

粘土と鋼矢板との相互作用に関する解析モデル

九州大学工学部 正○大谷 順 正 落合英俊
正 林 重徳 学 田中康徳
学 中野清人

1. まえがき: 軟弱粘土地盤の沈下・側方流動対策工として、鋼矢板工がしばしば用いられる。この対策工の効果を、変形問題として有限要素解析により評価、検討を行なう場合、粘土と鋼矢板との摩擦特性を解析に導入することは必要不可欠である。著者らは、この摩擦特性が、2つの材料を接触させて行なう定体積一面せん断挙動でシミュレートできるとして改良型一面せん断試験機による摩擦試験を行い、その特性を明らかにしてきた[1]。また、このモデルとして Goodman タイプの接触要素の導入を前提にした曲線近似によるパラメータ決定法についても報告している[2]。

本報告は、圧密圧力が 0.5 ~ 3.0 kgf/cm² の摩擦試験結果より、まず摩擦挙動のモデル化を行なった。次に、前述の Goodman タイプのモデル化の欠点を指摘した上で、通常の平面要素を基本とした、厚さを持つ要素の適用を提案し、その構成関係として、流れ則を導入した弾塑性構成式の定式化を行なったものである。

2. 摩擦特性のモデル化: 試料及び試験の概要は、文献[1]を参照されたい。図-1 ~ 3 は、各圧密圧力 ($p'_c = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ kgf/cm²) の試験結果である。図-1 はせん断応力とせん断変位関係を示し、図-2 は、そのせん断変位に対して垂直応力の変化を示したものである。またこれらの結果をもとにベクトルカーブを図-3 に示した。次に、これらの結果を解析に取り入れるために図-4 に示すモデル化を行なった。図-4(a) に示すように、モデルはその特性より 3 つの状態に区分した。これはせん断応力がピークに到るまでの線形部分 I、ピーク後残留状態までの部分 II と残留状態 III から成る。ここで状態 II ではひずみ軟化傾向を示すが、この図より明らかなように垂直応力は減少している。また図-4(b) のベクトルカーブより状態 II、III はある降伏曲面上にあると考えられ、流れ則を導入した塑性論の適用が可能となる。以下この解析手法と構成関係について述べる。

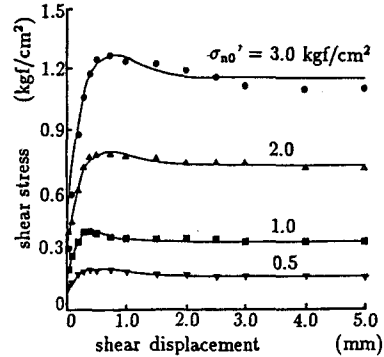


Fig.1 Shear stress - shear displacement relation from friction test.

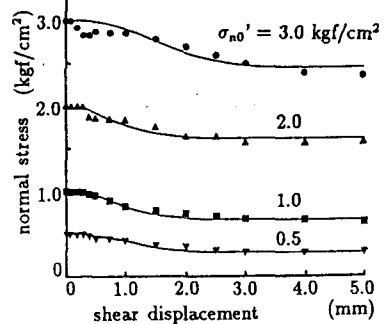


Fig.2 Normal stress - shear displacement relation from friction test.

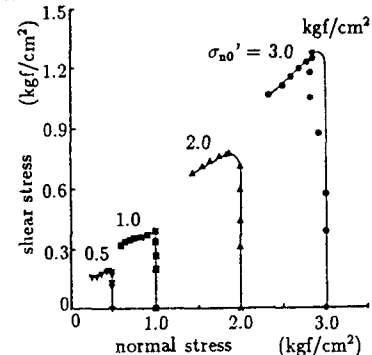


Fig.3 Stress path from test results.

3. 解析モデルとその定式化: 上述の実験結果より応力と変位関係が下式で表示される。

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma'_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ss} & k_{sn} \\ k_{ns} & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_s \\ w_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

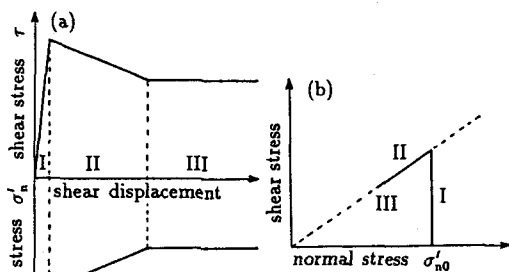


Fig.4 Model behavior of friction property between clay and steel.

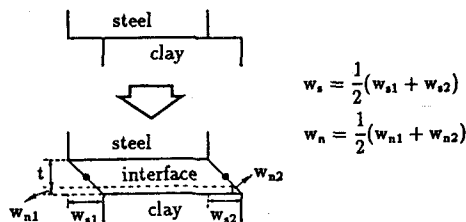


Fig.5 Definition of shear and normal strains.

上式の諸量については、文献[2]を参照されたい。まず、数値解析モデルとして、図-5に示すように厚さ t を持つ要素を考え[3]、換算ひずみ量を以下のように定義する。

$$\gamma = \frac{w_s}{t} = \frac{1}{2} \left(\frac{w_{s1}}{t} + \frac{w_{s2}}{t} \right) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{w_n}{t} = \frac{1}{2} \left(\frac{w_{n1}}{t} + \frac{w_{n2}}{t} \right) \quad (3)$$

ゆえに、式(1)は次式に書き換えられる。

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma'_n \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \gamma \\ \varepsilon \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{ここで、} [D] = \begin{bmatrix} \frac{k_{ss}}{t} & \frac{k_{ns}}{t} \\ \frac{k_{ns}}{t} & \frac{k_{nn}}{t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

以上よりマトリックス $[D]$ は、通常の応力-ひずみ関係を表わす構成マトリックスと同様であり、土を対象とした構成則の導入が可能となる。また、軟弱粘土と鋼材との相互作用は、その剛性が著しく異なる理由から、Goodmanタイプのようなひずみの適合条件を満足しない要素の導入は、不適当であると考えられる。

次に、一般的な弾塑性マトリックスの誘導について述べる。まず摩擦挙動における降伏関数を以下のように定義する。

$$f = f(\sigma'_n, \tau) \quad (6)$$

全ひずみ増分ベクトル dE は、その弾性部分と塑性部分より

$$dE = dE_e + dE_p \quad (7)$$

ここで、 $dE = \{ d\gamma \quad d\varepsilon \}^{-1}$ であり、それぞれの成分も同様である。関連流れ則を適用すると、塑性増分ひずみは、

$$dE_p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (8)$$

式(6)、(7)、(8)と $df = 0$ より最終的に下式が導かれる。

$$\begin{Bmatrix} d\tau \\ d\sigma'_n \end{Bmatrix} = [D_{ep}] \begin{Bmatrix} d\gamma \\ d\varepsilon \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここで、

$$[D_{ep}] = [D_e] - [D_p]$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{k_{ss}}{t} & 0 \\ 0 & \frac{k_{nn}}{t} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{f_s^2 k_{ss}^2}{tD} & \frac{f_s f_n k_{ss} k_{nn}}{tD} \\ \frac{f_s f_n k_{nn} k_{ss}}{tD} & \frac{f_n^2 k_{nn}^2}{tD} \end{bmatrix}$$

また、 $f_n = \frac{\partial f}{\partial \sigma'_n}$ 、 $f_s = \frac{\partial f}{\partial \tau}$ 、 $D = \frac{1}{t}(k_{nn} f_n^2 + k_{ss} f_s^2)$ であり、また式(1)において弾性状態の k_{sn} 、 k_{ns} は考慮していない。

本報告では、降伏関数については一般的な関数として表示しているが、クーロン摩擦則はその代表的な応用と考える。

4. 今後の展望: 粘土と鋼矢板との摩擦を評価するモデルとして厚さを持つ接触要素の定式化を行った。今後は、文献[2]で考察したモデルと共に解析に導入し、解析結果よりその妥当性を検討していく所存である。最後に、今回のモデル化は鋼材の表面がなめらかな場合のものであることを付け加えておく。

参考文献 (1) 中野ら”粘土と鋼矢板の摩擦特性” 昭和63年度土木学会西部支部研究発表会。(2) 中野ら”粘土と鋼矢板との相互作用モデルにおけるパラメータ決定手法、土木学会第44回年次講演会。(3) Desai et al.”Thin-Layer Element for Interfaces and Joints”, Int. Jour. for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, 1984.