

III-93 単杭の挙動に関する一考察

法政大 正 山門明雄

法政大 正 岸田親弘

(株)間組 正〇草添守人

1. まえがき

鉛直荷重のみを受ける単杭の挙動について、現在までに種々の研究がなされている。これらはいずれも線形弾性論的取扱いか、あるいはそれを拡張した弾塑性的扱い、すなわち塑性領域では土は、完全塑性体とみなす、いわゆる非硬化弾塑性体として議論されている。

そこでこの報告は実際の土の特性に少なからずとも近づけるために、一連の三軸圧縮試験を行いそのデータに基づいて、地盤の力学的特性をいかにして解析に導入するべきかを検討してみた。そして土を、硬化塑性体の逐次破壊現象として扱い、有限要素法による単杭の解析を行い、単杭のモデルを作成し、実験値との比較を試みた。

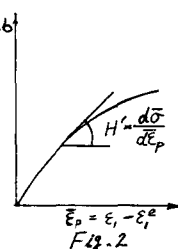
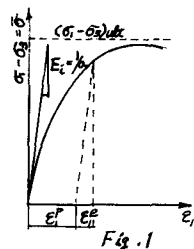
2. 解析方法

杭軸を対称軸とし、地盤を軸対称要素に分割し、土要素と杭要素周囲との結合は非線形なバネで結び、有限要素法により解析する。土要素の剛性マトリックスを K_s^i 、杭要素の剛性マトリックスを K_p^i 、土要素と杭要素を結ぶバネ要素の剛性マトリックスを K_b^i とし、これらをそれぞれ系全体の剛性マトリックス K に合成すれば

$$K = \sum K_s^i + \sum K_p^i + \sum K_b^i \quad \text{----- (1)}$$

このようにして系全体の剛性マトリックス K が決まれば

$$K\delta = P \quad \text{----- (2)}$$



なる連立一次方程式を解けばよいのであるが、材料特性を導入する時

$$d\sigma = D \cdot d\varepsilon \quad \text{----- (3)}$$

の D マトリックスが問題となる。Fig.1に示すように土の応力～歪関係を表わすのに弾性成分に関してはHookの法則による D_e を塑性成分に関してはPrandtl-Reussの式を用いた D_p により増分応力 $d\sigma$ と増分歪 $d\varepsilon$ とを弾性成分と塑性成分の和で表わすものと仮定する。すなわち

$$d\sigma = d\sigma_e + d\sigma_p, \quad d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p, \quad D = D_e + D_p \quad \text{---- (4)}$$

D_p には D_e のヤング率に変わる加工硬化率 H' が必要である。この H' は

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} = H' \quad \text{----- (5)}$$

で定義される。ただし、相当応力 $\bar{\sigma}$ 、相当塑性歪増分 $d\bar{\epsilon}$ は三軸圧縮試験の軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、軸歪 ϵ_1 と一致するように定義することにする。このようにすると三軸試験から得られた軸差応力～歪曲線から Fig. 2 に示す $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1^p$ 曲線を作ればそれが、 $\bar{\sigma} \sim \bar{\epsilon}^p$ の関係を与える。この曲線の接線勾配が加工硬化率 H' である。

3. 三軸圧縮試験による加工硬化率 H'

H' は三軸圧縮試験結果から得られた応力～歪曲線より考えている応力状態における相当応力 $\bar{\sigma}$ 、すなわち軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と側圧 σ_3 により一義的に定まるようにする。土の非線形な応力～歪曲線を

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_1}{a + b \epsilon_1} \quad \text{----- (6)}$$

なる双曲線で近似する (Fig. 1)。定数 b は極限応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ の逆数を表わすが、一般に土の圧縮破壊強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ より小さい。そこでこの $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ とを関連づけるために R_f なるファクターを導入して、

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad \text{----- (7)}$$

と置く。この R_f の値は 1 より小さく一般に 0.75～1.0 の範囲内にあり側圧 σ_3 には無関係な定数となる。パラメーター a 、 b を初期接線係数 E_i と圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ で表わすと eq (6) は

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_1}{\frac{1}{E_i} + \frac{R_f \cdot \epsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}} \quad \text{----- (8)}$$

通常の三軸圧縮試験では側圧 σ_3 が一定であるが、実際の地盤内では荷重の増加にともなって σ_3 も変化するはずである。Jambui は実験的に初期接線係数 E_i と側圧 σ_3 との間に次の関係があることを示した。

$$E_i = K \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad \text{----- (9)}$$

n , p_a , K は定数

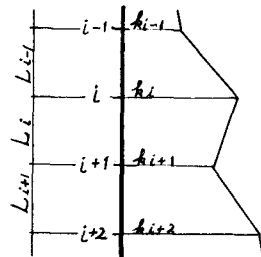
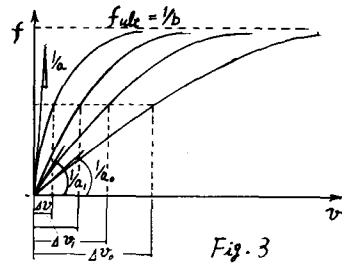
eq (8) を Fig. 2 の $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1^p$ 曲線に変換すると

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_1^p}{\frac{1}{E_i} + \frac{R_f \cdot \epsilon_1^p}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}} \quad \text{----- (10)}$$

従って H' は eq (5), (8) より

$$H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}^p} = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\epsilon_1^p} = \frac{\frac{1}{E_i}}{\left\{ \frac{1}{E_i} + \frac{R_f \cdot \epsilon_1^p}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right\}^2}$$

$$\epsilon_1^p = \epsilon_1 - \epsilon_1^e = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_i \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)} - 1 \right\}} \quad \text{----- (11)}$$



土の圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は Mohr-Coulomb の破壊基準に従うものと仮定すれば

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2C \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \cdot \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \text{----- (12)}$$

eq.(11) に eq.(9), (12) を代入して整理すれば H' は次のようになる。

$$H' = \left\{ \frac{1 - R_f \cdot S}{R_f^2 \cdot S^2 - R_f \cdot S + 1} \right\}^2 \cdot K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

$$S = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2(C \cdot \cos \phi + \sigma_3 \sin \phi)} \quad \text{----- (13)}$$

以上より各荷重段階ごとに各々の要素の相当応力 $\bar{\sigma} (= \sigma_1 - \sigma_3)$, σ_3 を評価すれば H' が決まる。

4. 土要素と杭要素を結ぶバネ定数 k

杭と土との境界面に作用する摩擦力和杭軸方向の変化との間にも式(6)と同様な関係が成立つことが実験的に確かめられた。そこで、杭の単位長さ当りに作用する杭周面摩擦力を f (kg/cm) その時の杭と土との相対変位を v (cm) とし杭周面摩擦力 $\sim$ 変位曲線を

$$f = \frac{v}{a + bv} \quad \text{----- (14)}$$

で近似する。

杭の単位長さ当りのバネ係数を k (kg/cm) とすれば

$$k = \frac{df}{dv} = \frac{a}{(a + bv)^2} \quad \text{----- (15)}$$

となる。実際に解析に用いるバネ係数は各増分荷重区間では一定とした式(15)から計算される式(14)の接線係数を用いた。

定数 a , b を決めるには杭の載荷試験データから決めるのであるが、この様なデータの变位には地盤自身の变位が含まれており、杭周面と杭に接する地盤との相対变位ではない。そこで定数 a を決めるために次の様な繰返し計算を行った (Fig. 3)。

- 1) a の初期値 a_1 として載荷試験データより求めた杭要素の変位 v_i と摩擦力 f_i より a_1 を求める。
- 2) 1) の a_1 を用いて系全体の剛性マトリックスを作り式(12)を解く。
- 3) 2) で得られた杭要素と土要素を結ぶバネの変形より新しい a_1 を決める。
- 4) 2) に戻って a_1 を 3) で決めた a_1 で置き換え。3) まで実行し a_1 を決める。以下同様な操作を繰返し相対変位 v_i が一定値 v_i になった時の a_1 を a とする。

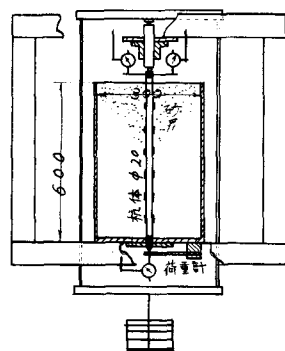


Fig. 5

解析に用いる杭の*i*番目の節点のバネ定数 K_i (kg/cm)はFig. 4より

$$K_i = \frac{k_i}{2} (L_{i-1} + L_i) \quad \text{----- (16)}$$

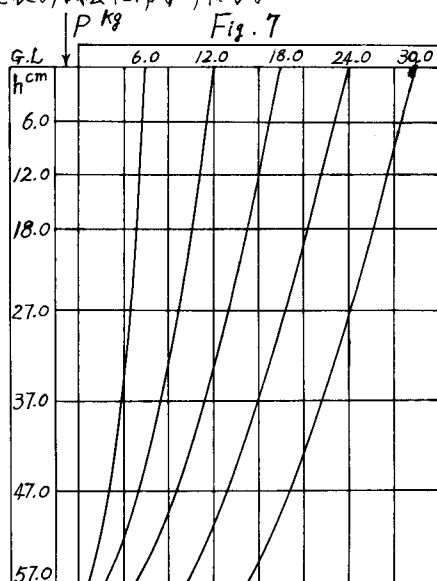
とした。

5 模型実験

Fig. 5 に示す実験装置を用いて、荷重を段階的に加えながら、杭頭および杭先端の変位を測定すると同時に、杭モデルに取付けたストレインゲージにより軸内の分布を測定した。また計算に必要なこの砂地盤特性を表わす各定数を決定するために一連の三軸圧縮試験を行った。

6. 計算値と実験結果

解析はFig. 5 に示した杭先端の支持条件を変えた杭モデルについて計算を行った。ここでは軸面の都合上その内の一つを選んで杭頭の荷重沈下曲線(Fig. 6), 軸力分布(Fig. 7), 地盤内の応力分布(Fig. 8)を示した。荷重は2.6Kgずつ6回に分けて載荷し計算を行った。なお まだ十分な計算結果を得ていないので地盤条件、杭先の支持条件の影響等については次の発表の機会にゆずりたい。



参考文献

1. 山田嘉昭：塑性力学，Hill, R.: The Mathematical Theory of Plasticity
2. Tomas, M. Duncan and Chin-Yung, Chang, "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil Mechanics," ASCE, SM4, 1967
3. Girijavallabhan, C, P, and Reese, L. C., "Finite Element Method for Problems in Soil Mechanics," ASCE, SM2, 1968
4. O. C. Zienkiewicz, The Finite Element Method, McGraw Hill

