

# シンガポール海岸埋立用土の土質化学的検討

喜田大三  
中田禮嘉

## 概 要

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・力学的諸性質ばかりでなく、化学的諸性質、いかえれば土質化学的諸性質をも明らかにしておく必要がある。

さて現在、シンガポールで大規模な埋立工事が当社によって行なわれている。掘削・埋立用土は花崗岩系沖積砂土であるが、わが国の花崗岩系砂土には見られない極めて特異な性質を有しているために、工事開始当初、掘削に苦勞した。そこで、土質化学的にその原因を検討した結果、掘削時に砂土が非常に硬く、掘削刃の摩耗が激しいのは、土の砂分を構成している造岩鉱物のうち、硬い石英砂が多量に（土全体の約60%）含まれており、しかもそれが非常に密に詰まっていることによることが判明した。また、このような砂土が水によって容易に軟化し粘土的性質を示すのは、粘土分（土全体の約12%）の40~50%が水中で容易に膨潤する2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物のモンモリロナイトであることによることがわかった。

このような土質化学的調査研究によって、当地区の掘削工法をきわめて効果的に改善することができた。

## 1. まえがき

土木工事においては、土は主要な天然の建設材料である。さて、建設材料の使用にあたっては、その物理・力学・化学的諸性質を十分把握していなければならない。鉄、セメントなどの人工材料では、これら諸性質を把握することは比較的容易である。しかるに、土は天然の建設材料であるため、その化学的諸性質は複雑であり、従来から物理・力学的諸性質のみを測定して、土木工事の設計・施工が行なわれてきた。しかし、土木工事をより確実にしかも経済的に遂行するためには、それだけでは不十分であり、それら諸性質を発現させる原因となる化学的諸性質、すなわち土質化学的諸性質をも把握しなければならない。

そして、著者の一人である喜田は、1961年に土質化学という新しい学問分野を提唱し、次のように定義した<sup>1)</sup>。“土の物理的・力学的諸性質を解明、改善するため、土の鉱物学的・コロイド学的組成、化学的成分、

界面化学的性質、および化学的諸反応を研究する科学” いかえれば、土質化学は土の化学と土の物理学または力学との境界領域を研究対象としている。

さて現在、シンガポールにおいて大規模な海岸埋立工事が当社によって行なわれている。シンガポール港

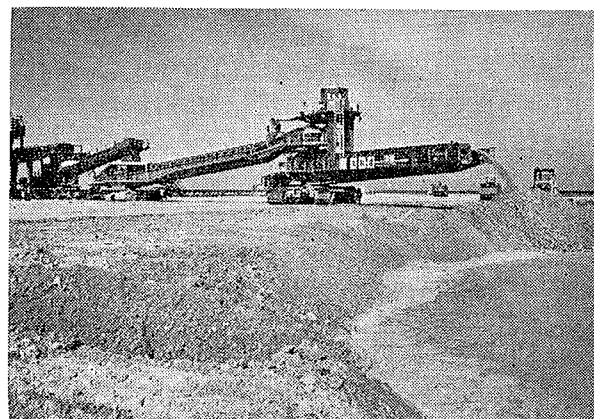


図-2 スプレッダーによる掘削土の埋立て



図-1 バケット・ホイールエキスカベーターによる掘削



図-3 空からの埋立て現場

東寄りの海岸ベドックからタンジョンルーまでの延長10km, 幅 500m を埋立てるため, 背後のベドック丘陵を掘削し, ベルトコンベアーにて直接埋立地に掘削土を運搬している。その土量は約 2,000 万 m<sup>3</sup> である。掘削・埋立ての状況を図-1, 2, 3 に示した。

ところで, 1966年2月当社土木本部より, 掘削工法と関連して, 掘削土の特異的性質を早急に検討するように依頼された。

すなわち, 掘削土は花崗岩系沖積砂土であるが, 全体の約35%にあたる 700 万 m<sup>3</sup> の土は, わが国の花崗岩の風化土であるマサ土とは大いに異なっており, 掘削時に非常に硬くて掘削刃の摩耗が激しく, 他方, 一度スコールに襲われるときわめて容易に軟化し粘土の性質を示す。

そこで, 掘削土がこのような特異的性質を示す理由を土質化学的に究明し, 当地区の掘削工法を検討する際に指針を与えようとした。そして, その研究成果はすでに土木本部に報告した<sup>2), 3)</sup>。この研究において, 土質化学的観点から土に対処することが非常に重要であることを実証したので, 報文としてここに発表するしだいである。

なお本報文では, 3. において掘削土が硬く掘削刃の摩耗が激しい理由を解明し, 4. において掘削土が水で軟化し, 粘土の性質を示す理由を検討した。

## 2. 供試土

シンガポールは亜熱帯性の気候下にあり, 月平均気温は27.3°Cであり, 較差は少ない。また, 年平均降水量は2,487mmであり, 1月にもっとも多く312mmである。

ところで, 掘削地区の地質は, 図-4 に示したように, 花崗岩系沖積層である。当地区の北西に存在する花崗岩が崩壊・運搬・堆積したものと判断できる。そして, この沖積土が侵食作用を受けて, 海拔約31~61mの平坦な丘陵地形を形成している。

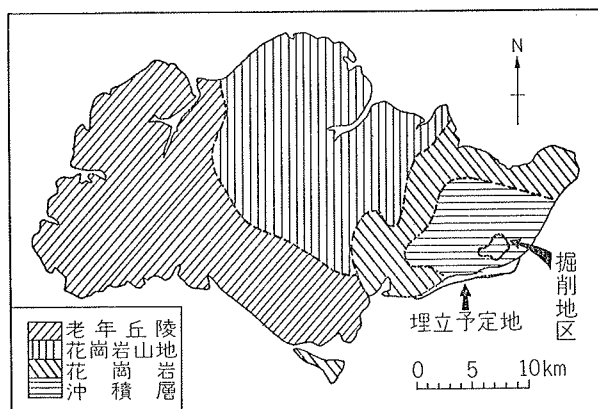


図-4 地質図

さて, 掘削地区の土を代表する地点より, 大きさ30cm×30cm×30cmの乱さない試料を採取し, その表面

をパラフィンで塗付して運んできた。実験の目的に応じて, この湿潤試料だけでなく気乾試料をも使用した。土の色はマンセル方式によれば, 7.5R<sup>7</sup>/<sub>8</sub> (明赤), 7.5R<sup>8</sup>/<sub>6</sub> (灰白) および 5YR<sup>7</sup>/<sub>8</sub> (橙) である。したがって, 供試土のラテライト化の程度は微弱であると考えられる。また, 有機物は肉眼では見当たらない。

## 3. 土が硬く, 掘削刃の摩耗が激しい

### 3. 1 実験項目とその方法

実験項目は次の4項目である。

- (1) 粒度試験
- (2) 単位体積重量の測定
- (3) 土の構造および構成鉱物の観察
- (4) 砂分中の一次鉱物含有量の測定

以下に, 各項目の実験方法を概説する。

(1) 粒度試験 気乾土を過酸化水素処理したのち, 試料中の活性酸化物の鉄(Fe), アルミニウム (Al), ケイ素(Si)を Mg 還元法 (マグネシウム還元法) によって溶出し, それぞれの成分を比色分析する<sup>4)</sup>。すなわち, 溶出液中の Fe は オーフェントロリン法にて, Al はアルミノ法にて, Si はモリブデン青法にてそれぞれ発色させ, 島津光電比色計 (スペクトロニック20) で比色定量する。これら諸成分の含量をそれぞれの酸化物 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> として重量百分率に計算し, それらの合計を粘土分 (2μ以下) に加える。

さて, Mg 還元法で活性酸化物を除去した土を超音波処理 (1.5KV, 10分間) し, 水中に完全分散させる (なお, 分散剤を添加しなくても十分に分散した)。しかるのち, シルト (20~2μ) および粘土 (2μ以下) を沈降法に基づくピペット分析法<sup>5)</sup>にて定量し, ついで孔径2,000, 1,000, 500, 250μの各フルイ (JIS) でフルイ分けし, 250~20μの値は100から全定量値を差し引いて求める。

結果を粒径加積曲線として表示し, JIS A 1204 に基づいて土の分類を行なった。

(2) 単位体積重量 (γ<sub>v</sub>) の測定 湿潤土塊を円柱形に成形し, その全表面をパラフィンで塗付し<sup>6)</sup>, 常法にしたがい試料の全重量 (W) と体積 (V) とを測定し, γ<sub>v</sub> (= W/V, g/cm<sup>3</sup>) を計算した。

(3) 土の構造および構成鉱物の観察 気乾土塊をカナダバルサム液で固め, 常法にしたがい厚さ0.03mmの薄片を作成し, 偏光顕微鏡で土の構造を観察し, また含まれる造岩鉱物 (一次鉱物) を判別した。

(4) 砂分中の一次鉱物含有量の測定 粒径 500μ以上の砂では, 顕微鏡下で各鉱物を分離しそれぞれ秤量した。また粒径 500~20μの砂では, 顕微鏡下で各鉱物の出現頻度と比重より算出した。

### 3. 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について, 土質化学的に検討した。その結果, 土中の砂粒子が密に詰っており, しかも砂分を構成している造岩鉱物のうち, 硬い石英砂が多量に, すなわち土全体の約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-5の粒度試験結果から, JIS A 1204 に基づいて土を分類

すると砂と判定された。また、普通の砂土の単位体積重量  $\gamma_t$  は約  $1.8\text{g/cm}^3$  であるにもかかわらず、供試土のそれは  $2.08\text{g/cm}^3$  ときわめて大きなものであった<sup>7)</sup>。このことは、供試土中の砂粒子が非常に密に詰った構造をしていることを意味している。

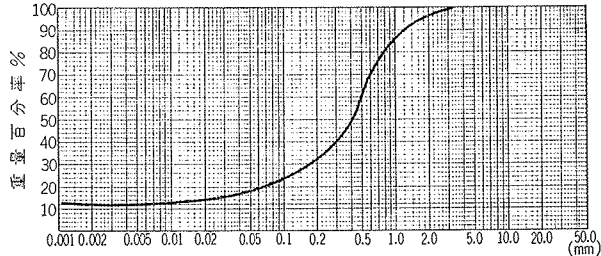
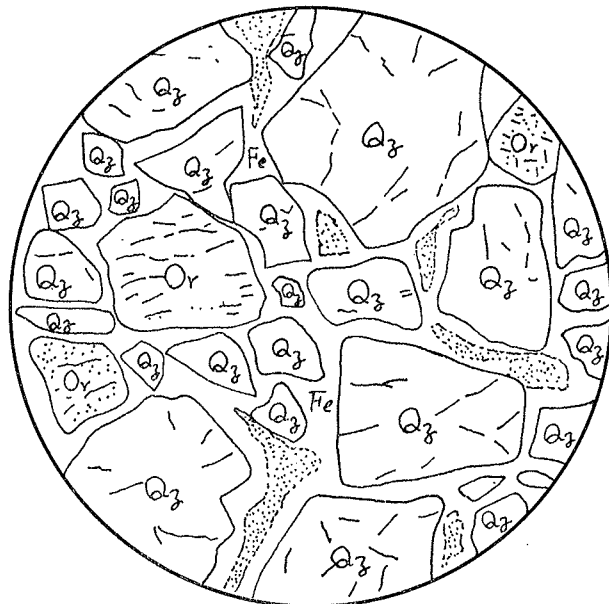


図-5 土の粒度試験結果 (粒径加積曲線)

そこで、供試土の一部を薄片状にして、土の構造を観察した結果、この事実を裏付けることができた。すなわち、図-6からわかるように、砂粒子ばかりでなく、その間ゲキに粘土や鉄鉱物などが密に詰っている。なぜこのような密な構造をした土が生成したかはさらに現地の地質を詳細に調査しない限りわからない。

(2) 硬い石英砂を約60%も含む 図-6の薄片検鏡図によれば、特に多量の石英が観察された。また、正長石も観察されたが、その大部分は粘土化していた。一方、供試土は花崗岩に由来するにもかかわらず、雲母はほとんど認められず、すでに粘土化していると考えられる。なお、その他の重鉱物は0.0004%しかなく、ほとんど含まれていないと考えて良い。



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-6 薄片の偏光顕微鏡観察図  
(Open Nicol による観察)

次に、供試土の86.7%を占めている20 $\mu$ 以上の砂分について、各粒径ごとに一次鉱物の量を調べ、その結果を表-1に示した。同表において、粒径が大きい砂分ほど相対的に多量の石英が含まれ、しかも20 $\mu$ 以上の砂分全体に対し、石英含有量は69.1%重量(土全体に対し約60%重量)という非常に高い値を示している。石英の硬度はモースの硬度計によれば7であり、普通の土中に、存在している造岩鉱物中でもっとも硬い。

粒径区分 $\mu$	粒径分布 %	鉱物量 (%)	
		石英	長石
>2000	3.9 (100)	3.0 (76.9)	0.9 (23.1)
2000~1000	20.2 (100)	19.0 (94.3)	1.2 (5.7)
1000~500	21.3 (100)	17.7 (83.3)	3.6 (16.7)
500~250	22.2 (100)	13.4 (60.3)	8.8 (39.7)
250~20	19.1 (100)	6.8 (35.6)	12.3 (64.4)
計	86.7 (100)	59.9 (69.1)	26.8 (30.9)

表-1 砂分中の石英および長石(一部他の鉱物を含む)の含有量

以上のように、この砂土には多量の石英砂が密に詰っているため、その掘削に際し、掘削刃の摩耗が激しいのは当然である。

#### 4. 土は水で容易に軟化する

##### 4.1 実験項目とその方法

実験項目は次の7項目である。

- (1) 沸化現象の観察
- (2) 粘土鉱物の同定
  - (a) X線分析
  - (b) 示差熱分析
  - (c) 電子顕微鏡観察
  - (d) 呈色反応
- (3) 化学的性質
  - (a) 陽イオン交換容量(CEC)の測定
  - (b) 置換性陽イオンの測定
  - (c) 水素イオン濃度(pH)の測定
  - (d) 三二酸化物の定量
- (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
  - (a) 液性限界
  - (b) 塑性限界

以下に各項目の実験方法を概説する。

##### (1) 沸化現象の観察

浸漬湿潤の場合 気乾土塊を蒸留水の中に完全に浸し、土塊の軟化・崩壊の様子を経時的に観察した。

毛管湿潤の場合 砂の上に口紙を敷き十分蒸留水で湿めさせたのち、その口紙上に気乾土塊をのせ、沸化現象を経時的に観察した。

## (2) 粘土鉱物の同定

(a) X線分析 粘土鉱物の多くは層状の単位ケイ酸塩層よりなる。X線回折法による同定<sup>8)</sup>には、この単位ケイ酸塩層の積み重なり方向の規則性に基づいて現われる00 $l$ 回折ピークを利用する。単位ケイ酸塩層の厚みを  $d_{(001)}$  Å とすれば、X線回折図上には

$$l\lambda = 2d_{(001)} \sin \theta$$

$l=1, 2, \dots$  整数,  $\lambda$ : X線の波長 (Å),  $\theta$ : 試料面に対するX線の入射角度

の関係を満足する  $2\theta$  の位置に、一連の回折ピークが現われる。土に含まれる粘土鉱物のほとんどは、その結晶構造がすでに明らかにされ、各鉱物に対する  $d_{(001)}$  値が知られている。したがって、未知の粘土試料についてX線回折して粘土鉱物の  $d_{(001)}$  値を求め、これを既知のものと同定することにより鉱物群、鉱物種を決定することができる。しかし、土中の粘土鉱物にはX線的に類似したものが多く、簡単に同定できない。そのような試料に対しては、各種の化学処理や加熱処理を行ない、これらの処理による回折ピークの変位を総合判断して鉱物を同定する。

本実験では島津自記X線回折装置 (GX-3B型) を使用し測定条件は Cu K $\alpha$ (Ni), 40KV, 20mA, 2°/分, T.C. 5~10sec., D.S. 1.0mm, S.S. 0.5mm, R.S. 0.25mmであった。

無処理の粘土試料 3.1 (1)の粒度試験の場合と同様にし、完全分散させた土の水懸濁液よりサイフォンにて分離・採取した粘土分 (2 $\mu$ 以下) を、まず Jackson 法の簡略法<sup>9)</sup>にて脱鉄処理する。しかるのち、塩化カルシウム溶液にてカルシウム型粘土とし、よく気乾してからメノウ乳鉢で粒径50 $\mu$ 以下に粉砕する。この粉末試料を水でペースト状とし、スライドガラス上で気乾し、定方位の試料をえる。これをX線分析した。

エチレングリコール処理の粘土試料 上記無処理の定方位試料をエチレングリコール水溶液で湿らせ、X線分析した。

加熱処理の粘土試料 上記無処理の定方位試料を300°Cの電気炉で30分間加熱したのち、デシケーター中で空冷し、X線分析した。分析後、それを大気中に18時間放置し、再びX線分析した。

(b) 示差熱分析 一般に加熱による試料の状態変化をこれにともなう熱エネルギー変化を検知することによって追跡する分析法を示差熱分析という<sup>10)</sup>。実際には、測定温度範囲内で加熱変化を示さない物質と試料とを同一条件下で連続的に加熱し、その間の温度差を測定記録する。そして、記録された試料の吸熱あるいは発熱温度から鉱物を同定する。

測定は、島津自記示差熱分析装置 (DT-2A形) を使用し加熱速度は10°C/分で行なった。

無処理の粘土試料 X線分析の項で述べた方法で調製した無処理の粉末試料を、そのまま示差熱分析した。

ピベリジン処理<sup>10)</sup>の粘土試料 無処理の粉末試料をピベリジンとよく混合後、10分間放置する。ついで、湯浴上で約2時間加熱乾燥し、デシケーター中で空冷後、示差熱分析した。

(c) 電子顕微鏡観察 粘土分に含まれている鉱物を日立電子顕微鏡 (HS-7形, 倍率 $\times 24,000$ ) で観察し、その結晶形および大きさから同定した。

(d) 呈色反応<sup>11)</sup> X線分析の項で述べた無処理の粉末試料をベンジジンの飽和水溶液に浸し、その呈色状態を観察し粘土鉱物を同定した。

## (3) 化学的性質

(a) 陽イオン交換容量 (CEC) の測定 粘土鉱物 (広義

には土粒子) は一般に負荷電を持っているため、正荷電の陽イオンを吸着する能力がある。その荷電量は陽イオン交換容量 (CEC) として表示され、この CEC 値は粘土鉱物の種類によって非常に異なる。

測定は次のようにして行なった。気乾土 (または、粘土試料) に酢酸アンモニウム溶液を加え、1晩放置後口過洗浄する。ろ液を (b) の置換性陽イオンの測定に使用する。さて残渣をエチルアルコール、ついで塩化ナトリウム溶液で洗浄し、後者の洗浄液に置換してきたアンモニア態窒素を蒸留法<sup>12)</sup>にて定量し、CEC 値を求める。

そして結果を105°Cで炉乾した土 (または粘土) 100g 当りのミリグラム当量 (meq) で表示した。

(b) 置換性陽イオンの測定 土粒子に吸着している置換性陽イオンを (a) でえたろ液について測定した。陽イオンのうちカルシウム (Ca), マグネシウム (Mg) を EDTA によるキレート滴定法で、ナトリウム (Na), カリウム (K) を蛍光分析法で求めた。結果の表示は (a) と同じである。

(c) 水素イオン濃度 (pH) の測定 1:2.5の水 (または塩化カリウム溶液) 懸濁液中の pH を東亜ガラス電極 pH計 (HM-5A) で測定した。

## (d) 三酸化物の測定

活性酸化物 気乾土について、3.1 (1) 粒度試験の項で述べた方法によった。

熱塩酸可溶性酸化物<sup>13)</sup> 気乾土に濃塩酸を加え砂皿上で沸騰させ、空冷後、溶液中の Fe, Al, Si を3.1 (1) で述べた比色法で定量した。

(4) モンモリロナイトの膨潤・分散性の検討 気乾土に蒸留水を加え沸化処理を30分間行なったのち、下記の処理をする。

## 無処理

往復振とう処理 (毎分120回往復, 振幅9.3cm の振とう器で1時間)

超音波処理 (1.5KV, 10分間)

完全分散処理 (Mg 還元法+超音波処理)

上記の処理後、溶液を振とう瓶に移し全量を500mlとし、1分間手で反転振とうしたのち静置し、ピベット法<sup>5)</sup>で粘土分 (2 $\mu$ 以下) を採取・秤量した。ついで、各処理試料の粘土分をサイフォンで多量に採取し、X線分析の項で述べた方法を用いて脱鉄、Ca型の粉末試料を作成する。そして、その粘土試料を定方位としX線分析した。

(5) 耐水性粒団の分析<sup>14)</sup> 気乾土を蒸留水中で30分間沸化処理したのち、粒径20 $\mu$ 以下の各粒径をピベット分析法で、250 $\mu$ 以上の各粒径をフルイ分析法で求め、250~200 $\mu$ を計算で求めた。

(6) 透水試験 JIS A 1218 の変水位透水試験を採用した。使用した水は水道水および人工海水 (蒸留水 1 $l$ に NaCl 27g, CaCl<sub>2</sub> 5g, MgSO<sub>4</sub> 5g, KCl 1g 溶かす) であり、同一試料について、時間をおいて測定を2~3回繰り返した。

(7) コンシステンシー試験 420 $\mu$ 以下の気乾試料について試験を行なった。

(a) 液性限界  $W_L$  JIS A 1205

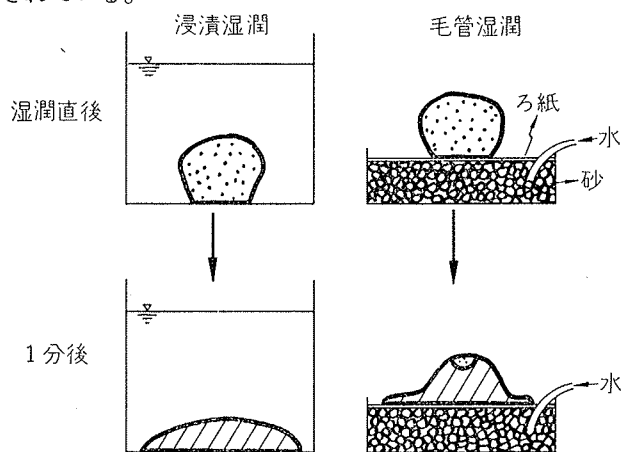
(b) 塑性限界  $W_P$  JIS A 1206

## 4. 2 結果と考察

掘削土は、前章3で説明したように、掘削時に非常に硬い砂土である。しかし、水をかけると容易に軟化し、しかも粘土的性質を示す。本章では、このような

特異的現象の原因を土質化学的に検討した。その結果粘土含有量はわずかに約12%であるが、その40~50%が2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物のモンモリロナイト(Montmorillonite)で占められており、この粘土鉱物が水ときわめて良く親和し、加水時に膨潤し、土を容易に軟化させ、しかも土を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 現地では、掘削土がスコールによって容易に軟化することを経験している。そこで、その現象を確かめたのが図一7に示す実験である。気乾土塊を水に入れた場合(浸漬湿潤)、土塊中から気泡が激しく出てくると同時に、土塊は極めて短時間に崩壊した。また土塊を徐々に水で湿らせた場合(毛管湿潤)にも、前の場合よりもゆっくりであるが、土塊は容易に軟化・崩壊した。またこのように沸化・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、表一2に示した。この土は水中でほとんど構成基本粒子すなわち一次粒子に分割されている。



(注) 軟化崩壊部分を斜線で示す

図一7 気乾土塊の沸化現象

粒径区分	耐水性粒団分析	粒度試験
>2000 μ	4.8%	3.9%
2000~1000	20.4	20.2
1000~500	23.3	21.3
500~250	26.8	22.2
250~20	17.4	19.1
20~2	3.6	0.9
<2	3.7	12.4
	100.0	100.0

表一2 耐水性粒団の分析結果と粒度試験結果との比較

さて、このように土塊が水で崩壊する作用を沸化作用という。沸化作用を引起す破壊力は二通りある<sup>15)</sup>。1つは土塊内に向って水が急速にしみこむ時、内部に閉じこめられた空気の圧力が高まり、ついに土塊を破壊してしまう場合である。もう1つは、閉じこめられた空気の効果がなくても、土粒子間の結合物質による結合が加水によって弱化し、土塊が崩壊する場合であ

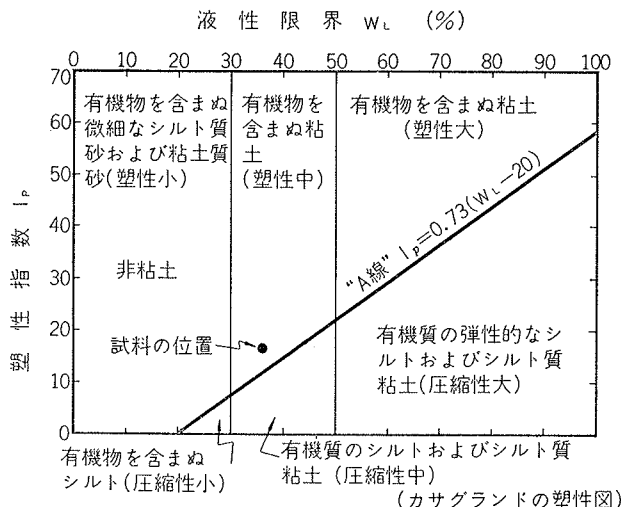
る。そして、浸漬湿潤には前述の両者の破壊力が作用し、毛管湿潤には主として後者が作用する。

供試土は前述のごとく、浸漬湿潤でも毛管湿潤でも容易に崩壊した。したがってこの土には、加水によって容易にその結合力が弱められる結合物質が含まれていると想定した。そこで化学分析し、(2)で述べるように、この土に2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物モンモリロナイト(以下Mと略す)が含まれていることが判明した。そして上述の沸化現象は、土粒子を連結していた粘土鉱物のうちMが加水によって膨潤し、土粒子間の連結力が弱められたことによる。

また、3.2(1)で述べたように供試土の粒度は砂である。そして、この種の粒度の土の透水係数kは普通 $10^{-3}$ cm/secのオーダーである。ところがこの土の場合、表一3に示したように $k=10^{-5}$ cm/secと異常に低いオーダーであった<sup>7)</sup>。さらにkは時間の経過とともに低下した。この事象の原因として考えられる第1は、この土は密なる構造をしていて間ゲキが小さいということである。しかしこれだけでは、kが異常に低く、しかも時間とともに低下しないはずである。第2の理由は(2)で後述するように、この土には粘土鉱物のMが含まれていることである。Mはほかの粘土鉱物よりも粒径が小さく、しかも水とよく親和して膨潤するためkは異常に小さくなる。その上、Mの膨潤は時間とともに進むので、kも経時的に下がる。(なお、Mを主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。)その証明として、表一3に示すように、海水を使用した場合のkは水道水の場合よりも大きくなった。これは海水中に溶けている陽イオンによって、Mの膨潤が抑えられたからである。

		1回目	2回目	3回目
透水係数 k(cm/sec)	水道水の場合	$3.37 \times 10^{-5}$	$3.11 \times 10^{-5}$	$1.46 \times 10^{-5}$
	海水の場合	$6.60 \times 10^{-5}$	$5.95 \times 10^{-5}$	

表一3 透水試験(JIS A 1218)の結果<sup>7)</sup>



図一8 コンシステンシー試験結果

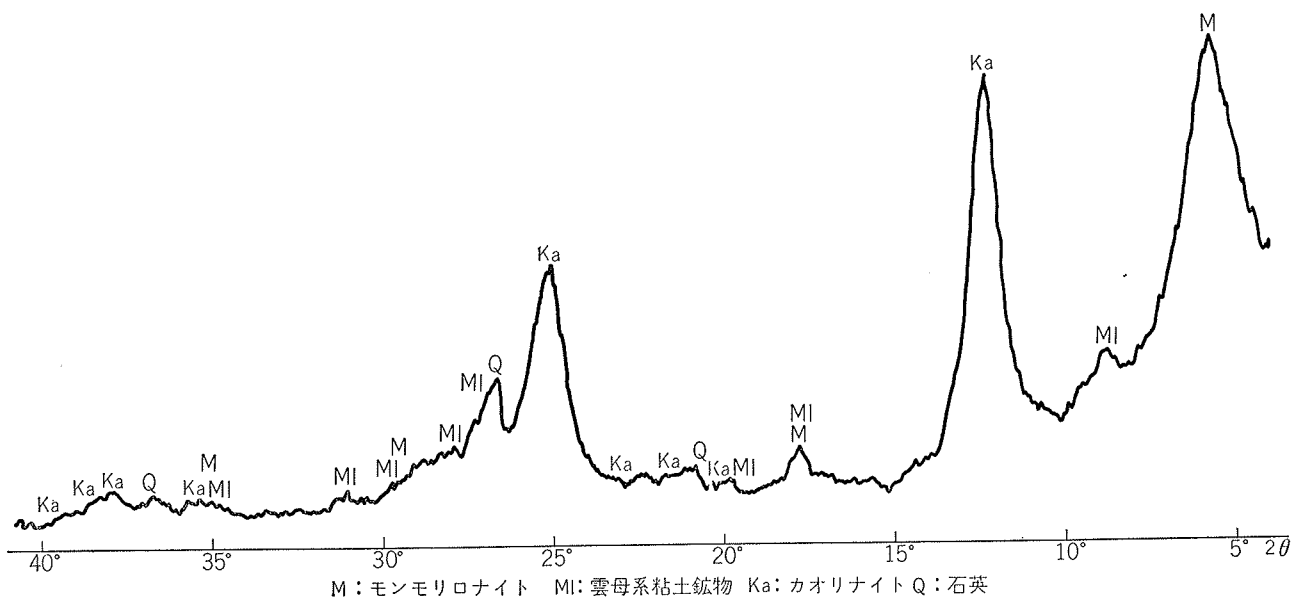


図-9 粘土分 (<2μ, 脱鉄, Ca型) のX線回折曲線

さらに、供試土の液性限界  $W_L$  は 36.0%, 塑性限界  $W_P$  は 17.8%, 塑性指数  $I_p$  は 18.2であった<sup>7)</sup>。これらの値をカサグランドの塑性図にプロットすると、図-8のようになり、この砂土は有機物を含まぬ粘土と判定された。そして、その活性度 ( $=I_p/2μ$  以下の含量) を計算すると 1.47であり、Skempton の分類によれば 4 群に属し<sup>16)</sup>、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的性質を示すのは、(2) で述べるように、水に対してきわめて大きな親和性を持つ粘土鉱物 M を含むことによるのである。

(2) 水でよく膨潤する粘土鉱物、モンモリロナイト

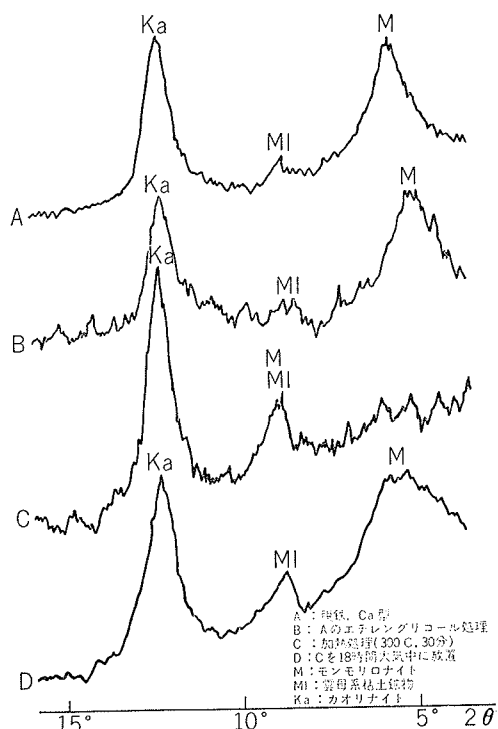


図-10 各種処理粘土分 (<2μ) のX線回折曲線

を含む 前節(1)で述べたように、掘削土が水で容易に軟化し、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, 以下MIと略す)、すなわちセリサイト (Sericitte) またはイライト (Illite)、および 1:1型結晶質粘土鉱物のカオリナイト (Kaolinite, 以下Kaと略す) だけでなく、水との親和性の大きな 2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物のモンモリロナイト (Montmorillonite, 以下Mと略す) も含まれていることが判明した。

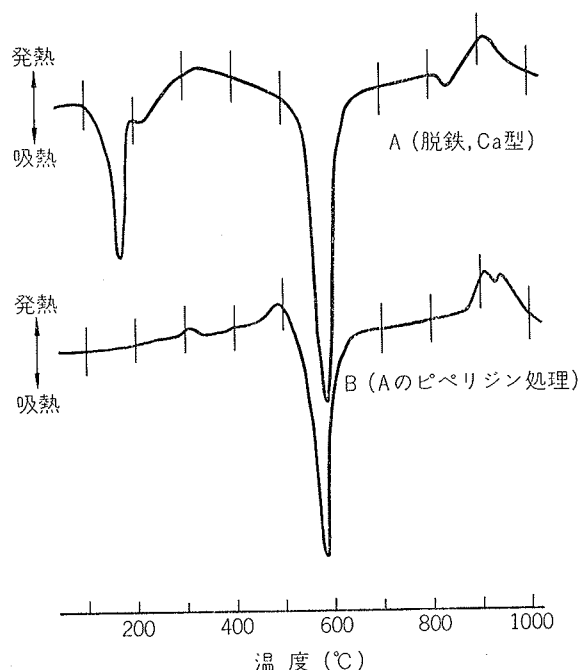


図-11 粘土分 (<2μ) の示差熱分析曲線

以下に、これら粘土鉱物の同定経過を述べる。

X線回折曲線を図-9に示した。一次鉱物の石英による回折ピークのほかに、15Å, 10Å, 7.2Åの粘土鉱物によるピークが見られる。そこでこれらの粘土鉱物を同定するために、粘土試料について2~3の処理を行ない結果を図-10に示した。15Åのピークはエチレングリコール処理で17Åに、加熱処理で10Åに変位し、復水現象も見られる。これらから、15ÅのピークはMであると判定した。また10Åのピークはエチレングリコール処理で変位しないから加水ハロイサイトではなくMI、同様に7.2ÅのピークはKaであると判定した。

図-11の示差熱分析曲線Aにおいて、吸着水の脱水による吸熱ピークは170°C付近で大きく、かつ220°C付近に二段ピークが現われている。さらに830°Cの吸熱ピークに引続いて910°Cのゆるやかな発熱ピークが見られる。これらはMの存在を示すものである。このことを更に確認するため、ペペリジン処理を行なって得た示差熱分析曲線がBである。Mと結合したペペリジンの加熱分解による発熱ピークが、300°Cおよび500°C付近に見られ、Mの存在が確認できた。さて曲線Aにおける590°C付近の吸熱ピークはKaのものであるが、900~1000°Cの発熱ピークが弱いので、Kaの結晶性は低いと推定できる。また100~200°C, 600°C付近、800~900°Cの吸熱ピークおよび900~1000°Cの発熱ピークは、MIのものとも一致する。

図-12の電子顕微鏡写真によると不定形薄片状の粒子が見られる。これはMの特徴と一致する。また、はっきりとした六角板状粒子が見られないので、Kaの結晶性は低いと推定できる。

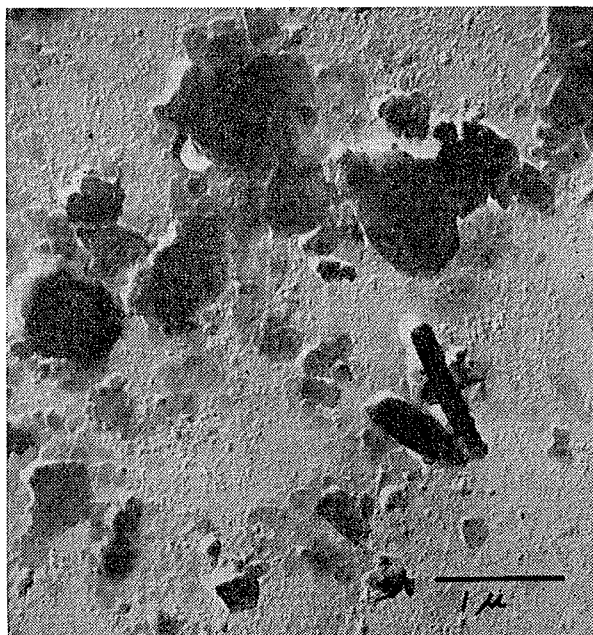


図-12 粘土鉱物の電子顕微鏡写真

脱鉄した粘土試料をベンジジンの飽和水溶液に浸すと、ただちにベンジジンブルーが発現した。この現象

は、試料中にMが含まれていることを明確に示している。

次に、2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物Mの含有比率を、粘土試料のX線分析と陽イオン交換容量(CEC)とから測定した。まず、粘土分をX線分析し、先に同定した三種類の粘土鉱物の含有比率を、それぞれの鉱物の回折ピーク(Mは(001), MIは(002), Kaは(001)の面積から計算すると、次のようになる。

$$M : MI : Ka = 48 : 3 : 49$$

これらの値を用いて、表-4のようにしてCEC値を計算すると41.6 meq/100gである。他方、粘土分のCEC実測値は37.2 meq/100gである。そして、上記の計算値は実測値とよく類似するので、上記の含有比率は妥当であるといえる。したがって、この土には、粘土分の40~50%に相当する多量のMが含まれていることが判明した。

粘土鉱物	X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
合計			41.60 meq/100g

(注) 粘土分 (<2μ) のCEC実測値 37.2 meq/100g

表-4 粘土鉱物の含有比率の検討

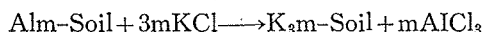
ところで、Mの膨潤・分散の程度は、Mに吸着されている陽イオンの質および量によって著しく影響される。たとえば、ベントナイト(主成分はM)の膨潤・分散の順位はNa ≥ Li > K > Ca = Ba > Hである<sup>17)</sup>。またMは、水の水素イオン濃度(pH)が中性もしくはアルカリ性である場合、よく膨潤・分散することができる。

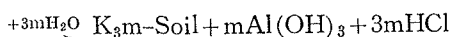
そこで、供試土の置換性陽イオンとpHとを測定し、それらの結果を表-5に示した。同表から、Mの膨潤に有効に作用する陽イオンの量がやや少なく、また塩基飽和度も低いことがわかる。そして、土の塩基不飽和の部位の大部分に置換性アルミニウム、一部分に水素が吸着していることをpHの値から推定できる。すなわち、土のpH(H<sub>2</sub>O)は弱酸性であるが、pH(KCl)

pH (1:2.5)	H <sub>2</sub> O	5.36	陽イオン交換容量 (CEC) meq/100g	置換性陽イオン meq/100g		
	KCl	3.65		Na	K	Ca
活性酸 化物%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	. . .	Mg	0.23	0.13
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10		Ca	0.62	0.73
	SiO <sub>2</sub>	0.08		計(B)	1.71	
熱塩酸可 溶性酸化 物 %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.26	. . .	塩基飽和度 % (=B×100/CEC)		40.1
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.98				
	SiO <sub>2</sub>	0.09				

表-5 供試土 (<2mm) の二・三の化学的性質

は強酸性であるので、次の反応式から供試土は置換性アルミニウムに富むと判定した。





このような塩基飽和度の環境下において、供試土中のMが土を軟化させるのに有効に作用しているかどうかを検討した。その結果、図-13に示したように、気乾土を30分間水中で沸化処理後軽く振とうした無処理の場合でも、完全分散させた場合の粘土分の約30%が水中に良く分散してきている。その上、無処理の場合、ほかの処理と比較して、Mの回折ピークの面積比が極めて大きく、粘土分中のMがこのような塩基飽和度のもとで、かなり良く膨潤・分散することを意味している。

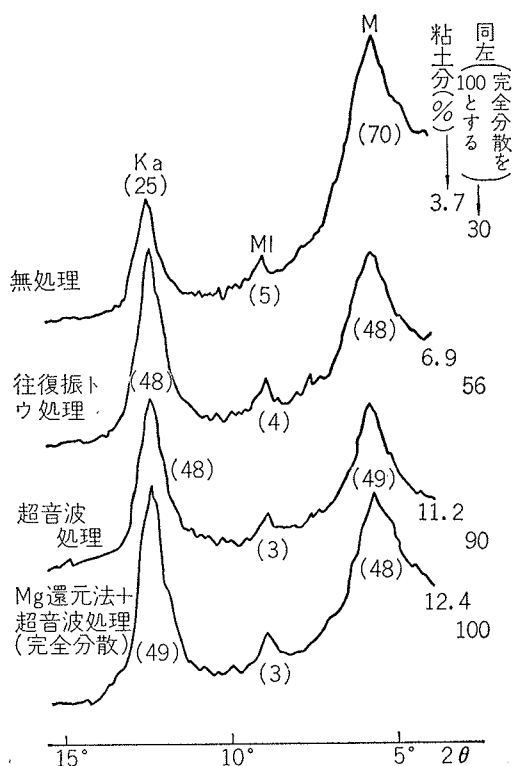


図-13 各種分散処理における粘土分 (<2μ) のX線回折曲線

M: モンモリロナイト MI: 雲母系粘土鉱物  
Ka: カオリナイト  
( )内の数字は各粘土鉱物の回折ピークの面積比を表わす。

以上の実験結果を総括して、粘土分の40~50%占めている2:1型膨脹性結晶質Mは、水で良く膨潤し、水による土の軟化に有効に作用していると判断した。

なお、表-5に示したように、土粒子間の結合物質の一種である三二酸化物の量はそれほど多くなく、ラテライト化の程度は微弱であり、水による土の軟化を妨げていないと考えられる。

### 5. まとめ

土木工事において、土は欠くことができないもっとも重要な天然の建設材料である。したがって、工事が

より確実に経済的に遂行されるためには、当然、工事前に土の物性を十分把握しておかねばならない。すなわち、土の物理・力学的諸性質だけでなく、それら諸性質を発現させる原因となる土質化学的諸性質をも明らかにする必要がある。

そして本報文では、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、次の結果をえた。

(1) 掘削時に砂土は非常に硬く、掘削刃の摩耗が激しいのは、土の砂分を構成している造岩鉱物のうち硬い石英砂が多量に、土全体の約60%重量も含まれており、しかもそれらが非常に密に詰っているからであると判定した。

(2) 一方、このような掘削土が水によって容易に軟化するのは、土のわずか約12%を占める粘土分の40~50%が、水で良く膨潤する2:1型膨脹性結晶質粘土鉱物のモンモリロナイトであることによることを明らかにした。さらに、かかる粘土鉱物の存在がこの砂土の透水性やコンシステンシーにも影響し、加水時にこの砂土が粘土の性質を呈するようになることを解説した。

以上の結果は、当地区の掘削工法を決定する上で、きわめて有益な指針を与えることができた。

なお、本研究は、土木工事において土を土質化学的に調査・検討することが、非常に有効であることを実証した一例である。

### 謝 辞

本報文における鉱物の偏光および電子顕微鏡観察は東北大学の増井淳一助教授にいただいた。

また、試料は当社土木本部工務部の平田昌三部長から提供され、かつご指導を受けた。そして、当技術研究所の福住隆二主任研究員および西林清茂研究員に便宜を計っていただいた。さらに、工事現場の写真は当社本店総務部の江良尹孝氏から提供された。

以上の方々に厚くお礼を申し上げます。

### 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), 1
- 2) 喜田: シンガポール ベドック・タンジョンル間海岸埋立工事掘削のための土質調査報告書(その1), 土質化学的検討(1966)
- 3) Kita, D.: Soil Survey Report on Soils at Cutsite, Coastal Reclamation Scheme, Bedok to Tanjong Rhu Contract No. 1., Singapore. Part 1, Geochemical Study (1966)
- 4) 京都大学農芸化学教室編: 新改版農芸化学実験書第3巻, (1965), 988~992
- 5) 京都大学農芸化学教室編: 新改版農芸化学実験書第1巻, (1965), 258~262
- 6) 土質工学会: 土質試験法, (1964), 42
- 7) 福住, 西林: シンガポール ベドック・タンジ



ンルー間海岸埋立工事掘削のための土質調査報告  
書(その2), 土の工学的性質と施工法の検討(1966)

- 8) 和田: 土肥誌, 37, (1966), 9
- 9) 大羽: 土肥誌, 37, (1966), 1
- 10) 須藤: 粘土鉱物, 増補版, (1961), 132
- 11) 文献10), 148
- 12) 文献 5), 131
- 13) 文献 5), 243
- 14) 文献 4), 1027~1037
- 15) 喜田: 文献 1), 31
- 16) Grim, R. E.: Applied Clay Mineralogy, (1962),  
219
- 17) Baver, L. D.: Soil Physics, (1956), 90