

くさび杭の設計法に関する考察（その1）

日本道路公団	名古屋技術事務所	正会員	篠田	雅男
	(株) ニュー・シビル	正会員	佐伯	満寛
	同上	正会員	○長谷	寿晃
	東海大学	正会員	冬木	衛
		正会員	宇都	一馬

1. はじめに

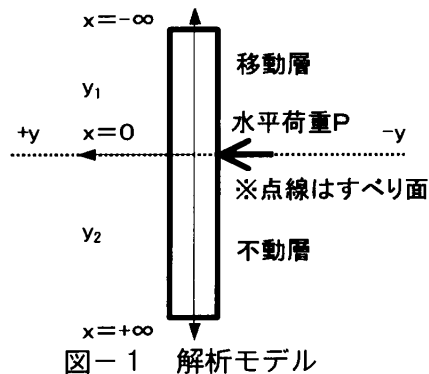
現行の地すべり抑止杭は“地すべり鋼管杭設計要領”¹⁾（以下「要領」と略す）によると、くさび杭、補強杭、せん断杭および抑え杭の4つに分類され、現状ではくさび杭と抑え杭が多用されている。

今回これらのうち「要領」で規定される「くさび杭」の設計法に関して、「要領」の力学モデルを尊重しつつ、杭の水平支持力問題として一般的に利用される「弾性床土のはり理論」を用いて解き直したところ、「要領」の設計法にいくつかの問題点があることが判明したので報告する。

なお、(その2)²⁾では、杭が有限長となる場合の結果を報告している。

2. 弾性床土のはり理論による「くさび杭」の解析

2.1 解析モデルと座標系の定義



座標系は杭を連続体として荷重、変位、曲げモーメント、せん断力の方向と符号については“横山幸満：鋼杭の設計と施工、山海堂、1963”を参考とする。

2.2 諸量の定義と計算例（「要領」のP.88より）

x	すべり面からの距離(m)
y_1, y_2	移動層, 不動層の変位(m)
θ_1, θ_2	移動層, 不動層のたわみ角(rad)
M_1, M_2	移動層, 不動層の曲げモーメント(kN・m)
S_1, S_2	移動層, 不動層のせん断力(kN)
β_1, β_2	$\sqrt[4]{\frac{Es_1}{4EI}}, \sqrt[4]{\frac{Es_2}{4EI}}$ 杭の特性値 $\beta_1=0.482\text{m}^{-1}, \beta_2=0.720\text{m}^{-1}$
Es_1, Es_2	移動層, 不動層の弾性係数(kN/m ²)
EI	杭の曲げ剛性(kN・m ²) = 132600kN・m ²
E	杭の弾性係数 = $2.0 \times 10^8 \text{kPa}$
I	断面2次モーメント = 66300cm ⁴
d	杭の直径 = 508.0mm
t	杭の厚さ = 14mm
P	水平荷重<集中荷重> = 294.3kN/m

2.2 一般解

図-1に示す解析モデルと座標系によると、杭の弾性方程式は、式(1)、(2)で示される。

$$\text{移動層: } EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} + Es_1 y_1 = 0 \quad \text{--- (1)} \quad \text{不動層: } EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + Es_2 y_2 = 0 \quad \text{--- (2)}$$

移動層、不動層の杭を半無限長とすると、 $x_1 = -\infty: y_1'' = 0, y_1''' = 0, \quad x_2 = +\infty: y_2'' = 0, y_2''' = 0$ の境界条件を用いて一般解はそれぞれ式(3)、(4)となる。

$$\text{一般解: } y_1 = e^{\beta_1 x} (A_1 \cos \beta_1 x + B_1 \sin \beta_1 x) \quad \text{--- (3)} \quad y_2 = e^{-\beta_2 x} (C_2 \cos \beta_2 x + D_2 \sin \beta_2 x) \quad \text{--- (4)}$$

ここで、 A_1, B_1, C_2, D_2 は積分定数で適当な境界条件を与えることにより定めることができる。

2.3 境界条件と解

すべり面における次の4つの境界条件より、

$$x=0: y_1=y_2, \quad y_1'=y_2', \quad y_1''=y_2'', \quad y_1'''-y_2'''=-P/EI$$

キーワード くさび杭，弾性床土のはり

連絡先 〒228-0803 神奈川県相模原市相模大野 3-18-10 アリスビル 6F (株) ニュー・シビル TEL 042-767-2330

境界条件の組合せは、移動層の杭のみが有限（不動層は半無限長）の場合には表－1に示す6ケース、移動層、不動層とも有限長の場合は表－1と表－2の組合せから18ケースが考えられる。

2.3 解法

式（1）、（2）は、表－1、2に示す境界条件により

解くことになるが、解析解を表示すると煩雑になるので、式（3）に示す行列から数値解を求めた。

$$A t = f \quad \cdots (3)$$

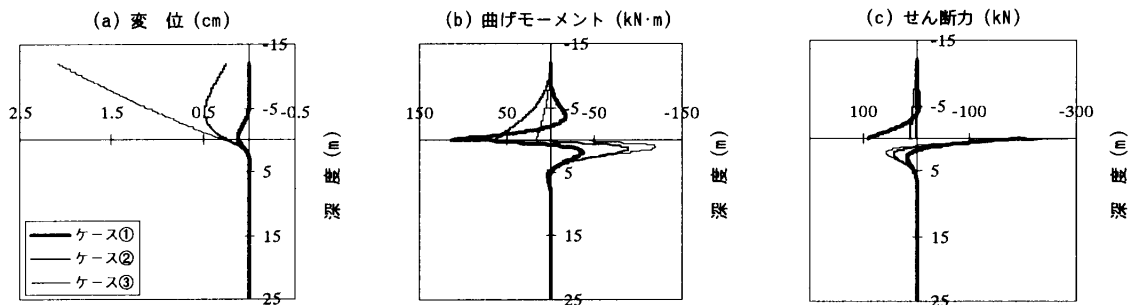
ここで、 A ：係数行列、 t ：積分定数（ A_i, B_i, C_i, D_i ）の列ベクトル、 f ：荷重項等（既知）の列ベクトル
係数行列は、移動層中の杭のみ有限長の場合は 6×6 の行列、移動層と不動層中の杭がともに有限長の場合は 8×8 の行列となる。ここでは、紙面の都合上、個々の要素を表示することは省略した。

3. 解析事例

解析は、「要領」P.88の解析例に示される定数を用いて行った。表－3に杭の諸元と荷重、表－4に杭の特性値を示す。

1例として、不動層の杭が半無限で、移動層の杭が有限で杭頭が自由端（表－1の（1）の場合）として計算した結果を図－2に示す。

図－2の（a）が変位、（b）が曲げモーメント、（c）がせん断力である。



図－2 解析結果（①：「要領」、②：① β_1 値の1/5、③：① β_1 値の1/10）

β_1 に関してケース①は「要領」の値をそのまま用い、ケース②はケース①の β_1 値の1/5、ケース③は1/10と変化させてある。これら移動層での杭の特性値の違いにより、変位、曲げモーメント、せん断力に特徴ある変化がみられる。他の計算例は省略したが、杭の有限・半無限、杭頭・杭先端の拘束条件、地盤の状態などの違いを反映した興味ある現象を呈している。

4. まとめ

今回の議論では、「くさび杭」を「弾性床のはりモデル」として、移動層中の杭のみ有限長、移動層と不動層中の杭がともに有限長の場合について検討を行った。なお、地すべり現象との整合性等の照査は一切行っていない。既往の研究^{3) 4) 5)}では、地盤と杭との相互作用を解析に取り入れる議論もある。これらは、今後の研究課題としたい。

本論文をまとめるにあたり、ご助言頂いた渡正亮氏（㈱アイエステー代表取締役会長）に謝意を表します。

参考文献

- 1) 地すべり鋼管杭設計要領：（社）地すべり対策技術協会, 1990.
- 2) 篠田雅男, 佐伯満寛, 長谷寿晃, 冬木衛, 宇都一馬：くさび杭の設計法に関する考察（その1），土木学会第57回年次学術講演会概要集（投稿中），2002.
- 3) 中村浩之, 土屋智：地すべり変位を考慮した抑止杭の解析, 地すべり, Vol.24, No.2, 1987.
- 4) 申潤植：地すべり工学－理論と実践－, 山海堂, 平成元年.
- 5) 小島義孝, 山田壽政, 渡邊直人, 速見博秀：くさび杭設計のための試論, 地すべり, Vol.32, No.3, 1995.

表－2 不動層の杭長が有限長の場合の杭先端境界条件
(l_2 ：杭長)

境界条件	(1) 自由	(2) ヒンジ	(3) 固定
杭先端 $x=l_2$	$y_2''=0$ $y_2'''=0$	$y_2=0$ $y_2''=0$	$y_2=0$ $y_2'=0$

表－3 杭の諸元と荷重

項目	単位
E	2.0E+08 kpa
I	66300 cm ⁴
d	508 mm
t	14 mm
P	294.3 KN/m
l_1	12 m

P: すべり面に作用する水平荷重

表－4 杭の特性値

ケース	β_1	β_2
ケース①	0.482	0.720
ケース②	0.144	0.720
ケース③	0.072	0.720

「要領」P.88より