

III-332

堆積軟岩（泥岩）の変形・強度特性の異方性について

東京大学生産技術研究所 正会員 木幡行宏・龍岡文夫
川崎製鉄(株) 鈴木正人
大日本土木(株) 土本英徳
東急建設(株)技術研究所 正会員 壺内達也・越智健三

はじめに：砂・礫の変形・強度特性には三種類の異方性がある。① 試料作成時、堆積時に形成される構造異方性に起因する初期異方性：空中落下法で作成された供試体では、等方圧密後のせん断時での0.001%程度以下の微小弾性ひずみに対するヤング率の異方性は意外に非常に小さい^{1, 2)}。しかし、塑性ひずみと圧縮強度は鉛直方向から圧縮した時が最も大きく、明確な異方性がある。礫でも同様である³⁾。② 異方応力状態に起因する異方性：ある方向の弾性直ひずみに対するヤング率はその方向の直応力だけの関数なので、異方応力状態では必然的に異方弾性体になる²⁾。③ 塑性せん断変形に起因する誘導異方性：ある方向の塑性せん断変形により弾性・塑性変形特性は異方的になる（逆方向のせん断に対する剛性は低下する）。しかし、圧縮強度に対する誘導異方性の影響は少ない。

堆積軟岩に対する上記のような系統的研究は非常に少ないようである。地質年代が150万年程度の堆積軟岩（泥岩）の初期異方性に関する富沢らの調査⁴⁾によると、 σ_1 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 方向が原位置での水平方向の時の約4倍もあり、CU・CD三軸圧縮試験では圧密応力が大きくなるほど異方性が減少するが、 σ_3 が15kgf/cm²にならないと異方性が解消しない。地殻運動・過圧密履歴に起因する異方性はありうるが、初期異方性が常にこのように大きいと堆積軟岩の変形・強度特性の設計値の設定は非常に複雑になる。このような大きな異方性は、試料がロータリーコアサンプリングにより得られたためで、この場合に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⁵⁾、人為的に異方的になった要因が無視できないと考えられる。

一方、セメンテーションの強い堆積軟岩（泥岩）では弾性ひずみに対するヤング率に圧密応力依存性が少ないので、異方応力状態に起因する異方性は少ないことが予想される。

今回相模原市の実験空洞内（図1）で、ブロックサンプリングによって乱れの少ない試料を

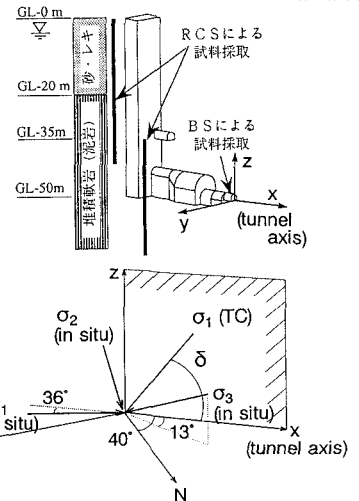


図1 試料採取地

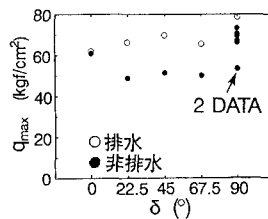


図2 q_{max} ～角度 δ 関係

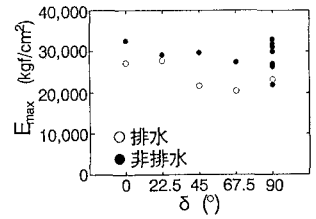


図3 E_{max} ～角度 δ 関係

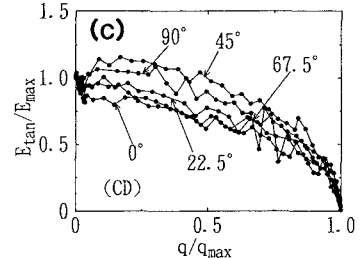
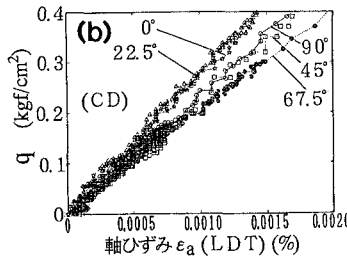
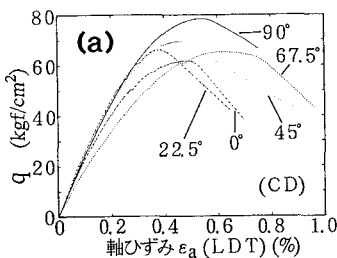


図4 CD三軸圧縮試験結果

採取して、上記二点を CU・CD 三軸圧縮試験により調べた。

試料： トンネル主軸を含む鉛直面内で、試料の長手軸がトンネル主軸方向（水平の x 方向）からなす角度 δ が 90° （鉛直方向）、 67.5° 、 45° 、 22.5° 、 0° （水平方向）となるように、試料を diamond core barrel を用いて採取した。初期地圧測定によると、原地盤内の σ_1 方向はほぼ水平面内にありトンネル主軸方向から 36° ずれている⁶⁾。直径 5cm、高さ 15cm の試料を原位置有効上載圧 (4.8 kgf/cm^2) で等方圧密してから、排水・非排水三軸圧縮試験を行った。軸ひずみは、局所変形測定装置 (Local Deformation Transducer, LDT) で測定した。

初期異方性： 図 2、3 に圧縮強度 q_{max} 及び「0.001% 以下の弾性ひずみに対する初期ヤング率 E_{max} 」と角度 δ の関係を示す。図 4 に、CD 三軸圧縮試験での応力・ひずみ関係の比較を示す (CU 三軸圧縮試験の結果は龍岡ら⁷⁾ の図 3 を参照)。これらの図で初期異方性は特に認められない。

異方圧密応力状態の影響： 図 5 に示す応力経路に沿って、1 から 25 までの応力点で 0.001% 程度の微小な軸ひずみ片振幅で非排水繰返し載荷を 0.1Hz で 11 回行った。図 6 に繰返し載荷 10 回目の E_{eq} ～ 軸応力 σ_a の関係を示す (E_{eq} はピーク/ピーク間の割線ヤング率であるが、ここでは E_{max} に等価である)。詳細に検討すると (図 6 a)、 E_{eq} は σ_a の増加に従って若干増加する (平均主応力の関数ではない)。しかし図 6 b から分かるように、その変化率は小さい。また、履歴減衰係数 h は主応力比 σ_a/σ_r の増加に伴って増加する傾向にある (図 7)。 h は σ_a/σ_r の関数ではない。これは、 σ_a/σ_r が大きいほど試料内部でマイクロクラックが生じているためであろうか。

結論： 今回実験を行った堆積軟岩 (泥岩) に関しては、以下のことが分かった。(1) 微小ひずみレベルでの弾性変形、ピーク以前の応力・ひずみ関係、圧縮強度に明確な初期異方性は認められなかった。従って、従来通り $\delta = 90^\circ$ の試料を用いた室内試験や $\delta = 0^\circ$ での変形・強度特性を測定する孔内載荷試験の結果から設計値を設定する際に、特に異方性を考慮する必要はない。(2) 圧縮強度の 10% 程度までのせん断レベル内で、初期弾性ヤング率 E_{max} は軸応力 σ_a の増加に伴って若干増加するがその増加率は小さく、異方応力状態及び圧力レベルの影響は小さい。(3) 微小ひずみレベルでの履歴減衰係数には、異方応力状態の影響が見られた。

参考文献： 1) Park, C. S. and Tatsuoka, F.: Anisotropic strength and deformation of sands in plane strain compression, ICSMFE, Vol. 1, pp. 1-4, 1994. 2) Hoque, E., Kamegai, Y., Siddiquee, M. S. A., Kohata, Y. and Tatsuoka, F.: Cross-anisotropic elasticity of sands by large triaxial tests measuring local strains, 土質工学会, 1994. 3) 董軍・中村和之・佐藤剛司・龍岡文夫：大型平面ひずみ圧縮試験による粗粒材の変形・強度特性の異方性、土質工学会, 1994. 4) 富沢次・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, 35-3, pp. 63-68, 1987. 5) 龍岡文夫・木幡行宏：硬質地盤材料のサンプリングによる試料の乱れについて、土質工学会, 1994. 6) 越智健三・壺内達也・龍岡文夫：空洞掘削と実験調査および線形逆解析による堆積軟岩の変形特性、土木学会論文集, No. 487/Ⅲ-26, pp. 177-186, 1994. 7) 龍岡文夫・木幡行宏・壺内達也・越智健三・土本英徳・村田健司：セメンテーションのある硬質地盤材料のコアサンプリングによる試料の乱れ、土質工学会, 1994.

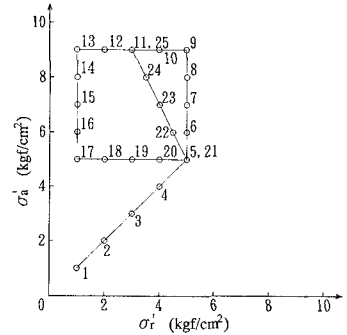


図 5 応力経路と繰返し三軸試験実施応力点

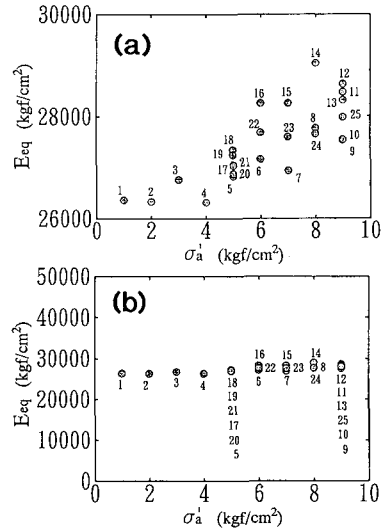


図 6 E_{max} ～ 軸応力 σ_a 関係：
a) 小スケール、
b) 大スケール

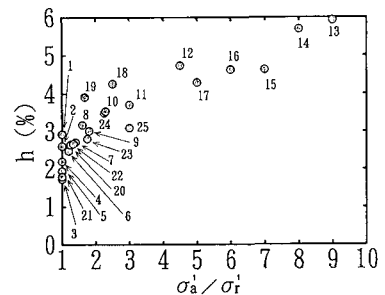


図 7 履歴減衰係数 h
～ σ_a/σ_r 関係