

## 調査と研究③

# 日韓トンネル施工のための注入工法 に関する研究（その3）

## A E計測を利用した注入効果確認実験

Studies on Grouting Works for the  
Construction of Japan - Korea Tunnel

九州支部 第3部会

### 1. はじめに

長大なトンネルを安全かつ効率的に施工するためには、地下水の止水と地山補強を目的とした注入工事が不可欠なものである。近年、施工された青函トンネルの例を見ても、注入工事に対して膨大な費用と工期が費やされている。

延長200キロメートルにもおよぶ日韓トンネルの注入工事を合理的に行ない、確実な施工を行なうためには、的確な判断に基づく注入管理が必要になってくる。

そこで、本研究は、注入管理の基準となる注入効果の確認方法の一手段として、A E（アコーステックエミッション）を利用した計測技術を提案し、その適応性を検討するために基礎的な実験を行なった。このA E法は、材料が破壊する過程に発生する音を検出して、その破壊程度および破壊位置を調べる非破壊検査である。

A E法を利用した注入効果確認方法は、注入の影響により発生する地盤内の微小な音をA Eとして検出し、その発生挙動を調べることによって、注入の影響範囲を推定するものである。

前回行なった基礎実験の結果より、A E法を利用した計測技術は、基本的には注入効果を確認する方法として適応できると思われる。しかし、実

施工における注入管理にA E計測を行なうには、厳しい現場条件に対する様々な問題が残されている。

したがって、今回の研究では、A E法を利用した注入効果確認の方法が、実際の注入工事において有効な注入管理システムとなるよう、測定方法および解析技術について実験的検討を行なった。

### 2. 研究概要

前年度の実験結果から、A E（アコーステックエミッション）を利用した計測法は、注入の影響により発生する地盤内の微小な音を、A E信号として検出することができ、また、このA E信号を解析処理して、音の発生位置の標定が可能となつた。

したがって、A E計測法を従来の注入管理に加えることにより、目に見えない地盤内の注入状況をより的確に判定することができる可能性が得られた。

今回は、A E計測法を用いた注入管理の実施工に対する適応性を検討するために、現場における注入作業を実験的に再現した条件下で、A E計測法およびA E解析技術の検証を行なった。

実験に使用した注入機器および注入システムは、実際の注入工事に使用されているものを用

い、注入材料は、止水を目的として一般に施工されているものを使用した。模擬地盤として前回使用した材料は、一軸圧縮強度が $100\text{kgf/cm}^2$ 程度あり、音の減衰特性の小さいものであったため、実験的にはAEの測定が可能であった。しかし、今回、注入の対象となる地盤は、実施工でのAE測定の限界を検討する必要があるため、音の減衰特性の大きな地盤条件の悪いものを想定して一軸圧縮強度が $1\sim20\text{kgf/cm}^2$ 程度の試験体を作成した。

実験方法は、模擬地盤における注入状況を注入圧力と注入量で管理すると同時に、注入の影響により発生するAEを測定し、発生頻度と注入状況を対応させて検討した。測定したAE信号は、AE信号解析処理装置により必要なパラメータ毎に発生状況の解析を行ない、また、音の発信源を求めるために、個々のAEについて発生位置の標定を行なった。

注入状況とAE計測結果の検証は、注入時においては、地盤内に設置したひずみゲージの経時変化をモニタリングすることによって行ない、注入後は、試験体を分割して掘削し、注入材の固結状態を調査した。

さらに、各センサーで捕らえたAE信号の波形特性および減衰程度を調べるために、波形収録装置によってAE波形の周波数分析および波形成分の検討を行なった。

### 3. 注入実験

注入実験は、模擬地盤内における注入時のAEの発生状況を確認し、その発生位置および発生程度の検証を行なうもので、実施工におけるAE計測の問題を解決するため、実験的に現場条件を再現し、注入作業を行なった。

#### 3. 1 注入実験システム

図-1に注入実験システムを示す。

注入土槽の寸法は、直径 $800\text{mm}$ 、高さ $800\text{mm}$ の円筒形型枠を用い、模擬地盤の材料は、ソイル

モルタルのセメント配合比を変化させて、目標強度を3段階に設定して作成した。

表-1に模擬地盤の配合例を示す。

注入管理は、従来のP-Q管理で行ない、注入圧力はデジタル圧力計の指示値、注入量は注入材の使用量をそれぞれ解析に必要な電圧値に変換して、AE計測装置に転送した。注入方法は、一般に使用されている小型の注入ポンプを使用し、注入材の固結程度を自由に調整できる2液混合タイプの2重管ロッド工法を採用した。表-2に注入材の配合表を示す。

図-2に注入土槽内センサー配置図を示す。注入土槽の中央部に注入孔の先端がくるように注入ロッドを設置し、これと同じ高さの平面上に4個のAEセンサーを埋設し、その間隔を $500\text{mm}$ とした。また、注入ロッドの周辺には、円周方向に直径 $250\text{mm}$ と $500\text{mm}$ の位置に各8個のひずみゲージを等間隔に設置した。

注入中は、P-Q管理に対応させて地盤内のひずみ量を自動計測し、その経時的な変化はデータロガーに表示すると同時に、パソコンによってモニタリングを行なった。また、パソコンに転送されたデータは、各ケース毎に記録し、AE計測結果と注入状況の検証に使用した。

#### 3. 2 AE計測

実験で使用したAEセンサーは、地盤および岩盤を対象とし、今回、特に開発したものであり、以下の特徴を有する。

- ・高水準の電圧感度； $2\text{V/G}$
- ・低周波数範囲； $3\sim8000\text{Hz}$
- ・地中埋設構造；プリアンプ内蔵型

AE測定器は前回の実験で使用した汎用型測定器（NAIS 4800）を次のように改善した。

- ・メインアンプ内のフィルターを低周波数対応型（ $0\sim\infty\text{Hz}$ ）に交換。
- ・AE信号解析装置のデータ処理速度の高速化をはかり、短時間の計測を可能にした。
- ・標定システムの再計算を可能にした。

計測中は、注入圧力と注入量の経時変化をデー

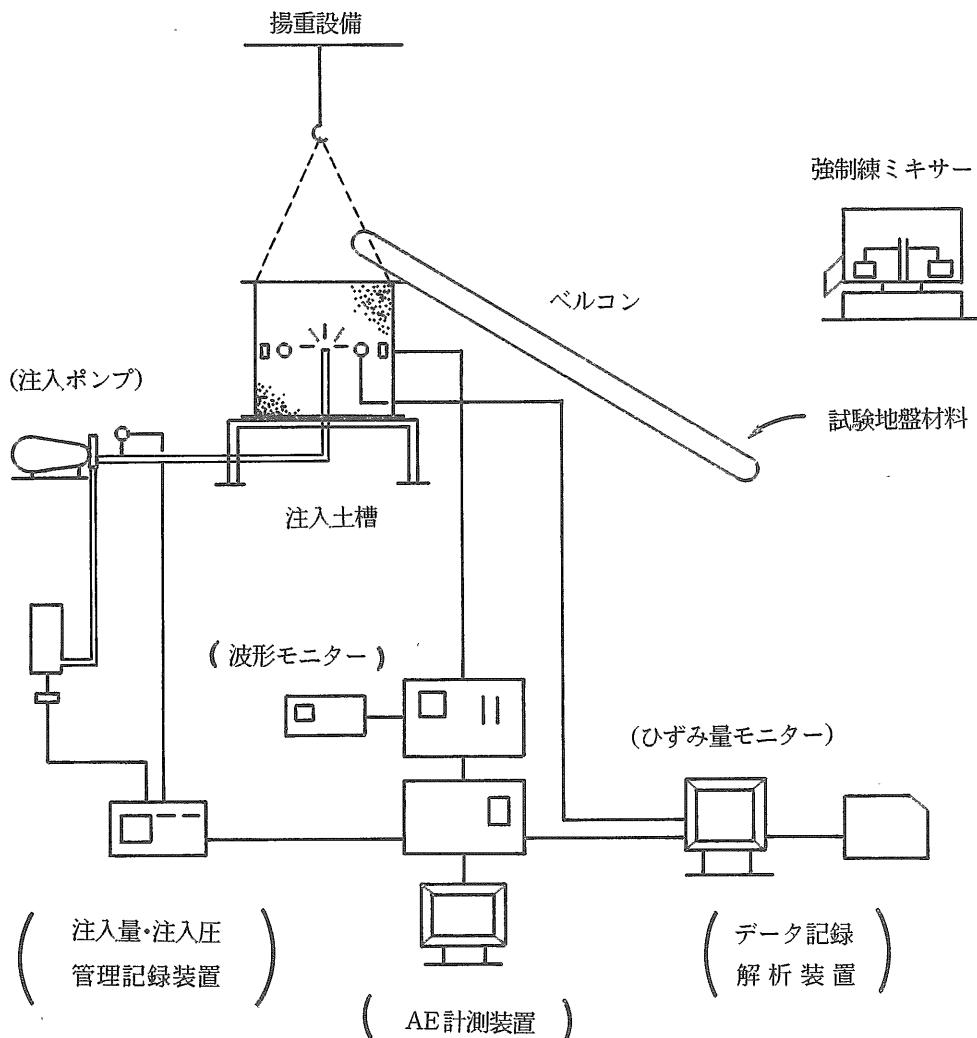


図-1 注入実験システム図

表-1 模擬地盤の配合例

配合 例	砂 (kg)	セメント (kg)	水 (kg)	目標強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	1000	30	60	1
2	1000	50	75	5
3	1000	200	100	20

表-2 注入材の配合表

種類	配 合		計
主材	3号水ガラス 水	25.0 ℥ 25.0 ℥	50.0 ℥
硬化材	F 剤 N 剤 残り 水	2.0 kg 2.8~3.1 kg	50.0 ℥

混合液 100 ℥ 当たり、液温度 20℃

タロガーで監視し、これに対応したAEの発生状況とひずみ量の挙動を、合わせて3つの画面により管理した。

注入の影響範囲は、AEの発生位置の経時変化により推定し、地盤内に埋設した4個のAEセンサーに到達したAE信号の時間差を計算することによって、平面的な2次元標定を行なった。

注入時に発生する個々のAE特性は、AE事象数(EV)、最大振幅値(PV)等のAEデータとして記録すると同時に、検出したすべてにAEは波形収録装置に収録し、その波形について各チャンネル毎に周波数成分や発生機構の検討を行なった。

測定に当たっては、センサーで検出した原波形をオシロスコープでモニターし、測定箇所の周囲で発生する雑音や電気的なノイズを確認した後、AE信号を識別するために必要な、しきい値および増幅値の設定を行なった。

### 3. 3 実験結果

注入実験結果の代表的な例を図-3に示す。横軸に注入の経過時間、縦軸にAEの事象数(EV)を表し、これに対応した注入管理状況を注入圧力(P)、注入量(Q)に表す。注入開始後5分を過ぎた地点(A点)で1回目のピークがあり、この時のAEの発生数は100個を越えている。これは、注入孔上部に作った注入スペースに注入材が充满して、注入圧力の急激な上昇によって圧力限界点を越え、一気に破壊が起こった時に測定されたAEである。さらに、注入を続けると徐々に注入圧力が上昇し、20分経過後(B点)で2回目のピークが見られる。これは、1回目の破壊で緩んだ地盤の中に注入材が進入し、地盤の空隙を埋めながら注入範囲を広め、飽和状態に達したときに地盤の破壊が生じAEが多発したものと思われる。

図-4に2次元の位置標定結果とひずみ量測定の結果を示す。No.1~4は、AEセンサーの設置した位置であり。数字の2~17は、ひずみゲージ

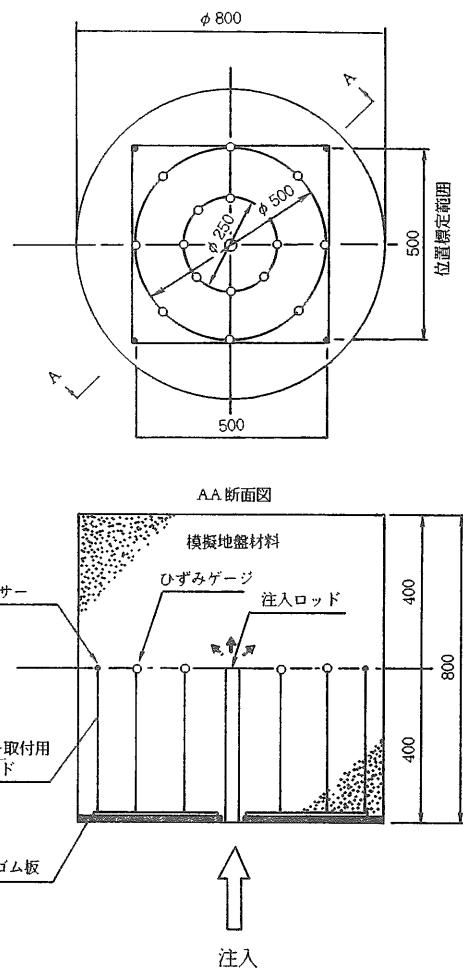


図-2 注入土槽内センサー配置図

の位置を示している。

AEの発生箇所は、ほとんどが注入ロッドを中心にして直径20cm内に集中し、最も離れた位置で30cmである。これは、ひずみ量の測定結果および、注入後の試験体を取り壊した時に測定した注入範囲の位置とおおむね一致した。

### 4. 減衰試験

AE計測で解析される信号は、発生源から検出され記録されるまでに幾つかの変化を受けてい

る。注入地盤のように非弾性体を対象としたAEの伝播中における周波数成分の変化は、相当に複雑であり、その中で最も大きな影響として知られているのが減衰である。

ここでは、実験に使用した模擬地盤について減衰試験を行ない、周波数分析（FFT解析）によって周波数成分の検討を行なった。

#### 4. 1 試験方法

図-5に減衰試験の概要図を示す。

試験体は、縦500mm×横800mm×深さ500mmのポリ容器に模擬地盤材料を詰め、この中にウェーブガイドを設定した位置に埋設する。

左端のウェーブガイドの上部には、AE波発生用のプレートを介してAEセンサーを取り付ける。

測定は、疑似AE波として、シャープペンシルの芯をプレートに当て、一定の力で折ったときの音を発信源でのAEとし、順次離れた位置でのAEを検出した。

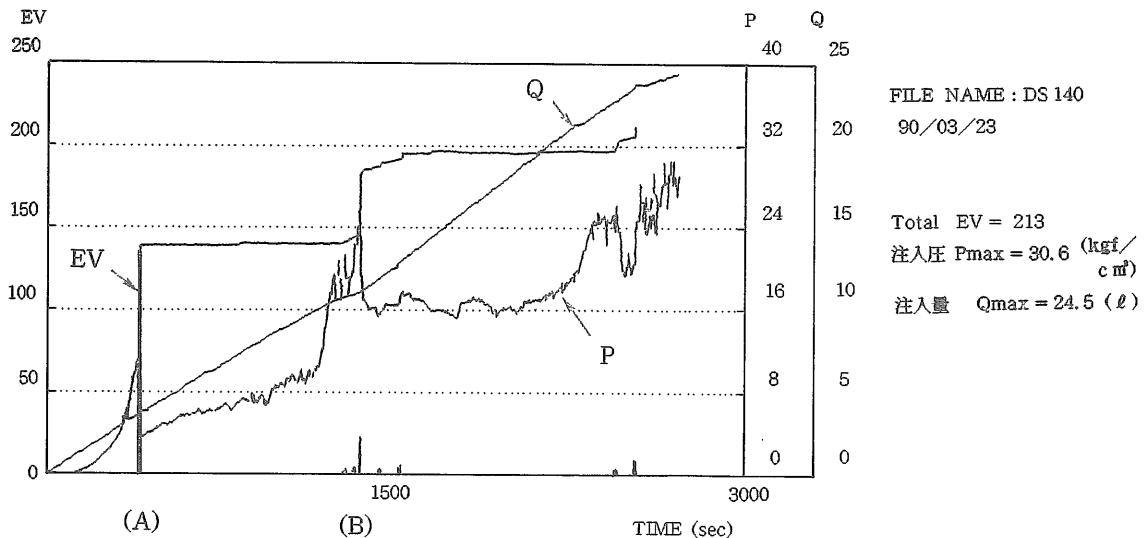


図-3 注入実験結果

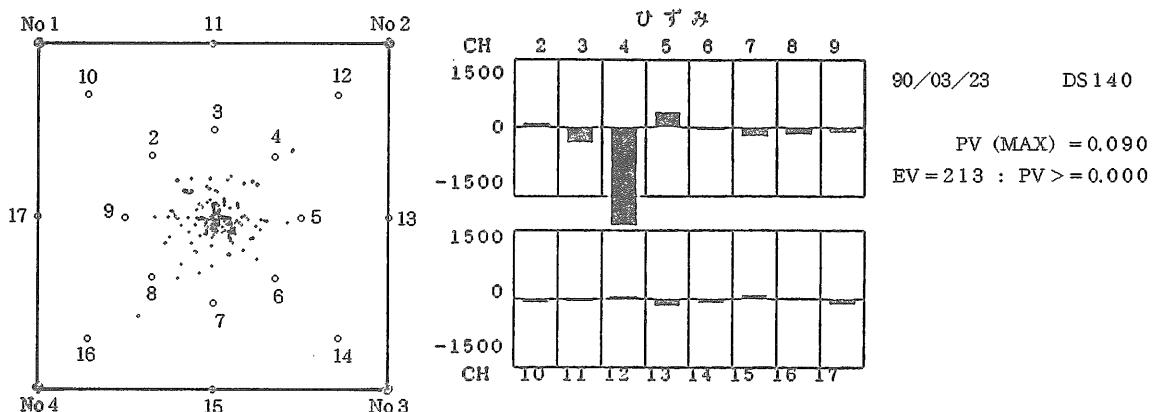


図-4 位置標定結果とひずみ量

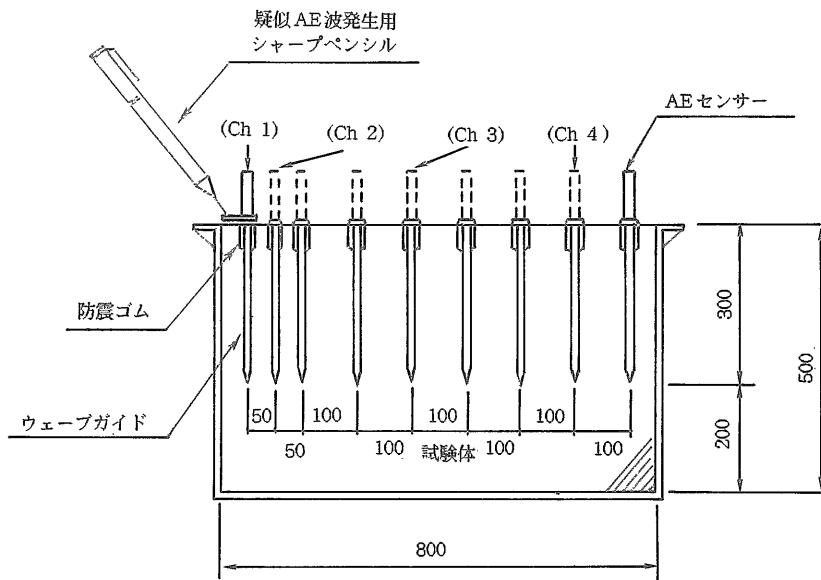


図-5 減衰試験概要図

#### 4. 2 試験結果

図-6に減衰試験結果を示す。

A E発生から各センサーまでの到達時間は、波形の立ち上がるまでの時間差で表わされる。Ch2は $180\mu s$ 、Ch3は $600\mu s$ 、Ch4では $1045\mu s$ と次第に長くなっているのが分かる。

また、音の強さを表わす最大振幅値も検出位置が離れるにしたがって次第に弱まり、Ch2で $0.8mV$ あったものが、Ch4では、 $0.05mV$ 以下に減衰している。

図-7、8に周波数(FFT解析)結果の一例を示す。

図-7の発信部(Ch1)における疑似A Eの波形を周波数分析した結果より、測定したA Eの周波数成分の構成は、数KHzから35KHzの間に分散し、その中でも特に、35KHz付近に卓越した周波数が見られる。図-8の検出部(Ch2)における波形の周波数分析結果では、2~3KHzの低周波領域の波が卓越し、僅かに20KHzのところに残っている程度である。しかし、発信部より10cm

以上離れた(Ch3)以降では、2~3KHzだけに集中し、その他の領域では全く測定されなかった。また、注入実験において注入中に検出したA Eを周波数分析した結果でも、疑似A E波と同様に数KHzの周波数が卓越していた。

これらの結果から、今回模擬地盤として想定した軟弱な注入地盤では、A E発生源で高周波成分が含まれていても、伝播過程において急激に減衰することが分かった。

#### 5.まとめ

今回の実験の結果より、注入の影響によるA Eの発生数量と注入圧力の間には相関性があり、注入圧力の上昇と共にA Eが発生し始め、限界注入圧力付近で非常に多くのA Eが発生することが分かった。したがって、注入の影響で発生する地盤の破壊過程のA Eを検出し、そのデータを解析することによって、注入材の影響範囲あるいは、進行方向を推定できることが確認できた。

これは、A E計測の特徴である位置標定システ

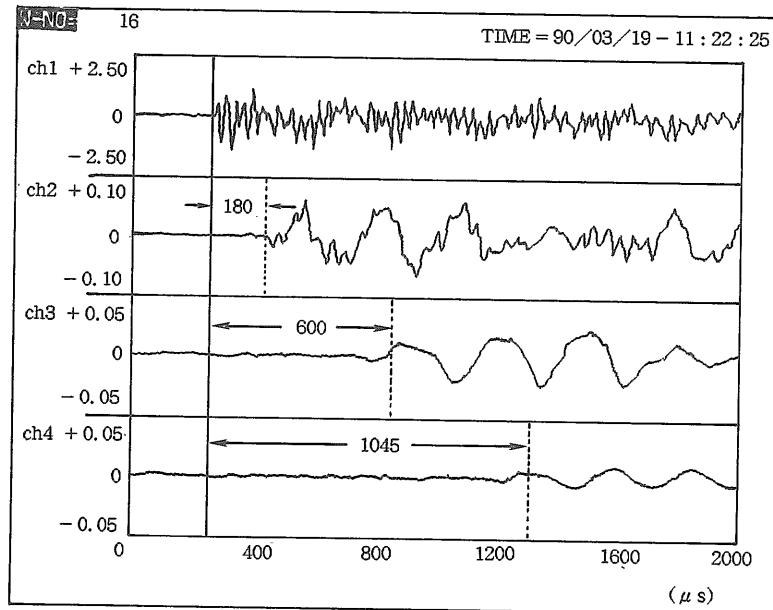


図-6 減衰試験結果

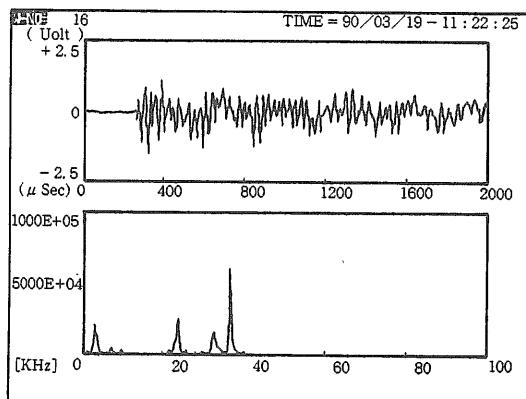


図-7 発信部の周波数分析結果

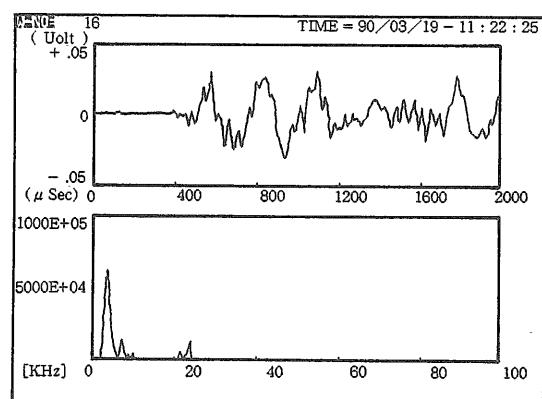


図-8 検出部の周波数分析結果

ムによるものであり、標定結果は、地盤内の変位を直接測定したひずみ量の経時変化と、注入実験終了後に注入材の浸透状況を調査した結果から、ほぼ正しい位置に標定されていることが検証された。

減衰実験の結果では、模擬地盤で測定されたAEは、大部分が数kHzの低周波領域であり、他の高周波成分は、急激に減衰することが分かった。このように、注入地盤内を伝播するAEを計測し、その発生位置を検出するには、低周波領域を対象にした地盤専用型の計測装置と非常に微弱な音を検出する高感度のAEセンサーが必要であることが確認された。

## 6. 今後の課題

前回および今回の実験結果から、AE計測法は、注入時に発生する地盤内の微小な音を測定することができ、その発生位置の標定を行なうことによって、注入範囲の推定が可能となった。

そのため、従来の注入管理法では得られなかつた情報として、目に見えない地盤内の状況を検知することができるため、注入材の逸脱や、オーバー注入を防止し、より的確な注入が期待できると思われる。

しかし、現段階のAE計測は、かなり高度な測定技術が必要とされ、実施工において計測を行なうには、測定の方法あるいは、測定条件について細かな設定が必要である。

今後、AE計測を実用化するには、特に測定上の問題として次の点を解決しなければならない。

(1) 施工現場で発生するノイズあるいは、電気的なノイズと実際のAEとの識別方法。

- ・増幅値、しきい値の適正な設定
- ・フィルターによるノイズの除去方法
- ・AEパラメーターの設定によるノイズの除去方法

(2) 広範囲な地盤を対象とした測定技術の確立。

- ・AEセンサーおよびAE信号解析装置の性能

向上

- ・AEセンサーの設置位置、数量および、設置方法

(3) 注入範囲の立体的判定を行なうため、3次元位置標定システムの開発。

(4) 多種多様な注入地盤条件に対応した計測技術の検討。

また、構造上の問題としては、

(1) トンネル周辺地山の水圧、発破振動等の悪条件に耐える頑丈な保護構造を持つAEセンサーや測定機器の開発。

(2) 測定装置の簡素化、および簡単な操作で測定できるシステムの開発。

等があげられる。

さらに、AE計測で得られた各々の条件下での計測データを系統的に整理し、P-Q-AE管理としてパターン化することによって、計測管理に基づいた、安全かつ効果的な注入工事が施工できると思われる。