

千葉県中部における地下深部軟岩の物理的・力学的性質

宮本 武司
(技術研究所)星野 一男
(技術開発本部)渡辺 浩平
(技術研究所)

§ 1. はじめに

近年、国土を有効に活用することが社会的に望まれており、またエネルギーの有効利用を図るため、大都市近郊の地下深部の軟岩に、LPG 高压貯蔵施設や圧縮空気貯蔵施設などの大規模な地下構造物を建設することが検討されている。地下深部にこのような大規模構造物を計画・設計する場合には、構造物建設時の安定性や変形挙動を予測・解析し、安全性を確認することが不可欠であり、このために地下深部の地質や地質構造、ならびに密度、間隙比、圧縮強度、変形係数、圧密降伏応力等の物性値を把握することが求められている。

筆者らは、東京湾周辺(特に、房総半島と三浦半島)の地下深部に分布する軟岩の地質構造とその物性把握を目的とし、これまでに既存資料に基づいて房総半島から千葉～船橋～東京～川崎～横浜を経て三浦半島に至る東京湾岸沿いに、地下1000～3000mまでの地層の対比と地質構造を推定し¹⁾、一軸圧縮強度の等強度線の深度分布を予想した²⁾³⁾。

また、川崎らは同様な目的で、千葉県袖ヶ浦市において深度600mのボーリングを行ない、下総層群～上総層群上部に相当する砂やシルト質砂を主体とする地層から試料を採取し、その物理試験・力学試験結果に基づいて単位体積重量や圧密降伏応力、過圧密比等の深度による変化を報告している^{4)~6)}。

しかし、深度が300m程度以深の地下深部の軟岩について、信頼できる調査データはまだ殆どないのが現状であり、地下深部の軟岩の物性およびその深度による変化を明確にすることが望まれている。また、従来同一名で呼ばれる地層はその物性も類似していると考えられがちであるが、地下深部においても同一地層の軟岩物性がどの地域でも類似するものかどうか検討することも重要な課題である。

千葉県中部の一帯には、新第三紀鮮新世から第四紀更新世にかけてほぼ類似した環境下で連続的に堆積した、

厚さ3000mに達する上総層群と呼ばれる比較的均質な軟岩が厚く重なって、地下深くまで分布する。この上総層群の地層は空間的にも連続性がよく、かつ広い範囲に分布し、さらにこの地域が日本最大の天然ガス田でもあることから、その地質層序は古くから詳細に調べられている⁷⁾⁸⁾。

今回、天然ガス探査を目的とする深度1200～2300mの大深度ボーリングが千葉県中部の市原市や成東町などの5地点で行なわれ、上総層群上部～下部に相当する笠森層以下浪花層までの軟岩(泥岩)コアが採取された。そのコア試料について地質層序の検討や対比とともに、密度試験、一軸圧縮試験、高压圧密試験などの室内試験を行なった。これらの大深度ボーリングによって得られた調査データは、深度による軟岩物性の変化だけでなく、同一地層の物性の地域変化を検討するのに十分な条件を備えているといえる。

本文では、これらのボーリングによる採取試料の試験結果に基づいて、採取深度と物理的・力学的性質の関係を中心に、地下深部に分布する上総層群の泥岩の物理的・力学的性質について報告する。

§ 2. 試験試料と採取位置

2.1 試験試料

試験には、ボーリングにより採取された泥岩のコア試料を用いた。全試験試料の粒度は、図-1に示す4本の

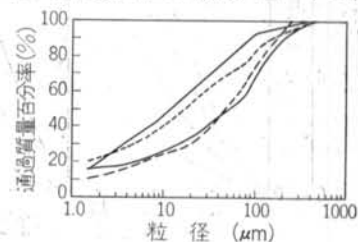


図-1 試験試料の粒度

粒径加積曲線で囲まれた範囲内にある。粒径 $75\mu\text{m}$ 以上の砂分含有率の範囲と平均は、それぞれ12~43%と30%であり、粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分含有率の範囲と平均はそれぞれ56~88%と70%である。また、肉眼上でもその粒度や土粒子配列組織等に大差はなく、試験試料はいずれもほぼ同様に均質な泥岩と見なすことができる。

2.2 試料採取位置

試料を採取したボーリング孔の位置は、図-2に示す

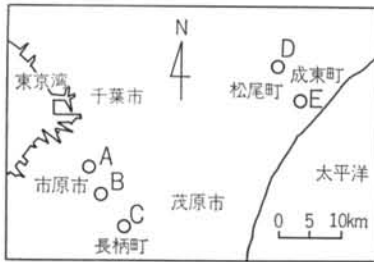


図-2 試料採取地点位置図

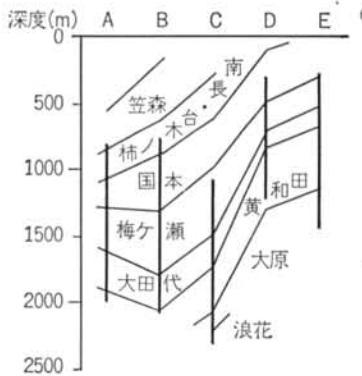


図-3 試料の採取深度と地層の分布

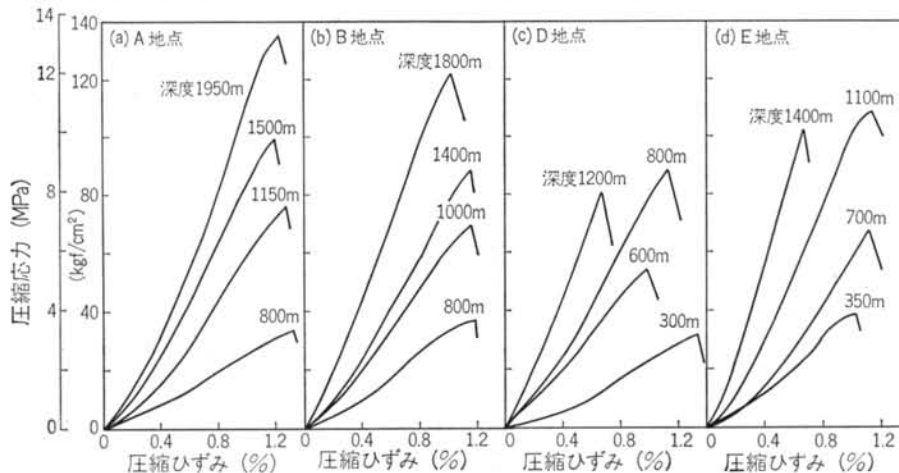


図-4 一軸圧縮試験結果(応力~ひずみ曲線)

A~Eの5地点である。A, B地点は市原市, C地点は長柄町にあり、これらA~Cの3地点は3.7~7.7kmの距離にある。また、D地点は松尾町, E地点は成東町にあり、D地点とE地点は5.8kmの距離にある。これに対しA~C地点とD・E地点との距離は約28~32kmで、かなり離れている。このように、試料の採取地点は位置的にA~C地点とD・E地点の2グループに分けられる。

各ボーリング孔における試料の採取深度は、天然ガス探査を目的としたものであるため、図-3に示すように地点によって異なっている。C地点では深度1100~2300mと最も深いのに対し、D, E地点ではこれより浅く300~1400mの範囲にある。

2.3 試料採取地点の地層の分布

図-3には、試料採取地点における地層の分布深度も示してある。この図のように、試料採取深度には第四紀更新世の笠森層から第三紀鮮新世の浪花層まで、上総層群の上部から下部にわたる地層が分布している。これらの地層の分布深度には、採取地点によって顕著な差が見られ、上総層群下部に属する大田代層下限の深度についてみると、市原市のA・B地点では2000m前後と深く、松尾町と成東町のC, D地点では700~800mと浅くなっている。このように、同一地層でも採取地点によってそ

	試験項目	試験方法
物理特性	土粒子の比重試験	JIS A 1202
	含水量試験	JIS A 1203
	密度試験	ノギス法
力学特性	高圧圧密試験	JIS A 1217 を準用
	一軸圧縮試験	JIS M 0302 を準用

表-1 試験項目と試験方法

の出現深度はかなり異なっている。

§ 3. 試験方法

試験項目と試験方法は表一に示すとおりで、力学試験としては、高圧圧密試験と一軸圧縮試験を行なった。

高圧圧密試験と一軸圧縮試験の試験方法の概要は、以下に示すとおりである。

圧密試験用供試体の寸法は、直径40mm、高さ20mmであり、ボーリングコアから旋盤を用いて整形した。高圧圧密試験は、空気圧式の載荷装置を用いて、6.25 kgf/cm² {0.613 MPa} から 800 kgf/cm² {78.4 MPa} まで、荷重増分比をほぼ1として、8段階の荷重を載荷し実施した。なお、各段階の載荷時間は24時間である。

一軸圧縮試験用供試体の寸法は、原則として直径50mm、高さ100mmとした。供試体の整形は、内径50mmのコア抜きボーリングマシンと、端面整形用精密平面研削盤を用いて行なった。圧縮時のひずみ速度は毎分0.1%である。

§ 4. 試験結果

4.1 一軸圧縮試験結果

図一4(a)~(d)に、一軸圧縮試験により得られた応力~ひずみ曲線の例を示す。なお、C地点では供試体の高さ~直径の比が1.1~1.5であり、他地点のそれが2.0程度であるのに比べてかなり小さく、強度が過大に測定されている可能性があるため、C地点のデータは除外した。

これらの図のように、いずれの試料ともひずみがある程度増加すると、ひずみに対し応力が直線的に増加するようになり、破壊点に達すると応力は急激に低下する。

また、採取深度が異なる試料では、応力~ひずみ曲線の直線部分の接線勾配（以下、変形係数と呼ぶ）や、観測された最大強度（以下、一軸圧縮強度と呼ぶ）が変化しており、深い深度の試料ほど一軸圧縮強度や変形係数が大きくなっている。しかし、破壊ひずみには採取深度による明瞭な変化は認められず、ほぼ1%前後の値を示している。

このように、試料の採取深度は一軸圧縮強度や変形係数に大きな影響を及ぼしている。

4.2 圧密試験結果

図一5(a)~(e)に、圧密試験により得られた間隙比~圧密圧力曲線（いわゆる $e \sim \log p$ 曲線）の例を示す。この

図のように、今回試験した上総層群の泥岩においても、 $e \sim \log p$ 曲線には通常の粘性土と同様に圧密降伏応力が存在し、これ以上の応力領域では間隙比が急激に減少する。また、採取深度が異なる試料では $e \sim \log p$ 曲線の位置・形状が異なり、採取深度が深いほど初期間隙比が小さく、かつ圧密降伏応力が高い傾向にある。

このように、間隙比や圧密降伏応力にも、試料の採取深度は大きな影響を及ぼしているといえる。

§ 5. 検討

5.1 物理的性質とその深度分布

5.1.1 間隙比

図一6に間隙比と試料採取深度の関係を示す。全体として、間隙比は0.45~1.22の広い範囲に分布し、かつ採取深度の増加に伴って減少する傾向にある。個々の採取地点毎に見ても、採取深度の増加に伴い間隙比が減少する傾向が見られるが、1地点当たりのデータ数が5ないし6個と少ないことから、間隙比の深度分布について個々の採取地点毎の詳細な検討はできない。一方、この図によれば測定データは、間隙比がほぼ0.7以下のグループと、間隙比がほぼ0.8以上のグループに二分できる。

前者のグループには、市原市と長柄町のA~C地点のデータ（図中の白抜き記号）が属し、後者のグループには松尾町と成東町のD、E地点のデータ（図中の黒塗り記号）が属する。前述したとおり、今回の試料採取地点5地点のうちA~C地点とD、E地点とはそれぞれ近距離にあるので、以下ではA~C地点を市原地域、C、D地点を成東地域とまとめて呼ぶことにする。

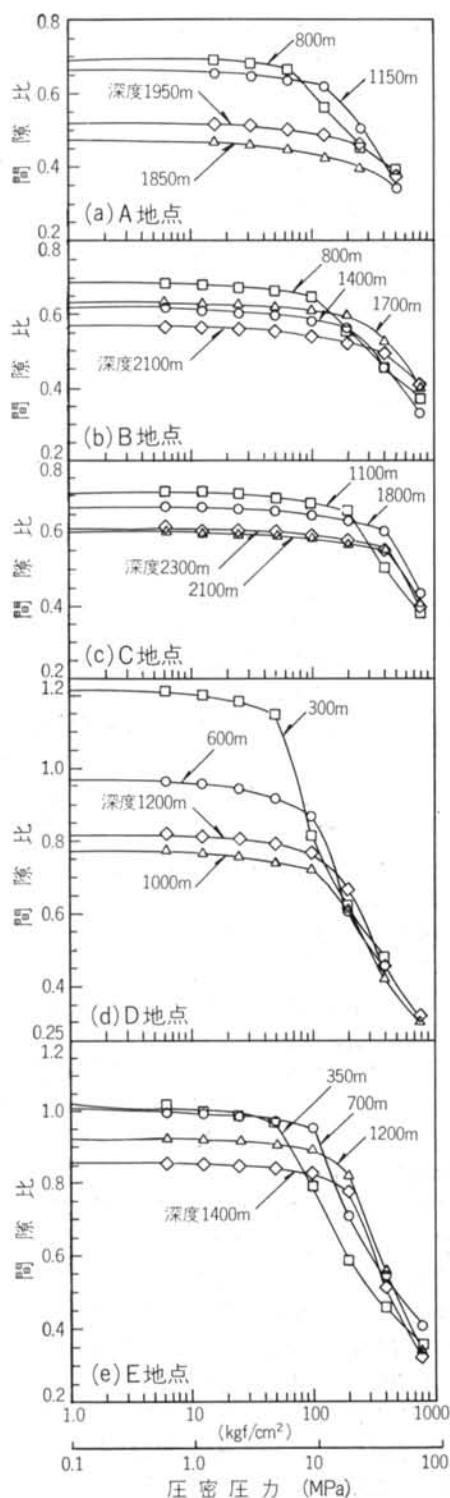
図一6中には、この2グループに分けて最小2乗法で求めた回帰直線が示してある。今回の試験だけではデータ数が充分でなくまだ断定はできないが、この回帰直線は以下のことを示している。

(a)深度が1000m増加したときの間隙比の減少は、市原地域と成東地域ではそれぞれ0.0751と0.268であり、後者は前者の約3.5倍と顕著な差がある。

(b)深度1500m以浅では、成東地域より市原地域の方が間隙比が小さい。例えば、深度1000mでは間隙比はそれぞれ0.90と0.65であり、後者は前者よりも小さい。

(c)成東地域と市原地域の間隙比の差は地表に近いほど大きい。深度が増して2000m付近になると消滅する。

間隙比（間隙率）は、泥質堆積物の岩石化の程度や力学的性質を表わす指標として用いられ⁹⁾¹⁰⁾、また軟岩の透水性や熱的性質の推定にも利用されている。したがっ



図—5 圧密試験結果 ($e \sim \log p$ 曲線)

て、以上のように距離が30 km 程度しか離れていない2地域間でも、深度と間隙比の関係にかなりの相異が認められることは、今後さらにデータを蓄積し、間隙比の深度分布とその地域性、およびその原因を明らかにしていく必要があることを示している。

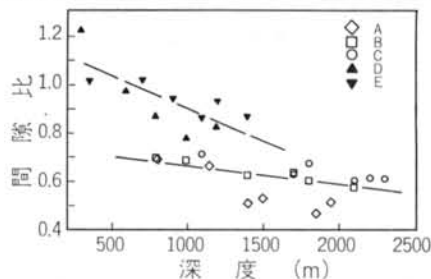
5.1.2 湿潤密度

図—7 に湿潤密度と試料採取深度の関係を示す。湿潤密度の測定値全体は、 $1.73 \sim 2.13 \text{ t/m}^3$ と広い範囲に分布する。また、この図上でも間隙比の場合と同様に、測定データは市原地域と成東地域の2グループに明確に分かれて分布する。この図中にも地域別に求めた回帰直線が示してあり、この回帰直線は以下のことを示している。

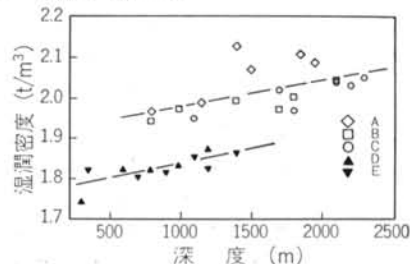
(a) いずれの地域とも、深度の増加とともに湿潤密度が増大する。

(b) 深度1000m 当たりの湿潤密度の増加は、市原地域と成東地域ではそれぞれ 0.062 t/m^3 と 0.074 t/m^3 であり、深度による湿潤密度の変化は両地域ともほぼ等しい。

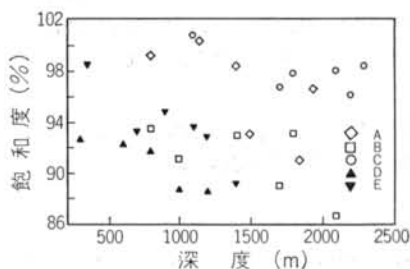
(c) 市原地域では成東地域より、いずれの深度においても



図—6 間隙比の深度分布



図—7 湿潤密度の深度分布



図—8 飽和度の深度分布

も湿潤密度の値がほぼ 0.15 t/m^3 大きい。

以上のように、湿潤密度に関しては間隙比と異なって深度2500m程度でも、まだ地域間の差が消失しないことを示唆している。

5.1.3 飽和度

図-8に飽和度の測定結果と試料採取深度の関係を示す。この図のように、飽和度は深度によらずほぼ100~88%の範囲にばらついていて、深度と飽和度の間に明瞭な関係は見られない。また、飽和度の平均は市原地域と成東地域ではそれぞれ95.1%と92.3%であり、前者の方がやや高いが、全体的な測定値のばらつき具合や、飽和度の算定精度等から見ると特に大きな差とはいえない。

しかし、地下水位以下にある粘性土では、通常飽和度として100%前後の値が得られることから判断すると、自然状態の採取試料の飽和度としては明らかに低い値に相当する。今回の試料は、採取後速やかにパラフィンで密封されており、採取後の乾燥に伴う含水比低下によって飽和度が低下したとは考え難い。

一方、今回の試料は地下300~2300mの大深度に位置する水溶性天然ガスの産出層から採取している。このため、飽和度低下の原因としては、サンプリングによる間隙水圧の大幅な低下に伴って、間隙水中に溶存していたガスが気泡として分離し、間隙水が押し出されたことにより試料の飽和度が低下したことが予想される。

飽和度の低下は、強度試験や圧密試験、透水試験などの試験結果に影響を及ぼす可能性がある。このような現象が実在するとすれば、大深度地盤の物性把握上重要な問題となるため、この原因と対策については今後さらに検討を続けていく予定である。

5.2 力学的性質とその深度分布

5.2.1 一軸圧縮強度と変形係数の深度分布

図-9, 10にそれぞれ、一軸圧縮強度、変形係数と試料採取深度の関係を示す。これらの図において測定データ全体についてみると、一軸圧縮強度と変形係数はそれぞれ深度の増加とともに直線的に増加する傾向にある。しかし、市原地域と成東地域に分けてみると、成東地域のデータは市原地域のデータのやや上側に分布する傾向にある。

また、図-9, 10中には地域別に求めた回帰直線が示してあり、この回帰直線は以下のことを示している。

(a)同一深度であれば、市原地域よりも成東地域の方が一軸圧縮強度や変形係数の値が大きい。

(b)深度1000m当たりの一軸圧縮強度の増加は、市原地域と成東地域ではともに 67 kgf/cm^2 (6.5 MPa) で等しい。

(c)深度1000m当たりの変形係数の増加は、市原地域と成東地域ではそれぞれ、 8900 kgf/cm^2 {873 MPa}、 11000 kgf/cm^2 {1080 MPa}であり、成東地域の方がやや大きい。

このように、深度の増加によって一軸圧縮強度と変形係数はともに増大する。また、一軸圧縮強度は成東地域と市原地域とでは、深度に関わらず 21 kgf/cm^2 (2.1 MPa)ほど異なるだけであるが、変形係数の値は深度とともに両地域間の差が拡大することになる。以下、一軸圧縮強度と変形係数の関係について検討を加える。

5.2.2 一軸圧縮強度と変形係数の関係

図-11に変形係数と一軸圧縮強度の関係を示す。この図によれば、ばらつきはあるが、測定データは図の左下方から右上方に向かってほぼ直線的に分布し、両者の間には良い相関性があることが分かる。

そこで、両者の関係を詳細に見る目的で、図-12に変形係数と一軸圧縮強度の比 (E/qu) と、試料採取深度の

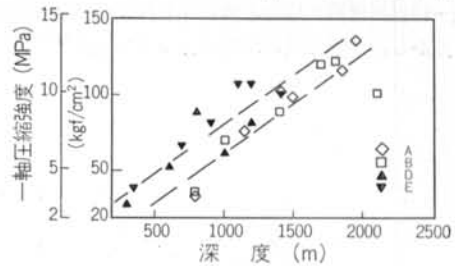


図-9 一軸圧縮強度の深度分布

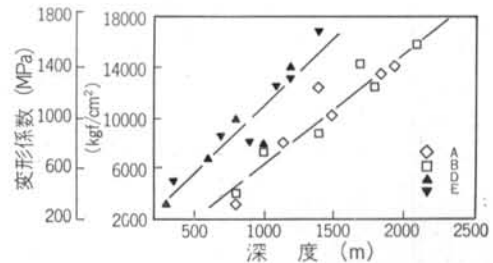


図-10 変形係数の深度分布

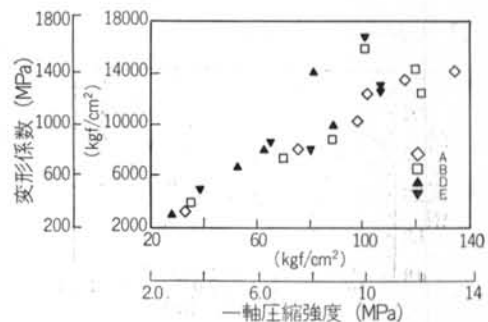


図-11 変形係数と一軸圧縮強度の関係

関係を示す。この比は、全体として96~173の範囲にあり、深度が変わっても殆ど変化していない。また、市原地域と成東地域に分けてみると、平均値はそれぞれ112と128であり、成東地域の方がやや高いがその差はわずかである。

川崎らによれば、袖ヶ浦市における深度600mまでの下総層群~上総層群上部(金剛地層、笠森層)についての調査結果から、変形係数と一軸圧縮強度の比は、深度によらずほぼ100であると報告されている⁴⁾⁶⁾。また、従来変形係数と一軸圧縮強度の比は、軟岩ではおよそ100、硬岩では200~500程度ともいわれている¹¹⁾。今回用いた試料は、川崎らより深度が深く時代が古い地層の軟岩であるが、川崎らの報告や従来とほぼ同様な値となっており、今回の試験結果からも変形係数と一軸圧縮強度の比は、深度に関わらずほぼ100程度の値を示すといえる。

5.2.3 圧密降伏応力

図-13に圧密降伏応力と試料採取深度の関係を示す。この図から、採取深度の増加に伴って圧密降伏応力は直

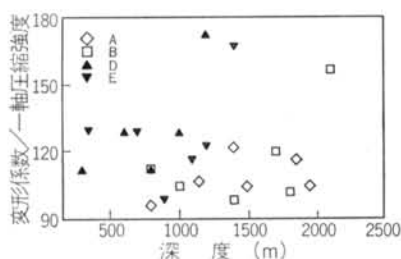


図-12 変形係数と一軸圧縮強度の比の深度分布

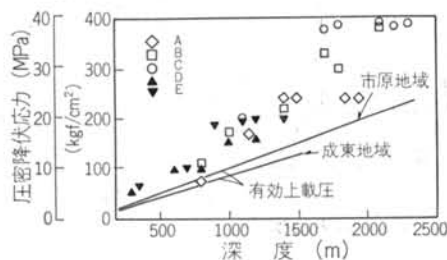


図-13 圧密降伏応力の深度分布

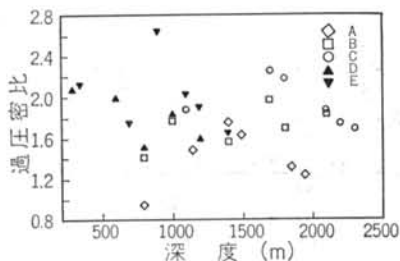


図-14 過圧密比の深度分布

線的に増加し、市原地域と成東地域とで圧密降伏応力に殆ど差はないことが分かる。

また、この図中には飽和密度と土被り厚から計算した有効上載圧が実線で示してある。この有効上載圧と比較すると、殆どの試料において圧密降伏応力の測定値が有効上載圧の計算値を上回っており、明らかに過圧密な状態にあるといえる。

図-14は有効上載圧に対する圧密降伏応力の比、すなわち過圧密比と試料採取深度の関係である。この図のように、過圧密比は深度に無関係に0.94~2.64の範囲に分布し、過圧密比と深度の間に特に明瞭な関係は認められない。

川崎らによれば、過圧密比は地表から深度200mまでは深度の増加とともに急速に減少するが、深度200~500mの範囲ではほぼ2.0付近の一定値を示すと報告されている⁵⁾。この報告と比較して、今回はほぼ同等ないし低い値が得られたが、これは今回の検討対象深度が川崎らの調査深度と同等、ないし深いことと対応すると解釈できる。したがって、過圧密比と深度の間に、今回の検討結果から直接には明確な関係を見出すことはできなかったが、深度200m以深においても過圧密比は徐々に減少していることが予想される。

市原地域と成東地域を比較すると、過圧密比の平均はそれぞれ1.68と1.92であり、成東地域では市原地域よりやや高い。前述したとおり、成東地域では同一深度にお

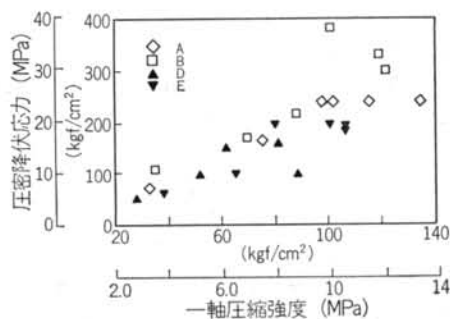


図-15 一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係

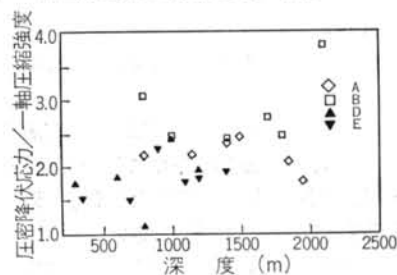


図-16 圧密降伏応力と一軸圧縮強度の比の深度分布

いて市原地域より一軸圧縮強度が大きいという特徴が見られるが、この原因は成東地域の過圧密比が市原地域より大きいことにあるものと考えられる。

5.2.4 一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係

図-15に一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係を示す。この図のように、ばらつきはあるが圧密降伏応力は一軸圧縮強度の増加とともに直線的に増加する傾向にある。

一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係を詳細に見るために、図-16に一軸圧縮強度に対する圧密降伏応力の比 (P_c/q_u) の深度分布を示す。この図のように、この比は 1.11 から 3.81 までの広い範囲に分布する。また、深度との間にも明瞭な関係は見られない。

成東地域と市原地域に分けてみると、 P_c/q_u の範囲はそれぞれ 2.44~1.11 (平均 1.85)、3.81~1.78 (平均 2.49) であり、成東地域では市原地域よりかなり小さくなっている。

5.3 地層の物性

5.3.1 物理的性質

図-17, 18にそれぞれ、各地層の間隙比と湿潤密度の値を示す。これらの図のように、間隙比と湿潤密度の値



図-17 各地層の間隙比

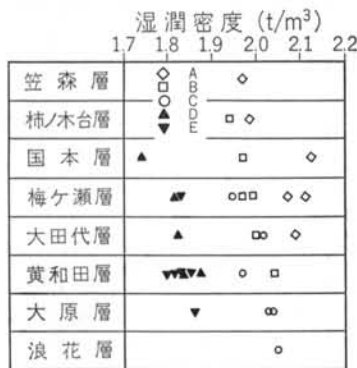


図-18 各地層の湿潤密度

は、同一地層であっても広い範囲にばらついている。しかし、地域毎に分ければ、同一地層の間隙比や湿潤密度は比較的限定された範囲の値を示し、かつ古い時代の地層ほど間隙比が小さく、湿潤密度は大きい傾向を示す。

一般に、同一名の地層であればその物性も類似すると考えられる傾向にあるが、このように同一地層であっても、必ずしも間隙比や湿潤密度の値が類似しているとは限らず、距離が 30 km 程度異なればこれらの値はかなり変化することを示している。

5.3.2 力学的性質

図-19, 20にそれぞれ、各地層の一軸圧縮強度と圧密降伏応力の値を示す。これらの図より、各地層の一軸圧縮強度と圧密降伏応力について、以下のことが分かる。

- 同一地層でも、測定値全体は広い範囲にばらつく。
- 地域毎に分けてみると、各地層は比較的限定された値を示す。
- 古い地層ほど大きな値を示す傾向にある。
- 同一地層であっても、市原地域と成東地域では値が異なり、市原地域の地層の方が成東地域よりかなり大き

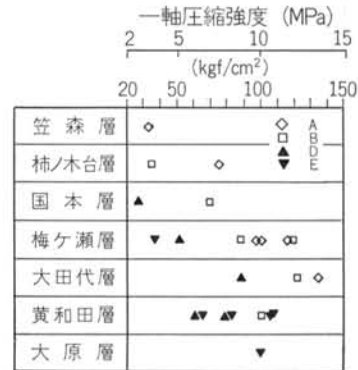


図-19 各地層の一軸圧縮強度

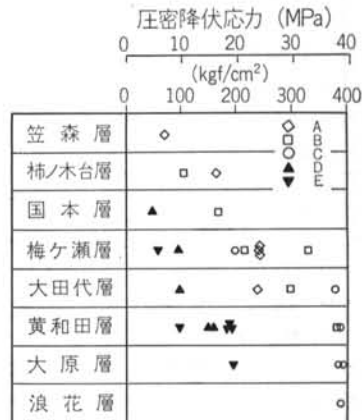


図-20 各地層の圧密降伏応力

な値を示す。

以上のように、今回の調査対象地域を全体として見ると、各地層の物理的・力学的性質は広い範囲にばらつくこと、および対象地域を距離が6～8kmの市原地域や成東地域の内部に限定して初めて、各地層がそれぞれ特有の物理的・力学的性質を示すことが分かる。

§ 6. おわりに

市原市や成東町など距離が3.7～32kmの範囲にある千葉県中部の5地点で、地下300～2300mのボーリング孔から採取した泥岩について、間隙比や湿潤密度などの物理的性質と、一軸圧縮強度や圧密降伏応力などの力学的性質を検討した。その結果、これらの泥岩の物理的・力学的性質およびその採取深度との関係について、以下のことが判明した。

(i)湿潤密度、一軸圧縮密度、変形係数、圧密降伏応力は、深度に比例して増加する。

(ii)過圧密比、一軸圧縮強度に対する変形係数の比 (E/q_u)、一軸圧縮強度に対する圧密降伏応力の比 (P_e/q_u) は、深度によらずほぼ一定範囲の値を示す。

(iii)同一深度であれば、成東地域では市原地域より間隙比、一軸圧縮強度、変形係数、圧密降伏応力が大きい。

また、地層とその物理的・力学的性質の関係について、以下のことが判明した。

(i)同一地層であっても、間隙比、湿潤密度、一軸圧縮強度、圧密降伏応力の値は、成東地域と市原地域とはかなり異なる。

(ii)同一地層であれば、湿潤密度、一軸圧縮強度、圧密降伏応力の値は、市原地域の方が成東地域より大きい。

(iii)同一地層が類似の物理的・力学的性質を示すのは、距離が8km程度の地域内に限られる。また、この地域内であれば、古い時代の地層ほど湿潤密度や一軸圧縮強度、圧密降伏応力の値が大きい。

(iv)対象地域を30km程度まで拡大すると、同一地層であってもその物理的・力学的性質は広い範囲の値を示す。

以上のように、地下300m以下の地下深部を構成する泥岩の物理的・力学的性質には、深度の他に地層や地域性が重要な影響を及ぼしていると判断される。今回は、距離が32km以下の千葉県中部の5地点に関する検討に留まったが、今後は房総半島を中心に、東京湾周辺のさらに広範な地域の地下深部に関するデータを蓄積し、その物理的・力学的性質やその地域性等を明らかにしていく予定である。

謝辞 試験試料ならびに資料を提供して頂くとともに、今回検討結果の公表を許可して頂いた関東天然瓦斯開発株式会社茂原鉱業所鉱業部の皆様に、深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 星野一男, 渡辺浩平, 八田敏行, 釜井俊孝: “東京湾岸地域の深部軟岩層の地質・物性断面” 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (1992年) pp. 479～483
- 2) 星野一男, 釜井俊孝: “東京湾周辺深部軟岩層の地質・物性の概要” 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (1989年) pp. 232～235
- 3) 星野一男, 釜井俊孝, 渡辺浩平: “東京湾周辺深部軟岩層の地質・物性の概要 (その2)” 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (1990年) pp. 492～495
- 4) 川崎了, 西好一, 窪田達郎: “東京湾東岸部における深部堆積物の工学的性質” 第25回土質工学研究発表会発表講演集 (1990年) pp. 97～98
- 5) 川崎了, 西好一, 桜井孝臣: “東京湾東岸部における深部堆積物の高圧圧密特性” 第25回土質工学研究発表会発表講演集 (1992年) pp. 99～100
- 6) 川崎了, 西好一, 藤原義一: “東京近郊における深部堆積地盤の物理的・力学的特性” 地下空間利用シンポジウム1992講演論文集 (1992年) pp. 93～100
- 7) 三梨昂, 安国昇, 品田芳二郎: “千葉県養老川・小櫃川の上総層群の層序” 地質調査所月報 Vol. 10 (1959年) pp. 83～98
- 8) 三梨昂, 他: “東京湾とその周辺地域の地質 (特殊地質図(20), 10万分の1, 地質説明書)” 地質調査所 (1979年) pp. 91
- 9) 星野一男: “岩石の物性を支配する地質要因について” 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(1984年) pp. 145～150
- 10) 星野一男: “自然岩石の固化機構と強度” 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 (1987年) pp. 1～6
- 11) 土質工学会編: “堆積軟岩の工学的性質とその応用 (土質基礎工学ライブラリー・30)” 土質工学会 (1987年) p. 59