

東海大学工学部

正員 宇都 一馬

正員 冬木 衛

学生員 桜井 学

1. まえがき

杭が水平荷重を受ける場合、杭-地盤系に複雑な現象を生じる。西田によれば、「その解析に当っては、杭の形状寸法と弾性的性状（幅： B 、長さ： L 、曲げ剛性： EI 、降伏強度： σ_y ）、土の応力-ひずみ関係（ σ - ε ）、土の有効単位体積重量（ γ ）、深さ（ z ）、杭のたわみ（ y ）、荷重規模（ H ）、載荷位置高さ（ R ）、載荷速度（ $\partial H / \partial t$ ）、載荷時間（ T ）、載荷履歴、土の時間的性質（クリープ・圧密）、杭打込影響、など種々の複雑な要因が吟味されてきたが、これら全てを實際設計の解析に適用することは困難である。」¹⁾としていっている。また、西田は文献1)で、杭基礎の水平支持力に関する研究を検討した結果をまとめている。最近の研究は「ワイの水平抵抗」²⁾（土と基礎、Vol.25, No.8, 1977.8）として文献2)に紹介されている。例えば、駒田・「土木構造物のワイの水平抵抗」³⁾（同）、山崎・「建築構造物のワイの水平抵抗」⁴⁾（同）、古藤田、風向・「ワイ材の塑性を考慮した解析法」⁵⁾（同）、岸田、中井・「地盤反力-変位関係の非線形性」⁶⁾（同）、矢作・「ワイの水平耐力と地盤の変形-N値とK値の関連について」⁷⁾（同）などである。さて、筆者らは、先に図-2 水平載荷試験の模式図杭の載荷試験から得られる荷重-変位曲線を定量的に表現するための数学モデルを設定し、非線形回帰を行ない、鉛直および水平載荷試験結果に適用し検討した結果をすでに報告した。これによると、この手法から得られる回帰係数によって主観の入らない支持力の評価法が可能となり、良好な結果が得られている。

今回の報告は、この手法をもとに、杭と地盤系の非線形性を考慮し、以下に述べるような仮定にもとずき、杭の水平抵抗の問題を *chang* の式を用いて線形計算しうる近似解析法について述べたものである。

2. 仮定

① 水平荷重 H と杭頭の変位 y の関係は次式で表わすことができる。³⁾（図-1 参照）

$$H = H_{\max} (1 - e^{-y/y_s}) \quad (1)$$

ここで、 $H_{\max}$ を極限荷重、 y_s を基準変位量と定義する。

② 地盤の横方向応力値は、任意の水平荷重のもとでは、深度方向に一定であるが、水平荷重の増加によってその値は変化する。

③ 杭体の曲げ剛性 EI は、任意荷重のもとでは、全長にわたって一定であるが、変位の増加に従って、次式のように低減する。

$$EI = (EI)_0 (e^{-y/y_s})^n \quad (2)$$

ここで、 n は曲げ剛性の低減指数と定義し、杭種、杭径、杭形状などによって変化するものと考えられ、多くの載荷試験結果から決定されるべきものである。

$(EI)_0$ は、杭体の初期剛性である。なお、 $n=0$ の場合には、 EI は変位によらず一定で、*chang* の式やその

他の式によって扱われる剛性のとり方と同じである。

④ ②、③から、任意の水平荷重のもとでは、*chang* の式が適用できることになる。

⑤ 大変形の曲げを受ける杭体であっても、平面保持が成立する。

以上の仮定によって、杭材や地盤の非線形的な変形を受ける杭の水平抵抗の問題を、いわゆる *chang* の式を用いて線形計算しようというわけである。

このような仮定によっているので、実験における現象のすべてを近似させることは不可能である。したがって、ここでは、実用的に重要な、杭頭の変位と地中部最大曲げひずみの2つを実測値とほぼ近似させうる計算方法の手順について以下に述べる。

3. 解析法の手順

① 水平載荷試験結果の荷重 H と変位 y の実測値を用いて、(1) 式の $H_{\max}$ と y_s を最小2乗法で決定する。³⁾ ただし、これは (1) 式が非線形であるため、電算によ

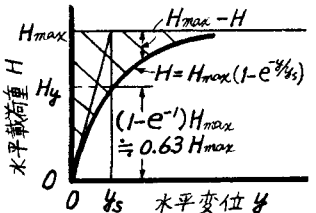
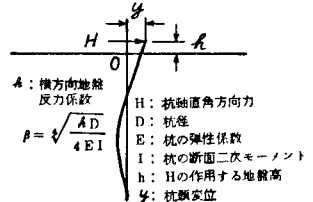


図-1 荷重-変位曲線の数学モデル



って多少の繰返し計算をすることになる。

② (1)式で $y = y_s$ とし、この場合の荷重を降伏荷重 H_y と定義すれば、

$$H_y = H_{max}(1 - e^{-1}) \approx 0.63 H_{max} \quad (3)$$

となり、また降伏荷重 H_y に対応する杭体の曲げ剛性 EI は次式で表わされる。

$$EI = (EI)_0 e^{-n} \quad (4)$$

③ Changの式によれば、杭頭自由の場合の杭頭の水平変位 y は次式で表わされる。(図-2参照)

$$y = \frac{(1 + \beta l)^3 + \frac{1}{2}}{3EI\beta^3} \cdot H \quad (5)$$

④ 降伏荷重 H_y に対応する β 値および l_s 値を、それぞれ基準 β 値および基準 l_s 値と定義し、 β_s, l_{s0} と書く。基準変位量 y_s は、(3)、(4)式を(5)式に代入して、次式で表わされる。

$$y_s = \frac{(1 + \beta_s l_s)^3 + \frac{1}{2}}{3(EI)_0 e^{-n} \beta_s^3} [(1 - e^{-1}) H_{max}] \quad (6)$$

⑤ β_s に関する3次方程式(6)式を解いて β_s 値を決定することができる。さらに l_{s0} 値は次式で求められる。

$$l_{s0} = 4(EI)_0 e^{-n} \beta_s^4 / D \quad (7)$$

なお、この β_s, l_{s0} は、文献3)で定義した β_s, l_{s0} とは異なる。ただし、 $n=0$ の場合には一致する。

⑥ 一方、地表面の水平変位 y はChangの式によると、次式で表わされる。

4. まとめ

1) 本計算法は、非線形的な杭の水平抵抗の問題を、簡単な線形計算で処理することを目的とした近似計算法であり、2.の仮定には大変無理なものもある。今後これらの改善が必要となろう。

2) (2)式の曲げ剛性の低減指数 n は、杭種、杭径、杭の形状などによって異なるものと考えられるので、今後多くの水平載荷試験結果を以上の方法で解析して決定する必要がある。

3) さらに、今回新しく定義した基準 l_{s0} も、今後数多くの水平載荷試験結果を同様な方法で解析して求め、この値と地盤調査によって求められる l_{s0} 値やその他の地盤定数などとの関係を明らかにする必要がある。このとき、土や地盤の σ - ϵ あるいは p - s 関係にも、今回と同様な手法を適用し、その基準値を用いると杭-地盤系の複雑な現象の系統的な取扱いが可能となる。

4) 今回新しく定義した曲げ剛性の低減指数 n と基準 l_{s0} を用いると、一般に規定されている許容変位量(例えば10mm)に対応する l_{s0} 値との結びつけも可能となる。

5) 地表面から載荷点までの高さの大きい杭の載荷試験結果には本手法を適用すべきではない。

なお、紙面の都合で解析例は省略したが、発表時にその若干例を紹介する予定でいる。

参考文献 1) 西田義親; 杭基礎の水平支持力-文献資料と研究解説-, 鋼管杭協会報告1号, 鋼管杭協会, (1975).

2) 「クイの水平抵抗」小特集号; 土と基礎, Vol.25, No.8, 土質工学会, (1977.8).

3) 塩井 宇都 冬木 近藤 桜井; 杭の荷重-変位曲線の非線形回帰結果による支持力の評価法, 第23回土質工学シンポジウム, (1978.11).

$$y = \frac{1 + \beta l}{2EI\beta^3} \cdot H \quad (8)$$

⑦ 杭頭と地表面における水平変位は異なるわけであるが、水平載荷試験のように、載荷点が地表面に近い場合には、この2点の変位はほぼ等しいので、(8)式で $\beta l \approx 0$ とおき、これに(1)、(2)式を代入すれば次式となり、このようにおいた β の誤差は極めて小さい。

$$\beta = \left[\frac{H_{max}(1 - e^{-y/y_s})}{2(EI)_0(e^{-y/y_s})^n y} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

⑧ (9)式と(9)式において $y = y_s$ とおいたときの β_s 値を用いて、 β/β_s を求めると次式となる。

$$\frac{\beta}{\beta_s} = \left[\frac{e^{-n}}{(1 - e^{-1})} \cdot \frac{(1 - e^{-y/y_s})}{y/y_s(e^{-y/y_s})^n} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

⑨ (7)式を用いて、同様な方法で次式となる。

$$\frac{l_s}{l_{s0}} = \left[\frac{e^{-\frac{n}{4}}}{(1 - e^{-1})} \cdot \frac{(1 - e^{-y/y_s})}{y/y_s(e^{-y/y_s})^{\frac{n}{4}}} \right]^{\frac{4}{3}} \quad (11)$$

⑩ 以上に述べた(6)、(7)式で、あらかじめ、基準値として定義した β_s 値と l_{s0} 値を求め、(10)、(11)式で $\beta/\beta_s, l_s/l_{s0}$ を求めておけば、任意の荷重 H 、または、任意の変位 y に対応する β, l_s が決定できることになる。この β を用いて杭の変位や曲げひずみなどを求めることができる。なお、これらの計算では、(1)式から $y/y_s = -\ln(1 - H/H_{max})$ なる関係があるので、利用すると便利である。