海底地盤の波浪による液状化現象の工学的重要性

Importance of Wave-induced Liquefaction in Seabed in Engineering Practice

善功企* (Kouki Zen)

海底の砂地盤が波浪の作用によって波状化することが知られているが、波状化を引き起こす過剰間隙水圧には、 平均主応力の変化による変動過剰間隙水圧と繰返しせん断応力による残留過剰間隙水圧がある。波状化現象は、 洗掘、漂砂、異形ブロックの沈下、海底地すべり、構造物基礎地盤の破壊、海底パイプラインの浮上など、現在、 未解明な海底地盤の工学的諸問題と密接な関係があり、波浪に対する海底砂地盤の安定問題を考える上で、波状 化の問題は極めて重要である。

キーワード:砂、<u>液状化、波浪</u>、間隙水圧、海岸 (1GC: E7/E8)

1. まえがき

北海やメキシコ湾に代表される1970年以降の海洋における石油開発や最近の我が国における沖合人工等構想、 海上空港計画、ウォーターフロント開発、廃棄物処理にかかわるフェニックス計画等にみられるように、海洋、 沿岸、港湾域における開発は、社会的、経済的観点から極めて重要な課題となっている。従来より、海底地盤を 対象とした土質工学的観点からの研究が少なからず行われているが、大水深、大波浪海域における海洋開発の進 展に伴って新たに解決すべき課題も発生している。海底地盤の土質工学的問題については、既に過去の研究をレ ビューしたいくつか報告¹¹⁻⁴¹が行われているが、それらの中でも、内外で注目されている問題の一つに波浪に よる海底砂地盤の液状化現象がある。砂地盤の液状化は、なんらかの外力の作用によって砂の骨格構造がくずれ 地盤が液体状態になる現象で、地震による砂地盤の液状化現象については、既によく知られているところである。 最近では、この液状化現象が海洋の波浪によっても発生することが明らかになっている。

海底地盤に作用する波力は、静的載荷に比較して載荷速度が速いことや周期的に多数回繰り返すことなど、地 震力と同様な特徴を有しているが、詳細に見ると、繰り返し回数が地震に比較して格段に多い点、衝撃波や砕波 を除くと周期が1オーダ大きい点、最大波が来襲する以前に小さな波群による載荷履歴を地盤に与える点、波力 が地盤表面や構造物と地盤との境界から作用する点などが異なっている。このような波力による液状化現象につ いては、その発生のメカニズムなど未解明な点も多く残されている現状であるが、これまで、波浪による液状化 に関する研究は比較的少なく、液状化の予測法や設計法等については未だ十分確立されているとは言い難い。

波浪によって海底地盤が液状化すると、静穏時の地盤の強度が失われることから、たとえば、海底地すべり、 海底パイプラインの浮上、異形ブロックの沈下、杭の支持力減少や洗掘、漂砂などの著しい底質移動を引き起こ し、港湾・海洋構造物およびその周辺地盤の安定に大きな悪影響を及ぼすことが予想される。したがって、液状 化現象の解明は、これらの諸問題を解決する上で、極めて基本的、かつ工学的に重要な課題であると考えられる。

このような背景から、本文は、波浪による液状化に関する既往の研究成果をもとに、実際の海底地盤で発生している諸現象と液状化現象との関連についてレビューし、実務における液状化現象の重要性について述べたもの ある。

* 運輸省港湾技術研究所 土質部動土質研究室 室長

- 1 -

善

2. 海底地盤に作用する波力

波浪に対する海底地盤の問題を取り扱う場合、流体運動によって海底地盤や構造物にどのような波力が作用するかを知る必要がある。波力は、構造物の形状等により異なるので、ここでは、波力が直接海底地盤に作用する 場合と構造物を介して間接的に海底地盤に作用する場合に分けて取り扱う。

2.1 直接海底地盤に作用する波力

一般に、流体と海底地盤との境界付近では、両者間のエネルギー伝達や応答などによって、流体と海底地盤は 極めて複雑な相互干渉を受ける。しかし、進行波に対する海底地盤全体の安定問題などを土質工学的に取り扱う 場合、海底面に作用する流体の運動を別途求め、その運動による外力を地盤面に垂直な力と平行な力に分けて表 すことが多い。

(a)海底地盤面に作用する水圧変動

波浪と海底地盤の問題を取り扱う場合、海底地盤に直接作用する波力として、海底地盤面の流体圧を波力と考 え、微小振幅波理論にもとづいて、海底地盤面の変動水圧を図-1のようにモデル化することが多い⁽⁾⁻⁷⁾。微 小振幅波理論によると、海底地盤面における静穏時か

らの変動水圧p。は、次式で与えられる。

$$p_{b} = p_{o} \sin \left(\lambda x - \omega t \right)$$
 (1)

$$p_{o} = \frac{\gamma_{w}H}{2\cosh(\lambda h)}$$
(2)

ここに、 p 。; 水圧変動振幅、λ; 2π/L、ω; 2π/ T、H; 波高、L; 波長、T; 周期、h; 水深、γ、 ; 海水の単位体積重量、t;時間である。

式(1)を用いて、水深10mの地点に、波高5m、 周期7 sの波が来襲したときの変動水圧 p_bの最大値 を求めると、 p_b=1.6tf/m²となる。この数値は、一 般の港湾の岸壁の設計で用いられている上載荷重1 tf



図-1 海底面の水圧変動

/m²~ 2 tf/m²に比較しても決して小さな値とはいえない。ただし、水圧そのものが盛土などと同様な実荷重とし て海底地盤に働くかどうかについては議論の余地がある。

(2)海底地盤面に作用するせん断応力

微小振幅波理論では、完全流体を仮定していることから、海底地盤面にはせん断応力は作用しない。しかし、 底質移動限界、漂砂、洗掘などに関連した海底地盤表層部の力学挙動を取り扱う場合には、流体の粘性によるせ ん断応力を考慮することが必要となる。例えば、田中・首藤(1980)は、粗面乱流時の波・流れ共存場における せん断応力を求める式を提案している⁹⁾。 それによると、海底面の最大せん断応力_{て。m}は、次式で与えられる。

$$\tau_{om} = \frac{\rho}{2} \quad f_{om} = U_{a}^{2} \qquad (3)$$

ここに、

$$\sqrt{\frac{f_{\circ}}{2}} = \frac{\overline{\kappa}}{\ln(h/h_{\circ}) - 1} \frac{\overline{u}_{\circ}}{\overline{u}_{\circ}} + \frac{\overline{\kappa}}{\pi} \{0.25 + 0.101 (\ln \frac{\omega h_{\circ}}{\overline{u}_{\circ}}) - \frac{1}{2} \ln f_{\circ} + 2.42 \}^{-1/2}$$
(4)

$$U_{n} = \frac{\pi H/L (L/T - \overline{u}_{c})}{\sinh (\lambda h)}$$
(5)

f。;摩擦係数、U.;境界層外縁流速の振幅、u。;平均流速(順流正、逆流負)、h;水深(底面から上向き)

- 2 -

、h。; 粗度長さ、 $\overline{\kappa}$; カルマン定数、 ρ ;海水の密度、T;周期、H;波高、L;波長である。

式(1)のp。との比較のため、式(3)~(5)を用いて、水深10mの地点に、波高5m、周期7 sの波が来襲した 場合の最大せん断応力を計算し、その結果を図-2に示した。平均流速(順流:波の進行方向の流れ)2.0m/sを 考慮しても、最大せん断応力は、10⁻²tf/m²のオーダとなり、p。の最大値1.6tf/cm²に比較して極めて小さい。

以上の考察から明らかなように、 海底地盤全体の安定問題などを検討 する場合には、波力としては水圧変 動による鉛直圧力が支配的な波力に なる。一方、海底地盤表層部の底質 移動問題などでは、極めて小さなせ ん断応力でも無視できず、特に、粘 土粒子から成る底泥の場合には、10-⁴tf/m²以下のせん断応力でも、底泥 の巻き上げが発生することが報告さ れている^{9),10})。本研究で対象とし ている液状化が実際に発生するとす れば、砂地盤は懸濁状体になること が想定され、底泥と同様に極めて小 さなせん断応力でも砂粒子の巻上げ や移動が生じる可能性がある。



図-2 田中・首藤の理論による海底面のせん断応力

2.2 構造物を介して間接的に地盤に作用する波力

波力が構造物を介して地盤に伝達される場合は、直接波力が作用する場合に比較して、構造物が介在する分だけ複雑となる。波力の種類は、一般には構造物の種類や形状、地形などにより異なり多くの波圧公式が提案されているが、我が国の港湾施設の設計では、直立壁に作用する波力の算定法として合田により提案された波圧公式が用いられている⁸¹。また、海洋鋼構造物のうち、柱状またはトラス構造物では抗力および慣性力、海底敷設管では抗力および揚力、海面付近のプラットフォームでは砕波による衝撃力、大型構造物では慣性力、海底敷設管では抗力および揚力、海面付近のプラットフォームでは砕波による衝撃力、大型構造物では慣性力、砕波圧、重複波圧などが考慮すべき波力としてあげられている¹¹¹。これらの波力は、一旦構造物を介すると、構造物と地盤との相互作用によって波力そのものとはやや違った形で地盤へ伝達されることになるが、地盤への応力伝達は構造物の剛性やたわみ性などの変形特性に加えて、地盤そのものの特性に依存する。個々の構造物に対する波力の詳細については、本文の範囲を越えるので、ここでは省略する。

2.3 物体力と表面力

海底地盤表面境界に作用する波力は、図-3に示す ように、間隙水によって受持たれる場合と、地盤境界 面の土粒子によって受持たれる場合がある。前者の場 合、海底地盤表面の水圧の時間的、場所的な分布によ って、地盤中には浸透力が生じる。これは物体力の一 つである。浸透水圧は浸透方向に垂直な断面に作用す る浸透流による圧力のことで、平行な断面に働く過剰 間隙水圧の差を意味する。地盤中の有効応力変化は、 後で述べるように、浸透流に起因する浸透水圧もしく は過剰間隙水圧によってもたらされると考えられる。 後者の場合、表面力が地盤中に伝達することにより過



図-3 海底地盤に作用する波力

剰間隙水圧や有効応力の変化をもたらす。表面力には海底地盤境界面の垂直応力やせん断応力がある。海底地盤の応力変動は、境界面における外力が水圧として作用するか実質的な応力として作用するかによって取り扱いが 異なると考えられるが、一般に、波浪により発生する過剰間隙水圧 u は、物体力に起因する成分 u ()。o,) と表面 力に起因する成分 u ("",)の和として、

$$u = u (b \circ d x) + u (b \circ d x)$$

で表される。

3. 液状化発生のメカニズム

3.1 体積変化と過剰間隙水圧

土塊は種々の大きさの土粒子の集合と、それ以外の間隙を占める水および空気から成り立っている。過剰間隙 水圧と土塊の体積変化には密接な関係があるが、圧縮性の異なる物質から構成される土塊の体積変化は、土粒子、 水、空気の個々の圧縮量だけではなく、土粒子により構成される骨格構造の圧縮量をも含めた量として把握され る。Bishop¹³⁾は、土塊を弾性体と仮定し、非排水条件のもとで飽和した土塊表面に周面応力σが作用したとき の過剰間隙水圧増分uを次式で表している。

$$u = \frac{1}{1 + n (C_{w} - C_{*}) / (C_{b} - C_{*})} \sigma$$
(7)

ここに、n:間隙率、C_{*}、C_{*}、C_{*}:それぞれ、水、土粒子、土の骨格の圧縮率である。土粒子の圧縮率C_{*}を 0とすると、Skempton¹⁴⁾の示した式に等しくなる。n、C_{*}、C_{*}を一定とすると、u/σはC_{*}が大きくなると 減少する。例えば、C_{*}=2.7x10⁻⁶ cm²/kgf、C_{*}=48x10⁻⁶ cm²/kgfとし、密な砂(間隙率 n = 0.3と仮定)および 緩い砂(間隙率 n = 0.5と仮定)について、それぞれ、C_{*}=1.8x10⁻³ cm²/kgfおよび9.0x10⁻³ cm²/kgfとすると、 u/σは、それぞれ、0.99、1.0となり、非排水状態の飽和土では、発生する過剰間隙水圧は加えられた等方応力 にほぼ等しくなる。しかし、わずかな気泡を含む不飽和土の場合には、気泡と間隙水の混合体の圧縮率C'*はC *に比べ2~3オーダ程度大きくなるから、u/σは必ずしも1にはならない。上記の例において、C_{*}のかわり にC'*=50x10⁻⁴ cm²/kgfとし、これを式(7)に代入すると、u/σ は、それぞれ、0.55、0.64となり、等方応 力の5~6割強の過剰間隙水圧しか発生しない。したがって、過剰間隙水圧で受け持たれる以外の残りの圧力成 分は、土の骨格によって受け持たれることになり有効応力は変化する。

式(7)における周面応力σを直交する3方向の主応力、σ₁、σ₂、σ₂により表すと、

$$u = B \left\{ \frac{1}{3} (\sigma_{1} + \sigma_{2} + \sigma_{3}) + a \sqrt{(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2}} \right\}$$
(8)

で表される。ここに、 a 、 B は、Skempton¹⁵⁾によって定義された間隙圧係数で、 a は土の圧縮性およびせん断 にともなう体積変化(ダイレタンシー)特性に依存する係数である。 B は、普通、 B 値とよばれる係数で次式で 表される。

$$B = \frac{1}{1 + n (C_{*} - C_{*})/(C_{b} - C_{*})}$$
(9)

式(8)によると、土塊の体積変化が弾性的である場合には、静的載荷により発生する過剰間隙水圧は、平均 主応力による成分とせん断応力による成分から成る。

繰返し荷重に対する過剰間隙水圧の挙動を取り扱う場合、間隙水圧係数だけを用いて複雑な挙動を表現することには困難をともなう。しかし、繰返し荷重に対しても、土塊中に発生する過剰間隙水圧は、静的荷重に対する 場合と同様に、平均主応力による成分u。とせん断応力による成分u。の和、

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\mathbf{c}} + \mathbf{u}_{\mathbf{z}} \tag{10}$$

(6)

- 4 -

として表すことが可能と考えられる。応力制御方式による飽和砂の非排水繰返し三軸せん断試験では、供試体内 に徐々に累積していく過剰間隙水圧 u に加えて、載荷応力の変動に応じて弾性的に応答する過剰間隙水圧 u 。が 観察されることからも肯首される。

3.2 平均主応力による過剰間隙水圧

波浪の進行にともなって、海底地盤面には水圧が繰返し作用する。海底面の水圧変動は全応力の変動を意味し、 地盤中の平均主応力の変動をもたらす。非排水条件下では、平均主応力の変動に応答する間隙水圧は土塊の圧縮 率もしくはB値に依存し、B値が1以下の場合、発生水圧は必ずしも平均主応力に等しくならない。波浪のよう に速度の速い載荷を受ける場合、砂地盤であっても、静的載荷に比較して相対的な排水性が低下し部分排水条件 となるから、非排水条件下での間隙水圧と類似の挙動

を示すと考えられる。

図-4は、波浪によって生じる海底地盤面の水の流 れと水頭差を描いたものである。いま、海底地盤中の 土要素について考え、任意の時間tにおける要素(x, z)内の平均主応力およびせん断応力による水圧変動 をp、要素直上の海底面水圧変動をp。とする。pお よびp。は一般に等しくなく、ともに場所的、時間的 に変動する。すなわち、海底地盤中には水頭勾配が生 じて非定常浸透流が発生する。以上のことを視点を変 えて考える。海底面水圧変動p。は、波浪によっても



図-4 海底地盤中の水の流れと水頭差

たらされる全応力の変動を意味するから、p。がそのまま地盤中に伝達される場合、すなわち、p = p。となるように水圧が伝播するする場合には、単に静水圧(中立応力)が変化しただけと考えられ、地盤中の有効応力の変 化は発生しないことになる。一方、p ≠ p。となる場合、全応力の変化 p。に対して間隙水圧の変化は p であるか ら、 (p - p。)だけの圧力差が生じる。図-5は、既往の研究¹⁽⁴⁾⁻²⁰⁾における p。と p の関係を p。の変動周期 T との関係で整理した結果である²¹⁾。図-5では、p。のかわりに p。の振幅 p。を、p は無次元深度 z / ℓ ≒ 0.4 5付近(ここに ℓ は透水砂層厚)における値を用いている。図-5から、海底面の水圧変動は必ずしもそのまま

海底地盤中へ伝播しないことが明ら かである。特に、周期が短くなると この傾向は大きく現れる。

上記の圧力差は、力の釣合いを考 慮すると土の骨格によって受けもた れると考えられることから、差の分 だけ有効応力が変化すると解釈され る。そこで、この水圧差 u を、

 $u = p - p_{b} \qquad (11)$

で表すと、 u は地盤中の過剰間隙水 圧の増加を意味することになる。基 準圧力として静穏時の静水圧をとり、 符号は静穏時の静水圧から水圧が増



図-5 既往の文献における周期と水圧比

加する方向を正とすると、有効応力の変化△σ'は次式でで表される。

$$\bigtriangleup \sigma' = -\mathbf{u} = \mathbf{p}_{\mathbf{b}} - \mathbf{p}$$

(12)

図-6 は一次元状態で地盤中の変動水圧分布と有効鉛直応力σ^{*}、の関係を描いたものである。図-6 の(b)は、 地盤中の水圧が図-6の(a)に示した①と②の分布をするときのσ^{*}、を、静穏時の有効鉛直応力σ^{*}、= γ ^{*}zとし て概念的に描いたものである。図-6の(b)によると、①の分布に対応するσ^{*}、は、ある深さ以浅で負となって おり、これは地盤の液状化を意味する。一方、 ②に対応する σ' 、は、静水状態の σ' 、。より も大きくなっており、地盤が高密度化 (Dess ification) するような応力が作用している と考えられる。このように、波浪の変動にと もなう海底面の水圧が、そのまま地盤中に伝 達されないという前提にたてば、u = (p - p)の大きさによって、地盤は液状化と高 密度化を繰返し生じることになる²¹⁾。

図-7は、式(12)の関係を現地観測結果に 基づき調べたものである²²⁾。図-7から海 底面の水圧変動に応答して、地盤中の有効応 力も変動すること、有効応力の変動量はほぼ 式(12)で表されることが明らかである。



液状化の予測を行うにあたって必要な海底地盤中の水圧の変動については、これまでの研究成果^{16),23)-25)}によると式(13)で表されることが明らかとなっている。

$$\frac{k}{\gamma_{w}} \left(\frac{\partial^{2} p}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} p}{\partial z^{2}} \right) = \frac{\partial \epsilon_{v}}{\partial t} + n C'_{w} \frac{\partial p}{\partial t}$$
(13)

式(13)に、境界条件として、式(1)の海底面上の変動水圧pьを与えると海底地盤中の変動水圧が求められる。 なお、式(13)のpは変動水圧を表し、過剰間隙水圧とは異なる点に留意すべきである。地盤を弾性体と仮定し、 式(13)を過剰間隙水圧uで表示すると、

$$C_{*} \left(\frac{\partial^{2} u}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} u}{\partial z^{2}}\right) = \alpha \quad \frac{\partial u}{\partial t} + (\alpha - 1) \quad \frac{\partial p}{\partial t}$$
(14)

$$= 1 + n \quad \frac{C_{w}}{C_{b}} \tag{15}$$

となる^{2 *)}。ここに、k:透水係数、 γ *: 間隙水の単位重量、C'*:間 隙水および気泡の混合体の圧縮率、 C_b: 土の骨格の圧縮率、C₊: 圧密 係数、n:間隙率である。なお、 α ($\alpha \ge 1$) は水圧の伝播特性を表す パラメータで伝達係数とよばれてい る。

α

3.3 繰返しせん断応力による過剰 間隙水圧

繰返しせん断応力による過剰間隙 水圧については、地震時を対象とし



図-7 有効鉛直応力の変動

た多くの研究がある。それらの中で比較的簡便で実用的に過剰間隙水圧を求める方法として、繰返し三軸試験等 により、直接、過剰間隙水圧を測定する方法がある。北海における石油掘削リグ基礎地盤の液状化を対象とした Lee and Focht²⁷⁾の研究はこの手法を用いている。波浪作用時の過剰間隙水圧は、地震時とは異なり排水の影響 を大きく受けることから、排水の影響を考慮することが重要であるが、Rahmanほか²⁸⁾は排水の影響を考慮して 過剰間隙水圧を算定する方法を提案している。この方法は、非排水条件のもとで実験的に求めた過剰間隙水圧の

- 6 -

繰返し波数に対する上昇曲線を、排水を規定する圧密方程式に組込んだものである。その式を二次元平面ひずみ 条件のもとで表すと、

$$C_{v} \left(\frac{\partial^{2} u}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} u}{\partial z^{2}}\right) = -\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t}$$
(16)

となる。ここに、u_uは、非排水条件下において発生する過剰間隙水圧で、

$$\frac{\partial u_{\pi}}{\partial t} = \frac{\sigma'_{vo}}{\theta \pi t_{p}} \frac{N}{N_{1}} \frac{1}{\sin^{2\theta - 1} (\pi r_{u}/2) \cos (\pi r_{u}/2)}$$
(17)

で与えられる。ここに、σ'ν。;初期有効拘束圧、to;等価換算波の継続時間、N、N」;それぞれ、繰返し波数、液状化波数、r」;間隙水圧比u₂/σ'ν。、θ;実験定数である。

繰返しせん断応力に起因する過剰間隙水圧を測定した例は少ないが、北海のエコフィスクタンク基礎地盤での 実測例がある³⁰,。また、我が国の被災防波堤を対象とした室内模型実験において、過剰間隙水圧を測定し液状 化を調べた例が報告されている³⁰。

3.4 液状化の発生規準と液状化パターン

海底地盤の液状化は、過剰間隙水圧が地盤の土被り圧σ'、。もしくは初期平均有効主応力σ'…。以下になったと きに発生すると考えられる。したがって、液状化の発生規準は、

一次元条件:	σ' , $s \leq u$	(17)
平面ひずみ条件:	σ' m o \leq u	(18)

で表される。

図-8は、平均主応力およびせん断応力による過剰間隙水圧のそれぞれの成分が卓越する場合の過剰間隙水圧 の挙動と液状化について描いたものである。平均主応力による過剰間隙水圧は、海底面の水圧変動に対してほぼ 弾性的に応答するから、液状化は図-8(a)に示すように、個々の波に対応して短時間ではあるが繰返し何度も

発生する。また、液状化が 起こる間で、地盤を高密度 化するような力も作用する。 一方、せん断応力による過 剰化と同様に、繰返し波数 状化と同様に、繰返し波数 とともに残留していく。図 - 8(b)に示すように、波 浪の繰返し作用によって過 剰間隙水圧が徐々に増加し ある繰返した時 点で液状化が発生する。こ のように、どちらの成分が



卓越するかによって、液状化の発生する状況が著しく異なる。したがって、これらを明確に区別する意味で、前 者を変動過剰間隙水圧、後者を残留過剰間隙水圧とよぶこともある。実際の海底地盤では、この両成分を重ね合 せたものが全過剰間隙水圧となるが、残留過剰間隙水圧は地盤の排水特性、波浪の周期の影響を強く受ける。

4. 液状化現象に関連する工学的諸問題

(1)洗掘

海洋構造物や防波堤周辺地盤の洗掘は、構造物の安定にとって重要な問題である。洗掘が関係して防波堤が被

- 7 -

災した例は少なくはない。過去の被災防波堤の被災状況(昭和40年~昭和57年の18年間分)によると、被災状況 をパターン別に個数で表した全国数1585のうち、「消波工の散乱・沈下・捨ブロックの散乱」に関連する被災が 623個(全体の約40%)、また、「海底地盤の洗掘」に関連する被災状況が331個(全体の約21%)を占めている ³¹⁾。このような現状にもかかわらず、構造物周辺地盤の波浪による洗掘のメカニズムについては必ずしも明確 ではない。Poseyほか³²⁾は、メキシコ湾の石油掘削リグ周辺地盤の洗掘について興味ある報告をしている。それ によると、洗掘は2種類あるが、杭周辺の大規模な洗掘は波浪の変動によって引き起こされる上向きの浸透流に よるとしている。浸透流(過剰間隙水圧)により地盤が液状化すると、砂は懸濁状態(液体)になることから、 液状化発生時に海底流が存在するとすれば、この流れによって土粒子は容易に浮遊したり輸送されたりする可能 性がある。したがって、地盤の液状化ボテンシャルを予測することができれば、その地盤は洗掘が発生しやすい 地盤かどうかを土質工学的観点から推測することも可能になると考えられる。従来より、洗掘の問題は流体力学 的な観点から地盤表層部近傍のみに焦点があてられてきたが、地盤全体の液状化発生の有無を考慮した洗掘現象 の解明が必要と思われる。

(2)漂砂

漂砂の移動限界水深の推定法として、これまでいくつかの経験式が提案されている。従来の漂砂の取り扱いでは、鉛直方向の力よりも海底地盤面の掃流力(せん断応力)が卓越すると仮定している。しかし、液状化が発生 すればせん断抵抗力は極めて小さくなるから液状化が発生するかどうかは、移動限界水深の推定にあたって重要 な問題である。また、砂の移動限界水深h,に関する既往の公式は、以下の形式で表現されている^{3 3)}。

$$\sinh \frac{2\pi h_{I}}{L} = a \left(\frac{H}{H_{o}}\right) \left(\frac{H_{o}}{L_{o}}\right) \left(\frac{d_{o}}{L_{o}}\right)^{n}$$
(2.20)

ここに、 L。: 沖 波波長、H。:換 算沖波波高、L: 水深 h」での波長、 H:水深 h,での 波高、d.:底質 の粒径である。a、 nは実験定数であ る。この場合、海 底地盤の特性とし ては、底質の粒径 のみしか考慮され ていない。液状化 に起因する砂の移 動を考える場合に ついては、砂地盤 そのものの特性が 変化するから、地 盤特性の変化を考 慮しない既存の公



図-9 実測データと液状化の解析結果(第2回観測、その2)

式をそのまま適用することには疑問もある。同一の砂であっても、透水性、圧縮性、層厚、単位体積重量など液 状化に対する影響要因を考慮した推定法が必要と考えられる。

図-9は、変動過剰間隙水圧による液状化の発生時刻を評価し、砂粒子の舞い上がりとの関連について調べた 現地観測結果である³⁴⁾。この結果によると、海底付近の砂の濃度が大きくなる時刻が液状化の発生時刻(図-9でσ[・]、≤0となる時刻)とほぼ対応することが示されており、砂粒子の舞い上がりと液状化には密接な関連が あることが明らかである。

(3)異形ブロックの沈下

最近の調査で明らかとなった新潟西海岸の 離岸堤の断面を図-10に示す³⁵⁾。図-10に よると、海底面下約10mもの深さまでブロッ クが沈み込んでいることが分かる。これは、 離岸堤の機能を維持するため毎年嵩上げが行 われてきた結果であるが、ブロックの沈下原 因については良く分かっていない。沈下原因 に関しては、30年以上も前にも問題となり、 原因究明のための検討が行われている^{**}。 当時、原因としては、①洗掘による沈下、② 波による堤体の動揺によるゆり込み沈下、③ 堤体下面にそった砂の移動、流出にともなう 沈下の3つが考えられたが、二次元移動床実 験などから、③が主因と結論付けられている。 すなわち、これは、波の谷が来たときに発生 する潜堤内外の水位差によるパイピングによ



り、堤下面に沿う砂の移動が引金となって生じた沈下というもの(パイピング説)である。この結論にもとづき、 有孔ブロック堤、逆T型堤が棄却され、いわゆるテトラボッド堤とよばれるタイプが採用された経緯が報告され ている。しかし、図-10からも明らかなように、テトラボッド堤でさえも完全に沈下を免れることはできなかっ たことが明らかになり、30年経過した現在でも原因については未解明のまま残されているといっても過言ではな い。再度沈下原因について考えるにあたって、パイピング説に貴重な示唆が含まれていることに気付く。すなわ ち、パイピング現象とは、砂が液体状になってパイプ状に地盤から流出する現象であるから、現象そのものは液 状化現象と極めて似たものとなる。したがって、このパイピング説を、さらに掘り下げていくことにより沈下原 因が明らかにされる可能性が有るように思われる。すなわち、海底地盤が液状化すると支持力がなくなり、地盤 上の重量構造物は沈下すると考えられる。

図-11は、変動過剰間隙水圧による捨石マウンド法先地盤の液状化領域を解析し、円形すべり計算により安定 性を調べた結果である³⁷⁾。液状化を考慮すると、液状化の瞬間は、円形すべりに対する安全率が0.9となり1.0 を下回る結果となる。3.2で述べたように、地盤は液状化と高密度化を交互に繰返すので、液状化の瞬間に徐々 に捨石が沈下していく可能性があることが指摘されている。



- 9 -

図-11(a) 液状化領域

図-11(b) 液状化を考慮した円形すべり計算

(4)海底地すべり

Terzaghi^a^a)は、大規模な海底地すべりが液状化によって発生することを報告している。彼は液状化を引き起 こす外力として波浪については言及しなかったけれども、何らかの原因で局所的な液状化が発生することによっ て、大規模な海底地すべりが誘引されると述べている。0kusa and Yoshimura^a)は、波浪の作用によって砂地盤 がすべり破壊を起こすことを理論的に示している。液状化が発生しなくても、過剰間隙水圧が発生することで、 砂地盤のせん断強度は低下することから、このような不安定性も含め地盤の液状化は、海底地すべりと密接な関 連があると考えられる。また、大規模な海底地すべりが、石油掘削リグの被災につながった例もあり、地形変化 の激しい海域における海洋開発では、海底地すべりは工学的に大きな問題となる場合もある。

(5)構造物基礎地盤の破壊

海底地盤が液状化するとせん断強度がなくなる。また、液状化に至らなくてもせん断強度は低下する場合があ ることから、これらの影響を考慮しない海洋構造物等の設計は危険側となる。現在のところ、波浪の繰返しの影 響を考慮した設計に言及しているのは、DNV基準(ノルウェー船級協会; Det Norske Veritas)および杭構造 物において地盤の強度低下を考慮したAPI基準(American Petroleum Institute)がある。波浪による液状化 については、北海のエコフィスクタンク基礎地盤における検討結果²¹および実測結果^{29)・40)}がある。この例で は、海底地盤の波浪による液状化の可能性は小さいという結果が報告されている。この理由として、地盤が極め て密であったこと、排水性が良好であったことが指摘される。一方、我が国の被災防波堤の解析事例²⁾では、シ ルト層に挟まれた砂層中の過剰間隙水圧が上昇し、せん断強度の低下によってすべり破壊が発生した可能性が指 摘されている。砂地盤が緩く堆積し、かつ排水性(大規模な構造物の境界を含めた地盤全体としての排水性)が 低い場合には、液状化の可能性があると考えられる。

(6)海底パイプラインの浮上

海底パイプラインの波浪に対する安定性の検討において、パイプ周辺地盤の応力変動や液状化の問題に取組ん だ報告がなされている⁴¹⁾⁻⁴³。例えば、Silvis⁴³の研究では、810kmのガスパイプライン(外径1.25m)の基礎 地盤の液状化問題が解析的に取り扱われている。この研究では、地盤に直接作用する波浪による応力とパイプに 作用する流体圧による応力によって引き起こされる液状化について検討されているが、結論として、パイプの存 在によって、液状化ポテンシャルが大きくなることが指摘されている。海底パイプラインの波浪に対する安定問 題は、パイプ周辺地盤の洗掘なども大きな問題となっており、液状化の問題ともあわせ、さらに研究の余地があ ると考えられる。

5. あとがき

本文では、波浪に応答して変動する地盤中の過剰間隙水圧に着目して、液状化といった視点から海底地盤のい くつかの現象を見直してみた。ここで示した視点から海底地盤の諸現象をとらえると、従来の流体力学では必ず しも明らかではなかった洗掘や漂砂などの発生メカニズムが、少しは見えてくるのではないかと思われる。本文 では、液状化という言葉でくくった表現を用いているが、液状化に至らなくても過剰間隙水圧の発生によって砂 地盤のせん断強度は低下することから、海底地盤の安定性を検討する場合には、如何に精度良く過剰間隙水圧を 予測するかが重要な課題となる。液状化に関する研究の現状は、どちらかといえば理論的側面からの研究が進ん でいるように見受けられるが、今後、理論に裏付けられた実験、観測などをさらに充実する必要がある。特に、 理論解析に用いるべきパラメターの決定、4. で述べた個々の問題と液状化の関連の検証、液状化後(Post-liq uefaction)の地盤の挙動など、解決すべき課題も多い。波浪による液状化の問題は、実務上極めて重要な課題 であり、設計法の確立に向けて今後の研究の進展を期待するものである。

参考文献

1)大草重康(1984):海底地盤の土質力学、土木学会論文集、第346号、Ⅲ-1、pp.13-21.
 2)善功企(1984):海洋開発における波と海底地盤の動的問題、昭和59年度港研講演会講演集、pp.77-133.
 3)土木学会海洋開発委員会(1991):沿岸域の開発における海底地盤の波浪応答講演会テキスト、pp.1-67.
 4)八嶋 厚、岡二三生、加藤 満(1992):波浪による海底地盤の破壊について一特に液状化現象に着目して-、

善

ウォーターフロント開発に関する土質工学上の諸問題、平成4年度土質工学セミナー、土質工学会中部支部、 pp. 51-90.

- 5)Henkel, D.J. (1970) : The role of waves in causing submarine landslides, Geotechnique, Vol. 20, No. 1. pp. 75-80.
- 6)Wright, S.G. and Dunhum, R.S. (1972) : Bottom stability under wave induced loading, Proceedings of the 4th Offshore Technology Conference, Paper No. 1603, pp. 853-862.
- 7)Bjerrum, L. (1973) : Geotechnical problems involved in foundations of structures in the North Sea, Geotechnique, Vol. 23, No. 3, pp. 319-358.
- 8)田中 仁、首藤 伸夫(1980):波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験、第27回海岸工学講演会論文集、土 木学会、pp.163-167.
- 9)楠田哲也、山西博幸、川添正寿、二渡 了(1988):波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究、第35回海岸 工学講演会論文集、土木学会、pp.352-356.
- 10)柴山知也、中西雅明、石原 肇、佐藤慎司(1987):波による底泥の浮遊機構に関する研究、第34回海岸工 学講演会論文集、土木学会、pp.271-275.
- 11) 運輸省港湾局監修(1989):港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会
- 12) 土木学会編(1973):海洋鋼構造物設計指針(案)解説、土木学会
- 13)Bishop, A.W. (1973) : The influence of an undrained change in stress on the pore pressure in porous media of low compressibility, Geotechnique, Vol.23, No. 3, pp. 435-442.
- 14)Skempton, A.W. (1960a) : Effective stress in soils, concrete and rocks, Proceedings of the Conference on Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 4-16.
- 15)Skempton, A.W. (1960b) : The pore-pressure coefficient in saturated soils.
- Correspondence to Geotechnique, Vol.10, No.4, pp.186-187.
- 16)Yamamoto, T. (1977) : Wave-induced instability in seabeds, Proceedings of the ASCE Special Conference. Coastal Sediments, pp. 898-913.
- 17)井上令作(1975): 飽和度の高い砂層における間隙水圧の伝ば、土木学会論文報告集、第236号、pp.81-92.
- 18) Tsui, Y. and Helfrich, S.C. (1983) : Wave-induced pore pressures in submerged sand layer, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 109, No. GT4, pp. 603-618.
- 19)Okusa, S., Nakamura, T. and Fukue, M. (1984) : Measurements of wave-induced pore pressure and coefficient of permeability of submarine sediments during reversing flow, Proceedings of the IUTAM 83 Symposium, Seabed Mechanics, pp.113-122.
- 20)Maeno, Y. and Hasegawa, T. (1985) : Evaluation of wave-induced pore pressure in sand layer by wave steepness, Coastal Engineering in Japan, Vol. 28, pp. 31-44.
- 21) 善功企、山崎浩之、渡辺 篤(1987):海底地盤の波浪による液状化および高密度化、港湾技術研究所報告、第26巻、第4号、pp.125-180.
- 22)善功企、山崎浩之、佐藤 泰(1989):海底地盤の波浪による液状化-現地観測および解析-、港湾技術 研究所報告、第28巻、第3号、pp.29-57.
- 23)Madsen, O.S. (1978) : Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed, Geotechnique, Vol. 28, No. 4, pp. 155-164.
- 24)Nago, H. (1981) :Liquefaction of highly saturated sand layer under oscillating water pressure, Memories of the School of Engineering, Okayama University, Vol.16, No.1, pp.91-104.
- 25)Okusa, S. (1985) : Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol. 35, No. 4, pp. 517-532.
- 26)Zen, K., Yamazaki, H. and Lee, I.K. (1991) : Wave-induced liquefaction and instability of breakwaters, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development, Vol. 1, pp. 673-678.

- 27)Lee, K.L. and Focht, J.A. (1975) : Liquefaction potential at Ekofisk Tank in North Sea, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, No.GT1, 1975, pp.1-18.
- 28)Rahman, M.S., Seed, H.B. and Booker, J.R. (1977) : Pore pressure development under offshore gravity structures, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT12, pp. 1419-1436.
- 29)Clausen, C.J.E., Dibiagio, E., Duncan J.M. and Andersen, K.H. (1975) : Observed behavior of the Ekofisk Oil Storage Tank foundation, Proceedings of the 7th Annual Offshore Technology Conference, Vol. 3, pp. 399-413.
- 30)梅原靖文、善功企、小黒良則(1979):波力を受ける防波堤基礎地盤の液状化に関する模型実験、第14回 土質工学研究発表会概要集、 土質工学会、 pp.1317-1320.
- 31) 善功企(1991): 消波ブロックが沈む、みなとの防災、港湾海岸防災協議会、No.110、pp.24-28.
- 32)Posey, C. J. (1971) : Protection of offshore structures against underscour, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 97, No. HY7, pp. 1011-1016.
- 33)石原藤次郎編(1972):水工水理学、丸善株式会社
- 34) 鶴谷広一、椎住智昭(1990): 砕波帯における底質の流動化と浮遊について、海岸工学論文集、第37巻、土 木学会、pp. 289-293.
- 35)西田仁志、山口 豊、近藤豊治、清水謙吉(1985):孔間弾性波探査法による離岸堤の埋没状況に関する考察、第32回海岸工学講演会論文集、土木学会、pp.365-369.

36)第一港湾建設局(1987):新潟西海岸における侵食対策の歴史-技術的検討の系譜-、第一港湾建設局資料 37)善功企(1990):波浪による海底地盤の液状化現象、平成2年度港研講演会講演集、pp.1-49.

- 38)Terzaghi, K. (1957) :Varieties of submarine slope failures, Norwegian Geotechnical Institute Publication, No. 25, pp. 1-16.
- 39)Okusa, S. and Yoshimura, M. (1987) : Wave-induced instability in sandy submarine sediments, Soils and Foundations, Vol. 27, No. 4, pp. 62-72.
- 40)Lee, K.L. (1976) : Predicted and measured pore pressures in the Ekofisk Tank foundation, Proceedings of the 1st International Conference on the Behaviour of Offshore Structures, Vol.2, pp. 384-398.
- 41)Christian, J.T., Taylar, P.K., Yen, J.K.C. and David, R.E. (1974) : Large diameter underwater pipeline for nuclear power plant designed against soil liquefaction, Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference, Paper No. 2094, pp. 597-606.
- 42)Mei, C.C. and Foda, M. (1981) : Wave-induced stresses around a pipe laid on a pore-elastic sea bed, Geotechnique, Vol. 31, No. 4, pp. 509-517.
- 43)Silvis, F. (1990) : Wave induced liquefaction of seabed below pipeline, Proceedings of the 4th Young Geotechnical Engineers' Conference, Delft.