

乱さない洪積粘土の三軸圧縮試験におけるベディングエラーの評価

Evaluation of bedding error in triaxial compression test on Pleistocene clay

北海道大学大学院工学研究科 ○ 学生会員 李 徳建 (Dejian LI)
 北海道大学大学院工学研究科 正 会 員 澁谷 啓 (Satoru SHIBUYA)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三田地利之 (Toshiyuki MITACHI)

1. はじめに

三軸試験におけるベディングエラーとは、成型時に形成された供試体端面のゆるみ層の存在および供試体端面とキャップおよびペDESTAL面との平行性・平滑性の欠如が理由で生じる「キャップや載荷ピストンの動きから求めた軸ひずみ」に含まれる測定誤差を言う¹⁾。一般的に、自然粘土の再構成試料や沖積粘土試料を用いた三軸圧縮試験において、供試体の圧密中の軸ひずみが1%以上になると、0.001%程度のひずみレベルにおいても、ベディングエラーの影響は無視できることが知られている²⁾。一方、軟岩や硬質粘土等の硬質地盤材料を用いた場合、とりわけ、軸ひずみが1%未満では、かなりのベディングエラーが観測されている¹⁾。

「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法」³⁾では、ベディングエラーの影響を含まない軸ひずみを0.001%程度以下の精度で測定することを要求している。具体的には、「供試体上下端とキャップ・ペDESTALとのなじみが不完全なことや、ろ紙などの供試体上下端付近のゆるみによる軸変形の測定誤差が5%以上であると予想される場合、供試体の軸変形量を適切な方法で供試体の側面で測定する」と規定されている。その場合には、適切な局部軸変形測定方法を採用する必要があると考えられる。

三軸試験における微小ひずみの測定方法はターゲットと測定機器との接触の有無によって接触型と非接触型に分けられる⁴⁾。接触型では、①LVDT(Linear-variable Differential Transducers)を用いた一連の方法(例えば、Brown et al. 1974⁵⁾, Costa-Filho 1985⁶⁾)、②Jardine ら⁷⁾が硬質粘土(ロンドン粘土)の微小ひずみの変形の測定のために再開発した Electrolevel Inclinator に代表される傾斜計(Inclinometer)を用いる方法、③Clayton ら⁸⁾のホール効果(Hall Effect)ゲージによるもの、④後藤ら⁹⁾の LDT(Local Deformation Transducer)による方法などがあげられる。また、非接触型には、⑤ギャップセンサー(Proximity Transducer)を用いた方法¹⁰⁾がよく用いられる。

本研究では、ターゲット(Target)直接挿入方法¹¹⁾を活用して、新たな局部軸変形測定システム(図-1 参照)を開発し、比較的硬質な洪積粘土三軸供試体のベディングエラーを評価した。

2. 軸変形の測定と実験方法

実験の実施にあたって、とりわけ、乱さない洪積粘土供試体で圧密時の累積軸ひずみが1%未満であるような場合には、ベディングエラーの影響が無視できないことが予想

された²⁾。したがって、図-1に示すようなターゲット直接挿入法を適用した局所軸変形測定システムを利用した。本システムでは、ステンレス製ターゲット(直径 25mm, 厚さ 1mm の円盤)に取り付けられた針を供試体の中に水平方向に直接に挿入し、非接触型変位計(PROXIMETER)を利用して、供試体側面上の2点間の軸変形量を直接に測定した。一方、供試体の全体の軸変形量の測定には、セル外部に設置した駆動モーターの回転数から算定した値を用いた。ただし、本装置では高剛性ロードセルを用いているため、微小ひずみにおけるロードセルの圧縮量は無視できる程小さい。本論文では、局部軸変形測定システムおよび載荷軸の移動量による軸変形の測定値をそれぞれ“Local”と“Overall”と表記する。両者の測定値の差がベディングエラーによるものと考えられる。

また、本研究室で開発された自動収録システム¹²⁾を用いて、ベンダー要素によるせん断弾性波速度を適宜測定した。なお、円柱供試体(D=50mm, H=100mm)の端面にろ紙を設置せず、ろ紙は側面に短冊状に配置した。

一連の実験には、大阪湾で採取した自然粘土の再構成試料{O12(R)}および自然粘土不攪乱試料(沖積粘土: O13, 洪積粘土: O12, O11, O10, O9)¹³⁾を用いた。なお、局部軸変形測定システムの距離(初期値)は60mmとした。

3. 考察

図-2は乱さない洪積粘土試料 O12 および O9 をそれぞれ原位置の有効土被り圧まで、 $\sigma'_v/\sigma'_a = 0.5$ 一定で再圧縮時の累積軸ひずみと平均有効応力の関係である。図に示すスケールでは、再構成試料と同様に、比較的軟らかい

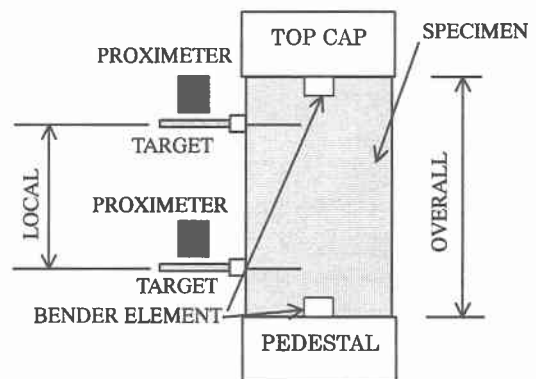


図-1 局所軸変形とその測定方法

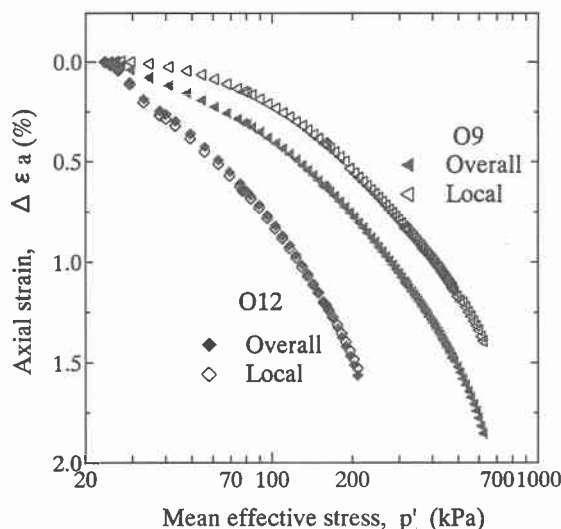


図-2 圧密時の軸ひずみ

O12 試料の場合には、両測定値に差が見られなかった。一方、より硬いO9 試料の場合には、両者の応力～ひずみ関係が明らかに違っており、 p' によらず $\Delta \varepsilon_a(\text{Overall}) > \Delta \varepsilon_a(\text{Local})$ となっている。

図-3 は非排水圧縮せん断時の偏差応力 $q \sim \varepsilon_a$ 軸ひずみ関係である。図に示すひずみのスケールでは、再構成試料(O12R)および乱さない試料でも (O12, O9) において、 $\varepsilon_a(\text{Local})$ と $\varepsilon_a(\text{Overall})$ の間に有意な差が見られなかった。微小ひずみ振幅による繰返し载荷中およびせん断開始直後の微小ひずみ範囲の挙動を見てみると、再構成試料 O12(R) には顕著な差が見られなかった。その一方、乱さない試料にはいずれも供試体全体の軸ひずみ(overall)より小さな局部軸ひずみ(local)を測定された (図-4 参照)。

圧密中、適宜微小な軸ひずみ振幅による繰返し载荷を与え、微小ひずみ範囲における偏差応力～軸ひずみの関係から非排水等価弾性ヤング係数 E_{eq} を算出した。また、せん断開始時の微小ひずみ範囲における偏差応力～軸ひずみの関係から非排水弾性ヤング係数 E_{max} を算出した。これらの E_{eq} および E_{max} の測定値に着目すると、再構成試料では、測定方法に関係なく、ほぼ同じ弾性ヤング係数 E が得られた(O9,O12)。それに対して、洪積粘土の乱さない試料において、計測方法によってそれぞれ異なる値が得られている。すなわち、 $\varepsilon_a(\text{Local})$ から算定した $E_{max}(\text{Local})$ の方が $E_{max}(\text{Overall})$ よりも大きな値を示している。これはベディングエラーの影響であろう。(図-4 参照)。

本研究では、せん断弾性波による G_{BE} と応力～ひずみ関係から求めた同様な微小ひずみレベルでの E_{eq} を比較する目的で、土供試体を等方弾性体ならびに非排水状態でのポアソン比を 0.5 と仮定し、室内供試体の等価せん断弾性係数 $G_{eq} = E_{eq}/3$ を算定している。図-5, 6, 7 で、再構成試料 O12(R) と乱さない試料 O12, O9 の圧密時のせん断弾性係数 G を比較した。図から分かるように、再構成試料 O12(R) には、測定方法に関係なく、ほぼ同じせん断弾性係数 G が得られた。一方、乱さない洪積粘土試料の場合には、 $G_{eq}(\text{overall})$ より $G_{eq}(\text{local})$ のほうが大きかった。また、 $G_{eq}(\text{overall})$ と $G_{eq}(\text{local})$ 両方は圧密の初期段階にはベン

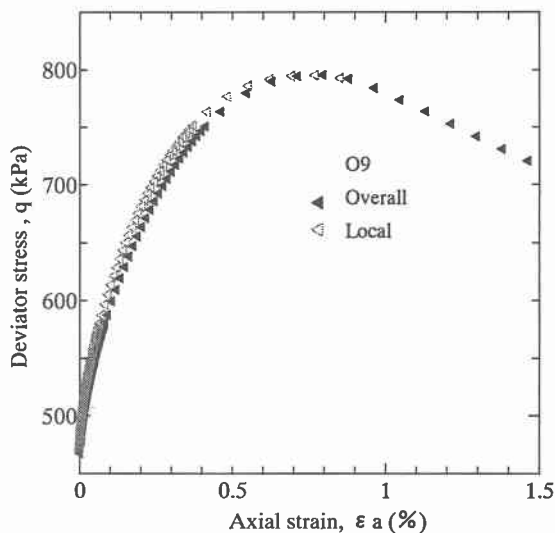
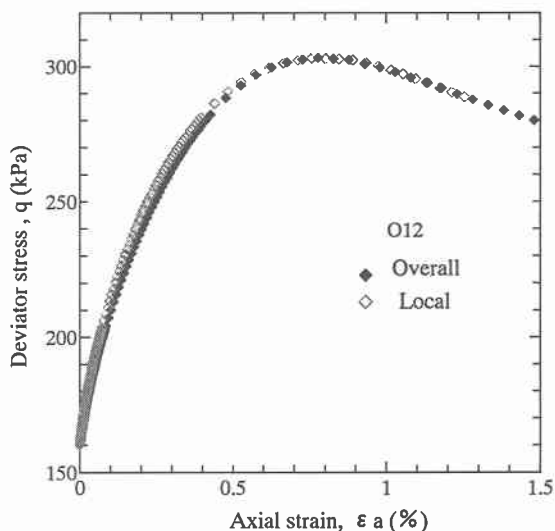
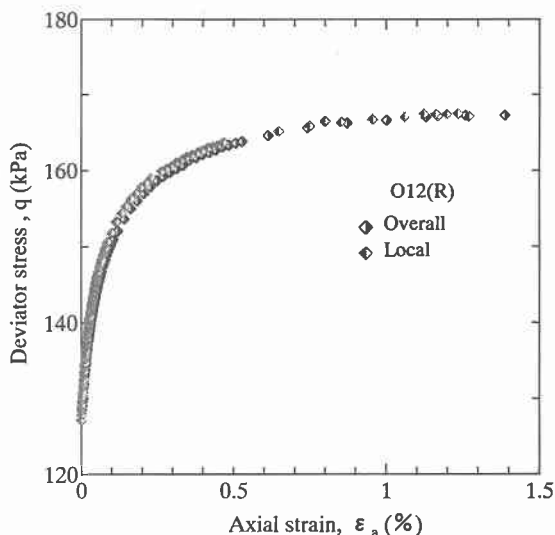
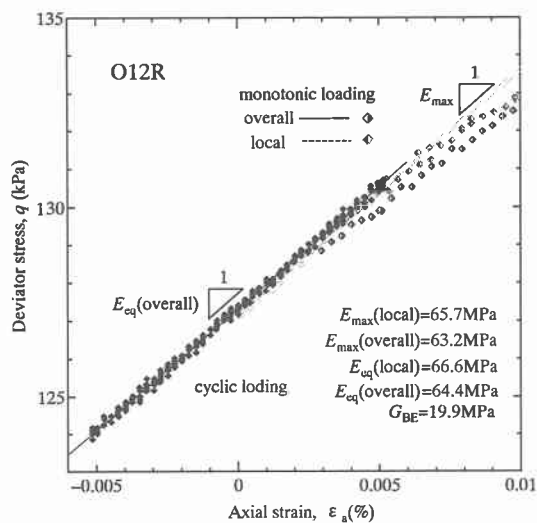


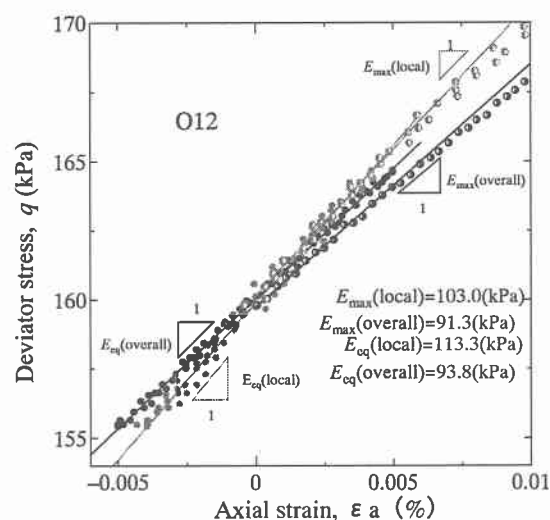
図-3 せん断時の偏差応力～軸ひずみ関係

ダーによる測定値 G_{BE} より明らかに小さいが、原地盤の有効土被り圧まで再圧縮すると三者の値がかなり近づいた。

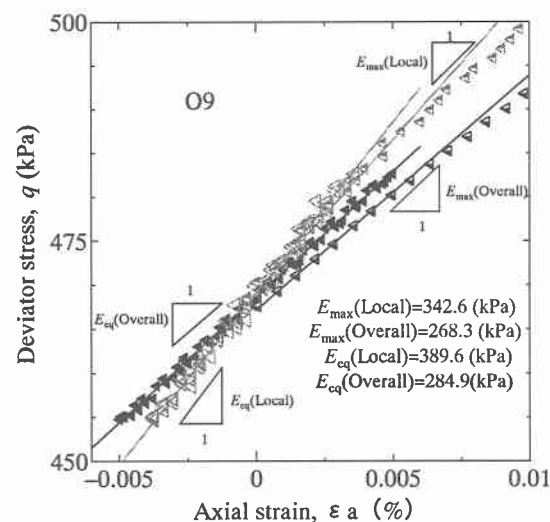
図-8 には大阪湾粘土の再構成試料と乱さない試料のせん断弾性係数の測定(あるいは推定)値をまとめて示している。図からわかるように、洪積粘土の乱さない試料を



a) 再構成試料



b) 乱さない試料(O12)



c) 乱さない試料(O9)

図-4 大阪湾土粘土の弾性ヤング係数の測定例

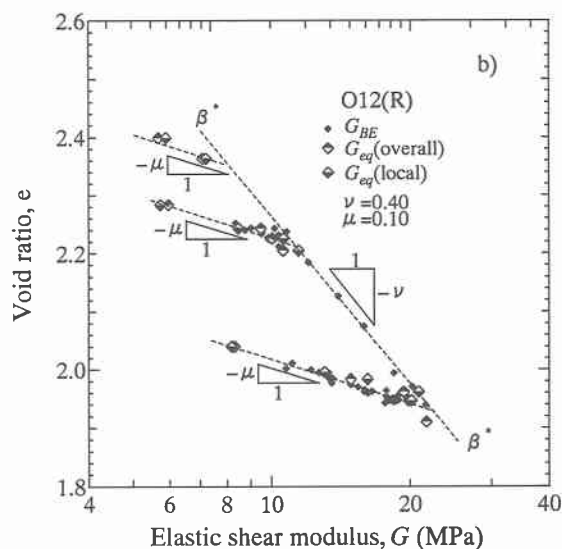
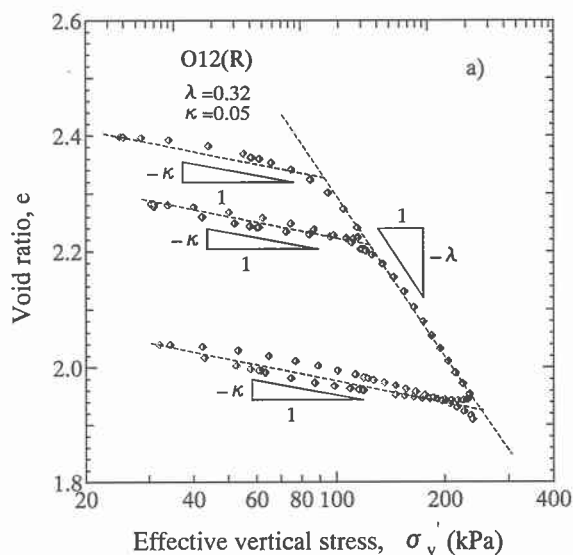


図-5 再構成試料を用いた K_0 状態における圧縮・膨張試験結果の例

用いた場合には圧密時の累積軸ひずみが 2% までは測定方法による差が顕著であった。全体の傾向から見ると、ベディングエラーの低減化による影響により、 $\Delta \varepsilon_a < 3\%$ になると、 $G_{BE}/G_{eq}(\text{Local})$ の比も 1.05 以内になる。

4. まとめ

本研究で開発したシステムで一連の三軸圧縮試験を行った。①本システムの適用することによって、軸変形をより正確に測定できた。②比較的硬い洪積粘土試料の微小ひずみでの剛性を求める時、 $\Delta \varepsilon_a < 3\%$ では局部軸変形を測定する必要があることが分かった。本研究で開発された局部軸変形測定方法は供試体へのセッティングが簡単であり、硬質洪積自然粘土試料への適用が確認された。

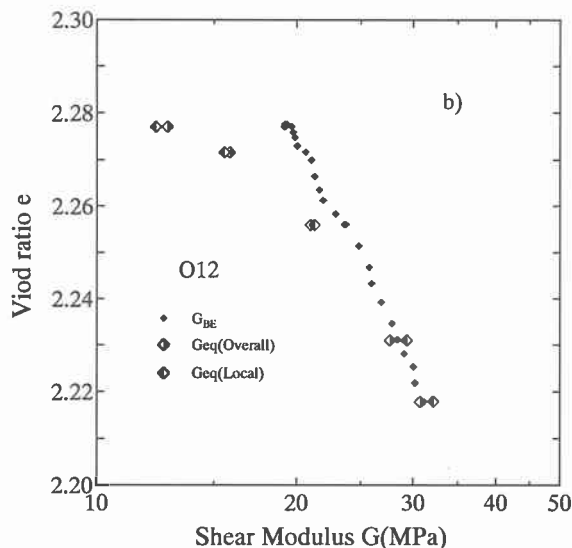
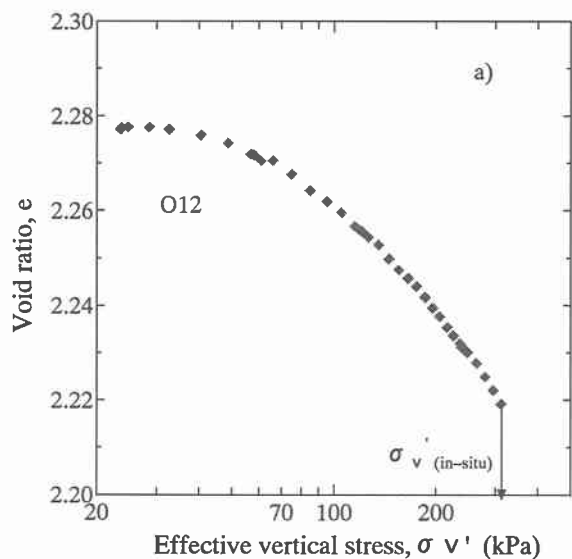


図-6 乱さない試料の再圧縮時の挙動の例 (O12)

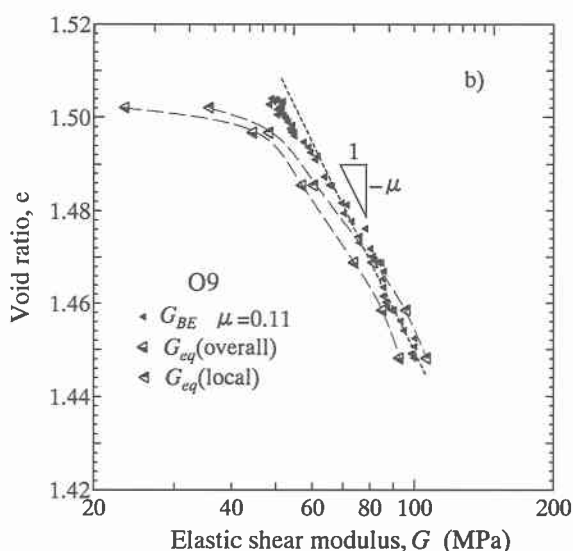
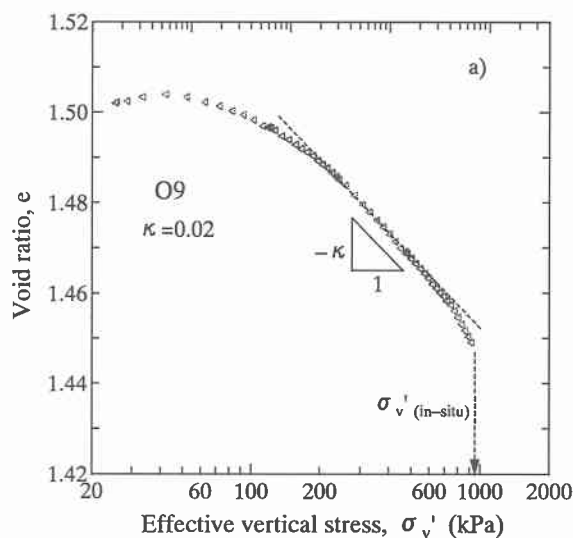


図-7 乱さない試料の再圧縮時の挙動の例 (O9)

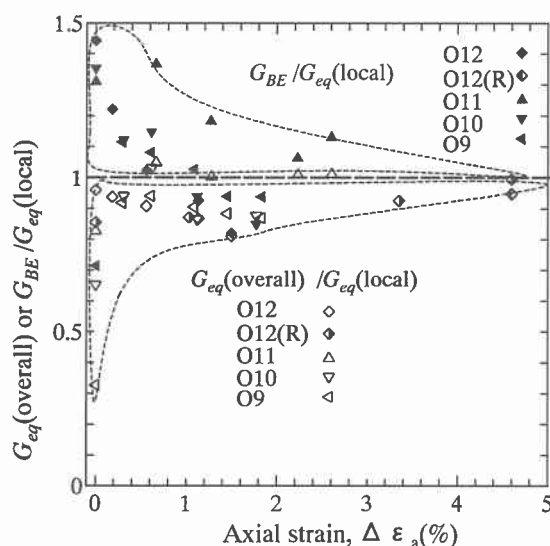


図-8 測定値の比較

謝辞：局部軸変形測定システムの開発に当たって、川口貴之氏（函館高専）から大変有益な助言を得た、ここに記し

て感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 龍岡文夫・木幡行宏(1994)：ベディングエラー，土と基礎，Vol. 42, No. 9, pp53-55.
- 2) Tatsuoaka, F. and Kohata, Y.: Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications, Prefailure deformation of geomaterials, Vol.2, pp.947-1063, 1995.
- 3) 地盤工学会：地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法 (JGS 0542-2000), 土質試験方法と解説 第一回改定版, 第7編, 第3章, pp.658-678, 2000.
- 4) Scholey, G. K., Frost, J. D., Lo Presti, D. C. F., and Jamiolkowski, M.: A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 18, No. 2, pp. 191-200, 1997.
- 5) Brown, S. F. and Snaith, M. S.: The Measurement of recoverable and irrecoverable deformation in the repeated load triaxial test, *Geotechnique*, Vol.24, No.2, pp.255-259, 1974.
- 6) Costa-Filho, L. De. M.: Measurement of axial strains in Triaxial test on London clay, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.8, No.1, pp.3-13, 1985.
- 7) Jardine, R. J., Symes, M. J., and Burland, I. B.: The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus, *Geotechnique*, Vol.34, No.3, pp.323-340, 1984.
- 8) Clayton, C. R. I. and Khatatuli, S. A.: A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens, *Geotechnique*, Vol.36, No.4, pp.593-597, 1986.
- 9) Goto, S., Tatsuoaka, F., Shibuya, S., Kim, Y.-S. and Sato, T.: A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, *Soils and foundations*, Vol.31, No.1, pp.169-180, 1991.
- 10) Hird, C. C. and Yung, P. C. Y.: The use of proximity transducer for local strain measurements in triaxial tests, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.12, No.4, pp.292-296, 1989.
- 11) Presti D. C. F. L., Puci I., Pallara O., Maniscalco R. and Pedroni S.: Experimental laboratory determination of the steady state of sands, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.1, pp.113-122, 2000.
- 12) 川口貴之・三田地利之・渋谷 啓・佐野信房：室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数Gの評価，土木学会論文集，No.694/III-57, pp.195-207, 2001.
- 13) 李 徳建・渋谷 啓・三田地利之：大阪湾海底粘土の力学特性と年代効果，土木学会論文集投稿中，2002.