

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 396 Sept. 1981

沖縄県および奄美諸島の大地震時における地盤加速度

北 澤 壮 介
 楡 垣 典 弘
 野 田 節 男

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 対象とした地点	5
3. 地 震 調 査	9
3.1 歴史地震	9
3.2 想定地震	16
4. 基盤における地震動	21
4.1 基盤の最大加速度	21
4.2 入力地震波形	22
5. 地盤のモデル化	25
5.1 土の動的変形特性の評価	25
5.2 粘性土のせん断弾性定数と減衰定数	25
5.3 砂質土のせん断弾性定数と減衰定数	27
5.4 初期せん断弾性定数	29
5.5 地震応答解析モデル	30
6. 地盤の地震応答解析手法	31
7. 計算結果と考察	33
7.1 計算結果の概要	33
7.2 地盤の最大加速度	44
7.3 地盤のひずみと固有振動数	45
7.4 地震資料との比較	46
7.5 設計への適用	47
7.6 地盤加速度推定手法の問題点	50
8. 結 論	51
参 考 文 献	51
記 号 一 覧 表	53
付 録 沖縄県および奄美諸島の各地点の土質柱状図と地盤モデル定数 および応答計算結果	

Estimation of the Maximum Ground Acceleration in Okinawa Prefecture and Amami Islands

Sosuke KITAZAWA*
Norihiko HIGAKI*
Setsuo NODA**

Synopsis

In order to obtain the fundamental data required in planning the countermeasures against earthquake disaster, the accelerations at ground surface of 111 sites in Okinawa Prefecture and Amami Islands are calculated.

10 of the great earthquakes caused damages are selected for design earthquakes. The earthquake response analysis of horizontal soil layers in this report is based on the multiple reflection theory, and the technique of iterative elastic analysis incorporating strain compatible soil moduli and damping is used.

In Amami Islands, the maximum ground accelerations of 190–280 Gal are expected. At most of the sites in Okinawa Islands in Okinawa Prefecture, the maximum accelerations of 150–400 Gal are expected. And in Sakishima Islands in Okinawa Prefecture, the maximum accelerations of 150–410 Gal are expected.

The accelerations estimated in this report do not always directly correspond to a seismic coefficient in the current design procedure. But, the relationship between acceleration and seismic coefficient is available for gravity type quaywalls.

* Member of the Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structures Division
** Chief of the Earthquake Resistant Structures Laboratory, Structures Division

沖縄県および奄美諸島の大地震時における地盤加速度

北 澤 壮 介*
 椋 垣 典 弘*
 野 田 節 男**

要 旨

沖縄県および奄美諸島における地震防災対策の基礎資料として、代表的な地点における大地震時の地盤の最大加速度を推定した。

対象地点としては、奄美大島、喜界島、徳之島などよりなる奄美諸島から16地点、沖縄島およびその周辺の島々よりなる沖縄諸島から61地点、宮古島、石垣島、西表島などよりなる先島諸島から34地点の合計111地点を選定した。想定地震としては、過去に発生した地震の中から対象とした地域に最も大きな影響を与えたと思われる地震を選定し、奄美諸島、沖縄諸島にそれぞれ3つ、先島諸島に4つの合計10の地震を想定した。地盤の地震応答解析では重複反射理論を適用し、等価線型解析法により土のせん断弾性定数と減衰定数のひずみ依存性を考慮した。

大地震時に予想される地盤の最大加速度は、奄美諸島では190～280Gal、沖縄諸島の大部分の地点で150～400Gal、先島諸島では150～410Galとなった。

なお、ここで得られた地盤加速度は、そのまま現行設計法における震度とは単純に結びつかない。したがって、計算結果を利用する際には対象構造物の形式や実際の被害例等を参考にして慎重に検討する必要がある。たとえば重力式岸壁の場合には、簡単な計算式により震度に換算することができる。

1. まえがき

平坦な土地の少ない我が国において、臨海部の平野は社会活動・産業活動の最も盛んな地域を形成している。港湾はこのような地域の都市活動に必要な物資の流通拠点であり、海岸堤防や水門等の海岸保全施設は海水の浸入からこれらの背後地を守っている。万一、このような地域が大地震に襲われた場合には、付近の諸港湾は緊急物資の輸送や復興作業の拠点としての機能を果さねばならないし、海岸保全施設に守られた臨海部の空間は、緊急避難のための重要なスペースとなる。これらの事を考慮すると、地震によって港湾・海岸の諸施設が破壊されることは、地域全体の社会・経済活動に甚大な影響を与えるものと考えられる。東京湾沿岸や大阪湾沿岸等の大都市域の他にも、臨海部のこのような状況は、本土から離れた島しょにおいても同様である。

運輸省港湾局では、港湾地域の地震防災対策について従来より種々の調査・研究を重ねてきており、その一環として港湾局防災課および港湾技術研究所が中心となり、昭和48年～53年に「大都市震災対策調査」を実施した。この調査は、地震予知技術の進展、地震動の諸性質や地

盤振動特性の解明、構造物の耐震設計法の改良など、最近の地震学・耐震工学の成果を利用することにより、臨海地域が大地震に襲われた場合に予想される地盤加速度や地中ひずみ等の工学的情報についてより信頼性の高い値を求め、当該地域における地震防災対策を効果的に遂行する際の基礎的資料を収集するものである。対象とした地域は、東京湾沿岸¹⁾²⁾、東海沿岸³⁾、大阪湾沿岸⁴⁾、北海道太平洋沿岸⁵⁾、広島湾沿岸・瀬戸内海西部および北九州沿岸地域⁶⁾であった。

本報告では、沖縄県および奄美諸島に対して、従来とほぼ同様の手法により調査を実施している。当該地域を調査対象とした理由は以下のようである。既に述べたごとく、島しょにおける震災対策は他地域と同様に重要であることに加えて、奄美地方は地震活動度がかかなり高いこと、沖縄県には八重山地震津波のように非常に大きな被害をもたらした事例があるためである。

本報告で得られた地盤加速度は、大地震時における地域内の地震危険度をマクロ的に把握するために役立つほか、計算手法等の精度が向上し推定値そのものの信頼度も高まったので、各地点ごとに地震防災対策を立案する

* 構造部 地震防災研究室

** 構造部 耐震構造研究室長

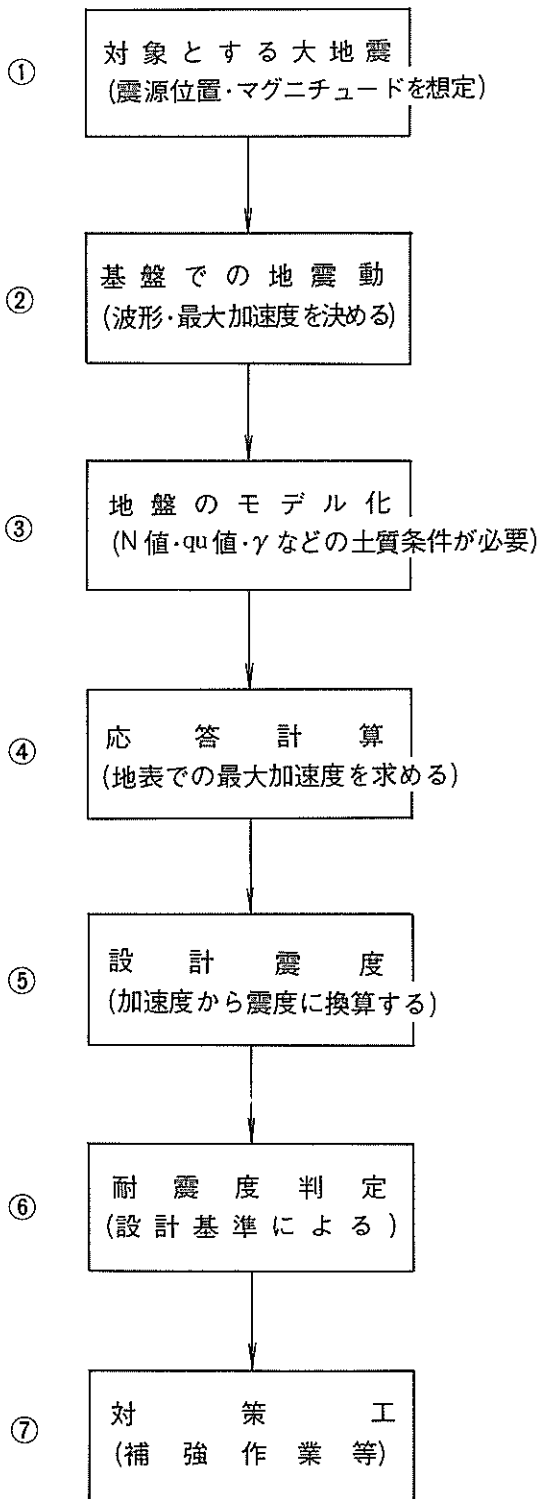


図-1.1 震度法による耐震性判定の一方法

際の基礎的資料としても活用できる。大地震に対する構造物の耐震性の検討あるいは防災対策には種々の方法が考えられるが、ここではその一例を図-1.1に示す。この内で、本報告で取扱う範囲は①～④までである。図-1.1に従って、本報告の概略および防災対策上その後続く作業について説明する。

① 歴史上の記録を含めた地震記録や地震予知情報を参考にし、対象地域に大きな影響があると思われる大地震の震源、マグニチュードを定める。

② 防災対策上の観点から検討地点を選定し、その地点の基盤に伝わってくる地震動の強さ、地震波形を定める。

③ 検討地点のボーリングデータに基づき、地盤を数層の水平層にモデル化する。

④ 基盤から入射した地震動が、モデル化された地盤内をせん断波として上方に伝播すると仮定し、土の動的強度特性を考慮した多層重複反射理論によって地表面での地盤加速度を計算する。同時に、地盤の固有周期、振動増幅率および地中ひずみも求める。

以上の作業および計算結果に対する若干の検討が本報告の内容であるが、防災対策においてこれらの成果を導入するための一例として以下のステップが考えられる。

⑤ 求めた地盤加速度を用いて、耐震設計における地震力を算定する。港湾構造物に対する現行の設計法⁷⁾では、地震力の求め方として震度法が採用されており、図中の⑤設計震度が地域別震度・地盤種別係数および重要度係数の積として直ちに求まるようになっている。それゆえ、地震力はこの設計震度と構造物の重量の積で表わされる。しかし、地盤加速度を設計震度に換算するということは、実際には動的に作用する地震力を静的な外力として取扱うことであるから、換算にあたっては構造物の力学的機構・設計算法・許容応力の取り方等が密接にかかわりあってくる。この点について、現時点ではいまだ十分な説明がなされているとは言い難いが、重力式構造物に関しては7.5に紹介する方法が野田らにより提案されている。

⑥ 構造物の耐震度を判定する。重力式岸壁については、⑤で得られる設計震度に対して現行設計法で安全率が1以上になるか否かを検討すればよい。その他の構造物に関しては、過去の地震被災例の解析等を参考に、④で得られる地盤加速度に対して、その安定性が検討される⁸⁾。

⑦ 必要に応じて、補強工等の適切な対策を施す。⑥、⑦に関する検討は、既に運輸省第二港湾建設局、第五港湾建設局、その他の諸機関において実施された例がある。⁹⁾¹⁰⁾

2. 対象とした地点

本報告で対象とした地域は、沖縄県および奄美諸島であり、図-2.1に示すように北から順に、奄美諸島、沖縄諸島および先島諸島の3つの地域に分けることができる。奄美諸島は、奄美大島、喜界島、徳之島、沖永良部島などよりなり、奄美大島には重要港湾である名瀬港がある。沖縄諸島は、沖縄島とその周辺の小さな島々よりなり、重要港湾である那覇港、運天港、金武湾港、中城湾港がある。先島諸島は、宮古島、石垣島、西表島などよりなり、宮古島および石垣島にはそれぞれ重要港湾である平良港、石垣港がある。

計算の対象とした地点は、奄美諸島から16地点、沖縄諸島から61地点、先島諸島から34地点の合わせて111地点であり、1から順に通し番号がつけてある。表-2.1~2.3に、それぞれ奄美諸島、沖縄諸島、先島諸島の各地点の緯度、経度および想定地震の震源域の縁からの距離(実効距離)を示す。想定地震、震源域、実効距離については3.2および4.1において詳述する。

各地点の土質柱状図の収集にあたっては、なるべく深

くまでボーリングが行われており、基盤とみなせる地層に達しているものに限った。ここでいう基盤とは、岩盤あるいはN値が50以上程度の土層をいう。最終的に計算で用いた各地点の土質データとしては、いくつかの近くの土質柱状図を比較検討し、その地域の代表的なデータと思われるものを選定した。しかし、土質柱状図の収集にも制限があるため一部の地点についてこのような検討を十分行うことができなかった。この報告に記されている大地震時における地盤加速度は、それぞれの地点のそれぞれの地盤モデルに対する計算値であり、今回の計算結果を他の地点に利用する場合には、各地点の地盤条件について十分な比較検討が必要である。

以下に沖縄県および奄美諸島の地質について、文献11)より抜すい要約して述べる。本地域の地質学的構造は、時代の新しいものから順に次の9つの地層に区分される。1) 近代堆積層及び砂丘、2) 隆起さんご礁及び隆起海浜地積、3) 国頭礫層、4) 琉球石灰岩、5) 租納礫層、6) 島尻層群、7) 八重山夾炭層、8) 宮良層群、9) 古生層である。

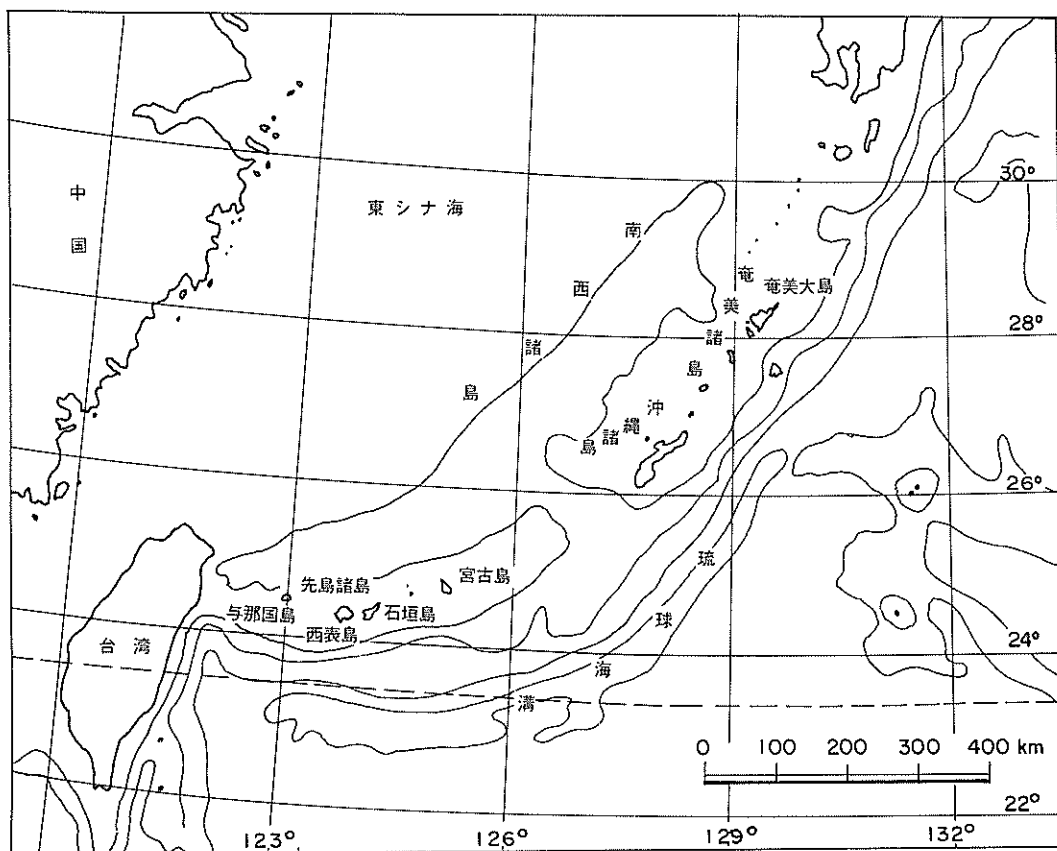


図-2.1 沖縄県および奄美諸島の位置

表-2.1 奄美諸島の各地点の位置と実効距離

地点 番号	地 点 名	北 緯	東 経	実 効 距 離 (km)		
				喜界島地震	奄美大島地震	徳之島地震
1	大笠利港防波堤	28°29'47"	129°42'04"	61.7	34.6	99.9
2	赤木名港防波堤	28°27'27"	129°40'15"	60.5	32.4	95.0
3	竜郷港	28°26'45"	129°36'28"	61.8	28.9	92.5
4	大熊漁港	28°23'52"	129°31'21"	62.7	26.1	86.0
5	名瀬港-9.0m岸壁	28°22'43"	129°29'59"	62.8	26.0	83.6
6	名瀬港西防波堤	28°22'56"	129°29'59"	63.0	25.9	84.0
7	湯湾港	28°16'23"	129°17'41"	69.1	32.2	72.2
8	篠川港	28°12'55"	129°17'26"	67.9	36.1	66.0
9	古仁屋漁港防波堤	28°08'23"	129°18'51"	65.3	41.4	57.5
10	湾港	28°19'34"	129°56'13"	50.3	54.3	91.3
11	実久漁港防波堤	28°11'08"	129°11'09"	73.4	42.2	64.8
12	瀬武港-4.5m岸壁	28°09'44"	129°12'48"	71.4	42.7	61.7
13	俵港	28°07'57"	129°14'50"	69.0	43.8	57.8
14	請阿室港物揚場	28°01'43"	129°15'29"	67.5	52.4	46.6
15	亀徳港-9.0m岸壁	27°44'19"	129°01'31"	85.3	87.7	32.3
16	与論港	27°02'05"	128°24'14"	158.9	55.4*	96.5

* : 沖縄島北部地震

表-2.2 沖縄諸島の各地点の位置と実効距離 (その1)

地点 番号	地 点 名	北 緯	東 経	実 効 距 離 (km)		
				沖縄島北部 地震	沖縄島南西 地震	沖縄島南東 地震
17	辺土名漁港	26°44'48"	128°10'59"	46.2	78.1	79.8
18	国頭電報電話局	26°44'22"	128°10'52"	46.3	77.5	79.1
19	運天港航路	26°39'21"	127°59'53"	51.7	58.1	69.0
20	運天港-3.5m物揚場	26°40'20"	128°00'00"	51.4	59.6	70.6
21	海洋博覧会会場(1)	26°41'34"	127°52'52"	56.5	54.0	73.5
22	海洋博覧会会場(2)	26°40'36"	127°53'17"	56.3	52.9	71.8
23	渡久地港本部漁協冷蔵庫	26°39'21"	127°53'31"	56.4	51.4	69.7
24	本部町健堅地先	26°38'27"	127°52'51"	57.2	49.4	68.4
25	新渡久地港	26°38'03"	127°53'02"	57.2	49.0	67.8
26	名護市字名護宮里地先	26°35'13"	127°58'27"	54.3	51.3	62.5
27	北部ダム事務所総管理庁舎	26°35'23"	127°59'35"	53.5	52.8	62.7
28	名護警察署	26°34'29"	127°59'10"	54.2	51.3	61.3
29	前兼久漁港防波堤	26°26'30"	127°48'09"	68.1	28.6	52.2
30	読谷村山田温泉	26°25'52"	127°47'23"	69.2	27.0	51.7
31	都屋漁港	26°23'08"	127°43'27"	75.2	19.4	50.6
32	新那覇市外電話局	26°14'14"	127°41'33"	85.5	10.0	42.8
33	旧那覇一S	26°14'27"	127°40'47"	86.0	9.1	43.7
34	那覇港施設ヤード	26°14'49"	127°40'45"	85.6	9.2	44.0
35	那覇港波高観測所	26°14'47"	127°40'32"	85.9	8.9	44.2
36	那覇新港ふ頭	26°13'53"	127°40'30"	86.9	8.5	43.4
37	那覇港-11.0m岸壁第4バース	26°13'44"	127°40'33"	87.0	8.5	43.3
38	那覇港-11.0m岸壁第3バース	26°13'57"	127°40'38"	86.7	8.7	43.4

表-2.2 沖繩諸島の各地点の位置と実効距離 (その2)

地点 番号	地 点 名	北 緯	東 経	実 効 距 離 (km)		
				沖繩島北部 地 震	沖繩島南西 地 震	沖繩島南東 地 震
39	那覇港-11.0m岸壁第1バース	26°14'08"	127°40'38"	86.5	8.8	43.5
40	那覇新港ふ頭A型岸壁(1)	26°13'57"	127°40'54"	86.4	9.1	43.1
41	那覇新港ふ頭A型岸壁(2)	26°13'44"	127°40'53"	86.7	9.0	43.0
42	那覇港臨港道路泊陸上工区	26°13'35"	127°41'00"	86.1	10.0	42.1
43	那覇港臨港道路泊航路	26°13'23"	127°40'57"	87.0	9.0	42.6
44	那覇港泊ふ頭南岸	26°13'10"	127°41'05"	87.1	9.1	42.3
45	那覇港臨港道路泊海上工区	26°13'16"	127°40'46"	87.3	8.7	42.7
46	那覇港臨港道路波之上工区(1)	26°13'03"	127°40'27"	87.8	8.3	42.8
47	那覇港臨港道路波之上工区(2)	26°13'00"	127°40'17"	88.0	8.0	42.9
48	安全運転学校那覇本校	26°12'44"	127°40'06"	88.5	7.8	42.9
49	那覇港琉球中央倉庫	26°12'32"	127°40'10"	88.6	7.8	42.7
50	那覇空港国際線ターミナルビル付近	26°12'32"	127°38'58"	89.8	6.3	43.9
51	那 覇 空 港	26°12'01"	127°38'56"	90.3	6.3	43.5
52	琉球放送ビル	26°12'50"	127°40'58"	87.6	8.9	42.2
53	仲井間ビル	26°12'38"	127°41'24"	87.4	9.5	41.6
54	國場中継ポンプ場	26°11'30"	127°41'24"	88.6	9.5	40.8
55	与根漁港突堤	26°09'50"	127°39'20"	92.4	7.2	41.7
56	糸満漁港	26°07'53"	127°40'10"	93.9	9.1	39.8
57	那覇地方法務局糸満出張所	26°07'52"	127°40'07"	94.0	9.1	39.8
58	喜屋武漁港	26°05'31"	127°39'39"	97.2	10.3	39.3
59	久高漁港	26°09'15"	127°53'06"	82.4	27.1	30.9
60	海野漁港北防波堤	26°11'15"	127°48'46"	82.9	20.1	34.7
61	当 派 漁 港	26°11'10"	127°46'47"	84.5	17.1	36.0
62	中部製糖第一工場事務所	26°13'03"	127°45'54"	83.0	15.9	38.2
63	南西石油南原製油所	26°13'31"	127°47'14"	81.4	17.9	37.6
64	泡 瀬 漁 港	26°19'10"	127°50'11"	73.0	24.6	41.8
65	南原漁港突堤	26°19'53"	127°52'01"	70.8	27.7	41.9
66	中城湾港(津堅地区)防波堤	26°14'26"	127°56'11"	74.1	31.8	34.4
67	浜漁港埋立護岸	26°19'29"	127°57'16"	67.7	35.3	39.9
68	金 武 湾 港	26°20'07"	127°53'31"	69.5	30.0	41.6
69	具志川中学校	26°21'23"	127°51'13"	70.0	27.6	44.0
70	沖繩アルミ工場	26°26'55"	127°52'12"	64.3	34.0	51.1
71	安田漁港北防波堤	26°44'26"	128°19'17"	46.3	88.3	82.9
72	粟国港-4.5m岸壁	26°34'22"	127°14'11"	104.8	36.9	92.9
73	鳥 島 漁 港	26°35'26"	126°49'50"	140.2	66.7	125.5
74	久米島電報電話局付属舎	26°20'27"	126°45'07"	152.8	63.4	122.1
75	座間味電話局	26°13'31"	127°18'09"	111.9	10.2	70.0
76	阿 嘉 漁 港	26°11'04"	127°16'55"	115.6	11.8	70.5
77	慶留間港護岸	26°10'20"	127°17'39"	115.4	10.9	69.1

表-2.3 先島諸島の各地点の位置と実効距離

地点 番号	地 点 名	北 緯	東 経	実 効 距 離 (km)			
				宮古島 地 震	石垣島 地 震	八重山 地 震	与那国島 地 震
78	池間漁港-4.5m岸壁	24°55'17"	125°15'07"	39.4	65.3	115.2	253.5
79	島尻漁港	24°52'25"	125°17'55"	44.4	65.8	114.8	256.3
80	平良港北防波堤	24°48'36"	125°16'27"	50.1	60.7	108.3	252.0
81	荷川取漁港船揚場	24°48'35"	125°16'52"	50.2	61.2	108.8	252.6
82	平良港南防波堤	24°48'17"	125°16'00"	50.6	60.7	108.2	252.2
83	平良—S	24°48'13"	125°16'49"	50.7	60.8	108.3	252.4
84	宮古空港	24°46'49"	125°17'44"	53.2	60.9	107.7	253.1
85	与那覇湾	24°45'44"	125°15'42"	54.6	57.5	103.9	249.4
86	来間前浜港防波堤	24°43'15"	125°15'21"	58.7	55.4	100.6	247.7
87	佐良浜漁港防波堤	24°50'19"	125°12'50"	46.9	57.8	106.1	247.2
88	下地島空港管理棟	24°49'15"	125°08'44"	48.8	52.2	100.0	240.2
89	国仲~佐良浜港線道路橋梁	24°49'10"	125°10'08"	48.8	53.7	101.5	242.3
90	長山港-3.0m物揚場	24°48'11"	125°11'34"	50.3	54.4	101.9	244.1
91	水納港	24°44'32"	124°41'51"	72.9	30.4	67.8	195.8
92	普天間港	24°38'24"	124°43'22"	80.1	25.2	59.5	194.9
93	舟越漁港	24°30'13"	124°16'38"	119.3	40.8	34.5	149.4
94	底原ダム	24°24'48"	124°12'54"	130.6	46.3	26.3	141.4
95	名蔵大橋	24°23'45"	124°08'20"	137.3	52.6	26.5	134.0
96	神田橋	24°23'49"	124°08'52"	136.6	51.9	26.3	134.8
97	なたつ橋	24°20'57"	124°08'41"	140.4	53.2	22.2	133.5
98	石垣漁港	24°20'29"	124°08'45"	141.0	53.3	21.5	133.5
99	石垣—S	24°19'56"	124°09'20"	141.0	52.8	20.4	134.2
100	石垣港-7.5m岸壁	24°20'03"	124°08'59"	141.2	53.2	20.8	133.7
101	石垣港南防波堤	24°19'31"	124°08'51"	142.1	53.7	20.1	133.4
102	八重山病院	24°19'47"	124°10'26"	139.9	51.5	19.7	135.9
103	竹富東港防波堤	24°19'54"	124°05'36"	145.4	57.9	22.6	128.5
104	小浜港物揚場	24°20'13"	123°59'28"	152.5	66.4	28.1	119.1
105	黒島港防波堤	24°14'55"	124°00'07"	158.3	68.1	21.4	118.7
106	鳩間港防波堤	24°27'38"	123°49'15"	157.6	79.9	47.8	107.2
107	船浦港物揚場	24°24'01"	123°48'47"	162.0	81.1	43.9	104.7
108	大原橋	24°16'25"	123°52'35"	165.7	78.1	31.5	107.6
109	波照間漁港	24°03'44"	123°46'00"	189.4	95.9	33.2	96.2
110	祖納港	24°28'03"	122°59'53"	229.9	159.0	116.4	48.9
111	久部良漁港	24°26'47"	122°56'15"	236.4	165.1	121.3	45.2

古生層は最も古い地層で板岩、砂岩、輝緑凝灰岩、礫岩、千枚岩、結晶片岩、放射虫チャート、結晶質石灰岩などからなっており、一部は火成岩により貫入されている。古生層は、奄美大島、沖縄、石垣、西表などに分布する。

宮良層群は、石垣島、小浜島の2か所にだけ露出していて、ひどくしゅう(褶)曲した古生層を傾斜不整合におおっている。おもに緻密な石灰岩からなり、砂岩、礫岩を伴い、各所で急角度で傾斜している。

八重山夾炭層は、八重山諸島の与那国、西表、石垣などの島々に発達し、宮良層群の上に不整合にのっている。下部は安山岩溶岩、安山岩質凝灰岩、集塊岩よりなり、上部は数層の稼業価値のある炭層をはさむ淡褐色砂岩や灰色頁岩に移り変わる。この夾炭層は傾斜はゆるいが、多くの断層で切られている。

島尻層群は、喜界、沖縄、宮古などの島々に発達し、沖縄では、古生層上に不整合にのり、沖縄周辺の小島や喜界、宮古では本層が基盤岩をなしている。本層は、軟

かい淡青色の泥灰岩と軟かい褐色砂岩からなり、時には直径1 m位の硬い泥灰質の団塊をつくることがある。

租納礫層は、西表島租納東部およびその南西の内離島にだけ露出している。石灰岩及び砂岩の巨円礫からなり、両地とも八重山夾炭層群と断層で接し、租納では琉球石灰岩で不整合におおわれている。

琉球石灰岩は喜界島以南の琉球列島に広く分布し、租納礫岩以下の古い地層との間には常に著しい不整合が認められ、基底部には時に礫岩が発達することがある。琉球石灰岩は一般に水平であるが、しばしば国頭礫層とともにわずかに傾斜している。層の厚さは最高100 mを越え、徳之島では下部の砂質の部分だけでも約60 mに達する。

琉球列島のいたるところに数メートルの厚い礫層でおおわれた高い連続した台地が海岸に沿って広く発達している。この海岸ではこの礫層よりも古いすべての地層が海に向かって傾斜し、またこの礫層の標高は80~100 mの間のもが多く、谷によって切り開かれている。この台地をおおっている礫層を国頭礫層といい、一般に赤土とこの層よりも前にできたすべての岩石の丸い礫から構成されている。

隆起さんご礁の主成分は造礁さんごであるが、暗礁に付着する有機物質を伴っている。久米島及び喜界島の海岸に沿って発達しているのが最も典型的である。このさんご礁は最も低い沿岸台地を構成し、20 mの標高の台地にゆるい角度で海に向かって傾斜して海水面と接続しており、沿岸さんご礁と直接連続している。琉球石灰岩が直接海に突入したところを除き、他の島々では隆起さんご礁に相当する沿岸隆起礁がいたるところに細長い台地として発達している。琉球石灰岩が直接海に突入した場合は、石灰岩は直立した絶壁となっている。

砂丘が海岸や内陸に発達し、主として有孔虫の殻からなるが、それらは時に固結して石灰岩をつくることがある。

次に各島の地質について述べる。

奄美大島は全島ほとんど古生層からなり、一部に花崗岩が貫入している。笠利半島の海岸低地には国頭礫層が発達する。

沖縄諸島には古生層、玢岩、島尻層群、琉球石灰岩、国頭礫層、隆起海浜堆積物がある。古生層は沖縄島中部以北に広く発達するほか、瀬底、伊江、古宇利各島の一部に発達し、主として粘板岩、砂岩よりなる。石灰岩は本部半島をはじめ、北部の西海岸地区に発達している。玢岩は、西部に古生層を貫いて点々と露出する。島尻層群は南部に広く発達するほか、本部半島基部にも発達す

る。琉球石灰岩は南部及び周辺の島の他、中部の東海岸に段丘をなして発達する。多くは白色あるいは淡黄色で、固結度も様ではない。国頭礫層は那覇以北の標高80~100 mの段丘上に、古生層や琉球石灰岩を不整合におおって最もよく発達し、多くは厚さ5 m以下である。

宮古島はほとんど全域が琉球石灰岩からなり、東海岸の一部に島尻層群が発達するにすぎない。伊良部、下地、来間などの各島も琉球石灰岩のみからなる。

石垣島には、古生層、モンゾニ岩、閃緑岩、玢岩、宮良層群、八重山夾炭層群、琉球石灰岩、国頭礫層、隆起海浜堆積物が発達する。琉球石灰岩は南部の高位置段丘をなして広く分布するほか、川平、伊原間各半島の海岸地域に発達する。竹富島も全島ほとんどが琉球石灰岩である。

西表島は、古生層、八重山夾炭層群、租納礫岩、琉球石灰岩、国頭礫層、隆起海浜堆積物からなる。古生層は島の北東部に発達し、八重山夾炭層群は島の大部分を占めている。租納礫岩は租納と内離に発達するだけであり、琉球石灰岩、国頭礫層、隆起海浜堆積物は北部や東部の海岸にごくわずかに発達するにすぎない。

3. 地震調査

3.1 歴史地震

最近の地震学のはほぼ一致した考えによれば、地震は、地殻に応力が加わり続けてしだいにひずんで、ひずみがある限度に達すると地殻が破壊して断層を生じることによって起こる。地殻に応力を加えるものは海洋底地殻であって、これは海洋底の拡大に伴って移動し、海溝で大陸地殻の下に沈み込む。弧状列島は、大洋側にこのような海溝を有し、したがって地震をはじめとする諸活動が非常に活発である。弧状列島の地震は大きく分けて、(1)海溝内側における活動度の高い浅発地震、(2)海溝内側から島弧の下に斜めにはいりこんでいる面に沿う深い地震、(3)火山フロント周辺からその内側の浅発地震である。¹²⁾ マグニチュード8クラスの巨大地震の大部分は(1)の地域に起こる。

沖縄県および奄美諸島の島々は、図-2.1に示したように九州から台湾へと続く琉球弧といわれる弧状列島を形成しており、その東側にはフィリピン海プレートが沈み込んでいる琉球海溝がある。Katsumata¹³⁾ は、琉球弧での地震の深さ方向の分布を調べ、前述の弧状列島の特徴を示していることを指摘した。それによると、この地域の地震の震央は北西方向に35~45°傾斜した厚さ約50 kmの面状の領域に集中しており、北部の奄美諸島付近では、火山フロント周辺の浅い地震がみられる。また

台湾付近については、このような面は見当たらず、ほとんどの地震が100 km より浅いところで起っている。このように沖縄県および奄美諸島では、一般に考えられているように千島、本州、伊豆、小笠原の各弧状列島に比べると地震の活動度が低いものの、世界的にみれば活動的な地域である。

表-3.1は、名瀬、那覇、平良、石垣を中心とする半径200 km 圏を含む地域に発生した比較的大きな163個の地震を年代順にまとめたものである。本表には、文献(14)~(20)に記載されている日本および台湾の地震のうち、(1)1885年以前については、記録が残されている地震はかなり大規模なものであったと考えられるので、各種文献に記載されているすべての地震、(2)1886年以降については、マグニチュード6以上の地震および被害地震が示されている。表中の備考欄の数字は、その地震についての記載のあった文献の番号で、複数の文献にある場合は主なもの1つだけを示した。この地方は広い地域に島が点在しているという地理的条件から歴史地震の記録が少なく、また最近まで十分な地震観測も行われてい

なかった。したがって、記録もれや震源位置およびマグニチュードの精度の劣るものが、日本の他の地域に比べて多いと考えられる。

表-3.1の地震の震央位置を地図上にプロットしたものが図-3.1である。この図からも明らかなように、沖縄県および奄美諸島の地震は、北部と南部から台湾東方沖に多く、沖縄諸島付近には大規模な地震の記録が少ない。このように、沖縄県および奄美諸島は北東から南西へ約900 km にもおよぶ地域であり、地震の発生にも地域差が認められる。したがってここでは、北から順に、奄美諸島、沖縄諸島、先島諸島の3つの地域に分けて考えてみることにする。

(1) 奄美諸島

奄美大島の名瀬における有感地震の数は、強いものが少ないものの全九州で最も多く²¹⁾、奄美諸島周辺は地震活動のかなり高い地域である。またこの地域では今世紀になってから1901年と1911年の2回も最大級の地震が発生しており、破壊的地震の巣の1つであると考えられている。特に1911年の地震は、マグニチュードが8.0

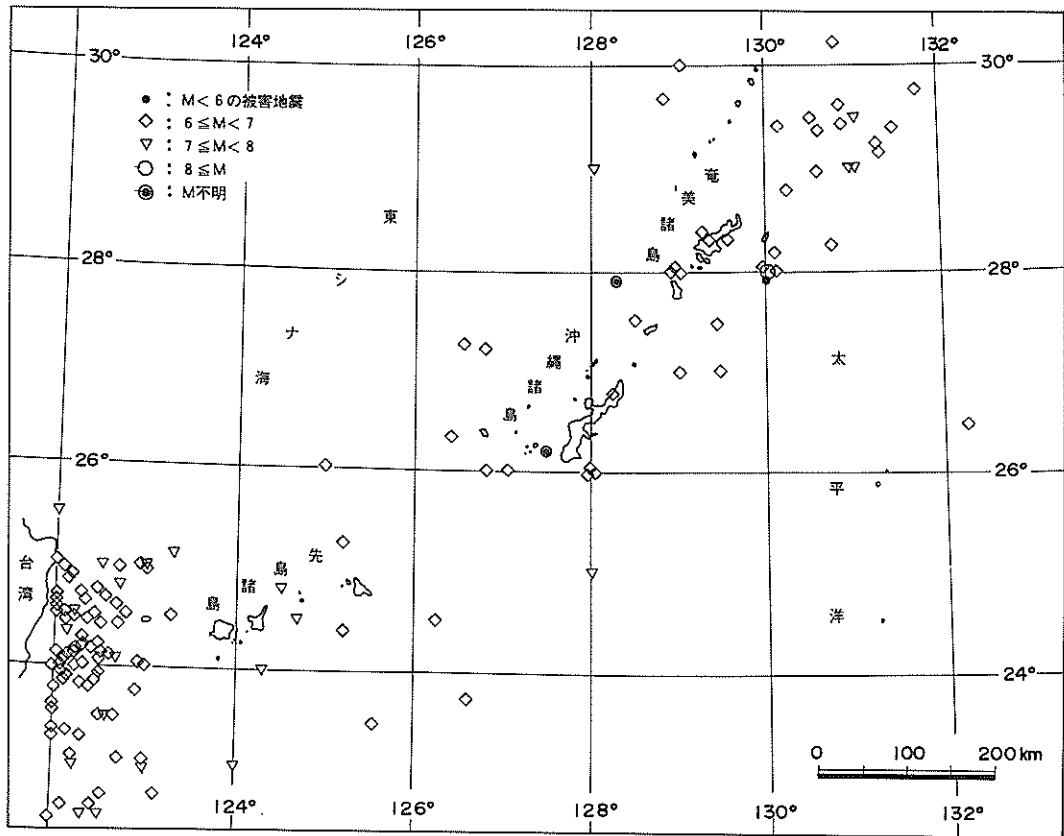


図-3.1 沖縄県および奄美諸島の主な地震

表-3.1 主な地震の表(その1)

発震時			地名	震源			マグニチュード	備考
年	月	日		経度°E	緯度°N	深さ(km)		
1625			石垣島					19)
1664			沖繩島	128.4	27.9			19)
1665	3		沖繩島					19)
1667			宮古島					20)
1686	5		宮古島					19)
1696	6	1	宮古島					20)
1706			宮古島					20)
1714			石垣島					19)
1760	5	15	沖繩島					20)
1768	7	22	沖繩島南西近海	127.5	26.2			14)
1771	4	24	石垣島南方沖	124.3	24.0		7.4	14)
"	8	30	石垣島					19)
1842	4	17	宮古島					20)
1858	9		沖繩島					19)
1868			宮古島					19)
1889	10	1	奄美大島沖	130	28	s	6	15)
1898	9	1	石垣島東方沖	124.7	24.5	s	7	15)
1901	6	24	奄美大島沖	130	28	s	7.5	15)
1903	6	7	台湾北東部	122	25	s	6	15)
1908	7	1	台湾北東沖	122.0	24.0	s	6.1	15)
1909	3	11	屋久島付近	130 1/2	30 1/2	s	6.2	15)
"	4	15	台湾北東沖	122 1/2	25	vs	7.2	15)
"	8	29	沖繩島付近	128	26	s	6	15)
"	9	11	奄美大島付近	129	28	100	6.3	15)
"	11	21	台湾北方沖	122	25 1/2	vs	7.0	15)
1910	1	7	与那国島南方沖	123	24	s	6.2	15)
"	4	12	与那国島北方沖	123	25	200	7.6	15)
"	7	6	沖繩島北東沖	129	27	s	6.0	15)
"	9	1	台湾東方沖	122.4	24.1	—	6.5	18)
1911	3	24	台湾東方沖	122	24	—	6	18)
"	3	24	与那国島南方沖	123	24	s	6.8	15)
"	6	15	奄美大島付近	130.0	28.0	100	8.0	15)
1912	11	3	台湾東方沖	122	24	—	6	18)
1913	1	9	奄美大島沖	130	28	s	5.9	15)
"	3	4	奄美大島付近	129	28	150	6.6	15)
1914	7	5	奄美大島北西部	128	29	200	7.0	15)
"	7	6	台湾東方沖	122	24	60	6.75	18)
"	11	28	奄美大島北東沖	131	29	s	7.0	15)
1915	1	6	石垣島北西沖	123.3	25.1	150	7.4	15)
"	3	1	石垣島南方沖	124	23	s	7.4	15)
1916	2	1	屋久島南方沖	131	29 1/2	s	7.4	15)
1917	7	4	沖繩島南方沖	128	25	s	7.3	15)
1919	3	11	沖繩島沖	128	26	—	6.2	15)

表-3.1 主な地震の表(その2)

発震時			地名	震度			マグニチュード	備考
年	月	日		経度°E	緯度°N	深さ(km)		
1919	6	1	宮古島北方沖	125	26	200	6.8	15)
"	11	1	台湾東方沖	122.2	23.1	—	6	18)
"	12	21	台湾南東沖	122.5	22.5	s	7.3	15)
1920	1	23	台湾東方沖	122.1	24.5	—	6.25	18)
"	5	29	与那国島西方	122.7	24.4	—	6	18)
"	10	20	台湾東方沖	122.3	24.1	—	6.5	18)
1921	4	2	台湾東方沖	123	23	s	7.4	15)
1922	7	2	台湾東方沖	122.3	23.8	—	6	18)
"	7	19	台湾東方沖	122.3	24.2	—	6	18)
"	9	2	台湾東方沖	122.2	24.5	s	7.6	15)
"	9	17	台湾東方沖	122.5	23.9	—	6.75	18)
"	10	15	台湾東方沖	122	24 ¹ / ₂	s	6.9	15)
"	10	27	台湾東方沖	122.0	23.3	—	6.5	18)
"	12	2	台湾北部近海	122.0	24.6	—	6.25	18)
1923	4	6	台湾東方沖	122.3	24.7	—	6	18)
"	5	4	台湾東方沖	122.3	23.3	—	6	18)
"	7	2	台湾東方沖	122 ¹ / ₂	23 ¹ / ₂	s	7	15)
"	8	12	沖繩島付近	128	26	s	6.8	15)
"	8	27	台湾東方沖	122.1	24.1	—	6.25	18)
"	11	4	屋久島南方沖	130.8	29.4	s	6.8	15)
"	11	6	屋久島南方沖	130.9	29.1	s	7.1	15)
"	11	7	屋久島南方沖	130.4	29.0	s	6.5	15)
"	11	19	与那国島南西沖	122.5	24.2	—	6	18)
"	11	26	石垣島南西沖	123.2	23.5	s	6.4	15)
1924	7	22	台湾東方沖	122.0	23.7	s	6.8	15)
1926	3	14	奄美大島近海	129.0	28.0	30~60	6.1	16)
"	6	29	沖繩北西沖	126.8	27.3	140	7.5	16)
"	9	13	台湾南東沖	122.5	22.7	—	6.25	18)
"	11	2	与那国島北西沖	122.7	24.9	—	6	18)
1928	10	20	奄美大島近海	130 ¹ / ₂	29 ¹ / ₃	20	6.8	16)
1929	2	8	台湾北部近海	122.1	24.8	—	6	18)
"	8	19	台湾東方沖	122.5	24.2	—	6.75	18)
"	10	24	台湾南東沖	122.5	22.4	—	6.5	18)
"	12	18	与那国島西方	122.7	24.6	—	6	18)
1930	8	21	台湾北部近海	122.0	24.6	40	6.5	18)
"	9	10	与那国島北西沖	122.6	24.7	20	6	18)
1931	1	2	台湾東方沖	122.1	23.7	—	6.25	18)
"	6	17	沖繩北東沖	129 ¹ / ₂	27.0	50	6	16)
"	6	19	屋久島近海	129.0	30.0	0	6.0	16)
"	8	18	沖繩北方	128	27	50	5.9	16)
"	10	24	台湾東方沖	122.2	24.0	—	6	18)
1932	5	28	奄美大島近海	131.3	29.2	0	6.1	16)
"	10	9	台湾東方沖	122.5	23.5	130	6	18)

表-3.1 主な地震の表(その3)

発震時			地名	震源			マグネチュード	備考
年	月	日		経度 °E	緯度 °N	深さ (km)		
1932	10	24	台湾東方沖	122.25	24.5	—	6.25	18)
1933	2	19	与那国島西方	122.8	24.5	100	6	18)
1935	2	10	台湾北部近海	122.1	24.9	60	6.25	18)
"	12	18	宮古島南方沖	125.6	23 1/2	20	6.8	16)
1936	4	13	沖繩南西沖	127	26	30~60	6.0	16)
1937	11	26	与那国島東方	123 1/3	24 1/2	30~40	6.4	16)
1938	1	11	奄美大島北東沖	130.8	29.6	100	6 1/4	16)
"	2	8	台湾北部近海	122.1	24.8	—	6	18)
"	4	23	奄美大島近海	130.1	28.2	165	6 1/4	16)
"	6	10	宮古島北北西沖	125.2	25.3	30~60	6.7	16)
"	6	16	奄美大島近海	129.4	27.5	0	6.9	16)
"	8	28	台湾東方沖	122.5	21.6	40	6	18)
"	9	1	台湾東方沖	122.4	23.7	—	6	18)
"	12	23	台湾東方沖	122.0	23.6	—	6	18)
1939	5	16	台湾東方沖	122.0	23.6	—	6.25	18)
1940	1	27	奄美大島近海	132.2	27.5	50	6.4	16)
"	8	6	台湾東方沖	122.5	24.4	—	6	18)
1941	7	24	奄美大島近海	129 1/2	28 1/3	0	6.2	16)
"	10	1	台湾北部近海	122.0	24.7	—	6	18)
1942	3	22	奄美大島北東沖	130.6	29.4	0	6.7	16)
1943	1	7	沖繩西方沖	126.4	26.3	40	6.0	16)
"	11	24	台湾東方沖	122.0	22.5	—	6.9	18)
1946	6	2	台湾南東沖	122.4	23.8	—	6.25	18)
"	12	19	台湾北東沖	122.5	24.75	100	6.75	18)
1947	3	16	台湾東方沖	122.3	24.3	—	6	18)
"	8	17	台湾東方沖	122.3	24.3	—	6	18)
1948	10	4	台湾東方沖	122.3	24.1	20	6	18)
"	12	21	台湾東方沖	122.3	24.0	—	6	18)
1949	1	20	台湾東方沖	122.7	23.5	—	6.5	18)
1951	1	28	台湾東方沖	122.3	24.3	—	6	18)
"	3	6	奄美大島付近	129.3	28.3	200	6.9	16)
"	6	6	奄美大島北東沖	131.7	29.8	90	6 3/4	16)
"	10	22	台湾東方沖	122.2	24.1	40	6.5	18)
"	10	25	台湾東方沖	122.1	23.9	40	6.75	18)
1952	12	24	奄美大島近海	130	28	30~100	6.0	16)
1953	12	1	奄美大島北西沖	128.8	29.7	230	6 3/4~7	16)
1954	6	18	奄美大島北東沖	131 1/4	29 1/4	0~10	6.1	16)
1955	3	28	奄美大島北東沖	130.1	29.4	60	6.3	16)
"	7	25	台湾東方沖	122.0	23.3	—	6	18)
"	9	22	台湾東方沖	122.5	23.9	—	6.75	18)
"	12	26	奄美大島近海	130.2	28.8	60	6.0	16)
1956	6	29	与那国島南西沖	122.6	24.1	—	6	18)
1957	7	19	台湾東方沖	122.29	24.46	110	6.1	18)

表-3.1 主な地震の表(その4)

発震時			地名	震源			マグニチュード	備考
年	月	日		経度 °E	緯度 °N	深さ (km)		
1958	3	11	八重山群島	124.5	24.75	80	7	14)
"	10	13	沖繩北西沖	126 ¹ / ₂	27 ¹ / ₄	240	6 ³ / ₄	16)
1959	2	28	沖永良部島近海	128.5	27.5	0~50	6.0	14)
"	4	27	与那国島北西沖	122.70	24.81	127	7.5	18)
1960	7	8	屋久島近海	130 ³ / ₄	30 ¹ / ₄	60	6.1	16)
"	9	12	沖繩島北部	128 ¹ / ₄	26 ³ / ₄	60	6 ¹ / ₂ ~6 ³ / ₄	16)
1961	2	5	台湾東方沖	122.53	24.04	75	6.2	18)
"	4	10	台湾東方沖	122.09	24.09	53	6.5	18)
"	5	14	台湾北東沖	122.41	25.46	246	6	18)
"	7	18	奄美大島北東沖	131.46	29.37	60	6.6	16)
"	9	17	台湾東方沖	122.16	24.03	51	6.3	18)
"	12	3	与那国島北方沖	122.95	24.93	156	6.3	18)
1962	6	25	台湾東方沖	122.52	24.08	39	6.5	18)
"	11	27	与那国島北方沖	122.95	25.02	186	6	18)
1963	1	31	沖繩西方沖	126.75	26.0	20	6.2	16)
"	2	13	台湾東方沖	122.14	24.33	67	7	18)
"	4	21	台湾東方沖	122.25	24.12	52	6	18)
1966	3	13	与那国島南西沖	122.65	24.09	59	7.5	18)
"	3	23	与那国島南方沖	122.91	23.75	51	6.3	18)
"	7	1	台湾東方沖	122.33	24.67	60	6.1	16)
1967	10	25	台湾東方沖	122.20	24.44	70	6.5	18)
1968	1	13	台湾東方沖	122.21	24.13	55	6.2	18)
"	11	12	沖永良部島近海	128.42	27.47	20	5.6	14)
1970	1	1	奄美大島近海	129.22	28.40	50	6.1	16)
1972	1	4	台湾南東沖	122.10	22.60	33	6.9	16)
"	1	25	台湾南東沖	122.30	22.50	33	7.5	16)
"	1	25	台湾東方沖	122.20	23.00	33	7.0	16)
1975	3	23	石垣島南西沖	123.15	22.72	70	6.5	16)
"	5	24	台湾南東沖	122.55	22.47	40	6.5	16)
"	6	7	宮古島南東沖	126.58	23.72	60	6.0	16)
1976	6	20	宮古島南東沖	126.23	24.52	30	6.2	16)
"	12	15	奄美大島東方沖	130.73	28.25	60	6.0	16)
1978	5	23	種子島	130.37	30.98	160	6.7	16)
"	8	11	宮古島南沖	125.20	24.42	30	6.0	16)
"	12	23	台湾東方沖	122.68	23.07	40	6.9	16)

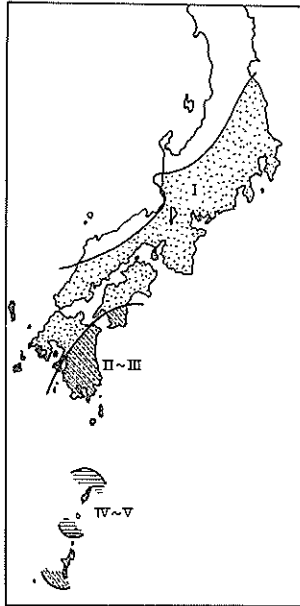
(注) s : プレート境界面あるいはその付近 40~80 km

vs : 大陸側プレート内部 0~15 km

の巨大地震であり震源が約100 km と深かったために、有感の地域が広く福島県でも感じたとして、被害は喜界島で最大であり、奄美大島、沖繩島が多かった。文献22)によると、1911年の地震は、日本における最大級の地震といわれている1933年の三陸沖地震と震度分布にほとんど差がなく、1923年の関東地震よりも大規模

なものであったと推定されている。この他にも徳之島南東沖では1938年にM=6.9、沖永良部島近海では1959年にM=6.0の地震が発生しており、最近では1970年に名瀬の西にM=6.1の地震が発生し、名瀬市を中心に局所的に相当の被害が出た。これらの地震に関する文献14)の記述を図-3.2に示す。

343° 1901 VI24 (明治34), 16時04分 奄美大島近海 $\lambda=129.3^{\circ}E$ $\phi=28.3^{\circ}N$ $M=7.9(7.4)$ 震域は広い。被害は少なく、名瀬市内で石垣の崩壊、瓦の脱落等の小被害あり、宮崎県細島で16時55分ころから約4寸、(12cm)の高潮があり、20時30分~23時の間が最高で、7~8寸(21~24cm)に達した。(一)



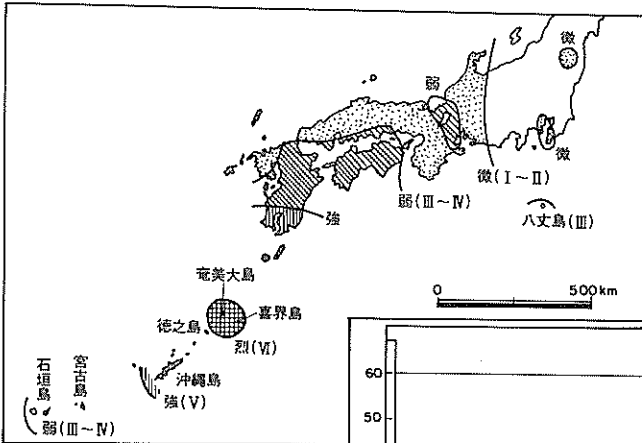
343-1図 震度分布
[中央気象台による。1905]

543 1959 日 28 (昭和34) 05時56分 沖永良部島近海 $\lambda=128.5^{\circ}E$ $\phi=27.5^{\circ}N$ $M=6.0h=浅$ 沖永良部で震度IV。かつ軽微な被害あり。

592-1表

日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
有感	10	5	4	3	1	2	3	2	2	0	3	1	1	2	1	1
日	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	計
有感	0	0	5	7	5	0	2	2	1	1	0	0	0	1	2	67

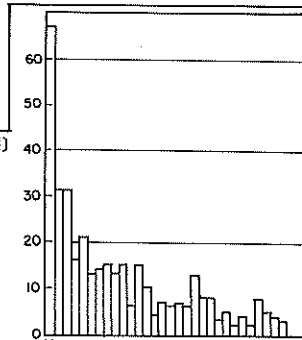
385° 1911 VI15 (明治44) 23時25分 喜界島近海 $\lambda=130.0^{\circ}E$ $\phi=28.0^{\circ}N$ $M=8.2(7.7)$ 6月13日に5回、14日に11回、15日に12回の前震があった。被害は385-1表のように奄美大島・喜界島・徳之島・沖繩島等に生じた。とくに喜界島の被害が最大である。名瀬では煉瓦煙突の倒壊・破損、倉庫の破損等があり、鎮西村に小津波、人家過半浸水すると



385-1図 震度分布 [今村の報告(1913)から作製]

592 1970 I 1 (昭和45) 04時02分 奄美大島近海 $\lambda=129^{\circ}13'E$ $\phi=28^{\circ}24'N$ $M=6.1$ $h=50$ km 震度は名瀬でV、屋久島・沖永良部でIII、奄美本島の名瀬市・大和村に被害が多く、本島で傷5、崩壊れ4、徳之島伊仙町で崩壊れ、全体で住家一部破損1,462、水道関係32カ所、土木関係14件の被害あり、名瀬港埠頭のコンクリートに亀裂を生ず、1月中の有感余震回数は592-1表のとおり。

いう。那覇では煉瓦煙突の崩壊・亀裂、石垣の崩壊、橋台の破損、家の傾斜2~3等があった。首里では王城の城壁の倒壊が著しかった。宮崎県でも小煙突の破損、壁の亀裂等の小被害があった。別の文献(14)によると、この地震の犠牲者は死12、全潰家屋422、半潰家屋561である。 $\lambda=130.25^{\circ}E$ $\phi=27.75^{\circ}N$ [0]注:中央気象台地震課地震普及会、1954、



385-2図 名瀬における余震回数
[20倍地震計観測による]

385-1表 日本列島付近の地震災害概表 No.1.

	死傷	住家		非住家*		石垣 破壊	山崩
		全潰	半潰	全潰	半潰		
喜界島	1 9	401	533	1,149	915	3,253所	37
奄美大島	11	28	65**	50	188	46	195所
徳之島	5 6	5	1	1			834間
沖永良部島							多し
沖繩島	1 11	1	3				598所

* 倉牛馬豚舎。 ** 倉倉庫。

今村の報告(1913)から著者が作った。すべての被害を網羅しているとはいえない。——は確度が低い。

図-3.2 奄美諸島の歴史地震資料¹⁴⁾

(2) 沖繩諸島

沖繩島およびその周辺には大規模な地震の記録が少なく、現在も地震活動はあまり活発ではない。しかし、歴史地震を調べてみると、1768年の沖繩島南西近海の地震(M:不明)、1923年の同じく南東近海の地震(M=6.8)、1960年の北部の地震(M=6 1/2~6 3/4)などがある。また、沖繩島南方の北緯24°から26°、東経

126°から128°の地域は、現在地震活動の空白域となっており、¹⁴⁾将来大地震の発生する可能性も考えられるが明らかではない。これらの地震に関する文献(14)、(20)の記述を図-3.3に示す。

<p>328 1898 IX 1 (明治31) 18時00分 八重山群島 $\lambda=124.0^{\circ}\text{E}$ $\phi=24.5^{\circ}\text{N}$ $M=6.5(6.0)$ 石垣・宮古両島で家屋半潰2, 堤防破損1(長さ3間(約6m)), 道路破損16カ所(延長8間(約14m)), 橋梁の破損1, 石垣の崩壊1, 124カ所, 山崩れ7カ所の被害があった。$\lambda=124.75^{\circ}\text{E}$と考える。</p>	<p>490* 1938 VII 10 (昭和13) 18時53分 宮古島北々西沖 $\lambda=125.2^{\circ}\text{E}$ $\phi=25.3^{\circ}\text{N}$ $M=6.7$ $h=$浅 震後小津波が近くの島を襲った。宮古島平良港では震後10分で津波がきた。</p>	<p>波の高さ1.5mで、棧橋の流失等の微小被害を生じた。6月中の余震回数は490-1表のとおり。〔1〕</p>																				
490-1 表																						
日	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	計
有 感	3	6	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	15
無 感	81	143	53	23	14	6	4	5	7	10	4	2	4	5	3	11	4	3	0	4	2	388

<p>573* 1966 III 13 (昭和41) 01時31分 台湾東方沖 $\lambda=122.6^{\circ}\text{E}$ $\phi=24.2^{\circ}\text{N}$ $M=7\sim 7.5$ 与那国島で死2。台湾で死4, 傷11, 沖縄・九州西海岸に小津波。震度は与那国島(V) 石垣島(IV), 宮古島(III), 那覇(I)だった。</p>	<p>540 1958 III 11 (昭和33) 09時26分 八重山群島 $\lambda=124.5^{\circ}\text{E}$ $\phi=24.75^{\circ}\text{N}$ $M_{FAS}=7$ $h=80\text{ km}$ 八重山で死1, 傷1, 家屋・水田・道路・堤防等に軽微被害あり。</p>
---	---

図-3.5 先島諸島の歴史地震資料¹⁴⁾

<p>明和5 VI 9 26.2° 1768 VII 22 127.5° 琉球：王城，三ヶ寺，王陵，極楽陵の石垣がくずれた。津波（波高1m）で慶良間島民家9戸が損じた。〔1〕</p> <p>377 1909 VIII 29 (明治42) 19時27分 沖縄 沖縄本島で強く、石垣等崩れ，那覇地方で死1，傷8，首里地方で傷2，半潰家屋3を生じた。また，両地区で石垣7,800間(約14km)が倒れた。参考：大森房吉，1909，明治42年8月29日の沖縄地震，地学雑誌，21，721。</p>
--

図-3.3 沖縄諸島の歴史地震資料¹⁴⁾²⁰⁾

(3) 先島諸島

この地域に最も大きな被害を与えた地震は、1771年に石垣島南沖で発生したM=7.4の八重山地震である。この地震は大津波を伴い、明和の大津波として広く知られている。この津波は高さ85mにまで達したといわれ、被害は石垣島で最大で同島の面積の約40%が波に洗われた。このため、宮古、八重山両諸島で約12,000人が死亡した。この津波については、文献23)に詳しい。なお、この地震の震央周辺は、現在地震活動の空白域であると指摘されている²⁴⁾

宮古島と石垣島の間には1898年と1958年にM=7.0の地震が、宮古島北方には1938年にM=6.7の地震が発生している。

また、与那国島から台湾東方沖にかけての地域は、台湾でも最も地震活動の活発な地域であり、最大級のものを含む地震が深さ100km以浅で数多く発生している。

1966年に与那国島南西沖に起ったM=7.5の地震は、与那国島にかなりの被害を与えた。

これらの地震に関する文献14), 23)の記述を図-3.4, 図-3.5に示す。

3.2 想定地震

本報告は、特定の地震を想定して各地点に予想される最大加速度を求めようとするものである。その際、どのような地震(位置、深さ、マグニチュード)を想定するかが、最も大きな問題となる。対象とする地域に近い将来に発生が予想される具体的な地震がある場合には、それについてまず検討すべきであろう。しかし、地震予知に関する研究が進歩した現在においても、具体的に地震を予想することはなかなかむずかしい。このような現状では、ほとんどの大地震がくり返し同じ地域に起こることが地震学において定説になっていることを考慮すると、過去の地震資料による検討にも十分意味があると考えられる。そこで本報告では、対象とした地域に過去に発生した大きな地震の中から、検討地点に最も大きな影響を与えた地震をいくつか選定し、それらを参考にして想定地震を決めた。

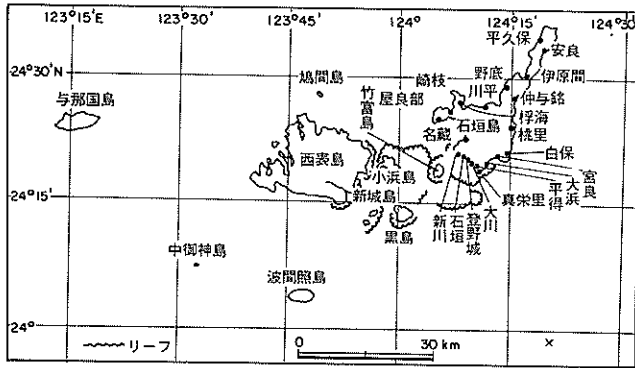
(1) 奄美諸島

図-3.6に、奄美諸島地域に想定した3つの地震を示す。円は、マグニチュードから後に述べる方法により計算される震源域を表わし、rはその半径である。

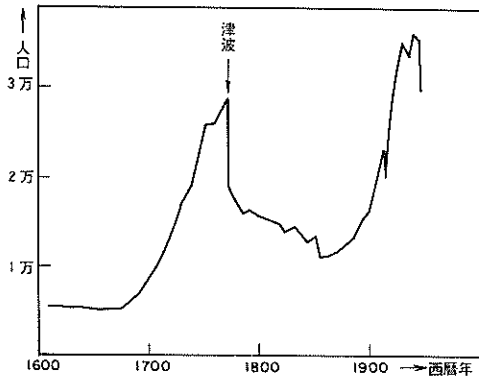
まず、本地域に発生した最大級の地震である1911年の地震を想定地震とした。この地震の震央位置、深さ、マグニチュードについては種々の説があるが、ここでは宇津¹⁵⁾に従い、震央位置28°N, 130°E, 深さ100km, マグニチュード8.0とした。この想定地震を喜界島地震と呼ぶこととする。

また、1970年の奄美大島近海に発生した地震を参考に、名瀬の西北に震央をもつ中規模の近地震を想定し

202° 1771 Ⅳ 24 (明和 8 Ⅲ 10) 刻刻 八重山・宮古両群島 $\lambda=124.3^{\circ}E$ $\phi=24.0^{\circ}N$ $M=7.4$ [Ⅲ] 八重山地震津波 震害はなかったようである。津波の被害は石垣島で最大で同島の面積の約40%が波に洗われた。両群島とも津波は異常退潮ではじまり、大波は3回襲来した。八重山におけるおもな被害は、202-1表のとおり。表中の波高は古文書のまま、(一説によれば、記録は丈と尺をとり違えたので、表の値の1/10であるという?)。この他浸水住家1,003戸。船流失98。表中の*印は、その島の住人が石垣島に出張して死亡したことを示す(西表島のみは死亡者の大部分がそうであった)。また、新城島では行きの波より、戻りのほうが強かったという。また、島内に津波で打ち上げられた大石が現在でも見られるが、大部分は海拔20m以下のところにある。一部では40mくらいのところにもある。202-1図のリーフの位置は島による被害の差を考えるのに有効であろう。また、宮古群島では波高12~13丈(約40m)に達したという。波は宮古島の東海岸および米間・池間・伊良部・下地・多良間・水納の各島を襲い、死2,548、船の破損76。八重山は1772・1773・1776・1777・1802・1834・1852年に大飢饉や疫病・麻疹が流行し、八重山群島の人口は202-2図のような推移をたどった。離島における大津波の直接・間接に及ぼした社会的影響の一つと考えることができる。(4) 参考:牧野清, 1968, 八重山の明和大津波。



202-1図 震央地盤



202-2図 石垣島における人口推移

202-1 表

島	村名	当時の人口	死・不明者数	死亡率(%)	住家全壊	波高(m)	
石垣島	大川村	1,290	412	32	174	9.2	
	石垣村	1,162	311	27	148	9.2	
	新川村	1,091	213	20	139	8.2	
	登野城村	1,141	624	55	184	12.2	
	平得村	1,178	560	48	178	26.0	
	真栄里村	1,173	908	77	176	19.4	
	大浜村	1,402	1,287	92	210	44.2	
	宮良村	1,221	1,050	86	149	85.4	
	白保村	1,574	1,546	98	234	60.0	
	桃里村	689	0	0	52	9.7	
	仲与銘村	283	283	100	52	10.7	
	伊原間村	720	625	87	130	32.7	
	安良村	482	461	96	90	56.4	
垣島	平久保村	725	25	3	15		
	野底村	599	24	4			
	浮海村	212	23	11			
	川平村	951	32	3			
	崎枝村	729	5	0.3	12		
	屋良部村						
	名蔵村	727	50	7			
	小計	17,349	8,439	48.6	1,891		
	島	竹富島	1,313	*27	2.0		
		小浜島	900	*9	1.0		
鳩間島		489	*2	0.4			
西表島		4,596	*324	7.5	16		
黒島		1,195	293	25	85		
新城島		554	205	37	184		
波間照島		1,528	*14	0.9			
与那国島		972	0	0	1		
合計		28,896	9,313	32.2	2,176		

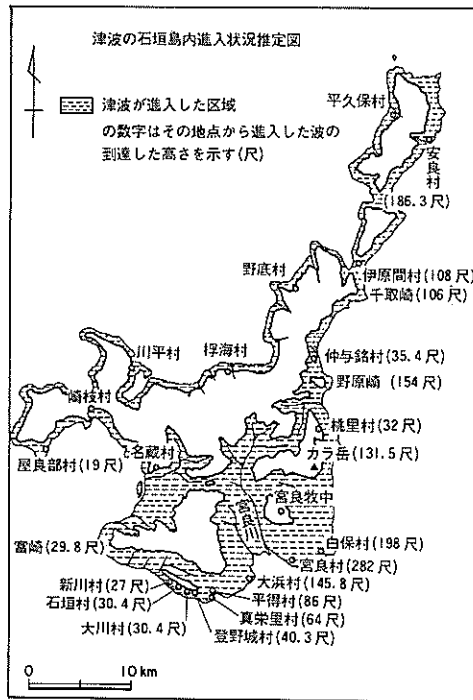


図-3.4 先島諸島の歴史地震資料(八重山地震)^{14) 23)}

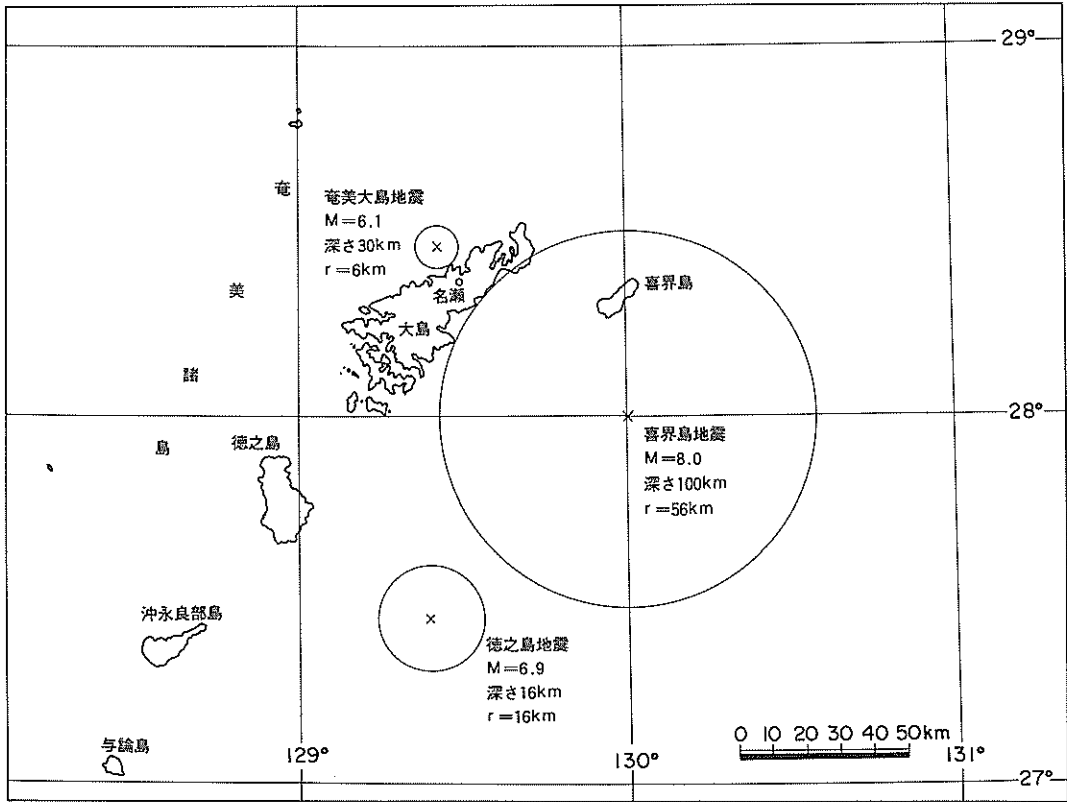


図-3.6 奄美諸島の想定地震

た。気象庁によると、この地震の震央は名瀬の西約 30 km でその深さは 50 km である。しかし吉川²⁵⁾は、図-3.7 に示すように名瀬の西北 10~15 km に余震の震央が分布していることや S-P 時間の分布図等から、本震の位置は気象庁発表よりも名瀬に近く、震源の深さも 50 km よりも浅かったのではないかと考えられるとしている。そこで、ここでは奄美大島により大きな影響を与える地震を考え、余震域のほぼ中央 28.46°N, 129.42°E に震央をもつ地震を想定地震として採用した。震源の深さは 30 km、マグニチュードは 6.1 とした。この想定地震を奄美大島地震と呼ぶこととする。

徳之島南東沖に発生した 1938 年の地震では被害の有無について記録がないが、震源の位置から考えて徳之島、沖永良部島などの奄美諸島南部に大きな影響を与えると思われるので、この地震を想定地震とした。震央は、27.5°N, 129.4°E、マグニチュード 6.9 である。また震源の深さは記録では 0 km となっているが、本報告では 4.1 で述べるように震源域としてマグニチュードから決まる半径を持つ球状の領域を考えているので、ここでは震源域が地表に接する深さ、すなわち 16 km とする。この想定地震を徳之島地震と呼ぶこととする。

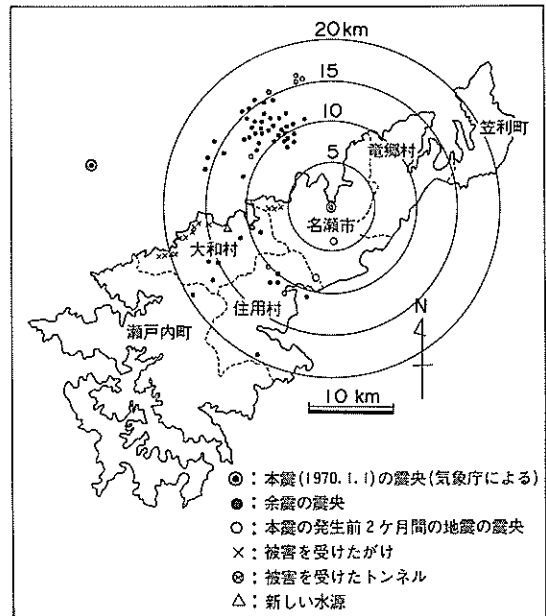


図-3.7 1970年奄美大島近海の地震の震央²⁵⁾

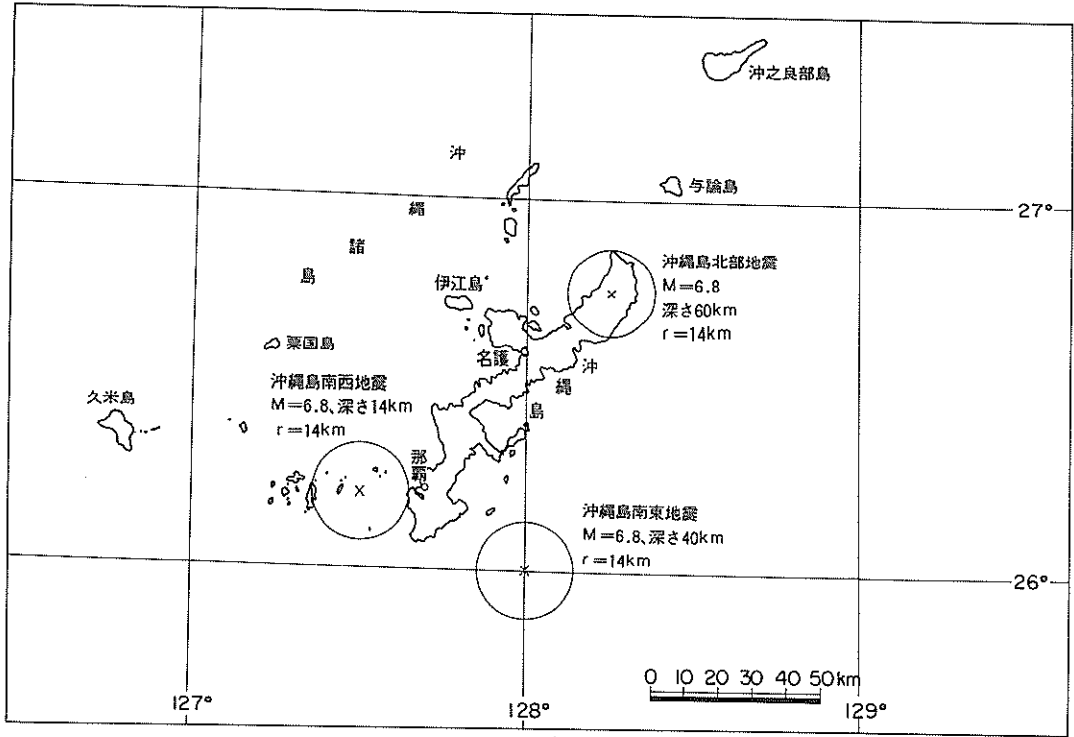


図-3.8 沖縄諸島の想定地震

(2) 沖縄諸島

沖縄島およびその周辺には巨大地震の記録がなく、過去の記録のみから推定すると、この地域で発生する地震のマグニチュードの上限は6.8程度である。そこで、沖縄島の北部と南部に3つのマグニチュード6.8の地震を想定した。図-3.8に想定地震を示す。

北部地方に大きな影響を与える地震として、1960年に沖縄島北部に発生した地震を想定した。震央は26.75°N, 128.25°E, 震源の深さは60kmである。この想定地震を沖縄島北部地震と呼ぶこととする。

次に沖縄の中心都市である那覇に大きな影響を与える地震として、那覇の西方に1768年に発生した地震を参考にして想定地震を決めた。この地震は、マグニチュードが不明であるが、前述の理由によりここでは6.8とした。また大陸側プレート内部の浅い地震と考えて、震源の深さを14kmとした。震央は26.2°N, 127.5°Eである。この想定地震を沖縄島南西地震と呼ぶこととする。

また南部地方に大きな影響を与える地震として、1923年に沖縄島南東沖に発生した地震を想定した。震央は26.0°N, 128.0°E, 震源の深さは40kmとした。この想定地震を沖縄島南東地震と呼ぶこととする。

(3) 先島諸島

図-3.9に本地域の想定地震を示す。

宮古島付近には大規模な地震の記録がないので、北方沖に1938年に発生した中規模の地震を想定地震とした。震央は25.3°N, 125.2°E, 震源の深さは30km, マグニチュードは6.7である。この地震を宮古島地震と呼ぶこととする。

次に、石垣島と宮古島の間に発生した1898年と1958年の地震のうち、両島に近い方の1898年の地震を想定地震とした。震央は24.5°N, 124.7°E, マグニチュードは7.0である。震源の深さは、プレート境界面付近を考え40kmとした。この想定地震を石垣島地震と呼ぶこととする。

また、1771年の大津波を伴った地震を想定地震として採用した。震央は24.0°N, 124.3°E, マグニチュードは7.4である。震源の深さは不明であるが、大きな津波を伴ったことから浅いと推定して、震源域が地表に接する深さ28kmとした。この想定地震を八重山地震と呼ぶこととする。

台湾東方沖に発生する大地震の中から、本地域に比較的近く大きな影響を与える地震として、1966年に与那国島南西沖に発生した地震を想定地震とした。震央は24.09°N, 122.65°E, 震源の深さは59km, マグニチュード

は 7.5 である。この想定地震を与那国島地震と呼ぶこととする。

本報告において想定した地震の一覧を表-3.2に示す。

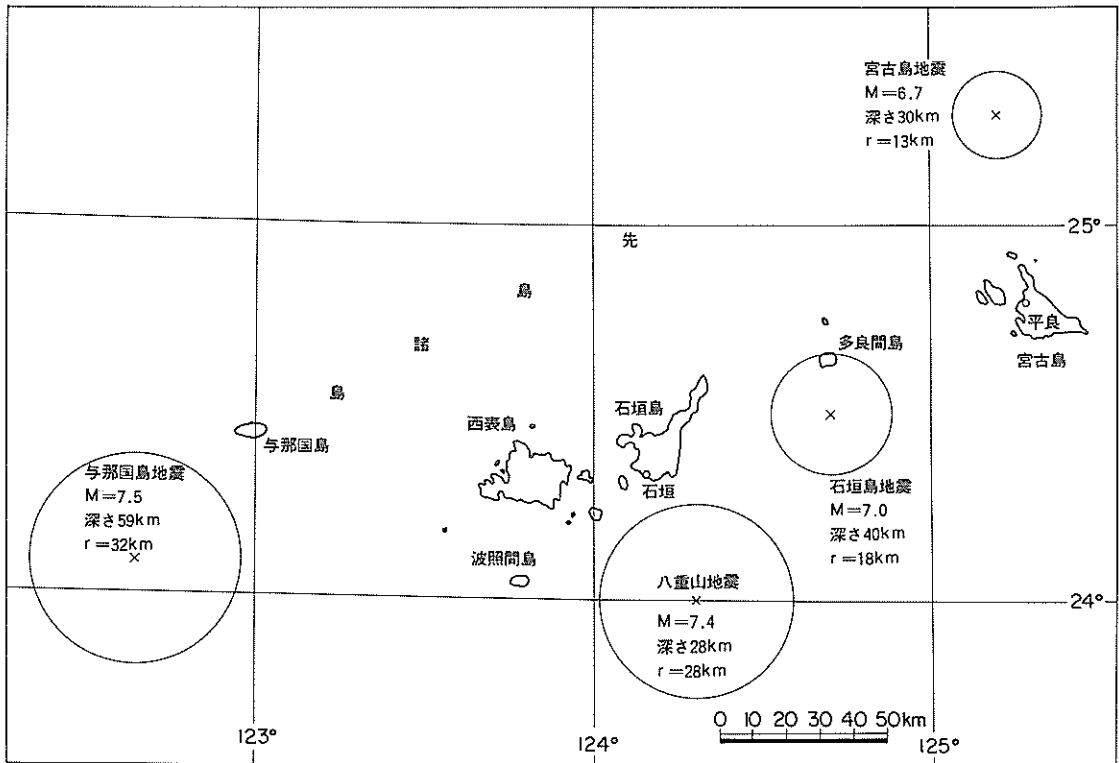


図-3.9 先島諸島の想定地震

表-3.2 沖縄県および奄美諸島の想定地震

地域	地震名	震源の位置			マグニチュード
		経度 °E	緯度 °N	深さ km	
奄美諸島	喜界島地震	130.0	28.0	100	8.0
	奄美大島地震	129.42	28.46	30	6.1
	徳之島地震	129.4	27.5	16	6.9
沖縄諸島	沖縄島北部地震	128.25	26.75	60	6.8
	沖縄島南西地震	127.5	26.2	14	6.8
	沖縄島南東地震	128.0	26.0	40	6.8
先島諸島	宮古島地震	125.2	25.3	30	6.7
	石垣島地震	124.7	24.5	40	7.0
	八重山地震	124.3	24.0	28	7.4
	与那国島地震	122.65	24.09	59	7.5

注) 地震名は、区別が容易なように著者らが仮に名付けたものである。

4. 基盤における地震動

4.1 基盤の最大加速度

ある規模の地震が起きた時、震源からある距離の地点での最大加速度がいくらになるのかを推定しようという研究が多くなされてきた。これらの研究では、距離として、(1)震央距離または震源距離、(2)断層面からの距離、(3)球状の震源域を仮定してその縁からの距離などが採用されている。(1)は震源を点と仮定したものであり、(2)、(3)は震源のある広がりをもつものだとする考え方である。地震がある広がりをもつ断層運動によって起こるものであることを考慮すると、最大加速度の距離による減衰特性を論ずる場合、(1)よりも(2)、(3)を採用する方が合理的であると考えられる。

しかし、地震学における研究成果として断層面（位置、大きさなど）が推定されている地震は、過去の大地震の一部や近年発生が予想されている東海地震などに限られており、3.で想定地震として採用した地震を含めその他の大部分の地震では、断層面はわかっていない。勝又²⁶⁾は、マグニチュードから決まる半径を有する球状の震源の広がり（ここでは震源域と呼ぶ）を仮定して、震源域の縁からの距離（ここでは実効距離と呼ぶ）を採用することを提案している。球状の震源域の半径は、余震域の面積等の既得の研究成果をふまえて、次のように表わさ

れている。

$$\log r = 0.5M - 2.25 \quad (4.1)$$

ただし、 r ：震源域の半径 (km)

M ：マグニチュード

勝又の方法はいくつかの仮定からなりたっており、あくまでも近似的な意味での最大加速度を推定するものである。しかし、この推定方法は、大地震時に震央からなり離れた地点で大きな加速度が観測されたという現象を説明でき、断層面がわかっていない場合には最も妥当なものであると考えられる。野田ほか²⁷⁾は、過去にこの方法によって基盤の最大加速度と実効距離およびマグニチュードの関係を提案した。図-4.1に、この基盤の最大加速度と実効距離およびマグニチュードの関係を示す。基盤の最大加速度は、港湾地域における強震観測網により地表面で得られた強震記録に6.で述べる地盤の応答解析手法を適用して推定したものであり、基盤が露出している場合に得られる加速度を意味している。また実効距離としては、断層面が求められている大地震では断層面からの距離を、余震域のわかっている地震では余震域の面積と等しい平面的な広がりをもつ球体を震源域と考えてその縁からの距離をそれぞれ採用している。なお、震源域内の最大加速度については、震央付近の強震記録の数

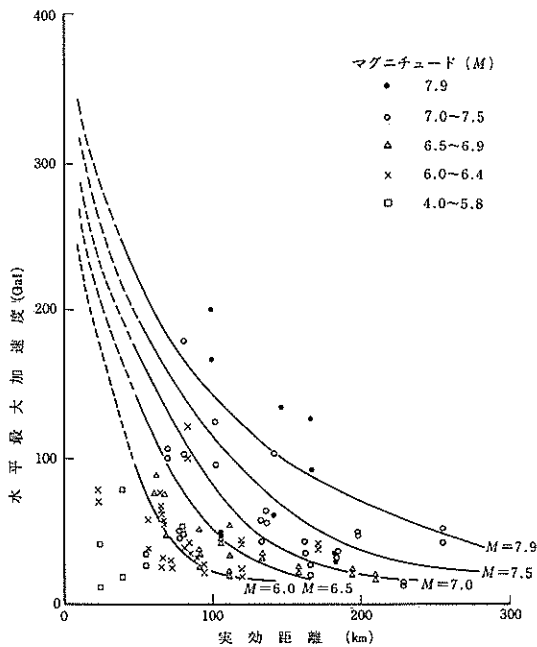


図-4.1 基盤の最大加速度と実効距離

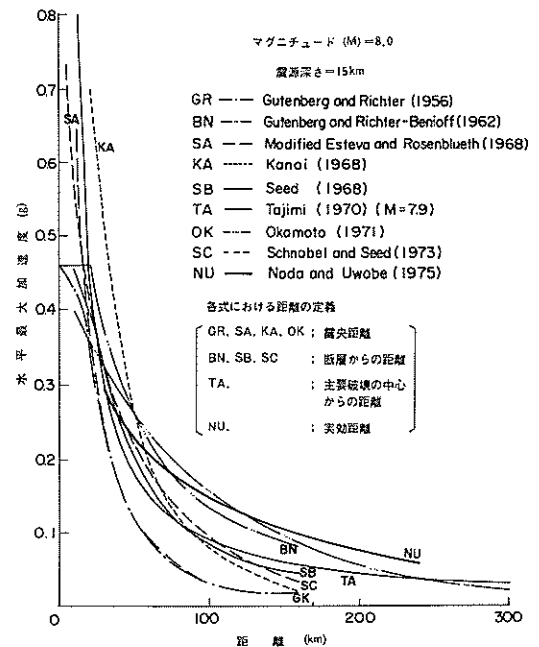


図-4.2 最大加速度と距離の関係式の比較 (M=8.0の場合)

表-4.1 基盤の最大加速度の距離による減衰

実効距離 km	マグニチュード					
	6.0	6.5	7.0	7.5	7.9	8.5
0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
5	302.0	318.0	333.0	355.0	368.0	378.0
10	238.0	268.0	298.0	318.0	341.0	356.0
15	208.0	239.0	270.0	298.0	318.0	335.0
20	187.0	219.0	248.0	272.0	298.0	320.0
25	170.0	201.0	230.0	250.0	282.0	305.0
30	155.0	187.0	215.0	239.0	268.0	293.0
35	139.0	175.0	203.0	225.0	254.0	282.0
40	123.0	163.0	192.0	214.0	243.0	272.0
45	107.0	150.0	181.0	203.0	231.0	261.0
50	91.0	138.0	169.0	194.0	222.0	251.0
55	78.0	126.0	159.0	184.0	211.0	241.0
60	66.0	116.0	150.0	175.0	202.0	234.0
65	56.0	105.0	140.0	167.0	193.0	225.0
70	48.0	96.0	131.0	158.0	184.0	217.0
75	40.0	86.0	123.0	150.0	176.0	209.0
80	35.0	78.0	115.0	143.0	168.0	202.0
85	30.0	69.0	107.0	136.0	161.0	195.0
90	26.0	61.0	99.0	129.0	155.0	189.0
95	23.0	56.0	91.0	122.0	149.0	183.0
100	21.0	51.0	84.0	116.0	143.0	177.0
105	20.0	46.0	77.0	110.0	138.0	172.0
110	19.0	42.0	70.0	104.0	133.0	167.0
115	18.0	39.0	64.0	99.0	128.0	162.0
120	17.0	36.0	58.0	95.0	123.0	158.0
125	16.5	32.0	52.0	89.0	119.0	153.0
130	16.0	30.0	48.0	84.0	115.0	148.0
135	15.5	27.0	45.0	79.0	111.0	145.0
140	15.0	25.0	41.0	74.0	107.0	141.0
145	14.5	23.0	38.0	70.0	103.0	137.0
150	14.0	21.0	36.0	66.0	100.0	134.0
155	13.5	20.0	33.0	62.0	96.0	130.0
160	13.0	19.0	31.0	58.0	93.0	127.0
165	12.8	18.0	29.0	55.0	90.0	123.0
170	12.6	17.0	27.0	51.0	87.0	121.0
175	12.4	16.5	26.0	48.0	84.0	118.0
180	12.2	16.0	24.0	45.0	81.0	115.0
185	12.0	15.5	23.0	43.0	78.0	112.0
190	11.8	15.0	22.0	41.0	76.0	109.0
195	11.6	14.5	21.0	39.0	73.0	107.0
200	11.4	14.0	20.0	37.0	71.0	104.0
205	11.2	13.8	19.5	35.0	68.0	102.0
210	11.0	13.6	19.0	34.0	66.0	100.0
215	10.8	13.4	18.0	33.0	64.0	98.0
220	10.6	13.2	17.5	31.0	62.0	96.0
225	10.4	13.0	17.0	30.0	60.0	94.0
230	10.2	12.8	16.5	29.0	58.0	92.0
235	10.0	12.6	16.25	28.0	56.0	90.0
240	9.8	12.4	16.0	27.0	54.0	88.0
245	9.6	12.2	15.75	26.0	53.0	86.0
250	9.4	12.0	15.5	25.5	51.0	84.0
255	9.2	11.8	15.25	25.0	49.0	82.0
260	9.0	11.6	15.0	24.0	47.0	80.0
265	8.8	11.4	14.75	23.5	45.0	78.0
270	8.6	11.2	14.5	23.0	43.0	76.0
275	8.4	11.0	14.25	22.5	41.0	74.0
280	8.2	10.8	14.0	22.0	40.0	72.0
285	8.0	10.6	13.75	22.0	38.0	70.0
290	7.8	10.4	13.5	22.0	36.0	68.0
295	7.6	10.2	13.25	22.0	34.0	66.0
300	7.4	10.0	13.0	22.0	33.0	65.0

が少なく十分なものではないので、ここでは地震のマグニチュードに関係なく400Galと仮定している。表-4.1は、図-4.1の曲線を数値化したものである。図-4.2は、他の研究成果との比較であり、横軸は個々の曲線によってそれぞれ震央距離、断面層からの距離、主要破壊の中心からの距離、実効距離というように異なっている。

本報告では、図-4.1を用いて基盤における最大加速度を推定した。図-3.7、図-3.9、図-3.10に示した想定地震の震源域の平面的広がり、このような考え方により式(4.1)から求めたものである。

4.2 入力地震波形

基盤面に到達する地震波は、各地震および各地点毎に発震機構や伝播経路の地域特性により異なっているものの、その継続時間や振動数特性などは、地震の規模、対象地点までの距離など何らかの相関関係があると推定される。しかし、現在のところこれらの関係は主に定性的に議論されており、規模および距離によりそれらが具体的数値として与えられる関係で、広く用いられているものがあるとはいいがたい。そこで本報告では、地盤の地震応答解析における入力地震波形として、地震の規模を考慮するという観点より、想定地震と同程度のマグニチュードの地震において記録された波形を用いることとした。マグニチュード6.1~6.9の想定地震、すなわち奄美大島地震、徳之島地震、沖繩島北部地震、沖繩島南西地震、沖繩島南東地震および宮古島地震に対しては1978年2月に宮城県沖で発生した地震の際に大船渡港で記録されたものを、マグニチュードが7.0~7.5の想定地震、すなわち石垣島地震、八重山地震および与那国島地震に対しては1978年6月の宮城県沖地震の際に同じく大船渡港で記録されたものを、マグニチュードが8.0の喜界島地震に対しては1968年の十勝沖地震の際に八戸港で記録されたものをそれぞれ用いた。表-4.2に、使用した入力地震波形に関するデータを示す。なお、記録番号は当研究所耐震構造研究室が整理のために付したものであり、以下では地震波形を呼ぶのにこの記録番号を使用することとする。

S-1120N41WおよびS-1210E41Sは、大船渡港の岩盤上で得られたものであり、そのまま基盤での地震波形とみなすことができる。それぞれの波形を図-4.3、図-4.4に示す。一方、S-252NSは、八戸港の地表で得られたものであり、この地表の記録から6.で述べる地震応答解析手法により基盤面への入射波形を計算し、入力地震波形としなければならない。八戸港の土質柱状図と

表-4.2 応答解析に使用した地震波形

想定地震の マグニチュード	記録番号 成分	地点名	年月日	地震名	マグニ チュード	震源の位置			震源距離 km	最大 加速度 Gal
						経度 °E	緯度 °N	深さ km		
6.1 ~ 6.9	S-1120 N41W	大船渡防地-S	1978 2.20		6.7	142.20	38.75	50	71	61
7.0 ~ 7.5	S-1210 E41S	大船渡防地-S	1978 6.12	宮城県沖地震	7.4	142.17	38.15	40	111	161
8.0	S-252 NS	八戸-S	1968 5.16	十勝沖地震	7.9	143.58	40.73	0	178	170*

* 記録波形を基盤にもどしたときの最大加速度，地震のパラメータは気象庁による。

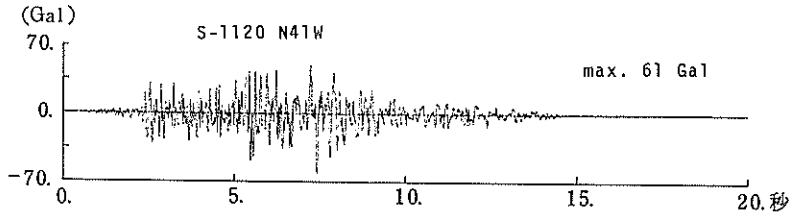


図-4.3 入力地震波形 (S-1120 N41W 大船渡)

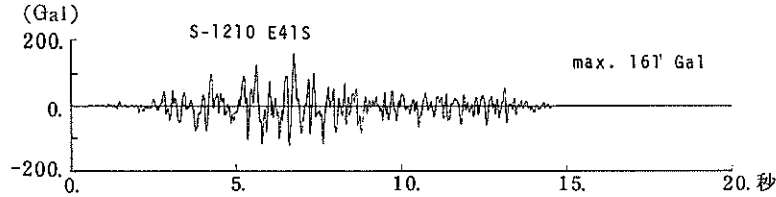


図-4.4 入力地震波形 (S-1210 E41S 大船渡)

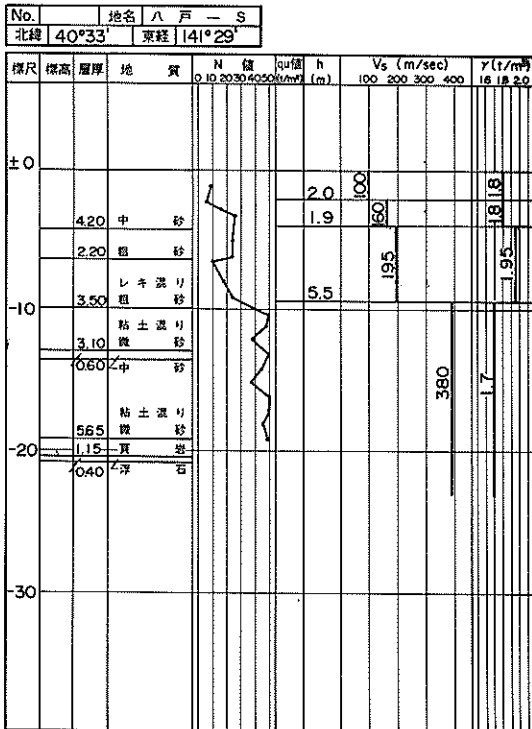


図-4.5 八戸港の土質柱状図と地盤モデル

計算に用いた地盤モデルは図-4.5に示す通りであり，地盤のモデル化に当っては，ボーリングによる土質調査およびPS検層の結果を参考にした。²⁸⁾ 地表の記録から基盤面への入射波形を計算した結果を図-4.6に示す。図中，基盤の入射波とは，基盤面へ到達する入射波の2倍で，基盤面が露出している場合に得られる地震波を意味している。

また，これらの入力地震波形のフーリエスペクトルをそれぞれ図-4.7～図-4.9に示す。これらは，地震の規模が大きくなる程地震動の卓越振動数が低くなるという知見と一致している。

なおこれらの入力地震波形は，実際の記録のうち最大加速度が発生した部分を含む15秒間を取り出し，その最初の部分は徐々に振動が始まるように，最後の部分は徐々に振動が小さくなるように，それぞれCOS型の重み関数をかけてある。COS型の重み関数の長さは，ここでは2秒間とした。さらに，フーリエ変換に伴うリンク効果を断つために，15～20秒の間はゼロを与え，入力地震波形全体の長さは20秒間とした。また，応答解析においては，最大加速度が4.1で求めた値になるように，ある係数をかけて用いることになる。

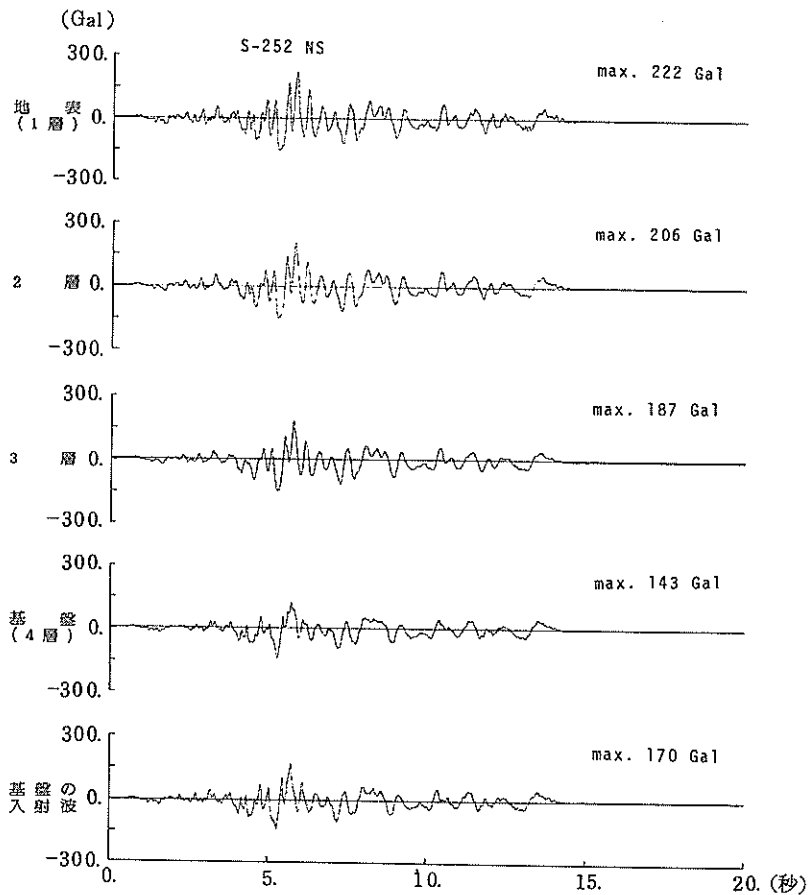


図-4.6 各層境界における地震波形と入射波形
(S-252 NS 八戸)

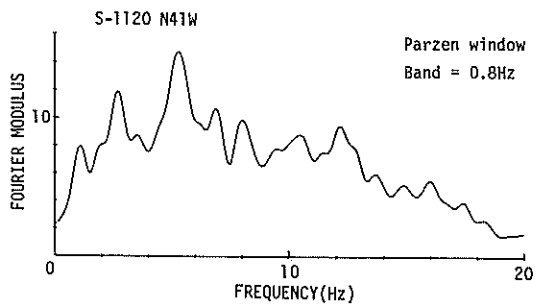


図-4.7 入力地震波のフーリエスペクトル
(S-1120 N41W 大船渡)

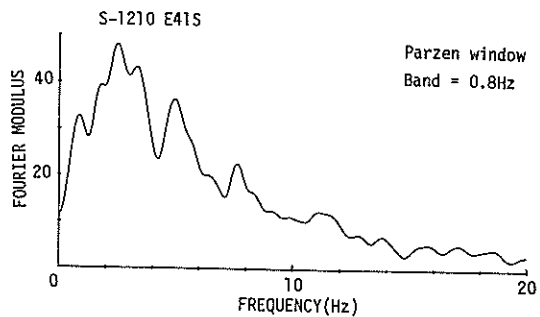


図-4.8 入力地震波のフーリエスペクトル
(S-1210 E41S 大船渡)

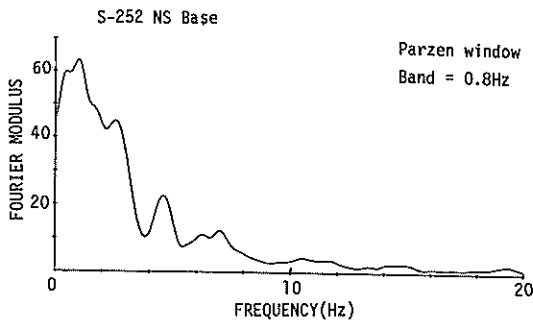


図-4.9 入力地震波のフーリエスペクトル (S-252 NS 八戸 入射波)

5. 地盤のモデル化

5.1 土の動的変形特性の評価

地盤の地震応答解析に用いられる土の動的変形特性の値は、計算結果を大きく支配する。したがって、これを把握しておくことは、地震応答解析を行う上で、重要な事項である。

土はくり返し荷重に対して、図-5.1に示すような履歴ループを描く。地盤の応答解析法は、土のこのような非線型挙動を時間的に逐次追跡していく逐次解析法、および力学的にほぼ等しい結果を与える線型モデルにおきかえて計算する等価線型解析法の2つに大きく分けることができる。

逐次解析法では、土の非線型履歴曲線は、バイリニアモデル、Ramberg-Osgoodモデル、Hardin-Drnevichモデルなどによって理想化される。バイリニアモデルは、降伏前と降伏後の2つのせん断弾性係数を用いて履歴ループをひし形でおきかえるものである。Ramberg-OsgoodモデルとHardin-Drnevichモデルは、履歴曲線を計算の便のために数式表示したもので、4個あるいは3個

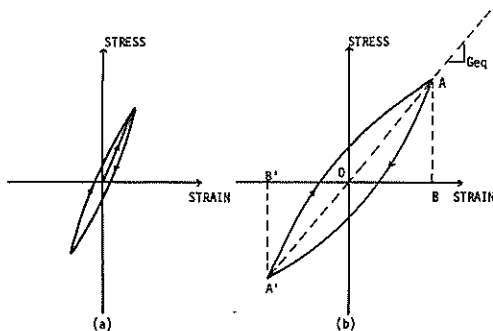


図-5.1 せん断ひずみによる土の変形特性の相違

のパラメータを与えることによって履歴曲線が確定される。

逐次解析では、土の変形係数が逐次変化するために解析が複雑となる。そこで、履歴ループを描く土の応力~ひずみ関係を簡略化して、ひずみレベルに応じた1つのせん断弾性定数と減衰定数で表わそうとするのが、等価線型解析法である。履歴ループを描く土の等価線型モデルへのおきかえは、次のように行われる。図-5.1の原点と最大ひずみの生じる点Aを結ぶ直線の勾配を等価せん断弾性定数 G_{eq} とし、等価減衰定数 h_{eq} は普通次式のように表わされる。

$$h_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (5.1)$$

ΔW : 履歴曲線のループの全面積、1サイクル中に系から失われるエネルギー

W : 線型モデルに蓄積されるひずみエネルギーの最大値 ($\triangle OAB$ の面積)

このように定義した等価せん断弾性定数と等価減衰定数は、ひずみによって変化する。すなわち、ひずみが小さい時は図-5.1(a)に示すように、土は大きなせん断弾性定数を示し、ループの面積(減衰定数)も小さい。しかし図-5.1(b)に示すように、ひずみが大きくなるとせん断弾性定数は小さく、ループの面積は大きくなる。したがって、等価線型解析法に用いられるせん断弾性定数および減衰定数は、ひずみの関数として示される。

本報告の地盤の地震応答解析は等価線型解析法により行った。なお本報告では、等価せん断弾性定数 G_{eq} を G 、等価減衰定数 h_{eq} を h と略して記すこととする。

5.2 粘性土のせん断弾性定数と減衰定数

粘性土のせん断弾性定数および減衰定数に影響を与える因子としては、ひずみの大きさの他に、拘束圧、塑性指数などが考えられる。これらをパラメータとして、せん断弾性定数や減衰定数のひずみ依存曲線を求める試みが数多くなされている。このような研究では一般に、せん断弾性定数は初期せん断弾性定数 G_0 に対する比 G/G_0 で、減衰定数は等価減衰定数で表わされる。

本報告では、以下に示すこれらの研究成果を比較し、図-5.2、図-5.3に示すように平均的な曲線を設定して使用した。比較する際には、ほぼ深さ15~25 mに相当する拘束圧 1.0 kgf/cm^2 を標準とした。

Seedほか²⁹⁾は、それまでの数多くの研究者による実験結果を $G/G_0 \sim \gamma$ で整理すると比較的狭い幅に分布することから、その平均曲線を使うことにより、原場計測等から初期せん断弾性定数を知れば、ひずみに応じたせん

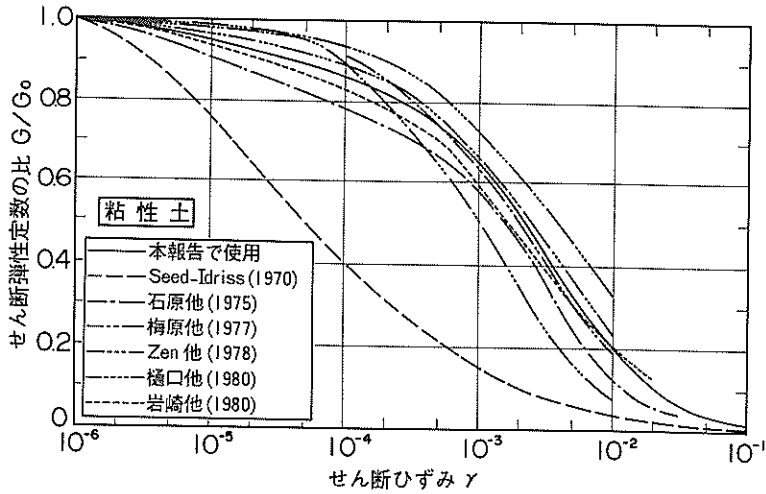


図-5.2 粘性土のせん断弾性定数とひずみ

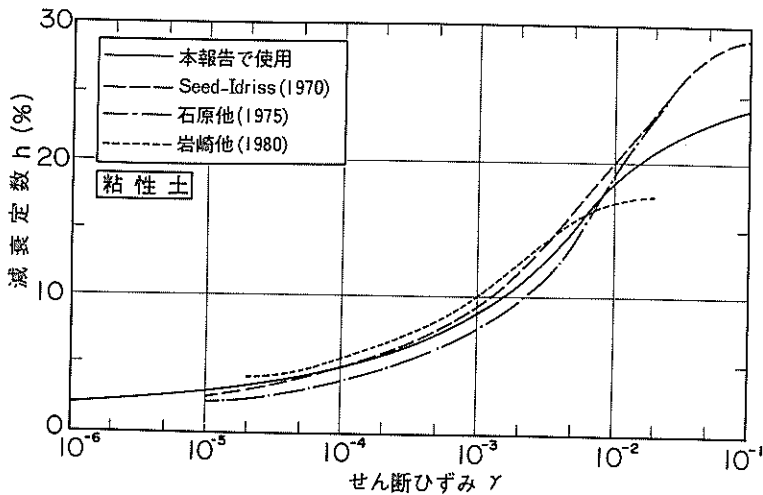


図-5.3 粘性土の減衰定数とひずみ

断弾性定数を近似することができる。また、減衰定数についても同様にして、 $h \sim \gamma$ の平均曲線を求めた。

石原ほか³⁰⁾は、埋立軟弱地盤のシルトを対象に、乱さない試料を用いて、圧密圧力 0.5 kgf/cm^2 および 1.0 kgf/cm^2 で振動三軸試験を行い、圧密圧力の相違による G/G_0 と h の変化は認められなかったとしている。 $h \sim \gamma$ 曲線は、Seed ほかの結果とよく一致している。

梅原ほか³¹⁾は、不攪乱川崎粘土に対して振動三軸試験を行い、 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係は、平均有効主応力にかかわらず一義的に決まるとした。

Zen ほか³²⁾は、練り混ぜた 6 種類の試料を調整し、共振

試験と振動三軸試験を行って、平均主応力、塑性指数などが動的変形係数に及ぼす影響を調べた。それによると、粘土に近くなるにつれて $G/G_0 \sim \gamma$ が平均主応力によらず一義的に示され、塑性指数が小さくなるにつれて G/G_0 のひずみの増大に伴う低下が大きくなるとしている。図中の曲線は、6 種類の試料のうちほぼ中間の塑性指数 $I_P = 25.1\%$ のものである。

樋口ほか³³⁾は、4 本の不攪乱粘土に対して共振試験と振動三軸試験を行い、塑性指数が小さくなると G/G_0 のひずみに対する低下率が大きくなる傾向を示した。図中の 2 本の曲線は、拘束圧が約 1.0 kgf/cm^2 で $I_P = 77.8\%$,

および $I_p=75.5\%$ のものである。

岩崎ほか³⁴⁾は、各地で採取した不攪乱粘性土を対象に共振試験と振動三軸試験を行い、低ひずみ領域 ($\gamma \approx 10^{-6} \sim 10^{-4}$) においては G/G_0 は圧密圧力の増加に伴い増加すること、中高ひずみ領域 ($\gamma \approx 10^{-4} \sim 10^{-1}$) においては、圧密圧力に依らないことを指摘した。これらをふまえて、広いひずみ領域における粘性土の動的変形特性の標準曲線を次式のように提案した。

$$\left. \begin{aligned} G/G_0 &= A \cdot \sigma_p^B \quad (\gamma = 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}) \\ G/G_0 &= [G/G_0]_{\gamma=5 \times 10^{-4}} \cdot K \\ &\quad (\gamma = 5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2}) \end{aligned} \right\} (5.2)$$

ここで定数 A 、 B および K はひずみの大きさに応じて求められる定数、 σ_p は平均有効主応力である。図中の曲線は、 $\sigma_p=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合のものである。減衰定数については、平均有効主応力等に無関係な平均曲線を暫定的に示している。

これらの曲線を比較してみると、 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線は、図-5.2 に示すように Seed ほかを除いて G/G_0 でほぼ 0.2 の幅の範囲におさまっている。 $h \sim \gamma$ 曲線は、図-5.3 に示すように 10^{-2} 以下ではほぼ一致しており、 10^{-2} 以上のところでは差が生じている。しかし実際の応答計算では、 10^{-2} 以上の大ひずみが生じることはほとんどなく、影響は少ないと考えられる。

本報告では、図-5.2、図-5.3 に実線で示す曲線を使用した。

5.3 砂質土のせん断弾性定数と減衰定数

砂質土のせん断弾性定数および減衰定数に影響を与え

る重要な因子としては、ひずみの大きさのほかに拘束圧、間隙比 (あるいは相対密度) などがある。本報告では、砂質土についても粘性土と同様に、以下に示すようなこれまでの研究成果を比較し、平均的な曲線を設定して使用した。これらの曲線を図-5.4、図-5.5 に示す。砂の場合、拘束圧が大きくなると G/G_0 の減少はゆるやかになり、減衰定数は小さくなるという報告^{35)~38)}もあるが、値に関してはまだ結論が得られていない。そこで、今回対象とした地盤の厚さも考慮して、ここでは粘性土と同様に拘束圧 1.0 kgf/cm^2 を標準とした。

Seed ほか²⁹⁾は、粘性土と同様にそれまでの研究成果を整理して、 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ の平均曲線を示した。

Sherif ほか³⁵⁾は、4種類の乾燥砂についてねじり単純せん断試験を行って、次のような関係式を提案した。

$$\left. \begin{aligned} G &= 2.8 \phi (\sigma'_c)^{0.85} \cdot \gamma^{-0.6} \quad (\gamma < 0.03) \\ G &= 2.8 \phi (\sigma'_c)^{1.677+0.6} \cdot 40 (0.205)^{7/6.03} \\ &\quad (0.03 \leq \gamma \leq 1) \end{aligned} \right\} (5.3)$$

ここに、 ϕ は砂のせん断抵抗角 (度)、 σ'_c は有効拘束圧で、 G とともに単位は psi である。ひずみはパーセント表示である。図中の曲線は、 $\sigma'_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2 \approx 14.223 \text{ psi}$ のときのものである。

柴田ほか³⁶⁾は、飽和砂に対して圧密非排水条件下で振動三軸試験を行い、過剰間隙水圧の発生が無視できる程度の微小ひずみを対象として次式を提案し、従来のデータを活用して式の適用範囲がかなり広い (10^{-3} のオーダーまで) ことを確かめた。

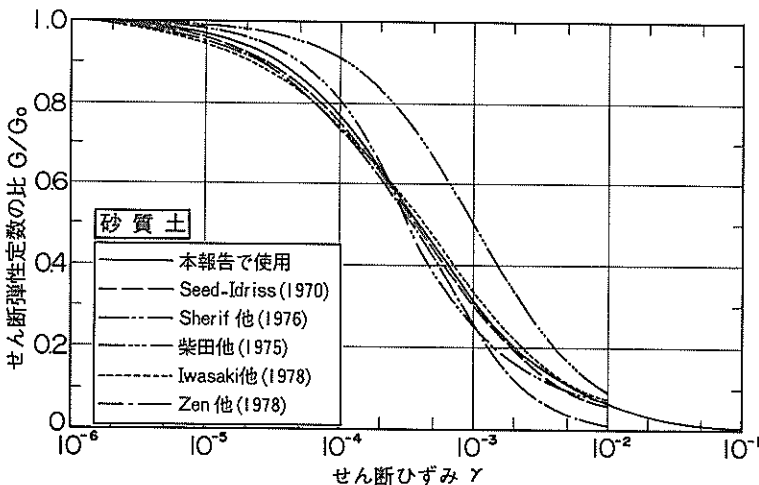


図-5.4 砂質土のせん断弾性定数とひずみ

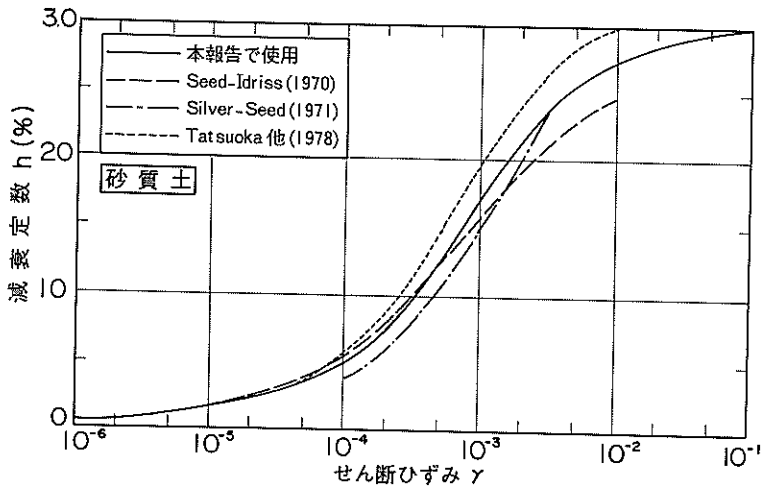


図-5.5 砂質土の減衰定数とひずみ

$$G/G_0 = 1 / \left(1 + 10^3 \frac{\gamma}{\sqrt{\sigma'_c}} \right) \quad (5.4)$$

ここに、 σ'_c は有効拘束圧である。図中の曲線は $\sigma'_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ のときのものである。

Iwasaki ほか³⁷⁾と Tatsuoka ほか³⁸⁾は、きれいな砂および原地で採取した様々な砂を対象に共振試験とねじりせん断試験を行い、次のような関係式を提案した。

$$[G/G_0]_{\sigma_p} = f(\gamma) \cdot \sigma_p^{m'(\gamma)} \quad (5.5)$$

ここに、 σ_p は平均主応力 (kgf/cm^2)、 $f(\gamma)$ は $\sigma_p = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の時の G/G_0 の値、 $m'(\gamma)$ は平均主応力が G/G_0

に及ぼす影響を表わす関数である。図中の曲線は、 $\sigma_p = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の時のものである。また減衰定数は、 $h \sim G/G_0$ の関係として求められており、 $\sigma_p = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合について $h \sim \gamma$ に換算したものを示してある。

Zen ほか³²⁾は、前述のように練り混ぜた6種類の粘性土について共振試験と振動三軸試験を行った。図中に示した曲線は、これらの中で最も砂に近いと考えられる試料、すなわち砂分69.2%、シルト分17.8%、粘土分13.0%で塑性指数が0の試料について、平均主応力 1.0 kgf/cm^2 で求められたものである。

Silver ほか³⁹⁾は、均一粒径で角ばった石英質砂に対

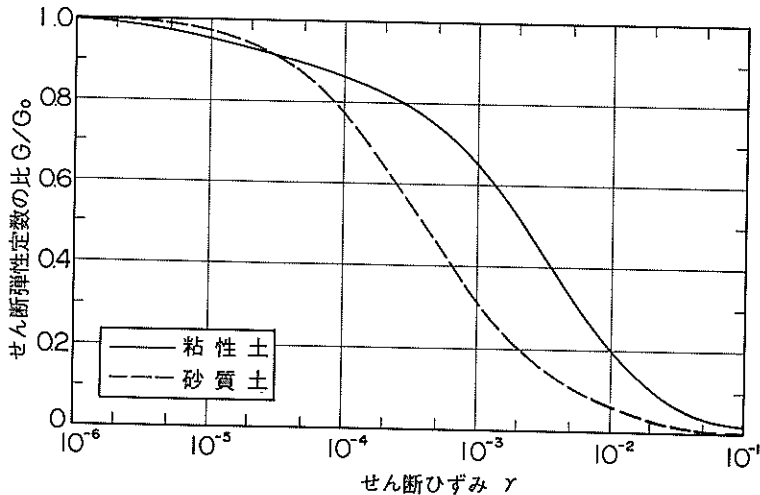


図-5.6 土のせん断弾性定数とひずみ

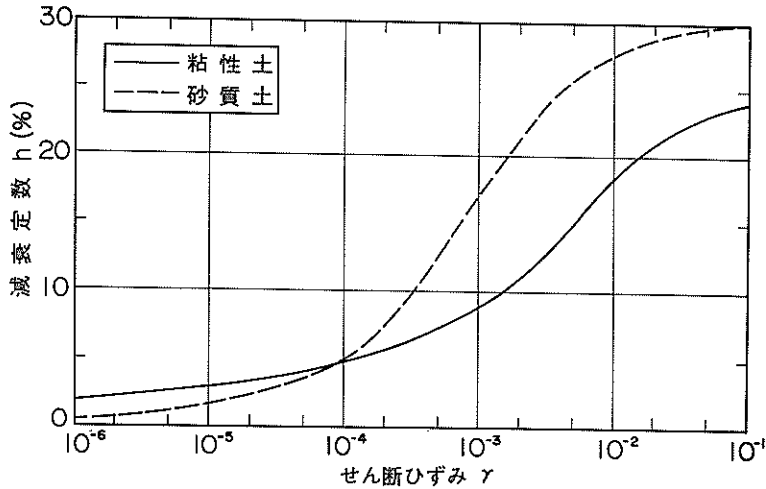


図-5.7 土の減衰定数とひずみ

表-5.1 土のせん断弾性定数と減衰定数のひずみによる変化

種類 γ	砂質土		粘性土	
	G/G ₀	h (%)	G/G ₀	h (%)
1 × 10 ⁻⁶	1.000	0.5	1.000	2.0
2 #	0.997	0.6	0.993	2.2
5 #	0.987	1.1	0.970	2.6
1 × 10 ⁻⁵	0.967	1.7	0.948	3.0
2 #	0.939	2.4	0.927	3.4
5 #	0.863	3.6	0.893	4.1
1 × 10 ⁻⁴	0.767	5.0	0.860	4.8
2 #	0.637	7.4	0.820	5.6
5 #	0.447	12.4	0.743	7.3
1 × 10 ⁻³	0.311	17.0	0.645	8.8
2 #	0.200	21.0	0.520	10.8
5 #	0.108	25.5	0.327	14.9
1 × 10 ⁻²	0.064	27.3	0.200	18.6
2 #	0.032	28.6	0.103	20.8
5 #	0.012	29.6	0.040	23.0
1 × 10 ⁻¹	0.006	30.0	0.020	24.0

して、気乾燥状態で相対密度と鉛直応力を変えて動的単純せん断試験を行った。減衰定数に対する相対密度の影響はほとんどなく、図中に示した曲線は、鉛直応力が 2,000 lb/f² ⇔ 1.0 kgf/cm² の時のものである。せん断弾性定数については、G₀ の値が求められていないため、G/G₀ として表わすことができないので図中には示していない。

これらの曲線を比較してみると、G/G₀ ~ γ 曲線は、

図-5.4 に示すように柴田ほかを除いてほとんど一致しており、本報告では図中の実線を使用した。h ~ γ 曲線は研究例が少ないが、図-5.5 に実線で示す平均的な曲線を使用した。

本報告で用いた G/G₀ ~ γ, h ~ γ の曲線を図-5.6, 図-5.7 に、代表的なひずみでのそれぞれの値を表-5.1 に示す。ひずみが 10⁻² 以上の範囲の値は、実験値が少ないので 10⁻² 以下の値を参考にして定めた。

5.4 初期せん断弾性定数

5.2, 5.3 で述べた粘性土および砂質土のせん断弾性定数は、初期せん断弾性定数 G₀ に対する比で表わされている。したがって、土のひずみに対応したせん断弾性定数を求めるためには、初期せん断弾性定数を定める必要がある。ここでいう初期せん断弾性定数とは、γ = 10⁻⁶ 時のせん断弾性定数のことであり、弾性波探査時に生じるひずみにほぼ等しいと考えられる。そこで、弾性波探査によりせん断波速度が求められている時には、次式により初期せん断弾性定数を定めるのがよいと考えられる。

$$G_0 = V_s^2 \cdot \rho \quad (5.6)$$

V_s : せん断波速度

ρ : 土の密度

しかし大部分の土質調査においては、N 値あるいは一軸圧縮強度 q_u しか求められていない。このような場合には、N 値あるいは q_u 値より初期せん断弾性定数を推定した。N 値と弾性波探査の結果を集積して、N 値と初期せん断弾性定数の間の関係を見出そうという研究は、数多くなされている。一般に、初期せん断弾性定数と N 値

表-5.2 $G_0 = aN^b$ における
 a と b の値^{40) 41)}

a	b	備考
1,220	0.62	Ohba ほか
1,390	0.72	大田 ほか
1,200	0.80	Osaki ほか
1,580	0.668	Hara ほか
1,200	0.737	Imai

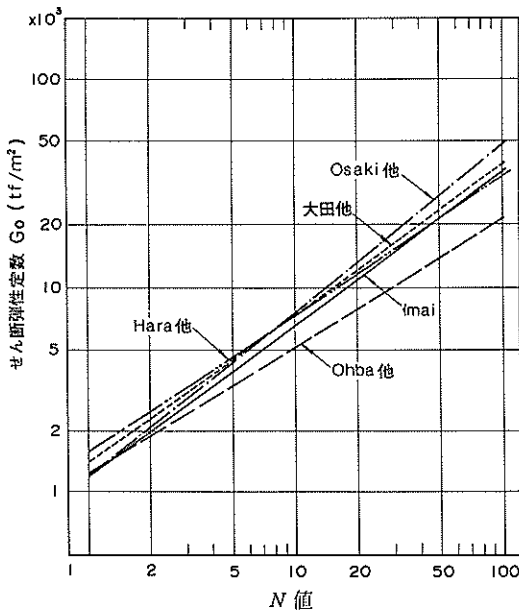


図-5.8 N 値とせん断弾性定数の関係

の関係は次式のように表わされる。

$$G_0 = aN^b \quad (\text{tf/m}^2) \quad (5.7)$$

今までに提案された a と b の値をまとめて示すと、表-5.2のとおりであり、それぞれ少しずつ異^{40) 41)}っている。これらを図示すると図-5.8のようになる。

この中で Imai⁴¹⁾ の研究は、沖積層、洪積層、第3紀層、埋土などの幅広い種類の地盤に対する943の数多くのデータを整理して求めたものであり、種々の地盤に適用可能と考えられる。したがって本報告では、Imaiにより提案された次式の関係により、初期せん断弾性定数を仮定した。

$$G_0 = 1,200 N^{0.737} \quad (\text{tf/m}^2) \quad (5.8)$$

上式の相関係数は0.888である。

一方、Hara ほか⁴²⁾ は粘性土について、非排水せん断強度 s_u (kgf/cm^2) と初期せん断弾性定数の関係を次式のように求めた。

$$G_0 = 5,160 s_u^{1.012} \quad (\text{tf/m}^2) \quad (5.9)$$

但し、 $s_u = \frac{1}{2} q_u$ (kgf/cm^2)、 q_u は一軸圧縮強度、また上式の相関係数は0.95である。したがって本報告では一軸圧縮強度が求められているものについては、(5.9)式により初期せん断弾性定数を仮定することとした。

5.5 地震応答解析モデル

地盤の地震応答解析を行うためには、実際の地盤をいくつかの層にモデル化しなければならない。必要なモデル定数は、各層の層厚、単位体積重量、初期せん断弾性定数(またはせん断波速度)である。

モデル化は次のような手順で行った。

(1) 土質柱状図から判断して基盤を設定する。ここでいう基盤とは、地震学でいう地震基盤とは異なり、 N 値50以上を有する地盤という程度の工学的な基盤のことである。

(2) 土質が変化するところを見つけ、各土質ごとに分割する。この際、同じ土質でも N 値や q_u 値が大きく異なる時はさらに分割する。分割は1層の厚さがおおむね10m以下となるように行い、それよりかなり厚くなる時は2層に分割し、逆に非常に薄い層は無視した。

(3) 各層の土に対して、5.2、5.3で述べた砂質土と粘性土のどちらのひずみ依存曲線を適用するかを決める。いいかえると、各層の土を砂質土とみなすか粘性土とみなすかを判断する。実際の地盤では、各層の土は砂分あるいは粘土分だけから構成されていることは少なく、レキ、砂、シルト、粘土の各成分がいろいろな割合で混じっている場合が多い。そこで、この判別には次のように考えた。まず、レキ、砂、石灰岩は砂質土とみなし、シルト、粘土は粘性土とみなした。ただし、ここでいう石灰岩とは基盤に現われているものではなく、もっと浅いところにあるものことで風化作用により微粉状になっていることが多い。○△混り△△、□□質××等

表-5.3 ひずみ依存曲線の選択

土質	ひずみ依存曲線
⑤ 混り ③	粘性土
⑤ 質 ③	粘性土
③ 混り ⑤	砂質土
③ 質 ⑤	粘性土

⑤: レキ, 砂

③: シルト, 粘土

と表示されているものについては、表-5.3に示すように礫や砂分のかかなり多いものだけを砂質土とみなした。

埋立地については、埋立後の現在の土質柱状図がほとんど得られていないため、埋立前の土質調査の際に得られている土質柱状図を利用し、現状に合わせるため便宜的に埋立土砂として N 値10の砂層を仮定した。付録の土質柱状図において標尺が0以上の部分は、このようにして仮定した砂層である。

このように海底面上ある厚さの砂層を仮定している地点で、海底面下に軟弱粘土層が厚く堆積している場合には、有効土かぶり圧と非排水強さの次式で示す関係より、非排水強さを仮定した。

$$\frac{s_u}{p} = 0.3 \quad (5.10)$$

ここで、 s_u ：非排水強さ

p ：有効土かぶり圧

(4) 単位体積重量を決める。単位体積重量は、土質調査により求められているものはそのまま使用し、その他のものは土質および N 値から表-5.4のように仮定した。岩については、標準貫入試験結果が50回打撃で貫入量が数cmと非常に小さいものも適宜貫入不可能と同等とみなした。

(5) 初期せん断弾性定数あるいはせん断速度を決める。各層の N 値あるいは q_u 値の平均値を求め、これから5.4で述べた方法により仮定した。

対象地点の土質柱状図および地盤モデル定数は、付録に示してある。ここでは、地盤の初期せん断弾性定数を

一般に理解しやすいせん断波速度で表示してある。

表-5.4 単位体積重量の仮定値

土の種類	N 値	単位体積重量 (tf/m ³)
粘性土	$N < 10$	1.6
	$N \geq 10$	1.8
砂質土	$N < 20$	1.8
	$N \geq 20$	2.0
岩	$N < 50$	2.0
	$N \geq 50$	2.2
	貫入不可能	2.4

6. 地盤の地震応答解析手法

地盤の地震応答計算手法には、重複反射モデルによるもの、質点モデルによるもの、有限要素法によるものなどがあり、さらに土の変形特性を線型とみなすものや非線型性を考慮するものなど多種がある。

本報告においては、重複反射モデルを採用し、繰り返し計算による等価線型解析を行った。等価線型解析に必要な土のひずみとせん断弾性定数、減衰定数の関係はすでに5で述べたとおりである。

重複反射モデルは、地盤を水平な地層の重なりとし、基盤から垂直に入射したせん断波が上方に進行し、各層の境界で透過と反射を繰り返すものとして取り扱うものである。図-6.1は下方の基盤から入射した波が上方の各層に伝播する様子を時間の経過を横軸にして示したものである。地表面や各層の境界面での地震波は、基盤か

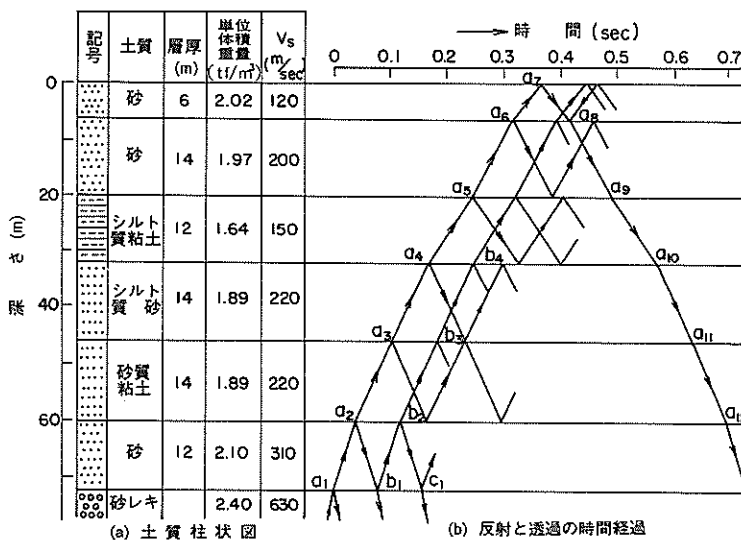


図-6.1 重複反射モデルによる地震波の伝播

ら引き続き入射してくる地震波による透過、反射成分 a, b, c ……を各時間ごとに合計したものとして求めることができる。このような重複反射の考え方は、数理的には概略次のようになる。

粘性係数 η を持つ粘弾性体の波動方程式は次式となる。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (6.1)$$

ここで、 ρ : 密度

G : せん断弾性定数

u : 水平方向の変位

z : 鉛直方向の座標

t : 時間

η : 粘性係数

角振動数 ω の調和波の場合、第 j 層における上式の解は次式で与えられる。

$$u = U_j(z) \cdot \exp(i\omega t) \quad (6.2)$$

$$U_j(z) = E_j \exp(i k_j z) + F_j \exp(-i k_j z) \quad (6.3)$$

$$k_j^2 = \frac{\rho_j \omega^2}{G_j + i\omega \eta_j} = \frac{\rho_j \omega^2}{G_j^*} \quad (6.4)$$

ここで、 E_j は透過波の複素振幅、 F_j は反射波の複素振幅であり、 U_j はそれらの和で地中の変位の複素振幅である。さらに G_j^* は複素せん断弾性定数である。これを減衰定数 h_j を使って、

$$\omega \eta_j = 2 G_j h_j \quad (6.5)$$

とおきかえると G_j^* は次のようになる。

$$G_j^* = G_j + i\omega \eta_j = G_j(1 + 2i h_j) \quad (6.6)$$

実験結果によると大部分の土の G および h は、ここで問題とする振動数領域においてほぼ一定値をとるといわれている。したがって、ここでは以下 G_j^* は振動数の影響をうけないと仮定する。さらに各層の境界においてせん断力、および変位が等しいという条件より、 E_j 、 F_j に関して次の関係式がみちびかれる。

$$E_{j+1} = \frac{1}{2} E_j (1 + \alpha_j) \exp(i k_j H_j) + \frac{1}{2} F_j (1 - \alpha_j) \exp(-i k_j H_j) \quad (6.7)$$

$$F_{j+1} = \frac{1}{2} E_j (1 - \alpha_j) \exp(i k_j H_j) + \frac{1}{2} F_j (1 + \alpha_j) \exp(-i k_j H_j) \quad (6.8)$$

ここで、 H_j は各層の厚さであり、 α_j は複素インピーダンス比で、次式で与えられる。

$$\alpha_j = \frac{k_j G_j^*}{k_{j+1} \cdot G_{j+1}^*} \quad (6.9)$$

また、地表面でせん断力が生じないという条件より、

$$E_1 = F_1 = \frac{1}{2} A_0 \quad (6.10)$$

ここで、 A_0 : 地表面での変位振幅

以上の関係式より、 A_0 あるいは基盤の入射波 E_{n+1} が与えられれば各層ごとの振幅比が得られる。

以上は調和波に対して適用できるものであるが、時系列で与えられた一般の地震波に対しても、フーリエ変換を用いれば上述の関係式が適用できる。すなわち、時系列で与えられた地震波をフーリエ変換し、与えられた調和波に対して各層ごとの周波数伝達関数をかけあわせて、その結果をこんどはフーリエ逆変換を用いて時系列のデータになおせばよい。この方法では土の応力とひずみの関係を線型として取り扱うが、図-5.6、図-5.7に示す $G/G_0 \sim \tau$ 、 $h \sim \tau$ の平均的曲線を用いてくり返し計算をすることにより、擬似的な非線型解析が可能となる。この計算は、Schnabel ほかによって開発された SHAKE⁴³⁾ というプログラムが利用しやすい。

実際に地盤の応答計算を行う手順は次のようになる。

- (1) 地盤の各層の土に対して、初期せん断弾性定数、単位体積重量を与えて地盤の解析モデルを作る。
 - (2) この地盤の解析モデルに対し、与えられた地震動を入力して重複反射理論に基づき、線型応答解析を行う。
 - (3) 応答解析で求めた各層でのひずみの値に対応する新しいせん断弾性定数と減衰定数を図-5.6、図-5.7に示す曲線から求める。
 - (4) 新しいせん断弾性定数と減衰定数により解析モデルを修正し、同じ地震動を入力して、再び重複反射理論に基づく線型応答解析を行う。
 - (5) 新しく求められた各層でのひずみの値に対応する各層のせん断弾性定数と減衰定数を再び求める。
 - (6) このようにして、各層のせん断弾性定数と減衰定数が前回のそれとほぼ等しい値に収束するまで繰り返し計算を行う。
 - (7) 以上のようにして得られた各層のせん断弾性定数と減衰定数は、その入力地震波で生じるひずみの大きさに対応しているため、最後の応答解析により正しい結果が得られたことになる。
- ところで、新しい土のせん断弾性定数を定める際に、計算された最大ひずみの何パーセントを有効ひずみとす

るかが問題となる。Schnabel ほか⁴⁴⁾は、SHAKE プログラムを使った地盤の地震応答計算の結果と実測値との比較を行って、それらがかなりよく一致することを示しているが、この場合は最大ひずみの 65 % のひずみに対応する土の諸定数を使用している。したがって、本報告においても最大ひずみの 65 % を有効ひずみとして、これに対応する新しい土の諸定数を求めた。また、せん断弾性定数と減衰定数の誤差が 5 % 以内に収まった時、収束したと判断した。

7. 計算結果と考察

7.1 計算結果の概要

想定地震に対する各地点の地盤加速度の計算結果を図-7.1～図-7.7に示す。円の中の数字が地点番号であり、地点番号の横の3行あるいは4行の数字が求められた地表での最大加速度である。図-7.1、図-7.2の奄美諸島の場合、上中下のうち上が喜界島地震、中が奄美大島地震、下が徳之島地震を想定した場合の最大加速度を示している。図-7.3～図-7.5の沖縄諸島の場合は、

それぞれ沖縄島北部地震、沖縄島南西地震、沖縄島南東地震による最大加速度を示している。図-7.3には、奄美諸島地域の南端に位置する地点番号16の与論港も含まれている。本地点では、奄美大島地震の影響は小さく、沖縄島北部地震の影響が大きいと判断されるので、想定地震として喜界島地震、沖縄島北部地震、徳之島地震を採用し、上から順にこれらの地震による最大加速度が示されている。図-7.6、図-7.7の先島諸島の場合は、上から順に、宮古島地震、石垣島地震、八重山地震、与那国島地震による最大加速度が示されている。

なお、これら各地点の地表での最大加速度を基盤での最大加速度および各層のひずみのうち最も大きいもの(最大ひずみと称す)とともに表-7.1～表-7.3に示す。また、付録に最大加速度の鉛直方向の分布と、各層の最大ひずみを示す。付録の図中に示した基盤の加速度とは、基盤が露出している場合に得られる加速度であり、入射波はその1/2となる。地盤の応答計算により得られる基盤面での加速度は、この入射波と上層からの反射波との和である。

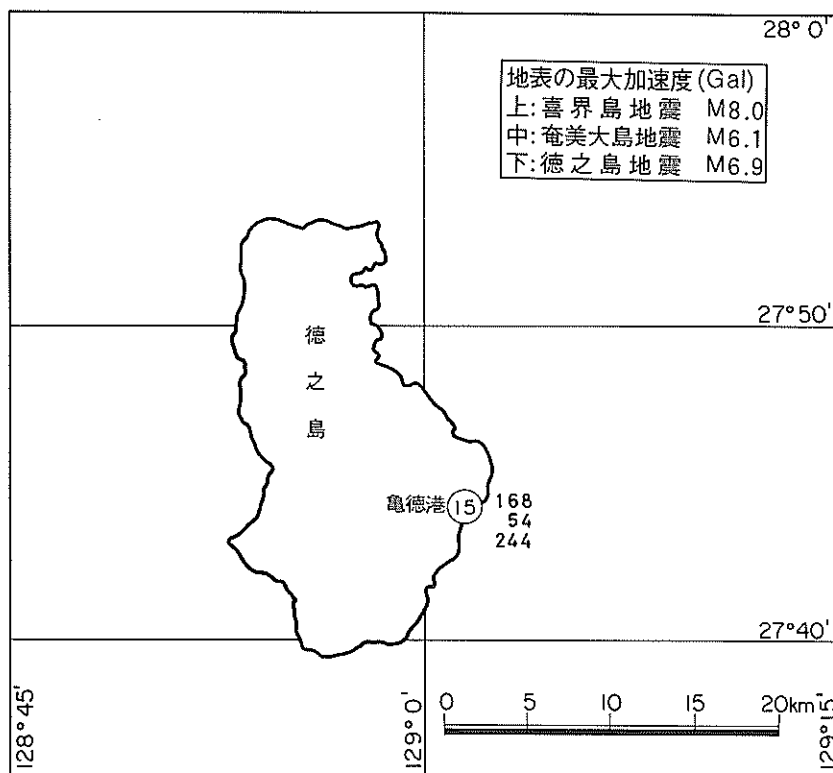


図-7.2 奄美諸島の地表の最大加速度 (2)

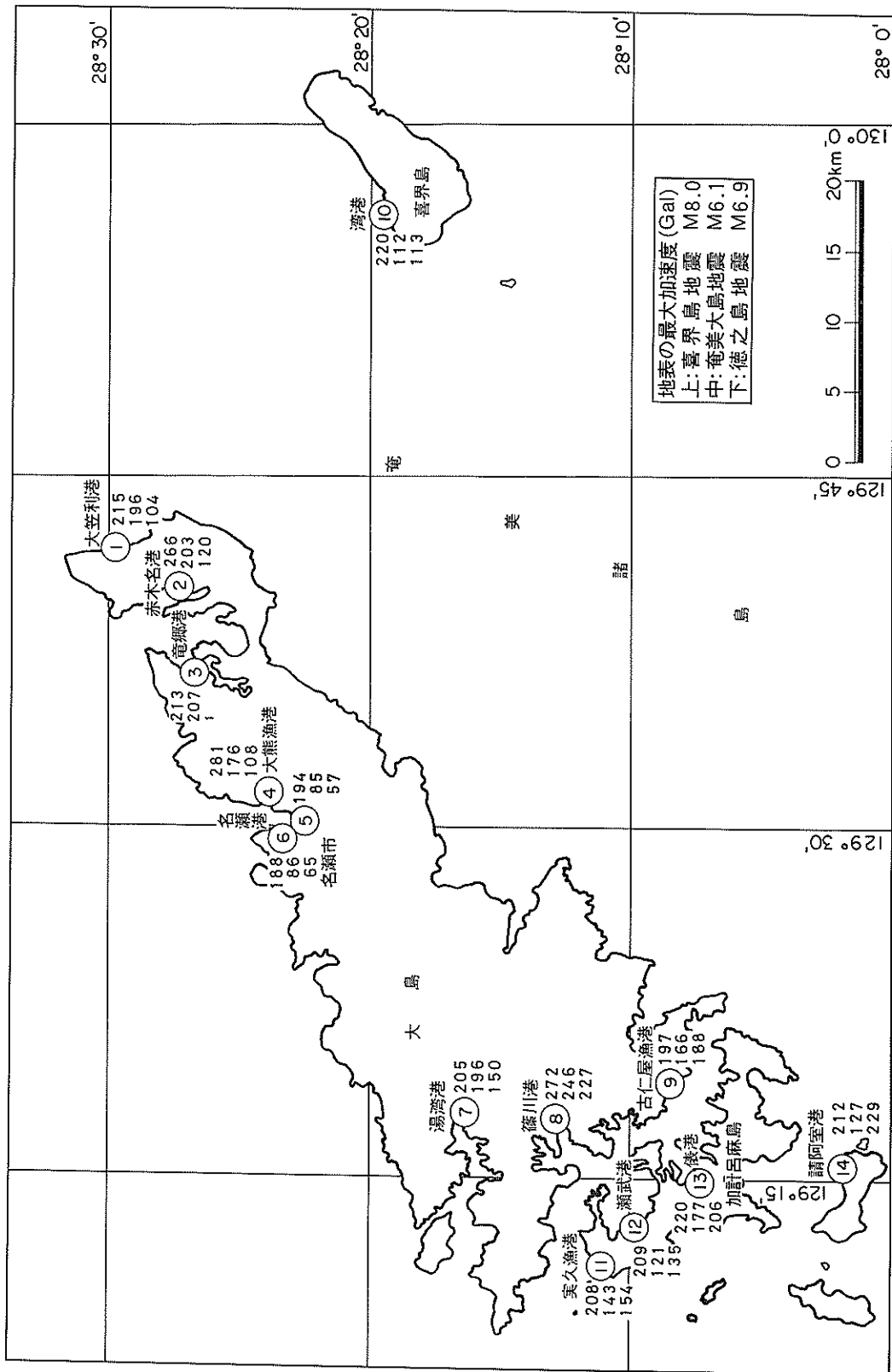


図-7.1 奄美諸島の地表の最大加速度 (1)

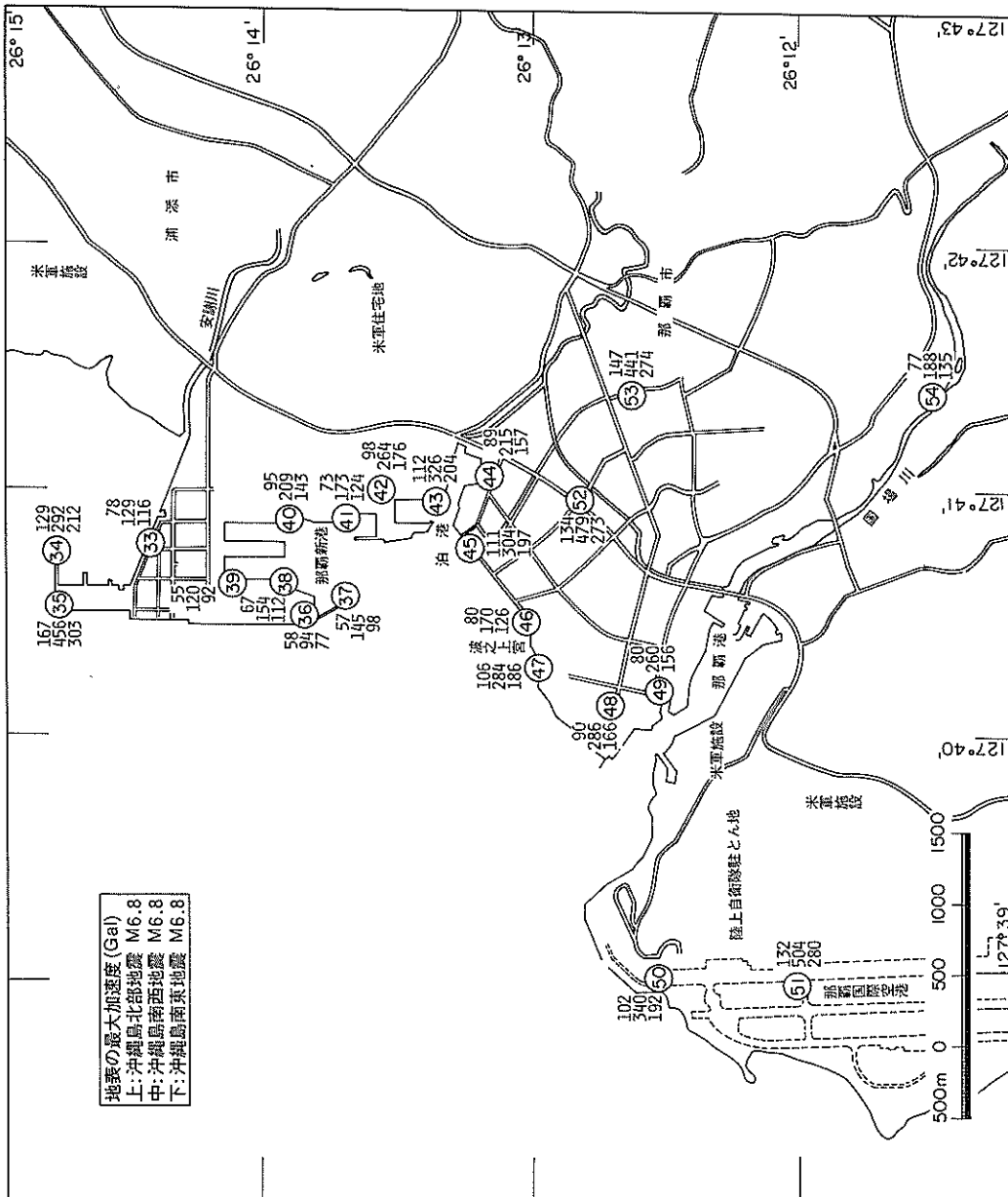


図-7.4 沖縄諸島の地表の最大加速度 (2) 那覇市

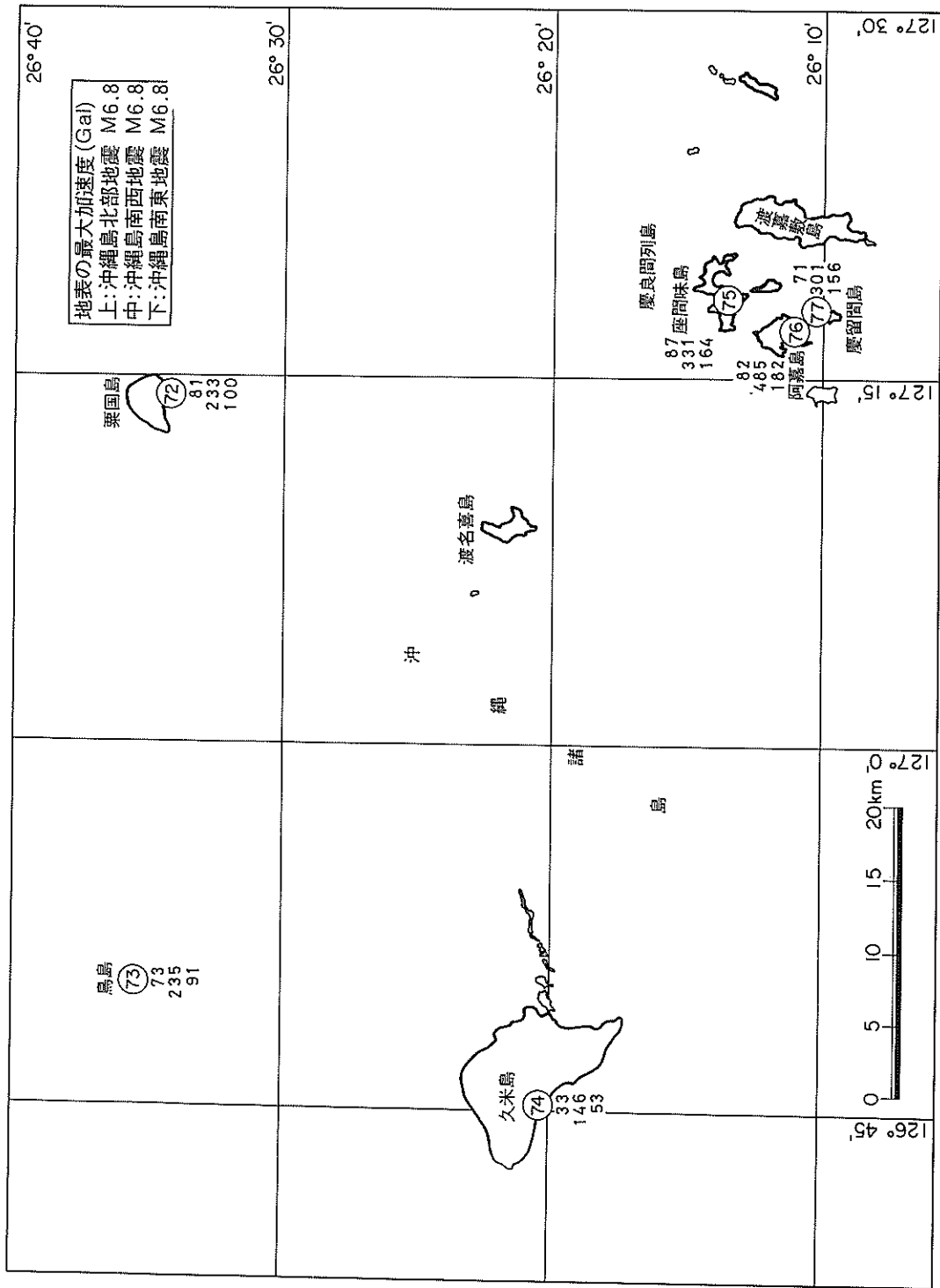


図-7.5 沖縄諸島の地表面の最大加速度 (8)

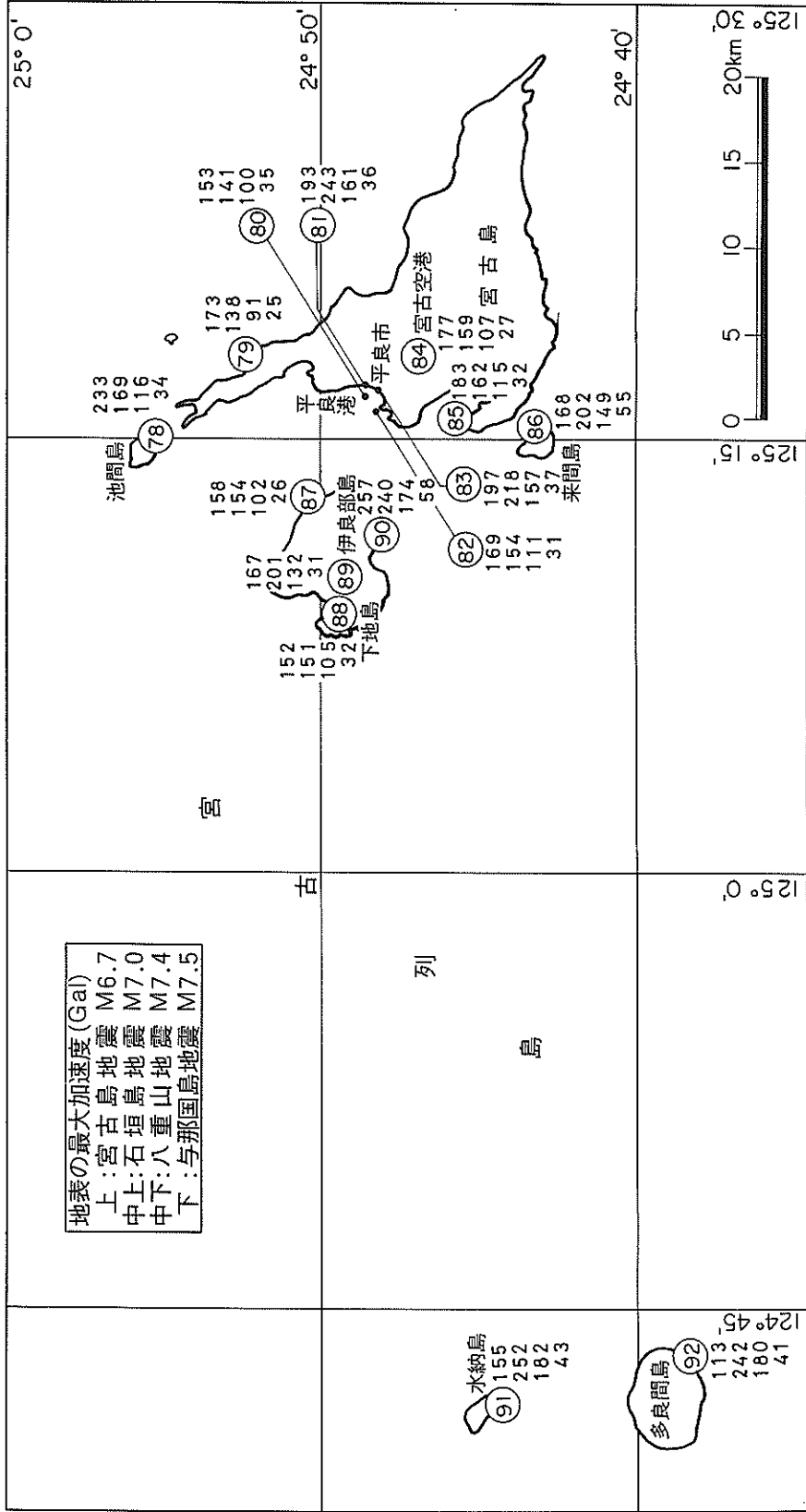


図-7.6 先島諸島の地表の最大加速度 (1)

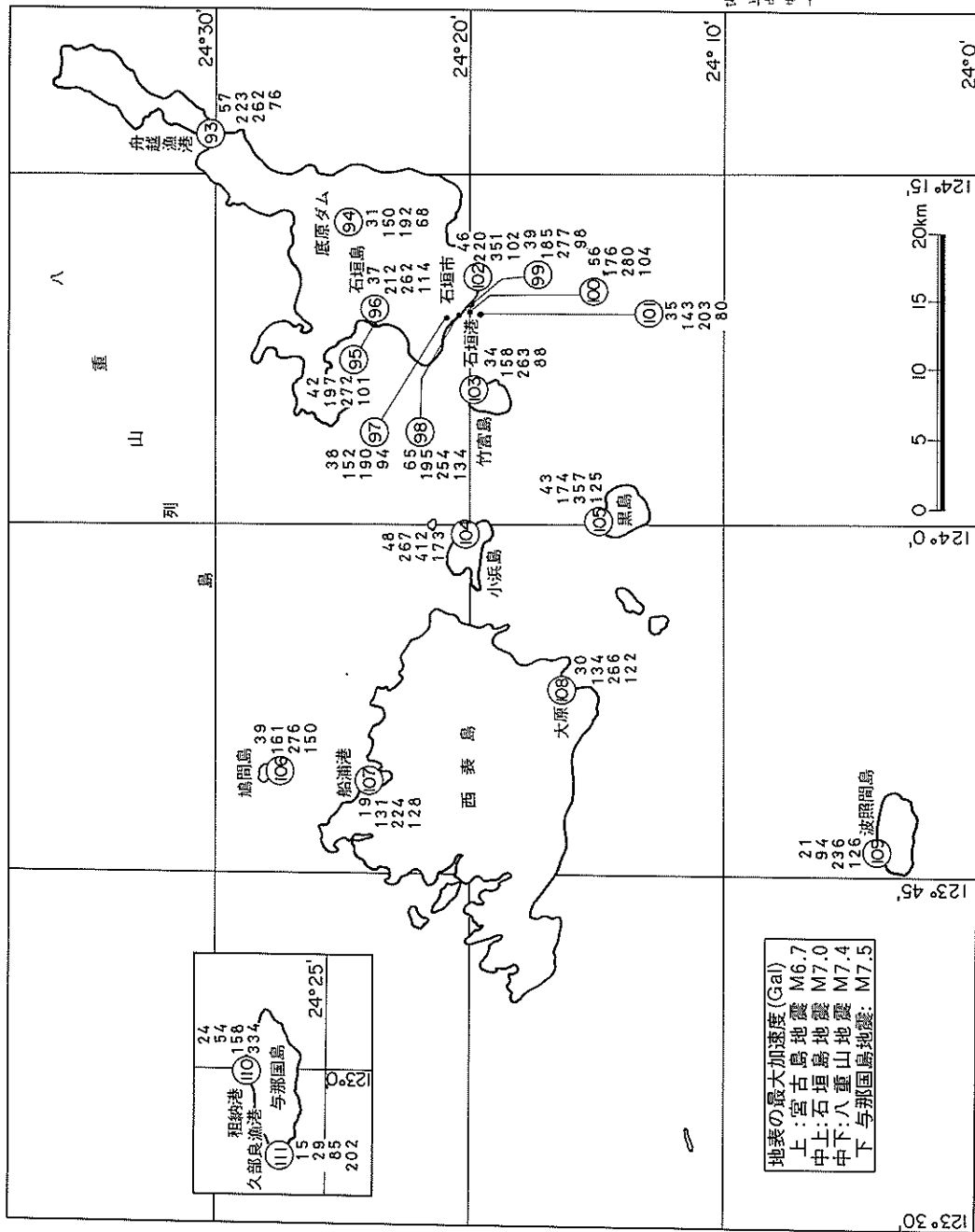


図 7.7 先島諸島の地表面の最大加速度 (2)

表-7.1 奄美諸島の各地点の最大加速度と地盤の最大ひずみ

地点 番号	種類 想定地震名 地点名	基盤の最大加速度 (Gal)			地表の最大加速度 (Gal)			地盤の最大ひずみ (%)		
		喜界島	奄美大島	徳之島	喜界島	奄美大島	徳之島	喜界島	奄美大島	徳之島
1	大笠利港防波堤	204	148	78	215	196	104	0.014	0.011	0.005
2	赤木名港防波堤	206	154	84	266	203	120	0.081	0.030	0.015
3	竜郷港	204	165	88	213	207	110	0.011	0.009	0.004
4	大熊漁港	202	173	98	281	176	108	0.517	0.105	0.053
5	名瀬港-9.0m岸壁	202	173	102	194	85	57	0.376	0.081	0.050
6	名瀬港西防波堤	202	174	101	188	86	65	1.179	0.194	0.084
7	湯湾港	191	155	120	205	196	150	0.032	0.022	0.017
8	榑川港	193	143	131	272	246	227	0.092	0.062	0.057
9	古仁屋漁港防波堤	198	127	148	197	166	188	0.168	0.026	0.030
10	湾港	226	89	90	220	112	113	0.148	0.020	0.020
11	実久漁港防波堤	184	124	133	208	143	154	0.093	0.035	0.038
12	瀬武港-4.5m岸壁	187	123	140	209	121	135	0.436	0.085	0.097
13	依港	191	119	147	220	177	206	0.199	0.074	0.099
14	請阿室港物揚場	194	94	171	212	127	229	0.125	0.032	0.079
15	亀徳港-9.0m岸壁	166	35	204	168	54	244	0.099	0.009	0.063
16	与論港	99	145*	82	99	129*	76	0.029	0.031*	0.016

*：沖繩島北部地震

表-7.2 沖繩諸島の各地点の最大加速度と地盤の最大ひずみ (その1)

地点 番号	種類 想定地震名 地点名	基盤の最大加速度 (Gal) ¹			地表の最大加速度 (Gal)			地盤の最大ひずみ (%)		
		沖繩島 北部	沖繩島 南西	沖繩島 南東	沖繩島 北部	沖繩島 南西	沖繩島 南東	沖繩島 北部	沖繩島 南西	沖繩島 南東
17	辺土名漁港	166	103	101	216	167	165	0.173	0.111	0.109
18	国頭電報電話局	166	104	102	244	154	151	0.038	0.021	0.020
19	運天港航路	153	140	119	221	203	175	0.013	0.012	0.010
20	運天港-3.5m物揚場	154	137	116	87	82	73	0.178	0.161	0.138
21	海洋博覧会会場(1)	143	148	111	99	101	84	0.065	0.068	0.049
22	海洋博覧会会場(2)	143	150	114	223	232	181	0.016	0.017	0.012
23	渡久地港本部漁協冷蔵庫	143	154	117	84	87	80	0.073	0.080	0.056
24	本部町隄堅地先	142	158	120	128	139	110	0.037	0.041	0.031
25	新渡久地港	142	159	121	199	213	178	0.043	0.047	0.037
26	名護市字名護宮里地先	147	154	131	153	158	138	0.053	0.056	0.047
27	北部ダム事務所総合管理庁舎	149	150	131	149	149	132	0.051	0.052	0.045
28	名護警察署	148	154	134	143	147	132	0.067	0.070	0.061
29	前兼久漁港防波堤	120	208	152	136	231	171	0.015	0.029	0.019
30	読谷村山田温泉	118	213	153	134	232	169	0.019	0.035	0.025
31	都屋漁港	108	239	155	144	263	194	0.030	0.078	0.046
32	新那覇市外電話局	91	286	174	111	309	202	0.015	0.048	0.029
33	旧那覇-S	90	294	172	78	129	116	0.036	0.207	0.074
34	那覇港施設ヤード	91	293	171	129	292	212	0.038	0.138	0.077
35	那覇港波高観測所	90	295	171	167	456	303	0.023	0.106	0.055

表-7.2 沖縄諸島の各地点の最大加速度と地盤の最大ひずみ (その2)

地点 番号	種類 想定地震名 地点名	基盤の最大加速度 (Gal)			地表の最大加速度 (Gal)			地盤の最大ひずみ (%)		
		沖縄島 北 部	沖縄島 南 西	沖縄島 南 東	沖縄島 北 部	沖縄島 南 西	沖縄島 南 東	沖縄島 北 部	沖縄島 南 西	沖縄島 南 東
36	那 覇 新 港 ふ 頭	89	298	172	58	94	77	0.052	0.164	0.099
37	那覇港-11.0m岸壁第4バース	89	298	173	57	145	98	0.050	0.168	0.098
38	那覇港-11.0m岸壁第3バース	89	297	172	67	154	112	0.062	0.191	0.118
39	那覇港-11.0m岸壁第1バース	89	296	172	55	120	92	0.076	0.209	0.125
40	那覇新港ふ頭A型岸壁(1)	90	294	173	94	209	143	0.075	0.235	0.138
41	那覇新港ふ頭A型岸壁(2)	89	294	173	73	173	124	0.035	0.144	0.073
42	那覇港臨港道路泊陸上工区	90	286	175	98	264	176	0.032	0.111	0.064
43	那覇港臨港道路泊航路	89	294	174	112	326	204	0.016	0.069	0.035
44	那覇港泊ふ頭南岸	88	293	175	89	215	157	0.048	0.267	0.122
45	那覇港臨港道路泊海上工区	88	296	174	111	304	197	0.019	0.087	0.044
46	那覇港臨港道路波之上工区(1)	87	300	174	80	170	126	0.023	0.126	0.059
47	那覇港臨港道路波之上工区(2)	87	302	173	106	284	186	0.021	0.087	0.046
48	安全運転学校那覇本校	86	304	174	90	286	166	0.018	0.062	0.036
49	那覇港琉球中央倉庫	86	304	174	80	260	156	0.025	0.092	0.051
50	那覇空港国際線ターミナルビル付近	84	316	171	102	340	192	0.016	0.099	0.039
51	那 覇 空 港	83	316	172	132	504	280	0.062	0.330	0.150
52	琉 球 放 送 ビ ル	88	295	175	134	479	273	0.029	0.120	0.062
53	仲 井 間 ビ ル	88	290	177	147	441	274	0.045	0.167	0.095
54	屋 場 中 継 ポ ン プ 場	86	290	179	77	188	135	0.069	0.228	0.145
55	与 根 漁 港 突 堤	81	309	176	133	474	273	0.007	0.035	0.018
56	糸 満 漁 港	78	293	181	83	178	148	0.031	0.165	0.073
57	那覇地方方法務局糸満出張所	78	294	181	84	261	169	0.028	0.160	0.072
58	喜 屋 武 漁 港	74	284	182	92	365	227	0.003	0.013	0.007
59	久 高 漁 港	96	212	202	120	258	247	0.010	0.024	0.023
60	海 野 漁 港 北 防 波 堤	95	236	193	97	231	191	0.026	0.062	0.052
61	当 添 漁 港	93	249	190	169	402	318	0.036	0.151	0.097
62	中部製糖第一工場事務所	95	254	185	109	257	201	0.037	0.117	0.074
63	南 西 石 油 南 原 製 油 所	98	245	186	81	154	128	0.102	0.257	0.196
64	泡 瀬 漁 港	112	220	176	106	204	164	0.048	0.097	0.076
65	南 原 漁 港 突 堤	116	211	176	137	207	182	0.083	0.151	0.124
66	中城湾港(津堅地区)防波堤	110	199	193	132	232	225	0.012	0.024	0.024
67	浜 漁 港 埋 立 護 岸	121	191	181	162	246	233	0.031	0.059	0.055
68	金 武 湾 港	118	204	177	146	251	218	0.006	0.011	0.010
69	具 志 川 中 学 校	117	211	171	169	297	244	0.019	0.034	0.027
70	沖 繩 ア ル ミ 工 場	127	194	154	220	317	260	0.030	0.053	0.039
71	安 田 漁 港 北 防 波 堤	165	87	95	275	149	161	0.058	0.024	0.027
72	粟 国 港 - 4.5 m 岸 壁	65	187	80	81	233	100	0.010	0.041	0.013
73	鳥 島 漁 港	35	123	44	73	235	91	0.016	0.057	0.020
74	久米島電報電話局付属舎	29	129	47	33	146	53	0.001	0.004	0.001
75	座 間 味 電 話 局	57	285	117	87	331	164	0.026	0.115	0.052
76	阿 嘉 漁 港	53	276	116	82	485	182	0.003	0.025	0.007
77	慶 留 間 港 護 岸	54	281	119	71	301	156	0.009	0.064	0.024

表-7.3 先島諸島の各地点の最大加速度と地盤の最大ひずみ

地点 番号	種 類 想 定 地 震 名 地 点 名	基盤の最大加速度 (Gal)				地表の最大加速度 (Gal)				地盤の最大ひずみ (%)			
		宮古島	石垣島	八重山	与那国島	宮古島	石垣島	八重山	与那国島	宮古島	石垣島	八重山	与那国島
78	池間漁港-4.5m岸壁	176	139	92	25	233	169	116	34	0.065	0.077	0.051	0.014
79	島尻漁港	164	139	92	25	173	138	91	25	0.004	0.003	0.002	0.000
80	平良港北防波堤	150	149	99	25	153	141	100	35	0.051	0.101	0.065	0.013
81	荷川取漁港船揚場	150	148	99	25	193	243	161	36	0.032	0.057	0.031	0.005
82	平良港南防波堤	149	149	99	25	169	154	111	31	0.095	0.153	0.093	0.021
83	平良—S	149	148	99	25	197	218	157	37	0.034	0.062	0.038	0.007
84	宮古空港	143	148	100	25	177	159	107	27	0.010	0.009	0.006	0.001
85	与那覇湾	140	154	105	26	183	162	115	32	0.031	0.058	0.035	0.008
86	来間前浜港防波堤	132	158	109	26	168	202	149	55	0.075	0.167	0.111	0.022
87	佐良浜漁港防波堤	158	154	102	26	158	154	102	26	—	—	—	—
88	下地島空港管理棟	153	165	110	27	152	151	105	32	0.052	0.087	0.058	0.015
89	国仲— 佐良浜港線道路橋梁	153	162	108	27	167	201	132	31	0.023	0.037	0.020	0.004
90	長山港-3.0m物揚場	150	160	107	26	257	240	174	58	0.065	0.093	0.060	0.012
91	水納港	105	214	157	39	155	252	182	43	0.005	0.010	0.007	0.001
92	普天間港	93	229	171	39	113	242	180	41	0.003	0.007	0.005	0.001
93	舟越漁港	45	190	222	66	57	223	262	76	0.005	0.024	0.029	0.008
94	底原ダム	37	178	243	73	31	150	192	68	0.007	0.071	0.111	0.027
95	名蔵大橋	33	164	243	80	42	197	272	101	0.015	0.140	0.215	0.065
96	神田橋	33	165	243	79	37	212	262	114	0.012	0.119	0.226	0.060
97	なたつ橋	31	163	258	80	38	152	190	94	0.010	0.104	0.191	0.048
98	石垣漁港	31	162	261	80	65	195	254	134	0.011	0.124	0.218	0.047
99	石垣—S	31	163	265	80	39	185	277	98	0.011	0.085	0.141	0.043
100	石垣港-7.5m岸壁	31	163	264	80	56	176	280	104	0.008	0.115	0.297	0.055
101	石垣港南防波堤	30	162	267	81	35	143	203	80	0.014	0.328	0.719	0.096
102	八重山病院	31	166	269	78	46	220	351	102	0.004	0.024	0.051	0.009
103	竹富東港防波堤	29	154	256	86	34	158	263	88	0.001	0.005	0.008	0.002
104	小浜港物揚場	26	138	239	96	48	267	412	173	0.009	0.118	0.343	0.056
105	黒島港防波堤	24	134	261	96	43	174	357	125	0.002	0.008	0.020	0.006
106	鳩間港物揚場	24	115	193	107	39	161	276	150	0.002	0.012	0.024	0.011
107	船浦港物揚場	23	113	201	110	19	131	224	128	0.009	0.081	0.158	0.079
108	大原橋	22	118	230	107	30	134	266	122	0.001	0.007	0.015	0.006
109	波照間漁港	18	90	226	121	21	94	236	126	0.001	0.002	0.007	0.003
110	祖納港	14	31	91	196	24	54	158	334	0.003	0.007	0.020	0.046
111	久部良漁港	14	29	86	203	15	29	85	202	0.000	0.001	0.002	0.006

7.2 地盤の最大加速度

(1) 奄美諸島

奄美諸島の各地点で得られた地盤の最大加速度は、喜界島地震の場合 190~280Gal、奄美大島地震の場合 90~250Gal、徳之島地震の場合 60~250Galであった。

喜界島地震は、震源が深いもののマグニチュードが 8.0 で今回想定した地震のうち最も規模が大きく、起こり得る地震としても最大級のものである。奄美諸島では、請阿室港、亀徳港および与論港を除くすべての地点で本地震による加速度が最も大きく、平均してみると約 220Gal である。また 3 地点で 250Gal を越える加速度が得られた。

奄美大島地震は、マグニチュードが 6.1 で今回の想定地震の中で最も規模が小さいが、震源が奄美大島に非常に近い。したがって、奄美大島の各地点の地盤加速度が大きく、名瀬港を除いて平均してみると、約 200Gal となる。一方名瀬港の 2 地点では、地盤加速度が 85Gal および 86Gal と他の地点に比べてかなり小さくなっている。これは、 N 値が 10 未満の層が 30~40m もある軟弱な地盤であるため、地盤の固有振動数が低く地震波の高振動数成分が伝播しにくいこと、地震の規模が小さいことから入力地震波形として比較的高振動数成分を含むものを用いたことによると考えられる。

徳之島地震の場合、震源に近い請阿室港および亀徳港の地盤加速度が大きく、それぞれ 229Gal、244Gal となっている。奄美大島などでは、100Gal から地点によっては 200Gal を越える地盤加速度が得られた。今回、適当な土質柱状図を入手できなかったので計算しなかった沖永良部島でも、その位置から考えて奄美大島南部と同程度の加速度となることが予想される。

与論港は奄美諸島の南端に位置し沖繩島に近いため、沖繩島北部地震による地盤加速度が最も大きく、129Gal となった。

(2) 沖繩諸島

沖繩諸島における想定地震は、マグニチュードがすべて 6.8 であり、それほど規模が大きい。しかし、震源が沖繩島直下あるいは海岸から 15~25km と近いため、その影響は大きい。

沖繩島北部地震の震源域は沖繩島北部の直下にあり、震源が 60km とやや深いものの、震源域直上の辺土名漁港、安田漁港などでは地盤加速度が 220~280Gal とかなり大きい。沖繩島の中部以北では、4 地点で 200Gal を越えているほか、その他のほとんどの地点で 130~140Gal 以上となっている。また、那覇市内の各地点の地盤加速度を平均してみると約 100Gal である。

沖繩島南西地震の震源域は、那覇市から実効距離で 6~10km であり、那覇市内の各地点の基盤の加速度は 300Gal 前後で非常に大きい。したがって地盤加速度は那覇市内の過半数の地点で 250Gal を越え、4 地点で 400Gal 以上の加速度が得られた。一方、那覇新港内のいくつかの地点で、地盤加速度が 90~170Gal と基盤の加速度に比べてかなり小さくなっているが、これは前述の名瀬港と同じ理由によると考えられる。また、本部半島から沖繩島南部までの広い地域にわたって 150~400Gal の加速度が得られており、これらの地域では、本地震による加速度が最も大きくなっている。慶良間列島も本地震の震源域に近く、300~485Gal の地盤加速度が得られた。また、鳥島、粟国島では約 230Gal、久米島では約 150Gal の地盤加速度が得られた。

沖繩島南東地震の場合、中城湾、金武湾および沖繩島南部の過半数の地点で 200Gal 以上の加速度が得られており、最大は当添漁港の 318Gal である。しかし、震源が沖繩島南西地震よりも遠いため、南部においても沖繩島南西地震による加速度の方が大きい。また北部や本部半島では、130~180Gal の加速度となった。

(3) 先島諸島

宮古島地震の震源は宮古島の北方約 50km にあって、宮古島への影響が大きい。宮古島およびその周辺の各地点で 150~230Gal、そのうち平良港では 150~200Gal の地盤加速度が得られた。これに対して石垣島、西表島などは、実効距離で 130~160km と震源からかなり離れているため、地盤加速度は比較的小さく、すべての地点で 60Gal 以下であった。

石垣島地震の震源は宮古島と石垣島のほぼ中間に位置し、宮古島では 140~240Gal、石垣島では 140~220Gal の地盤加速度が得られた。宮古島では、本地震および前述の宮古島地震による地盤加速度が最も大きい。石垣島地震の震源に最も近い多良間島、水納島の地盤加速度は、それぞれ 242Gal、252Gal となった。また、西表島は震源からやや離れているため、地盤加速度は 130Gal 程度であった。

八重山地震の震源は石垣島の南方に位置し、石垣市での実効距離は約 20km、基盤での加速度は約 265Gal である。石垣島、西表島およびその周辺の各地点で、190~410Gal の大きな地盤加速度が得られた。これらを平均すると約 270Gal であり、本地震は石垣島、西表島に最も大きな影響を及ぼす地震であるといえる。また、実効距離で約 110km に位置する宮古島でも 100~170Gal の地盤加速度が得られた。

与那国島地震は、マグニチュードが 7.5 で今回の想定地

震の中で2番目に大きく、与那国島の2地点における地盤加速度は202Gal, 334Galとなった。また石垣島や西表島では、80~130Gal程度の加速度が得られた。これに対して、本地震の震源域が先島諸島の西端に位置しているために、宮古島では地盤加速度が25~55Galであり、その影響は小さい。

7.3 地盤のひずみと固有振動数

地盤のひずみの大きさは、液状化やすべりによる地盤破壊の発生の可能性を検討する際の参考となる。図-7.8に、各地点の地盤の最大ひずみの値の分布を示す。地盤のひずみは加速度によって大きく異なるので、ここでは基盤の最大加速度の値により、3つのグループに分けて示してある。

図-7.8および付録の図から次のようなことがわかる。

- (1) 基盤の加速度が100Gal未満の場合には、地盤の最大ひずみは0.1%以下であり、0.01~0.03%に最も多く分布する。
- (2) 基盤の加速度が100Galから200Galの場合には、地盤の最大ひずみはおおむね0.01~0.3%の範囲にあり、0.03~0.1%に最も多く分布する。
- (3) 基盤の加速度が200Gal以上の場合には、地盤の最大ひずみはおおむね0.01~0.3%の範囲にあり、0.1~0.3%に最も多く分布する。
- (4) 地盤加速度が200Gal以上の場合に、のべ数地点において最大ひずみが0.3%を越えており、1%を越えている地点も1か所ある。
- (5) 最大ひずみが0.1%以上とかなり大きくなっている地点は、喜界島地震の際の大熊漁港や名瀬港、沖縄島

南西地震の際の那覇港付近、石垣島地震と八重山地震の際の石垣港などであり、軟弱地盤の厚いところや、地中に薄い軟弱層の存在するところが多い。

地盤の固有振動数は、入力地震波の卓越振動数との関係で加速度の増幅に大きな影響を与えることが知られており、検討しておく必要がある。図-7.9は各地点の地盤の固有振動数の値の分布を示したものである。ここに示した地盤の固有振動数は、地震時に地中で発生したひずみの大きさに対応したせん断弾性定数と減衰定数から計算されたものである。地盤加速度が大きくなるとそれに対応して地中のひずみが大きくなり、土のせん断弾性定数は減少し減衰定数は増加するから、地盤の固有振動数は小さくなる。しかし、加速度による地盤の固有振動数の変化はひずみとちがって少なく、むしろ基盤から上の地盤の厚さの影響が大きい。したがって図-7.9では加速度によるグループ分けはしていない。

図-7.9および付録の図から次のようなことがわかる。

- (1) 地盤の固有振動数は1.0~5.0Hzに集中しており、中でも1.0~3.0Hzの地点が多い。
- (2) 地盤の固有振動数が10Hzを越えている地点がかなりあるが、これらは基盤が数mと比較的浅いところにある地点である。このような地点は、地盤が良く地震時にも加速度が大きくならないと考えられがちであるが、比較的小さな地震が近くに起きた場合、高い振動数成分を含んだ地震波により地表では大きな加速度となる恐れがある。
- (3) 地盤の固有振動数が1.0Hz以下の地点は、名瀬港や那覇港付近であり、軟弱地盤の厚いところに対応して

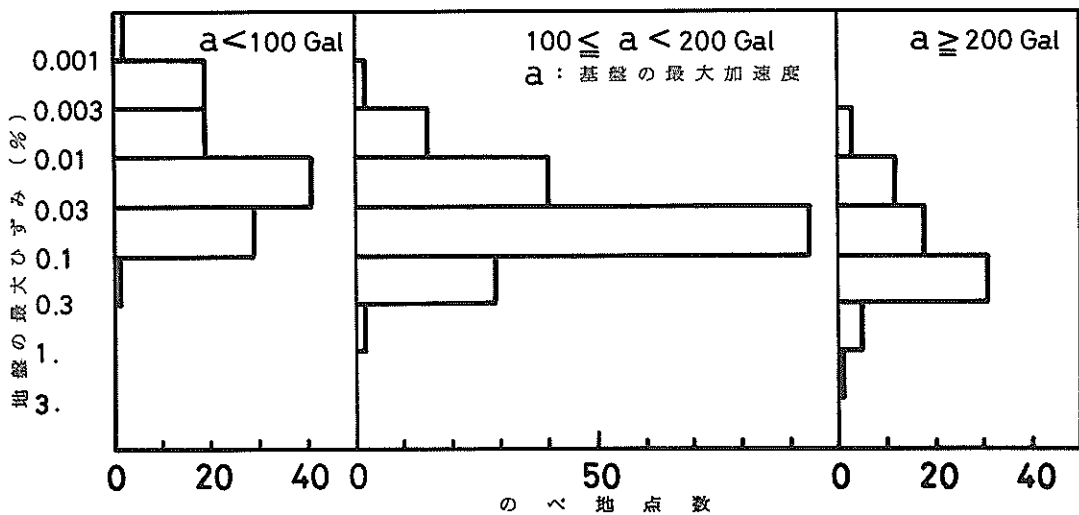


図-7.8 基盤の最大加速度別に見た地盤の最大ひずみ

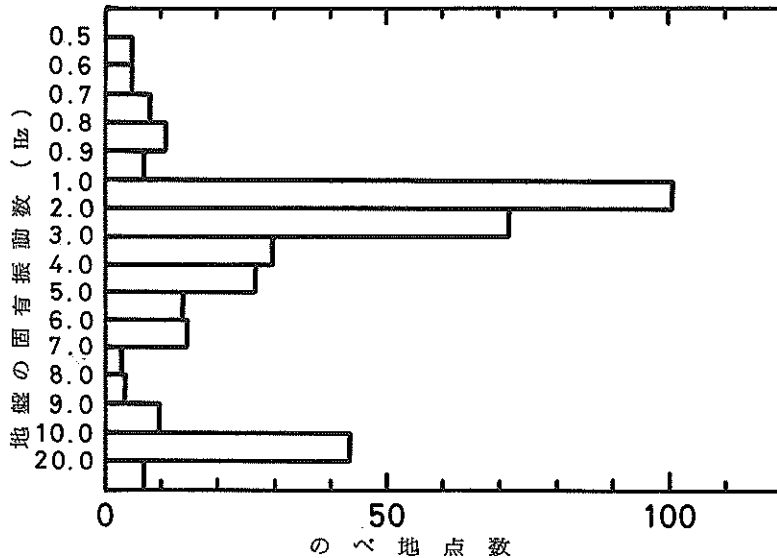


図-7.9 地盤の固有振動数

いる。このような地点では(2)と逆に地表の加速度があまり大きくならないことも考えられる。

7.4 地震資料との比較

3.1で述べたように、沖縄県および奄美諸島は広い地域に島が点在しているという地理的条件から、歴史地震に関する情報が非常に少なく、したがって震源位置およびマグニチュードの推定精度がかなり劣ると思われる。地盤加速度の推定値が、当該地震に関する文献の記述と調和的であれば、本報告で得られた結果の精度を裏付けることとなろう。しかし、ここでは歴史地震と想定地震の間の関係にかなり不明確な所が含まれていることから、文献の記述と得られた地盤加速度がそのまま対応するものではないことを考慮して、両者を単に比較するにとどめる。

(1) 喜界島地震 — 図-3.2中の385*がこの地震に対する文献の記述である。この地震は我が国における最大級の地震の一つと言われるだけあって、有感地域は広大であり、被害が発生した場所も広く分布している。喜界島と奄美大島は烈震であったと記されているが、烈震に対応する地盤加速度が表-7.4に示すようにおおよそ250~400Galであると、本報告の推定値はいくぶん小さいように思われる。

(2) 奄美大島地震 — 図-3.2中の592が対応する被害の記述である。奄美大島の震度がVで被害が大きかったことと、計算結果の約200Galの地盤加速度はほぼ調和すると考えられる。

(3) 沖縄島南西地震 — 図-3.3中の明和5年の地震

が対応している。那覇周辺で石垣の崩壊が記されているが、他の文献ではこのような現象は震度V以上に対応するとみられている。計算結果によると那覇周辺で約300Galが得られており、想定地震のマグニチュードの設定に問題は残るものの、想定地震による結果は被災例より推定される地震動より幾分大きいと判断される。しかし、地震の発生年代が古く、当時の家屋数の少ないことを加味すると両者はほぼ対応するとも考えられる。

(4) 沖縄島南東地震 — 図-3.3中の377がこの地震に対応する。那覇周辺の各地点で石垣の崩壊と死傷者が散見されるが、計算結果においても200~300Galの加速度が得られており、両者はほぼ対応すると見なせよう。

(5) 宮古島地震 — 図-3.5中の490*がこの地震に対応する記録である。記録によると津波による微小な被害にかざられていたようであり、計算結果も宮古島において震度Vの上位の値である150~200Galを示していることから、両者に大きな相違はないように思われる。

(6) 石垣島地震 — 図-3.5中の328がこの地震に対応する記録である。記録によると、石垣島、宮古島において、石垣の崩壊や山崩れが多数発生している。一方、計算によると、両島において140~240Galの地盤加速度が得られており、両者はほぼ対応していると考えられる。

(7) 八重山地震 — 図-3.4がこの地震に対する文献の一例である。この地震津波に関しては多くの調査研究がなされているが、いずれも津波による被害に焦点がずえられており、地震動の強さに関する記録は少ない。これは発震年が1771年と古いために関連する記録が少な

表-7.4 気象庁の震度階と加速度

震度	名称	説明	相当する加速度
0	無感	人体に感じないで地震計に記録される程度	0.8 Gal 以下
I	微震	静止している人や、特に地震に注意深い人だけに感ずる程度の地震	0.8 ~ 2.5 Gal
II	軽震	大ぜいの人に感ずる程度のもので、戸障子がわずかに動くのがわかるくらいの地震	2.5 ~ 8.0 Gal
III	弱震	家屋がゆれ、戸障子がガタガタと鳴動し、電灯のようにつり下げ物は相当ゆれ、器内の水面の動くのがわかる程度の地震	8.0 ~ 25.0 Gal
IV	中震	家屋の動揺が激しく、すわりの悪い花びん等は倒れ、器内の水はあふれ出る。また歩いている人にも感じられ、多くの人々は戸外に飛び出す程度の地震	25.0 ~ 80.0 Gal
V	強震	壁に割れ目が入り、墓石、石どうろうが倒れたり、煙突、石垣などが破損する程度の地震	80.0 ~ 250.0 Gal
VI	烈震	家屋の倒壊は30%以下で山崩れが起き、地割れを生じ、多くの人々は立っていることができない程度の地震	250 ~ 400 Gal
VII	激震	家屋の倒壊が30%以上に及び、山崩れ、地割れ、断層などを生じる	400 Gal 以上

いことと、震動による被災例が津波により流失したためではないかと推測される。本報告では、石垣島において250~400Gal以上の大きな加速度が推定されており、想定地震の設定等に議論されるべきところは多いが、防災対策上は看過できない地震といえよう。

(8) 与那国島地震—図-3.5中の573*が対応する被害記録である。震度分布および計算結果は、与那国島でV(200~330Gal)、石垣島周辺でIV(80~130Gal)、宮古島でIII(25~55Gal)となっており、本報告の推定値はやや大きいように思われる。

以上は、文献に記されている地震動の影響と推定された地盤加速度の比較である。既に述べた如く両者が一致すべき理由は必ずしも強くないが、推定された加速度にはかなり大きな値も多く、今後、当該地域の地震防災対策を進める際に十分配慮されることが望ましいと思われる。

7.5 設計への適用

本報告において得られた地盤加速度の最も大きいものを見ると、喜界島地震の場合に奄美諸島で約280Gal、沖繩島南西地震の場合に那覇港で約450Gal、八重山地震の場合に石垣港で約280Galとなっている。しかし、これらの加速度が、次に述べるような点で、港湾構造物に対する現行設計法における設計震度とは単純に結びつかないので注意する必要がある。

現行設計法⁷⁾における地域別震度は、沖繩県、奄美諸島とも0.05であり、地盤種別係数および重要度係数を考

慮した設計震度では最高でも0.09である。現行の地域別震度は、統計的に与えられた河角による再現期間75年の最大地震加速度の期待値をもとにしている。さらに、河角の研究には今回対象とした地域は含まれておらず、本地域の地域別震度は、他の地域との整合性を考慮して決められたものである。これに対して、本報告の計算結果は、既応最大の地震による地盤加速度を推定したものである。すなわち、本地域の地震の記録はこの約350年間しかなく日本のほかの地域に比べて短かいが、その中から対象とする地域に最も大きな影響を及ぼす地震を想定したものであり、その発生頻度は考慮していない。仮に、対象構造物の重要度や耐用年数などにより、75年あるいは100年の再現期間を考えると、当然、地盤加速度は本報告の結果よりも小さくなる傾向にある。本報告で得られた結果を利用する際には、この点に十分配慮することが必要である。

また、現行設計法における設計震度が必ずしも地震時の地盤の最大加速度の重力加速度に対する比とはならないことが知られており、その一例を紹介する。重力式岸壁については、港湾構造物に対する現行設計法における設計震度と地盤の最大加速度との関係は、次式のように与えられている。²⁷⁾

$$e_A = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha_{\max}}{g} \right)^{1/3} \quad (7.1)$$

表 - 7.5 既 応

表 題	東京湾沿岸地域の大地震時における地盤加速度	東京湾沿岸地域の大地震時における地盤加速度(その2) — 土のせん断弾性係数, 減衰定数のひずみ依存性を考慮した場合 —	東海沿岸地域の大地震時における地盤加速度
港湾技研資料No. (発行年月)	No.177(1974.3)	No.194(1974.9)	No.204(1975.3)
著 者	野田節男, 上部達生	上部達生, 野田節男	同 左
関 係 機 関	港湾局防災課	同 左	同 左 第五港湾建設局
対 象 地 域	横須賀から木更津までの東京湾沿岸地域, 112地点	同 左	熱海から熊野までの東海沿岸地域, 111地点
想定地震(マグニチュード)	元禄地震(8.2) 東京湾北部の地震(7.5) 関東地震(8.2)	東京湾北部の地震(7.5) 関東地震(8.2)	安政地震(8.4) 濃尾地震(8.4)
入 力 地 震 波	S-252 NS, S-340 E W, 入射波(土の変形係数のひずみ依存性を考慮していない)	同 左 (同 左)	S-252 NS 入射波 (同 左)
基 盤 の 設 定	N値50以上の洪積砂層あるいは岩盤		同 左
基盤の最大加速度	同本らによる式(a:基盤加速度, M:マグニチュード, D:震央距離) $\log_{10} \frac{9}{640} = \frac{(D+40)}{100} (-7.604+172.44 M - 0.1036 M^2)$		同 左
地盤の応答計算手法	重複反射理論(土の変形係数のひずみ依存性を考慮しない)	重複反射理論(土の変形係数のひずみ依存性を考慮したプログラム SHAKE)	
土の変形係数とひずみの関係	—	Seedらによるもの	同 左
N値よりS波速度あるいはせん断弾性定数の推定式	今井らの式(1970年) $V_s = 92.1 \times N^{0.329}$	同 左	同 左
N値より非排水強さの推定式	—	原らによる式 $S_u = 3.07 \times N^{0.688}$	同 左
N値より相対密度の推定方法	—	MeyerhofのN値と相対密度の関係より推定	同 左

の 報 告 書

北海道太平洋沿岸地域の大地震時における地盤加速度	大阪湾沿岸地域の大地震時における地盤加速度	広島湾，瀬戸内海西部および北九州沿岸地域の大地震時における地盤加速度	沖縄県および奄美諸島の大地震時における地盤加速度
No. 252 (1977.3)	No. 253 (1977.3)	No. 285 (1978.3)	No. 396 (1981.9)
野田節男，上部達生，千葉忠樹	同 左	同 左	北澤社介，松垣典弘，野田節男
同 左 北海道開発局港湾建設課	同 左 第三港湾建設局	同 左 同 左 第四港湾建設局	同 左 沖縄開発庁沖縄総合事務局 第四港湾建設局
函館から根室までの北海道太平洋沿岸地域，62地点	神戸から岸和田までの大阪湾沿岸地域，112地点	仁方から岩国までの広島湾沿岸地域の67地点，宇部から下関，宇の島から博多までの沿岸地域の77地点	奄美諸島の16地点，沖縄諸島の61地点，先島諸島の34地点
1952年十勝沖地震 (8.1) 根室半島沖地震 (7.5) 青森東方沖地震 (7.5) 地震の空白域を震源域とした地震 (7.5)	1956年京都文禄地震 (7.4) 南海道沖地震 (8.4)	芸予地震 (7.6) 1686年の地震 (7.0) 679年筑紫の地震 (6.7) 1898年山口県見島の地震 (6.8) 南海道沖地震 (8.4)	喜界島地震 (8.0)，奄美大島地震 (6.1)，徳之島地震 (6.9)，沖縄島北部地震 (6.8)，沖縄島南西地震 (6.8)，沖縄島南東地震 (6.8)，宮古島地震 (6.7)，石垣島地震 (7.0)，八重山地震 (7.4)，与那国島地震 (7.5)
S-252 NS 入射波 (土の変形係数のひずみ依存性を考慮)	同 左 (同 左)	S-252 NS, S-213 E W 入射波 (同 左)	S-1120 N41W, S-1210 E41S, S-252 NS 入射波 (同 左)
同 左	同 左	同 左	同 左
筆者らによる図 (実効距離とマグニチュードより)	同 左	同 左	同 左
同 左	同 左	同 左	同 左
同 左	同 左	同 左	最近の研究成果の平均的なもの
今井らの式 (1975年) $V_s = 89.8 \times N^{0.341}$	同 左	同 左	今井の式 (1977) $G_0 = 1,200 N^{0.737}$ (tf/m ²)
同 左	同 左	同 左	—
同 左	同 左	同 左	—

ここで、 e_A : 作用震度

α_{\max} : 地盤の最大加速度 (Gal)

g : 重力加速度 (980Gal)

これは、過去の大地震における重力式岸壁の被害の解析および強震観測の成果をふまえて、現行設計法における設計震度と地盤最大加速度との関係を検討して得られた結果であり、その後上式の関係は、矢板構造物にも適用できることが示されている。⁴⁵⁾作用震度とは、その地震時に構造物に作用したと思われる地震動の大きさに対応した現行設計法における震度である。

7.6 地盤加速度推定手法の問題点

本報告とほぼ同様の手法により、日本の沿岸のいくつかの地域について、大地震時における地盤加速度を推定し報告してきた。^{1)~6)}これらの検討の過程では、それぞれの時点での地震学、耐震工学等の関連分野の成果をできるだけ取り入れるという基本姿勢に従い、地盤加速度の計算法を改善したり、基盤の加速度の推定方法を新たに提案したりしてきた。これらをまとめて、表-7.5に示す。現時点では、今回の地盤加速度の推定方法が最も妥当なものであると判断しているが、問題点や今後さらに検討すべき事項もある。これらについて、とりまとめて以下に述べる。

(1) 基盤加速度と実効距離の関係を求めるに際し、震源域の縁では地震のマグニチュードによらず最大加速度を400Galと定め、さらに震源域内でも基盤加速度は400Galとしている。これが妥当であるかどうかについては議論の余地が多分にあり、この点について検討を深めておくことは直下型地震の際の地盤加速度を推定する上で重要である。また、その後蓄積された多くの強震記録を加えて、基盤加速度と実効距離の関係を再検討し、より信頼性の高いものにする必要であろう。

(2) 入力地震波としては、想定地震の規模を考慮して、ほぼ等しいマグニチュードの地震による特定の記録波形を使用している。しかし、発震メカニズムや震源距離などが波形に及ぼす影響は考慮していない。入力地震波の波形が異なれば各地点の地盤加速度は異なった値を示すと考えられ、地震波の選択が妥当かどうかは、さらに検討すべきであると考ええる。また最近では、数多くの地震記録を統計的に処理して、マグニチュードや震源距離などから応答計算に使用すべき合理的な模擬地震波を作成しようとする研究が進んでおり、これらの成果を利用することも考えられる。

(3) 過去の研究成果を参照の上、基盤は N 値50以上の洪積砂層あるいは岩盤ということで検討を実施してい

る。しかし、最近の研究成果によると、ある地点の地盤応答を説明する場合にはこうした基盤では不十分であり、もっと深い基盤を設定すべきであるという指摘がなされている。この点に関してはさらに研究が進むことが望まれる。ただし、本報告で示したように多くの地点を対象として地盤加速度を推定する場合には、ボーリングデータの収集上あまり深いところのものまでは得難いという制約もある。

(4) 地盤のモデル化において、地盤の N 値あるいは非排水強度から初期せん断弾性定数を仮定しているが、実際の測定値にはかなりのばらつきがある。したがって、より信頼できる地盤加速度を得るためには、PS検層などにより直接的にせん断弾性定数を求めておくことが必要と考える。

(5) せん断弾性定数および減衰定数のひずみ依存性については、粘性土と砂質土に分けて、最近の代表的な研究例を比較し、平均的な曲線を定めて使用している。しかしながら、今回対象とした地域特有のサンゴ質の砂やシルトにもこれらの平均的なひずみ依存曲線が適用できるかどうか明らかでない。将来さらに詳しく検討する必要がある場合には、特殊な土に対しても動的室内試験を実施すべきである。

(6) 地盤のモデル化において、砂礫層は砂層としてモデル化しているが、粒径が砂に比べて非常に大きいレキのせん断弾性定数や減衰定数も砂のそれと同一に扱ってよいのかどうか明らかでない。最近では、レキに対しても動的室内試験が実施されるようになっており、将来これらの成果を検討する必要がある。

(7) ここで用いた応答解析手法は、せん断弾性定数と減衰定数のひずみ依存性を考慮しているが、これらは等価線型モデルによるもので、地震時の土のひずみ状態を時々刻々追跡してゆく正確な意味での非線型応答計算ではない。等価線型解析が実用上十分な精度を有していることは一応確かめられているが、どのような条件下でもそうであるのかどうか明らかにしておく必要がある。

(8) 計算結果によれば、大地震時には軟弱層のひずみが大きくなり、1%程度に達するものがある。地盤の最大ひずみが数%に達すると地盤が破壊に至ると考えられ、このような大きなひずみ領域まで等価線型解析法が適用できるかどうか疑問である。振動実験による研究や現地地盤での地震観測の成果が望まれる。

(9) ここで用いた応答解析手法は全応力解析法であり、地震時の間隙水圧の上昇によるせん断弾性定数の低下を考慮することができない。したがって、液状化の恐れのある砂質地盤を対象とする場合には、有効応力に基づく

解析法によるのが望ましいと考えられる。ただし、現時点では、有効応力解析法は研究段階にあり、適用には種々の問題点がある。

8. 結 論

本報告において明らかになったことは、次のとおりである。

(1) 奄美諸島は地震活動の活発な地域であり、またマグニチュード8クラスの巨大地震の発生する恐れのある地域である。

(2) 沖縄諸島地域で発生する地震のマグニチュードの上限は6.8程度と推定される。

(3) 先島諸島は、マグニチュード7.0~7.5の地震の発生する恐れのある地域である。

(4) 奄美諸島地域に予想される地盤加速度は、喜界島地震(マグニチュード8.0)を想定した場合に最も大きく、190~280Galとなった。

(5) 沖縄島北部に予想される地盤加速度は、沖縄島北部地震(マグニチュード6.8)を想定した場合に最も大きく、220~280Galとなった。

(6) 沖縄島の本部半島から南部までの地域に予想される地盤加速度は、沖縄島南西地震(マグニチュード6.8)を想定した場合に最も大きく、大部分の地点で150~400Galとなった。また、那覇市内の過半数の地点で、250Galを越える地盤加速度が得られた。

(7) 先島諸島の宮古島に予想される地盤加速度は、宮古島地震(マグニチュード6.7)および石垣島地震(マグニチュード7.0)を想定した場合に最も大きく、150~240Galとなった。

(8) 先島諸島の石垣島および西表島に予想される地盤加速度は、八重山地震(マグニチュード7.4)を想定した場合に最も大きく、190~410Galとなった。

(9) ここで得られた地盤の最大加速度は、そのまま現行設計法における震度とは単純に結びつかない。したがって、計算結果を利用する場合には構造物の形式や震害例などを参考にして検討する必要がある。たとえば重力式岸壁の場合には、簡単な計算式により震度に換算することができる。(1981年6月30日受付)

謝 辞

本報告は、運輸省港湾局防災課を中心に実施されている海岸保全施設築造基準改定調査の一環として、海岸事業調査費によりなされたものである。検討地点の選定およびボーリングデータの収集にあたっては、下記の諸機関より多大な御協力をいただいた。

総理府沖縄総合事務局開発建設部港湾計画課

同 上 那覇港工事事務所

同 上 平良港工事事務所

同 上 石垣港工事事務所

運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所

また、当所に研修中であった岡村隆正氏(元竹中土木(株)、現大阪府土木部)には、歴史地震調査および検討地点の地盤のモデル化にあたって御協力をいただいた。最後ではあるが、ここに記して関係各位に深く謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

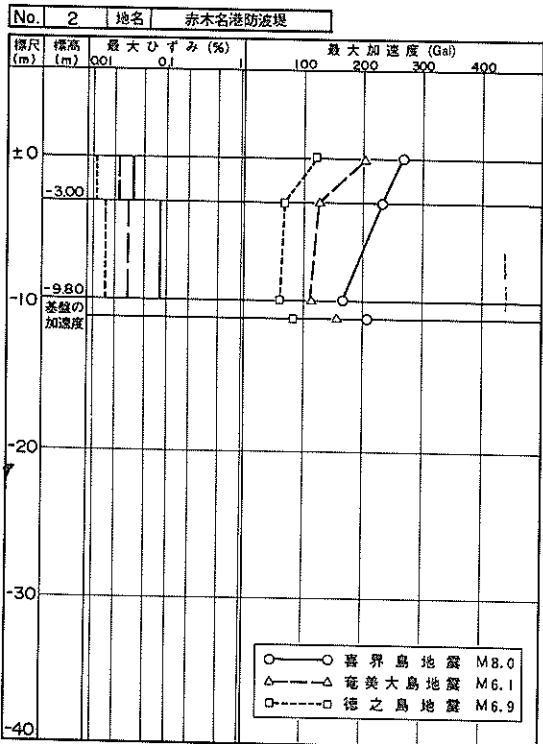
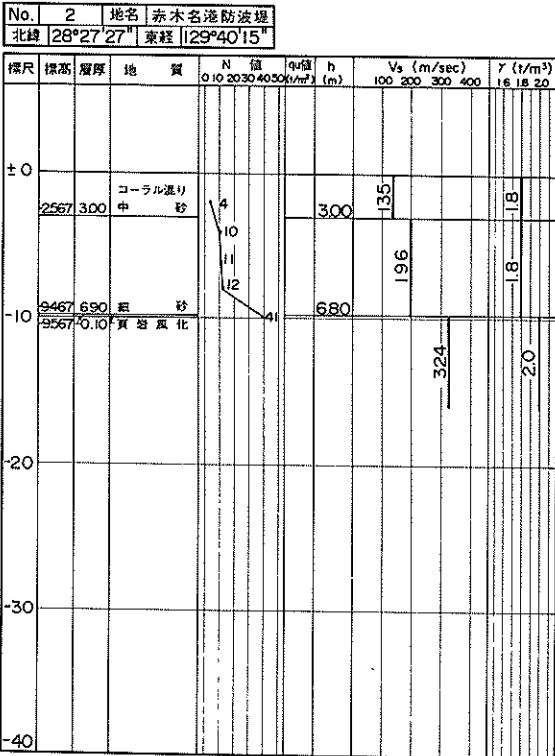
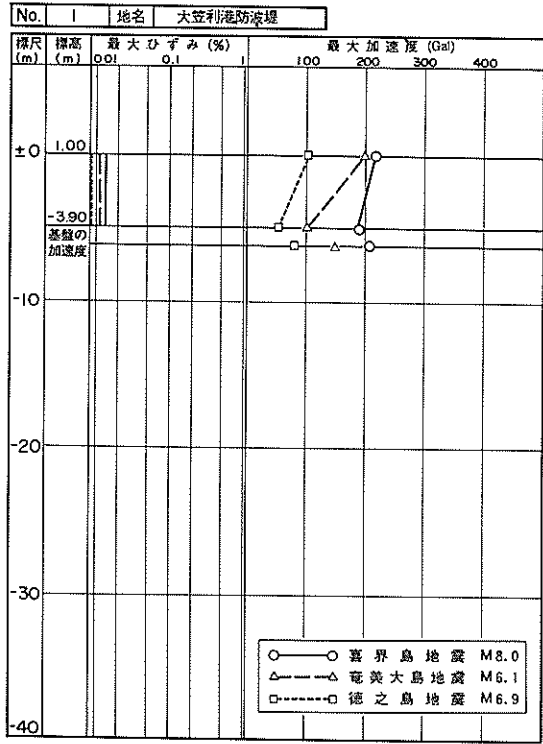
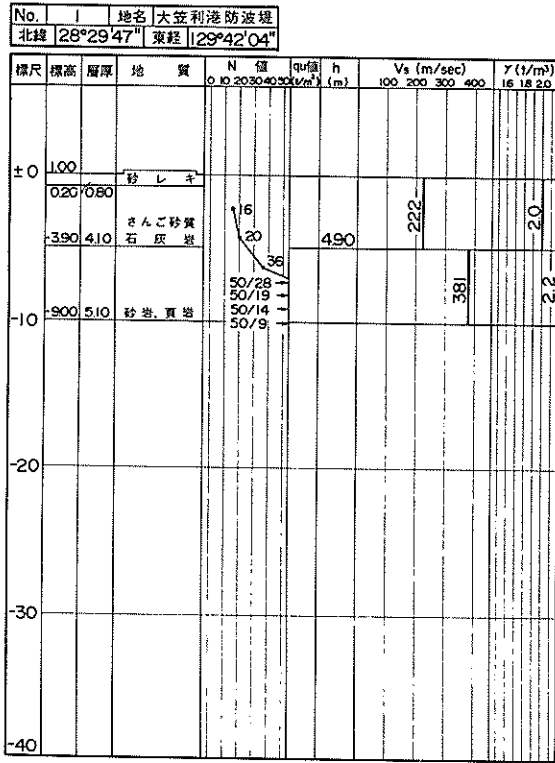
- 1) 野田節男, 上部達生: 東京湾沿岸地域の大地震時における地盤加速度, 港湾技研資料, No.177, 1974年3月。
- 2) 上部達生, 野田節男: 東京湾沿岸地域の大地震時における地盤加速度(その2) — 土のせん断弾性係数, 減衰定数のひずみ依存性を考慮した場合 —, 港湾技研資料, No.194, 1974年9月。
- 3) 上部達生, 野田節男: 東海沿岸地域の大地震時における地盤加速度, 港湾技研資料, No.204, 1975年3月。
- 4) 上部達生, 野田節男, 千葉忠樹: 大阪湾沿岸地域の大地震時における地盤加速度, 港湾技研資料, No.253, 1977年3月。
- 5) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 北海道太平洋沿岸地域の大地震時における地盤加速度, 港湾技研資料, No.252, 1977年3月。
- 6) 上部達生, 野田節男, 千葉忠樹: 広島湾, 瀬戸内海西部および北九州沿岸地域の大地震時における地盤加速度, 港湾技研資料, No.285, 1978年3月。
- 7) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 第1編, 第11章, 地震及び地震力, 日本港湾協会, 1979年3月, pp.2-165~2-171。
- 8) 土田肇, 稲富隆昌, 野田節男, 上部達生, 柳生忠彦, 村田利治: 港湾・海岸施設耐震性調査手法について, 港湾技研資料, No.336, 1980年6月。
- 9) 運輸省第二港湾建設局: 南関東大都市震災対策調査報告書, 1973年3月。
- 10) 運輸省第五港湾建設局設計室: 東海沿岸防災(地震・津波)対策調査(第4報), 業務資料-1978, No.3, 1978年9月。
- 11) 松本達郎, 野田光雄, 宮久三千年: 日本地方地質誌九州地方, 朝倉書店, 1962, pp.320~339。
- 12) 宇津徳治: 地震学, 共立出版, 1977。
- 13) Katsumata, M. and Sykes, L.R.: Seismicity and Tectonics of the Western Pacific: Izu-Mariana-Caroline and Ryukyu-Taiwan Regions, Jour. of Geophysical Res., Vol.74, No.25, 1969, pp.5923~5948。

- 14) 宇佐美龍夫：日本被害地震総覧，東京大学出版会，1975.
- 15) 宇津徳治：1885年～1925年の日本の地震活動 — M6以上の地震および被害地震の再調査 — ，地震研究所い報，Vol.54，1979，pp.253～308.
- 16) 気象庁：地震月報（月刊）および地震月報別冊
- 17) Lee, W. H. K., Wu, F. T. and Jacobsen, C. : A Catalog of Historical Earthquakes in China Compiled from Recent Chinese Publications, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.66, No.6, 1976, pp.2003～2016.
- 18) Lee, W. H. K., Wu, F. T. and Wang, S. C. : A Catalog of Instrumentally Determined Earthquakes in China (Magnitude ≥ 6) Compiled from Various Sources, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.68, No.2, 1978, pp.383～398.
- 19) 沖縄県：沖縄の災害，1977.
- 20) 理科年表 昭和56年版，丸善，1980.
- 21) 安井 豊：名瀬の有感地震についての一調査 一点観測による震源決定の精度，験震時報，29巻，2号，1964，pp.21～25.
- 22) 気象庁地震活動検測センター：奄美大島（Jan. 1, 1970）の地震活動について，地震予知連絡会報，Vol.3, 1970, pp.72～76.
- 23) 牧野 清：八重山の明和大津波，1968.
- 24) 気象庁地震課地震予知情報室：琉球諸島の地震活動について，地震予知連絡会報，Vol.20, 1978, pp.183～184.
- 25) 吉川圭三：奄美大島の地震活動，京大防災研究所年報，第14号A，1971，pp.1～8.
- 26) 勝又 護：地震動の最大加速度の推定，験震時報，第37巻，第3号，1972，pp.79～87.
- 27) 野田節男，上部達生，千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，1975，pp.67～111.
- 28) 土田肇・上部達生：地表における強震記録より推定した基盤地震動の特性，港湾技術研究所報告，Vol.11, No.4, 1972年12月，pp.191～270.
- 29) Seed, H. B. and Idriss, I. M. : Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Report No. EERC 70-10, University of California, 1970.
- 30) 石原研而，根井基雄，上田茂，竹原有二：地震時における埋立軟弱地盤の応答解析，第4回日本地震工学シンポジウム，1975，pp.423～430.
- 31) 梅原靖文，善功企，浜田浩二：不攪乱川崎粘土の動的変形定数について，土木学会第32回年次学術講演会，第3部，1977，pp.251～252.
- 32) Zen, K., Umehara, Y. and Hamada, K. : Laboratory Tests and In-situ Seismic Survey on Vibratory Shear Modulus of Clayey Soils with Various Plasticities, Proc. 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1978, pp.721～728.
- 33) 樋口嘉章，梅原靖文，大根田秀明：原位置及び室内試験による盛土の動的変形特性，第15回土質工学研究発表会，1980，pp.613～616.
- 34) 岩崎敏男，常田賢一，吉田精一：沖積粘性土の動的変形・強度特性について，第15回土質工学研究発表会，1980，pp.625～628.
- 35) Sherif, M. A. and Ishibashi, I. : Dynamic Shear Moduli for Dry Sand, Proc. ASCE, Vol.102, No. GT11, 1976, pp.1171～1184.
- 36) 柴田 徹，Soefarno, D. S. : 繰返し載荷を受ける砂質土の応力・ひずみ特性，土木学会論文報告集，第239号，1975，pp.57～65.
- 37) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. : Shear Moduli of Sands under Cyclic Torsional Shear Loading, Soils and Foundations, Vol.18, No.1, 1978, pp.39～56.
- 38) Tatsuoka, F., Iwasaki, T. and Takagi, Y. : Hysteretic Damping of Sands under Cyclic Loading and its Relation to Shear Modulus, Soils and Foundations, Vol.18, No.2, 1978, pp.25～40.
- 39) Silver, M. L. and Seed, H. B. : Deformation Characteristics of Sands under Cyclic Loading, Proc. ASCE, Vol.97, No. SM8, 1971, pp.1081～1098.
- 40) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1976，pp.193～196.
- 41) Imai, T. : P- and S-Wave Velocities of the Ground in Japan, Proc. of the 9th I. C. S. M. F. E. 1977, pp.257～260.
- 42) Hara, A., Ohta, T., Niwa, M., Tanaka, S. and Banno, T. : Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils, Soils and Foundations, Vol.14, No.3, 1974, pp.1～12.
- 43) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California, 1972.
- 44) Schnabel, P. B., Seed, H. B. and Lysmer, J. : Modification of Seismograph Records for Effects of Local Soil Conditions, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.62, No.6, 1972, pp.1649～1664.
- 45) 北島昭一，上部達生：矢板岸壁地震時被災の分析，港湾技術研究所報告，第18巻，第1号，1979年3月，pp.67～127.

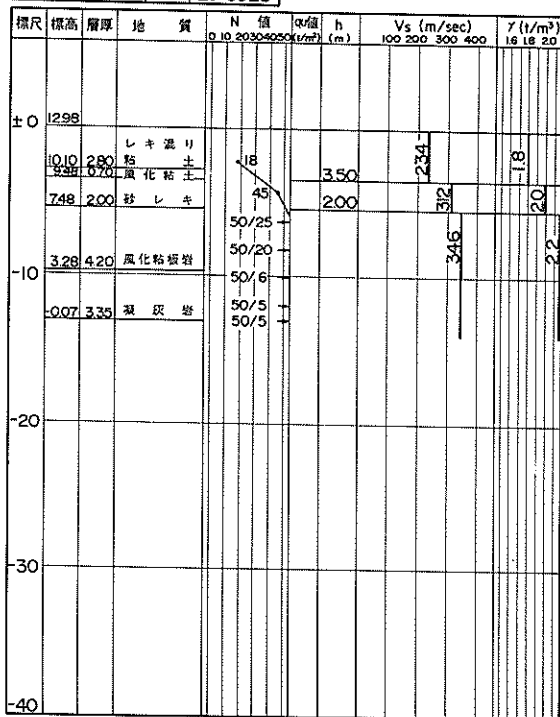
記 号 一 覧 表

A_0 : 地表面での変位振幅	t : 時 間
e_A : 作用震度	u : 水平方向の変位
E_j : 透過波の複素振幅	U_j : 変位の複素振幅
F_j : 反射波の複素振幅	V_s : せん断波速度
$G(G_{eq})$: せん断弾性定数	W : 履歴ループの面積
G_0 : 初期せん断弾性定数	z : 鉛直方向の座標
G_j^* : 複素せん断弾性定数	α_j : 複素インピーダンス比
g : 重力加速度	α_{max} : 地盤の最大加速度
$h(h_{eq})$: 減衰定数	γ : 土のひずみ
H_j : 層 厚	η : 粘性係数
I_p : 塑性指数	ρ : 密 度
M : 地震のマグニチュード	σ'_c : 有効拘束圧
N : 標準貫入試験値	σ_p : 平均主応力
P : 有効土かぶり圧	σ'_p : 平均有効主応力
q_u : 一軸圧縮強度	ϕ : 砂のせん断抵抗角
r : 震源域の半径	ω : 角振動数
s_u : 非排水強さ	

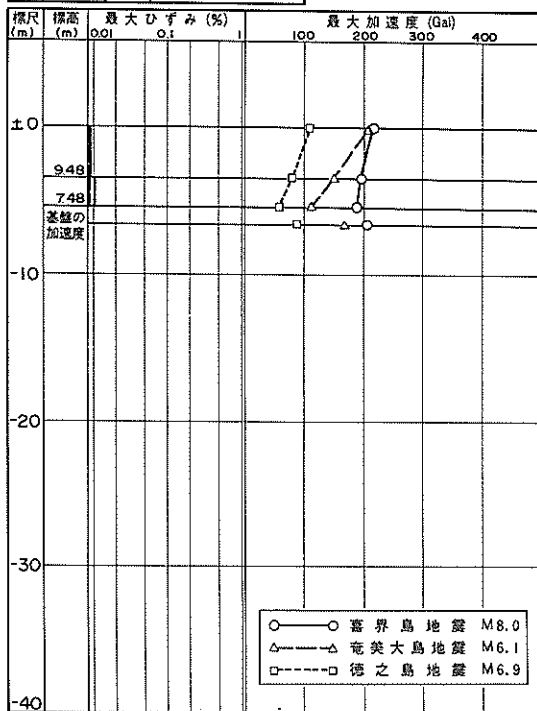
付録 沖縄県および奄美諸島の各地点の土質柱状図と地盤モデル定数および応答計算結果



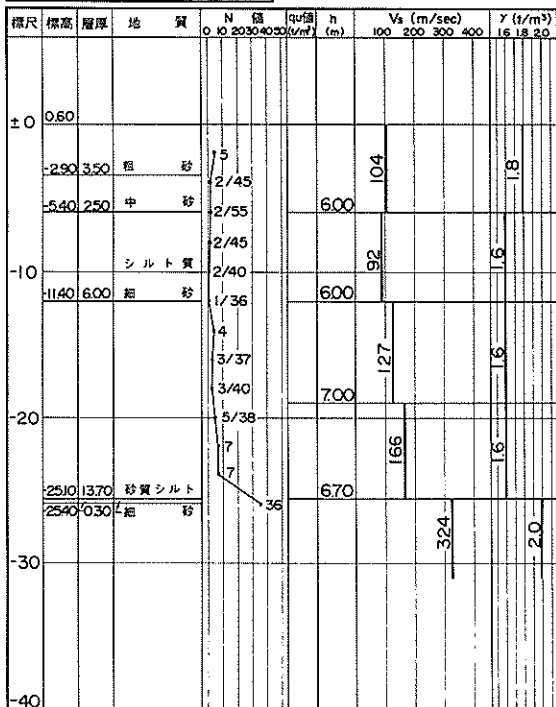
No. 3 地名 竜郷港
 北緯 28°26'45" 東経 129°36'28"



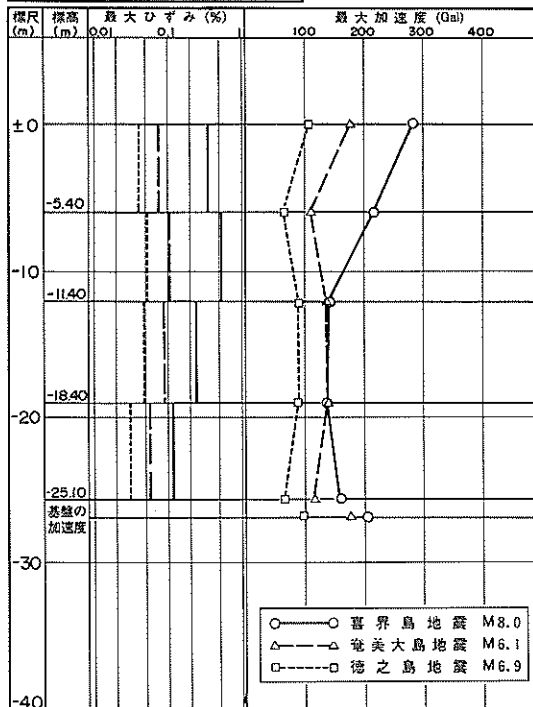
No. 3 地名 竜郷港



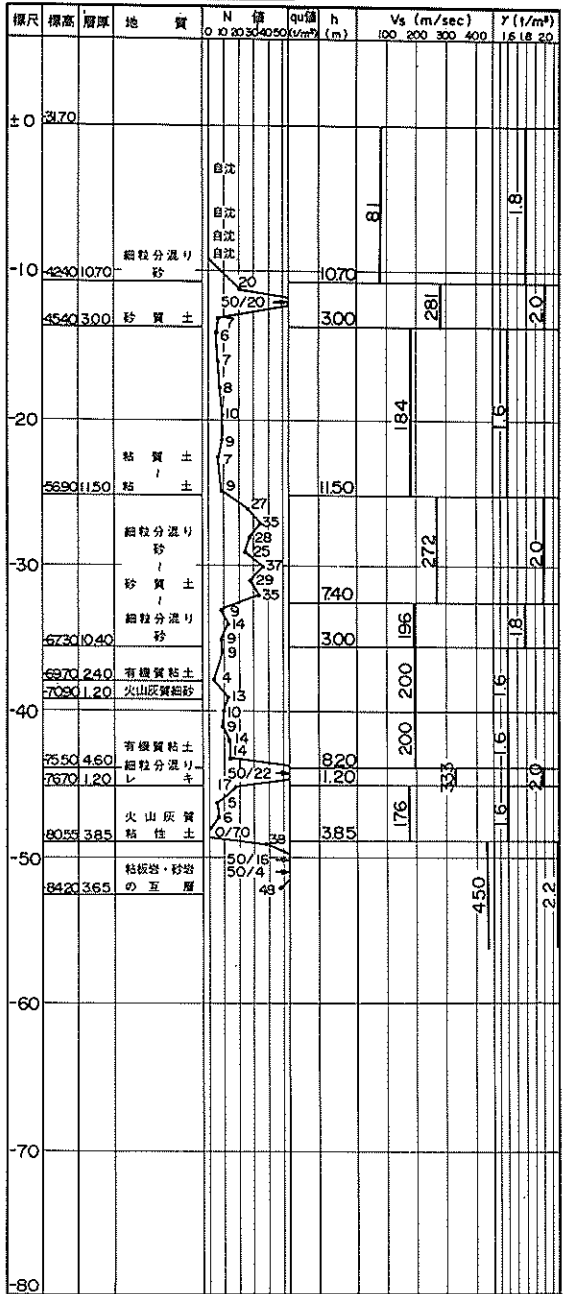
No. 4 地名 大瀬漁港
 北緯 28°23'52" 東経 129°31'21"



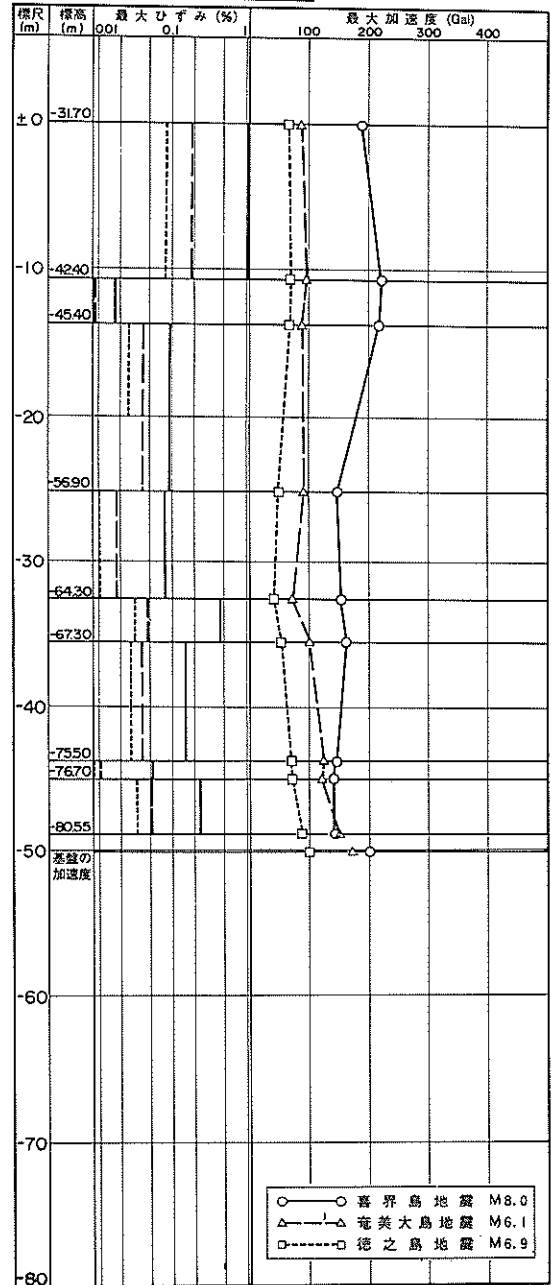
No. 4 地名 大瀬漁港



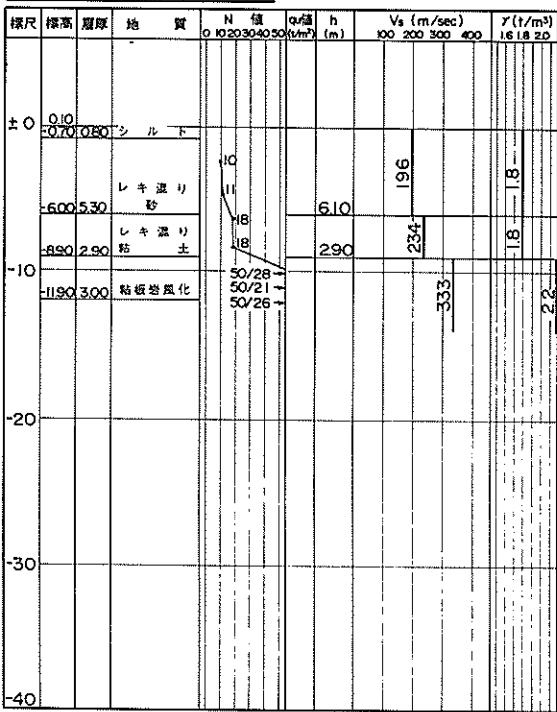
No. 6 地名 名瀬港西防波堤
 北緯 128°22'56" 東経 129°29'59"



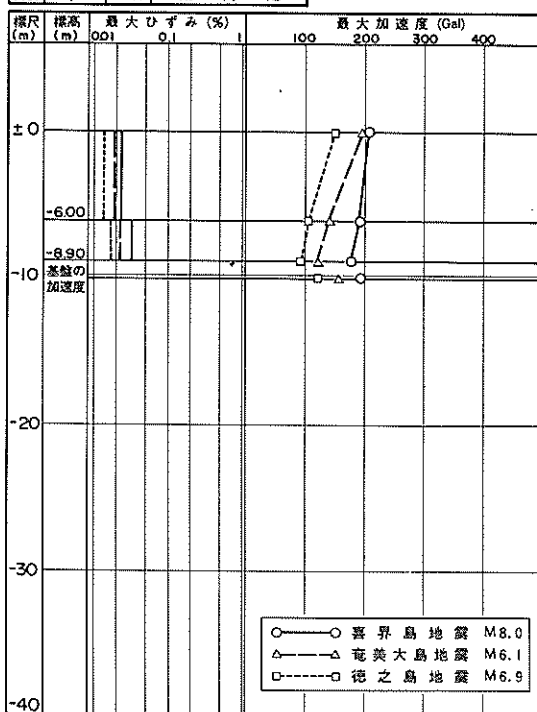
No. 6 地名 名瀬港西防波堤



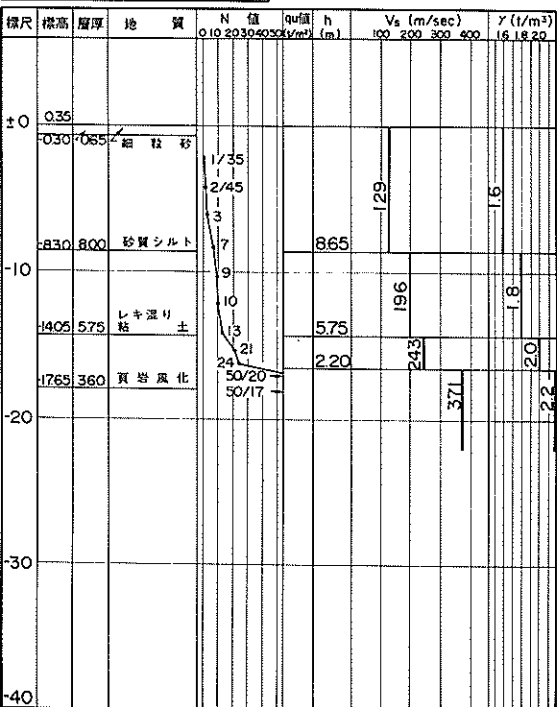
No. 7 地名 湯湾港
 北緯 28°16'23" 東経 129°17'41"



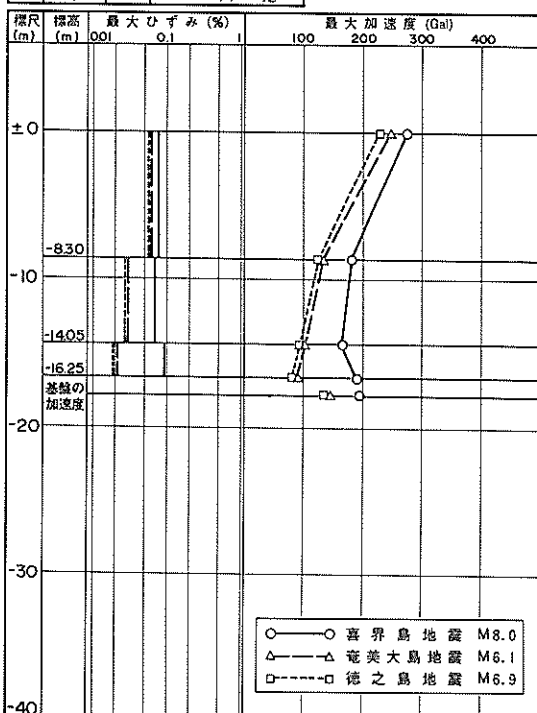
No. 7 地名 湯湾港



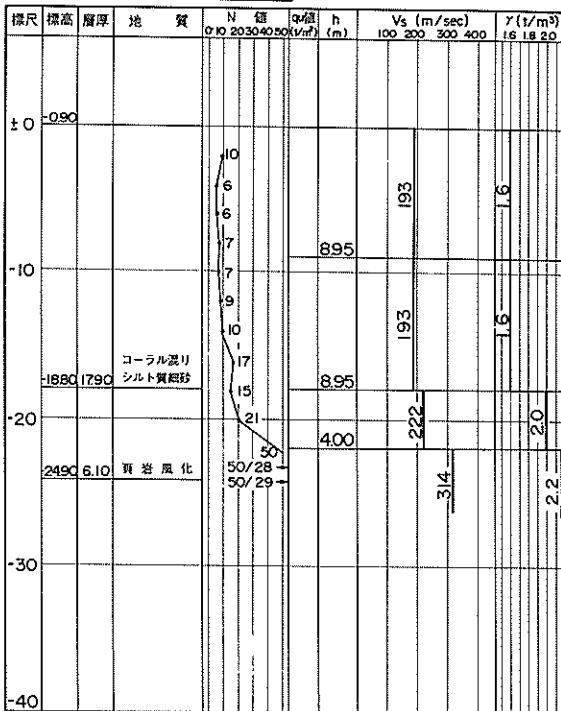
No. 8 地名 篠川港
 北緯 28°12'55" 東経 129°17'26"



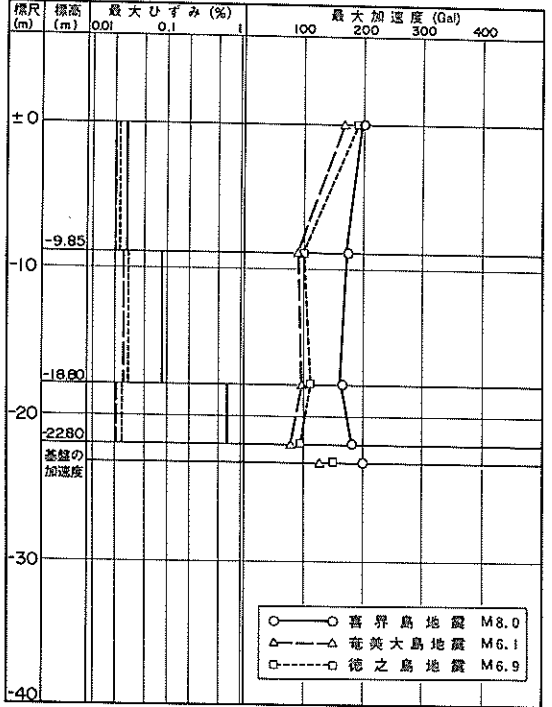
No. 8 地名 篠川港



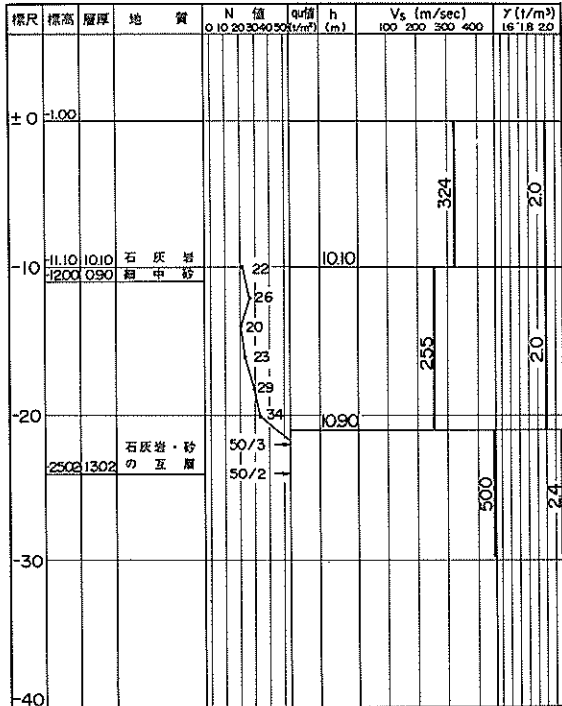
No. 9 地名 古仁屋漁港防波堤
 北緯 28°08'23" 東経 129°18'51"



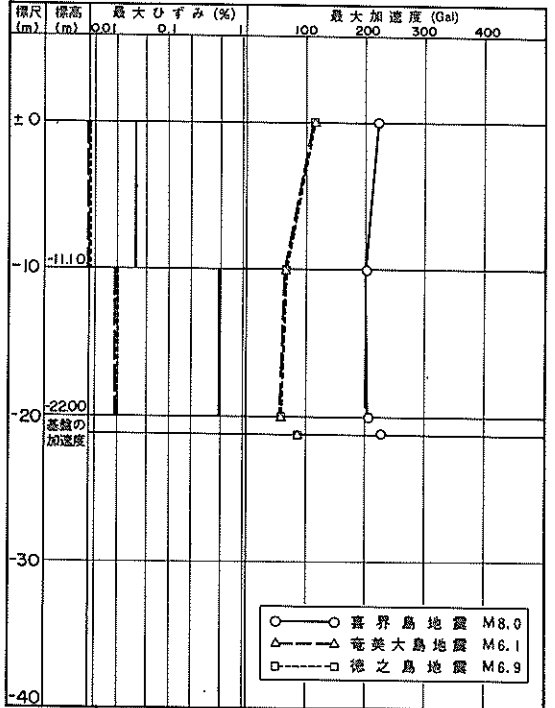
No. 9 地名 古仁屋漁港防波堤



No. 10 地名 湾 港
 北緯 28°19'34" 東経 129°56'13"



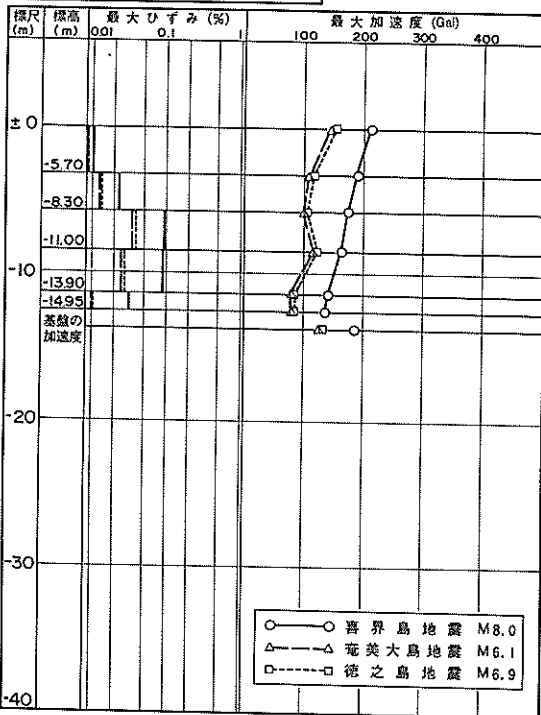
No. 10 地名 湾 港



No. 11 地名 実久漁港防波堤
北緯 28°11'08" 東経 129°11'09"

標尺	標高	層厚	地質	N 値		h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)								
				0	10		20	30	40	50	16	18	20						
	±0																		
	-5.70	3.20	砂質土	11	10		320	196											
	-8.30	2.60	レキ混り砂	16	12		260	254											
	-11.00	2.70	砂質土	9	8		270	182											
	-13.90	2.90	レキ混り砂	14	9		290	208											
	-14.85	1.05	千粒状凝結砂	15	38		105	495											
	-20																		
	-30																		
	-40																		

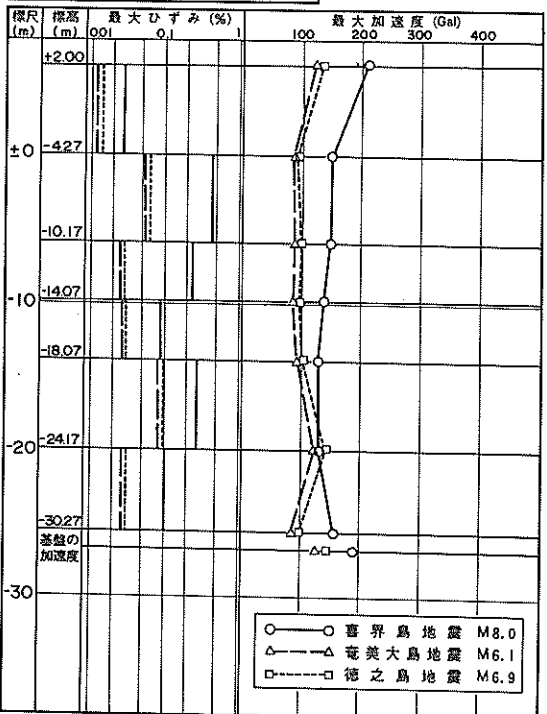
No. 11 地名 実久漁港防波堤



No. 12 地名 瀬武港-4.5m岸壁
北緯 28°09'44" 東経 129°12'48"

標尺	標高	層厚	地質	N 値		h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)								
				0	10		20	30	40	50	16	18	20						
	±2.00																		
	±0	-4.27	埋立砂	8	2/3		6.27	189											
	-10.17	5.90	細砂	4	6		5.90	146											
	-14.07	3.90	サンゴレキ混り細砂	16	11		3.90	189											
	-20	-24.17	サンゴレキ混り砂質シルト	3	3		4.00	196											
	-30	-30.27	砂レキ粘板岩	4	3		6.10	143											
	-30	-30.27	粘板岩	23	26		5.70	243											
	-30	-30.27	粘板岩	27	20														
	-30	-30.27	粘板岩	15	15														
	-30	-30.27	粘板岩	15	15														

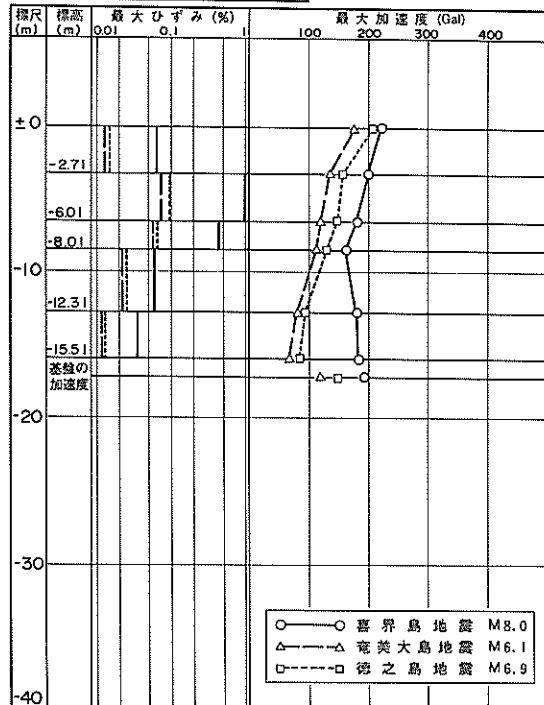
No. 12 地名 瀬武港-4.5m岸壁



No. 13 地名 儀 港
 北緯 28°07'57" 東経 129°14'50"

標尺	標高	層厚	地 質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)					
				0	10	20	30		40	100	200	300	400	1.6	1.8	2.0		
±0	0.49																	
	-2.71	3.20	シルト混り 砂レキ	7	6	6		3.20		166								
	-6.01	3.30	シルト混り 砂レキ	2	7			3.30		135								
	-8.01	2.00	砂質シルト	12	2			2.00		129								
-10				17	11					196								
	-15.51	7.50	風化性 粘性土	12	14			4.30										
	-17.51	2.00	風化粘板岩	22	27	34		3.20		276								
-20				49														
	-15.51			50	29													
	-17.51			50	10													
-30																		
-40																		

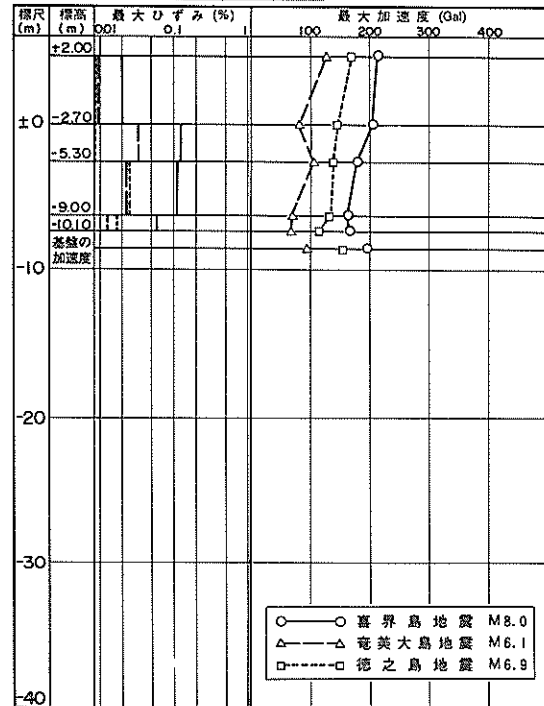
No. 13 地名 儀 港



No. 14 地名 請阿堂港物揚場
 北緯 28°01'43" 東経 129°15'29"

標尺	標高	層厚	地 質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)					
				0	10	20	30		40	100	200	300	400	1.6	1.8	2.0		
+2.00																		
±0	-2.70	4.70	埋立砂					4.70		169								
	-3.50	0.80	レキ混り砂	5	8			2.60		166								
	-9.00	5.50	砂質土	11	13			3.70		202								
	-10.10	1.10	レキ混り砂	21	28			1.10										
	-10.82	0.70	千枚岩状粘板岩	50	12													
-10																		
-20																		
-30																		
-40																		

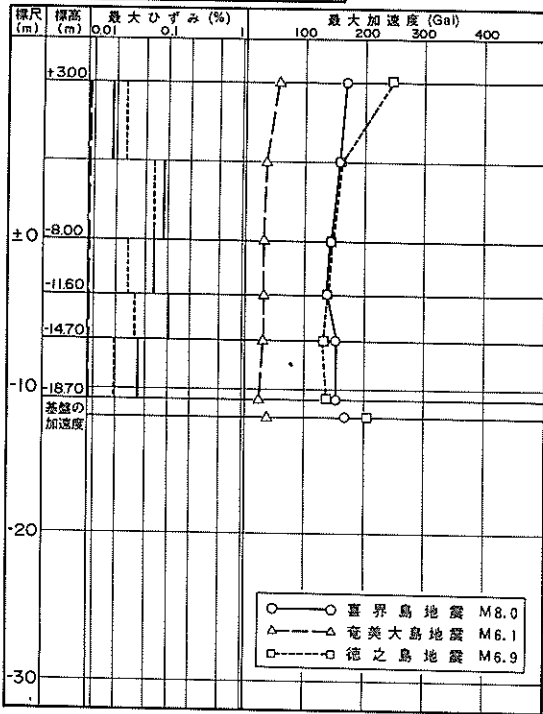
No. 14 地名 請阿堂港物揚場



No. 15 地名 龜徳港-9.0m岸壁
 北緯 27°44'19" 東経 129°01'31"

標尺	標高	層厚	地質	N値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)						
				0	10	20	30		100	200	300	400	15	18	20				
	+300																		
	-800	1100	埋立砂					5.50			189								
	-1160	360	玉石入り砂レキ	24	21	19	13	360			189								
	-1470	310	砂レキ	16	29	29	27	310			239								
	-1800	330	シルト質砂	33	34	32	30	400			287								
	-2300	500	泥岩	50/23	50/20	50/10					368								

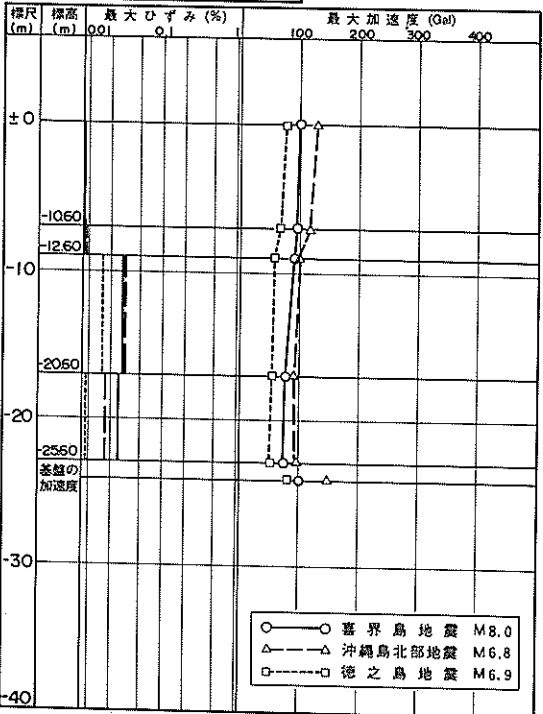
No. 15 地名 龜徳港-9.0m岸壁



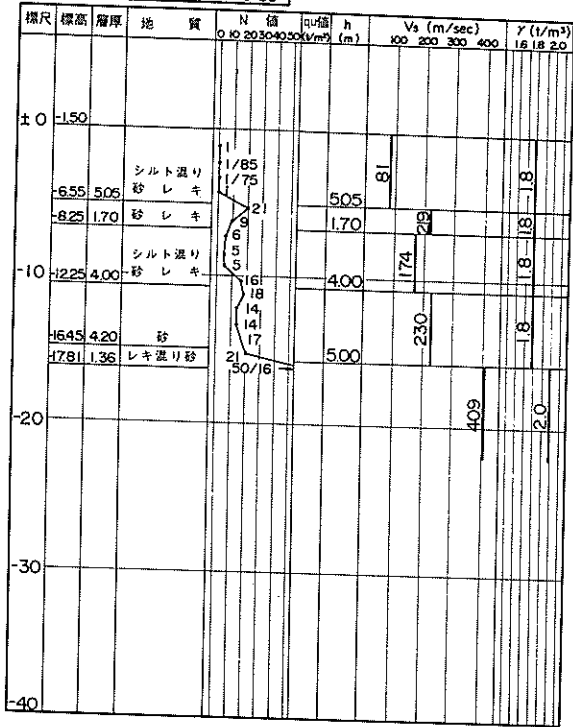
No. 16 地名 与論港
 北緯 27°02'05" 東経 128°24'14"

標尺	標高	層厚	地質	N値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)						
				0	10	20	30		100	200	300	400	15	18	20				
	+360																		
	-1060	700	石灰岩					7.00											
	-10			50/23	50/16			2.00			364								
	-20	2560	砂レキ	31	23	27	23	8.00			265								
	-30			33	37	46	48	5.00			317								

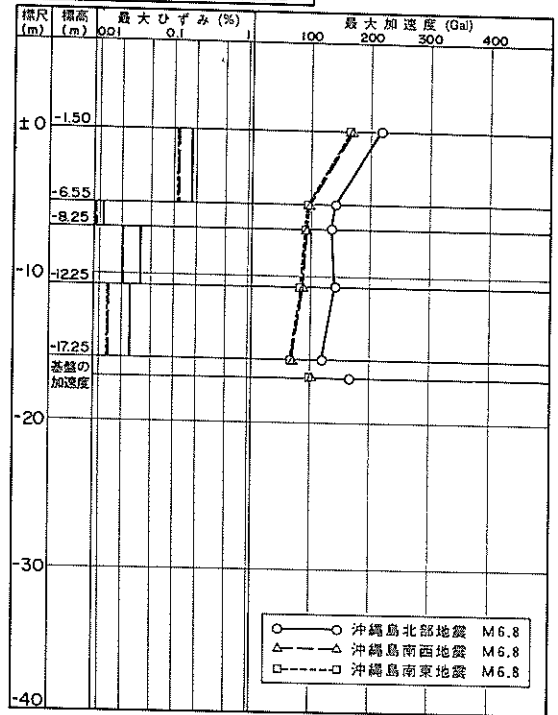
No. 16 地名 与論港



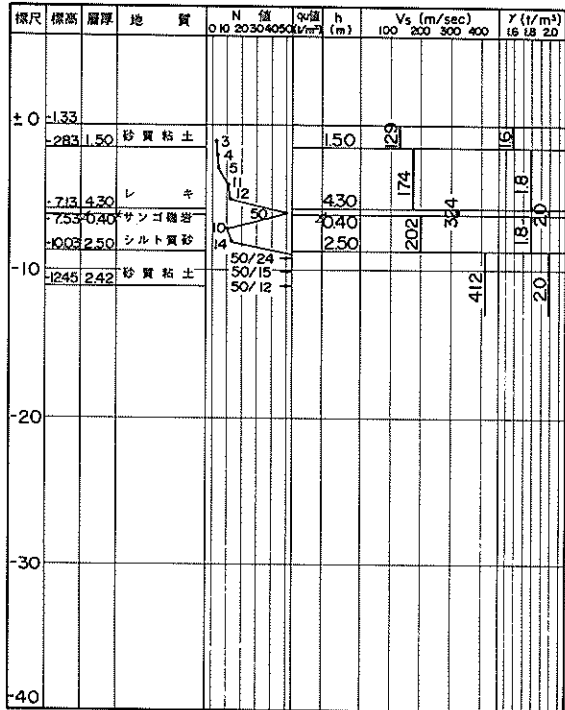
No. 17 地名 辺土名漁港
北緯 26°44'48" 東経 128°10'59"



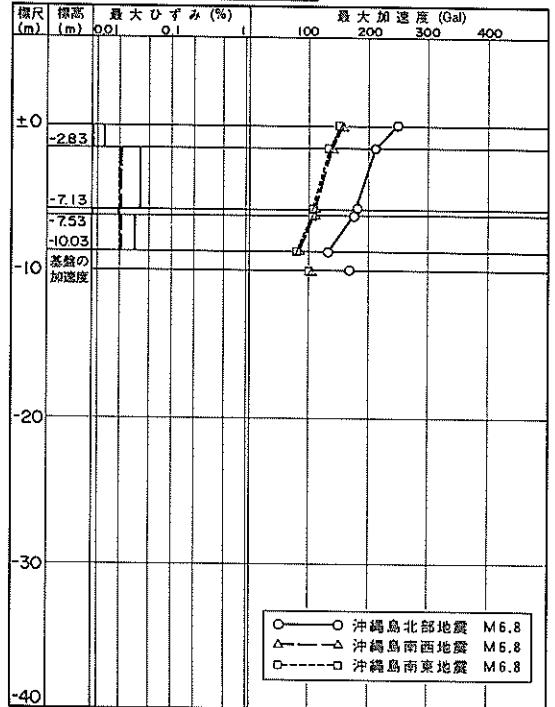
No. 17 地名 辺土名漁港



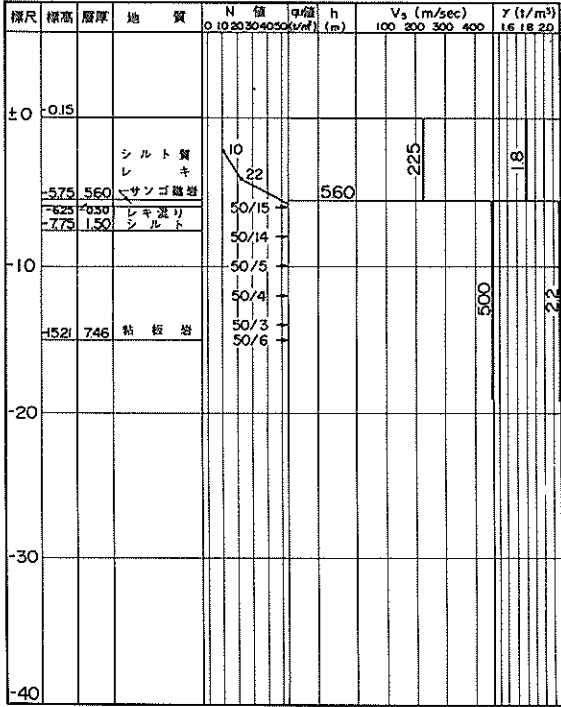
No. 18 地名 国頭電報電話局
北緯 26°43'22" 東経 128°10'52"



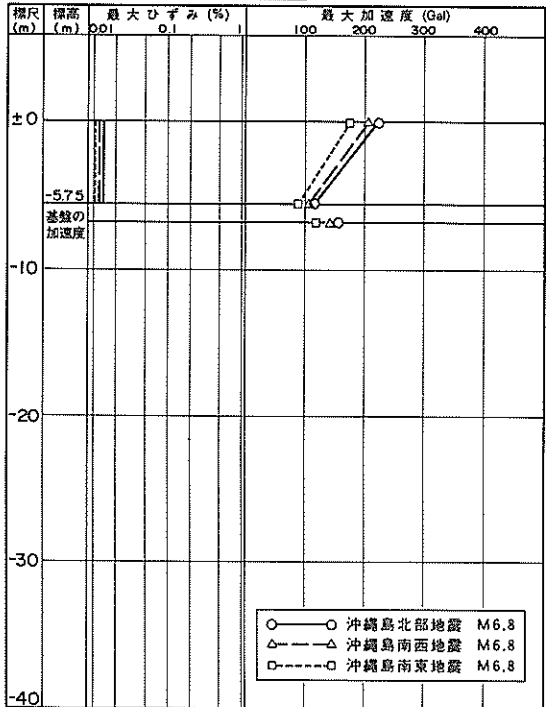
No. 18 地名 国頭電報電話局



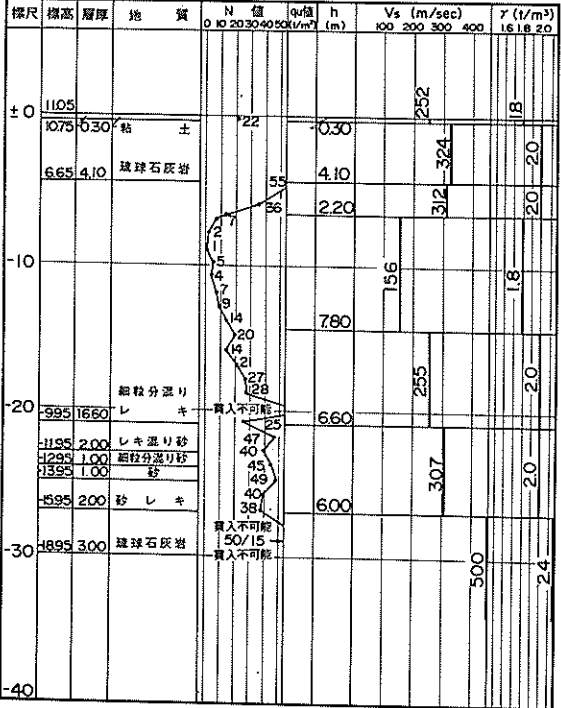
No. 19 地名 運天港航路
北緯 26°39' 21" 東経 127°59' 53"



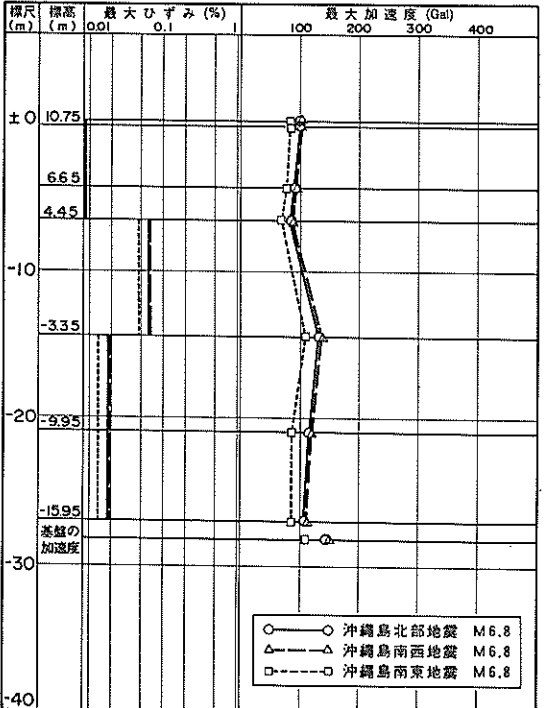
No. 19 地名 運天港航路



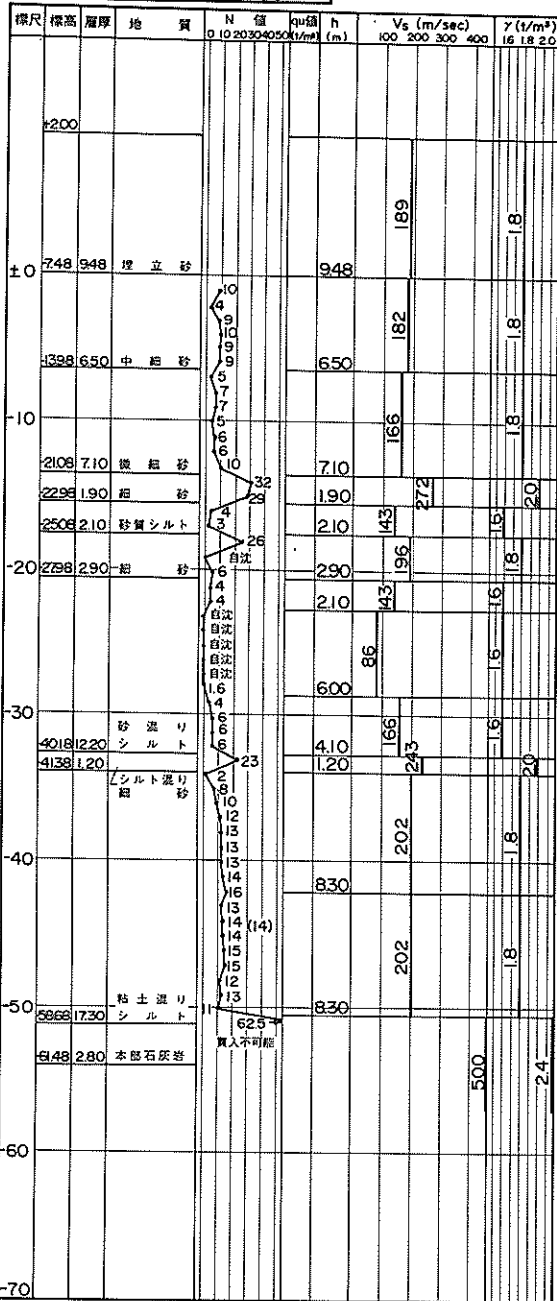
No. 21 地名 海洋博覧会会場(1)
北緯 26°41' 34" 東経 127°52' 52"



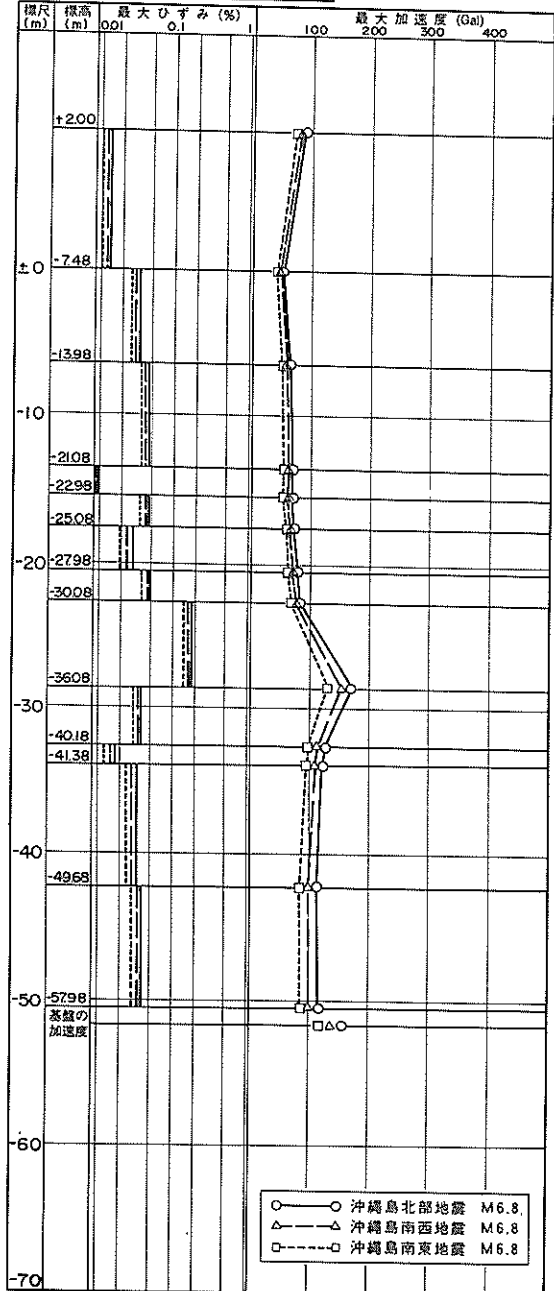
No. 21 地名 海洋博覧会会場(1)



No. 20 地名 運天港-3.5m物揚場
 北緯 26°40'20" 東経 128°00'00"



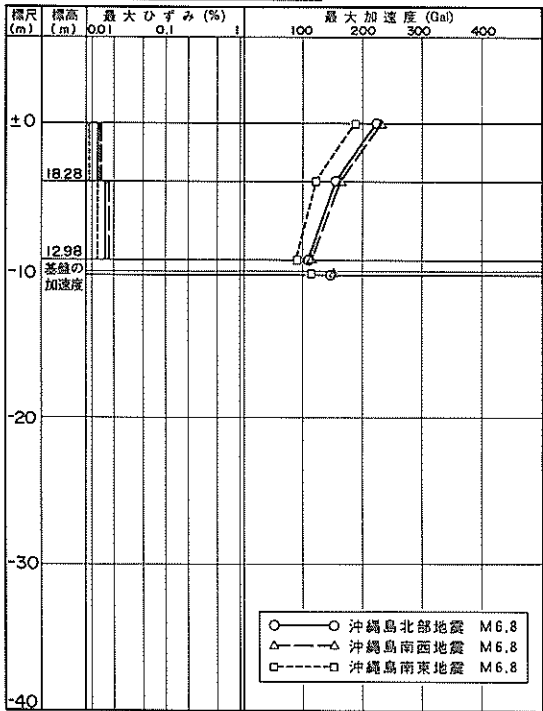
No. 20 地名 運天港-3.5m物揚場



No. 22 地名 海洋博覧会会場(2)
北緯 26°40'36" 東経 127°53'17"

標尺	標高	層厚	地質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)			
				0	10	20	30		40	100	200	300	400	18	20	
±0	2218			12												
	2168	0.50	黄土	13												
	1828	3.40	粘土混りレキ	14				390			208		18			
	1298	5.30	砂レキ	25	32	26					278		20			
-10				44	39			530								
	906	3.92	塊状石灰岩	50/18												
	788	1.18	風化石灰岩	50/6												
	753	0.30	ケイブ	50/9												
	499	2.60	風化石灰岩	50/12												
			風化石灰岩	41												
			風化石灰岩	50/16												
			風化石灰岩	50/26							500		24			
-20	188	3.10	風化石灰岩	28												
			風化石灰岩	36												
			風化石灰岩	50/12												
	-392	5.80	風化石灰岩													
	-692	3.00	風化石灰岩													
-30	-782	0.90	風化石灰岩													
-40																

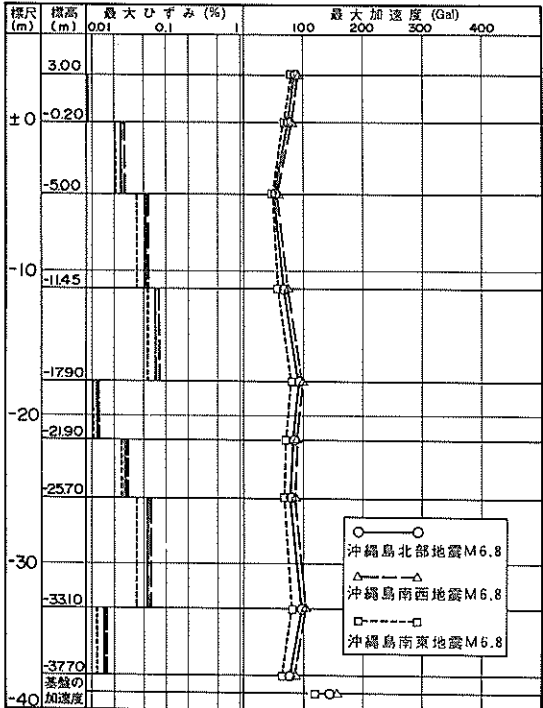
No. 22 地名 海洋博覧会会場(2)



No. 23 地名 渡久地港本部漁協冷蔵庫
北緯 26°39'21" 東経 127°53'31"

標尺	標高	層厚	地質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)			
				0	10	20	30		40	100	200	300	400	18	20	
±0	+300															
	-0.20	3.20	埋立砂					320			189		18			
	-1.60	1.40	シルト混り砂レキ	9							156		18			
	-5.00	3.40	シルト混り砂レキ	15	15			480			146		18			
			シルト混り砂レキ	7	4											
			シルト混り砂レキ	6	6			645			146		18			
-10			シルト混り砂レキ	5	5						146		18			
	-1790	12.90	シルト混り砂レキ	4	6			645								
	-1880	0.90	シルト混り砂レキ	25	28											
			シルト混り砂レキ	50/23				400			281		20			
			シルト混り砂レキ	3	33											
			シルト混り砂レキ	17	18			380			225		18			
	2770	8.90	シルト混り砂レキ	14	32											
			シルト混り砂レキ	2	1											
			シルト混り砂レキ	6	10						189		18			
			シルト混り砂レキ	10	33			740								
			シルト混り砂レキ	39	39											
			シルト混り砂レキ	50/23												
	-3590	8.20	シルト混り砂レキ	40	38						307		20			
	-3840	2.50	シルト混り砂レキ	32	32			460								
-40				51/20							380		20			

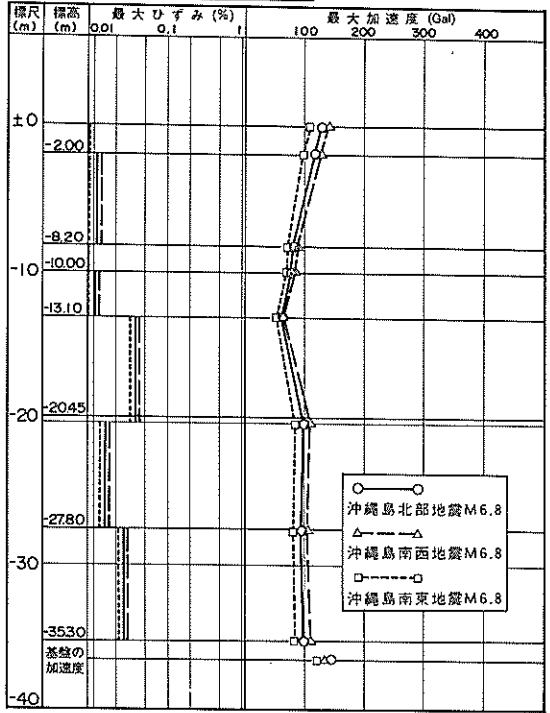
No. 23 地名 渡久地港本部漁協冷蔵庫



No. 24 地名 本部町健盛地先
 北緯 26°38'27" 東経 127°52'51"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)		
				0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		100	200	300	400	1.6	1.8	2.0
±0	-2.00	1.50	サンゴ礁岩						200	196			1.8			
	-8.20	6.20	サンゴ礁混り砂	21	21	20			6.20	235			2.0			
-10	-10.00	1.80	サンゴ礁岩	50/25					1.80	33			2.2			
	-13.10	3.10	サンゴ礁混り砂	35					3.10	287			2.0			
-20	-20.45								-7.35	184			1.6			
	-27.80	14.70	粘土	24					-7.35	261			1.8			
-30	-30.40	2.60	サンゴ砂混りシルト質砂	20					-2.44	244			1.8			
	-35.30	4.90	混りシルト質砂	50/21					-7.50	369			2.0			

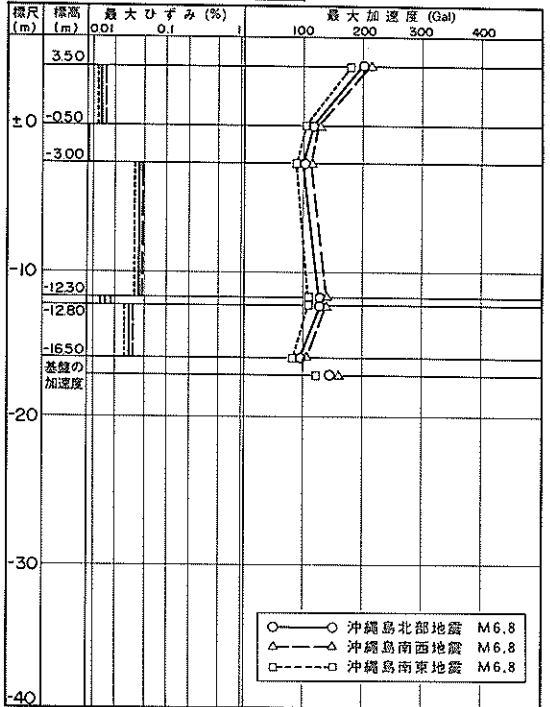
No. 24 地名 本部町健盛地先



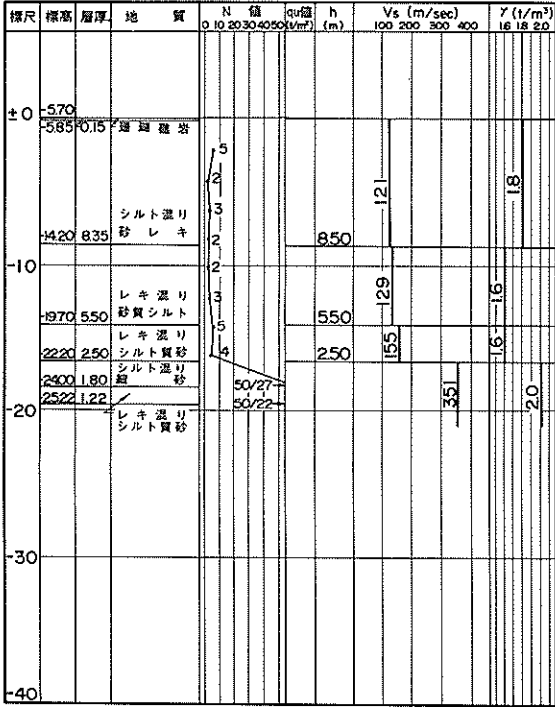
No. 25 地名 新渡久地港
 北緯 26°38'03" 東経 127°53'02"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)		
				0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		100	200	300	400	1.6	1.8	2.0
±0	+3.50									189			1.8			
	-0.50	4.00	埋立砂					4.00	326			2.2				
	-3.00	2.50	サンゴ礁岩	50/26				2.50	208			1.8				
-10	-12.30	9.30	シルト混り砂レキ	20	14	9	8		9.30	287			2.0			
	-12.80	0.50	砂混りレキ	36					-0.50	214			1.8			
	-13.90	1.10	琉球石灰岩	14					-0.50	287			2.0			
	-16.50	2.60	レキ混り粘土	13					3.70	500			2.2			
-20	-20.06	3.56	琉球石灰岩	50/6												

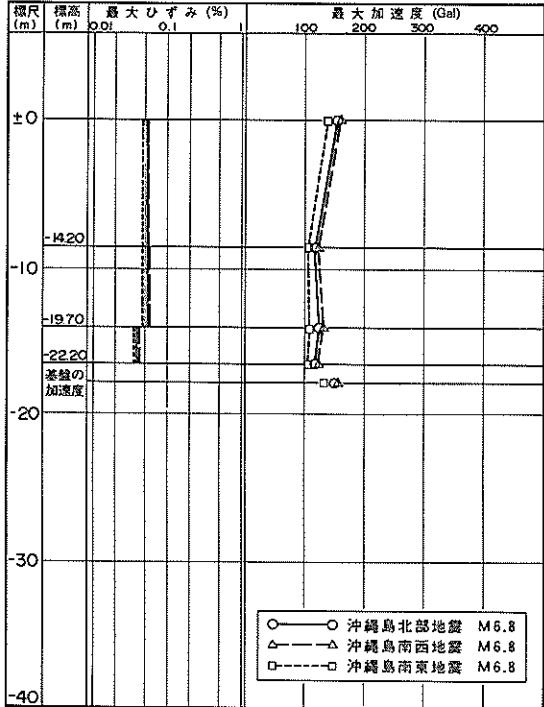
No. 25 地名 新渡久地港



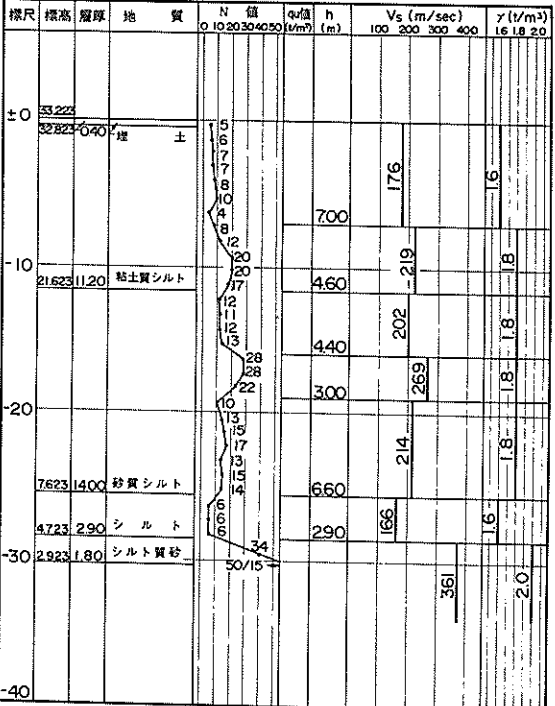
No. 26 地名 名護市字名護宮里地先
北緯 26°35'13" 東経 127°58'27"



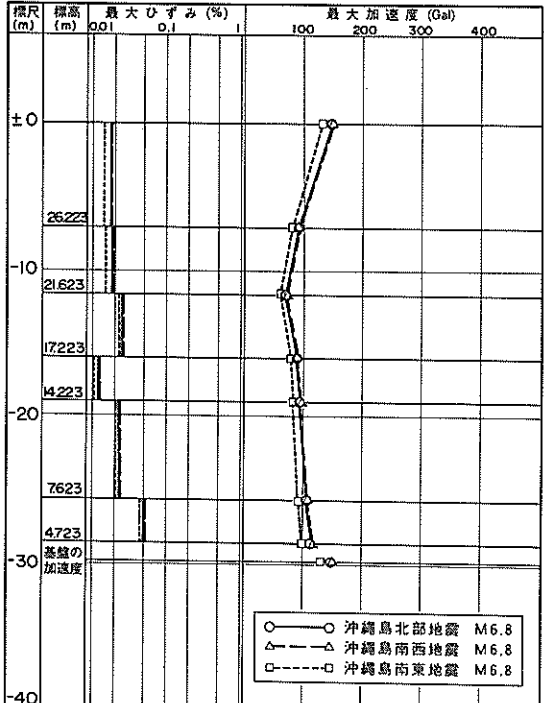
No. 26 地名 名護市字名護宮里地先



No. 27 地名 北部ダム事務所総合管理庁舎
北緯 26°35'23" 東経 127°59'35"



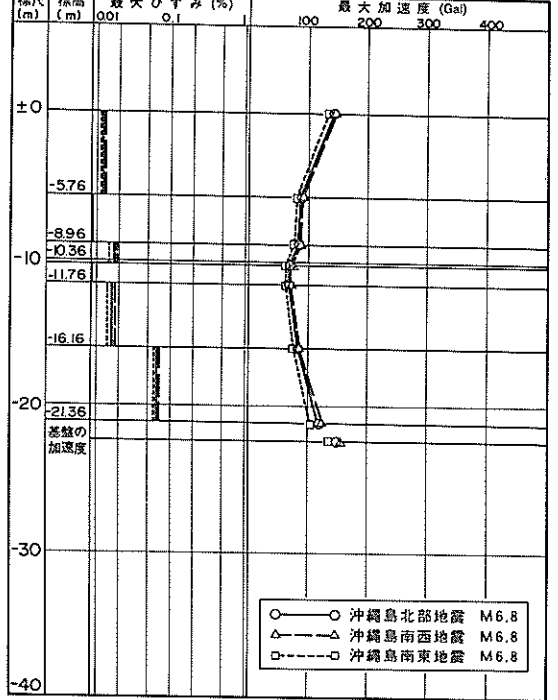
No. 27 地名 北部ダム事務所総合管理庁舎



No. 28 地名 名護警察署
 北緯 26°34'29" 東経 127°59'10"

標尺	標高	層厚	地質	N値		h	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)							
				0	10		100	200	300	400	16	18	20					
±0	-0.16																	
	-5.06	4.90	砂	16	12					189								
	-5.70	0.70	砂レキ	4	17													
	-8.96	3.20	サンゴ礁岩	買入不可能														
-10	-10.36	1.40	砂レキ	16	50/10					223								
	-11.56	1.40	サンゴ礁岩	買入不可能														
				13	34													
				12	36													
				3	10					247								
-20	-21.36	9.60	砂レキ	9						166								
	-23.66	2.30	粘板岩	買入不可能														
	-25.66	2.00	砂レキ	50	50/20													
-30																		
-40																		

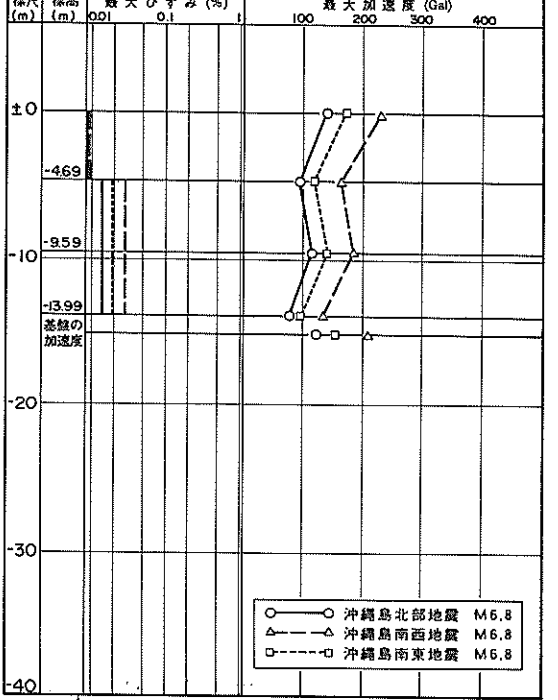
No. 28 地名 名護警察署



No. 29 地名 前兼久為港防波堤
 北緯 26°26'30" 東経 127°48'09"

標尺	標高	層厚	地質	N値		h	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)							
				0	10		100	200	300	400	16	18	20					
±0	-0.09																	
	-3.54	3.45	ビーチコーラル (砂レキ)	32	29													
	-4.69	1.15	砂レキ	23	22					258								
				22	21													
				31	28													
-10	-9.59	4.90	粘土混り砂レキ	27	25					255								
	-12.09	2.50	シルト混り砂	29														
	-14.40	2.31	海風化帯シルト混り砂	38	39					287								
				40														
-20																		
-30																		
-40																		

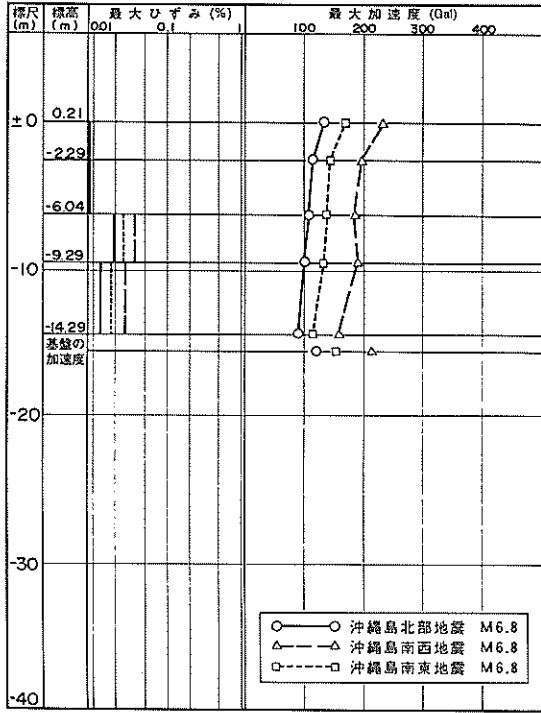
No. 29 地名 前兼久為港防波堤



No. 30 地名 読谷村山田温泉
 北緯 26°25'52" 東経 127°47'23"

標尺	標高	層厚	地質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)				
				0	10	20	30		40	50	100	200	300	400	1.6	1.8	2.0
±0	0.21		レキ混り 粘土	13				250	189								
	-2.29	250	粘土	50/19													
	-3.29	100	砂レキ	買入不可能				375									
	-6.04	275	石灰岩	17													
	-9.29	325	シルト質 細砂	20						248							
-10				26				325									
	-14.29	5.00	シルト混り レキ	50/15													
				45													
				43													
				42													
				45													
				50/2				500									
			石灰質砂岩	買入不可能													
				50/6													
				47													
			レキを含む 石灰質砂岩	買入不可能													
	-24.29	1000	石灰質砂岩	買入不可能													
	-26.09	1.80	粘板岩	2													
				35													
-40																	

No. 30 地名 読谷村山田温泉

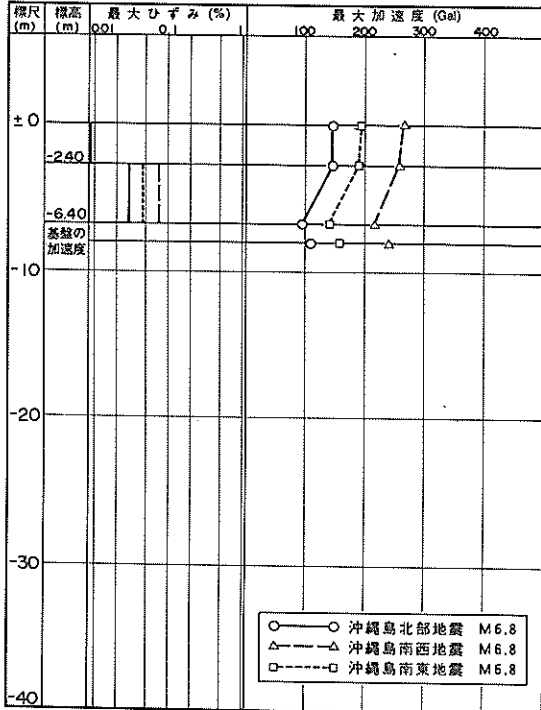


○—○ 沖縄島北部地震 M6.8
 △---△ 沖縄島南西地震 M6.8
 □- - -□ 沖縄島南東地震 M6.8

No. 31 地名 都屋漁港
 北緯 26°23'08" 東経 127°43'27"

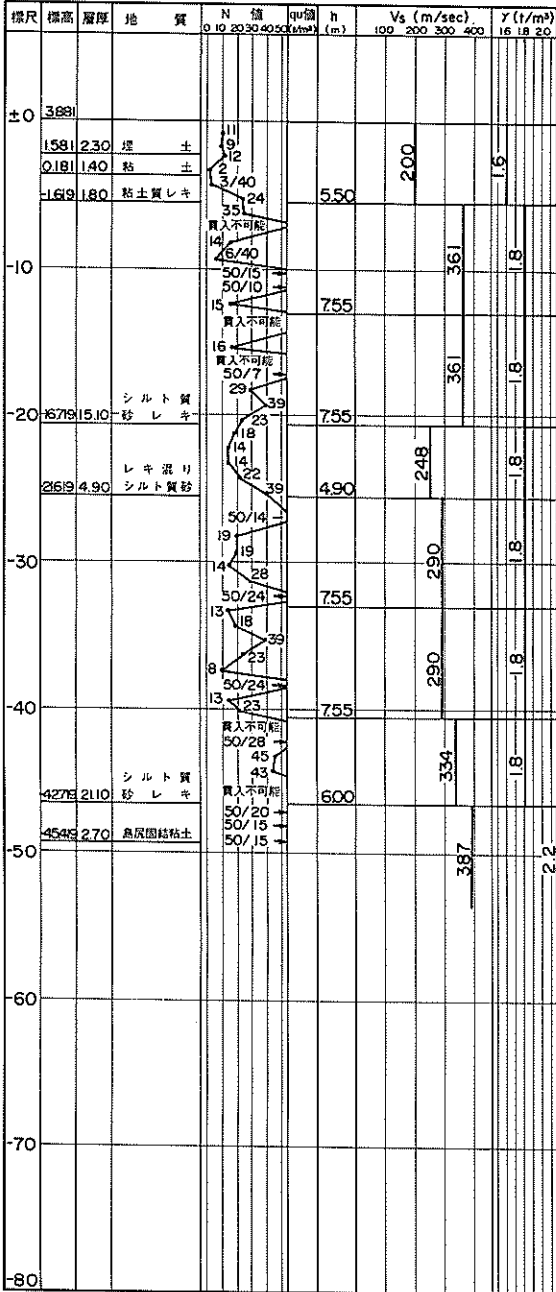
標尺	標高	層厚	地質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)				
				0	10	20	30		40	50	100	200	300	400	1.6	1.8	2.0
±0	0.30			50/20				270									
	-2.40	270	サンゴ礁岩	買入不可能													
	-4.20	1.80	石	23													
	-6.60	240	砂	3				4.00	189								
				6													
-10				50/5													
				50/15													
				50/3													
				50/5													
	-9.90	3.30	石														
-20																	
-30																	
-40																	

No. 31 地名 都屋漁港

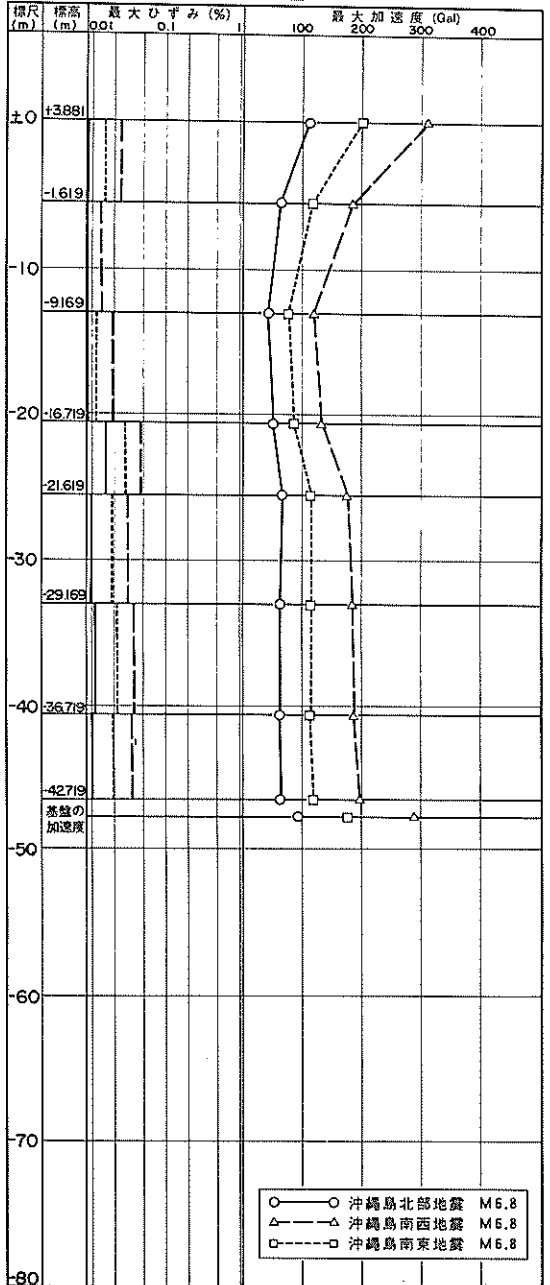


○—○ 沖縄島北部地震 M6.8
 △---△ 沖縄島南西地震 M6.8
 □- - -□ 沖縄島南東地震 M6.8

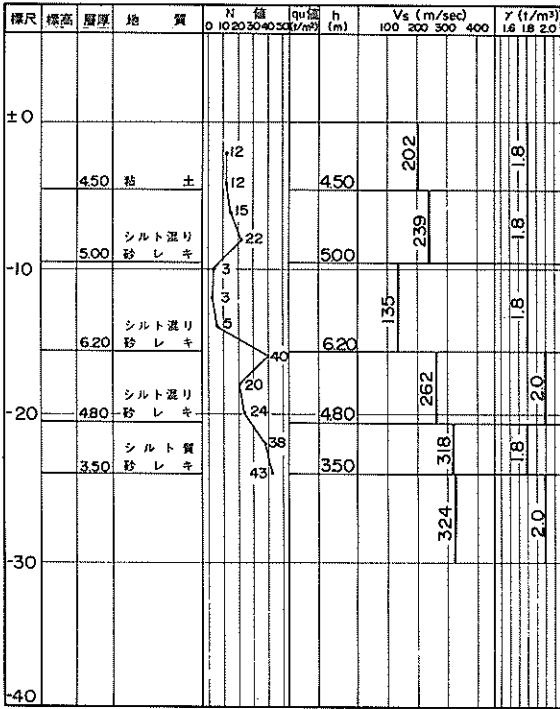
No. 32 地名 新潟市外電話局
 北緯 26°14'14" 東経 127°41'33"



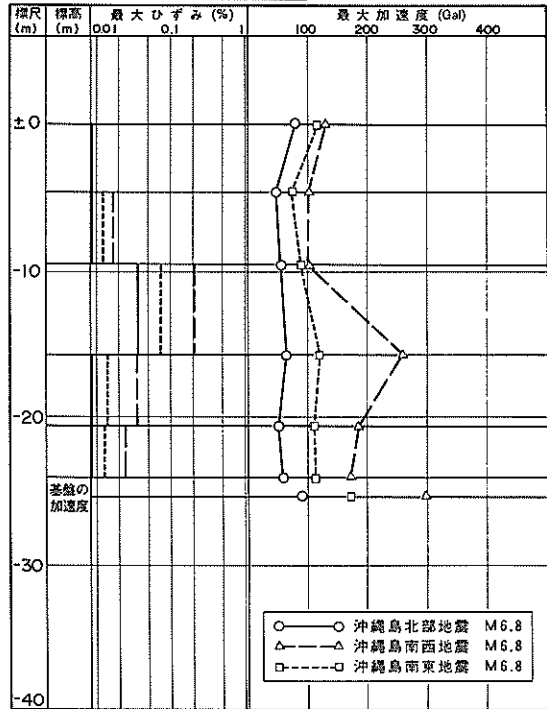
No. 32 地名 新潟市外電話局



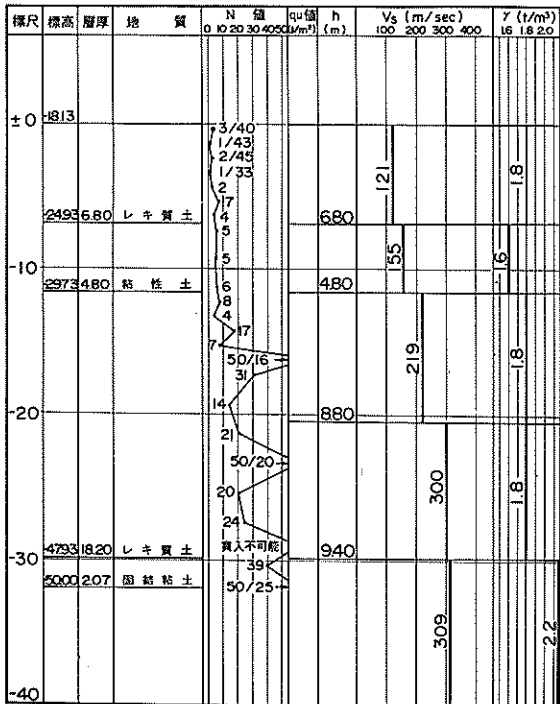
No. 33 地名 旧那覇 - S
 北緯 26°14'27" 東経 127°40'47"



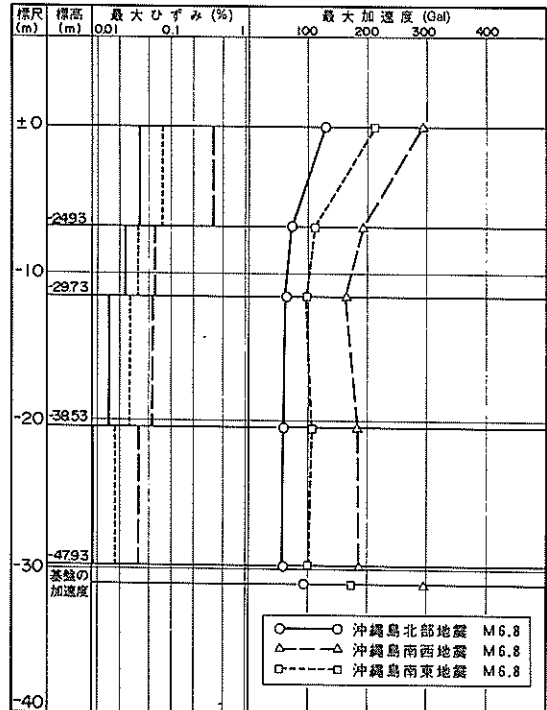
No. 33 地名 旧那覇 - S



No. 34 地名 那覇港施設ヤード
 北緯 26°14'49" 東経 127°40'45"



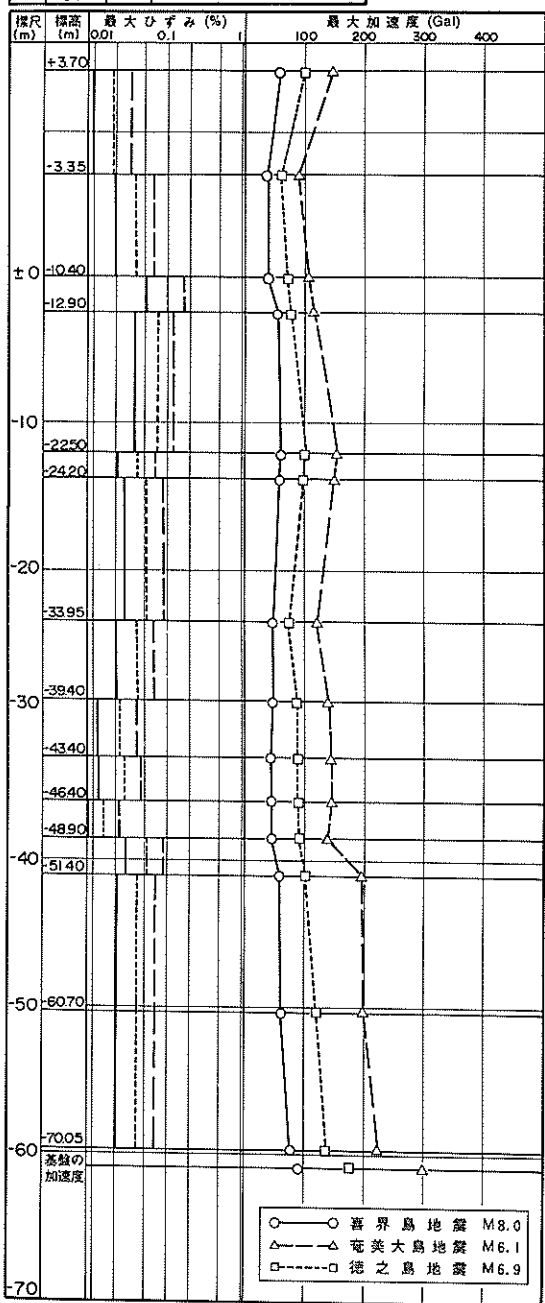
No. 34 地名 那覇港施設ヤード



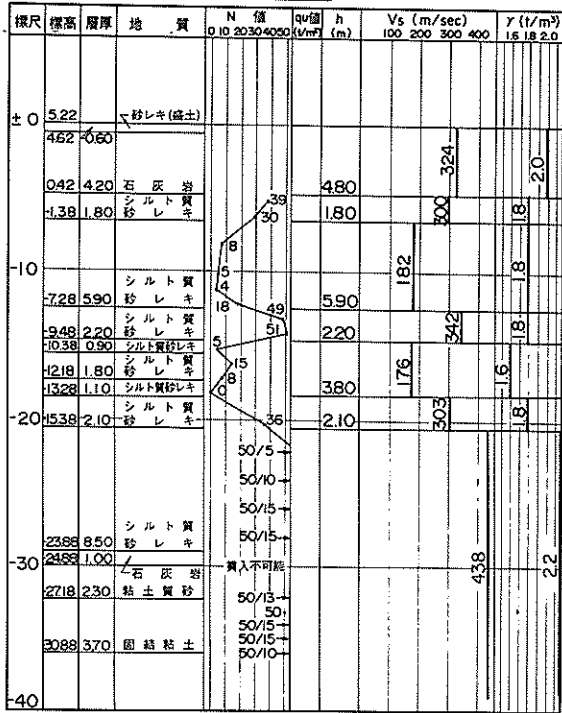
No. 37 地名 那覇港-11.0m岸壁第4バース
 北緯 26°13'44" 東経 127°40'33"

標尺	標高	層厚	地質	N 値				Vs (m/sec)	γ (t/m³)
				0	10	20	30		
	+3.70								
							7.05	189	1.8
±0	+0.40	14.10	埋立砂	0/50			7.05	189	1.8
	-12.90	2.50	粘土	0/70			2.50	122	1.8
				0/50					
-10									
	2259	9.60	砂質シルト	1/50			9.60	135	1.6
	2420	1.70	シルト質砂	12			1.70	202	1.8
				9				193	1.6
-20									
	3395	9.75	粘土	13			9.75	219	1.8
				50/26					
	3940	5.45	シルト質砂レキ	17			5.45	290	2.0
-30									
	4340	4.00	砂レキ	50			4.00	281	1.8
	4640	3.00	シルト質砂レキ	32			3.00	290	1.8
	4890	2.50	レキ	50/17			2.50	373	2.0
-40									
	5140	2.50	砂レキ	50/26			2.50	202	1.8
				50/14					
				20				239	1.8
-50									
				17				239	1.8
				17					
				18				9.30	1.8
				8					
				50/5					
				33				239	1.8
-60									
	7005	18.65	シルト質砂レキ	21			9.35		
	7100	0.95	風化凝結粘土	50/24					
	7255	1.55	鳥居粘土	50/10					
-70								408	2.2

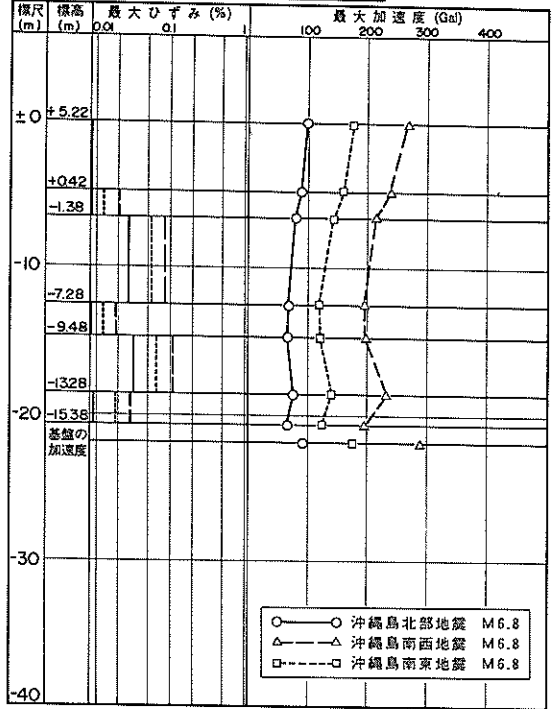
No. 37 地名 那覇港-11.0m岸壁第4バース



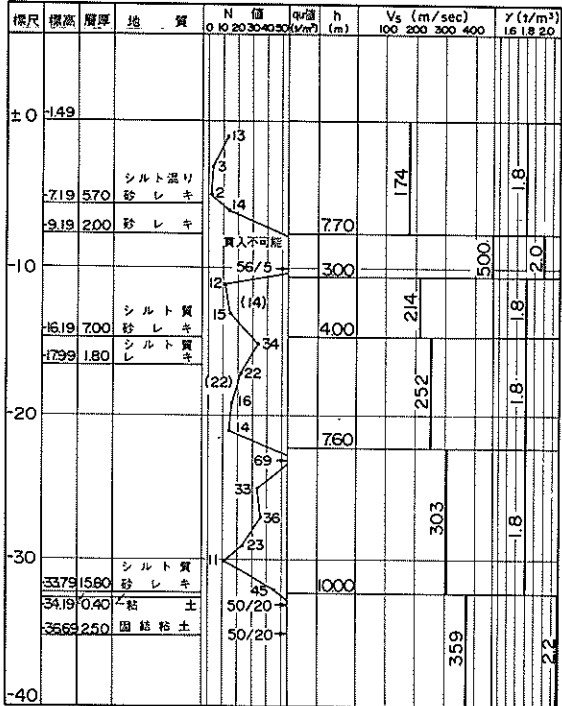
No. 42 地名 那覇港臨港道路泊陸上工区
北緯 26°13'35" 東経 127°41'00"



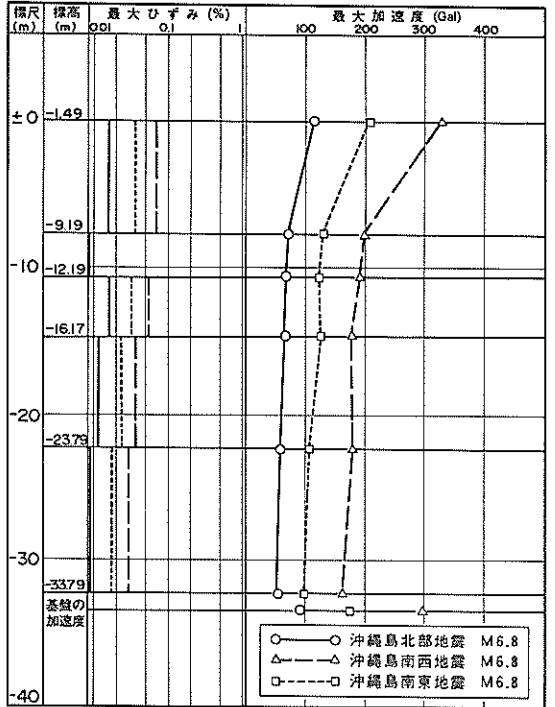
No. 42 地名 那覇港臨港道路泊陸上工区



No. 43 地名 那覇港臨港道路泊陸上工区
北緯 26°13'23" 東経 127°40'57"



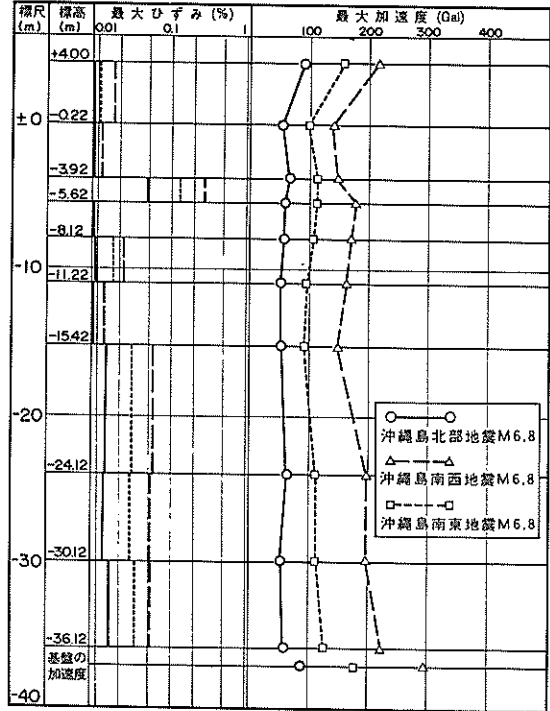
No. 43 地名 那覇港臨港道路泊陸上工区



No. 44 地名 那覇港泊心頭南岸
北緯 26°13'10" 東経 127°41'05"

標尺	標高 (m)	層厚 (m)	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)			
				0	10	20	30	40		100	200	300	400	1.6	1.8	2.0	
	+4.00																
±0	-0.22	4.22	埋立砂						4.22		189						
	-0.92	0.70	砂														
	-1.92	1.00	粗砂														
	-3.92	2.00	シルト質砂						3.70		309						
	-5.62	1.70	シルト質砂						1.70		35						
	-5.82	1.20	石灰岩						2.50		391						
	-7.82	0.70	石灰岩						2.50		391						
	-8.12	0.80	石灰岩						3.10		261						
	-13.92	5.80	シルト質砂						4.20		353						
	-14.72	0.80	石灰岩														
	-15.42	0.40	シルト質砂														
	-21.52	6.10	珪球石灰石								219						
	-22.12	0.60	シルト質砂														
	-22.92	0.80	石灰岩														
	-24.12	1.20	珪球石灰石						8.70								
	-29.12	5.00	シルト質砂						6.00		252						
	-39.12	14.00	シルト質砂						6.00		252						
	-40		固結粘土								376						

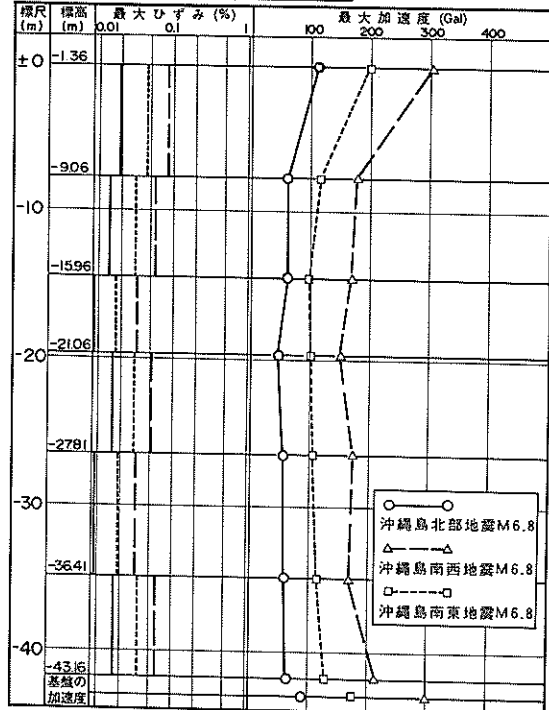
No. 44 地名 那覇港泊心頭南岸



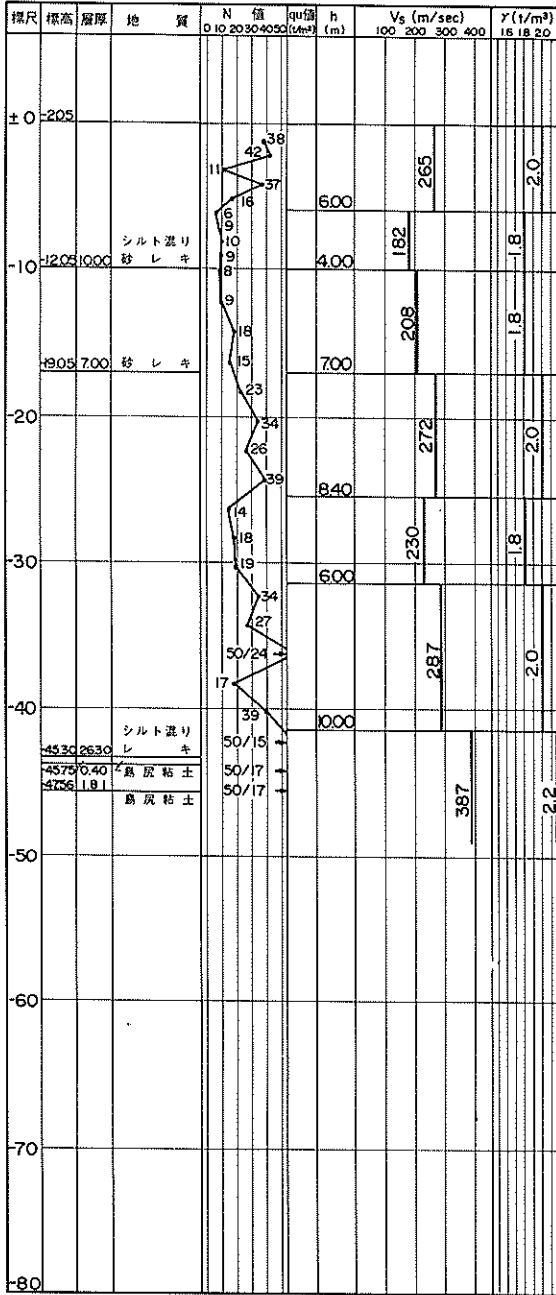
No. 45 地名 那覇港臨港道路海上工区
北緯 26°13'16" 東経 127°40'46"

標尺	標高 (m)	層厚 (m)	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)			
				0	10	20	30	40		100	200	300	400	1.6	1.8	2.0	
±0	-1.36																
	-9.06	7.70	シルト質砂						7.70		156						
	-15.96	6.90	シルト質砂						6.90		214						
	-21.06	5.10	シルト質砂						5.10		284						
	-27.81	6.75	シルト質砂						6.75		234						
	-29.73	1.92	粘土質砂														
	-43.16	13.43	シルト質砂						6.75		261						
	-40		固結粘土								433						

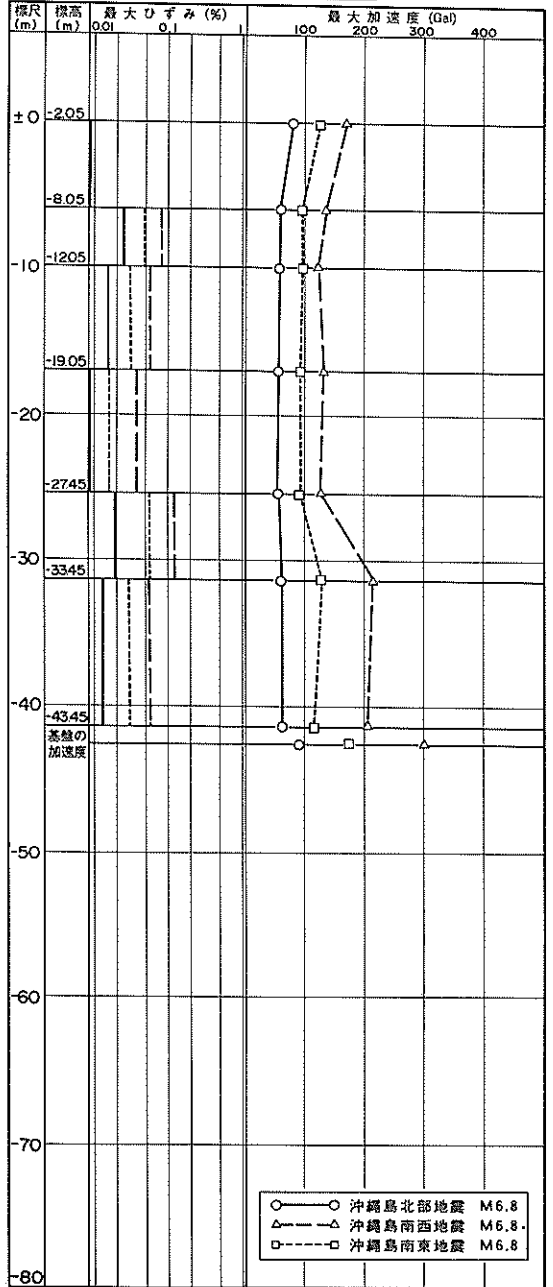
No. 45 地名 那覇港臨港道路海上工区



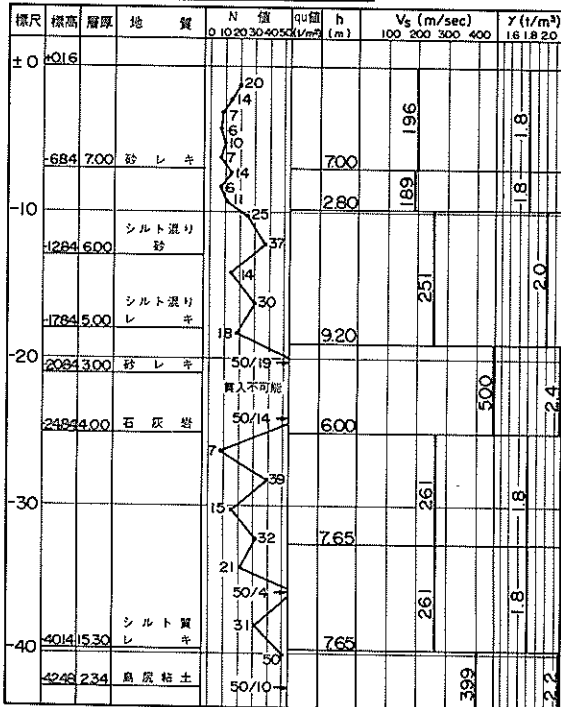
No. 46 地名 那覇港臨港道路波之上工区(1)
 北緯 26°13'03" 東経 127°40'27"



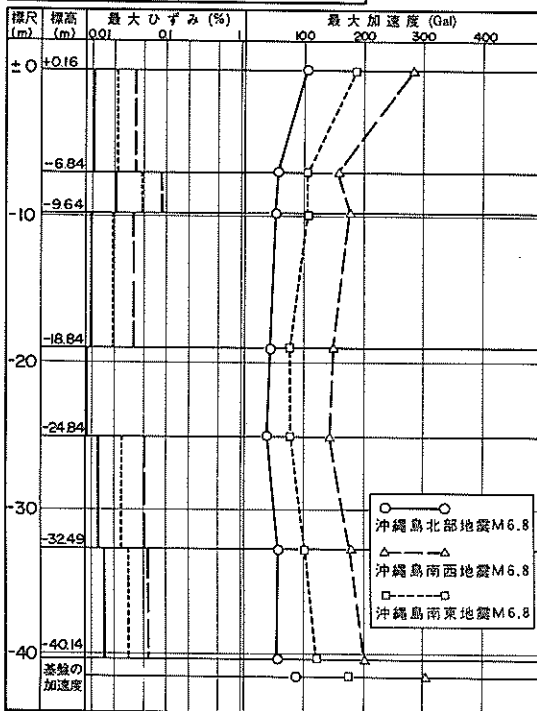
No. 46 地名 那覇港臨港道路波之上工区(1)



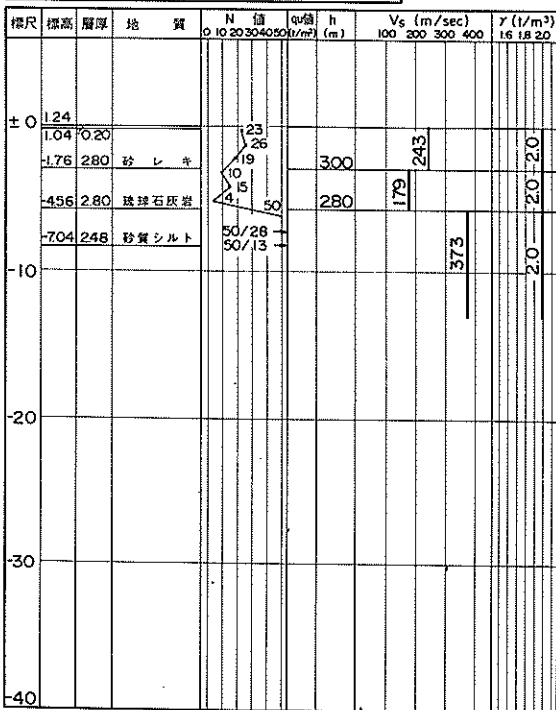
No. 47 地名 那覇港臨港道路波之上工区(2)
 北緯 26°13'00" 東経 127°40'17"



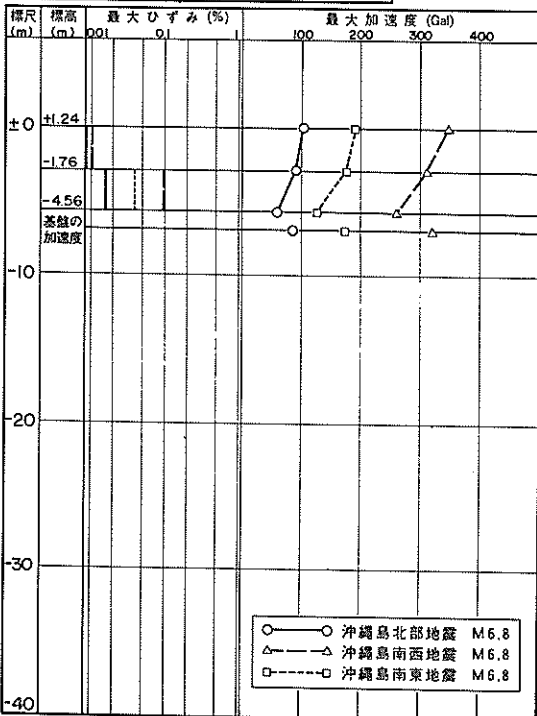
No. 47 地名 那覇港臨港道路波之上工区(2)



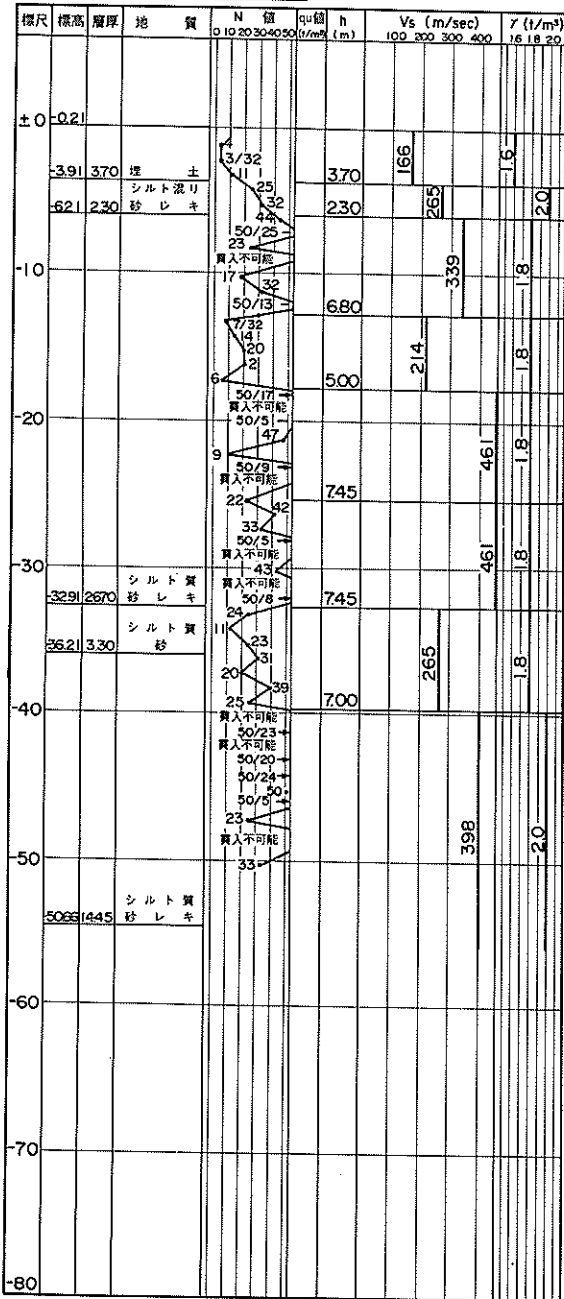
No. 50 地名 那覇空港国際線ターミナルビル附近
 北緯 26°12'32" 東経 127°38'58"



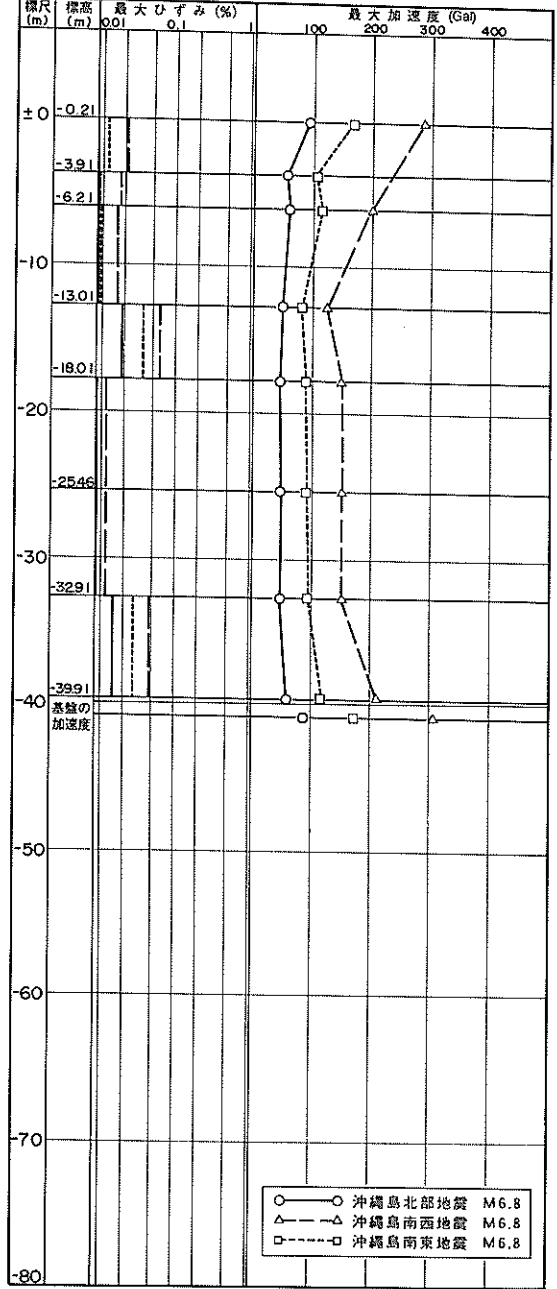
No. 50 地名 那覇空港国際線ターミナルビル附近



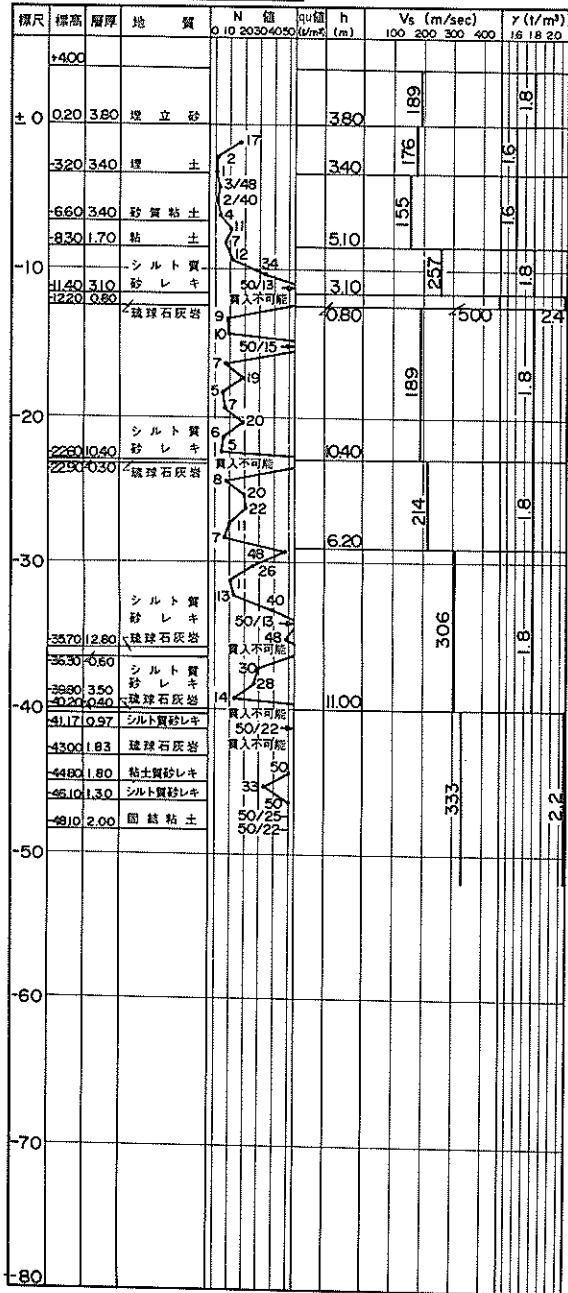
No. 48 地名 安全運転学校那覇本校
 北緯 26°12'44" 東経 127°40'06"



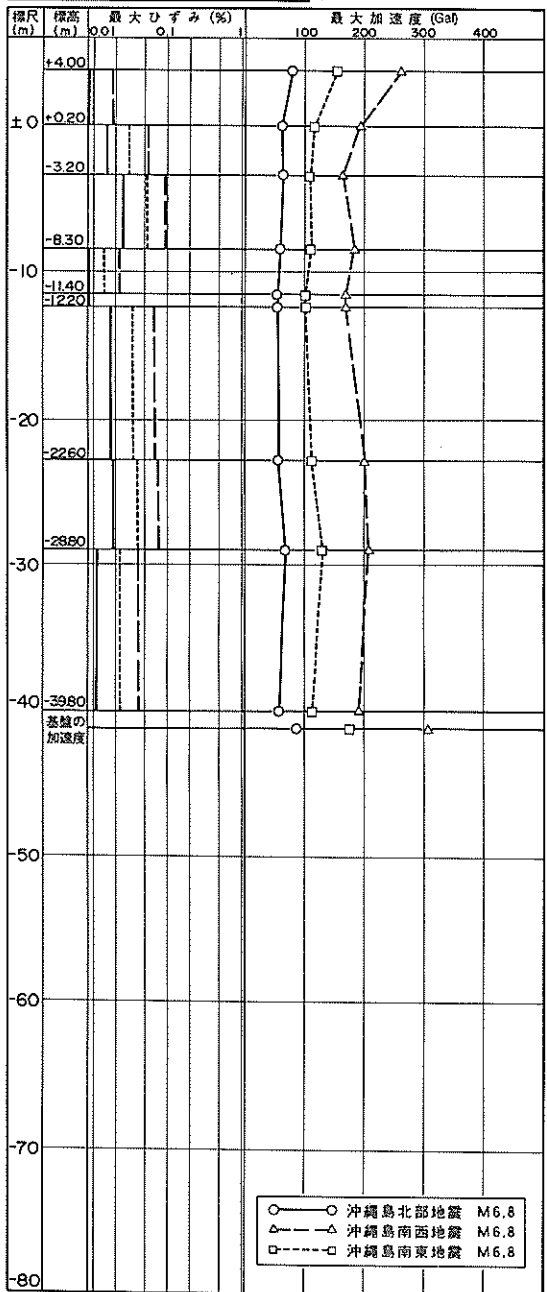
No. 48 地名 安全運転学校那覇本校



No. 49 地名 那覇琉球中央倉庫
 北緯 26°12'32" 東経 127°40'10"



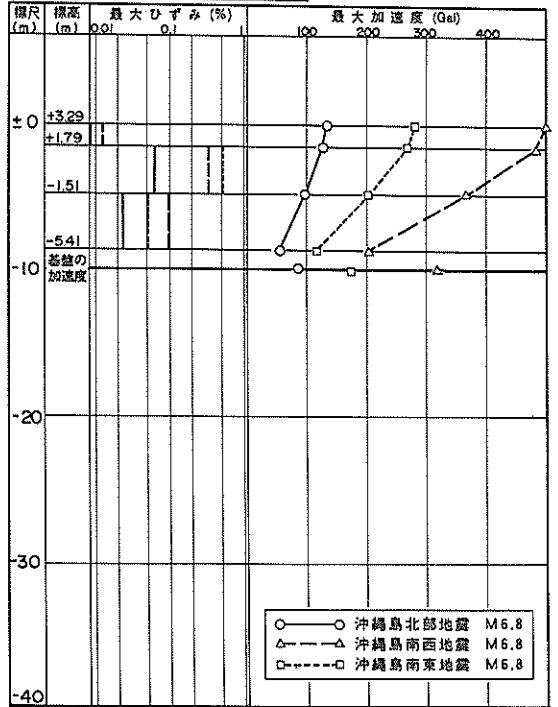
No. 49 地名 那覇港琉球中央倉庫



No. 51 地名 那覇空港
北緯 26°12'01" 東経 127°38'56"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)			γ (t/m³)				
				0	10	20	30	40		50	100	200	300	400	16	18	20
±0	3.29																
	1.79	1.50	レキ混り砂						1.50	89							
	-1.51	3.30	レキ混りシルト	1	1/80				3.30	86					1.6	1.6	1.8
				2	2/40												
				3	2/40												
	4.51	3.00	粘性土	4													
	5.41	0.90	風化腐泥岩	5													
	6.71	1.80	風化泥岩	6					3.90	155					1.6	1.6	2.0
-10				12	30/27												
-20																	
-30																	
-40																	

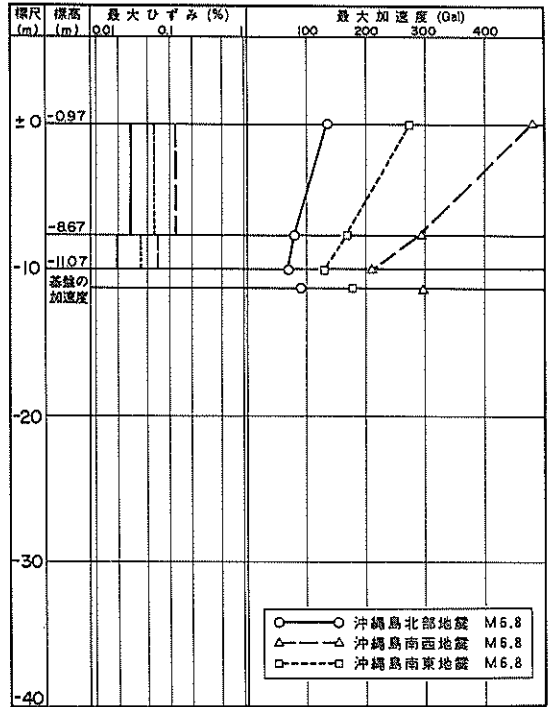
No. 51 地名 那覇空港



No. 52 地名 琉球放送ビル
北緯 26°12'50" 東経 127°40'56"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)			γ (t/m³)				
				0	10	20	30	40		50	100	200	300	400	16	18	20
±0	-0.97																
	-1.97	1.00	埋土														
				1	1/32												
				2													
				3													
				4													
				5													
	-8.67	6.70	粘土	6					7.70	129					1.6	1.6	2.0
				7													
	-11.07	2.40	粘土質シルト	8					2.40	184					1.6	1.6	2.0
-10				9													
				10	50/18												
				11	50/23												
				12	50/19												
				13	50/18												
				14	50/22												
				15	50/11												
				16	50/14												
				17	50/13												
				18	50/14												
				19	50/17												
				20	50/18												
				21	50/22												
				22	50/23												
				23	50/15												
				24	50/17												
				25	50/14												
				26	50/16												
				27	50/20												
				28	50/18												
	28.57	1.760	砂質シルト														
	29.15	0.48	固結粘土														
-30																	
-40																	

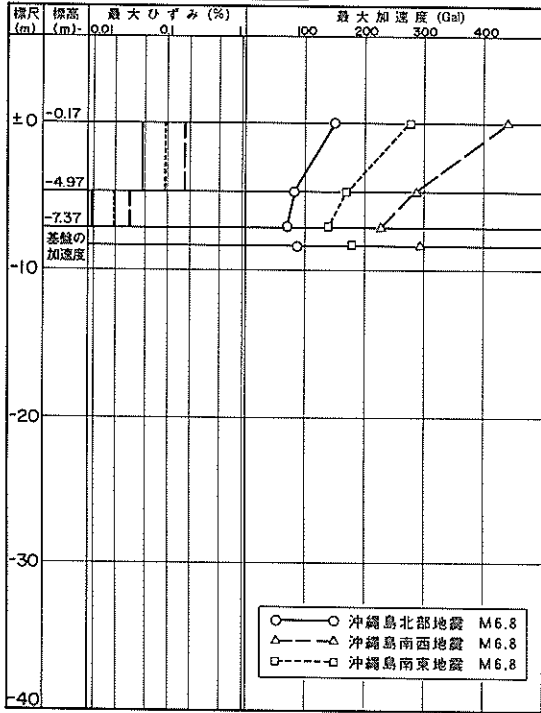
No. 52 地名 琉球放送ビル



No. 53 地名 仲井間ビル
 北緯 26°12'38" 東経 127°41'24"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					平均値	h (m)	Vs (m/sec)			r (t/m ³)		
				0-10	10-20	20-30	30-40	40-50			100	200	300	400	1.5	1.8
±0	-0.17	0.42	0.25	レキ	2	11	22	33	44	480	86	15	1.5			
	-7.37	6.95		粘土	21	33				240	208		1.8			
-10	-10.44	3.07		島尻泥岩										324	2.2	
					50/25											
					50/22											
					50/22											
-20																
-30																
-40																

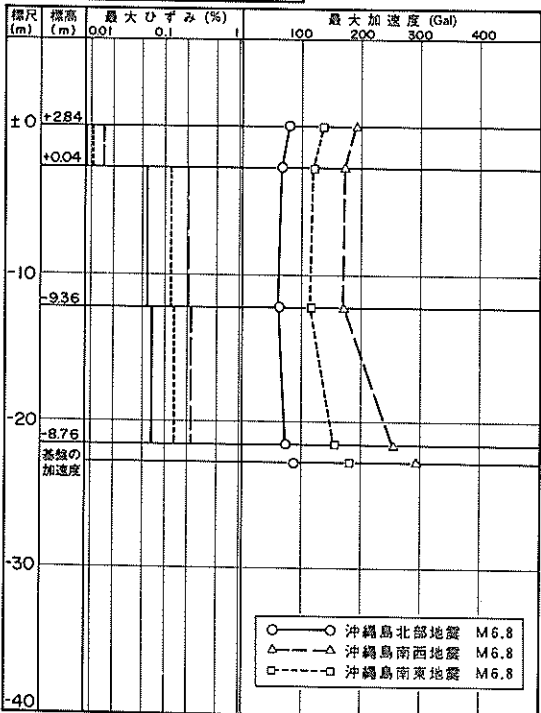
No. 53 地名 仲井間ビル



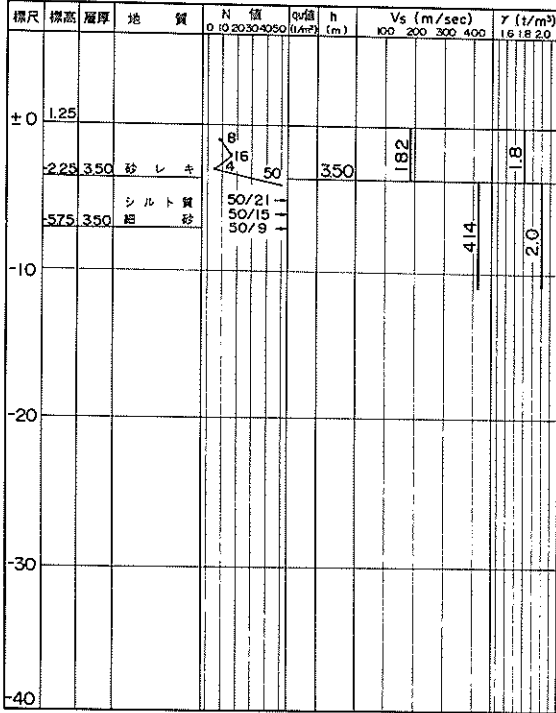
No. 54 地名 国場中継ポン場
 北緯 26°11'30" 東経 127°41'24"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					平均値	h (m)	Vs (m/sec)			r (t/m ³)		
				0-10	10-20	20-30	30-40	40-50			100	200	300	400	1.5	1.8
±0	2.84	1.24	1.60	レキ混り粘土	6	10	12	15	18	280	143		1.6			
	0.04	1.20		粘土質レキ	2	3	5	8	12				1.6			
-10					0	0	0	0	0		86		1.6			
					0	0	0	0	0							
					0	0	0	0	0		940					
					0	0	0	0	0				1.6			
					0	0	0	0	0							
					0	0	0	0	0							
					0	0	0	0	0				1.6			
-20					0	0	0	0	0		86		1.6			
					0	0	0	0	0							
					0	0	0	0	0							
					0	0	0	0	0							
					0	0	0	0	0							
-20	18.76	18.80		シルト質粘土	3	5	8	12	15	940			1.6			
					50/26											
					50/24											
					50/21											
	21.37	2.61		島尻固結粘土												
-30																
-40																

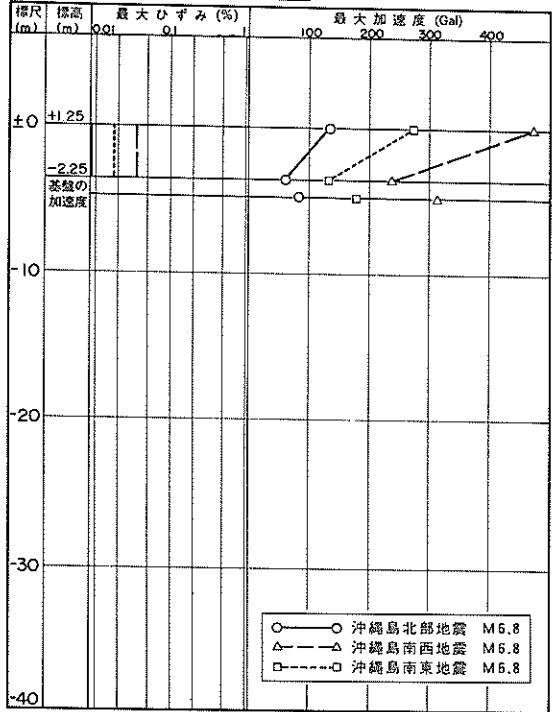
No. 54 地名 国場中継ポン場



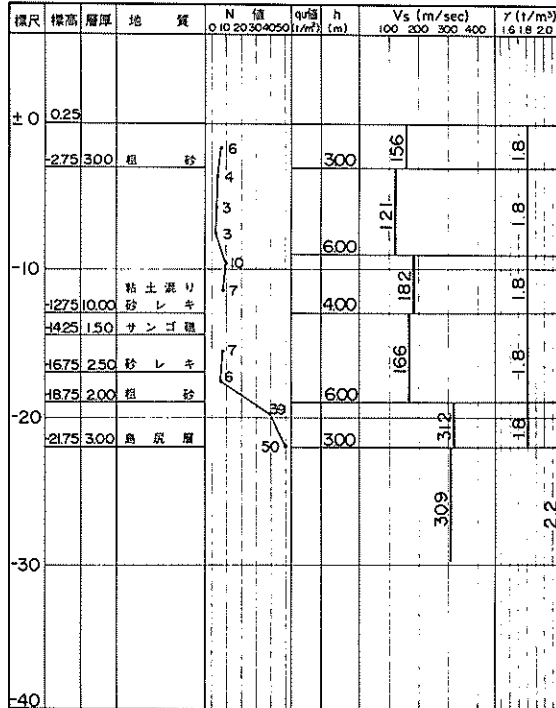
No. 55 地名 与根漁港突堤
 北緯 26°09'50" 東経 127°39'20"



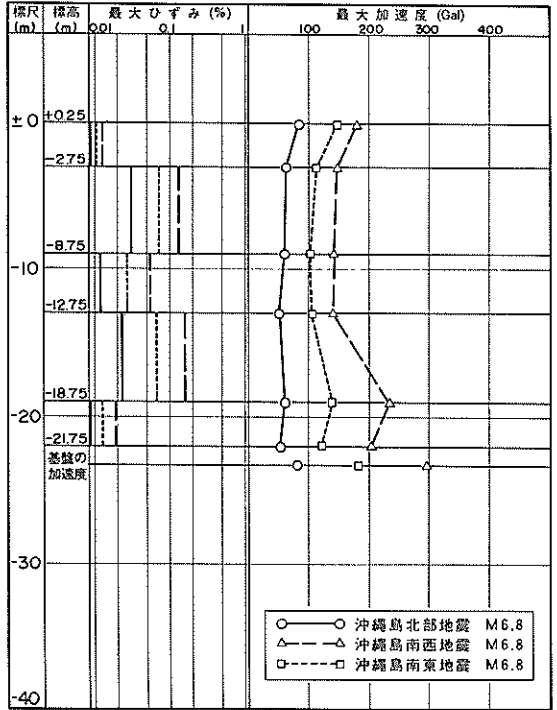
No. 55 地名 与根漁港突堤



No. 56 地名 糸満漁港
 北緯 26°07'53" 東経 127°40'10"



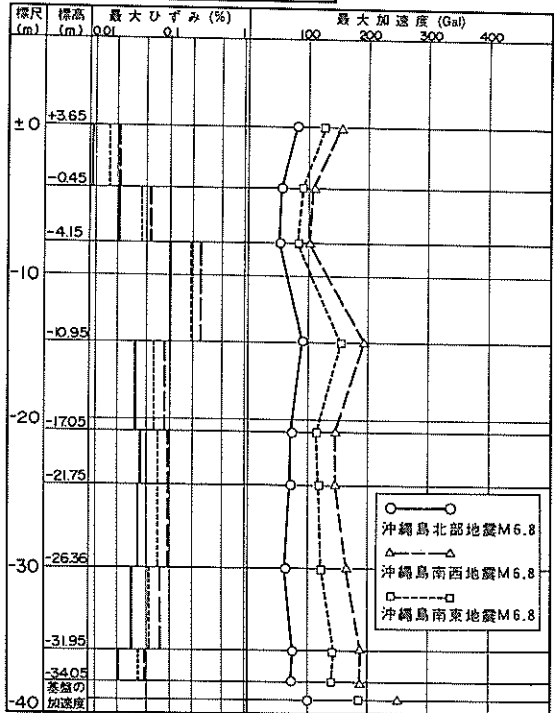
No. 56 地名 糸満漁港



No. 63 地名 南西石油南原製油所
 北緯 26°13'31" 東経 127°47'14"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)					
				0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		100	200	300	400	1.6	1.8	2.0			
±0	3.65																		
	-0.45	4.10	砂レキ	11	2/40				4.10	146									
	-2.05	1.60	レキ混り砂	14	16														
	-4.15	2.10	シルト混り砂レキ	3	2/40				3.70	156									
-10	-8.15	4.00	砂質シルト	11	2/40														
	-10.95	2.80	砂質シルト	11	1/33				6.80	86									
	-12.85	1.90	シルト質砂	3	3/35														
-20	-17.05	4.20	砂質シルト	8	2	3	4												
	-21.75	4.70	シルト質土	3	3	4	3		4.70	143									
-30	-31.95	10.20	砂質シルト	3	3	5	4		4.60	155									
	-34.05	2.10	粘土	3	3	3	3												
-40	-35.05	1.58	固結粘土	5	10	5	13		2.10	176									
				30/14	50/18														

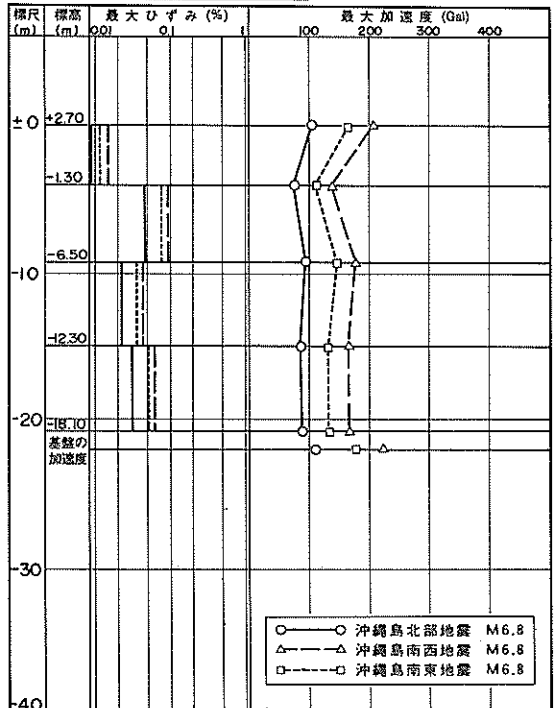
No. 63 地名 南西石油南原製油所



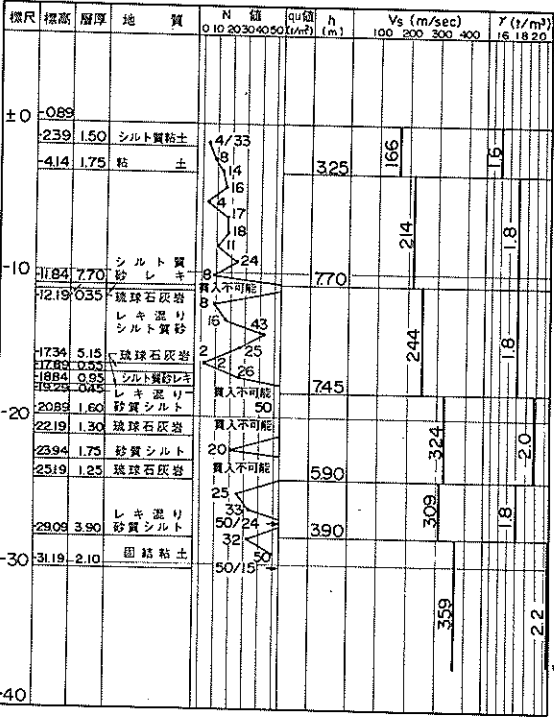
No. 64 地名 泡瀬漁港
 北緯 26°9'10" 東経 127°50'11"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)					
				0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		100	200	300	400	1.6	1.8	2.0			
±0	2.70																		
	-1.20	1.50	レキ	10	7				4.00	182									
	-1.30	2.50	細砂	2	2														
	-3.90	2.90	粘土	2	2				5.20	111									
-10				3	3														
				4	4				5.80	166									
				5	5														
-20	-18.10	4.30	粘土	6	6				5.80	166									
	-21.30	3.20	固結粘土	10	10														
-30				60															
-40				54															

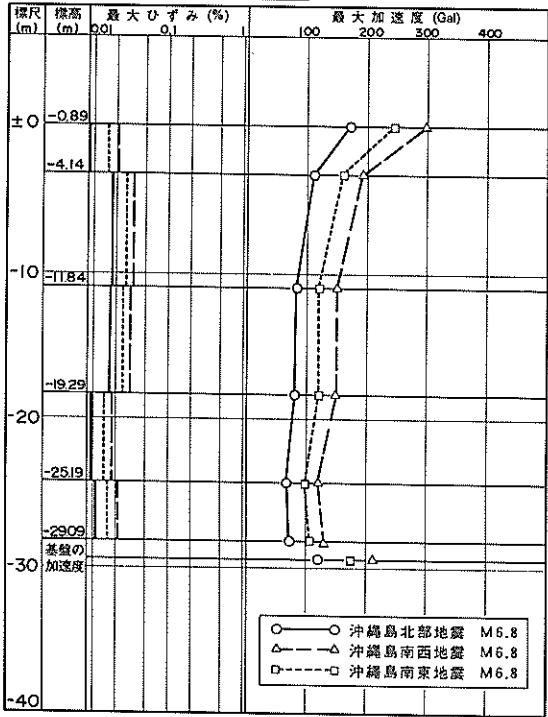
No. 64 地名 泡瀬漁港



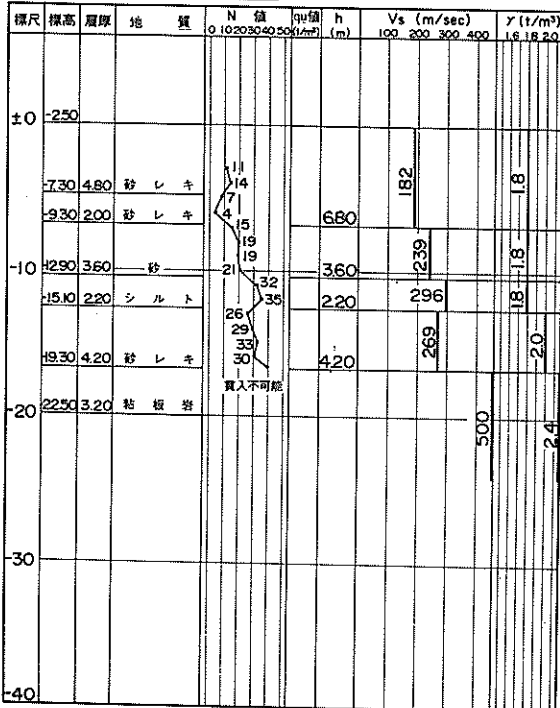
No. 69 地名 具志川中学校
 北緯 26°21'23" 東経 127°51'13"



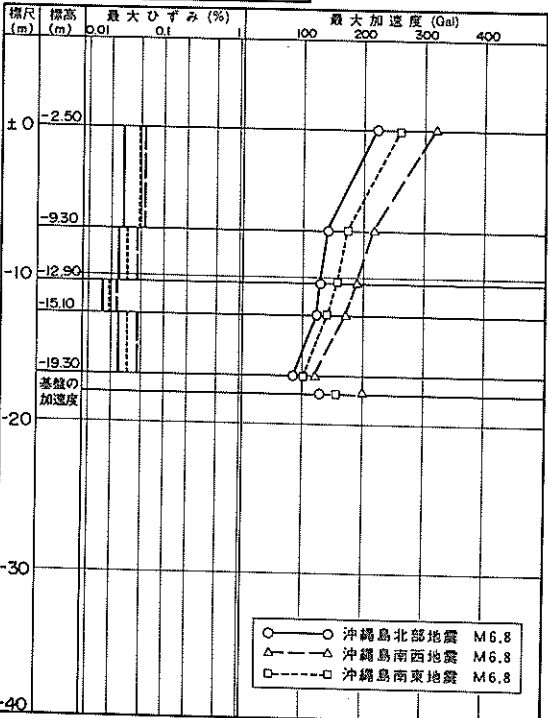
No. 69 地名 具志川中学校



No. 70 地名 沖縄アルミ工場
 北緯 26°26'55" 東経 127°52'12"



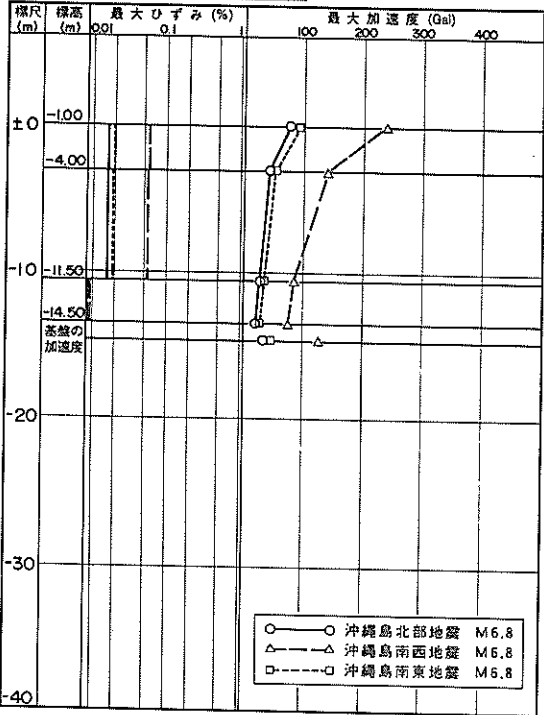
No. 70 地名 沖縄アルミ工場



No. 73 地名 島島漁港
北緯 26°35'26" 東経 126°49'50"

標尺	標高	層厚	地質	N値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)
				0	10	20	30	40		100	200	300	400	
±0	-1.00	2.30	1.30	砂質粘土	17/60					300	86		1.6	
					1/80									
					3/40									
					3/45									
					3/40									
-10	-10.20	7.90		粘土	4				750	129		1.6		
	-11.50	1.30		砂質粘土	23	29	41							
				粘土混り砂レキ	23	29	41		300	272		2.0		
	-15.35	3.85			50					324		2.0		
-20														
-30														
-40														

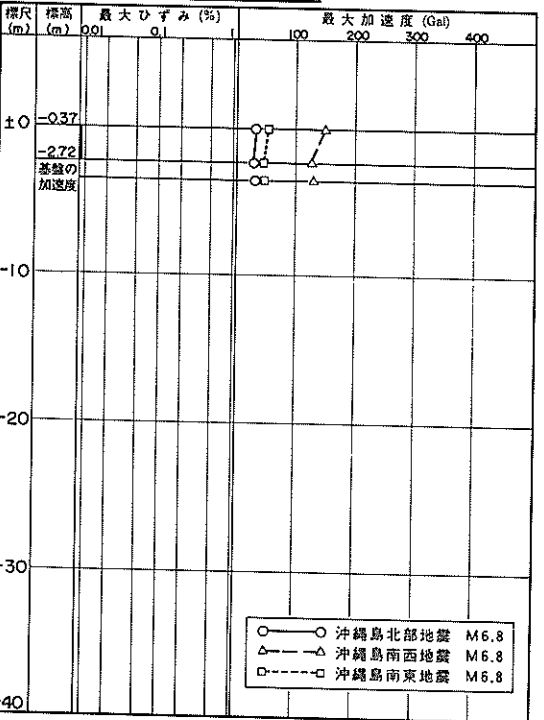
No. 73 地名 島島漁港



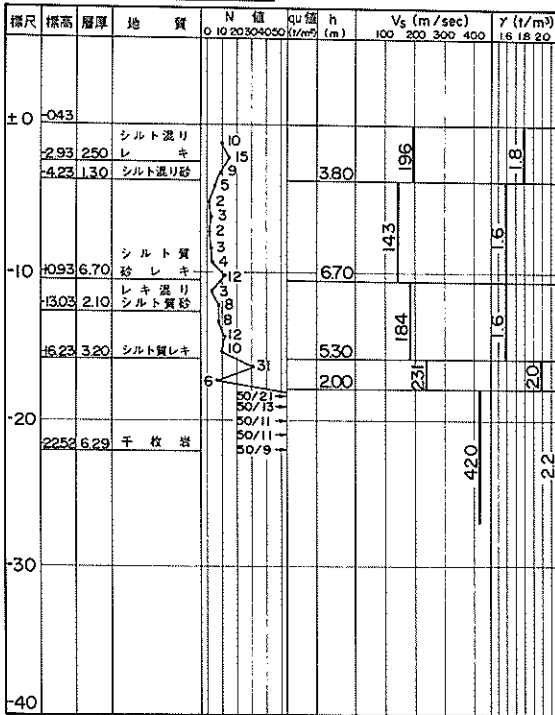
No. 74 地名 久米島電報電話局附属舎
北緯 26°20'27" 東経 126°45'07"

標尺	標高	層厚	地質	N値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)
				0	10	20	30	40		100	200	300	400	
±0	-0.37	2.72	2.35	レキ混り砂	19/20					2.35	225		1.8	
					7									
					25/23									
					50/21									
					50/3									
					買入不可能									
					50/6									
					50/3									
-10	-7.40	3.88		安山岩								500	2.4	
-20														
-30														
-40														

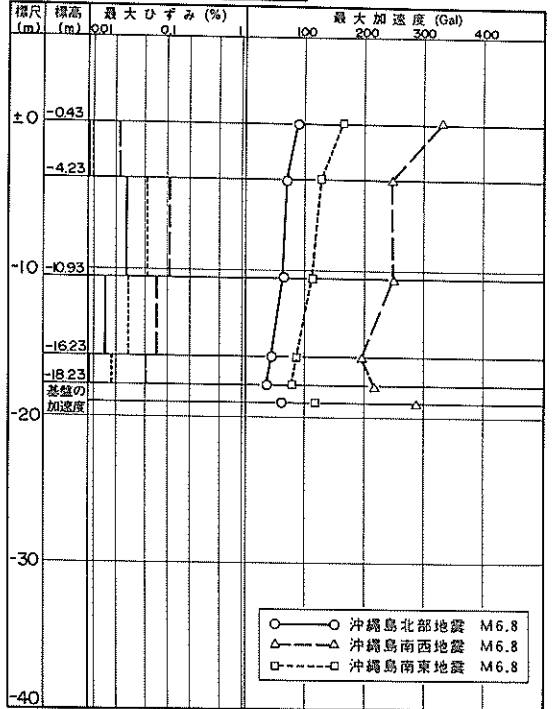
No. 74 地名 久米島電報電話局附属舎



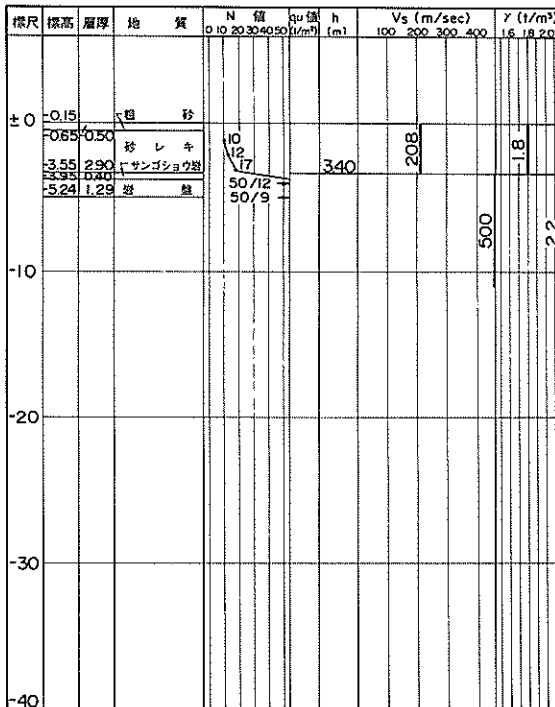
No. 75 地名 座間味電話局
北緯 26°13'31" 東経 127°18'09"



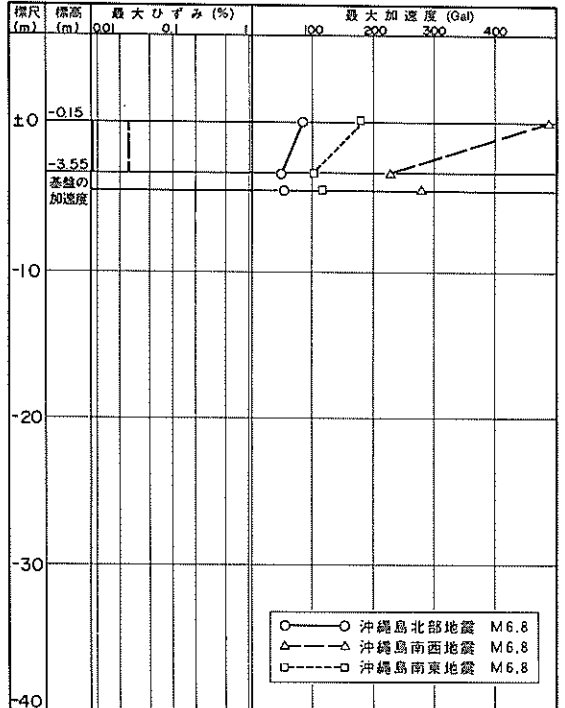
No. 75 地名 座間味電話局



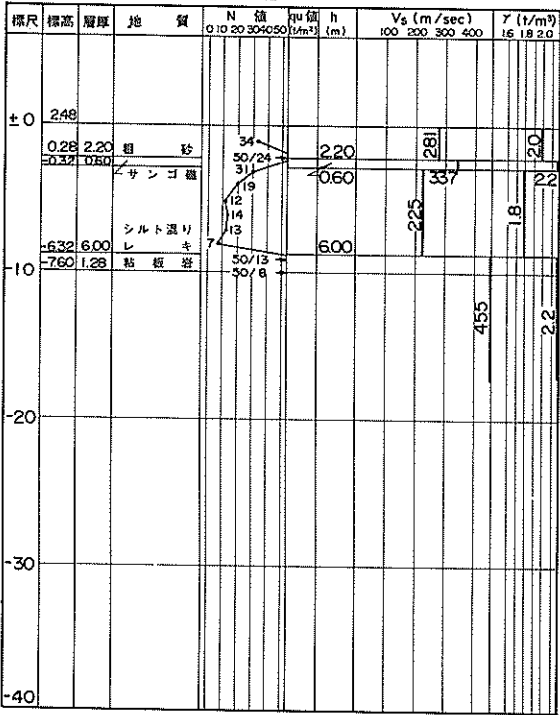
No. 76 地名 阿嘉漁港
北緯 26°11'04" 東経 127°16'55"



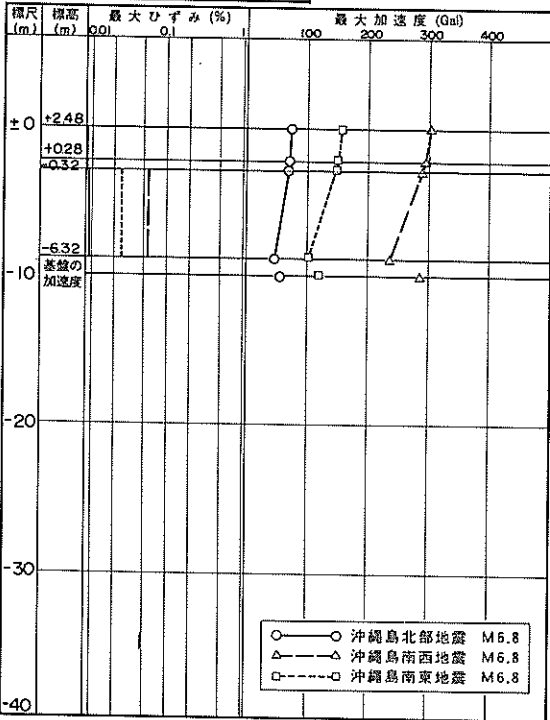
No. 76 地名 阿嘉漁港



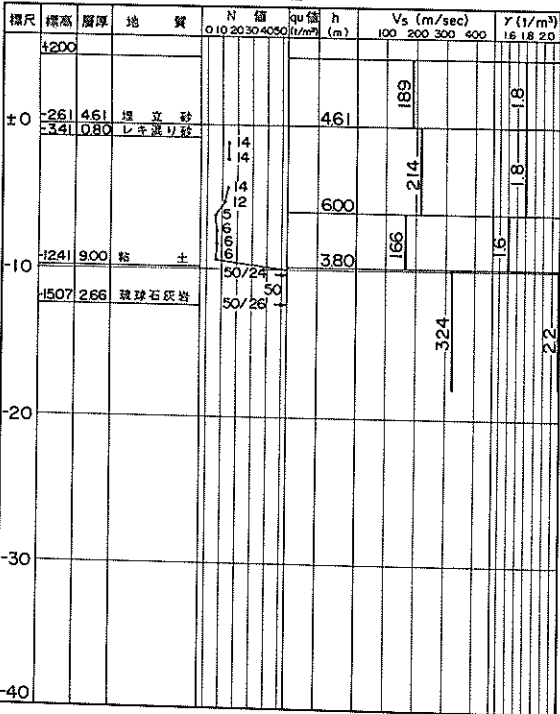
No. 77 地名 摩留間港護岸
 北緯 26°10'20" 東経 127°17'39"



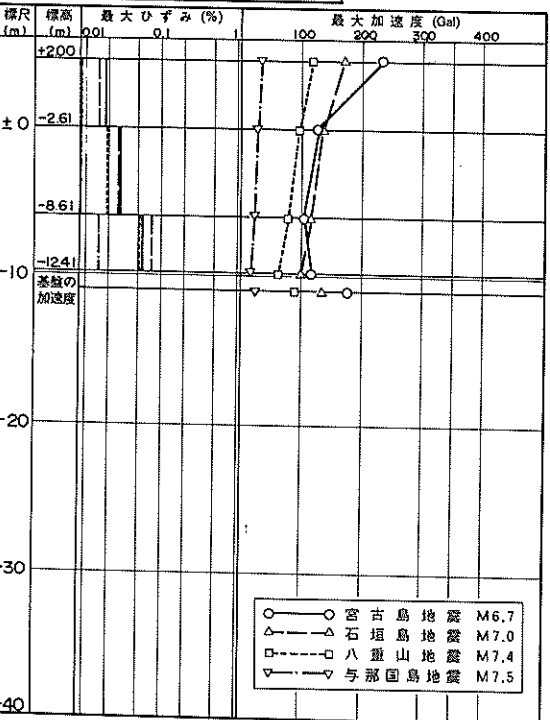
No. 77 地名 摩留間港護岸



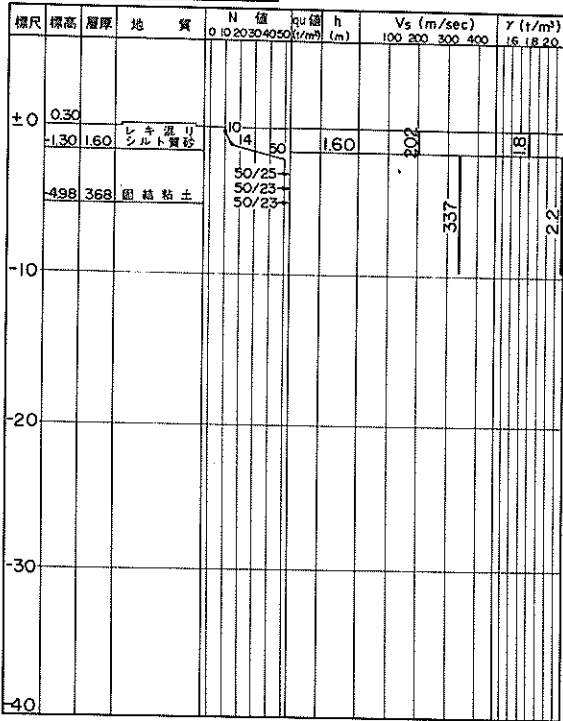
No. 78 地名 池間漁港-4.5m岸壁
 北緯 24°55'17" 東経 125°15'07"



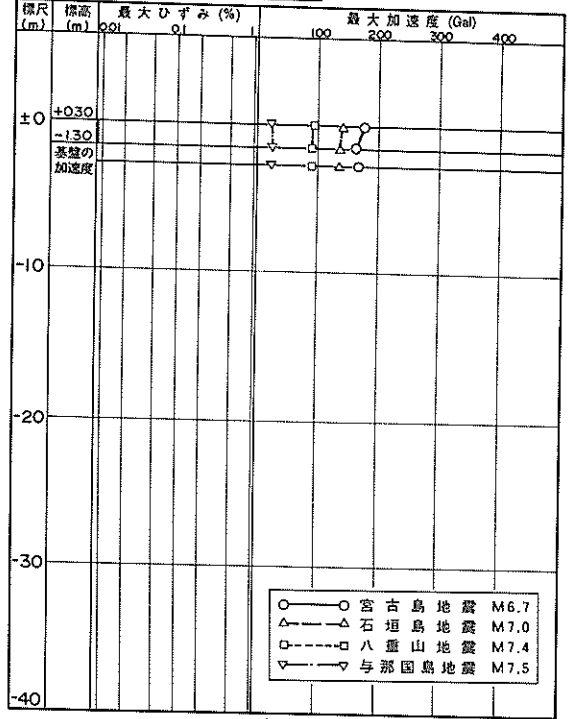
No. 78 地名 池間漁港-4.5m岸壁



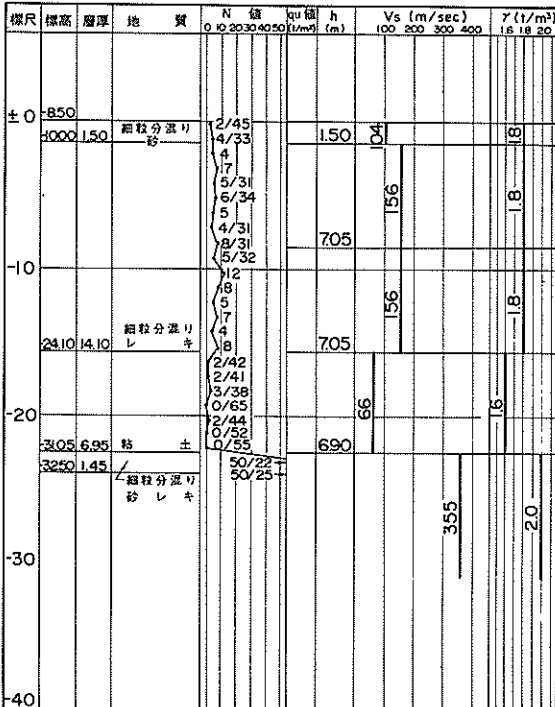
No. 79 地名 島尻漁港
 北緯 24°52'25" 東経 125°17'55"



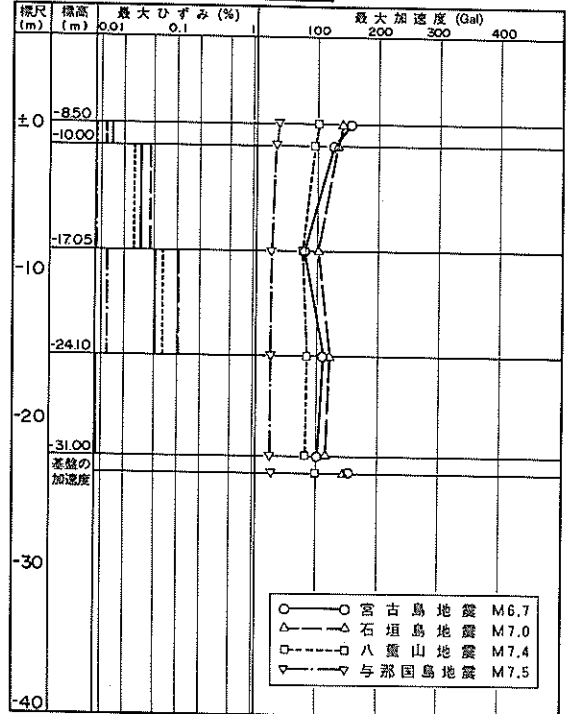
No. 79 地名 島尻漁港



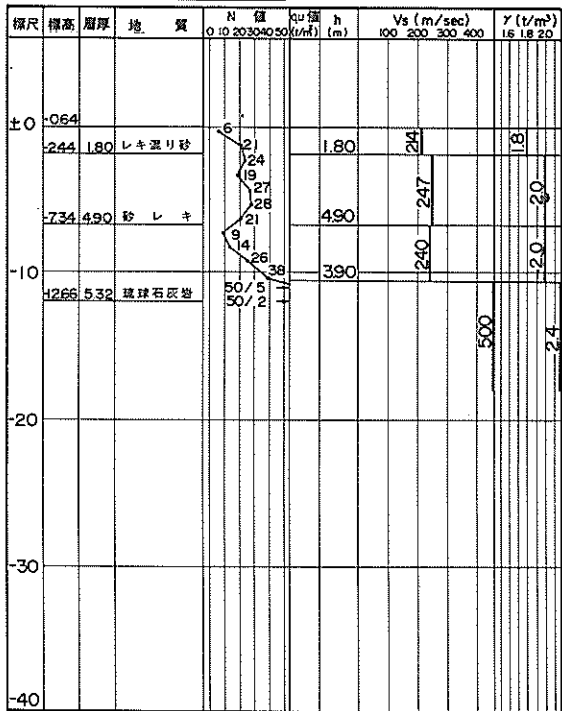
No. 80 地名 平良港北防波堤
 北緯 24°48'36" 東経 125°16'27"



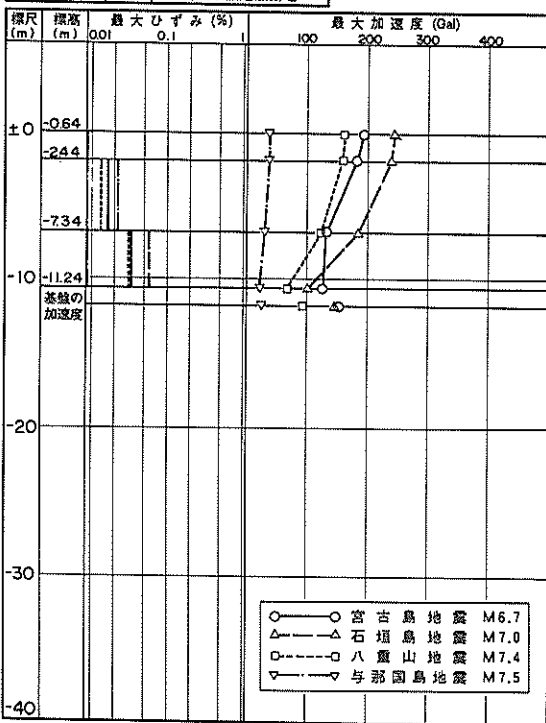
No. 80 地名 平良港北防波堤



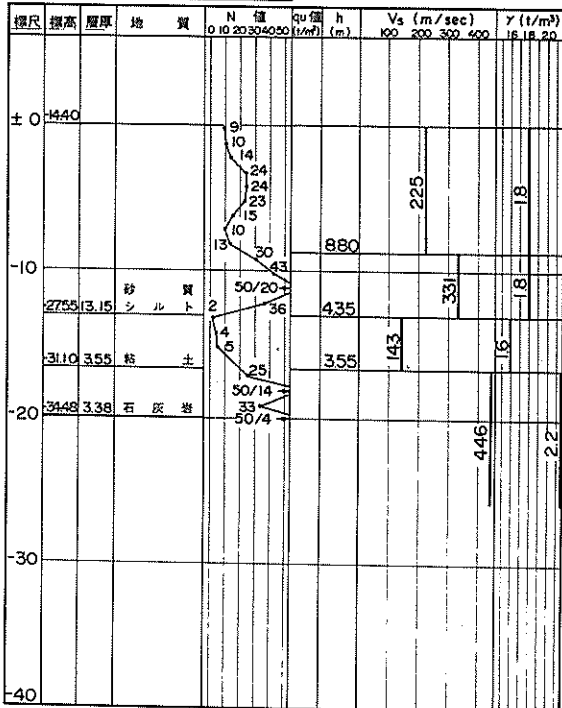
No. 81 地名 荷川取漁港船揚場
 北緯 24°48'35" 東経 125°16'52"



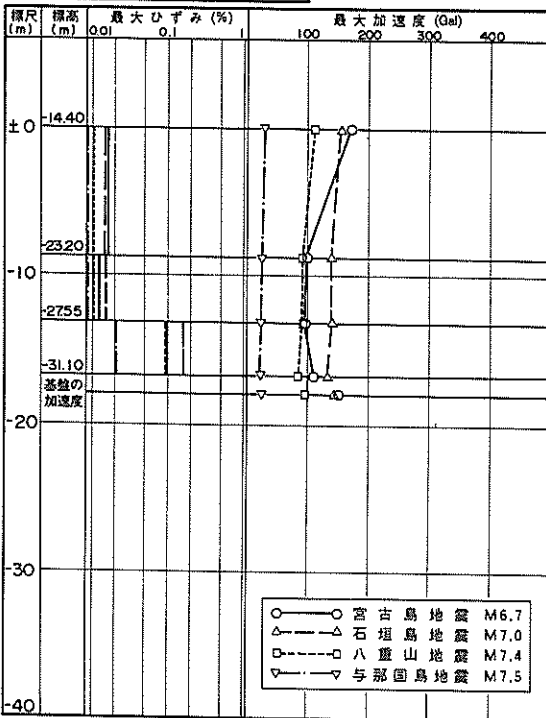
No. 81 地名 荷川取漁港船揚場



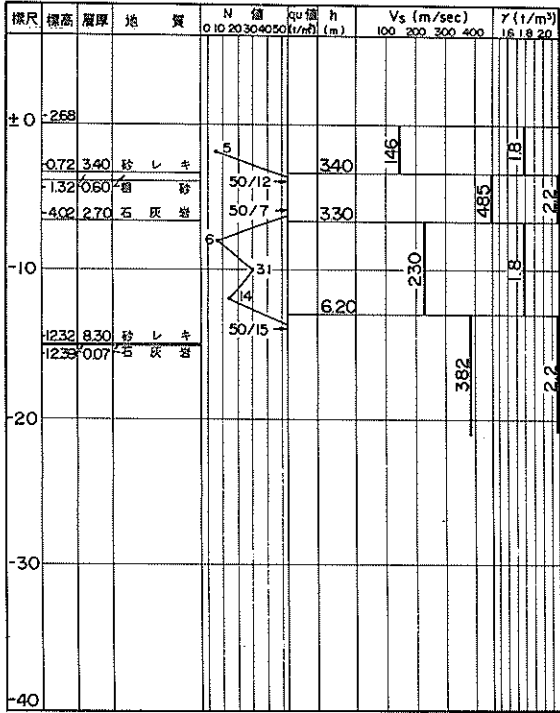
No. 82 地名 平良港南防波堤
 北緯 24°48'17" 東経 125°16'00"



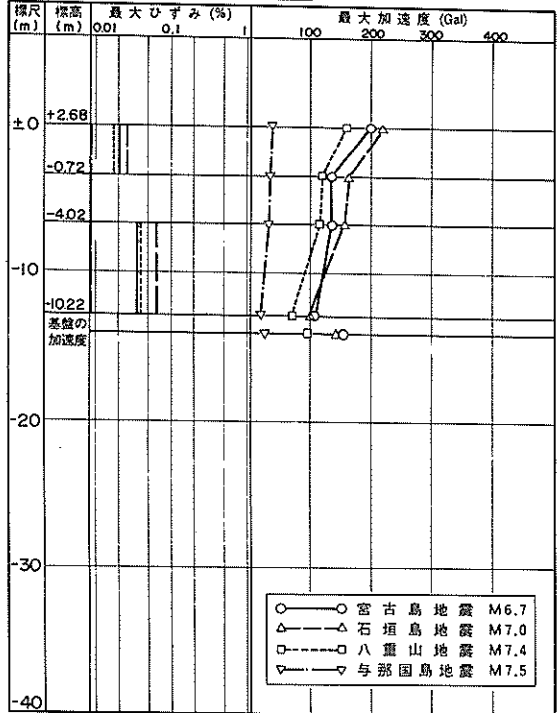
No. 82 地名 平良港南防波堤



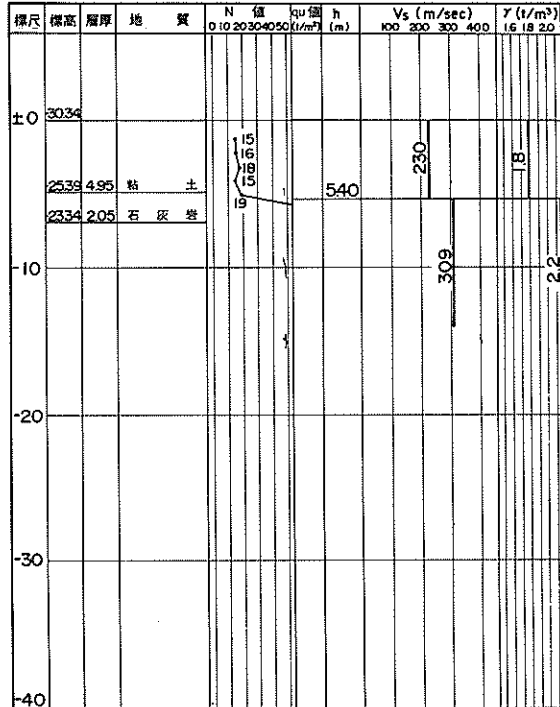
No. 83 地名 平良-S
 北緯 24°48'13" 東経 125°16'49"



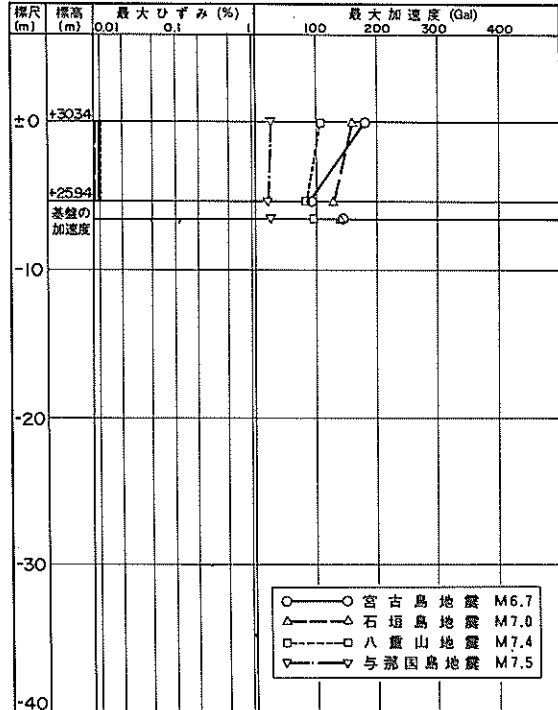
No. 83 地名 平良-S



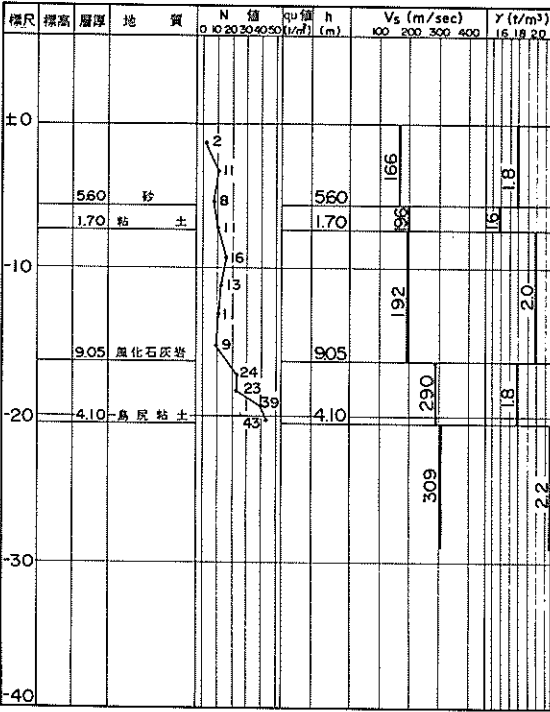
No. 84 地名 宮古空港
 北緯 24°46'49" 東経 125°17'44"



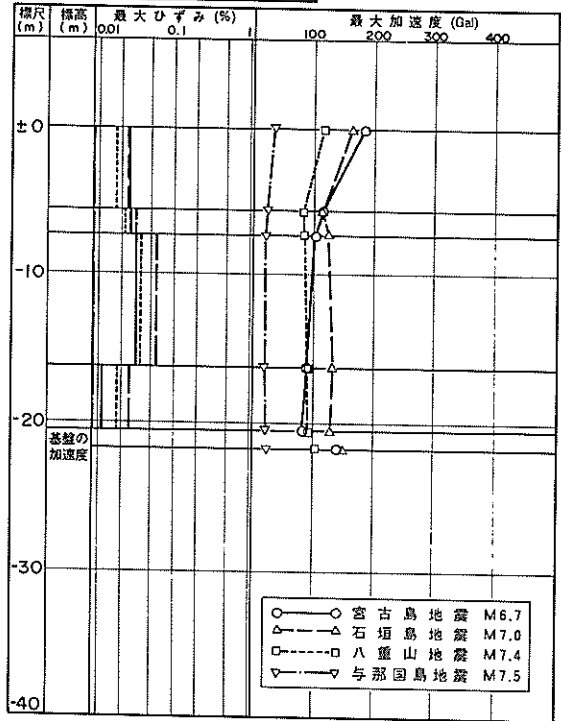
No. 84 地名 宮古空港



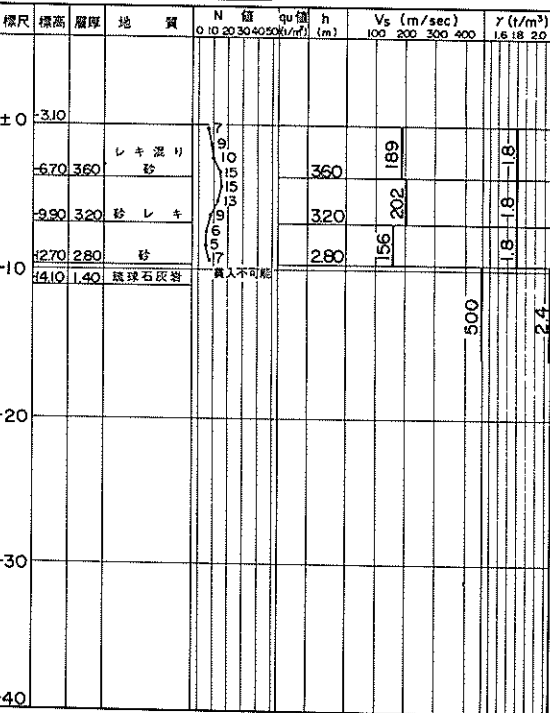
No. 85 地名 与那覇湾
 北緯 24°45'44" 東経 125°15'42"



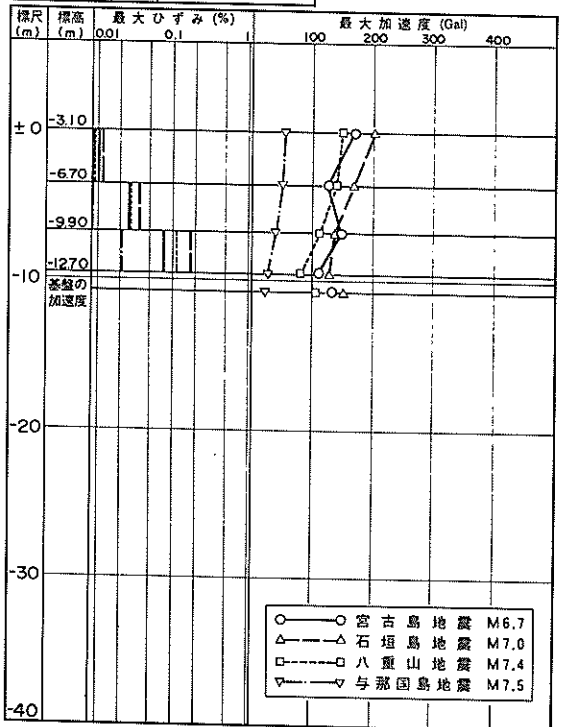
No. 85 地名 与那覇湾



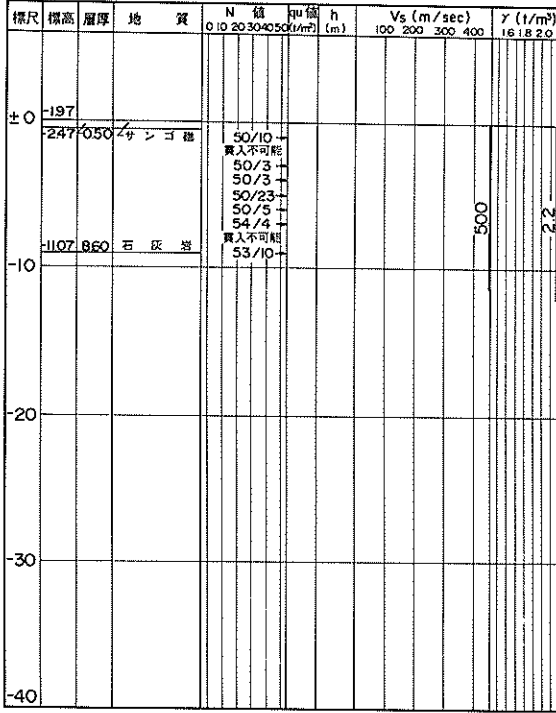
No. 86 地名 来間前浜港防波堤
 北緯 24°43'15" 東経 125°15'21"



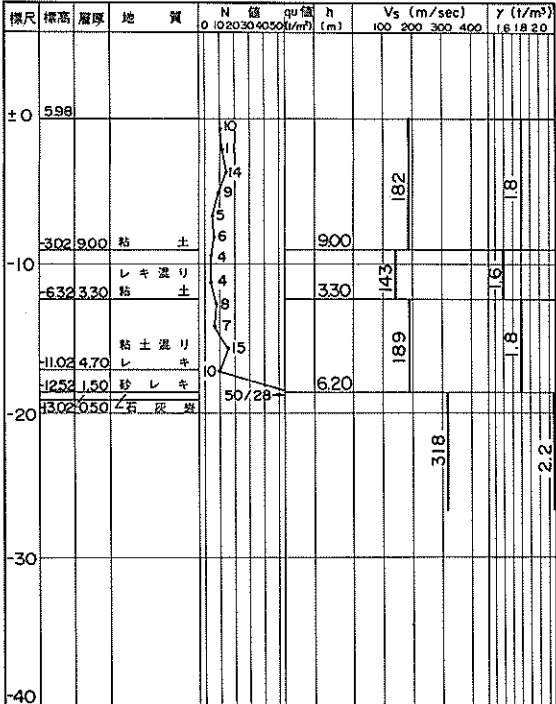
No. 86 地名 来間前浜港防波堤



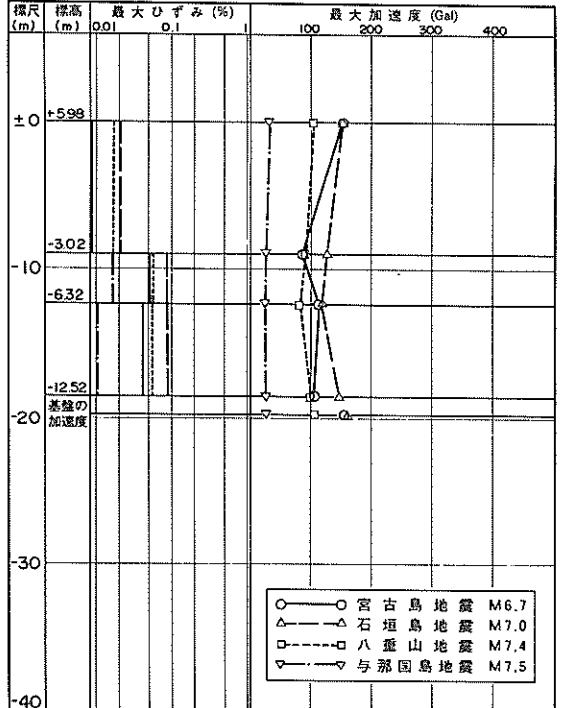
No. 87 地名 佐良浜漁港防波堤
 北緯 24°50'19" 東経 125°12'50"



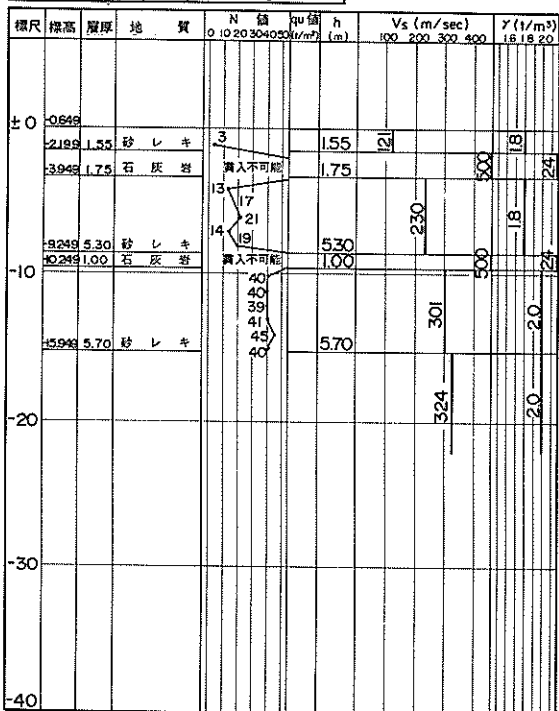
No. 88 地名 下地島空港管理棟
 北緯 24°49'15" 東経 125°08'44"



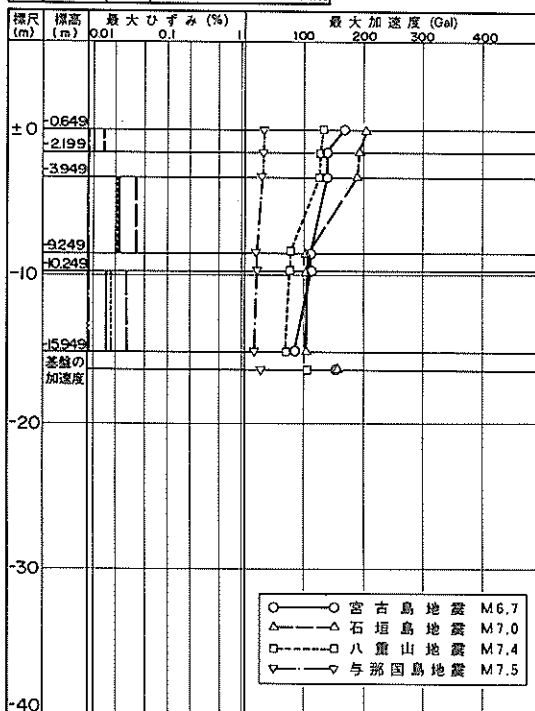
No. 88 地名 下地島空港管理棟



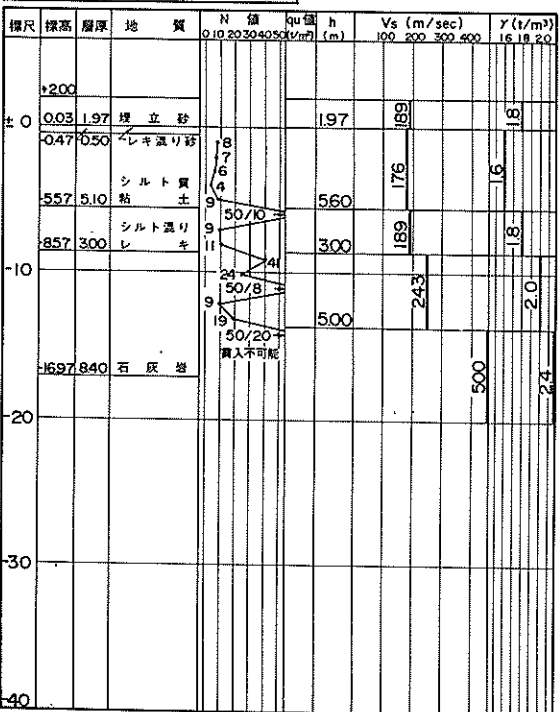
No. 89 地名 国仲～佐良浜港線道路橋梁
 北緯 24°49' 0" 東経 125°10' 08"



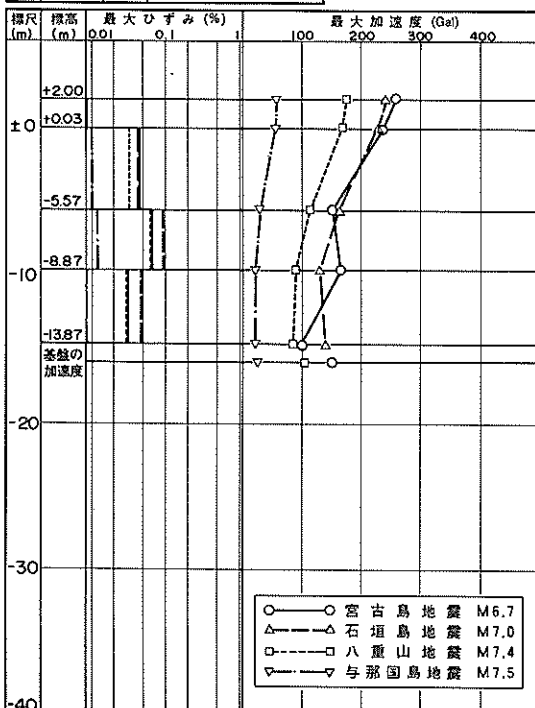
No. 89 地名 国仲～佐良浜港線道路橋梁



No. 90 地名 長山港～3.0m物揚場
 北緯 24°48' 11" 東経 125°11' 34"



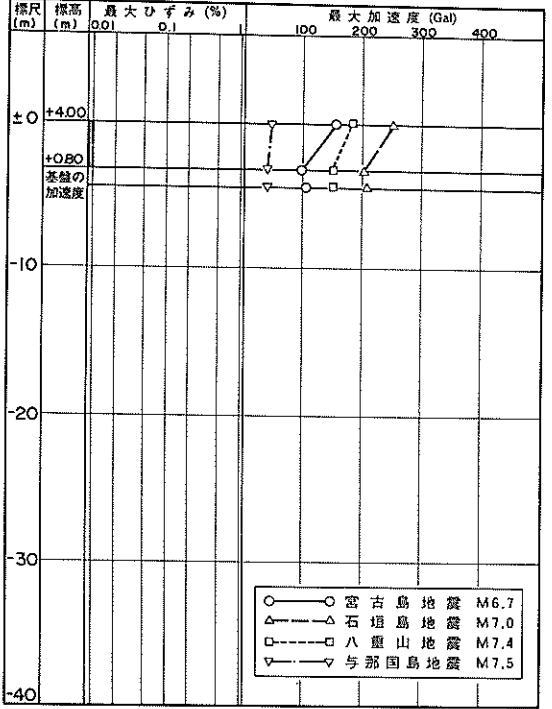
No. 90 地名 長山港～3.0m物揚場



No. 91 地名 水納港
 北緯 24°44'32" 東経 124°41'51"

標尺	標高	層厚	地質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)							
				0	10	20	30		40	50	100	200	300	400	16	18	20			
±0	4.00	0.80	3.20	砂	15	14	15	3.20	219	18										
		1.00	1.80	サンゴ礁岩	貫入不可能								500							24

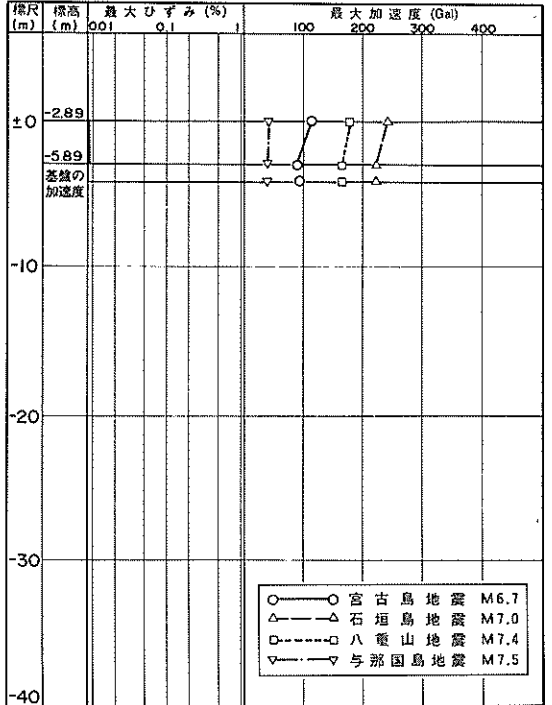
No. 91 地名 水納港



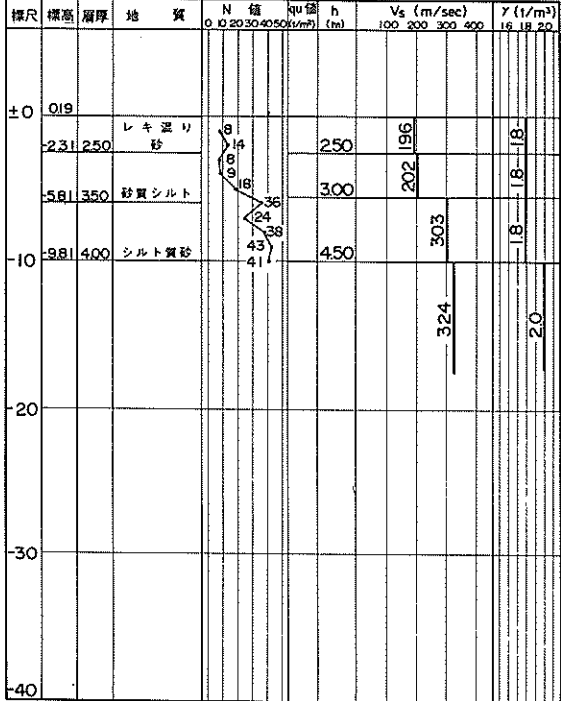
No. 92 地名 普天間港
 北緯 24°38'24" 東経 124°43'22"

標尺	標高	層厚	地質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)							
				0	10	20	30		40	50	100	200	300	400	16	18	20			
±0	-2.89	5.89	3.00	砂	レ	キ	12	23	3.00	234	18									
		5.89	1.00	石灰岩	50/3								500							24

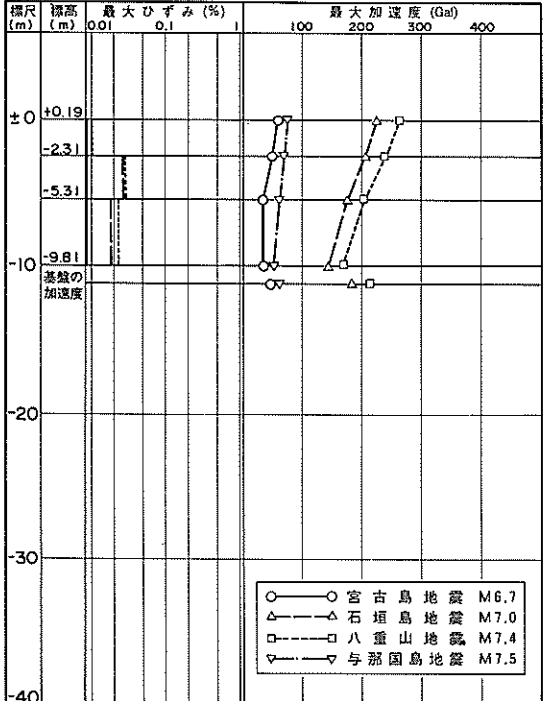
No. 92 地名 普天間港



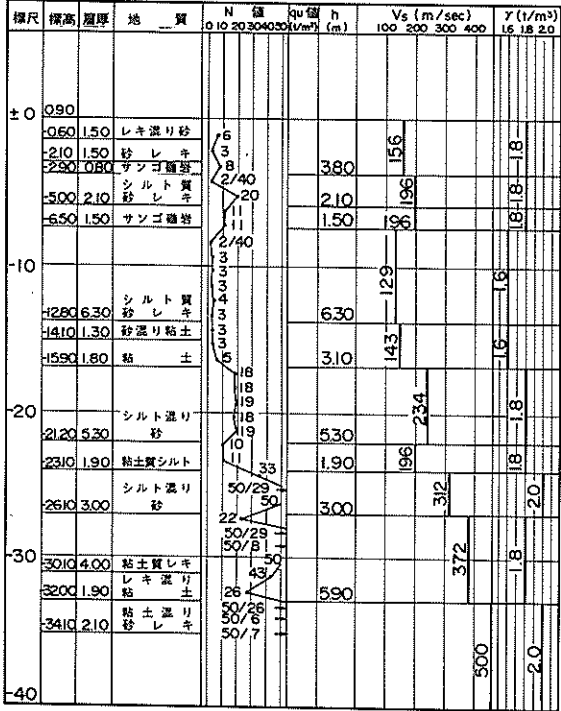
No. 93 地名 舟越漁港
 北緯 24°30'13" 東経 124°16'38"



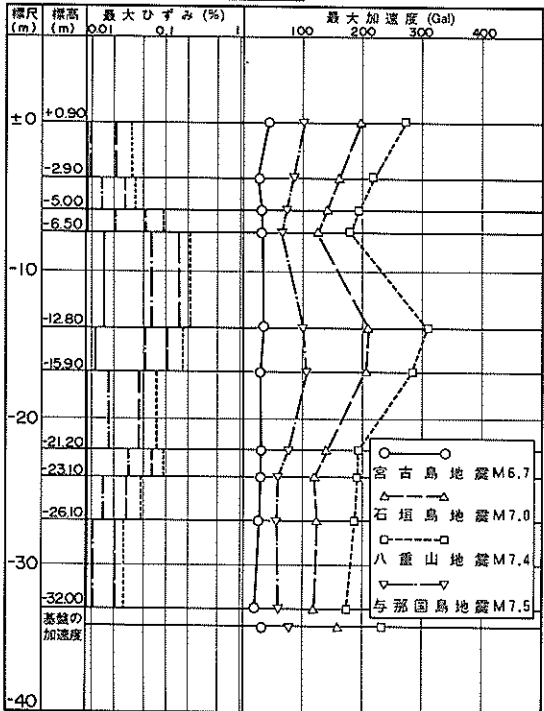
No. 93 地名 舟越漁港



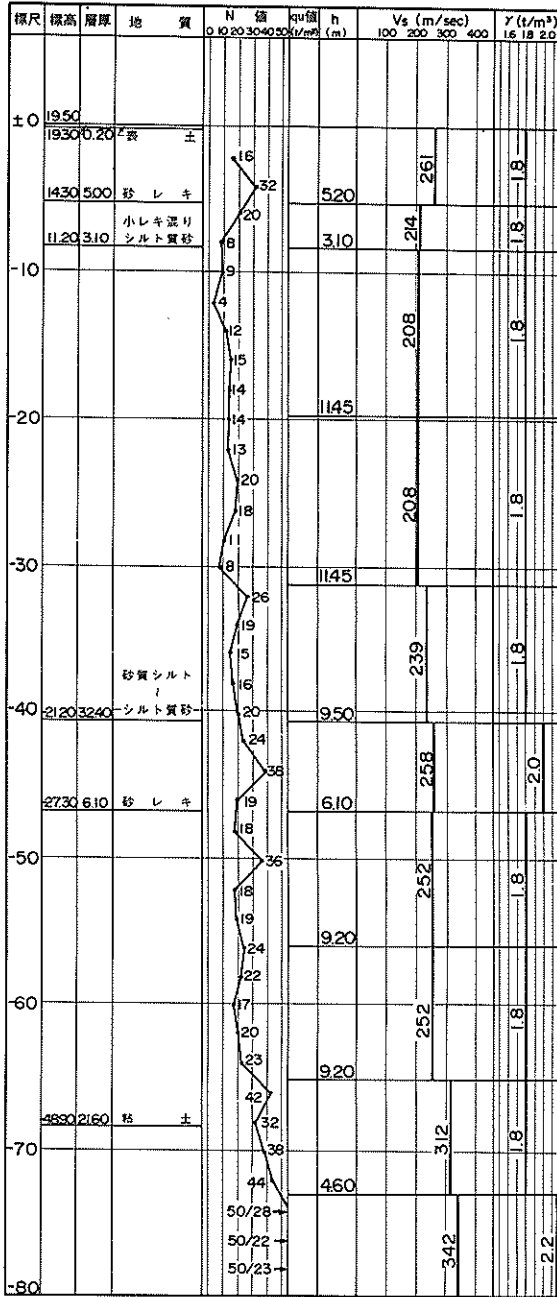
No. 95 地名 名蔵大橋
 北緯 24°23'45" 東経 124°08'20"



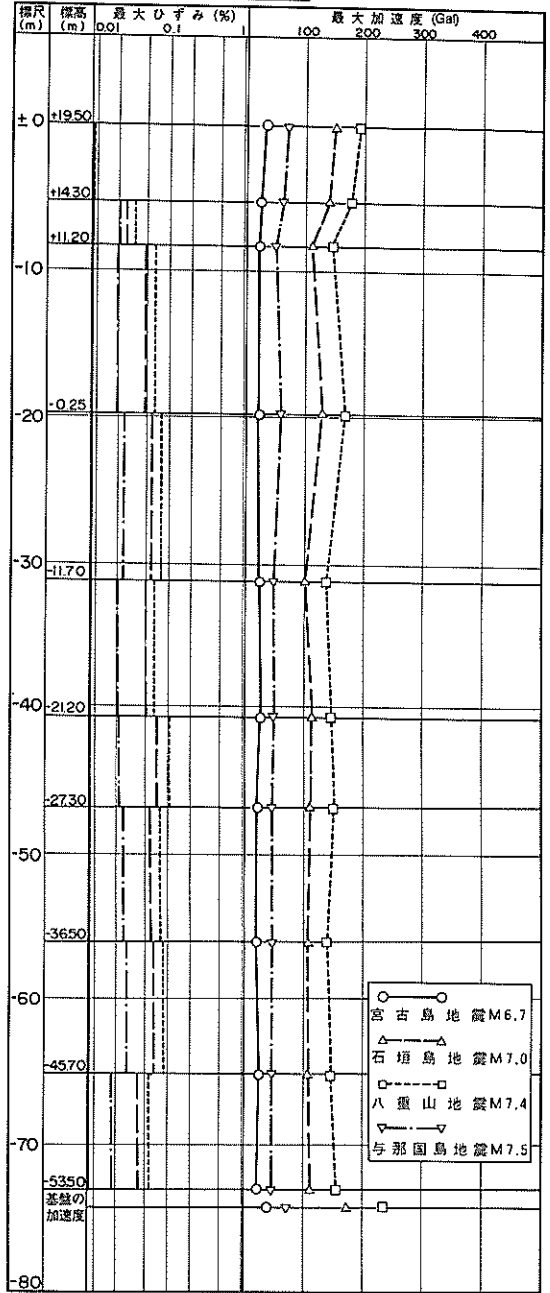
No. 95 地名 名蔵大橋



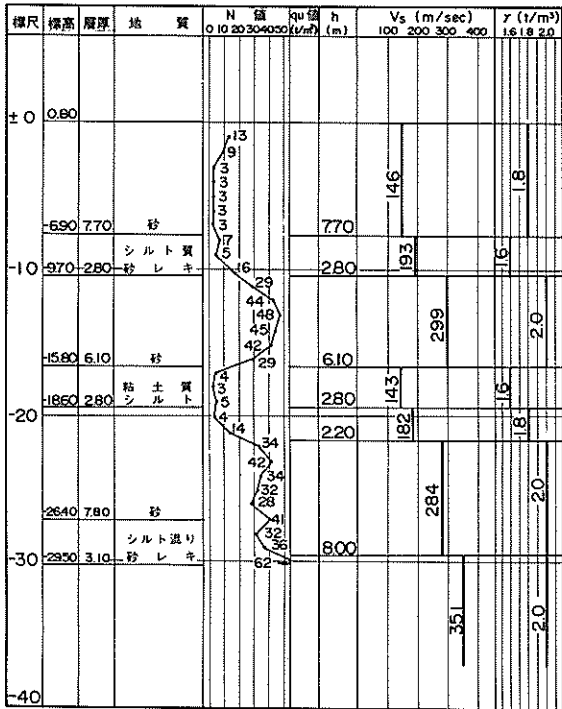
No. 94 地名 底原ダム
 北緯 24°24'48" 東経 124°12'54"



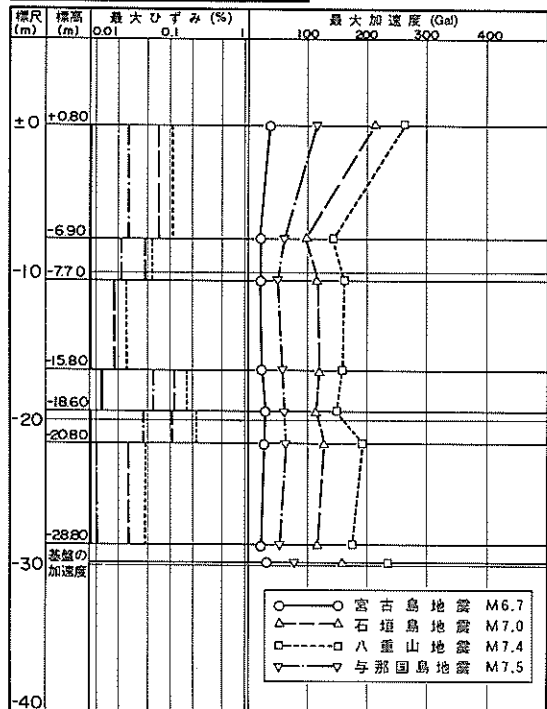
No. 94 地名 底原ダム



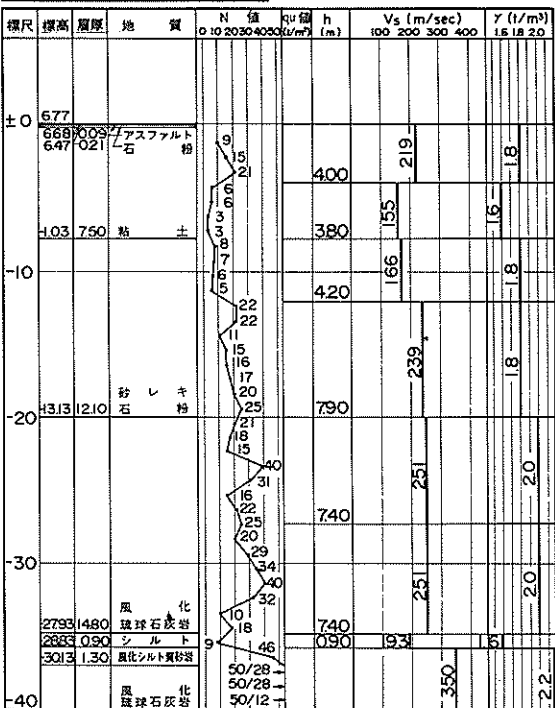
No. 96 地名 神田橋
北緯 24°23'49" 東経 124°08'52"



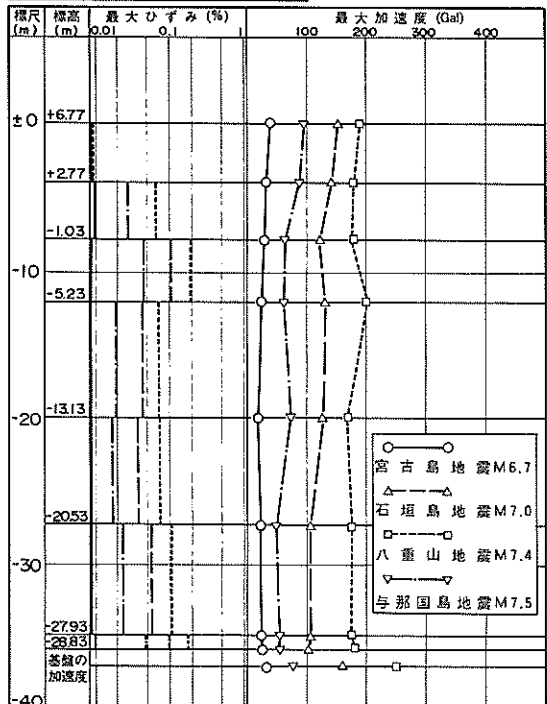
No. 96 地名 神田橋



No. 97 地名 なたつ橋
北緯 24°20'57" 東経 124°08'41"



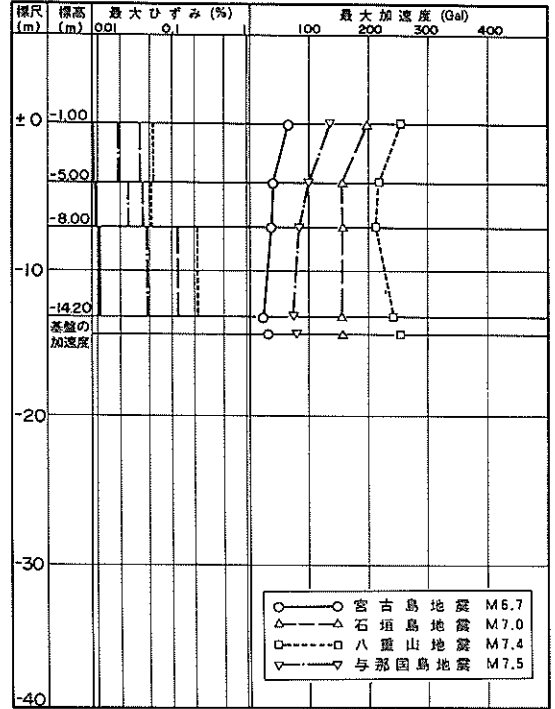
No. 97 地名 なたつ橋



No. 98 地名 石垣漁港
北緯 24°20'29" 東経 124°08'45"

標尺	標高	層厚	地質	N値					h	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)				
				0	10	20	30	40		50	100	200	300	400	16	18	20	
±0	-1.00																	
	-5.00	4.00	砂							4.00	135							1.8
	-8.00	3.00	シルト質砂							3.00	176							1.6
	-14.20	6.20	シルト混り砂							6.20	174							1.8
	-17.50	3.30	石灰岩										500					2.4
				貫入不可能														

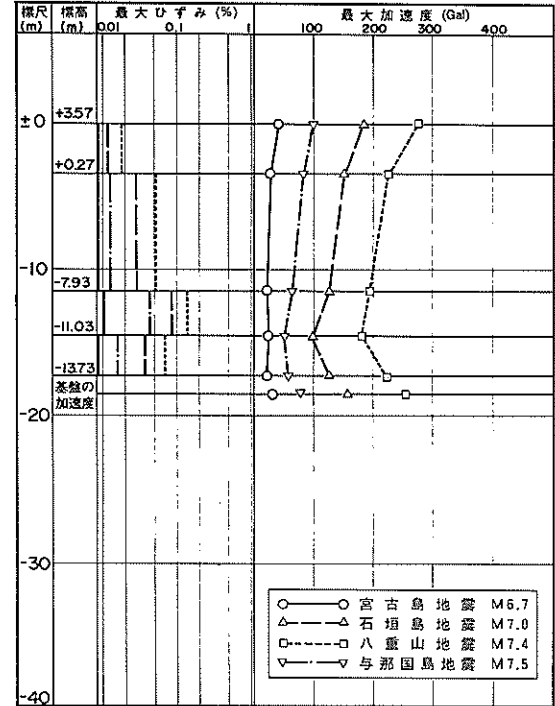
No. 98 地名 石垣漁港



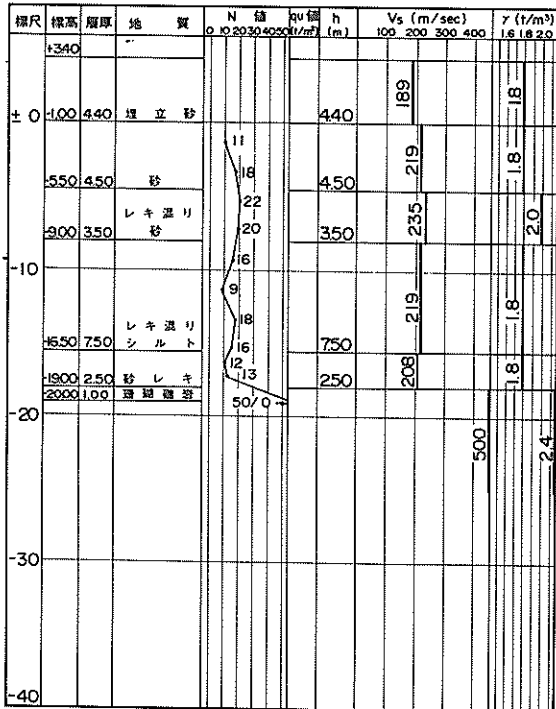
No. 99 地名 石垣-S
北緯 24°19'56" 東経 124°09'20"

標尺	標高	層厚	地質	N値					h	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)						
				0	10	20	30	40		50	100	200	300	400	16	18	20			
±0	3.57																			
	3.42	0.15	砂																	
	0.27	3.15	埋土																	
	-1.63	1.90	シルト混り砂																	
	-7.93	6.30	砂																	
	-11.03	3.10	シルト質砂																	
	-12.03	1.00	サンゴ岩																	
	-13.73	1.70	シルト混り砂																	
	-16.11	2.38	琉球石灰岩																	
														309					2.2	

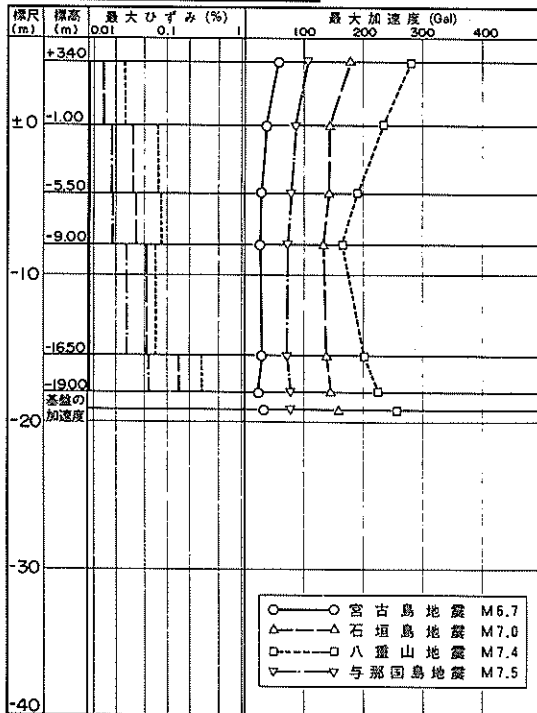
No. 99 地名 石垣-S



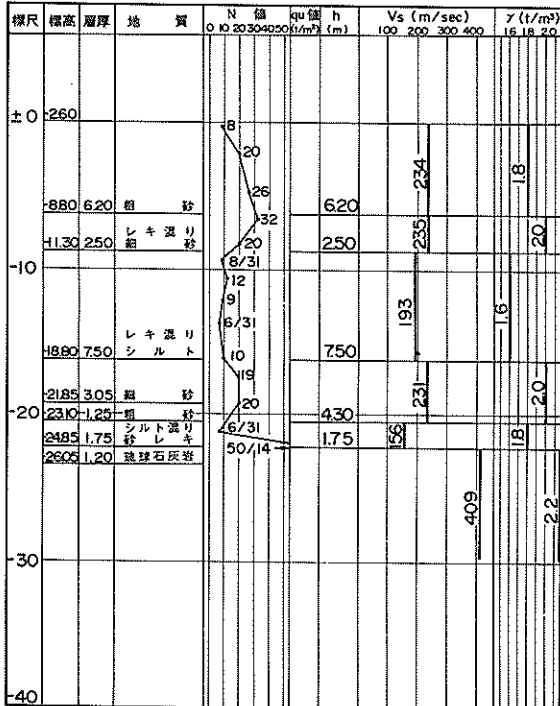
No. 100 地名 石垣港-7.5m岸壁
 北緯 24°20'03" 東経 124°08'59"



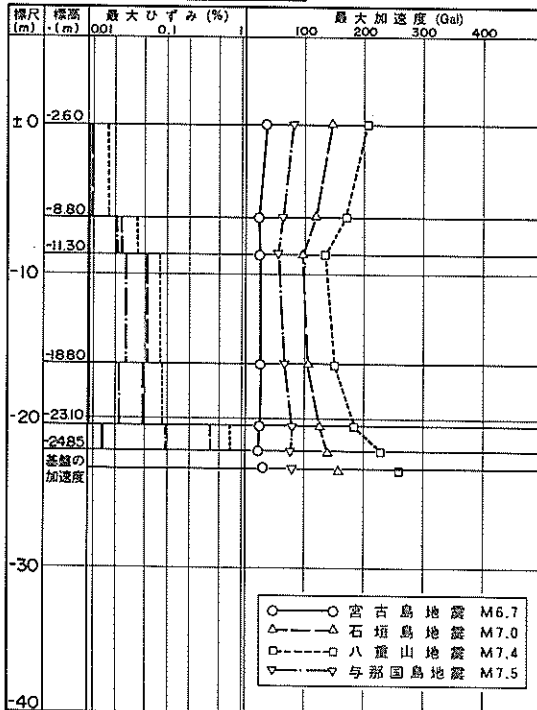
No. 100 地名 石垣港-7.5m岸壁



No. 101 地名 石垣港南防波堤
 北緯 24°19'31" 東経 124°08'51"



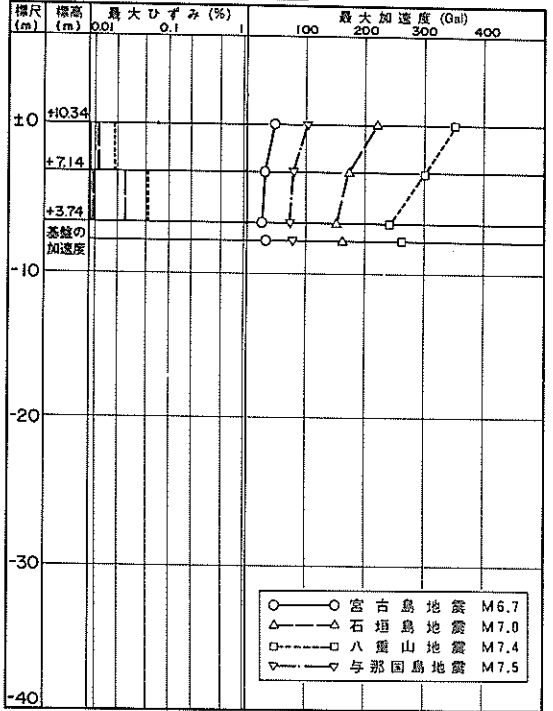
No. 101 地名 石垣港南防波堤



No. 102 地名 八重山病院
 北緯 24°19'47" 東経 124°10'26"

標尺	標高	層厚	地質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)
				0	10	20	30		100	200	300	400	
±0	1034												
	7.14	3.20	粘 土	19	17	17	320	184		1.5			
	2.14	5.00	砂 レキ	21	17	50/20	340	219		1.8			
-10						50/20				2.0			
-20											376		
-30													
-40													

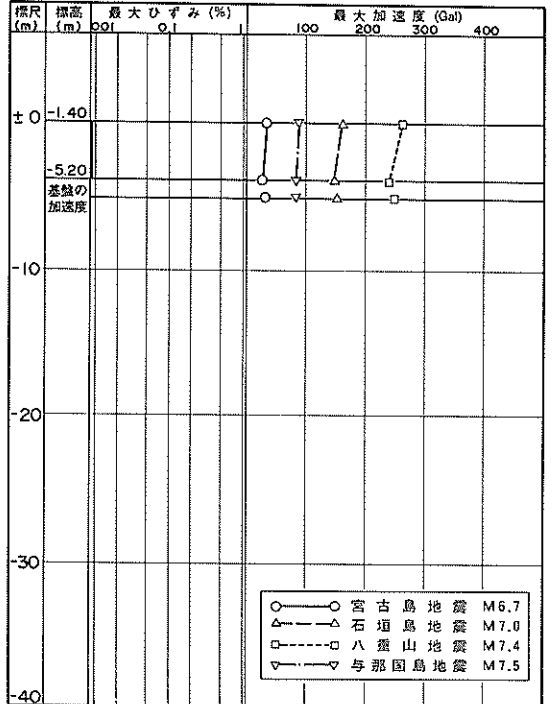
No. 102 地名 八重山病院



No. 103 地名 竹富東港防波堤
 北緯 24°19'54" 東経 124°05'36"

標尺	標高	層厚	地質	N 値				h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)
				0	10	20	30		100	200	300	400	
±0	-1.40		レキ混り砂										
	1.80	0.40											
	5.20	3.40	レキ混り砂	24	28	39	380	269		2.0			
	6.70	1.50	レキ混り砂	24	28	39				2.0			
-10											486		
-20													
-30													
-40													

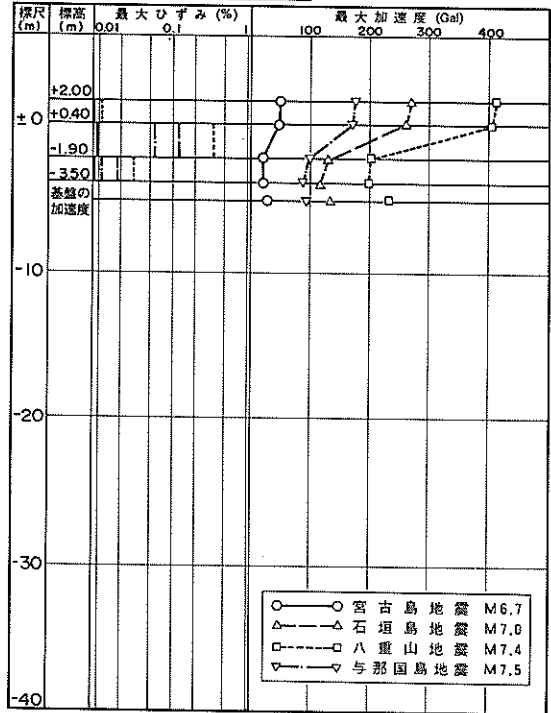
No. 103 地名 竹富東港防波堤



No. 104 地名 小浜港物揚場
北緯 24°20'13" 東経 123°59'28"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)	
				0	10	20	30	40		50	100	200	300		400
	+200														
	±0	0.40	1.60	埋立砂					1.60		121	239		18	18
		-1.90	2.30	砂レキ					2.30						
		-3.50	1.60	強風化片岩					1.60						
		-4.60	1.10	中風化片岩											
	-10														
	-20														
	-30														
	-40														

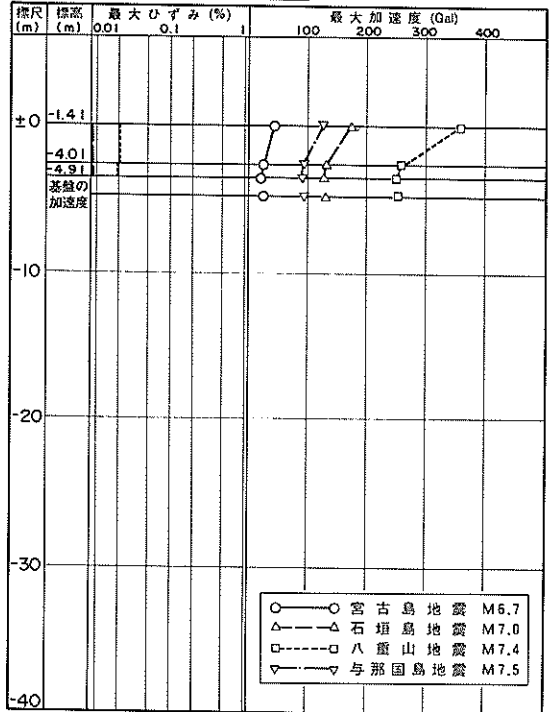
No. 104 地名 小浜港物揚場



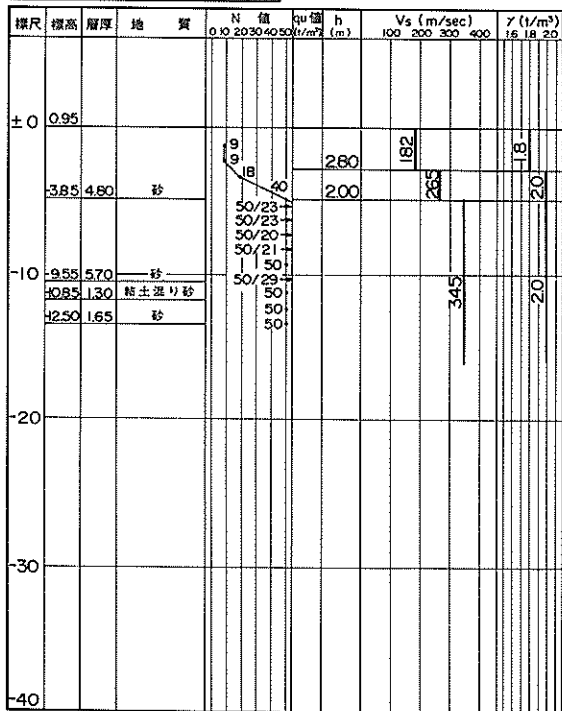
No. 105 地名 黒島港防波堤
北緯 24°14'55" 東経 124°00'07"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m ³)	
				0	10	20	30	40		50	100	200	300		400
	±0	-1.41													
		-4.01	2.60	砂レキ					2.60		174			18	18
		-4.91	0.90	風化石灰岩											
		-6.41	1.50	石灰岩					0.90						
	-10														
	-20														
	-30														
	-40														

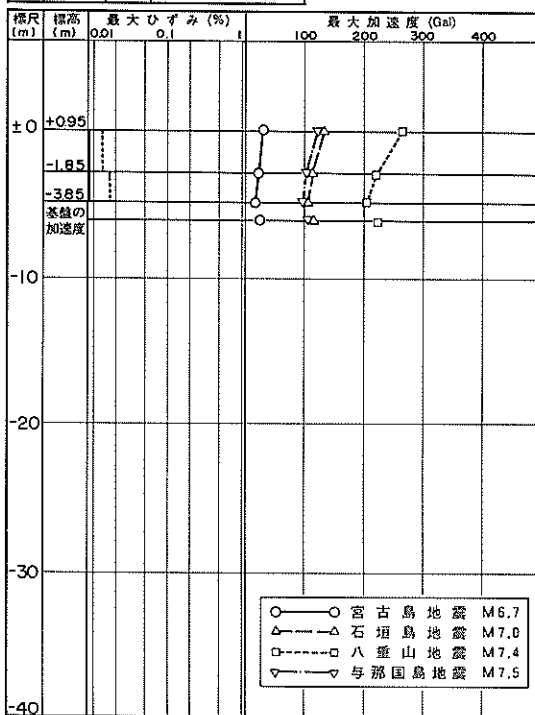
No. 105 地名 黒島港防波堤



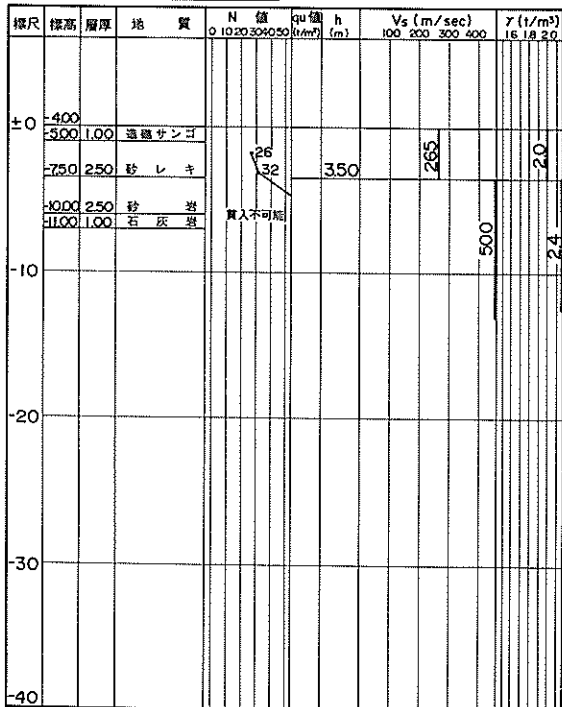
No. 108 地名 大原橋
 北緯 24°16'25" 東経 123°52'35"



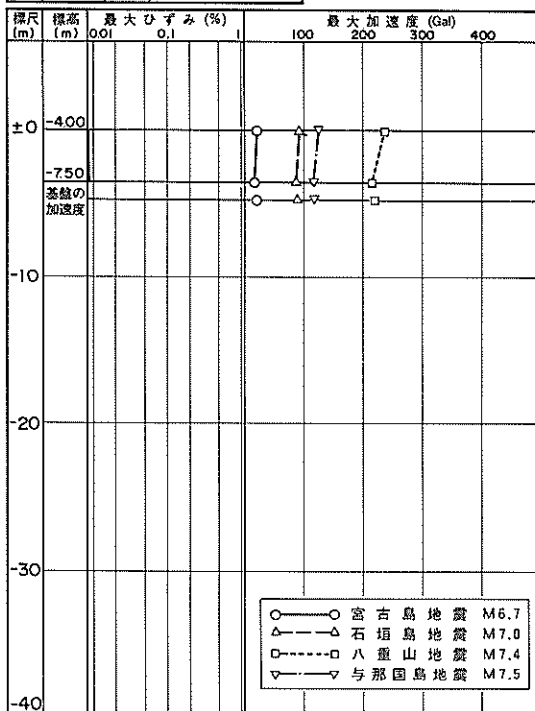
No. 108 地名 大原橋



No. 109 地名 波照間漁港
 北緯 24°03'44" 東経 123°46'00"



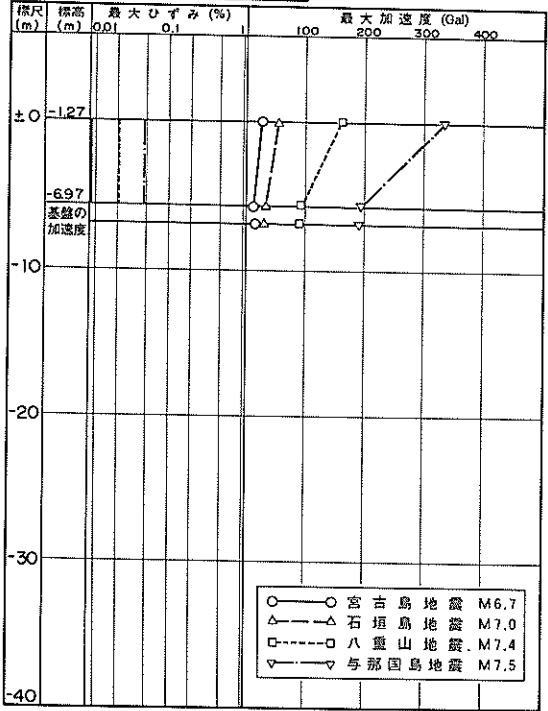
No. 109 地名 波照間漁港



No. 110 地名 祖納港
北緯 24°28'03" 東経 122°59'53"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)		
				0	10	20	30	40		50	100	200	300	400	15	18
±0	-1.27		砂													
	-1.57	0.30	砂													
	-6.97	5.40	レキ混り土			3	7	50/8	570	155					16	
-10	-11.30	4.33	石灰岩					50/4						300		
								50/3							22	
-20																
-30																
-40																

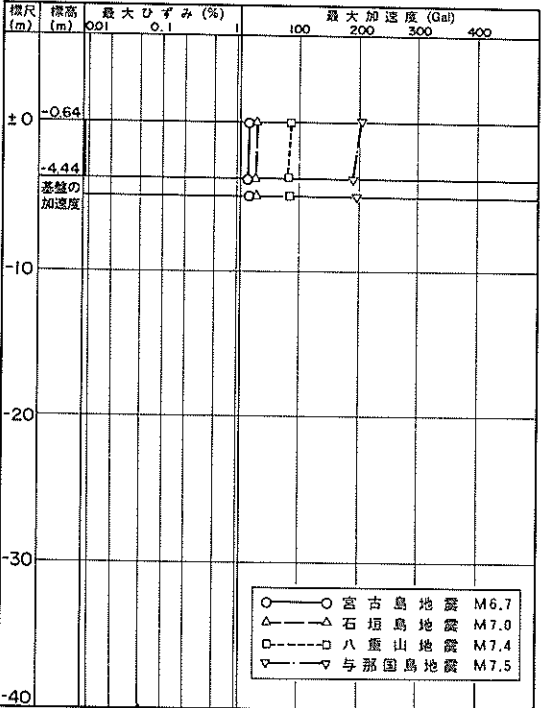
No. 110 地名 祖納港



No. 111 地名 久部良漁港
北緯 24°26'47" 東経 122°56'15"

標尺	標高	層厚	地質	N 値					h (m)	Vs (m/sec)				γ (t/m³)		
				0	10	20	30	40		50	100	200	300	400	15	18
±0	-0.64		砂レキ													
	-1.84	1.20	砂レキ													
	-2.84	0.80	琉球石灰岩			21	33	50/27	380	275					20	
	-6.41	3.77	砂レキ			42	50								20	
-10																
-20																
-30																
-40																

No. 111 地名 久部良漁港



港湾技研資料 No. 396

1981・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.