# 海底地盤からのサンプリングに伴う応力変化が 強度特性に及ぼす影響

Strength expression mechanism of sampling specimens taken from the sea floor

中谷 奈央<sup>1)</sup> Nao Nakatani 杉山 友理<sup>2)</sup> Yuri Sugiyama 飯塚 敦<sup>3)</sup> Atsushi Iizuka

概要:近年,新たな海洋資源の発見や,多発する大規模地震をきっかけに, Marine Geotechnologyのさらなる発展が期待 されている.そのためには、大深度海底粘土の力学特性を正確に評価する必要がある.しかし、海底粘土試料の採取は非 常に困難であり、採取試料は拘束圧解放に伴う乱れの影響を大きく受けていると考えられる.そこで本論文では、サンプ リング試料の応力変化が強度特性に及ぼす影響について検討を行った.初めに、気体の溶解現象を考慮した数理モデルを 組み込んだ有限要素解析プログラムを用いて、応力解放に伴う不飽和化シミュレーションを行い、応力解放後を初期とし、 三軸試験シミュレーションを行うことで、応力解放を受けた試料の非排水強度を求めた.その結果、応力解放を受けた試 料は、深海底地盤の安定性評価に大きく影響を及ぼす可能性があることが分かった.

キーワード:不飽和土,溶解気体,非排水せん断強度,構成モデル,サンプリング試料の乱れ,UU試験

## 1. はじめに

1914年に発見されたベネズエラ、マラカイボ湖における油田開発をきっかけにMarine Geotechnologyが発展した. それから約100 年が経った現在、新たな海洋資源の発見や、多発する大規模地震をきっかけに、資源採取のためのインフラ保全、津波などにつな がる大規模な海底地形変動予測などの目的で、Marine Geotechnologyのさらなる発展が期待されている.現在注目されている深海底 地盤は軟弱粘土であり、減圧法によるメタンハイドレート開発やプレートの沈み込みが、周辺地盤の強度特性にどのような影響を 及ぼすか未解明である. そのため、今後Marine Geotechnologyを発展させるためには、大深度海底粘土の力学特性を正確に評価する 必要がある.力学特性の把握には海底粘土試料を用いた土質試験を行う必要があるが、試料の採取は非常に困難であり、試料を採 取することができても,採取試料は拘束圧解放に伴う乱れの影響を大きく受けていると考えられる.粘土試料のサンプリングに伴 う有効応力変化については、Skempton and Sowa (1963)に始まり、Ladd and Lambe (1963)、Noorany and Seed (1965)などの研究がある. これらの研究で、試料の有効応力が変化する原因は、海底地盤は飽和状態であり、除荷重は全て間隙水圧が受け持つことから、機 械的な乱れによるものであると考えられてきた.しかし,既往の研究<sup>1)</sup>で,サンプリング試料の残留有効応力が予想外に小さくなる という実測結果があることから、サンプリングに伴い不飽和化が生じたために有効応力が変化したのではないかと考えられる.採 取試料が不飽和であるとせん断試験結果に大きく影響を及ぼし、原位置強度を誤って評価してしまうことになる. そこで本論文で は、サンプリング時の応力解放に伴う不飽和化を考慮した応力変化について検討することを研究目的とする。不飽和化が生じる原 因として、溶解空気の放出が挙げられる. 海底地盤は超高圧下に存在し、メタンハイドレート層の存在からも分かるように、溶解 空気を多く含むと考えられる。溶解空気が試料採取時の拘束圧減少に伴い放出することで不飽和化が生じると考えた。溶解空気放 出による不飽和化を表現するためには、二相系から三相系への相変化を表現できる数理モデルの構築が必要である.構築した数理 モデルを用いて、拘束圧除荷過程をシミュレートすることで、サンプリング時の応力解放に伴う不飽和化及び応力変化について検 討する.また、サンプリング試料の応力変化が強度特性に及ぼす影響についても検討するため、応力解放後を初期とし、三軸試験 シミュレーションを行うことで、応力解放を受けた試料の非排水強度について調べる.

# 2. 空気の溶解を考慮した数理モデル

Borja<sup>7</sup>は三相混合体理論を用いて不飽和土の構成モデルを提案しており、金澤<sup>9</sup>はそれに倣って土/水/空気連成問題として定式 化を行っている.しかしながら、これらの方法では、高飽和度領域で境界値問題を解くと、空気相が封入され、過剰な空気圧変化 が計算され、計算が不安定になるという問題点がある.また、実際の空気は圧力に応じて液相への溶解が生じることも考慮できて いない.そこで、本研究では空気相の液相への溶解を考慮した数理モデルを提案する.

#### (1) 連続条件式

混合体理論に基づき、地盤材料を多相混合体としてモデル化した.間隙気体と溶解気体について、それぞれ状態方程式及びヘン リーの法則が成り立つと仮定した.気体の状態方程式より、

$$p_{a}V_{a} = \frac{m_{a}}{M^{*}}R^{*}T$$
 (1a)  

$$\rho_{a} = \frac{m_{a}}{V_{a}} = \frac{p_{a}M^{*}}{R^{*}T}$$
 (1b)  

$$\overline{\rho}_{a} = \frac{m_{a}}{V} = n(1-S_{r})\frac{p_{a}M^{*}}{R^{*}T}$$
 (1c)

のように、気体の密度として表すことができる.ここで、 $\rho_a$ は気体の実密度、 $\bar{\rho}_a$ は気体の部分密度、 $m_a$ は気体の質量、 $V_a$ は気体の体積、 $R^*$ は気体定数、 $M^*$ は物質量、Tは絶対温度、 $p_a$ は空気圧である.また、液相への溶解を考慮して、ヘンリーの法則より溶解気体の密度は、

$$m_{la} = k_h p_a V_w$$
(2a)  

$$\rho_{la} = \frac{m_{la}}{V_w} = k_h p_a$$
(2b)  

$$\overline{\rho}_{la} = \frac{m_{la}}{V} = n S_r k_h p_a$$
(2c)

のように与えられる.ここで、 $\rho_{la}$ は溶解気体の実密度、 $\bar{\rho}_{la}$ は溶解気体の部分密度、 $m_{la}$ は溶解気体の質量、 $V_w$ は液相の体積、 $k_h$ はヘンリー定数である.本来、相変化に伴い温度変化が生じると考えられるが、本研究では温度変化はないものと仮定し、また、溶解気体はイオンとして存在するため体積をもたず、溶解しても液相の体積変化はないものと仮定している.

固相,液相,気相(溶解気体を含む)それぞれの質量保存則を以下のように示す.添え字 $\alpha = s, f, a, la$ で,各相の変数を区別する.

$$\dot{\overline{\rho}}_{\alpha} + \overline{\rho}_{\alpha} \operatorname{div}_{a} = 0 \ \left(\overline{\rho}_{\alpha} = \phi_{\alpha} \rho_{\alpha}\right) \tag{3}$$

ここで、 $\bar{\rho}_{\alpha}$ は部分密度、 $\rho_{\alpha}$ は実密度、 $v_{\alpha}$ は相の実速度、 $\phi_{\alpha}$ は体積占有率を表す.また、ドットは増分を表す.固相と液相の質量保存則より液相の連続条件式は、

$$\dot{n}S_r\rho_w + n\dot{S}_r\rho_w + nS_r\rho_w \text{div}\boldsymbol{v}_w = 0 \tag{4}$$

が得られる.ここで、nは間隙率、 $S_r$ は飽和度である. 固相と気相の質量保存則と、式(1c)、(2c)より気相の連続条件式は、

$$-(1-S_r)\dot{\varepsilon}_v - n\dot{S}_r + \frac{n(1-S_r)}{p_a}\dot{p}_a + \text{div}\boldsymbol{v}_a$$

$$-\frac{S_rk_hp_a}{\rho_a}\dot{\varepsilon}_v + \frac{nk_hp_a}{\rho_a}\dot{S}_r + \frac{nS_rk_h}{\rho_a}\dot{p}_a + \frac{k_hp_a}{\rho_a}\text{div}\boldsymbol{v}_w = 0$$
(5)

が得られる. 空気及び水の出入りがある場合,ダルシー則より,

$$\tilde{\mathbf{v}}_{w} = -k_{w}k_{rw} \cdot \operatorname{grad} h \qquad (6a)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_{a} = -k_{a}k_{ra} \cdot \operatorname{grad} h_{a} \qquad (6b)$$

$$h_{a} = \frac{P_{a}}{\rho_{w}g} \qquad (6c)$$

$$k_{rw} = S_{e}^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left(1 - S_{e}^{\frac{1}{m}}\right)^{m} \right]^{2} (6d)$$

$$k_{ra} = \left(1 - S_{e}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - S_{e}^{\frac{1}{m}}\right)^{2m} (6e)$$

である. ここで、 $\tilde{v}_w$ 、 $\tilde{v}_a$ はそれぞれ液相、気相の固相に対する相対速度、 $\varepsilon_v$ は土塊の体積ひずみ、 $p_a$ は間隙空気圧、  $k_w$ は飽 和透水係数、 $k_{rw}$ は比透水係数、 $k_a$ は絶乾透気係数、 $k_{ra}$ は比透気係数、hは全水頭、 $h_a$ は空気圧力水頭、mは Mualem 係数 <sup>9</sup> である. 式(6d)、(6e)は van Genuchten<sup>10</sup>によって提案された比透過係数である.

# (2) 構成関係と水分特性曲線

不飽和土の構成モデルには、大野ら 10の提案するモデルを用いた. 有効応力は次式で表される

$$\begin{aligned} \mathbf{\sigma}' &= \mathbf{\sigma}_{net} + p_s \mathbf{1} = \mathbf{\sigma}_{net} + S_e s \mathbf{1} \text{ (7a)} \\ \mathbf{\sigma}_{net} &= \mathbf{\sigma}^{T} - p_a \mathbf{1} \text{ (7b)} \\ s &= p_a - p_w \text{ (7c)} \\ S_e &= \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \text{ (7d)} \end{aligned}$$

ここで、 $\sigma'$ は有効応力テンソル、 $\sigma_{net}$ はネットストレステンソル、 $p_s$ はサクション応力、1は二階単位テンソル、 $S_e$ は有効飽 和度、sはサクション、 $\sigma^{T}$ は全応力、 $p_w$ は間隙水圧、 $S_{re}$ は限界飽和度である。降伏関数は、次式で与える。

$$f\left(\mathbf{\sigma}', \zeta, \varepsilon_{v}^{p}\right) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_{v}^{p} = 0$$
(8a)  

$$\zeta = \exp\left[\left(1 - S_{e}\right)^{n_{v}} \ln a\right]$$
(8b)  

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_{0}}$$
(8c)  

$$p' = \frac{1}{3}\mathbf{\sigma}' : \mathbf{1}$$
(8d)  

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}\mathbf{\sigma}_{\mathbf{D}} : \mathbf{\sigma}_{\mathbf{D}}}$$
(8e)  

$$\mathbf{\sigma}_{\mathbf{D}} = \mathbf{\sigma}' - p'\mathbf{1}$$
(8f)

ここで、 $\varepsilon_{\nu}^{p}$ は塑性体積ひずみ、Mは限界状態におけるq/p'、Dはダイレタシー係数、 $a \ge n_{s}$ は不飽和化に伴う降伏応力の増加を表すパラメーター、 $\lambda$ 、 $\kappa$ はそれぞれ圧縮、膨潤指数、 $\sigma_{p}$ は偏差応力テンソルである.

水分特性曲線モデルには、ヒステリシス表現が可能な河井ら<sup>12</sup>のモデルを用い、次式で表される杉井、宇野<sup>13</sup>のロジスティック 曲線式を適用した.

$$\frac{S_r - S_{ra}}{S_{rf} - S_{ra}} = \frac{1}{1 + \exp(A + B\log_e \frac{s}{s_0})}$$
(9a)

ここで、 $S_{ra}$ は $s \rightarrow \infty$ のときの収束飽和度、 $S_{rf}$ は $s \rightarrow 0$ での飽和度、 $S_{ra}$ はA, Bは形状パラメータ、 $s_0$ は単位サクションである.

3. 応力解放シミュレーション

### 3.1 水深の違い

採取深度が深いほど、サンプリング試料の飽和度が小さくなるという実測データから、本節では水深が異なる試料を採取した場合の飽和度変化及び応力変化について検討する.ここでは採取する海底深度が同じで、水深だけが異なるケースについて調べるため、海底深度100mで、水深が20,500,1000mからそれぞれ採取する場合を想定し、想定採取試料をそれぞれ h20,h500,h1000とする. 原位置でかかる拘束圧を静水圧と等しいと仮定し、拘束圧が0kPaになるまで非排気非排水条件で等方除荷する.用いた解析メッシュ及び材料定数を図-3.1、表-3.1にそれぞれ示す.また、本解析に用いた水分特性曲線を図-3.2に示す.

応力解放後の飽和度変化を図-3.3 に、有効応力変化及び間隙水圧変化をそれぞれ図-3.4,3.5 に示す. これらの結果は全て、サンプ リング試料の中央の要素に着目した結果である. 図中に、溶解空気を考慮しなかった場合の結果も合わせて載せているが、溶解空 気がないと仮定すると、拘束圧除荷に伴う応力変化は全て間隙水圧変化になり、飽和度が変化せず、有効応力も変化しない結果を 得た. また、除荷重が大きいほど残留有効応力が小さくなっており、残留間隙水圧が大きく保たれていることが分かる. これらの 結果から、応力解放に伴い、水深が深いところにある試料ほど原位置と大きく異なる応力状態となってしまうといえる. また, 図 -3.3 より、採取深度が深くなるほど、採取後の飽和度が小さくなっていることが分かる. これは、採取深度が深いほど溶解空気量 が多く、さらに図-3.6 に示すグラフから, 拘束圧除荷に伴う間隙空気圧変化が大きいため、放出する空気量が多いためであると考 えられる. また, 拘束圧除荷初期は, 溶解空気の放出に伴う不飽和化が緩やかに生じているが, 間隙空気圧がある程度小さくなる と, 間隙空気の圧縮率が大きくなるため, 放出した空気が膨張し, 急激に飽和度が小さくなると考えられる.

#### 4. 非排水三軸試験シミュレーション

例えばメタンハイドレートの採取が本格化した場合、原位置に基礎を置き、パイプ等を差し込むことでメタンハイドレートを回 収することが考えられている.この時、回収用のパイプを支える支持杭を打設する場合、原位置の支持力係数等が必要になる.一 般的に支持力はN値を用いて算出されるが、陸上地盤と海底地盤に同じ理論が適用できるか分からないので、サンプリング試料を 用いた力学試験が必要であると考えられる.原位置は飽和状態であり、サンプリング試料も一般的には不飽和化は生じないと考え られていることから、不覚乱飽和粘土を対象とした一軸あるいは三軸試験を行うことで支持力計算を行うことが予想される.しか し、不飽和化が生じた場合、加圧前の応力状態が異なり、また載荷荷重により

せん断前の応力状態も異なるため、原位置の非排水強さを誤って評価してしまう可能性や、一般的な三軸試験結果と異なる結果を 得られる可能性がある.

そこで本章では、前章で行った応力解放シミュレーション後の応力状態を初期として、一軸試験及び UU 試験シミュレーション を行った.加圧は非排気非排水条件の下等方状態で行い、加圧後、図-3.1 に示す解析領域上端面に軸ひずみ速度 1.0%/min で非排水 せん断を行った.

h20,h500,h1000の結果をそれぞれ図4.1,4.2,4.3 に示す.各図に、溶解空気を考慮しなかった場合の試料を用いてUU試験を行った ときの結果を合わせて載せている.これらの結果から、まず、溶解空気を考慮しなかった場合、非排水状態で圧縮しても間隙水圧 変化が生じるたけで、有効応力状態は変化しないので、どの拘束圧状態でも非排水せん断強さが同じであり、また、水深が異なっ ていても、海底深度が同じなので同様の非排水せん断強さを得ていることが分かる.しかし、溶解空気を考慮すると、不飽和化が 生じ、試料の有効応力状態も変化していることから、その状態を初期として非排水条件で等方圧縮すると、圧縮応力によりせん断 初期の応力状態及び飽和度が異なるため,異なる非排水せん断強度を得たと考えられる.さらに、非排水せん断強さを比較すると、 採取水深が深い試料ほど、原位置強度よりもせん断強さを過小評価してしまう結果になった.ここで,h500の試料について,圧縮 応力を 200,400,600kPa として同様にシミュレーションを行ったときの全応力変化に対する飽和度及び有効応力変化についてそれ ぞれ図4.4,4.5 に示す.この結果から、圧縮に伴い飽和度と有効応力の両方が変化し、圧縮応力が大きいほどせん断初期の飽和度 と有効応力が大きいことが分かる.そのため図4.6 に示す応力-ひずみ関係より、原位置強度をかなり過小評価してしまうことが分 かる.しかし、圧縮応力を 2,4,6MPa とかなり大きくすると、原位置の有効応力状態に近づき、高飽和度状態になるため、原位 置強度とほとんど差が生じなくなることが分かる.これらの結果から、UU 試験から得られる非排水せん断強度は、圧縮応力を大 きくすることで原位置強度に近づけることができるといえる.

また,一軸試験だと,拘束圧除荷に伴いせん断初期の飽和度及び有効応力が原位置とかなり異なる. 図-4.10 に示す一軸試験シミ ュレーション結果より,水深が 20m 程度であると原位置強度とほとんど差は生じないが,採取深度が深い場合,拘束圧除荷に伴う 乱れが大きいため,原位置強度をかなり過小に評価してしまうとこになるといえる.

# 5. 結論

拘束圧除荷に伴う不飽和化が三軸試験から得られる強度にどのような影響を及ぼすか検討するため、一軸試験・UU 試験シミュ レーションを行った.その結果,試験方法によって原位置強度の評価が異なり,さらにせん断初期の応力状態が強度に及ぼす影響 も異なるため,試験方法の選択及び初期応力状態の選定には十分注意を払う必要があるといえる.以下に各試験シミュレーション から得た結果をまとめる.

(1)一軸試験結果

不飽和化の影響に加え、せん断時に有効応力が原位置よりもかなり小さいために、原位置強度をかなり過小に評価してしまうことが分かった.

(2)UU 試験

圧縮応力が小さいと、圧縮応力がほとんど空気圧・水圧変化として作用するため、飽和度は大きくなるが有効応力が大きくならず、せん断初期の有効応力が小さいため、強度を過小に評価してしまうことが分かった.しかし、圧縮応力を大きくすることで、 高飽和度状態になったときに圧縮応力が有効応力として作用するため、せん断初期の有効応力状態が原位置の状態に近くなり、飽 和度も大きくなるため原位置強度とほとんど差が生じなくなる結果を得た.

以上の結果から、原位置強度を正しく評価するためには、UU 試験ならば、飽和状態になるまで圧縮応力を加えた後でせん断試 験を行うことが有効であると考えられる.この原稿はICSGE2015の国際会議に投稿したものである.

#### 参考文献

- 1) 藤下利男:荷重除荷に伴う粘土の膨張について、港湾技術研究所報告、4巻1号、pp.47-60.1965
- 2) Borja, R. I.: A mathematical framework for three-phase deformation and strain localization analyses of partially saturated porous media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.193, pp.5301-5338, 2004.
- Kawai, K. Iizuka, A & Kanazawa, S. : Expression of mechanical characteristics in compacted soil with soil/water/air coupled F.E. simulation. Proc. of the 18<sup>th</sup> ICSMGE, 1129-1132, 2013.
- 4) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.514-522, 1976.
- van Genuchten, M.: A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 6) Ohno, S., Kawai, K. & Tachibana, S. : Elasto-plastic constitutive model for unsaturated soil applied effective degree of saturation as a parameter expressing stiffness, *Journal of JSCE*,63(4), 1132-1141, 2007. (in Japanese).
- Kawai, K., Iizuka, A., Hayakawa, E. & Wang, W. : Non-uniform settlement of compacted earth structures caused by the deformation characteristics of unsaturated soil on wetting, *Soils and Foundations*, 47(2), pp. 195-206, 2007.
- Sugii, T. & Uno, T. Modeling of hydraulic properties for unsaturated soils. Proc. Symp. Permiability of Unsaturated Ground, Japan, pp. 179-184. 1996. (in Japanese)

著者:1) 中谷奈央、工学研究科市民工学専攻、学生;2) 杉山友理、工学研究科市民工学専攻、学生;3) 飯塚敦、都市安全研 究センター、教授

| λ      | K       | M            | $e_i$        |
|--------|---------|--------------|--------------|
| 0.1074 | 0.0107  | 1.339        | 1.0          |
| а      | $n_s$   | $k_w(m/day)$ | $k_a(m/day)$ |
| 90     | 1.0     | 0.6          | 3.0          |
| $k_h$  | $M^{*}$ | $R^*$        | Т            |
| 0.173  | 1.28    | 8.31         | 288.15       |
| 2      |         |              |              |

#### 表-3.1 材料定数

 $k_h (\text{mol} / \text{m}^3 \cdot \text{kPa}), M (\text{kg} / \text{mol}), R(\text{J} / \text{K} \cdot \text{mol}), T(\text{K})$ 



図-3.1 解析メッシュ









# Strength expression mechanism of sampling specimens taken from the sea floor

Nao Nakatani Yuri Sugiyama Atsushi Iizuka

# Abstract

Our country is island nation and it consists of steep mountains and forests, most of the country. Therefore, we need to develop the sea floor. In the design of marine structure, construction costs of the structure are highly dependent on the strength of the ground. So, it is necessary to ascertain the exact strength. However, there are some problems with the unconfined compression test is a common test method in our country. In particular, problems are that the method of evaluating the degree of turbulence is not established and the method of determining the strength of the soil is ambiguous because of variations in the strength.

In this research, I considered how much unconfined compressive strength we've evaluated improperly, by the vaporization of the dissolution gas being considered one of the causes of disturbance at the time of sampling. I also examined water depth and seabed depth we can evaluate uniaxial compressive strength is correct.

©2016 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.