

(49) 堆積軟岩の異方性の検討

Examining Anisotropy of Sedimentary Softrock

王 林*・龍岡文夫**・越智健三***・壺内達也***・木幡行弘****

L. WANG, F. TATSUOKA, K. OCHI, T. TSUBOUCHI, Y. KOHATA

Inherent anisotropy of the stiffness and strength of an about 2 million years old sedimentary soft mudstone, which is nearly unweathered and tectonically only slightly disturbed, was investigated. Triaxial compression tests were performed by using core samples retrieved by block sampling. The samples with the axis being in certain horizontal directions in-situ were slightly stronger and stiffer than those with the axis being vertical in-situ, but the difference is not larger than 30 %. So, large anisotropy of stiffness and strength was not found at this site.

1. まえがき

近年、堆積軟岩上あるいは内部に大型重要構造物を建設する例や、大規模・大深度掘削する例が増えている。その際、軟岩の詳細な変形・強度特性が必要になる。特に変形・応力解析には、0.1%以下の小さなひずみでの変形特性が重要な設計パラメータとなる。

通常の地盤調査では、ロータリーコアチューブサンプリングにより試料を採取するので、三軸圧縮試験の最大主応力 σ_1 の方向が原位置での鉛直方向である試料しか得ることができない。しかし、地盤は異方的な変形・強度特性を持っている可能性がある。

今回、神奈川県相模原市での堆積軟岩地盤内に掘削した立坑内から深度 50 m において掘削したトンネル内から、空間的に広い範囲の角度から乱さない試料を採取した。それを用いて精密な三軸試験を行い、0.001%以下から 1%程度までの連続した軸ひずみでの変形特性と圧縮強度を測定した。その結果、全般的に原位置での水平面内で南北方向と南西～北東の方向の間で圧縮した時の弾性ヤング率、ピーク強度がともに他方向に圧縮した時よりも 30%程度大きくなることが分かった。

2. 試料及び試験方法

首都圏西部地区に卓越する上総層群の堆積軟岩の物性の研究のために、神奈川県相模原市郊外の田名地区に地下 50 m の実験空洞を試験施工した。図 1 (a) に実験空洞と地質構成を示す。上総層群の泥岩は、未固結な砂層やスコリア層の薄層を含んでいて、堆積時期は、第三紀(鮮新紀)～第四紀(洪積紀)前期と考えられている。深度 50 m 位置では第三紀末期頃(166 万年前)と推定される。

* 学会員、東京大学大学院, ** 正会員、東京大学教授, *** 正会員、東急建設(株)技術研究所,
**** 正会員、J R 鉄道総合技術研究所

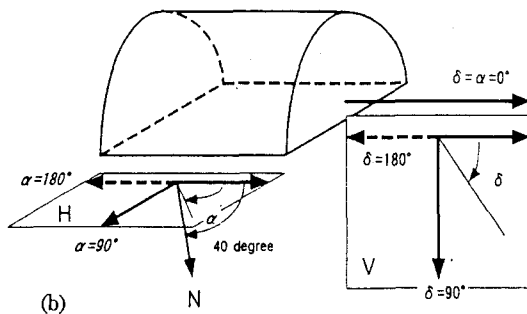
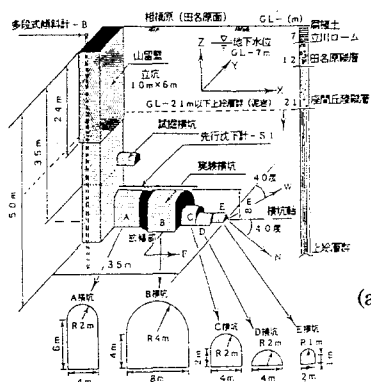


図-1 相模原現場の概略図

堆積軟岩には地殻運動・過圧密履歴に起因する異方性がありうるが^{1)・2)}、初期異方性が大きくなると堆積軟岩の変形・強度特性の設計値の設定は非常に複雑になる。一方、試料がロータリーコアサンプリングにより得られたものである場合は、コア試料に水平方向のクラックが入り、乱れやすいので³⁾、人為的に異方性が発生する可能性がある。そこで、深度 50 m の実験空洞内から掘削直後にブロックサンプリング(Block Sampling, BS)あるいはダイヤモンドコアバレルを用いた地盤からの直接コアリング(Direct Coring, DC)によって乱れの少ない試料を採取した。

軸の三つの直交方向に加えて、図 1 (b) に示すように、サンプリングは水平断面と鉛直断面で、 $\alpha=0^\circ \sim 180^\circ$ 、 $\delta=0^\circ \sim 180^\circ$ と多くの角度で行った。 $\delta=0^\circ$ で、 $\alpha=40^\circ$ が南北方向、 $\alpha=130^\circ$ が東西方向である。

三軸供試体は、5 cm (直径) × 15 cm (高さ) である。原位置有効上載圧 (4.8 kgf/cm²) で等方圧密後、排水、あるいは非排水状態で三軸圧縮した。二つの局所変形測定装置 LDT (Local Deformation Transducers) を用いて供試体側面で軸ひずみを精密的に測定した。載荷ひずみ速度は、0.01%/min. とした。

3. 試験結果について

(3-1) 応力ひずみ関係：図2は、CD三軸圧縮試験の応力ひずみ関係の典型例である。LDT測定した軸ひずみに比べて、載荷ピストンの軸変位から求めた軸ひずみ(External)は、大きなベディングエラ

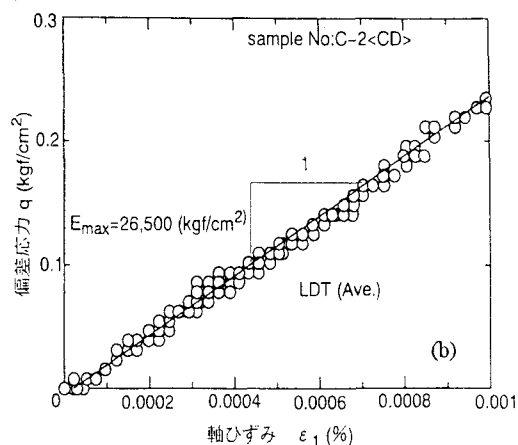
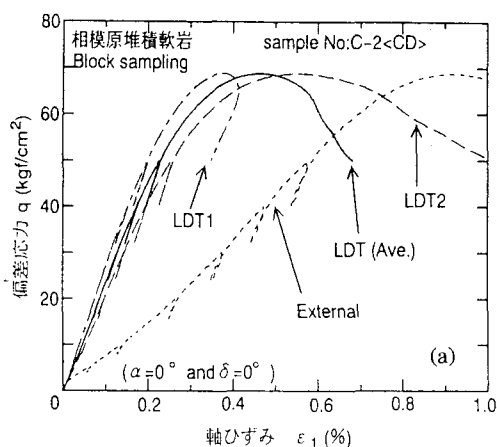


図-2 三軸試験の応力・ひずみ関係

ーを含んでいる。また、0.005%程度以下の軸ひずみではきわめて高い線型性を示している。図2(b)より0.001%軸ひずみレベルで初期弾性ヤング率 $E_{\max}=26500$ (kgf/cm²)が得られる。

(3-2) 変形係数の異方性: 図3(a)に、 $E_{\max}$ と水平断面中のサンプリング角度の関係を、図3(b)に $E_{\max}$ と鉛直断面中のサンプリング角度の関係を示す。非排水三軸試験(CU TC)の $E_{\max}$ は、排水三軸試験(CD TC)の $E_{\max}$ よりやや大きい。この差の原因は、初期弾性変形時には、せん断剛性率は排水条件の差によらないが、非排水条件(CU)でのポアソン比 $\nu_u(=0.42)$ が排水条件(CD)でのポアソン比 $\nu_u(=0.2)$ よりも大きいからと考えられる(Tatsuoka and Kohata, 1995)。排水条件と非排水条件のいずれでも、 $\delta=0^\circ$ で、 $\alpha=45^\circ \sim 90^\circ$ あたりでの $E_{\max}$ 各角度の値に比べてやや大きい傾向がある。しかし、全般的に見れば、 $E_{\max}$ の方向依存性は小さい。図4に、接線ヤング率レベル ($E_{\tan}/E_{\max}$) と偏差応力レベル ($q/q_{\max}$) の関係を示す。黒記号が水平断面で、白記号が鉛直断面での関係である。排水と非排水の条件のいずれでも、異方性がほとんどないと言える。また、排水条件による差も明瞭ではない。

図5、6は、正確な軸ひずみから求めた E_{50} とピーク応力時の軸ひずみ $(\epsilon_1)_f$ である。 E_{50} には若干異方性が見られるが、 $(\epsilon_1)_f$ には異方性はほとんど認められない。なお、 $(\epsilon_1)_f$ は排水条件のときの方が明白に大きい。 $(\epsilon_1)_f$ の値はほとんど0.6%以下であり、 $(\epsilon_1)_{\text{external}}$ から求めた $(\epsilon_1)_f$ の平均値0.9%(CD)、0.75%(CU) よりもはるかに小さい。このことは、地盤変形から

逆算した ϵ_1 と通常の実験方法から求めた $(\epsilon_1)_f$ を比較して地盤内の破壊接近度と推定すると、危険側である。

堆積軟岩では堆積面と直角方向の変形係数の方が平行方向より大きいという報告がある⁷⁾。試験時の σ_1 の方向が堆積面となす角度が 0° と 90° の中間の角度で、最小となるとする報告もある⁴⁾。土岐らが堆積軟岩変形・強度異方性を、鉛直方向と水平面内の直交する2方向(東西方向、南北方向)の計3方向から調べたところ、東西方向の弾性係数は他の方向より40%大きいと認められた⁴⁾。さらに、Chong et al.⁷⁾ の研究によると、堆積軟岩で平均すると水平方向の変形係数が鉛直方向より約85%大きいという報告例もある。これらの報告の結果が異なる原因は、地殻運動によって堆積後の地盤内の応力履歴が非常に複雑になっていることと関係があるのかも知れない。

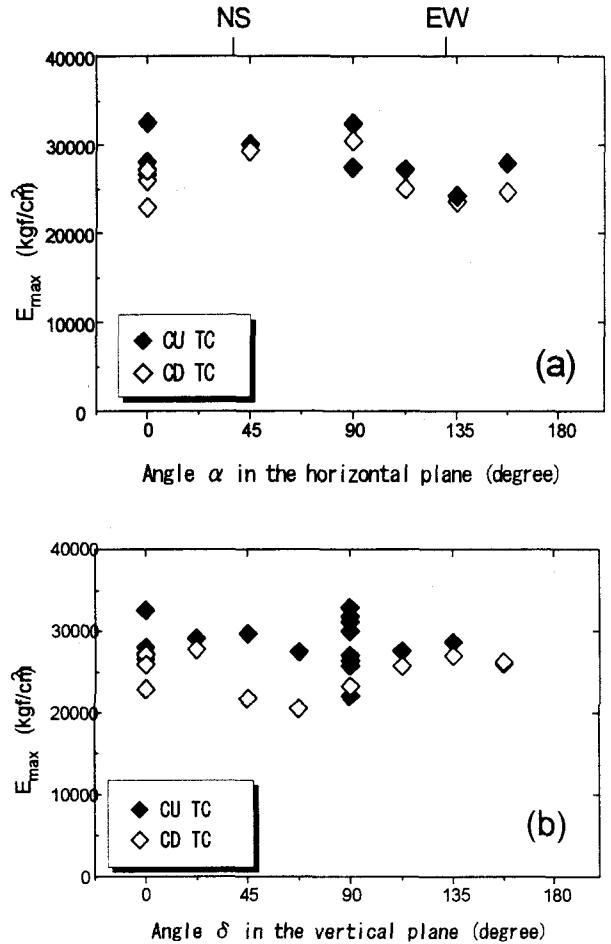


図-3 $E_{\max}$ とサンプリング角度の関係

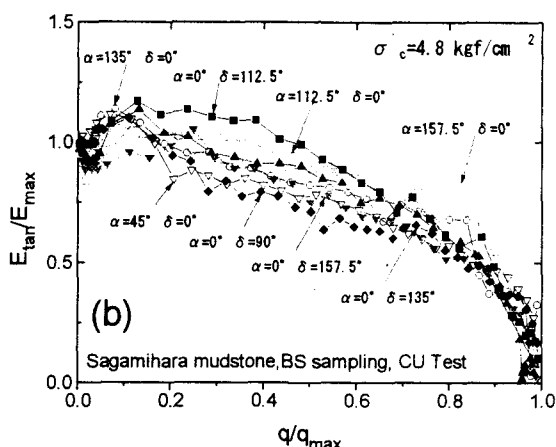
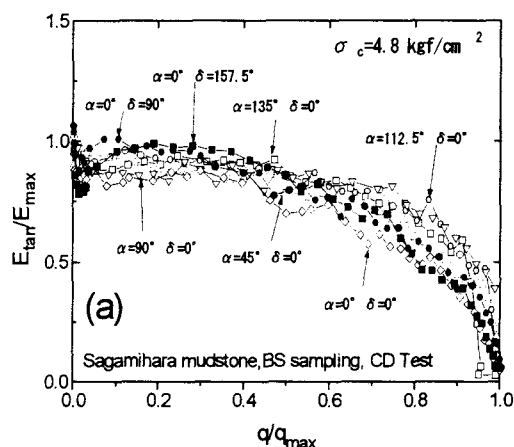


図-4 各角度の接線ヤング率と荷重レベル $q/q_{\max}$ の関係

(3-3) 三軸圧縮強度の異方性：土質材料では、強度が高い方向に剛性も高い。渡辺らの第三期堆積軟岩の異方性の研究では、水平供試体は鉛直供試体に対して、強度で1.6倍、変形係数で2.6倍である⁵⁾。これに対して、堆積軟岩（泥岩）の初期異方性に関する富沢らの調査では、 σ_1 の方向が原位置での鉛直方向に一致する場合の一軸圧縮強度は σ_1 の方向が原位置での水平方向時の約4倍になると報告されている⁶⁾。

図7に、圧縮強度 $q_{\max}$ とサンプリング角度の関係を示す。 $E_{\max}$ の場合と同様に、 $\delta=0^\circ$ で $\alpha=45^\circ \sim 90^\circ$ の間で非排水と排水両試験での $q_{\max}$ は他の方向の値に比べてやや大きい。ただし、この差は大きくて30%である。これも大きな地殻的圧力による履歴存在の原因かもしれない。なお、排水三軸試験(CD TC)の $q_{\max}$ が非排水三軸試験(CU TC)の $q_{\max}$ より大きくなる原因は、非排水三軸試験では載荷ピークまで有効拘束圧が減少するためである。

今回、 $E_{\max}$ と $q_{\max}$ の値が大きかったのは、「三軸試験での σ_1 方向」が「原位置での $\delta=0^\circ$ 、 $\alpha=45^\circ \sim 90^\circ$ の方向」であり、これは「原位置での推定される σ_3 の方向」に近い。原地盤内の主応力の方向はクラックの方向とそれに沿うすべり

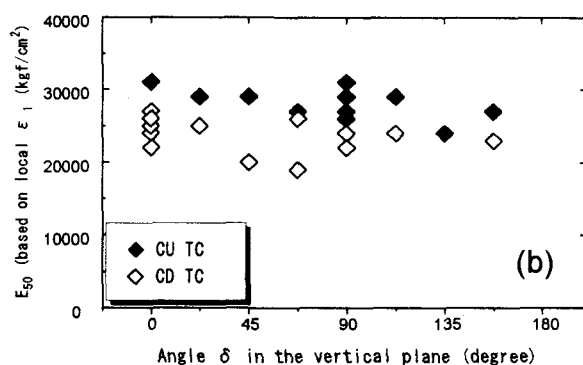
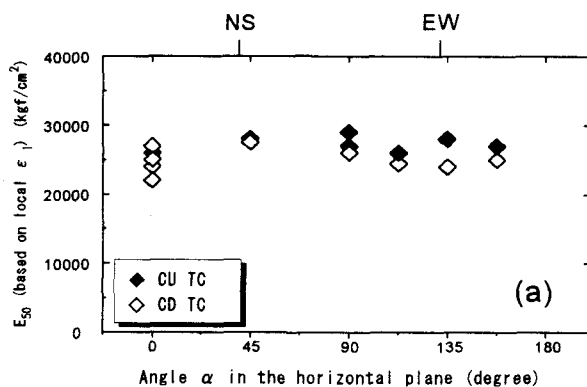


図-5 E_{50} とサンプリング角度の関係

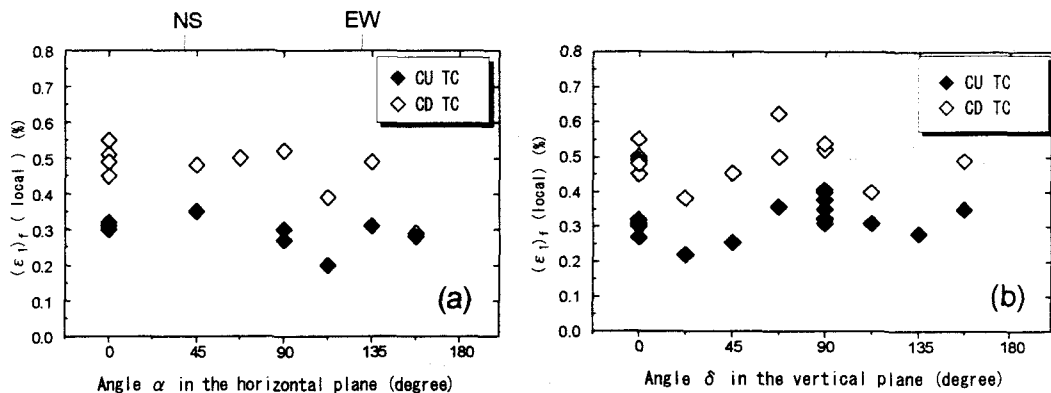


図-6 破壊ひずみ(local)とサンプリング角度の関係

の方向とオーバーコアリング方による地山応力状態の推定に基づく。これらの点の議論は、別途報告したい。

4. あとがき

今回実験を行った堆積軟岩（泥岩）に関して、以下のことが分かった。(1)微小ひずみの弾性係数、ピーク強度以前の変形係数と応力レベルの関係、圧縮強度などに強い初期異方性を認められなかった。大局的に見ると、鉛直試料を用いた変形・強度特性を用いて設計しても、大きな間違いではない。従来、堆積軟岩の異方性が非常に強いという研究報告もあるが、今回の結果はそれとは異なっている。(2)詳細に見ると、圧縮試験での σ_1 の方向が原位置での水平面内で南北方向と南西・北東の間にある供試体の強度・剛性がやや大きい傾向にある。

参考文献

1) Kohata, Y., Wang, L., Tatsuoka, F., Ochi, K., Tsubouchi, T., Inherent and Induced Anisotropy of Sedimentary Softrock, 10th Asian Conference of ISSMFE, Beijing, Aug. 1995. 2) 木幡行宏・龍岡文夫・鈴木正人・土本英徳・壺内達也・越智健三：堆積軟岩（泥岩）の変形・強度特性について、土木学会第49回講演会、平成6年9月。3) 王林・諏訪勝彦・龍岡文夫・

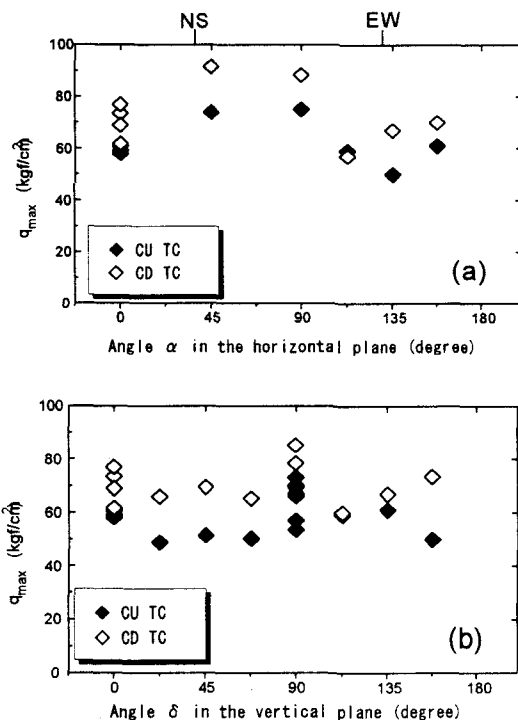


図-7 ピーク強度とサンプリング角度の関係

木幡行宏・越智健三・壺内達也：サンプリング方法による軟岩試料の乱れ、第30回土質工学研究発表会、平成7年6月。4) 土岐祥介・三浦均也・持田文宏：堆積軟岩の変形・強度異方性、第25回土質工学研究発表会、平成2年6月。5) 渡辺浩平・川崎広貴・傳田篤・中沢亨：第三紀堆積泥岩の異方性に関する研究、第24回土質工学研究発表会、平成元年6月。6) 富沢修次・長谷川和夫・池内武文・大西昇：東京連絡橋の基礎地盤となる土丹の物性、土と基礎、1994.6。7) Chong, K.P. (1984), Mechanical Characterization of Oil Shale, Mechanics of Oil Shale, Elsevier, pp.165-288.