

## 41 表層崩壊防止用の短杭の水平載荷試験

建設省 土木研究所 ○ 右近則男 仲野公章  
 兵庫県土木部砂防課 五十嵐亘弘 森岡 遼  
 神戸土木事務所 富田徹夫 近藤健二

### 1. 諸言

急傾斜地崩壊防止工事において土留柵工等表層崩壊防止を目的として短杭を用いるケースが増加している。しかし、地すべり防止等に用いられる比較的長大な杭とは違い、短杭の機能に関する解析や経験的知識は少ない。本報告では、兵庫県神戸市にある大阪層群の砂礫層からなる傾斜地において実施した長さ2, 3mの短杭の水平載荷試験結果をもとに、傾斜地盤上の短杭の挙動の解析法および崩壊防止機能についての検討結果を述べる。

### 2. 試験概要

試験に用いた杭材は、H形鋼( $12.5 \times 12.5 \times 6.5 \times 9$ )であり、杭の設置は $\phi 50\text{mm}$ のボーリング孔を $\phi = 300\text{mm}$ に拡孔した後、H形鋼を垂直に挿入しモルタルを注入した。載荷試験は根入れ長(1, 2m)と前面土被り厚(0.5m, 1.0m)を変え、合計4ケース実施した。また、 $\phi 50\text{mm}$ のボーリング削孔時に孔内水平載荷試験を実施し、地盤反力係数(K値)を測定した。各ケースの杭および地盤の概要を図-1に示した。

水平載荷試験にあたっては載荷水平力、杭および地盤の変位および杭材のひずみを測定した。測定位置は図-2に示すとおりである。載荷パターンは地山からの土圧を想定し、一方向載荷とした。載荷ステップは1t毎で、載荷速度は増荷時で $0.5\text{ t}/\text{分}$ 、減荷時には $1\text{ t}/\text{分}$ とした。

### 3. 試験結果

#### (1) 杭および地表面変位

図-3にNo.2およびNo.4杭における各載荷ステップ開始時の杭および地表面の変位状況を示した。荷重と変位の関係は明瞭に非線形性を示しており、その傾向は根入れ長の短いNo.2(No.1も同様)の杭で顕著である。概ね彈性的挙動とみなせる荷重レベル

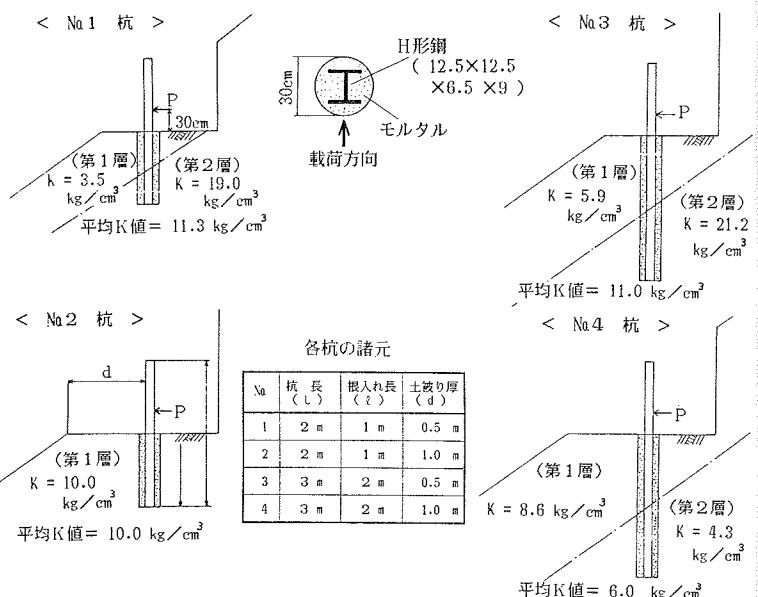


図-1 杭および地盤の概要

ルは、No.1, 2で約1tf, No.3, 4で約2tfであった。

## (2) 杣の水平抵抗力

杭の降伏値( $P_y$ )および極限耐力( $P_u$ )を評価するために荷重と変位の関係を両対数にプロットしたものを図-4に示した。プロットは各載荷ステップ開始時の値である。これによると降伏値はNo.1, 2の杭では推定できず、No.3, 4の杭で2~3tfであった。また、極限耐力はNo.1, 2の杭で2~3tf, No.3, 4の杭で5~6tfであった。

一方、杭材の応力ではNo.1, 2の杭はいずれも許容応力に達せず、No.3, 4の杭では水平力6tfで許容応力、最大荷重載荷時に極限応力を越えている。したがって、No.1, 2の根入れの短い杭の耐力は地盤の強度により強く依存していることがわかる。これらの杭については、地盤の破壊の領域が深部にまでおよび、杭の固定度が減少し杭が下端をヒンジとして前に倒れかのような破壊形態が想定される。一方、No.3, 4の杭では杭の挙動から見た極限耐力と杭材の破壊応力度がほぼ同じ載荷重のときに発生しており、一般的な長い杭で言われるような杭の水平耐力が部材の強度に依存する傾向を示している。

## 4 挙動解析

水平地盤上の単杭の水平載荷時の挙動を解析する手法は、一般に地盤反力のとり方によって極限地盤反力法、弾性地盤反力法および弾塑性地盤反力法の3つに分類される。今回は、弾性地盤反力法として線形のChangの式<sup>1)</sup>と非線形の今井の方法<sup>2)</sup>および弾塑性地盤反力法として高速道路調査会の方法<sup>3)</sup>をとりあげて杭の挙動解析を行ない、載荷試験との比較により傾斜地盤上の杭の解析への適用性を検討した。

### (1) 杣の変位

実測値および各計算式から求めた杭頭変位と水平力との関係を図-5に示した。実測値の荷重～変位曲線はクリープ変位を差し引き滑らかな曲線でフィッティングさせてある。したがって、荷重単調増加時のP～y曲線と同等な曲線である。図-5によれば、各杭とも初期の小さな変位段階では解析値と実測値の差は小さいが、変位が大きくなり塑性変位が増大するに従って差が大きくなる。特

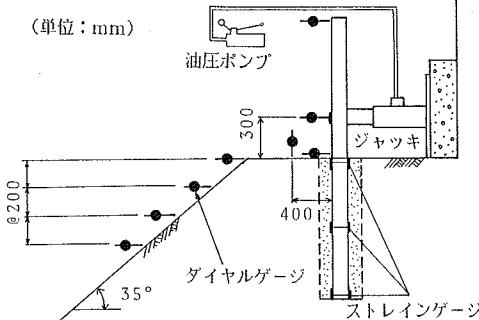


図-2 各種計測器の設置位置

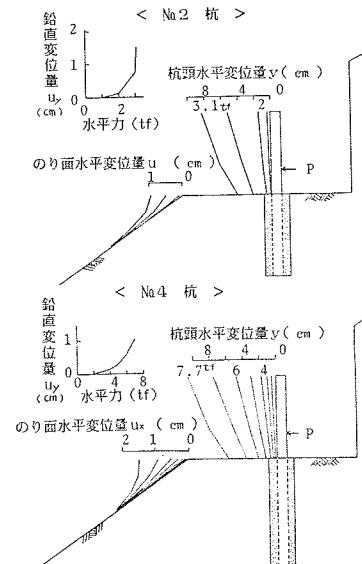


図-3 杣および地表面変位状況  
(No.2, No.4杭)

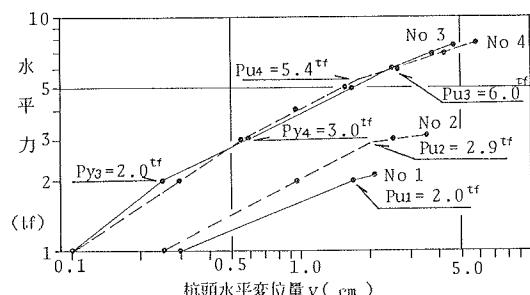


図-4  $\log P \sim \log y$  の関係

に、線形弾性地盤反力法に基づく解析法 (Chang の式) では、 $P$  と  $\gamma$  が直線関係にあるためその傾向が大きい。今井の方法による  $P$  ～  $\gamma$  の関係は、非線形を考慮している解析法の特色を反映して非線形な杭の挙動を表現してはいるものの実測値との適合性は良くない。また、弾塑性地盤反力法 (高速道路調査会の方法) による計算では根入れの長い No.3, 4 の杭では比較的良く  $P$  ～  $\gamma$  の関係を表現しているものの他の杭での適合性は良くない。

## (2) 曲げモーメント

各杭の曲げモーメントの実測値と解析値とを比較したもののが図-6 に示した。解析手法は Chang の式および高速道路調査会の方法によった。なお、地盤反力係数 ( $K$  値) および地盤の強度定数 ( $C$ ,  $\phi$ ) は土質試験結果を用いた。No.3, 4 の杭では実測されたモーメント (ひずみから計算) の分布は低い荷重レベルでは地表部に最大曲げモーメントを生じており、極限荷重段階に近づくにつれて、地表面から下の方へ移動していく。Chang の式による計算値と実測値とを比較してみると、低い荷重レベルでの値はほぼ同程度であるが分布の形は異なっている。しかし、荷重が増大し極限荷重は近になると最大モーメントの位置も大きさとも良く一致している。高速道路調査会の方法による計算値の分布形は Chang の式とほぼ同じであるが、地表部から順次塑性化していく

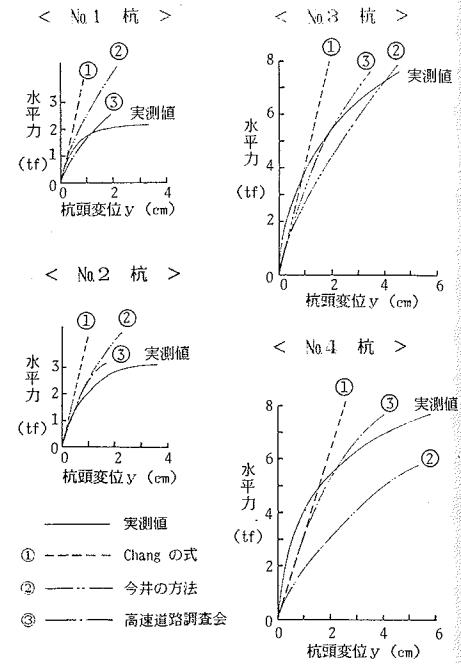


図-5 杭頭変位の実測値と計算値の比較

— 実測値  
--- Chang の式  
— 高速道路調査会

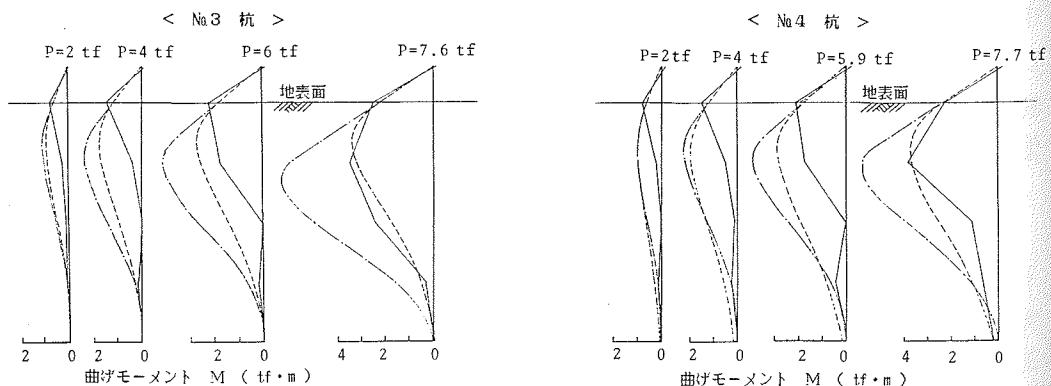
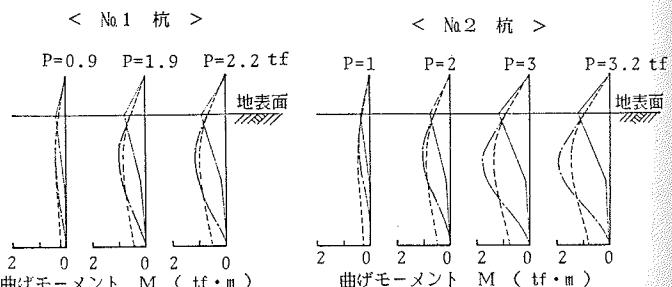


図-6 杭の曲げモーメント図

く過程を考慮できる解析法のため、荷重の増加とともに最大曲げモーメントの位置は下方へ移動していく傾向がある。また、その値も実測値に比べ大きなものとなっている。No.1, 2の短い根入れの実測値を見ると、いずれの荷重段階においても地表部で最大曲げモーメントが生じており、その分布形も杭下端をヒンジとし地表面を支点とする単純バリのモーメント分布に類似している。各解析法によるモーメント値と実測値とを比較してみると、いずれも分布形は異なる。モーメントの最大値に関しては、Changの式では発生位置は異なるが値はほぼ等しくなっている。一方、高速道路調査会の方法は実測値よりも大きな値となっている。

## 5. 結論

今回の試験では杭前面の土被り厚、杭の根入れ長の異なる4本の杭について現場水平載荷試験を実施した。これらの杭が一般の支持杭や構造物の基礎杭と異なる点としては、根入れ長が短い、斜面上の杭(前面が傾斜している)、杭径が小さいなどをあげることができる。

一般の杭については検討事例も多く、種々の挙動計算法が提案されているが、上記の諸条件下における検討事例は少ない。今回の試験では一般的な既往の手法が斜面上の短杭の解析にも適用可能か否かの検討を実施した。また、風化花崗岩地帯において今回の載荷試験と同一条件で実施した試験結果<sup>4)</sup>を加えて整理すると以下のような結論が導き出される。

- ① 地盤が堅い(地盤反力係数K値の大きい)斜面においては、杭前面の土被り厚を大きくとることは杭耐力の増大に大きな効果があるが、K値の小さな斜面では効果が小さく、反対に根入れ長を大きくとることにより耐力を増すことが可能である。
- ② 地盤が比較的堅硬あるいは根入れ長がある程度確保された杭(例えば、Changの式の適用条件である $\beta l > \pi^2$ <sup>注)</sup>)においてはChangの式により杭材の曲げモーメントを予想できそうである。このことは、変位がある程度の量まで許容される斜面安定に用いられる短杭においては、安全率を考慮したうえで、Changの式で求められる曲げモーメントに基づいて設計法を確立できる可能性があることを示していると考えられる。
- ③ 変位の予測は特にその値により構造・寸法を算定するような場合には重要なファクターとなるがChangの式で変位を予測しようとするのは、精度上困難である。しかし、地盤が堅硬な場合や根入れが長い場合は、地盤反力の非線形性を考慮した既存の解析法(今井の方法、高速道路調査会の方法)によりある程度の評価が可能である。

注)  $B = \sqrt{KD/4EI}$       K: 地盤反力係数(K値)      D: 杭径      E: 杭材の弾性係数  
 I: 杭の断面二次モーメント      l: 杭の長さ

## 〈参考文献〉

- 1) 例えば、山口柏樹: 土質力学(全改訂), 技報堂出版, PP 287~289, 1984
- 2) 山肩邦男: 建築構造物のクイの水平抵抗, 土と基礎, Vol. 25, No. 8, PP 7~14, 1977
- 3) 高速道路調査会: 深礎ぐいの設計に関する研究報告書, PP 5~45, 1978
- 4) 急傾斜地崩壊研究室: 杭工に関する調査報告書, 土木研究所資料第1941号, PP 60~65, 1983