

応力経路に依存した破壊挙動と透水特性に関する実験的研究

鈴木健一郎^{1*}・竹村貴人²・中岡健一¹

¹株式会社 大林組 地盤技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

²日本大学 文理学部 地球システム科学科 (〒156-8550 東京都世田谷区桜上水3-25-40)

*E-mail: suzuki.kenichiro@obayashi.co.jp

地下空洞近傍の応力場は、掘削前の広域造構応力や掘削による応力再配分により様々な応力場を経験する。掘削過程では、圧縮応力場や伸張応力場により破壊挙動が異なり、その場合、それぞれの応力場で形成された流体の移動経路となる亀裂の特性も異なる。また、空洞近傍での透水性も応力場の違いにより異なることが知られている。

このような背景の下、伸張応力場での破壊特性、応力の回転に伴う透水特性の変化を予測することを目的として、大型の真三軸試験装置を用いて、来待砂岩の三軸圧縮および伸張試験を行い、応力経路による破壊挙動の違いと透水性の違いを調べた。

Key Words : stress path, failure criteria, permeability, true triaxial test, compression, extension

1. はじめに

地下空洞近傍の応力場は、掘削前の広域造構応力や掘削による応力再配分により様々な応力場を経験する。そのため、損傷・破壊のプロセスは応力経路によって多様である。掘削過程では、鉛直方向が最大主応力の場合、その増加による圧縮破壊やそれに伴うせん断亀裂の発生、水平方向が最大主応力であった場合には、その解放と鉛直方向応力の増加による伸張破壊により空洞壁面に平行な亀裂が発生するなど挙動が異なる。地下空洞の実測によると変形の多くが不連続面の開口であるとの報告¹⁾もあり、破壊挙動の解明は重要である。その場合、それぞれの応力場で形成された流体の移動経路となる亀裂は、物理的特性も異なれば、水理学的、力学的特性も異なる。また、空洞近傍での透水性も応力場の違いにより異なることが知られている。このような背景の下、伸張応力場での破壊特性を調べたり²⁾、応力の変化に伴う亀裂開口幅の変化を定式化、応力の回転に伴う透水特性の変化を予測することを目的とした実験データを集めることが必要となる。

ここでは、大型の真三軸試験装置を用いて、来待砂岩の三軸圧縮試験および伸張試験を行い、応力経路による破壊挙動の違いを調べた結果について報告する。また、別途実施した圧縮破壊、伸張破壊させた供試体について、透水試験を実施し、透水特性についても調べたので、その結果についても述べる。

2. 実験方法および試験条件

実験は岩盤多機能試験装置(写真-1)を用いて行った。この装置は、鉛直最大荷重10MN、側方最大荷重5MNを有する、3方向の荷重を独立に制御できる試験装置で、透水試験も可能である。円柱供試体の破壊試験およびブロック供試体による破壊-透水試験のそれぞれの方法を以下に述べる。



写真-1 岩盤多機能試験装置

(1) 円柱供試体の破壊試験

来待砂岩のブロック試料から、方向による違い

を避けるために同一方向に、直径150mm、高さ300mmの円柱供試体を採取し、図-1に示すような剛体載荷板を介して3方向から载荷を行った。载荷速度は、载荷、除荷ともに0.5mm/minとして、等方応力状態まで载荷後、圧縮試験では、Z方向を载荷、XY方向を除荷し、伸張試験では、Z方向を除荷、またはXY方向を载荷し、それぞれ破壊するまでの载荷を行った。中間主応力の影響を調べたケースも1ケース追加した。载荷条件を表-1に示す。

(2) ブロック供試体の破壊—透水試験

図-2に透水試験の状況を示す。来待砂岩のブロック供試体の寸法は一辺500mmの立方体である。ブロックの周辺はゴムスリーブを被せ、載荷板によりX,Y,Zのそれぞれの軸方向荷重を独立に载荷した。破壊方法は、圧縮条件（Z载荷）と伸張条件（XY载荷）の2種類である。その後、各方向の応力を変化させて透水試験を行った。透水試験は表-2に示す5ケースである。

3. 実験結果および考察

(1) 円柱供試体の破壊試験結果

円柱供試体の破壊試験結果を平均主応力と最大せん断応力関係としてまとめる。まず、圧縮条件と伸張条件に注目して示す。図-3では平均主応力の増加経路でも低下経路でも円柱軸方向に圧縮される場合は、同一の破壊規準線上に達すると破壊する。一方、図-4に示した伸張条件での破壊時の応力状態と経路を同様にプロットしたものは、応力経路に依存せず別の直線上に並び、圧縮条件と伸張条件では破壊規準は圧縮条件とは異なることがわかる。

平均主応力に注目すると、図-5に示したように、平均主応力に対するせん断応力の増加の緩急により、または、図-6に示したように、平均主応力の減少に対する軸差応力減少の緩急により破壊規準が異なることが示された。

これらの結果は図-7に示すように、平均主応力—偏差応力面では直線のコーン状であるが、偏差面ではおにぎり形の破壊規準に近いものであった。図中高橋ら²⁾が行った伸張試験結果も併記した。

表-1 载荷条件

試験条件	Z载荷	$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 5 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x = \sigma_y \leq \sigma_z$
		圧縮条件
		$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 15 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x = \sigma_y \leq \sigma_z$
	XY除荷	$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 5 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x \leq \sigma_y \leq \sigma_z$
		$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 50 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x = \sigma_y \leq \sigma_z$
		$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 70 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x = \sigma_y \leq \sigma_z$
		$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 100 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x = \sigma_y \leq \sigma_z$
伸張条件	XY载荷	$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 5 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x = \sigma_y \geq \sigma_z$
		$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 10 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x = \sigma_y \geq \sigma_z$
		$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 15 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x = \sigma_y \geq \sigma_z$
	Z除荷	$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 70 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_x = \sigma_y \geq \sigma_z$

偏差面において、今回の応力レベルでは非線形とな

っていない。高応力レベルでの非線形性と偏差面での中間角度における検討が課題である。

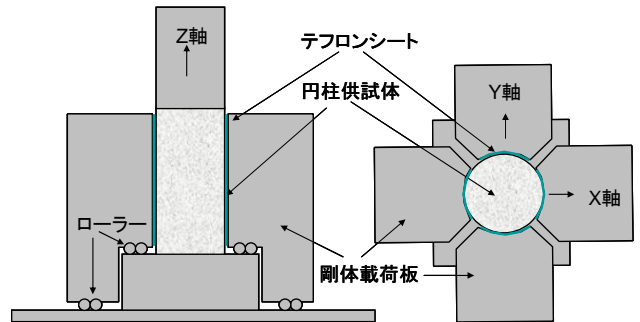


図-1 三軸圧縮試験、伸張試験の状況

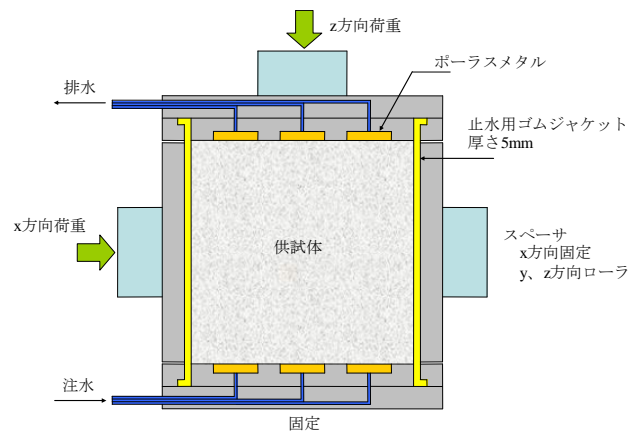


図-2 透水試験の状況

表-2 透水試験条件

X軸 MPa	Y軸 MPa	Z軸 MPa	透水圧 MPa
0.1	0.1	0.1	0.05
2.0	2.0	2.0	0.05
0.1	2.0	2.0	0.05
2.0	0.1	2.0	0.05
2.0	2.0	0.1	0.05

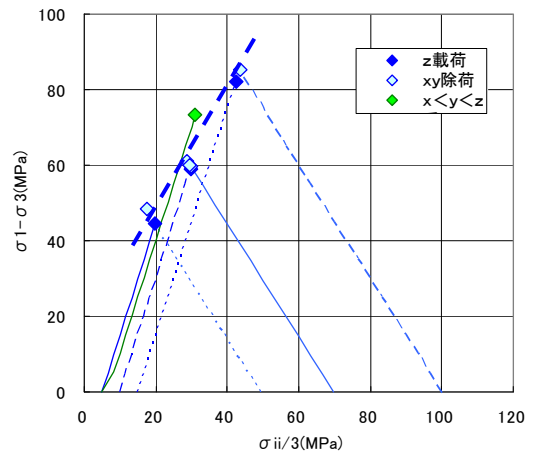


図-3 破壊点と応力経路（圧縮条件）

次に破壊状況を示す。写真-2には圧縮条件の供試体の破壊状況を示す。Z軸载荷のケースでは、せん断面が主応力方向に対して鋭角に発達する。水平方向、すなわち最小主応力からの角度は 78° ($45^\circ + 57/2^\circ$) の傾斜に相当する。右の写真は、XY除荷のケースであるが、z軸载荷と同様なせん断面方向となっている。伸張条件の供試体の破壊状況の写真-3では、z面にはほぼ平行な破壊面と若干の傾きを持った破壊面 (Z伸張時の摩擦角からはz軸からお

よ 61°) が得られている。XY载荷のケースが左でZ除荷のケースが右である。

応力経路に依存した破壊規準において、圧縮側と伸張側は明らかに破壊形式が異なり、次の破壊規準に従うもと考えられる。

(2) ブロック供試体の破壊—透水試験結果

透水試験は破壊条件により発生した亀裂がどのように異なるかを透水性で調べる目的と、亀裂が存在した場合の応力軸の回転に伴う変化を調べる二つの

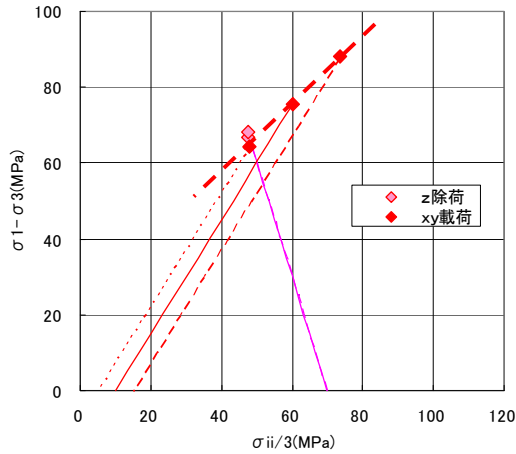


図-4 破壊点と応力経路 (伸張条件)

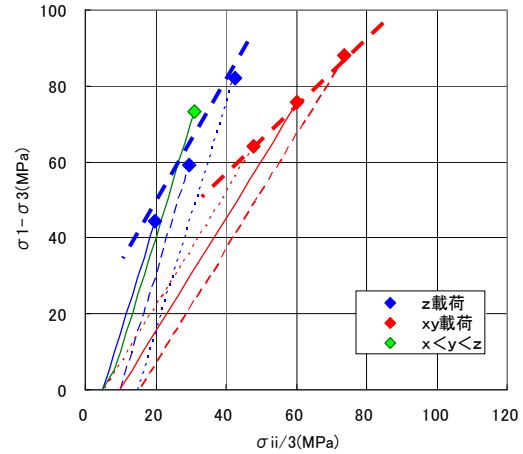


図-5 破壊点と応力経路 (平均主応力の増加側)

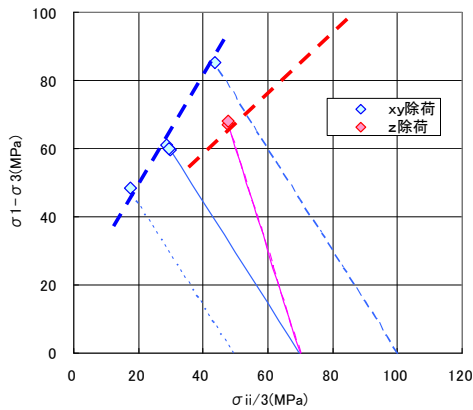
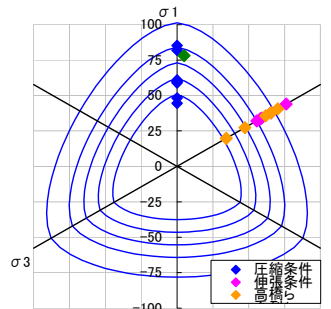
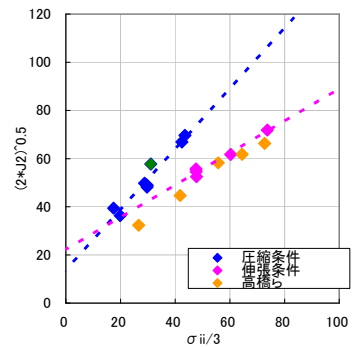


図-6 破壊点と応力経路 (平均主応力の減少側)



deviatoric section



meridian

図-7 破壊規準



写真-2 破壊状態 (左: z 载荷. 右: xy除荷)
(亀裂はトレースして強調してある)



写真-3 破壊状態 (左: xy载荷. 右: z除荷)
(亀裂はトレースして強調してある)

目的で実施した。

圧縮状態で亀裂を作成するために測圧 1 MPaで、Z軸方向を破壊するまで载荷して、せん断亀裂を発生させた。荷重－変位関係を図-8に、破壊時の供試体の状況を写真-3に示す。その後、透水試験を前述の表-2に示す応力状態で実施した。結果を表-3に示す。

Y軸方向応力を一定 (0.1MPa) として、X軸方向およびZ軸方向に同じ速度で载荷し、伸張破壊をさせた後に透水試験を実施した。荷重－変位関係を図-9に、破壊時の供試体の状況を写真-4に示す。透水試験の結果を表-4に示す。

圧縮条件と伸張条件において、亀裂の発生状況の違いと、それに伴う透水性の違いが明確に現れた。

4. まとめと今後の課題

(1) 破壊規準

圧縮、伸張それぞれの応力経路により来待砂岩の破壊試験を実施し、両者の違いを調べた。その結果、圧縮状態と伸張経路とでは、圧縮経路の方が大きなせん断応力となり、伸張経路では、破壊規準は若干下がる結果となった。

空洞掘削や斜面掘削などによる応力解放型の岩

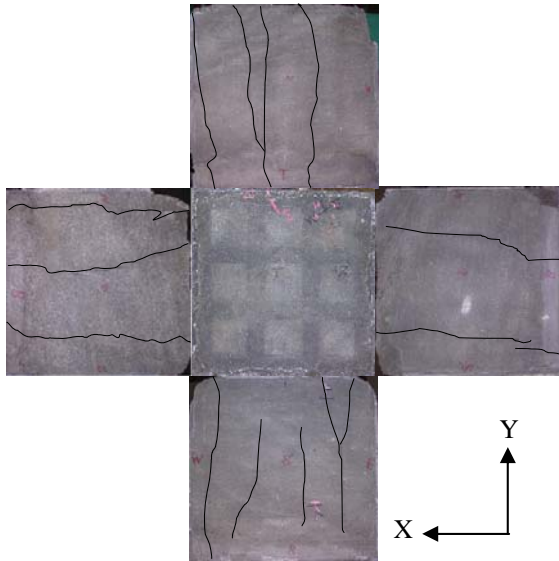


写真-3 圧縮試験破壊供試体
(亀裂はトレースしてある)

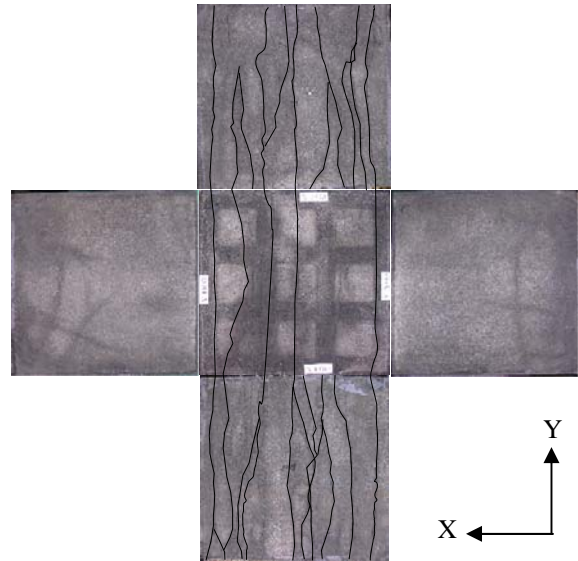


写真-4 伸張試験破壊供試体
(亀裂はトレースしてある)

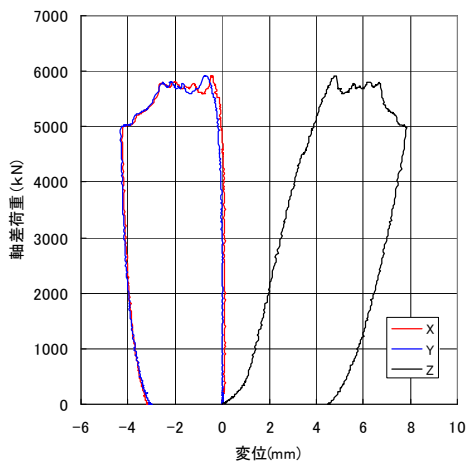


図-8 荷重－変位関係 ($\sigma_x = \sigma_y = 1\text{MPa}$)

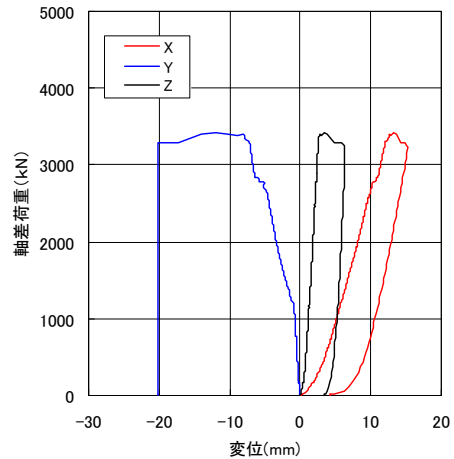


図-9 荷重－変位関係 ($\sigma_y = 0.1\text{MPa}$)

表-3 圧縮試験後の透水試験結果

X軸 MPa	Y軸 MPa	Z軸 MPa	透水圧 MPa	透水係数 m/s
0.1	0.1	0.1	0.05	3.04E-07
2.0	2.0	2.0	0.05	1.85E-09
0.1	2.0	2.0	0.05	3.76E-09
2.0	0.1	2.0	0.05	2.46E-08
2.0	2.0	0.1	0.05	6.76E-08

表-4 伸張試験後の透水試験結果

X軸 MPa	Y軸 MPa	Z軸 MPa	透水圧 MPa	透水係数 m/s
0.1	0.1	0.1	0.05	3.13E-06
2.0	2.0	2.0	0.05	3.00E-07
0.1	2.0	2.0	0.05	2.97E-06
2.0	0.1	2.0	0.05	2.74E-06
2.0	2.0	0.1	0.05	3.00E-06

盤の破壊に対して、圧縮側の強度定数を用いることは伸張側の破壊がある場合には注意を要する。

(2) 透水特性

伸張試験で破壊させた来待砂岩は、透水係数が圧縮破壊のものに比べて1オーダーから2オーダー大きくなる。水平方向の応力の卓越する空洞掘削などにおいては壁面近傍に空洞軸方向に亀裂が発達し、透水性が大きくなる報告⁴⁾もあり、空洞近傍の透水性評価においても伸張状態と圧縮状態の破壊を十分に区別することが重要となる。

以上のように、透水性の違いは破壊形態、亀裂の進展状況に依存していることがわかる。今回の試験では、完全に破壊させての亀裂状況の比較であったが、応力段階で亀裂の進展状況を確認し、また様々な岩種において実施し、応力再配分に伴う亀裂の進展と

透水性の評価のためのデータを蓄積していく必要がある。

参考文献

- 1) 堀義直, 宮腰勝義: 新高瀬川地下発電所の空洞掘削に伴う岩盤ゆるみ性状の検討, 電力中央研究所報告, No.376528, 1977
- 2) 高橋直樹, 高橋学, 木山保, 竹村貴人: 封圧下における来待砂岩の伸張試験, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.723-728, 2008.
- 3) Chen, W. and Saleeb, A.: *CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR ENGINEERING MATERIALS*, Vol.1 Elasticity and Modelling, p John Wiley & Sons, 1982.
- 4) 本島勲: 地下空洞掘削に伴う周辺岩盤における透水性の変化に関する考察, 電力中央研究所報告, No.379009, 1979

EXPERIMENTAL STUDY ON FAILURE CRITERIA AND HYDRAULIC PROPERTIES DEPENDING ON THE STRESS PATHS

Kenichiro SUZUKI, Takato TAKEMURA, and Kenichi NAKAOKA

Triaxial compression and extension tests of Kimachi sandstone were conducted using true-triaxial testing machine. Column specimens had a diameter of 150mm and a height of 300mm. And hydraulic properties were investigated after failure of cubic specimens with 500mm sides.

Through the experimental results, it was suggested that deviatoric section of failure criteria was different between compression and extension conditions and these difference of failure stress condition seemed to be propagation of cracks. Hydraulic properties also depended on the crack distribution and stress conditions.