三重津海軍所ドック渠壁と旧佐賀城構口橋台の路床の土工材料の産地同定

防衛大学校　　正会員　正垣孝晴・奥田大史
埼玉大学　小口千明

1．はじめに

三重津海軍所ドック渠壁と旧佐賀城構口橋台の路床の土工材料として使用されている砂と粘性土の産地を検討する。前者はドック北壁 14 層（No.15）と構口橋台路床のトレンチ（No.41）の砂であり，後者はドック 2 トレ北壁 13 層（No.1）と構口橋台路床のトレンチ（No.40）の粘性土である。検討に用いた粘性土は，図-1 および図-2 中に，砂質土は図-2 中に，凡例として示されている。これらには，上記の試料のほか想定される産地の試料，比較対象として用いた川崎粘土（No.28）なども含まれる。川崎粘土は，神奈川県川崎市の東京湾から採取した沖積粘性土であり，三重津海軍所や旧佐賀城構口橋台の使用材料ではないものの，三重津海軍所船屋地区の木杭の施工法等を検討するためのモデル試験[1)]やコーン貫入試験[2)]の結果の解釈の検討に用いたものである。これら 14 試料に対して，粒度・液塑性限界試験と造岩鉱物と粘土鉱物の同定を行い，比較検討した。

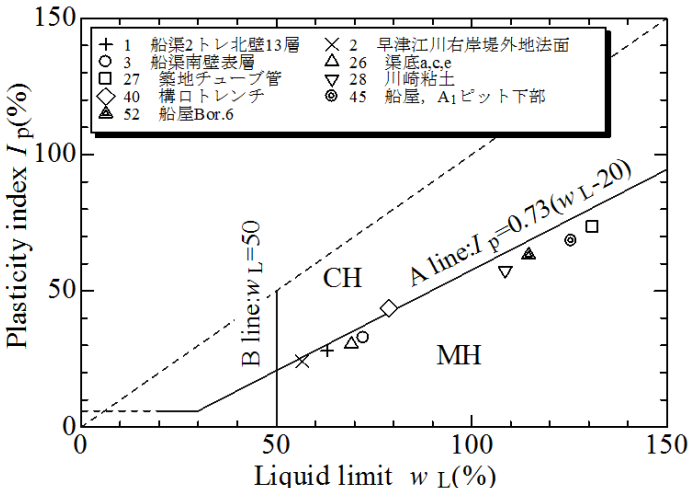

図-1 粘性土の塑性図

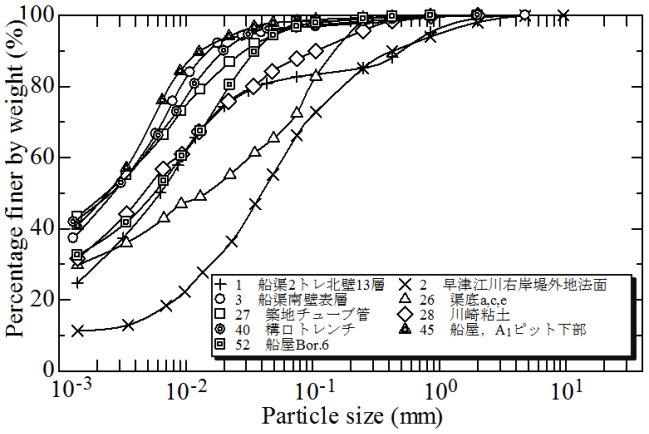

図-2　粘性土の粒径加積曲線

2．粒度・液塑性限界試験結果

粘性土 9 試料について行った液塑性限界試験の結果（図-1）より，ドック 2 トレ北壁 13 層と構口トレンチを含む塑性指数 I_p が 24～44%と I_p=58～73%の 2 つのグループに区分できることが見て取れる。前者のグループは，早津江川に遡上する浮泥（No.2）と同様な塑性を示し，後者のそれは有明粘土（□，△，◎）や川崎粘土（▽）の自然堆積した沖積粘土である。JGS 0051-2000[3)] によると，No.40 の構口粘土（高液性限界粘土 CH）を除き，高液性限界シルト MH に分類される。

三重津海軍所ドライドックの渠壁材料の検討の中で，早津江川に遡上する浮泥の粒度と塑性的性質の定点調査[4)] が行われている。それによると，ドックや船屋地区を含む早津江川に堆積する浮泥の粒度と塑性的性質は，構口トレンチ（No.40）を含み，図-1 に示す範囲と同等である。構口トレンチ（No.40）は，A 線（I_p=0.73 (w_L-20)）直上に位置するが，両グループの粘性土は

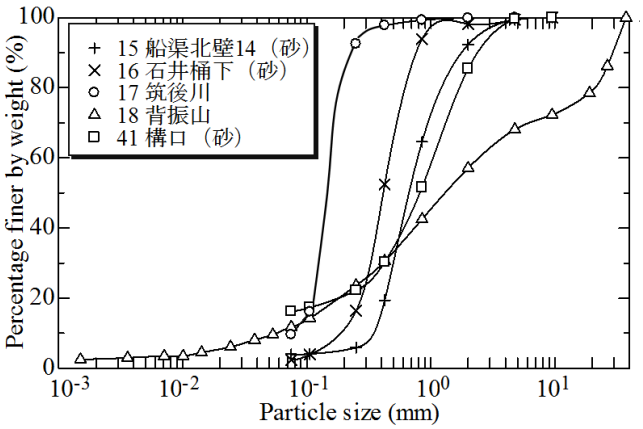

図-3　砂質土の粒径加積曲線

キーワード　三重津海軍所，ドライドック，佐賀城構口橋台，物理特性，粘土鉱物，造岩鉱物
連絡先　〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20　TEL：046-841-3810　E-mail：shogaki@nda.ac.jp

いずれも我が国の海成粘性土[5]の範囲である。しかし，構口トレンチ（No.40）の粘性土は，黄褐色であることから，他の粘性土（青灰色）と異なる陸成粘土であると判断される。

粘性土の粒径加積曲線を図-2 に示す。船渠 2 トレ北壁 13 層（No.1）の 0.03 mm 以下の粒径は，早津江川に遡上する浮泥（No.2）や自然堆積土（No.27,45,52）と同様な曲線を示すが，それ以上の粒径では，シルトと砂分の混入が多く，粒径加積曲線としては不自然な形状を示している。0.2 mm 以上の粒径が早津江川右岸堤外地（No.2）のそれと整合することから，この粘土が船渠 2 トレ北壁 13 層（No.1）に混入した（あるいは，混合させた）と推察される。

砂質土についても粒度分析試験を行った（図-3）。ドック北壁 14（No.15）と構口トレンチ（No.41）で使用された砂は，後者の細粒分含有量が約 16%であり前者よりも多い。後者の色調はこのトレンチ内の互層地盤の粘性土と同様に黄褐色であり，山砂と判断される。

３．化学組成の分析結果

化学組成については，走査型電子顕微鏡とそれに付随するエネルギー分散型 X 線化学分析装置（日本電子株式会社製 SEM-EDS, JSL-5400LV/JSD2200）を用いて分析した。十分に紛砕して粉末状態にした試料を，マウント（試料台）上に載せてカーボン蒸着を行い，通常の岩石や土に含まれる主要 10 元素（SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, $FeO+Fe_2O_3$，MnO，MgO，CaO，Na_2O，K_2O，P_2O_5）と硫黄（SO_3）を FP（ファンダメンタルパラメータ）法により分析した。この方法は，物質に電子を照射してはね返る X 線が元素固有のエネルギー値を持つことを利用し，理論計算により試料を構成している元素の種類とその組成（wt. %）を推定するものであり，エネルギー分散型蛍光 X 線分析と同様の結果を得ることができる。あらかじめ定性分析を行うことで，上記 11 元素が主要元素であることを確認している。

元素分析の結果を表-1 に示す。各粉末試料を 2 回分析した平均値である。石井樋下流部（No.16），ドック 2 トレ北壁 14 層（No.15），および，構口トレンチ 3（No.41）の試料は，SiO_2 値が 60 wt.%以上，Na_2O 値と K_2O 値は MgO 値や CaO 値よりも高い値を示し，背振山の砂（No.18）の化学組成に近い。また、黄褐色を呈す構口トレンチ（No.41）の試料は，筑後川河口の砂（No.17）と同様に MgO と CaO の含有量が高いことから，その産地は安山岩質を給源流域である可能性が示唆される。また，鉄分（$FeO+Fe_2O_3$）の含有量が 4.32 %と他よりも低く，この砂そのものが強力に鉄酸化に寄与したとは考えにくい。筑後川河口の砂（No.17）については，SiO_2 値が 60 wt.%を下回り，Na_2O 値と K_2O 値は MgO 値および CaO 値よりも低い，という結果であった。

表-1 化学組成分析の結果

Soil (No.)	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	$FeO+Fe_2O_3$	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	SO_3	Total
船渠 2 トレ北壁 14 層（砂）(15)	62.94	0.83	17.73	7.10	0.06	1.26	2.77	3.18	3.99	0.01	0.09	99.96
石井樋下流部（砂）(16)	64.71	0.75	16.71	7.59	0.06	1.33	2.37	2.35	3.66	0.41	0.09	100.00
筑後川河口（砂）(17)	57.06	1.12	19.68	9.99	0.26	2.60	3.50	2.70	2.61	0.28	0.24	100.04
背振山（砂）(18)	62.58	0.84	20.72	6.37	0.39	0.67	1.33	2.20	4.71	0.12	0.11	100.05
構口トレンチ 3 砂（最上層）(41)	71.38	0.55	16.12	4.32	0.13	0.97	1.14	2.12	2.74	0.34	0.18	100.00
船渠2トレ北壁13面(粘土)(1)	57.28	1.19	22.17	11.45	0.26	1.98	1.94	0.73	2.41	0.37	0.25	100.03
早津江川右岸堤外地法面(粘土)(2)	59.35	1.01	21.66	8.40	0.26	2.58	2.53	1.05	1.88	0.53	0.77	100.08
船渠南壁表層（粘土）(3)	57.03	1.04	23.81	11.07	0.05	2.42	1.68	0.47	1.72	0.35	0.39	100.03
渠底 a,c,e (26)	59.29	1.10	20.03	8.18	0.34	2.98	1.85	1.04	2.08	0.87	2.24	100.00
築地チューブ管 (27)	62.76	1.23	19.89	7.86	0.41	1.92	1.17	0.86	2.02	0.33	1.56	100.00
川崎粘土 (28)	62.51	1.30	20.77	8.46	0.30	1.77	1.31	1.12	2.00	0.19	0.26	100.00
構口トレンチ 3 粘土 (40)	59.25	0.76	17.07	9.13	0.11	2.99	3.57	2.16	2.26	0.27	2.42	100.00
船屋, A1, ピット下部 (45)	61.72	0.95	19.99	6.99	0.08	2.78	1.27	1.40	1.88	0.24	2.69	100.00
船屋, Bor.6 (45-mm サンプラー) (52)	59.84	1.11	19.74	8.20	0.39	2.71	0.88	1.43	1.93	0.70	3.07	100.00

粘土画分の 6 試料（No.1, 2, 3, 26, 40, 52）は，いずれも，SiO_2 値が 60 wt.%よりも低く，Al_2O_3 値と $FeO+Fe_2O_3$ 値は 26～34 wt.%と高く，Na_2O 値や CaO 値は 0.5～2.4 wt.%と低い。風化あるいは変質して，SiO2 やアルカリ・アルカリ土類金属が溶出し，鉄分が残存して粘質土となったものと考えられる。No. 26, 27, 28, 40 は，SiO_2 の含有量が 59~63 wt.%の範囲にあり，化学組成的には安山岩質に近い。また，No.26,40,45,52 からは，硫黄（SO_3）も検出されている。このことは，海成土そのものであること，もしくは，地中などの還元環境で硫酸還元菌の活動で硫黄が生成されたことが推定される。なお，No.26（渠底の粘土）と No.28（川崎粘土）は同程度の組成値を示していることから，川崎粘土を用いたモデル試験やコーン貫入試験の結果 [1),2)] と三重津海軍所の試験結果との整合性を議論するうえでも遜色ないと考える。

4．造岩鉱物と粘土鉱物の同定

粘土と砂試料に含まれる鉱物を同定するために，（埼玉大学科学分析支援センター所有の）X 線粉末回折装置（XRD）（（株）リガク製 Ultima III） を用いて，X 線の管電圧 40 kV，管電流 40 mA，発散スリット 0.5°，散乱スリット 0.5°，受光スリット 0.3 mm の条件で分析を行った。砂質試料については，メノウ乳鉢を用いて十分に粉砕した測定用試料を，スキャンスピード 4.0°/min，スキャンステップ 0.02°，3°～60°の回折角の範囲で分析した。粘土試料については，水簸を行い 2 μm 以下の粘土画分を集めたペースト状の試料を，スキャンスピード 2.0°/min，スキャンステップ 0.01°，3°～20°の回折角の範囲で定方位法にて分析した。

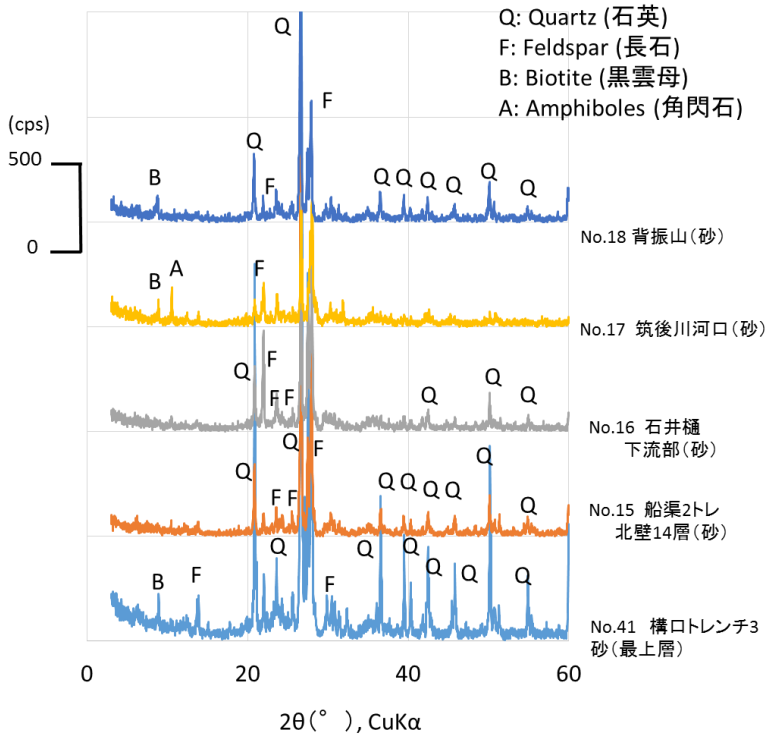

図-4 砂質試料の鉱物同定結果

また，膨潤性の粘土鉱物が含まれているか否かを調べるために，エチレングリコール処理後の試料も測定した。

砂質試料の分析結果（図-4）より，構口トレンチ 3（No.41）と船渠 2 トレ北壁 14 層（No.15）の試料は背振山（No.18）の砂ときわめて類似した XRD パターンを示し，主要な鉱物として，石英，長石，黒雲母が含まれており，花こう岩起源であることが推定される。築後川河口（No.17）の試料は，石英を含まないことが特徴であり，角閃石が同定された。この試料は SEM-EDS 分析からも，鉄やマグネシウムに富む組成であることが示されている。これは，筑後川流域の上流部に位置する耶馬渓地域ないし英彦山地域に分布する耶馬渓溶結凝灰岩（デイサイト質）は多くの角閃石を含むこと [6)] に加え，その近隣には安山岩質の九重火山も分布することなどから，これらの地域が給源である可能性が推察される。

一方，構口トレンチ（No.41）は，長石のピークとして 2θ =14° で出現しているのが特徴的で，角閃石も含まれていないことから，同じ給源流域，すなわち，筑紫川河口の砂ではないと推察される。以上の結果から，ドック 2 トレ北壁 14 層（No.15）と構口トレンチ 3（No.41）は，筑後川河口部の砂ではなく，脊振山系の流域の砂を用いていると考えるほうが妥当であろう。

また，2 μm 以下の粘土画分については。前記のように，回折角を絞った詳細な分析に加え，エチレングリコール処理も行ったことで，カオリン鉱物，雲母粘土鉱物，およびスメクタイト等の粘土鉱物が同定された。カオリン鉱物と雲母粘土鉱物は主に花こう岩の風化により生成されるが，スメクタイトはよりアルカリ環境下あるいは熱水の影響がある場合に生成されるといわれており [7),8)]，デイサイト～安山岩質の地質を給源流域とす

る基盤岩の風化により生成されたと推察される。川崎粘土（No.28）を含め，No.1, 2, 3, 26, 27, 40, 45, 52 の粘土画分は，構成している粘土鉱物の種類は同様であるものの，試料によってはスメクタイトを多く含むもの（No.41 など）もあり，塑性指数が高いことと調和している。

５．おわりに

粒度・液塑性限界試験と造岩鉱物と粘土鉱物の分析結果は，以下のように要約される。

1) 船渠 2 トレ北壁 13 層（No.1）の 0.03 mm 以下の粒径は，早津江川に遡上する浮泥（No.2）や自然堆積土（No.27, 45, 52）と同様な曲線を示した。しかし，それ以上の粒径では，シルトと砂分の混入が多く，粒径加積曲線としては不自然な形状を示した。0.2 mm 以上の粒径が早津江川右岸堤外地（No.2）のそれと整合することから，この粘土が船渠 2 トレ北壁 13 層（No.1）に混入した（あるいは，混合させた）と推察された。

2) 構口トレンチ（No.41）は，2θ =14° に特徴的に出現する長石のピークをはじめ，石英と黒雲母を含むが，角閃石を含まず，花こう岩起源であると推察される。したがって，筑紫川河口の砂ではなく，脊振山系の流域の砂を用いていると考えるほうが妥当である。

3) 筑後川河口（No.17）の試料は，石英を含まないことが特徴であり，角閃石が同定された。これは，筑後川流域の上流部に位置する耶馬渓地域ないし英彦山地域に分布する耶馬溪溶結凝灰岩（デイサイト質）は多くの角閃石を含むこと [6] に加え，その近隣には安山岩質の九重火山も分布することなどから，これらの地域が給源と推察される。

4) No. 26（渠底 a,c,e）, 27（築地チューブ管）, 28（川崎粘土）, 40（構口トレンチ）は，SiO_2 の含有量が 59~63 wt.%の範囲にあり，安山岩質に近い。とくに, No.26 と No.28 は化学組成的にも同程度の組成値を示していることから, 川崎粘土を用いたモデル試験やコーン貫入試験の結果 [1) 2)] と三重津海軍所の試験結果との整合性を議論するうえでも遜色ないと考える。

参考文献

1) 奥田大史・正垣孝晴：木杭打設による周辺地盤の変形挙動に関するモデル試験，第 45 回土木学会関東支部研究発表会，投稿中，2018.

2) 正垣孝晴・奥田大史・渡邉優一・中野充：ポータブルコーン貫入試験による原位置非排水強度の推定，第 14 回地盤工学関東支部発表会，pp.114-117, 2017.

3) 地盤工学会：土質試験の方法と解説（第 1 回改訂版），pp, 223, 2000.

4) 正垣孝晴・中野充・鈴木直文：早津江川に遡上する浮泥の粒度と塑性的性質の定点調査（三重津海軍所ドライドック渠壁材料の検討に中で），第 52 回地盤工学研究発表会，pp. 319～320, 2017.

5) 松本一明・三嶋信雄・柳沢栄司：第 2 章　判別分類に関する試験，地盤調査・土質試験結果の解釈と適用例，地盤工学会，p.57,1998.

6) 北川隆司・柿谷 悟・湊 秀雄：花崗岩中の粘土細脈を構成する雲母粘土鉱物-モンモリロナイト鉱物・雲母-膨潤層混合層鉱物. 粘土科学, 21, No. 4, pp.141-152, 1981.

7) Kitagawa, R.: Clay veins and clay minerals in the granitic rocks in Hiroshima and Shimane Prefectures, southwest, Japan. –Effect of the hydrothermal activities on the de-composition of the granitic rocks– Jour.Sci. Hiroshima Univ. Ser. C, 8, 47-80, 1986.

8) 鎌田浩毅：宮原地域の地質. 地域地質研究報告. 5 万分の 1 地質図幅. 福岡(7) 第 49 号. 地質調査所, 2007.