斜杭の水平支持力特性に関する支持力試験と解析

九州共立大学大学院　学○高良新悟
新日本製鐵㈱　正　小松章
九州共立大学　正　狩山裕，前田良刀

1.はじめに

斜杭は水平抵抗が大きく，耐震性に優れている基礎杭型式であるが，打撃杭工法が環境問題から採用されなくなったことと併行して現在ではほとんど適用されていない．しかし，近年回転工法などを用いて鋼管杭での斜杭の施工が可能になってきたことから，より経済的な基礎構造として見直されようとしている．本文では，室内模型および原位置での斜杭の水平支持力試験を行った結果と先に提案している速度場法による塑性地盤反力式をもとにした計算式を比較しながら斜杭の水平支持力特性を考察する．

2.室内模型群杭の載荷試験[1) 2)]

2.1 模型試験の概要

載荷試験は写真-1，に示すように，横幅W=1500 ㎜，深さH=900 ㎜，奥行きL=50 ㎜，の二次元の土層に，土粒子を模したアルミ棒を積層して試験地盤として実施している．アルミ棒は径1.6 ㎜と 3 ㎜を 3 対 2 の割合で混合しており，単位体積重量 γ_d=16.7kN/m^3，内部摩擦角はせん断試験からφ=21 °が得られている[3)]．模型杭は，①板厚 t=3 ㎜，奥行き L=50 ㎜で，杭長 l=650 ㎜，根入れ長D_f=600 ㎜，地上部の突き出し長h=50 ㎜を有するアルミ板の柔な単杭と，②地盤の受働抵抗特性を把握し易くするため，杭の曲げ変形の影響を与えない剛な杭を用いた．剛な杭は，板厚 t=50 ㎜，奥行き L=50 ㎜のアルミ角棒からなっており，杭長 l=650 ㎜，根入れ長D_f=325 ㎜，地上部の突き出し長h=325 ㎜である．なお，ここでは水平荷重方向と反対方向に傾斜している杭を out-batter 杭といい，水平荷重方向に傾斜している杭を in-batter の杭と呼んでいる．

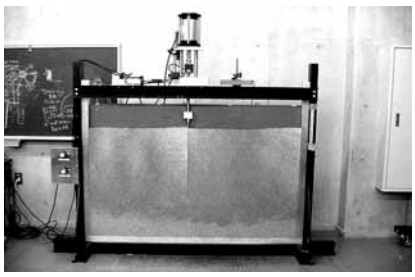
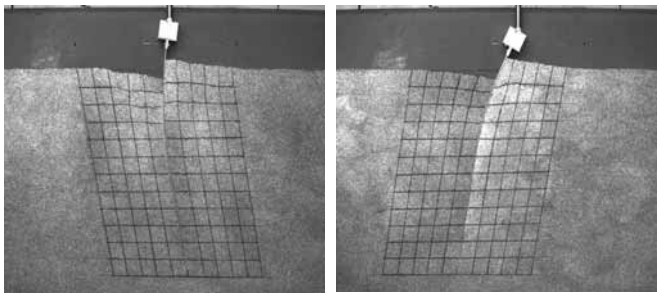


写真-1　載荷試験装置全景

2.2 模型試験の結果

写真-2に載荷後（約50mm程度変位後）のアルミ地盤の変位状況を示している．また，図-1は単杭の杭体の傾斜に伴う水平支持力の変化を示したものである．図では，鉛直杭（α=0 °）の水平支持力に対する斜杭の水平支持力比の変化と杭の傾斜角の関係を示している．これから，out-batter杭は水平荷重により水平変位を生じるには杭本体が浮き上がる必要があり，水平変位により地中に沈み込む必要のあるin-batterのものに比較して地盤のせん断抵抗領域（受働抵抗領域）が小さいことから水平支持力が小さいことが分かる．なお，剛な模型杭においても同様な結果となった．



(1) 斜杭（α=-10 °）　　(2) 斜杭（α=+10 °）

写真-2　斜杭の水平載荷試験（載荷後）

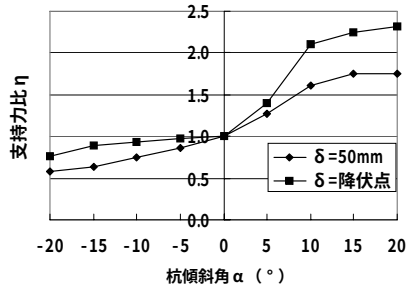


図-1　柔な単杭の水平支持力比と杭傾斜角α

3.原位置実大載荷試験における支持力特性の検討

原位置で斜杭の支持力特性を検討するために千葉県富津市の新日本製鐵（株）総合技術センター内にて鋼管杭の水平載荷試験を実施した．試験は，直杭（α=±0 °）と斜杭（α=+15 °, -15 °）の 3 ケースで行なった．試験杭の緒元，地盤条件，試験概要を図-2 に示す．ここで，鋼管杭の打設は，回転圧入工法（NS エコパイル工法）にて実施している．杭頭荷重～杭地表面位置での変位関係を図-3 に示す．杭の水平支持力は地盤の受働抵抗領域の違いにより斜杭角度α=+15 °が最も大きく，α=±0 °, -15 °の順に支持力が小さくなる．この傾向は模型試験と同様である．

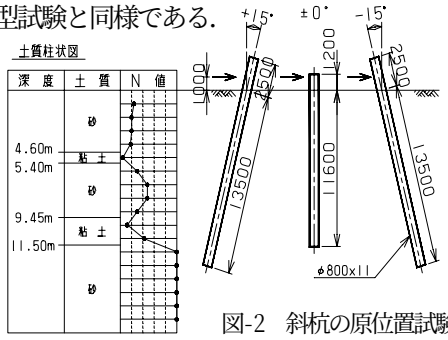


図-2　斜杭の原位置試験の概要図

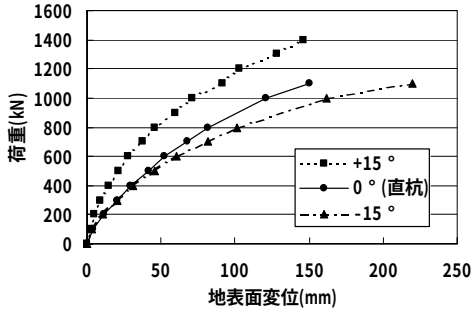


図-3　杭頭荷重～杭地表面位置変位関係

4.速度場法による斜杭軸直角方向の塑性地盤反力評価式[3)]

4.1 支持力式と受働土圧係数

筆者らは,斜杭の水平支持力に関する塑性地盤反力評価式を既に提案している.[3)] 図-4に示すように，基礎と地盤の間の摩擦力を考慮した遷移領域（A）と受働くさび領域（B）の地盤抵抗領域を考慮して斜杭の水平支持力を評価する必要があると考え，斜杭の水平支持力を速度場法にて導いた.

任意の深さZの塑性地盤反力評価式および受働土圧係数は,図-1 の破壊メカニズムから内部消散エネルギーと外力仕事を等値して式（1）（2）で得られる．詳細は文献（3）参照のこと.

$$R_H(z) = a_p \cdot B \cdot K_{p\gamma c\delta} \cdot \gamma \cdot z \qquad (1)$$

ここで，R：杭軸直角方向塑性地盤反力，B：杭径，$K_{p\gamma c\delta}$：壁面摩擦角δのときの受働土圧係数，γ：土の単位体積重量，z：着目点の深さ，α_p：三次元性考慮のための係数であり，2～3程度が一般的である.

また受働土圧係数 $K_{p\gamma c\delta}$ は次式により求められる.

$$K_{p\gamma c\delta} = \frac{1}{\frac{\gamma z^2}{2}} \cdot R_H = \frac{2c}{\gamma z} N_c + N_\gamma \qquad (2)$$

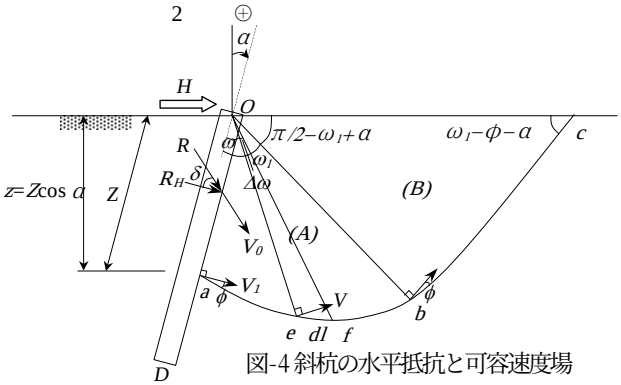


図-4 斜杭の水平抵抗と可容速度場

4.2 提案式の適用性とその考察

図-5，6に模型試験での剛な杭と柔な杭の水平支持力比～杭傾斜角関係を水平支持力比κ～杭傾斜角α関係を示す.ここで,水平支持力比κは次式で定義する.

κ=（傾斜角αの杭の水平支持力）/（直杭の水平支持力）

なお,試験時の水平支持力比は，模型杭の荷重～変位関係の降伏点で求めている．理論式を用いて解析した結果は，試験結果をほぼ表現することができる.

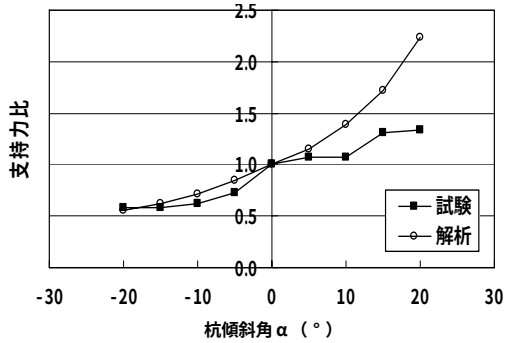


図-5　剛な単杭の支持力比～杭傾斜角の関係

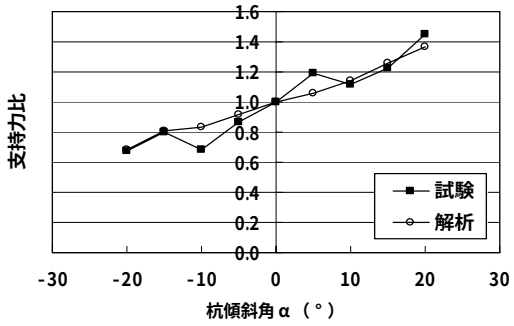


図-6　柔な単杭の支持力比～杭傾斜角の関係

図-7に，原位置載荷試験での荷重・変位関係の試験結果と解析結果の比較を示す．ここでの解析方法式は（2）の受働土圧係数，地盤反力係数k_Hは久保らの提案[4)]を用いている.試験結果と解析結果は，概ね良い対応を示している.

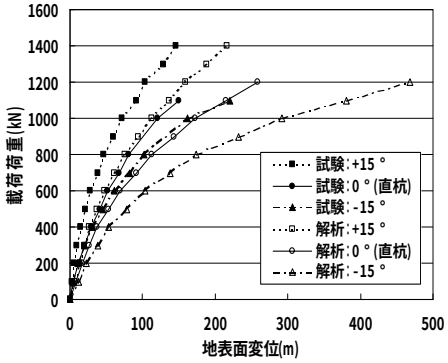


図-7　杭頭荷重～杭地表面変位関係の実測値と解析値の比較

5.まとめ

①室内および原位置での載荷試験から得られる支持力特性を考察した.

②速度場法より求めた理論式を用いた解析値は試験結果と良く対応した.

参考文献

1）小松，前田：模型杭の支持力特性に関する室内試験，地盤工学シンポジウム論文集，第48回地盤工学シンポジウム，2003.

2）杉浦，久々宮，前田，森：模型群杭基礎の支持力試験，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，2002.

3）小松：傾斜群杭の支持力特性と実務への適用性に関する研究，九州共立大学学位請求論文，2006.1

4）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説　1999