

海底洪積粘土地盤の物性パラメータと粘土鉱物分布との相関について

嘉門雅史・川前修平*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

大阪湾海成粘土の地盤物性の評価は、今後のベイエリア開発において基本的に重要な課題である。ここでは、海底地盤の物性を鉱物学的視点から解明することを目指し、海底粘土地盤中の粘土鉱物の同定・定量をX線回折分析によって行い、大阪湾海底地盤の水平・垂直方向の粘土鉱物の分布を推定する。それとともに、従来の地盤パラメーターを収蔵している大阪湾海底地盤情報データベースを活用することによって、粘土鉱物組成と地盤物性との相関について広域的に検討し、堆積環境や地域特性について明らかにする。

キーワード：粘土鉱物、地盤物性、データベース、海底地盤

1. はじめに

地盤物性の把握のためにさまざまな土質試験が考案され、その結果地盤の挙動がかなり正確に推定されるようになったが、試験時に重視されるのは応力状態など主として外的条件であって、地盤の構成材料である土に関しては通常その粒度分布に基づき砂であるか粘性土であるかの区分がなされる程度である。しかし、粘土分、特に $2\mu\text{m}$ 以下の微粒子は種々の層状の珪酸塩である粘土鉱物で構成され、その化学組成は互いに似通っているものの、それらの示す性質は極めて多様であることが知られている。したがって、その性質の多様さから粘土鉱物が地盤物性に何らかの影響を及ぼしていることは十分に考えられる。さらに、海底地盤中でみられる粘土鉱物は、その供給源である陸域での風化を受けた二次鉱物であり、河川から海域に運搬される際に化学的変質を受けるが、堆積後には地質学的年代を経なければ粘土鉱物の変質は起こらないと考えられているので、粘土鉱物組成は堆積時の環境を推定する際の指標になるといえる。

一方、地盤物性に関する試験が数多く実施され、地盤情報が蓄積するにつれてその情報を総合的に解釈す

ることが試みられるようになってきた。例えば、大阪湾海底の地盤情報は地盤工学会関西支部(1994)によって、3000本を上回るボーリングデータが入力されたデータベースが構築されており、総合的な情報処理が可能となっている。そのデータベースの活用成果の一つとして、海成粘土の地盤物性には地域性が見られることが判明している。そこで、粘土鉱物の水平・垂直分布の特徴と地盤物性の地域性との相関や、堆積環境を加味した鉱物学的な視点から地盤物性の整理の可能性を検討するものである。したがって本研究では、大阪湾海成粘土の地盤物性の評価に鉱物学的視点から取り組むことを目指し、粘土分の大部分を占める粘土鉱物の同定・定量を行い、大阪湾海底地盤の水平・垂直方向の粘土鉱物の分布を推定する。それとともに、地盤情報データベースを活用することによって、粘土鉱物組成と地盤物性との相関を広域的に検討する。

2. 海底地盤情報データベースとその活用

2.1 地盤情報データベースシステムについて

(1) データベースの構成

地盤情報のほとんどは、三次元空間の中で(x, y, z)

座標のデータによって関係づけられる。本研究で用いた「大阪湾海底地盤情報データベース」のシステムでも、その考え方に従い、地図情報データベースを核として、ボーリング情報と地層層序の情報、地盤変状情報などを独立してデータベース化し、その関係は位置座標やコードで結びつける方式がとられている。

(2) システムの構成

大阪湾海底地盤情報データベースの構築にはシステム DIG (Data-base system for Information of Ground) が用いられた。これはホストデータベースシステムとローカルデータベースシステムからなり、ローカルデータベースシステム(LDB)は主としてデータベースの入力管理を行い、かつ手軽に利用できるように小規模なデータベースとして用意されたシステムであり、主にパーソナルコンピュータ上で作動する。また、ホストデータベースシステム(HDB)はLDBを集中して管理し、その大量データを高速に検索することに重点を置いたシステムであり、EWS(Engineering Work Station) 上で作動する。

(3) データの内容と入力

データベースへの入力、前述のLDBシステムを用いて行われる。様々な試験の報告書の記載内容が正確に蓄積されるように入念な入力管理を行って、データ入力の信頼性の向上が図られている。入力作業はかなりの労力を要し、膨大な時間と経費が必要とするが、データの信頼性の低いデータベースはその用をなさないことに留意しなければならない。

2.2 本研究におけるデータベースの活用

本研究の目的は、海底地盤の物理化学的特性と地盤物性との相関を検討することである。地盤の物理化学的特性はデータベースには含まれていない情報であるが、地盤物性は海底地盤情報データベースがまさに対象としているデータである。そこで、通常なら試料の物理化学的性質と地盤物性との両者を把握しようとするに膨大な時間を要するが、データベースを利用することによって非常に多くの試料についての地盤物性の情報を得ることができ、それと物理化学的性質との相関の検討を効率的に行うことができる。

3. 粘土鉱物とその同定・定量方法

3.1 粘土鉱物

粘土鉱物とは一般に含水珪酸塩鉱物を指しており、大部分は層状構造を持っている。その化学組成や構造は類似したものであり、Si と Al (あるいは Mg) , O, H の組合せ、及び結晶の一部に取り込まれた Fe, K など

の元素の種類と量によって区別される。また粘土鉱物はそのほとんどが薄片状、板状のものであり、その理由は粘土鉱物が主に層状構造をとっているためである。

3.2 陽イオン交換容量

粘土鉱物は全体としては電氣的に中性であるものの、その表面は一般に負の電荷を持っているので、電荷を中和するために反対符号の電荷を持つ陽イオンの吸着が起こる。これらの吸着イオンをもった粘土鉱物が他のイオンを含む溶液と接触すれば、吸着イオンと液中のイオンとの間で、瞬間的な早さで交換反応が起こる。

交換反応によって溶液から取り込み、また溶液中に放出される陽イオンの量を測定すれば、反応に関与する粘土あるいは粘土鉱物の負の電荷量を知ることができる。この陽イオンの量をそれぞれ、陽イオン交換容量(CEC)と呼び、単位質量 (通常 100g) あたりのミリグラム当量数(meq)で示される。

CEC は砂分などの粗粒土ではほとんど無視でき、細粒土のように粘土分が大きな割合を占めると CEC は飛躍的に大きくなる。粘土鉱物組成が既知の場合、それぞれの粘土鉱物の CEC とその含有量の積の総和がその土の CEC と考えることができる。すなわち、

$$CEC = \sum C_{wi} \quad (1)$$

である。ただし、 w_i は各粘土鉱物の含有量であり、 C_i は各粘土鉱物の陽イオン交換容量である。また、海成粘土に吸着されている交換性陽イオンは Mg^{2+} と Na^+ が、淡水成粘土では Mg^{2+} と Ca^{2+} が卓越している。

3.3 粘土鉱物の特徴

粘土鉱物は様々なものがあるが、本研究で対象としている大阪湾の海底地盤においては、スメクタイト、クロライト、イライト、カオリナイトが含まれている

Table 1 Properties of clay minerals

clay mineral	size (μm)	CEC (meq/100g)
smectite	d=0.1-1 t=d/100	80-150
chlorite	d=0.05-2 t=d/10	10-40
illite	d=0.1-2 t=d/10	10-40
kaolinite	d=0.3-3 t=d/3=d/10	3-15

ことが既往の研究（嘉門ら，1988）によって指摘されている。Table.1 にこの4つの鉱物の特徴を示す。

3.4 粘土鉱物の産状

一般にカオリナイトは海底堆積物中に少なく、河底あるいは湖底に多いとされている。しかし、日本においては河川が短いために陸源のカオリナイトが供給され海底に堆積することもある。水中の溶解イオン濃度が低く、かつ水の循環がある程度よく、物質の溶脱作用が行われる条件では、カオリナイトの堆積は卓越する（日本粘土学会，1967）。

イライトは、ほとんどあらゆる堆積物中に見いだされるが、海底堆積物において特に特徴的なものとされる。イライトが海底で安定であるのは、海水中の K^+ の濃度が影響していると考えられている。

クロライトは海底で生成されるものもあるが、他の粘土鉱物が変化して生成することもあり、海成、河川成を特徴づけるものではない。

スメクタイトは火山灰起源の海成粘土層を特徴づけるものとされている。

3.5 粘土鉱物の同定、定量

粘土鉱物の同定には様々な方法があるが、本研究では最も一般的に用いられているX線回折法により同定を行った。X線回折には、理学社製X線回折装置を使用した。使用時の諸元は、

管電圧 40 kV

管電流 20 mA

対陰極およびフィルター Cu

である。

X線回折結果による粘土鉱物の同定・定量方法、供試体作製方法は以下に示すとおりである。

3.5.1 X線回折に基づく粘土鉱物の同定・定量

(1) 粘土鉱物の同定

粘土鉱物は層状珪酸塩であるので、この層の規則的な積み重なりに基づいて現れるX線回折強度曲線を利用して鉱物の同定を行う。いま、底面間隔を $d\text{\AA}$ とすると、

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2)$$

ここで、 $n:1, 2, \dots$ (整数)

λ : X線の波長

θ : 試料面に対するX線の入射角度

の関係を満足する 2θ の位置にピークを示す一連の回折強度線が現れ、この式をBraggの条件式という。

回折強度曲線のピーク位置は粘土鉱物に固有のものであり、そのピーク位置により試料中の粘土鉱物の種

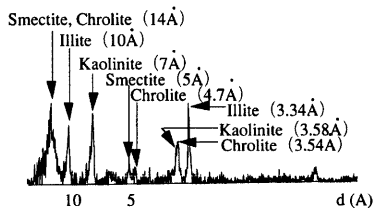


Fig.1 X-ray diffraction curve of untreated specimen

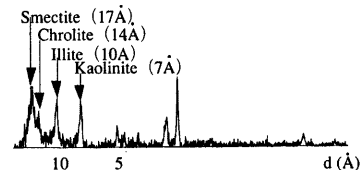


Fig.2 X-ray diffraction curve of ethyleneglycol treated specimen

類を同定することができる。ただし d 値の近い複数の粘土鉱物が試料中に存在する場合、特に d 値の比較的大きい範囲では、回折曲線が重なり合って同定が困難になることがある。そのようなときには薬品処理、加熱処理など様々な処理を行うことにより同定が可能となる。

例えば、Fig.1 に示すX線回折結果の一例では $14\text{\AA}$ においてスメクタイトとクロライトのピークが重なり合っている。この場合、エチレングリコール（もしくはグリセロール）処理を行うのが有効である。この処理によって、スメクタイトの層間にエチレングリコール（グリセロール）分子が入り込んで複合体を形成し、底面間隔が $17\text{\AA}$ に広がるため、回折曲線のピークが移動する(Fig.2)。一方、クロライトはそのような複合体を形成しないので、底面間隔は不変であり、ピークは元の位置のままである。この性質を利用してスメクタイトとクロライトとを区別することができる。

また、カオリナイトは $7\text{\AA}$ におけるピークがクロライトと重なり合うが、これは $3.5\text{\AA}$ のピークがクロライトとはわずかにずれているために両者を区別することができる。しかし、反射が幅広いときや重なるときには加熱処理、HCl 処理が必要となる。

(2) 粘土鉱物の定量

回折曲線の反射強度は粘土鉱物の含有率に比例するので、その比によって試料中に存在する粘土鉱物の含有率が推定できる。生沼ら（1968）は試料中にスメクタイト、クロライト、イライト、カオリナイトが含まれているときのそれぞれの反射強度比を以下の式で求められるとしている。

$$\begin{aligned} I_{\text{kaolinite}} : I_{\text{chrolite}} &= I_{3.58} : I_{3.54} \\ I_{\text{smectite}} : I_{\text{chrolite}} : I_{\text{illite}} &= I_{17} : I_{14} : I_{10} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $I_{3.58}$ 、 $I_{3.54}$ ：未処理の試料の3.58、3.54Åにおける反射強度、 I_{17} 、 I_{14} 、 I_{10} ：エチレングリコール処理した試料の17、14、10Åにおける反射強度、である。

クロライトの反射強度は(3)式のどちらにも含まれており、クロライトの反射強度を基準に1とすると、各粘土鉱物の反射強度 J_i は以下のように表される。

$$J_i = \frac{I_i}{I_{\text{chrolite}}}, i = \text{smectite, chrolite, illite, kaolinite} \quad (4)$$

このようにして求めた反射強度比は粘土鉱物の含有率の比を表す。そこで、粘土鉱物の含有率比と試料中の2μm以下の粒子含有量 w とを用いてそれぞれの粘土鉱物の含有率 w_i は次式のようにして求められる。

$$w_i = w \times \frac{J_i}{\sum J_i} \quad (5)$$

以上のようにして粘土鉱物の定量を行った。

3.5.2 供試体作製法

(1) 試料調整方法

粉碎した試料20gをピーカーに取り、6%の過酸化水素水20mlを加え、全土粒子が浸るようにする。ピーカーにガラス板などでふたをし、110℃の恒温乾燥炉の中に1時間入れる。過酸化水素水を加えるのは土中の有機物を分解し、また発生する気泡によって団粒化した土粒子を分散させるためである。恒温炉から取り出したピーカーに蒸留水を加え、全量が200mlになるようにし、1日静置する。分散剤（ヘキサメタリン酸ナトリウムの飽和水溶液）を2ml加えた後に200mlのメスシリンダーに入れてよく振とうし、静置する。

(2) 未処理供試体

室温(20℃)下で静置後4時間経過した後、液面から5cmの部分までの懸濁液をピペットで吸い出し、プレートガラス上にガラス面の2/3程度を占めるように静かに滴下し、水平を保って1日乾燥させたものを未処理の供試体としてX線回折に用いた。

ここで、振とうしてから4時間後に液面から5cmの部分の吸い出すというのは、Stokesの法則に基づき2μm以下の粒子を得るためである。また、このような供試体作成法を定方位法といい、底面反射が強調されるので一般的に底面反射の弱い自然地盤中の土を用いて測定する際にはこの方法によって行うのが望ましい

とされている（土質工学会、1978）。

(3) エチレングリコール処理供試体

未処理の供試体を恒温装置内にエチレングリコールの入ったカップとともに60℃で1日置き、発生するエチレングリコールの蒸気によって供試体をコーティングする。この処理を行ったものをエチレングリコール処理供試体とする。

(4) 粘土分含有量の測定

試料調整の前に分取したものから島津製作所製の光透過式粒度分析器を用いて試料中の2μm以下の粒子の含有量を求めた。粘土分は我が国における土質工学では一般に5μm以下の粒子とされているが、粘土鉱物は一般に2μm以下の粒子であるので本研究では2μm以下の粒子を粘土分と考え、その含有量とX線回折によって求めた粘土鉱物含有量比とを用いて粘土鉱物含有量を推定した。

4.大阪湾海底地盤中の含有粘土鉱物の分布

4.1 試料採取位置について

本研究に用いた試料はFig.3に示す10本のボーリングから得た。大阪湾には大小数多くの河川が流れ込み、堆積物の供給源となっているが、その中で最も重要な河川は湾奥部から流れ込む淀川水系である。よってその他の河川や他の海域から潮流に乗って搬入する物質の影響は無視しうると考えられている。

大阪湾内の堆積物の供給源である淀川水系周辺地域で見られる粘土鉱物は、スメクタイト、クロライト、イライト、カオリナイト、ハロイサイトであり（小村、1976）、大阪湾の粘土中にもそれらの鉱物が含まれていると予想されるが、本研究で用いた試料中の粘土鉱物の同定を3.で述べた方法により行った結果、試料中にはスメクタイト、クロライト、イライト、カオリナイトが含まれていることが確認された。



Fig. 3 distribution of points

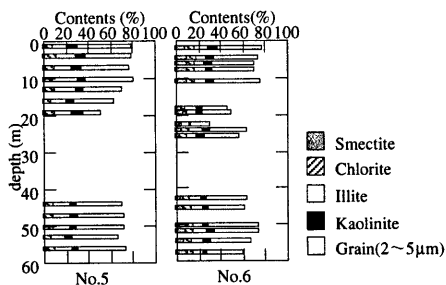


Fig.4 Vertical change of clay mineral composition (No.5, 6)

4.2 構成粘土鉱物の垂直方向の含有量分布

X線回折分析による粘土鉱物の定量結果を、ボーリング5, 6について垂直方向に表したものがFig.4である。この図から同一ボーリングの異なる層間の粘土鉱物組成の違いよりも異なるボーリング間における差の方が大きいことがわかる。

4.3 構成粘土鉱物の水平方向の含有量分布

粘土鉱物の水平分布を沖積粘土層のMa13層と上部洪積層のMa12層について示したものがFig.5, 6である。Ma11層以下の海成粘土層は試料を入手できた地点が少ないうえにここでは取り上げない。

(1)Ma13層

スメクタイトはボーリング2, 3の試料中に最も多く含まれ、淀川河口付近のボーリング5で非常に少なくなる。1, 4, 6, 10では両者の中間程度の含有量である。ボーリング7は試料が入手できず、ボーリング8, 9ではMa13層を欠いているため、この地域ではどのような分布をしているのか不明であるが、(2)で述べるようにMa12層における分布によるとボーリング6から10にかけての変化はあまり大きくないので、それほど大きな違いはないものと考えられる。

クロライトは全体的に変化に乏しいが、ボーリング1から10にかけて大阪湾を時計回りの方向に進むにしたがって増加している傾向がみられる。

イライトはスメクタイトとは逆の傾向を示し、ボーリング2, 3のように陸に近く近いところでは比較的少なく、2, 3に比べて沖にあるボーリング1, 4, 5では多く含まれ、またこの順に淀川河口部に近づくにつれて含有量は増加し、スメクタイトの最も少なくなるボーリング5で最も多く含まれていることがわかる。ボーリング6では1, 4と同程度に含まれるが、10ではやや少ない。

カオリナイトはクロライトと同様に変化は大きくないものの、阪神地域から泉南にいくにつれて次第に多

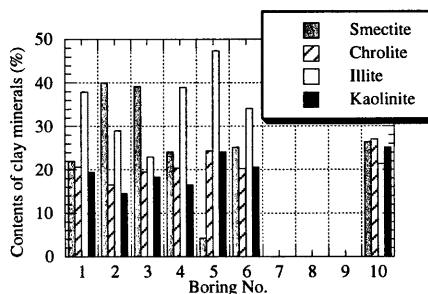


Fig.5 Horizontal distribution of clay minerals (Ma13)

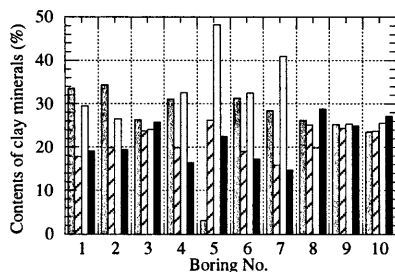


Fig.6 Horizontal distribution of clay minerals (Ma12)

く含まれていく傾向がみられる。

(2)Ma12層

スメクタイトがボーリング5で少ないという点ではMa13層と同様であるが、Ma13層ではスメクタイトの非常に多かったボーリング2, 3において、スメクタイトはそれほど多く含まれていないことがわかる。また、Ma13層では得られなかったボーリング7, 8, 9のスメクタイトの含有量は6, 10とそれほど変わらないものの、この順に緩やかに減少しており、全体的にみてもボーリング1から10にかけて次第に減少していく傾向が見られる。

クロライトはMa13層と同様な傾向を示しており、ボーリング1から10にかけて増加しているが、6, 7ではその傾向に反してやや少ない。

イライトもMa13層と同様な傾向を示し、ボーリング2, 3では比較的少なく、スメクタイトの少ないボーリング5で最も多くなる。また、Ma13層においては試料がないために検討できなかったボーリング7の地点においてもイライトはかなり多く含まれていることがわかるが、Ma13層の欠如していたボーリング8, 9や10では比較的少ない。

カオリナイトについては、イライトとは逆にボーリ

ング3, 8, 9, 10で他に比べて比較的多く含まれ, 4, 6, 7ではやや少ないことがわかる。

4.4 大阪湾海底地盤中の粘土鉱物分布に対する考察

(1) 垂直方向の分布

Fig.4より, ボーリング間の粘土鉱物の含有量の違いに比べて, 同じボーリング内の同一の海成粘土層中での違いは比較的小さいことがわかる。このことから本研究で対象とした範囲においては地質学的にも新しいこともあり, 堆積後に粘土鉱物の変化, 続成作用はほとんど起こっていないといえる。また, 同一層で粘土鉱物の含有量がそれほど変わらないということは, その堆積年代における堆積物の供給源に変化が乏しかったことを示すと考えられる。

(2) 水平方向の分布

水平分布において最も目立つ特徴はボーリング5でスメクタイトが他のボーリングに比べて少ないことである。これはボーリング5が堆積物の主要な供給源であると考えられている淀川の流路上に位置し, 微粒のスメクタイトはすぐには堆積しないためと類推できる。ただし, 青木ら(1990)は淀川の河口部を離れるほどスメクタイトの含有量が減少する傾向が見られることを指摘している。その理由として, 淡水から海水へと環境が変化する段階で, スメクタイトがより安定なイライトやクロライトへと化学的に変質していくことを挙げており, 粒径の違いによる差別的堆積は大阪湾では起こらないとしている。確かにFig5, 6からも, スメクタイトの減少しているところではイライト, クロライトの増加がみられ, このことを実証しているとも考えられる。しかし, この説ではボーリング5よりも淀川河口から離れた西宮浜のボーリング2, 3でスメクタイトが多く含まれていることを説明できない。

そこで, 淀川から大阪湾に供給されたスメクタイトは, 湾内の流れによって運ばれて変質する前に流速の遅いところに到達して堆積するものと, 湾内でまず変質した後に堆積するものの2通りがあると考えた。大阪湾の恒流の概略を示したのがFig.7である(藤原ら, 1989)。これによると, 大阪湾内において, 淀川河口部より西側の西宮沖では時計回りの環流が生じているが, 淀川河口の南の泉北・泉南沿岸は大阪湾の湾口に向かって概ね一方向の流れが生じていることがわかる。よって淀川から供給されたスメクタイトのうち, 前者の環流にのったものは, 変質する前に西宮沖で多く堆積し, 泉北沖の恒流にのったものはあまり堆積せず, 湾口に向かって流れていくにつれスメクタイトはイライトやクロライトに変質していくと考ええると, スメクタイトの水平方向の分布は定性的に説明できる。

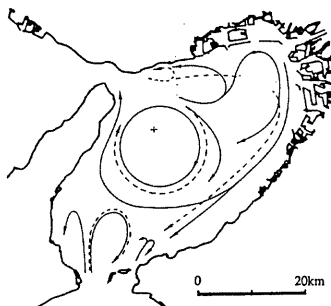


Fig.7 Surface current of Osaka bay

クロライト, イライトの含有量の変化はスメクタイトの変化と逆の傾向を示しており, これは先述の化学的変質が起こっているためと考えられる。ただし, クロライトの変化はイライトに比べて乏しく, 粘土の堆積環境が海成であることを強く示すのはイライトであると考えられる。

一方, 粘土鉱物中のカオリナイトの比率がボーリング8, 9で他に比べて高いのは, 堆積環境が淡水成であるためと考えられる。つまり, この試料採取点は他に比べて陸地に近いことがわかる。しかし, ボーリング2, 3も陸地に近いにもかかわらず, 特にMa13層においてはスメクタイトが多く含まれる一方, カオリナイトは少ないので試料採取地点のみが理由であるとはいえない。そこで再びFig.7に示す大阪湾内の恒流図を見ると, 2, 3の位置する地域は環流が卓越しているのに対し, 8, 9の地域では一方向の恒流が卓越していることがわかる。それゆえ, スメクタイトのように微粒でかつ化学的に不安定な粘土鉱物は後者の地域では堆積しにくいといえる。さらに前述したように, 海成粘土で特徴的なイライトが8, 9では少ないことからこの地域の堆積環境が淡水成であることを裏付けている。

以上から, 粘土鉱物の堆積は, カオリナイトのように安定な鉱物は粒径による差別的堆積によって説明できるものの, スメクタイトのように活性の高い鉱物は堆積物の供給源からの距離だけではその含有量の変化を十分説明できないことがわかる。ただ, 古くから指摘されている化学的変質による解釈でも本研究によって得た結果と合致しないところがあるので, 河口部付近など粘土鉱物に変質する前に供給されると考えられる地域では, 粒径による差別的堆積が生じており, その供給源からある程度離れたところでは, 化学的変質が起きてから堆積しているとするのが妥当であろう。

5. 粘土鉱物と地盤物性との相関

5.1 物理特性との相関

(1) 粘土鉱物との相関

粘土含有率と塑性指数との相関を検討した結果が Fig.8 であり、比較的相関は高い。粘土分、特に 2 μ m 以下の粒子は主に粘土鉱物からなり、試料中の粘土鉱物が物理特性に対して何らかの影響を及ぼすことが考

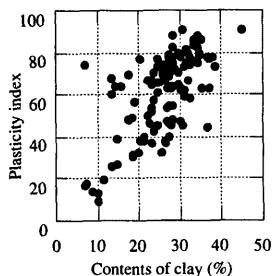


Fig.8 Interrelationship between Contents of clay and Plasticity index

えられ、以下で検討した。

ボーリング2における粘土鉱物と物理特性の深度方向の変化を Fig.9 に示す。この図から4つの粘土鉱物の中ではイライトと物理特性の深度方向の変化とが比較的一致していることがわかる。紙面の関係上、他のボーリングの例は省略するが、イライトと物理特性の対応は概ね同様である。そこで、ボーリング1~10のイライトの含有率と物理特性との相関を検討した結果が Fig.10 であり、他の粘土鉱物と比較すると相関は高かった。また、いわゆる沖積層である Ma13 層と上部洪積層の Ma12 層に分けて、検討したものが Fig. 11, 12 であり、この図からどちらの層でも傾向は同様であることがわかる。

また、Fig.9 により深度方向に土の陽イオン交換容量と物理特性との比較をすると、陽イオン交換容量は液性限界と塑性指数に対応して変化していることがわかる。

(2) 物理特性との相関についての考察

粘土含有率は物理特性と相関をもつことがわかり、粘土分の主要な構成物である粘土鉱物が物理特性に何らかの影響を及ぼすことがこの結果から十分考えられ

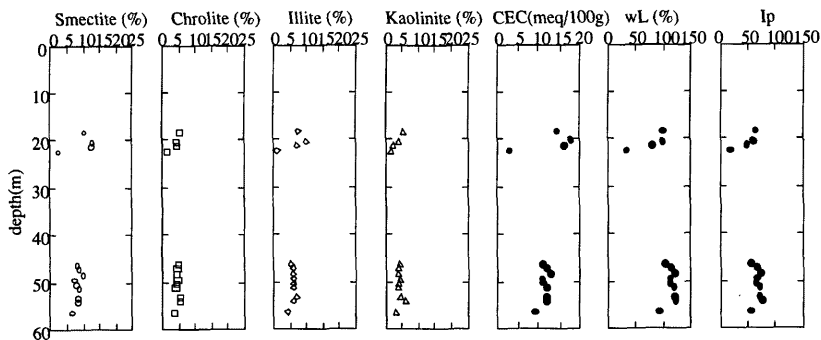


Fig.9 Vertical change of clay mineral composition and physical properties

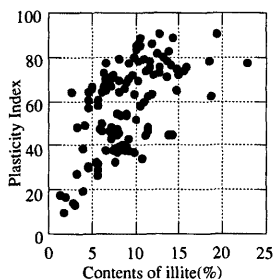


Fig.10 Interrelationship between Contents of illite and Plasticity Index

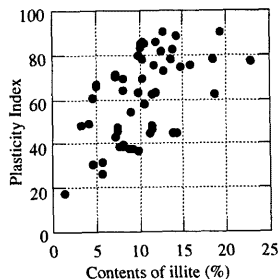


Fig.11 Interrelationship between Contents of illite and Plasticity Index (Ma13)

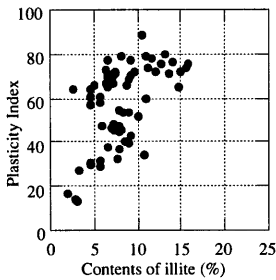


Fig.12 Interrelationship between Contents of illite and Plasticity Index (Ma12)

る。そこで、大阪湾の海底粘土中の粘土鉱物で特に微粒のスメクタイトの含有量に液性限界や塑性指数は大きく左右されると考えたが、本研究ではその傾向は認められず、むしろ、試料中の粘土鉱物では中程度の大きさをもつイライトの含有量と液性限界や塑性指数といった物理特性との相関が強いことがわかった。これは、前述したように、スメクタイトが海水中では不安定であり、クロライトやイライトに変質するため、微粒分が堆積する条件でもスメクタイトの含有量が少なくなり、逆にクロライトやイライトはその条件下で予想されるよりも多く含まれるということがこのような結果を示す原因の一つと考えられる。また、粘土鉱物の含有量から推定した土の陽イオン交換容量と液性限界・塑性指数の深度方向の変化は概ね対応しており、これは物理特性との相関を検討する際に粘土鉱物個々の性質を別々に着目するより土全体としての性質を考慮する方が有効であることを示している。

5.2 強度特性との相関

(1) 粘土鉱物との相関

砂・シルトに粘土鉱物を加えることで一軸圧縮強度が非常に大きくなることがあり、さらに一軸圧縮強度の最大値を得るのに必要な粘土鉱物の量は、スメクタイトが他の粘土鉱物に比較して少量であることや、同量の粘土鉱物の添加による強度の増加は、スメクタイト、イライト、カオリナイト（≒クロライト）の順に大きいことが知られている。これらのことは土の強度が粘土鉱物の種類や量と何らかの相関を持つ可能性を示している。ただし、前述したように一軸圧縮強度は深度の増加による影響が大きいので、その影響を除くために、土の一軸圧縮強度を有効土被り圧で除して無次元化したものを考え、その指標と粘土鉱物の含有量との相関を検討した。一例としてボーリング 10 ににおける深度方向の変化を粘土鉱物とともに Fig.13 に示

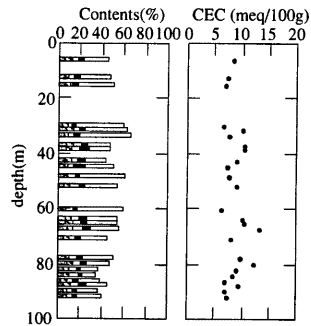


Fig.13 Vertical distribution of clay mineral and CEC

すが、どの粘土鉱物についても明確な傾向を示しているものはなく、強度特性と粘土鉱物との相関は認められなかった。

(2) 強度特性との相関についての考察

強度を示す指標として一軸圧縮強度を有効土被り圧で除したものをを用いたが、これは強度増加率という非排水せん断強さを有効土被り圧で除したものに对应しており、一般に 0.3~0.35 の値をとるが、大阪湾沖積粘土においては神戸型で 0.4~0.8、大阪型で 0.2~0.6、泉南型で 0.2~0.7 とされている（土質工学会関西支部、1990）。この値は粘土鉱物および間隙水中の陽イオンの種類に左右されるといわれている（嘉門ら、1988）が、本章で検討した結果では粘土鉱物の種類による差は少なく、間隙水中の陽イオンの種類に影響を受けると予想される。しかし、ここでは土の非排水せん断強さとして一軸圧縮強度を用いたのであるが、一軸圧縮強度はサンプリング時の乱れなどによりばらつきが大きく、そのため統一的な傾向が得られなかったと考えられる。

5.3 圧密・圧縮特性との相関

(1) 粘土鉱物との相関

液性限界と圧縮指数は Skempton の経験式など古くから関連づけられている。5.1 で述べたように、粘土分含有量は液性限界と比較的高い相関関係が得られているので、粘土分含有量と圧縮指数との間にも相関があることは十分考えられる。そこで、その両者の相関を検討したのが Fig.14 であり、この図から粘土分含有量は圧縮指数ともある程度相関を持つといえる。

また、粘土分は透水性が低いので粘土分含有量の増加することにより圧密の進行が遅くなる。そこで圧密の速度に影響を及ぼす圧密係数と粘土分含有量との相関を示したのが Fig.15 である。

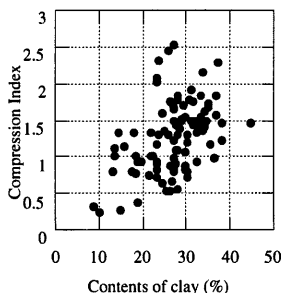


Fig.14 Interrelationship between Contents of clay and Compression Index

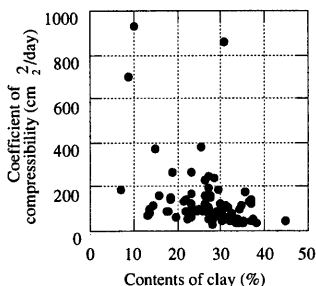


Fig.15 Interrelationship between Contents of clay and Coefficient of compressibility

この図からそれほど相関は高くないものの、粘土分含有量が増加するにしたがって、圧密係数が減少する傾向がよみとれる。以上から粘土分と圧密・圧縮特性との間にはある程度の相関が見られ、それゆえ粘土分の大部分を占める粘土鉱物は圧密・圧縮特性にある程度影響を及ぼすものと考えられる。

粘土鉱物の圧縮性はその種類により異なるが、さらにその交換性陽イオンの種類によっても異なることが知られている。すなわち、スメクタイトの圧縮性はカオリナイトのそれよりも大きく、さらにスメクタイトの交換性陽イオンが Na^+ のときは Ca^{2+} のときよりも圧縮性が非常に大きい、カオリナイトでは交換性陽イオンの種類による圧縮性の違いは小さい (Grim, 1962) ということである。3. で述べたように堆積環境が海成ならば交換性陽イオンは Na^+ が卓越し、淡水成ならば Ca^{2+} が卓越するので、土の圧縮性は粘土鉱物や堆積環境の違いによって差が生じると考えられる。また、粘土鉱物の種類によって圧密のメカニズムが異なることも知られている。すなわちスメクタイト粒子表面には他の粘土鉱物に比べて非常に厚い水膜があり、その水膜中の水分子は高い配向性を示す。圧密圧力の低い範囲では間隙水のみが移動し、高い圧力になって初めて配向水が移動するが、配向水はスメクタイト粒子の再配列を妨げるので、結局スメクタイトは低圧の段階で大部分の圧密を生じ、高圧に至るとほとんど圧密しなくなる。一方、カオリナイトでは配向水よりも間隙水の方が多く、配向の度合いも低い。そのため圧密圧力の低い段階から間隙水が排出され、圧力が高くなってもその排水量の変化は小さいとされている (Grim, 1962)。イライトやクロロライトは吸着水膜の厚さはスメクタイトとカオリナイトの中間程度である。このような違いは圧密の速さに影響を及ぼすと考えられる。

そこで、まずボーリング5における粘土鉱物と圧密特性の深度方向の変化を示したものが Fig.16 である。この図より物理特性の場合と同様にイライトの変化が圧密特性値の変化と概ね対応しているようである。

そこでボーリング1~10のイライト含有量と圧縮指数の相関を検討したものが Fig.17 である。

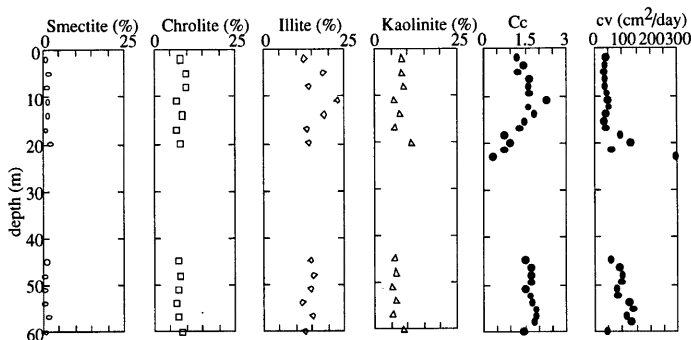


Fig.16 Vertical change of clay mineral and consolidation properties

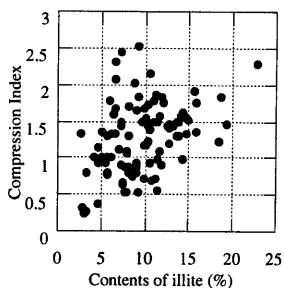


Fig.17 Interrelationship between Contents of illite and Compression Index

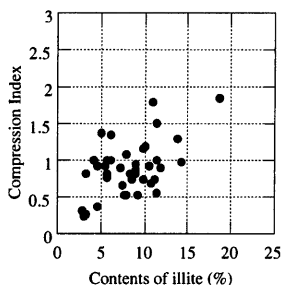


Fig.19 Interrelationship between Contents of illite and Compression Index (wL<100%)

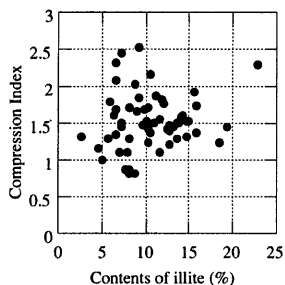


Fig.18 Interrelationship between Contents of illite and Compression Index (wL>100%)

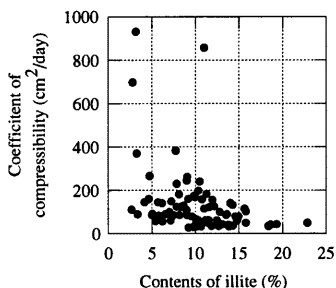


Fig.20 Interrelationship between contents of illite and coefficient of compressibility

さらに、堆積環境を考慮するために液性限界が 100% 以上のものを海進時、100%未満を海退時とすることによって区別し、圧縮指数との相関を検討したものが Fig.18, 19 である。

物理特性の場合と異なり、Fig.17 からはイライトと圧縮指数との相関はかなり低いといえる。しかしながら堆積環境を考慮した図からはイライトと圧縮指数との相関は海進時にはあまり高くもないものの海退時にはやや相関が強まることがわかる。

一方、各粘土鉱物含有量と圧密係数との比較した結果、イライト含有量の増加に従い圧密係数の減少が認められた(Fig.20)が、他の粘土鉱物に関しては明確な傾向は見られなかった。

(2) 圧縮・圧密特性との相関についての考察

粘土分の主要な構成物である粘土鉱物は、その種類・堆積環境によって圧縮性に差があるので、粘土鉱物と圧縮指数との間の相関を種類・堆積環境を考慮に入れて検討した。スメクタイトの圧縮性は元来大きく、また堆積環境にもその圧縮性は左右されるので、この含有量が圧縮指数に影響を及ぼすと考えたが、イライ

トの含有量による影響の方がより大きかった。また、海成よりも淡水成における方が粘土鉱物の含有量と圧縮指数との相関が高かったが、これは海成粘土では綿毛化構造をとるので圧縮性は元々高く、粘土鉱物の種類および量にあまり左右されず、一方淡水成粘土ではランダム構造や分散構造をとるのは粘土鉱物の性質により決まるため粘土鉱物の種類および量が圧縮性にかなり影響を及ぼすことが原因であろう。

次に、粘土分含有量が増加するにしたがってそれほど明確でないものの圧密係数が減少する傾向が認められた。これは微粒である粘土分の透水性は低く、それが間隙水の排出を抑制するためである。粘土分の多くを占める粘土鉱物はその種類によって圧密時の土粒子周辺の水の挙動が異なり、その挙動の差が圧密係数に及ぼす影響を検討したが、粘土鉱物で特に吸着水膜の厚いスメクタイトより、むしろ吸着水膜の厚さが中庸であるイライトの含有量が増加した場合の方が圧密係数は明確に減少しており、本研究においてはイライトが圧密挙動に影響を及ぼしているといえる。

6. 結論

本研究において、大阪湾の海底地盤中の粘土鉱物組成を推定し、地盤物性との相関を検討した。

その結果、大阪湾海底地盤の粘土鉱物の分布について得た知見をまとめると以下のようになる。

- 1) 垂直方向の分布については、同じボーリング内の同一の海成粘土層中での違いは比較的小さく、本研究で対象とした範囲においては堆積後に粘土鉱物の変化はほとんど起こっていないといえる。
 - 2) 水平方向の分布については、河口部付近など粘土鉱物に変質する前に供給されると考えられる地域では、粒径による差別的堆積が生じており、その供給源からある程度離れたところでは、化学的変質が起きた後に堆積していると考ええることで定性的に説明できた。
- さらに粘土鉱物組成と地盤物性との相関を検討した結果として得た知見をまとめると、以下の通りである。
- 1) 物理特性と粘土分含有量はかなりの相関をもつことがわかった。液性限界は粘土鉱物の中でも特に微粒のスメクタイトの含有量に大きく左右されると考えたが、むしろ中程度の大きさをもつ伊利トの含有量が増加するにつれて液性限界が増加する傾向を示した。塑性指数についても液性限界と同様にスメクタイトよりも伊利トの含有量との相関が強かった。また、粘土鉱物の含有量に基づき土の陽イオン交換容量を推定することによって物理特性の変化を定性的に説明できた。
 - 2) 本研究において、強度に対する粘土鉱物による明確な影響はなかった。
 - 3) 粘土分含有量は圧縮指数ともある程度の相関を示した。各粘土鉱物と圧縮指数とを検討した結果、堆積環境を考慮することで伊利トとの相関が比較的強いことがわかった。また、圧密係数と粘土分含有量に関しては、それほど明確ではないものの、含有量が増加するにしたがって圧密係数が減

少する傾向が見られた。また、粘土鉱物を個別に検討すると圧密係数に対しては伊利トによる影響が最も大きかった。

謝辞

本研究に際し、平成 6～8 年度文部省科学研究費基盤研究(A)(1)「海底洪積粘土地盤の長期沈下に関する設計パラメーターの同定のための研究」(課題番号 06555142、代表・嘉門雅史京都大学防災研究所教授)の援助を受けた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 青木三郎・生沼 郁・星野 透：大阪湾堆積物中の粘土鉱物の分布、東洋大学紀要、教養課程篇(自然科学)第 34 号、別刷、pp.1-18, 1990.
- 生沼 郁：Method of quantitative estimation of clay minerals in sediments by X-ray diffraction analysis, 東洋大学紀要 教養課程篇, pp.1-15, 1968.
- 嘉門雅史・浅川美利：新体系土木工学 16 土の力学(I)、技報堂出版, pp.30-36., 1988.
- 小村良二：千里山丘陵北方の大阪層群の粘土鉱物組成について：地質調査所月報、第 25 巻、第 10 号、pp.37- 44, 1976.
- 土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー15 土質工学における化学の基礎と応用, p.299, 1978.
- 土質工学会関西支部：海底地盤、第 2 章、第 4 章, 1994.
- 日本粘土学会編：粘土ハンドブック、pp.165-166, 1967.
- 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫：大阪湾の恒流と潮流・渦、海岸工学論文集、第 36 巻、pp.209-213, 1989.
- Grim, R.E.: Applied Clay Mineralogy, pp.259-260, 1962.

Engineering Characteristics of Seabed Deposits in Osaka Basin due to the Distribution of Clay Minerals

Masashi KAMON and Shuhei KAWAMAE*

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The objective of this study is to evaluate the relationship between the composition and distribution of clay minerals and physical and/or engineering properties of seabed deposits in Osaka basin. Despite of similarity of their

chemical composition, clay minerals show the different physical and/or engineering properties. As the clay minerals are considered to define the engineering characteristics of the clayey soils, special attention was focused on the clay minerals, and identification or quantitative analysis of clay minerals were conducted. Some of them are depending on the distribution of clay mineral contents. The physical and engineering properties of the soil were obtained by using the Osaka Bay seabed database (SBDB).

Keywords: Clay mineral; Geotechnical properties; Database; Marine deposit