

高含水比の粘土における固体の沈降特性に関する実験

Experiment on Settlement Behavior of Solid Mass in Clay Slurry with High Water Content

片山遥平	Yohei KATAYAMA	(広島大学工学院工学研究科)
土田 孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究科)
村上博紀	Hiroki MURAKAMI	(広島大学大学院工学研究科)

スラリー状の粘土に固体粒子を混合した場合の材料分離特性を検討するため、粘土スラリー内での固体粒子の沈降特性を実験により検討した。粘土の含水比を変化させ、寸法 1.2cm~3.1cm の立方体の模型を用いた沈降実験を実施した結果、固体粒子の沈降特性は、粘土地盤の支持力問題として求めた安全率と良好な関係を示すことがわかった。安全率は粒子側面に作用する粘着力を考慮する場合と考慮しない場合の 2 通りを用いたが、いずれの安全率も沈降特性と関連があり、前者では 2.5 以下、後者では 4.5 以下になったときに沈降量は急増した。以上の結果は、粘土スラリー内にレキや製鋼スラグなどを混合したときの分離の条件を考える上で有効であると考えられる。

キーワード：粘土，粘着力，沈降，ベーンせん断試験，支持力 (IGC : E02, E03)

1. はじめに

一般廃棄物および産業廃棄物を適性に処分するための管理型処分場は、もっとも重要なインフラストラクチャーの一つである。廃棄物の管理型最終処分場は、内陸部の山間地か臨海部の港湾内に立地される場合が多いが、一般に都市圏では内陸部に適地が見つかりにくいいため、港湾の中の海面処分場として設置される場合が多い^{1),2)}。港湾に設置された海面処分場では、海底面が粘土層の場合、通常はこの粘土層が底面の遮水層としての条件を満たすため、遮水構造としては側面の遮水のみを考えればよい。しかし、海底面が砂地盤である地点に管理型処分場を設置する場合は、底面の遮水を行う必要がある。

海底面が砂地盤の場合の底面遮水の方法として、海成粘土に間隙調整材（ベントナイト）とゲル化剤を配合した土質遮水材料を一定の厚さで敷設する工法がある^{1),2),3)}。この土質材料は、使用する材料が無機の自然材料であるため経年劣化しないこと、セメントなど固化材を使用しないため変形へ追従性を有することから、長期的に海面処分場の遮水性能を維持することが可能である。また、製造から打設に至るまで既存の施工機械や施工方法を用いることができることも、施工性と経済性の観点から長所となっている。

本工法が海面処分場の底面遮水に本格的に使用された例としては、平成 16 年に建設された愛媛県四国中央市の寒川東部産業廃棄物処分場がある^{4),5)}。本工事では 45,000m² の面積に、厚さ 2m、全体で約 100,000m³ のスラ

リー状の土質系遮水材料が海水中に打設された。

本工法を施工する上で問題となる点として、底面遮水材料を打設した層の下に作用する揚圧力がある。海面に立地した管理型廃棄物処分場では、廃棄物を投入する前に底面および側面の遮水が行われるが、処分場内の水位は一般に平均潮位付近よりも低く設定される。このため処分場の外の水位が処分場内の水位よりも高くなると底面遮水層の下部に揚圧力が作用するので、底面遮水層を安定させるためにはカウンターウエイトとなる覆土を行う必要がある。揚圧力が大きい場合にはより厚い覆土層が必要となりその分だけ廃棄物処分場の容量が減少することになる。

以上のような揚圧力を考慮すると、底面遮水に用いる土質系遮水材料は単位体積重量が大きいことが望ましい。遮水材料自体の単位体積重量が大きければ必要なカウンターウエイトが減少するからである。人工的に混合した地盤材料の単位体積重量を増加させる方法としては、レキあるいは重量の大きい製鋼スラグ（粒子密度約 3.6g/cm³）を重量調整材として混合する方法が考えられる。たとえば、渡部らは粘土スラリーに各種の条件で砂を混合して透水係数を求めた実験により、砂分を 50%程度混合しても、粘土スラリーの透水係数はほとんど変化しないことを報告している¹⁾。しかし、レキや製鋼スラグなどの粒子をスラリー状の粘土と混合した場合、これらの粒子が粘性土内で沈降、分離すると、透水係数の増加が懸念される。このため、粘土スラリー内で粒子が安定する条件を明らかにした上で混合を考える必要がある。

以上の観点から、本研究は、粘土中の製鋼スラグをモデ

立方体の模型を用いて、スラリー内における沈降特性を調べ、単一の模型の密度と大きさと粘土スラリーの強度と沈降特性の関係を明らかにすることを目的とした。模型を立方体にしたのは、模型の製作及び計算が容易なためである。

2. 実験方法

本研究では粘土として徳山港粘土（液性限界 110.6%，塑性限界 40.0%，土粒子密度 2.616g/cm^3 ）を用いた。用いた模型固体を写真-1 に示すが、アルミ板、アルミ棒、プラスチック板を用い、アルミ板で作った箱の内部に鉄粉、鉛玉、砂を充填して重量を調整した。表-1 に用いた模型の寸法と密度を示す。模型個体の密度としては製鋼スラグ（密度 $\rho=3.44\text{g/cm}^3$ ）の密度を基準とし、参考として約 2 倍の密度の模型も用いた。粘土スラリーの含水比は、130%、140%、145%、150%、155%、160% の 6 条件とした。図-1 に各含水比における試験前と試験後におけるベーンせん断強度の測定例を示す。図のように、含水比の条件が同じでも試験ごとにベーンせん断強度の値にはばらつきがあった。この原因としては試験時の粘土の攪拌の程度の違いなどが考えられる。せん断強度の値は含水比 130% のときに $0.32\text{ kPa}\sim 0.44\text{ kPa}$ 、160% のときは $0.10\text{ kPa}\sim 0.22\text{ kPa}$ であった。

写真-2、図-2 に試験装置と試験開始時の状況を示す。実験はまず徳山港粘土に水を加えて含水比を調整し、十分に攪拌した後、ベーンせん断強度を測定した。次に、粘土スラリーを直径 110mm、高さ 130mm のプラスチック容器に入れ、模型固体を粘土スラリーの中に模型の高さ分埋め込んだ状態で沈降を開始した。模型の沈降量は模型の上に取り付けたプラスチック板の沈降量を非接触センサーで測定することにより求め、測定時間は 1 時間とした。

3. 実験結果

図-3(a)～(e) は、5 種類の模型を用いた場合のそれぞれの時間と沈降量の関係である。図のように 60 分間の沈降量の最大は 3.42mm であり（模型 5）、最小は 0.10mm であった。沈降量に大きな差があるが、時間と沈降の関係はいずれもよく類似しており、沈降は最初の 10 分間に急速に進行し、10 分経過後はほぼ安定した速度となっている。今回は沈降量の計測を 60 分間行ったが、ほとんどの場合 60 分が経過しても沈降は継続している。しかしながら沈降速度は含水比および模型の条件によって大きく異なっている。

図をみると、模型 3、4、5 ではいずれも含水比が大きくなるとせん断強度が小さいほど沈降量は大きく、含水比が小さいせん断強度が大きいほど沈降量は小さくなっている。模型



写真-1 模型個体

表-1 試験に用いた模型の寸法と密度

試験番号	幅 (cm)	奥行き (cm)	高さ (cm)	密度 (g/cm^3)
1	1.23	1.21	1.35	3.51
2	2.09	2.13	2.02	3.21
3	2.06	2.10	2.09	6.40
4	3.21	3.19	3.08	3.37
5	3.24	3.14	3.08	6.46

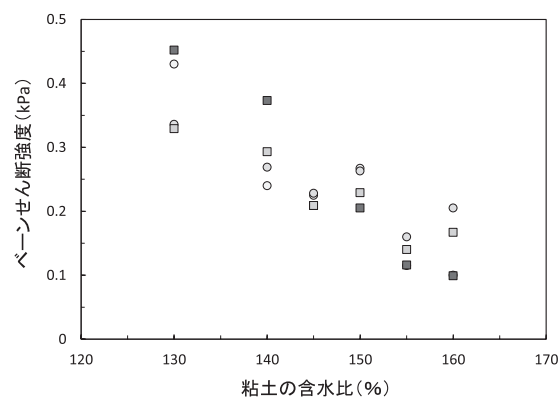


図-1 粘土スラリーのベーンせん断強度



写真-2 試験装置

1 と模型 2 では含水比と沈降量の関係が上記の逆になっている場合があるが、全体としてみると含水比すなわち粘土のせん断強度と沈降量にはほぼ一定の関係があることがうかがえる。

以上の結果より、粘土スラリー中の模型の沈降を支持力問題として検討することとする。

4. 支持力理論を用いた安全率と沈降量の関係

図-4 に支持力問題としての考え方を示した。模型の底面において模型の重量による分布荷重を考えると、分布荷重の大きさは模型重量から模型の体積分の粘土スラリーの重さを引いた重量を模型底面積で割った値となる。この分布荷重に対して、粘土スラリーの粘着力 c による模型底面における地盤支持力を考え、 $\phi=0$ のときの帯基礎の支持力係数 (Prandtl による) $N_c=5.14$ 、正方形基礎に関する形状係数 1.3 を用いると支持力は $(5.14 \times 1.3)c$ となる⁶⁾ (ここでは模型側面に働く粘着力は無視する)。以上より、支持力に関する安全率 F は次式で計算することができる。

$$F = \frac{c_{u(vane)} \times 5.14 \times 1.30}{\frac{W - W_{clay}}{A}} \quad (1)$$

ここに、 $c_{u(vane)}$: ペーンせん断強度、 W : 模型質量、 W_{clay} : 模型個体の体積分のスラリーの重量、 A : 模型個体底面の断面積である。

図-5 は底面とともに側面に働く粘着力を考慮したとき

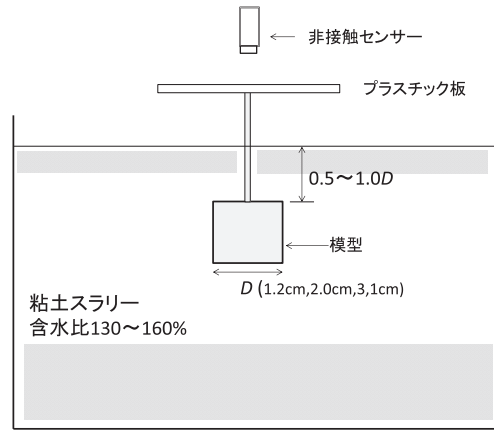
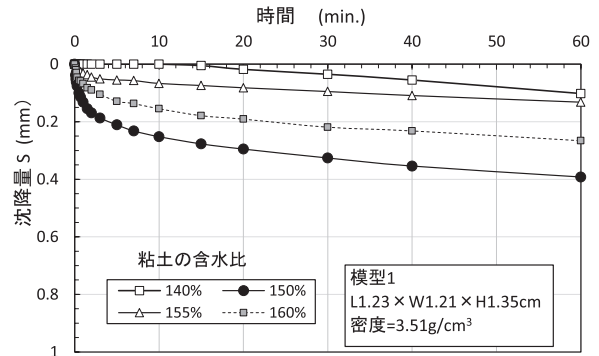
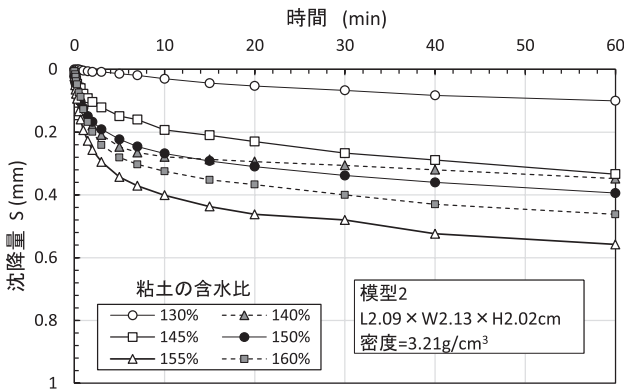


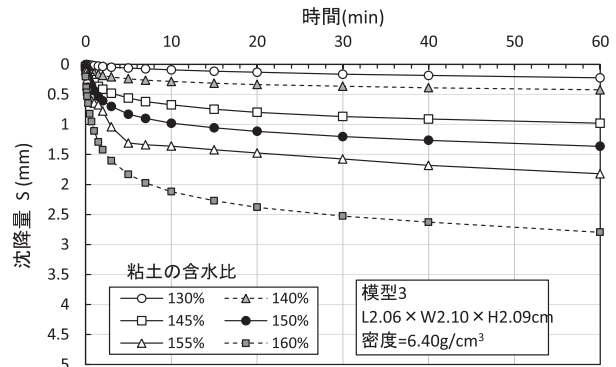
図-2 実験方法



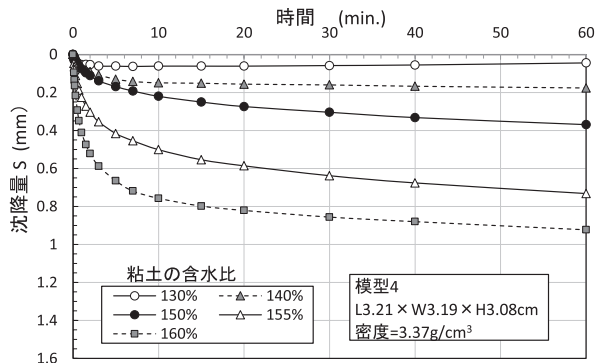
(a) 模型 1



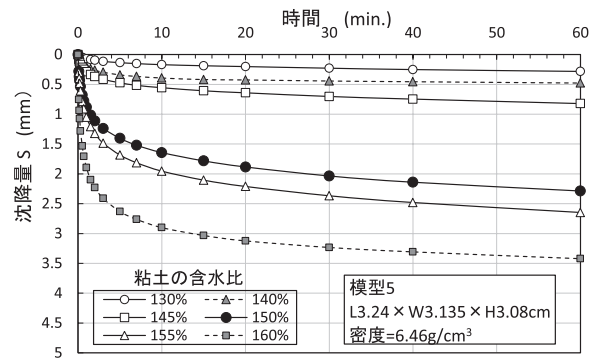
(b) 模型 2



(c) 模型 3



(d) 模型 4



(e) 模型 5

図-3 時間と沈降量の関係

の支持力の考え方である。側面に付着した粘土の粘着力により上向きの力が働いているとすると、支持力に関する安全率 F は次式ようになる。

$$F = \frac{c_{u(vane)} \times (5.14 \times 1.30 + B/A)}{\frac{W - W_{clay}}{A}} \quad (2)$$

ここに B は4つの側面の面積の合計であり、模型が立方体の場合 $B/A=4$ となる。

式(1)による安全率を計算し、断面積がほぼ $2.0\text{cm} \times 2.0\text{cm}$ である模型2および模型3について経過時間5分および60分のときの安全率と沈降量の関係を図-6に示した。図をみると、5分及び60分の経過時間において沈降量はある安全率を境に急増する傾向が見られる。そこで急増前と急増後のそれぞれにおいて安全率と沈降量の関係を直線で近似しその交点を求めた。図中の実線と破線はそれぞれ経過時間5分、60分の時の沈降量と安全率の関係を示している。図のように、経過時間5分と60分では安全率がそれぞれ1.7と2.0よりも小さくなったときに沈降量が急激に増加する傾向が見られる。すなわち、粘土スラリー中の個体の沈降を支持力問題として考えた場合、式(1)による安全率1.7~2.0が沈降に関する限界値を表している可能性がある。

同様の整理を、各辺の寸法が約 1.2cm の模型1について行ったのが図-7である。今回用いた含水比と立方体の密

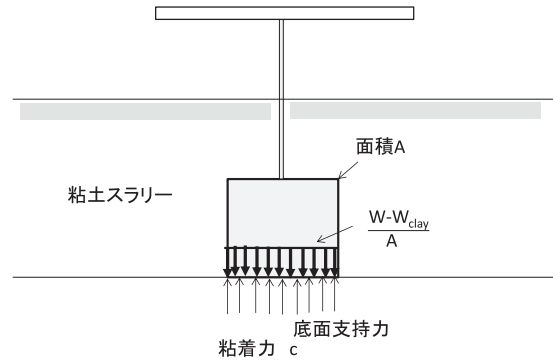


図-4 支持力の考え方（側面抵抗を無視）

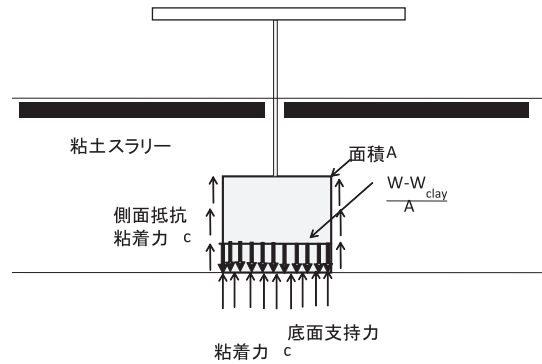


図-5 支持力の考え方（側面抵抗を考慮）

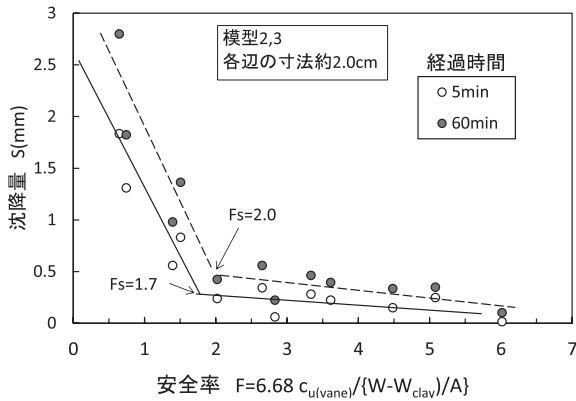


図-6 式(1)の安全率と沈降量の関係（模型2と3）

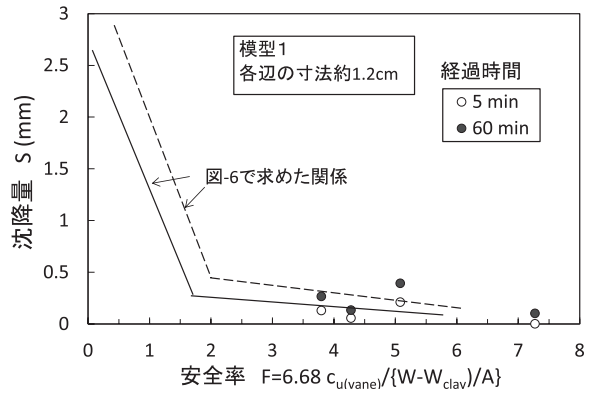


図-7 式(1)の安全率と沈降量の関係（模型1）

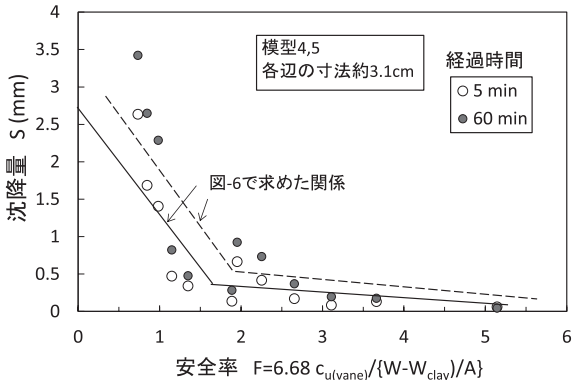


図-8 式(1)の安全率と沈降量の関係（模型4と5）

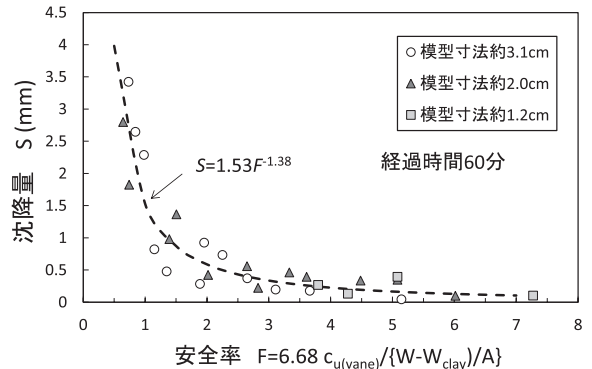


図-9 式(1)の安全率と沈降量の関係（寸法別）

度ではいずれも安全率が 3.5 以上になっているが、経過時間 5 分および 60 分における沈降量は図中に示す模型寸法約 2.0cm のときの関係を示す実線と破線の値とほぼ同程度であった。図-8 は模型寸法が約 3.1cm のときの経過時間 5 分、60 分のときの沈降量と安全率の関係である。図中には寸法約 2.0cm のときの線を示すが、両者の関係はほぼ同様となっている。

図-9 は今回用いた 3 種類の模型について経過時間 60 分の沈降量と式(1)による安全率の関係を示した。この図をみると、模型の寸法によらず、両者には比較的良好な関連がみられる。図より、沈降量が急増するのは安全率が 2.5 以下であるといえる。

次に、模型の側面に働く粘着力を考慮して求めた式(2)による安全率と沈降量の間を調査する。図-10 は、断面積がほぼ 2.0cm×2.0cm である模型 2 および模型 3 について経過時間 5 分および 60 分のときの式(2)による安全率と沈降量の間である。図-6 と同様に沈降量が急増する前と急増する後における安全率と沈降量の間を実線(経過時間 5 分)と破線(経過時間 60 分)で近似し、その交点を求めた。図をみると、沈降量は経過時間 5 分および 60 分で安全率がそれぞれ 3.3 と 4.1 よりも小さくなったときに急激に増加している。したがって、粘土スラリー中の個体の沈降を図-5 のような支持力問題として考えた場合、式

(2)による安全率では 3.3~4.1 が沈降に関する限界値になっている。

各辺の寸法が約 1.2cm の模型 1 および寸法が約 3.1cm の模型 4, 5 について同様の整理を行い、図-11 と図-12 に示した。いずれも図中には寸法約 2.0cm のときの安全率と沈降量の間を表す線を示しているが、模型の寸法が異なっても、安全率 3.5~4.0 以下になると沈降量が急増するなど、両者の関係はほぼ一致しているといえる。

図-13 は今回用いた 3 種類の模型について経過時間 60 分の沈降量と式(2)による安全率の間である。図のように、安全率と沈降量には良好な関連がみられ、式(2)による安全率を用いると沈降量が急増するのは安全率が 4.5 以下である。

図-9 に示す式(1)による安全率と沈降量、図-13 に示す式(2)を用いた安全率と沈降量との近似曲線と相関係数を求めると、それぞれ以下ようになった。

$$S = 1.53F^{-1.38} \quad (R^2=0.777) \quad (3)$$

$$S = 3.90F^{-1.52} \quad (R^2=0.763) \quad (4)$$

ここに、 S ：模型の沈降量、 F ：式(1)で定義した安全率である。

以上のように、いずれの式による安全率を用いても相関係数はほぼ同じであった。

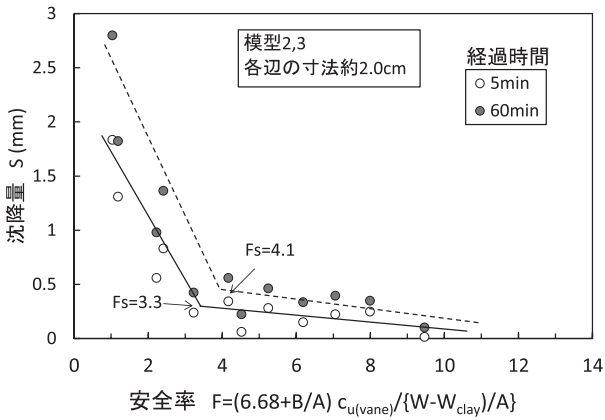


図-10 式(2)の安全率と沈降量の間 (模型 2 と 3)

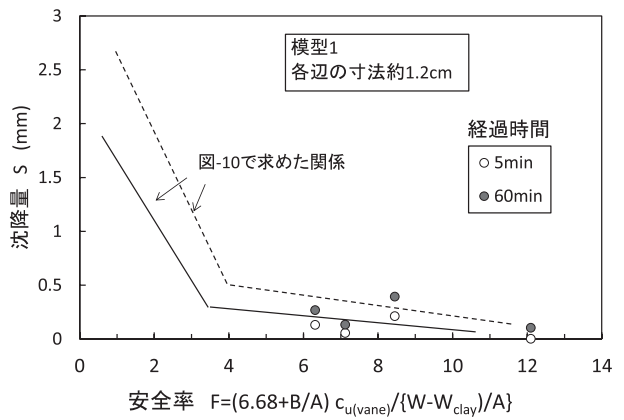


図-11 式(2)の安全率と沈降量の間 (模型 1)

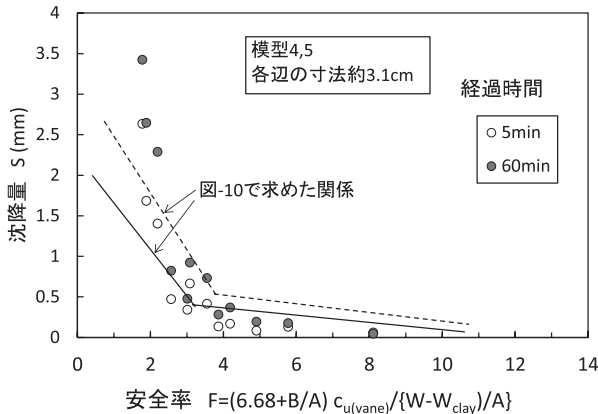


図-12 式(2)の安全率と沈降量の間 (模型 4 と 5)

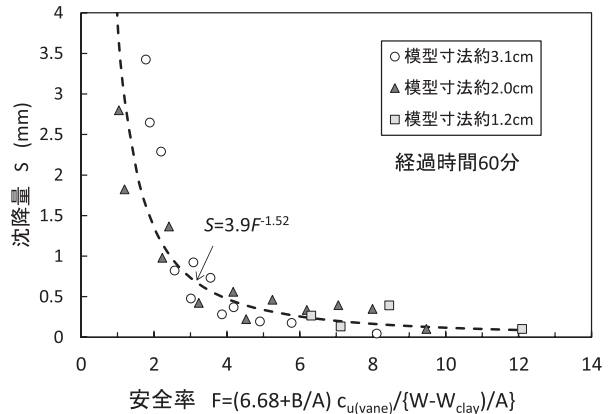


図-13 式(2)の安全率と沈降量の間 (寸法別)

ここで、式(1)および式(2)で沈降量が急増するときの安全率が1よりもかなり大きい理由について考察する。本解析に用いた強度はベーンせん断強度であり、ベーンを回転したときのトルクの最大値から求めている。したがって、ベーンせん断強度は粘土が大きく変形したときに発現する強度であるので、模型と接している粘土層の変形を考慮すると、図-4、図-5の支持力問題として考えたときに発現している粘着力がベーンせん断強度よりも小さくなっている可能性が考えられる。安部らは、波浪作用下の底泥の安定を波浪によって発生する円弧すべり解析によって評価できることを報告している⁷⁾が、この場合も液性限界よりも大きい粘土層のせん断強度は、ベーンせん断強度の1/6程度であるとしている。これを、スラリー状の粘土の強度を用いて安定問題などの力のつり合いに用いる場合、問題の種類によってベーンせん断強度よりも小さい強度を用いる必要があることを示していると考え、今回の実験結果においても同様の解釈ができる可能性がある。スラリー状の粘土におけるせん断強度をどのように考えるかについては、今後さらに検討が必要である。

5. まとめ

海面に設置する管理型廃棄物処分場では、透水性の高い海底面を遮水するため、スラリー状の遮水地盤材料が敷設される場合がある。このような遮水地盤材料では処分場の内外水位差によって上向きの揚圧力が作用するため、レキや製鋼スラグを混合して単位体積重量を大きく調整することができることが望ましい。本研究は、スラリー状の粘土に固体粒子を混合した場合の材料分離特性を検討するための基礎試験として、粘土スラリー内での固体粒子の沈降特性を実験により検討した。

粘土の含水比を変化させ、寸法1.2cm～3.1cmの立方体の模型を用いた沈降実験を実施した結果、固体粒子の沈降速度が急増する点は、粘土地盤における支持力問題として求めた安全率と良好な関係を示すことがわかった。安全率の求め方として粒子側面に作用する粘着力を考慮する場合と考慮しない場合の2通りを用いたが、いずれの安全率も沈降特性と明らかな関連があり、前者の安全率では2.5以下、後者では4.5以下になったときに沈降量は急増した。

以上の結果は、粘土スラリー内にレキや製鋼スラグなど粒径の大きい粒子が存在する場合、これらの粒子が粘土スラリー内を沈降し、結果として下部の粒子と上部の粘土層が分離する現象と関連づけることができると考えられる。すなわち、沈降量急増点よりも安全率が小さい場合は粒子

はスラリー内を沈降して下部に堆積し上部に粘土スラリーが移動する結果分離が発生し、一方、沈降量急増点より安全率が大きい場合は、粒径の大きい粒子は粘土スラリー内に安定して留まり分離はしないと推定される。ただし、これらは推定であり、さまざまな条件で固体粒子を粘土スラリーと実際に混合したときの分離の有無と本研究で定義した2つの安全率との関連性を確認することは今後の課題である。

謝辞

本研究は、環境省による平成24年度、25年度環境研究総合推進費(補助金)課題名「放射能で汚染された廃棄物を対象とした海面最終処分場に関する研究」によって実施したものである。協力いただいた関係各位に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡部要一, 土田孝, 斉藤邦夫, 山田耕一, 上野一彦: 粘土系遮水材料における微視構造と透水係数の関係, 第47回地盤工学シンポジウム, pp.381-388, 2002.
- 2) 山田耕一, 鶴飼亮行, 伊野同, 土田孝, 渡部要一: 変形追従性材料を用いた遮管理型廃棄物海面処分場の遮水工法に関する実海域実証実験, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.177-182, 2003.
- 3) 上野一彦, 山田耕一, 渡部要一: 管理型海面処分場に用いる浚渫粘土を主材料とした土質遮水材料の提案, 土木学会論文集 G, Vol.64, No.2, pp.177-186, 2008.
- 4) 日経BP: 日経コンストラクション, No.411, pp.30-34, 2006.
- 5) 川崎隆広, 山田耕一, 上野一彦: 海面処分場における土質遮水材料の施工事例, 地盤と建設, Vol.27, No.1, 地盤と建設, pp.187-194, 2009.
- 6) 山口柏樹: 土質力学(全改訂), 技報堂出版, pp.257-272, 1984.
- 7) 安部太紀, 土田孝, 熊谷隆宏: 波浪作用下における軟弱地盤の安定性について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, p.I_711-I_715, 2012.

(2014年6月24日 受付)