25mm 径の塩ビパイプで採取した粘性土の品質と原位置強度の推定 (三重津海軍所ドライドック遺構の地盤工学的分析のなかで)

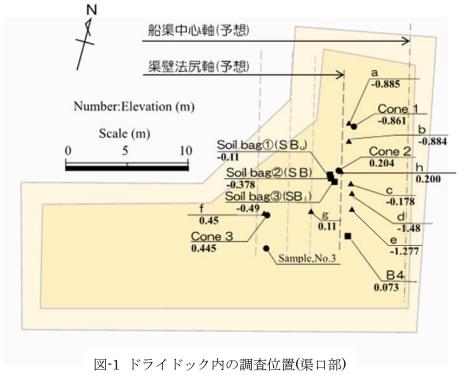
防衛大学校 (正) 正垣 孝晴·(学) 為廣 国寿 佐賀市教育委員会 中野 充

1. はじめに

三重津海軍所は、佐賀藩が 1859 年に設置した洋式海軍施設である. 我が国で現存する最古のドライドックがこの敷地内に地中保存され、2015 年に登録された世界遺産「明治日本の産業革命遺産」の構成資産の一つになっている. 2013 年の発掘調査では、ドック東側に木組みによる 4 段の渠壁が出現し、2016 年 3 月までの西渠壁に相当する場所の発掘調査では、約 80cm 厚の貝殻層が西渠壁部と予想される基底部の存在が確認されたが、東渠壁のような木組み構造はドックの西側では発見されていない。また、渠底部に対しては、貝の薄層や土嚢が確認されているが船荷重等を支持する強固な地盤改良の痕跡や構造体の存在は確認されていない。 渠底部の地盤工学的解釈 10とドック構築で使われた砂と粘土の産地特定と施工法 20の検討を行ってきた。 三重津海軍所は世界遺産に登録された文化財であるので、ボーリングを伴う試料採取は許されない。本稿は、内径 25 mmの塩ビパイプを用いて、渠底部から採取した粘性土の品質と原位置強度を推定し、ドライドック遺構を地盤工学的に分析する.

2. 検討方法

塩ビパイプによる試料採取とコーン貫入試験の位置を図 - 1 に示す。三重津海軍所ドライドックの渠軸は,ほぼ南北に配置されているが,図-1 はドック西側の渠口部に位置している。ドック西側の渠壁法尻軸とそれに直行する 3 箇所からポータブルコーン貫入試験(JGS 1431-2013)と先端を 30°程度の角度に加工した市販の塩ビパイプ(JIS K 6742:内径 25 mm,肉厚 3.5 mm)を地盤に貫入して,図-1 に示す a~g の 7 個所で試料を採取した。図 - 2 はドックの推定断面と塩ビパイプによる試料採取位置を示している。塩ビパイプは,長さ 50 mmに切断して,その中から直径 d 15 mm,高さ h 35 mmの小型供試体を作成して,サクション測定を伴う一軸圧縮試験 3 を行った。一軸圧縮試験は JIS A1216 に準拠している。



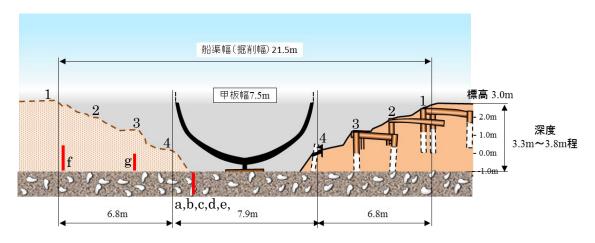


図-2 ドックの推定断面と塩ビパイプによる試料採取位置

3. 塩ビパイプで採取した試料の品質

三重津海軍所跡に隣接した佐野記念館公園 ⁴⁾と戸ケ里漁港 ⁵⁾の改築に関係して、乱れの少ない試料採取(JGS 1221)を伴うボーリング調査が行われている。当該地は表層から盛土、完新世の有明粘土と砂質土が互層状に堆積し、その下層は更新世の三田川層である。ドックはこれらの試料採取位置から 30~79m程の距離にあり、当該地の各土層の水平方向の連続性は

極めて良好であると判断されているり.塩ビパイプやコーン貫入試験の標高は,図-1のそれぞれの位置に併記している.

図-3 は自然含水比 w_n , 湿潤密度 ρ_t , サクション S_0 , 軸ひずみ ϵ_t , 一軸圧縮強さ q_u , 変形係数 E_{50} を標高Eに対してプロットしている.

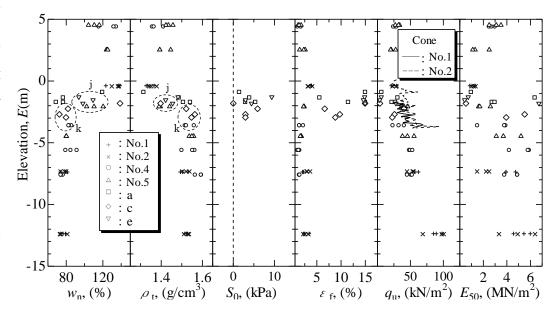


図-3 一軸圧縮試験結果

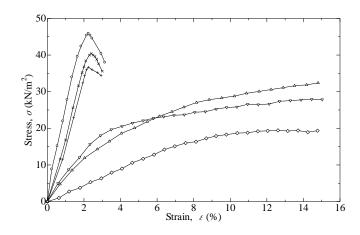


図-4 応力 σ とひずみ ε の関係 (No.5 と e)

表-1 図-	4 の供試体の測定値
--------	------------

		ω_n	ρ_t	S_{0}	q_u	E_{50}	$arepsilon_f$
		(%)	(g/cm^3)	(kPa)	(kN/m^2)	(MN/m^2)	(%)
+	No.5-3-1	110	1.40		36.7	1.6	2.3
×	No.5-3-2	102	1.44		40.4	1.7	2.4
0	No.5-3-3	120	1.39		45.9	2.6	2.3
Δ	e-U-1	94	1.48	9.3	31.7	14.0	14.9
♦	e-U-2	109	1.42	3.0	19.6	2.3	14.6
∇	e-U-3	98	1.46	4.4	28.1	6.7	14.9

コーン貫入試験による q_u は、コーン指数 q_c から得た粘着力 c を 2 倍して示している。塩ビパイプで採取した試料 の $E=-(1\sim3)$ mの深度では、 $w_n=70\sim140\%$ の変化があるが、図-3 の j で示す $E=-(1.4\sim2)$ mの No.5 と e の供試体の w_n は、それぞれ($102\sim120$)%と($94\sim109$)%の範囲であり、 ρ_t の平均値は 1.45 と 1.41 g /cm 3 と同等である(I_p は 75% の自然堆積土)。これらのプロットの応力 σ とひずみ ϵ の関係を図 - 4 に示す。図 - 4 に示す供試体の測定値を表 - 1 に纏めた。JGS 1221 に準拠して採取した試料 $^{4),5)}$ の σ と ϵ の立ち上がり勾配は大きい。この試料の ϵ_f は約 2%であ

るのに対し、塩ビパイプで採取した試料のそれらは 15%に達している。後者の q_u は前者の 65%程度であり、塩ビパイプの貫入と引抜きに起因した試料攪乱が大きいことが分かる。

4. 原位置非排水強度の推定とドックの構築(入船)が地盤強度に及ぼす影響

図 - 1 の a, c, e から採取した試料の $q_u/q_{u(max)}$ と $p_{\rm m}/S_{\rm o}$ の関係を図 - 5に示す. ここで $q_{\rm u(max)}$ は, a, c, eから採取した試料の q_u の最大値であり、 p_m は採 取した試料の有効土被り圧の 2/3(静止土圧係数 K_0 を 0.5 とした平均有効応力(kP_a)), S_o は供試体の サクション(kPa)である. プロットを外挿して, $p_{\rm m}/S_{\rm o}=1$ の $Rq_{\rm u}$ として、1.774 を読み取る. 測定し た $q_{\rm u}$ に $Rq_{\rm u}$ を乗じた値 $q_{{\rm u}({\rm I})}^*$ は、原位置の $q_{\rm u}$ の推 定値 6である. 川崎粘土に対するモデル試験の結 果を同様に図-6に示す.川崎粘土は大型土層(d 44.2 cm, h 69 cm)の圧密圧力が 49 kPaと 68kPaで 作成した塑性指数 I_p=69%の再構成粘土から、塩 ビパイプとブロックサンプリングで試料を得た. 49 kPaと68kPaのwnは、それぞれ87%と80%程 度である. 図 - 6 は 49 kP_a の結果であり、 Rq_u は 1.276 である. 図 - 6 の $p_{\rm m}/S_{\rm o}$ の最小値が 2.43(図 -5 は 4.01)と小さいのは、ブロックサンプリングの 供試体に対応したプロットであり, 試料の乱れが 小さいのが理由である.

図 - 7 は $q_u/q_{u(1)}$ *と p_m/S_o の関係を示している. 図 - 3 で示した三重津の結果(+)に加え、佐賀市の旧築地反射炉(×)と川崎粘土に対するモデル試験の結果も併せて示している. 図 - 7 の直線は、原位置の非排水強度 $c_{u(1)}$ を推定する簡便法 6 として提案されている式であり、 q_u と p_m 、 S_o から $c_{u(1)}$ が推定できる. この式は、 I_p =26~370%、 q_u =15~168 kN/m^2 の範囲の国内外の 32 の堆積地に対する231 個の供試体から得ている. この推定式から得た $c_{u(1)}$ は、 K_0 圧密三軸試験による原位置圧密降伏応力下の非排水強度とも対応し、推定値の変動係数の観点でも実用的であると解釈されている 7 .

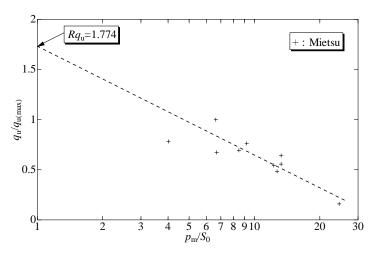


図-5 $q_u/q_{u(max)}$ と p_m/S_o の関係 (三重津ドライドック a, c, e)

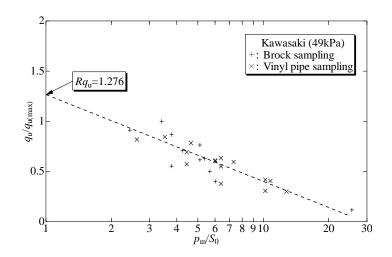


図-6 $q_u/q_{u(max)}$ と p_m/S_o の関係 (川崎粘土,49 kP_a)

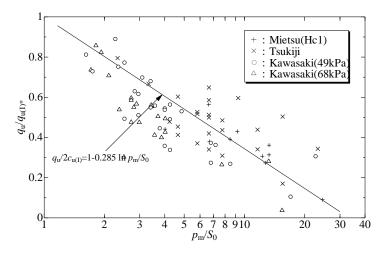


図-7 各種試料の $q_{\rm u}/q_{\rm u(I)}^*$ と $p_{\rm m}/S_{\rm o}$ の関係

図 - 7に示すプロットは、三重津の結果を含めて、図中の直線の近傍に位置している。表 - 2は、各プロットの p_m/S_o 下で、 $q_u/2c_{u(1)}$ に対する $q_u/q_{u(1)}$ *の比 $Rq_{u(1)}$ の統計量をまとめている。n とs はデータの個数と標準偏差である。s は 0.1~0.2 の値であり、ガラスの破壊強度や軟鋼の上降伏点の変動係数と同等である 7 . すなわち、 $q_{u(1)}$ *の推定値のばらつきは、人工材料のそれらと同等であることが分かる。

図 - 8 は q_u を E に対してプロットしている。図 - 1 の a, c, e から得た塩ビパイプ貫入によって採取した試料の q_u は,採取時の試料の乱れに起因して JGS 1221 で採取した試料の q_u (+)とコーン貫入試験による値より小さい。しかし,a, c, e の q_u とサクションを用いて簡便法で推定した $2c_{u(l)}(\bigcirc)$ は,JGS 1221 で採取した試料の q_u やコーン貫入試験による強度より 2 倍程度大きい。極限支持力 q_a は,一般に粘着力 c の 5.14 を乗じて計算される。図 - 8 に示す q_u と $2c_{u(l)}$ の平均値(12 kN/m^2 と $38 kN/m^2$)から計算される q_a は, $63kN/m^2$

表-2 $q_u/2c_{u(l)}$ に対する $q_u/q_{u(l)}^*$ の統計量

Site	n	$Rq_{u(I)}$	S
Mietsu	11	0.97	0.18
Tsukiji	24	1.01	0.22
Kawasaki (49kPa)	26	1.19	0.23
Kawasaki (68kPa)	20	1.22	0.16
Total	81	1.10	0.20

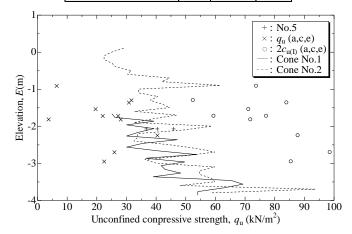


図-8 quの測定値と原位置強度の推定値

と 196kN/m² となる. このドックでの修理記録がある電流丸(咸臨丸の姉妹船)の平均荷重度 g を 21.2kN/m² とすると, q_a/q で定義した安全率は, それぞれ 2.3 と 6.7 となる.

当ドライドックの場合,入船によるドックは、ドック構築に伴う有効土被り圧(36.2 kN/m²)の減少分より小さい.このため、ドック構築や入船による船渠の地盤の安定と変形に関する地盤工学的問題は、小さいと推察される.有明粘土地盤上に、横須賀製鉄所ドライドックのような石造ドックを構築する地盤工学的技術は、当時の我が国には存在していないことを反映して、三重津海軍所船渠は、潮汐による干満差を利用した簡易な木製ドライドックであると解釈される.三重津海軍所の木組み間に石材でなく、砂と粘性土の互層を配しているのは、軟弱な有明粘性土地盤を意識した構造体の荷重低減と版築による地盤強度の増強に加え、潮汐の干満による過剰間隙水圧の消散効果が期待される.ドック底部の標高(約-1m)を更に下げることは干潮時の自然排水の観点で困難と推察される.以上のことは三重津海軍所のこのような地盤とドックの状況を反映していると推察された.

5. おわりに

内径 $25 \, \mathrm{mm}$ の塩ビパイプを用いて、渠底部から採取した粘性土の品質と原位置強度を推定し、ドライドック遺構を地盤工学的に分析した。 q_u の測定値や原位置の推定値を用いた支持力の計算から、ドック構築や入船による船渠の地盤の安定に関する地盤工学的問題は、小さいと推察された。有明粘土地盤上に、横須賀製鉄所ドライドックのような石造ドックを構築する地盤工学的技術は、当時の我が国には存在していないことを反映して、三重津海軍所ドライドックは、潮汐による干満差を利用した簡易な木製ドライドックであると解釈された。

参考文献 1) 正垣孝晴・中野充:三重津海軍所ドライドック渠底部の地盤工学的解釈, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, pp.46-47, 2016. 2) 正垣孝晴・中野充・鈴木直文:三重津海軍所ドライドックで使われた砂と粘土の産地特定と施工法, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, pp.47-48, 2016. 3) Shogaki, T.: Effect of specimen size on unconfined compressive strength properties of natural deposits, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.1 pp.158-167, 2007

- 4) 川副町企画商工課,委託第1号平成12年度佐野記念館公園地質調査業務委託,地質調査報告書,平成13年2月.
- 5) 川副町,平成 13 年度 戸ケ里漁港(早津江地区)修築(19 号物揚場地質調査)委託報告書,平成 13 年 11 月.
- 6) Shogaki, T.: An improved method for estimating *in-situ* undrained shear strength of natural deposite, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.2, pp.1-13, 2006. 7) 正垣孝晴:性能設計のための地盤工学,鹿島出版会,pp.94-100, 2012.