

西沖埋立地盤の繰返しせん断強さ

山本 哲朗*・大原 資生**・堀 渕 幸 司***

Cyclic Shear Strength of the Nishioki Reclaimed Deposit

Tetsuro YAMAMOTO, Sukeo ŌHARA and Kohji HORIBUCHI

Abstract

The stability of the saturated reclaimed deposit in the Nishioki district during cyclic shear is examined using simplified methods of liquefaction analysis. The deposit with thickness of about 3m consists of very soft silty sand, which has N-value below 3, and water content above liquid limit of 38.9%.

Also, in order to obtain cyclic shear strength of the silty sand, cyclic shear tests were carried out using cyclic triaxial test apparatus.

It is shown from the analyses that when the deposit is subjected to an earthquake of $M=6$, the deposit causes failure like the liquefaction of sand. Furthermore, it is found that though the density of the silty sand increases due to the drainage after the first cyclic shear failure, the silty sand easily fails again as compared with the first failure.

1. まえがき

宇部ポリプロ工場の建設が予定されている西沖埋立地区の地盤はおおむね深さ28mまでは第四紀層、それ以深は第三紀層から成る。第四紀層は砂、シルト、シルト質砂および砂礫といった各種の土質地盤の成層によって構成され、第三紀層は砂岩と頁岩の互層によって構成されている。残留水位は深さ1m内外から数mのところであり、すべての地盤は飽和状態に近いものと考えられる。

埋立土として深さ10m程度以浅に搬入された約3～4mの厚さで堆積する飽和シルト地盤あるいはシル

ト質砂地盤はN値が最大の場合でも6程度であり、自然含水比は液性限界よりも高くてもきわめて軟弱である。

1991年周防灘地震 ($M=5.9$) の際には当地区に近接する地域のN値が3以下の軟弱地盤にはかなり大きい地震動が発生して地割れが発生したことが確認されている¹⁾。このことから西沖地区の飽和シルトおよびシルト質砂地盤が $M=6$ の地震を受けた時には繰返しせん断破壊が発生することが懸念され、その地盤の繰返しせん断強さを検討することが必要となった。

本文はとくに飽和シルト質砂地盤の繰返しせん断による破壊に対する予測を簡易液状化判定法および道路橋示方書の方法を用いて検討した結果をのべる。あわせてこの検討に当たって必要なシルト質砂の繰返しせん断強さを繰返し三軸試験機を用いた実験によって求めた結果についてのべる。

*社会建設工学科

**宇部工業高等専門学校

***大学院社会建設工学専攻

2. シルト質砂の諸性質

今回検討の対象とした西沖シルト質砂地盤は Fig. 1 のボーリング柱状図に示すように、深さ6.4m~10.8mの間に介在しており、埋立土として搬入された地盤である。

シルト質砂の物理定数および強度定数は Table 1 に、粒度曲線は Fig. 2 に示す。これらはボーリングコアとして採取された試料を炉乾燥した後、網目 2mm のふるい通過分として得られた試料に対して得られたものである。Table 1 に示すように、このシルト質砂の粘土分含有率 F_{clay} は 13.5% であり、著者らが先の研究²⁾ で明らかにしているように砂にみられる液状化破壊が発生しない限界として得られた $F_{clay} = 15\%$ に非常に近く、この点がこの土の特徴である。また自然含水比はほぼ 34~53% の範囲にあることがわかっており、液性

限界値 38.9% にほぼ等しいかそれ以上になっている。なお、本シルト質砂には微粒子の石炭ガラが多量に含まれているので土粒子の比重が 2.186 となり、通常のシルト質砂の比重に比べてかなり小さい。

3. シルト質砂地盤の繰返しせん断による破壊に対する検討

後に繰返しせん断試験の結果でのべるように本シルト質砂は砂の液状化に似た破壊（以下繰返しせん断破壊という）が生じることがわかったので、今回対象としているシルト質砂地盤は繰返しせん断による破壊を生じるか否かを以下の 2 つの液状化判定法を用いて検討してみた。地盤厚は 4.4m である (Fig. 1)。

簡易液状化判定法³⁾ では式(1)から地盤の液状化抵抗比 $(\tau_e/\sigma'_v)_M$ 、式(2)から地震時に地盤に生じる動的応力比 τ_d/σ'_v を求め、 $\tau_d/\sigma'_v > (\tau_e/\sigma'_v)_M$ の場合に液状

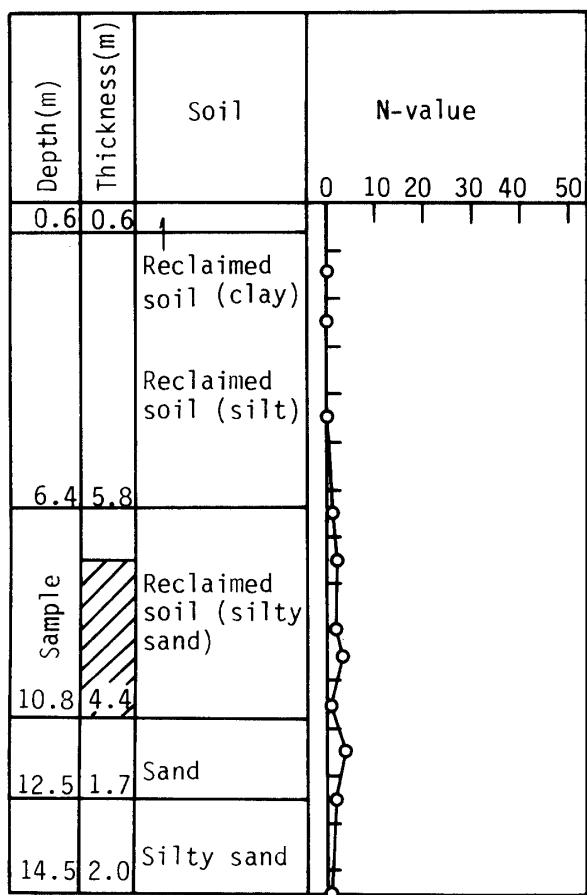


Fig. 1 Boring log of the deposit which became the aim of this study

Table 1 Physical and strength properties of sample

G_s	2.186
U_c	51.7
D_{50} (mm)	0.089
D_{max} (mm)	2.00
W_L (%)	38.9
W_p (%)	NP
I_f	9.9
e_{max}	1.538
e_{min}	0.836
F_{clay} (%)	13.5
FC (%)	40.5
c_{cu} (kPa)	32.3
ϕ_{cu} (°)	34.8

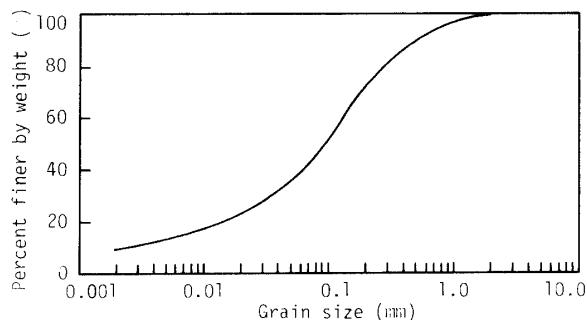


Fig. 2 Grain size distribution curve of sample

化が発生すると判断される。

$$(\tau_e/\sigma'_v)_M = \gamma_m (\tau_e/\sigma'_v)_{M7.5} \quad (1)$$

ここで $(\tau_e/\sigma'_v)_M$ は任意のマグニチュード M の地震に対する地盤のせん断抵抗であるが、これは Fig. 3 から得られる $M=7.5$ の地震に対する原位置液化抵抗 $(\tau_e/\sigma'_v)_{M7.5}$ に地盤の N 値に対しての補正係数 γ_m を乗じて得られる (Fig. 4)。

$$\tau_d/\sigma'_v = 0.65 \cdot \alpha_{max}/g \cdot \sigma'_v/\sigma'_v \cdot \gamma_d \quad (2)$$

ここで τ_d : 動的せん断応力, σ'_v : 鉛直有効応力, σ'_v : 鉛直全応力, α_{max} = 地盤表面の最大加速度, g : 重力加速度, γ_d : 動的せん断応力の深さによる低減係数 ($=1-0.015z$), z : 深さ

この地盤の水中単位重量を 0.9tf/m^3 とすると深さ 10.8m における σ'_v は $0.9 \times 10.8 = 9.72\text{tf/m}^2 = 0.972\text{kgf/cm}^2$ となり、有効上載圧に対する N 値の補正值 (N_1) は $N_1 = N/\sqrt{\sigma'_v} = 3/\sqrt{0.972} = 3.0$ となる。また細粒分含有率 FC に対する N 値の補正值 (N_a) は次のように求められる。

$$\begin{aligned} N_a &= N_1 + 8 + 0.1(FC - 20) \\ &= 3 + 8 + 0.1(40.5 - 20) = 13.1. \end{aligned}$$

したがって Fig. 3 から $\gamma = 5\%$ として $N_a = 13.1$ に対する $(\tau_e/\sigma'_v)_{M7.5}$ は 0.16 と求め得る。また、Fig. 4 から $M=6$ の地震に対しては $\gamma_m = 1.32$ となる。

以上によって式(1)から $(\tau_e/\sigma'_v)_{M6} = 1.32 \times 0.16 = 0.21$ となる。

ここでは $M=6$ の地震を想定して地盤のせん断抵抗を求めた。その理由は当地域における過去の地震資料によって1991年に発生した周防灘地震 ($M=5.9$) 程度の地震は、その地域で発生する最大級のものであると判断したことにある¹⁾。

一方、式(2)から $\tau_d/\sigma'_v = 0.65 \cdot (0.85/9.8) \cdot (20.5/9.7) \cdot 0.84 = 0.22$ が得られる。この計算では $\alpha_{max} = 0.85\text{m/s}^2$ を用いたが、この値は1991年の周防灘地震の際に震央距離 (Δ) = 6.2km に位置する軟弱地盤の表面加速度を波動方程式を用いて計算によって得られたものである¹⁾。この地盤にはかなりの揺れが生じ、地割れが発生したことが確認されている。その地盤は飽和したシルトおよび砂の互層から成り、N 値は平均で3程度である。

以上のように $\tau_d/\sigma'_v (=0.22) > (\tau_e/\sigma'_v)_{M6} (=0.21)$ であるので、 $M=6$ の地震に対してはシルト質砂地盤は液化化に似た破壊が生じる可能性が高いという結果が得られた。

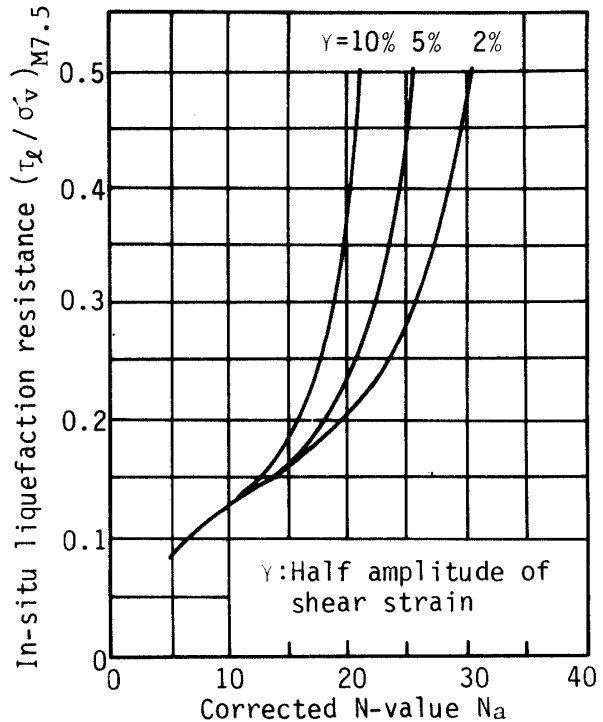


Fig. 3 In-situ liquefaction resistance (after Y. Yoshimi (1991))

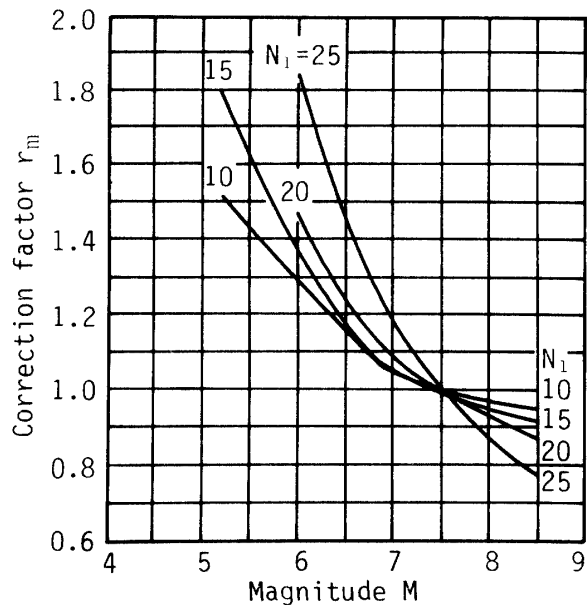


Fig. 4 Correction factor of the liquefaction resistance for N-value of the ground (after Y. Yoshimi (1991))

道路橋示方書の方法では液化化抵抗は次式で与えら

れている⁴⁾。

$$\tau_e/\sigma'_v = 0.0882\sqrt{N/(\sigma'_v+0.7)} + 0.225\log_{10}(0.35/D_{50}) \quad (3)$$

これに必要な諸値を代入すると、

$$\tau_e/\sigma'_v = 0.0882\sqrt{3/(0.97+0.7)} + 0.225\log_{10}(0.35/0.089) = 0.15$$

このように道路橋示方書にある方法を用いるとシルト質砂地盤の液状化抵抗は簡易法の場合に比べて0.15/0.21=0.75倍ほどに見積られ、この方法を用いた液状化判定ではこの地盤はM=6の地震に対して液状化に似た破壊が容易に発生するといえよう。

また、M=6の地震波数5を考えるとFig. 6 (a)から $(n_L)_1 = 5$ 回のときの液状化抵抗は0.22となり、この値は式(1)の計算値とほぼ等しくなっている。

以上の検討からM=6で震央距離がきわめて小さい地震が当地域に発生した際はシルト質砂地盤には液状化に似た破壊が発生する可能性が大きいと結論づけることができる。

4. シルト質砂の繰返しせん断強さ

繰返し三軸試験機を用いて粒径2mm以下のシルト質砂の繰返しせん断強さを求める実験を行った。この試験機は復動エアシリンダーを用いた応力制御型のものである。

実験は次のようにして行った。2時間ほど湯煎煮沸した試料を水中落下法によってゴムスリーブ内に詰めて飽和供試体を作製した。その直径は5cm、高さは12cmで、相対密度 D_r の平均値は74.1%である。

次に側圧 $(\sigma'_{30}) = 1 \text{ kg f/cm}^2$ のもとで非排水繰返しせん断実験を行った。すなわち、周期2秒で一定振幅の繰返し軸差応力 σ_a を供試体に与えた。供試体に砂の液状化に似た破壊が生じた後、同じ供試体に対して圧密排水を行い、最初と同じ軸差応力を用いて再び非排水繰返しせん断実験を行った。圧密時間は30分から1日まで数とおりに変えて二回目の繰返しせん断実験を行うことで圧密時間が一度破壊した供試体の繰返しせん断強さにどのように影響を与えるかを調べた。

Figs. 5 (a), (b)はそれぞれ初回および二回目の繰返

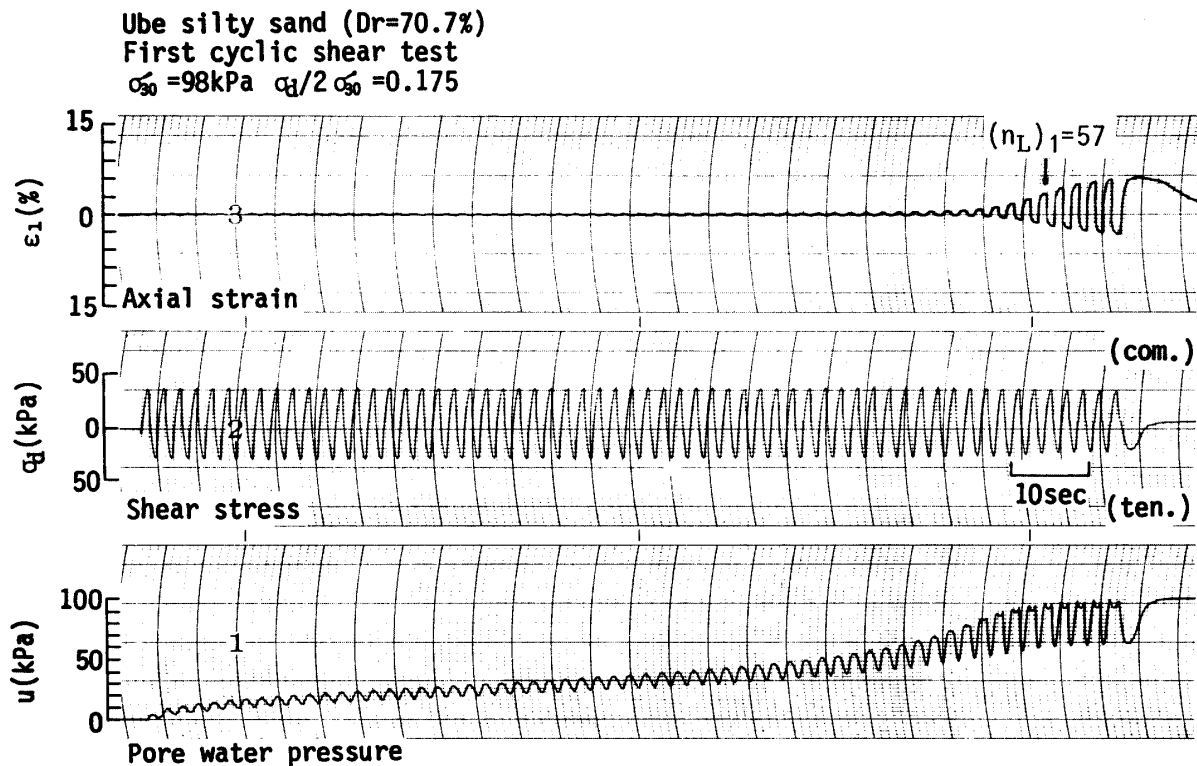


Fig. 5 (a) Test record of first cyclic shear test

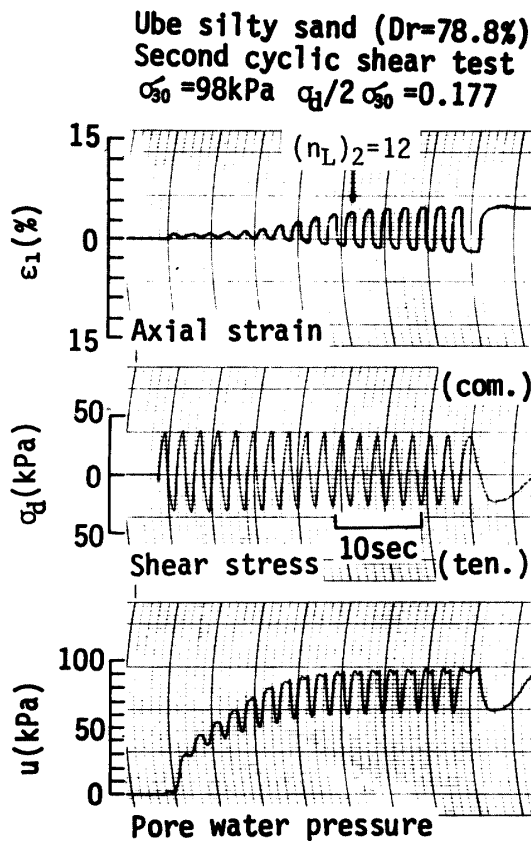


Fig. 5 (b) Test record of second cyclic shear test

しせん断実験の記録波形の一例を示す。両方の記録に見られるように、ゆるい砂とは違ってシルト質砂では繰返し回数の増加にともない、軸ひずみおよび間隙水圧は徐々に増加しており、ある繰返し回数とともに急激に増加することはない。破壊が生じた後も間隙水圧は側圧に決して等しくはならない。破壊時の間隙水圧比は0.95~0.97であった。これはシルト質砂には粘土分が13.5%含まれて粘着力が存在するので、間隙水圧がかなり大きくなっても砂の場合のように土粒子がバラバラとなって水中に浮遊することがないためである。

ここでは軸ひずみ両振幅 ϵ_{1D} が5%に達した時に破壊が生じたと思われた。

Fig. 5 (a)の初回の液状化実験では供試体は $D_r=70.7\%$ であり、繰返し回数 $(n_L)_1=57$ 回の時に破壊が生じている。Fig. 5 (b)の再液状化実験では初回の破壊後の圧密排水によって供試体の D_r は78.8%に増加しているが、破壊までの繰返し回数 $(n_L)_2$ は12回で初回に比べてかえって小さくなっていることがわかる。すなわち初回の破壊後の圧密排水によって供試体に密度増が

生じるが、二回目の破壊は初回よりも容易に生じるという結果が得られたわけである。このことは一度破壊したシルト質砂供試体に生じた破壊面が再度の圧密によって完全に消失しないため、その部分が弱くなり、二回目の破壊が容易に生じるためと考えられる。なお、著者らは砂の場合には初回の液状化後の圧密排水によって密度が増加すると再液状化は発生し難いという結果を得ている^{5),6)}。

Figs. 6 (a), (b)はそれぞれ初回および二回目の繰返しせん断破壊を生じるまでの繰返し回数 $(n_L)_1$ 、 $(n_L)_2$ と応力比 $(\sigma_d/2\sigma'_{30})$ の実験値を示す。Fig. 6 (c)はFig. 6 (a), (b)から得られた $(n_L)_1$ あるいは $(n_L)_2$ と $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ の関係曲線を一緒に示す。同図には比較のため豊浦砂の同様の曲線も示す。

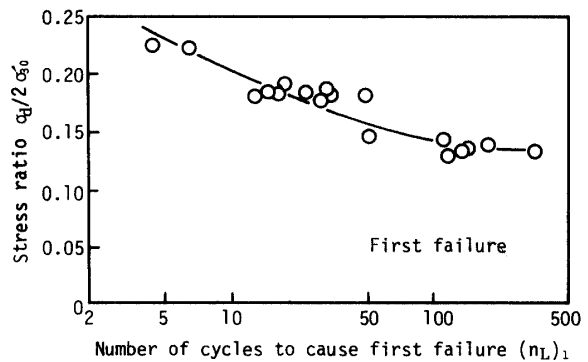


Fig. 6 (a) Relationship between number of cycles to cause first failure $(n_L)_1$ and stress ratio $\sigma_d/2\sigma'_{30}$

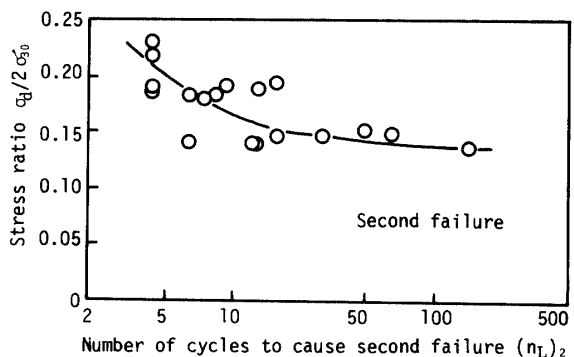


Fig. 6 (b) Relationship between number of cycles to cause first failure $(n_L)_2$ and stress ratio $\sigma_d/2\sigma'_{30}$

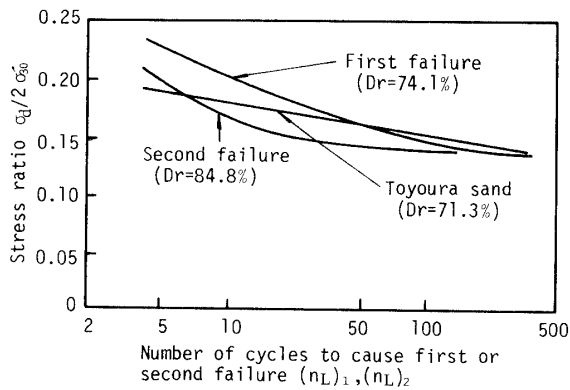


Fig. 6 (c) Number of cycles to cause first or second failure $(n_L)_1, (n_L)_2$

Figs. 7 (a), (b)はそれぞれ初回の破壊後の圧密排水によって生じた供試体の体積ひずみ v と圧密排水後の相対密度 D_r と圧密時間 t の関係を示す。両図から v および D_r は本実験範囲内の応力比および圧密時間には影響を受けず、 v は3.2~4.1%、 D_r は82~87%の範囲にあることがわかる。

Fig. 6 および Fig. 7 (b)から初回の破壊後に供試体の密度が増加しても二回目の繰返しせん断強さは初回に比べて小さくなるのがわかる。たとえば $(n_L)_1 = (n_L)_2 = 20$ の場合には初回の破壊を生じる応力比は0.18であり、二回目のそれは0.16である。

また $(n_L)_1 \leq 50$ の場合にはシルト質砂の応力比は豊浦砂よりも大きい、 $(n_L)_1 > 50$ の場合には豊浦砂よりもやや小さくなっており、シルト質砂の繰返しせん断強さは砂とそれほどの差異はないことがわかる。

Fig. 8 は初回の破壊後に生じた残留軸ひずみ ϵ_{1r} が二回目の破壊のポテンシャルに与える影響を調べた結果である。二回目の繰返しせん断による破壊のポテンシャルの評価には指標 $(n_L)_2 / (n_L)_1$ を用いた。Fig. 8 からいずれの結果も $(n_L)_2 / (n_L)_1 < 1.0$ であり、二回目の繰返しせん断による破壊のポテンシャルはかなり大きいことがわかる。

また ϵ_{1r} が圧縮、引張り側のいずれであっても、 ϵ_{1r} が大きいほど二回目の繰返しせん断による破壊のポテンシャルは増加する傾向にあることがわかる。

二回目の繰返しせん断時には供試体の変形は残留変位が生じた側とは反対側に卓越して生じ、破壊付近ではひずみ振幅の中心は初回の実験前の供試体の高さに漸近するようである。すなわち、初回の破壊後に生じた残留ひずみの向きとは逆方向に変形が起こりながら二回目の破壊が生じるわけである。

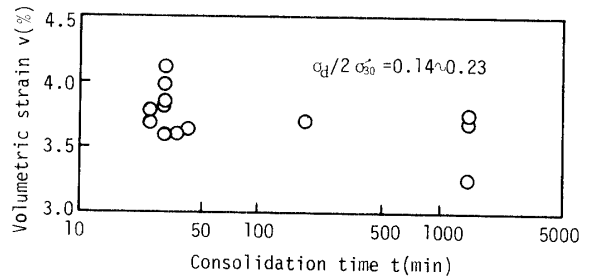


Fig. 7 (a) Variation of volumetric strain after first failure v with consolidation time t

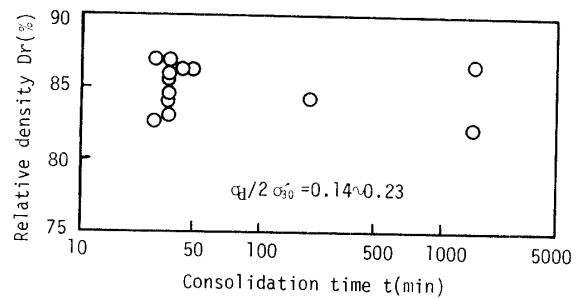


Fig. 7 (b) Variation of relative density after first failure D_r with consolidation time t

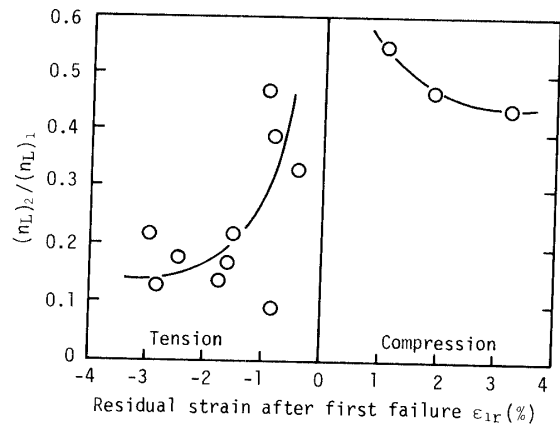


Fig. 8 Variation of $(n_L)_2 / (n_L)_1$ with residual strain after first failure ϵ_{1r}

なお、砂については初回の液化化後に残留ひずみが生じた場合には再液化化ポテンシャルは初回に比べてかなり大きくなり、一方残留ひずみが生じない場合には再液化化ポテンシャルは小さくなるという報告⁷⁾があ

る。

5. まとめ

宇部ポリプロ工場建設予定地域の西沖埋立地区はほぼ深さ28mまでは第四紀層、それ以深は第三紀層からなる地盤で構成されている。埋立土として搬入されて厚さ3m～4m程度でかなり広範囲に分布する飽和シルト質砂地盤はN値が最大でも6程度できわめて小さく、また自然含水比は液性限界値よりも大きくて非常に軟弱であることから、M=6級の地震時には液状化に似た破壊が発生することが懸念された。

本文はこのシルト質砂地盤の液状化に似た破壊の発生の子測を行ってみた。その結果、簡易液状化判定法および道路橋示方書にある方法のいずれを用いた検討によってもM=6の地震に対してはシルト質砂地盤は液状化に似た破壊を生じる可能性が大きいという結論が得られた。

また繰返し三軸試験機を用いた実験によってシルト質砂の繰返しせん断強さは砂のそれとあまり差異はないが、一度繰返しせん断による破壊が生じた後のシルト質砂では密度増があっても二回目の破壊がきわめて容易に生じることが明らかにされた。二回目の破壊は初回の破壊に生じた残留ひずみが大きいほど初回に比べて発生し易くなる。

最後に実験および結果の整理を手伝って戴いた本学卒業生(現、中電技術コンサルタント(株))山野 享氏、

ならびに実験試料の提供に便宜を計って戴いた宇部興産コンサルタント(株)鈴川俊道氏に厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本哲朗, 鈴川俊道, 大原資生: 1991年周防地震(M=5.9)について, 地盤と建設, Vol.9, No.1, pp.155~161, 1991
- 2) 大原資生, 安永文夫, 藤井信夫: 粘土を含む砂の液化について, 山口大学工学部研究報告, Vol.24, No.3, pp.47~52, 1974
- 3) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化(第2版), 技報堂出版, 1991
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1980
- 5) 大原資生, 山本哲朗: 振動台による飽和砂の再液状化に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, 22巻, 2号, pp.123~130, 1982
- 6) 山本哲朗, 大原資生, 百合野博司・西田哲哉: 液状化時の振動継続時間が飽和砂層の再液状化に及ぼす影響, 地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集, pp.199~204, 1991
- 7) 松岡 元, 山崎浩之, 松原義仁, 青木 康, 原 康彦: 粒子構造の変化に注目した再液状化現象の解析, 第20回土質工学研究発表会講演集, Vol.1, pp.625~626, 1985

(平成4年3月30日受理)