

京都大学大学院 ○岡田康彦
 京都大学防災研究所 佐々恭二
 京都大学防災研究所 福岡浩

1. はじめに

1995年西宮市仁川地すべり(34人死亡)、1996年長野県小谷村(16人死亡)と1997年鹿児島県出水市(21人死亡)の崩壊・土石流災害等、近年地すべり土塊の流動化による災害が多発している。地すべりの流動化につながる液状化による高速長距離運動のメカニズムの研究は、現在もっとも重要、かつ最先端の研究課題と考えられる。現在までに、三軸圧縮(引張)試験機を用いた液状化に関する研究により多くの知見が発表されている。しかし、三軸圧縮(引張)試験において得られる強度は、均一な試料に対する圧縮(引張)強度であるためせん断強度とは異なる。また、この試験機では、試料に数cmの変形しか与えることができない。それに対して、リングせん断試験では、試料を直接せん断することで地すべりのすべり面を再現し、また制限なくせん断変位を与えることができる。本研究では、兵庫県南部地震により発生した宝塚地すべり地より採取した大阪層群試料を用いて、非排水速度制御リングせん断試験を行い、直接せん断条件における砂質土試料の構造破壊(応力座標上で、応力経路が破壊線に到達する前にピークのせん断抵抗を示し、その後間隙水圧の発生に伴ってせん断抵抗が減少する現象)の発生する条件、液状化が発生した後の最終的なせん断挙動に関して考察を行った。

2. リングせん断試験機

試験に用いたリングせん断試験機は、佐々等により1996年に開発された地震時地すべり再現試験機(DPRI Ver.5)である。上下に分かれたリング状のせん断箱に試料を詰め、直接せん断を行う。せん断箱の外側直径は18cm、内側直径は12cmであり、せん断中の試料の高さは約6cmで、せん断面は、試料中のほぼ中央に形成される。下せん断箱の上端にはゴムエッジが取り付けられている。このゴムエッジは、旋盤をかけることにより、表面が完全になめらかになるように加工してある。試験時には、このゴムエッジにテフロンをスプレーし、シリコングリースを塗ることにより、ゴムエッジと上せん断箱との間の表面摩擦を減少させ、また、脱気水や試料が漏れることを防ぐ。また、せん断箱をセットした後は、このギャップ間の力は、一定(1.4kN)に保たれるように調節されており、試験中の完全飽和状態を再現することができる。

3. 実験プログラム

3.1 試料

試料は大阪層群をもちいた。大阪層群は、鮮新世から更新世中期の風化花崗岩の湖底堆積物あるいは海成堆積物であり(市原1996)、関西地方に広く分布する。石英(77%)、長石(23%)からなる角張った砂質土で、平均粒径(D_{50})は0.9mm、均等係数(U_c)は5.2、そして比重(G_s)は2.61である。

3.2 実験手順

可能な限り粗な試料を作成できるように、せん断箱上部から計量カップよりゆっくりと乾燥試料を注ぎ込んだ。試料を飽和させるために、次の2点を行った。(1)CO₂ガスを循環させ、試料中に空気がない状態にした(約1時間)。(2)CO₂ガスと入れ替わるように、脱気水を試料下部から浸透させた(約12時間)。飽和させた試料の B_0 値を測定し、0.95以上の値を示した試料を完全に飽和した試料として非排水試験を行った。

4. 構造破壊の応力条件

約103kPaから628kPaに正規圧密した大阪層群試料に対して、せん断速度1mm/secでせん断距離10mmまで非排水速度制御リングせん断試験を行った。Fig.1は、その有効応力経路である。全ての試験において、間隙水圧が単調増加するに伴って有効応力が減少し、最終的にはかなり小さなせん断抵抗が発揮された。

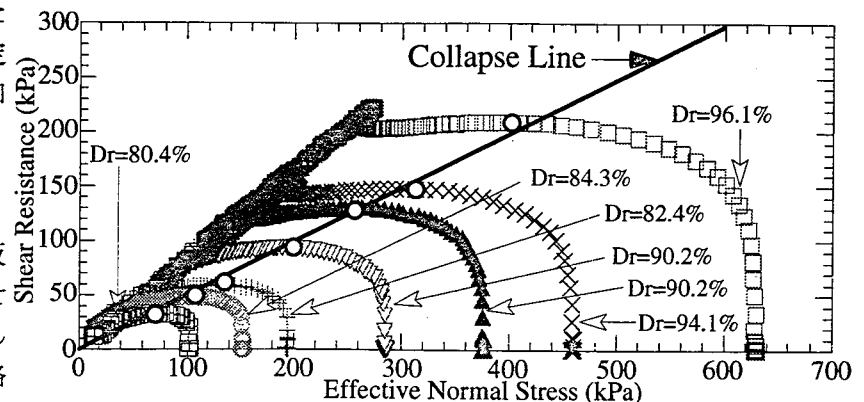


Fig. 1 Collapse line on stress paths of normally consolidated Osaka-group coarse sandy soils.

また、全ての応力経路が最終の応力点に移動する途中で破壊線に到達し、その後破壊線に沿って移動している。つまり、全ての試験で従来の液化化ではなくすべり面液化化が発生した。しかし、応力経路は、破壊線に到達する前に一度ピークのせん断抵抗を示し、その後せん断抵抗を減じながら破壊線に到達しており、構造破壊現象が確認された。また、試料が構造破壊したと考えられる点 (Fig. 1 中の丸) は、原点を通る直線(Collapse line)で結ぶことができた。つまり、正規圧密した大阪層群試料に対する非排水速度制御リングせん断試験では、応力経路がある応力比に到達すると構造破壊し、その後せん断の進行とともに間隙水圧が発生する事を示すものである。これは、直接せん断条件下での構造破壊に対する破壊の基準則として提案されうるものと考えられる。

5. 液化化発生後の非排水せん断挙動

5.1 せん断速度の違いが最終的な間隙水圧発生に与える影響

これまでに、三軸試験機を用いて、ひずみ制御と応力制御による砂質土の非排水せん断挙動の相違等について研究されてきたが、ここでは、せん断速度を変えた非排水速度制御リングせん断試験を行い、間隙水圧発生量の相違を調べた。Fig. 2 は、50, 100, 200 kPa に正規圧密した大阪層群試料に対して、種々のせん断速度を与えた試験において、定常状態に到達した際の過剰間隙水圧比を示したものである。200 kPa に圧密した試料では過剰間隙水圧比はほぼ一致し、また、50, 100 kPa に圧密した試料に関しては、若干ばらつきがあるが、全てが 0.8 以上の大きな値を示すとともに、最大で 0.05 程度の違いしかない。長距離せん断時の定常状態においては、有効応力の減少によりこれ以上粒子破碎が発生しない状態であるが、今回の試験結果より、せん断速度の違いは最終的な粒子破碎による間隙水圧の発生量にはほとんど影響を与えないことが明らかになった。

5.2 リングせん断試験による定常状態

非排水三軸試験により多くの研究者が steady state line を提案しているが、三軸試験では、せん断距離が短く粒子破碎は終了しておらず、Poulos (1981)の定義に基づいた定常状態の再現は難しい。Fig. 3 は、飽和させた大阪層群試料に対するリングせん断試験と非排水三軸圧縮試験(Okada et al. 1998)より得られた e - $\log \sigma$ 図であるが、リングせん断試験による試験結果は、三軸圧縮試験によるものよりも左側に位置している。大阪層群試料に対するリングせん断試験では、長距離直接せん断することにより粒子が破碎され相当量の過剰間隙水圧が発生し定常状態に到達した。この状態においては可能な粒子破碎は終了しており、Poulos の定義に基づいた定常状態が最終的に得られたと考えられる。この意味で、リングせん断試験により得られた steady state line は、"ultimate steady state line"であると解釈した。試料の残留強度を議論する際には、三軸試験による steady state 時の強度ではなく、著者らはリングせん断試験による ultimate steady state 時の強度を考慮するべきであると強調する。

引用文献

市原実 (1996): 大阪層群と中国黄土層, 築地書館, 191 p.
 Okada, Y., Sassa, K., and H. Fukuoka (1998): Comparison of shear behaviour of sandy soils by ring-shear test with conventional shear tests. *Environmental Forest Science, Proceedings of IUFRO Div.8 Conferences, Kyoto*, Kluwer Academic Publisher, pp. 623-632.
 Poulos, J. (1981): The steady state deformation. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 107, No. GT5, pp. 553-562.

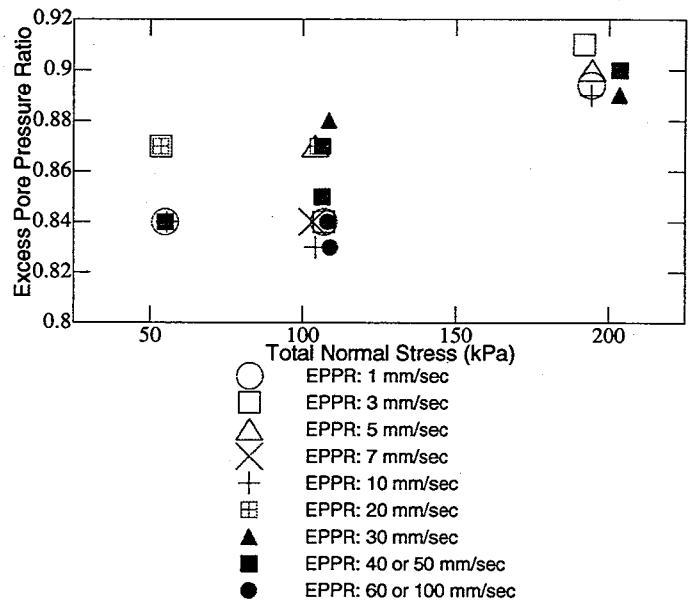


Fig. 2 Effect of shear speed on excess pore pressure ratio.

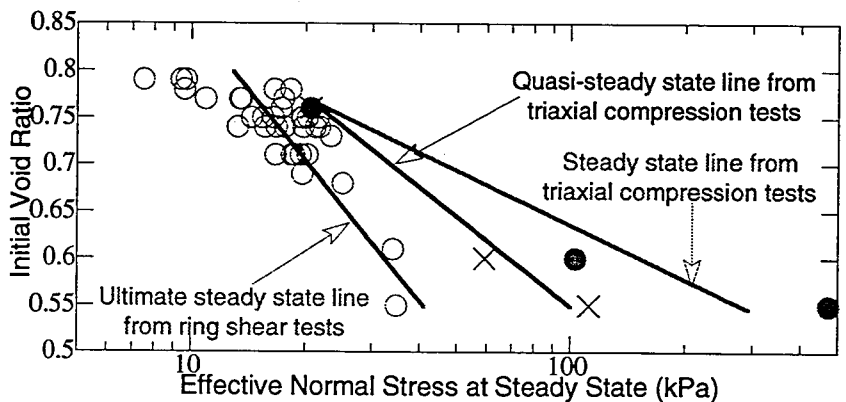


Fig. 3 Ultimate steady state line compared with steady state line and quasi steady state line.