田下凝灰岩の圧裂引張り試験における 載荷点近傍の破壊のメカニズム

青野 泰久1*・谷 和夫2・岡田 哲実3・酒井 理哉3

¹横浜国立大学 大学院 都市イノベーション学府(〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5) ²横浜国立大学 大学院 都市イノベーション研究院(〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5) ²一般財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所(〒271-1194千葉県我孫子市我孫子1646) *E-mail: aono-yasuhisa-rk@ynu.ac.jp

圧裂引張り試験は円柱供試体の側面に線荷重を加え、載荷軸に沿って引張り破壊が生じることを仮定す るが、載荷軸に平行な方向の直応力が一様に作用せず、載荷点近傍で大きくなるため、複雑な破壊形態を 示す.しかし、この載荷点近傍の破壊形態や求められる引張り強さに及ぼす影響は解明されていない.そ こで、圧裂引張り試験における破壊のメカニズムを解明するため、供試体の端面のひずみ分布を調べた. その結果、破壊時に載荷軸面の中央部において2~4本の引張り破壊の亀裂と、載荷点近傍において3~10 本の引張り破壊の亀裂が見られた.また、破壊時の供試体の直径D₀と載荷点近傍の亀裂の生じた幅w_{cr}の比 w_{cr}/D₀は0.08~0.14となることがわかった.

Key Words : rock, splitting tensile strength test, tensile strength, tensile failure

1. はじめに

圧裂引張り試験は簡便であることから岩石の引張り強 さを求める場合に利用頻度が高く,硬岩のみならず軟岩 も対象としている.この試験は一様な線荷重を供試体に 加えることが理想であるが,軟岩では載荷幅が増加し帯 荷重となり,引張り強さを過小評価している可能性があ る.また,等方線形弾性理論によれば,載荷軸を含む面 に作用する直応力(引張り応力)は一様に分布するが,載 荷軸上の直応力(圧縮応力)は載荷点で無限大となり,載 荷点近傍でせん断破壊が生じている可能性もあるため, 地盤要素としての引張り強さが正しく評価されていない ことが懸念される.

Coviello et al.(2005)^bは円弧状の載荷板の試験機を用い, 石灰砂岩,気泡コンクリートの圧裂引張り試験を行ない, 載荷点近傍において楔状の破壊が生じた後に,載荷軸面 内に引張り破壊が生じることを示した. Namikawa et al.(2007)²はセメント改良土を用い圧裂引張り試験を行い, 試験後の供試体(直径 50mm)の側面における載荷幅が 5mm 前後であることから載荷幅は 0mm から 5mm 前後 に増加するとしたが,有限要素解析では載荷幅の変化を 考慮することは困難であるため載荷幅を 3mm と仮定し 有限要素解析を行った.その結果,軟岩では載荷点近傍 にせん断破壊が生じ,供試体中央に引張り破壊が生じる ことを示したが,載荷幅の広がりを考慮した実際の試験 結果から供試体の載荷点近傍の破壊形態の様子は解明さ れていない.

これらの載荷点近傍の破壊形態を解明するため,新た に開発した試験機を用い圧裂引張り試験を行った.供試 体の端面においてひずみ分布を調べ,等方線形弾性理論 との比較を行なった.

2. 等方線形弾性理論による理論値

圧裂引張り試験における供試体内の応力分布は2次元 弾性論³により求められている.供試体の中心を通る載 荷軸をV軸、中心を通りV軸に直交する軸をH軸とする と、V軸から水平方向の距離x、H軸から鉛直方向の距離 y,荷重P,供試体の半径aについて,荷軸方向に直交す る方向の直応力α(引張りを負),載荷軸方向の直応力α, せん断応力な,最大主応力(圧縮)の,最小主応力(引張 り)の,最大主応力方向(反時計回りの角度)の,最大せん 断応力_{tmax},伸び縮みのない方向*β*, *β*を求められる. 図 $-1に\sigma_1(\pi a/P), \sigma_3(\pi a/P), \tau_{max}(\pi a/P), 伸び縮みのない方向$ の分布図を示す. σ₃(πα/P)の分布図を見ると、載荷軸に 近いほど大きいことがわかる.また, $\sigma_{(\pi a P)}$, *τ*max(*πa/P*)の分布を見ると載荷点近傍ほど大きく,載荷点 では無限大になることがわかる. さらに伸び縮みのない 方向は載荷点近傍から放射状に広がっていることがわか る.



(a) σ₁(πα/P), σ₃(πα/P)の大きさと向き







⁽c) 伸び縮みのない方向

図-1 σ₁, σ₃, τ_{max}, 伸び縮みのない方向の分布図



(a)全体図



(b) 載荷点近傍の拡大図



一般に岩石の引張り強さは圧縮強さの1/10~1/15であり、 せん断強さは圧縮強さの1/2である.引張り強さの比を1, 圧縮強さの比を10, せん断強さの比を5とし、図-1から 破壊の生じる領域と向きの予測を行なった(図-2).載荷 点近傍において Tmax(πa/P)は無限大であるため、載荷軸上 に引張り破壊が生じるまでの間にせん断破壊が生じると 考えられる.

3. 試験方法

(1)試験装置

地盤工学会基準(JGS 2251-2009)⁴に示されている圧裂引 張り試験機の構成は圧縮装置,ロードセル,上下載荷板で あり,載荷時に供試体に一様な線荷重を加えられるよう にロードセル,上部加圧板,供試体,下部加圧板及び圧 縮装置のそれぞれの中心軸が,同一直線状に設置可能で あることが条件である.また,地盤工学会基準(JGS 2251-2009)⁴の規定では供試体の作成時において含水比な どの物理特性や力学特性を極力変化させないように配慮 することや,採取後直ちに試験を行うことが望ましいと



(a) 正面図





図-3 開発した圧裂引張り試験機と水槽

表− 供試体のナー	タ
-------------------	---

	計測値	平均值
密度 ρ (g/cm ²)	2.03~2.05	2.04
弾性波速度 V _P (m/s)	2240~2997	2620
弾性波速度 V _S (m/s)	872~1144	1029
ポアソン比 _{Va}	0.36~0.44	0.41
せん断弾性係数 G _d (MN/m ²)	1550~2660	2169
弾性係数 Ed(MN/m²)	4483~7389	6091

されている.以上を考慮し,図-3に示す圧裂引張り試 験機を開発した.実験装置は水槽,試験機で構成されて いる.水槽,試験装置を軸圧縮が可能な載荷枠に設置 した.水槽(200*300*150mm)は1枚の底盤(ステンレス)と 4枚の側板(アクリル製2枚とガラス製2枚)からなる. 供試体両端面においてひずみ分布を求めるために写真撮 影ができるように水槽の正面と背面の側板はガラスとし た.供試体の上方から載荷面,前方から端面の撮影を行 う.載荷板(ガラス板)に塗ったグリースが排除かれた幅 を載荷幅 w_bとした.

水槽の大きさは試験機の大きさ,供試体を設置するために手を入れる隙間,水を入れるときの隙間を考慮し, 平面寸法を 200*300mm とした.

試験機は底盤,4本のシャフト,スライド上盤からなる.スライド上盤は上盤,載荷板,2個の載荷板固定治具,4個のブッシングからなる.上盤には60*70mmの覗き窓用に穴を開けてある.また載荷板に直接ロードセルが接触すると応力が集中し載荷板が割れてしまうため,加圧部の上盤は残し,上盤中央に球座を設置した.試験機の載荷板,ブッシング以外はステンレスである.

(2)供試体の寸法

地盤工学会基準(JGS 2551-2009)⁴によると供試体の軸方向に一様な線荷重をかけるため形状は真円柱を標準とし、 直径を $D_0=50$ mm,長さ $L_0 \ge D_0 0 0.5\sim1.0$ 倍の範囲内を標準としている.一方 JIS M 0303-2000⁵,JIS M 0301-1975⁹, 軟岩の調査・試験の指針⁷,地質調査標準仕様書⁸では $D_0 \ge 20\sim100$ mm としている. L_0 が 20mm の場合,載荷部 分が上盤で隠れてしまい載荷幅の観察ができないため, $D_0=100$ mm, $L_0=50$ mm の真円柱の供試体を対象に検討した.

(3)使用した供試体

供試体は新第三紀凝灰岩である田下石を用いた.供試体のデータを表-1示す.試料を観察すると、ところどころに基質部に比べもろい、礫が変質した「みそ」が分布し不均質である. 「みそ」の長軸方向が卓越する方向と最大主応力 σ_i の生じる向きがなす角度を ψ と定義し、 $\psi=0^\circ$, 90°の試験を行った.

弾性波速度 $V_{\rm P}$, $V_{\rm S}$ は地盤工学会基準(JGS 1220-2009)⁹の パルス透過法により求めた.またポアソン比 $v_{\rm d}$, せん断 剛性率 $G_{\rm d}$, 弾性係数 $E_{\rm d}$ は $V_{\rm P}$, $V_{\rm S}$, ρ を用いて算出した.

(4)供試体両端面のひずみ分布の計測

ひずみ分布を計測するために使用するソフトウェアが 白黒で画像を識別するため、供試体の両端面を乾燥させ た後、白色スプレー塗料(株式会社ケーヨー、アクリル ラッカースプレー)を塗り、タトゥーに用いるシール (ELECOM, EJP-TATA4)を湿潤した端面に接着した.マ ーカーは *μ*-1mm の円を 2mm 間隔で格子状に配置した.

載荷中の供試体の端面の撮影は5sごとに行い,載荷点 近傍の撮影範囲はカメラのピントが合う最大まで拡大し た縦20mm,横35mmとした.載荷前(BL),破壊直前(BF), 破壊直後(AF)のうち2枚の画像を用いて,非接触ひずみ 計測ソフトウェアNCDM¹⁰から供試体端面における載荷 軸方向に直交する方向のひずみ₆,載荷軸方向のひずみ *ε*, せん断ひずみ_{Xy},最大主ひずみ(圧縮)*ε*,最小主ひず み(引張り)*ε*,最大主応力方向(反時計回りの角度)*θ*,最 大せん断ひずみ_{Mmx}のコンター図を作成する.

(5) 軸荷重と軸変位の計測

軸荷重の計測にはロードセル(最大荷重 10kN, 分解能 1/4000)を用い, 載荷枠のロッドに設置した. 鉛直変位の 計測には差動トランス式変位計(最大変位 10mm, 分解能 1/9000)を用い, 載荷板に設置した.

(6) 載荷方法

試験の方法は地盤工学会基準³によると試験開始から 破壊までの時間は 1~15 分とされ,制御方法は特に記述が ないことから供試体両端面のひずみの変化を読み取るた めに変位制御で行った.載荷速度は 1.25*10³mm/s である.

4. 実験結果

(1) 応力と無次元化した変位の関係

図-4に応力 σ と無次元化した変位 ε の関係を示す. σ が0~60kPaのとき ε が減少し、その後、 σ の増加とともに ε が増加しているのがわかる.これは、図-5に示すよう に載荷中に載荷板がたわみ、変位計が負の値を出力した ためであると考えられる.

表-2に最大荷重 P_{mx} ,破壊直前の画像を撮影したとき の荷重 P_{BF} ,破壊直後の画像を撮影したときの荷重 P_{AF} の 比 P_{BF}/P_{mx} 、 P_{AF}/P_{mx} をまとめた. Coviello et al.(2005)^Dは載荷 点近傍において楔状の破壊が生じた後に,載荷軸面内に 引張り破壊が生じることを示した.しかし,今回の実験 ではすべてのCaseおいて P_{BF}/P_{mx} が0.98以上であるにもか かわらず,破壊直前の画像を観察すると破壊面は見られ なかった.破壊直後の画像はすべてのCaseにおいて破壊 面が見られた.しかし,大変形後の画像は,破壊直後に 生じる載荷点近傍の開口していない亀裂が開口している 可能性があるため, P_{AF}/P_{max} が0.71以上であるCase 6, 8, 10の画像から破壊形態を求める.

(2) 無次元化した載荷幅と無次元化した荷重の関係

図-6に無次元化した載荷幅と無次元化した荷重の関係を示す. wkは荷重が増加すると急激に発達し、その後



図-4 応力と無次元化した変位の関係



図-5 載荷中の載荷板の様子(A-A'断面図)

表-2 P_{BF}/P_{max}と P_{AF}/P_{max}の一覧表

Case	$P_{\rm BF}/P_{\rm max}$	$P_{\rm AF}/P_{\rm max}$
1	0.995	0.338
2	0.998	0.336
3	1.000	0.435
4	1.000	0.432
5	0.987	0.124
6	1.000	0.728
7	0.999	0.482
8	0.997	0.947
9	1.000	0.402
10	1.000	0.716



図-6 無次元化した載荷幅と無次元化した荷重の関係



それぞれのコンター図から載荷軸に沿った部分に生じ る破壊面の最大主ひずみの方向は載荷軸に直行する方向 であることがわかり,供試体中央に生じる幅 0.16mm 以 上の亀裂は引張り破壊によるものであると考えられる.

また,この引張り破壊面は載荷軸から 1.02mm-3.91mm 離れた箇所た部分に生じる破壊面の最大主ひずみの方向 は載荷軸に直交する方向であることがわかり,供試体中 央に生じるに発生し,2~4 本生じていた.また,載荷点 近傍を見ると幅 0.05mm-0.13mm の亀裂が見られる.コ ンター図を見ると,最大主ひずみ方向が載荷軸に直交す る方向であり,引張り破壊が生じていることがわかる. この破壊面は 3~10 本生じていた. Namikawa et al.(2007)⁹ は有限要素解析で,載荷点近傍にせん断破壊が生じ,供 試体中央に引張り破壊が生じることを示したが,載荷幅 が広がる実際の試験では,供試体の載荷点近傍と供試体 中央に引張り破壊が生じていることがわかった.

破壊時の供試体の直径 D_0 と載荷点近傍において亀裂の 生じた高さ h_{ar} の比 $h_{a'}D_0$ は0.10-0.12, D_0 と載荷点近傍にお いて亀裂が生じた幅 w_{ar} の比 $w_{a'}D_0$ は0.08-0.14となった.

以上の結果から圧裂引張り試験における破壊のメカニ ズムのモデル化を行う.図-8に載荷直後,破壊直前,破 壊直後の供試体の様子を示す.載荷は一様な線荷重から 載荷幅をもった帯荷重となる.載荷幅は広がるが破壊ま で亀裂は生じず,破壊時に供試体中央に2-4本の引張り 亀裂,載荷点近傍に3~10本の引張り亀裂が生じる.

(4) 理論解と実験結果の比較

図-1 の理論解と実験結果を比較をすると,理論解で は載荷軸面において引張り応力が最大になるが,実験で は理論解の*G*(*πaP*)が1-0.9の部分で引張り破壊が生じて いることがわかる.これは供試体が不均質であること, 理論解では載荷幅の影響を考慮していないことによるも のであると考えられる.さらに,理論解では載荷点近傍 ほど*τ*max が大きくなるため,せん断破壊が生じると予想 したが,実際は載荷点近傍において,破壊時に複数の引 張り破壊が生じていた.

5. まとめ

新たに開発した圧裂引張り試験機を用いて圧裂引張り 試験を行ない、供試体の端面の観察の結果と理論値の比 較を行なった.理論解では載荷軸面に引張り破壊、載荷 点近傍においてせん断破壊が生じると考えられたが、実 験では供試体中央の載荷軸近傍において引張り破壊の亀 裂が2~4本、載荷点近傍において引張り破壊の亀裂が 3~10本生じた.これは供試体が不均質であること、理論 解では載荷幅の影響を考慮していないことによるもので あると考えられる.

参考文献

- Coviello, A., Lagioia, R. and Nova, R. : On the measurement of the tensile strength of soft rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.38, No.4, pp.251-273, 2005.
- Namikawa, T. and Koseki, J.: Evaluation of tensile strength of cementtreated sand based on several types of laboratory test, *Soils and Foundations*, Vol. 47, No.4, pp.657-674,2007.
- 3) 森口繁一:2次元弾性論,岩波講座 現代応用数学, pp.33-41, 1957.
- 4) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解析, pp.901-911, 2009.
- 5) 社団法人 資源・素材学会:岩石の引張強さ試験方法,2009.
- 6) 社団法人 資源・素材学会:岩石の強さ試験用試料の採取方法及び試験片の作製方法,2010.
- 7) 土木学会:軟岩の調査・試験の指針(案),1991.
- 8) 社団法人 日本鉄道施設協会: 役務関係標準仕様書集,[平成 20年改訂版]JR東日本編,第2編 地質調査標準仕様書, 2008.
- 9) 地盤工学会:地盤材料試験の方法と解析, pp.259-270, 2009.
- 10) 酒井 理哉:非接触ひずみ計測ソフトウェアNCDM, 電 力中央研究所.

THE MECHANISM OF FAILURE NEAR THE LOADING POINT IN THE SPLITTING TENSILE STRENGTH TEST ON TAGE STONE

Yasuhisa AONO, Kazuo TANI, Tetsuji OKADA and Michiya SAKAI

The specimen of the splitting tensile strength test is loaded pressure from side and develop the failure on the loading axis. However, the direct stress which acts on the loading axis is not uniform. Therefore the stress concentrate near the loading point and the failure mechanism is complicated. We obtained this failure mechanism and the influence to the tensile strength.

As a result, in the central part of the loading axial surface, $2 \sim 4$ tensile cracks was observed and near the loading point, $3 \sim 10$ tensile cracks was observed. Moreover, the ratio of diameter, D_0 , and width of the observed cracks, w_{cr} is 0.08~0.14.