

疲労破壊としての砂の液状化現象とその解析法

(財)大阪土質試験所 正員 岩崎 好規

1. まえがき

地震時における砂地盤の液状化に関する定量的予測をほかにするためには、主に次の3つを行う必要がある。i) 一般応力状態ならびに地震時応力下での砂要素の液状化現象を求めると。ii) 実際に液状化した場所の地盤条件およびその地震の特性を求めると。iii) i) で求められた現象を用いて ii) で求められた条件のもとで解析を行ないその現象の妥当性を確かめると。本報告は iii) に属するもので Seed, H. B. による^{2), 3)}解析とした新しい新潟地震の場合も、その以後発表された室内試験結果なども考慮し、さらに疲労という材料の破壊形式として液状化を理解し、一般の疲労破壊現象と適用し解析を試みたので報告する。

2. 疲労破壊としての砂の液状化現象

今までの室内実験から得られた飽和砂の液状化の特性を整理すると、次に示すような材料の疲労破壊と似ての現象が指摘できる。a. 巨視的塑性変形を起すことなく破壊する³⁾。b. 繰返し応力振幅が静的破壊応力以下であっても破壊する。c. 一定の応力振幅に対して一定の繰返し数のうちに破壊し、繰返し応力振幅が小さいほど破壊に要する繰返し数は大きい。d. 同じ材料を用い同じ条件のもとでも、疲労強度をいし寿命のばらつきが大きい⁴⁾。又この他実験の特徴として次のようなものがある。e. 疲労破壊の内部要因として同ゲキ水圧の上昇は、一定の繰返し応力を与えると、ほぼ繰返し数に比例して初期液状化に至りその後数回の繰返しで完全破壊に至る場合が多い⁵⁾。f. 繰返し周波数による違い(1/6, 1/2 および 4/s)は、応力レベルによる液状化への影響と比較すれば無視する程度である³⁾。g. 一定の同ゲキ比の砂要素か、ある繰返し数で液状化するに要するせん断繰返し応力は拘束圧に比例して³⁾。h. ある拘束圧で、一定の繰返し数で液状化するに要するせん断繰返し応力は砂要素の相対密度(Rd)に比例する³⁾。a~dの一般の疲労の性質、e~hの砂要素の液状化の特性を考慮して、次のような飽和砂要素の液状化に関する疲労破壊現象が仮定できよう。

3. 疲労破壊現象

砂の液状化に関する室内実験は、a. 動的三軸、b. 動的単純せん断、c. 動的ねじり、d. 動的平面変形 e. 振動箱実験などで行われており、a~dは土要素に関する応力-変形関係を求めることかからいであるのに対して、eの振動箱によるものは土要素の集合の特殊な境界条件のもとでの特性を求めることになり一般性を著しく欠いて³⁾。水平砂地盤での地震時応力のシミュレーションは、液状化によるせん断層が破壊面に作用するせん断力では、地震前には $\tau = 0$ で地震時にはランダムな大きさの繰返し作用すると考えらるることから、主に繰返し三軸と繰返し単純せん断による解析が主である。

- i) 繰返し三軸試験²⁾…地震前には、潜在破壊面に垂直応力 σ'_c のみが作用して³⁾いるが、地震時には、 σ'_c 一定の予繰返しせん断応力 $\tau_d = \frac{\sigma'_3 - \sigma'_1}{2}$ を作用させて破壊に至る繰返し数 N を求め³⁾る。
- ii) 繰返し単純せん断試験³⁾…地震前には、潜在破壊面に垂直応力 σ'_c のみが作用して³⁾いるが、地震時には σ'_c 一定の予繰返しせん断応力 τ_d を作用させ³⁾る。

2), 3)

Seed 3) の行, f2-連の研究によれば, i) と ii) とで得られた結果には相当の相違があり, ある一定の垂直応力のモトにある繰返し数で破壊に要する繰返しセシ断応力の大きさは ii) から i) に比べて約 35% 程度と低いこと, 単純セシ断試験の装置自体のモフコーナに空隙のつきやすさ, "応力集中" などと比較検討した結果, 考慮して"応力状態では, 単純セシ断から求めた大ききの 40~50% 増し, 三軸からの大ききの 50~55% 減して"と推定する。さて i) の結果から $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}{\sigma'_{vc}} \times \frac{1}{R_d}$ と N の関係, 又 ii) の結果から $\frac{\tau_a}{\sigma'_{vc}} \times \frac{1}{R_d}$ と N の関係をプロットしたものが図 1 ~ 2 である。

N と $\frac{\tau_a}{\sigma'_{vc}} \times \frac{1}{R_d}$, $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}{\sigma'_{vc}} \times \frac{1}{R_d}$ の間には次のような実験的關係

$$\frac{\tau_a}{\sigma'_{vc}} \times \frac{1}{R_d} = \alpha / N^\beta + \delta \quad \text{--- ①}$$

と仮定して (α, β, δ は定数)

データのバラツキは主に δ

によるものと見做し, δ が正規分布

するを仮定しての破壊確率を非

線型回帰解析を行なって求め

中に示した。破壊確率 $P = 0.50$

を中心にあつた N のモトでの $\frac{\tau_a}{\sigma'_{vc}} \times \frac{1}{R_d}$

$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}{\sigma'_{vc}} \times \frac{1}{R_d}$ のバラツキは, ± 20

% 以内にはほぼ全試料の 95% が破

壊して"と見做した。

iii) Miner の法則... 地震時応力は, 振幅

が時間的に変化するランダム応力である。ラン

ダム応力による疲労破壊の簡単な仮定の一つに

Miner の法則と呼ばれ次のようなものがある。

疲労破壊が起るまでの寿命を L とし一定の

応力振幅 S_i を n_i 回繰返した後の残余寿命 L_{left}

は, S_i の応力振幅で破壊する繰返し数を N_i

とて

$$L_{left} = 1 - \frac{n_i}{N_i} \quad \text{②}$$

と与えられる。

ランダム応力の際は, S_1, S_2, \dots, S_k の応力振幅

が n_1, n_2, \dots, n_k 回繰返した後の残余寿命は ②

式を拡張して次式で与えられる。 $L_{left} \rightarrow 0$ には

$$L_{left} = 1 - \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad \text{③}$$

命とては 0.6 程度が無難であるという提議は提案して

いる。

4. 新潟地震による液状化の解析

新潟平野は, 厚い沖積層 (80~180 m) で知られており, 新潟市周辺の新潟火力

図 - 1

S-N Curve for Liquefaction obtained from Cyclic Simple Shear Tests with lines of Probability to Liquefy ---

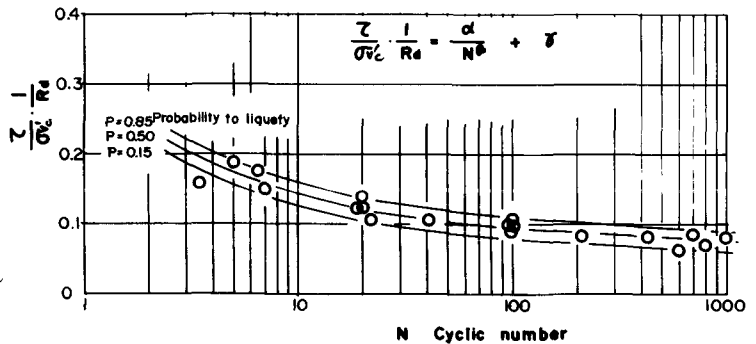
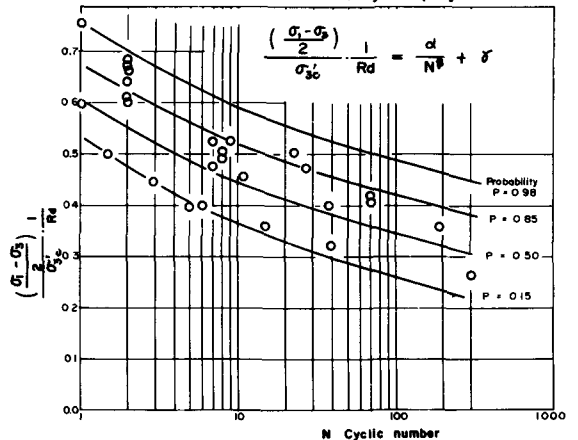


図 - 2

S-N Curve for Liquefaction obtained from Cyclic Triaxial Loading Tests with lines of Probability to Liquefy ---



電断におけるボーリング柱状土を参考に、地下120m以下で地震基礎と層の多質点(20)系におよぼす地震基礎との最大加速度 $0.14g$ 、卓越周期 0.5 sec と修正 T_{aft} の加速度波形を用いて応答解析を Modal Analysis の方法で行ない、各深さ毎のセ=断応力の時間的変化を求めた。用いた土の動的物理定数は、砂質系の土に対しては、土要素に作用する垂直応力、相対密度等から、粘性土に対しては一軸圧縮セ=断強さから求め、さらに生じたひずみによって修正値をから求められた。新端の砂地盤の液状化による被害地区は、被害軽微地区(B-ZONE)、と激甚地区(C-ZONE)に分けられその被害の程度を標準貫入試験による N 値の深さについての分布および N 値の平均値の深さ変化は図-4に示されている。

図-3

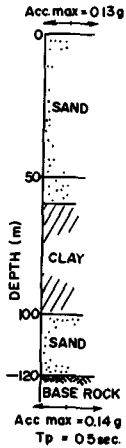
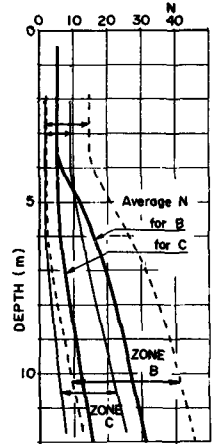


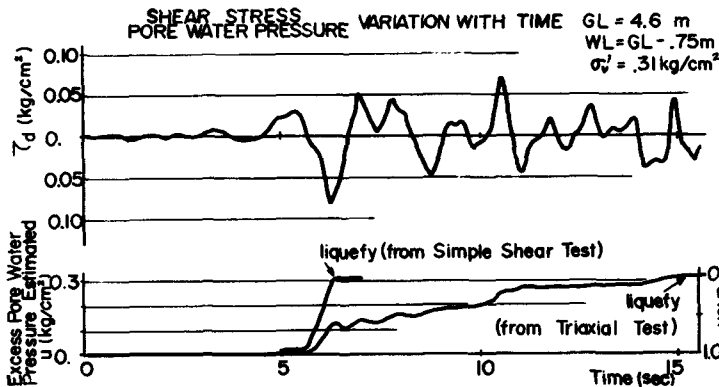
図-4



5 残余寿命の計算
残余寿命の計算を行ない解析した例を 被害激甚地区(C-ZONE)を例として示す。計算したセ=断力の時間的変化の一例が 地表下 4.6 m の砂要素に作用するものを示している。前述した三軸試験と単純セ=断試験からの S-N 曲線中、破壊確率 $P=0.50$ のものを基準にして計算、推定する残余寿命の減少と向水圧の上昇が図-5にセ=断応力の時間的変化と共に示されている。単純セ=断から予想されるものは、6 sec 後には、向水圧が上載荷重 ($\sigma_v = 0.31 \text{ kg/cm}^2$) に等しくなり、残余寿命 $L_{left} = 0$ となり、液状化と推定されるが、三軸試験から液状化の推測によれば 15 秒後には、液状化が生じていることが分る。

以上のような計算を各深さごとにに行ない、地震動 8 秒、12 秒 および 15 秒後での残余寿命 L_{left} の深さ方向分布の時間的推移を 図-6 に示した。この図から繰返して単純セ=断試験による推定の方が、三軸試験結果よりのものよりはずかしく液状化しやすくなることと明らかになっている。単純セ=断からの推定によれば、8 秒後では G.L. -3~11m の範囲で $L_{left} \leq 0$ となり液状化しているが、三軸試験の結果によれば 12 秒後に G.L. -6~7m あたりで液状化が起き、15 秒後には 5~8m に範囲が広がっているにすぎない。地震動がはじまると十数秒後に液状化現象が地上で観測されているという事実と解析結果をみれば、実際の地震時応力状態の液状化は、Seed によっておこなうように、単純セ=断と三軸試験によって得られた標準の間にありとみられる。

図-5



6 Seed と著者の方法比較
Seed の行った新端地震の解析過程と、著者のものとを

比較して次に示す。

	Seed 1=F3方法 ¹⁾	著者の方法
地質構成	0~60mの砂地盤 W.T.=G.L.-0.75m	0~120mの砂、粘柱土 互層。(火力発電所の平均) W.T.=G.L.-0.75m ²⁾
地震基底への入力係	Taftを修正 $A_b=0.125g$ $T_p=0.33\text{ sec}$	Taftを修正 $A_b=0.14g$ $T_p=0.50\text{ sec}$
応答計算	各層点 Modal Analysis	各層点 Modal Analysis
N値と相対密度	Terzaghi-PeckとGibbs and Holtzの平均	Gibbs and Holtzの90%
地震によるセリ断力	ランダム応力と10回繰返しの一応力に満ちかえり	ランダム応力のまゝ。
液状化現象	10回繰返しで液状化は必要応力との比較。	残余寿命の計算
室内試験	繰返し三軸試験	繰返し三軸と単軸と二軸試験

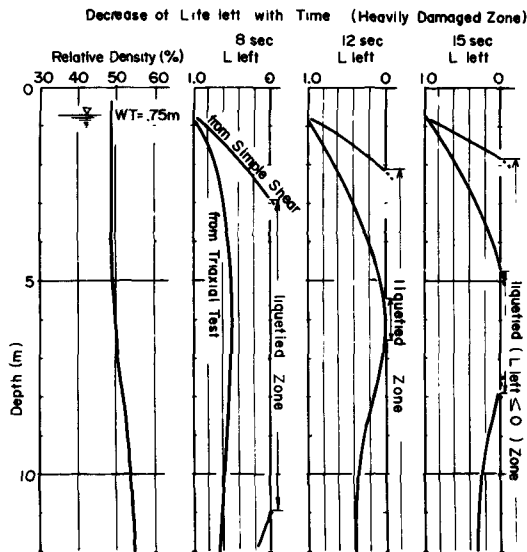
繰返し応力におきかえりにてせらる。これは鋭い直観と多くの訓練のなすにせりるにてあつて何人差も多い。ランダム液状化を用いるにてこの点も解決した。

7. あとがき……残された問題は多くあり、各種ランダム応力状態での液状化現象、砂の状態の定量的測定法などの明確化は特に重要である。地震応答の計算はすべて Univ. of Calif., Berkeley の計算セータで行つたにせり。Prof. Seedとの討議は、この研究を進めると非常に有益であつた。深く感謝の意を表します。

参考文献

1. H. Bolton Seed and I.M. Idriss (1967) "Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake" Proc. A.S.C.E. Vol 93 No. SM3, 1967, pp. 83~108
2. K.L. Lee and H.B. Seed (1967) "Cyclic Stress Conditions Causing Liquefaction of Sand" Proc. A.S.C.E. Vol 93, No. SM1, pp. 67~70
3. Pencock, W.H. and Seed, H.B. (1968) "Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions" Proc. A.S.C.E. Vol 94 No. S.M. 3, 1968, pp. 689~708
4. Yoshimi, Y. and Oh-oka, H. (1970) "Liquefaction of Saturated Sand during Vibration under Quasi-Plane Strain Conditions" Proc. 3rd Japan Earth. Eng. Symp - 1970 pp 183~190.
5. 栗田徹, 行存浩 (1970) "飽和砂の繰返し応力による液状化現象の研究" 土木学会論文報告集 No. 180 pp. 83~89
6. 岩崎好規 (1971) "液状化現象とこの砂の液状化現象とその解析法について" 第6回土工学会論文発表会報告集 pp. 153
7. 横田武夫 (1964) "材料強度学" 岩波全書 p 232
8. 土木学会 "新潟地震震害調査報告"

図 - 6



特に Seed に F3 方法の問題となるのは、地震によるセリ断力のランダムな応力と等価な10回の