

港湾技研資料

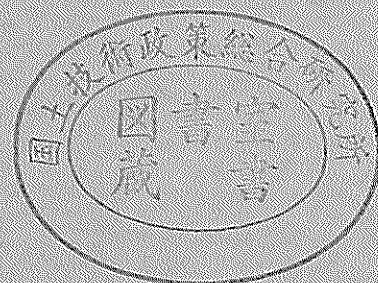
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 623 June 1988

振動三軸法による液状化・非液状化地盤の事例解析

善		功	企
梅	原	靖	文
山	崎	浩	之

運輸省港湾技術研究所



振動三軸法による液状化・非液状化地盤の事例解析

善 功 企*
梅 原 靖 文**
山 崎 浩 之***

要 旨

1973年6月の根室半島沖地震, 1978年6月の宮城県沖地震, 1983年5月の日本海中部地震により液状化した地盤と液状化しなかった地盤を対象に行なった液状化事例解析結果について報告している。事例解析では, 乱さない試料の振動三軸試験結果から現地盤の繰り返しせん断強さ応力比を求め, 一方, プログラム「SHAKE」を用いた地盤の地震応答解析結果から繰り返しせん断応力比を算定し, 両者から繰り返しせん断抵抗率を求めている。本研究では, この繰り返しせん断抵抗率と液状化地点および非液状化地点の関係を調べ, いわゆる振動三軸法による液状化予測手法の適用性を検討している。

キーワード: 地震, 液状化, 事例, 砂, 現地調査, 室内実験

1. まえがき

1964年の新潟地震以来, 飽和砂質地盤の液状化に関して数多くの研究が実施されてきた。それらの成果は, 各機関の基準等に取り入れられ¹⁾, 液状化の予測・判定・対策等に広く用いられるようになってきている。これらの諸基準では, 主として, ①粒度, N 値から液状化判定を行なうものと, ②液状化に対する繰り返しせん断強さと地震により発生するせん断応力の比較により液状化の判定を行なう方法が採用されている。①の方法は, 既往の地震による液状化地盤の粒度, N 値等から, 室内試験結果などを加味したうえで経験的に導かれたもので, その簡便さから多くの基準等で採用されている。②の方法は, 基本的には Seed - Idriss²⁾の提案に基づくものであるが, 液状化のメカニズムが考慮されている点でより詳細な検討が可能である利点を有しており, このような方法を詳細な液状化予測法とよぶこともある。

港湾における液状化の予測では, 従来から粒度と N 値を用いる方法が採用されており³⁾, 近年, この方法をさらに拡充した粒度と N 値による新しい液状化予測法が提案されている⁴⁾。一方, 最近では, 乱さない砂質土のサンプリング技術や室内における動的試験技術の向上, また, 地震応答解析手法の普及等から, 詳細な液状化判定が比較的容易に行なえる状況になってきており, 粒度, N 値

による方法を補間する意味で詳細な液状化予測法が用いられている。

前述のように, 詳細な液状化予測法は, 液状化のメカニズムが考慮されている点で, 地盤や地震動の特性が適切に評価されれば, より精度の高い予測を行なえる可能性がある。しかしながら, 港湾地域において, このような方法を実際に検証した例は少なく, その適用性については未解明な点もある。特に, 従来の検証法では, 主として液状化地点を対象に行なわれているが, この場合, 地盤の特性が液状化発生によって変化している可能性も大きく, 厳密な意味での検証とは考えられないという問題がある。したがって, 本研究では, 液状化地点の近傍に非液状化地点があり, かつ, その地域の基盤において実際に地震動が観測されている場所を選定し, 非液状化地点に重点をおいた事例解析を行なうことにより詳細な液状化予測法の適用性を点べようとしたものである。

2. 詳細な液状化予測法

2.1 既往の研究

液状化の予測を行なう手法には, 1.で述べたように, 粒度・ N 値等を用いた簡易判定法と, 室内における液状化試験から得られる繰り返しせん断強さと地盤の地震応答解析を実施して得られる繰り返しせん断応力を比較して判定を行なう詳細な判定法がある。

* 土質部 動土質研究室長
** 土質部長
*** 土質部 動土質研究室

後者の方法の基本的な考えは Seed-Idriss²⁾ の提案に基づくもので、①地震応答解析により地盤内に生じる繰り返しせん断応力を算定すること、②乱さない試料の液状化試験を行ない、ある単純化された条件下で繰り返しせん断強さを決定すること、③上記の①と②で得られた繰り返しせん断応力と繰り返しせん断強さを、地震時における実際の地盤の挙動に換算するための補正を行なうこと、④補正された現地盤での繰り返しせん断応力 τ_L と繰り返しせん断強さ τ_R を比較して液状化の予測を行なうことからなる。

また、地盤内の対象深さの τ_L および τ_R を有効上載圧 σ'_v で無次元化して、それぞれ、現位置での繰り返しせん断応力比 $L = \tau_L / \sigma'_v$ および繰り返しせん断強さ応力比 $R = \tau_R / \sigma'_v$ として表し、いわゆる繰り返しせん断抵抗率 F_I を次式により求め液状化予測を行なうことも行なわれている。

$$F_I = R / L \quad \dots\dots\dots (1)$$

このような考えに基づく具体的な方法には、その後に提案された Seed-Idriss⁵⁾ の方法、石原⁶⁾ の方法、岩崎・龍岡^{7),8)} の方法などがあるが、これらの方法の相違点は、上記④で述べた補正方法の考えの相違によるものである。以下に、これらの方法の概要を述べる。

(1) Seed の方法

(a) 地震時の繰り返しせん断応力

地震時の地盤内に発生する繰り返しせん断応力波形を、地震応答解析により求め、得られた繰り返しせん断応力の最大値 τ_{max} から、次式により一様振幅の繰り返しせん断応力 τ_L に換算する。

$$\tau_L = 0.65 \cdot \tau_{Lmax}$$

(b) 地盤の繰り返しせん断強さ

振動三軸試験で得られた繰り返しせん断強さ応力比 τ_d / σ'_e (τ_d, σ'_e は、各々、液状化試験時の繰り返しせん断応力および有効拘束圧) を、ある補正係数 c_r を用いて、次式のように現地盤の繰り返しせん断強さ τ_R に換算する。

$$\tau_R = (\tau_d / \sigma'_e) \cdot c_r \cdot \sigma'_v$$

上式において、 (τ_d / σ'_e) の値は液状化波数 N_I によって異なるが、地震のマグニチュード M との相関が与えられており、それぞれ $M=7, 7.5, 8$ に対して、液状化波数 $N_I=10, 20, 30$ 波のときの (τ_d / σ'_e) の値を採用する。

(c) 液状化の予測

(a), (b) で求めた τ_L と τ_R を比較し、 $\tau_R < \tau_L$ であれば、液状化の可能性大、 $\tau_R > \tau_L$ であれば、液状化の可能性小とする。

(2) 石原の方法

(a) 地震時の繰り返しせん断応力比

地盤内に発生する繰り返しせん断応力波形を地震応答解析により求め、繰り返しせん断応力の最大値 τ_{Lmax} を有効拘束圧 σ'_v で除して繰り返しせん断応力比の最大値 L を求める。

(b) 地盤の繰り返しせん断強さ応力比

振動三軸試験で得られた繰り返しせん断強さ応力比 τ_d / σ'_e は、等方応力条件で得られたものであるから、現位置での応力の異方性を考慮するために、 τ_d / σ'_e に $(1 + K_0) / 3$ (K_0 : 静止土圧係数) を乗じて補正を行なう。また、振動三軸試験結果は、規則波に対するものであるから、実際の不規則波に対して換算係数 c_k を用いて補正を行なう。この場合、せん断波形が衝撃型(最大繰り返しせん断応力 τ_{Lmax} が起こる側の波形のみを考えると、 τ_{Lmax} が通過する以前に、 τ_{Lmax} の6割以上の振幅をもつ波頭が2つ以下しか存在しない場合)のときは $c_k = 0.55$ で、振動型(τ_{Lmax} が通過する以前に、 τ_{Lmax} の大きさの6割以上の振幅をもっている波頭が3つ以上ある場合)のときは $c_k = 0.70$ で τ_d / σ'_e を除す。これらをまとめると次式となる。

$$R = (\tau_d / \sigma'_e) / c_k \cdot (1 + 2K_0) / 3$$

ここで、 (τ_d / σ'_e) の値は、液状化波数 $N_I = 20$ 波のときの値が用いられる。

(c) 繰り返しせん断抵抗率

L と R から式(1)により F_I を求める。

(3) 岩崎・龍岡の方法

(a) 地震時の繰り返しせん断応力比

石原の方法と同様にして L を求める。

(b) 地盤の繰り返しせん断強さ応力比

次式により現位置での繰り返しせん断強さ応力比を求めらる。

$$R = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5 \cdot (\tau_d / \sigma'_e)$$

ここに、 c_1 : 応力の異方性に関する補正係数で、 $(1 + 2K_0) / 3$ 、 c_2 : 地震波形の不規則性に関する補正係数で、石原の方法と同様に、 $1 / 0.55 \sim 1 / 0.70$ であるが、平均値をとって 1.62、 c_3, c_4 : 試料のかく乱、密度化に関する補正係数でほぼ 1 とみなされている、 c_5 : 地震波形の多方向性に関する補正係数で、0.9 程度とされている。以上の補正係数から、 $c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5 = 1$ とし

て、

$$R = (\tau_d / \sigma'_c)$$

が得られる。(τ_d / σ'_c) の値は、石原の方法と同様に液状化波数 $N_l = 20$ 波のときの値が用いられている。

(c) 繰り返しせん断抵抗率

L と R から式(1)により F_l を求める。

2.2 本報告の方法

本報告で用いた方法は、基本的には 2.1 で述べた方法と同様であるが、不規則な地震波を正弦波に換算するさいに、Annaki-Lee⁹⁾ の提案している等価波数の概念を適用している。ここでは、この方法を振動三軸法とよぶことにするが、本方法による液状化予測法のフローを示すと図-1 のようになる。以下に、振動三軸法の詳細について述べる。

(1) 繰り返しせん断強さ応力比

繰り返しせん断強さ応力比は振動三軸試験により求められるが、振動三軸試験は、実際の地震時の地盤、応力条件等を相当単純化したうえで行なわれる。すなわち、①実際の地盤は K_0 状態にあるのに対し、振動三軸試験では等方状態で試験が行なわれる、②また、実際の地震では主応力方向が変化するのに対して、振動三軸試験の

場合には主応力方向は不変である、③実際の地震波は不規則波であるのに対して、振動三軸試験では正弦波を加えている。したがって、振動三軸試験の結果を現位置に適用するにあたっては、これらの条件の相違を補正する必要がある。振動三軸試験から得られた応力比から、対象地盤の繰り返しせん断強さ R を求めるためには、2.1 (2)、(3)の方法と同様に、振動三軸試験結果に、異方応力状態に対する補正として、 $(1 + 2K_0) / 3$ を、地震波のような多方向せん断に対する補正として、0.9 を乗じるものとした。したがって、繰り返しせん断強さ応力比 R は、次式で表される。

$$R = 0.9 \cdot (1 + 2K_0) / 3 \cdot (\tau_d / \sigma'_c) \quad \dots(2)$$

(τ_d / σ'_c) の値の決め方については、繰り返しせん断応力波形の不規則性を考慮して、Annaki-Lee⁹⁾ の提案している等価波数の概念を適用しており、2.1の方法と異なる点である。この方法については以下に述べる繰り返しせん断応力比を求める過程で説明する。

(2) 繰り返しせん断応力比

せん断応力波形の不規則性に対する補正は、地震応答解析から得られる不規則なせん断応力波形を、一様振幅を持つ正弦波に置き換え、液状化に対して不規則波と等価な効果を持つように波数を換算しようとするものである。

まず、地盤の地震応答計算を実施し、検討対象地盤の任意の深度における最大繰り返しせん断応力を求める。各深度の最大繰り返しせん断応力を τ_{Lmax} とし、2.1(1)で述べた Seed らの方法と同様に、地盤中の任意の深さの不規則なせん断応力波形を一様振幅の繰り返しせん断応力に換算するが、換算する一様振幅のせん断応力 τ_L を便宜的に τ_{Lmax} の 0.65 倍 ($\tau_L = 0.65 \tau_{Lmax}$) と取る。このとき、繰り返しせん断応力比 L は、

$$L = \tau_L / \sigma'_v = 0.65 \tau_{Lmax} / \sigma'_v \quad \dots(3)$$

で表される。この L に相当する波形に換算した場合の等価波数 N_{eq} を以下のようにして決定する。

まず、地盤の地震応答計算から求まるせん断応力振幅 (片振幅を有効な載圧で割ったもの) のうち、振幅が τ_i (τ_i / σ'_v) である波数を N_i とする。一方、振動三軸試験から得られる繰り返しせん断強さ応力比～液状化波数 ($R \sim N_l$ 曲線) の関係から τ_i / σ'_v により液状化を生じるに要する繰り返し波数を N_{if} 、式(3)の τ_L / σ'_v を繰り返しせん断応力比とした時に液状化を生じるに要する繰り返し波数を N_{lf} とすると、図-2 に示すようにして、 $R \sim N_l$ 曲線を用いて、 τ_i / σ'_v 、 τ_L / σ'_v から N_{if} 、

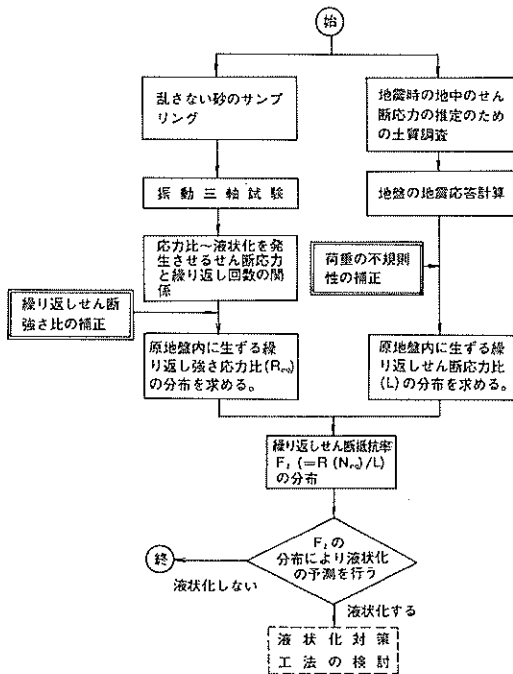


図-1 振動三軸法による液状化予測フロー

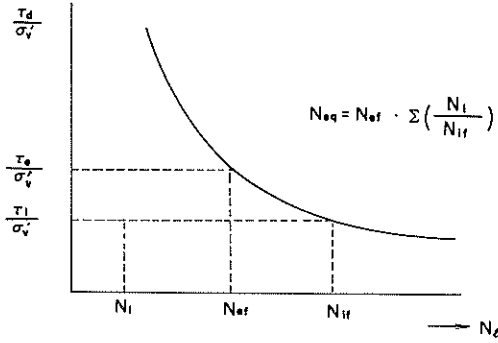


図-2 等価波数 N_{eq} の計算

N_{ef} をそれぞれ求めることができる。そこで、ある大きさ以上の τ_i (τ_i / σ'_v) に対して、それぞれに対する波数 N_i を求め、次式により等価波数を求める。

$$N_{eq} = N_{ef} \cdot \sum N_i / N_{if}$$

上式において、 N_i / N_{if} は任意の振幅を持つせん断応力が N_i 回作用した時の液状化に寄与する程度を表すものである (N_{if} の定義から明らかなように、 $N_i = N_{if}$ の時液状化が生じることになり、このとき $N_i / N_{if} = 1$ に対応している)。なお、乱さない試料を用いた液状化試験の場合、試料数に限度があるため、波数の少ない点におけるデータが欠落し、図-2 のような $R \sim N_i$ 曲線を描くことが困難になる場合がある。このような場合には、 $R \sim N_i$ 曲線を両対数紙上で直線より近似し⁹⁾、それを用いて等価波数 N_{eq} を求めている。

(3) 繰り返しせん断抵抗率

$R \sim N_i$ 関係、 L 、 N_{eq} を用いて繰り返しせん断抵抗率 F_t を以下のようにして求める。まず、 $R \sim N_i$ 関係から、 $N_i = N_{eq}$ における R の値を求め、これを $R(N_{eq})$ とする。この値と L から、 F_t は、

$$F_t = R(N_{eq}) / L \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。

3. 現地調査

3.1 調査地点

調査の対象とした地点は、1973年6月の根室半島沖地震において被災した花咲港および釧路港¹⁰⁾の係船岸背後の地盤、1978年6月の宮城県沖地震により被災した石巻港¹¹⁾および1983年5月の日本海中部地震により被災した秋田港¹²⁾の係船岸背後の地盤である。図-3～図-6に調査位置を示す。



図-3 釧路港調査位置

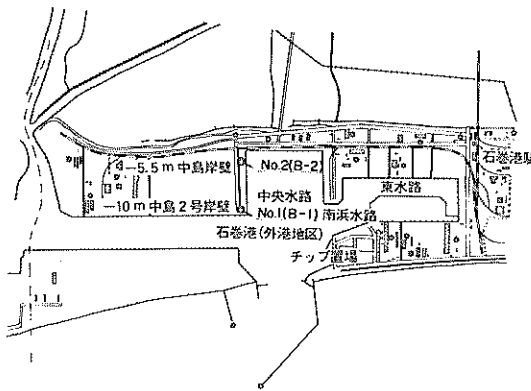


図-4 石巻港調査位置



図-5 花咲港調査位置

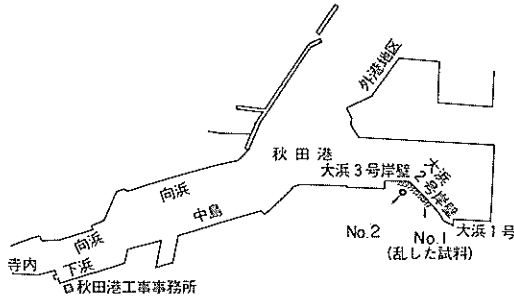


図-6 秋田港調査位置

3.2 調査項目

各港での調査は、原則として液状化地点と非液状化地点の2ヶ所で行なっているが、花咲港については2ヶ所とも液状化地点で、秋田港については、非液状化地点からのみ乱さない試料の採取を行なっている。各調査地点では、乱さない試料の採取を行なうとともに、別孔で標準貫入試験、PS検層を実施し、 N 値、弾性波速度を測定した。PS検層法の概要を表-1に示す。また、標準貫入試験から得られた乱された試料を用いて比重、粒度分布を求めた。乱さない試料の採取は、水圧式の固定ピストン式サンプラーを用いて行なった。乱さない試料は、主として、密度測定と液状化試験に用いられた。

3.3 調査結果

各地点の地盤の概要を付図-1~付図-4に、また、

PS検層結果を付図-5~付図-8に示す。表-2に、各調査地点において標準貫入試験により採取された試料の物理特性を示している。表-2において、 D_{50} は平均粒径、 U_c は均等係数、 G_s 、 D_r は、それぞれ比重、相対密度である。74 μ 以下の割合がかなり大きくなっているが、これは、部分的にシルト質の試料が含まれている結果であり、繰り返し三軸試験では、このような試料は除外している。

4. 振動三軸試験

4.1 試験装置

試験に使用した装置は、電気油圧サーボ方式の振動三軸試験装置¹³⁾である。本装置の構成は下記の5つに大別される。

a) 荷重・変位制御装置

入力信号系、制御系、フィードバック検出系から成る制御装置である。入力信号としては、三角波、矩形波、正弦波およびランダム波を用いることができる。発振可能周波数は0.01Hzから20Hzで、周波数精度は1.5%である。荷重制御方式で試験を行なう場合には、各波数ごとに供試体下端の荷重検出器によりピックアップされた荷重がフィードバックされ、入力信号と電気的に比較修正され、入力信号に比例した荷重が載荷される。また、幅広い周波数成分をもつ地震時におけるランダム波形も、データレコーダと入力等価装置を接続することにより、荷重もしくは変位の形で入力可能である。

表-1 PS検層法の概要

調査名	調査地点	地上 海上	弾波 探査方法	波動伝達様式	起振方法	調査位置	起振位置	受振位置	孔径 (mm)	調査深度 (m)	測定間隔 (m)
釧路港土質調査 工事 (S57年10月)	北海道釧路市 釧路港西港地区	地上 T.P. +2.11m	PS検層	ダウンホール	P波;かけや S波;板叩き	No. 1	孔口から1.45 m離れた地表 面	孔内1点毎 20点	66	1.0~ 20.0	1.0
		地上 T.P. +3.01m				No. 2	孔口から1.35 m離れた地表 面	孔内1点毎 20点	66	1.0~ 20.0	1.0
石巻港土質調査 工事 (S55年11月)	宮城県石巻市 石巻港中島埠頭	地上 K.P. +3.05m	PS検層	アップホール	P波;かけや S波;板叩き	No. 1 (B-1)	—	孔内1点毎 36点	66	0~35	1.0
		地上 K.P. +3.73m				No. 2 (B-2)	—	孔内1点毎 25点	66	0~25	1.0
花咲港土質調査 工事 (S56年9月)	北海道根室市 花咲港中島地区	地上 D.L. +2.06m	PS検層	ダウンホール	P波;かけや S波;板叩き	No. 1' 孔	孔口から2.0 m離れた地表 面	孔内1点毎 10点	66	0.5~ 9.5	1.0
		地上 D.L. +2.32m				No. 2 孔	孔口から2.4 m離れた地表 面	孔内1点毎 20点	66	1.0~ 20.0	1.0
秋田港土質調査 (S59年10月)	秋田県秋田市 秋田港大浜地区	地上 D.L. +3.6m	PS検層	ダウンホール	P波;かけや S波;板叩き	No. 2	—	孔内1点毎 30点	76	1.0~ 30.0	1.0

表-2 試料の物理的特性

調査地点	$D_{50}(\text{mm})$	U_c	74 μ 以下(%)	G_s	D_r (%)
釧路港 No 1 (液状化地点)	0.046 ~ 0.730	2.8 ~ 7.1	0.0 ~ 78.0	2.313 ~ 2.669	30.7 ~ 65.7
	No 2 (非液状化地点)	0.077 ~ 0.700	1.6 ~ 4.7	2.610 ~ 2.709	63.7 ~ 91.0
石巻港 B-1 (液状化地点)	0.125 ~ 0.330	1.8 ~ 2.4	0.0 ~ 20.2	2.690 ~ 2.772	37.8 ~ 70.2
	B-2 (非液状化地点)	0.130 ~ 0.200	1.6 ~ 2.3	2.686 ~ 2.732	44.7 ~ 83.1
花咲港 No 1' 地点 (液状化地点)	0.141 ~ 0.220	1.5 ~ 1.8	0.2 ~ 13.0	2.629 ~ 2.671	36.2 ~ 82.1
	No 2 地点 (非液状化地点)	0.110 ~ 0.190	2.4 ~ 3.9	2.661 ~ 2.696	42.2 ~ 74.2
秋田港 No 2 (非液状化地点)	0.14 ~ 0.20	2.4 ~ 9.6	5.0 ~ 18.0	2.630 ~ 2.710	—

b) 試験機本体

三軸セル、油圧シリンダ、サーボ弁からなる。この原理は、入力された電気信号をサーボ弁の動きに変換し、油圧回路の油量の変動により油圧シリンダを作動させるものである。シリンダ内の油量の変動は、直径50mmの載荷ロッド、載荷ピストンを介して三軸セル内の供試体に伝達される。供試体に加わる荷重は、供試体下端のペDESTALに組込まれた荷重検出器によってピックアップされ、フィードバックされることにより所定の荷重を繰り返し載荷することができる。載荷ピストンの三軸セル内への貫入にともなう側圧の変化を防止するために、油圧シリンダ上部に容積補償シリンダが設けられている。三軸セルは、載荷時に内壁の変形を避け、セル内圧の高精度化をはかるために、内筒外径200mm、外筒外径250mm、高さ220mm、耐圧強度10 kgf/cm²の透明アクリル製の二重円筒構造となっている。セル上蓋の中央には載荷ピストンの貫入孔があり、水漏れを防ぐためにOリングが埋め込まれているが、直径50mmのトップキャップおよび下部ペDESTAL自体が最大容量200 kgfの荷重検出器になっており、セル内で荷重の計測を行なうことによって、ピストンの摩擦を含まない正確な荷重が計測される。

c) 油圧源

軸圧および側圧載荷用の油圧シリンダに高油圧を供給する装置で、最大油圧は70 kgf/cm²、最大油量は22 l

/min である。

d) 水圧供給装置

側圧、背圧供給や圧密排水量測定などを行なう装置である。

e) 計測装置

荷重検出器はストレンゲージタイプの検出器である。側圧、間隙水圧等は半導体タイプの小型圧力変換器により計測される。軸変位は差動変位計により載荷ロッドの変位量として測定される。

4.2 試料

繰り返し三軸試験に用いた試料は、各港から採取された乱さない砂質土で、サンプリング後、試料の水抜きを行ない現地で凍結した後、試験室へ運んだ。図-7には、繰り返し三軸試験に用いた各試料の粒径加積曲線を示しているが、釧路港の試料を除き粒径のそろった貧粒度の試料であり、粒度分布および均等係数、平均粒径等からみるといずれも液状化の可能性の大きな試料とみなされる。

4.3 試験方法および条件

a) 凍結試料の成形

現地から運ばれたサンプリングチューブ(内径75mm、長さ750mm)を、電動のこぎりを用いて長さ約15 cmに切断した。切断するさいに、凍結試料の融解を防ぐため液体窒素を使用した。切断した試料は冷凍庫で30分程度冷やした後に、金属用のこぎりで立て割りのスリットを

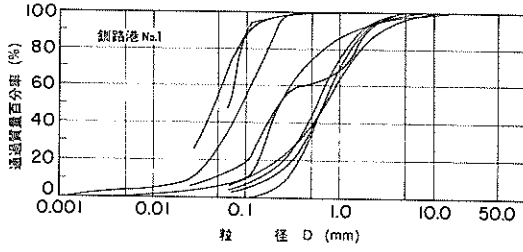


図-7(a) 試料の粒径加積曲線

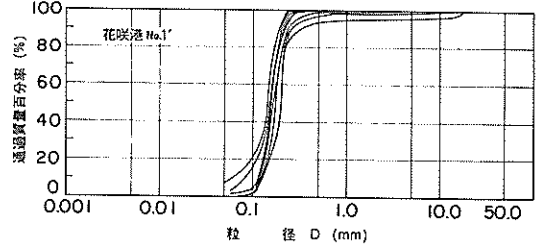


図-7(e) 試料の粒径加積曲線

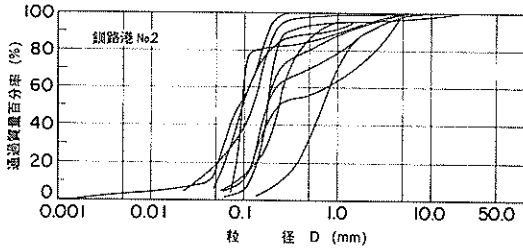


図-7(b) 試料の粒径加積曲線

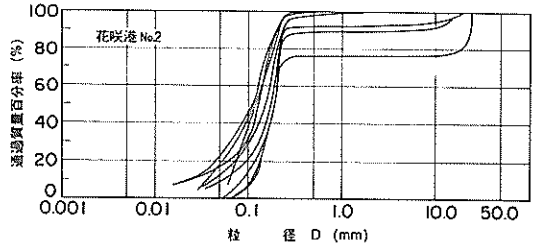


図-7(f) 試料の粒径加積曲線

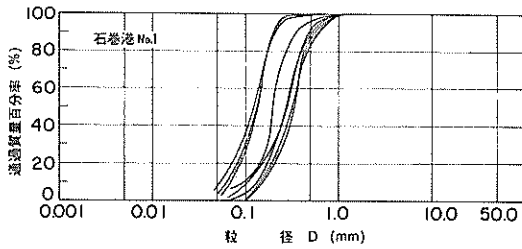


図-7(c) 試料の粒径加積曲線

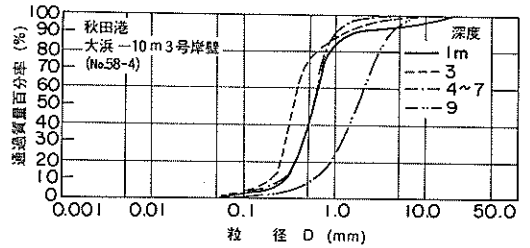


図-7(g) 試料の粒径加積曲線

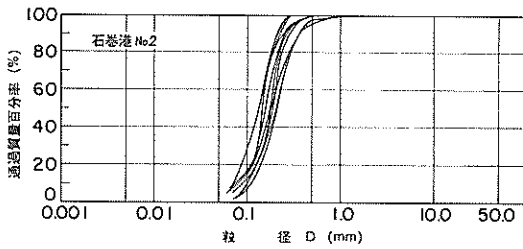


図-7(d) 試料の粒径加積曲線

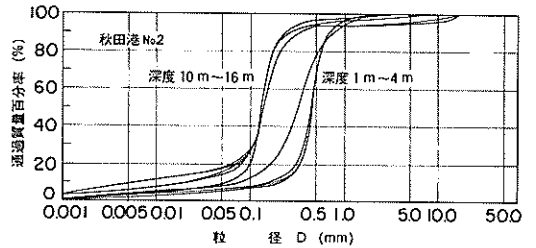


図-7(h) 試料の粒径加積曲線

入れ、そこをマイナスドライバーで広げて試料を押し出した。その試料を自動試料成形機にセットし直径50mmに成形した。試料の周面の融解を防止するために、成形中はジェットサイホンを用いて液体窒素を散布した。成形終了後、あらかじめ冷やしておいたマイターボックスに試料をセットし、端面の成形を行なった。供試体の標準寸法は、直径50mm、高さ125mmである。

b) 供試体の融解

成形された供試体の寸法を測定後、厚さ0.2mmのゴムスリーブをかぶせ、三軸セル内にセットする。セット後、三軸セル内に水を満たし、セル圧0.2 kgf/cm²、軸圧0.2 kgf/cm²の等方圧力状態で約1時間放置して供試体を融解した。

c) 供試体の飽和

0.2 kgf/cm²のセル圧を加えた状態で、供試体の底部から低圧で二酸化炭素(CO₂)を循環させた。CO₂を循環させると、まず供試体上部から空気と水が排出される。水の排出が止り、CO₂が一定の速度で流れはじめてから30分程度放置した。その後、セル圧1.0 kgf/cm²、背圧0.8 kgf/cm²を加え、脱気水を供試体下部からゆっくりと送水した。供試体体積の約2倍の量の脱気水を循環させた後、飽和程度を調べるために、B値を測定した。B値が0.95以上を確認して圧密を開始した。このときの拘束圧は2.0 kgf/cm²、背圧は1.0 kgf/cm²で、有効拘束圧は1.0 kgf/cm²である。

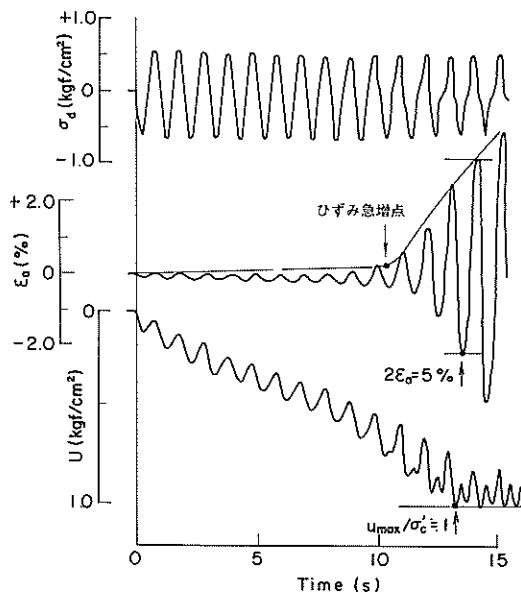


図-8 液状化時点の決め方

d) 繰り返し荷重

圧密終了後、側圧一定の状態で行った繰り返し軸荷重を載荷した。波形は正弦波を用いた。周波数は1 Hzである。

4.4 試験結果

(1) 液状化時点の決め方

繰り返し波数が何波で液状化が発生したかを求める方法として、図-8の模式図に示すように、軸ひずみが急増する点(軸ひずみ急増点)、過剰間隙水圧が有効拘束圧に等しくなる点(初期液状化点)、軸ひずみ両振幅が5%もしくは10%となる点などいくつかの定義がある。従来、安全側をとって、軸ひずみ急増点をもって液状化が発生したと定義していたが¹³⁾、ひずみ急増点から初期液状化点までの波数は、供試体の密度、応力条件によりかなり変化することから、ひずみ急増点に対する波数を用いるやり方は液状化強度を過小評価することになる¹⁴⁾また、最近では、液状化試験を一つの指標(Index)試験と考え、軸ひずみ両振幅が5%もしくは10%のときをもって液状化とする方法が一般的になりつつあり、どのような状態をもって液状化とみなすかによって、液状化強度は異なってくる。しかしながら、図-9に示すように、初期液状化点と軸ひずみ両振幅が5%のときをもって液状化と定義した時に得られる繰り返しせん断強度比と波数の関係を比較してみると、両者の差はほとんどみられていない。図-10は、図-9に示したような関係から、液状化波数N_l=20波における繰り返しせん断強さ応力比を比較した結果であるが、(τ_d/σ'_c)_{u_max/σ'_c=1.0}と(τ_d/σ'_c)_{2ε_a=5%}はほぼ1:1に対応している。したがって、本報告では試験データの整理上の簡便性を考慮して、液状化の定義を軸ひずみ両振幅が5%のときと定義する。なお、この定義は、上述のように初期液状化点に対応するものであるが、2ε_aが10%のときをもって完全液状化とよぶ場合もあり、この場合、液状化波数N_l=20波における繰り返しせん断強さ応力比の比率、(τ_d/σ'_c)_{2ε_a=10%}/(τ_d/σ'_c)_{2ε_a=5%}は、1.1~1.2

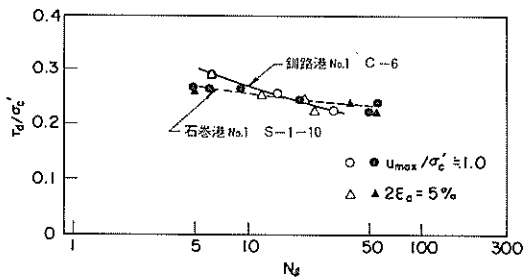


図-9 繰り返しせん断強さ比の比較

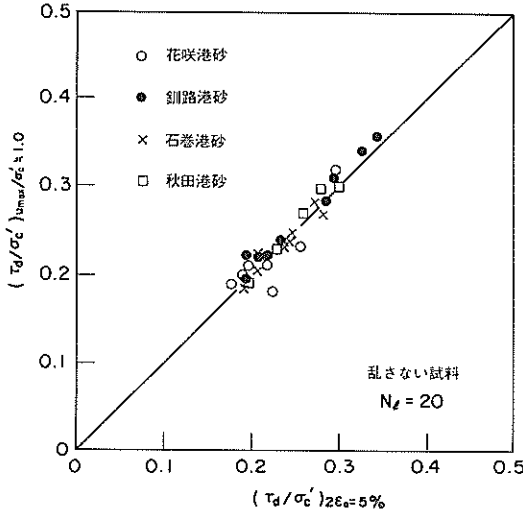


図-10 $N_f = 20$ 波における繰返しせん断強さ比の比較

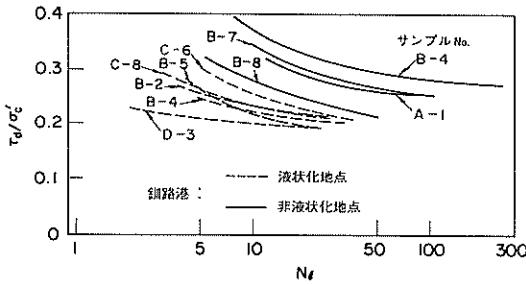


図-11 繰返しせん断強さ比と液状化波数

表-3(a) 液状化波数 $N_f = 20$ 波における繰返しせん断強さ応力比(釧路港)

試料名 釧路港	深度 (m)	N値	D_r (%)	τ_d/σ'_c	
				U_{max}/σ'_c ≈ 1.0	$2\varepsilon_a$ $= 5(\%)$
No 1 地点					
B-2	2.76	6	52.1	.224	.216
D-3	3.76	3	41.0	.196	.193
B-4	5.46	4	34.4	.221	.208
B-5	6.26	7	65.7	.225	.196
C-6	7.06	7	51.3	.239	.231
C-8	8.76	10	30.7	.220	.211
No 2 地点					
A-1	3.96	18	63.7	.285	.285
B-4	6.36	24	77.2	.342	.327
B-7	8.86	23	66.8	.310	.296
B-8	9.66	24	91.0	.356	.345

表-3(b) 液状化波数 $N_f = 20$ 波における繰返しせん断強さ応力比(石巻港)

試料名 石巻港	深度 (m)	N値	D_r (%)	τ_d/σ'_c	
				U_{max}/σ'_c ≈ 1.0	$2\varepsilon_a$ $= 5(\%)$
B-1 地点					
S-1-1	4.75	9	43.0	.200	.195
S-1-2	5.75	12	48.7	.211	.211
S-1-3	6.75	12	37.8	.203	.203
S-1-5	9.75	20	67.7	.232	.234
S-1-9	12.75	15	70.2	.215	.215
S-1-10	13.75	14	38.7	.238	.242
B-2 地点					
S-1-1	2.25	7	44.7	.221	.208
S-1-2	4.75	16	65.0	.246	.246
S-1-4	7.75	19	62.8	.182	.192
S-1-7	11.75	17	83.1	.284	.273
S-1-8	12.75	19	63.2	.269	.280
S-1-9	13.75	21	51.5	.240	.240

表-3(c) 液状化波数 $N_f = 20$ 波における繰返しせん断強さ応力比(花咲港)

試料名 花咲港	深度 (m)	N値	D_r (%)	τ_d/σ'_c	
				U_{max}/σ'_c	$2\varepsilon_a$ (%)
No 1 地点					
0-2-1	3.25	8	36.2	.192	.180
0-1-2	3.55	8	37.7	.182	.224
0-2-2	4.25	8	38.5	.212	.217
0-1-4	5.15	21	82.1	.320	.296
No 2 地点					
0-2-2	3.55	12	42.2	.204	.201
0-2-3	4.35	8	74.2	.232	.255
0-1-3	5.75	7	56.4	.210	.198
0-2-7	8.25	8	50.2	.202	.192

表-3(d) 液状化波数 $N_f = 20$ 波における繰返しせん断強さ応力比(秋田港)

試料名 秋田港	深度 (m)	N値	D_r (%)	τ_d/σ'_c	
				U_{max}/σ'_c ≈ 1.0	$2\varepsilon_a$ $= 5(\%)$
No 2 地点					
S-1	3.40	13	-	0.227	0.226
S-6	12.00	16	-	0.200	0.195
S-7	12.95	16	-	0.270	0.260
S-8	13.90	14	-	0.300	0.295
S-9	14.85	23	-	0.293	0.282

程度になるといわれている。^{15), 16)}

(2) 繰り返しせん断強さ応力比

上記のようにして液状化時点を定義したとき繰り返しせん断強さ応力比 τ_d/σ'_c と液状化波数 N_l の関係の一例を図-11に示す。2で述べたように、液状化の検討を行なう場合、繰り返しせん断強さ応力比 R もしくは $R(N_{eq})$ を求める必要がある。このさい、液状化波数 N_l もしくは等価波数 N_{eq} を定めてそれらの N_l, N_{eq} に対応する繰り返しせん断強さ応力比が適用されるが、得られた $\sigma_d/\sigma'_c \sim N_l$ の関係が十分信頼性のあるものか検討するために、乱さない試料を用いて得られた $\tau_d/\sigma'_c \sim N_l$ 関係と、既往の結果やその他の土質特性との相関について調べておく。ただし、等価波数 N_{eq} は、算定法がやや複雑で、地震波形によっても異なるので、ここでは、ある特定の液状化波数 $N_l = 20$ 波における τ_c/σ'_c について述べる。 $N_l = 20$ 波としたのは次の理由による。2.1で述べたように、Seedらは、不規則波形のうち支配的な波数は地震のマグニチュード M により決るとし、 $M = 7, 7.5, 8$ に対してそれぞれ $N_l = 10, 20, 30$ 波を想定すればよいとしていること、さらに、石原、岩崎・龍岡らは、我が国の場合、海洋性の地震が支配的であることを考慮して、Seedらの $M = 7.5 \sim 8$ 対応する波数として $N_l = 20$ 波を採用していること、また、1973年の根室半島沖地震および1978年の宮城県沖地震では、ともに $M = 7.4$ 、1983年の日本海中部地震では、 $M = 7.7$ であったことなどである。以上のことから、液状化波数 $N_l = 20$ 波における $(\tau_d/\sigma'_c)_{20}$ を整理した結果が表-3である。

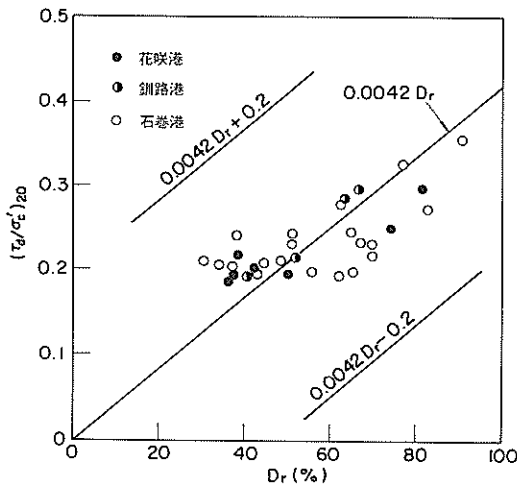


図-12 繰り返しせん断強さ比と相対密度

(3) 繰り返しせん断強さ応力比と相対密度および N 値
 細粒分が少なく、均等係数の小さなきれいな試料を水中あるいは空気中に自由落下させて作成した供試体の $(\tau_c/\sigma'_c)_{20}$ と相対密度 D_r の間には、 D_r が 80% 以下において次の関係があるといわれている。⁶⁾

$$(\tau_d/\sigma'_c)_{20} = 0.0042 \cdot D_r$$

本試験において用いた乱さない試料について、同様な関係を調べた結果を図-12に示しているが、ほぼ同様な関係が得られている。図-13は、 $(\tau_d/\sigma'_c)_{20}$ と D_r の深度分布を描いたものである。 $(\tau_d/\sigma'_c)_{20}$ の深度に対する変化の傾向は、 D_r とほぼ対応している。また、図-14は、 $(\tau_d/\sigma'_c)_{20}$ と N 値の関係を調べたものである。従来から指摘されているように、 $(\tau_d/\sigma'_c)_{20}$ と N 値の間には良い相関性がみられる。

次に、乱さない諸料から求められた相対密度と N 値から推定される相対密度について検討しておく。有効土被圧 σ'_v の影響を考慮した N 値と相対密度 (ここでは、 D_r^* と記す) の関係式としてはいくつか提案されているが、ここでは次に示す Myerhof の式¹⁷⁾を用いた。

$$D_r^* = 21 \cdot \sqrt{N / (\sigma'_v + 0.7)}$$

図-15は、乱さない試料から実測した相対密度 D_r と上式から計算した相対密度 D_r^* の関係を示したものである。

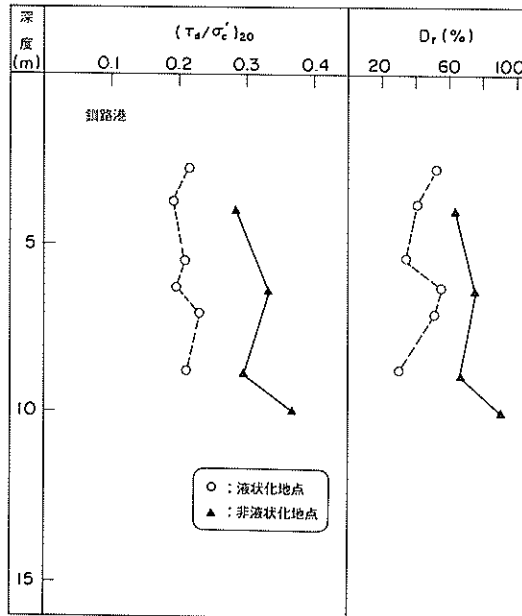


図-13 繰り返しせん断強さ比と相対密度の深度分布

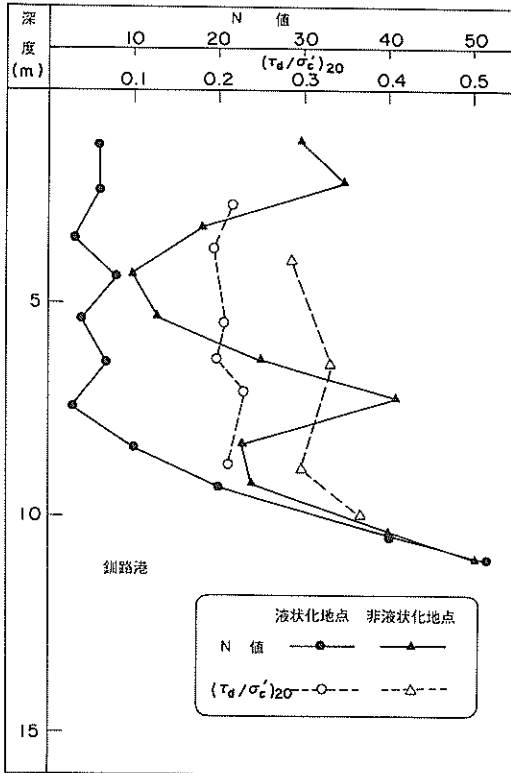


図-14 繰り返しせん断強さ比とN値の深度分布

両者の間にはばらつきはあるものの、平均的には、 $D_r = D_r^*$ とみなされ、本試験に使用した試料に対しては上式の適用性が良いこと、乱さない試料から求められた相対密度 D_r はほぼ妥当な値とみなされることを意味するものである。また、図-16は、ほぼ同じ有効土被圧 σ'_v に対してプロットしたものであり、上記と同様なことがいえる。

4) 再構成砂の液状化強度との比較

乱さない試料を用いた振動三軸試験結果は、採取された試料の品質により大きく影響される。砂質試料の乱れの評価法についてはいくつかの研究が行なわれているが、実用的に完成された方法はない。そこで、ここでは、乱さない試料のうち、振動三軸試験後、同一の試料を再構成して再度試験を実施し、繰り返しせん断強さ応力比 τ_d/σ'_c と液状化波数 N_i の関係を求め、乱さない試料から得られたものと比較した。図-17は、結果の一例であるが、相対密度が同じ条件では、乱さない試料の τ_d/σ'_c が大きくなっている。図-18は、 $N_i = 10, 20, 30$ 波における比較を行なったもので、ここでいう乱さない試料の τ_d/σ'_c は、完全に乱された試料の τ_d/σ'_c に比較

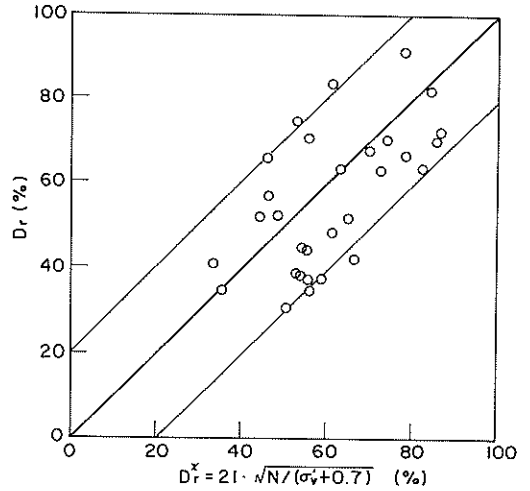


図-15 相対密度の実測値と推定値

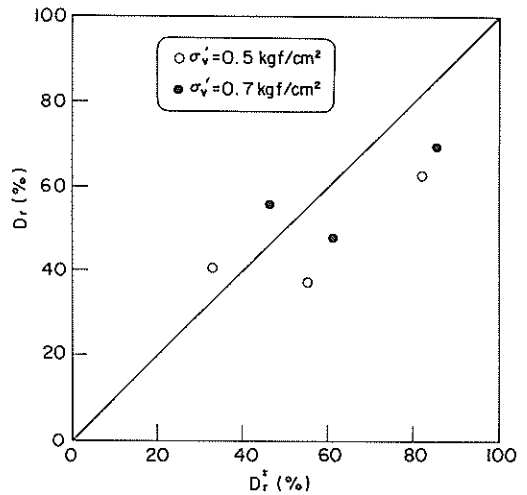


図-16 同じ有効拘束圧に対する相対密度の実測値と推定値

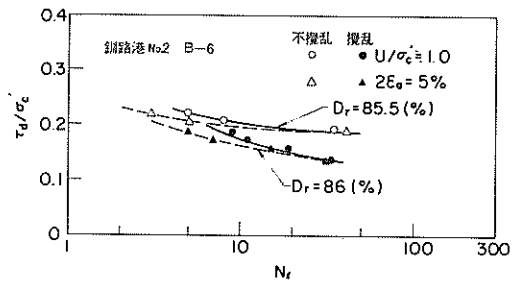


図-17(a) 繰り返しせん断強さ比と液状化波数

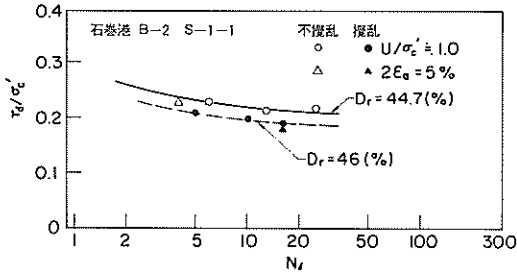


図-17(b) 繰り返しせん断強さ比と液状化波数

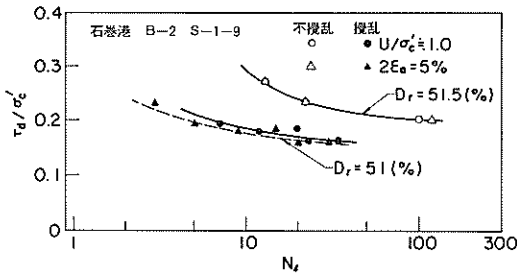


図-17(c) 繰り返しせん断強さ比と液状化波数

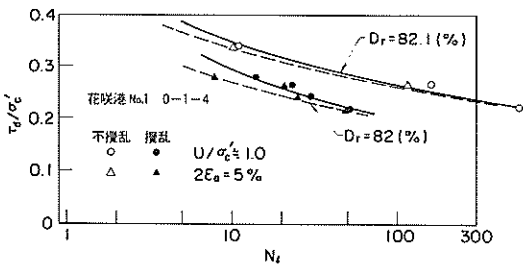


図-17(d) 繰り返しせん断強さ比と液状化波数

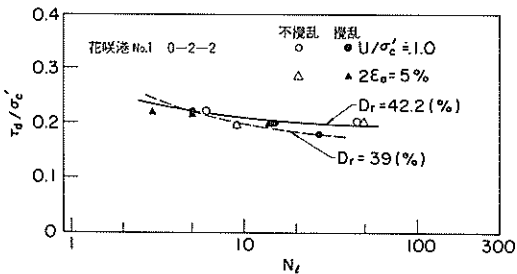


図-17(e) 繰り返しせん断強さ比と液状化波数
(乱さない試料と再構成試料の比較)

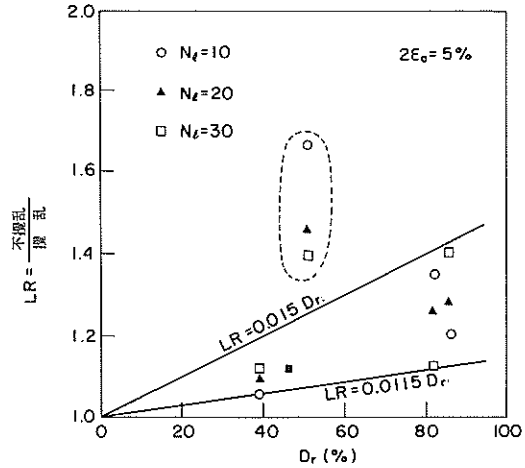


図-18 繰り返しせん断強さ比の比較

して 1.1 ~ 1.7 倍程度が得られている。

5. 地盤の液状化事例解析

1973 年根室半島地震および 1978 年宮城県沖地震により液状化が発生した地点と液状化が発生しなかった地点を対象に 2.2 で述べた方法で事例解析を実施した。この場合、基盤において実際の地震波形が得られている釧路港と石巻港を解析の対象とした。さらに、既往の液状化予測法との比較では、花咲港、秋田港の事例も追加している。これら各港における地震の一覧を表-4 に示す。

5.1 釧路港

(1) 地震応答解析

3. で述べた土質調査の結果をもとに、液状化地点、非液状化地点の地盤を表-5 の一例に示すようにモデル化した。地層は砂と粘土の 2 種類に分割した。剛性率、減衰比のひずみ依存性については、それぞれについて標準的な曲線を与えた。¹⁸⁾ 基盤における地震動としては、1973 年根室半島沖地震のさいに釧路港で実際に観測された地震波形¹⁹⁾を用いた。強震計設置地点は、中央埠頭の付け根の所で、ほぼ基盤上に設置されていると考えてよい。図-19 に、本解析で用いた基盤加速度波形(KUSHIRO-S, S-733(2) S15W)を示す。基盤での最大加速度は、188.4 gal である。地震応答解析は、重複反射理論に基づいて開発されたプログラム「SHAKE」を用いた。図-20 に解析により得られた各深度での最大せん断応力および加速度を示す。

(2) 繰り返しせん断強さ応力比

乱さない試料を用いて、4. で述べた振動三軸試験を実

表-4 各港の地震応答解析に用いた地震動

港名	地点名	ボーリングNo	地震名 地震波形	基盤最大加速度 (gal)	地震の タイプ	液状化 の有無
釧路港	西港地区-3M物揚場	1	1973年根室半島沖地震 KUSHIRO-S S-733(2)S15W	188	衝撃型	液状化
	西港地区 東防波堤取付部	2				非液状化
石巻港	-10M中島2号岸壁	1 (B-1, B-1')	1978年宮城県沖地震 KAIHOKU W42N	293	振動型	液状化
	-5.5M中島岸壁	(B-2)				非液状化
花咲港	中浜地区-6M岸壁	1'	1973年根室半島沖地震 (HACHINOHE S-252 NS)*	(250)**	衝撃型	液状化
	中浜地区-5.5M岸壁	2				液状化
秋田港	大浜2, 3号岸壁	1 (58-4)	1983年日本海中部地震 AKITA S-1567 EAST	191	振動型	液状化
	大浜2, 3号岸壁 旧護岸法線背後	2				非液状化

* ただし、1968年十勝沖地震(M=7.9)の際に八戸港で観測された波形から基盤での波形に逆算したもの。
** 花咲港での地表面最大加速度は280gal程度と推定されているため基盤最大加速度250galとした。

表-5 地震応答解析用にモデル化された地盤(釧路港液状化地点)

層数 6		基盤までの深度 (m) 26.10					
水位線の層番号 2		水位線までの深度 (m) 1.65					
層番号	土質	層厚 (m)	深度 (m)	有効土被 σ'_v (tf/m ²)	剛性率 G_0 (tf/m ²)	単位体積重量 (tf/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)
1	砂	1.65	0.83	1.48	2222.	1.8000	110.
2	砂	0.67	1.99	3.31	2469.	2.0000	110.
3	砂	0.67	2.66	3.98	2469.	2.0000	110.
4	砂	0.67	3.34	4.66	2469.	2.0000	110.
5	砂	0.67	4.01	5.33	2469.	2.0000	110.
6	砂	0.61	4.66	5.97	5898.	2.0000	170.
7	砂	0.61	5.27	6.58	5898.	2.0000	170.
8	砂	0.61	5.88	7.19	5898.	2.0000	170.
9	砂	0.61	6.49	7.80	5898.	2.0000	170.
10	砂	0.61	7.10	8.41	5898.	2.0000	170.
11	砂	0.61	7.71	9.02	5898.	2.0000	170.
12	砂	0.61	8.32	9.63	5898.	2.0000	170.
13	砂	0.61	8.92	10.24	5898.	2.0000	170.
14	砂	0.61	9.53	10.85	5898.	2.0000	170.
15	砂	0.61	10.14	11.46	5898.	2.0000	170.
16	砂	3.80	12.35	13.67	17163.	2.0000	290.
17	砂	11.85	20.17	21.49	31041.	2.0000	390.
18	基盤				34145.	2.2000	390.

施した。得られた τ_d/σ'_e を地盤中の静止土圧係数 K_0 を0.5として式(2)により補正して現地盤の $\tau_d/\sigma'_v \sim N_i$ 関係を求めた。乱さない試料を用いた液状化試験では、試料数に限度があるため、波数の少ない点におけるデー

タが欠落し、広範囲にわたる $R \sim N_i$ 曲線を描くことが困難な場合には、 $R \sim N_i$ 曲線を図-21の例に示すように両対数紙上で直線により近似した。

(3) 等価波数

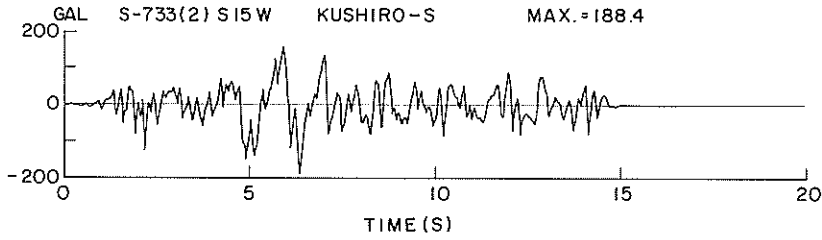


図-19 釧路港における基盤加速度波形 (1973年根室半島沖地震)

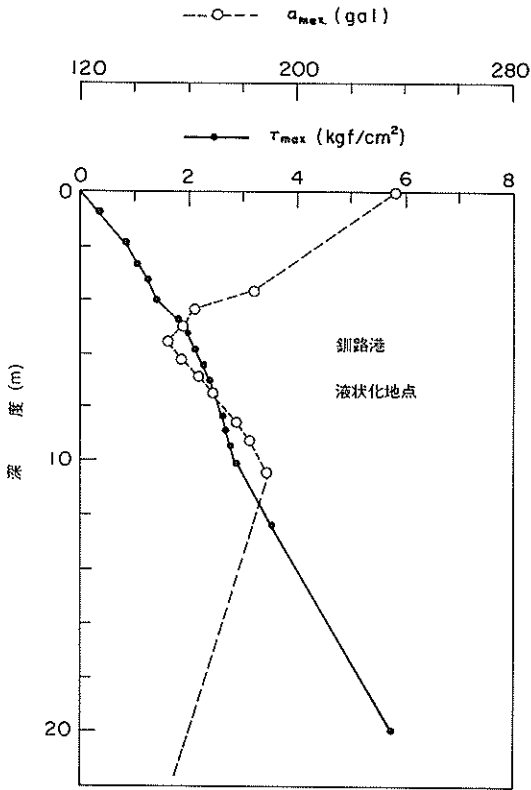


図-20(a) 最大繰り返しせん断応力と最大加速度の深度分布

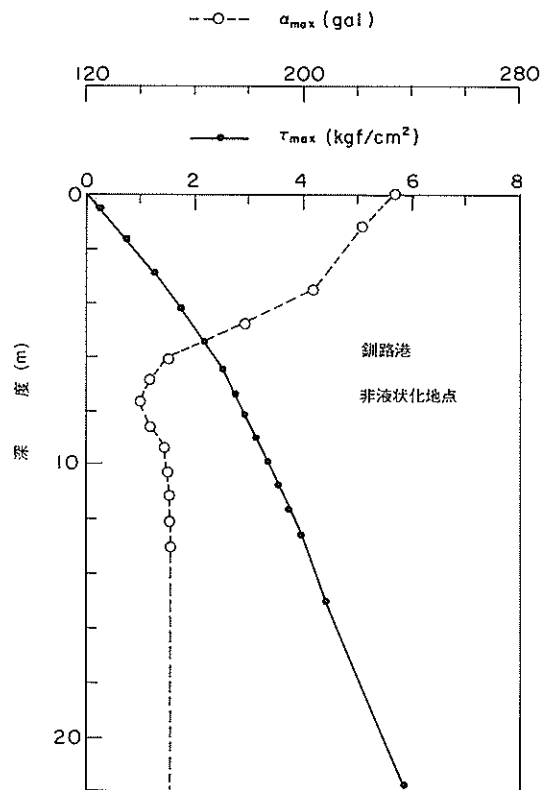


図-20(b) 最大繰り返しせん断応力と最大加速度の深度分布

等価波数を算定するためには、対象深度のせん断応力の時刻歴が必要であるが、これは地震応答解析により得られる。図-22は、液状化地点の深度4.68mにおけるせん断応力の時刻歴を示している。このような図(計算値)から、2.2で述べた方法で等価波数 N_{eq} と繰り返しせん断強さ応力比 $R(N_{eq})$ を計算した結果を表-6に示す。 $R(N_{eq})$ の値は、 N_{eq} から図-21を用いて求めている。なお、表-6で、限界の繰り返しせん断応力比 $\tau'/\sigma'v$

とは、液状化を引起こす最小の繰り返しせん断応力比のことである。

(4) 繰り返しせん断抵抗率

各対象深度において、表-6のような表を作成し繰り返しせん断抵抗率 F_i を算定した。図-23は、このようにして求めた F_i の深度分布を描いたものである。図-23では、本方法で得られた結果を○で示している。図-23の○によると、液状化地点の F_i は0.7~0.8の間にあ

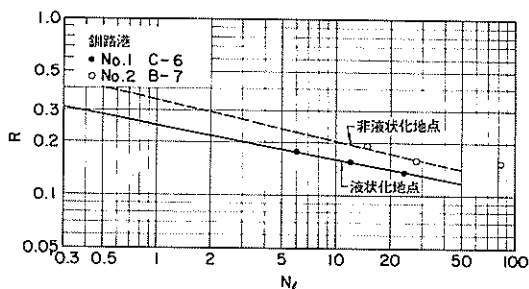


図-21 両対数で表した繰り返しせん断強さと液化化波数の関係

る。一方、非液化化地点では、 F_l は 0.9 ~ 1 程度の値となっている。液化化地点と非液化化地点における F_l を比較すると、液化化地点と非液化化地点の繰り返しせん断抵抗率は、前者が後者に比較して小さくなり、 F_l の大小という点においては地盤の液化化に対する抵抗性が矛盾なく説明される。ただし、図-23の結果からも明らかのように、非液化化地点でも $F_l < 1$ となっており、 $F_l = 1$ を境にして液化化、非液化化を予測するとやや安全側の結果を与えることになるが、この点については後で考察する。

5.2 石巻港

石巻港についても、釧路港と同様な解析を行なった。地震波形としては、1978年宮城県沖地震において石巻市開北橋基盤上で観測された地震動 (KAIHOKU W42N) を用いた。基盤の最大加速度は 239 gal である。図-24に、 F_l の深度分布 (○で表示) を示している。この場合も、釧路港の事例と同様に、非液化化地点においても $F_l < 1$ となっている。

5.3 既往の方法による液化化予測

ここでいう既往の方法とは、2.1で述べた岩崎・龍岡の方法において、地震波形の不規則性に関する補正係数 c_2 のかわりに、石原の方法で用いた補正係数 c_k を用いた方法である。実際に検討対象地盤の地震波形が得られている場合には、地震波形が衝撃型か振動型かの判断が比較的容易に行なわれることから、ここでは c_2 のかわりに c_k を採用したものである。また、ここでは、釧路港、石巻港のほか、1973年根室半島沖地震のさいに液化化が発生した花咲港、1983年日本海中部地震のさいの秋田港における液化化地点と非液化化地点も検討の対象とした。ただし、花咲港の場合には、実際の地震波形が観測されていないので、1968年十勝沖地震において八戸港で観測された波形 (S-252 NS 基盤、最大基盤加速度 170 gal) を用いたが、最大基盤加速度とし

ては 250 gal とした。秋田港の地震波形は、図-25に示す実際に観測された波形 (S-1567 EAST AKITA、最大基盤加速度 191.3 gal) を用いている。なお、釧路港、花咲港に適用した地震波形は衝撃型であるから $c_k = 0.55$ 、石巻港、秋田港に適用した地震波形は振動型であるので $c_k = 0.70$ とし、式(2)の補正係数を用いて、 $C_k = 0.9 \cdot (1 + 2K_0) / 3 \cdot c_k$ として、それぞれ $C_k = 1.09$ 、 $C_k = 0.86$ とした。

釧路港、石巻港の F_l の深度分布は、既に図-23、図-24に示されており (図中の●)、それぞれ、図-26、図-27に花咲港、秋田港で得られた F_l の深度分布を示す。ただし、秋田港の液化化地点の結果は、図-28に示す再構成試料による $(\tau_d / \sigma'_c)_{20}$ を用いている。地盤の相対密度は、前述の Myerhof の式を用いて N 値から推定した。これらの結果は、換算波数を用いた F_l と同じかやや大きくなる傾向があるが、非液化化地点においてなお $F_l < 1$ のところもみられる。

5.4 繰り返しせん断抵抗率と液化化

地盤の液化化を予測する場合、繰り返しせん断抵抗率 $F_l = 1$ を境に液化化、非液化化を予測することが一般的であるが、5.2、5.3で述べた事例解析では、非液化化地点においても F_l が 1 以下のところがみうけられる。図-29(a)、(b)は、それぞれ、5.2、5.3で得られた F_l の深度分布をまとめて示したもので、○は液化化地点、●は非液化化地点の値である。図-29において、非液化化地点のみを対象として境界の F_l 値を求めると、 F_l は 0.85 程度となっている。ここで、非液化化地点を対象としたのは、液化化地点の調査は液化化発生後に行なわれたものであることから、地盤特性が液化化前に比べて著しく変化している可能性も考えられたこと、また、液化化地点においても、深度によっては液化化が発生していない可能性があることなどによるものである。

さて、ここで述べた振動三軸法による液化化予測法は、実際に観測された地震波形を用いて液化化事例解析を行なっている点に特徴がある。ここで得られた事例解析結果では、 F_l が 0.85 ~ 1.0 でも液化化しないという結果が得られているが、この結果をそのまま実際の液化化予測に適用し、いかなる場合にも機械的に、 $F_l < 0.85$ を液化化の指標とすることについてはさらに検討を要するものと思われる。すなわち、実際には、液化化予測対象地点における地震動 (地震波形、最大加速度等) を予知することは現状では不可能に近く、また、現地盤の均一性 (一つのサンプラー内においても土質特性が均一でない場合もある) やサンドサンプリング手法が確立されていない (サンプラーの規格が不統一、押込み式と回転式

表-6 振動三軸法による液状化予測計算表

ボーリング地点	釧路港(No.1:液状化地点)				サンプル名	C - 6				
深 度(m)	6.48				地震波形	KUSHIRO S-733(2)S15W				
基盤の最大加速度 (gal)						188.4				
有効上 載 力 σ'_{v0} (kgf/cm ²)						0.780				
限界の繰返し強さ応力比 $R_{50} = \tau' / \sigma v'$						0.121				
限界のせん断強さ τ' (kgf/cm ²)						0.094				
最大せん断応力 τ_{max} (kgf/cm ²)						0.229				
等価せん断応力 $\tau_e = 0.65 \tau_{max}$						0.149				
繰返しせん断応力比 $L = \tau_e / \sigma'_{v0}$						0.191				
N_{ef} (Lに対する N_l)						4.0				
半 波 の 数						12				
半波No	τ_i	$\frac{\tau_i}{\sigma'_{v0}}$	N_{if}	$\frac{1}{N_{if}}$	半波No	τ_i	$\frac{\tau_i}{\sigma'_{v0}}$	N_{if}	$\frac{1}{N_{if}}$	
1	0.229	0.294	0.4	2.5	9	0.103	0.132	34	0.03	
2	0.194	0.249	1.0	1.0	10	0.098	0.126	36	0.03	
3	0.196	0.251	1.0	1.0	11	0.119	0.153	12	0.08	
4	0.205	0.263	0.72	1.39	12	0.142	0.182	5	0.20	
5	0.145	0.186	4.2	0.24	13					
6	0.102	0.131	29	0.03	14					
7	0.120	0.154	12	0.08	15					
8	0.117	0.150	14	0.07	①	$\Sigma(1/N_{if}) = 6.65$				
等価波数 $N_{eq} = N_{ef} \times 0.5 \times ①$						13.3				
$R(N_{eq})$ (N_{eq} に対する R)						0.151				
繰返しせん断抵抗率 $F_l = R(N_{eq}) / L$						0.79				
判 定						液状化 する				
備 考										

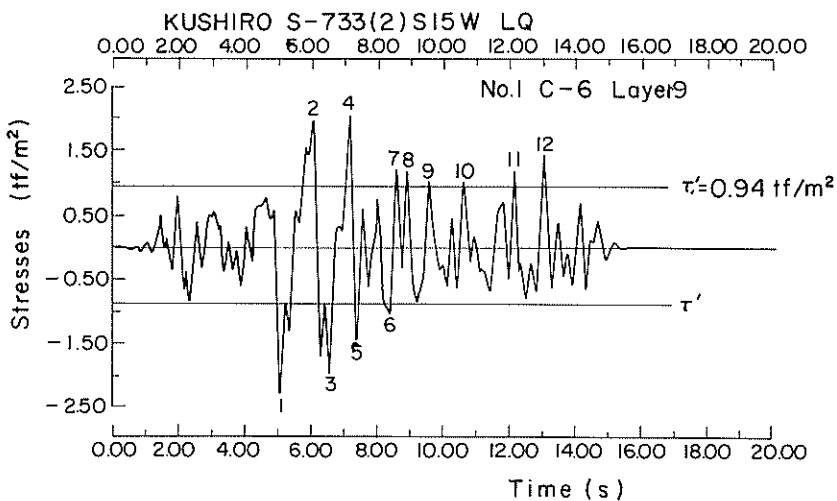


図-22(a) 繰返しせん断応力の時刻歴

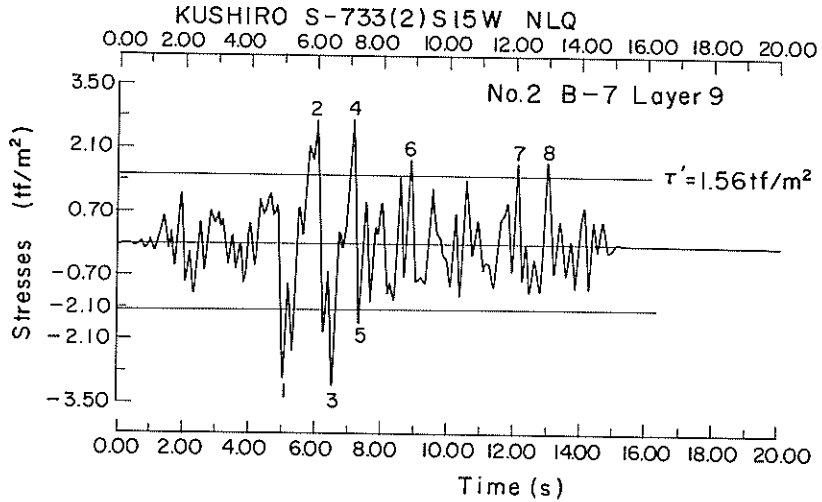


図-22(b) 繰り返しせん断応力の時刻歴

サンプラーの優劣等)など未解明な点も存在する。このような現状を考慮すると、実務的には何らかの安全性を見込む必要があるものとする。どの程度の安全率 F_s を見込むかについては明確ではないが、仮りに $F_t < 1$ を液状化の指標とすると、本事例解析では、 $F_s = 1.0 / 0.85 = 1.17$ を採ったことになる。

次に、非液状化地点における F_t 値が1以下になる理由について考察する。 F_t は、式(2)に示されるように、繰り返しせん断強さ応力比 R と繰り返しせん断応力比 L の比であるから、非液状化地点における F_t 値が1以下になる理由として、①繰り返しせん断強さ応力比 R が過小評価されていること、②繰り返しせん断応力比 L が過大評価されていること、もしくは、③①と②の両方が考えられる。

①の主要な原因としては、試料の乱れの影響や振動三軸試験において液状化時点を軸ひずみ両振幅 $2\varepsilon_a$ が5%になった時としたことの影響などが考えられる。これらのうち、試料の乱れについては、その影響を定量的に把握する方法が確立されておらず、したがって、ここでは、同じサンプリング手法を用いて注意深くサンプリングを行えば同じ品質の試料が得られるとの前提になって議論を進めることにする。このような考えは、2.1で述べた岩崎らの方法において、補正係数 $e_3 \cdot e_4 = 1$ とみなす考えと同様である。一方、ここで採用した液状化時点の定義は、4で述べたように初期液状化点に対応するものであるが、場合によっては、 $2\varepsilon_a$ が10%のときをもって完全液状化とよぶ場合もある。この場合、液状化波数 $N_t = 20$ 波における繰り返しせん断強さ応力比の比率、

$(\tau_d/\sigma'_c)_{2\varepsilon_a=10\%} / (\tau_d/\sigma'_c)_{2\varepsilon_a=5\%}$ は、1.1~1.2程度になるといわれており^{15),16)} $2\varepsilon_a$ が10%のときを液状化とすると、5.3の方法で求めた F_t の境界値は0.94~1.0となる。等価波数 N_{eq} を用いる方法では、 $R(N_{eq})$ は $\tau_d/\sigma'_v \sim N_t$ 関係の形に依存するので、簡単には求められないが、傾向としては5.2の方法で求めた F_t 値よりも大きくなることは明らかである。

②の主要な原因については、地震応答解析が、重複反射理論に基づくプログラム「SHAKE」を用いて行われたことによる繰り返しせん断応力の過大評価が考えられる。この解析手法は、いわゆる全応力解析法とよばれるもので、有効応力解析法に比較するとかなり大きなせん断応力を与えるといわれている。図-30は、石原の文献²⁰⁾から、全応力解析法と有効応力解析法による地盤中の繰り返しせん断応力比を読取り比較したものである。図-30において、間隙水圧を考慮しない解析とあるのは、全応力解析であるが応力~ひずみ関係を Hardin-Drnevich 型の双曲線モデルで与えた場合である。図-30から明らかのように、プログラム「SHAKE」を用いた場合の繰り返しせん断応力比の割合 (Shakeによる解析/有効応力解析) は、深度20m以浅で約1.4~1.8倍、部分的に2.4倍となっており、有効応力解析法に比較して大きな繰り返しせん断応力比を与えている。定量的な倍率については、地盤や地震動の特性にも依存すると思われるが、このような傾向は、Finnら²¹⁾ Martinら²²⁾ によっても報告されている。実用上は、全応力解析法を用いることは安全側の結果を与えることにはなるが、上記のように非液状化地盤において F_t 値が1以下になる原因の一

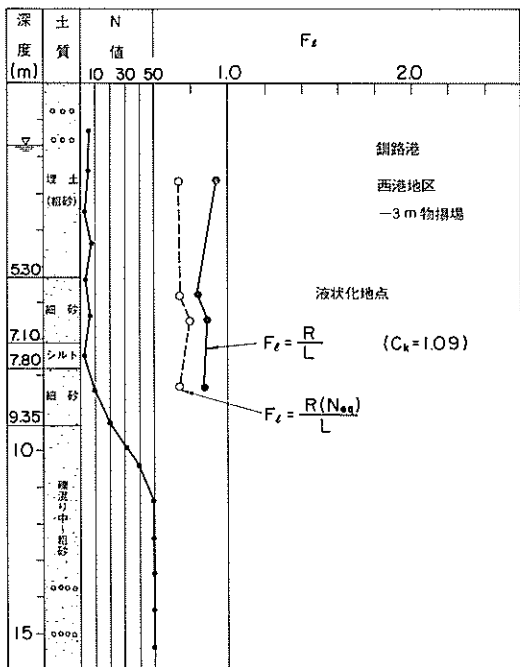


図-23(a) 繰り返しせん断抵抗率の深度分布
(釧路港：液状化地点)

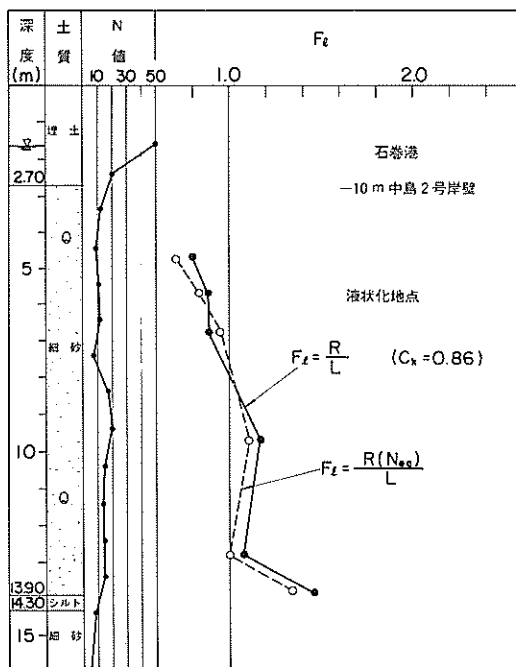


図-24(a) 繰り返しせん断抵抗率の深度分布
(石巻港：液状化地点)

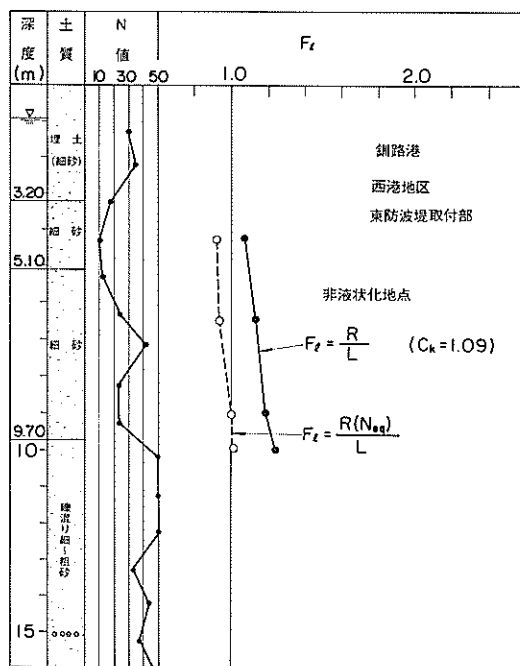


図-23(b) 繰り返しせん断抵抗率の深度分布
(釧路港：非液状化地点)

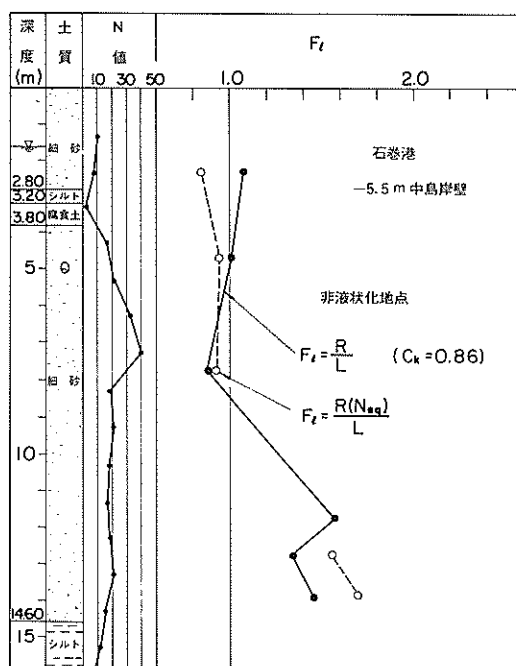


図-24(b) 繰り返しせん断抵抗率の深度分布
(石巻港：非液状化地点)

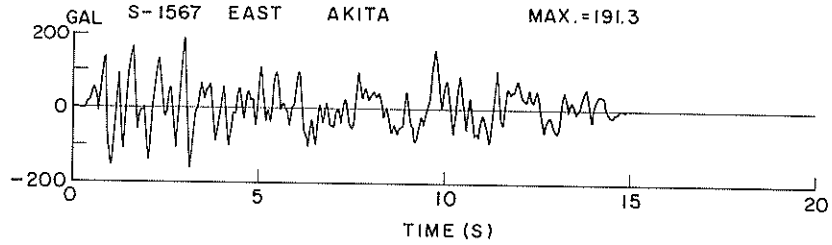


図-25 秋田港における基盤加速度波形
(1983年日本海中部地震)

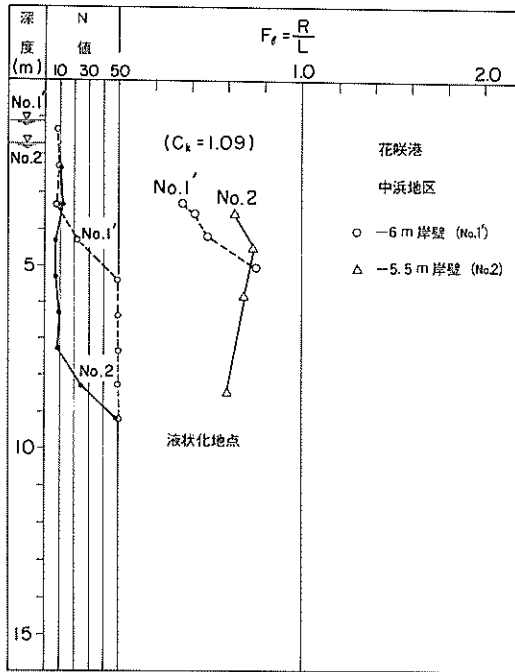


図-26 繰り返しせん断抵抗率の深度分布
(花咲港)

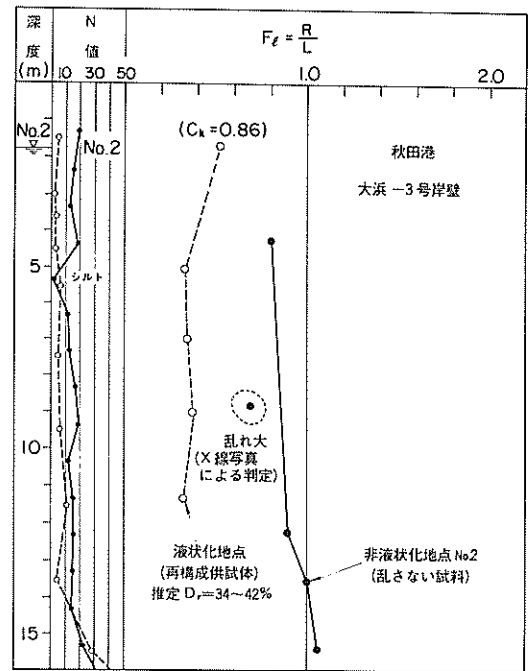


図-27 繰り返しせん断抵抗率の深度分布
(秋田港)

つが全応力解析法を用いたことによるものと考えられる。

以上のことを考慮すると、ここで適用した液状化予測法では、 $F_l = 1$ を指標として液状化・非液状化の予測を行なった場合、やや安全側の結果を与えるものと考えられるが、 $F_l = 1$ において液状化の予測を行なうことは、実用上安全サイドの予測を与えるという意味で、現状では背首されるものと思われる。ただし、本報告で取り扱った事例では、 $F_l = 0.85$ を境として液状化、非液状化の区別がなされる結果を示しており、また、上述のように、 F_l 自体にも安全側の要素が含まれていることから、

$F_l = 0.85 \sim 1.0$ の範囲における液状化の判定については、上述のことを十分考慮して構造物の重要度等を勘案のうえ判定を行なっても良いものと思われる。なお、本報告で示した解析例は2つの地盤(4つの地点)の事例に過ぎず、本報告の結果を適用するにあたっては、導かれた結果が少ない事例に基づくものであることに充分留意すべきであろう。

6. まとめ

過去のいくつかの地震により液状化が発生した地盤と

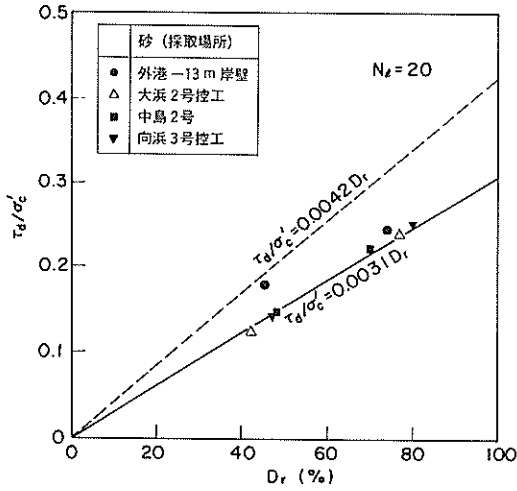


図-28 繰り返しせん断強さ比と相対密度

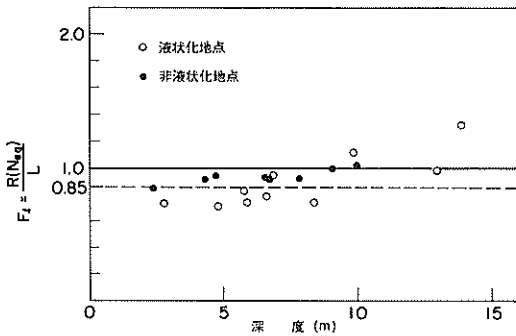


図-29(a) 繰り返しせん断抵抗率の深度分布 (振動三軸法)

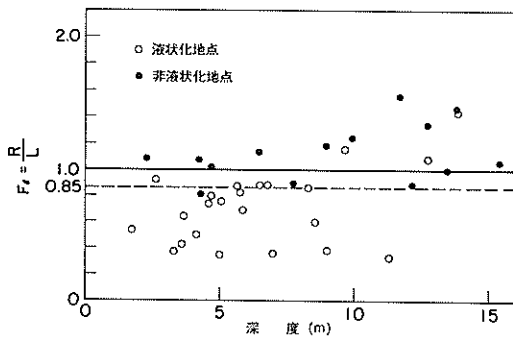


図-29(b) 繰り返しせん断抵抗率の深度分布 (既往の方法)

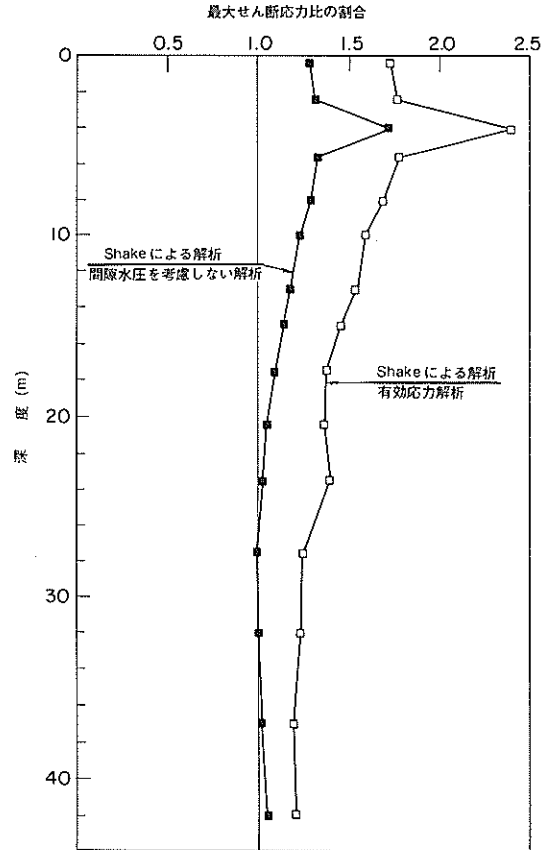


図-30 解析方法による繰り返しせん断応力比の相違 (石原²⁰⁾原図)

液状化が発生しなかった地盤を対象に、いわゆる振動三軸法による液状化予測手法といわれる方法を用いて、その適用性について調べた。その結果をまとめると以下のようになる。

(1) 振動三軸法により、 $F_1 = 1$ を指標として液状化・非液状化の予測を行なった場合、約2割程度の安全率が含まれていることが明らかとなった。実用上は、安全サイドの予測ということで、 $F_1 = 1$ において液状化の予測を行なうことも背負されるものと思われる。

(2) 本報告で取り扱った事例では、 $F_1 = 0.85$ を境として液状化、非液状化の区別がなされる結果を示したが、 F_1 自体にも安全側の要素が含まれていることから、 $F_1 = 0.85 \sim 1.0$ の範囲における液状化の判定については、十分詳細な土質調査・試験が実施されれば、構造物の重要度等を勘案のうえ液状化判定を行なって良いものと思われる。

7. あとがき

本研究は、液状化地点の近傍に非液状化地点があり、かつ、その地域の基盤において実際に地震動が観測されている場所を選定し、非液状化地点に重点をおいた事例解析を行なうことにより詳細な液状化予測法の適用性を調べたものである。実際に液状化地点および非液状化地点近傍において地震波が観測された例はきわめて少なく、現状ではここで述べたような実際の地震波を用いた解析を数多く期待することはできないが、今後とも、引続き同様な事例を集積していく必要があるものと考え。

最後に、本報告に取りまとめられている現地調査、振動三軸試験等のデータは、元土質部動土質研究室大根田秀明研究官、入沢一明研究員の努力に負うところが大きい。また、使用した地震波形の一部は構造部耐震構造研究室倉田栄一研究官にいただいたものである。記して深甚の謝意を表する次第である。

(1988年3月31日受付)

参考文献

- 1) 谷口栄一, 安田 進: 地盤の液状化, 6.液状化についての諸基準, 土と基礎, Vol. 30, No. 3, pp. 69-76, 1982.
- 2) Seed, H.B. and Idriss, I.M.: Analysis of Soil Liquefaction; Niigata Earthquake, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 93, No. SM3, pp. 83-108, 1967.
- 3) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1979.
- 4) 井合 進, 小泉勝彦, 土田 肇: 粒度とN値による新しい液状化予測法, 港湾技術研究所報告, Vol. 25, No. 3, pp. 125-234, 1986.
- 5) Seed, H.B. and Idriss, I.M.: Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273, 1971.
- 6) Ishihara, K.: Simple Method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits during Earthquakes, *Soils and Foundation*, Vol. 17, No. 3, pp. 1-18, 1977.
- 7) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田 進: 砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 641-648, 1978.
- 8) 大橋昭光, 岩崎敏男, 龍岡文夫, 宮田造邇: 東京湾岸道路の曙橋および新辰巳橋における地盤耐震性調査, 土木研究所資料, 第1170号, 1976.
- 9) Annaki, M. and Lee, K.L.: Equivalent Uniform Cyclic Concept for Soil Dynamics, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 103, No. GT6, pp. 549-564, 1977.
- 10) 運輸省港湾局, 港湾技術研究所, 北海道開発局港湾部: 1973年根室半島沖地震港湾被害報告, 津波調査報告, pp. 1-139, 1973.
- 11) 土田 肇他: 1978年宮城県沖地震港湾被害報告, 港湾技研資料, No. 325, 1979.
- 12) 土田 肇他: 1983年日本海中部地震港湾被害報告, 港湾技研資料, No. 511, 1985.
- 13) 梅原靖文, 善 功企, 浜田浩二: 振動三軸試験による飽和砂の液状化特性, 港湾技術研究所報告, Vol. 15, No. 4, 1976.
- 14) 梅原靖文, 善 功企, 浜田浩二: 排水効果を考慮した飽和砂の液状化強度, 港湾技術研究所報告, Vol. 20, No. 1, 1981.
- 15) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 安田 進: 不攪乱砂質土の非排水動的強度の正規化表示, 第13回土質工学研究発表会講演集, pp. 465-468, 1978.
- 16) 東京都土木技術研究所: 東京低地の液状化予測, 1987.
- 17) Myerhof, G.G.: Discussion of Session 1, *Proc. of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, 1957.
- 18) 土田 肇, 山田通一郎, 倉田栄一: 港湾地域強震観測地点資料(その1), 港湾技研資料, No. 34, 1967.
- 19) 北沢壮介, 桧垣典弘, 野田節男: 沖縄県および奄美大島の大地震時における地盤加速度, 港湾技研資料, No. 369, 1981.
- 20) 石原研而: 地盤の液状化 4.液状化を考慮した地盤の応答解析法, 土と基礎, Vol. 29, No. 11, pp. 85-91, 1981.
- 21) Finn, W.D.L., Martin, G.R. and Lee, M.K.W.: Comparison of Dynamic Analyses for Saturated Sands, *Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 1, pp. 472-491, 1978.
- 22) Martin, P.P. and Seed, H.B.: Simplified Procedure for Effective Stress Analysis of Ground Response, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 105, No. GT6, pp. 739-758, 1979.

付 録

No.1 (液状化地点)

標尺 (m)	深さ (m)	土質記号	土質名	N 値			B 孔		C 孔		D 孔	
				0	10	20	採取深度 (m)	試料No.	採取深度 (m)	試料No.	採取深度 (m)	試料No.
1												
2							2.00	B-2				
3							2.76				3.00	D-3
4												
5	5.35		埋土 (粗砂)				4.70	B-4				
6	6.67		砂混りシルト				5.46					
7	7.10		埋土				6.28	B-5				
8	7.80		砂混りシルト						6.30	C-6		
9	9.35		細砂						7.06			
10	9.85		砂混り粗砂						8.00	C-8		
11	10.90		砂混り粗砂						8.76			
12												
13	12.70		粗中砂									
14	13.75		細砂									
15												
16	15.80		砂混り粗砂									
17	16.65		細砂									
18	17.40		砂混り粗砂									
19			砂 層									
20	19.70		砂混り粗砂									

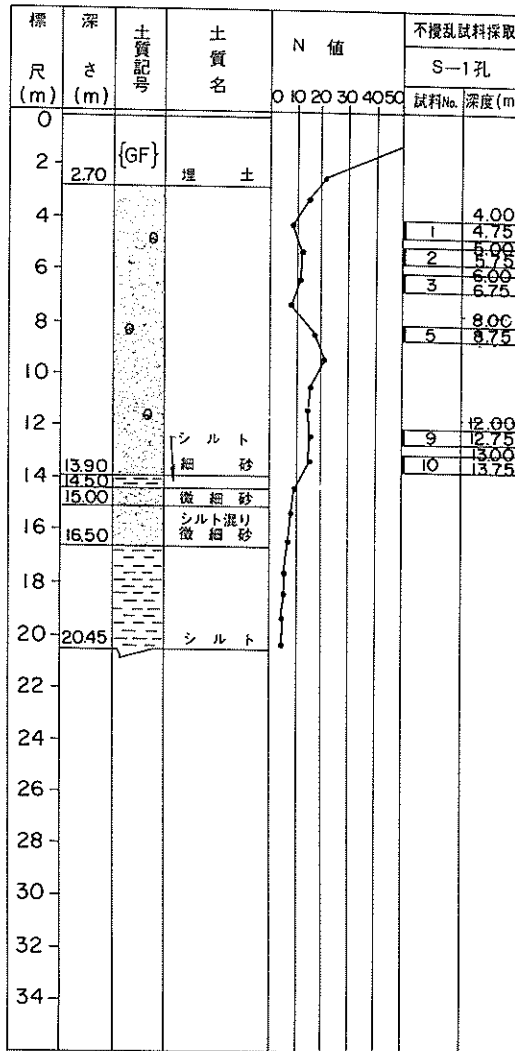
付図-1(a) 釧路港の土質 (No.1)

No.2 (非液状化地点)

標尺 (m)	深さ (m)	土質記号	土質名	N 値			A 孔		B 孔	
				0	10	20	採取深度 (m)	試料No.	採取深度 (m)	試料No.
1	1.50		埋土 (細砂)							
2			埋土 小礫混り 粗砂							
3	3.20						3.20	A-1		
4							3.96			
5	5.10		粗砂							
6									5.60	B-4
7										
8										
9									8.10	B-7
10	9.70		粗砂						8.96	
11									8.96	B-8
12			礫混り 粗砂						9.60	
13										
14	14.40		中砂							
15	14.90		礫混り粗砂							
16	16.60		粗砂							
17										
18										
19			礫混り 粗砂							
20										

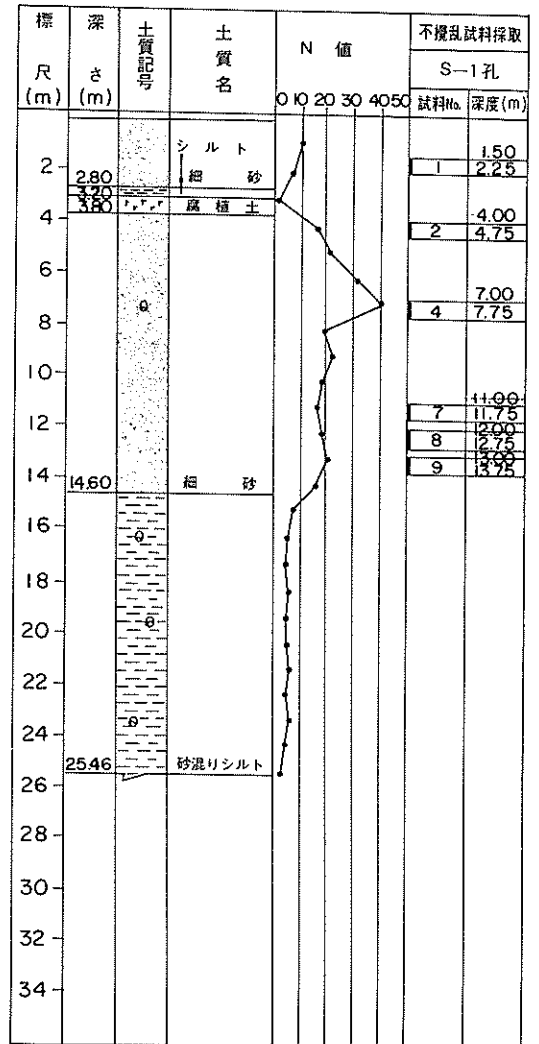
付図-1(b) 釧路港の土質 (No.2)

No.1 (B-1') (液状化地点)



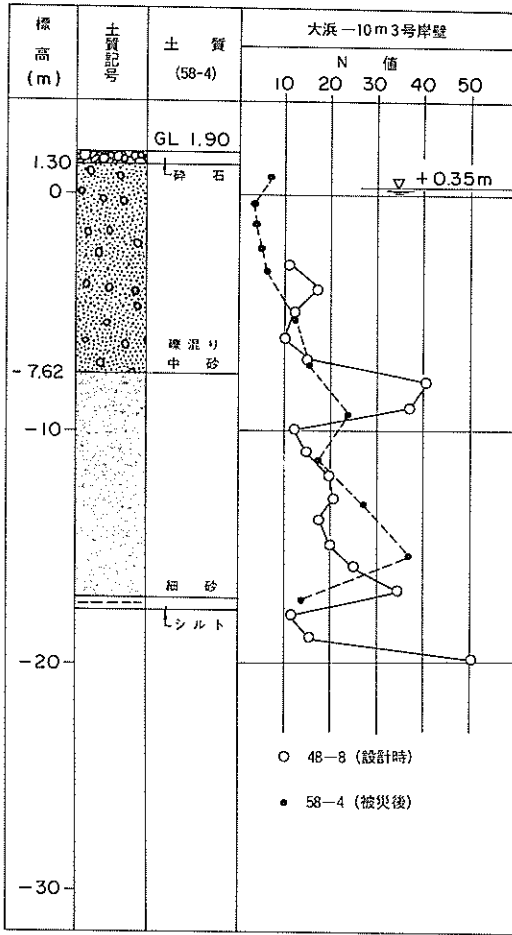
付図-2(a) 石巻港の土質 (No.1)

No.2 (B-2) (非液状化地点)



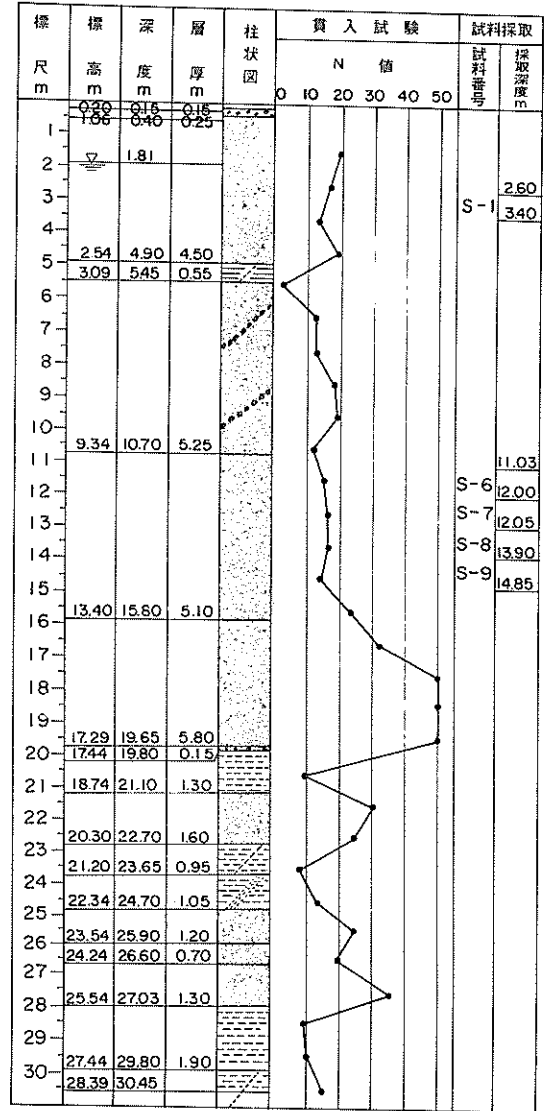
付図-2(b) 石巻港の土質 (No.2)

No.1 (液状化地点)

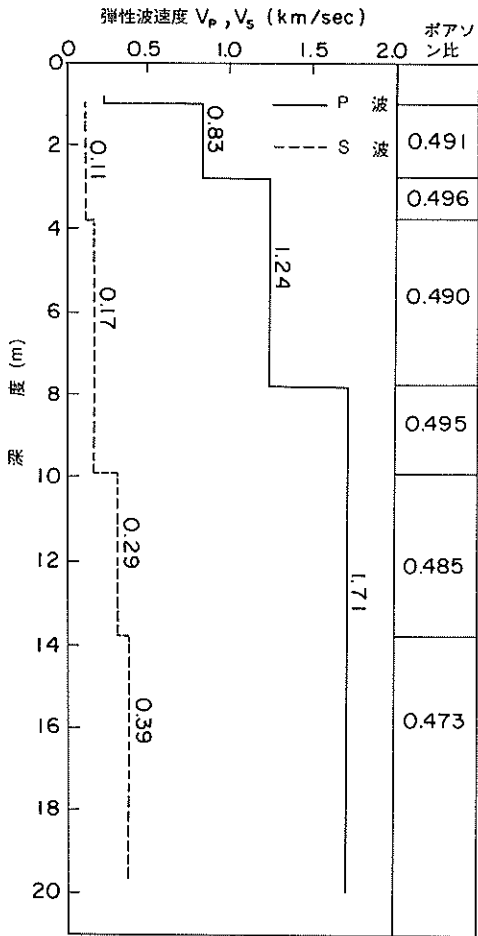


付図-4(a) 秋田港の土質 (No.1)

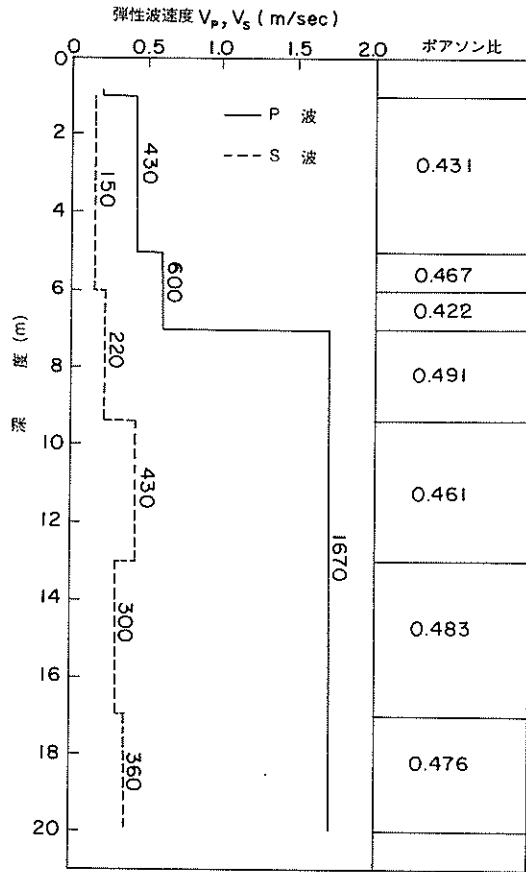
No.2 (非液状化地点)



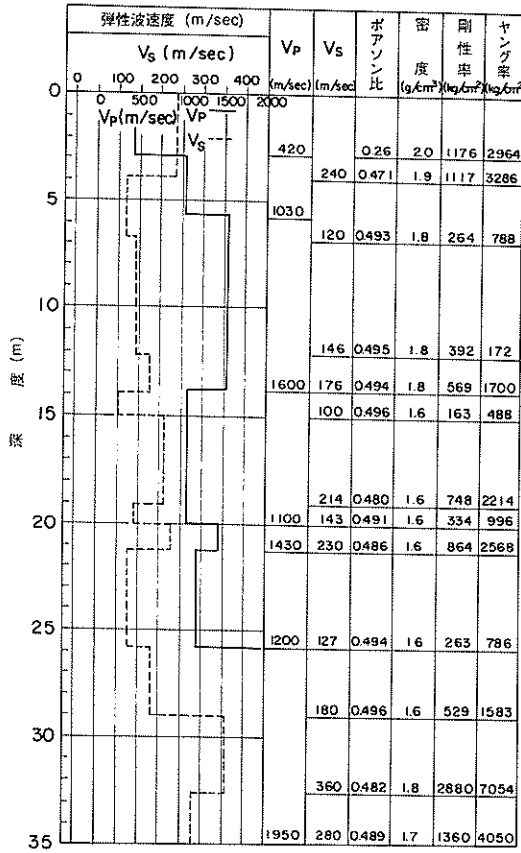
付図-4(b) 秋田港の土質 (No.2)



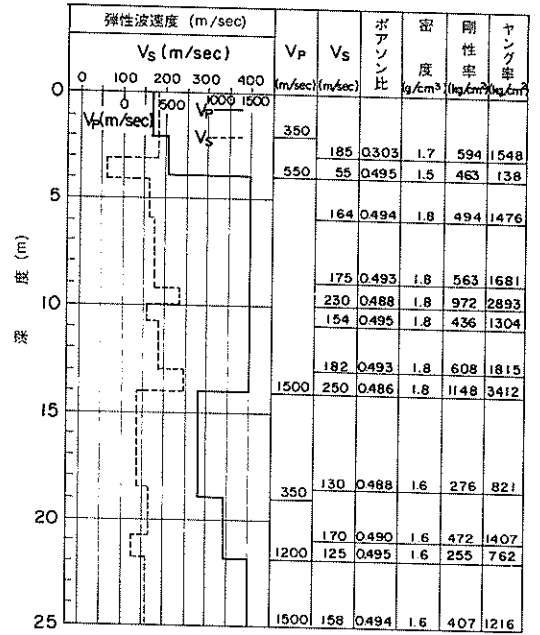
付図-5(a) 釧路港のPS検層結果(No.1)



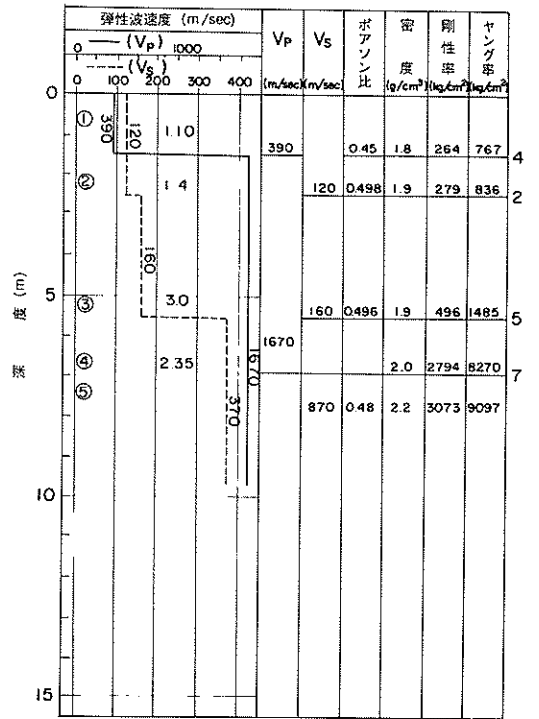
付図-5(b) 釧路港のPS検層結果(No.2)



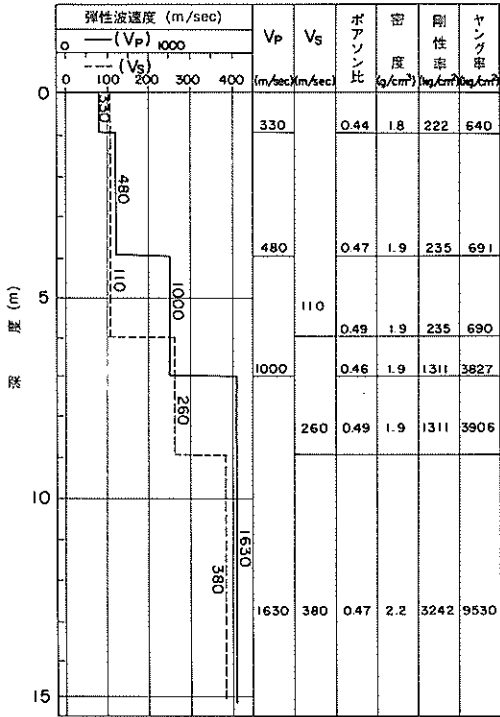
付図-6(a) 花咲港のPS検層結果 (No.1)



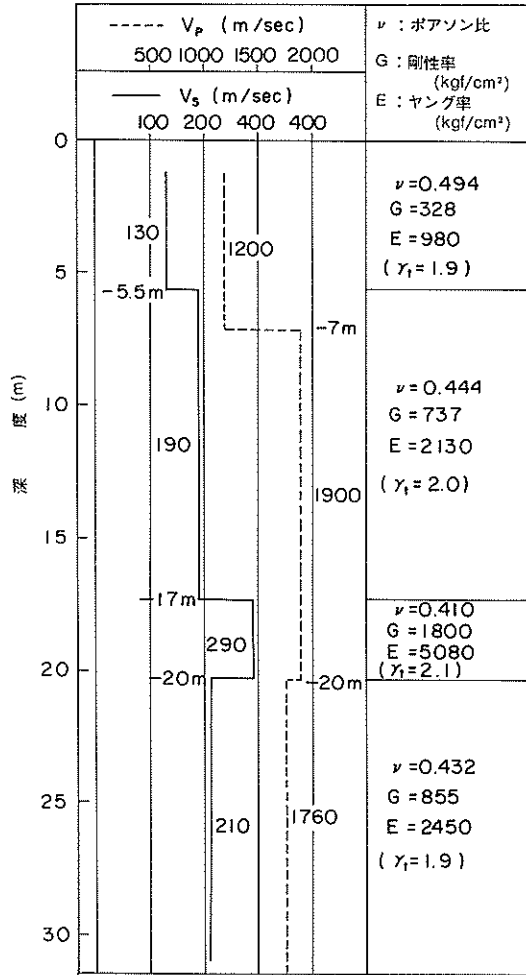
付図-6(b) 花咲港のPS検層結果 (No.2)



付図-7(a) 石巻港のPS検層結果 (No.1)



付図-7(b) 石巻港のPS検層結果 (No.2)



付図-8 秋田港のPS検層結果 (No.2)

港湾技研資料 No.623

1988・6

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 日青工業株式会社

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