

表層地盤中の面構造の引上げ抵抗に係る一考察 (表層型メタンハイドレートの賦存性状を例に)

谷 和夫^{1*}・北村 公織²・Choi Hong seok³

¹東京海洋大学 学術研究院 海洋資源エネルギー学部門 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

²元 東京海洋大学 海洋環境学科 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

³Korea Maritime & Ocean University (727 Taejong-ro, Yeongdo-Gu, Busan 49112, South Korea)

*E-mail: ktani00@kaiyodai.ac.jp

Key Words : *lifting resistance, hydrate, limit equilibrium, rigid perfectly plastic, stability, analysis*

1. はじめに

海底の浅部(概ね100メートル以浅)に存在しているメタンハイドレートは、より深部の砂層中に存在する砂層型メタンハイドレートと区別され、表層型メタンハイドレートと呼ばれる。メタンハイドレートの密度が氷と同程度(約0.9 Mg/m³)で海水より軽いため、土砂に被覆されるか互層状態にあるか、あるいは土粒子と固着または間隙を充填することなどによって浮力に対して安定な状態を保っている(浮上しない)と想像される。

この表層型メタンハイドレートが、海底の浅い地層中に安定して貯留・固定される条件が分かれば、その賦存量や性状の評価に資すると思われる。そこで、図-1に示すように、砂または粘土よりなる地層に被覆された状態の塊状のメタンハイドレート層(密度 $\rho_{MH} = 0.9 - 1.0$

Mg/m³)を想定して、その力学的な安定性を検討した。

2. 安定解析の方法

(1) 問題の設定

図-1に示すように、水平方向の広がり(幅)が B で厚さが H_{MH} の塊状のメタンハイドレート層が、水平な海底面下の砂または粘土よりなる一様な地層の中(上面までの深さが Z の位置)に存在する二次元問題を検討する。メタンハイドレート層に作用する浮力に起因して、被覆する地層の下面に鉛直上向きの荷重 F が作用する。地層を剛完全塑性体と仮定して、被覆する地層がメタンハイドレート層を浮上させない極限荷重 F_{lim} を極限つり合い法^{1),2)}により検討した。被覆する地層の単位体積重量は γ ($=\rho g$, ρ は地層の湿潤密度, g は重力加速度)とし、モール・クーロンの破壊規準(粘着力を c , せん断抵抗角を ϕ)に従うと仮定した。

(2) 仮定する破壊メカニズムと極限つり合い条件

図-2に最も簡単な破壊メカニズム1を示す。メタンハイドレート層の上面の両端(点Aと点B)と地表面の間に水平と角度 α ($0 < \alpha \leq \pi/2$)をなす直線状のせん断破壊面ADとBCが左右対称に形成されて、被覆する地層の台形部分ABCDが鉛直上向きに破壊する形態を仮定した。

以下に、自重が W (式(3))の台形部分ABCDに作用する力の鉛直方向のつり合い条件(式(1))と破壊条件(式(2))を示す。

$$F - W + 2N \cos \alpha - 2T \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

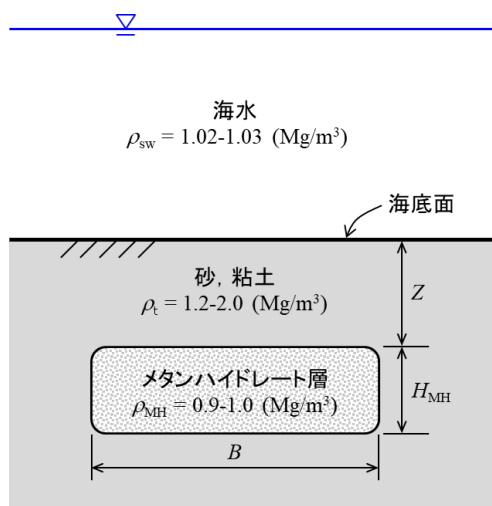


図-1 表層型メタンハイドレートの概念

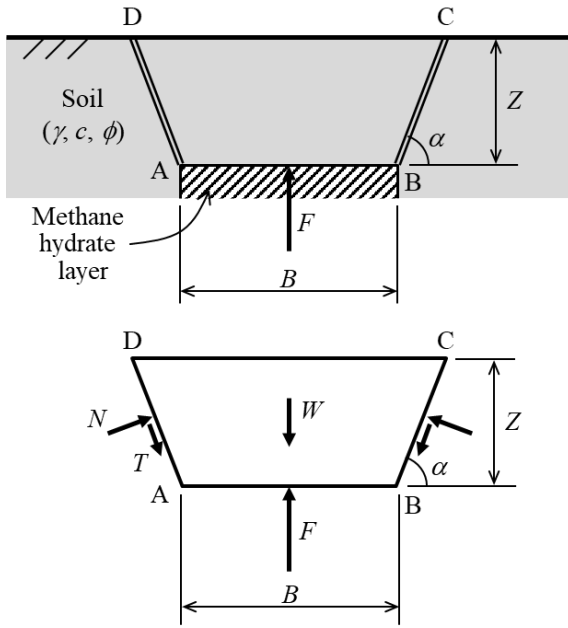


図-2 破壊メカニズム1と破壊領域に作用する力

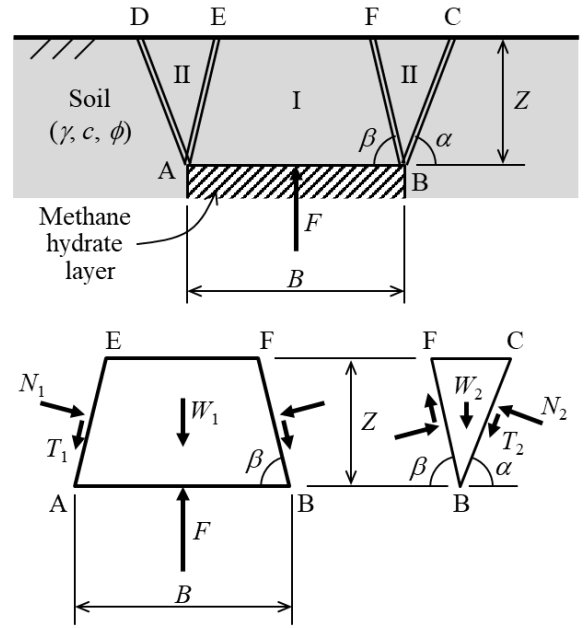


図-3 破壊メカニズム2と破壊領域に作用する力

$$T = N \tan \phi + \frac{cZ}{\sin \alpha} \quad (2)$$

$$W = \gamma Z \left(B + \frac{Z}{\tan \alpha} \right) \quad (3)$$

ただし、 N と T はせん断破壊面（ADとBC）に作用する直荷重とせん断荷重である。なお、水平方向のつり合い条件は左右対称なので満足されている。

メタンハイドレート層の真上の地層（長方形部分）の自重 γBZ で無次元化した荷重 F は式(4)となる。

$$\frac{F}{\gamma BZ} = \left(1 + \frac{Z}{B \tan \alpha} \right) + 2 \left\{ \frac{c}{\gamma B} - \frac{N \cos(\phi + \alpha)}{\gamma BZ \cos \phi} \right\} \quad (4)$$

上式の第1項は台形部分ABCDの自重 W に、第2項はせん断破壊面ADとBCに作用する荷重 N と T によるものだが、 N が不定なので解くことができない。

そこで、図-3に示すように、せん断破壊面（AEとBF）を追加した破壊メカニズム2を仮定した。水平と角度 β （ $\tan^{-1}(2Z/B) \leq \beta \leq \pi - \alpha$ ）をなす直線状のせん断破壊面AEとBFが左右対称に形成されて、被覆する地層の台形部分ABFEおよび三角形AEDとBCFが鉛直上向きに破壊する形態を仮定する。

以下に、自重が W_1 と W_2 （式(10)と(11)）の台形部分ABFEおよび三角形部分BCF（またはAED）に作用する力の鉛直と水平方向のつり合い条件（式(5)と(6)と(7)）と破壊条件（式(8)と(9)）を示す。

$$F - W_1 - 2N_1 \cos \beta - 2T_1 \sin \beta = 0 \quad (5)$$

$$W_2 - N_1 \cos \beta - T_1 \sin \beta - N_2 \cos \alpha + T_2 \sin \alpha = 0 \quad (6)$$

$$N_1 \sin \beta - T_1 \cos \beta - N_2 \sin \alpha - T_2 \cos \alpha = 0 \quad (7)$$

$$T_1 = N_1 \tan \phi + \frac{cZ}{\sin \beta} \quad (8)$$

$$T_2 = N_2 \tan \phi + \frac{cZ}{\sin \alpha} \quad (9)$$

$$W_1 = \gamma Z \left(B - \frac{Z}{\tan \beta} \right) \quad (10)$$

$$W_2 = \frac{\gamma Z^2 (\tan \beta + \tan \alpha)}{2 \tan \alpha \tan \beta} \quad (11)$$

ただし、添え字の1と2は台形部分ABFEと三角形部分AEDとBCF（ないしその外側面）を示す。なお、台形部分ABFEの水平方向のつり合い条件は左右対称なので満足されている。

メタンハイドレート層の真上の地層（長方形部分）の自重 γBZ で無次元化した荷重 F は式(12)となる。

$$\frac{F}{\gamma BZ} = 1 + \left(\frac{Z}{B} \right) f_1(\alpha, \beta, \phi) + 2 \left(\frac{c}{\gamma B} \right) f_2(\alpha, \beta, \phi) \quad (12)$$

ただし、

$$f_1 = \frac{1}{\tan \beta} \left\{ \frac{(\tan \alpha + \tan \beta) \cos(\beta - \phi) \sin(\alpha + \phi)}{\tan \alpha \sin(\alpha + \beta)} - 1 \right\}$$

$$f_2 = \frac{\cos \phi \cos(\alpha - \beta + \phi)}{\sin \alpha \sin \beta}$$

3. 極限荷重の計算結果

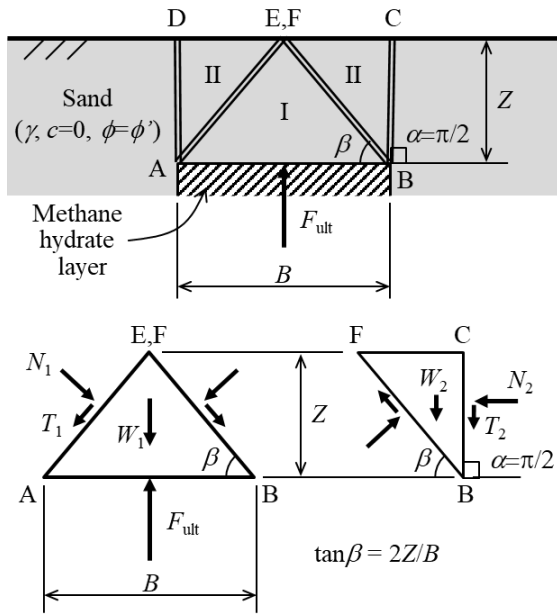


図-4 非粘着性の地層（砂層）の破壊メカニズム2と破壊領域に作用する力

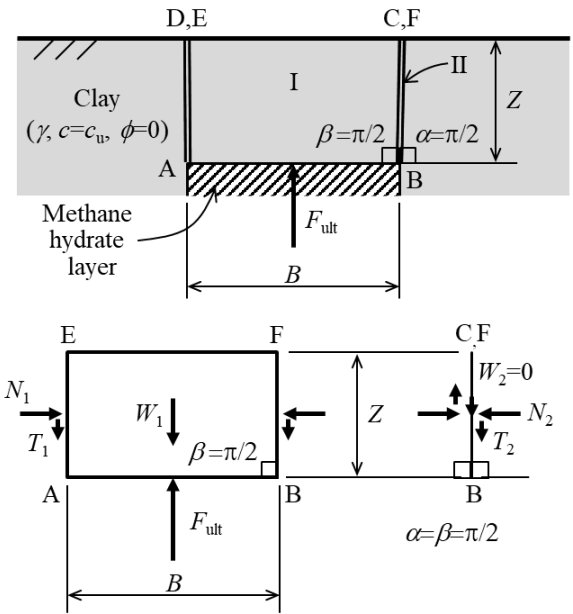


図-6 粘着性の地層（粘土層）の破壊メカニズム2と破壊領域に作用する力

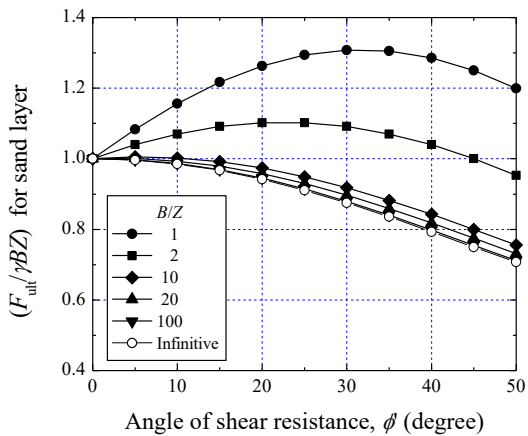


図-5 非粘着性の地層（砂層）の場合の $(F_{ult}/\gamma BZ)$ とせん断抵抗角 ϕ の関係

(1) 非粘着性の地層（砂層）の場合

被覆する地層が細粒分を含まない飽和した砂からなる場合には、粘着力を無視（非粘着性（摩擦性））、 $c=0$ & $\phi=\phi'$ することができる。この場合には、式(12)の第3項はゼロになるので、第2項の $f(\alpha, \beta, \phi)$ が最小となる条件で極限荷重 F_{ult} が求まる。この条件は、図-4に示すように外側のせん断破壊面ADとBCが鉛直の場合、つまり $\alpha=\pi/2$ で、内側のせん断破壊面AEとBFが海底面で交差する（EとFが重なる）場合、つまり $\beta=\tan^{-1}(2Z/B)$ となる。その結果、式(13)が得られる。

$$\left(\frac{F_{ult}}{\gamma BZ}\right) = 1 + \left(\frac{Z}{B}\right) \sin \phi' \cos \phi' - \frac{\sin^2 \phi'}{2} \quad (13)$$

図-5に式(13)の $(F_{ult}/\gamma BZ)$ とせん断抵抗角 ϕ の関係を示す。 γBZ で無次元化したメタンハイドレート層が浮上しない極限荷重 F_{ult} は、 $\phi'=0$ と $\phi'=\beta$ で1.0となり、その中間でピークを有する。この理由は、 $0 < \phi' < \beta$ では再外縁のせん断破壊面ADとBCに作用する直荷重 N_2 が圧縮でせん断荷重 T_2 が下向きとなって浮上を抑制するが、 $\phi' > \beta$ では N_2 は引張りで T_2 は上向きとなって浮上を促進するからである。実際には飽和した砂層内に引張りが作用することは考えられないので、メタンハイドレート層が上面深さ Z に比して水平方向の広い範囲に分布している場合（ $B/Z > 10$ ）には、 $\phi' > \beta$ では $(F_{ult}/\gamma BZ) \approx 1.0$ と考えれば良いと推測する。一方、狭い範囲にしか分布していない場合（ $B/Z < 10$ ）には、 ϕ' が数度から数十度の範囲で $(F_{ult}/\gamma BZ)$ の値はピークを有する。

(2) 粘着性の地層（粘土層）の場合

被覆する地層が正規圧密状態の飽和した粘性土からなる場合には、せん断抵抗角を無視（粘着性（非摩擦性））、 $\phi=0$ & $c=c_u$ することができる。この場合には、式(12)の第2項の $f(\alpha, \beta, \phi=0)$ はせん断破壊面AEとBFが鉛直の場合、つまり $\beta=\pi/2$ のときに最小値ゼロとなり、第3項の $f(\alpha, \beta, \phi=0)$ はすべてのせん断破壊面が鉛直の場合、つまり $\alpha=\beta=\pi/2$ のときに最小値1.0となる。よって、式(14)が得られる。

$$\left(\frac{F_{ult}}{\gamma BZ}\right) = 1 + 2 \left(\frac{c_u}{\gamma B}\right) \quad (14)$$

γBZ で無次元化したメタンハイドレート層が浮上しな

い極限荷重 F_{ul} は、 $c_u = 0$ （せん断抵抗がゼロ）の場合に1.0で、 γB で無次元化した粘着力 c_u に比例して増加する。

(3) 粘着力もせん断抵抗角も有する地層の場合

一方、被覆する地層が過圧密状態の飽和した粘性土ないしやや固結した土質地盤や軟岩からなる場合には、粘着力 c もせん断抵抗角 ϕ も有する（ $\phi > 0$ & $c > 0$ ）。この場合には、式(12)の左辺（ $F/\gamma BZ$ ）が最小となる条件は被覆層の厚さとメタンハイドレート層の幅の比（ ZB ）に依存し、極限荷重 F_{ul} を解析的に求めることは容易ではない。

4. おわりに

水平な海底面の下にメタンハイドレート層が浮力に対して安定して存在する条件を、極限つり合い法を利用して検討した。今後は、極限解析（上界法・下界法）^{1),2)}なども利用して検討を続ける。

参考文献

- 1) Atkinson, J.H.: Foundations and slopes, An introduction to applications of critical state soil mechanics, McGraw-Hill Book Co., 382p, 1981.
- 2) 木村孟, 日下部治: 第4章 マスの破壊（構造力学）, 土の強さと地盤の破壊入門（入門シリーズ 13）, 土質工学会, pp.271-364, 1987.