

投稿論文 (和文)
PAPERS

岩盤基礎グラウト注入特性のAEエネルギーによる評価

上田貴夫*・中崎英彦**・柿沢忠弘***・鈴木志朗****

本論文は、岩盤基礎グラウティング時に発生するAEエネルギーに着目して注入特性の評価を行った結果について論じたものである。原位置計測は、4～6チャンネルのAE計測システムを用いて、ダムサイトを対象に3箇所を試験注入フィールドで実施された。試験結果より、注入に伴って発生する水圧破砕現象は、AEエネルギーで特性化出来ることが明らかとなった。そして、これらの結果より、AEイベント、AEエネルギーをもとにしたマルチパラメータ評価手法がグラウティング時の注入特性を評価する上で有効であることが示された。

Key Words : acoustic emission, dam grout, hydrofracture, AE energy, injection characteristics

1. はじめに

ダム等において実施される基礎岩盤へのグラウトは、一般に、地質調査に始まり、透水試験としてのいわゆるルジオンテスト、試験注入等の段階を踏んで最適な注入仕様を決定した上で行うのが現状である。しかし、近年、ダムの建設場所が従来のように硬固な岩盤を対象にした箇所が少なくなり、軟岩等良好とは言えない地質を対象に建設を余儀なくされるケースが増加しつつある。この場合、基礎岩盤の改良、止水を目的としたグラウトの重要性は以前にも増して大きくなり、グラウトの注入管理技術も増々困難で新たな課題に直面するようになった。すなわち、岩盤が悪くなればなるほど複雑な亀裂性状を有するようになり、注入に伴うグラウトの漏出、あるいは過大な注入圧による岩盤の持ち上がり等の現象に遭遇するようになった。これらの現象を防止するためには、高度な注入管理技術が必要とされるが、注入等による地盤・岩盤改良は、直接目視しながら確認して進めることが不可能であり、現状では、注入量、注入圧、あるいは岩盤変位等の計測でもって適切になされているかどうか判定せざるを得ない。

本研究は、特に、軟岩あるいは亀裂性岩盤を対象にした注入時の岩盤の挙動をモニタリングする手段としてのAE（アコースティックエミッション）の有効性を検証することを目的としており、著者らが今まで実施してきた、ダムグラウトの注入試験でのAE計測の手法とAEパラメータによる評価方法についてまとめたものである。

2. グラウト注入管理上の問題

(1) ルジオンテストにおける岩盤の挙動

ダム基礎岩盤のグラウティングの施工方法については、土木学会のダム基礎岩盤グラウティング施工指針¹⁾に示されているように、グラウト注入前のパイロット孔においてルジオンテストを実施し、その結果に基づいてグラウト孔の孔間隔、パターン、注入圧力等を決定している。通常ダムの透水性指標として用いられるルジオン値(Lu①)は図-1に示すように、一般にはP～Q(注入圧力～単位時間注入量)曲線から求められるが、もし、 $P < 1$ MPaで降伏する場合、折点より延長した線による換算ルジオン値(Lu②)が求められる。P～Q曲線の折点は限界圧力として注入圧力を設定する際の重要な指標となる。

注入圧力はこのようなルジオンテスト結果、あるいは、岩盤のかぶりや上部構造物に応じて決められる。どのような圧力の時にどの程度の注入量が適切であるかの判断はグラウトにおいては特に重要であり、この適否がグラウトの成否を左右する。この設定が適切でないと、過大な注入圧によって岩盤を動かしたり、逆に注入が不十分で止水性が確保されず、パイピング等の原因になるといった例が指摘されている。特に、軟岩等を対象にした浅部の注入に対して限界圧力付近で注入するときは、厳重な注入管理が必要となる。

P～Q曲線等、注入時の圧力、注入量の挙動などに関しては、今まで数多くの研究が行われてきたが、中でも、F. K. Ewert²⁾は、亀裂性岩盤(Fractured Rock Mass)に注入が行われた場合の注入特性(P～Q曲線)の分類を試みており、4つのグループに分けられることを模式的に示した。著者らは、このような概念を注入時に亀裂内で生じている現象に着目して次のようなタイプ分けを試みている³⁾。

* 正会員 工修 課長 (株)竹中工務店原子力・エネルギーエンジニアリング本部
(〒104 中央区銀座8-21-1)

** 正会員 工修 専門部長 (株)竹中工務店技術研究所

*** 正会員 工修 研究員 (株)竹中工務店技術研究所

**** 正会員 専門部長 (株)竹中土木工事本部

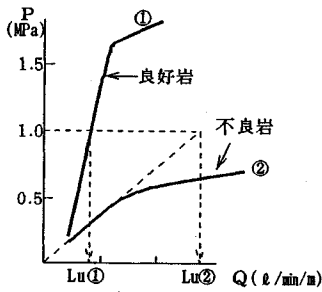


図-1 P-Q 曲線によるルジオン値の決定

ルジオン試験における注入圧と累積注入量の経時特性を模式的に示すと図-2 (a) のようになる。ここで作用させる最大注入圧力、その過程で得られる最大累積注入量を、各々 P_{max} , $\sum Q_{max}$ とし、各注入圧力とそれまでに得られた累積注入量を各々 P/P_{max} , $\sum Q / \sum Q_{max}$ という無次元化量で表すと大別して図-2 (b) に示すようなタイプに分類できる。これら各タイプと亀裂内で生じている現象を模式的に示したものが図-3 である。各タイプの特徴は以下のとおりである。

タイプ A…注入圧と注入量が比例関係を示し、流れが Darcy の法則に従った層流であることを示唆している。一般には比較的良好な岩盤の場合が多い。

タイプ B…ある圧力より注入圧が高くなると、注入量が急激に増加する。この原因としては、岩盤内でのクラックの拡大、進展が生じているか (タイプ B1)、狭在物の洗い流し、エロージョン等 (タイプ B2) が生じたことを示唆している。

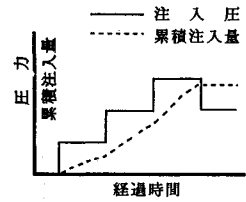
タイプ C…タイプ B と逆に、圧力が高くなるとクラックが閉塞するタイプでクラックの先端での目詰まり、毛管力による流れの阻止等が生じたものと考えられる。

以上のような分類において、注入管理上注意を払わなければならないのはタイプ B である。なぜなら、タイプ B はいわゆる岩盤の浮き上がり、上部構造物への有害な変形に結びつくハイドロフラクチャーを誘発しやすいからである。しかし、このようなタイプは、亀裂内狭在物の洗い出し等によっても発生する可能性があり、両者の見きわめは現状では P-Q 曲線に対する深い洞察力と経験に頼らざるを得ない。

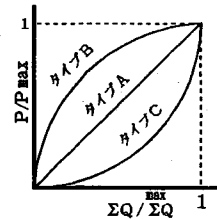
ちなみに、我国のルジオンテスト施工指針によると、限界圧力は注入量が急増する点の圧力というように定義されており、いわゆる岩盤変位を伴うのか、狭在物の洗い出しなのか、その差は明確になっていない。

(2) AE 法の適用性について

上述の議論を押し進めると、注入管理上重要な点は、



(a) 圧力と注入量の経時変化



(b) 無次元化表示によるタイプ分類

図-2 ルジオンテストにおける圧力、注入量の経時変化と無次元表示によるタイプ分類



図-3 注入時における岩盤亀裂挙動のタイプ分類

注入に際して注入圧力を適切に設定するとともに、岩盤変状のモニタリングが必要であるということに帰着される。

通常、注入時の岩盤の挙動をつかむためには岩盤変位計等が設置される。この方法は、岩盤の変状をマクロ的に監視する方法としては有効であるが、岩盤内亀裂がどのように進展しているのか、注入によって岩盤内で何が起ころうとしているのか等を局部的に、かつ事前にとらえようとするには十分満足な手段であるとはいいがたい。注入圧により岩盤内の局部でどのような現象が生じるかどうかを予測する方法として AE 法の適用が考えられるが、グラウト注入のような岩盤注入工事で測定した例は筆者らの試験を除いて非常に少ない。

注入という観点から類似した技術として、地熱開発(高温岩体発電)に伴って用いられる水圧破砕技術を挙げることが出来る。新妻らは一連の水圧破砕実験の研究を通して、水圧破砕によって生じた岩盤の破壊面を AE 位置標定によって同定出来ること、また、AE エネルギーが発生した亀裂の大きさと相関関係にあることを示し、岩盤破壊時の現象を捉えることに AE が有力な武器になることを報告している⁴⁾。一方、瀬戸らは炭質岩石層を対象として水圧破砕を実施し、採炭による地山応力の解放がなされていない岩盤条件における水圧破砕亀裂の進展状況、亀裂の広がり、方向、再注入の効果について AE データからの検討を加えている⁵⁾。その他にも、数

表一 AE を併用した岩盤の注入特性の分類^{3),9)}

タイプ	無次元化した P~Q~AE 関係	特 徴	例	岩 質
A		安定な注入 注入圧力、注入量、AE カウントレイトが比例する。 岩盤は安定である。		中 硬 岩
B 1		水圧破砕 ある圧力レベルに達すると注入量、AE カウントレイトともに急激に増加する。		軟 岩 又は ジョイントを 有し、部分的 に開口亀裂が 存在する岩盤
B 2		洗い流しまだば浸透 注入圧力が増加するにつれて注入量は増加するが AE カウントレイトはそれほど変化しない。		狭雑物を有し
C		閉塞 注入圧力が増加するにつれて注入量、AE カウントレイトともに減少する。		亀裂に富む岩

注 釈 : - - - - - 注入圧力-時間注入量
—— 注入圧力-AE カウントレイト

例の実施例があるが⁶⁾⁻⁸⁾、いずれも亀裂の少ない硬質岩盤を対象にしたものであり、グラウト注入の対象となる亀裂充填程度、注入圧、注入量といった視点からの AE 適用例はほとんど見受けられない。著者らは、以前、現場 AE 計測データに基づいて、前述した P~Q 曲線に AE 発生特性をモデル化したパターンを組み合わせ、注入量、注入圧及び AE 発生率（イベント発生率）による岩盤の注入特性の分類を試みた^{3),9)}。表一に分類表を示す。タイプ A はいわゆる安定な注入を示す岩盤であり、注入圧力の増加とともに注入量、AE 発生量が増加するが、著しい変化を示さない。この種のパターンは、比較的固い岩質で見受けられよう。タイプ B 1 は、ある圧力レベルに達すると注入量、AE 発生量が急激に増加し、いわゆるハイドロフラクチャーが生じることを示唆している。軟岩、部分的開口亀裂が多く存在する岩盤や、注入圧が高すぎる場合にこの種のパターンになると考えられる。タイプ B 2 は、注入圧力が増加するにつれて、ある圧力レベルを越えると注入量は急に増加する傾向を示すが、AE 発生量はそれほど顕著な増加は示さない。このような現象は、岩盤内亀裂に存在する狭在物が注入によって洗い流されたり、亀裂がエロージョンで拡大したりする場合に見受けられる。タイプ C は、注入圧力が増加するにつれて、注入量、AE 発生量とも増加する傾向は小さくなる。これは、開口亀裂が狭在物等によって閉塞する結果生じるものと考えられる。タイプ B 2、タイプ C とも亀裂がよく発達した岩盤特有の現象であると考えられる。この方法は、AE の最も基本的なかつ簡便なパラメータであるイベント計測によって岩盤の変状をモニタリングし、あわせて注入特性を区別しようとするものであった。この方法の利点としては、計測が容易で現場適用しやすい点が挙げられるが、明確なパターン分類が出来ない場合や、イベント計測自体が雑

音等の影響を受けやすい等の不利な点があることである。このことから、注入時の岩盤の挙動をより明確に表す方法として、AE パラメータのイベントの他に AE エネルギーを考慮したマルチパラメータ解析手法を適用し、現場計測試験結果について検討を加えた。

3. AE 計測手法と原位置試験の概要

(1) 計測システムと AE センサー

図一4 にグラウトの注入システムと AE 計測方法の概念図を示す。

図一5 に AE モニタリングシステムの構成を、図一6 に原位置計測用に開発した地中埋設型センサーの詳細を示す。現場における AE センサーの設置方法としては、地表面に設置したウェーブガイド（鉄筋棒等）の先端に接着剤でセンサーを取り付ける方法と、地中の所定の深さにセンサーを埋設する方法が考えられる。図一6 に示したセンサーは後者のタイプであり、センサー容器を水中に吊り下げて固定せず伝搬波を補足する方法（タイプ一①）と、孔壁に接触させる方法（タイプ一②と③）が考えられる。センサーを孔壁に密着させる方法としては、センサーを埋め込んだホルダーごと地中で固めてしまう方法（タイプ一③）、あるいは、センサーに連結した側板が拡幅して孔壁に密着させる方法（タイプ一②）等があり、著者らは、タイプ一①~③までのいずれの方法も適用を試みた。一般に、このような埋設型センサーは各種の雑音の影響を受けにくいこと、AE 発生源近傍にセンサーを設置できるため良好な感度を得られること等の利点がある。

AE 計測において重要な問題は、S (signal)/N (noise 比)、雑音除去法、センサーの帯用周波数、標定領域（測定可能領域）の選定である。雑音に関しては、特に建設現場で使用の上では作業雑音が避けられないことから

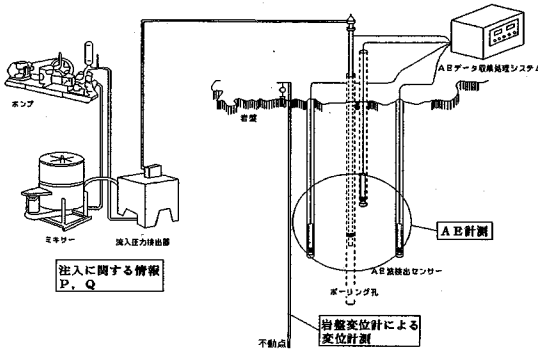


図-4 グラウトの注入システムと AE 計測概要

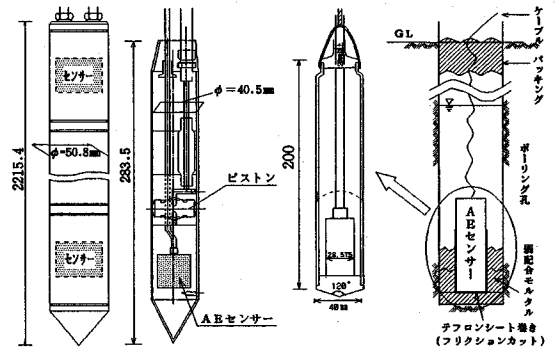


図-6 著者らが開発した地中埋設型 AE センサー

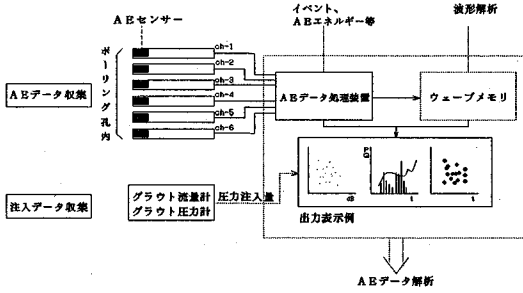


図-5 モニタリングシステムの構成

上述したように地中埋設型センサーを用いる方法が有効となる。また、グラウト注入のように比較的限られた領域をモニタリング対象とする場合は、かなりの高周波まで測定できるセンサーを使用する必要がある。著者らは、原位置試験においては10~30 kHzあたりの応答特性を持った AE センサーを使用した。

(2) 試験方法と試験条件

試験にあたっては、まず所定の深度に AE センサーを設置したあと、透水試験・グラウト注入の手順で各孔の注入試験を行い、その間に発生する AE を収録した。透水試験は、あらかじめ設定された最高圧まで注入圧力を階段状に上昇させ、各圧力段階で5~10分間一定圧力を保持して注入量を測定し、ルジオン値を決定するのが通常である。最高圧に至った後は、階段状に圧力を減少させ試験を終了させる。一方、グラウト注入は、各注入孔の透水試験が終わった後にあらかじめ設定された注入圧のもとで通常3~6時間程度の注入を行う。AE計測にあたっては、注入中の発生特性を把握できるように、可能な限り全注入時間にわたって計測を継続した。

これらのデータは、基本的には注入圧力、時間、注入量、そして AE の各種パラメータという関係でデータ整理を実施するとともに、測定域近傍に設置した岩盤変位計の測定値とも比較検討することによって以下に述べる考察を加えた。

今回のデータ解析の対象として取り挙げた原位置計測

表-2 現場計測試験のケースと計測条件

試験番号	試験場所	地質	ルジオン値 (試験位置近傍)	計測条件 (センサー深度 (m))	AE センサーチャンネル数	試験条件 (注入深度 (m))	最大注入圧 (MPa)	注入種類
H1	Hダム [第1次] 宮城県	炭質泥岩 (一部砂岩、泥岩層が介在)	11~75	12.0	4	4.0	1.2st	透水
						22.0	3st以降	
H2	Hダム [第2次] 宮城県	炭質泥岩及び砂岩の互層	4~10	0.5 1.5	6	2.0	0.1	透水
						4.0	0.1	
S	Sダム 兵庫県	変斑れい岩	10~20	18 20	6	18.0	4st	透水
						25.0	5st	

の3ケースについて、それぞれの試験条件を表-2に示す。

4. AE法による注入特性の評価

(1) 有効 AE パラメータの選定

AE計測において、一般に用いられる AE パラメータとしては、1) イベント (event), 2) リングダウンカウント (ringdown count), 3) 持続時間 (duration), 4) 立ち上がり時間 (rise time), 5) 最大振幅 (maximum amplitude), 6) エネルギー (energy), 等を挙げる事が出来る¹⁰⁾。最もよく用いられるものは、リングダウンカウントあるいはイベントであるが、材料の破壊性状を特性づけるパラメータとしては AE エネルギーの有効性を指摘する研究が多い^{11), 12)}。本研究は注入時の岩盤の挙動特性を明確にすることを目的としていることから、AE エネルギーに着目して現場試験結果を分析した。

エネルギーに関連したパラメータとしては、山口らの研究によるエネルギーモーメントがあり¹³⁾、材料の破壊パターンの選別に有効であると報告されている。AE エネルギーは波形の持つパワーを示す量であり、一般には、式 (4.1) で示される実効値 (RMS), すなわち、

$$\sqrt{\int_0^{T_d} x^2(t) dt} \dots \dots \dots (4.1)$$

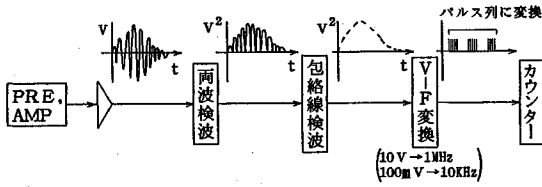


図-7 AE エネルギーの算定法

ここに、 $x(t)$: AE 波形の関数形

Td : AE 波の継続時間

で定義される値を用いたり、AE 波尖頭値の 2 乗値を用いたりする場合が多い。本研究ではエネルギー量としては図-7 に示すように、AE 波を包絡線検波した後に発生電圧を $10\text{V} = 1\text{MHz}$ 換算のカウント数に変換した無次元量で表示した量をパラメータ (エネルギー発生量) として用いた。

さて、表-2 に示す 3 つの現場試験に関して、パラメータ評価の基本となる透水試験時での発生特性について整理したものの代表例を、図-8 (a), (b) に示す。

それぞれのデータを見ると、特徴的なことは、注入圧があるレベル ((a) では初期及び 0.7MPa , (b) では 0.2MPa あるいは 0.3MPa) に達すると AE の発生が顕著になることである。また、両者のデータについて共通して指摘出来ることは、イベント発生率の方がエネルギー発生率 (単位時間、本計測では 100 秒間当たりの AE エネルギーを指す。) よりも分散して発生する傾向にあり、その分注入時の岩盤挙動を評価する上で特徴を把握しにくくなる点であろう。この傾向は著者らが今まで実施した他のデータについても指摘出来る。

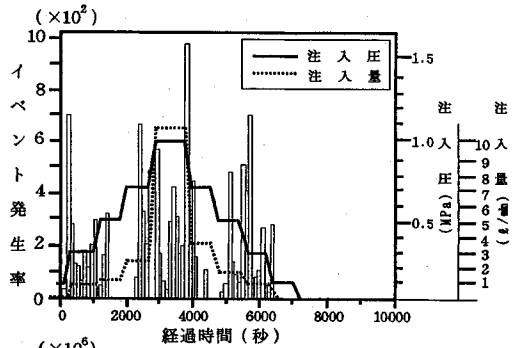
(2) AE エネルギーと岩盤変位に関する検討

過大なグラウト注入圧によって岩盤破壊が生じ、岩盤が持ち上がることはグラウチングで最も避けなければならないことであり、一般には岩盤変位計を設置することで監視しているのが現状である。ここでは AE エネルギーの発生量と岩盤変位の関係について考察を加えることによって AE エネルギーが岩盤の破壊を表現するパラメータとして有効であるかどうかを検討した。

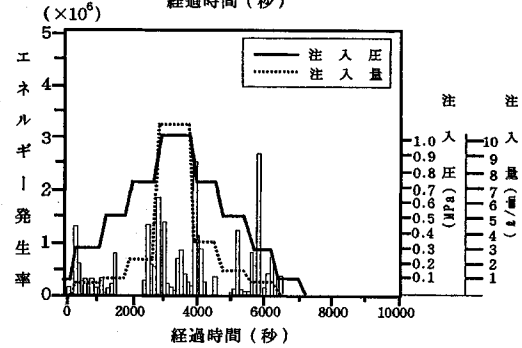
グラウト注入において、岩盤変位が発生する過程は、現象論的に考えると、次のような 2 つの段階に分けることが出来る。

- ①亀裂が新たに発生する、あるいは既存亀裂が拡大、進展する段階。
- ②連続した亀裂面が形成され、その亀裂面に注入圧が作用することにより、岩盤が持ち上がり、地表面における岩盤変位として観測される段階。

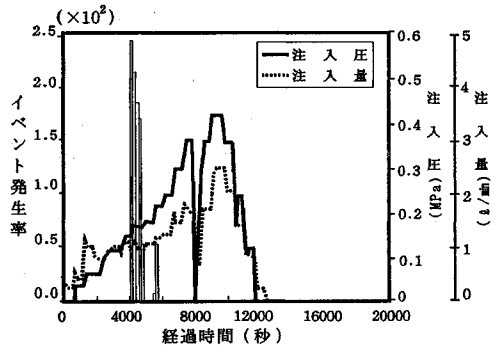
さて、以上に述べたような亀裂形成及びそれに伴う変位過程を考えたとき、発生する AE エネルギーは次のように与えることが出来る。



(a) Sダム, 4st. 透水試験



(a) Sダム, 4st. 透水試験



(b) H-1ダム, 5st. 透水試験

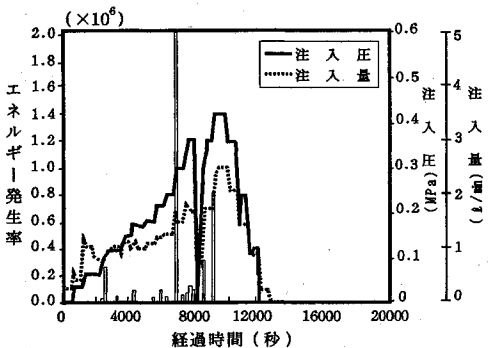


図-8 透水試験時における AE イベント及びエネルギー発生特性の経時変化

$$E_T = E_c + E_d \dots\dots\dots (4.2)$$

ここに、

E_T : 全発生 AE エネルギー

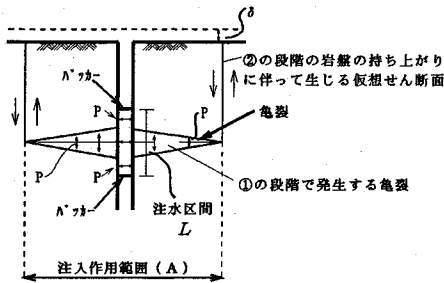


図-9 岩盤内亀裂と岩盤変位モデル

E_c : 過程①の亀裂形成時に生ずる AE エネルギー

E_d : 過程②の岩塊の持ち上がり時に生ずる AE エネルギー

AE エネルギー (E_c) は変位を伴わない状態で観測されるのに対して, E_d は変位とともに発生すると考えられる。

ところで②の段階における揚圧力と岩盤変位の関係, すなわち, 岩盤変位が生じる条件として, 松田らは次のような関係を与えている¹⁴⁾。

揚圧力 \geq 岩盤抵抗力

すなわち,

注入圧力 \times 作用面積 \geq 上載岩盤自重 + 岩盤強度 (上部岩塊の側面せん断力, 曲げ抵抗力)

そこで岩盤内に発生した亀裂と変位状況を図-9 のように単純化したモデルに置き換えて検討を加える。

岩盤変位が同図のように平面的な亀裂の形状 (あるいは既存亀裂の拡幅) により, 亀裂面の上部の岩塊が押し上げられることによって生じるとすれば, その仕事量は, 松田らの考え方等を参考にして,

$$Wd = A \cdot (P - \sigma_v) \cdot \delta \dots\dots\dots (4. 3)$$

ここに, A : 注入圧力の作用面積

P : 亀裂内における注入圧力

σ_v : 亀裂面に作用する鉛直地圧

δ : 地表面における岩盤変位

さて, 岩塊がなした仕事量は, 変位の発生とともに AE エネルギーとして観測されるとすれば, 岩盤変位と AE エネルギー (E_d) の間には次式が成り立つ。

$$E_d \propto Wd$$

また, 注入圧の作用面積がほぼ一定の値をとると仮定すれば,

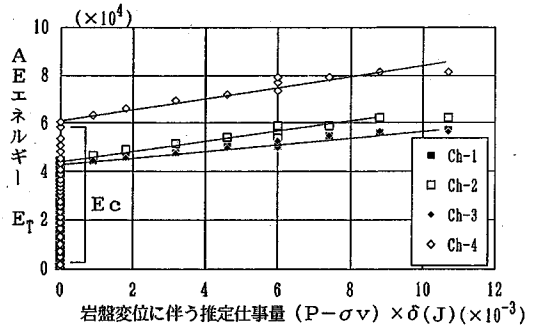
$$E_d = \alpha (P - \sigma_v) \delta \dots\dots\dots (4. 4)$$

ここに α : 比例定数

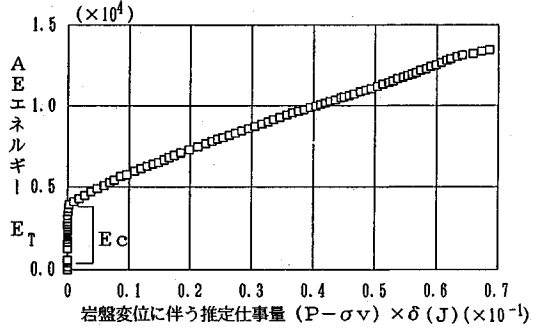
したがって, 全発生 AE エネルギーは,

$$ET = E_c + \alpha (P - \sigma_v) \delta \dots\dots\dots (4. 5)$$

式 (4. 5) より, 注入時における AE 発生エネルギーは注入初期は変位を伴わない状態で発生し, その後, 変位に比例して発生する傾向があることが指摘出来る。



(a) H-1 ダム, 5 st. 透水試験



(b) H-2 ダム, グラウト No.1

図-10 岩盤変位に伴う仕事量と AE エネルギーの関係

以上のような考え方のもとに比較的変位が発生したと認められる H-1 及び H-2 のデータをもとに, 縦軸に AE エネルギー量, 横軸に各岩盤変位発生時の仕事量 $(P - \sigma_v) \delta$ を取ってプロットしたものが図-10 (a), (b) である。

図-10 (a), (b) より全 AE エネルギーは, 式 (4. 2) に示すように, 亀裂形成時に生ずるエネルギー (E_c) と岩盤の持ち上がり時に生ずる AE エネルギー (E_d) に分離され, AE エネルギー (E_d) は, 岩盤変位によりなされた仕事量と比例関係を示すことが指摘できる。

単に変位量と AE エネルギーの関係として捉えた場合, 同図のような傾向を明確に示すことが困難であったが, 式 (4. 5) のような仕事量との関係として捉えると, AE エネルギーが岩盤破壊現象と密接な関係にあることを導くことができる。

(3) 注入量と AE エネルギー

前述の議論より, AE エネルギーは発生する亀裂量及びそれに伴う岩盤変位と密接に関連することが指摘された。このことは, 亀裂の拡大, 進展に伴う注入量変化とも大いに関連するものと判断される。したがって, ここでは, 注入時の注入量の変化と発生 AE エネルギーの関連性について検討する。

AE エネルギーと発生亀裂体積との関係に関しては, 横内らの研究がある¹⁵⁾。彼らは, 地熱エネルギーの開発を目的として岩体内での水圧破碎による亀裂面の形成試

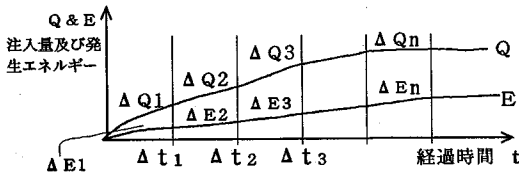


図-11 AE エネルギーレートの定義

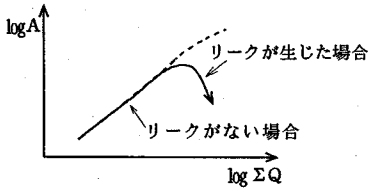


図-12 エネルギーレートと累積注入量の関係

験を実施し、その時に発生した AE エネルギーと注入水量の関係からリーク水量を補正することによって、亀裂形成時に発生する平均 AE エネルギーと亀裂体積が比例することを指摘した。

この結果は換言すれば、水圧破碎が生じて発生した AE エネルギーは発生亀裂量の体積と密接に関連していることを示しており、同様の考え方は、グラウト注入において亀裂の拡大、進展に伴って発生する AE エネルギーと新たに発生した亀裂内への注入量にも適用できるものと考えられる。

今、グラウト注入時において単位注入量当たり発生する AE エネルギーを AE エネルギーレートと定義し、AE エネルギーレートと累積注入量の関係について考察を加える。ここで累積注入量とは、各加圧試験における亀裂進展開始後の注入量の累積値である。岩体への加圧水の浸透が無視でき、また亀裂外への加圧水のリークがない場合、この累積注入量は亀裂体積に等しく、さらに AE エネルギーレートは単位亀裂進展体積当たり放出される AE エネルギーとなる。今、AE エネルギーとして、グラウト注入時を時間帯に区切り、各時間帯の注入量 ΔQ とその時間帯に発生した AE エネルギー ΔE から次式のように各時間帯の AE エネルギーレート A を求めることとする (図-11)。

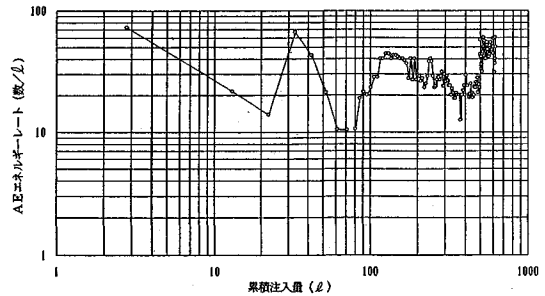
$$A = \frac{\Delta E}{\Delta Q} \dots\dots\dots (4. 6)$$

このようにして求めた AE エネルギーレートに対して、累積注入量を両対数軸上にプロットすると、一般には図-12 ような傾向が得られる。

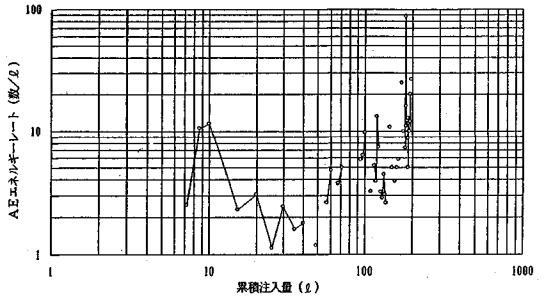
もし、注入中にリークが生ずると、

$$A = \frac{\Delta E}{\Delta Q} = \frac{\Delta E}{\Delta Q_c + \Delta Q_l} \dots\dots\dots (4. 7)$$

ここに ΔQ_c : 亀裂進展体積
 ΔQ_l : グラウトのリーク量



(a) H-2 ダム, グラウト No. 1



(b) H-2 ダム, グラウト No. 2

図-13 AE エネルギーレートと累積注入量の関係

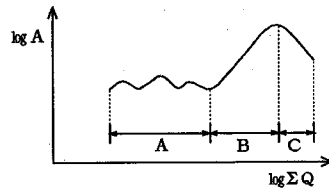


図-14 グラウト注入過程におけるエネルギーレートと累積注入量の関係

となり、図-12 に示すように A と ΣQ の関係は直線からはずれる傾向を示すようになる。ここで、今まで実施したグラウト注入のデータに関してこのような関係をプロットしたものの代表例を図-13 (a), (b) に示す。

これらの各図より、グラウト注入に関しては図-14 に示すように大きく 3 つの領域に分類することができる。

領域 A は、エネルギーレートが累積注入量に対して特に増加しない領域であり、現象としては、既存亀裂等への流入が支配的な注入であると考えられる。これに対して、B 領域では前述の水圧破碎実験と同様、亀裂充填が徐々に進行していき、水圧破碎が生じるようなエネルギーが累積されていく過程であると考えられる。C 領域では、水圧破碎が生じエネルギー増加より注入量増加が卓越、すなわち、発生亀裂内にグラウトがどんどん送り込まれていく状態を示している。

従って、グラウト注入方法としては、領域 A から領域 B に至り、B の過程でエネルギーレートがほぼ飽和

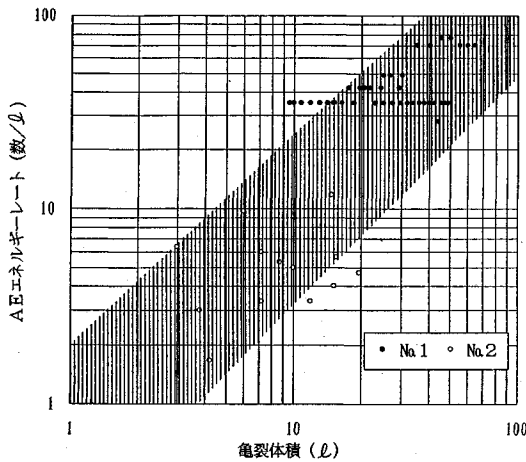


図-15 AEエネルギーレートと亀裂体積の関係 (H-2ダム, グラウトNo.1&2)

に達したところでストップするのが大きな岩盤破壊を防止, かつ必要な充填を行うといった観点から理想的であると考えられる。

Bの過程はエネルギーレートと累積注入量が比例し, 現象的には亀裂が拡大・進展していると考えられる。この段階のデータのみに着目すると, B過程の累積注入量は亀裂の拡大・進展体積に相当すると考えられる。図-13(a), (b)の計測値について, B過程のデータだけに注目してこの間のエネルギーレートと注入量の関係を整理し, 図-15に示す。

同図中, ハッチ部分は横内ら¹⁵⁾が指摘した比例関係を外挿した場合を示す。データのバラツキはやや大きい, AEエネルギーと亀裂体積は両対数軸上でほぼ比例関係にあると判断することが可能で, エネルギー量の発生傾向は, 亀裂の拡大・進展に結びついていると考えることができる。データのバラツキは, グラウト注入等, 亀裂性岩盤を対象にする場合は, 微小亀裂等が現実には多数存在しているため, 硬質岩の水圧破碎のように直線上にはプロットされないことに起因していると考えられる。

(4) 注入特性の評価手法

a) マルチパラメータ図による特性分類

4.(2)と4.(3)章ではAEエネルギーの特性は, 岩盤変位に伴う仕事量や亀裂発生量と相関するパラメータであることを示した。また, 2.(2)章では, イベント計測だけでは注入特性分類に限界があることに触れた。そこで, 本研究では, 従来用いられてきたイベントのパラメータの他に, エネルギーのパラメータを加えたAEのマルチパラメータ表示により, グラウト注入による岩盤内の挙動を評価する手法を検討し, AE法によるグラウトの注入管理法を示す。

AEのイベントの傾向については, 今まで述べて来たように, 単に破壊だけでなく, 亀裂内の流れ, 洗い流し

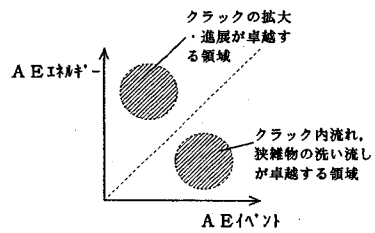


図-16 マルチパラメータによる評価方法

等の種々の要因に対しても発生する傾向にある。特に破壊が伴う場合はその時点で著しい発生傾向を示すが, 持続性のある現象, 例えば微小亀裂の連続的の発達, 亀裂内流れ, 雑音等に対しても, 累積されれば値として無視できないものとなり, 破壊だけを明確に分離することが困難な点もある。一方, AEエネルギーはAE波の最大振幅と持続時間に依存するパラメータであり, 4.(2), 4.(3)章で示したように亀裂の拡大に相関が大きく, 特に破壊等の大規模なAEが発生した場合は著しく大きくなる傾向にある。従って, ハイドロフラクチャーに至るような現象を区別するにはAEのエネルギーに着目した方が有効であろう。

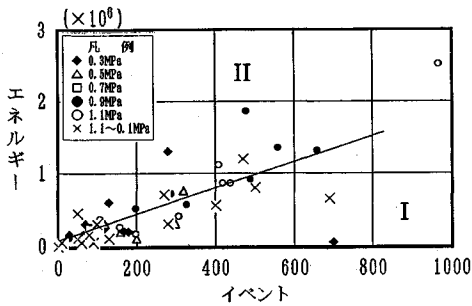
このような観点より, このような2つのパラメータで与えられる図上でそれぞれの現象がどのように特性化けられるかを模式的に示したものが図-16である。

亀裂の拡大・進展, さらには岩盤破壊といった現象が卓越する注入では, AEのエネルギーの発生傾向は, イベントカウントより相対的に卓越するものと考えられる。一方, 亀裂内の流れ, 狭雑物の洗い流し等の現象が卓越する注入では, むしろイベントカウントの発生率の方が多。

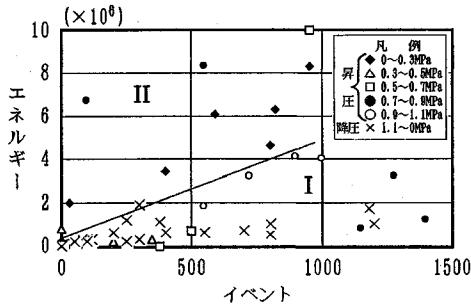
b) 事例による検証

各測定ケースのデータを同様なパラメータを用いてグラフ上で示したものを, 図-17(a)~(d)に示す。

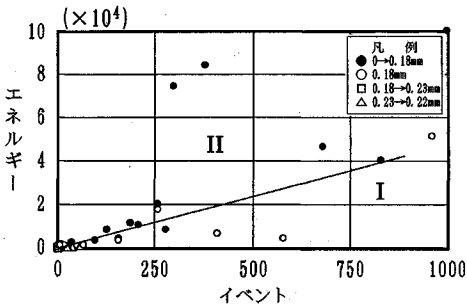
各図はそれぞれ, 注入圧力段階あるいは岩盤変位段階ごとにAEエネルギー及びイベントの発生特性がどのように変化したかを示すためにそれぞれの圧力, 変位段階ごとに分類している。いずれの図においても, エネルギー~イベント関係は全体として比例関係を示す領域内にプロットされる点が大半を占めるが, 例えば図-17(a)のSダム4ステージの例では, 初期の注入圧力が0.3MPa及び0.9MPaに達したときにエネルギー量が卓越する点はやや増加する傾向にある(図中●印及び◆印で示す)。このような傾向は, 図-17(b)のSダム5ステージにおいても認められ, 注入圧力0.7~0.9MPaでエネルギー量が卓越した点が出現しているのがわかる(図中●印で示す)。これは, Sダムの場合, 限界圧力が0.7~0.9MPaと指摘されており, (本箇所近傍で実施されたルジオンテスト等の結果から確認され



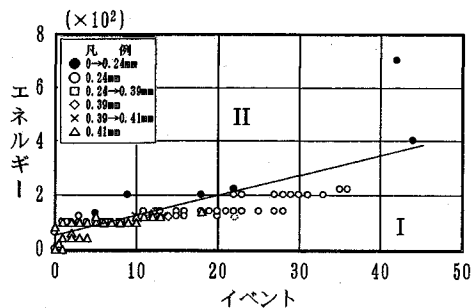
(a) Sダム, 4st.



(b) Sダム, 5st.



(c) H-2ダム, グラウトNo.3



(d) H-2ダム, グラウトNo.1

図一17 マルチパラメータ表示による注入時挙動の分類例

ている。) 注入限界圧近傍で、亀裂発生を伴うAEが多く発生したことを裏付けるものであり、このようなデータプロットの妥当性を物語っている。

同様の傾向は、図一17(c)、図一17(d)のH-2ダムのグラウト1,3のケースでも認められ、図一17(c)のケースでは岩盤変位が0.18mmに達した時点(図中

●印で示す)、図一17(d)のケースでは岩盤変位量が初期の段階で0.24mm生じた時点(図中●印で示す)でエネルギーがイベントを卓越した領域になることが指摘できる。変位量自体は、注入孔と変位測定孔との距離や注入仕様に応じ、同じ変位でも測定値は異なることが多く、絶対値自体に大きな意味はないが、定性的傾向を説明する上では妥当であろう。さらに、興味深い点は、図一17(a)、(b)からわかるように、降圧段階(各図において、×印で示す)では、エネルギーよりイベントが数多く発生する領域、すなわち、亀裂内流れ等による小規模AEのみが卓越する領域にプロットが集中していることである。このことは、ハイドロフラクチャーを伴わない亀裂内流れ、狭在物の流出等によるAEはエネルギー量が小さなAEが数多く発生し、結果としてイベント量に反映されているものと解釈できよう。

図一17(a)~(d)の各図における直線は、図一16の模式図と同様に、エネルギー量が卓越する領域(Ⅱ)、イベントが卓越する領域(Ⅰ)に大別するために引いたものであり、岩盤変位が顕著に発生したり、限界圧力を越えて注入した場合などはいずれもⅡ領域の方にAEの発生傾向が集中しやすいことを指摘することが出来る。

以上のようなデータより、イベント~エネルギーグラフ上で注入試験時のAEデータをプロットすれば、注入特性がどのような状況でなされているかを、AEパラメータ測定だけで判別することが可能となる。

5. 結 論

以上、著者が実施してきたグラウト注入時におけるAE計測により、AEパラメータの特性に関して以下のような点が明らかになった。

- 1) 岩盤変位を伴うAEエネルギー量は、岩盤変位に伴って岩盤が成した仕事量と比例関係にあることが見いだされた。
- 2) 注入量の増加量より求めた亀裂体積とAEエネルギー量は両対数軸上でほぼ比例する傾向が指摘された。
- 3) 以上の点よりAEエネルギーのパラメータを導入することにより、AEエネルギーが、注入に伴う岩盤内亀裂の拡大、進展を示すパラメータとして有効であることが判明した。

4) エネルギー、イベント両者を併用したマルチパラメータ表示により、グラウト注入時の岩盤の挙動を分類することを試みた結果、本研究の課題であった、ハイドロフラクチャーによる注入量の増加と既存亀裂内狭在物の洗い出しによる注入量の増加の区別をこのような図上で区別することが可能であることが判明した。そして、マルチパラメータ表示により、グラウトの注入管理を

AE で行うことが可能性であることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：ダム基礎岩盤グラウチングの施工指針，1972 年
- 2) Ewert, F. K. : Rock Grouting, Springer Verley, pp.276~299, 1985.
- 3) Ueda, T. et. al : Acoustic Emission monitoring on foundation grouting for rock masses, Proc. of Int. Conf. on Rock Mechanics, Vol.2, pp.569~572, 1987.
- 4) 新妻弘明他：グリッド法による超大型岩石破壊試験の A
35, 1991.7.
- 5) 上田貴夫他：岩盤基礎グラウチングの注入管理への AE 計測の応用，竹中技術研究報告，第 38 号，pp.111~125, 1987.11.
- 6) 瀬戸政弘他：夾炭層岩石での水圧破碎亀裂形成時の AE と地圧，地下亀裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集，pp.55~59, 1990.7
- 7) 宮本剛寿他：AE 波による岩体内亀裂のモード判別の可能性，同上，pp.60~64, 1990.7.
- 8) 佐々木俊二他：水圧破碎で発生する AE の震源分布と発震機構，日本非破壊検査協会，006 特別研究委員会資料 No.79, pp.35~39, 1986 年.
- 9) 板倉賢一他：岩盤の巨視的破壊に先行する AE の特徴，日本非破壊検査協会，006 特別研究委員会資料 No.79, pp.75~77, 1986 年 5 月.
- 10) アコースティック・エミッションの基礎と応用，コロナ社.
- 11) 森井享他：AE による GFRP 温水浸漬材の破壊モード評価，第 8 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，pp.223~228, 1991.
- 12) 横内淳吾他：岩体内の開口型亀裂進展にともなう AE エネルギーの放出特性の解析，第 6 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，pp.123~128, 1987.
- 13) 横内淳吾他：岩体内の開口型亀裂進展にともなう AE エネルギーの放出特性の解析，第 7 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，pp.117~122, 1989.
- 14) 松田達他：ダム基礎岩盤の透水特性とグラウチング効果の評価について，大ダム，No.95, p.20, 1981.3.
- 15) 横内淳吾他：岩体内の開口型亀裂進展にともなう AE エネルギーの放出特性の解析，第 6 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，pp.123~128, 1987.

(1992.7.7 受付)

EVALUATION FOR THE CHARACTERISTICS OF ROCK GROUTING BY ACOUSTIC EMISSION ENERGY

Takao UEDA, Hidehiko NAKAZAKI, Tadahiro KAKIZAWA and Shiro SUZUKI

Acoustic emission (AE) characteristics for rock grouting, which have been obtained from several dam sites, are studied, regarding the relationship between AE energy and rock behavior. In situ monitoring tests were carried out for three different rock types and some injection conditions using four to six channels AE acquisition system. Hydrofracture originated due to the injection pressure can be characterized by the AE energy parameter, that is, the deformation energy accumulated in the rock mass during pressurization process is proportional to the AE energy and also relates to the injection amount increase accompanied with the crack enlargement.

As a result, grout injection evaluation technique is proposed based on the AE multi-parameter method and, its effectiveness is clarified through the sampling data.