

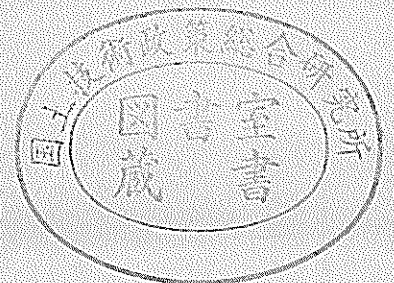
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 15 NO. 4 DEC. 1976

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第15巻 第4号 (Vol. 15, No. 4), 1976年12月 (Dec. 1976)

目 次 (CONTENTS)

1. 流れの中の風波についての実験的研究 (第2報)
..... 加藤 始・鶴谷広一・土肥俊満・宮崎 豊..... 3 B- 6
(Experimental Study of Wind Waves Generated on Water Currents (2nd Report)
..... Hajime KATO, Hiroichi TSURUYA, Toshimitsu DOI, Yutaka MIYAZAKI)
2. 振動三軸試験による飽和砂の液状化特性
..... 梅原靖文・善 功企・浜田浩二..... 49 E-10
(Liquefaction of Saturated Sands in Dynamic Triaxial Tests
..... Yasufumi UMEHARA, Kouki ZEN, Kouji HAMADA)
3. 港湾における空間設計手法の開発 (第2報) ——任意形状物体および地形の
景観図化——..... 奥山育英・佐々木芳寛..... 75 2B- 2
(Development of Space Design of Port and Harbour (2nd Report)——Visual
Simulation of Arbitrary Three Dimensional Objects and Terrain——
..... Yasuhide OKUYAMA, Yoshihiro SASAKI)
4. 羽根車形状が浚渫ポンプ特性に及ぼす影響について
..... 増田勝人・宮崎昭二・岡山義邦..... 95 2C- 8
(Influence of Impeller's Shape on the Characteristics of Dredging Pump
..... Katsuo MASUDA, Shoji MIYAZAKI, Yoshikuni OKAYAMA)

2. 振動三軸試験による飽和砂の液状化特性

梅原靖文*・善 功企**・浜田浩二**

要 旨

液状化を主体とする砂の動的特性を調べるために、振動三軸試験装置による4種類の飽和砂の非排水繰り返し載荷試験が実施された。試験から得られた結果を用いて、液状化強さに及ぼす諸要素の影響や、静的三軸試験との相関性および実際の液状化地盤への適用性などが検討された結果、次のことが明らかにされた。

- 1) 液状化強さは、相対密度や平均粒径の影響のみによるものではなく、砂の種類により異なる。このことは、圧縮性の相違をもたらす砂の表面形状や粒子構造などの微視的要因によるものと考えられる。
- 2) 慣用の排水せん断試験による圧縮性が、液状化強さによく対応することから、液状化強さが慣用の三軸試験の結果から推定しうる可能性がある。
- 3) 動的内部まさつ角 ϕ'_d は、静的内部まさつ角 ϕ'_s よりもかなり小さい。両者の正接の比 $\tan \phi'_d / \tan \phi'_s$ は、砂の種類、相対密度にかかわらず、液状化強さと一義的に対応する。
- 4) 振動三軸試験を用いて新潟地震における液状化地盤を解析した結果は、地震前後の N 値の変動をかなり良く説明した。

* 土質部 土性研究室長

** 土質部 動土質研究室

2. Liquefaction of Saturated Sands in Dynamic Triaxial Tests

Yasufumi UMEHARA*

Kouki ZEN**

Kouji HAMADA**

Synopsis

Undrained cyclic loading triaxial tests on four kinds of saturated sands were conducted to investigate the dynamic properties of sands including liquefaction. Test results were examined to find the governing factor among those which contribute to liquefaction of different sands, correlation between dynamic and static triaxial tests, and applicability to the analysis of sand deposits having liquefied.

It may be concluded that:

1) The susceptibility to liquefaction differs according to types of sands except the influence of known factors such as relative density and mean grain size. This may be due to the microscopic factor including shapes and structures of sand grains, which may cause some difference of compressibility in sand.

2) Since the susceptibility of sands to liquefaction corresponds to the index on compressibility obtained from drained triaxial tests, there may be a possibility to predict liquefaction from conventional drained triaxial tests.

3) The angle of internal friction from dynamic tests, ϕ'_d is considerably small compared with that from static drained tests, ϕ'_s . The ratio, $\tan \phi'_d / \tan \phi'_s$ well corresponds to the susceptibility of sands to liquefaction irrespective of types of sands and relative density.

4) The liquefaction zone estimated from dynamic test results reasonably agrees with the zone, in which the N -values of standard penetration tests conducted after an earthquake vary from those prior to the earthquake.

* Chief of the Soil Mechanics Laboratory, Soils Division

** Member of the Soil Dynamics Laboratory, Soils Division

目 次

要 旨	E-10	49
1. ま え が き	E-14	53
2. 液状化試験の意義		53
2.1 地震時応力状態と繰り返しせん断試験		53
2.2 せん断試験結果の液状化予測への活用	F- 1	54
3. 振動三軸試験装置による実験概要		54
3.1 実験装置		54
3.2 試 料	F- 3	56
3.3 実験方法	F- 4	57
4. 実験結果と考察	F- 5	58
4.1 液状化の発生条件		58
4.2 液状化強さの評価とその特性	F- 7	60
4.3 液状化過程の有効応力表示と動的内部まざつ角	F-14	67
5. 地盤の液状化検討例	G- 3	70
6. 結 論	G- 4	71
7. あとがき		71
参考文献	G- 5	72
記号一覧表	G- 6	73
付 録		73

1. まえがき

1964年6月の新潟地震以来、飽和砂質地盤の液状化が港湾施設をはじめ、各種の施設、構造物建設上の大きな問題としてクローズアップされるようになってきている。地震時に生ずる液状化は地盤中の飽和砂に繰り返しせん断力がほぼ非排水条件とみられる状態で加わるため、間げき水圧が徐々に上昇し、最終的には、初期の拘束圧と等しくなることにより生ずる現象と考えられている。このような液状化の発生機構は、各種のせん断試験により比較的容易に調べられる。せん断試験法としては、振動三軸試験^{1),2)}、振動単純せん断試験^{3),4)}、ねじりせん断試験^{5),6)}があり、それぞれ一長一短がある^{4),5)}が、応力解析が容易で試験技術上の問題点の少ない振動三軸試験法が、実務的な見地から最も汎用性の高いものとみられている。いずれの方法も基盤から地表面に伝播する地震波によって、土中の一要素が水平方向のせん断力を繰り返し受けるといふ考え方にもとづくものであり、繰り返しせん断中のせん断応力、ひずみ、間げき水圧の変化を測定することにより、液状化強さを定量的に評価しようとするものである。すなわち、せん断試験の目的は、地震時状態を室内において再現し、色々な土質条件のもとでの液状化の発生規準を決定することである。このような液状化発生規準は地震時地中応力の推定値との対比により、現地盤の液状化予測に活用される。この場合、液状化が発生すると支持地盤は流体同然となってしまうことから、「発生する」と判定されるか「発生しない」と判定されるかにより、構造物設計上、根本的な相違が生ずるのが普通である。せん断試験の結果は、液状化するか否かという両極端の判定のほかに、中間段階の状態の設計上の配慮に対する情報として活用しうる可能性をも秘めているものと思われる。

本報告では、4種類の砂に関する振動三軸試験を実施し、同一条件における各種の砂の液状化に対する相対的な強さを調べ、そのような相対的な強さの生ずる要因を分析、検討するとともに、液状化強さと慣用の三軸試験結果との相関性を調べ、静的試験結果からの液状化強さの推定の可能性に関する検討を行なった。また、得られた試験結果を用い、新潟地震における実地盤の液状化領域と地震前後の標準貫入試験結果の変動領域の関係について考察した。

2. 液状化試験の意義

2.1 地震時応力状態と繰り返しせん断試験

岩盤上に水平な堆積層があるような理想化された地盤

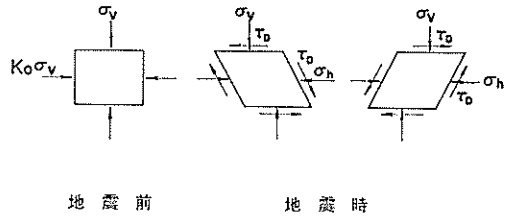


図-2.1 地震時応力状態

条件のもとでは、地震時の応力及び変形は、岩盤より上方へ伝播するせん断波により支配されると考えるのが一般的である。このような場合には、土中の一要素の応力条件は図-2.1で示す形で与えられる。対象とする点での初期有効土被り圧を $\sigma'_v = \sigma_v$ とすると、地震前には、最大及び最小有効主応力は、それぞれ、 σ_v 及び $K_0 \sigma_v$ で与えられる。ここに K_0 は静止土圧係数である。一方、地震時には上述した初期応力のほかに、方向が交互に逆転する繰り返しせん断力 τ_d が作用することになる。

上述したような地盤の地震時応力状態を近似させた条件で行なわれる各種せん断試験法は、H.B. Seed が試験結果の解釈ならびに適用法を具体的に示して⁷⁾ 以来、液状化を調べる主要な試験法となっている。中でも最も広く用いられるものは振動三軸試験であり、通常、等方圧密した飽和砂に一定の軸差応力が繰り返し与えられる。この場合、供試体の 45° 面上の応力状態が現地盤の水平面上の応力状態を表わすことになる。ただし、図-2.1に示されているように、現地盤においてみられるせん断応力の方向が逆転する条件は、 $K_0=1$ の場合、すなわち等方応力状態の場合にしか満足させ得ないという制約がある。このような現地盤の地震時応力条件は、振動単純せん断試験装置により近似させることができる⁸⁾。

振動三軸試験の結果と振動単純せん断試験の結果を直接比較すると前者の方が液状化を生ずるに要するせん断力の大きさは大きい、すなわち、液状化し難い結果を与えると云われている^{3),4)}。しかしながら、両者の拘束条件の相違を考慮することにより、両試験法による試験結果は等価であることが、実験的かつ理論的に検証されている⁴⁾。このことは、一方の結果から拘束条件を考慮して他方の結果を推定しうることを意味しており、従って $K_0=1$ の場合にしか現地条件を再現し得ない振動三軸試験の結果から振動単純せん断試験の結果 ($K_0 < 1$)、さらには、拘束条件の相違を考慮して現地盤での状態を直ちに推定しうることを意味している。この場合、静止土圧

係数 K_v の値の評価とその液状化に及ぼす影響の評価の重要性が指摘され、 K_v の値を任意に選定しうるねじりせん断試験法も開発されている⁹⁾。

上述したせん断試験の場合には、通常、正弦波または矩形波のような規則波を用い、試験結果から現地盤の液状化を予測するさいに、地震波の不規則性を考慮するのが一般的である⁹⁾ が、実際の地震波を直接入力する方法も採用されるようになってきている¹⁰⁾。

2.2 せん断試験結果の液状化予測への活用

各種のせん断試験法により飽和砂の液状化強さが評価される。このような液状化強さに影響する要素としては、土の種類と粒度分布（粒径、均等係数）、密度（間げき比、または相対密度）、初期拘束圧、地震動の強さと継続時間が主要なものとして示されている⁹⁾。これらの要素の影響の定量的評価は、多くの室内実験データや現地観測データにより試みられている。

現地の地盤条件と想定地震が与えられた場合に地盤が液状化するか否かの判定、すなわち、液状化の予測は工学上非常に重要な問題である。土田は振動台試験の結果と新潟地震により液状化を生じた現地盤の条件及び実測最大加速度などのデータを結びつけることにより、限界 N 値にもとづく液状化予測法を示している¹¹⁾。一方、H.B. Seed 等はせん断試験の結果を用いた液状化予測法を提案している⁹⁾。その要点は 1) 地盤条件の決定、2) 地震時に作用する動的せん断応力 τ_{av} の決定、3) 液状化を生ずるに要するせん断応力 $\tau_{i,N}$ の決定、4) τ_{av} と $\tau_{i,N}$ の比較 ($\tau_{av} > \tau_{i,N}$ ならば液状化する (図-2.2))、の 4 項目の作業からなり、せん断試験の結果は $\tau_{i,N}$ の決定のために活用される。

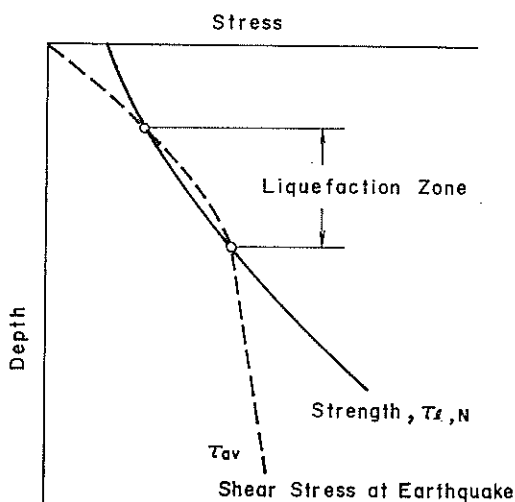


図-2.2 液状化の判定法

せん断試験の結果を液状化予測に活用する場合には、地震波の不規則性、せん断試験と現地盤の応力条件の相違を考慮する必要がある。通常の液状化試験は正弦波や矩形波のように定常的な規則波を与えるため、このような室内試験の結果から現地盤における地震時の挙動を推定するためには不規則波形を有する地震波の効果がどの程度の大きさの何波の規則波の效果と同等であるかを把握しておくこと、すなわち、等価正弦波（矩形波）のような考え方が必要となる。H.B. Seed 等⁹⁾ は、不規則地震波の効果を規則波の效果に換算するにあたって、次のような考え方を示している。すなわち、不規則地震波の最大せん断応力 τ_{max} の 65% の大きさの一律荷重振幅 $\tau_{av} = 0.65 \tau_{max}$ により規則波の大きさを表わし、地震波のマグニチュード $M = 7, 7.5, 8$ に応じて、規則波の繰り返し波数をそれぞれ 10, 20, 30 波とみなすというものである。このことは、地震動の強さはマグニチュードと震源からの距離により決まるという一般的知見を、それぞれ繰り返し回数と最大せん断応力振幅の選定の中に反映させたものである。一方、現地盤と室内せん断試験の応力条件の相違は、補正係数の使用により考慮するとしている⁹⁾。地震時最大せん断応力 τ_{max} の評価については、対象地盤に対する地震応答解析による厳密法と表層を剛体とみなして、地表面最大加速度 α_{max} から任意の深さの点のせん断応力を評価する簡易法を提案している。谷本¹²⁾ は H.B. Seed の方法を修正して、最終的には、土田の場合と同様、限界 N 値を用いる判定法を示している。

上述の方法は、主として応力による比較を基本としているが、完全液状化時点では、過剰間げき水圧が拘束圧と等しくなることから、間げき水圧の発生量に着目した方法が提案されており¹³⁾、さらに、間げき水圧の消散過程をも考慮した残留間げき水圧の量にもとづく判定法も提案されている¹⁴⁾。

液状化の予測については、一般的に多くの仮定が含まれており、汎用の予測法を得るまでには、これらの実験的、理論的解明がなお必要とされている。

3. 振動三軸試験装置による実験概要

3.1 実験装置

実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である。装置全景を写真-3.1に、また装置のブロック図を図-3.1に示した。本装置は大別すると、入力信号系・制御系・フィードバック検出系からなる制御装置、サーボ弁・油圧シリンダー（軸圧および側圧用）・三軸セルよりなる試験機本体、動力源となる油圧源、側

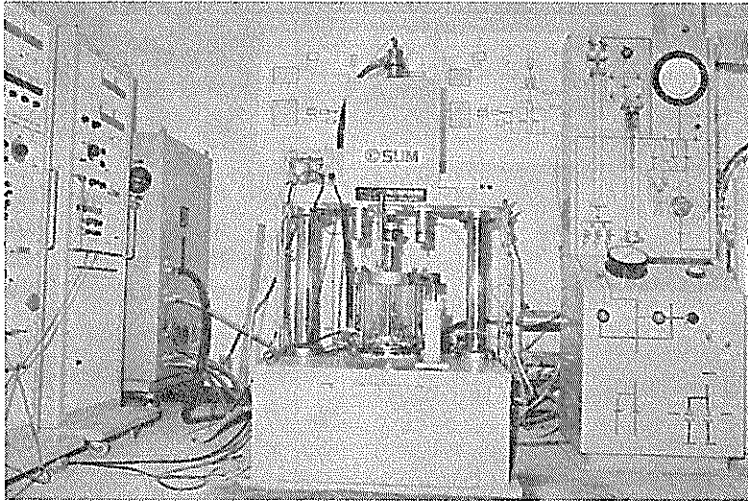


写真-3.1 振動三軸試験装置

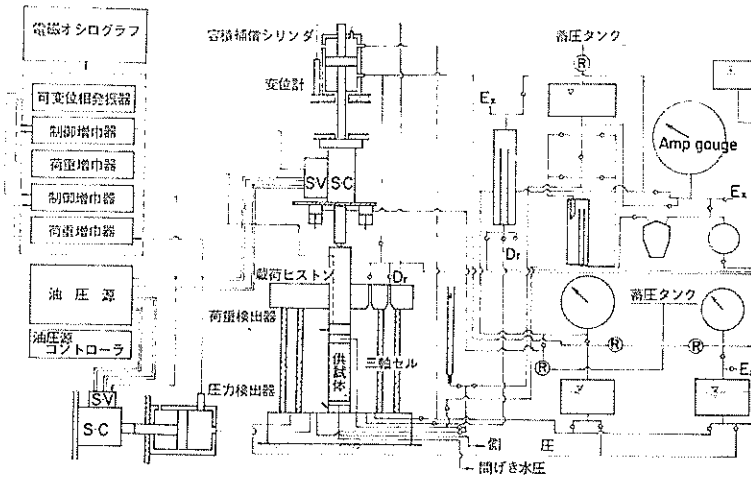


図-3.1 装置のブロック図

圧・バックプレッシャー供給・圧密排水量測定などを行なう装置、荷重・変位・間げき水圧・側圧・供試体容積変化量などをピックアップして電磁オシログラフに記録するための計測装置より構成される。

(1) 制御装置

入力信号系から入力される信号は三角波、矩形波、正弦波信号の3種類で、発振器周波数は周波数精度1.5%以内で0.01~20 Hzまで可能である。荷重制御方式によって実験が行なわれる場合には、各波数において、供試体上下端に設置されている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、入力信号と電氣的に比較・修正されることによって、入力信号に比例した荷重を載荷することができる。また、地震時における波

形のように幅広い周波数成分をもつ不規則波形も、データレコーダと入力等価装置を接続することによって、荷重もしくは変位の形で入力可能である。

(2) 試験機本体

本体の載荷機構は電気油圧サーボ方式である。図-3.2に本装置に採用されている電気油圧サーボ方式の動作原理の模式図を示す。その原理は、電気信号として与えられた入力サーボ弁の働きにより油圧回路の油量の変動となって油圧シリンダーを作動させるものである。シリンダー内の油量の変動は、直径50mmの載荷ロッド、載荷ピストンを通して三軸セル中の供試体に伝達される。供試体上下端に設置された荷重検出器により、供試体に加わる荷重をピックアップしフィードバックすることに

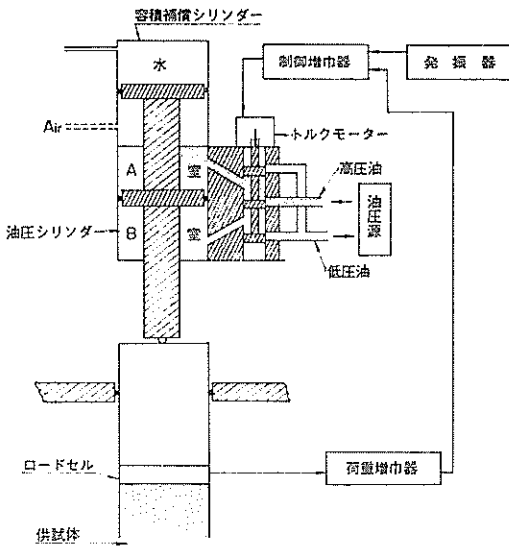


図-3.2 動作原理図

よって、所要の荷重を繰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は、油圧シリンダー上部にある容積補償シリンダーによって防止される。

三軸セルは、振動時の内壁の変形をさげ、セル内圧の高精度化をはかるとともに、供試体の容積変化測定精度を高める目的で、内筒外径 200mm、外筒外径 250mm、高さ 220 mm、耐圧強度 10 kg/cm² を有する透明アクリル製の二重セル構造になっている。セルを固定する上蓋の中央には、載荷ピストンの貫入孔があり、孔内にはセル中の水漏れを防ぐために 2 個の Oリングが埋込まれている。直径 50mm のトップキャップおよびベDESTAL には供試体内部の排水を行なうためのポーラスメタルが取り付けられており、またそれら自体が最大容量 100kg もしくは 200kg の荷重検出器になっている。供試体に作用する軸荷重はこの検出器により検出されるので、ピストンと上蓋貫入孔間の摩擦を含まない正確な荷重が測定される。軸荷重の測定が供試体底部のみで行なわれる場合には、慣用の静的三軸試験で用いられるものと同様なアクリル製のトップキャップが使用される。トップキャップと載荷ピストンの連結は、供試体をセットしセルを上蓋で固定した後行なわれる。供試体の寸法は、直径 50mm、高さ 125mm を標準としている。供試体と載荷ピストンの直径を等しくした理由は、試験方法によっては軸荷重と側方荷重の位相差を変えて載荷することがあり、そのような試験をも実施できるようにするためである。

側方荷重を変動させる場合についても、動作原理は軸

表-3.1 装置の性能

制 御 部	発振器周波数	0.01~20Hz	
	周波数確度	1.5%以内	
	出力波形	矩形波、三角波 正弦波、任意波	
載 重	軸荷重	加振器形式 油圧サーボシリンダー 加振器最大出力 200kg 動的軸圧範囲 $\pm 0.1 \sim \pm 3.0 \text{ kg/cm}^2$ 周波数範囲 0.01~20Hz	
	側 方 荷 重	加振器形式	油圧サーボシリンダー
		加振器最大出力	300kg
		動的側圧範囲	$\pm 0.1 \sim \pm 3.0 \text{ kg/cm}^2$
最大供給水量		270ml	
	油圧~水圧変換	断面積 20cm ²	
	周波数範囲	0.01~10Hz	

荷重の場合と同様なメカニズムであるが、外部信号により発生する圧力を供試体へ伝達する方式が異なっている。油圧シリンダーの動作により発生した圧力は、一担水圧シリンダーを介して水圧変動に変換され、三軸セル内に連結された剛なパイプを通して供試体に載荷される。軸荷重と側方荷重の位相差は、可変位相発振器によって 0~360° の間の任意の値に設定することが可能である。表-3.1 に装置の性能を示す。

(3) 油 圧 源

軸圧および側圧載荷用の油圧シリンダーに高油圧を供給する装置である。最大油圧は 70 kg/cm²、最大油量は 22l/min、電動機馬力 3.7kW、電源 3 相 200V である。

(4) 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。載荷ピストンと貫入孔の摩擦の影響を除去するために、供試体上下端のトップキャップ、ベDESTAL 部分が荷重検出器をかねており、供試体上下端面に加わる荷重の大きさが常に正確に検出される。側圧、間げき水圧は半導体方式の小型圧力変換器（最大容量 5 kg/cm² または 10 kg/cm²）により計測される。軸変位は差動変位計（全ストローク $\pm 40 \text{ mm}$ 、ストロークレンジ $\pm 40 \text{ mm}$ 、 $\pm 20 \text{ mm}$ 、 $\pm 4 \text{ mm}$ の三段階切替）により、セル室外の載荷ロッドの変位量として測定される。

3.2 試 料

実験に使用した試料は、高萩砂(茨城県高萩)、小名浜砂(福島県小名浜)、万代島砂(新潟県万代島)、豊浦標準砂の 4 種類である。これらの 4 種類の試料のなかで、万代島砂については、1964 年の新潟地震のさいに現地盤

振動三軸試験による飽和砂の液状化特性

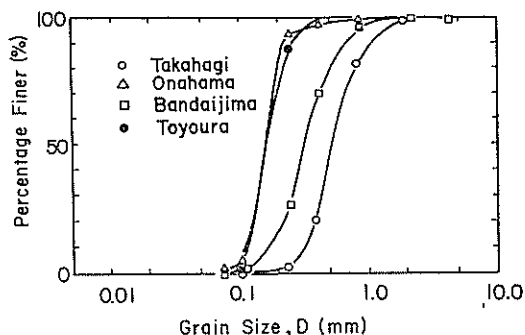


図-3.3 粒径加積曲線

表-3.2 試料の物理的特性

試料	粒度分布				土粒子 比重	e_{max}	e_{min}
	D_{10}	D_{50}	D_{60}	U_c			
高萩砂	0.33	0.42	0.60	1.82	2.658	0.959	0.641
小名浜砂	0.13	0.16	0.17	1.3	2.745	1.044	0.629
万代島砂	0.25	0.32	0.48	1.9	2.671	1.007	0.590
豊浦砂	0.12	0.18	0.19	1.6	2.644	0.971	0.557

が実際に液状化現象を生じた場所から採取されたものである。各試料の粒径加積曲線を図-3.3に、物理的性質を表-3.2に示す。図-3.3、表-3.2のなかの値には、過去に報告されている値と異なったものも存在している。高萩砂は採取された状態のまま、フルイ分け、粒度調整など行なわれていない。小名浜砂についても同様であるが、比重が2.745とやや大きい値をもつ。この原因は自然状態で、粒度のよい砂鉄分が重量にして1.3~1.5%含まれていることによるものである。実験にはこの砂鉄分を除去しない自然の試料が用いられた。万代島砂については、飽和砂の液状化に関する一斉試験¹³⁾に使用されたものと同一の試料で、粒度分布、物理的特性を調べたところ、ほとんど同じ値が得られたので、混乱をさけるために、一斉試験で採用された値を用いることにした。供試体の相対密度を決定するために必要な最大および最小間げき比の測定には、緩詰めの場合、ロードヤスプーンを用いて試料を流しこむ方法、密詰めの場合、試料に振動、打撃、振動および打撃を加える方法などがある。これらの方法は同じでも、試料の流しこみ方や振動の与え方などの試料の作成方法が相違すれば、異なった結果が得られる。これまで、各研究機関において、独自の方法により最大、最小間げき比の測定が行なわれているのが現状であり、測定法の合理的、統一の確立が望まれるが、ここでは、上記の方法で、乾燥砂および飽和砂を用

いて行なったそれぞれの測定結果の平均値の最大と最小の値を採用している。これは、粒子破碎のない限り、測定法のいかんにかかわらず、試料のとりうる最大および最小の間げき比をそれぞれ最大間げき比、最小間げき比とするという考えにもとずいている。

3.3 実験方法

(1) 供試体の作成

各々の試料を炉乾燥させたのち、500ccのビーカーに600~700g程度とり、乾燥重量を計測する。ビーカー内の試料を水浸させ、スプーンで十分攪はんし、間げきに含まれる空気を除去する。さらにその後、デンケータ内で15時間以上負圧(0.95kg/cm²)を加え、時折ビーカーに振動を与えることにより気泡を排除して飽和試料を作成した。つぎに、供試体成形用モールドにゴムスリーブをはり、そのなかに半分程度水を満たし、飽和試料をスプーンを用いて静かに水中へ流しこんだ。中詰め、密詰め供試体を作成する場合には、3層に分けて試料をモールド内に注ぎ、それぞれ鉄製の棒でモールドに適当な打撃を与えた。作成される供試体の寸法は、直径50mm、高さ125mmを標準とした。試料がモールド内に注ぎこまれた後、トップキャップをかぶせ、ゴムスリーブで密閉された供試体を約60cmの水頭差の負圧により自立させ、モールドを取除いて排水量および供試体の寸法を測定した。測定はノギスを用いて行ない、直径は供試体の上・中・下部の3か所、高さは約120°間隔で3か所を測定し平均値を採用した。供試体の乾燥重量は、ビーカー内に残留した試料を炉乾燥して求めた重量を、もとの重量から差引くことにより求めた。一度試験した試料は繰り返して使用しなかった。

(2) 実験条件

振動三軸試験装置を用いて砂の液状化実験を行なう場合の載荷方法としては、側圧一定・軸圧変動、同一の側圧・軸圧を逆位相で変動、側圧一定・軸圧ランダム変動などの方法がある。三軸供試体45°面の応力状態を地震時の土要素の応力状態に近似させるためには、45°面上上の垂直応力が常に一定の条件を満足する必要がある。このためには位相差を180°に保ちながら、同一の振幅で側圧と軸圧を変動させる方法が望ましい¹³⁾。しかしながら、飽和土の場合には側圧一定で軸圧を変動させる試験でも、得られた結果から単に間げき水圧のみを補正することによって、側圧と軸圧の両方を変動させた場合の結果を推定することができること¹⁾、また実験手段が比較的簡単なことなどから、側圧一定・軸荷重変動の条件で液状化実験を行なった。制御方式は荷重制御による方法と変位制御による方法が可能であるが、試料の液状化強

さを求める実験では変位制御よりも荷重制御の方が適当であると考えられるので、本実験では荷重制御方式を採用した。軸荷重の変動波形は、一般に三角波、矩形波、正弦波などの均一な繰返し波形が用いられている。ここでは正弦波を用いた。波形の相違が液状化強さにおよぼす影響について調べられた結果によると、矩形波を用いた場合と正弦波を用いた場合では、動的強度について10%の差が生じ、一般に波形の変化が急激になるほど、またピーク荷重の載荷時間が長くなるほど動的強さが低下すると報告されており、さらにこれらのことから、砂の動的試験には正弦波を用いることが推奨されている。⁷⁾ 振動数の影響については、広範な振動数を用いた実験を行ない、その有無を調べる必要があるが、本実験では振動数を3 Hzに規定して同一載荷条件における4種類の飽和砂の液状化特性を調べた。

供試体をセットした後、セル内に水を満たし軸圧、側圧1.0kg/cm²を加えた。バックプレッシャーは加えなかったが、間げき水圧係数Bを求めたところ、各試料についてBは0.9前後もしくはそれ以上であった。圧密は等方圧で行ない、圧密圧力は、高萩砂、小名浜砂、万代島砂については1.0kg/cm²、豊浦砂については3.0kg/cm²を用いた。圧密排水は供試体の上部から行なった。圧密終了状態を排水量および間げき水圧が0になることにより確認し、排水コックを閉じて非排水条件で軸荷重を繰返し載荷した。表-3.3に以上の実験条件を示す。

試験中の計測は、軸荷重、軸変位、間げき水圧、側圧について行なわれた。軸荷重の測定には、最大容量100 kgの荷重検出器が用いられた。また荷重載荷中の供試体の上下端面における荷重を測定する予備実験を行なったところ、供試体上下端面で検出される荷重の大きさは等しく、位相のずれもみられなかったので、本実験にあたっては、供試体の底部においてのみ荷重が測定された。軸変位は、載荷ロッドに取付けられた差働変位計により、ストロークレンジ±20mmの範囲で測定された。間げき水圧は、供試体の底部において測定された。これらの値は、電磁オシログラフに記録された。実験終了後、波形を1/500cmスケールで読取り電算機で処理する方法がとられた。

4. 実験結果と考察

4.1 液状化の発生条件

3.3の方法により、初期間げき比、拘束圧、せん断荷重振幅を与えて繰返しせん断試験を実施すると適当な組み合わせの条件の場合に液状化が発生する。図-4.1に液状化が生じた場合の測定記録の一例を示す。図-4.1に

表-3.3 実験条件

試料	高萩砂	小名浜砂	万代島砂	豊浦砂
せん断方法	振動三軸試験，側圧一定・軸圧変動			
供試体寸法	直径50mm，高さ125mm			
ゴムスリーブ	材質生ゴム，厚さ0.25mm			
供試体作成方法の詳細	① 試料を水浸し，スプーンで攪はん後，15時間以上0.95kg/cm ² の負圧で真空吸引 ② モールドにゴムスリーブをはり，半分程水を満たす。スプーンで試料を静かに流しこむ。中・密詰めの場合は，3層に分けて，それぞれ鉄製の棒でモールドに打撃を与える。 ③ 60cmの水頭差で負圧を加えて自立させ，モールドを取りはずす。 ④ 等方圧にて正現圧密			
有効平均主応力 (kg/cm ²)	1.0	1.0	1.0	3.0
バックプレッシャー (kg/cm ²)	0			
初期乾燥密度 (g/cm ³)	1.427 ~1.591	1.391 ~1.659	1.397 ~1.673	1.475 ~1.611
初期間げき比	0.671 ~0.862	0.655 ~0.973	0.597 ~0.912	0.641 ~0.793
相対密度 (%)	30.5 ~90.6	17.1 ~93.7	22.8 ~98.3	43.0 ~79.3
応力波形	正弦波			
周波数	3 Hz			
初期液状化の定義	ひずみ急増点			

よれば、繰返し回数増加とともに間げき水圧は次第に上昇し、25サイクル以降においてやや急激な上昇を示した後、間げき水圧のピークの値は拘束圧に近づく。一方、軸ひずみ振幅は24サイクルまでは微小な振幅で変動するが25サイクル以降において急増する。この間、側圧はほぼ一定値に維持されている。図-4.1は液状化記録の典型例であるが、軸ひずみ振幅が急増しはじめる点を初期液状化、間げき水圧が拘束圧と等しくなり、その結果、有効応力が0となる時点を完全液状化と呼び、それぞれ対応する繰返し波数により表わすのが慣例となっている。なお、初期液状化点の波数の定め方には、他に色々の方法が提案されている¹⁰⁾が、上述のように軸ひずみの急増点として定めるのが、簡単で、かつまた、実際の構造物に対する影響への配慮という点からも合理的と思われる。軸ひずみ振幅の急増点として初期液状化時の

振動三軸試験による飽和砂の液状化特性

Takahagi $f = 3\text{ Hz}$, $\sigma_3 = 1.0\text{ kg/cm}^2$

Test No. 13 $e_i = 0.729$ $N_e = 25$

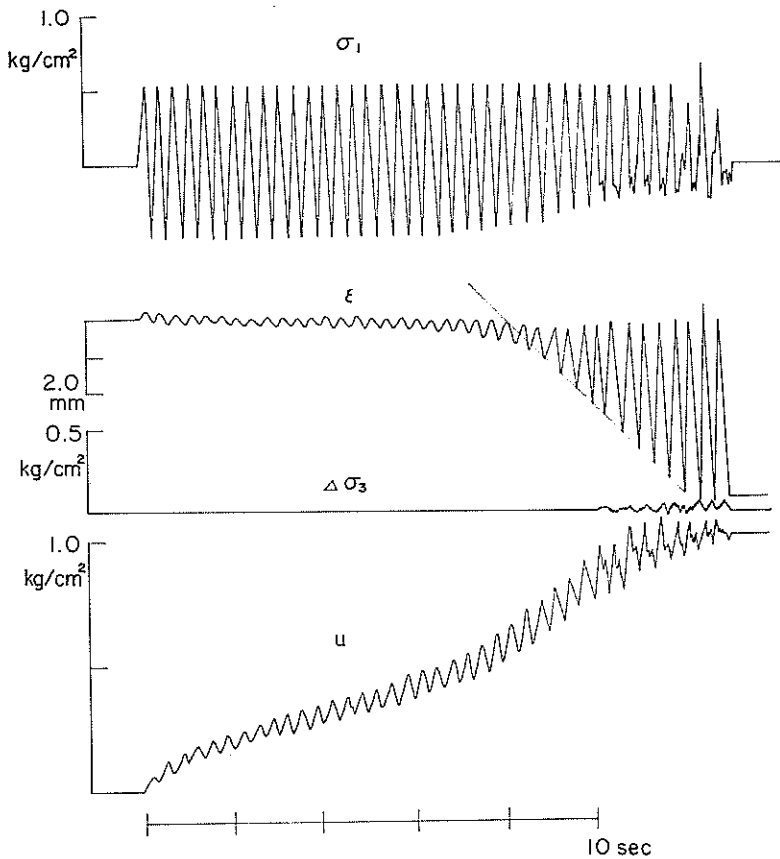


図-4.1 測定記録例

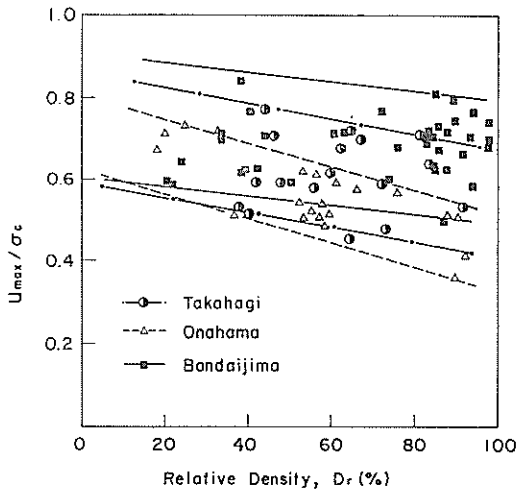


図-4.2 初期液状化時点における間げき水圧

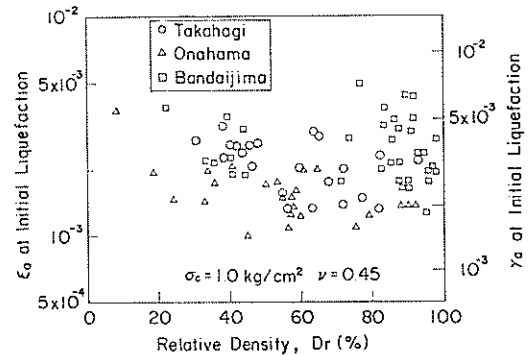


図-4.3 初期液状化時点におけるひずみ振幅波数を定めると図-4.1の場合には、 $N_i = 25$ となる。

軸ひずみ急増点として定義される初期液状化時点における過剰間げき水圧のピークの値 u_{max} の拘束圧 σ_e に対する割合 u_{max}/σ_e を 3 種類の砂について調べ、相対密度

に対してプロットすると図-4.2のようになる。完全液化時点では、 $u_{max}/\sigma_c=1$ となる。軸ひずみ急増点として定められた初期液化時点では、各砂ともかなりのばらつきを示すが、概略0.5~0.8の範囲に分布し、相対密度の増加とともにやや減少する傾向が認められる。

図-4.3は初期液化時点における軸ひずみ振幅 ϵ_a または、ポアソン比 $\nu=0.45$ として求めたせん断ひずみ振幅 $\gamma_a=(1+\nu)\epsilon_a$ を相対密度に対して示したものである。初期液化は、軸ひずみ振幅の急増点として定義されるものであり、 ϵ_a の値は必然的にばらつきやすいが、初期液化時点では、この値は相対密度、砂の種類による顕著な相違はなく、0.1~0.5%程度のオーダーとなっている。

4.2 液化強度の評価とその特性

(1) 液化基準

飽和した砂質土の液化に対する抵抗力、すなわち液化強度は前述したような動的せん断試験により求めることができる。砂質土が非排水繰り返しせん断により液化化して行く過程で観察される初期液化時点は、前述のように軸ひずみ振幅の急増点に対応する繰り返し波数として規定する規程を採用する。

一定の拘束圧 σ_c のもとで、初期間げき比 e_i ならびにせん断応力振幅 τ_D (側圧一定試験の場合軸荷重振幅 σ_D の $\frac{1}{2}$)を与えて一連の実験を行ない、2つの要素の各組み合わせに対して初期液化時時の波数 N_i が求められる。この場合、初期間げき比 e_i は試験前に適当な値を

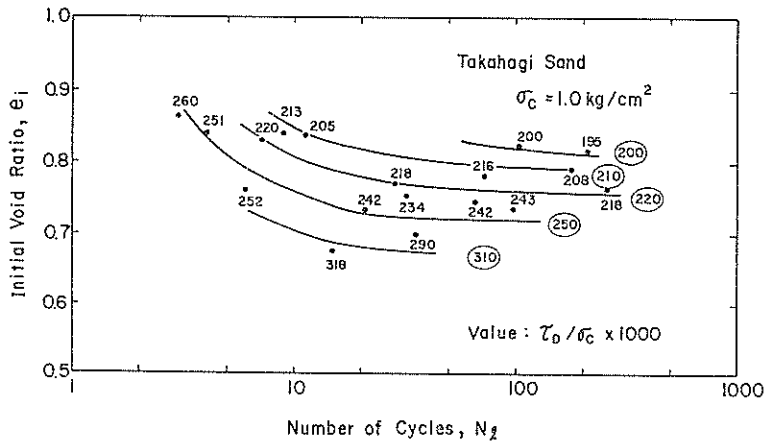


図-4.4 a 初期間げき比と液化化波数 (高萩砂)

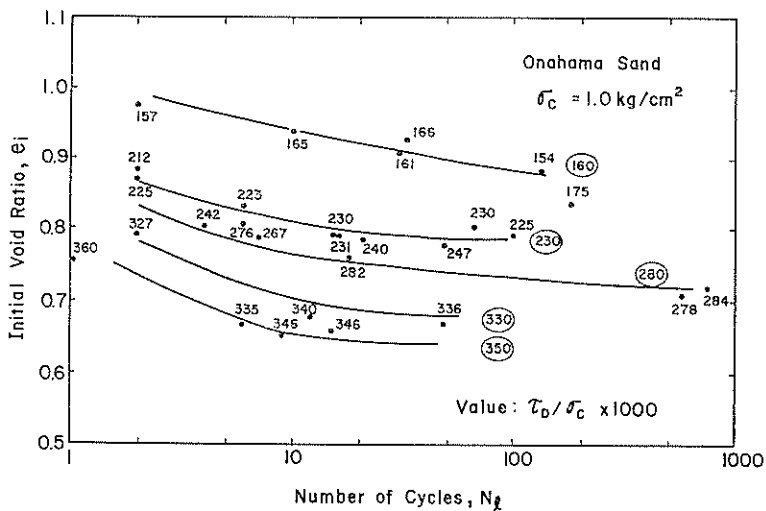


図-4.4 b 初期間げき比と液化化波数 (小名浜砂)

振動三軸試験による飽和砂の液状化特性

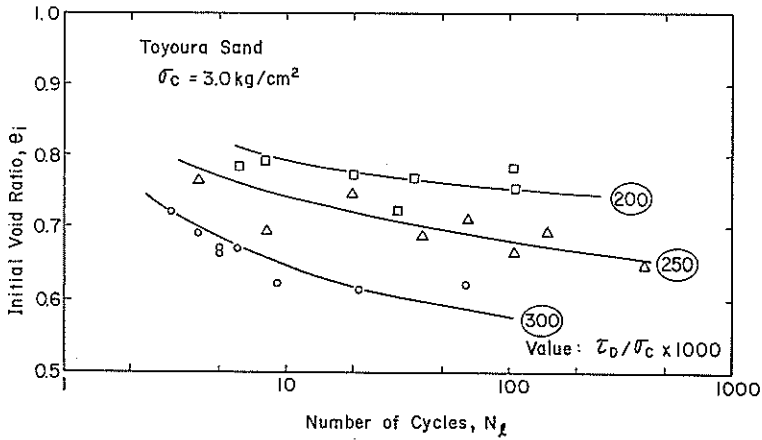


図-4.4 c 初期間げき比と液状化波数 (豊浦砂)

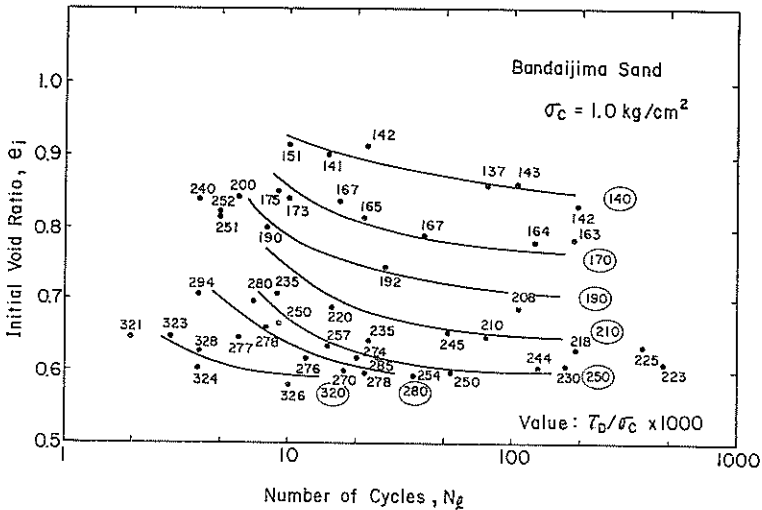


図-4.4 d 初期間げき比と液状化波数 (万代島砂)

想定しても各試験について予定通りの値を得ることは非常に難しく、また、せん断応力振幅も試験前の設定値とは若干異なるのが普通であり、いずれも正確な値は試験後に判断することになる。

上述のことを考慮して、4種類の砂について、初期間げき比 e_i を初期液状化時の波数 N_f に対してプロットしたものが図-4.4 a~4.4 d である。各図の中の数値は、応力比 τ_D/σ_c の小数点以下3ケタの値であり、これらのプロットから白丸で囲んだ値を持つ $\tau_D/\sigma_c \times 1000$ の等値線を実線で示してある。なお、パラメーターとして、せん断応力振幅 τ_D のかわりに応力比 τ_D/σ_c を採用した意味は、液状化時の波数 N_f が τ_D 及び σ_c の個々の値よりは応力比 τ_D/σ_c により一義的に定まるといことが判明

している¹⁾ことを考慮し、拘束圧の影響を除いたものである。拘束圧の影響については、豊浦標準砂を用い、 $\sigma_c=1.0, 2.0, 3.0 \text{ kg/cm}^2$ に変えた実験から同様のことが確認されている¹⁷⁾。乱さないシラスのように見かけの粘着力を有する試料の場合には、 N_f は τ_D/σ_c により一義的には定められないことが指摘されている¹⁸⁾が、通常の砂については、 τ_D/σ_c を用いることにより拘束圧の影響は除去しうるものと考えられる。従って、豊浦標準砂以外の3種の砂の場合にはすべて $\sigma_c=1.0 \text{ kg/cm}^2$ のもとで実験を行なった。図4.4 a~4.4 d に示したデータは応力比 τ_D/σ_c が同じであれば、 e_i が大きいほど液状化に要する繰返し波数 N_f は小さい、換言すれば、緩詰めめ砂ほど液状化しやすいことを意味している。

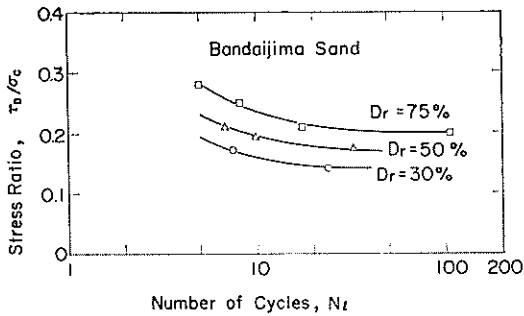


図-4.5 応力比と液状化波数 (万代島砂)

図-4.4 a～図-4.4 d のデータより同じ初期間げき比に対する応力比と液状化に要する波数の関係を求めることができる。図-4.5に万代島砂の場合について、3種類の初期間げき比（相対密度で表示）に対する応力比と液状化波数の関係を示した。図-4.5は相対密度が同じ場合、応力比が大きいくほど液状化に要する繰り返し波数は少ない、すなわち、液状化しやすいことを示している。図-4.5のような $\tau_D/\sigma_c \sim N_i$ 曲線はいわゆる液状化規準と呼ばれるものであり、相対密度が小さいほど $\tau_D/\sigma_c \sim N_i$ 曲線は下方に移動する。他の砂についても図-4.4 a, 図-4.4 b, 及び 図-4.4 d から全く同様にして一定の相対密度についての液状化規準すなわち $\tau_D/\sigma_c \sim N_i$ 曲線が定められる。このようにして定めた4種類の砂についての液状化規準を比較したものが、図-4.6 a～図-4.6 c であり、それぞれ相対密度 $D_r=30, 50, 75\%$ の場合に対するものである。これらの図から4種類の砂の液状化規準は、いずれの相対密度の場合にもほぼ類似のパターンを有することが認められる。これらの図において、液状化強さの大小は、特定の波数を与えた場合、応力比が上にくるか否かにより判断されるものであるが、4種類の砂の液状化強さの相対的な関係は相対密度によりやや相違する。たとえば、高萩砂と小名浜砂を比較した場合、緩詰めの場合には、高萩砂の $\tau_D/\sigma_c \sim N_i$ 曲線は小名浜砂のそれの上位にあり、従って高萩砂の方が液状化しにくい、密詰めの場合には、この傾向は逆になり、小名浜砂の方が液状化しにくい。しかしながら、いずれの場合についても、万代島砂は最下方にあり、従って、使用した砂試料の中では最も液状化しやすい部類に属するといえる。

本実験に使用した砂のうち、小名浜砂と万代島砂は土田が振動台試験に使用したものとほぼ同じとみられるものであるが、両砂の液状化強さの傾向は、振動台試験で得られた結果¹¹⁾と定性的には対応している。しかし、両試験法による定量的な対応関係については、今後の課題である。

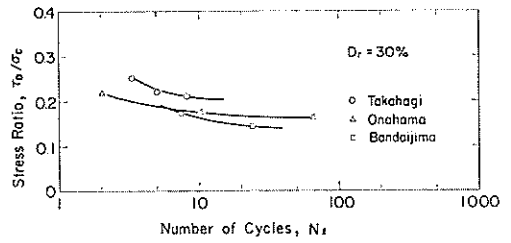


図-4.6 a 応力比と液状化波数 ($D_r=30\%$)

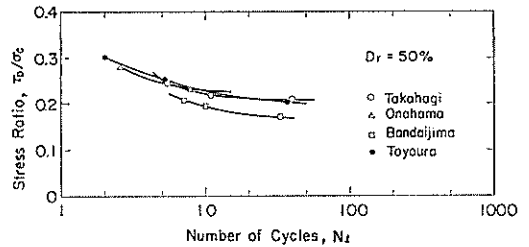


図-4.6 b 応力比と液状化波数 ($D_r=50\%$)

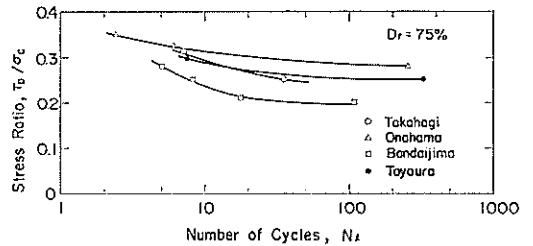


図-4.6 c 応力比と液状化波数 ($D_r=75\%$)

(2) 特定波数に対する液状化強さ

液状化に要するせん断荷重 τ_D は初期間げき比が同じであれば、拘束圧 σ_c に比例して増大するため、応力比 τ_D/σ_c を用いることにより拘束圧の影響を除去した型で液状化規準が一義的に規定される。 N 波で液状化を生ずるに要する応力比 τ_D/σ_c を $R(N)$ とすると $R(N)$ は初期間げき比または相対密度が同一の場合の繰り返し波数 N に対する液状化強さを意味することになる。

実際に生ずる地震波は不規則波形を有し、かつ波数も不確定であるが、前述したように、H.B. Seed らは、不規則地震波のうち支配的な波の数は、地震のマグニチュードにより決まるとし、マグニチュード $M=7, 7.5, 8$ に対し、それぞれ、10, 20, 30波を想定すればよいとしている。そこで、 $N_i=10$ 及び $N_i=30$ において液状化を生ずるに要する応力比 $\tau_D/\sigma_c = R(10)$ 及び $\tau_D/\sigma_c = R(30)$ を図-4.4 a～図-4.4 d から求め、相対密度に対してプロットしたものが図-4.7 a 及び図-4.7 b である。両図中の2本

振動三軸試験による飽和砂の液状化特性

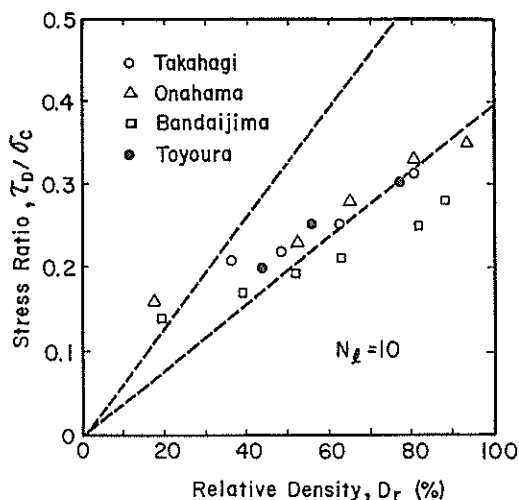


図-4.7 a 応力比と相対密度 ($N_t=10$)

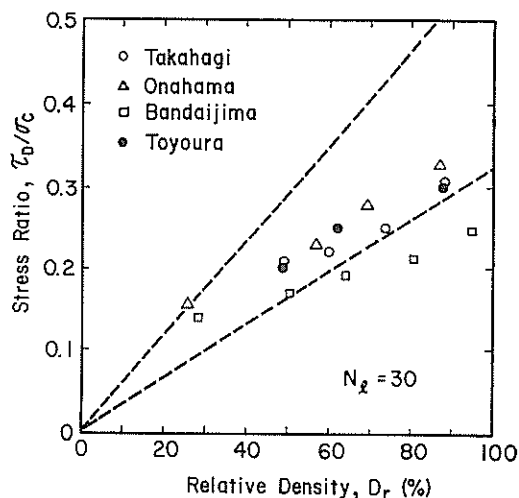


図-4.7 b 応力比と相対密度 ($N_t=30$)

の直線は従来の実験成果が多く分布するとされている範囲である。図-4.7 a 及び図-4.7 b から 4 種類の砂のいずれの場合にも液状化強さ $R(10)$ 及び $R(30)$ は相対密度に対してほぼ直線的に増加していることが示される。H.B. Seed 等は、液状化強さは相対密度に正比例している⁹⁾が、図-4.7 a、図-4.7 b のデータは、座標原点を通らず、 $D_r=0$ でもある大きさの抵抗力を有するように見える。このことは、最も緩い状態でも、砂は安息角に相当する内部まさつ角を有すること、拘束圧を与えれば、砂は剛性を持ちうることから、初期間げき比として圧密前の値を採用するがぎり、最緩状態でも液状化に対する抵抗を示すとみるのが妥当ではないかということを示唆している。

示唆している。

いずれにしても、液状化強さは相対密度に対して直線的に増加するが、4 種類の砂について液状化強さをそれぞれ比較すると小名浜砂、豊浦砂及び高萩砂、万代島砂の順序で液状化しやすくなる傾向がある。前 3 者の砂については、液状化強さの相違はあまり顕著ではないが、万代島砂の場合には、 $R(10)$ 、 $R(30)$ とも他の 3 種類の砂にくらべて、かなり液状化しやすいことが指摘される。

上述のように、ある繰返し波数における液状化強さは、相対密度により強い影響を受けることが明らかであるが、相対密度が同じでも、砂の種類により液状化強さは相違しており、砂粒子の詰まり方の程度を表わす相対密度以外にも砂の液状化特性を支配する要因があることを示している。これについては、後に検討することとする。

(3) 液状化強さと諸要素の影響

飽和した砂質土の液状化に及ぼす要素のうち、拘束圧及び締固め程度(初期間げき比 e_i または相対密度 D_r)の影響については、従来から多くの実験成果があり、また、先に示した実験結果からも明らかである。しかしながら、拘束圧の影響を除去し、かつ、相対密度が同じであっても、たとえば、図-4.6a~図-4.6c または図-4.7 a 及び図-4.7 b に示したように砂の種類により液状化強さは異なる。このような相違をもたらす要因として、他に想定されるものは、粒度分布、透水性のような物理的性質の相違のほか、砂粒子の表面形状や粒子骨格構造の相違に帰因する圧縮性、まさつ抵抗などの力学的性質に関連した要因があげられよう。以下では、このような観点から、従来の成果をも加味して実験結果を検討する。

a) 粒度分布

粒度分布自体による影響については、定量的評価が困難であるため、粒径(例えば平均粒径 D_{50})、均等係数($U_c=D_{60}/D_{10}$)の両者による影響として調べられるのが普通である。このうち、均等係数については、特徴的な傾向は見い出せず、支配的要因とはならないことが指摘されている¹⁹⁾。一方、粒径の影響については、いくつかの実験成果があり、0.1~0.2mm 程度のものが最も液状化しやすいとされている。例えば、図-4.8 は、平均粒径 D_{50} が $N_t=30$ 波で液状化を生ずるに要する応力比に及ぼす影響を示したものである。図-4.8において、点線は K.L. Lee 等²⁰⁾による系統的な実験結果であり、実線は H.B. Seed 等⁹⁾が米国の砂に関する実験成果をとりまとめて提案したものである。一方、日本の研究者による従来の成果は一点鎖線で示した範囲に分布している¹⁹⁾。

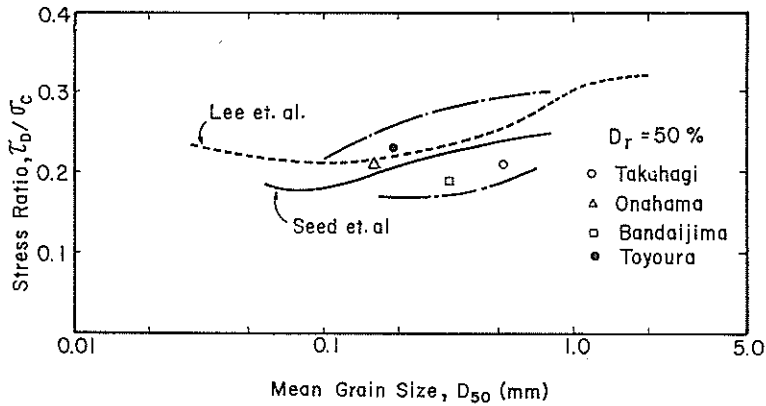


図-4.8 $N_i=30$ における応力比と平均粒径

本実験に使用した4種類の砂について、相対密度 $D_r=50\%$ 、 $N_i=30$ に対する液状化強さを図-4.8に、4種類の記号でプロットしてある。K.L. Lee 等の実験値は、同一の試験装置による結果であり、液状化強さに及ぼす粒径の相違の影響に関して、異なった砂との相対的な関係を知るのに好都合と思われる。H.B. Seed 等の提案曲線は異なった研究者による成果から総合的に評価したものであり、装置の相違による影響、砂粒子の形状や粒子構造の相違の影響なども潜在的に含んでいると思われるが、我国で実施された成果もある程度のばらつき範囲内で代表的に表現しており、実用上の見地から同一相対密度に対する液状化強さの相違を平均粒径のみの影響として評価する場合に有効であろう。

今回の4種類の砂に関する実験は、同一の試験装置による結果であり、実験結果の相対的な関係は平均粒径ないしは砂固有の性質の相違にもとづくものである。同一装置で求められた K.L. Lee 等の結果と今回の実験値を対比すると、小名浜砂及び豊浦標準砂については、K.L. Lee 等の曲線にはほぼ一致するが、高萩砂及び万代島砂については、K.L. Lee 等の曲線は過大な値を与える。このことは、平均粒径が液状化強さを評価する上で、一つの影響因子とは考えられるが、独立した要素とは考えにくい場合があることを示唆している。

b) 透水性

相対密度が同じであっても、液状化強さに相違が生ずる要因の中に、透水性の影響が関係する可能性がある。振動台上の砂層を振動させる方式の液状化試験の結果によれば、液状化の容易さと透水係数の間にかなり良い相関性があることが指摘されている¹¹⁾。振動三軸試験における液状化強さと透水係数との関係を調べるため、4種の砂に関する透水試験（定水位法）を実施し、その結果

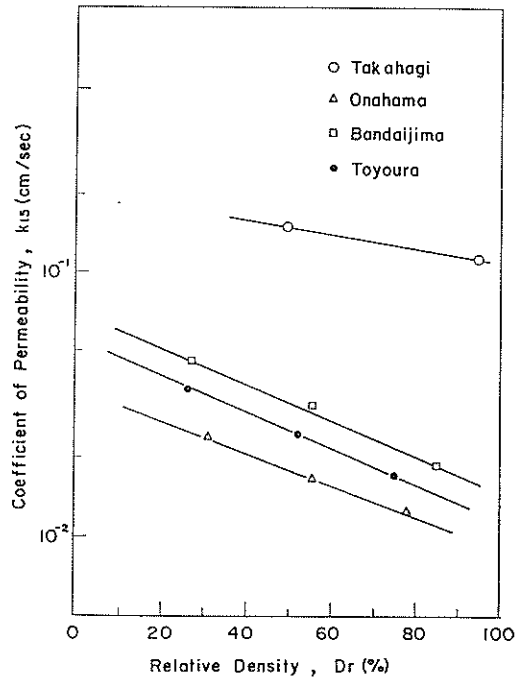


図-4.9 透水係数

を図-4.9に示した。各砂の透水係数は相対密度とともにほぼ直線的に減少しており、同じ相対密度に対して、高萩砂の透水係数が非常に大きく、以下、万代島砂、豊浦標準砂、小名浜砂の順序で小さくなる。この順序は平均粒径 D_{50} の大きさの順序に対応している。

液状化強さについては、例えば図-4.7 b) に示すように、相対密度により多少の変動があるが、ほぼ小名浜砂、豊浦標準砂、高萩砂、万代島砂の順に小さくなる。従って、振動三軸試験における液状化強さは透水性とは

直接関係しないように考えられる。このことは、同一の砂の場合に透水係数は相対密度の増大にともない小さくなるのに対し、液状化強さは大きくなること、また、砂にくらべて透水性のはるかに小さいシルトや粘土の場合に液状化強さが大きくなる²⁰⁾ ことから明らかである。

振動台試験の場合も振動三軸試験の場合も液状化現象はともに発生する過剰間げき水圧の累積による有効応力の低下に帰因するものであるが、透水性の影響に関する上述したような実験事実は、両者の場合の液状化に及ぼす透水性の役割に根本的な相違があることを示唆している。すなわち、振動三軸試験の場合には、飽和砂が非排水状態で繰り返しせん断されるため、繰り返しせん断により発生した間げき水圧の排水による消散過程がないため透水性が関与しないのに対し、振動台試験の場合には、振動中に砂層表面よりの排水による過剰間げき水圧の消散があるため、残留間げき水圧の量が透水性に影響されることによるものであろう。すなわち、透水性は過剰間げき水圧の発生過程には関係せず、消散過程に影響を及ぼすものと考えられる。

c) 圧縮性

同一の相対密度の場合に、砂の種類により液状化強さが相違することは、非排水繰り返しせん断中の過剰間げき水圧の挙動に反映されるものと考えられる。側圧一定の非排水繰り返しせん断試験において発生する過剰間げき水圧はせん断荷重振幅すなわち軸荷重振幅のみにより支配されるものであるため、Skempton の間げき水圧係数 A に相当するものが、飽和状態の場合には初期液状化時点について次式で与えられる。

$$A_f = \frac{\Delta u_t}{(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)} = \frac{\Delta u_t}{2\tau_D}$$

ここに、 Δu_t : 初期液状化時の過剰間げき水圧増分
 τ_D : せん断荷重振幅

係数 A は、土の種類、応力履歴、ひずみにより影響されるものであるが、通常の三軸試験の場合には、破壊時の値が報告され、これによって、土の特性を分類しようとされている²¹⁾。

図-4.10 はこのような間げき水圧係数 A_f を各砂について求め、初期間げき比 e_i に対してプロットしたものである。図-4.10 には、通常非排水せん断試験の間げき水圧係数 A の e_i に対する典型的な傾向の例²²⁾ も点線で示されている。

通常の三軸試験の場合には、縮った状態に対しては、ダイラタンシーが顕著となり、砂壊時には A_f の値は負となるのに対し、繰り返しせん断試験により液状化が

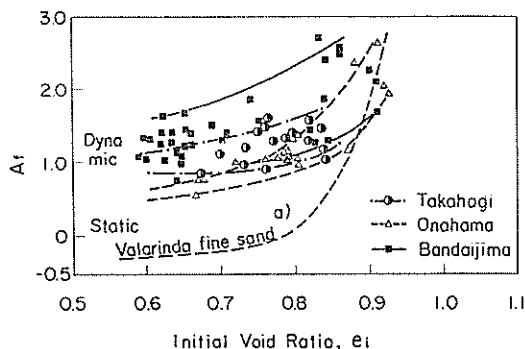


図-4.10 間げき水圧係数と初期間げき比 (a) 文献 28)

生ずる場合には、 $A_f > 0$ となり、この値は e_i の増加とともに大きくなる。繰り返しせん断試験の A_f の値は、液状化強さの傾向とほぼ対応しており、従って、砂の種類による液状化強さの相違を調べる指標とみなしうる可能性がある。

非排水状態の飽和砂が繰り返しせん断を受けた場合に生ずる液状化は、繰り返しせん断中の過剰間げき水圧の累積による有効拘束圧の減少にともなって生ずる現象であるが、排水状態において同様の繰り返しせん断荷重を与えれば、非排水状態における過剰間げき水圧に対応した体積変化を生ずることになる。与えられたせん断荷重のもとでの砂の体積変化は砂の圧縮性を現わすものであり、砂の種類による圧縮性の相違が飽和砂の液状化強さと密接な関係にあることは容易に想像される。このような対応関係の検討は、液状化現象の機構を明らかにする上で有用な手段であると考えられる。このような観点にたつ研究には、八木²²⁾及び八木等¹³⁾、今井等²³⁾などの報告がある。

八木及び八木等は、三軸圧縮試験装置及び単純せん断試験装置による静的繰り返し排水せん断試験における残留体積変化量から対応する非排水せん断試験における残留過剰間げき水圧の大きさを推定することを試みている。この場合、両者を結びつけるための係数として膨張係数を用い、膨張係数としては側方拘束の一次元圧縮・膨張試験から求めればよいとしている。一方、今井等は、振動三軸試験による液状化強さ $R(30)$ と応力制御型静的三軸排水試験による圧縮量との関係を調べている。彼等は応力制御型排水せん断試験における最大圧縮点での体積ひずみ v_c と対応する主圧力差 q_c の比 $c = v_c/q_c$ として定義される圧縮指数を用いることにより、液状化強さが一義的に評価されるとしている。

上述のような報告からも砂の圧縮性と液状化強さは密接な関係があることが示唆される。圧縮性の尺度として

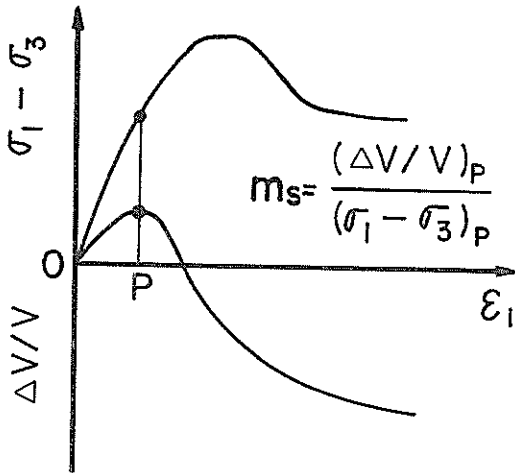


図-4.11 a 排水せん断試験の応力、体積ひずみ～軸ひずみ関係の模式図

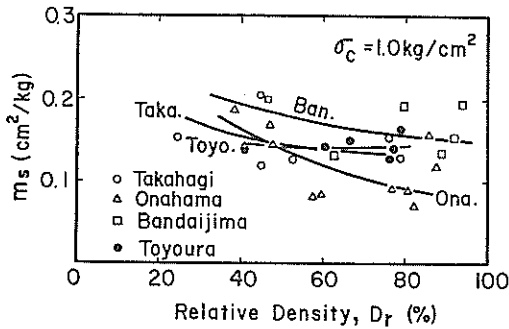


図-4.11 b 圧縮性と相対密度

は、どのようなものを使用すべきかについては、なお、検討の余地があると思われるが、今回、使用した砂については、慣用のひずみ制御型三軸排水試験から得られる図-4.11 a に示したような指数 $m_s = (\Delta V/V)_P / (\sigma_1 - \sigma_3)_P$ を用いてみた。図-4.11 a の曲線は、三軸排水せん断試験の応力～軸ひずみ曲線、体積ひずみ～軸ひずみ曲線を表わす。飽和した砂質土を圧密排水せん断すると締め固め程度によりその大きさは相違するが、負のダイレイタンスを生じ、軸ひずみに対してピークを生ずるのが一般的であり、体積ひずみの軸ひずみに対する変化傾向は静的圧密非排水せん断試験の間げき水圧特性に対応している²¹⁾。従って、繰り返しせん断中の過剰間げき水圧の累積によって生ずる液状化は上述の負のダイレイタンスの発生と直接関係があることは容易に想像される。このような観点から、三軸排水せん断試験における圧縮性の目安として、体積ひずみのピーク値 $(\Delta V/V)_P$ と対応する主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_P$ の比を採用するものとする。

上述のようにして定めた m_s の値を相対密度に対して示したものが図-4.11 b である。図中、 m_s の値が大きいほど圧縮性が大きいことを意味する。 m_s の値は拘束圧により変わると思われるが、 $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の場合についてのみ示した。図-4.11 b から排水せん断試験における砂の圧縮性は相対密度により異なるが、4種類の砂に関する圧縮性の傾向は、図-4.7a または図-4.7b に示した4種類の砂の液状化強さの傾向とほぼ対応している。このことから、相対密度が同じであっても液状化強さに相違が生ずる原因が、圧縮性の相違をもたらすものにあることが推定される。

液状化過程中には、砂の圧縮性とは逆の関係にある剛性の急激な変化が生ずる。ここに、剛性を表わすものとして、非排水繰り返しせん断試験における軸荷重振幅と軸ひずみ振幅の比として定義される等価弾性係数を取り上げる。

図-4.12 は、繰り返しせん断試験中の等価弾性係数の繰り返し波数に対する関係の一例を示した。等価弾性係数は繰り返し波数の増加とともに載荷初期の値から緩やかに減少し、初期液状化の発生とともに急激に減少する。このような等価弾性係数の繰り返し波数に対する変化傾向から載荷初期及び初期液状化時のものをピックアップし、相対密度に対してプロットしたものを図-4.13 に示す。図中の載荷初期の等価弾性係数を白印の記号で表わし、初期液状化時のものを黒印で示した。載荷初期の等価弾性係数については、 $N_i = 30$ 以上で液状化する場合のもののみ選び出し、これらの初期の2～5波に対応する値をプロットしてある。図-4.13の縦軸の右側のもは、ポアソン比 $\nu = 0.45$ と仮定した²²⁾ 場合の等価剛性率 G を示す。図-4.13のデータは、載荷初期の動的変形係数は相対密度の増加とともに増大し、 $\log E_D$ または $\log G$ は相対密度 D_r とともにほぼ直線的に増加すること、初期液状化時の動的変形係数は、その性格上、かな

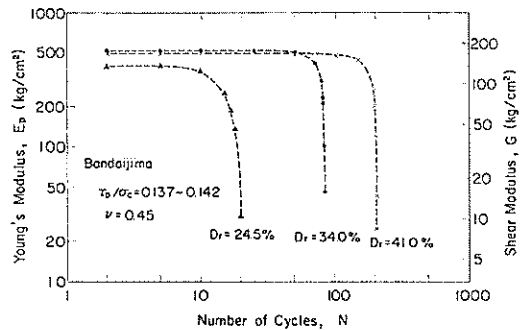


図-4.12 動的変形係数と繰り返し波数

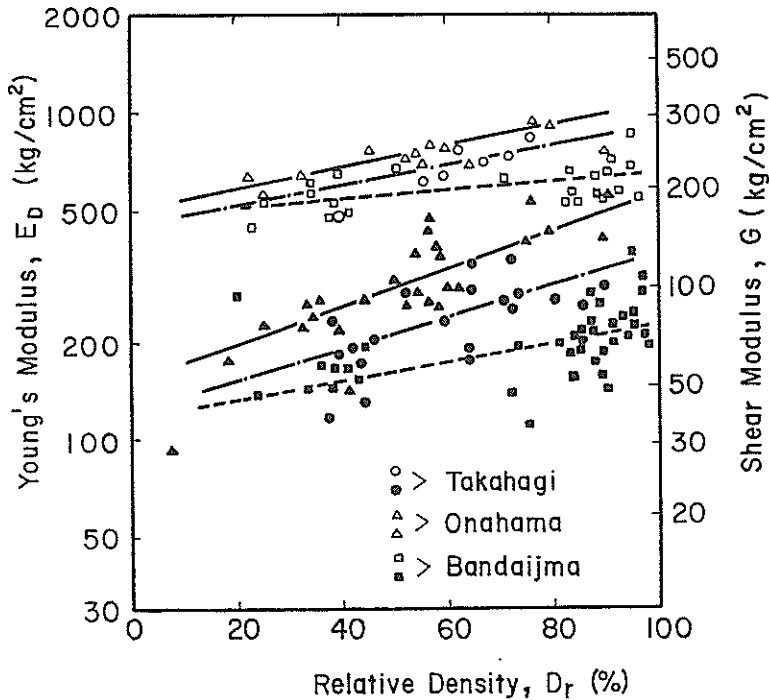


図-4.13 载荷初期および初期液状化時の動的変形係数と相対密度

りのばらつきをともなうが、概して、载荷初期の傾向とほぼ同様の傾向があることを示している。また、载荷初期の動的変形係数は相対密度及び砂により異なるが、初期液状化時には $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ 程度にまで減少すること、初期液状化時に維持される剛性は载荷初期の剛性が大きいものほど大きいことが指摘される。3種類の砂についての剛性を比較すると小名浜砂、高萩砂、万代島砂の順に小さくなり、初期液状化時においても同様である。万代島砂については、相対密度の増加に対する剛性の増加の割合が、他の2種類の砂にくらべてとくに低いことが注目される。3種類の砂に関する同一相対密度における剛性の相違は、図-4.7a及び図-4.7bに示した同一相対密度における液状化強さの相違に直接関係するものであることが認められ、このことは、排水せん断試験から求められる圧縮性の相違が液状化強さを支配することに対応している。

4.3 液状化過程の有効応力表示と動的内部まさつ角

一定のせん断荷重が繰り返し载荷され、残留間げき水圧の累積により飽和砂が液状化する現象は、繰り返しせん断中の有効応力変化を追跡することによって、その物理的意味がより明らかにされる。

図-4.14は繰り返し载荷中の有効応力経路の一例であり、側圧一定で軸荷重を変動させた場合の、供試体内の

45°面上における有効鉛直応力とせん断応力の変化を表示したものである。図-4.14には、各繰り返し波数が記入しており、対応する波数における圧縮側及び伸張側のピークの値が実線で結ばれている。圧密終了後、拘束圧 $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の等方応力状態から一定せん断荷重振幅の繰り返し载荷により、図-4.14に示すように、応力状態は右から左へ移動する。これは、繰り返し载荷中の発生間げき水圧の累積により45°面上の有効鉛直応力が減少することによるものである。同時に有効拘束圧の減少による剛性の低下を招くため、ある波数以上では、一定振幅のせん断荷重が与え得なくなる。このような波数は、緩詰めの場合には、軸ひずみが急増する時の波数として定めた初期液状化時の波数と対応するが、密詰めの場合には、軸ひずみ急増点に対応する波数よりも若干大きい。いずれにしても、このような点は、通常、伸張側に最初に現われ、ある波数経過後に圧縮側に現われるというパターンをとる。従って一般的には、伸張側の応力状態により液状化の波数 N_L が支配される。同一初期間げき比を有する供試体に異なったせん断応力振幅を与えることにより、上述のような点がいくつか見出しうる。これらの点を結んだ直線から、与えられた初期間げき比における動的破壊線を見出すことができる。動的破壊面の定義については、問題点もあるが、静的せん断

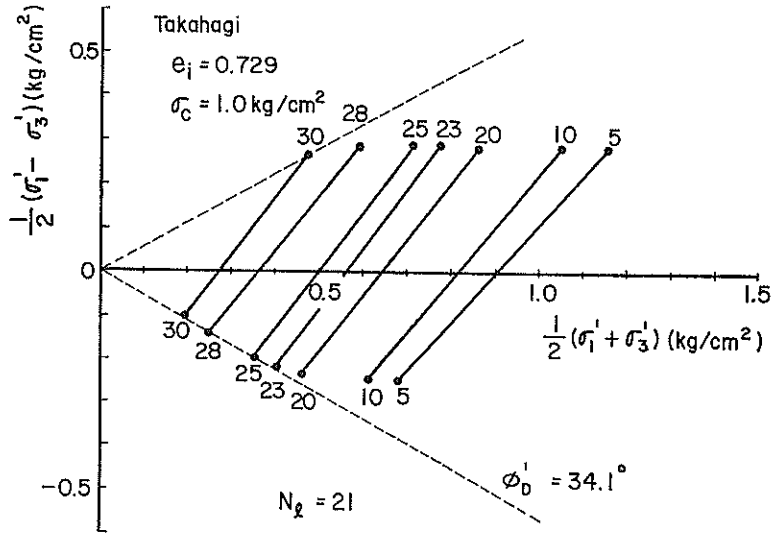


図-4.14 繰り返しせん断時の有効応力径路

試験の場合の破壊規準と同様にクローン型の破壊規準が適用できるものとし、次式で表示されるものとする。

$$\tau_f = (\sigma - u) \tan \phi'_b + c'_b$$

ここに、 σ : 破壊面上の垂直応力 (全応力表示)

u : 過剰間ゲキ水圧

τ_f : 破壊時のせん断応力

ϕ'_b : 動的内部まさつ角

c'_b : 動的粘着力

破壊時のせん断応力 τ_f は、一定のせん断荷重振幅を与える応力制御試験の場合には明確に認め難いが、一定のせん断荷重振幅が与え得なくなる時の、有効主応力より描いたモールの応力円の接線により与えられるものとする。このようにして求められる動的な破壊線は、緩詰めの場合には、初期液化化時の有効応力状態より求められるものとほぼ対応するが、密詰めの場合には、若干異なるようである。動的破壊線は、シラスのように、見かけの粘着力がかなり認められるような¹³⁾場合には、上述のように、同一の初期間げき比を有するいくつかの試験からでない限り厳密には定められないが、通常の砂の場合には、 c'_b はほとんど0と考えてよく、従って原点を通る直線として定めうる。一般に、正確な初期間げき比の値は試験後に判明するため、同一の初期間げき比という条件で試験するのは難しいが、 $c'_b=0$ とみなしうる場合には、任意の初期間げき比に対し一点法を用いることができる。今回使用した3種類の砂については、適当な初期間げき比のもので実施した液化化試験結果から、動的破壊

面を求めた。この場合、図-4.14は45°面上の応力状態を表わすものであり、 $\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \sim \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)$ 図上の直線のこう配を m とすると、動的破壊面の傾斜角として与えられる動的内部まさつ角は、 $\phi'_b = \sin^{-1} m$ として与えられる²³⁾。図-4.15は、上述のようにして定めた動的内部まさつ角 ϕ'_b を、初期間げき比に対応する相対密度に対してプロットしたものを示す。豊浦標準砂については、既報のように¹³⁾、 $\sigma_c=1.0, 2.0, 3.0 \text{ kg/cm}^2$ のもとでのせん断応力振幅をかえて実験した結果から、共通接線の傾斜角として定めたものである。図-4.15には、静的排水せん断試験 (CD 試験) より求めた静的内部まさつ角 ϕ'_a があわせて示してある。ただし、 ϕ'_a はエネルギー補正前のものである。

以下では、上述のようにして定めた動的内部まさつ角 ϕ'_b の静的内部まさつ角 ϕ'_a との関係、ならびにこれらと液化化強さ $R(30)$ ($N_i=30$ で液化化を生ずるに要する応力比 τ_b/σ_c) との関係について若干の検討を行なう。図-4.14のような有効応力径路から、一点法により求めた動的内部まさつ角 ϕ'_b と相対密度との関係は、図-4.15に示すように、かなりのばらつきはさけられないが、各砂についての傾向は、平均的にみれば、4種類の曲線で表示したように相対密度とともに大きくなる。同一の相対密度に対する静的内部まさつ角 ϕ'_a と比較すると ϕ'_b の方が一般にかなり小さく、その傾向は相対密度が小さい場合に著しい。すなわち、比較的密詰めの場合 ($D_r=80\%$ 前後) と緩詰めの場合 ($D_r=30\%$ 前後) について、高萩砂の場合、 $3^\circ \sim 8^\circ$ 、豊浦標準砂の場合、 $5^\circ \sim 8^\circ$ 、

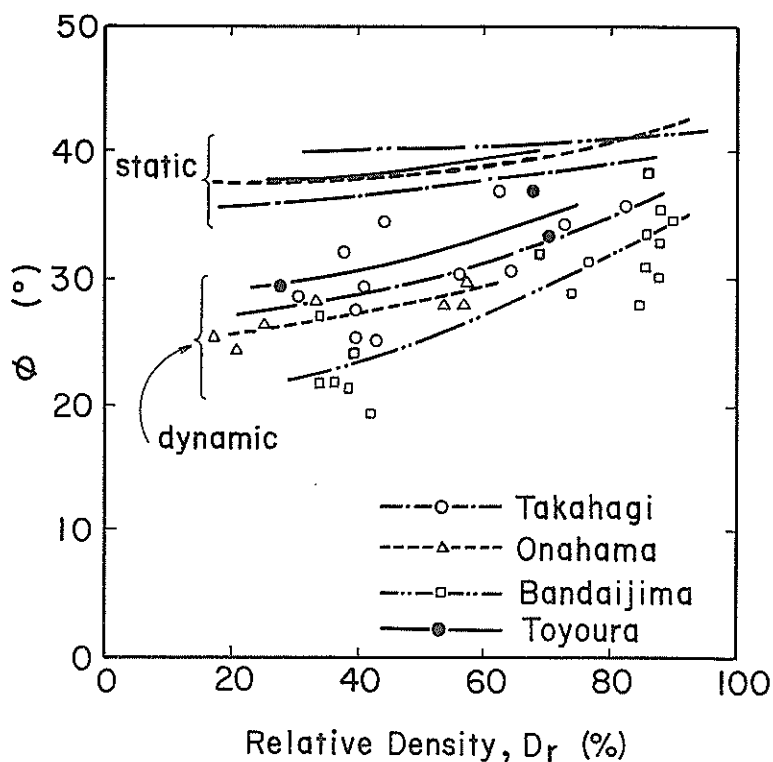


図-4.15 静的、動的内部摩擦角と相対密度

小名浜砂の場合、 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 、万代島砂の場合、 $7^{\circ} \sim 18^{\circ}$ 程度、 ϕ_b の値は ϕ_a より小さい。このような動的内部まっ角 ϕ_b 、あるいは静的内部まっ角 ϕ_a と液状化強さとの関係については図-4.15と図-4.7bを対比すると明らかかなように、同一の砂については両者とも相対密度とともに増大するため、 ϕ_b または ϕ_a の小さいものほど液状化強さは小さい。しかし、異種の砂を比較した場合には、相対密度が同じであっても、内部まっ角が大きいものほど液状化強さが大きいとはかぎらない。このこと

は、とくに、静的内部まっ角 ϕ_a の傾向からみても明らかである。このような傾向をより具体的に表わしたものが図-4.16aであり、これは、図-4.7bの適当な相対密度における液状化強さ $R(30)(N_f=30)$ で初期液状化を生ずるに要する応力比 τ_b/σ_c と図-4.15の対応する相対密度における、それぞれ ϕ_b 及び ϕ_a の値の関係として表示したものである。異種の砂を比較した場合に、一方の砂の ϕ_b または ϕ_a が大きいにもかかわらず、液状化強さが低くなる場合があるということは、液状化強さが繰り返し载荷中の過剰間げき水圧の発生に容易さに直接支配されるものであり、これは前述のごとく、相対密度が同じであっても、砂粒子の表面形状、粗滑の程度、粒子構造などに起因する圧縮性の相違に影響されるものであるのに反し、内部まっ角は、変形、すなわち圧縮性とは直接的には無関係に決められることが関係しているものと考えられる。飽和砂が振動を受けた場合には、図-4.15または図-4.16aに示したように、慣用の排水三軸試験より求まる ϕ_a より一般的にかなり小さくなる。低下の割合は相対密度により異なり、緩詰めの場合に顕著であるが、低下の割合と、対応する液状化強さの関係を示したものが図-4.16bである。図-4.16bの横軸 $\tan \phi_b/$

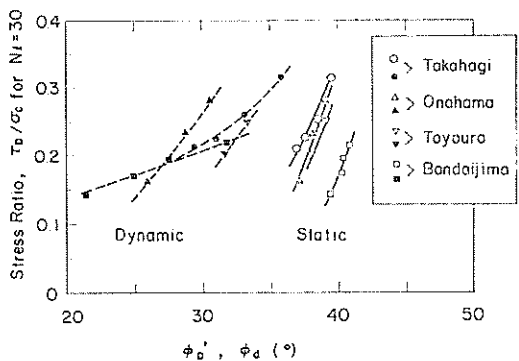


図-4.16a 静的、動的内部摩擦角と液状化強さ

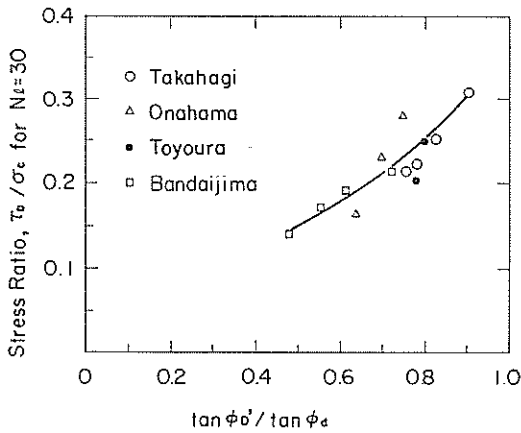


図-4.16 b 液状化強さと $\tan \phi_b' / \tan \phi_d$

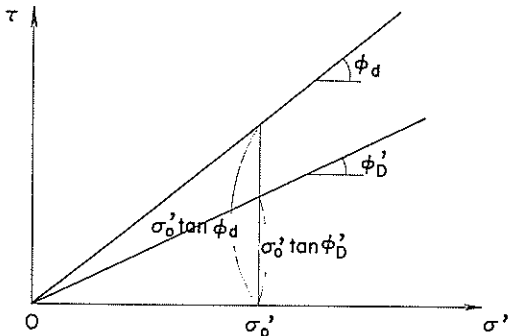


図-4.17 静的、動的破壊時のせん断強さの比

$\tan \phi_d$ は動的内部まさつ角 ϕ_b' の低下の割合を示す目安となるものであるが、この物理的意味は、図-4.17 に示したように、破壊面上の鉛直有効応力が等しい場合のせん断強さの比を表わすものである。図-4.16 b は、内部まさつ角の低下の大きい場合に液状化強さは低くなることを表わしており、この関係は、4種類の砂に関するかぎり、ほぼ同様の傾向を示している。異種の砂を比べた場合に、液状化強さは ϕ_b' 、 ϕ_d の個々の値には直接影響されなにかかわらず、低下の割合と液状化強さの関係が異種の砂の場合でもほぼ同様の傾向を示すことの理由は明白ではない。

5. 地盤の液状化検討例

新高地盤の被災報告²⁰⁾によれば、多くの港湾構造物の被害は、現行の震度法による設計法によりかなりよく説明しようとされている。しかし、万代島奥護岸については、震度0.2程度まで安全となるにもかかわらず、構造物は全壊して型をとどめず、水没沈下したと報告されている。報告書では、これらの原因が液状化によるもので

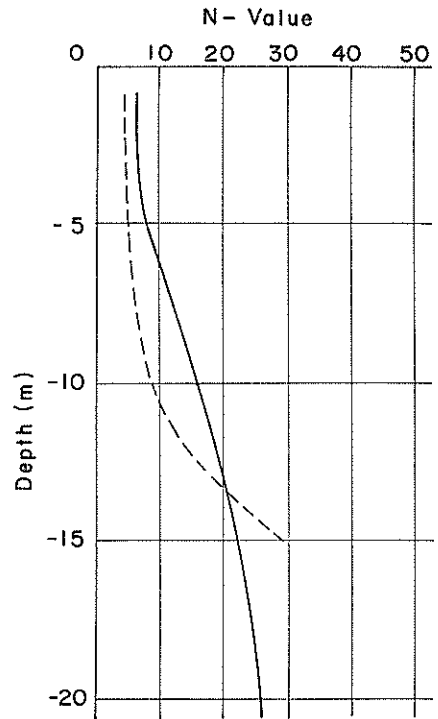


図-5.1 地震前後の標準貫入試験結果 (実線：地震前、破線：地震後)

あるとは断定していない。土田¹¹⁾は、近辺にみられた状況から、液状化によるものであろうと推定しているが、どの程度の深度で生じたものかは明らかでない。この付近で実施された標準貫入試験結果²⁰⁾によれば、図-5.1に示すように、深さ-4m~-13mまで地震前後でN値の減少がみられる。また、-13m以深では、逆にN値は増大している。一般的にN値の地震前後の増減の傾向は一定していないので、N値の傾向から地盤の液状化領域を推定することはできない²¹⁾が、N値の変動から液状化が発生したであろうことが推定される。

液状化領域を定量的に把握するため、Seed等⁹⁾の簡易的な液状化予測法を適用してみる。ただし、簡易法では、液状化強さは、相対密度と平均粒径により規定されるところであるが、砂の種類により一義的には決まることが判明したので、万代島砂の振動三軸試験結果を直接適用することとする。解析の対象とする地盤の土質断面図を図-5.2に示す。この地域は海面から-2m~-3mの所に厚さ1~2mのミルト分の多い土の存在がみとめられるが、それより以深は砂地盤と考えられる。

2.2に述べた手順に従い、かつ、対象地盤から採取した万代島砂の試験結果を直接使い解析した結果を図-5.3に示す。ただし、対象地点の地表面最大加速度は、0.17

振動三軸試験による飽和砂の液状化特性

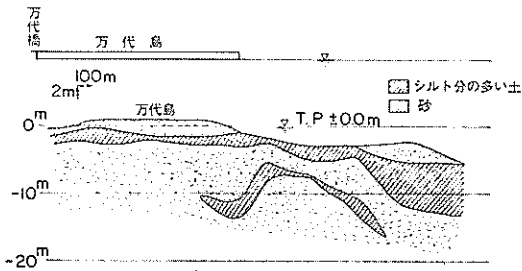


図-5.2 万代島地域の土質断面図

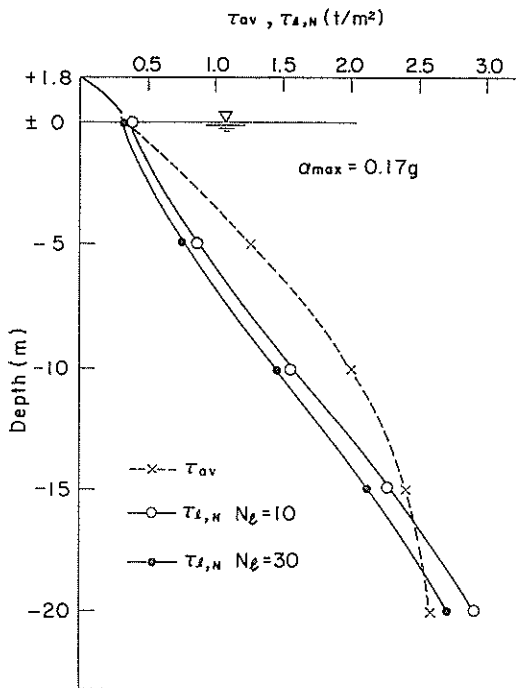


図-5.3 地盤の液状化検討例

gを用いた¹¹⁾。計算の詳細は付録に示す。図-5.3には、 $M=7$ 及び 8 に相当するとされている $N_f=10$ 及び $N_f=30$ の場合の結果を示した。図-5.3によれば、 $N_f=10$ の場合には深さ $\pm 0\text{ m}$ ～ -16 m まで液状化の可能性があることになり、また、 $N_f=30$ の場合には、 $\pm 0\text{ m}$ ～ -18 m まで液状化の可能性があることになる。新潟地震の場合には、 $M=7.5$ といわれており、図-5.3の $\tau_{s,N}$ の中間のものが対応するものと考えられる。ただし、上層部のシルト分の多い土も同一の砂としていることから、実際には、その部分の液状化の可能性は計算結果よりも小さいものと思われる。以上の解析手順にはいくつかの仮定が含まれており、特に地震による地中応力の算定値にはある幅が存在するが、平均的な値を適用することによ

て、地盤の液状化領域と N 値の変動についての関連が、ある程度明らかにされた。また、地震後の -4 m ～ -15 m 間における N 値の減少は、下層の液状化により生じた上向きの水の流れによって地盤が緩んだこと²⁷⁾、上層部の砂が海水とともに流出したこと²⁸⁾などによるものと推定される。

6. 結 論

振動三軸試験装置により、4種類の飽和砂の液状化特性を主体とする動的せん断特性を調べ、これらに及ぼす諸要素の影響、静的三軸試験結果との相関性、試験結果の液状化地盤への適用性を検討した。その結果、次のことが明らかにされた。

1) 液状化強さは、相対密度、粒度分布とくに平均粒径により強い影響を受けるが、これらのみにより一義的に決まらず、砂の種類によって相違がある。この傾向は実際に液状化を生じた万代島砂の場合によく顕著であり、4種類の砂の中ではとくに液状化しやすい。また、透水性は、非排水状態の液状化強さには関与しない。

2) 上述したような砂の種類による液状化強さの相違は、圧縮性の相違をもたらす粒子表面形状、粒子構造などの微視的要因にあると考えられる、慣用の排水せん断試験による圧縮性が、砂の種類、相対密度にかかわらず、液状化強さによく対応することから、液状化強さが慣用の三軸試験の結果から推定しうる可能性がある。

3) 飽和砂の動的内部まさつ角 ϕ_d は、静的内部まさつ角 ϕ_s にくらべてかなり小さい。両者の正接の比 $\tan \phi_d / \tan \phi_s$ 、すなわち、動的せん断強度と静的せん断強度の比は、4種類の砂に関わらず、砂の種類、相対密度にかかわらず液状化強さと一義的に対応する。しかし、動的および静的内部まさつ角は、砂の種類が異なれば、必ずしも液状化強さを表わすものではない。

4) 振動三軸試験結果を用いて、新潟地震における液状化地盤を解析した結果は、地震前後の N 値の変動をかなり良く説明した。

7. あとがき

振動三軸試験装置を用いて4種類の飽和砂の液状化特性について調べ、その結果を利用して新潟地震のさいの万代島地域地盤の液状化現象を解析したところ、深さ $\pm 0\text{ m}$ ～ -17 m にわたって地盤が液状化した可能性のあるという結果が得られた。しかしながら、砂地盤の液状化を判定する手順のなかには、いくつかの仮定や未解決な部分が含まれていることが銘記されなければならない。第1に、現場および室内試験における相対密度の決

定方法である。N値から現場の相対密度を推定する方法には、Terzaghi-Peck, Gibbs-Holtz, Thorburn, 柳瀬などによる多くの提案があるが、我国における種々の砂に対して、これらの方法が一義的に適用可能か否かという点については明らかにされていない。また、室内実験で相対密度を決定する場合においても、最大および最小間げき比の測定方法がいくつか存在し、測定方法の相違によって、得られる値が異なってくる。したがって、本報文では、いくつかの測定方法で求めた最大、最小間げき比のなかの最大値および最小値を採用している。現場および室内における相対密度の合理的、統一的な決定方法の早急な確立が必要である。第2に、室内実験の結果の原地盤への適用方法がある。振動三軸試験などのように土要素を考える実験では、比較的現場の条件に近い厳密な条件を再現できる利点があるが、実験方法や実験装置の相違によって結果に差異が生じる。したがって、振動三軸試験による結果と単純せん断試験による結果の相互比較や振動台実験結果との定量的なつきあわせ、原地盤における液状化データの集積、解析などを行うことによって、得られた結果をいかなる形で、どれだけの精度で、原地盤に適用することができるかを把握することが今後に残された問題である。第3に、地震外力の評価と地震により生じる地盤中の応力の算定法があげられる。従来の応答解析では、基盤からのせん断波が、線形弾性地盤に作用する条件のもとで行なわれているものが多い。実際の地盤では、基盤からのせん断力のみではなく、表面波の存在も無視できないといわれており、また、地盤の挙動も非線形性を示すことなどから、これらを考慮した応答解析が望まれる。

おわりに、土質部松並仁茂部長、構造部耐震構造研究室土田肇室長、ならびに土質部、構造部の関係諸氏により有益な討議、示唆をいただいた。記して感謝の意を表す。
(1976年9月30日受付)

参 考 文 献

- 1) Seed, H.B., and Lee, K.L., "Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading", ASCE, Vol. 92, No. SM6, Nov., 1966, pp. 105~134.
- 2) 柴田 徹, 行友 浩, "飽和砂の繰返し載荷による液状化現象の研究", 土木学会論文報告集 No. 180, 1970年8月, pp. 83~96.
- 3) Peacock, W.H., and Seed, H.B., "Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions", ASCE, Vol. 94, No. SM3, May, 1968, pp. 689~708.
- 4) Finn, W.D.L., Pickering, D.J. and Bransby, P.L., "Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests", ASCE, Vol. 97, No. SM4, Apr., 1971, pp. 639~659.
- 5) 吉見吉昭, 大岡 弘, "リングねじりせん断試験機による飽和砂の液状化実験", 第16回土質工学シンポジウム, 1971, pp. 27~32.
- 6) Ishihara, K. and Li, S., "Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test", Soils and Foundations, Vol. 12, No. 2, 1972, pp. 13~39.
- 7) Silver, M.L. et al, "Cyclic Triaxial Strength of Standard Test Sand", Journal of Geotech. Div., ASCE, May, 1976, pp. 511~523
- 8) Seed, H.B. "Soil Liquefaction in the Niigata Earthquake", Proc. of Japan Earthquake Eng. Symp., 1966.
- 9) Seed, H.B. and Idriss, I.M., "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", ASCE, Vol. 97, No. SM 9, Sept., 1971, pp. 1249~1273.
- 10) Ishihara, K. and Yasuda, S., "Sand Liquefaction in Hollow Cylinder Torsion under Irregular Excitation", Soils and Foundations No. 1, 1975, pp. 29~44.
- 11) 土田 肇, "砂質地盤の流動化の予測と対策", 昭和45年度港湾技術研究所講演会, 1970年12月, pp. 3-1~33.
- 12) 谷本喜一, "飽和砂質土の室内実験による液状化", 第16回土質工学シンポジウム, 1971, pp. 21~26.
- 13) 八木則男, 西田義親, "繰返しせん断を受けた飽和砂地盤の過剰間げき水圧の一計算例", 第10回土質工学研究発表会, 1975年6月, pp. 715~718.
- 14) Ishihara, K., Lysmer, J., Yasuda, S., Hirao, H., "Prediction of Liquefaction in Sand Deposits during Earthquakes", Soils and Foundations, Vol. 16, No. 1, Mar., 1976, pp. 1~16.
- 15) 吉見吉昭, 大岡 弘, "飽和砂の液状化に関する一斉試験", 土と基礎, Vol. 20, No. 7, 1972年7月, pp. 67~68.
- 16) 谷本喜一, 植村隆晴, "周期載荷を受ける飽和砂の破壊", 土木学会論文集, No. 183, 1970年11月, pp. 63~72.
- 17) 梅原靖文, 善 功企, 浜田浩二, "港湾工事材料としてのシラスの工学的性質(その5)振動三軸試験による動的性質", 港湾技術研資料, No. 211, 1975年3月, pp. 79~101.
- 18) 大原資生, "シラスの液化について", 第10回災害科学シンポジウム, 1973年3月, pp. 263~266.
- 19) 首都高連道路協会, "砂層の流動化に関する研究報告書", 1975年3月, pp. 18~25.
- 20) Lee, K.L. and Fitton, J.A., "Factors Affecting the Cyclic Loading Strength of Soil", Vibration Effects of Earthquakes on Soil and Foundations, ASTM STP 450, 1968, p. 3.
- 21) 最上武雄編, "土質力学", 技報堂, 1969, pp. 479~622.
- 22) 八木則男, "繰返しせん断による砂の体積変化と

振動三軸試験による飽和砂の液状化特性

- 過剰間げき水圧”, 第7回土質工学研究発表会, 1972, pp. 297~300.
- 23) 今井五郎, 川原靖雄, “砂の圧縮性と液状化強度の関係”, 第10回土質工学研究発表会, 1975年6月, pp. 333~336.
- 24) Park, T.K. and Silver, M.L., “Dynamic Triaxial and Simple Shear Behavior of Sand”, Journal of Geotech. Eng. Div., ASCE, June, 1975, pp. 513~529.
- 25) “土質試験法”, 土質工学会, 1969年9月, p. 420.
- 26) “新潟地震港湾被害報告 第2部”, 運輸省港湾局, 港湾技術研究所, 第一港湾建設局, 1965年3月.
- 27) 岸田英明, “飽和砂質地盤の液状化による被害例と対策”, 第16回土質工学シンポジウム, 1971年, pp. 55~62.
- 28) Bjerrum, L., S. Kringstad and O. Kummeneje, “The Shear Strength of Fine Sand,” Proc. 5th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, 1961, pp. 29~37.

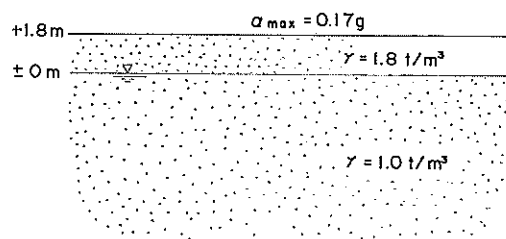
記号一覧表

- A: 間げき水圧係数
 A_f : 破壊時または初期液状化時の間げき水圧係数
 B: 間げき水圧係数
 c'_d : 動的試験における粘着力(有効応力表示)(kg/cm^2)
 D_{10} : 10%通過粒径(mm)
 D_{50} : 50%通過粒径(mm)
 D_{60} : 60%通過粒径(mm)
 D_r : 相対密度(%)
 E_D : 等価弾性係数(kg/cm^2)
 e_i : 初期間げき比
 G : 等価剛性率(kg/cm^2)
 K_0 : 静止土圧係数
 m_s : 排水せん断試験の体積ひずみのピーク値の, 対応する軸差応力に対する比(cm^2/kg)
 N : 標準貫入試験のN値
 N_L : 初期液状化までの繰り返し波数
 u : 過剰間げき水圧(kg/cm^2)
 Δu_i : 初期液状化時の過剰間げき水圧増分(kg/cm^2)
 V : 体積
 ΔV : 体積増分
 $\Delta V/V$: 体積ひずみ
 α_{\max} : 地表面最大加速度(g)
 γ_a : せん断ひずみ振幅
 ϵ_1 : 軸ひずみ
 ϵ_a : 軸ひずみ振幅
 σ, σ' : 垂直応力(全応力, 有効応力)(kg/cm^2)
 σ_1, σ'_1 : 最大主応力(全応力, 有効応力)(kg/cm^2)
 σ_3, σ'_3 : 最小主応力(全応力, 有効応力)(kg/cm^2)
 σ_c : 初期拘束圧(kg/cm^2)
 σ_D : 軸荷重振幅(kg/cm^2)
 σ_{av}, σ'_av : 土被り圧(全応力, 有効応力)(kg/cm^2)
 τ : せん断応力(kg/cm^2)
 τ_{av} : 地震時動的せん断応力(kg/cm^2)
 τ_D : 繰り返しせん断応力振幅(kg/cm^2)

- τ_f : せん断強度(kg/cm^2)
 $\tau_{i,N}$: 液状化を生ずるに要するせん断応力(kg/cm^2)
 τ_{\max} : 最大せん断応力(kg/cm^2)
 ϕ_d : 排水試験によるせん断抵抗角(度)
 ϕ'_d : 有効応力表示による動的せん断抵抗角(度)

付 録

解析方法の詳細は文献1)に述べられているので, ここでは, 万代島地域地盤の条件と計算手順について示す。本文中図-5.2の地盤を付図-1のようにモデル化した。



付図-1

(1) 地盤条件

付図-1に示すように, 地下水面上の単位重量 1.8t/m^3 , 水中重量 1.0t/m^3 とし, 地盤のNは図-5.1の地震前の値を用いる。地表面加速度 $\alpha_{\max}=0.17\text{g}$ である。

(2) 地震時等価せん断応力 τ_{av}

地震時の地盤中のせん断応力を求める場合に, 地震波形の不規則性, 継続時間を考慮して, これを等価なせん断応力に置換することが行なわれる。すなわち, τ_{av} は地震によって発生する最大せん断応力 τ_{\max} の65%という仮定にもとずき,

$$\tau_{av} = 0.65\tau_{\max} = 0.65(r_a \cdot \gamma z \cdot \alpha_{\max}/g)$$

で与えられる。ここで, $\gamma z \cdot \alpha_{\max}/g$: 地盤を剛体とした時の深さ z の点のせん断力, r_a ; τ_{\max} と $\gamma z \cdot \alpha_{\max}/g$ の比である。上式を用いて τ_{av} を計算すると付表-1のようになる。 r_a の値は文献1)の図から平均値を読み取った。

付表-1

深 度 (m)	γz (t/m^2)	r_a	τ_{av} (t/m^2)
+ 1.8	0	—	0
± 0	3.24	0.99	0.35
- 5	13.24	0.94	1.38
-10	23.24	0.85	2.18
-15	33.24	0.66	2.42
-20	43.24	0.55	2.63

付表-2

深 度 (m)	N 値	有効上載 圧 (t/m ²)	相対密度 (%)	c _r	τ _D /σ _c		τ _{i,N} (t/m ²)	
					N _i =10	N _i =30	N _i =10	N _i =30
+ 1.8	7	0	66	0.62	0.215	0.195	0	0
± 0	7	3.24	54	0.58	0.195	0.175	0.37	0.33
- 5	8	8.24	48	0.57	0.185	0.165	0.87	0.78
-10	15.5	13.24	48	0.59	0.200	0.185	1.56	1.45
-15	22	18.24	62	0.61	0.205	0.190	2.28	2.11
-20	26	23.24	62	0.61	0.205	0.190	2.91	2.69

(3) 有効上載圧 σ'_v および相対密度 D_r
N値から相対密度を推定する方法として、多くの提案があるが、ここでは Gibbs and Holz の式

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}}$$

を用いた。

(4) 液状化を起こさせるのに必要なせん断応力 τ_{i,N}
N値および有効上載圧から地盤の相対密度が推定されれば、その相対密度に対応する砂の液状化強さを図-4.7 a, または 図-4.7 b により決定する。この場合に、振動

三軸試験の結果を現地盤に適用するための補正係数 c_r が用いられる。c_r の値は相対密度の関数として与えられている。τ_{i,N} は

$$\tau_{i,N} = \left(\frac{\tau_D}{\sigma_c} \right) \cdot c_r \cdot \sigma'_v$$

である。図-4.7 a, 図-4.7 b の N_i=10, N_i=30 に対応するマグニチュードは、それぞれ 7 および 8 といわれている。τ_{i,N} の計算結果を付表-2に示す。

(5) 液状化の検討

以上のようにして求めた τ_{av} と τ_{i,N} を比較して、液状化の可能性を検討する (図-5.3)。