

岩石の圧縮履歴が引張時の強度・変形特性に及ぼす影響とマイクロクラックに関する一考察
Effects of compression history on tensile strength and deformability and a consideration on microcrack

新 孝一^{*} ・坂井慎二^{**} ・西松裕一^{***} ・大久保誠介^{****}
Koichi SHIN, Shinji SAKAI, Yuichi NISHIMATSU and Seisuke OKUBO

In the main experiments, cubic rock blocks were compressed up to pre-failure levels and uniaxial specimens were cored from these cubes in the compressed direction and the lateral direction to be used for tensile tests. As the results it was found that 1) the microcracks made in the axial direction during the compression render anisotropy of tensile strength and deformability, 2) the rate of AE events during compression is proportional to the dilatancy, 3) while the non-linear part of strain comes from both the displacement recovery at the shear surface of the microcracks and the opening of a extending microcracks, AE during tension accompanies only to the extending microcracks.

1. はじめに

トンネル、地下発電所や将来の高レベル廃棄物処分、超電導エネルギー貯蔵など、地下岩盤内に空洞をつくって利用するためには、岩の変形・強度特性、透水特性、熱伝導特性などを考慮して空洞設計を行う必要がある。このような岩のさまざまな特性を支配する主な要因の一つに、岩の中の微小なクラックを挙げることができる。

また、近年では岩盤応力の測定を応力解放法や水圧破碎法などのような大掛かりな原位置試験でなく、採取した岩石試料を用いてより簡易に求めようとする AE 法、DRA 法、DSCA 法、ASR 法、音弾性法¹⁾などの研究も行われている。これらの方法は岩石の非線形・非弾性的な応答を用いて過去の応力履歴の痕跡を読み取るようとするものであり、その挙動特性には岩石内のマイクロクラックとその挙動が大きく影響する。

このような点から岩の工学においてマイクロクラックの挙動特性を調べることの意義は大きく、従来からさまざまな研究が行われており、例えば、圧縮載荷により岩石内に載荷方向に卓越したマイクロクラックが発生すること²⁾、既存のマイクロクラックの方向性により強度や弾性波速度の異方性が生じること³⁾、などが解明されている。

本報告では、圧縮載荷で生じたマイクロクラックがその後引張り載荷を受ける場合に岩の特性に対してどのような影響を与えるのか、という観点から基礎的な実験的検討を行った。主たる実験では、複数のレベルに圧縮載荷履歴を持つ岩石（三城目安山岩）から作成した縦方向と横方向の引張試験片を用いて AE 等を

* 正会員 電力中央研究所地盤耐震部

** 正会員 日鉱金属(株)

*** 正会員 東京大学名誉教授

**** 正会員 東京大学工学部

計測しながら引張試験を行った。このような実験に基づき圧縮载荷に伴うマイクロクラックの性質について考察を行う。

2. 実験方法と実験結果

岩石が圧縮载荷を受けて強度破壊以前に発生したマイクロクラックがどのようなもので、その後の岩石の特性にどのように影響するかを、一軸圧縮試験、圧縮引張両振り試験、圧縮履歴試料の一軸引張試験、で調べた。

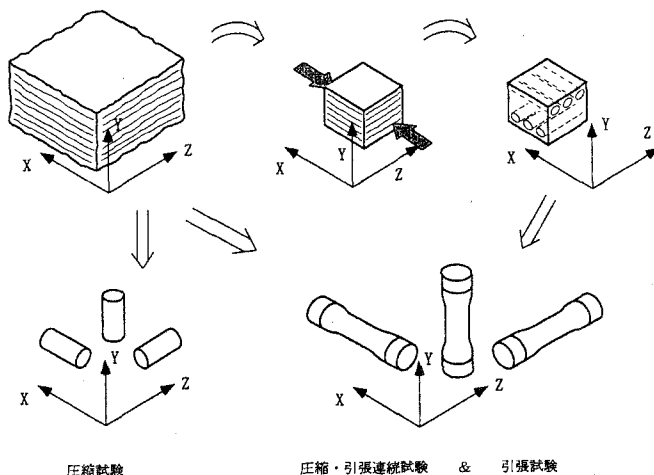


図1 試験片の作成手順

2. 1 試料の準備と計測

実験に用いた岩石は福島県西白河郡矢吹町に産する三城目安山岩である。これは緑泥石ガラス質の石基中に、0.1～数mmの輝石、斜長石の斑晶を含む。また流理面が認められる。

これの大きなブロック状岩塊にX-Y-Zの座標を設定し、方向性を保持して約13cm四方の立方体試料を6個切り出した。流理面の法線方向をY軸としている。また立方体試料以外に、X, Y, Zの各方向の圧縮用(φ約30mm)と引張用(ドッグボーン型φ約24mm)の試験片を10個程度ずつ作成した。試験片の載荷面の平行度を±0.01mm以内に収めた。すべての試料を35℃の乾燥器でデシケートで乾燥させた。試料作成の手順を図-1に示す。

載荷試験中にロードセルにより荷重、ひずみゲージによりひずみを測定し、またAE測定を行いイベントを計数した。AEセンサーの共振周波数は約200KHzである。測定系のデッドタイム(信号入力後の不感時間)

は0.82msecであり、これは1イベント(事象)のAE波形の後部を再びカウントしないための充分な長さであった。AEイベントがランダムに発生する場合、単位時間にN個発生したイベントをデッドタイムdの計数システムがカウントする数の平均値は、 $N \cdot e^{-Nd}$ で与えられる。本測定系の場合、ランダムに発生するイベントを計数できる限度はおおよそ450/secである(図-2)。全実験を通じて計数したAEレートは破壊直前を除いて概ね100/sec以下であったので、カウント数は実際に発生したイベント数とほぼ等しいと見なすことができる。

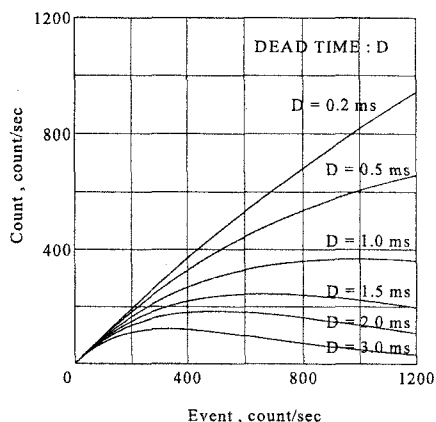
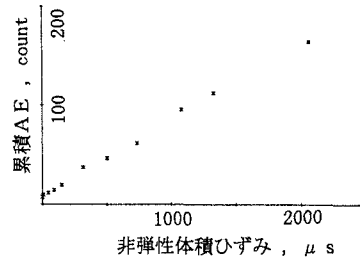
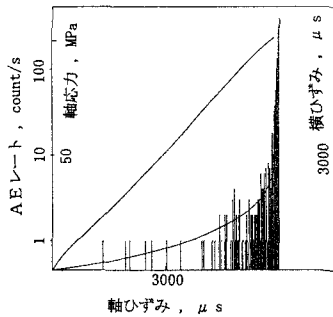


図2 AE発生率とカウント数の関係

2. 2 一軸圧縮試験

まず、寸法 $\phi 30 \times 60\text{mm}$ の試験片を用いて、一軸圧縮強度（約 100MPa）を得た。用いた試験機は 20 トン容量の Riehle 型である。圧縮試験時の、応力、縦・横ひずみ、AE レート関係の



例を図-3a に示す。図 3a 圧縮：軸ひずみ-AE、応力、横ひずみ 図 3b 圧縮：累積 AE-非弾性体積ひずみ
 載荷の途中から縦
 ひずみに比して横ひずみが大きく増加する特徴があり、それに伴い AE レートも増加している。また、AE 累積と非弾性体積ひずみ（体積ひずみとその弾性成分との差）には、破壊の直前まで直線関係があった（図-3b）。

2. 3 圧縮引張両振り試験

圧縮載荷もできるような端面治具を持つ引張試験片を、まず圧縮強度の 22%, 47%, 64% まで圧縮し除荷した後、引き続き 1 トン容量の新型 Olsen 式試験機で引張試験を行った。これらの応力-縦ひずみ関係を原点付近を拡大して図-4 に示す。この図から、圧縮載荷によって生じた残留ひずみが、同軸での引張試験時の引張ひずみに加わる様子が伺える。またこの結果、圧縮載荷レベルが大きいほど引張時のヤング率が小さくなっていることもわかる。

2. 4 圧縮載荷履歴試料の一軸引張試験

立方体試料を 100 トン容量の Amsler 型試験機で X 方向に一軸圧縮強度 S_c の 60%, 75%, 90% まで載荷したのち、この立方体試料から X 方向と Z 方向の引張試験用の試験片を 3 本ずつ作成する。これらの圧縮履歴を持つ引張試験片と圧縮履歴のない引張試験片とを用いて、AE、縦・横ひずみを計測しながら一軸引張試験を行う。なお、横ひずみはいずれの試験片でも Y 方向すなわち流理面に垂直な方向で測定した。この結果の荷重、軸ひずみ、AE レートの関係の例を図-5 に示す。ひずみ为非線形になるとともに AE レートが増加していることがわかる。

これらの結果が、圧縮載荷レベル、引張方向とどのような関係になっているかを検討するために、下記の項目に着目した。

- 1) 引張強度 S_t 、
- 2) 引張時の初期接線および 80% 割線ヤング率 $E_{0\%}$, $E_{80\%}$ 、
- 3) 引張応力が 3MPa のときの軸ひずみ ϵ_{L3} 、
- 4) 引張応力が 3MPa のときの AE イベントの累積 $\Sigma_3 AE$ 、
- 5) 引張時に AE が顕著に始まる時点の軸ひずみ ϵ_L^{AE} 、
- 6) 引張時に AE が顕著に始まる時点の応力 σ_L^{AE} 、
- 7) 引張時の破壊横ひずみ ϵ_T^c

以上の項目を、圧縮載荷レベルと引張方向別に整理して、図-6(a)~(g)に示す。なお、項目 5) の「AE が顕著に始まる時点」を、AE レートが 0/sec である最後の時と定義してデータ処理した。図 6 の左側は X 方向引張、右側は Y 方向引張の結果であり、14 の各グラフは横軸に圧縮載荷履歴レベル(% S_c)をとっている。

これらの図から、引張り試験結果に対してそれ以前の圧縮载荷履歴がそのレベルや方向に応じて影響を与えていることがわかる。

3. 考察

前節で述べた実験における岩石の引張時の強度・変形特性、それらの異方性に対する圧縮载荷履歴の影響は、圧縮载荷時に岩石内に生じたマイクロクラックに起因するものと考えられる。岩石の圧縮载荷によ

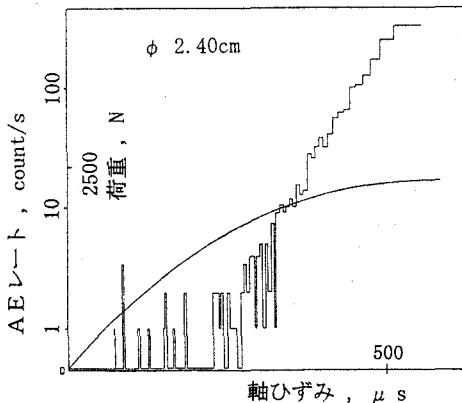


図5 引張試験結果例

り载荷方向にマイクロクラックが発生することは従来の研究で認められているが、ここではそのマイクロクラックの形状の概念的モデルを図-7のように想定する。すなわち、図中にハッチングして示した既存の面での滑りにより、その面端部から圧縮载荷方向に新たな亀裂が発生し進展していると考えられる。このようなモデルが引張試験で観察した、強度、ヤング率、AE増加時のひずみ・応力、破壊時横ひずみ、などの傾向を説明しう

1) 引張強度 S_t

図-6aより、X方向の圧縮载荷履歴を持つ試料をX方向ならびにZ方向に引張試験した場合、X方向では载荷レベルによる引張強度の変化が見られず、Z方向では圧縮载荷による引張強度の低下が認められる。この強度変化は大きくはないので、有意かどうかをWelchの検定⁴⁾により次のように判断した。まず、圧縮载荷レベル0%のX、Z方向の引張強度 S_t の母平均に有意差があると言いつきの危険率は50.5%であるので、両者は同一とみなした。次に、X方向の引張試験結果について、载荷レベル0%と、60, 75, 90%の引張強度の母平均に有意差があると言いつきの危険率は、いずれも35~52%であるので、X方向の圧縮履歴によりX方向引張強度が低下したとは判断しきれない。これに対しZ方向について、载荷レベル0%と、60, 75, 90%の引張強度の母平均に有意差があると言いつきの危険率を求めるといずれも5%以下になるので、X方向の圧縮履歴によりZ方向の引張強度が低下したと判断する。

このように、X方向の圧縮履歴によりX方向の引張強度低下は認められないがZ方向の引張強度低下が明瞭であることは、圧縮载荷により岩石内部に圧縮方向に卓越したマイクロクラックが発生・成長したためと考えられる。

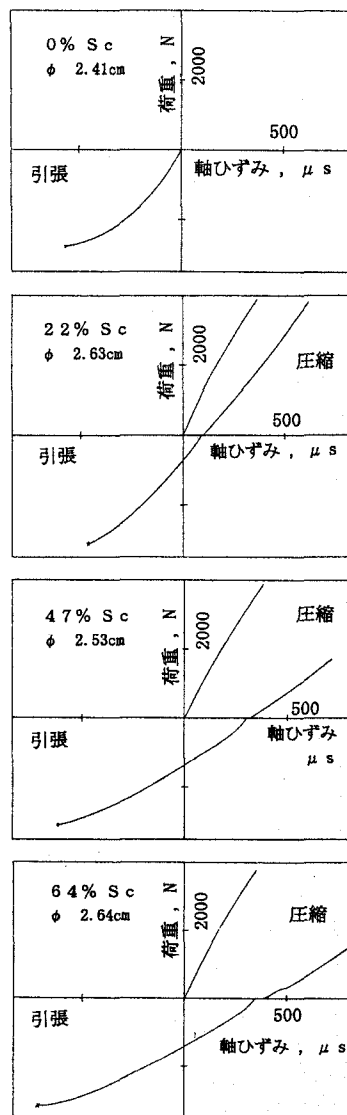


図4 圧縮引張両振り試験結果

このように、X方向の圧縮履歴によりX方向の引張強度低下は認められないがZ方向の引張強度低下が明瞭であることは、圧縮载荷により岩石内部に圧縮方向に卓越したマイクロクラックが発生・成長したためと考えられる。

2) 引張時の初期接線および80%割線ヤング率 $E_{0\%}, E_{80\%}$

引張試験時のヤング率は、図-6b に示したようにX, Z方向の引張試験片とも、圧縮載荷レベルの増加とともに低下している。

Z方向の引張時のヤング率がX方向の載荷履歴により低下していることは、引張り方向に垂直なX方向のマイクロクラックが増加していると考えることにより説明できる。

一方、X方向の引張時のヤング率の低下は、このようなマイクロクラックによるコンプライアンスの増加というメカニズムでは説明できない。X方向のヤング率低下は、X方向圧縮載荷時の残留ひずみが残存していたため、これが回復することによるヤング率低下だと考えられる。これは、図-4 に示した圧縮引張両振り試験の結果から明瞭に確認される。

すなわち図-7 に示した模式図において、X方向に引張る場合にはマイクロクラックのせん断変位を回復し、Z方向に引張る場合にはマイクロクラックを更に進展させ、メカニズムは異なるが結果として同様にヤング率が低下する(図-8)。

3) 引張応力が3MPaのときの軸ひずみ ϵ_{L3}

この値は、X, Z方向試験片とも、圧縮載荷レベルとともに増加している。これは、ヤング率がX, Z方向とも低下していることと対応している。またこの原因メカニズムはヤング率の場合と同様にX, Z方向で異なると考えられる。

4) 引張応力が3MPaのときのAEイベントの累積 Σ_3AE

この値は、X方向では圧縮履歴レベルに関わらず変化が見られないが、Z方向では圧縮履歴レベルの増加とともに増加している傾向が見られる。これは、AE は主にマイクロクラックの進展に伴って発生し、図7の模式図のせん断面の変位回復に伴っては発生しないと考えることによりつぎのように説明できる。

X方向の試料の場合、圧縮履歴により発生したマイクロクラックは、引張により新たに進展する向きではないので、 $\Sigma_{30}AE$ にも変化が見られない。一方、Z方向の試料では、圧縮履歴により発生したクラックが引張により進展する向きにあるので、 $\Sigma_{30}AE$ が圧縮履歴レベルとともに増加する(図-8)。

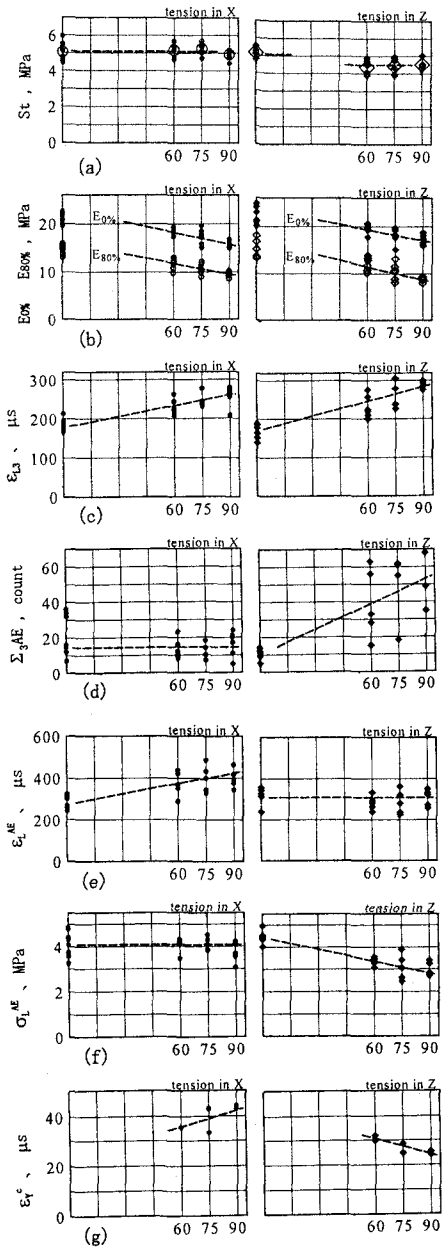


図6 圧縮履歴試料の引張試験結果

5) 引張時に AE が顕著に出始める時点の軸ひずみ ϵ_L^{AE}

AE が顕著に出始める時点での軸ひずみは、図-6e に示したように、X 方向試験片では圧縮載荷レベルとともに増加傾向があり Z 方向では変化が見られない。これも前項と同様に次のように説明される。

X 方向試験片で ϵ_L^{AE} が増加することは、2) で述べた圧縮時の残留歪みが回復することによるひずみが増加するためと考えることができる(図-8)。このような効果は Z 方向試験片にはない。2) に述べたように、Z 方向試験片には圧縮載荷時に発生したマイクロクラックが引張時に進展する向きにあるので、低応力で AE が出始めるが、ヤング率も低下しているので ϵ_L^{AE} はほぼ一定になる。

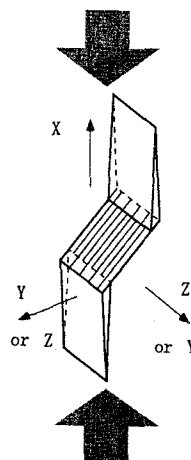


図7 マイクロクラックの模式例

6) 引張時に AE が顕著に出始める時点の応力 σ_L^{AE}

AE が顕著に出始める時点での引張応力は、図-6f に示したように、X 方向では圧縮載荷レベルに伴う明瞭な変化が見られないが、Z 方向では減少している。これは前項 ϵ_L^{AE} の結果と相補完しあって解釈することができる。

すなわち、X 方向試験片では圧縮載荷履歴による X 方向の残留ひずみはあるが、引張により進展する向きのマイクロクラックは新たに生じていない。だから、AE が増加する時のひずみは増加するが応力には変化がない。一方、Z 方向の試験片では圧縮載荷により引張時に進展する向きにマイクロクラックが生じているので、AE が増加しはじめる応力は圧縮載荷レベルとともに低下する(図-8)ことになる。

7) 引張時の破壊横ひずみ ϵ_Y^f

引張試験での横ひずみは、X、Z 方向試験片とも図-1 に示すように流理面に垂直な Y 方向で測定した。横ひずみ測定は実験の後半になって追加実施したのでデータ点数が少ないが、図-6g に示すように、X 方向試験片では圧縮載荷レベルの増加とともに破壊時横ひずみが増加し、Z 方向では減少する異方性が見られる。

X 方向試験片では、圧縮載荷により横 (Y) 方向にもマイクロクラックのせん断変位に伴う伸びの残留ひずみが生じており、このマイクロクラックは X 方向の引張りによって残留変位が回復されるような向きである(図-7)。したがって、引張り試験時の横ひずみは通常の分以外に回復分が加わって大きくなる。そして X 方向では引張り強度の低下はない。だから、 ϵ_Y^f は、圧縮載荷レベルとともに増加する。

一方、Z 方向試験片では、横 (Y) 方向の伸びの残留ひずみはあるものの、それは引張試験で回復できるようなマイクロクラックの向きでない(図-7)。だから、X 方向試験片の場合のような理由で ϵ_Y^f が増加することはない。Z 方向試験片では、引張時に進展するようなマイクロクラックが新たに発生しているので、これによるポアソン比の低下の効果があり、また引張強度が低下傾向にあるということから ϵ_Y^f は低下する(図-8)、と考えられる。

4. まとめ

本報告では、岩石を圧縮したときに強度破壊以前に生じるマイクロクラックの性質や影響について調べるために、三城目安山岩試料を用いたいくつかの実験を行い検討を行った。その結果、圧縮履歴を与える岩石の変形・強度特性への影響などについて、以下のようないくつかの興味ある知見を得た。

- 1) 圧縮載荷により縦方向に発生するマイクロクラックにより、その後の横方向の引張載荷に対しては低応力から AE が発生するようになり引張強度は低下する。しかし、縦方向の引張に対しては、マイクロクラックの配向性のため、AE の発生応力にも引張強度にも変化がない。
- 2) 圧縮載荷時の累積 AE イベント数と非弾性体積ひずみ（ダイラタンシー）とは直線関係にある。
- 3) 圧縮（X 方向）により生じた残留横ひずみ（Y 方向）は、発生したマイクロクラックの配向性のため、圧縮と同じ方向に引っ張ったときには回復するが、横（Z 方向）に引っ張ったときには回復しない。
- 4) 引張載荷時の主な AE は新たな引張クラックの進展によって発生し、残留ひずみの回復によっては発生しない。

ここで検討し解明したことは岩石の材料科学的で基礎的な力学特性である。冒頭に述べたように力学特性のみならず透水性、熱伝導特性、なども考慮する必要のある将来の岩盤空洞設計に際しては、これら岩盤特性に小さくない影響を与えると考えられるマイクロクラックの発生やその性質について留意する必要がある。また、岩石の示す微小な非線形現象を計測して過去の地圧を推定しようとする場合にも、その非線形現象の起源はマイクロクラックの挙動にあると考えられるので、その性質を十分に把握する必要がある。今後はこれらの観点からマイクロクラックに起因した岩の特性の解明を具体的に工学として役立てるためにさらに研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 新 他：岩石試料の弾性波速度変化を利用した初期地圧測定法のための基礎検討、電中研報告 U92046、1993 年 2 月
- 2) P.Tapponier & W.F.Brace; Development of stress-induced microcracks in Westerly granite, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol.13, p.103-112, 1976 など
- 3) 山本 他：圧裂荷重下における岩石の変形・破壊挙動、徳山工業高等専門学校研究紀要、No.12, p.53-58, 1988
- 4) 林周二：統計学講義第 2 版、丸善、昭和 48 年

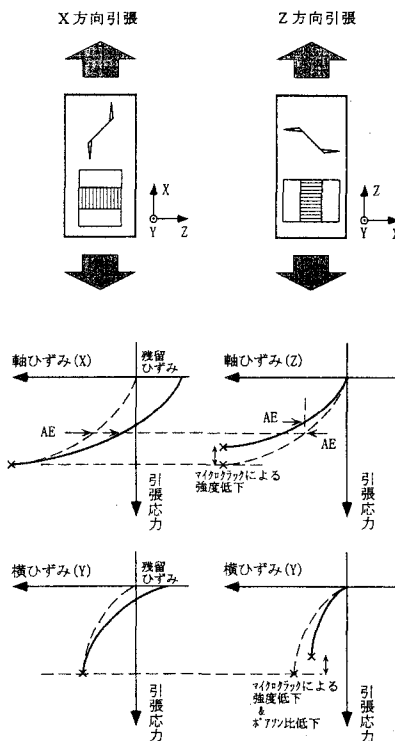


図 8 圧縮時のマイクロクラックによる引張挙動特性