

大林組技術研究所 正員 喜田大三

1. まえがき

土木では、土は主要な天然の建設材料である。したがって、人工の建設材料の場合と同様に、土木工事の設計・施工前にその物性、すなわち土の物理的・力学的諸性質ばかりでなく、それら諸性質を発現させる原因となる化学的性質をも把握しておく必要がある。

そして、喜田は1961年に土質化学を次のように定義した¹⁾。“土の物理的・力学的諸性質を解明し改善するため、土の鉱物組成、化学成分、界面化学的性質および各種添加剤との化学的諸反応を研究する科学”つまり、土質化学は化学と物理・力学との境界の科学である。

さて現在、当社はシンガポール東海岸の埋立工事を行なっている(写真-1、-2、-3)。ベドック—タンジョンルー向の海岸、延長8.8km、幅260~660mを埋立てるため、背後のベドック丘陵の花崗岩系沖積砂土(図-1)を掘削し、掘削土をベルトコンベヤにて埋立地に運搬している。埋立土量2065万 m^3 の約1/3にあたる700万 m^3 の土は、わが国の花崗岩系砂土にみられない極めて特異な性質を有している。すなわち、掘削時にこの砂土は非常に硬く掘削刃の摩耗が激しく、他方、一度スコールに襲われると極めて容易に軟化し粘土般的性質を示す。

そこで、掘削土がかゝる特異的性質を示す原因を土質化学的に究明し、掘削工法を検討する際に指針を与えようとした。なお、研究成果の詳細は社内的に²⁾、また技研所報³⁾に発表している。

2. 土が硬く、掘削刃の摩耗が激しい。

2-1. 実験項目 (1)粒度試験、(2)単位体積重(γ)の測定、(3)土の構造および構成鉱物の観察、(4)砂分中の一次鉱物量の測定。

2-2. 結果と考察 掘削時に砂土が非常に硬く、掘削刃の摩耗が激しい理由を土質化学的に検討した。その結果、砂粒子が密に詰っており、最も硬い石英砂が多量に(土全体の約60%重量)含まれていた。

(1) 密に詰った構造をもつ砂土である。図-2に粒度試験結果を示す。さて普通の砂土のγは約1.8 g/cm^3 であるが、供試土のγは2.08 g/cm^3 である。このことは、砂粒子が非常に密に詰っていることを示唆している。そこで、気乾土塊をカナダバルサム液で固め、厚さ0.03mmの薄片を作成し、土の構造を観察した。図-3に示すように、砂粒子ばかりでなく、その間ゲキにもシルト・粘土分が密に詰っている。な



写真-1 バックホウエクスケーターによる掘削

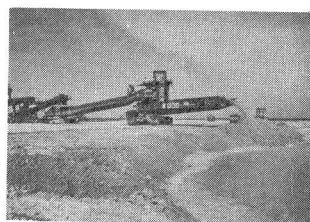


写真-2 スプレッダーによる掘削土の埋立

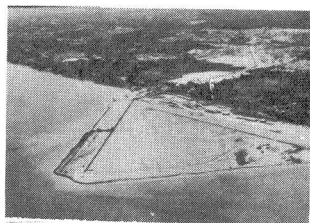


写真-3 空からの埋立現場

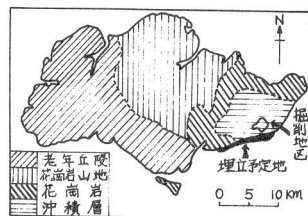


図-1 地質図

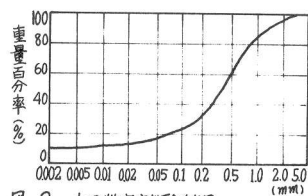
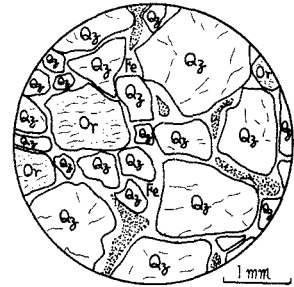


図-2 土の粒度試験結果

お、一面セン断において自然含水状態で $C=0.7\text{ kg/m}^2$ 、 $\phi=40^\circ$ である。

(2) 硬い石英砂を約60%も含む。図-3の薄片検鏡図によれば、特に多量の石英が観察される。正長石も観察されるが、大部分粘土化している。また花崗岩に由来するにもかかわらず、雲母は殆んど認められず、すでに粘土化していると考えられる。さて、供試土の86.7%を占める砂分(>0.02mm)について、各粒径ごとに一次鉱物量を測定し、その結果を表-1に示した。粒径の大きい砂分ほど石英量が増え、そして砂分全体に対し、石英含有量は69.1%重量(土全体の約60%重量)という非常に高い値である。しかも、石英のモース硬度は7であり、普通の上中に存在する一次鉱物のうち最も硬い。



Qz: 石英, Or: 正長石(大部分粘土鉱物化)
Fe: 鉄鉱物および粘土鉱物

図-3 薄片の偏光顕微鏡観察図(Open Nicolによる)

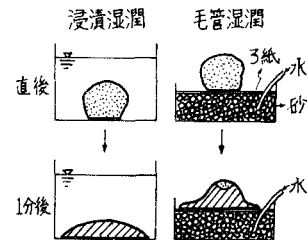
以上のように、この砂土には多量の石英砂が密に詰まっているので、掘削時に掘削刃の摩耗が激しいのは当然である。

3. 土は水で容易に軟化し、粘土的性質を示す。

3-1. 実験項目 (1)沸化現象の観察、(2)粘土鉱物の同定—X線分析(Cu K α)、示差熱分析、電顕観察、呈色反応、(3)化学的性質—陽イオン交換容量(CEC)、交換性陽イオン、水素イオン濃度(pH)、三二酸化物などの各測定、(4)モンモリロナイトの膨潤分散性の検討、(5)耐水性粒団の分析、(6)透水試験、(7)コンシステンシー試験。

3-2. 結果と考察 掘削土は、前章2で説明したように、非常に硬い砂土である。しかし、現地ではスコールによって容易に軟化し粘土的性質を示す。かかる特異的現象の原因を土質化学的に検討した。その結果、粘土含量はわずか約12%であるが、その40~50%は2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物モンモリロナイトであり、この粘土鉱物が水と極めて良く親和するので、加水時に膨潤して土を容易に軟化させ、また粘土質にすることが判明した。

(1) 水で容易に軟化し、粘土的性質を示す。図-4に示す沸化実験において、供試土は浸漬湿潤でも毛管湿潤でも速やかに崩壊した。しかも、この沸化崩壊した土の耐水性粒団の分析結果を粒度試験結果と比較し、表-2に示した。この土は水中で構成基本粒子すなわち一次粒子にほとんど分割されている。



(注)軟化崩壊部分を斜線で示す。

図-4 気乾土塊の沸化現象

以上の現象は、この土が加水によって容易にその結合力を弱められる結合物質を含むことを推定させる。そして(2)に後述するように、この土は膨脹性粘土鉱物モンモリロナイト(M)を含むことが判明した。上述の沸化現象は、土粒子を連結していた粘土鉱物のうちMが加水時に膨潤し、土粒子間連結力が弱められたことによる。

また、この種の砂土の透水係数は普通 10^{-3} cm/sec のオーダーである。ところが、表-3に示すように良は 10^{-5} cm/sec の異常に低いオーダー

表-2 粒団分析と粒度試験との比較

粒径区分 mm	粒団分析 %	粒度試験 %
>2	4.8	3.9
2 ~ 1	20.4	20.2
1 ~ 0.5	23.3	21.3
0.5 ~ 0.25	26.8	22.2
0.25 ~ 0.02	17.4	19.1
0.02 ~ 0.002	3.6	0.9
<0.002	3.7	12.4
計	100.0	100.0

である。この現象の原因の1は、この土は密な構造をもつので向ゲキが小さいことである。2は、(2)で後述するように、この土がMを含んでいることである。Mを活性成分とするベントナイトは透水抑制材として広く使

用されている。なお、海水を使用した場合の良が水道水の2倍であるのは、海水中の塩類によってMの膨潤が抑えられたことによる。

また、供試土は粒度試験から砂土、粒度とコンシステンシー試験から粘土質砂土と分類された。なお、図-5のカサゲランド塑性図上にコンシステンシーの値をプロットした。また、その活性度($I_p < 2\mu$)は1.47であり、Skemptonの分類によれば4群に属し、活性度はかなり高い。この砂土が、このように活性度の高い粘土質的性質を呈するのは、親水性の大きな粘土鉱物Mを含むことによる。

(2) 水でよく膨潤する 2:1 型膨脹性結晶質粘土鉱物モンモリロナイト(Montmorillonite, Mと略す)を含む。(1)に前述したように、掘削土が加水によって容易に軟化し、粘土的性質を示すのは、この砂土中に約12%含まれている粘土コロイド分の鉱物・化学的諸性質の特異性によると推察した。

そこで、まず粘土鉱物をX線分析、示差熱分析、電子顕微鏡観察、呈色反応などで同定したところ、2:1型非膨脹性結晶質の雲母系粘土鉱物(Mica clay minerals, MIと略す)、すなわちセリサイト(Sericite)またはイライト(illite)、および1:1型結晶質粘土鉱物カオリナイト(Kaolinite, Kaと略す)だけでなく、水との親和の大きな2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物モンモリロナイトも含まれていることが判明した。以下に、これら粘土鉱物の同定経過を略述する。

図-6に脱鉄したCa型粘土のX線回折曲線とその回折ピークに相当する鉱物名を示した。図-7には、これら粘土鉱物M, MI, Kaを同定するため、粘土試料を各種処理してX線分析した結果をまとめている。また、図-8の示差熱分析結果は粘土鉱物M, MI, Kaが

存在すること、およびKaの結晶度が低いことを示している。さらに、図-9の電顕写真では、不定型薄片状のMがみられ、またKaの結晶度が低いと推定される。また脱鉄した粘土試料をベンジジン飽和水溶液で湿らせると、ただちにM特有のベンジジンブルーが発現した。

次に、粘土試料中の各粘土鉱物の含有比率を、

表-3 透水試験(JIS A 1218)の結果

		1回目	2回目	3回目
透水係数	水道水	3.37×10^{-5}	3.11×10^{-5}	1.46×10^{-5}
良 (cm/sec)	海水	6.60×10^{-5}	5.95×10^{-5}	—

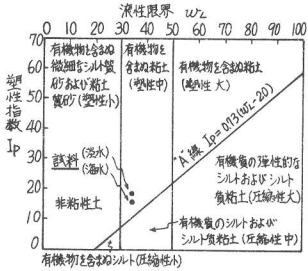


図-5 コンシステンシー試験結果

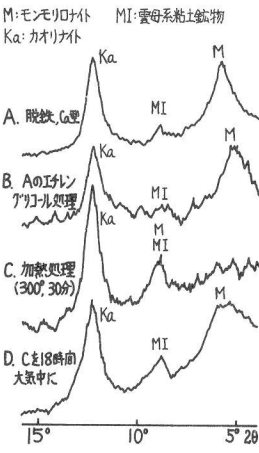


図-7 各種処理粘土のX線回折

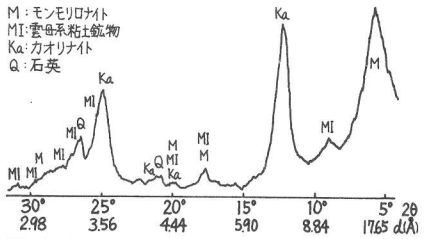


図-6 粘土($< 2\mu$, 脱鉄, Ca型)のX線回折

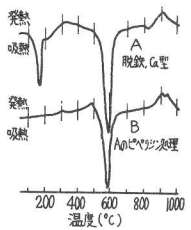


図-8 粘土の示差熱分析

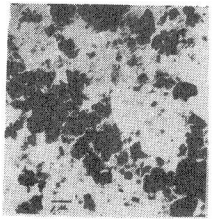


図-9 粘土鉱物の電顕写真

×線回折と陽イオン交換容量(CEC)とから測定した。まず、脱鉄したCa型粘土を×線回折し、各鉱物の回折ピーク(Mは(001), MIは(002), Kaは(001))の面積から、その含有比率を算出すると次のようになる。M:MI:Ka=48:3:49 さて、これらの値を用いて、表-4のように粘土分のCECを計算すると41.6 meq/100gである。この値は実測値の37.2 meq/100gと類似しているため、上記の含有比率は妥当である。かくして、この砂土中には粘土分の40~50%(土全体の5~6%)に相当する多量のMが存在していることが判明した。

ところで、供試土中のMの膨潤分散の程度は交換性陽イオン、pHなどに著しく影響される。表5の結果から、Mの膨潤に有効に作用する陽イオンがやや少ないが図10に示すように、気乾土を30分間水中で沸かし軽く振とうした無処理の場合でも、粘土分の約30%が水中に分散している。しかも、他の処理に比べて無処理では、Mの回折ピークの面積比が非常に大きい。すなわち、無処理でも全Mの44%が良く膨潤・分散している。

以上、粘土分の40~50%占めている2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物Mは水と良く親和し、加水による土の軟化に有効に作用している。また、表-5の三二酸化物の分析結果から、この土のラテライト化の程度は微弱であり、水による土の軟化を防げないと判定された。

4. まとめ

現在、シンガポールにおいて当社が行なっている海岸埋立て工事に用いる掘削土を、土質化学的に検討し、当地区の掘削工法に有益な指針を与えた。土質化学的検討の結果は次のようである。

- (1) 掘削時に花崗岩系土積砂土が非常に硬く、掘削刃の摩耗が激しいのは、最も硬い石英砂が多量に(土全体の約60%重量)含まれ、しかも密に詰まっていることに因ると判定した。
- (2) 一方、このような掘削土が加水によって容易に軟化し粘土的性質を呈するのは、粘土分(約12%)の40~50%が、水との親和性が極めて大きい2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物モンモリロナイトであることに基因していることを明らかにした。

謝辞 土木本部の平田工務部長、技研の福住主任研究員に研究上便宜を与えてくれた。また技研の中田研究員は実験を担当した。記して謝意を表する。

参考文献 1)喜田：土壌構造と結合物質の作用および改良剤の利用に関する研究(学位論文、1961)

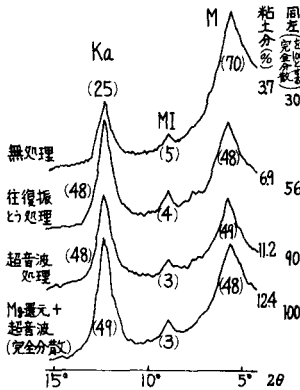
- 2)喜田：シンガポール ベドック・タンジョンルー 周海岸埋立工事掘削のための土質調査報告書(その1)(1966), D.KITA: Soil Survey Report on Soils at Cutsite, Coastal Reclamation Scheme, Bedok to Tanjong Rhu Contract No.1 Singapore. Part 1, Geochemical Study (1966)
- 3)喜田・中田：シンガポール海岸埋立用土の土質化学的検討, 大林組技術研究所報, No.1, 87~95 (1966)

表-4 粘土鉱物の含有比率の検討

粘土鉱物	×線分析より求めた含有比率(a)	計算に用いた粘土鉱物のCEC (b)	CECの計算値(a)×(b)
モンモリロナイト(M)	48 %	80 meq/100g	38.40 meq
雲母型粘土鉱物(MI)	3	25	0.75
カオリナイト(Ka)	49	5	2.45
(注) 粘土分のCEC実測値 37.2 meq/100g			計 41.60 meq/100g

表-5 供試土の二、三の化学的性質

pH (1:25)	H ₂ O 5.36 KCl 3.65	陽イオン交換容量(CEC) meq/100g	4.26
活性酸化物 %	Fe ₂ O ₃ 0.02	交換性陽イオン meq/100g	Na 0.23
	Al ₂ O ₃ 0.10		K 0.13
	SiO ₂ 0.08		Ca 0.62
熱塩酸可溶酸化物 %	Fe ₂ O ₃ 1.26	塩基飽和度 %	Mg 0.73
	Al ₂ O ₃ 1.98		計 1.71
	SiO ₂ 0.09		40.1



(注) ()内の数字は各粘土鉱物M, MI, Kaの回折ピークの面積比である。

図-10 各種分散法にてした粘土分の×線回折