<報 文>

地すべり防止杭の挙動に関する実験的研究 (1)

Experiment Study on the Behavior of Lateral Resistance
of Piles against a Land-Sliding. (1)

福 本 安 正*

Yasumasa FUKUMOTO

はじめに

地すべり防止杭に生ずる曲げモーメント、反力およびタワミ曲線等に関しては未解決の問題がのこされている。地すべり防止杭が受ける土圧を想定した理論式はいくつかあるが、これらのほとんどは、地すべり現場において実際の杭の計測と検証をもとになり立てられたものでない。

筆者は防止杭にヒズミ計と土圧計をとりつけ、いくつかの地すべり地で測定を続け、杭に生ずる曲げモーメント、反力およびタワミ曲線の解析をおこなった^{1),2),3)}。その結果、これらの断面力の分布曲線は、(1)杭の剛性、(2)地すべり面の深さ、(3)地すべり面から上の杭の突出長、(4)地すべり面以深の根入長、地すべり土圧のかかり方、等の各因子の影響をうけて変化することが明らかになった。これらの各因子による変化を現場杭の計測により究明するには多大の手数と経費を必要とし、きわめて困難であるので地すべり現場において現位置の土塊供試体を作り、このなかに模型杭を挿入し、この供試体を水平載荷する実験を試み、実際の杭の挙動についての推定をおこなった。

I 実験方法について

1. 現位置土塊供試体と模型杭

実験は新潟県栃尾市北荷頃地すべり地においておこなった。地すべり斜面の末端部に地表部分の土を剥ぎとり、土塊供試体の底面が地すべり土層となるようにして、幅 1 m、長さ 2 m の土塊供試体を現位置で成型しながらタコ掘りし、周囲を鉄型枠を密着させて組立てた。

この土塊供試体の前面にジャッキを設置して、水平載荷できるようにした。また供試体の側面にはダイヤルゲージをとりつけ、土塊の変位を観測できるように装置した (図-1 参照)。

模型杭は、杉板と鉄板を用い、長さ 205 cm、幅 5 cm とし、両面に 20 cm 間隔にストレンゲージを貼りつけた。

模型杭の種類、寸法および剛性は表-1 に示す

表-1 模型杭の寸法、剛性、断面係数

種類	材質	長さ cm	幅 cm	厚 cm	断面剛性 EI $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$	EZ $\text{kg} \cdot \text{cm}$
A	鉄	205	5.0	0.85	0.728×10^6	1.713×10^6
B	鉄	205	5.0	0.85	0.728×10^6	1.713×10^6
C	鉄	205	5.0	2.20	9.400×10^6	8.545×10^6
D	杉板	205	5.0	1.50	0.126×10^6	0.168×10^6
E	杉板	205	5.0	1.50	0.126×10^6	0.168×10^6

備考: $EI \cdot EZ$ は実験値

表-2 土質試験

土 質 分 類		粘土質ローム
土粒子の比重		2.648
単位体積重量	g/cm^3	1.65~1.66
含水比	%	613~630
流動指数	I_f	13.25
塑性限界	W_p %	28.34
塑性指数	I_p	34.04
液性限界	W_L %	62.38
一軸圧縮強さ	kg/cm^2	0.207~0.261
鋭敏比		1.16~1.94
直接せん断試験	粘着力 kg/cm^2 内部摩擦角	0.25 17°14'
三軸圧縮試験	粘着力 kg/cm^2 内部摩擦角	0.105 2°18'

図-1 土塊供試体、模型杭配置図

* 新潟県 治山課

とおりである。杭の剛性および寸法は、つぎに述べる相似法則をもとに予備試験をおこない決定した。

また、この地区の地質は新第三紀中新世西山層で砂質泥岩およびシルト質泥岩からなり、土塊供試体付近の土質試験結果は表-2のとおりであった。

2. 模型杭の相似率の決定

模型杭と地すべり防止杭の相似関係を求めるには、杭のタワミ曲線の相似をあらかじめ知らなければならない。これについては実際の地すべり防止杭の測定と模型杭の予備実験とでおよそその杭の変位、曲げモーメントおよび反力について求めた。それによると、

(1) 曲げモーメントの分布曲線は、S字型と弓型の2つのパターンがある。

(2) 剛性の小さい杭や地すべり面が深いときのモーメントはS字型の分布曲線となりやすく、剛性の大きい杭は弓型分布曲線となる。ただし、剛性の大小は地すべりの激しさの相対的な関係で決まる。

(3) 最大曲げモーメント $M_{\max}$ はS字型では地すべり面の上下に2つ生じ、弓型では地すべり面の下だけに生ずる。 $M_{\max}$ が2つ生ずる場合は、地すべり面の下の $M_{\max}$ が大きいので、この点で破壊する。しかし、剛性の小さいコンクリートパイルなどはすべり面の上下の両 $M_{\max}$ 点で破壊する。

(4) すべり面から上の杭の突出長が大きいと、拘束反力が働き、そのため、 $M_{\max}$ の大きさを小さくする働きをなす。

(5) 地すべり面より上の杭反力は、すべり面のやや上で最大となり、すべり面ではほぼゼロとなる。等のことを知り得た。これらの要求を満たすために、剛性とセン断面の厚さをいく種類かをとることを前提に、つぎのような相似率により、模型杭の決定をおこなった。

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_p}{x_m} &= R_x = \text{一定} \\ \frac{y_p}{y_m} &= R_y = \text{一定} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

図-2

x_p : 防止杭の杭頭からの深さ

x_m : 模型杭の杭頭からの深さ

y_p : 防止杭の x における変位

y_m : 模型杭の x における変位

したがって、 $y=f(x)$ の微分式により、つぎの関係式がなりたつ。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_p}{dx_p} &= \left(\frac{R_y}{R_x} \right) \frac{dy_m}{dx_m} \\ \frac{d^2y_p}{dx_p^2} &= \left(\frac{R_y}{R_x^2} \right) \frac{d^2y_m}{dx_m^2} \\ \frac{d^3y_p}{dx_p^3} &= \left(\frac{R_y}{R_x^3} \right) \frac{d^3y_m}{dx_m^3} \\ \frac{d^4y_p}{dx_p^4} &= \left(\frac{R_y}{R_x^4} \right) \frac{d^4y_m}{dx_m^4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

いま、杭の断面剛性を EI 、杭の各部の曲げモーメントを M 、セン断力を S 、杭反力強度（杭の単位長あたり）を q とすると、弾性曲線式により、つぎのようにあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{M}{EI} &= \frac{d^2y}{dx^2} \\ \frac{S}{EI} &= \frac{d^3y}{dx^3} \\ \frac{q}{EI} &= \frac{d^4y}{dx^4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(2)式により、(3)式はつぎのようにあらわすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_p}{(EI)_p} &= \left(\frac{R_y}{R_x^2} \right) \frac{M_m}{(EI)_m} \\ \frac{S_p}{(EI)_p} &= \left(\frac{R_y}{R_x^3} \right) \frac{S_m}{(EI)_m} \\ \frac{q_p}{(EI)_p} &= \left(\frac{R_y}{R_x^4} \right) \frac{q_m}{(EI)_m} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{(EI)_p}{(EI)_m} = R_{EI} = \text{一定とすると}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_p}{M_m} &= R_M = \left(\frac{R_y}{R_x^2} \right) R_{EI} \\ \frac{S_p}{S_m} &= R_s = \left(\frac{R_y}{R_x^3} \right) R_{EI} \\ \frac{q_p}{q_m} &= R_q = \left(\frac{R_y}{R_x^4} \right) R_{EI} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

となる。 R_M 、 R_s および R_q は定数なので、曲げモーメント、セン断力および杭反力曲線は相似となる。

また、 R_q は土の性質によって決まり、タワミ曲線を相似ならしめるに必要な R_{EI} は(5)式により下式のようにあらわされる。

$$R_{EI} = R_q \cdot R_x^4 \cdot R_y^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

R_q は防止杭の計測や模型杭の実験により決定することが必要である。

防止杭の計測と模型杭の予備実験結果によると、杭反力は地すべり面でゼロとなるS字型の放物線型をなし、杭反力 P の最大点は地すべり面の下に発生する。そし

て、この $P_{\max}$ と変位 y は比較的に比例関係が見られるが、変位が大きくなると、土が塑性化する前に杭が降伏するので、 $P_{\max}$ 発生点と P ゼロ点の移動低下はあまり見られない。したがって、地すべり面の下 R_q については、土を弾性体とみなすことができるが、計算を簡略化するためと、土が塑性化したときに対応させるために、上の状態をつぎの両極端の場合を想定すると⁴⁾、

(A) 杭反力が深さに比例する場合

杭前面の土が塑性状態となり、ランキンの塑性破壊土圧が働くとき、つぎの式であらわすことができる。

$$q = K \cdot x \cdot B \quad \dots\dots\dots (7)$$

K : 土圧係数

B : 杭幅

$$\frac{K_p}{K_m} = R_K, \quad \frac{B_p}{B_m} = R_B \quad \text{とおくと}$$

$$R_q = R_K \cdot R_x \cdot R_B \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり、これを(6)式に代入すると

$$R_{EI} = R_K \cdot R_x^5 \cdot R_B \cdot R_y^{-1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。

(B) 杭反力が深さと変位量に比例する場合

土が弾性状態で、土の弾性係数は深さに比例するとき、つぎの式であらわすことができる。

$$q = k \cdot x \cdot y \cdot B \quad \dots\dots\dots (10)$$

k : 横方向地盤反力係数

$$\frac{k_p}{k_m} = R_k \quad \text{とおくと(10)式はつぎのとおりとなる。}$$

$$R_q = R_k \cdot R_x \cdot R_y \cdot R_B \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。これを(6)式に代入すると

$$R_{EI} = R_k \cdot R_x^5 \cdot R_B \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。

模型杭と防止杭の間で、長さ、幅、タワミが完全相似であり、そしてまた土の条件も同じときは

$$R_x = R_y = R_B = R_c, \quad R_K = 1, \quad R_k = 1$$

であって、したがって

(A) の場合

$$R_q = R_c^2, \quad R_{EI} = R_c^5 \quad \dots\dots\dots (13)$$

(B) の場合

$$R_q = R_c^3, \quad R_{EI} = R_c^6 \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。しかし、現場杭と同じ材質を用い、同じ形状にするならば、 $R_{EI} = R_c^4$ となり、(13, 14) 式の要求をみたすことができない。したがって、材質と形状を考慮して EI を縮尺して上式を満足させることが必要である。実際の杭は一般的に鋼管であるが、模型杭は鉄板と杉板を用い、形状を矩形とした。

つぎに下記のことを考慮することが必要である。

① 地すべり面の深さをどの程度と想定するか。

② 防止杭の地すべり面以深の長さ(根入長)をどれ位と想定するか。

③ 土塊供試体を水平载荷するとき、供給荷重の増加にともない、杭前面の土が塑性化するが、土が塑性破壊するまえに模型杭のヒズミが弾性限界に達するような大きさの剛性にする。つまり土の弾性領域内において、できるだけ大きなヒズミとなるような剛性の模型杭とすることにより精度のたかい解析ができる。

④ それとともに、杭挿入位置をジャッキ能力に適應して決定し、供給荷重が杭に適当なヒズミ量としてあらわれるようにする。

以上の要求をみたすようにして、相似率を最終的に決めなければならない。

① については、第三紀層黒色泥岩地帯の杭打工事箇所地すべり面の深さを調査した結果⁵⁾、4.5~6.0mの深さが圧倒的に多く、また土質累重状態の調査からも同様の結算が得られたので、この深さに対応させることとした。

② 杭の根入長は、K. Terzaghi, 横山, 福岡-宇都, L. Menard, 吉中等の各氏の提案した水平方向地盤反力係数 k_h を求め^{6), 7), 8)}、これから特性長 β を計算し、根入長を決定することができる。これらの各式により試算してみるとほぼ近似する。

また、久保⁹⁾ はモーメント第1ゼロ点の長さの1.5倍とすれば無限長とみなし得ることを実験により明らかにし、また B.B. Broms¹⁰⁾ は粘性土において、短杭、長杭をつぎの基準で判別している。

$$\text{短杭} < \frac{2.25}{\beta}$$

$$\text{長杭} > \frac{2.25}{\beta}$$

$$\text{中間杭} \approx \frac{2.25}{\beta}$$

また、Y.L. Chang の式によれば π/β 以上の杭長とすれば無限長とみなし得るとしている。この Y.L. Chang の式により、径 318.5mm, 厚さ 6.9mm と 10.3mm の二種類の鋼管杭について、 N 値 10 として根入長を計算すると、3.2m と 3.5m となる。したがって原型杭の根入長を 3.0~4.0m と想定し、これに対応するよう模型杭の根入を設計すればよい。

③ 相似率の計算値により模型杭をつくり、予備試験をおこなった結果、理論計算値より大きくする必要があることが明らかになり、そのため、杉板と鉄板を用い、剛性の上限を計算値より大きくした。

④ 水平载荷による土塊供試体の各部分の変位をダイヤルゲージにより計測し、応力の伝播状態と上限降伏値を求めるとともに、各载荷段階での杭のヒズミ量等を予備実験で明らかにし^{11), 12)}、これにより杭挿入位置を土塊供試体の前面から 30cm と 40cm と決定した。

以上のほかに、セン断面の厚さを4種類にかえることにより、地すべり面の深さによる影響とともに、すべり面からの突出長の長短による影響をあわせ検討できるようにした。

根入長の R_x はつぎの式により求めた。すなわち、

(A)の場合

前掲 (9) 式に、 $R_x=R_y$, $R_K=1$ とおくと、

$$R_{EI}=R_x^4 \cdot R_B \dots\dots\dots (15)$$

$$\therefore R_x=\left(\frac{R_{EI}}{R_B}\right)^{1/4} \dots\dots\dots (16)$$

(B)の場合

前掲 (12) 式に、 $R_K=1$ とおくと

$$R_{EI}=R_x^5 R_B \dots\dots\dots (17)$$

$$\therefore R_x=\left(\frac{R_{EI}}{R_B}\right)^{1/5} \dots\dots\dots (18)$$

となる。この (16) および (17) 式により、径 318.5mm、厚さ 6.9mm と 10.3mm の二種の鋼管杭を原型杭とし、各模型杭との比 R_x を求めると表-3 のとおりとなった。この表の R_x が示すとおり、最も剛性の大きなC杭においても根入長が 1.0m あればほぼ原型杭に対応できる。したがって、セン断面厚が薄くなるにしたがい根入長はさらに十分となることになる。

表-3 R_x の値 (鋼管の径318.5mm, 厚 t_1 6.9mm, t_2 10.3mm)

模型杭	(A)		(B)	
	t_1	t_2	t_1	t_2
A・B	7.81	8.57	5.17	5.58
C	4.12	4.52	3.10	3.34
D・E	12.10	13.28	7.35	7.92

(A) 杭反力が深さに比例する場合

(B) 杭反力が深さと変位量に比例する場合

3. 模型杭の剛性試験

模型杭A, B, C, D, Eの両面にストレンゲージ (共和電業製 KFC 5-C₁-11) を 20cm 間隔に貼り、実験に先立って剛性試験をおこなった。

試験方法は、図-3 に示すとおり集中荷重によるヒズミ量を測定し、断面剛性をつぎの計算式により求めた。すなわち、集中荷重 P を加えたときに生ずる支点中央

図-3 剛性試験

の最大曲げモーメント M は

$$M=\frac{Pl}{4} \dots\dots\dots (19)$$

とあらわされる。またモーメントをヒズミと剛性の関係であらわすとつぎの式となる。

$$M=\frac{\epsilon EI}{y} \dots\dots\dots (20)$$

したがって、(19), (20) 式より、断面剛性はつぎのようにあらわされる。

$$EI=\frac{Pl y}{4\epsilon} \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 M : 曲げモーメント

I : 断面 2 次モーメント

P : 集中荷重

y : 中立軸からの距離

l : 径間

ϵ : ヒズミ

E : 杭の弾性係数

実験により得られたヒズミ量を (21) 式に代入して求めた各杭の断面剛性を示すと、さきに示した表-1 の断面剛性の数値となった。

4. 杭の組合せ

水平載荷する 3 箇の土塊供試体に 5 本の模型杭を 2 本ずつ表-4 に示したように組合せて挿入した。挿入はソイルオーガーで孔をあけ、挿入したのち孔と杭の間隙に砂を充填した。

No. 1 および No. 3 土塊供試体のセン断面厚は 4 種類とし、最初 40cm の厚さの載荷をおえたのち、順次厚くして載荷実験をくり返した。

5. 供試体の水平載荷および測定方法

供試体のジャッキによる水平載荷方法と実験仕様は下記のとおりとした。

- (1) 上載荷重 0 t/m²
- (2) 水平最大荷重 2.0~4.0 t/m²
- (3) 段階荷重方式 5~10 ステップ
- (4) 荷重載荷時間 20 分/1 ステップ
- (5) 土塊変位測定時間 0, 5, 10, 20 分
- (6) 杭頭条件 自由と固定

表-4

土塊供試体番号	杭の組合せ	供試体高 (セン断面厚) の種類
No. 1	A : E (同時対比)	40cm, 60cm, 80cm, 100cm.
No. 2	A : C (入れ換え試験) A : D D : C	100cm
No. 3	B : D (同時対比試験)	40cm, 60cm, 80cm, 100cm

水平最大荷重は、予備試験で求めた上限降伏値が 3.5 t/m² であったので、この値を超えるようにして 4.0 t/m² とした。そして 1 ステップを 1 ~ 0.5 t/m² きざみとした段階荷重方式で載荷することとした。

杭のヒズミは、各ゲージの端子をスイッチボックスに連結し、短時間に計測をおこなった。

6. 杭の断面力の計算式

模型杭のヒズミ分布を測定し、このヒズミ量からつぎに示す弾性曲線式をもちい、杭反力、セン断力、曲げモーメントおよびタワミ曲線を解析計算した。

$$P = EI \frac{d^4 y}{dx^4} \dots\dots\dots (22)$$

$$S = EI \frac{d^3 y}{dx^3} \dots\dots\dots (23)$$

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots (24)$$

$$y = \int \int \frac{M}{EI} dx \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 P : 杭反力

S : セン断力

M : 曲げモーメント

E : 杭の弾性係数

I : 断面 2 次モーメント

x : 杭頭からの深さ

y : 杭の変位

(以下次号)

参考文献

- 1) 福本安正：地すべり防止グイの挙動に関する研究 土質工学会論文報告集 Vol. 12, No. 2, 1972.
- 2) 福本安正：地すべり防止グイの破壊状態と反力分布について、第 9 回土質工学研究発表会 1973.
- 3) 福本安正：地すべり防止グイの断面力の分布型について、第 12 回 地すべり学会研究発表会
- 4) 篠原登美雄・久保浩一：杭の横抵抗に関する実験的研究 (その 1) 運輸技術研究所報告 Vol. 11, No. 6, 1961.
- 5) 福本安正：地すべり地の土質累重および強度、弾性係数について、日本林学会誌 Vol. 54, No. 9, 1972.
- 6) 横山幸満：鋼杭の設計と施工、山海堂 1963.
- 7) 土質工学会編：土質工学ハンドブック、技報堂 1965.
- 8) 土質工学会編：土質調査法 1970.
- 9) 前掲 4)
- 10) B. B. Broms: Design of Laterally Loading Piles, Proc. A. S. C. E. Vol. 91.
- 11) 福本安正：地すべり報告書 (地すべり機構調査 II) 1973 新潟県治山課
- 12) 福本安正：地すべり報告書 (地すべり機構調査 III) 1973 新潟県治山課

(原稿受理日 昭和 49 年 5 月 15 日)

地すべり現地検討会開催案内

地すべり学会新潟支部 主催
土質工学会北陸支部 後援

下記のとおり表記検討会を新潟県北魚沼郡守門村、東野名地すべり地 (林野庁所管) で開催します。支部外からの参加も歓迎致します (詳細は新潟県砂防課企画課査係あてお問い合わせください)。

記

1. 日程と行程

9 月 11 日 (木)

9 : 40 長岡駅東口前集合

10 : 00 小千谷駅前集合

10 : 30 小出駅前集合

11 : 30 守門村東野名現場着

11 : 30 ~ 12 : 00 現地概要説明

12 : 00 ~ 13 : 00 昼食

13 : 00 ~ 16 : 20 ずい道工, 集水井工, 杭打工,
水路工等見学現地検討

16 : 30 現地出発

17 : 00 北魚沼郡入広瀬村浅草山荘着

18 : 00 ~ 20 : 00 懇親会

9 月 12 日 (金)

8 : 30 ~ 11 : 30 討論会

2. その他

9 月 11 日は貸切バス, 12 日は宿から国鉄大白川駅までマイクロバスをそれぞれ使用します。

新潟県砂防課：新潟市学校町 1

Tel. 0252 (23) 5511 (代)

浅草山荘：新潟県北魚沼郡入広瀬村大字大白川新田

Tel. 025796-2331