

海 底 地 盤

中 瀬 明 男*

1. ま え が き

一般的に海底地盤といえば、海岸構造物や港湾構造物を建設する場合の基礎地盤から、太平洋や大西洋の海底すなわち海洋底地盤までを含む。これらの地盤のうち、土木構造物の建設に最も関連が大きく、したがって、十分な工学的調査が行われているのは港湾地域の海底地盤である。つまり海底地盤の全体からみれば大陸棚の陸縁部であり、海岸部分としては沖浜部にあたる限られた場所の地盤が比較的良好に調べられていることになる。これまでの港湾地域の工事で経験した水深は、ほとんどの場合が 30 m 以下である。

一方、大水深部の海底地盤についても、最近の海洋開発に対する関心とともに興味が寄せられている。しかし海洋底の地盤調査は主として海洋学的な観点から行われており、調査深度および調査項目の両者ともに、土質基礎工学的な見地からは不十分なものが多い。大水深海底地盤に対する土質工学的調査の例もないわけではなく、海底油田開発のためにメキシコ湾でかなり行われているが、最大の規模のものは 1961 年のモホール計画におけるガダループ島沖のボーリング調査であろう。この場合には、水深 3558 m の海底面から 170 m のボーリングが行われ、普通の土質力学的試験も実施されている。しかし、この場合にも地盤の工学的性質の検討という点については、通常の土質調査に比して、その品質は高い評価を受けるに至っていない¹⁾。

港湾地域の海底地盤にも岩盤からへどろに至る種々のものがあるが、土木構造物の建設に関して最も問題の多いのは沖積粘性土地盤であろう。これらの粘性土地盤は、砂地盤の場合のような液状化による地震災害を受けることは少ないが、常時の沈下や支持力の検討に細心の注意を要し、これらの推定を誤れば

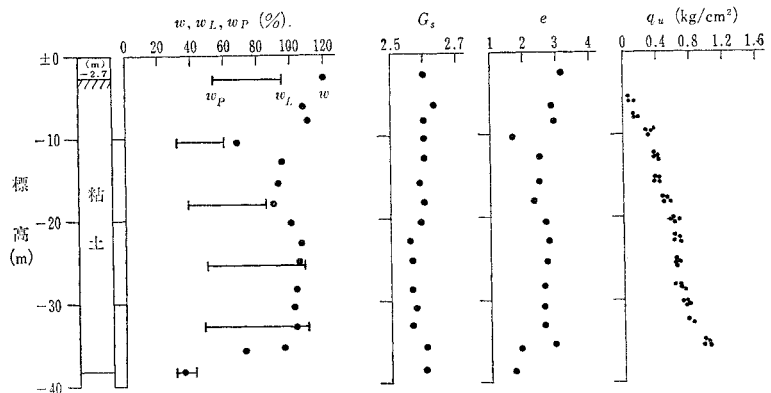
地盤破壊または過大な変形などの手戻り工事となることが多い。現在、話題に上がっている関西海上空港や東京湾横断道路のような大規模工事においても、海底の軟弱粘性土地盤の取扱いが技術的課題のかなりの部分を占めている。したがって、ここでは港湾地域の軟弱粘性土地盤における調査、設計、施工などの問題点を述べることにしたい。

2. 地 盤 状 態

図一¹⁾ は海底軟弱地盤の調査結果の代表的な一例を描いたものである。この例では -38 m 以下は締まった砂礫層が -70 m 以深まであり、建設予定構造物の規模もあまり大きくないため、この表層 40 m 厚の粘土層が主な土質工学的検討の対象となる。この地盤は -10 m 付近でやや砂分の多い部分が見られるほかは、ほぼ一様粘土が連続している。

この例のように、比較的一様な土であることが海底軟弱粘性土地盤の一般的傾向であり、土層の概略の判定に困ることは少ない。このような土の分類特性、すなわち土粒子比重、間げき比、含水比、単位体積重量、コンシステンシー特性、およびこれらの特性の相互の関係については他の文献^{2), 3)}を参照されたい。

図二²⁾ はやや水深の大きな海底地盤の調査結果例である。この場合には、砂層をはさんで 2 つの粘性土層が存在する。上部粘性土層は図一¹⁾の場合と大差ない性質の



図一¹⁾ 土質調査結果例 (その 1)

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

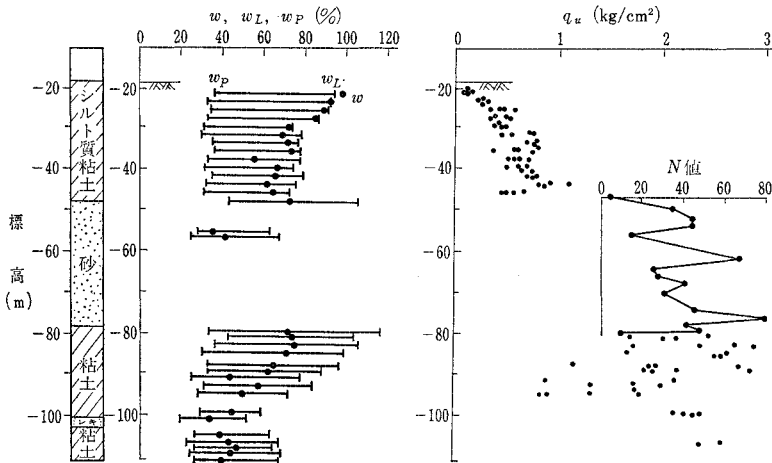


図-2 土質調査結果例 (その 2)

ものと思われるが、砂層の下の粘性土層はかなり硬いものであり、さらに中間砂層の標準貫入試験結果からわかるように、この砂層もかなり締まったものである。したがって、この地盤上に小規模な構造物を建設する場合には上部粘性土層の検討のみを行い、中間砂層は基盤と考えてさしつかえないといえよう。しかし、ここに大規模な構造物を建設する場合には、支持力問題はよいとしても沈下の推定において下部粘性土層を無視することはできない。

3. 圧密特性と沈下推定

一般に、粘性土の強度や圧縮に関する性質は、その土の圧密状態によって異なる。この圧密状態は、未圧密、正規圧密および過圧密の3つに分けられる。運搬堆積された粘土層がその自重のもとで平衡状態に達した状態を正規圧密状態という。発達中のデルタ堆積のように、正規圧密状態に達する以前に新たに堆積が行われるものを未圧密状態といい、その典型的な例はミシシッピ一河口沖の海底地盤である¹⁾。

過圧密状態は、いったん正規圧密状態になったのちに土かぶり圧の一部が浸食や沈降による水没などにより減

少し、それによる膨張を終了した場合にみられる。しかし、地質学的にみて常に海面下にありしかも浸食作用もない場所の粘土が過圧密状態であると判定される場合があり、土質工学的な注目を浴びている。このような例は、わが国の水際線付近の海底地盤にもみることが多い。

図-3 は粘土の圧密における圧密圧力と間げき比の関係を描いたものである。(a) 図の直線 ABE は正規圧密状態に達した場合の p と e の関係を表わしており、地盤より試料採取して

圧密試験を行うと CBE のような結果が得られ、この曲線の変化点 B が地盤中における有効土かぶり圧と等しくなる。地盤中で $A \rightarrow B$ と進み、荷重除去によって $B \rightarrow C$ と膨張した C の状態が過圧密といわれるものである。このように、 $e - \log p$ 曲線の変化点に対応する圧力 p_c を、圧密圧力の変化と結び付けて考えたものが在来の先行圧密圧力である。

圧密試験による $e - \log p$ 曲線において、 p_c が地盤内の有効土かぶり圧 p_v より大きいものを過圧密状態と判定するのであるが、 $p_c > p_v$ の状態が圧密圧力の変化以外の要因によっても生じることが指摘されている²⁾。図-3 (b) は、B 点で正規圧密状態になった粘土が、一定の有効土かぶり圧 p_v のもとに長時間放置された場合を表わしている。この場合には、長時間内に $B \rightarrow C$ と圧縮が進み、C の状態の粘土の圧密試験を行うと CDE のように進んで、 $p_c > p_v$ という結果が得られる。さらに海水中の固結物質の沈殿によって粘土粒子間の化学的結合が強化されると、図-3 (c) のように、 $p_c > p_v$ の傾向がさらに著しくなる。

生成要因のいかんにかかわらず、過圧密状態の粘土の場合には、正規圧密粘土に比して沈下量が小さくして沈下速度が大きい。東京湾や大阪湾の海底粘土は、地盤内の

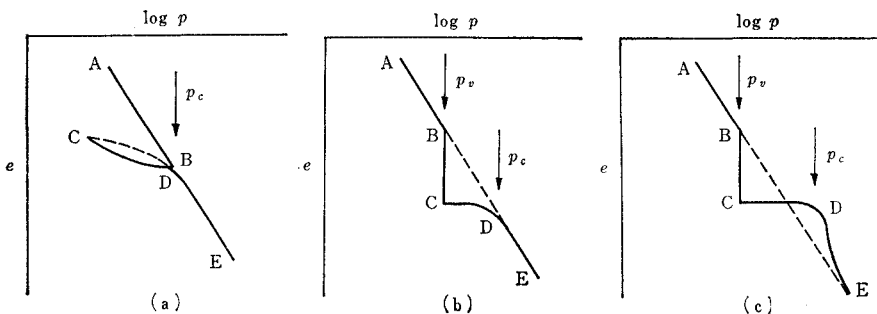


図-3 圧密圧力と間げき比

土かぶり圧の変化以外の要因によると思われる過圧密状態のものが多いが、 $(p_c - p_v)$ の値が 10 t/m^2 を越す例もある。図-4 は、大阪湾の海底粘土地盤における p_c と p_v の関係の一例である。

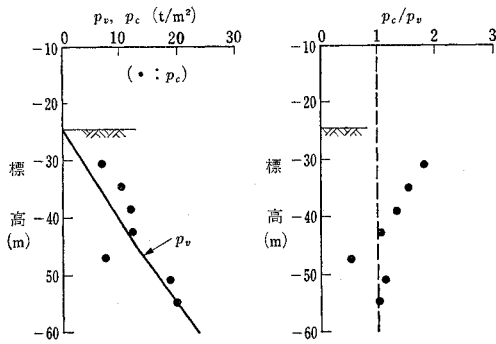


図-4 p_c と p_v の関係の一例

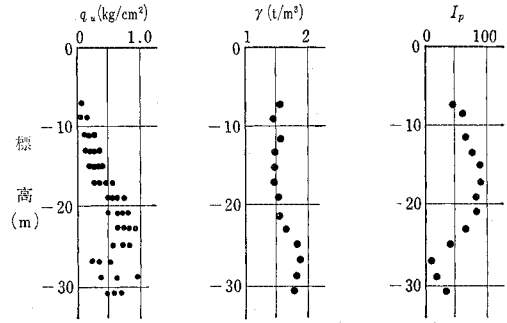


図-5 砂含有量の多い粘性土の一軸圧縮強度

過圧密粘土地盤における圧密沈下量とその速さを推定する方法は確立されるに至っていないが⁹⁾、現在のところは、圧密試験結果に基づいて、地盤中の有効土かぶり圧に対応して諸係数を求める方法が提案されている⁶⁾。

粘土地盤の圧密沈下推定において、計算値と実測値の一致が悪く、とくに実際の沈下速さが計算値を大幅に上回ることが各方面で指摘されている。この問題については、圧密試験と計算に用いる圧密理論の両者の要因が考えられるが、地盤の不均一性を考慮しないで計算を行うことによるものが多いように思われる⁷⁾。

前に海底粘土層の特性として土の均一性を述べたが、これは分類特性に関するものである。分類特性よりみて一律な地盤であっても、圧密に関する特性、とくに沈下量の尺度となる体積圧縮係数は深さとともに減少するのが普通であり、この係数が深さ方向に一定でなければ、圧密に関する限りは、不均一地盤ということになる。ただし、サンドドレーンによって圧密を促進させる場合には、圧密沈下の推定における問題は、さほどないといえよう⁸⁾。

4. 強度特性と安定問題

(1) 設計強度

地盤の支持力などを検討する際には、土質調査およびせん断試験結果から設計強度を決める必要があるが、海底の軟弱粘性土地盤の場合には、土の乱れの影響が大きい。土の乱れは主として試料採取時に加える機械的攪乱のことであり、海底地盤の場合には地盤中で受けていた有効拘束圧の除去のほかに、土中の間げき水圧の解放も加わってくる。さらに大水深の海洋底の場合には、土中の間げき水自体の膨張も、無視できなくなるであろう。

海底の軟弱粘性土地盤における安定問題で考えるべきせん断強度は、主として非排水せん断強度、すなわち粘土の粘着力である。在来の港湾工事における土質調査で

は、主として一軸圧縮試験が行われ、一軸圧縮強度 q_u の1/2として粘着力 s_u を求めている。この q_u 値は乱れによって著しく変化するため、設計強度を求める場合に注意を要する。

採取した試料について求めた q_u 値を深さに対してプロットすると、かなりのばらつきがある。しかし、試料が乱れると q_u 値が減少することから、測定 q_u 値の最大のもののみを重視するのは危険である。一般に、地盤の強度は異方性があり、普通の地盤では鉛直に採取した試料の q_u 値が最大となるためである。港湾工事の際に生じた滑り破壊例の解析結果によれば⁹⁾、深さに対し q_u の平均的分布を考えた場合の安全率が、 $F=0.93 \sim 1.04$ となる。一方、 q_u の深度分布の上限および下限を考えた場合の計算安全率は、おのおの $1.10 \sim 1.44$ および $0.74 \sim 0.80$ となった。したがって、 q_u を用いる場合には、深さに対する平均的分布を考えて設計強度を決めるべきである。

常に海水で飽和している海底地盤から試料を採取する場合、一般に拘束圧の除去によって試料の飽和度は多少減少するが、試料の砂含有量が比較的多い場合には飽和度がかなり減少し、測定 q_u 値が異常に低下することがある。図-5はその一例であるが、-25 m以下では土の性質が粘土から砂の方に变化し、 q_u 値も減少している¹⁰⁾。このような場合には、拘束圧の除去による強度低下を、土の粘土含有量または塑性指数 I_p をパラメータとして補正する方法が提案されている¹⁰⁾。

(2) 圧密および膨張による強度変化

粘性土のせん断強度は圧密の進行とともに増大する。軟弱粘性土地盤上の土構造物の建設においては、初期の地盤支持力が小さいため、いくつかの段階に分けて載荷を行い、各段階の載荷重による圧密で増加した強度に見合うだけの載荷重を加えるという多段載荷工法を用いることが多い。この多段載荷の設計で最も重要な指数は、圧密による粘着力の増加割合 (s_u/p) である。

正規圧密状態にある粘性土の s_u/p 値については、塑

性指数 I_p との間に、 $s_u/p=0.11+0.0037 I_p$ の関係が一般的に認められている。この関係は欧米の粘土に対して経験的に求められたものであるが、わが国の海底粘性土地盤についても、図-6 に示すように、ほぼ同じ関係が認められるようである¹¹⁾。

圧密で粘着力が増加すると同時に、粘性土が膨張すれば粘着力は減少する。港湾構造物の場合には構造物の前面水深が規定されることが多いので、圧密による地盤改良をする際には、圧密荷重としての盛土などを圧密終了後に部分的に撤去することが多い。このような条件の工事においては、荷重除去による粘着力の減少を見込んでおくことが必要となる。

粘性土の膨張による粘着力の低下割合については、図-6 のような簡便な関係は見い出されていないが、三軸圧縮試験装置を用いて圧密と膨張を伴う非排水せん断試験を行えば、その推定をすることができる。図-7 は、港湾区域内の泊地しゅんせつの前後の q_u 値の変化の一例である¹²⁾。

過圧密状態にある粘性土地盤の粘着力変化の状況は、正規圧密状態のものとは異なっている。過圧密粘性土地盤を圧密する場合の s_u/p 値は、正規圧密のものに比して $1/3 \sim 1/4$ となる。したがって、地盤の圧密状態の判断を誤って、過圧密の場合に図-6 の関係を適用すれば危険となる。過圧密粘性土の s_u/p 値を詳細に検討するためには三軸圧縮試験装置を用いて圧密→膨張→圧密という手順を追うべきであろう。過圧密状態にある限りは、圧密による粘着力の増加割合と、膨張による粘着力の減少割合は、実用上等しいと考えてよい¹²⁾。

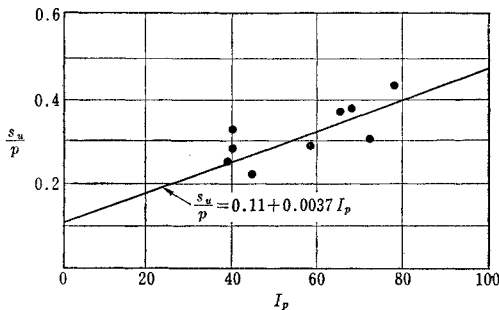


図-6 s_u/p と I_p の関係

5. あとがき

海底地盤上に土木構造物を建設する際には、海中であるという制約から、施工管理がかなり困難となる。一般的にいえば、海底の軟弱粘性土地盤は、陸上の軟弱地盤

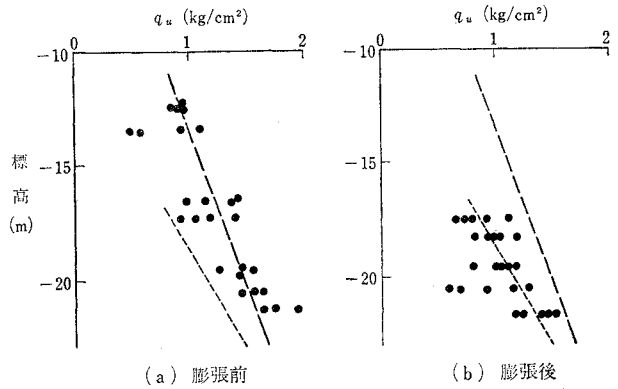


図-7 膨張による q_u の変化

より軟弱さの程度がひと回り上であり、しかも、海中ということから大規模な構造物を建設する例が多いので、施工管理の精度を十分に考慮した設計を行うことが必要である。

参考文献

- 1) 中瀬明男：海洋底における土質力学の問題，港湾技術研究所報告，Vol. 13, No. 1, pp. 39-63, 1974.
- 2) 松本一明・小川富美子：港湾地域における土の工学的諸係数の相関性について（第1報），港湾技術資料，No. 71, p. 40, 1969.
- 3) 渡辺進：工学的な性質，土質基礎工学ライブラリー1，土質工学会，pp. 80-135, 1966.
- 4) Bjerrum, L. : Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, Geotechnique, Vol. 17, pp. 81-118, 1967.
- 5) 中瀬明男・小林正樹・兼近明男：過圧密粘土の圧密特性，港湾技術研究所報告，Vol. 12, No. 1, pp. 123-139, 1973.
- 6) 土質工学せん断試験法委員会：圧密試験，土質試験法—第1回改訂版，土質工学会，pp. 274-325, 1969.
- 7) 中瀬明男・小林正樹：圧密における理論と実際，土と基礎，Vol. 21, No. 11, pp. 17-21, 1973.
- 8) 中瀬明男・小林正樹：圧密による軟弱地盤の改良効果，土と基礎，Vol. 20, No. 8, pp. 19-24, 1972.
- 9) Nakase, A. : The $\phi_u=0$ analysis of stability and unconfined compression strength, Soil and Foundation, Vol. 7, No. 2, pp. 33-50, 1967.
- 10) 中瀬明男・勝野克・小林正樹：砂分の多い粘性土の一軸圧縮強さ，港湾技術研究所報告，Vol. 1, 11, No. 4, pp. 83-102, 1972.
- 11) Nakase, A. : Contribution to the $\phi_u=0$ analysis of stability, 港湾技術研究所土質部資料，No. 1, p. 64, 1966.
- 12) 中瀬明男・小林正樹・勝野克：膨張による粘土の強度変化について，昭和46年度港湾技術研究所講演会講演概要，pp. 2-1~22, 1971.

土木学会編・48年夏期講習会テキスト

基礎と地盤

定価 2200円 会員特価 2000円 (〒170)