

# 地すべり抑止杭の挙動観測結果と解析について

## The Measured Behaviour and Analysis of Piles for Preventing Landslide

阿部和明\* 黒川国夫\*\* 木村誠一\*\*\*

Kazuaki ABE, Kunio KUROKAWA and Seiiti KIMURA

地すべり抑止杭の深さ方向のひずみ、変位、土圧の大きさと分布などの現場計測を2カ所で行った。これらの観測結果に基づき、杭の曲げモーメントおよびこれに作用する地すべり力の解析を行った。

その結果、抑止杭で最も一般的な2列に配列された抑止杭では、曲げモーメントは単杭を条件としたモデル、例えば、既存の指針に示されているようなモデル計算では杭の厳密な挙動は正確に解析できず、門型ラーメン構造モデルによる解析が計測結果とよく合致することがわかった。

さらに、杭の設計地すべり抑止力と杭に作用した実測地すべり力との比較、杭に作用する地盤反力と杭変位、曲げモーメントの関係について調査した。また、切土を伴う地すべり末端部の抑止杭では、杭に作用する応力分布は曲げモーメントが支配的である場合が多いことが示唆された。

《斜面安定；地すべり；地すべり抑止工；地すべり防止杭》

The magnitudes and distributions with depth of stresses, displacements and earth pressures on landslide prevention piles have been measured in 2 different sites. On the basis of measurements bending moments and landsliding force have been analyzed.

As a result, it has become clear on the most common prevention pile systems arranged in two lines that the measured values of bending moments agree well with the calculation results which analyzed with portal bracing structure models and the actual behaviour can not be analyzed accurately with single pile models, for example, as indicated in existing manuals.

Furthermore, comparison of landsliding force between calculation and measurement and also the relationship between subgrade reactions, displacements of piles and bending moments have been investigated.

It has been suggested on behaviour of piles accompanied with excavation in low area of landslide profiles that bending moments predominate often in distribution of the applied stresses.

Keywords: slope stability, landslide, prevention works against landslide, landslide prevention pile.

### 1. ま え が き

道路整備の進展に伴い地すべり地帯における道路築造が増してきており、地すべり対策として抑止あるいは抑

制工として種々の対策工が実施されている。その対策工のひとつに地すべり抑止杭工があって、近年富に採用実績が多くなってきている。

しかし、その設計法としては種々提案されているが、

\*基礎工研究室副室長 \*\*同室主任研究員 \*\*\*同室員

各設計法と実測値との関係は、地形地質および地すべり形態が多様なためか、比較的かけ離れた計測結果を示すことが多く、的確さの点では確立されたとはいえない面があり、設計精度の向上が必要である。

このため、地すべり地の既設および新設の抑止杭を対象として、挙動観測調査および室内実験などを通じて解析を行い、設計施工に関する基準化の可能性について検討を加えるとともに、あわせて地すべり地帯における重要構造物基礎の設計に資することを目的とし、調査・解析を行っている。

## 2. 計測調査個所の概要

### 2.1 A 個所

A 個所は一般国道 239 号の霧立峠付近に位置し、昭和 51 年度の道路改良工事の切土により、約幅 100 m、長さ 200 m、層厚 18 m の地すべりが発生したため、対策工として排土工、集水井工、遮水工などを先行し、昭和 59 年度に抑止杭工を実施している。

地質は中生代上部白亜紀の暗灰色泥岩が主体で、風化あるいは応力開放により粘土化しやすく、地層は  $N=10 \sim 28$  の風化部、 $N \geq 50$  の未風化部に分かれている。

設計としては、すべり面 (II) で現状安全率  $F_{s0}=0.95$  とし、計画安全率  $F_{sp}=1.1$  で  $P_R=190 \text{ tf/m}$  が得られ、クサビ杭 (曲げ杭) として設計されている (図-1)。

### 2.2 B 個所

B 個所は一般国道 237 号の平取町振内に位置し、過去に小規模地すべりを起こしている形跡が見られ、道路改良工に事よって地すべりを誘発させる可能性が推定された。その対策工として集水井、遮水工、抑止杭工を昭和 58 年度に実施している。

地質は新第三紀系の泥岩を基盤とし、その上に砂礫混じりシルトや粘土が不規則に堆積しており、堆積層は  $N=10 \sim 30$ 、基盤は  $N \geq 50$  の未風化層である。

設計は複合円すべりで現状安全率  $F_{s0}=0.95$  とし、計画安全率  $F_{sp}=1.2$  で  $P_R=202 \text{ tf/m}$  が得られ、せん断杭として設計されている (図-2)。

## 3. 抑止杭の構造および計測装置の概要

### 3.1 A 個所

A 個所の構造および計測器の取付詳細は図-3 であり、計器の種類は

#### ① ひずみ計

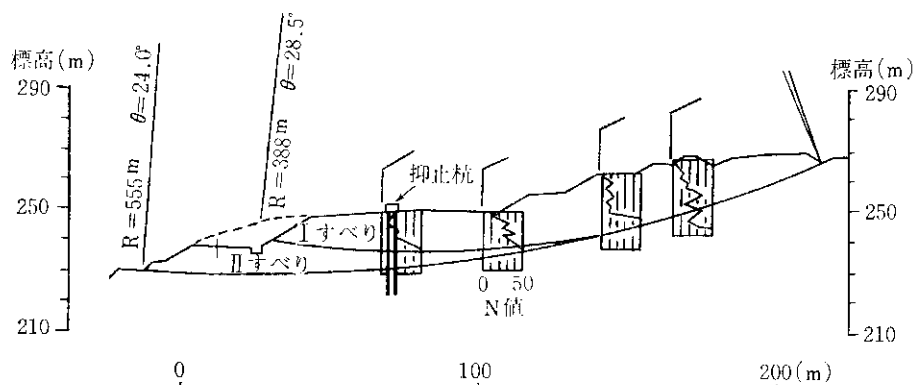


図-1 A 個所地すべり解析断面図

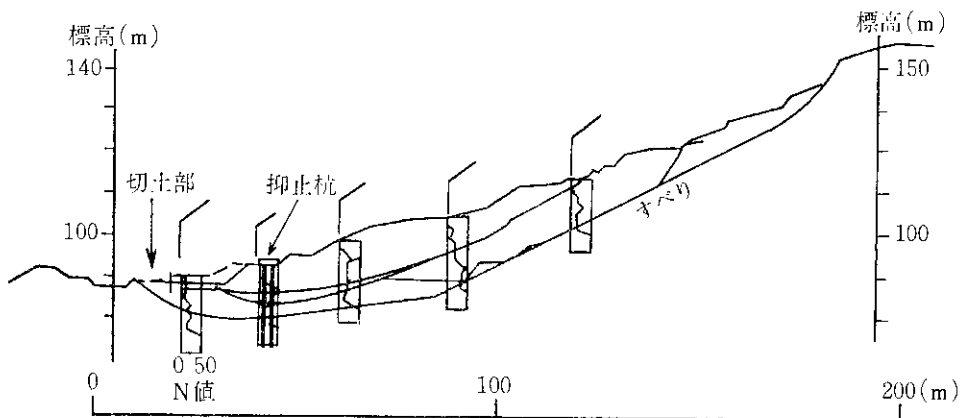


図-2 B 個所地すべり解析断面図

- ② ロードセル型土圧計
- ③ 水位計測用水圧計
- ④ 地中変位測定用パイプ (φ50.5 mm 地中, 杭内) を用いている。

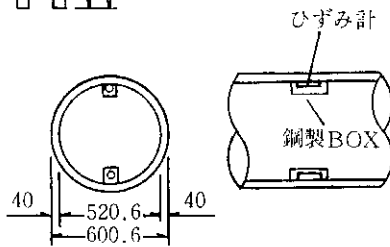
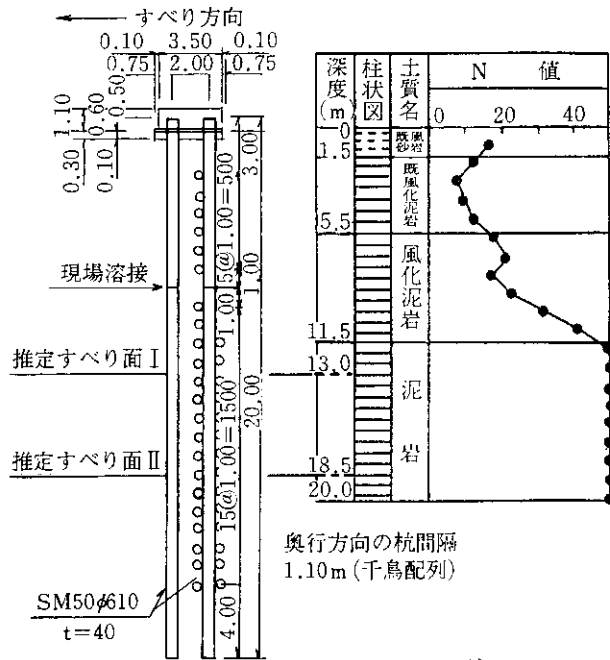


図-3

### 3.2 B 個所

B 個所の構造および計測器の取付詳細は図-4であり、計測器の種類は

- ① ペーパー型ひずみゲージ
- ② 土圧計

その他として、杭の断面性能に影響を与えるコードプロテクターが取付られている。

### 4. 施工方法の概要

施工方法は両者ともロックオーガーによる掘削を行い、発泡モルタル ( $\sigma_{ck}=40\sim80 \text{ kg f/cm}^2$ ) の先行あるいは同時充填によって杭の固定を行っている。ここで留意すべき点として、掘削の過程で掘削屑が粘土状になり、若干であるが孔壁に付着することであり、解析において一考を要する点である。

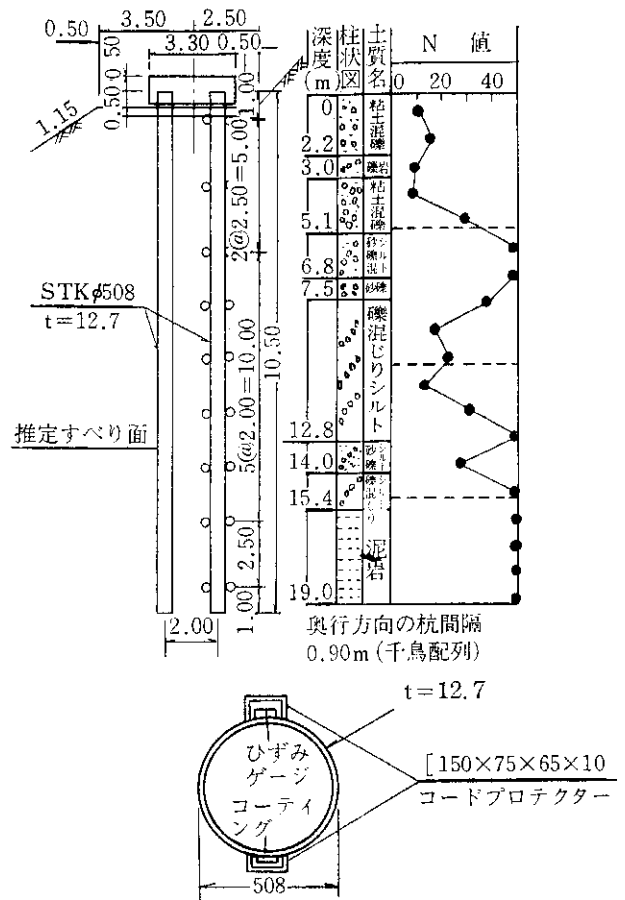


図-4

### 5. 計測結果について

#### 5.1 A 個所

観測を始めてからの経過は2年である。計器の設置当時 (工事中) は計測値の変動も大きかったが、その後ほぼ安定し、昨年1年間では変位量に1 cmの増加が見られたが、モーメントでは微増となっており、現在は (昭和61年11月) 目立つ変動がなく落ち着いた状態で経過してきている。

#### 5.1.1 抑止杭位置と変位パターンとの関係

抑止杭の施工位置は、工事着手前では土工指針に示される図-5の中部に位置し、施工後ではほぼ末端部に位置する結果となっている (図-1)。変位パターンとしては、ラーメン構造による杭頭拘束力の影響のためか末端、中部、頭部の変位パターンをあわせもつ複雑なパターンを示している (図-8)。

#### 5.1.2 地すべり抑止力、変位量、モーメントについて

地すべり抑止力は、計画安全率  $F_{s0}=1.10$  の  $P_r=208 \text{ tf/本}$  に対し、Iすべり面で計測結果の逆算値は  $P_r=50\sim60 \text{ tf/本}$  で落ち着いており、モーメントはひずみ計から  $M_{\max}=63 \text{ tm/本}$ 、変位量は鋼管杭内で  $Y_{\max}=5.8 \text{ cm}$ 、

地盤中(杭から山側に3m)で  $Y_{max} = 6.1\text{cm}$  が計測されている(図-7, 8)。

### 5.2 B 個所

観測を始めてからの経過は3年である。変位計測装置が設置されていないため応力だけになるが、計測値の変動形態はA個所とほぼ同様である。

#### 5.2.1 抑止杭位置と変位パターンの関係

抑止杭の施工位置は図-2で全体的に見ると末端部となるが、局部的に見ると杭位置付近のすべり面勾配および末端部の状態から図-5の中部に近いと考えられる。

#### 5.2.2 地すべり抑止力, 変位量, モーメントについて

地すべり抑止力は, 計画安全率  $F_{s0} = 1.20$  の  $P_r = 208\text{tf/本}$  に対し, 計測結果の逆算値は  $P_r = 11 \sim 15\text{tf/本}$  で落着いており, モーメントはひずみゲージから  $M_{max} = 12.5\text{tm/本}$  が計測されている(図-12)。

## 6. 解析について

杭変位および応力状態から, 地すべり推力および作用機構を解明する目的で, 種々の計算法を用いて解析を試みてみた。特にその中において, 最も一般的な道路土工指針式(クサビ杭)を代表させ解析結果を以下に述べる。

### 6.1 A 個所

#### 6.1.1 土工指針式(クサビ杭)による解析

土工指針式は単杭を条件として, モーメントおよび変位形状は図-6が基本的モデルである。しかし, 対象の

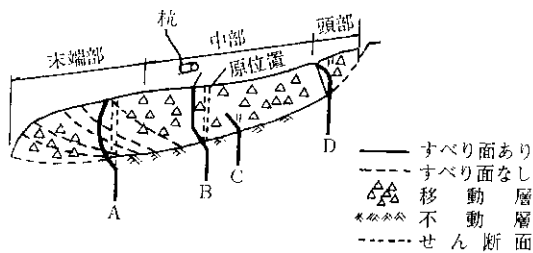


図-5 抑止杭位置と変位パターン概念図

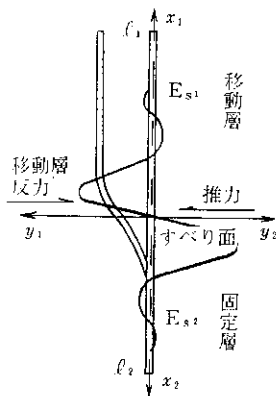


図-6 クサビ杭の計算モデル

構造は門形ラーメンであって, 厳密にはラーメン構造の影響が生じるが, 計算が繁雑となるため無視しうる程度の影響と考えて, 解析を行うものとした。

モーメント量を近似するように  $P_r$  を設定し計算したのが図-7である。この結果, 移動層では計算値に対し計測値が小さい, このことは移動層の拘束力が弱いことを意味している。

このため, 移動層の拘束力を弱く評価する意味で,  $\bar{N}$  値の調整(28→8.4)を試みた。その結果も  $M_{max}$  は近似するが, 移動層のモーメントは依然として約1/4の値が減少した程度で近似(図-7の③)させることができない。

この点を考察すると, 指針式は図-9(a)が計算モデルであって, 移動層は等速移動することが条件である。しかし, 当ケースは地盤および杭変位(図-8), でわかるように不等速移動であり, 図-9(b)のような形で逆に拘束力を与ええる必要があって土工指針式による解析は無理がある。

#### 6.1.2 ラーメンフレーム(変位法)による解析

ここでは, 非線形バネを考慮した解析法は複雑となるため, 図-10に示す門型ラーメンの計算モデルを考え, 計測値に近似させたシミュレーション計算の結果が図-11である。

図-11の①は計測値で, ②は計測値の変位とモーメントに近似させた逆算結果である(ただし, 厳密には荷重とバネは分布状態にあり, 逆算を容易にするため集中荷

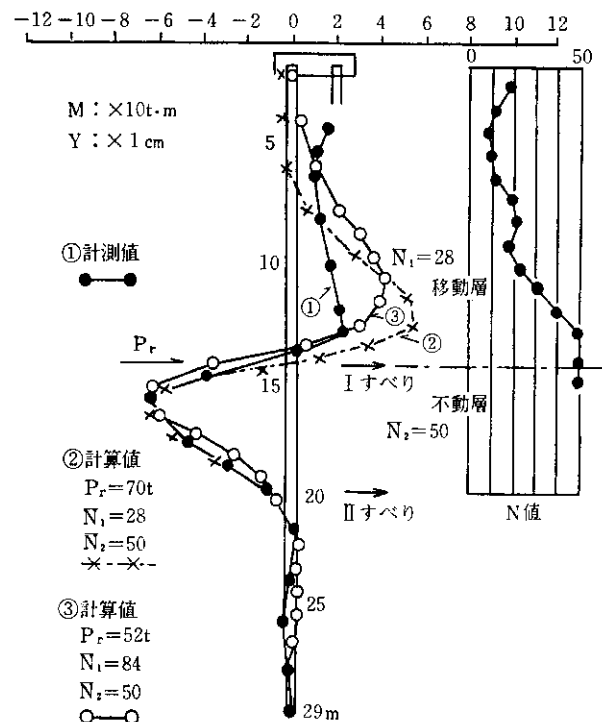


図-7 モーメント図(土工指針式)

重および点バネとした)。

結果は不動層に若干の差異が認められるが、移動層はほぼ一致している。ただし、変位は約1cm程度の開差が生じ一致させることができなかった。また、このとき不動層のバネ ( $K_n$ ) は  $1/\beta$  程度の範囲でかなり低減する必要が生じている。これらの原因を考察すると、①計測

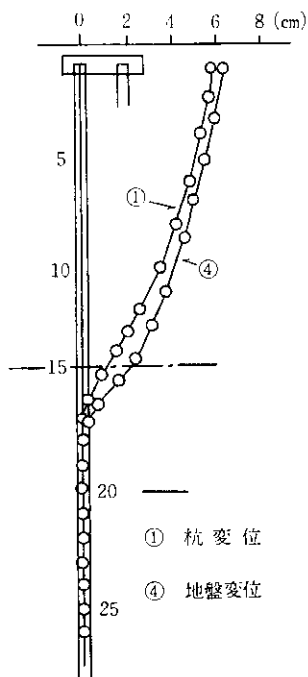


図-8 計測変位図

器の誤差、②4、の施工で述べた粘土壁による非線形バネ状態(2段バネ)、③軽微な塑性破壊などが考えられる。また、非線形バネという点でごく簡易的であるが、発泡モルタルの特性試験を行ったところ非線形バネとして評価するほどの値は見いだせなかった。参考として、フリーの状態(拘束反力を与えない)で同じ推力を与えたのが図-11の③である。この結果を計測値と比較す

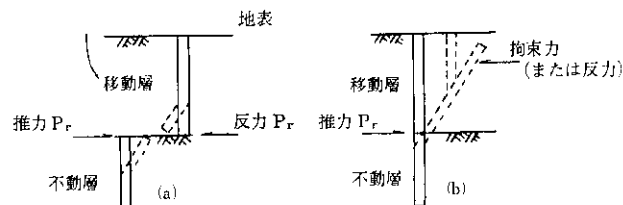


図-9 杭応力模式図

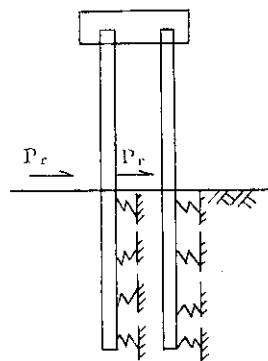


図-10 ラーメン計算モデル

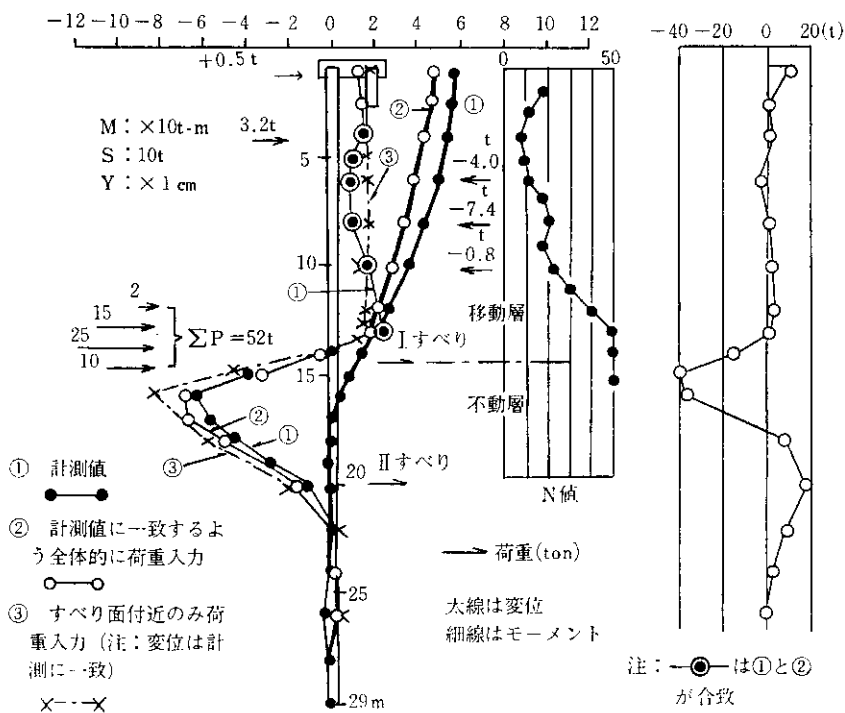


図-11 モーメントおよび変位図(ラーメン)

せん断力図

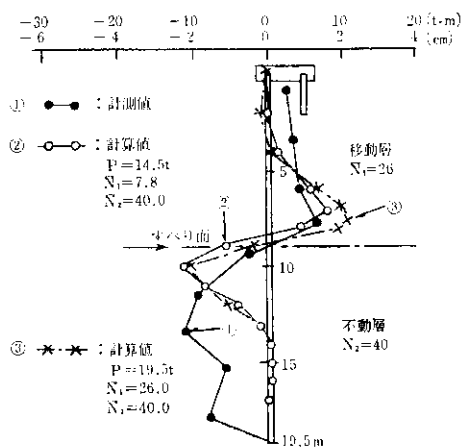


図-12 モーメント図 (土工指針式)

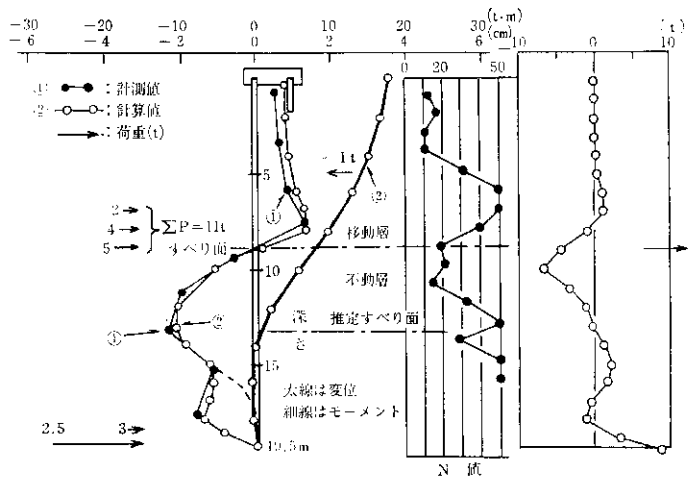


図-13 モーメントおよび変位図 (ラーメン) せん断力図

ると、モーメントおよび変位に大差がなく、やはり移動層の地盤反力が小さい結果を示している。なお、解析すべり面は設計のⅡすべり面とは異なったⅠすべり面ではば一致した結果となっている。

## 6.2 B 箇所

### 6.2.1 土工指針式による解析

A 箇所と同様の計算を行ったが、計測値ではすべり面下に弱い地層があるため  $M_{max}$  が深い位置で発生しており、計算式が一層系の関係で A 箇所とは逆に不動層を近似 (図-12) させることはできない。

### 6.2.2 ラーメンフレーム (変位法) による解析

A 箇所と同様に図-13の①が計測値であり、②は計測値に近似させた逆算結果である。ここで、特異的なのが不動層の杭先端部に異常と見えるモーメントが発生しており、計算値は点線であって一致しない。しかし、計算変位からみると杭先端付近に大きな反力が生じ、バネの状態 (非線形) によっては計測モーメントと同じパターンが発生しそうである。したがって、逆に杭先端に反力相当の荷重を与えると計測モーメントに一致し、非線形バネの存在を示唆しているものと考えられる。

一方、考えがたいが荷重を与えて一致したことは、杭先端付近のすべり面の存在も否定できず、結果として杭先端付近の応力状態に関しては、変位の測定値がないため推定の域をでない。

なお、ここでも不動層では  $1/\beta$  の範囲でバネ ( $K_h$ ) を低減させる必要が生じており、また、すべり面は推定値と計算値に約 4 m もの開差がある。したがって、地すべり力の大きな開差は当然の結果と考えられる。さらに、この開差の原因について考察をすると、推定すべり面の決定は、ひずみ計観測に基づくもので、比較的信頼できると考えられるが、A 箇所の「Ⅱすべり面」のこともあ

り、抑止杭の設置によるすべり面の変化も考えておく必要があると思われる。

## 7. まとめ

### 7.1 モーメントと変位量について

解析の結果をみると、両箇所とも変位およびモーメントと荷重の作用状態は抑え杭の支持機構を示しており、その理由として特に道路工事の場合、治山工事などの現状維持を主目的とする場合とは異なり、

- ① 末端部を切土などで現状の改変 (図-14) があること。
- ② 杭背面部がのり面として斜面となり、地盤反力があまり期待できない。

となる場合が多く、したがって抑え杭の挙動を示すものと考えられる。

抑え杭の特徴は、移動層の地盤反力が期待できない場合のパターンであって、そのため、荷重に対しほとんどが杭鋼性だけによる対処となる。そのときの杭の剛性は片持ちばりの形となるため、変位に対し意外に弱いことである。また反面、図-11の③のようにすべり面付近のみに荷重が集中しても大きな変位が生じ、この状態は不安定な背面土塊を杭の剛性に応じた力で押しだすことを

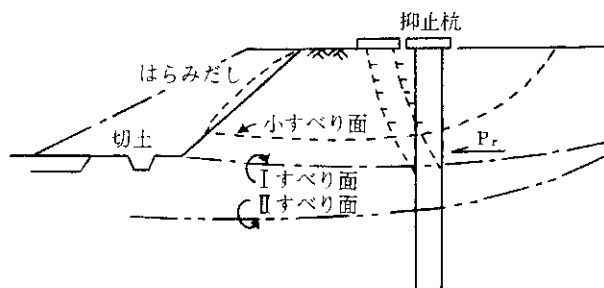


図-14 切土と抑止杭の挙動モデル

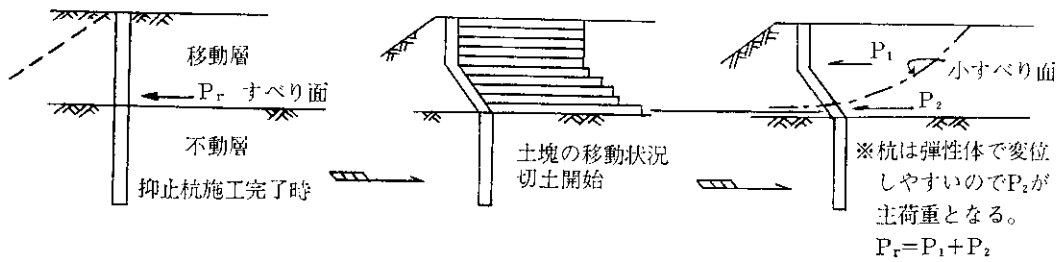


図-15 杭と地盤変位に関する (1 モデル)

意味する。

ちなみに、前述の原因とは限らないが〔ほかに、①地下水の上昇に伴うパイピングに起因する土塊の押しだし、②杭間の中抜けによる押しだしが考えられる(注、図-8の杭と地盤の変位に注目)〕、さらに、参考として昭和60年度に実施した北海道開発局所管工事の施工実態調査では、24件の内4件が抑止杭背面土塊の崩壊を起こしている報告がある。

### 7.2 計画抑止力と実測抑止力について

兩個所とも計画抑止力と実測抑止力(作用力)とに大きな開差が認められた。この点について考察をすると、

- 1) 気象、地質、地層条件などが設計の設定条件までに達していない。
- 2) 集水井の施工によって、水位低下の効果が計算以上に発揮されている。
- 3) 地すべりに対する調査方法、密度および解析法などに基づく精度の限界による誤差。

なども考えられるが、解析結果から得られた点としては、

- A) すべりだそうとすると、抑止杭が先制的な効果を発揮した結果、すべり面上昇をもたらし(兩個所のすべり面に注目)、結果として地すべり力の低下となった。
- B) 杭が弾性体のため、図-15の模式図の関係で推力の分散が考えられ、計測結果としては  $P_2$  が主力となる地すべり力が得られた結果と考えられる。また、この場合の  $P_1$  ゾーンは、背面土塊の地盤反力と杭剛性にかかわる相互作用のバランス ( $F_s = 1.0$ 程度) で安定し、したがって  $P_1$  ゾーンの安全率には余裕がないものと考えられ、背面土塊は

別途の対策工で安全率を高める必要があると考えられる。

以上のように考えると、抑止杭の設計は背面土塊の対策が万全であれば(注、経済的にはやや難点となるが、杭自体による変位量の減少を図ることはそれ以上に難点となり効果的でない)杭の断面力としては、 $P_2$  ゾーンの推力に対応すればよいものと考えられる。

さらにその反面としては、シャフト工などRC構造の剛度の高い深礎杭などは荷重分散現象が起りにくくなり、逆に全面的なすべり力を受止める必要になると考えられる。

### 8. あとがき

道路工事における抑止杭として、水平支持および荷重の作用機構について少ないデータのもとであるが解析と考察を行った。その結果、抑え杭が中心的となったが一方ではクサビ杭との関係もあり、抑え杭とクサビ杭との位置関係は、一概念として図-16が考えられる。しかし、両者の境界条件など定量的な面は不明であり、この点を解明する必要があるが難問でもある。

さらに、せん断杭が多用されているのが実状にある。せん断杭は杭と地盤との相対的な強度差および計測応力状態などを考えると、せん断力が支配的となるのは稀なケースと考えられ、また、応力面ではせん断変形の関係で杭の全断面有効と考えるのは中詰材によっては問題がある。

しかし、実際面では北海道内に限ると、近年において抑止杭の破壊ないし大事にいたったケースは見当たらない。このことは、結果的に設計推力が過大となっていると考えられ、したがって、この設計法の位置付けはひとつの簡便法と考えられる。このため、背面土塊の変位を問題にする場合など、本質的な面を見失わず用いるべきかと考えられる。

今後としては、クサビ杭はオーソライズされており、抑え杭側に着目した境界条件および設計推力の設定などについてデータの集積を図り、解明を進めていく考えである。

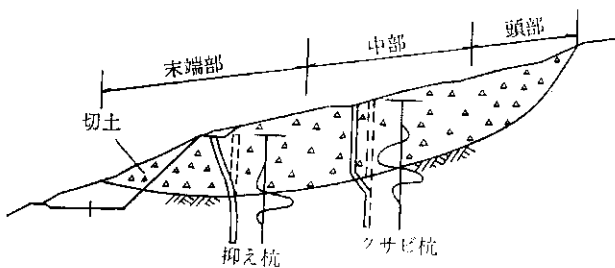


図-16 杭の施工位置に基づく概念図

本研究調査工に当り御指導を戴いた森第3研究部長に対し、深甚の謝意を表すものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本道路協： 会道路土工のり面工・斜面安定工指針，昭和54年4月。
- 2) 日本河川協会： 建設省河川砂防技術指針(案)，山海堂，昭和60年10月。
- 3) 中村浩之： 地すべりの三つの機能，土質工学会論文報告集，Vol. 17, No. 1, Mar. 1977.
- 4) 地すべり研究会： 地すべり斜面の調査・解析・防止工資料集，経営開発センター出版部，昭和52年10月。
- 5) 日本道路協会： 道路橋示方書・同解説・共通・下部構造編。
- 6) 建設部道路計画，課建設部道路建設課，各開発建設部，土木試験所： 地すべり地における抑止杭・構造物基礎に関する調査研究(新規)，第28回北海道開発局技術研究発表会論文集，昭和60年9月。
- 7) 建設部道路計画課，建設部道路建設課，各開発建設部，土木試験所： 地すべり地における抑止杭・構造物基礎に関する調査研究(継続)，第29回北海道開発局技術研究発表会論文集，昭和61年8月。

\*

\*

\*