

繊維片を混合した浚渫粘土の圧密特性

新舎 博¹, 熊谷 隆宏¹, 渡部 要一²

1 五洋建設(株)・技術研究所

2 (独)港湾空港技術研究所・地盤研究領域

概 要

浚渫粘土の圧密を促進するための方法として、透水係数の高い繊維片を混合した場合の圧密特性の改善効果を調べた。混合した繊維片は園芸用に市販されているピートモス(繊維の平均長:0.45mm)である。浚渫粘土に対して繊維片を乾燥質量比で20~40%混合した試料を作製し、段階載荷圧密試験、土槽圧密実験を実施した。土槽圧密実験の結果によると、粘土層の底面に負圧を作用させたケース(層厚1m)では、30%混入時において、繊維片混合粘土の圧密係数 c_v が原料粘土の6~13倍になるなど、著しい圧密特性の改善効果が得られた。本実験結果を用いて、現場施工を想定した鉛直ドレーンによる圧密改良仕様を試算した結果、繊維片の混合により、ドレーン間隔を大幅に拡げることが可能であるなどの実用性が認められた。

キーワード: 圧密特性, 繊維片, 浚渫粘土, 土槽実験, 圧密解析

1. はじめに

浚渫土を処分した埋立粘土地盤を圧密改良する際には、通常、鉛直ドレーンを打設した後、排水層を確保して圧密荷重を載荷することが多い。この場合には、浚渫土の投入後にドレーンの打設が不可欠であるが、仮に予め粘土に透水性の良い材料を混合することによって粘土の圧密特性そのものを著しく改善することができれば、ドレーンの打設が不要になる、あるいはドレーンの打設間隔を拡げることができるという利点を期待できる。なお、浚渫粘土は高含水比状態にあり、せん断強度が非常に小さいことから、圧密荷重として、偏差応力による地盤の破壊を生じさせないように負圧を盛土の代わりに作用させることもある。負圧による圧密は真空圧密と呼ばれている。

土に混合する材料として、短繊維材料の適用が試みられている。通常の場合の混合目的は、土および地盤の力学特性を補強することであり、粘着力がほとんどない砂質系材料に粘着性を付加させるために混合されることもある。この目的において使用される材料は、長さが数十~数百mmのポリエステル¹⁾、ナイロン繊維²⁾、あるいはグラスファイバー³⁾などである。しかしながら、これらの材料は、引張強度は大きいものの、面内透水係数はほぼゼロであり、粘土の透水性の改善に利用できるものではない。粘土に混合する透水性の良い材料として、産業廃棄物の種類から選択すると、紙くず、木くず、繊維くずなどが挙げられる。これらの平成20年度の排出量⁴⁾は、それぞれ1,383千t(産業廃棄物全体の0.3%)、6,262千t(同1.6%)および74千t(同0.8%)であり、直接の再生利用率はそれぞれ4%、2%

および3%と非常に低い。したがって、これらの材料の再生利用率をさらに向上させる必要があると考えられる。また、産業廃棄物の処理に関して、建築用材として利用できない間伐材や雑草などの有機質材料は、埋立や焼却処分がなされており、運搬や焼却の都合上、これらの材料を細かく裁断してチップ状⁵⁾(以下、繊維片という)にして処分することも行われている。

一方、浚渫粘土に関しては、航路の増深やシルテーション対策などの目的で、年間約2,000万 m^3 の浚渫がなされている。浚渫した粘土は、護岸が閉め切られた後には幾分加水して処分場まで管路輸送することが一般的である。最近、この管路輸送の間にセメントスラリーを効率的に混合して浚渫土を固化処理する技術、すなわち管中混合固化処理工法⁶⁾が開発されており、この方法を利用すると、空気圧送船のホッパー部に繊維片を投入することにより、繊維片と浚渫土の効率的な混合が可能と考えられる。

繊維片を多く含む自然堆積粘土としては、泥炭がある。泥炭の圧密係数 c_v は10~450 cm^2/day の範囲にあり⁷⁾、繊維片を多く含有するほど、 c_v が大きくなる傾向がある。

本文では、浚渫粘土に繊維片を混合して、繊維片混合粘土(以下、F粘土)の圧密特性を調べ、繊維片の有効利用の可能性について考察した。以下では、2章でF粘土の圧密特性に関する実験方法、3章で実験結果、4章で一次元圧密解析、5章で実地盤への適用性についての考察をそれぞれ記述する。

2. 実験方法

粘土の圧密特性を把握する際に、最も一般的な方法は段階荷重による圧密試験 (JIS A 1217) を実施することである。この試験は直径 6cm×高さ 2cm の供試体を用いるが、F 粘土の圧密特性を調査する際には、排水距離 (両面排水条件より、排水距離は 1cm) に比べて長い繊維片を混合すると、長い繊維片が鉛直ドレーンのように機能し、排水促進の影響が顕著に表れて繊維片混合の影響を圧密特性として正確に把握できない恐れがある。

そこで、繊維片として、木材片、雑草などを含めて比較検討した結果、比較的容易に材料を入手でき、品質も安定しているピートモス (peat moss) を用いることにした。ピートモスは、ミズゴケ類などの蘚苔類、アシ、ヨシ、スギ、ヌマガヤ、ヤナギなどの植物が腐植化した土 (泥炭と呼ばれる) を脱水、粉碎、選別したものであり、園芸用の保水材として広く市販されているものである。実験では写真 1 に示す褐色系ピートモスを使用した。このピートモスのふるい目と通過質量百分率の関係を図 1 に示す。なお、図 1



写真 1 褐色系ピートモス

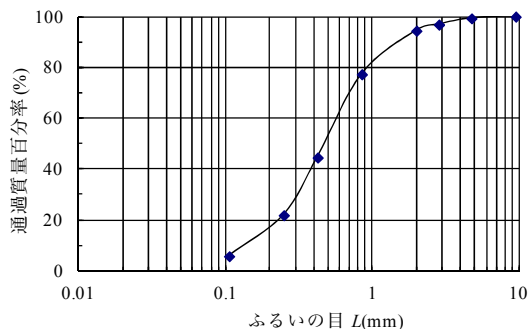


図 1 ピートモスの通過質量百分率

は繊維片群をできるだけほぐしながら、土の粒度試験 (JIS A 1204) で求めたものであり、繊維片を 1 本ずつ区分して、その長さの分布を求めたものではない。図 1 によると、ピートモスは最大繊維長が約 10mm で、平均繊維片長 (50% 通過質量百分率) が 0.45mm であることがわかる。写真 2 は、乾燥した繊維片の顕微鏡写真 (キーエンス製: VH-6300) である。乾燥した繊維片は水に触れると膨張するが、不規則な形状と長さを持ち、芯の部分には大きな通水部を持つことがわかる。



写真 2 繊維片の顕微鏡写真

ピートモスの圧密試験時の含水比 (JIS A 1203) は 100% であり、強熱減量 L_i は 99.1% であった。実験は、まず、基本試験として段階荷重圧密試験を実施し、次に、土槽実験として、自重圧密と真空圧密実験を実施した。以下では、実験の方法について述べる。

2.1 室内基本試験

1) 試料の作製

試料の作製にあたり、浚渫粘土として表 1 に示す物理特性を有する福山港海成粘土を用いた。この粘土は粘土分が 60.4%、自然含水比が 117.3%、強熱減量が 9.1% である。F 粘土の作製方法は、安定処理土の締固めをしない供試体作成方法 (JGS 0821-2009) に準じた。すなわち、海成粘土とピートモスを容器に入れ、ミキサ (ケンミックス KM-800, 240rpm) で 10 分間攪拌して作製した。圧密速度は塩分濃度の影響を受けるが、脱塩は実施していない。

F 粘土のピートモス配合率 β は、(1) 式で定義した。

$$\beta = m_f \times 100 / (m_f + m_s) \quad (1)$$

ここに、 m_f : 繊維片の乾燥質量、 m_s : 粘土の乾燥質量であ

表 1 土の物理特性

項目	土粒子密度 γ_s (g/cm^3)	コンシステンシー特性			強熱減量 L_i (%)	pH	粒度組成		
		液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_P (%)	塑性指数 I_p			砂礫分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)
福山港粘土	2.682	121.3	40.9	80.4	9.1	8.16	6.0	33.6	60.4
F粘土20	2.328	113.2	46.3	66.9	27.9	6.02	13.1	33.9	53.0
F粘土30	2.204	102.5	47.4	55.1	37.6	4.88	13.0	25.3	62.7
F粘土40	2.100	106.4	50.0	56.4	45.3	4.31	18.1	16.2	65.7

る。

β を 20%, 30% および 40% に調整した F 粘土の物理特性を表 1 に示す。粘土のみと F 粘土のコンシステンシー特性との比較から、ピートモスを混合すると液性限界 w_L が低下し、塑性限界 w_p が増加する傾向があることがわかる。土の pH は、福山港海成粘土が 8.2, F 粘土が 4.3~6.0 である。ピートモスの pH が 3.6 であることから、ピートモスの混合量を多くすると、pH は低下する。F 粘土の粒度組成は、JIS A 1204 で求めた。粒度組成は、砂が 13~18% であり、ピートモスの混合量が増加すると、シルト分が減少し、粘土分が増加する傾向がある。粘土分が増加するのは、沈降試験の際に分散剤として過酸化水素水を添加するが、その際に、ピートモスに付着していた粘土分が分離して加算されたものと考えられる。なお、沈降試験において、ピートモス(繊維片)はそのほとんどが水面に浮かんでいた。

2) 段階荷重圧密試験

段階荷重圧密試験は、JIS A 1217 の規格に従って実施した。試験は、ピートモスをそのまま混合したもの(基本試験 1: 混合量の影響試験)と、ふるい目で分けし、繊維長の相違が圧密速度に及ぼす影響についても調査した(基本試験 2: 繊維長の影響)。

2.2 土槽実験

1) 実験土槽

実験土槽は、幅 30cm×長さ 150cm×高さ 120cm の矩形土槽と直径 30cm×高さ 120cm の円筒土槽を用いた。図 2 に、実験土槽を示す。実験は屋外で実施した。

矩形土槽実験は負圧作用時の圧密挙動を調べるためのもので、土槽の底面に幅 94mm×厚さ 3.9mm のプラスチックボードドレーン材 (PBD) に排水ホースを取り付けたキャップ付ドレーン材 (写真 3) と珪砂 6 号による 15cm 厚の砂層を置き、その上に F 粘土を投入して、キャップ付ドレーン材を通じて F 粘土に負圧を载荷した。円筒土槽実験は、負圧作用なしの圧密挙動を矩形土槽実験の結果と比較するためのもので、F 粘土を入れ、そのまま放置して自重圧密沈下を測定した。

2) F 粘土の初期状態

土槽実験に使用した試料は、F 粘土 20 と F 粘土 30 である。F 粘土の初期状態は、土と繊維片が材料分離しないことと、流動性を持たせて供試体を作製しやすくすることを考慮して、100~150mm 程度のフロー値 f を確保することにした。ここに、フロー値は直径 80mm×高さ 80mm の円筒容器内に試料を入れ、容器をゆっくり持ち上げた際の試料の拡がり幅を示している (JHS A 313)。

図 3 に、含水比とフロー値の関係を示す。試料の初期状態は、材料分離を生じないように、F 粘土 20 は初期含水比 w_0 を 335% ($w_0=2.96 \times w_L$, $f=144\text{mm}$)、および F 粘土 30 は $w_0=466\%$ ($w_0=4.55 \times w_L$, $f=114\text{mm}$) とした。

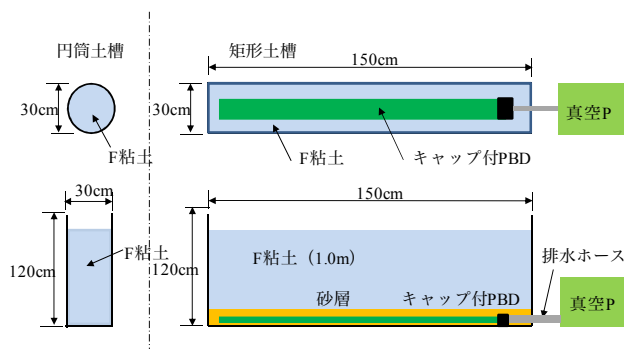


図 2 実験土槽

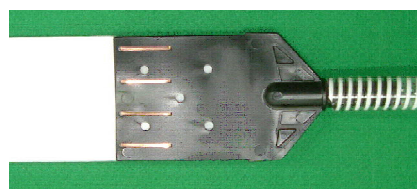
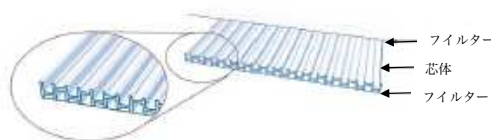


写真 3 ドレーンとキャップ付ドレーン

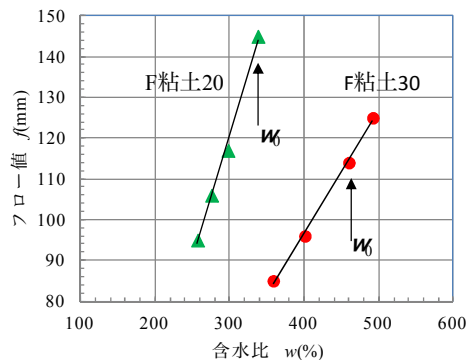


図 3 F 粘土の $w \sim f$ 関係

3. 実験結果

3.1 基本試験 1: 混合量の影響

本節では、購入したピートモスをそのまま混合した試料に対する試験結果を示す。段階荷重圧密試験で得られた間隙比 e と圧密圧力 $\log p$ の関係を図 4 に示す。繊維片の混合量を増やすと、同一の p に対する e が増加し、圧縮指数 C_c が増加した。具体的には、 $p=40\text{kN/m}^2$ において、粘土のみで $e=2.20$, F 粘土 20 で 2.76, F 粘土 30 で 3.76, F 粘土 40 で 4.71 となり、粘土のみに対する F 粘土の体積比 ζ を (2) 式で求めると、その値はそれぞれ 1.14, 1.49, 1.79 となる。すなわち、繊維片を混合すると、粘土の体積が大きくなる増加することがわかる。

$$\zeta = (1 + e) / (1 + e_0) \quad (2)$$

ここに、 e は F 粘土の間隙比、 e_0 は粘土のみの間隙比である。

図 4 より C_c を求めると、粘土のみの場合の 0.95 から、F 粘土 20 で 1.38、F 粘土 30 で 2.12、F 粘土 40 で 2.67 と増加し、除荷時の膨張指数 C_s も、 C_c と同様に繊維片が多くなるほど増加する傾向がある。

圧密係数 c_v と平均圧密圧力 p の関係を図 5 に示す。 c_v は、粘土のみが最も小さく、繊維片を混合すると大きく増加する。例えば $p \leq 10 \text{ kN/m}^2$ では、粘土のみに対する F 粘土 40 の c_v の比 ($= c_v / c_{v0}$) は、およそ 100 倍であることがわかる。 $p > 10 \text{ kN/m}^2$ になると、 c_v の値は、粘土のみは p の増加につれて次第に増加するのに対して、繊維片を混入する

と、次第に減少する傾向となった。

以上の結果から、繊維片を混合すると、低応力域の c_v は著しく増加するが、有効応力の増加に伴って c_v は次第に低減する結果が得られた。

3.2 基本試験 2：繊維長の影響

本節では、ピートモスの繊維長を変えた試料の圧密特性について、考察する。図 6 は、F 粘土 20 と F 粘土 30 について、段階荷重圧密試験の結果を示している。なお、図 6 内には、図 4 と図 5 に示した繊維片長を区分けしていない試料の試験結果 (F 粘土 20、F 粘土 30 と表記) も合わせて示した。 $e \sim \log p$ 関係は、F 粘土 20 および F 粘土 30 とともに繊維長が長くなるほど、同一の p に対する e が大きくなり、かつ、 c_v も増加する傾向がある。また、両 F 粘土とも、

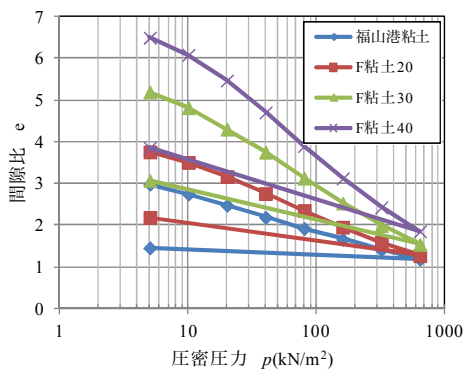


図 4 $e \sim \log p$ 関係

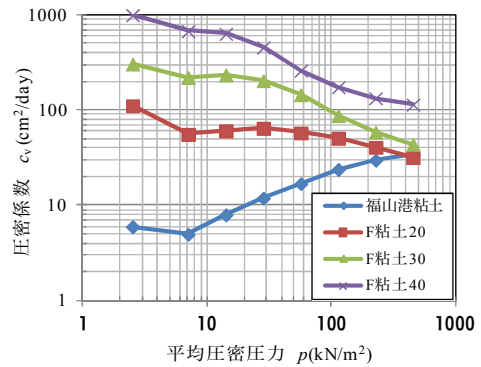
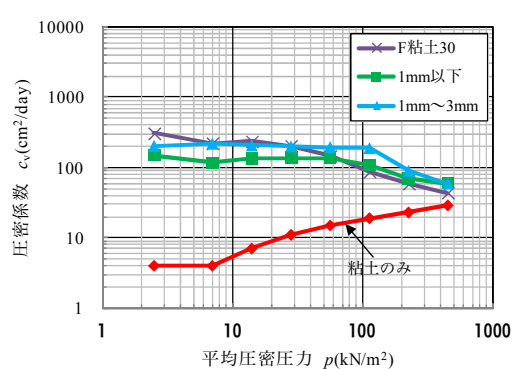
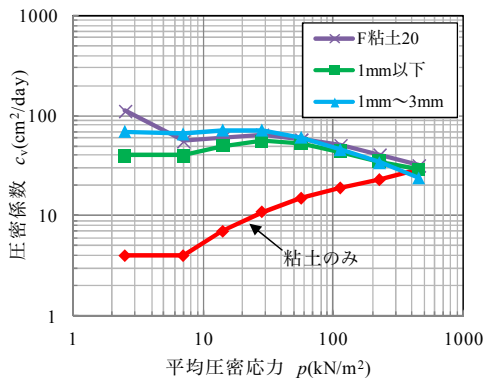
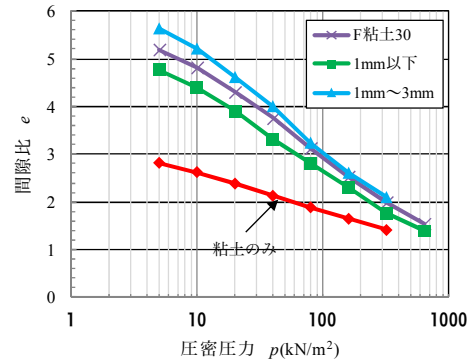
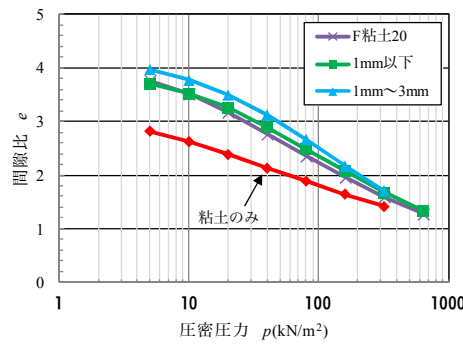


図 5 $\log c_v \sim \log p$ 関係



(a) F 粘土 20

(b) F 粘土 30

図 6 $e \sim \log p$ および $\log c_v \sim \log p$ 関係

高応力域において、 c_v の増加が見られなくなる傾向がある。具体的には、 $p=10\text{N/m}^2$ において、両F粘土の $c_{v(1\sim 3\text{mm})}/c_{v(1\text{mm以下})}$ はおおよそ1.5~2.0であり、 c_v は粘土の c_{v0} の10~50倍程度に増加していることがわかる。

3.3 土槽実験

矩形土槽実験と円筒土槽実験の結果を以下に示して考察する。

1) 負圧の作用

キャップ付ドレーン材の先端において、間隙水圧計で測定した作用負圧の結果を図7に示す。負圧はF粘土20とF粘土30とも、実験開始から -60kN/m^2 以上の負圧が継続して作用していた。しかしながら、約110時間経過後になると、F粘土が等方的に収縮して側方にも変形が生じ、F粘土と土槽内側壁面との間の隙間から空気を吸引するようになったため、負圧の維持が困難となった。本論文の本来の主旨ではないが、天日乾燥の影響を把握することを目的に、実験はそのまま放置して継続した。

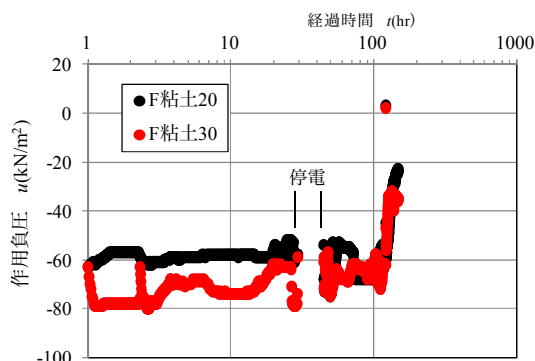


図7 矩形土槽実験における作用負圧

2) 時間～沈下曲線

時間～沈下曲線を図8に示す。負圧作用あり（矩形土槽実験）と自重のみ（円筒土槽実験）を比べると、負圧作用がある場合は、沈下速度が速く、負圧作用停止時点での沈下量はF粘土20で約19cm、F粘土30で約27cmであった。一方、自重のみの場合は、沈下速度が遅く、矩形土槽実験の負圧作用停止時点に相当する時刻において、F粘土20で約2cm、F粘土30で約5cmであった。

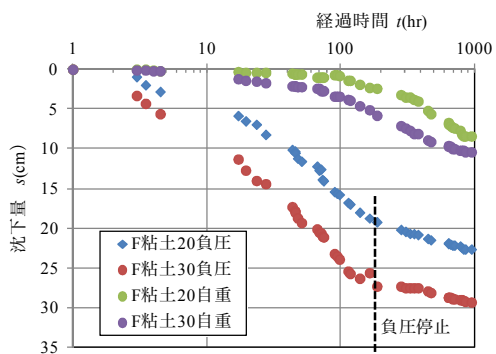


図8 時間～沈下曲線

3) 含水比分布

F粘土の含水比分布を測定した。測定場所は幅30cmの中央部と長さ150cmを20cm間隔毎に区切った交点である。サンプラーは直径3cmの亚克力円筒を用い、固定ピストン式シンウォールサンプラーによる土試料の採取方法(JGS 1221)に準じて試料を採取した。含水比分布の変化

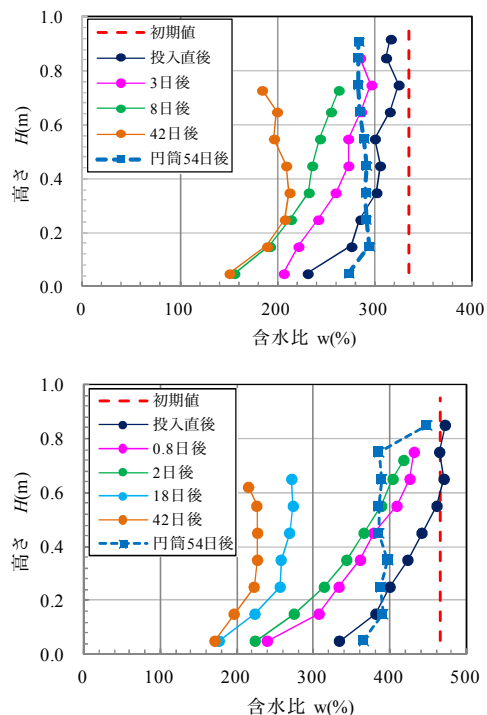


図9 含水比分布

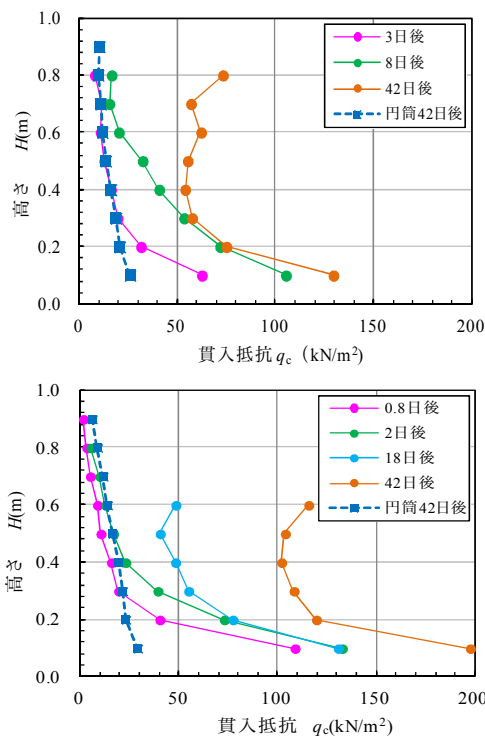


図10 コーン貫入抵抗

を時刻ごとに図9に示す。負圧作用中においては（負圧停止は約6.3日後）、F粘土20およびF粘土30とも、含水比は深部で著しく低下する傾向がある。その後、F粘土20は42日後、F粘土30は18日後以降、土層上部に、天日乾燥による含水比の低下が認められる。一方、円筒実験では、自重圧密と表層からの乾燥収縮の影響が少しずつ現れていることなど、含水比の分布は著しく異なっている。

4) コーン貫入抵抗

せん断強さの深度分布の指標とするために、コーン貫入試験を実施した。測定場所は、含水比測定地点から約10cm離れた場所であり（試験の順番は、先にコーン貫入試験を実施し、後でサンプリングを実施した）、幅30cmの土槽を跨ぐように足場を設け、コーン貫入試験は電気式静的コーン貫入試験方法（JGS 1435）に準じて実施した。コーン貫入抵抗 q_c の結果を図10に示す。負圧作用中は粘土層の底面付近の q_c が大きくなり、負圧停止後は乾燥の影響を受けて土層上部の q_c が増加した。負圧を作用させない円筒実験の結果と比べると、含水比分布と同様、負圧作用の有無により q_c の分布に顕著な差があることがわかる。

4. 一次元圧密解析

一次元圧密解析プログラム「CONAN」⁸⁾⁹⁾を用いて沈下解析を行った。このプログラムは圧密中の層厚の変化を考慮することが可能であり、かつ、粘土の応力～ひずみの非線形性、および透水係数の応力依存性を考慮することができる。圧密解析を実施した目的は、厚さ2cmの段階荷重圧密試験で求めた圧密特性が、より層厚の大きい地盤に適用できるかどうかを調べることである。F粘土は繊維片を多く含んでおり、通常の均質な粘土とは異なる。段階荷重圧密試験で求めた圧密特性、特に圧密係数 c_v が、土槽実験の沈下フィッティングで求めた c_v と大きく異なる場合には、実地盤への適用にあたっては段階荷重圧密試験で求めた c_v に適切な補正が必要であると考えられる。

1) 解析モデル

解析モデルを図11に示す。解析では、1m厚さの粘土層

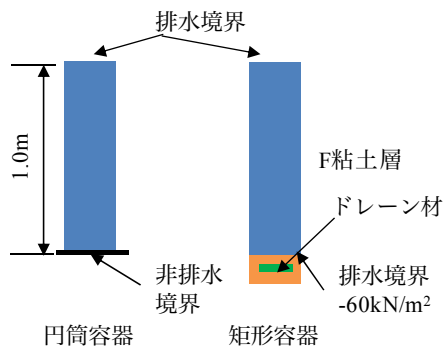


図11 解析モデル

表2 入力土質定数

項目	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	初期間隙比 e_0	$\log f = a \times \log p + b$	$\log k = c \times \log p + d$
F粘土20	2.328	7.8	a=-0.135 b=0.767	c=-0.930 d=-2.290
F粘土30	2.204	10.3	a=-0.160 b=0.898	c=-1.100 d=-1.570

k : m/day、 p : kN/m²

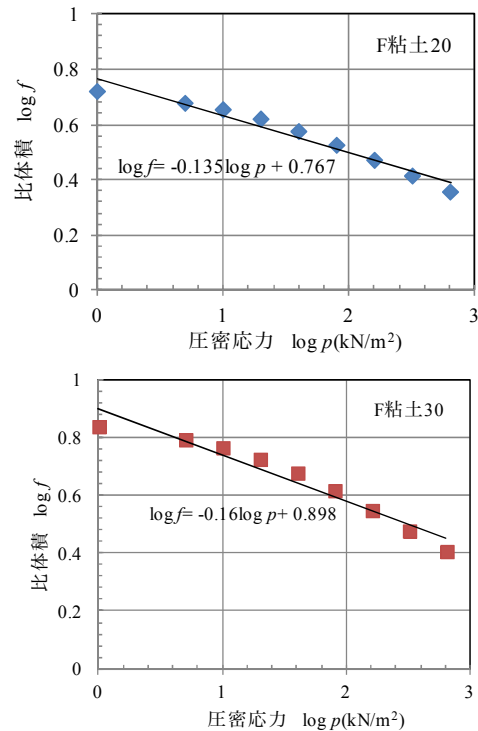


図12 $f \sim p$ 関係

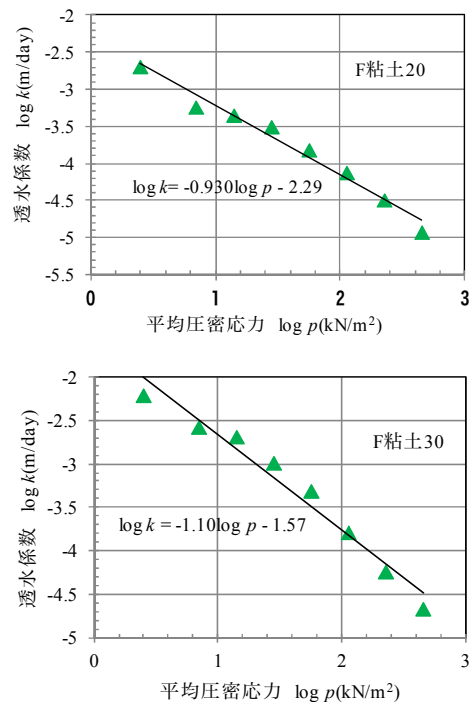


図13 $k \sim p$ 関係

を 10 分割して、時間～沈下曲線と、任意時刻における層内の間隙比分布を算出した。負圧を作用させた矩形土槽実験の排水条件は、粘土層下部を-60kN/m²の負圧作用状態で排水、粘土層表面を排水とした。また、粘土の自重のみが作用する円筒土槽実験の排水条件は、下部を非排水、粘土層表面を排水とした。

解析は、F 粘土 20 と F 粘土 30 において、負圧作用と自重のみの計 4 ケースを実施した。

2) 入力土質定数

解析における初期状態は、F 粘土 20 で $e_0=7.8$ ($w_0=335\%$)、F 粘土 30 で $e_0=10.3$ ($w_0=466\%$) とした。圧密定数は段階荷重圧密試験結果から求めた比体積 f ($f=1+e$) ~ 圧密圧力 p 関係、および透水係数 k ~ 平均圧密圧力 p 関係から設定した。圧密試験結果を、それぞれ図 12 と図 13 に示し、土質定数の入力値を表 2 に示す。

3) 時間～沈下曲線

実験と解析の時間～沈下曲線を図 14 に示す。F 粘土 20 と F 粘土 30 の矩形土槽実験（負圧作用）の結果と解析結果を比べると、圧密試験で求めた透水係数 k を用いると解析の沈下が早くなり、透水係数を 0.1 倍に低減すると、両粘土とも、実測の沈下曲線とよく一致する解析結果が得られた。また、円筒土槽実験（自重のみ）の結果と解析結果を比べると、透水係数を 0.01 倍に低減すると、実測の沈下曲線とよく一致する解析結果が得られた。

図 15 は、F 粘土 20 と F 粘土 30 について、実測と解析の間隙比 e の深度分布を比較して示したものである。矩形土槽実験では実測と解析の沈下曲線が比較的良好一致した $0.1k$ 、円筒土槽実験では $0.01k$ の解析結果を示している。F 粘土 20 の矩形土槽実験では、3 日後において、実測の方が解析よりも幾分圧密が遅れる傾向にあるが、間隙比 e の分布はよく類似している。また、F 粘土 30 の矩形土槽実験では、3 日後において、実測と解析は比較的良好一致している。一方、円筒土槽実験では、天日乾燥の影響を受けているため、天日乾燥の影響を考慮できない解析との比較はあまり良い一致が見られないが、54 日後において、F 粘土 20 および F 粘土 30 とともに、粘土層下部の間隙比 e の分布は両者で類似していると言える。以上より、解析での透水係数を低減すると、実測と解析の沈下および e の分布は、概ね一致すると言える。

4) 圧密速度に関する考察

実測に解析の沈下曲線をフィッティングして求めた透水係数 k を、段階荷重圧密試験の結果と比較して以下に考察する。なお、圧密係数 c_v と k の間には(3)式の関係があり、総沈下量に関する体積圧縮係数 m_v は変化しないことから、 c_v と k は比例する。そこで、ここでは k ではなく、 c_v を用いて、圧密速度に関して考察する。

$$c_v = k / (m_v \times \gamma_w) \tag{3}$$

ここに、 γ_w は間隙水の単位体積重量である。

圧密沈下速度は、(4)式で示される平均圧密圧力 p に対する圧密係数 c_v で評価することができる。

$$P = (p_0 \times p_f)^{0.5} \tag{4}$$

ここに、 p_0 は初期有効応力、 p_f は圧密荷重である。

表 3 は、実験における初期有効応力 p_0 と圧密過程における平均圧密圧力 p を求めた結果である。ここに、円筒土槽実験は、圧密後の有効応力が 0.5m 深度での土被り圧になると設定した。また、矩形土槽実験は 0.5m 深度での土被り圧と作用負圧の和になると設定し、作用負圧は粘土層表面が零、粘土層底面が-60kN/m²の三角形分布に近似できることから、粘土層中央部の有効応力増分を 30kN/m² とした。得られた計算結果は、表 3 に示す通りであり、粘土の p_0 は 0.109~0.122kN/m² となり、円筒土槽実験の p は 0.24~0.30 kN/m² (平均 0.27kN/m²)、矩形土槽実験の p は 1.82~1.94 kN/m² (平均 1.88kN/m²) となった。

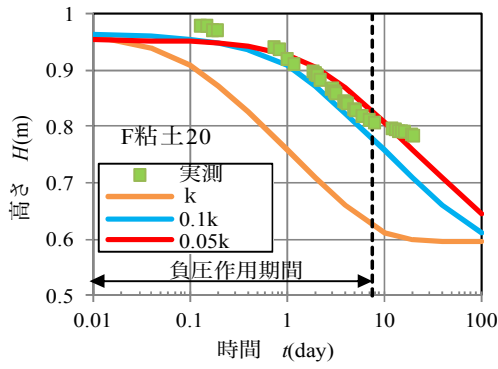
表 3 実験における平均圧密圧力

土質	初期 比体積 f_0	初期有 効応力 p_0 kN/m ²	円筒土槽実験		矩形土槽実験	
			自重力 (0.5m) p_1 kN/m ²	平均 圧密応力 $(p_0 \times p_1)^{0.5}$ kN/m ²	負圧 (-60) p_2 kN/m ²	平均 圧密応力 $(p_0 \times p_2)^{0.5}$ kN/m ²
	F粘土20	8.8	0.122	0.75	0.3	30.75
F粘土30	11.27	0.109	0.54	0.24	30.54	1.82

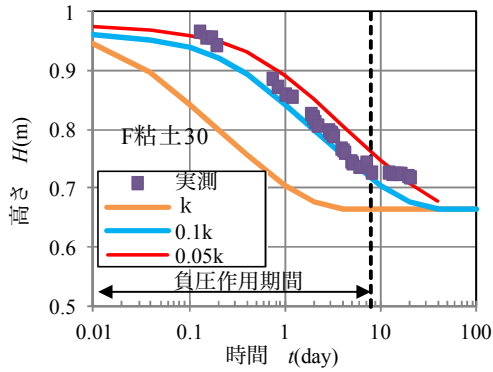
水中単位体積重量 F粘土20: 1.51kN/m³, F粘土30: 1.07kN/m³

図 16 は段階荷重圧密試験の結果であり、 $\log c_v \sim \log p$ 関係が直線であると仮定して、平均 p に対する c_v を読み取った（矢印位置）。圧密試験でこうして得た c_v と土槽実験の沈下フィッティングで得た c_v をまとめて表 4 に示す。円筒土槽実験（負圧なし）の応力レベル（平均 0.27kN/m²）において、段階荷重圧密試験で得た c_v は F 粘土 20 で 150cm²/day、F 粘土 30 で 900cm²/day であったが、沈下フィッティングで得た c_v はそれぞれ 1.5 cm²/day と 9.0 cm²/day であった（段階荷重圧密試験の c_v の 0.01 倍）。また、矩形土槽実験（負圧あり）の応力レベル（平均 1.88kN/m²）において、段階荷重圧密試験で得た c_v は F 粘土 20 で 100cm²/day、F 粘土 30 で 400cm²/day であったが、沈下フィッティングで得た c_v は、それぞれ 10cm²/day と 40cm²/day であった（標準圧密試験の c_v の 0.1 倍）。両土槽実験において、沈下フィッティングで得た c_v と粘土本来の c_v (c_{v0} と表す) の比率を求めると、F 粘土 20 で $c_v/c_{v0}=1 \sim 3.3$ 、および F 粘土 30 で $c_v/c_{v0}=6 \sim 13$ となり、繊維片を混合すると、1~13 倍の圧密促進効果が得られることがわかる。

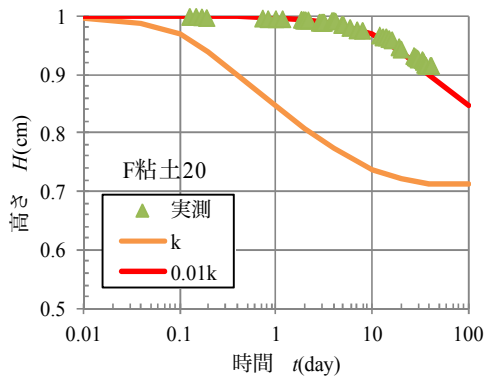
段階荷重圧密試験の c_v と土槽実験の c_v が大きく異なる



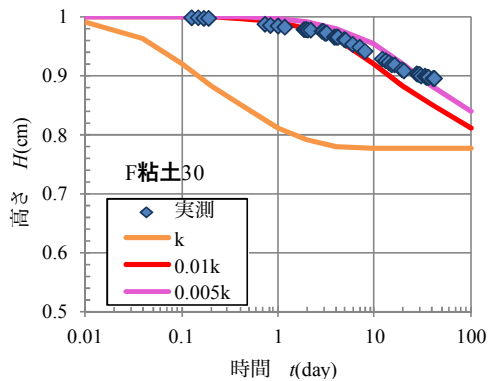
(a) 矩形土槽実験 (F粘土 20: 負圧)



(b) 矩形土槽実験 (F粘土 30: 負圧)

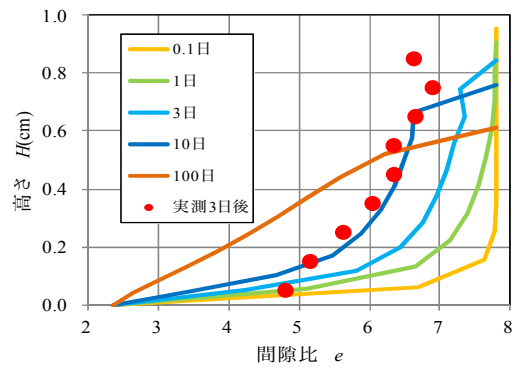


(c) 円筒土槽実験 (F粘土 20: 自重)

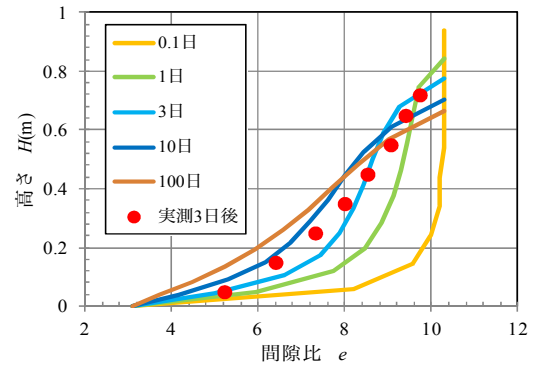


(d) 円筒土槽実験 (F粘土 30: 自重)

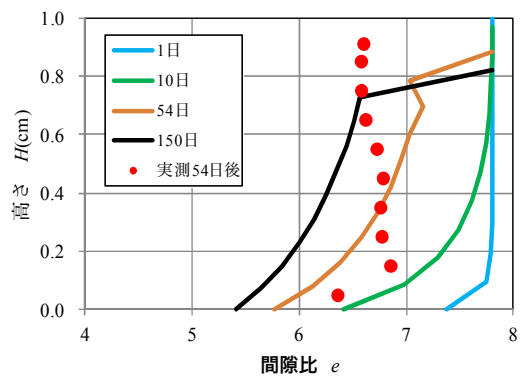
図 14 時間～沈下曲線



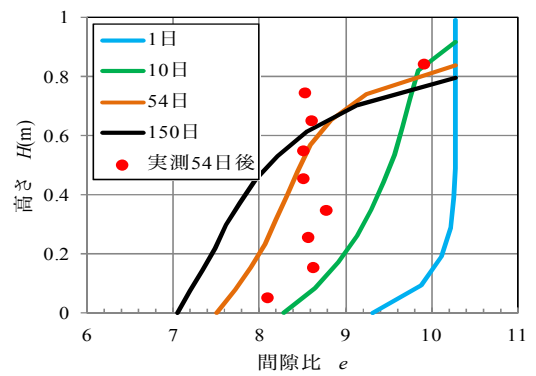
(a) 矩形土槽実験 (F粘土 20: 0.1k)



(a) 矩形土槽実験 (F粘土 30: 0.1k)



(c) 円筒土槽実験 (F粘土 20: 0.01k)



(d) 円筒土槽実験 (F粘土 30: 0.01k)

図 15 間隙比分布

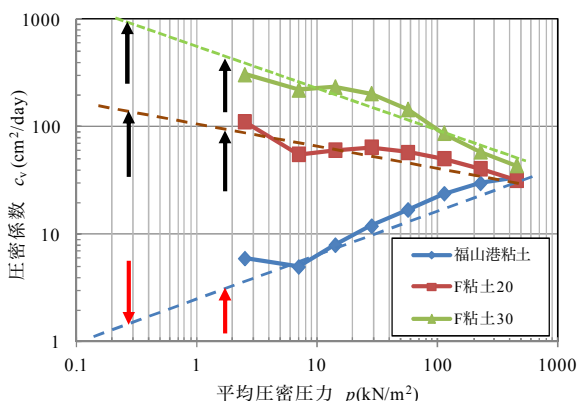


図 16 低応力域での c_v

表 4 p に対する c_v/c_{v0} 値

土質		円筒土槽実験 ($p=0.27\text{kN/m}^2$)			矩形土槽実験 ($p=1.88\text{kN/m}^2$)		
		H	c_v	c_v/c_{v0}	H	c_v	c_v/c_{v0}
		cm	cm^2/day		cm	cm^2/day	
粘土のみ	標準圧密	1	1.5	1	1	3	1
	F粘土20	標準圧密	1	150	100	1	100
	土槽	100	1.5	1	50	10	3.3
F粘土30	標準圧密	1	900	600	1	400	133
	土槽	100	9	6	50	40	13

注：粘土のみを c_{v0} と表記

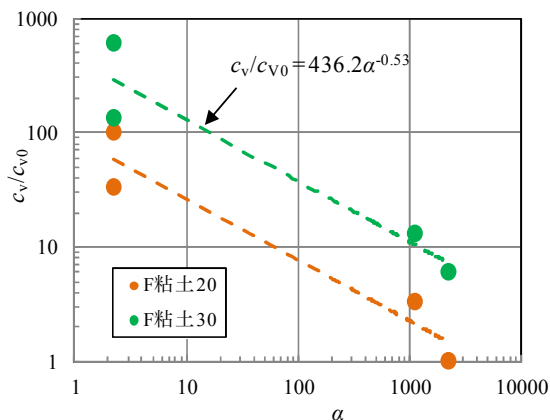


図 17 $\alpha \sim c_v/c_{v0}$ の関係

理由として、排水距離 H と繊維片長 L との比率が大きく異なることが要因に挙げられる。すなわち、ピートモスは平均繊維長 L が 0.45mm である繊維片の集合体であり、 2cm 高さの圧密供試体内に存在する場合は、排水距離 H と繊維片長 L の比 $\alpha (=H/L)$ は 2.2 、矩形土槽における負圧作用時の 1m 高さの両面排水条件での供試体内に存在する場合は、 $\alpha=1111$ 、円筒土槽で自重圧密時の 1m 高さの片面排水条件での供試体内に存在する場合は、 $\alpha=2222$ であるなど、繊維片のサイズは同一であるが、排水距離が大きく異なるためと考えられる。このことは、3.2 で示したように、繊維片の長さを変化させた段階載荷圧密試験において、 α

が小さくなるほど c_v が増加する結果と一致する。本実験で得られた α と先に述べた c_v の比率 ($=c_v/c_{v0}$) の関係を図 17 に示す。

5. 実地盤への適用性検討

5 章では、F 粘土の実地盤への適用性について検討する。粘土地盤の圧密改良方法としては、鉛直ドレーンを打設する場合を想定する。粘土の c_v とドレーン仕様は実際の現場を想定して次のように仮定した。これらの条件は通常的设计において、ほぼ一般的なものであると考えられる。

- ・粘土の c_{v0} : $50\text{cm}^2/\text{day}$
- ・ドレーン仕様： プラスチックボードドレーン
ドレーン間隔 $d=1.0\text{m}$
正方形配置

圧密速度の算定に Barron の近似解¹⁰⁾を用いると、平均圧密度 U_h は(5)式で求めることができる。

$$U_h = 1 - \exp\left\{-8 \frac{T_h}{F(n)}\right\} \quad (5)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$T_h = c_h \cdot t/d_e^2, \quad n = d_e/d_w$$

ここに、 T_h ：時間係数、 c_h ：水平方向の圧密係数 ($=c_v$)、 d_e ：有効径 ($=1.13d$)、 d_w ：ドレーンの換算直径 ($=5\text{cm}$) である。この(5)式を用いて、 U_h が 90% になる日数を求めると、上記条件の場合 $t_{90}=175$ 日となる。

さて、繊維片を 30% 混合した高含水状態の浚渫粘土を真空圧密 (-60kN/m^2 の負圧作用) で改良する際に、(5)式および図 17 に示した $\alpha \sim c_v/c_{v0}$ 関係、すなわち(6)式を用いると、平均繊維長 L と t_{90} の関係を得ることができる。なお、上記条件の場合、 $H=1.13 \times 100/2=56.5\text{cm}$ である。

$$c_v/c_{v0} = 436.2\alpha^{-0.53} \quad (6)$$

表5は、 L が 0.45mm 、 5mm 、 50mm の繊維片を 30% 混合した場合について、ドレーンによる改良仕様を算定したものである。 $L=0.45\text{mm}$ (本実験試料) を混合した場合は、 $d=100\text{cm}$ では $t_{90}=18$ 日となり、圧密期間を大きく短縮することができる。また、 $t_{90}=175$ 日とすると、ドレーン間隔 d を 2.65m にまで広げることが可能である。また、現地施工においては、 0.45mm よりも長い繊維片を混合することが可能であり、 5mm あるいは 50mm の繊維片を混合すると、表5に示すように、ドレーン間隔をより広く設定することが可能と考えられる。なお、長さ 50mm については、本論文で得た結論の枠組みの中でその改善効果を定量的に予測できるかどうかは不明な点も多く、大規模実験による実

証が必要であると考えている。繊維片を土に混合する技術としては、ミキサ混合や回転式破碎混合¹¹⁾がある。ミキサ混合では繊維長さが64~100mmの短繊維(ただし、混合量は0.2~0.4%)を混合しており¹²⁾、長さ50mm程度の繊維片の混合は可能である。

表 5 F粘土 30 によるドレーン改良仕様

L	α	c_v/c_{v0}	$d=100\text{cm}$	$t_{90}=175\text{日}$
			$t_{90}(\text{日})$	$d(\text{m})$
繊維片なし	∞	1	175	1
0.45mm	1256	9.9	18	2.65
5mm	113	35.6	5	4.65
50mm	11.3	120.6	2	5.0以上

ここに、 $H=56.5\text{cm}$

F粘土 20 を対象として、体積土量変化率 ξ について考察する。計算条件は地山状態の浚渫粘土の含水比を 1.1 倍の液性限界($w_n=133.4\%$)とし、粘土に混合する繊維片の含水比を 100%、繊維片密度を 1.50g/cm^3 と設定した(繊維片密度は土粒子密度に相当するものである。粒度の沈降試験では、繊維片はほとんどが浮かんでいたが、JIS A 1202 の土粒子の密度試験において加熱すると、すべて沈殿していた。沈殿は、繊維片に含まれていた気泡が抜け出したためと考えられる)。計算結果を図 18 に示す。繊維片を混合すると、F粘土 20 の ξ は 1.26 となる。流動性を確保するために、本土槽実験と同様、加水して含水比を 335%にすると、 ξ は 2.97 となる。また、図 9 から、脱水後に、含水比が 200%になると、 ξ は 1.91 になる。

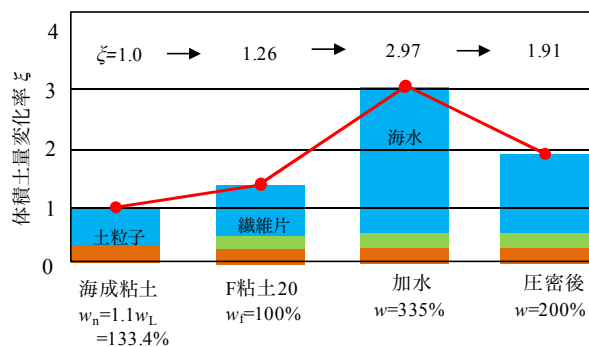


図 18 体積土量変化率

F粘土のように、繊維片を多量に混合すると、その土質特性は泥炭に類似するのではないかと懸念がある。泥炭は、一般に、湿性植物の遺体が、低温多湿の条件のもとで多年にわたり分解が不十分のまま自然に堆積してきたものであり、植物繊維は互いに交錯して海綿状の組織を形成している¹³⁾。一方、F粘土は海成粘土に短繊維を混合したものであり、むしろその力学特性は短繊維混合補強土に近いと考えられる。短繊維混合補強土については、一軸圧縮強さは必ずしも増加しないが、ピークひずみ後の強度

低下が小さく、韌性が高まる、また、降雨や流水に対する対エロージョン性が高まるなどの利点がある¹²⁾ので、F粘土も同様の効果がある可能性がある。ただし、短繊維混合補強土は数 10mm のポリエステル製繊維を 0.2~0.4% の質量比で添加するものであり、F粘土とは大きく異なっている。今後、F粘土の力学特性についても、明らかにする必要がありと考えられる。

6. 結論

海成粘土に繊維片(ピートモス)を乾燥質量比で 20~40%混合した繊維片混合粘土(F粘土)を作製して段階載荷圧密試験を実施するとともに、円筒土槽実験(自重のみ)と矩形土槽実験(負圧作用)を実施した。土槽の高さは共に 1m であり、自重のみの実験は上面排水、負圧作用の実験は粘土層下部に -60kN/m^2 の負圧を作用させた両面排水条件である。実験で得られた圧密曲線に一次元圧密理論をフィッティングして得られた c_v を段階載荷圧密試験結果と比較し、かつ現地への適用性を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 段階載荷圧密試験の結果によると、繊維片を 20~30%混合すると、圧密係数 c_v が粘土の数十~数百倍になり、圧密速度を著しく速める改善効果が認められた。また、繊維片を混合すると、同一の圧密圧力 p に対する間隙比 e は増加した。
- (2) 粘土に繊維片を同量混合した段階載荷圧密試験の結果によると、長い繊維を混合するほど、 c_v が増加する結果が得られた。
- (3) 土槽実験で得られた実測圧密曲線に解析で得られる理論圧密曲線をフィッティングして得た c_v は、繊維片を 20%混合した場合は粘土本来の値の 1~3.3 倍、30%混合すると粘土本来の値の 6~13 倍となり、圧密速度の改善効果が認められた。
- (4) 浚渫粘土からなる埋立地盤をドレーンで改良する場合を想定すると、粘土のみの場合のドレーン間隔 $d=1\text{m}$ (正方形配置)、 $t_{90}=175$ 日に対して、平均繊維長 0.45mm の繊維片(ピートモス相当)を 30%混合すると、 $d=2.65\text{m}$ 、 $t_{90}=175$ 日となり、繊維片の混合により、ドレーン間隔を大きく拡げることが可能と考えられる。

段階載荷圧密試験と土槽実験とで c_v が大きく異なった理由として、繊維片長と排水距離の関係が大きく異なることが考えられる。

今後の課題としては、繊維片の種類、繊維片の混合量、繊維片長、排水距離と繊維片長の変化させた圧密試験、ドレーンによる圧密改良実験、実規模での実証実験などが必要であり、繊維片混合による圧密促進効果について、さらに検討を進める予定である。

謝辞

土槽実験に関し、真空圧密ドレーン工法研究会の関係者とペンタテクノサービス(株)の安田淳一氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 三木博史, 藤井厚企, 小畑敏子, 藤木広一, 加津憲章, 増井仁: 短繊維混合補強土の特性と現場適用事例, 第13回ジオシンセティックスシンポジウム, pp.337-345, 1998.
- 2) 仲原寛昭, 卷内勝彦, 峰岸邦夫: 短繊維混合補強土の力学特性に及ぼすファイバー形状の影響, 第14回ジオシンセティックスシンポジウム, pp.227-233, 1999.
- 3) 卷内勝彦, 峰岸邦夫, 崔仁鎬: ファイバー混入による土の補強効果, 第11回ジオシンセティックスシンポジウム, pp.37-44, 1996.
- 4) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部: 平成22年度事業, 産業廃棄物排出・処理状況調査報告書, 平成20年度実績(概要版), p.35, 2011.
- 5) 藤井克己, 小原学, 及川正一, 及川智文: 廃木材チップの暗渠排水用被覆材としての利用, 農業土木学会誌, Vol.71, No.4, pp.305-307, 2003.
- 6) 管中混合固化処理工法. 技術マニュアル(改訂版): (財)沿岸技術研究センター, pp.46-56, 2008.
- 7) 月館光三: 東北地方における泥炭の圧密特性とその特徴, 農土論集(98), pp.31-35, 1982.
- 8) 今井五郎, 藤森 賢, 佐野建志: 一次元圧密の新しい数値解析法, 第43回年次学術講演会公演集, pp.348-349, 1988.
- 9) 今井五郎, 藤森 賢, 小久保裕, 林 裕三: 粘土が一次元圧密挙動に及ぼす影響, 第24回土質工学研究発表会, pp.399-402, 1989.
- 10) たとえば, 吉国洋: パーチカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂出版, p.39, 1979.
- 11) 中島典昭, 齋藤由紀子, 高橋勇, 吉田直人, 横田季彦, 佐藤泰: 短繊維混合補強土への回転式破碎混合工法の適用性について, 材料, Vol.59, No.1, pp.62-67, 2010.
- 12) 短繊維混合補強土の特性と現場適用事例: 三木博史, 藤井厚企, 小畑敏子, 藤木広一, 加津憲章, 増井仁, 第13回ジオシンセティック論文集, pp.337-345, 2009.
- 13) 炭性軟弱地盤対策マニュアル: (独)土木研究所, 寒地土木研究所, p.2, 2011年3月.

(2012. 11. 22 受付)

Consolidation property of dredged soil mixed with discrete fiber

Hiroshi SHINSHA¹, Takahiro KUMAGAI¹ and Yoichi WATABE²

1 Penta-Ocean Construction, Institute of Technology

2 Port and Airport Research Institute

Abstract

Consolidation property of dredged soil mixed with discrete fiber has been investigated by conducting consolidation tests. A small scale tests, i.e. standard consolidation tests and two kinds of large scale tests, i.e. laboratory model tests were carried out. One of the laboratory model tests was the consolidation test for the clay layer of 1m thickness, and vacuum pressure of -60kN/m^2 was applied from the bottom end of clay layer. The other was the consolidation test for the clay layer with the same size, without consolidation pressure except self weight of the clay. In the test case of mixed soil of fiber content of 30% in dry weight, coefficient of consolidation increased to around 6-13 times of that of the original clay. Thus, it is expected by using the dredged soil mixed with 30% fiber that the installation spacing of prefabricated drains can be increased from 1.0m to 2.65m in square arrangement, by which quantities of the prefabricated drains will be minimized.

Key words: consolidation property, discrete fiber, dredged soil, laboratory model test, consolidation analysis