

京都大学工学部 正会員 赤井浩一

京都大学工学部 正会員 堀 正幸

京都大学大学院 学生員 岡 二三生

1. まえがき

従来、土の動的挙動を解析するために、土の応力-ひずみ関係は線型の弾性体や粘弾性体で表現されてきた。しかしながら実際の土の減衰特性や動的せん断剛性はひずみレベルに依存しており、非線型な挙動を示すことがわかっている。したがって動的解析においてはこの非線型性を考慮する必要がある。次節の解析においては減衰特性が非線型になっている。粘性土中における応力波の減衰および波速について考察するため Shock-tube に三軸装置を連結したものをを用いて波動伝播実験を行った⁽¹⁾。その結果、応力空間内において応力波の減衰を量的に議論することがわかった。この実験結果を解析するために、すでに弾-粘塑性性を基礎とした粘土の応力-ひずみ関係を粘性土中の波動伝播問題に適用することを報告しているが、本報告においては、適用するために用いた仮定について検討を加えより一般性のあるものとした。特に動的問題をとりあつかう場合、弾性ひずみの量は全ひずみの中で占めるの量を定めると考えられる。したがってこの点について考慮している。足立らは平衡時における粘性土の応力-ひずみ関係として Roscoe らの original Theory を用い、Pergyna の弾-粘塑性体の理論をつかって粘性土の動的応力-ひずみ関係を提案している⁽²⁾。本報告もこの理論を基礎としている。

2. 弾-粘塑性体による解析

応力緩和試験における応力経路は最大主応力軸に平行な線上にあること、および L. の主張からせん断時における発生間げき水圧はせん断ひずみと一義的関係にあることが予想される。図-1 は動的降伏曲面の決定手法を示すものである。ひずみを弾性ひずみと塑性ひずみの和であるとすれば、厳密には点 A_0 と点 A_s における粘塑性ひずみの量は等しくない。したがって動的降伏曲面を決定するために点 A_0 と粘塑性ひずみ量が等しい点を静的な応力パス上に求めることが必要となる。発生間げき水圧は全ひずみに依存すると考えられるから、発生間げき水圧を弾性ひずみに依存する間

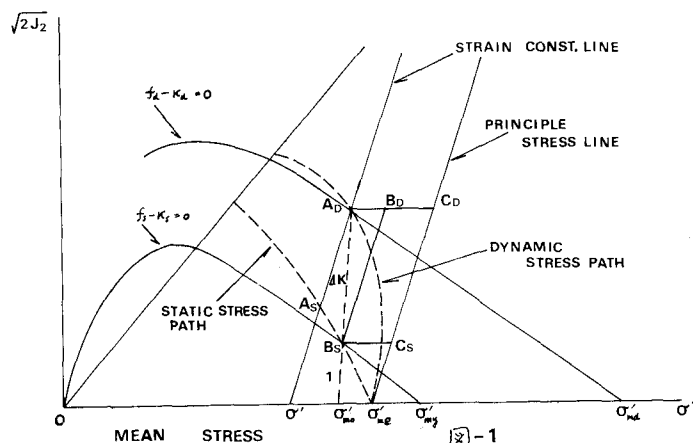


図-1

げき水圧と粘塑性ひずみに依存する間げき水圧に分けることができる。⁽³⁾

図-1 で $\overline{A_0 C_0}$ が点 A_0 における発生間げき水圧を表す。点 A_0 における弾性ひずみを $\epsilon_{(A_0)}^E$ 、粘塑性ひずみを $\epsilon_{(A_0)}^{VP}$ とすると、

$$\epsilon_{(A_0)}^E : \epsilon_{(A_0)}^{VP} = \overline{A_0 B_0} : \overline{B_0 C_0}$$

として点 B_0 を決定する。

ただし $\overline{A_0 B_0}$; 弾性ひずみに対応した水圧, $\overline{B_0 C_0}$; 塑性ひずみによる間げき水圧

点 B_0 から主応力軸 σ_1 を平行におろした線と静的な応力パスとの交点を求め、その点を B_s とする。したがって、粘塑性ひずみを硬化パラメータ K とすれば点 A_0 と点 B_0 は同一のひずみ硬化を有すると考えられる。よって A_0 を通る動的降伏曲面は B_s を通る静的降伏曲面を $(\sigma_{m0}', 0)$ に関して相似変換して求めることができる。静的降伏曲面は(1)式で与えられる。

$$f_s - K_s = \sqrt{2} \sigma_s + M^* \sigma_{m0}' \ln(\sigma_{m0}' / \sigma_{m0}') = 0 \quad (1)$$

したがって、動的降伏曲面は(2)式で与えられる。

$$f_d - K_d = \sqrt{2} \sigma_d + M^* (\sigma_{m0}' + \Delta k \sigma_{m0}') \ln(\sigma_{m0}' + \Delta k \sigma_{m0}') / (\sigma_{m0}' + \Delta k \sigma_{m0}') = 0 \quad (2)$$

よって、三次元の構成式は(3)式で与えられる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = S_{ij} / 2G(e) + K / (1+e) \sigma_{m0}' \delta_{ij} + \gamma \langle \Phi(F) \rangle \{ (M - \sqrt{2} \sigma_{m0}' / (\sigma_{m0}' + \Delta k \sigma_{m0}')) \delta_{ij} + S_{ij} / \sqrt{2} \} \quad (3)$$

ただし、 $F = \Delta k = (\sqrt{2} \sigma_d - \sqrt{2} \sigma_s) / \sqrt{2} \sigma_s$ 、 $\sqrt{2} \sigma_s = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$ 、 $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$ 、 $\sigma_{m0}' = \frac{1}{3} \sigma_{kk}$

$M^* = (\sqrt{2} \sigma_s / \sigma_{m0}')$ critical state

関数 $\Phi(F)$ はYang & Jappらの定ひずみ速度せん断試験の実験式をふくむものとして

$$\Phi(F) = C'(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, m) \exp\{(\sqrt{2} \sigma_{ij} / \alpha(\varepsilon_{ij})) F\} \quad (4)$$

Shock-tubeによる波動伝播実験において、同じ応力レベルにおいても σ_{m0}' (圧縮応力)が大をいほど減衰が小さいことから $\alpha(\varepsilon_{ij})$ を次のようにおくことができる。

$$\alpha(\varepsilon_{ij}) = \alpha'(\varepsilon_{ij}) \cdot \sigma_{m0}' \quad (5)$$

以上より一次元の構成式は、非排水状態で(6)式となる。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{3G} \dot{\sigma} + \gamma \langle \Phi(F) \rangle \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

ただし ε ; 軸ひずみ、 σ ; 軸差応力

(6)式より一次元波動方程式は、

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \gamma \langle \Phi(F) \rangle \right) \quad (7)$$

ただしポアソン比を0.5として $E = 3G$ 、 u ; 粒子速度

(7)式は準線形の偏微分方程式だから特性曲線によって数値積分できる。(6)式において G は一般にひずみの関数であるが、ここでは一応波速から求めた弾性係数より求めた。(6)式は土粒子間隙と吸着水の系に対応するものであるから、解析にあつては固相水圧の予測が必要となる。したがって本来、土粒子間隙、吸着水系と自由水系を同時に連立させて解く必要があるが、ここでは固相水圧が応力 σ はひずみの線型関数 $\sigma = E \varepsilon$ の関数とあてはめてみる。(7)式を数値積分した結果は当日発表する予定である。

(参考文献)

- 1) 赤井, 堀, 岡 (1974) "Shock-tubeによる波動伝播に関する研究" 第9回土質工学研究発表会講演集 102
- 2) 足立, 安藤 (1973) "土質材料の動的降伏曲面について" 第8回土質工学研究発表会講演集, 85
- 3) 赤井, 足立, 安藤 (1974) "飽和粒土の応力-ひずみ-時間関係" 土木学会論文報告集 225号 p.63 ~ p.61