

Ⅲ-A175

地盤流動の模型実験のための材料相似則

東京大学工学部 正会員 東畑郁生
東京大学元大学院生 William Vargas-Monge

1. はじめに

ゆるい砂質地盤が震動によって剛性を失い流動的に破壊する現象を、1 Gの振動台模型実験で調べることがよく行なわれている。本稿で取り上げるのは、模型地盤に使用する砂の密度、間隙比をどれくらいに設定すればよいのか、という問題である。従来は、模型地盤の相対密度を、想定している原地盤と同じにそろえている。しかしこの方法では、流動現象を研究する場合には次のような問題がある。

図1は、密度と拘束圧を三通りに変えて砂の三軸非排水圧縮試験を実施した例である。やや極端だが、高圧の1960kPa、間隙比0.908の実験がゆるい詰め実地盤を代表しているものとする。この実験では応力ひずみ関係がピーク強度に到達した後いちじるしく軟化を示し、残留強度状態に至った。砂地盤が静的荷重の下で流動的に崩壊する現象の起こりやすさを、この軟化現象は表わしている。二番目の実験では、1 Gの模型実験を意識して拘束圧を98kPaに下げた。ただし慣用法を念頭において、高圧の実験と同じ間隙比を採用した。すると応力ひずみ関係にはピーク後の軟化現象が見られなくなり、単調に硬化していく挙動に変化してしまった。このような砂に繰り返し荷重を与えても、ひずみが徐々に蓄積されていくことはあっても壊滅的な流動破壊にはなりにくい。このように低圧の実験で砂の間隙比を高圧時とそろえてみても、起こる現象はかなり異なるものになるのである。図1で間隙比を0.949に変えたところ、98kPaの下でもピーク強度後に軟化が起こった。このように低圧実験では砂をもっとゆるい詰めにする必要がある。

2. リングせん断実験

外径15cm、内径10cm、高さ2cmの豊浦砂供試体を上下からリングで拘束してねじりせん断する実験を行なった。リングせん断実験には変形が数百%ひずみまで可能である、という長所がある。せん断中の供試体の高さを一定に保つ機構を設けることにより、非排水せん断の代わりに体積一定せん断を行なった。

実験例を図2に示す。中空供試体の肉厚中央におけるねじり変位を横軸にプロットしてあるが、この変位20mmがせん断ひずみにして100%に相当する。実線の単調載荷実験ではピーク強度後に軟化が生じ、その後再び硬化した。実地盤がこのような振る舞いをするのであれば、低圧の模型実験でも同様の挙動を実現することが理想である。本稿ではピークから応力が軟化する度合いを特に取り上げる。実地震では図2の破線のように繰り返し載荷後の大変形も重要であり、発揮される強度は単調載荷時よりかなり小さい。

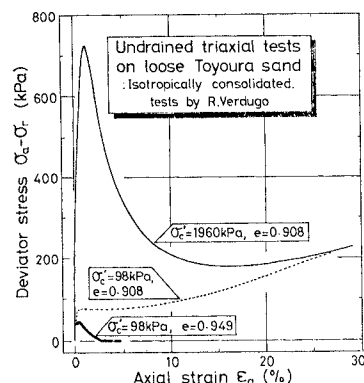


図1 豊浦砂の非排水三軸圧縮試験

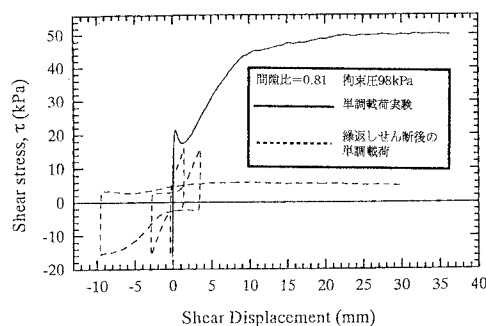


図2 リングせん断実験例

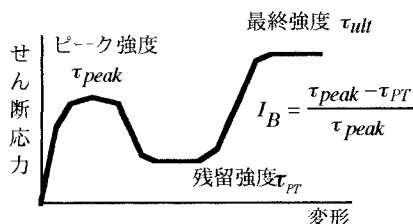


図3 脆性指数 I_B の定義

キーワード： 地盤流動 砂 非排水せん断 相似則 リングせん断

〒113-8656 文京区本郷 東京大学工学部土木工学科 電話03-3812-2111 Fax.03-5689-7268

3. 脆性指数

軟化度合いを表現する指標として本稿では、図3で定義される脆性指数 I_B を使う（Bishop, 1967）。 $I_B=0$ が軟化の全くない状態、 $I_B=1$ が完全に軟化して強度を失う状態に対応する。図4は I_B とせん断時の間隙比との関係を、100kPaで圧密した実験から取り出したものである。ゆる詰め砂ほど I_B が大きい、つまり軟化がいちじるしい。また間隙比が0.794以下なら軟化が生じず、砂は単調に硬化する。これに対して低圧の10kPaの実験（図5）では、ゆる詰め砂ほど I_B が大きいことには変わりがないが、間隙比が0.846以上でないとなら軟化が生じない。つまり同じ程度の軟化を起こす（ I_B が同じ）ためには、低圧下では間隙比を増やさなければならない。

脆性指数 I_B はピーク後の軟化に注目した指標であるが、変形がもっと進んだ時の最終強度 τ_{ult} にも関連がある。図6はこの I_B と最終強度 τ_{ult} 発現の指標 $(\tau_{ult} - \tau_{peak})/\tau_{peak}$ とを比べたものである。軟化が著しい（ I_B が大）砂では最終強度指標が負になり、最終強度はピーク強度に及ばないことがわかる。逆に軟化の少ない砂では最終強度がピーク強度をかなり上回る。このように I_B を高圧と低圧で共通にすれば、ピーク強度に比した最終強度の発現度合も、低圧の実験でかなり再現できる。

4. 材料の相似則

図4や5のデータの平均傾向を破線で代表させてみた。二本の破線はおおよそ平行なので、高圧（100kPa、図4）と同じ脆性指数を低圧（10kPa、図5）でも達成するためには、間隙比を約0.05増やせばよい（相対密度を約12%減らせばよい）ことがわかる。同じ作業を25kPaや50kPaでも試みたところ、拘束圧によらず破線はいずれもほぼ並行になり、拘束圧にかかわらず間隙比を増減させることにより同じ脆性指数を達成できることがわかった。原地盤の拘束圧と間隙比が (σ_{c1}', e_1) 、低圧の模型実験の拘束圧が σ_{c2}' の時、模型地盤に与えるべき間隙比 e_2 は、次の式で決定できる。

$$e_2 = e_1 + 0.052 \log_{10}(\sigma_{c1}' / \sigma_{c2}') \quad (1)$$

この式は、流動破壊現象に限定して使われるべきもので、実地盤と1G模型実験の間で流動破壊特性が等価になるように材料特性を規定するものである。

5. 結論

豊浦砂のリングせん断実験をおこない、定体積条件下で砂の大変形挙動を調べた。そして拘束圧が実地盤の値から1G模型実験の低い値へ変化しても砂の流動破壊特性を等しく保つためには、砂の間隙比を増やせばよいことを示した。間隙比の調整量は式1で示されている。

6. 参考文献

- Bishop, A.W. (1967): "Progressive failure with special reference to the mechanism causing it," Proc. Geotech. Conf., Norway, Vol.2, pp.142-150.
 Verdugo, R. and Ishihara, K. (1996): "The steady state of sandy soils," Soils and Foundations, Vol.36, No.2, pp.81-91.

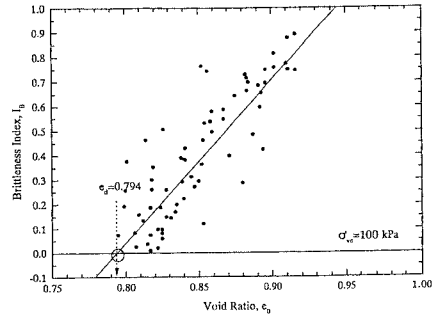


図4 100kPaで圧密したときの脆性指数と間隙比との関係

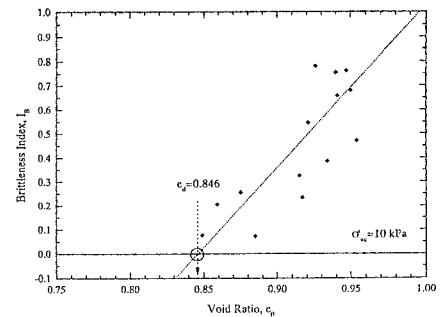


図5 低圧の10kPaで圧密したときの脆性指数と間隙比との関係

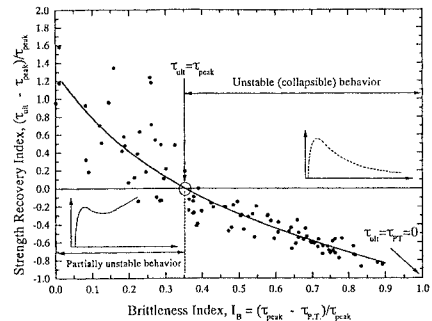


図6 軟化に着目した脆性指数と最終的な強度回復との関係