

III-B13 深礎基礎の水平変位に対する確率論的アプローチ

徳島大学工学部 正会員 鈴木 壽
名古屋大学工学部 正会員 松尾 稔

1.はじめに 深礎基礎の荷重～変位関係は、地盤と基礎体の境界面における摩擦あるいは純粋な3次元問題であることなどから、その力学的挙動を正確に把握することは非常に難しい。特に、FEMによる数値解析では、その力学的なモデル化、入力パラメータなどによって計算結果は大きく影響を受ける。したがってここではこれまでとは全く異なった方法、すなわち大型現場載荷試験データを用いた帰納的な方法により、深礎基礎の水平荷重～変位関係を求める。さらに、この単純化された関係を確率論的に記述する。

2.指数関数式の導入 ここで述べる方法は水平変位に限らないので、送電用鉄塔基礎を念頭に置いて一般論的に述べると、以下のようなものである。図-1は各機関が実施した大型現場水平および引揚げ載荷試験結果を各極限支持力式に対する無次元量として整理したものである。図に示すようにいずれの荷重変位関係も指数関数で良く近似できることが分かる。したがって、深礎基礎の荷重～変位関係のすべてを次式の指数関数式で表すこととする。

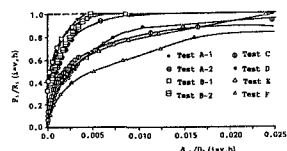


図-1 大型現場実験における荷重～変位関係

$$y_i = 1.0 - \exp(-B_i x_i) \quad (i = h, v, c) \quad (1)$$

ここに、 y_i 極限支持力 R_i に対する荷重比 (P_i/R_i) であり、 x_i は変位 δ_i と根入れ深さ D_f の比 (δ_i/D_f) で、いずれも無次元量である。上式で、 $x = 0$ における dy/dx を求めると次式となる。

$$\left. \frac{dy_i}{dx_i} \right|_{x_i=0} = B_i \quad (2)$$

この式は $\delta_i=0$ における $P_i \sim \delta_i$ 関係の接線勾配が B_i であることを意味している。式(1)の $P_i \sim \delta_i$ 関係は B_i (水平変位だけの場合) の具体的な算定法を示し、大型現場実験の実測データに基づいた実用的な深礎基礎の荷重～変位関係の評価法を示す。

3.水平荷重～変位関係 まず、この荷重～変位関係の B_h の算定法について示す。図-2は地盤を弾性バネ、基礎体を剛体とした場合の B_h 算定用モデルを示しており、基礎体の水平方向の挙動を、同図に示すような剛体的な回転で表す。このモデルの妥当性は大型現場水平載荷試験における力学的挙動から明らかとなっている。したがって、杭頭での変位を δ_h とすると、基礎体底部から距離 z における変位 $\delta_h(z)$ は次式で表される。

$$\delta_h(z) = \frac{z}{D_f} \delta_h \quad (3)$$

地盤はバネモデルとした弾性体と仮定しているので、 z における反力 $P_h(z)$ は次式で得られる。

$$P(z) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} K_{Hs} \delta_h(z) \cos \theta \frac{B}{2} d\theta = K_{Hs} \delta_h(z) B \quad (4)$$

ここに、 K_{Hs} は傾斜地盤を考慮した地盤のバネ定数であり、次式を用いる。なお、この式は数多くの模型実験結果から得られたものであり、一般に妥当であると認められている。

$$K_{Hs} = (0.3 \log \alpha_1 + 0.7) K_H \quad (5)$$

ここに、 α_1 は基礎前面から斜面までの水平距離と基礎体径との比を、また K_H は水平地盤における地盤反力係数(kgf/cm)を示しており、それぞれ次式から求められる

$$\alpha_1 = \frac{A_1 - z}{B \tan \beta} \quad (6) \quad K_H = K_{H0} \left(\frac{B_H}{30} \right)^{-\frac{3}{4}} = 12.8 K_{H0} B_H^{-\frac{3}{4}} \quad (7)$$

ここに、 A_1 、 B 、 β はそれぞれ基礎体有効長、基礎体径、地盤傾斜角である。また、(7)には $K_{H0} = E_0 / 30$
 $B_H = \sqrt{BD_f}$ の関係がある。式(4)を各層について積分すれば第1層における反力は次式となる。

$$P_{hi}(z) = \int_{D_i}^{D_{i+1}} K_{Hs} \delta_h(z) B dz \quad (8)$$

したがって、基礎体底面での力のモーメントを考えると次式が成立する。

$$P_h D_f = \sum_{i=1}^n \int_{D_i}^{D_{i+1}} K_{Hs} \delta_h(z) B_z dz \quad (9)$$

ここに、 $z = (D_{i+1} + D_i) / 2$ で、式(3)を代入すれば P_h は次式で得られる。

$$P_h = \frac{\delta_h}{D_f^2} B \sum_{i=1}^n \int_{D_i}^{D_{i+1}} K_{Hs} z \bar{z} dz \quad (10)$$

したがって、水平荷重～変位関係を示す式(1)中の B_h は次式で算定できる。

$$B_h = \frac{P_h}{R_h} / \frac{\delta_h}{D_f} = \frac{\lambda_h B}{R_h D_f} \sum_{i=1}^n \int_{D_i}^{D_{i+1}} K_{Hs} z \bar{z} dz \quad (11)$$

ただし、 λ_h は、水平地盤反力係数を補正するための係数である。

4. 水平荷重～変位関係式の検討 次に、ここで提案した深礎基礎の荷重～変位関係式の計算値と現場実験の実測データとの比較を行う。解析の対象とした現場実験は長岡、今市における水平載荷試験である。図-3はそれらを比較したものである。図から分かるように、式(1)による計算値は実測値を良く説明している。なお、計算に用いた極限水平支持力の値は各現場実験で得られたものとし、式(11)の B_h は $\lambda_h=1$ とした。

5. 水平変位量のばらつき 式(1)を δ_h について整理すると次式となる。

$$\delta_h = \frac{D_f}{B_h} \ln \left(1.0 - \frac{P_h}{R_h} \right) \quad (12)$$

上式において、 R_h 、 P_h は極限水平支持力と水平荷重であるので、共に確率変数である。 B_h は荷重～変位関係をフィッティングさせるための確率変数 λ によって表される。したがって、 δ_h は複数の確率変数の関数として与えられるので、以下のように平均値と分散を求めることができる。 δ_h を e_{R_h} （極限水平支持力の解析誤差、 P_h 、 λ_h の平均値のまわりでテーラー級数に展開すると次式が与えられる。

$$\delta_h = \delta_v(E[e_{R_h}] \cdot E[P_h] \cdot E[\lambda_h]) + (e_{R_h} - E[e_{R_h}]) \frac{\partial \delta_h}{\partial e_{R_h}} + (\lambda_h - E[\lambda_h]) \frac{\partial \delta_h}{\partial \lambda_h} + (P_h - E[P_h]) \frac{\partial \delta_h}{\partial P_h} + \dots \quad (13)$$

ただし、偏微係数は $E[e_{R_h}]$ 、 $E[P_h]$ 、 $E[\lambda_h]$ における値とする。式(13)において級数を一次の項で打ち切り、一次近似の平均と分散をとれば次式となる。

$$E[\delta_h] = \frac{D_f}{B_h(E[\lambda_h])} \ln \left\{ 1.0 - \frac{E[P_h]}{R_h(E[e_{R_h}])} \right\} \quad (14)$$

$$Var[\delta_h] = \left(\frac{\partial \delta_h}{\partial e_{R_h}} \right)^2 Var[e_{R_h}] + \left(\frac{\partial \delta_h}{\partial P_h} \right)^2 Var[P_h] + \left(\frac{\partial \delta_h}{\partial \lambda_h} \right)^2 Var[\lambda_h] \quad (15)$$

6. おわりに ここでは深礎基礎の水平変位の確率論的取り扱いかたのみ述べてきたが、同様な考えが引揚げ、圧縮荷重～変位関係にも成り立つ。我々はこれらの成果を踏まえて深礎基礎の信頼性設計を確立していく予定である。参考文献 Ove Ditlevsen : Uncertainty Modeling, McGraw-Hill, 1981

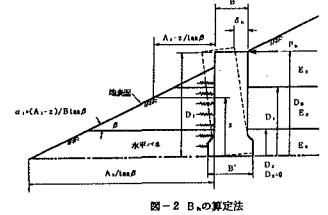
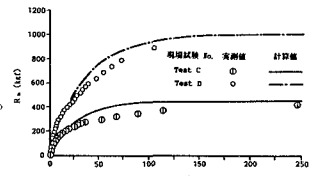

 図-2 B_h の算定法


図-3 新しい支持力式と実測値との比較(水平支持力の場合)