多層地盤中の多段アンカー付き抑え杭の特性について

On the Characteristic Features of the Cantilever Type Pile (Osaegui) with Anchors in the Lateral Layers

小島義孝* 山本哲三** 速水博秀***
Yoshitak KOJIMA Tetsuzou YAMAMOTO Hirohide HAYAMIZU

Abstract

Recently steel pile work has been developed as an effective countermeasure against landslides.

We introduce a general method of calculating the deflection, angle of deflection, bending moment, shearing force and anchor forces of the pile with anchors in the lateral layers under arbitrary load conditions for the design of the cantilever type for landslide prevention.

We analyze the characteristics of the pile under various conditions using a personal computer.

キーワード：地すべり，杭，アンカー設計計算

1. はじめに

近年、地すべり抑止工や山留工などでアンカー付きの杭工あるいは親杭（横矢板）アンカー工などが実施されることが多い。しかしながら、実際にこれらの工法を設計する場合、杭とアンカーの負担力の割合を決定する簡便で合理的な方法が確立されているとはいえないのが現状である。杭を主体にするかアンカーを主体にするかで異なるが、負担すべき抑止力や土圧はいずれか一方に受持たせる場合が多いようである。ここでは、多層地盤中の抑え杭（地すべり推力を片持梁的に受け持つ杭）にアンカーを多数取り付けたとときの杭のたわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力を決定する1つの一般的な方法を述べる。またその結果をパソコン上でプログラミングして、抑え杭に対するアンカーの段数、地盤の層数、外力の分布形態の力学的影響を検討した。

2. 計算手法

図-1に示す計算モデルに基づいて力のつりあい方程式をたてると次のようになる。すなわち、移動層の i 番目の区間に対して、

$$EI \frac{d^4 y_i}{dx^4} = 0 \quad (i=1 \sim m) \quad \dots\dots\dots (1)$$

不動層の i 番目の地層に対しては

$$EI \frac{d^4 y_i}{dx^4} + E_s y_i = 0 \quad (i=1 \sim n) \quad \dots\dots\dots (2)$$

境界条件は、次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} x = -L_E \text{ で } y'' = 0, y''' = 0 \\ x = -l_i \text{ で } y_{i-1} = y_i, y'_{i-1} = y'_i, y''_{i-1} = y''_i, \\ y_{i-1}''' = \frac{H_i}{EI} + y_i''' \quad (i=1 \sim m) \\ x = L_R \text{ で } y = 0, y' = 0 \text{ または } y'' = 0, y''' = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(1)式および(2)式の一般解はそれぞれ次の(4)、(5)式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} y_i &= a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \\ y_i' &= 3a_i x^2 + 2b_i x + c_i, \quad \theta_i = y_i' \\ y_i'' &= 6a_i x + 2b_i, \quad M_i = -EI y_i'' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

図-1 計算モデル

* 日本基礎技術(株) 技術本部調査設計第一部
** " 北陸支店調査設計部
*** " 技術本部顧問

$$\begin{aligned}
 y_i''' = 6a_i, \quad S_i = -EI y_i''' \quad] \quad (i=1 \sim m) \\
 \begin{pmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i/EI \\ S_i/EI \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1(\beta_i x_i), F_3(\beta_i x_i), \\ \beta_i F_2(\beta_i x_i), \beta_i F_4(\beta_i x_i), \\ 2\beta_i^2 F_3(\beta_i x_i), -2\beta_i^2 F_1(\beta_i x_i), \\ 2\beta_i^3 F_4(\beta_i x_i), -2\beta_i^3 F_2(\beta_i x_i), \\ G_1(\beta_i x_i), G_3(\beta_i x_i) \\ -\beta_i G_2(\beta_i x_i), \beta_i G_4(\beta_i x_i) \\ -2\beta_i^2 G_3(\beta_i x_i), 2\beta_i^2 G_1(\beta_i x_i) \\ -2\beta_i^3 G_4(\beta_i x_i), -2\beta_i^3 G_2(\beta_i x_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{pmatrix} \\
 (i=1 \sim n) \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

ただし $F_1(\beta_i x_i) = e^{\beta_i x_i} \cos \beta_i x_i$
 $G_1(\beta_i x_i) = e^{-\beta_i x_i} \cos \beta_i x_i$
 $F_2(\beta_i x_i) = e^{\beta_i x_i} (\cos \beta_i x_i - \sin \beta_i x_i)$
 $G_2(\beta_i x_i) = e^{-\beta_i x_i} (\cos \beta_i x_i + \sin \beta_i x_i)$
 $F_3(\beta_i x_i) = e^{\beta_i x_i} \sin \beta_i x_i$
 $G_3(\beta_i x_i) = e^{-\beta_i x_i} \sin \beta_i x_i$
 $F_4(\beta_i x_i) = e^{\beta_i x_i} (\cos \beta_i x_i + \sin \beta_i x_i)$
 $G_4(\beta_i x_i) = e^{-\beta_i x_i} (\cos \beta_i x_i - \sin \beta_i x_i)$
 (4)式, (5)式の係数 $a_i, b_i, c_i, d_i, A_i, B_i, C_i, D_i$ を定めることができれば, これらの式を用いて, たわみ y_i , たわみ角 θ_i , 曲げモーメント M_i , せん断力 S_i を杭の各位置で計算することができる。なお, a_i, b_i は移動層の外力条件だけで定まり, 次式で与えられる。

$$a_i = -\frac{\sum_1^i H_k}{6EI} \dots\dots\dots (6)$$

$$a_i = -\frac{\sum_1^i H_k l_k}{2EI} \dots\dots\dots (7)$$

ここで, H_k は上から k 番目の外力で, すべり面から l_k の距離に作用する。

一方, c_i, d_i は, 移動層の外力条件だけでは定まらず, 杭の先端条件 ($y=0, \theta=0$ または $M=0, S=0$ 等) が決ってはじめて定めることができる。杭の先端条件が決まると, すべり面上での連続条件により, 移動層の最下層の c_m, d_m を定めることができる。 c_m, d_m が求まると次の(8)式, (9)式を用いて, c_i, d_i を定めることができる (詳細は後述する)。

$$c_{i-1} = \frac{1}{2} \frac{H_i}{EI} l_i^2 + c_i \dots\dots\dots (8)$$

$$d_{i-1} = \frac{1}{6} \frac{H_i}{EI} l_i^3 + d_i \dots\dots\dots (9)$$

不動層の i 番目の層内の係数 A_i, B_i, C_i, D_i は $i-1$ 番目の層との境界上でのたわみ, たわみ角, 曲モーメント, せん断力の値 $y_{i-1}^*, \theta_{i-1}^*, M_{i-1}^*, S_{i-1}^*$ によって表わすことができる。ここで, すべり面での $y_0^*, \theta_0^*, M_0^*, S_0^*$ の値 (以後, すべり面での値ではアスタ

リスク * を省略する。) は後述の(16)式で与えられる。これから, i 番目の層内の y_i, θ_i, M_i, S_i を求めることができる。その関係式を(10)式に示す¹⁾。

$$\begin{pmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i \\ S_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1(\beta_i x_i) & \frac{1}{\beta_i} z_2(\beta_i x_i) \\ -4\beta_i z_4(\beta_i x_i) & z_1(\beta_i x_i) \\ 4EI\beta_i^2 z_3(\beta_i x_i) & 4EI\beta_i z_4(\beta_i x_i) \\ 4EI\beta_i^3 z_2(\beta_i x_i) & 4EI\beta_i z_3(\beta_i x_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{i-1}^* \\ \theta_{i-1}^* \\ M_{i-1}^* \\ S_{i-1}^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{EI\beta_i^2} z_3(\beta_i x_i) & -\frac{1}{EI\beta_i^3} z_4(\beta_i x_i) \\ -\frac{1}{EI\beta_i^2} z_2(\beta_i x_i) & -\frac{1}{EI\beta_i^2} z_3(\beta_i x_i) \\ z_1(\beta_i x_i) & \frac{1}{\beta_i} z_2(\beta_i x_i) \\ -4\beta_i z_4(\beta_i x_i) & z_1(\beta_i x_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{i-1}^* \\ \theta_{i-1}^* \\ M_{i-1}^* \\ S_{i-1}^* \end{pmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

ここで,

$$z_1(\beta x) = \cosh \beta x \cdot \cos \beta x$$

$$z_2(\beta x) = \frac{1}{2} (\cosh \beta x \cdot \sin \beta x + \sinh \beta x \cdot \cos \beta x)$$

$$z_3(\beta x) = \frac{1}{2} \sinh \beta x \cdot \sin \beta x$$

$$z_4(\beta x) = \frac{1}{4} (\cosh \beta x \cdot \sin \beta x - \sinh \beta x \cdot \cos \beta x)$$

$$\cosh \beta x = \frac{1}{2} (e^{\beta x} + e^{-\beta x})$$

$$\sinh \beta x = \frac{1}{2} (e^{\beta x} - e^{-\beta x})$$

(10)式の右辺第1項のマトリックスを E_i , 第2項のベクトルを V_{i-1}^* , 左辺のベクトルを V_i とすると(10)式は次のように書ける。

$$\begin{aligned}
 V_i &= E_i \cdot V_{i-1}^* = E_i \cdot E_{i-1}^* \dots E_1^* \cdot E_2^* \cdot V_0 \\
 &= E_i \cdot K_{i-1}^* \cdot V_0 = K_i V_0 \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

ただし, $K_{i-1}^* = E_{i-1}^* \cdot E_{i-2}^* \dots E_2^* \cdot E_1^*$ であり, $E_{i-1}^*, V_{i-1}^*, K_{i-1}^*$ は $E_{i-1}, V_{i-1}, K_{i-1}$ の x_i の代わりに L_i を代入したものである。

杭の先端では, 次式が成立する。

$$V_n^* = K_n^* V_0 \dots\dots\dots (12)$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 V_n^* &= (y_n, \theta_n, M_n, S_n)^T, \quad V_0 = (y_0, \theta_0, M_0, S_0)^T \\
 K_n^* &= \begin{pmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* & a_{13}^* & a_{14}^* \\ a_{21}^* & a_{22}^* & a_{23}^* & a_{24}^* \\ a_{31}^* & a_{32}^* & a_{33}^* & a_{34}^* \\ a_{41}^* & a_{42}^* & a_{43}^* & a_{44}^* \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

もし, 杭の先端で $y_n=0, \theta_n=0$ が成立すると(12)式から, 次の関係が得られる。

$$\begin{aligned}
 a_{11}^* y_0 + a_{12}^* \theta_0 + a_{13}^* M_0 + a_{14}^* S_0 &= 0 \\
 a_{21}^* y_0 + a_{22}^* \theta_0 + a_{23}^* M_0 + a_{24}^* S_0 &= 0 \dots\dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

また、杭の先端で $M_n=0$, $S_n=0$ が成立するならば、同様に、次の関係を得る。

$$\left. \begin{aligned} a_{31}^* y_0 + a_{32}^* \theta_0 + a_{33}^* M_0 + a_{34}^* S_0 &= 0 \\ a_{41}^* y_0 + a_{42}^* \theta_0 + a_{43}^* M_0 + a_{44}^* S_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

一方、すべり面においては、 y , θ , M , S の連続条件により次の関係式を得る。

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= y_m = d_m \\ \theta_0 &= \theta_m = c_m \\ M_0 &= M_m = -2b_m EI \\ S_0 &= S_m = -6a_m EI \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

$y_n=0$, $\theta_n=0$ が成立するならば(14)式及び(16)式から、次式を得る。

$$c_m = [\{ 2(a_{13}^* a_{21}^* - a_{23}^* a_{11}^*) b_m + 6(a_{14}^* a_{21}^* - a_{24}^* a_{11}^*) a_m \} / (a_{12}^* a_{21}^* - a_{11}^* a_{22}^*)] EI \dots\dots\dots (17)$$

$$d_m = [\{ 2(a_{13}^* a_{22}^* - a_{23}^* a_{12}^*) b_m + 6(a_{14}^* a_{22}^* - a_{24}^* a_{12}^*) a_m \} / (a_{12}^* a_{21}^* - a_{11}^* a_{22}^*)] EI \dots\dots\dots (18)$$

また、 $M_n=0$, $S_n=0$ が成立する場合は、次式を得る。

$$c_m = [\{ -2(a_{33}^* a_{41}^* - a_{43}^* a_{31}^*) b_m + 6(a_{34}^* a_{41}^* - a_{44}^* a_{31}^*) a_m \} / (a_{31}^* a_{42}^* - a_{41}^* a_{32}^*)] EI \dots\dots\dots (19)$$

$$d_m = [\{ 2(a_{33}^* a_{42}^* - a_{43}^* a_{32}^*) b_m + 6(a_{34}^* a_{42}^* - a_{44}^* a_{32}^*) a_m \} / (a_{31}^* a_{42}^* - a_{41}^* a_{32}^*)] EI \dots\dots\dots (20)$$

(17)~(20)式で c_m , d_m が求まると、(8), (9)式を用いて、すべての c_i , d_i を求めることができ、(4)式より移動層部の y , θ , M , S を計算することができる。不動層部の y , θ , M , S は(11)式を用いて計算することができる。

次に、多段アンカーの設計アンカー力を求める。設計アンカー力の水平成分はアンカーを取り付ける位置で、たわみを与えたとき、そのたわみを維持するのに必要な外力として求める。たわみは0でなくともよいが0とした方が仕上りが美しくなり、自然であるので、設計アンカー力（の水平成分）としてはたわみが0となるような外力として求めるとよい。実際の設計アンカー力は、上に述べた方法によって求められた設計アンカー力の水平成分とアンカー打設角から求める。

いま、図-2のように不明の外力が k 個あるとし、それを $X_{ji}(i=1 \sim k)$ で表わす。このとき、次の k 個の関係式を得る。

$$\begin{aligned} & a_{ji}' l_{ji}^3 - b_{ji}' l_{ji}^2 + c_m' l_{ji} + f_{ji}' l_{ji} - d_m' - e_{ji}' \\ &= \left(\frac{l_{ji}^3}{6EI} - \frac{l_{j1} l_{ji}^2}{2EI} + \phi_3 l_{j1} l_{ji} + \phi_4 l_{ji} - \phi_1 l_{j1} - \phi_2 \right) X_{j1} \\ &+ \dots\dots\dots \\ &+ \left(-\frac{l_{j(i+1)}^3}{6EI} + \frac{l_{ji} l_{j(i+1)}^2}{2EI} + \phi_3 l_{ji} l_{j(i+1)} + \phi_4 l_{j(i+1)} \right. \end{aligned}$$

図-2 既知力（とすべり力）と未知力（アンカー力）の関係

$$\begin{aligned} & -\phi_1 l_{j(i+1)} - \phi_2) X_{j(i+1)} + \dots\dots\dots \\ & + \left(-\frac{l_{jk}^3}{6EI} + \frac{l_{ji} l_{jk}^2}{2EI} + \phi_3 l_{ji} l_{jk} + \phi_4 l_{jk} \right. \\ & \left. - \phi_1 l_{jk} - \phi_2 \right) X_{jk} \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

ここで、

$$a_i' = -\frac{1}{6EI} \sum_{i=1}^i K_i \quad (K_i \text{ は地すべり力（既知）})$$

$$b_i' = -\frac{1}{2EI} \sum_{i=1}^i K_i l_i$$

$$d_m' = (2b_m' \phi_1 + 6a_m' \phi_2)$$

$$e_i' = -\frac{1}{6EI} \sum_{i=i+1}^m K_i l_i^3$$

$$c_m' = (2b_m' \phi_3 + 6a_m' \phi_4)$$

$$f_i' = -\frac{1}{2EI} \sum_{i=i+1}^m K_i l_i^2$$

($M_n=0$, $S_n=0$ の場合)

$$\phi_1 = \frac{a_{33}^* a_{42}^* - a_{43}^* a_{32}^*}{a_{31}^* a_{42}^* - a_{41}^* a_{32}^*}, \quad \phi_2 = \frac{a_{34}^* a_{42}^* - a_{44}^* a_{32}^*}{a_{31}^* a_{42}^* - a_{41}^* a_{32}^*}$$

$$\phi_3 = \frac{a_{43}^* a_{41}^* - a_{42}^* a_{31}^*}{a_{32}^* a_{41}^* - a_{31}^* a_{42}^*}, \quad \phi_4 = \frac{a_{34}^* a_{41}^* - a_{44}^* a_{31}^*}{a_{32}^* a_{41}^* - a_{31}^* a_{42}^*}$$

($y_n=0$, $\theta_n=0$ の場合)

$$\phi_1 = \frac{a_{13}^* a_{22}^* - a_{23}^* a_{12}^*}{a_{11}^* a_{22}^* - a_{21}^* a_{12}^*}, \quad \phi_2 = \frac{a_{14}^* a_{22}^* - a_{24}^* a_{12}^*}{a_{11}^* a_{22}^* - a_{21}^* a_{12}^*}$$

$$\phi_3 = \frac{a_{13}^* a_{21}^* - a_{23}^* a_{11}^*}{a_{12}^* a_{21}^* - a_{11}^* a_{22}^*}, \quad \phi_4 = \frac{a_{14}^* a_{21}^* - a_{24}^* a_{11}^*}{a_{12}^* a_{21}^* - a_{11}^* a_{22}^*}$$

3. 計算結果

上に述べた解析結果をパソコン用にプログラミングした。用いた言語はベーシック (BASIC) である。流れ図を図-3に示す。

杭として、450.0×28.0mm の厚肉連心力鋼管を用

い、48.3tfの地すべり力が水平に作用するものとして、地すべり力の分布形態、アンカーの段数、根入れ地盤の層数を変化させて、定量的な検討を行った。図-4に共通する計算条件を示す。検討の方法は、地層が1層でアンカーなしの所謂「抑え杭」の杭の状態（図5-1、表-1のCASE 1）を基準にし、次の①、②、③のように条件を変化させたとき、杭のたわみ、たわみ角、曲モーメントせん断力がどのように変わるかを調べた。

① 外力の合計を一定（48.3tf）とし、分布形態を変化させる。

② アンカーの段数を増す。

③ 根入れ地盤の地層数を増す。

以下の表-1及び図-5.1～5.4に計算結果をまとめた。なお、計算には富士通のパソコン FMR-70HX₂ (CPU; 32ビット、クロック数; 20MHZ) 及び FMR-60FD (CPU; 16ビット、クロック数 12MHZ) を用い、言語は MS-DOS 上の F-BASIC 86 HG という BASIC を使用した。

図-3 流れ図

地すべり力	$\Sigma H = 48.3 \text{ tf}$
末端条件	$M = 0, S = 0$
移動層の厚さ	9.00m
不動層の厚さ	13.50m
杭の弾性係数 E	$2.10 \text{ E} + 07 \text{ tf/m}^2$
許容曲げ応力度 σ_a	$2.2000 \text{ E} + 04 \text{ tf/m}^2$
許容せん断応力度 τ_a	$1.2700 \text{ E} + 04 \text{ tf/m}^2$
杭の外径	450.0mm
肉厚	28.0mm
杭の断面積 A	$3.7120 \text{ E} - 02 \text{ m}^2$
杭の断面 2 次モーメント I	$8.2990 \text{ E} - 04 \text{ m}^4$
杭の断面係数 Z	$3.6880 \text{ E} - 03 \text{ m}^3$

図-4 計算条件（共通）

計算時間は次のとおりである。

（条件 1）

三角形分布荷重（分割数50）
アンカー 5 段
地層数 7 層

（結果 1）

FMR-70 HX₂ 21 sec
FMR-60 FD 39 sec

（条件 2）

集中荷重 1 個
アンカー なし
地層数 1 層

（結果 2）

FMR-70 HX₂ 8 sec
FMR-60 FD 13 sec

4. 考 察

4.1 外力条件の違いの影響

外力の分布形態が集中荷重であるか、分布荷重（正確には分布荷重を多数の集中荷重でおきかえたもの）であるかによって、杭に生じるたわみ、応力等どのような違いが生じるかを調べた。それによると、外力分布形態の違いの影響は移動層部の杭と不動層中の杭とは異なる。不動層中の杭に関しては、詳しい説明は省略するが、分布荷重に等価な集中荷重が存在して、不動層中の杭に与える力学的効果（たわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力）を分布荷重の場合と全く等しくすることができる（表-1の CASE 1 と CASE 4）。一方、移動層部では、分布荷重と等価な集中荷重は存在せず、同じ全体荷重を与えたとしても、集中荷重、三角形分布荷重、台形分布荷重、長方形分布荷重あるいは一般の分布荷重では杭に生じる影響は異なる。1例として、表-1の条件の場合で、杭に生じるたわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力は CASE 1 の集中荷重 1 個の場合を100%として、三角形分布荷重（CASE 2）では68～69%、台形分布荷重（CASE 3）では83～92%、長方形分布荷重（CASE 4）では100～117%となる。

4.2 アンカーの段数の影響

アンカーなしの抑え杭に生じるたわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力は大きなものになりがちである。しかし、アンカーを取り付けると、それらを小さくすることができる。例をあげると、48.3tfの集中荷重が作用した場合（表-1の CASE 1、図-5.1）には、 $y_{\max} = 44.8 \text{ cm}$, $\theta_{\max} = 0.052 \text{ rad}$, $M_{\max} = 222.79 \text{ tf}$, $S_{\max} = 88.48 \text{ tf}$ という値になる。これに、適当な位置にアンカーを取り付けると、上記のケースを100%として、アンカー1段の場合（表-1の CASE 5） $y_{\max} = 5.4\%$, $\theta_{\max} = 19.2\%$, $M_{\max} = 36.4\%$, $S_{\max} = 28.4\%$ に、2段の場合（表-1の CASE 6）は、 $y_{\max} = 9.9\%$, $\theta_{\max} = 3.8\%$, $M_{\max} = 15.9\%$, $S_{\max} = 43.8\%$ に、3段の場合（表-1の CASE 7）は、 $y_{\max} = 0.2\%$, $\theta_{\max} = 0.0\%$, $M_{\max} = 4.2\%$, $S_{\max} = 13.2\%$ にそれぞれ減少する。ただし、ここで気をつけないといけないことは、曲げモーメントやせん断力はアンカーを取り付ける位置によって変化し、それ

表-1 計算結果一覧表

CASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
図 示	5-1	-	-	-	-	-	-	-	5-2	-
すべり力の作用位置および作用位置	集中荷重 ①48.31f (x=4.5m)	三角形分布荷重 total 48.31f	台形分布荷重 total 48.31f	長方形分布荷重 total 48.31f	集中荷重 ①48.31f (x=4.5m)	集中荷重 ①48.31f (x=4.5m)	集中荷重 ①18.10f (x=7.5m) ②18.10f (x=4.5m) ③18.10f (x=1.5m)	三角形分布荷重 total 48.31f	台形分布荷重 total 48.31f	長方形分布荷重 total 48.31f
アンカーの段数と作用位置と大きさ	なし	なし	なし	なし	1 段 ①23.18 (x=8.00) ②46.64 (x=3.00)	2 段 ①9.53 (x=8.00) ②46.64 (x=3.00)	3 段 ①7.47 (x=8.5) ②15.40 (x=6.0) ③20.99 (x=1.5)	1 段 ①15.81 (x=8.0) ②20.13 (x=8.0)	1 段 ①20.13 (x=8.0) ②25.09 (x=8.0)	1 段
根入地盤の層数	1 層	1 層	1 層	1 層	1 層	1 層	1 層	1 層	1 層	1 層
変形係数Eaの大きさ	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$	$E_g=10,000\text{tf/m}^3$
大	Ymax (mm) 上の 表示 (100)	0.306 (68.3) (x _p =9.00m)	0.392 (87.5) (x _p =9.00m)	0.490 (109) (x _p =9.00m)	0.024 (5.4) (x _p =4.20m)	0.004 (0.9) (x _p =5.40m)	0.001 (0.2) (x _p =1.00m)	0.017 (3.8) (x _p =3.80m)	0.016 (3.6) (x _p =3.80m)	0.014 (3.1) (x _p =3.80m)
値	θmax (rad) 上の 表示 (100)	0.036 (69.2) (x _p =9.00m)	0.048 (92.3) (x _p =9.00m)	0.061 (117) (x _p =9.00m)	0.010 (19.2) (x _p =8.80m)	0.002 (3.8) (x _p =3.80m)	0 (0) (x _p =2.20m)	0.006 (11.5) (x _p =8.00m)	0.006 (11.5) (x _p =8.00m)	0.005 (9.6) (x _p =7.50m)
(Mmax (kN-m) 上の 表示 (100)	222.79 (100) (x _M =0.30m)	152.55 (68.5) (x _M =0.30m)	185.27 (83.2) (x _M =0.30m)	222.79 (100) (x _M =0.30m)	81.12 (36.4) (x _M =4.50m)	33.35 (15.0) (x _M =4.50m)	9.32 (4.2) (x _M =3.00m)	38.48 (17.3) (x _M =3.80m)	36.04 (16.2) (x _M =4.05m)	33.57 (15.1) (x _M =4.10m)
対	Smax (mm) 上の 表示 (100)	60.24 (68.1) (x _S =1.50m)	73.40 (83.0) (x _S =1.50m)	89.48 (100) (x _S =1.50m)	25.12 (28.4) (x _S =4.20m)	38.79 (43.8) (x _S =4.20m)	11.66 (13.2) (x _S =3.00m)	32.49 (36.7) (x _S =3.80m)	28.17 (31.8) (x _S =3.80m)	23.21 (26.2) (x _S =3.80m)
値	たか-1mm以下なる段数 たか-1mm以下なる段数 たか-1mm以下なる段数 たか-1mm以下なる段数	5.70 m 6.00 m 12.00 m 12.90 m	5.70 m 6.00 m 12.00 m 12.90 m	5.70 m 6.00 m 12.00 m 12.90 m	4.20 m 2.70 m 9.30 m 9.90 m	0.90 m 0 m 8.10 m 11.10 m	0 m 0 m 5.10 m 6.00 m	1.80 m 2.70 m 3.30 m 9.90 m	1.80 m 2.70 m 3.30 m 9.90 m	1.80 m 2.40 m 3.30 m 9.90 m
α	(β=0.6154)	(β=0.6154)								
β	5.10	5.10								
備 考	基準ケース	外力の分布位置の異なる段のYmax, θmax, Mmax, Smax etc.の違いの検討	外力の分布位置の異なる段のYmax, θmax, Mmax, Smax etc.の違いの検討	外力の分布位置の異なる段のYmax, θmax, Mmax, Smax etc.の違いの検討	アンカーの段数がYmax, θmax, Mmax, Smax etc.の違いの検討	アンカーの段数がYmax, θmax, Mmax, Smax etc.の違いの検討	アンカーの段数がYmax, θmax, Mmax, Smax etc.の違いの検討	アンカーの段数がYmax, θmax, Mmax, Smax etc.の違いの検討	アンカーの段数がYmax, θmax, Mmax, Smax etc.の違いの検討	アンカーの段数がYmax, θmax, Mmax, Smax etc.の違いの検討

表-1 計算結果一覧表 (つづき)

C A S E	11	12	13	14	15	16	17	18
図 番	—	—	—	5-3	—	5-4	—	—
すべり力の作用形態 および作用位置	集中荷重 ①48.3kN(x=4.5m)	長方形分布荷重 total 48.3kN	集中荷重 ①48.3kN(x=4.5m)	長方形分布荷重 total 48.3kN	集中荷重 ①48.3kN(x=4.5m)	三角形分布荷重 total 48.3kN	台形分布荷重 total 48.3kN	長方形分布荷重 total 48.3kN
アンカーの段数と 作用位置と大きさ	なし	なし	なし	なし	なし	5 段	5 段	5 段
アンカーの段数と 作用位置と大きさ	2 段 0~2.0 E _s =1,000kN/m ² 2~13.5 E _s =10,000kN/m ²	2 段 0~2.0 E _s =1,000kN/m ² ~13.5 E _s =10,000kN/m ²	3 段 0~2.0 E _s =10,000kN/m ² ~4.0 E _s =1,000kN/m ² ~13.5 E _s =10,000kN/m ²	3 段 0~2.0 E _s =10,000kN/m ² ~4.0 E _s =1,000kN/m ² ~13.5 E _s =10,000kN/m ²	7 段 0~1.0 E _s =1,000kN/m ² ~2.0 E _s =2,000kN/m ² ~4.0 E _s =4,000kN/m ² ~6.0 E _s =12,000kN/m ² E _s =20,000kN/m ²	5 段 ①1.8(x=8.00) ②3.9(x=6.50) ③9.5(x=5.00) ④1.0(x=3.50) ⑤29.5(x=2.00)	5 段 ①6.0(x=8.00) ②4.9(x=6.50) ③9.6(x=5.00) ④2.0(x=3.50) ⑤23.8(x=2.00)	7 段 ①10.9(x=8.00) ②5.9(x=6.50) ③9.8(x=5.00) ④3.2(x=3.50) ⑤17.2(x=2.00)
掘入地盤の段数 と段数係数E _s の大きさ	2 段 0~2.0 E _s =1,000kN/m ² 2~13.5 E _s =10,000kN/m ²	2 段 0~2.0 E _s =1,000kN/m ² ~13.5 E _s =10,000kN/m ²	3 段 0~2.0 E _s =10,000kN/m ² ~4.0 E _s =1,000kN/m ² ~13.5 E _s =10,000kN/m ²	3 段 0~2.0 E _s =10,000kN/m ² ~4.0 E _s =1,000kN/m ² ~13.5 E _s =10,000kN/m ²	7 段 0~1.0 E _s =1,000kN/m ² ~2.0 E _s =2,000kN/m ² ~4.0 E _s =4,000kN/m ² ~6.0 E _s =12,000kN/m ² E _s =20,000kN/m ²	5 段 ①1.8(x=8.00) ②3.9(x=6.50) ③9.5(x=5.00) ④1.0(x=3.50) ⑤29.5(x=2.00)	5 段 ①6.0(x=8.00) ②4.9(x=6.50) ③9.6(x=5.00) ④2.0(x=3.50) ⑤23.8(x=2.00)	7 段 ①10.9(x=8.00) ②5.9(x=6.50) ③9.8(x=5.00) ④3.2(x=3.50) ⑤17.2(x=2.00)
最大 値	Y _{max} case 1 での [x _y] 比の係数 (x _y =9.00m) 0.682 (152)	0.724 (162)	0.462 (103)	0.504 (113)	0.780 (174)	0.001 (x _y =0.60m)	0.000 (x _y =0.60m)	0.000 (x _y =0.60m)
値	θ _{max} case 1 での [x _θ] 比の係数 (x _θ =9.00m) 0.072 (138)	0.081 (156)	0.053 (102)	0.063 (121)	0.080 (154)	0.000 (x _θ =1.35m)	0.000 (x _θ =1.35m)	0.000 (x _θ =1.35m)
(地 材料 値)	M _{max} case 1 での [x _M] 比の係数 (x _M =0.80m) 235.70 (106)	235.70 (106)	222.71 (100)	222.67 (100)	244.78 (110)	9.82 (x _M =2.00m)	7.76 (x _M =2.00m)	5.40 (x _M =2.00m)
	S _{max} case 1 での [x _S] 比の係数 (x _S =3.00m) 86.50 (97.8)	86.50 (97.8)	77.56 (87.7)	77.56 (87.7)	73.06 (82.6)	16.37 (x _S =1.80m)	13.07 (x _S =1.80m)	9.28 (x _S =1.80m)
なにか1mm以下になる深さ はなにか90.00mm になる深さ 掘削ローテーション0.1m になる深さ せん断力0.1Nになる深さ	2.40 m 3.00 m 12.90 m 13.50 m	3.00 m 3.00 m 12.90 m 13.20 m	6.30 m 6.30 m 12.90 m 13.50 m	6.30 m 6.30 m 12.90 m 13.50 m	7.50 m 7.60 m 13.20 m —	— m 7.50 m 8.10 m —	— m 7.20 m 7.80 m —	— m 6.90 m 7.90 m —
θ	①0.3461(0~2.00) ②0.6154(~13.50)	①0.6154(~2.00) ②0.3461(~4.00) ③0.6154(~13.50)	①0.6154(~2.00) ②0.3461(~4.00) ③0.6154(~13.50)	①0.3461(~2.00) ②0.4115(~3.00) ③0.4894(~5.00) ④0.5820(~5.00) ⑤0.6441(~6.00) ⑥0.7319(~13.50)	①0.2910(0~1.0) ②0.3461(~2.0) ③0.4115(~3.0) ④0.4894(~5.0) ⑤0.5820(~5.0) ⑥0.6441(~6.0) ⑦0.7319(~13.50)	①0.3461(~2.00) ②0.4115(~3.00) ③0.4894(~5.00) ④0.5820(~5.00) ⑤0.6441(~6.00) ⑥0.7319(~13.50)	①0.3461(~2.00) ②0.4115(~3.00) ③0.4894(~5.00) ④0.5820(~5.00) ⑤0.6441(~6.00) ⑥0.7319(~13.50)	①0.3461(~2.00) ②0.4115(~3.00) ③0.4894(~5.00) ④0.5820(~5.00) ⑤0.6441(~6.00) ⑥0.7319(~13.50)
備 考	掘入れ地盤の状態が変化した場合のY _{max} , θ _{max} , M _{max} , S _{max} , etc.の値の検討 歩段アンカー、歩段地盤の場合の外力の形態が変化した場合の検討

图-5.3 卸支杭(長方形分布荷重, 3層地盤)

図-5.4 アンカー付抑え杭（三角形分布分荷重，多層地盤）

图5.1 抑之杭(集中荷重, 1層地盤)

図-5.2 アンカー付抑え杭（台形分布荷重，1層地盤）

らの最大値は移動層内に生じることもあるということである。次に、杭の根入れ長に關係する不動層中の杭のたわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力の大きさと深度の關係については次のようなことが明らかになった。不動層中で $y=1\text{ mm}$ 以下、 $\theta=0.01\text{ rad}$ 以下、 $M=0.1\text{ tf}\cdot\text{m}$ 以下、 $S=0.1\text{ tf}$ 以下になる深度が、アンカーなしの場合（表-1の CASE 1, 図-1）、すべり面から、それぞれ 5.70 m 、 6.00 m 、 12.30 m 、 12.90 m であったものが、アンカーを取り付けると、1 段の場合（表-1の CASE 5） 4.20 m 、 2.70 m 、 9.30 m 、 9.90 m 、2 段の場合（表-1の CASE 6） 0.90 m 、 0 m 、 8.10 m 、 11.10 m 、3 段の歩合（表-1の CASE 7）、 0 m 、 0 m 、 5.10 m 、 6.00 m と浅くなってくる。このことは、抑止杭を計画しているとき、すべり面下に軟らかい層があり、地盤反力がとれない場合や背後の構造物等の關係で、根入れ部の反力が大きくなると不都合な場合 アンカーの定着層を確保できるならば、アンカー付き抑え杭が非常に有効な手段となることを示唆している。

4.3 多層地盤の影響

すべり面より下に、軟らかい層がある場合、移動層部でのたわみ、たわみ角は軟らかい層のない場合に比べて、一般に増加する。 $M_{\max}$ もやや増加するが、 $S_{\max}$ は減少する傾向にある。すべり面に近い部分に軟らかい層がある場合には、これらの傾向は特に顕著であるが、すべり面より離れるにしたがって、せん断力を除いて、弱くなる。すべり面下に厚さ 2 m の相対的に軟らかい $E_s=1000\text{ tf/m}^2$ の地層がある場合（表-1の CASE 11）は、ない場合（表-1の CASE 1）に比べて $y_{\max}=152\%$ 、 $\theta_{\max}=138\%$ 、 $M_{\max}=106\%$ 、 $S_{\max}=97.8\%$ となる。これに対し、すべり面下 $2\text{ m}\sim 4\text{ m}$ の 2 m 区間に $E_s=1000\text{ tf/m}^2$ の地層があるとき（表-1の CASE 13）は、 $y_{\max}=103\%$ 、 $\theta_{\max}=102\%$ 、 $M_{\max}=100\%$ 、 $S_{\max}=87.7\%$ となる。また、すべり面下に軟らかい地層が厚く存在すればするほど、 $M_{\max}$ 、 $S_{\max}$ が生じる位置が下方に移る傾向にある。

表-1の CASE 1 では $M_{\max}$ 、 $S_{\max}$ が生じる位置はすべり面下 0.30 m 、 1.50 m であったものが、表-1の CASE 11 では 0.90 m 、 3.00 m となり表-1の CASE 15 では 1.20 m 、 3.90 m となっている。

5. まとめ

(1) 多層地盤中の抑え杭に、多段のアンカーを取り付けた場合の杭のたわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力を計算する式を導出した。この式を用いれば、外力として、集中荷重ばかりでなく、任意の形態の分布荷重も計算できる。

(2) 導出した計算式をパソコン用にプログラミングして外力条件、アンカー段数、地盤条件の違いが、杭のた

わみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力に与える影響を系統的に調べた。

(3) 集中荷重と分布荷重の違いに関しては、次のことがいえる。

不動層中の杭については、分布荷重（あるいは多数の集中荷重）と全く力学的効果（たわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力の大きさ）が等しくなるように、等価な集中荷重の大きさと作用位置を決定することができる。一方、移動層部では、分布荷重に等価な集中荷重は存在せず、不動層中に等しい力学的効果を与える等価集中荷重と比べて、たわみ、たわみ角は分布荷重の方が大きくなる傾向にあり、また、曲げモーメント、せん断力の分布形態は、集中荷重、分布荷重で異なってくる。

三角形分布荷重、上底が下底よりも短い台形分布荷重、長方形分布荷重では、他の条件が同じであれば、この順に杭の $y_{\max}$ 、 $\theta_{\max}$ 、 $M_{\max}$ 、 $S_{\max}$ は大きくなる。

(4) 杭にアンカーを取り付けることによって、アンカーなしの場合に比べて、著しく杭に生じるたわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力を小さくすることができるばかりか、根入れ長も短くすることができる。アンカーの負担力は、取り付け位置のたわみを 0 にするように決定するとよい。その場合、外力の分布形態、取り付け位置によって、アンカーの負担力は複雑に変わってくる。

(5) すべり面より下に軟らかい層があると、たわみ、たわみ角、曲げモーメントは増加し、せん断力は減少する傾向にある。また軟らかい層が厚ければ、最大曲げモーメント、最大せん断力を与える位置も下方に移動する傾向にある。

(6) ここに述べた方法を市販のパソコンを用いて実行すると、三角形分布荷重、7 層地盤、5 段アンカーという条件で、MS-DOS 上の BASIC 言語を用いて 21 sec (32 ビット機 、クロック数 20 MHz) 及び 39 sec (16 ビット機 、クロック数 12 MHz) であったので十分実用的なものである。

謝 辞

本論文については、建設省土木研究所地すべり研究室中村室長に適切な批評をしていただきました。心より、お礼申し上げます。また、日本基礎技術(株)の調査・技術・工事の各分野で協力願った関係各位に対しても謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村浩之・土屋 智：地すべり変位を考慮した地すべり抑止杭の解析，地すべり，Vol.24，No.2，pp.17～25，1987
- 2) 柴藤 修・森崎 充・中野 明・福田久弥・後藤祐二：杭頭アンカー付抑止杭に関する一考察，第27回地すべり学会研究発表会講演集，pp.194～197，1988
- 3) 横山幸満：パーソナル・コンピュータのための荷重関数法による梁の力学，山海堂，1987

(原稿受理日 平成2年1月25日)