

室内模型実験による地すべり抑止杭の抑止機構に関する考察

MODEL TESTS ON THE PREVENTIVE MECHANISM OF LANDSLIDE STABILIZING PILES

足立紀尚*・木村 亮**・多田 智***

By Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA and Satoshi TADA

Walls of piles have often been used as a stabilizing device for landslides. In this study, a series of laboratory model tests have been carried out to help elucidate the preventive mechanism of these piles. Namely, a pile or group piles were installed in a sandy model ground made by piling aluminum rods up on a bottom plate. The load acting on each pile and the ground movement around the piles were then measured while or after moving the bottom plate downward uniformly. The main results obtained from these model tests are as follows: 1) A kind of arching action takes place in the ground surrounding the piles, and 2) Zigzag arrangement piles are more effective than Parallel piles since a so-called double arch can be anticipated with the Zigzag piles.

Keywords: stabilizing piles, landslide, model test, arching action

1. ま え が き

わが国は世界でも有数の地すべり発生国であり、地すべり危険地帯が数多く指定されている。地すべりは、いったん発生すると人命の損失、建造物の倒壊など大きな被害をもたらす。昭和60年7月に長野県地附山で発生した大規模な地すべりは、まだ記憶に新しい。そのため以前から地すべりを予知する研究とともに、多くの対策工法が開発されてきた。地すべり防止対策工には、大きく分けて抑制工と抑止工の2つがある。抑制工とは、地すべり地域の水を抜く等、自然条件を変化させることによって地すべりを抑制しようとするもので、抑止工とは、杭やアンカーなどの構造物によって地すべりを抑止するものである。

地すべり防止工法の中で杭による抑止工法は、木杭等を用いて古くから実施されており、全国の大規模地すべり地の34%に適用されている¹⁾。この地すべり抑止杭は、横棧橋や橋台の基礎杭、側方流動中の構造物基礎杭などと同じく受働杭と総称されるものの1つである。受

働杭とは、杭周辺地盤が何らかの原因で移動し、その結果杭に水平力が作用する杭である。受働杭に対するものとして主働杭があるが、これは杭が頭部に水平外力を受け、土に荷重が伝達されて土が動くような杭である。受働杭と主働杭の最大の相違点は、杭に作用する水平荷重が、主働杭の場合ははじめから与えられているのに対し、受働杭では地盤と杭の相互作用によって定まる点にある。

ここで杭の水平抵抗に関する一般的な問題点を列挙すると以下のようにまとめられる。

- 1) 地盤と杭の応力、変形状態とその非線形性*
 - a) 杭が地盤から受ける地盤反力分布
 - b) 杭周辺地盤の応力分布
 - c) 地盤の弾性域と塑性域
 - d) 杭周辺地盤のクリープ性状
- 2) 群杭による低減効果と各杭の荷重分担率*
- 3) 打ち込み杭、場所打ち杭等施工法による挙動の差異
- 4) 杭頭の固定度
- 5) 主働杭と受働杭*

地すべり抑止杭の杭体に作用する荷重および抑止機構に関しては、上記の問題点が複雑に絡み合っており、多くの未解明な点が残されている。これらのことを明らかにす

* 正会員 工博, Ph.D. 京都大学教授 工学部交通土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 京都大学助手 工学部交通土木工学科 (同上)

*** 学生会員 京都大学大学院 工学部土木工学科 (同上)

るため、実際の現場で杭体に作用する荷重、地盤の変形性状を計測することは非常に重要であり、福本²⁾の興味深い研究がある。しかし、現場計測を行うためには、莫大な経費および手間がかかる。そこで、模型杭を用いた実験が現在までに種々実施されてきた。これらの模型実験は大別すると、人工的な地すべりをどのように発生させるかによって、以下のように2種類に分類される。

- 1) 杭を含んだ地盤を直接せん断試験の要領で強制的にせん断する方法^{3), 4), 14)}
- 2) 杭を建て込んだ土槽を傾斜させたり、斜面下部の仕切板を移動させてすべりを生じさせる手法^{5)~7)}

また地すべり抑止杭の設計において、地すべり土塊の移動によって杭体に作用する土圧の算定が必要となる。土圧算定式に関しては、現象を単純化することにより理論的に種々誘導されている^{3), 6), 8)~10)}。

本論文は、室内モデル実験により、引張り領域に打設した地すべり抑止杭の抑止機構の解明を試みたものである。また、本実験は地盤を約90°回転させ、底部が一樣に降下する降下床によって地盤の流動を発生させる点に特徴があり、地盤材料としては砂質地山を想定している。前述した杭の水平抵抗の問題点(*印)を念頭におきながら、杭体に作用する土圧と杭周辺地盤の挙動に着目し、以下の点について考察を加えている。

- 1) 杭前面の地盤の移動状態とアーチ効果
- 2) 杭体に作用する土圧の変化と各種パラメーターが与える影響
- 3) 適正な杭中心間隔および杭配置に対する検討

2. 実験概要

(1) 地すべり抑止杭のモデル化

まず地すべり抑止杭が施工された後、地すべり土塊の変形パターンを Fig. 1 のように単純化して考える。杭体を境にして地すべり土塊を土塊1、土塊2に分けると、(a) は始めに土塊1がすべり出し、それとともに土塊2が移動して杭体に荷重が作用する場合であり、(b) は土塊2が最初に移動し、土塊1はある程度抵抗力をもち、杭体にプラスの影響を及ぼす場合である。つまり土塊1は(a)では引張り領域となるが、逆に(b)では圧縮領域となる。地すべり防止杭は群杭として用いられるの

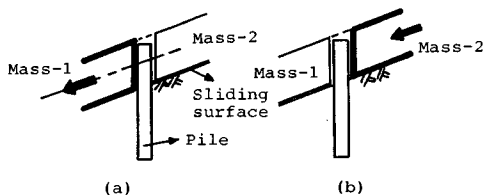


Fig. 1 Deformation configuration of landslide mass.

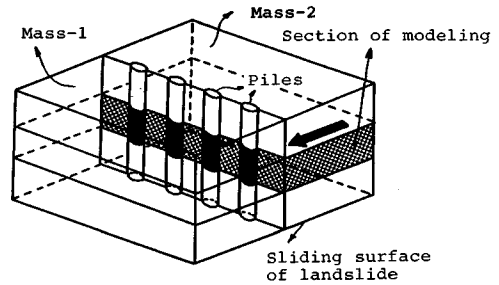


Fig. 2 Modeling of landslide stabilizing piles.

で、実際の現象は杭体間の土のすり抜け、地すべりの発生機構により2つのモードが組み合わさって、その抵抗問題はより複雑である。しかし、本論文では、第1段階として(a)の機構の解明に焦点をしばり、図の一点鎖線上の平面部分だけの挙動を考えた実験を実施する。

Fig. 2 は本実験で取り扱う地すべり抑止杭モデルを示している。図のように杭体がすべり方向に対して並列状に並んでおり、ハッチ部が Fig. 1 の一点鎖線上平面に相当する。模型実験は土塊1を最初に移動させ、杭体周辺地盤の変形状態と杭に作用する土圧を計測した。この場合杭体に作用する土圧の深度分布の変化は考慮しておらず、二次元的な杭体周辺のすべり現象のみに注目している。

(2) 実験装置

実験は Photo 1 および Fig. 3 に示すように、縦80 cm、横100 cmで底板が一樣に最大50 mm降下する降下床を用いて行った。地盤は砂質地盤を想定し、直径3.0 mmと1.6 mm、長さ5 cmのアルミ棒を重量比2:3で混合した(豊浦標準砂の粒径加積曲線に平行、 $\gamma=2.10 \text{ gf/cm}^3$, $\phi=30^\circ$, $c=0 \text{ kgf/cm}^2$) 積層体で表現した。モデル杭は降下床底板より20 cm上方にセットする。つまり、従来の模型実験では傾斜地盤に杭を建て込み、なんらかの方法で地盤を側方に流動させている。それに対し、本実験では積層体下部が Fig. 1 の土塊1、上部が土

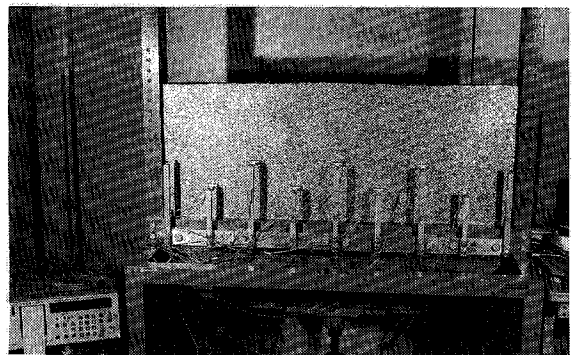


Photo 1 Experimental apparatus.

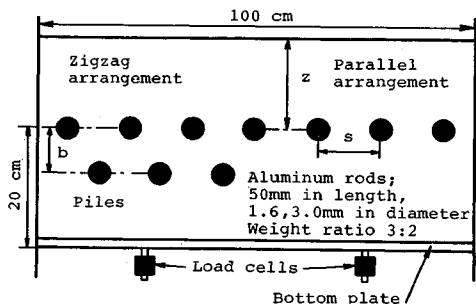


Fig. 3 Sketch of experimental apparatus and spacing between piles.

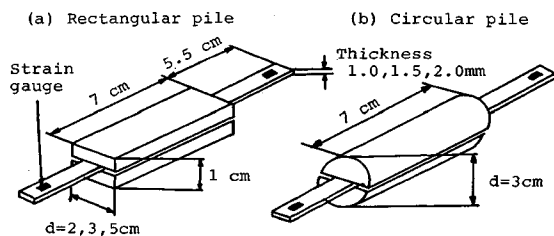


Fig. 4 Model piles.

塊 2 に相当し、土塊を約 90° 回転させて、底部が一様に降下する降下床の降下によって流動を生じさせ、現象を調べていることに特徴がある。

杭に変形を許しなかつ杭体に作用する土圧を測定するために、Fig. 4 に示すモデル杭を作成した。杭形状と杭幅を考慮するために、モデル杭として方形断面の杭と円形断面の杭の 2 種類を用いた（以後、それぞれ方形杭、円形杭と略称する）。これらのモデル杭はアルミ製の剛体に厚さ 1~2 mm の板ばねをはさんだもので、板ばねの両端に左右、表裏 4 枚でブリッジを組んだ曲げゲージを張ることにより、荷重と曲げひずみの関係から、杭体に作用する荷重が求まる。予備実験によると、曲げひずみと作用荷重の線形性は良好で、板ばねは弾性的に挙動し、測定誤差は ±0.2% であった。また降下床下部にはロードセルを 2 個取り付け、杭体に作用する荷重とは別に、降下床にかかる荷重が測定可能である。杭体は Photo 2 に示すように、降下床下部フレームから伸びたアーム先端に板ばね両端をねじで止め固定した。

(3) 実験のパラメーター

本実験では Table 1 に示すように、杭剛性、杭形状、杭配置、杭間隔、地すべり作用外力をパラメーターとした。以下各パラメーターについて説明する。

1) 杭剛性

杭体にはさみ板ばねの厚さと材質によって、杭剛性を 4 種類変化させた。曲げ剛性の比は 1:3:8:15 であり、以下簡単のためそれぞれの杭を、剛性小、剛性中、剛性

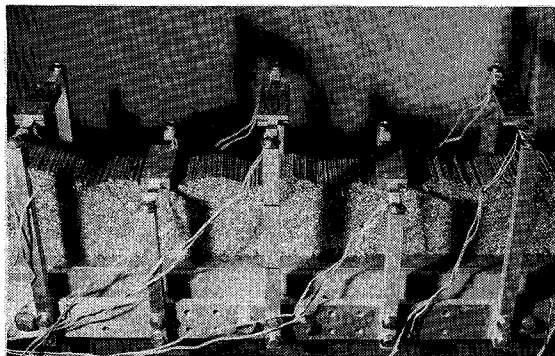


Photo 2 Fixed condition of model piles.

Table 1 Parameters of model tests.

Rigidity of piles	Thickness of plate springs 4 different kinds
Shape of piles	Rectangular (d=2,3,5cm) Circular (d=3cm)
Arrangement of piles	Parallel and Zigzag piles
Spacing between piles	Spacing between piles; s s=2.0d~12.0d Spacing between front and back piles; b b=5,7,5,10cm
External force	z=10~40cm

大、剛性特大と略称する。杭体の変位と作用荷重の関係は、剛性小で 0.63 mm/kgf である。

2) 杭形状

方形杭と円形杭の 2 種類で、方形杭は杭幅を、円形杭に対しては杭と周辺地盤の間の粘着力を考慮した実験を実施した。

3) 杭配置および杭間隔

Fig. 3 に示すように杭配置は、並列杭と千鳥杭の 2 種類である。また杭間隔には隣合う杭の中心間隔 s と、千鳥杭の場合前列杭と後列杭の杭中心間隔 b をとった。

4) 地すべり作用外力

Fig. 1 に示す土塊 2 から杭に作用する外力を変化させるため、杭中心から積層体表面までの高さをパラメーター z とした。千鳥杭の場合、 z は前列杭からの高さとする。これは、次の 2 つの状態を表現するパラメーターである。

a) 地すべり作用外力の大小。

b) 同一抑止杭で地表面に近い部分か、深い部分か。つまり、a) では z を大きくすると抑止すべき荷重が大きくなり、逆に小さくすると抑止荷重は小さくなる。また b) では z が大きいほど杭周辺地盤の拘束圧も大きくなるので、深い杭の部分を考えていることになる。このように z の取扱い方には注意を要するが、その大小はそれぞれ深い部分で地すべり外力大、浅い部分で地すべり外力小に対応する。

これら各種のパラメーターを組み合わせると 160 ケースの実験を行い、再現性のチェックのために、各ケース同

じ実験を3回繰り返して行った。

(4) 実験手順

実験の手順を以下に示す。

1) 降下床の底板を所定の位置にセットし、アルミ棒積層体を20cm積み上げる。その後モデル杭を所定の位置に固定し、再びアルミ棒積層体を杭上部に積み上げる。地盤の均一性を保つため所定の高さzまで積んだとき、杭に作用する荷重が杭体上部のアルミ棒積層体による土被り圧にほぼ等しくなるようにする。

2) 積層体を積み上げた後、直径1.6mm、長さ7cmのアルミ棒先端に1cm四方の方眼紙をつけた標点を埋め込む。

3) 降下床を降下させ、所定の降下量δで各杭に作用する荷重を測定し、あわせて標点の写真撮影を行う。

4) 引き伸ばした写真からデジタイザーを用いて、降下床の降下による各標点の変位を計測する。

3. 実験結果および考察

(1) 並列群杭の荷重分担率

まず始めに、並列杭のおのおのの杭が受け持つ荷重分担について考察する。そこで各降下量δにおける中心杭(地すべり抑止杭の中心に位置する杭)の作用荷重を1とした場合、各杭に作用する荷重の割合の一例を示したものがTable 2である。ただし、これらはδ=1~4mm時(測定点:7点)の平均値であり、各杭の番号は表の下に示すとおりである。結果は中心杭から3本だけを示すが、パラメーターによらず各杭の受け持つ荷重は中心杭が受け持つ荷重の90~110%となっているので、引張り領域に打った地すべり抑止並列杭の各杭は両端杭を除いて、ほぼ同じ荷重を受け持つ。したがって並列杭においては中心杭の挙動を調べれば他の杭の挙動が十分把握できる。

(2) 杭周辺地盤の移動状態とアーチ効果

一般に並列杭前面にはアーチ効果が期待できることが

知られている^{10)~12)}。杭周辺の標点が降下床の降下とともにどのように移動するかを調べれば、アーチの存在位置が判明する。そこで以下のような考察を行った。

Fig. 5 (a) に並列杭, $s=4.0d$, $z=15\text{ cm}$ の地盤に埋め込んだ標点の位置を示す。Fig. 5 (b) は縦軸に標点の鉛直変位量 x を、横軸に $\Delta x/\Delta\delta$ を取っている。

$\Delta x/\Delta\delta$ は(鉛直変位増分)/(降下量増分)を表わしており、たとえばある標点が $\delta=3\text{ mm}$ から $\delta=5\text{ mm}$ へ変化させたとき $x=1.0\text{ mm}$ からさらに 1.8 mm 鉛直に変位したとすれば $\Delta x/\Delta\delta=1.8/(5-3)=0.9$, $x(\delta=5.0\text{ mm})=1.0+1.8=2.8\text{ mm}$ と計算される。図中白丸、黒丸、黒三角はそれぞれ $\delta=3, 5, 10\text{ mm}$ 時の $\Delta x/\Delta\delta$ と x の関係をプロットしたもので、白丸中の数字が図

(a) の各標点の番号に対応している。図 (b) から標点の動きは大きく分けて A, B, C の3種類に分類できる(A: 標点番号5, B: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15, C: 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19)。ここで縦軸に着目してプロットをみると、白丸が $x=3\text{ mm}$, 黒丸が 5 mm , 黒三角が 10 mm 近傍にある点は降下床と同様の降下をしている点であり、同様にして $\Delta x/\Delta\delta$ に対しては、各印が1に近いほど降下床と同じ移動をする点である。そこで $\Delta x/\Delta\delta$ が0.6以下である点は杭体および杭

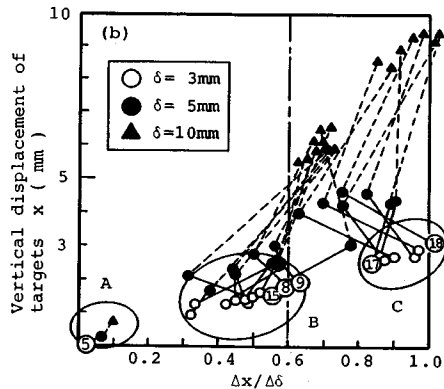
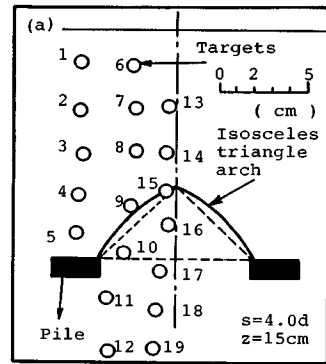
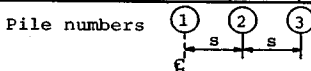


Fig. 5 Ground movement around the piles for Parallel piles.

Table 2 Ratio of load distribution for Parallel piles.

Kinds of piles	s	Pile numbers		
		①	②	③
Rectangular, Small rigidity, z = 15cm	2.0d	1.00	1.01	0.96
	4.0d	1.00	0.98	0.98
	6.0d	1.00	1.00	0.93
Rectangular, Medium rigidity, z = 15cm	2.0d	1.00	1.05	1.12
	4.0d	1.00	1.00	0.97
	6.0d	1.00	1.00	1.00
Rectangular, Large rigidity, z = 25cm	2.0d	1.00	1.09	1.24
	4.0d	1.00	0.94	0.92
	6.0d	1.00	0.99	0.95
Rectangular, Large rigidity, z = 40cm	2.0d	1.00	1.21	1.09
	4.0d	1.00	0.97	0.95
	6.0d	1.00	0.97	0.84



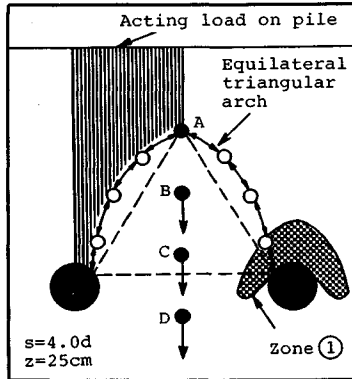


Fig.6 Arching effect.

間のアーチ作用によって流動を阻止されている点であるとする、Cは完全に降下床と同等の降下をする領域にある点である。特に標点番号9, 15の動きに注意すると、この標点あたりが遷移領域と考えられ、Fig.5 (a)のようなアーチの位置が推定できる。

次に Fig. 6 を参照してアーチのでき方について考察する。杭間の粒子 A, B, C, D に着目すると、降下床の降下とともに粒子 D は降下床と同様の降下をする。粒子 D が下方に降下するので、その上部の粒子 B, C も D に引きずられるように下方に移動しようとする。しかし粒子 A は降下量 δ が小さい ($0 \sim 2$ mm 時) 間は降下床と同様の降下をするものの、ある程度降下するとアーチ状の粒子の列が杭の存在によって隣どうし手をつなぐように結び付き、各杭の荷重分担が同じであるので、斜線で示した部分の2倍の荷重が杭体に作用する。ここでポイントとなることは、杭後方の地盤が移動したとき、杭前面の地盤では杭近傍の粒子が杭の存在をキャッチし、粒子 A まで迅速に“下方に杭が存在する”という情報を伝える点と、隣合う粒子の力の伝達だけでなく内側からアーチを抑える力が必要な点である。粒子 B, C は杭が存在するといった情報を得られても隣合う粒子どうしで手を結べないか、全く杭の存在に気が付かず下方に移動するわけである。

各ケースの標点の移動を上記の手法を用いて整理した結果、杭前面のアーチは以下に示すように2種類あることがわかった。

- 1) 直角二等辺三角形と半円の中間に位置するアーチ (二等辺アーチと略称, Fig.5 参照)
- 2) 正三角形と 60° の扇型の中間に位置するアーチ (正三角形アーチと略称, Fig.6 参照)

以上の2つのアーチから、杭体に作用する荷重の推定値が求められる。すなわち、アーチより下部の領域は降下床と同等の降下をするので、杭が地盤の側方流動によって受ける荷重の推定値はアーチ上部のアルミ棒積層体の

Table 3 Load acting on central piles for Parallel piles.

Kinds of piles		Measured values (gf)	Calculated values (gf)
Rectangular, Small rigidity, z = 15cm	2.0d	930 ($\delta=4.50$)	880 A
	4.0d	1440 ($\delta=3.00$)	1550 A
	6.0d	1740 ($\delta=2.50$)	1980 A
	8.0d	1830 ($\delta=3.00$)	1730 C
	Single pile	1590 ($\delta=3.50$)	1730 C
Rectangular, Small rigidity, z = 25cm	2.0d	1590 ($\delta=1.50$)	1490 B
	4.0d	2540 ($\delta=4.50$)	2640 B
	6.0d	2990 ($\delta=5.00$)	3215 B
	8.0d	3430 ($\delta=8.00$)	3750 B
	Single pile	3530 ($\delta=8.00$)	4410 C
Rectangular, z=10cm, Small rigidity, s = 3.0d	15cm	790 ($\delta=2.00$)	780 A
	20cm	1220 ($\delta=2.00$)	1220 A
	20cm	1630 ($\delta=2.00$)	1650 B
	25cm	2170 ($\delta=2.00$)	2120 B

A; Isosceles triangle arch
B; Equilateral triangle arch
C; $45^\circ + \phi/2$ failure

重量として算定できる (Fig. 6 の斜線部の2倍の荷重)。その結果の一例を Table 3 に示す。表中測定値の値は右に示している降下量 δ (mm) 時、つまり最大荷重時の値であり、そのときにアーチ効果が最大限に発揮されているとして推定値を算定した。推定値の欄には2つのアーチのうちどのアーチであると推定したか、またアーチ作用のない場合は、単杭の例のように写真撮影の結果水平面から $45^\circ + \phi/2$ の角度 (60°) のすべり線が現われる等のコメントを記入してある。表から並列杭の場合、アルミ棒積層体高さ z の大小により側方の拘束圧も異なり ($z=15$ cm と 25 cm では 1.69 倍) アーチのでき方に違いがでることがわかる。方形並列杭, $s=3.0d$ のアルミ棒積層体高さ z を 10, 15, 20, 25 cm と変化したケースから、 $z=15 \sim 20$ cm の間にアーチのモードに変化を生じる境界があると推定される。

(3) 円形杭の抑止機構

円形杭と方形杭の杭形による作用荷重は、一般に円形杭に作用する荷重は方形杭に作用する荷重よりも $0 \sim 15\%$ 小さい¹³⁾。Fig. 7 は円形並列杭 ($z=15$ cm, $s=4.0d$) の結果をもとに、杭周辺地盤の変形パターンを図化したものである。図中左側は 15 mm 間隔で描いた標線の変

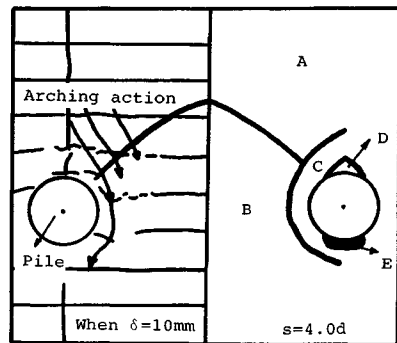


Fig.7 Ground movement and divided areas for Circular Parallel piles.

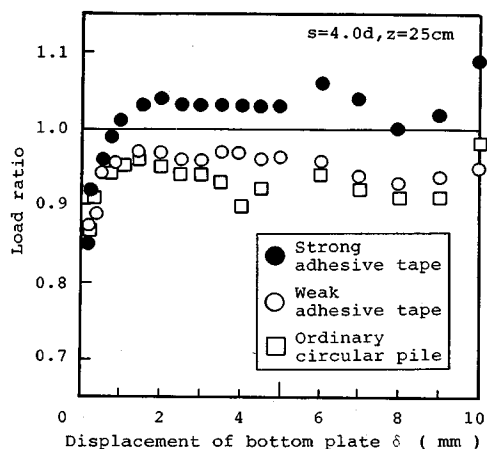


Fig. 8 Adhesive effect between Circular piles and the surrounding particles.

形と、標点の移動状況を示している。この結果から、右側に杭周辺地盤の変形パターンを以下のように領域分けした。

- A: 杭前面のアーチ作用により変位が抑えられる領域
- B: 降下床と同じまたはそれに近い変位をする領域
- C: 回り込みなど降下量よりも大きな変位をする領域
- D: ほとんど変位しない静止領域
- E: 降下床の降下による空隙

円形杭に作用する荷重が方形杭と比べて小さい理由は主に、杭の形状からアーチの足場になるところ（上記の領域CおよびFig. 6の領域①）が不安定でアーチができにくいことによる。そこで円形杭に形成されるアーチの足場を安定させ、また杭と周辺の土粒子との接着を強める目的で、円形杭に粘着力をつけた実験を実施した。

粘着力をつけるために2種類の接着力の両面テープを用いた。以下それぞれ粘着力強、粘着力弱と略称するが、予備実験よりその接着の程度は粘着力強が粘着力弱の2.5倍である。これらのテープを円形杭の回りに貼りつけ実験を実施し、円形杭および同じ幅の方形杭に作用する荷重と比較した。

Fig. 8は横軸に降下量 δ を取り、縦軸に $z=25$ cm, $d=3$ cmの方形杭に作用する中心荷重を1としたときの円形杭、粘着力強の円形杭、粘着力弱の円形杭の中心杭荷重の比をプロットしたものである。杭中心間隔はいずれも $s=4.0d$ である。この図によると円形杭に作用する荷重は前述したように0~15%程度小さくなっているが、粘着力をつけた円形杭はいずれも円形杭よりも大きくなり、粘着力強の円形杭は方形杭に作用する荷重よりも大きい値を示している。粘着力による杭周辺地盤のアルミ棒の流動の阻止は、実験中の観察によっても確認されたが、特に粘着力強の円形杭ではその近傍のアルミ

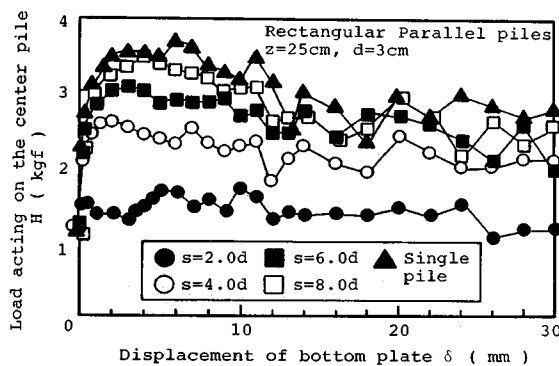


Fig. 9 Relationship between load acting on central pile and displacement of bottom plate.

棒は全く動かず、前述の流動領域Cの変形を止めれば、その抑止効果は大きくなると考えられる。以下の考察では、簡単のためすべて方形杭に対して行う。

(4) 適正杭中心間隔の検討

方形並列杭、剛性大、 $d=3$ cm, $z=25$ cmのケースを例にとって、杭中心間隔の違いの影響について考察する。Fig. 9は縦軸に中心杭に作用する荷重（以下、 H と略称する）、横軸に降下床の降下量 δ をとり実験値をプロットしたものである。この値は3回の実験から得られた測定値の平均値をとった。3回の実験値の再現性は良好で、 δ が5 mm以上は多少ばらつくものの5 mm以下では $\pm 10\%$ 程度であった。Fig. 9から以下のことが読み取れる。ただし図中の単杭とは、積層体の中心に杭を1本だけセットした杭配置を意味する。

a) $\delta=0$ mmにおいては、どの杭間隔でも土被り圧(0.8 kgf)よりも若干大きな荷重を受けているが、 δ の増加により H は急増する。

b) H は $\delta=3\sim 5$ mm時に最大荷重をとり、以後徐々に減少する。

c) 杭間隔が離れているほど H は大きい。

d) δ が10 mmを超えると単杭と $s=8.0d$ の挙動は同じようになる。

e) どの杭間隔でもいったん減少した H が、再び増加するような現象がみられる。

a), b)に関しては、アーチ効果により荷重による作用応力が杭体に集中するためである。しかしb), d)のように降下量が5 mmを超えるとアーチは徐々に切れはじめ、杭に作用する荷重は減少する。アーチが切れはじめのは $\delta=5$ mm前後と考えられるが、実験中の観察によると、この時点で杭周辺地盤が大きく下方に移動するなど、アーチが切れはじめたことを裏付ける挙動が確認された。e)のような現象は δ が5 mmを超えても杭前面の地盤で粒子の再配列が起こり、2段階目、3段階目のアーチができるためと考えられる。また方形杭の杭

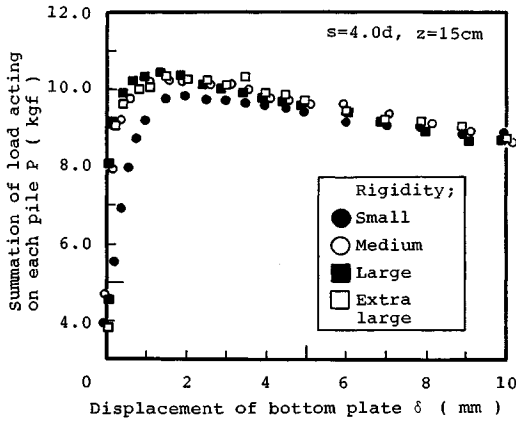


Fig. 10 Effect of pile rigidity.

幅とアルミ棒積層体の粒径との相対的な大きさの違いが、上記結果にどのような影響を与えるかを、杭幅 $d=2\text{ cm}$, 5 cm の実験で確かめたが、 $d=3\text{ cm}$ の場合と同一の結果が得られた。

次に Fig. 10 に並列杭、 $s=4.0d$, $z=15\text{ cm}$ の杭剛性をパラメータとした各ケースの全荷重 P (各杭の受け持つ荷重の合計) と降下量 δ の関係を示す。この全荷重 P の値も、3回の実験から得られた測定値の平均値をとった。図から杭剛性が大きくなるほど、わずかな降下量で急激に P が増加しその最大荷重も大きい。しかし、杭前面のアーチ作用が消滅すると考えられる $\delta=5\text{ mm}$ 以降は、どの剛性も同じような挙動を示す。これは剛性の大きい場合はモデル杭が変形しにくく、初期の段階で応力が集中しやすいからであると考えられる。しかし剛性特大の杭に注目すると、 $\delta=0\sim 5\text{ mm}$ 時において P は、剛性大の杭に作用する P と同程度か、それ以下の値しか示さない。これは、杭剛性にはある一定の上限値があり、この値を超えた剛性では応力の集中の度合いが同じになりあまり剛性の違いがみられないか、あるいはアルミ棒積層体高さが 15 cm と小さいため剛性大、剛性特大のどちらも杭体の変形が微少で、地盤と杭との相対移動量に作用荷重が関係するとも考えられる。

前節の Fig. 9 のように流動土塊を並列群杭で抑止する場合、杭の単位長さ当たりの支持力と杭間隔が問題となる。たとえば、杭の支持力が 3.0 kgf とすると、杭間隔を $6.0d$ 程度にしておけばすべりを抑止することができるが、もし支持力が 2.5 kgf であると $6.0d$ では杭は破壊し、 $4.0d$ まで杭間隔を狭くする必要がある。このように地すべり抑止杭の設計に関しては、必要抑止力、杭間隔、杭体の支持力とが密接に関係している⁹⁾。そこで Fig. 9 の見方を変えて横軸に降下量 δ 、縦軸に次式の抑止率 η を取った図を Fig. 11 に示す。

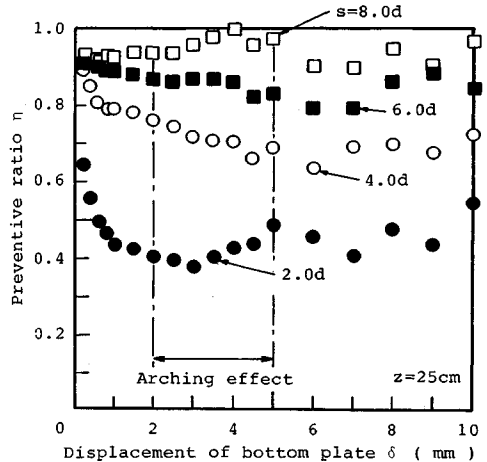


Fig. 11 Preventive ratio.

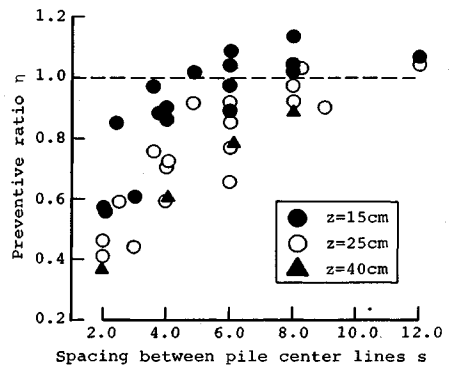


Fig. 12 Relationship between preventive ratio and spacing between pile center lines.

$$\text{抑止率 } \eta = \frac{\text{群杭 1 本当たりの抑止力}}{\text{単杭の抑止力}} \dots\dots\dots(1)$$

つまり抑止率とは各降下量において単杭の抑止力を 1 としたときの並列杭 1 本当たりの抑止力の割合を示している。一般に単杭に作用する荷重が杭 1 本当たりとしては最大値を取るの、 $1-\eta$ は並列群杭 1 本当たりの単杭に対する余力の割合を示す。抑止率 η は図から s および δ の関数であるが、横線で示したアーチ効果の卓越する範囲で平均を取り、各ケースに関して z をパラメータとして $\eta\sim s$ 関係を示すと、Fig. 12 のようになる。 z が小さいほど η は大きいという傾向はあるが、図から杭中心間隔が狭いほど残存抑止力は大きく、 $8.0d$ 以上になると各杭は単杭と同一の挙動を示すようになり、アーチ効果は期待できないと結論づけられる。

(5) 千鳥杭の有効性

千鳥杭のおのおのの杭が受け持つ荷重分担は、杭間隔 s , b , また z によらず前列杭は中心杭とほぼ同じ荷重分担を示し、後列杭は中心杭に隣接する杭と同じ荷重分

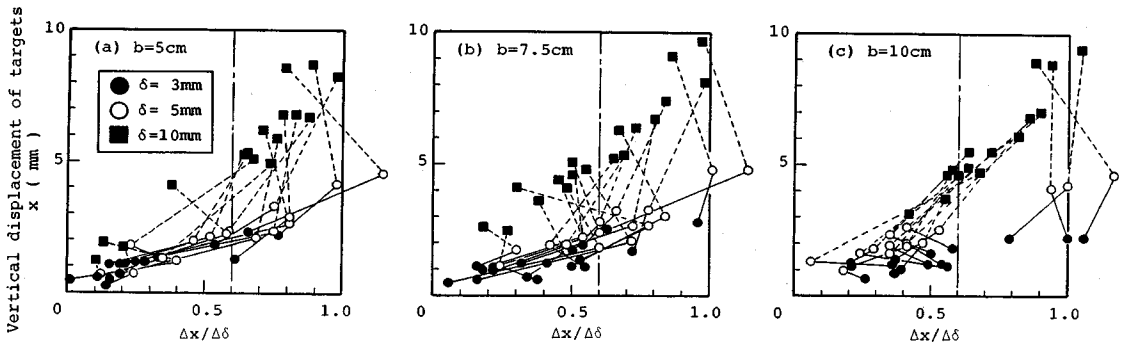


Fig. 13 Ground movement around the piles for Zigzag arrangement piles.

担となった。よって千鳥杭では中心杭とそれに近接する後列杭の挙動を考察する。

まず始めに並列杭の場合と同様に、方形千鳥杭、 $s = 2.0d$ 、 $z = 15\text{ cm}$ のケースの $x \sim \Delta x / \Delta \delta$ 関係を Fig. 13 に示す。図はそれぞれ、 $b = 5\text{ cm}$ 、 7.5 cm 、 10 cm の場合で、黒丸、白丸、黒四角は $\delta = 3, 5, 10\text{ mm}$ 時に相当している。また参考のため千鳥杭の標点の変位ベクトルの一例を Fig. 14 に示す。図は $b = 10\text{ cm}$ のケースであるが、図中の (a)、(b) はそれぞれ $\delta = 3 \sim 5\text{ mm}$ 、 $5 \sim 10\text{ mm}$ 時の変位ベクトルである。図中黒丸は $\Delta x / \Delta \delta$ の値が 0.6 以上の点である。Fig. 13 の $\Delta x / \Delta \delta$ 関係を比較すると以下のことが認められる。

- a) 各図の標点の動きは次の3つに分類される。
 - A; く字型 ((c) 図, $b = 10\text{ cm}$)
 - B; 逆くの字型 ((a) 図, $b = 5\text{ cm}$)
 - C; 混合型 ((b) 図, $b = 7.5\text{ cm}$)

b) く字型 ((c) 図) は、 $\delta = 3\text{ mm}$ 時は各点とも $\Delta x / \Delta \delta$ は 0.35~0.6 程度だが、 $\delta = 5\text{ mm}$ 時には逆に左にシフトして小さくなり、この時点でもまだかなりアーチ作用が発揮されている。これは変位ベクトル図 (Fig. 14) から明らかである。

c) 逆くの字型 ((a) 図) は、 $\delta = 3\text{ mm}$ 時は $\Delta x / \Delta \delta$ は 0.1~0.3 付近に集まっているが、 $\delta = 5\text{ mm}$ 時には b) とは逆に 0.5~0.7 付近に移動する。 $b = 5\text{ cm}$ の場合降下量が小さいときは、前列杭との協同作業で抑止効果が顕著であるが、降下量が増大すればその効果は低下する。

d) 混合型 ((b) 図) は、く字型と逆くの字型が混在した形となる。

次に Fig. 15 に $s = 2.0d$ 、 $z = 25\text{ cm}$ のケースの $P \sim \delta$ 関係を示す。図中 $b = 0\text{ cm}$ とは同一杭中心間隔の並列杭のことである。図から地すべり土塊の引張り領域に打設した千鳥杭は、前列杭と後列杭の間隔が大きいほど抑止力が大きくなり、並列杭と比較すると、同じ幅に杭を打つならば千鳥杭の方が有効であることがわかる。また

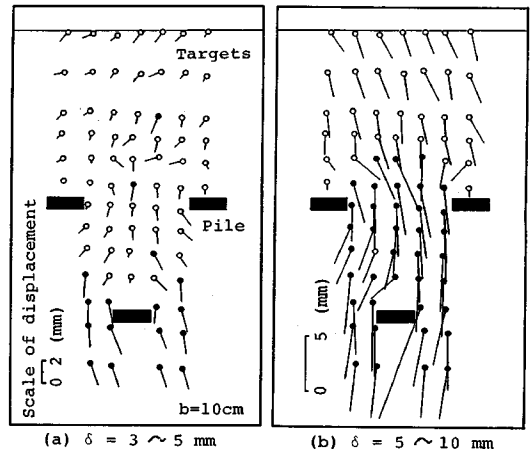


Fig. 14 Displacement vector for Zigzag arrangement piles ($b = 10\text{ cm}$).

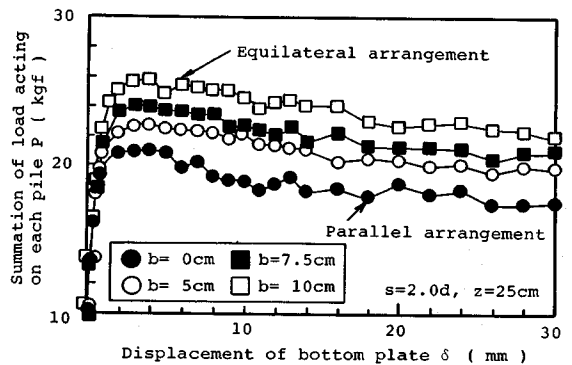


Fig. 15 Efficiency of Zigzag arrangement piles.

$b = 10\text{ cm}$ のケースは隣接する杭が正三角形に配列されている場合であり、通常の千鳥杭はこのように打設するのでその有効性が類推できる。

さらに前列杭と後列杭の関係について検証を行う。

Fig. 16 は $s = 2.4d$ 、 $z = 25\text{ cm}$ 、 $d = 5\text{ cm}$ 、 $b = 5\text{ cm}$ の千鳥杭の前列杭荷重と、 $s = 4.8d$ の並列杭の中心杭荷

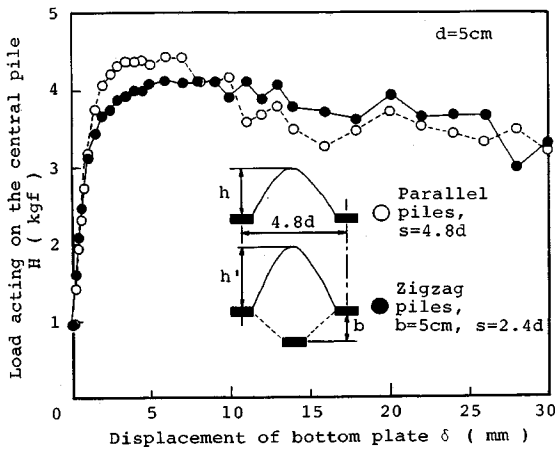


Fig. 16 Comparison with arching shape between Parallel and Zigzag arrangement piles.

重を比較した図である。これによると $\delta=0\sim 10$ mm までは並列杭の方が千鳥杭よりも荷重が大きく後列杭の影響による、つまり、千鳥杭のように下部に杭が存在するとアーチの中抜けが阻止され、その結果前列杭のアーチが大きくなり（アーチ高さ $h' > h$ ）、前列杭荷重が並列杭に比べ小さくなる。

最後に、千鳥杭が有効な理由は杭体前面に2段のアーチ効果が期待できるためであるが、Fig. 17はFig. 15のケース ($b=10$ cm) の前列、後列各杭に作用する荷重の推移を示したものである。図から降下床の降下とともにまず始めに後列杭前面にアーチができ、 $\delta=2$ mm時に最大荷重をとる。後列杭のアーチが切れると前列杭と後列杭間の地盤の移動量が増加するので、前列杭は後列杭より遅れて最大荷重をとりアーチが発生する。したがって、地盤の移動量を後列杭のアーチ効果が最大限に発揮される移動量以下にすれば、引張り領域に打設された千鳥杭は、前列および後列杭の協同作業によりすべりを有効に抑止できることになる。一般に地すべり抑止杭は、杭打設地点から下方の斜面が杭地点で分断し単独にすべりださないように、下流側の安定を考慮して圧縮領域に打設される。よって地すべり斜面上部（引張り領域）の安定化をはかる場合、土を排土する手法が用いられる。しかし前述の実験事実から、その代替案として引張り領域に千鳥杭を打設することを積極的に取り上げるべきであろう。

以上の結果をもとに、 $z=15$ cmの場合のアーチ形状を前列中心杭荷重が最大時についてFig. 18のようにまとめることができる。このとき、以下のような特徴を挙げることができる。

1) 千鳥杭は前列、後列間が大きくなると2段階のアーチ効果が期待できる。

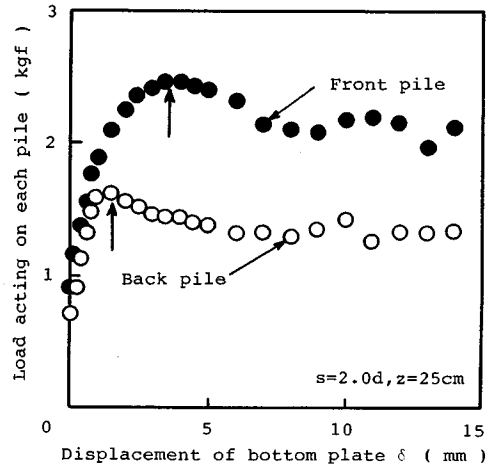


Fig. 17 Behaviour of the front and back piles.

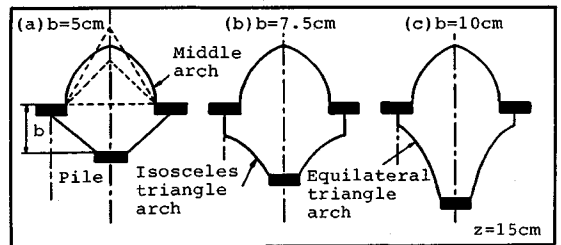


Fig. 18 Arching shape for Zigzag arrangement piles.

2) 前列杭と後列杭の間隔 b が小さい場合、後列杭にはアーチができない。

3) 前列杭間の地盤は後列杭により中抜けがある程度抑えられているので、二等辺アーチよりやや大きなアーチができる。

Fig. 18のアーチ形状から各杭に作用する荷重を推定した結果と、Table 3およびその他のケースの結果をまとめて、杭体に作用する荷重に対して横軸に推定値、縦軸に測定値をとってプロットしたものがFig. 19である。図から並列杭、千鳥杭および単杭とも推定値は測定値をかなりうまく表現しており、推定したアーチ形状は妥当であると考えられる。

4. おわりに

本研究は、地盤材料にアルミ棒積層体（砂質地山を想定）を用い、砂質地盤の側方流動現象を底面が一様に降下する降下床を用いて表現し、引張り領域に打設された地すべり抑止杭の抑止機構を実験的に調べたものである。杭体の変形から作用荷重を測定できる装置と、標点の移動を写真で追うことにより、以下のような知見を得た。

(1) 地すべり土塊の引張り領域に打設した並列群杭

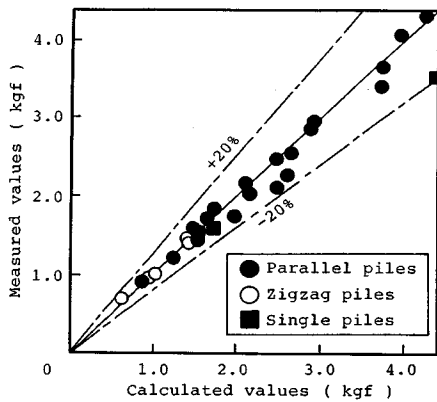


Fig. 19 Relationship between measured and calculated values for acting load on piles.

は、杭前面のアーチ効果によりすべりを抑止する。しかし、杭中心間隔が $8.0d$ 以上になるとアーチ効果は認められず、単杭と同一の挙動をする。

(2) 杭前面のアーチの有無が降下量によって決まるため、杭体に作用する荷重は降下床の降下により変化する。

(3) 円形杭には方形杭よりも $0\sim 15\%$ 程度小さな荷重が作用するが、円形杭でも杭周辺地盤の動きを阻止すれば、抑止効果は大きくなる。

(4) 杭剛性による杭に作用する荷重の違いは、降下量の小さいとき ($\delta=0\sim 5\text{ mm}$) にのみみられ、杭剛性が大きいほど作用荷重は大きい。

(5) 千鳥杭は、2段階のアーチ効果が期待でき杭間のすり抜けを防ぎ抑止効果は大きい。前列杭と後列杭との間隔によりその効果は異なる。

(6) 水平方向の拘束圧の大小によってアーチ形状には違いが生じるが、2つのアーチを仮定することによって実験結果を十分説明できる。また千鳥杭は、前列杭と後列杭との間隔によってそのアーチ形状は異なる。

以上の結論は室内模型実験という限られた条件のもとで得られたものであるため、実際の現場に適用するには多くの問題点がある。しかし、抑止機構の解明に対して、いくつかのパラメーターを制御できることから、定性的にはあるが、その生因と挙動を細かく説明することができた。今後さらに本研究を発展させ、以下の点につい

て検討を加えて次の機会に発表する予定である。

- 1) 引張り領域に打設した地すべり抑止杭に対する、杭周辺地盤の挙動の理論的考察
- 2) 圧縮領域に打設された杭に対する抑止機構の解明
- 3) 粘着力をもつ地盤材料を用いた実験
- 4) 実験の現象を説明できる数値解析手法の開発

参考文献

- 1) 建設省土木研究所地すべり研究室：地すべりの実態（その3）、土木研究所資料1204号、pp.1~58, 1977.
- 2) 福本安正：地すべり防止クイの挙動に関する研究、土質工学会論文集、Vol.12, No.2, pp.61~73, 1971.
- 3) 渡 正亮・中村浩之：地すべり抑止工法の設計について、地すべり、Vol.5, No.1, pp.25~31, 1968.
- 4) 市山正一・有水恭一：地すべり防止ぐいに関する模型実験、道路公団研究所報告、pp.320~336, 1977.
- 5) 大野睦雄・加藤俊昭・笠 博義：地すべり抑止杭の配置効果に関する実験的研究、間組研究年報、pp.41~49, 1984.
- 6) Fukuoka, M., Imano, M. and Hada, M. : Earth Pressure in the Sliding Soil Mass, Proc. IVth Int. Conf. Field Workshop on Landslides, pp.245~250, 1985.
- 7) Bosscher, P. and Gray, D. : Soil Arching in Sandy Slopes, Jour. of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.112, No.6, pp.626~645, 1986.
- 8) 山田剛二・渡 正亮・小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の実態と対策、山海堂、pp.141~173, 1971.
- 9) Ito, T. and Matsui, T. : Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles, Soils and Foundation, Vol.15, No.4, pp.31~36, 1975.
- 10) Wang, W. and Yen, B. : Soil arching in Slopes, Jour. of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.100, No.GT1, pp.61~78, 1974.
- 11) Terzaghi, K. : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, N.Y., pp.66~75, 1943.
- 12) 村山朔郎・松岡 元：砂質土中のトンネル土圧に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第187号、pp.95~108, 1971.
- 13) 足立紀尚・木村 亮：受働杭の水平抵抗に関する模型実験、地盤の側方流動に関するシンポジウム発表論文集、pp.29~36, 1986.
- 14) Matsui, T., Hong, W.P. and Ito, T. : Earth Pressure on Piles in a Row due to Lateral Soil Movements, Soils and Foundations, Vol.22, No.2, pp.71~81, 1982.

(1988.6.15・受付)