

組合せ荷重を受けるケーソン-捨石マウンド系の破壊曲面

Failure locus of a caisson-rubble mound system subject to combined loads

小林俊一*・関口秀雄*・J. A. M. Teunissen†

Shun-ichi Kobayashi, Hideo Sekiguchi & J. A. M. Teunissen

Stability of a composite breakwater which consists of a caisson and a rubble mound is discussed. Stability against sliding is conventionally estimated by the following formula, $H = \tan \delta \cdot V$ where V , H and $\tan \delta$ are vertical load, horizontal resistance force and apparent friction angle between a caisson and a rubble mound. The value of $\tan \delta$ used for design is 0.6 which is an empirical constant. From geotechnical point of view, this stability problem is equivalent to a bearing capacity problem of a shallow foundation subject to combined loads. By introducing macroscopic failure locus of a caisson-rubble mound system in 3-dimensional load space $V-H-M/B$, it can be easily explain that $\tan \delta$ depends on loading conditions. Non-linear FE analysis is performed to evaluate a bearing capacity characteristic. The numerical results show that $\tan \delta$ reduces owing to existence of a moment load around a base of a caisson. For breakwater problems, a horizontal component of wave loads also cause moment loads because they are working at some heights from the base. The importance of an applied height of a horizontal load is highlighted for rational estimation of sliding resistance of the breakwater system.

Keywords : Sliding, bearing capacity, apparent friction angle, macroscopic failure locus

1. はじめに

わが国の防波堤はケーソン式混成堤がその主流を占めている。ケーソン式混成堤の安定性を照査するためには、下部の捨石マウンドと上部のケーソン躯体の滑動および転倒に対する検討が必要であることは言うまでもない。従来、滑動に対する安定性の検討は、作用波力と捨石マウンド-ケーソン間の摩擦抵抗力を考慮した、水平方向の力の釣合から求められてきた。このうち摩擦抵抗力については、見かけの摩擦係数 $\tan \delta = 0.6$ として評価を行っているのが実情である。この値は経験的に知られてきたもので、実務上にも有用であるが、物理的な根拠に乏しい。本研究では地盤工学の視点から、波力を受けるケーソン式混成堤の安定性の問題を“組合せ荷重を受ける浅い基礎の支持力問題”と位置づけ、その支持力特性を荷重空間におけるマクロな破壊曲面で表現し、さまざまな荷重条件におけるケーソン式混成堤の安定性の合理的な評価を試みる。

2. マクロな破壊曲面による浅い基礎の支持力特性の表現

(a) 一般的考察 さまざまな荷重条件における基礎の支持力特性を扱うためには、支持力特性を closed form で表現できる方が見通しが良い。しかしながら、一般的に支持力問題の理論解を closed form で得ることは困難である。そのため、ここでは実験解に基づく closed form の実験式として、表現の簡便な Nova et al. の実験式 [1] を用いて議論を進めることにする。

Nova et al. は 1g 場において、砂質地盤上の浅い基礎に傾斜荷重および偏心荷重を載荷する支持力実験を行い、結果を鉛直荷重 V 、水平荷重 H およびモーメント荷重 M/B からなる 3 次元荷重空間内のマクロな破壊曲面として次式で表現した。

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

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

このマクロな破壊曲面をスケッチしたものが図 1 である。 μ 、 ψ はそれぞれマクロな破壊曲面を $V-H$ 面あるいは $V-M/B$ 面で切った断面の原点における傾きで

$$\mu = \left. \frac{dH}{dV} \right|_{V=0, M=0} \quad \psi = \left. \frac{dM}{B dV} \right|_{V=0, H=0} \quad (2)$$

*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)

†非会員 Delft Geotechnics

である。 β は H_{max} が発揮される V の値を決めるパラメータで、 $\beta = 1$ であれば H_{max} は $V = 0.5V_{max}$ の時に発揮されることになる。

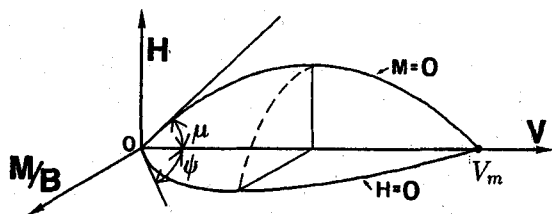


図 1. 浅い基礎のマクロな破壊曲面

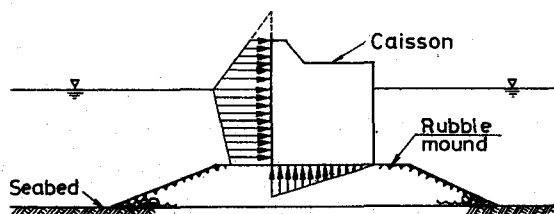


図 2. ケーソン式混成堤に作用する外力

(b) ケーソン式混成堤への適用 ケーソン式混成堤に作用する外力としては、図 2 に示す波力と揚圧力を考慮する。まずこれらを集中荷重に置き換え、図 3 に示す単純化を行う。ここで波力による水平荷重 H がケーソン底面から l_H の位置に作用すること、揚圧力およびケーソンの水中重量による鉛直荷重 V が底面中央から偏心量 e_c の位置に作用することを考慮すると、底面中央回りには

$$\frac{M}{B} = \frac{e_c}{B} \cdot V + \frac{l_H}{B} \cdot H \quad (3)$$

なるモーメント荷重が生じていることが理解される。式 3 を式 1 に代入すると、マクロな破壊曲面は V - H 面上に投影され

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

と表される。ここに $\bar{I}$, $\bar{\varepsilon}$ はそれぞれ

$$\bar{I} = \frac{\mu \cdot l_H}{\psi B}, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{e_c}{\psi B} \quad (5)$$

と定義される無次元量である。

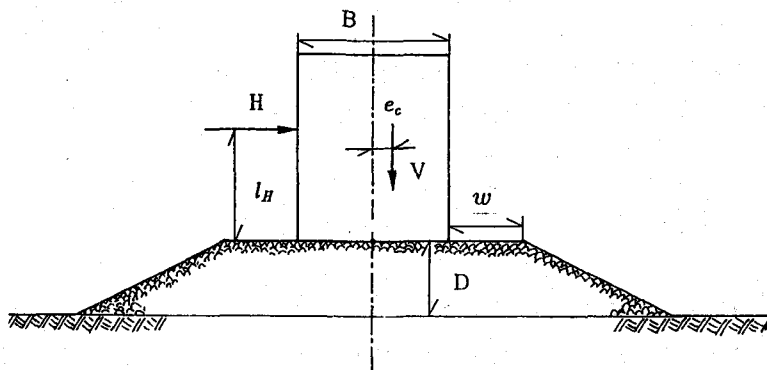


図 3. ケーソン式混成堤に作用する外力の単純化

従来の設計で用いられている“見かけの摩擦係数 $\tan \delta$ ”はこの V - H 面に投影されたマクロな破壊曲面の割線勾配を表していることになる。この式から、同一の鉛直荷重が載荷されているとき ($\xi = \text{const.}$) に、水平力作用高さが増加すれば l_H が大きくなり、発揮される水平支持力 h は減少することがわかる。したがって割線勾配も小さくなる。つまり水平力作用高さによって見かけの摩擦係数は低下する。また曲線は原点を通り、上に凸であることから、鉛直荷重が増加しても割線勾配が低下することがわかる。

以上のように見かけの摩擦係数 $\tan \delta$ は荷重条件によってその値を大きく異にする。そこで混成堤に作用する荷重条件について検討を行う。一般的に鉛直荷重レベルは捨石マウンドの鉛直極限支持力よりも十分小さい。したがって、捨石マウンド-ケーソン系の荷重状態はマクロな破壊曲面の原点側の部分にあると考えて良い。また揚圧力はケーソンの水中重量に比べるとかなり小さいので、鉛直荷重の偏心によって生じるモーメント荷重は小さいと考えられる。一方、水平荷重については、合田式を援用した図 2 の波圧力分布からも容易に想像できるように、ケーソン幅とほぼ同じオーダーの水平力作用高さを有した水平荷重が作用しており、底面にはかなり大きなモーメント荷重が生じていると考えられる。このことから、ケーソン部の滑動安定性を検討する場合、水平力作用高さによる“見かけの摩擦係数”の低下を十分に考慮する必要があることがわかる。

3. 破壊曲面の同定

(a) 捨石マウンドの支持力実験 これまでの Framework をもとに、実際の防波堤の滑動安定性を評価するためには、捨石マウンド-ケーソン系の支持力特性を具体的に把握しなければならない。原位置における捨石マウンド-ケーソン系の支持力実験は、陸上でほぼ実物に近い規模の実験マウンドを築造し支持力特性を求めた田中らの実験例 [2] を除いては、あまり行われていないようである。同実験では、幾何条件としてマウンド厚 $D = 2[m]$ の実験マウンド上に、肩幅 $w = 3[m]$ となるように幅 $B = 3[m]$ のブロックを設置した。荷重条件は偏心のない一定の鉛直荷重を載荷した状態で、2通りの水平力作用高さ $l_H = 0.55, 1.50[m]$ とした水平荷重を載荷している。

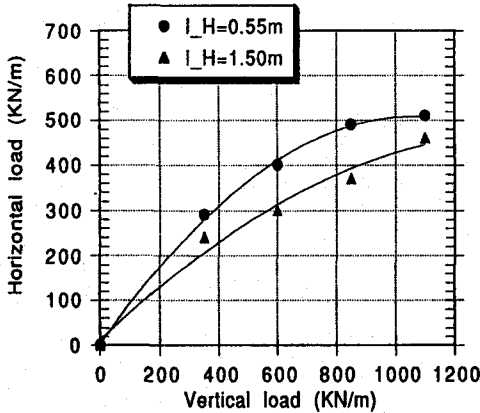


図 4. 田中らによる支持力実験の結果

表 1. 解析に用いたパラメータ

	Unit	Mound	Caisson
Young's Modulus	[KN/m ²]	2.5×10^5	2.5×10^{10}
Poisson's ratio	—	0.3	0.3
Friction angle	[Deg.]	30°	—
Dilatancy angle	[Deg.]	0°	—
Cohesion	[KN/m ²]	5.0	—
Unit weight	[KN/m ³]	18.0	0.0

この実験結果 (図 4) からマクロな破壊曲面のパラメータを同定すれば、 $V_{max} = 2400[KN/m]$ 、 $\mu \approx 0.97$ 、 $\psi \approx 0.43$ 、 $\beta = 1.0$ が得られる [3]。以下では同実験を参考に、非線形有限要素法 [4] によって支持力特性を評価する。

(b) 有限要素法による解析 まず、地盤は非関連流れ則に従う弾完全塑性 Mohr-Coulomb 材料であると仮定した。ケーソンは地盤よりも十分に大きな剛性を有する弾性体とし、その底面は完全に粗とした。解析に使用した材料パラメータを表 1 に示す。解析に使用したメッシュは図 5 で、厚さ $D = 2[m]$ の水平地盤上に自重を無視した幅 $B = 3[m]$ ケーソン構造物を設置している。解析は荷重制御条件で行い、ケーソンの上面に鉛直力および水平力を等分布荷重として作用させた。境界条件として両端はスライダー、下端は完全拘束とした。実際の実験マウンドは斜面を有するが、混成堤を対象とした低い鉛直荷重レベルの解析を行うので、斜面による支持力特性の変化は無視できると考え、解析では水平地盤を対象としている。

非線形計算は、各増分ステップに対して力の釣合のアンバランスが 0.5% 以下となるように反復計算を行い、解が収束しなくなったところで支持力破壊が生じたとみなした。ただし一般に Newton 法は大域的収束性を有さないもので、荷重増分ステップが大きすぎることによって解が発散することもある。そこで各解析後、荷重～変位曲線の形状をチェックし、荷重増分ステップが適当であったことを確認している。また極限荷重を精度よく求めるため、9 節点のアイソパラメトリック 2 次要素を使用した [5]。

(c) 鉛直支持力解析結果 予備的な解析として鉛直極限支持力の解析を行った。その結果 $V_M \approx 2100[KN/m]$ を得た。これを Terzaghi の支持力公式に当てはめると $N_\gamma = 25.9$ となり、内部摩擦角 30° に対しては過大な値である。一方、幾何条件を変え、十分な層厚と両端境界までの距離を確保した別の解析例では、 $N_\gamma = 15.4$ となる。これらから図 5 のメッシュを用いた解析では、地盤層厚が浅いため地盤底面の境界の剛性が支持力に反映されている可能性や両端の拘束条件が効いている可能性がある。

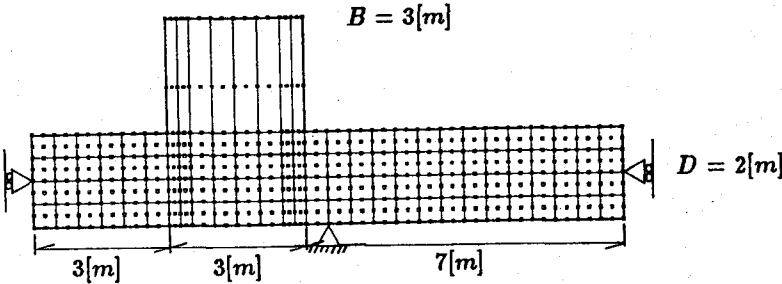


図 5. 有限要素解析に用いたメッシュ

(d) 組合せ荷重下の支持力解析結果 水平力作用高さをそれぞれ $l_H = 0.5, 1.5, 2.5, 5.0[m]$ とした場合の解析結果を図 6 に示す。これらの解析では荷重経路として、まず所定の鉛直荷重に達するまで鉛直荷重のみを単調に載荷し、次いで鉛直荷重を一定に保ったまま、水平荷重を一方方向に単調に負荷していく経路をとった。数値解析結果は、水平力載荷高さの増加や鉛直荷重の増加に伴う見かけの摩擦係数の低下を定性的によく表している。しかし原位置実験結果と定量的には一致せず、特に水平方向の支持力は実験結果の約 50% 程度しか発揮されていない。この理由として捨石マウンド材の内部摩擦角が 30° よりも大きいことや、ダイラタンシー角がゼロではないことが考えられる。特に、ダイラタンシー角は鉛直支持力にはほとんど影響を及ぼさないが [6]、本解析のように鉛直荷重レベルが低く、単純せん断モードが卓越する場合には大きな水平支持力を発揮すると考えられる (付録参照)。

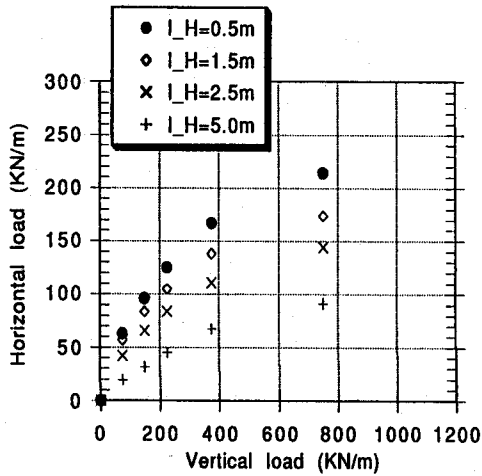


図 6. FEM による解析結果

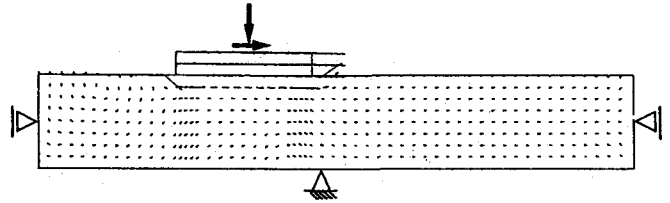


図 7. 滑動が卓越した破壊モード ($l_H = 0.5[m]$)

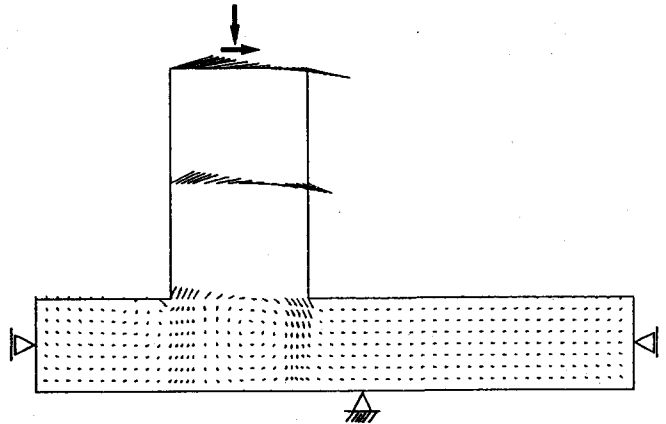


図 8. 転倒が卓越した破壊モード ($l_H = 5.0[m]$)

破壊モードの例を図 7、8 に示す。図 7 は水平力作用高さが $l_H = 0.5[m]$ のケースで、典型的な滑動モードが生じており、ケーソンがほとんど水平方向に滑動している様子が見られる。一方、図 8 は水平力作用高さが $l_H = 5.0[m]$ のケースで典型的な転倒モードが生じ、底面部に明瞭な回転中心が見られる。

これらの解析結果をもとにマクロな破壊曲面のパラメータの同定を行う。まず、鉛直荷重の偏心率が $e_c = 0$ より、式 4 は

$$h = \xi \frac{(1 - \xi)^\beta}{\sqrt{1 + \beta^2}} \quad (6)$$

となる。パラメータ β は最大水平抵抗力 H_{max} が発揮される時の鉛直荷重 $V = V_M / (1 + \beta)$ となることから推定できる。本解析ではほぼ $V \approx 700 [KN/m]$ で H_{max} が発揮されているので、 $\beta \approx 2.0$ となる。しかしこの値は地盤下部の剛な境界の影響が大きく出ていると考えられ、下部の境界の影響のあまり出ない鉛直荷重レベルの低い領域を表現するには適当ではないと考えられる。そこで通常よく用いられる $\beta = 1$ を仮定する。式 6 より、鉛直荷重が等しく、水平力作用高さの異なるケースを取り上げると、

$$\frac{h(l_H = 0.5[m])}{h(l_H = 2.5[m])} = \sqrt{\frac{1 + (\mu/\psi)^2 (2.5/3.0)^2}{1 + (\mu/\psi)^2 (0.5/3.0)^2}} \approx 1.5 \quad (7)$$

から2つのパラメータの比が $\mu/\psi = 1.4$ と求められる。ついで式6を用いたカーブフィッティングを行い、 $\mu \approx 0.63$ 、 $\psi \approx 0.44$ が求められる。これらのパラメータから鉛直極限支持力を推定すれば $V_M \approx 1350 [KN/m]$ で、支持力係数にして $N_\gamma \approx 16.7$ 程度であることを付記しておく。

以上のパラメータを用いて同定したマクロな破壊曲面と解析結果を $V-H$ 面上に表したのが図9である。図中の曲線は上から順にそれぞれ $l_H = 0.0, 0.5, 1.5, 2.5, 5.0 [m]$ のケースを表す。また $V = 375 [KN/m]$ 面で切った $H-M/B$ 面上の破壊曲面を図10に示す。破壊曲面の形状は H 軸方向に膨らんだ楕円で表されている。この破壊曲面を用いることにより、さまざまな荷重条件下での見かけの摩擦係数を評価することが可能である。また解析結果から、ケーソンに作用する水平力作用高さが滑動に大きく影響を及ぼす因子であることが容易に理解される。

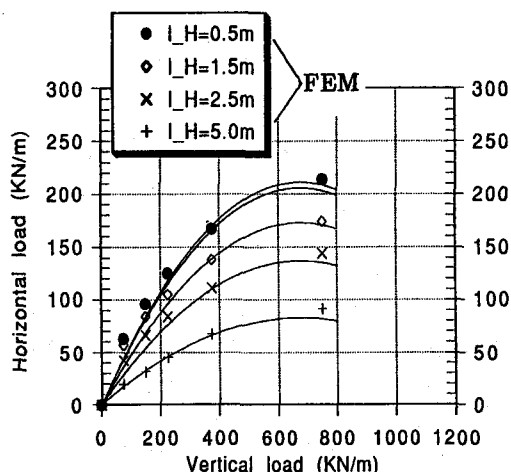


図9. FEM 解析結果と同定した
マクロな破壊曲面 ($V-H$ 面)

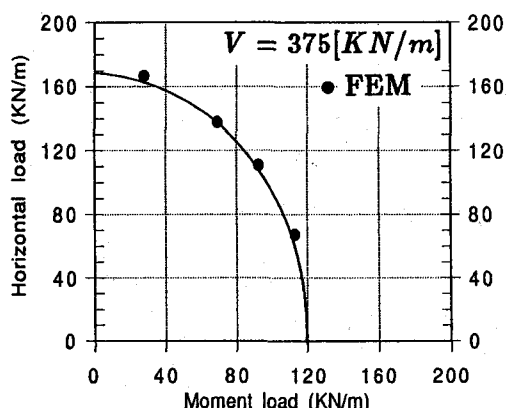


図10. FEM 解析結果と同定した
マクロな破壊曲面 ($H-M/B$ 面)

4. まとめ

従来、ケーソン式混成堤の設計に用いられている滑動安定計算では、見かけの摩擦係数として、先験的に得た定数 $\tan \delta = 0.6$ を用いて滑動抵抗を評価している。しかしながら、組合せ荷重を受ける浅い基礎の支持力問題と捉えれば、見かけの摩擦係数が荷重状態に依存することを簡明に表現することが可能である。

捨石マウンド-ケーソン系の支持力特性を評価するため、非線形有限要素法による解析を行った。解析結果は既往の実験結果と定性的によい一致を見た。また、これらの解析結果からマクロな破壊曲面を同定することにより、さまざまな荷重条件における見かけの摩擦係数の評価が可能である。解析結果が定量的に一致しなかった原因として、捨石マウンドの物性を適切に評価できていなかったことが挙げられる。

ケーソン式混成堤の滑動安定性を合理的に評価するためには、捨石マウンド-ケーソン系の支持力特性を把握するとともに、ケーソンに作用する外力、特に水平力の作用位置についても十分に考慮する必要がある。

今後の課題として、より精緻な地盤のモデル化、繰り返し塑性による揺れ込み沈下の検討、地盤-流体-構造物系の相互作用の問題としての定式化などが挙げられる。

Appendix ダイラタンシーと水平支持力の関係

ダイラタンシーによる水平支持力の増加を要素の挙動から簡単に説明する。体積一定条件で単純せん断変形を与えたときの塑性ひずみ速度円を図A1に示す。ダイラタンシー角 α のため面 S に対する塑性ひずみ速度は図中のA点である。一方、破壊状態を考えると、応力円はMohr-Coulombの破壊線に接しているので、塑性ひずみ速度と応力の共軸性の仮定のもとで面 S に対する応力は図A2のB点になる。面 S 上の主応力とせん断応力の比を $\eta = \sigma/\tau$ とすれば、ダイラタンシー角 $0 \leq \alpha \leq \varphi$ に対して $\sin \varphi \leq \eta \leq \tan \varphi$ となる。ケーソン直下の大部分の要

素が単純せん断モードであれば、応力比 η はおおよそ見かけの摩擦係数 $\tan \delta = H/V$ に対応すると考えられる。

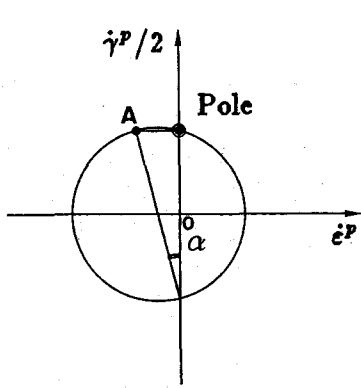


図 A1. 単純せん断を受ける
要素の塑性ひずみ速度

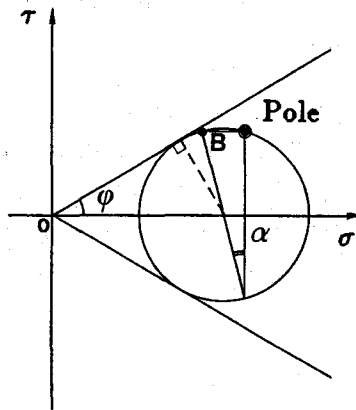


図 A2. 単純せん断を受ける要素の応力

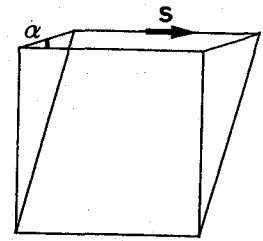


図 A3. 単純せん断を受ける要素

参考文献

- [1] Nova, R. & Montrasio, M. , "Settlements of shallow foundations on sand," Géotechnique 41, No. 2, pp. 243-256, 1991.
- [2] 田中洋行 他, "捨石マウンドの均しと支持力の関係について," 海洋開発論文集, 土木学会, Vol. 3, pp. 131-136, 1987.
- [3] 小林俊一 他, "波力を受けるケーソン構造物の安定性に関する考察," 海洋開発論文集, 土木学会, Vol. 8, pp. 81-86, 1992.
- [4] J. A. M. Teunissen, "Analysis of Plasticity and Non-coaxiality in Geomechanis," Dissertation Delft Univ. , 1991.
- [5] Nagtegaal, J. et al. , "On numerically accurate finite element solutions in the fully plastic range," Comp. Meth. Appl. Mech. Engng. Vol. 4, No. 2, pp. 153-177, 1974.
- [6] Davis, E. H. & Booker, J. R. , "The Bearing Capacity of Strip Footings from the Standpoint of Plasticity Theory," Proc. 1st Australia-New Zealand Conf. on Geomech. , Vol. 1, pp. 276-282, 1971.