

来待砂岩の三軸伸張応力による変形・強度特性に関する研究

Study on the Deformation and Strength Characteristic of Kimachi Sandstone under Confined Triaxial Extension Test

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

本研究では、直径 50mm、高さ 100mm の来待砂岩円柱供試体を用いて封圧下における三軸伸張試験を実施した。封圧は 40MPa、60MPa、70MPa、80MPa、90MPa および 100MPa とした。岩石供試体は封圧 70MPa 以上で引張破壊し、破壊時の軸圧は封圧の増加に伴い大きくなった。破壊時の岩石供試体の破断面は、封圧に関わらず軸方向に垂直であった。また、同一サイズの円柱供試体を用いた三軸圧縮試験との比較を行った結果、最大強度は三軸伸張試験のほうが三軸圧縮試験よりも必ず大きいことが明らかとなった。

キーワード：封圧，三軸伸張試験，ひずみ

A confined triaxial extension test was conducted using Kimachi sandstone. Confining pressures were 40 MPa, 60 MPa, 70 MPa, 80 MPa, 90 MPa and 100 MPa. They developed brittle failure at a confining pressure of 70 MPa or higher. The axial stress at failure increased with the increase of confining pressure. It was obvious that the extensional stress state shows essentially higher maximum strength and behaves more brittle than the compressive stress state.

Key Words: Confining Pressure, Triaxial Extension Test, Strain

1. はじめに

開削後の空洞周囲の応力状態やコアディスキングを発生させる応力場は、3つの主応力が圧縮でかつ最大主応力と中間主応力が等しい三軸応力場となることが考えられる。

このような応力場における岩石の変形・破壊挙動を評価する方法として、Boker¹⁾は封圧下における三軸伸張試験（以後、エクステンション試験）を開発し、その後改良が加えられて来ている^{2)~5)}。

これらの先駆的な研究により、エクステンション試験手法が検討・改良され、その精度も向上してきた。しかしながら、通常の三軸圧縮試験と比較して試験が複雑である等の理由もあり研究例は少なく、十分なデータが蓄積されているとは言い難い。

本研究では、来待砂岩を用いたエクステンション試験を実施し、来待砂岩の変形・破壊挙動について検討した。また、同一サイズの円柱供試体を用いた三軸圧縮試験と変形・強度特性に関して比較を行った。

2. 試験の概要

(1) 岩石供試体

試験に用いた岩石供試体は、写真-1 に示す直径 50mm、高さ 100mm、50℃で乾燥させた来待砂岩である。表-1 に、その物性値を示す。表中の値は、岩石供試体 3 個から計測したものの平均値である。

(2) 三軸試験装置と試験手法について

a) 三軸試験装置

エクステンション試験装置には、写真-2 に示す三軸



写真-1 岩石供試体

表-1 来待砂岩の物性値

項目	単位	特性値
見かけ密度	g/cm ³	2.23
空隙率	%	25.8
P波速度	km/sec	2.90
S波速度	km/sec	1.61
動的ポアソン比	—	0.276
動的ヤング率	MPa	18,125



写真-2 三軸試験装置

表-2 三軸試験装置の諸元 (最大値)

軸荷重 kN	封圧 MPa	間隙圧 MPa	供試体寸法 mm
4,600	100	100	φ100×200H

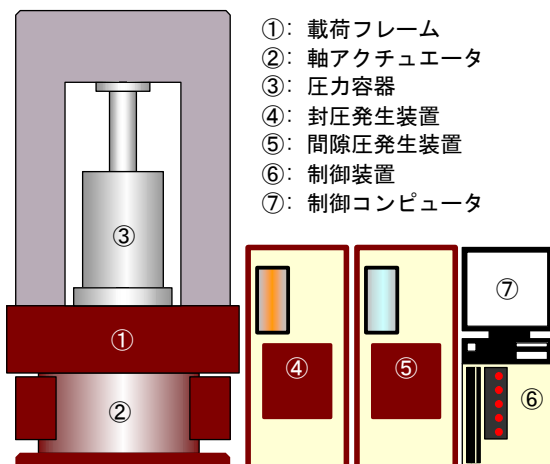


図-1 三軸試験装置の構成

試験装置を用いた。その諸元を表-2に示す。本試験装置は、図-1に示すように載荷フレーム、軸アクチュエータ、圧力容器、封圧発生装置、間隙圧発生装置、制御装置および制御コンピュータで構成される。制御系はデ

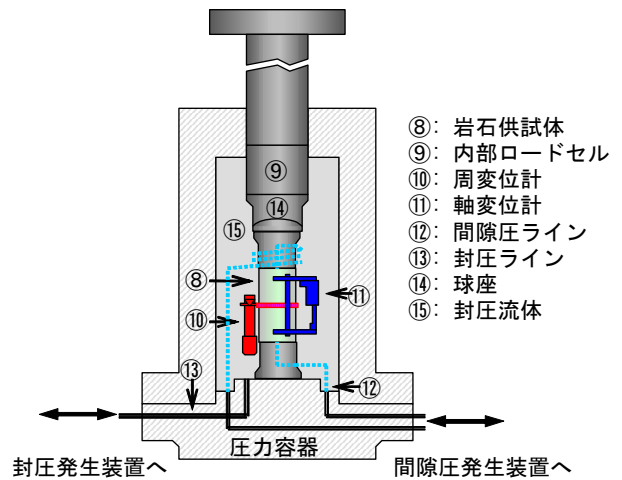


図-2 圧力セル内のセットアップ

ジタルサーボシステムで構成されているため、精度の高い制御が可能である。図-2は、圧力セル内に岩石供試体をセットした状況を模式的に示したものである。

b) 試験手法

岩石供試体アセンブルは、写真-3に示すように凸型のエンドピースを取り付け、テフロン系熱収縮チューブで被覆したものである。供試体と凸型エンドピースは接着剤等による結合は行っていない。岩石供試体の上下は、テフロン系熱収縮チューブの上から鋼製のバンドで締付けた。そして、写真-4に示すように軸変位計および周変位計を岩石供試体に取り付け、これを圧力セル内に設置した。このとき、岩石供試体下側のエンドピースはボルトで台座に固定したが、上側のエンドピースは、軸荷重 0.3kN~0.5kN で軸方向ピストンに接触させただけで固定していない。このことと、前述したように岩石供試体と凸型エンドピースは接着剤等による結合は行っていないことから分かるように、今回実施したエクステンション試験では供試体に引張力を作用させることはできない。したがって、試験中の3主応力のすべては圧縮となり、封圧が低く差応力が小さい場合には岩石供試体を破壊できないことがある。

次に、圧力容器の蓋を閉じて封圧流体を注入し、封圧を 0.125MPa/sec の昇圧速度で所定の値まで昇圧した。この状態は $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ となる静水圧状態であり、岩石供試体は一旦、最大主応力まで負荷されたことになる。静水圧状態にした後、軸圧が封圧よりも小さくなるよう、すなわち $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ の応力状態となるよう 0.05kN/sec の載荷速度で軸圧を減少させた。

c) 試験ケース

表-3に、実施した試験ケースごとの封圧の設定値と、岩石供試体が破壊したか否かを示す。



写真-3 岩石供試体のアッセンブル

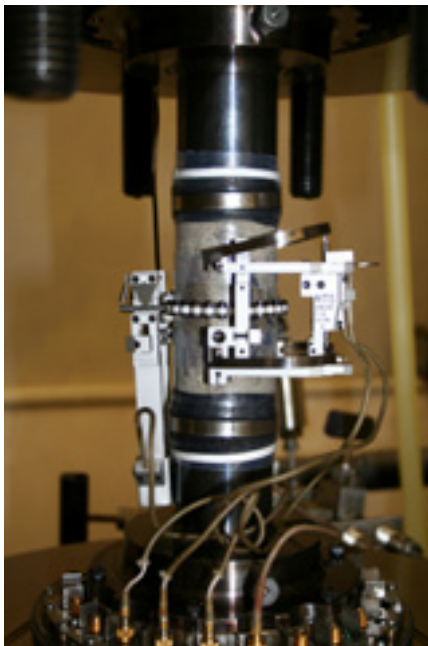


写真-4 軸変位計と周変位計の設置状況

表-3 試験ケース

試験ケース	封圧の設定値 (MPa)	破壊したもの
1	40	
2	60	
3	70	○
4	80	○
5	90	○
6	100	○

今回の試験では、封圧 60MPa までは岩石供試体が破壊に至る前に軸圧の除荷を終了させた。岩石供試体が破壊に至った試験ケースは、封圧 70MPa 以上のものである。

3. 試験結果

(1) 軸圧-軸ひずみ関係

図-3～図-5 は、代表的なケースとして試験ケース 2 (設定封圧=60MPa)、試験ケース 4 (設定封圧=80MPa) および試験ケース 6 (設定封圧=100MPa) における軸圧除荷過程での軸圧とひずみの関係を示したものである。なお、本試験における結果の整理は、圧縮応力や縮みを正、引張応力や伸びを負として表記する。

まず、軸圧-軸ひずみ関係を見ると、いずれの試験ケースにおいても、軸圧の低下に伴い軸ひずみは伸張側に増大している。一方、軸圧-周ひずみ関係から、周ひずみは軸圧の減少とともに収縮側に増加していることが分かる。そして、体積ひずみは軸圧の減少とともに膨張側となっている。

岩石供試体が破壊した試験ケース 4 および試験ケース 6 の軸圧-ひずみ関係に着目すると、その履歴形状は破壊荷重到達後にひずみの増分を伴わず急激に軸圧が増加するものとなっている。これより、岩石供試体の破壊挙動が脆性的であることが分かる。

ここで、試験ケース 4 と試験ケース 6 における破壊後の岩石供試体を写真-5 および写真-6 に示す。Ramsey and Chester⁶⁾は、ドッグボーン型類似の Carrara 大理石供試体を用いたエクステンション試験を実施し、60MPa 程度までの封圧下では供試体に引張破壊が生じ破断面は軸方向にほぼ垂直であること、および封圧がそれより大きくなると破壊は引張とせん断の混合型となり、破断面が傾斜することを示した。これに対して、今回実施したエクステンション試験における岩石供試体の破壊状況は、写真-5 および写真-6 から明らかなように、破断面は軸方向に垂直なものとなった。したがって、封圧 80MPa および 100MPa の場合でも岩石供試体の破壊は引張破壊が卓越したものと考えられる。

(2) 封圧と諸物性値の関係

表-4 に、試験時の封圧、岩石供試体破壊時(破壊に至らない試験ケースの場合は最小値)の軸圧、ヤング率およびポアソン比を示す。これらの結果をもとに、軸圧、ヤング率およびポアソン比と封圧の関係をそれぞれ示したものが図-6～図-8 である。図は、破壊した場合と破壊に至らなかった場合とでプロットを分けて示している。

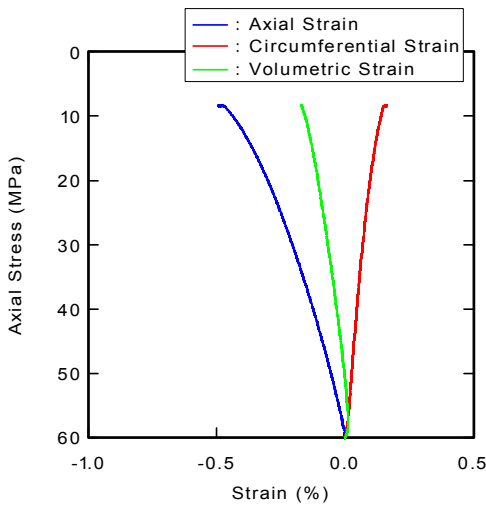


図-3 軸圧-ひずみ関係 (試験ケース 2)

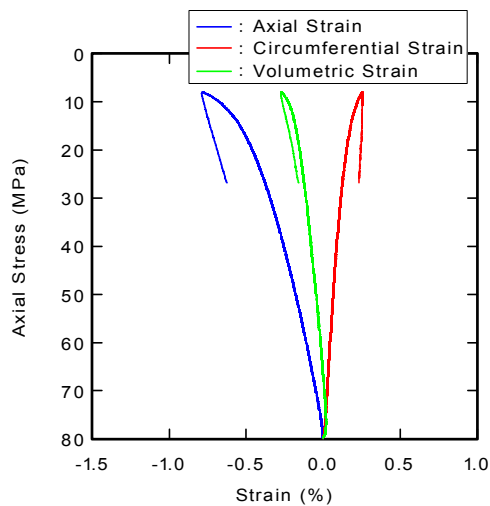


図-4 軸圧-ひずみ関係 (試験ケース 4)

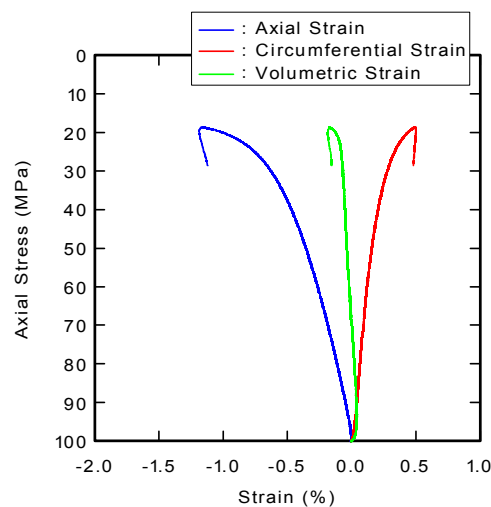


図-5 軸圧-ひずみ関係 (試験ケース 6)



写真-5 破壊後の岩石供試体状況 (試験ケース 4 (封圧=80MPa))



写真-6 破壊後の岩石供試体状況 (試験ケース 6 (封圧=100MPa))

表-4 封圧と諸物性値

試験ケース	封圧 $\sigma_1 = \sigma_2$ (MPa)	軸圧 σ_3 (MPa)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比
1	39.8	0.2	12,732	0.26
2	60.0	8.4	13,521	0.28
3	69.7	5.3	13,552	0.27
4	79.5	8.1	14,599	0.29
5	89.7	14.0	14,635	0.35
6	99.8	18.6	15,493	0.35

なお、ヤング率は、静水圧载荷時を 0%、軸圧最小時を 100% の応力レベルとした場合の 50% 応力レベルにおける軸圧-軸ひずみ関係の傾きとして定義した。また、ポアソン比は、50% 応力レベルにおける軸圧-周ひずみ関係の傾きの絶対値でヤング率を除いて求めた。

図-6 に示す岩石供試体破壊時の軸圧と封圧の関係をみると、軸圧は封圧の増大に伴い増加することが分かる。この結果は、富池ら⁷⁾が行った支笏溶結凝灰岩を用いた実験結果と整合する。なお、岩石供試体が破壊した試験ケース 3~試験ケース 6 の破壊時の軸圧を考慮すると、封圧の設定値が 60MPa である試験ケース 2 でも、さらに軸圧を除荷すれば岩石供試体が破壊に至ったものと考えられる。

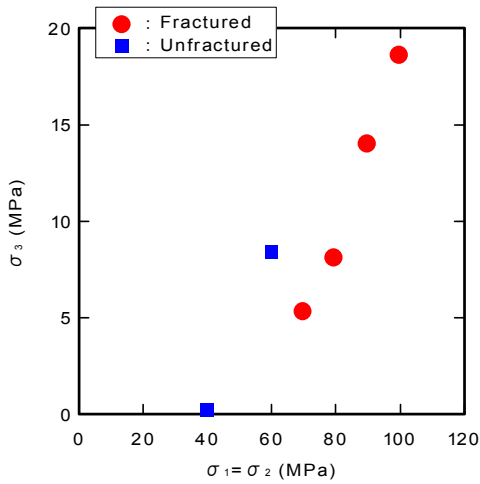


図-6 破壊時（ピーク時）の軸圧と封圧の関係

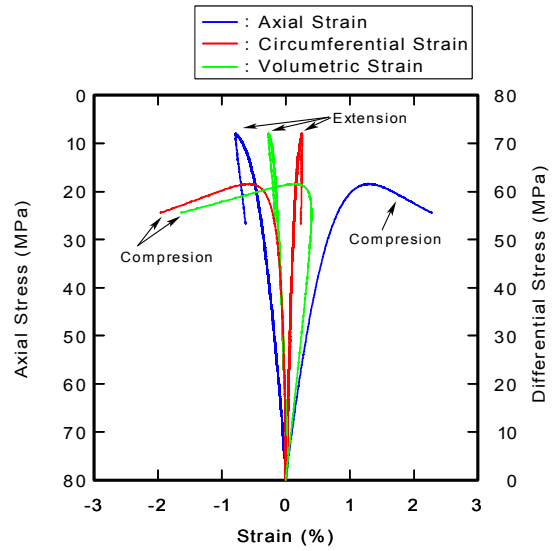


図-9 軸圧または差応力-ひずみ関係（試験ケース 4）

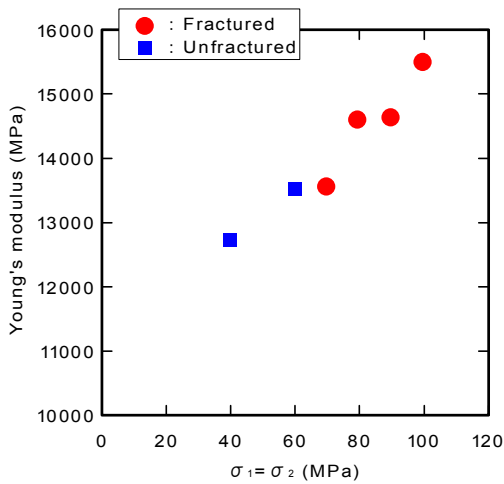


図-7 ヤング率と封圧の関係

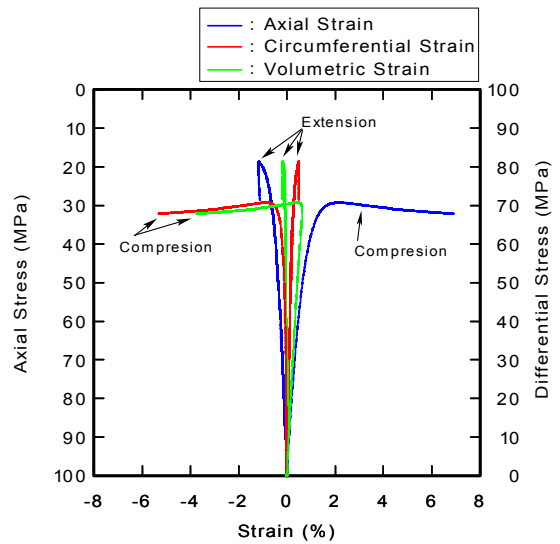


図-10 軸圧または差応力-ひずみ関係
（試験ケース 6）

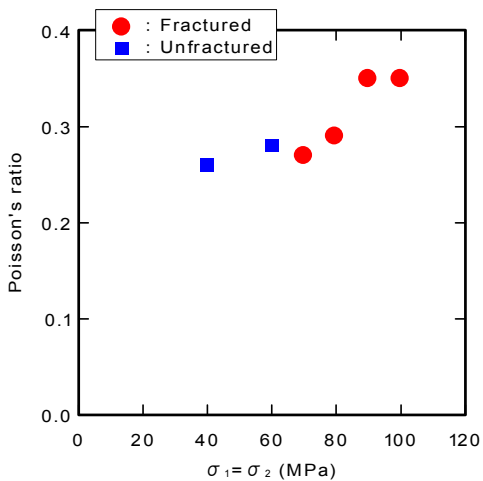


図-8 ポアソン比と封圧の関係

図-7 に示すヤング率と封圧の関係から、ヤング率は、封圧の増加に伴って増大する傾向を示す。図-8 に示すポアソン比と封圧の関係では、封圧 90MPa 以上のポアソン比が若干大きくなっているものの、封圧の違いによってポアソン比が変化するような明瞭な相関は認められない。

藤井ら⁸⁾は、白浜砂岩と支笏溶結凝灰岩を岩石供試体に用いた封圧 60MPa までのエクステンション試験を実施し、封圧の増加とともにヤング率は増加すること、およびポアソン比と封圧の相関は低いことを示している。今回の試験結果は、藤井ら⁸⁾の結果に整合するものである。

(3) 三軸圧縮試験結果と三軸伸張試験結果の比較

図-9 および図-10 は、試験ケース 4 および試験ケース 6 の三軸伸張試験結果から得られた最小主応力値を封圧値として実施した三軸圧縮試験結果から得られた軸差応力-ひずみ関係と、三軸伸張試験結果から得られた軸圧-ひずみ関係を示したものである。

これらの結果より、最大強度は三軸伸張試験のほうが三軸圧縮試験よりも必ず大きいことが明らかである。そして、三軸伸張試験における変形量は、各主ひずみおよび体積ひずみとも三軸圧縮試験よりも小さく、三軸伸張試験は三軸圧縮試験よりも脆性的な挙動を示すことが分かる。

4. おわりに

本研究では、来待砂岩を用いたエクステンション試験を実施し、その変形・強度特性について検討するとともに、三軸圧縮試験結果との比較を行った。

三軸圧縮試験と三軸伸張試験の違いは中間主応力が最小主応力に等しいか、最大主応力に等しいかという違いであり、主応力のすべては圧縮応力場である。得られた試験結果は、三軸圧縮と三軸伸張応力場における岩石の変形特性が大きく異なることを示しているものと考えられる。

なお、今回実施したエクステンション試験では、一度、岩石供試体に最大主応力までの応力履歴を与えているため、これが岩石供試体の変形・強度特性に影響を与えた可能性もある。今後は、最大主応力ならびに中間主応力と最小主応力を同時に制御し、前述した応力履歴の影響がないエクステンション試験を実施し、三軸伸張応力場における岩石供試体の変形・強度特性について検討することが必要であると考えられる。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ①軸圧の低下に伴い、軸ひずみは伸張側に増大し、周ひずみは収縮側に増加する。また、体積ひずみは軸圧の減少とともに膨張側となる。
- ②岩石供試体の破壊状況は引張破壊が卓越し、破断面が軸方向に垂直なものとなった。
- ③岩石供試体破壊時の軸圧とヤング率は、封圧の増大に伴い増加する。
- ④ポアソン比と封圧の関係には明瞭な相関が認められない。
- ⑤最大強度は、三軸伸張試験のほうが三軸圧縮試験よりも必ず大きい。

⑥三軸伸張試験における変形量は、各主ひずみおよび体積ひずみとも三軸圧縮試験よりも小さい。

⑦三軸伸張試験は三軸圧縮試験よりも脆性的な挙動を示す。

謝辞：本研究は、独立行政法人産業技術総合研究所からの受託試験として実施したものです。ご指導いただいた産業技術総合研究所の関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Boker, R., : Die Mechanik der bleibenden Formänderung in Kristallinisch aufgebauten Körpern, Ver. dt. Ing. Mitt. Forsch., 175, pp.1-51, 1915.
- 2) Brace, W. F., : Brittle fracture of Rocks, in State of stress in the Earths Crust, W. R. Judd(Ed.), New York, Elsevire, pp.111-174, 1964.
- 3) Mogi, K., : Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive stress, Felsmech. Ingenieurgeol., 4(1), 41, 1966.
- 4) Mogi, K., : Effect of the intermediate principal stress on rock failure, J. Geophys. Res., Vol.72, No.20, pp.5117-5131, 1967.
- 5) Murrell, S. A. F., : The effect of triaxial stress systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures, Geophys. J., 10, pp.231-281, 1965.
- 6) J. M. Ramsey and F. M. Chester : Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture, Nature, Vol.428, pp.63-66, 2004.
- 7) 富家孝明, 藤井義明, 石島洋二 : 封圧下にある岩石の引張強度に関する実験的研究, 資源・素材学会北海道支部平成 12 年度春季講演会講演要旨集, pp.31-32, 2000.
- 8) 藤井義明, 上原洋二郎 : 封圧下で一方向に伸び変形を受ける岩石の変形・破壊挙動に関する研究, 資源と素材, Vol. 122, No.6,7, pp. 330-337, 2006.