

波力を受けるケーソン構造物の安定性に関する考察

Stability of caisson structures subjected to wave forces

小林俊一*・関口秀雄*・柴田 徹*

Shun-ichi Kobayashi, Hideo Sekiguchi and Toru Shibata

ABSTRACT: This paper discusses the stability against sliding of caissons subjected to wave forces, as a bearing-capacity problem under combined loading. It is shown that the sliding resistance of such a caisson is best represented in terms of load space. The practical implications of this approach include the observation that the ratio of the horizontal resistant force to the effective vertical load is by no means a constant, but decreases significantly with increasing height of application of the lateral force H above the caisson base. It is also shown that this observation is compatible with what has been predicted from nonlinear finite-element analyses incorporating a non-associated Mohr-Coulomb, elastic-perfectly plastic model.

KEY WORD: apparent friction coefficient; bearing capacity; combined loading; sliding

1. はじめに

従来、混成式防波堤の安定性は、ケーソンに作用する波力、ケーソン-捨石マウンド間の摩擦抵抗力、ケーソンの自重から算定される力の釣合をもって評価されてきた。特に滑動に関しては、ケーソン-捨石マウンド間の見かけの摩擦係数を経験的に $\tan \delta = 0.6$ としてその安定性を評価していたが、この値に明瞭な根拠はない。

本論文では、捨石マウンド上の浅い基礎の支持力問題という観点からケーソンの滑動抵抗力を評価する方法について検討し、大型模型実験結果ならびに数値解析結果への適用を試みた。また、ケーソン-捨石マウンド間の見かけの摩擦係数が持つ物理的意味についても考察を加えた。

2. ケーソンに作用する外力

ケーソンに作用する外力としては、波に起因する水平方向の波圧力、鉛直方向の揚圧力、水面下の部分に働く浮力およびケーソン-捨石マウンド間に作用する滑動抵抗力を考える。これらの諸力を簡単に表現するため、図1に示すように偏心量 e_c を有する鉛直力 V および底面からの作用高さ l_H を有する水平力 H がケーソンに作用すると考えた。この図からケーソン底面には鉛直力、水平力に起因するモーメント荷重が作用していることが理解される。

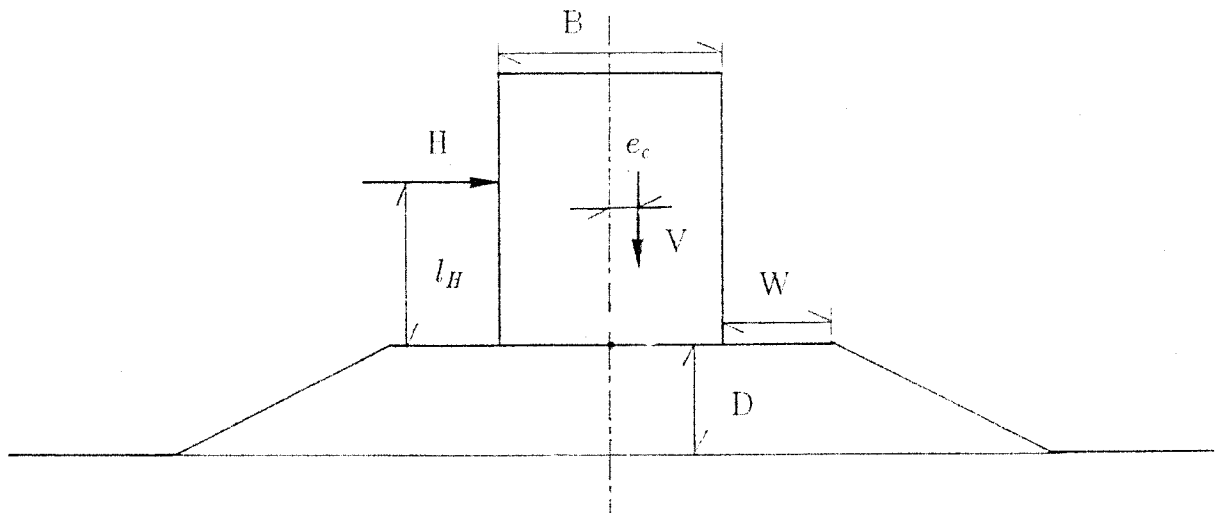


図1: ケーソンに作用する外力

3. 組合せ荷重を受ける浅い基礎の降伏曲面

組合せ荷重を受ける基礎の支持力を鉛直力 V 、水平力 H 、モーメント力 M の3成分からなる荷重空間内で整理し、得られた曲面をマクロな意味で“降伏曲面”と呼ぶことにする。ここでは地盤形状として、水平地盤とマウンドを有する地盤の2ケースを取り上げ、降伏曲面を表現する方法について検討した。

(a) 水平地盤上の基礎の場合 傾斜、偏心を有する組合せ荷重によって基礎の支持力が低下することはよく知られている。偏心荷重に対しては Meyerhof [1]、傾斜荷重に対しては Meyerhof [1]、Hansen [2]、組合せ荷重に対しては Georgiadis et al. [3]、Nova et al. [4] などの実験式が提案されている。傾斜荷重が作用したときの基礎の降伏曲面について、Georgiadis et al. が行った実験結果と、各提案式を表したものが図2および図3である。ただし図2はモーメント

*正会員 京都大学工学部土木工学科 (606 京都市左京区吉田本町)

荷重 $M = 0$ とした場合、図3では水平荷重 $H = 0$ とした場合である。これらの図から、Georgiadis et al. , Nova et al. の提案式が Georgiadis et al. の実験結果をうまく表現していることがわかる。ここでは式の簡便さから Nova et al. の提案式

$$h^2 + m^2 - \xi^2(1 - \xi)^{2\beta} = 0$$

$$\xi = V/V_M; h = H/(\mu V_M); m = M/(\psi B V_M) \tag{1}$$

を用いることにする。ここに μ はモーメント荷重 $M = 0$ のとき、 V - H 平面上に投影した降伏曲面の初期接線勾配、 ψ は水平荷重 $H = 0$ のとき、 V - M/B 平面上に投影した降伏曲面の初期接線勾配、 B は基礎幅、 β は降伏曲面の形状を決めるパラメータ、 V_M は最大鉛直支持力である。

(b) マウンド上の基礎の場合 マウンドを有する地盤上の浅い基礎の支持力についても、運輸省港湾技術研究所[5]で行われた遠心力載荷実験の結果によると、式(1)で近似できると考えられる。その実験結果と式(1)による近似を図4に示す。

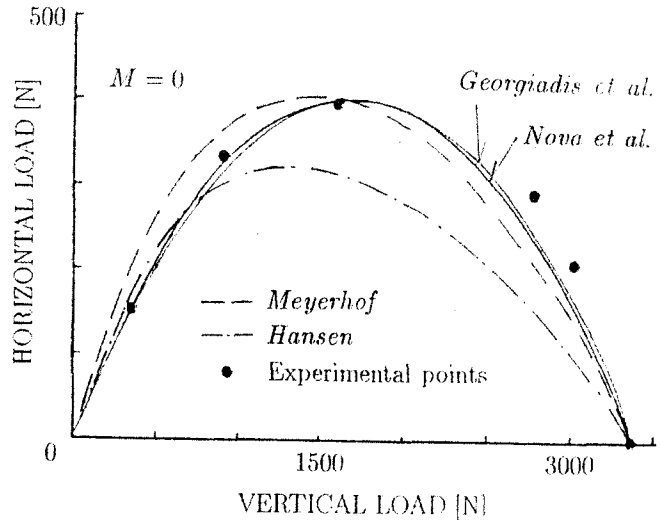


図2: 水平地盤上の浅い基礎の降伏曲面 ($M = 0$)

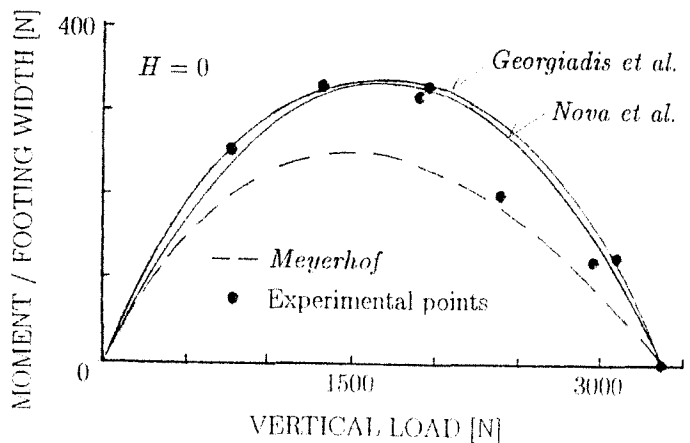


図3: 水平地盤上の浅い基礎の降伏曲面 ($H = 0$)

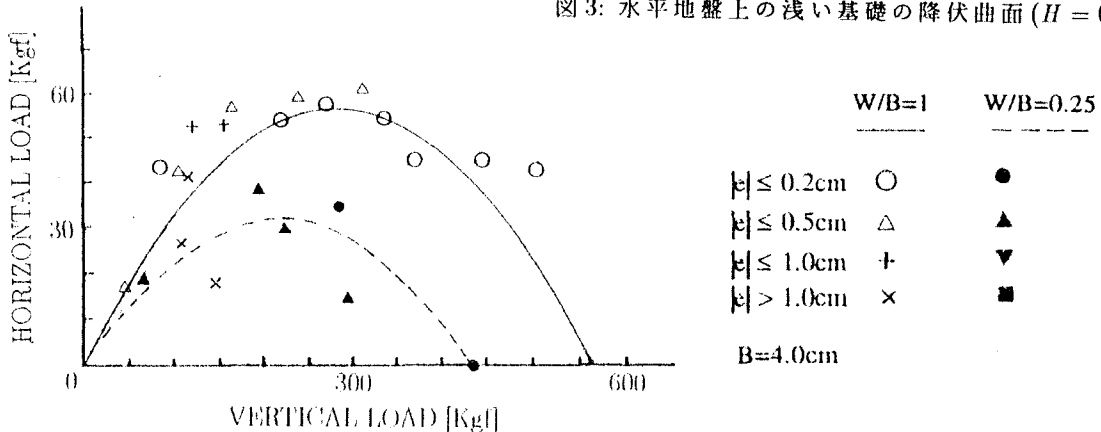


図4: マウンド上の浅い基礎の降伏曲面 ($D/B = 3$)

4. 見かけの摩擦係数の推定法

(a) 一般的考察 外力に対して発揮される滑動抵抗力は、荷重条件によってその値を大きく異にする。従来、滑動抵抗力を評価する際に用いられてきた摩擦係数は、組合せ荷重を受ける基礎の降伏曲面を V - H 平面上に投影して得られた曲面の割線勾配であるので、これを“見かけの摩擦係数”と称することにする。

図2,3,4に見られるように、荷重空間内の降伏曲面の形状から、鉛直荷重レベルによって見かけの摩擦係数は変化することがわかる。さらに、鉛直荷重、水平荷重が同一であっても、それらの作用位置が変化することによって生じる基礎底面まわりのモーメント荷重のため見かけの摩擦係数は変化する。

モーメント荷重 M は鉛直荷重 V が偏心量 e_e 、水平荷重 H が作用高さ l_H を有していることによって発生すると考えられる。つまり

$$M = e_e \cdot V + l_H \cdot H. \tag{2}$$

また、無次元化偏心量 $\bar{e}$ 、無次元化水平力作用高さ $\bar{l}$ を式(3)により定義する。

$$\bar{e} = \left(\frac{e_c}{\psi B} \right), \quad \bar{l} = \left(\frac{\mu l_H}{\psi B} \right). \quad (3)$$

これらの式を式(1)に代入すると

$$h = \xi \left\{ -\frac{\bar{e} \cdot \bar{l}}{1 + \bar{l}^2} + \sqrt{\frac{(1 - \xi)^{2\beta}}{1 + \bar{l}^2} - \left(\frac{\bar{e}}{1 + \bar{l}^2} \right)^2} \right\} \quad (4)$$

となる。従って V - H 平面上における降伏曲面の接線勾配 $dH/dV = \mu dh/d\xi$ は次のよう表される。

$$\frac{dH}{dV} = \mu \left[-\frac{\bar{e} \cdot \bar{l}}{1 + \bar{l}^2} + \frac{\frac{(1 - \xi)^{2\beta-1}}{1 + \bar{l}^2} \{1 - (1 + \beta)\xi\} - \left(\frac{\bar{e}}{1 + \bar{l}^2} \right)^2}{\sqrt{\frac{(1 - \xi)^{2\beta}}{1 + \bar{l}^2} - \left(\frac{\bar{e}}{1 + \bar{l}^2} \right)^2}} \right] \quad (5)$$

また原点での降伏曲線の接線勾配 $dH/dV|_{V=0}$ は

$$\frac{dH}{dV}|_{V=0} = \mu \left\{ -\frac{\bar{e} \cdot \bar{l}}{1 + \bar{l}^2} + \sqrt{\frac{1}{1 + \bar{l}^2} - \left(\frac{\bar{e}}{1 + \bar{l}^2} \right)^2} \right\} \quad (6)$$

である。この関係式から降伏曲面の原点における接線勾配は無次元偏心量 $\bar{e}$ と無次元化水平力作用高さ $\bar{l}$ の関数であることがわかる。 $\bar{e}, \bar{l}$ と原点における接線勾配 $dH/dV|_{V=0}$ の関係を図5に示す。

(b)大型滑動実験への適用 これまでの議論をもとに、田中ら[6]による大型滑動実験の結果を整理する。田中らは陸上ではほぼ実物に近い規模の実験マウンドを築造し、マウンド上に設置された幅 $B = 4[m]$ の基礎に、偏心量 $e_c = 0$ なる鉛直荷重と、水平力作用高さ $l_H = 0.55[m]$ 及び $1.50[m]$ なる水平荷重を載荷する支持力実験を実施した。得られた水平荷重 H と鉛直荷重 V の関係を図6に示す。この関係を基に必要なパラメータを同定する。

まず現実的な仮定として、最大水平抵抗力は最大鉛直支持力の50%の鉛直荷重が作用しているときに出現するとして、 $\beta = 1.0$ とする。偏心量が0であることに留意すると、降伏曲面は

$$h = \xi(1 - \xi) \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{l}^2}} \quad (7)$$

となる。従って、鉛直荷重 V が等しく、水平力作用高さ l_H が異なるケースでは、発揮される水平抵抗力の比 $h(l_H = 1.50)/h(l_H = 0.55)$ は水平力作用高さ l_H のみの関数となる。実験結果からこの比を読み取ると約0.8であるので

$$\frac{h(l_H = 1.50)}{h(l_H = 0.55)} = \sqrt{\frac{1 + (\mu/\psi)^2(0.55/4.0)^2}{1 + (\mu/\psi)^2(1.50/4.0)^2}} \approx 0.80. \quad (8)$$

上式を μ/ψ について解くと、 $\mu/\psi \approx 2.25$ なる結果が得られる。

また、初期接線勾配は

$$\frac{dH}{dV}|_{V=0} = \frac{\mu}{\sqrt{1 + \bar{l}^2}} \quad (9)$$

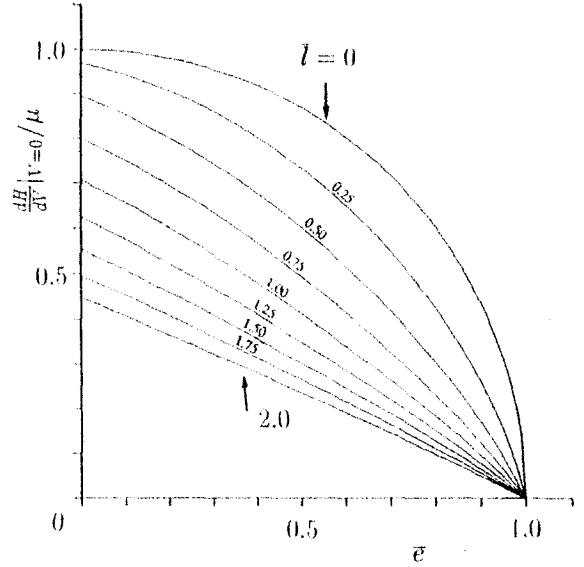


図5: 見かけの摩擦係数の低下とモーメント荷重の関係

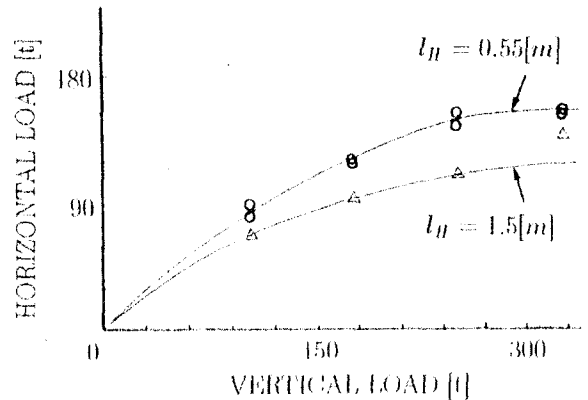


図6: 捨石マウンドの支持力実験結果

となる。実験結果によると、初期接線勾配は $l_H = 0.55[m]$ のとき0.93、 $l_H = 1.50[m]$ のとき0.75程度であるので、この式をもとに μ について解くと $\mu \approx 0.97$ が得られる。また $\mu/\psi \approx 2.25$ なる結果を用いると $\psi \approx 0.43$ が得られる。

この結果をもとに、水平力作用高さと初期接線勾配の関係を図7に示す。

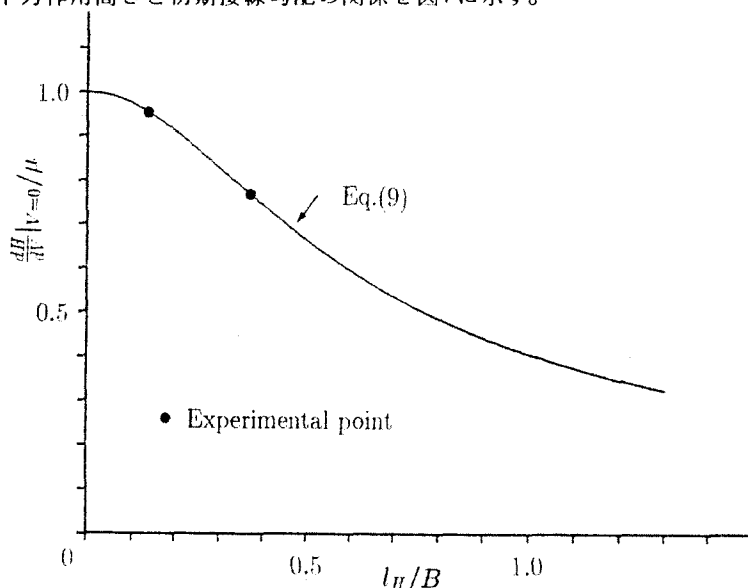


図7: 見かけの摩擦係数の低下と水平力作用高さの関係

(c)有限要素法による解析結果への適用

Teunissen[7]は有限要素法により、水平地盤上に設置された幅 $B = 100[m]$ の重力式構造物が偏心のない一定鉛直荷重下で水平荷重を受けるときには、水平荷重の作用位置によって水平方向の支持力が変化する結果を得ている。それによると、地盤は非関連流れ則に従うMohr-Coulomb材料とし、物性値を内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 、ダイレイタンス角 $\psi = 0^\circ$ 、ヤング率 $E = 24[MN/m^2]$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、単位体積重量 $\gamma = 15[KN/m^2]$ 、粘着力 $c = 5[KN/m^2]$ とおいた。解析結果を図8に示す。図中の13[m]、100[m]はそれぞれ水平力の作用高さ l_H を表している。Davis & Booker[8]による支持力係数を利用して、最大鉛直支持力を概算すると $V_M = 1120[MN/m]$ であるから、この解析における鉛直荷重レベル20～60[MN/m]は、降伏曲面の原点に近い領域 $\xi = 0.018 \sim 0.054$ に相当することがわかる。降伏曲面の勾配は式(5)の表現に留意すると

$$\frac{dH}{dV} = \mu \frac{1 - 2\xi}{\sqrt{1 + \bar{I}^2}} \quad (10)$$

となり、この領域では降伏曲面はほぼ直線で近似できる。しかしながら、解析結果を直線で外挿すると鉛直荷重 $V = 0$ のときに、水平荷重 $H = 5[MN/m]$ 程度の水平抵抗力が現れる。なぜこのような水平抵抗力が出現するのか不明であるが、地盤材料に含まれる粘着力の項の影響も考えられよう。

水平抵抗力から $H = 5[MN/m]$ を差し引くことにより補正を行い、解析結果を整理すると、 $\mu = 0.475, \psi = 0.66$ を得る。

5. ケーソン-捨石マウンド間の見かけの摩擦係数の持つ物理的意味について

従来、ケーソン-捨石マウンド間の見かけの摩擦係数に関しては経験的に $\tan \delta = 0.6$ を与えていたが、前述の議論によるとこれは必ずしも適当でない。水平力の作用高さが変化することによって、水平抵抗力が異なってくることが、実験および解析の両面から観察されているが、その原因としてさまざまな要因があろう。ここでは要素レベルの

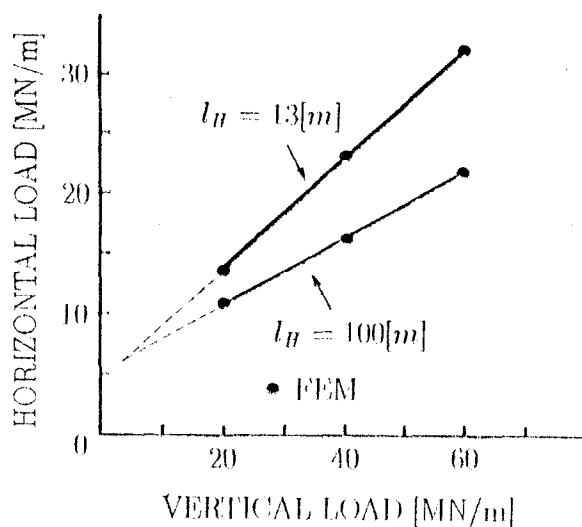


図8: 有限要素法による解析結果

破壊形態の違いから出現する水平抵抗力が異なることを示す。

水平力の作用高さが低く、基礎底面にモーメント荷重があまり生じていないケースを考える。このとき地盤の変形は単純せん断に近く、水平方向の塑性軸ひずみ速度は $\dot{\epsilon}_{xx}^p \approx 0$ である(図9参照)。

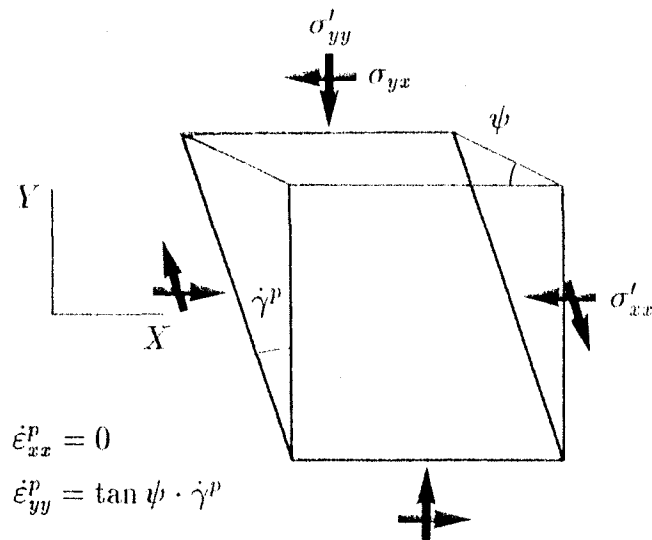


図9: 単純せん断を受ける要素

ダイレイタンスがない材料を考えれば、鉛直方向の塑性軸ひずみ速度も $\dot{\epsilon}_{yy}^p = 0$ となり、与えられた塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}^p$ に対して一つのひずみ速度円が決まる(図10参照)。

塑性ひずみ速度と応力の共軸性を仮定すると、主応力方向が決まるので、1つの面の応力状態が決まれば応力円を確定することができる。

いま、水平面に直応力 σ'_{yy} とせん断応力 σ_{yx} が作用しているとする。構造物の水平支持力が極限状態にあるならば、応力円は破壊線に接している。この破壊時の応力円を図11に示している。応力円の幾何条件から、水平面は破壊面とはならず、水平面上の応力状態(点A)は破壊線上の応力状態(点B)とは異なる。

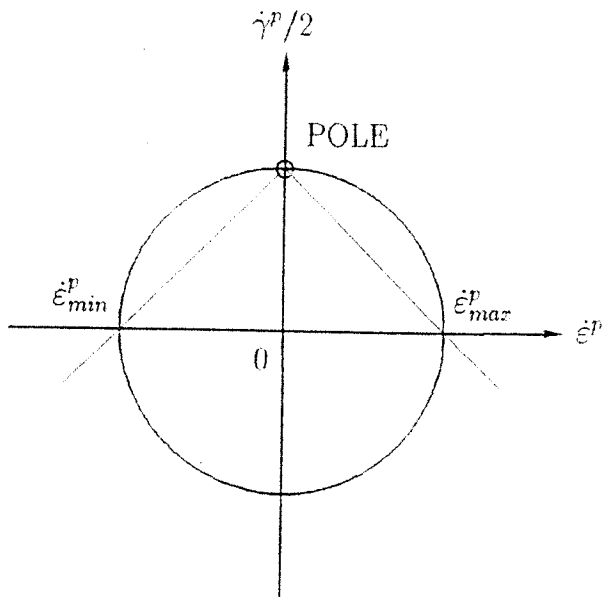


図10: 単純せん断時のひずみ速度円

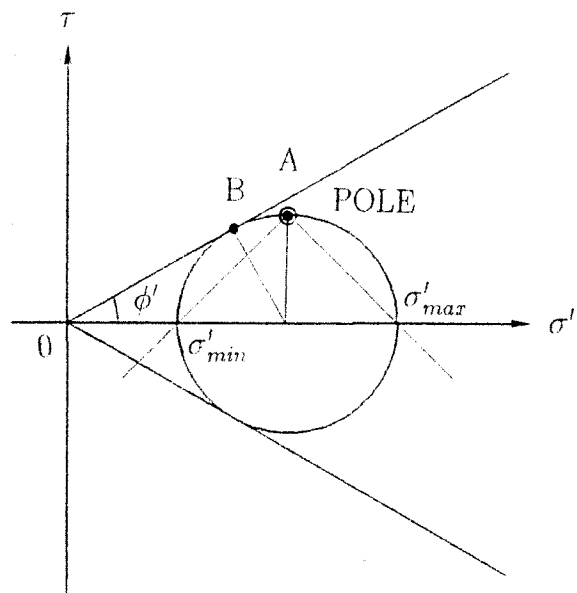


図11: 単純せん断時の応力円(破壊円)

つまり、水平面上のせん断応力-直応力比 σ_{yx}/σ'_{yy} は $\tan \phi$ とはならず、 $\sin \phi$ となる。

もし、構造物底面の地盤が一様に単純せん断で破壊に至ったと仮定すれば水平面上の応力は

$$\begin{aligned} \sigma_{yx} &= H/A \\ \sigma'_{yy} &= V/A \end{aligned} \tag{11}$$

と表され、見かけの摩擦係数 $\tan \delta$ は

$$\tan \delta = \frac{H}{V} = \frac{\sigma_{yx}}{\sigma'_{yy}} = \sin \phi \quad (12)$$

となる。内部摩擦角が $\phi = 30^\circ$ の場合、見かけの摩擦係数は $\tan \delta = 0.5$ となる。有限要素法の解析結果より $\mu \approx 0.475$ と同定されたが、この値から降伏曲面の原点付近で生じる滑動破壊の場合、構造物底面の地盤ではほぼ一様な単純せん断モードによる変形が卓越していることがわかる。

また、水平力作用高さ $l_H = 13[m]$ の場合、 $H/V = 0.46$ であるので、やはり単純せん断モードが卓越していると考えられるが、 $l_H = 100[m]$ の場合、 $H/V = 0.28$ であるので単純せん断モード以外のモードで破壊にいたる要素がかなり存在することが予想される。

6. まとめ

防波堤ケーソンの安定性を地盤支持力の観点から検討した結果、以下の知見を得た。

- マウンド上のケーソンの支持力に関する降伏曲面についても、水平地盤上の基礎の降伏曲面に対して提案された実験式が適用できる。
- 鉛直荷重が大きくなると見かけの摩擦係数が低下することが知られていたが、荷重空間内の降伏曲面に着目すると、定量的に摩擦係数の低下を表現することが可能である。
- モーメント荷重による見かけの摩擦係数の低下に関しても降伏曲面を用いた定量的な評価が可能である。この考え方を田中らの実験に適用した結果、 $\mu \approx 0.97$ 、 $\psi \approx 0.43$ を同定した。これらの結果から求めた見かけの摩擦係数の低下は図7の通りである。
- 有限要素法を用いた支持力の数値解析結果からも、水平力の作用位置によって発揮される水平支持力が異なることが明らかとなった。
- 有限要素法の結果から求めた降伏曲面の原点付近の傾き $\mu \approx 0.475$ は、基礎底面下の地盤が一様な単純せん断モードで破壊すると仮定したときの見かけの摩擦係数 $\tan \delta = 0.5$ にほぼ等しいことが明らかとなった。これは原点付近で生じる滑動の場合、一様な単純せん断モードが卓越していることを意味する。
- 防波堤ケーソンの滑動抵抗力を詳しく評価するためには、今後さらに内部摩擦角の拘束圧依存性、応力とひずみ速度の非共軸性などの影響も調べていく必要がある。

参考文献

- [1] Meyerhof, G.G., "The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads," Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech., Vol. 1, 1953.
- [2] Hansen, J.B., "A general formula ofr bearing capacity," Danish Geotechnical Institute Bulletin, 1961.
- [3] Georgiadis, M. and Butterfield, R., "Displacement of footings on sand under eccentric and inclined loads," Canadian Geotechnical Journal 25, pp. 199-212, 1988.
- [4] Nova, R. and Montrasio, L., "Settlements of shallow foundations on sand," Géotechnique 41, No. 2, pp. 243-256, 1991.
- [5] Terashi, M. and Kitazume, M., "Bearing capacity of a foundation on top of high mound subjected to eccentric and inclined load," Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 26, No. 2, pp. 3-24, 1987.
- [6] 田中洋行, 小谷 拓, 高橋盛男, "捨石マウンドの均しと支持力の関係について," 第12回海洋開発シンポジウム、海洋開発論文集, pp. 131-136, 1987.
- [7] Teunissen, J.A.M., "Double shearing and non-coaxiality in Geomaterials," Technical Report, Delft Geotechnics, 1991.