

土 木 研 究 所 資 料

土木研究所における高密度強震観測システム ——(3)沼津地区の観測システム——

昭和59年 9 月

建設省土木研究所
地震防災部・振動研究室

Copyright © 1984 fiscal year 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 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ってはならない。

土木研究所における高密度強震観測システム

——(3)沼津地区の観測システム——

振動研究室	前	室	長	荒	川	直	士*
	室		長	佐	々	木	康
	前主任研究員			川	島	一	彦**
	研	究	員	田	村	敬	一
				相	沢		興
				高	橋	和	之

要旨 土木研究所における高密度強震観測システム — (3) 沼津地区の観測システム —

既往の強震観測記録の解析結果によれば、構造物の耐震設計に重要な周期範囲の地震動特性は、地震の発生機構、震源から観測地点までの伝播経路の特性および観測地点付近の局地的な地形・地盤条件の3者に強く影響されることが明らかになっている。しかしながら、上記諸要因と地震動特性との関係を把握するためには、これまでのように散在する観測点による観測では不十分であり、特定地域に多数の強震計を系統的に配置する高密度強震観測が必要とされている。このような背景のもとに、建設省土木研究所では昭和56年度を初年度とする4箇年で、地震予知連絡会が指定した「観測強化地域」の1つである駿河湾沿岸の相良地区、焼津地区、沼津地区および松崎地区の4箇所において高密度強震観測場の設置を進めている。

本資料は、昭和58年度に設置を完了した沼津地区における高密度強震観測システムの概要を紹介するものである。

キーワード：高密度強震観測、地震動、耐震設計

* 現 日本道路公団 東京第一建設局建設第二部 調査役

** 現 建設省土木研究所 地震防災部耐震研究室 室 長

ま え が き

既往の強震観測の解析結果によれば、構造物の耐震設計に重要な 0.1 ～ 2 秒程度の周期範囲の地震特性は、地震の発生機構、震源から観測地点までの伝播経路の特性および観測地点付近の局地的な（10 m ～ 1 km 程度の範囲）地形・地盤条件の 3 者に強く影響されることが明らかになっている。このうち、地震動におよぼす局地的な地形・地盤条件の影響の解明は、既往の地震被害が地形・地盤条件の変化部に多く発生している事実から工学的には、最も重要な研究課題の 1 つである。しかしながら、上記諸要因と地震動特性との関係を把握するためには、これまでのように散在する観測点による観測では、不十分であり、特定地域に多数の強震計を系統的に配置する高密度強震観測が必要とされている。これにより、今後建設予定の吊橋、沈埋トンネル等の長大構造物の設計地震力の評価を適切に行うとともに、道路施設、ライフライン施設等の耐震設計および耐震性評価手法の開発、マイクロゾーニング手法の開発等に大きく貢献すると考えられる。

このような背景のもとに、建設省土木研究所では、地震動におよぼす地形・地盤条件の影響の解明を目的として、昭和 56 年度を初年度とする 4 箇年で静岡県駿河湾に沿った相良地区、焼津地区、沼津地区および松崎地区の 4 箇所に高密度強震観測場を建設する計画を立て、現在までに相良地区（昭和 56 年度）、焼津地区（昭和 57 年度）および沼津地区（昭和 58 年度）の設置を完了した。

本資料は、昭和 58 年度に設置を完了した沼津地区における高密度強震観測システムの概要を紹介するものである。

昭和 59 年 9 月

建設省土木研究所 地震防災部振動研究室

前 室 長 荒 川 直 士*

室 長 佐々木 康

前 主任研究員 川 島 一 彦**

研 究 員 田 村 敬 一

相 沢 興

高 橋 和 之

* 現 日本道路公団 東京第一建設局建設第二部 調査役

** 現 建設省土木研究所 地震防災部耐震研究室 室 長

目 次

まえがき

1. 高密度強震観測	1
1.1 高密度強震観測の背景	1
1.2 土木研究所における高密度強震観測	2
2. 観測地点の概要	3
2.1 地形・地盤条件	3
2.2 観測網	3
3. 観測システム	14
3.1 基本設計	14
3.2 観測機器	15
4. 強震計の設置	23
4.1 観測小屋の概要	23
4.2 強震計の設置箇所	23
謝 辞	34
参考文献	35
付 属 資 料	
1. 室内土質試験結果	37
2. 観測小屋周辺の平面図	43
3. 相良地区高密度強震観測場における観測記録例	49

1. 高密度強震観測

1.1 高密度強震観測の背景

地震工学の分野においては、各種の構造物とその周辺地盤上に、工学的強震計を設置し、地震時におけるこれらの動的な振動応答を直接測定するために強震観測を行っている。工学的強震計のほとんどは加速度計で、 $\pm 0.5\text{ G}$ ～ $\pm 1\text{ G}$ までの最大加速度を測定できるものが多い。工学的強震計が設置されたのは昭和30年代からであるが、昭和39年の新潟地震により、強震記録の有用性が認識されて以降急速に設置数を増し、現在では設置台数は1200台を越えている。

強震観測の一種には、特定地点の近傍で鉛直方向または水平方向に複数の地震計を展開する群列強震観測がある。我が国における群列強震観測の例は1934年にまでさかのぼることができるが、本格的に実施されたのは1959年以降であって、現在では約100地点で実施されている。これらは主として構造物の地震応答の観測を目的としたものであって、地震の発生機構、伝播経路、局地的条件が地震波形に及ぼす影響を観測することを目的としたものは少ない。

現在までの地震観測による記録の蓄積と、地震学、地震工学の発達とによって、地震動の特性が地盤により異なること、特に工学的に重要な短周期地震動の特性が、地震の発生機構、震源から観測地点までの伝播経路の特性および観測地点付近の局地的条件に強く影響されることが明らかになってきたが、同時に、これら諸要因と地震動の特性との関係を把握するためには、これまでの散在する観測点によるものではなく、特定地域に多数の強震計を系統的に配置する高密度強震観測の必要性が痛感されるに至った。

以上の背景の下に、1977年1月インドで開催された国際地震工学会（IAEE）主催の第6回世界地震工学会議の実行委員会において、ユネスコその他の機関の支援のもとに、高密度強震観測に関する国際作業部会の設置が決議された。その後この決議が国際地震学地球内部物理学協会（IASPEI）に伝わり、IASPEIも国際作業部会の主催者に加わることとなった。

高密度強震観測に関する国際作業部会は、世界16箇国からの参加者を得て、1978年5月米国ハワイ州のホノルルで開催されたが、これに先立って我が国でも、日本学術会議地震工学研究連絡委員会に高密度強震観測作業部会が設けられ、国際作業部会への参加準備を整えるとともに国際作業部会終了後も引き続き、国内における高密度強震観測計画の作成や関係各機関との連絡調整を行っている。

国際作業部会においては、今後10年間に大地震発生の可能性が高い地域として、世界中から28箇所を選び出した。この中には、我が国の東北地方東部、駿河湾伊豆半島地区、中部地方西部の3地域が含まれており、中でも駿河湾伊豆半島地区は、上記28箇所の中でも大地震発生の可能性が最も高い6地域に入っている。また、国際作業部会は横ずれ断層（Strike Slip Fault）、逆断層（Subduction Thrust Fault）および縦ずれ断層（Dip Slip Fault）のそれぞれごとに地震発生機構、伝播経路の影響を観測するための代表的計器配置計画と、局地的条件の影響を観測するための各種の代表的計器配置計画の推進と調整のため、IAEEとIASPEIの協力のもとに、国際高密度観測評議会（ISMAC）を設置するよう求めた。

我が国では、日本学術会議地震工学研究連絡委員会の高密度強震観測作業部会が中心となって、観測計画がまとめられている。この計画は、1) 高密度強震観測システムの開発、2) 地震発生機構と伝播機構の影響解明のための高密度強震観測および解析、3) 局地的な地形・地盤条件の影響解明のための高密度強震観測および解析の三つからなり、1)の課題は理学、工学両分野で、2)の課題は理学分野で、3)の課題は工学分野で担当することとしている。また、この計画には、北海道大学工学部、東京大学地震研究所、東北大学・名古屋大学の各理工学部、京都大学防災研究所、北海道開発局土木試験場、気象庁気象研究所、科学技術庁国立防災科学技術センター、建設省土木研究所および建築研究所、運輸省港湾技術研究所が、それぞれ分担を定めて参加している。また、昭和55年4月24日に日本学術会議第79総会において「高密度強震観測の推進について」の勧告が提案・可決され、昭和55年5月12日に内閣総理大臣へ勧告が出されている。

1.2 土木研究所における高密度強震観測

構造物の耐震設計法の合理化を図るためには地盤条件に応じた地震動の特性を正しく把握することが重要であることを認識し、土木研究所では昭和32年以来、橋、ダム、河川堤防、堰、地下街、沈埋トンネル等各種の公共土木施設とそれらの周辺地盤上において強震観測を進めている。昭和59年3月現在で土木研究所が所掌する強震観測（SMAC型強震計）は、約150地点、300台となっている。また、昭和45年以後、東京湾、大阪湾、伊勢湾などの大規模特殊事業計画地域において合計7地点で深さ120m程度までの鉛直群列強震観測を実施している。

しかし、今後建設予定の吊橋、沈埋トンネルのような長大な構造物の設計地震入力の評価、都市内における道路施設網、運輸施設網、エネルギー供給施設等をシステムとして捉えた場合のネットワークの地震災害危険度の評価、さらには、地震防災計画立案の基本資料となる合理的なマイクロゾーニング手法の開発等を図るためには、地震動におよぼす地形・地盤条件の解明が強く必要とされるに至っている。

このような背景のもとに、土木研究所では、前節に示した高密度強震観測計画の一環として、昭和56年度を初年度とする4箇年間で、静岡県の相良地区、焼津地区、沼津地区および松崎地区の4箇所に、1箇所当たり約53,000千円、合計約212,000千円をもって高密度強震観測場を建設する予定としている。本資料は、この計画に基づき昭和58年度に設置完了した沼津地区の高密度強震観測場の概要をとりまとめたものである。

2. 観測地点の概要

2.1 地形・地盤条件^{7), 8)}

沼津地区高密度強震観測場（図2.1参照）は沼津市の西部に位置し、愛鷹山の山裾から浮島ヶ原の低地を横断し、千本松原の砂丘に至る地区に展開されている。浮島ヶ原は図2.2に示すように北を富士山および愛鷹山麓、また、南を海岸砂州に挟まれた沼津から吉原に至る東西方向約15 km、南北方向1.5～2.5 kmの細長い沖積低地である。浮島ヶ原の標高はほとんど海拔2.5 m以下であり、特に、東田子の浦駅付近では海拔1 m以下となっている。浮島ヶ原は海岸砂州の背後に閉じ込められた入海の跡であるとされており、近年に至るまで沼沢地が残在していた。浮島ヶ原の南北方向の地質断面図を示すと、図2.3のようになる。すなわち、表層部は10～15 mの厚さで有機質土で覆われており、その下には砂礫、海成砂およびシルトの互層、さらにその下には海成砂層が厚く堆積している。基盤は愛鷹山麓をつくる凝灰角礫岩であり、東田子の浦付近では地表面下160 m付近に存在するとされている。

地中地震計の設置に伴い、図2.1に示したNa 3地点で深度10 m、32 mおよび60 m、Na 10地点で深度32 m、Na 11地点で深度32 m、Na 14地点で深度11 mの合計6本のボーリング調査を行った。このうち、Na 3地点では、当初、深度30 mおよび60 m付近の2箇所に地中地震計を設置する予定としていたが、深度60 mのボーリング孔の孔壁が掘削後の湧水によって崩壊したために60 mまでの土質柱状図を参照の上、地中地震計の埋設深度を地質条件の変化部に当る深度10 mおよび32 mの2箇所に変更した。なお、昭和59年1月現在で湧水の水頭および流量は、それぞれ、GL+5.20 mおよび100 l/分程度であることが確認された。土質柱状図および室内土質試験結果は、それぞれ、図2.4および付属資料1に示すとおりである。図2.4より、Na 3、Na 10およびNa 11地点では、有機質土、粘土および狭在する砂から成る軟弱層が6～7 m続き、それ以深は、主として、よく締った砂層および砂礫層となっていることがわかる。なお、Na 3およびNa 11地点では30 m付近に比較的軟らかいシルト層が存在することが認められる。また、Na 14地点では、地表面下10 m付近までローム層が続き、それ以深は砂礫層となっている。この砂礫層は愛鷹山の岩盤線に連なると考えられる。今回のボーリング調査結果および既往のボーリング資料⁹⁾より沼津地区高密度強震観測場の南北方向の地質断面図を模式的に示すと、図2.5のようになる。また、本地区の立体的な地盤構成は図2.6に示すとおりである。

2.2 観測網

前節で示したような地形・地盤条件を考慮して、図2.1および図2.7に示すように、愛鷹山の山裾から海岸砂丘に至る地盤条件の変化する方向のNa 5、Na 14、Na 4、Na 13、Na 3、Na 10、Na 2、Na 6およびNa 1地点とこれに直交するNa 7、Na 8およびNa 9地点を中心とし、これにNa 11およびNa 12地点を加えた合計14箇所に強震計を配置した。このうち、Na 14地点では愛鷹山の岩盤線に連なると考えられる地表面下11 mの砂礫層中に地中地震計を設置した。また、Na 3地点では地表の他に地表面下10 mおよび32 mの2箇所に、Na 10およびNa 11地点では地表の他に地表面下32 mに地中地震計を配している。本地区は昭和59年2月に設置を完了し、3月22日より観測を開始した。



図 2.1 沼津地区高密度強震観測場

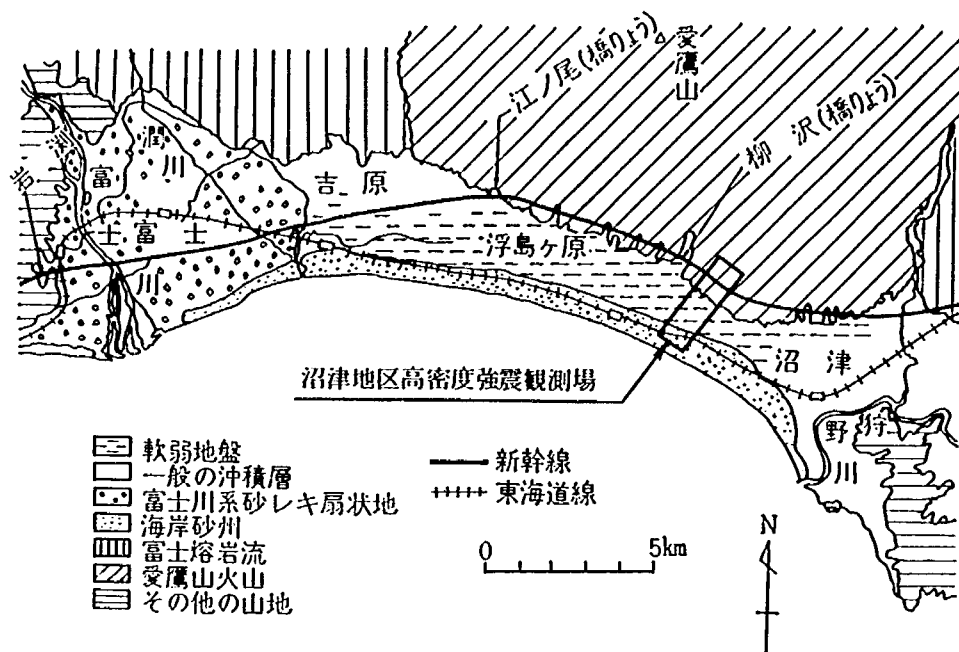
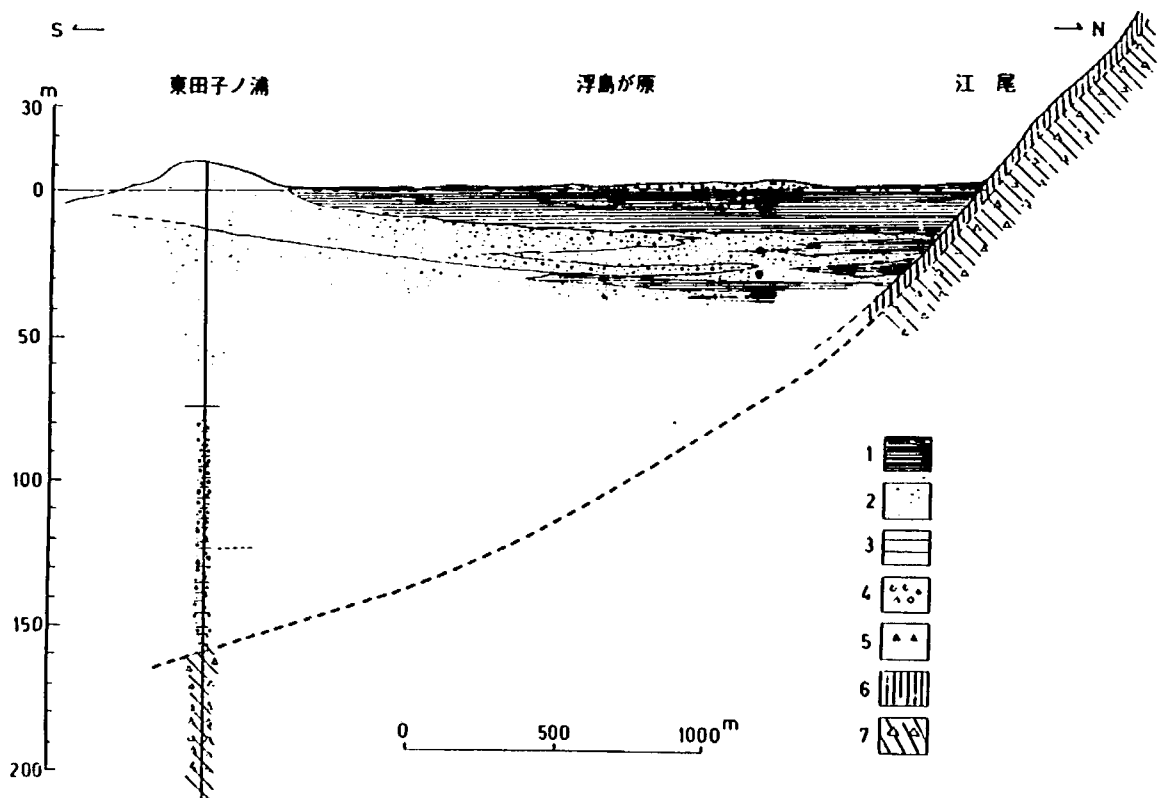
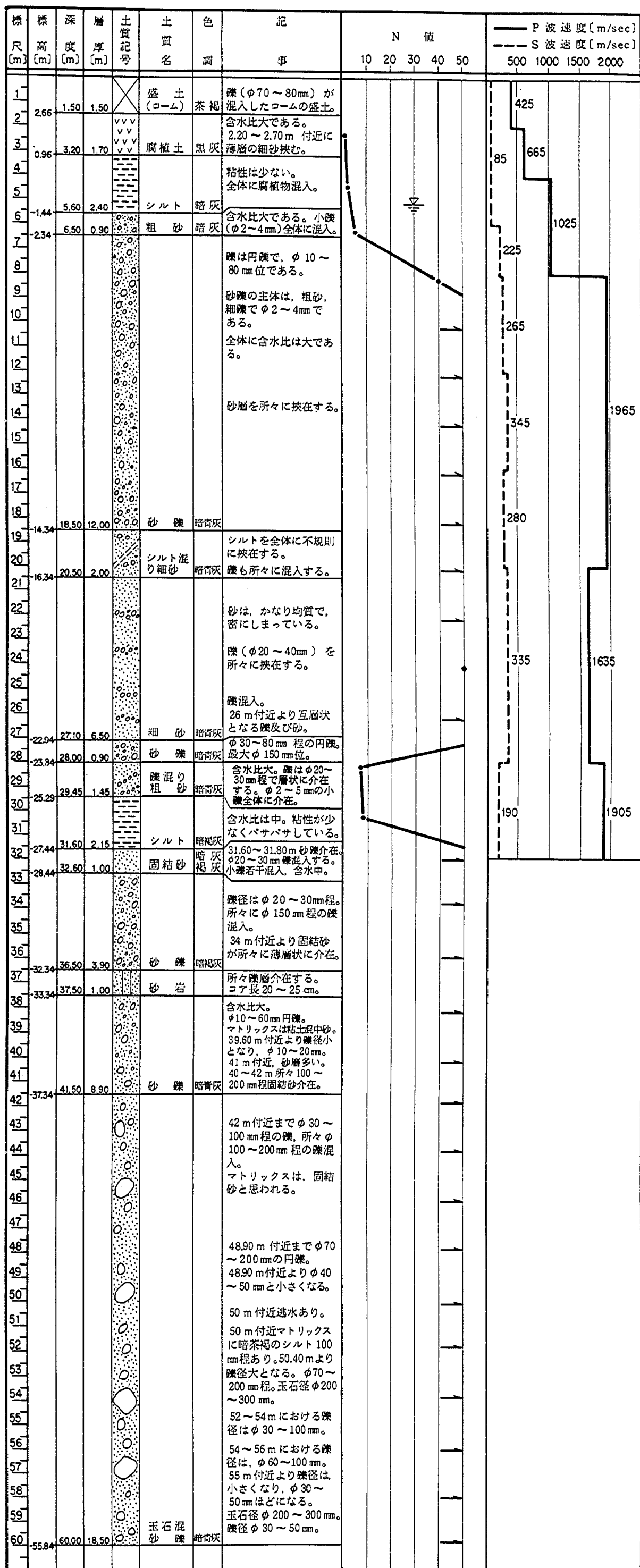


図 2.2 浮島ヶ原周辺の地盤条件(文献7)に加筆)



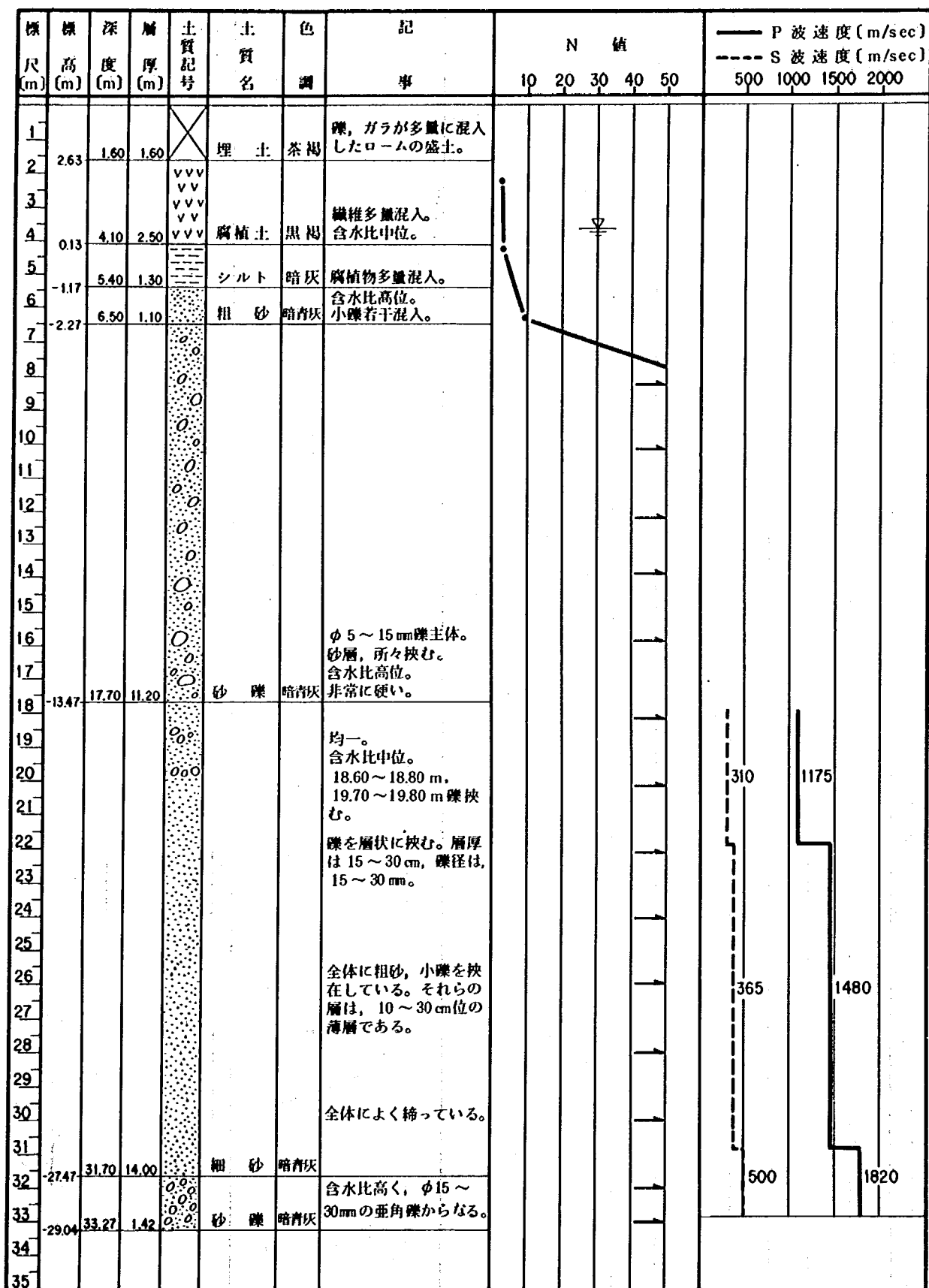
1: 有機質シルト, 粘土, 2: 砂, 3: シルト, 4: 礫, 5: 火山礫, 6: ローム, 7: 凝灰角礫岩

図 2.3 浮島ヶ原の地質断面図(文献8)による)



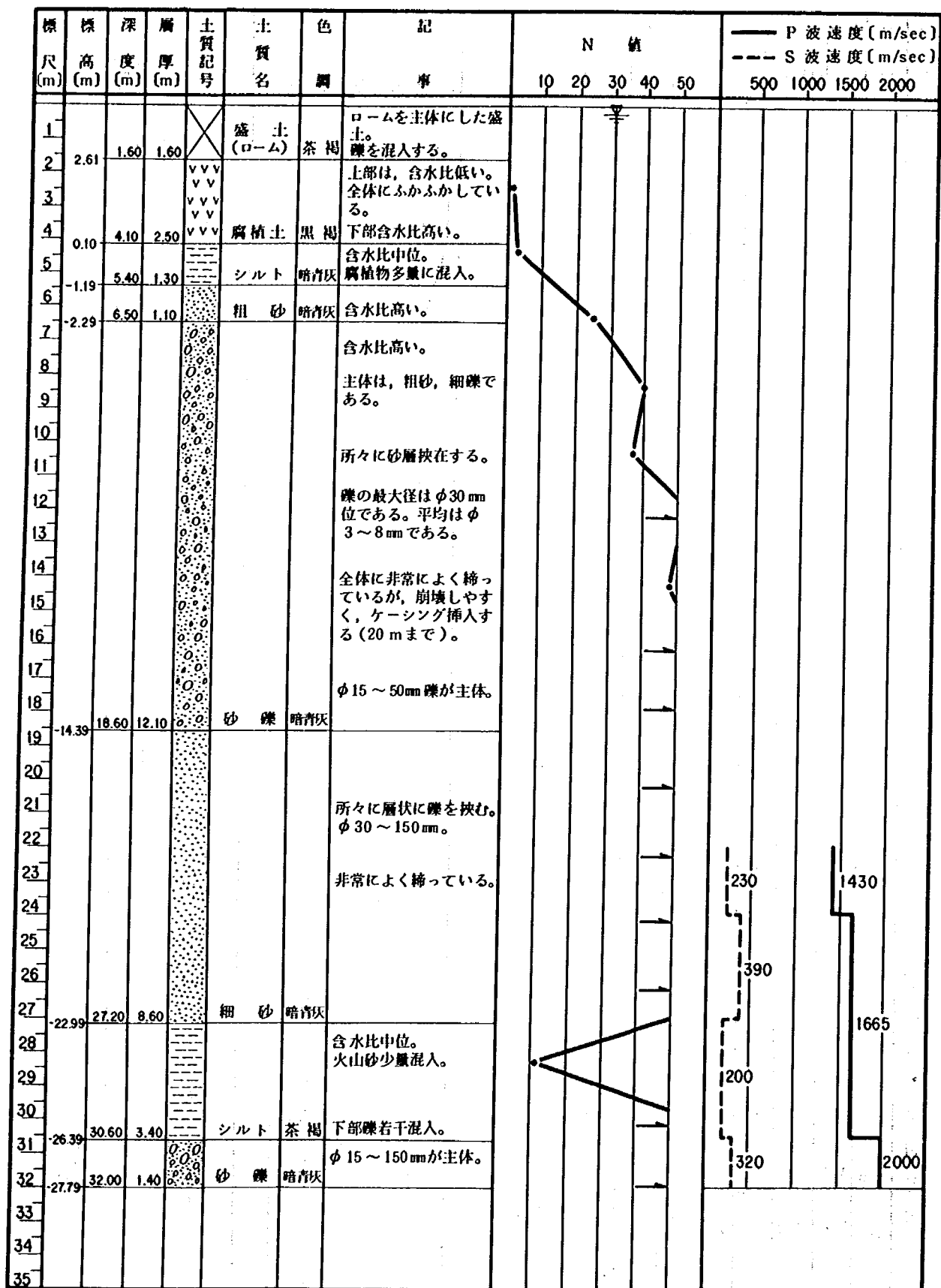
(a) No.3 地点

図2.4(1) 土質柱状図



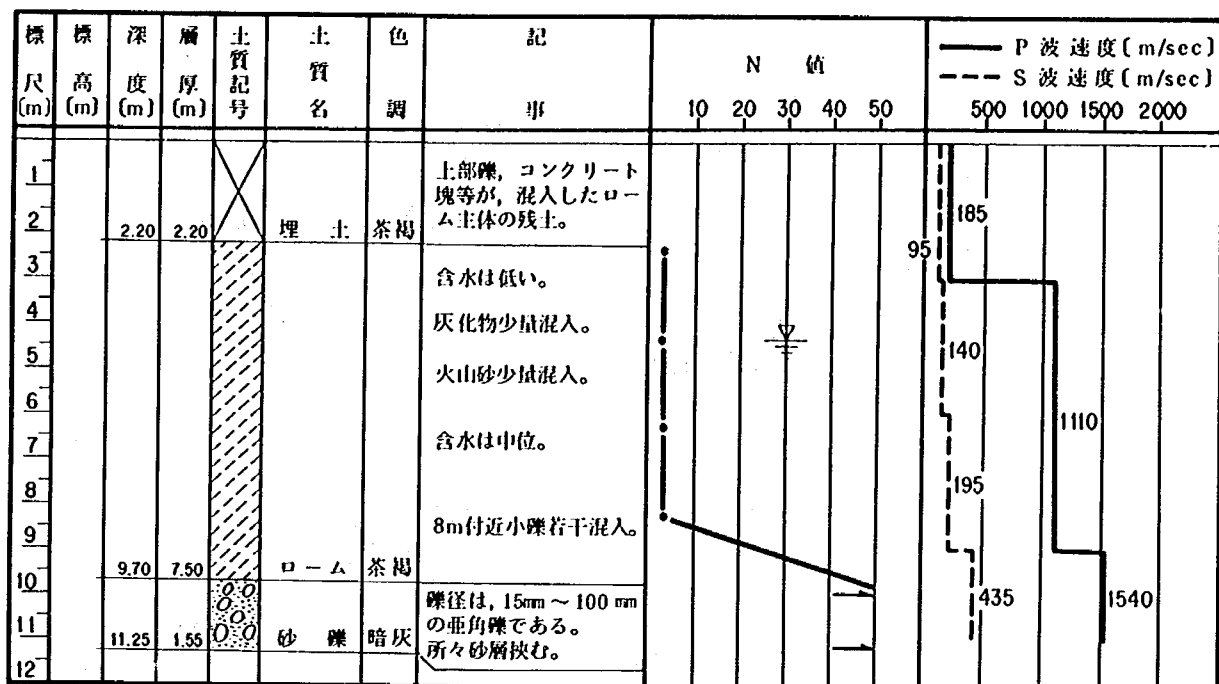
(b) No.10 地点

図2.4(2) 土質柱状図



(c) No.11 地 点

図2.4(3) 土 質 柱 状 図



(d) No.14 地 点

図2.4(4) 土 質 柱 状 図

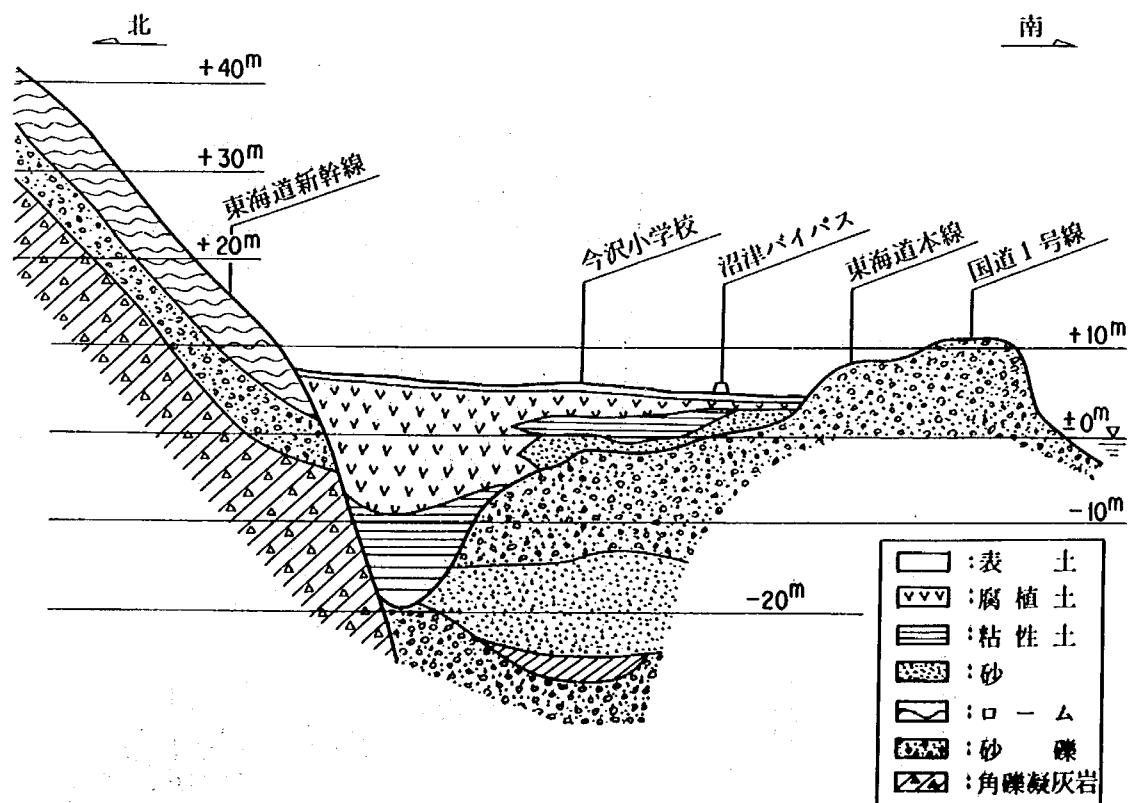
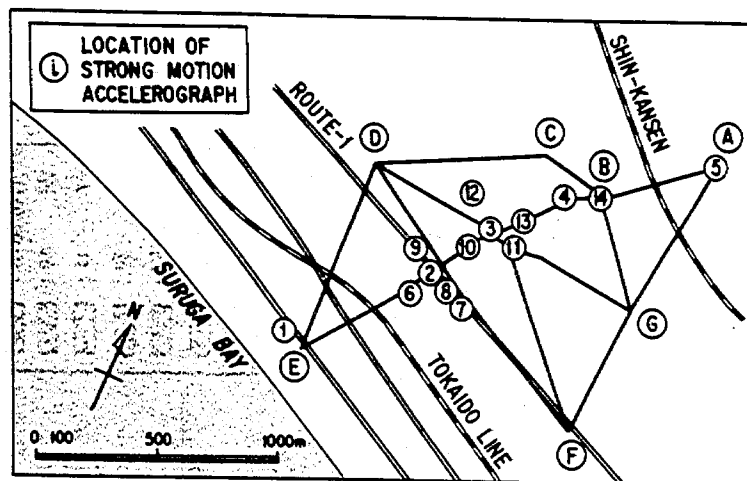


図 2.5 沼津地区高密度強震観測場付近の地質断面図



	TOP SOIL, ORGANIC MATERIALS
	CLAY
ALLUVIUM	GRAVELS
	SAND
DGL	GRAVELS
DLL	LOAM
DG2	GRAVELS

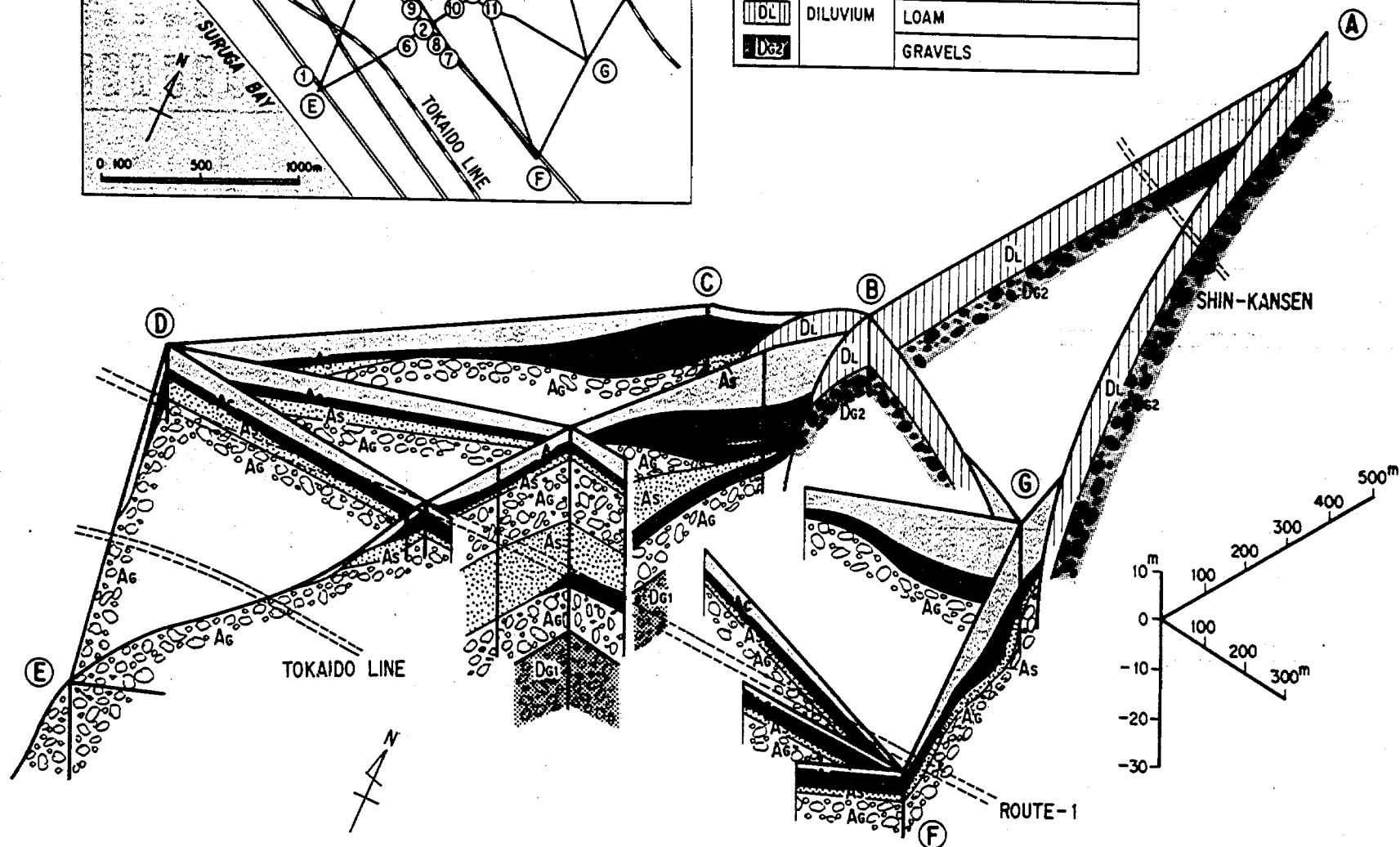


図 2.6 沼津地区高密度強震観測場の地盤構成

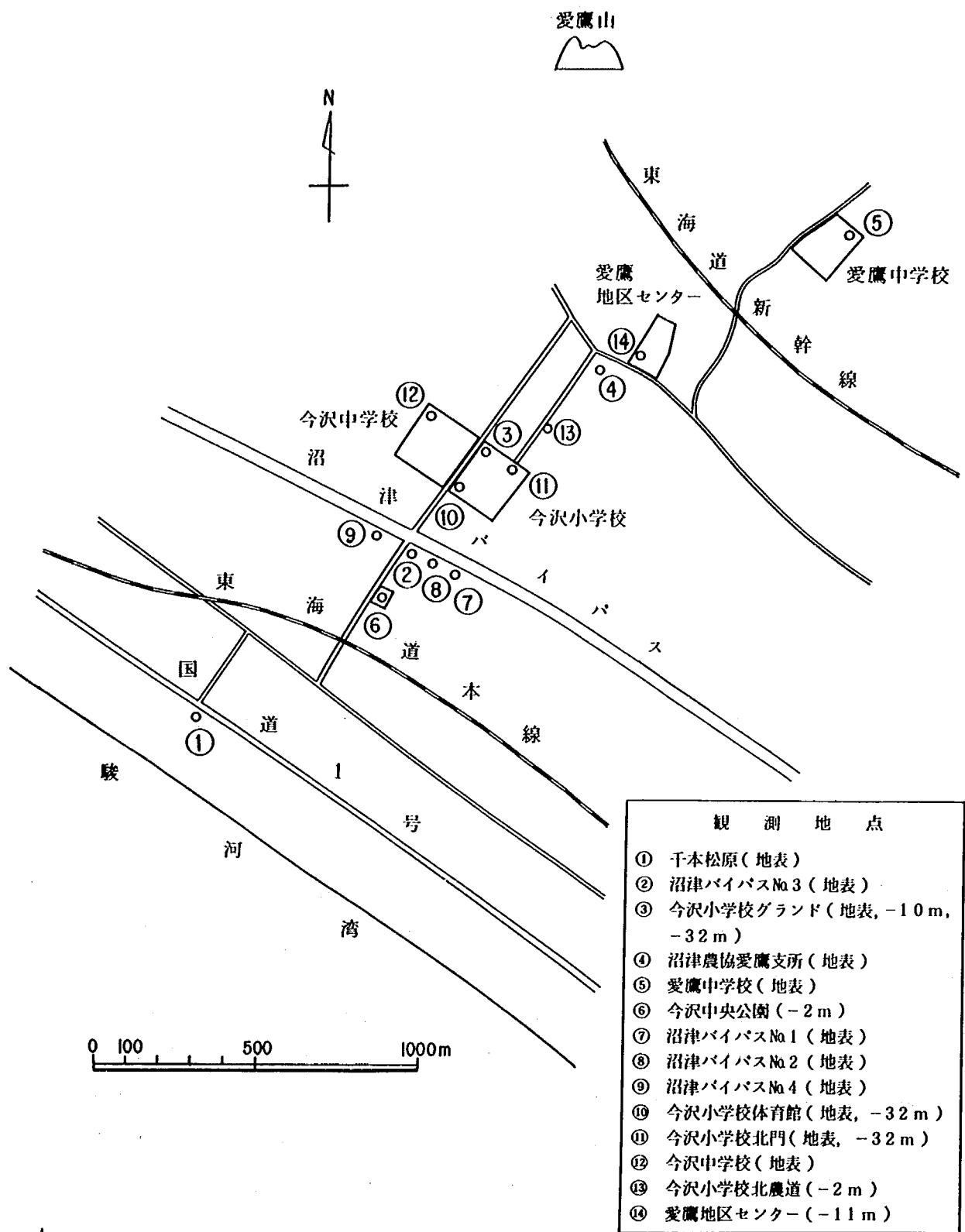


図 2.7 沼津地区高密度強震観測場概念図

3. 観測システム

3.1 基本設計

沼津地区においては、昭和54年度に図2.1に示したNo.1, No.2, No.3およびNo.5地点、また、昭和55年度にNo.4地点に、それぞれ、強震計を設置し、計5台の強震計から成る1方向高密度強震観測場(Simple Extended Array)による観測を実施してきた³⁾。この観測ではデジタルカセット方式の強震計が用いられており、その主要な仕様を示すと、表3.1のようになる。すなわち、デジタルカセット方式強震計はA/D変換器が12ビットであること、および遅延メモリーを有していないこと以外は後述する高密度強震観測用の強震計と同等の性能を有している。そこで、昭和58年度は、5台の既存のデジタルカセット方式強震計に13台の高密度強震観測用強震計を増設し、全体として3方向高密度強震観測場(Local Laboratory Array)とすることにした。この高密度強震観測用強震計の仕様を決定するに際して考慮した事項は以下のとおりであり、これらの点に基づき、次節に示す観測機器を選定した。

(1) 記録方式

高密度強震観測では、観測点相互間で時間軸のそろった記録を得ることが必要である。このためには、記録部は各観測点に対して共通とする方式(以下、集中記録方式と呼ぶ)と、観測・記録は個々の観測点ごとに独立であるが、それぞれの観測点で絶対時刻を知ることにより同期をとる方式(以下、個別記録方式と呼ぶ)がある。両者にはそれぞれ得失があり、これを比較検討したのが表3.2である。しかし、最終的には、1)記録部を分散することにより、全く記録が得られないといった状態を避けられること、2)将来増設される他地区の高密度強震観測計との記録の相互利用が可能となることから、個別記録方式を採用することとした。

(2) 周期範囲および分解能

地震動には、数kHzの非常に高い振動数成分から地球の1次固有周期に相当する53.5分の超長周期成分までが含まれている。このうち、土木工学の分野で必要とされるのは、1/30秒(30Hz)～10秒程度の範囲と考えられる。この理由は、以下のとおりである。

- 1) 長大吊橋の1次固有周期をみると、関門橋のタワーの固有周期が約6秒、また、現在建設中の明石海峡大橋(本州四国連絡橋)のタワーの固有周期が約10秒と、10秒程度の構造物が存在する。
- 2) 構造物の部材の中には、固有振動数が30Hz程度に達するものがある。また、地震動の最大加速度は、現在までに断層直近では1000galを超す例も報告されている。海洋性の横ずれタイプの地震では、震源直上であっても、ある程度の距離はあるが、一応1000gal程度は見込む必要があると考えられる。

また、周期10秒の地震動を考慮するためには、最小0.1gal程度までの加速度は測定する必要があると考えられる。従って、観測には少なくとも 10^4 のダイナミックレンジが必要となる。ただし、自動感度切替は、切替の確実さ(耐久性)に対する疑問が残ること、切替の瞬間のゼロドリフトが生じ、全体としての精度は必ずしも高くないと考えられることから、採用しないこととし、16ビット

のAD変換器を用いることで、これに対処することとした。

(3) サンプルング間隔

30 Hzまでの地震動を確実に取るために、1波長内の記録数を7回以上と見込み、 $30 \times 7 = 210$ 200 Hz をサンプルング間隔とした。なお、この場合のナイキスト振動数は100 Hz となる。

(4) 記録時間

本震の前の前震で記録紙を消耗してしまい、肝心の本震の記録が取れなかった例もあるので、1回の記録時間を2分と見込み、 $2 \text{分} \times 15 \text{回} = 30 \text{分}$ を一応の記録時間とした。ただし、群発性地震が発生した場合には、これでも対処できないため、こまめにテープを取りかえる必要がある。

(5) 同期時間の精度

いま、強震計間の最小間隔を50 mとし、基盤でのせん断弾性波の速さで地震動が水平方向に伝播するとする。せん断波の速度を3 km/sec 程度と見込むと、伝播に要する時間は、 $50 \text{m} / 3000 \text{m/sec} = 1/60$ 秒となる。この程度の時間差を検出するためには、同期の精度はサンプルング間隔、すなわち、1/200 秒程度でなければならない。

NHKの時報により時刻校正を行うとすれば、深夜0時から朝5時までの5時間を除けば、毎1時間ごとに校正が行われる。従って、最も長く時刻校正が行われない5時間を考えると、この間における複数の強震計間の相対的な時計精度を1/200 秒以下に保つためには、個々の強震計の時計精度はこの半分、すなわち、1/400 秒以下でなければならない。

$$5 \text{時間} \times 3600 \text{秒/時間} \times \text{精度} < 1/400 \text{秒}$$

従って、精度 1.4×10^{-7} 程度の水晶時計を用いる必要がある。

(6) 防水ケース

長期間の現場観測に耐えるために、強震計のケースは防水・防塵性の高いものでなければならない。また、これにより、海岸近くの観測においても耐蝕性を高めることができる。

3.2 観 測 機 器

以上のような考え方にに基づき、建設省建設技術評価制度「普及型強震計の開発」において評価を受けた強震計を検討した結果、その一つを上記基本仕様に合うように手を加え、これを高密度強震観測に用いることとした。

本強震計の仕様は、以下に示すとおりである。

(1) 強震計本体

強震計本体は、換振器から3成分の信号を受け、これをAD変換器により数値化した後、自動時刻校正されたタイムコードとともにデジタルカートリッジに記録するものである。AD変換は、逐次比較方式の16ビットAD変換器を用いて、1/200 秒間隔で行う。

時刻校正は、公称精度 10^{-7} (日差0.01秒) の水晶時計を毎正時にNHKの時報で自動校正することにより行う。なお、時刻校正の際の誤差は高々1/200 秒である。

また、商用電源の切断に備えるために、強震計の電源には、フローティングバッテリーを使用した。バッテリーの容量は、電源の切断後 24 時間の待機後に、60 分間の記録が可能となるように定めた。さらに浸水や塵埃の侵入による強震計内部の腐食を防止するために、強震計は 2 気圧の完全防水アルミダイキャスト製の密閉ケースに収納した。なお、主要な仕様は表 3.3 に、また、外観は写真 3.1 に示すとおりである。

起動は上下方向加速度が 3 gal (可変) 以上になった瞬間にかかり、水平方向加速度の 5 秒間における平均値が 5 gal 以下になり、かつ上下方向加速度が起動レベル以下になった後、30 秒後に自動停止するようになっている。

(2) 地上用換振器

地上用換振器は、地上部における水平 2 成分、鉛直 1 成分の加速度を電気信号として検出するものであり、強震計内に設置されている。換振部は速度帰還型サーボタイプ加速度計を使用しており、測定加速度範囲は公称 ±1000 gal である。

なお、主要な仕様は、表 3.4 に示すとおりである。

(3) 地中用換振器

地中用換振器は、ボーリング孔内に設置し、地中における水平 2 成分、鉛直 1 成分の加速度を電気信号として検出するものである。地中用換振器と強震計間は、専用のキャプタイヤケーブルで接続されている。換振部の仕様は地上用換振器と同一であるが、地中用換振器は地中に設置されるために十分な耐水性を有していなければならない。このため、設置に先立ち、耐圧水槽を用いて、地中用換振器およびキャプタイヤケーブルが 30 気圧の水圧に 1 時間耐えられることを確認している。なお、主要な仕様は、表 3.5 に示すとおりである。

(4) 強震計の振幅および位相特性¹⁰⁾

換振器から A/D 変換器に至るまでの回路構成は、図 3.1 に示すとおりであり、これに従い各段階における振幅特性および位相特性について以下に示す。

1) 換振器

換振器の構成は、図 3.2 に示すとおりである。地動加速度と出力電圧 E_s との振幅特性 $A_1(\omega)$ および位相特性 $\phi_1(\omega)$ は、それぞれ、次のように与えられる。

$$A_1(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1-u^2}{2hu}\right)^2}} \quad (3.1)$$

$$\phi_1(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{2hu}{1-u^2} \right) - \frac{\pi}{2} \quad (3.2)$$

ここで、

$$u = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 31.4 \text{ [1/sec]}$$

h : 減衰定数 ($h = 240$)

f_0 : 振子の固有振動数 ($f_0 = 5 \text{ Hz}$)

2) ドリフト除去用ハイパスフィルター

強震計の傾斜等による長周期のドリフトを除去するため図 3.3 に示すハイパスフィルターを用いている。入力電圧 E_s と出力電圧 E_u との振幅特性 $A_2(\omega)$ および位相特性 $\phi_2(\omega)$ は、それぞれ、次のように与えられる。

$$A_2(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}} \quad (3.3)$$

$$\phi_2(\omega) = -\tan^{-1} \frac{1}{\omega CR} \quad (3.4)$$

ここで、

$$C = 10 [\mu\text{F}]$$

$$R = 1 [\text{M}\Omega]$$

なお、式 (3.4) の符号がマイナスであることは、出力電圧 E_u の位相が入力電圧 E_s の位相に対して進むことを意味している。

3) エリアジングフィルター

エリアジングフィルターは、図 3.4 に示す RC 2 次ローパスフィルターであり、入力電圧 E_u と出力電圧 E_a との振幅特性 $A_3(\omega)$ および位相特性 $\phi_3(\omega)$ は、それぞれ、次のように与えられる。

$$A_3(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - u_c^2)^2 + \left(\frac{u_c}{Q}\right)^2}} \quad (3.5)$$

$$\phi_3(\omega) = \tan^{-1} \frac{\frac{u_c}{Q}}{1 - u_c^2} \quad (3.6)$$

ここで、

$$u_c = \frac{\omega}{\omega_c}$$

$$\omega_c = 347 [1/\text{sec}]$$

$$Q = 0.73 [1/\text{sec}]$$

4) 強震計の振幅および位相特性

式 (3.1) ~ (3.6) より、強震計の総合的な振幅特性 $A(\omega)$ および位相特性 $\phi(\omega)$ は、それぞれ、次のようになる。

$$A(\omega) = A_1(\omega) \cdot A_2(\omega) \cdot A_3(\omega) \quad (3.7)$$

$$\phi(\omega) = \phi_1(\omega) + \phi_2(\omega) + \phi_3(\omega) \quad (3.8)$$

式 (3.7) および式 (3.8) より、 $A(\omega)$ および $\phi(\omega)$ を示すと、図 3.5 のようになる。

表 3.1 デジタルカセット方式強震計の主要仕様

換 振 部	成 分	3 成分 (水平 2 成分, 上下 1 成分)
	型 式	力平衡形サーボタイプ加速度形
	固有振動数	50 Hz
	減衰定数	0.7
	測定加速度範囲	± 1 G
起 動 部	感振方向	上下方向
	起動加速度	0.01 G
記 録 部	チャンネル数	4 チャンネル (データ 3, タイムコード 1)
	記録方式	デ ィ ジ タ ル
	A/D変換器	12 ビット A/D変換器
	ダイナミックレンジ	66 db
	サンプリング間隔	1/200 秒
	測定振動数範囲	0 ~ 50 Hz (3 db) : -12 db/oct
	テープ	デジタルカセットテープ
	最大記録時間	20 分
	内蔵バッテリー	6 箇月待機後 30 分の記録が可能
	ケース	防水型アルミケース
タイムコード	時計精度	10^{-6}
	自動時刻校正	J J Y 信号により 6 秒毎に校正

(K I N E M E T R I C S : D S A - 1)

表 3.2 記録方式の比較

方 式	方式の説明	長 所	短 所
集中記録方式	複数の換振器からの信号を同一の記録装置に入力する方式	1) 複数観測点間の記録の完全同期および起動時間の同期をとることができる。 2) 観測小屋の設置が1箇所ですむ。	1) 観測小屋と各換振器間にケーブルを敷設しなければならない。ケーブル敷設用の用地、費用およびその維持保守、さらには地震時の破断等に問題がある。 2) 記録部が故障すると全観測点の記録がとれない。
個別記録方式	個別に時刻校正機能付の水晶時計で、絶対時刻を記録する方式	1) 観測点間の距離がはなれていても問題ない。 2) 将来、観測場を増設する場合、それぞれの観測場内の時刻の同期をとるのみならず、観測場間の同期をとることもできる。 3) 1台の記録器の故障が全体の記録の収録不能とはならない。	1) 絶対時刻を正しくキャッチするため、自動時刻校正装置が必要であるが、この精度が各強震計間でどの程度確保できるかが問題である。 2) 観測点ごとに観測小屋が必要とされる。
	テレメタリングシステムを利用し、親時計の時刻を子時計に電送する方式	1) 複数観測点間の子時計の時刻信号を同一にできるため、時刻の同期を完全にとることができる。 2) 10 km 程度の範囲で、障害物がなければ、観測点間の距離は任意にとることができる。	1) 有線の場合には専用回線（公社回線）が必要となり、無線の場合は電波管理局の免許が必要となる。

表 3.3 高密度強震観測用強震計の主要仕様

成 分	4チャンネル(データ3, タイムコード1)
測定加速度範囲	±1000 gal
測定振動数範囲	0.1~30 Hz
記 録 方 式	ディジタル
A D 変 換	16ビットAD変換器
ダイナミックレンジ	96 db
サンプリング間隔	1/200 秒
最大記録時間	約30分(使用テープ: 3M, DC300XL)
起 動	上下方向加速度により行い、1~10 gal の範囲で設定可能
遅延メモリー	5 秒
水 晶 時 計	月, 日, 時, 分, 秒, 表示
時 計 精 度	公称 10^{-7}
時 刻 較 正	NHKの時報による自動校正
内蔵バッテリー	電源切断後24時間後において約60分の記録が可能
ケ ー ス	2気圧の水圧に対して24時間以上にわたり耐水性のある防水構造

(東京測振: SAMTAC-17S)

表 3.4 地上用換振器の主要仕様

成 分	3 成分（水平 2 成分，上下 1 成分）
型 式	速度帰還型サーボタイプ加速度計
固 有 振 動 数	5 Hz
減 衰 定 数	240
測 定 加 速 度 範 囲	±1000 gal
測 定 振 動 数 範 囲	0.1～30 Hz（フラット）
最 小 分 解 能	0.001 gal
横 感 度	3 %以下
直 線 性	0.3 %以下

表 3.5 地中用換振器の主要仕様

成 分	3 成分（水平 2 成分，上下 1 成分）
型 式	速度帰還型サーボタイプ加速度計
固 有 振 動 数	5 Hz
減 衰 定 数	240
測 定 加 速 度 範 囲	±1000 gal
測 定 振 動 数 範 囲	0.1～30 Hz（フラット）
最 小 分 解 能	0.001 gal
横 感 度	3 %以下
直 線 性	0.3 %以下
耐 水 性	30 気圧の水圧に対して 1 時間以上の耐水性

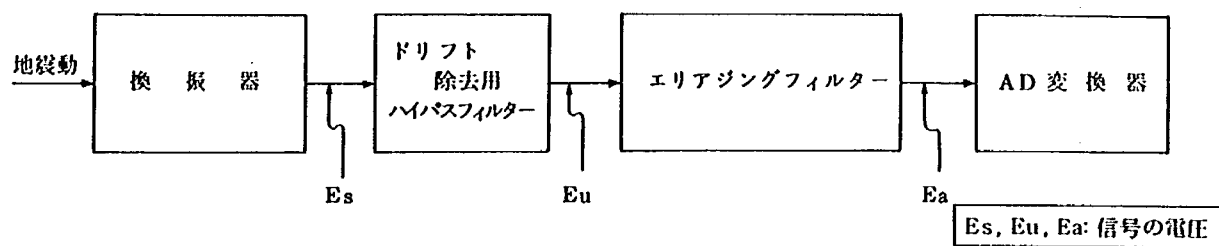


図 3.1 換振器からA/D変換器に至るまでの構成

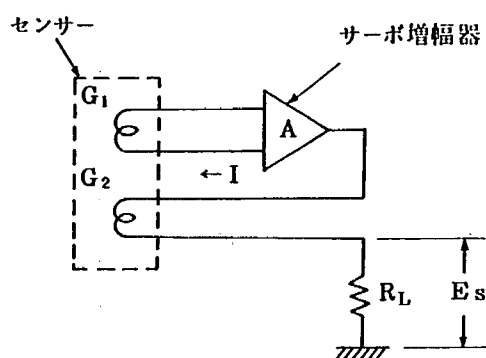


図 3.2 換振器の構成

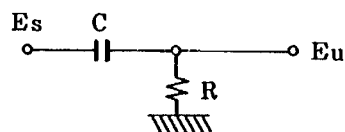


図 3.3 ドリフト除去用ハイパスフィルターの構成

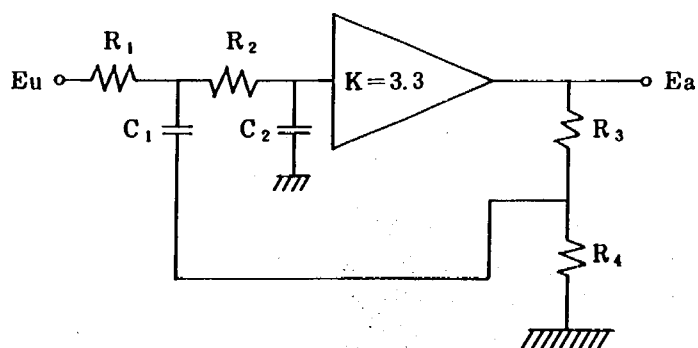
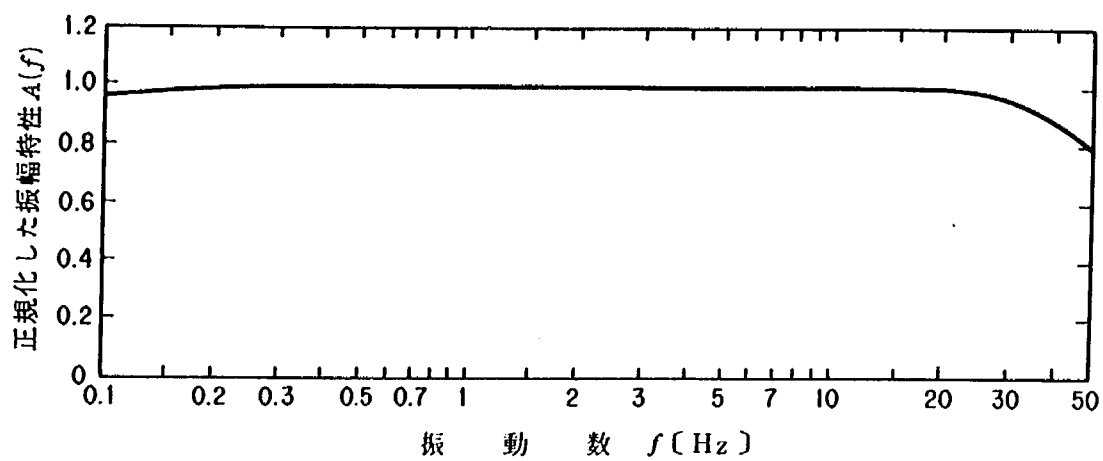
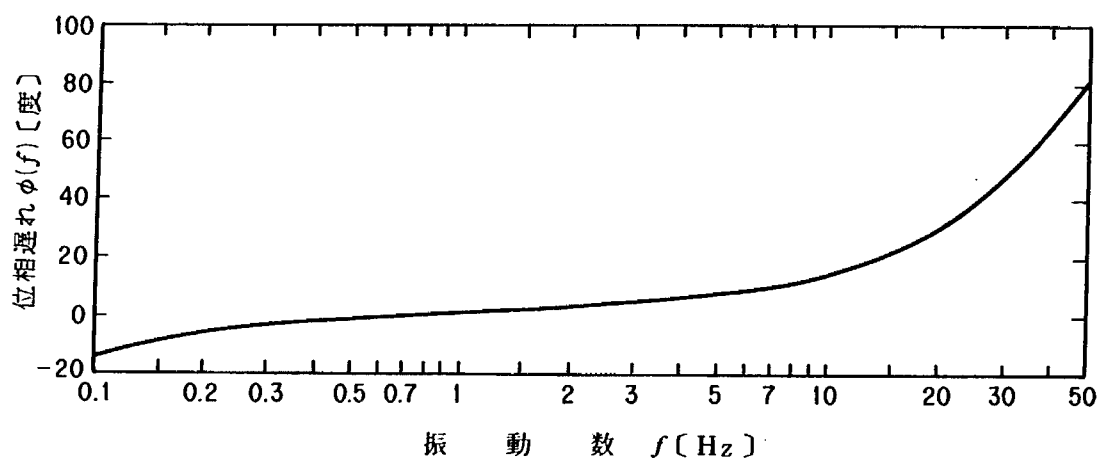


図 3.4 エリアジングフィルターの構成



(a) 振幅特性 $A(f)$



(b) 位相特性 $\phi(f)$

図 3.5 強震計の振幅および位相特性

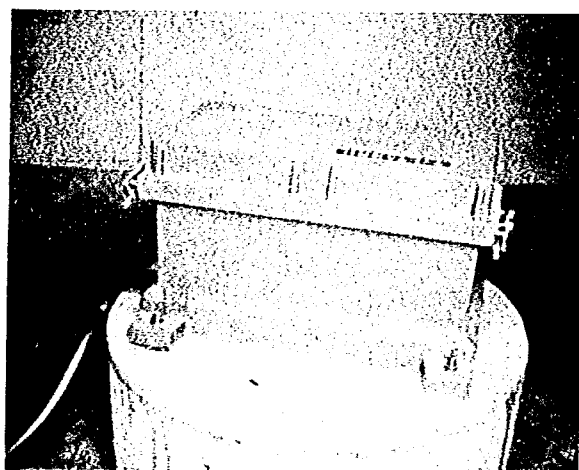
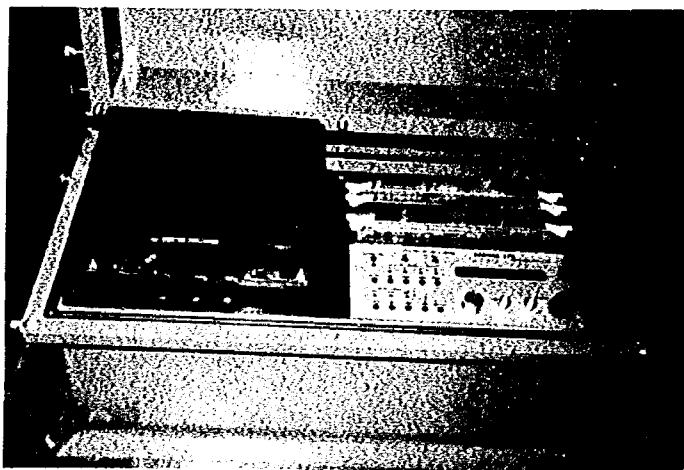


写真 3.1 強震計の外観

4. 強震計の設置

4.1 観測小屋の概要

強震計は図 4.1 に示すような高さ 2.3 m、幅 2.1 m、奥行 2.1 m の観測小屋の中に直径 70 cm、水切高 35 cm のコンクリート製取付台を設け、この上に設置されている。ただし、地中地震用の強震計本体は、換振器がボーリング孔中に埋設されているため、観測小屋内に設置棚を設け、その上に据え付けている。強震計の設置状況は写真 4.1 に示すとおりである。コンクリート製取付台の基礎 (1.2m×1.2m×0.3m) は、地震時に地盤と一体に振動するよう、9 本の松丸太 (長さ 1.5 m、直径 12 cm) を打ち、その上に設けられている。また、観測小屋の振動が影響しないように、取付台の基礎は観測小屋の基礎とは縁を切っている。観測小屋は RC 構造とし、強震時にも破壊しない構造としている。

4.2 強震計の設置箇所

強震計を設置したのは以下に示す 14 箇所であり、各観測小屋の外観は写真 4.2 に示すとおりである。このうち、3.1 節で述べたように、No. 1、No. 2、No. 3、No. 4 および No. 5 地点は既存の観測点 (昭和 54、55 年度設置) である。また、観測小屋周辺の平面図を付属資料 2 に示す。

1) 千本松原 (No. 1 地点)

千本県営林の中の国道 1 号寄りに設置している。

2) 沼津バイパス No. 3 (No. 2 地点)

国道 1 号沼津バイパスの今沢交差点近くに設置している。

3) 今沢小学校グラウンド (No. 3 地点)

沼津市立今沢小学校のグラウンドの北西端に設置している。本地点では、既設置の地上用強震計に加えて、昭和 58 年度に地表面下 10 m および 32 m の 2 箇所にも地中地震計を設置した。

4) 沼津農協愛鷹支所 (No. 4 地点)

沼津農協愛鷹支所の倉庫の西側に設置している。

5) 愛鷹中学校 (No. 5 地点)

沼津市立愛鷹中学校の敷地の北端に設置している。

6) 今沢中央公園 (No. 6 地点)

沼津市今沢中央公園の東側の植込みの中に設置している。植込みは高さ 1 m 程度の盛土上に作られているため、本地点では 2 m のボーリングを行い、地中地震計を設置した。

7) 沼津バイパス No. 1 (No. 7 地点)

沼津バイパス No. 3 より約 140 m 三島寄りのバイパス沿いに設置している。

8) 沼津バイパス No. 2 (No. 8 地点)

沼津バイパス No. 3 より約 80 m 三島寄りのバイパス沿いに設置している。

9) 沼津バイパス No. 4 (No. 9 地点)

沼津バイパスNo.3より約100m静岡寄りのバイパス沿いに設置している。

10) 今沢小学校体育館 (No.10 地点)

今沢小学校体育館の南側に設置している。本地点では、地表の他に地表面下3.2mに地中地震計を設置している。

11) 今沢小学校北門 (No.11 地点)

今沢小学校グラウンドの北側にある北門近くに設置している。本地点では、地表の他に地表面下3.2mに地中地震計を設置している。また、後述する今沢小学校北農道に設置した地中地震計の記録部は本地点の観測小屋内に設置している。

12) 今沢中学校 (No.12 地点)

沼津市立今沢中学校のグラウンドの北西端に設置している。

13) 今沢小学校北農道 (No.13 地点)

今沢小学校の北側の農道上に設置している。本地点では、観測小屋を設置する場所がなかったため、地中用換振器を地表面下2mの位置に設置し、換振器のケーブルを農道沿いの電々公社の電柱に共架することにより、記録部は約120m離れた今沢小学校北門の観測小屋内に設置した。

14) 愛鷹地区センター (No.14 地点)

沼津市愛鷹地区センターの西側出入り口付近の地表面下11mの砂礫層中に地中地震計を設置している。なお、記録部は同センターの合併処理機械室内に設置した。

強震計の観測方向は図4.2に示すとおりであり、全観測点においてX方向が北になるように設置している。観測小屋の方向は図4.3に示すとおりである。また、地中用換振器から観測小屋内に至るケーブルの配線は図4.4に示すとおりである。なお、地中用換振器の設置位置は図4.5に示すとおりである。

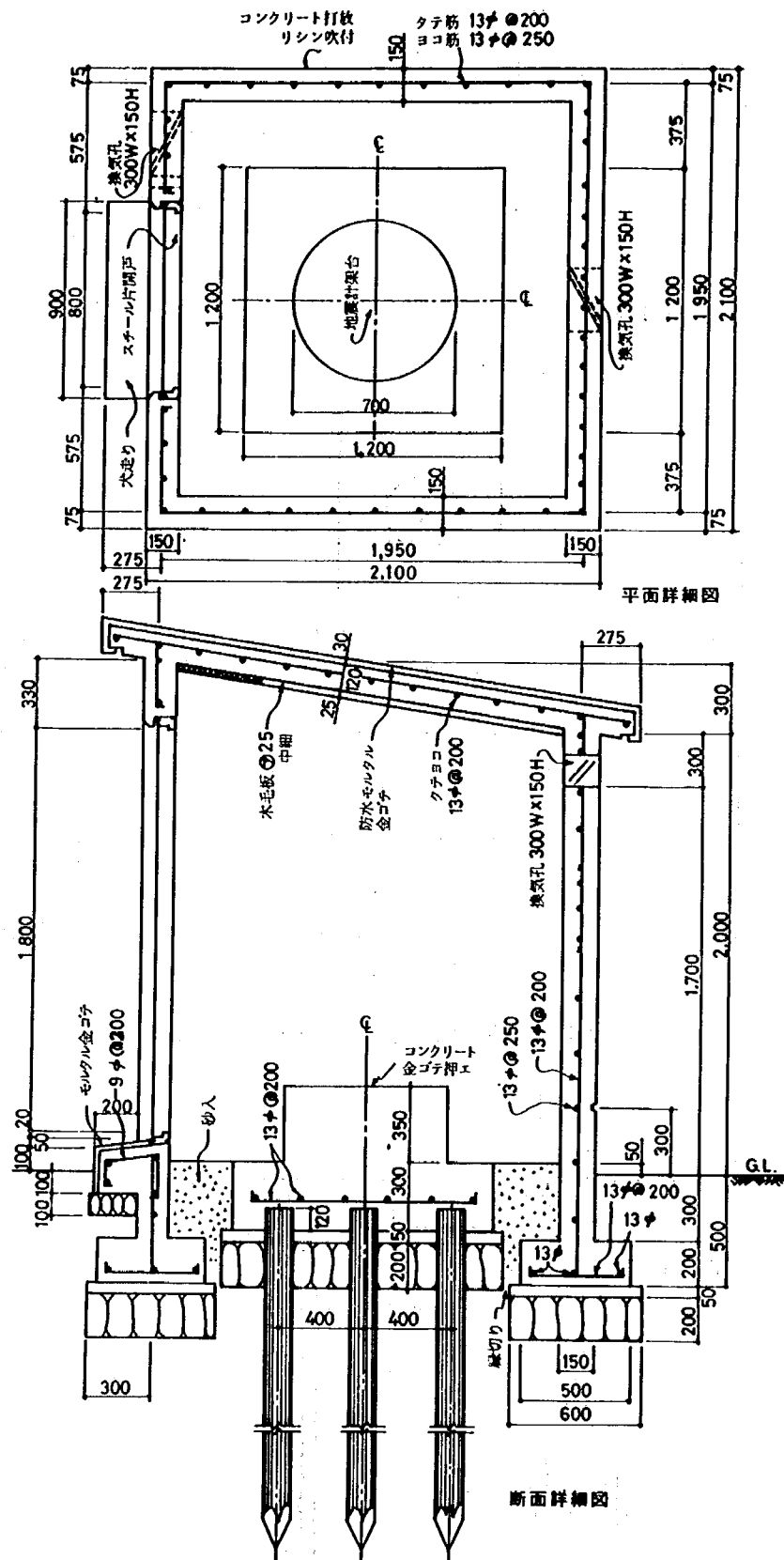


図 4.1 観測小屋断面図

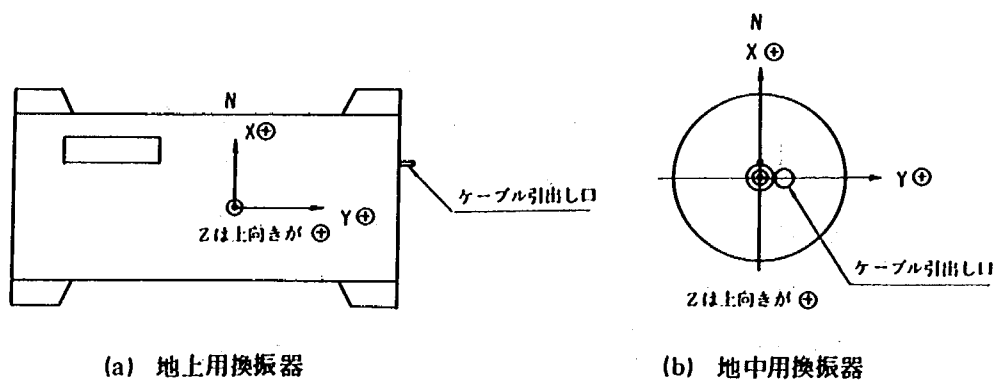


図 4.2 強震計の観測方向

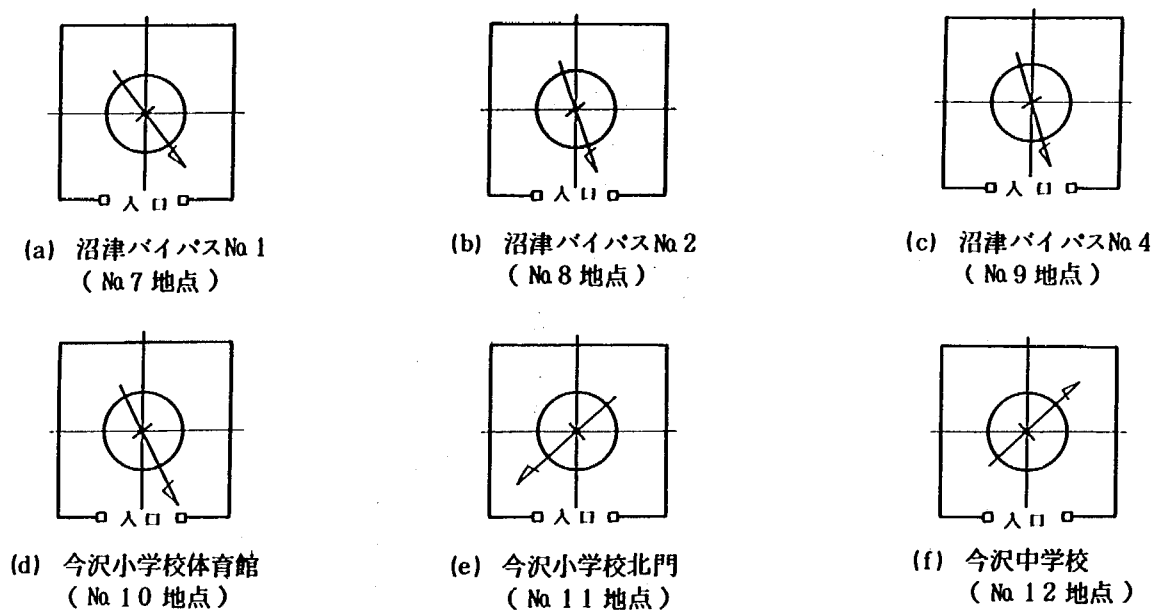


図 4.3 観測小屋の方向

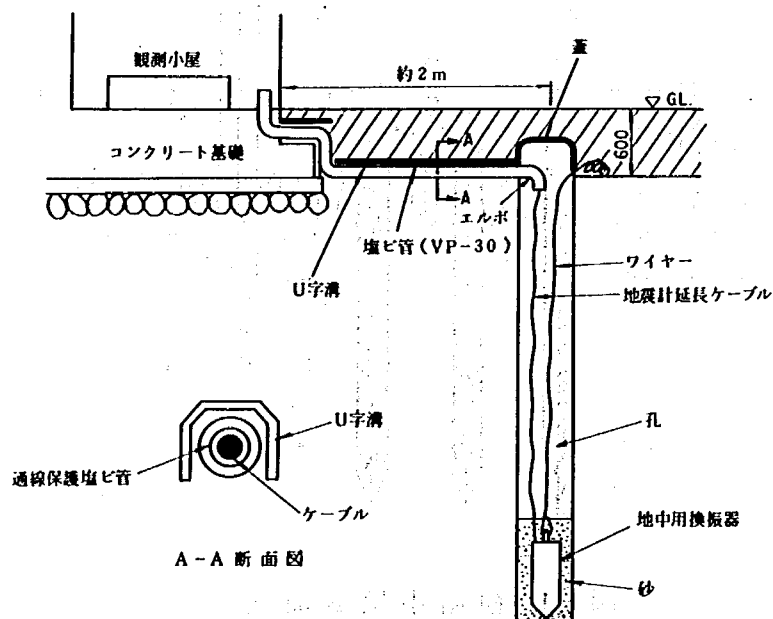
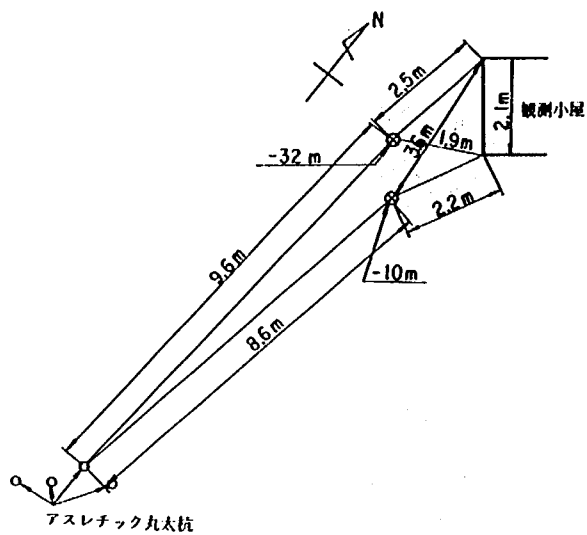
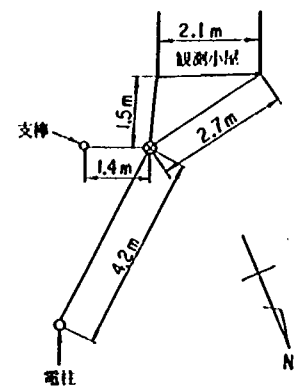


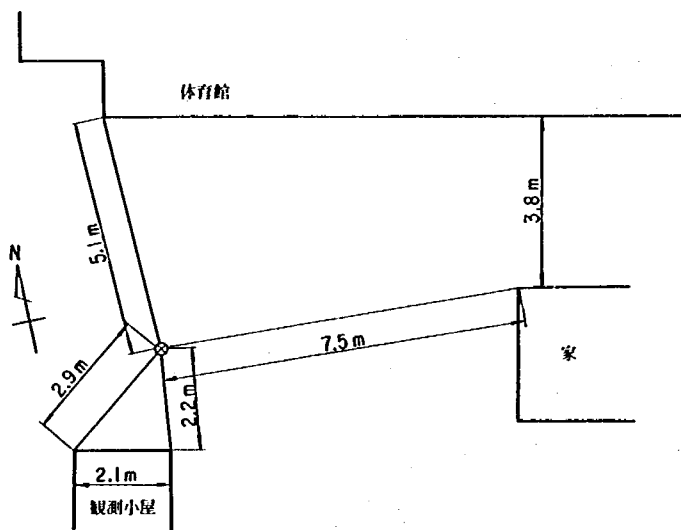
図 4.4 地中用換振器からのケーブル配線



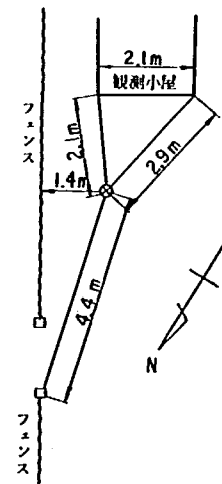
(a) 今沢小学校グラウンド (No. 3 地点)



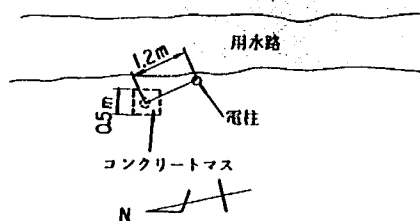
(b) 今沢中央公園 (No. 6 地点)



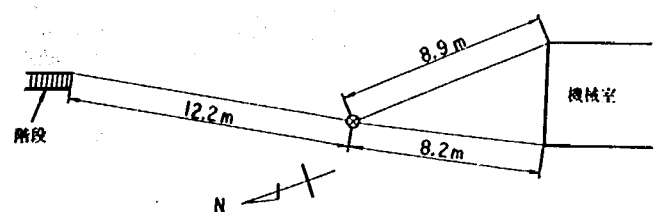
(c) 今沢小学校体育館 (No. 10 地点)



(d) 今沢小学校北門 (No. 11 地点)

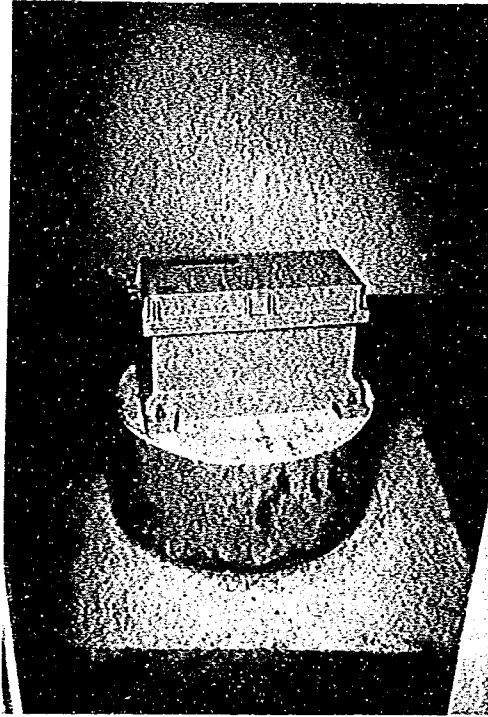


(e) 今沢小学校北農道 (No. 13 地点)

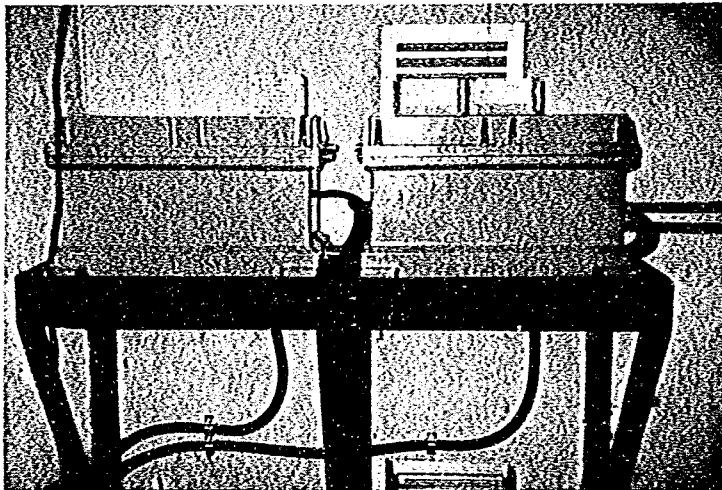


(f) 愛鷹地区センター (No. 14 地点)

図 4.5 地中用換振器の設置位置

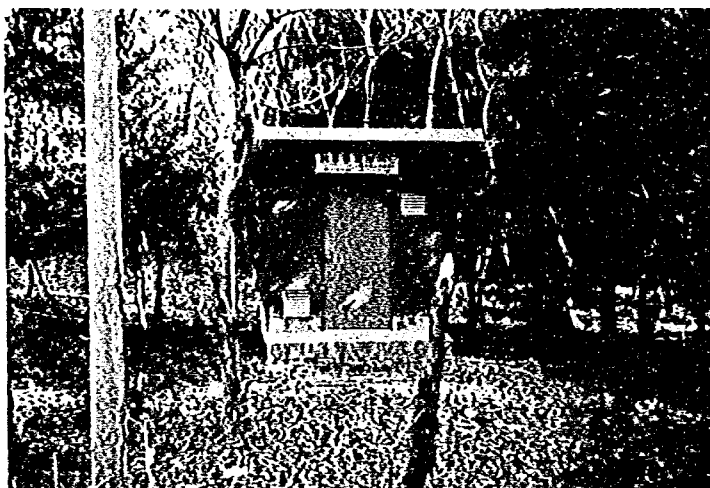


(a) 地上用強震計



(b) 地中地震計（記録部）

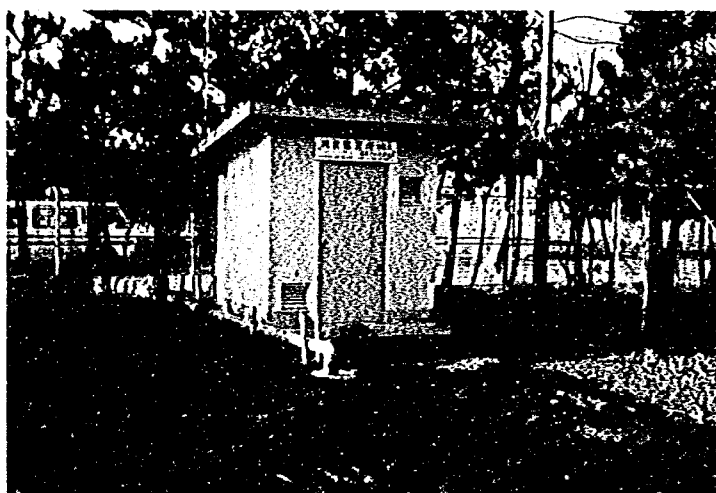
写真 4.1 強震計設置状況



(a) 千本松原 (No 1 地点)



(b) 沼津バイパス No 3 (No 2 地点)

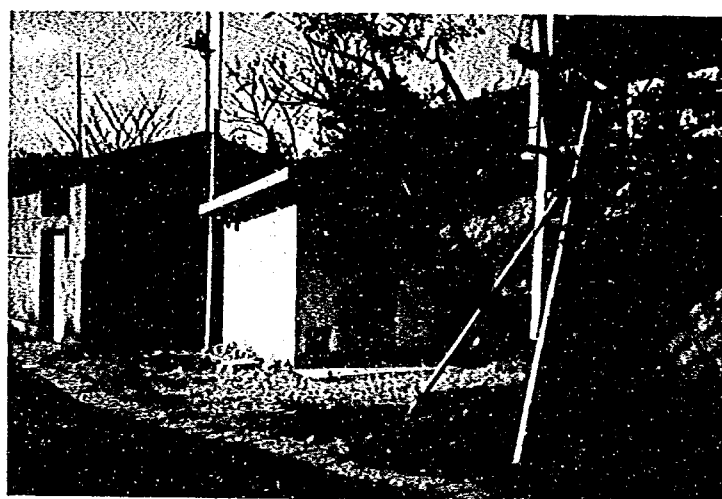


(c) 今沢小学校グラウンド (No 3 地点)

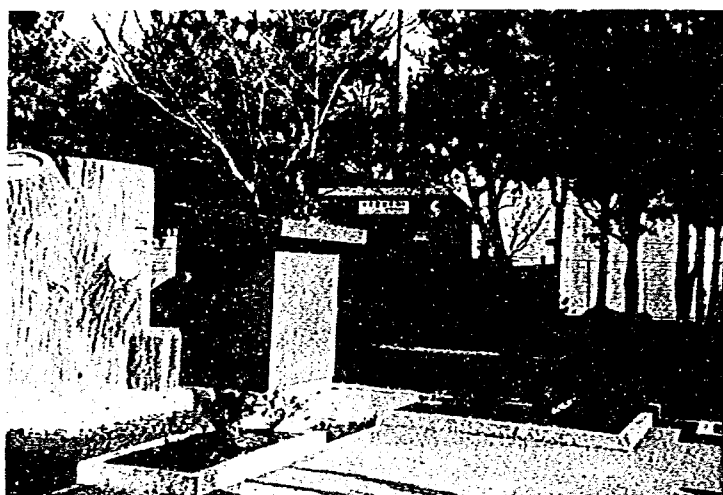
写真 4.2 (1) 観測小屋の外観



(d) 沼津農協愛鷹支所 (No. 4 地点)

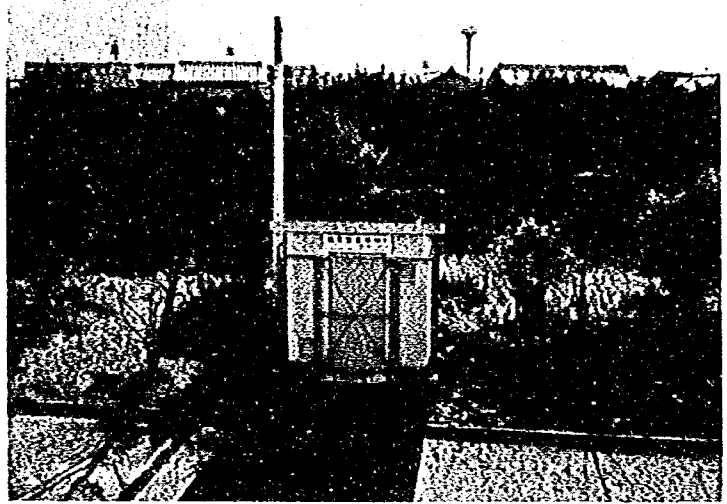


(e) 愛鷹中学校 (No. 5 地点)

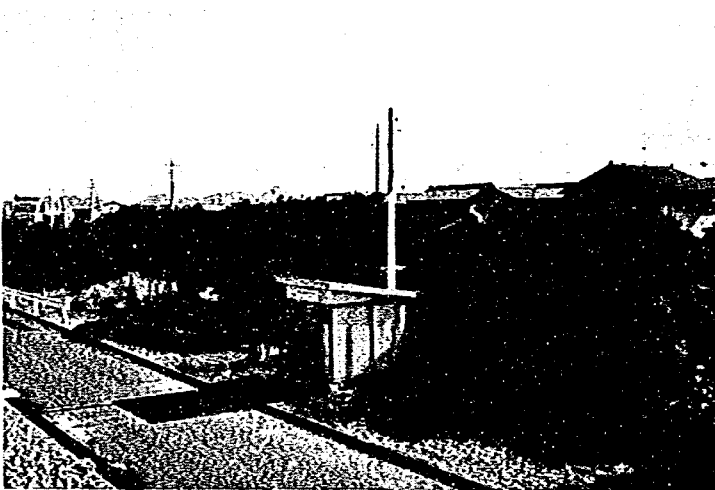


(f) 今沢中央公園 (No. 6 地点)

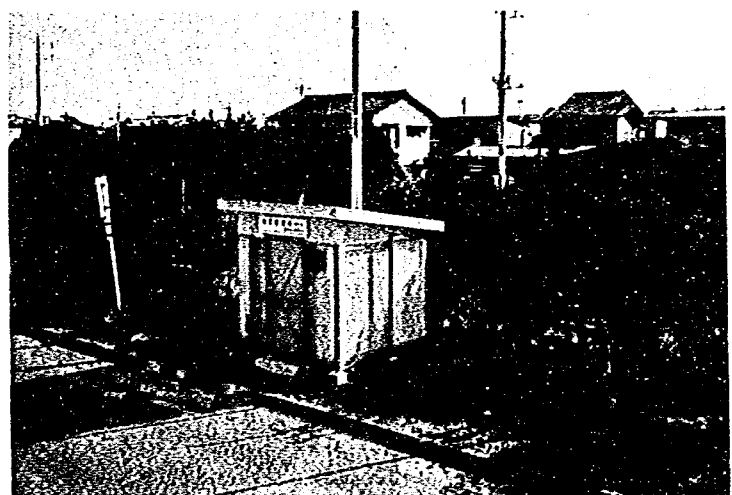
写真 4.2 (2) 観測小屋の外観



(g) 沼津バイパスNo 1 (No 7 地点)

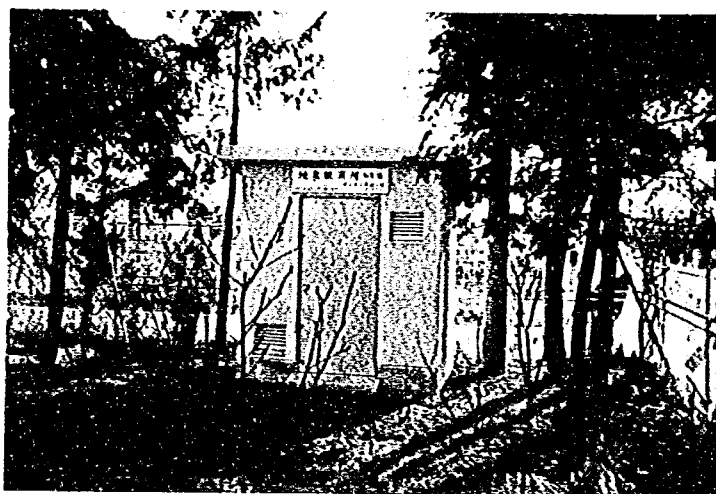


(h) 沼津バイパスNo 2 (No 8 地点)

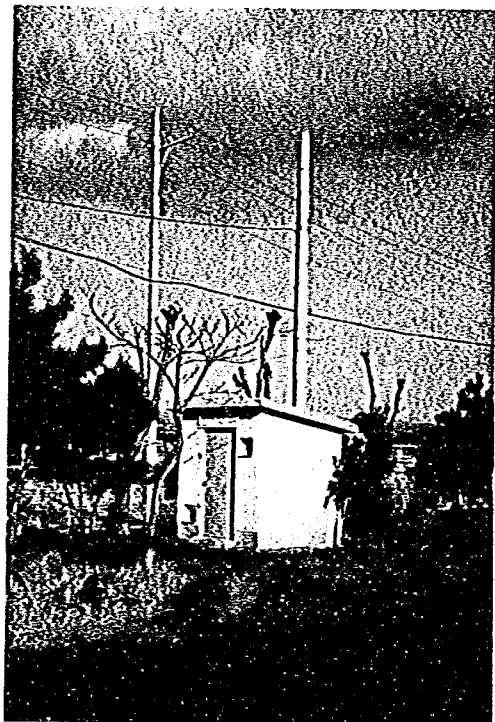


(i) 沼津バイパスNo 4 (No 9 地点)

写真 4.2 (3) 観測小屋の外観



(j) 今沢小学校体育館 (No. 10 地点)

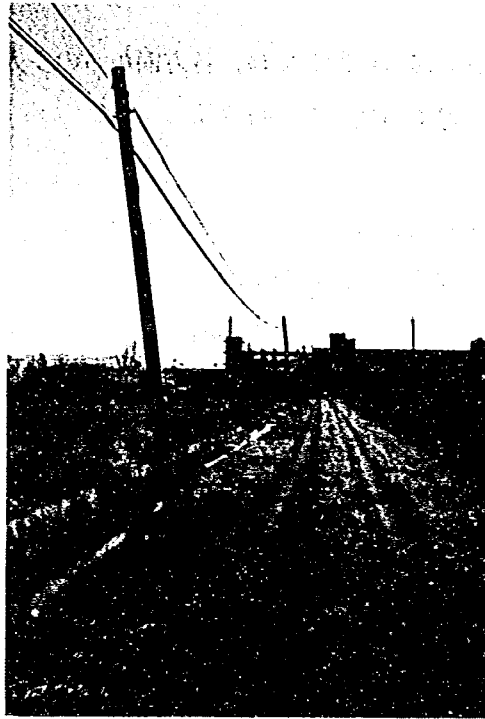


(k) 今沢小学校北門 (No. 11 地点)



(l) 今沢中学校 (No. 12 地点)

写真 4.2 (4) 観測小屋の外観



(m) 今沢小学校北農道 (No 13 地点)
 (手前の電柱直下の地盤中
 (-2m) に設置している)



(n) 愛鷹地区センター (No 14 地点)
 (中央右の扉の内側に設置している)

写真 4.2 (5) 観測小屋の外観

謝

辞

沼津地区における高密度強震計の設置に関しては、各方面からの多大な御支援をいただきました。以下にお世話になった機関名を示し、厚くお礼申し上げます。

建設省大臣官房技術調査室

- // 中部地方建設局企画部企画課
- // // 沼津工事事務所
- // // 静岡国道工事事務所富士国道維持出張所

静岡県総務部地震対策課

- // 土木部道路建設課
- // // 道路維持課

沼津市長

沼津市総務部地震対策室

- // 都市計画部緑地公園課
- // 教育委員会
- // 愛鷹出張所
- // 愛鷹公民館

沼津農業協同組合愛鷹支所

沼津市立愛鷹中学校

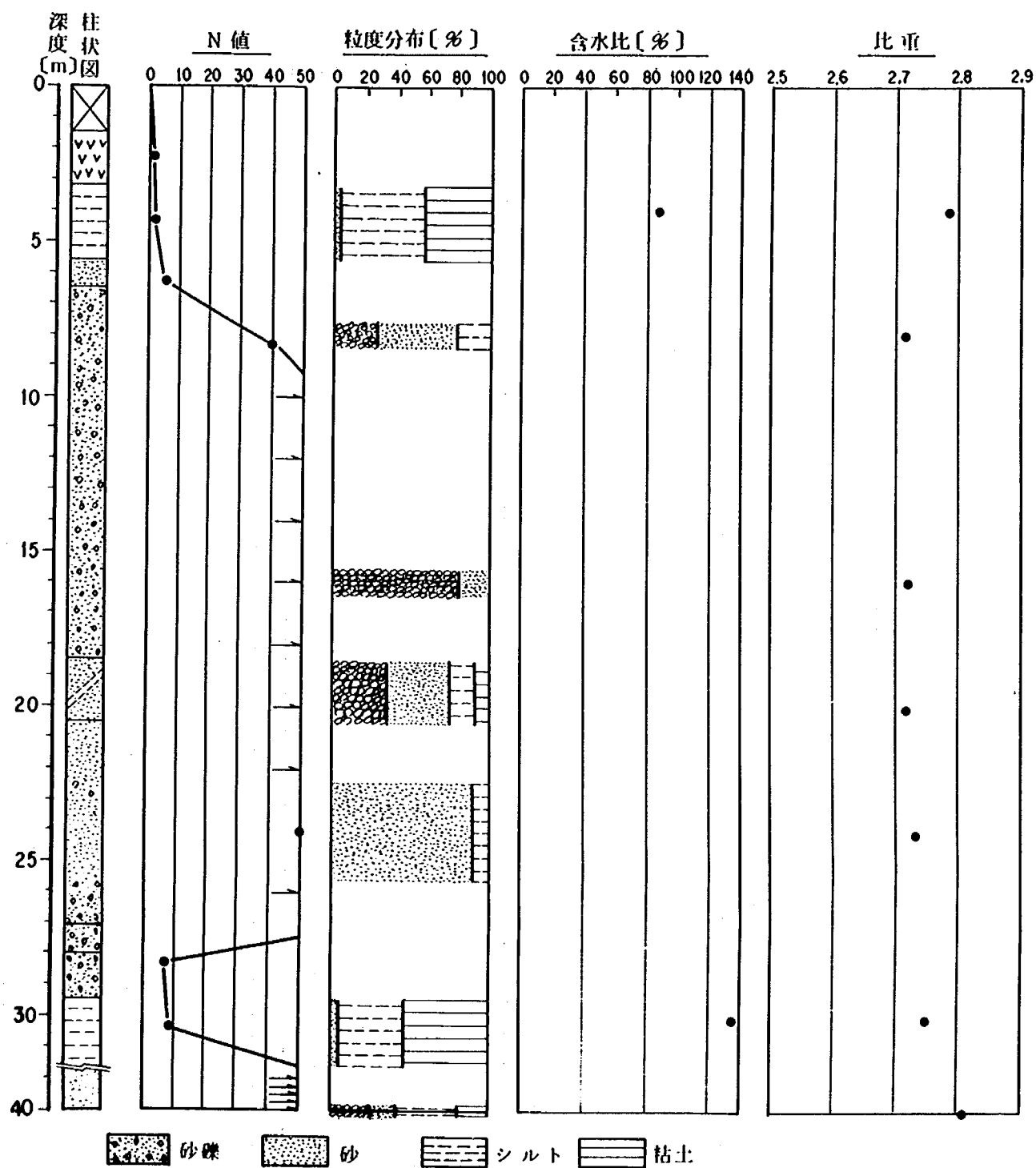
- // 今沢中学校
- // 今沢小学校

参 考 文 献

- 1) 日本学会議：高密度強震観測の推進について（内閣総理大臣あて），昭和55年5月12日
- 2) 大久保忠良：高密度強震観測計画について，土木技術資料，第22巻，第4号，昭和55年4月
- 3) 大久保忠良，岩崎敏男，川島一彦：土木研究所における高密度強震観測計画および記録の解析，日米天然会議耐風耐震構造専門部会，第13回合同部会，昭和56年5月
- 4) 大久保忠良，荒川直士，川島一彦，土木研究所における高密度強震観測および記録の解析，日米天然会議耐風耐震構造専門部会，第14回合同部会，昭和57年5月
- 5) International Association for Earthquake Engineering : Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, Proc. of the International Workshop on Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, Edited by Iwan, W. D., Honolulu, Hawaii, U.S.A., May, 1978
- 6) 建設省土木研究所：土木構造物に対する強震観測，土木研究所資料，第1734号，昭和57年6月
- 7) 池田俊雄：地盤と構造物，鹿島出版会，昭和50年7月
- 8) 土隆一編：静岡県の地質，昭和49年3月
- 9) 静岡県地震対策課：静岡県地震対策基礎調査報告書——ボーリング柱状図集(東)——昭和58年3月
- 10) 建設省土木研究所：高密度強震観測用デジタル強震計の記録精度に関する実験的検討，土木研究所資料，第2019号，昭和58年8月
- 11) 建設省土木研究所：土木研究所における高密度強震観測システム——(1) 相良地区の観測システム——土木研究所資料，第1847号，昭和57年7月
- 12) 建設省土木研究所：土木研究所における高密度強震観測システム——(2) 焼津地区の観測システム——土木研究所資料，第1994号，昭和58年3月
- 13) 佐藤和夫，荒川直士，川島一彦，田村敬一：建設省土木研究所における高密度強震観測，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，第1部，昭和58年9月
- 14) 田村敬一，相沢興，高橋和之：高密度強震観測による地盤条件の影響，第19回土質工学研究発表会講演集（2分冊の1），昭和59年5月

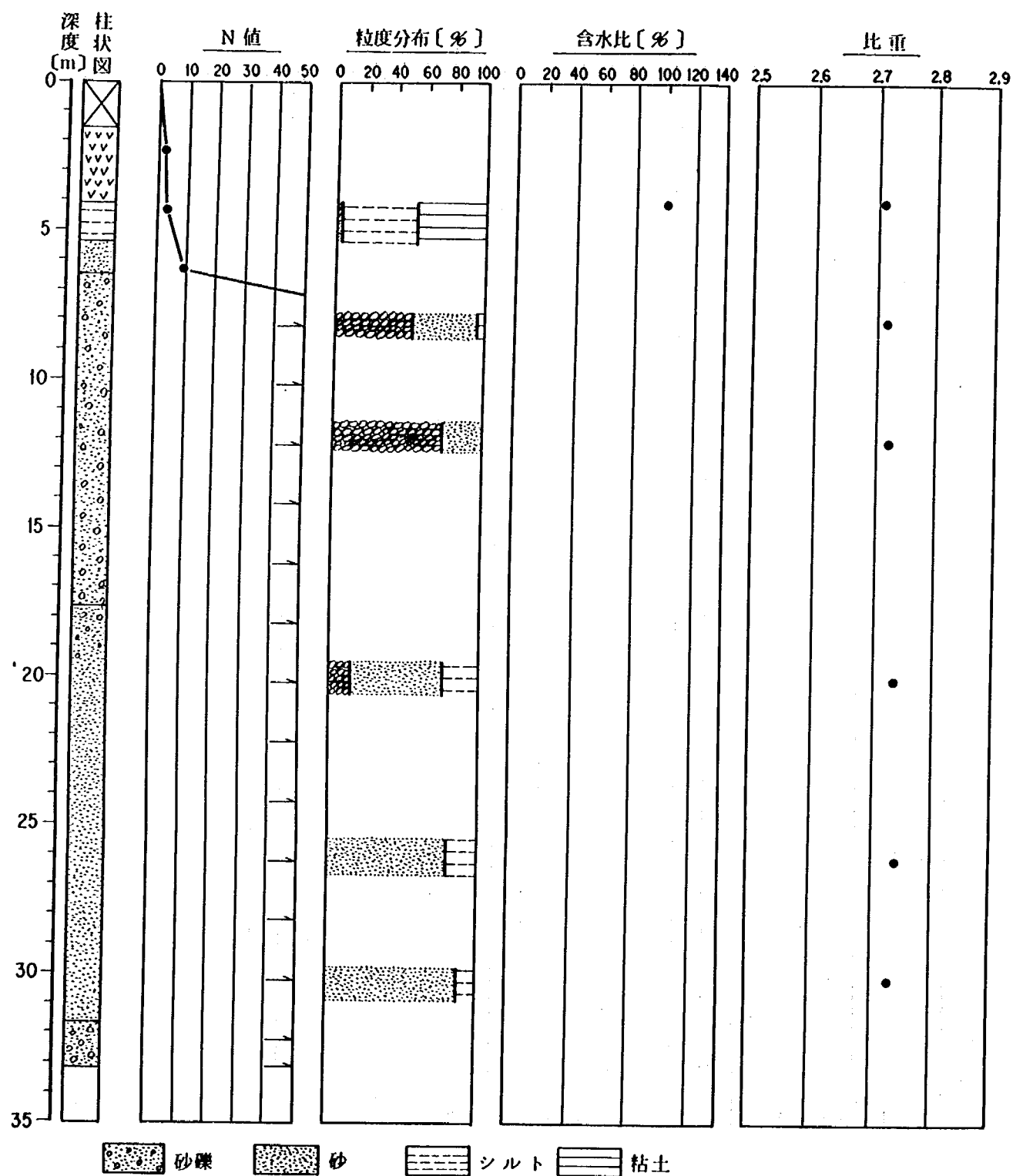
付属資料 1. 室内土質試験結果

WILSON, J. L. & J. L. WILSON



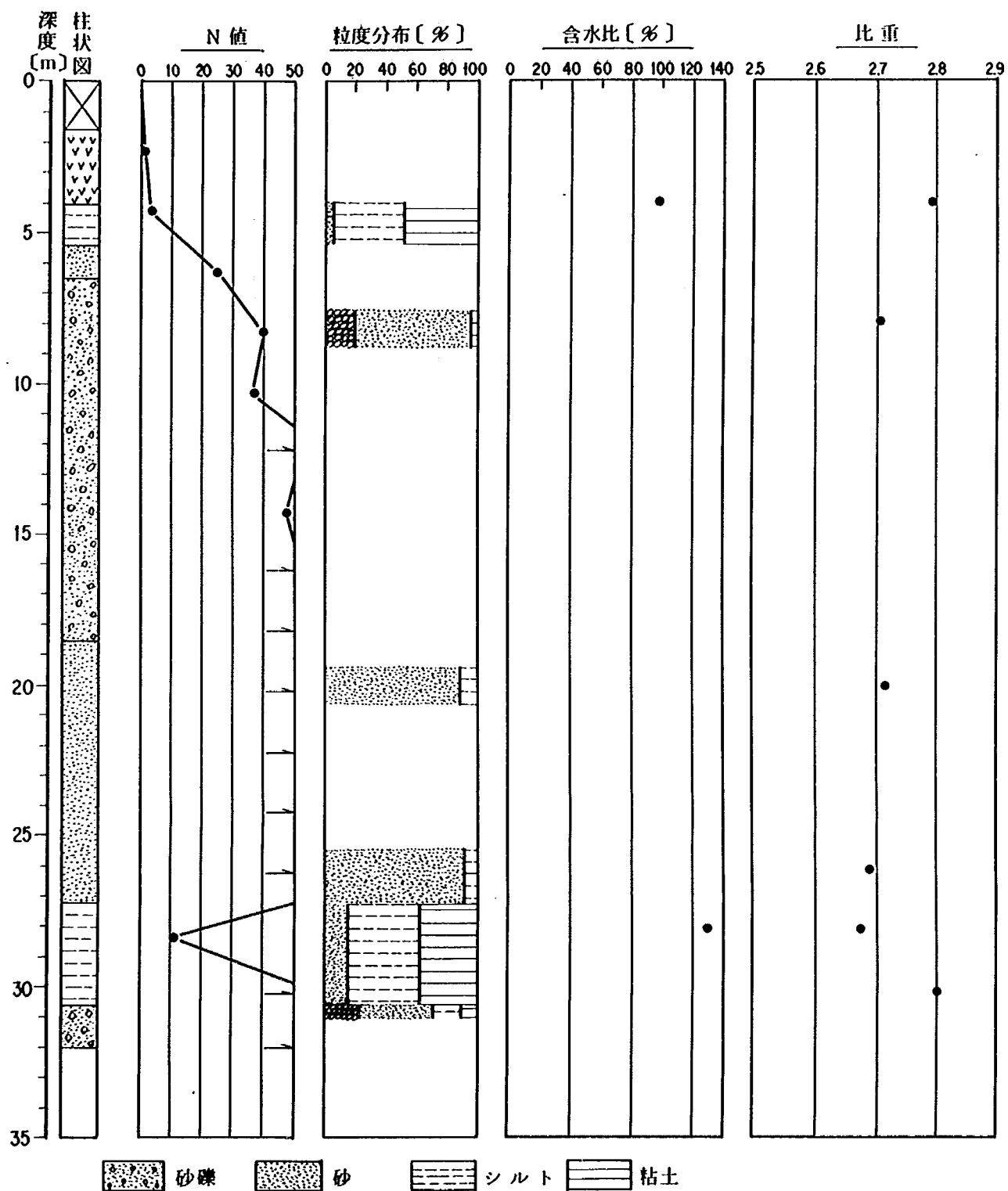
(a) No 3 地 点

付図 1 (1) 室内土質試験結果



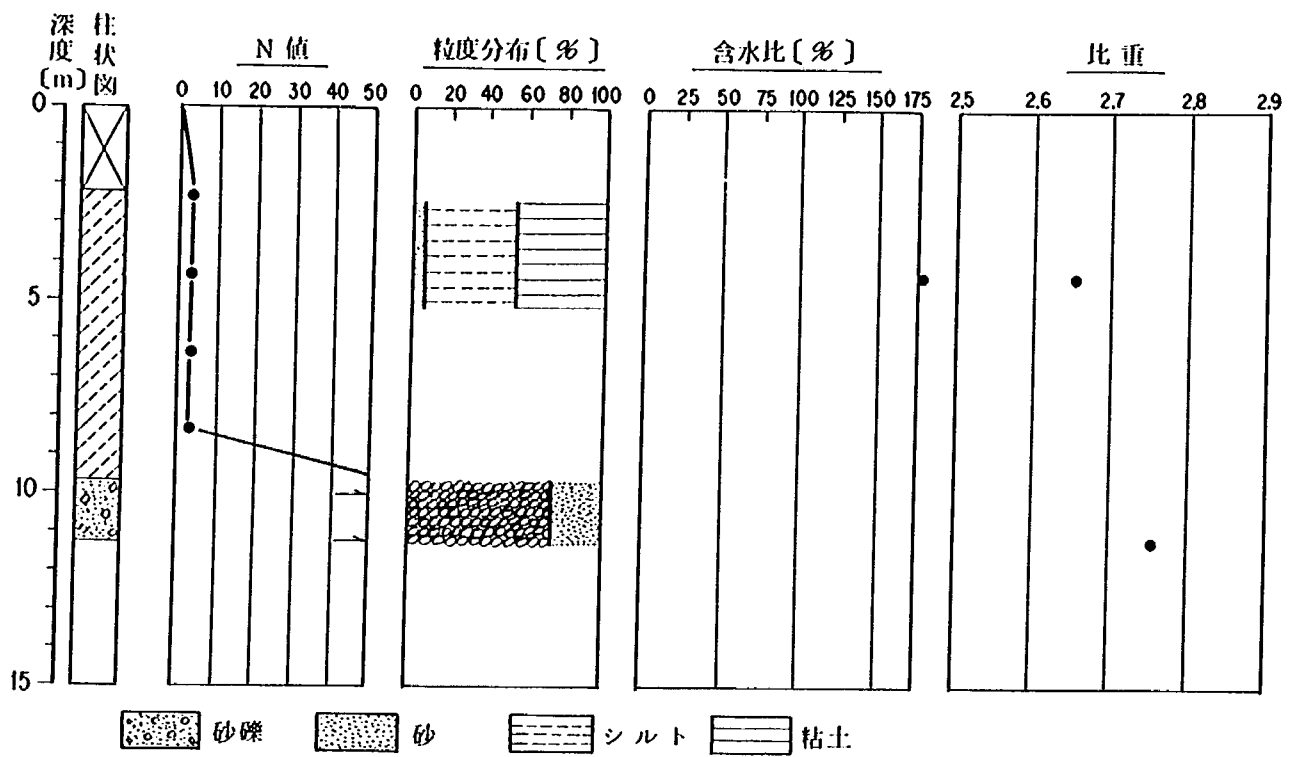
(b) No.10 地点

付図1 (2) 室内土質試験結果



(c) No. 11 地点

付図1 (3) 室内土質試験結果

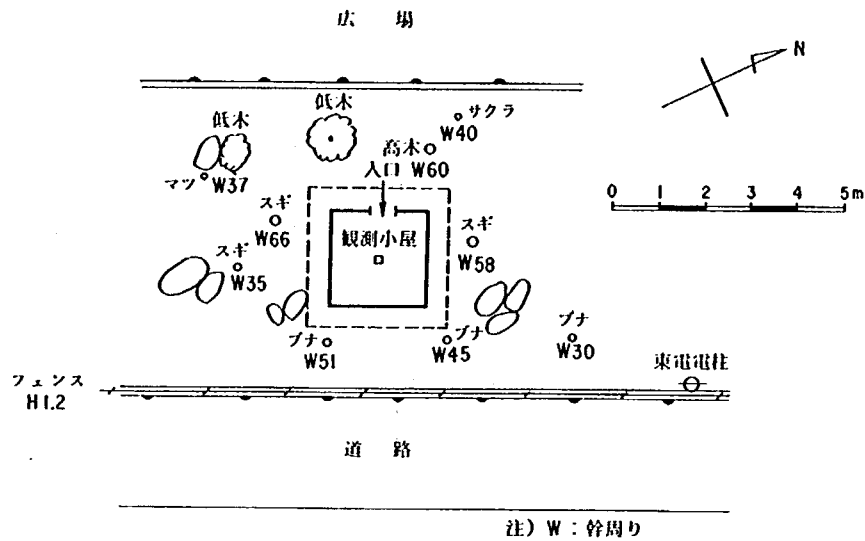


(d) No. 14 地点

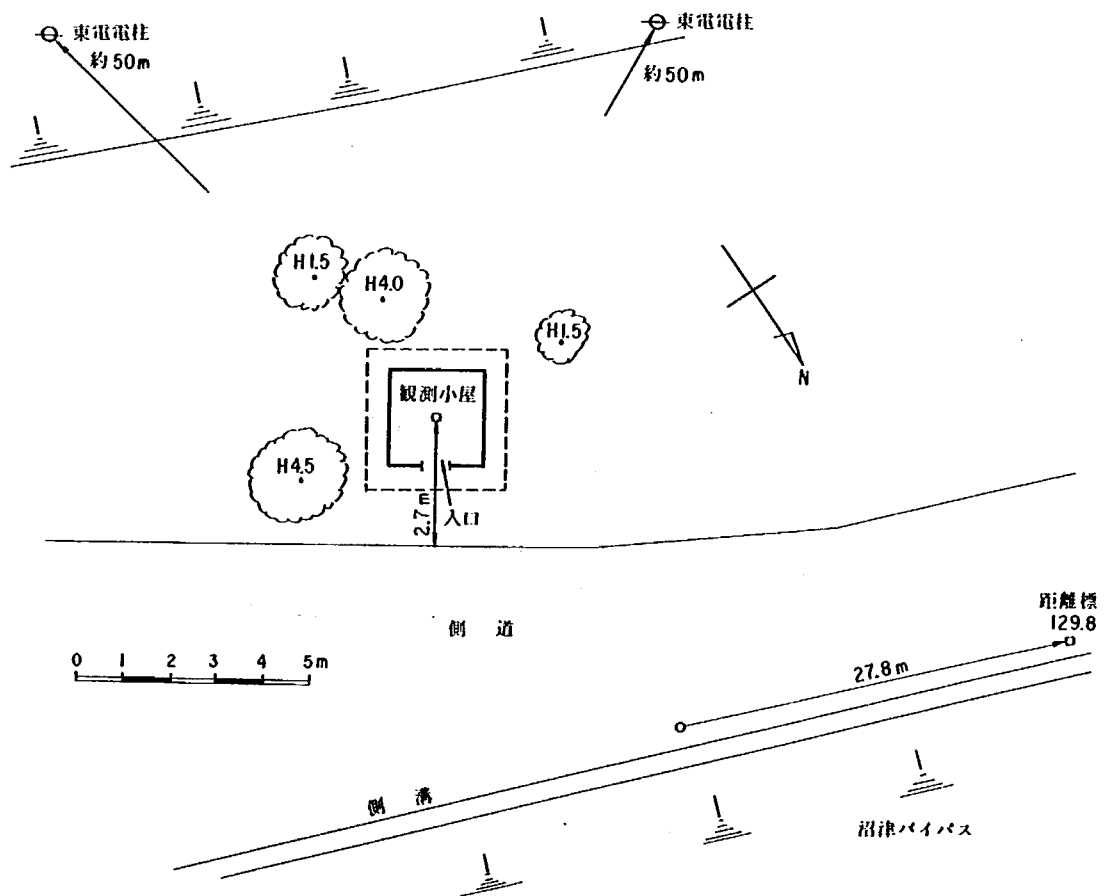
付図1(4) 室内土質試験結果

付属資料 2. 観測小屋周辺の平面図

END OF DOCUMENT (NOTHING TO FOLLOW)

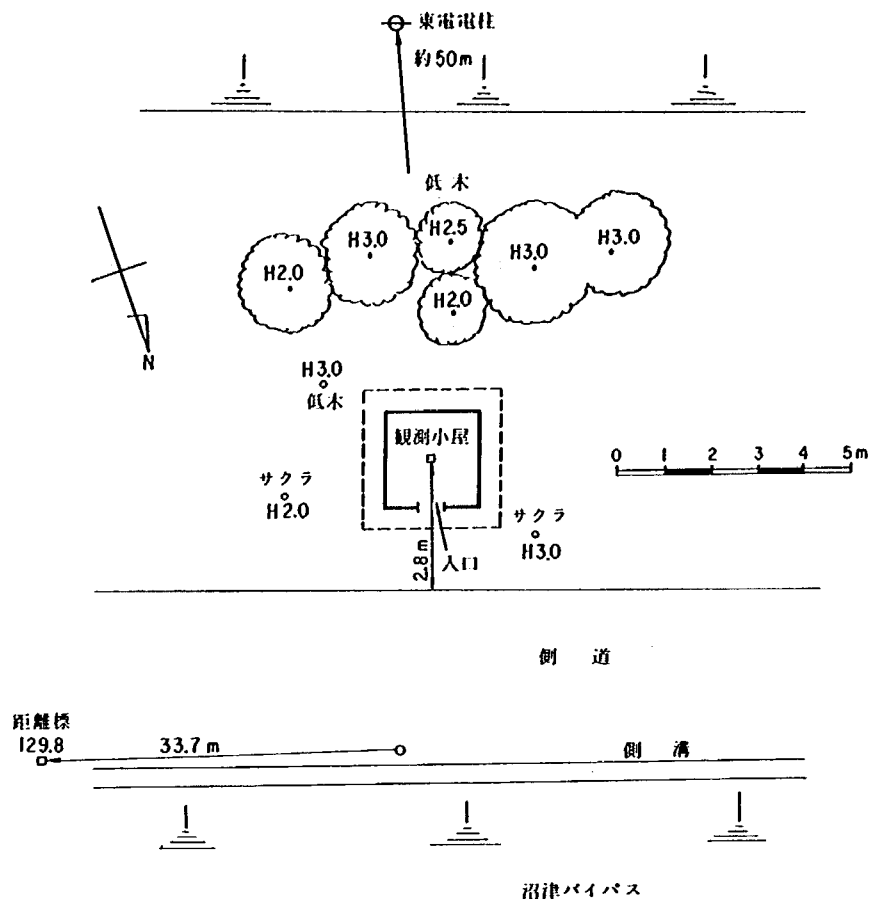


(a) 今沢中央公園 (No. 6 地点)

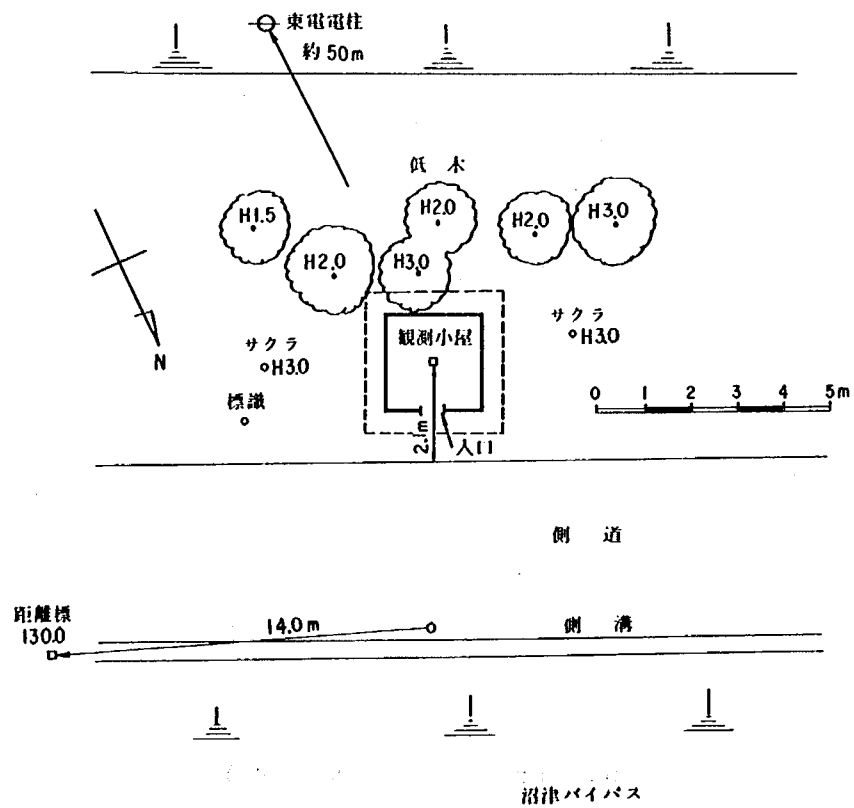


(b) 沼津バイパスNo. 1 (No. 7 地点)

付図 2 (1) 観測小屋周辺の平面図

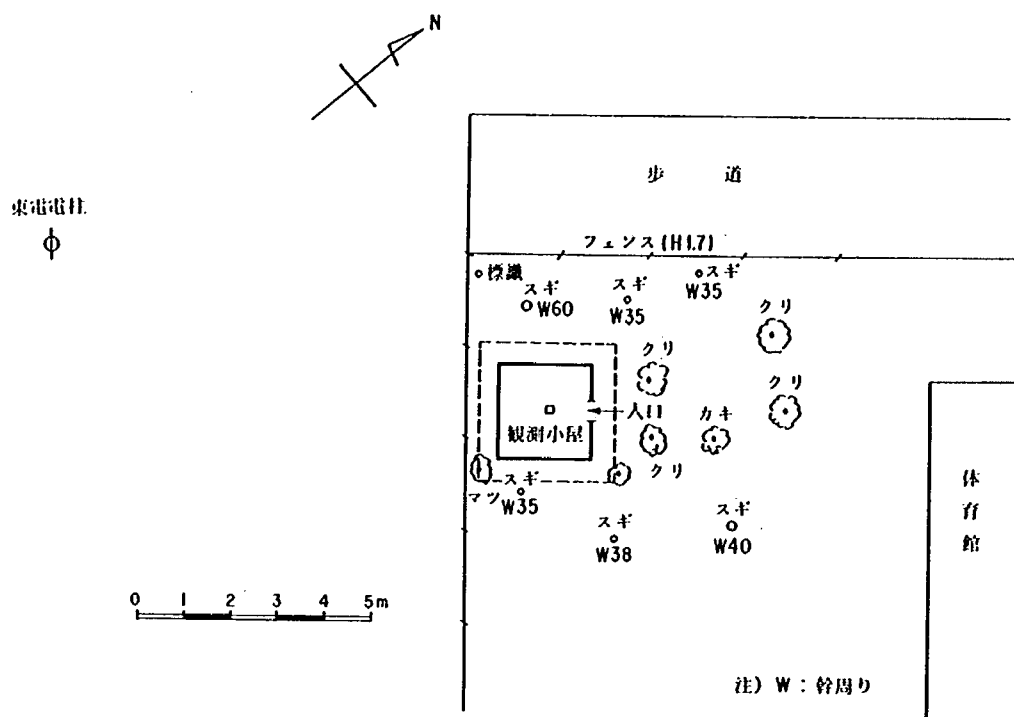


(c) 沼津バイパスNo. 2 (No. 8 地点)

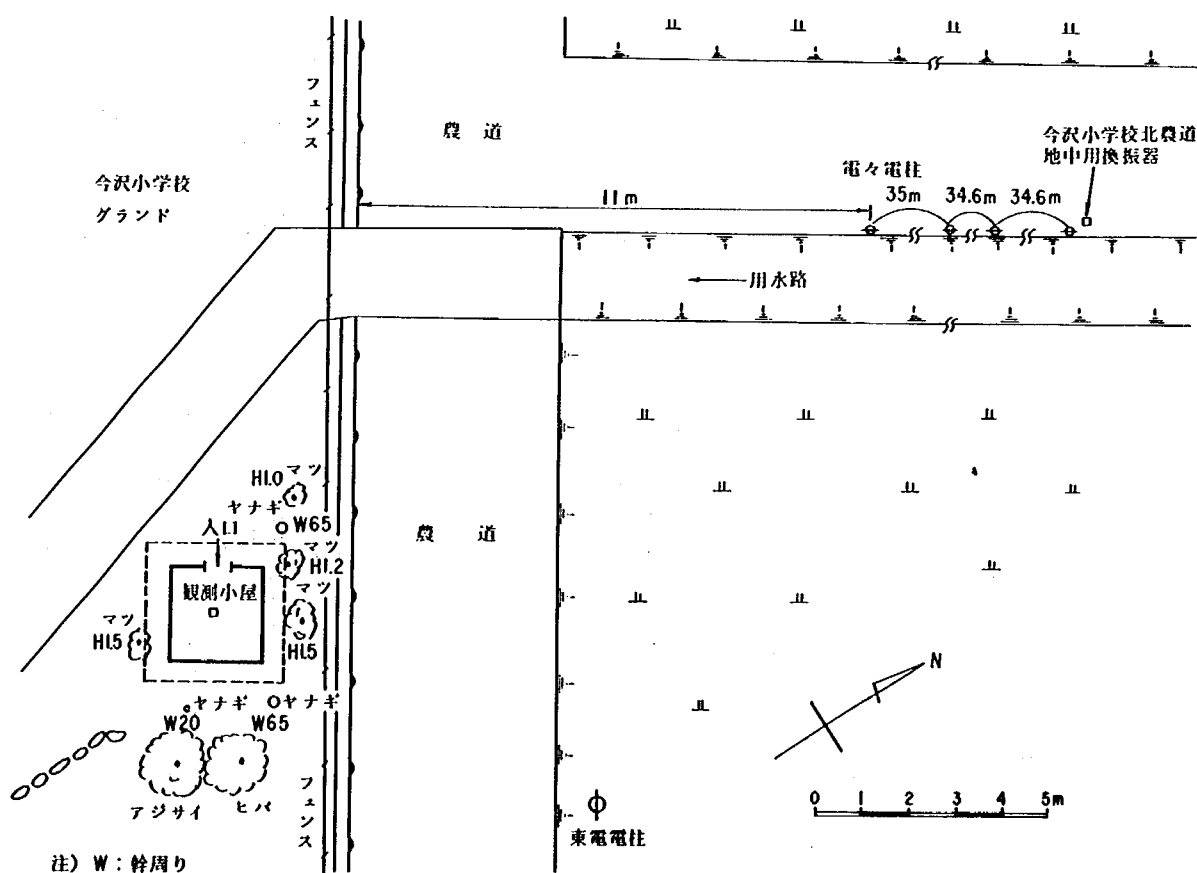


(d) 沼津バイパスNo. 4 (No. 9 地点)

付図2 (2) 観測小屋周辺の平面図

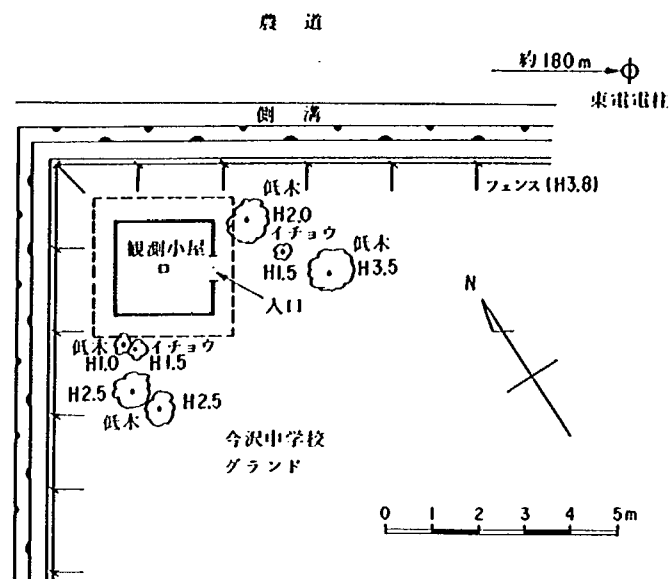


(e) 今沢小学校体育館 (No. 10 地点)

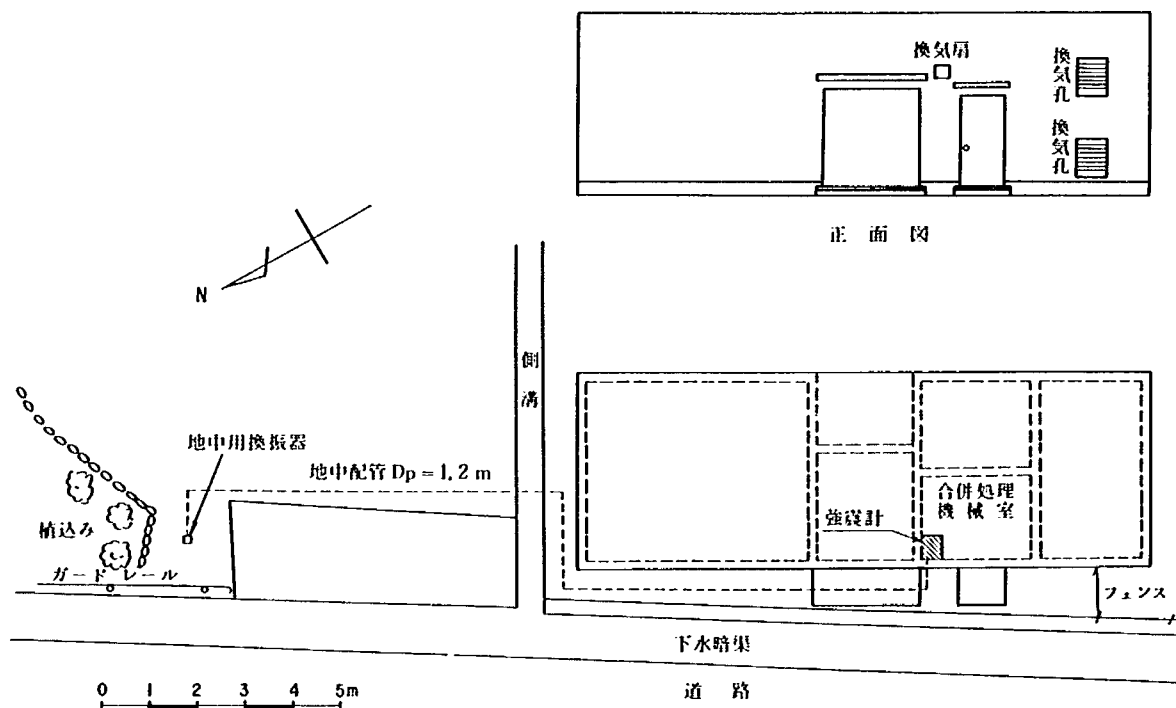


(f) 今沢小学校北門および今沢小学校北農道 (No. 11 および No. 13 地点)

付図 2 (3) 観測小屋周辺の平面図



(g) 今沢中学校 (No. 12 地点)



(h) 愛鷹地区センター (No. 14 地点)

付図 2 (4) 観測小屋周辺の平面図

付属資料 3. 相良地区高密度強度観測場における
観測記録例

(1) 相良地区高密度観測場の概要

相良地区高密度強震観測場は、静岡県榛原郡相良町内に展開されている。本地区は、付図 3.1 に示すように、駿河湾に注ぐ萩間川沿いの地区であり、萩間川の後背低地、砂丘、周辺丘陵地から構成されている。本地区の地盤構成は付図 3.2 に示すとおりであり、基盤層は、新第三紀中新世の相良層である。相良層は、泥質岩を主体とし、一部に礫層および砂層を挟んでいる。このような地形・地盤条件を考慮して、強震計を丘陵地から萩間川の後背低地に至る No. 1, No. 2, No. 3, No. 4, No. 5 および No. 7 地点と後背低地から砂丘に至る No. 6, No. 8, および No. 9 地点を中心とし、これに No. 10 地点を加えた合計 10 箇所に配置している。このうち、No. 4, No. 5, No. 8, および No. 10 地点の 4 箇所においては、地表だけではなく、相良層中に約 5 m 貫入する位置（深度 30 ～ 36 m）にも地中地震計を配している。

(2) 観測記録例

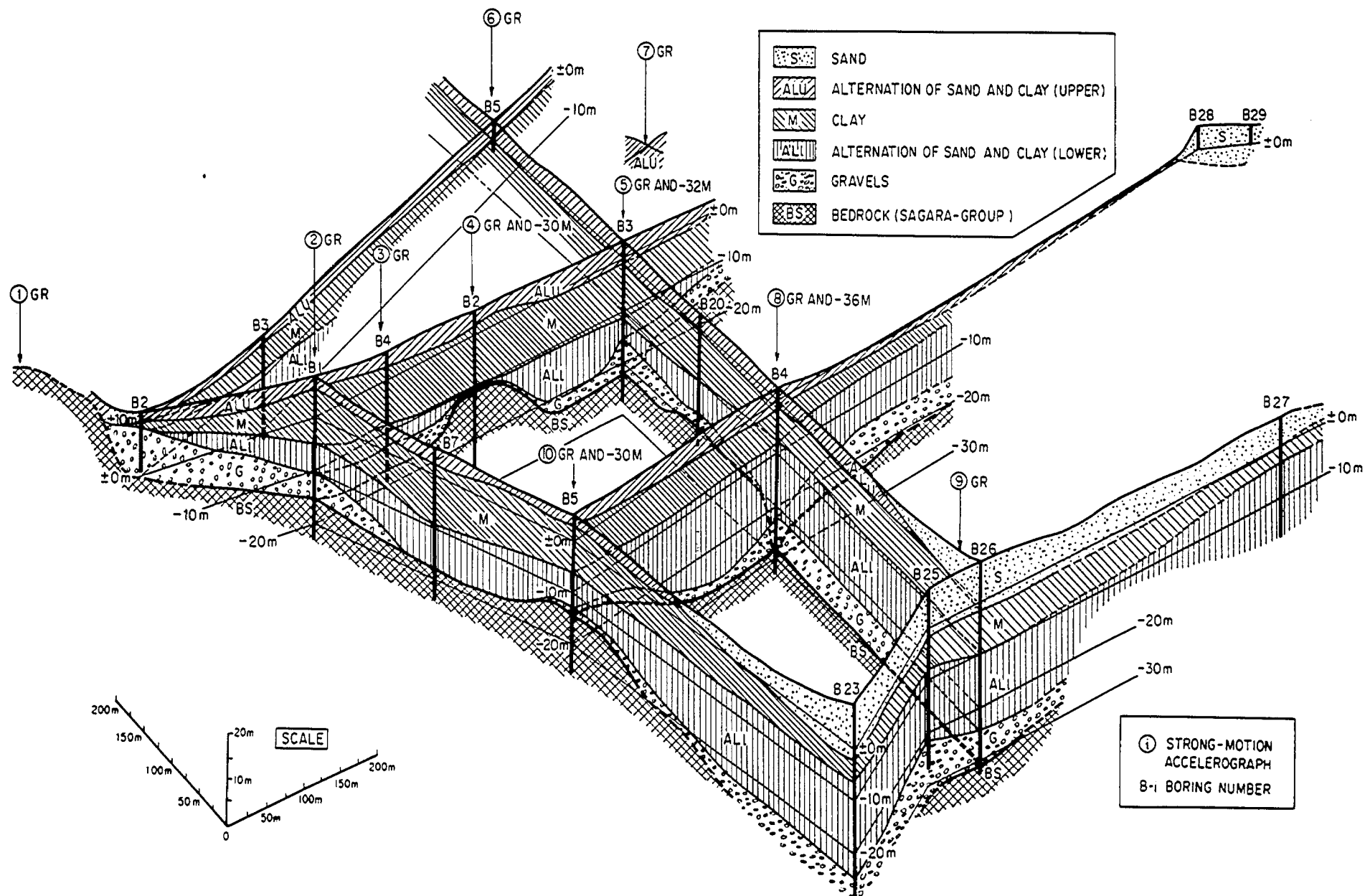
観測記録の一例として、昭和 58 年 3 月 16 日に発生した静岡県西部を震源とする地震（マグニチュード 5.7）により相良地区高密度強震観測場で得られた記録を示す。付図 3.3 は記録波形の例として、付図 3.1 に示した丘陵地から萩間川の後背低地に至る No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 および No. 5 地点の加速度波形を示したものであり、また、付表 3.1 は各観測点での最大加速度を示したものである。付図 3.3 および付表 3.1 からわかるように、丘陵上で相良層の露出する No. 1 地点および砂丘上の No. 9 地点では、相対的に最大加速度が小さくなっている。次に、No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 および No. 5 地点の加速度応答スペクトル S_A^i （ $i = 1, 2, \dots, 5$ ）（減衰定数 5%）を示すと、付図 3.4 のようになる。応答スペクトルの値は、上述の最大加速度の場合と同様に、No. 1 地点では小さく、No. 2 地点および No. 3 地点では大きいことがわかる。また、応答スペクトルの卓越周期は、一般に、南北成分では 0.15 秒および 0.3 秒付近、東西成分では 0.15 秒付近となっている。次に、観測点ごとの加速度応答スペクトルを比較するために、No. 1 地点の応答スペクトルに対する他の地点の応答スペクトルの比 S_A^i / S_A^1 （ $i = 2, 3, \dots, 5$ ）を求めると、付図 3.5 に示すようになる。付図 3.5 より、No. 2 地点および No. 3 地点における応答スペクトル比（増幅率）は、No. 4 地点および No. 5 地点における増幅率よりも大きいことがわかる。なお、増幅率が大きい固有周期は、南北成分では 0.5 秒付近であるのに対して、東西成分では 0.15 秒付近および 0.7 秒付近である点が興味深い。

付表 3.1 最大加速度の一覧

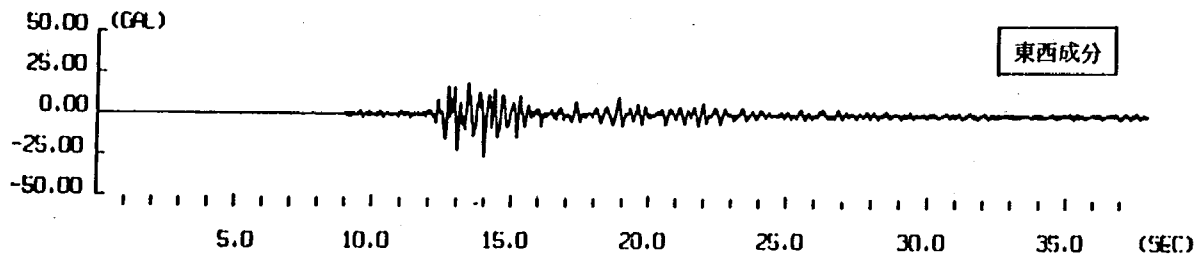
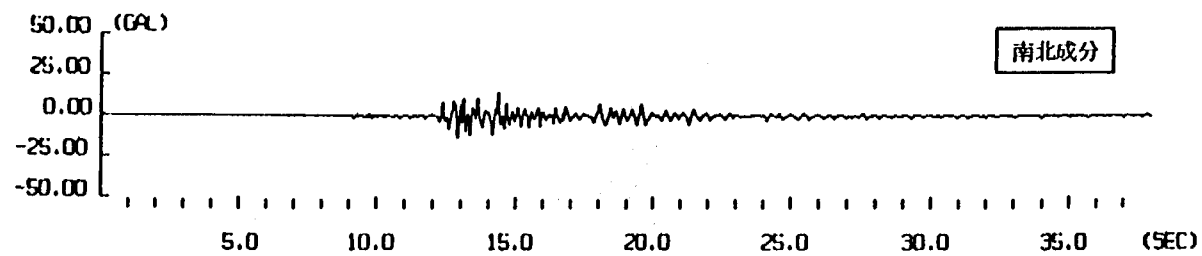
地点 No.	設 置 場 所	最大加速度 (gal)		地点 No.	設 置 場 所	最大加速度 (gal)	
		南北成分	東西成分			南北成分	東西成分
1	地 表	14.2	26.1	6	地 表	23.1	31.5
2	"	27.9	41.8	7	"	37.6	—
3	"	35.7	69.7	8	"	32.0	31.2
4	"	29.7	31.9		—36m	9.3	8.0
	—30m	8.7	11.8	9	地 表	26.1	24.3
5	地 表	25.0	27.2	10	"	43.7	49.9
	—32m	—	—		—30m	10.1	8.6



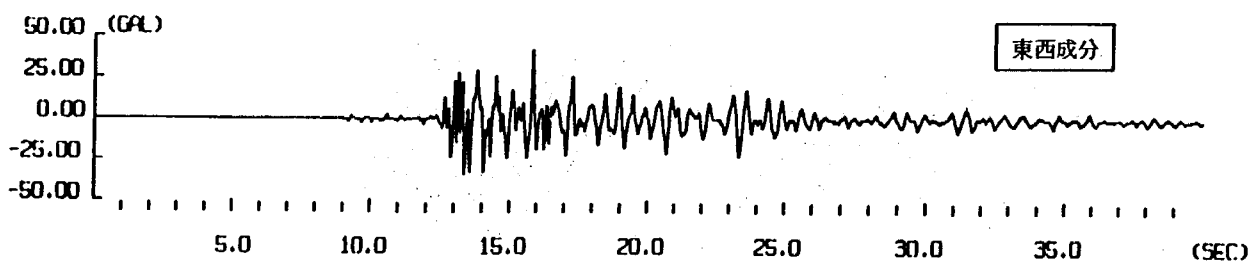
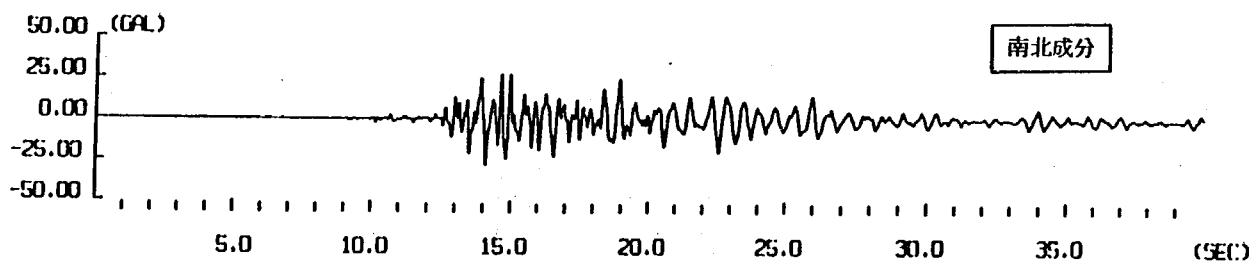
付図 3.1 相良地区高密度強震観測場



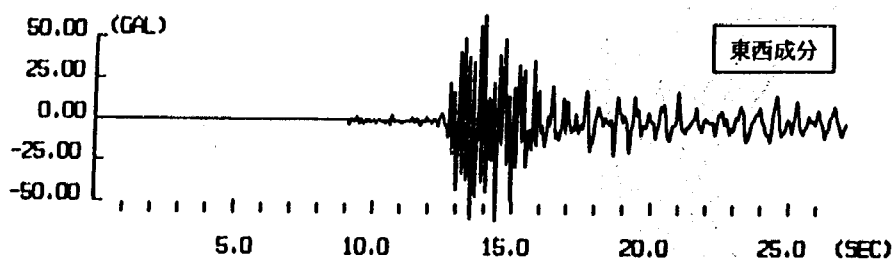
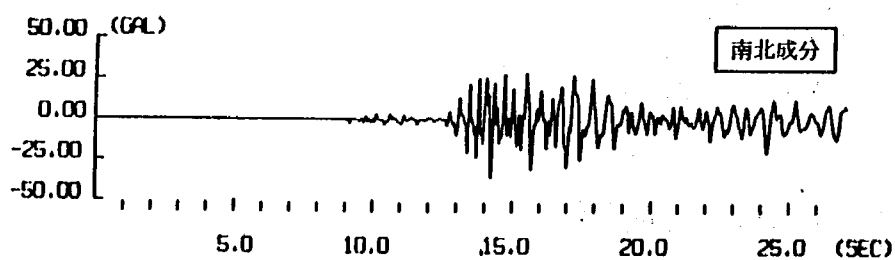
付図 3.2 相良地区高密度強震観測場の地盤構成



(a) No 1 地 点

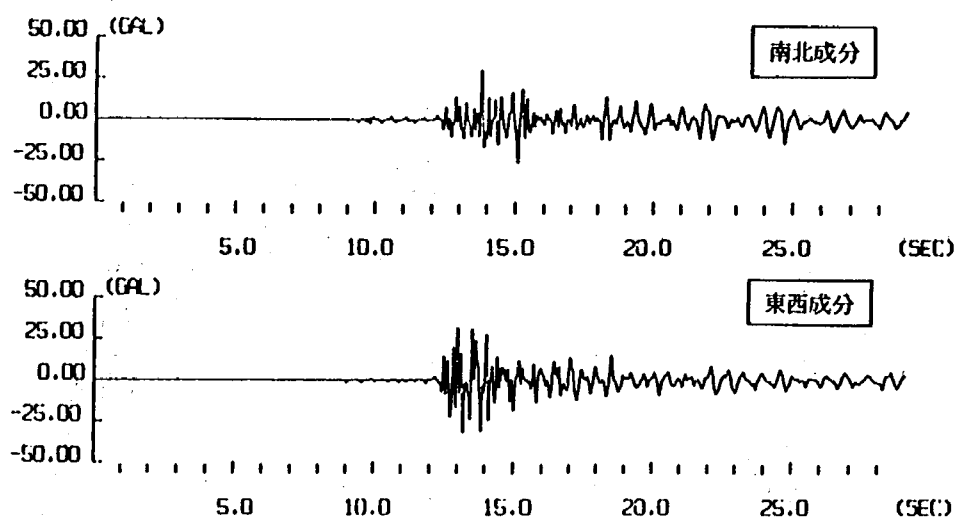


(b) No 2 地 点

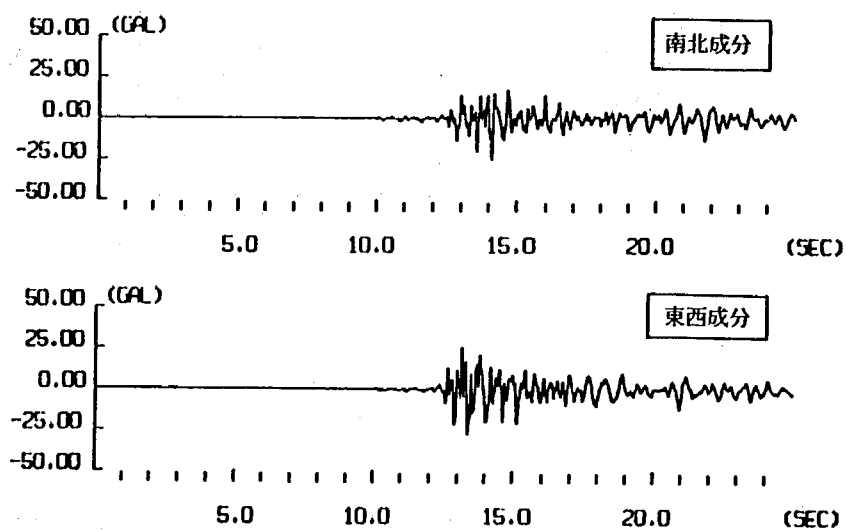


(c) No 3 地 点

付図 3.3 (1) 加速度波形の一例

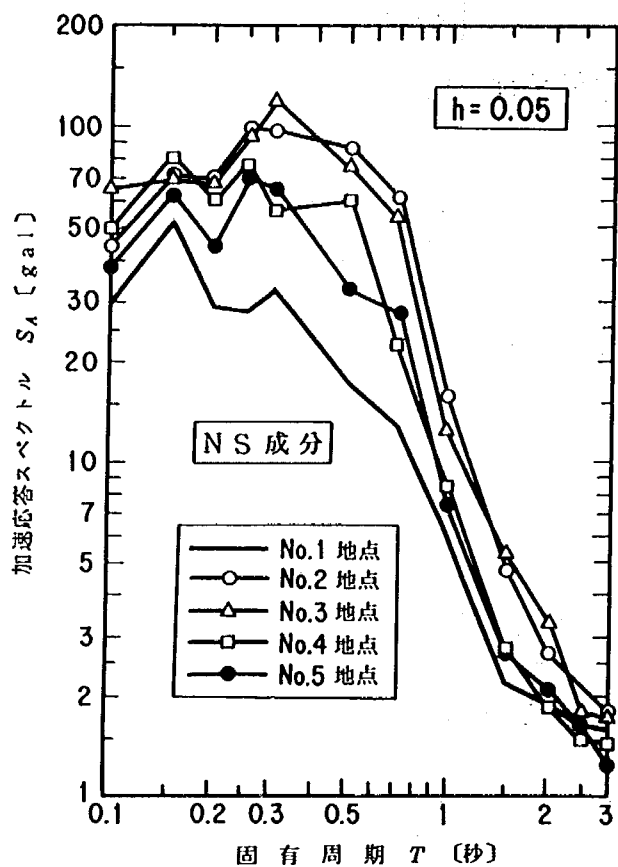


(d) No. 4 地 点

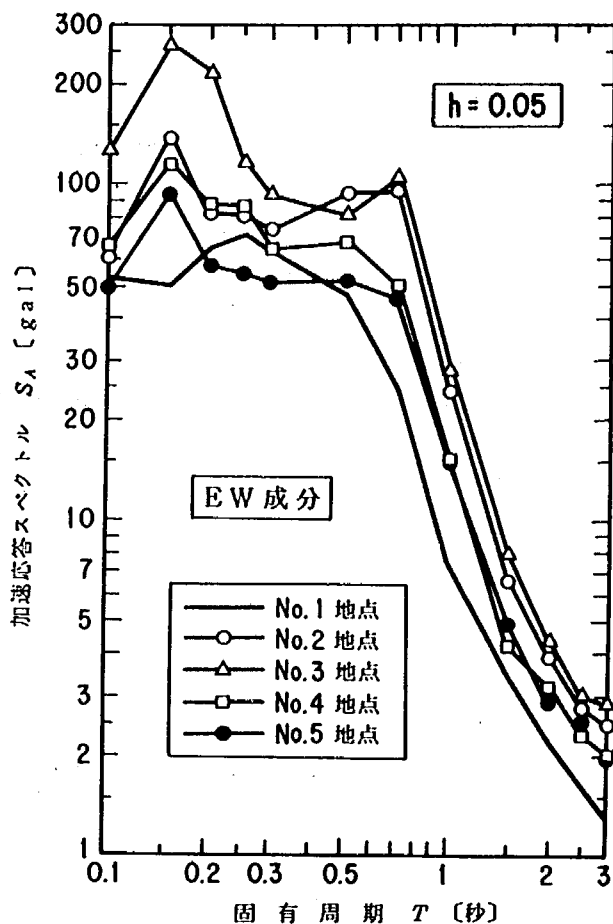


(e) No. 5 地 点

付図 3.3 (2) 加速度波形の一例

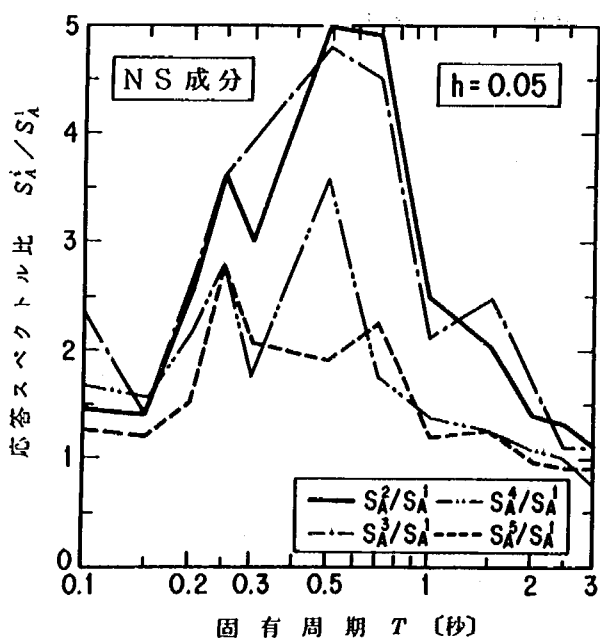


(a) 南北成分

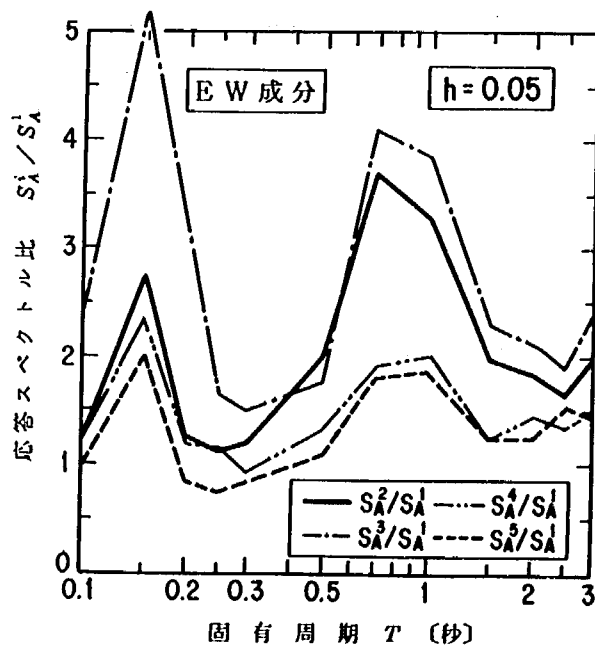


(b) 東西成分

付図3.4 加速度応答スペクトル



(a) 南北成分



(b) 東西成分

付図3.5 加速度応答スペクトル比

土木研究所における高密度強震
観測システム

— (3) 沼津地区の観測システム —

ISSN0386-5878

土木研究所資料第 2140 号

昭和 59 年 9 月 (1984 年)

直 土
川 康
木 彦
島 一
村 興
沢 之
橋
荒 高
佐 高
川 高
田 高
相 高

キーワード 高密度強震観測, 地震動, 耐震設計

要 旨

本資料は, 沼津地区における高密度強震観測システム
の概要をとりまとめたものである。



郵便はがき

3 0 5 - □ □

40
円
切
手
を
は
い
下
さ
い

建設省土木研究所

振 動 研 究 室 御 中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. 182

No. 182

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 2140 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 2140 号

土木研究所における高密度強震観測システム

— (3) 沼津地区の観測システム —

