

グラウチングによる岩盤改良範囲と 亀裂充填状況の評価

— A E の発生状況および透過弾性波の振幅変化に 着目した方法 —

宇次原雅之^{1*}・金川忠¹・藤井真希¹・阿部義宏¹

¹日特建設株式会社 技術本部（〒104-0044 東京都中央区明石町 13-18）

*E-mail: masayuki.ujihara@nittoc.co.jp

岩盤グラウチングでは、注入材による岩盤改良効果を的確に評価することが重要なポイントとなる。そこで筆者らは、グラウチング中のアコースティック・エミッション（以下、A E）測定により、注入材が必要な範囲に到達していることを確認し、さらにグラウチング前後に行う孔間弾性波測定により、透過弾性波の振幅値の変化を指標にして岩盤亀裂が注入材によって十分に充填されていることを確認する手法を提案する。本稿では、まず手法の概要を述べ、室内試験による予備検討および原位置での確認試験の結果をもとに提案手法の適用性について論ずる。

Key words : grouting effect, acoustic emission, cross-hole seismic measurement, amplitude

1. はじめに

岩盤構造物の建設では、岩盤の強度向上や遮水性の改良を目的として、岩盤グラウチングが行われる。しかし、グラウチングは岩盤内で行われるため、直接目視により結果を確認することができない。したがって、グラウチング効果を適切に評価する手法の適用が重要となる。

ダム基礎処理のグラウチングでは、その効果の評価手法として、主にルジオンテスト（透水試験）が用いられている。ルジオンテストは、透水性の指標であるルジオン値によりグラウチング効果の評価を行うものであり、止水を主目的とするダムグラウチングの評価に適した手法であるといえる。しかし、ルジオンテストには、注入材によって改良された範囲や注入材の浸透方向に関する情報を得ることが難しいという短所がある。グラウチングによる改良範囲の推定および改良効果の評価手法として、物理探査手法の適用も試みられているが、まだ汎用的な方法とは言えない¹⁾。

このような状況を踏まえ、筆者らはA E測定と孔間弾性波測定を用いるグラウチング効果の評価手法を提案する。岩盤グラウチングにおけるA E測定は、過剰な注入圧力による岩盤破壊の発生を監視する目的で、研究・報

告がなされている²⁾が、本手法では、A E測定を、注入材が必要な位置に到達していることを確認する方法として用いる。また、孔間弾性波測定によるグラウチング効果の評価では、従来のように弾性波速度の変化だけを評価指標に用いるのではなく、孔間の岩盤内を伝播する透過弾性波の振幅値の変化を評価指標として用い、注入材が亀裂を十分に充填しているか否かの判定を行う。提案する手法は、以上の二つの測定法により、グラウチングによる岩盤改良範囲と亀裂充填状況の評価を行うものである。

2. 手法の概要

本手法は以下のような手順で実施する。

- 1) 注入孔周辺に複数のA E観測孔を設ける。
- 2) グ라우チング前に、観測孔間で孔間弾性波測定を行う。
- 3) グ라우チング中に、観測孔においてA E測定を行う。
- 4) グ라우チング後に、観測孔間で孔間弾性波測定を行う。

上記 2)と 4)のグラウチング前後の孔間弾性波測定の結果から、透過弾性波の振幅値の変化を比較して、岩盤内の亀裂充填状況を判定する。また、3)のグラウチング中の A E 測定結果から、A E が発生している位置には注入材が到達しているものと判定し、その到達範囲を求める。

以下では、室内モデル試験による予備検討および原位置での確認試験の結果をもとに、本手法の適用性について検証する。

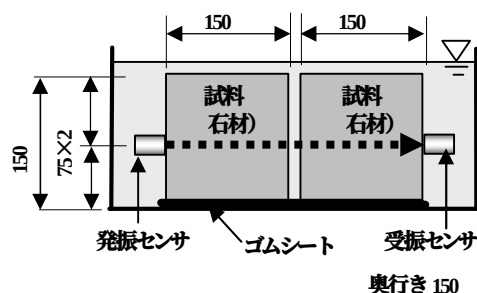


図-1 試験装置（開口亀裂モデル）の概要（単位 mm）

3. 室内モデル試験による予備検討

(1) 室内モデル試験の目的

開口した亀裂のある岩盤で孔間弾性波測定を実施する場合、地下水面よりも浅い所では、弾性波は亀裂のかみ合った部分を伝播する。亀裂面において接している面積が増えると、透過弾性波の振幅値は増加する（例えば 3）ことから、それまで中空だった部分に注入材が充填されると振幅値が大きくなることは理解しやすい。しかし、開口した亀裂が地下水面より深いところにある場合は、通常は亀裂内が水で満たされているため、弾性波は水を介しても伝播する。したがって、亀裂内の水が注入材に置き換わった場合に、透過弾性波の振幅値がどの程度変化するかを把握しておく必要がある。ここでは、水中に設けた開口亀裂モデルを用いて室内試験を行い、注入材充填前後の振幅値の変化を確認する。

(2) 試験装置と試験方法

図-1 に、試験装置（開口亀裂モデル）の概要を示す。水を満たした水槽内に 2つの試料（石材）を入れ、その間に隙間を設けて、これを開口亀裂に見立てる。試料の底面と側面には薄いゴムシートを貼りつけ、隙間に充填する注入材が隙間の外（水槽内）に漏れ出さないようにする。試験に用いた試料を表-1 に示す。試料は、含水状態の違いによって弾性波伝播特性に影響が出ないように、試験実施前に 1ヶ月以上水浸させておく。

このモデルの両端に、発振センサと受振センサを瞬間接着剤により固着させる。センサは 30kHz 共振型の A E センサとし、受振側にはプリアンプ付きのものを、発振側には同じタイプでプリアンプなしのものをを用いる。弾性波の発振は、0～350V で可変可能な高電圧パルス発振器を用いて行う。

発振された弾性波は、亀裂を含む試験試料を透過して、受振センサにより検出される。検出された信号は、プリアンプで 40dB 増幅され、デジタルオシロスコープにより 128 回のスタッキング・平均化が行われた後に記録される。記録波形から、初動振幅値と初動到達時間を読み取ることになる。

表-1 室内試験に用いる試料の種類

試験試料	特 徴	密 度 (t/m^3)	弾性波速度* (km/s)
花崗岩	中粒・硬質	2.729	4.885
安山岩	硬質・多孔質	2.074	3.750
コンクリート	市販のブロック	2.330	5.544

*弾性波速度は方向により異なるため、試験に用いた透過方向の値のみ示した。

以上の試験装置を用い、亀裂内が水で満たされた場合と、亀裂に注入材が充填された場合について、透過弾性波の測定を行う。注入材は、水／セメント比が 100%のセメントミルク（普通ポルトランドセメント）を使用し、隙間内の水を抜いた後、上部から流し込んで充填する。

(3) 室内モデル試験の結果

図-2 は、試料にコンクリートブロックを用い、開口幅 10mm とした開口亀裂モデルを使用して、注入材による亀裂充填後 40 日間の初動振幅値と伝播速度の変化を示したものである。初動振幅値は、亀裂内が水で満たされているときの値を 100 とした場合の変化率を、伝播速度は、センサ間の距離を初動到達時間で除した値を用いている。

初動振幅値は、亀裂充填後 24 時間経過するまでに急激に増加し、亀裂が水で満たされているとき（以下、初期状態と記す）の 1.75 倍となっている。その後も増加は続き、30～40 日後には初期状態の 2.4 倍となる。伝播速度も同様に経過時間とともに増加するが、24 時間後

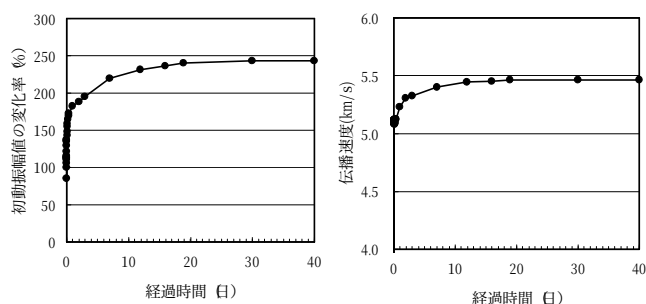


図-2 初動振幅値、伝播時間の 40 日間の変化
（亀裂幅 10mm のコンクリート試料に充填した場合）

で初期状態から 3%程度、30~40 日後でも 6%程度と、わずかな増加にとどまっている。

初動振幅値の増加は、注入材の材齢が進むにつれて進行していることから、亀裂内に充填された注入材の物性の変化により生じていると考えることができる。

図-3 は、充填直後の初動振幅値の増加状況を確認するため、試料に花崗岩と安山岩を用い、開口幅 10mm とした開口亀裂モデルを使用して、充填直後から 72 時間経過するまでの初動振幅値と伝播速度の変化を測定した結果である。初動振幅値は亀裂内が水で満たされているときの値を 100 とした場合の変化率を、伝播速度はセンサ間の距離を初動到達時間で除した値を用いている。経過時間 0 は、亀裂内が水で満たされている初期状態の値である。

初動振幅値は、花崗岩、安山岩ともに、注入材を充填した直後の値が、初期状態の値の半分以下になっている。その後、約 1 時間経過後から増加がはじまり、数時間で初期状態と同じレベルまで回復する。24 時間後には、初期状態の 1.7~1.8 倍まで増加している。伝播速度も同様に、注入材充填直後には、初期状態の値よりもわずかながら小さくなっており、6~12 時間経過後に初期状態と同じレベルまで回復する。24 時間後の増加量は、2%程度となっている。

注入材充填直後の初動振幅値が、水で満たされているときに比べて小さくなり、その後増加するのは、注入材として用いたセメントミルクの凝結・固化作用に伴う物性の変化によるものであると推定される。内田ほか⁴⁾は、セメントペースト内で弾性波を透過させ、そのときの振幅値の変化を測定し、セメントミルクの凝結・固化作用に伴って振幅値が増加することを示している。増加する原因として、材料練り混ぜ初期には粘性拡散による減衰のため振幅値が小さく、その後水和反応に伴って粘性拡散による減衰が小さくなり、急速に振幅値が増加することをあげている。本試験においても、同様の現象が起こっているものと推定される。

図-4 は、花崗岩試料を用い、亀裂開口幅を変えて 72 時間の初動振幅値、伝播速度の変化を測定した結果である。変化量を分かりやすくするため、伝播速度も初期状態の値を 100 としたときの変化率で示した。

初動振幅値は、開口幅にかかわらず、充填直後の値が初期状態の値よりも小さくなる。充填して約 1 時間経過後から増加がはじまり、6 時間経過すると初期状態と同じ値まで回復し、24 時間後には 1.4~1.8 倍程度まで増加する。増加量の割合は 10mm がもっとも大きく、以下、4mm、2mm となっている。伝播速度は、亀裂幅が 10mm のモデルでは 24 時間後に、初期状態から 2%程度増加しているが、亀裂幅の小さい 4mm、2mm のモデルでは 24

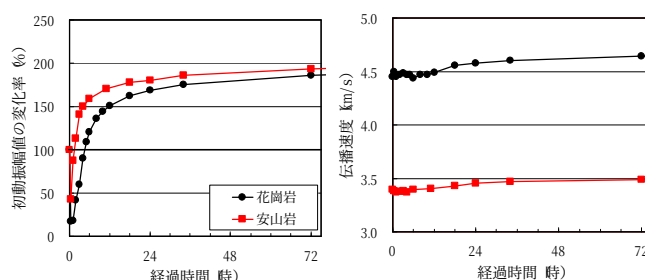


図-3 初動振幅値、伝播時間の 72 時間の詳細な変化 (亀裂幅 10mm の花崗岩、安山岩試料に充填した場合)

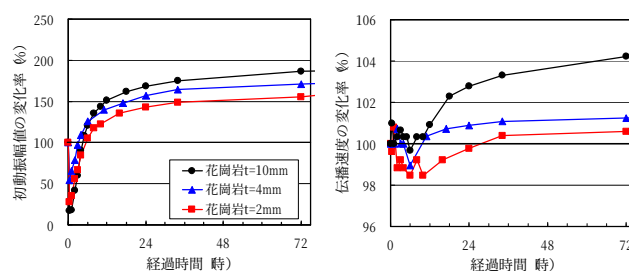


図-4 初動振幅値、伝播時間の 72 時間の詳細な変化 (亀裂幅の異なる花崗岩試料に充填した場合)

時間後の増加量が 1%未満である。このように弾性波の伝播速度は、開口幅が小さいと注入材を透過する距離が短くなるため、変化が非常に小さくなる。

(4) 室内モデル試験結果のまとめ

室内モデル試験結果から、亀裂が注入材により充填されて固化すると、水で満たされている場合に比べ、透過弾性波の初動振幅値がかなり増加することが確認できた。これはモデルに用いた試料の種類 (花崗岩、安山岩、コンクリートブロック) にかかわらず認められた。

また、これまでグラウチング効果の評価指標として用いられていた伝播速度 (弾性波速度) では、亀裂が注入材によって充填されても増加量は数%程度であり、亀裂幅が小さくなるにつれて、さらに速度の増加量が小さくなることがわかった。

以上より、透過弾性波の初動振幅値は、弾性波速度よりも亀裂内の充填状況を敏感に示すことができる評価指標であるといえる。

なお、初動振幅値は、注入材として用いたセメントミルクが凝結・固化するまでは、亀裂内が水で満たされているときよりも低い値を示すことが判明した。したがって実際に現場で適用する場合は、硬化待ち時間を 1 日程度取る必要がある。

4. 原位置での確認試験による適用性の検討

(1) 原位置確認試験の目的と方法

本手法の適用性を検証する目的で、原位置での岩盤グラウチング中のA E測定およびグラウチング前後での孔間弾性波測定を行い、グラウチングによる岩盤改良範囲と亀裂充填状況を評価する。

試験地の岩盤は、中生代白亜紀の砂岩、泥岩からなる。コア観察によると、層面に平行な傾斜角度 45°前後の亀裂が多い。亀裂間隔は概ね 10~30cm であり、局部的に著しく褐色化し、くさび状に破碎されている箇所が見られる。測定実施時の地下水位は、概ね GL-2.5m である。コアを用いて測定した弾性波速度は、泥岩で 4.9 km/s、砂岩で 5.4km/s、岩盤の弾性波速度は 4.9~5.1km/s である。

試験孔およびセンサの配置を図-5 に示す。G1 孔、R4 孔を注入孔、R2 孔、R3 孔をA E観測孔とする（R4 孔注入時のみG1 孔もA E5 の観測孔とした）。各孔の孔長は 10mとし、注入対象区間は GL-5m 以深とする。注入材料はセメントミルク（早強セメント）とする。グラウチング前後の孔間弾性波測定はR2 孔を発振孔、R3 孔を受振孔として行う。したがってR2 孔、R3 孔を含む鉛直断面において、G1 孔、R4 孔のグラウチング効果を評価することになる。

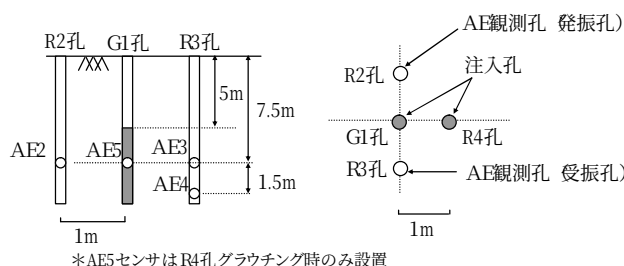


図-5 原位置での試験孔配置

グラウチング中のA E測定は、A EセンサをR2 孔の GL-7.5m (A E2) , R3 孔の GL-7.5m (A E3) , GL-9.5m (A E4) , G1 孔の GL-7.5m (A E5) にそれぞれ設置して行う。A Eセンサは 30kHz 共振型センサを用い、孔内水中にぶら下げる形で設置する。検出したA Eは、プリアンプで 40dB、メインアンプで 60dB 増幅する。その後、5kHz のハイパスフィルタにより低周波のノイズを除去する。トリガーはノイズレベルを考慮して 0.2V に設定する。A E発生数のカウントはイベント計数方式とし、ファーストヒットのみをA Eカウンタで計数する。なお、オシロスコープにより別途、波形を記録する。A Eの発生位置は、各センサでのA Eの検出の有無から推定する。

孔間弾性波測定は、発振センサをR2 孔の GL-7.5m,

受振センサをR3 孔の GL-7.5m (A E3) , GL-9.5m (A E4) に設置して行う。発振電圧は 350mV とし、受振した信号を 128 回のスタッキングを行い平均する。測定はグラウチング前と完了してから 24 時間後に行う。

(2) 原位置でのA E測定結果

G1 孔での水押し試験、G1 孔でのグラウチング、R4 孔でのグラウチング時のA E測定結果を、図-6~8 に示す。

図-6 に示すグラウチング前のG1 孔での水押し試験では、注入開始直後から 0.2 MPa 程度の低い注入圧力段階において、A E4 で多くのA Eが検出されている。時間の経過とともにA Eは収束するものの、注入圧力が 0.5MPa に昇圧されて以降、再び多量のA Eが検出されるようになる。A E3 では、注入圧力が低い段階ではA Eはほとんど検出されていないが、注入圧力が 1.0MPa に昇圧された直後に多くのA Eが検出されている。

このような測定結果から、G1 孔からR3 孔へは、A E4 付近に連続する水みちと、それより浅部のA E3 付近に連続する水みちが存在することが推定される。前者は圧力が低い段階から通水していることから、開口した亀裂であると推定される。後者は、注入圧力が 1MPa となったときに通水するような水みちである。A E2 ではA Eは検出されておらず、R2 孔側へは水みちが連続していないものと考えられる。

図-7 に示すG1 孔からのグラウチングでは、水/セメント比 800%の薄い配合のセメントミルクのみで注入を行った。グラウチングに伴うA Eは、A E4 で多く検出されている。注入圧力とA E検出状況の関係から考えると、水押し試験結果から推定したA E4 近傍に連続する開口亀裂に沿って、セメントミルクがR3 孔付近に到達しているものと推定される。A E3 では、検出数は少ないが、注入圧力が 1MPa となったときにA Eを検出している。したがって、A E3近傍へ連続する水みちにもセ

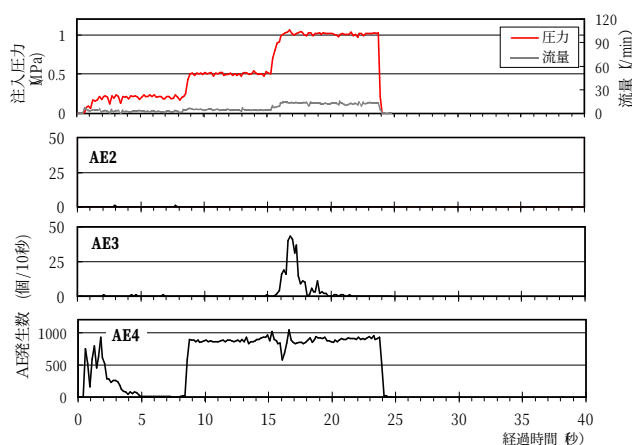


図-6 注入前G1孔水押し試験時のA E測定結果

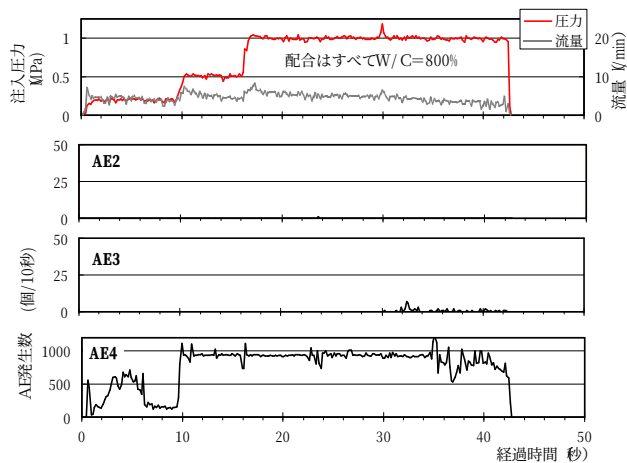


図-7 G1孔グラウチング時のA E測定結果

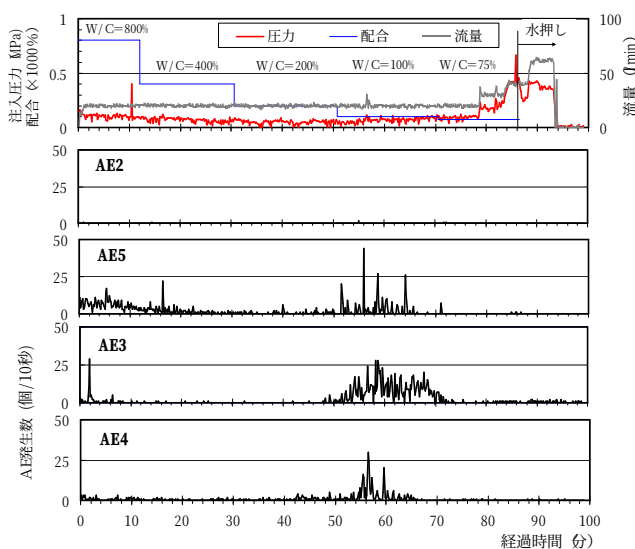


図-8 R4孔グラウチング時のA E測定結果

メントミルクが到達しているものと推定される。以上の結果から、G1孔からR3孔に通じる岩盤亀裂には、セメントミルクが充填されたと判定できる。また、G1孔からR2孔間では、水みちとなるような連続した岩盤亀裂はないものと推定される。

図-8に示すR4孔からのグラウチングでは、水／セメント比を800%から75%まで切り替えて注入を行った。注入開始から50分程度経過したところから、AE3、AE4、AE5でAEが検出されている。これらのAEは、いずれもひとつのセンサのみで検出されており、複数のセンサで検出されたものはほとんどない。したがって、センサのごく近傍で発生したAEであると考えられる。この結果により、R4孔からG1孔に通じる岩盤亀裂と、R4孔からR3孔に通じる岩盤亀裂にはセメントミルクが充填されているものと判定できる。また、R4孔からR2孔間では、水みちとなるような連続した岩盤亀裂はないものと推定される。

なお、AE測定終了後に各孔内へのセメントミルクの

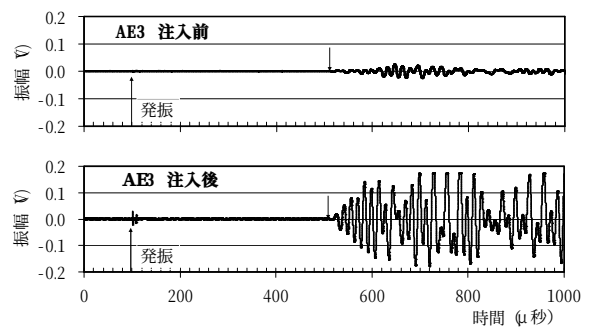


図-9 グ라우チング前後の弾性波伝播挙動の変化

表-2 グ라우チング前後の孔間弾性波測定結果

指標	伝播速度 (km/s)		初動振幅値 (mV)	
グラウチング	前	後	前	後
A E3	482	486	286	433
A E4	5.11	5.47	2.08	5.03

流れ込みを確認するため、孔底深度を測定した。その結果、R3孔、G1孔では孔底深度が浅くなっており、セメントミルクの到達、沈殿が確認されたが、R2孔の孔底深度はグラウチング前と同じであり、セメントミルクの到達、沈殿は確認されなかった。このことは、AE測定で得られた判定結果を裏付けるものである。

(3) 原位置での孔間弾性波測定結果

図-9に、R2孔を発振孔、R3孔を受振孔として行った孔間弾性波測定の結果を示す。R3孔では、AE3、AE4の2つのセンサを設置して透過弾性波を受振しているが、このうちAE3で測定された受振波形を、グラウチング実施の前後に分けて示す。また、表-2にAE3およびAE4のグラウチング前後の初動振幅値と弾性波伝播速度の変化を示す。初動振幅値は、グラウチングによりAE3で286mVから433mVと約1.5倍、AE4で2.08mVから5.03mVと2.4倍に増加している。したがって、セメントミルクにより亀裂が充填されていると判定することができる。一方、グラウチング前後の弾性波速度の変化は、AE3で1%以下の増加にとどまっており、AE4でもその増加量は6.5%程度である。

以上により、透過弾性波の初動振幅値の変化は、弾性波速度の変化よりも亀裂の状態を敏感に現わすことができる評価指標であるということが、原位置での試験でも確認された。

(4) 原位置試験結果のまとめ

原位置でのグラウチング時にAE測定を行った結果、注入孔とAE観測孔の間に連続した岩盤亀裂がある場合は、注入材がAE観測孔に到達したことを把握できることが確認できた。

また、グラウチング前後に行った孔間弾性波測定の結

果、透過弾性波の初動振幅値がかなり増加しており、岩盤亀裂が充填されていることが確認できた。しかも、透過弾性波の初動振幅値は、従来用いられている弾性波速度の変化よりも、亀裂の状態を敏感に現わすことができる評価指標であるということが、原位置での試験でも確認された。なお、今回の試験結果では、注入材による亀裂充填の有無は確認できたが、その改良程度を把握するまでには至っていない。今後の課題としたい。

5. 結論

グラウチングにおける岩盤改良効果の評価手法として、グラウチング中のAE測定とグラウチング前後の孔間弾性波測定の結果を利用した評価方法を提案し、その適用性について、室内モデル試験、原位置確認試験により検討した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- 1) 注入孔の周辺にAE観測孔を設け、グラウチング中のAE発生状況を測定することにより、岩盤中の亀裂に充填される注入材の到達範囲を把握できることがわかった。
- 2) 亀裂が注入材により十分に充填され固化すると透過弾性波の初動振幅値は、亀裂が水で満たされているときの値に比べ大きく増加することがわかった。しかも、初動振幅値は、従来用いられている弾性波速度の変化

よりも、亀裂内の状態を敏感に現すことができる評価指標値であることが判明した。

- 3) 以上の結果から、本手法はグラウチングによる岩盤改良範囲と亀裂内の注入材充填状況を把握・評価できる方法として、十分に活用できることが明らかとなった。

今後は、上記知見を基に種々の地盤条件に適用し、原位置での岩盤グラウチングの効果判定に利用していく予定である。

参考文献

- 1) 小早川博亮：グラウチングによる岩盤改良の予測・評価に関する現状と今後の研究課題，電力中央研究所報告（U98052），pp.1-28，1999.
- 2) 上田貴夫，中崎英彦，柿沢忠弘，鈴木志朗：岩盤基礎グラウト注入特性のAEエネルギーによる評価，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.1-10，1994.
- 3) 谷本親伯，岸田潔：一軸圧縮状態での岩盤不連続面を透過する弾性波伝播特性に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.523，pp.49-58，1995.
- 4) 内田慎哉，鎌田敏郎，六郷恵哲：超音波によるセメントペーストの凝結硬化過程の連続モニタリング，弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，土木学会，pp.293-300，2004.

EVALUATION OF IMPROVEMENT AREA AND CRACK FILLING SITUATION BY GROUTING

METHOD OF ATTENTION TO SITUATION OF OCCURRENCE OF AE AND CHANGE OF AMPLITUDE OF PENETRATION ELASTIC WAVE

Masayuki UJIHRA, Tadashi KANAGAWA, Maki FUJII, Yoshihiro ABE

In rock grouting, adequately evaluating the effect of the improvement of the injection material is overarching point. Then, authors propose the technique for confirming ; by acoustic emission measurement in grouting, it is confirmed that the injection material has reached within the range where that want to be improved. And by the cross-hole seismic measurement before and behind grouting, makes the change of the amplitude value of the penetration elastic wave, it is confirmed to filled enough with the injection material in crack. In this text, the outline of the technique is first described, and the applicability of the proposal technique is discussed based on the result of a experiment by the indoor and in situ.