

海の波や流れと海底地盤

Effect of Ocean Wave and Current on the Seabed Ground

土 田 孝 (つちだ たかし)

運輸省港湾技術研究所土質部土性研究室 室長

1. はじめに

沿岸域での多くの建設事業で軟弱地盤対策の対象となるのは海成粘土地盤である。地質学によると最終氷期以降の完新世(9000~6000年前, 縄文時代早期から初期)において海水面は約30m程度上昇した。日本列島の多くの地域では5000年前ごろには海水面が現在よりも2~3m高くなっていたことを示す跡が存在し, その後は海水面の著しい上昇が無くなったと考えられている¹⁾。今日軟弱地盤を構成する沖積粘土層や砂層は, 海面上昇期に河川や潮流によって運搬された土が堆積して形成されたものである。

このように考えると, 海は地盤にとっていわば「母」であり, その波や流れは当初より形成された地盤ときわめて密接な関係があったはずである。本文は, このような観点から, 海と海底地盤との関係について考察してみた。

2. 海底地盤が形成されるとき初期状態

河川から運搬された泥が海底で地盤として形成されていく過程は, 概ね次のようであると考えられる。

- ① 雨水など河川等による土砂の侵食と運搬
- ② 河川の流れにより河口へ移動
- ③ 塩水環境での沈降と堆積
- ④ 波浪や潮流による再移動
- ⑤ 自重圧密による高密度化およびセメンテーションによる固化
- ⑥ 上部にさらに堆積する荷重による圧密脱水

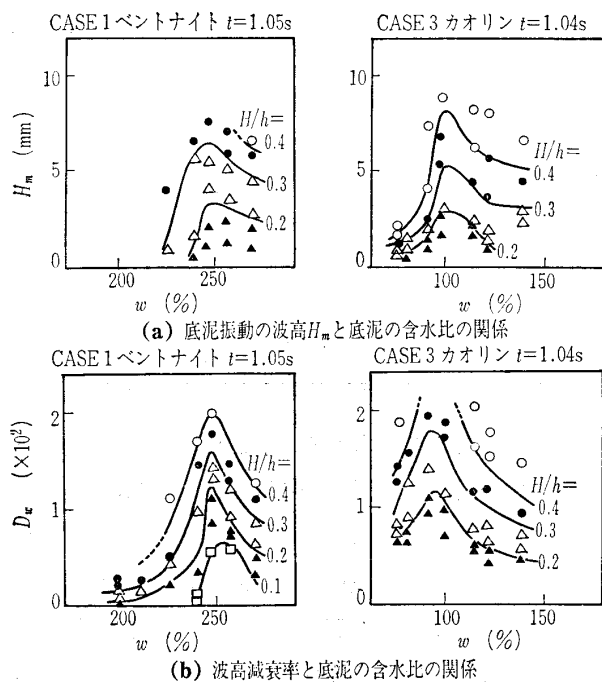
これまでの地盤工学では, 暗黙のうちに, 波浪や潮流の影響を受けない⑤や⑥の段階から海底地盤として考えていたようである。例えば, 港湾建設のために土質調査を行う場合も, 通常は一軸圧縮試験

の供試体が自立するような深度(1m程度)から試料採取や土質試験が行われている。また, 沈降についてはへどろの埋立などに関連した研究が行われてきたが, この場合も波や流れの影響はほとんど考慮されず, もっぱら一次的な現象として取り扱われてきた。すなわち, 波や流れが関連する①~④の部分は水工学や海岸工学の分野の仕事で, 土が1箇所にはいわば「定住」してからが土質工学の仕事と考えられてきたようである。

確かに土の含水比が非常に大きい場合は, これを高含水比の土と考えるよりも, 泥水(流体)と考えた方が適切であろう。しかし, 徐々に含水比が低下してくるにつれて流体から土に変化してくるはずである。問題はこの境界がどこかということであり, それは海底地盤が形成される時の初期含水比がどのような値であるかという問題に結びついてくる。

五明らは, 波の作用下における底泥の挙動を調べる実験を行った結果を報告している²⁾。五明らの実験は長さ25m, 幅40cm, 深さ1.5mの二次元造波水槽の中央に長さ2.5m, 深さ7cmの溝を設け, 底泥を敷きつめた条件で各種の波を作用させるものである。波の作用によって底泥は巻き上がりが見られ, その後底泥層全体の振動, 波状運動, 破壊へといたることが観察されている。図-1(a)は, 波による底泥振動の波高 H_m と含水比 w の関係を示している。図中の H/h は水深 h に対する波高 H の比である。また図-1(b)は, 底泥上を単位距離だけ進む間の波高減衰率 D_w と底泥の含水比 w の関係である。図-1(a), (b)をみると, ある特定の含水比において底泥の振動の波高や波の波高の減衰率が最大になる傾向が見られる。

これは次のような説明が考えられる。底泥の含水比がある値以下の場合, 底泥が十分なせん断強度

図-1²⁾

をもっているため波による影響をあまり受けない。一方、底泥の含水比がかなり大きい場合は、底泥は水とほぼいっしょに動くので、相互の及ぼし合う影響は少なくなる。両者の間に底泥と波とが相互にもっとも影響を及ぼすような含水比の状態が存在するのであり、いわばここが土質工学と海岸工学の分野を分ける含水状態であると考えられる。五明らが用いた底泥はカオリナイトとベントナイトであり、液性限界 w_L はそれぞれ 47.6%, 160.2% であった。図-1(b)をみると、波高減衰率が極大となるのは含水比が液性限界の1.5~2.0倍のときである。

五明・三村は東京湾、広島湾、琵琶湖において潜水士によって底泥を直接採取し、表層から各深度における含水比とせん断強度を測定した³⁾。図-2には各点において深度5cmごとに平均の含水比を求め、それを液性限界で正規化して示している。図のように、表層付近の含水比はいずれも液性限界の1.5~2.0倍となっている。このことと図-1(a), (b)の実験結果を考えると、底泥が1箇所にはほぼ落ちついて自重圧密を開始する時を海底地盤が形成される初期状態とすれば、そのときの含水比は液性限界の1.5~2.0倍程度ではないかと推定される。

このように堆積時の初期状態を問題とする理由は、初期含水比 w_0 によって圧密後の $e-\log p$ 関係が大きく異なってくるからである。このことは室内で粘土試料を調整して再圧密する場合にはっきり表れ、

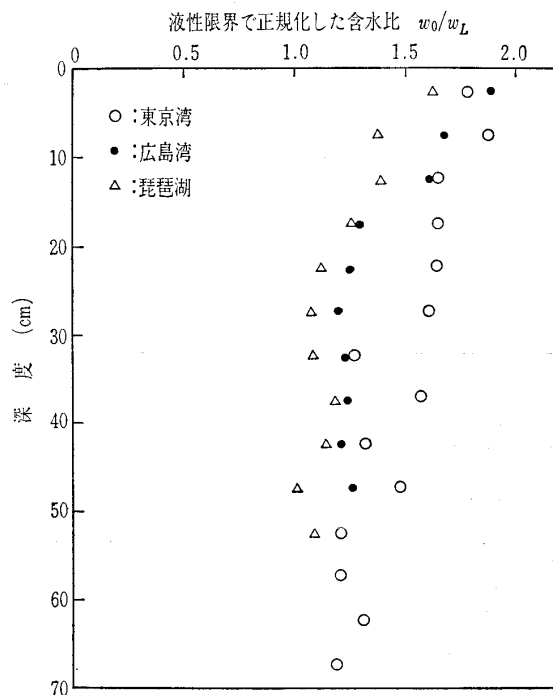


図-2 深度と含水比の関係

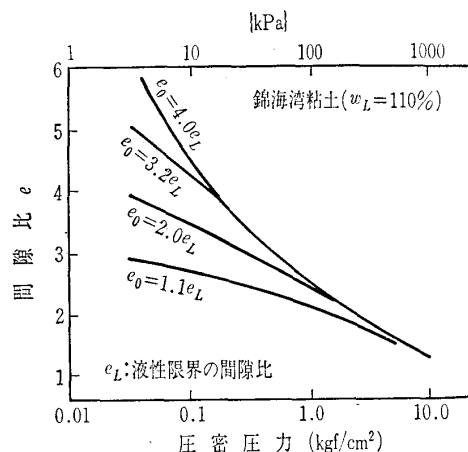
例えば図-3に示すように w_0 が大きいほど同一の圧密圧力に対する間隙比の値が大きくなる⁴⁾。したがって、海底地盤の原位置における間隙比の意味を解釈するためには、初期の状態をある程度把握しておくことが重要なのである。

液性限界の2倍という含水比が持つ意味については井上らの研究⁵⁾が興味深い。井上らはシンガポールの海成粘土($w_L=87, 80\%$)を用いてスラリー状態での強度を調べた。図-4は液性限界で正規化した含水比とせん断強度の関係であるが、図をみると含水比が w_L の2倍以下になると含水比の低下による強度増加が非常に顕著になることがわかる。井上らは $w=2w_L$ がペーストとスラリーの境界と解釈できている。

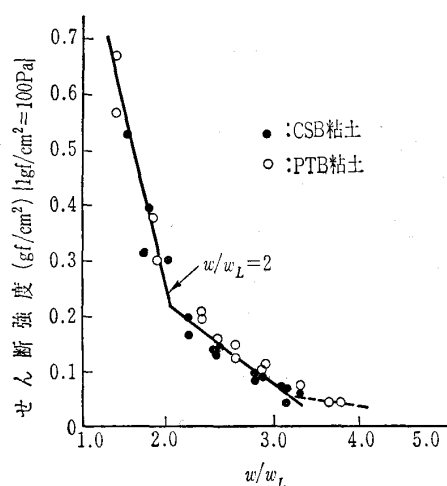
このように図-1と図-4には密接な関連があると思われるが、波によるせん断力と粘土スラリーのせん断強さの間にはオーダーの違いがあり、今後さらに定量的な検討が必要とされている。

3. 海底地盤における年代効果

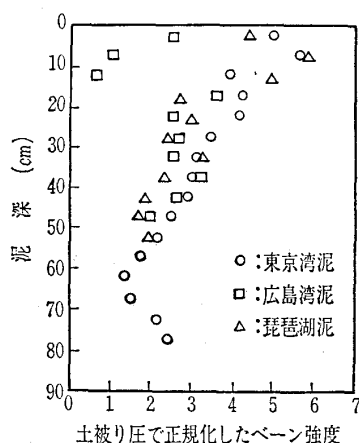
図-5は、五明らによる海底表層の底泥のせん断強度 τ_0 を有効土被り圧 p_0 で正規化した強度 τ_0/p_0 の深度分布である。図のように τ_0/p_0 は表層で1~6程度の値であり、通常の正規圧密粘土の値である0.3



図—3 初期含水比が $e - \log p$ 関係に及ぼす影響



図—4 液性限界で正規化した含水比と強度の関係⁵⁾



図—5 土被り圧で正規化したせん断強度と深度の関係³⁾

～0.4 よりも 1 オーダー大きな値である。これらの表層が大きな応力履歴を受けたことは考えられないので、底泥の表層は見かけの過圧密状態になっているといえる。図—5 のように、この傾向は淡水域の底泥（琵琶湖）でも海域の底泥と同様である。五明

らは表層部の過圧密状態の原因について検討した結果、長期間の圧密による二次圧密効果とこの間の土粒子間の化学的こう結作用（セメンテーション効果）によるものと推定している³⁾。二次圧密とセメンテーションは年代効果として知られている。

一般に、表層に見られる見かけの過圧密の傾向は深度とともに相対的に減少する。通常、海底地盤では深度 1 m 以深ではたかだか 0.1 kgf/cm^2 {10 kPa} 程度の過圧密圧力であるので、実際の設計では正規圧密地盤として解析されることが多い。しかし、最近、重要になっている波や潮流による航路埋没（シルテーション）問題や、汚染された底質の改善のための覆砂工法（シーブリー事業）などは海底表層における力学挙動が支配的な問題であり、年代効果による見かけの過圧密を十分に考慮する必要がある。

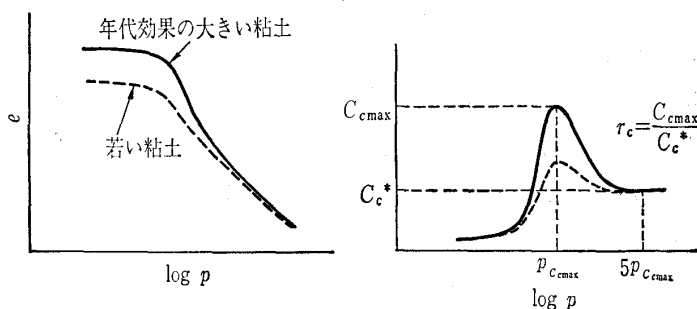
土田らは、海底粘土地盤の年代効果を定量的に評価する指標として、正規圧密領域における圧縮指数の変化に着目することを提案している。年代効果の大きい粘土は、図—6 に示すように圧密圧力が圧密降伏圧力 p_c を越えた直後に大きな圧縮性を示す。そこで、圧縮指数の最大値と圧密が進んで圧縮指数がほぼ一定となったとき値の比を圧縮指数比 r_c として定義すると、 r_c が大きいほど年代効果が大きいと考えられる⁶⁾。いくつかの海成粘土について求めた r_c の範囲は次のようになる。

$r_c = 1.0 \sim 1.2$ (室内再圧密粘土)

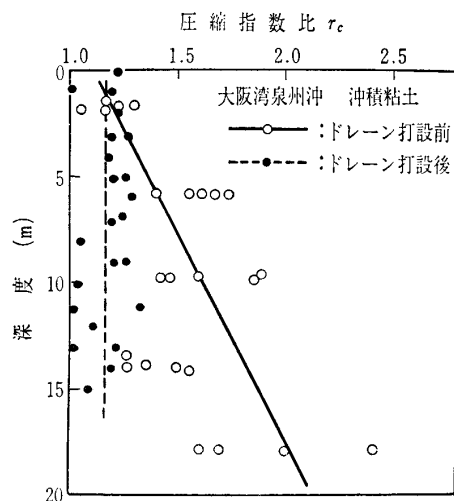
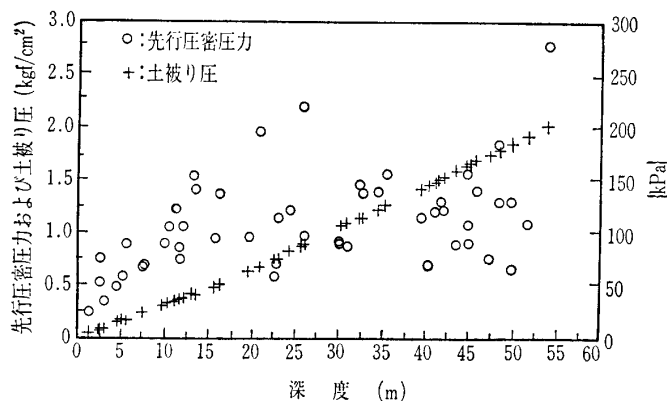
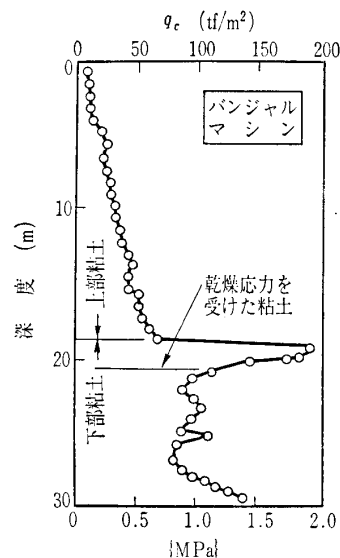
$r_c = 1.1 \sim 3.0$ (深度 30 m までの日本の沖積粘土)

$r_c = 1.1 \sim 6.0$ (大阪湾海底洪積粘土)

図—7 は大阪湾泉州沖の沖積粘土地盤においてサンドドレーン打設前後の圧縮指数比の変化を示したものである。図のようにドレーン打設前には r_c が 1.2～2.5 の範囲にあり深度とともに増加する傾向を示しているが、このことは自然海底地盤の年代効果を示していると考えられる。これに対して、ドレー



図—6 圧縮指数比 r_c の定義

図—7 ドレーン打設前後の r_c の変化図—8 深海底表層の圧密降伏圧力⁷⁾図—9 深度と q_c の関係⁸⁾

海底地盤の強度に明りょうな影響を示している例が報告されている。図—9はインドネシアのバンジャルマシン港における海底地盤のコーン先端抵抗であるが、深度20m付近において q_c 値が急増している。これは、この層が約10000年前の海面低下時に陸上に現れ乾燥応力を受けたためと解釈することによって、よく説明できるのである⁸⁾。

4. 海底地盤の堆積圧縮曲線

地質学的に正規圧密の状態と考えられる海底地盤において、原位置の間隙比と土被り圧 p_0 の関係を調べることによって、いわゆる堆積圧縮関係 (Sedimentary Compression Curve) が求められる。堆積圧縮関係はいわば自然地盤における $e - \log p$ 関係である。

Burland (バーランド)⁹⁾ は、多くの粘土について室内で液性限界 w_L に近い初期含水比で練り返した試料を圧密したときの $e - \log p$ 曲線の実験データを整理した結果、間隙比を次式で正規化した間隙指数 (void index) I_v と圧密圧力の関係が、粘土によらずほぼ一致することを見だし、これを Intrinsic Compression Line (ICL, 固有圧縮線) と呼んだ。

$$I_v = (e - e_{100}^*) / C_c^* \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 e_{100}^* は圧密圧力が 1 kgf/cm^2 {100 kPa} での間隙比。

(1)式における C_c^* と e_{100}^* は、液性限界における間隙比 e_L によってそれぞれ次のように与えられるとされている。

ン打設後に埋立による圧密が進んだ若い地盤では r_c は1.0～1.3に低下している。

さて、海底面表層においてみられる見かけの過圧密は水深6000mの深海においても顕著にみられることがRafalovich (ラフォロビッチ) らによって報告されている⁷⁾。図—8は水深6170mの深海底における表層地盤の深度と圧密降伏圧力および有効土被り圧の関係である。図のように表層では過圧密比が4～10であり、過圧密の傾向は深度35m付近まで見られる。Rafalovichらは、この地点において地質学的な応力履歴が考えられないため、化学的なセメンテーション、生物作用によるセメンテーション、二次圧密などによる見かけの過圧密であるとしている。図—5と図—8では深度方向への影響範囲などにおいて大きく異なっているが、これらの海底地盤の年代効果が形成されるメカニズムを解明することが今後の課題である。

さて、年代効果とは異なるが、地質学的な履歴が

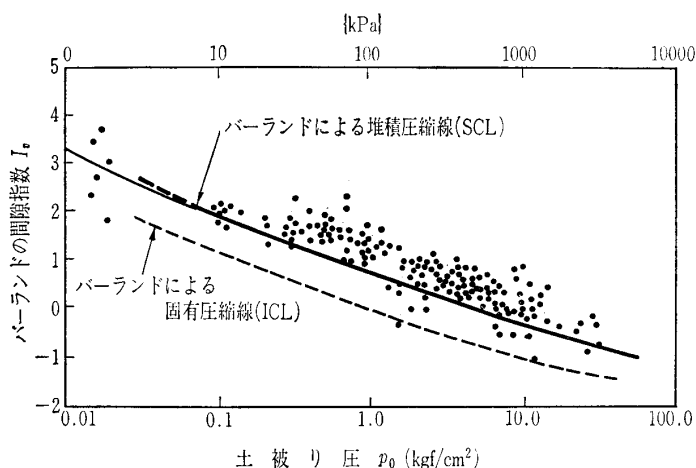


図-10 土被り圧と間隙指数の関係 (大阪湾海底地盤)

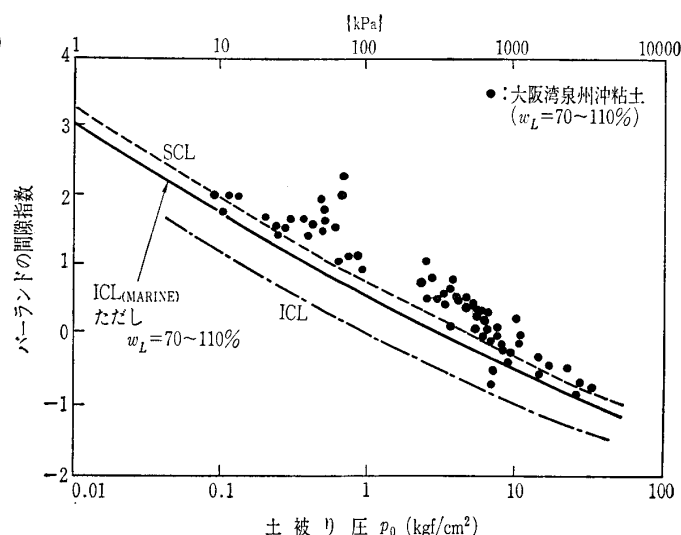
$$C_c^* = 0.256 e_L - 0.04 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$e_{100}^* = 0.109 + 0.679 e_L - 0.089 e_L^2 + 0.016 e_L^3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

さらに, Burland は, 自然地盤における堆積圧縮関係について, 間隙比を(1)~(3)式によって正規化した間隙指数と土被り圧の関係が地盤によらずほぼ1本の線で表されることを示し, Sedimentary Compression Line (堆積圧縮線, SCL) と呼んだ。ICL と SCL の関係を図-10に示すが, Burland は両者の相違が, 自然地盤における年代効果とそれによる構造の影響であるとしている。

関西国際空港建設地点 (過去に大きな荷重履歴を受けたことが無いと考えられる) において実施された大阪湾の 400m ボーリングの試料の土質試験結果より, 土被り圧と間隙比の関係を間隙比を式(1)~(3)を用いて正規化して図-10に示した。図のように, I_c と土被り圧 p にはほぼ一定の関係が見られるが, SCLにおけるデータのばらつき (± 0.2 程度) を考慮しても, 大阪湾海底地盤の間隙指数は SCL よりもかなり高くなっている。Burland によれば, ICL は粘土に固有の $e - \log p$ 関係であり, ICL よりも上部に間隙比が存在するのは年代効果によって形成された高位の構造によるものである。圧密降伏圧力を上回る荷重によって圧密が行われたときに $e - \log p$ 関係が最終的に ICL まで収束しうると考えると ICL よりもはるかに高い間隙比を有する大阪湾の海底地盤は, 潜在的に圧縮性が相当高いことになる。

さて, Burland は ICL の定義において初期含水比が液性限界に近い試験結果による $e - \log p$ 関係を用いているが, この根拠ははっきりと示されていない。すでに述べたように海底地盤が形成されるとき

図-11 土被り圧と間隙指数の関係
(大阪湾海底地盤, $w_L=70\sim 110\%$)

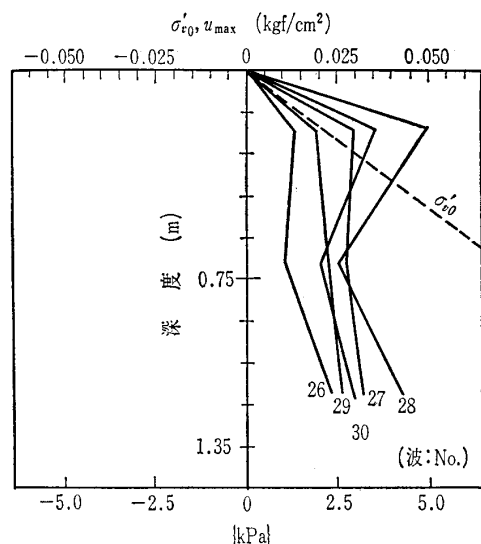
期含水比が液性限界の1.5~2.0倍であったと仮定すると, ICL は年代効果や構造の違いのほかに初期含水比の違いによる影響を受けていると考えられる。

筆者は Burland と異なった立場から粘性土の統一的な $e - \log p$ 関係の解釈を提案している^{4), 10)}。筆者のモデルによって, 液性限界が 70~110% の場合に初期含水比を $1.50 w_L$ としたときの年代効果を考慮しない $e - \log p$ 関係を計算し, 式(1)~(3)で正規化して ICL_(MARINE) として図-11に示した。図中には大阪湾粘土 ($w_L=70\sim 110\%$) の原位置における p_0 と間隙指数もプロットしている。

図を見ると, ICL_(MARINE) は初期含水比の違いによって ICL よりも間隙指数が大きくなり SCL にかなり接近している。したがって, Burland が年代効果により粘土の構造の違いとした SCL と ICL の相違は, 地盤が形成されるときに初期含水比の影響としてかなりの部分が説明できると考えられる。大阪湾の海底粘土地盤における年代効果の大きさは原位置の間隙指数と (ICL ではなく) ICL_(MARINE) との差であると解釈できるが, 図よりほとんどの深度において ICL_(MARINE) よりも間隙指数は大きく, 地盤は年代効果によって高位化した構造を持っていると判断される。

5. 波による砂質地盤の液状化

波浪の進行に伴って, 海底地盤面には変動する水圧が作用する。海底面の水圧変動は全応力の変動を意味するが, この変動がそのまま地盤中の水圧とし

図-12 観測された最大変動過剰間隙水圧¹¹⁾

て伝播する場合には、単に中立応力である静水圧が変化しただけで地盤中の有効応力の変化は発生しない。従来、筆者を含め多くの土質の研究者は「海底地盤は完全飽和地盤→ B 値は1.0→波による水圧変動は地盤の有効応力と無関係」という先入観を持っていたように思われる。

ところが実際には、砂地盤では波浪による圧力変動がそのまま地盤中に伝達していない、すなわち地盤における B 値が1.0でないのである。このことから強い波浪が作用する場合には、地盤の表層は有効応力の増加による高密度化と液状化を繰り返していることが明らかになっている¹¹⁾。図-12は、港湾技術研究所の波崎観測栈橋において、波浪時に観測された土中の最大変動過剰間隙水圧を示している。図のように表層から約40 cmまでの層で過剰間隙水圧が有効土被り圧を越えており、波による液状化が発生していることが確認された。

波による液状化は、洗掘や漂砂などこれまで海岸工学の分野で取り扱われてきた分野に土質工学の観点からの新たなアプローチを行ったものであり、今後大きな発展が期待されている。

6. おわりに

海底の地盤に関する最近の話題を紹介した。いずれも従来の土質工学の枠にとどまらず、応用地質学や海岸工学との境界での問題になっているのが特徴である。このことは土質工学が今後進むべき方向を示唆するように思われる。なお、本文の執筆にあたり、東亜建設工業㈱技術研究所の五明美智男氏の協力を得たことを記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 成瀬 洋：第四紀，岩波書店，1982.
- 2) 五明美智男・矢内栄二・小島 洋・大槻 忠・糸列長敬：波と底泥の相互干渉に及ぼす物性の影響について，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 322～326，1985.
- 3) 五明美智男・三村信男：現地不攪乱底泥の強度特性，第39回海岸工学講演会論文集，pp. 501～505，1992.
- 4) 土田 孝：粘性土の圧縮性と液性限界の関する一考察，土の判別と工学的分類に関するシンポジウム，土質工学会，pp. 95～102，1993.
- 5) Inoue, T., Tan, T.S. and Lee, S.L.: An Investigation of Shear Strength of Slurry Clay, Soils and Foundations, Vol. 30, No. 4, pp. 1～10, 1990.
- 6) 土田 孝・小林正樹・水上純一・田中政典：高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現，港湾技術研究所報告，第28巻，第1号，1989.
- 7) Rafalovich, A. and Chaney, R.C.: Correlation Between OCR and Depth for Deep-Sea Sediments, ASCE, GT, Vol. 116, No. 11, 1990.
- 8) 半沢秀郎・鈴木耕司・田中洋行：粘土のノーマライズされた非排水せん断強度，土と基礎，Vol. 39, No. 8, pp. 29～34，1991.
- 9) Burland, J.B.: On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays, Geotechnique, Vol. 40, No. 3, pp. 329～347，1990.
- 10) 土田 孝：初期間隙比の異なる粘性土の圧縮特性の統一的表现，土木学会第48回年次学術講演会，pp. 992～993，1993.
- 11) 善 功企：海底地盤の波浪による液状化に関する研究，港湾技研資料，No. 755，p. 75，1993.

(原稿受理 1994. 2. 25)