

斜面上の杭の水平支持力特性に関する模型載荷試験

03A3710 岡村 一誠
03A3731 林 侑央
指導教員 前田 良刀

1. はじめに

斜面上に建設される杭では地盤の受働抵抗領域が減少するため水平地盤に比較して水平支持力が低下する。旧日本道路公団 JH では昭和 40 年代前半から斜面上の深礎杭の水平支持力評価法と設計法について研究が行われ、その成果が高速道路に限らず、現在多くの道路橋基礎の設計に適用されている。

そこでは地盤の受働抵抗を評価するために、図-1 に示すような簡便な土楔による極限釣合い法が示されている。この土楔は旧日本道路公団¹⁾により初めて提案されたものであるが、この理由は、斜面角 θ が土の内部摩擦角 ϕ を超えると粘着力の無い粉体を仮定して提案されている一般のクーロン土圧では地盤が不安定になり解が得られないことによる。しかし、旧日本道路公団の方法では安全側のために三角形の楔土塊による底面での受働抵抗のみが考慮されている。

本研究は、斜面上の杭に関する模型載荷試験を行い地盤のすべり形状を詳細に観察し、破壊メカニズムを検討することにより合理的な水平支持力評価法の一助とするものである。

2. 模型載荷試験とその概要

2.1 試験土層と試験杭

載荷試験に用いた土層は、図-2, 3 に示すように横長さ $L=1080\text{mm}$, 奥行き $w=400\text{mm}$, 深さ $H=470\text{mm}$ の内空断面を有するもの当研究室で長年の実績がある試験土層である。試験杭はアルミ製の平面形状 $50 \times 50\text{mm}$ の正方形で全長 $l=700\text{mm}$ の概ね剛体と仮定できるものである。一般に杭の平面形状は円形であるが今回は杭端部からの平面的なすべり線の発達が明瞭に観察できると考えられる矩形とした。

杭の根入れ長 $D_f=400\text{mm}$ でヒンジ部をつくり杭が剛体的に回転できる構造とした。また、杭の地上部突き出し長は 250mm であるが水平荷重の載荷位置は地上部 $h=150\text{mm}$ としている。写真-1 に試験装置全景を示す。

さらに、載荷試験後に地盤内の破壊形状を詳細に観察するため色づけした $\phi=1.7\text{mm}$ の pasta を試験地盤上部より深さ方向に 5cm の間隔で 9 層、平面的に杭を

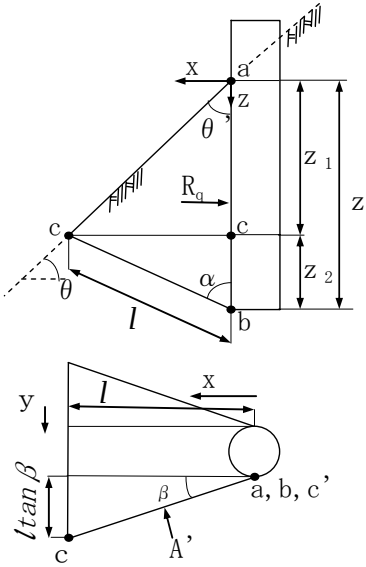


図-1 塑性化領域のすべり面（極限釣合い法）¹⁾

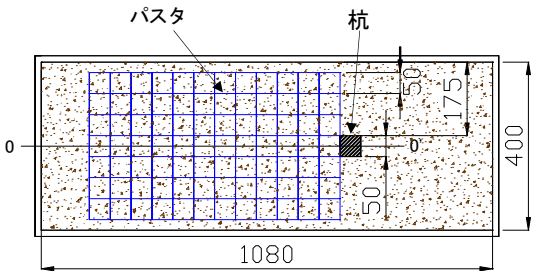


図-2 試験土層とパスタ配置図（平面図）単位:mm

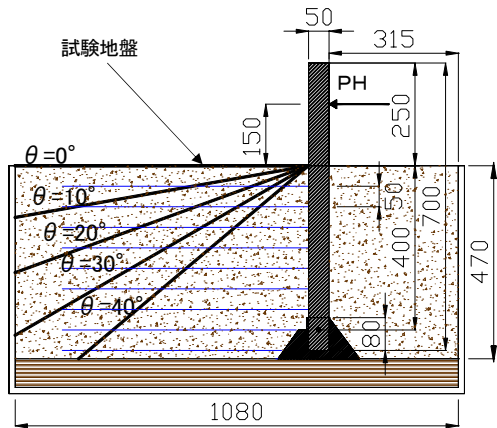


図-3 試験土層とパスタ配置図（側面図）単位:mm

表-1 試験ケース一覧

		斜面傾斜角 $\theta (^{\circ})$				
		0	10	20	30	40
試験 ケース	1回目	$\theta-0-1$	$\theta-10-1$	$\theta-20-1$	$\theta-30-1$	$\theta-40-1$
	2回目	$\theta-0-2$	$\theta-10-2$	$\theta-20-2$	$\theta-30-2$	$\theta-40-2$

中心として8層にわたり敷設した。(図-2, 3 参照)

また、試験地盤としての斜面を作成するために不飽和土が有する間隙水の負圧（サクション）を利用することとした。これにより試験地盤は任意の傾斜角度に作成できる。

土層内の仕切り版の後背部より地盤下部から注水し地盤内の水位を地盤表面部に一定に保ったまま 24 時間放置した、その後、各試験ケースで極力地盤の飽和度に差が出ないように、すべてのケースで排水開始から 1 時間以内に地盤の成形と荷重試験を実施した。

2.2 試験ケースと荷重の荷重方法

表-1, 図-3 に試験ケースを示す。試験地盤の傾斜角度は $\theta=0\sim40^\circ$ まで、 10° 間隔で変化させてそれぞれの傾斜角度で 2 ケースずつとした。これにより、全 10 ケースの荷重試験となる。

荷重の荷重は剛な荷重ロッドを介してエアースリンダーにより、地盤表面から $h=100\text{mm}$ の位置に荷重される。また、荷重・変位関係は荷重点位置で測定する。荷重は静的な単調増加型とし、荷重速度は試験終了までの時間にあまり差が出ないように、斜面傾斜角 $\theta=0\sim20^\circ$ の範囲で 20 秒毎に $\Delta PH=12.5\text{N}$ 、 $\theta=30\sim40^\circ$ の範囲では 20 秒毎に $\Delta PH=6.25\text{N}$ を荷重している。

2.3 試験地盤作成の詳細

試験地盤は乾燥岡垣砂を多重フルイ（3 重）による空中落下方式により水平地盤を作成後、前述の理由により飽和させた。試験土層を約 30 秒で 1 往復する速度で砂撒き装置を移動させている。このような方法により、乾燥単位体積重量 $\gamma_d=15.8\text{kN/m}^3$ の地盤が作成され、このとき地盤の内部摩擦角は $\phi=42^\circ$ 、となること が当研究室の成果から得られている。また、不飽和時の粘着力は土層での掘削試験から、 $c=3.6\text{kN/m}^2$ 程度が得られた。

以下に、試験地盤の作成手順を具体的に示す。

- ① 杭を所定の位置に鉛直に固定し、杭下端のヒンジ部セットのための木材部上端まで砂を空中落下させる。
- ② 杭下端部（深さ 450mm）から試験地盤表面まで深さ方向に 5cm 間隔で色付けしたパスタを計 9 層に渡り敷設する。このとき、平面的には縦と横の間隔が $5\text{cm}\times 5\text{cm}$ の格子状になるように縦 8 本、横 10 本を並べる。

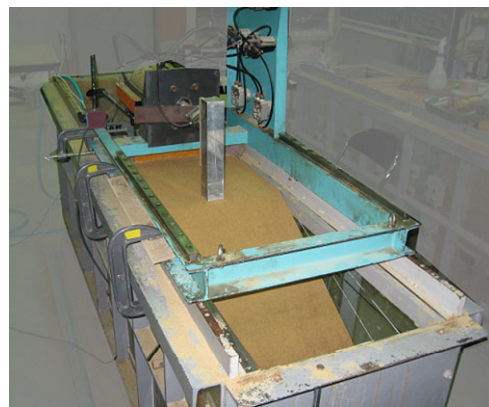


写真-1 試験装置全景

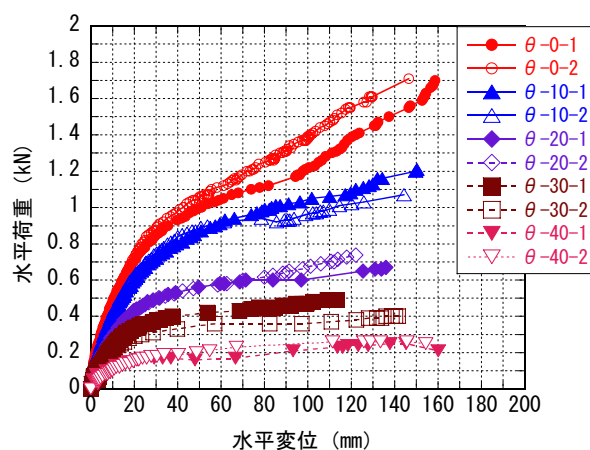


図-4 水平荷重・水平変位の関係

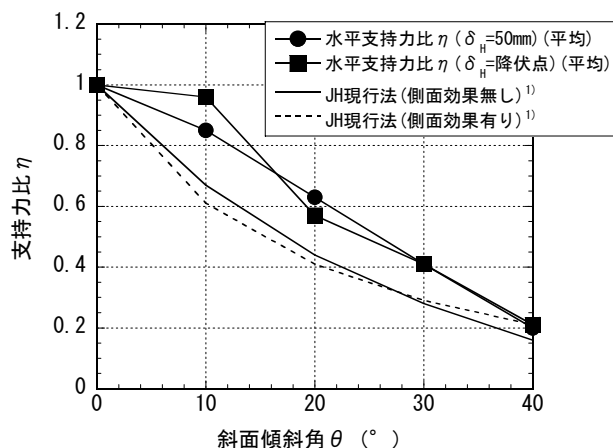


図-5 斜面傾斜角 θ と水平支持力比 η の関係

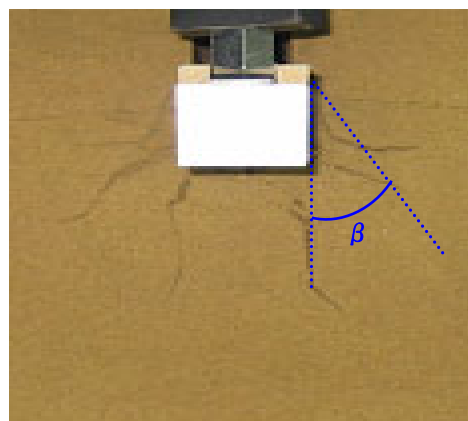


写真-2 斜面傾斜角 $\theta=0^\circ$ ($\theta-0-1$)

- ③ 土層の下部から注水し，試験地盤表面から水がしみ出した後，24 時間水位を保ったまま放置する。
- ④ 注水完了から 24 時間経過後，土層下部からゆっくりと排水する。
- ⑤ 排水開始後，掘削面を乱さないよう留意しながら，1 時間以内に斜面地盤を掘削整形し試験地盤とする。
- ⑥ その後，直ちに載荷試験に移行する。

3. 試験結果とその考察

3.1 荷重・変位関係と水平支持力

図-4 に試験から得られた水平荷重・変位関係を示す。各斜面角で 2 ケースずつ試験を実施したが同一の斜面角度の場合の荷重・変位曲線は概ね同じであり支持力試験の精度は良好であることが分かる。斜面角度が大きくなるにつれて支持力は急激に低下しているが，これは理論的予測と一致する結果である。

なお，地上部突き出し長 $h=150\text{mm}$ の存在による地表面位置でのモーメント $M_t = \Delta PH \times h$ も外荷重として杭に水平変位を与える要因となるが，その程度は地盤反力係数に影響を受けるため，ここでは水平荷重のみを外荷重として評価している。

図-5 は無次元化した支持力比 η と斜面傾斜角 θ の関係を示したものである。ここで，支持力比 η は斜面傾斜角 $\theta=0^\circ$ の水平支持力（降伏支持力）と各斜面傾斜角 θ での水平支持力（降伏支持力）の比である。

$$\eta = \frac{\text{各斜面傾斜角 } \theta \text{ }^\circ \text{ の水平支持力（降伏支持力）}}{\text{斜面傾斜角 } \theta=0^\circ \text{ の水平支持力（降伏支持力）}} \cdots (1)$$

杭の極限支持力の判定は一般に，荷重・変位曲線が変位軸に平行になったときであるが，斜面傾斜角が小さくなると地盤の進行性破壊現象のため極限支持力が明確でない場合も生じるため今回は水平変位 δ_H が 50mm に達したときの荷重を極限支持力としている。

また，荷重・変位曲線の曲率の最も大きい付近で接線を引き，2 本の接線の交角を 2 等分する線と荷重・変位曲線の交点を降伏支持力としている。

図-5 には試験結果の他に JH 現行法（図-1 参照）による計算結果も併せて示している。これから，斜面角度が大きくなると杭の水平支持力が低下し，斜面角 $\theta=40^\circ$ では，平坦地盤の約 20%程度となることが分かる。JH 現行法の極限釣合い法では試験値に比較して支持力の低下を大きく見積もっている。

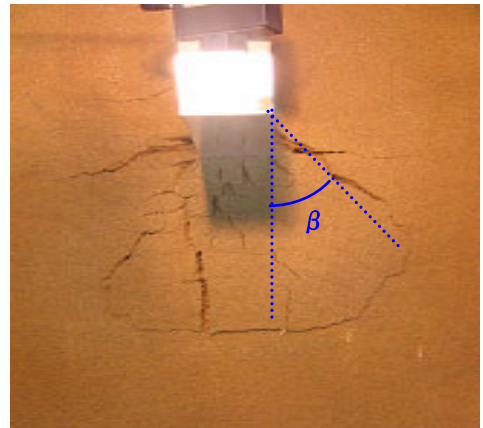


写真-3 斜面傾斜角 $\theta=10^\circ$ ($\theta-10-1$)

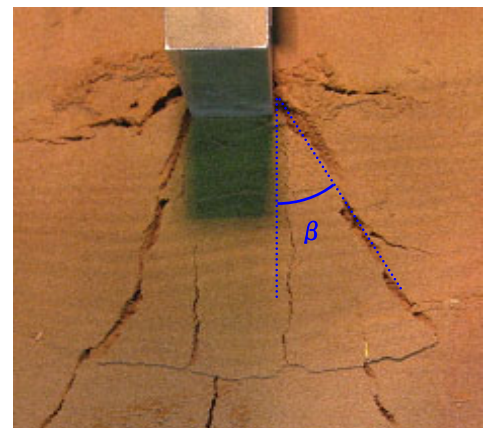


写真-4 斜面傾斜角 $\theta=20^\circ$ ($\theta-20-1$)

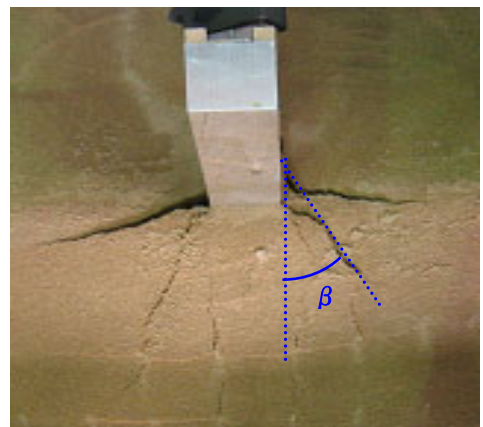


写真-5 斜面傾斜角 $\theta=30^\circ$ ($\theta-30-1$)

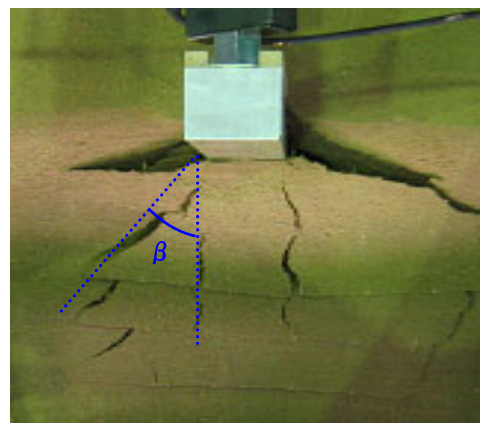


写真-6 斜面傾斜角 $\theta=40^\circ$ ($\theta-40-1$)

3.2 地盤の破壊性状

写真-2～6 に各斜面傾斜角における水平変位 $\delta_H=50\text{mm}$ 付近での地盤の破壊性状を示す。地盤の破壊は杭端部から角度 β をもって側方へ拡大するすべり線と杭幅で基礎前方に平行に進展するすべりの2つが顕著である。これら2つのすべり線は理論的には共役すべり線と考えられ、地盤の受働抵抗を知るには、いずれか1つのすべり線に関して釣合いモデルを考えれば良いことになる。これから、図-1 に示す JH 現行法は合理的であることが分かる。

図-6 はすべり線の拡がり角 β と斜面角 θ の関係を示したものであるが、 β は斜面角に依らずほぼ一定の値となる。図には JH 現行法による計算結果も示しているが試験値との相関は良好である。

図-7 は試験後に地盤を慎重に掘削して地盤の破壊性状を深さ方向に観察したもので、杭中心線方向についてまとめたうちの1例である。パスタの移動・切断によりすべり線が確認できることから図-7 に示すすべり線網を描くことができる。なお、アルミの杭と地盤間に摩擦が存在する為、杭近傍では曲線すべりの過渡領域となることが予測される。実務的には簡便な直線すべりを仮定しているので、ここでは受働くさび角の評価として最も外側のすべり線でパスタの切断が確認された点から杭のヒンジ部に向かって直線を引き、この直線と杭の交角を受働くさび角 α としている。

図-8 は受働くさび角と斜面角の関係を示したものである。図中には JH 現行法による計算値も示している。JH 現行法は斜面の影響を考慮した経験式であるが理論的にも受働くさび角は斜面角の影響を受けることは明らかである。今回の試験でも受働くさび角 α は斜面角 θ の影響を受け、 θ の増大とともに α も大きくなるが直線すべりでの受働くさび角 α を上述の如く評価したため α の大きさは試験値が小さくなっている。

4. まとめ

本研究での成果を以下に要約する。

- (1) 不飽和地盤のサクシオン（負圧）を利用することにより安息角以上の載荷試験用の斜面地盤を容易に作成することができた。また、地盤中にパスタを敷設することによりすべり線をかなりの範囲で観察できた。
- (2) 同一条件下での載荷試験による2つの水平荷重・変位関係は概ね同じである試験精度は良好であった。試験から、斜面傾斜角が大きくなるにつれて水平支持

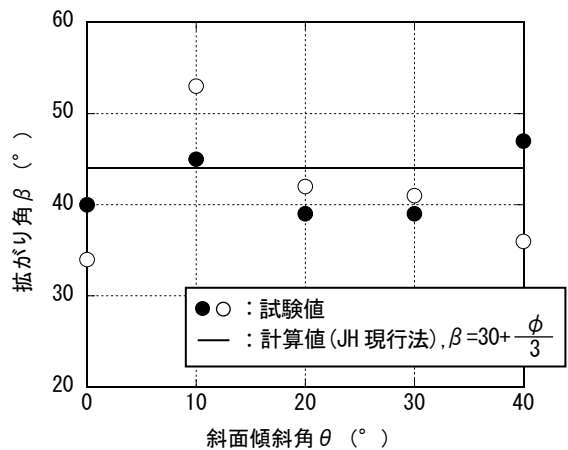


図-6 拡がり角 β と斜面傾斜角 θ の関係

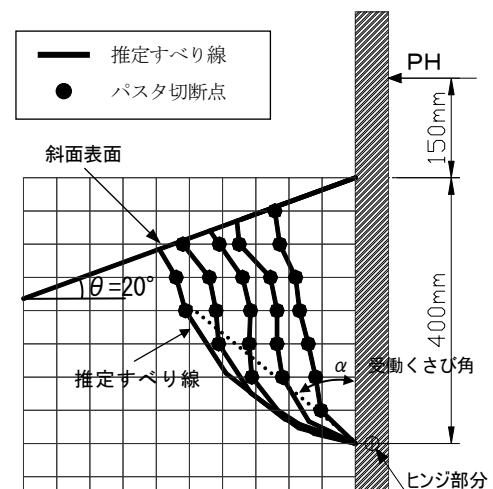


図-7 斜面内部のすべり線 ($\theta=20$ -1 の例)

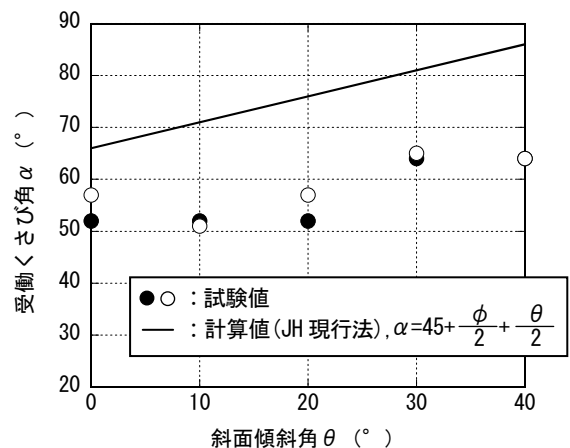


図-8 受働くさび角 α と斜面傾斜角 θ の関係

力は急激に低下する結果が得られた。このとき JH 現行法は多少安全側の値を予測する。

- (3) 平面的な拡がり β は斜面傾斜角 θ の影響を受けずほぼ一定の値となり JH 現行法とも概ねよく対応した。
- (4) 受働くさび角 α は斜面傾斜角 θ の影響を受け、 θ の増大とともに α も大きくなる。

参考文献

- 1) (財) 高速道路調査会：基礎構造物に関する調査研究 研究－昭和 47 年度報告－，1973. 2