

圧裂引張り試験における破壊のメカニズムを 解明するための試験機の開発

青野 泰久^{1*}・谷 和夫¹・岡田 哲実²・酒井 理哉²

¹横浜国立大学（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）

²財団法人 電力中央研究所（〒271-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

*E-mail: b0743001@ynu.ac.jp

岩石の引張り強さを求める試験として最も利用頻度が高いものは圧裂引張り試験である。圧裂引張り試験は供試体に理想的に線荷重を加えることを条件とするが、実際には荷重を加えていくと載荷幅がゼロではない。さらに載荷点近傍でせん断破壊が生じている可能性があるため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。また供試体の飽和条件が引張り強さに及ぼす影響は明らかにされていない。

本報告ではこれらのメカニズムを解明するための新たな圧裂引張り試験機を開発し適応性を検証した。仕様や耐用性の検討を具体的に示す。

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

1. はじめに

岩石の引張り強さを求める圧裂引張り試験は利用頻度が高いが、理想的に線荷重を加えることは不可能である。Namikawa et al.(2007)¹⁾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。さらに載荷軸を含む面に作用する直応力(引張り応力)は理想的には一様に分布するが、載荷軸に平行な方向の直応力は載荷点で理想的に無限大となる。そのため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。一方Coviello et al. (2005)²⁾は乾燥状態と湿潤状態のカルカレナイトを用いて圧裂引張り試験を行い、湿潤状態の方が引張り強さは小さくなることを示した。また福井ら(2000)³⁾は乾燥状態の田下凝灰岩を用いて圧裂引張り試験を行った。しかし地盤工学会基準(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

ことが望ましいとされている。さらに田下凝灰岩などの軟岩は地下水以下に存在し湿潤していることが多く、湿潤状態を保つために供試体を水浸させた状態で試験を行うことが望ましいと考えられる。

載荷幅の変化や載荷点近傍の破壊形態を解明するために新たな圧裂引張り試験機を開発した。以下に装置の詳細と予備的に行った実験の結果を紹介する。

2. 実験装置の概要

(1)実験装置

2.1 実験装置

図-1に地盤工学会基準(JGS 2251-2009)⁴⁾に示されている圧裂引張り試験機の構成を示す。圧縮装置、ロードセル、上下載荷板から構成され、載荷時に供試体に一樣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。

図-2に開発した圧裂引張り試験機を示す。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幅と前・後方から両端面の撮影を行う。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個のプッシングからなる。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、プ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樣な線荷重をかけるため形状は真円柱を標準とし、直径を $D_0=50\text{mm}$ 、長さ L_0 を D_0 の0.5~1.0倍の範囲内を標準としている。一方JIS M 0303-2000⁵⁾、JIS M 0301-1975⁶⁾、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 を20~100mmとしている。 L_0 が20mmだと載荷部分が上盤で隠れてしまい載荷幅が観察できないので $D_0=50\sim 100\text{mm}$ 、 $L_0=50\sim 100\text{mm}$ の真円柱の供試体を対象に検討した。

(3) 載荷板の曲率と形状

載荷幅を計測できるように載荷板(厚さ10mm)は強化ガラスである。ISRM基準では上下の載荷板に供試体の半径の1.5倍の曲率を設けている。また地盤工学会基準(JGS 2551-2009)⁴⁾によると圧裂引張り試験は一軸圧縮試験の破壊荷重に比べて小さいことから、加圧板は一軸圧縮試験で使用する平らな加圧板をそのまま兼用する場合がほとんどであると示している。曲率を設けることにより、供試体の軸と載荷軸が一致しやすくなるという利点があるが、載荷幅が広がりやすく、載荷板が曲率をもっているため載荷幅が湾曲して見えるレンズ効果が出てしまうという欠点がある。よって載荷板は地盤工学会基準の平らなものを選んだ。載荷幅の観察は載荷板の供試体の接触する面に水性マジックを塗り、供試体が載荷板と密着することにより水性マジックが除かれる部分を載荷幅とした、そのため供試体の上部数mmは水面上に出ている。

地盤工学会基準(JGS 2551-2009)⁴⁾によると圧裂引張り試験から求まる σ_t は式(1)で表されている。

$$\sigma_t = \frac{2P_{\max} + W}{\pi D_0 L_0} \quad (1)$$

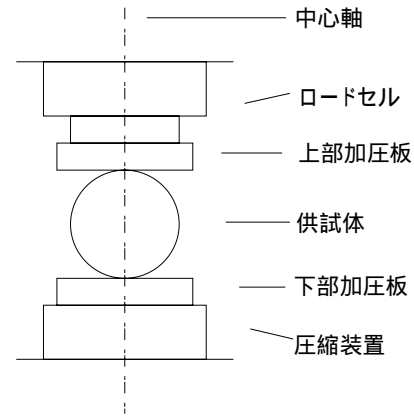
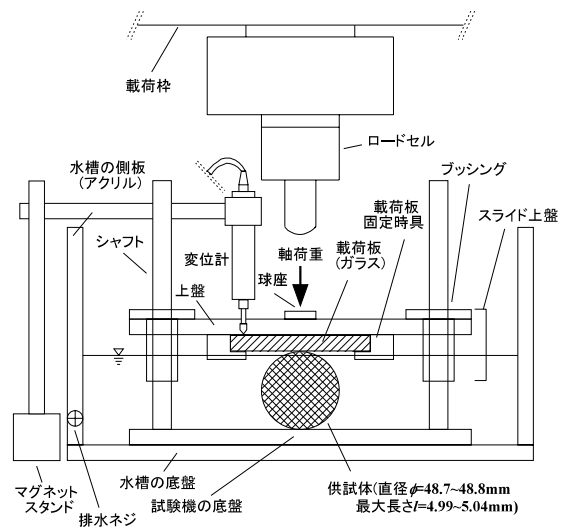
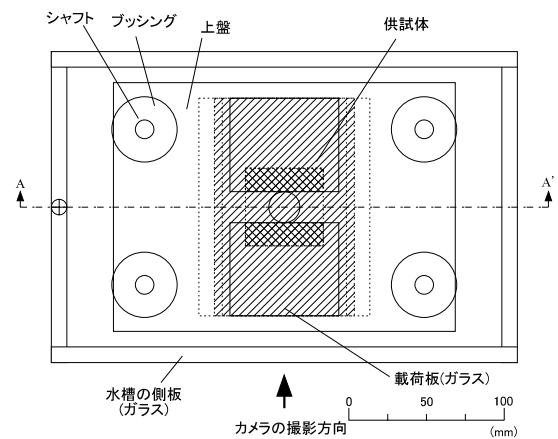


図-1 試験機の構成⁴⁾



(a) A-A' 断面



(b) 平面図

図-2 開発した圧裂引張り試験機と水槽

使用する試料は軟岩であり、一軸圧縮強さ q_u が20MPa以下と仮定し、引張り強さ σ_t は q_u の約1/10なので2MPaと仮定した。**式(1)**から載荷板にかかる最大荷重 P_{max} を7.85kNと仮定し、スライド上盤の重さ W が 6.56×10^{-3} kNであるので、これらの和である7.86kNの荷重に耐えられる強化ガラスの載荷板を選んだ。スライド上板の一部は水没し試験中に水浸深さは変化するが水浸部分が微小であるため、スライド上板の水中重量は考慮しない。また硬岩、中硬岩を用いた実験の場合、載荷板より大きな荷重がかかるので厚めの載荷板(ガラス)の耐久性を検討する必要がある。

$D_0=48.8\text{mm}$, $L_0=49.9\text{mm}$ の石膏の供試体を用いて**図-3**のA, A'点で変位を計り載荷板のたわみを調べ、B, B'点で変位を計り上盤のたわみを調べた。その結果、載荷板のたわみは $3.00 \times 10^{-3} \sim 4.40 \times 10^{-3}\text{mm}$ となり、上盤のたわみは $4.00 \times 10^{-3} \sim 2.56 \times 10^{-1}$ となった。載荷板のたわみに比べ上盤のたわみが大いだが、これは載荷板が割れないように載荷板と上盤の間に厚さ1mmのゴム板を入れているため、ゴム板の変位が上盤のたわみの変動の大きさに関係していると考えられる。そのため上盤で軸変位を計測すると、ゴム板の変位が同時に計測されてしまい、供試体の変位が計れないため、**図-3**のA点に変位計を設置し軸変位を計測した。

また $D_0=49.8\text{mm}$, $L_0=100.0\text{mm}$ の石膏の供試体を用いて載荷幅が一樣に変化するか確認した。供試体中央からそれぞれ25mm, 50mmの4ヶ所で荷重が1kN, 2kN, 3kN, 4kN, 5kNのときに載荷幅 w_k の計測を行った結果、最大と最小の差が $1.63 \times 10^{-1}\text{mm}$ 以下であったため、ほぼ一樣に載荷幅が変化していることがわかる。

(4) ブッシングと4本のシャフト

載荷板が供試体の軸回りに傾斜していると供試体が試験機から外れてしまったり、供試体の軸方向に傾斜していると一様な線荷重がかけられないので、スライド上盤と試験機の底盤の平行度を保つためにスライド上盤に奥行き方向に4本のシャフト($\phi=12\text{mm}$)を通し、それぞれのシャフトと上盤にブッシング(日本ベアリング株, SMF12UU)を取り付けた。またスライド上盤に曲げ変形が生じないようにスライド上盤の曲げ剛性を高め供試体の軸方向のシャフト間の距離を120mmと、供試体の最大長さ $L_{max}=100\text{mm}$ より大きくした。ブッシングとシャフトの摩擦 F は $4.20 \times 10^{-3}\text{kN}$ であった。

(5) 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

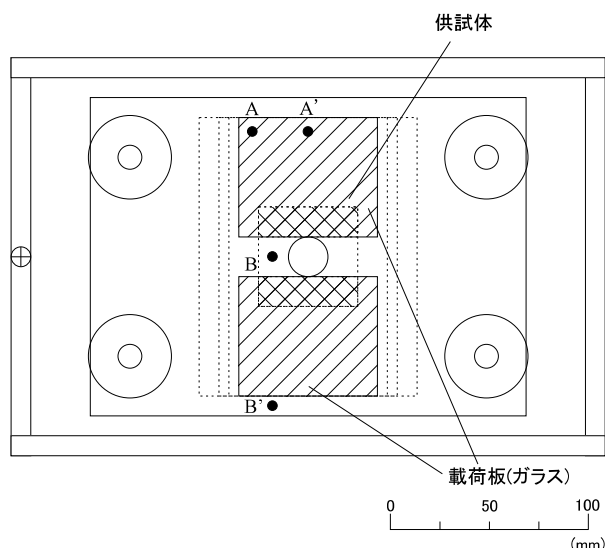


図-3 変位計の設置箇所

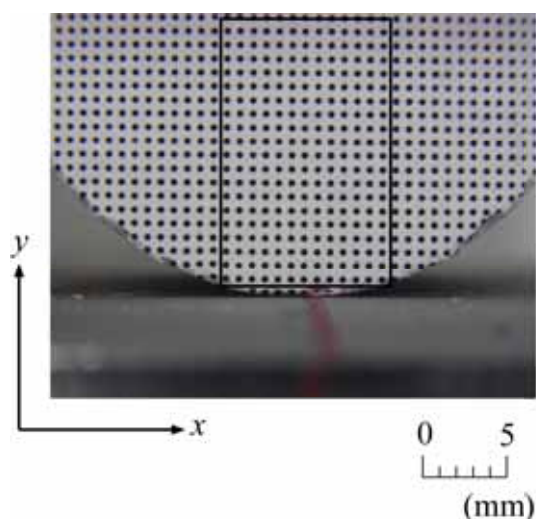
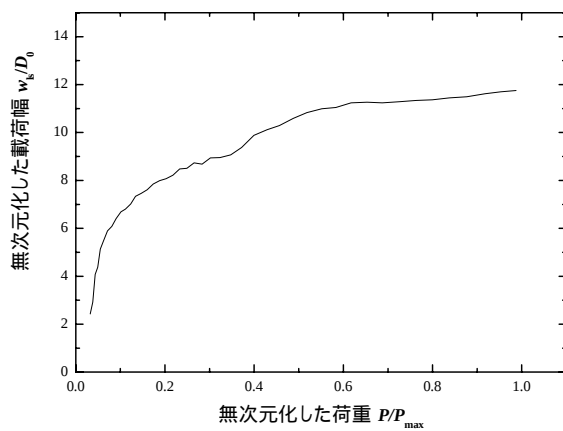
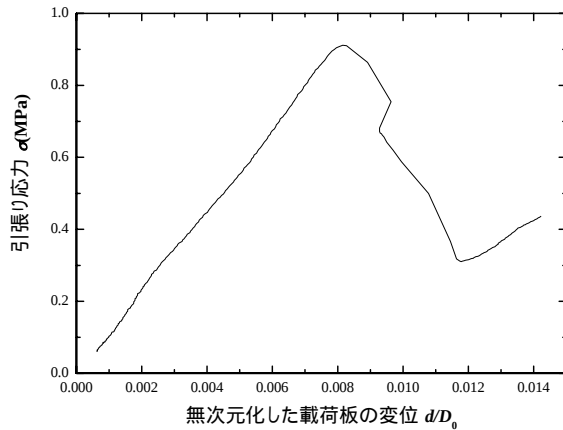


図-4 マーカーの配置と観察範囲

表-1 供試体のデータ

直径 $D_0(\text{mm})$	48.7
長さ $L_0(\text{mm})$	50.0
密度 $\rho_{sa}(\text{g/cm}^3)$	2.05
弾性波速度 $V_p(\text{m/s})$	2633
弾性波速度 $V_s(\text{m/s})$	1057
ポアソン比 ν_d	0.40
せん断弾性係数 $G_d(\text{MN/m}^2)$	2286
弾性係数 $E_d(\text{MN/m}^2)$	6418

(ELECOM, EJP-TATA4)を湿潤した端面に圧接した。マーカーは**図-4**に示すように $\phi=0.5\text{mm}$ の円を1mmで格子状に配置した。



上: σ - d/D_0 の関係 下: w_b/D_0 - P/P_{max} の関係

図-5実験結果

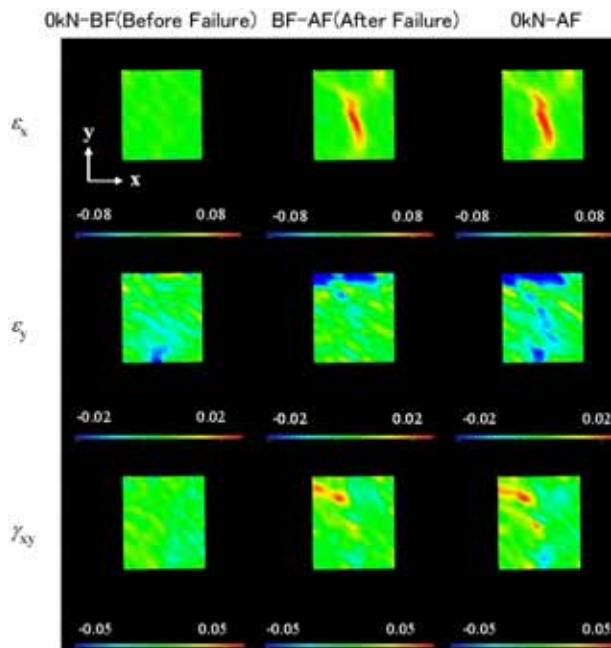


図-6コンター図

(6)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, 載荷枠のロードに設置した。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。

3. 検証実験

(1)試験の方法

試験の方法は地盤工学会基準⁴⁾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 8.65×10^{-4} mm/s である。

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。弾性波速度 V_p , V_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 ν_d 、せん断剛性率 G_d 、ヤング率 E_d は V_p , V_s , ρ_{sa} を用いて算出した

(2) 荷重(応力)と変位の関係, 載荷幅と荷重の関係, 飽和度の与える引張り強さの影響

引張り応力 σ と無次元化した載荷板の変位 d/D_0 の結果を図-5 上に示す。引張り応力 σ は式(2)より求められる。

$$\sigma = \frac{2P+W-F}{\pi D_0 L_0} \quad (2)$$

P は軸荷重である。無次元化した載荷板の変位 d/D_0 における変位量 d は式(3)から求める。

$$d = d_m + d^* \quad (3)$$

ここで d_m は変位計から得られた軸変位, d^* はスライド上盤を載せたときに発生する変位量である。したがって図-5 の上の値は原点からとっていない。

無次元化した載荷幅 w_b/D_0 と無次元化した荷重 P/P_{max} の結果を図-5 下に示す。 w_b は荷重が増加すると急激に発達し, その後増加率が低下する。滑らかな変化ではない理由は凝灰岩の不均質性と考えられる。また Namikawa et al.(2007)¹⁾ はセメント改良土を用いて圧裂引張り試験を行い, 載荷幅を 3mm と仮定しているが, 今回の実験では田下凝灰岩の載荷幅 w_b は 10mm 以上増加した。これは Namikawa et al.(2007)¹⁾ の使用したセメント改良土のヤング率 E_d が 3000 であり, 今回使用した田下凝灰岩比べ小さく, 硬いものほど載荷幅が出にくいと予想した結果と違うものになった。中硬岩, 硬岩でも試験し, 載荷幅の変化を観察する必要がある。

破壊荷重に至るまでの経過時間 t は 455s, 破壊荷重 P_{max}

は 3.49kN, 引張り強さ σ_t は 0.91MPaとなった。今回の実験で湿潤状態の田下凝灰岩の引張り強さ σ_t は 0.52~0.91MPaを示した。福井ら(2000)³⁾の示した乾燥状態の田下凝灰岩の引張り強さである 1.8MPaに比べ小さいことがわかる。田下凝灰岩は細かい「みそ」を含み、岩石が水に触れることにより「みそ」が軟化するため、乾燥状態に比べ強度が小さくなることが考えられる。また同名称でも採取する地点によって強度が異なることも考えられる。

(3) 供試体両端面のひずみ分布の検討

画像データからひずみを計測できる非接触ひずみ計測ソフトウェアNCDM¹⁰⁾を用いて供試体両端面のひずみ分布を作成した。供試体の端面の荷重をかける前(0kN)、破壊直前(BF)、破壊直後(AF)の3枚の画像を比較することにより作成したコンター図(横ひずみ ε_x 、縦ひずみ ε_y 、せん断ひずみ γ_{xy})を図-6にまとめた。

ε_x をみるとBFとAFの間に急激な引張りひずみが生じていることがわかる。破壊後における引張り破壊面と引張りひずみの生じる箇所は一致した。

ε_y をみると 0kNとBFの間において載荷点近傍で圧縮ひずみが生じていることがわかる。しかし、BFとAFの間では供試体端面中央部の圧縮ひずみが生じるという結果となった。

γ_{xy} をみると載荷点近傍でせん断ひずみが生じていることがわかる。破壊後における供試体の載荷点近傍は楔形にせん断破壊が生じていた。

ε_x 、 γ_{xy} についてはコンター図は予想通りの結果となったが、 ε_y についてはAFまで載荷点近傍で圧縮ひずみが生じるという予想とは異なる結果となった。これは供試体中央部に引張り破壊が生じたときに、実際に供試体中央に圧縮ひずみが生じることやマーカーが細かいためNCDM¹⁰⁾の誤ったデータの出力などが考えられる。

4. まとめ

開発した圧裂引張り試験機を用いて新第三紀凝灰岩である田下凝灰岩の載荷に伴う載荷幅の広がり方や端面のひずみ分布を計測することができた。

今回は湿潤状態で試験を行ったが、載荷幅の観察の際にグリースを用い、供試体と上盤を水浸させた試験を行う。また中硬岩、軟岩を用いた試験が行える載荷版、載荷板固定治具を作製し試験を行い軟岩との w_k の広がり方の違い、破壊形態を調べる。さらに今回作成したコンター図における ε_y が予想していた結果と異なっていたため、ひずみ分布の精度を上げて試験を行うために供試体の直径の大きさ、マーカーの大きさ、マーカーの配置間隔を変えた状態の圧裂引張り試験を行う。

参考文献

- 1) Namikawa, T. and Koseki, J.: Evaluation of tensile strength of cement-treated sand based on several types of laboratory test, *Soils and Foundations*, Vol. 47, No.4, pp.657-674, 2007.
- 2) 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.
- 3) 福井 勝則, 大久保 誠介, 岩野 圭太: 一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の載荷速度依存性, 土木学会論文集, Vol.0, No. 344, pp.59-71, 2003.
- 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.

APPARATUS FOR SPLITTING TENSILE STRENGTH TEST

Yasuhisa AONO, Kazuo TANI, Tetsuji OKADA, Michiya SAKAI

The splitting tensile strength test is a popular test method to evaluate the tensile strength of rocks. However, there are some discussions on the validity of this test method; such as practically not a line-loading and possible involvement of shear failure in the vicinity of load application point. This paper describes the development of a new apparatus for this test for the purpose to investigate the failure mechanism of the specimen during test. Some of the characteristic features are; strain distribution on both ends of the specimen and the width of the practically strip-loading can be measured. Moreover, the test can be conducted with the specimen under the water.