

層理面を有する泥岩の内部構造と 圧裂引張試験の破壊形態に関する考察

三好 航平^{1*}・緒方 奨²・中島 伸一郎³・安原 英明⁴・岸田 潔¹

¹京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

²大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘)

³山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁴愛媛大学大学院 工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

*E-mail: miyoshi.kouhei.85r@st.kyoto-u.ac.jp

本研究では、X線CT撮影により内部構造を観察した泥岩に対して圧裂引張試験を実施し、内部構造と破壊形態の関係を考察した。まず、圧裂引張試験前の供試体の内部構造をX線CTを用いて撮影し、撮影した画像から光線硬化によるノイズを除去した。供試体の内部構造の観察を行ったのち、圧裂引張試験を実施した。圧裂引張試験後の供試体に対しては再度X線CT撮影を実施したほか、破断面の形状は3D形状測定機を用いて計測し、破断面および破壊の評価を行った。

CT撮影を行った各泥岩供試体の破壊形態と内部構造の比較によって、圧裂引張試験の破壊形態および強度に層理面、潜在き裂が影響を及ぼしていることを確認できた。

Key Words : mudstone, Brazilian test, X-ray CT, internal structure

1. はじめに

泥岩を含む堆積岩は、堆積層が脱水作用、粒子の移動、変形による空隙の減少、粒子の溶解、再結晶などの続成作用と呼ばれる作用を受けることによって形成される。堆積岩の形成後に発生する地殻応力による変形は、堆積物の種類により変形性が異なるため、層理面に沿って割れ目が発生しやすい。

Tavallali and Vervoort²⁾は圧裂引張試験における強度と破壊形態に対する層理面の方向の関係性を砂岩を用いた実験により考察し、圧裂引張試験における破壊形態を以下の3つに分類した。

1. 層理面に平行に発生する layer activation
2. 載荷方向に平行に供試体中央を通るように発生する central fractures
3. 中心を通らず曲線状に発生する non-central fractures

Tavallali and Vervoort は層理面の平行方向にコアリングした供試体を用いて、圧裂引張試験を層理面および走向と水平面の角度 θ が 0° (荷重方向に垂直) から 90° (荷重方向に平行) の間の様々な角度で実施した。 θ が小さい範囲では載荷方向に平行に central fractures が発生し、 $\theta = 45^\circ \sim 60^\circ$ では central fractures と layer activation との遷移領域となり、 θ が大きくなると layer activation 破壊が支配的になることを示した。

本研究ではX線CT撮影により内部構造を観察した泥岩に対して圧裂引張試験を実施し、供試体ごとの内部構造による破壊形態の違いについて考察を行っていく。

2. 実験条件

(1) 供試体の計測とX線CT撮影

泥岩のボーリングコアより、直径30 mm×長さ30 mmの円柱形供試体5本 (B-1~B-5とする) を作製し、寸法および質量と、層理面の傾斜角度を供試体表面の写真より計測した。本研究では、層理面の角度として供試体の円断面からの傾斜角度 ξ を用いる (図-1)。表-1に各供試体の体積、密度、供試体の地表面からの深度、傾斜角度 ξ を示す。

表-1 供試体情報

	体積 [cm ³]	密度 [g/cm ³]	深度 [m]	傾斜角度 ξ [deg]
B-1	23.41	2.72	31.11	59
B-2	23.16	2.75	32.02	60
B-3	23.42	2.69	51.15	53
B-4	23.70	2.71	51.43	52
B-5	23.00	2.70	51.86	57

つぎに、X線CTスキャナ (TOSCANER 東芝ITコントロールシステム社製)を用いCT撮影を行った。X線CT撮影で得られた画像は供試体水平方向の画像が高さ方向に積み重なっている。得られた画像は、gray valueによって表現され、gray valueの高い(白い)ところでは高密度、低い(黒い)ところでは低密度となっている。図-2(a)

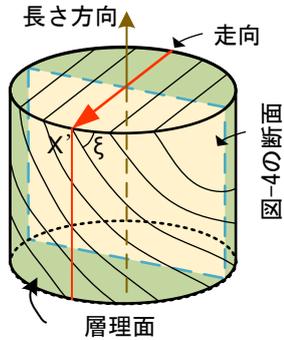
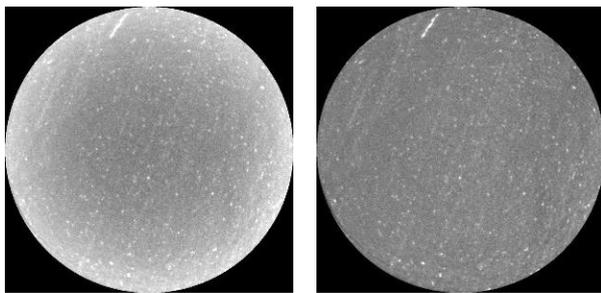


図-1 供試体の位置関係



(a) 光線硬化除去前

(b) 光線硬化除去後

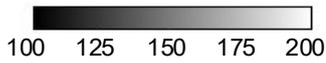


図-2 光線硬化の除去

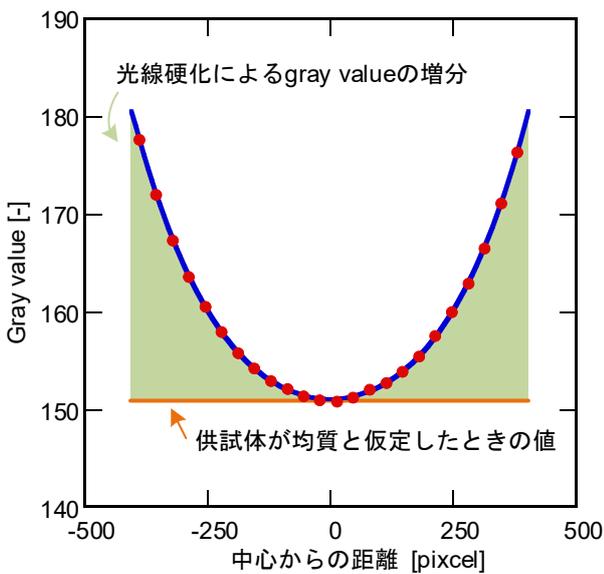
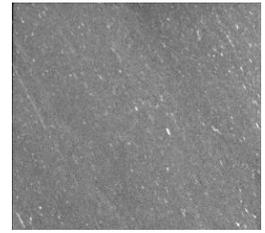


図-3 光線硬化によるgray valueの変化



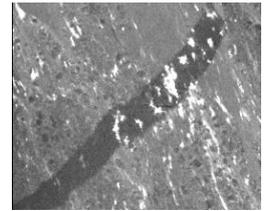
(I-a) B-1の表面



(I-b) B-1の内部構造



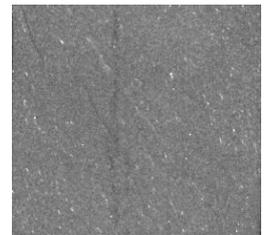
(II-a) B-2の表面



(II-b) B-2の内部構造



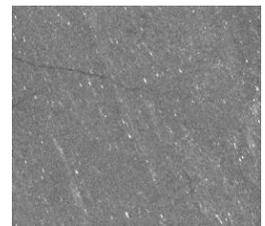
(III-a) B-3の表面



(III-b) B-3の内部構造



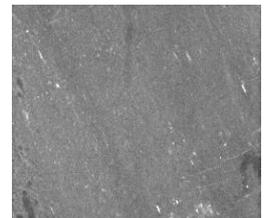
(IV-a) B-4の表面



(IV-b) B-4の内部構造



(V-a) B-5の表面



(V-b) B-5の内部構造

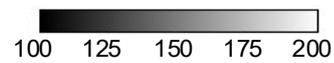


図-4 各供試体の表面と内部構造

では光線硬化と呼ばれる現象によって周辺部のgray valueが高くなっており白く見える。本研究では、この光線硬化の影響を中島ら³⁾の方法を参考にして除去した。はじめに、高さ方向の全スライスにおいて、空白が入らないような円形領域で画像をトリミングした。つぎに高さ方向にある全スライスのgray valueを平均化した画像において、画像中心から円を描き、同心円上のgray valueの平均をプロットしたのち、供試体中心部からの距離とgray valueの関係を4次式で近似した。ここで、供試体は平均的には均質であると仮定すると、最小値からのgray valueの増分が光線硬化によるものであると考えられる(図-3)ため、この部分を撮影画像から除去した(図-2 (b))。

各供試体の表面の写真と中心を通り同じ角度から見た断面のCT撮影画像を図-4に示す。泥岩を構成する粒子の大きさに関しては、B-2はほかの供試体に比べて大きくなっており、また供試体B-2では表面から見られた白い斜交層理がCT画像では密度の小さな部分として現れていた。大きな斜交層理のないB-1, 3-5について観察すると、B-3-5には線上の低密度領域が存在しており、これらは供試体内の潜在的な欠陥もしくはき裂であると考えられる。本研究で用いた供試体はサンプリング深度が近いのにもかかわらず、内部構造が大きく異なる結果となった。

(2) 圧裂引張試験

X線CT撮影を行った後に、圧裂引張試験を実施した。本研究では、圧裂による岩石の引張強さ試験⁹⁾に準拠して試験を実施した。载荷軸の角度の違いによる強度の変化を観察するために2種の载荷パターンの実験を実施した。B-1, B-4は走向に垂直($\theta = 0^\circ$)に载荷し、B-2, B-3, B-5は走向と平行($\theta = 90^\circ$)に载荷した。圧裂引張強さ σ_t は以下の(1)式を用いて算出した。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D_0 L_0} \quad (1)$$

ここで P は荷重、 D_0 は供試体の直径、 L_0 は供試体の長さである。

表-2 圧裂引張試験の結果

	最大荷重 [kN]	圧裂引張 強さ [MPa]	走向と 载荷軸	直角方向 の Z_2 値	平行方向 の Z_2 値
B-1	22.3	15.02	垂直	0.277	0.221
B-2	17.8	12.11	平行	0.306	0.353
B-3	8.13	—	平行	—	—
B-4	17.71	11.77	垂直	0.291	0.465
B-5	18.77	12.82	平行	0.593	0.291

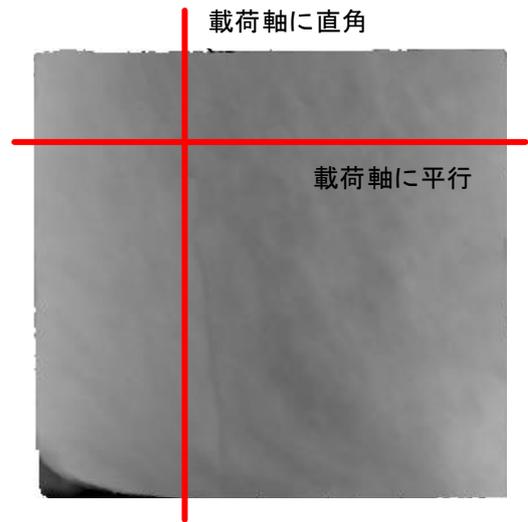


図-5 表面形状における位置関係

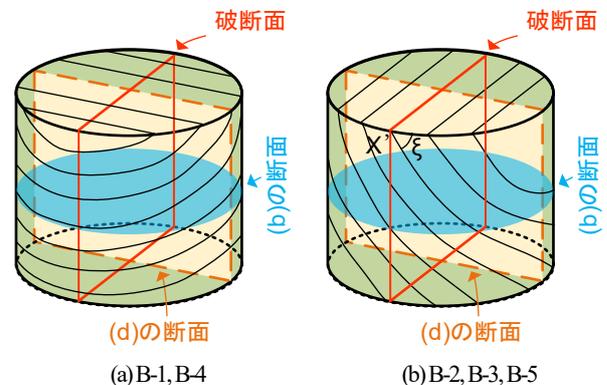


図-6 図-7~11における各画像の位置関係

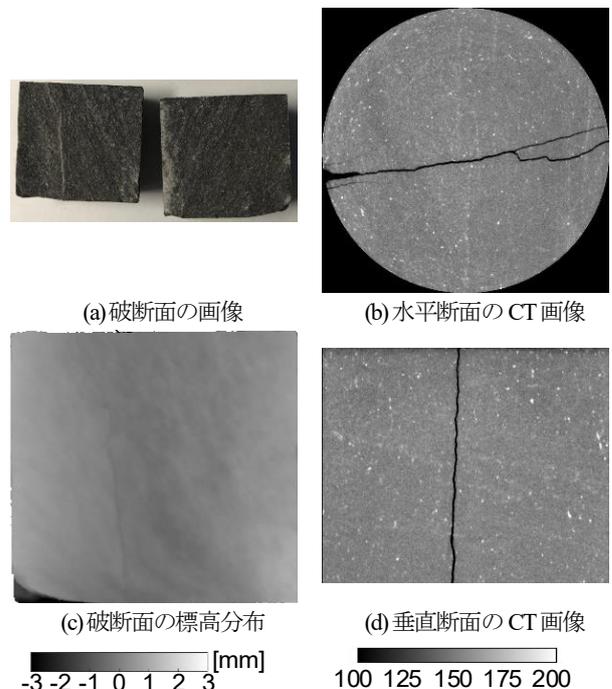


図-7 供試体 B-1 の破壊形態

(3) 圧裂引張試験後の計測

破壊後の供試体の破断面の表面形状をキーエンス社のVR-3200を用いて計測した。さらに、実験後に破断面と内部構造の位置関係を確認するために再度供試体のX線CT撮影を実施した。

3. 結果と考察

圧裂引張試験の結果を表-2にまとめた。表-2では破断面の粗さの指標として Z_2 値を計算した。 Z_2 値は図-5に示しているように载荷軸に対して、直角方向と平行方向それぞれの全直線に対して計算し、それぞれの平均値をとった。 Z_2 値は以下の式(2)で表される⁹⁾。

$$Z_2 = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで $y_{i+1} - y_i$ は測点間の標高差[mm]、 Δx は測点間の距離[mm] (本研究では0.023594 mm)、 M は測点数である。

破壊後の供試体の(a)表面の写真、(b)長さ方向中央付近の横断面画像、(c)破断面の表面標高分布、(d)破断面に垂直で中心を通る断面のCT画像を図-7~11に示す。

供試体B-3については载荷途中に斜め方向に割れが発生したため、圧裂引張強さ、 Z_2 値を算出できなかった。

(1) 各供試体における破壊形態の観察

ここからはX線CT画像と破壊形態の比較を各供試体ごとに行っていく。

最も圧裂引張強さが大きかったB-1について破壊前の内部構造を観察すると、あとに述べるほかの供試体に見られた潜在的な内部欠陥を認めることができなかった。このことにより他の供試体よりも圧裂引張強さが大きかったと考えられる。また、破断面はほぼ供試体長さ方向に平行に発生していた。Tavallali and Vervoortによる分類のcentral fracturesにあたる破壊であると考えられる。

大きな斜交層理がみられた供試体B-2においては、破断面は斜交層理ではなく全体的な層理面に沿って発生していた(図-8(d))。

供試体B-3の破断面は圧裂試験で通常みられる载荷軸に平行な面と層理面にある程度沿った面の複合的なものとなった(図-9(a))。図-9(d,e)においては破断面が上部では低密度の面に沿って形成され、高密度の面と交わる点からは高密度面に沿って形成されていた。

B-4については、破断面は供試体斜め方向にある層理面に沿って形成されていた。また、図-10(b)を見ると破断面が曲線状に形成されており、non-central fracturesにあたる破壊であると考えられる。このことは層理面の存在

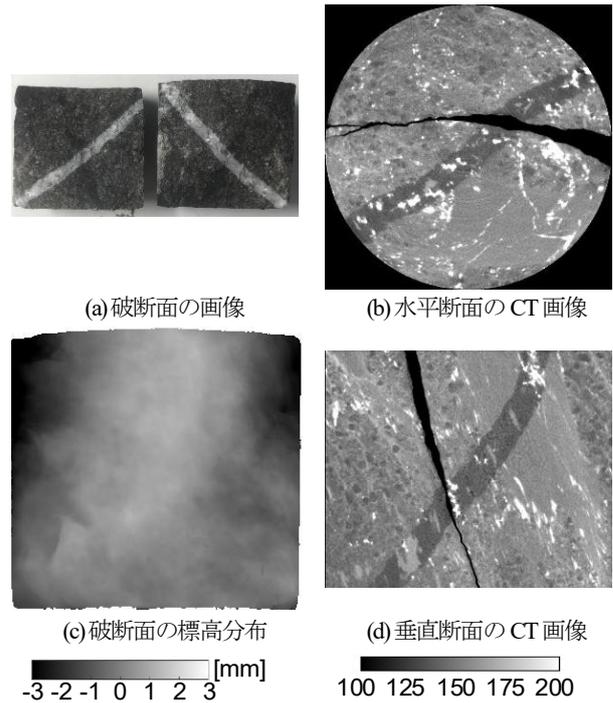


図-8 供試体 B-2 の破壊形態

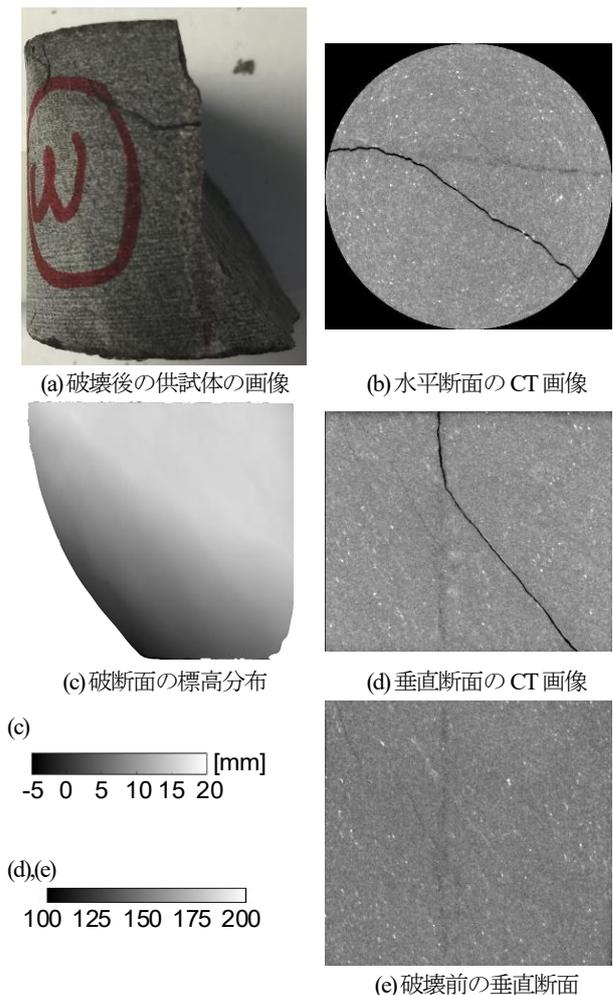


図-9 供試体 B-3 の破壊形態

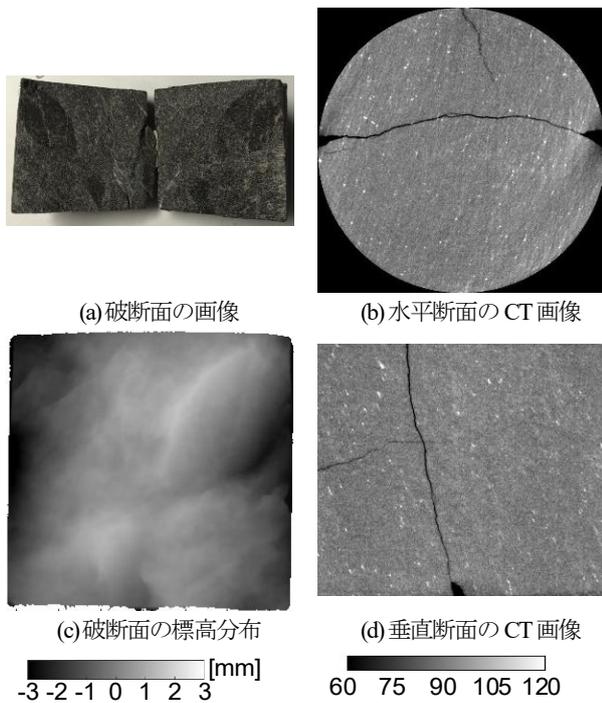


図-10 供試体B-4の破壊形態

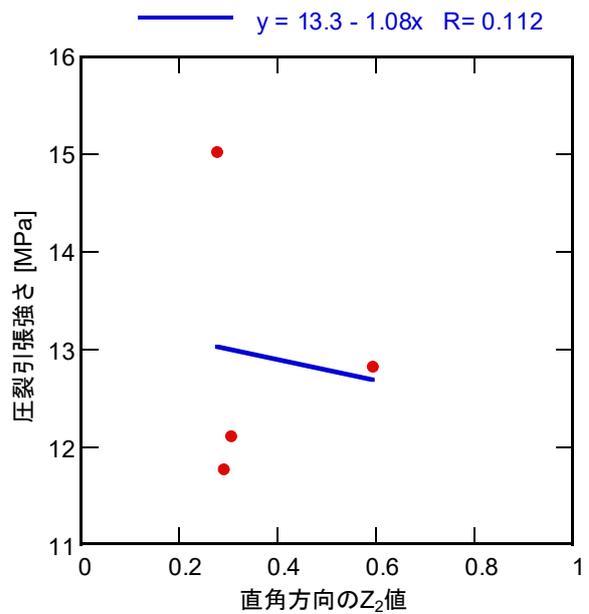


図-12 载荷軸直角方向のZ₂値と圧裂引張強さ

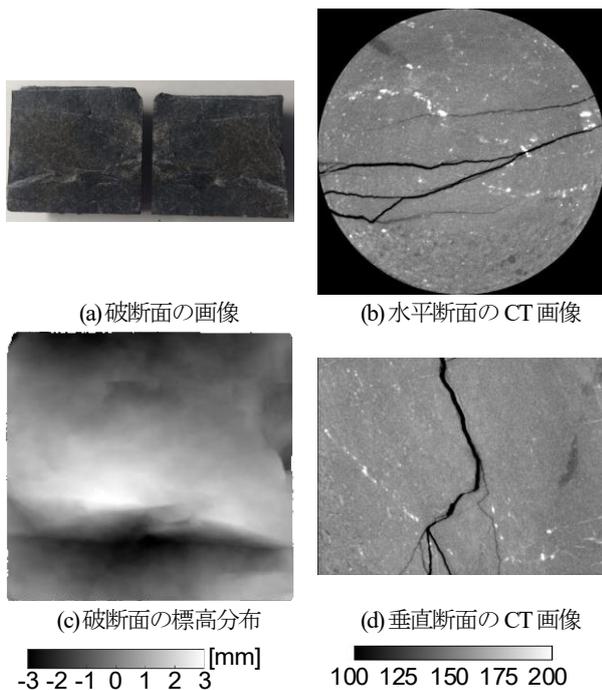


図-11 供試体B-5の破壊形態

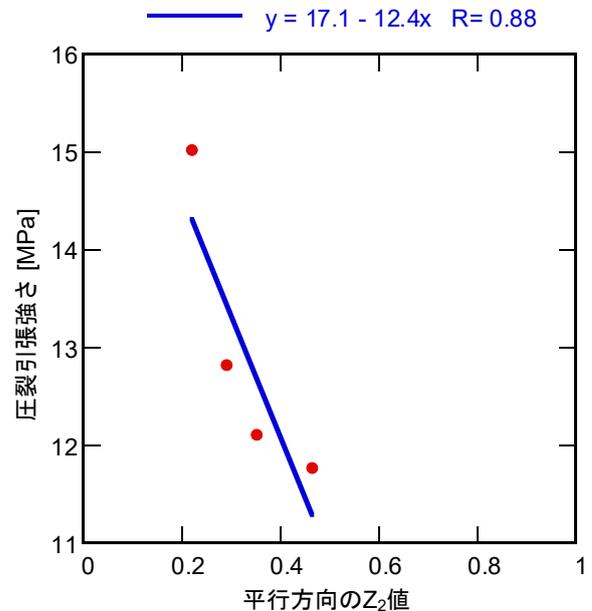


図-13 载荷軸平行方向のZ₂値と圧裂引張強さ

によって破断面の形状が変化していることを表している。供試体B-4では密度が小さいことを表す黒い領域が線状に分布しており（図-4 IV-b），これらは潜在的な亀裂であると考えられる。

B-5についてはB-4と同様に密度が小さいことを表す黒い領域が線状に分布しており（図-4 V-b），これらは潜在的な亀裂であると考えられる。破壊形態に関しては、図-11 (d)において破断面は上下端付近で層面に沿った向きに、中央下部で2つの破壊面をつなげるような向き

に破断面が発生していた。上端では低密度の領域に、下端では高密度の鉱物が複数分布している領域に破断面が形成されていた。

B-1, B-4は走向に直角に载荷したため、本来ならば破断面に直角な断面の画像では、層状構造は斜め方向ではなく水平方向に見えるはずであるが、図-7, 10 (d)では斜め方向に確認できる。圧裂引張試験を実施する際には供試体を目視することによって走向を定めていたことや破断面が斜め方向に形成されたためにこのような誤差が生

まれたと考えられる。

(2) 表面形状に関する考察

破壊面の凹凸の指標として破壊面において载荷軸直角方向、平行方向の Z_2 値をそれぞれ計算し、圧裂引張強さとの関係を図-12, 13に示す。载荷軸に直角な方向の Z_2 値と圧裂引張強さには相関関係がみられなかった一方で、载荷軸に平行な方向の Z_2 値には強い負の相関がみられた。圧裂引張試験における理想的な破断面は、载荷軸に平行で中心を通るように形成される。本研究では図-7~11に示すように破断面が曲面となっており、供試体中心を通らないものが多い。本研究の供試体では理想的な破断面が形成される前に、内部構造の分布や载荷荷重のかかり方の違いによる局所的な応力集中点もしくは弱部において破壊が生じ、弱い部分に選択的に破壊が進行することによって破断面の凹凸が大きくなったことが考えられる。

4. おわりに

供試体内部に潜在的な欠陥のある供試体は、欠陥のない供試体に比べて圧裂引張強さが小さくなった。载荷軸に平行な方向の Z_2 値と圧裂引張強さには強い負の相関がみられた。圧裂引張強さの小さな供試体は層理面に沿っ

て破断面が形成されているケースが多かった。上記のような結果となったメカニズムについては数値解析等によって検討していくことが必要である。

また、本研究においては供試体数が5つと少なく、全供試体の層理面の傾斜角度 ξ がおおむね 60° と同じため、サンプル数を増やし様々な層理面の傾斜角度 ξ 、走向と载荷軸の角度 θ に対して実験を行い、統計的な分析を行っていくことが今後の課題である。

参考文献

- 1) 三木幸蔵, 古谷正和: 土木技術者のための岩石・岩盤図鑑, 鹿島出版会, 1983.
- 2) Tavallali, A. and Vervoort, A.: Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.47, No.2, pp.313-322, 2010.
- 3) 中島伸一郎, 長谷川大貴, 安原英明, 岸田 潔: マイクロフォーカス X 線 CT による花崗岩のき裂形状および開口幅の評価: 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, 2010 年 1 月, 講演番号 51.
- 4) 地盤工学会, 圧裂による岩石の引っ張り強さ試験, 地盤材料試験の方法と解説, 2009, pp.901-911.
- 5) Tse, R. and Cruden, D. M.: Estimating Joint Roughness Coefficients, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol.16, No.5, 1979.

A CONSIDERATION BETWEEN INTERNAL STRUCTURE OF MUDSTONE WITH BEDDING PLANE AND FAILURE MODE OF BRAZILIAN TEST

Kohei MIYOSHI, Sho OGATA, Shinichiro NAKASHIMA,
Hideaki YASUHARA, and Kiyoshi KISHIDA

In this study, the relationship between the internal structure and the failure mode was examined by performing a Brazilian test on mudstone whose internal structure was observed by X-ray CT imaging. Noise due to beam hardening was removed from the captured image. After the observation of the internal structure of the specimen, the Brazilian tensile tests were conducted. The fracture surface was evaluated by measuring the shape of the fracture surface using a 3D shape measuring machine.

By comparing the failure mode and internal structure of the specimens, it was confirmed that the bedding plane and latent cracks had an effect on the failure mode and strength in Brazilian tests.