

中性固化材を活用した地盤改良に関する研究

Study of soil improvement using neutral hardening materials

渡邊賢二 Kenji WATANABE (福山大学大学院)
田辺和康 Kazuyasu TANABE (福山大学工学部)
富田武満 Takemitsu TOMITA (福山大学工学部)
松岡武男 Takeo MATSUOKA (チヨダエコリサイクル(株))

近年、土質安定処理分野では、環境問題としてセメント系及び石灰系の改良地盤から六価クロムの溶出や強アルカリ性の問題が取り上げられている。この問題の解決策として、これまでに種々の方法が提案されている中で、中性固化処理法が着目されてきた。本論ではその基礎特性について検討を行なった。その結果、高分子剤による凝結・吸水効果が重要な役割を果たしていること、石膏系材料による処理効果はセメント系固化材のような強度発現は得られないまでも、一定の地盤改良効果を示すことが明らかとなった。また、対象土の有機物含有量と初期含水比の影響が、改良土の粒子形状と汚濁防止効果に現れることが認められた。

キーワード：高分子剤，石膏，試験方法，地盤改良 (IGC : D02, D10, K06)

1. はじめに

今世紀は環境問題を考える世紀といわれており、建設業界においてもこの問題は無視できない状況となっている。なかでも、建設工事に伴い副次的に発生する建設汚泥と、環境整備事業として発生する浚渫ヘドロの有効利用が急務の課題となっている。我が国の建設汚泥に係わる諸問題は、「受入適地の不足」、「不法投棄等の不適正処分」や「住民苦情」の問題が発生している。それに伴って環境への負荷の増大が懸念されるようになった。

建設汚泥の取り扱いについては、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」に基づいて行なわれ、有効利用に関しては「再生資源の利用の促進に関する法律」に準拠して行なわれている。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。

我が国の建設汚泥の再資源化については、その利用目的に応じて焼成処理、スラリー化安定処理、高度安定処理、熔融処理、高度脱水処理、乾燥処理が挙げられるが、利用にあたっては、土壤環境基準や処理土の土質材料としての品質基準に適合させる必要がある¹⁾。

土質安定処理分野の中では、セメント系および石灰系処理土に対して、六価クロムの溶出や強アルカリ性等の問題がクローズアップされてきた。六価クロムの問題に対しては、ポルトランドセメントの含有量を抑えた改良材の開発が進められている。また、強アルカリ性問題については中性固化材の研究開発が進められている。いずれにせよ現状の処理土をめぐっては、土壤・地下水汚染

問題等の処理対策が重要課題となってきた。

このような背景から、本研究ではセメント系および石灰系の改良材に代わる中性固化材の団粒化のメカニズムと、処理強度等に関する工学的な基本特性について検討を行なった。

2. 中性固化材の特性

土の物理化学特性は、粒度分布、粘土分含有量、粘土鉱物の種類、有機物含有量、含水比、pH値等のパラメータによって変化する。また、これらのパラメータは土質安定処理効果にも影響を及ぼすことが知られている。

従来までの石灰系とセメント系による反応メカニズムは、水和反応とポズラン反応による水硬性生成物によって安定化が図られている。一方、中性固化による反応メカニズムは、それらの反応とは異なるものである。本実験で用いた中性固化材は、無機質固化材(以下ではA材と称す)と高分子剤(以下ではB剤と称す)の2種を併用している。A材は石膏を主原料としており、汚泥を固化して強度改善を図る。B剤の高分子剤はアニオン型ポリアクリルアミドを使用しており、汚泥を凝結させて大きなフロックを形成する役割を果たす²⁾³⁾。以下にその詳細を述べる。

2.1 高分子剤の特性

高分子系のB剤の物性効果としては、①分子量、②イオン性、③架橋反応の程度が重要となる³⁾⁴⁾⁵⁾。

①分子量

分子の拡がり、分子量が100万、200万、1000万と

増えるほど、分子の拡散が大きくなり架橋効果も有効に働く。また、少ない添加量で凝結効果を示すが、最適添加量以上の高濃度になると分散現象が起こることもある。

②イオン性

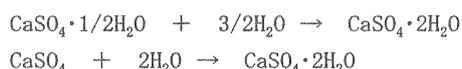
イオン性はノニオン性(荷電なし)とアニオン性及びカチオン性に分類される。高分子剤の凝結条件は、pH 値が中性の時はノニオン性が有効で、それ以上の場合にはアニオン性が有効となる。また、カチオン性は強酸性から中性までが適正とされている。アニオン性高分子はカルボキシル基を多く含み、中性域以上では互いの静電反発力で大きく拡がり、少ない添加量で凝結効果が図れる。逆に酸性域ではカルボキシル基が非解離となり、分子の拡がりが収縮する。よって、pH 値の影響をほとんど受けないノニオン性高分子剤が有効となる。また、A 材の添加量は B 剤の吸着性に影響を与える。つまり、汚泥表面に A 材が吸着すると、カルボキシル基が主である B 剤の吸着活性基に影響する。A 材の添加量が少ないと汚泥表面の吸着点が少ないため、カルボキシル基を多く持つアニオン性高分子剤の吸着力が強く凝結性に優れる。一方、A 材の添加量が多いと吸着点が多く、アニオン性高分子は吸着過多となり、分子の拡がりを保つことができなくなり、フロックが小さく凝結性が低下する。カチオン性高分子は、カチオン基の吸着で高分子鎖が直接的に汚泥粒子を結びつける。よって、陽イオン交換容量の高い有機質汚泥にはカチオン系が、低い無機質汚泥にはアニオン系とノニオン系が処理材として使用されている。

③架橋反応

高分子鎖が三次元に網目構造でのびる反応を架橋反応といい、この架橋反応による凝結作用の有無が A 材の凝結効果に大きく影響する。

2.2 石膏の特性

石膏は硫酸カルシウムよりなり、二水石膏、半水石膏、無水石膏の 3 種に分類される。図-1 に石膏の形態変化を示す。二水石膏は脱水の程度により半水石膏とⅢ型無水石膏となり、結晶転移によりⅡ型とⅠ型の無水石膏が生成される。硬化に関しては凝結時間が長いと結晶形状が針状から立方体状へと変化して、平均細孔径が増大することにより、強度が低下することが確認されている⁶⁾。石膏の水和反応式を示すと以下ようになる。



半水石膏と無水石膏は水と反応して二水石膏となり、その結晶が密に絡み合うことで凝結するが、土質安定材としての処理効果には不十分である。したがって、第 3 物質の補助材による反応生成物の開発が重要となる。

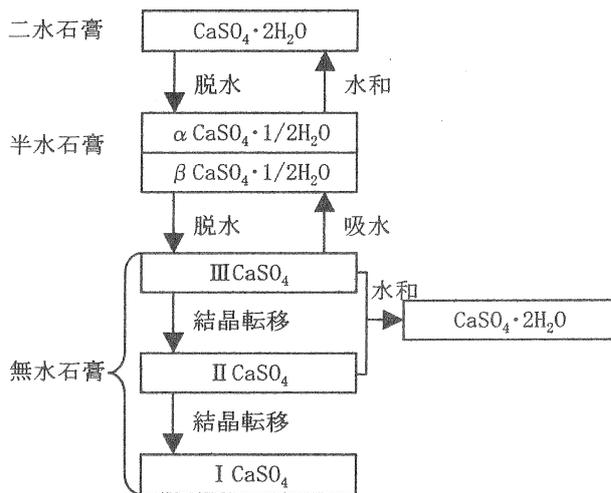


図-1 石膏の形態変化

3. 中性固化材の凝結メカニズムの検討

3.1 実験方法

用いた試料は、福山粘土を 1.2W_L(W=64.0%)に調整したものを対象土とした。また、処理材に A 材の石膏系と B 剤の高分子系材料をそれぞれ 20%/dry と 0.6%/dry 添加するという条件のもとで、以下の 3 パターンについて検討した。

- CASE I : B 剤(1分攪拌) → A 材(1分攪拌)
- CASE II : A 材(1分攪拌) → B 剤(1分攪拌)
- CASE III : B 剤(10分攪拌) → A 材(10分攪拌)

3.2 結果と考察

写真-1 に CASE I の結果を示す。未処理土に高分子系の B 剤を添加すると、水が取り込まれて土粒子間同士が結合している様子がみられた。また、土質性状は糊状となり、粘り気のある感触であった。ここで浸水状況を見ると、未処理土と比べて透明度が高い状態となっている。次に A 材を添加すると、粒状化している様子がみられた。これは A 材と糊状物質との水和反応及び高速攪拌作用によって粒状化したものと推察される。浸水状況を見ると、B 剤添加処理後と比べて、よりいっそう透明度が高くなっている。したがって、A 材が汚泥の凝結化を促進させていると思われる。

写真-2 に CASE II の結果を示す。未処理土に対して A 材を添加した試料は、団粒化を形成していない。浸水状況については、未処理土と同様の汚濁状態である。次に B 剤を添加すると、写真-1 の B 剤試料と同様な土質性状を示し、浸水状況はコロイド分を凝結した透明な状態まで改善されている。

写真-3 に CASE III の結果を示す。ここでは、B 剤添加後の攪拌時間の影響について検討を行なった。攪拌時間を長くすると高分子の切断が起こり、凝結効果の低下が懸念されているが、本実験の結果においては 10 分程度の

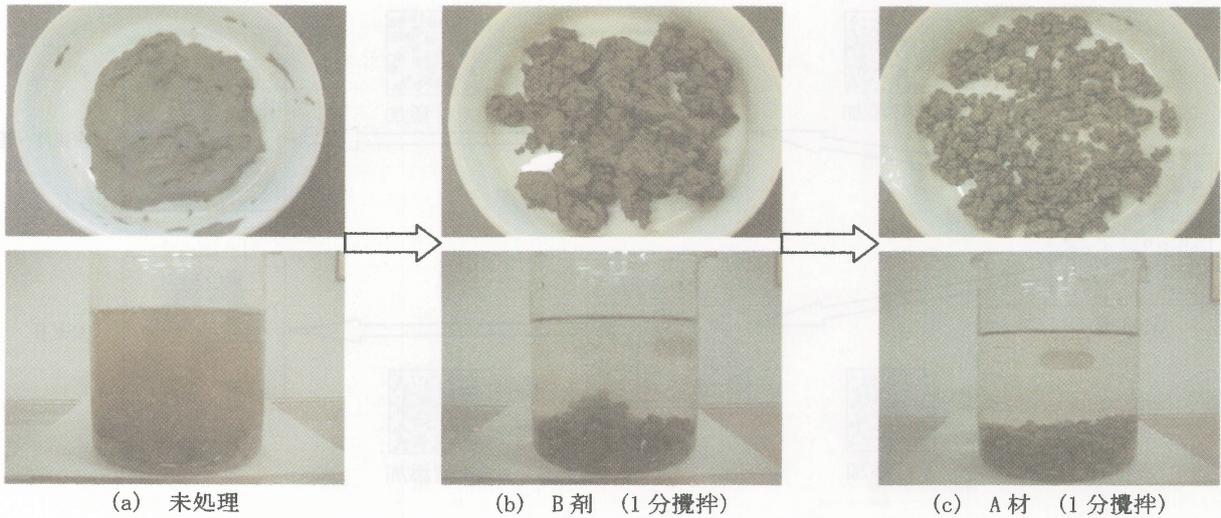


写真-1 CASE I

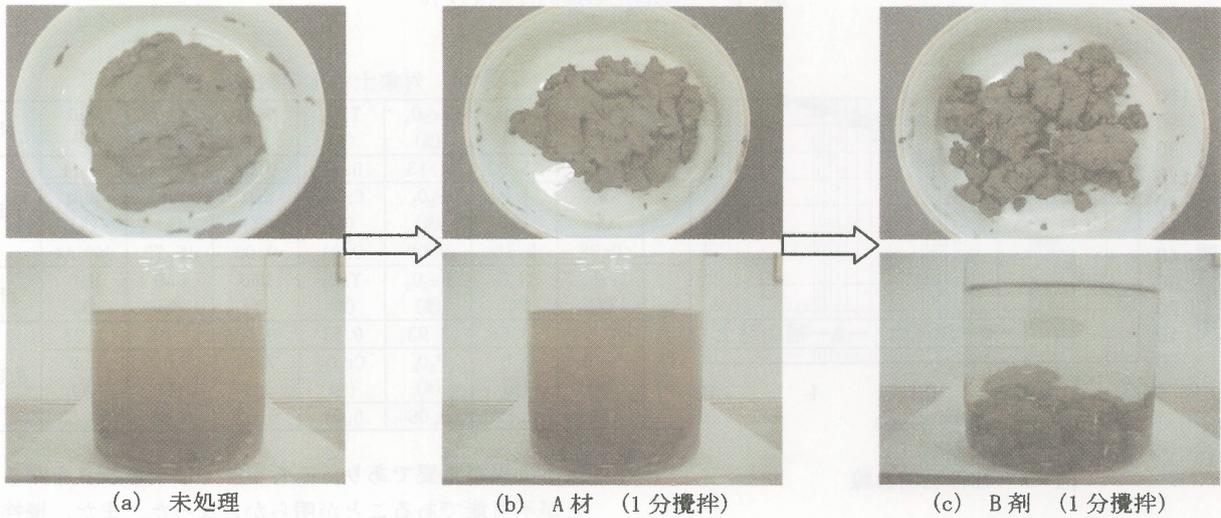


写真-2 CASE II

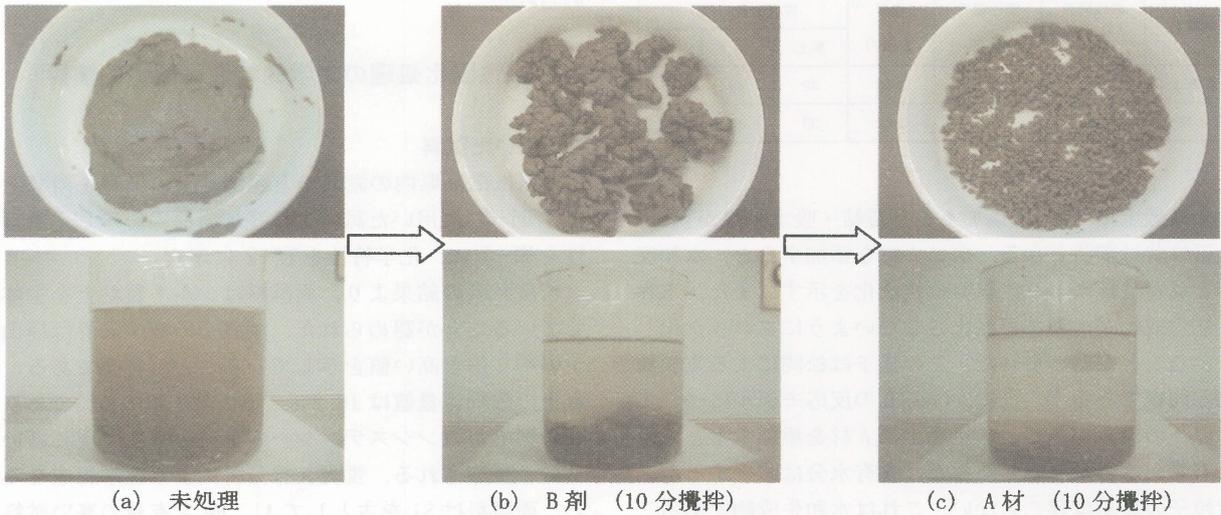


写真-3 CASE III

攪拌ではその傾向はみられない。また、A 材を添加して 10 分攪拌した試料の性状は、写真-1 の処理試料と比べて、粒子径が小粒化していることが認められた。

3.3 処理材の反応モデル

試験結果より、図-2 のような反応モデルを仮定した。CASE I・III の反応モデルについては以下のようなものである。

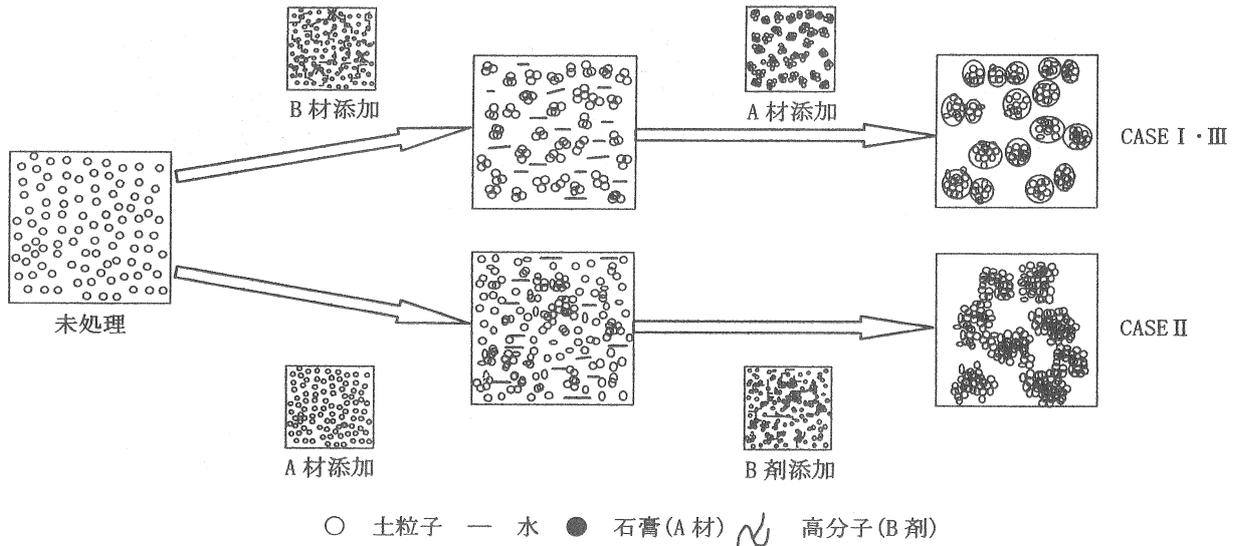


図-2 中性固化処理の反応モデル

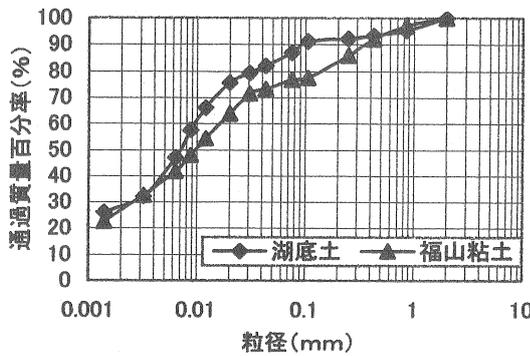


図-3 粒径加積曲線

表-1 対象土の物理特性

試料名	液性限界 W _L (%)	塑性限界 W _P (%)	密度 (g/cm ³)	粒度分布 (%)		
				粘土	シルト	砂
湖底土	110	57.1	2.43	38	49	13
福山粘土	53.3	24.3	2.62	39	39	22

未処理土に B 剤を添加すると凝結・吸水効果が現れ、土質性状は糊状となる。次に A 材を添加すると、水和反応と高速攪拌により、試料は粒状化を示す。また、水和反応生成物が汚泥を再泥化させないようにフロック化していることが認められた。この様子は松岡による実験結果と同様である⁴⁾。次に、CASE II の反応モデルについては以下のようなものである。未処理土に A 材を添加すると、単に石膏と水とが反応した量だけ含有水分は減少するが、土粒子の凝結は起こらない。これは水和生成物である二水石膏の結晶水の結合エネルギーが小さく、水分保持力の低いことが影響しているものと考えられる。しかし、B 剤添加後は水が取り込まれて凝結作用が起こり団粒形成するが、粒状化の状態までには至らない。

このように、中性固化処理では高分子剤による凝結・

表-2 対象土の化学組成と pH 値

湖底土	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	CaO (%)	MgO (%)	pH
	50.59	25.52	4.13	0.41	0.04	0.24	0.44	
	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	ZrO ₂ (%)	H ₂ O ⁻ (%)	SUM (%)	4.55
	0.98	2.16	0.09	0.01	0.02	15.79	100.42	
福山粘土	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	CaO (%)	MgO (%)	pH
	67.46	14.56	3.93	0.51	0.08	1.21	1.23	
	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	ZrO ₂ (%)	H ₂ O ⁻ (%)	SUM (%)	8.30
	2.10	2.82	0.06	0.01	0.03	5.62	99.63	

吸水効果が重要であり、石膏単味では土質改良を図ることが不可能であることが明らかとなった。また、攪拌時間については両材ともに 1 分程度で十分であることが認められた。

4. 中性固化処理の工学的特性に関する検討

4.1 用いた試料

試料は広島県内の湖底土と福山粘土の 2 種を対象とした。図-3 に用いた試料の粒径加積曲線を示し、物理特性を表-1 に、化学特性を表-2 に示す。

粒度試験の結果より、両試料はシルト質粘土を主体としていることが認められた。湖底土の液性限界は福山粘土の約 2 倍と高い値を示していることが特徴である。湖底土の強熱減量値は 16.2%、福山粘土は 5.6%であり、この影響がコンシステンシーや土粒子密度に現れているものと推察される。蛍光 X 線分析により化学組成をみると、両試料は Si を主として Al, Fe 含有量の高い試料であることが認められた。pH 値については、湖底土が 4.55 の酸性に対して、福山粘土は 8.30 とアルカリ性を示す試料である。このように、両試料の物理化学的性質は異なる特性を有している。

表-3 湖底土の団粒形成と浸水状況

湖底土	初期含水比 (%)	B 剤の添加量 (%/dry)	A 材の添加量 (%/dry)	団粒形成	浸水状況
	88 (0.8W _L)		0.2	20	×
0.4			○		汚濁なし
0.6			○		汚濁なし
0.8			○		汚濁なし
110 (W _L)		0.2	20	×	汚濁なし
		0.4		×	汚濁なし
		0.6		○	汚濁なし
		0.8		○	汚濁なし
132 (1.2W _L)		0.2	20	×	汚濁なし
		0.4		×	汚濁なし
		0.6		○	汚濁なし
		0.8		○	汚濁なし

表-4 福山粘土の団粒形成と浸水状況

福山粘土	初期含水比 (%)	B 剤の添加量 (%/dry)	A 材の添加量 (%/dry)	団粒形成	浸水状況
	42.6 (0.8W _L)		0.2	20	○
0.4			○		汚濁なし
0.6			○		汚濁なし
0.8			○		汚濁なし
53.3 (W _L)		0.2	20	○	汚濁なし
		0.4		○	汚濁なし
		0.6		○	汚濁なし
		0.8		○	汚濁なし
64.0 (1.2W _L)		0.2	20	○	汚濁なし
		0.4		○	汚濁なし
		0.6		○	汚濁なし
		0.8		○	汚濁なし

4.2 試験方法

ソイルミキサーの選定にあたっては、攪拌効率性能の高い2軸の強制パドルミキサーを選定した。対象土の初期含水比は、液性限界(W_L)を軸にして3種(0.8W_L, W_L, 1.2W_L)の含水比に調整した。処理条件については、3. で得られた結果に基づいてB剤とA材の順に添加処理し、各1分間の攪拌とした。なお、B剤添加量の決定については以下のように検討した。

試料に対して、B剤は0.2, 0.4, 0.6, 0.8%/dryまでの範囲とし、A材は20%/dryに固定して試験を進めた。ここでは、最適高分子剤量を求めるために、団粒形成と浸水状況から判断した。その結果を表-3と表-4に整理して示す。

表-3の湖底土試料は、初期含水比とB剤の添加量が団粒形成に影響を及ぼしている。また、浸水試験による汚濁度については、各試料ともに処理効果が認められた。表-4の福山粘土試料は、湖底土試料と比べて傾向が若



図-4 実験の流れ

干異なっているが、初期含水比の影響を受けることなく団粒形成し、汚濁度は全試料に処理効果が認められた。団粒形成と汚濁防止効果を重視して、B剤の添加量を0.6%/dryとした。

図-4に試験の流れを示す。ここで、A材の添加量は、強度発現をみるために20%/dryと30%/dryとして検討を行なった。

4.3 実験結果

(1) 改良土の粒子形状

改良土の粒子形状を写真-4と写真-5に示す。両試料の粒子形状は、0.8W_L試料は1~3mm, W_L試料は1~6mm, 1.2W_L試料は1~15mmの粒度範囲を示し、初期含水比が高いものほど粒度範囲が大きくなることが明らかとなった。また、写真-4と5の(b)試料は、1~2mm前後の均一な粒子形状を示していることが明らかになった。このように、初期含水比とA材の添加量によって粒子形状の異なることが認められた。

(2) 養生日数と一軸圧縮強さの関係

養生日数に伴うq_u値の関係を図-5に示す。両試料ともにセメント処理ほどの強度増加は望めないが、養生日

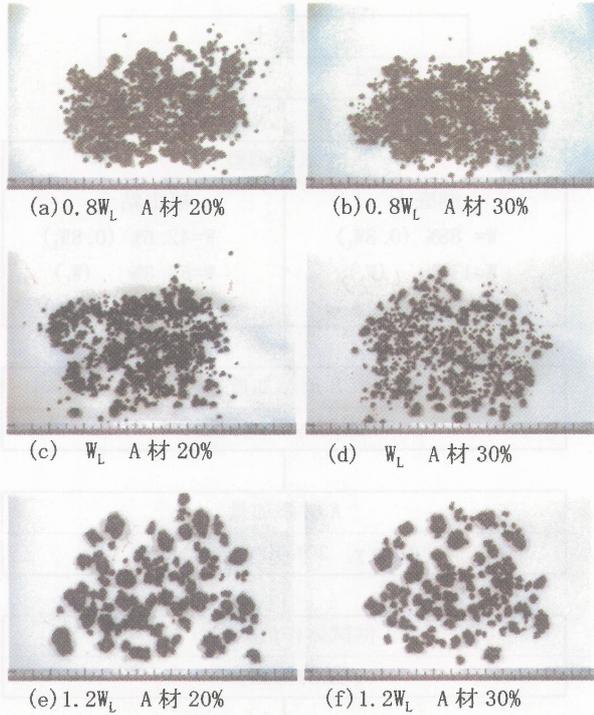
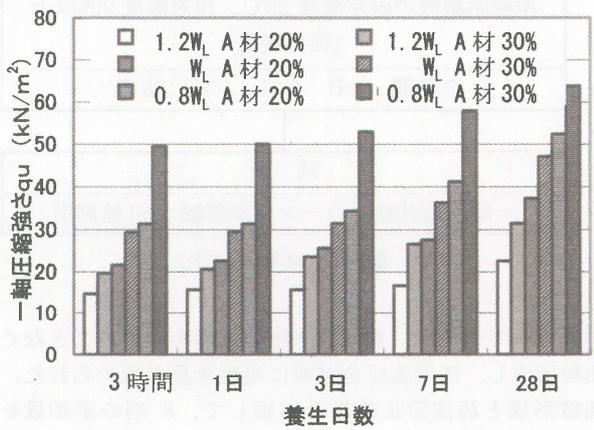


写真-4 湖底土処理試料



(a) 湖底土試料

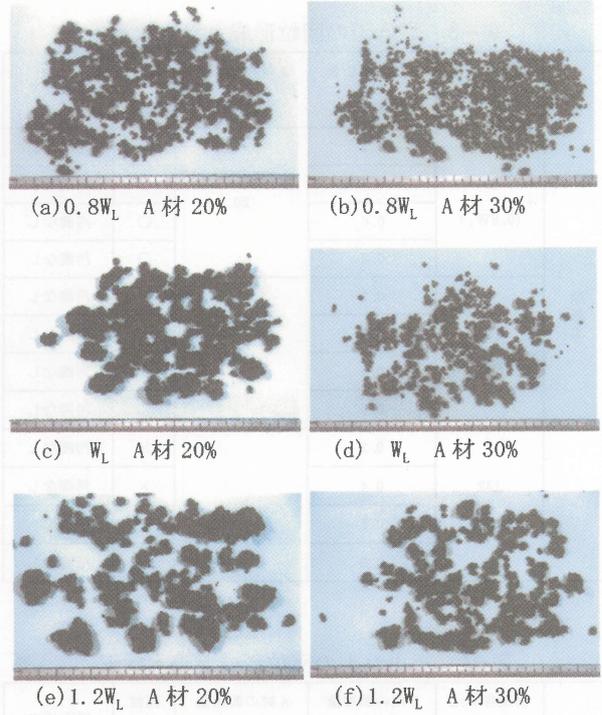
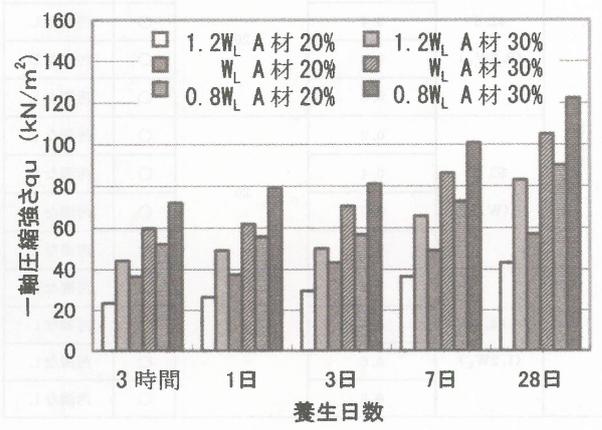
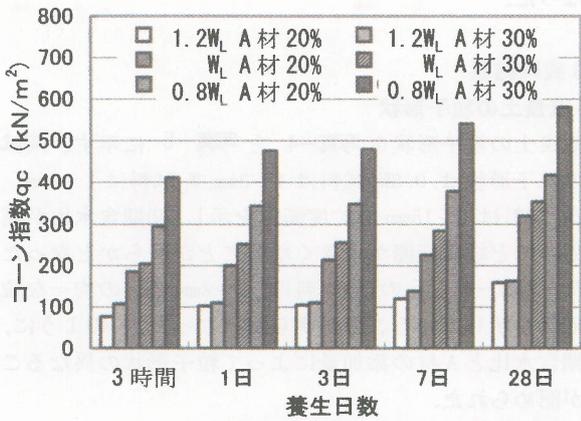


写真-5 福山粘土処理試料

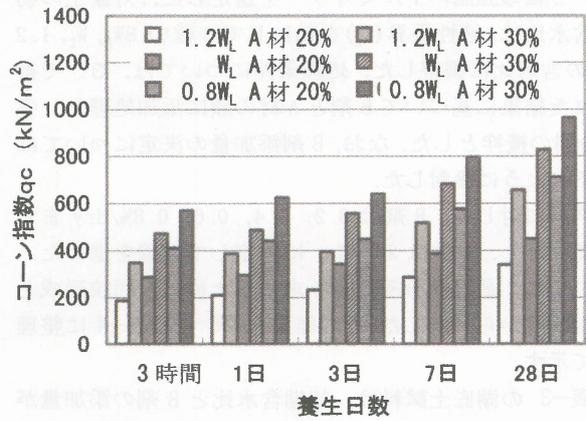


(b) 福山粘土試料

図-5 養生日数と一軸圧縮強さの関係

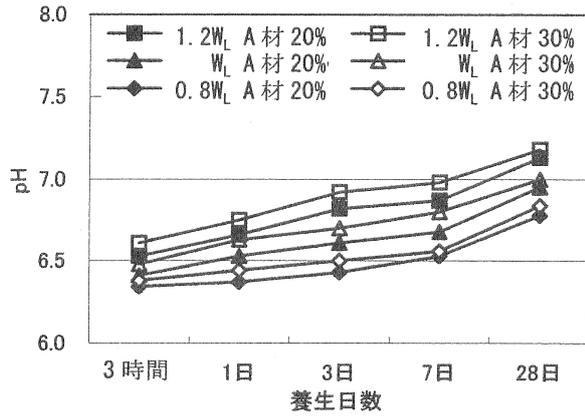


(a) 湖底土試料

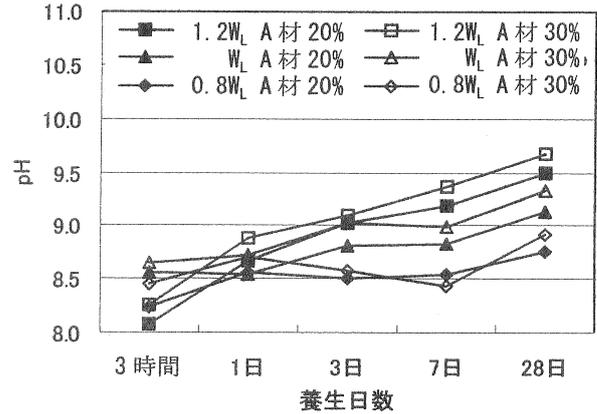


(b) 福山粘土試料

図-6 養生日数とコーン指数の関係



(a) 湖底土試料



(b) 福山粘土試料

図-7 養生日数と pH 値の関係

数に伴って q_u 値は増加傾向を示す。(a)の湖底土試料は、初日から3日養生までの q_u 値に差はみられないが、それ以降の q_u 値は増加傾向にある。(b)の福山粘土試料についても同様の傾向を示した。また、初期含水比と添加量が q_u 値に及ぼす影響についてみると、(a)の湖底土試料はその影響が明確に現れているが、(b)の福山粘土試料は初期含水比よりもむしろ、添加量の方が q_u 値に影響していることが認められた。運搬に要するための q_u 値は 30kN/m^2 以上を必要とするが⁷⁾、28日養生後の各試料を比較してみると、湖底土については $1.2W_L$ (A材 20%/dry) 処理試料がその値を満たしていない。一方、福山粘土は $1.2W_L$ (A材 20%/dry) 処理を除く全ての試料が初日から運搬できるまでに改良されている。また、福山粘土の $0.8W_L$ と W_L の A材 30%/dry 処理試料については、28日養生の強度が盛土材料 ($q_u \geq 100\text{kN/m}^2$)⁷⁾ として利用できるまでに改良できた。

(3) 養生日数とコーン指数の関係

養生日数に伴う q_c 値の関係を図-6 に示す。28日養生後の改良土を土質材料としての品質区分に分類すると次のようである。湖底土は、「泥土」から「第4種処理土」以下に区分される試料が多く、これらの試料は標準仕様ダンプトラックに山積みできず、その上を人が歩けない状態にある。一方、福山粘土は $q_c = 400\text{kN/m}^2$ 以上の試料が多く、「第4種処理土」以上の改良効果が得られた。両試料の q_c 値は q_u 値に近似した傾向を示している。これらの関係を一次回帰式で整理すると以下のようである。

(湖底土)

A材 20%/dry 添加試料・・・ $q_c = 8.7q_u$ ($R^2 = 0.9028$)

A材 30%/dry 添加試料・・・ $q_c = 8.3q_u$ ($R^2 = 0.8825$)

(福山粘土)

A材 20%/dry 添加試料・・・ $q_c = 7.6q_u$ ($R^2 = 0.9847$)

A材 30%/dry 添加試料・・・ $q_c = 7.9q_u$ ($R^2 = 0.8637$)

対象土の影響が実験定数に現れているようである。一

般に、原地盤に対する q_u と q_c の関係は $q_c \approx 5q_u$ で整理されているが、改良土の影響か湖底土試料は $q_c = 8.5q_u$ 、福山粘土試料は $q_c = 7.8q_u$ の関係式が得られた。両試料ともに相関性の高い実験式となっている。

(4) 養生日数と pH 値の関係

養生日数に伴う pH 値の関係を図-7 に示す。両試料ともに養生日数に伴って pH 値は上昇する傾向にある。また、初期含水比が高く A 材添加量の多い試料のものほど pH 値は高い。28日養生後の pH 値についてみると(a)の湖底土試料(未処理の pH 値は 4.55)の pH 値は 6.7~7.2 を示し、中性域で処理されていることが認められた。一方、(b)の福山粘土試料(未処理の pH 値は 8.30)の pH 値は 8.7~9.7 を示しており、アルカリ側へふれているが、セメント系や石灰系処理土のようなアルカリ状態 (pH: 11~12 程度) ではない。pH 値がアルカリ側へ上昇する要因については、密封養生による CO_2 の遮断とポゾラン物質による影響が考えられる。一般的には大気中の CO_2 との反応による CaCO_3 の反応物質により pH 値は低下していく。

5. おわりに

建設汚泥の有効利用を目的として、広島県内で採取した湖底土と福山粘土の物理化学的性質の異なる2種の試料を対象に、中性固化材による改良土の団粒メカニズム及び工学的な基礎特性についての検討を行った。結果を要約すると以下ことが明らかになった。

- ① 汚泥の団粒化には高分子剤(B剤)の凝結・吸着効果が重要な役割を果たす。
- ② 石膏系材料(A材)単味では土質改良が不可能であることが認められた。
- ③ B剤は高分子量にもよるが、少量の添加で凝結効果を示し、汚濁防止材としての処理効果が認められた。
- ④ 対象土のフロック化を得るためのB剤添加量は、約0.6%/dry程度で処理効果が認められた。

- ⑤ 中性固化材は、セメント系固化材のような強度発現は得られない。これは、石膏系のA材が短時間でエトリングaitを生成し、水和反応を抑制しているものと考えられる。
- ⑥ 強度発現は対象土の初期含水比と有機物含有量が影響している。
- ⑦ 高強度を得るためには、ポゾラン物質の開発が重要である。
- ⑧ q_u 値と q_c 値の関係を一次回帰式で整理すると $q_c = 7.6 \sim 8.7 q_u$ の実験式が得られた。
- ⑨ 福山粘土試料は盛土材料として再利用できるまでに改良することができた。
- ⑩ pH 値については密封養生による影響か、養生日数に伴いアルカリ側へ反応する傾向を示した。しかし、セメント系や石灰系材料のような強アルカリ状態までには至らない。

謝辞

本研究の実施にあたり、実験の協力をしていただきました(株)北川鉄工所の西河元雄氏並びに関係者各位に、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松林久行：建設汚泥リサイクル指針(総論)，pp. 3-5 1, 1999.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 松林久行：建設汚泥リサイクル指針(技術編)，pp. 209-215, 1999.
- 6) 無機マテリアル学会：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック，pp. 138-156, 1995.
- 7) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第二版)，pp. 149-161, 1994.