

ボーリング孔内岩盤せん断試験の成立性の検討

FEASIBILITY STUDY ON NEW BOREHOLE ROCK SHEAR TEST

岡田 哲実*・小早川 博亮*・木方 建造**・細野 高康***

Testuji OKADA, Hiroaki KOBAYAKAWA, Kenzo KIHO and Takayasu HOSONO

A new In-situ test method was proposed for the purpose of evaluating strength characteristics for rock masses in deep ground. The test is conducted on a specimen prepared at the wall of a drill-hole. The feasibility of the test method was investigated by the model tests. The model tests were performed on sedimentary soft rock of diatomaceous mudstone and were simulated by FEM analyses. FEM analyses were carried out based on the results of triaxial compression tests. As a consequence, the specimens of the model tests were successfully sheared on the assumed shear plane. The computed results approximately agreed with the model test results.

Key Words: in-situ test, rock mass, borehole, shear strength

1. はじめに

通常、発電所や地下空洞等が建設される岩盤の力学特性調査では、調査用の試掘坑を掘削して原位置岩盤試験を行い、その結果から得られた力学物性値を設計用物性値として採用している場合が多い。しかし、地下深部や海底の岩盤を対象とする場合、原位置の試掘坑を掘削することは、多大な費用と時間を要するため、地点予定地を選定する初期調査の段階では原位置岩盤試験の実施は事実上かなり困難である。例えば、高レベル放射性廃棄物処分の調査においても、精密調査地区選定段階(三段階プロセスの第2段階)では地上からのボーリング調査で処分地としての適否を検討することになっている(例えば、原子力発電環境整備機構, 2001)。したがって、ボーリング孔を利用した試験によって岩盤の力学特性を精度よく把握することができれば、精密調査地区選定段階での早期の施設設計が可能となり、調査の合理化に大いに貢献できる。

一方、ボーリング孔を用いた岩盤の力学特性(特に変形特性)調査技術としては、プレッシャーメータ試験(孔内水平載荷試験)が基準化され、一般的に用いられている(例えば、土木学会, 2000)。地下深部(約百m以深)の調査に使用された例はあまり多くないが(例えば、藤原ら, 1992)、耐圧および精度の問題が解決できれば、地下深部への適用は十分に可能と考えられる。土質地盤であれば、プレッシャーメータ試験から得られる圧力-変位量関係を用いて、粘土や砂の強度を解析的に求める方法が提案されているが(地盤工学会, 1995)、岩盤にそのまま適用できるものは見あたらない。その他、研究的にはボーリング孔内で強度を直接求める試験方法が、いくつか提案されているものの(岡本ら, 1988)、現状で岩盤せん断試験や室内要素試験と比較できるほどの信頼性を有するものは存在しない。

そこで本研究では、まずは不連続面の少ない堆積岩(特に堆積軟岩)を対象として、ボーリング孔内で岩盤のせん断強度を直接求める試験方法を新たに考案し、模型実験および数値解析により、その成立性を検討した。実験結果から得られる強度が、コアを用いた室内要素試験から得られる強度と整合し、設計用の物性値として使用しうるレベルの試験法となることを目指す。

* 正会員 修士(工学) (財)電力中央研究所
** 正会員 工学博士 (財)電力中央研究所
*** 正会員 工学博士 (株)ダイヤコンサルタント

2. 考案した試験方法

図－1 に示す手順で試験を実施する。

- ①所定の深度までボーリング孔（A孔，孔径 $2R_a$ ）を掘削する。
- ②孔底の中心にやや小さいボーリング孔（B孔，孔径 $2R_b$ ）を掘削する。
- ③B孔下部を拡孔ビット等の方法でA孔と同等の大きさに拡孔し，孔内に長さ L の凸部（せん断部）を成形する。
- ④パッカーと載荷板が一体となった試験機を設置し，B孔内に設置したパッカーで（せん断部に）所定の拘束圧を加える。
- ⑤拘束圧 P を加えた状態で（場合によっては圧密を行った後），載荷板に下向きの荷重 F を加え，岩盤を（仮想せん断面で）せん断する。

荷重 F を加えた時，仮想せん断面でせん断するかどうか試験のポイントである。また，原位置で行うからには，せん断面の大きさ（長さ L ）は，岩盤せん断試験と同等の大きさにできることが理想である。

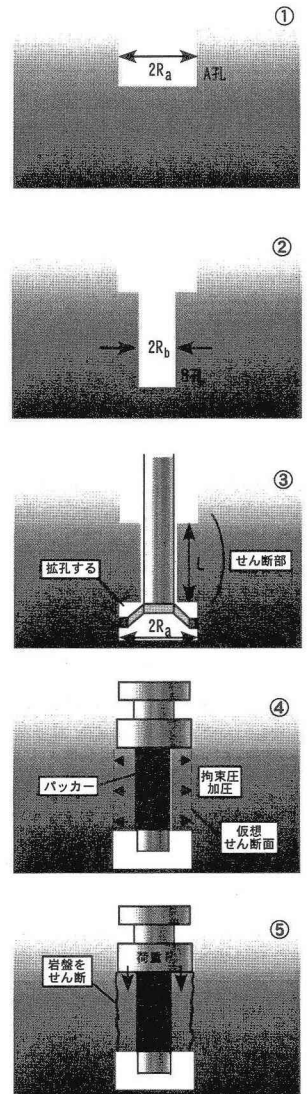
本試験では，仮想せん断面における垂直応力とせん断応力を算定し，仮想せん断面上のせん断強度を求める。なお，パッカーの圧力を P とした時，弾性理論より仮想せん断面での垂直応力 σ は次式により求めることができる。

$$\sigma = P \cdot (R_b^2 / R_a^2)$$

ここで， R_a ：拡孔部の半径（A孔の半径）， R_b ：パッカー部の半径（B孔の半径）である。一方，仮想せん断面でのせん断応力 τ は，次式で与えられる。

$$\tau = F / 2 \pi \cdot R_a \cdot L$$

ここで， F ：載荷板による載荷荷重， L ：せん断部の長さである。



図－1 試験の手順

3. 成立性の検証方法

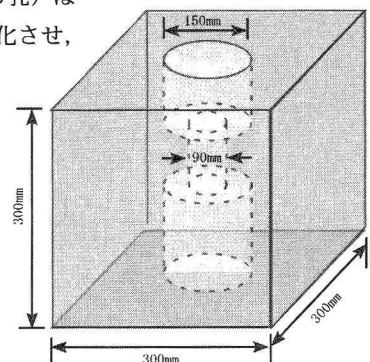
考案した孔内岩盤せん断試験の模型実験を行い，室内三軸圧縮試験および模型実験の数値解析の結果と比較することにより，試験方法の成立性の検証した。

(1) 模型実験の方法

実験に用いた試料は，能登半島でブロックサンプリングした珪藻泥岩(300×300×300mm程度)で，図－2のように最初からせん断部をあらかじめ成形した状態で試験体を準備した。ボーリング孔（A孔）はφ150mm，ボーリング孔（B孔）はφ90mmと固定し，孔内の凸部（せん断部）の長さ L を5，10，15cmと変化させ， L が5cmのケースのみ，拘束圧を0.2～3.0MPaと変えた（表－1）。

表－1 試験条件一覧

拘束圧P 長さL	0. 2MPa	0. 4MPa	0. 8MPa	3. 0MPa
5cm	○	○	○	○
10cm	－	○	－	－
15cm	－	○	－	－



図－2 試験体模式図

実験は室内で実施し、図－3に示すように孔にパッカーを挿入し、孔壁に所定の拘束圧を負荷して、 $\phi 150\text{mm}$ の載荷板で上方から荷重を加え、荷重と変位の関係を確認しながらピーク値が確認されるまで荷重を加えた。載荷（変位）速度は排水条件を想定し、 0.005mm/min とした。試験時にパッカー圧の影響により試験体が引張り破壊を生じないように、試験体は剛性の高い鋼製棒で拘束し、試験体と鋼製棒との隙間はモルタルで充填した。試験終了後には供試体を孔軸方向に2分割し、供試体内部の破壊状況を観察した。

(2) 室内三軸試験の方法

模型実験と同じブロックから直径 50mm 、高さ 100mm の供試体をコアドリルにより採取し、室内三軸試験を行った。試験方法は、「岩石の圧密排水三軸圧縮試験方法（JGS2534-2003）」に準拠して行った。ただし、変位については供試体の側面で計測せず、ピストンの変位を計測した。拘束圧は $0 \sim 0.8\text{MPa}$ の5拘束圧で、載荷速度は $0.01\%/min$ とした。

(3) 数値解析の方法

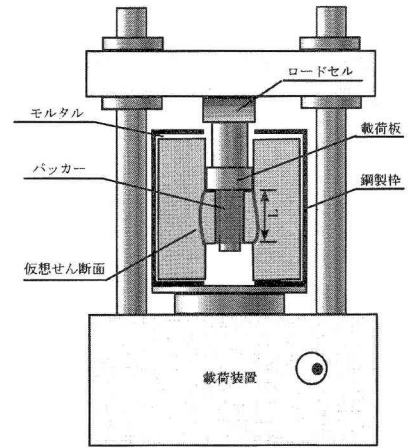
孔内せん断試験の模型実験をFEMにより数値解析した。解析の方法は、軸対称モデルを用いた非線形弾性解析とし、模型実験と同様にせん断部の長さ L と拘束圧を変化させてパラメータを設定した。解析に用いた岩石の物性値は基本的に室内三軸試験の結果から求めた（表－2）。非線形特性は、初期の弾性係数で正規化した弾性係数と破壊余裕度の関係で整理し、三軸圧縮試験結果から設定した。図－4に解析モデルを示す。せん断装置とゴム膜の物性値は既往のデータを参考にした。また、ゴム膜と岩盤の間のすべりを考慮し、境界部には薄い要素を設けた。境界部の物性値は不明であるが、パラスタの結果、物性値の影響は大きくないことを確認し、表－2の値を設定した。

4. 成立性の検証結果

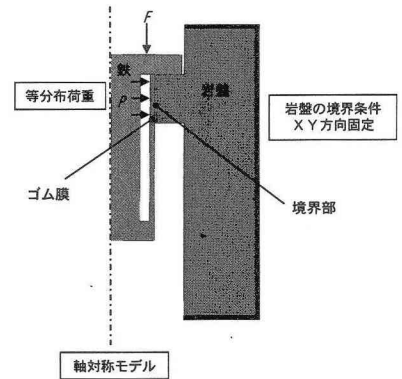
(1) 模型実験の結果

模型実験の結果から、得られた載荷板の変位と仮想せん断面上のせん断応力 τ との関係を図－5に示す。せん断部の長さ $L = 5\text{cm}$ における変位とせん断応力の関係は、パッカー圧 P にそれほど依存しない結果となった。一方、拘束圧を 0.4MPa 一定で L を変化させたケースでは、変位とせん断応力の関係は大きく異なり、ピーク値も L が長いほど小さくなる傾向が見られる。

試験終了後に試験体を切断し、せん



図－3 試験装置図



図－4 解析モデル図

表－2 解析用物性値一覧

	岩盤	載荷板他（鉄）	ゴム膜	接触部
弾性係数 E_0 (MPa)	138	200000	50	50
ポアソン比 ν_0	0.2	0.29	0.49	0.49
引張強度 σ_t (MPa)	0.3	500	500	0.0
粘着力 c (MPa)	0.639	100^{FE1}	100^{FE1}	0.0
内部摩擦角 ϕ (°)	8.3	1.0	1.0	30.0
破壊後弾性係数 E_f (MPa)	0.138	2000	5.0	0.005
破壊後ポアソン比 ν_f	0.48	0.48	0.49	0.49
弾性係数特性値 $A1^{FE1}$	1.0	1.0	1.0	1.0
" $B1^{FE1}$	0.54	0.25	0.25	0.5
ポアソン比特性値 $A2^{FE2}$	1.0	1.0	1.0	1.0
" $B2^{FE2}$	0.27	0.125	0.125	0.25
線形/非線形境界 RJP^{FE3}	0.65	0.001^{FE5}	0.001^{FE5}	0.25

注1) $E/E_0 = A1 \times R^{B1}$ R: 破壊余裕度

注2) $\nu_f - \nu = (\nu_f - \nu_0) \times A2 \times R^{B2}$

注3) $RJP < 1.0 \rightarrow$ 線形、 $0 < RJP \rightarrow$ 非線形

注4) 破壊ないように大きめに設定

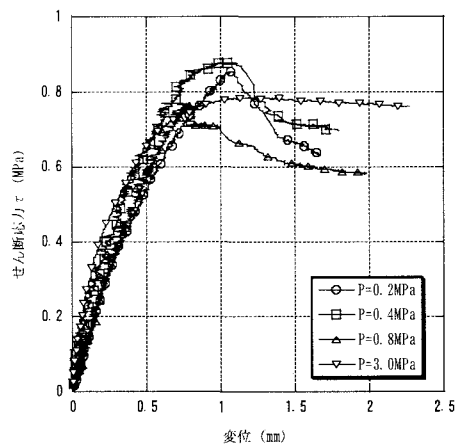
注5) 線形性を保つように小さめに設定

断面の状況を観察したところ、 $L=5\text{cm}$ の場合は仮想せん断面で破壊が確認されたが、 $L=10\text{cm}$ と 15cm の場合は仮想せん断面でせん断していないことがわかった。図-6にせん断面のスケッチの結果の一例を示す。 $L=5\text{cm}$ の試験では、全ての供試体で、仮想せん断面でせん断破壊していることが確認できた。しかし $L=10\text{cm}$ と 15cm のケースでは仮想せん断面上の破壊による連続した亀裂が確認できなかった。特に $L=10\text{cm}$ のケースでは、荷重部付近から外側に向かって引張りによって生じたと思われる亀裂が確認できた。また $L=15\text{cm}$ のケースでは、仮想せん断面付近の亀裂はほとんど見られず、下端部付近ではパッカー圧によると思われる破壊が見られた。

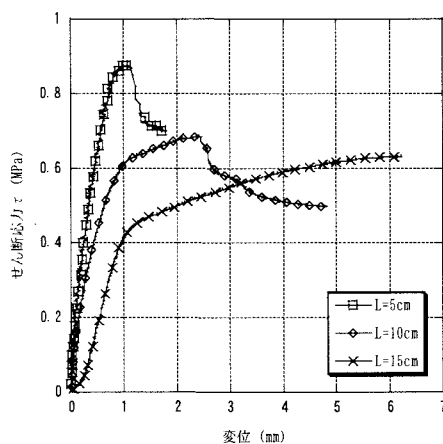
以上のことから、 $L=5\text{cm}$ のケースでは、岩盤せん断試験としての適用の可能性が示唆される結果となったが、 L の長さが長くなるとせん断以外のモードが卓越する結果となり、岩盤せん断試験としての適用が困難であることがわかった。

(2) 数値解析の結果

数値解析の結果から得られた荷重板の変位と仮想せん断面上のせん断応力 τ との関係を図-7に示す。実験結果(図-5)と比較すると、 $L=5\text{cm}$ のケースでは、変形量は計算結果の方が小さいもののピーク強度については概ね等しい結果となった。計算結果の変形が小さい理由としては、模型実験におけるベッディングエラーの影響が大きいものと思われる。一方、拘束圧を 0.4MPa 一定で L を変化させたケースでは、実験結果と同様に L が長いほどピーク値が小さくなる傾向が見られる。特に $L=15\text{cm}$ のケースで 0.4MPa 程度で変位



(a) $L=5\text{cm}$ のケース



(b) $P=0.4\text{MPa}$ のケース

図-5 せん断応力と変位の関係(実験)

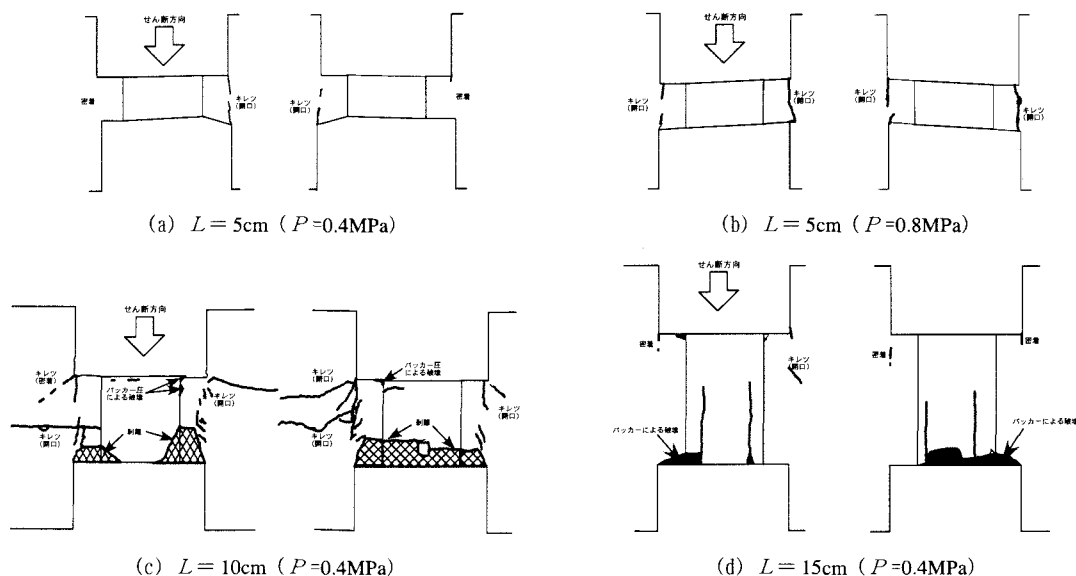


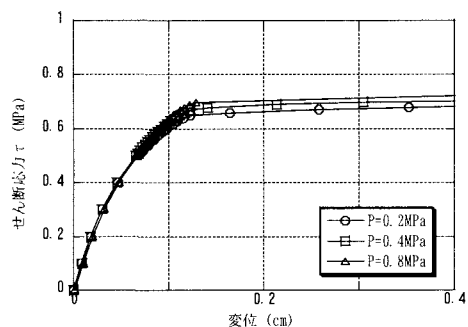
図-6 切断した試験体の切断面(破壊面)のスケッチ

が増加する傾向も類似している。

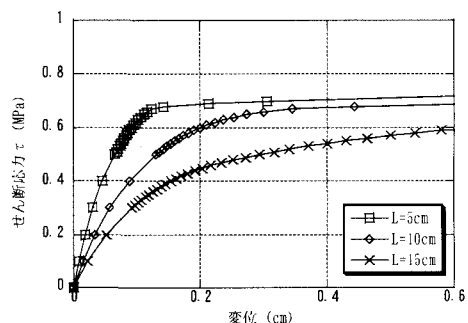
図-8に各破壊要素の分布状況を示す。ただし、破壊の判定は図-9に示すとおりで、引張破壊とせん断破壊を区別し、安全率が1未満となった要素と定義した。これより、 $L=5\text{cm}$ のケースでは、載荷板付近で若干引張破壊が見られるものの、パッカー圧によらず仮想せん断面上にせん断破壊が連続的に生じている。ただし、 $P=3.0\text{MPa}$ では載荷版したの破壊領域が広がっている。 $L=10\text{cm}$ のケースでは、仮想せん断面上ではほぼ連続的にせん断破壊を生じているものの、せん断破壊の領域が仮想せん断面以外にも広く分布している。 $L=15\text{cm}$ のケースでは、仮想せん断面に連続的なせん断破壊は見られず、パッカー近傍で引張破壊が生じている。以上の破壊形態は概ね実験の観察結果(図-6)と類似しており、実験結果をある程度表現できているものと思われる。これらの数値解析結果からも $L=5\text{cm}$ のケースがせん断試験として適切であることがわかった。以降、数値解析では、仮想せん断面上に破壊した要素が連続した時の荷重ステップを孔内岩盤せん断試験の破壊と定義した。

(3) 模型実験と数値解析と三軸試験結果の比較

模型実験、数値解析、三軸試験の破壊時の σ と τ の関係($L=5\text{cm}$ のケース)を図-10に示す。これより、三軸試験と数値解

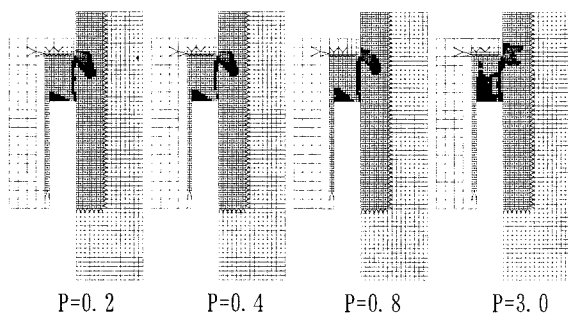


(a) $L=5\text{cm}$ のケース

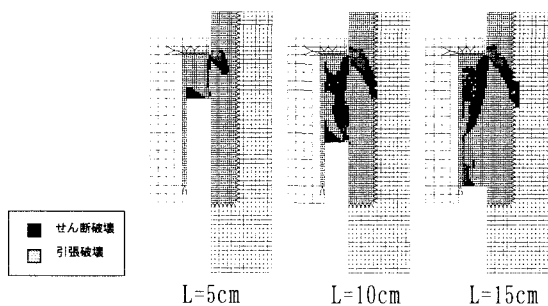


(b) $P=0.4\text{MPa}$ のケース

図-7 せん断応力と変位の関係(数値解析)



(a) $L=5\text{cm}$ のケース



(b) $P=0.4\text{MPa}$ のケース

図-8 数値解析結果の破壊状況

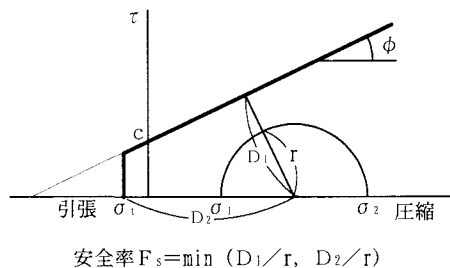


図-9 安全率の算定方法

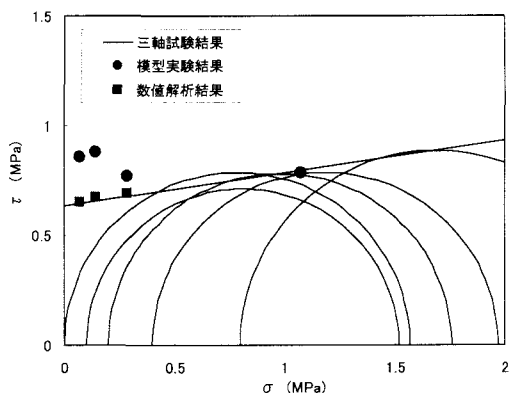


図-10 σ と τ の関係の比較

析の結果はほぼ一致している。模型実験の結果はこれらと比較すると若干大きな値を示す結果となった。この原因として、実験に使用した岩石材料がφの小さい材料であるため、供試体のばらつきの影響が顕著にあらわれてしまった可能性がある。その他の原因として、室内試験は完全飽和で実施したのに対して、模型実験では若干不飽和で実験を行ったことによる含水条件の影響、模型実験における境界（試験体のサイズ）の影響、せん断メカニズムの根本的な違いによる影響などが考えられるが、今のところは原因を特定するに至っていない。今後追加実験を行い、この原因について検討する予定である。

5. まとめ

ボーリング孔内で岩盤のせん断強度を直接求める試験方法（ボーリング孔内岩盤せん断試験）を新たに提案し、模型実験を実施した。その結果、せん断部の長さ $L=5\text{cm}$ の場合は、想定した仮想せん断面でせん断することができたが、 L が長い場合は（ $L=10\text{cm}$ および 15cm の場合）はうまくせん断することができなかった。数値解析の結果からも同様の傾向が確認された。また、模型実験から得られた岩石のせん断強度は三軸試験や数値解析の結果と比較すると若干大きな値を示した。この理由について、現時点では明確ではないが、今後も検討を行う予定である。

【謝辞】

本研究は経済産業省受託研究「ボーリング技術高度化調査」において実施したものである。

【参考文献】

- 1) 原子力発電環境整備機構：特定放射性廃棄物処分の概要調査等の選定手順の基本的考え方，2001.
- 2) 土木学会：原位置岩盤試験法の指針，2000.
- 3) 地盤工学会：地盤調査法，1995.
- 4) 藤原義一，西 好一，池見元宣，川崎 了，吉田保夫，国生剛治：軟岩CAESのための都市近郊大深度地盤の力学特性の解明－ボーリング孔を利用した原位置・試験－、電力中央研究所研究報告U92022，1992.
- 5) 岡本敏郎，土谷 尚：講座「新しい現地調査法」2. 変形・強度を求めるための現地調査法，土と基礎，Vol.36，No.1，pp.87-91，1988.