

等方および移動硬化型モデルを用いた地中土圧問題の解析

名古屋工業大学

中井 照夫

” 大学院生

西村 珠美

大阪セメント

小林 敬昌

はじめに

等方硬化型および移動硬化型の粘土の弾塑性モデルを用いて、地盤の局部沈下問題と局部押し上げ問題の有限要素解析を行った。繰り返し載荷時の応力・ひずみ挙動や主応力軸の回転の影響すなわち応力誘導異方性を考慮できる移動硬化型のモデル (kinematic t_{ij} -clay model¹⁾) による解析結果とこれらの特性を考慮しない等方硬化型モデル (t_{ij} -clay model²⁾) の解析結果を比較し、応力誘導異方性の考慮の仕方が地盤の応力・変形挙動におよぼす影響を考察した。

1. 解析の方法

解析はStone・Woodが行った降下床実験³⁾を参考に、図-1に示す有限要素メッシュを用いて行っている。深さ20m幅66mの地盤の半幅を対象とし、この半幅地盤を660個の四辺形要素に分割している。また、田村ら⁴⁾の剛塑性有限要素解析と同様、局部沈下と局部押し上げの両ケースについて解析している。地盤の局部沈下や局部押し上げは図-1の右下部分に破線で示すような強制変位を与えることにより表現しているが、Stone・Woodの降下床実験³⁾同様地盤中の変位が不連続にならないようにスロープをつけて変位を与えている。解析地盤の両側面は滑らかとし、強制変位を与える部分を含め底面は十分粗い(水平方向の変位を許さない)としている。地盤材料は飽和した藤の森粘土を想定し、完全非排水条件下と完全排水条件下の両方で解析する。また地盤の初期応力は単位体積重量 $\gamma_v (=1.8 \text{ tf/m}^3)$ と静止土圧係数 $K_0=0.47$ から計算している。

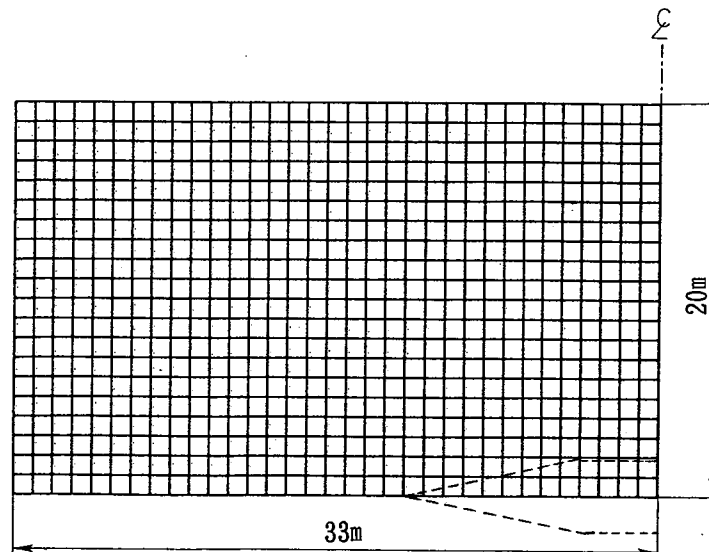


図-1 有限要素分割

Analysis of Earth Pressure in Ground by Isotropic and Kinematic Hardening Models;

T. Nakai, T. Nishimura (Nagoya Institute of Technology) and Y. Kobayashi (Osaka Cement).

2. 解析で用いた構成モデルの特徴

等方硬化型モデル (t_{ij}-clay model²⁾) および移動硬化型モデル (kinematic t_{ij} - clay model¹⁾) は三軸圧縮条件下の単調な応力経路下では、周知のCam-clay model⁵⁾ とほぼ同じ応力～ひずみ関係となる。しかし、Cam-clay modelでは難しい以下の諸特性が適切に考慮できるモデルとなっている。

- ① 土の変形・強度特性におよぼす中間主応力の影響
- ② 塑性流動方向の応力経路依存性

さらに、移動硬化型モデルでは等方硬化型モデル (Cam-clay model、t_{ij}-clay model) では表現できない

- ③ 応力履歴の影響や主応力方向の回転、つまり応力誘導異方性

も考慮できるモデルとなっている。表-1に藤の森粘土の土質パラメーターを示しているが $\gamma/(1+e_0)$ 、 $\kappa/(1+e_0)$ 、 ϕ' (comp.)、 α 、 ν_e は両モデルで共通のパラメーターであり、 ξ だけが移動硬化型モデルで新たに追加されたパラメーターである。図-2に平均主応力一定の三軸圧縮条件下で $\sigma_1/\sigma_3=3$ までせん断後三軸伸張側にせん断した時の3つのモデルによる解析結果の比較を示す。

表-1 藤の森粘土の土質パラメーター

$\lambda/(1+e_0)$	5.08×10^{-2}
$\kappa/(1+e_0)$	1.12×10^{-2}
ϕ' (comp.)	33.7°
α	0.7
ν_e	0.1
ξ	0.2

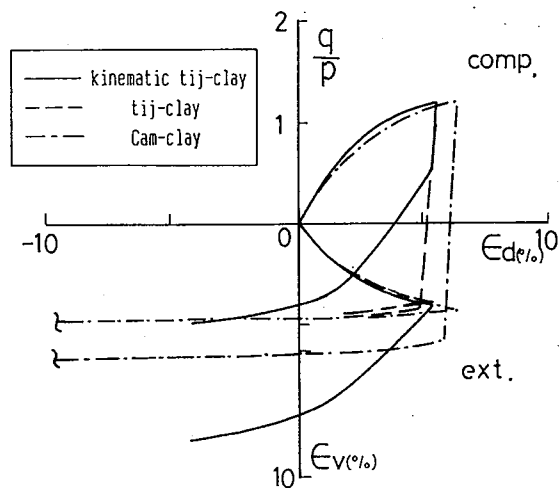


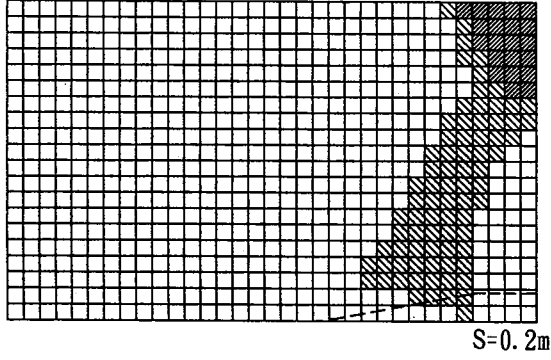
図-2 三軸圧縮・伸張試験の解析結果

3. 局部沈下問題の解析結果

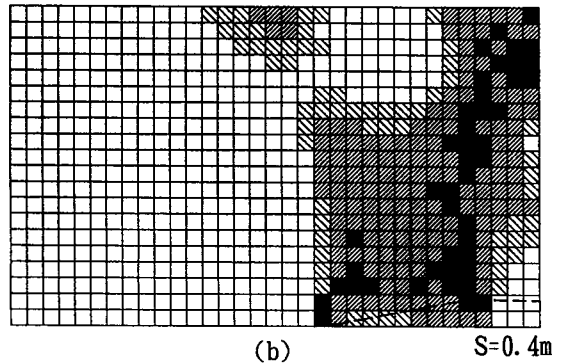
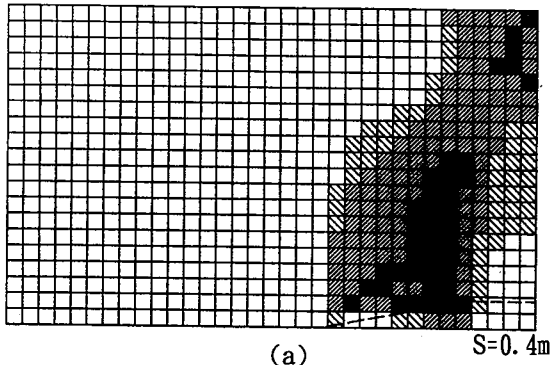
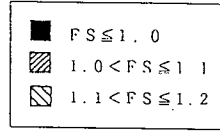
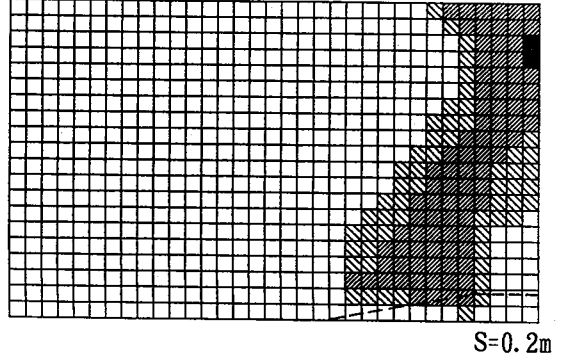
図-3(a),(b)は両モデルによる非排水条件下の地盤内安全率分布を示している。(ここに、Sは底面での強制変位量を表す。)また、図-4(a),(b)は排水条件下の地盤内安全率分布を示している。両条件下においてモデル間にそれほど有為な差は見られないが、移動硬化型モデルによる解析結果の方が破壊域や安全率の低い領域が遅く発生し、特に降下床のスロープ付近で安全率が高いことがわかる。図-5および図-6はそれぞれ非排水条件下および排水条件下における降下床部の平均応力～変位量関係である。以後の解析において、白ヌキのプロットは等方硬化型モデルによる結果を、黒くぬりつぶしたプロットは移動硬化型モデルによる結果を示している。また、非排水試験の解析結果では4角形のプロットは全応力を、丸形のプロットは有効応力を意味している。図-5により、底面平均土圧は有効応力では両モデルの間に大きな差はないが、全応力では移動硬化型モデルによる土圧の方が等方硬化モデルによるものより大きくなっており、初期土圧からの変化量は小さくなっていることがわかる。また、図-6の排水条件下でも移動硬化型モデルによる土圧の方が大きめになっていることがわかる。図-7, 8は、両モデルによる底面土圧分布を示しているが、ここでも移動硬化型モデルによる土圧分布の方が等方硬化型モデルによる土圧分布よりも変化が少なくなっている(特に、非排水条件の全応力分布や排水条件下の応力分布)ことがわかる。すなわち、主応力軸の回転がない場合、両モデルによる応力～ひずみ関係が同じになることを考えれば、これらモデルによる土圧の差は主応力軸の回転によるダイレタンスーの違いによるといえる。

以上の結果より、局部沈下問題の解析において応力履歴の影響や主応力軸の回転の影響を考慮しない通常

移動硬化型モデル



等方硬化型モデル

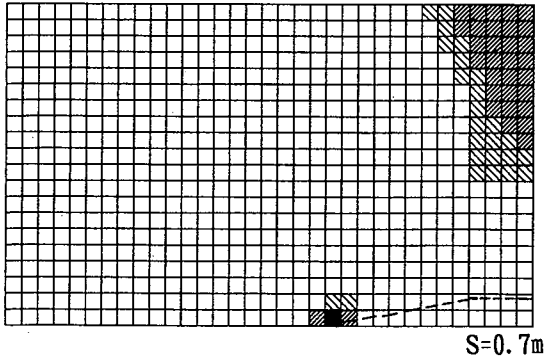


(a)

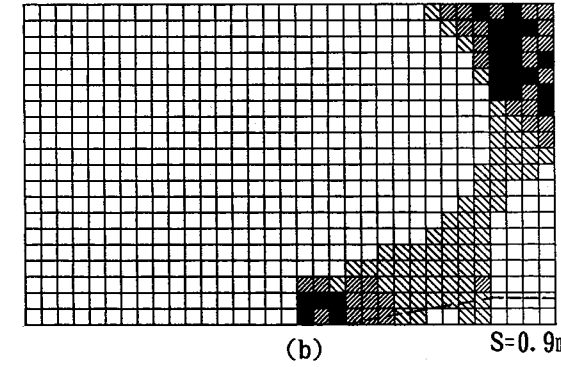
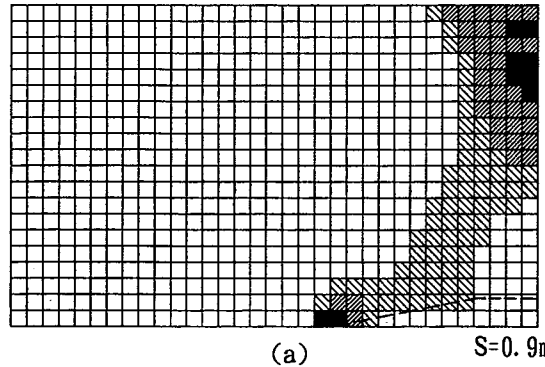
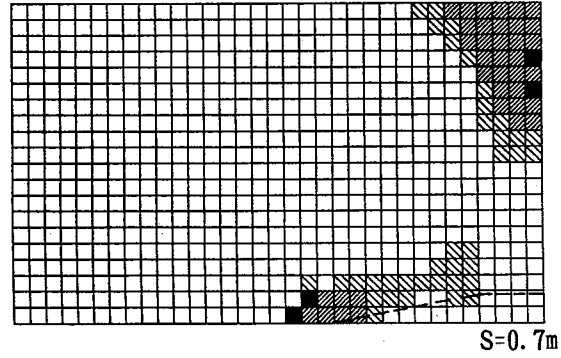
(b)

図-9 局部押し上げ時の非排水条件の粘土の安全率分布

移動硬化型モデル



等方硬化型モデル



(a)

(b)

図-10 局部押し上げ時の完全排水条件の粘土の安全率分布

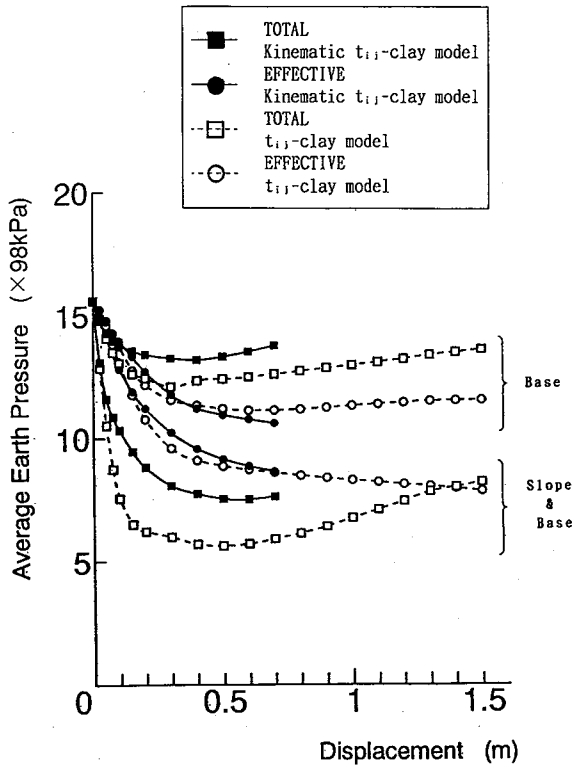


図-5 局部沈下時の非排水条件の粘土の降下床部分の底面平均土圧

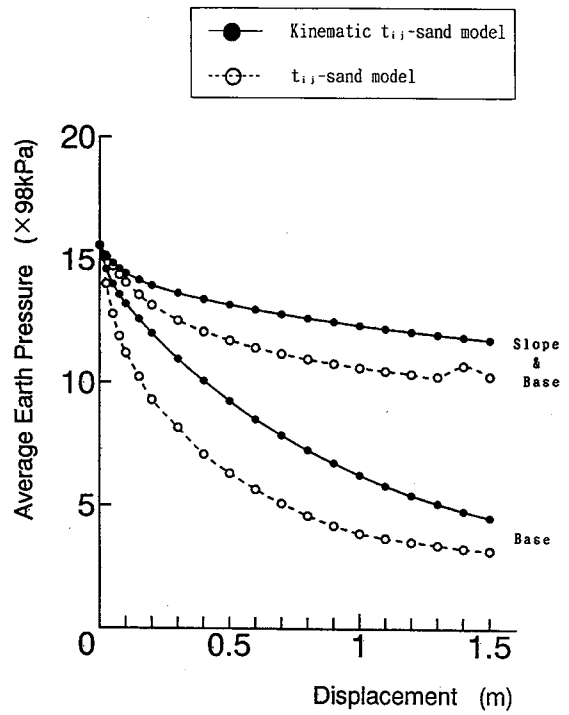


図-6 局部沈下時の完全排水条件の粘土の降下床部分の底面平均土圧

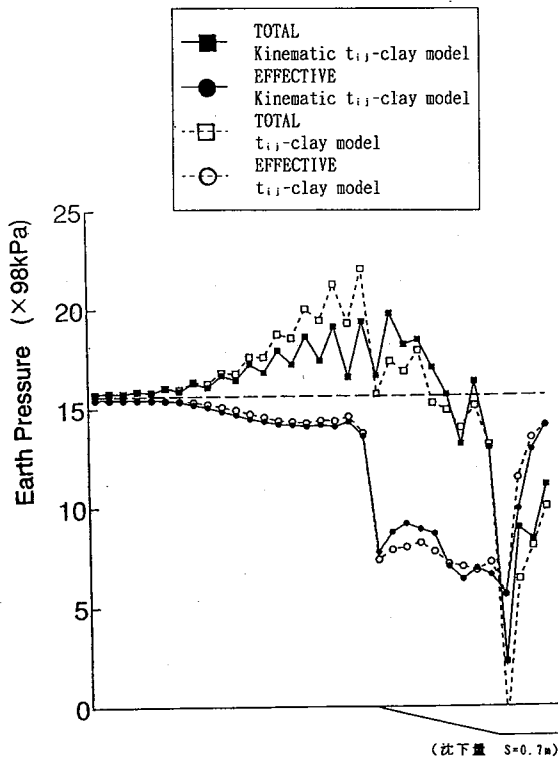


図-7 局部沈下時の非排水条件の粘土の底面土圧分布

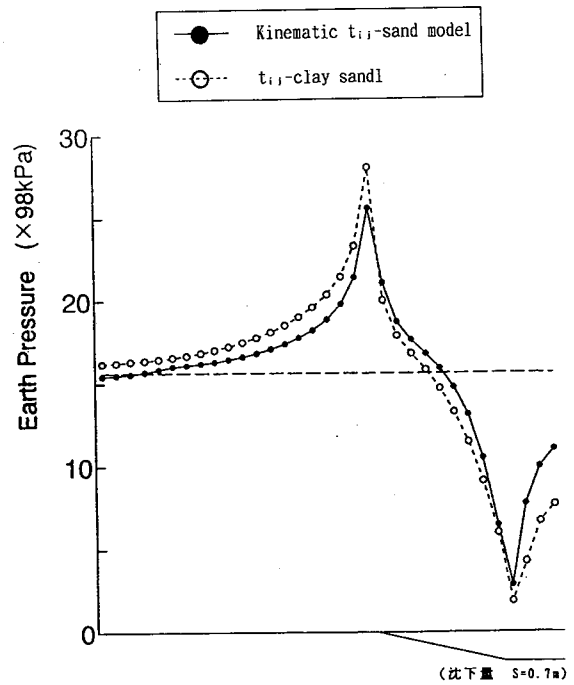


図-8 局部沈下時の完全排水条件の粘土の底面土圧分布

4. 局部押し上げ問題の解析結果

図-9(a), (b)および図-10(a), (b)は非排水および排水条件下の局部押し上げ時の地盤内安全率分布の解析を示す。ここでも、局部沈下時同様移動硬化モデルの方が破壊域や安全率の低い領域の発達が遅くなっているが、局部沈下の場合と異なりこれらの領域は上方であり横に広がらずに中心に向かって発達していくようである。

図-11, 12は、押し上げ部の平均土圧～変位関係、図-13, 14は底面土圧分布の解析結果を示している。ここでも、非排水条件下の解析では有効応力に大きな差がなくても、発生する間隙水圧はモデルにより異なり全応力に差があることがわかる。また、排水条件下でも、発生するダイレタンシーの差のため平均土圧や土圧分布に差が生じている。その結果、移動硬化型モデルによる土圧は局部沈下の場合と同様初期土圧からの変化量が小さくなるため、この場合等方硬化モデルの土圧よりも小さくなることになる。図-15, 16は1例として排水時の両モデルによる地盤内の主応力分布図を示しているが、移動硬化モデルの方が主応力軸の回転が少なく応力の集中の度合も小さいようである。以上、局部押し上げ問題の解析においても移動硬化モデルと等方硬化モデルの解析結果は局部沈下問題と同様の差異を示していることがわかる。

5. 考察

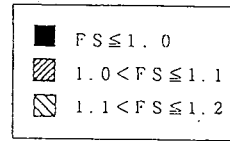
以上の一連の局部沈下あるいは局部押し上げ問題の解析結果は以下の様にまとめられる。

主応力軸の回転を含む応力誘導異方性を考慮した移動硬化型モデルの方がこれらの点を考慮しない等方硬化型モデルよりも破壊領域の発達が遅く応力の集中度も大きくなく、主応力軸の回転も少ないといえる。ここに、等方硬化型モデルでは塑性流動方向は移動硬化型モデルよりも変化しにくい特性をもっている。すなわち、等方硬化型モデルでは種々の方向に異なる応力増分を与えてもひずみの出方はそれほど変化しない。これを逆にみると等方硬化型モデルではわずかな変形パターン（ひずみの出方）のちがいでにより地盤の応力状態が大きく異なる可能性があることを意味する。その結果、ここでの解析のように、同じ強制変位を与えても等方硬化型モデルによる解析結果の方が移動硬化型モデルの結果よりも地盤内の応力の変化が大きく破壊領域の発達が早く応力の集中度や主応力軸の回転が大きくなることになる。したがって実際の土の応力～ひずみ挙動を移動硬化型モデルの方がより忠実に表現できることを考えれば、よく使われる等方硬化型モデル（例えばCam - clay model 等）による解析ではこれらの点に注意して解析結果を解釈する必要があるだろう。

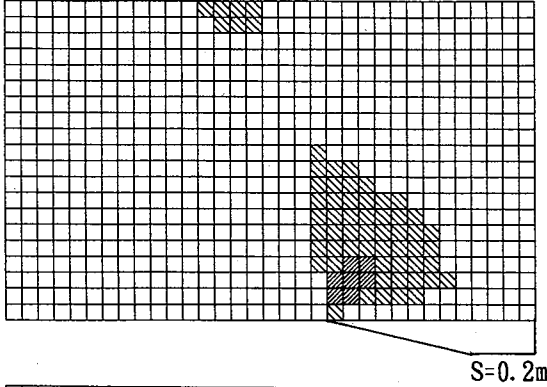
文献

- 1) Nakai & Hoshikawa (1991): Proc. 7th IACMOG, Vol.1, pp.655-660.
- 2) Nakai & Matsuoka (1986): Soils & Foundations, Vol.26(3), pp.81-98.
- 3) Stone & Wood (1988): Geol. Soc. Eng. Geol. Special Publication 5, pp.159-165.
- 4) 田村・足立 (1992): 第27回土質工学研究発表会, Vol.2, pp.2047-2048.
および第47回土木学会年次講演会, III-333, pp.706-707.
- 5) Schofield・Wroth (1968): Critical State Soil Mechanics.

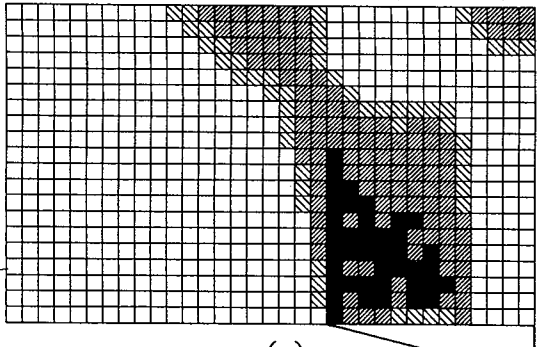
の等方硬化型のモデルでは移動硬化型モデルに比べ地盤内の安全率は低めに全土圧は小さめに、土圧分布の変化は過大に評価することになる。



移動硬化型モデル



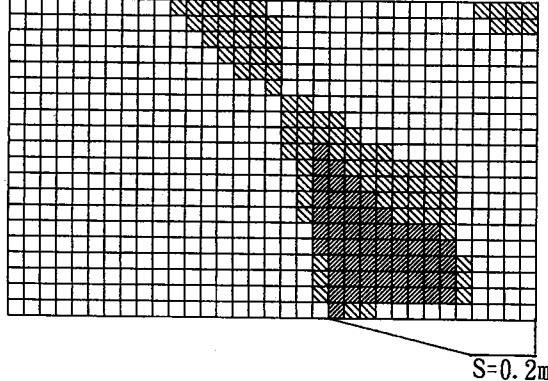
S=0.2m



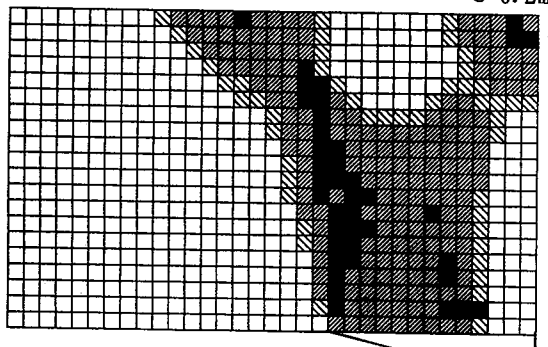
S=0.4m

(a)

等方硬化型モデル



S=0.2m

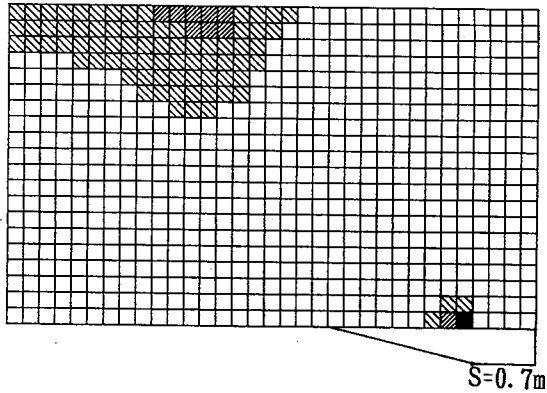


S=0.4m

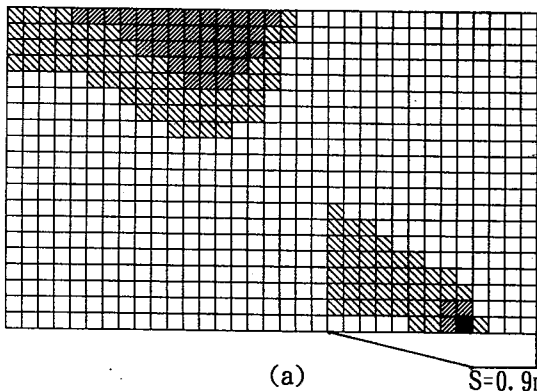
(b)

図-3 局部沈下時の非排水条件の粘土の安全率分布

移動硬化型モデル



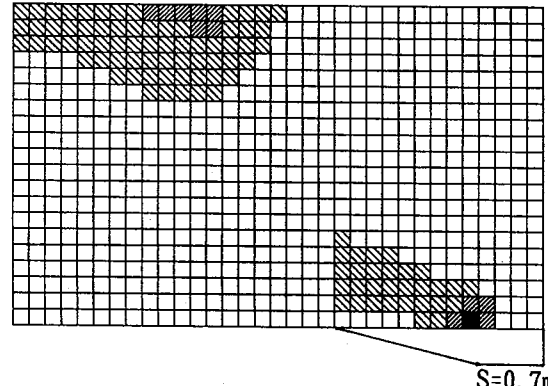
S=0.7m



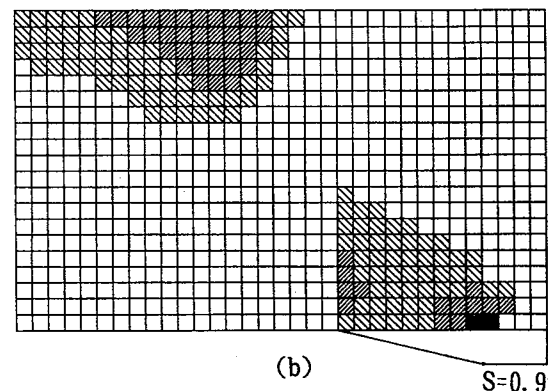
S=0.9m

(a)

等方硬化型モデル



S=0.7m



S=0.9m

(b)

図-4 局部沈下時の完全排水条件の粘土の安全率分布

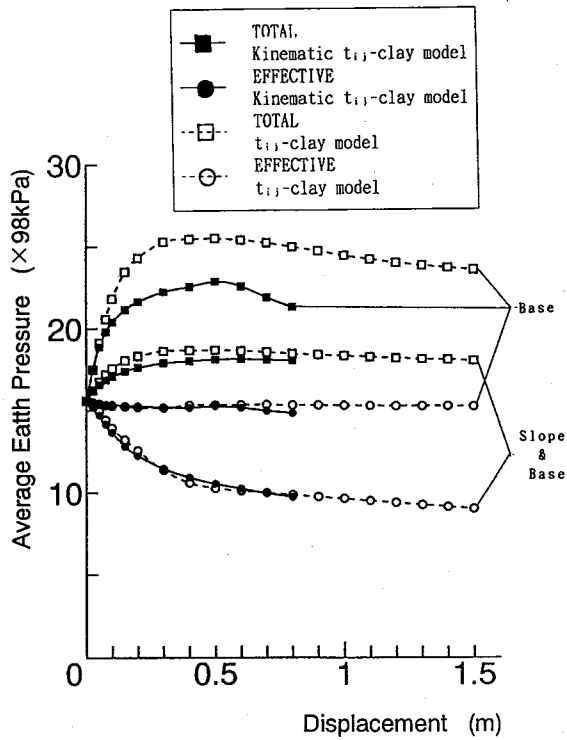


図-11 局部押し上げ時の非排水条件の粘土の押し上げ変位部分の底面平均土圧

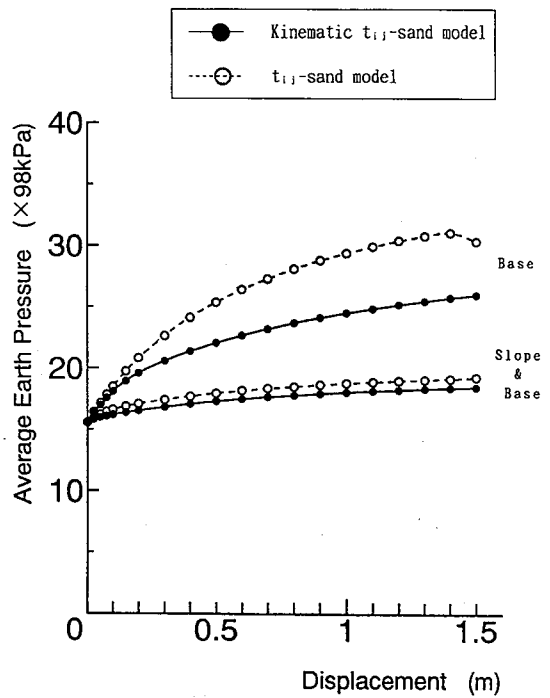


図-12 局部押し上げ時の完全排水条件の粘土の押し上げ変位部分の底面平均土圧

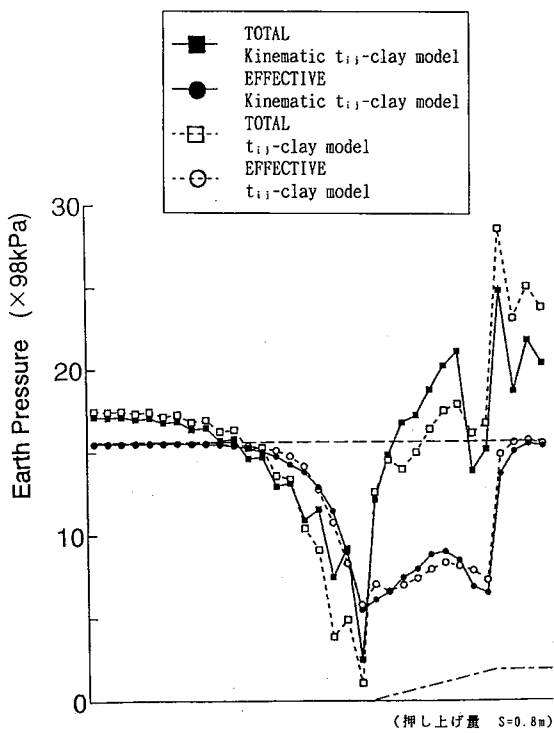


図-13 局部押し上げ時の非排水条件の粘土の底面土圧分布

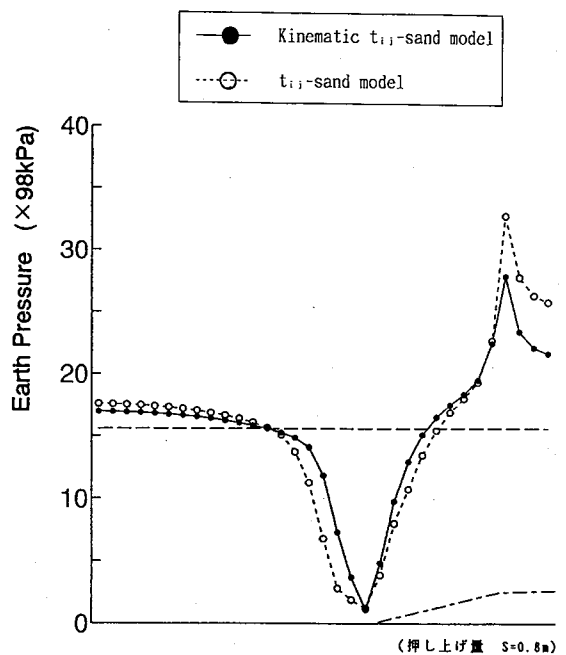


図-14 局部押し上げ時の完全排水条件の粘土の底面土圧分布

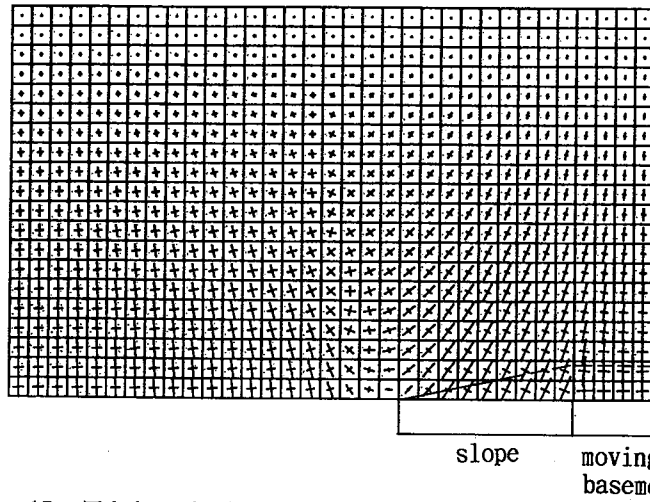


図-15 局部押し上げ時における完全排水条件の粘土の主応力図
(移動硬化型モデル)

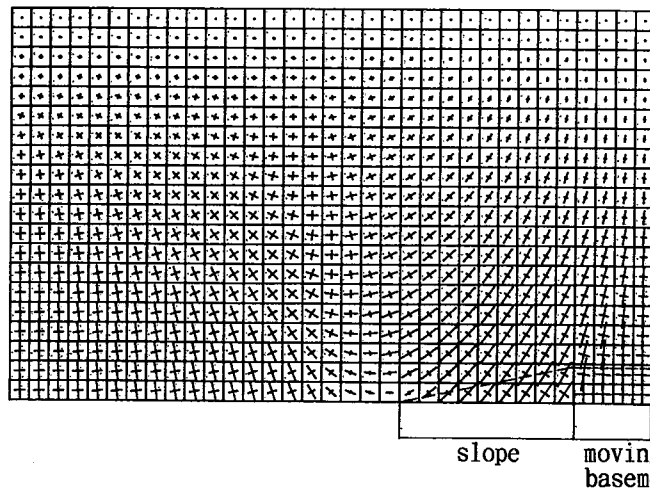


図-16 局部押し上げ時における完全排水条件の粘土の主応力図
(等方硬化型モデル)