

地すべり抑止杭の抑止機構に関する研究

足立 紀尚・木村 亮
多田 智・宮本 和男

STUDY ON THE PREVENTIVE MECHANISM OF LANDSLIDE STABILIZING PILES

By Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA, Satoshi TADA and Kazuo MIYAMOTO

SYNOPSIS

Walls of piles have often been used as a stabilization device for landslides. In this study, a series of two-dimensional laboratory model tests have been carried out to help elucidate the preventive mechanism of these piles against landslides. Namely, a pile or group piles were installed in a model ground made by piling aluminum rods up on a bottom plate of trap door. The load acting on each pile and the ground movement around the piles were then measured when moving the bottom plate downward uniformly. The following five items were taken notice of in this paper: 1) The arching effect in front of piles and the preventive mechanism, 2) The effect of the cross section of piles and the pile width, 3) Loading tests controlled by air pressure, 4) Strain condition of the ground surrounding the piles, and 5) Behaviour of Two-tiered arrangement piles.

1. はじめに

わが国の地すべり災害の歴史は古く、鎌倉時代までその記録が残っているほどで、世界でも有数の地すべり発生国である。現在でも地すべり危険地帯が数多く指定されており、地すべりをいかに防止するかは重要な問題である。一般に、地すべり防止対策工法として、抑制工とともに地すべり抑止杭による抑止工法が適用されている。この地すべり抑止杭は、地盤と杭の相互作用により杭体に作用する水平荷重が定まり、挙動が複雑なため未解明の点を数多く残している。

一般に地すべり抑止杭を設計する際には次の点を考慮しなければならない¹⁾。

- (1) 杭は、前面にも後面にも力を伝え得るように、地中に埋設する杭とボーリング孔壁間の空き空間をモルタルなどで充填する。
- (2) 杭本体がせん断や曲げで破壊してはならない。
- (3) 杭周辺地盤が破壊してはならない。
- (4) 杭と杭の間の土塊が中抜けを生じてはならない。
- (5) 杭打設地点から下方の斜面が杭地点で分断し、単独にすべり出してはいけない。

筆者らは、上記の留意点を念頭におきながら、現在までに地盤材料にアルミ棒積層体を用いた簡単な室内模型実験により地すべり抑止杭の抑止機構の解明を試みた²⁾。ただし、これらの実験では上記(5)については考慮していない。すなわち、(5)では地すべり抑止杭は地すべり下部の圧縮領域に打設しなけ

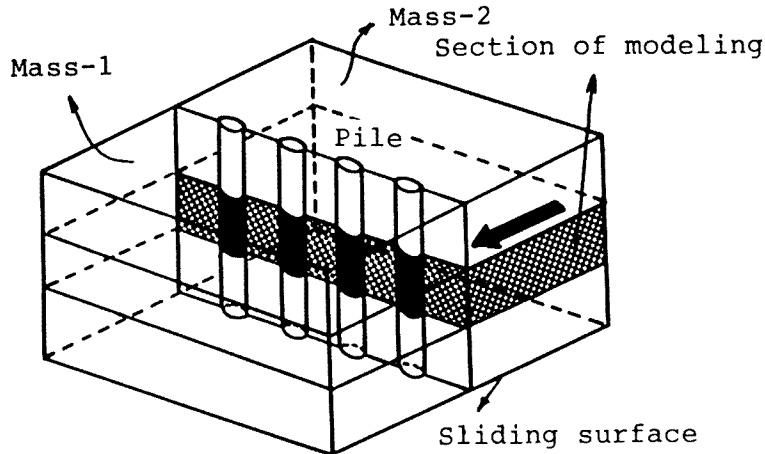


Fig. 1. Modeling of landslide stabilizing piles.

ればならないと規定されているが、本実験の対象としている抑止杭は引張り領域に打設した杭である。つまり、Fig. 1 示すように杭打設地点から下方の斜面（土塊一）が杭地点で分断したとき、並列杭および千鳥杭が杭上部の地盤（土塊一）をどのように抑止するかを検討している。

本報告では、文献2)の実験をさらに発展させ、以下に示す5つの点にポイントをおいて、地すべり抑止杭の抑止機構の解明を試みた。

- (1) 杭前面のアーチ作用と抑止機構
- (2) 杭幅、杭形状が抑止機構に与える影響
- (3) 空気圧制御による載荷実験
- (4) 杭周辺地盤のひずみ分布
- (5) 2杭間に段差がある場合のアーチ作用

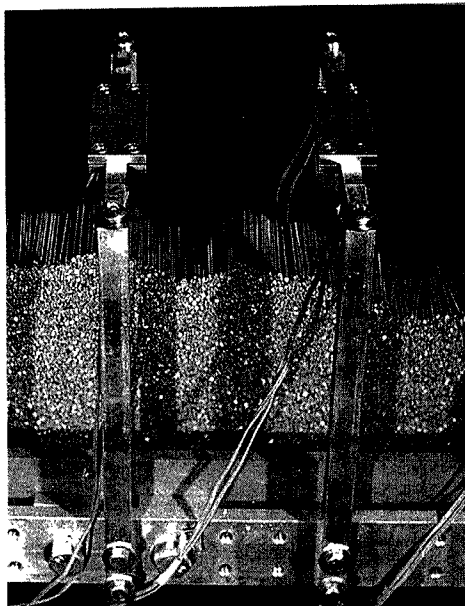


Photo. 1. Model piles and fixed condition.

2. 実験の概要

2.1 実験の特徴

実験装置および手法の詳細については、文献2)を参照されるとして、ここでは模型実験の特色について述べる。本実験は砂質地盤を対象とし、地すべり土塊の引張り領域に打設した抑止群杭の挙動を調べたもので、実験の特徴は以下のようにまとめられる。

- (1) Fig. 1 に示すように、杭を含む地すべり土塊を2次元モデルとしてとらえ、地盤をアルミ棒積層体 ($\phi = 30^\circ$, $c = 0 \text{ kgf/cmf}$) で表現した。
- (2) 地盤を約 90° 回転させ、地すべり土塊の移動現象を底板が一様に降下する降下床で表現した。
- (3) Photo. 1 に示すように、ひずみゲージを用いてモデル杭自身に簡易ロードセルの機能をもたせ、モデル杭に作用する荷重を計測した。
- (4) 地盤に標点を埋め込み、写真撮影によって地盤の

動きを測定した。

(5) 種々のパラメータを変化させ、数多くの実験が容易にでき、現在までに160ケースを実施した。

上記(1)に示したように、地すべり土塊中 Fig. 1 のハッチの部分だけを取り出し、2次元モデルとして杭周辺地盤の変形状態と、杭に作用する土圧に着目して実験を実施しており、深さ方向の杭体に作用する土圧分布および土塊の移動状態等の3次元的效果はここでは考慮していない。

2.2 実験のパラメータ

実験のパラメータは、Fig. 2 および Table 1 に示すように隣合う杭の中心間隔 s 、アルミ棒積荷高さ z 、杭幅 d 、杭形状、杭剛性、杭配置である。以下に各パラメータについて詳しく説明する。

(1) 杭間隔

Fig. 2 に示すように、隣合う杭の杭中心間隔 s と、千鳥杭の場合の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、 $d=2\text{ cm}$ の場合は $s=3.0\text{ d}$, 6.0 d , 9.0 d , 12.0 d , $d=3\text{ cm}$ の場合は $s=4.0\text{ d}$, 6.0 d , 8.0 d , $d=5\text{ cm}$ の場合は $s=2.4\text{ d}$, 3.6 d , 4.8 d である。前列・後列杭間隔 b は 5 cm , 7.5 cm , 10 cm の3種類である。

(2) アルミ棒積荷高さ

地すべり作用外力表現するパラメータとして、杭中心から積層体表面までの高さを取り z と表記する。千鳥杭の場合 z は、Fig. 2 に示すように最前列杭からの高さとした。このパラメータに関しては $z=15\text{ cm}$, 25 cm の2種類を基本としたが、地すべり作用外力が大きい場合を検討するために、後述するようにアルミ棒積層体上部に空気圧制御による載荷装置を設置した実験も実施した。

このアルミ棒積荷高さ z は次の2つの状態を表現するパラメータと考えている。

(a) 地すべり土圧の大小

(b) 同一抑止杭で地表面に近い部分か、深い部分か

(a) では z を大きくすると抑止すべき荷重が大きくなり、逆に小さくな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 z の大小と杭剛性の大小により、深い部分で地すべり外力大、浅い部分で地すべり外力小のモデルができる。

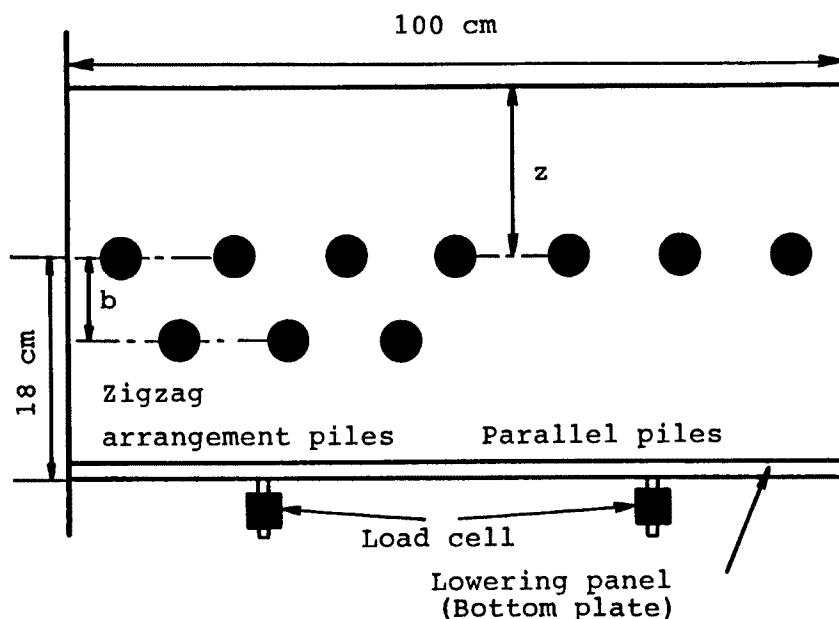


Fig. 2. Sketch of experimental apparatus and parameters.

Table 1. Parameters of experiment

Parameters	
Spacing between pile center lines	Spacing between piles (s) $s=2.0d\sim12.0d$ Spacing between front and back piles (b) $b=5, 7.5, 10\text{ cm}$
Landslide external force	Height of assembled aluminum rods (z) $z=10\sim40\text{ cm}$
Cross section of piles and pile width (d)	Rectangular pile $d=2, 3, 5\text{ cm}$ Circular pile $d=3\text{ cm}$
Rigidity of piles	4 different kinds Ratio of bending rigidity $1:3:8:15$
Arrangement of piles	Parallel piles, Zigzag arrangement piles and Two-tiered arrangement piles

(a) Rectangular pile

(b) Circular pile

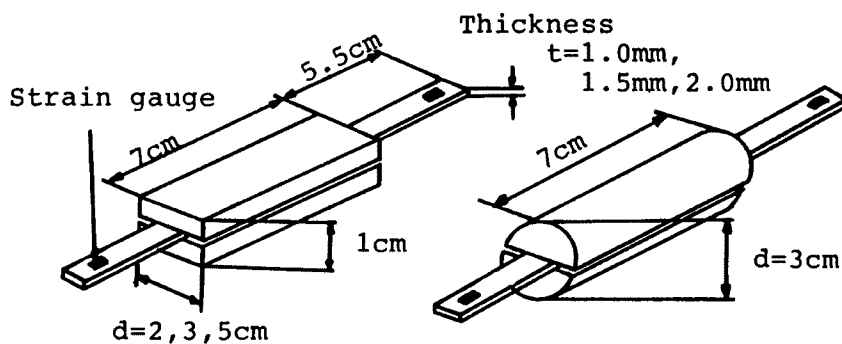


Fig. 3. Model piles.

(3) 杭幅および杭形状

Fig. 3 に示すように、杭幅がそれぞれ 2 cm, 3 cm, 5 cm の方形断面の杭（方形杭と略称）および、直径が 3 cm の円形断面の杭（円形杭と略称）の 4 種類である。方形杭の杭幅を変化させることにより、地盤材料であるアルミ棒の粒径と杭幅の相対的な大きさの違いが、地すべり抑止杭の抑止効果に与える影響を調べることができる。

(4) 杭剛性

杭体にはさみこまれた板ばねの剛性は、材質、厚さによって 4 種類に分かれる。荷重～変位曲線から求めた曲げ剛性の比は、 $1:3:8:15$ である。以下それぞれ剛性小、剛性中、剛性大、剛性特大と略称する。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, 0.04 mm/kgf である。本実験においては、特に剛性中および剛性特大について実験を行った。

このパラメータは杭本体の剛性の大小、さらに同一抑止杭において深い部分にあるのか、浅い部分にあるのかを示すものである。つまり、剛性が強くなるほど変形が小さいので、同一杭においてすべり面に近く、深い部分を表すことになる。

2.3 実験手順

実験の手順の概略を以下に示す。

- (1) 地盤の均一性を保つため所定の高さ z までアルミ棒を積んだとき、杭の作用荷重が計算上の土被りによる作用荷重にほぼ等しくなるようにする。その後、アルミ棒先端に 1 cm 四方の方眼紙をつけた標点を埋め込む。
- (2) 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、併せて標点の写真撮影を行う。
- (3) 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測定する。

3. 実験結果と考察

本実験は同じ実験を再現性のチェックのために 3 回行ったが、その再現性は良好であった。以下実験値は 3 回の実験結果の平均値で表す。

3.1 杭前面のアーチ作用と抑止機構

文献 2) の結果より、地すべり抑止杭の杭前面にはアーチが存在し、抑止機構とアーチ効果とは密接に関係していると結論づけられた。一般に、砂質地盤内のアーチ作用に関しては Terzaghi³⁾、村山・松岡⁴⁾、Wang & Yen⁵⁾ らの研究があるが、Fig. 4 を参照して並列杭前面のアーチの形成の過程について考察する。

Fig. 4 の杭間の粒子 A、B、C、D に着目すると粒子 D は降下床の降下とともに同様の降下をする。粒子 D が下方へ移動するのでその上方の粒子 B、C も粒子 D に引きずられるようにして下方へ移動しようとする。しかし、粒子 A は降下量が小さい ($\delta = 0 \sim 1 \text{ mm}$) 間は降下床と同様の降下をしようとするが、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同士手をつなぎように結び付き、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 まで迅速に情報を伝達するということと、隣合う粒子の力の伝達だけではなく、図に示すような内側からアーチを支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同士で手を結べないか、あるいは全く杭の存在に気がつかず下方へ移動するわけである。

アーチ形状に関しては従来の実験²⁾より、標点の変位ベクトルをもとに 2 種類のアーチ形状が推定されている。すなわち、アルミ棒載荷高さ z が 20 cm 以上では正三角形をベースとしたアーチ、それ以下では 2 等辺三角形をベースとしたアーチが形成される。本報告ではこの結果の妥当性を検証するために、杭前面のアルミ棒積層体に標点を埋め込み四角形要素に分割し、その標点の変化からそれぞれの四角形要素のひずみを内挿した。すなわち、四角形要素のひずみが小さい場合にはその要素の各節点は一様に降下しているか、あるいは降下が抑えられている要素である。また、ひずみが大きい要素は各節点の変位がばらばらで、すべり線に沿ってすべりを起こしていると考えられる要素である。これよりアーチ部分にあたる要素は、ひずみが大きいと考えられ、このことからアーチ形状を推定した。

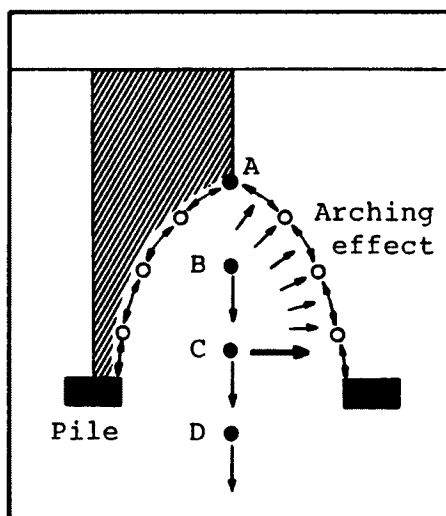


Fig. 4. Arching effect in front of piles.

Fig. 5 は、方形並列杭, $s=4.0d$, $z=25\text{ cm}$, $d=3\text{ cm}$, 剛性中のケースの各要素の主ひずみの分布を示したものである。ただし、主ひずみの圧縮、引張りの区別はつけていない。 $\delta=0\sim1\text{ mm}$ のときは、各要素とも主ひずみ分布はばらばらである。しかし、 $\delta=1\sim3\text{ mm}$ になると杭間をベースとした正三角形の辺上の要素の主ひずみが大きくなり、またこの方向もほぼアーチに沿った方向となっている。つまり、この部分にアーチが形成されているのではないかと推定される。さらに $\delta=3\sim5\text{ mm}$ となると、杭直上の要素が回り込みを始め、その部分の主ひずみがかなり大きくなっている。それに対し、杭間の要素の主ひずみは小さくなってきている。つまり、要素の各節点が均等に降下しており、アーチが切れ始めていると考えられる。アーチが消滅していると思われる $\delta=7\sim10\text{ mm}$ の主ひずみ分布を見てみると、 $\delta=3\sim5\text{ mm}$ 時と同様に杭直上部の要素は回り込みを起こしており主ひずみは大きい、その他の要素の主ひずみはかなり小さくなっている。このことからこの降下量では、各節点がほとんど一様に降下していると考えられる。以上主ひずみ分布の結果から、このケースでは正三角形アーチが形成されていると推定するのは妥当といえる。

3.2 杭幅による作用荷重の違い

文献2) では、杭幅 $d=3\text{ cm}$ の方形並列杭前面のアーチ効果について考察を行った。Fig. 6 は、現在までの実験結果をもとに、降下床の降下量 δ と並列群杭の中心の杭に作用する荷重 H との関係を模式的に

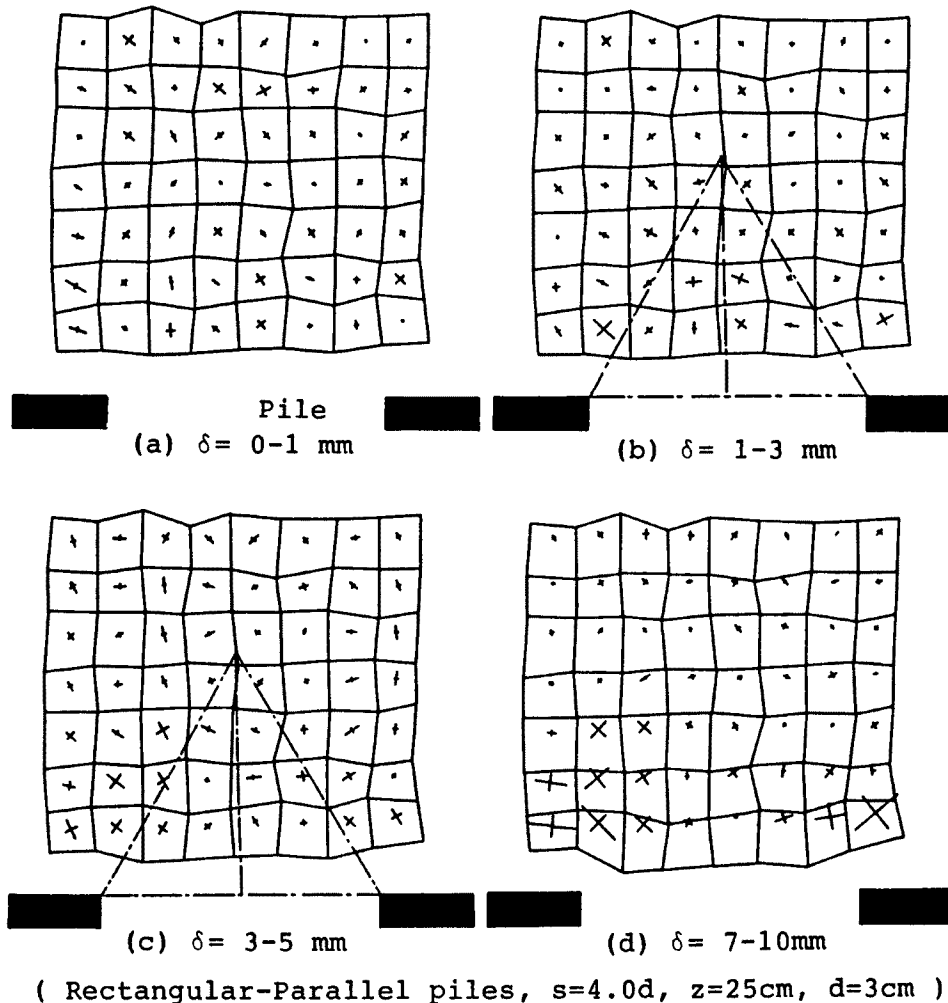


Fig. 5. Strain distribution in front of Parallel piles.

描いた図である。この図から以下のような知見を得た。

- (1) 並列群杭の中心杭に作用する荷重 H は、降下床の降下量 $\delta = 0$ mm においては、どの杭間隔でも計算上の初期作用外力に近い値を示しているが、 δ の増加により急増する（領域 a）。しかし、 $\delta = 3 \sim 5$ mm 時（領域 b）で最大荷重をとった後は H は徐々に減少する（領域 c）。
- (2) 杭中心間隔 s が離れているほど H は大きくなり、単杭が最大となる。この場合単杭とは積層体の中心部に杭を 1 本だけセットした杭配置である。
- (3) δ が 10 mm を越えると、杭中心間隔 s が 8.0 d 以上の挙動は単杭の挙動と同じようになる。
- (4) どの杭間隔でも一旦減少した H が、再び増加するような現象がみられる（領域 d）。

以上のような結果に対して、本研究では杭幅が上記の結果に対して影響を及ぼすかどうかを検討するために、杭幅 $d = 2$ cm, 5 cm の

方形杭で同一の実験を実施した。Fig. 7 (a), (b) はそれぞれ $d = 2$ cm, 5 cm の場合の中心杭荷重 H と降下量 δ の関係を示したものである。図から、 $\delta = 0$ mm においては杭にかかる計算上の初期作用外力 ($d = 2$ cm の場合は 525 gf, $d = 5$ cm の場合は 1313 gf) に近い値を示しているが、 δ が増加していくに伴い H は急増し、 $\delta = 2 \sim 5$ mm 時に最大荷重をとり以後徐々に減少していく。また、 $\delta = 10$ mm を越えると H の変動が激しくなる。また杭中心間隔が大きくなるほど作用荷重が大きくなるといった、前述した $d = 3$ cm の結果と同一の結果が得られている。よって $d = 2$ cm, 3 cm, 5 cm という杭幅の範囲では、アルミ棒の粒径と杭幅の相対的な大きさの違いは抑止効果に影響を与えないことが明らかにされた。

3.3 適正杭中心間隔の検討

前節の Fig. 7 のように流動土塊を並列群杭で抑止する場合、杭の単位長さ当りの許容支持力と杭間隔が問題となる。例えば、Fig. 7 (b) の $d = 5$ cm の場合、杭の許容支持力が 4.5 kgf とすると、杭間隔を 4.8 d 程度にしておけばすべりを抑止することができるが、もし許容支持力が 4.0 kgf であると 4.8 d では杭は破壊し、3.6 d 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・杭体の許容支持力とが密接に関係している⁶⁾。そこで Fig. 7 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. 8 に示す。Fig. 8 は $d = 3$ cm, $z = 25$ cm のケースである。

$$\text{抑止率 } \eta = \frac{\text{群杭一本当りの抑止力}}{\text{単杭の抑止力}}$$

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一本当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一本当たりとしては最大値を取るの、その荷重が杭の許容支持力より小さければ、 $1 - \eta$ は極限荷重に対する並列群杭一本当りの余力の割合を示す。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

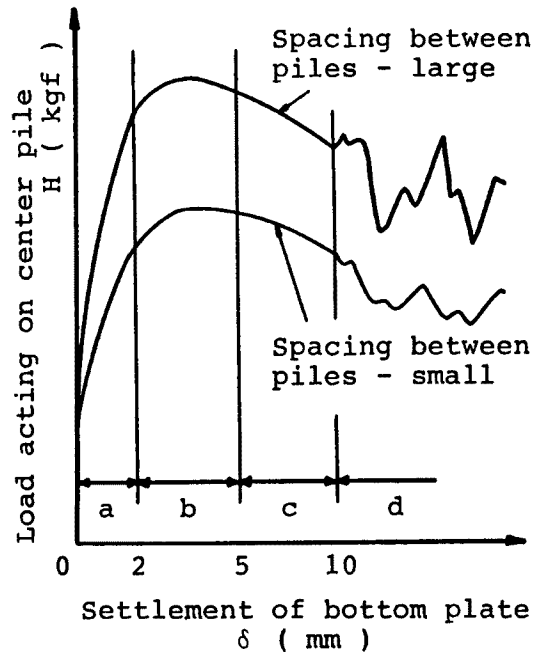
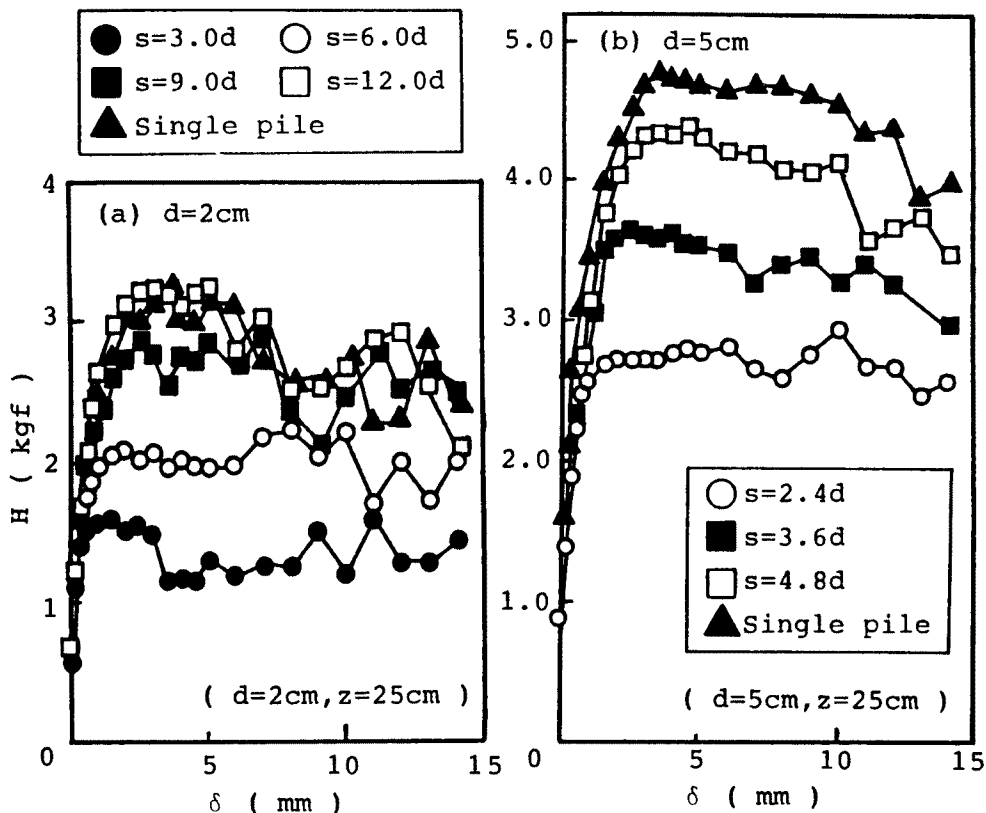
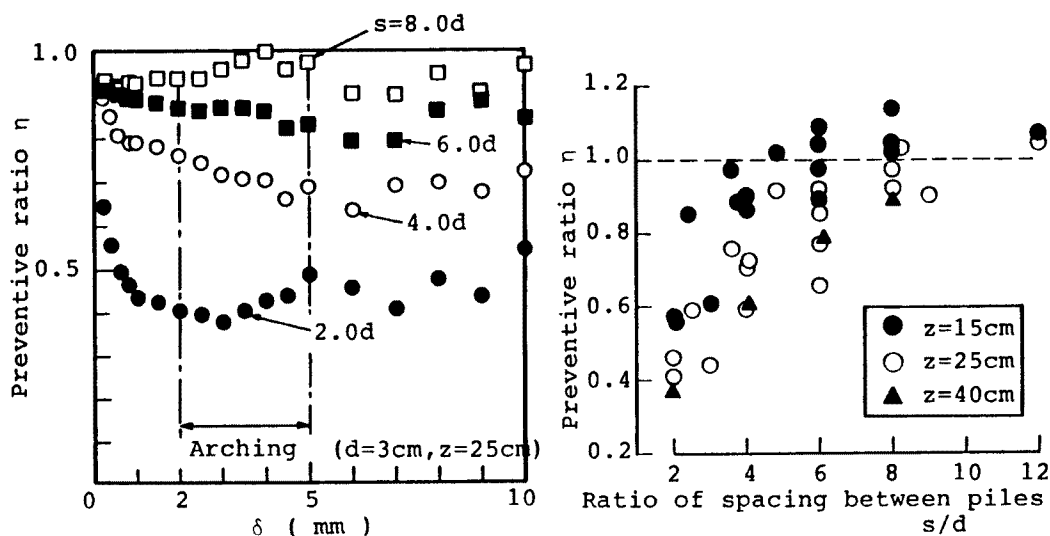


Fig. 6. Typical figure between load acting on central pile (H) and displacement of bottom plate (δ).

Fig. 7. $H\sim\delta$ curves of Parallel piles (pile width $d=2\text{ cm}$ and 5 cm).Fig. 8. Preventive ratio η ($d=3\text{ cm}$, $z=25\text{ cm}$). Fig. 9. Relationship between preventive ratio (η) and ratio of spacing between piles (s/d).

パラメータとして $\eta \sim (s/d)$ 関係を示すと Fig. 9 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、図から杭中心間隔比が狭いほど残存抑止力は大きく、8.0 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。

3.4 杭形状による作用荷重の違い

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 0～15% 程度小さい²⁾。これは主に円形杭の場合、杭の形状からアーチの足場になるところが不安定でアーチができにくいことに原因がある。そこで円形杭に形成されるアーチの足場を安定させ、また杭と土粒子の粘着を強め土の回り込みを防ぐ目的で、円形杭に粘着力を付けた実験を行い、杭に作用する荷重の変化を調べた。

粘着力を付けるためには 2 種類の粘着力の両面テープを用いた。このテープの粘着力の強さを調べるために予備実験を行ったが、その接着強さは、じゅうたんなどを接着する強粘着力テープ（以下粘着力強と略称）の方が、紙などを接着する弱粘着力テープ（以下粘着力弱と略称）の 2.5 倍であった。これらのテープを円形杭の回りに貼り付け実験を実施し、円形杭に作用する荷重と比較した。なおテープの幅は粘着力強が 3 cm、粘着力弱が 5 cm である。

Fig. 10 は杭中心間隔 $s = 6.0 d$ の、降下量 δ と並列群杭各杭に作用する荷重の合計（全荷重 P と略称）との関係を示したものである（ $z = 25$ cm, 剛性中）。粘着力弱、強ともにアーチが形成される $\delta = 0 \sim 5$ mm の範囲では破線で結ばれた円形杭に比べ大きな荷重が作用している。これは杭に粘着力をつけることにより、杭周辺のアルミ棒の流動が阻止されアーチの足場が安定し、アーチが形成されやすくなっているためと考えられる。さらに Fig. 11 は、横軸に降下量 δ 、縦軸に $z = 25$ cm, 剛性中の $d = 3$ cm の方形杭に作用する中心杭荷重を 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 $s = 4.0 d$ 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。粘着力による杭周囲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。特に粘着力強の円形杭では、その近傍のアルミ棒は全く動かず、杭近傍の地盤の変形を止めれば、その抑止効果は大きいと考えられる。実際の現場では杭とボーリング孔壁間の空き空間は、モルタルなどで充填されており、その妥当性が上記の結

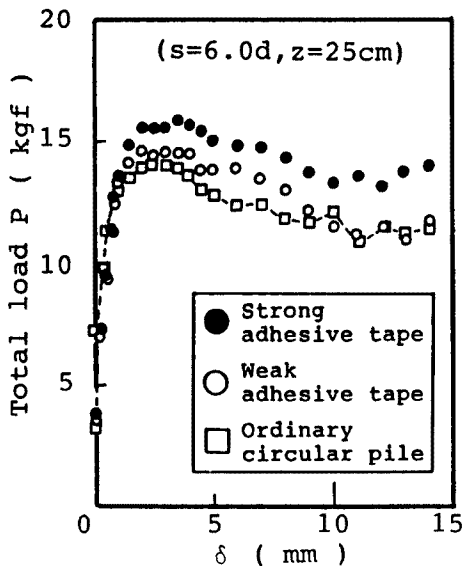


Fig. 10. Load acting on circular piles with adhesive tape.

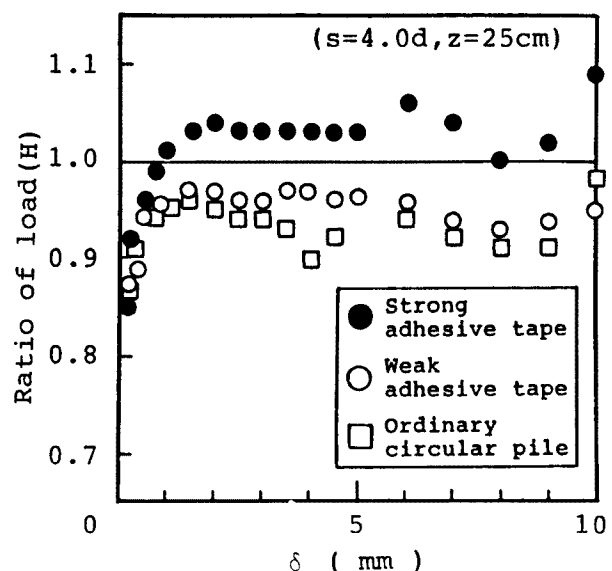


Fig. 11. Adhesive effect between piles and surrounding ground.

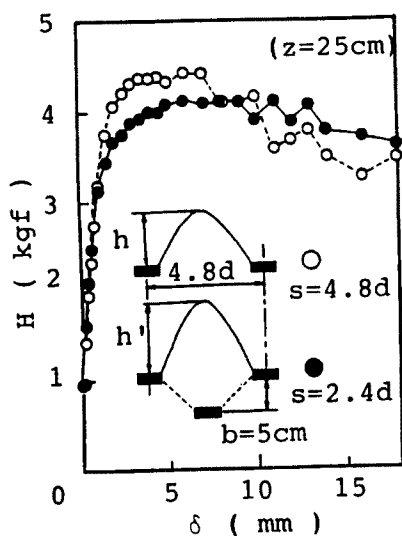


Fig. 12. Difference of load acting on center pile (H) between parallel and Zigzag arrangement.

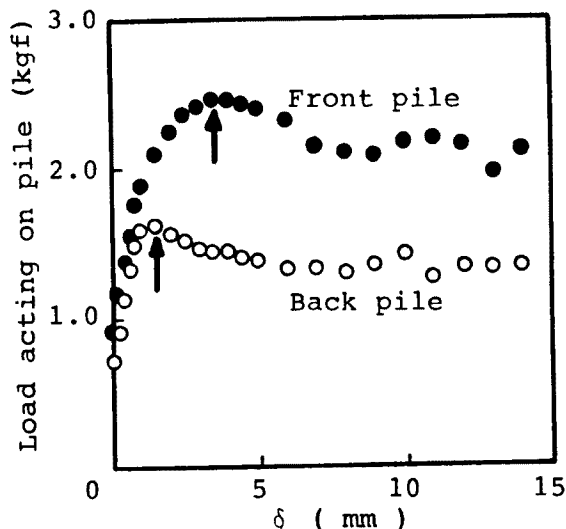


Fig. 13. Double-arch on Zigzag arrangement piles.

果から検証される。

3.5 千鳥杭の前列、後列杭の挙動

文献2)において、“地すべり土塊の引張り領域に打設した千鳥杭は、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が、前列杭と後列杭との間隔によりその効果は異なる。”という結果が得られている。本節では千鳥杭の前列杭と後列杭の関係について検証を行う。

Fig. 12は $z=25\text{ cm}$, $s=2.4\text{ d}$, $d=5\text{ cm}$, $b=5\text{ cm}$ の千鳥杭の前列杭に作用する荷重と $s=4.8\text{ d}$ の並列杭の中心杭荷重 H を比較した図である。これによると $\delta=0\sim10\text{ cm}$ 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Fig. 12のように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わけである。

また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. 13は前列各杭の作用荷重の推移を示したものである（ $z=25\text{ cm}$, $s=2.0\text{ d}$, $d=3\text{ cm}$, $b=10\text{ cm}$ ）。図から降下床の降下と共にまず始めに後列杭前面にアーチができ、 $\delta=1.5\text{ mm}$ で最大荷重をとる。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。

3.6 空気圧制御による載荷実験

一般にアルミ棒積層体の鉛直応力はFig. 14 (a)に示すように三角形分布をなす。本研究は地すべり土塊中の杭の水平抵抗を検討するモデル実験であるが、地すべり斜面を約 90° 回転しているために重力の影響をどうしても無視できない。その欠点を補うために、積層体上部から空気圧制御で載荷する実験を実施した。空気圧制御で載荷した場合、杭に作用する荷重の分布はFig. 14 (b)のようになり（空気圧を A_p とする）、アルミ棒積層体上部と下部との作用外力の比が小さくなり、重力の影響をかなり小さくすることが可能になる。以下空気圧制御による載荷実験に用いたモデル杭はすべて方形杭、 $d=3\text{ cm}$ である。

ここで空気圧制御による載荷実験の手順について述べる。まず、杭前面より 22 cm アルミ棒を積み上げ、アルミ棒積層体上部にPhoto. 2に示すゴム製のエアバックをのせる。そしてPhoto. 3のように載荷装置を設置し、エアバックを上部、両側面とも鉄板で拘束することにより完全に密封し、下部に荷重を伝達

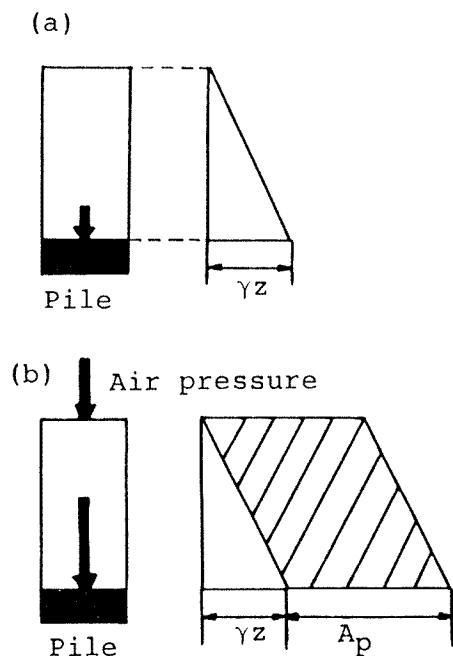


Fig. 14. Load acting on pile by using loading apparatus controlled by air pressure.

させる。次に降下床を降下量 $\delta = 0$ mm の位置にセットし、精度 0.01 kgf/cm^2 のプレッシャーゲージ (Photo. 2) を通して空気圧を上部から載荷する。空気圧は最大 0.5 kgf/cm^2 まで載荷することができる。空気圧を載荷した場合、圧力が均等にかかるかどうか重要であるが、並列杭の荷重分担を調べた結果、ほぼ均等に荷重が作用していることがわかった。本研究では空気圧を 0.1 kgf/cm^2 、 0.2 kgf/cm^2 の 2 種類載荷した。 0.1 kgf/cm^2 載荷の場合、これをアルミ棒積層体高さに換算すると 50 cm、また 0.2 kgf/cm^2 載荷の場合は、100 cm に相当する。

実験は空気圧を載荷する前に降下量を $\delta = 0$ mm にセットして開始しているが、空気圧を載荷することにより、降下床は 0.1 kgf/cm^2 載荷の場合で 0.07 mm、 0.2 kgf/cm^2 載荷の場合で 0.22 mm の降下が生じた。また降下床降下とともにエアバックの変形による影響は、抑止群杭を設置した場合は 8 mm 前後、杭を設置しない場合は 4 mm 前後まではあまり支障はないことが予備実験によって確認された。

Fig. 15 (a) (b) に空気圧 0.1 kgf/cm^2 、 0.2 kgf/cm^2 の場合の降下床降下による全荷重 P およびロードセル荷重 L_c の各実験の実測値を示す。これらのケースはすべて並列杭、 $s = 4.0 d$ の結果である。ロードセル荷重とは降下床下部に設置した 2 個のロードセル (Fig. 2 参照) に作用する荷重で、実験中常に $L_c + P = \text{const.}$ になることが望まれる。これらの図を見ると抑止群杭が受け持つ全荷重とロードセル荷重の合計は $\delta = 0 \sim 7$ mm 程度まではほぼ一定に保たれ、結果は良好であった。計算上の全荷重は、 0.1 kgf/cm^2 載荷で 121.5 kgf、 0.2 kgf/cm^2 載荷で 171.5 kgf であるが、この値よりも実験値は小さな値を示す。これは、降下床側面の摩擦、あるいはエアバックのすみが円形であるために圧力が伝わっていない部分があるためと考えられる。

Fig. 16 は $s = 4.0 d$ の並列杭の中心杭荷重 H と降下量 δ との関係、およびそのばらつきを z をパラメー

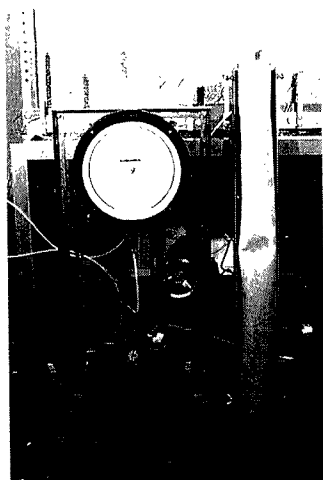


Photo. 2. Air bag and pressure gauge.

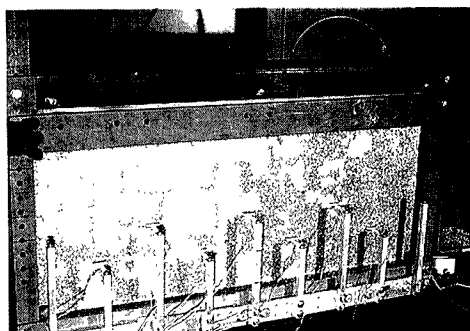


Photo. 3. Loading apparatus controlled by air pressure.

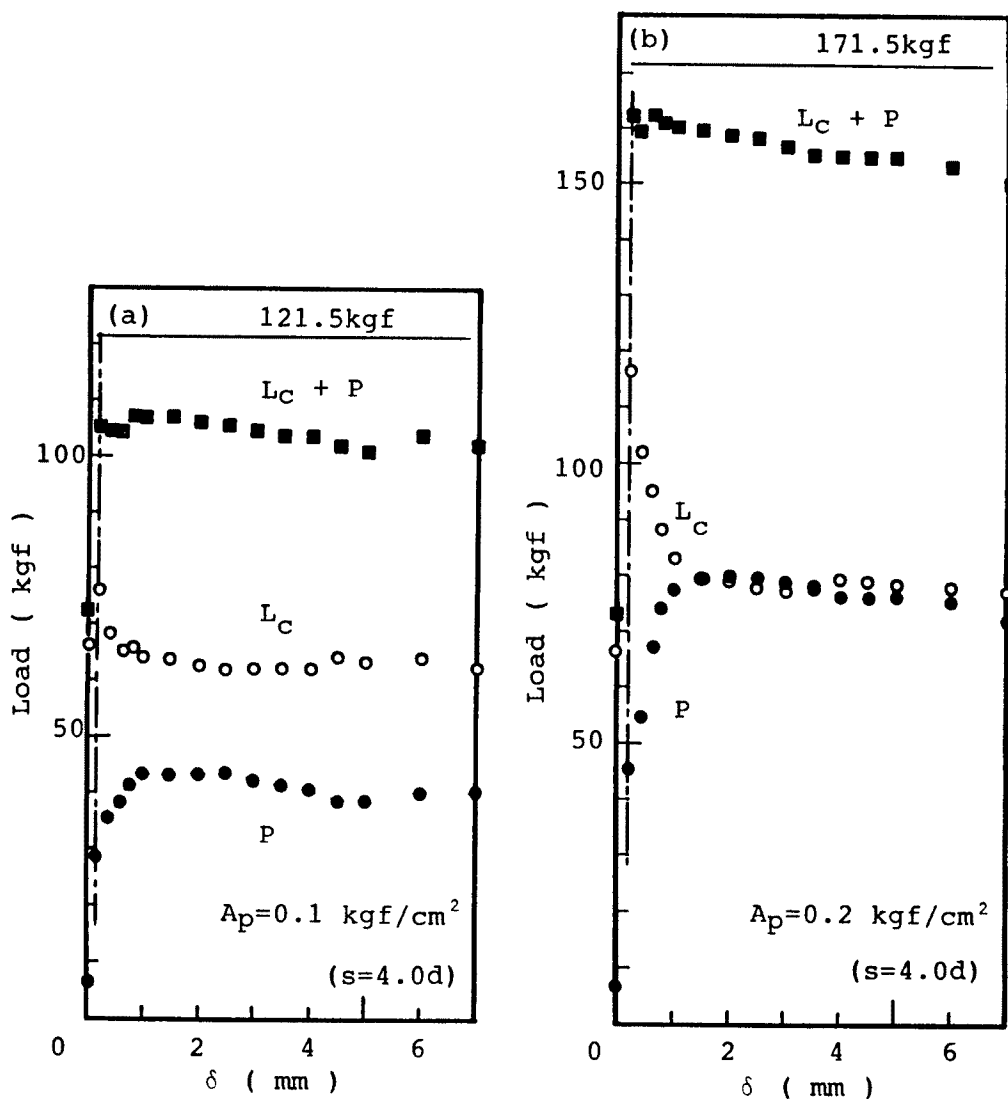


Fig. 15. Relationship among load acting on load cells (L_c), summation of load acting on each pile (P) and displacement of bottom plate (δ).

タとして示したものである。この図から空気圧を載荷した場合でも $z = 25 \text{ cm}$ のケースと同じように、降下量 δ が増加するにつれて中心杭荷重 H は急増し、 $\delta = 1 \sim 4 \text{ mm}$ 付近で最大荷重をとり、以後減少する傾向がみられる。ただし、ばらつきの程度は空気圧をかけない $z = 25 \text{ cm}$ のケースに比べて非常に大きい。

Fig. 17 は $A_P = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の杭中心間隔をパラメータとした中心杭荷重 H と降下量 δ の関係である。この図から杭中心間隔 s が大きくなるほど中心杭に作用する荷重は大きくなり、 $z = 25 \text{ cm}$ の場合と同様な結果が得られた。

以上の結果より、作用荷重の傾向から考えるとこのケースにおいても並列杭前面にはアーチが形成されていると考えられるが、今後さらに詳しい検討が必要である。

3.7 杭に段差がある場合のアーチ作用 (2本杭)

現在までに、並列杭および千鳥杭の前列杭および、後列杭の杭前面にはアーチ作用が発生し、それに

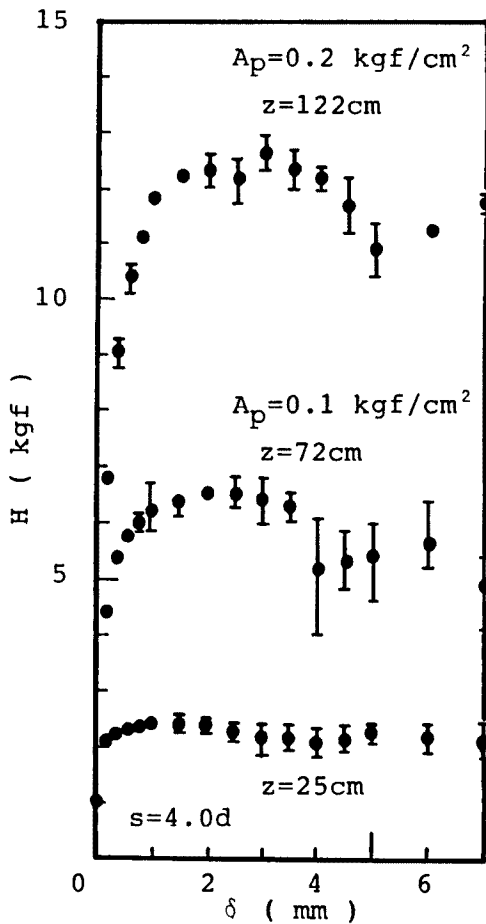


Fig. 16. $H \sim \delta$ curves and data scattering condition. ($s = 4.0 \text{ d}$).

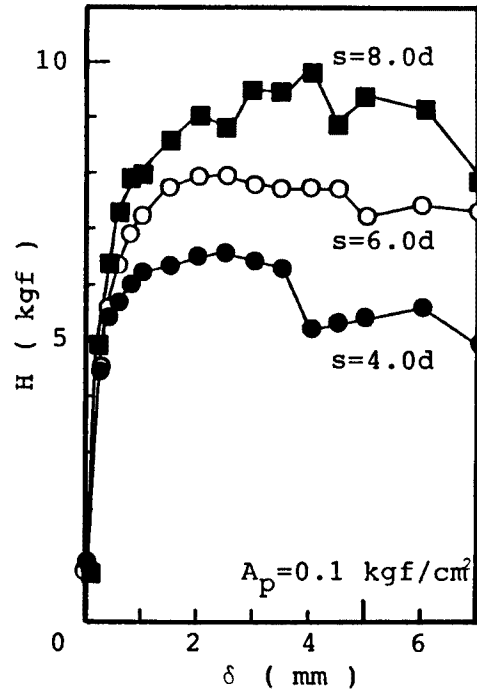


Fig. 17. $H \sim \delta$ curves ($A_p = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$).

よって地すべり土塊を抑止することが判明している²⁾。ところが千鳥杭のように、隣合う杭が並列状に並んでいるのではなく、段差のある場合にはアーチ作用が発生するのかどうかはまだはっきりとはわかっていない。そこでアルミ棒積層体に段差をつけた2本のモデル杭を建て込み、前列・後列杭間隔をいろいろ変化させて

この2本の杭間にアーチ作用が発生するかどうかを検証した。

Fig. 18 は、 $d = 3 \text{ cm}$ 、 $s = 4.0 \text{ d}$ 、 $z = 25 \text{ cm}$ 、前列・後列杭間隔 b が 5 cm のケースの変位ベクトル図である。図中黒丸の点は (標点の鉛直変位増分) / (降下床の鉛直変位増分) が 0.6 以上の点で、降下床と同等の降下をしていると考えられる点である。図から $\delta = 0 \sim 1 \text{ mm}$ 時は、2 杭間の標点は全体的に一樣に降下している。しかし、 $\delta = 1 \sim 3 \text{ mm}$ になるとかなり降下は抑えられ、前列杭と後列杭との間にアーチが形成されていると考えられる。このとき前列杭と後列杭に作用する荷重も Fig. 19 に示すようにほぼ最大荷重に近い荷重となっている。その後 $\delta = 3 \sim 5 \text{ mm}$ では後列杭上部での降下が大きくなっているが、これは1段目のアーチが切れ始めるということと、形成されていたアーチが左右対称ではなく右半分の辺の方が長く後列杭上部の標点が流動しやすい状態にあるためと考えられる。作用荷重を見ても前列杭、後列杭ともに減少していることがわかる。ところが $\delta = 5 \sim 7 \text{ mm}$ では再び降下が抑えられており、1段目のアーチよりもやや大きめのアーチが形成されているようである。このとき作用荷重も徐々に増加し始めている。その後、 $\delta = 7 \sim 10 \text{ mm}$ では、どの標点も真下に降下しておりアーチはほぼ消滅していると考えられる。また図は省略するが、 $b = 7.5 \text{ cm}$ のケースではアーチ効果は認められたものの、 $b = 10 \text{ cm}$ の場合は2杭間にアーチは存在しなかった。

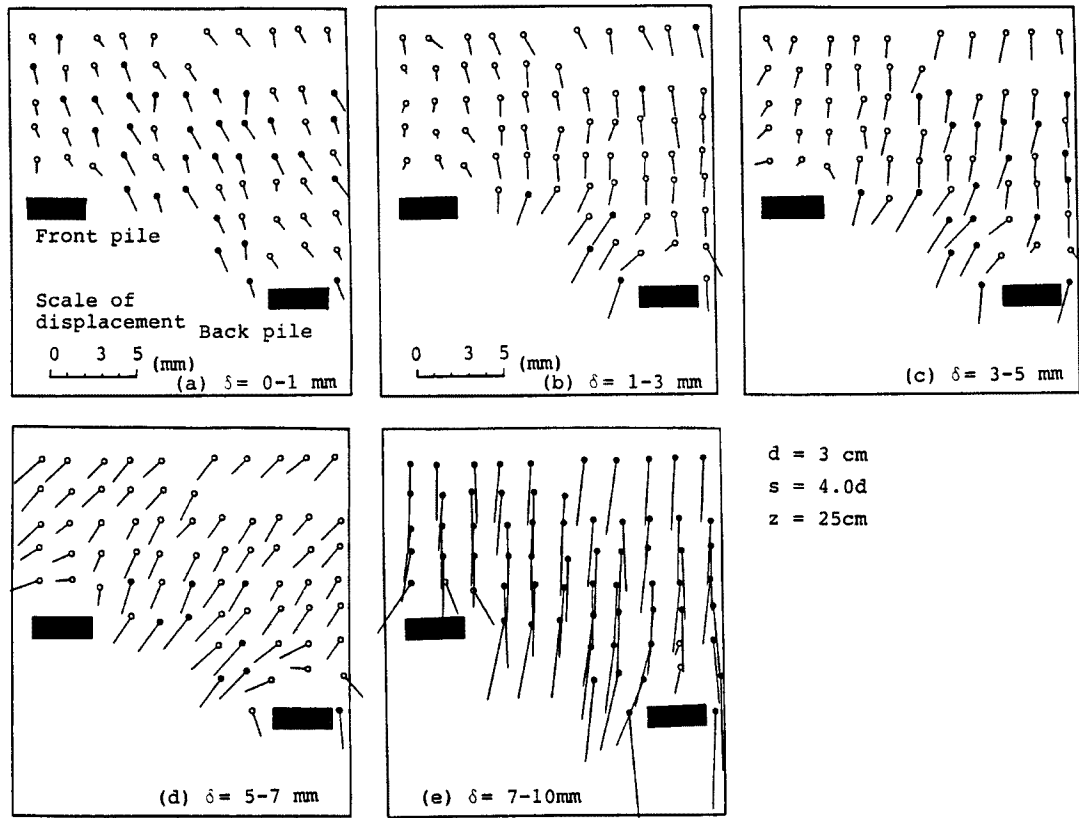


Fig. 18. Movement of surrounding ground on Two-tiered arrangement piles.

4. 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、主に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示す。
- (2) 円形杭に作用する荷重は、方形杭に作用する荷重よりも小さいが、円形杭に粘着力をつけ円形杭近傍のアルミ棒の流動を阻止すると、大きな抑止効果がみられる。

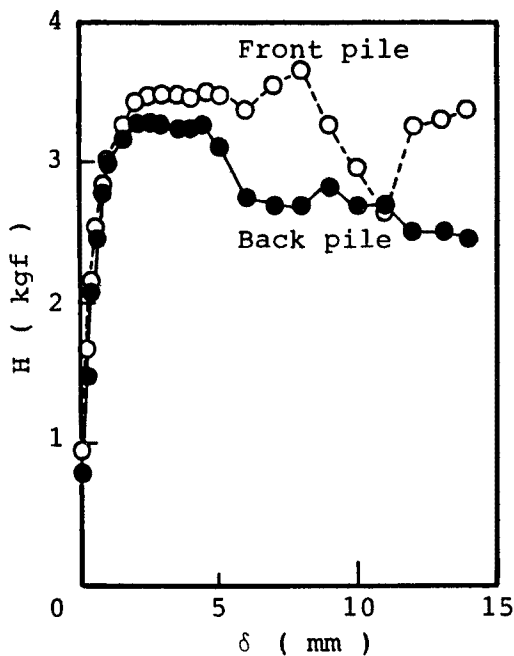


Fig. 19. Load acting on Two-tiered arrangement piles.

- (3) 杭幅が2～5 cmの間では杭幅によらず抑止機構は同じである。
- (4) 空気圧制御による荷重は、抑止群杭とロードセルではほぼすべての荷重が受け持たれ、抑止杭前面にはアーチ作用が発生しているようであるが、この点に関してはより詳しい検証が必要である。
- (5) 段差をつけた2杭間におけるアーチ作用については、前列・後列杭間が狭い場合はアーチが形成される。

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が、今後さらに、

- (1) 杭周辺地盤の挙動のより詳細な検討
 - (2) 圧縮領域に打設された杭に対する抑止機構の解明
 - (3) 粘着力を持った地盤材料による実験
 - (4) 3次元的なすべり形態に対する研究
 - (5) 実験の現象を説明できる数値解析手法の開発
- などを実施すれば現場への適用の可能性があると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：土砂災害の予知と対策，土質工学会，1985，pp.115～116
- 2) 足立紀尚・木村 亮・多田 智：地すべり抑止杭の水平抵抗に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，第30号，B-2，1987，pp.167～189
- 3) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, N. Y., 1943, pp.66～75
- 4) 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，1971，pp.98～108
- 5) Wang, W. & Yen, B.: Soil Arching in Slopes, Jour. of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.100, No. GTI, 1974, pp.61～78
- 6) Ito, T. & Matui, T.: Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles, Soils and Foundation, Vol.15, No. 4, 1975, pp.31～36