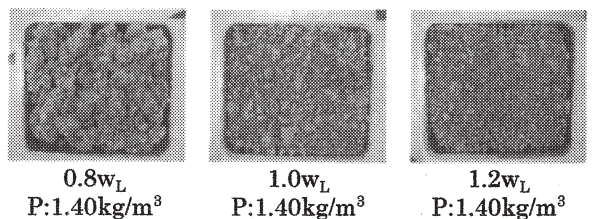


写真2 高分子剤単味処理

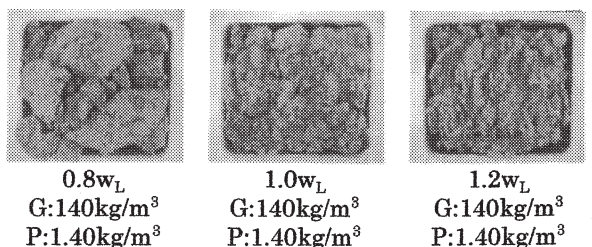


写真3 複合処理

表5 処理材の配合表

	P (kg/m ³)	G (kg/m ³)	S (kg/m ³)							
			0%	呼名	20%	呼名	40%	呼名	60%	呼名
A	1.40	100	0	A0	20	A2	40	A4	60	A6
B	1.40	150	0	B0	30	B2	60	B4	90	B6
C	1.40	200	0	C0	40	C2	80	C4	120	C6

P：高分子剤、G：焼石膏、S：スラグ

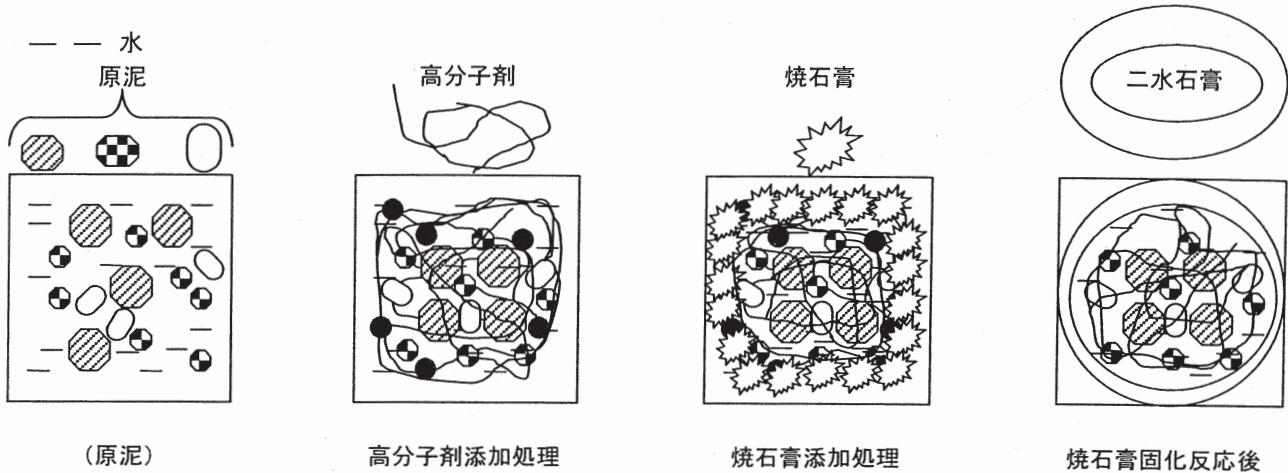


図3 松岡が示した処理材の添加順序と固化反応モデル¹⁰⁾

＜スラグを添加しない場合の処理材添加手順＞

初めに高分子剤を添加して攪拌する。この過程では、高分子剤内に水を取り込ませると同時にアルカリの原因となる水酸基等を固定化させる。この反応の結果、土粒子間同士の結合により原泥をフロック化させて処理土を造粒化させる。次に造粒化した処理土に焼石膏を添加して攪拌する。この過程では、粒状体の周りに存在している水と焼石膏との間で水和反応を起こさせて凝固の促進を図る。最終的には短時間で焼石膏の水和反応が終了し、その結果、二水石膏を生成するので造粒化した処理土は強固にカプセル化されるという考えに基づいている。

＜スラグを添加する場合の処理材添加手順＞

初めにスラグを添加した後、高分子剤→焼石膏の順に添加した。反応モデルは、スラグをカプセル内に封じ込めて水硬性を図りながら、二水石膏で団粒化させることをイメージしている。

供試体作製までに1時間密封養生したが、これは大澤らの研究成果から処理後1時間未満では供試体作製時に練返しの影響を受ける。そのことで処理強度が小さくなることを考慮して決定した。

物理化学試験の手順は、初めに一軸圧縮試験を行い、試験終了後の試料土を十分に解きほぐしてから含水比試験、pH試験に用いた。

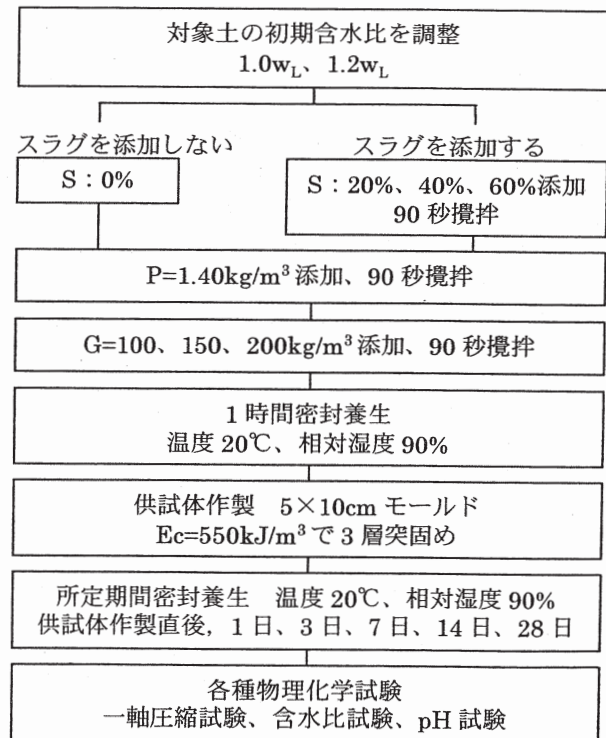


図2 実験の流れ

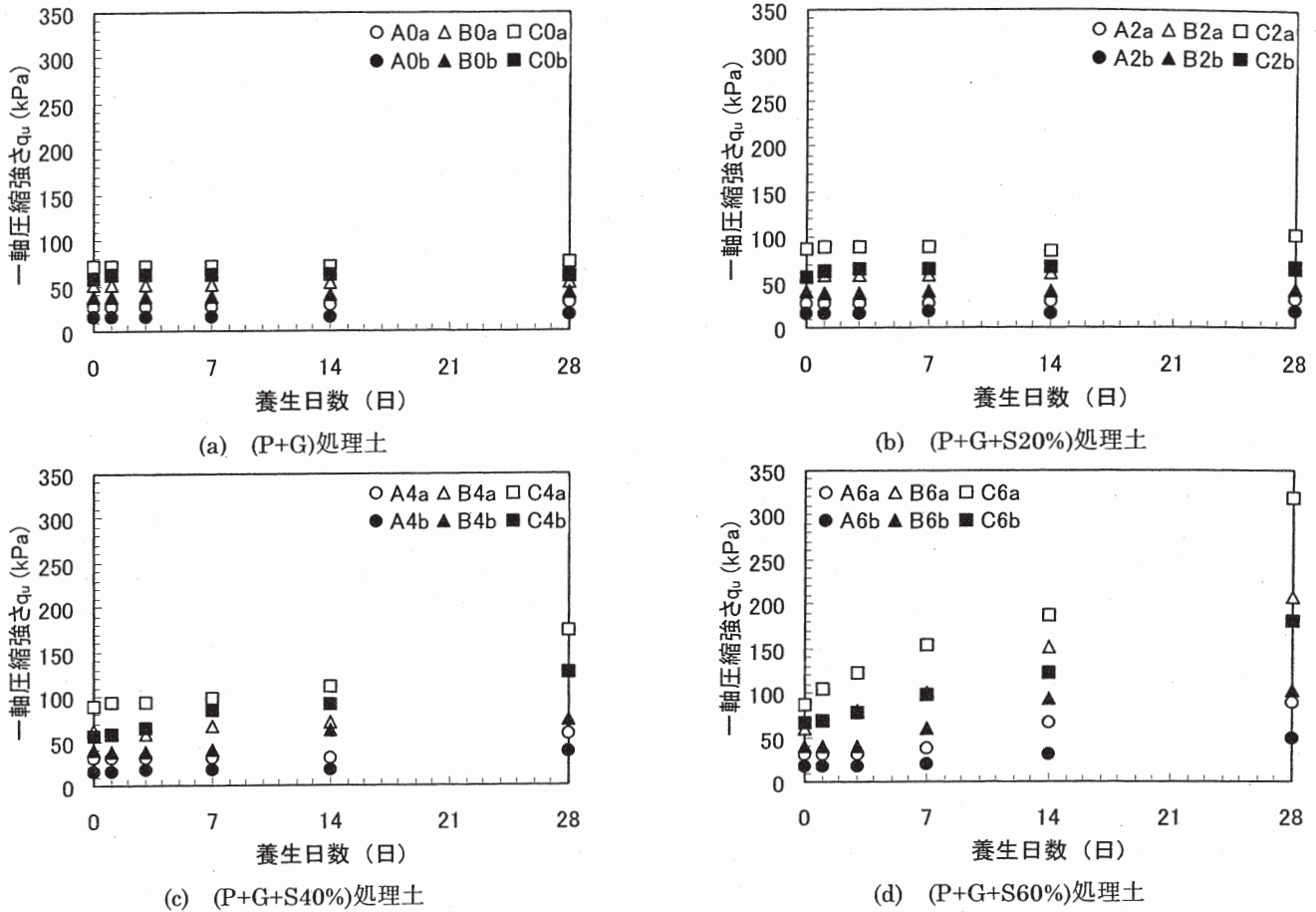


図4 養生日数と一軸圧縮強さの関係

4.2 実験結果

実験結果の図中の凡例記号は表5の「呼名」に示した通りとし、 $1.0w_L$ 試料は凡例記号の末に a を、 $1.2w_L$ 試料は b をつけて示す(例えば A2a : $1.0w_L$ 試料の $P=1.40\text{kg/m}^3$, $G=100\text{kg/m}^3$, $S=20\text{kg/m}^3$)。

(1) 強度特性

図4に養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。(a)をみると、初期強度と28日養生後の一軸圧縮強さに顕著な差は認められず、養生日数による処理土の強度発現はみられないことが明らかとなった。これは、セメント及び石灰系処理土ではみられない、焼石膏処理土の特徴といえる。しかも、処理後1時間程度で固化が終了することを考慮すると、その後は締固め密度の管理によって強度予測することができる。つまり、処理直後に処理土を利用できることが特記すべき事項である。処理1時間後の一軸圧縮強さは、A0a : 35kPa、B0a : 55kPa、C0a : 75kPa、A0b : 17kPa、B0b : 43kPa、C0b : 60kPa という結果が得られた。 $1.0w_L$ 処理土と $1.2w_L$ 処理土の強度差を同一焼石膏添加量で比較すると、約 15kPa の差が認められた。また、焼石膏添加量が 50kg/m^3

増大するごとに約 20kPa の強度増加が認められた。処理土を運搬するに要する一軸圧縮強さは 30kPa 以上と定められているが、この値を満足しない処理土は A0b のみであった。

(b)、(c)、(d)にスラグ添加処理土の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。強度発現特性についてみると、20%添加処理土の(b)は養生日数に伴う強度発現が認められない。スラグ 40%添加処理土の(c)は、A4a と A4b 以外の処理土に強度発現が認められた。スラグ 60%添加処理土の(d)は全処理土で強度発現が認められた。

28日養生後に盛土材料として用いることができるまでの処理土($q_u \geq 100\text{kPa}$)は C3a、B4a、C4a、B6a、B6b、C6a、C6b の7種であった。これらの結果から、スラグを添加処理することである程度の強度改善が見込めることが明らかとなった。

図5に28日養生後の圧縮応力と圧縮歪みの関係を示す。図は $1.0w_L$ のスラグ 0%と 60%添加処理土の結果を示している。全体的に一軸圧縮強さが 100kPa 程度の処理土の破壊歪みは 8~10%であり、100kPa 未満の処理土の破壊歪みは明瞭なピークを

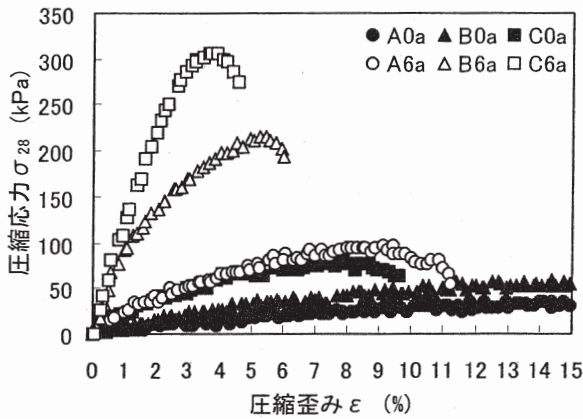


図5 圧縮応力と圧縮歪みの関係

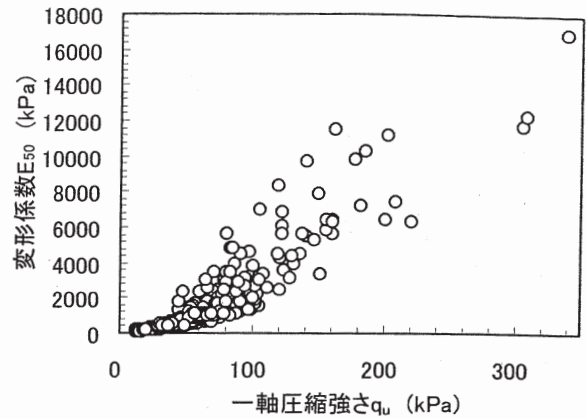
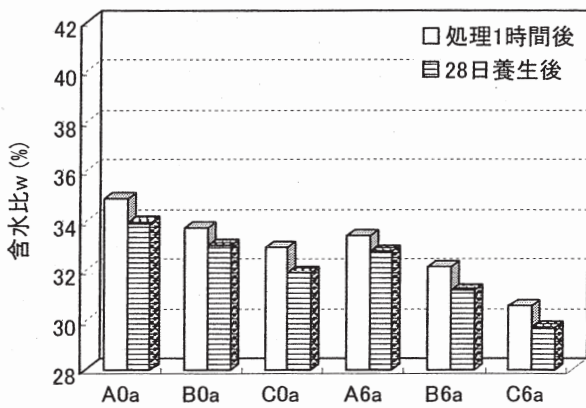
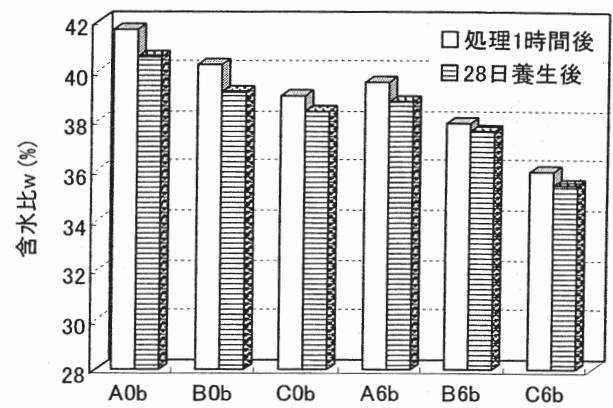


図6 一軸圧縮強さと変形係数の関係



(a) 1.0w_L 処理土



(b) 1.2w_L 処理土

図7 養生日数と含水比の関係

示していない。通常、セメント系固化処理土の破壊歪みは 1.0~2.0 の範囲内でピークを示すことが多く、固くて脆いコンクリートのようなブリッキーな状態にある。ここで、盛土材料や埋戻し材料としての利用を想定すると、外部から受ける荷重に対して相応なじん性が求められるため、このような状態の処理土は本来適さないと考えられる。スラグの添加により一軸圧縮強さが 100kPa 以上を示した処理土の破壊歪みは小さくなっていくものの、全ての処理土が 3.0%以上の値をとり、ある程度のじん性を付加した土質材料へと処理することができた。

図6に一軸圧縮強さと変形係数の関係について示す。上述したように、セメント系固化処理土の破壊歪みは小さいことから変形係数は大きな値をとり、その値は一軸圧縮強さの 100 倍以上を示すことが知られている。すなわち、乾燥収縮によるひび割れや地震・繰返し荷重によるクラックの発生等で著しい強度低下に繋がるのではないかと懸念される。一方、得られた処理土の変形係数は一軸圧縮強さの 50 倍程度であり、一般土の性質と同様な傾向にある。し

たがって、土木材料として使用しても、周辺地盤との馴染みが良いと考えられる。

(2) 含水比特性

図7は処理1時間後と28日養生後の含水比をヒストグラムで表わしたものである。全体的に処理材添加量の多いものほど含水比の低下が認められたが、養生日数に伴う含水比の変化割合は小さいことが特徴である。含水比変化については、水和反応による低下が考えられるが、その反応率はセメントや石灰のような著しい変化を示さないことが明らかとなった。

(3) pH 特性

図8に養生日数とpHの関係を示す。(a)スラグ0%添加処理土のpHは中性域にある。一方、(b)、(c)、(d)スラグ添加処理土のpHは、養生日数に伴ってアルカリ側へ反応している。この要因は密封養生によるCO₂の遮断とスラグのアルカリ成分による影響が考えられる。28日養生後のpHは11前後を示しており、総理府の定める排出基準値の範囲を大きく上回っている。しかし、セメント系・石灰系処理土

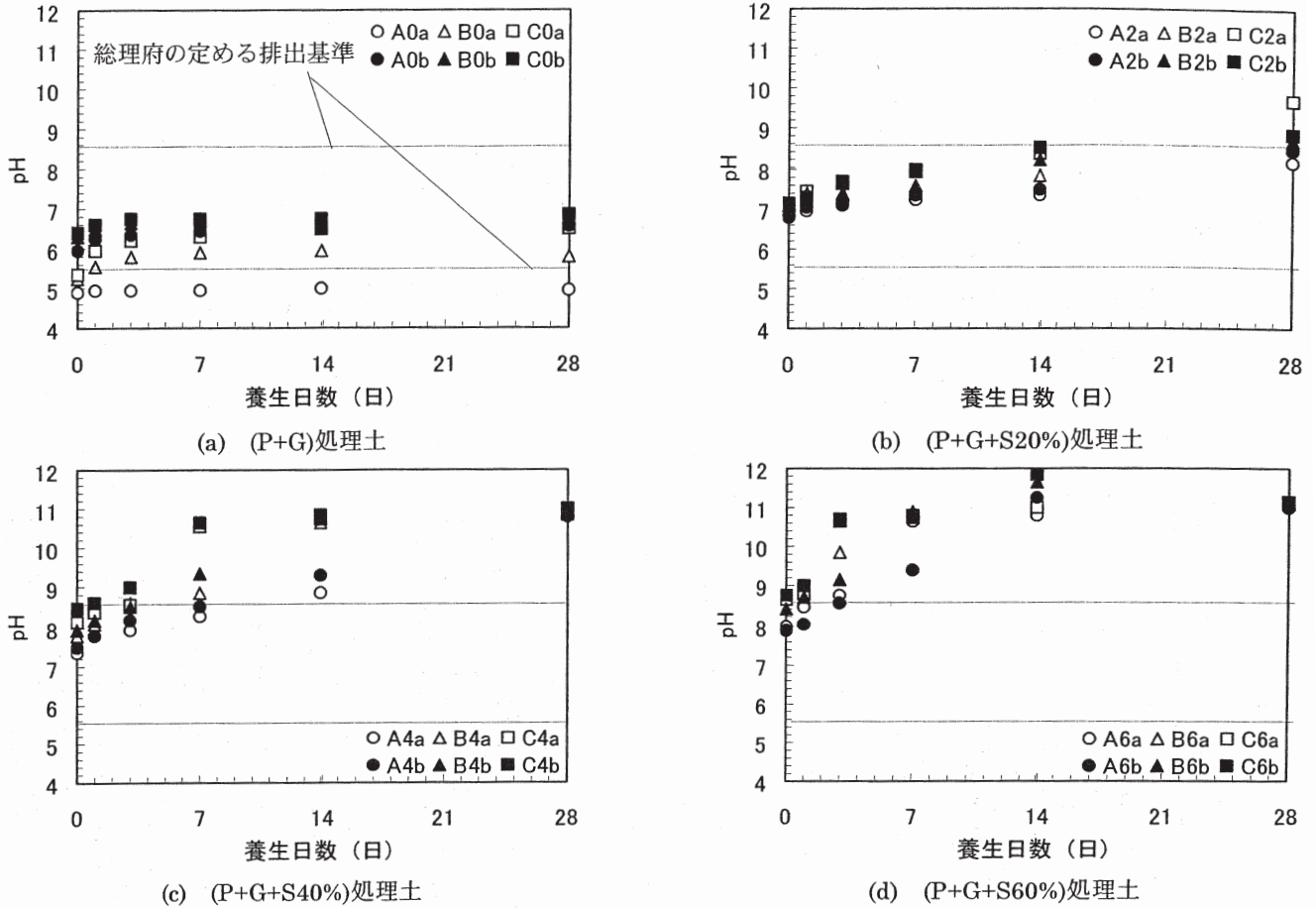


図8 養生日数とpHの関係

のような強アルカリ状態(pH \geq 12)には至っていない。また、小寺ら⁴⁾は石膏系固化処理土を屋外にて養生させることによるpHの低下を確認している。このことから、大気中ではCO₂との反応によるCaCO₃の生成物がpHを低下させていくものと推察される。

5. おわりに

建設汚泥の有効利用の向上と環境問題の改善を目的として、焼石膏、高分子剤及びスラグを用いた土質安定処理土の工学的な基礎特性について検討を行った。得られた結果を要約すると以下のようなになる。

- ① 焼石膏と高分子剤を同時に添加した複合処理については造粒化を得ることができないが、高分子剤→焼石膏の順に添加することで造粒化を得ることができた。
- ② 造粒化を得るための高分子剤添加量は1.40kg/m³であるが、初期含水比によって変動する。
- ③ 焼石膏と高分子剤を用いた処理強度は小さく、強度発現は認められない。
- ④ スラグを添加することで強度改善が見込めることが明らかとなった。また、初期含水比が低く、

- スラグ添加量の多いものほど強度発現は著しい。
- ⑤ 処理土の破壊歪みは大きく、変形係数は一軸圧縮強さの50倍程度であり、処理土はある程度のじん性を付加した土質材料に変わる。
- ⑥ 含水比の低下は処理材添加量が支配しているが、その割合は小さい。
- ⑦ スラグを添加した処理土のpHは養生日数に伴ってアルカリ側へ反応した。しかし、セメント系・石灰系処理土のような強アルカリ状態(pH \geq 12)には至っていない。

参考文献

- 1) 勝又正治・山本達生・寺尾好太・宮野隆徳：湖沼底泥の中性固化処理実験について，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B247(2000)
- 2) 山本達生・勝又正治・寺尾好太・宮野隆徳：中性固化材(有機・無機)を用いた建設汚泥の固化処理方法について，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B246(2000)
- 3) 小寺秀則・市原道三・小林学：石膏系固化処理土の適用性に関する実験的研究，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-028, pp.55-56(2002)

- 4) 小寺秀則・市原道三・小林学・佐々木謙一・大澤誠司：石こう系固化材による軟弱土の改良に関する実験的研究(その1)－固化材量の影響－，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ－557，pp.1113－1114(2003)
- 5) 小寺秀則・市原道三・小林学・佐々木謙一・大澤誠司：石こう系固化材による軟弱土の改良に関する実験的研究(その2)－改良土の諸性状－，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ－558，pp.1115－1116(2003)
- 6) 柴田靖・落合正水・高橋守男・兵頭英明・岡林茂生・田坂行雄：排煙脱硫石膏を主材とした中性土質改良材による軟弱土の改良実験，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ－030，pp.59－60(2002)
- 7) 鍋島康之・松井保・渡辺晃司・浜野廣美：セメントと固化された汚泥の二酸化炭素による中性化実験，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ－071，pp.141－142(2003)
- 8) 山田優・鈴木建夫・西元央：二酸化炭素を用いた泥土のセメント安定処理，第35回地盤工学研究発表会講演概要集，D－10，pp.1219－1220(2000)
- 9) 渡邊賢二・田辺和康・富田武満・松岡武男：中性固化材を活用した地盤改良に関する研究，地盤と建設，Vol.20，No.1，pp.19－26(2002)
- 10) 松岡武男：建設リサイクル技術第1回建設汚泥の現状と問題点，土木施工，42巻，12号，pp.56－60(2001)
- 11) 松岡武男：建設リサイクル技術第2回環境に優しい固化材を用いた汚泥のリサイクル，土木施工，43巻，1号，pp.68－71(2002)
- 12) 松岡武男：建設リサイクル技術第3回環境に優しい固化材を用いた施工例Ⅰ，土木施工，43巻，3号，pp.102－105(2002)

(2004年7月15日受付 2004年8月23日受理)