液状化による間隙の再配分に着目した部分排水繰返しせん断試験

日本大学大学院工学研究科・学生会員　○谷田貝　航　　日本大学工学部・正会員　仙頭　紀明

1.研究の目的及び背景 過去の地震では時間遅れを伴う地盤の変形や大量の噴砂の発生等の被害が報告されている[1),2),3)]。これらの現象を説明するためには間隙水の消散による間隙の再配分を考慮する必要がある。間隙の再配分の模式図を図-1 に示す[4)]。この消散過程では、低透水層直下の液状化層上部では間隙水が補足され体積膨張し、液状化層下部では体積収縮が生じる。そのような経緯より液状化層上部では、間隙比の増加により進行性破壊が発生し、前述の被害が生じたものと考えられる。本研究ではこの体積膨張が起こる箇所に着目し、中空ねじりせん断試験装置を用いて間隙の再配分を考慮した部分排水繰返しせん断試験***(Patially Drained Cyclic shear Test)***を行った。実験では体積ひずみ・せん断ひずみ速度を制御して与えることで、間隙水の流入が砂の強度・変形特性に及ぼす影響を定量的に評価することを目的とする。

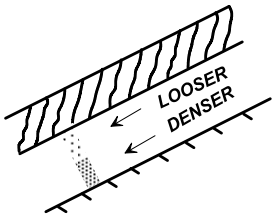

図-1 間隙の再配分の模式図

2.実験手順 本試験では中空ねじりせん断試験装置を用いた。試験装置の概略図を図-2 示す。なお、間隙水を注入するために体積ひずみ制御装置を用いた。本装置はモーターの回転運動をボールねじとナットにより直動運動に変換することで直径 2cm のピストンを前後に動かす構造になっている。モーターはパルスモータであり、1 ステップあたりのピストンの移動量が 0.00002mm となるように設定した。すなわち 1 ステップあたり $6.28*10^{-6}$cc の間隙水の注入量を制御することができる。試料には豊浦砂を用いた。試料の物理特性を図-3 に示す。供試体は外径 7cm、内径 3cm、高さ 10cm である。供試体は空中落下法により作製した。なお目標相対密度 Dr は 40%(緩詰)、70%(密詰)とした。供試体は 10kPa で自立させた後、飽和させるため、間隙の空気を二酸化炭素と置換し、脱気水を通水した後、背圧を 100kPa 載荷した。なお、供試体の B 値は 95%以上を目標とした。その後、供試体は有効拘束圧 100kPa で等方圧密した。圧密終了後、初期せん断応力(τ_{ini}=5kPa)を排水条件で載荷した後、所定の応力振幅で繰返しせん断を載荷した。その際せん断ひずみ速度は 1%/min とした。部分排水試験では、体積ひずみ/せん断ひずみ比($d\varepsilon_v/d\gamma$)を-0.06、-0.10 とし注入量を制御した。ここで符号のマイナスは体積膨張(流入)を意味する。また試験ケースを表-1 に示す。ケース 1,2 は非排水試験、ケース 3~6 は部分排水試験である。繰返し載荷試験ではせん断ひずみが片振幅 20%に達したら試験を終了した。

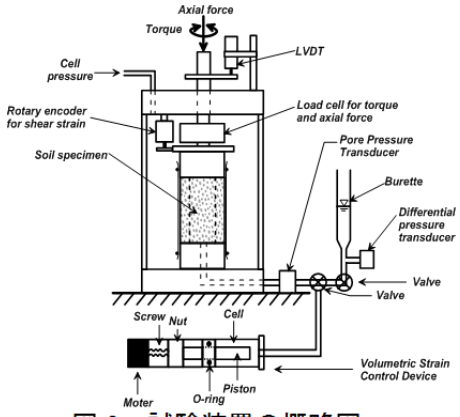

図-2　試験装置の概略図

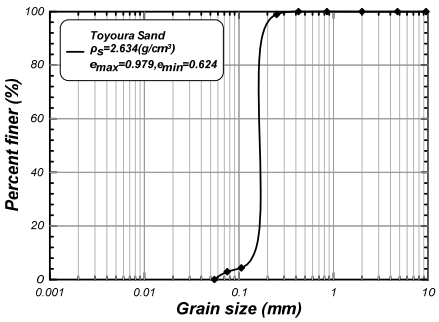

図-3 試料の物理特性

表-1　試験ケース

	排水条件	相対密度 Dr(%)	応力比 τ/σ_{vo}'	$d\varepsilon_v/d\gamma$
1-1	非排水	72.7	0.15	
1-2		73.4	0.20	
1-3		67.3	0.40	
2-1		41.0	0.10	
2-2		37.0	0.15	
2-3		42.5	0.20	
3-1	部分排水	68.0	0.10	-0.06
3-2		74.8	0.20	
3-3		67.1	0.40	
4-1		37.7	0.15	
4-2		38.0	0.10	
4-3		42.7	0.05	
5-1		67.5	0.10	-0.10
5-2		71.9	0.20	
5-3		66.0	0.40	
6-1		42.2	0.05	
6-2		43.4	0.08	
6-3		41.9	0.10	
6-4		39.8	0.12	

3.試験結果 図-4 に非排水条件における Dr=70%及び Dr=40%の応力-ひずみ関係、有効応力経路を示す。図-5 には部分排水条件の Dr=70%及び Dr=40%の応力-ひずみ関係、有効応力経路を示す。応力ひずみ関係を比較すると部分排水条件の方が著しい剛性の

キーワード：液状化，間隙の再配分，部分排水試験，液状化強度，中空ねじりせん断試験

連絡先：福島県郡山市徳定字中河原 1 番地　TEL　024-956-8710　FAX　024-956-8858

低下を示し、少ない載荷回数でせん断ひずみが 20%に達することがわかる。また有効応力経路を比較すると部分排水試験では, 非排水試験のように有効応力がゼロに達した後にはサイクリックモビリティーを示さなかった。また Dr=40%の応力-ひずみ関係(図-4(c),図-5(c))を比較すると部分排水条件の方で急激なひずみの発生が見られた。また有効応力経路(図-4(d),図-5(d))をみると p'=40kPa までの載荷回数を比較すると非排水条件では 267 回、部分排水条件では 9 回と部分排水試験の試料が著しい強度低下を示した。図-6 には部分排水試験における間隙比-有効応力の関係を示す。同図には豊浦砂における Steady state line[5]の結果も合わせて示した。Dr=66%の試料は Seady state line に達していない。一方 Dr=41.9 の%結果をみると Seady state line 近傍まで達している。このような間隙比の増加によって Dr=40%の供試体は不安定化した。すなわち供試体の自立が困難になり、供試体が軸方向に圧縮した。図-7,8 に液状化強度曲線を示す。同図に既往の解析結果[5]も合わせて示した。なお、解析では K_0=0.5 で異方圧密した単純せん断条件である。Dr=40%,70%ともに実験値と解析値の液状化強度曲線はほぼ等しくなった。また非排水条件と部分排水条件($d\varepsilon_v/d\gamma$=-0.10)の載荷回数 15 回の液状化強度を比較すると Dr=70%で約 65%、Dr=40%で約 50%の強度低下が生じた。また部分排水試験において Dr=40%,70%ともに高い応力比もとでは体積ひずみ/せん断ひずみ比の影響はほぼ見られなかった。

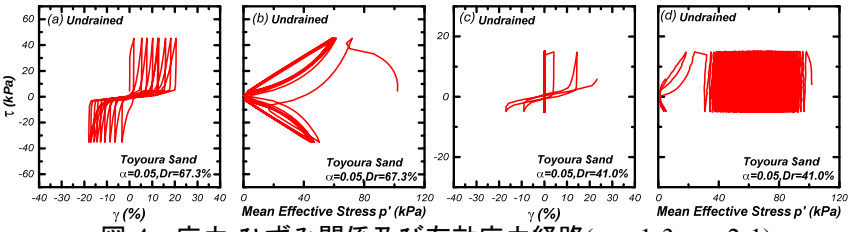

図-4　応力-ひずみ関係及び有効応力経路(case1-3,case2-1)

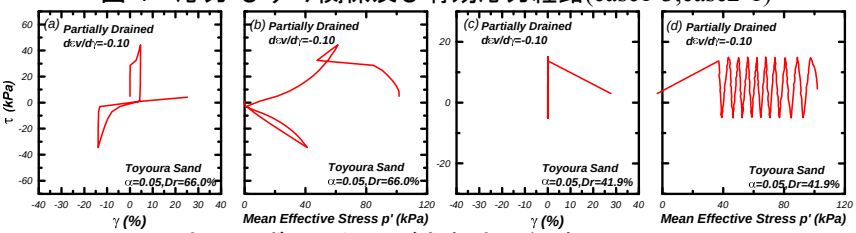

図-5　応力ひずみ関係及び有効応力経路(case5-3,case6-3)

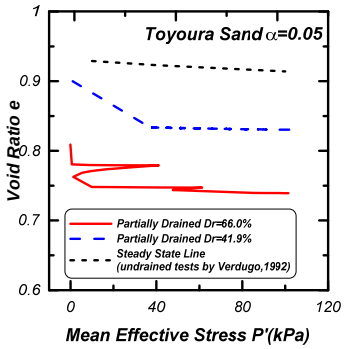

図-6 間隙比-有効応力の関係

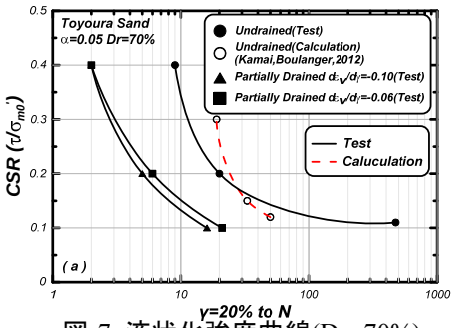

図-7 液状化強度曲線(Dr=70%)

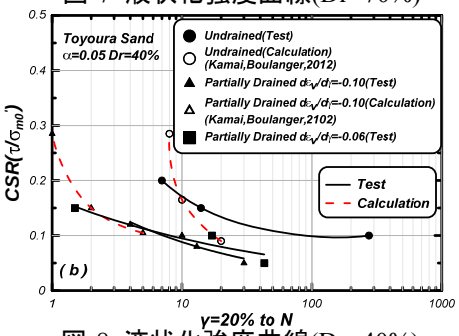

図-8 液状化強度曲線(Dr=40%)

4.まとめ 間隙の再配分に着目した体積膨張を伴う豊浦砂の部分排水繰返しせん断試験を行った結果、以下のことがわかった。

1)部分排水試験の方が非排水試験と比較して、ひずみ軟化が起こりやすく、ひずみ振幅が 20%に達する応力載荷回数が少ないことがわかった。

2)部分排水試験では、Dr=40%の試料は砂が Seady state line に達し、不安定化し流動することがわかった。しかし、Dr=70%の試料は Seady state line に達していないことがわかった。

3) Dr=40%の非排水条件、部分排水条件の実験値の液状化強度曲線と既往の解析値を比較すると体積膨張による同様の強度低下の傾向を示すことがわかった。

謝辞 本研究は文部科学省の科学研究費(基盤研究(A):課題番号 23246086(代表.風間基樹))の援助を受けました。記して謝意を示します。

参考文献 1)土木学会:新潟地震震害調査報告書,第 13 編,pp. 836-837, 1966. 2)安田,石川,萩谷;東日本大震災における液状化による平面道路の被害,土木学会第 67 回年次学術講演会,Ⅲ209, pp. 417-418, 2012. 3)浦安市:浦安市液状化対策技術検討調査委員会資料, 2011. 4)Kamai, R. and Boulanger, R., W.:Single-element simulations of partial-drainage effects under monotonic and cyclic loading,Soil Dynamics and Earthquake Engineering35, pp29-40, 2012. 5) Verdugo, R. and Ishihara, K. : “The steady state of sandy soils,” Soils and Foundations, 36(2), 81-91, 1996.