

島尻層泥岩地盤の工学的特性

Engineering Properties of Shimajiri Mudstone Ground

新城 俊也 (しんじょう としや)

琉球大学教授 農学部生産環境学科

小宮 康明 (こみや やすあき)

琉球大学農学部生産環境学科

1. はじめに

島尻層群は、泥岩と砂岩とが互層をなす新第三紀の地層であり、沖縄本島中南部地域の基盤を形成している。最近、那覇市を中心とした都心部の過密化と市街地の拡大とに伴ってスペースを確保する必要性から、地下空間を有効に利用することに関心が高まっている。島尻層においては道路、下水道、送電線敷設用等のトンネル開削による地下利用がなされ、また共同溝、地下駐車場など地下空間を立体的に利用する試みが計画されている。島尻泥岩層を不透水層とする琉球石灰岩地帯での地下ダム建設も地下空間の利用の一つに挙げられる。これらの開削は10～20mの比較的浅い深度を対象としたものであるが、大深度の地下空間の利用として、地下ダムと併設して不透水層基盤を形成している泥岩層内に地下備蓄方式の貯水槽を開削することや、数百mの深度に位置し泥岩層に挟まれている砂岩層を利用した圧縮空気貯蔵ガスタービン発電などが考えられる。これらについては水資源開発、電力供給の観点から将来に向けてその必要性和技術上の問題を検討する必要がある。

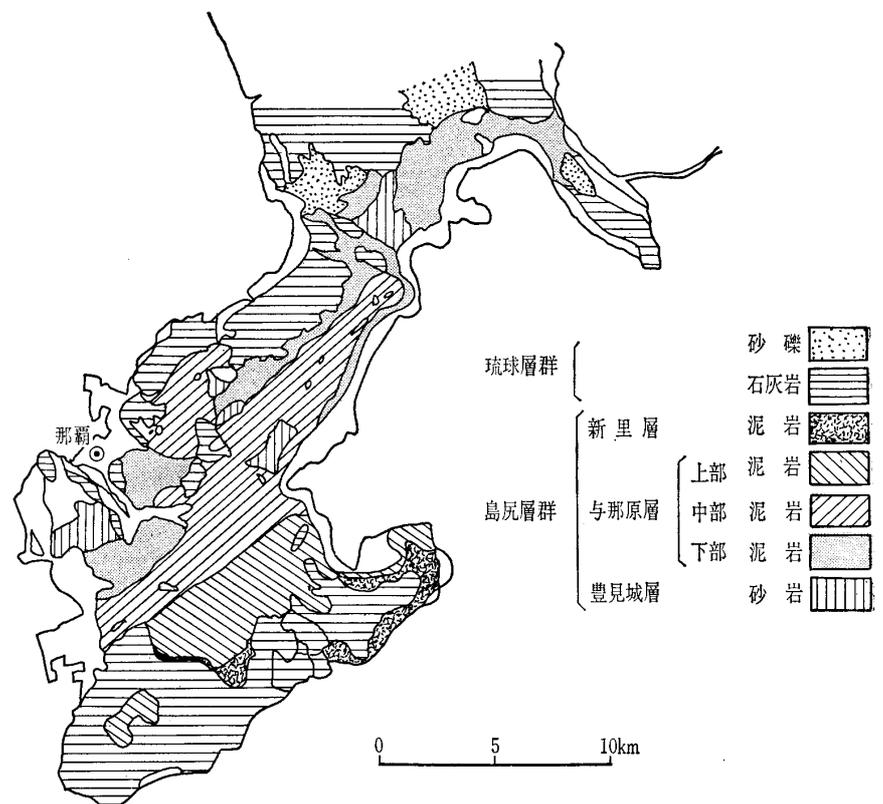
ところで、島尻層は N 値50以上の良好な支持層であるため、地盤調査は支持層確認のための標準貫入試験が主に実施されている。しかし、強度、変形などの力学特性に関する深度ごとの調査例は少ない。

送電線敷設用トンネル工事に伴う立孔（直径5.5m、深さ27m）の開

削に際し、泥岩のブロックサンプリングを深さごとに行った。本報告はこれらの泥岩について物理試験、力学試験を実施し、深度方向に力学特性を検討したものである。

2. 島尻層群の地質概要^{1),2)}

図-1に沖縄本島中南部地域の地質分布図を示す。島尻層群は、その層厚が2000m以上に及び、下位から豊見城層、与那原層、新里層に細分されている。豊見城層は層厚約1100mの砂岩と泥岩の互層からなり、その間、数10mから約100mの層厚の砂岩を十数枚挟んでいる。与那原層は層厚約900mの泥岩からなり、ところどころに砂岩と凝灰石の薄層を挟んでいる。このうち那覇市およびその周辺に分布す

図-1 沖縄本島中南部地域の地質図¹⁾

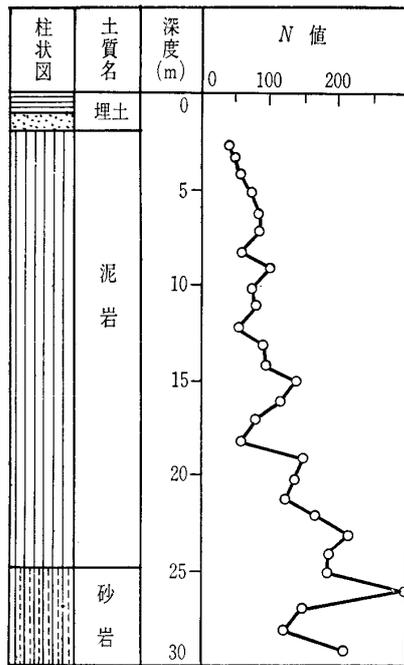


図-2 柱状図とN値分布図

るものは豊見城層最上位の約100m層厚の砂岩層と与那原層下部の泥岩層であり、これらはN値50以上の固結度良好な地盤を形成しているが、断層破碎帯や風化帯では20~30を示す。

3. 調査地点と土質試験

調査地点は、那覇市の安里交差点近くに位置する立坑開削現場である。地盤柱状図と標準貫入試験結果を図-2に示す。N値50以上の場合は30cm貫入に換算した換算N値で示してある。深さ2mまでは路盤、路床、置換砂層、それより深度25mまで泥岩層、25~30mは砂岩層である。N値は、40から300までの範囲で変動が著しいが、深さとともに増大する傾向にある。砂岩層の全層厚は確認できないが、調査地点付近には豊見城層最上位の砂岩層が地表に

露出し、また比高50m以上の大断層をはじめとする数本の断層が分布していること²⁾から、豊見城層最上位の砂岩層と推察される。これに基づくと当地点に分布する泥岩層の推定堆積埋没深度は新里層の推定層厚250m¹⁾を加えると、おおよそ1100~1200mとなる。

試料は立坑の掘削と並行して深さ6.5m、10m、15m、20mの地点で一辺約40cmの泥岩をブロック状に採取した。なお、25m付近の砂岩層は10cm未満の間隔で泥岩の薄層を挟んでおり、ブロック状のサンプリングが困難であった。

実施した室内試験は物理試験と高圧一次元圧密試験³⁾および三軸圧縮試験(UU試験、CD試験)である。物理試験はJIS法に準拠して行った。このうち粒度試験はJIS法のほかに試料の分散処理に超音波⁴⁾を用いた場合についても行っている。圧密試験は、直径33mm、高さ20mmの供試体について、段階载荷により圧密圧力640kgf/cm²まで行った。各载荷段階の圧密時間は24時間を標準とした。三軸圧縮試験は直径5cm、高さ10cmの供試体について拘束圧9kgf/cm²までのUU試験およびCD試験を行った。せん断速度はそれぞれ0.5%/minと0.003%/minである。CD試験では圧密促進のため供試体側面にパーパードレーンを巻き、また飽和を確保するため1~2kgf/cm²のバックプレッシャーを圧密段階から作用させている。なお、力学試験では供試体の軸荷重は堆積面に垂直な方向に作用させている。

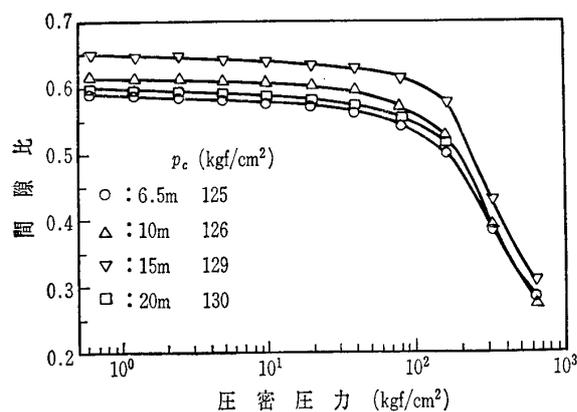
4. 試験結果と考察

4.1 物理的性質

各深さの泥岩の物理試験結果を表-1に示す。泥

表-1 島尻層泥岩(那覇市安里)の物理的性質

深さ (m)	含水比 w (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	土粒子の 密度 ρ_s (g/cm ³)	粒度組成(%)			液 限 性 界 w_L (%)	塑 限 性 界 w_p (%)	塑 指 数 I_p	固 結 指 数 I_B
						砂分	シルト分	粘土分				
6.5	22.1	2.09	0.611	99.9	2.76	1.4	26.1	72.5	66.5	26.6	39.9	0.39
						2.9	52.6	44.5				
10	22.2	2.09	0.610	100.3	2.76	0.3	20.9	78.8	76.2	25.6	50.6	0.42
						6.9	47.5	45.6				
15	23.5	2.07	0.651	99.9	2.76	0.9	25.9	73.2	71.0	26.8	44.2	0.59
						25.4	44.9	29.7				
20	21.8	2.10	0.600	100.3	2.76	0.5	22.0	77.5	59.7	24.5	35.2	0.53
						15.7	47.8	36.5				
24.5	22.1	2.10	0.605	100.0	2.76	0.8	23.5	75.7	58.0	23.6	34.4	0.25
						1.1	42.4	56.5				

図—3 泥岩の $e \sim \log p$ 曲線

岩は完全飽和しており、含水比および湿潤密度はそれぞれ 21.8~23.5%, 2.07~2.10 g/cm³ の範囲にあり、深さ方向への変化は小さい。粒度組成は超音波法に比べて JIS 法では細粒分が極端に少ない。これは JIS 法では土粒子の分散が十分でなく、泥岩構成粒子が互いに強く結合していることを示唆している。泥岩は 72.5~78.8% の粘土分を含有し、構成粒子は塑性指数 34~51 の高塑性無機質粘土 (CH) である。また、これらの土粒子は pH 8.3~8.6 を示し、アルカリ性である。

ところで、泥岩構成粒子は超音波処理によりほぼ完全分散状態まで分散しているので⁴⁾、固結の程度を表す指標として、便宜的に JIS 法による粘土分含有量 CF_{JIS} と超音波処理による粘土分含有量 CF を用い固結指数 $I_B = (CF - CF_{JIS}) / CF$ を定義する。 I_B が 1 に近いほど固結度は大きく、0 に近いほど固結度は小さいことを表す。表—1 から分かるように固結指数は深さ 15m の泥岩で最も大きく、20m, 10m, 6.5m の順に減少し、24.5m の泥岩で最も小さい。固結指数は必ずしも深さの順に増大していないことや 10m までの領域では表層ほど固結指数が減少していることを考慮すると、固結度は単に上載圧だけによるのではなく、堆積環境、堆積後の地質履歴および風化の影響が大きいことが考えられる。深さ 6.5m の泥岩では N 値 50 以上であるにもかかわらず一部風化の影響と思われるクラックの存在がみられた。

4.2 圧密特性

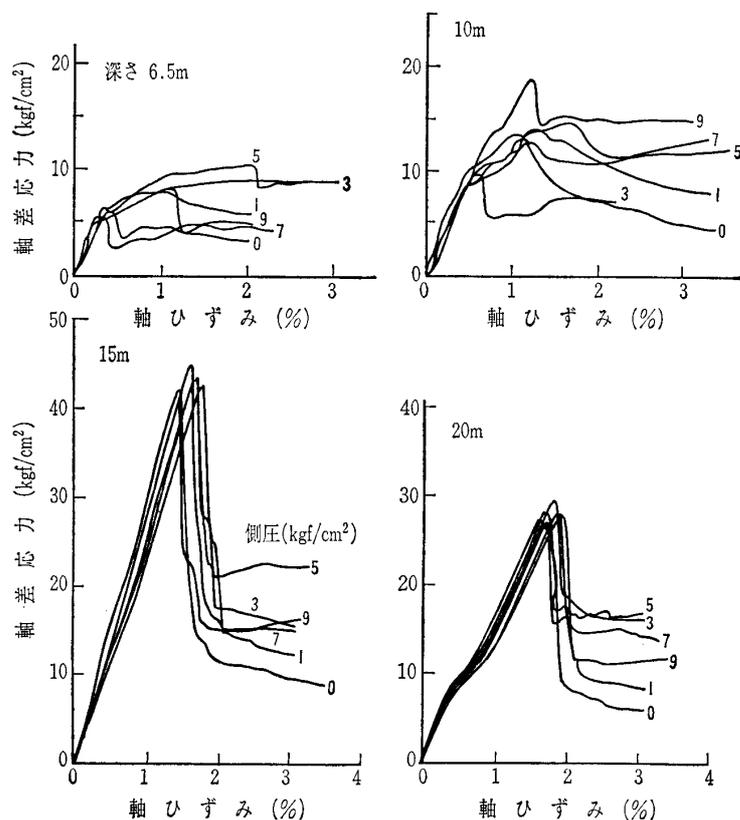
この種の泥岩において圧密沈下が実用上問題になることはないが、地盤の特性を把握する上

で圧密降伏応力のような物性値を明らかにしておくことは有用である。各深さの泥岩の圧密圧力と間隙比の関係を図—3 に示す。 $e \sim \log p$ 曲線は似かよった形状を示し、明らかな圧密降伏点が認められる。圧密降伏応力 p_c は 125~130 kgf/cm² であり、新里層と与那原層の泥岩の単位体積重量 (1.9~2.1 kgf/cm³) と推定堆積埋没深度 (100~1200m) から概算される先行有効土被り圧 110 kgf/cm² に近い。降伏後の圧縮指数 C_c は 0.39~0.49 である。圧密試験による透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-10}$ cm/sec のオーダーにあり、この泥岩は実用上不透水性である。

4.3 強度特性

(1) 応力ひずみ関係

図—4 に UU 試験による軸差応力と軸ひずみの関係を、また図—5 に CD 試験による軸差応力~体積ひずみ~軸ひずみ関係を示す。UU 試験においては深さ 6.5m と 10m の泥岩の応力~ひずみ関係はそれぞれ軸ひずみが 0.3% と 0.5% までの初期段階では弾性的であるが、クラックの影響のため小さい軸ひずみでピーク強度に達し、その後塑性的挙動を示すか、あるいはひずみ軟化挙動を示している。一方、15m と 20m の泥岩では破壊付近まで弾性的であり、軸ひずみ 1.5~2.0% で明らかなピーク強度を示し、



図—4 応力~ひずみ関係 (UU 試験)

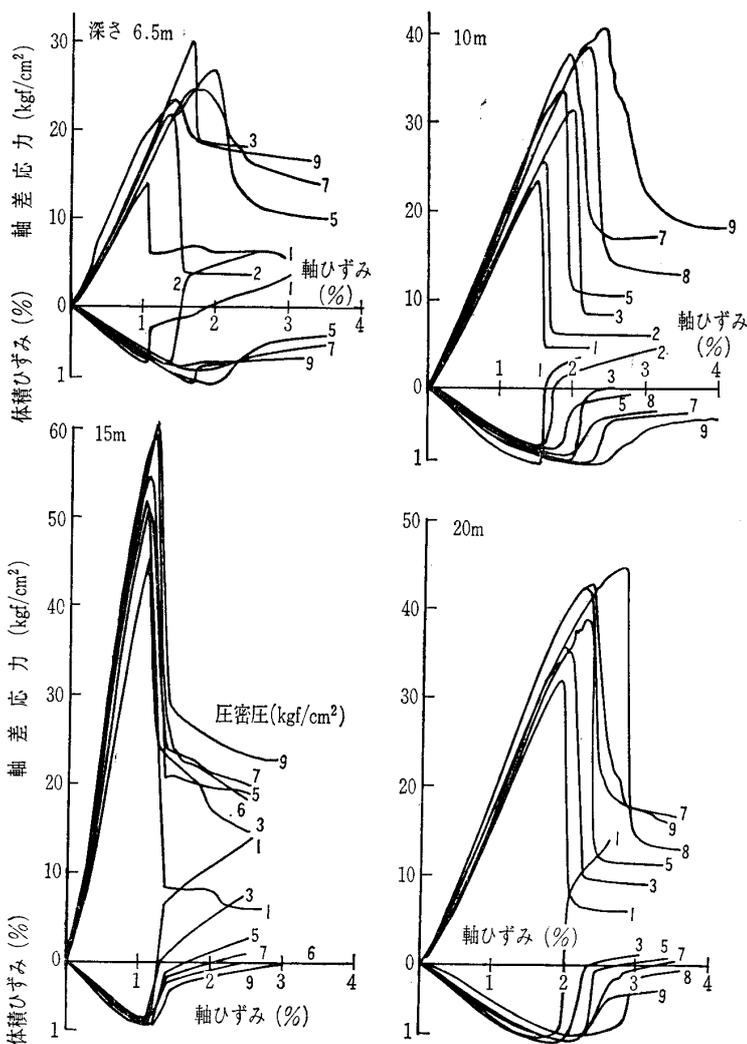


図-5 軸差応力～体積ひずみ～軸ひずみ関係(CD実験)

その後ひずみ軟化を伴う脆性的応力～ひずみ関係を示している。

CD試験における応力～ひずみ関係はいずれの深さの泥岩でもピーク強度付近まで弾性的であり、ピーク強度に達した後はひずみ軟化が顕著である。体積ひずみはピーク強度近くまでは軸ひずみと直線関

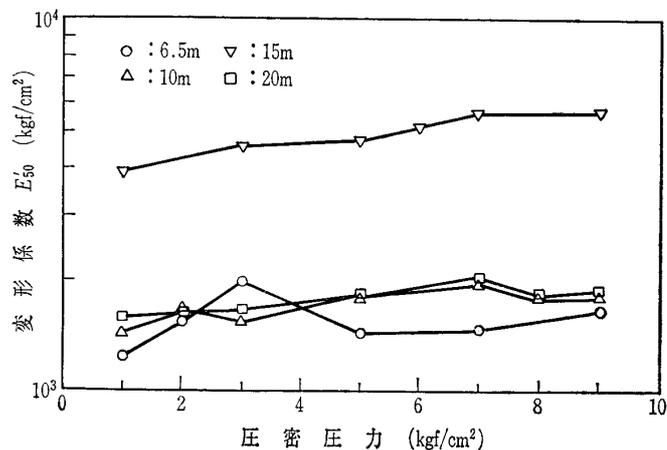


図-6 排水変形係数と圧密圧力の関係

係を保ちながら収縮を示し、その後破壊に伴って膨張に転じている。

それぞれの深さの泥岩に対するUU試験による非排水条件の変形係数 E_{50} には側圧の影響は少なく、それらの値(平均値)は深さ6.5mで $1.8 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、10mで $2.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、15mで $2.6 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、20mで $1.5 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ であった。図-6と図-7はCD試験による排水条件の変形係数 E_{50}' とポアソン比 ν' を圧密圧力(有効拘束圧)との関係で示したものである。 E_{50}' は拘束圧依存性であり、圧密圧力 1 kgf/cm^2 から 9 kgf/cm^2 までの増加により深さ15mの泥岩では $4 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ から $5.6 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ まで、他の深さの泥岩では約 $1.5 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ から $1.8 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ まで増大する。 ν' も圧密圧力の増加に伴い深さ15mの泥岩では0から0.05まで、その他の深さの泥岩では0.1から0.2まで変化している。

(2) せん断強度定数

UU試験による破壊時のモール円と包絡線を図-8に示す。深さ6.5mと10mの泥岩ではばらつきがあるが、ひび割れ硬質粘土においてみられるような側圧の増加に伴うせん断強度の増加がうかがえ、 $\phi_u > 0$ となる。一方、深さ15mと20mでは、飽和粘土に類似し、せん断強度は側圧の大きさに関係なく一定であり、非排水せん断強度定数は $\phi_u = 0$ 、 $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ となる。 c_u の大きさは固結指数(表-1参照)に対応しており、深さ15mの泥岩で最も大きく、深さ6.5mの泥岩で小

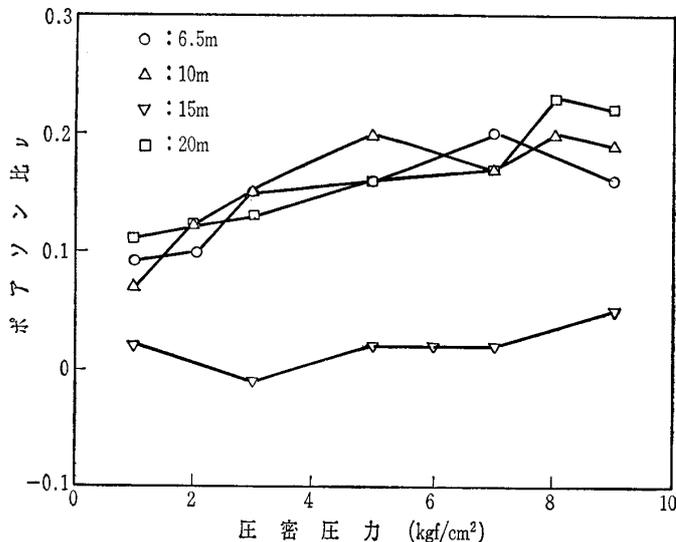
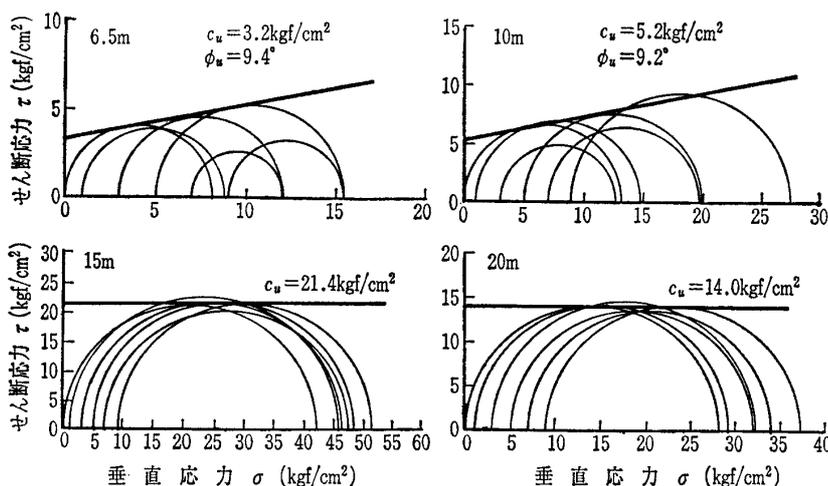
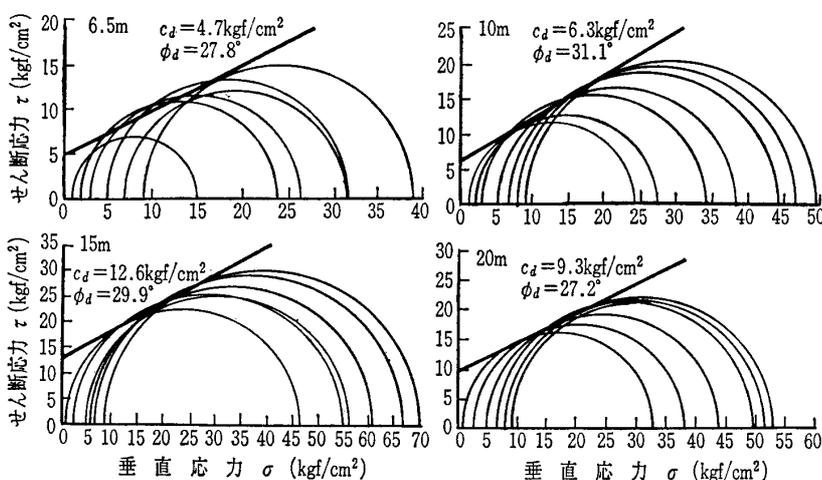


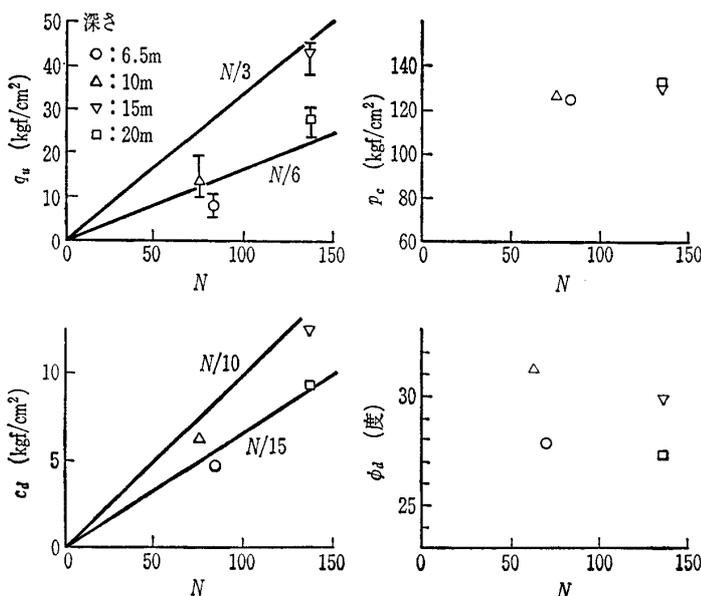
図-7 排水ポアソン比と圧密圧力の関係



図—8 各深さの泥岩の破壊包絡線 (UU 試験)



図—9 各深さの泥岩の破壊包絡線



図—10 換算N値と力学定数の相関

さい値となっている。

図—9は深さごとの泥岩のCD試験による破壊包絡線を示している。せん断強度定数 c_d , ϕ_d は直線近

似により最小二乗法で決定している (相関係数 $R=0.958\sim0.997$)。 ϕ_d は $27.2^\circ\sim31.1^\circ$ を示し、深さごとの差異は小さい。一方、 c_d は、深さごとに変動が大きいが、固結指数と対応し、固結度の大きい深さ15mの泥岩の 12.6 kgf/cm^2 から、固結度の小さい6.5mの泥岩の 4.7 kgf/cm^2 まで変化している。

4.4 N値と力学定数の関係

N値にもとづいて力学定数を推定することがしばしば行われる。砂川ら⁵⁾は与那原層下部の泥岩に対してN値と一軸圧縮強度 q_u の関係を次のように提案している。

$$q_u = N/6 \sim N/3 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(1)$$

図—10に今回得られた力学定数 q_u (三軸UU試験による圧縮強度), p_c , c_d , ϕ_d と換算N値との関係を示す。 q_u とN値の関係はクラックの影響の強い深さ6.5mの泥岩を除いて砂川らによる式(1)の関係に適合している。 p_c と ϕ_d はN値に関係なくほぼ一定であり、相関はみられない。 c_d はN値の増大とともに増加しており、それらの間に相関が認められそうである。

ある。

なお、N値と力学定数との相関を明らかにするにはデータの蓄積が必要である。

5. ま と め

島尻泥岩層において深さ6.5mから深さ20mまでおよそ5m間隔でブロックサンプリングした試料について土質試験を行い、深度方向への力学特性を調べた。結果をまとめると次のようである。

- (1) 物理的性質と圧密特性 (圧密降伏応力) に深度による差がほとんどみられない。
- (2) 深さ10mまではクラックの影響による強度低下がみられる。
- (3) 10mより下方では強度変形特性は土被り圧よりも固結度の影響を強く受けている。
- (4) 換算N値と p_c , ϕ_d との相関はみられないが、 q_u , c_d には相関が認められる。

最後にサンプリングの機会と土質調査資料の提

報文-2215

供をいただいた沖縄電力, ブロックサンプリングに協力いただいた奥村組, 大城組, 四電コンサルタントに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 福田 理ほか: 第5次沖縄天然ガス資源調査・研究概報, 地質調査所月報, Vol. 21, No. 11, pp. 627~672, 1970.
- 2) 古川博恭・仲村 剛: 那覇市及びその周辺海域の地盤(沖縄の地盤 その1), 琉球列島の地質学研究,

第6巻, pp. 59~88, 1982.

- 3) 新城俊也・小宮康明: 第三紀層泥岩の高圧圧密特性, 土と基礎, Vol. 32, No. 2, pp. 11~16, 1984.
- 4) 小宮康明・新城俊也・島袋 弘: 島尻層泥岩の粒度試験における超音波処理の有効性, 農業土木学会誌, Vol. 55, No. 9, pp. 43~47, 1987.
- 5) 砂川徹男・上原方成: 島尻層群における与那原層の工学的性質, 土と基礎, Vol. 31, No. 4, pp. 27~31, 1983.

(原稿受理 1992.8.3)