

1 はじめに

斜面の崩壊防止、特に長大斜面の崩壊対策として比較的規模の小さな杭を土留め柵的に用い、斜面の表層部の崩壊防止に用いるケースが増えている。しかし、これらの短杭についてはどのような挙動を示すのか、またその耐力や評価法についての検討事例は少ない。前報¹⁾では、神戸市にある大阪層群の崩積土斜面で実施した水平載荷試験結果を報告した。今回の報告では更に地盤種の異なる風化マサ土斜面での水平載荷試験結果も加えて既存の挙動解析法の適用性を検討した。

2 試験概要

試験に用いた杭材は、H形鋼(12.5×12.5×6.5×9)であり、杭の設置はφ50mmのボーリング孔をφ300mmに拡孔した後、H鋼を垂直に挿入しモルタルを注入した。載荷試験は各々の斜面(風化マサ土斜面、崩積土斜面)で根入れ長2mの杭で行い、杭前面の土かぶりの厚さを0.5、1.0mの2種について行った。また、各杭とも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。各杭の幾何形状を図-1に示した。

水平載荷試験は土質工学会の基準に準拠し、載荷水平力、杭および地盤の変位ならびに杭材のひずみを測定した(図-2)。

3 挙動解析

(1) 解析手法

水平地盤上の短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かたによって極限地盤反力法、弾性地盤反力法、弾塑性地盤反力法の3つに大別される。今回の解析では弾性地盤反力として、線形の有限長の杭²⁾と、非線形の今井の方法³⁾、また弾塑性地盤反力法として高速道路調査会の方法⁴⁾を用いた。なお、一般にもっともよく用いられるChangの式については、試験杭の特性値(β)× l が π 以下になると杭先端の影響が解析値に出てくるため今回の解析では杭先端の支持条件を考慮した有限長の杭による解析を行った。なお、 βl が π より大きくなると両者の解析値は一致し、今回の条件では $\beta l > 2.5$ 程度であれば実用上の差はほとんど

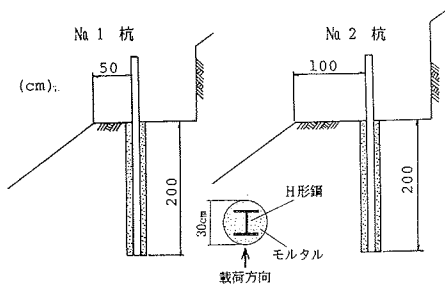


図-1 杭の概要

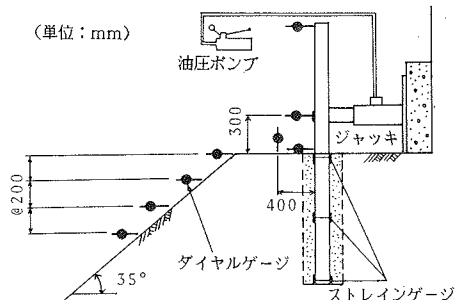


図-2 各種計測器の設置位置

表-1 計算に用いたK値の一覧

杭 No	杭の設置条件		深度 (m)	風化マサ土斜面				崩壊土斜面			
	根入れ (m)	土かぶり (m)		K値 (kg/cm)				K値 (kg/cm)			
				実測値	有限長の杭	今井の方法	高速道路調	実測値	有限長の杭	今井の方法	高速道路調
1	2.0 m	0.5 m	0 ~ 0.5	23.9	16.4	23.9	44.1	8.0	3.9	8.0	11.0
			0.75 ~ 1.25	60.7		60.7		3.7		3.7	
			1.5 ~ 2.0	47.7		47.7		21.2		21.2	
2	2.0 m	1.0 m	0 ~ 0.5	9.1	15.2	9.1	48.9	5.9	2.1	5.9	6.0
			0.75 ~ 1.25	43.9		43.9		3.4		3.4	
			1.5 ~ 2.0	93.9		93.9		8.6		8.6	

注) 高速道路調査会のK値は、各深度における実測値の平均
有限長の杭のK値は、道路橋示方書の方法による基準K値の平均

なかった。また、計算に用いたK値を表-1に示した。

(2) モルタル部の剛性評価

一般に、杭を建て込んだ後の間隙はモルタル等で充填することが多いが、それらのモルタル部については施工の不均一性、杭体形成の確認等の不確定要素があるため、H鋼のみの剛性で杭体を設計している。ここではモルタル部を含めた剛性の評価を実挙動ととの比較で検討してみた。H鋼とモルタルの付着強度や両者間の変位に関する適合条件の不備等の問題点は残るが、モルタル部をはりに評価し、杭体をモルタルとH鋼の複合体と仮定する。すなわち

$$\text{複合体の剛性} : EI = E_s \cdot I_s + E_c \cdot I_c \quad \text{ここで } E_s \cdot I_s : \text{H鋼の剛性}$$

$$E_c \cdot I_c : \text{モルタルの剛性}$$

また、この場合のH鋼の曲げモーメントの負担率は、 $(E_s \cdot I_s) / (E_s \cdot I_s + E_c \cdot I_c) M \approx M/4$ と考えた。

(3) 杭の変位

実測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-3に示した。線形の有限長の杭では変位と荷重が直線関係にあるため、荷重全域にわたり変位を追跡することは不可能である。今井の方法では解析法の特徴を反映して非線形な杭の挙動を表現しているものの、全体的には実挙動に対する十分な追従とはなっていない。有限長の杭でモルタル部の剛性を評価しても、同様に追跡精度は良くない。

高速道路調査会の方法では杭の非線形な挙動を合理的に表現し得る結果となっている。しかし、剛性のとり方、地盤定数のとり方によって実挙動との数値的なくい違いは大きなものがある。特に塑性域の範囲および塑性後の土塊の抵抗力を算定する際に用いる地盤定数(C, φ)のとり方によって杭の挙動が大きく異なることがわかる。今回の計算結果では土の粘着力を5 tf/m²とした時にいずれのケースについても実測値とかなり整合性がよくなった。

(4) 杭の曲げモーメント

曲げモーメントはH鋼材のひずみから計算した。各解析法の計算値と実測値とを比較したものが図-4である。図には比較的弾性挙動を示す荷重段階を左側に、変位が進行した状態(塑性域)の荷重段階での曲げモーメントを右側に図示した。また、実測モーメントは圧縮、引張り両面の平均をとっている。なお、図中‘H鋼+モルタ

ル' とあるのは杭体の剛性としてH鋼とモルタル部の両方の剛性を考慮した場合(複合体)の解析値であり、H鋼に生ずるモーメントを表していないが、(2)で述べた仮定に従えばH鋼は杭体が発生するモーメントの1/4を負担することになる。従って実測値と比較する場合には、モーメントの値を横軸方向に1/4倍することになる。

この図から、全般的にモーメントに関しては実測値と計算値の間には、変位にみられるほどの極端な隔たりはなく、とくに有限長の杭ではその分布形、値ともよい整合性が得られ、最大値に関しては計算値と実測値との間は5%以内の誤差に納まっている。モルタル部を考慮した計算結果をみると、モーメントの負担率を考えなければ実測値との整合性はかなり良い。ただし、前述の仮定によればH鋼はモーメントの1/4を負担することになり、この意味からは整合性は良くないといえる。

高速道路調査会の方法で計算した結果をみてみると、H鋼のみの剛性を考慮した場合は、低い荷重段階では比較的良好な対応を示すが杭の挙動が塑性域にまで及ぶような荷重段階では計算値の方がかなり大きく、実測値との対応は有限長の杭による計算値ほど良好ではない。一方、モルタル部を考慮した場合をみると、複合体のモーメントはH鋼のみのモーメントに比べ更に実測値との対応は良くない。そこで前述の仮定のようにH鋼のモーメントの負担率を考える(すなわち横軸方向に1/4倍してみると)、根入れの深い部分では実測値に近似する傾向があるが、地表部に近いところでは実測値の方が2~3倍大きくなる。なお、H鋼の負担するモーメントは当初1/4と仮定したが、実測値との近似という面からみると風化マサ土斜面で約1/2、崩積土斜面で約1/1.5程度となった。

5 結語

杭の変位に関しては、その値により杭体の構造、寸法を計画するような場合には重要なファクターとなる。しかし、線形弾性地盤反力法では変位全域にわたり追跡することは難しい。高速道路調査会の方法では杭の非線形の挙動を最も良く表現できるが、計算に用いる地盤定数の値によってその解析値が大きく変わる欠点をもつ。しかし、地盤定数を正確に把握できれば杭の挙動を比較的大きな変位まで追跡することができる。

曲げモーメントに関しては弾性地盤反力法(有限長の杭、 $\beta l > \pi$ でChangの式と等しい)による計算でも実挙動との誤差は小さく、特にピーク値に関しては発生位置の若干の違いはあるが、ほぼ同一の結果を得た。

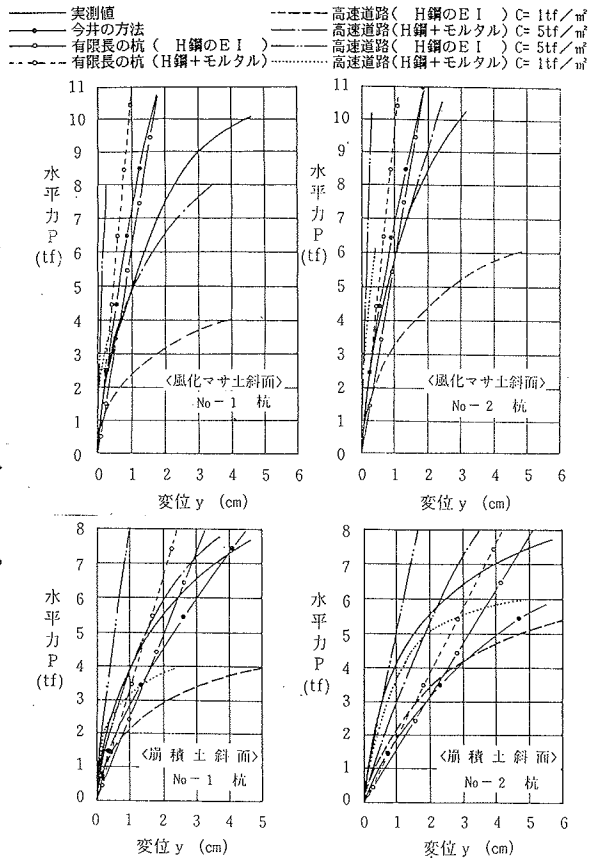


図-3 杭頭変位の実測値と計算値との比較

したがって、概略的な評価に関しては充分適用性がある。また、一般に測定値より大きめの値を得ることからこの分を設計上の安全率に相当するものとみなすならば簡便なChangの式、有限長の杭で得られる曲げモーメントで杭体を設計することは実務上充分であろう。ただし、これら既存の手法を用いる場合は、地盤が堅硬か根入れがある程度確保できる杭（例えば $\beta l > 2.5 \sim 3$ 以上の杭）に限ることが必要条件である。モーメント分布や最大モーメントの発生位置等の厳密な解析には地盤の塑性化を考慮できる弾性地盤反力法（今回の高速道路調査会の方法等）によらなければならないが、その際には詳細な地盤調査を前提とする必要がある。

剛性に関してはモルタル部を含めて評価する有効性は認められるものの、それらを積極的に評価して設計体系に組み入れるだけの有効性を強調する結論には至らなかった。

5 おわりに

今回の試験では杭の挙動が塑性域にまで及ぶため、弾性地盤反力法では実測値との整合性は必ずしも良くないが、曲げモーメントの評価においては比較的良好な結果が得られた。弾性地盤反力法では実現象とは異なる種々の仮定を含んでいるが、ある程度の根入れと地盤反力が期待できれば短杭の解析にも利用できそうである。一方今回のように変形が塑性域まで及ぶような杭において、その耐力を変位によって論ずる場合には地盤の塑性を考慮した解析法で検討する必要がある。これらの解析法は地盤の破壊の過程を良く表現できるものの、地盤定数の設定や塑性領域の設定に検討の余地が残されている。

注) $\beta l = \sqrt[4]{KD/4EI} \cdot l$

<参考文献>

- 1) 右近、仲野 : 表層崩壊防止用の短杭の水平載荷試験、昭和60年度砂防学会研究発表会概要集、1985
- 2) 例えば 横山幸満 : くい構造物の計算法と計算例、山海堂、1977
- 3) 今井常雄 : 地盤の横方向K値の研究(3),(4)、土と基礎、VOL17, No.11, VOL18, No.1、1965, 1966
- 4) 高速道路調査会 : 斜面上の深礎ぐいに関する調査研究報告書、1983

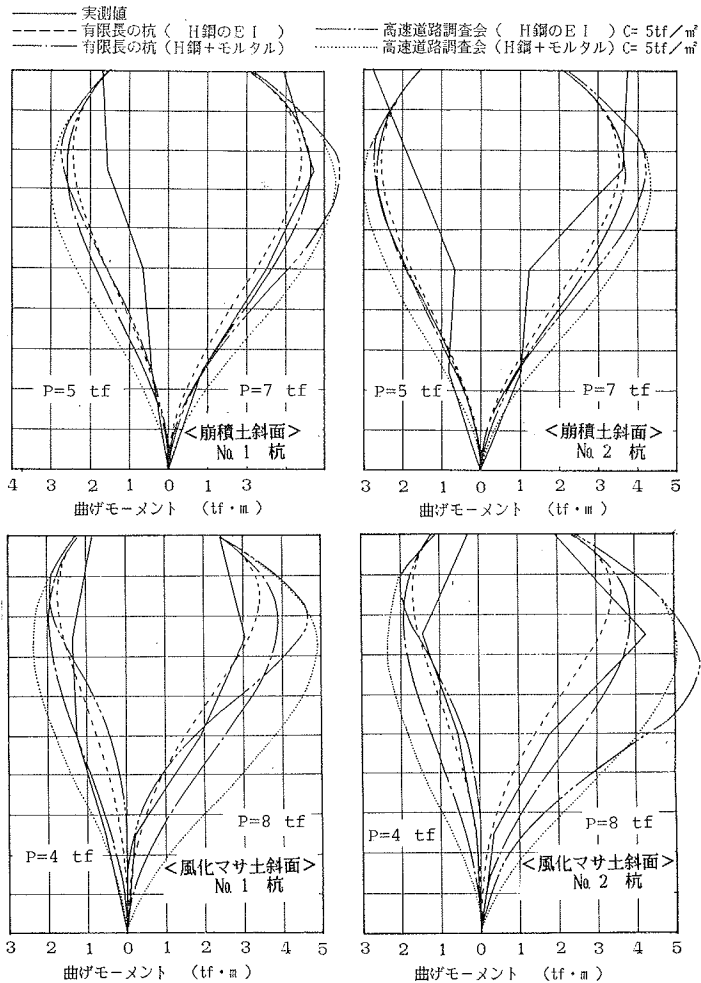


図-4 曲げモーメントの実測値と計算値との比較