

不攪乱粘性土の変形・強度特性に及ぼす応力履歴と年代効果の影響

Effect of Stress History and Aging on the Stress-Deformation Characteristics of Undisturbed Clay

北海道大学大学院○学 生 員 真田 昌慶(Masanori Sanada)

北海道大学大学院 フェロー会員 三田地 利之(Toshiyuki Mitachi)

1. はじめに

自然堆積粘土は堆積から現在に至るまでの長期間を経て一般に「年代効果」と呼ばれる粒子骨格のミクロ構造の変化、セメンテーション、二次圧密などによる力学特性の変化を受けている。

本研究では、粘性土の変形・強度特性に及ぼす応力履歴と年代効果の影響を調べることを目的として、現地盤より採取した不攪乱粘性土(AIT-clay)とその再構成試料に異なる圧密応力履歴を与えた供試体について、ベンダーエレメントを装着したH-II型一面せん断試験装置¹⁾を用いて以下の実験を行った。

- ① 定圧一面せん断試験を実施し、式(1)に示す Hvorslev の破壊基準²⁾における強度パラメータに及ぼす年代効果の影響の検討。
- ② ベンダーエレメント試験³⁾(以後 BET) から得られるせん断剛性率 G に及ぼす応力履歴と年代効果の影響の検討。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= c_e + \sigma'_v \tan \phi'_e \\ c_e &= \mu \cdot \sigma'_e \end{aligned} \right\} (1) \quad \begin{aligned} \phi'_e &: \text{有効せん断抵抗角} \\ \sigma'_e &: \text{等価圧密応力} \\ \mu &: \text{有効粘着力係数} \end{aligned}$$

2. 試験概要

・試験試料

不攪乱試料として、タイの AIT のキャンパス内より採取された粘土試料(AIT-J-2-4~4-4)を供試体として用いた。不攪乱試料の試験後の供試体や供試体成形時に生じる削り屑、サンプリング方式の違う同一深度の試料の425 μm ふるい通過分をスラリー状に攪拌し、十日間予圧密したものを再構成試料(AIT-R)の供試体として用いた。

表1 試験試料

試料名	Depth (m)	$\sigma'_{v \text{ in-situ}}$ (kPa)	ρ_s (g/cm ³)	図中記号		
				OCR1	OCR2	OCR4
AIT-J-2-3	4.53	42.3	2.66	●	△	□
AIT-J-2-4	4.38	41.6	2.66	○	△	□
AIT-J-4-4	6.38	51.0	2.70	◎	△	□
AIT-R	—	50.0	2.70	●	▲	□

・試験条件

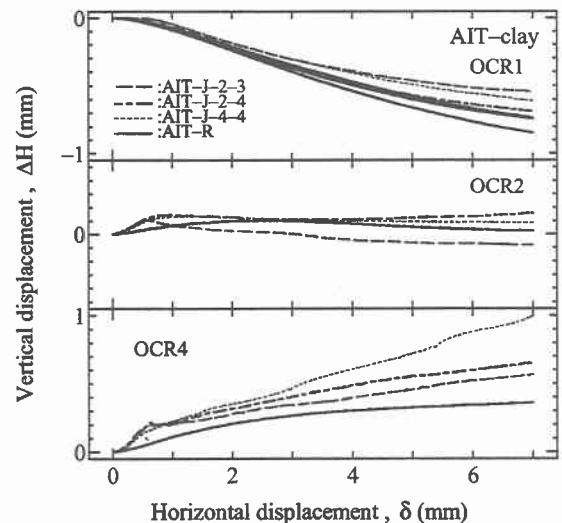
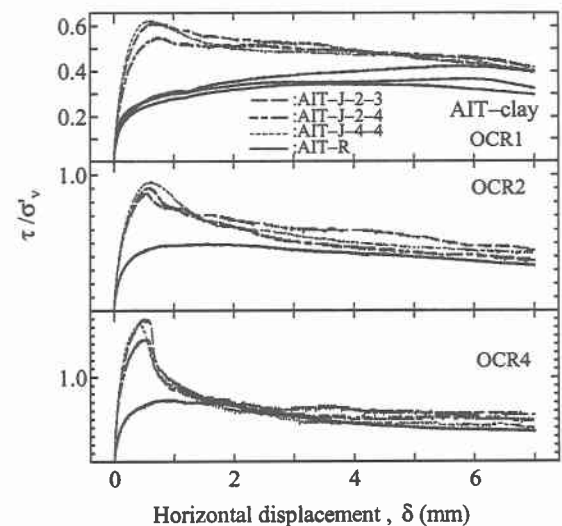
本試験で用いた供試体は直径60mmの円形断面で高さは40mmである。まず、供試体に所定の応力履歴を与えるため以下の条件で圧密、膨張を行った。不攪乱試料(AIT-J-2-4~4-4)については、各試料において現地盤での有効土被り圧まで一次的に圧密したものを正規圧密とした。過圧密条件として、現地盤での有効土被り圧まで圧密後 OCR2、4 まで膨張させた。再構成試料では正規圧密の場合 70, 120, 180(kPa)、過圧密では 120(kPa)まで圧密後 OCR2、4 まで膨張させた。圧密の打ち切りは不

攪乱試料では 3t 法に従ったが、再構成試料については、時間の短縮のために 2t 相当の圧密時間で打ち切っている。圧密応力の載荷速度は 5.0(kPa/min)、除荷速度は 2.5(kPa/min)である。せん断は定圧条件で変位速度 0.02(mm/min)でせん断変位 7mm まで行う。BET は各試験の圧密、膨張終了時に行った。

3. 試験結果、考察

3.1 定圧一面せん断試験結果

図1、図2は前述の各応力履歴を受けた後の不攪乱、再構成試料のせん断中の鉛直変位およびせん断応力の変

図1 $\Delta H \sim \delta$ 関係図2 $\tau/\sigma'_v \sim \delta$ 関係

化を示したものである。定圧試験では、図1から分かるようにせん断中に間隙比が変化するので、図3に示す圧密終了時の間隙比と再構成試料におけるNCLの傾き λ および図1から求められるせん断破壊時の鉛直変位の変化量より算出した破壊時の間隙比 e_f によって、不攪乱試料および再構成試料についてそれぞれ等価圧密応力 σ'_e を算出し、図2、図4より得られる定圧一面せん断強度 τ_d と鉛直応力 σ'_v をそれぞれ σ'_e で正規化したものをプロットしたものが図5である。なお、図3以降において、図中の記号は表1の凡例に従っているが、各々の図においてはOCR1の場合の記号で代表している。

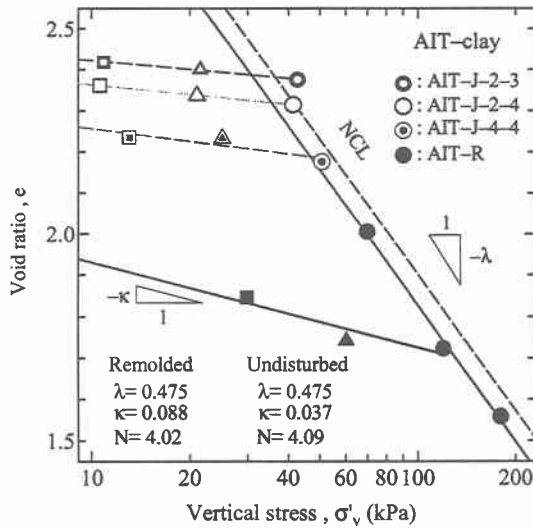


図3 $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係

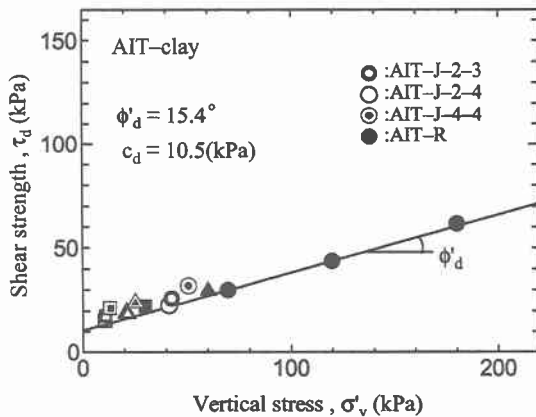


図4 $\tau_d \sim \sigma'_v$ 関係

有効せん断抵抗角 ϕ'_e は再構成試料において $\phi'_e=10.6^\circ$ 、不攪乱試料においては $\phi'_e=11.2^\circ$ であり両者はほぼ等しい値を示した。一方、有効粘着係数 μ は再構成試料で $\mu=0.166$ 、不攪乱試料では $\mu=0.454$ となり、両者の間に大きな差がみられた。不攪乱試料と再構成試料の μ の差が年代効果による構造の影響を表していると考えられる。

3.2 $G \sim \sigma'_v$ の相関

一面せん断試験における粘性土の $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係および $e \sim \ln G$ 関係には強い相関があり、図3、図6中のパラメータを用いて正規圧密領域におけるせん断剛性率 $G(=G_{NC})$ は σ'_v の関数として式(2)のように表現可能であ

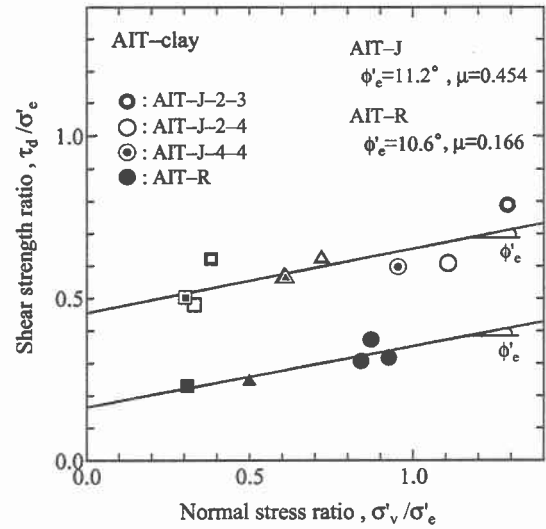


図5 $\tau_d/\sigma'_e \sim \sigma'_v/\sigma'_e$ 関係

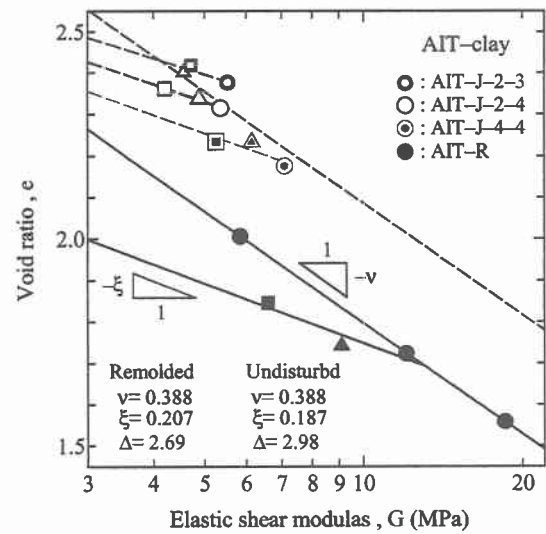


図6 $e \sim \ln G$ 関係

り、過圧密領域における G についても先行圧密応力 σ'_{vy} を用いて同様に式(4)のように表現できることが知られている⁴⁾。また、式(4)は G_{NC} および過圧密比(OCR)を用いて式(6)のように表現することができる。なお、 $\sigma'_v=1\text{kPa}$ 、 $G=1\text{MPa}$ に相当する正規圧密時の間隙比をそれぞれ N 、 Δ とし、再構成、不攪乱試料において正規圧密時の $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係および $e \sim \ln G$ 関係の傾きは等しいものと仮定している。

$$G_{NC} = \sigma'_{vy} \cdot n_G \quad (2)$$

$$n_G = \exp\{(\Delta - N)/v\} \quad (3)$$

$$G = \sigma'_{vy} \cdot \sigma'_{vy} \cdot n_G \quad (4)$$

$$\psi = (\lambda/v - \kappa/\xi) \quad (5)$$

$$G = G_{NC} \cdot OCR^\psi \quad (6)$$

$$G_U/G_R = \frac{n_{GU}}{n_{GR}} \cdot OCR^{\psi_U - \psi_R} \quad (7) \quad \left[\begin{array}{l} \bigcirc_U: \text{不攪乱} \\ \bigcirc_R: \text{再構成} \end{array} \right]$$

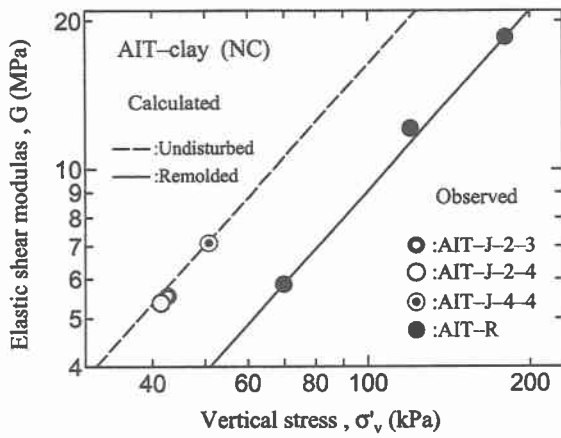


図7 $\ln G \sim \ln \sigma'_v$ 関係 (正規圧密)

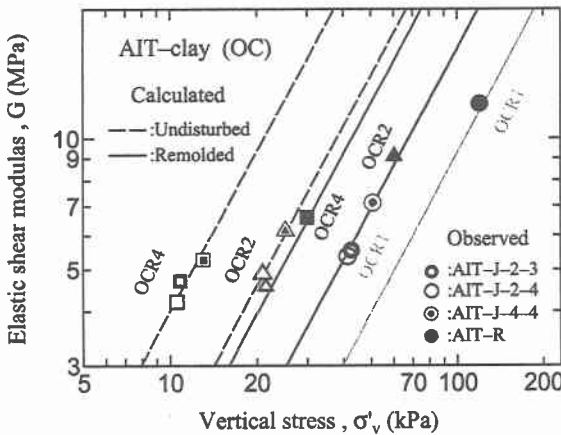


図8 $\ln G \sim \ln \sigma'_v$ 関係 (過圧密)

図7, 図8は正規圧密, 過圧密領域において式(2), 式(6)を適用して得られた計算値と実験値を比較したものである。再構成, 不攪乱試料ともに計算値は実験結果の傾向をよく表しており, 同一の鉛直応力, 過圧密比におけるGの値は再構成試料に比べて不攪乱試料の方が大きな値を示すと考えられる。また, 同一の応力において再構成試料の $G(=G_R)$ に対する不攪乱試料の $G(=G_U)$ の増加の割合 (G_U/G_R) はOCRの関数として式(7)のように表現可能であり, 各々の過圧密比における (G_U/G_R) は一定である。

3.3 $G \sim \tau_d$ の相関

図9は圧密終了時およびせん断応力最大時の間隙比と鉛直応力の関係を示した模式図である。正規圧密領域に

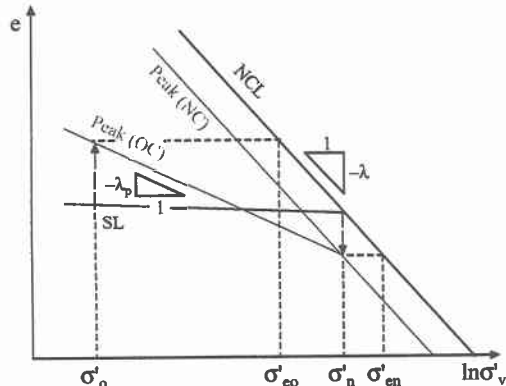


図9 $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係 (模式図)

において圧密終了時とせん断破壊時の間隙比の差は鉛直応力によらずほぼ一定(図10参照)である。せん断破壊時の $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係の $\sigma'_v = 1 \text{ kPa}$ に相当する間隙比の値を Γ とし, 図9中のパラメータを用いると式(1)は式(8)のように表される。つぎに, 図9の幾何学的関係から得られる式(9)を用いて等価圧密応力を消去することにより式(1)は式(10)のように表現することができる。

$$\tau_d / \sigma'_n = \mu \cdot \sigma'_{en} / \sigma'_n + \tan \phi'_e \quad (8)$$

$$\sigma'_{en} / \sigma'_n = \exp\{(N - \Gamma) / \lambda\} \quad (9)$$

$$\tau_d = (\tan \phi'_e + m_p) \cdot \sigma'_n \quad (10)$$

$$m_p = \mu \cdot \exp\{(N - \Gamma) / \lambda\} \quad (11)$$

過圧密領域においても同様にせん断破壊時の $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係の傾き λ_p を用いて式(1)は式(12)から式(9), 式(13), 式(14)を用いて等価圧密応力を消去することにより, 鉛直応力およびOCR($=\sigma'_{en}/\sigma'_o$)の関数として式(15)のように表現することができる。

$$\tau_d / \sigma'_o = \mu \cdot \sigma'_{eo} / \sigma'_o + \tan \phi'_e \quad (12)$$

$$\sigma'_{eo} / \sigma'_o = (\sigma'_{eo} / \sigma'_{en}) \cdot (\sigma'_{en} / \sigma'_n) \cdot (\sigma'_n / \sigma'_o) \quad (13)$$

$$\sigma'_{eo} / \sigma'_{en} = OCR^{-\lambda_p / \lambda} \quad (14)$$

$$\tau_d = (\tan \phi'_e + m_p \cdot OCR^{\Lambda_p}) \cdot \sigma'_o \quad (15)$$

$$\Lambda_p = 1 - \lambda_p / \lambda \quad (16)$$

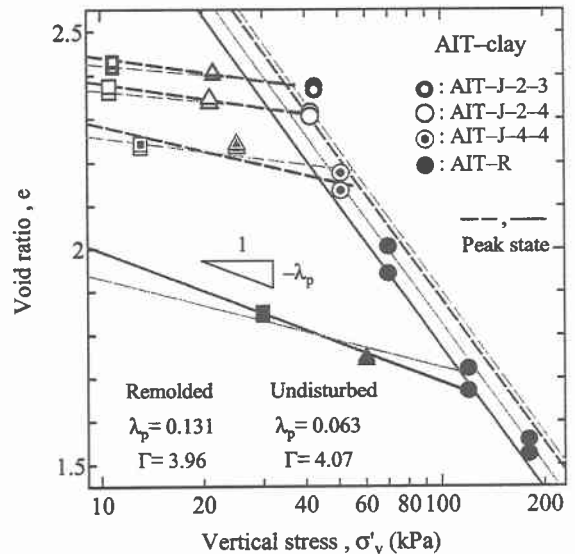


図10 $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係 (破壊時)

図10は本試験より得られた再構成, 不攪乱試料の圧密終了時およびせん断応力最大時の間隙比と鉛直応力の関係を示したものである。図10より得られた各パラメータの値を式(10), 式(15)に適用して得られた計算値と実験値を比較したものが図11, 図12である。再構成, 不攪乱試料ともに計算値は実験結果の傾向をよく表している。

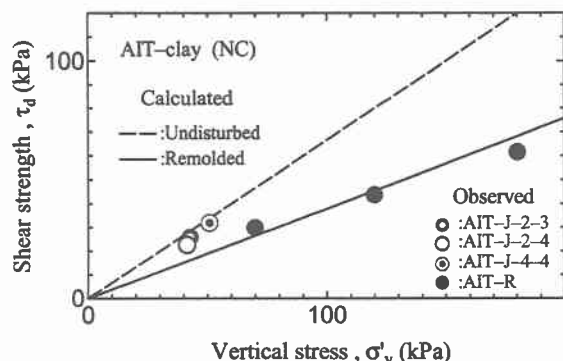


図 11 $\tau_d \sim \sigma'_v$ 関係 (正規圧密)

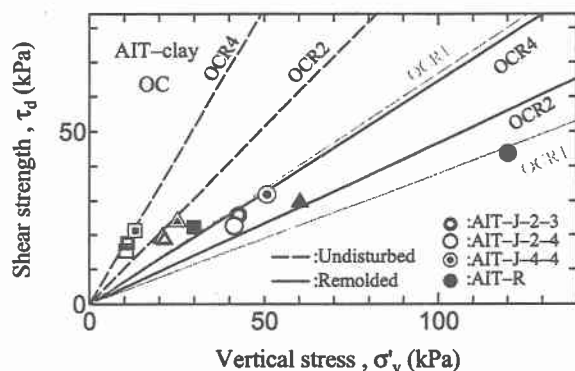


図 12 $\tau_d \sim \sigma'_v$ 関係 (過圧密)

式 (2), 式 (10) より鉛直応力 σ'_v を消去すると正規圧密におけるせん断弾性係数 G と定圧一面せん断強度 τ_d の関係を式 (17) のように表現可能である。過圧密領域においても同様に式 (6), 式 (15) より σ'_v を消去することにより G は τ_d と OCR の関数として式 (18) のように表現できる。

$$G = \left\{ \tau_d / (\tan \phi'_e + m_p) \right\}_v^{\lambda} \cdot n_G \quad (17)$$

$$G = \left\{ \tau_d / (\tan \phi'_e + m_p \cdot OCR^{\Lambda_p}) \right\}_v^{\lambda} \cdot n_G \cdot OCR^{\psi} \quad (18)$$

図 13, 図 14 は正規圧密, 過圧密領域各々に式 (17), 式 (18) を適用して得られた計算値と実験値を比較したものであり再構成, 不攪乱試料ともに計算値は実験結果の傾向をよく表している。

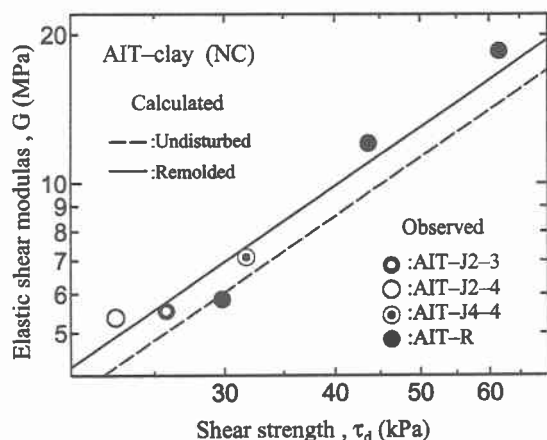


図 13 $\ln \tau_d \sim \ln G$ 関係 (正規圧密)

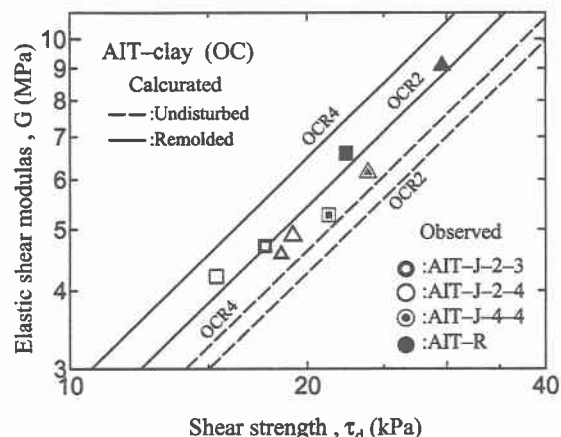


図 14 $\ln \tau_d \sim \ln G$ 関係 (過圧密)

4. まとめ

- 1) 不攪乱試料, 再構成試料に関わらず (すなわち年代効果の有無に関わらず) 粘土の有効せん断抵抗角 ϕ'_e は一定であり, 有効粘着力係数 μ の差が構造の発達などによる年代効果の影響であると考えられる。
- 2) 同一の鉛直応力, 過圧密比におけるせん断剛性率 G の値は再構成試料に比べて不攪乱試料の方が大きな値を示す。
- 3) 定圧一面せん断強度 τ_d と鉛直応力 σ'_v の関係は ϕ'_e , μ を用いて応力履歴, 年代効果により異なる傾きを持つ直線関係として表現可能であり, 同一の過圧密比において不攪乱試料の傾きは再構成試料の傾きより大きな値を示す。
- 4) せん断剛性率 G は定圧一面せん断強度 τ_d の関数として表現可能である。

参考文献

- 1) 荻野俊寛, 三田地利之, 澁谷啓, 池亀泰彦: ベンダーエレメントを組み込んだ一面せん断試験装置による粘性
- 2) 土の変形・強度特性の評価, 地盤工学会北海道支部技術報告集, pp.1-10, 1999.
- 3) Hvorslev, M. J. : Physical components of the shear strength of saturated clays, Proc. ASCE Research Conf. On Shear Strength of Cohesive Soils, pp. 169-273, 1960.
- 4) 荻野俊寛, 三田地利之, 澁谷啓, 及川洋: 圧密定体積一面せん断試験による粘性土の変形・強度特性, 土木学会論文集, No.673/III-54, 15-26, 2001.3
- 5) 真田昌慶, 荻野俊寛, 川口貴之, 三田地利之, 澁谷啓: ベンダーエレメント装着型一面せん断試験装置による過圧密粘土の変形・強度特性, 第 35 回地盤工学会研究発表会講演集 pp.309-310, 2001