

東京大学工学部 正員 石原研而
 " 大学院 学生員 龍岡文夫
 " " " " 〇安田 進

まえがき

任意の荷重変化を受ける飽和砂の液状化に関しては、静的くり返し排水試験より得られる砂のダイレタンシー特性にもとづいて水圧上昇を推定する方法¹⁾、一樣くり返し非排水試験結果にもとづく方法²⁾、そして金属の疲労破壊理論を適用した方法³⁾、等が提案されている。しかし、これらによると荷重変化の履歴に関する追跡が近似的である為か、水圧上昇が多めに計算されることになる。

そこで、別に報告した試験結果⁴⁾などを基にくり返しせん断現象の解明をおこない、4つの仮定にもとづいてダイレタンシー特性を表わすモデルを作製した。これを飽和砂の非排水せん断過程に適用し、静的および動的くり返し試験時の Stress Path を推定した。一方、実際の試験より得られた結果とこの推定値と比較し、その妥当性と実用性を検討した。

実験装置、方法および試料

実験装置、方法については、静的試験は龍岡・芝の報告⁵⁾、動的試験は石原・安田の報告⁶⁾に述べてあるものと同じである。試料は静的試験では富士川砂、動的試験では新潟万代島砂を用いた。いずれも loose な状態（富士川砂は $Dr \approx 50\%$ 、新潟砂は $Dr \approx 45\%$ ）で試験をおこなった。

塑性モデル

以下に述べる4つの仮定をたててモデル化した。

仮定1 --- Stress Path の相似性

砂においては、 (p', q, e) 空間において重層的に State Surface が存在していると考えられる。yield する時にはこの State Surface 上を動くことになるが、非排水状態の $e = \text{const.}$ 面で切ると図1のような切口となる。これは静的非排水圧縮試験および伸張試験より求めたものである。図1でわかるように、これらの曲線はほぼ相似な形をしている。したがってある平均主応力 p' において得られた Stress Path の形状と一定に保つて大きさを加減すれば、他の平均主応力のもとにおける Stress Path が推定できるものと仮定する。ただし、三軸試験においては一般に圧縮側と伸張側とでダイレタンシー特性が異なるので、この Stress Path の形も両者では違うものとする。

仮定2 --- Yield Loci の形状

塑性ひずみの生じる条件を規定するのが Yield Loci であるが、ここでは図2のごとく、くり返しせ

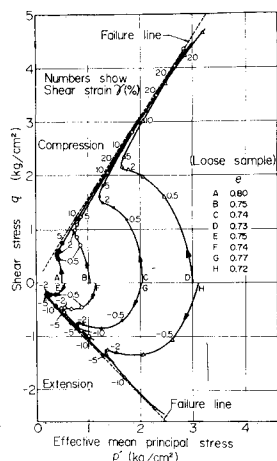


図1. 静的非排水試験による Stress Path

せん断時において以前にうけた q/p' の最大値を新たに越えた時にのみ yield がおこると仮定する。これは Yield Loci を原点を通る直線と仮定することに等しい。

仮定3 --- Yield Condition の独立性

せん断方向が逆転するくり返しせん断では、各々のせん断方向において Yield Condition が独立していると仮定する。つまり、今回の試験のような三軸試験において、軸圧変化が圧縮側と伸張側とで Yield Condition を別々に考える。

仮定4 --- 液状化の発生条件

図3のA点のように、静的非排水圧縮（又は伸張）試験の Stress Path には変曲点がある。この変曲点が生じる角度（ q/p' ）を変相角と呼ぶと、くり返し試験において、この変相角をこえるまでは unloading 時の Stress Path は弾性的で $p' = \text{const.}$ (E→F) となるが、変相角を越えた後で unloading すると一気に原点に向う（G→H）と仮定する。そして液状化がこの時点で生じたと考える。

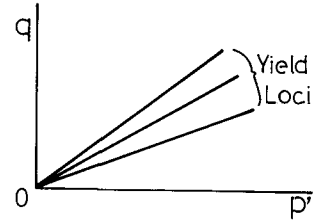


図2. Yield Loci の形状

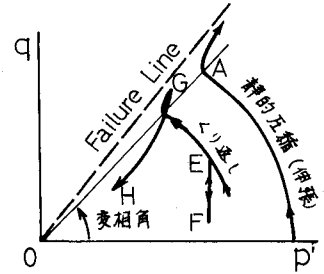


図3. 液状化の発生条件

塑性モデルにもとづいた Stress Path の推定手順

くり返しせん断時における各回のせん断力が与えられると、前述の塑性モデルを用いて Stress Path が推定できる。図4にこれを示した。まずBのせん断力によりS-C Line(非排水圧縮試験による Stress Path)上のA→Bをたどる（仮定1）。そして unloading によりB→Cとたどった（仮定2）後に、伸張側のせん断力DによりS-E Line（非排水伸張試験による Stress Path）に相似なC→Dの Path となる（仮定1、3）。この後 unloading によりD→E、そして次に圧縮側のせん断力Gが働くが、一度履歴をうけたO-B Lineに達するまでは弾性的 path ($p' = \text{const.}$)をたどりO-B Lineに達したFから yield を始め（仮定2）、S-C Line に相似にF→Gとたどる（仮定1）。Gから unloading でHに達した後、Iのせん断力によってO-D Lineを越えないので弾性的挙動をする（仮定2、3）。次のせん断力LでKから yield を始めJ→K→L→Mとたどる。そしてNから yield を始め、変相角を越えた後Sに達し、unloading すると一気に原点に近づく液状化が生じる。（仮定4）。

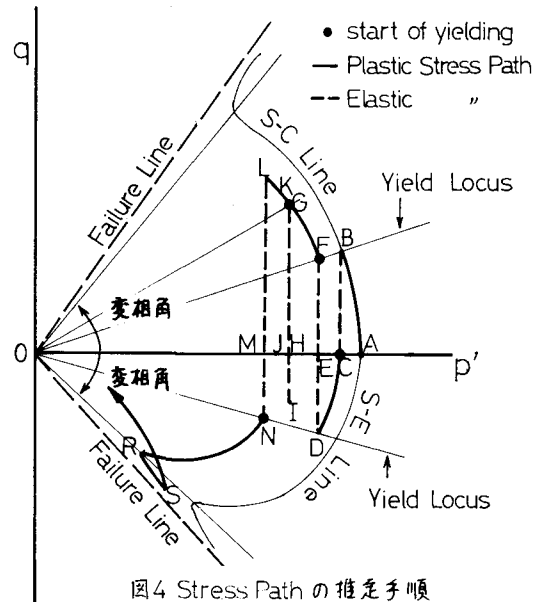
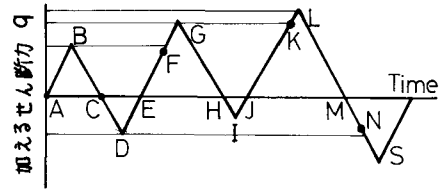


図4 Stress Path の推定手順

静的くり返し試験結果と塑性モデルによる推定 Stress Path

静的くり返し試験をおこなった場合の Stress Path と、そのくり返しせん断力を与えた場合の推定 Stress Path を比較してみた。図5は一定振幅応力くり返し試験結果、図6はその推定 Stress Path である。

図5に生じているカギ形の部分22→23は図6にも現われている。その原因が逆に推察される。つまり、変相角を越える前後でこのような path をたどらざるを得ないので、このようなカギ形が生じると考えられる。図5と図6では液状化までの回数は多少違、てきたが、これは S-C Line、S-E Line の形が少し違ったり、せん断力の大きさが少し違うと回数が大幅に違っ

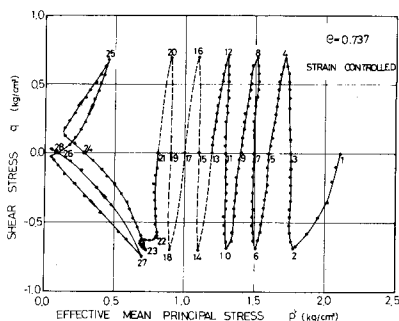


図5. 静的くり返し試験

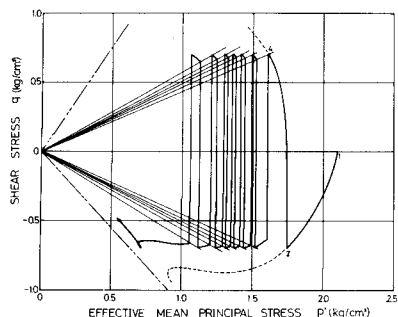


図6

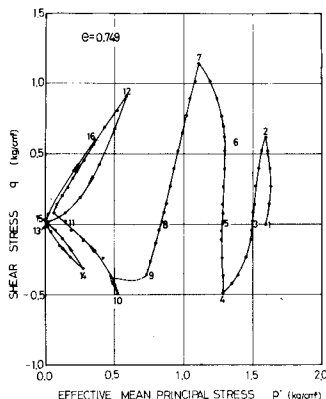


図7. 静的ランダム試験

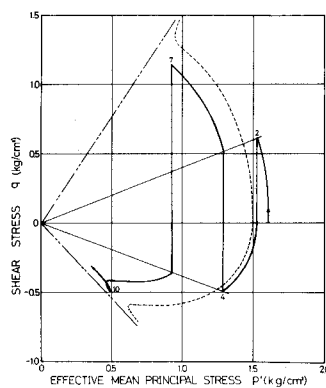


図8

てくる為と思われる。そしてこの事からも液状化の微妙さうかがえる。

次に、ランダムな振幅の応力を加えた試験結果を図7に、推定 Stress Path を図8に示した。これらはよく合致した。

動的くり返し試験結果と塑性モデルによる推定 Stress Path

今回用いた三軸装置においては、静的くり返し試験結果と動的くり返し試験結果とで生じる現象はほぼ同じとみなしうる。そこで動的くり返し試験を行なった場合の Stress Path とその推定 Stress Path を、次に比較した。図9、11に新潟地震時加

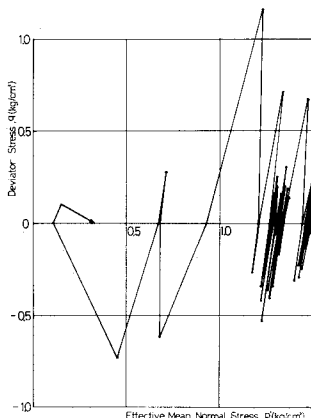


図9 動的試験(新潟地震応力)

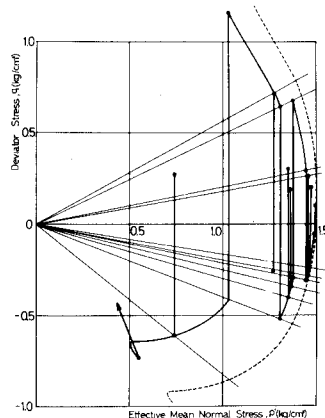


図10

速度記録波形せん断力を加えた場合の試験結果を示した⁶⁾。図9は軸圧変化が圧縮状態の時最大せん断力を、図11は伸張状態の時に最大せん断力を与えた場合である。これらの推定 Stress Pathを図10、12に示した。これらと比較してみると、かなりよく合致していることがわかる。

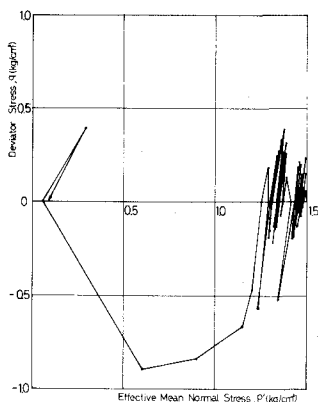


図11. 動的試験(新潟地震波
応力)

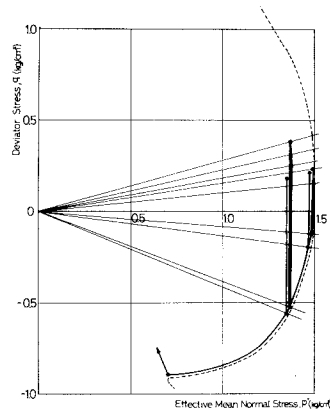


図12.

むすび

くり返し荷重をうける飽和砂に関して、(1) Stress Path の相似性、(2) Yield Loci の形状、(3) Yield Condition の独立性、(4) 液状化の発生条件、の4つの仮定をたてて非排水せん断時の挙動についてのモデルを作製した。一方、静的くり返し試験、静的ランダム応力試験、および新潟地震波を simulate した動的試験を行ない、Stress Path を描いた。この Stress Path と上記のモデルより推定した Stress Path とを比較した結果、両者がかなりよく一致することが示された。

このモデルを用いる為には、各砂について静的非排水せん断時の Stress Path がわかっていればよい。したがって、静的非排水試験の結果がわかっているならば、くり返しせん断時、又は地震荷重のもとにおける Stress Path、そして液状化の予測が可能になる。

参考文献

- 1)、八木則男、“繰り返しせん断による砂の体積変化と過剰間げき水圧”、第7回土質工学研究発表会、昭47
- 2)、Toru Shibata, Hiroshi Yukitomo, Manabu Miyoshi, “Liquefaction process of sand during cyclic loading”, Soils and Foundations Vol.12 March 1972
- 3)、岩崎好規、“震害破壊としての砂の液状化現象とその推定解析法について”、第6回土質工学研究発表会、昭46
- 4)、龍岡、安田、“三軸装置における砂の応力～歪特性(第4報)”、土木学会第27回年次学術講演会、昭47
- 5)、龍岡、芝、“三軸装置における砂の応力～歪特性(第3報)”、第7回土質工学研究発表会、昭47
- 6)、石原、安田、“新潟地震の液状化に関する動的三軸試験”、
- 7)、李、石原、西郷、“中空三軸装置による飽和砂のくり返しせん断”、