

(18) 三軸圧縮再載荷による岩石のカイザー効果に関する実験

Experimental Research on the Kaiser Effect of Rock
under Triaxial Compressive Re-loading

渡辺 英彦*, 田野 久貴**

Hidehiko WATANABE, Hisataka TANO

The estimation of in-site stress using the Kaiser effect of acoustic emission has been measured under uniaxial compressive re-loading. The axial stress of re-loading direction alone can be measured by this method. In this study, we carried out two experiments on triaxial compressive re-loading using Ohya tuff and Abukuma granite.

When the axial directions were the same in the case of pre-loading and re-loading under confining pressure of $\sigma_2 = \sigma_3$, pre-confining pressure and pre-axial stress were estimated by the Kaiser effect under re-loading of hydrostatic pressure and differential stress. In the case of hydrostatic re-loading of the core specimen which were drilled out the cubic specimen of Ohya tuff, subjected to repeated stress from three principal directions ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$), the Kaiser effect was observed at three pre-axial stresses.

1. はじめに

ボーリング孔より採取された岩石コアを用いて初期地圧を推定する方法¹⁾の一つにA Eのカイザー効果を用いた方法がある。A E法による地圧推定に関する最初の研究は金川ら²⁾により提案され、その後、多くの実験的研究が行われている。これらの研究では先行載荷として一軸圧縮、三方向からの一軸圧縮が行われ、除荷後、再び一軸圧縮を行い、その時のA E計測より先行載荷時の応力推定を行っている^{3), 4)}。この再載荷により得られる推定応力は再載荷軸方向の応力である。一方、石橋⁵⁾はモデル軟岩を用いて、また渡辺ら⁶⁾は凝灰岩を用いてピーク強度以降のカイザー効果を検討するために三軸圧縮の再載荷を行っているが、推定している応力は再載荷軸方向の応力である。本研究では先行載荷として岩石供試体に三軸圧縮を行い、再載荷として静水圧、引き続いて軸差応力を載荷し、その時のA Eを計測した。この計測結果より一つの供試体を用いて、先行載荷時の側圧と軸応力の2つの応力推定の可能性について実験検討を行った。また、立方供試体に大きさの異なる三主応力を与え、採取したコア試料の静水圧再載荷時のA E計測についても実験検討を行った。

* : 正会員 工修 日本大学専任講師 工学部土木工学科

** : 正会員 工博 日本大学教授 工学部土木工学科

表1 岩石物性

	大谷凝灰岩	阿武隈花崗岩
一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	1 2 8	1 9 5 5
弾性係数* (kgf/cm ²)	2.6×10^4	3.4×10^4
吸水率 (%)	24.7	0.26
含水率 (%)	3.0	0.28
有効間隙率 (%)	34.3	0.68
湿潤密度 (g/cm ³)	1.74	2.73
自然密度 (g/cm ³)	1.44	2.72
乾燥密度 (g/cm ³)	1.40	2.72

*：一軸圧縮試験時

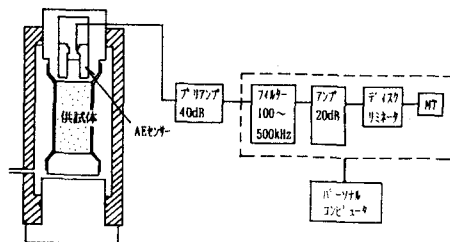


図1 A E計測システム

2. 等側圧の先行载荷

2.1 岩石試料

宇都宮市大谷町周辺より採取された細目の凝灰岩（大谷石）と福島県田村郡産の阿武隈花崗岩の2種類の岩石を用いた。各岩石の物性を表1に示す。それぞれブロック状の試料より $\phi 5 \times h 10$ cm、端面の平行度1/20mm以内の円柱供試体を作製し、絶乾状態とした後、室温にて実験を行った。

2.2 载荷方法

先行载荷として三軸圧縮試験装置により軸差荷重を载荷した。载荷は液圧により側圧を载荷し、その後、所定の軸応力を载荷した。载荷した側圧、軸応力の大きさと試験個数は、大谷凝灰岩は側圧30、軸応力60kgf/cm²を5本行った。阿武隈花崗岩は側圧50、軸応力80kgf/cm²と側圧100、軸応力160kgf/cm²の2通りをそれぞれ3本ずつ行ったが、軸応力を所定の値より大きくした場合もある。この三軸圧縮状態をAEがほとんど発生しなくなる1時間保持した。

再载荷においてはAEカウントをリアルタイムで表示しながら行った。まず静水圧の载荷過程においてAEの急増点より先行側圧をおおまかに推定する。その後、側圧をAE急増点レベルまで戻し、側圧を一定として軸差荷重を载荷した。载荷終了後、AE発生傾向-静水圧-軸応力の関係より先行側圧と先行軸応力の推定を行った。

2.3 A E計測方法

三軸圧縮下におけるAE計測は図1に示すように、上加圧盤内に設置したAEセンサーにより計測を行なった。使用したAEセンサーの共振周波数は140kHzであり、100kHz～200kHzに高い利得を有している。システムの応答周波数帯は100kHz～500kHzである。AEセンサーからの出力は、プリアンプで40dB増幅した後、メインアンプでさらに20dB増幅した。デイスクリベは载荷を行っていない状態でノイズを計測しない程度（40mV）とした。AEカウントには、AEの1事象を1カウントとするイベントカウントと、デイスクリベを越える振幅の回数を全てカウントするオシレーションカウントがある。ここでのAEカウントはイベントカウントを用いている。

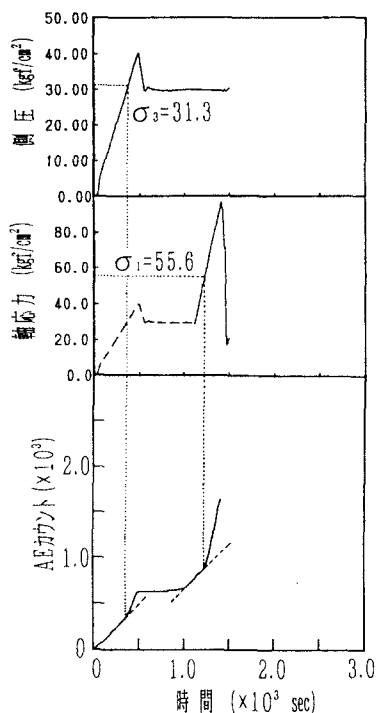


図2 大谷凝灰岩の計測結果
(先行側圧 $\sigma_3=30.3$ kgf/cm²)
(先行軸応力 $\sigma_1=56.8$ kgf/cm²)

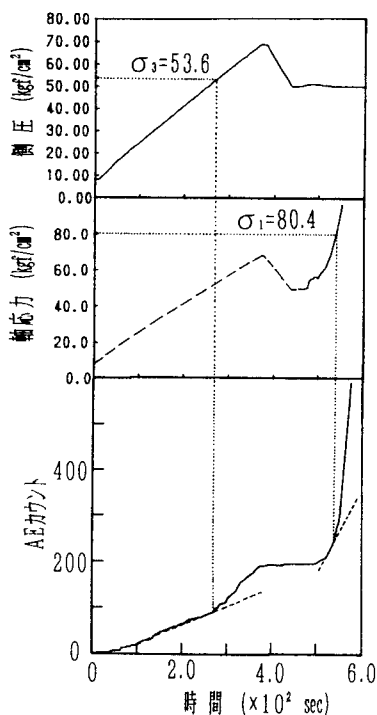


図3 阿武隈花崗岩の計測結果
(先行側圧 $\sigma_3=50.4\text{kgf/cm}^2$)
(先行軸応力 $\sigma_1=82.9\text{kgf/cm}^2$)

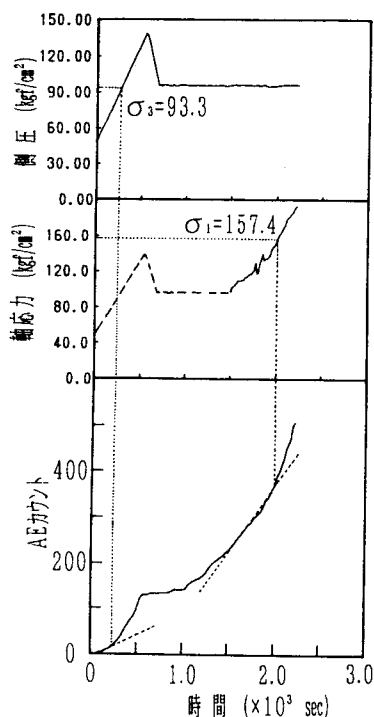


図4 阿武隈花崗岩の計測結果
(先行側圧 $\sigma_3=100.9\text{kgf/cm}^2$)
(先行軸応力 $\sigma_1=161.0\text{kgf/cm}^2$)

2.3 実験結果と考察

大谷凝灰岩の再載荷時の側圧、軸応力、AE発生状況を図2に示す。載荷はまず静水圧をAE発生急増点以降(500sec)まで載荷し、その後、圧力をAE急増点レベル(側圧約30kgf/cm²)まで戻す。次に、側圧を一定として軸差荷重を載荷している。図に示す軸応力の破線は静水圧載荷区間、実線は軸差荷重の載荷区間である。

AE発生状況は、500secまでは静水圧載荷によるAE、1000secからのAEは軸差荷重載荷によるものであり、静水圧除荷時(500~600sec)には、AEはほとんど計測されなかった。静水圧、軸差応力の各載荷によるAEの発生は、各載荷直後より時間経過とともに直線的に発生している。この直線的な発生傾向(図中の破線)から離れ始める点をカイザー効果点とすると側圧は31.3、軸応力は55.6kgf/cm²と推定される。先行載荷として載荷した側圧 $\sigma_3=30.3$ 、軸応力 $\sigma_1=56.8\text{kgf/cm}^2$ に近い値を示している。

阿武隈花崗岩の先行側圧 $\sigma_3=50.4$ 、先行軸応力 $\sigma_1=82.9\text{kgf/cm}^2$ の場合の結果を図3に示す。再載荷は先行載荷時の静水圧を8kgf/cm²まで除荷した後に行っている。AE発生傾向は、大谷凝灰岩の場合と同様に、静水圧、軸差応力とも各々載荷直後から直線的な発生傾向を示し、その後、急増している。この直線(図中の破線)から離れ始める点より側圧は $\sigma_3=53.6$ 、軸応力は $\sigma_1=80.4\text{kgf/cm}^2$ と推定された。次に、阿武隈花崗岩の先行側圧 $\sigma_3=100.9$ 、先行軸応力 $\sigma_1=161.0\text{kgf/cm}^2$ の場合の結果を図4に示す。先ほどと同様に各応力を推定すると側圧は $\sigma_3=93.3$ 、軸応力は $\sigma_1=157.4\text{kgf/cm}^2$ と推定された。

今回行った側圧、軸応力の推定結果をまとめて図5に示す。(推定値/先行载荷値)を推定誤差とすると、図5の破線は推定誤差10%の範囲である。阿武隈花崗岩の軸応力推定において推定誤差が大きい場合がみられるが、ほとんどの場合に推定誤差は10%以内にあり、側圧、軸応力ともに精度よく推定されている。等側圧で最大主応力方向と三軸圧縮の再载荷軸方向が一致している場合には、1つの供試体より先行側圧と先行軸応力の2つの応力推定が可能であると考えられる。

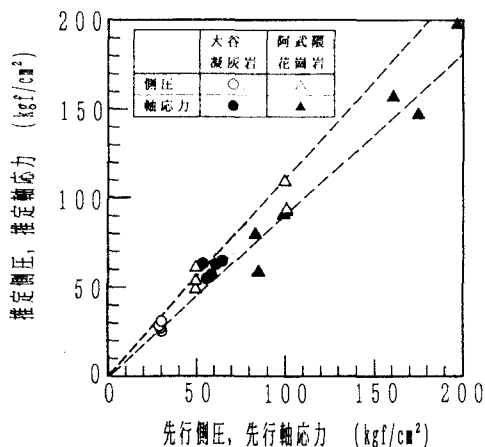


図5 推定結果

3. 大きさの異なる三主応力の先行载荷

先行载荷が等側圧の場合には、静水压再载荷により先行側圧付近でカイザー効果が確認された。先行载荷の三主応力の大きさが異なる場合には、静水压再载荷によるカイザー効果点はその応力に対応しているのかを検討するために以下の実験を行った。

3.1 実験方法

大谷凝灰岩の一辺13cmの立方供試体を用いて実験を行った。先行载荷は、図6に示すように三方向から大きさの異なる一軸圧縮を行った。すなわち、X方向に30kgf/cm²の応力を10回、Y方向に60kgf/cm²を10回、Z方向に90kgf/cm²を10回繰り返すのを1セットとし、これを5セット行うことにより各面に50回ずつの繰り返し载荷を行った。先行载荷終了後、この立方体のZ方向よりφ5×h10cmのコア試料を採取し、静水压による再载荷を行った。

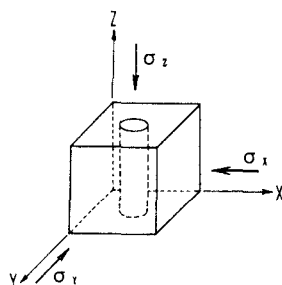


図6 立方供試体の载荷方法
(X方向 $\sigma_x=30\text{kgf/cm}^2$)
(Y方向 $\sigma_y=60\text{kgf/cm}^2$)
(Z方向 $\sigma_z=90\text{kgf/cm}^2$)
(各面50回の繰り返し载荷)

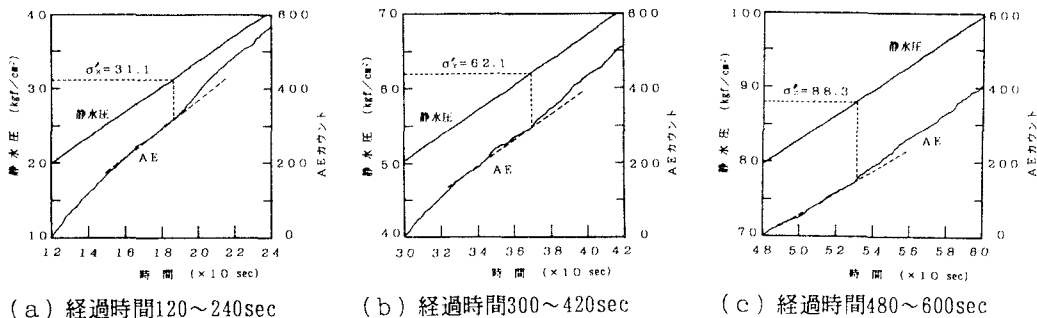


図7 コア試料の静水压再载荷

3.2 実験結果と考察

静水圧再載荷によるAE計測結果を、載荷経過時間120~240sec, 300~420sec, 480~600secの3区間に分けて図7に示す。AEは一定の割合で発生し急増点が明瞭ではないが、180, 370, 530sec付近からやや急増する傾向がみられる。この点をカイザー効果点とすると、はじめの急増点(180sec付近)は 31.1kgf/cm^2 でありX方向の先行応力 30kgf/cm^2 に近い値を示している。2番目の急増点(370sec付近)は 62.2kgf/cm^2 でY方向の先行応力 60kgf/cm^2 に、3番目の急増点(530sec付近)は 88.3kgf/cm^2 でZ方向の先行応力 90kgf/cm^2 に近い値を示している。これまでに行われている一軸圧縮再載荷による推定方法では、再載荷を行った方向の軸応力のみが推定されている。今回の静水圧再載荷による推定結果は、一つの供試体から三つの先行軸応力を推定できる可能性を示している。

4. おわりに

AEのカイザー効果を利用した岩盤の初期地圧推定において、三軸圧縮による再載荷を適用するために大谷凝灰岩と阿武隈花崗岩の2種類の岩石を用いて基礎的な実験を行った。

等側圧で最大主応力方向と三軸圧縮再載荷の軸方向が一致している場合には、再載荷において、静水圧再載荷を行いAEの急増点より先行側圧を推定し、さらに継続して、軸差荷重載荷によるAEを計測することにより先行軸応力の推定が可能であった。

大きさの異なる三主応力を与えた立方供試体からコア試料を採取し、このコア試料に静水圧再載荷を行った。AEの急増点は明瞭ではないが、三つの先行軸応力($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)付近でカイザー効果が観察された。カイザー効果の検出を困難にしている原因には、コア採取による影響、再載荷までの経過時間などが考えられるが、これについては試験方法、有効なパラメータの抽出を含め、今後検討したい。また、コア試料を用いたほかの試験(DSCA法、DRA法など)との比較検討も必要である。

5. 参考文献

- 1) 資源・素材学会：コアを用いた地圧計測ワークショップ論文集，1991
- 2) 金川 忠，林 正夫，仲佐博裕：岩石における地圧成分のAcoustic Emissionによる推定の試み，土木学会論文報告集，第258号，pp.63~75，1977
- 3) 村山朗郎，道廣一利，斉藤二郎，吉岡尚也：載荷方法が花崗岩のカイザー効果に及ぼす影響，土木学会論文集，No.364/III-4，pp.107~112，1985
- 4) 瀬戸政宏，歌川 学，勝山邦久：繰り返し載荷時のAE発生特性を用いた応力履歴岩石からの先行応力推定，土木学会論文集，No.445/III-18，pp.93~100，1992
- 5) 石橋孝治：三軸圧縮試験を利用したAE法による先行応力推定，第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.376~380，1992
- 6) 渡辺英彦，田野久貴，赤津武男：三軸圧縮下におけるピーク強度以降のカイザー効果に関する実験，土木学会第50回年次学術講演会III，pp.630~631，1995