

アーチダムの二次クーリング時およびジョイントグラウティング時におけるAE法適用性の検討

峰村 修¹・坂田 昇²・湯山茂徳³・岡本享久⁴・丸山久一⁵

¹正会員 新潟県三面川開発事務所 (〒 958-0268 新潟県岩船郡朝日村大字小川 29-3)

²正会員 工博 鹿島技術研究所 (〒 182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

³正会員 工博 博士(学術) 日本フィジカルコースティクス(株) (〒 151-0011 東京都渋谷区東 2-17-10)

⁴正会員 工博 太平洋セメント(株) 清澄研究所 (〒 135-8410 東京都江東区清澄 1-2-23)

⁵FIID-会員 Ph.D. 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

アーチダムにおける二次クーリング時, およびジョイントグラウティング時の安全監視を, AE 法を用いて行い, 適用性を検討した. 二次クーリング時のパラメータ解析結果により, AE 活動は時間経過とともに, ほぼ直線的に増加することが示された. またモーメントテンソル解析から, コンクリートブロック中に, AE 発生集中部は存在しないことが確認された. 一方グラウティング時には, 隣接するジョイント部に充水を開始した時点, およびブロッキング開始時に, 大きな AE 活動が観察され, これらはセメントミルクのジョイント内への不均一な浸透過程に起因する, 局所的な不安定状態で発生したものと推察された. 本計測において, 危険な兆候を示す AE 活動は観察されず, ダムは安全な状態にあったと結論された.

Key Words : acoustic emission, arch dam, joint grouting, moment tensor analysis, secondary cooling, safety surveillance

1. はじめに

アーチダムなどのブロック打設工法による大型マスコンクリート構造物においては, 硬化過程の水和熱で生ずる熱応力に起因する温度ひび割れの発生を防止するために, コンクリート内に予め埋設したパイプの通水による温度管理が実施される. こうしたコンクリートダムは, 山間地に建設される場合が多く, 低温, 降雪など気候条件の影響で, 冬季期間は建設が中断されることもまれではない. その期間, 堤体温度を安定温度まで低下させる目的で, 2 次クーリングが行われる. この時堤体全体が収縮するが, 通常適用されるひずみ測定では, ひび割れの発生・進展などの挙動について把握するのは, 困難なのが現状である.

一方, 安定温度まで降下後, 堤体を一体化するために, 加圧したセメントミルクを打設ブロック間のジョイント部に注入するジョイントグラウティングが実施される. この時の施工状態は, セメントミルク注入量, 密度, 圧力, またジョイント内に設置し

た変位計でジョイントの開口量などを測定することで管理される. しかしながら, セメントミルク排出口における排出状況をモニター可能な手法は現在のところ存在しない. また, ブロック内にひび割れが存在する場合には, グ라우ティング時の圧力により, セメントミルクがひび割れ内に漏洩したり, 場合によっては, 新たなひび割れ進展を生じさせる危険性がある. さらに, 加圧力は小さいにも拘わらず, ジョイント部の面積が大きいので, グ라우ティング時にダム堤体に載荷される荷重は大きく, 最悪の場合堤体を損傷させる可能性も考えられる. したがって, ジョイントグラウティング施工時の安全管理は極めて重要であり, それを効率的に行うために, 有効な監視手法の開発が望まれている.

固体中に発生する弾性波を検出して評価する AE 法¹⁾は, コンクリート構造物に広く適用され²⁾, 劣化度を評価する検査手法として, また工程管理などを行うための監視手法として, 有効性が報告されている. AE 法には, 検出された信号に信号処理を行い, その強度や発生頻度の相対的比較を行うパラメ

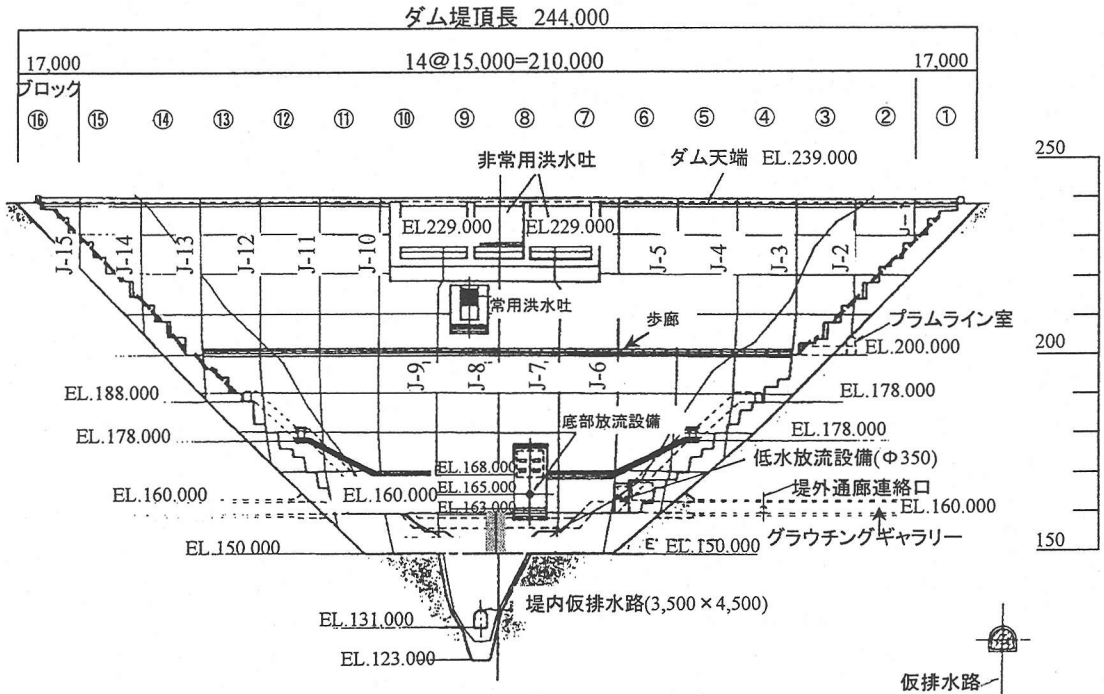


図-1 建設中のアーチダム（下流から見た立面展開図）

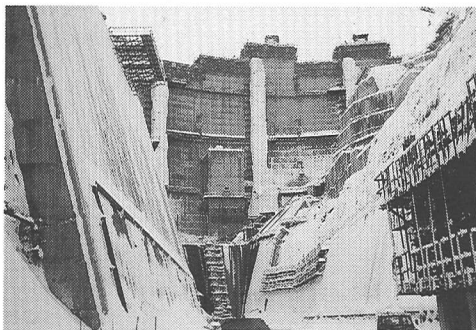


写真-1 建設中のアーチダム（下流から撮影）

ータ解析と、6 個以上の波形からなる波形セットに弾性波動理論を適用し、AE 源となるひび割れの種類、方向、また運動の方向などを定量的に評価するモーメントテンソル解析^{3), 4)}の 2 種類がある。このうち、パラメータ解析は、古くから一般的に用いられてきた手法であり、ひび割れの発生や破壊の進行過程を定性的に評価することを目的に、広く用いられている。一方、モーメントテンソル解析は、ひび割れの発生状況を可視化し、さらに破壊進行過程

を定量的に評価する手法として、各種コンクリート供試体^{5), 6)}や部材^{7) ~ 11)}において、近年広く適用されるようになった。

本研究では、AE 法を用いて建設中のアーチダムにおける二次クーリング時のひび割れ発生・進展挙動の監視を試み、またジョイントグラウティング時に生ずる可能性のある既存ひび割れへのセメントミルクの漏洩や、加圧力による堤体の損傷の有無を調べ、AE 法の安全監視手法としての適用性について検討した。

2. 試験方法

(1) 被監視構造物

図-1および写真-1に、AE 計測を行った建設中のアーチダムを下流から見た立面展開図と、その写真がそれぞれ与えられている。本アーチダムは、新潟県岩船郡朝日村にあり、ダム天端高さは 116m(海拔 239m)、また堤頂長さは 244m である。常時満水時の貯水量は、1 億 2550 万 m^3 となる。AE 計測は、河床からの高さ 80m(海拔 200m)付近まで、コンクリート打設が終了した時点で行われた。

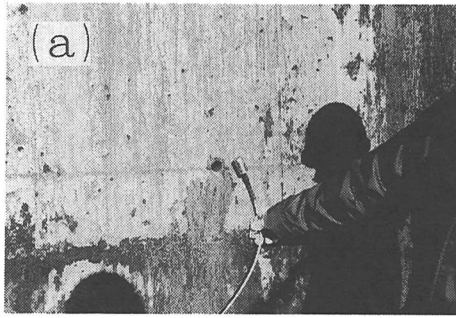


写真-2 AEセンサー設置状況

(2) AE計測法

a) AEセンサー

大型コンクリート構造物であるダム内で発生するAE信号を検出するために、PAC社製R1.5IUD.B低周波AEセンサーを用いた。このセンサーは、コンクリート内に埋設するために、防水仕様に設計され、センサーケースからステンレスワイヤで保護された同軸ケーブルが、直接取出されている。共振周波数は15kHz、また計測周波数帯域は10～50kHzであり、通常使用されるAEの周波数帯域(50kHz～1MHz)に比べ、極めて低い周波数領域に感度を持つ。ダムのような大型コンクリート構造物内においては、AE波の伝播減衰が大きく、通常の周波数帯域では、有効なAE計測は行えないことが予想される。AE波の伝播状況の校正結果によれば、前記の低周波数帯域であれば十分有意なAE信号を検出可能ことが示されている。このセンサーで検出された信号は、センサーケース内のプリアンプで40dB増幅後、同軸ケーブルを介してPAC社製MISTRAS AE計測装置に入力された。

b) AE計測装置

AEパラメータ解析、およびモーメントテンソル解析用波形収録には、16チャンネルMISTRAS AE計測装置を用いた。この装置は、完全デジタル信号処理方式のため、パラメータ解析を行いながら、AE波形を収録できる。本計測では、サンプリング周波数として200kHzを、また記録波形長として、各々のAE信号に対して4kワードを用いた。

c) AEセンサー取り付け法、および位置

信頼性の高いAE計測を行うために、AEセンサーを、下記の手順でダム表面に埋設した。

- ①ダム下流および上流面の所定位置に、直径32mm、深さ50mmのセンサー埋設孔をドリルで削孔する。
- ②センサー表面とダムコンクリート面との接着を良

好にするため、埋設孔内に必要量のモルタルを埋め込む。

- ③センサー挿入後、モルタルをさらに埋め込み、センサー埋設孔を完全に充填する。

こうして、AEセンサーは、安定的な計測が行える状態で、コンクリート表面直下に半永久的に設置される。写真-2に、センサー設置状況が示されている。

図-2に、AEセンサー設置位置が模式的に示されている。12個のセンサーを、海拔150～164mにあるブロック8および9の表面にそれぞれ6個ずつ埋設した。また、4個はダムブロック内の通廊床面上に設置した。CH1～CH9すなわちブロック9に配置した合計9個のAEセンサーで検出したAE信号が2次クーリング時にモニターされ、また全てのAEセンサーで検出した信号が、グラウティング時に解析された。ここで、AE源の位置標定に用いたセンサーグループ内における最大センサー間距離は、18mを超えている。

(3) モーメントテンソル解析

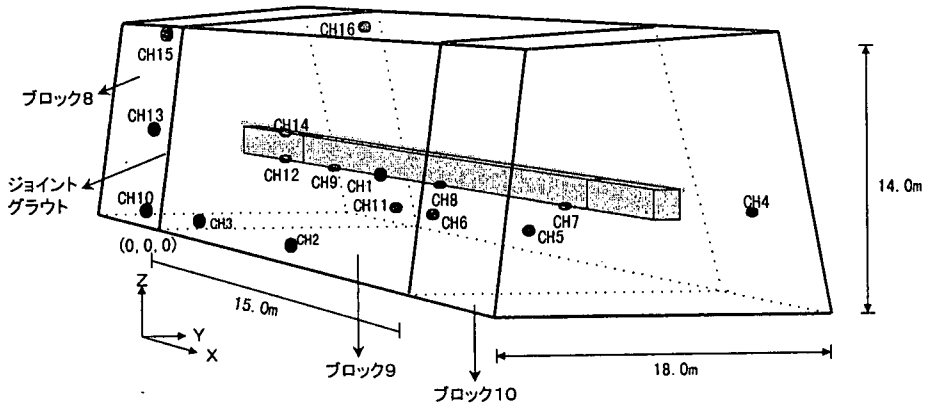
固体中の点 y におけるクラック(ひび割れ)発生による検出点 x でのAE波動 $u_i(x,t)$ は、クラックベクトル $b(y,t)$ をクラック面上(ただし法線ベクトルを n として)で定義し、さらにこのクラックベクトル $b_k(y,t)$ を運動の大きさ b 、運動方向 l_k 、発生時間関数 $S(t)$ と分離すれば、クラックの幾何情報を表示するテンソルとして、式(1)に示されるモーメントテンソル m_{pq}

$$m_{pq} = C_{pqkjlknj} b(y) dS \quad (1)$$

が得られるので、

$$u_i(x,t) = G_{ipq}(x,y,t) m_{pq}(y) * S(t) \quad (2)$$

と与えられる¹⁾。



2次クーリング時 CH1~CH9
グラウト時 CH1~CH16

図-2 AEセンサー設置位置

さて、多量の AE 波形処理が容易なように、時間項を分離してモーメントテンソル成分を線形連立方程式から求める SIGMA コード¹²⁾ にしたがえば、式(2)において、P 波初動に関係する項のみを時間項を除いて取り出し、グリーン関数には無限体の解を用いると検出点 x での P 波初動の振幅値 $a(x)$ は、

$$a(x) = C \cdot \text{ref}(r_i) \cdot r_p r_q / R \cdot m_{pq}(y) \quad (3)$$

と表される。ここで C はセンサー感度も含めた物性値の係数、 R はクラック発生点 y から検出点 x への距離であり、 r_i, r_p, r_q はその方向余弦を意味する。また $\text{ref}(r_i)$ は、センサー設置点での反射を考慮した検出点への入射角に依存する反射係数である。これにより、無限解を用いながら、半無限解に対する場合の処理が行える。

式(3)において、三次元位置標定によりクラックの発生位置が決定されていれば、右辺は m_{pq} を除いて全てわかっている項である。したがって、モーメントテンソルは 2 階の対称テンソルであることから、少なくとも 6 箇所の検出点で得た P 波初動振幅値を左辺に代入して得られる連立方程式を解くことにより、モーメントテンソル成分を求めることができる。

こうして得たモーメントテンソルの固有値を求め、さらに引張型クラックとせん断型クラックでは、3 個の固有値に特徴ある差異が存在することに基づいた解析を行うことにより、AE 源となったクラックの種類、傾きの方向、運動の方向を決定することができる。

すなわち、固有値分解により、せん断型クラック

において主軸方向の最大値を X とすると、固有値として $(X, 0, -X)$ が得られる。一方、引張型クラックの場合、引張成分は、もともと主軸の方向と一致しているので、その偏差成分は $(Y, -0.5Y, -0.5Y)$ で、また引張成分のうち平均値の等方成分は、 (Z, Z, Z) で表される。ここで、対象となる AE 源が、引張型およびせん断型の混合していることを仮定すると、第 1(最大)固有値で正規化された、以下の固有値分解式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} 1.0 &= X + Y + Z \\ \text{第 2 固有値} / \text{第 1 固有値} &= 0 - 0.5Y + Z \\ \text{第 3 固有値} / \text{第 1 固有値} &= -X - 0.5Y + Z \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

したがって、固有値が得られれば式(4)の比率 X, Y, Z の決定は容易なため、これによりせん断型の寄与率: X と、引張型の寄与率: $Y + Z$ を求めることができる。ここで純せん断型クラックの場合、 b と n は垂直であり、 X は 100%となる。一方、純引張型のクラックでは、 b と n は同一方向を示し X は 0%となる。このようにして、AE 源(クラック)は、引張型 ($X \leq 40\%$)、中間型 ($40\% < X < 60\%$)、あるいはせん断型 ($60\% \leq X$) に分類できる。

3. 試験結果

(1) AE発生源位置標定の校正

AE 発生源の位置標定精度を検証するために、通廊内床面の異なる 5 箇所ではハンマー打撃により擬似

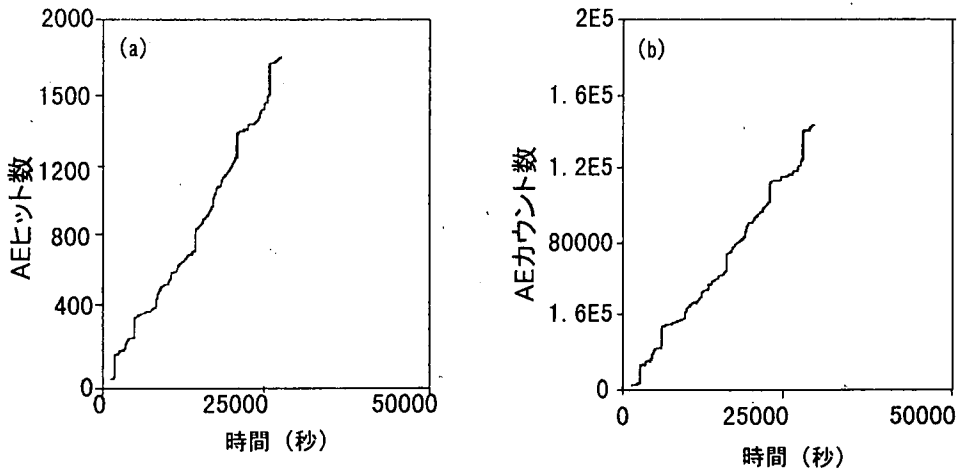


図-3 二次クーリング中に計測された AE ヒット数, およびカウント数の履歴 (計測時間約10時間)

AE 信号を入力し, 校正を行った. 位置標定には, 1 箇所最低 10 回信号を入力し, 初動 P 波の信号到達時間差をもとに計算を行い, その結果と実際に擬似信号を入力した位置とを比較した. たとえば, 擬似信号を CH7 と CH8 間の $(X, Y, Z) = (9.8, 8.8, 6.0)$ で 10 回入力した場合, 計算結果の平均値は, $(X, Y, Z) = (10.5, 8.3, 4.9)$ であった. 実際の信号入力位置と, 計算で得た AE 源位置標定結果の間には, ある程度の差が見られるが, その原因として,

- ①擬似 AE 信号は, AE センサーの囲む領域外で入力されたこと,
- ②三次元位置標定を行うにあたり, 理想的な AE センサー配置は, 位置標定領域を囲んで円筒面上, あるいは球面上に配置することであるが, 本計測ではこうした理想的配置をとることができなかったこと,
- ③通廊の中央付近に幅 2m, 長さ 5m, 深さ 1.5m 程度の凹部があるため, 場合によっては, 正確な P 波到達時刻を求めるのが困難な AE センサーが存在すること,

などが考えられる. しかしながら, 二次クーリング時, あるいはグラウティング時において大部分の AE は, センサーの囲む領域内で発生すると考えられるため, 上述の①と③の原因に基づく誤差は, 軽減されると期待される. したがって, 実際の AE 計測時には, 擬似信号入力時に比べて, より良好な位置標定精度を得ることが可能と考えられる.

ところで, P 波速度は, センサー CH1, 2, および 3 近くのコンクリート表面上を, ハンマーで打撃して求めた. AE 信号入力位置とセンサー間の距離は既知のため, P 波信号到達時間を求めることによ

り, 音速は計算可能である. 得られた音速値には, 伝播経路の違いにより, 多少の差が生じたが, 平均値として 4577m/s が得られ, この値を位置標定計算に用いた. なおこの音速値は, 50N ~ 60N/mm² の強度を持ち, 品質「優」を与えるアーチダムコンクリートにおいて, 妥当な値である.

(2) 二次クーリング時の AE 監視

a) パラメータ解析

最初の AE 計測は, 1996 年 12 月 24 ~ 26 日に, また第二回目の計測は 1997 年 1 月 20 ~ 24 日に行った. この期間におけるコンクリートブロック内の温度降下は, それぞれ 0.4 °C, および 0.7 °C であった. 有効な計測を行うには, より大きな応力変化を得るために, できる限り大きな温度変化を生ずることが望まれたが, 施工の都合により, 前述した計測期間となった.

一例として, 約 10 時間の計測期間中に得られた AE ヒット数 (a), およびカウント数 (b) の履歴が, 図-3 に与えられている. この図より, AE 活動は, 時間経過とともに, ほぼ直線的に増加していることがわかる. こうした傾向は, 全計測期間を通じて観察された. 時間経過とともに直線的に活動度が増加する場合の AE 発生源は, 機械的, あるいは外的雑音によるものであることが一般的に知られている. これとは対照的に, 後述する考察に示すように構造物が欠陥 (ひび割れ) の発生・進展などにより危険な状態におかれた場合には, 一定の条件下, たとえば荷重保持時に指数関数的に AE 活動は上昇する. 本計測期間中には, こうした状況は全く見られなかった. したがって二次クーリング中に, ひび割れの

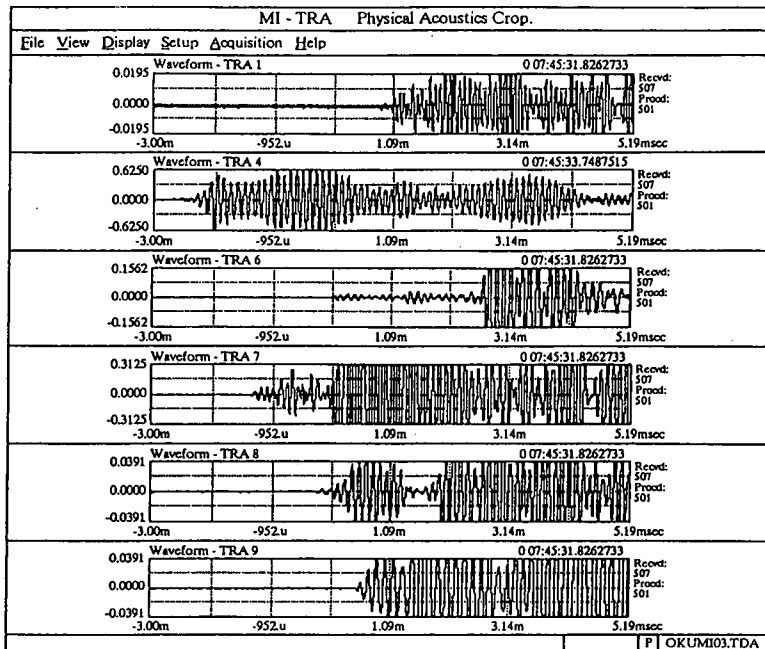


図-4 モーメントテンソル解析が適用可能な波形セットの一列

表-1 二次クーリング第一回 AE 計測時のモーメントテンソル解析結果
(1996年12月24日 8:30～16:30)

イベント No.	位置 (m)			種類	X 軸となす 角度 (°)	Y 軸となす 角度 (°)
	X	Y	Z			
161	5.673	11.367	-5.236	引張型	32.1	60.1
162	11.184	13.359	5.954	引張型	77.1	83.1
245	4.631	12.001	-35.468	せん断型	-	-
248	4.853	6.457	-13.230	せん断型	-	-
292	6.772	2.048	-16.235	中間型	-	-
301	3.490	8.261	-4.138	中間型	-	-
378	12.350	13.079	3.010	せん断型	-	-
501	13.672	17.454	4.016	引張型	71.7	9.0

発生や進展は起こらず、コンクリートブロックは危険な状態には全くなかったと結論される。検出された AE 信号の発生源は、冷却パイプとコンクリートブロック間のこすれや振動などの、機械的雑音であると推察された。

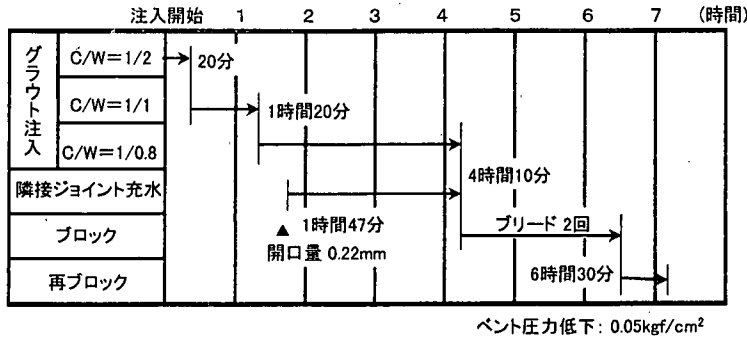
b) モーメントテンソル解析

計測時の雑音、あるいは AE 波伝播における減衰の影響で、モーメントテンソル解析を行うのに必要な、6 個の波形に対して初動 P 波データを読みとり可能な波形セット数は限定された。第一回計測時に、合計 507 組の波形セットを検出したにもかかわらず、解析可能な波形セット数は 8 組であった。第二回計測結果では、合計 1517 組の波形セットが得られた

が、そのうち解析可能なものは、11 組のみであった。モーメントテンソル解析を適用するには、それぞれの波形セットで、最低 6 個以上の波形に対して、初動 P 波の到達時刻、および振幅値を正確に読みとる必要がある。しかしながら、被監視構造物は極めて大きく、最大センサー間距離は、18m 以上であったため、AE 波伝播における減衰により、データ読み取り可能な 6 個以上の波形から成る有意な波形セットを得るのは、かなり困難であった。検出した波形セット数に比べ、解析可能な波形セット数が極めて少なかったのは、こうした理由によると考えられる。

図-4に、モーメントテンソル解析が適用可能な波

表-2 ジョイントグラウティングの施工手順



形セットの一例が示されている。表-1に、第一回計測に対する解析結果がまとめられている。引張型、せん断型、および中間型ひび割れの検出数は、ほとんど同一である。したがって、二次クーリング時において、発生機構を特徴付け、優先的な AE 発生源となる現象は、生じなかったものと考えられる。

構造物が、一定の荷重下で危険な状態におかれた場合、小さな領域で AE が集中して発生する、AE 集中源の存在することが一般的に知られている。表中にはこうした AE 集中源の発生は認められず、したがってダムブロックは、二次クーリング中にひび割れの発生や進展は起こらず、安全な状態にあったと考えられる。

(3) グラウティング時のAE監視

a) パラメータ解析

グラウティングは、海拔 150 ~ 164m にあるブロック 8 と 9 間のジョイント J8 に対して、1997 年 3 月 20 日に行った。ジョイント部の幅は 14.7m、また高さは 14.0m であることから、その面積は約 205.8m² である。表-2に、グラウティングの施工手順が示されている。セメント/水比は、グラウティング開始時点で 1/2 であり、20 分経過後 1/1 に、また 1 時間 20 分経過後 1/0.8 に変更された。その後グラウティングが終了するまで、この値に保たれた。セメントミルクの圧力と密度は、サブライ、およびベント弁位置でモニターした。またジョイント部の開口変位は、ジョイント内に設置した 2 個の変位計で測定した。

グラウティング開始 1 時間 47 分後、ジョイント開口量が 0.22mm となった時点で、J8 がこれ以上開口しないようにブロック 7 と 8、およびブロック 9 と 10 との間にある隣接ジョイントに充水した。全ての弁を閉じ全体の圧力を一定に保つためのブロッキングは、グラウティング開始後 4 時間 10 分後に

行った。さらにその 2 時間 20 分後に再度ブロッキングを実施した。グラウティング作業は、ベント弁での圧力が 0.05kgf/cm² (4.9kPa) まで低下した時点で終了した。

大部分の AE 信号は、ジョイント部付近に設置した CH10 ~ CH16 のセンサーで検出された。一方、ブロック 9 内に設置したセンサーでは、ほとんど信号は検出されなかった。したがって、グラウティング中にはほとんどの AE 信号はジョイント部で発生したと考えられる。AE ヒット計数率(a)、ヒット数(b)、カウント数(c)、およびエネルギー(d)で表される AE 活動度の履歴が、図-5に示されている。グラウティング開始後 1 時間 47 分の時点で、顕著な AE 活動が観察される。これは、隣接するジョイントに充水を始めた時刻に対応する。また大きな AE 活動度がブロッキングを開始した 4 時間 10 分後に発生している。およそ 6 時間 30 分後、すなわち再ブロッキング開始に対応して、ある程度の AE 活動が観察される。しかしながら、上述した特別な時点以外は、一般的に AE 活動度は小さい。

図-5に示されるように、一定時点において大きな AE 活動が特徴的に発生する原因として、次の説明が可能である。すなわち、隣接するジョイントに充水した時点、あるいはブロッキング開始時点において、ジョイント面全体が加圧され、セメントミルクは局所のおよび一時的な不安定状態を起こしながら、ジョイント内に浸透し始める。AE 発生は、局所的な不安定状態に強く依存するため、大きな AE 活動がこの時点で発生する。しかしながら、ジョイント内の圧力分布が安定状態に移行するにつれ、AE 活動は低下する。定性的にはあるが、大きな AE 活動は、このようにセメントミルクの不均一な浸透により生じた局所的な不安定状態に起因したものであると推察される。

これまでに行われた各種構造物の AE 計測結果に

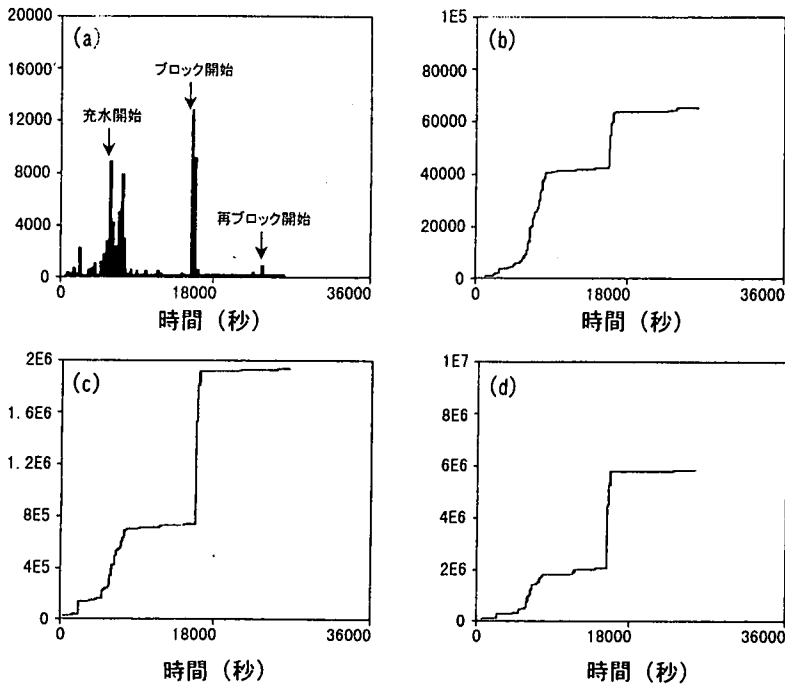


図-5 グ라우ティング中に検出された AE 活動度 (ヒット計数率(a), ヒット数(b), カウント数(c), エネルギー(d)) の履歴

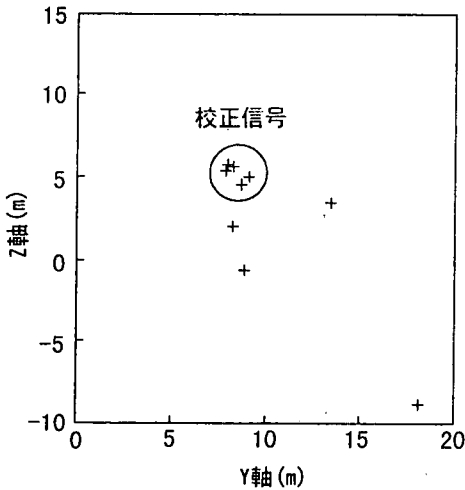


図-6 ジョイント面上($X=0$)における AE 発生源の位置標定

より、構造物が危険な状態にある場合、荷重(圧力)保持中においても大きな振幅値とエネルギーを持つ AE 信号が多く発生することが示されている。本計測中において、こうした現象は全く観察されな

かった。したがって、グラウティング時に、新たなひび割れの発生や進展、また提体の損傷などは起こらず、構造物は安全な状態にあったと結論される。

b) 位置標定

本計測で、モーメントテンソル解析が適用可能な波形セットを得ることはできなかった。しかしながら、4 個の有意な AE 波形を用い、いくつかの AE イベント(波形セット)に対しては、ジョイント面上($X=0$)の平面位置標定が可能であった。その結果が図-6に与えられている。ここで、円で囲まれたジョイント面中央付近の AE 発生集中部は、注入パイプをハンマー打撃することで与えた校正 AE 信号に起因している。グラウティング時に検出された実際の AE 信号は、ジョイント面全体にわたり、広く分布している。

4. 考察

AE 法は、金属製、あるいは FRP 製構造物の健全性診断法として広く適用され、ASTM⁽¹³⁾あるいは ASME^{(14)・(15)}により、試験法が規格化されている。実構造物に対する試験において、これらの規格に基づき、AE 発生源の等級分類に基づく評価基準が規

定され、自動的な評価判定による構造物の健全性診断が行われている。コンクリート構造物は、金属製あるいは FRP 製構造物と比べ、性状、材料とも全く異なるが、既に広く適用されている後者の試験法、あるいは評価法に関する経験を、コンクリート構造物の試験を行う際に参照するのは、合理的なことと考えられる。

AE 発生源は、通常その活動度の状況をもとに等級分類が行われる。ここで活動度は、ヒット数、カウント数、あるいはエネルギーのデータを用いて判断される。たとえば、対象となる AE 発生源は、そのヒット数、カウント数、あるいはエネルギーが、荷重保持時、あるいは荷重増加時に、連続的に増大する場合に活動度が大きいと判定される。さらに AE 発生源は、その活動度の変化率が荷重の増加とともに連続的に上昇する場合、あるいは、荷重が一定の際には時間経過とともに連続的に上昇の場合に、極めて危険な状態にあると判定される。

こうした AE 活動度に加え、AE 発生源を特徴づけるもう一つの重要な因子は、AE 発生源位置標定結果から評価される AE 発生源領域の大きさである。もし構造物が極めて危険な状態にある場合、非常に小さな領域に AE 発生源の集中域が観察される。多くの場合、成長するひび割れが危険な欠陥であると考えられ、集中度の大きな AE 発生源となる。

これまでに行われた破壊試験^{9)~11)}により、AE 活動の連続的な上昇や AE 発生源の集中は、各種コンクリート供試体や部材においても、破壊が進行し危険度が上昇するとともに観察される一般的な現象であることが示されている。本計測においては、こうした AE 活動度の連続的な上昇や、AE 発生源の集中域は全く観察されなかった。したがって、二次クーリング時およびグラウティング時に、ひび割れの発生や進展などは起こらず、ダムは安全な状態にあったと結論される。

5. まとめ

建設中のアーチダムにおいて、二次クーリング時およびグラウティング時に AE 法を適用し、検出した AE 信号のパラメータ解析、およびモーメントテンソル解析を行い、以下の結果を得た。

- (1) 低周波 AE センサー(共振周波数 15kHz)を用いることにより、最大センサー間距離が約 18m を超える広い監視領域に対して、有意な AE

信号を検出可能であることが示された。

- (2) AE 発生源位置標定精度に関する校正試験により、擬似 AE 信号の入力位置と、実測結果から計算された位置の間には、ある程度の誤差が存在することが示された。しかしながら、実際の AE 計測時には、誤差を与える要因は減少するため、位置標定精度は向上すると推察された。
- (3) 二次クーリング時に行われたパラメータ解析結果より、AE ヒット数、およびカウント数は時間経過とともに、ほぼ直線的に増加することが示された。したがって、この場合の AE 発生源は、機械的あるいは環境雑音によるものであると推察された。一方、モーメントテンソル解析によりコンクリートブロック中には AE 発生集中部は全く存在せず、それゆえ二次クーリング時にひび割れの発生や進展は起こらず、ダムは安全な状態にあったと結論された。
- (4) グラウティング時において、隣接するジョイント部に充水を開始した時点、ブロッキングの開始時、また再ブロッキング開始時に、大きな AE 活動度が観察された。これらの AE は、セメントミルクのジョイント内への不均一な浸透過程で生じた、局所的不安定状態で発生したものと推察された。
- (5) 本計測において、危険な兆候を示す AE 活動の急上昇、あるいは、AE 発生源の集中する領域は観察されなかった。したがって、ダムは二次クーリング時、およびグラウティング時に安全な状態にあったと考えられる。

参考文献

- 1) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版(株)、1988。
- 2) 湯山茂徳：最近の AE 法によるコンクリート構造物検査、非破壊検査、Vol. 44, No. 1, pp. 8-14, 1995。
- 3) 大津政康：アコースティック・エミッションの波形解析理論とモーメントテンソル解に関する考察、材料、Vol. 36, No. 408, pp. 1025-1031, 1987。
- 4) Ohtsu, M., Okamoto, T. and Yuyama, S. : Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 2, Mar.-Apr., pp. 87-95, 1998。
- 5) 重石光弘、大津政康：コンクリート構造物への AE 逆解析の適用、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11, No. 1, pp. 311-316, 1989。

- 6) 湯山茂徳, 岡本享久, 重石光弘, 大津政康: モーメント・テンソル解析適用による鉄筋コンクリート供試体中に生ずるひび割れ進展過程の定量的評価と可視化, 非破壊検査, Vol. 43, No. 8, pp. 514-522, 1994.
- 7) Yuyama, S., Okamoto, T., Shigeishi, M. and Ohtsu, M. : Acoustic emission generated in corners of reinforced concrete rigid frame under cyclic loading, *Materials Evaluation*, Vol. 53, No. 3, Mar., pp. 409-412, 1995.
- 8) 村上祐治, 堤知明, 松島学, 湯山茂徳: 鉄筋腐食により劣化した RC はりの AE モーメントテンソル解析, 第 10 回 AE 総合コンファレンス論文集 (日本非破壊検査協会), pp. 171-176, 1995 年 11 月 9 日, 10 日, 高知.
- 9) Uchida, M., Shibata, T., Mori, D., Okamoto, T., Ohtsu, M. and Kishi, T. : Structural integrity evaluation of concrete members by AE method, *Progress in AE VIII (JSNDI)*, pp. 82-87, 1996.
- 10) Shiotani, T., Sakaino, N., Shigeishi, M., Ohtsu, M., Asai, Y. and Hayashi, T. : AE characteristics of full-scale concrete-piles under bending and shear load, *Proc. 6th Intern. Symp. AE from Compos. Mat.*, pp. 163-172, June 1-4, 1998, San Antonio, Texas, USA.
- 11) 村上祐治, 清水保, 神山英幸, 松島学, 湯山茂徳: 送電用鉄塔基礎の定着引抜き実験に関する変形挙動と AE 特性 (その II, モーメント・テンソル解析), 第 9 回 AE 総合コンファレンス論文集 (日本非破壊検査協会), pp. 143-150, 1993 年 11 月 11 日, 12 日, 沖縄.
- 12) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久: AE モーメント・テンソル解析のための SIGMA コードの開発, 非破壊検査, Vol. 42, No. 10, pp. 570-575, 1993.
- 13) Acoustic emission monitoring of structures during controlled stimulation, *ASTM: E569-82, Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03. 03.
- 14) Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing, *Article 12, Subsection A, Section V, Boiler and Pressure Vessel Code (December 1988 Addendum and later editions)*, ASME.
- 15) Acoustic emission examination of fiber-reinforced plastic vessels, *Article 11, Subsection A, Section V, Boiler and Pressure Vessel Code (1983 and later editions)*, ASME.

(1999. 1. 8 受付)

SAFETY SURVEILLANCE OF AN ARCH DAM UNDER CONSTRUCTION DURING SECONDARY COOLING AND GROUTING BY ACOUSTIC EMISSION

Osamu MINEMURA, Noboru SAKATA, Shigenori YUYAMA, Takahisa OKAMOTO and Kyuichi MARUYAMA

Acoustic Emission (AE) was applied in order to ensure the safety of an arch dam under construction. AE was monitored during secondary cooling and grouting between dam blocks. Quantitative AE waveform analysis based on the moment tensor analysis was performed as well as conventional AE parameter measurement. Low frequency AE sensors (15kHz resonant) were employed to detect AE signals generated in the dam concrete. Twelve sensors were installed at the dam surface and four of them were mounted on the floor of an inspection gallery inside the dam blocks. Neither critical AE activity nor intense AE cluster was found during the AE monitoring. It was concluded that the dam was safe during the secondary cooling and the grouting.