

トンネル掘削現場より採取した礫質土の変形特性の非線形性

東京大学生産技術研究所 正会員○古関潤一 正会員 桑野玲子 正会員 佐藤剛司 正会員 堤千花  
National Engineering Services Pakistan 非会員 Obaid Hassan QURESHI

1. はじめに

近年では低土被りの条件下でトンネル建設工事を行う事例が増えている。その際には掘削面の安定を保つと同時に周辺地盤の変位を許容レベル以下に抑える必要があり、これらを評価するうえで地山材料の強度変形特性が重要となる。地山が礫質土の場合には、室内試験まで実施して強度変形特性を把握する例はこれまで極めて限られていたが、最近のサンプリング技術の発展により、高品質な試料を採取することが可能になってきた。ここでは、北陸新幹線の第一魚津トンネル建設現場より採取した礫質土の大型三軸試験で得られた変形特性の非線形性についての検討結果を報告する。

2. 試料および試験方法

第一魚津トンネルの上半掘削底面（掘削前土被りは30m）より、水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング<sup>1)</sup>を行って直径30cm、高さ約100cmの試料を採取した。試料は開析扇状地堆積物で、図1に示した供試体の場合、最大粒径182mm、平均粒径27mm、細粒分含有率3.5%、均等係数132、初期間隙比0.16であった。



図1 試験後の供試体の例(B3)

試料の両端面を成形して高さ60cmの円柱供試体とした。拘束圧30kPaのもとで二重負圧法により飽和化を図ったが、B値は0.73~0.80にとどまった。所定の拘束圧まで等方圧密した後、軸ひずみ速度0.08%/minで排水せん断した。

圧密中とせん断中のいくつかの段階で軸方向に微小ひずみ振幅の排水繰返し载荷を行い、静的な鉛直ヤング率を計測した。一部の試験では、せん断中に軸差応力  $q = \sigma_v - \sigma_h$  を一旦ゼロまで除荷して再载荷する大振幅繰返し载荷も行った。

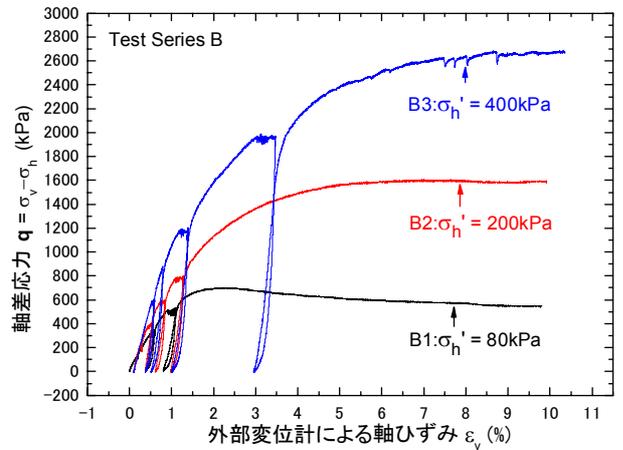


図2 応力ひずみ関係

3. 試験結果

応力ひずみ関係を図2に示す。ピーク強度定数は  $c=31\text{kPa}$ ,  $\phi=50.0\sim 51.4^\circ$  となった。詳細については文献2)を参照されたい。

微小繰返し载荷時の応力ひずみ関係の例を図3に示す。軸ひずみはLDTで測定した。ひずみの片振幅は約0.001%である。この傾きより微小ひずみレベルでの鉛直ヤング率  $E_v$  を求めた。

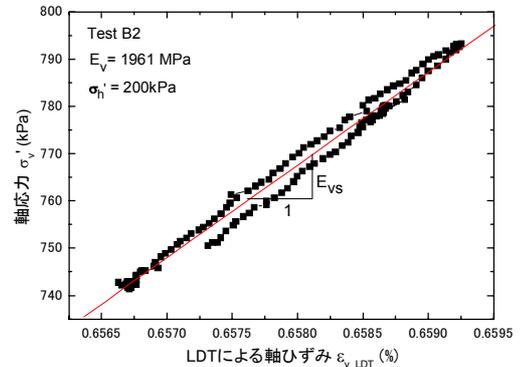


図3 微小繰返し载荷の例

$E_v$  と有効鉛直応力の関係を図4に示す。これらの関係を次式で近似した場合の係数  $n$  の値は、等方圧密過程では0.4~0.5程度となった。ただし、式中の添字0は基準値 ( $E_0$ は  $\sigma_v = \sigma_{v0}$  のときの  $E_v$  の値) である。なお、せん断過程では等方圧密過程よりも相対的に  $E_v$  が低下しているが、この理由としては、せん断により土粒子構造が損傷し、さらに微小繰返し载荷中に進行したクリープ変形の影響も受けたことが考えられる。

$$E_v = E_0 \cdot \left( \frac{\sigma_v}{\sigma_0} \right)^n \quad \dots(1)$$

なお、この  $E_v$  を水平・鉛直面上でのせん断弾性係数  $G_{vh}$  に換算した値は、各供試体のせん断波速度に基づく動的測定値よりも全般的に小さくなっ

たが、これらの測定値の応力レベル依存性は整合していた<sup>3)</sup>。

せん断中の荷重過程（再荷重過程で直前の除荷開始応力レベルを超えている場合を含む）における接線ヤング率  $E_{tan}$  と割線ヤング率  $E_{sec}$  のひずみレベル依存性を図5に示す。ただし、割線の定義と対応する軸ひずみ増分は最初のせん断開始時を原点としている。また、拘束圧 400kPa の試験 B3 では、せん断中に計測可能な LDT の数が5本から2本まで徐々に減少したため、各時点で計測できた分の平均値を用いてヤング率を算定した。これらのヤング率は非線形性が比較的強く、ひずみレベルが  $10^{-5}$  から  $10^{-4}$  に増加すると、 $E_{tan}$  はひずみレベル  $10^{-5}$  での値の50%程度に、また  $E_{sec}$  は30%程度に低下した。

せん断中の除荷過程における  $E_{tan}$  と  $E_{sec}$  のひずみレベル依存性を図6に示す。ただし、この場合の原点は各除荷過程の開始時としている。除荷過程での非線形性は前述した荷重過程における結果よりも弱く、 $10^{-5}$  から  $10^{-4}$  までのひずみレベルの増加に伴って  $E_{tan}$  と  $E_{sec}$  はそれぞれ80%、60%程度に低下した。

以上の異なる非線形性は、荷重過程では  $\sigma_v$  が増加しているため式(1)によれば微小ひずみレベルでの鉛直ヤング率  $E_v$  が本来増大しており、逆に除荷過程では逆の状況が生じていることの影響を受けている点に留意する必要がある。この影響を補正するために、そのときの  $\sigma_v$  の値を式(1)に代入して得られる  $E_v$  で  $E_{tan}$  を正規化して再整理した結果を図6に示す。ただし、式(1)の各パラメータは同じ供試体の等方圧密時の  $E_v$  の実測値（図4参照、B1はせん断時の値）に基づき設定した。

上記のような正規化を行った場合、ひずみレベル  $10^{-5}$  における正規化ヤング率  $E_{tan}/E_v$  は本来1.0となるはずであるが、図6によれば必ずしもそうになっていない。特に、除荷過程では0.6~0.8程度にとどまっているが、この理由としては、前述したようにせん断により土粒子構造が損傷した影響が考えられる。その影響も含んだ形で  $E_{tan}/E_v$  の低下傾向を評価すると、 $10^{-4}$  までのひずみレベルの増加に伴って荷重過程と除荷過程の  $E_{tan}/E_v$  はそれぞれ0.2~0.4、0.5~0.7程度に低下した。

4. まとめ

高品質な礫質土試料を対象に、微小ひずみレベルでの鉛直ヤング率の応力レベル依存性と、荷重・除荷過程における接線・割線ヤング率のひずみレベル依存性を整理して示した。

謝辞 本研究は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北陸新幹線第二建設局との共同研究の一環として実施した。

<参考文献> 1) 金子進ら(2005): 水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の深部地盤への適用, 第40回地盤工学研究発表会. 2) Qureshi ら(2006): Large scale triaxial tests on gravelly soils retrieved from tunneling sites in Toyama, 8th International Summer Symposium, 土木学会国際委員会. 3) 古関潤一ら(2007): トンネル掘削現場より採取した礫質土の微小変形特性, 第42回地盤工学研究発表会.

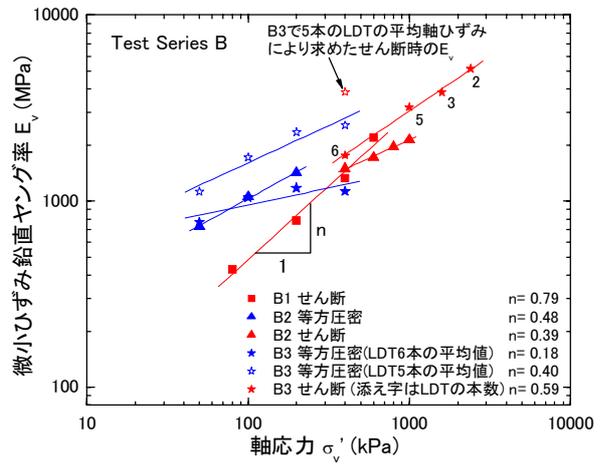


図4 微小ひずみレベルでの鉛直ヤング率

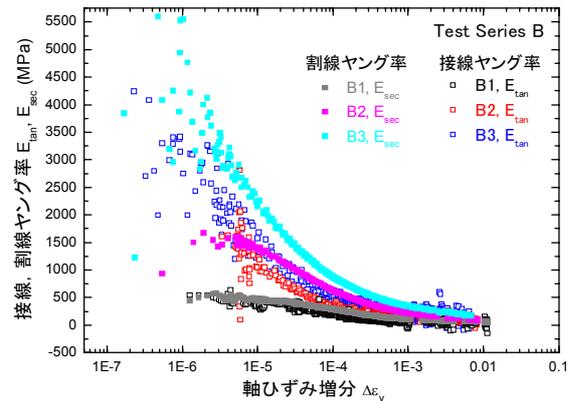


図5 荷重時の接線・割線ヤング率

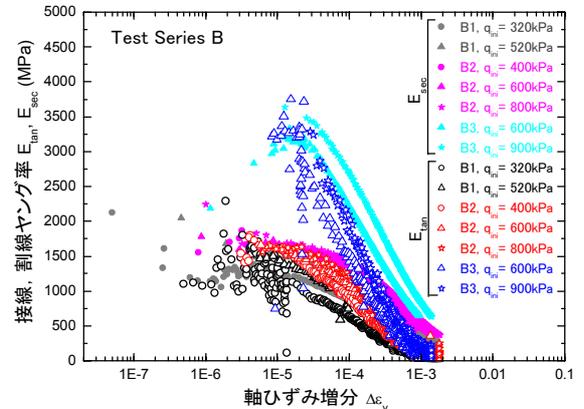


図6 除荷時の接線・割線ヤング率

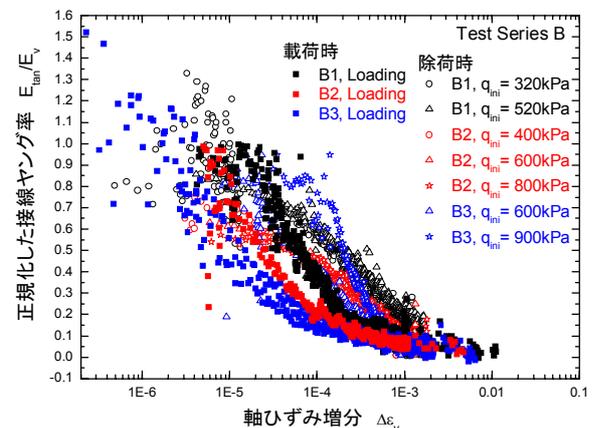


図7 正規化した接線ヤング率