

佐川, 炭酸工業 (株) 技術研究所 正 加藤 一行

1. まえがき

近年数多くの低温液体貯蔵用地下タンクが建造されている。この地下タンクは、液圧等の外力の他に地盤の凍結による圧力（凍結圧）を受ける。また地盤の凍結による変位（凍結変位）によって構造物の梁の整合性が悪影響を受けることもある。健全な地下タンクの設計のために、凍結による地盤の挙動を知ることが必要である。この分野においては高志のによって一連の研究（例えば [1]）が行われており相当の成果があげられる。例えば、供試体寸法と凍結膨張量との比、すなわち凍上率や熱流方向に作用する圧力と凍結速度の関数に表わされることを明らかにしたのが大きな成果である。この凍上率を用いて何らかの予知地盤凍結問題を解けば地下タンクの設計に有益とされるだろう。この線にそって凍上率そのものを初期からみとして有限要素解析した例 [2] もある。しかし単に初期からみとしたのでは凍結期間中の応力変化の効果を考慮できないから、一般に過大評価とされるだろう。そこで本論文では高志の凍上率の実験式とともに凍結からみの時間増分式を導き、凍結期間中の応力変化の効果を考慮できるようにした。またこの時間増分式を用いて変位拘束凍結の圧力増加（凍結膨張圧）を計算したところ、Olsen の実験結果 [3] と類似の曲線を得た。

2. 凍結からみの時間増分式

いま高志のの実験と同様の実験 (Fig-1) を考える。膨張は熱流方向に $\checkmark$ の成分をもたなければならない。 $u_m = u_c = \text{const.}$, $v = v_c = \text{const.}$ の条件のもとで実験を行うと凍上量 δ と時間 t は文献 [1] の Fig. 5.2 により、ほぼ

$$\delta = at \quad (a: \text{const.}) \quad (1)$$

と表わされ、また凍結からみを

$$\varepsilon_m^f = \frac{\delta}{L} \quad (2)$$

と定義し、さらに、凍結終了時間 = 凍上終了時間 = t_m とすると、 $L = v_c t_m$ となり、凍結からみ ε_m^f は次の (3) となる。

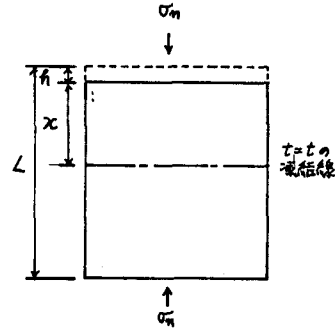


Fig-1 一次元凍結実験

$$\varepsilon_m^f = \frac{a}{v_c t_m} t \quad (3)$$

一方、 $t = t_m$ では、 ε_m^f は高志のの凍上式の $u_m = u_c$, $v = v_c$ のときの値

$$\xi(u_c, v_c) = \xi_0 + \frac{u_c}{v_c} \left(1 + \sqrt{\frac{u_c}{v_c}} \right) \quad (4)$$

とされるから、(3) で $t = t_m$ の値を (4) に等しいと見て定数 a を求めることができて、

$$a = \xi(u_c, v_c) \cdot v_c \quad (5)$$

となる。これを (3) に代入すると ε_m^f の時間関係式 (6) と得ることが出来る。

$$\varepsilon_m^f = \frac{1}{t_m} \xi(u_c, v_c) t \quad (6)$$

さらに、(6) を時間微分すると凍結からみ速度を得る。

$$\dot{\varepsilon}_m^f = \frac{d\varepsilon_m^f}{dt} = \frac{1}{t_m} \xi(u_c, v_c) \quad (7)$$

さて、果した u_m のもとで実験を行なった場合に次の結果が得られることが予想される。

$$(\dot{\varepsilon}_m^f)_{u_c=u_1} = \frac{1}{t_m} \xi(u_1, v_c) \quad (8)$$

$$(\dot{\varepsilon}_m^f)_{u_c=u_2} = \frac{1}{t_m} \xi(u_2, v_c) \quad (9)$$

(8), (9) の差をとると応力 u_m のみの関数と見て、

$$d\varepsilon_m^f = \frac{1}{t_m} d\xi \quad (10)$$

と取る。さらに応力の変化が δ と仮定して $d\delta = \left(\frac{\partial \delta}{\partial \sigma_n}\right) d\sigma_n$ と表わすことと仮定して、(10)は次式と取る。

$$d\dot{\epsilon}_n^f = \frac{1}{E_n} \left(\frac{\partial \delta}{\partial \sigma_n}\right) d\sigma_n \quad (11)$$

$t = t_j$ のとき $\sigma_n = \sigma_j$ 、 $t = t_R = t_j + \Delta t$ のとき $\sigma_n = \sigma_R = \sigma_j + \Delta \sigma_n$ とすると $t = t_R$ における $\dot{\epsilon}_n^f$ は次式と取る。

$$(\dot{\epsilon}_n^f)_{t=t_R} = (\dot{\epsilon}_n^f)_{t=t_j} + \frac{1}{E_n} \left(\frac{\partial \delta}{\partial \sigma_n}\right)_{t=t_j} \Delta \sigma_n \quad (12)$$

ここで、 $t = t_j > t > t_R$ における $\dot{\epsilon}_n^f$ は次式と与えられるものとする。

$$(\dot{\epsilon}_n^f)_{t=t} = (\dot{\epsilon}_n^f)_{t=t_j} + \left\{ (\dot{\epsilon}_n^f)_{t=t_R} - (\dot{\epsilon}_n^f)_{t=t_j} \right\} \frac{\ln(t/t_j)}{\ln(t_R/t_j)} \quad (13)$$

(12) と (13) に代入して $t = t_j$ から $t = t_R$ まで積分すると、この Δt の間の平均増分 $\Delta \epsilon_n^f$ を求めることと仮定して、

$$\Delta \epsilon_n^f = (\dot{\epsilon}_n^f)_{t=t_j} \Delta t + C \frac{1}{E_n} \left(\frac{\partial \delta}{\partial \sigma_n}\right)_{t=t_j} \Delta \sigma_n \quad (14)$$

$$\text{ここに } C = \left[t_R - \Delta t / \ln(t_R/t_j) \right]$$

と取る。この式を一次元の構成式で

$$\Delta \sigma_n = E (\Delta \epsilon_n - \Delta \epsilon_n^f) \quad (15)$$

に代入して整理すれば構成式が完成する。

3. 変位拘束凍結実験における圧力の時間変化
変位と圧力に拘束したとすると (15) は

$$\Delta \sigma_n = -E \left\{ (\dot{\epsilon}_n^f)_{t=t_j} \Delta t + \frac{C}{E_n} \left(\frac{\partial \delta}{\partial \sigma_n}\right)_{t=t_j} \Delta \sigma_n \right\} \quad (16)$$

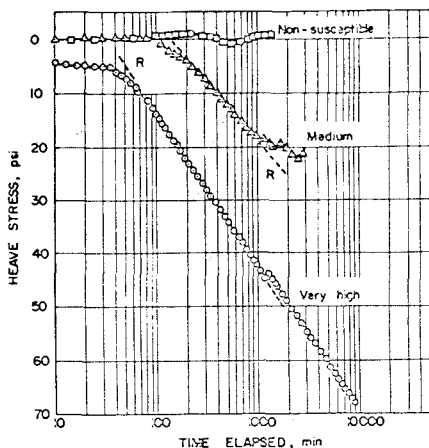


Figure-2 Typical Heave Stress vs. Log Time Plots (Olson, et al)

と取る。一方、

$$\left(\frac{\partial \delta}{\partial \sigma_n}\right) = -\frac{\sigma_0}{\sigma_n^2} \left(1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_c}\right) \quad (17)$$

であり、(16)は前項に $\Delta \sigma_n$ を代入し、この式を整理すると、圧力増分を求める式を得る。

$$\Delta \sigma_n = -\frac{(\sigma_n^2)_{t=t_j} E}{(\sigma_n^2)_{t=t_j} E - E \cdot C \cdot \sigma_0 \left(1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_c}\right)} (\dot{\epsilon}_n^f)_{t=t_j} \Delta t \quad (18)$$

この式に初期値として $(\sigma_n)_{t=0} = \sigma_i$ 、 $(\dot{\epsilon}_n^f)_{t=0} = \dot{\epsilon}(\sigma_i, \sigma_0) E_n$ と与え、step by step に計算すれば、 $t = t$ の圧力を求めることができる。この結果を Fig-3 に示した。これは Fig-2 に示した Olson の実験結果と類似の傾向を示す。

4. おわりに

本論文では高圧力の実験式をたてて単純条件における凍結ひずり時間増分式を導いた。この式を用いて変位拘束凍結問題を解いたところ Olson の実験と類似の傾向を得た。この式は凍結要素の凍結期間中の応力変化の効果を考慮しているが、初期ひずりによる解析よりも現実的といえる。最後にこの式は、単に凍結面と基準とした座標及び全体座標に変換すれば多次元に拡張できると仮定すれば、簡単に多次元の式と取る。これ故にすぐに有限要素法に適用することと仮定する。

参考文献 [1] 高志益田, 山本: 雪氷 vol. 36, no. 2, pp. 1~20 (1974)

[2] 鹿島建設研究所報, vol. 26, pp. 105~110 (1978)

[3] J.M. Olson: PB 258 157 (1974)

