

(14) A E と弾性波速度測定による花こう岩ブロックの熱破壊挙動の観測

(財)電力中央研究所 ○(正)石田 毅 ・ 北野 晃一
清水建設(株) (正)木下 直人・(正)若林 成樹

1. 緒言

近年、地熱発電や低温液化燃料の岩盤内貯蔵などの新たなエネルギー関連技術の発展に伴い、高温あるいは低温下における岩盤挙動の解明が必要とされるようになってきている。これらに関しては、すでいくつかの基礎的研究が進められているが、岩石ブロックの一部を周辺温度より高温に加熱する実験は筆者らの知る限りでは報告されていない。また、熱応力による岩盤の破壊のモニタリング手法の開発も今後の大きな研究課題である。そこで筆者らは、花こう岩のブロックを用い、その中央にヒーターを設置して加熱中の岩石内部の温度分布を測定するとともに、A E と弾性波速度の測定を行って供試体の破壊挙動を観測した。その結果、幾つかの興味ある知見が得られたので報告する。

2. 実験の方法

(1) 供試体と温度測定方法

実験に用いた供試体は、図1に示すように一辺300mmの立方体の中心にヒーターを挿入するためのφ28mmの円孔を上下方向に穿った稲田花こう岩である。供試体整形後約1週間室内で乾燥した後、円孔に電気加熱方式のカートリッジヒーター(容量2kW)を挿入し、ヒーター表面の温度が1時間に200℃上昇するように制御し、2時間30分かけて500℃まで加熱し、そのまま30分間保持した。ヒーターは直径22mm、長さ300mmであり、ヒーターと孔壁との隙間には標準砂を充填し、供試体の上下面は断熱材で覆った。ヒーターの温度はヒーター表面の中央部(MO)とその上下100mmの点(UO, DO)で熱電対を用いて測定した。一方供試体内部の温度の測定は、図1に示すように、一側面の中央とその上下100mmの位置からφ8mmの細孔を中心に向けて平行に3本穿孔し、各孔に10本ずつ熱電対を挿入し、孔内に供試体と温度伝導率がほぼ等しいセラミック系の充填剤を充填して測定した。各孔内の熱電対の位置(温度測定点)は、図1に拡大図を示したように、最深部No. 1をヒーター孔の壁面から6mmの位置に設置し、No. 1~6は10mm間隔で、No. 6~9は20mm間隔で設置しNo. 10のみは孔口近傍の供試体側面とした。各測定点の温度は1分毎に測定し、マイクロコンピュータを介してフロッピーディスクに収録した。なお、以下では上中下の3孔をそれぞれU, M, L孔と呼び、孔内の測定点の位置No. 1~10と組み合わせて、温度測定点をU1, M3等と呼ぶことにする。

(2) 岩石の破壊挙動の測定方法

加熱による岩石の破壊挙動の測定は、A E、弾性波速度、ひずみの3項目で行った。A Eセンサー、弾性波速度測定用の発・受振子、ひずみゲージの配置を図2の供試体表面の展開図に示す。

A Eセンサーには、P Z T素子を真ちゅう製容器の底面に貼りつけたものを使用し、プリアンプとメイアンプで各40dB、合計80dB増幅した後、雑音除去のため5kHz~100kHzのバンドパスフィルターを介してデータレコーダに収録した。この測定方法は既に報告した原位置測定に用いた方法[1]と同一であり、今回のような小規模な供試体での実験で震源決定等の詳細な解析を行うには測定周波数帯域が低すぎる。そこでA E測定は2チャンネルにとどめ、発生頻度の解析のみを行うこととした。

弾性波速度は、図2のT1, T2を発振子に、R1, R2を受振子として、T1-R1間とT2-R2間の2つのパスについて約30分毎(A E測定用データレコーダのテープ交換時)に測定した。発・受振子の仕様はA Eセンサーと同一である。

ひずみは、ゲージ長30mmの単軸ゲージ8枚を図2に示す位置に接着し、温度と同様1分毎に測定した。

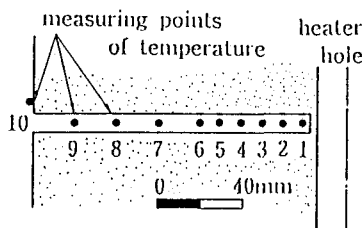
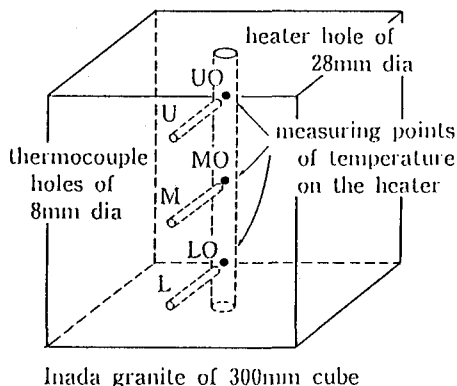


図1. 供試体形状と温度測定点。下図は熱電対埋設孔内の温度測定点の配置を示す。

AEセンサー、弾性波速度測定用の発・受振子、ひずみゲージはいずれもアロンアルファで供試体表面に緊く接着し、供試体上下面は断熱材で覆った。供試体側面は温度が一定となるよう、AE及び弾性波速度測定の雑音源とならないことを確認したうえで、ビニル製ホースを密に巻きつけ試験中ホース内に水道水を流して冷却した。

3. 実験結果と考察

(1) 温度測定結果

図3は、M孔で測定した供試体内部の温度変化をヒーター表面の温度変化とともに示したものである。一点鎖線で示したヒーター表面温度(UO, MO, LO)は、実線で示した供試体内部温度(M1~M10)の2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である。また、供試体内部の温度変化がM孔での測定値と一致するようにヒーター孔壁面の温度(W: 2点鎖線)を時間の2次関数として定め、これを境界条件として有限差分法による非定常熱伝導解析を行ったが、その結果を図3に破線で示した。なお、供試体内部の温度分布は、上部U、中央部M、下部Dの3孔でほとんど違いはなく、その差は最大でも10℃程度にすぎなかった。

まず、実験が終了した180分のヒーター表面温度MOとヒーター孔壁面より6mm内部の測定点M1の温度を比較すると、ヒーターと孔壁との3mm程度の間隙に充填された砂と孔壁から6mmの花こう岩を隔てるだけで、約270℃もの温度差が生じていることがわかる。次に、供試体内部のM1~M10の温度変化を見ると、当然のことながら、常にヒーターに近い測定点から順に高温を示していることがわかる。また、M1~M4では100℃で一旦温度上昇が止まり、その後再び温度上昇が始まる特徴的傾向が見られる。これは供試体中にわずかに残留していた水分の潜熱の影響と思われる。供試体はヒーター孔の穿孔等の整形後約1週間室内で乾燥して実験に供したが、水分が僅かに残留していたものと推測される。

図3の左上にはM1~M4の100℃付近での測定結果(実線)を拡大し、前述の有限差分法による非定常熱伝導解析結果(破線)とともに示した。両者を比較して詳しく見ると、M1の温度上昇が止まる、すなわちM1で水分の沸騰が始まって5分程度経過すると、矢印で示したようにM2で急激な温度上昇が生じる傾向がみられる。また、同様の温度上昇はやや遅れてM3, M4でも生じていることがわかる。このような急激な温度上昇は通常の岩石内の熱伝導だけでは説明できず、図中の実線と破線の差に相当する部分は、発生した高温の蒸気による熱の移動によっ

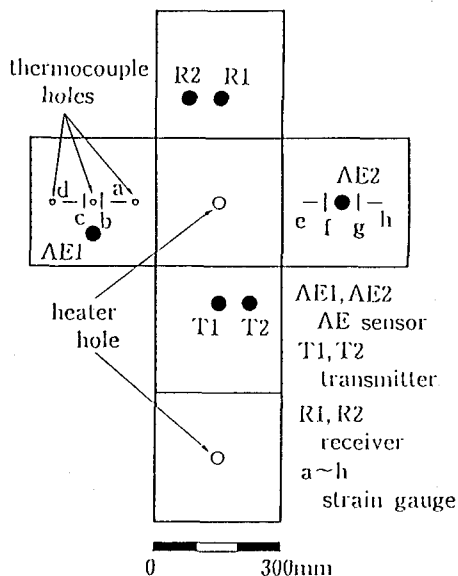


図2. AEセンサー、弾性波速度測定用の発振子、受振子、ひずみゲージの配置を示す展開図。弾性波速度(P波)は、T1~R1、T2~R2の2つのパスで測定した。

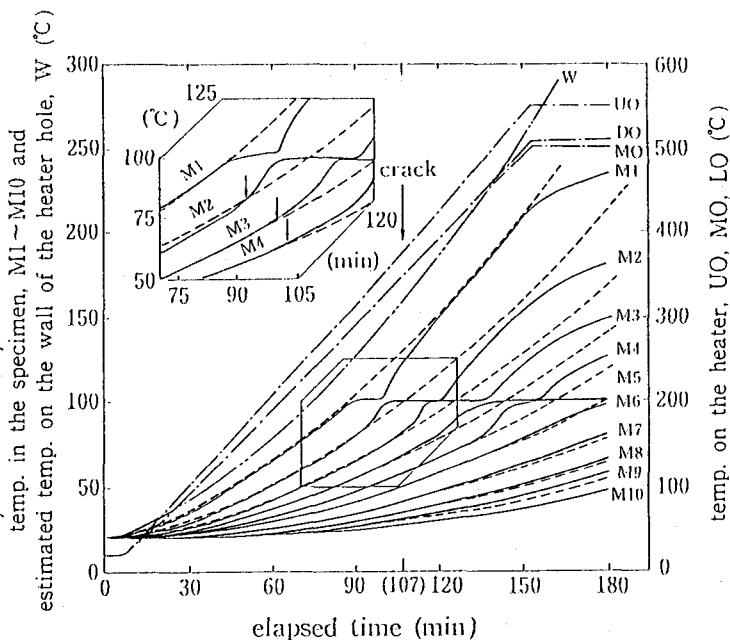


図3. 中央部熱電対孔(M)で測定した供試体内部温度(実線: M1~M10)及びヒーター表面温度(一点鎖線: UO, MO, LO)の経時変化。また、W(2点鎖線)は熱伝導解析の境界条件として用いたヒーター孔孔壁面の温度を、破線は解析結果を示す。一点鎖線(UO, MO, LO)に対するスケールのみは他の2倍になっている。左上は管内の拡大図で、矢印は急激な温度上昇の開始点を示す。

て生じたものと思われ興味がもたれる。

(2) 供試体の破壊状態

AE、弾性波速度、ひずみの測定から供試体の破壊は実験開始後107分に発生したと思われたが、実験中は供試体を断熱材と水道水を流したビニル製ホースで覆っていて表面を見ることができなかったため、発生した亀裂の観察は実験終了後に行った。その結果確認された供試体表面の亀裂を、図4の展開図に示す。また、図4に破線で示した位置で供試体の上端面から下端面まで貫くコア6本(コア径50mmが5本、80mmが1本)を採取して、供試体内部に発生した亀裂の観察を行った。その結果、供試体の上下の端面で観察された最小抵抗線方向の4本の亀裂のうち3本は供試体上下端からそれぞれ30~70mm程度で止まっており、供試体中央部にまで進展している亀裂は熱電対孔のある側面(以下ではこの側面を側面Ⅰ、これに向かい合う反対側面を側面Ⅱとよぶことにする)の方向に生じた亀裂だけであることがわかった。またこの亀裂は側面Ⅰからヒーター孔壁面まで連続して生じ、側面Ⅰでは熱電対孔とはほぼ一致しひずみゲージを切断して進展しているが、供試体内部では熱電対孔の位置とややずれて進展していることが確認された。

(3) AE発生頻度

実験中の10分ごとのAE発生頻度をヒーター表面のM0点、ヒーター孔壁面から6mm及び16mm離れた供試体内部のM1、M2点、供試体側面のM10点の温度変化とともに図5に示す。同図に示したAE発生頻度は、図2の2つのセンサーで得られた頻度の平均値であり、またAE発生開始点が明らかとなるよう発生頻度は対数で示している。

さて、AEの発生開始は加熱開始後40~50分頃であるが、45分におけるヒーター表面のM0点の温度は約144℃、ヒーター孔壁面から6mm離れた供試体内部のM1点では約48℃である。図3に2点鎖線で示したヒーター孔の壁面温度Wは、供試体内部の温度分布がM孔での測定値に一致するよう定めた非定常熱伝導解析の境界条件であるから、ヒーター孔壁面の推定温度としてみることができる。これをみると、45分におけるヒーター孔壁面の温度は約60℃と推定される。なお実験に用いたのと同じ岩石から直径30mm、長さ30mmのコアを採取し、これを炉に入れ、0.5℃/minのゆっくりした昇温速度で様に加熱しAEの発生を観測したところ、AEの発生開始温度は68℃であった。このAEの発生開始温度は、Johnsonら[2]やYong and Wang[3]のWesterly花こう岩に対する実験結果とはほぼ一致している。彼らは、昇温速度が遅く供試体中に温度勾配、すなわち熱応力が生じない条件下でもAEの発生がみられることから、AEの発生は造岩鉱物の熱膨張率の違いにより、鉱物粒子間に微小な亀裂が生じるためであるとしている。

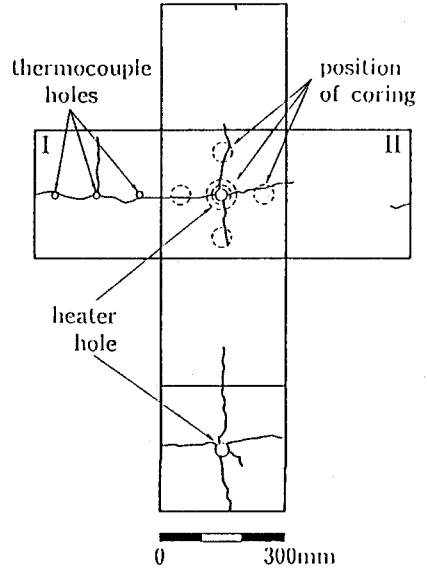


図4. 実験終了後の観察により確認された供試体表面の亀裂。上端面に示した破線は、供試体内部の亀裂を観察するためのボーリングコア採取位置を示す。

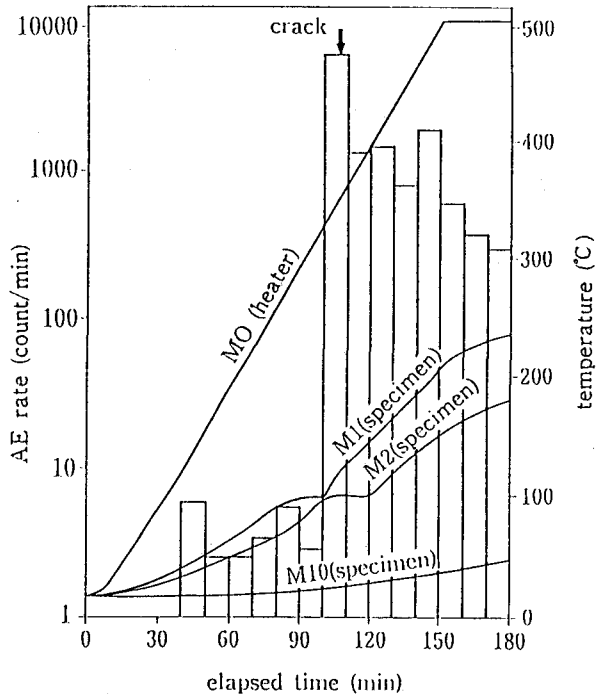


図5. 10分間毎のAE発生頻度と、ヒーター表面及び供試体内部温度の経時変化。

今回の実験におけるAEの発生開始も、ヒーター孔壁面近傍の岩石温度が約60℃に達し、この部分の鉱物粒子間に微小な亀裂が生じ始めたためと推測される。

AEの発生は、実験開始後100分を過ぎると、突然それまでの1000倍以上の極めて高い頻度で発生するようになった。ひずみゲージの測定では、106分から107分の間に不連続な顕著な変化が生じており、供試体側面の亀裂がこの1分間に生じたのは間違いない。従って、100～110分間のAEの急増は前述の供試体側面からヒーター孔壁面にかけての亀裂の発生に関連して生じたものと考えられる。なお図5をみると110分以降にもAEの発生は活発であるが、これらのAEは恐らく新たな亀裂の発生によるものではなく、すでに発生した亀裂の摩擦等によるものと思われる。

(4) 弾性波速度の変化

今回の実験では、図6に示すT1-R1、T2-R2の2本のバスで、約30分毎にP波速度を測定したが、P波速度は実験開始後増大し、亀裂の発生後急速に低下する傾向が明らかである。このような加熱に伴うP波速度の増大は何に起因するのであろうか。ヒーター孔周辺では温度上昇に伴い、岩石のヤング率の変化や水分の蒸発による乾燥が予想されるが、一様に加熱した稲田花こう岩の円柱形試料に対する1軸圧縮試験[4]では、温度の上昇に伴いヤング率が低下することが報告されている。また、岩石の湿潤化は、マイクロクラックの空隙を水で充填するためにP波速度の増加をもたらすが、乾燥化はこの逆のプロセスであるから、P波速度の減少をもたらすことが予想される。一方、ヒーター孔周辺では加熱によって温度勾配が生じ、半径、円周方向ともに圧縮応力が生じる。圧縮応力の作用が、岩石内のマイクロクラックの閉塞をもたらしP波速度の増大をもたらすことは、広く認められている。従って、実験開始直後のP波速度の増大は、ヒーター孔周辺の圧縮応力の作用によるものと思われる。

一方、供試体の破壊にともなうP波速度の低下は、上述の加熱にともなうP波速度の増大より一層顕著である。このようにP波速度は供試体内部に発生した熱応力や破壊に対応した変化を示すことがわかる。従って弾性波速度の測定は、熱応力の作用する条件下での岩盤の安定性評価手法としても有効であるといえる。

4. 結論

今回の実験結果を整理すると次の通りである。(1) 供試体の温度上昇は、100℃で一旦止まり、その後再び上昇が始まる特徴的傾向が見られた。これは、供試体中にわずかに残留していた水分の潜熱の影響と思われる。(2) ヒーター孔に最も近い岩石中の温度測定点が100℃に達して5分程度経過すると、それに隣接する岩石中の測定点で急激な温度上昇が生じた。この現象は、通常の岩石内の熱伝導だけでは説明できず、岩石中に残留していた水分が高温の蒸気に変化し、この蒸気による熱の移動が大きな影響を与えたものと思われる。(3) AEの発生は、孔壁付近の岩石の温度が約60℃程度に上昇した頃から始まり、この温度で造岩鉱物の熱膨張率の違いにより孔壁付近の鉱物粒子間に微小な亀裂が生じ始めたためと推測される。またAEの発生は供試体の破壊時に爆発的な増加を示した。これらのことから、AE測定は熱応力による岩石の破壊に対しても有効なモニタリング手法と思われる。(4) ヒーター孔周辺を伝播するバスで測定したP波速度は、実験開始後増大し供試体の破壊発生後急速に低下した。P波速度の増大は、ヒーター孔周辺の岩石に熱膨張による圧縮応力が作用し、マイクロクラックが閉塞したため生じたと思われる。このように、弾性波速度の測定は熱応力の作用する条件下での岩盤の安定性評価手法としても有効であると思われる。

[参考文献] 1) 石田毅・他：土木学会論文集.No.376, pp.141-149 (1986), 2) Johnson, B. et al.: 19th U.S. Symp. on Rock Mech., No.1, pp.259-267 (1978), 3) Yong, C. and Wang, C.: Geophysical Research Letters, Vol.7, pp.1089-1092 (1980), 4) 酒井昇：応用地質, Vol.29, pp.1221-1227 (1987)

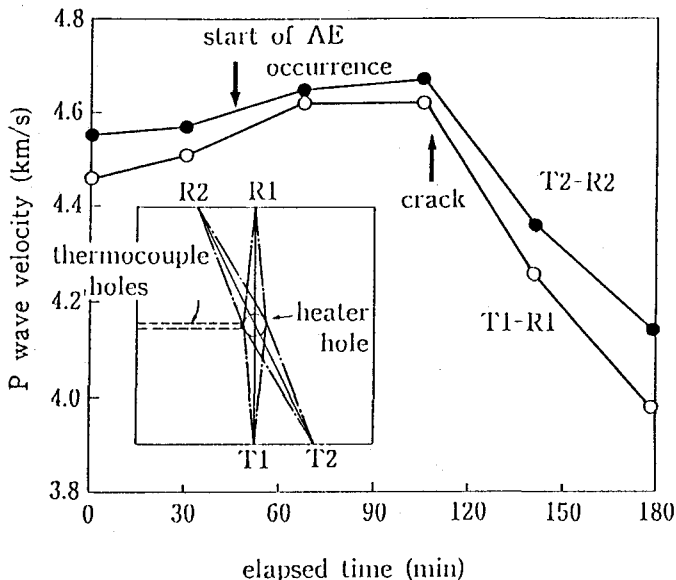


図6. T1-R1、T2-R2の2つのバスで測定したP波速度の経時変化。

(14) Acoustic Monitoring on Thermal Cracking in a Block of Granite

by Tsuyoshi ISHIDA*, Kōichi KITANO*
Naoto KINOSHITA** and
Naruki WAKABAYASHI**

* Central Research Institute
of Electric Power Industry

** Institute of Technology,
SHIMIZU Construction Co., Ltd.

An electric heater was inserted into the hole bored through in the center of a 300mm cubic block of granite, and the temperature on the heater was increased to 500 °C at the rate of 200 °C/h. An open crack was produced from a lateral surface to the center hole through the block at 107 minutes after the starts of heating. The distribution of temperature measured at 30 points in the block with thermocouples elucidated that this cracking was caused by the thermal tensile stress in the circumferential direction. Moreover, occurrences of acoustic emission and increase of P wave velocity were measured prior to the cracking, therefore, it is demonstrated that these acoustic measurements are available for monitoring thermal cracking of granite.