

III-174

境界面における砂のダイレイタンス挙動のシミュレーション

大阪大学 工学部 辛 嘉靖

大阪大学 工学部 松井 保

大阪大学 大学院 ○水野 克彦

1. はじめに

補強斜面の挙動を予測するためには、土と補強材の境界面におけるせん断摩擦特性を十分把握することが必要である。著者らは、境界面における拘束状態のダイレイタンス挙動を表現するための力学モデルを、すでに提案している¹⁾。

本報告では、提案しているモデルを用いて、定体積状態でのせん断試験と引き抜き試験について境界面における砂のダイレイタンス挙動をシミュレートしたものである。

2. 解析モデル

クーロンの降伏関数と関連流れ則に基づいた境界面における拘束ダイレイタンス特性は既に求められている¹⁾。すなわち、この簡単な弾塑性理論を用いると境界面におけるせん断過程下のダイレイタンス状態にある鉛直応力の増分は次式で示される。

$$d\sigma_n = \frac{K_n K_s \tan \phi}{K_s + K_n \tan^2 \phi} ds \quad (1)$$

ここに、 K_n 、 K_s はそれぞれ境界面の垂直およびせん断弾性係数、 ϕ は内部摩擦角、 $d\sigma_n$ は垂直応力増分、 ds はせん断変位増分である。

また、Generalized plasticity theoryを用いると、式(1)は次式のように変形される。

$$d\sigma_n = - \frac{n_{s1} n_{t2} K_n K_s}{H + (n_{t1} n_{s1} K_n + n_{s2} n_{t2} K_s)} ds \quad (2)$$

ここに、 n_{s1} 、 n_{s2} は塑性ポテンシャル面における垂直およびせん断応力の単位ベクトル成分、 n_{t1} 、 n_{t2} は塑性降伏面における垂直およびせん断応力の単位ベクトル成分、 H はひずみ硬化係数である。

塑性ポテンシャル面および降伏面における単位ベクトル成分はそれぞれ次式で表される。

$$(n_{s1}, n_{s2}) = (d_s, 1) \frac{1}{\sqrt{1+d_s^2}},$$

$$(n_{t1}, n_{t2}) = (d_t, 1) \frac{1}{\sqrt{1+d_t^2}} \quad (3)$$

ここに、 $d_s = (1 + \alpha) (M_t - \eta)$,

$$d_t = (1 + \alpha) (M_t - \eta), \quad \eta = \frac{\sigma_s}{\sigma_n}$$

また、 M_s は限界状態曲線の傾きで、一般に M_t は相対密度と M_s の積である。本研究では、 M_t/M_s と間隙比 e との関係は双曲線で表される²⁾。また、 α は材料定数である。

3. 境界面におけるダイレイタンス挙動のシミュレーション

3. 1. 定体積せん断試験

上記のモデルを用いて、砂との境界面の定体積せん断試験のシミュレーションを行った。解析結果を図-1に示す。図-1は、異なる M_t/M_s による応力経路を示している。用いたパラメータを表-1に示す。図中には同時に、垂直応力変化が減少から増加に変化する点を結んだ線（変相線）が示されている。図-1より、 M_t/M_s が小さい場合は、せん断にともないダイレイタンスは負になるが、 M_t/M_s が大きい場合、ダイレイタンスは負から正へと変化することがわかる。

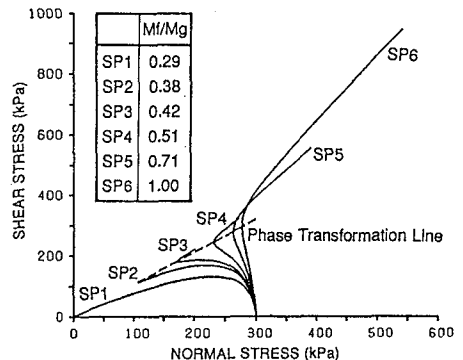
図-1 異なる M_t/M_s による応力経路

表-1 解析に用いたパラメータ（定体積せん断試験）

M_s	1.05
M_t	0.309~1.05
K_n (MPa/m)	300.00
K_s (MPa/m)	350.00
H_0 (1/m)	700.00
β_0	100.00
β_1	0.13
α	0.45

3.2. 引き抜き試験

上記モデルを有限要素解析に適用し、ジオテキスタイルの引き抜き試験の解析を行った。解析に用いるパラメータは、砂質土は3軸試験結果より、また砂質土とジオテキスタイルの境界面は直接せん断試験結果より求められる。表-2に砂質土および砂質土-ジオテキスタイル境界面の解析パラメータを示す。図-2に解析に用いたメッシュ図を示す。

境界面において M_o の値は一定で、 M_r/M_o の値を変化させた場合の解析結果を図-3、図-4に示している。図-3は、引き抜きせん断応力-変位関係であるが、 M_o/M_r が小さくなるとともに引き抜きせん断応力も小さくなる。図-4は、図-2に示した要素Aの応力状態を示している。図-a)より、せん断応力は、 $M_r/M_o=1.0, 0.5$ のとき、せん断とともに増加するが、 $M_r/M_o=0.25$ のとき減少する。図-b)より、垂直応力は、 $M_r/M_o=1.0, 0.5$ のとき、せん断とともに増加するが、 $M_r/M_o=0.25$ のとき減少する。図-c)より、 M_r/M_o の値が小さい場合は、負のダイレイタンスが発生するが、 M_r/M_o が大きくなると、ダイレイタンスは負から正へと変化することがわかる。これは図-1の結果と良好に一致している。

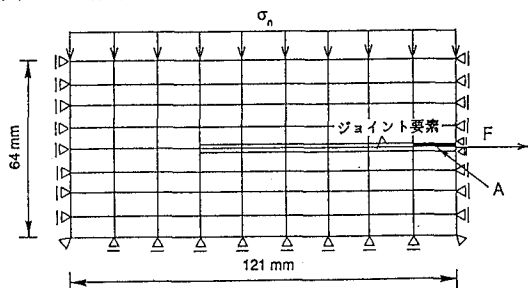


図-2 引き抜き試験の解析モデル

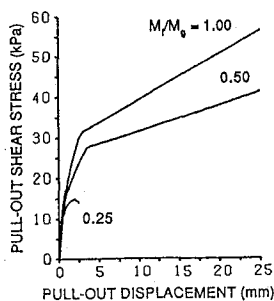
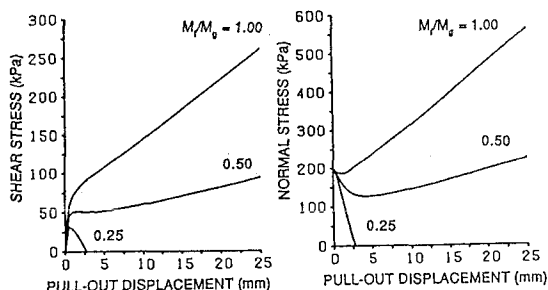


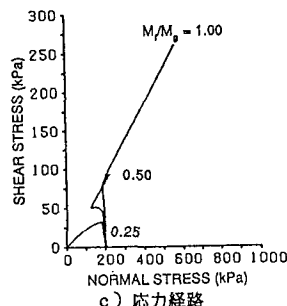
図-3 引き抜き試験の解析結果

表-2 解析に用いたパラメータ(引き抜き試験)

	砂質土	砂質土-ジオテキスタイル
M_o	1.22	0.40
M_r	1.20	0.1, 0.2, 0.4
M_r/M_o	0.98	0.25, 0.5, 1.0
K (MPa)	370.00	—
G (MPa)	430.00	—
K_n (MPa/m)	—	370.00
K_s (MPa/m)	—	430.00
H_o	1800.00	1800.00
β_o	2.50	2.50
β_s	0.13	0.13
α	0.45	0.45



a) せん断応力-変位関係 b) 垂直応力-変位関係



c) 応力経路

図-4 要素Aの応力状態の解析結果

4. 結論

定体積せん断試験と引き抜き試験について、境界面における砂のダイレイタンス挙動をシミュレートした。その結果、砂との境界面における異なるダイレイタンス特性が解析的にも、有限要素解析でも表現できることがわかった。

<参考文献>

1. T. Matsui, K. C. San, "An elastoplastic joint element with its application to reinforced slope cutting", Soils and Foundations, Vol. 29, No. 3, pp95-104, 1989.
2. K. C. San, T. Matsui, "Simulation of phase transformation phenomena of sand", 土木学会第47回年次学術講演会, 1992.