

土の液状化に及ぼす粒度および細粒分含有率の影響

わた なべ ただ お* そで かわ まさ と*
 渡 辺 忠 雄* 袖 川 正 人*
 た なか やす お* へ き おさむ*
 田 中 靖 雄* 日 置 修*

1. まえがき

砂質地盤の地震時の液状化現象については、1964年の新潟地震によって多大の被害を生じて以来、土質工学上の大問題として多くの研究がなされている。液状化発生に影響を及ぼす種々の因子についても明らかにされてきた。表題の粒度の影響については、リー & フィットン (Lee & Fittton)¹⁾ の実験で、砂の液状化に対しては平均粒径が支配的であることがわかった。また荻野・今井・篠崎²⁾ は細砂についてリー & フィットンの実験結果を裏づけるとともに、均等係数の大きな砂ほど液状化しにくいこと、および粒径が大きいほど、また均等係数が小さいほど締固めによる液状化防止効果が大きいことを明らかにした。

このように、粒度と砂の締まりぐあいと液状化発生の難易に大きな比重を占めるようであり、砂地盤では液状化対策工として地盤改良による締固めも各所で施工されているのが現状である。しかしわが国の埋立て地盤などのチュウ積砂層においては、その多くが完全な砂層ではなく、シルト、粘土といった細粒分を含んでいるのが通常である。したがって液状化対策を考える場合このような細粒分を含む地盤を対象とするケースが非常に多いものとみられる。こうしたことから筆者らは、振動三軸試験機を用いて、種々の粒度組成の土について一連の液状化実験を行ってきたので以下その概要を説明してみたいと思う。

2. 試験の概要

2.1 試験の内容

振動三軸試験は、つぎの3種類について行なった。

- i) 飽和砂の液状化に及ぼす間ゲキ比と粒度の影響
- ii) 細粒分を含む飽和砂の液状化
- iii) 細粒分を含む乱さない砂の液状化

i) においては、純粋な砂試料について、液状化に及ぼす間ゲキ比および粒度の影響を調べこれを処理するのに余裕間ゲキ比といった概念を導入した。ii) においては、細粒分を含む砂についても正規圧密状態では液状化を生じ得るが、これを過圧密状態にすることにより液状化に対する

抵抗がかなり増大することがわかった。iii) においては、特殊な成型器を作成しシンウォールチューブから直接三軸試験供試体を抜きとり、乱さない試料について試験した。同じ試料を乱して再成型したものと比較して、乱さない試料のほうが液状化に対する抵抗が大きいという結果を得た。

2.2 振動三軸試験機構

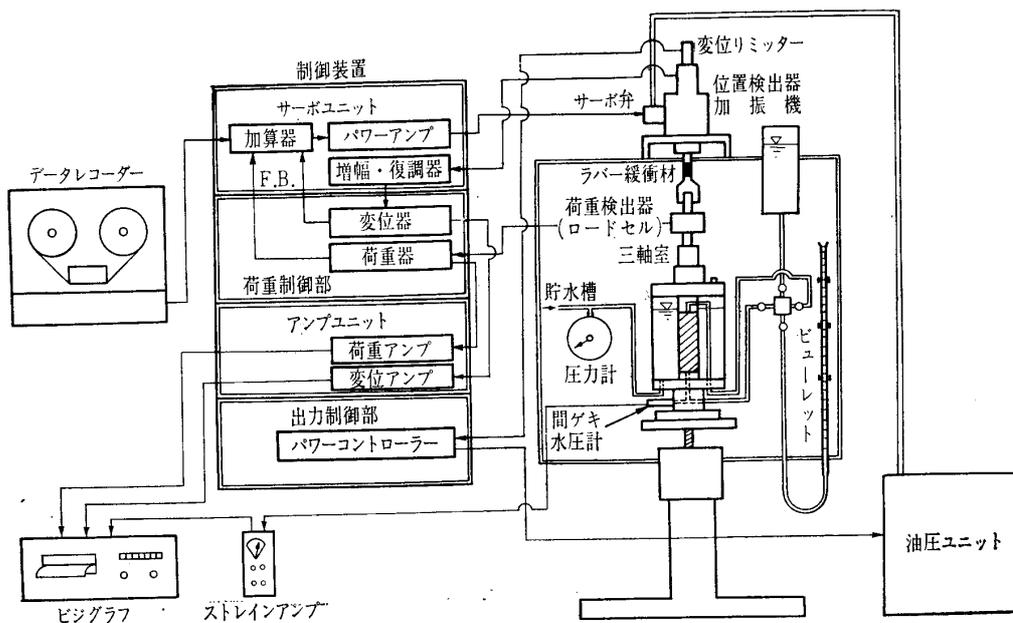
使用した振動三軸試験機は、前記 i) および ii) の実験では、図-1(a)に示した油圧サーボ式装置を、また iii) の実験では、図-1(b)に示した空気圧サーボ式装置を用いている。

それぞれの装置は、軸方向载荷ロッドが可動な三軸室をもった通常の三軸試験装置におのおの油圧サーボ機構あるいは空気圧サーボ機構を連結したものである。いずれの場合も、三軸室の軸方向载荷ロッドと加振ピストンの間にラバー緩衝材を入れ液状化後の波形の乱れを防いでいる。変位および荷重は、ピストンの位置を電気量に変換する動変位測定器、ならびに供試体に加わる荷重を電気量に変換するロードセルによって制御・検出されビジグラフに記録される。間ゲキ水圧は供試体下方の間ゲキ水圧計によって検出してストレインアンプで増幅されて変位・荷重とともにビジグラフに同時に記録される。入力波は、前記 i) および ii) の実験(油圧サーボ機構使用)ではサイン波を、iii) の実験(空気圧サーボ機構使用)ではく形波を用いた。いずれの場合も振動数は 1 Hz とした。試験結果の例を図-2に示す。

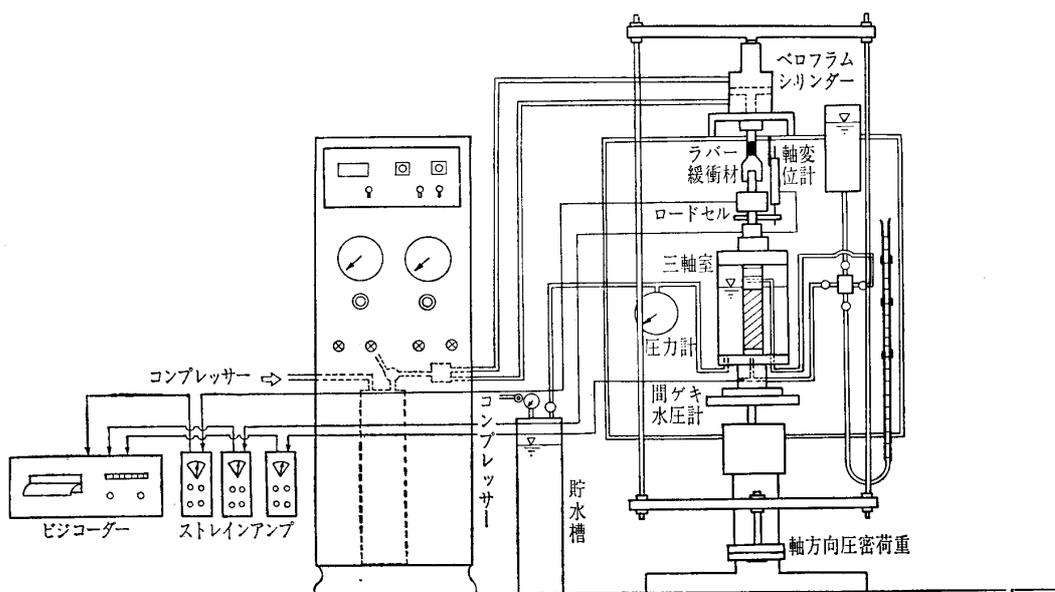
3. 飽和砂の液状化に及ぼす粒度と間ゲキ比の影響

飽和砂地盤の液状化の難易を左右する砂の締まりぐあいを表現する量として相対密度 D_r がよく用いられている。すなわち、 D_r の値の大小によって液状化に対する抵抗が決定されるとされている。しかし一方ではシラスのように高い相対密度でも液状化しやすい材料が存在し得ることが報告されており³⁾、また砂の粒径が大きくなると、相対密度が低くても著しく液状化しにくくなることも事実のようである¹⁾。こうしたことから相対密度のみによって砂の締まりぐあいを表わすのは必ずしも適切ではないように思われてくる。

* 不動建設(株)特殊工法事業本部 研究室



(a) 油圧サーボ式装置



(b) 空気圧サーボ式装置

図-1 振動三軸実験機構概略図

ところで、砂のダイレイタンスに注目すると、ダイレイタンスによる体積収縮の余地が多く残されている砂ほど、非排水状態でせん断応力を加えた場合間ゲキ水圧が容易に上昇し、液状化しやすいと考えてよいであろう。一般に砂の間ゲキ比 e はその最大値 e_{max} と最小値 e_{min} の中間にあり、締め固まると次第に e_{min} に近づく。したがって体積収縮の余裕を表わす量は $e - e_{min}$ であると考えてよ

からう。以下この $e - e_{min}$ の値を余裕間ゲキ比と呼ぶ。余裕間ゲキ比は、間ゲキ比範囲 $e_{max} - e_{min}$ の値と密接な関係があるとみられる。ここではいろいろな砂についてこれらの値を求め、粒度との関係についても調べた。

3.1 試料および実験方法

試験に用いた試料を表-1 に示す。各試料の粒径加積曲線は図-3 のとおりである。

最大間ゲキ比 (e_{max}) と最小間ゲキ比 (e_{min}) の測定法についてはいろいろな方法があり、粒度などによって測定方法でかなりの差がある。この実験ではリー&フィッソンの実験¹⁾に述べられた方法を用いて行なう。最大間ゲキ比は、鋼製モールド (直径 10 cm, 高さ 12.7 cm の突固めテスト用モールド) に乾燥砂をスプーンで無視できる高さから静かに注いで求める。最小間ゲキ比は、三軸試験用のモールド (直径 5 cm, 高さ 16 cm) に飽和状態で振動締固めを行ない最密状態を作り求めた。

試料はまず $\sigma_c = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ の拘束圧で圧密し、それに $\pm \sigma_{ap}$ の交番荷重を加え、ヒズミが急増し、間ゲキ水圧・

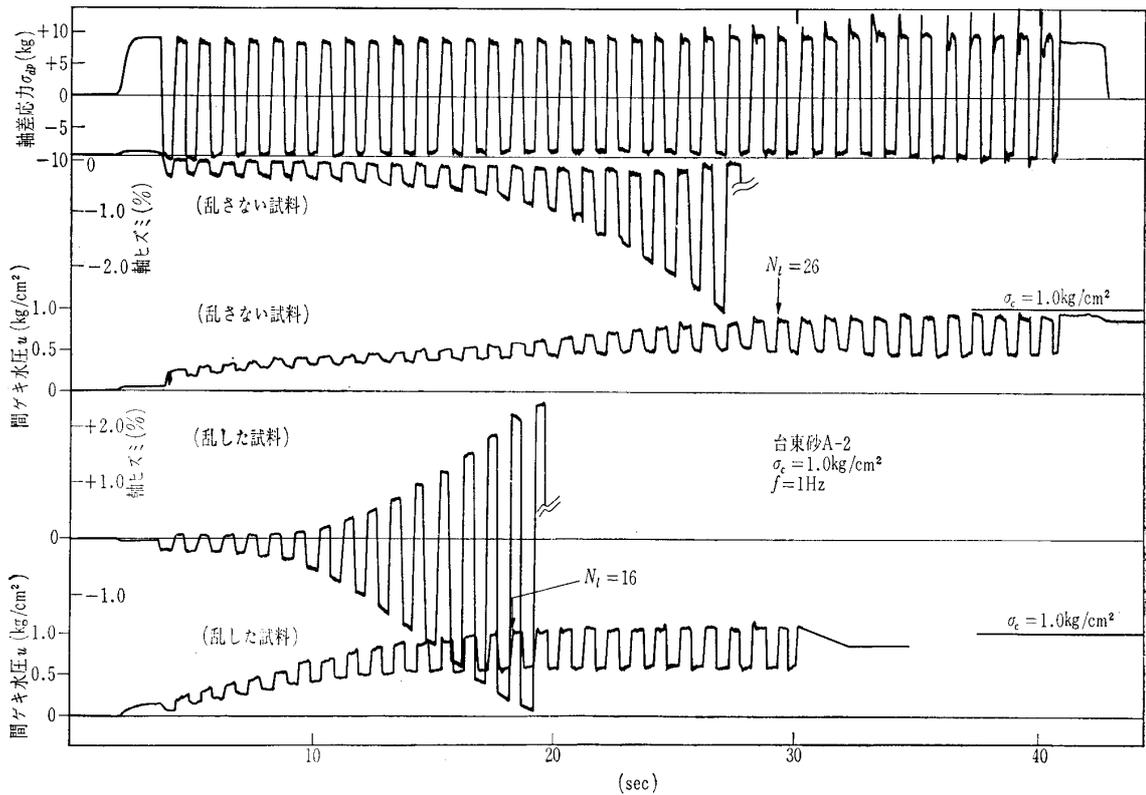
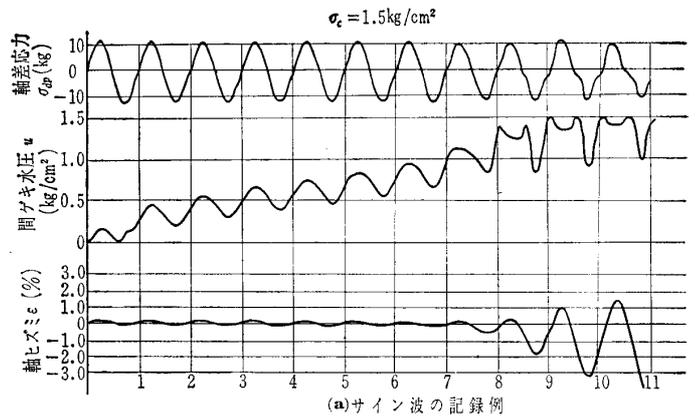


図-2 試験結果の例

波形にいわゆる飛び出し現象が現われた時点で初期液状化の始まりとみた。

3.2 実験結果

繰返し载荷回数 $N_t = 20$ で液状化を生ずるときの $\sigma_{ap}/2\sigma_c$ の値を縦軸に $e - e_{min}$ の値を横軸にとり、 $D_r = 40$ のときの実験結果を示すと図-4 のようになる。この図より同一の相対密度であっても材料によって液状化発生の難易に大きな差があることがわかる。つぎに、 $D_r = 40\% \sim 55\%$ の範囲のデータをこれと同じ方法でプロットすると図-5 のようになる。これより相対密度によらず、 $e - e_{min}$ の値が一定なら液状化発生時の $\sigma_{ap}/2\sigma_c$ の値がほぼ確定することがわかる。これで間ゲキ比範囲 $e_L = e_{max} - e_{min}$ が簡単にわかれば、地盤の間ゲキ比を知ることによって、液状

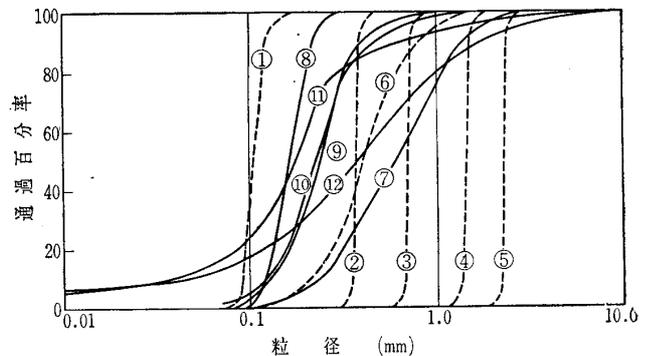


図-3 実験に用いた砂の粒径加積曲線

表-1 実験に用いた砂の諸定数

記号	試料名	比重	平均粒径 (mm)	均等係数	e_{max}	e_{min}
1	ガラスビーズ	2.52	0.11	1.19	0.790	0.551
2	"	"	0.36	1.09	0.721	0.553
3	"	"	0.71	1.06	0.689	0.534
4	"	"	1.41	1.07	0.641	0.520
1	富士川砂(フルイ)	2.68	0.11	1.19	1.148	0.616
2	"	"	0.36	1.09	1.050	0.615
3	"	"	0.71	1.06	0.944	0.603
4	"	"	1.41	1.07	0.900	0.584
5	"	"	2.19	1.05	0.847	0.569
6	富士川砂(配合)	"	0.40	2.15	0.933	0.481
7	富士川砂(自然)	"	0.61	3.35	0.835	0.469
8	豊浦標準砂	2.65	0.17	1.44	0.987	0.604
9	新潟砂	2.67	0.23	2.34	0.989	0.545
10	千葉砂	4.74	0.22	2.27	1.033	0.472
11	尻内砂	2.56	0.18	5.26	1.682	0.996
12	シラス(喜入町)	2.44	0.34	10.87	1.561	0.868

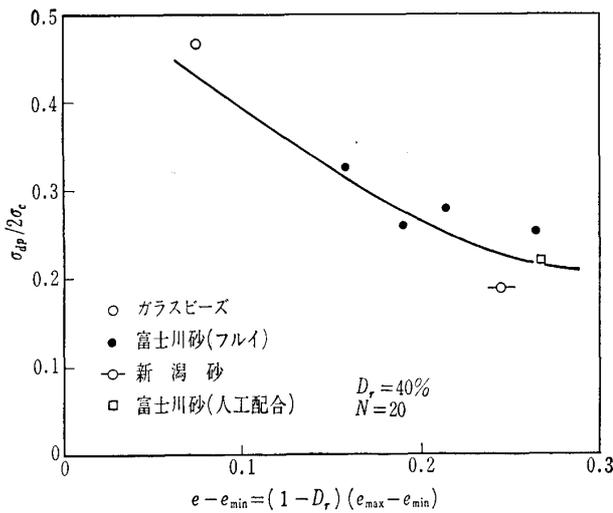


図-4 $D_r=40\%$ の場合の $\sigma_{dp}/2\sigma_c$ と $e - e_{min}$ の関係

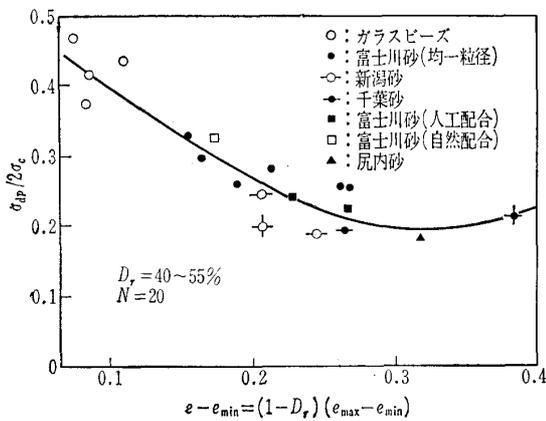


図-5 $\sigma_{dp}/2\sigma_c$ と $e - e_{min}$ の関係

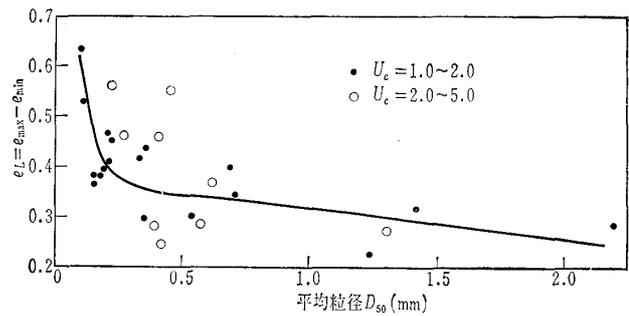


図-6 e_L と D_{50} の関係

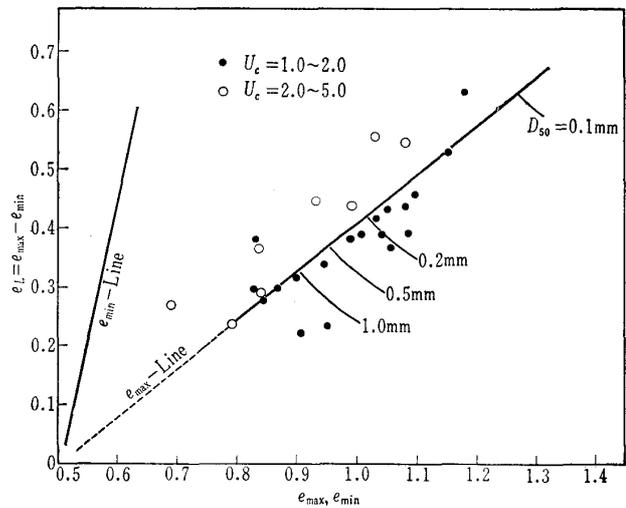


図-7 e_L と e_{max}, e_{min} の関係

表—2 用いた試料の一覧表

名称	比重 (G_s)	配合	土質分類	D_{50} (mm)	採取場所
高砂 A	2.711	0/100**	砂	0.18	東京都葛飾区 高砂中学校校庭 高砂A, Bは地表面下2~4mの深さより採取したものである。
		23/77*	砂	0.16	
		50/50	砂質シルト	0.063	
高砂 B	2.709	33/67*	シルト質砂	0.12	
江東 A	2.735	20/80	シルト質砂	0.09	東京都江東区東雲町1-1 江東Aは地表面下, 1~4m, 江東Bは地表面下4~10mの深さより採取したものである。
		58/42*	シルト質砂	0.075	
		80/20	砂質シルト	0.04	
		100/0	シルト	0.025	
江東 B	2.767	15/85*	砂	0.28	
洲崎砂	2.684	100/0	シルト質粘土	0.01	東京都江東区東陽町

** : A/Bと書いたとき, Aは74 μ 以下の細粒分の含有率を, Bは74 μ 以上の砂分のパーセンテージを表わす。

* : 採取した試料の自然配合

化の発生の有無, および対策としてどの程度締め固めればよいか推定できる。図—6は種々の文献で調べた他のデータをも混ぜて e_L の値を平均粒径 D_{50} に対してプロットしたものである。さらに同じデータで e_L の値と e_{max} の値とをプロットすると図—7に示すようになる。これらの図は, 現在のところ不完全であるが, 与えられた砂の粒度配合より, 平均粒径と均等係数を知れば, e_L の値を求め得る可能性がある。さらに, $e - e_{min}$ の値で砂の締め固めを表現できるなら, 最大間ゲキ比 e_{max} を測定する必要がなくなる。一般に e_{max} を正確に求めるのは e_{min} の測定に比べてはるかにむずかしく, 測定に個人差が入りやすい, 細粒分が15%程度以上になると飽和させて求めた e_{max} の値が極度に大きくなるため D_r の値が異常に小さくなる, などその精度に問題がある。この意味でも余裕間

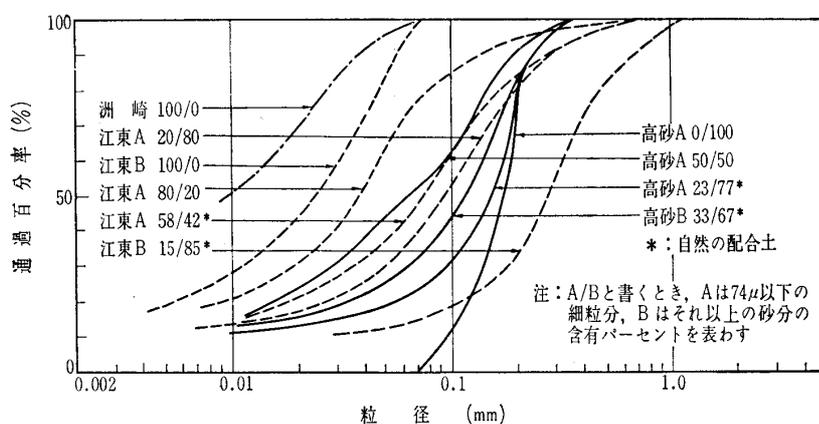
ゲキ比を用いると便利である。

4. 細粒分を含む飽和砂の液状化

細粒分を20%以上含むような砂については, 間ゲキ比以外に粘性の影響が現われ, 余裕間ゲキ比のみでは液状化現象の説明には不十分であろう。粘着力の増加が液状化に対する抵抗を強めることは想像にかたくない。実際の地盤では過圧密により粘着力を増すことができる。ここでは, 細粒分を含む飽和土について正規圧密の場合と過圧密の場合の液状化発生の難易を調べた。

4.1 試料および実験方法

試験に用いた試料は, 表—2に示したとおりである。各試料の粒径加積曲線を図—8に示す。これらの図, 表でA/Bと書くとき, Aは粒径74 μ 未満の細粒分の, Bは74 μ 以上の粗粒分の含有パーセントを表わす。平均粒径 D_{50} の値は0.01mm~0.28mmの範囲にあり通常のシルト質土の粒度をほぼ網らしている。供試体の作成にあたっては, 通常砂の場合に行なう, 脱気水を入れたモールド内に飽和土を注入する方式では供試体の下部に粗粒分が沈み不均一となるため, 脱気水にあらかじめ細粒分を混入してスラリー状にしておきこの中に粗粒分を沈殿させた。試験後供試体を上下方向に等分し, 各々の粒度配合を調べ供試体の一様性を確認した。正規圧密の場合は拘束圧 $\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ ま



図—8 実験に用いた土の粒径加積曲線

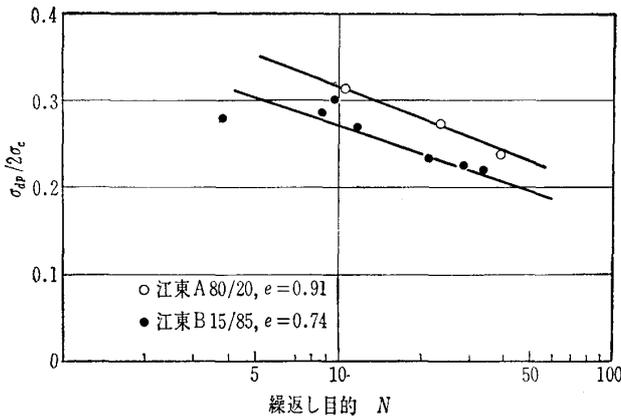


図-9 細粒分の少ない砂およびシルトの液状化に対する抵抗

で圧密し、土 σ_{ap} の交番荷重を加えた。過圧密の場合は過圧密比 O.C.R. を 1.5, 2.0 の2種とした。

4.2 正規圧密の場合

細粒分含有率80%および15%の砂について液状化に要する繰返し載荷回数と応力比の関係を示したものが図-9である。

この図より、細粒分の添加により液状化に対する抵抗は、増加はするが、さほど大きなものではないことがわかる。

4.3 過圧密の影響

つぎに、過圧密比 O.C.R.=1.5, 2.0 のときの液状化応力比と繰返し載荷回数の関係は図-10に示すようになる。

これより、土を過圧密状態にすることにより、液状化に対する抵抗がかなり増加することがわかる。

図-11は実験したすべての試料について過圧密比の影響をみたものである。土の平均粒径 D_{50} と繰返し載荷回数 $N=30$ 回で液状化を生ずるに必要な応力比をプロットしてある。図中の一点鎖線はリー&フィットン¹⁾の $D_r=50\%$ のデータであるが O.C.R.=1.0 の場合の結果に近い。この図より細粒分の含有が多く平均粒径の小さな土ほど過圧密の効果が大きいことがわかる。以上の結果より細粒分を含む土であっても液状化を生じる可能性はあり、その対策

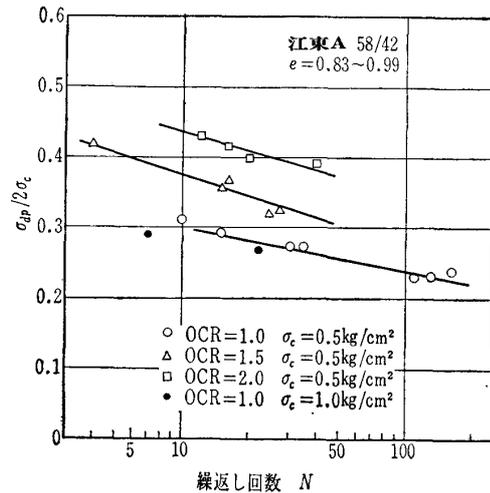


図-10 過圧密比の影響

としては、地盤を過圧密にするのが有効であるといえよう。

5. 細粒分を含む乱さない土の液状化

細粒分を含む土においては、過圧密状態にし、その粘着力成分を増大してやることによって液状化に対する抵抗を増加できることがわかった。このことから細粒分を含む土では、逆に、乱した試料を用いて試験を行なった場合、原地盤の乱さない土より液状化に対する抵抗が小さくなることが予想される。一般に砂の室内実験は、ほとんどが乱された試料を用いて行なわれている。これは、飽和したゆるい砂のサンプリングが非常に困難なこと、またかりにサンプリングができたとしてもその試料を成型することがむずかしいことによる。しかし、このような細粒分を含まない砂は、かく乱の影響は少なく、室内においても、原地盤に近い状態の供試体の作製が可能である。これに反し、細粒分を含む土(10%~30%)では注意深くすれば、乱さない試料の採取ができる。この種の土は粘着力成分を若干もっているから、かく乱の影響を受けやすい。そこで、繰返しせん断力を受けた場合に、細粒分を含む乱さない土と乱した土とでは液状化に対する抵抗がどのように違うかを調べてみた。

5.1 試料および実験方法

試験に用いた試料は、東京都台東区の隅田川沿いのチュウ積低地よりシンウォールサンプリングしたものである。試料の諸定数、およびこれを乱した試料の配合を、表-3に示す。各試料の粒径加積曲線は図-12のとおりである。

乱さない試料の供試体は、試料にかなり多量の砂分が含まれていて、円筒形に成型することが困難なため、カッター式直接成型器を用いて成型した。すなわち、シンウォールチューブの口のところにこの成型器

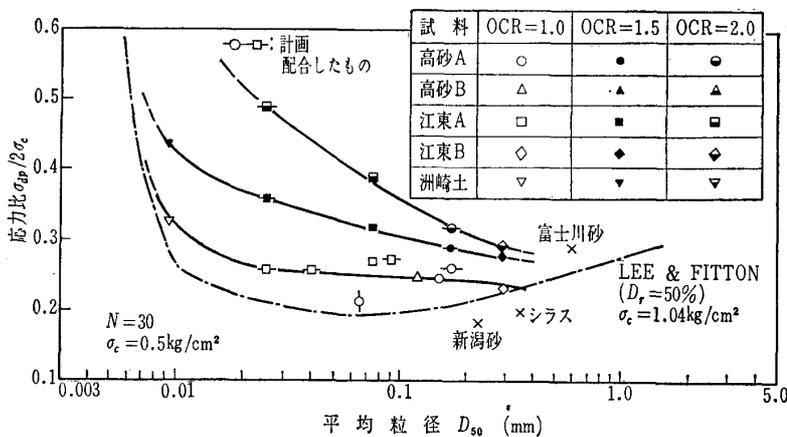


図-11 液状化に及ぼす過圧密の影響

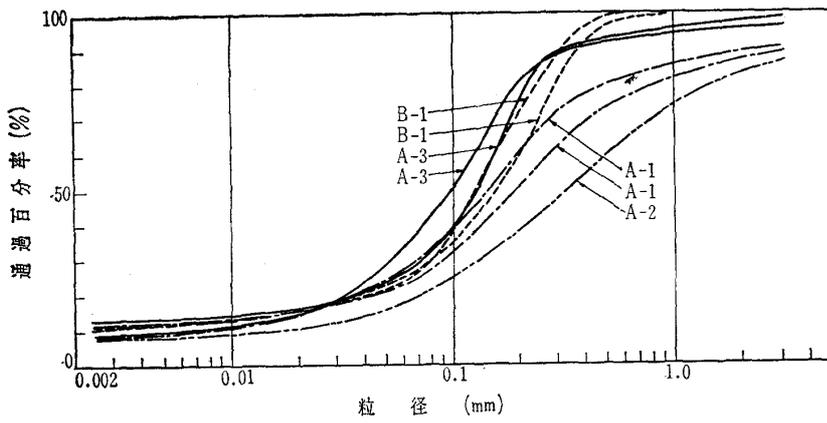


図-12 試料の粒径加積曲線

表-3 用いた試料の一覧表

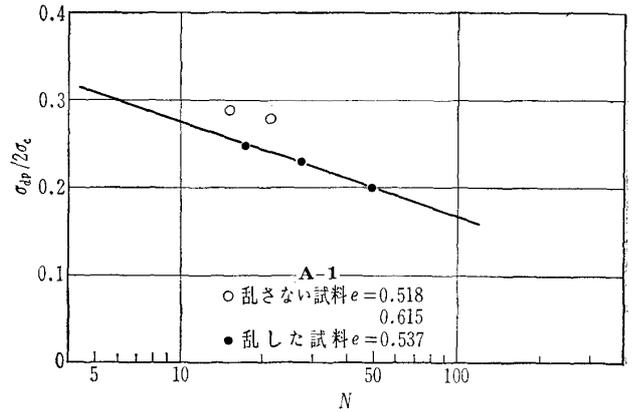
試料		細粒分含有率 (%)	間ゲキ比 e	試料採取場所	
乱さない試料	台東砂A	A-1	26	0.518	東京都台東区 日本堤2丁目 田中小学校
		B-1	32	0.615	
		A-2	21	0.439	
		A-3	31	0.689	
	台東砂B	B-1	32	0.705	
乱した試料	台東砂B	B-1	28	0.590	東京都台東区 橋場2丁目 橋場公園
		B-1	26	0.844	
	台東砂A	A-1	30	0.537	上記の試料を 使用
		A-2	20	0.461	
		A-3	40	0.718	
台東砂B	B-1	25	0.591		

を置き、試料は押し出されると同時にカッターで直径 5 cm の円筒形に成型され、成型器内にセットしたゴムスリーブに包まれる。供試体は、圧密終了後 ($\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$) 非排水状態で等方圧を加え、間ゲキ水圧の上昇を調べたが、間ゲキ水圧係数 (B 係数) が $B \approx 0.6$ 程度と小さく不飽和であることがわかった。そこで試料の飽和度を高めるため、供試体の下部から 0.5 kg/cm^2 の圧力で水を送りこみ、上部から排水するという操作を72時間~96時間継続し、 $B > 0.9$ を確認したのち、もとの圧密圧 $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ で再圧密した。乱した試料の供試体は、乱さない試料の振動三軸試験後、#200 (74 μ) フルイでふるい分け、表-3 に示した条件で配合し、4.1 で示したのと同じ方法で作成した。

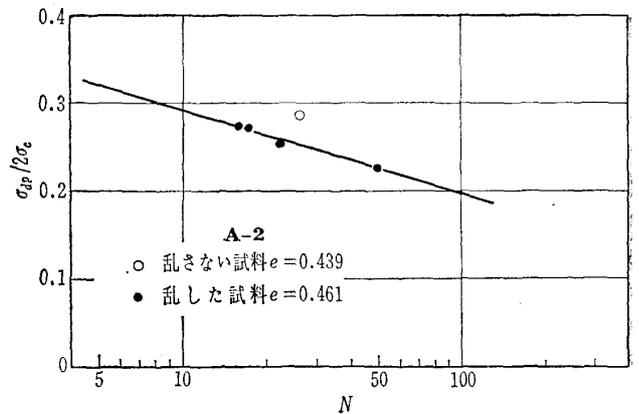
5.2 実験結果

各試料の、液状化に要した繰返し載荷回数と、応力比の関係を図-13(a)~(d)に示す。

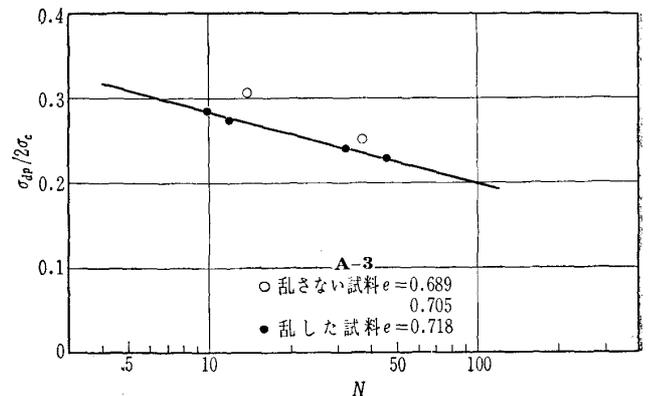
乱した試料と乱さない試料の液状化に対する抵抗を比較するため、横軸に細粒分含有率をとり、縦軸に両者の同じ繰返し回数で液状化を生じる応力比の比をとったものが図-14である。この図よりみて、乱さない試料のほうが乱した試料より液状化に対する抵抗が、応力比にして1.06~1.26倍程度大きいことがわかる。したがって細粒分を含む砂では、乱した試料による室内実験結果を原位地盤に適用する場合に液状化に対する抵抗をこの程度割増すことができよう。



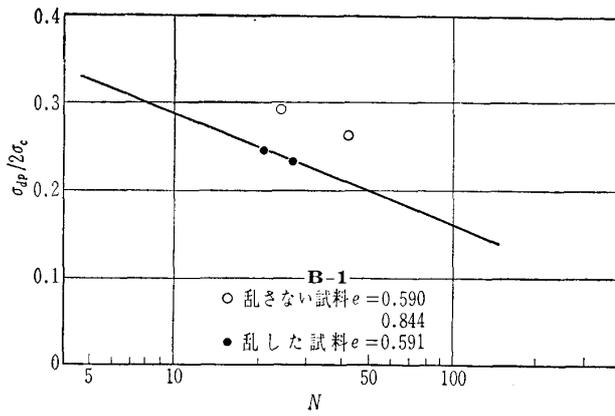
(a) 応力比と液状化回数の関係



(b) 応力比と液状化回数の関係



(c) 応力比と液状化回数の関係



(d) 応力比と液状化回数の関係

図-13

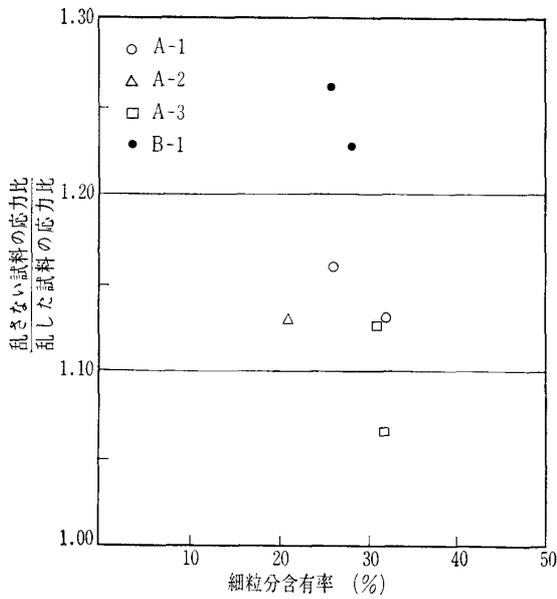


図-14 乱さない試料と乱した試料の液状化に対する抵抗の比較

6. まとめ

世界有数の地震国であり、かつ周囲をことごとく海にかこまれた日本列島においては、重要構造物のほとんどすべてが建設されるチュウ積地盤の地震対策が不可欠となっている。地盤の震害として最も注目されている液状化の問題に関して室内で実験を行ってきたが、ここに室内実験のこれまでの結果を列挙した。完全な砂では、余裕間ゲキ比を減少させること、すなわち、地盤を締め固め、間ゲキ比の減少を図ることが液状化対策としてすぐれていることを示した。現実に最も多く遭遇するシルト質地盤においては細粒分の含有量によっては、余裕間ゲキ比を減少させるのもさることながら、わずかに地盤を過圧密にすることで液状化に対する抵抗が増すことがわかった。このように細粒分を含む砂では粘着力成分の影響があることから、乱した砂において室内試験を行なった場合の原位地盤への適用の際の補正ができることがわかり、ある程度定量的な結果を得た。今後さらにデータが集積され、液状化対策に役立てば幸いである。

謝 辞

本実験は東京大学石原研而助教授のご指導をいただき、同大学土木工学科土質工学研究室において行なわせていただいた。深く感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) Lee, K.L. and Fitton, J.A. : Factors affecting the Cyclic Loading Strength of Soil, Vibration effects of earthquakes on soils and foundations, ASTM STP 450 1968
- 2) 荻野弘雅・今井五郎・篠崎博：飽和砂の液状化に及ぼす平均粒径・均等係数の影響，第9回土質工学研究発表会講演集，1974
- 3) 山内豊聡他：繰返し荷重を受けるシラスのような砂の間ゲキ水圧について，第22回土木学会年次学術講演会，1967

(原稿受理 1975. 3.14)

学会刊行物案内

土工管理とラジオアイソトープ

— 表面型密度計・水分計の取扱い手引き —

土質工学会編・発行

土質工学会では将来性に期待の大きい密度計と水分計の利用性を中心に慎重な検討を重ねた。その結果従来からの問題点も整理され、実用への確認が得られたので、ここにその成果の一つである表面型密度計・水分計の取扱い手引を世に送ることになった。

土の現場密度・含水量の測定手法の進歩を助けるばかりでなく、広く一般にもラジオアイソトープを利用した計器への理解を深める意味において非常に価値のあるものと確信している。

A 5 判, 127 ページ : 定価 2,000円, 会員特価 1,500円

(社) 土質工学会 電話 03-502-6256 〒105

東京都港区西新橋1-13-5 東亜別館内