

三軸圧縮試験における不攪乱礫質土の粘性特性

東京大学大学院 学生会員 ○榎本忠夫

東京大学生産技術研究所 正会員 佐藤剛司、古閑潤一

1. はじめに

礫質土の粘性における研究は、再構成試料に関するものがほとんどで、不攪乱礫質土に関する研究例は限られている。本研究では、トンネル建設現場から不攪乱礫質土を採取し、排水三軸圧縮における不攪乱礫質土の粘性特性を検討した。

2. 実験概要

北陸新幹線のトンネル建設現場から2種類の不攪乱礫質土を採取した。低土被りである枕野トンネルではトンネル掘削時に、地山の先行変位を抑制し地山の緩み防止と施工の安全を図るため、薬液注入による地盤改良が行われた。その際、トンネル鉛直掘削面から水平方向に鋼管を圧入して注入後試料を採取し、さらに水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したコアリング¹⁾を行い直径10cm・高さ20cmの円柱供試体を作製した。第一魚津トンネルでは、同様に水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング¹⁾を行うことで不攪乱礫質土を採取し、それを直径30cm・高さ50cmの円柱供試体に成形した。二重負圧法を用いて飽和化を図り、所定の有効拘束圧(300 kPa、400 kPa)まで等方圧縮後、排水三軸圧縮を開始した。単調载荷の途中でひずみ速度急変及び荷重保持载荷を行い、その結果を一定の理論的枠組の中で解析することで、地盤材料の粘性を定量的に評価した。

3. 実験結果及び考察

図-1に第一魚津トンネルで採取された不攪乱礫質土の応力-ひずみ関係を示す。1つの軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v$ に対して1つの応力-ひずみ関係が存在し、 $\dot{\epsilon}_v$ が大きいかほど応力も大きい。そして、载荷の途中で $\dot{\epsilon}_v$ を急増(減)すると有効主応力比 $R = \sigma'_v / \sigma'_h$ も急増(減)し、その後、その急変後 $\dot{\epsilon}_v$ に対応した応力-ひずみ関係に速やかに移行する傾向が観察された。これは、粘土や堆積軟岩などで観察される Isotach 粘性²⁾である。図-3に、図-1を解析することで得られた「 $\dot{\epsilon}_v$ の急変に伴う応力比の変化率 $\Delta R/R$ (図-2)」と「外部変位計で測定した $\dot{\epsilon}_v$ の変化比の対数 $\log\{(\dot{\epsilon}_v)_{after} / (\dot{\epsilon}_v)_{before}\}$ 」の関係を示す。この関係の勾配を速度感応係数 β と定義した。 β は、地盤材料の粘性の大きさを表現する。この β の値と「LDTで測定した不可逆せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}^{ir} (= \dot{\epsilon}_v^{ir} - \dot{\epsilon}_h^{ir})$ の比 $(\dot{\gamma}^{ir})_{after} / (\dot{\gamma}^{ir})_{before}$ に基づく β の値」には有意な差がない³⁾(Bedding errorの影響はほとんどない)。一方、 ΔR の $\dot{\gamma}^{ir}$ の増加に伴う減衰が終了した時の残留値を ΔR_r とし、その時の「一定の $\dot{\gamma}^{ir}_{before}$ での連続単調载荷における主応力比を R_r 」とする(図-2)。 $\Delta R_r/R_r - \log\{(\dot{\gamma}^{ir})_{after} / (\dot{\gamma}^{ir})_{before}\}$ 関係の勾配を残留速度感応係数 β_r と定義した。本研究では、 $\Delta R_r/R_r - \log\{(\dot{\epsilon}_v)_{after} / (\dot{\epsilon}_v)_{before}\}$ 関係も線形になることを確かめており、簡単のため、この勾配を β_r として計算した。

図-1に第一魚津トンネルで採取された不攪乱礫質土の応力-ひずみ関係を示す。1つの軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v$ に対して1つの応力-ひずみ関係が存在し、 $\dot{\epsilon}_v$ が大きいかほど応力も大きい。そして、载荷の途中で $\dot{\epsilon}_v$ を急増(減)すると有効主応力比 $R = \sigma'_v / \sigma'_h$ も急増(減)し、その後、その急変後 $\dot{\epsilon}_v$ に対応した応力-ひずみ関係に速やかに移行する傾向が観察された。これは、粘土や堆積軟岩などで観察される Isotach 粘性²⁾である。図-3に、図-1を解析することで得られた「 $\dot{\epsilon}_v$ の急変に伴う応力比の変化率 $\Delta R/R$ (図-2)」と「外部変位計で測定した $\dot{\epsilon}_v$ の変化比の対数 $\log\{(\dot{\epsilon}_v)_{after} / (\dot{\epsilon}_v)_{before}\}$ 」の関係を示す。この関係の勾配を速度感応係数 β と定義した。 β は、地盤材料の粘性の大きさを表現する。この β の値と「LDTで測定した不可逆せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}^{ir} (= \dot{\epsilon}_v^{ir} - \dot{\epsilon}_h^{ir})$ の比 $(\dot{\gamma}^{ir})_{after} / (\dot{\gamma}^{ir})_{before}$ に基づく β の値」には有意な差がない³⁾(Bedding errorの影響はほとんどない)。一方、 ΔR の $\dot{\gamma}^{ir}$ の増加に伴う減衰が終了した時の残留値を ΔR_r とし、その時の「一定の $\dot{\gamma}^{ir}_{before}$ での連続単調载荷における主応力比を R_r 」とする(図-2)。 $\Delta R_r/R_r - \log\{(\dot{\gamma}^{ir})_{after} / (\dot{\gamma}^{ir})_{before}\}$ 関係の勾配を残留速度感応係数 β_r と定義した。本研究では、 $\Delta R_r/R_r - \log\{(\dot{\epsilon}_v)_{after} / (\dot{\epsilon}_v)_{before}\}$ 関係も線形になることを確かめており、簡単のため、この勾配を β_r として計算した。

Key Words: 粘性、不攪乱礫質土、非線形三要素モデル

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学 生産技術研究所 TEL03-5452-6422

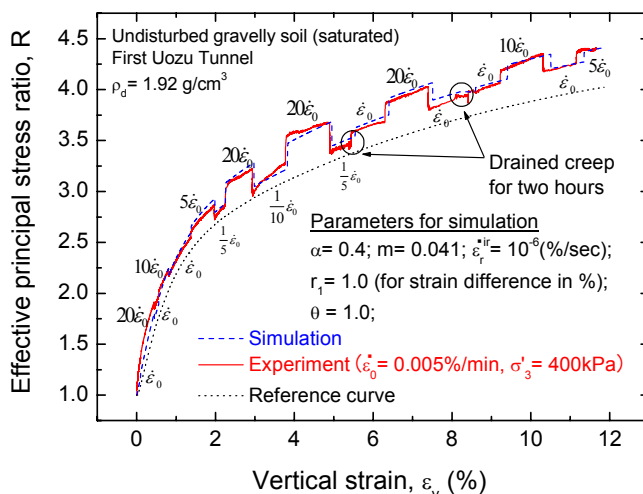
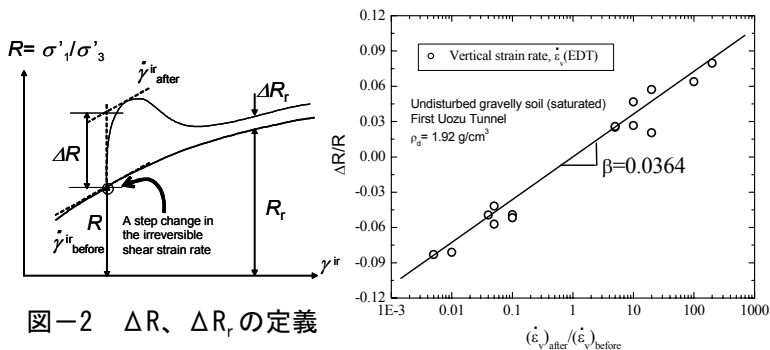
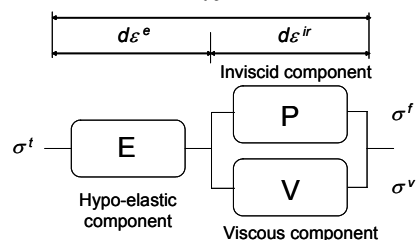


図-1 応力-ひずみ関係 (第一魚津トンネル)

図-2 ΔR 、 ΔR_r の定義図-3 速度感応係数 β 図-4 非線形三要素モデル²⁾

非線形三要素モデル²⁾の構造を図-4に示す。全ひずみ増分を弾性成分と不可逆成分に分離し ($d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^{ir}$)、全応力を非粘性応力と粘性応力に分離する ($\sigma'(\varepsilon^{ir}, \dot{\varepsilon}^{ir}) = \sigma^f(\varepsilon^{ir}) + \sigma^v(\varepsilon^{ir}, \dot{\varepsilon}^{ir})$)。非粘性応力 $\sigma^f(\varepsilon^{ir})$ —不可逆ひずみ ε^{ir} 関係は、不可逆ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}^{ir} = 0$ で載荷した時の応力—ひずみ関係 (reference curve) に対応している。Isotach 粘性、TESRA 粘性²⁾、Positive & Negative 粘性³⁾ 及び ε^{ir} の増加に伴う粘性の移行も表現できる粘性応力 $\sigma^v(\varepsilon^{ir}, \dot{\varepsilon}^{ir})$ は、以下の式で表現される⁴⁾。

$$[\sigma^v]_{\varepsilon^{ir}} = \int_{\tau}^{\varepsilon^{ir}} \left[d\{\sigma^f(\varepsilon^{ir}) \cdot g_v(\dot{\varepsilon}^{ir})\} \right]_{(\tau)} \cdot g_{decay, g}(\varepsilon^{ir}, \varepsilon^{ir} - \tau) \quad (1);$$

$$\text{ただし、} g_v(\dot{\varepsilon}^{ir}) = \alpha \cdot \left[1 - \exp\{1 - (\dot{\varepsilon}^{ir} / \dot{\varepsilon}_r^{ir} + 1)^m\} \right] (\geq 0) \quad (2);$$

$$g_{decay, g}(\varepsilon^{ir}, \varepsilon^{ir} - \tau) = \{1 - \theta(\varepsilon^{ir})\} \cdot r_1(\varepsilon^{ir})^{\varepsilon^{ir} - \tau} + \theta(\varepsilon^{ir}) \quad (3)$$

減衰係数 $r_1(\varepsilon^{ir})$ は粘性応力 ΔR の減衰速度を表し、 $0 < r_1 \leq 1$ であり r_1 が小さいほど減衰が速い。 $\theta(\varepsilon^{ir}) = \beta_r / \beta$ は、粘性タイプパラメータであり、Isotach 粘性 ($\beta > 0$, $r_1 = 1.0$) では $\Delta R_r / R_r = \Delta R / R$ より $\theta(\varepsilon^{ir}) = \beta_r / \beta = 1.0$ 、TESRA 粘性 ($\beta > 0$, $r_1 < 1.0$) では $\Delta R_r = 0$ より $\theta(\varepsilon^{ir}) = \beta_r / \beta = 0$ 、Positive & Negative 粘性 ($\beta > 0$, $r_1 < 1.0$) では $\Delta R_r < 0$ (ひずみ速度急増の場合) であるので $\theta(\varepsilon^{ir}) = \beta_r / \beta < 0$ である。式(2)の未定係数 α 、 m は β に基づいて決定される。

図-1に示す破線は、非線形三要素モデルによるシミュレーション結果であり、点線は reference curve を示している。非線形三要素モデルによって、粘性効果を含んだ応力—ひずみ関係を精度良く表現できている。

図-5に枕野トンネルで採取された薬液改良後の不攪乱礫質土の応力—ひずみ関係を示す。せん断初期は Isotach 粘性であるが、 $\dot{\varepsilon}_v$ 急変に伴う ΔR が ε^{ir} の増加に伴って減衰する TESRA 粘性²⁾へと移行していることが分かる。さらにピーク強度付近では、 $\dot{\varepsilon}_v$ を急増 (減) すると R も急増 (減) するが、 ΔR は ε^{ir} の増加に伴って減衰し、その後 R は $\dot{\varepsilon}_v$ 急増 (減) 前よりも小さく (大きく) なっている。これは、良く締め固めた良配合セメント改良礫土などで観察される年代効果⁴⁾と同様な傾向であると思われる。

図-6³⁾は、 r_1 (対数) と β の関係である。第一魚津トンネルで採取された不攪乱礫質土のデータもプロットした。破線で示したのは、三軸圧縮試験において有意な破砕性を有していない材料における平均的な関係であり、 r_1 と β には高い正の相関があることが分かる。これは、 $\dot{\varepsilon}_v$ 急変に伴う ΔR が大きいほど、粘性が Isotach 的挙動に近づいていくことを示している。

4. 結論

(1) 第一魚津トンネルで採取された不攪乱礫質土では、Isotach 粘性が観察された。(2) 枕野トンネルで採取された薬液改良後の不攪乱礫質土では、せん断初期における Isotach 粘性から軸ひずみの増加に伴って TESRA 粘性へと移行する傾向が観察された。(3) 破砕性が大きい材料を除くと、 β と r_1 の間には高い正の相関がある。ひずみ速度急変に伴う応力変化が大きいほど、Isotach 粘性に近づいていくことを意味している。

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。試料の採取と成形にあたり基礎地盤コンサルタンツ(株)にご尽力頂いた。ここに記して深謝の意を表す。

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) Di Benedetto, H. et al. (2002): “Time-dependent shear deformation characteristics of sand and their constitutive modeling”, *Soils and Foundations*, 42-2, pp.1-22., 3) Enomoto, T. et al. (2007): “Viscous property of granular material in drained triaxial compression”, *Proc. of Geotechnical Symposium*, Roma, March, 2006, pp.383-398., 4) Tatsuoka, F. (2007): “Inelastic deformation characteristics of geomaterial”, Special lecture, *Proc. of Geotechnical Symposium*, Roma, March, 2006, pp.1-108.

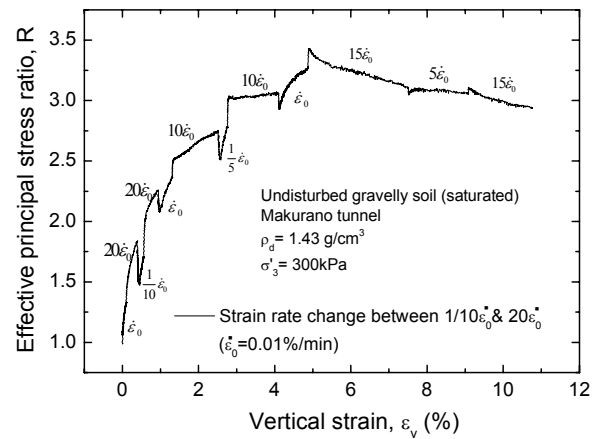


図-5 応力—ひずみ関係 (枕野トンネル)

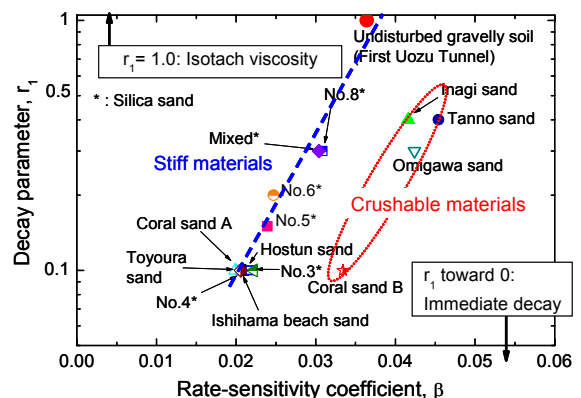


図-6 r_1 (対数) と β との関係 (文献3に加筆)