



有機硫化物を含む軟弱土の土質工学的特性

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SOFT ORGANIC SULPHIDE SOILS

Erick F. Schwab* (シュワブ)

スウェーデンとフィンランドにまたがる軟弱な微細粒径の堆積物は、後氷河期の最終段階ならびにそれ以降にバルト海に沈積したものである。北スウェーデンやフィンランドのボスニア湾の海岸に沿って、特に、多くの河川の河口付近に有機質土が沈積しており、この地方特有の言葉としてスパートモッカ (svartmokka) と呼ばれている。この土はバルト海が汽水環境にあった時期（およそ 7,000 年前でリトリナ海と呼ばれている）に堆積したものである。沈降堆積は現在のバルト海の海底でもなお継続している。スパートモッカは当初海岸地域で発見されたが、それはリトリナ海の後進がかなり限定されていたからである。図-1, 2 には試験位置、スパートモッカの分布、リトリナ海の後進ならびに最高海岸線を示している。最高海岸線は、後氷河期やそれ以降の別の段階でのバルト海の後進時の海岸線に対応している。

スパートモッカ地帯の分布はかなり限られたものであるが、土質工学的挙動の正確な知識は極めて重要なものとなっている。というのも北スウェーデンの多くの都市は、河川の河口部分に位置しているからである。さらに、スウェーデン北部の主要道路や鉄道は海岸線沿いに発達している⁷⁾。

スパートモッカは、河川の河口部⁸⁾や、リトリナ海の後底部の窪みや谷部¹⁾の静穏な水面下において堆積したものである。堆積物は、高い有機含有量を持ち、ピッチのような黒色を呈している。そして新鮮試料では、特有の臭いを有し、これは硫化鉄の含有の高さによっている。硫化鉄は、空気にさらされるとただちに酸化し、その色も灰褐色に変化する。時には褐色の細片がみられることもある。

ウーメオ(UMEÅ), カリクス(KALIX)で採取した新鮮試料の写真を図-3に示している。比較としてスカ・エドビー(Ska-edoby)(採取は、スウェーデン土質研究所内で行ったものである)からの、スウェーデンの典型的な後氷河期粘土の試料を示している。スカ・エドビーの粘土は層状を呈しており、これは通常、堆積速度の相違と環境条件とに基づく



図-1 クラムフォース、ウーメオ、カリクス、スカ・エドビー（ストックホルム郊外）の位置とスウェーデン、フィンランドにまたがるスパートモッカ地帯の分布

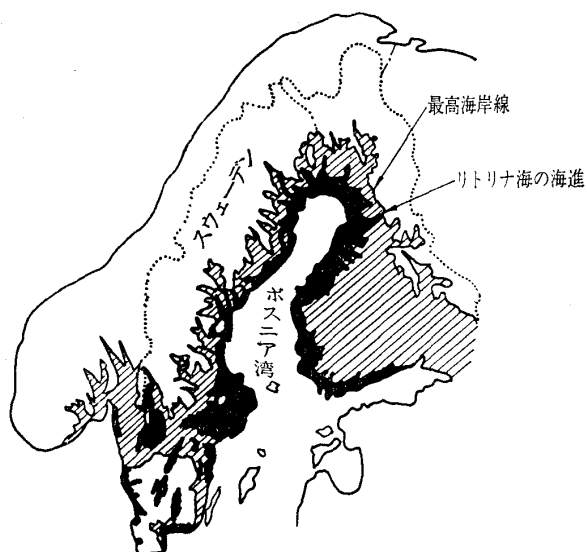


図-2 最高海岸線とリトリナ海の後進

* 調査・試験連合研究所地質工学部門(Federal Institute for Research and Testing, Geotechnical Dept.) オーストリア
元：スウェーデン王立工科大学(Royal Institute of Technology)

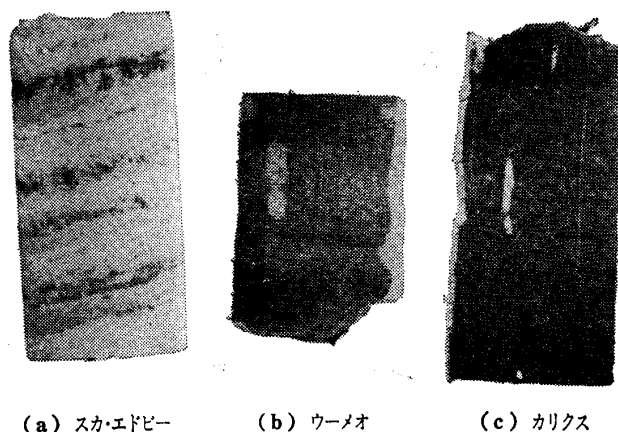


図-3 スカ・エドビー、ウーメオ、カリクス新鮮試料の断面写真

ものである。類似の層状性はカリクスとウーメオの堆積物にも存在することが予想される。しかしながらこの層状性は、土が黒色を呈することによってかくされてしまっている。層状性はスカ・エドビー粘土のように、明確に現われているわけではなくて、それはスパートモッカ土が、相対的に静止条件の静穏な水面下で堆積したからである。スパートモッカ土の硫化鉄は、バクテリアや藻類によって形成されたことを示すいくつかの証拠をもっている^{2), 5), 6)}。大量の有機物ならびに無機物が多くの河川から海へ供給された。有機物、植物遺骸、花粉、微生物、侵食された物質などは、その他の有機物質とともに海中に存在し、海水や堆積物の生物学的活性を高めている⁵⁾。有機物中の硫黄分は主としてたん白質の形成に関与している。硫化水素は、バクテリアによる有機物の分解中に解放（ガスとして放出）される。硫化水素は、例えば鉄イオンと再び反応して、ほとんど不溶性の硫化物をつくり、そして、それが堆積物中で合体した状態となる。土中の有機物は腐食、主として腐食酸からなっている。調査された土試料中にはいかなる非分解物質も検出されなかった。バクテリアと藻類は、堆積中に有機物と鉱物とを団粒化させる。バクテリアと藻類による土粒子の凝集体は重要な作用とみなされる。鉱物-有機複合体が形成されている⁵⁾。プッシュ (Pusch, 1970) は、微視的な研究からスパートモッカ土がしばしばガスで飽和した数多くの間隙を含んでおり、それはおそらく土の有機物量に依存していることを見出した。

堆積物の組成はきわめて複雑である。それらは、水分を除いて、砂から粘土径までの土粒子と有機物、硫化鉄、ガスを含んでいる。硫化物を含んだ有機質土と通常は無機質土との相違点は下記のとおりである。

- スパートモッカの単位体積重量は小さい。
- 硫化物を含む土の含水比は、同一の上載荷重下での無機質土の含水比より一般に高くなっており、これは有機物と硫化鉄の高い含水比と、有機物がオープン構造を作る

ことによる団粒体とに基づいている。

- 鉱物-有機物-硫化鉄-複合体の構造はきわめてオープンであり、土の粘性と高い変形性を生じさせている。
- 硫化物を含んだ土は、他の後氷河期堆積物より一般に相当粗い粒径をもっている。有機物と硫化物のために土は粘土のような外観をしている。
- スパートモッカ土の圧縮性は大きく、土は大きい二次圧密量、すなわち遅延圧密量をもつ。土はしばしば過圧密土の挙動を示す¹⁰⁾。
- 破壊は一般に進行性挙動を示す。相対的に大きいひずみと時間依存特性をもつ⁵⁾。応力-ひずみ曲線は典型的なひずみ硬化材料のそれである。
- せん断強度は微視的な特性と巨視的欠陥に影響されており、それらは例えば堆積や酸化作用あるいは、生物の作用を受けている。酸化によって生じるクラックは、カリクスの深い層の堆積物中で見出されている¹¹⁾。
- スパートモッカの液性限界は、コーン貫入による方法が通常の方法より一般に大きい値を与える。正規圧密粘土に対してはこの2つの試験結果は、ふつう非常によい一致を示している。
- 堆積物の鋭敏比は一般に10~30の間で変化する。しかしながら、低位あるいは中位の鋭敏比を示していた自然有機堆積土をリーチング（溶脱）によってクイッククレーに変化させることができ、これはプッシュ (1973) によって報告されている。
- 非排水せん断強度におけるフォールコーン試験とベーン試験との値の差はスパートモッカ土に対して大きなものとなることがある。通常のスウェーデン粘土では、この2つの試験結果は全くよく一致している。

鉱物学的には、堆積物は主としてイライト、石英、長石からなっており微量物質として緑泥石、カオリナイト、膨潤性物質、角閃石がみられる⁵⁾。

非排水せん断強度

スウェーデンでは、通常、軟弱土の非排水せん断強度を現場ではベーン試験、室内ではフォールコーンや一軸圧縮試験で決定している。スパートモッカ土においては、建設工事の最中や完工直後に、破壊に対する安全率が2とか3のような場合でさえもしばしば破壊を起こしている。それゆえこれらの土のベーンや室内試験で決定される非排水せん断強度は過大評価を与えていることになる。シュワブ、プロムス (1975a, 1975b, 1976, 1977) やシュワブ (1976) による研究によって、強度異方性や荷重の載荷速度だけでなく、これらの土が原位置において欠陥を有していることが、大スケールでの現場試験から得られる現場強度と、ベーンや室内試験から得られる値との相違の原因となることが明らかになった。K₀-三軸圧縮・伸張試験の結果

がこれらの土の非排水せん断強度の決定のために用いられるべきである。破壊に対する時間効果を解析上考慮されねばならない。

変形特性

粘土地盤上の基礎の沈下は一般にテルツァーギによって初めて提案された圧密理論に基づいて計算されている。この方法では最大沈下量と沈下速度とを算定することができる。基礎や盛土の全沈下量の評価は、一次圧密と二次圧密とを考えることによって求められる。経験上明らかになっていることだが、土の側方変位による鉛直沈下量は大きく、全沈下量の50%に達するほどである。スパートモッカに対して変形挙動を研究するために現場載荷試験が行われた。現場測定によって全沈下量の約40%が、載荷板の端部の下の土の側方変位に基づくことを示している。シュワブ、ブロムス、フネガルド (1976) によって明らかにされているが、有機物を含む軟弱土の沈下は三軸応力経路法試験によって信頼しうる値を決めうるものである。

スパートモッカ土における建設工事

前述のようにスパートモッカ土は圧縮性が大きく、せん断強度が小さいために基礎の設計に際しては特別の注意を払わねばならない。最も一般的な方法は次のとおりである。

相当大きい全沈下量や不同沈下量を許すような軽い建物ではベタ基礎やフーチング基礎などで支持される。破壊に対して十分な安全率をもち、かつ沈下も許しうるような低い道路盛土は路床上に直接支持させることも可能である。

軟弱土層を掘削し、砂や砂礫、岩などで置き換える方法は、その層厚が3 m以下であるときに用いられている。外力が非常に大きい場合には、ピアやケーソンが使用される。このとき構造物の沈下は考慮しなくてよい。

載荷盛土 (プレローディング) が経済的な手法となるのは軟弱土の層厚が大きいときである。パーティカルドレンとしてサンドドレンやペーパードレン、プラスチックボードドレンを圧密速度の促進のためによく用いている。しかしながら軟弱土の厚さが3 mを越える場合、杭基礎が最も一般的な方法である。スウェーデンでは既製コンクリート杭あるいは木杭がよく用いられ、支持層まで打ち込まれる。支持層が地下深いときには、浮き杭 (摩擦杭) が用いられる。地下水位の低下などによって生じる地盤の沈下は、建物の上下水道などのライフラインを沈下させたり破壊させたりする。沈下の予想される場合にはネガティブスキンプリクシオンについても考慮しておかなくてはならない。

軟弱土の層厚が大きい場合での道路盛土は、安全率が十分でなくて沈下を生じてよいならば犬走りを設けて施工されている。支持層まであまり深くなくて沈下を小さく保つ必要のあるときには置換工法が用いられる。岩屑を含ん

だ埋立て土で破壊まで載荷されると、軟弱土は横方向へおしのけられる。杭基礎も時には道路盛土に用いられることがある。

下水道敷設のためなどで、スパートモッカ土を鉛直に掘削することがあるが、一般に約2.5 m ぐらいの深さまでは安定を保っている。しかし局所的なすべりは、土中に存在するクラックによってしばしば生じている。掘削深度が大となったり、開削面を長時間保持しなくてはならないときには矢板で掘削面を支持する。深い掘削によって底面に盤ぶくれが生じるため安定解析をしておかねばならない。

基礎の設計解析において、土の非排水せん断強度を前述の方法で決定する必要がある。現場ベーンやフォールコーン試験の結果を使うときには、例えばヘルネルンド (Helenelund, 1977) によって提案されているような手法を用いてせん断強度を低減しておく必要がある。基礎や盛土の沈下の評価のために二次圧密沈下量を考慮しなければならない。基礎の下部の土の側方変位による沈下量は大きくて、全沈下量の50%にまで達することがある。

参考文献

- 1) Gardemeister, R., (1975): On engineering geological properties of fine-grained sediments in Finland, Dr. Thesis, Techn. Res. Cent. Finland, Building Technology and Community Development, Publ. 9, 91 p., Helsinki
- 2) Hallberg, R. O., (1970): Mikrobiologi och sulfidmalm-bildning, Särtryck ur Svensk Naturvetenskap, pp. 180-186, Stockholm
- 3) Magnusson, N. H., G. Lundquist and G. Regnell (1963): Sveriges Geologi. Kåp., De kvartära bildningar, Svenska bokförlaget, pp. 440-640, Stockholm
- 4) Pusch, R., (1970): Clay microstructure. A study of the microstructure of soft clays with special reference to their physical properties, National Swedish Council for Building Research, Document D 8, 76p., Stockholm
- 5) Pusch, R. (1973): Influence of organic matter on the geotechnical properties of clay, National Swedish Council for Building Research, Document D 11, 63p., Stockholm
- 6) Rickard, D., (1971): Sulfidmalm-bildning, Svensk Naturvetenskap, Stockholm
- 7) Schwab, E. F., (1976): Bearing capacity, strength and deformation behaviour of soft organic sulphide soils, Dr. Thesis, Royal Institute of Technology, 368 p., Stockholm
- 8) Schwab, E. F. and B. B. Broms, (1975a): In situ shear strength of soft organic soils, Proc. Istanbul Conf. on Soil Mechs. and Found. Engng., Vol. 1, pp. 298-308, Istanbul
- 9) Schwab, E. F. and B. B. Broms, (1975b): Strength behaviour of an organic clayey silt, The transactions of the Geological Society of Sweden, Vol. 96, Part. 3, pp. 276-283, Sweden
- 10) Schwab, E. F., B. B. Broms and E. Funegård, (1976): Comparison between calculated and measured settlements beneath a test fill on soft soil, Väg-och Vattenbyggaren, No. 8-9, Stockholm
- 11) Helenelund, K. V. (1977): Methods for reducing Undrained shear strength of soft clay, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, No. 3, p. 59

関連参考文献

- 12) Broms, B. B., (1969): Discussion, Main Session No. 5, Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechs. and Found. Engng., Vol. 3, pp. 385-394, Mexico
- 13) Hallberg, R. O., (1972): Iron and zinc sulphides formed in a continuous culture of sulfate-reducing bacteria N. Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte, Jg. 1972, Heft 11, pp. 481-500, Stuttgart
- 14) Holtz, R.D. and G. Holm, (1973): Belastningsförsöl på svartmocka, Statens Geotkniska Institut, Utlåtande om belastningsförsök, Linköping, Sweden
- 15) Holtz, R. D. and J. Wennerstrand, (1972): Embankments on soft ground by L. Bjerrum, Discussion of the Speciality Conference on Performance of Earth and Earth-Supporting Structures, ASCE, Purdue University, 1972, Vol. 3, Lafayette, Indiana
- 16) Nystrand, B. Å., (1970): Jämförande hållfasthetsundersökningar av bottniska lersediment, Trebetygsuppsats i kvartärgeologi vid Uppsala Universitet, 40p. Uppsala
- 17) Stille, H., A. Fredriksson and B. B. Broms, (1976): Analysis of a test embankment considering anisotropy, Proc. Conf. Num. Meth. in Geom., Vol. 2, p. 611-622, Virginia

(原稿受理 1978. 2. 28)

〔訳：嘉門雅史〕

京都大学 工学部土木工学科〕

土質工学会発行

土質基礎工学ライブラリー

シリーズ既刊 15巻

A 5判 布クロス上製本

送料1冊 240円

	ページ数	会員特価	定 価
1 軟弱地盤の調査・設計・施工法	310ページ	3,200円	4,200円
2 軟弱地盤における工事実施例	225ページ	1,700円	2,200円
3 掘削のポイント(第1回改訂版)	399ページ	3,800円	4,900円
4 土質調査試験結果の解釈と適用例	第1回改訂版を作製中		
5 建設工事における土質工学の実用例	376ページ	3,700円	4,800円
6 鋼グイ(鋼グイ研究委員会報告)	376ページ	2,800円	3,600円
7 土と基礎実用数式・図表の解説	443ページ	4,100円	5,300円
8 掘削にともなう公害とその対策	305ページ	2,200円	2,900円
9 土と構造物の動的相互作用	567ページ	4,200円	5,500円
10 日本の特 殊 土	356ページ	3,200円	4,200円
11 土留め構造物の設計法	360ページ	3,900円	5,000円
12 切 土 ノ リ 面	395ページ	4,000円	5,200円
13 軟弱地盤における工事実施例(その2)	360ページ	4,600円	5,900円
14 実施例に見る構造物基礎 ——設計施工上の諸問題——	303ページ	3,900円	5,000円
15 土質工学における化学の基礎と応用	324ページ	3,400円	4,500円

発売：(社)土質工学会 ☎03-251-7661(代)

〒101 東京都千代田区神田淡路町2-23(菅山ビル4階)