

保 存 用

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第3246号

土 木 研 究 所 資 料

口坂本地すべり調査報告書その3

—調査結果の総括と地すべり発生機構—

平成6年3月

建設省土木研究所
砂防部地すべり研究室

「Copyright © (1994) 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。」

口坂本地すべり調査報告書その3 —調査結果の総括と地すべり発生機構—

砂防部地すべり研究室

吉 松 弘 行
檜 垣 大 助
三 輪 賢 志

要旨

本調査では、静岡県静岡土木事務所からの受託調査として、昭和63年度から平成5年度まで口坂本地すべりにおいて、地すべり発生機構、対策工の立案、対策工の効果判定を行った。ここでは、これまでの調査結果及び対策工の施工資料を総括し、四万十帯の大規模地すべりの好例である当地すべりにおいて、今後の対策工計画の資料とするため、地下水流動とそれを支配する水文地質構造を調べ地すべり発生機構を明らかにした。

キーワード：地すべり，水文地質，地下水流動機構，地すべり機構

1. The first part of the report is a general introduction to the subject.

2. The second part is a detailed description of the methods used in the study.

3. The third part is a discussion of the results.

4. The fourth part is a conclusion.

5. The fifth part is a list of references.

6. The sixth part is an appendix.

7. The seventh part is a list of figures and tables.

8. The eighth part is a list of abbreviations.

9. The ninth part is a list of symbols.

10. The tenth part is a list of units.

11. The eleventh part is a list of definitions.

12. The twelfth part is a list of footnotes.

は じ め に

本調査では、静岡県静岡市口坂本地すべり地で、静岡県静岡土木事務所からの受託調査として昭和63年度から平成5年度まで土木研究所で行った調査内容に、これまで静岡県が口坂本地すべりで行った各種調査結果や地すべり対策工施工資料等も加えて総括的に考察し、当地すべり地の発生機構を明らかにした。当地すべり地は四万十帯の大規模地すべり地の好例である。ここでは主として間隙水圧変動の計測や地下水流動調査結果から当地すべり地の地下水流動機構の解明を試み、それが当地すべり地の形成史とどう関わっているかを考察した。仮説的な部分も多く含まれてはいるが、口坂本地すべりのみならず、大規模な地すべり地が多く存在する四万十帯の地すべりの発生機構解明・地下水調査法や地下水排除工計画の一参考資料となれば幸いである。

目 次

はじめに

1. 調査地の概要	1
1.1 口坂本地すべり周辺の地形・地質概要	1
1.2 口坂本地すべりの概要	3
1.3 口坂本地すべりの調査・対策工の経緯	6
2. 調査内容の総括	13
2.1 地すべりブロックの再検討	13
2.2 地すべり変動および地下水挙動調査	18
2.2.1 地表変動量観測結果	18
2.2.2 地中移動量観測結果	23
2.2.3 孔内水位, 間隙水圧観測結果	26
2.2.4 地下水流動調査	36
2.3 地下水流動と地すべり	40
2.3.1 電気探査, 弾性波探査による地盤構造の把握	40
2.3.2 水文地質構造の検討	50
2.3.3 地下水流動と地すべり発生機構	51
3. 口坂本地すべりの発生機構と今後の対策	52
4. ま と め	56
参 考 資 料	56

1. 調査地の概要

1.1 地形・地質概要

今回調査の対象となっている口坂本地区は、静岡市北部安倍川支流の中河内川の源流部に位置している。当地すべりを含む山稜は、大井川流域と安倍川流域の分水嶺となっており、標高1,300m～1,500mではほぼ南北方向に連続している。また、当調査地から約15km北には、大谷崩れが存在する。

調査地の東縁に接して勘行峰から口坂本に南北に伸びる尾根沿いには、笹山構造線が走っており、その西側斜面には幅50m～400mの広い緩傾斜地が連続して存在する。またこの構造線は、地形図や空中写真では明瞭なりニアメント（構造線）として読み取れる。

現在、山腹にはガリー状に侵食地形が発達しており、その内の幾つかは地すべり範囲の側方を規制している。

調査地周辺の地質としては、糸魚川－静岡構造線に沿ってほぼ南北に四万十帯が広く分布している。この四万十帯の地質は、糸魚川－静岡構造線及び中央構造線に支配されており、北東－北北東の主導線をもって帯状に分布する。当調査地には白亜系（～古第三系）の三倉層群が分布し、笹山構造線を挟んでその上位の瀬戸川層群に接している。この三倉層群は、その層序区分が確定していないため、瀬戸川層群も含めその層序・分布域は研究者により見解が異なっている。

三倉層群は、単調な砂岩頁岩互層の卓越する海成層で、全体的にN20～40°Eの走向をもち、北に傾斜している。地層は著しく剪断され、無数の小断層、小褶曲が認められる。また互層中の頁岩には剪断面が発達し、砂岩層のレンズ化が進行している。互層中には凝灰質砂岩層が数枚挟まれているが、同層は一般に硬く、侵食・風化に取り残されしばしば沢の中に小さな滝を形成している。

全体的な構造としては、一部に逆転層が認められるが、これらは局所的なもので地層は北に上位であり、大規模な褶曲は認められない。

図－1.1.1に四万十帯の地質概略図を示す。

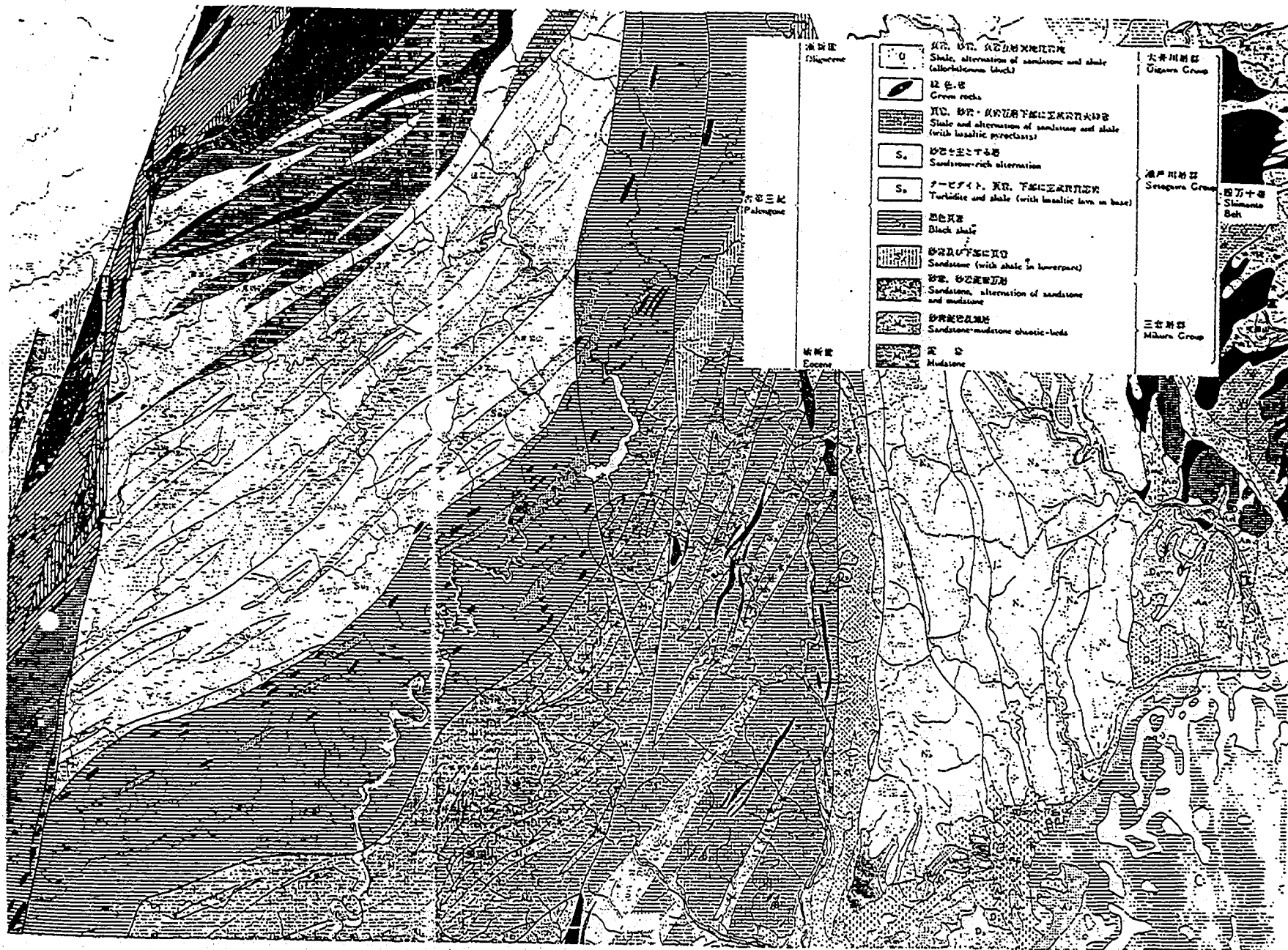


図-1.1.1 口坂本地すべり地周辺の地質（文献¹⁾）

1.2 口坂本地すべりの概要

口坂本地すべりは、「まえがき」でも述べたように、かなり以前から地すべりによる変状を示しており、昭和35年には、地すべり防止区域に指定されている。これは、静岡県内の建設省所管の地すべり防止区域としては三番目の指定地にあたる。指定地の面積は、図-1.2.1に示した範囲185.94haである。今回の調査は、この指定地の中でも特に活発な移動の認められるA及びBブロックを主たる対象としている。

防止区域は、巨視的にはほぼ尾根の陵線から沢筋まで、凹型かつ扇型の斜面形状を示しており、最大幅約2,000m、長さ約2,000mに達する。尾根の直下には、傾斜30～35度、比高50m程度の斜面が連なり、その下部は平坦面となる。更に、その下部には平均傾斜約20度ほどの斜面が続いており、地すべりによる変状はこの斜面を中心に発生している。このため等高線は乱れ、階段状の段差が広く分布している。

空中写真判読と地形図から、口坂本地すべり周辺の地すべり地形を抽出したものが図-1.2.2である。地すべりの分布は、三倉層群西縁の F_2 断層に沿って幅約2kmの区間に集中している。それらの一部は F_2 断層西側の犬居層群中及び笹山断層東側の瀬戸川層群中にも分布しているが、ほとんどが F_2 断層東側の三倉層群中に分布している。この分布傾向は北東～南西の方向性を有し、三倉層群の走向方向及び F_2 断層の方向と調和的である。

このような地すべり分布の特性は、当地区一帯の地すべり地形が三倉層群を構成する地層の物性及び地質構造に大きく規制されていることを示している。すなわち、三倉層群のうちでも、特に頁岩が優勢な区域で、笹山断層と F_2 、 F_3 断層に挟まれて大きく変形を受けた部分に多くの地すべり地形が分布しているものと考えられる。

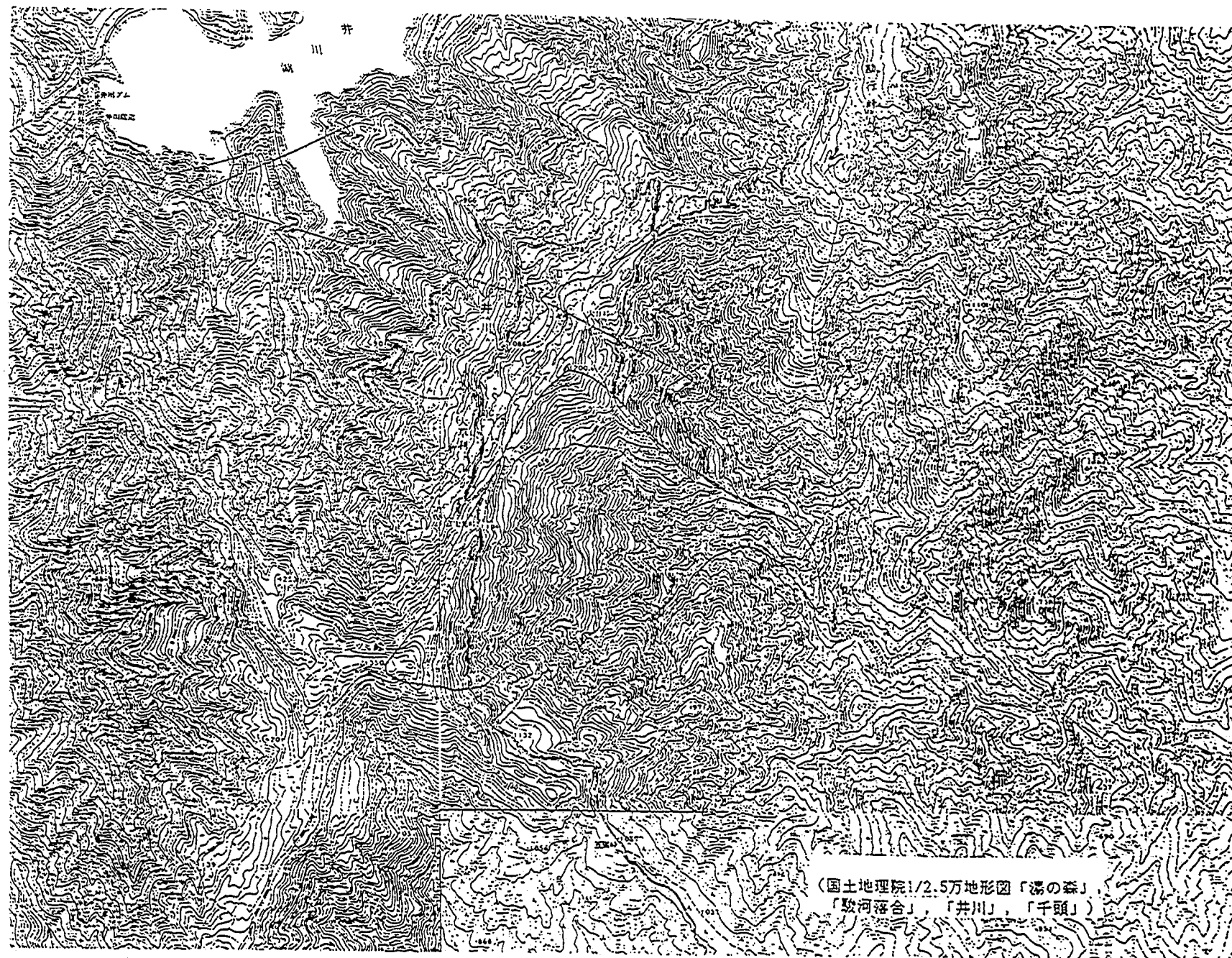


図-1.2.1 口坂本地区の1/2.5万地形図



図-1.2.2 地すべり地周辺の地形

1.3 地すべり調査・対策工の経緯

昭和63年の梅雨期における豪雨によって顕著な地すべり変動が認められ、昭和63年9月23日～24日の降雨時には、地すべり頭部に設置した伸縮計で1日約200mm、末端部の2次的に発生したブロックの頭部では1日約400mmと、地すべり土塊が全て崩落しても不思議でない極めて大きな移動量を記録している。移動抗観測結果によると、昭和63年8月から地すべり末端部付近で年間約3m、中央部付近で1.0～2.0m、頭部付近においても0.5～0.8m程度の移動を生じていることが認められた。

そこで、図-1.3.1、図-1.3.2、表1.3.1に示したように、地表変動量及び地中変動量調査・間隙水圧調査による地すべり機構の把握、調査ボーリングや地中変動調査によるすべり面の把握、孔内水位観測・地下水追跡や水質分析及び弾性波探査・電気探査等による地下水流動機構の把握を行った。

調査結果にもとづき、当地すべりは降雨による間隙水圧の上昇が原因と考えられたので、図-1.3.3に示すように排水トンネル、集水井等が集中的に施工された。

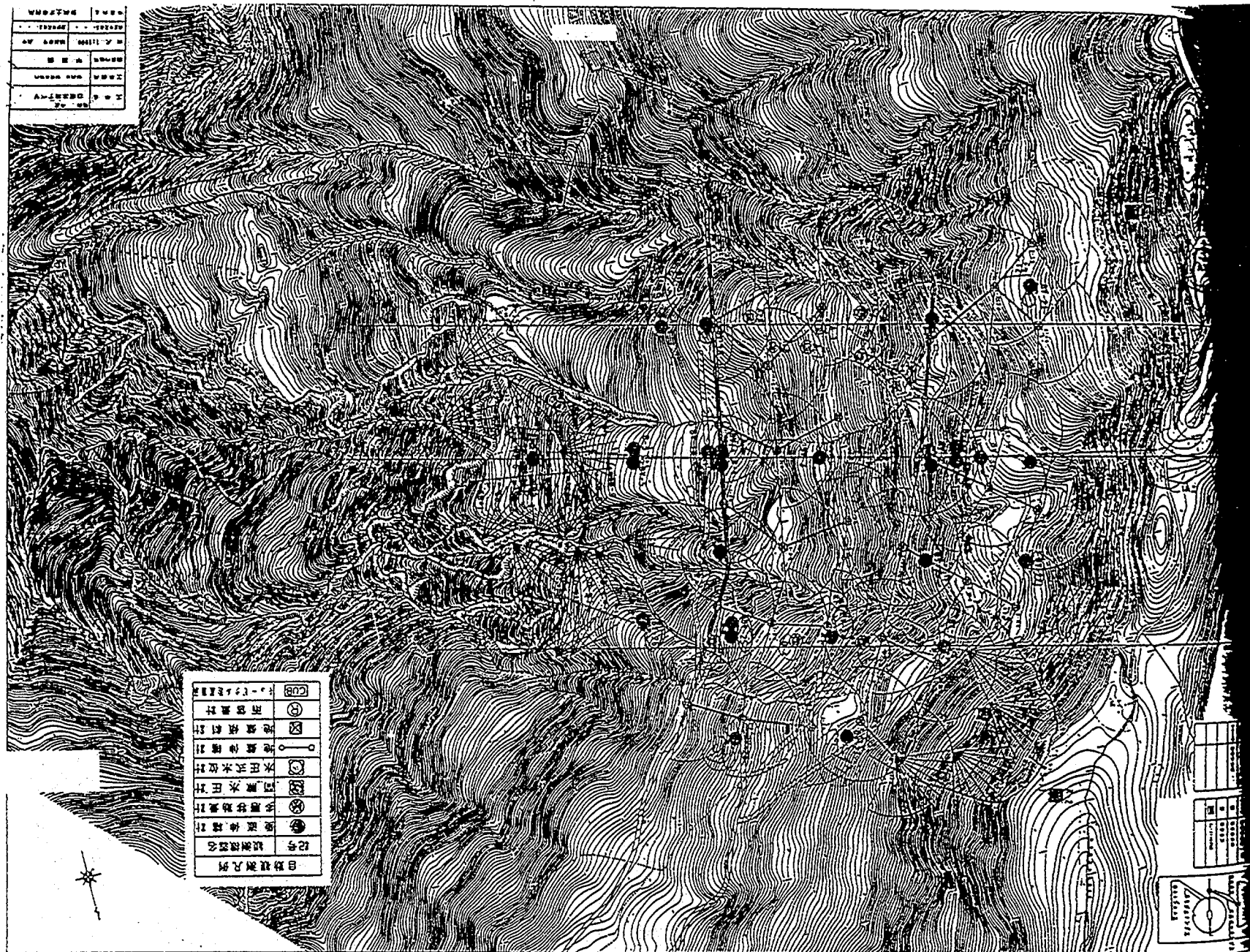


図-1.3.1 調査ボーリング及び計器配置平面図 (自動観測)²⁾

調査年度	7900
調査区画	100000
調査年度	7900
調査区画	100000
調査年度	7900
調査区画	100000
調査年度	7900
調査区画	100000

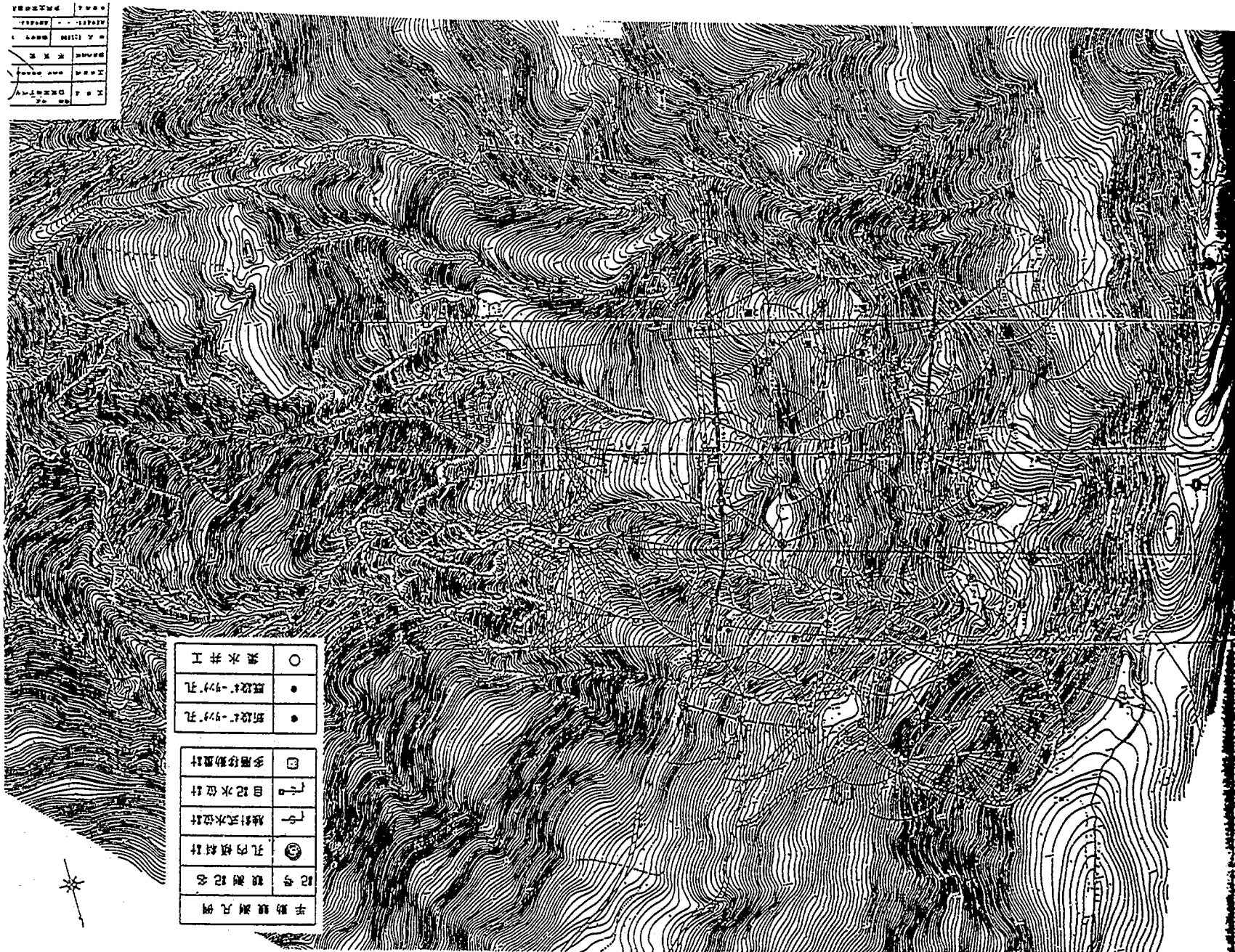


図-1.3.2 調査ボーリング及び計器配置平面図 (手動観測)²⁾

表-1.3.1(1) ボーリング調査結果及び観測内容一覧表²⁾

孔 番	孔口標高 (m)	削孔長 (m)	H3地下水位観測結果		H4地下水位観測結果		孔内傾斜計観測結果	地下水検層結果			地質調査結果			すべり面 (決定深度)	観 測
			最高水位	最低水位	最高水位	最低水位	孔 曲 が り 深 度	砂質土層	砂質土層	砂質土層	基岩上面	砂質土層	砂質土層		
BV-1-1	1092.94	60.0									36.4	32.4	31.25	36.4	歪 (H3にて)
1-2															⊕
2-1	1057.22	75.0	3.23	26.86	14.18	27.3	8, 17, 28				47.0	46.8	6.8	46.8	孔、水(H1にて)
2-2															⊕
3	1015.77	64.0	0.00	5.00	3.8	4.0					57.5	49.7	15.8	57.5	歪
4-1	985.24	80.0									60.3	59.6	27.15	59.6	多
4-2		65.5	30.0	39.4	35.6	55.8									⊕
5-1	968.11	90.0	4.40	6.91	5.34	12.3					59.3	58.0	22.8	59.3	歪 (H3にて)
5-2		65.0													⊕
6-1	938.43	60.0	14.39	17.45	14.51 ^(*)	14.51 ^(*)	(14.51)				58.7	58.7	14.8		多、水
6-2	936.67	60.0													多
7	(1057)	75.0					17, 23				40.6	39.6	21.7	40.6	⊕
8-1	1067.27	80.0					7, 74			58.1	75.1	72.5	5.3	75.1	孔 (H1にて)
8-2															⊕
8-3		70.0													⊕
9	1058.54	75.0	15.60	19.10	16.06	17.07	12				49.0	49.0	13.7	49.0	孔、水
10	1030.49	60.0									23.6		14.0		
11	1030.64	60.2									24.1	20.0	8.4		
12	1017.92	45.0	42.85	56.27	38.80 ^(*)	42.85 ^(*)	41.42(42.85)				30.2	30.2	4.6		
13	1003.41	35.0									12.1	12.1	12.1		
14															多
15-1	991	75.0					13, 14, 54, 55, 56				62.8	57.9	16.2	62.8	孔、水(H1にて)
15-2		70.0													⊕
16-1	991.86	86.2	21.50	26.68	21.96	27.7	37				69.4		21.1	69.4	水、水目
16-2		75.0													⊕
17	976.08	75.0										73.6			

^(*) 孔曲りにより
以深の測定不能

○：自動監視 歪：パイプ歪計 触：触針式水位計
水：水圧式水位計 垂：垂直伸縮計 自：自記水位計
孔：孔内傾斜計 多：多層移動量 間：間隙水圧計

表-1.3.1(2) ボーリング調査結果及び観測内容一覧表

孔 番	孔口標高 (m)	削孔長 (m)	H3地下水位観測結果		H4地下水位観測結果		孔内傾斜計観測結果 孔 曲 が り 深 度	地下 水 検 査 結 果			す べ り 面 深 度 決 定 根 拠				観 測
			最高水位	最低水位	最高水位	最低水位		H3水位	H4水位	水位変動	基岩上面	砂礫層下面	粘土層	決定深度	
BV-18	953.06	45.0										42.9	12.0		
19	938.38	37.0										36.0	8.5		
20	919.86	25.0										19.3	6.0		
21-1	1109.65	75.0									60.2	60.2	31.0	60.2	孔 (H117)
21-2															⊕
21-3															⊕
22-1	1087.0	50.0	0.00	20.50	0.30	19.60	29.33				35.6	29.2	13.3	35.6	孔、水
22-2	(1067.30)														⊕
23-1	1068.0	80.0	12.02	16.20	14.85	14.85	16				34.3	22.5	14.5	34.3	水、孔 (H117)
23-2															⊕
24-1	1034.5	70.0	21.20	26.60	23.50	33.60	23				47.5	36.5	22.5	47.5	孔、水
24-2															⊕
25-1	1008.0	55.0	30.40	36.90	35.10	38.70					52.5	38.5	26.0	52.5	孔、水
25-2	(782.0)														⊕
26-1	983.0	60.0	14.10	47.80	29.00	49.50						60.0	56.5	56.5	⊕
26-2															⊕
27	1057	50.0	11.80	13.90	12.70	14.80	16				36.0	18.0	14.2	36.0	孔、⊕
28	1027	50.0	22.50	29.10	24.00	28.10	38 (40)				45.0	40.8	28.8	40.8	孔、⊕
29	1038	70.0									57.7	51.3	40.7	40.7	
30	1103	40.0	8.80	15.00	10.10	14.10	18				29.10	16.0	7.4	29.10	孔、⊕
31															⊕
32															⊕
A-1	1182.0	70.0			47.62	48.58					20.0	20.0	12.5		孔
A-2	1029.49	70.0			24.30	28.50						30.0	7.0		⊕
A-3	1022.0	80.0			24.70	27.20					77.0	38.6	14.2	77.0	⊕
A-4	1006.90	80.0			46.20	62.40					74.6	53.5	27.8	74.6	⊕

表-1.3.1(3) ボーリング調査結果及び観測内容一覧表

[illegible]

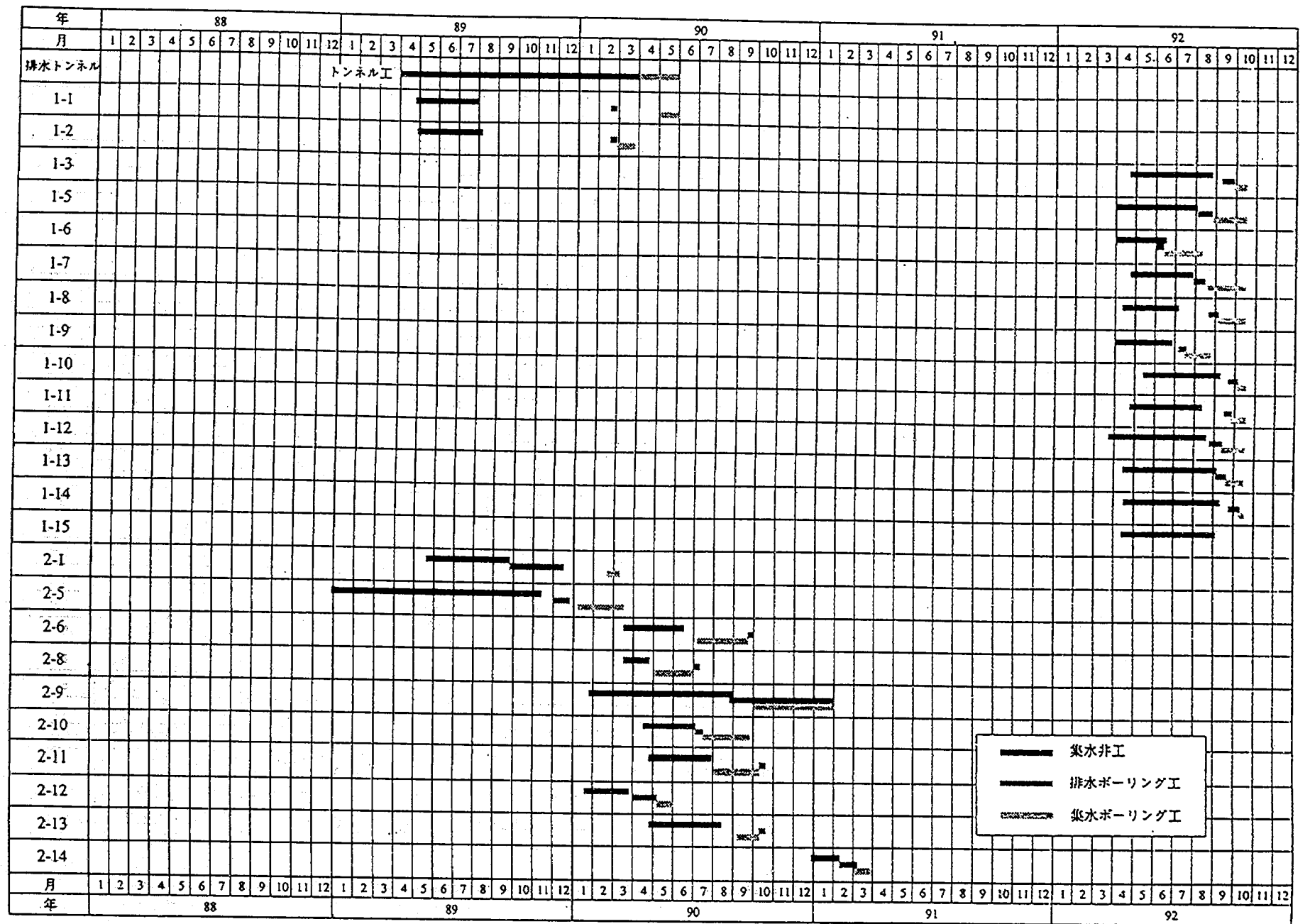


図-1.3.3 主な地すべり対策工の施工経緯

2. 調査内容の総括

2.1 地すべりブロックの再検討

従来、口坂本地すべり地では、最近形成されたとみられる滑落崖の分布・沢の発達から、A、B測線とD測線とは沢を境に異なるブロックにあると考えられてきた。しかし、地中変動量計測やコア判定によるすべり面深度は両ブロック間で類似した深度に有ること、空中写真判読では、両ブロックを囲む少なくとも昭和63年以前に形成された主滑落崖（地形的な主滑落崖）は一連で、それを形成した際のすべり面で現在も滑っていると考えられることから、今回の地すべり範囲はA、B、D測線を含む同一のブロックであると考えられる。そのすべり面は図-2.1.1の等高線に示される形状であることがわかった。

したがって、今回の地すべりの移動ブロックは、岩盤中に形成された一連のすべり面を有し、移動速さの差からほとんど動きの無い上部ブロック、対策工施工前は年間50cm程度の移動を示し、特に豪雨時の間隙水圧上昇に呼応して移動が活発化した中部ブロック、末端の斜面崩壊により最近も年間50～150cmの移動が見られ、その速さが降雨にほとんど影響されない末端ブロックの3つに分けられる。これらのブロックの区名とA、B、D測線に沿う地すべり断面図を図-2.1.2に示す。



すべり面等高線図

図-2.1.1 すべり面等高線図²⁾

A 測線断面図

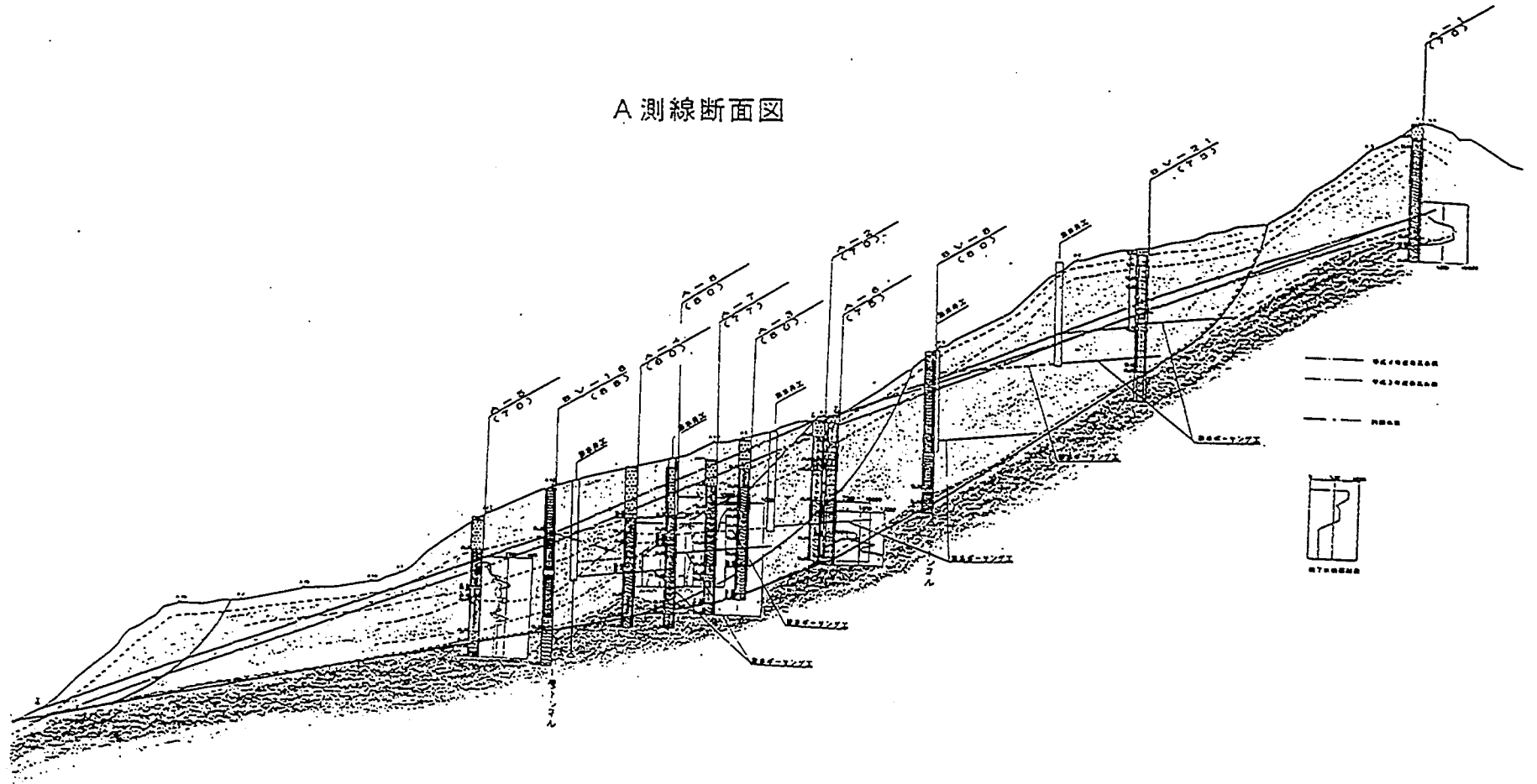


図-2.1.2(1) 測線沿いの地質構造断面図

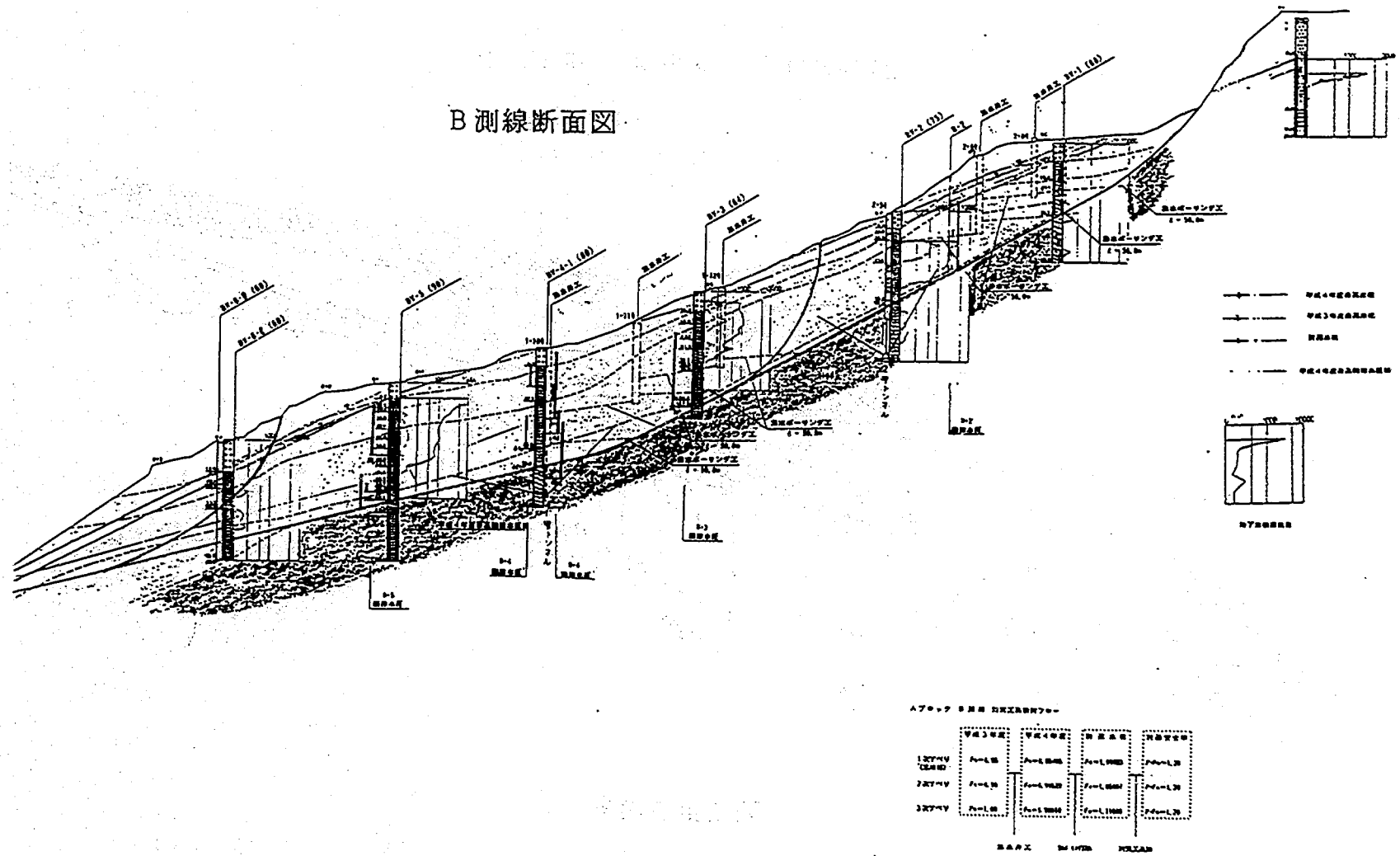


図-2.1.2(2) 測線沿いの地質構造断面図

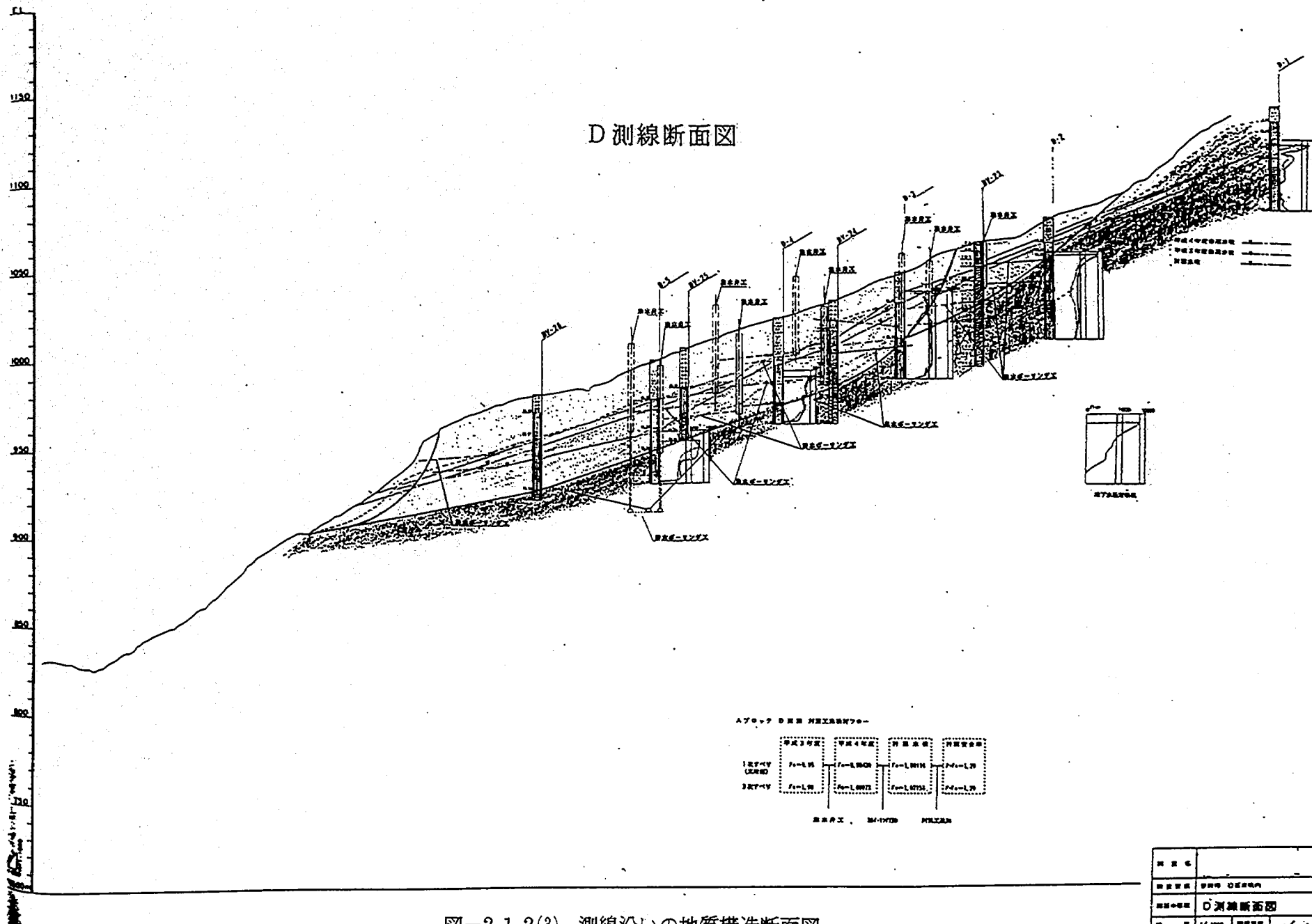


図-2.1.2(3) 測線沿いの地質構造断面図

図名	
図面内容	断面図 対照工場内
図面種類	D 測線断面図
図尺	1/1000
図面番号	
図面作成	1999.10.10

2.2 地すべり変動及び地下水変動調査

2.2.1 地表変動量観測結果（図-2.2.1.1）

中部ブロックの伸縮計による移動量は、1990年度の集水井施工によって大幅に低下し、さらに平成4年度の集水井施工によってほぼ安定化した。移動量は間隙水圧を介して降雨と相関が大きい³⁾が、同一の降雨量に対する移動量は顕著な低下を示し、対策工の効果が現れた⁴⁾。しかし、末端ブロックは移動量が低下していない。

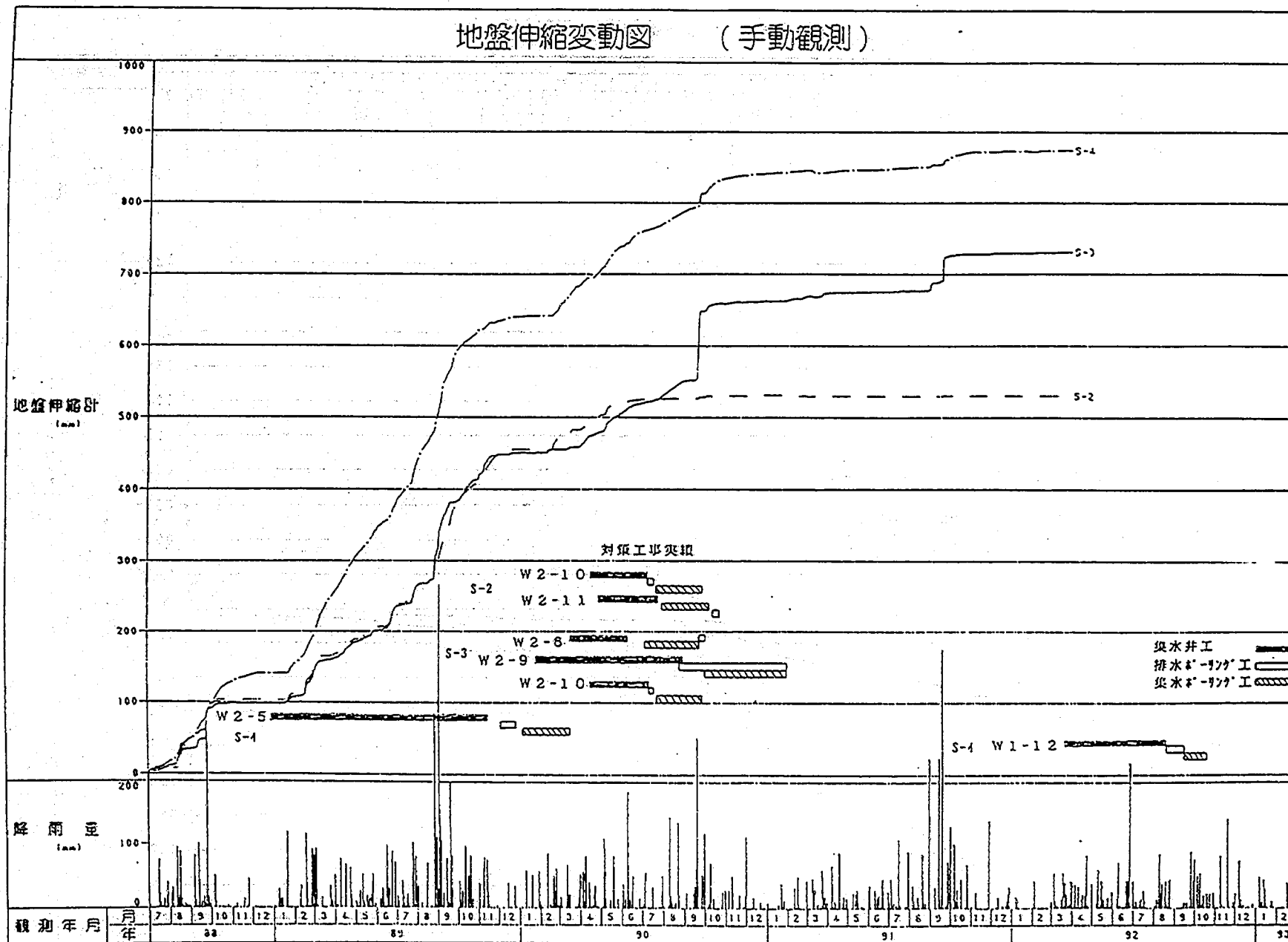


図-2.2.1.1 地表変動量調査結果²⁾(1)

地盤伸縮変動図 (手動観測)

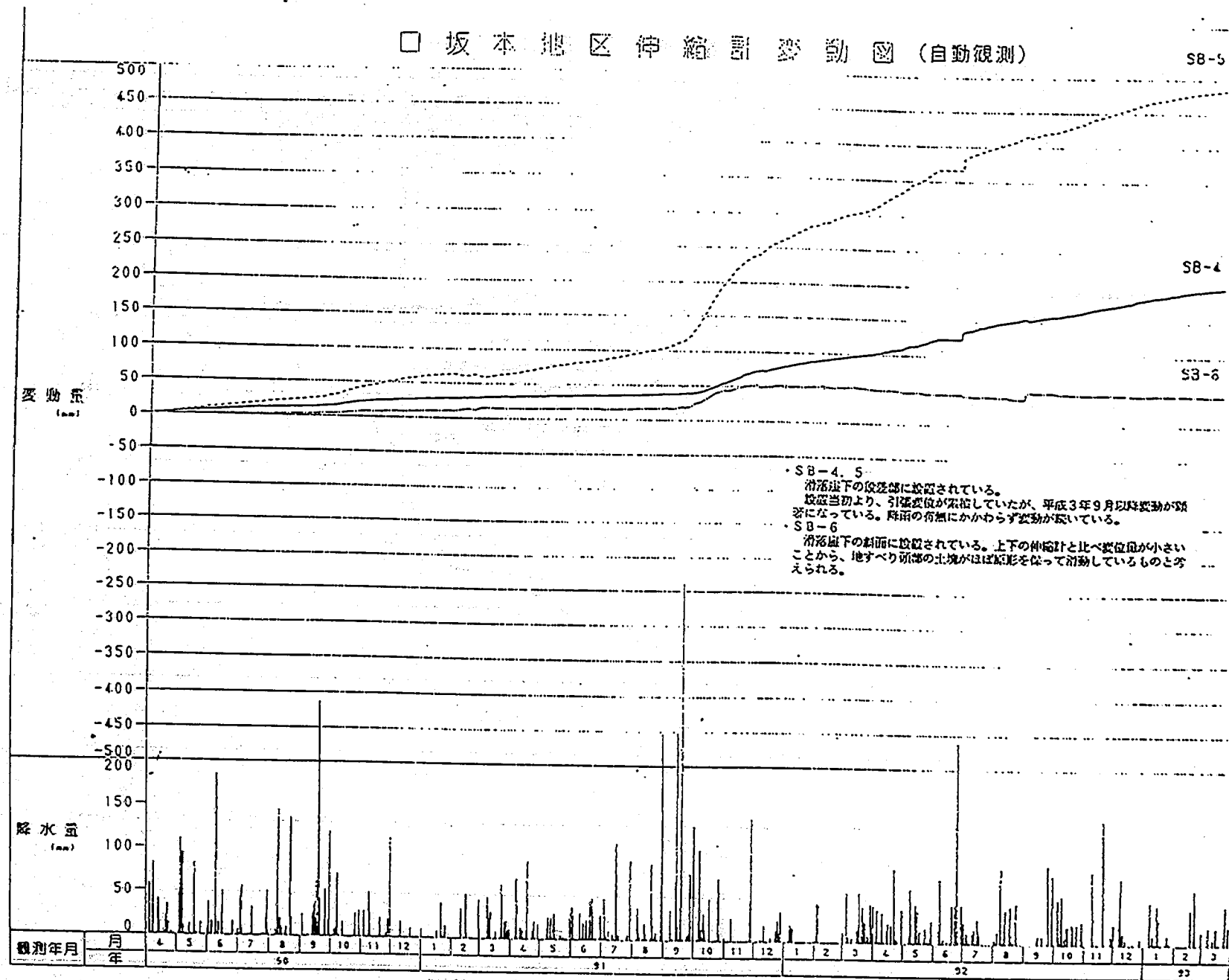


図-2.2.1.1 地表変動量調査結果 (2) □ 坂本地区伸縮計変動図

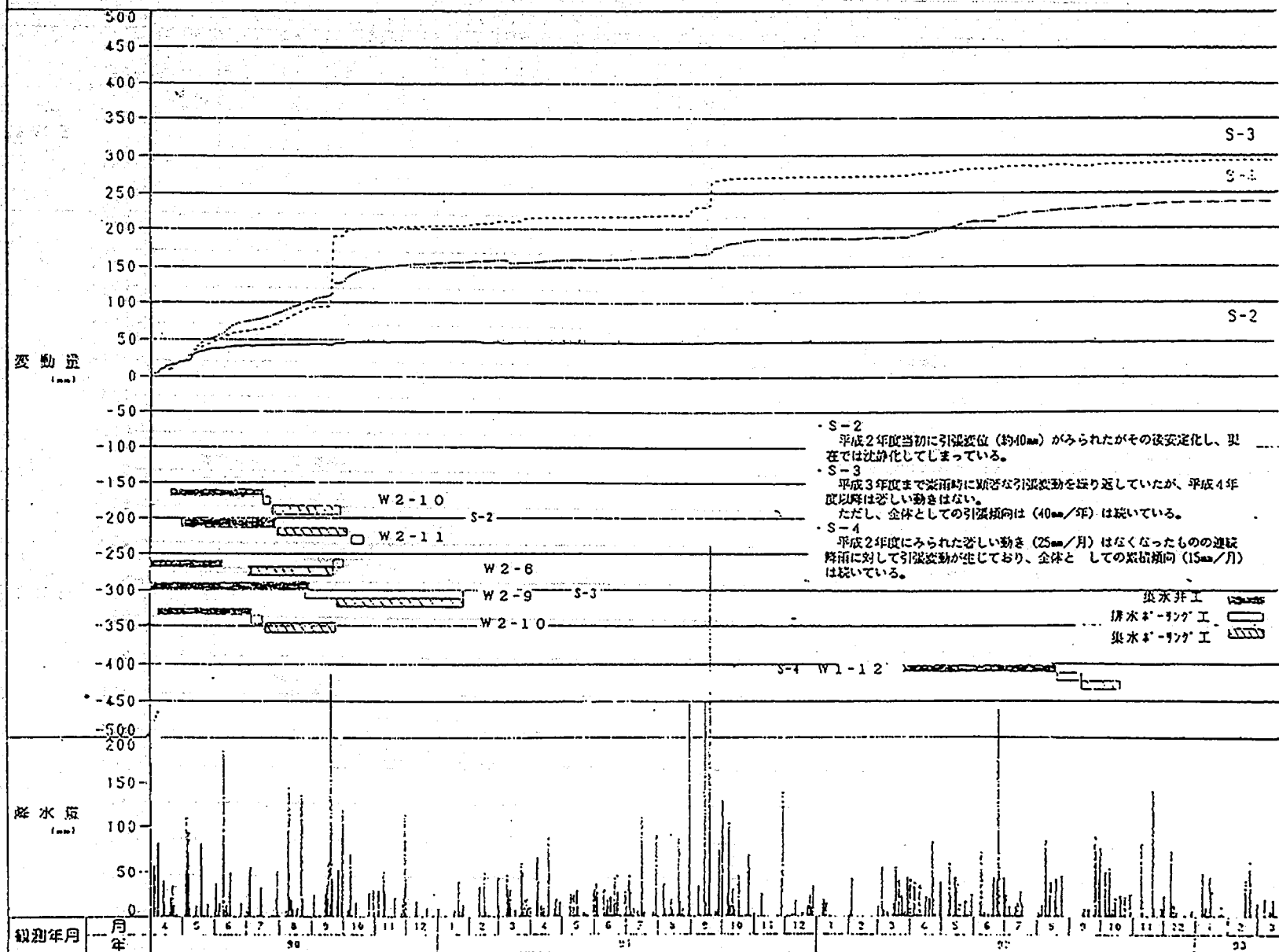


図-2.2.1.1 地表変動量調査結果(3)

□ 坊 蒸 部 區 韻 略 詩 話 四

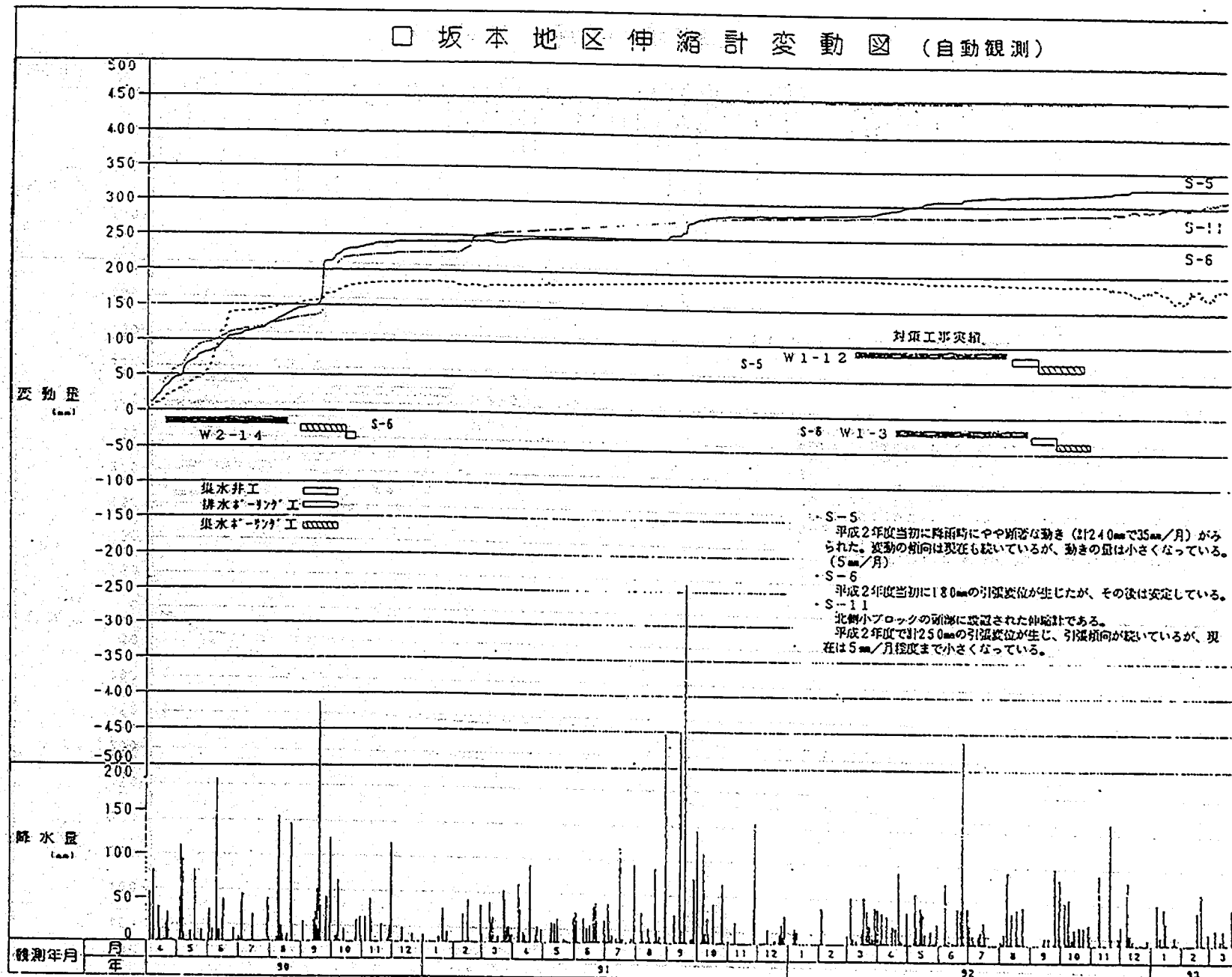


図-2.2.1.1 地表変動量調査結果 (4)

□ 坂本地区伸縮計変動図

2.2.2 地中移動量観測結果（図-2.2.2.1）

すべり面は明かになっているので、不動地盤に対する絶対移動量監視のため、地中移動量は多層移動量計と地中伸縮計で計測している。

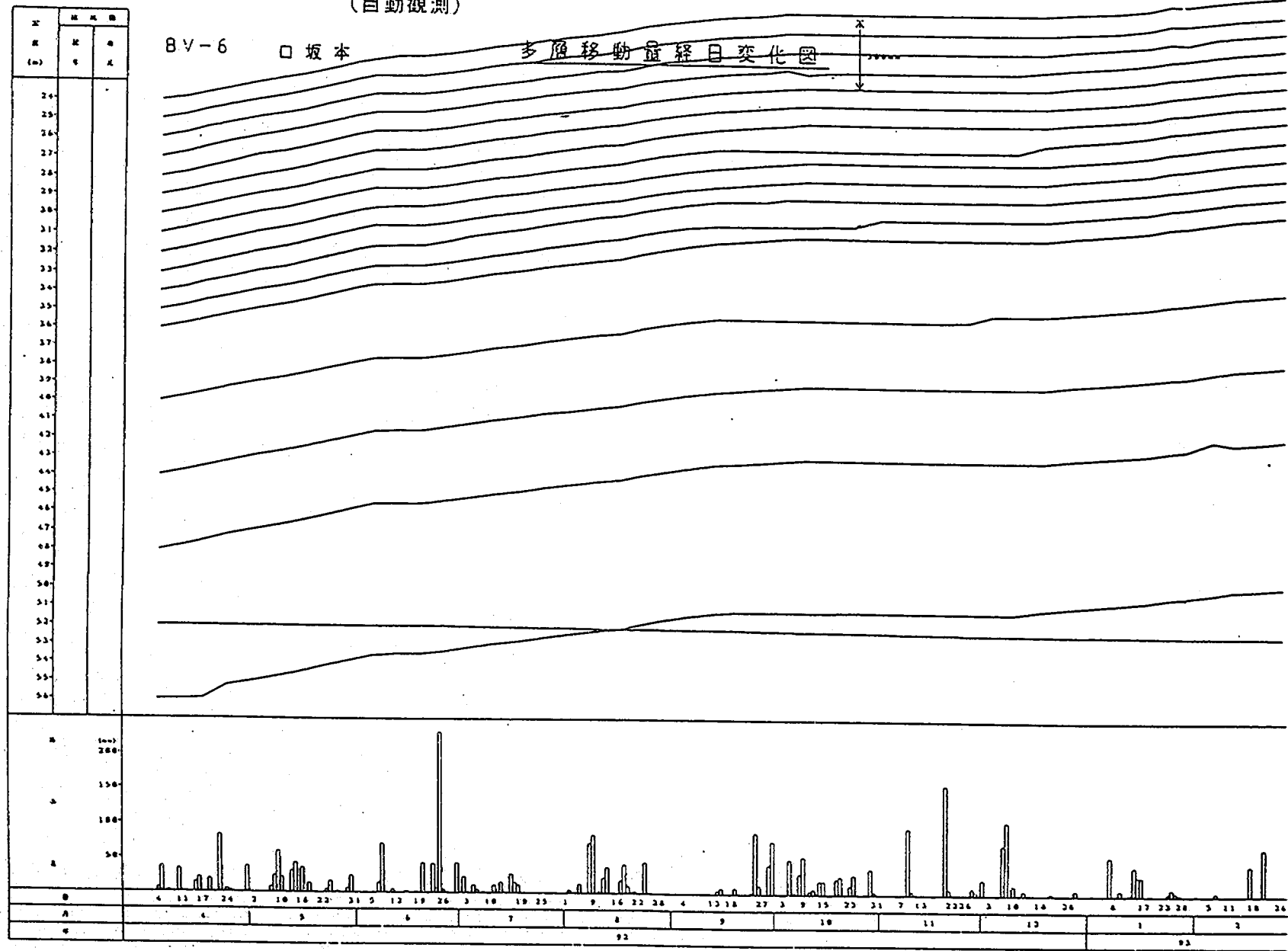
地表移動量と同じく、上部・中部ブロックでは集水井施工後はほとんど地すべりは安定化したが、末端ブロックでは、明瞭なすべり面を有する移動が降雨と無関係に継続している。

(自動観測)

BV-6

口坂本

多層移動量経日変化図



多層移動量経日変化図 BV-6

図-2.2.2.1 多層移動量計による地すべり変動量²⁾(1)

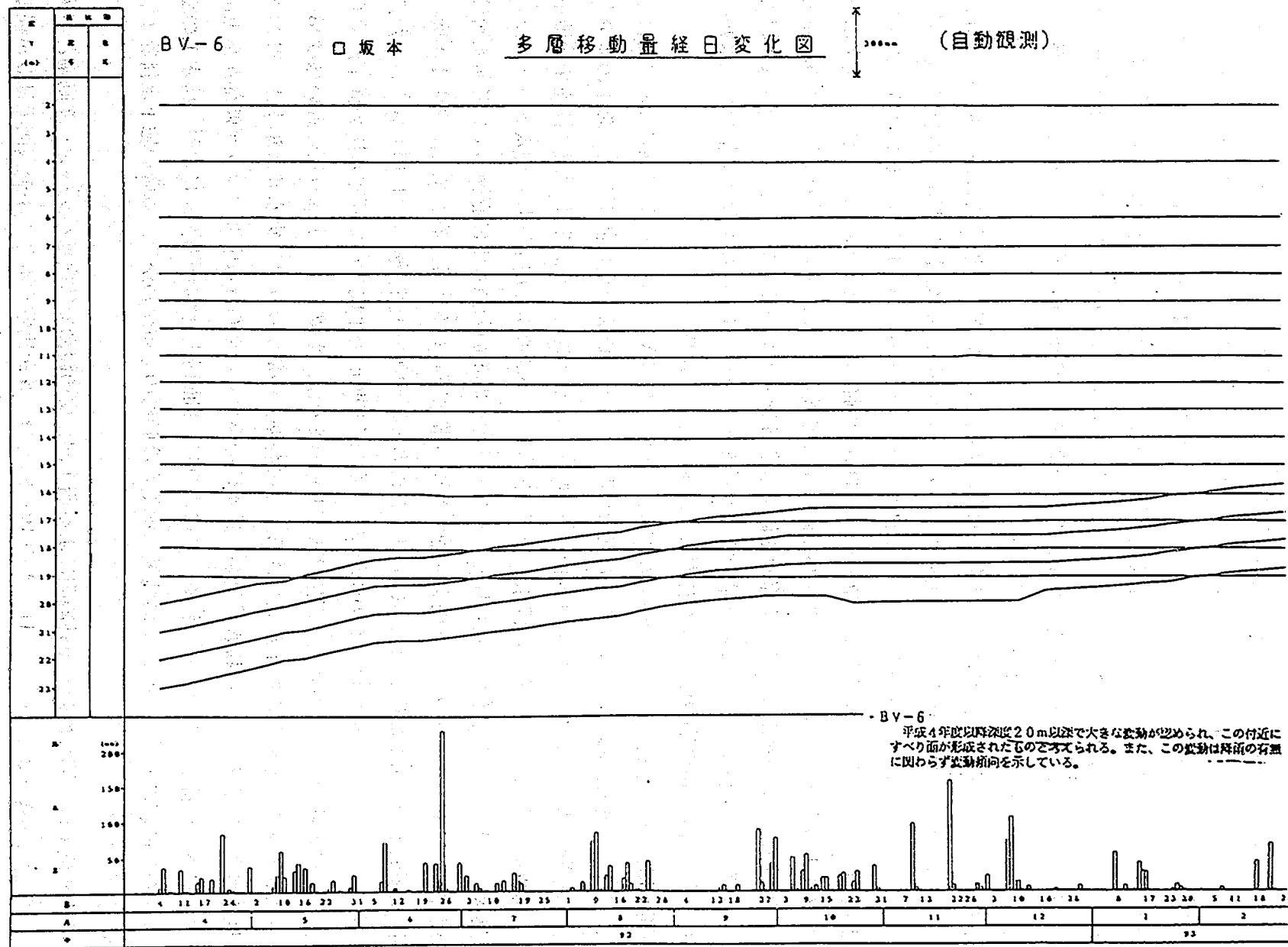


図-2.2.2.1 多層移動量計による地すべり変動量(2)

多層移動量経日変化図 BV-6

2.2.3 孔内水位・間隙水圧観測結果 (図-2.2.3.1, 図-2.2.3.2)

ここでは、地下水位という用語を用いず、全孔ストレーナパイプ中の水位は、複数の被圧帯水層を貫いていると、いずれの水頭による水位面をも表さない⁵⁾ことから、孔内水位という用語を用いる。また、主にB測線に沿ってすべり面 (BV-4 では孔壁崩壊ですべり面より約6 m深い) と移動土塊中の3~4深度で間隙水圧が測定されている。この目的は、これまでのコア判読や地下水検層等の水文地質調査と間隙水圧測定で複数の帯水層の存在が推定されたので、降雨による各層の間隙水圧挙動の差及び集水井と集水ボーリングの効果がどの層に現れているのかを確認するためである。又、すべり面の間隙水圧値と孔内水位の差の検討のため、一部孔では、間隙水圧観測孔に隣接して孔内水位を観測している。

孔内水位は、一般に手動観測による週1回程度の観測が多いが、口坂本では間隙水圧は降雨後2~5日以内に上昇するので、水位観測間隔のラフさが的確な斜面安定度評価の精度に影響する。そこで、連続観測による孔内水位と手動観測のそれを比較するため、D測線に於いて従来の手動観測孔内水位孔に隣接して水圧式水位計による自動観測孔を設けた。さらに、集水井の集水ボーリングによる水位低下量は、集水井から距離によって異なる⁶⁾が、複雑な地質構造のため、従来の揚水試験による透水係数では効果範囲や低下量を評価できないことが多い。そこで、A測線では、井戸からの距離による水位低下量の差に共通性がないか、平成4年度施工の複数の集水井について集水井からの距離のことなる孔内水位観測孔を設け観測した。

間隙水圧で地下水排除工施工前から観測されているのは、BV-4孔である (位置は図-1.3.1)。ここでは、深度27, 36, 43, 65mのうち43mの間隙水圧が平成2年度に低下した。降雨の多少を考慮した間隙水圧低下量については吉松ら (1992) ⁴⁾に示されている。施工時期と後述する地下水文構造から見て、この深度の間隙水圧低下に関与したのは近傍に施工された排水トンネルからの集水ボーリングによるものと見られる。そして、深度36mの間隙水圧に影響している帯水層は深度43mとは別の、中部ブロック内を浸透する浅い帯水層であると言える。また、平成4年度の間隙水圧低下の顕著な深度65mについては、この時期に中部-上部ブロックに広く施工された集水井によるらしい。上部ブロックのBV-31では、深度40mで平成2年に間隙水圧の低下が見られ、これは近傍の集水井の施工と対応する。BV-32では、平成4年にすべり面に近い深度48mのみに間隙水圧の基底値の低下が見られる。この時期、中部ブロックに集水井と集水ボーリングが施工されているので、その排水効果が、透水性の良いと考えられる中部ブロック頭部から上部ブロックへと伝播したためと見られる。このように、間隙水圧の深度別測定により、排水工の施工効果が深度別にとらえられ、その結果、地下水流動層の分布がわかり、以降の地下水排除工計画の参考となる。

孔内水位では、連続観測と手動観測による週1回程度の観測では変動パターン、変動幅とも大きく異なり、BV-24とD-3, D-4やBV-25とD-5を比較すると、手動観測では5 m程度の最高水位の違いを生じる。後述のように、口坂本のような破碎帯の地すべりでは、きわめて流動の速い地下水脈が存在し、間隙水圧変動が速く伝わる斜面で、孔内水位で安定解析する場合に

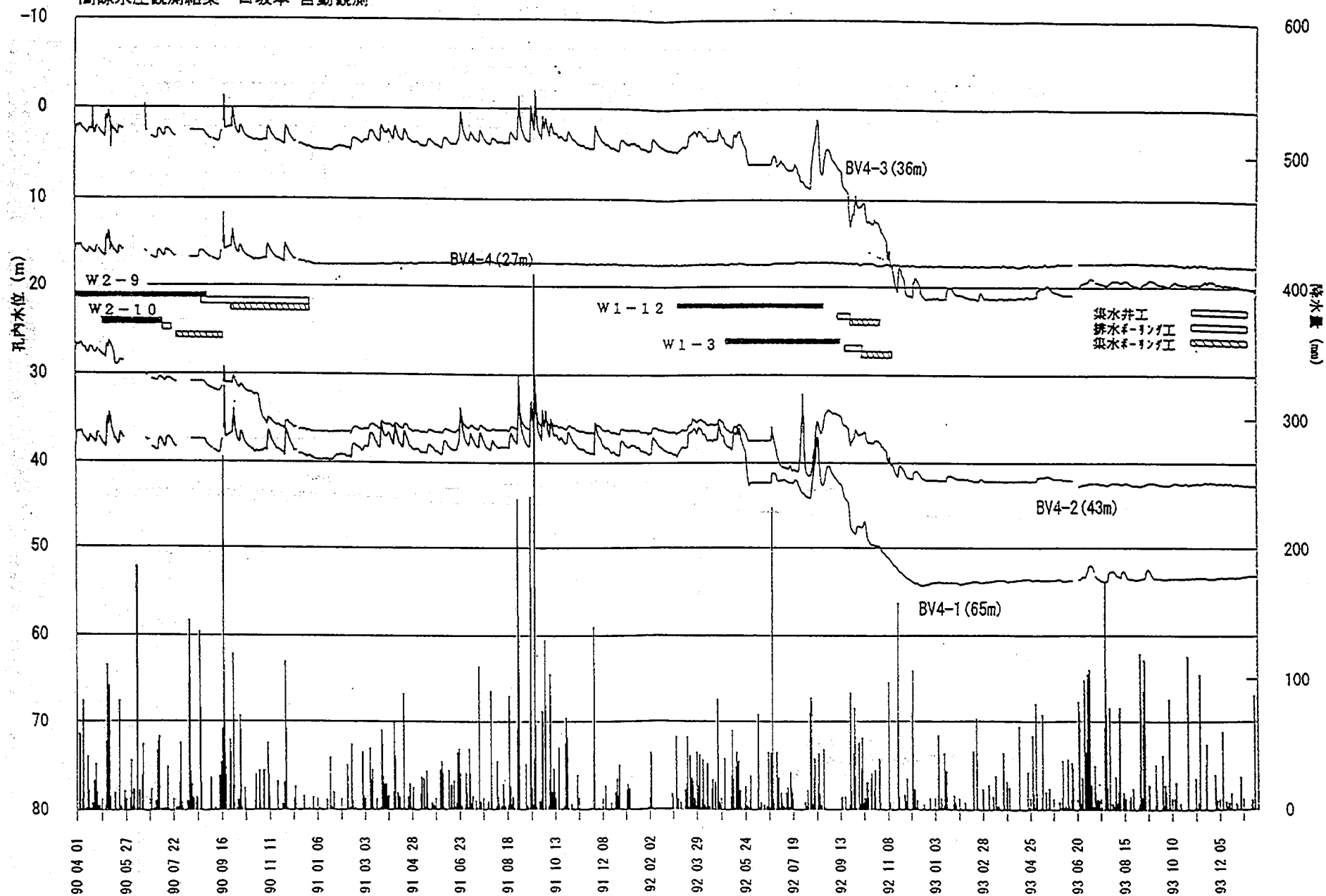


図-2.2.3.1 間隙水圧観測結果²⁾(1) (BV-4)

口坂本地区間隙水圧変動図(水頭換算)(自動観測)

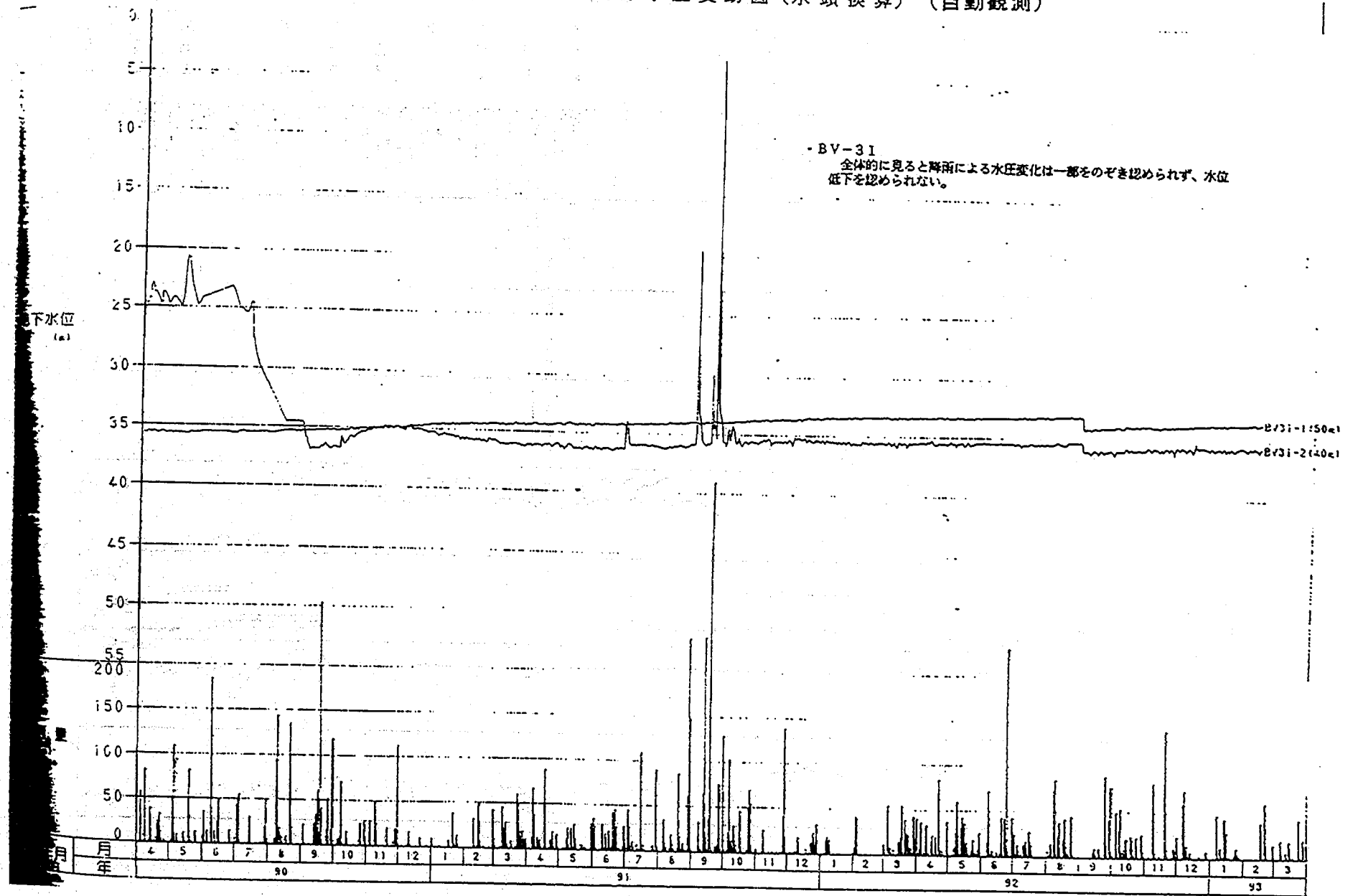


図-2.2.3.1 間隙水圧観測結果(2)(BV-31)

口坂本地区孔内水圧変動図

口坂本地区間隙水圧変動図(水頭換算)(自動観測)

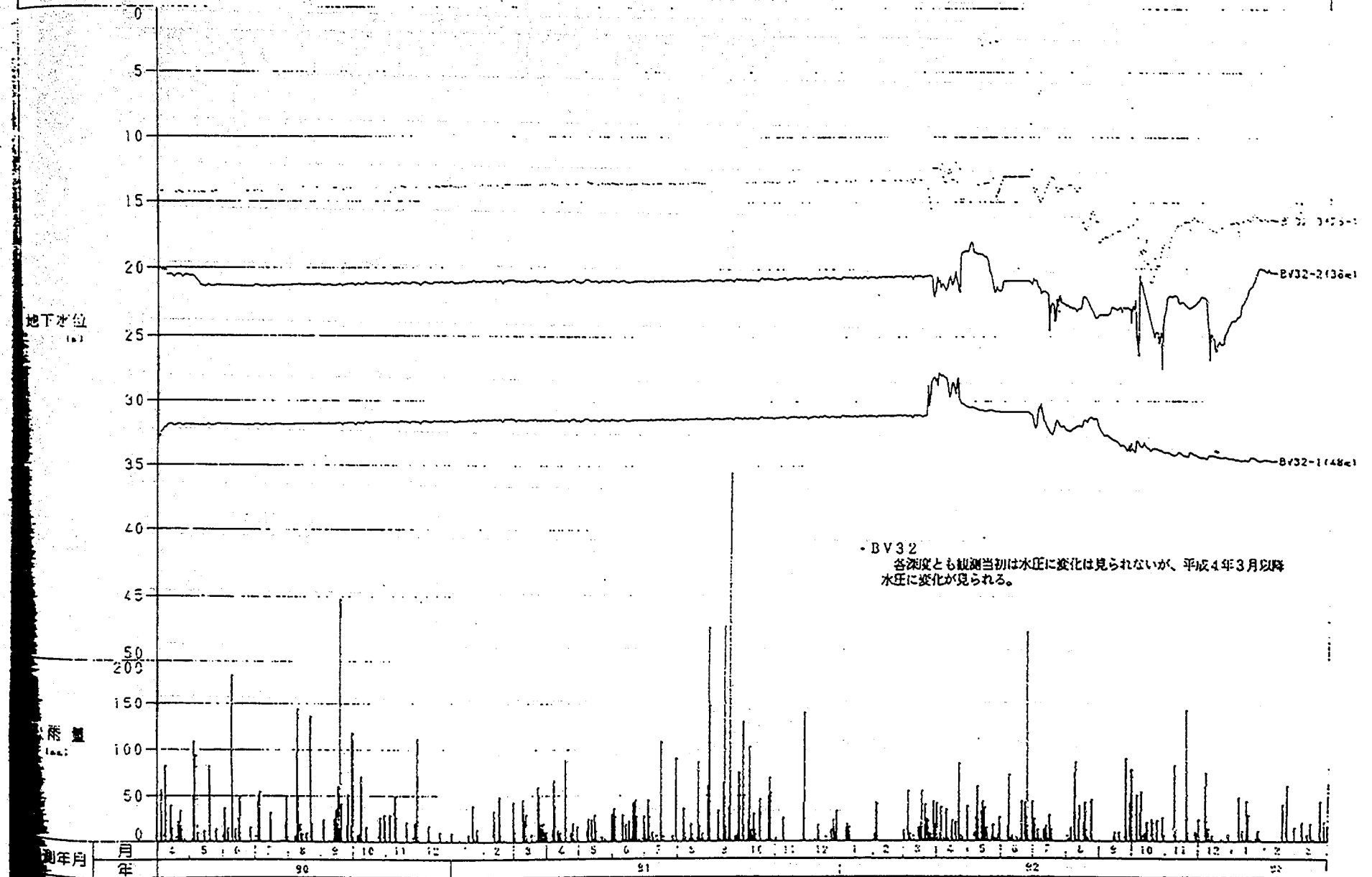


図-2.2.3.1 間隙水圧観測結果(3) (BV-32)

口坂本地区間隙水圧変動図

口坂本地区間隙水圧変動図(水頭換算) (自動観測)

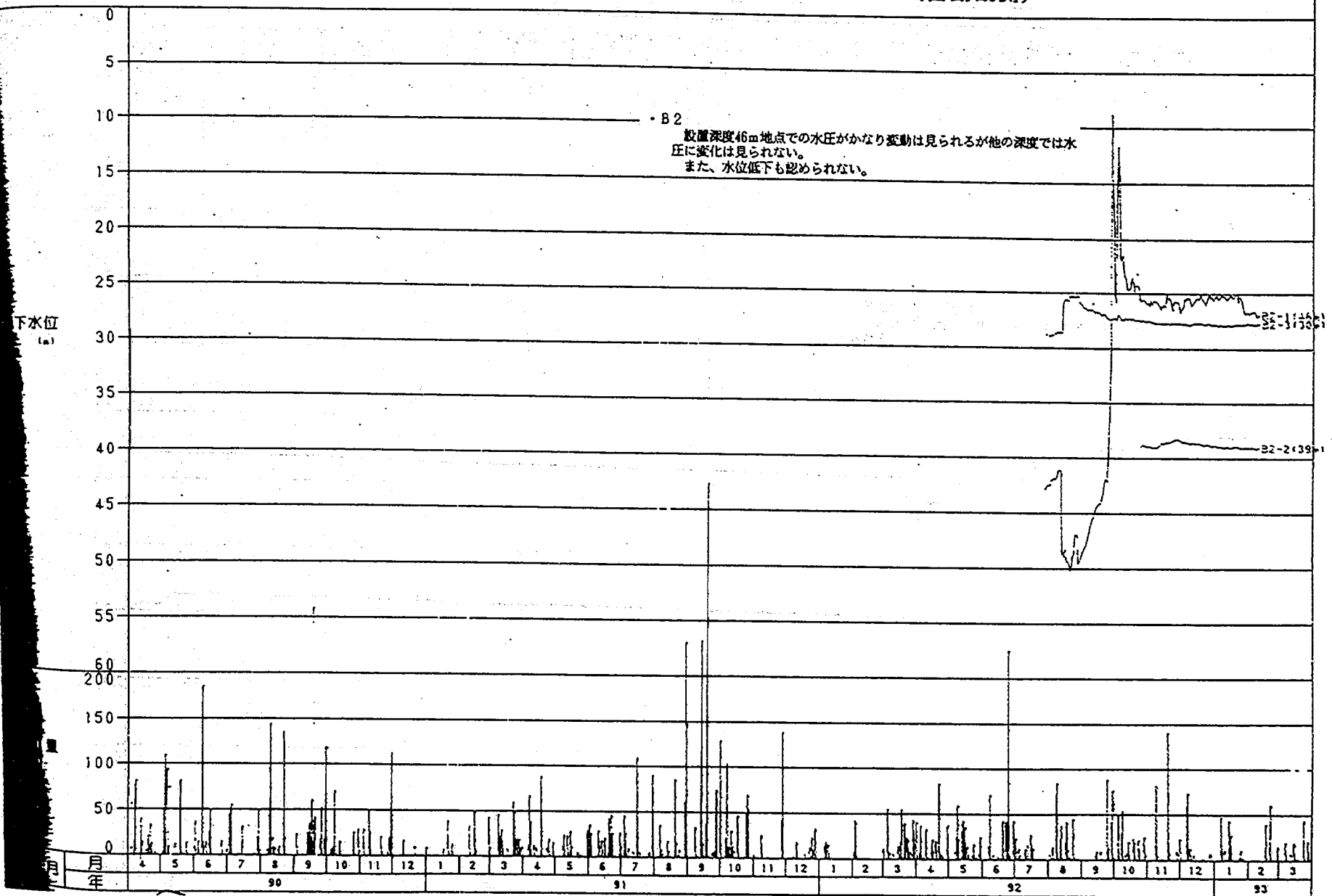


図-2.2.3.1 間隙水圧観測結果(4) (B-2)

口坂本地区間隙水圧変動図(水頭換算) (自動観測)

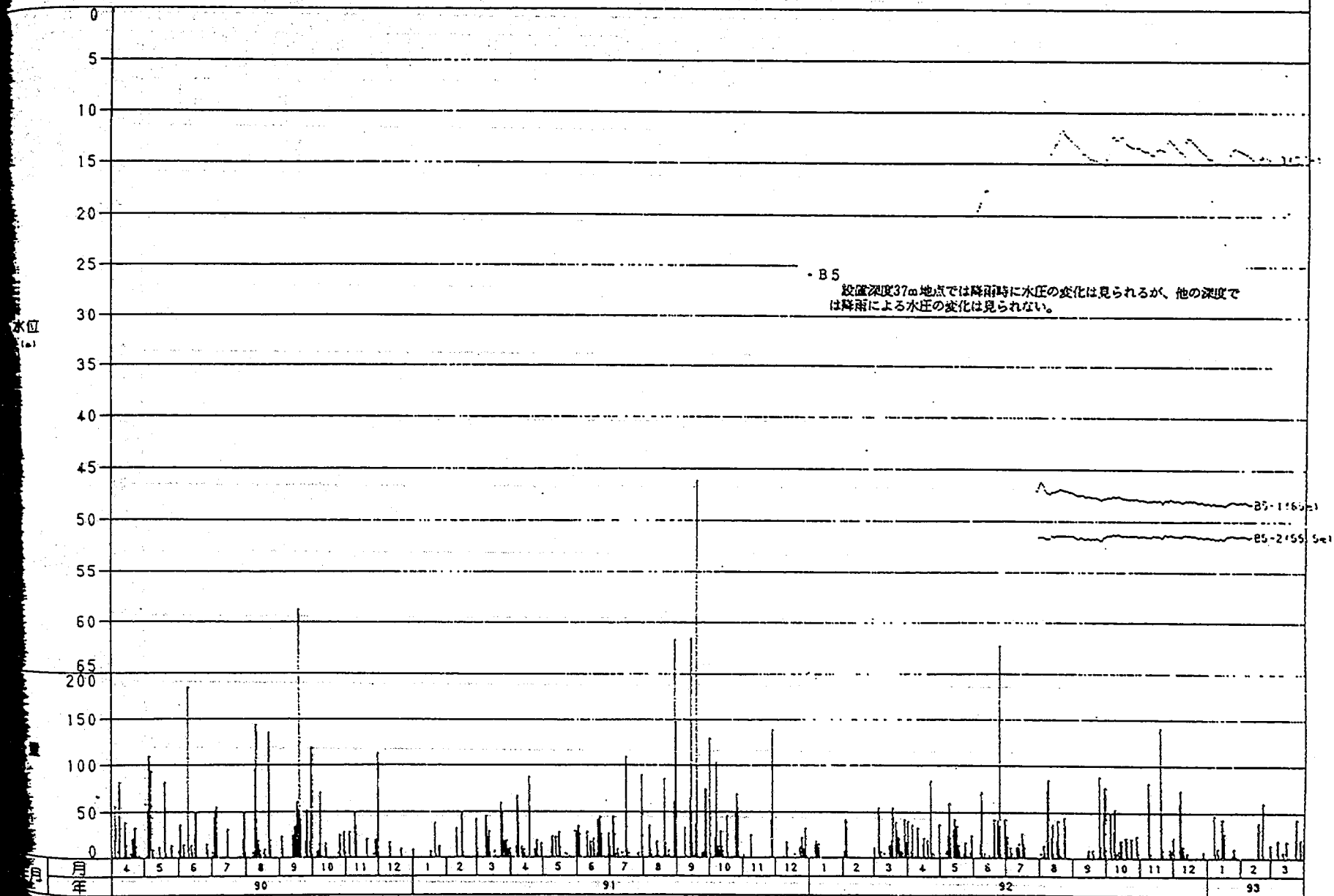


図-2.2.3.1 間隙水圧観測結果(5) (B-5)

口坂本地区孔内水位変動図

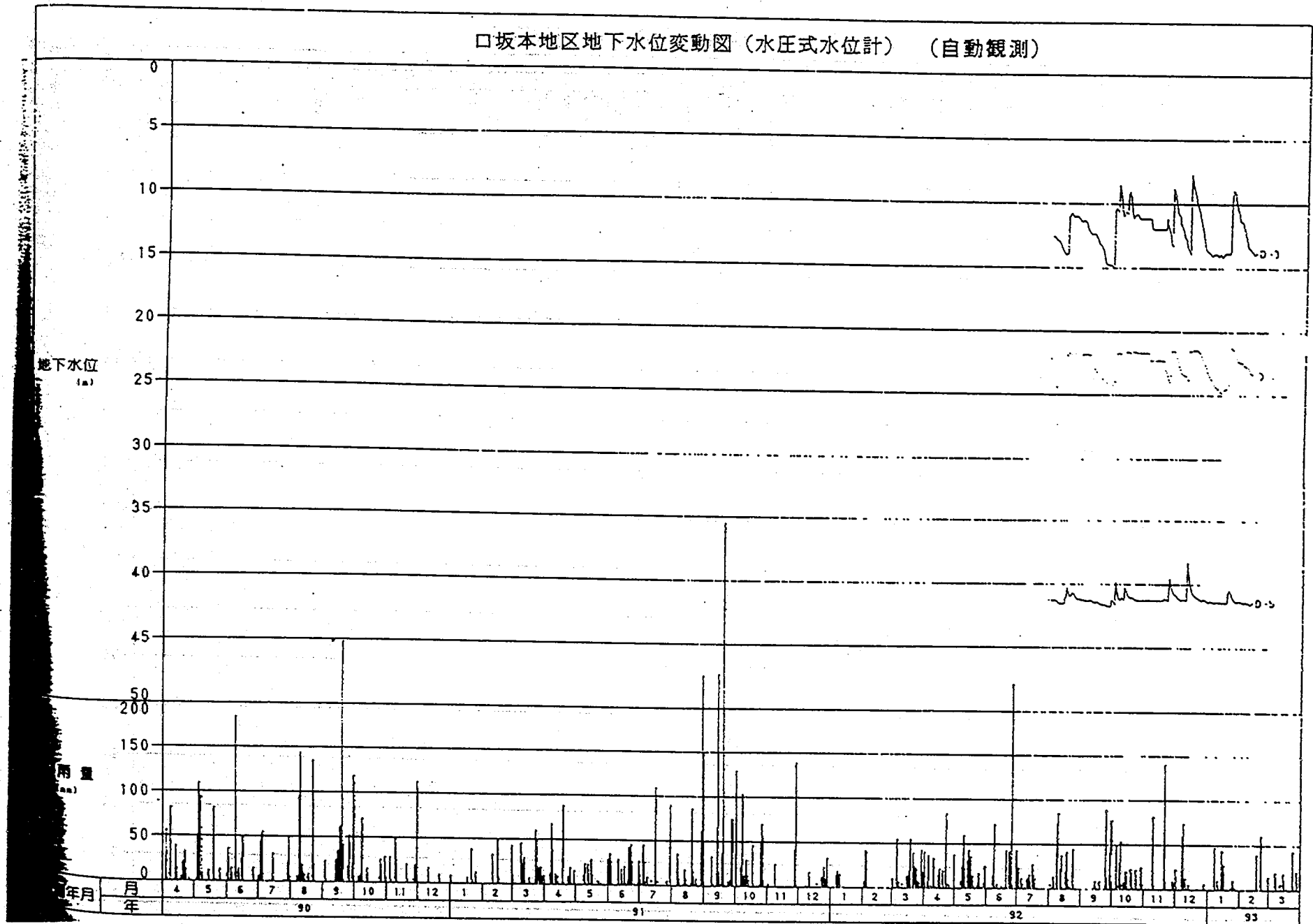


図-2.2.3.2 孔内水位変動²⁾(1) (D-3, D-4, D-5)

口坂本地区孔内水位変動図

□坂本地区孔内水位變動図 (手動観測)

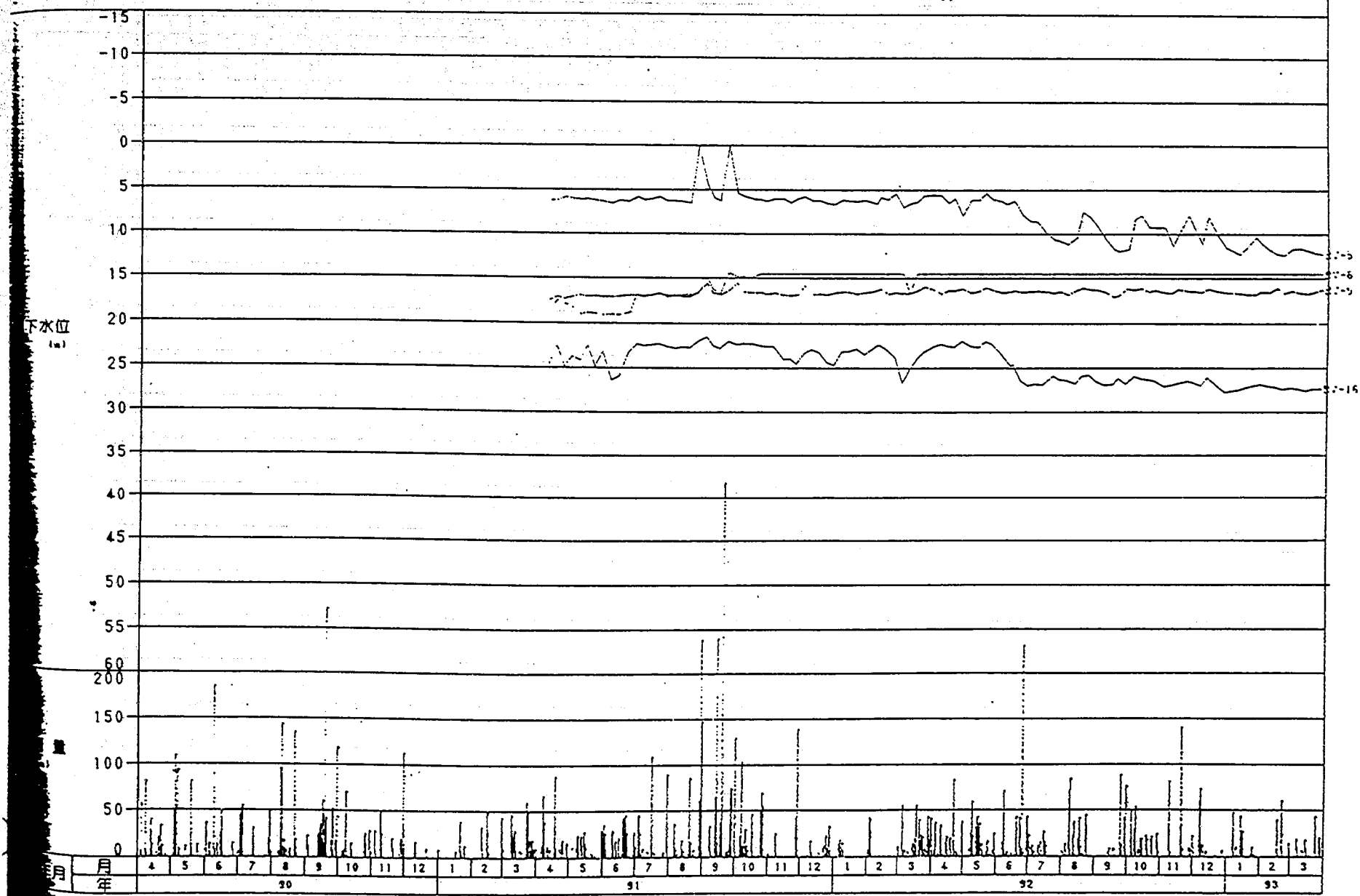


図-2.2.3.2 孔内水位変動(2) (BV-5, 6, 9, 16)

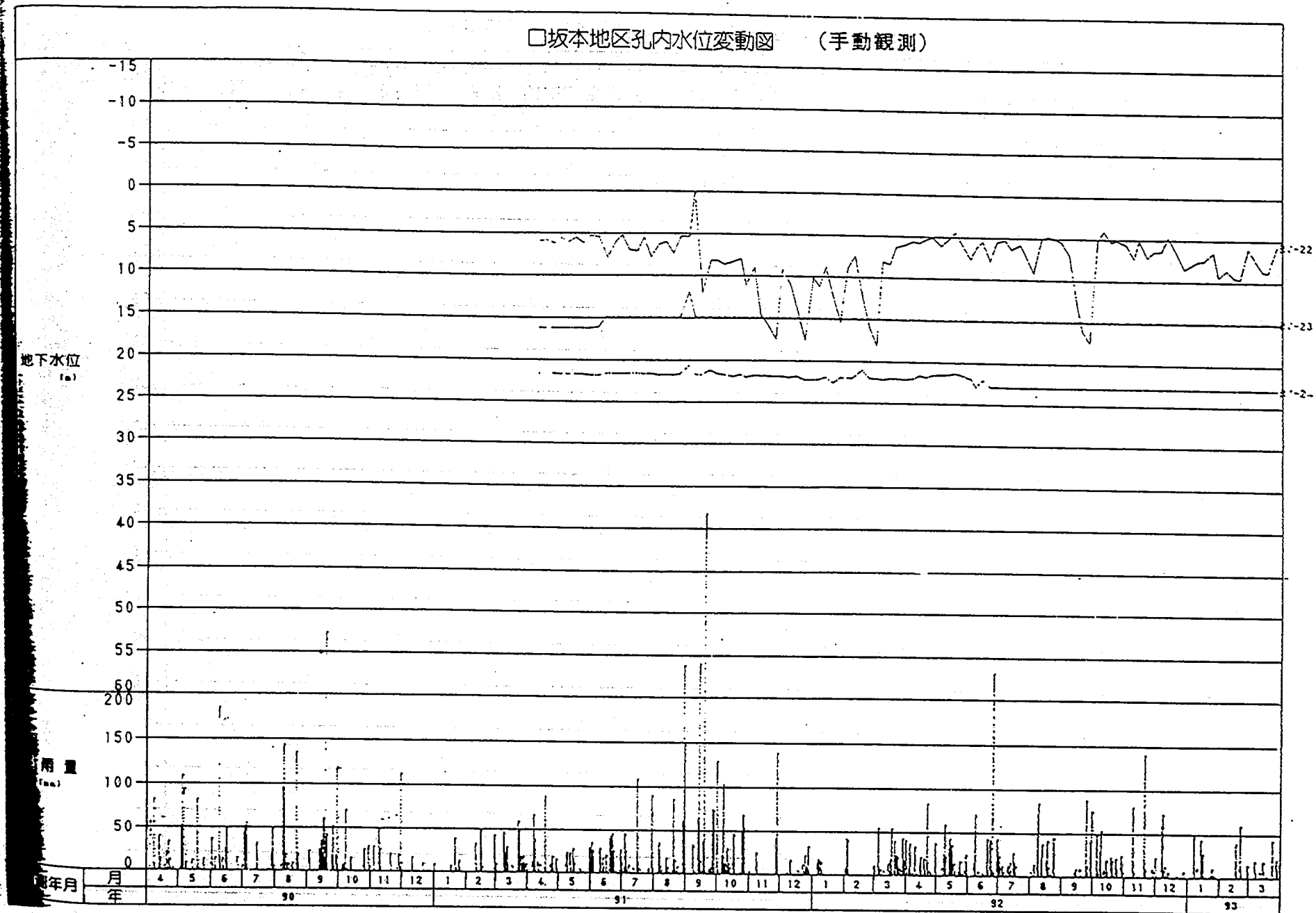


図-2.2.3.2 孔内水位変動(3) (BV-22, 23, 24)

□坂本地区孔内水位變動図

□坂本地区孔内水位變動図

(手動観測)

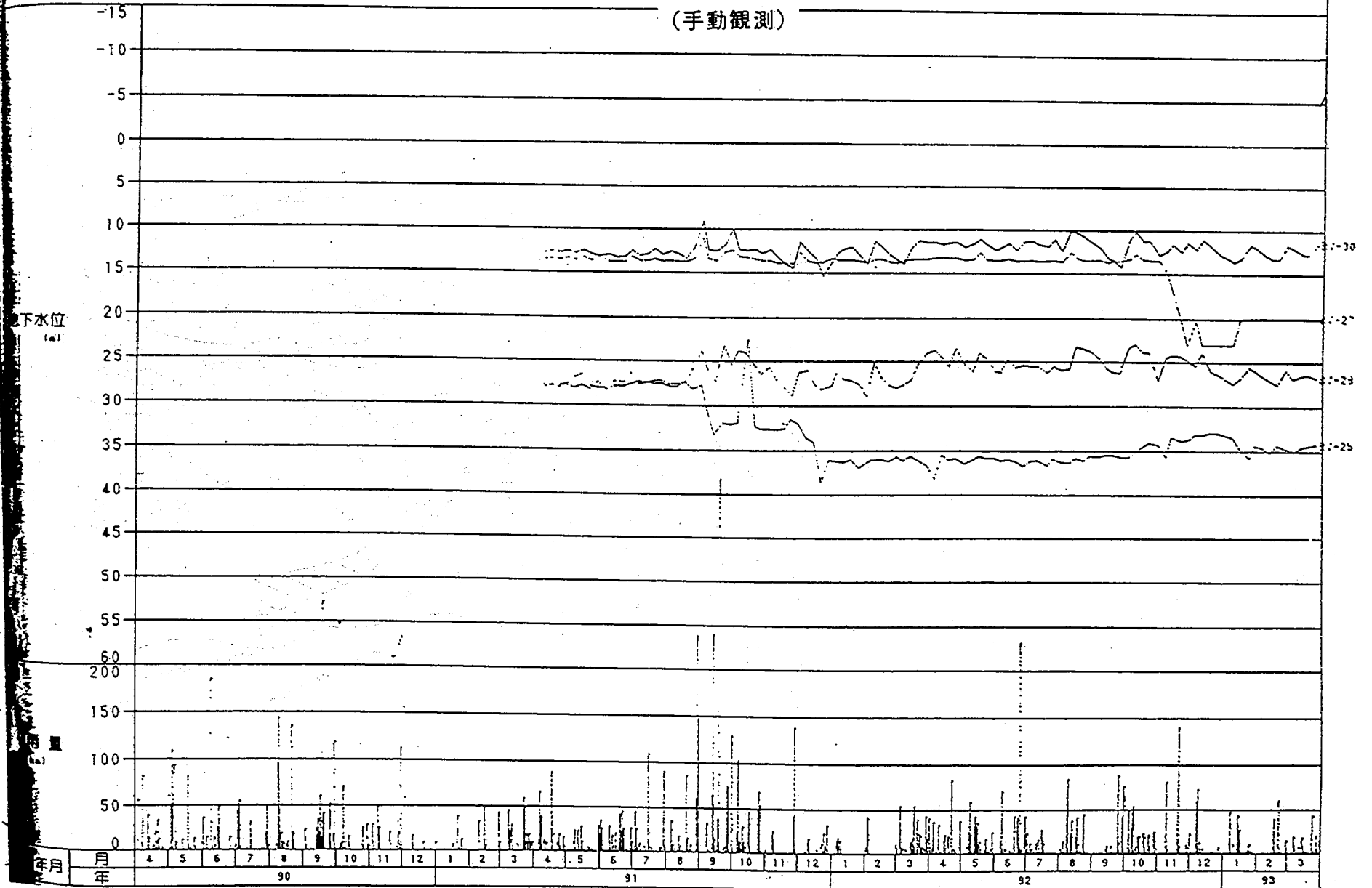


図-2.2.3.2 孔内水位変動(4) (BV-25, 26, 27, 30)

□坂本地区孔内水位變動図

も、水位のデータは連続観測によるものである必要があることになる。孔内水位でも集水井施工の効果は明瞭な水位低下として現れている。

2.2.4 地下水流動調査

平面的な地下水流動経路をつかむため硫酸マンガンをを用いた地下水追跡が上部ブロック1孔と分水稜線上のA-1, D-1孔から実施された。図-2.2.4.1には、各湧水や集水ボーリングにおける薬品の検出から求めた地下水の到達時間を示す。地下水は地すべりブロックのサイドに沿って流れ、B測線とD測線の間の沢へ集まっていることが分かった。それらの流速は $1 \sim 5 \times 10^{-1}$ cm/sとなり、単孔揚水試験による透水係数から推定される流速より2～3桁大きく、速い流動性を持った脈状（水みち）の流れあると考えられる。

また、地すべり地への地下水供給源を知る為、ボーリング孔や集水ボーリングにおける場所別深度別の採水による水質分析・水の電気伝導度測定を行った

測定はpH, Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- (pH4.8アルカリ度で測定) と電気伝導度について行った。水質分析結果をキーダイヤグラムに示す(図-2.2.4.2)。また、図-2.2.4.3には、他すべり地内の採水箇所と場所による地下水水質タイプ、電気伝導度の分布を示す。なお、電気伝導度はトータル溶存イオン量とほぼ比例関係に有るので、それが大きいほど岩石からの溶出の進んだ地中滞留時間の長い地下水と言える。

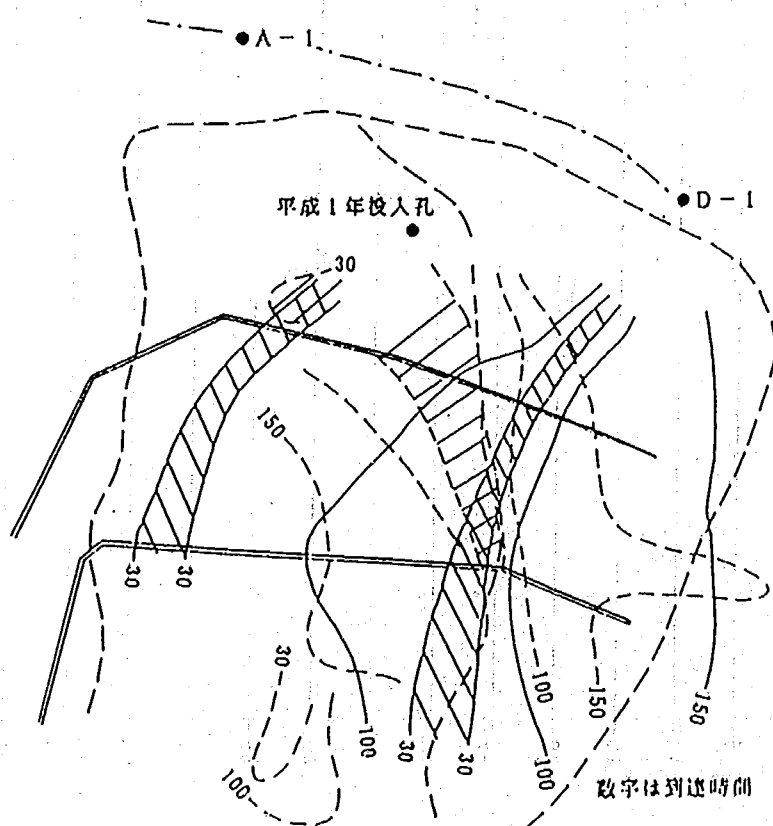


図-2.2.4.1 地下水追跡結果⁷⁾

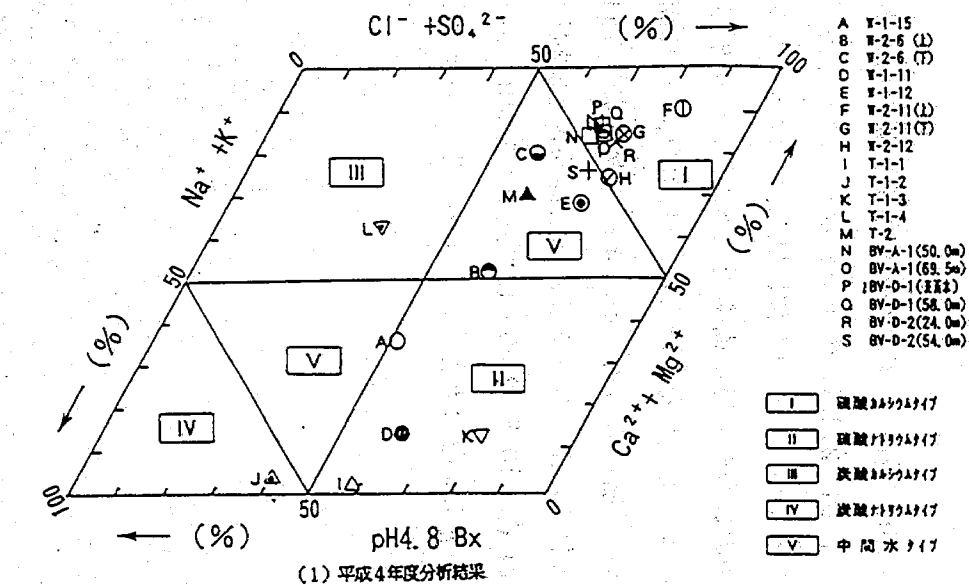


図-2.2.4.2 地下水水質分析結果⁷⁾

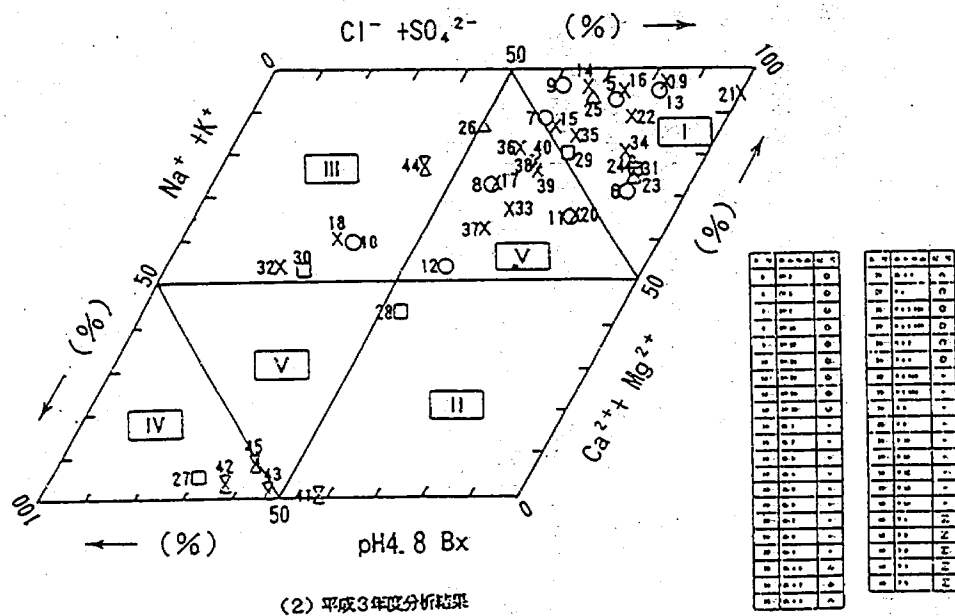
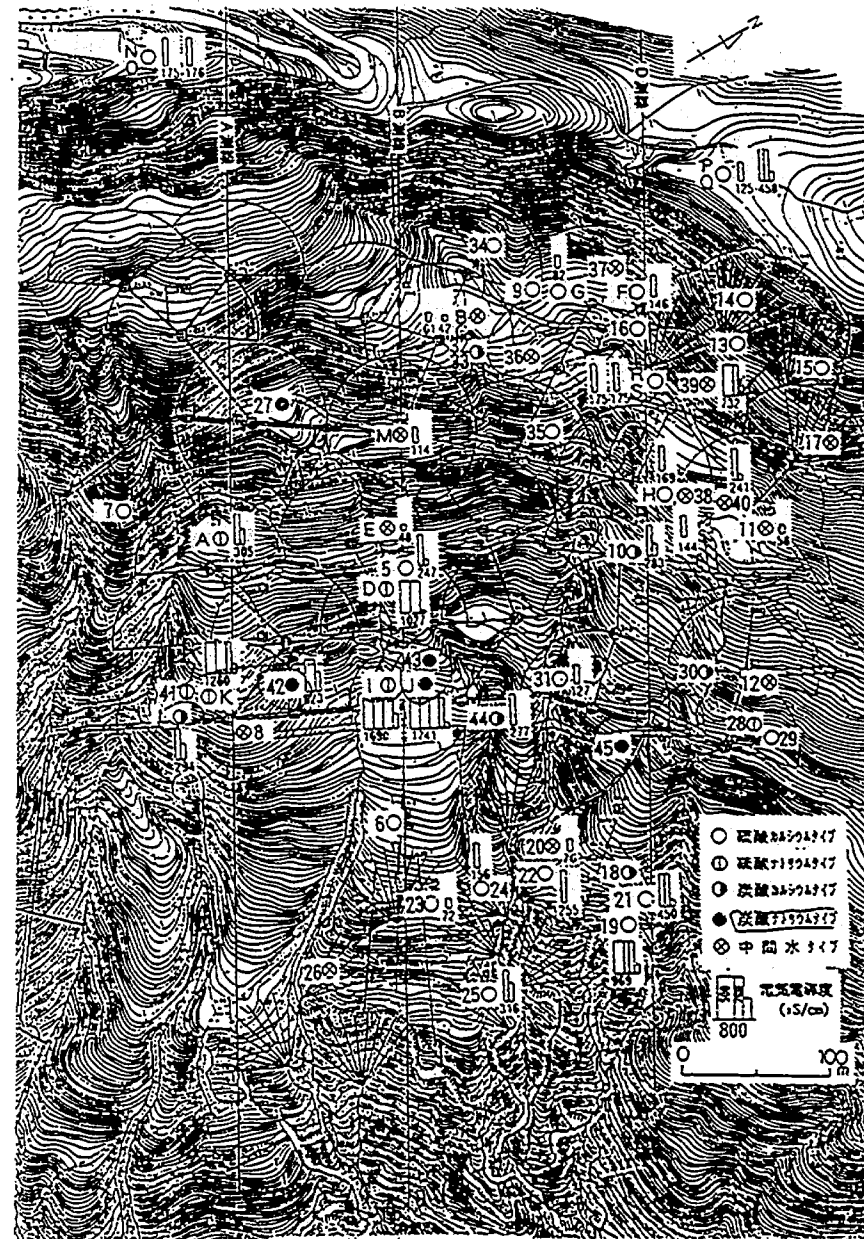


図-2.2.4.3 地下水水質分布と各測点の地下水の電気伝導度⁷⁾



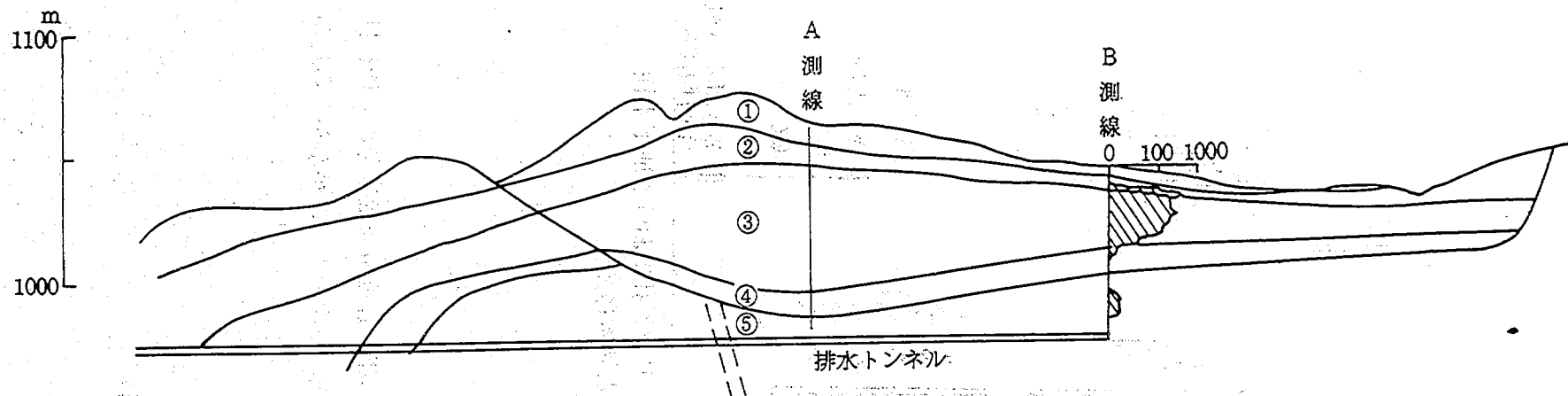
口坂本地すべり地では、幾つかの異なる水質タイプの地下水が分布していて、供給経路の異なる地下水が存在することを示している。各タイプの地下水分布は以下の様である。

- 1) 地すべり地全体に多いのは硫酸カルシウムタイプの地下水で、地すべり地外の分水界尾根上(A-1, D-1孔や地すべり地冠頭部の集水ボーリング)や地すべり地北西側頭部に集中している。
- 2) 地すべり地中部では、下側排水トンネルからの集水ボーリングや集水井から深い位置で施工された集水ボーリング等の地下水は地すべり地中部のすべり面付近に存在する地下水であり、硫酸ナトリウム、炭酸カルシウムまたは炭酸ナトリウムタイプで、電気伝導度の大きいことが多い。
- 3) 地すべり地中部～頭部のとくに地すべり土塊浅層部の地下水は中間水タイプが多く、電気伝導度は低い。
- 4) 地すべり地末端部には中部にあまり認められない硫酸カルシウムタイプの地下水が多く、しかも電気伝導度が地すべり地中部、頭部のものより高いものがある。

さらに、集水井・排水トンネル掘削地質断面による地下水流動部・難透水層の把握を行った。

集水井は深度30～50m程度であるが、どの箇所でも地すべり移動土塊は深さ5～10m以下約10～20mまでが酸化の進んだ褐色頁岩・砂岩風化層、その下位深さ20～40mまでが原岩色の風化岩、それ以深は比較的風化の進んでいない頁岩（一部砂岩）である。湧水の見られる地下水流動部は一般に褐色風化岩の下部。原岩色風化岩中に認められ、推定すべり面直上部にも地下水流動部が存在する。そして、これらの流動部の間には頁岩風化粘土層が挟まれることが多く、これが不透水層を形成しているものと考えられる。

排水トンネルは上側トンネルの掘削断面のみデータが得られた。集水井の掘削地質断面も考慮して、上側排水トンネル沿いの水文地質構造を描くと、図-2.2.4.4のようになる。図中、②層は褐色化した風化頁岩層で地下水位の変動域にあると考えられ、その下部にはしばしば地下水流動部がある。③層は原岩色風化岩層で地すべり地周辺の頁岩が受け盤構造であるのに、この層は流れ盤に近い。これは岩盤の重力性のクリープ変形によって生じたとみられ、変形に伴い層理面などが開口し、BV-4, 5では被圧水を持つ地下水流動層となっている。また④層はすべり面付近を構成する破碎・粘土化層で地下水流動層が挟まれる。ボーリング孔による簡易揚水試験の結果では、②層の透水係数が $1.45 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 、③層は $1.63 \times 10^{-2} \sim 2.45 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ （平均 10^{-3}cm/s 程度）④層は $>5.96 \times 10^{-3} \sim 3.66 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ と③層の透水係数の大きいことがわかる。（図-2.2.4.5）



- ① 崩積土類で全体に透性は良いが、層下面に不透水層となる粘土層を伴うため、集水井掘削時には、層下面からの湧水がある。
- ② 風化著しい頁岩層で、ブロック化して全体の透水性はよい。地下水位の変動域にあたりと考えられ、原岩色を失って褐色した層も含む。風化の原因として、③層と同じように岩盤のクリープ変形などが考えられる。
- ③ 岩盤のクリープ変形により構造が流れ盤に変化したと考えられる層である。変形に伴い、層理面などが開口し、地下水の変動が顕著である。常時飽和していると考えられる。透水性はよい。
- ④ 岩盤のクリープ変形の折れ点付近に担当すため、破砕が著しく粘土が集積している。
- ⑤ 本来の地質構造を残している基盤面の層である。一部破砕しているが面の密着性がよく、不透水層を形成する。
- ⑥ 断層など構造的な弱層部で透水層となる。

図-2.2.4.4 地すべり地の水文地質構造図

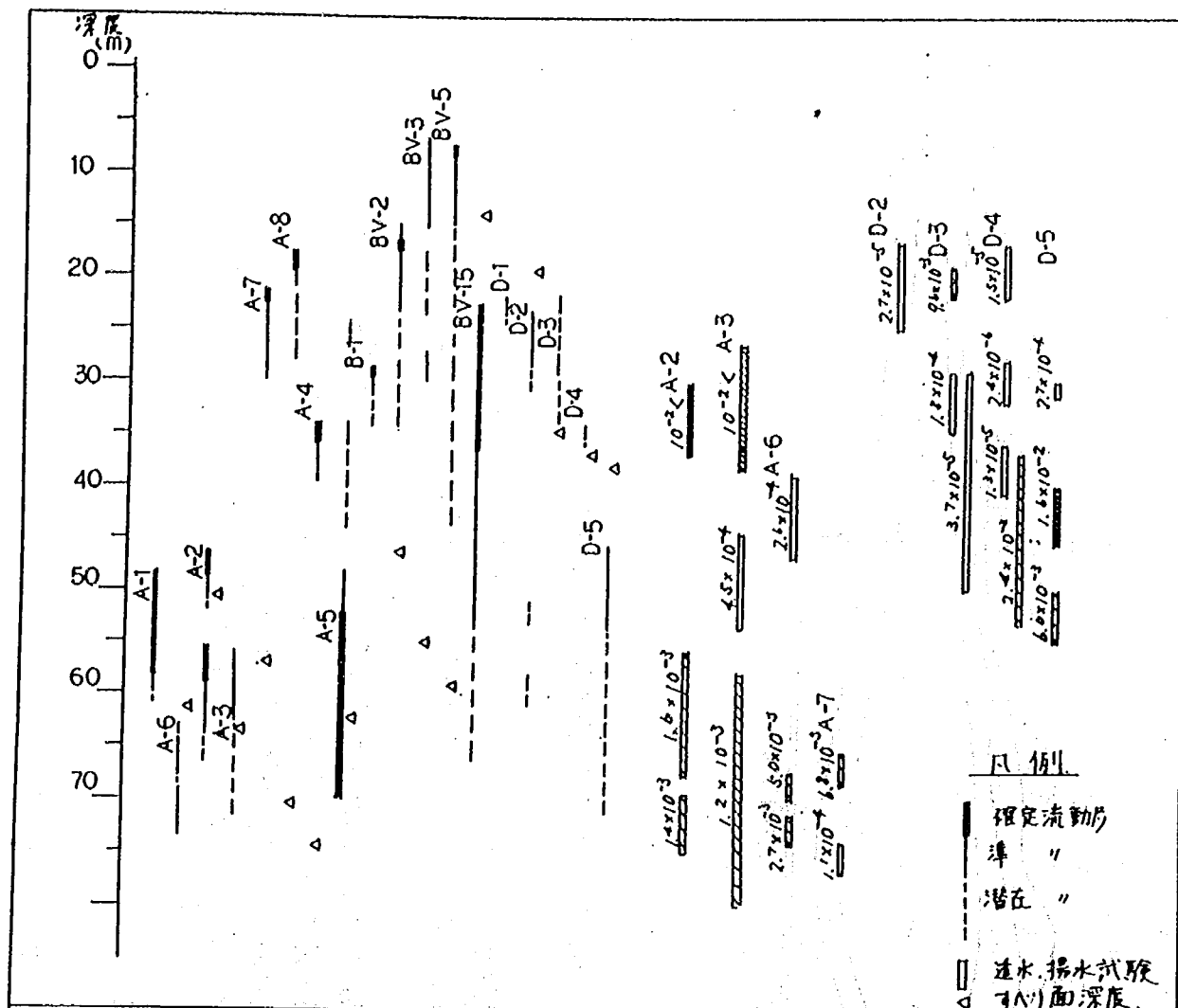


図-2.2.4.5 地下水層，透水係数総括図 各ボーリング孔における地下水検層及び揚水試験による地下水流動層と透水係数²⁾

2.3 地下水流動と地すべり

2.3.1 電気探査・弾性波探査による地盤構造の把握

1) 弾性波探査結果

A測線及びD測線に沿って弾性探査を実施した。その結果，速度分布は下記の5層に区分された。各々の速度層はボーリングその他の地質資料との対比から次のようにかんがえられる。(図-2.3.1.1)

速度層	地質状況
V ₁ 0.3~0.4km/sec	表層土類 (含む崖錐)
V ₂ 0.7~1.0km/sec	主として崖錐 (含む風化岩)
V ₃ 1.3~1.5km/sec	弱風化岩層
V ₄ 2.0~2.6km/sec	風化岩層
V ₅ 3.2~3.5km/sec	基盤岩層
4.0~4.5km/sec	基盤岩層

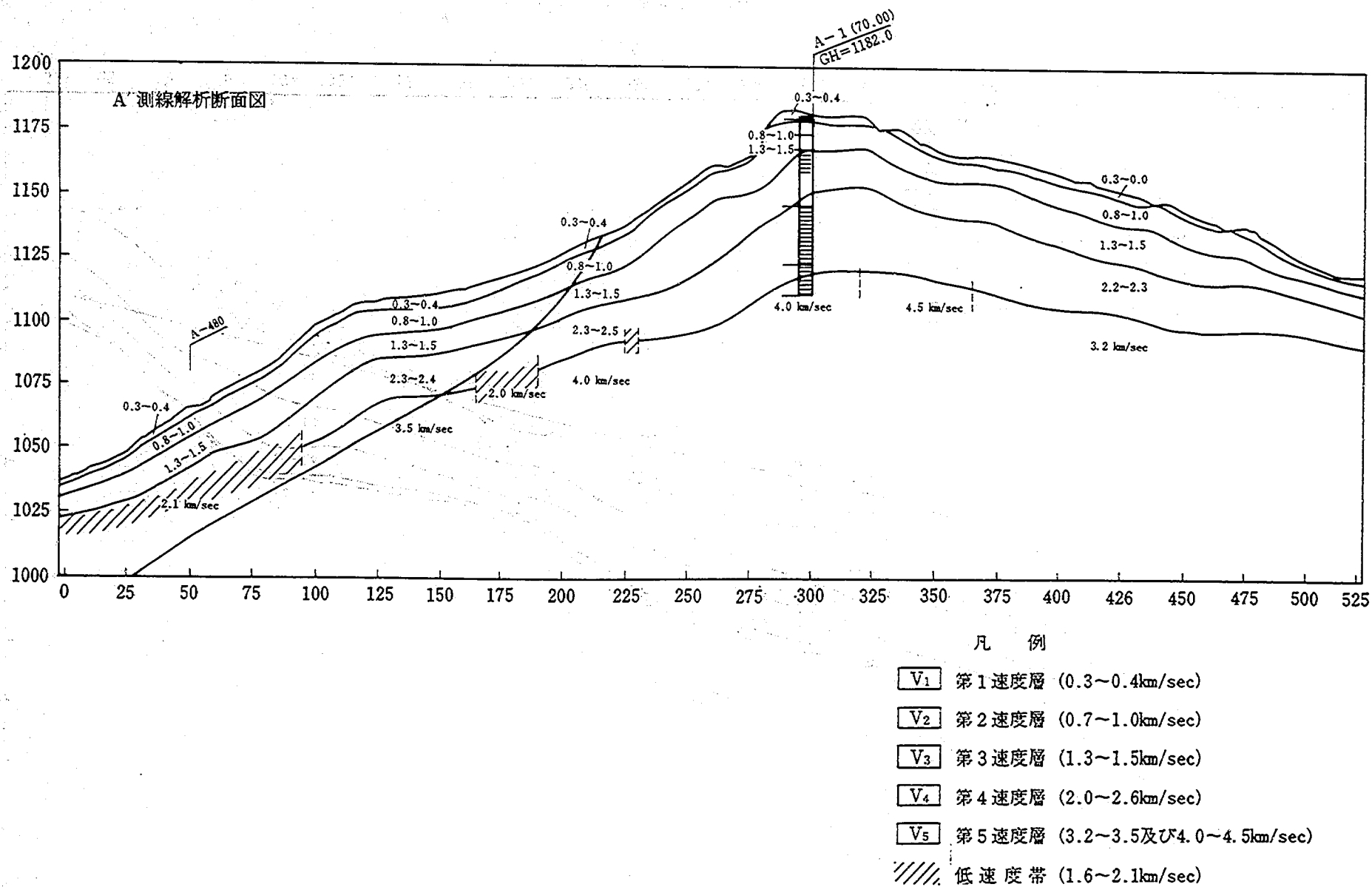


図-2.3.1.1 弾性波探査結果(1)

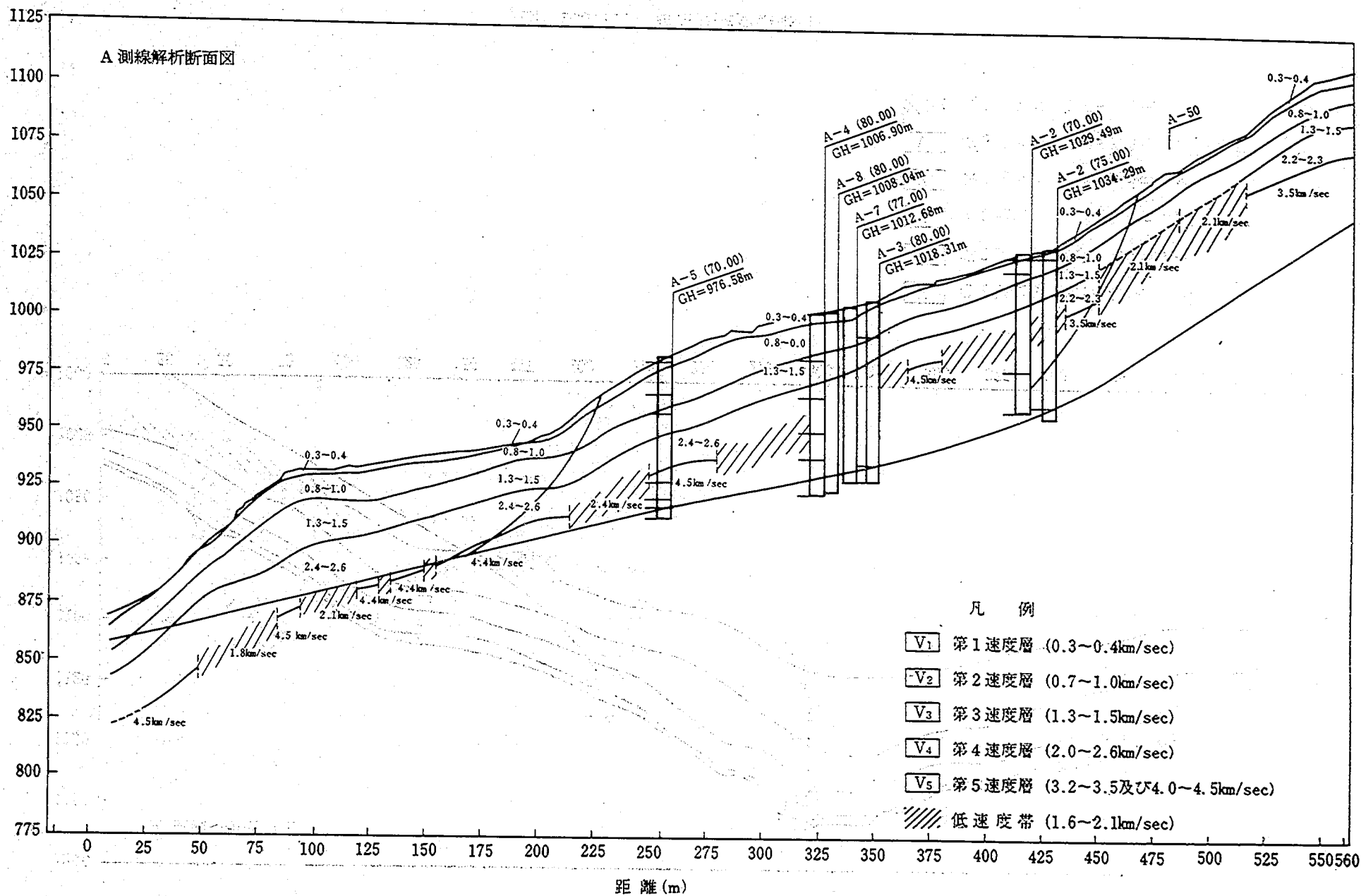


図-2.3.1.1 弾性波探査結果(2)

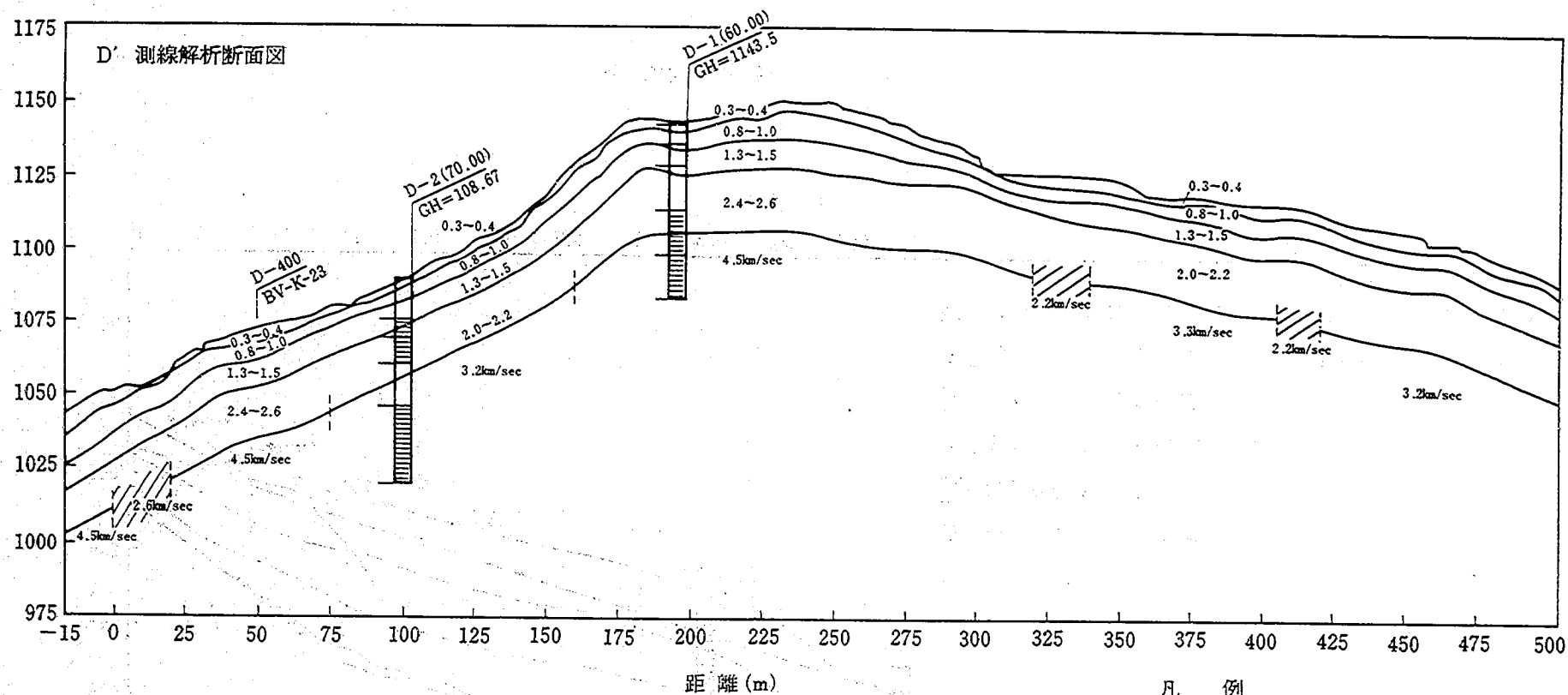


図-2.3.1.1 弾性波探査結果(3)

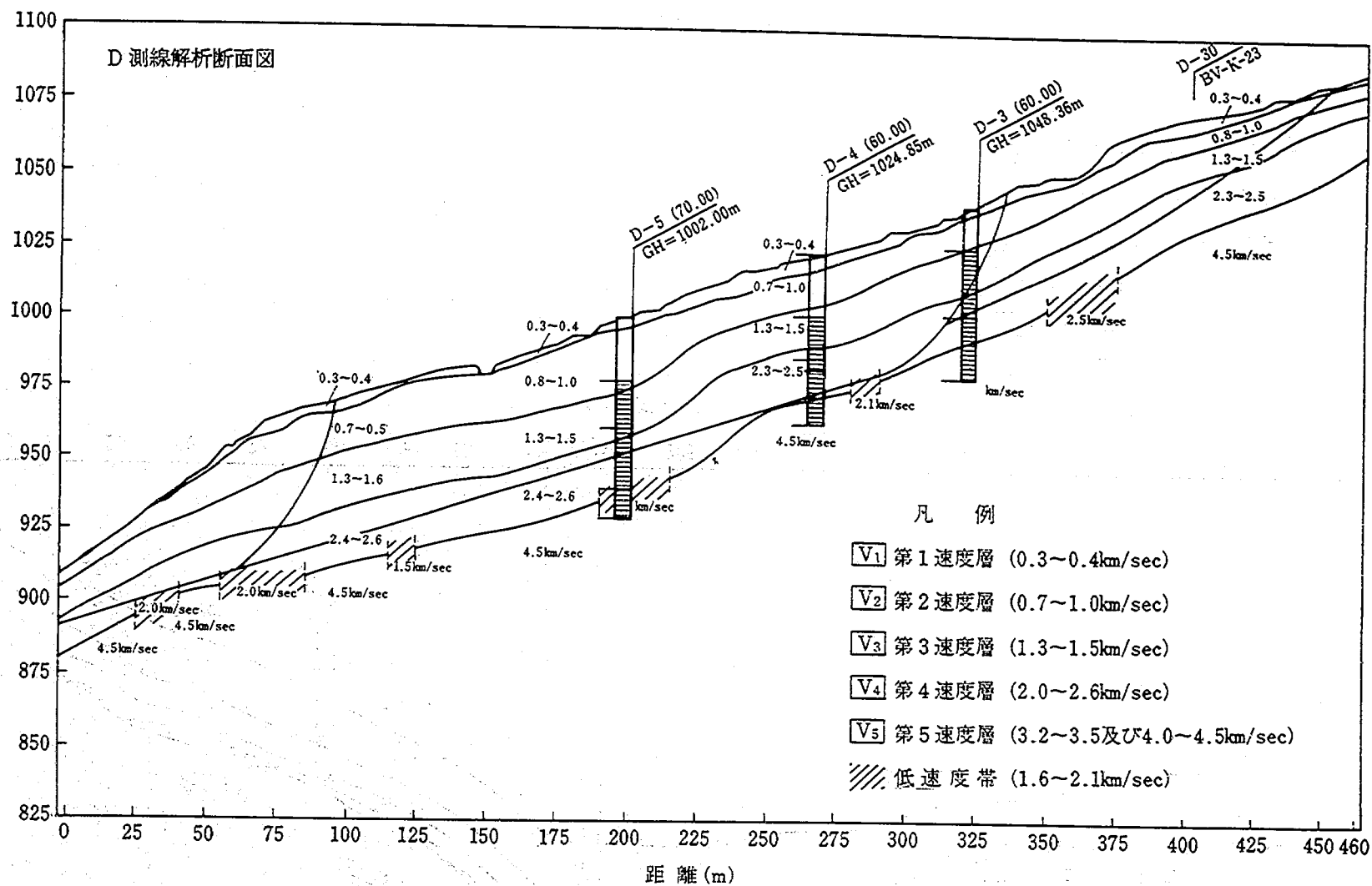


図-2.3.1.1 弾性波探査結果(4)

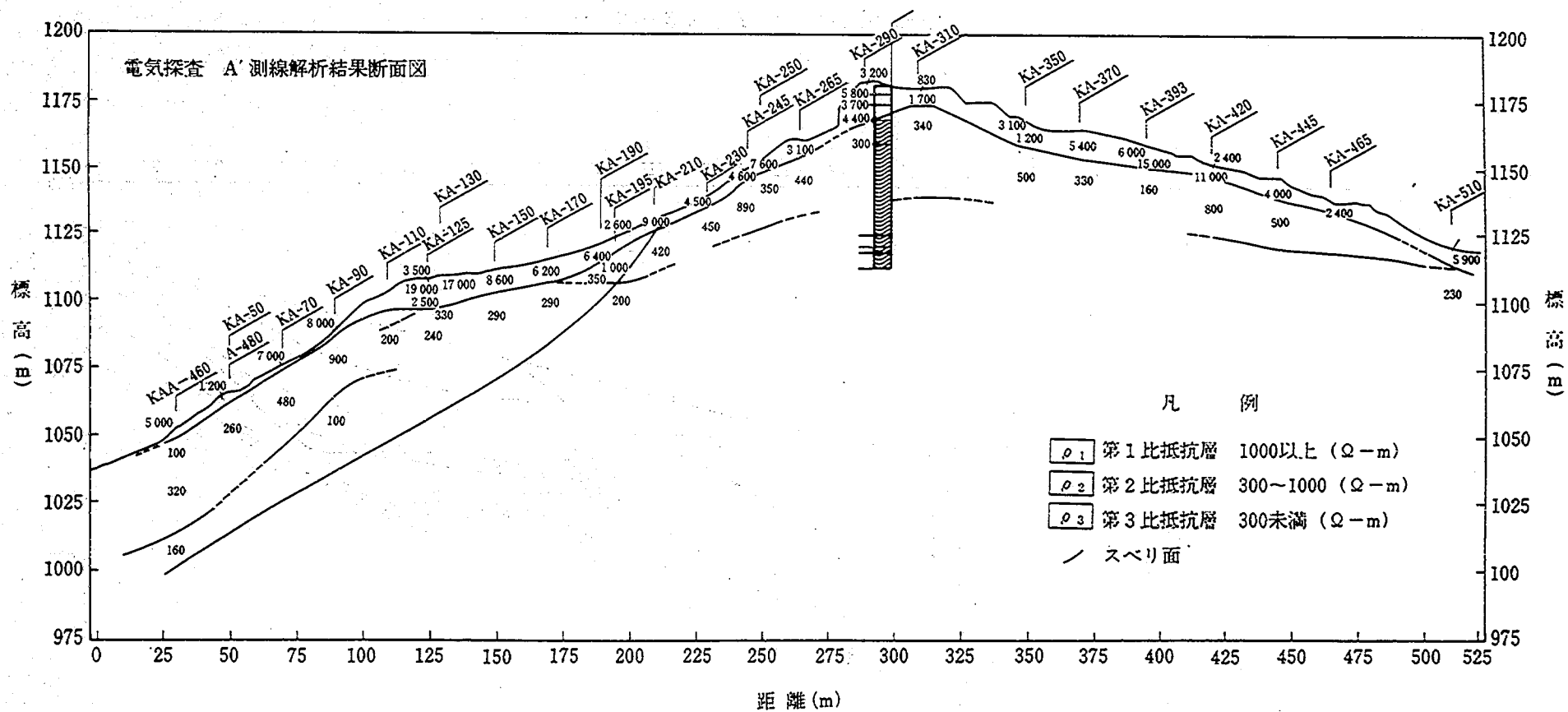


図-2.3.1.2 電気探査結果(1)

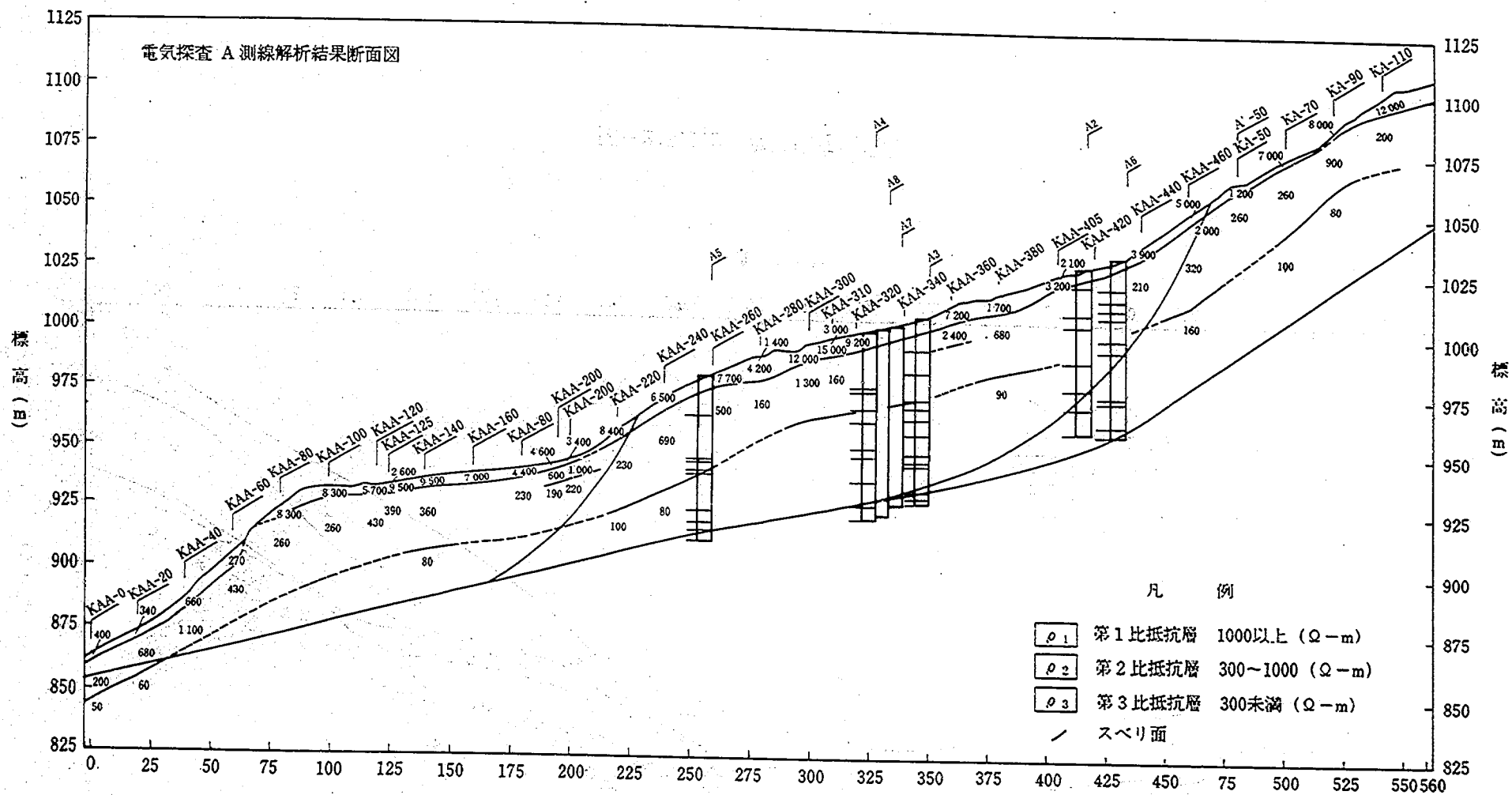


図-2.3.1.2 電気探査結果(2)

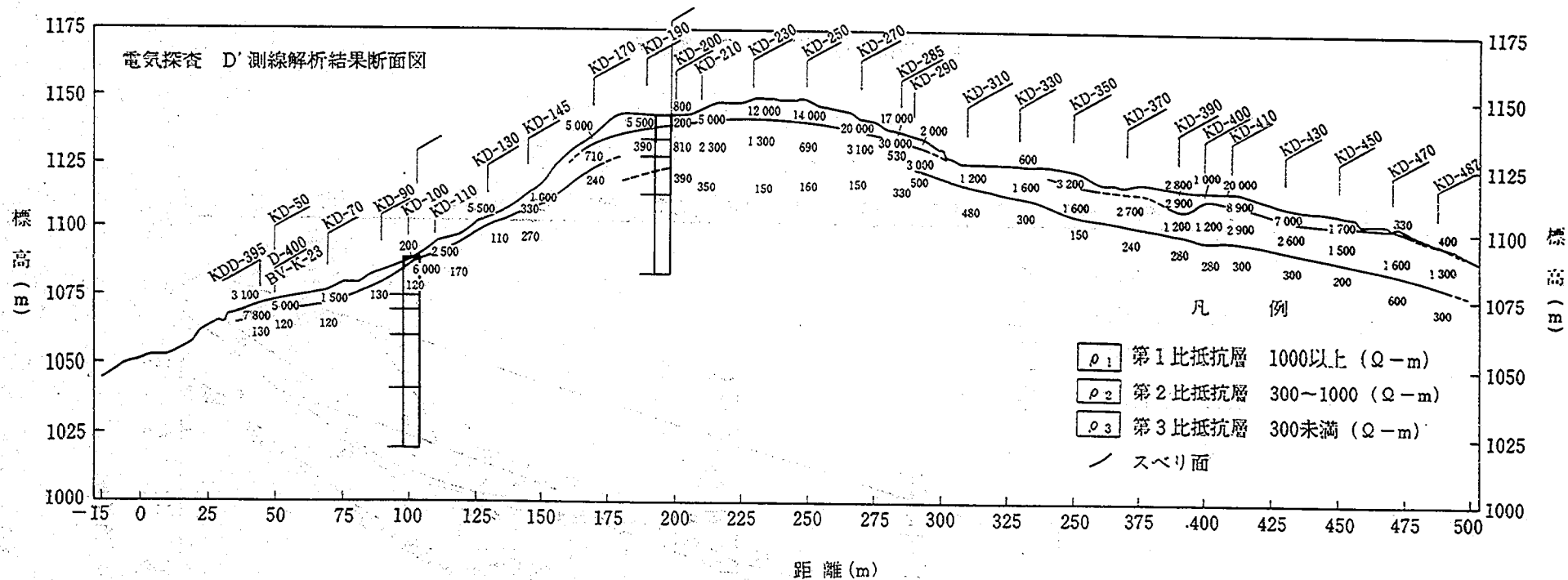


図-2.3.1.2. 電気探査結果(3)

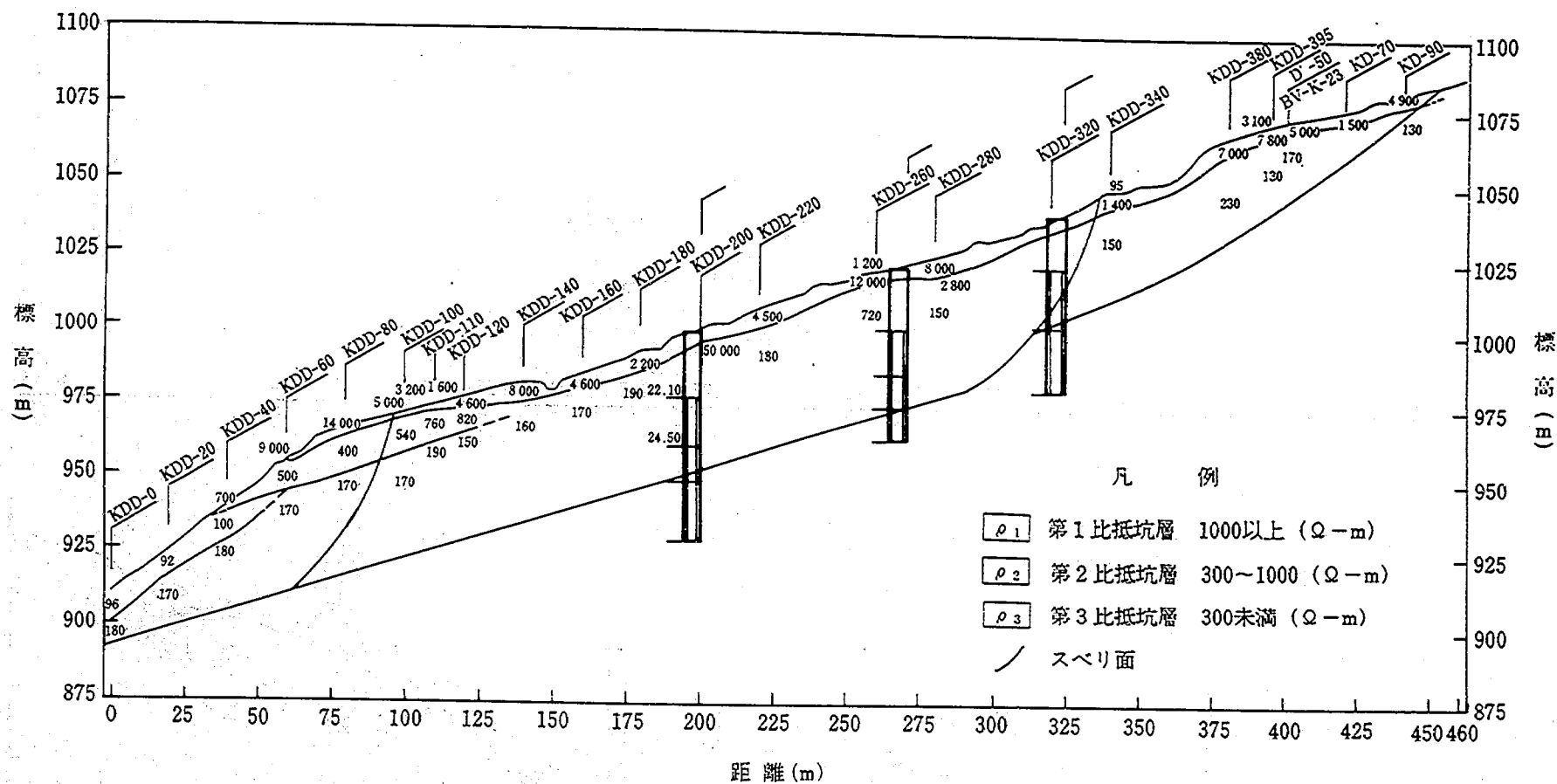


図2.3.1.2 電気探査結果断面図(4)

低速度帯 1.6~2.1km/sec

第5速度層の3.2~3.5km/sec層は主として井川公園自然遊歩道の尾根より西側部に分布しており低速度帯は比較的少ない。一方地滑り斜面（井川公園自然遊歩道の尾根より東側）では主として4.0~4.5km/sec層が分布しており低速度帯は比較的多い。これは尾根を境にして地質状況が異なる可能性が高い。

また地滑り斜面におけるA, A'測線とD, D'測線とを比較するとA, A'測線では低速度帯がD, D'測線におけるよりも多く分布する。これは局所的な岩相変化が著しいことを反映しているものと考えられる。さらに地すべり末端部では、第4速度層以下の低速度部分がすべり面以下にも存在している。

また、分水界稜線上の二重山稜が上部ブロックと連続し移動する可能性のあるものかが問題であったが、弾性波探査とボーリングコアからみて、二重山稜を形成した斜面変動はせいぜい地表下15m程度の範囲迄で、その形成原因は、地形的主滑落崖の形成後の側圧解放による基岩のトップリングによるものと考えられる。そして、凹地にテフラが堆積していることから、この斜面変動は安定しており、現在の地すべりとは関係していないと判断できる。

2) 電気探査

測定方法はウェンナー4極法で、

電極間隔 垂直探査 0.5~100m (19通り)

水平探査 2 ~ 50m (7通り) で探査を行った。

A・A'測線, D'測線（井川公園自然遊歩道の尾根より西側部）での探査結果から、次の3層に比抵抗分布は区分できる。

ρ_1 1000~18000 Ω M

ρ_2 200~ 1000 Ω M

ρ_3 50~ 200 Ω M

ボーリングその他の地質資料との対比から、第一比抵抗層は主として最表層のルーズな状態にある土砂に該当すると考えられる。第二比抵抗層は主として粘土状を呈する風化岩層と風化岩塊の混在する部分に該当すると考えられる。第三比抵抗層は主として地下水面より下部にある風化岩層に該当すると考えられる。

D測線, D'測線（井川公園自然遊歩道の尾根より東側）

ρ_1 1000~30000 Ω M

ρ_3 100~ 200 Ω M

この区域における比抵抗分布は2層に区分される。A・A'測線に比較すると風化岩塊を主体とする層は末端滑落崖等の一部を除いてはほとんど分布しないものと考えられる。また各比抵抗層に対比される地層はA・A'測線についての結果と同様である。なお電気探査の結果得られた各比抵抗層の境界はいずれも地下水面とは対応しない。これはこの区域における地下水が層状に分布するのではなく水脈状に分布するためと考えられる。

2.3.2 水文地質構造の検討

以上の結果から、当地すべり地における地下水流動を支配する水文地質構造は以下のように考えられる（図-2.2.4.4及び図-2.3.2.1）。

地下水追跡結果によると、A-1孔からは地すべり地内への地下水流入は認められず、D-1孔からは最近滑動の生じた地すべりブロックの頭部から南側サイドに沿って、D測線とB測線の間を流れる沢に沿って 10^{-1} cm/sオーダーの流速で地下水が流動していることはすでに述べた。すなわち、地すべりブロックの側部や頭部に沿う地下水流動部（水みち）が存在することになる。

一方、水質分析からは、 Na^+ や HCO_3^- を含む溶存イオン量の多い地下水が地下深部から地すべり地中部で供給され、それがすべり面付近を流下していると考えられる。地すべり地頭部～中部および浅層部の地下水は溶存イオン量の少ない中間型で、これは地すべり移動に伴いブロック頭部の透水性の良い部分を中心に浸透した降雨あるいはそれと地下深部からの水との混合したものゝを起源とするものであろう。

集水井・排水トンネル掘削地質断面からの地下水流動部は地下水検層による流動部深度と整合している。また、B測線に沿う深度別間隙水圧測定によると、深度30～40m付近に被圧地下水があり（図-2.3.2.1）、ここでは集水井等で大きく水圧低下が見られた。この深度は図-2.3.2.1の透水性の最も高い③層に相当し、水質的には浅層地下水流動層と判断される。また、すべり面付近（図-2.3.2.1の④層）では間隙水圧変動は大きい（BV-4孔）。地すべり地頭部では、すべり面付近の地下水を採る集水井の地下水電気伝導度は低い（採水点C、E）ので、透水性の良い頭部で降雨がすべり面付近まで浸透している可能性がある。したがってすべり面付近

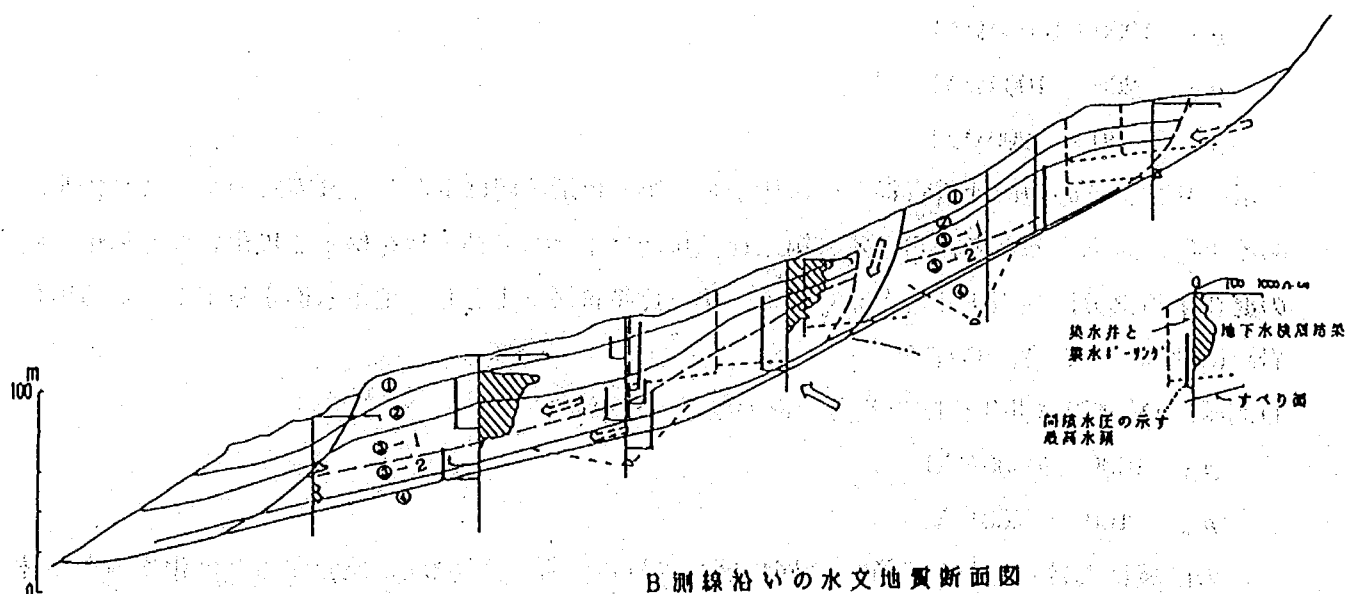


図-2.3.2.1 地すべり地の水質地質構造図

の地下水はブロック頭部の浸透水にすべり面下からの深層地下水が加わって流下し、間隙水圧の変動はブロック頭部から伝達されるが、地下水の主な供給源はすべり面下あるいは分水界稜線（ここにはリニアメントが存在している）にあるとみられる。地下水排除工ではすべり面下から供給される被圧水の水圧低下は困難であると考えられる。なお、鉛直方向の地下水浸透は頁岩の粘土化による難透水層の存在からブロック頭部を除いて考えにくく、間隙水圧変動の直接の原因とはなっていない。また、末端部ブロックが現在も滑動しているが、末端部のCaSO₄系の地下水は地すべり地中部でそれが見られないので、地すべり地以外の北側斜面から供給されている可能性がある。

2.3.3 地下水流動と地すべり発生機構

地下水検層結果による孔内水位以下での流動層は、ボーリングコアでは礫状あるいは亀裂の発達した棒状コアの所にあり、粘土がちの層準は難透水層となっている。そして、集水井や排水トンネルからの集水ボーリングによる間隙水圧低下が特定の深度に限られ、それより上下の深度では同時期に水圧低下が現れないことは、深度ごとにいくつか地下水体が存在し、それらの流動経路は単に斜面下方に向かっていているわけではないことを示す。このことと、地下水追跡による脈状流の存在を考え合わせると、地下水の流動経路は人体の血管のように3次元的分布をしていることが推定される。一方、地すべりブロック頭部や中部ブロック上部より高い位置にあるすべり面では、水質から浅層水の流動が考えられ、BV-32ですべり面付近のみ間隙水圧低下が見られたことなどから、すべり面に沿ってはある程度斜面方向に沿った流動層があると考えられる。深度別の間隙水圧値を比較しても、その水圧は上位の深度の水圧より高い所があり、すべり面付近の帯水層は流動性がありしかも間隙水圧の高い地下水層ということになる。

一方、地下水の供給源としては、水質分析から、深層地下水が地すべり地北西方の分水界稜線と、中部ブロック中部でのすべり面より下からの温泉水と似た成分の地下水供給が考えられる。

このような地下水文構造と間隙水圧変動動態から、斜面を不安定化させる間隙水圧の上昇は、単孔揚水試験に示される低い透水係数を持ったダルシー流ではなく、地すべり地内に横方向に連続する脈状や層状の帯水層に沿う地下水の速い流動またはその中を伝達される水頭拡散によって生じると考えられる。

3. 口坂本地すべりの発生機構と今後の対策

口坂本の大規模な地すべりの発生素因の形成過程は、地質構造分析や空中写真判読から、次のように考えられる(図-3.1)。

- 1) まず、NE-SW走向、N傾斜の斜面に対し受け盤構造の砂岩・泥岩互層が存在した。
- 2) 山体侵食の進行により、頭部に緩斜面を持つ凸型の重力的に最も不安定な横断型⁸⁾が生じ、久田⁹⁾が指摘するように、受け盤構造の斜面で岩盤クリープが進行した。その結果水文地質構造で示したやや流れ盤の構造が発生した。これは、現在の末端ブロックのすべり面より下位にも厚さ数十mを越える破碎層の存在にも現れており、弾性波探査結果とも整合するので、クリープの及ぶ深さは現在のすべり面より深かったと考えられる。
- 3) 分水界稜線に平行なりニアメントや地すべり地付近を南北に走るリニアメントに関係があると考えられる深層地下水が供給されうる環境から、クリープによる岩盤の劣化によりクリープの変動体内に深層地下水が供給されやすくなった。その結果、雨水の浸透による間隙水圧の上昇が変動体内に伝達されやすくなる、粘土層が発達するなどの原因により、斜面が不安定化しやすくなり、主滑落崖を作った地すべりが発生したと考えられる。現在の地すべりはこの地すべりと規模をほぼ同じにするものと考えられる。
- 4) これらの結果、すべり面付近や地すべりブロックの頭部では地下水の流動経路となった。さらに、岩盤クリープにより受け盤～やや流れ盤となった砂岩・頁岩互層の頁岩部の粘土化進行の結果、脈状の複数の流動経路が形成されたと考えられる。水質分析の結果からは、すべり面沿いの流動層や脈状の地下水体に沿って、降雨起源の地下水(浅層系)と地すべり下側からの深層地下水及び分水界稜線からの地下水とが混合して流れていると考えられる。降雨による間隙水圧の上昇は、これら地下水体を通して地すべり地塊内へ伝達されていく。
- 5) 口坂本では、樹枝状水系の発達で斜面下部の谷侵食が進行しやすい地形条件にある為、地すべりの末端は侵食され地すべりは移動によっても安定化する環境には無い。このため、現在の地すべりには末端ブロックが形成され、最も活動性が高くなっている。

地すべりの誘因は、直接的には、降雨-間隙水圧・孔内水位変動と地すべり移動の関係、地下水文構造からみて、主に地すべりブロック頭部やサイドからの雨水浸透によるすべり面付近の間隙水圧の上昇と、それがすべり面に沿う流動層で伝達されることによると考えられる。地すべり地北西方の分水界稜線やすべり面下位からの深層水の供給は降雨に即応する間隙水圧の上昇の原因としては説明できず、むしろ、間隙水圧の季節的変動や降雨に即応する間隙水圧上昇伝達の媒体の役割りを果たしている。しかし、末端ブロックは、降雨にほぼ関係無く、むしろ斜面崩壊が地すべり不安定の原因となっている。

これまで、排水工の集中的な施工により末端ブロックを除き地すべりは移動の面からはほぼ安定化した。これは、移動層内の脈状あるいは被圧帯水層状の地下水流動部分の間隙水圧を低下させたことによる。しかし、平成5年7月の段階では、孔内水位による斜面安全率の上昇は目標には達し

ていない。今後の対策の1つとして、分水界稜線からの深層地下水流入の抑制による間隙水圧の季節変動や基底値の低下が考えられる。このためには、稜線を横断する複数の断面による高密度の電気比抵抗映像法等の地盤探査により地下水流動経路をつかむ必要がある。又、末端ブロックに関しては、移動速さが大きいことから抑止工の施工は困難であり、斜面崩壊対策も危険性から施工が難しい。このブロックでは、最近降雨と無関係な移動を示している、雨水浸透によるすべり面間隙水圧上昇の抑制よりも、水質調査で現れたブロック北西方からの CaSO_4 型の地下水供給を抑制し、すべり面間隙水圧の基底値の低下を図った方が良くと考えられる。

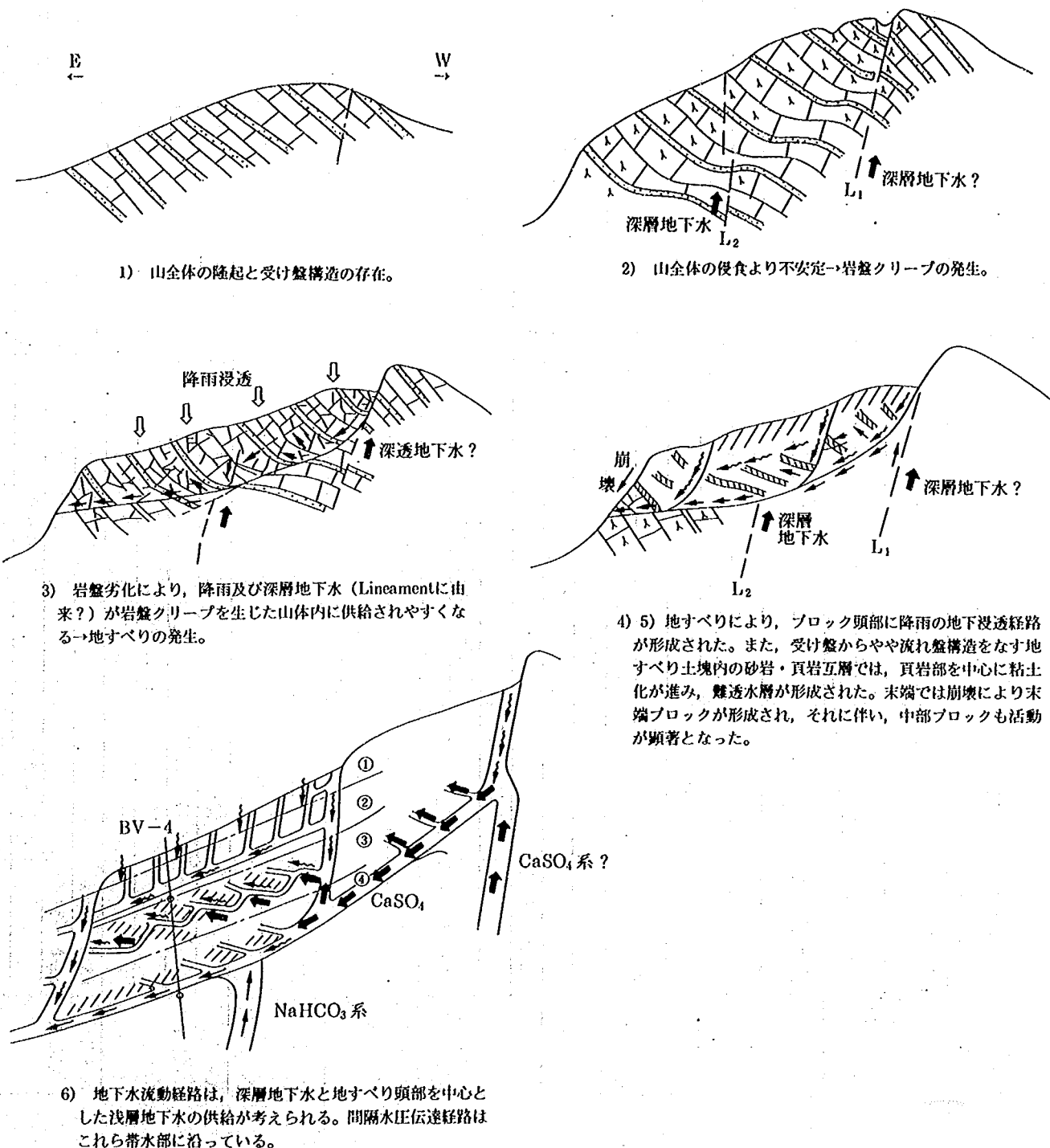


図-3.1 口坂本地すべりの形成過程と水文地質構造の形成

表-2.4.4.1 地下水検層結果による地下水流動度(1)

測 線	孔 番 (すべり面)	地下水検層結果		流動層 (面)	深度 (m)	対応地質	すべり面からの距離	実施年月日	備 考
		確 定	準 確 定	潜 在					
B	B-1 (13.15)	28.25~28.75					-15.6		すべり面より下位に流動層
			28.75~30.25				-17.1		
				30.25~32.00			-18.85	H 4. 5. 1	
	BV-1							S63.12. 8	流動層なし 24h後27.0~35.0m... 500Ω-cm以上
	BV-2 (46.8)	16.50~17.00				CL~D	29.8		
			15.14~16.50			D	30.3		
			17.00~23.00			D	23.8		
	BV-3 (57.5)			23.00~34.25		CL~D	12.55	S63.12. 7	
			7.00~17.50			Dt~D	40.0		
			27.50~29.00			D	28.5		
				6.00~7.00		Dt	50.5		
				17.50~23.50		D	34.0		
	BV-5 (59.3)	7.25~8.25				CM	27.75	S63.12. 7	
			8.25~14.00			Dt	51.05		
	BV-6					D	45.3		
				14.00~43.50		CL~D	15.8	S63.12. 6	
	BV-15 (B-4) (14.0)	22.50~36.50						S63.12. 6	流動層なし 24h後 24.5m... 500Ω-cm以上
			36.50~52.25			D~CL			
				52.25~66.50		D~CL	-22.5		
A	A-1	48.20~58.20						S63.12. 7	B-4 から約70m D測線より すべり面より下位に流動層
			58.20~59.60			CL~CM			
				59.60~60.30		CM		H 4. 4. 30	
	A-6 (61.1)		64.50~67.20			CM	-6.10		
			68.70~73.50			D, CL~CM	-12.40		準確定流動層下位にD層 (72.85~73.50m)
				63.00~64.50		D	-3.40		
				67.20~68.70		CM	-7.60		
	A-2 (50.7)	46.2~48.8				D	-7.60		
		56.0~58.0 ^a				CM	1.90		
			48.8~50.3 ^a			CL	-7.30		
			58.0~64.0 ^a			CM~D	0.40		流動層下位にD層 (50.00~50.70)
						CL	-13.30		砂岩層 (57.80~59.00) 介在

表-2.4.4.1 地下水検層結果による地下水流動度(2)

測 線	孔 番	地下水検層結果 流動層 (面) 深度 (m)			対応地質	すべり面からの距離	実施年月日	備 考
		確 定	準 確 定	潜 在				
A	A-2			50.30~51.3*	CM	-0.60		*印、すべり面を挟んで流動層
				64.00~66.5*	CL~CM	-15.80		△印、すべり面より下位に流動層
	A-3 (63.4)		45.70~52.50		CM~CL	10.90		すべり面を挟んで流動層
				52.50~71.30	D, CL~CM	-7.90		
	A-7 (57.2)	21.20~22.20			CL~CM	35.00		確定流動層下面にD層 (22.20~24.00m)
			22.20~30.00		D~CM	27.20		
	A-8 (70.5)	17.50~19.50			D	51.00		
			19.50~21.00		D	49.50		
				21.00~28.00	D~CL	42.50	H 4. 5. 10	
	A-4 (74.6)	34.00~36.00			CM	38.60		
			36.00~38.00		CM~CL	36.60		
				38.00~39.50	D	35.10	H 4. 4. 25	
	A-5 (62.1)	52.00~70.00			CL~D	-7.90		すべり面を挟んで確定流動層
			48.00~52.00		D	10.10		
				24.00~27.00	D	35.10		
				32.00~44.00	CL~D	18.10	H 4. 5. 8	
D	D-1		22.00~23.00		CL			
				23.00~24.00	CL		H 4. 5. 1	
	D-2 (19.5)		23.00~28.00		CL	-9.00		すべり面より下位に流動層
				28.00~31.00	CL~D	-11.50		
				51.00~53.00	CL~D	-33.50		下位にD層 (52.80~53.00m)
				58.00~61.00	CL	-41.50		
	D-3 (37.4)		27.50~29.00		D	8.40		
				20.20~27.50	D	9.90		
				29.00~32.00	D	5.40		
	D-4 (37.0)		34.00~34.50		D	2.50		すべり面を挟んで流動層
				37.00~37.30	D	-0.30		
	D-5 (38.45)		46.00~53.50		D~CL	-15.05		すべり面より下位に流動層
				53.50~55.70	CM	-17.25		

4. ま と め

本調査では、静岡県静岡土木事務所からの受託調査として、昭和63年度から平成5年度まで口坂本地すべりにおいて、地すべり発生機構、対策工の立案、対策工の効果判定を行った。ここでは、これまでの調査結果及び対策工の施工資料を総括し、四万十帯の大規模地すべりの好例である当地すべりにおいて、今後の対策工計画の資料とするため、地下水流動とそれを支配する水文地質構造を調べ地すべり発生機構を明らかにした。

本稿で用いた調査資料は、静岡県土木部砂防課、静岡県静岡土木事務所及び同俵沢出張所により実施された口坂本地すべり対策事業の中で行なわれた調査によるものが多い。資料を提供して頂いた各位及び資料とりまとめにご協力頂いた日本工管(株)防災部に感謝致します。

参 考 資 料

- 1) 静岡県地質図：日本地質図大系中部地方，p.34，朝倉書店。
- 2) 静岡県・日本工管(株)：平成5年度第2回口坂本地すべり合同会議資料及び計器変動図集，1994年2月。
- 3) 檜垣大助・丸山清輝・吉田克美・吉松弘行：地すべり地における間隙水圧変動の観測，地すべり28-3，pp.9-16，1991年。
- 4) 吉松弘行・檜垣大助・丸山清輝・綱木亮介：口坂本地すべり調査報告書，土研資料3121号，p.72，1992年。
- 5) 申 潤植：地すべり工学—理論と実践，山海堂，p.1002，1989年。
- 6) 建設省河川局傾斜地保全課，建設省土木研究所：第46回建設省技術研究会「地下水排除工の効果判定に関する研究」，p.57，1993年。
- 7) 吉松弘行・檜垣大助・西真佐人：口坂本地すべり調査，平成4年度砂防事業調査費報告，1993年。
- 8) 八木浩司：山地に見られる小崖地形の分布とその成因，地理学評論，54，pp.272-280，1981年。
- 9) 久田健一郎他：岩盤クリープと崩壊，二重山稜の成因に関する考察，「崩壊の素因と誘因」，文部省科研費「筑波大学大井川プロジェクト」報告，1982年。

口坂本地すべり調査報告書その3
ー調査結果の総括と地すべり
発生機構ー

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3246号
平成6年3月(1994)
砂防部地すべり研究室

要 旨

本調査では、静岡県静岡土木事務所からの受託調査として、昭和63年度から平成5年度まで口坂本地すべりにおいて、地すべり発生機構、対策工の立案、対策工の効果判定を行った。ここでは、これまでの調査結果及び対策工の施工資料を総括し、四万十帯の大規模地すべりの好例である当地すべりにおいて、今後の対策工計画の資料とするため、地下水流動とそれを支配する水文地質構造を調べ地すべり発生機構を明らかにした。

キーワード：地すべり、水文地質、地下水流動機構、地すべり機構



郵便はがき

五十円切手
をはって下
さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

砂防部地すべり研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第3246号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

土木研究所資料第3246号



口坂本地すべり調査報告書その3
—調査結果の総括と地すべり発生機構—