

波浪場にある海洋構造物—地盤系の支持力安定性を 支配する要因とその評価法

三浦清一*・川村志麻**・柴田泰孝***・横浜勝司****

1. ま え が き

波浪場にある海洋構造物—地盤系では、外力の作用方向およびその大きさ、また地盤条件の相違によって破壊形態は種々変化する。それゆえ、破壊形態に適した安定性評価に関する研究が必要となる。

本研究では、二次元平面ひずみ模型土槽装置を用いて一連の静的および繰返し載荷試験を行い、波浪のような組合せ荷重を受ける構造物支持地盤の支持力安定性を支配する要因について調べた。特に構造物支持地盤では、その地盤の支持力は堆積構造特性、特にその異方性の影響を強く受けることから、ここでは海洋構造物のような偏心・傾斜荷重が作用する場合の構造異方性の影響を定量化している。得られた実験結果に基づいて、防波堤のような構造物—地盤系の安定性を適切に評価可能な破壊基準式を提案している。次いで、支持力算定式として用いられている現行の Bishop 法に堆積構造異方性の影響を導入する方法を検討している。

2. 試験装置と方法

2.1 試験装置と模型地盤

本研究で用いた試験装置の全体図を図-1に示す。模型土槽の内寸法は幅 2000 mm、高さ 700 mm、奥行き 600 mm である。載荷装置は、繰返し載荷装置(鉛直方向、水平方向)および構造物周辺地盤の変動水圧を再現するための変動圧載荷装置と静的載荷装置である。なお、静的載荷試験装置の詳細は川村ら(2001)に詳しい。

各載荷試験では、ペロフラムシリンダーからの荷重を模型構造物に任意に載荷できるようになっている。また静的載荷試験では、載荷位置を変化させることにより偏心載荷も可能である。鉛直方向および水平方向の繰返し載荷装置には、それぞれ 2 組の変位計とロードセルが具備されており、模型構造物の変位量と作用する荷重が随時測定できるようになっている。

堆積構造異方性を有する地盤は、図-1に示す模型土

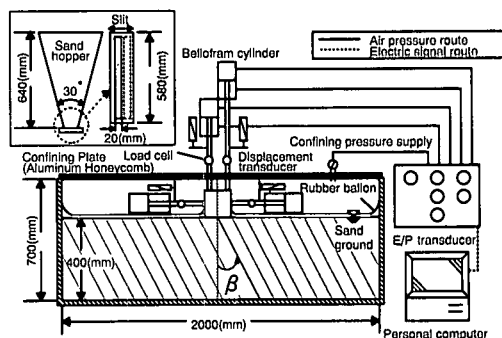


図-1 二次元平面ひずみ模型土槽装置

槽を目標とする堆積角 β になるように傾斜させ、豊浦砂 ($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmx} = 1.658 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmin} = 1.354 \text{ g/cm}^3$) をサンドホッパーから空中落下させることによって作製されている(川村ら, 2001)。本研究では、堆積角、すなわち鉛直方向と地盤の堆積面となす角 β が、90, 75, 60, 55°になるようにしている。なお、地盤厚は $H_s = 400 \text{ mm}$ である。その後、土槽底部より地盤構造を乱さないようにゆっくりと通水し模型地盤の飽和化を計った。用いた模型構造物の仕様は、幅 100 mm、高さ 100 mm、奥行き 580 mm、重量 0.127 kN である。構造物には、模型地盤との接触面を完全粗とするために底面にサンドペーパー (G 120) が貼付けられている。これらの装置および模型地盤を用いて一連の試験を行った。

2.2 試験方法

本研究では、堆積構造異方性が地盤の支持力特性に与える影響と波浪のような荷重条件下の破壊基準を調べるために、以下のような模型試験を行っている。

・静的中心 (SCL), 偏心載荷試験 (SEL): 地盤の支持力安定性におよぼす異方性の影響を調べるために行われた。地盤がすべり破壊を起こすまで、静的荷重を載荷している。また、荷重の偏心率 e/B (荷重の偏心距離を構造物の幅で除した値) が 0, 0.15, 0.3, 0.5 になるように載荷されている (図-2(a) および (b) 参照)。

・繰返し載荷試験 (CVL, CEL): 基本的な繰返し荷重を受ける構造物—地盤系の変形挙動を調べるために、構造物に半正弦波荷重を載荷している (図-2(c) および (d))

* フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科

** 正 会 員 工博 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科

*** 学生会員 室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻

**** 正 会 員 工修 専修大学北海道短期大学講師 土木科

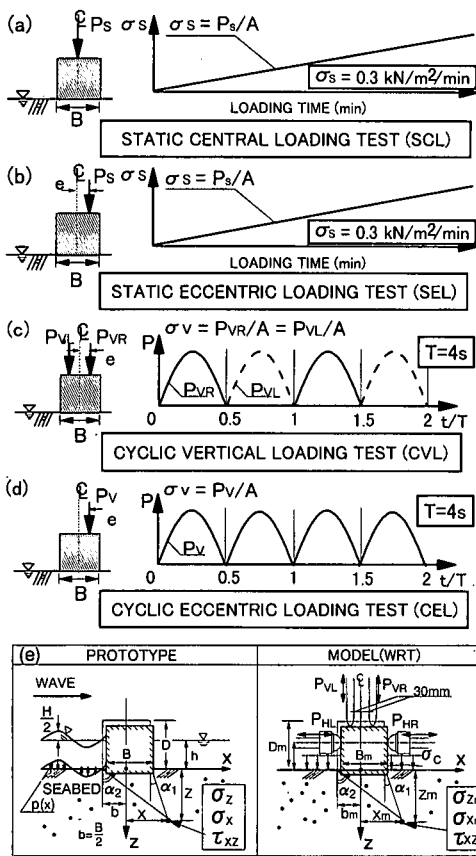


図-2 各試験の荷重方法

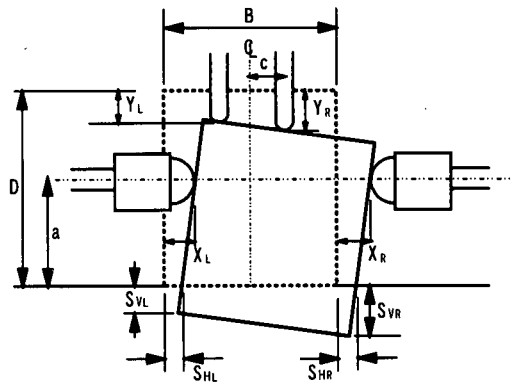


図-3 変位量の定義

方の変位量を $S_{V \text{ major}}$, $S_{H \text{ major}}$ とした。本研究では構造物の沈下量 $S_{V \text{ major}}$ を構造物の幅 B により正規化した沈下量比 $S_{V \text{ major}}/B$ を用いて、構造物の沈下挙動を評価している。

3. 試験結果と考察

3.1 繰返しおよび静的載荷を受ける地盤の支持力特性

基本的な繰返し荷重を受ける構造物—地盤系の繰返し強度を調べるために、図-4 は CVL 試験での繰返し応力 σ_v と、沈下量比 $S_{V \text{ major}}/B=3\%$, 5% , 10% に至るまでの繰返し回数 N_c との関係を示したものである。地盤の相対密度 D_r は 50% および 80% である。図より、繰返し強度 σ_{vu} は地盤密度の影響を受けているが、繰返し応力と所定の沈下量比に至るまでに必要な繰返し回数との間には一義的な関係が存在していることが明かである。ここで、繰返し荷重を受ける地盤の繰返し強度を、図中の各曲線が収束する点の応力値 σ_{vu} として定義し、以下の考察に用いた。

図-5 は、CVL 試験と同様に、WRT 試験における構造物底部中心に生じたモーメント M と、沈下量比 $S_{V \text{ major}}/B=3\%$, 5% に至るまでに必要な繰返し回数 N_c との関係を示したものである。WRT 試験では波の周期 10 s 、水深 15 m と想定して試験を行っている。なお想定した波高の大きさは図中に記載されている。これより、繰返し水平荷重が載荷された場合においても CVL と同様な結果が得られていることがわかる。構造物に生じるモーメント M が小さくなるにつれて、所定の沈下量比に達するまでの繰返し回数 N_c が増加するようである。また、地盤密度の相違による繰返し強度と回数との関係の変化はあまり見られない。そこで、CVL 試験と同様に各曲線の収束する点のモーメント値を WRT 試験での繰返し強度として評価した。WRT 試験での繰返し強度として、 $M=5.7\text{ N}\cdot\text{m}$ が得られている。

2.3 各変形量の測定および変位の定義

図-3 は、構造物—地盤系の変形特性を定量化するための変位量の定義を示している。繰返し鉛直および水平載荷装置に設置されている変位計により、測定される水平および鉛直方向の左右の変位測定量をそれぞれ (X_L , X_R) および (Y_L , Y_R) として、幾何学的関係 (三浦ら, 1996) から構造物の沈下量 S_{VL} , S_{VR} および水平移動量 S_{HL} , S_{HR} を算出している。ここでは、それぞれ卓越する

参照)。なお荷重の繰返し回数 N_c は 2000 回までとした。
 ・波浪場の応力状態を考慮した繰返し載荷試験 (WRT)：波浪場にある地盤の任意要素点の応力状態を再現させるために行った試験である (川村ら, 1999)。この試験法では、繰返し鉛直および水平荷重、さらに構造物周辺の地盤に載荷させる変動圧を適切に組合せて載荷させている (図-2(e) 参照)。この試験結果から、波浪のような繰返し荷重を受ける地盤の支持力・変形特性を評価することが可能である。なお、荷重の繰返し回数 N_c は CVL, CEL 試験と同様に 2000 回までとしている。以上のような一連の模型試験を行い、構造物—地盤系の支持力安定性を評価する方法を検討した。

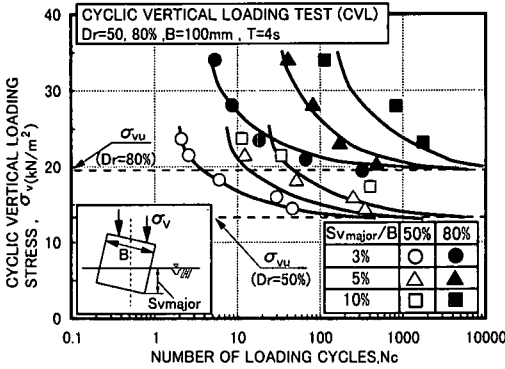


図-4 繰返し載荷 (CVL) 試験の繰返し強度

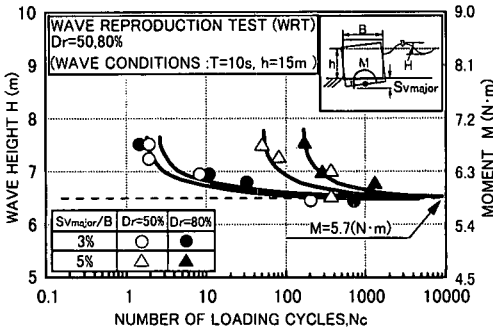


図-5 波浪力を再現した試験 (WRT) の強度特性

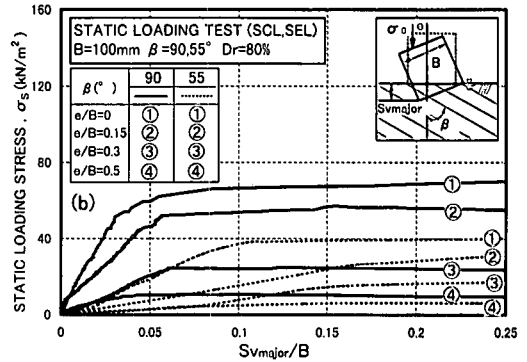
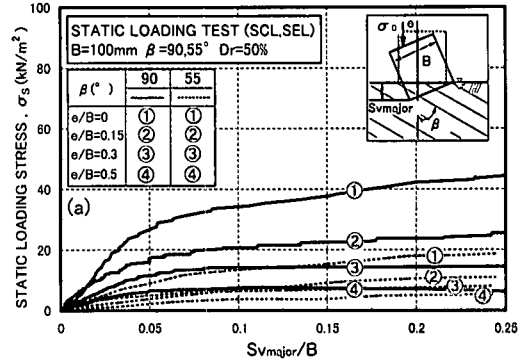


図-6 静的中心、偏心載荷 (SCL, SEL) 試験における構造異方性が支持力特性に与える影響: (a) $D_r=50\%$, (b) $D_r=80\%$

一方、静的載荷条件での地盤の支持力特性は以下のようである。図-6(a) および (b) は、種々の異方性地盤に対する載荷応力と沈下量比の関係の代表的な結果について示したものである。堆積異方性の違い ($\beta=90^\circ, 55^\circ$) によって、支持力値は変化している。このことは中心載荷条件や偏心載荷条件の違いに関わらず認められるが、偏心度が高くなることによってその傾向は小さくなるようである。このことから、波浪場にある構造物のように偏心荷重が作用するような荷重条件においても、地盤の構造異方性の影響は極めて重要であることが伺える。

3.2 波浪場にある構造物支持地盤の堆積構造異方性の影響を考慮した破壊基準

繰返しおよび静的荷重を受ける地盤の強度を評価するために、構造物底部中心に発生したモーメント M を構造物の幅 B で正規化した M/B と鉛直力 V の関係の整理を行った (図-7(a) および (b) 参照)。なお、鉛直力 V は地盤の繰返し強度 σ_{vu} および極限支持力 σ_{su} と構造物底面積の積で算出されている。

両図より、繰返しおよび静的の載荷方法および地盤密度に関わらず $M/B-V$ 関係は、ユニークな破壊包絡線によって表現されることがわかる。WRT 試験のように、水平方向の荷重が卓越するような場合においても破壊包絡

線にプロットできることが明かである。このことから、波浪のような繰返し鉛直および水平荷重を受ける構造物—地盤系の支持力特性は、放物線形状を有する破壊包絡線により評価可能であると言える。

次に、異方性の影響による破壊包絡線の形状変化を検討した。図中には、異方性の度合いが異なる4つの地盤に対する結果も併せてプロットしている。異方性の影響の相違によってその形状の大きさは変化するようであるが、両図ともに同様の放物線形状が得られている。このことは、 $M/B-V$ 関係の整理法は異方性の影響も合理的に評価可能であることを示唆するものである。過去の研究 (横浜ら, 2000) より、この関係は構造物の幅の影響も考慮できることが明らかにされている。

これらの関係を表現すると、以下の形式となる。

$$\left(\frac{H}{t_n}\right)^2 + \left(\frac{M}{B \cdot t_m}\right)^2 - a \left(\frac{M}{B \cdot t_n \cdot t_m}\right)^2 = \left[\frac{V}{V_{\max}}(V_{\max} - V)\right]^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M, V, H は構造物底部中心に作用するモーメント、鉛直力および水平力 (繰返しおよび静的載荷試験では $H=0$) であり、 $V_{\max}$ は破壊包絡線中の最大の鉛直力

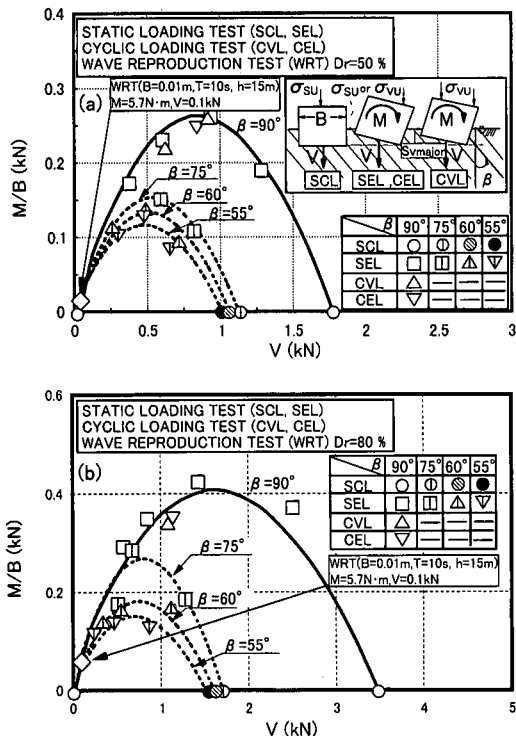


図-7 波浪のような繰返し荷重を受ける構造物—地盤系の破壊基準: (a) $D_r=50\%$, (b) $D_r=80\%$

V を示す。また B は構造物の幅、 t_m , t_n , a は破壊包絡線の形状と大きさを表す係数である。

以上のことから、海洋構造物のような複雑な組合せ荷重条件下にある構造物—地盤系の支持力特性は、異方性の影響や載荷条件の違い（静的あるいは繰返し）および地盤密度の変化に関わらず、 $M-V-H$ 空間（本研究では $M-V$ 空間）で評価可能であり、本提案式は安定性評価の1つの指標として有用であると言える。

3.3 支持地盤における堆積構造異方性の影響の定量化

次に、支持力におよぼす構造異方性の影響の定量化を試みた。既往の研究（例えば Oda・Koishikawa, 1979; 木村ら, 1982）では、支持力におよぼす堆積構造異方性の影響は、ある堆積角 β で著しくなることが明らかにされている。しかしながら、これらの研究では載荷条件が中心載荷であるために、海洋構造物のような偏心荷重が生じるような条件では未だ解明されていないのが現状である。本研究では、中心載荷または偏心載荷のような載荷条件の違いに関わらず、地盤破壊は塑性くさびの形成→塑性流動域の発達というすべり破壊が起こるものとした上で、支持力に与える異方性の影響を定量化した。

Oda・Koishikawa (1979) は、堆積構造異方性は最大主応力の方向と堆積角との間に一義的な関係があること

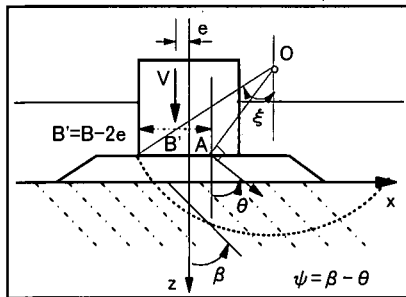


図-8 構造物に作用する力の方向 θ と堆積角 β の関係

を見出ししている。本研究では、地盤のすべり破壊を起こす力の方向と堆積角との関係として整理を試みた。以下、その定義について述べる。

偏心荷重のみが作用する場合、Meyerhof の概念に基づけば有効幅 B' に鉛直荷重 V が作用することになる。荷重の増加後、図-8 に示すように円弧すべり破壊を起こすものとすれば、この中心点 O に関する臨界角 ξ は、上界法によると偏心度 e には依存せず、 $\xi=66.8^\circ$ になる。すべりの変位速度方向を力の作用方向と考えて、各偏心度に対する力の作用方向を図-8 に示すように仮定した。すなわち、力の作用方向は鉛直方向から θ なる角度を有することになる。一般に、波浪場にある構造物—地盤系では鉛直、水平荷重が作用するため、外力の合力は傾斜荷重として構造物支持地盤に作用する。外力の合力の大きさや方向の違いによって破壊形態（円弧すべりを生じる）が変わらないとすれば、偏心荷重場においてもこの仮定は適用可能である。ここでは簡便化のために偏心荷重のみが作用するものとして上述のような方法考えた。

この作用方向角 θ と堆積角 β の差を相対角 ψ とし、異方性を定量化するパラメータとして以下の議論に用いている。

図-9 は、相対角 ψ と支持力変化率との関係を示している。地盤密度 D_r は 50, 80% である。支持力の変化率は、各載荷条件および異方性地盤の支持力値を $\beta=90^\circ$ の地盤で $e/B=0$ の載荷条件下の支持力値に対して正規化表示をしている。また図中には、各地盤に対する支持力値を Terzaghi の支持力解から逆算し、算出した内部摩擦角 ϕ も併記している。図より ψ と支持力変化率の間には載荷条件の有無によらず、一義的な関係が認められる。従来、偏心や傾斜荷重のような荷重条件の相違を同一条件下で評価することは困難であったが、この関係を用いれば、任意の異方性地盤の支持力を統一的に評価可能となる。

そこで、支持力算定式に異方性の影響を取入れる簡便法について検討した。現行の設計では、支持力安定性は

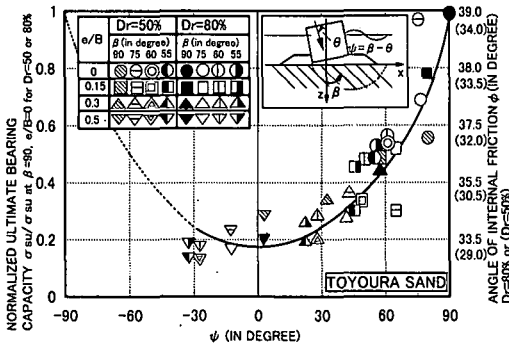


図-9 異方性の影響が与える支持力の変化率と相対角 ϕ の関係

設計法を構築する必要が迫られている(長尾, 1998)。破壊確率論から得られた定量的なパラメータを設計法に導入することによって、より適切な評価法が確立されると言えよう。しかしながら、地盤に対する強度特性およびこのような海洋構造物-地盤系の破壊のメカニズムの把握は未だ限られており、個々の現象に対する解明が必要である。

4. 結 論

一連の模型試験結果と考察から、以下のような結論が得られた。

(1) 波浪のような繰返し荷重条件下にある構造物-地盤系では $M-V$ 空間の破壊基準を用いることによって、支持力を適切に評価できる。これらの破壊基準は、地盤の異方性や地盤の密度を考慮できる式としても有用である。

(2) 地盤材料の異方性の影響を力の作用方向と内部摩擦角との関係によって定量化した。従来より、異方性の影響は偏心や傾斜荷重のように荷重条件の相違がある場合は定量化されていなかったが、提案した本算定式を用いることによって、簡便に異方性の影響を支持力算定式に考慮できる。

参 考 文 献

川村志麻・三浦浩一・横浜勝司・宮浦征宏 (1999): 繰返し力を受ける構造物支持地盤の破壊とその防止策に関する実験, 土木学会論文集, No. 624/III-47, pp. 77-89.
川村志麻・三浦浩一・横浜勝司 (2001): 波浪力を受ける海洋構造物支持地盤の異方性を考慮した側方変形の推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1011-1015.
木村 孟・斉藤邦夫・日下部治・司代 明 (1982): 砂地盤の支持力ならびに変形性状に対する異方性の影響について, 土木学会論文報告集, No. 319, pp. 105-113.
港湾施設の技術上の基準・同解説検討委員会 (1999): 港湾施設の技術上の基準・同解説
長尾 毅 (1998): 信頼設計法の適用に関する諸問題, 港湾技術研究所講演会講演集, 運輸省港湾技術研究所, pp. 23-42.
三浦浩一・川村志麻・田中則男 (1996): 波浪を受ける消波構造物・地盤系の流動破壊とその評価, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1016-1020.
横浜勝司・三浦浩一・川村志麻・宮浦征宏 (2000): 波浪力のような繰返し荷重場にある構造物-地盤系の安定性評価に関する実験, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 936-940.
Oda, M. and I. Koishikawa (1979): Effect of strength anisotropy on bearing capacity of shallow footing in a dense sand, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 3, pp. 16-28.

Bishop 法によって議論されている。すなわち、以下のような式で表される(港湾施設の技術上の基準・同解説, 1999)。

$$F = \frac{\sum \left\{ [c' b + \tan \phi' (W' + q)] \frac{\sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi')/F} \right\}}{\sum (W' + q) \sin \alpha + \frac{1}{r} \sum H a} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 c' :有効応力に基づく見かけの粘着力 (kN/m), b :分割細片の幅 (m), W' :分割細片の重量 (kN/m), q :分割細片に作用するサーチャージ (kN/m), ϕ' :内部摩擦角 (rad), α :分割細片の底面となす角 (rad), H :水平荷重 (kN/m), a :水平荷重のアーム長 (m), r :すべり円弧の半径 (m) である。

上式の内部摩擦角 ϕ' に異方性の影響による ϕ の低下を取り入れることによって、初期構造異方性の影響は考慮可能となる。図-9の実験結果より、支持力(内部摩擦角 ϕ)と異方性の影響の関係は、 ψ との関係として以下のようなになる。

$$\phi = \frac{\phi_{\beta=90^\circ}^2}{(\sin^2 \psi + (A \cdot \cos \psi)^2)^{0.5}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $\phi_{\beta=90^\circ}$ は $\beta=90^\circ$ の地盤の ϕ を、 ψ は相対角を示す。 A は地盤密度に依存する係数であり、例えば $D_r=50$, 80%では 1.07 と 1.15 になる。このように、原位置のサンプリング情報によって、異方性の度合いが明らかになれば、容易に算定式に導入することができ、さらに適切な安定性評価が可能である。

一方、海洋構造物の安定性評価では、系全体としての