

礫岩の応力ひずみ曲線と AE との関係

小早川博亮¹・京谷孝史²

¹正会員 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域 (〒 270-1194 我孫子市我孫子 1646)
E-mail: h-koba@criepi.denken.or.jp

²正会員 東北大学 工学部 土木工学科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

均質化法を用いた岩盤物性の評価方法が開発されている。現状で開発されている強度の算定方法は、要素内の 1 点が破壊した初期降伏として捉えており、降伏強度よりも低めの値を算定する可能性がある。一方、AE は材料の破壊に伴い発生する弾性波で、岩盤の場合にも破壊にいたる前段階から微小クラックの発生・進展に伴って発生するといわれており、材料の初期降伏を捉えることができると考えられる。本研究では、均質化法による岩盤物性評価法において、算定される強度の計算値と実験値との関係を明らかにすることを目的として、自然の礫岩を用いて AE を計測しつつ一軸圧縮試験を実施し、応力とひずみの関係と AE 発生との関係について検討した結果について報告する。

Key Words : acoustic emission, homogenization method, conglomerate, mechanical properties

1. はじめに

原子力発電所やダムなどの建設において、基礎岩盤の力学特性の把握は重要である。礫岩のような不均質な岩盤の場合、その力学特性は礫の分布、及び礫と基質の力学特性の差に支配されると考えられることから、何らかの形でこの特性を考慮して評価する必要がある。力学特性の評価は原位置岩盤試験によって実施することが通常であるが、試験体に巨礫が含まれている場合などは原位置岩盤試験の実施が困難である。

均質化法は、微視レベルで周期構造を持つ複合材料の力学特性を解析的に評価するのに有効な理論であり、近年工学分野への適用が積極的に行われている¹⁾。岩盤の力学特性の評価においても、亀裂性岩盤を対象として適用されつつある²⁾。この、均質化法に基づく岩盤の力学特性評価方法の特徴は、対象とする岩盤の幾何情報、および岩盤を構成する岩石の力学特性という 2 種類の情報のみから岩盤の力学特性を算定できることにある。

本研究では、均質化法による岩盤物性評価法において、計算値と実験値との関係を明らかにすることを目的とする。そのために、まず、均質化法に基づく岩盤物性評価法を用いて、礫岩の強度特性を評価した結果と室内試験によって求めた強度特性を比較し、両者の関係を明らかにする。さらに、礫岩の一軸圧縮試験を実施し、その際に発生するアコースティックエミッション (AE) を計測し、AE の発生状況の観点から、実験による強度特性と計算に強度特性に違いが生じる要因について検討した結果を述べる。

2. 自然礫岩の強度特性と均質化法による強度評価

(1) 自然礫岩の強度特性

自然礫岩の力学特性は、礫と基質の幾何学的な要因と各々の力学的な要因が影響しており、近年精力的に研究されている^{3) 4) 5) 6)}。岡田ら⁶⁾は第三紀中新世の火山礫凝灰岩を用いて強度特性を検討している。この検討においては、礫岩は地下約 20m の坑道付近からボーリングマシンでサンプリングされたコアを用いて、基質部、礫部、礫と基質の境界部および礫の分布する礫岩の室内三軸試験を実施し、その力学特性を詳細に把握している。まず、各部 (礫、基質、境界) 単体の力学特性を表-1 のように算定しており、礫が基質よりもかなり大きく、境界面の強度は基質よりもやや大きい程度であることがわかっている。そして、礫の分布する礫岩について、礫岩コアの周面からもとめた礫分の割合 (礫率と呼ぶ) と最大軸差応力 (q_f) の関係を図-1 のように算定している。この図からは礫率の増減によって q_f が増減するという傾向は明瞭ではない。

以下では、詳細に力学特性が把握されているとともに、精度の高い幾何的情報が取得されている岡田ら (2003) の研究結果に基づき、検討を行うこととした。

(2) 均質化法による礫岩の強度の算定

a) 計算方法

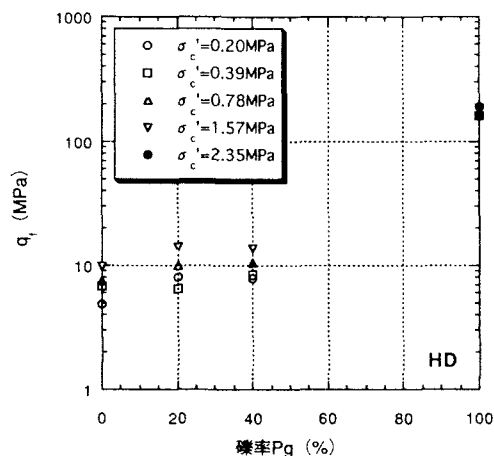
均質化法を用いた岩盤の力学特性評価法²⁾を用いて、礫岩コアの一軸圧縮強さを評価する。解析領域であるユニットセルの内部の応力状態 (微視応力 $\sigma_{ij}^0(\mathbf{y})$) は、

表-1 礫岩の基質と礫と境界の強度⁶⁾

	c (MPa)	ϕ (°)
基質の強度	1.14	38.8
礫の強度	18.5	63.3
境界の強度	2.10	25.2

表-2 礫岩の基質と礫と境界の特性⁶⁾

	密度 (g/cm ³)	E(MPa)	ν
基質	2.06	1170	0.42
礫	2.60	36900	0.41

図-1 礫岩の礫率 (P_g) と q_f の関係⁶⁾

解析領域に作用する巨視的平均応力 Σ_{mn} によって次式のように与えられる。

$$\sigma_{ij}^0(\mathbf{y}) = \{[E_{ijkl}(\mathbf{y}) - E_{ijpq}(\mathbf{y}) \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q}] \{E^H\}_{klmn}^{-1} \Sigma_{mn} \quad (1)$$

ここに、 $\frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q}$ は特性変位関数と呼ばれ、材料の力学特性と幾何情報によって与えられる変位分布を表し、 E^H は材料の均質化弾性係数表す。これを用いると、一軸圧縮強さは次のように考えることが出来る。すなわち、一軸圧縮応力状態を再現する Σ_{mn} を式 (1) に与えることにより、 $\sigma_{ij}^0(\mathbf{y})$ を算定することが出来る。式 (1) において、 Σ_{mn} と $\sigma_{ij}^0(\mathbf{y})$ は線形関係にあるので、「岩盤中の点 $\mathbf{x}$ の近傍にあるユニットセルの内部において、微視応力がそこに存在する岩石材料の強度を越えるような点 $\mathbf{y}$ が現れれば、岩盤中の点 $\mathbf{x}$ において巨視的破壊が始まる」²⁾ という初期破壊の定義を適用することにより、一軸圧縮試験における初期破壊を定義することができる。以下ではこの破壊強度を計算における一軸圧縮強さと定義して算定することとした。

b) 計算条件

礫岩は礫と基質から構成されるものとし、礫と基質の強度特性には表-1 の値を、変形特性および密度はコ



(a) 礫率 20 %



(b) 礫率 30 %



(c) 礫率 40 %

図-2 礫の分布状況

ア試験に基づく表-2 の値を用いた。

計算に用いる幾何情報は、室内三軸試験に供する円柱コアの側面の画像を用い、礫率が 20～40% の 10 個の画像に対して計算を行った。ユニットセルは横 300 × 縦 200 メッシュに分割して計算を行った。礫率が 20, 30, 40% の場合の代表的なユニットセルを図-2 に示す

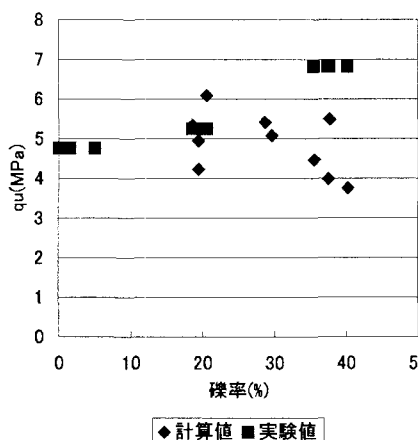


図-3 q_u と礫率の関係

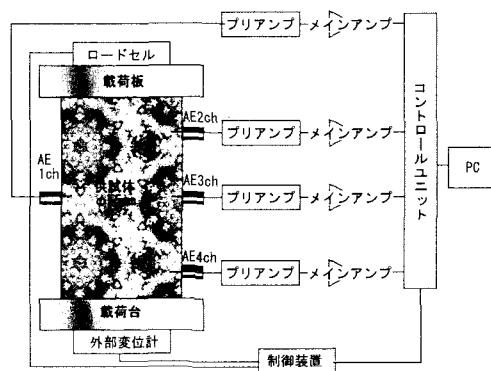


図-4 実験装置概要図

表-3 礫岩の特性

	高さ (mm)	密度 (g/cm^3)	礫率 (%)
供試体 A	62.47	2.153	28.3
供試体 B	89.05	2.275	34.1

(3) 計算結果と考察

三軸試験による q_f と拘束圧の関係から算定できる (c, ϕ) から、 $q_u = 2c \cos \phi / (1 - \sin \phi)$ の関係を用いて実験による一軸圧縮強さ (q_u) を算定し、計算による q_u との関係を図-3に示す。図より、礫率20%の場合には、計算値と実験値がほぼ対応するのに対し、40%の場合には計算値は実験値よりも小さく、7割程度の値が算定されていることがわかる。

本計算においては礫の分布と礫と基質の力学特性のみを計算の入力条件としていることから、計算結果による礫岩の一軸圧縮強さは礫の分布による応力集中の程度の影響を主要因としていと考えられる。従って、図-3に示す結果から、計算上は礫率の増加に伴って礫の増加による応力集中の影響が大きくなってきていると考えられる。応力集中は、剛性の異なる礫と基質が接する境界部において顕著であることから、最初に境界付近の要素が破壊荷重に達していると考えられる。

つまり、礫率が大きいほど、境界部での初期降伏の荷重が小さく、均質化法による計算はその値を算定している可能性がある。そこで、礫岩の一軸圧縮試験の際に AE を計測し、その特性と応力との関係について検討する。

3. 礫岩の一軸圧縮試験と AE の計測

(1) 実験装置

実験装置の概要図を図-4に示す。装置は、油圧によって載荷台が上昇する機構になっており、加圧装置から発生するノイズを極力除去できる工夫が加えられている⁷⁾。荷重は上部に取り付けたロードセルによって、また、変位は外部変位計によって計測する仕組みになって

いる。载荷に伴って発生する AE は図示する4箇所に設置した AE センサによって計測し、プリアンプ及びメインアンプによって増幅した波形を記録するとともに発生数を記録できる装置を備えている。

(2) 実験方法

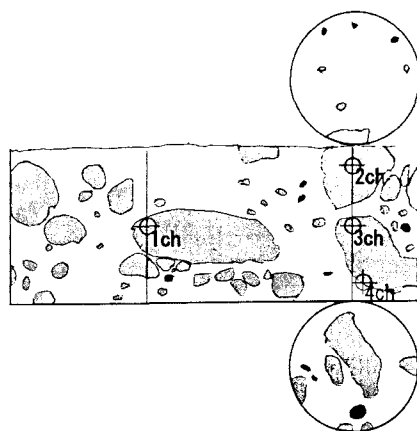
対象とした礫岩は、前述と同種類のものであり直径55mmの円柱コアである。供試体の高さ、礫率及び密度を表-3に示す。試料は大きささまざまな礫が混じっており、各々の礫の分布状況を把握するために、試料の側面にシートをあてて礫の形状を記録した(図-5)。実験は試料を乾燥させた状態で行った。軸载荷は変位制御で行い载荷速度は0.05mm/minとした。

4. 実験結果と考察

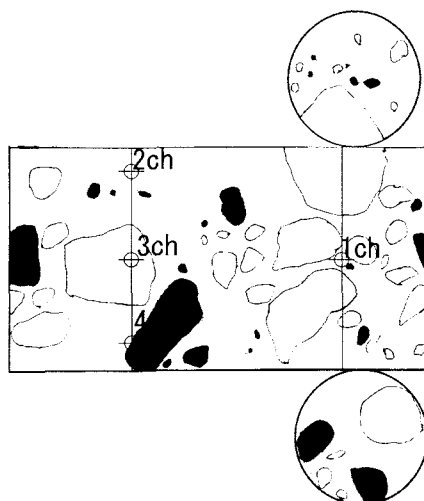
(1) 実験結果

実験によって得られた応力、ひずみ、および AE 発生数と時間との関係を図-6に示す。

供試体 A は、1ch で実験開始直後から AE 発生数のほぼ一定して増加する傾向が認められ、応力のピークとともに減少に転じている。1ch はセンサの設置位置が供試体の中央の礫であることから、供試体の平均的な傾向を捉えていると考えられ、この付近では軸荷重の増加とともに応力が増加していると考えられる。



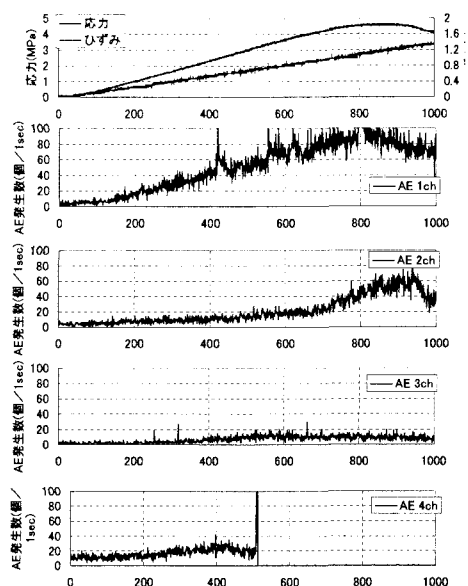
(a) 供試体 A



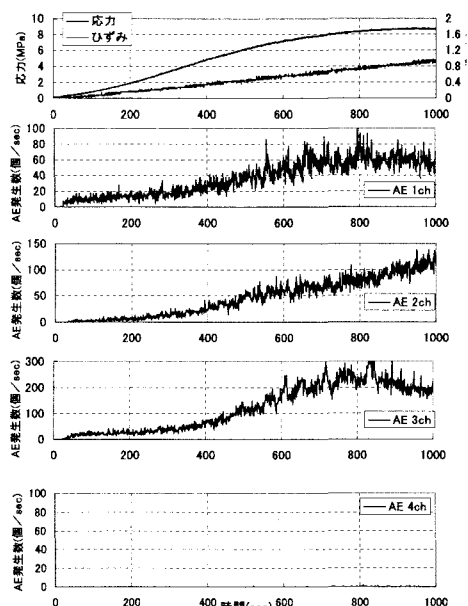
(b) 供試体 B

図-5 礫の分布状況とセンサーの配置

それに対し、4ch は 400 秒付近で一度ピークを迎え、500 秒付近でセンサが外れそれ以降欠測となっている。センサが外れる現象は、接着面付近の変形が大きい場合に起こると推定されることから、4ch 付近では載荷直後から応力集中しやすかったものと考えられる。これは 4ch と同じ礫に設置している 3ch において、4ch が外れた 500 秒以降、AE の発生数にほとんど増減が認められないことも整合している。一方、同じ断面上に設置した 2ch においては実験開始から 700 秒程度までは AE 発生数は微増かほぼ横ばいであるが、700 秒以降急激に増加に転じている。これは、開始から 700 秒まではこの礫の付近にはあまり荷重がかからなかったが、



(a) 供試体 A



(b) 供試体 B

図-6 応力、ひずみ、AE 発生数の時間変化

700 秒以降に応力集中していることを示唆しているものと考えられる。

供試体 B は、4ch ではほとんど AE が観測されなかった。この原因は明確には不明であるが、潜在的な不連続面などによってあまり荷重がかからなかった可能性が

ある。その他のセンサにおいては発生数は1ch,2chでほぼ等しく、3chで3倍程度の値を示している。増減の傾向は、荷重がかかり始めるとAEが発生し始め、300秒前後で増加速度が増し、さらに550秒付近では1~3chのすべてにおいてわずかではあるが発生数が急増する点が認められる。この供試体においては、ほぼ一様に荷重が伝達していることを示していると考えられる。

(2) 考察

a) 供試体 A, B における AE 発生の方の差

供試体 A と B の AE 特性は、①AE の急増する荷重レベルと②載荷しない状態での AE の発生 の 2 点において異なる。①については実験結果で述べたように、供試体 A では急増する荷重レベルが異なっているのに対し、供試体 B ではほぼ同じ荷重レベルで増減している。また、②については供試体 A は載荷しない状態でも AE が発生していたのに対し、供試体 B では載荷したときに初めて AE が発生している。

2つの供試体は、ほぼ同じ深度から採取しており、また、両者の礫率の差は6%程度であり、さらに、地質的にも同一と考えてよいことから、岩石の性状はほぼ等しいものと考えられる。しかし、この2つの供試体は、試料の含水状態が異なっており、これがAE発生の方の差の原因の1つとして考えられる。供試体 A は水浸から1日の気乾状態の後に試験を行ったのに対し、供試体 B は1週間程度室温で乾燥させている。このことから、供試体 A は試料内部に水分が残っており、乾燥に伴ってAEが発生していたのに対し、供試体 B の内部の含水状態は外気と平衡状態になっていたために、AEが発生しなかった可能性がある。また、礫の形状も原因の一つとして考えられる。

b) 均質化法による強度との関係

含水状態が変化している供試体 A については載荷しない状態でAEが発生することから、以下では供試体 B を対象に考察する。

今回のAEの計測に置いて、AEの発生が認められる応力は300kPaであり、降伏応力に比べると1/20以下である。このことから、AEの発生の有無を直接均質化法による強度と結びつけて議論することは困難と思われる。しかしながら、AEの発生数が急増する550秒の荷重は7MPa程度であり、降伏応力(約9MPa)に対して7~8割程度の値を示しており、この値と均質化法による強度は対応する可能性がある。

先の計算における入力物性値は、有限の大きさを持つコアから得た礫と基質の2種類の材料のみであり、礫岩を理想化したものである。ある微小な領域で発生したAEは、空間に分布する局所的な材料特性に大きく影響を受けていることから、AEの発生の有無と均質化法

による強度を直接結びつけることが困難であると考えられる。AEの発生数が急増する荷重は、ここでいう礫と基質といったより平均的な材料特性に関係している可能性があることから、均質化法による強度とAEが急増する荷重が関係していると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる

- (a) 均質化理論に基づく数値解析によって礫岩の一軸圧縮強さを評価する場合、破壊を初期破壊と定義すると、計算値は実験値に比べてやや小さめの値を算定する。
- (b) 岩石の性状のほぼ等しい2つの供試体の一軸圧縮試験において、AEを計測した結果、AEの発生の仕方は要素内で様ではなく、AEの発生する荷重レベルが異なった。この原因としては礫の分布による応力集中と試料の含水状態が影響していると考えられた。
- (c) 今回対象とした礫岩において、均質化法によって算定した強度とAEの発生する強度を直接結びつけることは困難であるものの、AEの発生数が急増する荷重と関係があるものと考えられた。

謝辞： 実験に用いた礫岩の試験体は電力中央研究所の岡田哲実氏にご提供いただいた。また、礫岩のAE計測の方法については3D地科学研究所の丹野剛男氏にご議論いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 京谷孝史, 岸野祐次, 渡嘉敷直彦 (1997): 均質化法と極限支持力解析法の組み合わせによる岩盤構造物の破壊強度評価法の提案, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.477-484.
- 2) 京谷孝史, 寺田賢二郎, 欧陽立珠 (1999): 岩石の力学特性と不連続面画像情報による岩盤の変形強度特性評価, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.131-150.
- 3) 川崎了, 伊藤洋, 小泉和宏 (1998): 礫岩コアの寸法効果とサンプリングによる乱れの評価, 応用地質, Vol.39, No.4, pp.391-400.
- 4) 片川秀基, 橋本徹, 平野秀次, 村上弘行 (2000): 天然の礫混じり岩石の力学的性質に及ぼす礫分の影響について, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.77-86.
- 5) 吉中龍之進, 長田昌彦, 五月女敦, 杉山弘泰, 浜野久美 (2001): 三軸圧縮試験による火山角礫岩の強度および変形特性, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp.85-100.
- 6) 岡田哲実, 野崎隆司, 伊藤洋, 中村敏明 (2003): 礫端の物性評価に関する研究(その2) - 三軸試験による力学特性評価と強度評価式の検証 -, 電力中央研究所報告, 研究報告(U02053).
- 7) 金川忠 (1999): 地下空洞建設におけるAcoustic Emissionの利用技術に関する研究, 京都大学学位論文.

THE RELATIONSHIP BETWEEN STRESS-STRAIN CURVE AND ACOUSTIC EMISSION OF CONGLOMERATE.

Hiroaki KOBAYAKAWA and Takashi KYOYA

The method to evaluate the rock mass properties using homogenization method has been developed. The rock mass strength calculated by this method was usually smaller than the strength by test. The reason should be the definition of failure on the method that even one point somewhere of the modeled area was yield equal to the failure of all the area. This definition of failure means initial failure of rock mass.

Acoustic emission (AE) is an elastic wave generated by the failure of the material. The initial yield point would be able to understand by measurement of the AE, since the generation and progress of microcrack produce the AE on rock mass. The purpose of this study is to clear the relationship of strengths between the experiment value and the calculated value. For that we measured the AE generated from the specimen of gravel rock under the uniaxial compression test, then examined the relationship between the stress-strain curve and AE event.