

# 土 木 研 究 所 資 料

地震応答解析による沿道斜面の耐震性の検討

——1978年伊豆大島近海地震による梨本地区の斜面崩壊の解析——

昭和55年7月

建設省土木研究所  
地震防災部振動研究室  
砂防部急傾斜地崩壊研究室

Copyright © 1980 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director 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、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

## ま え が き

昭和53年1月14日に発生した、伊豆大島近海地震では、伊豆半島東部～中部地区を中心として、各所で斜面の崩壊が生じ、長期間にわたって道路施設の機能が失なわれるとともに、一部地区では一般の家屋にも被害を与えている。変化に富む地形、地盤条件を有する我が国においては、山間部を通る道路延長が長く、このような箇所における地震発生時の被害を予測し、適切な対応策を講じるためには、沿道斜面の地震応答特性ならびにこれに基づいた安定性の検討が重要となる。本報告は、伊豆大島近海地震により表土層、崖錐層の崩壊を生じた修善寺～下田線梨本地区の斜面を取り上げ、数値解析による地震応答解析法により、斜面の基本的な振動特性を調査し、安定性の検討を行うとともに、すべり面法による安定性の解析結果との比較検討を行った結果をとりまとめたものである。

昭和 55 年 7 月

### 建設省土木研究所

地震防災部振動研究室長 岩 崎 敏 男

“ 主任研究員 川 島 一 彦

砂防部急傾斜地崩壊研究室長 安 江 朝 光

“ 研究員 仲 野 公 章

# 目 次

まえがき

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 1. 概 説 .....                    | 1  |
| 2. 解析対象とする斜面 .....              | 3  |
| 2.1 解析斜面の概要 .....               | 3  |
| 2.2 地盤条件 .....                  | 3  |
| 2.3 斜面のモデル化 .....               | 3  |
| 3. 地震応答解析の手法 .....              | 10 |
| 4. 入力地震動記録 .....                | 12 |
| 5. 地震応答解析結果 .....               | 15 |
| 5.1 応答加速度の分布 .....              | 15 |
| 5.2 せん断ひずみおよびせん断応力の分布 .....     | 15 |
| 6. 地震応答解析の結果に基づく斜面の安定性の検討 ..... | 26 |
| 6.1 地盤強度の推定 .....               | 26 |
| 6.2 すべり係数の分布 .....              | 32 |
| 7. すべり面法による安定性の検討 .....         | 39 |
| 7.1 概 説 .....                   | 39 |
| 7.2 すべり面法による安定解析法の概要 .....      | 39 |
| 7.3 検討内容 .....                  | 40 |
| 7.4 検討結果および考察 .....             | 43 |
| 8. 結 論 .....                    | 46 |
| 謝 辞 .....                       | 48 |
| 参考文献 .....                      | 49 |

# 1. 概 説

斜面の耐震性の検討は、地震時の斜面の危険度判定、崩壊形態の想定、対策工の安全度の算定などを意味するが、自然斜面に対しては、一般に次の2つの方法がある。

1) 従来の経験、実態との対比による検討

2) 計算による方法

前者は一般にまず斜面の地質、地形調査と履歴解析から始まる。すなわち、どのようにして現在の斜面ができたかについて、地質的、地形的解釈をたてることで、例えば、斜面の中腹に緩勾配の部分がある場合、それが上部からの崩積土から成るものか、または段丘堆積物から成るものかによって、地質的な見方が異なる。この場合は一般に素因が崩積土の方が地震時にすべりやすい。現地踏査時には過去の事例に照して判断するが、1978年1月伊豆大島近海地震など最近の例でも、雨に弱い斜面は地震にも弱かったり、基盤の上の表土層や強風化層などが基盤との境界で崩壊しやすいといった一般的傾向は見られるものの、地震の強さなどの誘因の特性と地形、地質などの素因の関係が降雨と同程度には分っておらず、経験的判断もかなり制約を受ける。伊豆大島近海地震では、298地点の斜面災害につき、現地踏査結果が集計され<sup>1)</sup>、これにもとづいて、点数制による危険度判定法が提案されている<sup>2)</sup>が、これも、2つの斜面でどちらが危険かという相対的な危険度ランクづけが、とにかくできるというのに過ぎず、ある地区で震度6～7の地震があれば、どれだけ斜面崩壊が発生するかについては対処しにくい。これを補うため、崩壊面積率を通して、発生した時の状況を把握しようとする試みがある。たとえば、1923年の関東大地震での丹沢～箱根地方の山地の崩壊率は約7%という報告があるが、もし、これと同程度の被害が対象とする地域で発生すると想定するならば、全体の約7%に当る斜面がすべると考えることになる。斜面の地盤条件は重要であるが、ボーリング、サウンディング、土質試験が実施された箇所はほとんどない。表1-1は、伊豆大島近海地震で被災したある斜面の代表的な地盤状態を表わすもので、この種のデータが集積されれば、経験的判断のもとになるばかりでなく、次の計算による耐震性の検討において対象斜面を的確にモデル化する作業に役立つ。今後地震で斜面崩壊が発生した際には、ボーリング、サウンディング、土質試験などのデータを集積して行かねばならない。

表 1-1 斜面の地盤調査結果の一例

|         | 地 山 区 分   | N 値   | P 波 速 度<br>m/s | S 波 速 度<br>m/s | q <sub>c</sub><br>kg/cm <sup>2</sup> | スウェーデン式<br>サウンディング |                 | E<br>kg/cm <sup>2</sup> |
|---------|-----------|-------|----------------|----------------|--------------------------------------|--------------------|-----------------|-------------------------|
|         |           |       |                |                |                                      | W <sub>sw</sub>    | N <sub>sw</sub> |                         |
| 崩壊したもの  | 表 土 層     | —     | 50～100         | —              | <10                                  | ≤100               | —               | —                       |
|         | 崖 錐 堆 積 層 |       | ≤300           | —              | 10～20                                | —                  | ≤25             |                         |
| 崩壊せずのもの | 強 風 化 帯 1 | ≤10   |                | —              | 20<                                  | —                  | ≤100            | 10～15                   |
|         | 強 風 化 帯 2 | 10～15 | 300～600        | 300            | —                                    | —                  | ≤200            | 40<                     |
|         | 風 化 帯     | 50<   | 600～1500       | 650            | —                                    | —                  | 500<            | —                       |
|         | はゞ新鮮な安山岩  | —     | 2800～3000      | —              | —                                    | —                  | —               | —                       |

次に、後者の計算による斜面の耐震性の検討は、盛土やフィルダムにおいて、最も一般的には円形すべり面についてスライス法により行われ、自然斜面についても円形すべり面や複合すべり面について、スライス法により検討されている例があるが、試験的な試みであって、一般的な方法は確立されていないのが現状である。一般に強さや変形性などの工学的性質が不均質異方性な地盤の的確なモデル化および斜面の地震応答特性の実測と解析に対して調査研究を進め、行政ニーズに対して遅れが目立つ技術レベルの向上を計らねばならない。

## 2. 解析対象とする斜面

### 2.1 解析斜面の概要

解析の対象とした斜面は、図2-1に示すように静岡県賀茂郡河津町梨木七滝地区に位置する主要地方道修善寺下田線沿いの斜面（昭和53年災害査定第89号）である。この箇所は、南方に尾根の裾部に沿って県道がほぼ直角にカーブする所であり、図2-2および写真2-1, 2-2に示すように、伊豆大島近海地震により斜面崩壊が2箇所発生した所である。崩壊斜面の1ヶ所は、東海バスを埋没させたもので、道路延長125mにわたる南西向き斜面（勾配約40°）が路面より30~50mの高さから崩壊したものであり、崩壊の深さは斜面に垂直な深さで、最大5m程度と考えられる。他の1ヶ所の崩壊は、道路延長110mにわたる南東向き斜面（勾配40°）が路面より50mの高さを頂点として崩壊したものであり、崩壊地に挟まれた尾根部が未崩壊地として残った。

本解析においては南西向き崩壊斜面（以下斜面-1と呼ぶ）と上記の未崩壊斜面（以下斜面-2と呼ぶ）の2ヶ所を対象として有限要素法による動的解析およびすべり面法による静的すべり解析を実施した。

### 2.2 地盤条件

本地区の地質は、地質分布、周辺の地質構造より推定すると下位から凝灰岩・凝灰角礫岩、変朽安山岩から構成されていると考えられる。凝灰岩は南東向き崩壊斜面東端に分布し、比較的良好な岩盤性状を示す。凝灰角礫岩は南東向き崩壊斜面に分布し、崩壊跡でみられる岩盤は良く固結したものであるが、崩壊頂部より上方斜面でのボーリング調査では深度4m付近までN値<10とルーズな性状を示している。変朽安山岩は、凸状未崩壊斜面（斜面-2）および南西向き崩壊斜面（斜面-1）に分布している。凸状未崩壊斜面での安山岩露頭は所々硬質な岩芯を残す赤紫色に風化変質した「礫混り砂質土」になっており、詳しくは、地質柱状図（図2-3）に示すように、地表付近ほど風化が著しく深度6m以浅はN値10~20を示している。地表から2~3mには崖錐性堆積層があり、その試料は土砂状を示すが、この中に礫状、棒状の堅硬な安山岩礫（最大径40cm）が点在し、その性質は一様でない。南向き斜面の崩壊跡露頭は硬質な岩盤であるが、割れ目が著しく発達しガサガサの状態である。崩壊頂部付近のボーリング調査でも深度11m付近までN値<40と凝灰角礫岩より著しい風化状況にある。

### 2.3 斜面のモデル化

図2-2の中の断面線A-A'（斜面-1）およびB-B'（斜面-2）に沿った断面図が、図2-4および図2-5である。ここで、もとなとなる図2-2の平面図は斜面崩壊後に作成されたものなので、崩壊前の地形は周囲の地形からおおよそ推定して求めたものである。

図2-4および図2-5に示した地層境界線は断面に沿った弾性波探査の結果より定めたもので地質境界とは厳密には一致しないが、図中の第①層が崖錐堆積層に対応し、②~④層（斜面-1）および②~③層（斜面-2）は風化安山岩帯、⑤層（斜面-1）および⑥層（斜面-2）はほぼ新鮮な安山岩帯に対応する

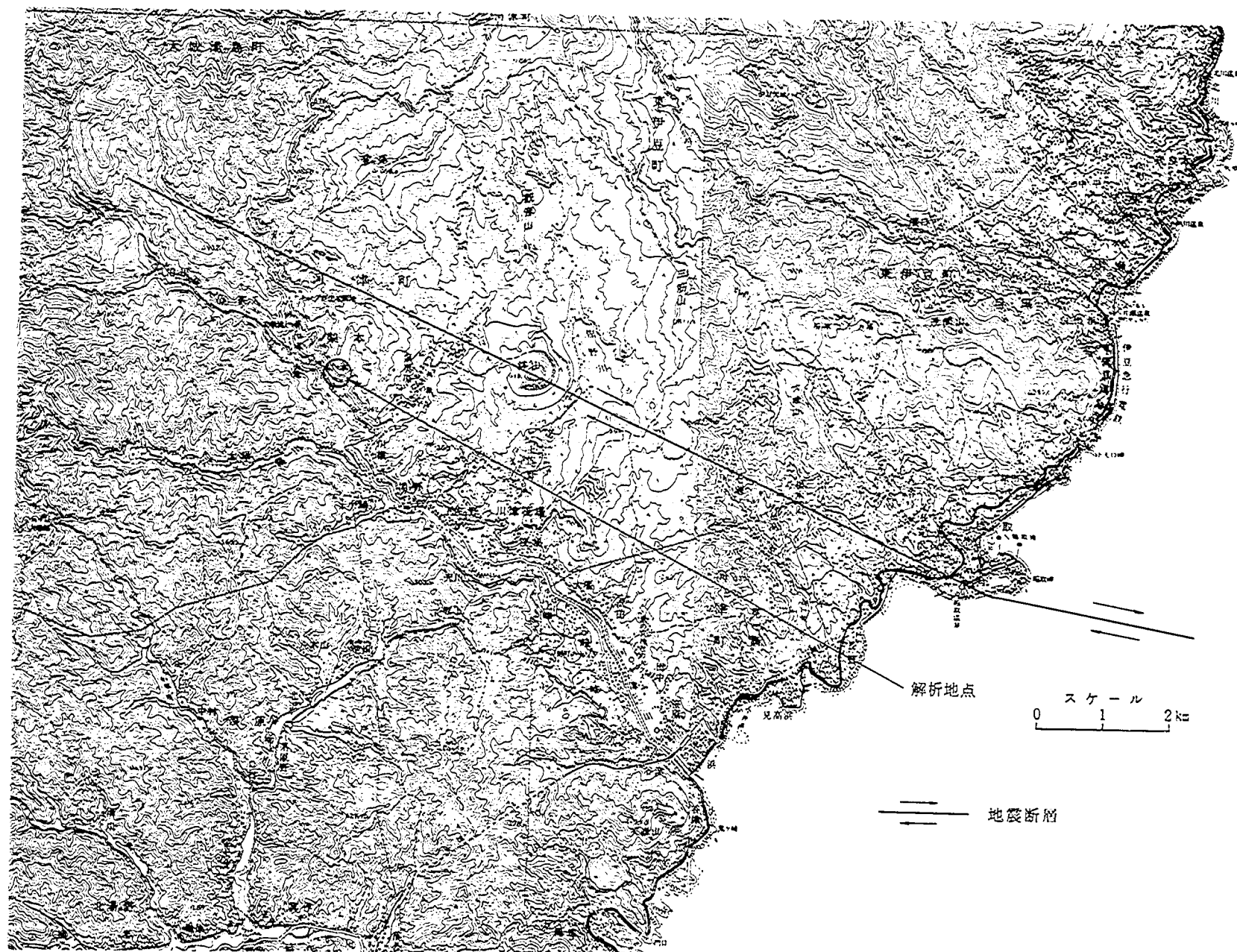


図 2 - 1 解析地点の概略位置 (国土地理院 5 万分の 1, 修善寺, 下田, 伊東, 稲取より作成)

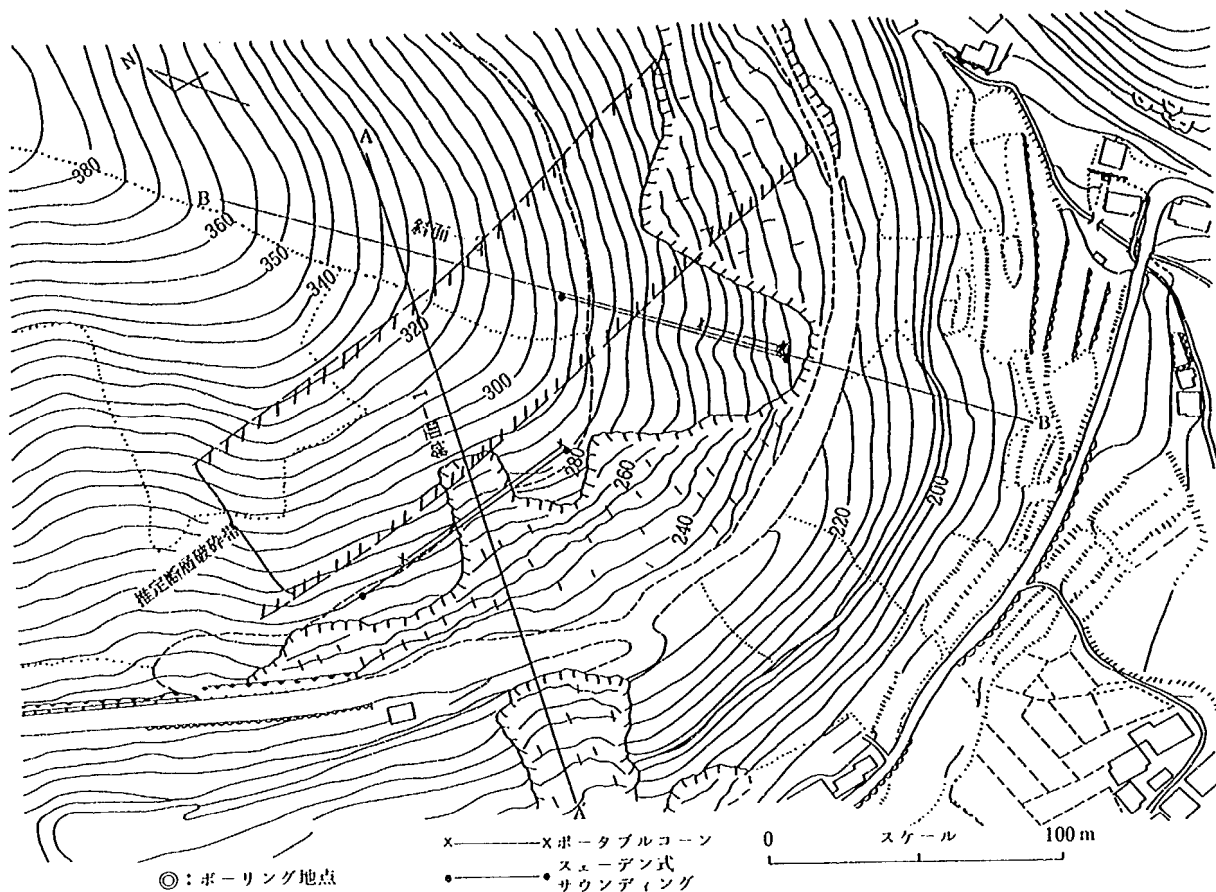


図 2 - 2 解析対象斜面一般図

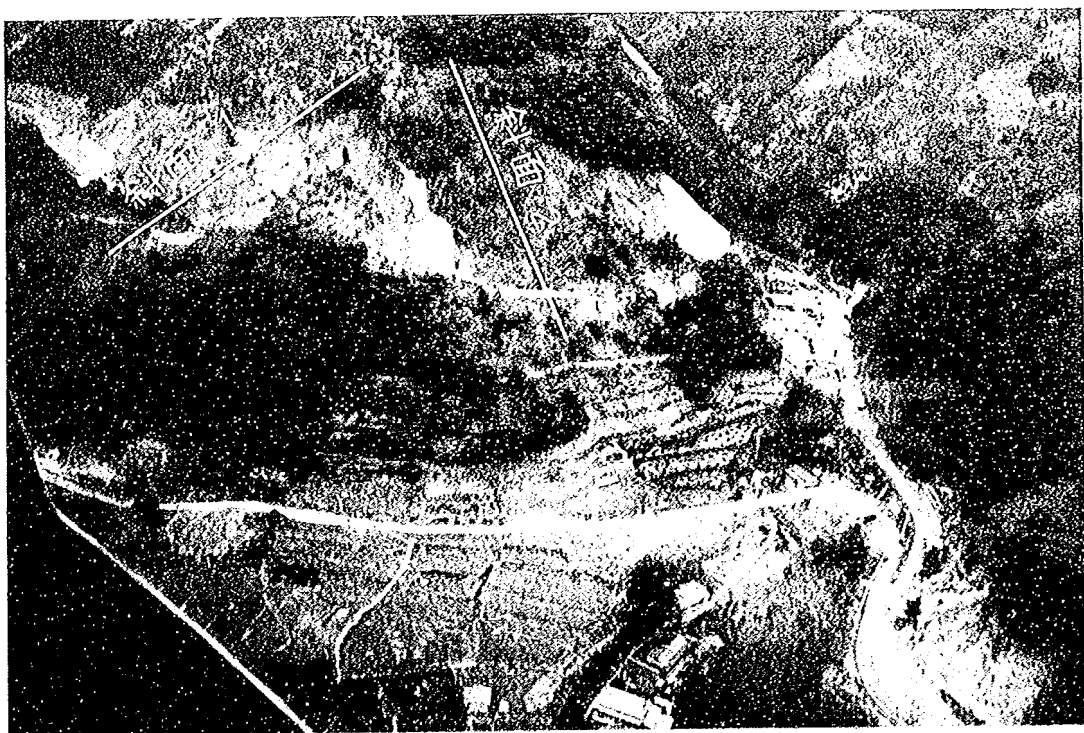


写真 2 - 1 解析対象斜面の状況（静岡県下田土木事務所による）

注）写真中左側の測線が斜面-1，右側の測線が斜面-2

（昭和53年1月15日撮影）

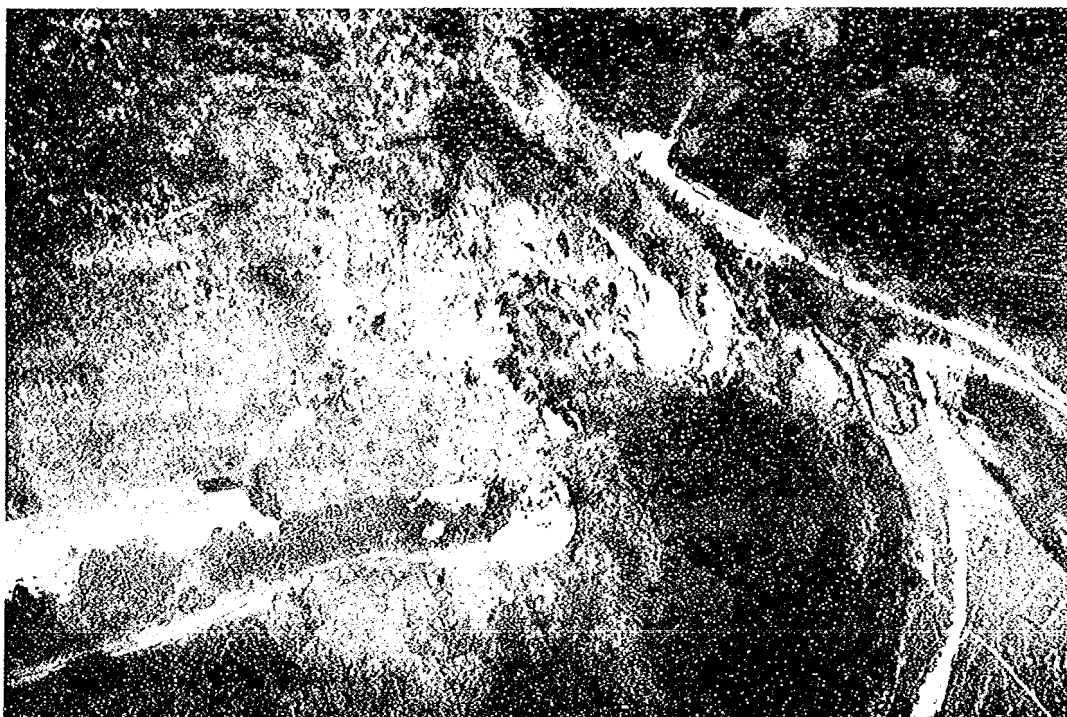


写真 2 - 2 斜面 - 1 の崩壊の状況（静岡県下田土木事務所による）  
（昭和53年 1 月 15 日撮影）

| 標高<br>m | 深<br>m | 厚<br>m | 柱<br>状<br>図 | 色<br>調 | 地<br>質<br>名 | 観<br>察                                                                                                                                                                                                                                                                                    | コ<br>ア<br>ー<br>形状 | 深<br>度<br>m | 標準貫入試験      |             |                  |     |                | 採取<br>方法 | 採取<br>深度<br>m |
|---------|--------|--------|-------------|--------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-----|----------------|----------|---------------|
|         |        |        |             |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                   |             | 深<br>度<br>m | N<br>値<br>回 | 10cm/sjの<br>打撃回数 | N 値 | 10 20 30 40 50 |          |               |
| 241.92  | 0.60   | 0.60   |             | 暗褐色    | 表土          | 草木根混入                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ▲                 | 1.15        |             |             |                  |     |                |          |               |
| 1       |        |        | ▲           | 茶褐色    | 崖崩壊土        | 0.60~1.60 m間は<br>がれ~5cmの塊を含<br>んで土砂状のコー<br>アである。1.60~<br>2.50 m間は堅硬な<br>安山岩層。塊状~<br>層状(最大40cm)を<br>呈す。                                                                                                                                                                                    | ▲                 | 1.60        | 6/30        | 1           | 2                | 3   |                |          |               |
| 2       | 243.02 | 2.50   | ▲           | 暗青灰色   |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 2.00        |             |             |                  |     |                |          |               |
| 3       |        |        | ▲           | 黄褐色    |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 2.50        |             |             |                  |     |                |          |               |
| 4       |        |        | ▼           |        | 安山岩<br>強風化帯 | 2.50~8.50 m間<br>貫入試験試料では<br>岩の組織が明確に<br>残るが風化が著し<br>く、砂状(細砂~<br>細粒性土)となっ<br>ている。しかしし<br>ながら、岩心(径5<br>cm以下)を残す。<br>コーアは小塊状の<br>土砂状を呈す。                                                                                                                                                     | ▲                 | 3.15        | 7/30        | 2           | 2                | 3   |                |          |               |
| 5       |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 3.45        | 8/30        | 3           | 2                | 4   |                |          |               |
| 6       |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 4.15        | 8/30        | 12          | 4                | 3   |                |          |               |
| 7       |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 5.15        | 20/30       | 7           | 7                | 10  |                |          |               |
| 8       |        |        | ▼           | 暗紫褐色   | 安山岩<br>風化帯  | 9.00 m以深は、塊<br>状箇所と、微細り<br>土砂状箇所が互に<br>混在する。<br>微細り土砂状箇所<br>は径5cm以下の塊<br>とがれ~2cmの粗<br>砂状(一部細砂状)<br>からなり、塊は、<br>もろく指圧で容易<br>に砕ける。<br>塊状として採取さ<br>れた区間は、最大<br>塊径10cmの短柱状<br>コーアであるが、<br>多くは、径2~5<br>cmの大きさで、コ<br>アテーサーの形状<br>を示さない。岩<br>質は堅硬であり、<br>崩壊は容易ではな<br>い。<br>然れども、粗粒は<br>褐色風化をおひる。 | ▲                 | 5.45        | 20/30       | 9           | 5                | 6   |                |          |               |
| 9       | 237.02 | 8.50   | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 6.45        | 13/30       | 9           | 8                | 6   |                |          |               |
| 10      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 7.15        | 18/30       | 7           | 5                | 6   |                |          |               |
| 11      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 7.45        | 18/30       | 7           | 5                | 6   |                |          |               |
| 12      |        |        | ▼           | 暗紫褐色   | 安山岩<br>風化帯  |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 8.15        | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 13      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 9.00        | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 14      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 9.55        | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 15      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 9.95        | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 16      |        |        | ▼           | 暗紫褐色   | 安山岩<br>風化帯  |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 10.90       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 17      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 10.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 18      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 10.22       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 19      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 10.90       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 20      |        |        | ▼           | 暗灰褐色   | 安山岩<br>風化帯  |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 11.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 21      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 11.34       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 22      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 12.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 23      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 12.22       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 24      |        |        | ▼           |        | 安山岩<br>風化帯  |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 13.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 25      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 13.50       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 26      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 14.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 27      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 14.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 28      |        |        | ▼           |        | 安山岩<br>風化帯  |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 15.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 29      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 15.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 30      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 15.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 31      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 15.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 32      |        |        | ▼           |        | 安山岩<br>風化帯  |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 16.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 33      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 16.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 34      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 16.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 35      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 16.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 36      |        |        | ▼           |        | 安山岩<br>風化帯  |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 17.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 37      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 17.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 38      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 17.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 39      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 17.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 40      |        |        | ▼           |        | 安山岩<br>風化帯  |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 17.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 41      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 17.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 42      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 17.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |
| 43      |        |        | ▼           |        |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▲                 | 17.15       | 50/26       | 20          | 17               | 6   |                |          |               |

図 2 - 3 ボーリング柱状図（ボーリング位置は図 2 - 2 参照）

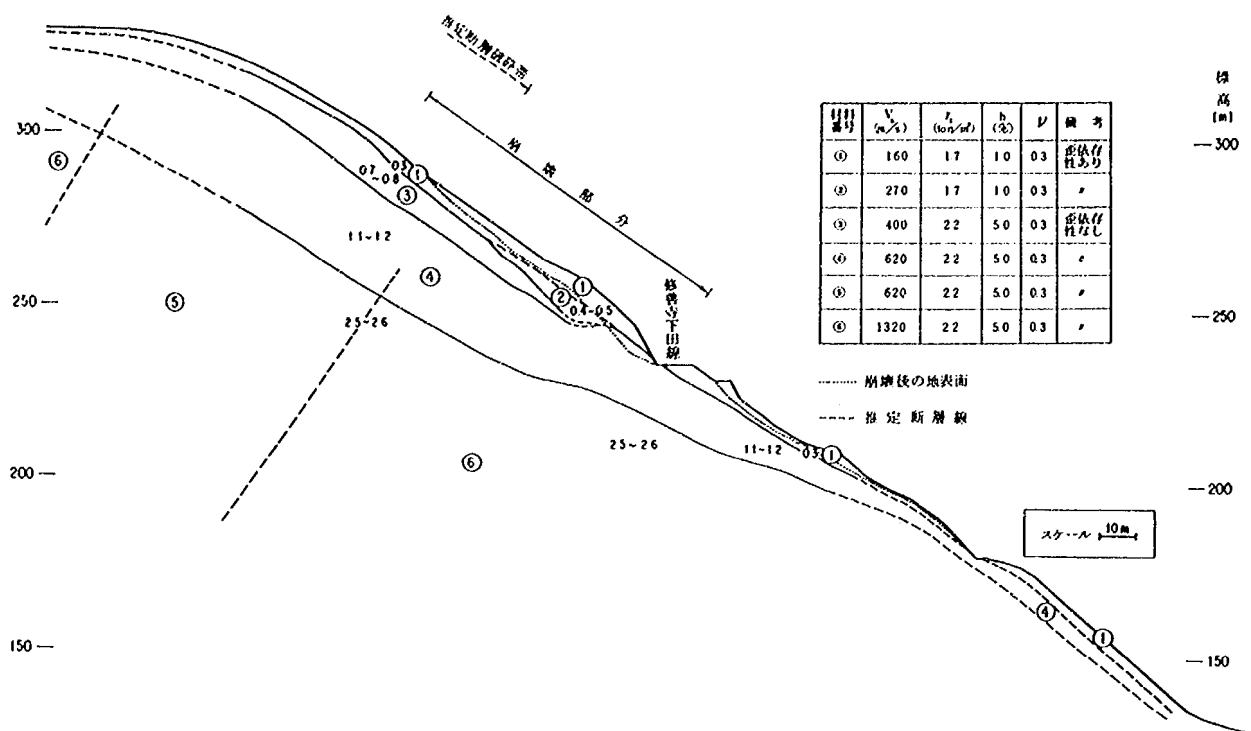


図2-4 解析対象断面（斜面-1，推定断面）

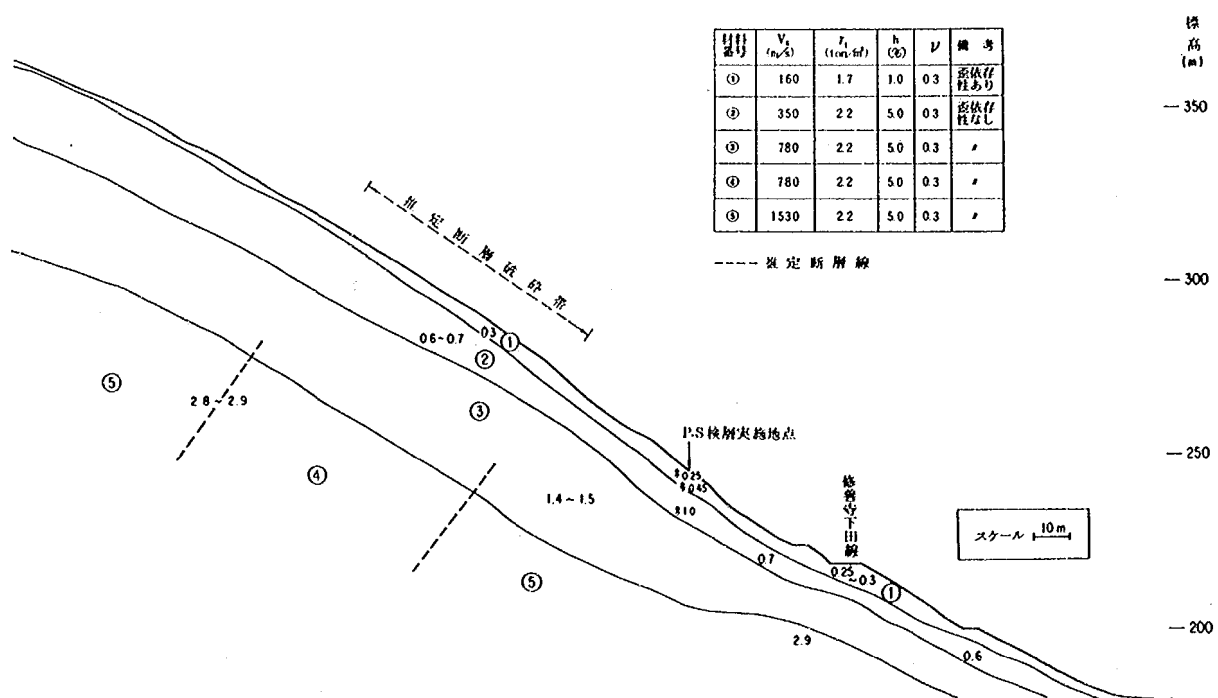


図2-5 解析対象断面（斜面-2，推定断面）

ものである。図中の数値は弾性波探査結果より得られたP波の伝播速度 (Km/sec) である。一方、未崩壊斜面において行なわれているPS検層の結果をもととし、ポアソン比( $\nu$ )を0.3程度と仮定してS波速度( $V_s$ )を求めた結果が図中右上の表に示した値である。同表中には単位体積重量( $\gamma$ , 推定値)も示されている。

また、過去の調査から解析地点付近に断層破砕帯があることが指摘されているが、ここではその性質に関する詳細な資料が得られないため、図2-2に示すように地表面に投影した幅をもって地表面にほぼ直角方向に貫入する破砕帯があるものと仮定した。破砕帯の地盤定数は図2-4の④層および図2-5の③層と同じとした。

地盤の剛性は図2-4および2-5に示したせん断波速度および単位体積重量から求めた。土の剛性および減衰特性は、ひずみ依存性を有しており、このような性質を表土層、崖錐層および強風化岩層(斜面-1, 2の①, ②層)に対して考慮した。解析に用いた $G/G_{\max} \sim h \sim r$ の関係は既往の沖積粘性土に対する実験結果を参考にして図2-6の通りとした。なお、①, ②層以外の地層に対しては $G$ および $h$ のひずみ依存性は考慮しないこととした。

最後に、斜面-1および斜面-2を有限要素法によってモデル化した結果を図2-7, 2-8に示す。ここで、両モデルとも、モデルの下端は標高125 mとし、この面を基盤面とみなして入力地震動を作用させることとした。また、両側面は、動的解析の場合には水平方向の移動を、また、静的な自重が作用した場合の解析には鉛直方向の移動を、それぞれ許容した。このような自由端面では地震時に波動の全反射が生じるがここでは、この面からある程度距離を取れば、減衰力の作用により端面の影響は小さくなるものと考えた。

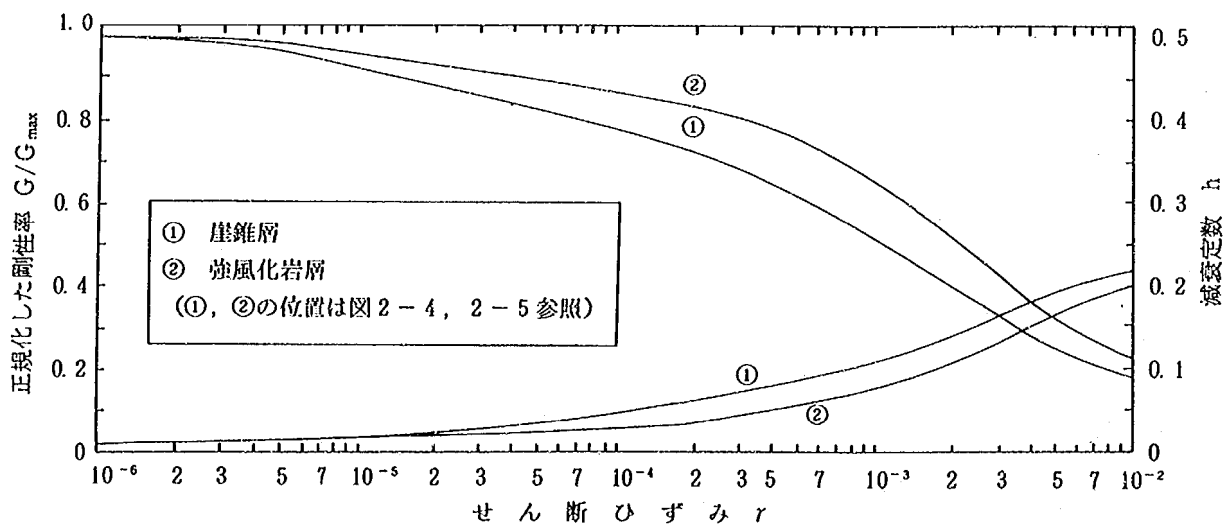


図2-6 解析に用いた $G/G_{\max} \sim h \sim r$ の関係

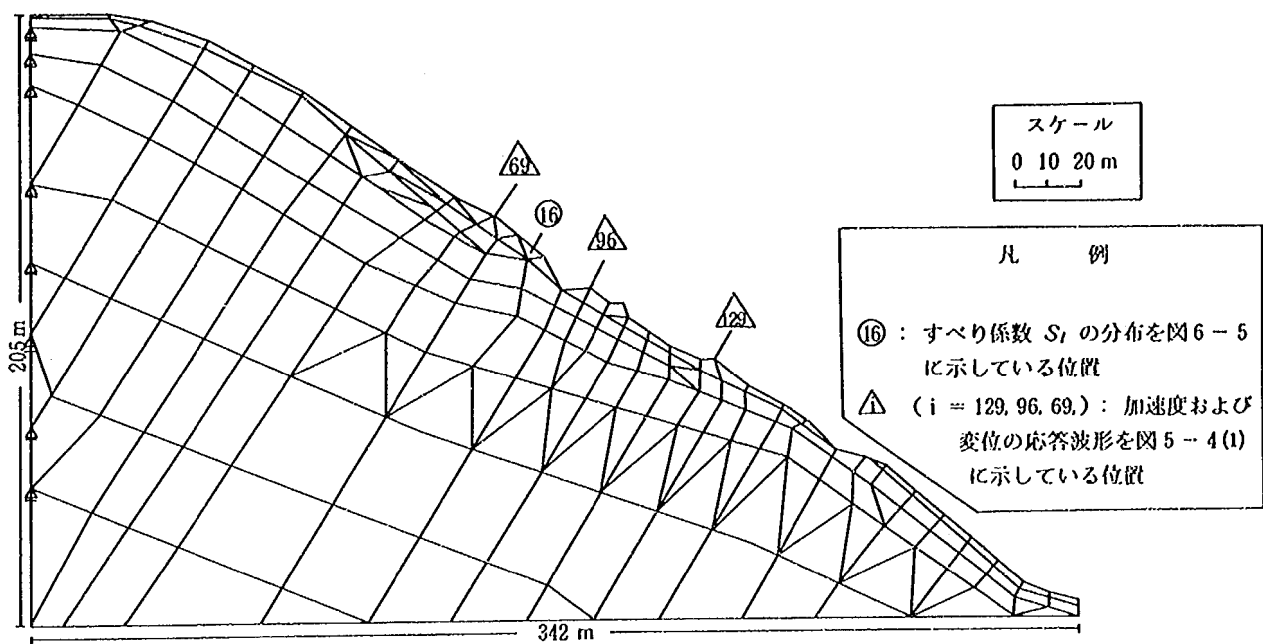


図 2-7 斜面-1 の有限要素モデル (節点数 195, 要素数 198)

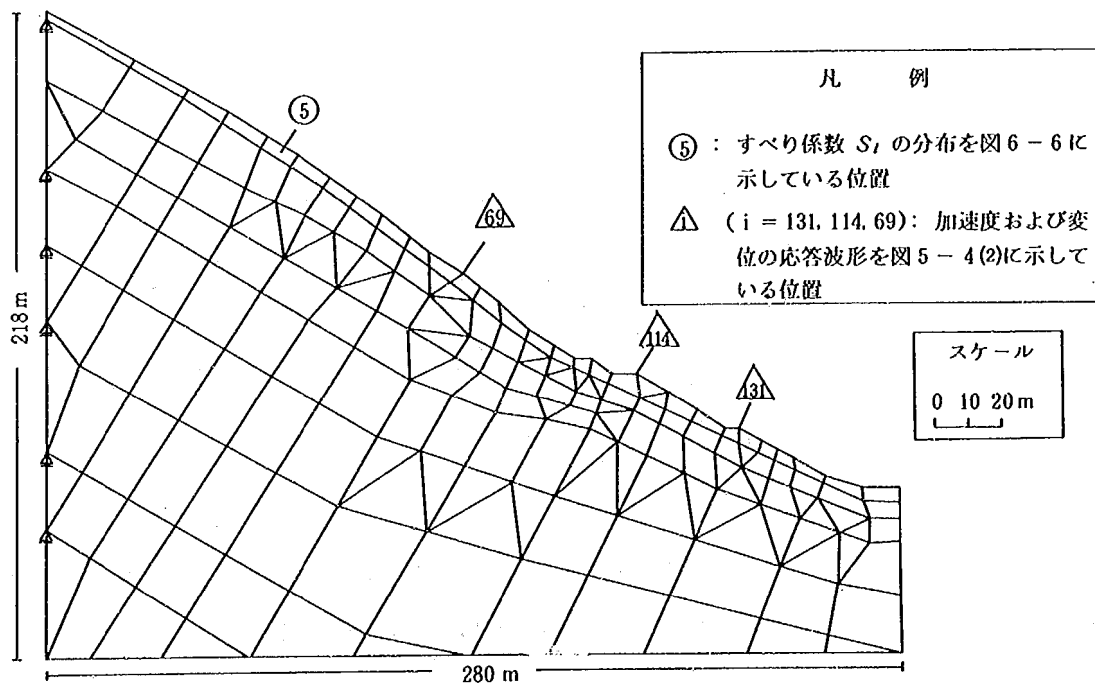


図 2-8 斜面-2 の有限要素モデル (節点数 174, 要素数 178)

### 3. 地震応答解析の手法

地震応答解析には、カリフォルニア大学で開発された LUSH を用いた。このプログラムでは、以下の手法により地盤の地震応答を計算している。

地盤を離散型の有限要素の集合により表示した場合の系の運動方程式は次式で与えられる。

$$\underline{M}\ddot{\underline{u}} + \underline{K}\underline{u} = -\underline{m}\ddot{\underline{y}} \quad (3-1)$$

ここで、

$\underline{u}$ ,  $\ddot{\underline{u}}$  : 基盤に対する相対変位および相対加速度

$\underline{M}$ ,  $\underline{K}$  : 質量および剛性行列

$\ddot{\underline{y}}$  : 基盤での入力加速度

$\underline{m}$  :  $\ddot{\underline{y}} = 1$  に対する荷重項で、次式で与えられる。

$$\underline{m} = \underline{M} \left( C_h \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} + C_v \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \right) \quad (3-2)$$

$C_h$ ,  $C_v$  : 水平および鉛直方向入力に対応する係数

ここで、入力地震動を次式で表わすと、

$$\ddot{\underline{y}} = \ddot{Y}e^{i\omega t} \quad (3-3)$$

応答  $\underline{u}$  は次式で与えられる。

$$\underline{u} = \underline{U}e^{i\omega t} \quad (3-4)$$

ここで、 $\ddot{Y}$ ,  $\underline{U}$  は、それぞれ、入力地震動の複素振幅および複素変位振幅ベクトルである。(3-3), (3-4) 式を (3-1) 式に代入すると、 $\underline{U}$  に関するつり合い方程式が得られる。

$$(\underline{K} - \omega^2 \underline{M}) \underline{U} = -\ddot{Y} \underline{m} \quad (3-5)$$

(3-5) 式は、 $\omega$  が固有振動数と一致しない限り、 $\underline{U}$  を未知数として解くことができる。実数の入力地震動

$$\ddot{y} = R_e(\ddot{Y}e^{i\omega t}) = R_e(\ddot{Y}) \cos \omega t - I_m(\ddot{Y}) \sin \omega t \quad (3-6)$$

に対する応答もやはり実数であるから、次式で与えられる。

$$\underline{u} = R_e(\underline{U}e^{i\omega t}) = R_e(\underline{U}) \cos \omega t - I_m(\underline{U}) \sin \omega t \quad (3-7)$$

このような複素形式の解法の特徴は、複素剛性により減衰定数を導入できることにある。すなわち、1自由度系の減衰振動から、複素せん断剛性  $G^*$  を

$$G^* = G(1 - 2\beta^2 + 2i\beta\sqrt{1-\beta^2}) \quad (3-8)$$

とすれば、減衰定数  $\beta$  に対するモーダルアナリシスによる解と  $G^*$  を用いた解は、振幅に関しては全く同じとなる。位相に関してはわずかに異なるが、その違いは一般に問題になる程の量ではない。減衰定数が要素ごとに変化している場合にも (3-8) 式を用いれば解析することができる。このように、要素ごとに減衰定数に変化している場合には、(3-5) 式の ( ) 内はどのような  $\omega$  に対しても一般にゼロとはならず、従って、全ての  $\omega$  に対して (3-5) 式を  $\underline{U}$  に対して解くことができる。

次に、実際の地震動を近似するために、等時間間隔  $\Delta t$  に数値化された  $N$  個の時系列入力地震動加速度を次式で表わす。

$$\ddot{y} = R_e\left(\sum_{s=0}^{N/2} \ddot{Y}_s e^{i\omega_s t}\right) \quad (3-9)$$

ここで、

$$\omega_s = \frac{2\pi s}{N\Delta t} \quad ; \quad s = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (3-10)$$

$$\ddot{Y}_s = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \ddot{y}_k e^{-i\omega_s k\Delta t}, & \text{for } s = 0, s = \frac{N}{2} \\ \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \ddot{y}_k e^{-i\omega_s k\Delta t}, & \text{for } 1 \leq s < \frac{N}{2} \end{cases} \quad (3-11)$$

$$\ddot{y}_k = \ddot{y}(k\Delta t), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-12)$$

従って、 $\ddot{Y}_s \exp(i\omega_s t)$  に対する (3-5) 式の解を  $\underline{U}_s$  とすれば、(3-9) 式の入力地震動を受けた場合の解  $\underline{u}$  は次式で与えられる。

$$\underline{u} = R_e\left(\sum_{s=0}^{N/2} \underline{U}_s e^{i\omega_s t}\right) \quad (3-13)$$

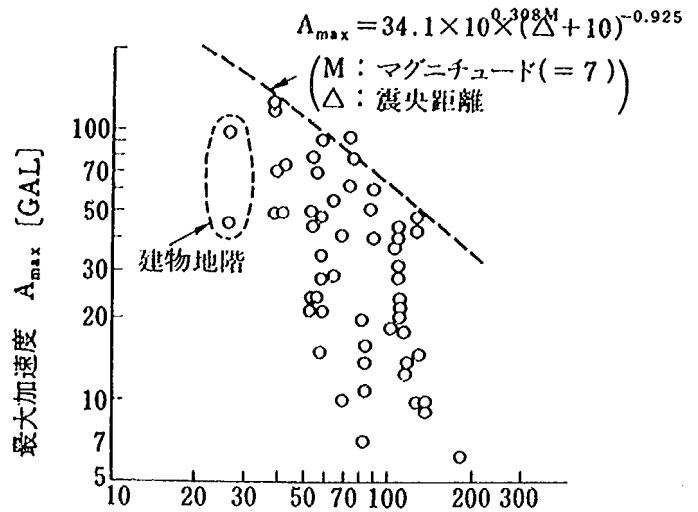
これより、節点における変位が求められると、要素ごとの変形および応力も求めることができる。

#### 4. 入力地震動記録

伊豆半島における工学式強震計の配置は1978年の伊豆大島近海地震発生当時には比較的稀薄であり、半島中部から南部にかけては強震計が設置されていなかった。従って、直接震源域近くの地震動を測定することはできなかったが、周辺の静岡県、神奈川県等に設置されていた強震計記録から図4-1に示すような最大加速度の距離減衰特性が得られている。また、このような強震計による震源域の地震動測定の穴を埋めるために、墓石の転倒により間接的な地震動強度の推定が行われた。この結果は図4-2に示す通りであり、ここで解析対象としている梨本地区では、最大加速度は瞬間的に400 gal

を超えたと考えられる領域に含まれている。この推定値は、斜面等地形条件による加速度の増幅を考慮したものではなく、いわば、平均的な地盤表面における最大加速度の値であるが、いま、解析地点における加速度増幅率を4程度と見込めば、基盤での最大加速度は約100 gal となる。ここでは、県道上での加速度がおおむね400 gal 程度あったと考え、結果として、この程度の最大加速度を与えるよう試算に基づき、基盤最大加速度を102 gal とした。

入力地震動の波形としては、伊豆大島近海地震に際して解析対象斜面と最も近い国鉄の新菊川変電所構内で得られた記録を標準とし、これに同地震による東京湾観音崎の記録、および1978年宮城県沖地震による開北橋近傍地盤上の記録の3種類を用いた(表4-1参照)。これらの加速度波形、および加速度応答スペクトル倍率 $\beta$ は図4-3、4-4に示す通りである。



余震域の中心(稲取地区)からの距離 $\Delta$  [km]  
図4-1 1978年伊豆大島近海地震による最大  
加速度(水平成分)の距離減衰特性

表4-1 解析に用いた入力地震動記録

| No | 地震名      | 発生年月日       | マグニチュード | 記録地点   | 記録成分   | 記録時の最大加速度 (gal) |
|----|----------|-------------|---------|--------|--------|-----------------|
| 1  | 伊豆大島近海地震 | 1978. 1. 14 | 7.0     | 新菊川変電所 | E-W    | 70              |
| 2  | 同上       | 同上          | 7.0     | 観音崎    | E-W    | 67              |
| 3  | 宮城県沖地震   | 1978. 6. 12 | 7.4     | 開北橋    | 橋軸直角方向 | 291             |



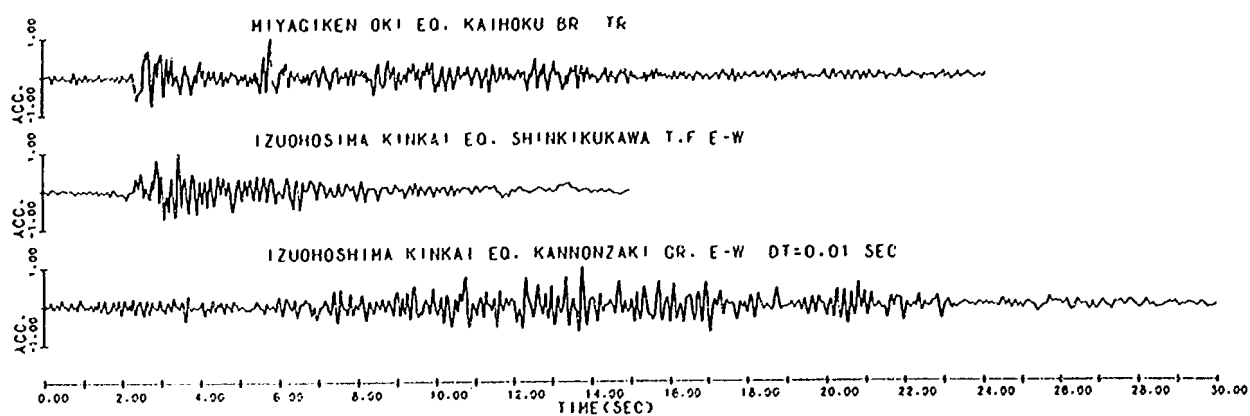


図 4 - 3 入力地震動記録の加速度波形

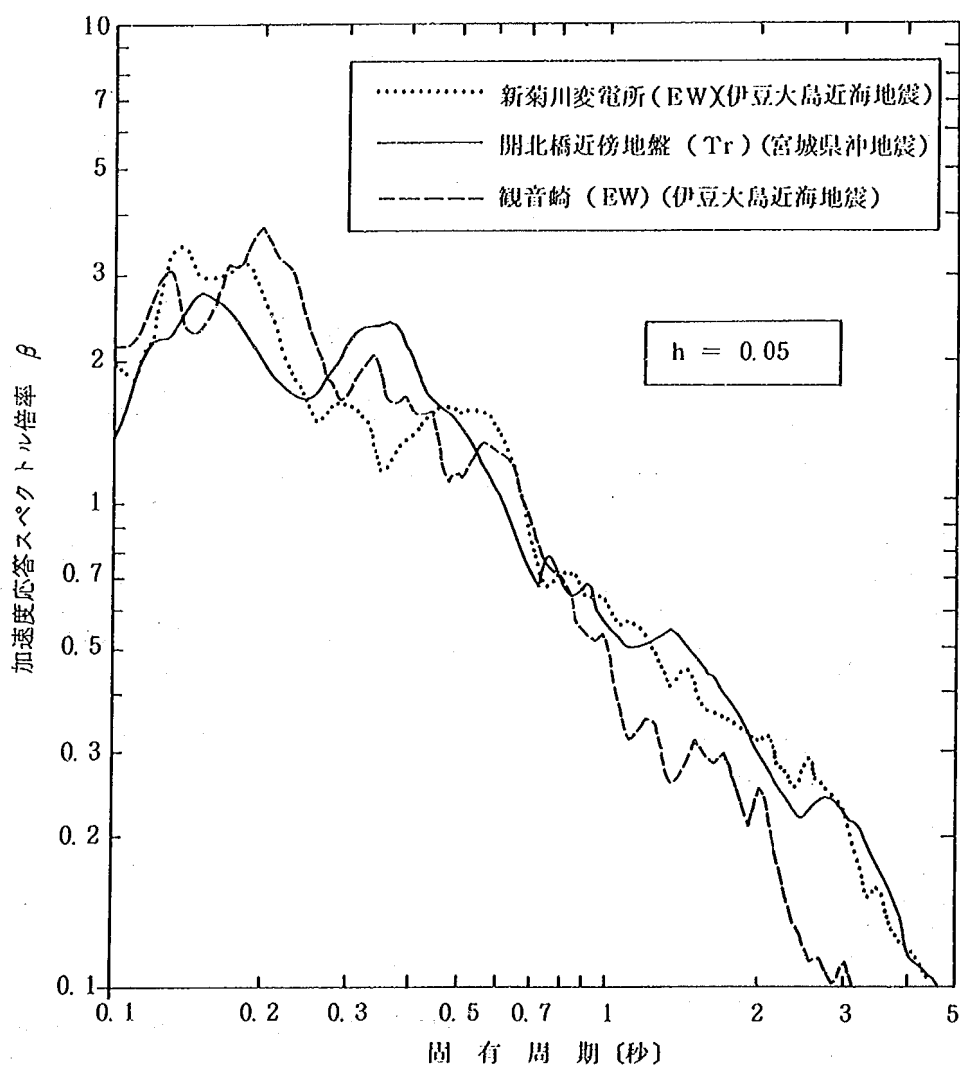


図 4 - 4 入力地震動記録の加速度応答スペクトル倍率  $\beta$  曲線

## 5. 地震応答解析結果

### 5.1 応答加速度の分布

図5-1, 図5-2, 図5-3は, それぞれ新菊川記録, 観音崎記録, 開北橋記録を作用させた場合の水平方向および上下方向の最大加速度の分布を示したものである。また, 図5-4は応答波形の1例として, 新菊川記録を作用させた場合の加速度および変位の応答波形(それぞれ, 水平成分および鉛直成分)を示したものである。水平方向の最大加速度の分布に関しては, 以下の特徴が指摘される。

- (i) 地山内の増幅は小さく, 地表付近の強風化層および崖錐堆積層内において増幅率が大きい。
- (ii) 形状としては, 大きくみてもゆるやかにふくらんだ斜面が, 起伏のない平坦な斜面より加速度が大きい。
- (iii) さらに, (ii)の中でも, 小さく出っばった凸部において著しく加速度が増幅される傾向にある。
- (iv) 道路面より上方に位置する斜面の表面における最大加速度を斜面-1, および斜面-2の間で比較すると表5-1のようになる。新菊川記録および開北橋記録を作用させた場合には, 崩壊を生じた斜面-1の方が, 崩壊を生じなかった斜面-2よりも大きい。反対に, 観音崎記録を作用させた場合には, 斜面-2の方が斜面-1よりも大きく, 加速度増幅率は地形・地盤条件に応じ, 入力地震動の種類ごとに変化する。

表5-1 道路より上側の斜面における最大加速度

| 入力地震動記録        | 斜面 - 1     |            | 斜面 - 2     |            |
|----------------|------------|------------|------------|------------|
|                | 水平加速度〔gal〕 | 上下加速度〔gal〕 | 水平加速度〔gal〕 | 上下加速度〔gal〕 |
| 新菊川 (伊豆大島近海地震) | 865        | 646        | 584        | 562        |
| 観音崎 (伊豆大島近海地震) | 690        | 558        | 828        | 726        |
| 開北橋 (宮城県沖地震)   | 594        | 536        | 506        | 485        |

また, 鉛直方向の最大加速度に関しては, 以下の事項が指摘される。

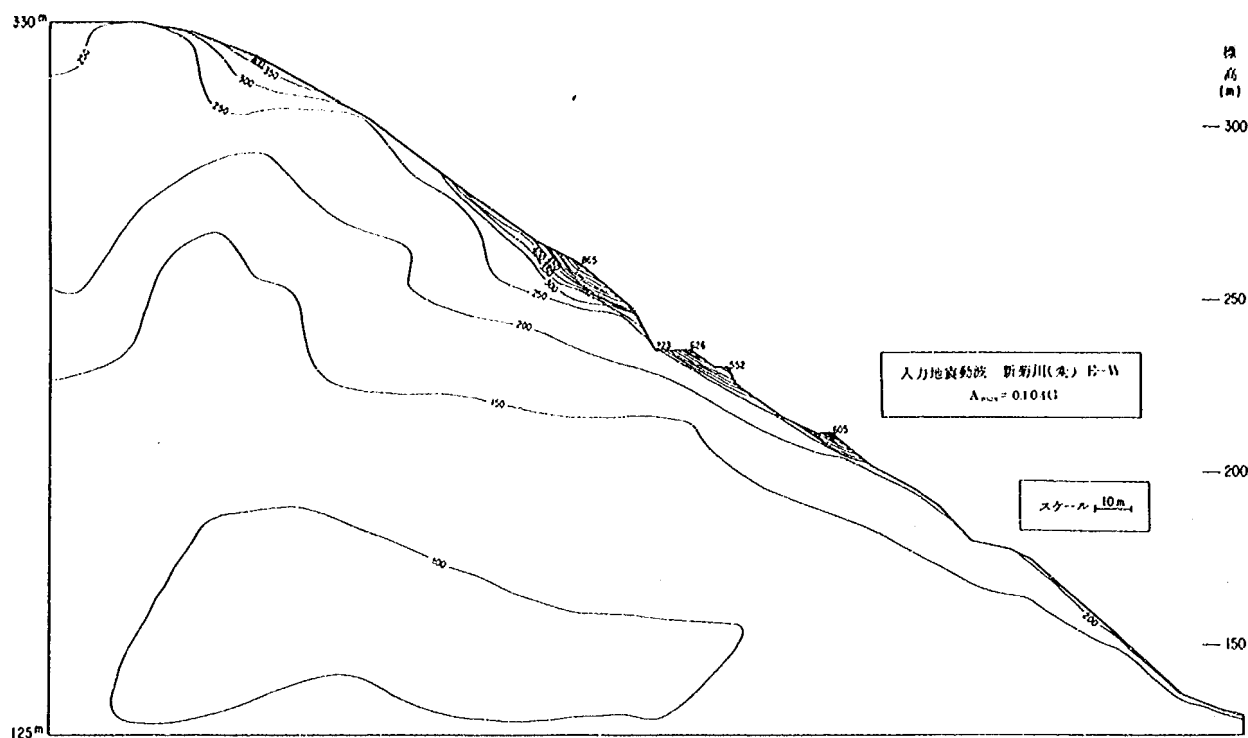
- (i) 今回の解析では, 鉛直方向には入力地震動を作用させていないにもかかわらず, 地形の影響で鉛直方向の加速度が生じる。道路より上方の斜面の表面における鉛直方向の最大加速度は表4-1に示す通りであり, その値は同一箇所における水平方向最大加速度の75~96%に達している。水平方向最大加速度に対する鉛直方向最大加速度の比は, 基本的には斜面の傾斜率によって変化すると考えられる。斜面の解析には, 今後, 鉛直方向の入力地震動も考慮することが必要とされよう。
- (ii) 最大加速度の増幅度に関する特徴は, 上記の水平方向最大加速度の場合と基本的に同じである。

### 5.2 せん断ひずみおよびせん断応力の分布

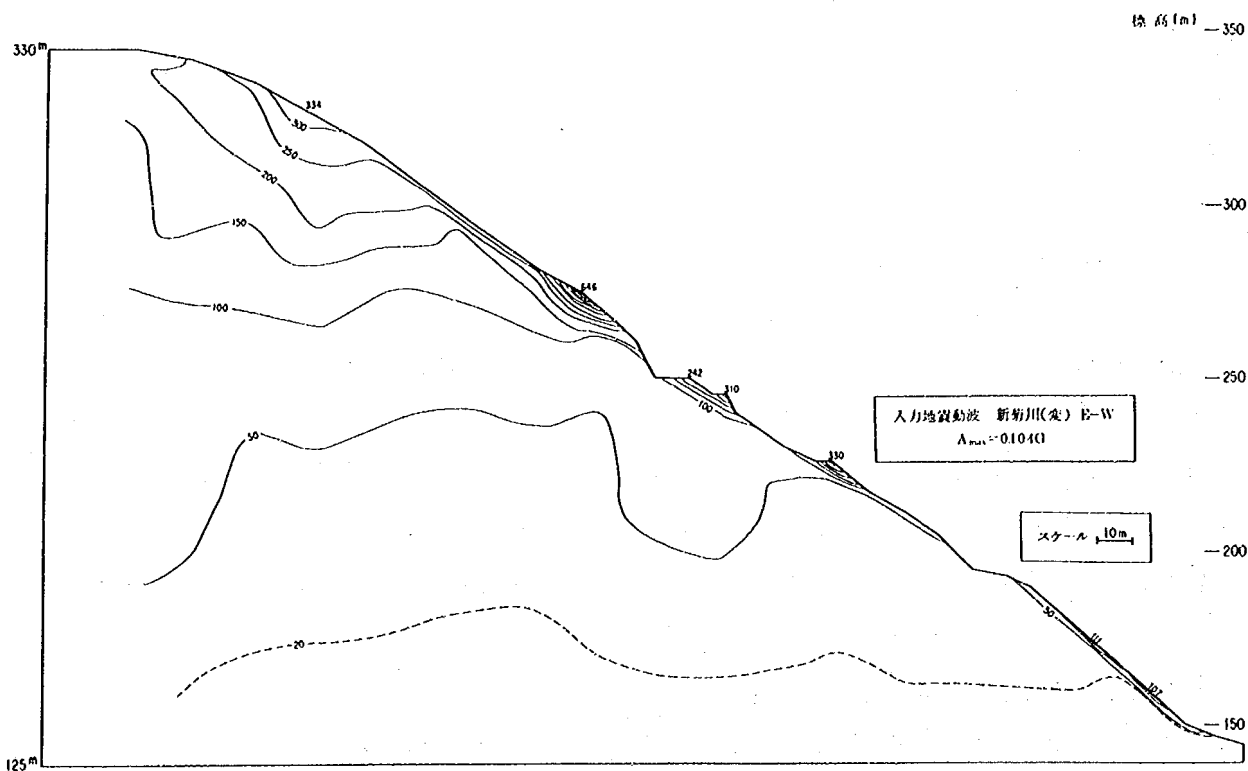
図5-5および図5-6は, それぞれ動的応答によって生じた最大せん断ひずみ, および最大せん断応力の分布を示したものである。これらは, いずれも常時のつり合い状態からの動的な変動分を表わしている。表土層および崖錐堆積層の最大せん断ひずみの大きさは, これより下方の地盤の最大せん断ひずみに比較し,

一般に1オーダー以上大きい。したがって、崖錐堆積層部の崩壊に着目し、ここでは崖錐堆積層だけの最大せん断ひずみ、および最大せん断応力の分布を示している。

図4-5の結果によれば、いずれの入力地震動の場合でも、斜面-1の最大せん断ひずみは、崩壊範囲の

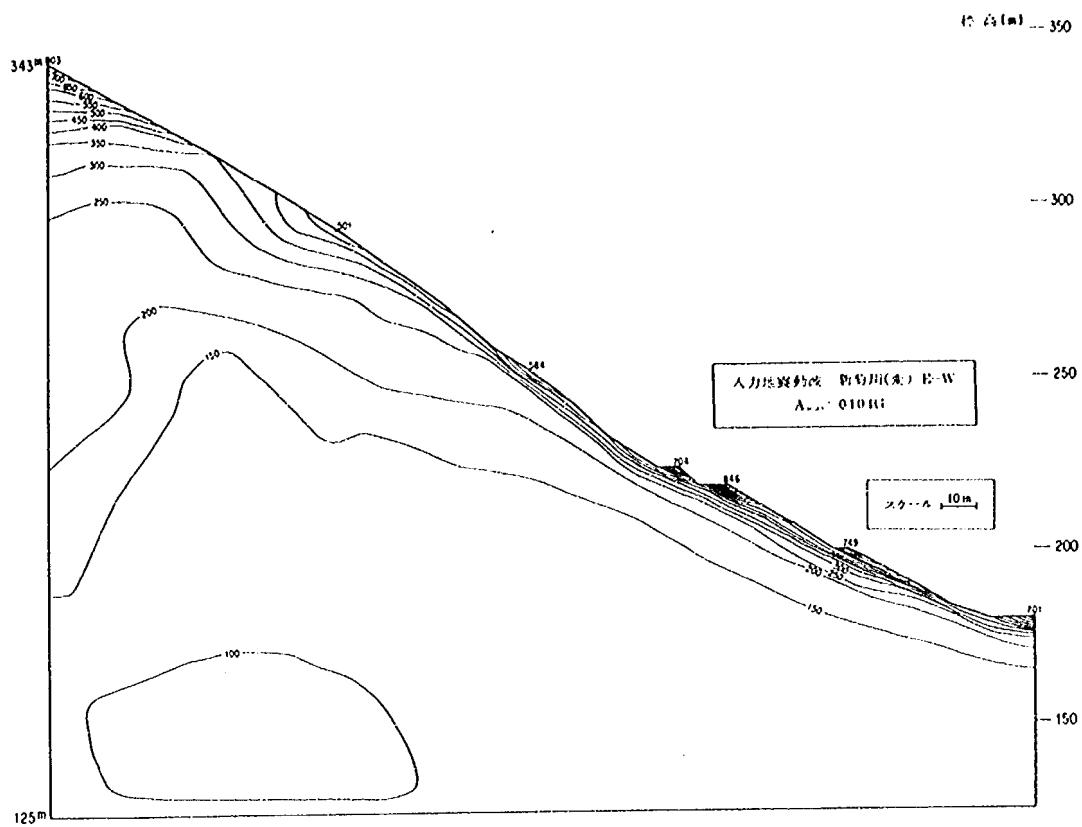


(a) 水平方向最大加速度〔gal〕

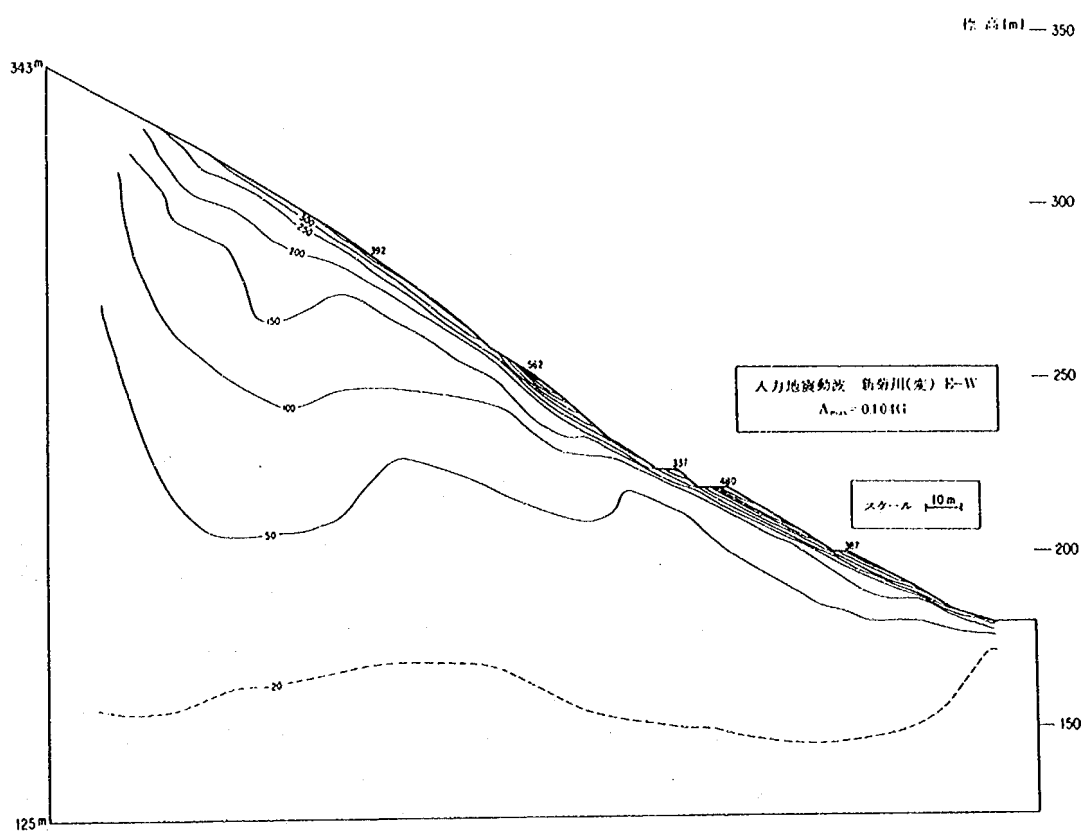


(b) 鉛直方向最大加速度〔gal〕

図5-1(1) 最大加速度の分布(斜面-1, 新菊川記録を作用させた場合)

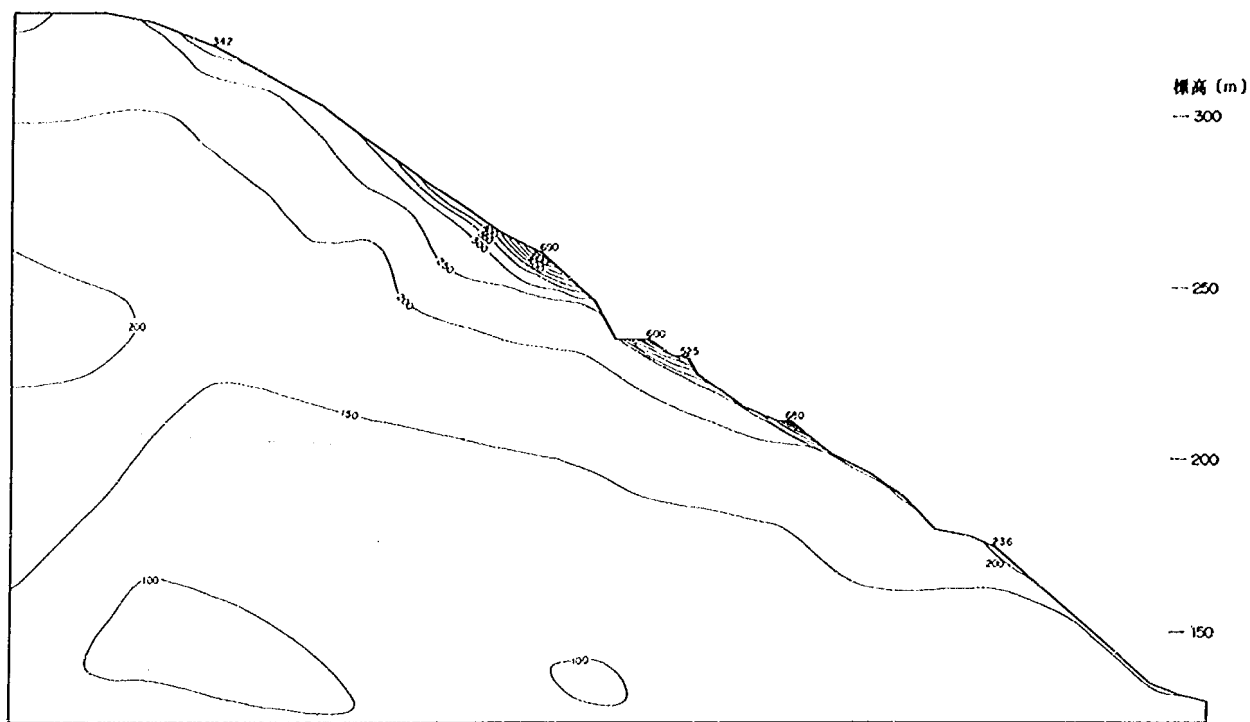


(a) 水平方向最大加速度

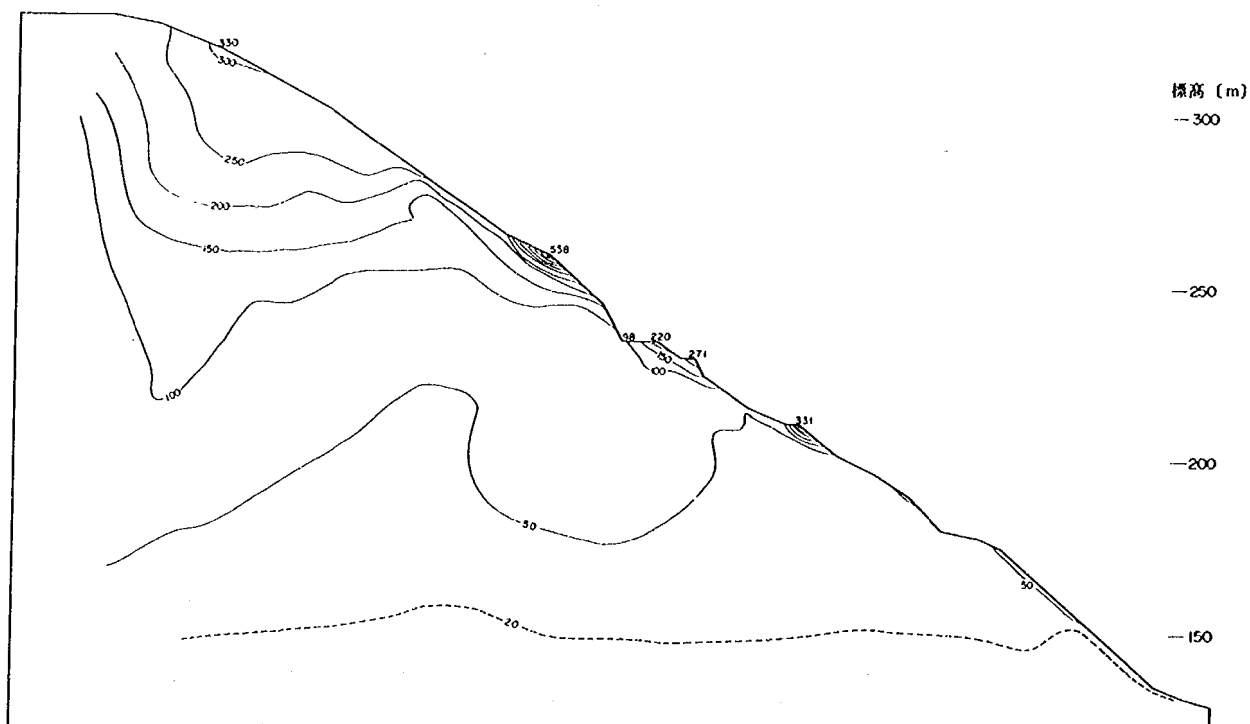


(b) 鉛直方向最大加速度

図 5 - 1 (2) 最大加速度の分布 (斜面 - 2, 新菊川記録を作用させた場合)

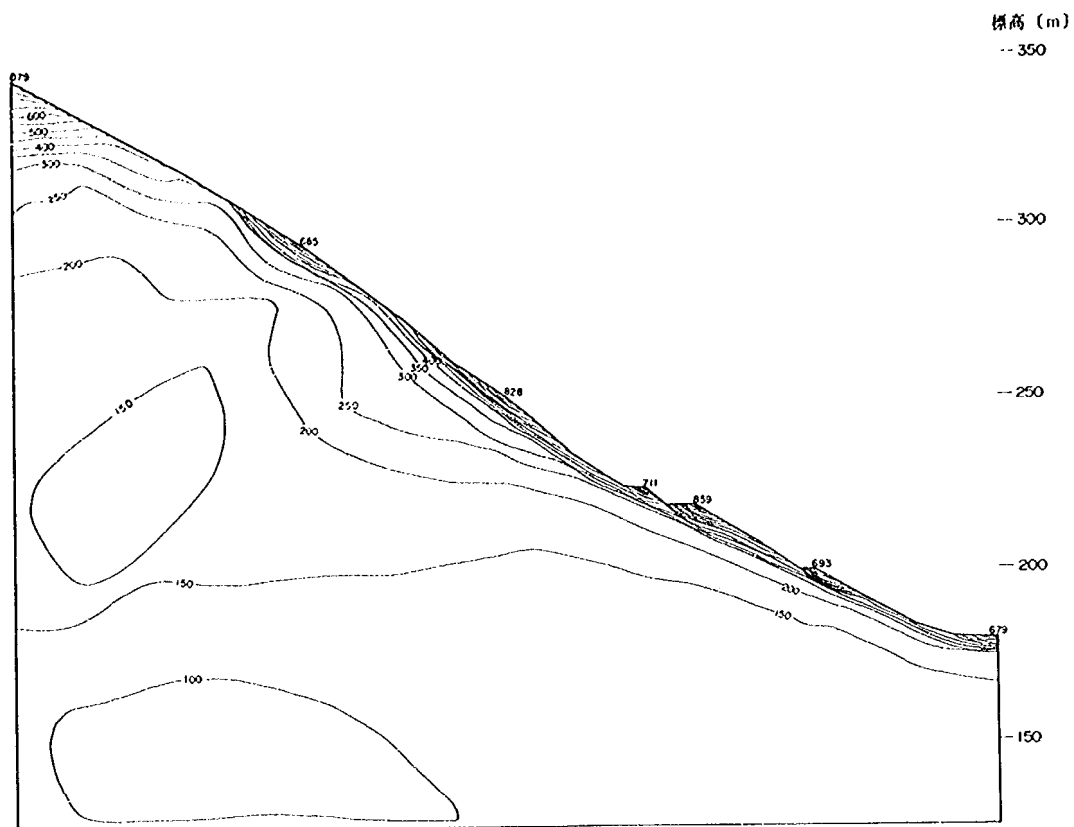


(a) 水平方向最大加速度 (gal)

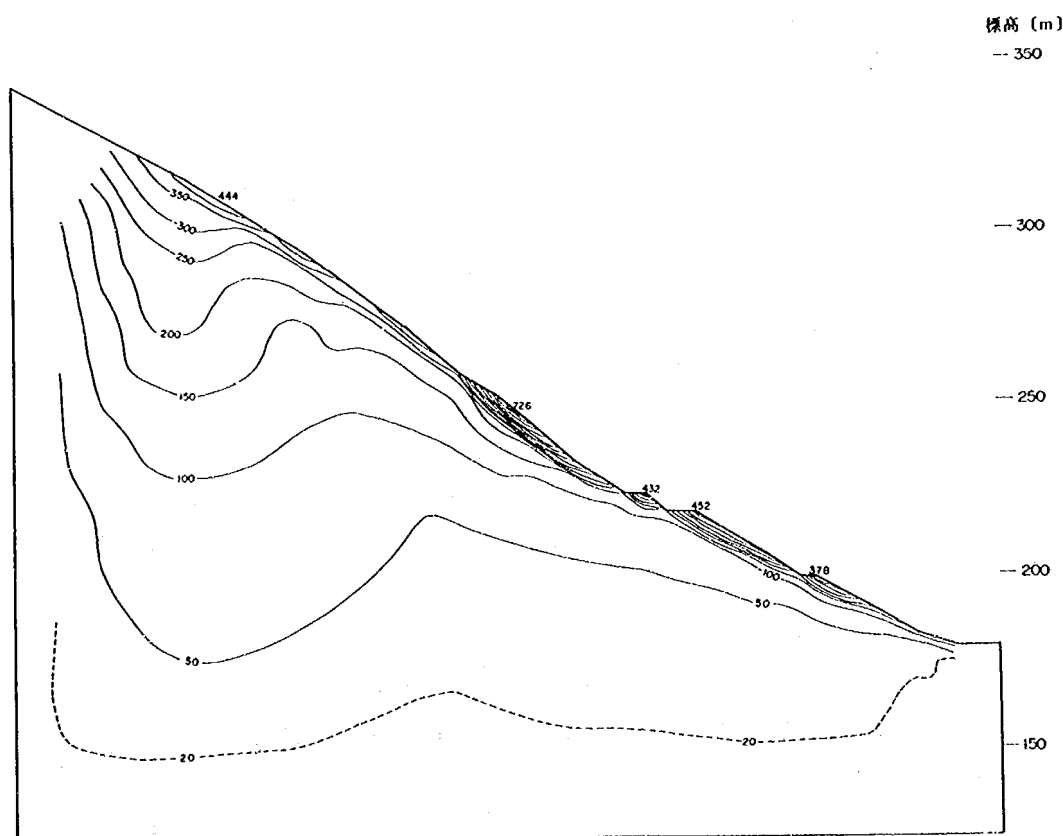


(b) 鉛直方向最大加速度 (gal)

図 5 - 2 (1) 最大加速度の分布 (斜面 - 1, 観音崎記録を作用させた場合)



(a) 水平方向最大加速度〔gal〕



(b) 鉛直方向最大加速度〔gal〕

図5-2(2) 最大加速度の分布(斜面-2, 観音崎記録を作用させた場合)

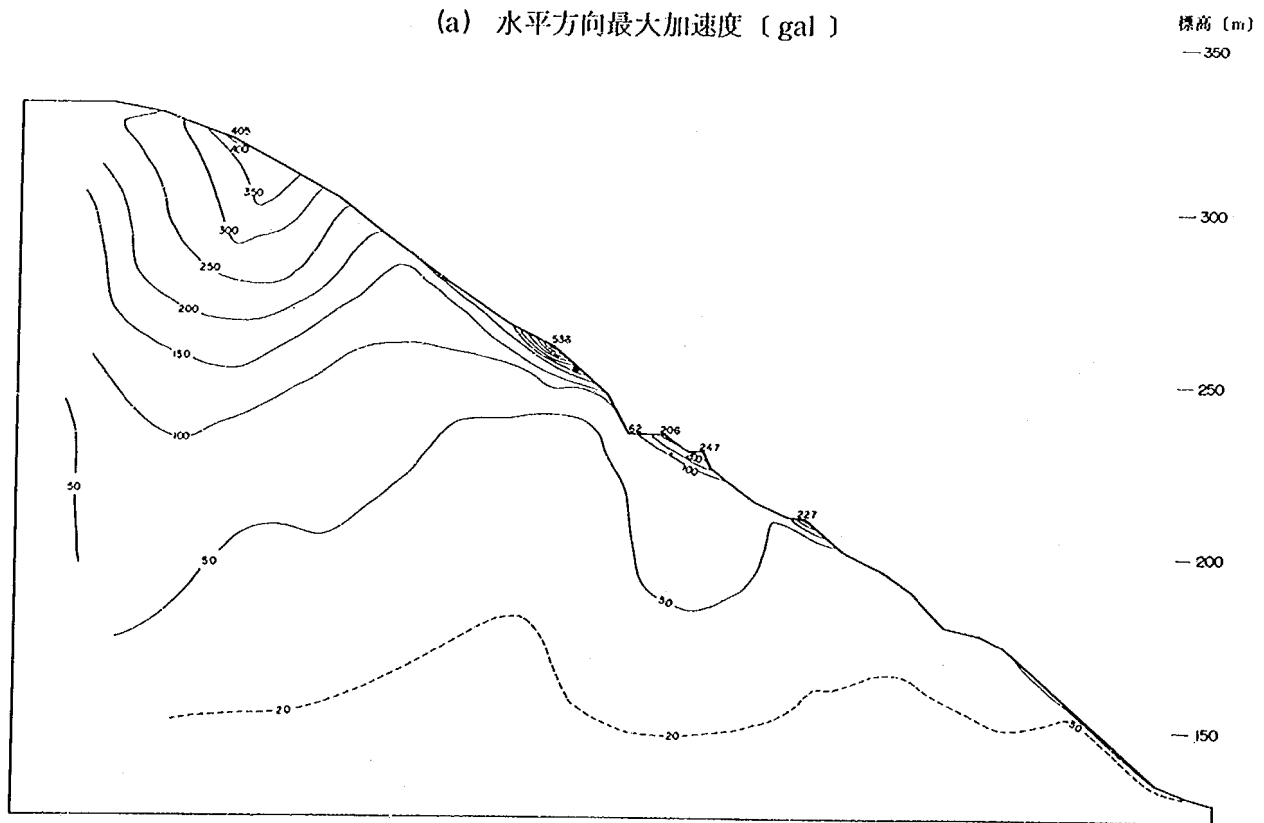
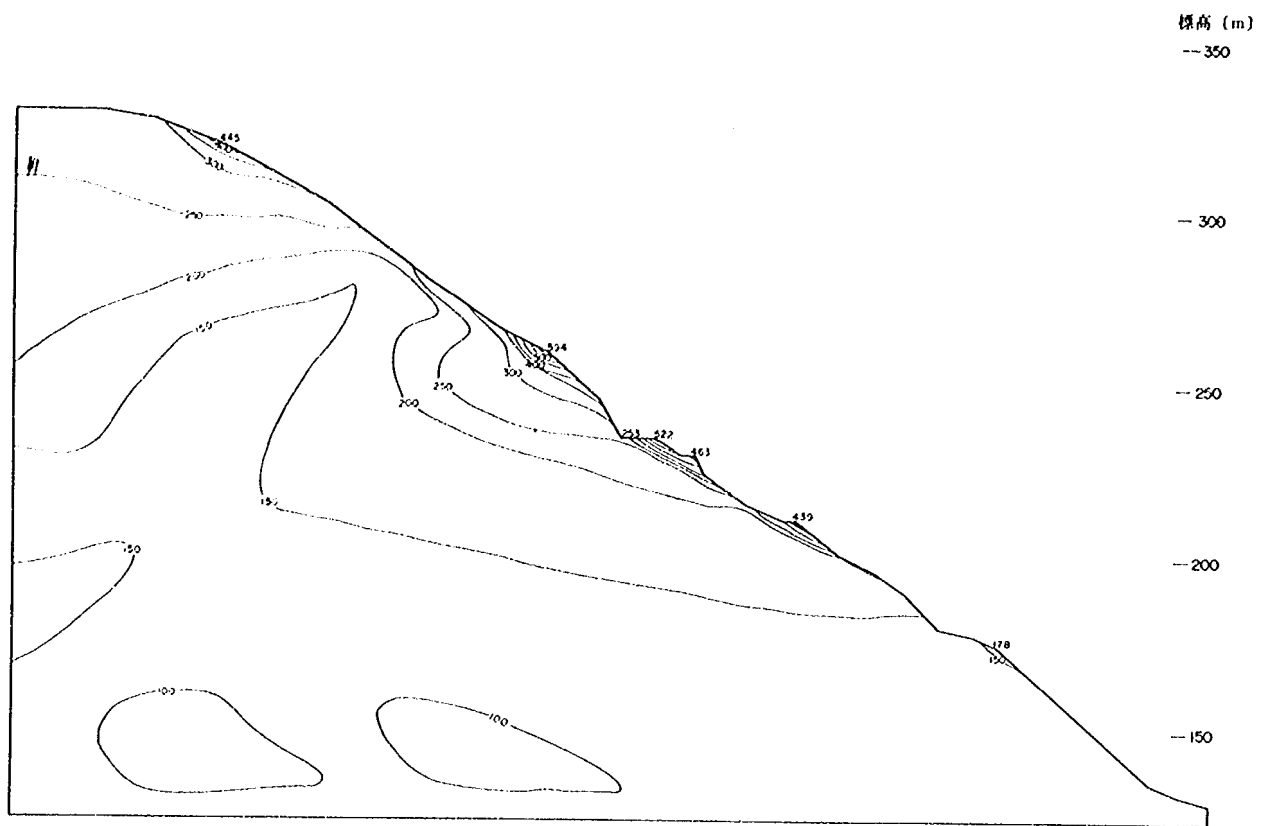
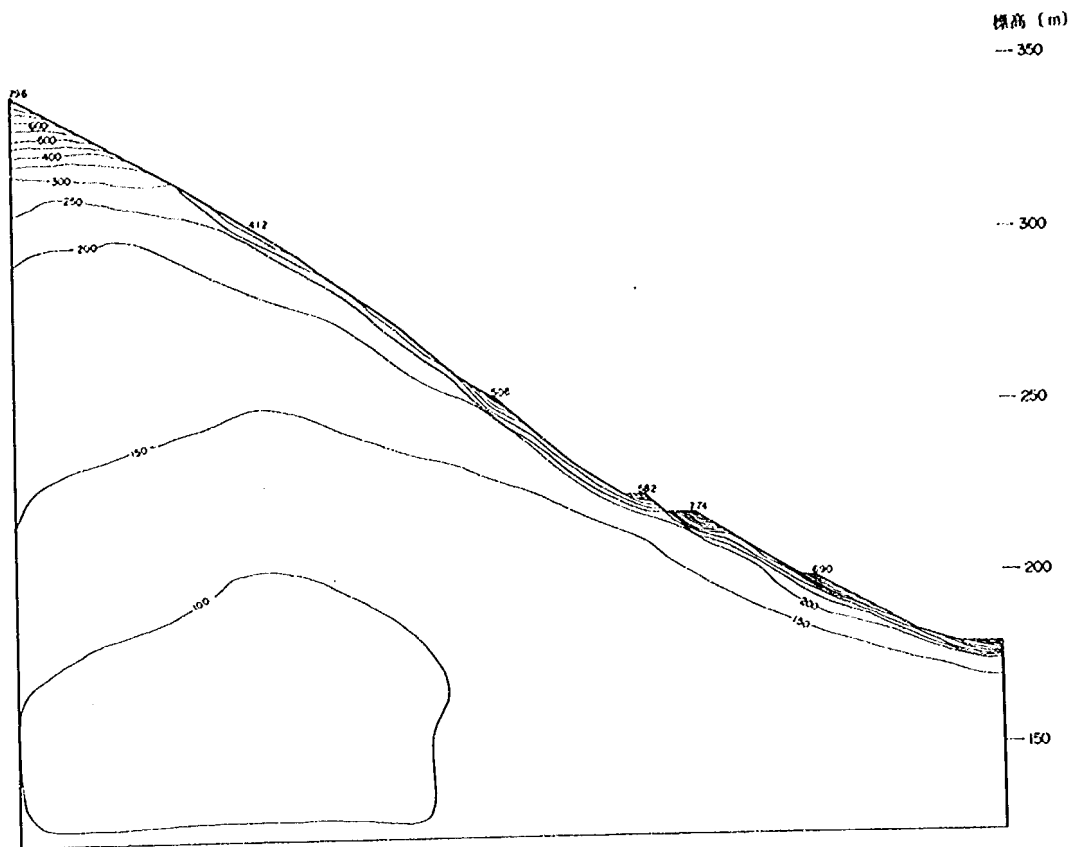
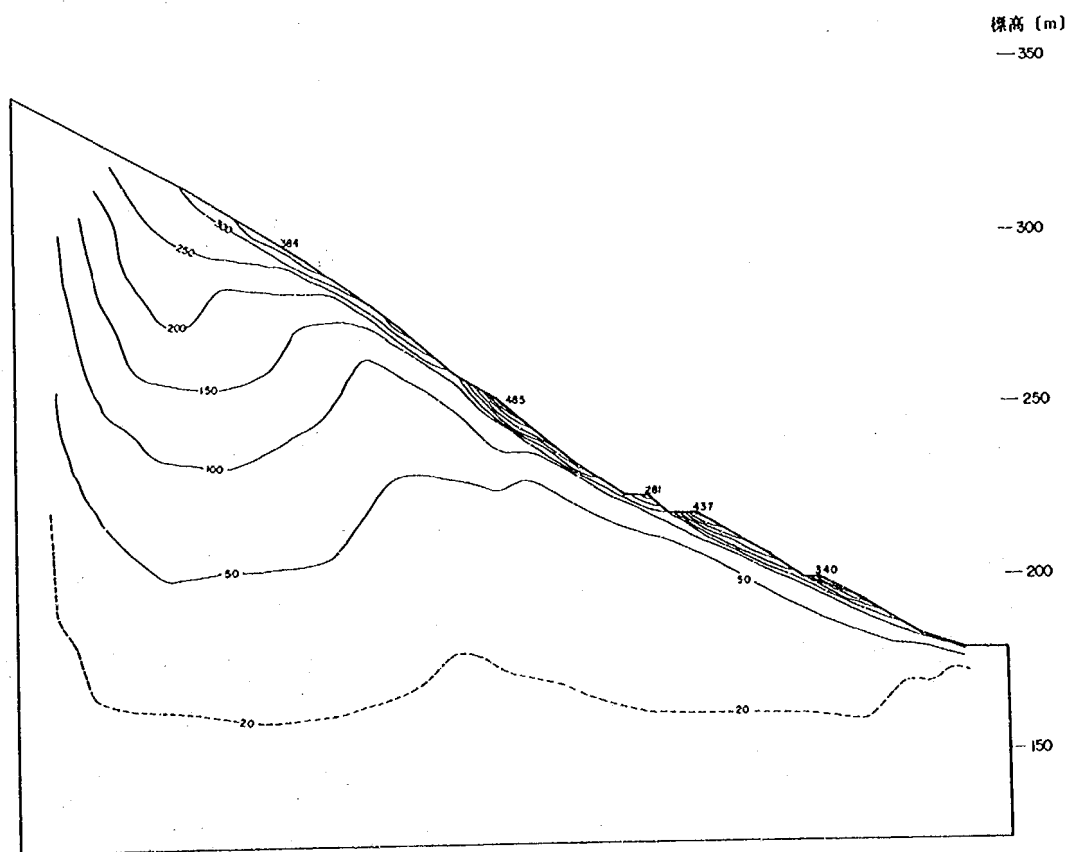


図 5 - 3 (1) 最大加速度の分布 (斜面 - 1, 開北橋記録を作用させた場合)



(a) 水平方向最大加速度 (gal)



(b) 鉛直方向最大加速度 (gal)

図 5 - 3 (2) 最大加速度の分布 (斜面 - 2, 開北橋記録を作用させた場合)

最下端（道路の真上）において、他の部分よりも相対的に大きくなっている。とくに、新菊川記録を作用させた場合には、一部において最大せん断ひずみは $10^{-3}$ を超えている。これに対して、斜面-2では斜面-1の場合のようにある特定箇所にせん断ひずみが集中する傾向は現われておらず、道路上方の斜面全体にわたっておおむね一様にせん断ひずみが発生している。

同様に、図5-6に示した最大せん断応力の分布においても、斜面-1の道路上方の斜面においては、箇所別に最大せん断ひずみが増化しているのに対して、斜面-2の場合にはこのような著しい箇所別な変化は認められない。したがって、斜面形状に起伏が少なく、また、表層の厚さもおおむね一様な斜面-2では、

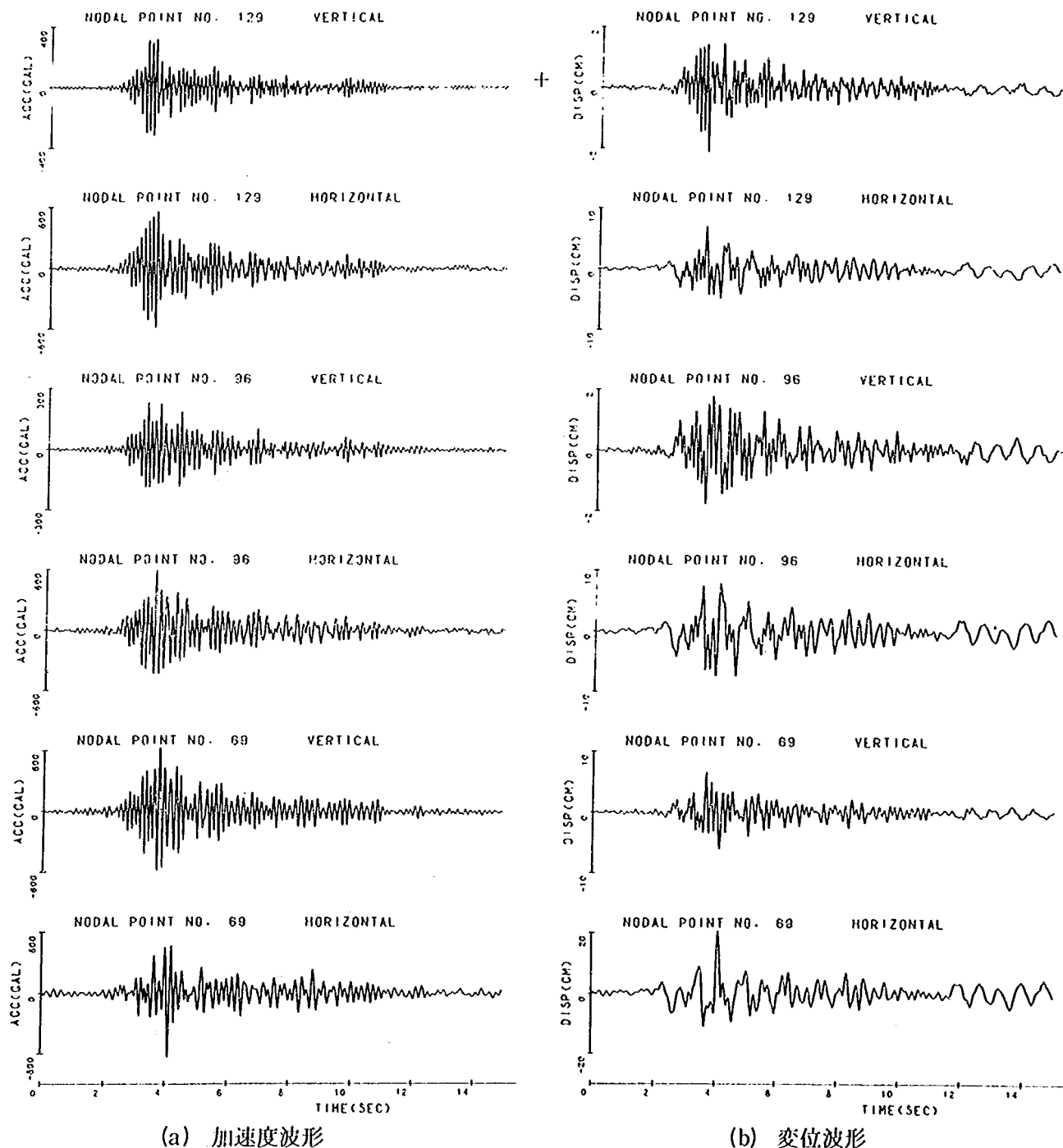
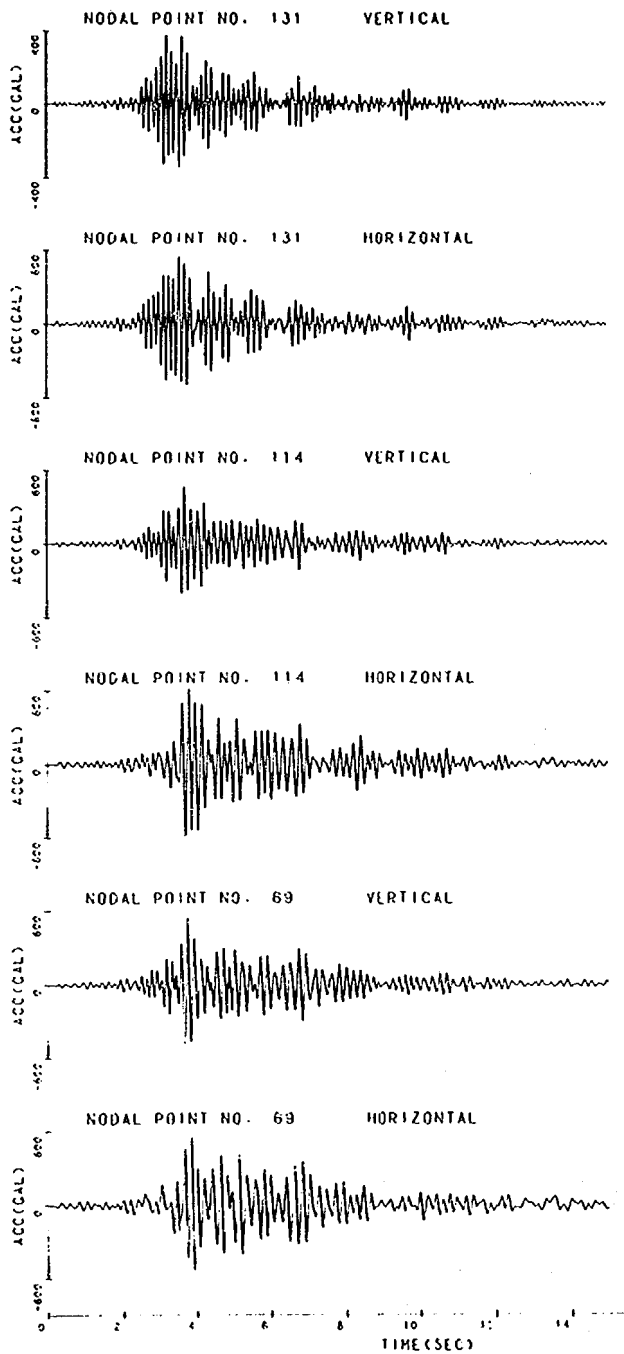
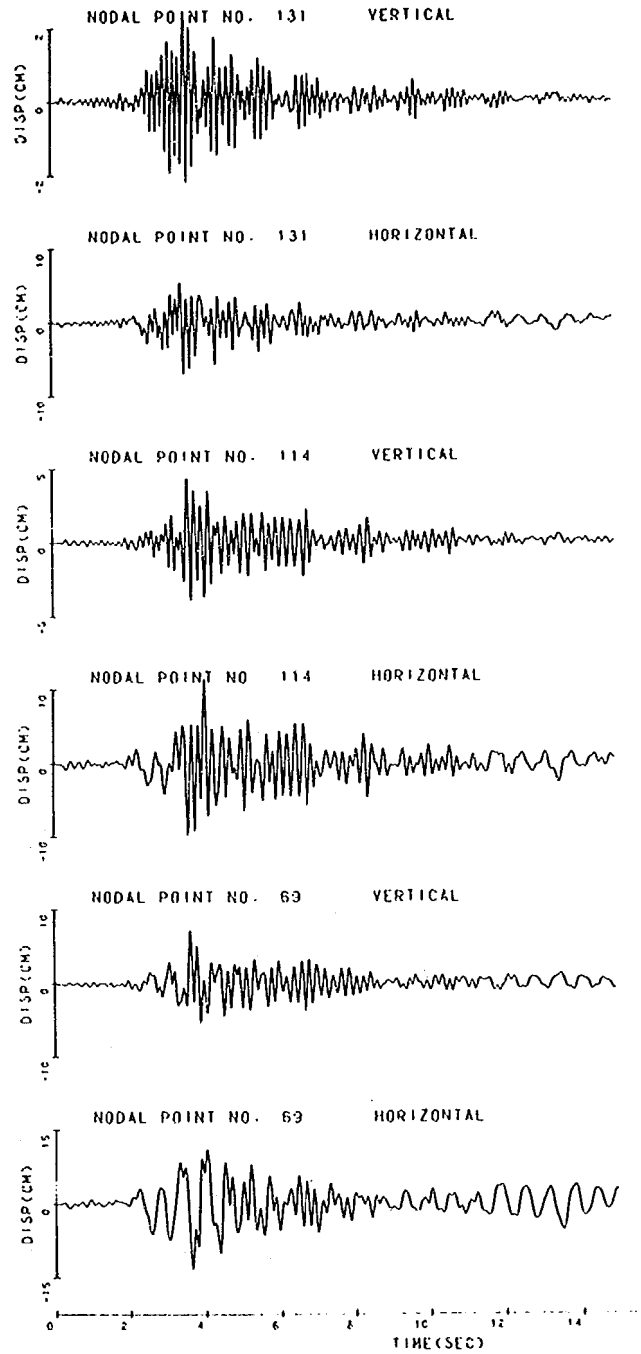


図5-4(1) 斜面-1の応答波形（新菊川変電所(EW)の記録を作用させた場合、節点番号は図2-7参照）

最大せん断応力および最大せん断ひずみともに斜面に沿ってなだらかに変化するのに対して、形状および表層の厚さが変化する斜面-1では、このような地形および地盤条件の変化に対応して最大せん断力および最大せん断ひずみの集中が生じることがわかる。



(a) 加速度波形



(b) 変位波形

図 5-4(2) 斜面-2 の応答波形 (新菊川変電所 (EW) の記録を作用させた場合、節点番号は図 2-8 参照)

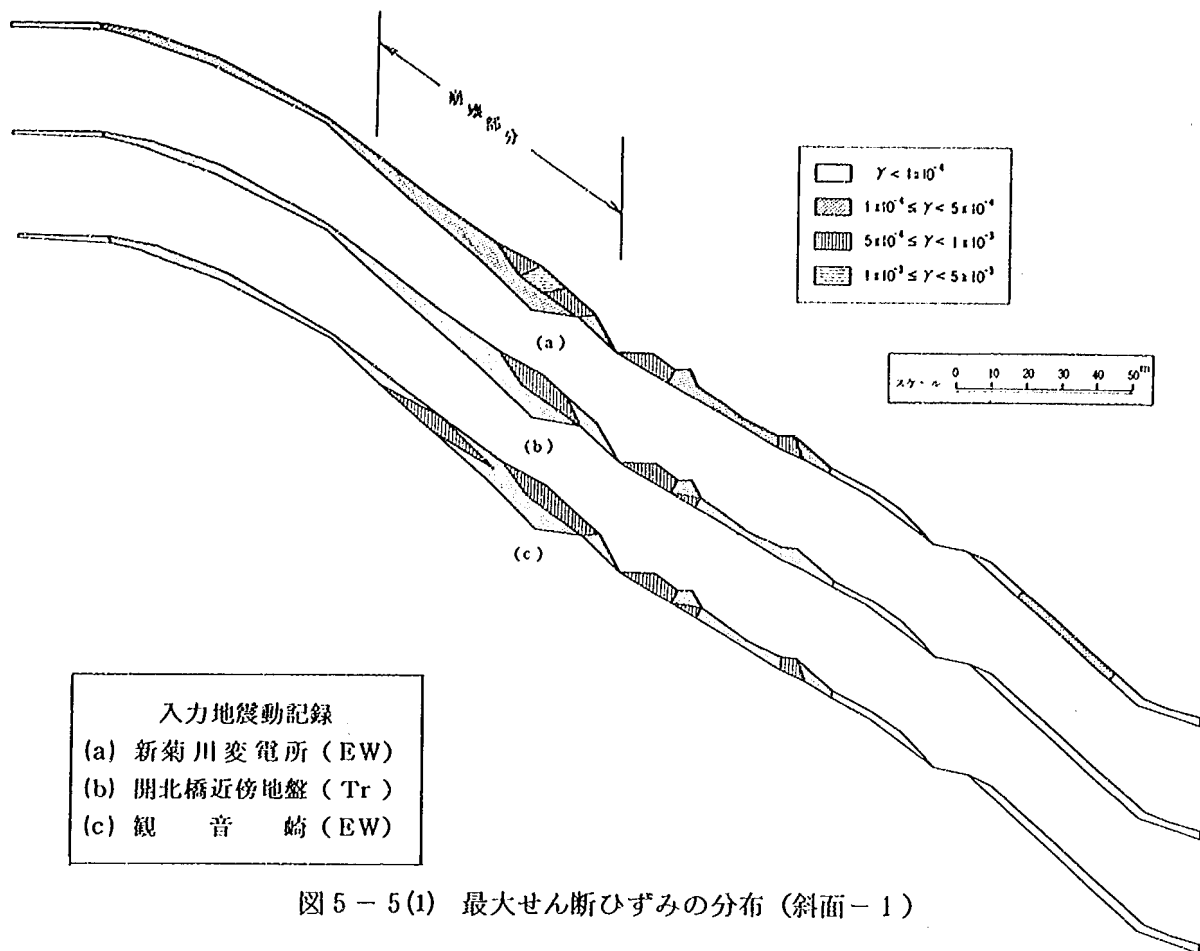


図 5 - 5 (1) 最大せん断ひずみの分布 (斜面 - 1)

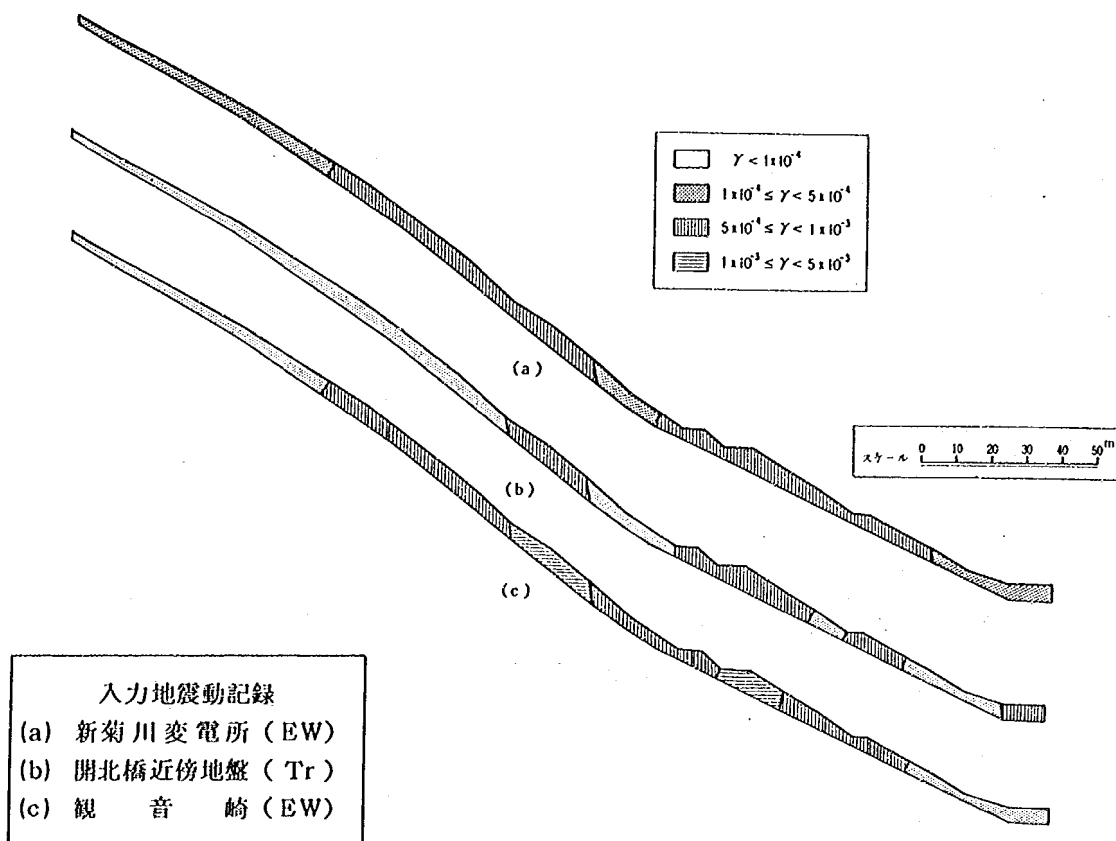


図 5 - 5 (2) 最大せん断ひずみの分布 (斜面 - 2)

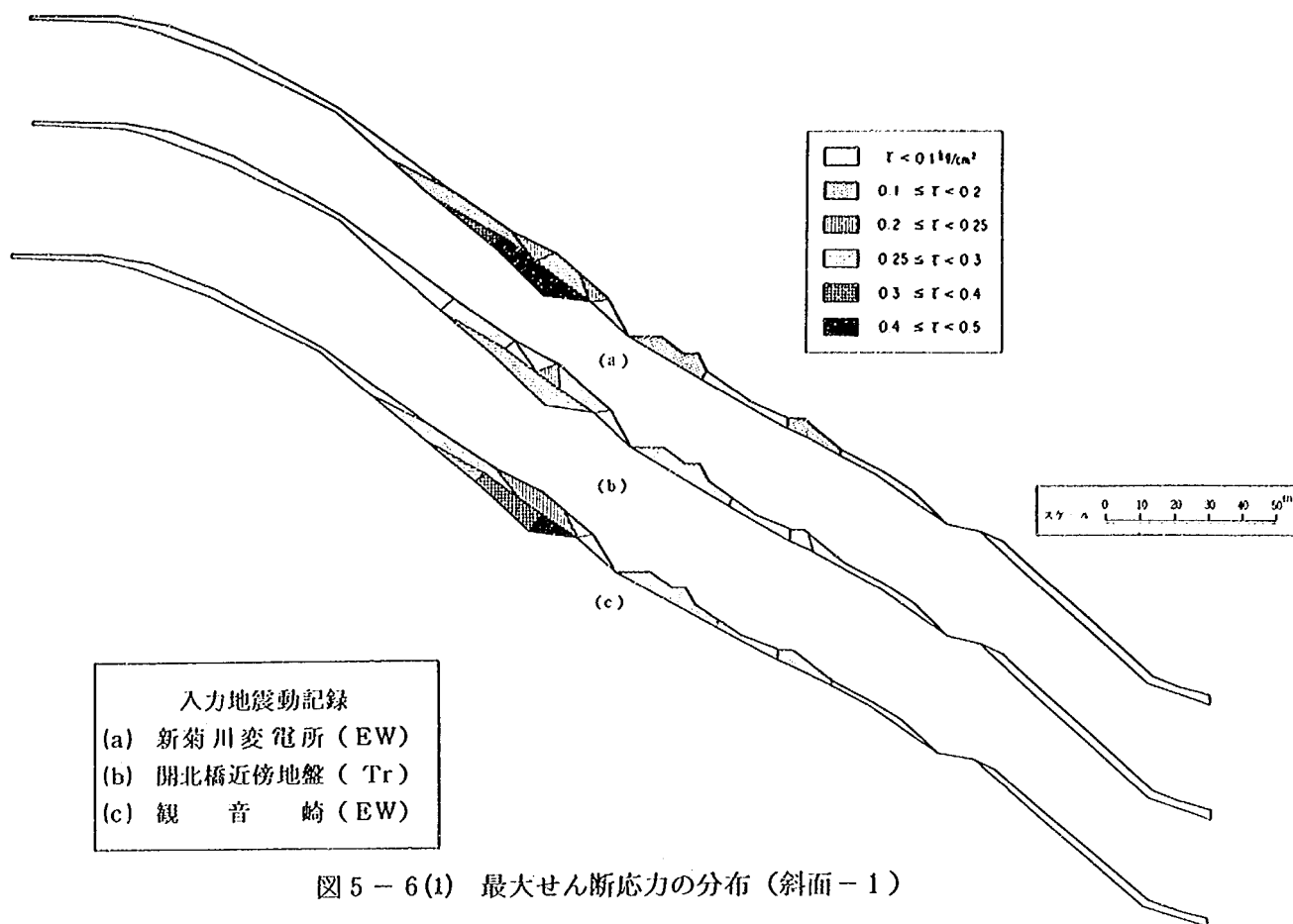


図 5 - 6(1) 最大せん断応力の分布 (斜面 - 1)

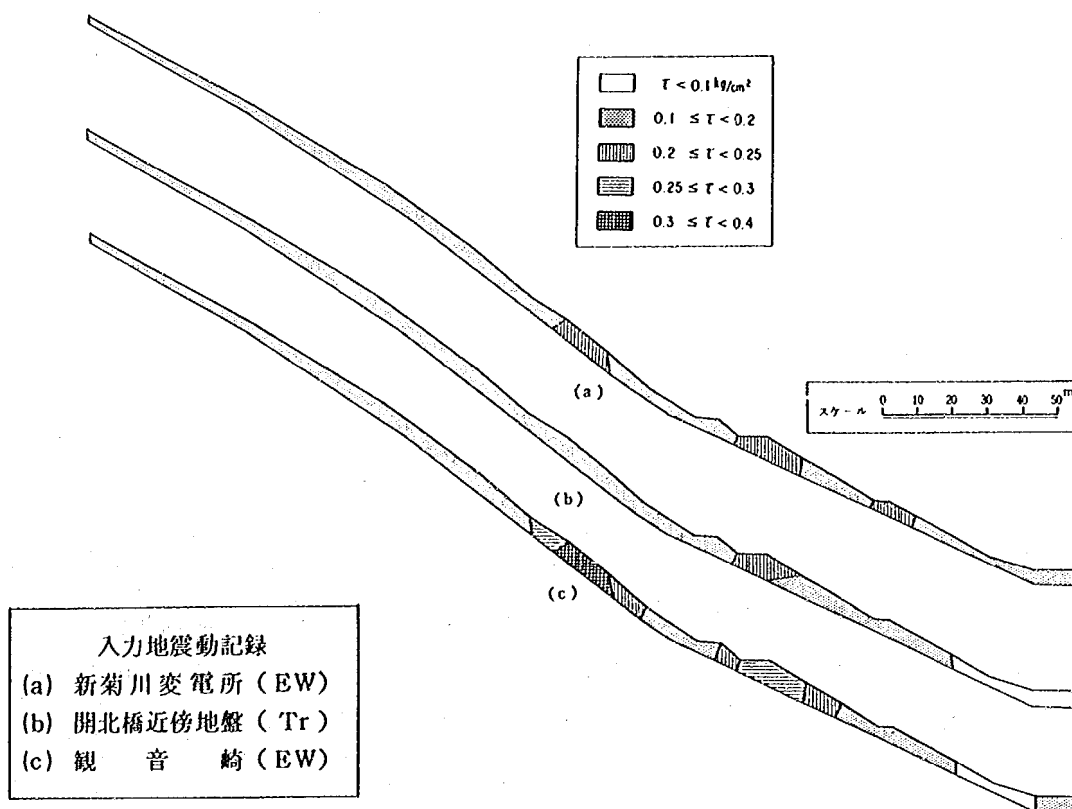


図 5 - 6(2) 最大せん断応力の分布 (斜面 - 2)

## 6. 地震応答解析の結果に基づく斜面の安定性の検討

### 6.1 地盤強度の推定

斜面-1および斜面-2において地震後に表層の地盤条件を把握する目的で、スウェーデン式サウンディングおよび静的コーン貫入試験機(ポータブルコーンペネトロメーター)を用いた調査を行った。調査地点は図2-2に示すようにいずれも県道より上方の斜面であり、斜面-1では道路とおおむね平行に、また斜面-2では道路と直交する方向にそれぞれ調査測線を設定した。

図6-1はスウェーデン式サウンディングの結果を示したものである。斜面-1においてはDS-9地点からDS-19地点間の崖錐層が崩壊している。地震後に崩壊した後から行ったサウンディングの結果からは直接崩壊した土層の強度を把握することはできないが、崩壊した崖錐層は強度の小さい部分であり、その下に現在残っている部分は強度的に崩壊に対して抵抗し得た土層とみることができる。いま、斜面-1における崩壊部分と未崩壊部分の区別が主として崖錐層の厚さによって生じたと考えられるならば、崩壊した崖錐の特性は、これに隣接するDS-8地点もしくはDS-20地点の特性とおおむね同じと考えることができる。したがって、ここではDS-8地点の強度をもって、崩壊した崖錐層の強度を代表させることとした。DS-8地点のサウンディング結果から粘着力Cを推定すると図6-2に示すようになる。図中には後述する静的コーン貫入試験から推定したCの分布も同時に示している。

ここで、粘着力Cは以下のようにして推定した。すなわち、スウェーデン式サウンディングの結果と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係はおおむね次式で与えられる<sup>11)</sup>。

$$q_u = 0.0045 W_{sw} + 0.0075 N_{sw} \quad (6-1)$$

ここで、

$q_u$  : 一軸圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

$W_{sw}$  : 荷重 (kg)

$N_{sw}$  : 貫入量 1 m 当りの半回転数

いま、土の内部摩擦角  $\phi$  を 0 と仮定すれば、

$$q_u = \frac{1}{2} C \quad (6-2)$$

となり<sup>11)</sup>、(6-1)、(6-2)式より粘着力Cを求めることができる。

次に、図6-3は斜面-1および斜面-2のポータブルコーン試験から求めたコーン支持力  $q_c$  の分布を示したものである。静的コーン貫入試験は図2-2からわかるように、スウェーデン式サウンディングとおおむね同じ側線に沿って実施されている。上述したスウェーデン式サウンディング試験の場合と同様に、斜面-1では、崩壊した崖錐層のコーン支持力  $q_c$  は、崩壊区間と隣接する未崩壊区間の  $q_c$  とおおむね同じであると考え、たとえば、Na8地点(これは、図6-1(a)のスウェーデン式サウンディングのDS-8地点とほぼ同一地点である)では、地表から深さ 1 m 程度の区間では  $q_c = 4 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$  となっている。い

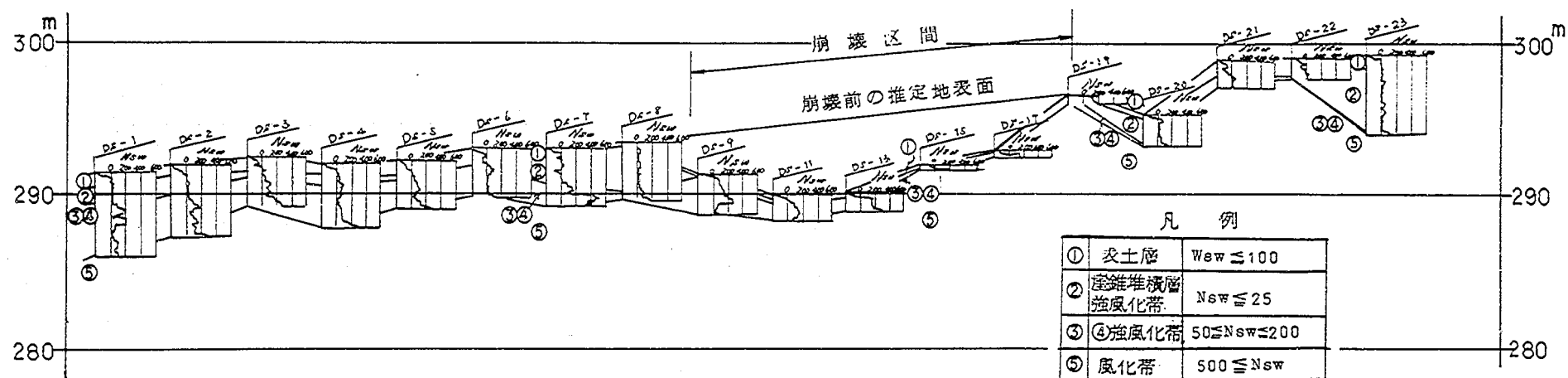


図 6-1(a) 斜面-1 の横断方向のスウェーデン式サウンディング貫入抵抗断面図

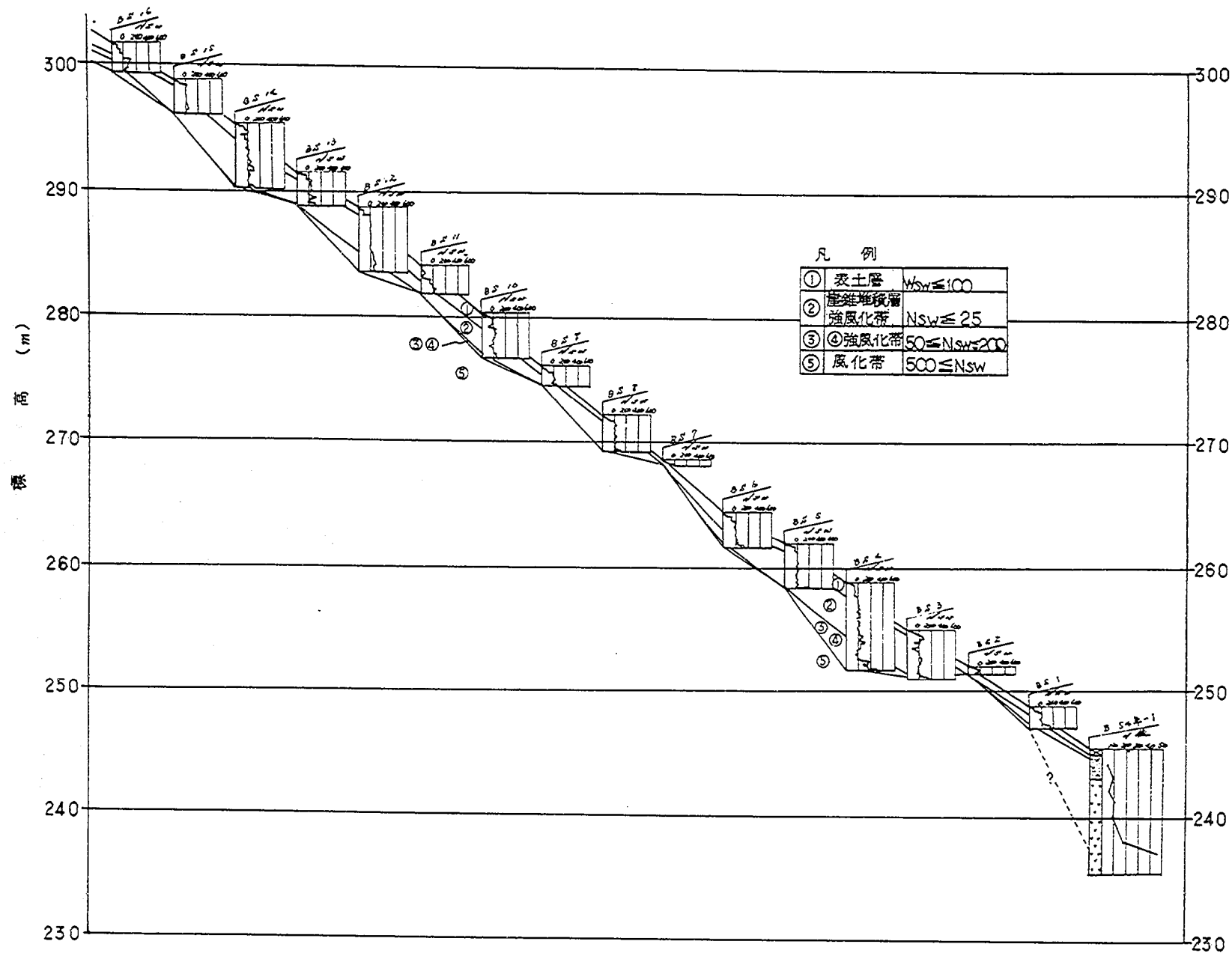


図 6 - 1(b) 斜面 - 2 の斜面方向のスウェーデン式サウンディング貫入抵抗断面図

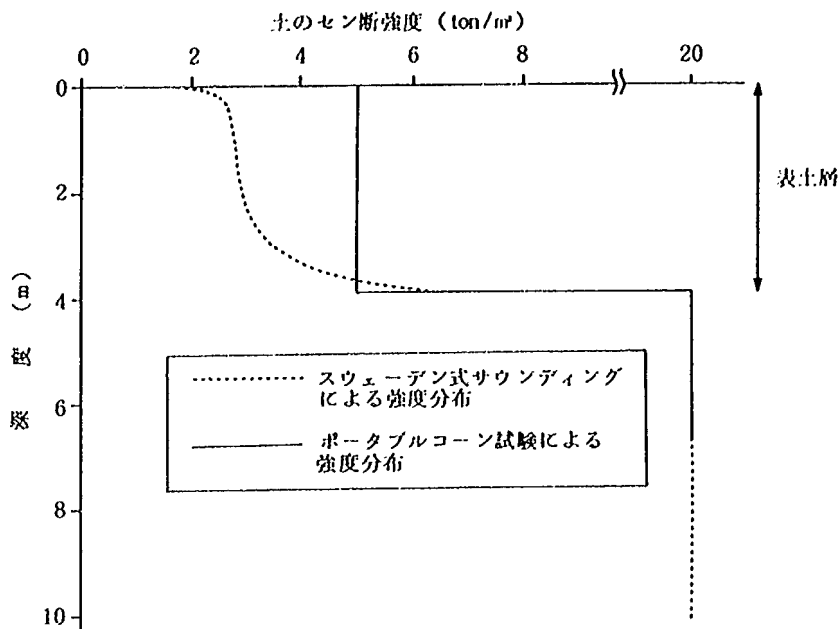


図6-2 斜面-1のDS-8地点におけるスウェーデン式サウンディングから推定した粘着力とポータブルコーンから推定した粘着力の比較

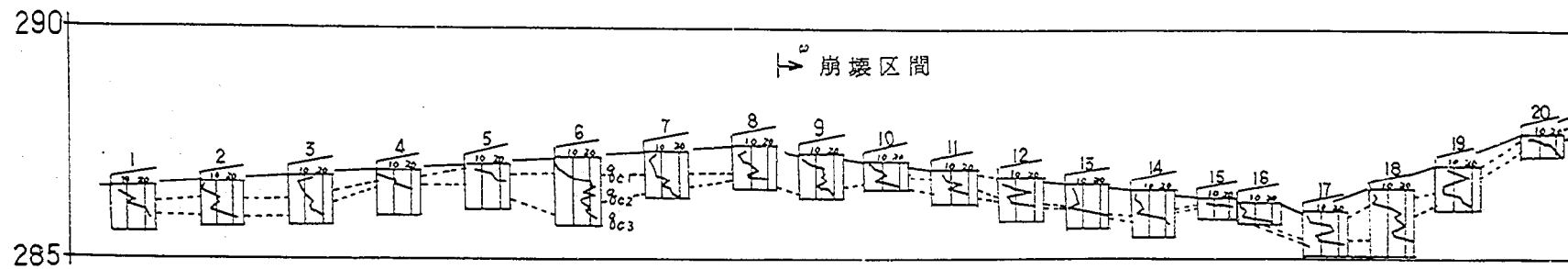
ま、粘性土の場合には、粘着力 $C$ とコーン支持力 $q_c$ の間には、近似的に次式の関係が成り立つとされている<sup>11)</sup>。

$$q_c = 10 C \quad (6-3)$$

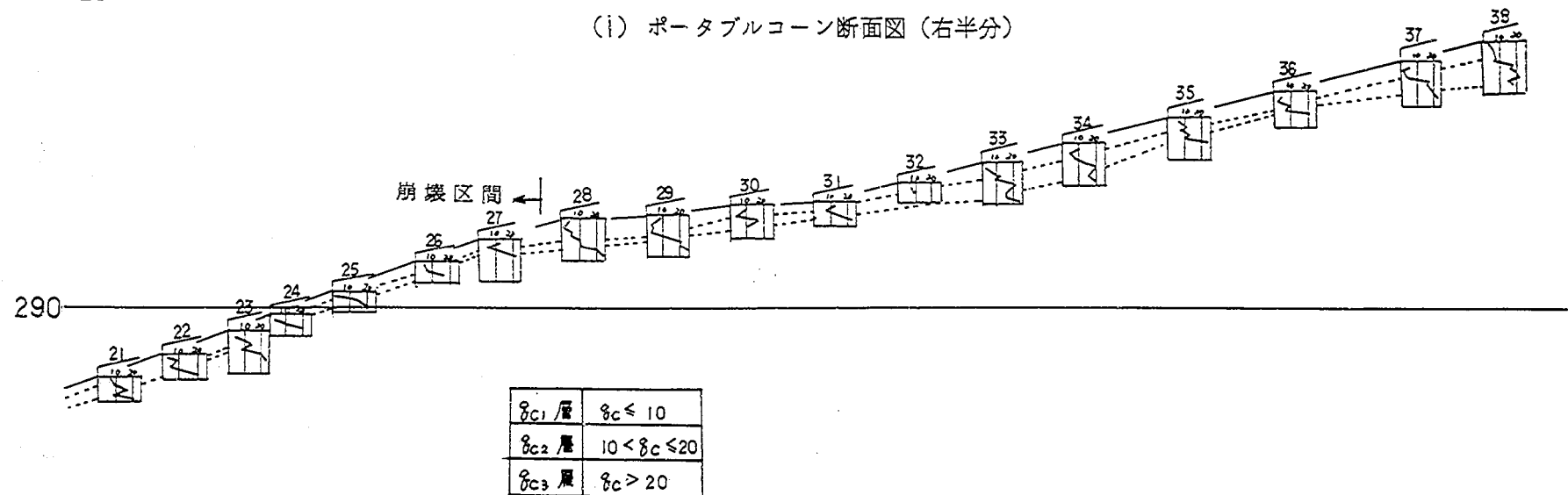
したがって、これから粘着力を推定すると、上記の $q_c = 4 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ に対応して、 $C = 4 \sim 6 \text{ t/m}^2$ となる。したがって、強度のばらつきを考えれば、 $C \approx 5 \text{ t/m}^2$ 程度と仮定することができよう。このようにして、ポータブルコーン試験から求めたNa.8地点(DS-8地点とほぼ同一地点)の $C$ の分布を図6-2に示す。表層では、 $C$ の値はスウェーデン式サウンディング試験結果からの推定値の方が、ポータブルコーン試験結果からの推定値よりも小さくなっているが、表層以下については、スウェーデン式サウンディング試験結果からは $C > 21 \text{ t/m}^2$ 、また、ポータブルコーン試験結果からは $20 \text{ t/m}^2$ 以上(地表から1~2mで $C > 20 \text{ t/m}^2$ となり、それ以深は貫入不能となっている)となっている。したがって、表層以下の土層については、 $C = 21 \text{ t/m}^2$ として取扱うこととした。

なお、斜面-1では、斜面に沿う方向の調査が実施されていないため、この方向への強度の分布は直接推定することができない。斜面-1では、表層の崖錐層は巨大な礫が点在する不均一な地盤構成であるが、このような特性は斜面方向に県道をはさんで上から下まで変わっていない。そこで、ここでは、崖錐層の粘着力 $C$ は斜面方向にはどこでも同じと仮定して、斜面の安定性を検討することとした。なお、崖錐層の厚さは図2-4に基づいて、斜面方向に変化させている。

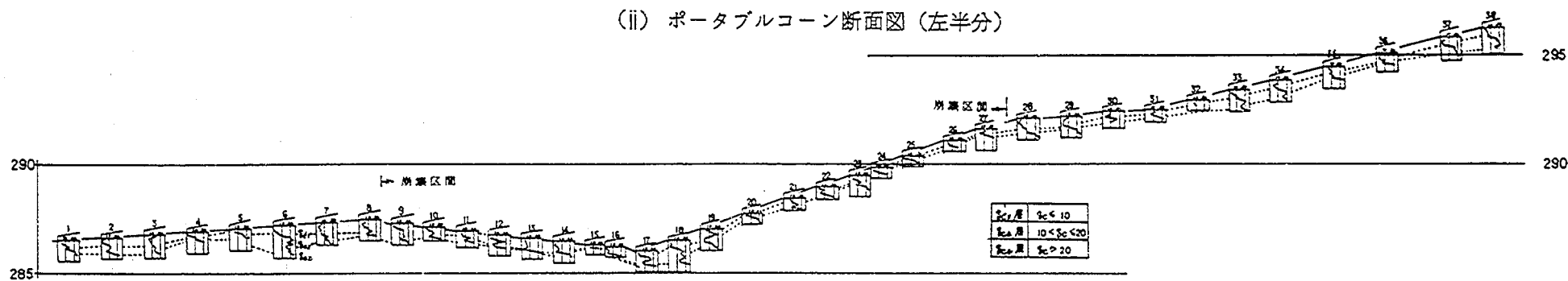
次に、斜面-2では、斜面方向にスウェーデン式サウンディング試験およびポータブルコーン試験が行われているため、これから(6-1)式および(6-3)式で粘着力 $C$ を求めることとした。しかし、ポータブルコーン試験は、図6-3(b)に示したように、測定深度がすべて1m以内と浅いため、解析に必要とさ



(i) ポータブルコーン断面図 (右半分)



(ii) ポータブルコーン断面図 (左半分)



(iii) ポータブルコーン断面図 ((i)+(ii))

図 6-3(a) 斜面-1 の横断方向のポータブルコーン断面図

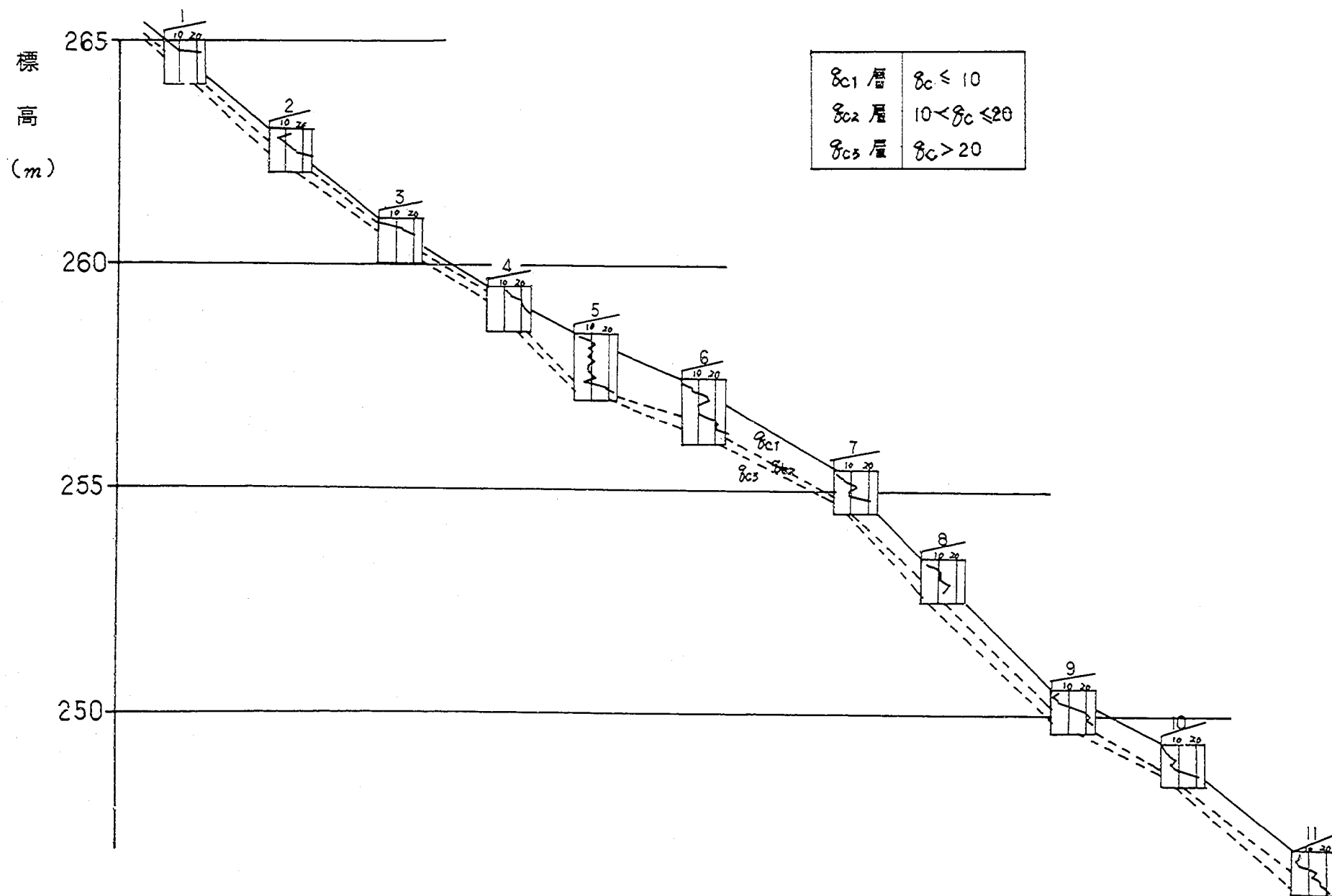


図 6 - 3(b) 斜面 - 2 の斜面方向のポータブルコーン断面図

れる深度の粘着力を（6-3）式で推定できない。そこで、コーン支持力を勘案して、ポータブルコーン試験に対応する粘着力の分布は斜面-1と同様に、崖錐層に対して5 t/m<sup>2</sup>と仮定した。なお、斜面-2では県道より下の斜面では、スウェーデン式サウンディング試験およびポータブルコーン試験のいずれも実施されていないため、以下では解析の対象から除外した。

## 6.2 すべり係数の分布

常時の状態（自重のみ作用した場合）および地震時の状態に対して、すべり係数  $S_f$  を次式で定義する。

$$\text{すべり係数 } S_f = \frac{\text{土に生じる最大せん断応力 } \tau_f}{\text{土のせん断強度 } \tau_f^R} \quad (6-4)$$

ここで、最大せん断応力  $\tau_f$  は、常時の状態に対しては、自重のみが作用した場合の斜面の変形を有限要素法により求め、それぞれの要素ごとに次式により計算する。

$$\tau_f^S = \sqrt{\left(\frac{\tau_x^S - \tau_y^S}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \tau_{xy}^S{}^2} \quad (6-5)$$

ここで

$\tau_f^S$  : 常時の状態における最大せん断応力

$\tau_x^S, \tau_y^S, \tau_{xy}^S$  : せん断応力

上記の計算には、図2-7および2-8に示した動的解析に用いたものと同じ要素分割を用いる。また、地震時の状態に対しては、せん断応力  $\tau_x^D(t), \tau_y^D(t), \tau_{xy}^D(t)$  は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \tau_x^D(t) &= \tau_x^S + \tau_x^d(t) \\ \tau_y^D(t) &= \tau_y^S + \tau_y^d(t) \\ \tau_{xy}^D(t) &= \tau_{xy}^S + \tau_{xy}^d(t) \end{aligned} \right\} \quad (6-6)$$

ここで、

$\tau_x^S, \tau_y^S, \tau_{xy}^S$  : (6-5)式による常時のせん断応力

$\tau_x^d(t), \tau_y^d(t), \tau_{xy}^d(t)$  : 動的解析による時刻  $t$  における動的せん断応力

$\tau_x^D(t), \tau_y^D(t), \tau_{xy}^D(t)$  : 自重分を加えた時刻  $t$  における動的せん断応力

これより、地震時の最大せん断応力  $\tau_f^D$  は次式で求められる。

$$\tau_f^D = \left| \sqrt{\left(\frac{\tau_x^D(t) - \tau_y^D(t)}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \tau_{xy}^D(t)^2} \right|_{\max \text{ for } t} \quad (6-7)$$

一方、土のせん断強度  $\tau_f^R$  は一般に次式で与えられる場合が多い。

$$\tau_f^R = C + \sigma \tan \phi \quad (6-8)$$

ここで、

$\tau_f^R$  : せん断強度

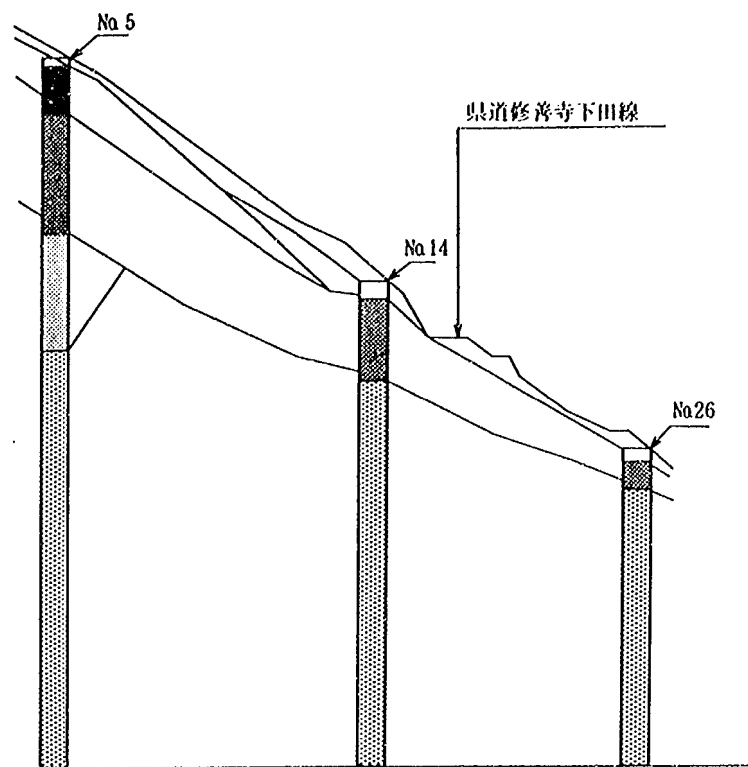
$C$  : 粘着力

$\sigma$  : 上載圧

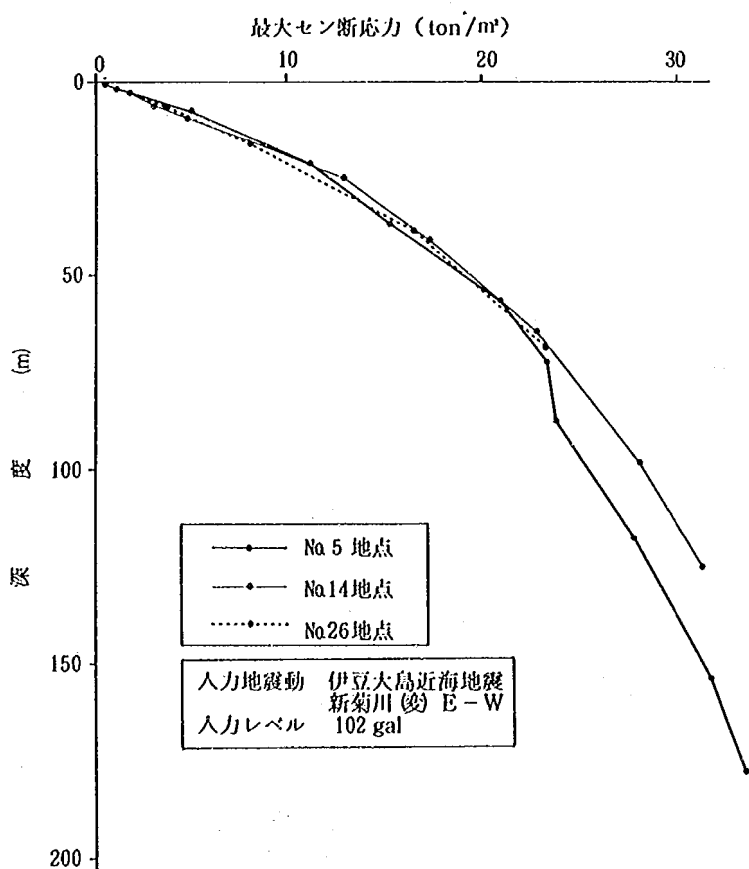
$\phi$  : 内部摩擦角

前節に示したように、崖錐堆積層に対して実施したスウェーデン式サウンディング試験および静的コーン貫入試験の結果から、 $C$ についてはある程度の推定が可能である。 $\phi$ についてはこれらの試験結果から直接求めることができないため、ここでは一応  $\phi = 0$  と仮定した。なお、このようにして求めたせん断強度  $\tau_f^R$  は静的な値であり、(6-4)式で動的せん断力と比較することは適切ではないが、ここでは、他に適当な方法がないことから、この点に関しては考慮していない。

このようにして、要素ごとに(6-4)式で、すべり係数  $S_f$  を求めることができるが、地震応答解析では要素ごとに要素の重心位置での応力が求められるため、崖錐層内での深さ方向の応力分布を安定性の検討に必要な程度に細かく求めることができない。そこで、図6-4に示すように斜面-1の中から3地点を選び、1次元の土柱モデルにより崖錐層内の応力分布を計算した。このような計算では斜面の形状の影響が計算結果に反映されていないが、表層の応力の分布を知るためにはある程度有効と考えられる。この結果によれば、最大せん断応力は深さ方向に深さ  $z$  の約  $1/2$  乗で増加していることがわかる。しかしながら、表層の2~5 m程度の範囲では、最大せん断応力は深さに比例して増加しているとみなしても大きな誤差は生じないと考えられる。このような点から、ここでは崖錐層内の最大せん断応力の分布を、地表面を0とし、要素の重心位置での計算値を結ぶ直線上



(a) 解析対象地点

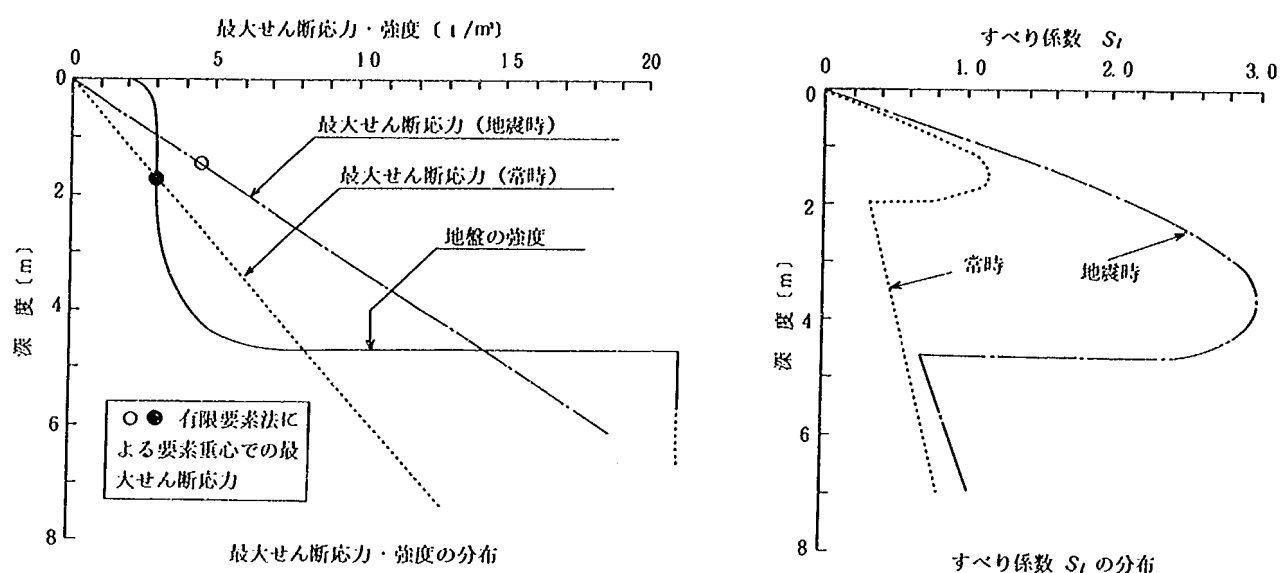


(b) 最大せん断応力の地中内分布

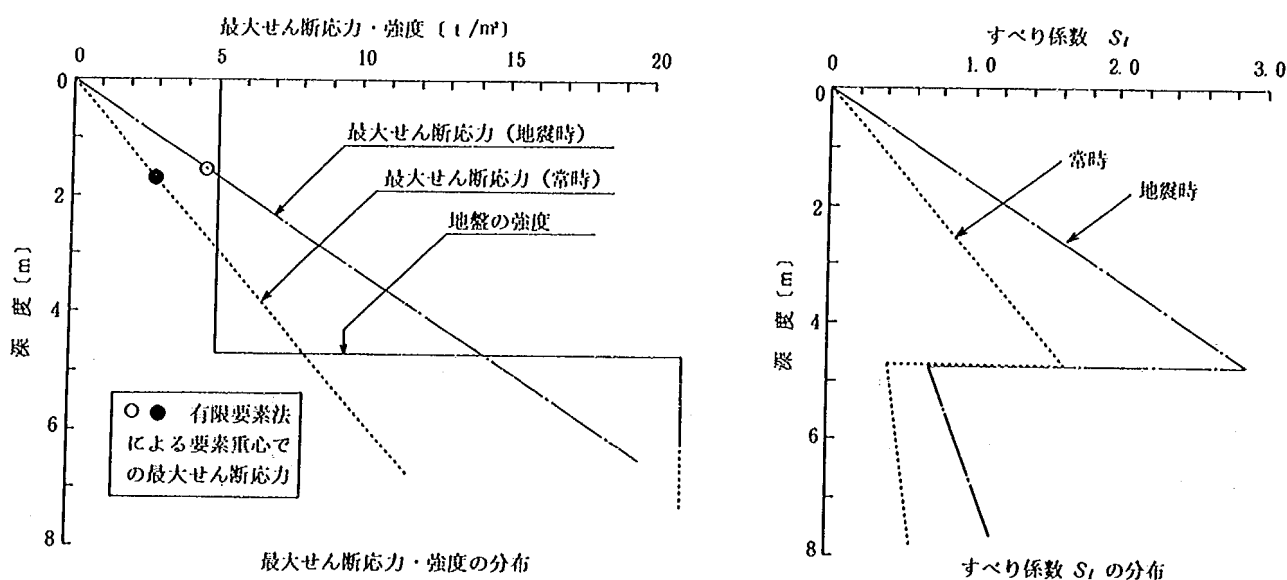
図6-4 一次元土柱モデルによる最大せん断応力分布の推定

の分布とした。たとえば、斜面-1における、最大せん断応力および強度の分布と、これより(6-4)式で求めたすべり係数  $S_f$  の分布は図6-5(斜面-1の県道直上の崩壊した斜面——図2-7に示す要素番号Na16)および図6-6(斜面-1の上方の未崩壊部分——図2-7に示す要素番号Na5)に示す通りである。

以上のようにして、斜面-1および斜面-2(ただし、斜面-2は県道上方の斜面のみ)の崖錐層内のすべり係数  $S_f$  の分布を求めた結果を図6-7(常時、スウェーデン式サウンディング調査結果から土の強度を推定した場合)、図6-8(地震時、同左)、図6-9(常時、静的コーン貫入試験結果から土の強度を推定した場合)、図6-10(地震時、同左)に示す。この結果から、すべり係数  $S_f$  の分布に関しては以



(a) スウェーデン式サウンディング調査より土の強度を推定した場合

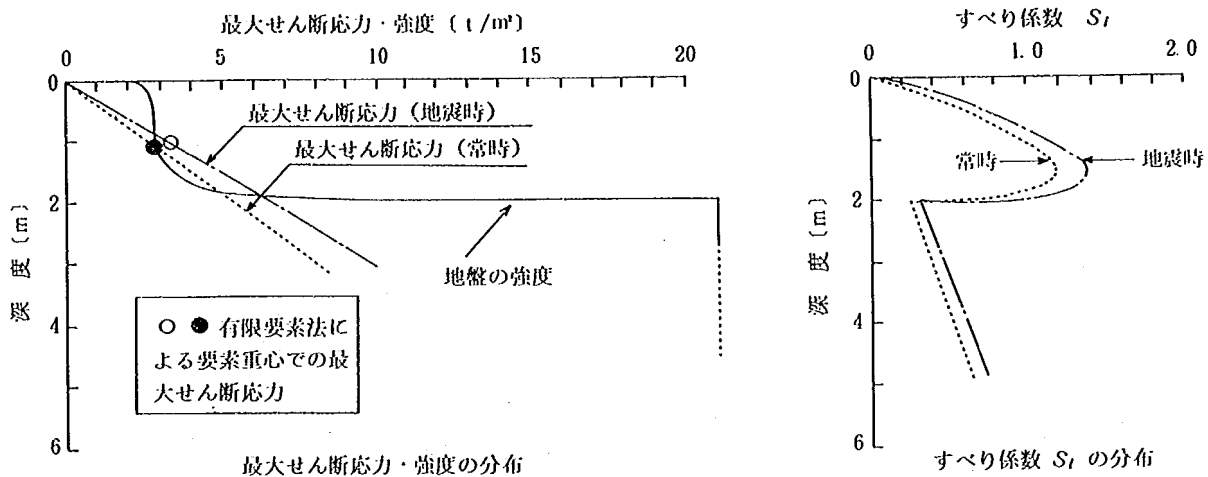


(b) 静的コーン貫入試験より土の強度を推定した場合

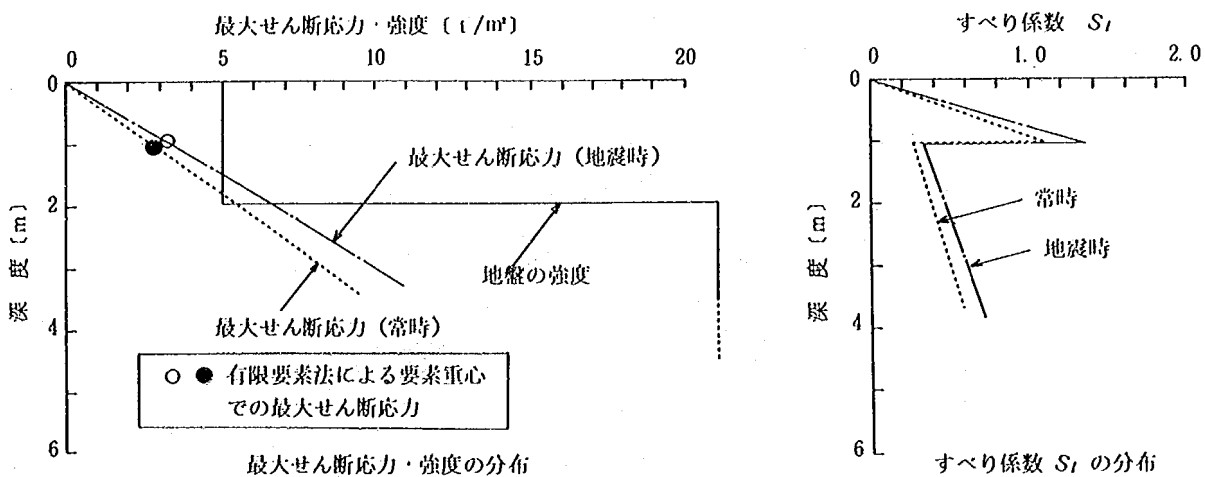
図6-5 最大せん断応力および強度の分布とこれより求めたすべり係数  $S_f$  の分布  
(斜面-1, 県道直上の斜面, 図2-7に示す要素Na16)

下の点が指摘される。

- (i) 地震時における  $S_f$  の分布を斜面-1 および斜面-2 の間で比較すると、スウェーデン式サウンディング調査結果および、静的コーン貫入試験結果のいずれから地盤の強度を推定した場合でも、斜面-1 の  $S_f$  は斜面-2 よりも大きい。たとえば、スウェーデン式サウンディングに基づいて地盤の強度を定めた場合には、 $S_f$  の最大値が、斜面-1 では 3.0 以上となる領域があるのに対して、斜面-2 では、1.5 程度にすぎない。
- (ii) 地震時における斜面-1 の  $S_f$  の分布は、崩壊区間内において、非崩壊区間よりも大きくなる傾向にある。ただし、崩壊区間のうち、最も山側（上方）では、必ずしも  $S_f$  の大小と崩壊の起点との間にはっきりした関係が認められる訳ではない。道路面から 10~15 m 程上方の斜面（崩壊面の最も谷側（下方））において、 $S_f$  の大きい領域がある。
- (iii) 常時における  $S_f$  の値は、斜面-1、斜面-2 ともに地震時の値に比較して小さい。たとえば、ス



(a) スウェーデン式サウンディング調査より土の強度を推定した場合



(b) 静的コーン貫入試験より土の強度を推定した場合

図 6-6 最大せん断応力および強度の分布と、これより求めたすべり係数  $S_f$  の分布  
(斜面-1, 県道上の未崩壊部分の最下端, 図 2-8 に示す要素 No. 5)

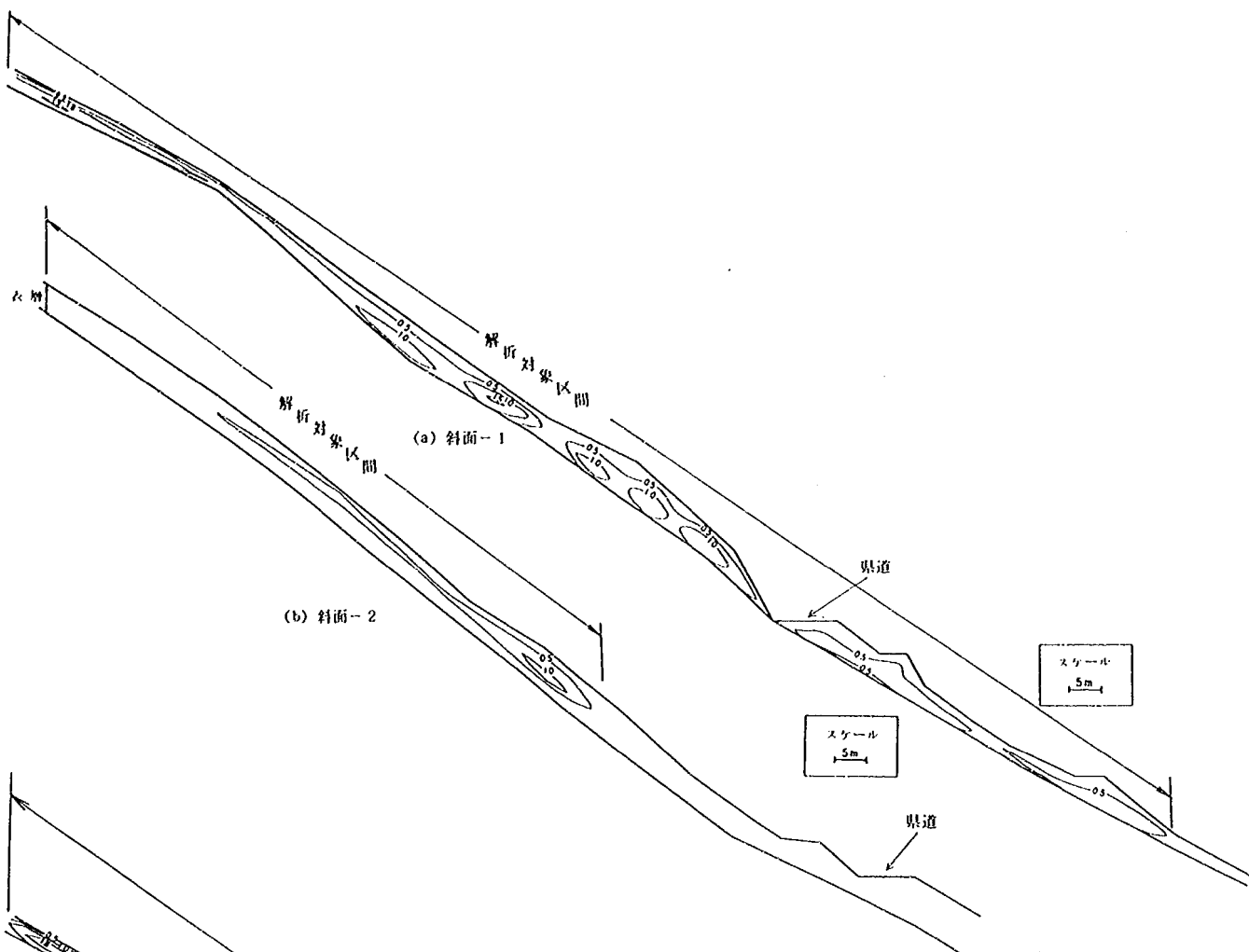


図 6 - 7 常時のすべりやすさ係数の分布  
(スウェーデン式サウンディングの結果を用いた場合)

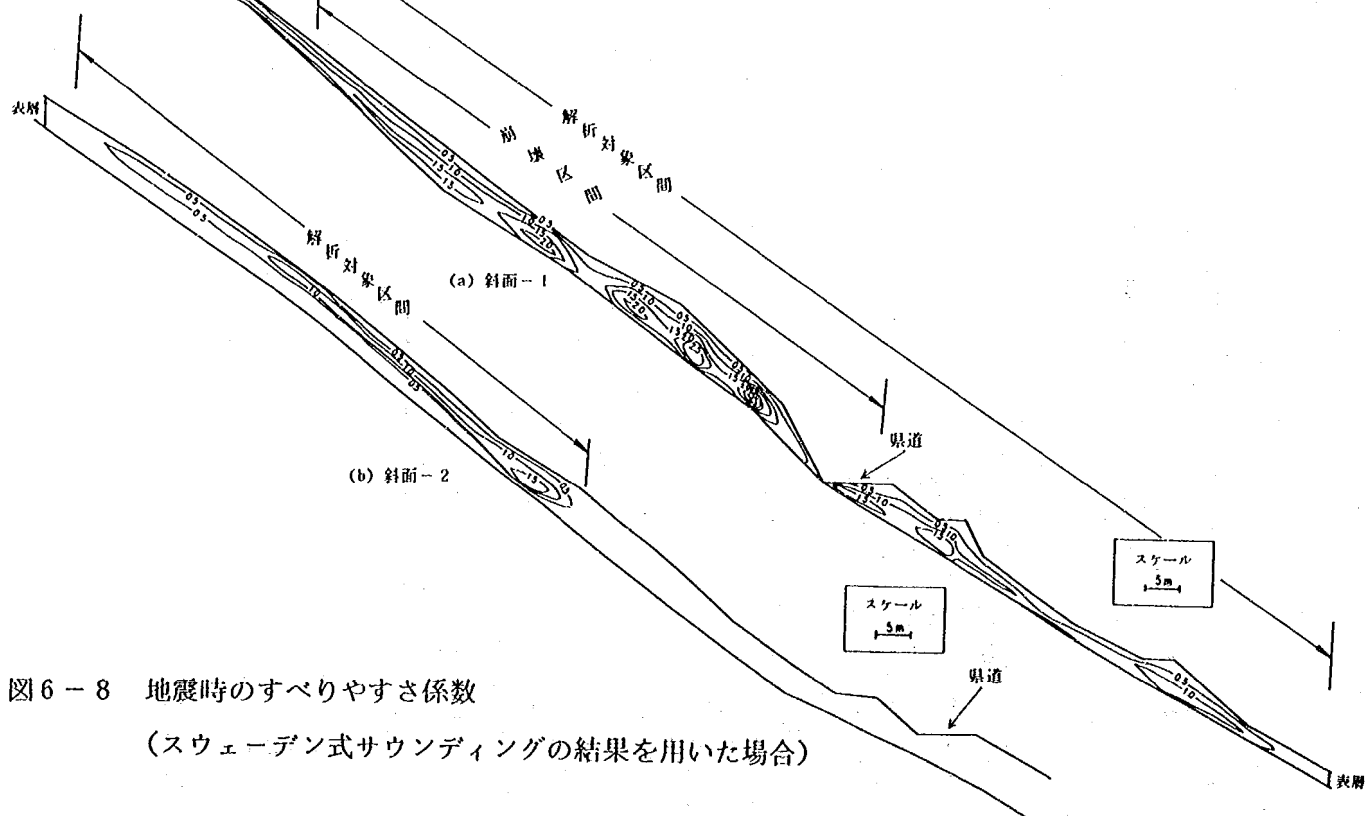


図 6 - 8 地震時のすべりやすさ係数  
(スウェーデン式サウンディングの結果を用いた場合)

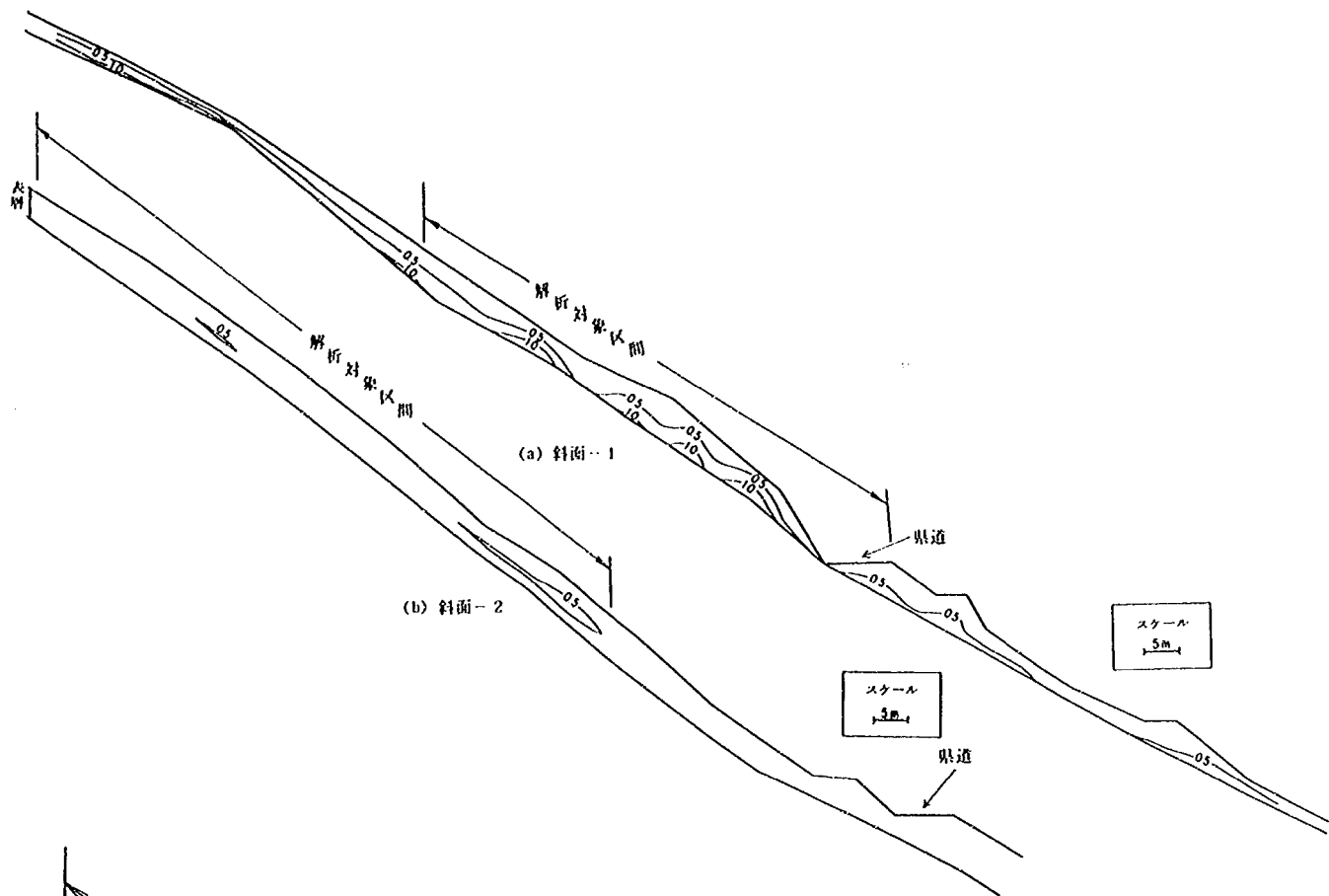


図 6 - 9 常時のすべりやすさ係数の分布  
(ポータブルコーンの結果を用いた場合)

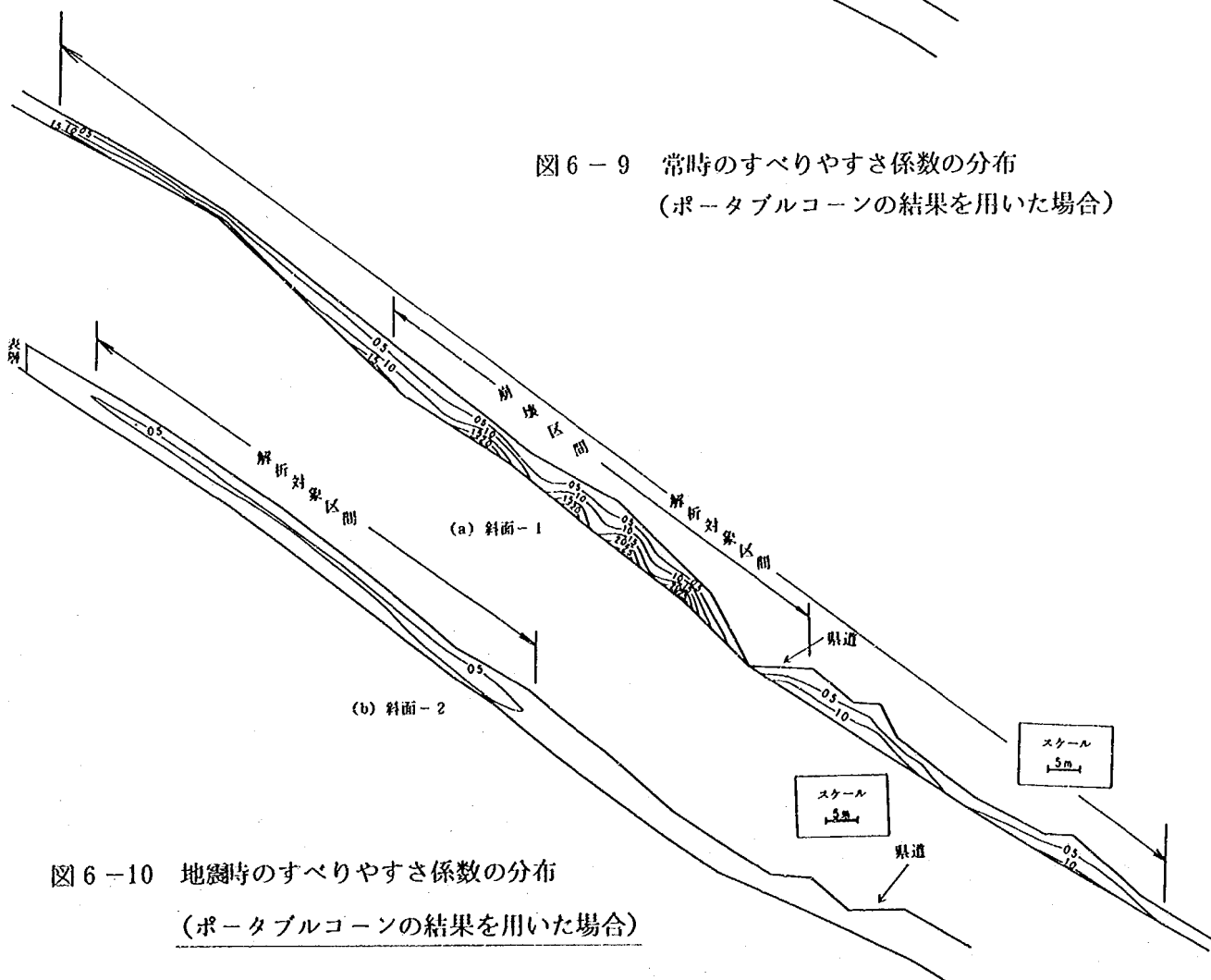


図 6 - 10 地震時のすべりやすさ係数の分布  
(ポータブルコーンの結果を用いた場合)

ウェーデン式サウンディングに基づいて、地盤の強度を定めた場合には、地震時の  $S_f$  の最大値が 3.0 以上であるのに対して、常時には 1.5 以上にすぎない。常時において  $S_f$  が相対的に大きい領域は、地震時にも  $S_f$  が大きくなっている。

- (iv) 斜面 - 1 における崩壊区間と非崩壊区間の両者、および、斜面 - 2 の  $S_f$  の分布（常時，地震時）を総合すると，ここに示した結果の範囲では，崩壊と非崩壊の判定を  $S_f \cong 2.0$ （スウェーデン式サウンディング調査に基づき強度を定めた場合），もしくは， $S_f \cong 1.5$ （静的コーン貫入試験に基づき強度を定めた場合）とすれば，崩壊の有無をおおよそ区別できると考えられる。

## 7. すべり面法による安定性の検討

### 7.1 概 説

地震時の斜面の安定度の予測手法のうち計算によるものでは、従来の円弧ないし複合すべり面法に地震加速度を静的慣性力に換算して作用させ、安全率を計算する方法と、有限要素法（FEM）を用いた弾性、非弾性の応力解析法を介してすべり安定を動的に検討する方法等がある。これらの手法は、精度や作業の煩雑さ等がそれぞれ異なるので、解析目的等に応じて適宜使い分ける必要があろう。

一般に、すべり面法による地震時斜面の安定解析法は、作業が容易な上に実施例も多く実績がある。一方有限要素法による動的応答解析は、地震時の斜面の挙動をできるだけ真実に近い姿で把握する目的で用いられているが、まだ実績も少なく作業は煩雑である。これから、詳細な解析が必要な場合には、この動的応答解析が用いられることも多いであろうが、そのような場合にも、動的応答解析法による結果が静的すべり面法による結果とどのような関連があるのかを明らかにしておくことが重要である。

したがって、本章では上記のような観点から、前章までに述べてきた有限要素法による解析結果と、すべり面法の一手法である Janbu の方法を石原<sup>9)</sup>が一部改良した方法による結果とを比較することにより、両手法の結果の関連性を検討した。

### 7.2 すべり法による安定解析法の概要

今回のすべり面法の基本となる Janbu の方法は Bishop 法<sup>10)</sup>を一般すべり面の解析に適するように Janbu によって拡張されたもの<sup>10)</sup>であり、複合すべり面法の一つである。

この方法は、図7-1のように斜面が任意の形のすべり面に沿ってすべるものと仮定し、この土塊を任意の細片に分割し、まず、そのうちの一つの細片を取り出して力の釣り合いを考え、次に、すべり土塊全体について安全率を計算する方法である。なお、地震力としては各細片に水平荷重  $(a/g) \cdot \Delta W_i$  を加えるという石原らの方法（ここではこの方法を以下 Janbu 式と呼ぶことにする。）を用いた。ここで、 $a$  は地震水平加

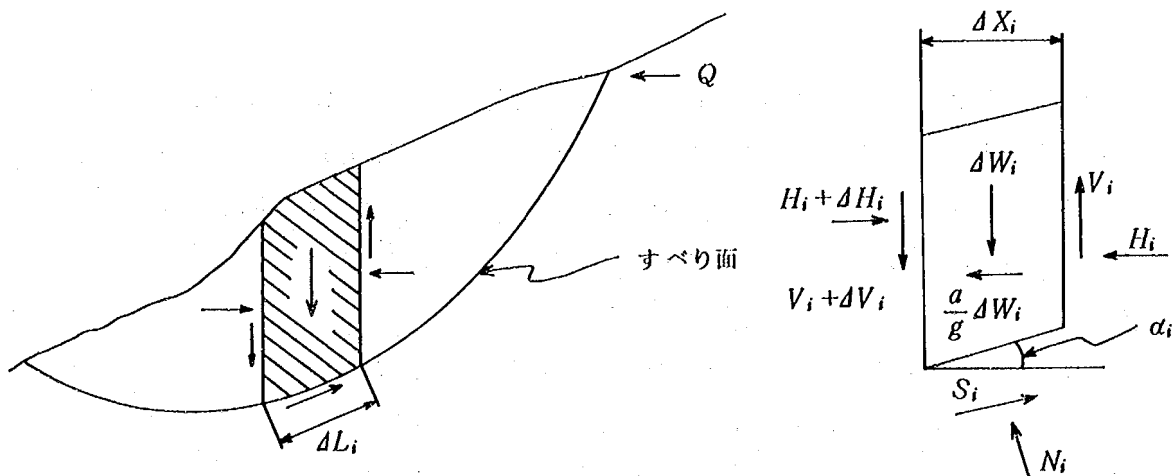


図7-1 Janbu によるすべり解析のモデル

速度 (gal) である。図 7-1 中の  $\Delta W_i$ ,  $S_i$ ,  $N_i$ ,  $\alpha_i$  は各細片の重量, せん断力, 垂直反力, すべり面の傾きを表わし,  $g$  は重力加速度,  $\Delta H_i$ ,  $\Delta V_i$  はそれぞれ水平・垂直方向の不特定内力である。

安全率 ( $F_s$ ) を求める式の誘導の詳細は参考文献<sup>9)</sup>に譲るが, 土塊の粘着力を  $C'$ , 内部摩擦角を  $\phi'$  とし, すべり土塊の上部に働く水平力等の外力  $Q$  をゼロ, また,  $\Delta V_i = 0$  とした場合の安全率は以下の式で表わされる。

$$F_s = f_0 \frac{1}{\sum \frac{a}{g} \Delta W_i + \sum \Delta W_i \cdot \tan \alpha_i} \cdot \sum \frac{C' \Delta L_i \cos \alpha_i + (\Delta W_i - U_i \Delta L_i \cos \alpha_i) \tan \phi'}{\cos^2 \alpha_i (1 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi'}{F_s})}$$

式中の  $f_0$  は, 図 7-2 のようにすべり面の始端と終端を結ぶ直線距離  $L$  と, この直線からすべり面までの最大距離  $d$  との比  $d/L$  により, 図 7-3 から求められる補正係数である<sup>10)</sup>。また,  $U_i$  は各細片のすべり面での間隙水圧であるが, 今回の計算では, 斜面崩壊時およびその後の地盤調査の際にもすべり面付近に地下水等が認められなかったことによりすべて  $U_i = 0$  とした。

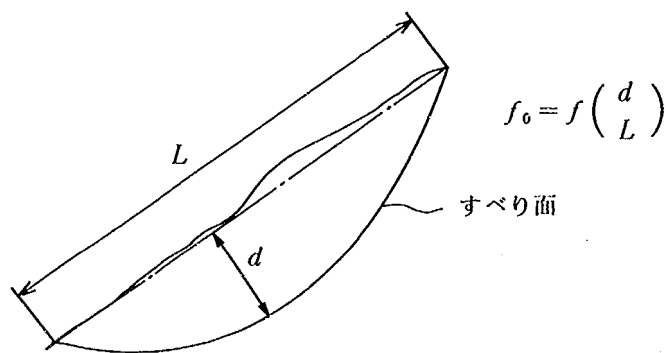


図 7-2 すべり面の形状 ( $d/L$ )

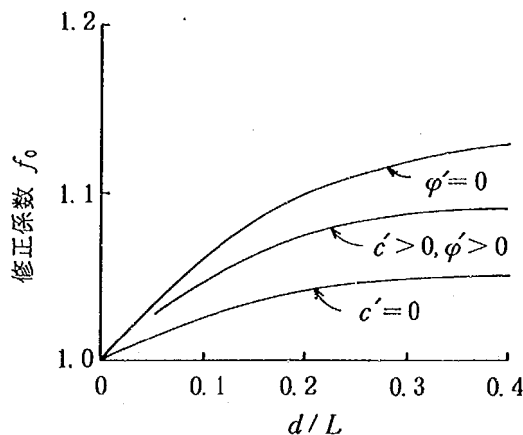


図 7-3 すべり面の形状 ( $d/L$ ) と補正係数 ( $f_0$ ) との関係

### 7.3 検討内容

#### 7.3.1 計算断面

Janbu 式により安全率を計算した断面は, 図 7-4 から図 7-6 に示す合計 14 断面である。各断面は以下に述べる主に 3 つの目的のために設定した。なお, 図中 1, 2, … の丸印のつかない番号は分割要素の節点番号であり, ①, ②, … の丸印のついた番号は要素番号を表わしている。また, 図 7-6 には ( ) でかこんだ節点における最大水平加速度と等最大水平加速度線も記入してある。

##### (1) 経験的に想定されるすべり面での安全率の検討

図 7-4 の①, ⑩および図 7-5 の⑩, ⑪は分割要素に沿って経験的に想定されるすべり面を設定したものであり, これらの断面について安全率を検討する。

##### (2) 斜面の凸部付近にすべり面を想定した場合の安全率の検討

地震応答解析の結果によれば, 図 5-1 ~ 図 5-3 に示したように, 斜面に突部がある場合にはその近傍

図 7-4

静的安定解析に用いる  
想定すべり面（斜面-1）

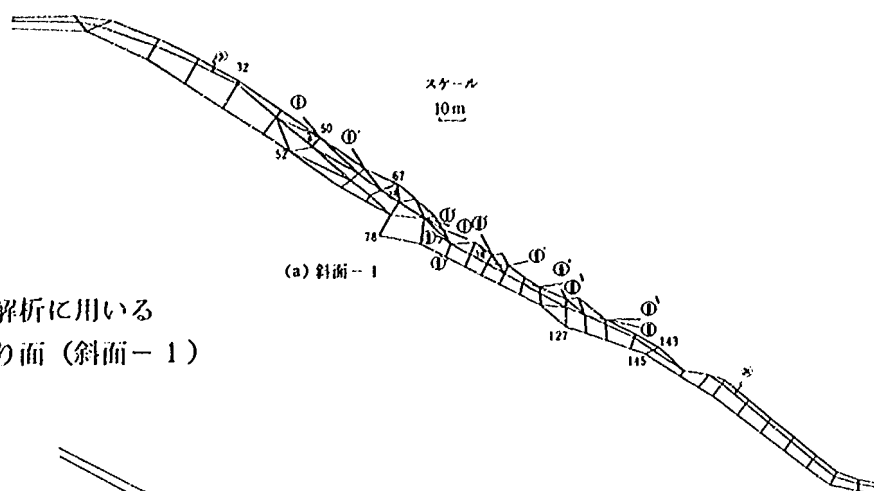


図 7-5 静的安定解析に用いる  
想定すべり面（斜面-2）

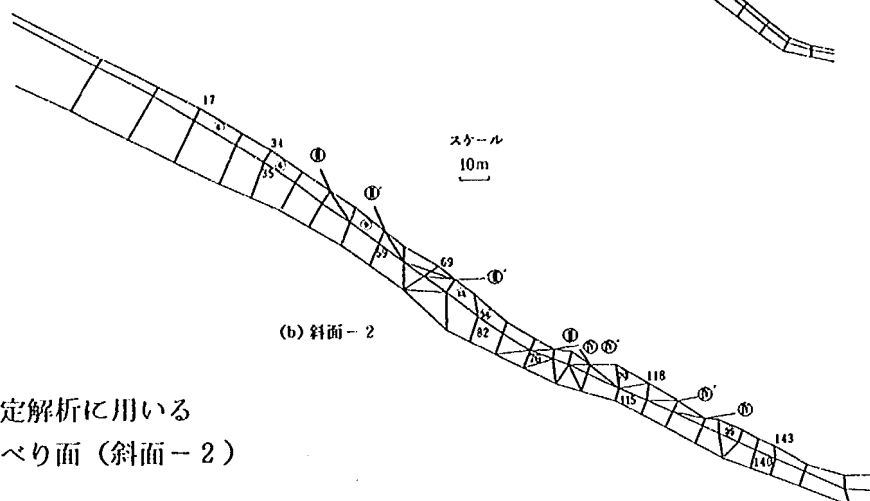
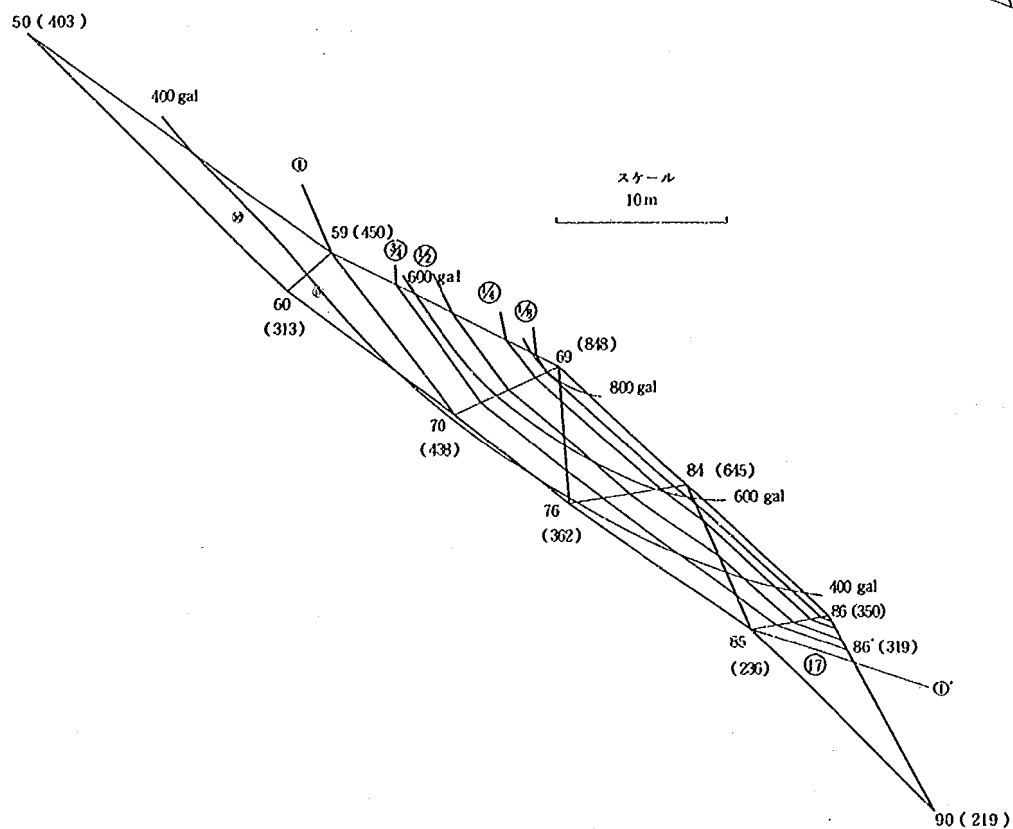


図 7-6 すべり面の深さを变化させた場合の安全率の  
検討（斜面-1の一部を取り出したもの）



で加速度が増幅される傾向がある。このような場合に、加速度が増幅される突起部の周辺で、すべりに対する安全率が減少するかどうかを検討するために、図7-4の①、②、③、④、および図7-5の⑤、⑥の断面にすべり面を想定して安全率を計算した。

### (3) 想定すべり面の深さを変化させた場合の安全率の変化の検討

図7-6の⑦、⑧、⑨、⑩の各すべり面は①のすべり面を基準として、この深さの、それぞれ約 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{3}{4}$ の深さにすべり面を想定した場合に、安全率がどのように変化するかを検討するために設けたすべり面である。

### 7.3.2 各スライスでの水平加速度の推定方法

Janbu式による計算に際しては、各スライスの水平加速度を、(a) 400 gal 一定、(b) 動的応答解析により求められた最大水平加速度の2ケースとした。

ここで、400 gal 一定の加速度を用いる解析は、すべり面法による安全率の計算では、全体に一樣な加速度の値を採用することが多いことを考慮したもので、加速度の強度は、伊豆大島近海地震においては解析地点付近での最大加速度がおおむね400 gal 程度と推定されていることによっている。

また、応答解析による加速度を用いたのは、場所ごとの加速度応答値の違いを考慮した場合に、(a)の方法と比較して、どの程度の差異が生じるかを検討するためである。なお、有限要素法による応答解析では、節点ごとに加速度が計算されるので、これをもとにJanbu式における各スライスごとの最大水平加速度を算定するには、以下の方法によった。

図7-7において、 $a, b, \dots, e$ は有限要素解析における節点名、およびそこでの最大水平加速度 (gal) を示すことにする。スライスA (四辺形) の4つの接点名およびそこでの最大水平加速度は  $A_{ab}, b, A_{de}, e$  である。 $a$  から  $A_{ab}$  までの距離を  $l_{aA}$ 、 $b$  から  $A_{ab}$  までの距離を  $l_{bA}$  とおいて、 $A_{ab}$  における最大水平加速度を距離により内挿して次のように求めた。

$$A_{ab} = \frac{a \cdot l_{bA} + b \cdot l_{aA}}{l_{aA} + l_{bA}}$$

また、各スライスに作用する最大水平加速度は、このようにして求めた4つの節点での最大水平加速度の算術平均値とした。例えば、スライスAでの最大水平加速度 (A) は次のようになる。

$$A = \frac{A_{ab} + b + A_{de} + e}{4}$$

### 7.3.3 土質定数 ( $C, \phi$ ) の推定

Janbu式による計算では、土質定数 ( $C, \phi$ ) を、次の2通りに仮定した。

(a)  $C = 5 \text{ ton/m}^2, \phi = 0^\circ$

(b)  $C = 3 \text{ ton/m}^2, \phi = 30^\circ$

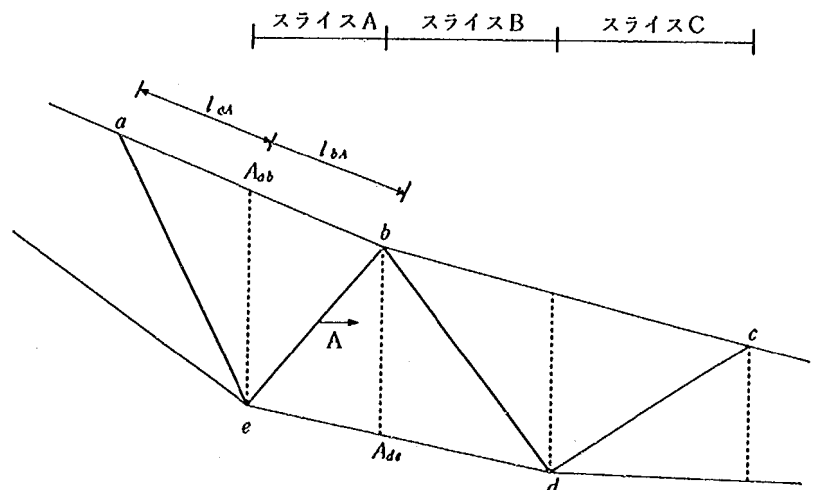


図7-7 有限要素解析における節点とすべり面法におけるスライスのモデル

なお、(a)の値は、6.1で述べたポータブルコーンからの推定値に対応させたものである。また、(b)の値は本七流地区に近い川合野地区における崩壊地での崖錐層の土質試験の結果では、 $C_{uu} \approx 3 \text{ ton/m}^2$ 、 $\phi_{uu} \approx 20^\circ$ の値<sup>13)</sup>が求められていることと、花崗岩地帯での岩盤区分D(崖錐層に相当)では一般に $C = 0 \sim 8 \text{ ton/m}^2$ 、 $\phi = 30^\circ$ <sup>5)</sup>程度と推定されることを参考にして設定したものである。

## 7.4 検討結果および考察

### 7.4.1 応答解析から求めた加速度を用いた場合と一様加速度を用いた場合の安全率の比較

図7-4、図7-5に示したすべり面①、②、③、④に対して、Janbu式により応答解析から求めた最大水平加速度を用いた場合の安全率と400 gal 一様加速度を用いた場合の安全率との関係を整理した結果が図7-8である。土質定数がa)、b)の2種類のケースとも、両者はよい相関を示し、プラスマイナス1割程度のバラツキを許せば、両者はほぼ一致すると考えられる。したがってここに示した範囲では、つまり、すべり面が深さ数m程度で経験的に想定されるような型であり、かつ、平均的な加速度がある程度の精度で推定できる場合には、場所ごとの加速度の違いを詳細に求めなくても、代表的な加速度値を用いることにより、近似的な安定度の評価をすべり面法により行うことができることを示していると言えよう。

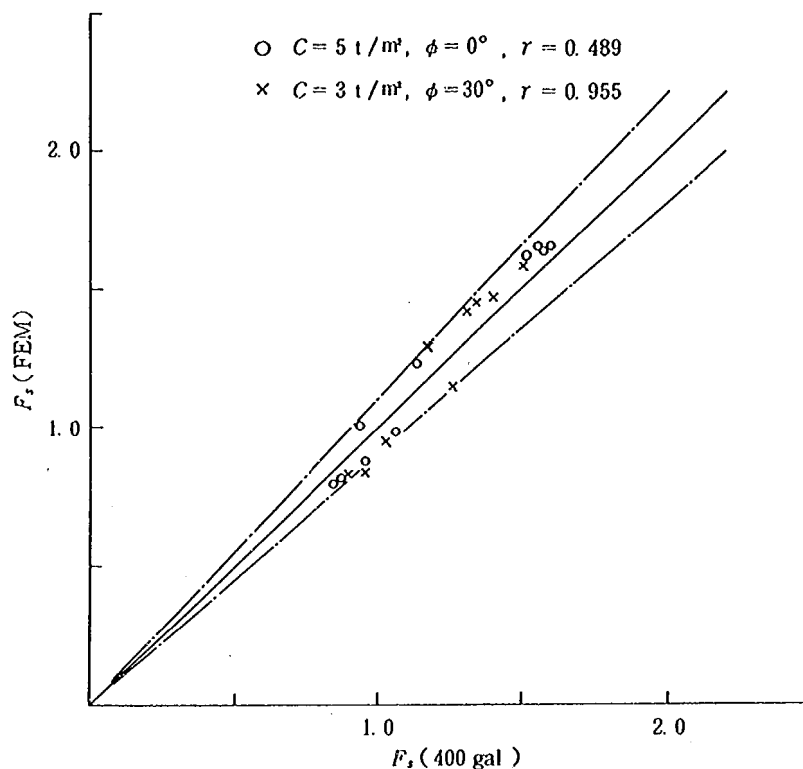


図7-8 地震応答解析から求めた加速度を用いた場合と一様加速度を用いた場合の安全率の相関 ( $r$ は相関係数)

### 7.4.2 崩壊部と非崩壊部での安全率

図7-4、7-5に示した①から④の各断面に対する安全率は表7-1に示す通りであり、これより崩壊部と非崩壊部の安全率を比較検討すると次のようになる。なお、①は、斜面-1の県道上方の崩壊面に沿って設定した断面であり、②は道路下の崩壊面に沿って設定した断面である。また、③と④は斜面-2の非崩壊地において、地層の境界と推定される面に沿って設定した断面である。

この結果によれば、①の安全率は③および④の安全率よりも大きく、この範囲では、ここでの地震時斜面の安定性の評価が比較的妥当なものであることを示している。しかしながら、②の断面については、これが崩壊したにもかかわらず、崩壊しなかった③、④の断面より高い安全率が計算上得られている。この原因としては、地盤条件把握の精度が大きな問題と考えられるが、今後、さらに慎重に検討することが必要とされよう。

表 7-1 斜面-1 および斜面-2 の経験的に  
想定されるすべり面の安全率

| すべり面 | $C = 5 \text{ t/m}^2, \phi = 0^\circ$ の場合 |                | $C = 3 \text{ t/m}^2, \phi = 30^\circ$ の場合 |                |
|------|-------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------|----------------|
|      | FEM                                       | a=400gal       | FEM                                        | a=400gal       |
| ①    | 0.81<br>(1.00)                            | 0.86<br>(0.00) | 0.82<br>(1.00)                             | 0.89<br>(1.00) |
| ②    | 1.22<br>(1.51)                            | 1.13<br>(1.31) | 1.28<br>(1.56)                             | 1.17<br>(1.31) |
| ③    | 1.00<br>(1.23)                            | 0.93<br>(1.08) | 1.00<br>(1.22)                             | 0.93<br>(1.04) |
| ④    | 0.79<br>(0.78)                            | 0.84<br>(0.98) | 0.94<br>(1.15)                             | 1.02<br>(1.15) |

- 注) 1) すべり面は図 7-4, 7-5 を参照  
 2) ( ) 内の数字は①の断面の安全率を 1.0 とした場合の、他の断面における相対的な安全率の値  
 3) FEM, a=400 gal はすべり計算において、それぞれ地震応答解析により求めた加速度を用いた場合、および 400 gal 一様の加速度を用いた場合を示す。

表 7-2 斜面凸部付近にすべり面を  
想定した場合の安全率

| 基本断面 | 安全率(A) |      | 検討断面 | 安全率(B) |      | B/A  |      |
|------|--------|------|------|--------|------|------|------|
|      | a      | b    |      | a      | b    | a    | b    |
| ①    | 0.81   | 0.82 | ①'   | 0.87   | 0.83 | 1.07 | 1.01 |
| ②    | 1.22   | 1.28 | ②'   | 1.64   | 1.41 | 1.34 | 1.10 |
|      |        |      | ②''  | 1.61   | 1.44 | 1.32 | 1.13 |
|      |        |      | ②''' | 1.65   | 1.57 | 1.35 | 1.23 |
| ③    | 1.00   | 0.93 | ③'   | 1.63   | 1.46 | 1.63 | 1.60 |
| ④    | 0.79   | 0.94 | ④'   | 0.98   | 1.14 | 1.24 | 1.21 |

a ;  $C = 5.0 \text{ ton/m}^2, \phi = 0^\circ$  の場合  
 b ;  $C = 3.0 \text{ ton/m}^2, \phi = 30^\circ$  の場合

#### 7.4.3 斜面の凸部付近にすべり面を想定した場合の安全率

斜面の凸部で加速度の大きい付近に、図 7-4, 7-5 に示したように、①', ②', ③', ④', ⑤', ⑥' のすべり面を想定した場合の安全率を表 7-2 に示す。表中の B/A の値は斜面の凸部付近に想定したすべり面での安全率 B をその基本となる経験的な想定すべり面での安全率 A で除した値（例えば、①' の 0.87 を①の 0.81 で除した値 1.07）を示している。したがって、この値が 1.0 より大きな場合は、斜面の凸部付近にすべり面を想定した方が、これより深い位置に従来の経験に基づいて、すべり面を想定した場合よりも相対的に安全率が高いことを示している。

ここでの検討は、すべり面深さが同じ場合を設定しているが、B/A の値はすべて 1.0 以上である。したがって、斜面の凸部付近において加速度応答が局所的に大きくなったとしても、このことが凸部付近の局所的な崩壊を発生させることにはならないことを示していると解釈されよう。

#### 7.4.4 想定すべり面の深さを变化させた場合の安全率の変化

図 7-6 に示したように、すべり面の深さを㊳, ㊴, ㊵, ㊶と变化させた場合の安全率を図 7-9 に示す。応答解析の結果によれば、加速度の値は崖錐層表面ほど大きく、崖錐層底面に近くなるにしたがって小さくなっている。したがって、加速度だけに注目すれば表層崖錐層の浅い部分の安全率の方が、崖錐層全体を対象とした安全率よりも、見かけ上低くなりそうであるが、安定計算の結果では、すべり面の深さを深くするにしたがって安全率は低下している。

この検討では、㊳から①'までの各断面ともに、同一の地盤定数 ( $C, \phi$ ) を持つ崖錐層と仮定しているため、これらの地盤定数の大きさおよび分布が变化した場合についても検討することが必要とされるが、一般には、崖錐層内に著しく強度の差が大きい境界がない限り、崖錐層の底面からすべると考えることができよ

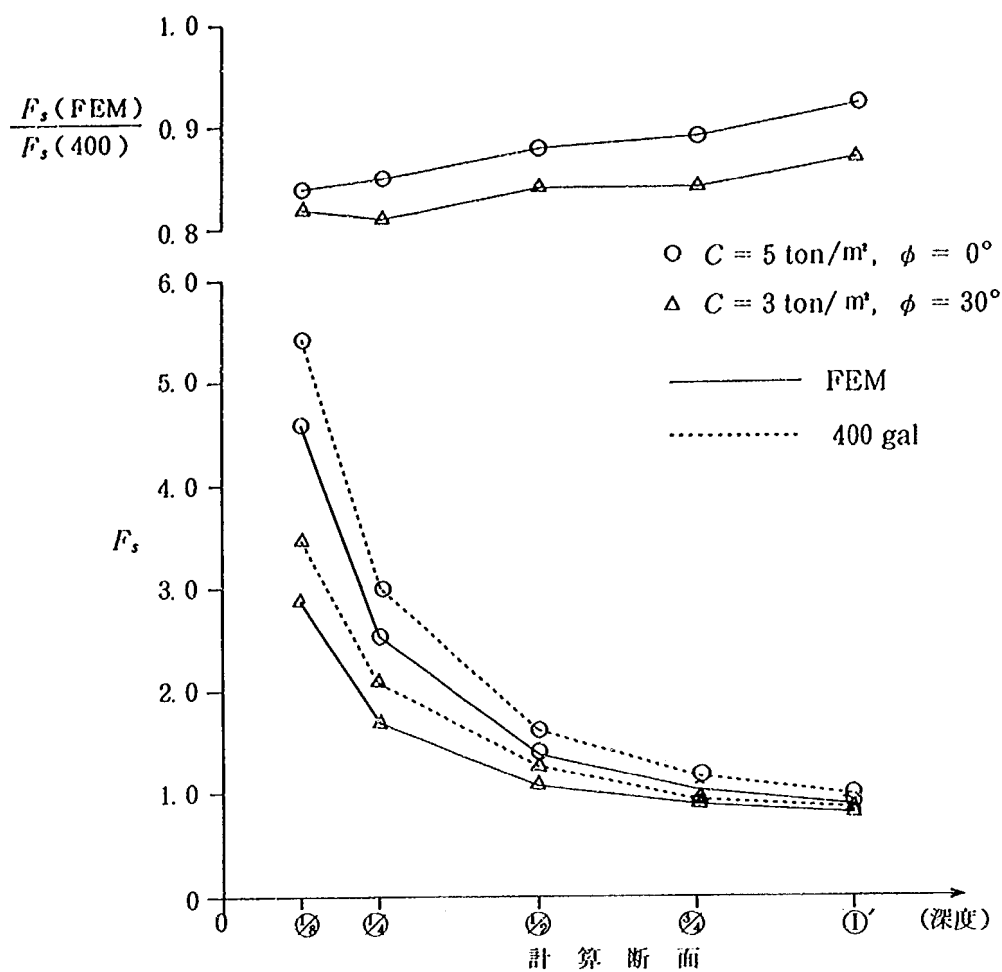


図 7-9 すべり面深さを变化させた場合の安全率の変化

う。事実、七滝地区での崩壊は、深度数 m の崖錐層と強風化層との境界で発生しており、上記の傾向と符合している。

図 7-9 には 7.4.1 に示したような場所ごとに加速度を変化させた場合と、代表値により一様な加速度に置きなおした場合の比較 ( $F_s(\text{FEM}) / F_s(400)$ ) も示してある。すべり面の深さが数 m と比較的深い場合には、7.4.1 に示したように  $F_s(\text{FEM}) / F_s(400) \approx 1.0$  であったが、㉔や㉕断面のような深さが 1 m 程度のごく浅い場合には、加速度の大きさの影響が現われて  $F_s(\text{FEM}) / F_s(400) \approx 0.8$  となり、応答解析からの加速度を用いた方が、一様加速度を用いた場合より約 2 割安全率が低下している。

## 8. 結 論

昭和53年1月14日の伊豆大島近海地震により表土層、崖錐層の崩壊を生じた修善寺～下田線梨本地区の斜面を対象として、地震応答解析により斜面の基本的な振動特性を調査し、安定性の検討を行うとともに、すべり面法による安定性の解析結果との比較検討を行った。本解析の結果は以下のようにまとめることができる。

(1) 地震動加速度の増幅は、水平成分、鉛直成分ともに地山内においては小さく、表面に近い強風化岩層および崖錐堆積層内において著しい。加速度の増幅は表層の地盤条件とともに、地形条件の影響を受け、形状としては大きくみてゆるやかにふくらんだ斜面に、また、その中でも、小さく出っばった凸部において、それぞれ、起伏のない平坦な斜面よりも大きく加速度が増幅される。

(2) 斜面の解析では、形状の効果により、水平方向に加振した場合には水平方向の応答加速度だけでなく鉛直方向の応答加速度が、また、鉛直方向に加振した場合には、鉛直方向の応答加速度だけでなく水平方向の応答加速度が、それぞれ生じる。斜面の安定性を検討するためには、鉛直成分の影響もあるとされており、今後、斜面の解析に際しては、水平方向の入力地震動だけでなく、鉛直方向の入力地震動も考慮することが必要とされよう。

(3) 伊豆大島近海地震による斜面崩壊を検討するために、同地震により解析地点から最も近い位置で採取された新菊川変電所の強震記録を基盤入力とし、表土層、崖錐層の崩壊を生じた斜面-1とこれに隣接する斜面-2の応答解析を行った。この結果によれば、斜面形状に起伏が少なく、また、崖錐層の厚さもおおむね一様な斜面-2では、地盤に生じる最大せん断ひずみおよび最大せん断応力がともに斜面に沿って、なだらかに変化するのに対して、形状および表層の厚さが変化する斜面-1では、このような地形および地盤条件の変化に対応して、最大せん断ひずみおよび最大せん断応力が特定箇所で大きくなる傾向がある。

(4) 動的解析より求めた地震時の最大せん断応力  $\tau_f$  に対する土のせん断強度  $\tau_f^R$  (スウェーデン式サウンディング調査結果および、静的コーン貫入試験結果から推定した) の比  $(\tau_f/\tau_f^R)$  として地震時のすべり係数  $S_f$  を定義すると、崩壊した崖錐層では崩壊しない崖錐層に比較して相対的に  $S_f$  が大きい。

(5) 常時におけるすべり係数  $S_f$  (常時の場合には、斜面の自重による最大せん断応力を  $\tau_f$  とした) は、斜面-1、斜面-2ともに地震時におけるすべり係数  $S_f$  よりも小さい。ただし、常時において  $S_f$  が周辺に比較して相対的に大きい箇所は、地震時にも  $S_f$  が大きくなっており、もともと常時に不安定な箇所が地震により崩壊しやすいことを示していると考えられる。

(6) 動的解析により求めた箇所ごとに異なる加速度値を用いて、Janbuの方法により、すべりに対する安全率を求めた場合と、一様な加速度を用いて同じすべりに対する安全率を求めた場合を比較すると、両者の安全率には著しい違いはない。このことから、すべり面の深さが本解析で対象としたように数m程度で一般的な形状の斜面では、場所ごとの加速度の違いを詳細に求めなくても、崖錐層内の代表的な加速度値を用いることにより、すべり面法により安全度の評価を行うことができると考えられる。

(7) 動的解析の結果によれば、斜面の凸部付近において、加速度の増幅が局所的に大きくなり得ることが

示されているが、すべり面をこのような凸部の付近に想定した場合（最大の深さは崖錐層の底面）と、崖錐層の形状に沿って、その底面近くに経験的に想定した場合のそれぞれの安全率をすべり面法によって求めた結果、安全率は後者の方が前者よりも小さくなった。したがって、斜面の凸部付近において加速度応答が局所的に大きくなったとしても、このことがすぐ、この付近の崩壊を招くことにはならないと考えられる。

(8) 動的解析の結果求めた崖錐層内の加速度値を用いて、すべり面の深さ（いずれも崖錐層内）を変化させて、すべり面法によって安全率を求めた。加速度の値は、一般に崖錐層表面ほど大きく、崖錐層底面になるにつれて小さいため、加速度だけに着目すれば、浅い位置にすべり面を想定した場合の方が、見かけ上安全率が低くなりそうであるが、安定計算の結果では、想定すべり面の深さを深くするにつれて安全率は低下した。解析に用いた地盤定数の分布が変化した場合についても検討することが必要とされるが、一般には、崖錐層内において著しく強度が変化しない限り、崖錐層の底面からすべるという計算結果になる。

謝

辞

本調査に際しては、静岡県土木部道路維持課ならびに同下田土木事務所の多大な御協力を賜わった。とくに、下田土木事務所天城道路整備課杉浦勉課長には、被害状況の確認ならびに地盤調査に関し、大変お世話になった。ここに記し、厚くお礼申し上げる次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路の震災対策に関する調査報告(I)——1978年伊豆大島近海地震災害——，道路震災対策委員会，昭和54年3月。
- 2) 日本道路協会：道路の震災対策に関する調査報告(II)——道路構築物の被災予測に関する研究——，道路震災対策委員会，昭和54年9月。
- 3) 東伊豆道路震災対策検討委員会：東伊豆道路震災対策検討委員会報告書，昭和54年3月。
- 4) 建設省土木研究所：地震災害予測のための地盤種判定等調査報告，土木研究所資料第1592号，昭和55年6月。
- 5) 高速道路調査会：基礎構造に関する調査研究——昭和48年度報告書，昭和49年2月，p. 110。
- 6) 藤井達也：道路の防災・震災対策，道路，昭和53年9月。
- 7) 安江朝光，友町雄二：地震と斜面崩壊，道路，昭和53年9月。
- 8) 建設省土木研究所：1978年1月伊豆大島近海地震調査概要，土木研究所資料，第1346号，昭和53年2月。
- 9) 石原研而，吉田喜忠，長尾哲：崩壊地における不撓乱資料の強度試験，東伊豆道路震災対策委員会報告書，東伊豆道路震災対策委員会，昭和54年3月。
- 10) 例えば，赤井浩一：土質力学，朝倉書店，昭和41年5月，pp. 245～250。
- 11) 土質工学会：土質調査法，昭和47年3月。
- 12) 大橋昭光，岩崎敏男，川島一彦：墓石の転倒状況から推定した1978年伊豆大島近海地震の地震動強度，土木技術資料，Vol. 20-11，昭和53年11月。
- 13) 建設省土木研究所急傾斜地崩壊研究室：伊豆大島近海地震による斜面崩壊現地調査報告書，昭和53年11月。
- 14) 大草重康，龍岡文夫，谷口栄一他：1978年1月伊豆大島近海の地震による見高入谷地区斜面崩壊に関する調査，土木研究所資料第1432号，建設省土木研究所，昭和53年12月。
- 15) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録 (No. 2)，土木研究所彙報，Vol. 33，昭和53年10月。
- 16) 芥川真知，吉中龍之進，安江朝光：地震災害と地形・地盤——山地における事例を中心として，土と基礎，Vol. 28，No. 6，昭和55年6月。
- 17) 岩崎敏男，川島一彦，森本徹：斜面の地震応答特性の一解析，第35回土木学会学術講演会，昭和55年9月。
- 18) 岩崎敏男，龍岡文夫：地震応答解析に基づく人工島の耐震安定性解析，土木研究所資料，第1058号，建設省土木研究所，昭和51年10月。
- 19) Chang, F. K.: An Empirical Interpretation of the Effects of Topography on Ground Motion of the San Fernando, California Earthquake, 9 February 1971, Miscellaneous Paper S-76-1, Waterways Experimental Station, 1976.

- 20) Sesma, F. J. and Rosenblueth, E: Ground Motion at Canyon of Arbitrary Shape under Incident SH Waves, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 7, 1979.
- 21) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 高木義和: 地盤の動的変形特性に関する実験的研究(II) —— 広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性 ——, 土木研究所報告, 第 153 号, 建設省土木研究所, 昭和55年 3 月。
- 22) Lawrence, L. D. and West, L. R.: Observed Effects of Topography on Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 63, No. 1, pp. 283-293, 1973.
- 23) Mostaghel, N. and Nowroozi, A. A.: Earthquake Response of Hills, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, No. 6, pp. 1733-1742, 1975.

地震応答解析による沿道斜面  
の耐震性の検討

土研資料第1600号  
昭55年7月(1980)  
岩崎敏男・川島一彦  
安江朝光・仲野公章

キーワード 斜面崩壊, 地震, 地震応答解析

**要旨** 本報告は、伊豆大島近海地震により表土層、崖錐層の崩壊を生じた修善寺～下田線梨本地区の斜面を取り上げ、数値解析による地震応答解析法により、斜面の基本的な振動特性を調査し、安定性の検討を行うとともに、すべり面法による安定性の解析結果との比較検討を行った結果をとりまとめたものである。



郵便はがき

二十  
円切  
手  
さい  
は  
を  
は  
い

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

地震防災部振動研究室御中

No. 094

No. 094

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 1600 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名 印