

(109) 原位置花崗岩加熱時の A E 測定

(財)電力中央研究所 ○(E)石田 毅・(F)北野晃一
清水建設(株) (E)木下直人・(E)若林成樹

ACOUSTIC EMISSION MONITORING DURING IN-SITU HEATER TEST OF GRANITE

Tsuyoshi ISHIDA and Kōichi KITANO, Central Research Institute of Electric Power Industry
Naoto KINOSHITA and Naruki WAKABAYASHI, Shimizu Corporation

Abstract

AE(Acoustic Emission) monitoring is a good method to detect rock fracture around an underground chamber. The authors made a new equipment to monitor AE activity in-situ accurately and efficiently. In order to examine its applicability, they carried out a small scale in-situ experiment in an old quarry of Inada granite.

An electric heater was inserted into the 100mm dia bored hole, and the temperature on the heater was increased to 800°C. AE was monitored for 60 hours with the 12 sensors buried in 4 holes bored 1m distant from the heater, and 636 AE hypocenters were located. At the first stage(the lower rock temperature), AE hypocenters clustered in pegmatite intruded into granite, which has the larger particles than the surrounding normal granite. At the second stage, AE started to occur also in normal granite, and their hypocenters have a tendency to cluster in pre-existing joints.

Because this experiment demonstrated that microcrack occurrence can be detected with the new AE monitoring equipment, the authors will monitor AE activity using it in rock around underground chambers and contribute to safe construction of them.

1. 緒言

筆者らは、地下空洞掘削時の周辺岩盤の安定性を評価・監視する手法として、A E(Acoustic Emission)測定に注目し、この測定手法を開発するため、いくつかの実験的研究を行ってきた^{1) 2)}。このたび、新たな原位置A E測定装置の開発を行い、その適用性を検討するため、稲田花崗岩の採石場の跡地で小規模な原位置加熱実験を行い、加熱時に発生するA Eの測定を行った。その結果、A Eの震源分布の経時変化が原位置の岩盤条件に対応する興味ある結果を得たので報告する。

2. 実験方法

(1) 実験現場と実験方法の概要

実験箇所は、図1に示すように小さい台地の上にあり、花崗岩角れきと土からなる平均40cm程度の厚さの表土に覆われている。実験箇所から10m程度離れた4~5m低い位置に小さい沢があり、沢沿いの露頭では概ね堅硬な花崗岩が観察された。実験箇所には、図1に示すように、岩盤を加熱するためのヒーター孔(H孔)として、直径100mm、深さ5.65mボーリング孔1本を掘削し、このヒーター孔から約1m離れた周囲に、A Eセンサー埋設孔(A E孔)として直径66mm、深さ約6.8mのボーリング孔4本を掘削した。図2にヒーターとA Eセンサーの設置位置を示す。岩盤の加熱には、U字管型パイプヒーター6本をステンレス製の保護管で覆った、直径90mm、長さ2.0m、最大出力20kWの電気ヒーターを用いた。実験時のヒーター孔の水位は深度5.45mにあり、加熱区間はこの水位より上部でかつ比較的地質的変状の少ない、深度3.3~5.3mの区間に選定した。A Eセンサーは、加熱区間を3次元的に取り囲むよう、4本のA E孔の深度2.4~5.8mの範囲に計12個配置した。

(2) A Eの測定方法

A Eセンサーは、厚み方向に分極した直径30mm、厚さ10mm、共振周波数67kHzの圧電素子を、直径40mmの真鍮製容器の底面に貼りつけたものである¹⁾。A Eセンサーとプリアンプは、所定の位置に穴をあけた角材に固定してA E孔内に挿入し、セメントミルクを注入して埋設設置した。

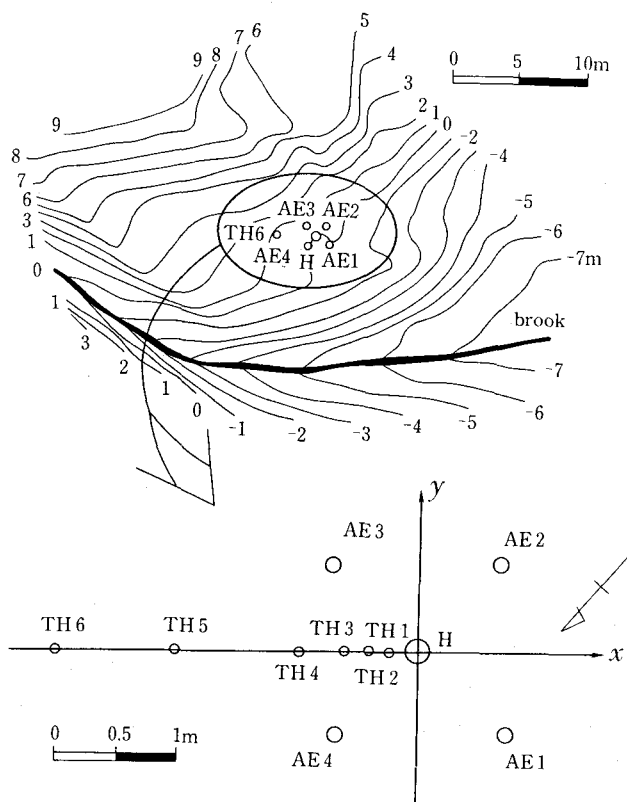


図1. 実験現場の地形とボーリング孔の配置。

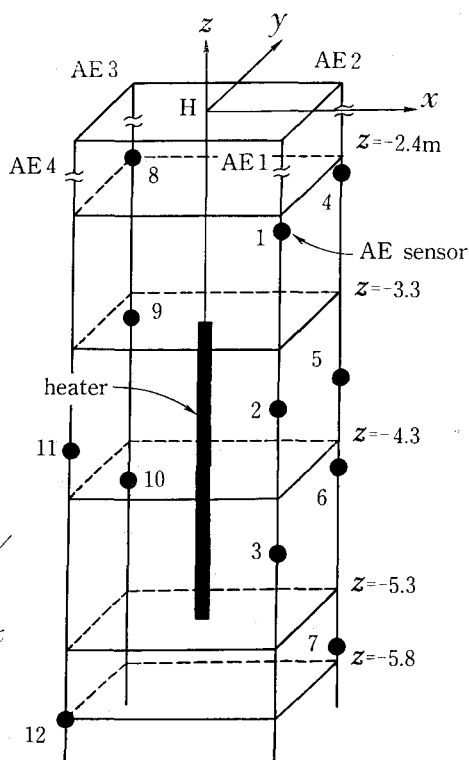


図2. AEセンサーとヒーターの設置位置。

AE測定には、筆者らが新たに開発した、図3に示すシグナルコンディショナー、AD変換機、ディスクユニットから成る12チャンネル用の測定システム(応用地質銻製)を用いた。今回の実験では、増幅率をプリアンプ40dB、シグナルコンディショナー40dB、合計80dBとし、また

AD変換機のサンプリングタイムは1 μ sとした。AD変換機のトリガーには、AE1孔中央部のセンサーNo. 2で受振した信号を用い、トリガーがかかる毎にAD変換機のディスプレイ上で12チャンネルの全波形を肉眼で観察し、5チャンネル以上で初動の立ち上がりを読み取れる良好な波形を含むAEイベントデータのみを、フロッピーディスクに収録した。データのGP-IB転送に時間を要するため、データの収録のたびに20秒程度の欠測時間を生じた。なお、今回の実験におけるAEの測定周波数帯域は、5kHz~100kHz程度である。

3. 実験結果

(1) AE発生頻度と加熱パターン

震源が決定されたAEのイベント数の経時変化を、加熱区間中央の深度4.3mにおけるヒーター温度及びTH1~6孔の深度4.3mで測定した岩盤温度の経時変化とともに図4に示す。この図において、ヒーター温度(測定点H-3)は、岩盤温度(測定点TH1-7、TH2-7など)の5倍のスケールで示しており、横軸は実験開始後の経過時間を示す。また、下部のローマ数字は次節で述べるAEの震源分布の時間区分を示す。

ヒーターの加熱パターンは図4に細い実線で示したようであり、深度4.3mのヒーター温度がこのパターンに従うようヒーターの温度制御を行った。すなわち、最初の9時間で180℃まで温度を上昇させたが、A

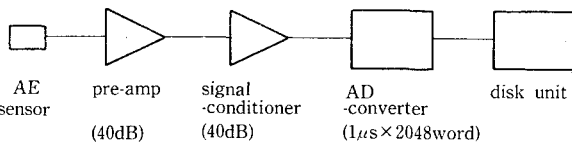


図3. AE測定系統図。

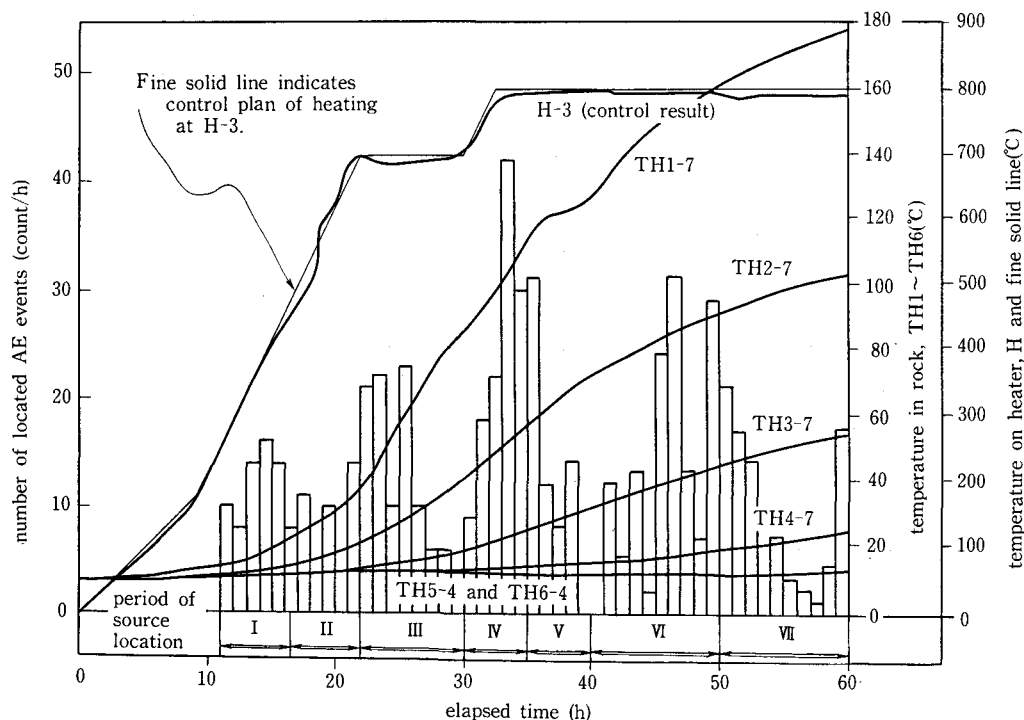


図4. 決定されたAE震源数、加熱区間中央部(深度4.3m)のヒーター(H-3)及び岩盤内温度(TH1-7, TH2-7など)の経時変化。

Eの発生が見られないため昇温速度を増大し、その後の13時間で当初計画していた700℃に到達させ、8時間保持した。しかしAEの発生があまり活発でないため、ヒーターの耐熱限界である800℃までさらに温度を上昇させることにし、2時間30分かけて700℃から800℃に温度を上げその温度で27時間30分保持した。

AEの発生は、ヒーター温度が約250℃に達した加熱開始11時間後から始まり、最大の発生頻度はヒーター温度が800℃に到達した直後の33時間～34時間後に記録した。その後、AEの発生頻度は増減を繰り返しながら、全体としては徐々に低下する傾向がみられた。

(2) AEの震源分布の経時変化

AEの震源分布の水平断面(x-y平面)及び2つの鉛直断面(x-z平面とy-z平面)への投影図を、図4に示した7つの期に区分して図5に示す。図の右端には、ヒーター孔と4本のAE孔のボーリングコア及びヒーター孔孔内のボアホールテレビ観察の結果から求めた地質断面図を示す。また各図の下部の数字は、各期の実験開始後の経過時間と決定された震源数を示す。図5のⅢ期以降のx-z断面の左側に示した曲線は、実測値に基づく各期の末、すなわち、実験開始30、35、40、50、60時間後の岩盤中の60℃の等温線である。60℃という温度は、花崗岩のAE発生開始温度の目安と考えられる。AEの震源分布の経時変化と岩盤温度との関係については、別の機会に詳しく報告する。

4. 考察

今回の実験でのAEの発生は、実験開始11時間後から始まり、AE発生初期の5時間半(Ⅰ期)の震源分布は、加熱区間下部の深度4.80m付近を中心とするヒーター孔周辺に集中する傾向を示した。またその後の5時間あまり(Ⅱ期)の震源分布は加熱区間上端の深度3.20m付近を中心とするヒーター孔周辺に集中する傾向を示した。図5で、右端の地質断面図と比較すると、Ⅰ期の震源分布は深度4.8m付近のペグマタイト脈⑥の位置と一致し、Ⅱ期の震源分布は深度3.2m付近のペグマタイト脈③の位置のみならず走行・傾斜まで一致していることがわかる。

さて、花崗岩ではその主要構成鉱物である石英と長石に線膨張係数の相違があり、花崗岩を加熱すると、これらの結晶粒子の境界に割れ目が多数発生するものと思われる。写真1は、ヒーター孔掘削時に採取し

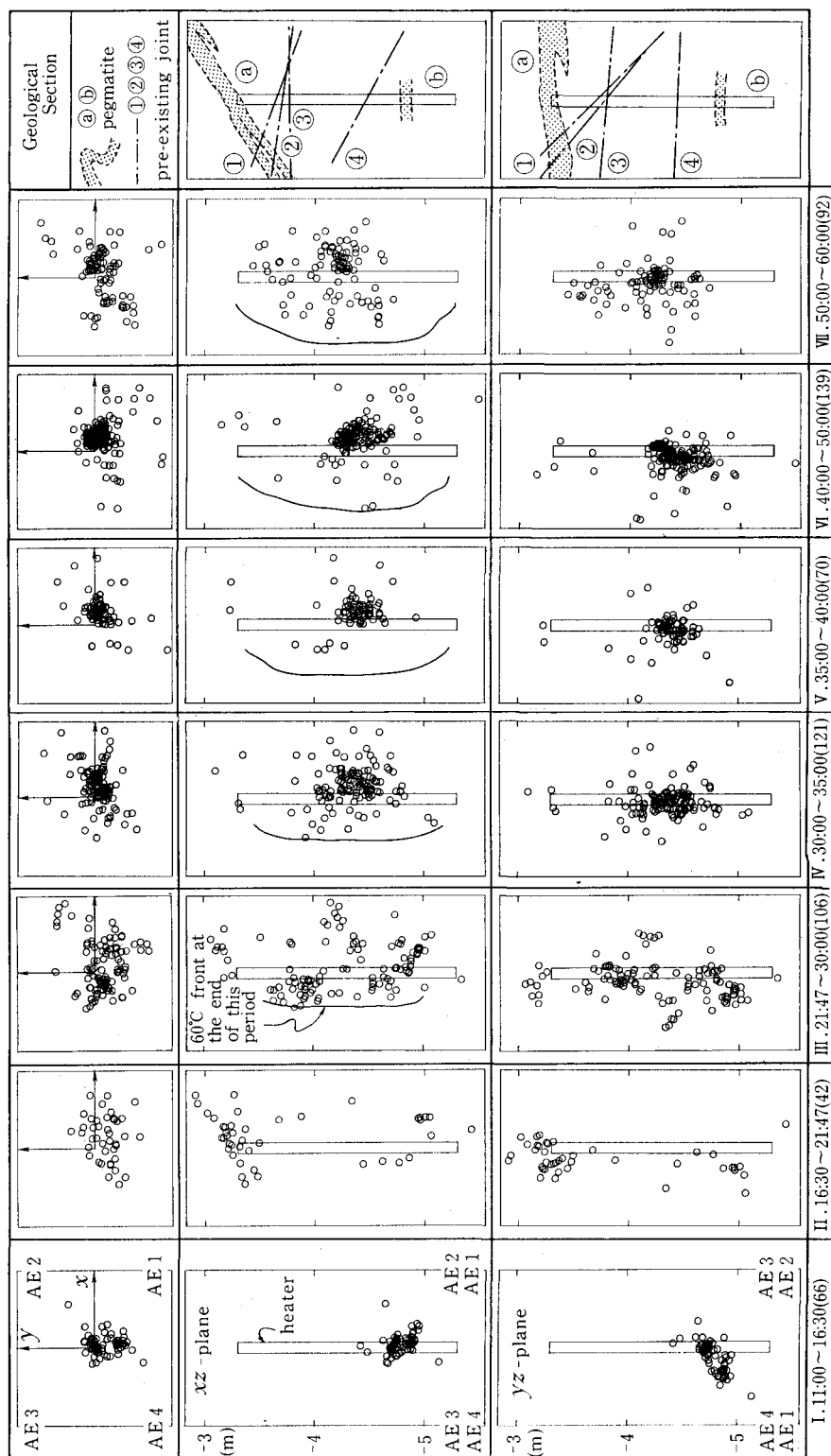


図5. 各期のAE震源分布の水平断面 (x y 平面) 及び2つの鉛直断面 (x z 平面と y z 平面) への投影図。
最下段に各期の実験開始後の時間と決定された震源数を示す。

たボーリングコアである。ペグマタイト位置に対応する深度3.2m及び4.8m付近のボーリングコアは、他の部分と異なり、白色を呈していることがわかる。ペグマタイトは、巨晶花崗岩とも呼ばれ、花崗岩とほぼ同じ鉱物組成を有するが、著しく粗粒であることに特徴がある。A Eの発生が、上述のような結晶粒子の境界における割れ目の発生によるものであれば、結晶の大きいペグマタイト部分は結晶の小さい他の部分よりも低い温度でA Eが発生すると考えられ、A E発生初期において震源がペグマタイト部分に集中したのは納得できる。

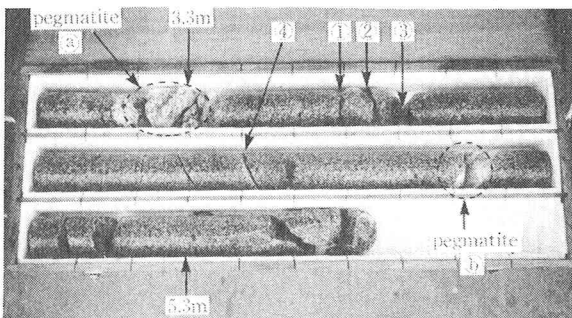


写真1. ヒーター孔深度3.0m～5.65m(孔底)のボーリングコア。

また、2箇所が存在するペグマタイトのうち、先に下方の深度4.80m付近でA Eが発生したのは、中央部に近いところの方が加熱区間端部よりも温度が高かったためと思われる。

その後、Ⅲ期には深度3.90mを中心とする深度3.55m～4.25m、Ⅳ期には4.40mを中心とする深度4.20～4.60mのヒーター孔周辺に新たな震源集中域が出現し、Ⅴ期以降はⅣ期の集中域に震源が集中する傾向が持続する。写真1のボーリングコアを見ると、深度3.6～3.7m付近及び4.0m付近に計4本のほぼ水平な既存の割れ目が、深度4.3mと4.4m付近には傾斜30°程度の既存の割れ目が各1本見られる。前者のほぼ水平な4本の割れ目の位置はⅢ期の震源集中域にほぼ対応し、後者の傾斜した2本の既存割れ目の位置はⅣ期以降の震源集中域にほぼ対応している。また、図5の右端に示した地質断面図をみると、Ⅲ期以降の震源分布は、①、②、③、④の節理の方向に概ね一致していることがわかる。従って、Ⅲ期以降の震源集中域の発生には、これらの既存割れ目の存在が密接な関係を有していると考えられる。この原因としては、熱応力の解放が、A Eの発生を伴うずれやすべりの形で、摩擦抵抗力が相対的に小さい既存の割れ目で集中的に生じた可能性がある。またヒーター孔周辺の岩盤中の水分が加熱によって圧力をもった蒸気にかわり、この蒸気が割れ目に侵入して、A Eの発生をさらに助長したのではないかと考えられる。

5. 結論

今回の実験の結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 岩盤温度の上昇にともない、最初A Eは花崗岩に貫入したペグマタイト部分で発生した。ペグマタイトは、巨晶花崗岩とも呼ばれ、花崗岩とほぼ同じ鉱物組成を有するが、著しく粗粒であることに特徴がある。花崗岩の場合、構成鉱物粒子間に線膨張係数の相違があり、温度上昇にともない結晶の境界に割れ目が生じてA Eが発生するものと思われる。このような機構を考えれば、結晶粒径が通常の花崗岩より大きなペグマタイト部分で最初にA Eが発生したのは合理的と思われる。

(2) 岩盤温度がさらに上昇すると、A Eは通常の花崗岩部分で発生し始めた。また、通常の花崗岩部分においては、既存の割れ目のある部分にA Eの震源が集中する傾向がみられた。この原因としては、熱応力の解放が、A Eの発生を伴うずれやすべりの形で、摩擦抵抗力が相対的に小さい既存の割れ目で集中的に生じた可能性がある。またヒーター孔周辺の岩盤中の水分が加熱によって圧力をもった蒸気にかわり、この蒸気が割れ目に侵入して、A Eの発生をさらに助長したのではないかと考えられる。

(3) A E震源の時間・空間的分布は原位置の岩盤条件と一致し、当所で開発したA E測定装置は十分に実用に供し得るものであることを確認した。この結果に基づき、A E測定手法をすでに実際の地下空洞周辺岩盤の安定性評価に適用しており、その成果については次の機会に報告したいと考えている。

謝辞：今回の実験に際しては、(財)電力中央研究所の金川忠主任研究員と佐々木俊二主任研究員に貴重な御助言を賜った。また、花崗岩の微小亀裂の考え方については、岐阜大学教養部の金折裕司助教授から多くの御示唆を賜った。ここに記して深謝の意を表するものである。

参考文献：1)石田毅・金川忠・佐々木俊二・浦沢義彦：A Eによる岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験，土木学会論文集，第376号／Ⅲ-6，pp.141-149，1986。 2)石田毅・北野晃一・木下直人・若林成樹：A Eと弾性波速度測定による花崗岩ブロックの熱破壊挙動の観測，土木学会論文集（投稿中）