

不連続性岩盤の力学特性に及ぼす応力径路の影響に関する一考察

INFLUENCE OF STRESS PATH ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF JOINTED ROCKS

永井哲夫*・國村省吾**・田中典明***

Tetsuo NAGAI, Shogo KUNIMURA, Noriaki TANAKA

Rock masses may come under various multiaxial loading conditions when major large works, such as excavations or foundations, are carried out. Therefore, in order to quantify the behaviour of jointed rock masses, engineers need to know sufficiently the influence of stress path on all the mechanical properties of intact rock and joints.

In this study, the strength and deformation characteristics of jointed rock masses are studied by experimental approaches, taking into account the stress path corresponding to the stress possibly developed in rock masses. The results show that stress path followed during the experiment has a great effect on the mechanical characteristics.

Keywords : jointed rocks, stress path, mechanical properties, unloading, excavation

1. はじめに

一般に、土の力学的挙動を的確に予測するには、応力径路がその力学特性に及ぼす影響を適切に評価しなければならない¹⁾。それに対して岩盤の場合、軟岩を対象として応力径路がその力学的挙動に及ぼす影響について検討された事例²⁾はあるものの、不連続性岩盤などを対象として十分な検討はなされていない³⁾のが現状である。

通常、大規模な地下空洞や岩盤斜面などの掘削工事において岩盤力学特性を評価する場合、原位置岩盤の変形およびせん断試験が実施される⁴⁾。前者については、平板載荷試験により所定の荷重レベルまで繰り返し載荷・除荷を行い、対象となる地点の初期応力レベルに対応した除荷時の接線弾性係数を求めている。一方、後者については、ブロックせん断またはロックせん断試験により、想定せん断面に作用する垂直およびせん断応力がともに単調増加する径路で載荷し、破壊時のそれらの値に基づき強度定数（一般には、 c および ϕ ）を求めている。以上のように、大規模な岩盤掘削において応力径路がその力学特性に及ぼす影響は十分に考慮されていない。

著者の一人は、これまで不連続性岩盤の力学特性に及ぼす応力径路の影響を把握するための第一段階として、岩石供試体を対象に応力径路がその力学特性に及ぼす影響について考察を行っている⁵⁾。そこで本研究では、岩質材料よりなる不連続供試体を用いて三軸実験を行い、応力径路がその見かけの力学特性および挙動に及ぼす影響について考察する。

*	正会員	博士（学術）	（株）青木建設	研究所	土木研究室
**	正会員		（株）青木建設	研究所	土木研究室
***	正会員		東京電力（株）	電力技術研究所	構造研究室

2. 岩石の力学特性に及ぼす応力径路の影響⁴⁾

著者の一人は、前述のように岩石供試体を用いて三軸実験を行い、応力径路がその力学特性に及ぼす影響について考察している。ここでは、その概要をまとめて示す。

供試体としては中国の赤砂岩を用い、図-1に示すような2種類の応力径路のもとで応力制御の三軸実験を行った。ここで、ケース1は通常の三軸圧縮試験と同様の応力径路であり、ケース2は等方等圧状態にしてから軸荷重の載荷と側圧の除荷を同時に行うものである。後者は、例えば空洞掘削時の壁面近傍の地点における応力径路に対応している。そして、実験の結果、ピーク強度、弾性係数および軸ひずみは応力径路の影響をあまり受けないが、横ひずみは大きな影響を受けることが分かった。

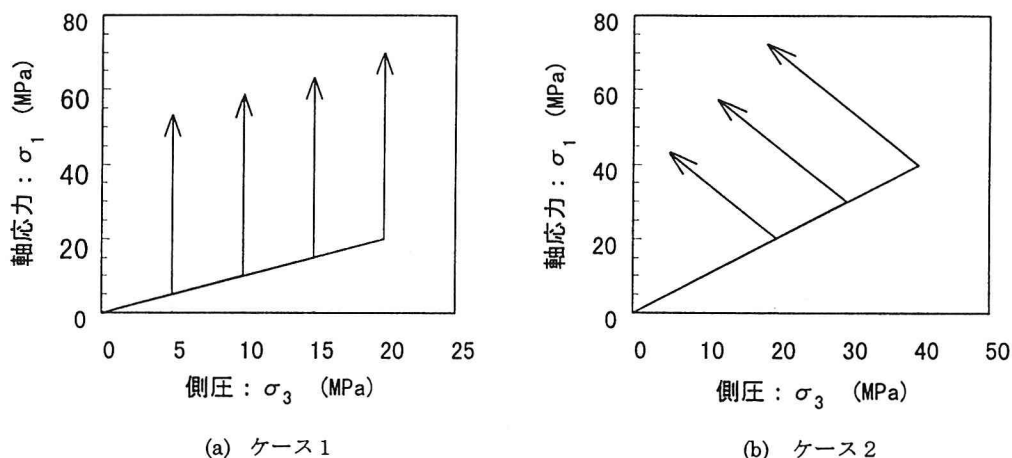


図-1 岩石供試体の三軸実験で設定した応力径路

3. 実験概要

本研究では、不連続性岩盤の力学特性に及ぼす応力径路の影響を把握するため、岩質材料を用いて不連続供試体を作製し、高剛性高圧三軸実験装置により2種類の応力径路のもとで疑似三軸実験を行った。ここでは、実験装置、供試体および実験方法についてそれぞれまとめて以下に示す。

3.1 実験装置

実験では、写真-1に示すように特製の大型三軸セルを有する高剛性高圧三軸実験装置を用いた。本装置の載荷方式は、軸荷重および側圧ともに電気・油圧サーボコントロールとなっており、軸方向の最大荷重は100tonf [980kN]、側圧の最大値は200kgf/cm² [19.6MPa]である。また、計測および制御システムは図-2に示すようになっている。

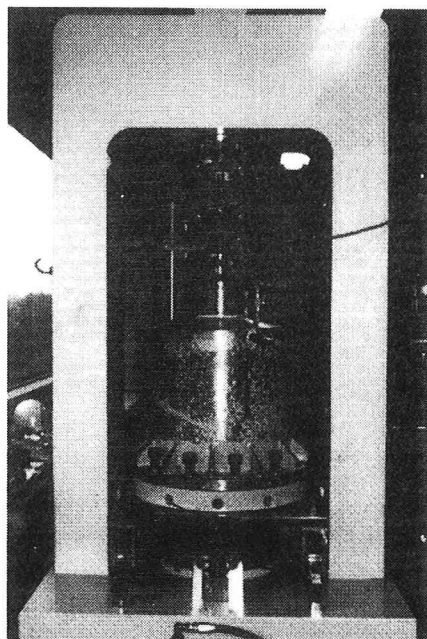
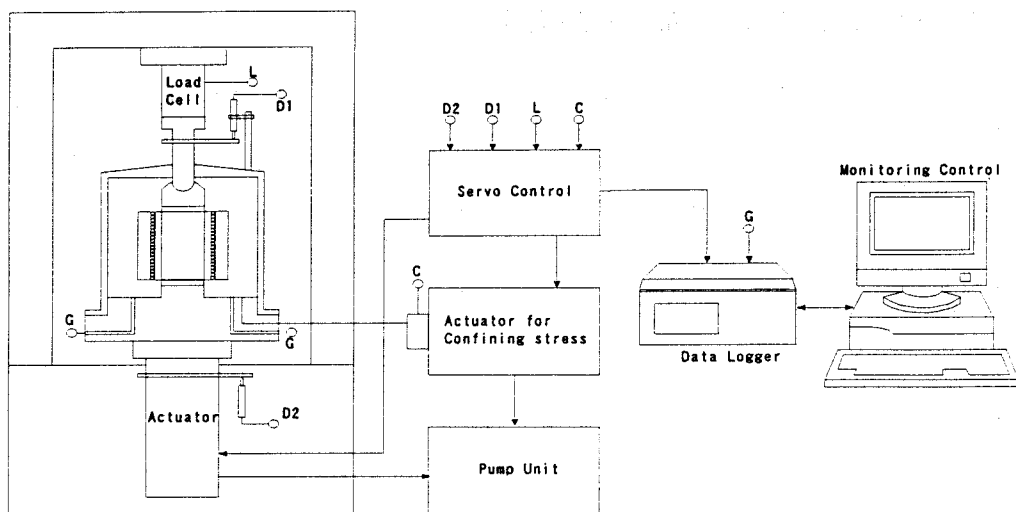


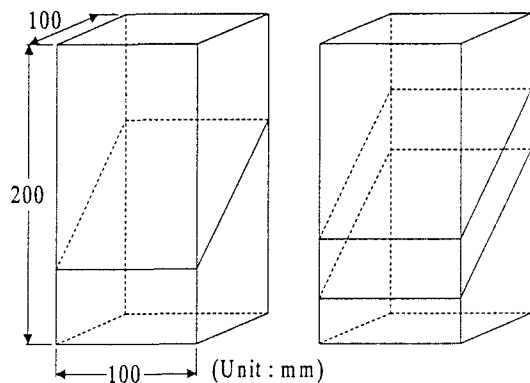
写真-1 高剛性高圧三軸実験装置



図－２ 本実験装置の計測および制御システムの概要

3.2 供試体

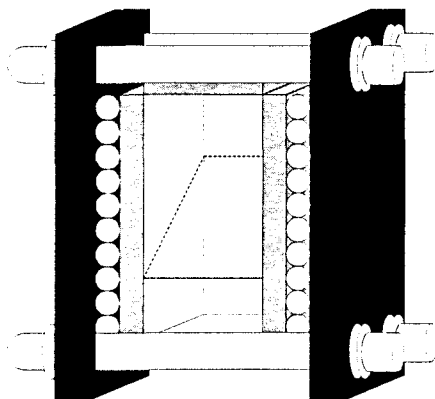
図－３に示すように卓越する一群の不連続面を含む不連続供試体を作製した。供試体の形状は直方体であり、寸法は幅100mm、奥行き100mm、高さ200mmである。その中に不連続面が二次元的に供試体を貫通するように配置されている。ここでは、岩石実質部の材料をモルタルとし、その配合はセメント：川砂：水＝1：2：0.5（重量比）としている。モルタルの一軸圧縮強度および弾性係数の平均値は、材令7日でそれぞれ420kgf/cm² [41.2MPa] および9.5×10⁴ kgf/cm² [9.3GPa] であった。一方、不連続面は、モルタル打設時にあらかじめ型枠内に設置したアクリル製の仕切板をモルタル硬化後取り除くことにより形成した。表面形状は平滑である。なお、供試体の養生は、室温20±1℃および湿度80±5%という条件下で、型枠内1日、脱型後空中6日を基本としている。



図－３ 不連続供試体の概要

3.3 実験方法

不連続供試体の軸荷重および中間主応力方向にエンドピースを取り付けて図－４に示すような平面ひずみ拘束装置にセットし、これを大型三軸セルの中に設置して油圧により側圧载荷を行った。これにより、最小主応力方向の境界条件を応力一定となるようにしている。なお、ここでは不連続供試体への油の浸入を防ぐため、供試体とエンドピースをシリコーンゴムで被覆している。

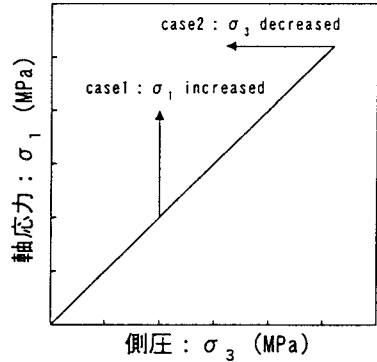


図－４ 平面ひずみ拘束装置の概要

本実験では、表－１に示すように２種類の応力経路のもとで、不連続面の角度および数を変化させて三軸実験を行った。いま、ここで設定した応力経路を示すと図－５のようになる。ケース１は通常の三軸圧縮実験と同様の応力経路で軸差応力を軸方向に載荷するもの、ケース２は等方等圧状態にしてから側圧を低減させることにより軸差応力を除荷するものである。前者については、初期の側圧を側圧比が0.05～20%の範囲で５種類選定し、載荷条件は0.01mm/min.の変位制御としている。一方、後者については、側圧比の範囲を11～23%とし、除荷条件は0.5kgf/cm²/min.の応力制御としている。なお、前述の側圧比とは、側圧と一軸圧縮強度の比 (σ_3/σ_c) として定義されるものである。

表－１ 実験条件

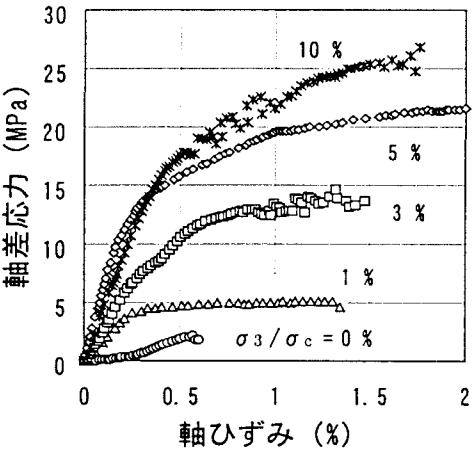
実験No.	応力経路	不連続面の角度 (°)	不連続面の数 (本)
1	ケース 1	50	1
2	"	"	2
3	"	60	1
4	"	"	2
5	ケース 2	50	1
6	"	"	2
7	"	60	1
8	"	"	2



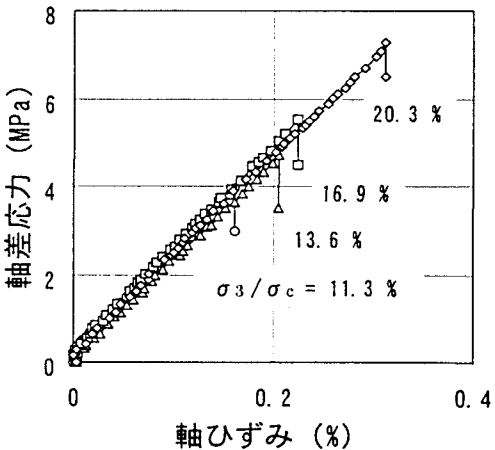
図－５ 本実験で設定した応力経路

4. 実験結果および考察

まず、実験によって得られた代表的な軸差応力－軸ひずみ曲線を応力経路ごとに示すと図－６および図－７のようになる。前者はケース１、後者はケース２という応力経路の場合の結果をそれぞれ示している。これらの図から、ケース１の場合、軸差応力が大きくなるにつれて弾性的な挙動から延性的な挙動に移行し、応力－ひずみ曲線は非線形となること、ケース２の場合、軸差応力が大きくなっても弾性的な挙動を維持し、破壊に至るまで応力－ひずみ曲線はほぼ線形となることが分かる。このような傾向は、全ての実験条件に対して見られた。



図－６ 軸差応力－軸ひずみ曲線 (No.1)



図－７ 軸差応力－軸ひずみ曲線 (No.5)

また、軸差応力のピーク値、見かけの弾性係数 (E_{50}) および破壊ひずみに着目すると、ケース 1 の場合、初期の側圧がわずかに増加するだけで各特性値は大きな増加を示すのに対して、ケース 2 の場合、初期の側圧が増加するに伴い軸差応力のピーク値および破壊ひずみは増加を示すが、見かけの弾性係数はほとんど変化しない。さらに、後者では比較的小さな軸差応力および軸ひずみで破壊に至ることが分かる。

次に、実験 No. ごとにそれぞれ最大および最小主応力を求めてモールの円を描き、モール・クーロンの破壊規準を適用して見かけの強度定数 c および ϕ を求める。その結果の一部を示すと図-8 および図-9 のようになる。これらは、それぞれ図-6 および図-7 に対応するものである。これらの図から、応力経路によって見かけの強度定数は大きく異なることが分かる。

一方、破壊形態は、両ケースとも不連続面に沿った破壊を示しているが、ケース 2 の場合はケース 1 に比べるとより急激で大きなすべり破壊を呈していた。

以上のように、不連続供試体の場合、応力経路がその力学特性に及ぼす影響は顕著であり、前述の岩石供試体の場合には見られないような現象が数多く確認された。これらのことから、不連続性岩盤の場合、応力経路によりその力学特性は大きく異なると考えられる。そこで著者らは、このような不連続性岩盤に特有の現象に関して、これまで不連続面の力学特性の応力依存性を考慮した不連続性岩盤と等価な連続体の構成式 (EJCM: Equivalent Joint Compliance Model) により検討を行っている⁹⁾。その結果、応力経路が不連続性岩盤の力学的挙動に及ぼす影響をよく表現できることが明らかにされている。今後、EJCMを用いて本実験結果の検討を行い、その妥当性を検証する予定である。

最後に、本研究は、東京電力(株)電力技術研究所と(株)青木建設研究所が平成 6 年度～7 年度に実施した共同研究「不連続性岩盤掘削時の支保工評価手法の研究」の一部である。なお、図表の作成に際しては(株)青木建設の小谷野、高橋両氏にご協力を頂いたもので、紙面を借りて深く感謝の意を表す次第である。

【参考文献】

- 1) 例えば、足立紀尚・龍岡文夫：土の力学(Ⅲ)－圧密・せん断・動的解析－，土木学会編新体系土木工学18，技報堂，1981。
- 2) 例えば、徳江俊秀・本島 陸・北原義浩：豊前系統開閉所切取斜面の掘削時の変形挙動の実測と数値解析との比較，電力中央研究所報告，研究報告：379030，1980。
- 3) Reik, G. and Zacas, M.: Strength and deformation characteristics of jointed media in true triaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.15, pp.295-303, 1978。
- 4) 土木学会：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針－解説と設計への適用－，1983。
- 5) 沈 明榮・孫 建生・永井哲夫：岩石の力学特性に及ぼす応力経路の影響に関する一考察，第3回岩盤システム工学シンポジウム講演論文集，pp.49-52，1995。
- 6) 孫 建生・國村省吾・永井哲夫・櫻井春輔：不連続性岩盤における応力経路問題の評価方法，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第Ⅲ部，pp.720-721，1994。

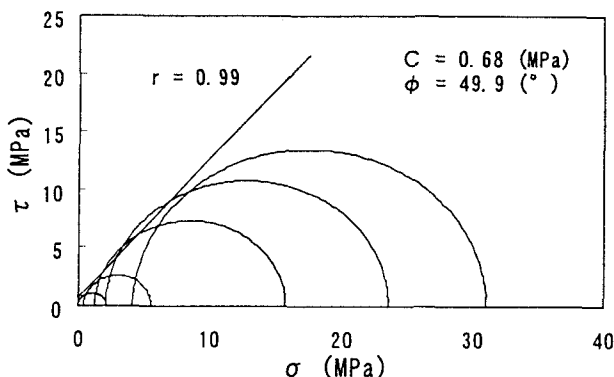


図-8 モールの応力円と包絡線 (No. 1)

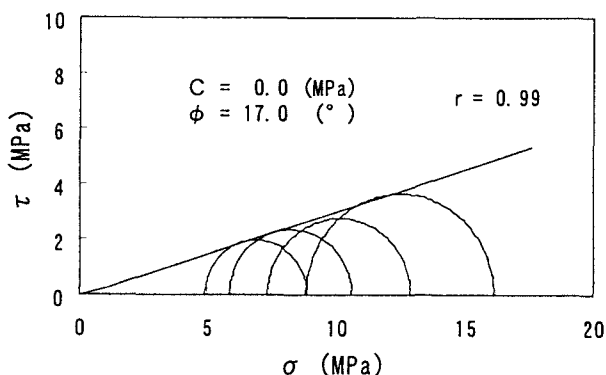


図-9 モールの応力円と包絡線 (No. 5)