

固化処理した泥土の盛土材料への適用性に関する研究

Applicability of Stabilized Muddy Soils for Fill Materials

奥村智美[†], 奥村哲夫^{††}, 成田国朝^{††}, 木村勝行^{††}

Tomomi OKUMURA, Tetsuo OKUMURA, Kunitomo NARITA, Katsuyuki KIMURA

Abstract In recent remarkable activities for 3R, reduce, reuse and recycle, of industrial wastes, recycling of muddy soil, by-product inevitably supplied in construction works, has still been behind the others. This paper concerns procedures of muddy soil stabilization and their practical application for reuse as embankment materials. Extensive investigation was done on physical and mechanical properties of stabilized soils, for various kinds of stabilizers and different mixing rates, to propose appropriate combination of soil and stabilizer. Applicability of stabilized soil for an impervious surface layer of dike was examined through some centrifuge model tests.

1. はじめに

近年、産業廃棄物の減量化・再資源化への取組みが進められている。その背景には、廃棄物処分場の不足や処分場周辺の生態・環境等への配慮が挙げられる¹⁾²⁾³⁾。

産業廃棄物のうち建設系の廃棄物には、高含水比の建設汚泥やコンクリート・アスファルト廃材などがあり、コンクリート・アスファルト廃材等の再資源化率は100%近いのに対し、建設汚泥は約75%と低く、建設系廃棄物の中で再資源化が最も遅れているのが状況である。

現在行われている建設汚泥や浚渫土などの泥土を再利用するための主たる手法は、セメント等の固化材を原泥に添加・混合して工学的性質や施工性を改善する「安定処理工法」である。しかし、建設汚泥や泥土の性状は多種多様であり、これらを安定処理した改質土の工学的性質については未だ未解明な問題が多く残されている。

本研究は、安定処理工法の一つである粒状固化工法によって泥土を処理し、改質土の物理・力学的特性を調べ、建設材料等への利用に適した固化材添加量などを見出すこと、および改質土を盛土材料として使用した場合の適用性に関して検討を加えたものである。

2. 改質土の基本的特性に関する研究

2.1 使用泥土の特性

実験には三重県四日市市の港湾浚渫土(以下、Y泥土と称す)、および岐阜県土岐市の造成地沈砂池堆積土(以下、T泥土と称す)の2種類の非自硬性汚泥を用いた。表-1に試料の物理的性質を示す⁴⁾。

粒状固化工法においては、泥土性状を簡便かつ迅速に把握するため一般にフロー値による泥土管理を取り入れ、泥土性状に適した固化材添加量を決定している。本試験においても、泥土性状をフロー値によって評価することとし、含水比調整を行ってフロー値100、150、200mmの3種類の試料土を作成した。各フロー値に対する含水比および湿潤密度を表-2に示す。

表-1 試料の物理的性質

項目		試料土	港湾浚渫土 (Y泥土)	沈砂池堆積土 (T泥土)
土粒子密度 (g/cm ³)			2.402	2.494
湿潤密度 (g/cm ³) (自然状態)			1.856	1.958
自然含水比 (%)			86.8	47.7
強熱減量 (%)			7.4	6.9
コンシシス	液性限界 (%)		68.1	41.9
	塑性限界 (%)		33.7	30.5
	塑性指数		34.4	11.4
粒度	礫分 (%)		0.0	7.0
	砂分 (%)		2.2	9.0
	シルト分 (%)		51.1	61.3
	粘土分 (%)		46.7	22.7
土質名称			シルト (MH)	シルト (ML)

[†] 愛知工業大学大学院建設システム工学専攻

^{††} 愛知工業大学工学部都市環境学科 (豊田市)

表-2 試料のフロー値と含水比および湿潤密度

項目 試料土	フロー値 F(mm)	含水比 ω (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)
港湾浚渫土 (Y 泥土)	100	99.1	1.493
	150	116	1.413
	200	140	1.357
沈砂池 堆積土 (T 泥土)	100	57.3	1.682
	150	64.8	1.626
	200	76.0	1.565

2.2 使用添加剤

使用した添加剤は、高分子凝集剤と固化材の 2 種類である。高分子凝集剤には、土粒子表面に吸着して粒子間架橋作用によって団粒化構造を形成する高分子系の凝集剤、固化材には、多量の有機物を含有する泥土(河川・湖沼・港湾の埋立てヘドロ等)を固化処理するために改良したカルシウム系の固化材を用いた⁵⁾。

2.3 改質土の作成方法

所定のフロー値に含水比調整した泥土に対し、高分子凝集剤を添加した後電動攪拌機で 1 分間混合した。これに固化材を添加し、再度 1 分間混合して改質土を作成した。高分子凝集剤と固化材の配合は、高分子凝集剤 $1m^3$ に対して $15kg$ 一定とし、固化材添加量 P を $50 kg/m^3$ (貧配合 1)、 $100 kg/m^3$ (貧配合 2)、 $150kg/m^3$ (標準配合) および $250kg/m^3$ (富配合) の 4 種類とした。作成した改質土は直射日光を避け空気中で密閉養生した。

2.4 実験内容

固化処理した養生後の改質土について、締固め試験、コーン貫入試験、一軸圧縮強度試験、CBR 試験、透水試験を行って改質土の強度特性を調べた。なお、一軸圧縮強度試験については、セメント協会標準試験方法(JCAS A-01-1990)、他の試験は JIS 規格に準拠して行った⁶⁾。

3. 結果および考察

3.1 締固め特性

図-1 および図-2 に、フロー値 100mm、養生 7 日の改質土 Y および改質土 T の締固め曲線を示す。両図より、いずれの改質土においても固化材添加量 P の増加によって最適含水比 ω_{opt} は低下し、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は高くなる傾向にあることが分かる。また、改質土 T の最適含水比 ω_{opt} は改質土 Y と比較して低く、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は高くなっていることが分かる。

図-3 は、固化材添加量 P と最大乾燥密度 ρ_{dmax} の関係を示している。図から、固化材添加量 P の増加に伴う最

大乾燥密度 ρ_{dmax} の増加傾向は、改質土 T より改質土 Y の方が大きいことが分かる。

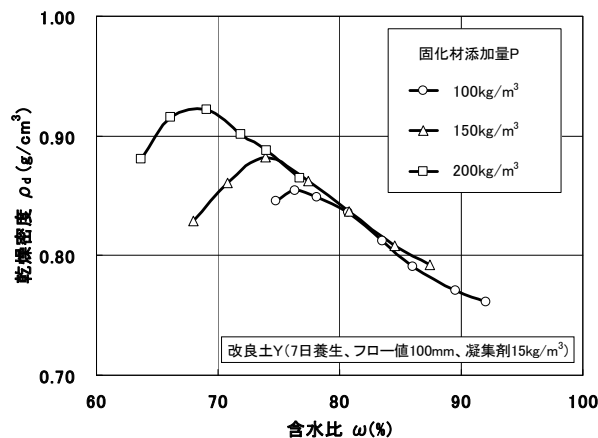


図-1 締固め曲線(改質土 Y)

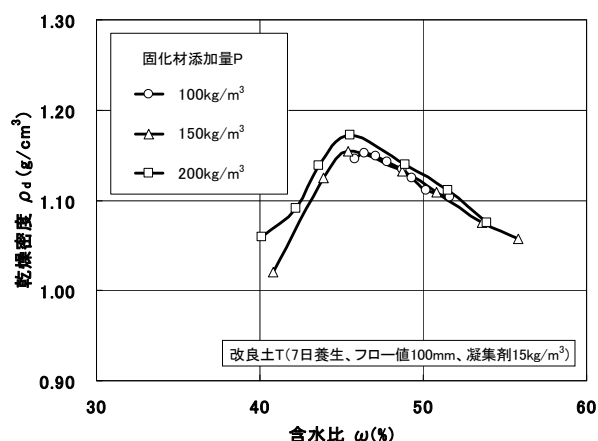


図-2 締固め曲線(改質土 T)

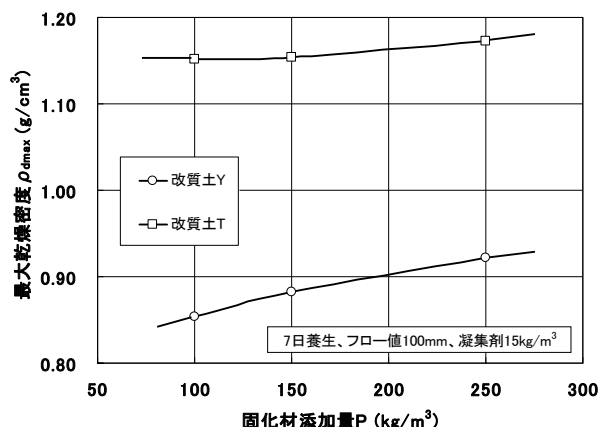


図-3 固化材添加量 P と最大乾燥密度 ρ_{dmax} の関係

3.2 透水特性

透水試験は、養生 7 日の改質土を用い、締固め D 値 100%、および D 値 95% 一定で、含水比を最適含水比を含む乾燥側と湿潤側の計 4 点で行った。

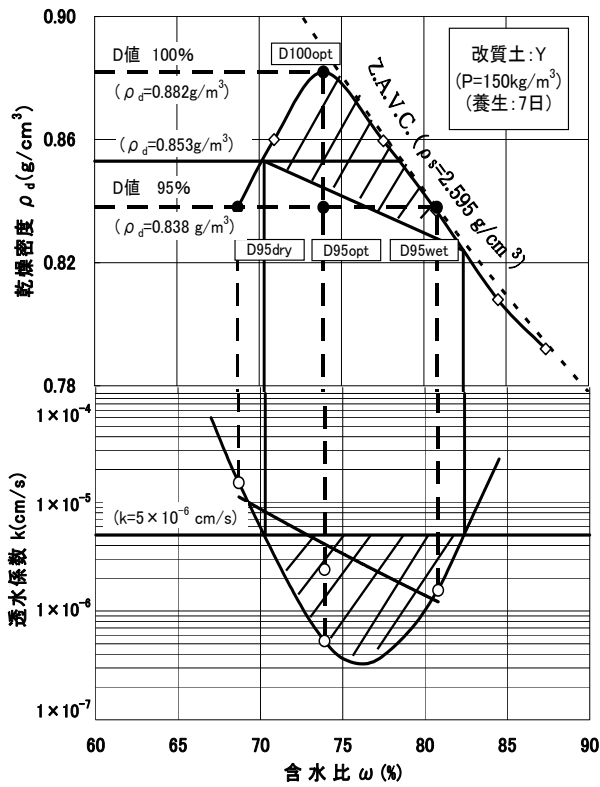


図-4 締固め状態と透水係数の関係
(改質土 Y、P=150kg/m³)

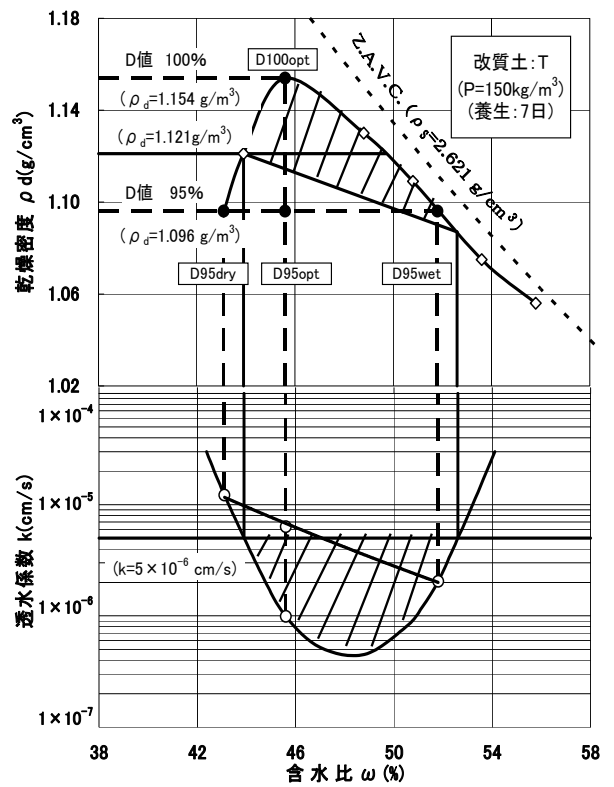


図-6 締固め状態と透水係数の関係
(改質土 T、P=150kg/m³)

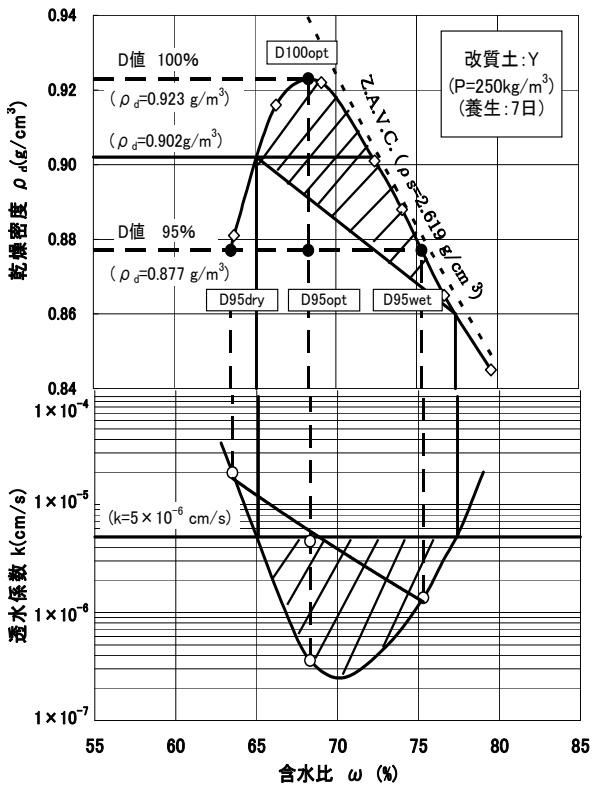


図-5 締固め状態と透水係数の関係
(改質土 Y、P=250kg/m³)

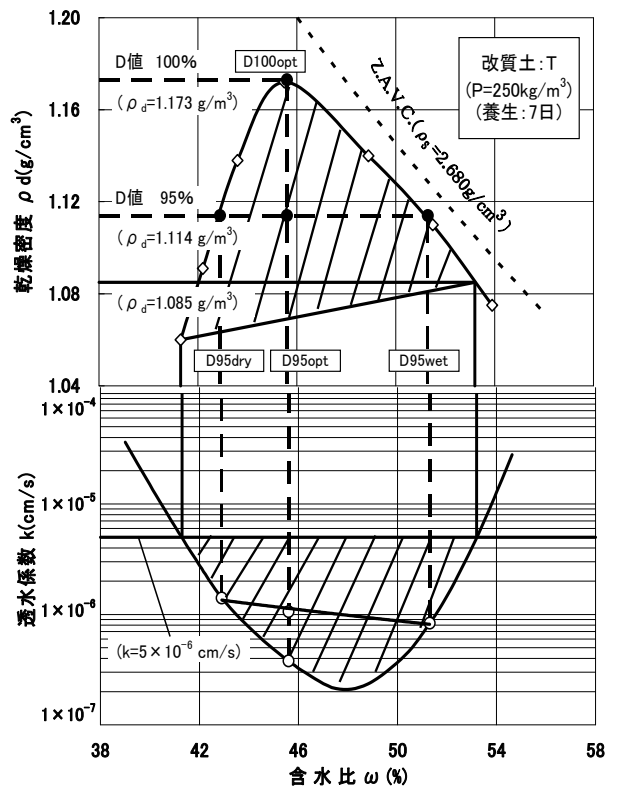


図-7 締固め状態と透水係数の関係
(改質土 T、P=250kg/m³)

図-4 および図-5 は、改質土 Y の標準配合 ($P=150\text{kg/m}^3$) および富配合 ($P=250\text{kg/m}^3$) の締固め状態と透水係数の関係を示したものである。両図より、密度が高いほど、また同一密度であっても締固め時の含水比が高いほど透水係数 k の値が低く、 k の最小値は最適含水比より湿潤値に現われており、一般土の特性と一致することが分かる。なお、この傾向は改質土 T においても認められており、図-6 および図-7 に、標準配合 ($P=150\text{kg/m}^3$) および富配合 ($P=250\text{kg/m}^3$) の結果を示す。

一般に築堤部の遮水材料として要求される透水係数 k の値は $k \leq 5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ であるとされている。この条件を満たす締固め状態 (ρ_d および ω) は、図中 $\rho_d \sim \omega$ 関係の斜線で囲った範囲となる。ここで、実堤体の施工を締固め度 (D 値) で管理するとした場合、 $k \leq 5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を満足する締固め D 値と固化材添加量 P との関係で改質土 Y および T について整理すると図-8 のようになる。図を見ると、改質土 T は固化材の添加量が多いほど D 値は低くなっており、施工管理が容易であるように判断される。

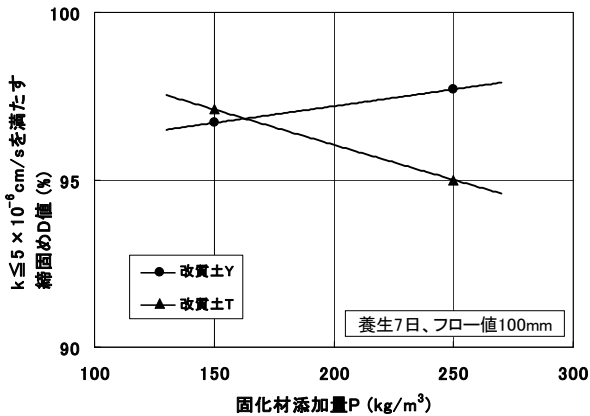


図-8 $k \leq 5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を満足する締固め D 値と 固化材添加量 P の関係

3.3 コーン貫入特性

改質土の要求品質は、コーン指数 q_c を用いて第4種改良土 ($q_c \geq 200 \text{kN/m}^2$)、第3種改良土 ($q_c \geq 400 \text{kN/m}^2$)、第2種改良土 ($q_c \geq 800 \text{kN/m}^2$) に区分されている⁷⁾。

図-9 (a) は、改良土 Y について、3時間および6時間養生後のコーン指数 q_c とフロー値 F との関係を固化材添加量別に記号を変えて整理したものである。図より、養生時間が長く、固化材添加量 P が多くなるほど、コーン指数 q_c が高く現われ、また、いずれの固化材添加量、養生時間においてもフロー値の増加に伴って q_c が低下する傾向にあることが分かる。

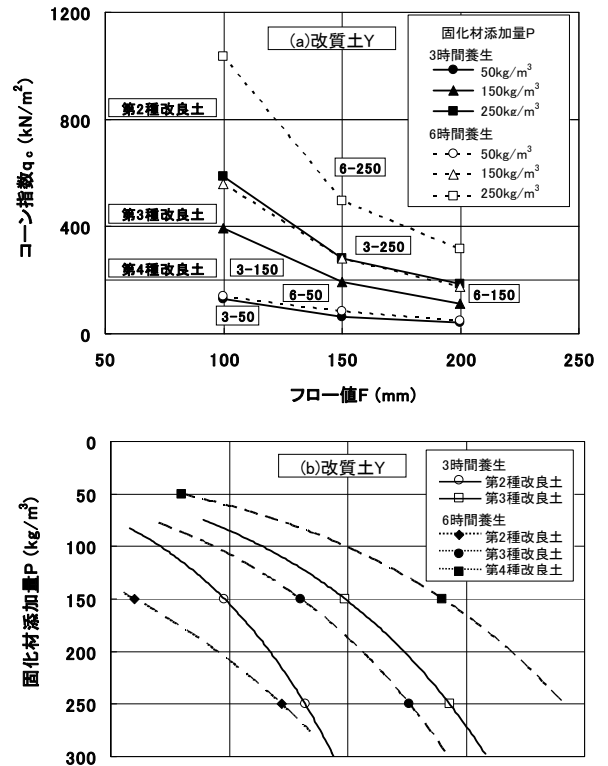


図-9 フロー値とコーン指数 q_c 、必要固化材添加量の関係(改質土 Y)

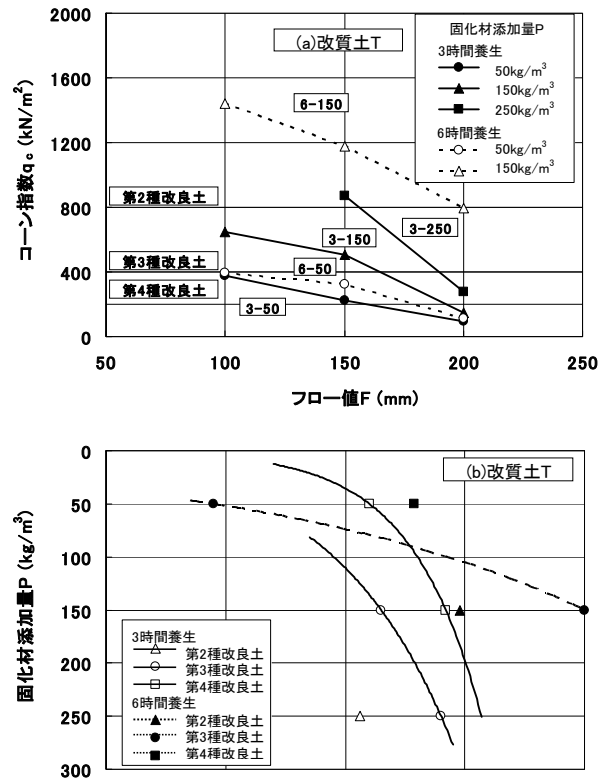


図-10 フロー値とコーン指数 q_c 、必要固化材添加量の関係(改質土 T)

同図(b)は、第2種から第4種に要求される q_u 値を満足する固化材添加量 P とフロー値との関係を養生時間別に示したもので、従来の結果を踏まえ、両者の関係を指数関係で近似している。図を見ると、フロー値の増大に伴って必要となる固化材の添加量が増加することがわかる。また、この傾向(曲線の傾き)は第4種、第3種、第2種の順に大きく現れており、要求品質が高いほどフロー値の制約が厳しくなるものと判断される。

図-10は改質土Tについて改質土Yと同様に整理した結果である。データにバラツキはあるものの、ほぼ改質土Yと同一傾向にあると見なすことができる。

3.4 一軸圧縮強度特性

図-11および図-12は、改質土YおよびTについて、養生日数(6時間、28日)と一軸圧縮強度 q_u の関係をフロー値、固化材添加量別に記号を変えて示したものである。両図ともに養生日数が長いほど q_u 値が高くなる傾向にあることがわかる。なお、フロー値、固化材添加量の違いと q_u 値との関係はデータのバラツキが大きく明確ではない。

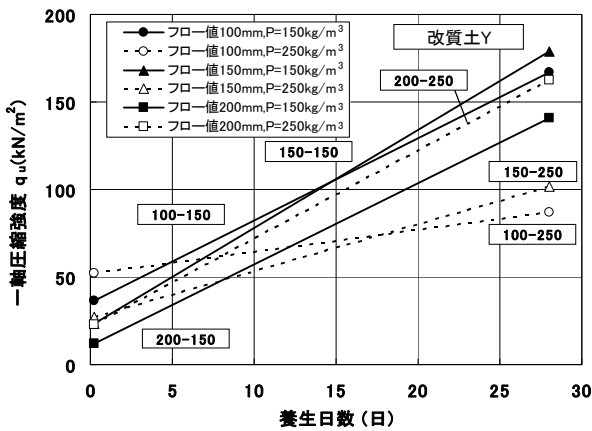


図-11 養生日数と一軸圧縮強度の関係(改質土Y)

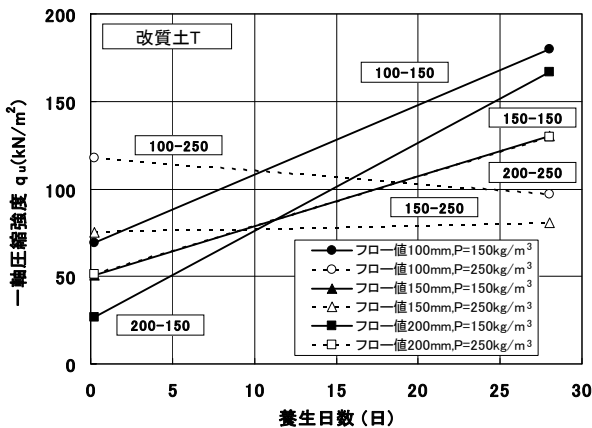


図-12 養生日数と一軸圧縮強度の関係(改質土T)

3.5 CBR特性

図-13は、改質土YおよびTについて、固化材添加量 $P=150\text{kg/m}^3$ 、養生日数28日におけるCBR値(設計CBR)とフロー値の関係を示したものである。図よりCBR値はフロー値の増大に伴って低下する傾向にあることがわかる。図-14は、CBR値と一軸圧縮強度 q_u の関係を整理した結果である($P=150\text{kg/m}^3$ 、養生日数28日)。図を見ると、CBR値が大きくなるほど一軸圧縮強度 q_u の値は高くなる傾向にあることが確認できる。

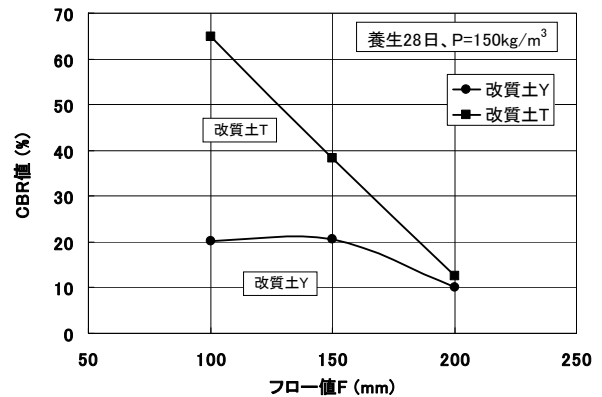


図-13 フロー値とCBR値の関係

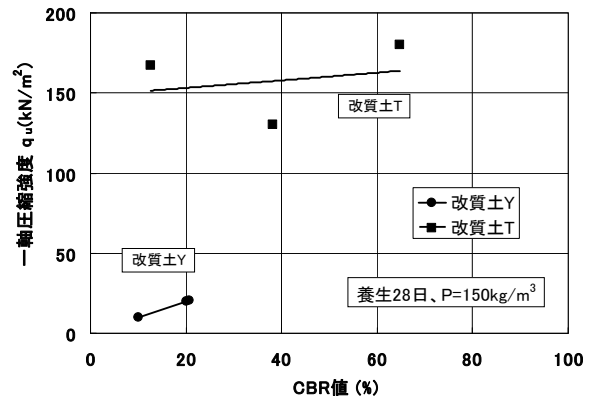


図-14 CBR値と一軸圧縮強度の関係

4. 盛土材料への適用性に関する実験

4.1 実験の概要

改質土を盛土堤体の表面遮水材料として使用した場合の適用性を遠心模型実験で検証した。実験では、堤体材料として山口砂、表面遮水材料として養生28日の改質土Yを使用した。表-3に試料の物性値および模型堤体の締固め状態を示す⁸⁾。

遠心模型実験は、アルミ製コンテナ(W460×D200×H460mm)内に高さ250mm、上下流斜面勾配1:0.8の模型堤体を作製した(図-15)。また、模型は貯水側斜面に遮

水ゾーンを設けない場合および形状の異なるゾーンを設置した計 3 種類とした。表-4 に 3 種類の模型に対する各 3 ケースの実験条件を示す。模型作製においては、図-15 に示す位置に 8 個の間隙水圧計(●印)を埋設し、間隙水圧計の前面には湿らせた珪砂 4 号を詰め、また堤体下流側には珪砂 3 号を用いた鉛直ドレーンを設置した⁹⁾。

実験は、堤体低部において遠心加速度 30G 一定を確認した後、貯水を開始し、目標水位(30G 場で 4.68m)を保つようにバルブ調整を行い、堤体内の浸透性状を調べた。また、堤体内の浸透が定常状態になったのを確認した後、貯水位を急降下させ堤体内の間隙水圧変化および斜面破壊形状を調べた。

表-3 堤体試料の物性値および堤体模型の締固め状態

試料	山口砂	改質土 Y
最大粒径 D_{max} (mm)	2.00	2.00
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.582	2.513
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.893	0.744
最適含水比 ω_{opt} (%)	10.9	83.5
締固め乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.76	0.707
締固め含水比 ω (%)	5.6	82
飽和透水係数 k_s (cm/sec)	2.19×10^{-2}	1.14×10^{-3}
締固め度 D-値 (%)	93	95

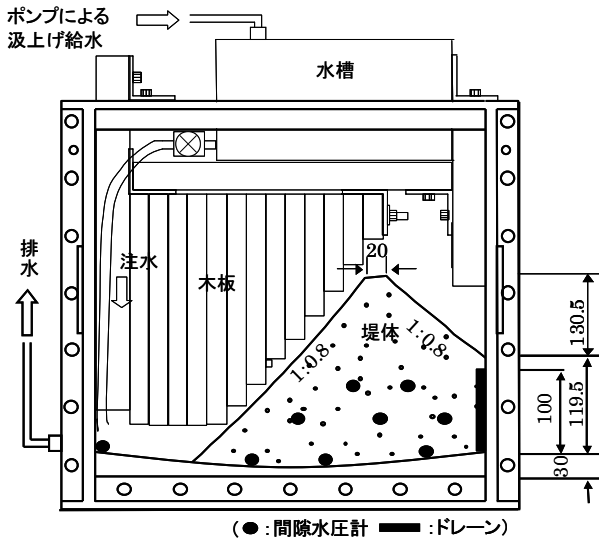


図-15 試料容器概略図

表-4 実験条件

CASE	斜面勾配	堤体試料	表面遮水(表層)
1	1 : 0.8	山口砂	表層なし
2			上端幅:10mm, 下端幅:40mm
3			上端幅:10mm, 下端幅:20mm

4-2 結果および考察

図-16 および図-17 に、CASE1 および CASE2 の貯水位急降下直前の堤体内の浸透状況を示した。両図を比較すると、CASE2 は CASE1 より浸潤面が低いことが確認できる。上流側の堤体表層部に改質土を設置した場合、堤体の透水係数 k_1 に対して改質土の透水係数 k_2 の値が低いため、遮水部は堤体部より浸透しにくく、このことが浸透挙動に影響したと考えられる。また、図-18 は CASE3 の貯水位急降下直前の堤体内の浸透状況を示しており、CASE2 と CASE3 の結果を比較すると、遮水ゾーンの層厚が厚いほど、浸潤面高さは低くなるのが分かる。なお、

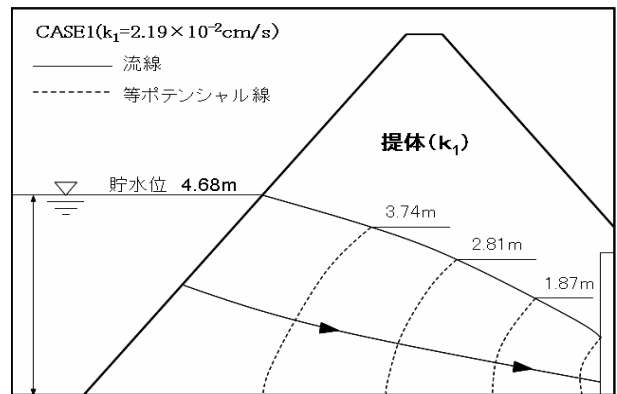


図-16 急降下直前の浸透挙動(CASE1)

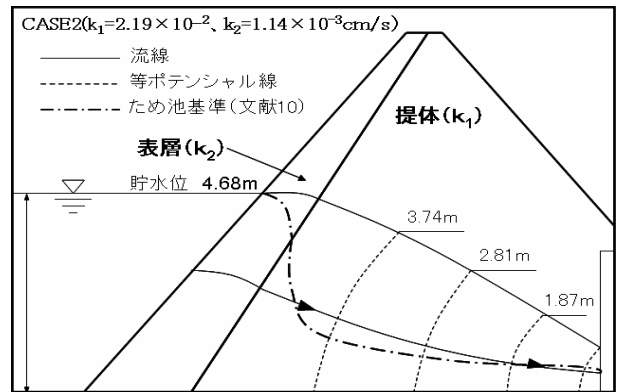


図-17 急降下直前の浸透挙動(CASE2)

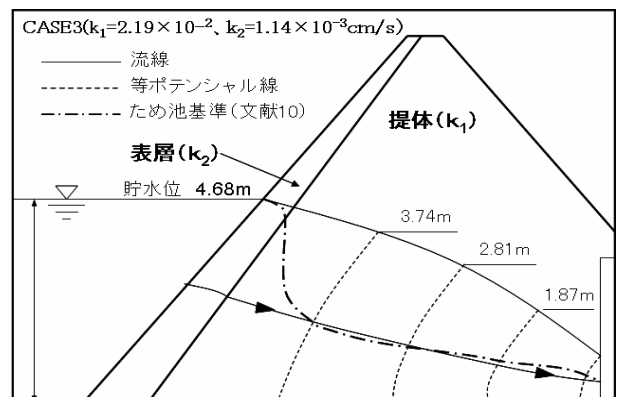


図-18 急降下直前の浸透挙動(CASE3)

図中の一点鎖線は農水省土地改良事業設計指針(ため池整備)に基づいて求めた湿潤面であり、本実験結果はCASE2、CASE3共に高く現れている¹⁰⁾。この理由として、貯水によって遮水ゾーンが飽和化し、強度低下に伴うクラックの発生あるいは浸透水圧による水みちの発生などが考えられ、これによって遮水機能が低下したためと推測される。

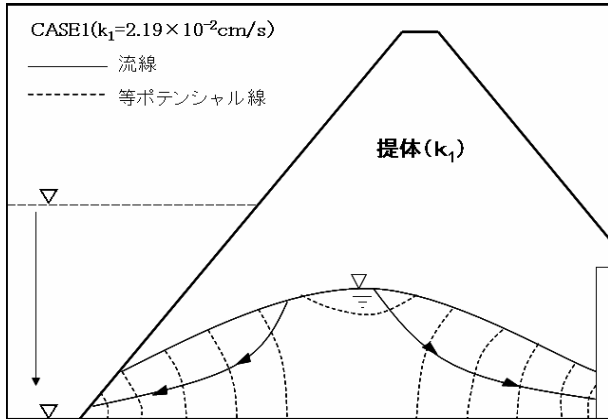


図-19 急降下終了後の浸透挙動(CASE1)

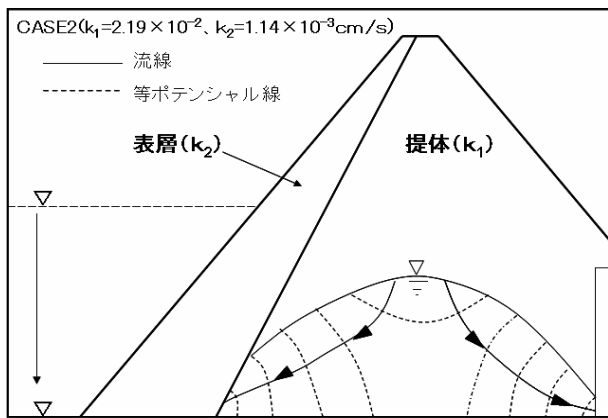


図-20 急降下終了後の浸透挙動(CASE2)

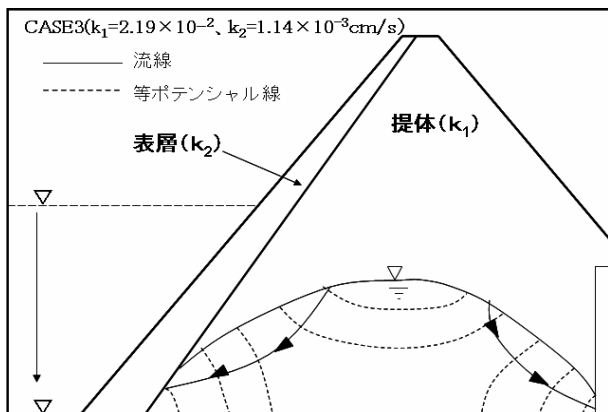


図-21 急降下終了後の浸透挙動(CASE3)

図-19および図-20にCASE1およびCASE2の貯水位急降下終了後(換算時間9h)の堤体内の浸透状況を示す。両図から、CASE2はCASE1より堤体内に多く残留間隙水圧が残っていることが確認できる。また、図-21はCASE3の貯水位急降下終了後(換算時間9h)の堤体内の浸透状況を示しており、CASE2とCASE3の結果を比較すると、遮水ゾーンの層厚が大きいほど残留間隙水圧が高いことが分かる。

図-22および図-23にCASE2およびCASE3の実験終了後の堤体のすべり破壊形状を示した。堤体の破壊は、貯水位急降下開始と同時に堤体の上流側から起こり、また、下流側にはクラックが発生した。破壊の形状を比較すると、遮水ゾーン下部の層厚が大きいほど破壊領域が広く、堤体内の残留間隙水圧の影響を大きく受けることが確認できた。

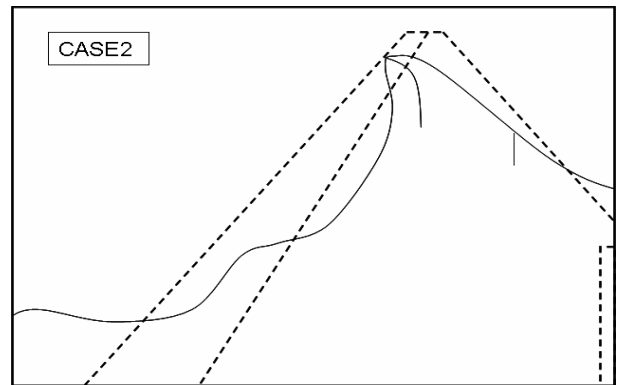


図-22 実験終了後の堤体の破壊形状(CASE2)

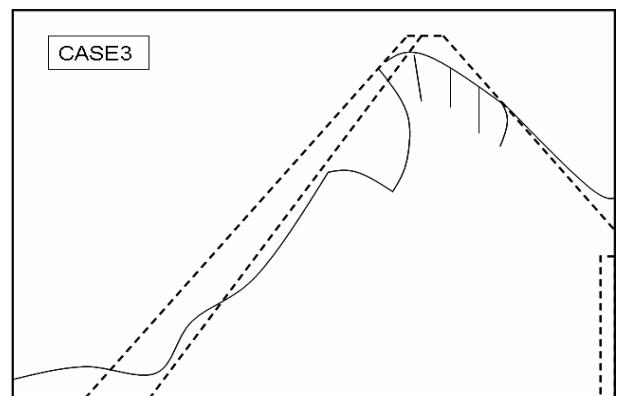


図-23 実験終了後の堤体の破壊形状(CASE3)

5. 結論

本研究では改質土の材料特性と盛土材料への適用性に関して調べた。結果を総括すると、以下のように整理される。

- (1) 固化処理された改質土の強度は、固化材添加量が多

いほど、また養生日数が長いほど大きく現われた。
また、固化材添加量が多くなるほど遮水性の施工範囲が拡大することが確認できた。

- (2) 盛土材料として要求される条件が厳しくなるほど固化材の添加量も多くなり、同時に要求品質を満たすことのできるフロー値の範囲が限定される。したがって、短時間に高品質な改質土が要求される場合、固化材添加量の選定が極めて重要となる。
- (3) 改質土をため池堤体の表面遮水材料として使用した場合の水位低下に伴う破壊形状を遠心模型実験で調べたところ、遮水ゾーン下部の層厚が大きいほどすべり破壊領域が拡大することが明らかとなった。また、改質土を遮水ゾーンに使用する場合、養生日数によって遮水効果が異なることが確認できた。

<参考文献>

- 1) (社)地盤工学会：廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用, 1998.
- 2) 永松郁生・野口真一・定岡直樹・中村吉男・奥村哲夫・成田国朝・大根義男：循環型社会形成を目指した泥土(建設汚泥)の再生利用技術について, 土木学会土木技術シンポジウム, pp. 75-80, 2005.
- 3) 福島伸二・谷茂・北島明・西本浩司：底泥土の固化処理強度に及ぼす粒度と含水比の影響, 土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 2, pp. 376-388, 2007.
- 4) 奥村智美・成田純・吉田了介：粒状固化工法による改質土の静的強度特性に関する実験的研究, 2006 年度卒業論文
- 5) 勝浦雄平・北迫太：粒状固化工法による処理土の締め固め・透水・変形特性に関する実験的研究, 2007 年度卒業論文
- 6) (社)セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第二版), 技報堂, 1994.
- 7) 建設省：建設発生土利用技術マニュアル(第 2 版), 土木研究センター, 1997.
- 8) 岡平雅人・河内俊徳・松島圭佑：固化処理土のため池堤体材料への適用性に関する遠心模型実験 2008 年度卒業論文
- 9) 伊藤大輔・佐野秀行・森俊樹：水位急降下に伴う堤体斜面の崩壊に関する遠心模型実験, 2003 年度卒業論文
- 10) (社)農業土木学会：土地改良事業設計指針, 「ため池整備」, 2000.
- 11) 山口栢樹・大根義男：フィルダムの設計および施工, 技報堂, 1973.
- 12) 宇野尚雄：土質工学における図解法の使い方, 土と基礎 Vol. 21, No. 2, pp75-82, 1973.
- 13) 大根義男：実務者のための土質力学：技報堂, 2006.
- 14) HARRY R. CEDERGREN：Seepage, Drainage, and Flow Nets, 2nd ed., A WILEY-INTERSCIENCE, 1977.

(受理 平成 20 年 3 月 19 日)