

互層軟岩の岩石物性と岩盤物性について

PROPERTIES OBTAINED FROM LABORATORY TESTES AND IN-SITU TESTES OF ALTERNATIVE LAYERED SOFT ROCK

水野直也*

Naoya MIZUNO

1. まえがき

一般に、岩盤の強度・変形特性は節理等の不連続面、層理面等に支配されるため、その把握のためには原位置岩盤試験が主体となり、室内の岩石試験は補足的な取扱いとなる。しかし、軟岩の場合には、不連続面が少なく、岩盤の強度・変形特性に関して岩石自体の物性が支配的要因となるものと考えられる。

対象とした岩盤は、新第三紀中新世後期の砂岩・泥岩の互層堆積軟岩である。ここでは、互層堆積軟岩に対して実施した岩石・岩盤試験の結果を述べるとともに、岩石試験結果から得られた強度・変形特性および地盤の互層構造を考慮した力学モデルを用いることにより、岩盤の強度・変形特性が評価できることを述べたい。

2. 地盤の特徴

調査を実施した地点の岩盤は、新第三紀中新世後期の堆積軟岩であり、泥岩と砂岩とから成る互層構造を示している。節理等の不連続面は少なく、全体としては均質な岩盤である。泥岩と砂岩の平均層厚は調査横坑付近で約13cmおよび約6cmであり、層理面の傾斜角は約10°である。

3. 室内岩石試験

泥岩と砂岩について一軸圧縮試験、三軸圧縮試験（側圧 $\sigma_3 = 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1.3, 2.0\text{MPa}$ ）および圧裂試験を実施し、これらの試験結果から図-1に示すように破壊基準を設定した。

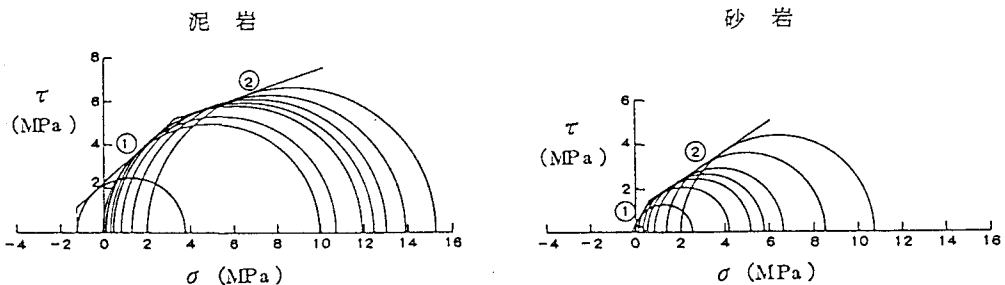


図-1 泥岩と砂岩の破壊包絡線

* 正会員 中部電力（株）土木建築部

変形特性は、三軸圧縮試験から得られた応力～ひずみ曲線に基づいて指数関数式¹⁾を用いて近似した。近似した泥岩、砂岩の応力～ひずみ曲線を図-2に示す。

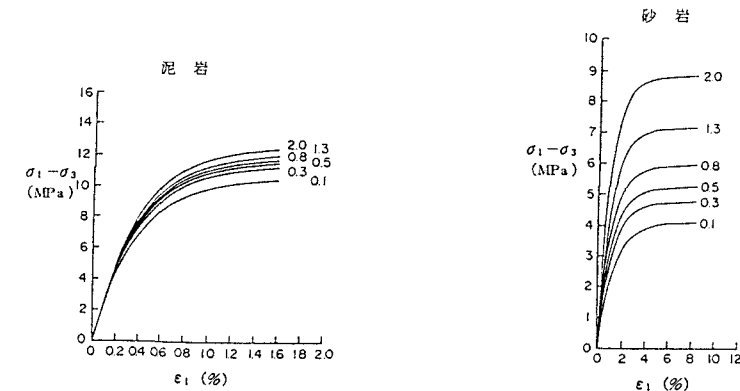


図-2 指数関数式により近似した泥岩と砂岩の応力～ひずみ曲線

4. 原位置岩盤試験の評価

4・1 岩盤試験の方法

(a) 原位置三軸試験

原位置三軸試験は、互層構造に伴う変形特性の異方性を検討するため、下端が地盤と連続した立方体の岩盤ブロックを2個切出した。寸法は泥岩、砂岩の層厚を考慮して1mとした。ブロックA、Bは、泥岩・砂岩の構成比がほぼ等しく（砂岩の構成比率約30%）、地質的差異も認められない。ブロックの座標軸と岩盤の層理面との関係を図-3に示す。

側圧 σ_3 は、対象構造物の常時の接地圧約0.5MPaを考慮して、0.5MPaおよび1.0MPaの2種類とし、軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)はそれぞれ0.3MPaおよび0.8MPaとした。試験は、最大主応力 σ_1 の方向を順次X、YおよびZ軸の各方向に設定して実施した。载荷は、各面にそれぞれ5台配置したピストンジャッキにより行った。図-4に試験概要を示す。

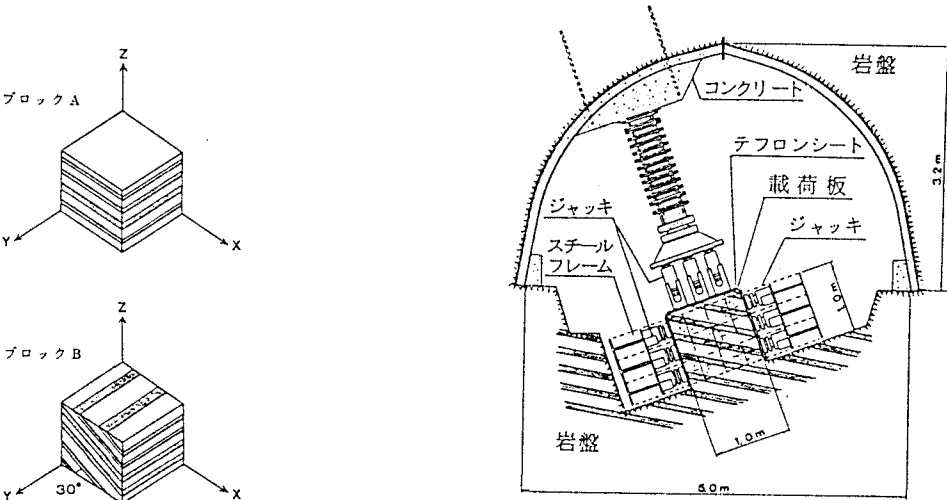


図-3 座標軸と層理面との関係

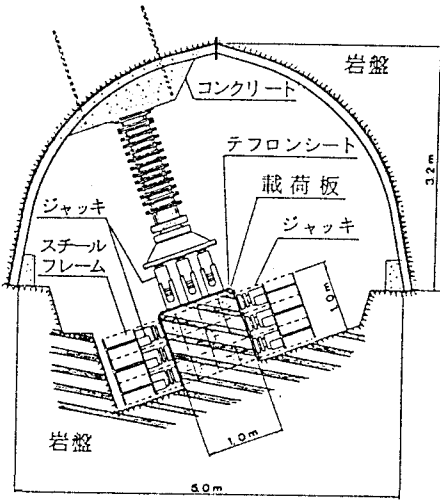


図-4 原位置三軸試験概要図

(b) 大型ブロックせん断試験

互層岩盤としてのせん断強度を求めるため、泥岩、砂岩の層厚および傾斜角度を考慮してブロック寸法が1.2m（長さ1.2m×幅1.2m×高さ0.6m）の大型ブロックせん断試験を実施した。

試験は、初めに対象構造物の常時の接地圧相当の0.5MPaの鉛直応力を長時間保持し変形が収束したのを確認した。次に、地震時を想定して、鉛直応力 σ_n をそれぞれ0.1、0.4、0.7 および1.0 MPa に変更した後に、せん断荷重を急速載荷した。せん断荷重の載荷速度は、油圧ジャッキ能力を考慮して0.15 MPa/min とした。図-5に試験概要を示す。

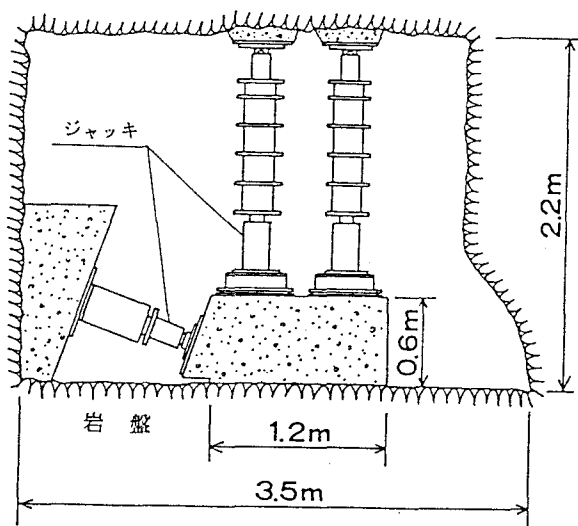


図-5 大型ブロックせん断試験概要図

4・2 岩盤試験結果とその解析的検討

(a) 原位置三軸試験

試験から求められた最大主応力 σ_1 方向の変形係数Dと層理面の法線と最大主応力方向とのなす角 θ との関係によれば、側圧 σ_3 が0.5 および1.0MPaのどちらの場合も変形特性に関する異方性が認められた。

これらの試験結果に対して、泥岩と砂岩の互層状態について直交異方性体の概念を導入し²⁾、岩石試験結果から得られた変形特性を用いて解析的検討を行った。原位置三軸試験から求められた変形係数と岩石物性を用いて直交異方性体モデルから求められた値を比較して図-6に示す（試験値は平均値を記載した。）。これによれば、両者は層理面の法線と最大主応力方向とのなす角 θ に対して同様の変化傾向を示しており、異方性に関してほぼ一致していた。

以上の結果から、岩石試験結果の変形特性を用いた直交異方性体モデルにより、原位置三軸試験結果の変形特性が表現できることが示された。

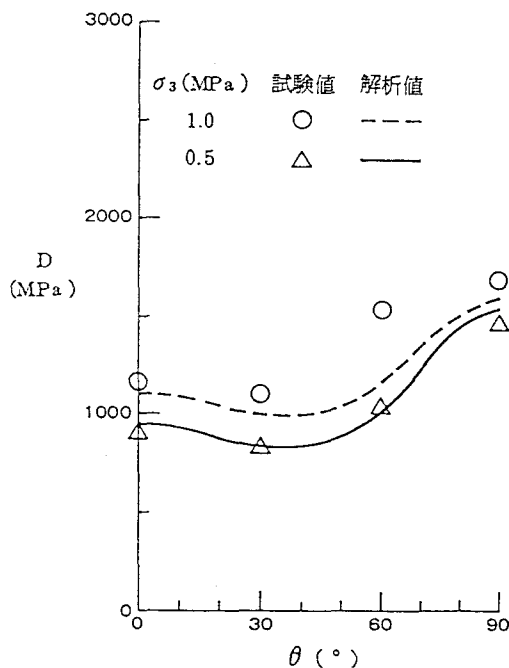


図-6 原位置三軸試験結果と解析との比較

(b) 大型ブロックせん断試験

ブロックせん断試験から得られた鉛直応力とせん断応力との関係からは、図-7に示すように、垂直応力の増加に伴い破壊時のせん断応力が増加する傾向が認められた。この結果を直線で回帰すると、みかけの粘着力 C は 0.77MPa 、内部摩擦角 ϕ は 34° となった。

これらの試験結果に対して、泥岩と砂岩の互層状態を考慮したFEMを用いた荷重増分法による逐次非線形解析を行った。解析用物性値は、岩石試験から求められた力学特性を用いた。変形特性については、指数関数式を用いて初期の有効拘束圧 σ_0' とひずみ ε とによる非線形性を考慮した。強度特性については、初期の有効拘束圧 σ_0' におけるせん断強度 τ_0 と最大発生せん断力 τ との比 (τ_0/τ) により破壊の判定を行った。

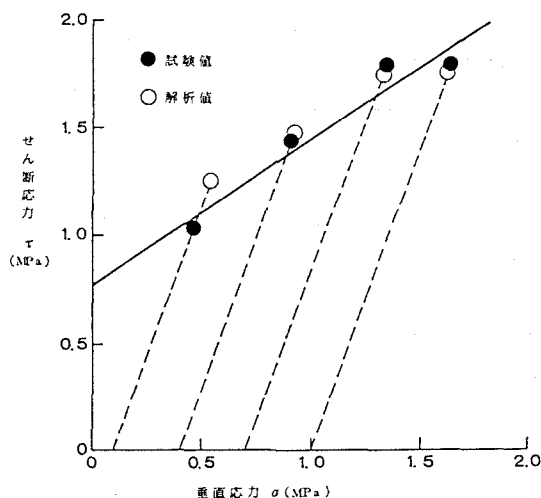


図-7 試験結果と解析値との比較

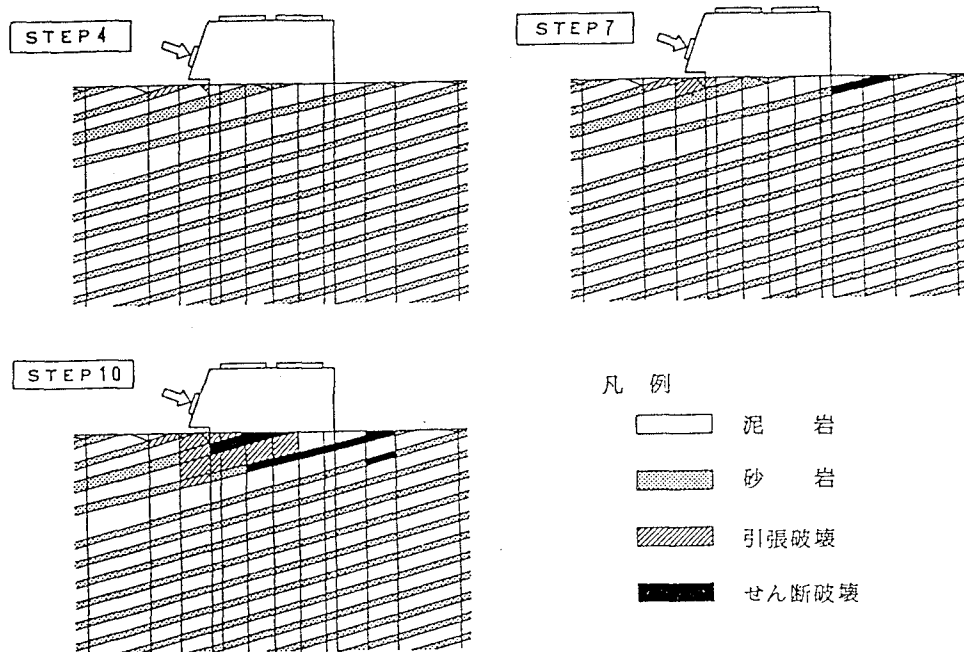


図-8 FEM解析による破壊進展図 ($\sigma_0 = 0.7\text{MPa}$ のケース)

図-8の破壊進展図は、 $\sigma_n = 0.7\text{MPa}$ のケースの逐次非線形解析の代表ステップを示したものである。これによれば、ブロック後方（せん断荷重載荷側）の岩盤で引張破壊が進展し、ブロック前方でせん断破壊が進展する様子がよく表現されており、ブロックせん断試験の一般的な破壊形態をよく模擬している。

同ケースにおける、せん断応力とブロックの水平変位との関係について、試験結果とFEM解析の値とを比較して図-9に示した。

さらに、解析から求められた応力～変位曲線の急変点をせん断強度と定義し、全ケースを試験結果と比較して前掲の図-7に示した。その結果によれば、解析値は試験値とよく一致しており、岩石試験から得られた力学特性を用いたFEM解析により、原位置のブロックせん断試験結果を表現できることが示された。

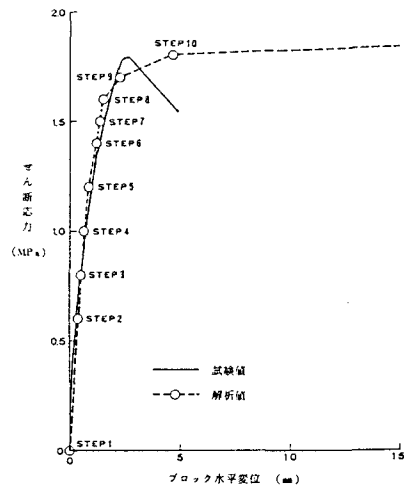


図-9 せん断応力～ブロック水平変位の試験結果と解析値との比較 ($\sigma_n = 0.7\text{MPa}$ のケース)

5. あとがき

新第三紀の泥岩、砂岩よりなる互層堆積軟岩を対象として、岩石・岩盤試験を実施し、これらの結果に解析的検討を加えた。その結果を要約すると以下のとおりである。

- ① 原位置三軸試験結果から、互層構造の影響による岩盤の力学的挙動に異方性が認められ、岩石試験結果から求めた変形特性を用いて直交異方性体により解析した結果は、原位置三軸試験結果から求めた変形特性の異方性とよく整合していた。
- ② 原位置大型ブロックせん断試験結果と、岩石試験結果から求めた強度・変形特性を用いてFEM解析した結果は、せん断強度、変形特性ともによく一致していた。
- ③ 岩盤試験により求めた強度・変形特性を評価するに当たっては、岩石試験結果から求めた力学特性および岩盤の構造を考慮した連続体力学モデルによる手法が有効であった。

以上の検討結果から、節理等の不連続面の影響の少ない堆積軟岩においては、岩石の力学特性を用いて岩盤の力学特性を把握できるものと考えられる。

6. 参考文献

- 1) 北原他：大型送電鉄塔の泥岩岩盤のロックアンカー基礎の引抜き耐荷力に関する現地試験と数値解析、第11回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1987。
- 2) Wardle, L. J. & C. M. Gerrard: The Equivalent Anisotropic Properties of Layered Rock and Soil Masses, Rock Mech, vol. 4, pp. 155~175, 1972.
- 3) 山本他：互層堆積軟岩を対象としたブロックせん断試験等に関する 2, 3 の考察, 電力土木 NO. 214, pp. 75 ~ 85, 1988.