

飽和粘性土中の応力波伝播について

京都大学工学部 正 員 赤井浩一
京都大学工学部 正 員 岡二三生
京都大学大学院 学生員 北 健二

1. まえがき

飽和粘性土の動的挙動を明らかにするために、筆者らは応力波伝播実験を行うと同時に、動態時にも有効な粘性土の構成関係の確立を目指してきた。粘性土は粘塑的性質とともに粘弾性的性質を有している。したがって、本報告においては、粘性土を粘弾性-粘塑性体として定式化を行い、一次元応力波伝播問題に適用した。さらに、応力波伝播実験で測定された間げき水圧についても考察を行った。

2. 粘性土中の一次元応力波伝播

構成関係 粘性土の構成関係として弾粘塑性体を提案してきたが、このモデルの欠点の一つは、実験時応力-ひずみ曲線の除荷時の傾向を十分に表せないことであつた。筆者らの低応力レベルにおける応力波のフーリエ解析結果は、位相速度特性がフォート型の遅延弾性的性質を有していること、さらに減衰特性はSpring-Viscoモデルで近似できることを示している。したがって、より一般的構成関係として、粘弾性-粘塑性体を考え、Spring-Viscoモデルと粘塑性体の組み合わせとした。体積ひずみ速度が粘弾性的性質を示さないと仮定すると、(1)式で表せる。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \nu_1 \dot{S}_{ij} + \frac{1}{3} \nu_2 \nu_m' \dot{S}_{ij} + (2b^{(s)} \dot{S}_{ij} - 2J^{(s)} \dot{\epsilon}_{ij}^{vp}) + \beta^{(s)} \frac{S_{ij}}{\sqrt{J_2}} + \beta^{(v)} \left\{ M^* - \frac{\sqrt{J_2}^{(s)}}{\nu_m^{(s)}} + M^* \ln \nu_m' / \nu_m^{(s)} \right\} \frac{1}{3} \dot{S}_{ij} \quad (1)$$

非排水状態として、 $\dot{\epsilon}_{kk} \doteq 0$ とすると、一次元の構成関係は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{11} = \frac{1}{E} \dot{\sigma} + (\mu \dot{\sigma} - E \mu \dot{\epsilon}_{11}^{vp}) + C_1 \exp \left\{ m \frac{\sigma - \sigma^s}{\nu_m'} \right\} \quad (2)$$

$$\nu_m' = - \frac{C_2}{\dot{\sigma}} \exp \left\{ m \frac{\sigma - \sigma^s}{\nu_m'} \right\} \left\{ M^* - \frac{\sqrt{J_2}^{(s)}}{\nu_m^{(s)}} + M^* \ln \nu_m' / \nu_m^{(s)} \right\} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{11}^{vp} = C_1 \exp \left\{ m (\sigma - \sigma^s) / \nu_m' \right\} \quad (4)$$

ここで、 σ ; 軸差応力、 ν_m' 平均有効主応力、 S_{ij} ; 偏差応力テンソル、 $\sqrt{J_2}$; S_{ij} の二次不変量、 ν_m ; 圧縮力、 μ 粘弾性係数、 E ; フォートルIX土内の弾性定数、 M^* ; Critical State line の傾き、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ 粘塑性ひずみ速度テンソル

(4)式については、現象的関係式(たとえばSigh & Mitchel や Yong & Yapp らの提案した実験式)との関係が明らかになっているが、(3)式に関しては応力後相時についてのみ明らかにしている。松井らは平均主応力一定の非排水繰り返し載荷時の過刺間げき水圧に関する実験式として次式を与えている。

$$\Delta \bar{u} = \Delta \bar{u}(t, Z_d) \exp(\alpha Z_d) \quad (\Delta \bar{u}; \text{過刺間げき水圧増加速度}, Z_d = Z_{max}, \alpha; \text{定数}) \quad (5)$$

$\nu_m = \nu_m' + u$ から、 $\nu_m = \text{Const.}$ では $d\nu_m' = -du$ となり、(3)式より

$$du/dt = C_3 \exp(m \sigma / \nu_m') \quad \text{ただし} \quad C_3 = \frac{C_2}{\dot{\sigma}} \exp(-m \sigma / \nu_m') \left(M^* - \frac{\sqrt{J_2}^{(s)}}{\nu_m^{(s)}} + M^* \ln \nu_m' / \nu_m^{(s)} \right) \quad (6)$$

Z_d が σ に対応すると考えれば、(1)式は(6)式を含むといえる。

一次元応力波伝播

(2)式と(3)式を用いて、一次元応力波伝播問題を特性曲線法によって求めたのが図-1と図-2である。図-1は応力波形が伝播するにつれて崩れてゆく過程であり、図-2はその時の応力-ひずみ関係である。入力波形に定数は、図-3に示す実験結果時のものに一致させた。 m と C_1 については定速せん断試験結果より次式で与えた。

$$m = -1.7 \times E_{11} + 40 (E_{11} < 0.2) \quad m = 23.0 (E_{11} > 0.2); \quad C_1 = 1.8 \times 10^{-4} \times (E_{11} \times 10^3)^{3.06} + 1.0 \times 10^{-18} (E_{11} < 10^3), \quad C_1 = 1.8 \times 10^{-14} (E_{11} \geq 10^3) \\ E_0 = 0.770, \quad M^* = 1300, \quad \lambda = 0.127, \quad \kappa = 0.021, \quad E' = 1.73 \times 10^9 \quad P_0 = 196.3, \quad \rho_{me} = 1.06 \text{ (kg/cm}^3\text{)} \quad \text{さらに、}$$

$\rho = E/E'$ ならびに、 μ' については赤井・堀の結果より $\rho = 0.4$, $\mu = 1.75 \times 10^{-5} \text{ (1/sec/kg/m}^2\text{)}$ とした。図-2によれば、除荷時に遅延弾性的性質が表れ、図-3に示す実験結果の傾向に一致している。図-1からは減衰が初期において強く、伝播するにつれてゆるやかになることがわかる。さらに間げき水圧の立ち上がり時間は応力波のそれに一致している。ただし、図-1で実線は σ と破線は間げき水圧を示す。

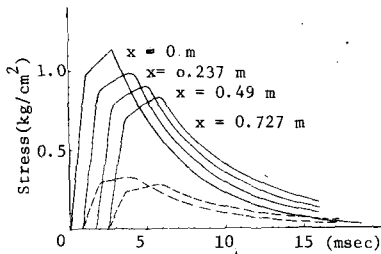


Fig. (1) Stress-Time Relation

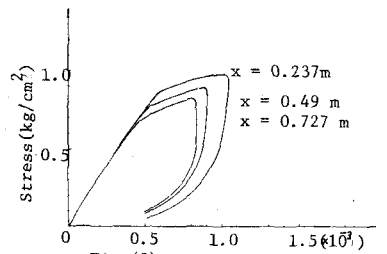


Fig. (2) Stress-strain relation

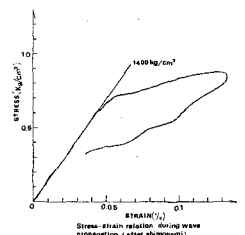


Fig. (3)

3. 実験結果および考察

Shock tube を載荷装置として行った実験方法については前報にゆずり、間げき水圧について考察する。用いた粘土は圧密された深草粘土であり、圧密圧力は $0.5 \sim 1.2 \text{ kg/cm}^2$ とした。シリーズ (a) L.L. 50.5%, P.L. 28.9%, P.I. 21.6, 含水比 36.7~38.4%, 先行圧密荷重 0.6 kg/cm^2 。シリーズ (b) L.L. 47.0%, P.L. 25.2%, P.I. 21.8, 含水比 37.0~41.0%, 先行圧密荷重 0.68 kg/cm^2 。表-1 は載荷速度、軸差応力の最大値を圧密圧力で除いた値と間げき水圧発生速度についてまとめたものである。実験時の間げき水圧発生速度は、(3)式と $du/dt = \frac{d\sigma}{dt} - \frac{d\sigma_m}{dt}$ で与えられるとすれば、 du/dt は $d\sigma/dt$ と σ/σ_m に依存している。表-1 より A シリーズでは A-2 の方が A-1 にくらべて $(\sigma/\sigma_m)_{\max}$ は小さいが、 σ が大きい

	$q_{\max}/\sigma'_{me}$	$(dq/dt)_{\max}$ $10^3 \times \text{kg/cm}^2/\text{msec}$	$(du/dt)_{\max}$ $10^2 \times \text{kg/cm}^2/\text{msec}$
A-1	0.494	0.227	0.129
A-2	0.263	0.457	0.694
B-1	0.263	0.196	0.176
B-2	0.214	0.400	0.094
B-3	0.299	0.598	0.289

Table-1

ため、 du/dt は大きいと考えられる。B シリーズでは、 $d\sigma/dt$ と $(\sigma/\sigma_m)_{\max}$ とともに他にくらべて B-3 が大きいので du/dt がもっとも大きい。このように、実験では du/dt は $d\sigma/dt$ と σ/σ_m の両方に依存することになるため、Dilatancy による過剰間げき水圧の発生を調べるには σ_m = 一定等の試験による方が望ましい。また間げき水圧の絶対量に m は測定方法も改善する余地があるといえる。

- 参考文献 1) Akai, K. & F. Oka; Proc. JSCE, No. 253, Sept. 1976, pp. 107~122
2) 松井・小原・伊藤; 土木学会論文報告集, 第257号, 1977年1月, pp. 41~51.
3) Akai, K. & M. Hori; Proc. JSCE, No. 221, Jan. 1974, pp. 81~91