

# 土木研究所資料

## 赤崎地すべり調査報告書(II)

平成元年3月

建設省土木研究所

新潟試験所

「Copyright©(1989) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W. R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

## 赤崎地すべり調査報告書（Ⅱ）

新潟試験所 所 長 下 村 忠 一  
主任研究員 白 石 一 夫  
研 究 員 丸 山 清 輝

### 要旨

赤崎地すべり調査は、北陸地方建設局飯豊山系砂防工事々務所の依頼により、地すべり防止工法の検討を行うための基礎資料を得ることを目的として実施したものである。主な調査項目は、(1)数値解析による地下水排除工の効果解析 (2)地すべり粘土のリングせん断試験 (3)リングせん断試験結果を用いた安定解析 である。

キーワード：地下水排除工，数値解析，準三次元，リングせん断試験，安定解析

# 赤崎地すべり調査報告書（Ⅱ）

## まえがき

赤崎地すべりは、新潟県東蒲原郡鹿瀬町の一級水系阿賀野川右岸に位置している。地すべりは標高50～190mの赤崎山南斜面にあり、斜面長約1,000m、末端の阿賀野川河岸部では約500mの幅を有し、末端部を底辺とする二等辺三角形を呈している。また、面積は、約40ha（主働ブロック25ha）に達している。地質は、地すべり左岸側に流紋岩の貫入帯（赤崎山）が存在し、新第三系の津川層に相当する凝灰岩と砂岩の互層から成る。基盤は全体的に流れ盤であるが、末端部で受け盤構造となっている。本地すべりは、すべり面が阿賀野川河床面下に達しているため、治水防災面上で、上・下流に悪影響が大きいことから、昭和56年度に直轄地すべり対策事業区域に指定され、現在、北陸地方建設局飯豊山系砂防工事々務所により、調査および地表水路工、横ボーリング工、集水井工等の防止工事が進められている。新潟試験所では、昭和59年度から61年度までは、補足調査と防止工法の検討を行うための基礎資料を得ることを目的として、以下に示す項目の地すべり調査を実施してきた<sup>1)</sup>。

- (1) 現地踏査と既存資料の収集および補足調査項目についての検討
- (2) 移動杭(観測帯)から見たブロック分けの検討
- (3) 集水井から採取した試料およびボーリングコアを用いたリングせん断試験
- (4) リングせん断試験結果を用いた主測線上での安定解析
- (5) トンネル排水工の効果
- (6) 間隙水圧の観測
- (7) 三次元地下水解析プログラムの開発

また、昭和62年度から63年度では、主に飯豊山系砂防工事々務所で計画実施されている地下水排除工の効果について、数値解析による調査解析を行った。本資料は、昭和62年度から63年度までの2ヶ年の調査をまとめたものである。以下に、その調査項目を示す。

- (1) 昭和61年度に開発した有限要素法による「割れ目系地山の三次元地下水解析プログラム」<sup>2)</sup>を用いた地下水排除工の効果解析
- (2) ボーリングコアを用いたリングせん断試験
- (3) リングせん断試験結果を用いた安定解析

最後に、本調査を行うにあたり、御協力下さった北陸地方建設局飯豊山系砂防工事々務所の方々、また、御指導助言を賜った元新潟試験所吉松弘行所長（現 急傾斜地崩壊研究室長）といろいろ御手伝い下された新潟試験所の佐藤克徳氏に厚く感謝いたします。

平成元年3月

# 目 次

1. 地下水排除工の効果解析	1
1.1 準三次元浸透流解析式の離散化	2
1.2 割れ目系の離散化方程式	3
1.3 割れ目系地山解析に関する離散化方程式	4
1.4 トンネル排水工の効果解析	7
1.4.1 土層構造とトンネル排水工のモデル化	7
1.4.2 解析条件	9
1.4.3 不透水層面の決定	9
1.4.4 トンネル排水工の効果解析結果	14
1.5 トンネル排水工、横ボーリング工、集水井工の効果解析	24
1.5.1 土層構造のモデル化	24
1.5.2 トンネル排水工のモデル化	24
1.5.3 横ボーリング工、集水井工のモデル化	25
1.5.4 解析条件	25
1.5.5 不透水層面の決定	26
1.5.6 トンネル排水工、横ボーリング工、集水井工の効果解析結果	26
1.6 「割れ目系地山の三次元地下水解析プログラム」を地すべり斜面 における地下水排除工の効果解析に適用する場合の注意点	39
2. ボーリングコアを用いたリングせん断試験	40
3. リングせん断試験結果を用いた安定解析	49
4. おわりに	58
参考文献	58

## 1. 地下水排除工の効果解析

地すべり斜面では、不透水層の深さが縦横断方向に変化していることや、地下水の供給が地すべり斜面上方だけでなく側面からもある。このことから、地下水排除施設による排水量および地下水位低下量を求めるためには、三次元で解析を行う必要がある。また、地すべり斜面の土層構造は、一般的に地表面から風化帯（崩積土層、風化岩層）、岩盤の順になっており岩盤には割れ目が存在している。したがって、地下水排除工の効果解析するには、これらの点を考慮する必要がある。今回用いた「割れ目系地山の三次元地下水解析プログラム」は、以下の条件によりプログラム化されている。

- (1) 地山を風化帯および割れ目を有する岩盤から成るものとする。
- (2) 風化帯に地下水面が存在し、風化帯の浸透流は平面流（準三次元流）とみなせるものとする。
- (3) 割れ目に流れ場があり、飽和しているものとする。
- (4) 割れ目は剛体中の水みちとし、水圧変動があっても透水性の変化や割れ目の変形は生じないものとする。
- (5) 割れ目と風化帯の浸透流は水理的に連続しているものとする。

今回の地下水排除工の効果解析では、前述した地すべり斜面の状況が、この条件を満足するようにモデル化する必要がある。

このプログラムでは、風化帯を準三次元浸透流状態で表現し、割れ目には平面要素を用いている。以下には、割れ目系地山の離散化方程式の基礎となる(1)準三次元浸透流解析における離散化方程式と(2)割れ目の離散化方程式を示し、つぎに(3)割れ目系地山の離散化方程式を示す。また、地下水排除工の効果解析では、昭和62年度にトンネル排水工について実施し、昭和63年度には昭和62年度の問題点を考慮するとともに、赤崎地すべりに計画実施されている横ボーリング、集水井、排水トンネルが施工された場合について実施している。

### 1.1 準三次元浸透流解析式の離散化

準三次元浸透流解析は、鉛直方向の流れ成分を微小であるとして無視し定式化を行い、三次元の地下水状態を二次元の解析で近似的に表現しようとするものである。ダルシーの運動方程式と、連続の式による支配方程式から求めた浸透流解析の三次元状態における離散化方程式に、準三次元状態を仮定すると次式で表される準三次元浸透流解析の離散化方程式が求められる。

飽和-不飽和浸透流の支配方程式は、

$$U = -K \nabla (h_p + h_o) \quad (\text{運動方程式}) \quad (1.1)$$

$$c \cdot \frac{\partial h_p}{\partial t} = Q - \nabla \cdot U \quad (\text{連続方程式}) \quad (1.2)$$

で表される。準三次元状態における離散化方程式は、

$$K h_p + B + E \frac{\partial h_p}{\partial t} - Q + q = Q \quad (1.3)$$

となる。ただし、

$$K = \int_{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial \underline{x}} K \frac{\partial \phi^T}{\partial \underline{x}} d v = \int_{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial \underline{x}} T \frac{\partial \phi^T}{\partial \underline{x}} d v \quad (1.4)$$

(透水性行列)

ここで、

$$T = \int_{h_0}^{h_0+h} K d z \quad (1.5)$$

$$B = \int_{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial \underline{x}} T K d v \quad (\text{位置水頭ベクトル}) \quad (1.6)$$

$$E = \int_{\Omega} \phi S \phi^T d v \quad (\text{比水分容量ベクトル}) \quad (1.7)$$

また、

$$S = \int_{h_0}^{h_0+h} C' d z \quad (1.8)$$

$$Q = \int_{\Omega} \phi Q d v \quad (\text{節点湧水率ベクトル}) \quad (1.9)$$

$$q = \int_{S_1} \phi n U d s \quad (\text{境界湧水率ベクトル}) \quad (1.10)$$

である。いま、

$$E = -B + E \frac{\partial h_p}{\partial t} + Q - q \quad (1.11)$$

とおけば、

$$K h_p = E \quad (1.12)$$

となり、これを解けばよい。

また、 $Q$ は、湧水量 $Q_0$ と割れ目系へ浸透する地下水量 $V_0$ を用いて、

$$Q = Q_0 + V_0 \quad (1.13)$$

と表される。ここで、 $\nabla_0$ は未知量である。

## 1.2 割れ目系の離散化方程式

割れ目は、厚さ $W$ を持つ多孔質媒体としてモデル化する。その場合、割れ目系の支配方程式は浸透流の支配方程式と同様に与えられる。

$$\mathbf{U} = -K \nabla h \quad (\text{運動方程式}) \quad (1.14)$$

$$c' \frac{\partial h_p}{\partial t} = Q - \nabla \cdot \mathbf{U} \quad (\text{連続方程式}) \quad (1.15)$$

ただし、(1.14)、(1.15)は、図-1に示す局所座標系で記述される。

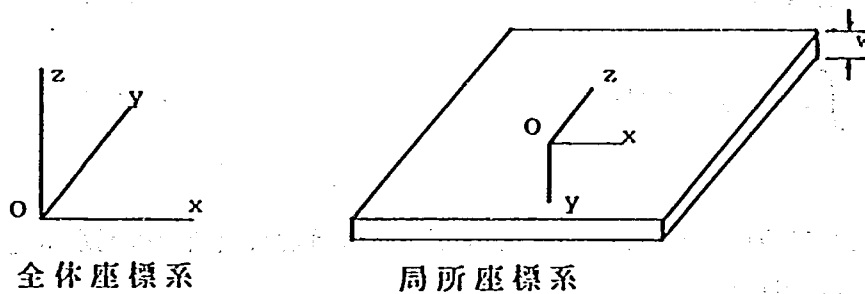


図-1 割れ目系の座標系

(1.14)、(1.15)の支配方程式は、浸透流の支配方程式と同様に離散化できる。

$$K_0 h_p + E_0 + E_0 \frac{\partial h_p}{\partial t} - Q_0 + q_0 = Q \quad (1.16)$$

ただし、

$$K_0 = \int_{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial x} K \frac{\partial \phi^T}{\partial x} d v \quad (\text{透水性行列}) \quad (1.17)$$

$$E_0 = \int_{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial x} K K d v \quad (\text{位置水頭ベクトル}) \quad (1.18)$$

$$E_0 = \int_{\Omega} \phi c' \phi^T d v \quad (\text{比水分容量ベクトル}) \quad (1.19)$$



$$Q_o = \int_{\Omega} \phi Q \, d v \quad (\text{節点湧水率ベクトル}) \quad (1.20)$$

$$q_o = \int_{S_1} \phi n U \, d s \quad (\text{境界湧水率ベクトル}) \quad (1.21)$$

である。ここで、添え字の  $c$  は割れ目系を示している。

いま、割れ目の厚さ方向に透水性の変化が無いとすれば、(1.17)、(1.18)は、

$$K_o = \int_{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial x} K \frac{\partial \phi^T}{\partial x} \, d v = \int_{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial x} T_o \frac{\partial \phi^T}{\partial x} \, d v \quad (1.22)$$

ここで、 $T_o = \int K \, d y = K W$  (1.23)

$$E_o = \int_{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial x} K K \, d v = \int_{\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial x} T_o K \, d v \quad (1.24)$$

$$E_o = \int_{\Omega} \phi C' \phi^T \, d v = \phi S_o \phi^T \, d v \quad (1.25)$$

また、 $S_o = \int C' \, d y = C' W$  (1.26)

で与えられる。

この他、 $q_o$  は割れ目の境界での湧水量を示すが、これは解析領域での湧水量  $q_{o0}$  と風化帯との境界での湧水量  $Y_{o0}$  を用いて、

$$q_o = q_{o0} + Y_{o0} \quad (1.27)$$

と表される。ここで、 $Y_{o0}$  は未知量である。

### 1.3 割れ目系地山解析に関する離散化方程式

割れ目系地山解析の離散化方程式は、風化帯の離散化方程式と割れ目系の離散化方程式を重ね合わせることによって得られる。

風化帯の離散化方程式は、

$$K h_o + E + E \frac{\partial h_o}{\partial t} - Q + q = Q \quad (1.28)$$

ただし、 $Q = Q_o + Y_o$  (1.29)

である。

また、割れ目系の離散化方程式は、

$$K_0 h_p + B_0 + E_0 \frac{\partial h_p}{\partial t} - Q_0 + q_0 = Q \quad (1.30)$$

ただし、

$$q_0 = q_{0g} + V_{0g} \quad (1.31)$$

である。

したがって、割れ目系地山全体の離散化方程式は、(1.28)と(1.30)を重ね合わせることで得られ、

$$\begin{aligned} (K + K_0) h_p + (B + B_0) + (E + E_0) \frac{\partial h_p}{\partial t} - (Q + Q_0) \\ + (q + q_0) = Q \quad (1.32) \end{aligned}$$

となる。

ここで、風化帯と割れ目系の地下水流の連続条件から、

$$V_g = V_{0g} \quad (1.33)$$

を得る。

(1.29)、(1.31)、(1.33)を(1.32)に代入すると、最終的な割れ目系地山の離散化方程式が得られる。

$$\begin{aligned} (K + K_0) h_p + (B + B_0) + (E + E_0) \frac{\partial h_p}{\partial t} - (Q_g + Q_0) \\ + (q + q_{0g}) = Q \quad (1.34) \end{aligned}$$

(1.34)を書き換えて、

$$K h_p + E + E \frac{\partial h_p}{\partial t} - Q + q = Q \quad (1.35)$$

を得る。

以上、これまでに用いた記号は、以下のことを示す。

$\mathbf{U}$  : 流速ベクトル

$K$  : 透水係数

$\nabla$  : 微分演算子

$h_p$  : 圧力水頭

$h_o$  : 位置水頭

$c'$  :

$$c' = c + \alpha S$$

$$c = \frac{\partial \theta}{\partial h_p}$$

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{: 不飽和帯} \\ 1 & \text{: 飽和帯} \end{cases}$$

$\theta$  : 体積含水率

$S$  : 貯留係数

$Q$  : 流量

$\cdot$  : 内積演算子

$\mathbf{K}$  : 透水性行列

$\mathbf{h}_p$  : 圧力水頭ベクトル

$\mathbf{h}_o$  : 位置水頭ベクトル

$\mathbf{E}$  : 比水分容量ベクトル

$\mathbf{Q}$  : 節点湧水率ベクトル

$\mathbf{q}$  : 境界湧水率ベクトル

$\mathbf{Q}$  : 零ベクトル

$\phi$  : 試験関数 (内挿関数)

$\sim$  : ベクトルであることを示す。

## 1.4 トンネル排水工の効果解析

本解析は、昭和62年度に実施したものである。

### 1.4.1 土層構造とトンネル排水工のモデル化

トンネル排水工の効果解析を行うには、先に述べたプログラム化の条件である(1)～(5)について満足するようにモデル化する必要がある。

まず、土層構造のモデル化について考える。赤崎地すべりの土層構造は、図-2に示すようになっていいる。すなわち、地表面から崩積土層、強風化砂岩、中～弱風化凝灰岩、強風化凝灰岩層、そして、中～弱風化砂岩層である。ここで、不透水層は地下水検層の結果等から判断すると中～弱風化砂岩層になるといわれる。この上部の層にも部分的に不透水層は存在するといわれるが、ここでは、モデルを簡単にするため不透水層の存在は考えず、全層を透水層とする。したがって、土層構造のモデル化は、中～弱風化砂岩層を不透水層とし、その上部は地表面まで透水層とする。

つぎに、トンネル排水工のモデル化について考える。排水トンネルは、中～弱風化砂岩層内に計画されている。また、排水トンネルから施工される集水ボーリングは、不透水層中にある排水トンネルのボーリング室から上部の透水層に向けて計画されている。これらのことから、赤崎地すべりにおけるトンネル排水工の概念図を示すと図-3のようになる。すなわち、排水トンネルは不透水層中に位置し、排水トンネルからの集水ボーリングは、排水トンネル付近では不透水層中に位置し、その先は透水層に至る。集水ボーリングの機能は、地下水を集めることであるが、以下のように分けて考えることができるといわれる。つまり、透水層中では見掛け上の透水係数を大きくすることによって集水しやすくし、不透水層中では、透水層と排水トンネルを連結するパイプの働きをするといふものである。このように考えると、集水ボーリングの排水に対する効

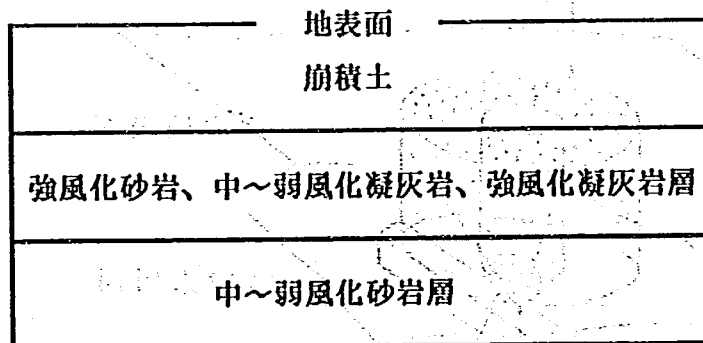


図-2 赤崎地すべりの土層構造

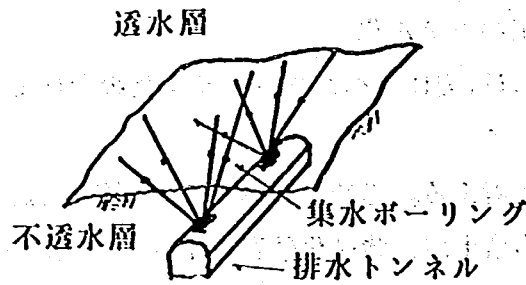


図-3 赤崎地すべりにおけるトンネル排水工の概念図

果は、透水層中と不透水層中では異なることになる。したがって、集水ボーリングは、透水層中と不透水層中の二つに分けてモデル化する必要がある。今回の解析に用いたトンネル排水工のモデル化の概念図を図-4に示した。透水層中の集水ボーリングは、見掛け上の透水係数を大きくする働きをする。このことから、透水層中では、集水ボーリングの存在する領域の透水係数を本来のものより大きくすることによってモデル化している。また、不透水層中では、集水ボーリングは、透水層と排水トンネルを水理的に連結する働きをするため、割れ目要素を用いてモデル化している。

今回の解析は、準三次元状態であるため集水ボーリングを線状にモデル化することはできない。したがって、ボーリング室からの集水ボーリングは、不透水層中では円錐を逆さにしたような面形状となり、透水層中では不透水層から地表面まで鉛直に立った中空の円柱状にモデル化されることになる。

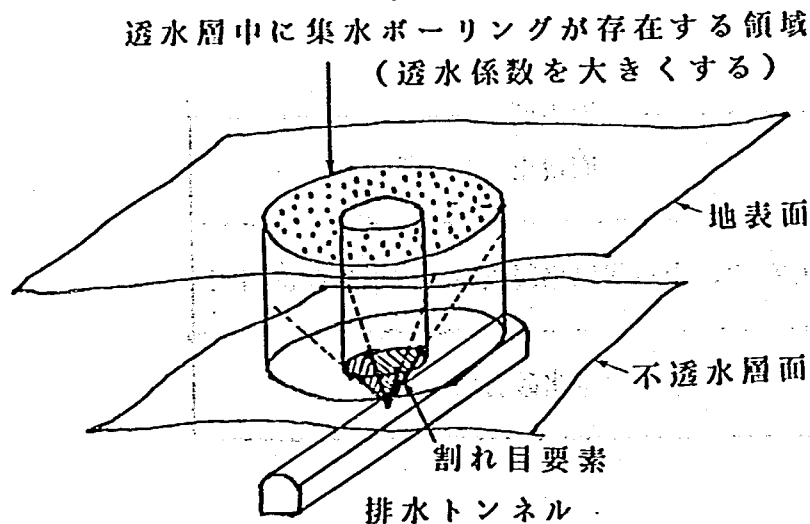


図-4 トンネル排水工モデル化の概念図

#### 1.4.2 解析条件

解析は、飽和浸透流定常解析とし、入力データおよび境界条件等は以下に示す。図-5には、赤崎地すべりの平面図を示した。本地すべりにおいては、図-5に示すI~Ⅷの横断面図およびA~Dの縦断面図が作成されている。このことから、これらの図をもとに図-6のメッシュ図を作成した。

準三次元解析では、各節点に不透水層面および地下水位の標高、水位固定の有無、透水係数を指定する必要がある。この内、不透水層面および地下水位の標高については、縦横断面図をもとに作成している。また、水位固定の有無については、地すべり斜面周辺全体について水位を固定とし、地下水の出入りは自由とした。その他、透水層の透水係数は、全層一定とした。

#### 1.4.3 不透水層面の決定

トンネル排水工の効果解析を行う前に、観測地下水位（HWL）と解析地下水位が一致するように不透水層面を決定する必要がある。これは、自由地下水の場合では、透水層を流れる流量は、常に一定であるため、地下水位は不透水層面に応じた形状となる<sup>3)</sup>したがって、地すべり斜面上のあらゆる地点で流量を一定にするために不透水層を決定するものである。不透水層面の決定は、初期データとして1.4.2で述べたように縦横断面図から作成したデータを用い、試行錯誤により観測地下水位（HWL）と解析地下水位ができるだけ一致するように、不透水層面の標高を繰り返し修正し行った。なお、排水トンネル位置の不透水層面の標高は、トンネル排水工のモデル化の上で透水層の厚さが地下水位の低下量を左右するため、横断面図のデータをそのまま使用することにした。また、不透水層面の標高の修正では対応仕切れないものについては、観測地下水位（HWL）の一部を修正している。以上の結果から最終的に求められたV、VI、Ⅶの横断面について、不透水層面と地下水位を図-7に示した。Ⅵ断面については、ほぼ観測地下水位（HWL）と解析地下水位が一致したものの、V、Ⅶ断面では差が大きく、特にⅦ断面は地すべり斜面周辺の固定水位を、観測地下水位（HWL）より10m程度下げる必要があった。また、地すべり斜面全体の不透水層面コンター図を図-8に示した。不透水層面は、横断的には地すべり斜面周囲で標高が高く、中央部で低くなる谷地形をしている。縦断的には、地すべり斜面頭部では高く、上段排水トンネル直上で低くなり下段排水トンネルではまた高くなっている。したがって、地下水は、上段と下段の排水トンネルの間で貯留される形状となる。

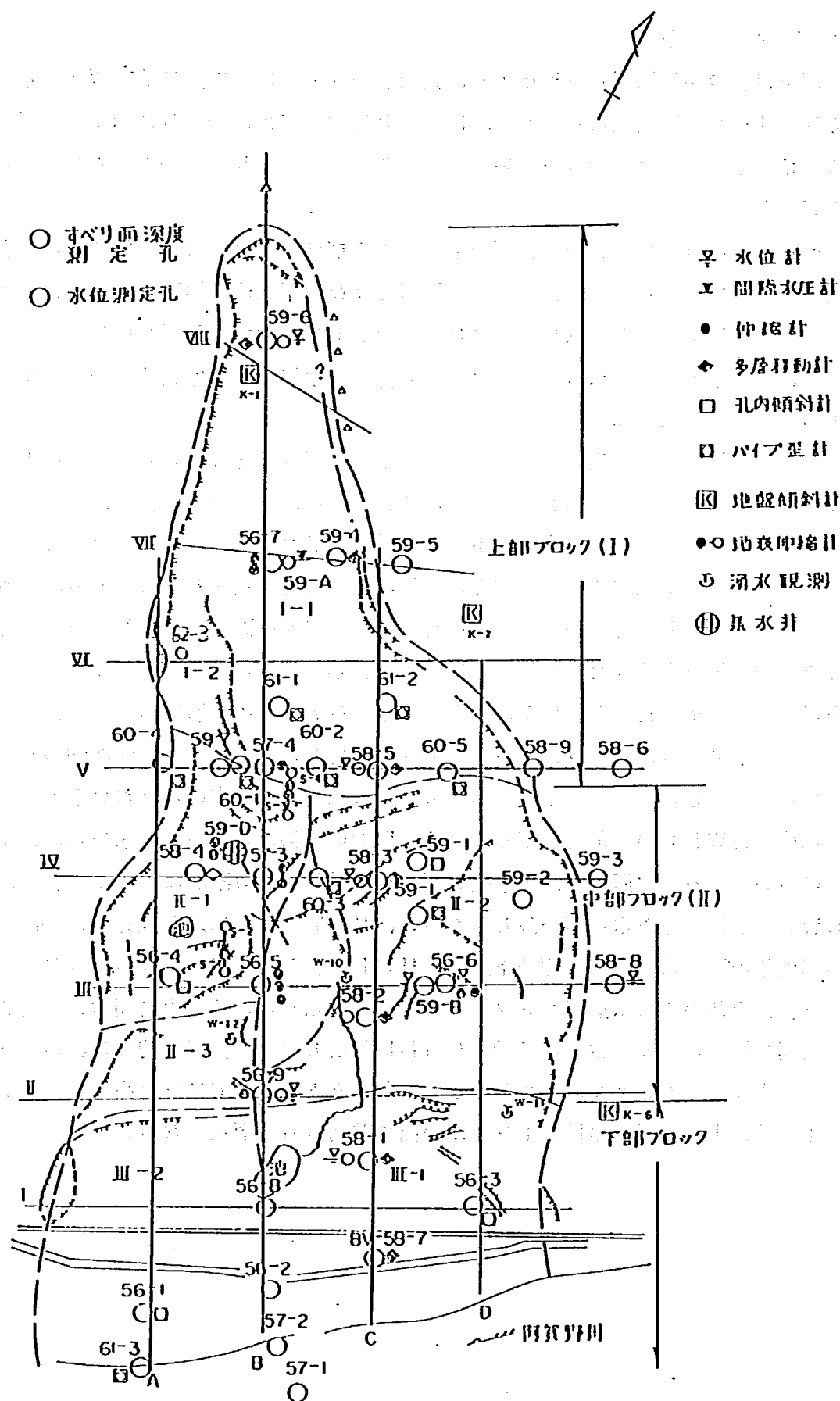
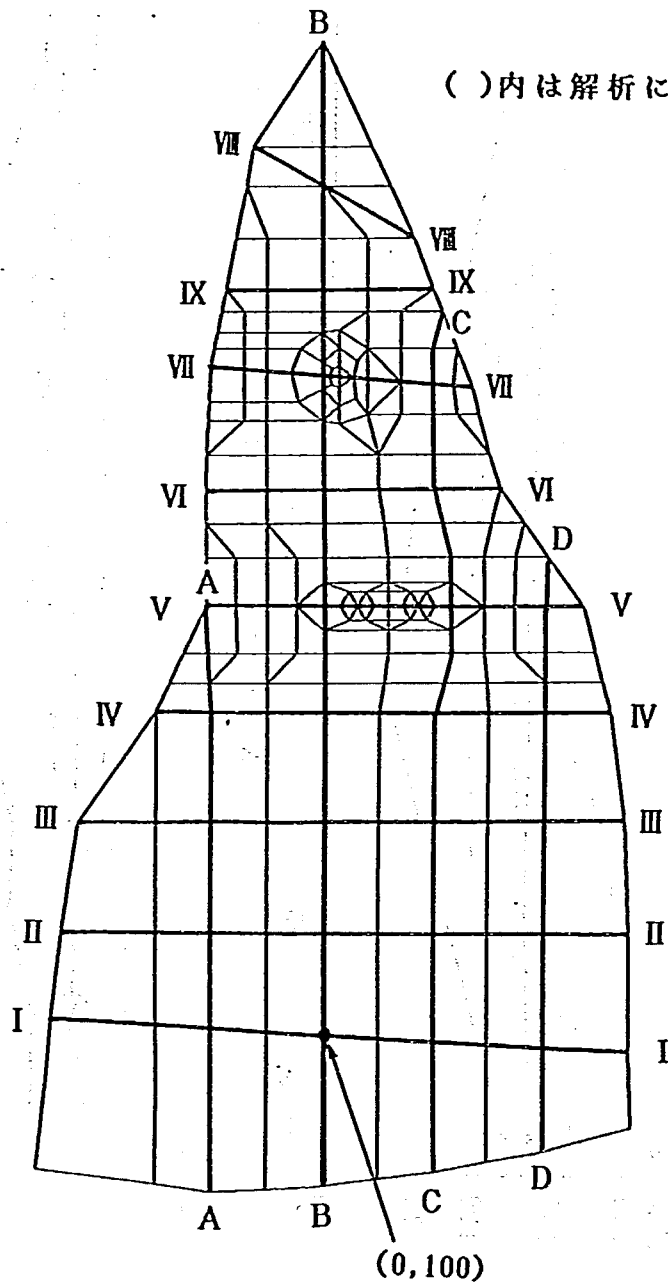


図-5 赤崎地すべり平面図



( )内は解析に用いたX,Y座標を示す。

(単位: m)

図-6 メッシュ図

縮尺  $\frac{1}{140.0m}$



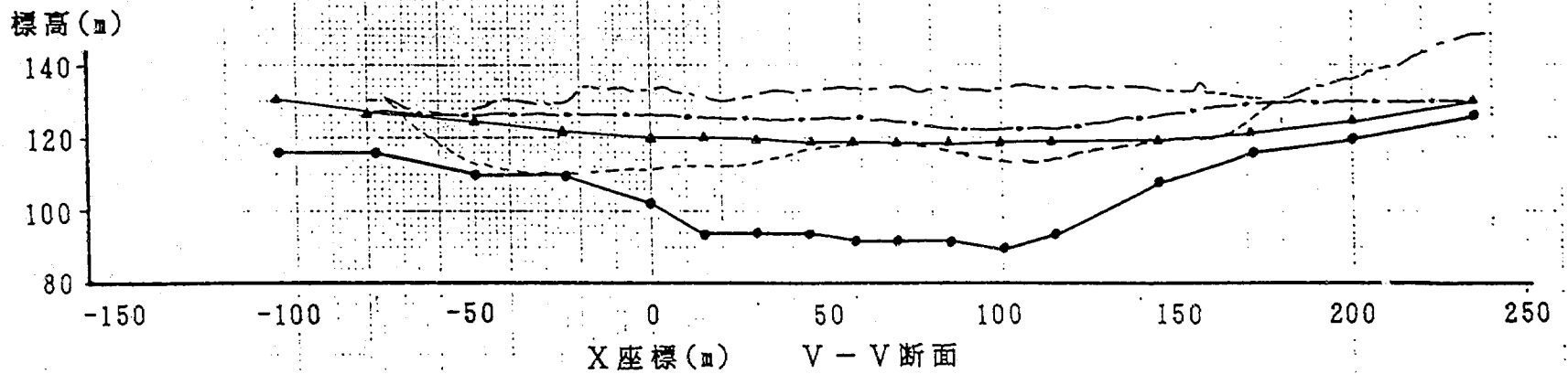
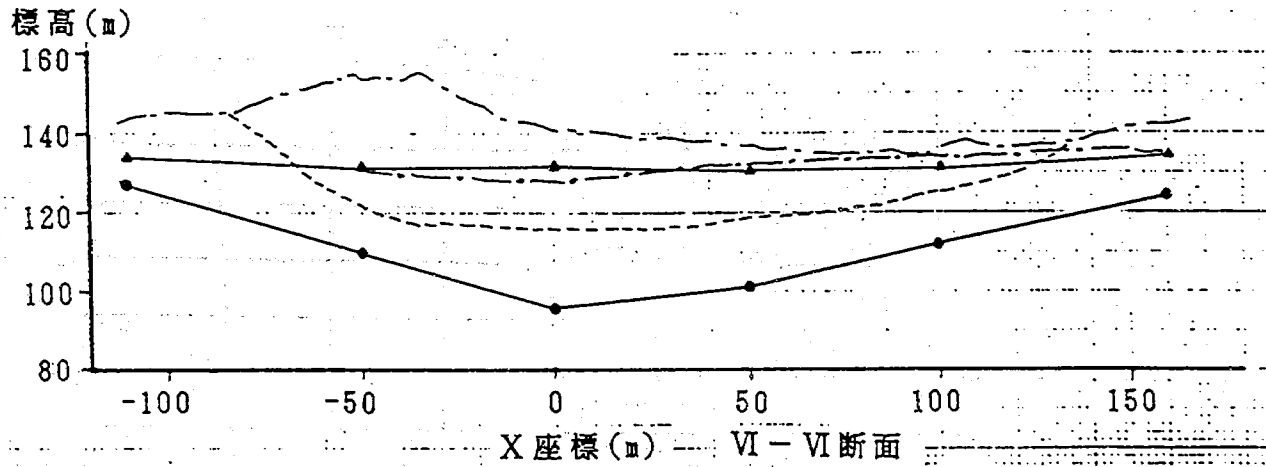
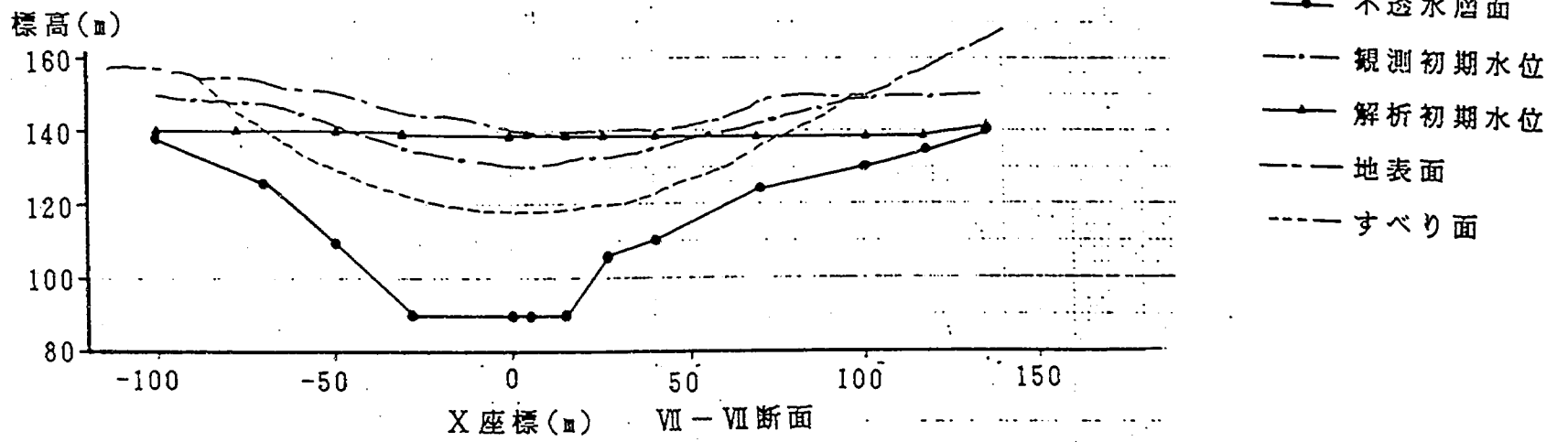
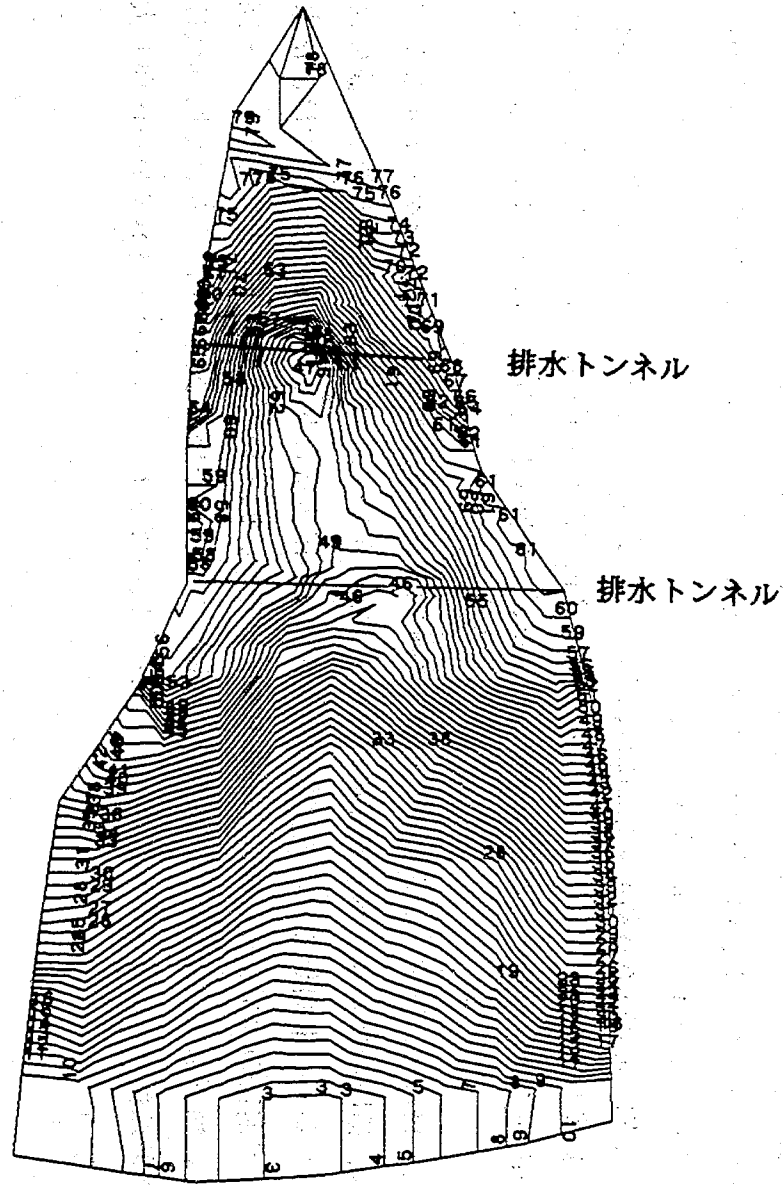


図-7 不透水層面と地下水位



縮尺 140.0m

番号	不透水層面 標高(m)
1	2
2	4
3	6
4	8
5	10
6	12
7	14
8	16
9	18
10	20
11	22
12	24
13	26
14	28
15	30
16	32
17	34
18	36
19	38
20	40
21	42
22	44
23	46
24	48
25	50
26	52
27	54
28	56
29	58
30	60
31	62
32	64
33	68
34	68
35	70
36	72
37	74
38	76
39	78
40	80

番号	不透水層面 標高(m)
41	82
42	84
43	86
44	88
45	90
46	92
47	94
48	96
49	98
50	100
51	102
52	104
53	106
54	108
55	110
56	112
57	114
58	116
59	118
60	120
61	122
62	124
63	126
64	128
65	130
66	132
67	134
68	136
69	138
70	140
71	142
72	144
73	146
74	148
75	150
76	152
77	154
78	156
79	158
80	160

図-8 不透水層面コンター図

#### 1.4.4 トンネル排水工の効果解析結果

トンネル排水工は、図-6のメッシュ図に示すVおよびVII測線上に計画されている。図-9には、トンネル排水工のモデル化した図を示した。ここで、トンネル排水工のモデル化に関する影響領域は、不透水層面が水平に存在した場合は、図-9に示すように円形を重ね合わせた形状となる。しかし、赤崎地すべりの場合は、前述した1.4.3 不透水層面の決定によれば、不透水層面が排水トンネルの施工方向で谷地形を示しているため、図-10に示すように不透水層面から透水層面に突き出ない集水ボーリングが一部存在することになる。これらは解析モデル上集水能力がないため取り除き、図-11、12に示すような半円あるいは扇型のトンネル排水工のモデル化に関する影響領域とした。

排水トンネルからの排水量は、現場等で測定された透水係数を用いて解析により求めることが望ましい。しかし、そのようなデータが無いこととトンネル排水工のモデル化の問題等があるため、今回の解析では、事務所が小柳-前川およびイ・ペ・クサンキンの式により求めた計画排水量が排水された時のトンネル排水工の効果について、解析することにした。

表-1には、解析流量と計画流量との対比を示した。計画流量は、上方のVII測線上の排水トンネルにおいては1.5t/min、下方のV測線上においては2.1t/minである。この計画流量には、前述したように集水能力の無い集水ボーリングも含まれているためこれらを除く必要がある。この方法としては、図-9に示す不透水層面が水平に存在した場合の影響領域と、図-11に示した不透水層面の決定結果を考慮した影響領域との面積比を用いて修正することが考えられる。この面積比は、ここでは約0.5程度であった。

解析は、計画流量と解析流量ができるだけ近くなるように、割れ目要素の透水係数を決めて行っている。表-2には、解析に使用した透水係数を示した。ここで、地山の透水係数が $K=1.0 \times 10^{-2}$  cm/secとなっているのは、当初の透水係数として $K=1.0 \times 10^{-3}$  cm/secを設定していたが、この値より小さくすると解が収束しなくなるためである。このため、解が収束する最小の透水係数として $K=1.0 \times 10^{-2}$  cm/secを選んだ。

主測線断面であるB断面の解析結果を図-13に示した。排水トンネル施工後の地下水位は、上段および下段の排水トンネル付近では最大で6m前後の低下がみられる。しかし、地すべり斜面の中段から末端に掛けての地下水位の低下は、この図では読み取れない程小さなものとなっている。

図-14には、排水トンネル施工前後の地すべり斜面全体の地下水位コンターを示した。地下水面は、横断的には地すべり斜面の頭部から中部にかけて斜面中央部で標高が低い状態になっている。しかし、末端部では、逆に斜面中央部で高い尾根状となっている。この図では、排水トンネル施工前後の地下水位の変化がわかりにくいので、図-15に示す地下水位変化コンター図を作成した。地下水位の低下量は、横断的には地すべり斜面中央部で大きい。また、縦断的には地すべり斜面頭部および下部では小さく、上段と下段の排水トンネルが施工されている区間で大きくなっている。

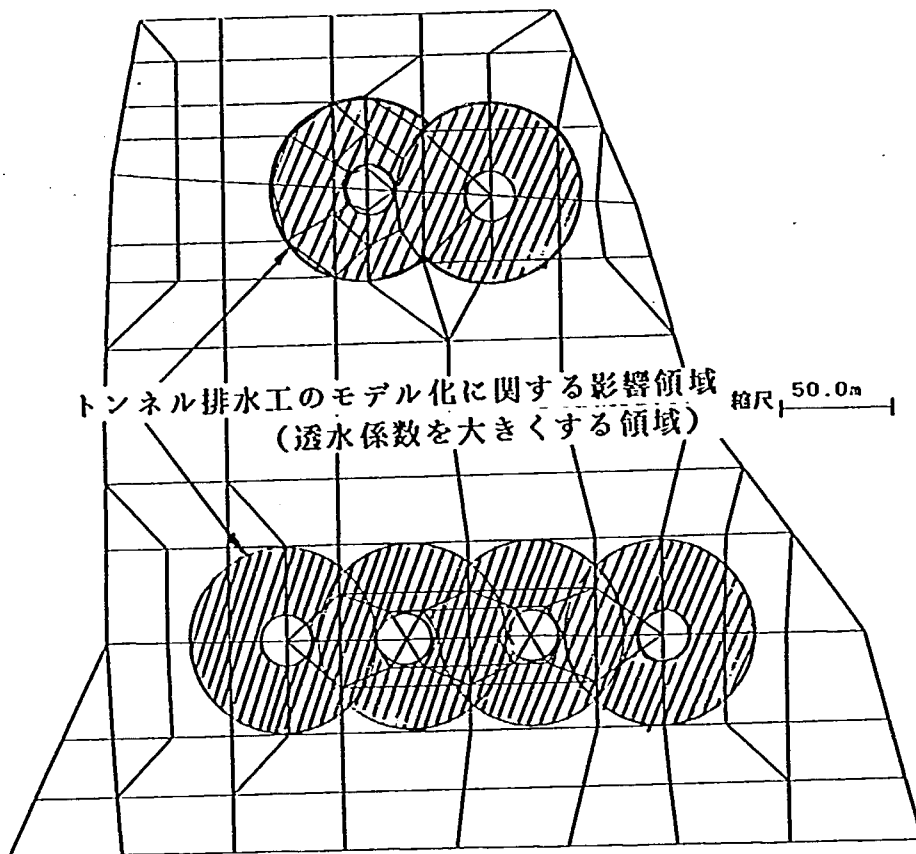


図-9 トンネル排水工のモデル化（不透水層面が水平な場合の影響領域）

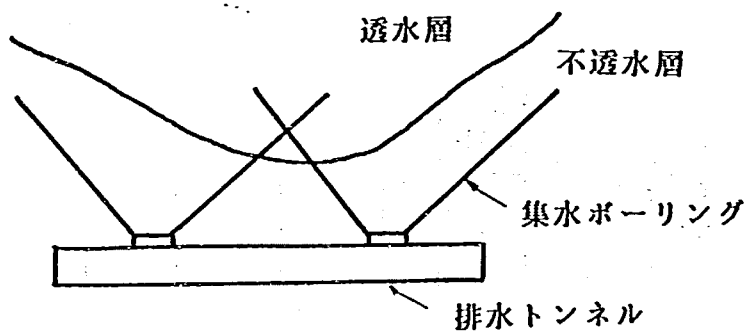
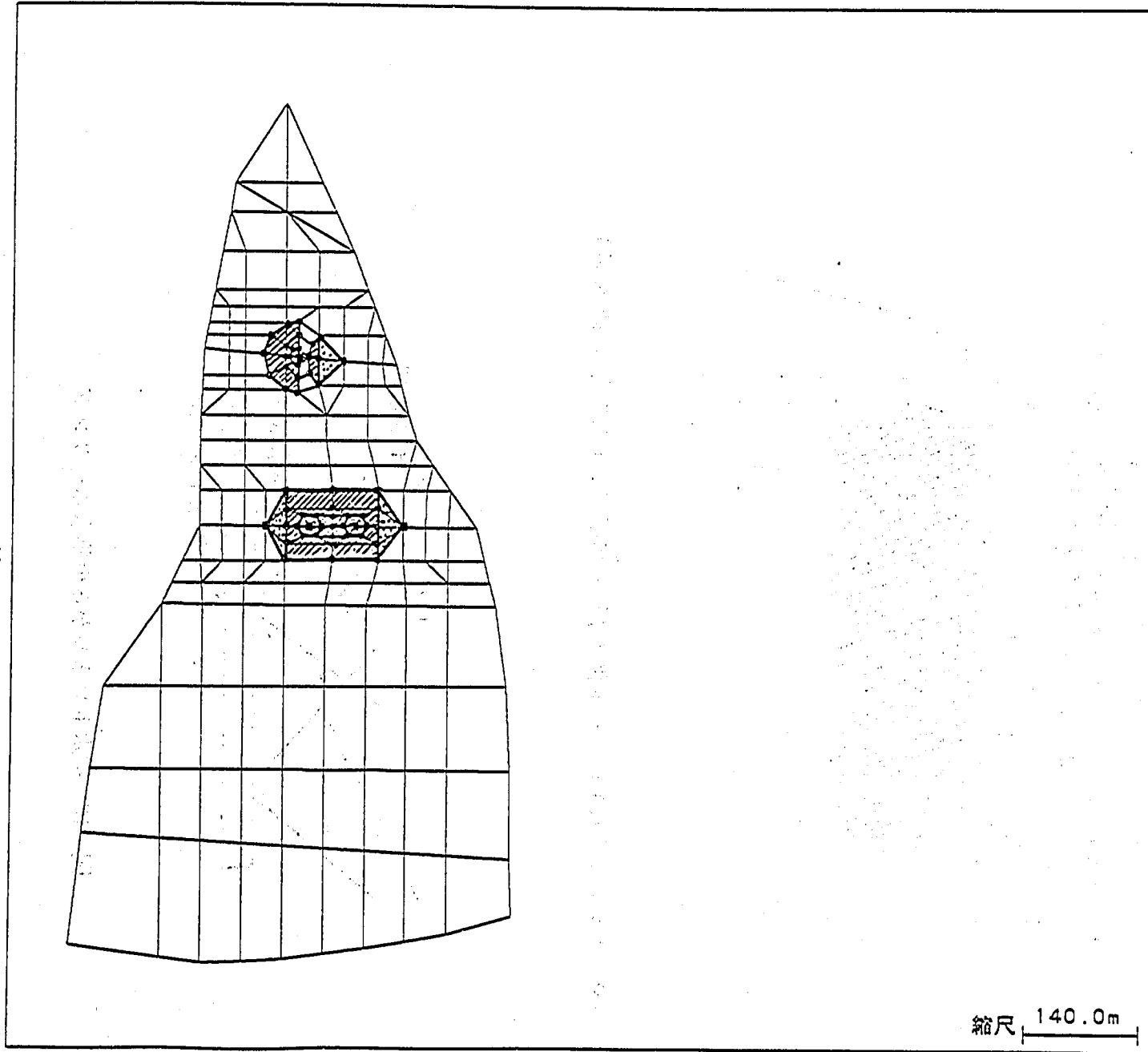


図-10 排水トンネルからの集水ボーリング







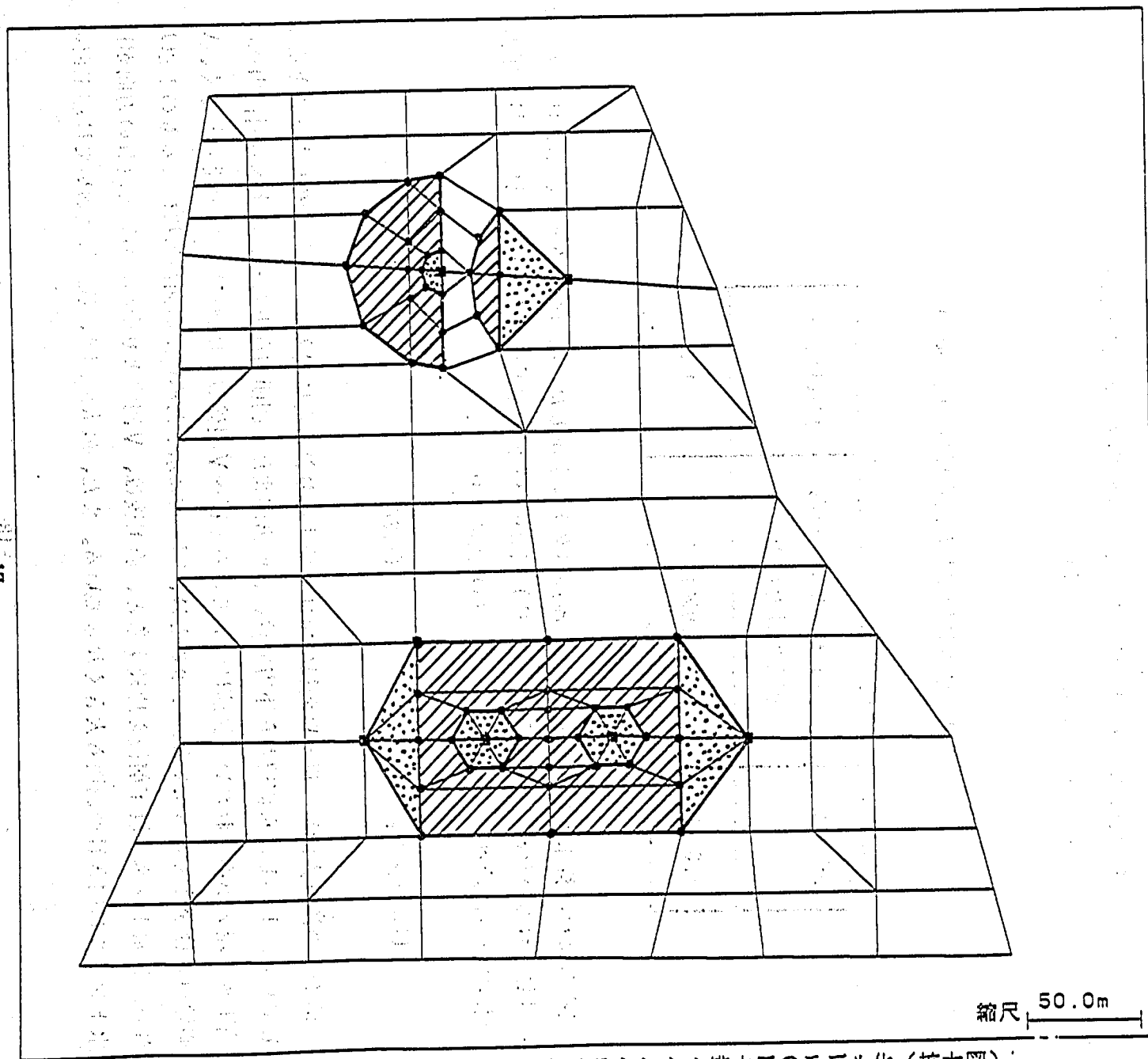
-  排水トンネルからのボーリングによって透水性が大きくなると考えられる領域
-  割れ目要素の存在する領域
-  透水性を大きくした節点
-  排水トンネルにおけるボーリング孔口

図-11 赤崎地すべりにおけるトンネル排水工のモデル化(全体図)







-  排水トンネルからのボーリングによって透水係数が大きくなると考えられる領域
-  割れ目要素の存在する領域
-  透水係数を大きくした点
-  排水トンネルにおけるボーリング孔口

図-12 赤崎地すべりにおけるトンネル排水工のモデル化(拡大図)

表-1 解析流量と計画流量との対比

排水トンネルの位置	解析流量 t/min	計画流量 t/min
上方	0.7	0.8 (1.5×0.5)
下方	1.6	1.1 (2.1×0.5)

※ 1.5, 2.1 t/min は、トンネル排水工設計時の計画流量  
0.5 は、影響領域の補正值

表-2 解析に使用した透水係数 (cm/sec)

地山部分	集水ボーリングの影響を受けた地山部分	割れ目要素
$1.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$	1.0

図-16には、排水トンネル施工前後の流速ベクトルを示した。流速ベクトルは、本プログラムでは計算されないため、各要素毎に(1.6)式を用いて位置水頭ベクトル $E$ を計算し、 $E$ を圧力水頭 $h_p$ で割り流速ベクトル $U$ とした(1.36)式により求めた。

$$U = E / h_p \quad (1.36)$$

地下水の流れ方向は、Ⅲ～Ⅸ測線に掛けて地すべり斜面内に向き、地下水が流入することを示している。しかし、Ⅲ測線から下方では、斜面方向または側面方向となり、地すべり斜面内への地下水の流入がみられない。流速についてみるとⅣ～Ⅴ測線およびⅦ～Ⅸ測線の間で大きく、Ⅵ測線付近は小さくなっている。このことは、図-13に示した不透水層面の形状によるものと思われる。排水トンネル施工前後を比較すると、施工後は、Ⅴ測線より上部において流れの方向が排水トンネルに向き且つ流速も大きくなっている。また、最大流速は、施工後においては施工前の

IV測線上にあったものがVI測線付近に移っている。

赤崎地すべりは、図-5に示すIVとV測線の間で大きくは二つのブロックに分けられる。今回の解析によれば、排水トンネルを施工することによって、上部ブロックにおける地下水位の低下量は大きい、下部ブロックにおける低下量は小さなものとなっている。これは、図-16の流速ベクトルによると、Ⅲ～V測線にかけての両側面からの地下水の流入によるものと考えられる。そして、このような結果に導いたのは、境界条件として地すべり斜面周囲の地下水位を固定とし、地下水の出入りを自由にしたことによるとと思われる。



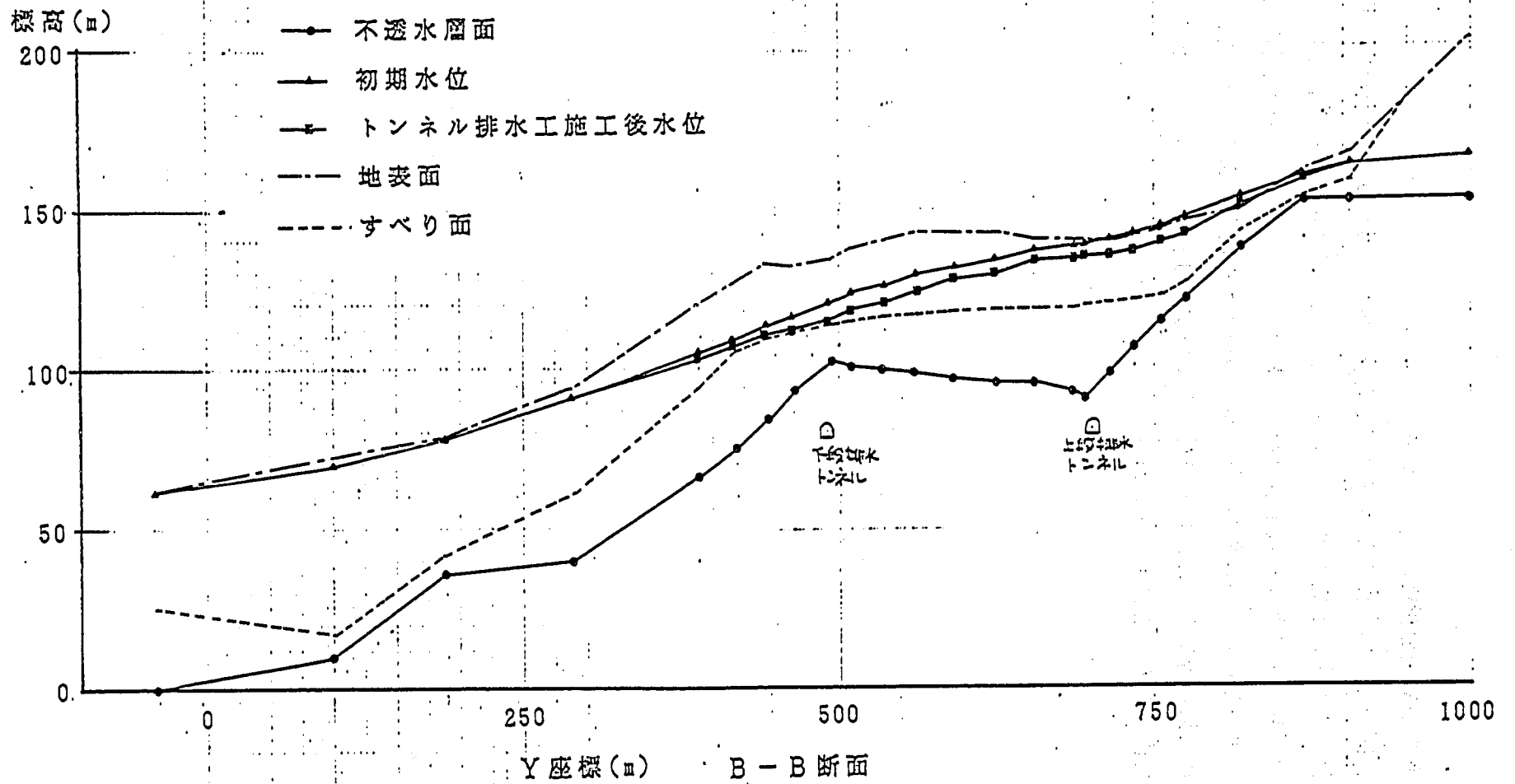
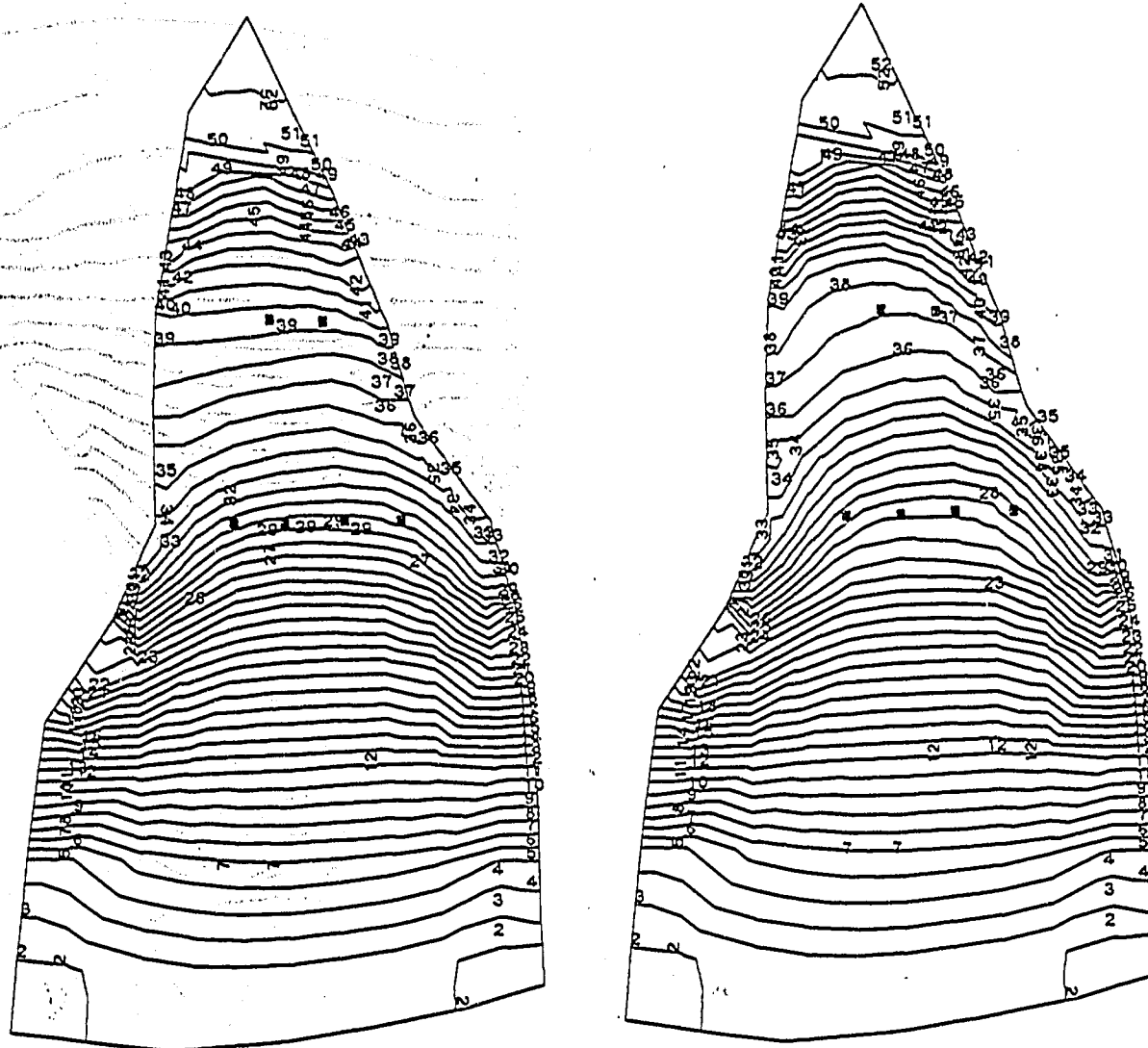


図-13 B断面におけるトンネル排水工の効果

地下水位コンター図

■ 排水トンネルにおける  
ボーリング孔口位置



初期状態

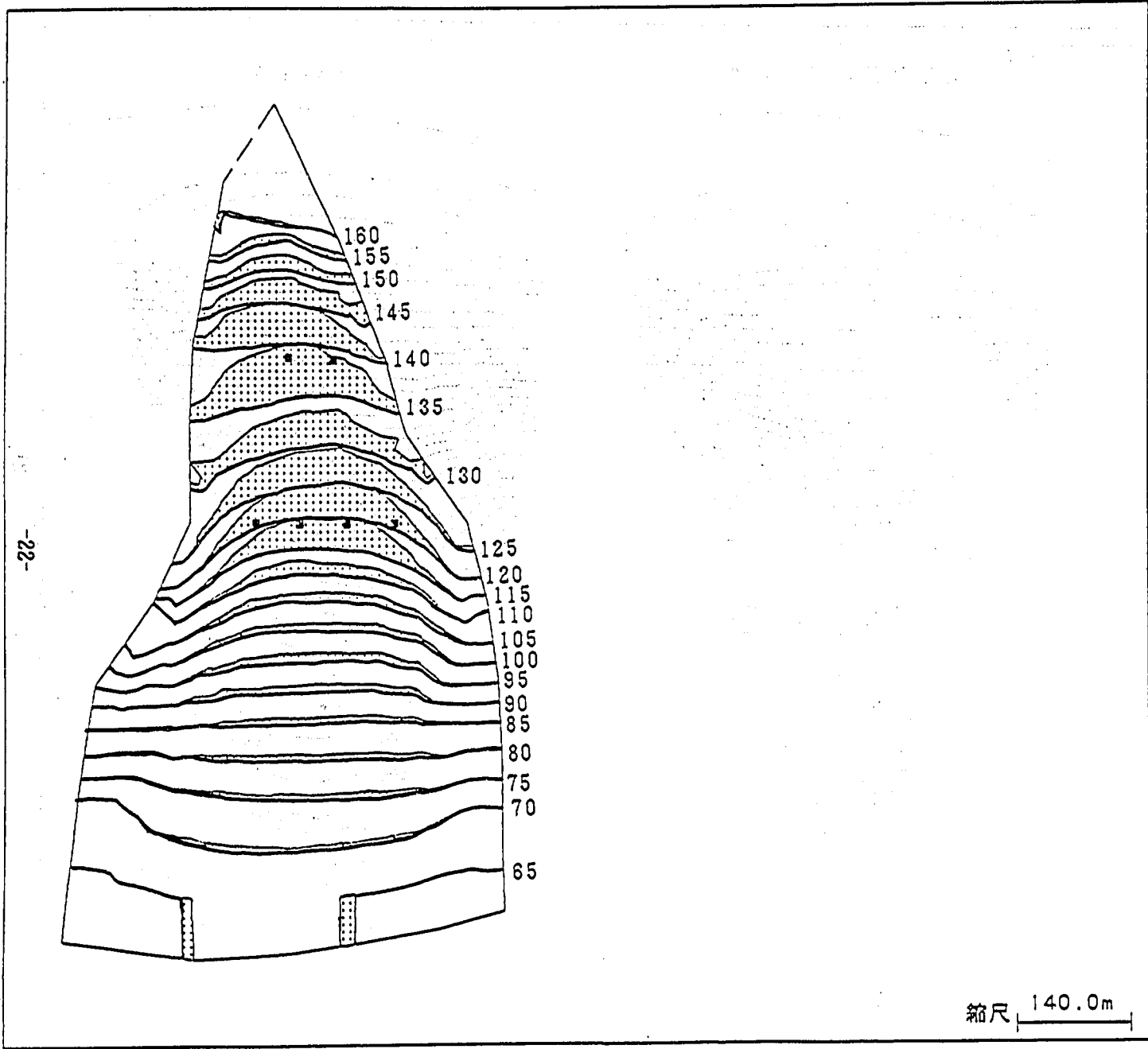
トンネル排水工施工後

縮尺 140.0m

番号	水位 (m)
1	62
2	64
3	66
4	68
5	70
6	72
7	74
8	76
9	78
10	80
11	82
12	84
13	86
14	88
15	90
16	92
17	94
18	96
19	98
20	100
21	102
22	104
23	106
24	108
25	110
26	112
27	114
28	116
29	118
30	120

番号	水位 (m)
31	122
32	124
33	126
34	128
35	130
36	132
37	134
38	136
39	138
40	140
41	142
42	144
43	146
44	148
45	150
46	152
47	154
48	156
49	158
50	160
51	162
52	164
53	166
54	168
55	170
56	172
57	174
58	176
59	178
60	180

図-14 トンネル排水工施工前後の地下水位コンター



■ 排水トンネルにおける  
ボーリング孔口位置

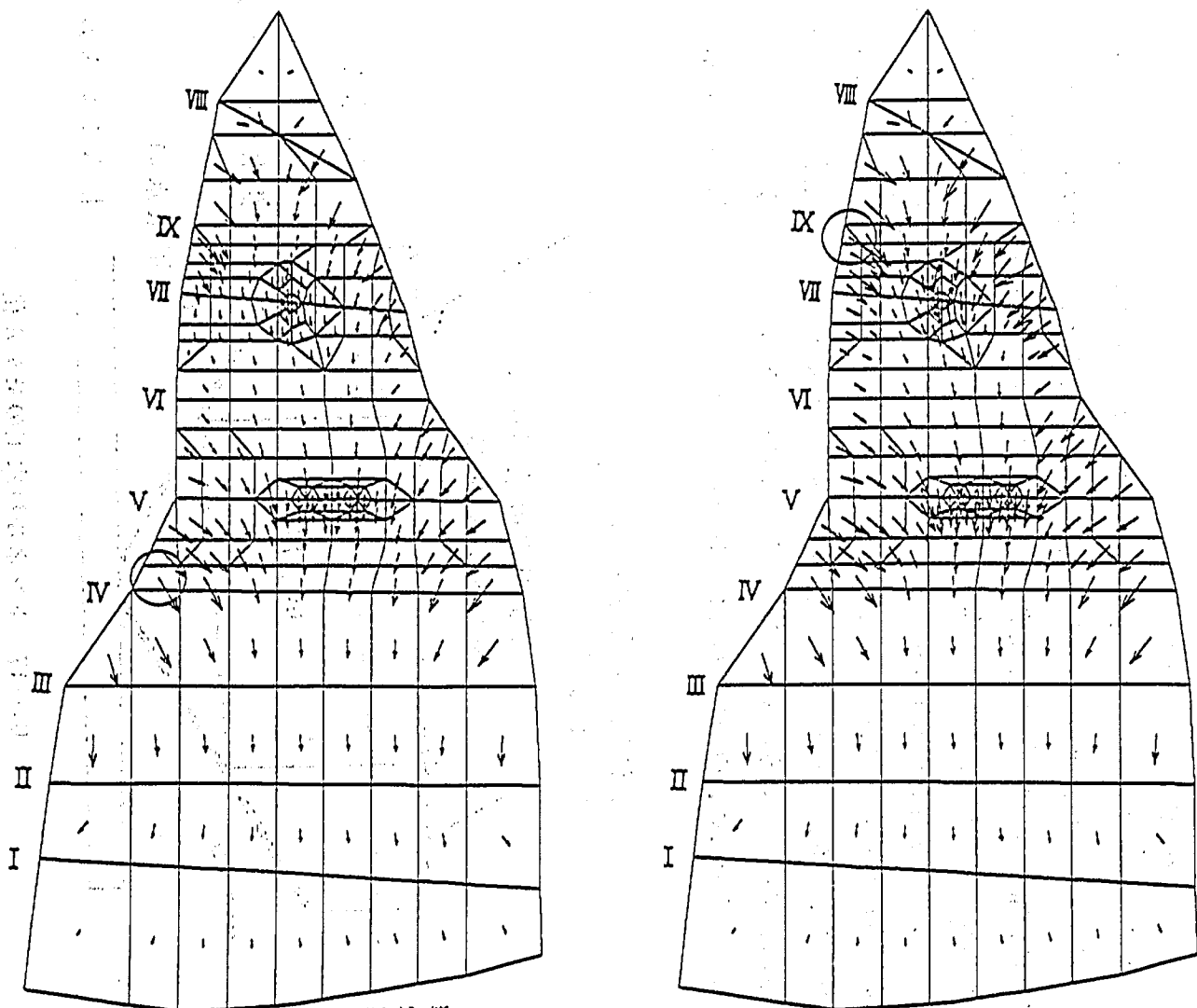
— 初期水位

— トンネル排水工施工後水位

■ 水位変化領域

図中の数値は水位を示す（単位：m）

図-15 トンネル排水工施工前後の地下水位変化



初期状態

トンネル排水工施工後

流速 0.010 cm/sec

図中の ○ は最大流速の位置を示す 縮尺 140.0m

図-16 トンネル排水工施工前後の流速ベクトル

## 1.5 トンネル排水工、横ボーリング工、集水井工の効果解析

本解析は、昭和63年度に実施したものである。

### 1.5.1 土層構造のモデル化

土層構造のモデル化は、基本的には1.4.1で述べた考え方によるものとする。すなわち、土層構造のモデルは、中～弱風化砂岩層を不透水層とし、その上部は地表面まで透水層とするものである。しかし、このモデル化による1.4でのトンネル排水工の解析では、地下水位が不透水層以下になる節点が多数存在するとプログラムが実行できなくなるという問題が生じている。このため、解析上の手法として透水層の透水係数を大きめに設定するなどの対策が必要であった。今回の解析では、透水係数を当初の設定値にするために不透水層面と透水層面の間に透水性の低い層（厚さ1 m、透水係数 $K=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ ）を仮想的に設定するという手法でこの問題を解決している。

### 1.5.2 トンネル排水工のモデル化

1.4 トンネル排水工の効果解析では、トンネル排水工のモデル化を図-4に示すようにした。すなわち、透水層中の集水ボーリングは、見掛け上の透水係数を大きくする働きがあると考え、透水層中では、集水ボーリングの存在する領域の透水係数を本来のものより大きくすることによってモデル化できるとした。そして、本解析に用いるプログラムが準三次元状態のものであるため、集水ボーリングを線状にモデル化せず、ボーリング室からの集水ボーリングは、不透水層中では円錐を逆さにしたような面形状とし、透水層中では不透水層から地表面まで鉛直に立った中空の円柱状にモデル化している。しかし、透水層中の集水ボーリングが、見掛け上の透水係数を大きくする働きがあるという考え方では、見掛け上の透水係数をどのように決めるかということが問題となる。このため、今回の解析では、図-17に示すようにモデル化した。排水トンネルは、

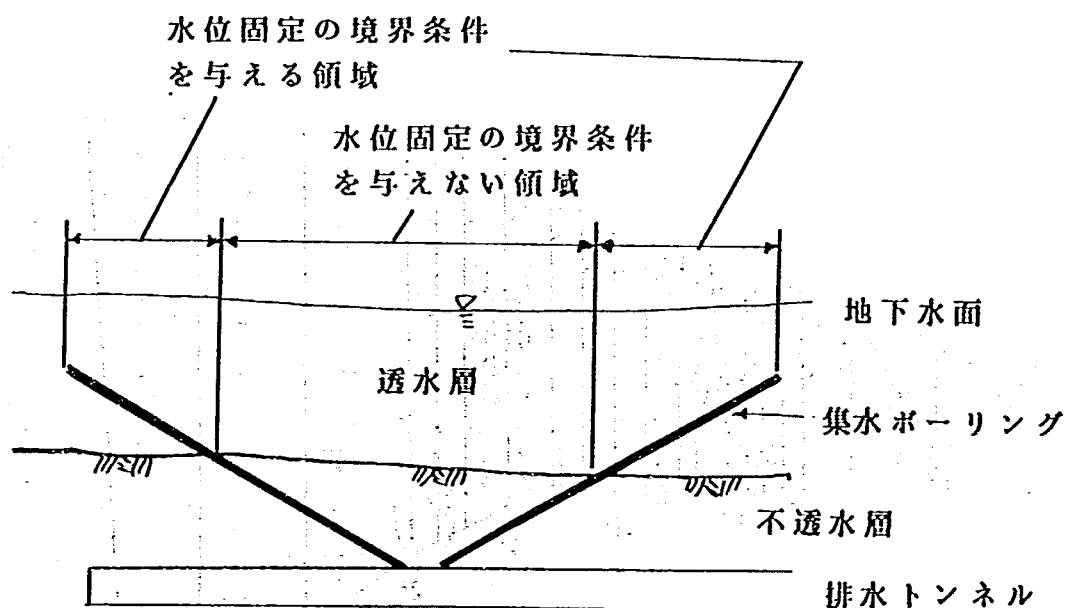


図-17 トンネル排水工のモデル化

全て中～弱風化砂岩層内に計画されている。このため、地下水排除工として有効となるのは排水トンネルのボーリング室から透水層中に向けて施工される集水ボーリングの透水層中のものに限られる。そして、集水ボーリングはボーリング位置の水圧を、ゼロにすることによって地盤から集水する。したがって、トンネル排水工のモデル化は、透水層中に存在する集水ボーリングにその位置の標高に水位を固定するという境界条件を与えて行う。ただし、地下水位以上に存在する集水ボーリングは、機能上無意味であることから解析には考慮しないものとする。

### 1.5.3 横ボーリング工、集水井工のモデル化

横ボーリング工は、地表面から一般に $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ で帯水層に向けて集水ボーリングを扇型に行い、地下水を地表に排出する工法である。また、集水井工は地下水の集中している付近に直径3～5m以上の縦井戸を下げ、その孔壁から集水ボーリングを行い、地下水を井戸に集め排水ボーリング等により地表に排水する工法である。横ボーリング工、集水井工、トンネル排水工の違いは、集水ボーリングを地表から行うか、集水井の中から行うか、あるいは、トンネル内から行うかの違いだけで基本的には同じと考えることができる。したがって、横ボーリング工、集水井工のモデル化は、1.5.2 トンネル排水工と同様にすることができるものとする。つまり、図-18、19に示すように、横ボーリング工については、集水ボーリングが地下水面に達した地点から透水層中の集水ボーリング位置の標高に水位を固定するという境界条件を与えることによってモデル化する。また、集水井工については、透水層内の集水ボーリングに前者と同様にその位置の標高に水位を固定するという境界条件を与えることによりモデル化する。

### 1.5.4 解析条件

解析は、1.4 トンネル排水工の効果解析と同様に飽和浸透流定常解析とし、図-20に示すメッシュ図は、図-5の赤崎地すべり平面図に示すI～ⅧおよびA～Dの測線における横断面図と縦断面図をもとに作成した。また、準三次元解析に必要な入力データである各節点の不透水層面および地下水位の標高、水位固定の有無、透水係数は、つぎのようにして作成した。まず、不透水層面および地下水位の標高については縦横断面図をもとに作成した。また、水位固定の有無に

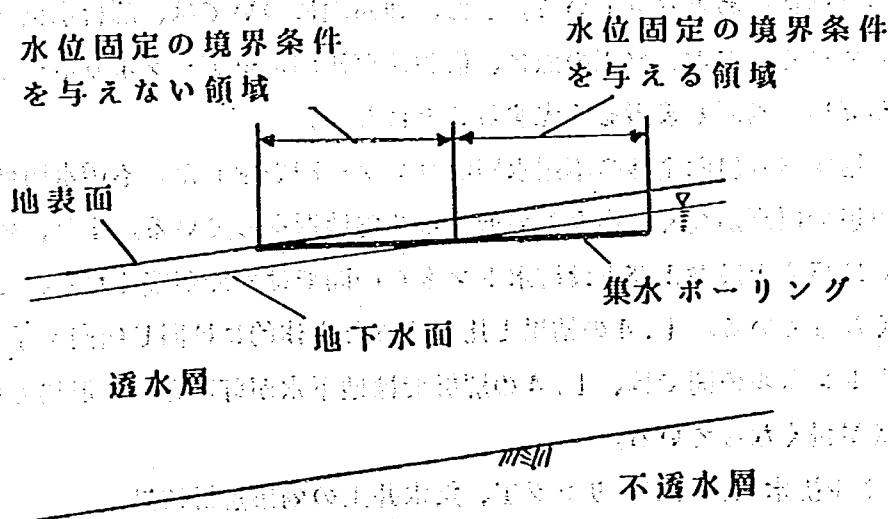


図-18 横ボーリング工のモデル化

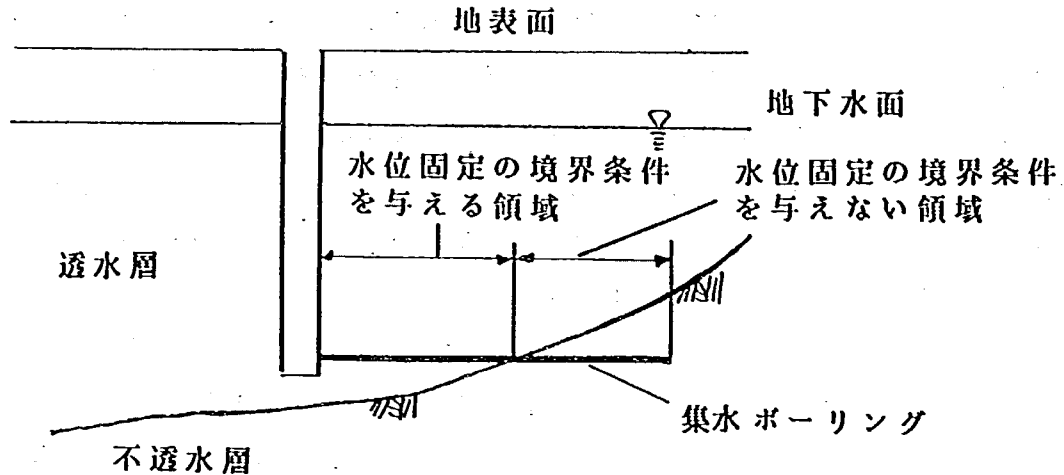


図-19 集水井工のモデル化

については地すべり斜面内に流入する地下水の流入経路が、十分に調査されていないため地すべり斜面周辺全体について水位を固定とし、地下水の出入りは自由とした。この他、透水層の透水係数は全層一定とし、 $K=1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ とした。

#### 1.5.5 不透水層面の決定

横ボーリング工、集水井工、トンネル排水工の効果解析を行う前に、1.4.3.で述べた理由により観測地下水位 (HWL) と解析地下水位が一致するように不透水層面を決定する必要がある。不透水層面の決定は、初期データを1.4.3の結果を参考にして作成し、観測水位ができるだけ再現されるように、不透水層面の標高を繰り返し修正し行った。以上の結果から最終的に求められたV、VI、VIIの横断面について、不透水層面と地下水位を図-21、22、23に示した。V、VI、VIIの横断面とも断面両端で、観測水位と解析水位を出来るだけ一致するようにしたため、断面中央付近で差が大きくなるという結果となった。V断面では、観測水位と解析水位との差が7 m程度あり、解析水位の方が低くなっている。VI断面では、観測水位と解析水位との差が6 m程度で解析水位の方が全体に高めとなっている。また、VII断面については、解析水位が観測水位より10 m以上高くなっている。なお、修正の際は、信頼性が観測水位データよりボーリングによる地質調査結果の方が高いと判断し後者を優先することにした。

図-24には、地すべり斜面全体の不透水層面コンター図を示した。不透水層面は、横断的には地すべり斜面周辺で標高が高く、中央部で低くなる谷地形をしている。また、縦断的には、地すべり斜面頭部では高く上段および下段排水トンネルの間では勾配が緩くなり、その下部では勾配が急となり低くなっている。1.4の結果と比較すると全体的には同じ傾向を示す。しかし、上段および下段排水トンネルの間では、1.4の解析では地下水が貯留される形状とはなっていたが、今回はその形状が緩くなっている。

#### 1.5.6 トンネル排水工、横ボーリング工、集水井工の効果解析結果

赤崎地すべりでは、調査結果によれば図-5に示すIV測線付近から上部ブロックにおいて、鉛

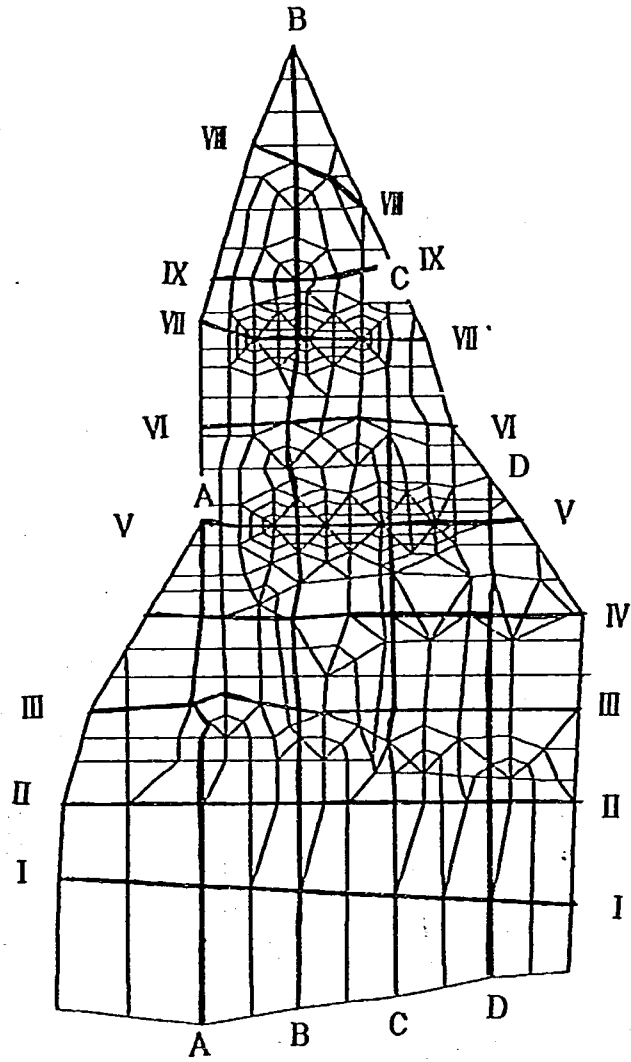


図-20 メッシュ図

縮尺 160.0m



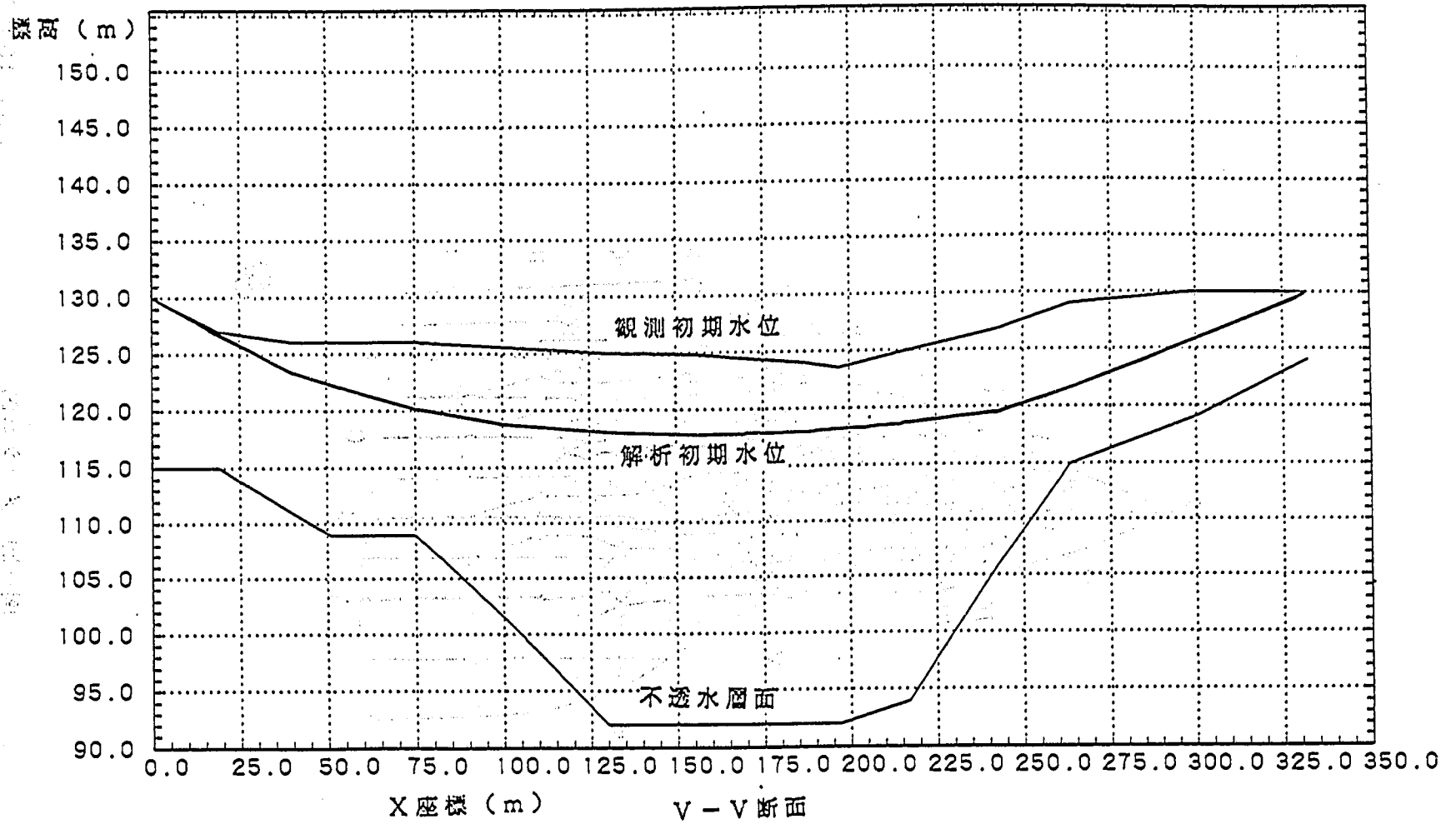


図-21 不透水層面と地下水位

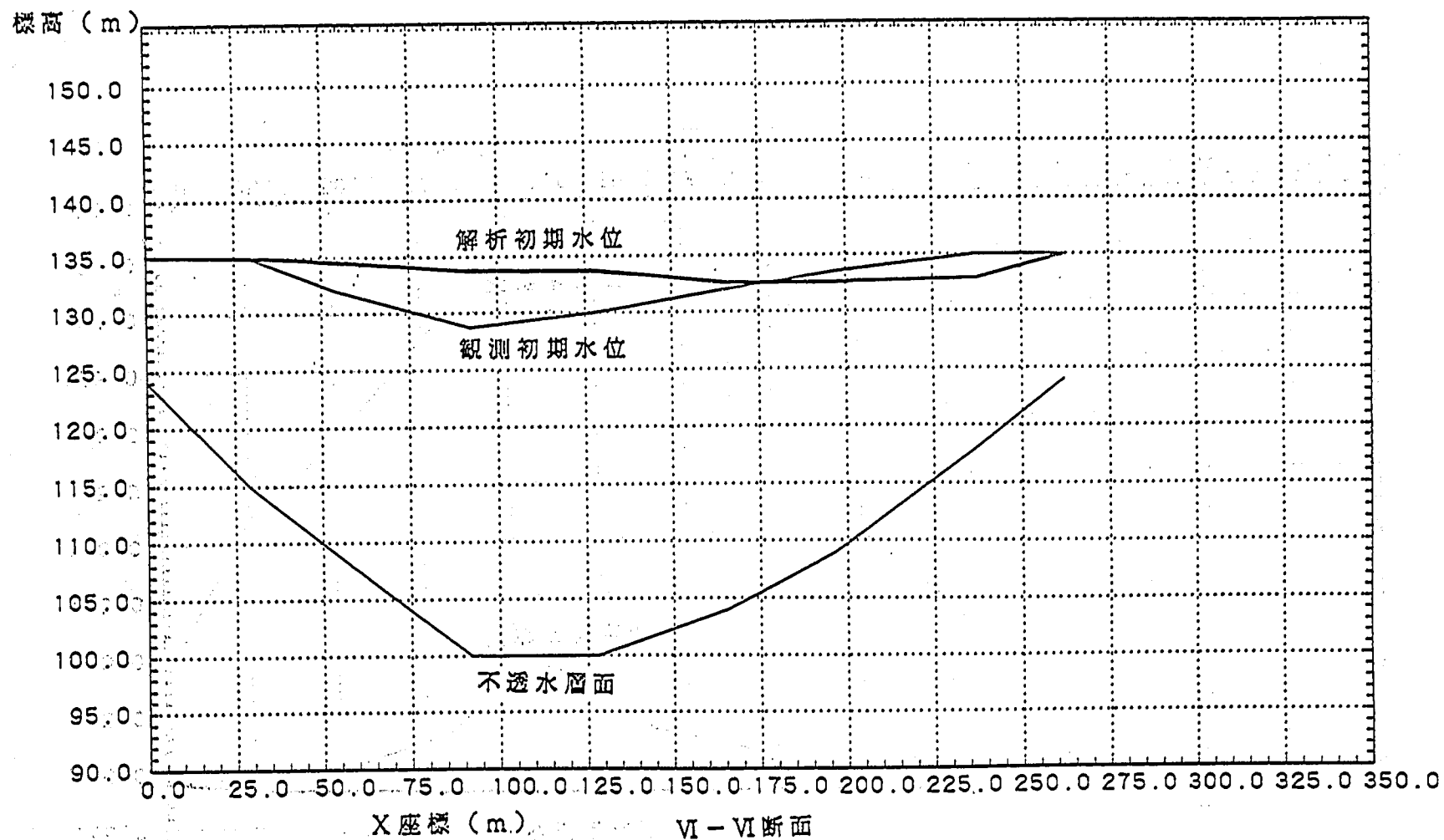


図-22 不透水層面と地下水位

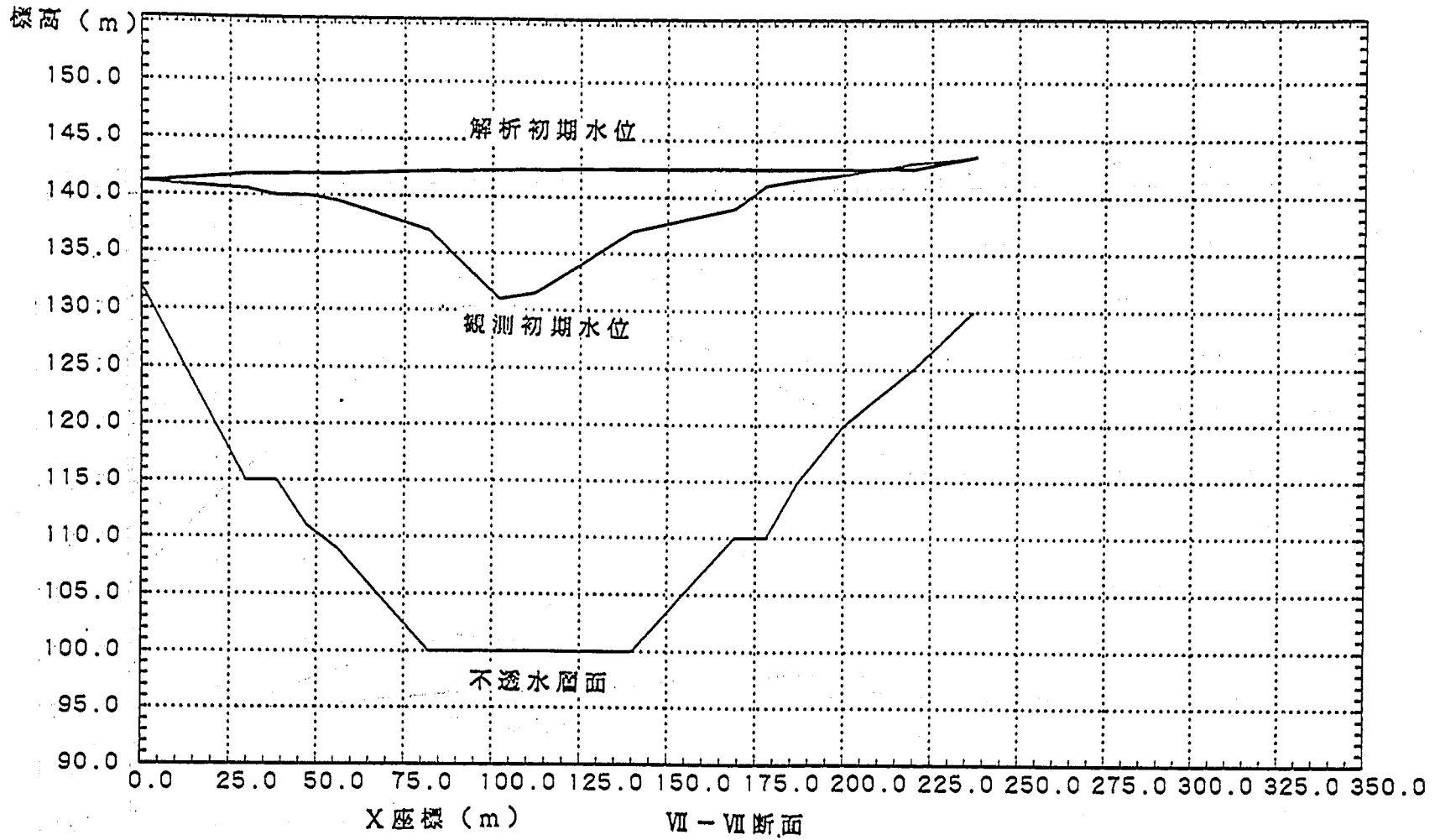
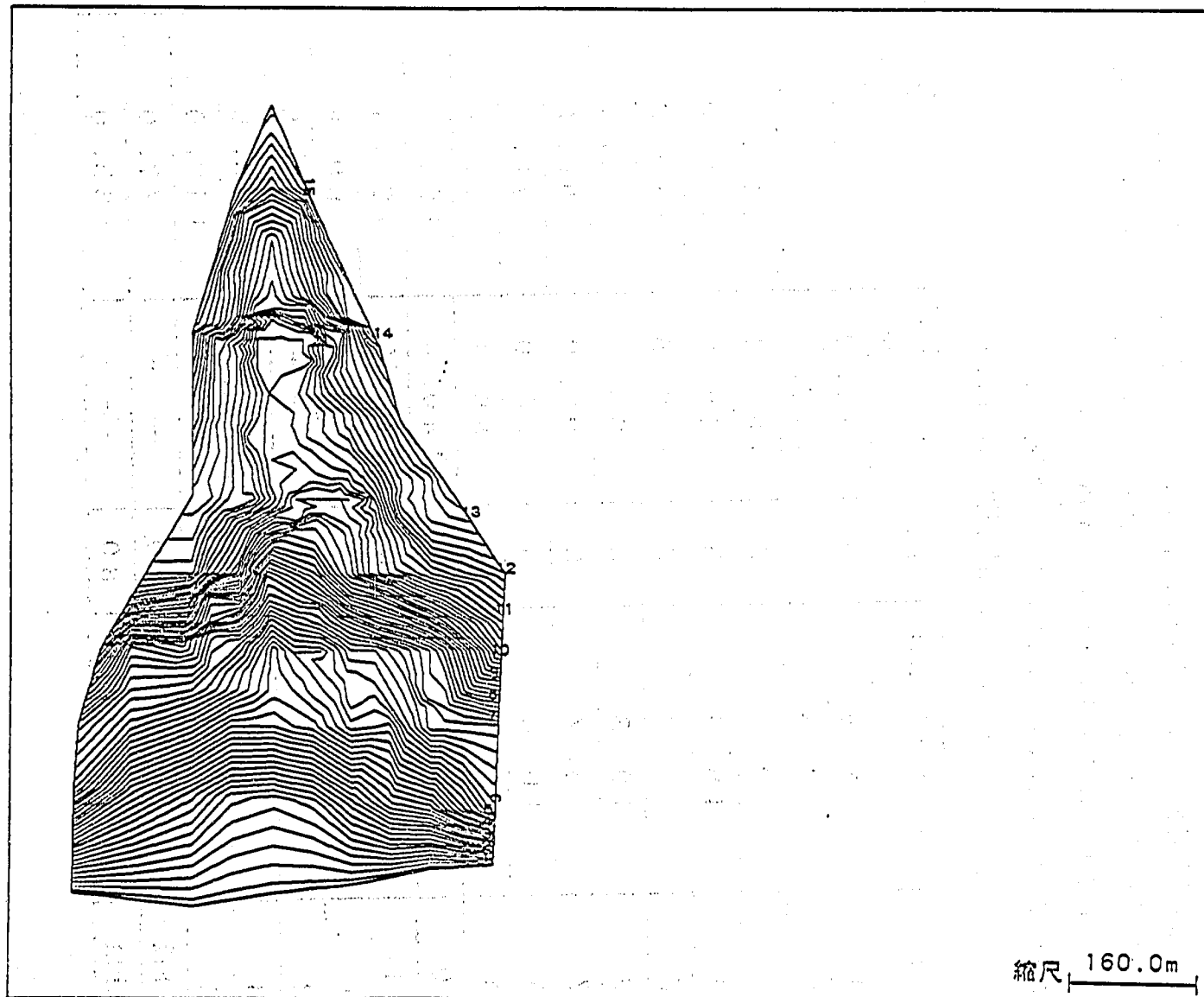


図-23 不透水層面と地下水位



番 号	不透水層面標高(m)
1	0
2	10
3	20
4	30
5	40
6	50
7	60
8	70
9	80
10	90
11	100
12	110
13	120
14	130
15	140
16	150
17	160

図-24 不透水層面コンター図

直方向に二つの帯水層が存在している。このため、地下水排除施設の配置計画では、二つの帯水層の地下水を排除するために上部の帯水層については集水井工を、下部の帯水層についてはトンネル排水工をそれぞれ計画している。しかし、本解析に用いる準三次元浸透流解析は、平面的な二次元解析であるため同じ位置において二つ以上のポテンシャルを表現することは不可能である。このため、トンネル排水工の計画している位置で想定されている二つの帯水層を考慮した解析はできない。また、平面的に同じ位置に集水井工およびトンネル排水工といった二つの工法の境界条件を与えることもできない。このような解析上の制約から今回の解析では、1.5.1土層構造のモデル化で述べたように帯水層は一つしか存在しないものとし、鉛直方向にトンネル排水工と集水井工が二段に用いられている場合は、トンネル排水工が用いられた場合と集水井工が用いられた場合の二つのケースについて行うことにした。

表-3は、地下水排除施設の施工深度を示したものである。また、図-25には、表-3をもとに、横ボーリング工、集水井工、それに鉛直方向にトンネル排水工と集水井工が計画されている地点では集水井工だけを考慮した場合（ケース1）のメッシュ図を、そして、図-26にはトンネル排水工だけを考慮した場合（ケース2）のメッシュ図をそれぞれ示した。

表-3 地下水排除施設の施工深度

地下水排除施設	ボーリング施工深度 m	角度	地表面標高 m	ボーリング施工標高 m
W1	8.8	5	111.0	102.2
W2	4.3	5	117.0	112.7
W3	19.3	5	136.4	116.7
W4	16.8	5	143.6	119.6
W5	24.3	5	132.5	119.3
W6	10.8	5	93.0	121.7
W7	6.7	5	93.0	86.3
W8	16.8	5	93.0	76.2
W9	12.8	5	88.4	75.6
W10	17.3	5	140.0	122.7
W11	15.3	5	142.0	126.7
H1	1.0	5	————	99.8
H2	1.0	5	————	99.3
H3	1.0	5	————	88.5
H4	1.0	5	————	149.0
排水トンネル下段	————	30	————	77.0
排水トンネル上段	————	30	————	85.0

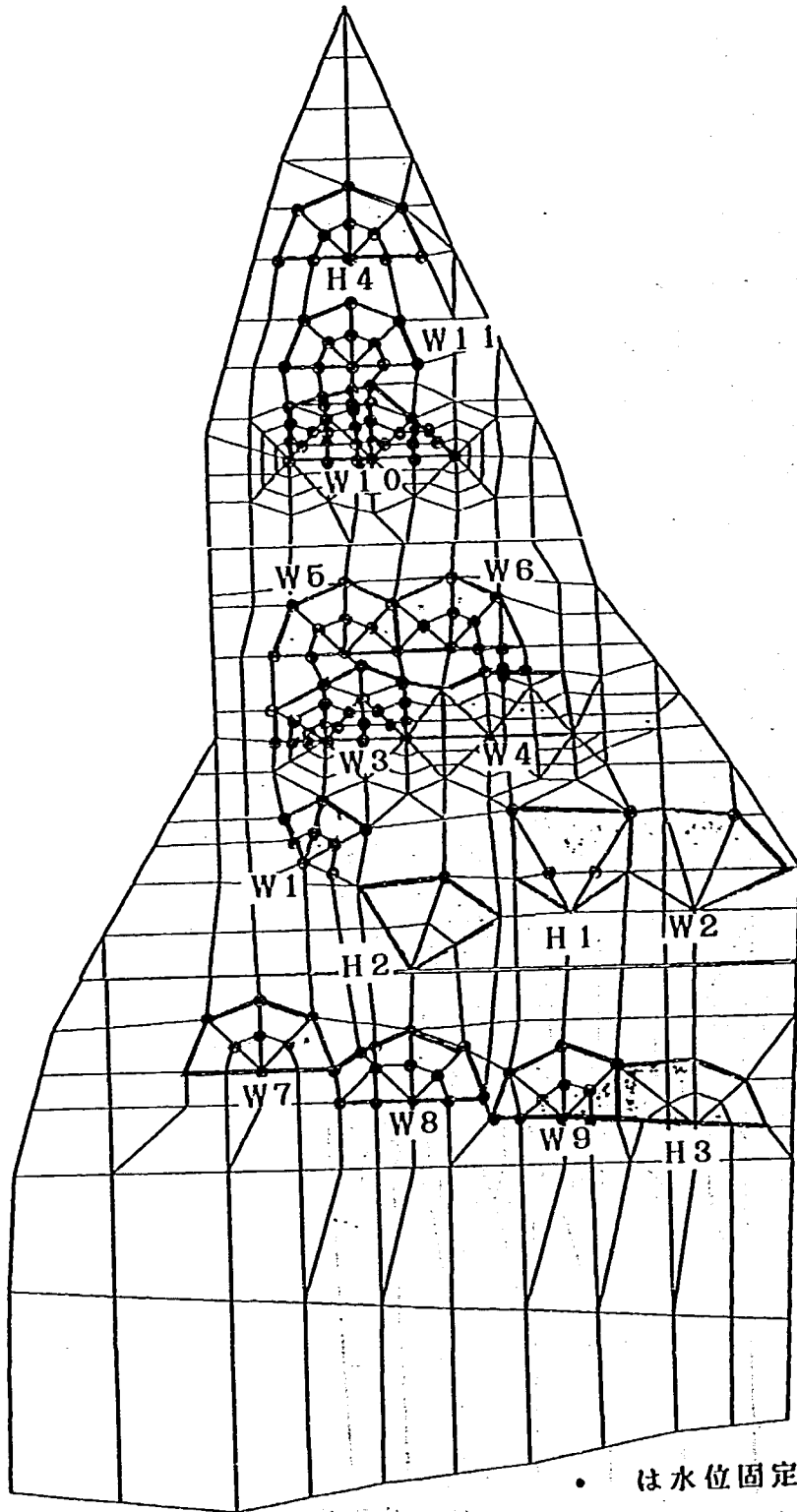
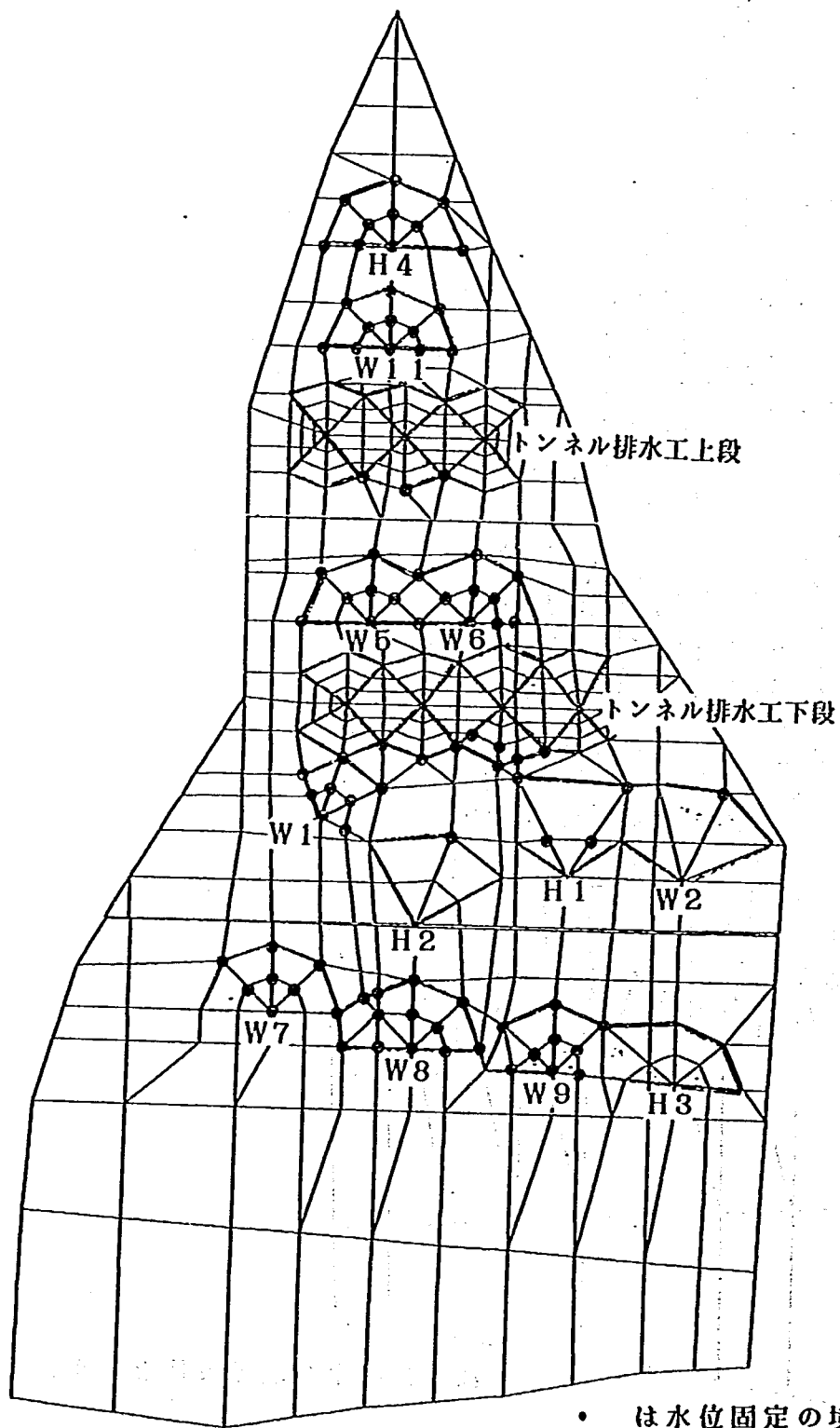


図-25 モデル化した地下水排除施設（ケース1）  
 （トンネル排水工を考慮しない）



● は水位固定の境界条件を与えた節点

図-26 モデル化した地下水排除施設（ケース2）  
（トンネル排水工を考慮する）

図-27には、主測線であるB測線の解析結果を示した。解析初期水位に対してケース1、ケース2の変化をみるといずれの場合もV測線から上部については地下水位の低下が大きくなっているが、下部については小さい。ケース1の地下水位の低下量は、V測線から上部で最大4mに達し、その下部では2m位である。一方、ケース2では、V測線上部でトンネル排水工の影響が大きく現れ、地下水位の低下量は上部排水トンネル付近で最大8m前後であり、下部排水トンネル付近では3m前後で上部のトンネル排水工の効果が大きくなっている。

平面的な地下水排除工の効果をみるために、地下水排除施設施工前後の地すべり斜面全体の地下水位コンターを示したのが図-28である。施工前の初期状態で、地すべり斜面の側面で地下水位が高く中央付近で低くなっている。それが、地下水排除施設が施工されることにより施設のある付近での地下水位が低下し、V測線より上部斜面においてはその低下量が多い。そして、特にトンネル排水工を考慮した場合には、地下水位の低下が顕著に現れている。ただし、V測線より下部斜面については、W1、W7、W8、W9付近で低下しているが、他の部分では低下量が小さくなっている。また、トンネル排水工の効果は、V測線下部斜面には影響が少ないように見える。なお、ケース1とケース2の解析結果を、重ね合わせることはできないので注意を要する。参考資料として、表-4にケース1とケース2の解析結果から得られた地下水排除施設からの排水量を示した。

図-29には、地下水排除施設施工前後の流速ベクトル図を示した。流速ベクトルは、(1.36)式により計算している。地下水排除施設施工前の初期状態では、流速ベクトルの分布は、図-16とほとんど変わらずⅢ測線から上部で地下水が地すべり斜面内に流入している。一方、施工後のケース1、2では、地下水排除施設に地下水が流入し、流速はトンネル排水工を考慮した場合の方が早くなっている。

1.4.4で述べたように、赤崎地すべりはⅣとⅤ測線の間で大きくは二つのブロックに分けられる。今回の解析も1.4.4項と同様に地下水排除施設が施工されることにより、上部ブロックにおいては地下水位の低下量は大きい、下部ブロックにおける低下量は小さいものとなっている。これは、境界条件として地すべり斜面周辺全体について水位固定とし、地下水の出入りを自由にしたことに対して、地下水排除施設が地すべり斜面内に横断的に配置されていることによる

表-4 地下水排除施設からの計算排水量

解析ケース	計算排水量 (l/min)
ケース1 (トンネル排水工を考慮しない)	1309.8
ケース2 (トンネル排水工を考慮する)	1613.7



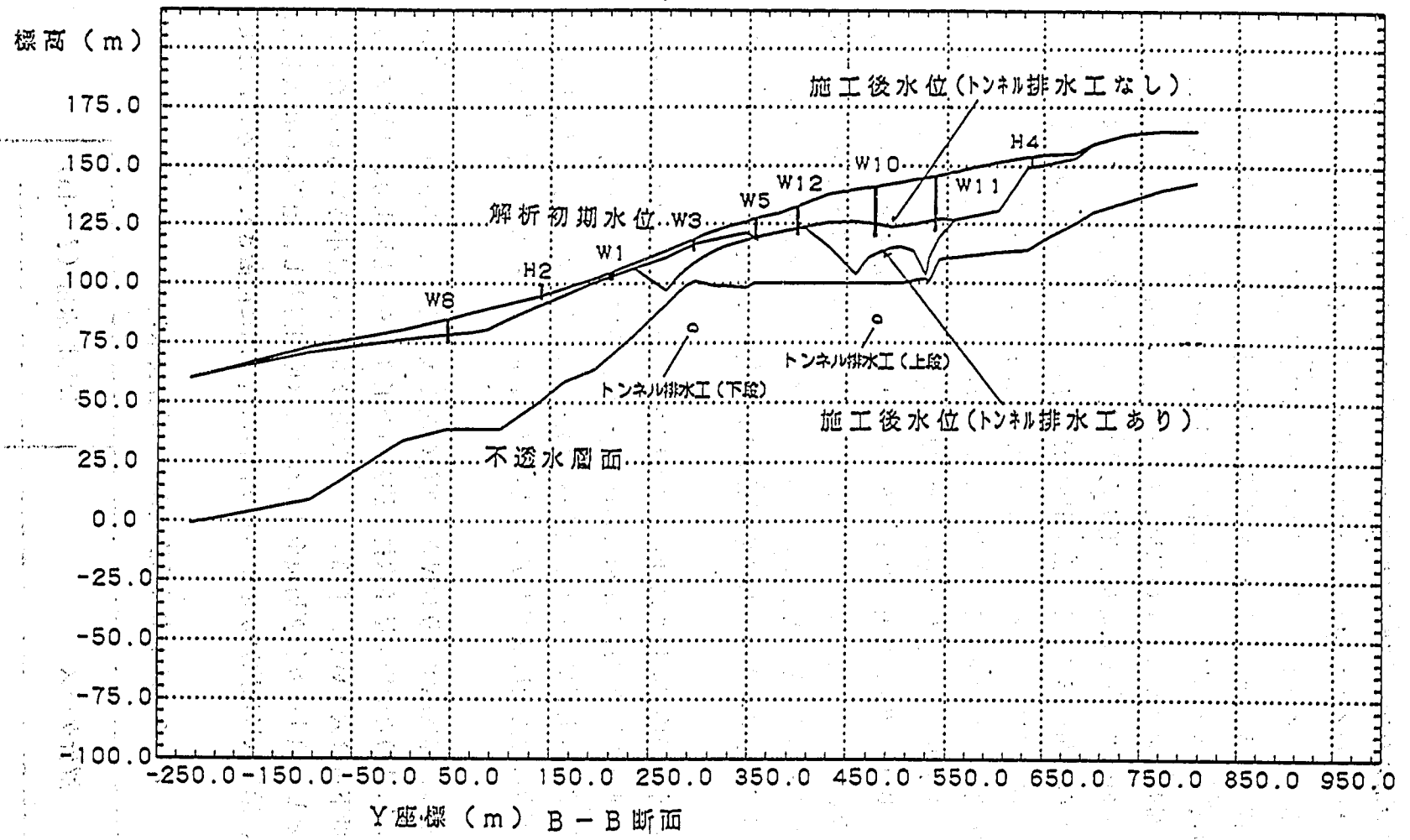
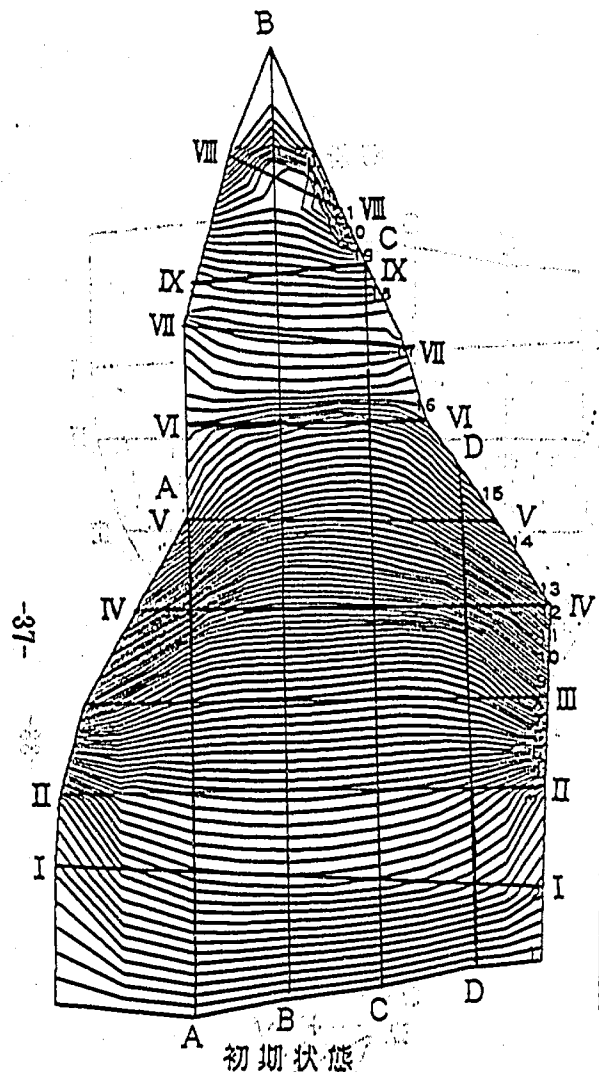
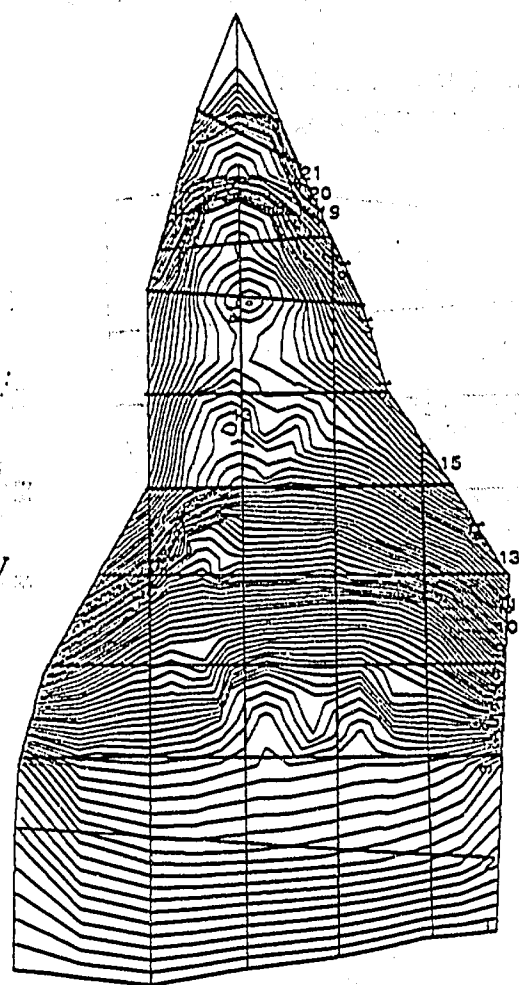


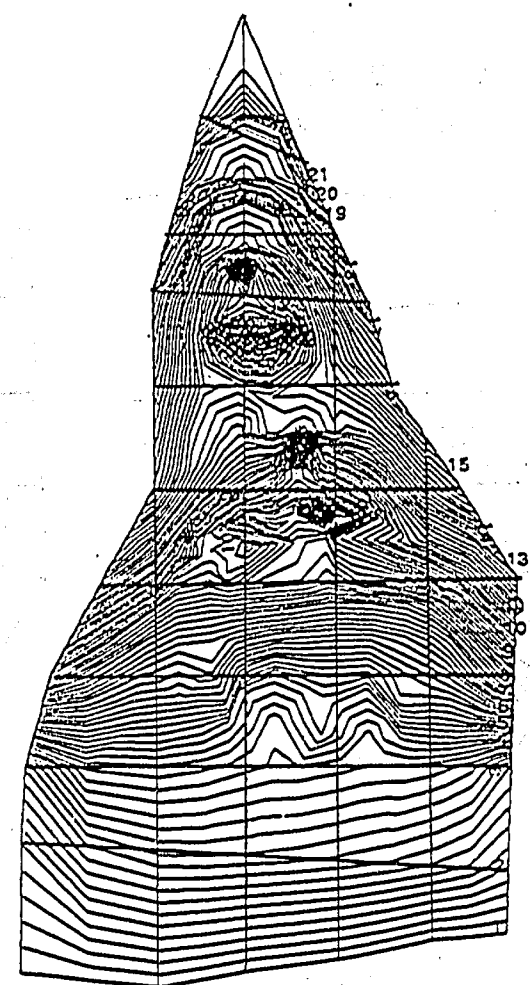
図-27 B断面における地下水排除工の効果



初期状態



地下水排除工施工後  
(トンネル排水工を考慮しない)

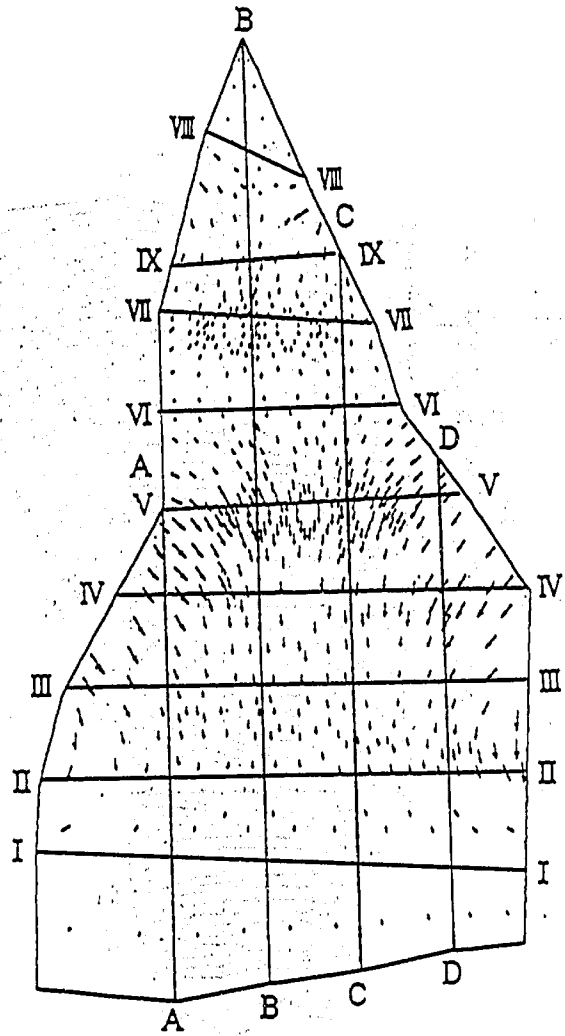


地下水排除工施工後  
(トンネル排水工を考慮する)

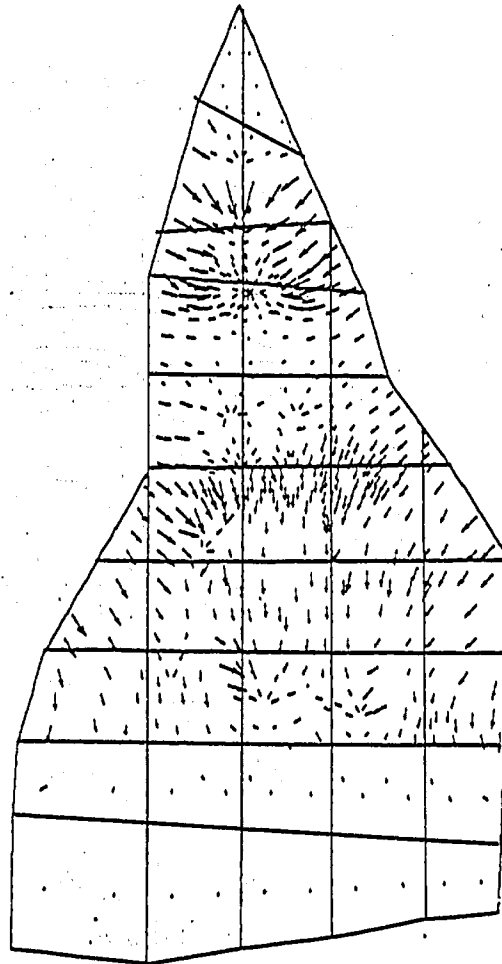
番号	水位標高(m)
1	60.0
2	65.0
3	70.0
4	75.0
5	80.0
6	85.0
7	90.0
8	95.0
9	100.0
10	105.0
11	110.0
12	115.0
13	120.0
14	125.0
15	130.0
16	135.0
17	140.0
18	145.0
19	150.0
20	155.0
21	160.0
22	165.0
23	170.0

縮尺 160.0m

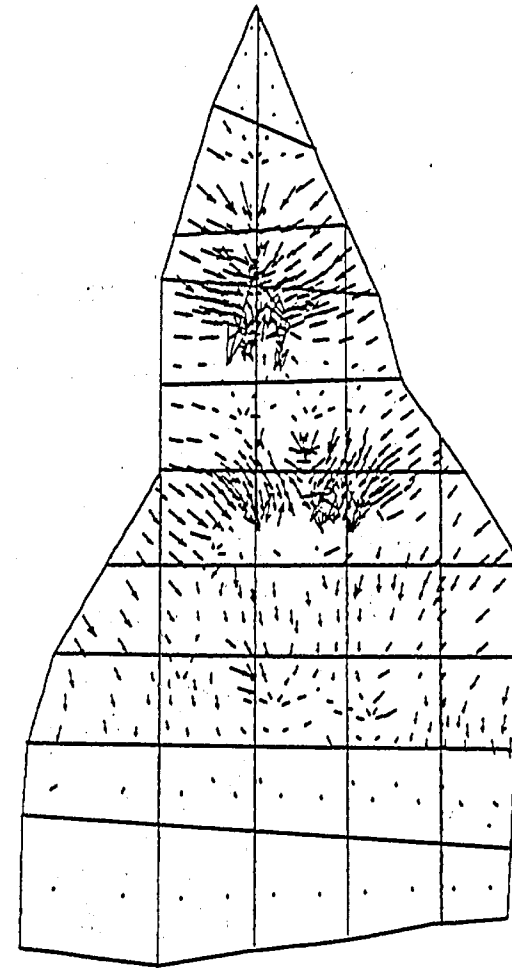
図-28 地下水排除施設施工前後の地下水位コンター



初期状態



地下水排除工施工後  
(トンネル排水工を考慮しない)



地下水排除工施工後  
(トンネル排水工を考慮する)

縮尺 160.0m

流速  $2.000 \times 10^{-3}$

図-29 地下水排除施設施工前後のベクトル図

と思われる。このような場合は、当然のことながら地すべり斜面側面に沿って施設を配置すれば地下水位を下げるができる。したがって、地下水排除施設の配置計画を立てるには、地下水がどのように地すべり斜面内に流入しているかを調査することが非常に重要であると言える。

1.4 トンネル排水工の効果解析および1.5 トンネル排水工、横ボーリング工、集水井工の効果解析では、入力データに関する調査が十分に行われていないため、多くの仮定を設けて行う必要があった。したがって、解析結果は必ずしも実際の地下水排除工の効果を示したものではない。地下水排除工の効果精度良く求めるためには、今後入力データに関する調査を十分に行う必要がある。

地すべり斜面において今回のような数値解析を実施することにより、不透水層面の形状および地下水の流速と流動方向（ベクトル）が求められる。これらは、地下水排除施設を施工する場合、前者は集水ボーリングの施工位置の決定に、後者は地下水排除施設の施工位置の決定に役立つと思われる。1.4と1.5の解析では、トンネル排水工において集水ボーリングが、不透水層が浅いために透水層に達せず集水能力の無いものが出るという結果が現れた。また、下部ブロックにおいては、地下水排除施設が地すべり斜面内に横断的に配置されているために、地下水位の低下量が小さいという結果が出た。これらの結果は、境界条件の設定によるところが大きいのであるが、トンネル排水工の問題については、不透水層面の形状をもとに集水ボーリングの位置と方向を検討すれば解決すると思われる。また、地下水排除施設の配置の問題については、地下水の流動方向をもとに検討すれば解決すると考えられる。

#### 1.6 「割れ目系地山の三次元地下水解析プログラム」を地すべり斜面における地下水排除工の効果解析に適用する場合の注意点

本プログラムは、準三次元状態を仮定した浸透流解析プログラムである。このため、解析対象は準三次元状態を満足する必要がある。これは、鉛直方向の流れ成分が非常に小さいという条件であり、具体的には、解析領域がある程度平坦であることを要求する。地すべり斜面は、ある程度の勾配を持つため、勾配が急な場合への適用には問題があると思われる。その問題とは、水平方向の流速に比べて鉛直方向の流速が無視できない場合である。具体的な判断方法としては、観測水位が、本プログラムで再現できるかどうかの一つの目安となると思われる。この他、準三次元浸透流解析では、帯水層が一つの場合しか解析ができない。したがって、帯水層が二つ以上あると判断される場合も帯水層が一つであるとしてモデル化を行う必要がある。帯水層を二つ以上設定する必要がある場合には、断面二次元解析で解析を行うか、三次元解析を行なう必要がある。

## 2. ボーリングコアを用いたリングせん断試験<sup>4)</sup>

地すべり斜面における防止工の合理的な設計を行うためには、斜面の安定度を正確に評価する必要がある。そのためには、すべり面形等の斜面形状やすべり面に作用する間隙水圧の測定、すべり面のせん断強さ等を求めることが非常に重要な作業である。一般的には、すべり面のせん断強さを決定する方法として、現状の斜面の安全率を1.0と仮定し逆算によりせん断強さ ( $C$ 、 $\phi$ ) の関係を求め定数の一方 (普通は粘着力) を適当に仮定し、他方を求める非常に実用的ではあるが経験的要素が多分に加味される解析方法が用いられている。しかし、この方法では、降雨量の多少および防止工事による斜面の安全率の変化を正確に求めることはできない。

すべり面における長期的なせん断強さは、ピーク強さ、完全軟化強さ、残留強さの3種類がある。これらの強さを求めるには、大変形のせん断試験を実施する必要がある。リングせん断試験は、その一つの方法である。リングせん断試験機は、ドーナツ型の供試体の中央に下部せん断箱から一方向のトルクを与えることにより、試験中にせん断面を変えることなく、任意の変位量まで自由にせん断させることのできる試験機である。ここで用いた試験供試体の寸法は、外径15.0cm、内径10.0cm、高さ約2.0cmである。

リングせん断試験は、昭和59~61年度には図-30に示す地すべり斜面中間部において昭和59、60年度に施工された集水井の位置およびボーリングBV-56-5の3ヶ所のすべり面付近の粘土と、阿賀野川沿いの地すべり末端部の河岸部に絞り出された粘土について行っている。昭和62、63年度は、図-30に示す上部ブロックに位置するボーリングBV-61-1 (深度25.5~25.9m) とBV-62-3 (深度15.8~16.3m) のすべり面付近のコア (凝灰質粘土) を用いて実施した。

試験に用いた供試体は、これまでと同様に以下に示す方法により作成したスラリー試料である。すなわち、蒸留水の中に一週間程度浸して置き、その後、ミキサーにかけ、礫等を除くため420 $\mu$ フルイを通過させる。そして、適当な含水比になるまで50 $^{\circ}$ C前後の乾燥炉で乾燥させるという方法である。試験条件は圧密排水とし、载荷後約一週間前後圧密した後、せん断速度0.01mm/minでせん断試験を行っている。

図-31-a、b、cには、各垂直応力 $\sigma_n$ 毎のせん断応力 $\tau$ および垂直変位~水平変位との関係を示した。また、図-32-a、bには、 $\tau \sim \sigma_n$ の試験結果を示した。BV-61-1については、ピーク強さとして $C' = 0.29 \text{tf/m}^2$ 、 $\phi' = 13.7^{\circ}$ 、残留強さとして $C'_r = 0 \text{tf/m}^2$ 、 $\phi'_r = 7.8^{\circ}$ が、BV-62-3については、ピーク強さとして $C' = 2.67 \text{tf/m}^2$ 、 $\phi' = 14.2^{\circ}$ 、残留強さとして $C'_r = 1.57 \text{tf/m}^2$ 、 $\phi'_r = 1.3^{\circ}$ が各々得られた。

昭和59年度からのリングせん断試験結果は、表-5に示す通りである。ピーク強さに対して残留強さは、地すべり末端部の試料を除くとかなり小さくなっている。特に、BV-62-3はピーク強さの内部摩擦角が $\phi' = 14.2^{\circ}$ に対して残留強さの内部摩擦角は $\phi'_r = 1.3^{\circ}$ と10%に満たないものとなっている。

表-6には、各試料の土質試験結果を示した。また、図-33、34は、表-6の値を各図にプロットし各試料の土質特性を示したものである。図-33によれば、BV-62-3についてはVH傾

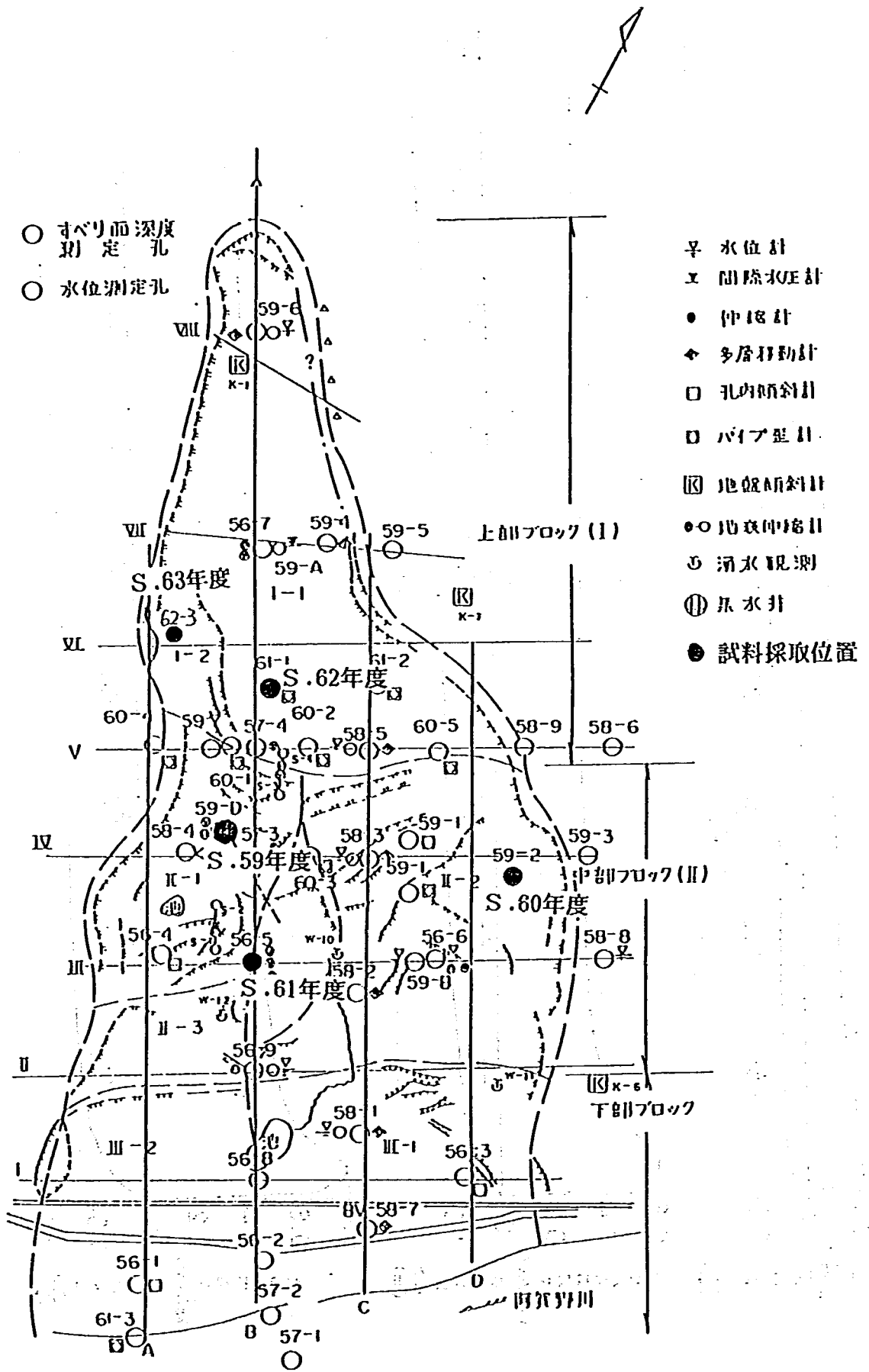


図-30 リングせん断試験試料採取位置

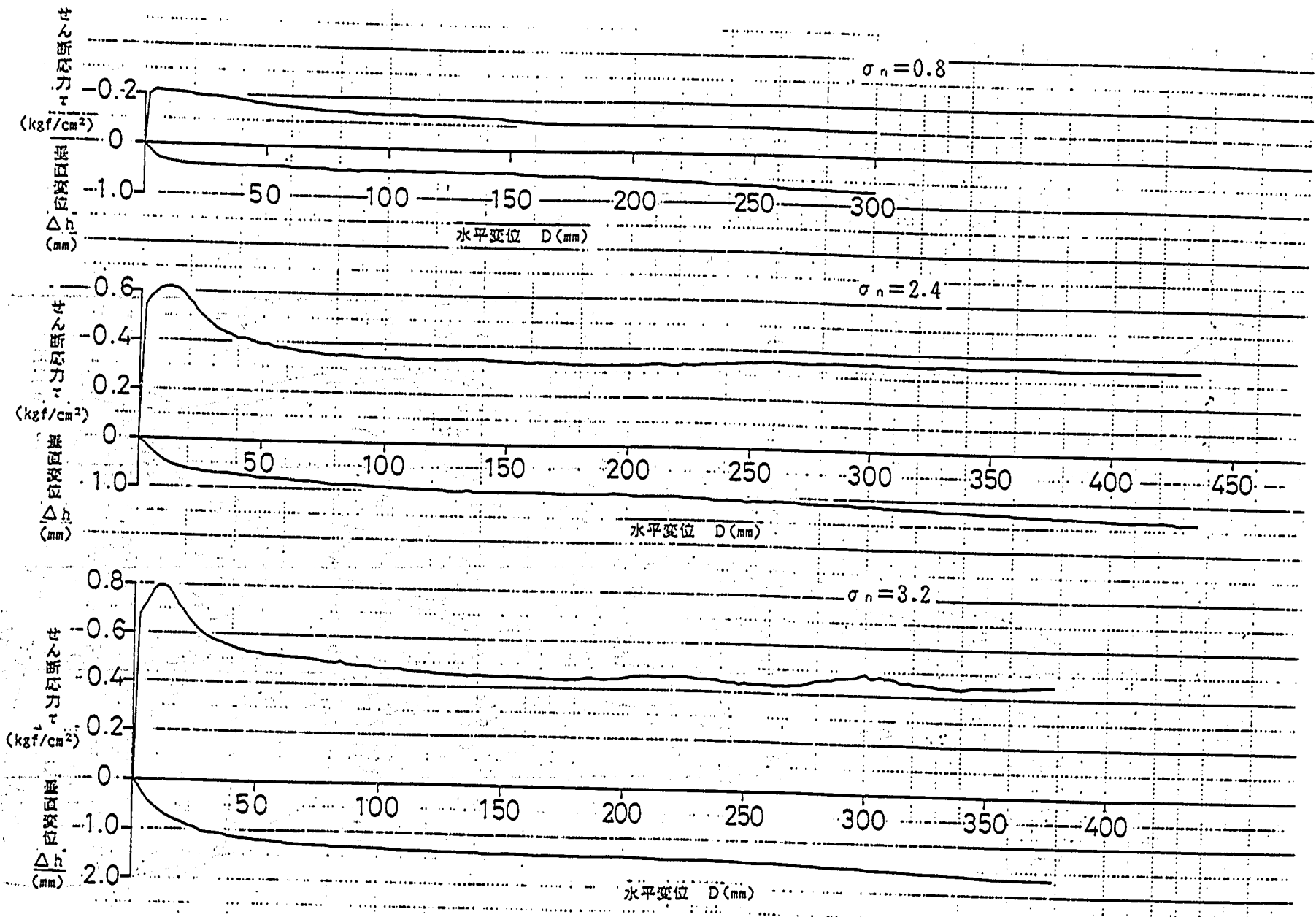


図-31-a せん断応力および垂直変位～水平変位の関係 (BV-61-1)

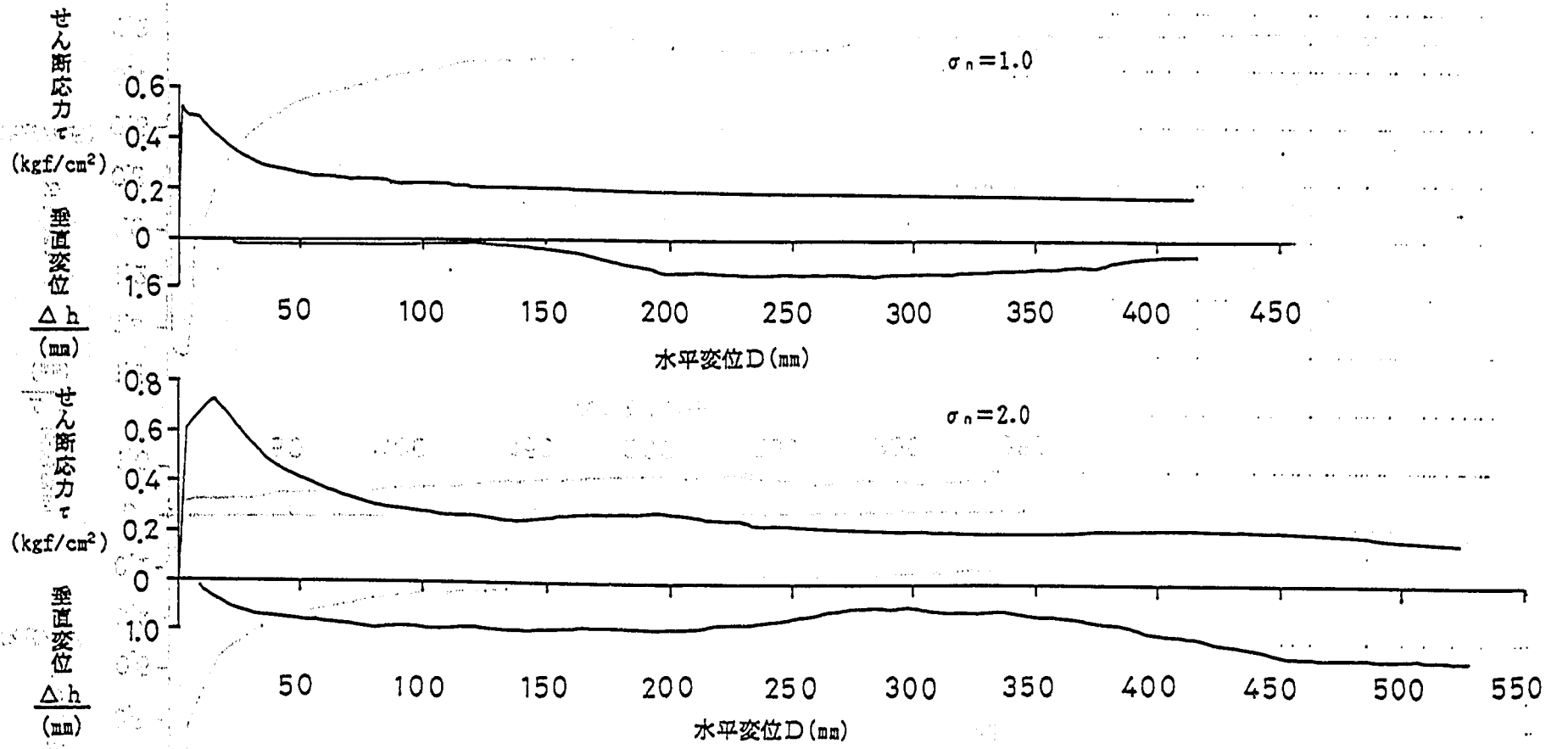


図-31-b せん断応力および垂直変位～水平変位の関係 (BV-62-3)



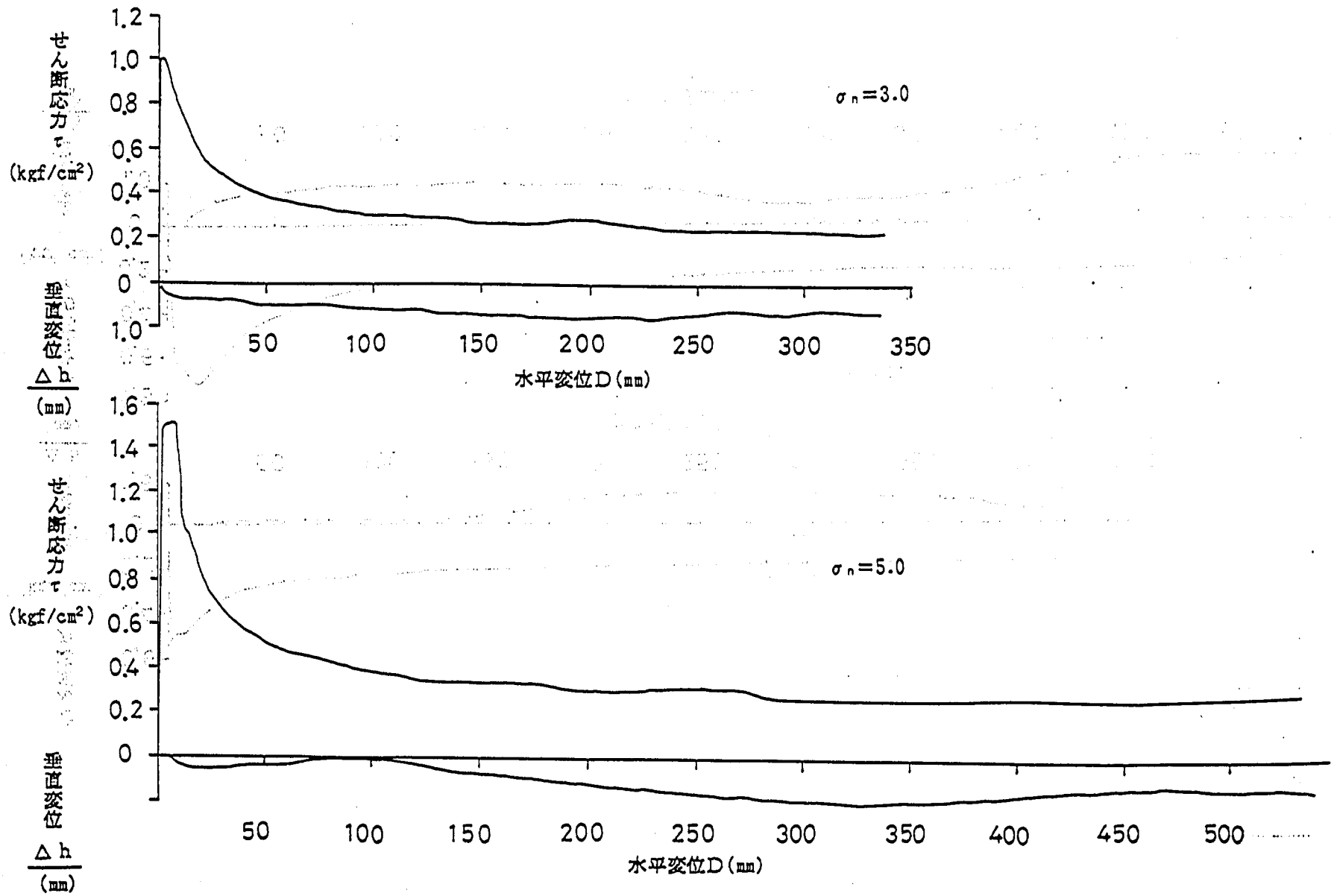


図-31-c せん断応力および垂直変位～水平変位の関係 (BV-62-3)

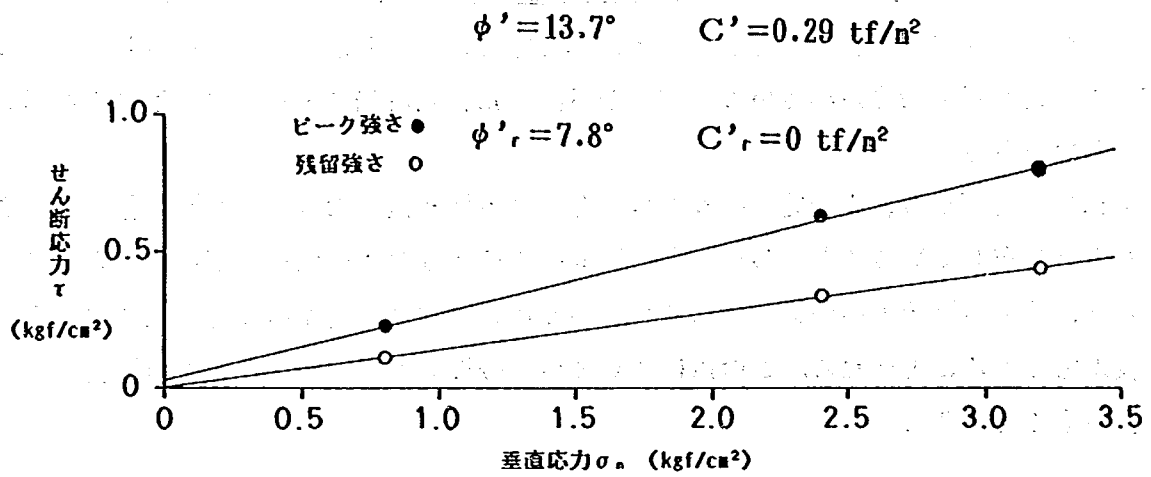


図-32-a リングせん断試験結果 (BV-61-1)

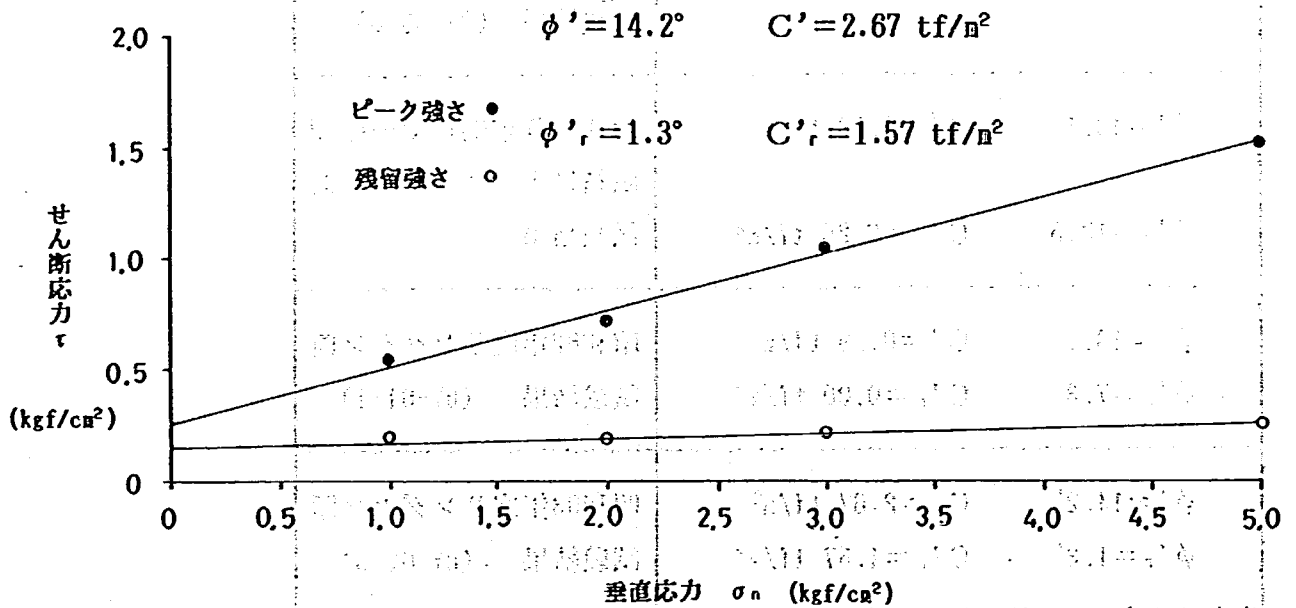


図-32-b リングせん断試験結果 (BV-62-3)

域に属すが他の試料はCH領域に属し、ほぼ第三紀層地すべりの特性を有することになる。また、図-34によれば地すべり末端の試料は、seycekによって示された点線の領域に入るが、他の試料については塑性指数が100を超える値であったり残留強さが小さいことが入っていない。このことから、赤崎地すべりのすべり面粘土は地すべり末端部を除くと、他の地すべりに比較して非常に塑性指数が大きく且つ残留強さが小さいことが分かる。また、残留強さのバラツキは、塑性指数の大小によるものである。

以上の土質試験の結果から、赤崎地すべりには、非常に塑性指数が大きく且つ残留強さが小さいすべり面粘土が分布していることが分かった。実際にこのようなすべり面粘土が広く分布していることになれば、地下水排除工の効果が出にくいということになり、地すべり防止工法の見直しを考える必要が出てくることになる。この点については、今後も土質試験を行い土の性質を明らかにする必要があると考える。

表-5 土質強度定数

$\phi' = 13.8^\circ$ $\phi'_r = 4.8^\circ$	$C' = 0.49 \text{ tf/m}^2$ $C'_r = 0.30 \text{ tf/m}^2$	昭和59年度リングセン断 試験結果 (W1)
$\phi' = 18.0^\circ$ $\phi'_r = 6.0^\circ$	$C' = 0.95 \text{ tf/m}^2$ $C'_r = 0.50 \text{ tf/m}^2$	昭和60年度リングセン断 試験結果 (W2)
$\phi'_r = 4.9^\circ$	$C'_r = 0.51 \text{ tf/m}^2$	昭和61年度リングセン断 試験結果 (BV-56-5)
$\phi' = 18.1^\circ$ $\phi'_r = 13.5^\circ$	$C' = 0.00 \text{ t/m}^2$ $C'_r = 0.25 \text{ tf/m}^2$	地すべり末端部での採取 試料によるリングセン断 試験結果
$\phi' = 13.7^\circ$ $\phi'_r = 7.8^\circ$	$C' = 0.29 \text{ tf/m}^2$ $C'_r = 0.00 \text{ tf/m}^2$	昭和62年度リングセン断 試験結果 (BV-61-1)
$\phi' = 14.2^\circ$ $\phi'_r = 1.3^\circ$	$C' = 2.67 \text{ tf/m}^2$ $C'_r = 1.57 \text{ tf/m}^2$	昭和63年度リングセン断 試験結果 (BV-62-3)

(注) (a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h) (i) (j) (k) (l) (m) (n) (o) (p) (q) (r) (s) (t) (u) (v) (w) (x) (y) (z)

表-6 土質試験結果

試料	S.59試料	S.60試料	BV-56-5	地すべり 末端部	BV-61-1	BV-62-3
深度 m	10.5	8.0	33.8~ 34.2	—	25.5~ 25.9	15.8~ 16.3
液性限界 $W_L\%$	200.0	126.8	286.0	68.4	274.0	126.0
塑性限界 $W_p\%$	20.7	20.2	13.5	20.3	44.6	56.0
塑性指数 $I_p$	179.3	106.6	272.5	48.1	229.4	70.0
日本統一土質分類	CH	CH	CH	CH	CH	VH
残留強さ $\phi'_r$	4.8	6.0	4.9	13.5	7.8	1.3

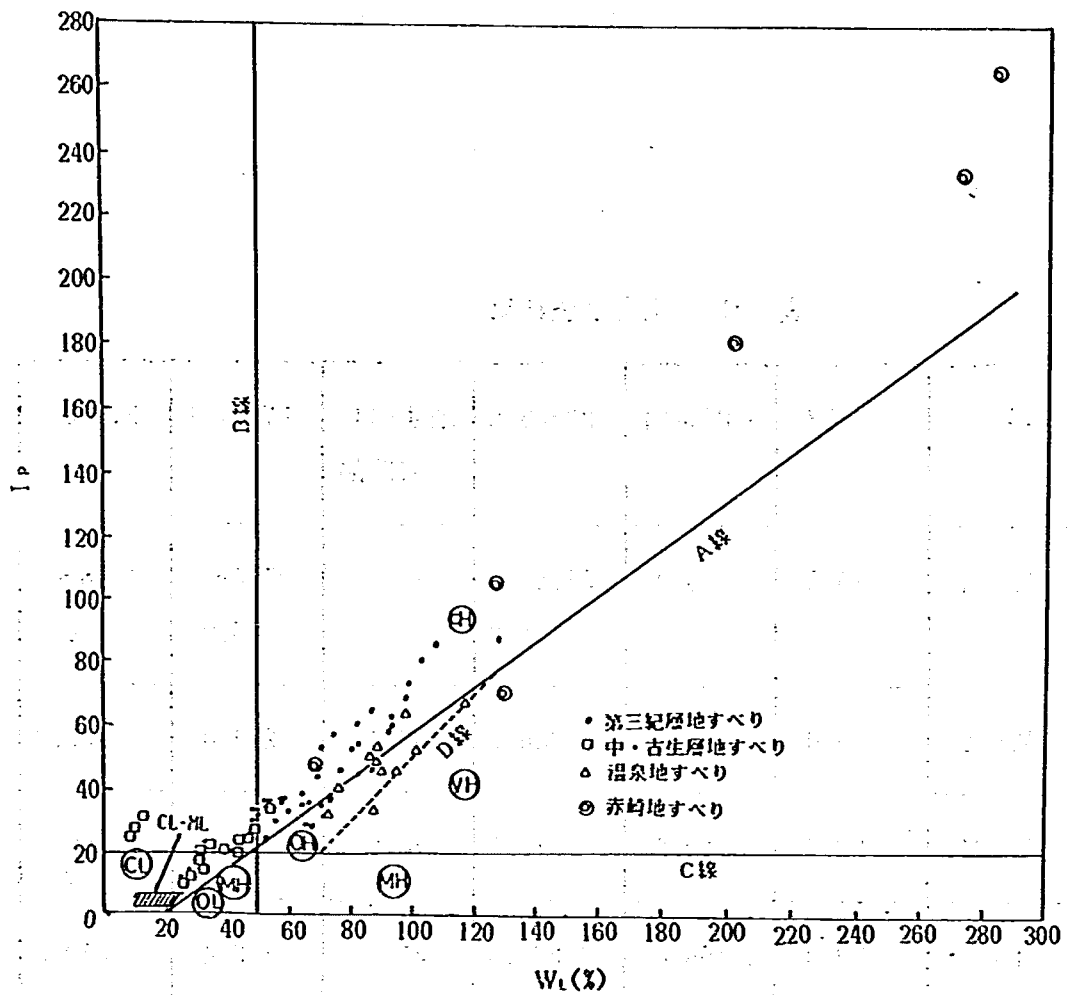


図-33 Casagrandeの塑性図<sup>4)</sup>

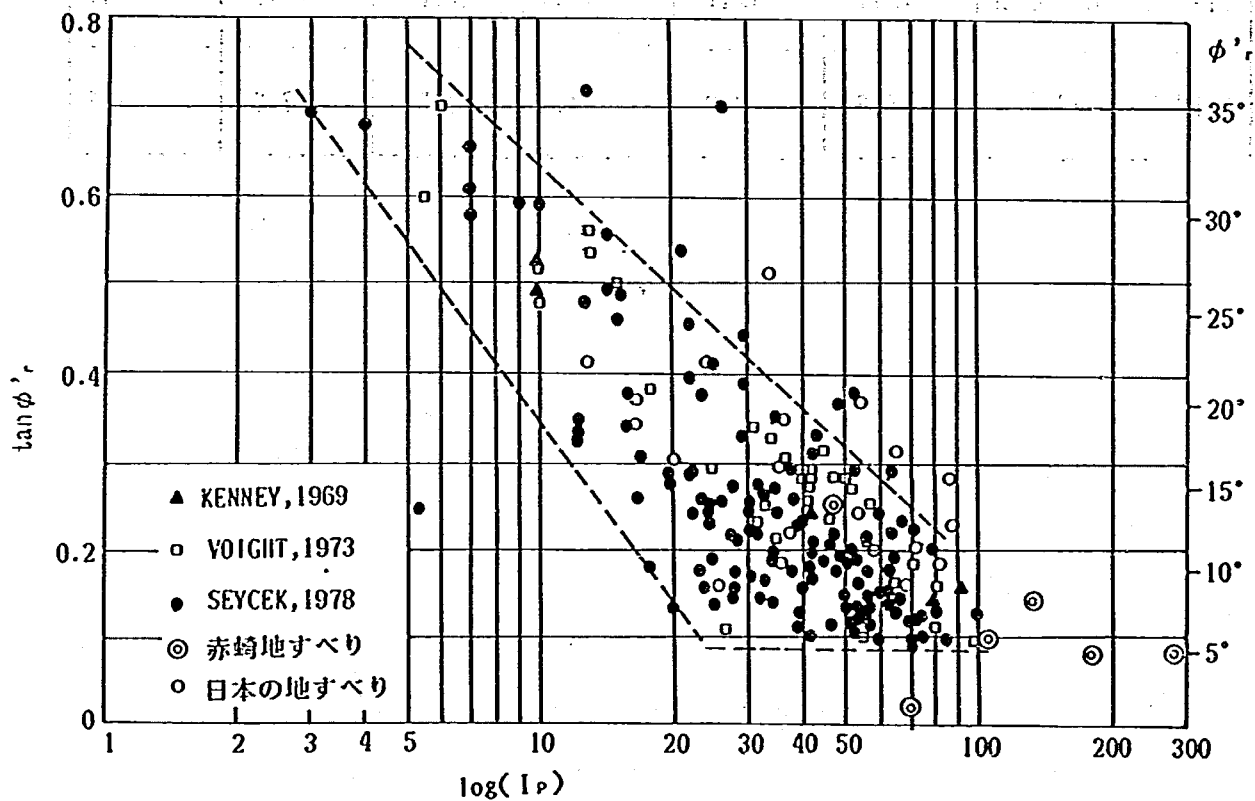


図-34 残留強さと塑性指数の関係<sup>4)</sup>

### 3. リングせん断試験結果を用いた安定解析

リングせん断試験結果を用いた安定解析は、昭和60年度から行っている。安定解析の方法は、Morgenstern and Price法と簡便法の二つの方法である。この内、Morgenstern and Price法は、静的つり合い条件のすべてを満足する合理性の高い方法であると言われている。この方法の詳細については、土研資料第1510号を参照されたい。

赤崎地すべりは、IVとV測線の間で大きくは二つのブロックに分けられる。上部ブロックの安定解析については、図-30に示す上部ブロックの下部に位置するBV-61-1とBV-62-3のボーリングコアを用いたリングせん断試験結果を用いて、HWL時、限界水位時、LWL時について行った。なお、土質強度定数は、BV-61-1のピーク強さ $C' = 0.29 \text{tf/m}^2$ 、 $\phi' = 13.7^\circ$ 、残留強さ $C'_r = 0.00 \text{tf/m}^2$ 、 $\phi'_r = 7.8^\circ$ とBV-62-3のピーク強さ $C' = 2.67 \text{tf/m}^2$ 、 $\phi' = 14.2^\circ$ 、残留強さ $C'_r = 1.57 \text{tf/m}^2$ 、 $\phi'_r = 1.3^\circ$ とした。また、湿潤単位体積重量は、流紋岩の礫が多く含まれていることから $\gamma_t = 2.10 \text{t/m}^3$ とした<sup>5)</sup>。

上部ブロックのB測線安定解析結果は表-7に、断面図は図-35にそれぞれ示した。Morgenstern and Price法によれば、ピーク強さの $\phi' = 13.7^\circ$ 、 $C' = 0.29 \text{tf/m}^2$ については、HWL時 $F = 2.23$ 、限界水位時 $F = 2.46$ 、LWL時 $F = 2.53$ と安全率が2.00以上を示した。また、ピーク強さの $\phi' = 14.2^\circ$ 、 $C' = 2.67 \text{tf/m}^2$ については、HWL時 $F = 3.08$ 、限界水位時 $F = 3.33$ 、LWL時 $F = 3.40$ と安全率が3.00以上を示した。一方、残留強さの $\phi'_r = 7.8^\circ$ 、 $C'_r = 0.00 \text{tf/m}^2$ については、HWL時 $F = 1.20$ 、限界水位時 $F = 1.33$ 、LWL時 $F = 1.37$ と安全率が1.00以上を示した。また、残留強さの $\phi'_r = 1.3^\circ$ 、 $C'_r = 1.57 \text{tf/m}^2$ については、HWL時 $F = 0.71$ 、限界水位時 $F = 0.73$ 、LWL時 $F = 0.74$ と安全率が1.00以下を示した。

一方、簡便法によれば、ピーク強さの $\phi' = 13.7^\circ$ 、 $C' = 0.29 \text{tf/m}^2$ については、HWL時 $F = 2.22$ 、限界水位時 $F = 2.46$ 、LWL時 $F = 2.53$ と、安全率が2.00以上を示した。ピーク強さの $\phi' = 14.2^\circ$ 、 $C' = 2.67 \text{tf/m}^2$ については、HWL時 $F = 3.08$ 、限界水位時 $F = 3.33$ 、LWL時 $F = 3.40$ と、安全率が3.00以上を示した。残留強さの $\phi'_r = 7.8^\circ$ 、 $C'_r = 0.00 \text{tf/m}^2$ については、HWL時 $F = 1.19$ 、限界水位時 $F = 1.33$ 、LWL時 $F = 1.37$ と、安全率が1.00以上を示した。また、残留強さの $\phi'_r = 1.3^\circ$ 、 $C'_r = 1.57 \text{tf/m}^2$ については、HWL時 $F = 0.72$ 、限界水位時 $F = 0.74$ 、LWL時 $F = 0.75$ と、安全率が1.00以下を示した。この結果、簡便法の安全率はMorgenstern and Price法によるものとほぼ同じ値となった。

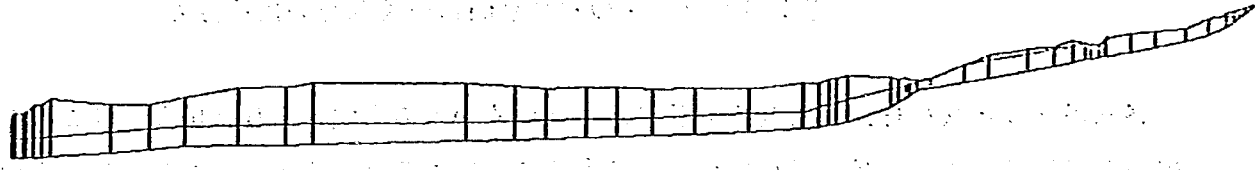
一方、下部ブロックのB測線安定解析については、これまで上部ブロックと同じくMorgenstern and Price法と簡便法の二つの方法で行っていた<sup>1)</sup>。しかし、下部ブロック末端が阿賀野川河床面に達しているにも関わらず水没部分を考慮していなかった。そこで、今回は水没部分を考慮した安定解析を行うことにした。方法は、(3.1)式で示される簡便法である。

$$F = \frac{\sum \{ C' / + (N - U) \tan \phi' \}}{\sum T} \dots\dots\dots (3.1)$$

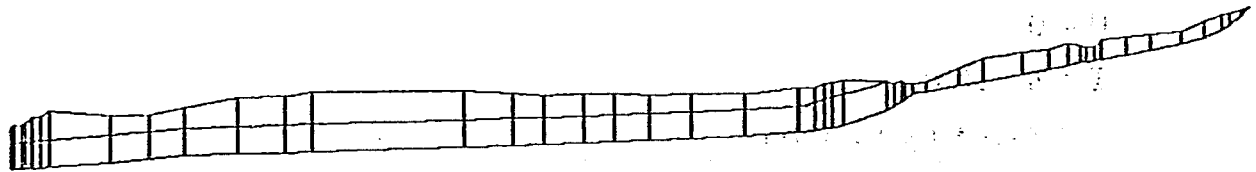
表-7 上部ブロックB測線安定解析結果 ( $\gamma_t = 2.10 \text{ t/m}^3$ )

地下水位	安全率 F		土質強度定数
	Morgenstern and Price法	簡便法	
HWL	2.23	2.22	$\phi' = 13.7^\circ$ $c' = 0.29 \text{ tf/m}^2$
限界地下水位	2.46	2.46	
LWL	2.53	2.53	
HWL	1.20	1.19	$\phi'_r = 7.8^\circ$ $c'_r = 0.00$ $\text{tf/m}^2$
限界地下水位	1.33	1.33	
LWL	1.37	1.37	
HWL	3.08	3.08	$\phi' = 14.2^\circ$ $c' = 2.67 \text{ tf/m}^2$
限界地下水位	3.33	3.33	
LWL	3.40	3.40	
HWL	0.71	0.72	$\phi'_r = 1.3^\circ$ $c'_r = 1.57 \text{ tf/m}^2$
限界地下水位	0.73	0.74	
LWL	0.74	0.75	

赤崎地すべり 上部ブロック 限界水位



赤崎地すべり 上部ブロック HWL



赤崎地すべり 上部ブロック LWL

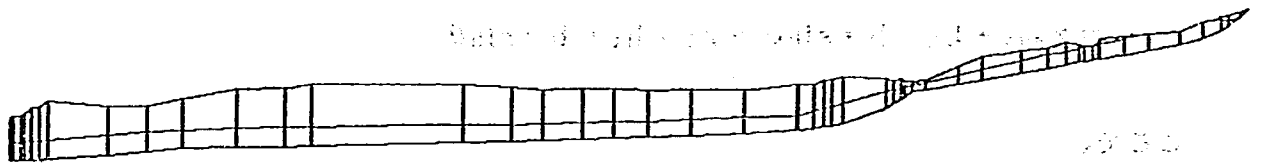


図-35 上部ブロック B 測線安定解析断面図



- F : 安全率  
 $\phi'$ , C' : 土の有効応力による内部摩擦角と粘着力  
 l : すべり面長  
 U : 各スライスのすべり面に働く間隙水圧  
 N : 各スライスのすべり面に働く荷重の垂直分力  
 T : 各スライスのすべり面に働く荷重の接線分力

各水没スライスに作用する荷重の計算法にはいくつかの方法があり、川上<sup>6)</sup>はこれを理論的に検討している。ここでは、その中の一つの方法を用いることにする。つまり、N、Tの計算の際に基準水面以上は湿潤重量を、それ以下は水中重量を用い、Uについては、基準水面以上を過剰間隙水圧と考えるものである。以下に、計算法を示す。

完全水没スライスの場合 (図-36-a 参照)

$$\begin{aligned} N &= W' \cos\theta \\ &= \gamma_{sub} \cdot h_s \cdot b \cdot \cos\theta \\ U &= 0 \\ T &= W' \sin\theta \\ &= \gamma_{sub} \cdot h_s \cdot b \cdot \sin\theta \end{aligned}$$

部分水没スライスの場合 (図-36-b 参照)

$$\begin{aligned} N &= W \cos\theta \\ &= (W' + W_t) \cos\theta \\ &= \gamma_{sub} \cdot h_s \cdot b \cdot \cos\theta + \gamma_t \cdot h_t \cdot b \cdot \cos\theta \\ U &= \gamma_w \cdot h \cdot b \cdot \sec\theta \\ T &= W \sin\theta \\ &= (W' + W_t) \sin\theta \\ &= \gamma_{sub} \cdot h_s \cdot b \cdot \sin\theta + \gamma_t \cdot h_t \cdot b \cdot \sin\theta \end{aligned}$$

ここで、

- $\gamma_{sub}$  : 水中単位体積重量  
 $\gamma_t$  : 湿潤単位体積重量  
 $\gamma_w$  : 水の単位体積重量 である。

表-8-a、b、cには下部ブロックの安定解析結果を、図-37には断面図をそれぞれ示した。なお、湿潤単位体積重量 $\gamma_t$ は、昭和59年度集水井が施工された際に測定した結果の平均値を用い $\gamma_t=1.75t/m^3$ とし、水中単位体積重量 $\gamma_{sub}$ は、 $\gamma_t$ から0.9を差し引いた値とした<sup>4)</sup>。ピーク強

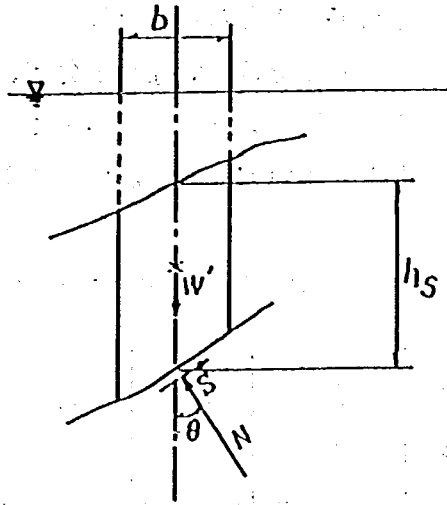


図-36-a 完全水没スライス

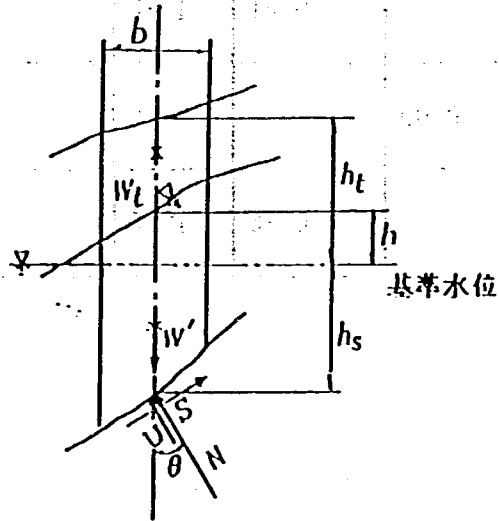


図-36-b 部分水没スライス

さの $\phi'$ 、 $C'$ を用いた場合は、HWL時においても安全率が1.00よりかなり大きくなっている。一方、残留強さの $\phi'_r$ 、 $C'_r$ を用いた場合は、地すべり末端の試料( $\phi'_r=13.5^\circ$ 、 $C'_r=0.25$  tf/m<sup>2</sup>) 以外は、安全率がLWL時でも1.00以下となっている。

安全率を精度良く求めるためには、すべり面形状、間隙水圧分布、土の単位体積重量、すべり面の土質強度定数を精度良く調査試験する必要がある。したがって、今後も、調査試験を継続して実施し、現状と合わない安全率が算出される原因を明らかにする必要がある。

表-8-a 下部ブロックB測線安定解析結果(HWL)

$\phi'$ °	$\phi'_r$ °	$C'$ tf/m <sup>2</sup>	$C'_r$ tf/m <sup>2</sup>	$\gamma_t$ t/m <sup>3</sup>	安全率 F
13.8		0.49		1.75	1.61
	4.8		0.30	1.75	0.56
18.0		0.95		1.75	2.15
	6.0		0.50	1.75	0.71
	4.9		0.51	1.75	0.58
18.1		0.00		1.75	2.10
	13.5		0.25	1.75	1.56

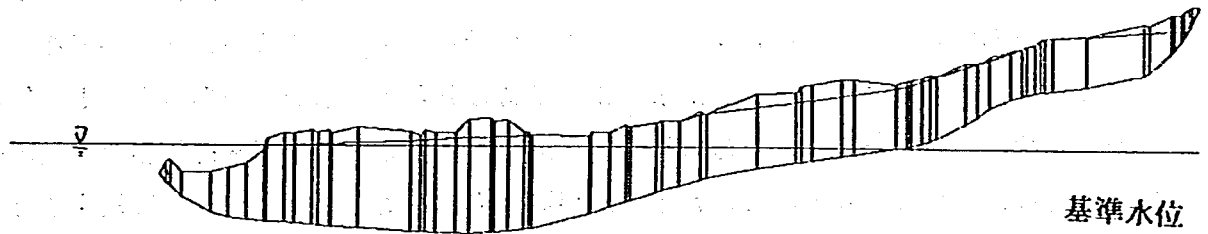
表-8-b 下部ブロックB測線安定解析結果(限界水位)

$\phi'$	$\phi'_r$	$C'$ tf/m <sup>2</sup>	$C'_r$ tf/m <sup>2</sup>	$\gamma_t$ t/m <sup>3</sup>	安全率 F
13.8		0.49		1.75	1.63
	4.8		0.30	1.75	0.56
18.0		0.95		1.75	2.17
	6.0		0.50	1.75	0.71
	4.9		0.51	1.75	0.59
18.1		0.00		1.75	2.13
	13.5		0.25	1.75	1.58

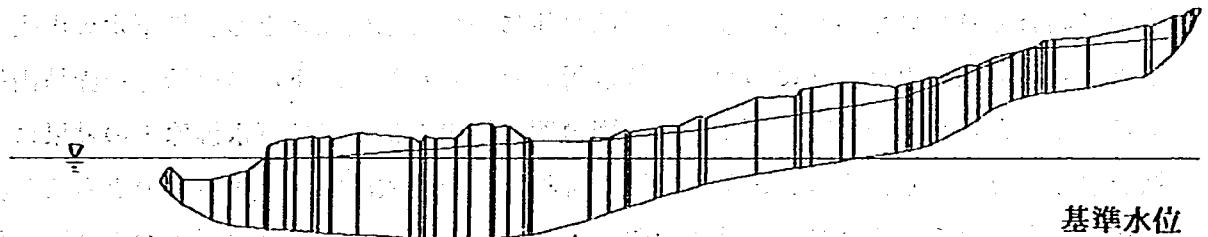
表-8-c 下部ブロックB測線安定解析結果 (LWL)

$\phi'$	$\phi'_r$	$C'$ tf/m <sup>2</sup>	$C'_r$ tf/m <sup>2</sup>	$\gamma_t$ t/m <sup>3</sup>	安全率 F
13.8		0.49		1.75	1.63
	4.8		0.30	1.75	0.57
18.0		0.95		1.75	2.18
	6.0		0.50	1.75	0.72
	4.9		0.51	1.75	0.59
18.1		0.00		1.75	2.13
	13.5		0.25	1.75	1.58

赤崎地すべり 下部ブロック HWL



赤崎地すべり 下部ブロック 限界水位



赤崎地すべり 下部ブロック LWL

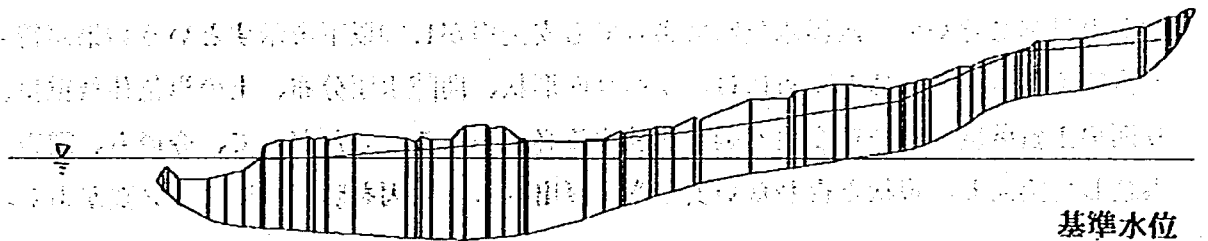


図-37 下部ブロック B 測線安定解析断面図

#### 4. おわりに

昭和62、63年度の調査結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 赤崎地すべりで計画実施されている地下水排除工の効果について、昭和61年度に開発した有限要素法による「割れ目系地山の三次元地下水解析プログラム」を用いて解析を行った。その結果では、トンネル排水工において集水ボーリングが、不透水層が浅いために透水層に達せず集水能力の無いものが出るという結果が現れた。また、下部ブロックにおいては、地下水排除施設が地すべり斜面内に横断的に配置されているために、地下水位の低下量が小さいという結果が出た。これらの結果は、境界条件の設定によるところが大きいのであるが、トンネル排水工の問題については、解析により求められた不透水層面の形状をもとに集水ボーリングの位置と方向を検討すれば解決すると思われる。また、地下水排除施設の配置の問題については、解析により求められた地下水の流動方向をもとに検討すれば解決すると考えられる。ただし、この解析には幾つかの仮定を設けているため、その結果は必ずしも実際の状況を現したものではない。したがって、仮定を十分認識した上で、解析結果を解釈する必要がある。

今後の課題としては、以下のものがある。すなわち、今回の解析では地下水の流入経路が十分に調査されていないため地すべり斜面全体について水位固定とし、地下水の出入りを自由とした境界条件のケースについてのみ解析した。しかし、地下水の供給源を赤崎山等いろいろと変えた場合についても解析し、今回の解析結果と併せて地下水排除工の効果について検討することにより、より合理的な地下水排除施設の配置計画ができるものとする。また、解析精度を上げるためには、地すべり斜面内への地下水の流入経路の調査および図-5に示す測線上の地下水位の経時的な変化等を観測することが必要である。

- (2) すべり面付近の試料を用いたリングせん断試験では、ピーク強さの土質強度定数に対して残留強さの土質強度定数が、極端に小さくなる結果が得られた。これは、地下水排除工の効果が出にくいということを示すものである。したがって、土質強度定数は、地すべり防止工事を実施して行く上で重要となるので、今後も調査試験を継続して行く必要がある。
- (3) リングせん断試験結果を用いた安定解析からは、残留強さを用いた場合地すべり末端部で採取した試料を除いて、限界水位時であっても安全率が1.00以下を示すという結果が得られた。安全率を精度良く求めるためには、すべり面形状、間隙水圧分布、土の単位体積重量、すべり面の土質強度定数を精度良く調査試験する必要がある。したがって、今後も、調査試験を継続して実施し、現状と合わない安全率が算出される原因を明らかにする必要がある。

#### 参考文献

- 1) 赤崎地すべり調査報告書 土木研究所資料 第2499号 昭和62年5月
- 2) 地すべり斜面の三次元地下水解析 土木研究所資料 部内第18号 昭和63年2月
- 3) 松尾新一郎、河野伊一郎；地下水水位低下工法 鹿島出版会

- 4) 中村浩之：土質調査ポケットブック 山海堂
- 5) 新関敦生：＜講座＞調査輯IV 地すべりの安定解析（その2），地すべり技術，Vol. 3，No. 3，pp.45-47，1977.
- 6) 川上 浩：自然斜面の安定性を評価する上での2.3の問題，土と基礎，Vol. 35 No. 11，pp. 3 - 8，1987



# 赤崎地すべり調査報告書(Ⅱ)

ISSN 0386-5878  
土木研究所資料 第2775号  
平成元年 3月 (1989)

新潟試験所 所 長 下村 忠一  
主任研究員 白石 一夫  
研究員 丸山 清輝

## 要旨

赤崎地すべり調査は、北陸地方建設局飯豊山系砂防工事々務所の依頼により、地すべり防止工法の検討を行うための基礎資料を得ることを目的として実施したものである。主な調査項目は、(1)数値解析による地下水排除工の効果解析、(2)地すべり粘土のリングせん断試験、(3)リングせん断試験結果を用いた安定解析である。

キーワード：地下水排除工、数値解析、準三次元、リングせん断試験、安定解析