

地すべり抑止杭の水平抵抗に関する実験的研究

足立 紀尚・木村 亮・多田 智

EXPERIMENTAL STUDY OF LANDSLIDE PREVENTION PILES FOR LATERAL RESISTANCE

By Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA and Satoshi TADA

Synopsis

Walls of piles have often been used as a stabilization work of landslides. The piles are usually described as "passive piles", however their preventive mechanism has been left unsolved.

In this study, as a clue to elucidate the preventive mechanism, we carried out a series of laboratory model tests. Namely, a pile or a group of piles was sited in model ground made by piling up aluminum rods on a bottom plate, and the load acting on the piles and the ground movement around the piles were measured when moving the bottom plate downward.

The test parameters of this study are the rigidity of piles, the geometrical arrangement of piles and the separation distance between piles.

The main results obtained in this study are as follows:

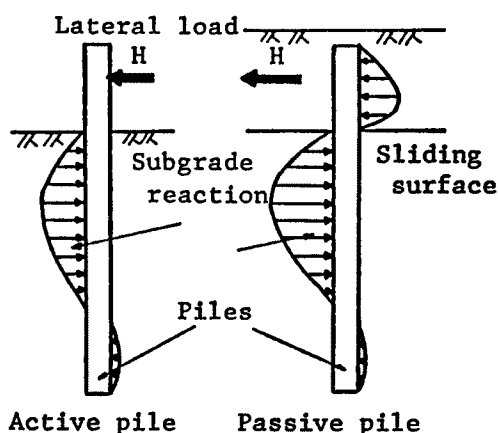
- 1) A kind of arching action takes place in surrounding ground.
- 2) The zigzag arrangement of piles is more effective than the single line arrangement since so-called double arching action is expected.

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、一旦発生すると多数の人命の喪失、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共に多くの地すべり防止対策工が開発されてきた。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（内側から対処する、内科的）もので、抑止工とは、杭などの構造物によって地すべりを抑止する（力には力で対処する、外科的）ものである。

地すべり防止対策工法の中でも、地すべり抑止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ひとつである。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、その結果、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、Fig.1のように杭に作用する水平荷重 H が、主働杭の場合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。

地すべり抑止杭の、杭体に作用する荷重および抑止機構などに関しては、まだ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、地盤の変形性状等を計測す



Active pile Passive pile
Fig. 1 Active and passive piles.

ることは、非常に重要である。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、Table 1 に示すように、人工的な地すべりをどのように発生させるかによって2種類に分類される。1つは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であり、他方は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方法である。また、地すべり抑止杭の設計では、地盤と杭の相互作用を取扱うが、地すべり土塊の移動によって杭体に土圧が作用するという点で、その挙動は非常に複雑である。よって設計において

Table 1 Examples for former experiments for landslide prevention piles

Direct shear test type	Unit (mm)	Watase et al. ³⁾	Fukumoto ^{3),4)}	Ichiyama et al. ⁶⁾
Sloping type (portition wall)	Unit (mm)	Ichiyama et al. ⁵⁾	Ohno et al. ⁷⁾	Fukuoka ⁸⁾

Table 2 Calculative equation of earth pressure for landslide prevention piles

No.	Kinds of equation	Characteristic and assumption
1	Lamb ⁹⁾	Landslide mass; Viscous flow. Experimental equation for resistance of single pile.
2	White ⁹⁾	Experimental equation. Revising the Lamb's equation by considering the interval between piles.
3	Hennes ⁹⁾	Landslide mass; Plastic material. Pile; Assumed very thin plate. Not considering compression and shear of soil.
4	Doken ⁹⁾	Landslide mass in front of pile; Rankine's passive state.
5	Ito & Matsui ^{10,11)}	Landslide mass in front of piles; Plastic condition. Applying Mohr-Coulomb's yield criterion. Considering the interval between piles.
6	Fukuoka ⁸⁾	Lateral earth pressure; Using the Coulomb's passive earth pressure.

は、これらの現象を単純化して考える。この単純化の違いにより、杭に作用する土圧の計算式が各種提案されているが、これらの計算式の特徴をまとめて Table 2 に示す。

ここで一般に杭の水平抵抗に関する問題点を列挙すると以下ようになる。

- (1) 杭と地盤の相互作用により杭が地盤から受ける地盤反力。
- (2) 杭周辺地盤の応力分布。
- (3) (1), (2) による地盤と杭の変形状態。
- (4) (3) の場合の地盤の弾性域と塑性域。
- (5) 群杭による低減効果と各杭の荷重分担率。
- (6) 杭周辺のクリープ性状。
- (7) 杭頭の固定度。
- (8) 各種施工法による挙動の差異。

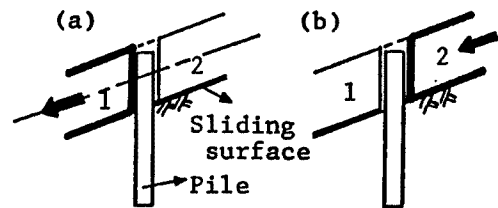
本研究は、上記の問題点を念頭に置きながら、地盤材料としてアルミ棒を用いた室内モデル実験により、側方流動する地盤中の地すべり抑止杭の抑止

機構の解明を試みるものである。まず地すべり抑止杭が施工された後の、地すべり土塊の変形パターンを Fig. 2 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) は最初に土塊 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かかる場合であり、(b) は土塊 2 が最初にすべり出し、土塊 1 はある程度抵抗力を持ち、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 つのモードが組合わさって、その抵抗問題はより複雑である。

本報告では、第 1 段階として (a) の変形モードについて考え、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した。Fig. 3 は本実験での地すべり抑止杭のモデル化を示している。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、杭前面の箱型の部分が Fig. 2 の土塊 2 に相当している。斜線部が Fig. 2 の一点鎖線上平面にあたり、この部分がすべった場合、黒く塗った杭体の周辺地盤の変形状態と杭に作用する土圧に着目し、模型実験を実施した。実験は杭体の変形を許すか許さないかによって、2 種類に分けられる。以下、杭の変形を許さない実験を実験 A、許すものを実験 B と略称する。

2. 実験 A

実験 A に関しては以前に報告したが、詳細は文献 12), 13) を参照されるときとして、その概略を説明する。実験は Fig. 4 に示すように、縦 80 cm、横 58 cm で底板が一様に最大 10 mm 降下する降下床を用いて行った。地盤を直径 3.0 mm と 1.6 mm、長さ 5 cm のアルミ棒に重量比 2:3 で混合した（豊浦標準砂の粒径加積曲線に平行、 $\gamma=2.18 \text{ gf/cm}^3$ 、 $\phi=30^\circ$ 、 $c=0 \text{ kgf/cm}^2$ ）積層体で表現し、中央部に直径 3 cm、長さ 7 cm のアルミ製の杭を入れ固定する。つまり、現在までの地すべり抑止杭の模型実験では傾斜地盤に杭を



1,2;Landslide mass

Fig. 2 Deformation configuration of landslide mass.

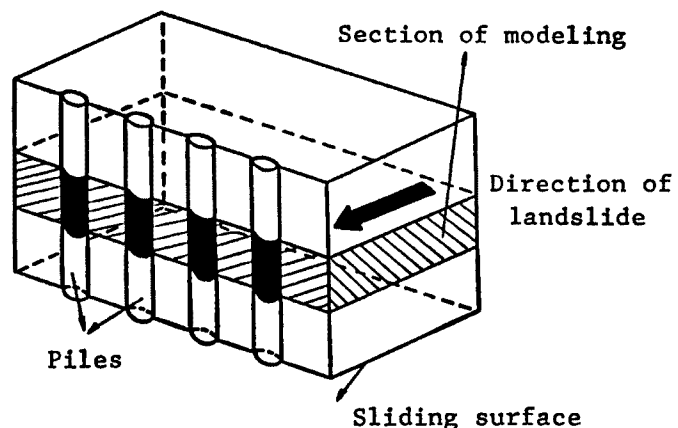


Fig. 3 Modeling of landslide prevention piles.

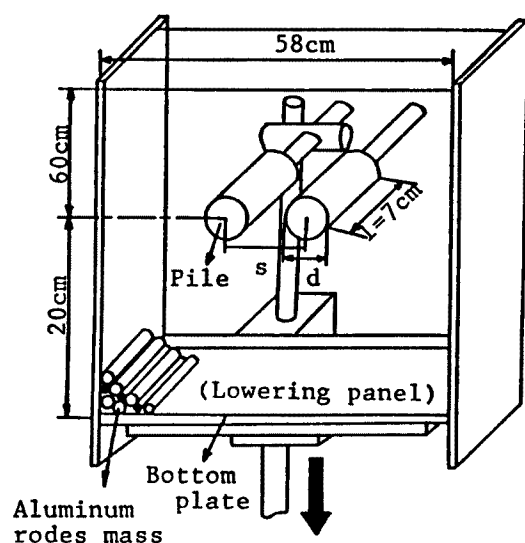


Fig. 4 Sketch of experimental apparatus (Experiment A).

建て込み、なんらかの方法で地盤を側方流動させている。しかし、本実験では積層体下部が Fig. 2 の土塊 1, 上部が土塊 2 に相当し、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側方流動を生じさせ、現象を調べていることに特徴がある。

実験は以下の手順で行った。

- (1) 降下床底板を所定の位置にセットし、アルミ棒積層体を 10 cm ごとに締め固めながら積み上げる。
- (2) 20 cm 積み上げたのちモデル杭 (5 本) を所定の杭配置に固定し、以後 (1) と同様の方法で杭体から上方 15 cm まで積み上げ積層体を作成する。
- (3) 積層体前面に標線を描き、直径 3 mm、長さ 8 cm のアルミ棒先端に方眼紙を付けた標点を埋めこむ。
- (4) 降下量を 3, 5, 10 mm とハンドルで降下させ、各降下量 (δ) で写真撮影する。

- (5) 引き伸ばした写真からデジタイザーによって各標点の変位を測定する。

実験の種類は Table 3 のようにケース 1 ～ ケース 4 の 4 種類で、杭中心間隔 (s) と杭配置をパラメータとした。

Fig. 5 はケース 3 ($s=4.0d$) 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 15mm 間隔で描いた標線の変形と、杭に近接した地盤の回り込み現象を示している。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。

これらの領域の境界は、標線、標点の変位より推定したものであるが、A・B・C の各領域境界には遷移領域が存在する。また杭前面のアーチは、C 領域の大変位により徐々にその効果が期待できなくなると考えられる。

上述のように、並列群杭間には降下床の降下とともに、アーチができる。このアーチ作用を、村山・松岡¹⁴⁾は降下床の実験から次のように説明している。“降下床の降下に伴ってある部分が局部沈下を起こし周

Table 3 Kinds of experiment A

Case	Central space of pile	Arrangement of piles
Case 1	$s = 2.0 d$	Parallel
Case 2	$s = 3.0 d$	Parallel
Case 3	$s = 4.0 d$	Parallel
Case 4	$s = 2.0 d$	Zigzag

Zigzag arrangement



辺部よりも下がる結果、今まではほぼ真下に伝わっていた粒子間力の大部分が、沈下部上方のアーチ形状の領域の外周部に沿って左右に分かれて沈下部外方に伝わる。そして、このアーチの粒子間力の伝達線、換言すればアーチ状の最大圧縮主応力線の形成が沈下部外方に作用する土圧の大きさを支配する主要な現象となっており、これをアーチ効果と言う。”

実験 A より得られた知見は以下のようにまとめられる。

- (1) 地すべり抑止並列杭の前面にはアーチ効果が期待でき変形は抑えられる。しかし杭後方の移動量が増加するとアーチ作用は低減する。
- (2) 杭周辺地盤は変形パターンにより領域に分割できる。
- (3) 千鳥配列杭は2段階のアーチにより変形を抑える効果がある。

以上、杭の変形は許さないとして実験を行っているが、実際の地すべり抑止杭では杭は変形するし、また杭体に作用する土圧を測定しなければ十分な実験とは言えない。そこで、以下に示す実験 B を実施した。

3. 実験 B

3.1 実験装置

実験 B の実験装置は、実験 A と同様に地盤をアルミ棒積層体で表現し、Fig. 6, Photo. 1 に示すような、縦 80cm、横 100cm で底板が一様に降下する降下床を用いた。

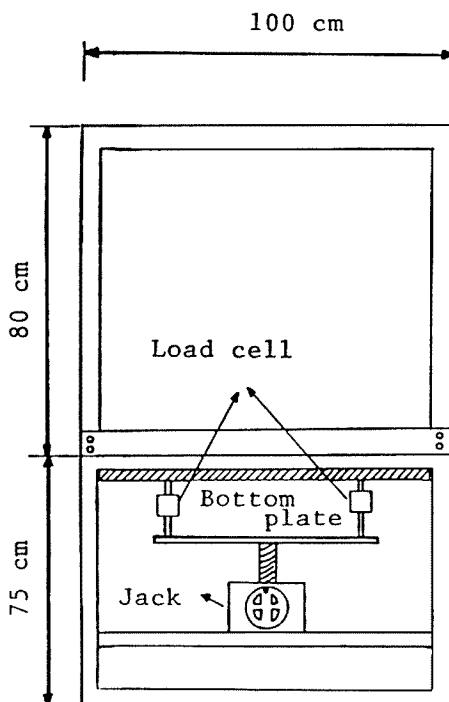


Fig. 6. Sketch of experimental apparatus (Experiment B).

杭に変形を許し、なおかつ杭体に作用する土圧を測定するために、Fig. 7 に示すモデル杭を作成した。杭形を考慮するために、モデル杭には方形断面の杭 (a) と円形断面の杭 (b) の2種類がある。以後、それぞれ方形杭、円形杭と略称するが、これらの杭体はいずれも長さ 7 cm、幅 3 cm で、方形杭の厚さは 1 cm である。これらのモデル杭はアルミ製の剛体で、厚さ 1.0 mm と 1.5 mm の板ばねをはさみこんだもので、板ばねの両端を固定することによって杭体の変形が許されている。また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貼ることにより、荷重と曲げひずみの

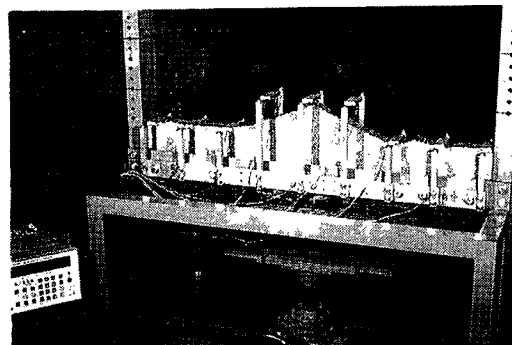


Photo. 1 Experimental apparatus.

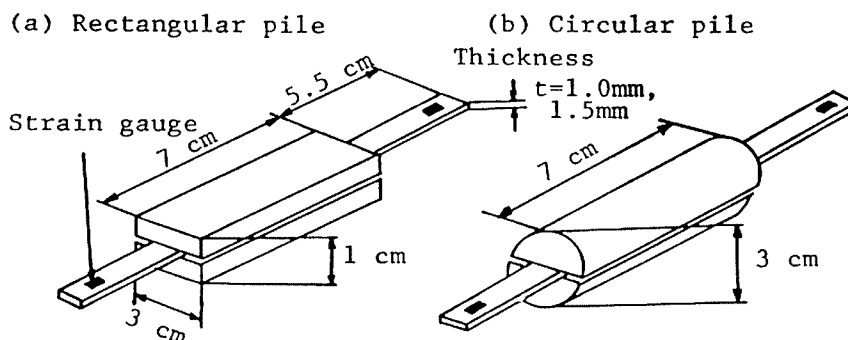


Fig. 7 Model of piles.

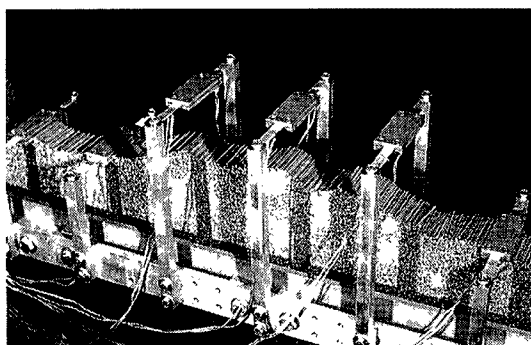


Photo. 2 model of piles.

関係から、杭体に作用する荷重が求まる。実験前に行ったキャリブレーションによると、曲げひずみと作用荷重の線形性は良好で、杭体に作用する荷重を除去したときの塑性ひずみも無視できる程度である。この装置を用いると、2.0 kgfの荷重が作用したときの測定誤差は ± 5 gfである。また、降下床下部にはロードセル（最大測定荷重 500 kgf, 測定精度 100 gf）を取り付けた。これにより、杭体に作用する荷重とは別に、降下床にかかる土圧を測定でき実験の精度向上を計った。

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ネジで止め固定した。

またモデル杭は最大15本まで固定することができる。

3.2 実験のパラメータ

本実験では **Table 4** に示すように、杭剛性・杭形・杭配置・杭間隔および土被りをパラメータとした。以下各パラメータについて説明する。

(1) 杭剛性

杭体にはさまれた板ばねによって、杭剛性は3種類に分かれる。厚さ 1.0 mm のばねの材質はジュ

Table 4 Parameters of experiment B

Parameter	
Pile rigidity	Thickness; t 1.0 mm (Duralmin, Stainless steel) 1.5 mm (Stainless steel)
Pile shape	Rectangular pile, Circular pile
Pile arrangement	Parallel, Zigzag, Arch, Double parallel
Pile space	Central space of piles; s 2.0 d, 3.0 d, 4.0 d, 6.0 d, 8.0 d Central space between front and back piles; b 5 cm, 7.5 cm, 10 cm
Overburden length	$z=10$ cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 40 cm

アルミンとステンレスの2種類があり厚さ 1.5 mm の材質はステンレスである。剛性の大きさは、1.0 mm—ジュラルミン・1.0 mm—ステンレス・1.5 mm—ステンレスの順に大きくなり、杭体の変位と作用荷重の関係は、それぞれ 0.63 mm/kgf, 0.24 mm/kgf, 0.08 mm/kgf であり、曲げ剛性の比は 1:3:8 となる。以下簡単のためそれぞれの杭を、剛性小・剛性中・剛性大と略称する。

(2) 杭 形

前述したように方形杭と円形杭の2種類である。

(3) 杭配置

並列杭・千鳥杭・アーチ杭・二段階並列杭の4種類であり、Fig. 8 に各杭配置を示す。アーチ杭・二段階並列杭は、(4) で述べるように千鳥杭・杭中心間隔 $s=4.0d$ ・前列後列中心杭間隔 $b=10\text{ cm}$ のケースと比較する配置である。

つまり、ある幅に同じ杭本数を打って地すべりを抑止する場合、どのような杭配置が有効であるかを検討する。

(4) 杭間隔

Fig. 9 に示すように、隣合う杭の杭中心間隔 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。杭中心間隔 s は $2.0d \cdot 3.0d \cdot 4.0d \cdot 6.0d \cdot 8.0d$ (d : 杭体の幅) の5種類、前列・後列杭間隔 b は $5\text{ cm} \cdot 7.5\text{ cm} \cdot 10\text{ cm}$ の3種類ある。ここで、 $b=10\text{ cm} \cdot s=2.0d$ の場合は千鳥杭の近接する3本の杭が正三角形状態となる。

(5) 土被り

杭中心から積層体表面までの高さを土被り z とし、 $10\text{ cm} \cdot 15\text{ cm} \cdot 20\text{ cm} \cdot 25\text{ cm} \cdot 40\text{ cm}$ の5種類とした。千鳥杭・

アーチ杭・二段階並列杭の場合、土被り z は Fig. 9 のように最前列杭からの高さとする。後述するように、 z の大小は抑止すべき地すべり土塊の大小に対応している。

これら各種パラメータを組み合わせ、90ケースの実験を行い、各ケース同じ実験を3回繰り返して行った。

3.3 実験手順

実験の手順を以下に示す。

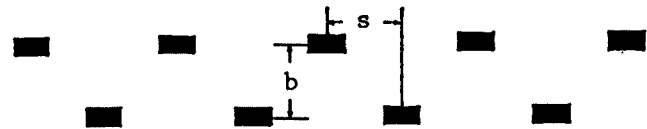
(1) 降下床の底板を所定の位置にセットし、アルミ棒積層体を積み上げる。

(2) 18 cm 積み上げた後、モデル杭（最大15本）を所定の位置に固定する。その後、再びアルミ棒積層体

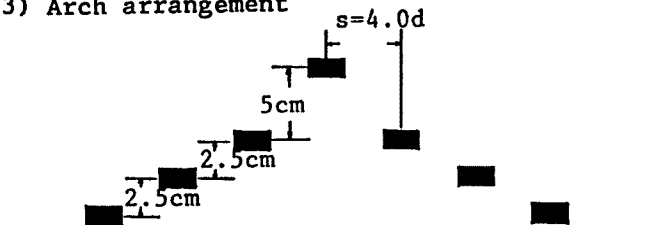
(1) Parallel arrangement



(2) Zigzag arrangement



(3) Arch arrangement



(4) Double parallel arrangement

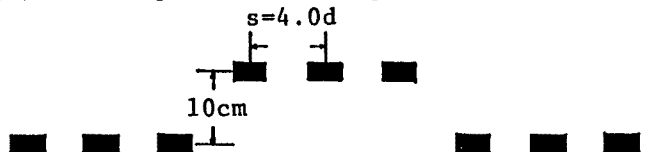


Fig. 8 Arrangement of landslide prevention piles.

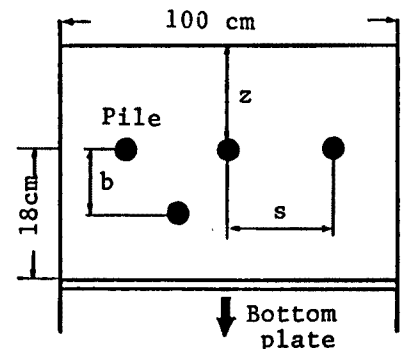


Fig. 9 Pile space and overburden length.

を積み上げる。地盤の均一性を保つため、所定の土被りまで積んだ時、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（杭幅×アルミ棒長さ×土被り高さ× γ ）にほぼ等しくなるようにする。ここで、実験Bの γ は実験Aと比較して若干小さく 2.10 gf/cm^3 である。

- (3) 積層体を積み上げた後、直径1.6 mm、長さ5 cmのアルミ棒先端に1 cm×1 cmの方眼紙を付けた標点を埋めこむ。
- (4) 降下床の降下量 δ を、1 mmまでは0.2 mmずつ、1 mmから5 mmまでは0.5 mmずつ、5 mmから14 mmまでは1 mmずつ、14 mmから30 mmまでは2 mmずつ降下させ、各降下量に達してから15秒後に各杭に作用する荷重をひずみ計測器に印字させる。
- (5) 降下量が0 mm・1 mm・3 mm・5 mm・10 mm・20 mm・30 mmの時、地上に固定したカメラで写真撮影を行う。
- (6) 杭周辺地盤の動きを調べるために、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。

4. 実験Bの結果と考察

4.1 並列杭の各パラメータによる作用荷重の違い

(1) 杭中心間隔による違い

方形・並列杭・剛性小・ $z=15 \text{ cm}$ 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. 10は縦軸に中心杭荷重（以下、 H と略称する。）をとり、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。中心杭荷重とは地すべり抑止群杭の中心に位置する杭（以下、中心杭と略称する。）に作用する荷重である。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。その3回の実験値のばらつきの程度の一例をFig. 11に示す。図には $s=2.0 \text{ d}$ 、 $s=6.0 \text{ d}$ の結果を示しているが、降下量 δ が5 mmまでと小さい段階では、ばらつきはほとんどなく $\pm 10\%$ 程度である。しかし、降下量が5 mmを越えるとその程度は大きくなる。Fig. 10から杭中心間隔が大きくなるほど、中心杭が受け持つ最大荷重は大きくなる。ここで図中の単杭とは、積層体の中心に杭を一本だけセットした杭配置のことである。

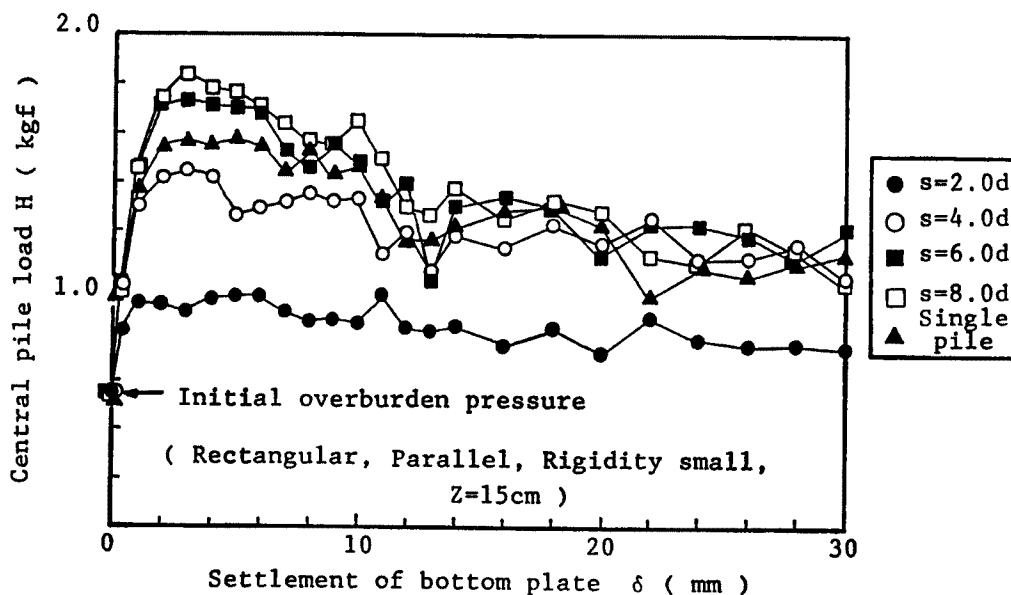
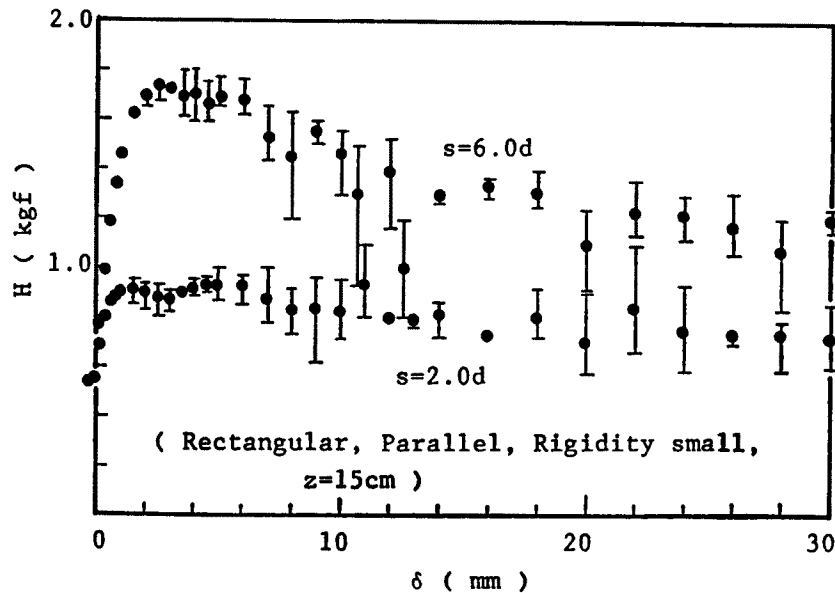


Fig. 10 Relationship between load (H) acting on central pile and settlement (δ) of bottom plate. (Rectangular, Parallel arrangement, Rigidity small, $z=15 \text{ cm}$)

Fig. 11 Data scattering of $H-\delta$ curves for Parallel arrangement.

り、8回の実験値のばらつきの程度を Fig. 12 に示す。単杭の場合は並列杭と比べて、ばらつきの程度は大きい。また δ と H の関係に着目すると、以下のことが認められる。

- (1) $\delta=0$ mm においては、どの杭間隔でも計算上の土被り圧 (0.47 kgf) に近い荷重を受け持っているが、 δ が増加するにつれて H は急増し、 $\delta=2 \sim 4$ mm 時において最大荷重をとり、以後徐々に減少する。
- (2) δ が 10 mm を越えると、杭中心間隔が 2.0 d 以外のものは同程度の値を取る。

これは $\delta=2 \sim 4$ mm 時において、杭前面におけるアーチ作用が最大限に発揮され、以後そのアーチが切れはじめ、 $\delta=10$ mm 以後はアーチ効果が消滅し、単杭と同じような挙動を示すようになるためと考えられる。アーチが切れはじめるのは $\delta=5$ 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現象が確認された。

ここで Fig. 10 では中心杭の荷重の推移を地すべり抑止並列杭の代表として示したが、並列杭の各々の杭が受け持つ荷重分担がどのようになるかを示す必要がある。そこで各降下量における中心杭の作用荷重を 1 とした場合の、各杭に作用する荷重の割合を示したものが Table 5 である。ただし、これは降下量 $\delta=1 \sim 4$ mm 時 (測定点: 7 点) の平均値であり、各杭の番号は表の下に示したとおりである。また 1 番杭を対称軸として軸対称となっている杭は同じ挙動をするはずであるから、それぞれの杭に作用する荷重の平均値をそれらの杭の作用荷重として計算した。この表から並列杭では、杭間隔、杭剛性、土被り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はば 80~120% となっている。ただし、杭中心間隔が 8.0 d の場合、3 番杭は降下床壁面との距離が 2 cm しか離れておらず、それが作用荷重に影響を及ぼし、1・2 番杭とは

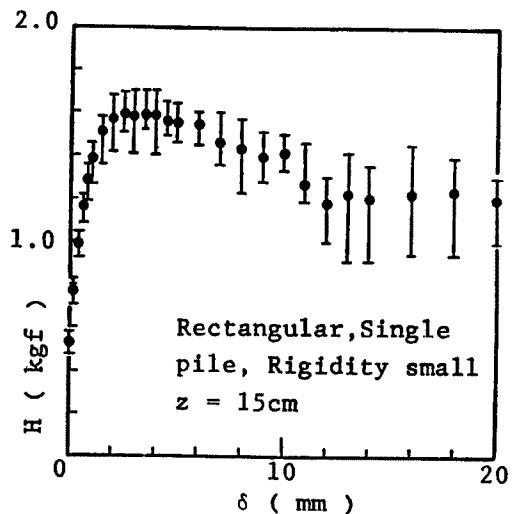
Fig. 12 Data scattering of $H-\delta$ curves for single pile.

Table 5 Distribution of load for parallel arrangement

Kinds of prevention group piles		Pile number						
		1	2	3	4	5	6	7
Rectangular, Parallel, Rigidity small, z=15 cm	2.0 d	1.00	1.01	0.96	1.03	1.01	1.00	1.02
	4.0 d	1.00	0.98	0.98	0.96			
	6.0 d	1.00	1.00	0.93				
	8.0 d	1.00	0.98	0.51				
Rectangular, Parallel, Rigidity medium, z=15 cm	2.0 d	1.00	1.05	1.12	0.92	1.03	1.05	1.13
	4.0 d	1.00	1.00	0.97	1.05			
	6.0 d	1.00	1.00	1.00				
	8.0 d	1.00	1.01	0.56				
Rectangular, Parallel, Rigidity big, z=15 cm	2.0 d	1.00	0.96	0.86	1.06	1.03	0.98	1.01
	4.0 d	1.00	1.02	1.01	0.96			
	6.0 d	1.00	0.97	0.95				
	8.0 d	1.00	1.02	0.54				
Rectangular, Parallel, Rigidity small, z=25 cm	2.0 d	1.00	0.98	1.10	1.10	0.96	1.11	1.10
	4.0 d	1.00	1.02	0.97	0.87			
	6.0 d	1.00	1.00	0.94				
	8.0 d	1.00	0.97	0.51				
Rectangular, Parallel, Rigidity big, z=25 cm	2.0 d	1.00	1.09	1.24	1.00	1.22	1.28	1.09
	4.0 d	1.00	0.94	0.92	0.81			
	6.0 d	1.00	0.99	0.95				
	8.0 d	1.00	1.01	0.47				
Rectangular, Parallel, Rigidity big, z=40 cm	2.0 d	1.00	1.21	1.09	1.13	1.20	1.05	0.99
	4.0 d	1.00	0.97	0.95	0.79			
	6.0 d	1.00	0.97	0.84				
	8.0 d	1.00	0.88	0.50				
Circular, pile Parallel, Rigidity small, z=15 cm, 5-piles	2.0 d	1.00	0.96	1.33				
	3.0 d	1.00	0.99	1.15				
	4.0 d	1.00	0.89	0.74				
Rectangular, Parallel, Rigidity small, s=3.0 d, 5-piles	z=10	1.00	1.00	1.08				
	z=15	1.00	1.04	1.23				
	z=20	1.00	1.09	1.11				
	z=25	1.00	1.04	1.04				

①
⋮
② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦
⋮

同一の荷重を受け持たない。しかし、一般に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と言える。並列杭の荷重分担が同じであることと、杭前面にアーチができることから、杭体に作用する荷重は Fig. 13 のように推定される。アーチの形状については、4.3 で詳細に述べるが、図の斜線部分の2倍が各杭に作用する最大荷重であると考えられる。

以上各杭が最大荷重を受け持っていると考えられる $\delta=1\sim4\text{ mm}$ 時の荷重分担を示したが、いったん杭前面のアーチが切れると ($\delta=5\text{ mm}$ 以降) 並列杭の荷重分担は必ずしも同じではなくなり、急激に1番杭の荷重が小さくなり、2番杭の荷重が大きくなる、というような近接杭間での荷重のやりとりがあった。これはアーチで支えていた荷重がアーチが切れていくことによって、どちらの杭に作用するかによってと思われる。ここで、各杭が受け持つ荷重の合計 (以下、全荷重 P と略称する。) の3回の実験値のばらつきの程度を Fig. 14 に示す。Fig. 14 は一例として、並列杭・剛性小・ $z=15\text{ cm}$ の $s=2.0d$ と $6.0d$ の場合を示している。この図を先の中心杭荷重 H のばらつきを示す Fig. 11 と比較すると、 H より P のほうがばらつきの度合いが小さいことがわかる。つまり、1本の杭の変化を見たとき、その杭自体に作用する荷重は変化しても、その変化した荷重はその杭以外の杭に作用するわけで、群杭全体として見てみると大きな変化にはならないわけである。以降並列杭においては1番杭の挙動を調べれば各杭の挙動が十分わかるといえよう。

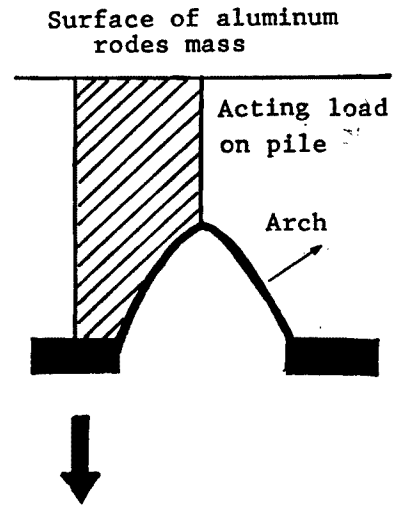


Fig. 13 Arching action.

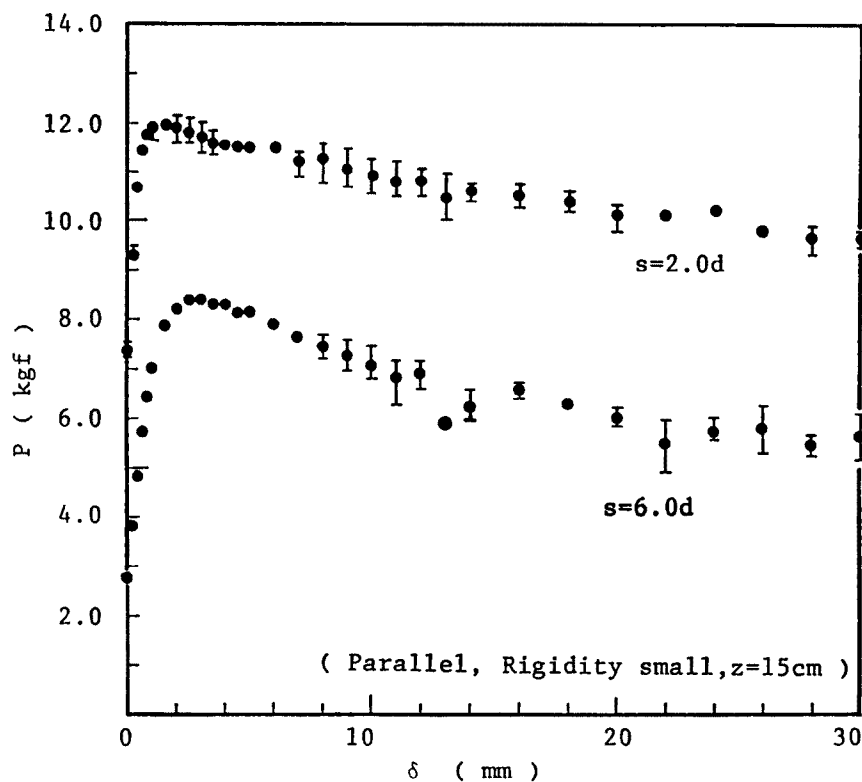


Fig. 14 Data scattering of $P-\delta$ curves for Parallel arrangement.

(2) 杭形による違い

杭形による作用荷重の違いについて示したものが Fig. 15 である。この図は横軸に方形杭の中心杭荷重 H 、縦軸に円形杭の中心杭荷重 H をとって $z=15$ cm の各ケースについて比較している。図から並列・千鳥・単杭という杭配置によらず、方形杭に作用する荷重のほうが0～25%程度大きいことがわかる。これは、アルミ棒積層体前面の観察結果から、杭前面のアーチが円形杭のほうが杭形状によりアーチができにくいから、あるいはできたとしても図中に示すように同じアーチ高さとする、アーチ根元の長さ f が大きくなり杭に作用する荷重が小さくなるからと考えられる。

以後の考察は、単純であり、明確なアーチ作用が発生するという観点から方形杭に限定して考える。

(3) 杭剛性による違い

Fig. 16 に並列杭・ $s=4.0d$ ・ $z=15$ cm の杭剛性をパラメータとした各ケースの全荷重 P と降下量 δ の関係を示す。この全荷重 P の値は、中心杭荷重 H と同様に3回の実験から得られた測定値の平均値をとった。Fig. 16 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 $\delta=5$ mm 以降は、どの剛性も同じような挙動を示すようになる。これは剛性の大きいものはモデル杭の変形があまり許されていないため、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。

(4) 土被りによる違い

Fig. 17(a), (b) に並列杭・剛性大で土被りがそれぞれ $z=25$ cm・40 cm の各ケースの H と δ との関係を示した。 $z=15$ cm の Fig. 10 も参照すると、土被りが大きくなるにつれて $\delta=5$ mm 以降の H の値のばらつきが大きくなることわかる。杭にかかる荷重は前述の Fig. 13 の斜線部の荷重の2倍と推定されるが、土被りが大きくなった場合、単純にそのような計算を行うことはできない。つまり、アーチ上部の荷重が均等に2つの杭に作用しているわけではなく、どちらか一方の杭に片寄って作用したり、アーチ作用の影響が地盤上部まで伝わらず各杭の荷重分担がばらつくのであろう。また隣合う杭間以外にも、ほかの杭同士で別の大きなアーチを形成している可能性も考えられる。

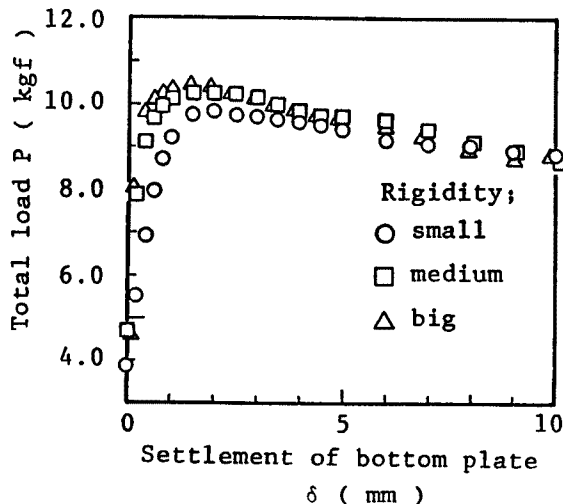


Fig. 16 Comparison between different rigidity of piles.

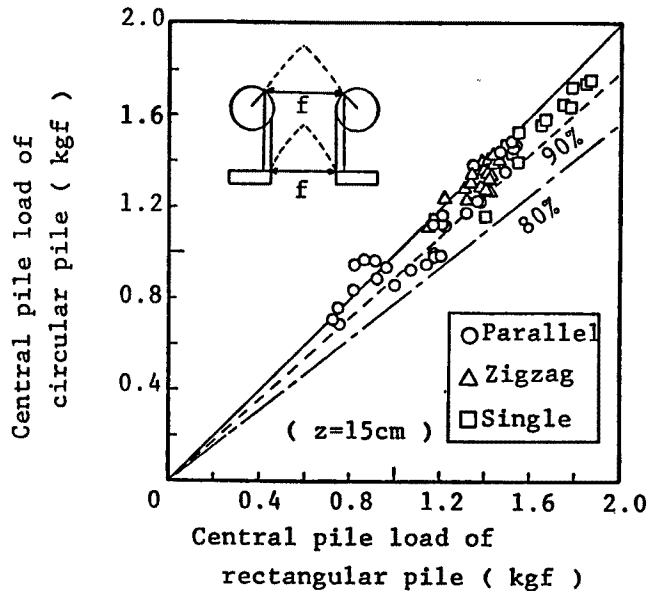


Fig. 15 Influence of pile shape on the load acting on central pile.

この土被り z というパラメータは、次の2つの状態を表現するパラメータである。

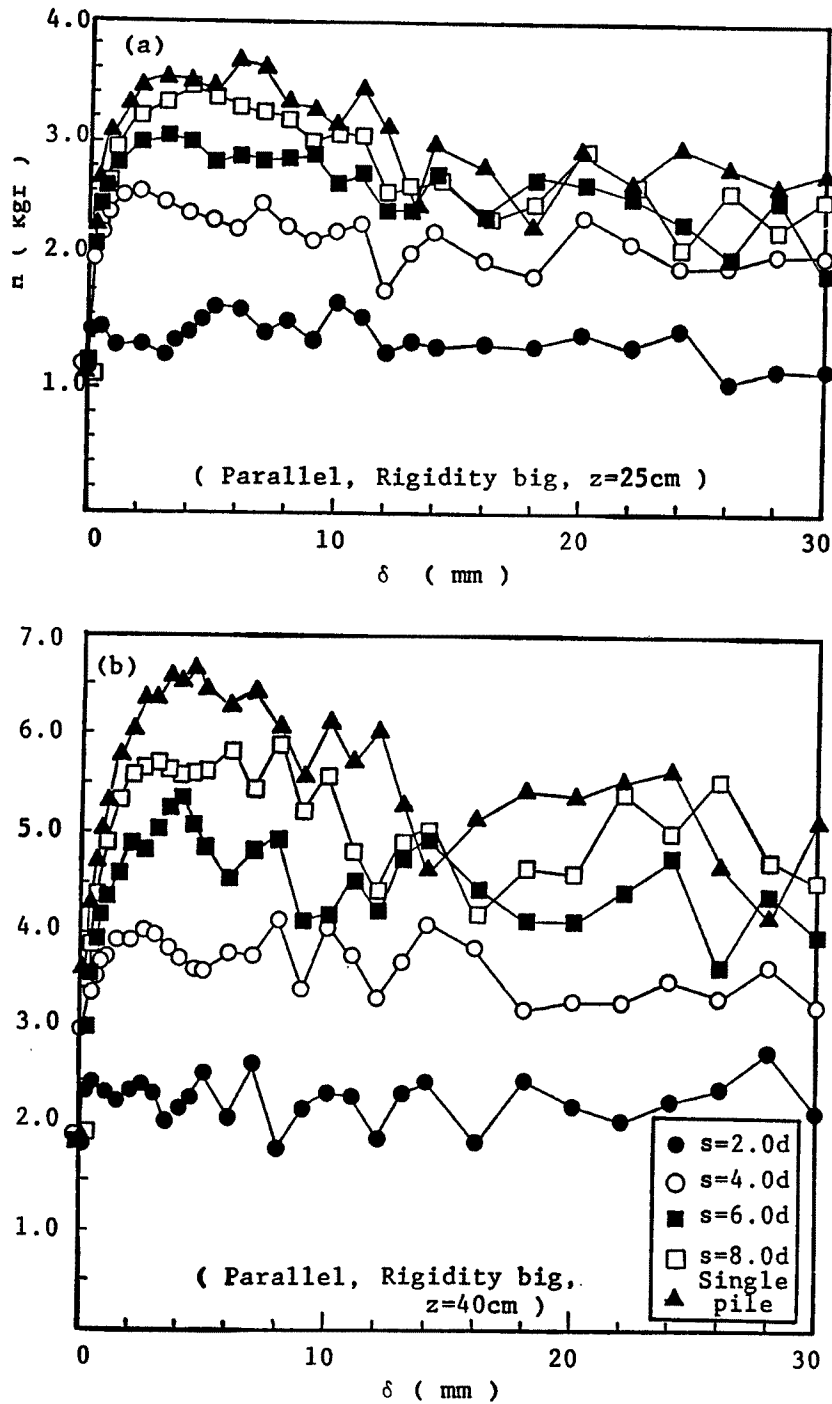


Fig. 17 Effect of overburden length.
 ((a) $z=25\text{ cm}$, (b) $z=40\text{ cm}$)

(1) 地すべり作用土圧の大小。

(2) 同一抑止杭で地表面に近い部分か、深い部分か。

つまり (1) 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 (2) 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部分の杭のセクションを考え

ていることになる。このように土被りの取扱い方には注意を要するが、土被り z の大小は、深い部分で地すべり土圧大・浅い部分で地すべり土圧小にそれぞれ対応している。

4.2 杭配置による作用荷重の違い

(1) 千鳥杭の杭間隔による違い

まず初めに並列杭の場合と同様に、千鳥杭の各々の杭が受け持つ荷重分担を Table 6 に示す。ただしこれは降下量 $\delta=1\sim4\text{ mm}$ 時の平均値であり、各杭の番号は図中に示したとおりである。表から杭間隔 $s \cdot b$ 、土被りによらず前列杭は1番杭（中心杭）とほぼ同じ荷重分担を示し、後列杭は2番杭とほぼ同じ荷重分担となる。この結果は千鳥杭の場合、2段の並列杭が存在すると考えると、並列杭の荷重分担の結果（Table 5）からも当然の結果といえる。また杭間隔 $s \cdot b$ による荷重分担の違いをみると、杭中心間隔 s によらず前列・後列杭間隔 b が大きくなるほど後列杭の荷重分担は大きくなっている。以後千鳥杭では1・2番杭の挙動を調べれば、各杭の挙動を十分知ることができる。

次に Fig. 18(a), (b) にそれぞれ、 $s=2.0d$ ・剛性小・ $z=15\text{ cm}$ 、 $s=4.0d$ ・剛性小・ $z=15\text{ cm}$ の各ケースの全荷重 P と δ との関係を示した。図中 $b=0\text{ cm}$ とはそれぞれのケースの杭中心間隔 s で打った並列杭のことである。これらの図から共通して次のようなことが認められる。

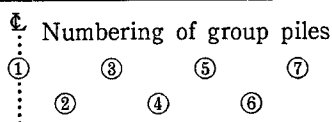
- (1) 前列・後列杭間隔 b が大きくなるほど、群杭に作用する全荷重 P は大きくなる。
- (2) 同じ土被りで、 $s=2.0d$ のケースと $s=4.0d$ のケースを比較した場合 $s=4.0d$ のケースは $\delta=10\text{ mm}$ 以降全荷重の値のばらつきが大きい。

上記 (1) および (2) から次のことが考察される。

- (1) 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、 $b=0\text{ cm}$ に相当する並列杭と比較すると、同じ幅に杭を打つならば千鳥杭のほうが有効であることが定量的に理解できる。

Table 6 Distribution of load for zigzag arrangement

Kinds of prevention group piles	Pile number						
	1	2	3	4	5	6	7
Zigzag, $b=5\text{ cm}$	1.00	0.58	0.93	0.58	0.92	0.60	0.99
$s=2.0d$, $z=15\text{ cm}$, $b=7.5\text{ cm}$	1.00	0.79	1.02	0.79	1.05	0.79	1.08
Rigidity small $b=10\text{ cm}$	1.00	0.94	1.00	0.89	0.99	0.93	1.09
Zigzag, $b=5\text{ cm}$	1.00	1.06	0.97	1.04			
$s=4.0d$, $z=15\text{ cm}$, $b=7.5\text{ cm}$	1.00	1.18	1.00	1.16			
Rigidity small $b=10\text{ cm}$	1.00	1.35	1.05	1.27			
Zigzag, $b=5\text{ cm}$	1.00	0.56	0.94	0.60	0.94	0.59	0.93
$s=2.0d$, $z=25\text{ cm}$, $b=7.5\text{ cm}$	1.00	0.60	0.98	0.62	0.99	0.66	0.97
Rigidity small $b=10\text{ cm}$	1.00	0.68	0.96	0.71	1.01	0.70	0.94
Zigzag, $b=5\text{ cm}$	1.00	0.86	0.93	0.75			
$s=4.0d$, $z=25\text{ cm}$, $b=7.5\text{ cm}$	1.00	0.89	0.94	0.79			
Rigidity small $b=10\text{ cm}$	1.00	0.86	0.91	0.79			



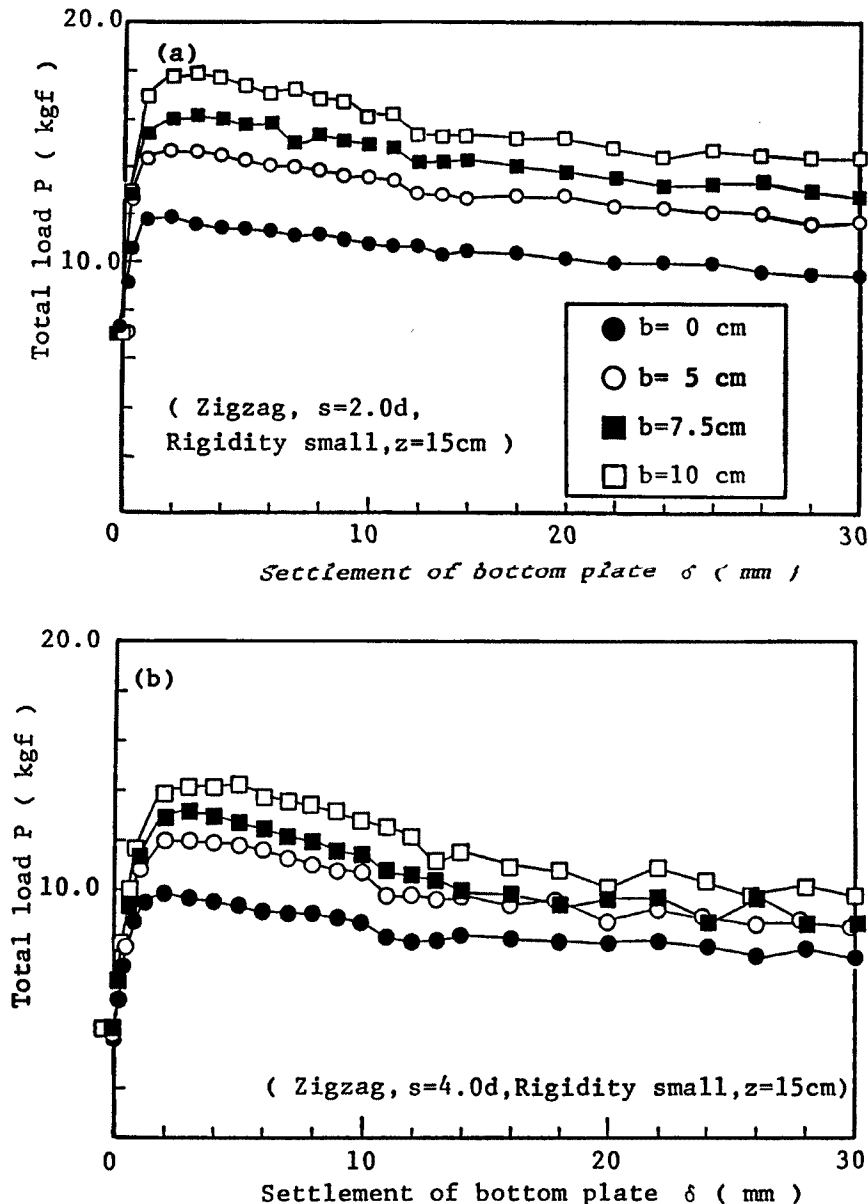


Fig. 18 $P-\delta$ curves of zigzag arrangement.
((a) $s=2.0d$, (b) $s=4.0d$)

(2) $s=4.0d$ の千鳥杭の場合は、同列間の杭中心間隔は $8.0d$ となり杭前面のアーチが形成されにくい
か、あるいはアーチができたとしても切れやすいのではないかと考えられる。

(2) 杭配置による違い

Fig. 19(a), (b) は $z=15\text{ cm}$ および $z=25\text{ cm}$ の場合の千鳥杭 ($s=4.0d$ ・ $b=10\text{ cm}$)・アーチ杭・二段階並列杭の全荷重比 λ と降下量 δ との関係を示したものである。全荷重比 λ とは千鳥杭にかかる全荷重を1とした場合のそれぞれの杭配列の全荷重の割合のことである。Fig. 19(a) から $z=15\text{ cm}$ の場合、 $\delta=5\text{ mm}$ 前後でアーチ杭・二段階並列杭とともに千鳥杭に比べ荷重が急激に減少している。 $\delta=5\text{ mm}$ は、並列杭ではアーチが切れはじめる降下量であり、これと同じくアーチ杭・二段階並列杭も $\delta=5\text{ mm}$ 付近でアーチが切れてしまい、抑止荷重が大きく減少してしまうと考えられる。しかし、千鳥杭は後列杭の抑止効果によ

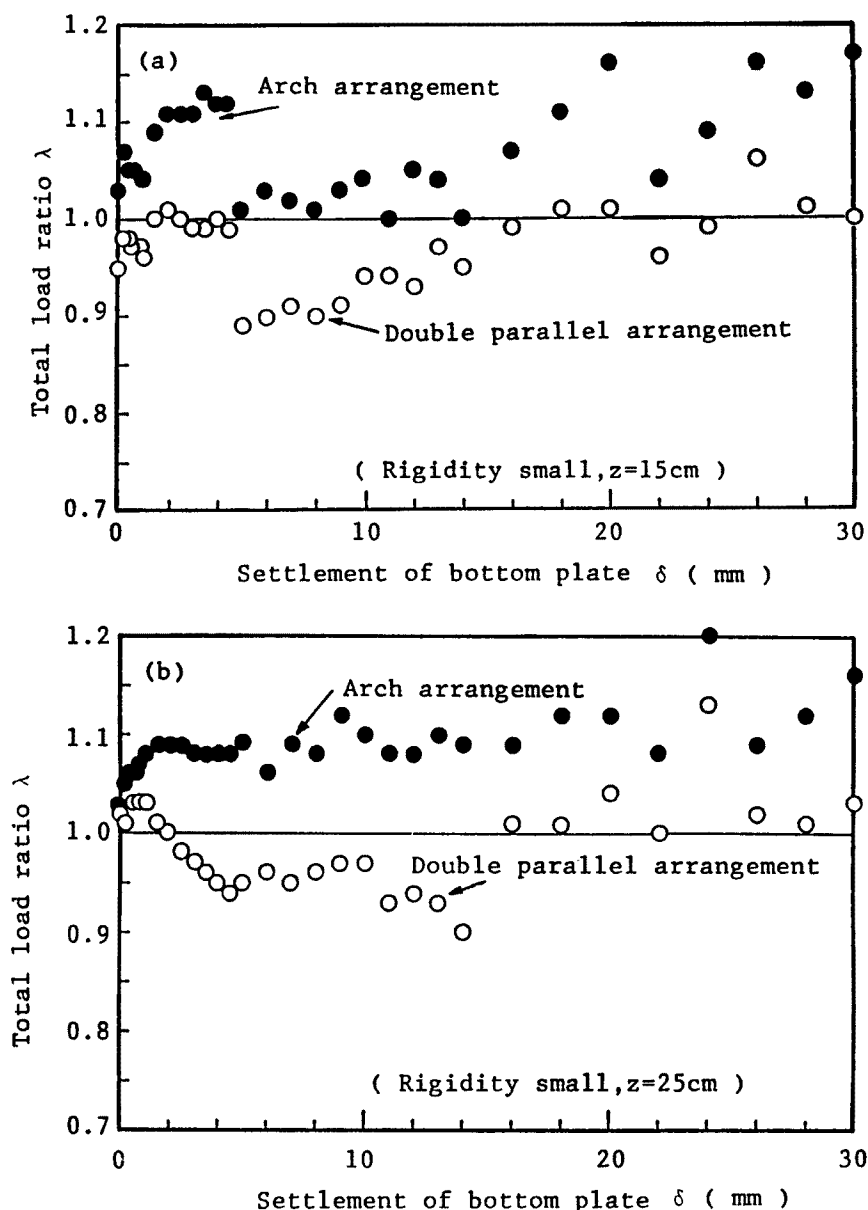
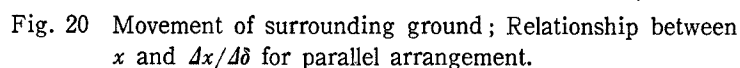


Fig. 19 Comparison between different arrangement of piles.
((a) $z=15$ cm, (b) $z=25$ cm)

り、 $\delta=5$ mm 以降でもアーチはまだ存在するか、切れたとしても後列杭がその荷重を抑えるために荷重は急激には減少しないと考えられる。

Fig. 19(b) の $z=25$ cm の場合、二段階並列杭では荷重の急激な減少は見られないものの、その抑止効果は千鳥杭より劣ると思われる。アーチ杭は $z=15$ cm の場合とは違い、全般にわたって千鳥杭より 10 %程度大きな荷重が作用し、その抑止効果は千鳥杭よりも大きい。(a) の結果と比較すると、土被りの大小により各配置の抑止効果は異なるが、千鳥杭以外の杭配置については地盤の変形状態、アーチ作用の有無などはっきり実験から検証していないので、ここでその抑止効果について早急に結論を出すことはできない。



ここでは、杭前面にアーチができることにより、どれだけの荷重が杭体に作用するかを推定する手法について説明する。

Fig. 20(a) に並列杭・ $s=4.0\text{ d}$ ・ $z=15\text{ cm}$ の地盤に埋めこんだ標点の位置を示す。各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、杭前面のアーチ位置が判明すると考え、以下の手順でアーチの形状を決定した。**Fig. 20(b)** は縦軸に標点の鉛直変位量 (x) を、横軸に $4x/\delta$ を取っている。 $4x/\delta$ は (鉛直変位増分)/(降下量増分) を表しており、たとえばある標点が $\delta=3\sim 5\text{ mm}$ の時 $x=1.0\text{ mm}$ からさらに 1.8 mm 鉛直に移動したとすれば $4x/\delta=1.8/(5-3)=0.9$, $x(o=5.0\text{ mm})=1.0+1.8=2.8\text{ mm}$ と計算される。図中黒丸・白丸・黒三角はそれぞれ $\delta=3, 5, 10\text{ mm}$ の時の $4x/\delta$ と x の関係をプロットしたもので、黒丸についている数字が (a) の各標点の番号に対応している。(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: 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点を見ると、●印が $x=3\text{ mm}$, ○印が 5 mm , そして▲印が 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 $4x/\delta$ に対しては●・○・▲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 $4x/\delta$ が 0.6 以下である点は杭体および杭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 は完全に同等の降下をする領域にある点である。特に 9, 15 番の標点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. 20(a)** のようなアーチの位置が推定できる。

Figure 1 consists of two diagrams, (a) and (b), illustrating the active load area for different arch types. Diagram (a) shows an isosceles triangle arch supported by two piles. A vertical dashed line from the apex to the base indicates the center. A shaded rectangular area, labeled 'Area of active load', is shown above the arch. Diagram (b) shows an equilateral triangle arch supported by two piles. A vertical dashed line from the apex to the base indicates the center. A shaded area, labeled 'Quasi-active load', is shown above the arch.

Fig. 21 Shape of arch for parallel arrangement.

Table 7 Acting load for parallel arrangement

Kinds of pile		Measured value	Estimated value	
Rectangular,	2.0 d	930 gf ($\delta=4.50$ mm)	880 gf	A
Rigidity small,	3.0 d	1220 gf ($\delta=2.00$ mm)	1250 gf	A
$z=15$ cm	4.0 d	1440 gf ($\delta=3.00$ mm)	1550 gf	A
	6.0 d	1740 gf ($\delta=2.50$ mm)	1980 gf	A
	8.0 d	1830 gf ($\delta=3.00$ mm)	1730 gf	$45^\circ+\phi/2$ failure
			2166 gf	A
Single pile		1590 gf ($\delta=3.50$ mm)	1730 gf	$45^\circ+\phi/2$ failure
Rectangular,	2.0 d	1590 gf ($\delta=1.50$ mm)	1490 gf	B
Rigidity small,	3.0 d	2170 gf ($\delta=2.00$ mm)	2120 gf	B
$z=25$ cm	4.0 d	2540 gf ($\delta=4.50$ mm)	2640 gf	B
	6.0 d	2990 gf ($\delta=5.00$ mm)	2920 gf	C
			3215 gf	B
	8.0 d	3430 gf ($\delta=8.00$ mm)	3330 gf	C
			3750 gf	B
Single pile		3530 gf ($\delta=8.00$ mm)	3190 gf	$\theta=69^\circ$ failure
			4410 gf	$45^\circ+\phi/2$ failure
Rectangular,	$z=10$ cm	790 gf ($\delta=2.00$ mm)	780 gf	A
Rigidity small,	15 cm	1220 gf ($\delta=2.00$ mm)	1220 gf	A
$s=3.0$ d	20 cm	1630 gf ($\delta=2.00$ mm)	1650 gf	B
	25 cm	2170 gf ($\delta=2.00$ mm)	2120 gf	B

A; Isosceles triangle arch

B; Equilateral triangle arch

C; Quasi-equilateral triangle arch

動によって受ける荷重は、荷重分担が同じであるとすると斜線の部分の2倍の領域の荷重が1本の杭にかかることになる。以上のように、2つのアーチを仮定し、杭周辺地盤の動きを写真撮影からとらえることにより、Fig. 20 と同じ手法でどちらのアーチ形状かを決定して、作用荷重の推定値を求めた。その結果を Table 7 に示す。表中測定値の値は右に示している降下量 δ 時、つまり最大荷重時の値であり、その時にアーチ効果がふるに発揮されていると仮定して推定値を求めた。備考の欄には Fig. 21 の2つのアーチのうちどのアーチで求めたか、またアーチ作用が無い場合は、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°) にすべり線が現れる等のコメントを記入してある。また擬似三角形アーチとは Fig. 21 の扇型をそのまま組み合わせた形である。表から並列杭の場合、土被り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) アーチのできかたに違いがでる。方形・並列杭・ $s=3.0$ d の z を $10 \cdot 15 \cdot 20 \cdot 25$ cm と変化させたケースから、 $z=15 \sim 20$ 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。

(2) 千鳥杭のアーチ作用の推定

並列杭の場合と同じく、千鳥杭、 $s=2.0$ d、 $z=15$ cm のケースの x と $4x/\Delta\delta$ の関係と標点の位置を Fig. 22(a), (b), (c) に示す。図はそれぞれ、 $b=5$ cm・ 7.5 cm・ 10 cm の場合に対応している。また、 x と $4x/\Delta\delta$ の関係の図中で、黒丸・白丸・黒四角はそれぞれ $\delta=3 \cdot 5 \cdot 10$ mm 時に相当している。(a)~(b) を比較してみると次のようなことが認められる。

(1) それぞれの図上の標点の動きは次の3つに分類される。

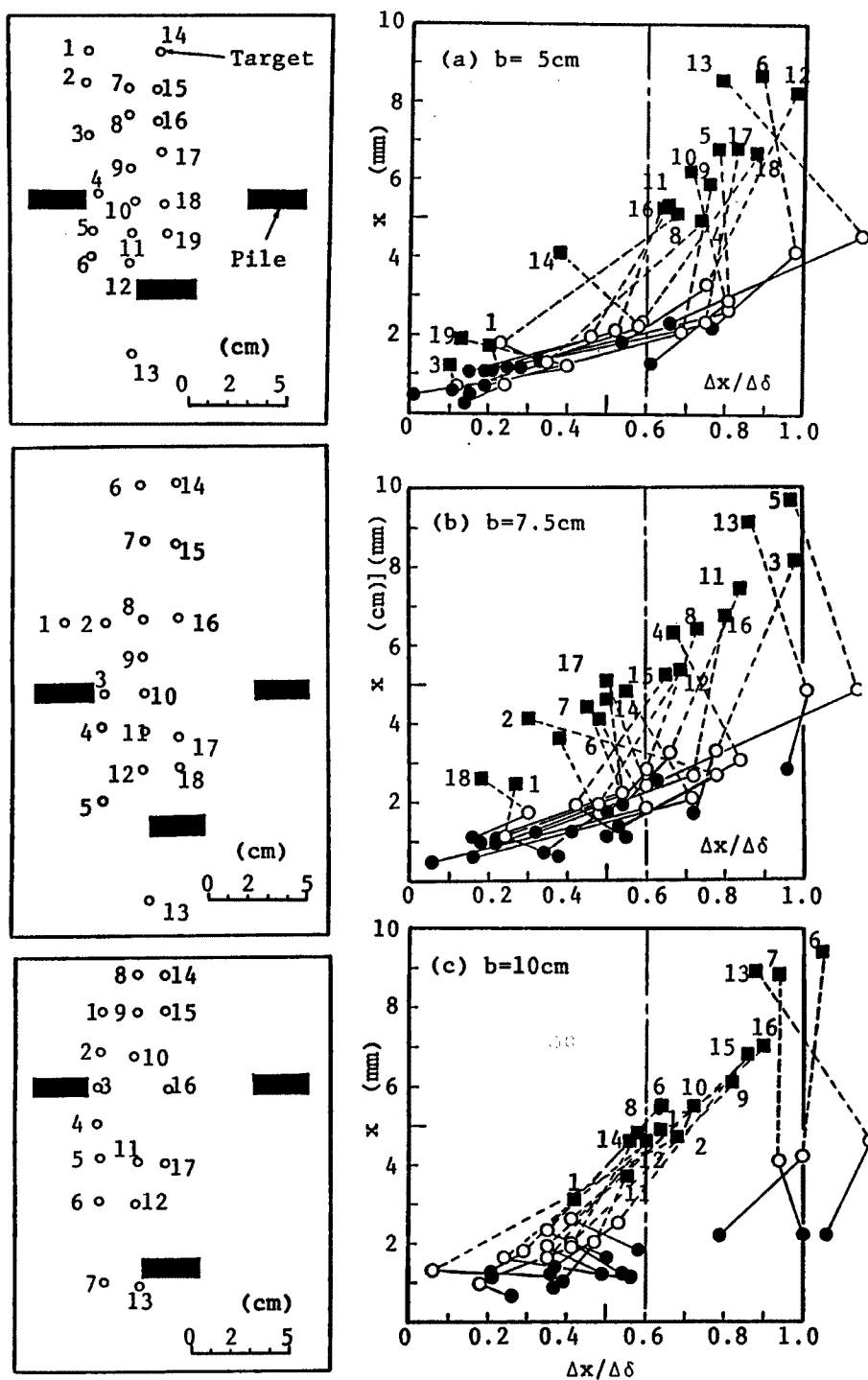


Fig. 22 Location of targets and relationship between x and $\Delta x / \Delta \delta$ for zigzag arrangement.
 ((a) $b = 5 \text{ cm}$, (b) $b = 7.5 \text{ cm}$, (c) $b = 10 \text{ cm}$)

- A ; く字型 ($(c) \cdot b=10$ cm)
 B ; 逆く字型 ($(a) \cdot b=5$ cm)
 C ; 混合型 ($(b) \cdot b=7.5$ cm)

- (2) く字型 ($b=10$ cm) は, $\delta=3$ mm 時は各点とも $\Delta x/\Delta \delta=0.35 \sim 0.6$ 程度だが, $\delta=5$ mm 時には逆に $\Delta x/\Delta \delta$ は左にシフトして小さくなる。このことから, この時点でもまだかなりアーチ作用が発揮されていると考えられる。
- (3) 逆く字型 ($b=5$ cm) は, $\delta=3$ mm 時は $\Delta x/\Delta \delta=0.1 \sim 0.3$ 付近に点が集まっているが, $\delta=5$ mm 時には (2) とは逆に $\Delta x/\Delta \delta=0.5 \sim 0.7$ 付近に移動する。このことは, $b=5$ cm の場合降下量が小さい時は, 前列杭との協同作用で抑止効果が顕著であるが, 降下量が増大すればその抑止効果は低下することがわかる。
- (4) 混合型 ($b=7.5$ cm) は, く字型の逆く字型が混在した形となっている。前列・後列杭間隔 b が A 型と C 型の間にあるので, これは妥当なことと思われる。

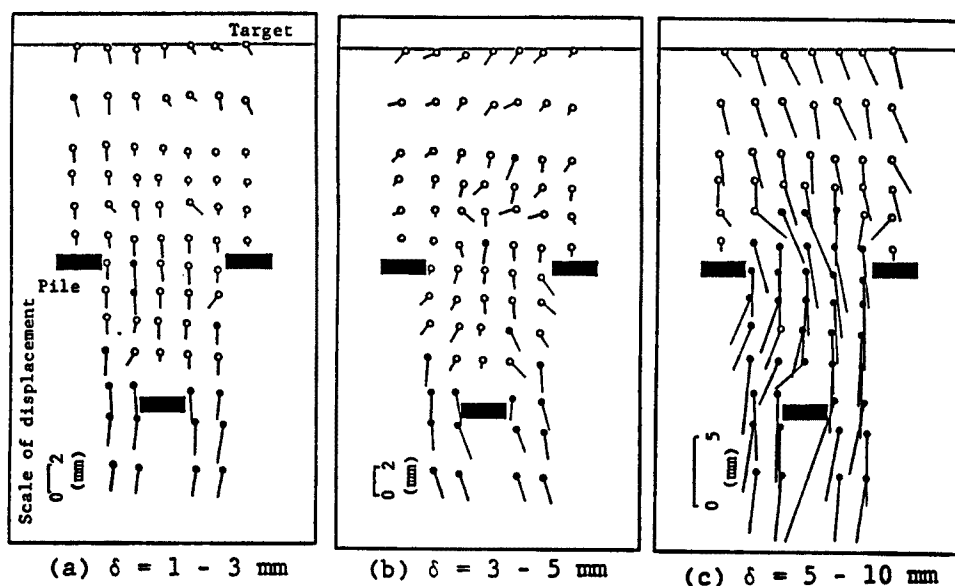


Fig. 23 Displacement vector of targets.
 (Zigzag arrangement, $s=2.0$ d, $z=15$ cm, $b=10$ cm)

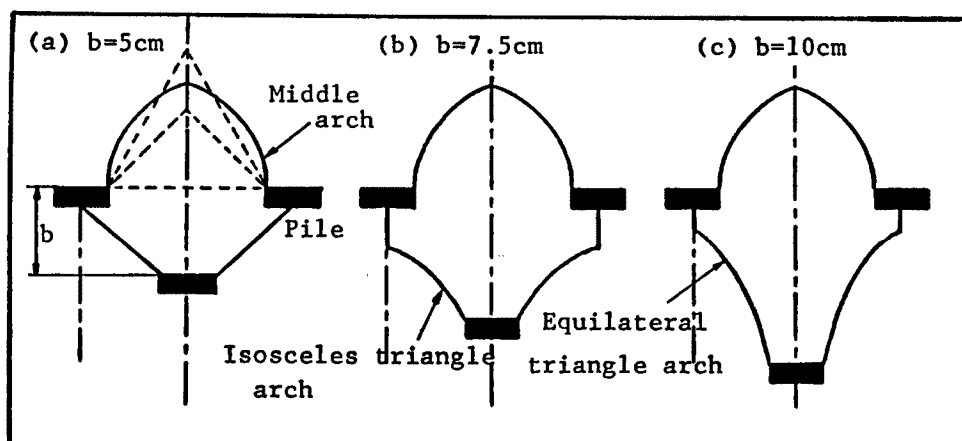


Fig. 24 Shape of arch for zigzag arrangement.

Table 8 Acting load for zigzag arrangement

Kinds of pile	Measured value	Estimated Value	
Rigidity small, $s=2.0 d$, $b=5$ cm	1490 gf ($\delta=5.00$ mm)	1465 gf	D
	722 gf	643 gf	Straight line
Rigidity small, $s=2.0 d$, $b=7.5$ cm	1410 gf ($\delta=4.00$ mm)	1465 gf	D
	938 gf	929 gf	A
Rigidity small, $s=2.0 d$, $b=10$ cm	1440 gf ($\delta=10.00$ m)	1465 gf	D
	1027 gf	1019 gf	B

A ; Isosceles triangle arch

B ; Equilateral triangle arch

D ; Middle arch (between A and B)

(5) 3つのケースを比較すると、2段階のアーチ作用により最も地盤の動きを抑止するのは $b=10$ cm のケースと考えられる。地すべり抑止杭としての千鳥杭は一般に $b=10$ cm のケースと同じく正三角形形状をなすように打設されているが、本実験結果からその有効性が裏付けられる。

次に、この3つのケースの標点の変位ベクトルの一例を Fig. 23 に示す。Fig. 23 は $b=10$ cm のケースであるが、図中の (a), (b), (c) はそれぞれ $\delta=1\sim 3$ mm, $\delta=3\sim 5$ mm, $\delta=5\sim 10$ mm 時の変位ベクトルである。図中黒丸はその時点で $\Delta x/\Delta \delta$ の値が0.6以上の点である。これらの図をもとにして、各ケースのアーチの形状を前列中心杭荷重が最大時について Fig. 24(a), (b), (c) のように推定した。

これらのアーチ形状は次のようなことを仮定して推定している。

- (1) 千鳥杭は2段階のアーチ効果が期待できる。
- (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にくく、 b が大きくなるにつれて形状の大きなアーチが形成される。
- (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. 24 のアーチ形状から各杭に作用する荷重を推定した結果を Table 8 に示す。

以上 Table 7, 8 をまとめて横軸に推定値、縦軸に測定値をとってプロットしたものが Fig. 25 である。図中横線でシンボルを結んであるものは2種以上の推定値を用いたことを示している。図から並列・千鳥・単杭とも推定値は測定値をかなりうまく表していると考えられる。

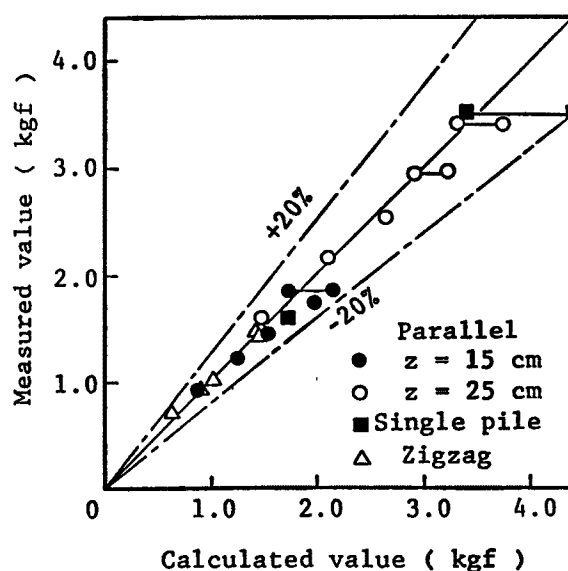


Fig. 25 Relationship between measured and calculated value for acting load on pile.

5. お わ り に

本研究は、地盤材料にアルミ棒積層体を用い、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った並列杭は、杭前面のアーチ効果によりすべりを抑止する。
- (2) 並列杭では、各杭の荷重分担はほぼ同じである。
- (3) 一般に、並列杭では杭中心間隔が大きくなるほど各杭の受け持つ荷重は大きくなるが、土被りの影響も受ける。
- (4) 杭前面のアーチ効果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、降下床の降下量により変化する。
- (5) 方形杭には円形杭よりも0～25%程度大きな荷重が作用する。
- (6) 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時 ($\delta=0\sim5\text{ mm}$) にのみ見られ、杭剛性が大きいほど作用荷重は大きい。
- (7) 土被りが大きくなると、杭体に作用する荷重のばらつきは大きくなる。
- (8) 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。
- (9) 千鳥杭、アーチ杭、二段階並列杭の抑止効果は、アーチ杭>千鳥杭>二段階並列杭の順となるが、杭周辺地盤の動きをさらに検討する必要がある。
- (10) 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。
- (11) 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。

以上得られた結論は、室内模型実験という限られた条件の下で得られたものであるため、実際の現場に適用するためには相似則・地すべりの発生機構・3次元的なすべり形態などの諸問題について詳しく検討しなければならない。

今後、さらに本研究を発展させるためには、杭周辺地盤の挙動のより詳細な検討、Fig. 3(b) のすべり土塊の変形モード（圧縮領域に打設された杭）についての抑止機構の解明、粘着力を持った地盤材料による実験、3次元的なすべり形態に対する研究、実験の現象を説明できる数値解析手法（流れ関数・ジョイント要素を用いた FEM 解析）の開発などが必要である。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所地すべり研究室：地すべり実態（その3），土木研究所資料，土研資料1204号，1977, pp. 1～58.
- 2) 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, 1968, pp. 25～31.
- 3) 福本安正：地すべり防止杭の挙動に関する実験的研究（1），地すべり，Vol. 12 No. 1, 1975, pp. 20～24.
- 4) 福本安正：地すべり防止杭の挙動に関する実験的研究（2），地すべり，Vol. 12 No. 2, 1975, pp. 38～43.
- 5) 市山正一・有水恭一：地すべり防止杭に関する模型実験，道路公団研究所報告，1976, pp. 199～211.
- 6) 市山正一・有水恭一：地すべり防止杭に関する模型実験，道路公団研究所報告，1977, pp. 320～336.
- 7) 大野陸雄ほか：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，1984, pp. 41～49.
- 8) Fukuoka: Earth Pressure in the Sliding Soil Mass, Proc. 4th Int. Conf. and Field Workshop

- on Landslides, 1985, pp. 245~250.
- 9) 山田剛二ほか：地すべり・斜面崩壊の実態と対策，山海堂，1971, pp. 141~173.
 - 10) 伊藤富雄・松井保：クイ間隔を考慮した地すべり防止グイの設計法に関する提案，土と基礎，Vol. 26 No. 6, 1978, pp. 31~36.
 - 11) Ito and Matsui: Methods to Estimate Lateral Force Acting On Stabilizing Piles, S & F, Vol. 15 No. 4, 1975, pp. 43~59.
 - 12) 足立紀尚・木村亮：受働杭の水平土圧に関する模型実験，第21回土質工学研究発表会概要集，1986, pp. 1213~1214.
 - 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，1986, pp. 29~36.
 - 14) 村山朔郎・松岡元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 187 号，1971, pp. 95~108.