

佐渡の鋭敏粘土

Sensitive Clay in Sado Island

島 山 正 則 (はたけやま まさのり)

応用地質㈱コアラボ試験センター

1. はじめに

「鋭敏粘土」という名称は、鋭敏比 S_t の概念を用いて Terzaghi (テルツァーギ) が提唱したものであり、我が国では有明海に分布する粘土 (有明粘土) が鋭敏粘土の代表格として広く知られている。Terzaghi の分類¹⁾によれば、 S_t が 4~8 の粘土を「鋭敏粘土」、 S_t が 8 を超える粘土を「超鋭敏粘土 (extrasensitive clay)」と呼び、また、 S_t が 16 以上の極めて特異な性質を持つ粘土をクイックレーと特称している。北欧やカナダにおいて報告されているクイックレーの成因は、巨大な氷塊に覆われていた地盤が、氷河期の終結に伴って氷圧から解放された後に隆起し、陸地化した海成粘土が徐々に塩分溶脱 (リーチング) を受けることによって鋭敏な状態に変化したと言われている²⁾。

一方、日本における鋭敏粘土の成因は、海水準変動に伴う海面上昇によって、泥質堆積物を主体とする地層が広範囲に堆積した。その後、海水準の後退によって海成平野を形成し、堆積した粘土が地下水等により塩分溶脱を受け、鋭敏な粘土層を形成したと考えられている。

日本の各地に分布している軟弱地盤には自然含水比が液性限界と同等、あるいは液性限界よりも高い値を示す“鋭敏な粘性土層”が存在する。このような鋭敏粘土の特徴として、粘性が高く、練り返すと流動化に近い状態となること、また、非排水せん断時には最大応力を過ぎたあたりで急激な破壊 (脆性破壊) を伴うことや、高い圧縮性と圧密係数が小さいことが挙げられる。そのため、土木や建設工事の際に問題となることが多い。

本報告では、佐渡島に分布する鋭敏な沖積粘性土の非排水せん断強度特性と圧密特性の特異性について、特に塑性指数 I_p に着目して考察した結果について述べる。

2. 佐渡島における沖積平野の形成

日本海に位置する佐渡島 (図-1 参照) は、北西部に連なる大佐渡山地と、南東部の小佐渡山地とに 2 分されており、島の中心部には国府川流域に沖積低地が分布している。この沖積低地は国仲平野と呼ばれ、最大層厚約 20 m の沖積粘土が堆積してい

る (図-2 参照)。

この国仲平野は、縄文海進の進行によって海が内陸奥部まで進入し、その後の海水準の後退によって形成された平野である。最近の研究によれば、国仲平野における標高 -5 m 以深の粘性土は海水域の環境下で堆積し、標高 -5 m 以浅の粘性土は淡水~汽水域の環境下で堆積したものであることが明らかになっている³⁾。

しかし、ここに堆積する海成粘土層は、塩分濃度がおおむね 1 g/L 程度と少なく³⁾、三浦ら⁴⁾が報告している有明粘土の塩分濃度と同等であることから、塩分溶脱 (リーチング) を受けて鋭敏な粘土地盤を形成している。塩分溶脱の要因は、海成粘土層下部に分布する礫層からの被圧地下水の浸透によって、間隙中の塩類が溶解し流出したと考えられている。

このように塩分溶脱によって鋭敏化した軟弱粘土地盤上に構造物を築造する際の問題点として、例えば、堤防のすべり破壊に対しては、鋭敏性を考慮した非排水せん断強さの検討が必要である。また、杭基礎橋台の安定に

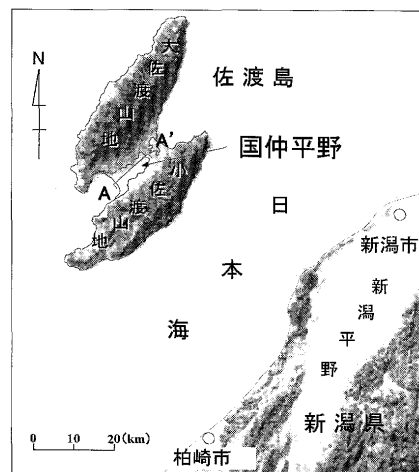
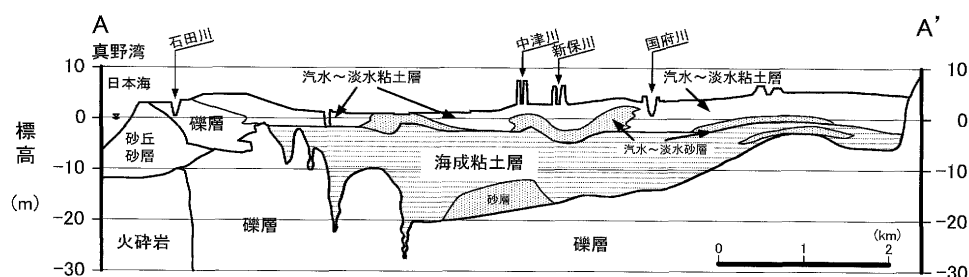


図-1 佐渡島の位置図

図-2 国仲平野の表層断面図 (新潟県地質調査業協会³⁾に加筆修正)

対しては、橋台背面の取り付け道路盛土の土圧の作用や、側方流動による橋台への影響が検討課題となる⁵⁾。

3. 国仲平野に分布する粘性土の土質特性

国仲平野に分布する沖積粘性土層は、シルト分・粘土分を主体とする粘性の高い地層であり、湿潤密度 ρ_t は $1.4 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ と小さな範囲に分布する。

図—3に、沖積粘土層の地盤特性を表す意味での代表地点における物理特性の深度分布図を示した。なお、同図には、盛土荷重等の影響を受けていない地点（盛土荷重 無 ●印）と、約6mの盛土荷重によって圧密が進行した地点（盛土荷重 有 ○印）の物理特性を併記している。

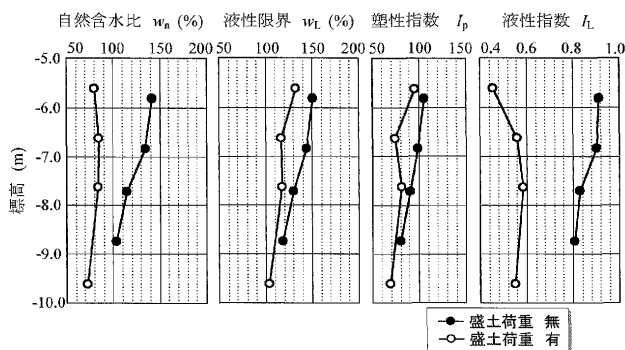
盛土荷重の影響を受けていない地点は、自然含水比 w_n は $100 \sim 150\%$ と高く、液性限界 w_L は、おおむね $w_L \geq w_n$ の関係にあり、高位な構造を有する高塑性な粘性土である。ただし、液性指数 I_L ($I_L = (w_n - w_p) / (w_L - w_p)$) は意外に小さく、全体的には1を下まわっている ($I_L = 0.8 \sim 0.9$)。

一方、盛土荷重によって圧密が進行している地点は、圧密に伴う含水比 w_n の減少傾向が各深度で顕著に現れているが、液性限界 w_L や塑性指数 I_p には自然含水比のような顕著な変化は見られない。そのため、液性指数 I_L は“盛土荷重 無”の地盤に比べて大きく低下している結果となっている。

3.1 非排水せん断強度特性

均質な粘性土の非排水せん断強さを求める方法としては、一軸圧縮試験が最も一般的であり多用されている。しかし、塑性指数 I_p が大きい粘性土のせん断破壊は、脆性的な傾向が強く、圧縮力が最大を示すと同時に急激な破壊が生ずる傾向がある。そこで、通常のひずみ制御による一軸圧縮試験（連続載荷方式）に加えて、クリープを考慮した進行性破壊への対応として応力制御による段階載荷方式の一軸圧縮試験（以下、一軸段階載荷クリープ試験と記す）を併せて実施し、両者の比率を考慮して原位置の設計強度を評価した。

一軸段階載荷クリープ試験の方法は、図—4に示すように、通常の一軸圧縮試験から得られる一軸圧縮強さ q_u の1/10に対応する応力を、1段階あたり10分間隔で段階的に載荷し、その応力とひずみの関係から降伏強度



図—3 物理特性の深度分布図

（以下、上限降伏値^{6),7)}と記す）を求める試験である。

塑性指数 I_p の高い鋭敏粘土の一軸圧縮試験結果は、破壊ひずみが小さく、ピーク強度付近で急激な脆性破壊を生ずることが多い。このような試料を対象に行った一軸段階載荷クリープ試験では、通常の一軸圧縮強さよりもかなり小さな応力から変形量が増大する傾向がみられる（図—4参照）。このような現象を考慮した強度の設定法として、Bjerrum（ペーラム）は、盛土や掘削に伴う基礎地盤の破壊事例をもとに、破壊に対する安全率（ペーラム強度から算定）と塑性指数 I_p の関係を示し、塑性指数 I_p の大きさに応じて安全率を低減する強度補正の考え方を提案している⁸⁾。

一方、本法では、塑性指数 I_p が大きい場合には高い安全率が必要であるという点ではBjerrumの考え方と同義であるが、一軸段階載荷クリープ試験で得られる上限降伏値 q_{uc} と一軸圧縮強さ q_u の比率を補正係数的な意味合いで考慮している点が異なっている。

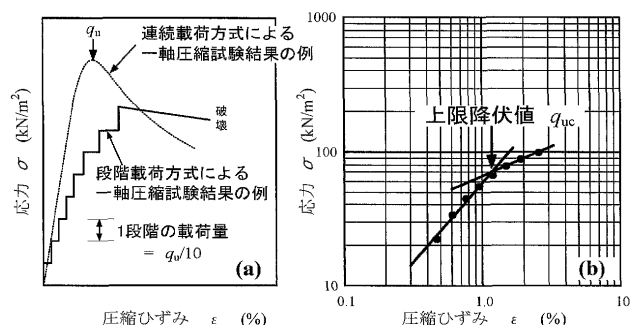
図—5に、強度低下率（上限降伏値 q_{uc} を一軸圧縮強さ q_u で除した値； q_{uc}/q_u ）と塑性指数 I_p の関係を示した。強度低下率は、塑性指数 I_p と良好な相関関係を示し、塑性指数 I_p の増加と共に強度低下率は減少している。特に、塑性指数 I_p が100付近では 0.4 ($q_u \times 0.4$ の応力が現場の設計強度) という極めて小さな値を示している。

地盤強度の決定法として、例えば、土田⁹⁾の研究によれば、乱れの少ない海成粘土地盤に対する強度は、一軸圧縮強さ q_u の0.75相当の強度を採用する方法が提案されている。この土田の提案を図—5に対比させると、強度低下率が0.75とした場合の塑性指数 I_p は50程度である。また、小川・松本¹⁰⁾がまとめた全国の港湾地域の海成粘土の塑性指数 I_p が40～50の範囲に多く分布していることから、図—5に示す考え方は、上述のような地盤強度の採用値の考え方と整合するものと考えられる。

以上のことから、塑性指数 I_p が50を超えるような鋭敏な粘性土については、原地盤の非排水せん断強度の設定にあたり、上述した $q_u \times 0.75$ よりも更に低減させることによって、すべり破壊等の地盤災害を未然に防ぐことが可能と考えている。

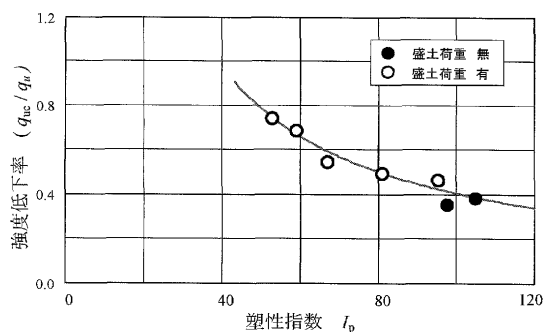
3.2 圧密特性

一般に土の圧縮特性は、 $e \sim \log p$ 関係 (e ；間隙比、 p ；圧密圧力) で表現される。図—6は、定ひずみ速度圧密



図—4 一軸段階載荷クリープ試験方法の概念図

報 告

図-5 強度低下率 (q_{uc}/q_u) と塑性指数 I_p の関係

試験によって得られた $e \sim \log p$ 関係であり、盛土等の荷重の影響を受けていない地点（盛土荷重 無 □印）と、約 6 m の盛土荷重によって圧密が進行した地点（盛土荷重 有 △印）の粘性土、さらに、“盛土荷重 無”の試料を練返して作製した試料（◆印）の 3 種類の関係を示している。

まず、練返した粘性土の $e \sim \log p$ 関係は、土田¹¹⁾の報告と同様に、圧密圧力に対して間隙比がほぼ直線的に減少する傾向を示している。次に、盛土荷重の影響を受けていない地点の粘性土は、初期間隙比 e_0 が 3.5 程度と高く、 $e \sim \log p$ 関係が、練返した粘性土よりも右方に大きく張りだした曲線形状を示している。また、圧密降伏応力 p_c 以降の圧密圧力の増加で非常に大きな勾配で沈下が発生し、練返し試料の曲線に漸近傾向を示す結果となっている。この p_c 以降にみられる急激な沈下挙動は、高位な構造を有する過圧密な粘性土の特徴的な圧密挙動であり、国仲平野に分布している粘性土は、過圧密な状態にあることが推察される。過圧密の要因については応力履歴によって過圧密化されたとは考えられないことから、二次圧密やセメンテーション等の年代効果によって構造が発達したものと推察される。

これに対して、盛土荷重によって圧密が進行した地点の粘性土は、圧密の影響によって初期間隙比が大きく減少し、 p_c 以降の急激な変形挙動が消滅している。

図-7 は、土田¹¹⁾によってまとめられた液性限界 w_L と圧縮指数 C_c の関係に国仲平野の粘性土の結果を併記し、両者を比較したものである。

ここで、 C_c は $e \sim \log p$ 曲線の最大勾配から求めた圧縮指数であり、 C_{c1000} は圧密圧力が 1 000 kN/m² の時の圧縮指数である。

図-7 (a) に示す液性限界 w_L と圧縮指数 C_c の関係をみると、国仲平野の粘性土は全般に液性限界 w_L が高い領域に位置している。特に、“盛土荷重 無”の試料の圧縮指数 C_c は、他の試料よりも高い値を示している。一方、図-7 (b) に示す液性限界 w_L と圧縮指数 C_{c1000} の関係では、圧密圧力の増大に伴って構造が消失し、一般的な海成粘性土の分布範囲に包含されている。

これらの傾向は、高位な構造を有する過圧密な粘土の特徴的な傾向であるが、圧密降伏応力 p_c を超える荷重の载荷に対しては非常に大きな圧縮性を示す試料であることが推測される。

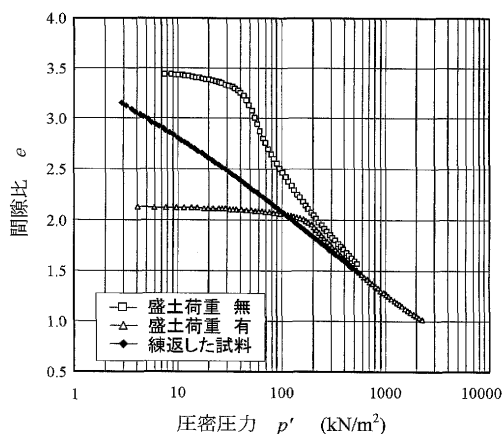
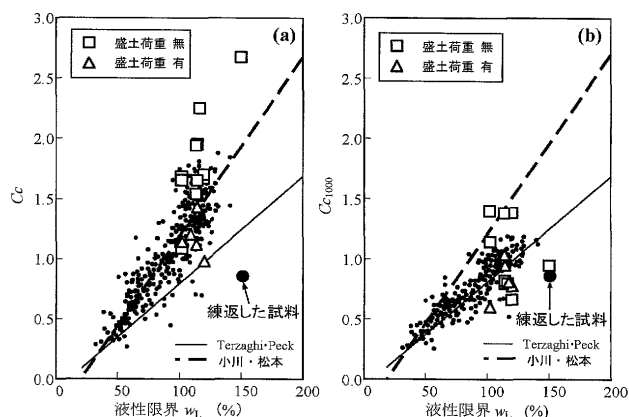
図-6 $e \sim \log p$ 曲線図-7 C_c と液性限界の関係（土田¹¹⁾に加筆修正）

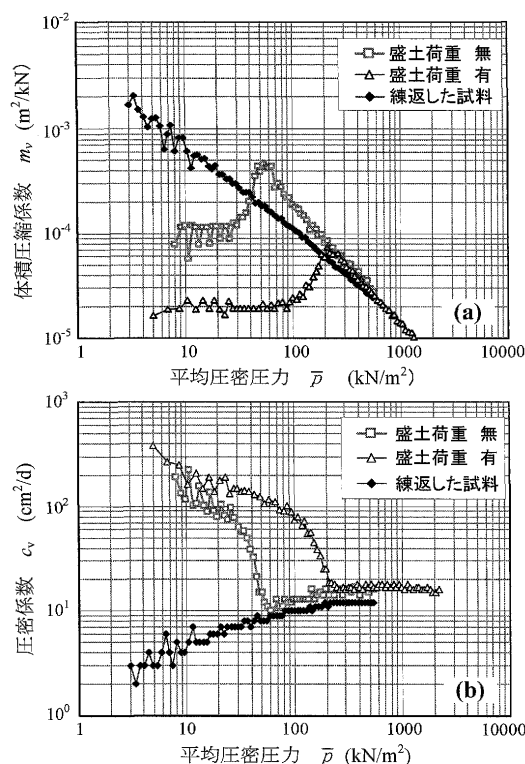
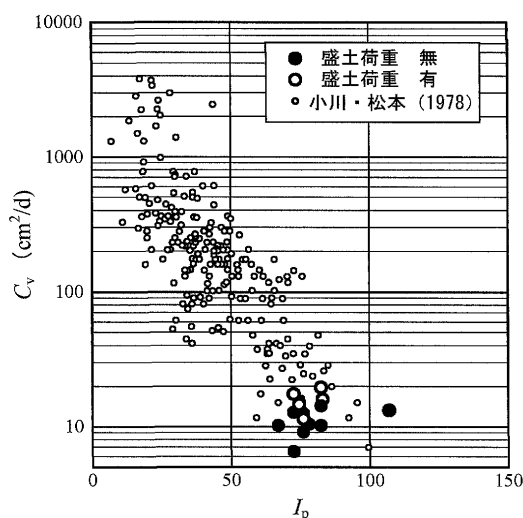
図-8 に平均圧密圧力 $\bar{p}$ と体積圧縮係数 m_v 、圧密係数 c_v の関係を示した。体積圧縮係数 m_v についてみると、盛土荷重の影響を受けていない地点の粘性土、ならびに盛土荷重によって圧密が進行している地点の粘性土ともに、正規圧密領域においては、練返した粘性土の m_v に漸近する傾向が明瞭に現れている。一方、圧密係数 c_v は、いずれの試料も、正規圧密領域において $c_v = 10 \sim 20$ cm²/d と非常に小さい値を示している点特徴的である。

図-9 は全国の港湾地域の高成粘土で得られた塑性指数 I_p と圧密係数 c_v の関係に、国仲平野の粘性土の結果をプロットして比較したものである。

圧密係数 c_v は、塑性指数 I_p の増加に伴って低下する傾向を示し、当該地のデータについても盛土荷重の有無にかかわらず、塑性指数 I_p が大きく、圧密係数が極めて小さい範囲に分布している。これは、圧密沈下が進行しても塑性指数 I_p への影響が少ないために、圧密係数にも大きな影響を及ぼさないことを裏付ける結果といえる。

4. ま と め

国仲平野に分布する海成粘土の特徴としては、塩分溶脱を受けているにもかかわらず液性限界が高い値を示し、また、液性指数 I_L は国府川流域に分布する海成粘土層で $I_L < 1$ の関係にある³⁾。一般的には、塩分溶脱を受け

図—8 $m_v \cdot c_v \sim \bar{p}$ の関係図—9 c_v と I_p の関係 (小川・松本¹⁰⁾に加筆修正)

ることによって、自然含水比 w_n に大きな変化がない状態で液性限界 w_L や塑性指数 I_p が低下し、その結果、液性指数 I_L が大きな値 ($I_L > 1$) となる。これまで考えられている傾向と異なる値を示す要因として田中ら¹²⁾の報告から、当該地の海成粘土中には高活性なスメクタイトを多く含んでいる可能性が推察される。

一方、過圧密地盤となっている要因については、応力履歴によって過圧密化したとは考えられないことから、二次圧密やセメンテーション等の年代効果によって構造が発達したものと推察される。この過圧密な現象は、高い間隙比を示し、 $e \sim \log p$ 関係が繰返した粘性土よりも右方に大きく張りだしている点や、 p_c 以降にみられる急激な沈下挙動からも裏付けられる。

また、当該地のような鋭敏な粘性土は、クリープ的な

載荷重に対しては一軸圧縮強さ q_u よりも小さな応力で破壊に至る場合が多い。このような粘性土地盤の安定性を評価するための指標として液性指数 I_L が用いられることもあるが、当該地のように $I_L \leq 1$ の粘性土に対しても塑性指数 I_p が高い値にあれば、強度低下率や圧密係数 c_v が左右されることが明らかであるので、塑性指数 I_p に着目した地盤強度や圧密特性の評価が重要であると考えている。

他方、塑性指数 I_p を指標として設計に必要な諸定数を導きだすことに対しては慎重な意見もあるが¹³⁾、例えば、河川堤防の嵩上げ等で、新たに荷重を載荷するような場合は、現場の非排水せん断強度の設定にあたっては重要な指標になり得ると考えている。特に、塑性指数 I_p が50を超えるような地盤に対しては、通常の一軸圧縮試験に加えて一軸段階載荷クリープ試験を併用して非排水せん断強さに対して強度低下率を考慮した上で設計に反映させることも有効な方法であると考えている。

最後に、佐渡に分布する沖積粘性土を対象とした研究報告が少ないことから“鋭敏粘土”としての知名度が低い、地盤材料として工事対象とする場合にはその性状は極めて難物である。今後、更に物性が解明され課題とされる性状解明が進むことを期待するものである。

参 考 文 献

- 1) Terzaghi, K.: *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, p. 31, 1948.
- 2) 柴田 徹: クイックレーとクイックスンド, 土と基礎, Vol. 20, No. 7, pp. 29~30, 1972.
- 3) 新潟県地質調査業協会: 新潟県地盤図説明書, pp. 2~51, 2002.
- 4) 三浦哲彦・赤峰剛徳・下山正一: 有明粘土の堆積環境とその鋭敏性について, 土木学会論文集, No. 541, pp. 119~131, 1996.
- 5) 渡部要一・竹村次朗・木村 孟: 裏込め荷重を受ける軟弱粘土地盤中の杭基礎橋台の長期挙動, 土木学会論文集, No. 568, pp. 227~240, 1997.
- 6) 村山朔郎・柴田 徹: 粘土のレオロジー的特性について, 土木学会論文集, 第40号, pp. 1~31, 1956.
- 7) 栗原則男: 粘土のクリープ破壊に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第202号, pp. 59~71, 1972.
- 8) Bjerrum, L: Problems of soil mechanics in unstable soils, *Proc. of 8th ICSMFE*, Vol. 3, pp. 111~159, 1973.
- 9) 土田 孝: 三軸試験による自然粘性土地盤の強度決定法に関する研究, 港湾技研資料, No. 688, pp. 164~168, 1990.
- 10) 小川富美子・松本一明: 港湾地域における土の工学的諸係数の相関性, 港湾技術研究所報告, 第17巻, 第3号, pp. 40~42, 1978.
- 11) 土田 孝: 海成粘土地盤の自然間隙比と土被り圧の関係に関する統一的な解釈, 地盤工学会論文報告集, Vol. 41, No. 1, pp. 127~143, 2001.
- 12) 田中洋行・J. Locat・D. R. Shiwakoti・田中政典: 日本と海外の海成粘性土の物理・化学的性質に関する相違点, 土と基礎, Vol. 49, No. 2, pp. 5~8, 2001.
- 13) 田中洋行・Jacquea Locat: 塑性指数に関する再考察, 土と基礎, Vol. 46, No. 4, pp. 9~12, 1998.

(原稿受理 2010.4.9)