

論文

八郎潟粘土地盤の圧密変形特性

金山素平*・高橋長仁**・山本清仁*・武藤由子*・倉島栄一*

*岩手大学農学部

〒020-8550 岩手県盛岡市上田3-18-8

**岩手大学大学院総合科学研究科

〒020-8550 岩手県盛岡市上田3-18-8

Consolidation Deformation Characteristics of Hachirogata Clay Ground

Motohei KANAYAMA*, Nagato TAKAHASHI**,
Kiyohito YAMAMOTO*, Yoshiko MUTO* and Eiichi KURASHIMA*

*Faculty of Agriculture, Iwate University

3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550

**Graduate School of General Sciences, Iwate University

3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550

Abstract

In this work, to evaluate the deformation characteristics of Hachirogata clay, soil tests such as one dimensional consolidation test and so on were conducted. Although this Hachirogata clay sample contained much sand and less clay from the grain size test result, it was found that the sample has high liquid limit, plasticity index, and natural water content. About the derived parameters from the consolidation test, the coefficient of volume compressibility, the coefficient of consolidation, and the coefficient of permeability were in the range of 10^{-4} – 10^{-2} m²/kN, 5–100 cm²/d and 10^{-9} – 10^{-7} cm/s, respectively. Compared with other clay samples, Hachirogata clay had low consolidation rate and permeability and high volume compressibility. Furthermore, as a result of analyzing the secondary consolidation behavior in which the strain progresses under a constant load, it was found that Hachirogata clay has high secondary consolidation rate. In addition, assuming the virtual ground composed of Hachirogata clay, the theoretical curve, and the settlement curve considering the secondary consolidation deformation amount were evaluated when the embankment load corresponding to the earth pressure was loaded on this virtual ground. The soil constant required for the calculation was the constant obtained from this consolidation test. It was clarified that it takes a long time to complete primary consolidation, and that the settlement increases when secondary consolidation starts early.

From the above results, it was confirmed that consolidation deformation of Hachirogata clay takes a long time, the amount of deformation increases, and the deformation continues over time after the main deformation is completed.

Key Words: Hachirogata clay, differential settlement, consolidation, coefficient of secondary consolidation, theoretical analysis

1. まえがき

軟弱な粘土地盤上に構造物を築造する場合、不同沈下や残留沈下が大きな問題となる。八郎潟干拓地は、秋田県西部の日本海に面する場所に位置している。かつて八郎潟は、八郎湖と呼ばれ、総面積22,024haという琵琶湖に次いで日本第二の広さを誇る湖であった。この八郎湖は雄物川と米代川から流出した土砂によって形成された陸繋島の男鹿半島の海跡湖であり、南部で日本海と通じている汽水湖でもあった。その水深は最深部

でも4–5m、湖底は平坦で大部分は肥沃な重粘土質土壌に覆われているという干拓に適した条件を備えていた。そのため古くから八郎湖の干拓事業は立案されており、1957年にオランダの対外援助機関の技術協力を得て国の直轄事業として国営八郎潟干拓事業が開始された。着工以来、工事は20年の歳月を要し1977年に完工となった。こうして八郎湖の湖底は総面積17,229haの大地へと干陸化された¹⁾。しかし、八郎潟干拓地においては40m以上の軟弱沖積粘土層が存在するため、水利施設などの農業用構造物に長期にわたる不同沈下が生じてい



Fig. 1 Differential settlement of channel (Some parts are deformed while others are not so deformed. This phenomenon has accelerated the channel degradation.)

る (Fig. 1). 鉛直方向に蛇行した状態の水路では、計画用水量を得るためには必要以上の水量を要することとなり、農業用水の確保および節水に支障をきたしている。また、この変形が水路の劣化を促進させたことが推察される。構造物が建築されてから半世紀近くが経ち、構造物自体の改修時期が近づいている現在、八郎潟粘土が有する圧密・変形特性を再検討し、適切な維持管理を行っていくことが急務である。

既往の研究によると、河野ら²⁾は、八郎潟干拓地の造成時の軟弱粘土地盤の土質特性について報告している。それによると、粘土層厚はおおむね20m前後であり、最も厚いところでは50m以上となること、粘土分40–60%、シルト分が40–55%および砂分が5%以下のほぼ均一な粘土・シルト層であること、粘土分の主要粘土鉱物は高膨潤性のスメクタイトであることを示している。コンシステンシーについて、液性限界は80–250%と広範囲で大きい値を示し、特に深さ1–4mで200%以上と非常に大きいこと、塑性限界は30–65%で、液性限界のように広範囲の値とはならないと述べている。圧密定数について、鋭敏性の高い粘土の特性を有すること、圧縮指数が0.6–2.2、圧密係数が0.5–50 cm²/day、体積圧縮係数が 2.0×10^{-3} – 5.0×10^{-2} m²/kNおよび透水係数が 1.0×10^{-10} – 10^{-8} cm/sと報告している。また、Tanaka³⁾は、八郎潟粘土の工学的特性について報告しており、45m以上の軟弱粘土層の存在を確認している。他の粘土の工学的特性と比較して、八郎潟粘土は塑性指数100以上となるような高指標特性を有することを示している。さらにこの高指標となる要因が粘土中に含有する珪藻の微化石にあることを指摘している^{4–6)}。

本研究は、新たに築造する構造物の適切な維持管理に資するため八郎潟粘土の圧密変形特性を把握することを目的とした。干拓地内で採取した八郎潟粘土を用いて段階的荷重による圧密試験を実施し、得られた土質定数について他の粘性土と比較・検討し、地盤の圧密変形量の数値解析を行った。

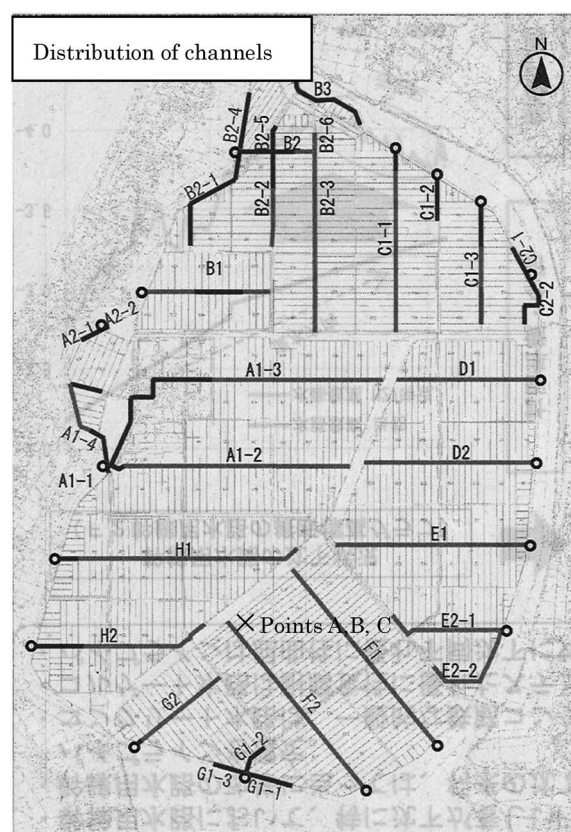


Fig. 2 Sampling location

2. 試験試料と試験方法

2018年7月、八郎潟において粘土試料を採取した。採取地点は八郎潟の南に存在するF2幹線水路末端の横の土手である。ここは既設水路の変状が著しく、用水の確保も問題となっている。末端を始点とし、そこから1mごとにA地点、B地点、C地点の合計3地点から採取を行った (Fig. 2)。採取方法はハンドオーガーを使用した手作業とした。地表の草や粗い土を除去し、その後ハンドオーガーを貫入させ、試料を採取した。ハンド

オーガーを貫入させていくにつれて地盤の抵抗が少なくなり簡単に掘り進めることができたが、深度を増すにつれてドロドロとした液状となり、ハンドオーガーでは満足に試料を採取することができなくなった。そのため200 cmに満たない地点で打ち切りとした。採取深さは表層から100–170 cmであり、採取試料は練返し状態である。なお、本研究ではA地点の試料と他の粘性土の圧密特性の比較を行った。比較試料は、有明粘土、セリサイト、カオリンおよび阿蘇ロームの4種類の練返し粘土であり、それぞれ主要粘土鉱物が異なる。

日本工業規格に記載されている試験方法に基づき、採取した八郎潟粘土に対して、粒度試験 (JIS A 1204)、密度試験 (JIS A 1202)、液性限界・塑性限界試験 (JIS A 1205)、段階载荷による圧密試験 (JIS A 1217) の4つの土質試験を実施した。

2.1 粒度試験

粒度試験では、2 mm ふるいで八郎潟粘土をかけた結果、すべての試料が通過したため、試料をそのまま粒径2 mm以下の試料として扱い、沈降分析を行った。使用した試料は塑性指数 $I_p \geq 20$ であったので、試料の分散として過酸化水素6%溶液を加える処理と分散剤（ヘキサメタリン酸ナトリウム飽和溶液）を加えてから攪拌する処理を行った。沈降分析を行った試料を75 μ m以上の土粒子を水洗いし、炉乾燥後に850, 425, 250, 105, 75 μ mふるいにかけるふるい分析を行った。

2.2 密度試験

容量100 mLのピクノメーターに試料を入れ、質量と温度を計測し、水の密度や土粒子の質量を使用し換算することによって土粒子密度 ρ_s を求めた。なお、土粒子間隙中の空気を排出するために煮沸処理を行うが、本試験では煮沸時間を24時間とした。

2.3 液性限界・塑性限界試験

液性限界試験は試料を入れた黄銅皿を1 cmの高さから1秒間に2回の割合で落下させ、落下回数が25回のとき、二分した溝の底部が長さ1.5 cmにわたり合流する

ときの含水比を求め、その値を液性限界とした。塑性限界試験は液性限界試験で用いた同じ試料を使用した。試料をすりガラス板上に載せ、手のひらで試料を転がしながら直径3 mmのひも状になるようにした。ちょうど直径3 mmで切れぎれになるときの含水比を求め、その値を塑性限界とした。

2.4 段階载荷による圧密試験

圧密試験において、供試体は練返し状態、寸法は直径60 mm、高さ20 mmとした。試料を圧密リングに詰め、ポーラスストーンとの間にろ紙を挟んで圧密試験機（(株)丸東製作所、S43-3UL-1）に設置し、载荷圧力 p を4.9 kPaあるいは9.8 kPaから始め、圧力増分比を1として24時間あるいは48時間ごとに载荷した。圧密圧力の範囲は4.9–1256 kN/m²（阿蘇ロームとセリサイトでは9.8–1256 kN/m²）とした。沈下量は変位計の末端をデーターロガーに接続し、沈下量を1秒ごとに計測した。

本研究においては、一次圧密終了後に現れる二次圧密挙動を評価するため二次圧密係数 C_{ae} に着目した。各圧密圧力段階で間隙比 e –対数時間 $\log t$ 曲線を作成し、圧密曲線の終期部分の勾配 $C_{ae} = \Delta e / \Delta \log t$ を評価した⁷⁾。

3. 試験結果と考察

3.1 八郎潟粘土

採取した八郎潟粘土試料の物理的性質をTable 1に示す。既往の研究から深度3 mまでは砂分の割合が多いことが報告されており³⁾、本試料においても比較的砂分が多いことがわかる。液性限界・塑性限界については予期した値よりかなり低い値となった。土粒子密度が小さく、粘土含有量が比較的多いA-2試料で液性限界 w_L が108.0%、塑性指数 I_p が69.6という比較的大きな値となっており、自然含水比 w_n も88.8%と高い。一方、砂分の含有量が著しく卓越し土粒子密度が大きいC-2試料では、 w_L が46.0%、 I_p が24.6とかなり小さく、 w_n も66.1%と低い値となっている。

Table 1 Physical properties of Hachirogata clay

Sample No.	Depth (cm)	ρ_s (g/cm ³)	Grain Size (%)			w_L (%)	w_P (%)	I_p	I_L	w_n (%)
			Clay	Silt	Sand					
A-1	120	2.566	19.4	21.3	58.8	77.9	33.5	44.3	0.55	58.0
A-2	170	2.504	21.3	36.3	41.9	108.0	38.4	69.6	0.72	88.8
B-1	100	2.525	9.7	20.6	68.5	64.0	27.7	36.3	0.67	52.1
B-2	120	2.511	11.7	22.5	65.1	62.2	29.6	32.6	0.52	46.4
B-3	160	2.591	17.3	17.9	64.6	67.2	30.3	36.9	1.05	69.0
C-1	130	2.573	19.4	28.0	52.2	87.0	36.7	50.3	0.93	83.5
C-2	170	2.591	11.8	0.0	87.6	46.0	21.3	24.6	1.82	66.1

ρ_s : soil particle density, w_L : liquid limit, w_P : plastic limit, I_p : plasticity index, I_L : liquidity index, w_n : natural water content

Table 2 Physical properties of other clayey soils

Sample	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	I_L	w_0 (%)
Ariake Clay	2.642	130.3	46.9	83.4	0.57	94.8
Aso Loam	2.707	115.6	51.6	64.0	0.86	106.8
Kaolin	2.650	71.5	27.7	43.8	0.83	70.1
Serisite	2.835	55.8	28.5	27.3	0.71	47.9

w_0 : water content at consolidation test

3.2 他の粘性土

粘土の種類の違いが粘土の力学的特性に影響を及ぼすことが知られている⁸⁾。八郎潟粘土の圧密特性の特異性を把握するため、他の粘性土と比較する。本研究では、主要粘土鉱物が異なる4種類の練返し粘土の標準圧密試験結果より得られたデータを用いた。練返し試料は有明粘土、セリサイト、カオリン、および阿蘇ロームである。各粘性土試料の物理的性質をTable 2に示す。圧密試験に際しては、各供試体の水分状態を同一にする必要がある。比較対象となる八郎潟粘土A-2試料の液性指数 I_L が0.72であったので、各粘性土試料の初期含水比は I_L が0.7程度になるよう含水比調整を行った。しかし、測定含水比によって計算された I_L は0.57–0.86とばらつく結果となった。

有明粘土の主要粘土鉱物はスメクタイトであり、八郎潟粘土も同様の主要粘土鉱物である^{2,3)}。スメクタイトは粒径が非常に小さい2:1型粘土鉱物であり、多量の水が加わると結晶の層間に水を吸収し膨張し、層間隔が広がり反応性に富み、水を保持しやすい特徴を有する。また、有明粘土は海洋性沖積粘土であり、八郎潟粘土と同様の軟弱粘土として知られている。セリサイトは絹雲母とも呼ばれ、熱水起源の雲母粘土鉱物である。使用したセリサイトは島根県雲南市三刀屋町産である。スメクタイトと同様2:1型粘土鉱物だが、水との反応性は乏しい。土粒子密度 ρ_s は2.8g/cm³を超えるほど大きく、塑性指数 I_p は小さい値となっている。カオリナイトは1:1型粘土の代表的粘土鉱物であり、比較対象としてよく用いられる。試料は、 ρ_s が2.65g/cm³、 I_p が50程度と平均的なカオリン粘土である。使用したカオリン粘土は鹿児島県薩摩川内市入来町産である。阿蘇ロームの主要粘土鉱物は黒ボク土で土中に埋没した火山灰の土層に見られるハロイサイトである。ハロイサイトもカオリナイト同様の1:1型粘土鉱物であるが、その ρ_s は2.7g/cm³程度の値となり、 I_p はカオリンよりも若干大きい値を示した。

3.3 八郎潟粘土の圧密諸定数

本研究で採取した試料を使用し、段階載荷圧密試験から得られた結果をFigs. 3, 4に示す。Fig. 3は e - $\log p$ 曲線である。粘土分含有量が多く、含水比の高いA-2試料が高領域に位置しており、その他の試料に関してはほぼ同一の曲線状に位置している。圧密試験開始前の初期間隙比 e_i は約1.6–2.94、曲線の最急勾配を示す圧縮指

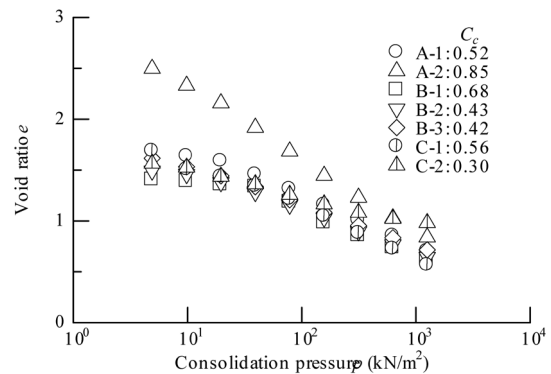
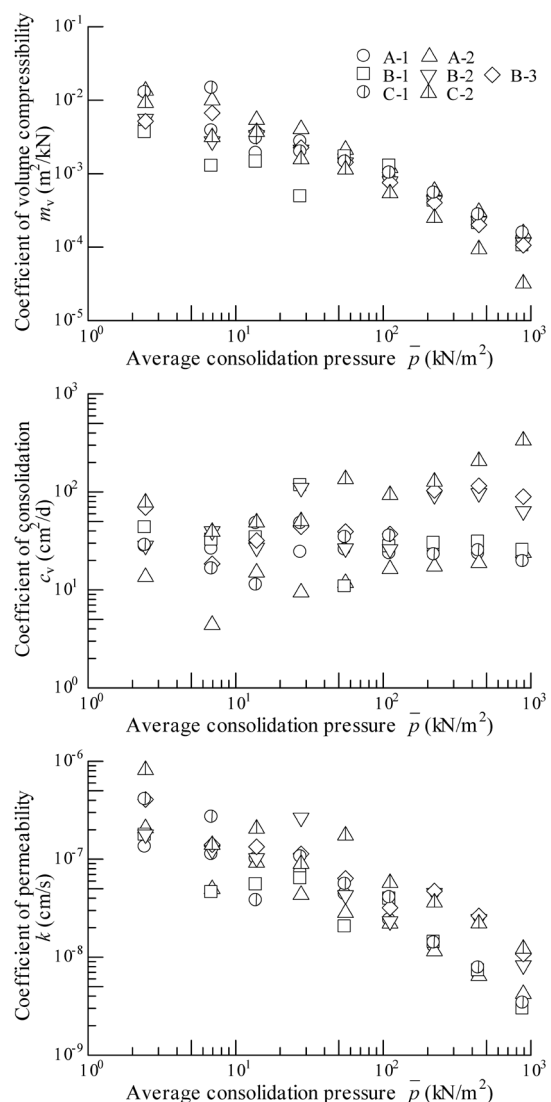
Fig. 3 e - $\log p$ relation of Hachirogata clay

Fig. 4 Relationships between consolidation constants and average consolidation pressure of Hachirogata clay

数 C_c は約0.3–0.85の範囲にあり、報告されている値(e_c : 2.0–5.0, C_c : 0.6–2.2)と比較すると比較的低い値となっている^{2,3)}。

Fig. 4は、それぞれ体積圧縮係数 m_v 、圧密係数 c_v および透水係数 k を平均圧密圧力 \bar{p} に対して示している。 m_v は、すべての試料で \bar{p} の増加に伴って減少傾向を示した。圧密圧力が100kN/m²以下において、粘土分の含有量が一番多いA-2試料が高い値で推移したが、その後の圧力の増加に対して試料間の差異は見られなかった。一方、砂分が多いC-2試料は初期値こそ高いものの急激に減少を示した。 c_v は、A-2試料において5.0–23.9cm²/dと低い値を示したことから、採取した八郎潟粘土試料の中でも特に圧密速度が遅く圧密の進行に時間を要することがわかる。C-2試料において、 \bar{p} が27.3kN/m²を超えると c_v は急激に増加を示した。一般的に載荷する圧力が大きくなると、粘土試料中に発生する過剰間隙水圧も大きくなり、試料中の砂分が多いほど過剰間隙水圧は消散しやすくなる。C-2試料は、砂分が他より著しく多い試料であったことから、圧密の進行が速まったと考えられる。 k は、ほとんどの試料で \bar{p} の増加に伴って減少した。透水係数の値を見ていくと、A-2試料の k は10⁻⁹から10⁻⁸という低域に分布し、砂分が多いC-2試料は10⁻⁸から10⁻⁷と高域に位置していた。本研究で得られた m_v は10⁻⁴–10⁻²m²/kN、 c_v は5–400cm²/day、 k は10⁻⁹–10⁻⁷cm/sの

範囲にあった。

Fig. 5は、二次圧密係数 $C_{\alpha c}$ を圧密圧力 p に対して示している。A-2試料の $C_{\alpha c}$ は0.03–0.05の範囲にあり高い値を示したが、その他の試料は0.03以下の値を示した。これは、同じ地域の地盤でもA-2試料は他の試料より主要な変形が終了した後も時間の経過とともに変形が継続し、変形量が大きくなることを示す。

これらの結果は既往の報告と合致する点もあるが、既往の値と比較すると圧縮性に関しては比較的低く、圧密速度に関しては大きく、透水性に関してはやや高い値となっている。この原因として試料の砂分含有量の高いことが挙げられるが、これは干拓造成時に地盤表面に設置された置砂が混入したためと考えられる。したがって、置砂の影響が小さく自然地盤に近いと考えられるA-2試料の値を使用し、他の粘性土との比較を行う。

3.4 他の粘性土の圧密特性との比較

Fig. 6は、主要粘土鉱物が異なる練返し粘土の圧密試験において、圧密圧力が78.5kN/m²から157kN/m²に増加した場合の沈下量 S と対数時間 $\log t$ 曲線である。この図からわかるように、圧密沈下挙動から試料を2種類に分類することができる。一つ目は、一次圧密終了後のクリープ挙動が大きくなる有明粘土、八郎潟粘土およびセリサイトである。特に、八郎潟粘土においては圧密にともなう時間的遅れと変形量の大きさは顕著である。他方は、クリープ挙動が顕著ではないカオリンと阿蘇ロームである。前者の主要粘土鉱物は2:1型であり、後者のそれは1:1型であることから、主要粘土鉱物の層状構造の違いが変形挙動に影響を及ぼすことが推察される。

Fig. 7は、各粘性土の体積圧縮係数 m_v 、圧密係数 c_v および透水係数 k を比較した図である。全試料の m_v は圧密圧力の増加にともないほぼ直線的に減少し、試料間の差は小さくなる傾向を示した。得られた m_v は10⁻⁴–10⁻²m²/kNの範囲内にある。その中でも八郎潟粘土の m_v は高い値の領域に位置し、セリサイト、有明粘土、カオリン、阿蘇ロームの順に低くなる傾向にあった。 c_v は圧密圧力の増大に対しセリサイトのみ一定値を示し、

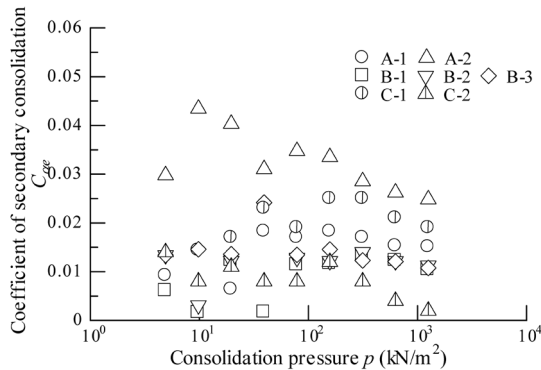


Fig. 5 Relationship between coefficient of secondary consolidation and consolidation pressure

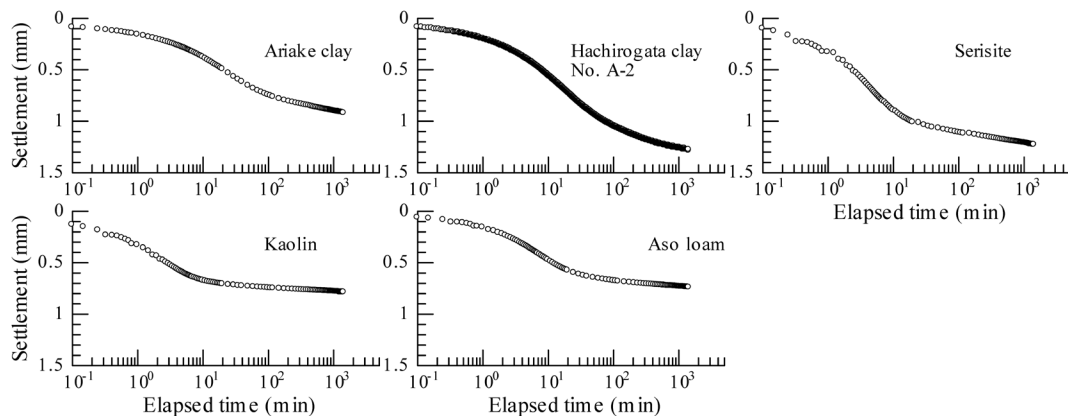


Fig. 6 Time settlement curve of each specimen at consolidation pressure, 157kN/m²

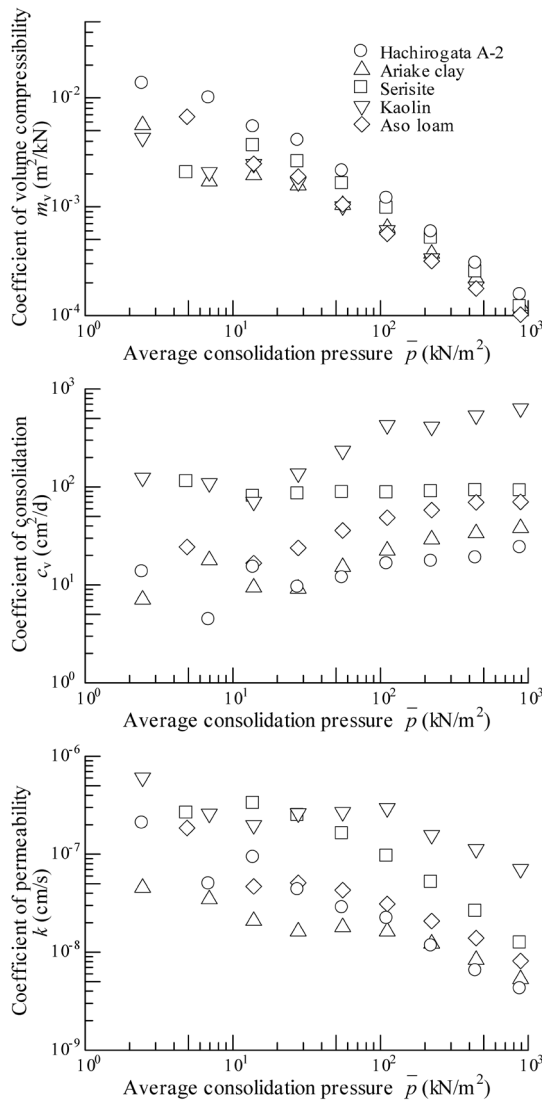


Fig. 7 Relationships between consolidation constants and average consolidation pressure of all clays

その他の試料ではやや増加する傾向を示した。得られた c_v は $5\text{--}500\text{ cm}^2/\text{d}$ の範囲内にある。各試料の c_v の分布に明確な違いがみられた。八郎潟粘土の c_v は全体の中で低い値を示す傾向にあり、有明粘土、阿蘇ローム、セリサイト、カオリンの順に大きくなる傾向にあった。 k に関しては、圧密圧力の増大にともない減少する傾向を示した。 c_v の分布と同様に、各試料の k の分布に違いがみられた。有明粘土および八郎潟粘土は低い値を示し、阿蘇ローム、セリサイト、カオリンの順に大きくなる傾向を示した。各パラメータの挙動から総合的に判断すると、八郎潟粘土は圧縮性が高く、圧密の進行に長時間を要し、透水性が低い粘土であることがわかる。有明粘土も同様である。セリサイトは高い圧縮性を有する粘土であると判断できる。阿蘇ロームは圧密の進行に時間を要し、低い透水性を有する粘土であると判断できる。

Fig. 8 は、各試料の二次圧密係数 C_{ae} を区間圧縮指数 C_c に対して示している。ここで C_{ae} は各圧密圧力 (9 点) において求められるのに対し、 C_c は圧力区間 (8 区間)

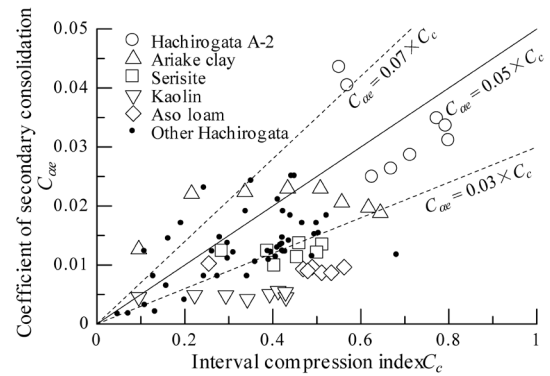


Fig. 8 Relationship between coefficient of secondary consolidation and interval compression index of all specimens

で求められることに注意されたい。したがって図示している各粘土のデータ数は 8 点である。図中の実線は Ladd et al.⁹⁾ が報告した経験式である。彼らは、Mesri and Godlewski¹⁰⁾ の研究成果を参考にして、 C_{ae} は過圧密領域・正規圧密領域を問わず C_c と一義的関係があると指摘し、泥炭では $C_{ae}/C_c = 0.07 \pm 0.02$ 、粘性土では $C_{ae}/C_c = 0.05 \pm 0.02$ を与えた。セリサイトの一部、カオリンおよび阿蘇ロームの試料の結果を除けば、本試験で得られた C_{ae}/C_c は Ladd らが指摘するように $C_{ae}/C_c = 0.05 \pm 0.02$ の範囲に分布している。特に八郎潟粘土試料の A-2 試料に関しては、 C_{ae} および C_c ともに大きい値を示したことから、圧縮性が高くかつクリープ挙動が卓越する粘土であることわかる。

本研究で得られた C_{ae} に関して、各粘土鉱物の構造が有する底面間隔との関連性について考察する。1:1 型粘土鉱物であるカオリナイトの底面間隔は 0.72 nm 、ハロイサイトにおいては 0.72 nm (dehydrated)、 1.01 nm (hydrated) として知られている。2:1 型粘土鉱物のスメクタイトの底面間隔は 1.54 nm 、マイカの中でも微細な粘土粒子を有するセリサイトは 1.00 nm である¹¹⁾。ハロイサイトの水和の有無の状態の違いもあるが、底面間隔はカオリナイト、ハロイサイト、セリサイト、スメクタイトの順に大きくなると考えられる。一方、本研究で得られた各試料の C_{ae} の平均値は、カオリンが 0.005 、阿蘇ロームが 0.009 、セリサイトが 0.012 、有明粘土が 0.020 、八郎潟粘土 A-2 試料が 0.033 であり、底面間隔の順序と同様にカオリン、阿蘇ローム、セリサイト、有明粘土、八郎潟粘土の順に C_{ae} は大きい値を示した。本研究で対象とした試料が自然堆積土であるため、粘土鉱物種、試料の水分状態、イオン組成、化学組成および鉱物以外の混入物質の存在などが粘土の構造に及ぼす影響が考えられるが、仮に二次圧密変形挙動を一定有効応力下における粘土粒子の移動と捉えるならば、二次圧密速度と粘土粒子の層間隔を表す指標には相関が存在すると考えられる。今後の採取試料の化学組成およびイオン組成等の詳細な検討と試験データの更なる収集が必要である。

3.5 仮想八郎潟粘土地盤の圧密変形量の評価

今後農業用構造物の改修が行われることを念頭に、八郎潟粘土で構成された仮想地盤を想定し、地盤の圧密変形量の評価を行った。仮想地盤については、八郎潟粘土の砂質土層に挟まれた両面排水の地盤を想定し、この地盤に土被り圧分の盛土荷重を載荷したときの圧密の進行について理論曲線と二次圧密変形量を考慮した沈下曲線を求めた。最終圧密量の算定には圧縮指数 C_c を用いる方法を採用し、圧密理論曲線と二次圧密変形量の計算は下記の式を用いた。

$$S = S_f \left(1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \right) \quad (1)$$

$$S_s = H_0 - S_{sc} - H_s(1 + C + C_{ac} \log t) \quad (2)$$

ここに、 S は理論曲線から求まる沈下量、 S_f は最終沈下量、 $M = \pi/2 (2m+1)$ 、 T_v は時間係数、 S_s は二次圧密変形量、 H_0 は初期粘土層厚 (5.000 m)、 H_s は実質粘土層厚 ($= H_0 / (1 + e_0) = 1.269$ m)、 S_{sc} は二次圧密が開始した時の沈下量、 C は二次圧密開始時の時間と沈下量より同定される係数、 C_{ac} は二次圧密係数、 t は二次圧密開始以降の時間である。二次圧密を考慮した沈下量は上記2式を加算することで求まる。

ここで問題となるのは、二次圧密の開始時を仮定することである。一般に、二次圧密は一次圧密終了後に発生すると仮定される。しかしながら、一次圧密中に発生する二次圧密の可能性は以前から指摘されてきた¹²⁾ が、一次圧密中に発生する二次圧密挙動は明確にできない。したがって、本研究では単純に圧密度 U が 70, 80, 90% 時に二次圧密が開始すると仮定し、二次圧密変形量の評価を行った。以下、計算に使用したパラメータである。砂質土層の土被り圧 p_0 を 20 kN/m²、圧密試験の試験条件である荷重増分比 1 を採用し盛土荷重 q は 20 kN/m² とした。初期間隙比 e_0 、圧縮指数 C_c 、圧密係数 c_v 、二次圧密係数 C_{ac} は本研究の圧密試験から得られた値を採用し、それぞれ 2.94, 0.85, 0.0005 (m²/d), 0.04 とした。なお、仮想地盤の圧密変形量が最大を示す危険側のシミュレーションとなるよう e_0 、 C_c 、 C_{ac} については最大値を、 c_v は最小値を採用している。

上記の値を使用し、理論曲線と二次圧密量を考慮した沈下曲線をグラフ化したものが Fig. 9 である。最終沈下量 S_f は 0.325 m である。図中の実線は理論曲線、破線、一点鎖線、二点鎖線はそれぞれ $U=70, 80, 90\%$ に二次圧密が開始したと仮定した沈下曲線である。二次圧密を考慮することによって得られる沈下曲線は、実際の沈下挙動に類似することがわかる。図からわかるように、理論圧密終了までに約 70 年かかることが推定されたこと (図中の矢印) から、地盤の変形が長期間継続することが予想される。二次圧密を考慮した場合、二次圧密開始時の違いによって求まる沈下量が異なっている。70 年経

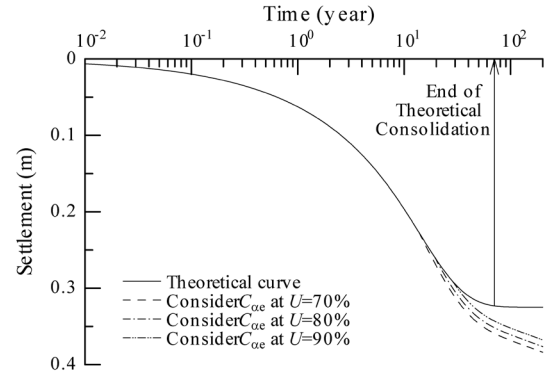


Fig. 9 Evaluation of consolidation deformation in virtual Hachirogata clay ground

過時の仮想地盤の沈下量は、 $U=70\%$ において 0.359 m、 $U=80\%$ において 0.352 m、 $U=90\%$ において 0.343 m となり、二次圧密が早期に開始するほど沈下量が大きくなることがわかる。そのため二次圧密開始時点の選定に関して詳細な検討が必要である。また、この変形量の評価においては、均質な層厚 5 m の仮想地盤を設定し、繰り返し試料の土質定数を使用していることから、今後は対象深度を深く設定し、不攪乱試料の土質試験および得られる土質定数をもとに検討を行う必要性がある。

4. まとめ

本研究は、八郎潟粘土の変形特性を評価するため、採取した八郎潟粘土試料を用いて段階載荷による圧密試験をはじめとした各土質試験を行った。本試験で使用した八郎潟粘土試料は砂分が多く粘土分の少ない粘性土であったが、高い液性限界、塑性指数および自然含水比を有することがわかった。圧密試験から求まる八郎潟粘土の体積圧縮係数は $10^{-4} \sim 10^{-2}$ m²/kN、圧密係数は 5–100 cm²/d、透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-7}$ cm/s であった。他の粘土試料と比較すると、八郎潟粘土の圧密係数と透水係数は低く、体積圧縮係数は高い値を示す傾向にあった。さらに、一定荷重下でひずみが進行する二次圧密挙動について解析すると、八郎潟粘土の二次圧密速度が卓越することがわかった。また、八郎潟粘土で構成された仮想地盤を想定し、地盤の圧密変形量の評価を行った。仮想地盤については、八郎潟粘土の層厚 5 m で砂質土層に挟まれた両面排水の地盤を想定し、この地盤に土被り圧分の盛土荷重を載荷したときの圧密の進行について理論曲線と二次圧密変形量を考慮した沈下曲線の評価を行った。計算に要する土質定数は、本試験より得られた定数を使用した。得られた最終沈下量は 0.325 m となり、一次圧密が終了するまでに約 70 年の時間を要すること、早期に二次圧密が開始すると沈下量が増大することがわかった。

上記結果から、八郎潟粘土の圧密変形には透水性が低いいため長時間を要すること、その変形量が大きくなること、さらに主要な変形が終了した後も時間の経過とともに

に変形が継続することを確認した。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会（基盤研究（C）、課題番号18KT05875）の補助を受けた。また、八郎潟粘土の採取に関して、農林水産省東北農政局西奥羽土地改良調査管理事務所、若鈴コンサルタンツ(株)東北支店からご協力をいただいた。最後に、本論文に関して、3名の査読者から貴重なご意見とご助言をいただいた。付記して深甚なる謝意を表する。

引用文献

- 1) 大潟村役場 (2011) 大潟村百科事典 (オンライン), (<https://www.ogata.or.jp/encyclopedia/index.html>) (2019.1.27 参照)
- 2) 河野英一・坂本茂弘・伊東義栄・松橋久光 (1995) 農業土木学会誌, 63(4), 49–55.
- 3) Tanaka, H. (2007) Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, 3, 1831–1852., Taylor & Francis Group, London.
- 4) Tanaka, H. and Locat, J. (1999) Canadian Geotech. J., 36, 493–508.
- 5) Locat, J. and Tanaka, H. (2001) Proc. 15th ICSMFE, 2295–2300.
- 6) Shiwakoti, D. R., Tanaka, H., Tanaka, M. and Locat, J. (2002) Soils and Foundations, 42, 1–17.
- 7) Mesri, G. (1973) Proc. ASCE, 99, SM1, 123–137.
- 8) 三笠正人 (1964) 土と基礎, 12(2), 17–24.
- 9) Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H. G. (1977) Proc. 9th ICSMFE, 421–494.
- 10) Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977) Proc. ASCE, 103, GT5, 417–430.
- 11) Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005) Fundamentals of Soil Behavior (3rd ed.). pp. 66–67. John Wiley and Sons, New York.
- 12) Taylor, D. W. (1948) Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, 700 pp.