

1.はじめに この報告は有効応力理論による地震応答解析のための土のモデル化について述べたものである。ここで提案する構成則は、土のせん断応力とひずみの関係をバネとスライダから成る力学的モデルに変換して解析することを試みたものである。せん断過程中に生じる負のダイレタンシー量はエネルギー損失から、正のダイレタンシー量は弾性エネルギーからそれぞれ算定されると仮定している。

2. 間隙水圧を考慮しないときの土の応力～ひずみ関係の力学的モデル化

解析に使用した力学的モデルはIwan¹⁾のレオロジー・モデルとして知られているものである。モデルはバネとクーロン・スライダから構成されており、個々のバネの強さとスライダの摩擦力を変えることで弾塑性的な応力とひずみの関係を表現できる。弾塑性体をモデル化する際にその応力～ひずみ関係が満足しなければならない一般的な条件として、Masingの規則がある。Iwanモデルのようなバネとスライダによって構成されるモデルでは、Masingの第1および第2規則を常に満足する²⁾ことから、問題はどのようにして実測された土の応力～ひずみ関係をIwanモデルのパラメータに変換するかということになる。変換にあたって土の骨格曲線が満足しなければならない条件として、条件1: 骨格曲線は一価の単調な増大関数である。条件2: 骨格曲線の接線勾配は原点から離れるにしたがい単調に減少する。があげられる。

3. 有効応力理論への力学的モデルの展開

(1) エネルギー損失と弾性エネルギーの算定: Iwanの力学的モデルでは応力とひずみはバネの伸縮量とスライダの移動量によって表現されることから、せん断過程でのエネルギー損失はスライダの行った仕事として計算される。また、弾性エネルギーは各バネの伸縮量から求められる。

(2) せん断応力と有効拘束応力との関係についての仮定: 動的なせん断応力は有効拘束応力の n 乗に比例し、 n はひずみが大きくなるにしたがい1.0に近づくことが実験的に知られている。いま、ひずみの大きさによらず n は1.0をとるとし、初期状態として拘束応力が σ のとき(間隙水圧が発生していない状態)の土の応力～ひずみ関係から求められたモデル(以後、初期状態モデルと呼ぶ)でのせん断応力を T 、有効応力が σ' の状態でのせん断応力を τ とおくとき、 $\tau/\sigma' = T/\sigma$ が常に成立つと仮定する。初期状態モデルから計算される時刻 t での弾性エネルギーを E_p とおくと、 σ' の状態での弾性エネルギー E_p' は $E_p \cdot \sigma' / \sigma$ となる。また、初期状態モデルで δt 間に失われるエネルギーを δE_L とおくと、 σ' の状態で δt 間に失われるエネルギー $\delta E_L'$ は $\delta E_L \cdot \sigma' / \sigma$ となる。エネルギー損失 E_L' は $\delta E_L'$ を時刻 t まで積分することで求められる。弾性エネルギーが状態量であるのに対して、エネルギー損失は累積量である。

(3) 負のダイレタンシー量とエネルギー損失との関係についての仮定: 片田ら³⁾はオンライン土質実験の結果から、ひずみエネルギーの蓄積量と発生する間隙水圧との間により対応関係のあることを報告している。片田らのいうひずみエネルギーの蓄積量はこの報告でのエネルギー損失と同義のものである。また、酒井⁴⁾らは砂の三軸試験結果から、累積せん断仕事と間隙水圧との間に指数関数で表される関係があるとしている。このような事実をふまえ、ここでは”土の骨格構造が収縮するのに要するエネルギーはエネルギー損失に比例する”と仮定する。

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_n^2}{m\nu} = E_L' \cdot \alpha \quad (1)$$

ここで ϵ_n は体積収縮ひずみ、 $m\nu$ は土の骨格構造の体積圧縮係数、 α はエネルギー損失にしろる体積収縮エネルギーの割合を示す係数で、1.0以下の値となる。

(4) 正のダイレタンシー量と弾性エネルギーとの関係についての仮定: 弾性体の有限変形理論によれば、せん断面に垂直なひずみはせん断ひずみの2乗の2分の1となる。弾塑性体の弾性エネルギーはせん断ひずみの2乗の次元をもつことから、ここでは”土の骨格構造が膨張するときの仕事は弾性エネルギーに比例する”と仮定する。

$$\sigma' \cdot \varepsilon_p = -E_p' \cdot \beta, \quad \sigma \cdot \varepsilon_p = -E_p \cdot \beta \quad (2)$$

ここで ε_p は体積膨張ひずみ、 β は比例定数である。

(5) 過剰間隙水圧とせん断応力： せん断過程で生じる体積ひずみ ε は ε_N と ε_p の和となる。非排水状態では骨格構造の体積変化はほとんど無視できることから、この体積ひずみ ε は有効応力の減少にともなう骨格構造の膨張によるひずみと等しいとおける。

$$p = K \cdot \varepsilon \quad (3)$$

ここで p は過剰間隙水圧、 K は土の骨格構造の体積弾性率である。

4. 計算結果 せん断面に垂直な拘束応力が 1.0 kgf/cm^2 (98.0 kN/m^2) の密とゆるい砂の試料に、 0.3 kgf/cm^2 (29.4 kN/m^2) の大きさの繰返しせん断応力をひずみ制御で載荷した試験をシミュレートした結果を図-1と図-2に示す。計算パラメータとして骨格曲線は堀井ら⁵⁾の行った排水せん断試験の結果 ($\sigma_v' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$) を採用した。密な砂については $K=1/m_v=350 \text{ kgf/cm}^2$ (34300 kN/m^2)、 $\alpha=0.08$ 、 $\beta=1.0$ とした。ゆるい砂については $K=1/m_v=250 \text{ kgf/cm}^2$ (24500 kN/m^2)、 $\alpha=0.14$ 、 $\beta=0.6$ とした。せん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係では反転時の τ にやや不自然な点も見られるが、全体として砂の液状化過程をかなり良く再現していると思われる。

5. まとめ 土のせん断応力とひずみの関係を力学的モデルに変換し、エネルギー損失と弾性エネルギーからダイレクشنシー量が算定されると仮定して解析した結果、砂の液状化過程をかなり良く再現できることがわかった。今後は土質試験結果との比較をふくめ、パラメータの設定について調べていきたい。最後になりましたがご討議いただいた東京大学生産技術研究所の片山恒雄教授と土木技術研究所の阿部博氏に感謝いたします。

参考文献 1) Iwan W.D. (1966) : App., Mech., December, pp.893-900 2) Joyner W.B. and Chen A.T. (1975) : BSSA, Vol.65, No.5, pp.1315-1336 3) 片田敏行、阿部幸樹、東山 晃 (1987) : 土木学会論文集、第388号、pp.43-50 4) 酒井 晃、落合英俊 (1986) : 土木学会論文集、第370号、pp.75-83 5) 堀井宣幸、プラタンテージ B.S. 龍岡文夫 (1988) : 第23回土質工学研究発表会、pp.451-454

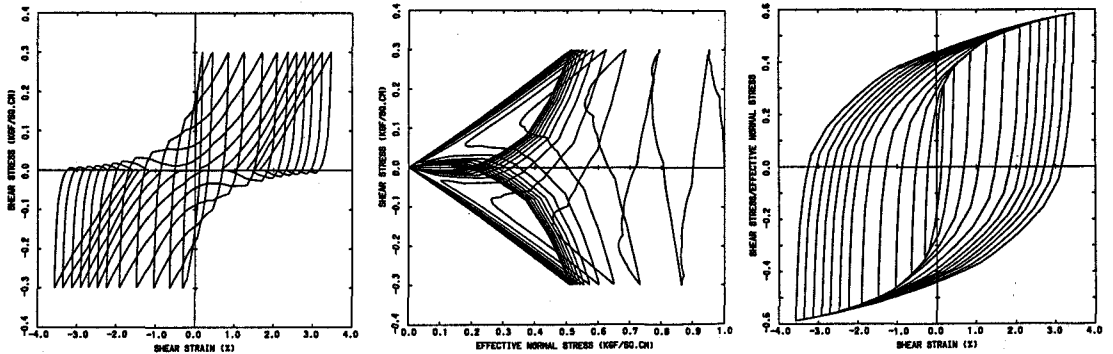


図-1 密な砂の計算結果

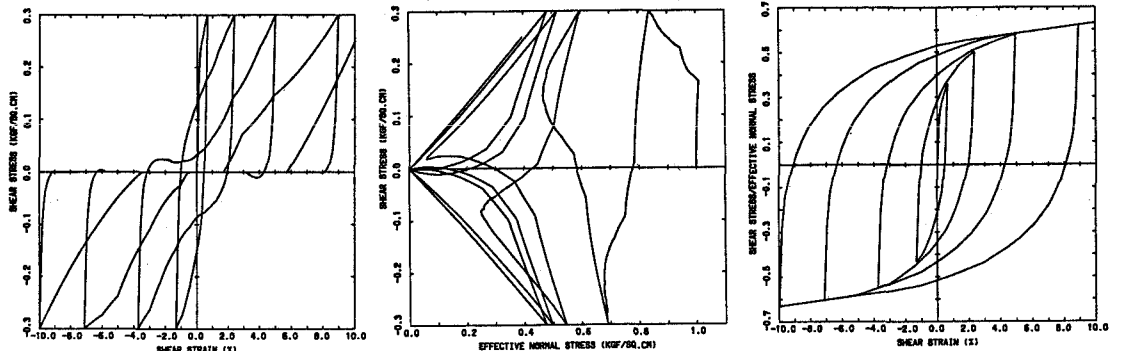


図-2 ゆるい砂の計算結果