

研究展望

海底地盤の土質力学

MARINE GEOTECHNOLOGY——STATE-OF-THE-ART

大 草 重 康*

By Shigeyasu OKUSA

1. まえがき——何が問題か

海洋底では漂砂、堆積、浸食（削はく）・再堆積、圧密続成作用、地盤不安定（slump, slide, creep, 混濁流、ダイアピル）等の地質過程が起きている。人類が海洋底に働きかけを行う場合、①そこにどのような地盤が分布し、それがどのような過程を経て形成されたか、②現在の海底地形の分布と現在起こりつつある地質過程の関係はどうか、③人間が地盤に加える作用が地形・地質環境にどのような影響を与え、その結果どのような地質過程が起こり得るか、を予測しなければならない^{1),2)}。海底地盤に対する人類の働きかけには、海洋構造物の建設（石油掘削プラットフォーム、港湾施設、海中道路、海底パイプライン、ケーブル、貯留タンク等）や海洋工事（作業）（海岸海底防災工事、海底表層資源採取、エネルギー採取等）などがある。

海底地盤の工学的問題を扱う学問技術分野を本論では Marine Geotechnology と総称することにする。これは電解質溶液・ガス・固体粒子からなる海底堆積物の物理的、力学的、化学的、生物的（古生物的）、音響的性質を研究し、種々の静的および動的作用に対する堆積物の応答を予測し制御することを目的としている。Marine Geotechnology は次の事項を明らかにしなければならない。

(1) 広域あるいは特定地域に起きている土粒子の運搬、堆積、浸食、地盤不安定等に影響を与える過程と型、

(2) これらの過程の水平方向および鉛直方向の変化、

- (3) 海底地盤の指示土性による分類、
- (4) 自然外力、特に台風や地震に対する地盤・間隙流体の応答と堆積物の安定・不安定性、
- (5) 自然状態で不安定（すべり、混濁流、浸食、液状化、急速堆積、断層、ダイアピル等）な地域の識別、
- (6) 海洋構造物の設置、資源の採取、工事、投棄等によって海底地盤中に発生する付加応力、
- (7) 海底に構造物を置くことによって発生する可能性のある地盤災害の型と規模、
- (8) 人間活動によって海底地盤および周辺地域に発生する生物環境を含めた環境変化、
- (9) 外力、特に波および地震力に対する構造物・地盤系の静的あるいは動的応答。

海底地盤と陸上地盤の最も大きな差は、海底地盤が空気より 800 倍も重い種々の電解質を含む海水下に置かれていることである。海水の存在は、海底地盤の性質に本質的な影響を与えるだけでなく、人間の働きかけに対しても技術的、経済的に大きな制約を与える。

海水が海底地盤に与える影響としては、①堆積様式が土の構造に与える影響、②急速な堆積域での未圧密地盤の形成、③削はくによる過圧密の発生、④波の動的繰返し作用、⑤堆積物中のガスの存在、⑥電解質を含む間隙水が粘土の構造に与える影響、等が挙げられる。これらの問題はすべて学際的アプローチが必要であり、海底地盤研究には土質力学、地質学、海底地形学、地球物理学、化学、海洋物理学、生態学等の研究者の共同が不可欠である。

本論では Marine Geotechnology にかかわるすべての問題を取り上げることはできないので、研究発展の歴史的点描の後、堆積物の特性、海底地盤の不安定、波と海

* 正会員 理博 東海大学教授 海洋学部
(〒424 清水市折戸)

海底地盤，ガスの影響などを紹介する。海底下から採取した土のサンプルが応力解放によって質が低下する問題は，海底地盤調査で最も重要な問題の一つである^{31,41}。これを含めて，サンプリングや調査法の問題は，きわめて重要にもかかわらず割愛せざるを得なかったので，文献を参照していただきたい⁵¹⁻⁷¹。

2. 歴史的点描

海底地盤の土質力学的問題を最初に系統的に扱ったのは，Terzaghi (1956)⁸⁾である。彼はその中で，海底斜面に起こる不安定を，①安定な粗粒堆積物斜面の上に急速に堆積した小規模なパッチのすべり，②液状化による流動すべり，③未圧密堆積物からなる緩傾斜面で不規則に起こる海底地すべりに分類し，それぞれの原因を彼の発展させた理論に基づいて解明し，豊富な実例を示した。

Marine Geotechnology は，1914年のベネズエラ，マラカイボ湖(最大水深250m)における油田発見に始まったと考えられる。この半かん半淡水湖の地質は，砂層をはさむ70mを越える厚さの軟弱粘土層で，技術の進歩とともにプラットフォームは70mを越えるくらいで支えられて，沖へ沖へと進んでいった。Terzaghiはここでの開発と油採掘に伴う地盤沈下に密接に関与した。

彼が未圧密粘土が典型的に発達すると指摘したミシシッピ河口デルタで1950年代にレーダー基地建設や石油開発が始まり，60年代に開発は本格化した。ここには150mを越える厚さの未圧密粘土が発達し，現在でも最も活発な海底不安定過程が起こっている海域である。ここはまた，波高17mを越えるハリケーンの常襲帯であり⁹⁾，地盤不安定はハリケーンと密接に結びついている。石油プラットフォームは，ジャケット型で深くまで支持されている。

60年代後半に北海油田が発見され，メキシコ湾と並んで北海がMarine Geotechnologyと海洋開発の一つの中心となった。この油田域の水深は，数十～百m程度の大陸棚であり，最終氷河(ウルム氷河)期には海水準の低下で陸化し，大陸氷河に覆われた。海底の地盤は氷河の消長および海水準変動と密接に関連して形成された締まった細砂，粗砂，過圧密粘土よりなる。波高20mを越える北海の厳しい海象条件に耐える大規模な海洋構造物を建設するための地盤工学の研究は，困難であると同時に最も魅力のあるものであった¹⁰⁾。

このような状況の中で土質力学の分野の碩学達が続々と海底地盤の研究に参加し，彼らの指導で新しい分野が開拓されていった。1967年にはイリノイ州で海底地盤に関する最初の国際シンポジウムが開かれ，それまでの知見が持ち寄られ，Marine Geotechnique¹¹⁾として1冊にまとめられた。70年代に入るとMarine Geotechnol-

ogyに関する総合報告や教科書が現われてくる。Terzaghiの論文から遅れて18年，1973年にBjerrumが北海油田開発に関連する地盤工学上の問題を総括した¹⁰⁾。この巨匠の死の直前の報告は，海底地盤の研究で何が問題か，何をなすべきかを明確に述べており，今日でもその新鮮さを失わない。同じ年にモスクワで開かれた国際土質基礎工学会議で福岡正巳・中瀬明男がぼつ興しつつあるMarine Geotechnologyの現況に関する特別講演を行った¹²⁾。したがって日本の研究者は，その発展の初期の段階からこの分野に密接に関与していた。翌年にはEideがBjerrumを引き継いで北海油田での経験をまとめた¹³⁾。

1975年には季刊のMarine Geotechnology誌が発行されるようになり，日本からは中瀬明男が副編集長として参加している。アメリカ合衆国では，ミシシッピデルタを対象としたShallow Experiment to Assess Storm Waves Affecting the Bottom (SEASWAB)計画が地質調査所が主体となり，6政府機関，大学の協力で始まった¹⁴⁾。1976年には，この成果に公募論文を加えシンポジウムが開かれ，上記雑誌に海底斜面安定特集として翌年発表された¹⁵⁾。この特集は未圧密粘土を主として扱っているにもかかわらず，この分野のほとんどすべての問題を網らしている。その中のSangreyの総合報告¹⁶⁾はこの分野の研究内容の現状をよくまとめている。一方，上記計画の参加機関の一つである合衆国海洋大気局(NOAA)は，独自にMarine Geotechnical/Rational Use of the Seafloor (RUSEF)計画を実施し^{17),18)}，成果を発表し始めた。この研究は，合衆国大西洋岸およびメキシコ湾を含む広大な地域を対象としている。

1973年から1977年にかけて土質工学会から海洋基礎構造物に関する5冊の本が出版された¹⁹⁾。

1976年には北海油田開発のイギリス側の講習会テキストがMarine Soil Mechanicsとして出版された²⁰⁾。土質力学の基礎はSchofieldが分担している。フランスではTirantの調査設計示方書に近い本が出された²¹⁾。今年に入って最近の成果を盛り込んだ中瀬明男の教科書が出た²²⁾。

Eide (1974)¹³⁾以降の北海地域での成果は，Marine Geotechnology誌，Vol. 3, No. 3 (1979)に詳しい。

イスラエルのAlmagarは，1982年に広範な文献をレビューして，主として地質家のためにこの分野の総括を行って²³⁾，貴重な貢献を行った。

1969年から毎年ヒューストンでOffshore Technology Conference (OTC)がアメリカの9学会の共催で開かれており，貴重な情報交換の場になっている。1976年からはNGIが主催してBehavior of Off-Shore Structures (BOSS)が3年おきに開催されている。日本で

は土質工学会主催で1982年海洋土質シンポジウムが開かれた。

3. 海底堆積物

海底堆積物は高含水比で生物の遺がいや有機物を含むことが多く、間隙水は海水であり、しばしば間隙に溶解ガスや気泡を含んでいる。水深が大きくなるに従って堆積物にかかる静水圧は大きくなり、そのえ波による変動水圧を受ける。堆積物の温度はふつう10°C以下である。大陸棚およびその外縁の堆積物は陸上に起源を有する碎屑物よりなり、その分布や物性は後氷期の海水準変動、気候変動および後背地の地形・地質・水文条件に大きく左右される。日本列島周辺の堆積物は、星野(1958)²⁴¹によって、①砂質分の多い河口堆積物、②礫分や砂分の多い海峡堆積物、③中央部に細粒物の多い湾堆積物、④粗粒物や細粒物が海洋条件や海水の化学条件に依存して分布する外海の堆積物、に分けられ、その地質学的全容は明らかにされた。しかし、その後近海域で多数の土質調査が行われてはいるが²⁵⁾、Keller²⁶⁾、27)やNoorany et al.²⁸⁾が行ったような工学的立場から総括したものは存在しない。

よく知られているように海底堆積物のせん断強度は

$$s = c' + (\gamma'z - u_w) \tan \phi' \dots\dots\dots (1)$$
 ϕ' : 真の内部摩擦角, γ' : 土の水中単位重量, z : 海底面からの深さ, u_w : 静水圧を越える過剰間隙水圧. c' は海底面における堆積物のせん断抵抗であり, 土粒子表面の分子的付着力によるものである. 粗粒堆積物で $c' \approx 0$, スウェーデンの湖底や湾底で $c' = 5.9 \sim 7.8$ kPa である²⁹⁾.

式(1)は

$$s = c' + \gamma'zU \tan \phi', \quad U = 1 - u_w/\gamma'z \dots\dots\dots (2)$$
と書かれる。 U は圧密度である。礫や砂は堆積直後に $u_w = 0$ になる。 $U = 1$ の状態が正規圧密状態であり、 $U < 1$ が未圧密状態である。

細粒堆積物になるに従ってその初期間隙比 e_0 は増大し、振動などの作用で空隙比は小さくならうとする^{11,8)}。このとき $u_w > 0$ ($U < 1$) になりやすい。堆積物が水中で沈降し海底で他の粒子と接触するとき (Fig. 1), c' が発揮されると、より安定な位置に転がり落ちようとするモーメント M より c' による抵抗モーメント M_R が大きくなり、不安定な位置に止まる。モーメント M は粒子重量 (すなわち粒径 D の3乗) と粒径に比例し、結局 D^4 に比例して大きくなる。Fig. 1は c' が比表面積に比例すると仮定して描いた概念図である。 M_R がわずかに M を上まわる粒径の範囲で、液状化を起こしやすい不安定構造が作られる。

その範囲よりさらに粒子が細粒になると、表面活性が

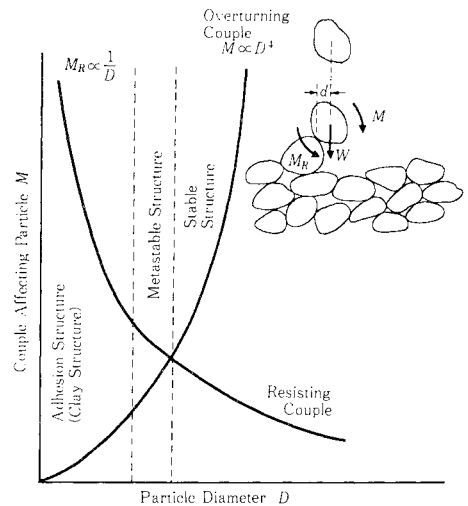


Fig. 1 Relationship between particle diameter and deposit structure.

大きくなって、容易には構造が破壊されなくなる。しかしこのような堆積物では、透水性が悪いので、急速な堆積が起こると $U < 1$ となって未圧密層になりやすい。

堆積物の不安定な構造が破壊されたり u_w が大きくなると、急速に $U = 0$ になり、間隙水が噴出して液状化を起こし流動する。液状化土塊が移動する距離と時間は透水性に依存し、細粒になるほどすべりは遠方に達し、扇状地状の地形を作る。

4. 海底面の不安定

Fig. 2は犬吠崎南方海域の海図と実測との差である³⁰⁾。この海底谷はそれまで見落とされていたものか、あるいは大規模な堆積物の移動によって新たに形成されたものである。外国では海洋構造物に被害を与えるよう

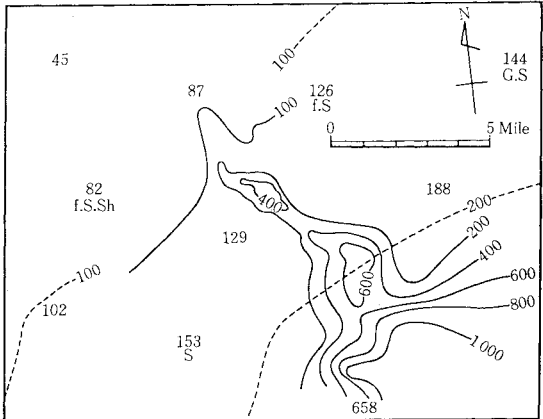


Fig. 2 Submarine canyon off Kujukurihama (solid line : 1963, broken line : before 1963).

な不安定が数多く知られている。いくつかの例と原因を紹介する。

(1) 未圧密粘土地盤の不安定

海洋堆積物の未圧密状態は、①急速な堆積、②堆積物中のガスの存在、③海底下あるいは陸上の被圧水の影響、④波による繰り返し荷重¹⁶⁾、⑤急速な水位低下、⑥陸上水位の上昇、などによって発生する。これらのあるものは一時的なものであり、他のものはかなり永続的である。未圧密状態は現地式(2)の u_w を測定して確かめるべきものであるが、現状は $s/\gamma'z$ の値から推定されているにすぎない。

未圧密粘土が最もよく研究されているのは、ミシシッピデルタである。ここには500以上の海洋構造物が作られ、海底パイプラインは数百kmにも達しており、海底の不安定によって被害が生じている^{31)~33)}。ハリケーンのために海底地形は著しく変わり、デルタ前面の傾斜 0.5° 以下の緩傾斜面はきわめて不規則な等深線になっている。“ここでは堆積物が動くか動かないかではなく、いつ、どのように動くかが問題なのである”³²⁾。ミシシッピデルタでの海底地盤の不安定は Fig. 3 のように分類されている³⁴⁾。

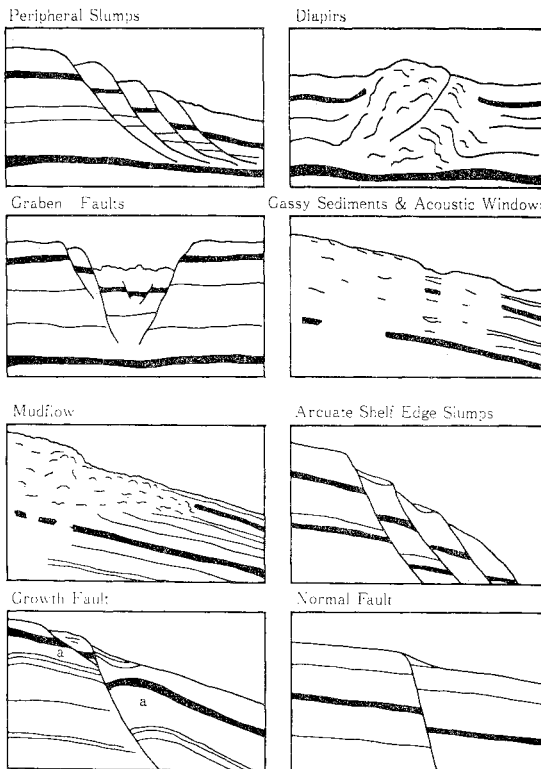


Fig. 3 Schematic diagrams of types of marine instabilities found in the Mississippi Delta (after Coleman and Garrison³⁴⁾).

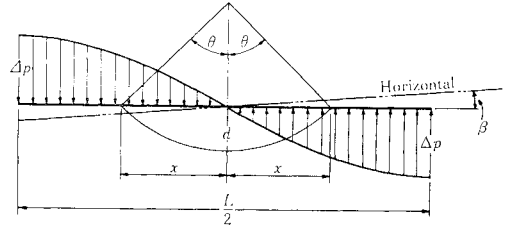


Fig. 4 Wave pressure on seafloor and assumed sliding surface (After Henkel^{21),35)}).

Terzaghi は未圧密粘土の深さ方向に $s/\gamma'z$ が式(1)の c' の存在によって単調に増加せず、ある深さで極小値を示すことから、その付近で発生する自重によるせん断破壊が不安定の原因と考えた³⁾。しかしその後の研究でミシシッピデルタでは $s/\gamma'z=0.03\sim0.05$ 程度では一定であることがわかった。海底斜面の傾斜を β とし、無限斜面の全応力のつり合いを考えると、 $s/\gamma'z=\beta$ であり、 $\beta=0.5^\circ=0.009$ であるから、重力だけでは破壊が起こらない。有効応力で考えても $U \tan \phi' \approx \beta$ のつり合い式で、デルタについて知られている $\phi'=20^\circ$ 、 $U=0.10\sim0.17$ を代入しても、現実の斜面は安定になってくる。そこで Henkel^{21),35)} は Fig. 4 のような波圧が剛な海底面にかかるとして、すべりの安定計算を行った。緩傾斜の海底面に波長 L 、振幅 Δp の正弦荷重が加わる時、図に示すような扇形土塊の円弧中心に対するすべりモーメント M_1 および扇形部海底面に対する波圧モーメント M_2 は

$$M_1 = \frac{2}{3} x^3 \gamma' \beta,$$

$$M_2 = \frac{\Delta p L^2}{2 \pi^2} \left(\sin \frac{2 \pi x}{L} - \frac{2 \pi x}{L} \cos \frac{2 \pi x}{L} \right)$$

これに対する抵抗モーメント M_R は

$$M_R = 2 x^3 \gamma' \left(\frac{s}{\gamma' z} \right) \left(\frac{\sin \theta - \cos \theta}{\sin^3 \theta} \right)$$

Henkel はミシシッピデルタにおける $s/\gamma'z=0.04$ 、 $\beta=0.008$ 、 $\gamma'=6.86 \text{ kN/m}^3$ の値を用い、ここに $L=60\sim180 \text{ m}$ の波がくるとして、波圧によってすべりが十分起こり得ることを示した。Henkel のこの論文は、海底地盤の力学に波力を組み込んだ画期的な労作である。

ミシシッピデルタについての論文は文献にあげておく^{36)~39)}。ミシシッピデルタの特殊な堆積環境で形成される粘性土の構造と物理的特性、特に間隙比や上載荷重との関係については Bennett et al. の優れた研究がある^{40)~42)}。

(2) 液状化しやすい海底地盤

液状化による海底地盤や河床地盤の流動は、ソ連のスピル河建設(1935、発破振動による)やオランダのゼー

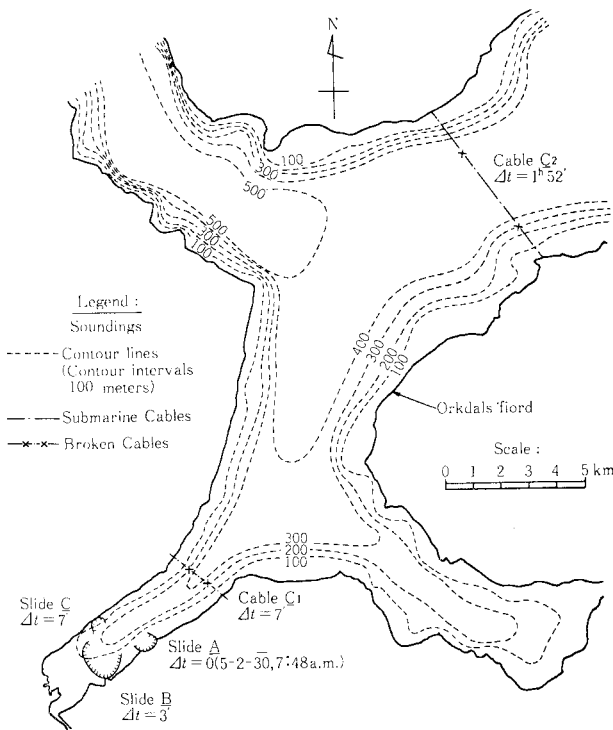


Fig. 5 Orkdals fjord flow slides and break of cables (After Andresen and Bjerrum⁴³⁾).

ランドで知られている⁸⁾。オランダの傾斜 15° 前後の海岸前面や海浜では1881年以来65年間に229回の流動すべりが発生し、 15 km/h 程度の速度で流れ、傾斜 5° 前後の扇状地状になった。すべりは極低潮時に起こっている。

Fig. 5は1930年ノルウェーのフィヨルドで発生した流動すべりと海底ケーブルの切断を示したものである^{8), 43)}。極低潮時に右岸に新しく盛土されたAの部分で500 mにわたって 1500 m^3 崩壊し水中に没した。約3分後に2 km 湾奥のBですべりが起こり、その4分後にCで流動すべりが発生すると同時に、 C_1 の海底ケーブルが切断された。さらに最初の崩壊から1時間52分後に C_2 の海底ケーブルが切断された。海底地盤はゆるい非塑性のシルト～シルト質砂である。AC₁の距離は約3 kmで傾斜は5～10%、 C_1C_2 は約20 kmで傾斜はほとんどない。Aから C_1 への破壊伝播速度は 26 km/h 、 C_1C_2 間では 10 km/h であった。崩壊の始まりは、極低潮時に基盤の割れ目を通して被圧地下水が上昇してきたためと考えられている⁴³⁾。全流動土量は 2500 万 m^3 程度である。

海底ケーブル切断の例としては、1929年 Grand Banksの地震によるものが有名である^{8), 44)}。この地震で大陸棚前縁から水深約5000 mの深海盆までの海底ケー

ブルが地震後13時間にわたって順次切断されていった。その速度は大陸斜面で 110 km/h 、深海盆で 20 km/h であった。この切断については、大規模な海底地すべりと混濁流への転化、進行性断層、液状化という現象だけの伝播などの考えがある。Terzaghiは上記のフィヨルドの例でも土砂が移動したのは C_1 までであり、その先は地盤中を液状化水圧が先で伝播したと考えている⁸⁾。

なお混濁流の地質的な面は星野の総合報告⁴⁵⁾を、力学的な面はMogenstern⁴⁶⁾を参照していただきたい。

北海域では上述のフィヨルドで流動破壊を起こす細砂～シルトと同一組成の土がきわめてよく締まった状態で深度25 m付近まで成層している。Henkelが考えた波の繰り返し荷重が締め固まった原因と考えられている^{10), 13)}。

(3) その他の海底地盤

ふつうの状態では安定している地盤が海洋構造物との関連で問題になるのは、動的作用を受けた場合である。動的荷重には、地震と波力があり、地震動に対する地盤の応答では日本の研究が世界中で使われている¹³⁾。海の波の動的作用は、北海の暴風の場合15秒前後の周期の波が6～9時間続き、その後同じ時間程度で減衰していく。波高は100年確率で25 mで、最大水平加速度 $0.2\sim 0.4\text{ g}$ の波が1500波程度続く。Ekofisk油田の19万t重力構造物は、設置中の1973年にすでに100年波高の90%の波を受け5日間で5 cm沈下したが、これは25 mの砂層内で起こり、予想された値であった¹³⁾。

海底地盤に対する繰り返し荷重の影響については、粘土を含め排水・非排水の条件で研究されているので文献^{13), 14), 16), 23), 47), 48)}を参照していただきたい。

なお深海堆積物の土質力学的研究も進んでおり⁴⁹⁾、またモホール計画などで採取された粘土では、深部へいっても強度に比較して間隙比が小さくならないような現象もみつかっている⁵⁰⁾⁻⁵²⁾。このような現象は遅い堆積速度と間隙水の塩分が関係しているという¹⁶⁾、まだよくわかっていない。

5. 海底地盤中の間隙水圧

海底地盤の間隙水圧を知ることは、堆積物の圧密状態Uや地震、波浪による海底地盤の不安定を解析するうえで重要である。海底地盤での測定が始まったのは、70年代に入ってからであるが、地層の圧密状態を直接測定によって知ることは困難であり、主として後者の目的で測定が行われているようである⁵³⁾⁻⁶¹⁾。これらの測定が

ら、①波の水圧は間隙流体に静水圧としてではなく減衰して伝えられること、②暴風時に間隙水圧が蓄積されること、③堆積物中のガスが水圧変動に大きく影響すること、④海底面と堆積物中での水圧変動に位相の遅れがあるらしいこと、⑤このような変動で地盤の不安定が起り得ること、などがわかってきた。しかし高波時の正確な測定は今後の課題である。③については実験報告もある⁶²⁾。

波の通過と海底地盤中の間隙水圧変動との関係は、理論的に種々の仮定のもとに解かれている^{63)~66)}。これらのうち Madsen・Yamamoto の透水性完全弾性堆積物の仮定による理論が、理論解として一般性をもつ^{67)~69)}。これは変形する多孔性物質の連続式とダルシー則から導かれるビオの方程式と有効応力・変位の弾性方程式を連立で解いたものである。波数 a 、角速度 ω の正弦波圧 $U_0 \cos(ax - \omega t)$ がほぼ水平な海底面 (x 軸) を通過するとき、海底面での有効応力を 0 とすれば間隙水圧変動 U は、5 秒程度以上の周期の波に対して、 z を鉛直上方にとり、

$$U = U_0 [B e^{\alpha z} \cos(ax - \omega t) + (1-B) e^{k_2 z} \cos(ax - k_2 z - \omega t)] \dots \dots \dots (3)$$

$$B = 1 / (1 + n\beta / m_v) \text{ Skempton の } B \text{ 係数} \dots \dots \dots (4)$$

n : 間隙率, β : 間隙流体の圧縮率, m_v : 土の圧縮率,

$$\begin{aligned} k_1 &= \sqrt{\frac{\pm a^2 + \sqrt{a^4 + (\omega \rho g m_v / k B)^2}}{2}} \\ k_2 &= \sqrt{\frac{\pm a^2 + \sqrt{a^4 + (\omega / c_v B)^2}}{2}} \end{aligned}$$

ρ : 間隙流体の密度, k : 透水係数, c_v : 圧密係数。

波によって発生する有効応力は、式 (3) 類似の項以外に $aze^{\alpha z} \cos(ax - \omega t)$ のような項が加わる。式 (3) から明らかのように、第 1 項は波の波長だけに依存する項であり、第 2 項は波長数十〜数百 m のふつうの波に対して $a^2 \ll \omega / c_v$ であるので、主として地盤の性質(および波周期)に依存する項である。第 2 項目は海底面変動に対して $k_2 z$ の位相遅れが生ずる。

さて飽和地盤では $B \approx 1$ なので、式 (3) の 2 項目は消え

$$\begin{aligned} U &= U_0 e^{\alpha z} \cos(ax - \omega t) \\ \bar{\sigma}_x &= U_0 a z e^{\alpha z} \cos(ax - \omega t), \\ \bar{\sigma}_z &= -U_0 a z e^{\alpha z} \cos(ax - \omega t) \\ \bar{\tau}_{xz} &= U_0 a z e^{\alpha z} \sin(ax - \omega t) \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

飽和地盤で波によって発生する間隙水圧や応力変動は、この理論では波長にのみ関係し、地盤の透水係数等に無関係である。ここは議論の多いところであり、式 (5) で表わされる変動を積極的に支持する測定結果はないようである^{61), 62)}。なお式 (5) で応力変動は $z = L/2 \pi$ で極値となる。

上記と同じ考えを海底パイプやケーソン周辺地盤の応力変動に適用したり^{70), 71)}、海底地盤内の主応力変化が液状化強度に与える影響を実験的に研究した例^{72), 73)}がある。最近のこの分野の発展や液状化に与える影響は文献^{74)~77)}で見出される。Yamamoto は弾性変形以外に摩擦減衰を入れて上記理論を発展させた⁷⁸⁾。

上と異なり海底地盤を完全弾性体として、波荷重の繰り返し载荷によるせん断変形から液状化ポテンシャルを考察した研究もある⁷⁹⁾。

6. 海底地盤中のガスの問題

海底堆積物中のガスは次のような現象に関係がある：①サンプル採取の際の応力変化、②音波探査(地震探査)における波動伝播特性、③ある理論における間隙水圧の変化(式(3)の B 係数)、④ガスの上方移動に伴う地盤強度および海底地形変化、⑤ガスによる未圧密状態の発生^{55), 56), 60)}。ここでは①と④を簡単に取り上げる。

(1) 不飽和が種々の地盤特性に与える影響

海底地盤に遊離ガスが含まれ、ガス圧は間隙水圧 u に等しいとする。原位置の飽和度 S 、サンプルを海面上に上げたときの飽和度 S_0 、ガス圧 u_0 とすれば、ボイルの法則とヘンリーの法則(定数 H)により、温度を一定とし⁴⁾、

$$u(1/S - 1 + H) = u_0(1/S_0 - 1 + H) \dots \dots \dots (6)$$

海面上でのガス圧を大気圧に等しいとすれば、 S_0 を測定して原位置の飽和度を知ることができる(Fig. 6)。サンプルを採取すると飽和度が低下し、サンプルの質に影響する^{31), 80)}。

不飽和の海底地盤に何らかの原因で全応力 Δp が加えられると、間隙圧 Δu と有効応力 $\Delta \bar{p}$ に配分される。 Δu と $\Delta \bar{p}$ の割合は式(4)の Skempton の B 係数で表わされる。

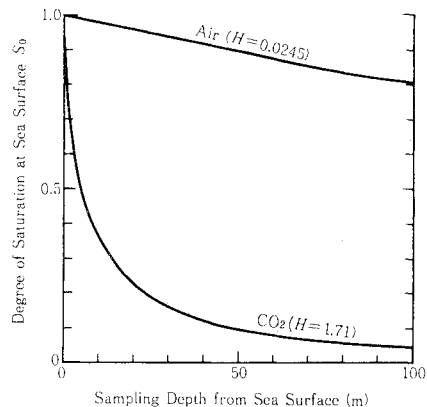


Fig. 6 Degree of saturation of sample at sea surface taken from depths where soil is saturated with gas dissolved water.

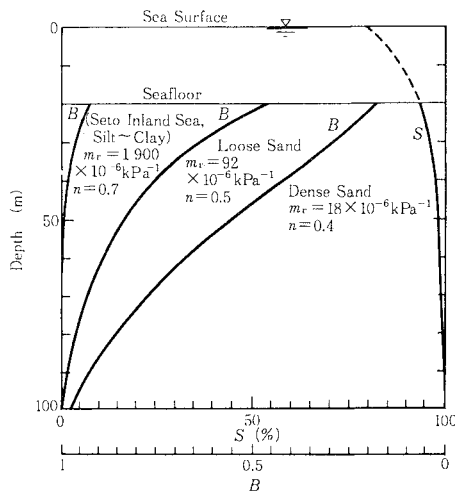


Fig. 7 Degree of saturation and pore pressure coefficient B for various soils.

$$\Delta u / \Delta p = 1 / (1 + n\beta / m_v) = B \dots \dots \dots (7)$$

β は水の圧縮率 β_w , ガスの圧縮率 β_a , 飽和度 S から

$$\beta = S\beta_w + (1 - S)\beta_a \dots \dots \dots (8)$$

β_a は等温過程を仮定すると $1/u$ になるので, わずかに不飽和になるだけで間隙圧係数 B は 1 より急速に小さくなる. Fig. 7 は水深 20 m の不飽和海底地盤が弾性的で m_v が一定とし, 海面上で $S_0 = 0.8$ になるときの種々の土^{81), 82)} の B の変化を示したものである. しかし海底面で地盤がきわめて軟弱で m_v が大きくなるとすれば, 海底面で $B = 1$ になるような別の曲線が得られる⁴⁾. 不飽和度が大きくなると加えられる圧力のうち有効応力 $\Delta \bar{p}$ に配分される割合は増大するが, ガスによる別の影響も大きくなる.

(2) Pockmark について^{83)~85)}

北海油田地域の海底の軟弱なシルト~粘土表面には, 直径数 m~数百 m, 深さ 1~15 m のくぼが存在し, 多いところで 1 km² 当たり 35 個も知られている. その壁面にはすべりの跡があり, 底には粗粒物がみられる. 下位の層準の不整合面にも埋没したくぼみが存在する. 砂質地盤では, くぼみが数 m~数 km に細長く伸びている. 前者は Pockmark といわれ, 後者は Mottled Seafloor といわれる. これらの成因はまだよくわかっていないが, 海底深部から割れ目などを通してガスや軽い液体が上昇してきて, 浸食を起こしたものと考えられている. 海洋構造物を設置する場合, 現存する pockmark を避けたり, グラウトで埋め戻すことが考えられている. Pockmark が形成されつつあるところでは, ガス抜パイプを打設したり, パイプライン路線上の pockmark 部分ではパイプに対する支持がなくなるので, 特別の支保が考えられている. Pockmark が形成されつつあるようなところでは,

上述のように間隙圧係数 B が低下するので, 応力状態が変化したり, 波に対する間隙水圧の応答が異なってくる. 現地でのこれらの位置の測量と成因の解明が急がれている.

7. あとがき

Marine Geotechnology は本論で触れられなかった多くの問題を含んでいる. 地震力が特に厳しい日本近海域において, 海底地盤の安定・不安定に関する過程, メカニズム, および地盤特性が関連分野の研究者・技術者の共同によって解明される日の近いことを期待したい.

日頃この分野でお世話になっている東工大・中瀬明男教授, 討論をいただいている東海大・福江正治, 中村隆昭助教授にお礼を申し上げる. 図面は東海大院生・畠山清君に引いていただいた.

参考文献

注 GT : Journal of Geotechnical Division, ASCE.,
 G : Geotechnique, Institution of Civ. Engrs.,
 MG : Marine Geotechnology, Crane, Russak & Com., Inc., NY.,
 MG2 : Marine Geotechnology, Vol.2, Marine Slope Stability Volume,
 OTC : Proc. Offshore Technology Conference.

- 1) Terzaghi, K. : Influence of geological factors on the engineering properties of sediments, Economic Geology, 50th Aniv. Volume, 557~618, 1955.
- 2) Henkel, D.J. : Geology, Geomorphology and Geotechnics, 22nd Rankine Lec., G, 32-3, 175~194, 1982.
- 3) 奥村樹郎 : 粘土のかく乱とサンプリング方法の改善に関する研究, 港湾技研資料, 193, 145 pp., 1974.
- 4) Esrig, M.I., et al. : Implication of gas content for predicting the stability of submarine slope, MG 2, 81~100, 1977.
- 5) D'Appolonia, E. : Underwater Soil Sampling, Testing, and Construction Control, ASTM STP 501, 1971.
- 6) Okusa, S. : Submarine Soil Sampling, Proc. Int. Con. Soil Sampling, 121~138, 日本土質工学会, 1978.
- 7) 土質工学会 : 土質調査法—第2回改訂, 780~821, 1982.
- 8) Terzaghi, K. : Varieties of submarine slope failures, NGI Publication 25, 1~16, 1956.
- 9) Bea, R.G. : Gulf of Mexico hurricane wave heights, J. Petroleum Technology, Sept.-1975, 1160~1172.
- 10) Bjerrum, L. : Geotechnical problems involved in foundations of structures in the North Sea, G, 23-3, 319~358, 1973.
- 11) Richards, A.F. (Ed.) : Marine Geotechnique, Proc. Int. Conf. Marine Geotechnique, 327 pp., Univ. Illinois Press, 1967.
- 12) Fukuoka, M., et al. : Problems of soil mechanics of the ocean floor, Proc. 8 ICSMFE, 4-2, 205~222, 1973.
- 13) Eide, O. : Marine soil mechanics, NGI Publication 103, 1~20, 1974.

- 14) Garrison, L.E. : The SEASWAB experiment, MG 2, 117~122, 1977.
- 15) Richards, A.F. (Ed.) : MG 2, 392 pp., 1977.
- 16) Sangrey, D.A. : Marine geotechnology—State of the Art, MG 2, 45~80, 1977.
- 17) Bennett, R.H. : Marine Geotechnical/RUSEF, Present & Recommended U.S. Gov. Res. in Seafloor Eng., 13 pp., 1978.
- 18) Nastav, F.L., et al. : Research element, study area, sample location, tracklines and publications of marine geotechnical seafloor stability program 1967~1980, NOAA Tech. Memo. ERL AOML-44, 101 pp., 1980.
- 19) 土質工学会：海洋開発における基礎構造物の現状，設計基準および事例 1973，施工技術 1974，海洋構造物の計画 1975，施工機械 1976，海底地盤調査法 1977.
- 20) George & Wood (Ed.) : Offshore Soil Mechanics, Cam. Univ. Press & Lloyd's Register Shipping, 468 pp., 1976.
- 21) Le Tirant, P. : Seabed Reconnaissance and Offshore Soil Mechanics for Installation of Petroleum Structure, Editions Technips, 508 pp., 1979.
- 22) 中瀬明男：海洋土質，技報堂，174 pp., 1984.
- 23) Almagar, G. : Marine geotechnical studies at continental margins I, Applied Ocean Research 4-2, 91~98, II, 4-3, 130~150, 1982.
- 24) 星野通平：日本近海大陸棚上の堆積物について，地学団体研究会専報 7, 41 pp., 1958.
- 25) 土質工学会海洋開発委員会：日本沿岸海底土質資料調査報告書，80 pp., 資料集，70 pp, 1979.
- 26) Keller, G.H. : Shear strength and other physical properties of sediments from some ocean basins, Proc. Conf. Civ. Eng. in the Oceans, ASCE, 391~417, 1967.
- 27) Keller, G.H., et al. : Variations in the mass physical properties of selected submarine sediments, Marine Geology, 9, 215~223, 1970.
- 28) Noorany, I., et al. : Engineering properties of submarine soils, State-of-the-Art Review, J. SM ASCE, 96, SM 5, 1735~1761, 1970.
- 29) Jakobson, B. : "Origin of cohesion" of clay, Proc. 3 ICSMFE, 1, 35~37, 1953.
- 30) 佐藤孫七：九十九里浜沖の海底谷について，港湾事情速報，海上保安庁水路部，1963-7, 1.
- 31) Bea, R.G. : How sea-floor slides effect offshore, The Oil & Gas J., November 29, 88~92, 1971.
- 32) Bea, R.G., et al. : Offshore platforms and pipe lines in the Mississippi Delta, GT, 106-8, 853~869, 1980.
- 33) Bea, R.G., et al. : Wave-induced slides in South Pass Block 70, Mississippi Delta, GT, 109-4, 619~644, 1983.
- 34) Coleman, J.M., et al. : Geological aspects of marine slope stability, North Western Gulf of Mexico, MG 2, 9~44, 1977.
- 35) Henkel, D.J. : The role of waves in causing submarine landslides, G, 20-1, 75~80, 1970.
- 36) Shepard, F.P. : Delta-front valleys bordering the Mississippi Distributaries, Bull. Geological Soc. Am, 66, 1489~1498, 1955.
- 37) Shepard, L.E., et al. : Consolidation characteristics and excess porewater pressure of Mississippi Delta sediments, OTC 3167, 1038~1048, 1978.
- 38) Prior, D.B., et al. : Disintegrating retrogressive landslides on very-low-angle subaqueous slopes, Mississippi Delta, MG, 3-1, 37~60, 1978.
- 39) Booth, J.S., et al. : A geologic and geotechnical analysis of the upper continental slope adjacent to the Mississippi Delta, OTC 3165, 1019~1028, 1978.
- 40) Bennett, R.H., et al. : Clay fabric and geotechnical properties of selected submarine sediments cores from the Mississippi Delta, NOAA Prof. Pap. 9, 86 pp., 1977.
- 41) Bennett, R.H., et al. : Clay fabric and related pore geometry of selected submarine sediment : Mississippi Delta, Scanning Electron Microscopy (Seminar Proc.), 1979 I, 519~524, Discussion p.424.
- 42) Bennett, R.H., et al. : Clay fabric of selected submarine sediments : Fundamental properties and models, J. Sedimentary Petrology, 51-1, 217~232, 1981.
- 43) Andresen, A., et al. : Slides in subaqueous loose sand and silt, Marine Geotechnique (Richards, R.F., Ed.), Univ. Illinois Press, 221~239, 1967.
- 44) Shepard, F.P. : Submarine Geology (3rd Ed.), Harper & Row, p.66, 330~331, 1973.
- 45) 星野通平：混濁流，海洋学会誌，21-1, 31~40, 1965.
- 46) Morgenstern, N.R. : Submarine slumping and the initiation of turbidity currents, Marine Geotechnique, Univ. Illinois Press, 189~220, 1967.
- 47) Lee, K.L., et al. : Liquefaction potential at Ekofisk in North Sea, GT, 101-1, 1~18, 1975.
- 48) Proc. Int. Conf. Recent Advances on Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, III, St. Lois, MO 1981.
- 49) Inderbitzen (Ed.) : Deep-Sea Sediment—Physical and Mechanical Properties, Plenum, 497 pp., 1974.
- 50) Moore, D. : Shear strength and related properties of sediments from experiment mohole (Guadelupe Site), J. Geophysical Res., 69~20, 4271~4291, 1964.
- 51) 中瀬明男：海底粘土の有効応力，含水比，強度の関係について，海洋土質シンポ，313~318, 1982.
- 52) Nakase, et al. : In situ void ratio, strength and overburden pressure anomalies in sea bed clays, IUTAM '83 Symp. Seabed Mechanics, 1983.
- 53) Richards, A.F., et al. : Differential piezometer probe for an in situ measurement of sea-floor pore-pressure, G, 25-2, 229~238, 1975.
- 54) Bennett, R.H., et al. : Initial Results and progress of Mississippi Delta sediment pore-water pressure experiment, MG, 1-4, 327~335, 1976.
- 55) Bennett, R.H. : Pore-water pressure measurements : Mississippi Delta Sediments, MG 2, 177~189, 1977.
- 56) Hirst, T.J., et al. : In situ pore-pressure measurements in Mississippi Delta front sediments, MG 2, 191~204, 1977.

- 57) Dunlap, W.A., et al. : Pore pressure measurement in underconsolidated sediments, OTC 3168, 1049~1058, 1978.
- 58) Bennett, R.H., et al. : Ambient and dynamic pore pressure in fine-grained submarine sediments : Mississippi Delta, Applied Ocean Res., 1-3, 115~123, 1979.
- 59) Okusa, S., et al. : Pore-pressure change in submarine sediments due to waves, MG, 4-2, 145~161, 1980.
- 60) Hulbert, M.H., et al. : Anomalous pore pressure in Mississippi Delta sediments : Gas and electrochemical effects, MG, 5-1, 51~62, 1982.
- 61) Okusa, S., et al. : Measurements of wave-induced pore pressure and coefficient of permeability of submarine sediments during reversing flow, IUTAM '83 Symp. Seabed Mechanics, 1983.
- 62) Tsui, Y., et al. : Wave-induced pore pressure in submerged sand layer, GT, 109-4, 603~618, 1983.
- 63) Reid, R.O., et al. : On the damping of gravity waves over a permeable sea bed, Trans. Am. Geophysical Union, Oct.-1957, 662~666.
- 64) Sleath, J.F.A. : Wave-induced pressure in beds of sand, J. HY, ASCE, 96-2, 367~379, 1970.
- 65) Moshagen, H., et al. : Wave-induced pressure in permeable beds, J. WW, ASCE, 101-1, 49~58, 1975.
- 66) Prevost, J.H., et al. : Wave-induced pressures in permeable beds (Disc.), J. WW, ASCE, 101-4, 464~465, 1975.
- 67) Madsen, O.S. : Wave-induced pore-pressure and effective stresses in a porous bed, G, 28-4, 377~393, 1978.
- 68) Yamamoto, T., et al. : On the response of a poro-elastic bed to water waves, J. Fluid M., 87-1, 193~206, 1978.
- 69) Yamamoto, T. : Wave-induced pore pressures and effective stresses in a homogeneous seabed foundations, Ocean Engineering, 8, 1~16, 1981.
- 70) Mei, C.C., et al. : Wave-induced stress around a pipe laid on a poro-elastic sea bed, G, 31-4, 509~517, 1981.
- 71) Mynett, A.E., et al. : Wave-induced stresses in a saturated poro-elastic sea bed beneath a rectangular caisson, G, 32-3, 235~247, 1982.
- 72) Ishihara, K., et al. : Sand response to cyclic rotation of principal directions as induced by wave loads, Soils and Foundations, 23-4, 1983.
- 73) Ishihara, K., et al. : Wave-induced liquefaction in seabed deposits of sands, IUTAM '83 Symp. Seabed Mechanics, 1983.
- 74) Kraft, L.M., et al. : Stresses due to wave-induced bottom pressures, GT, 109-7, 986~994, 1983.
- 75) Finn, W.D.L., et al. : Response of seafloor to ocean waves, GT, 109-4, 556~571, 1983.
- 76) Demars, K.R. : Transient stress induced in seabed by wave loading, GT, 109-4, 591~602, 1983.
- 77) Nataraya, M.S., et al. : Ocean wave-induced liquefaction analysis, GT, 109-4, 573~590, 1983.
- 78) Yamamoto, T. : On the response of a Coulomb-damped poroelastic bed to water waves, MG, 5-2, 93~129, 1983.
- 79) Seed, et al. : Wave-induced pore pressure in relation to ocean floor stability of cohesionless soils, MG, 3-2, 123~150, 1978.
- 80) フローリンの土質力学Ⅱ, 森北出版, 48~71, 1971.
- 81) Okusa, S., et al. : Geotechnical properties of submarine sediments in the Seto Inland Sea, MG, 5-2, 131~152, 1983.
- 82) Skempton, A.W. : The pore-pressure coefficients A and B, G, 4-4, 143~147, 1954.
- 83) Hovland, M. : Pockmarks and the recent geology of central section of the Norwegian Trench, Marine Geology, 47, 283~301, 1982.
- 84) Hovland, M. : Elongated depressions associated with pockmarks in the western slopes of the Norwegian Trench, Marine Geology, 51, 35~46, 1983.
- 85) Hovland, M., et al. : Potential influence of gas induced erosion on seabed instability, IUTAM '83 Symp. Seabed Mechanics, 1983.

(1984. 2. 26・受付)