

杭基礎および岩盤斜面の健全性評価のための調査・点検技術

飛鳥建設技術研究所 正会員 塩谷智基
飛鳥建設技術研究所 正会員 三輪 滋

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震により、土木建築構造物に甚大な被害をもたらしたのは記憶に新しい。地震後、上部構造物の調査のみならず、杭基礎などの下部構造が様々な手法により調査・診断され、数多くの損傷が指摘された¹⁾。著者らは損傷が生じるとき（クラック発生時）、あるいは既存の損傷箇所（既存クラック同士の摩擦や既存クラックからの新たなクラック発生）から発生する弾性波：アコースティック・エミッション²⁾を利用した、AEによるコンクリート杭損傷調査法を提案³⁾し、種々の損傷が懸念された杭基礎構造物に適用してきた。一方、1996年、豊浜トンネル坑口岩盤崩落事故、続いて発生した第2白糸トンネルの岩盤崩落事故が引金となり、岩盤の安定性監視技術の確立が強く望まれるようになった⁴⁾。著者らは、それらの事故以前から主破壊に先行して生じる微視的破壊にともなう微弱振動（AE：アコースティック・エミッション）にその可能性があると考え、AEの岩盤監視への適用性を室内実験を通じて検討する⁵⁾とともに、実際の岩盤斜面へのAE適用方法を提案⁶⁾し、既に多くの実斜面の長期安定性を監視している。

そこで、本論文では、適用対象は異なるが両者ともに破壊現象に起因したAEを利用している点で共通である「AEを利用したコンクリート杭の調査診断技術」および、「岩盤斜面のAEによる安定性監視技術」を紹介し、AE計測の健全性評価技術としての有用性を論じる。

2. AEを利用したコンクリート杭破損調査法

2.1 調査概要⁷⁾

AEによるコンクリート杭破損調査法の測定原理の概要を図-1に示す。損傷を有するコンクリート杭に静的あるいは動的荷重が与えられる場合、その損傷箇所の微小なずれや微視的クラックの進展にともなうAEの発生・放射が生じる。AE波は、杭体中を伝播するとともに地盤にも放射される。発生源が図中のAEセンサ#1と#2の間で、かつセンサ#1に近い位置にある場合を考える。このとき、各AEセンサへのAE波の到達は#1、#2の順となり、センサ間に到達時間差 δt が得られる。このとき、AE源の位置、つまり損傷位置は、

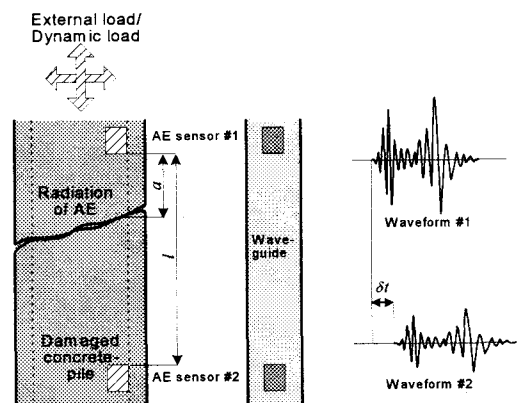


図-1 測定原理の概要

$$a = \frac{l - v\delta t}{2} \quad (1)$$

により与えられる。ここで、 l はAEセンサー間距離、 v はAE波伝播速度であり、杭体での計測は杭体伝播速度（たとえば、3500 m/s～4500 m/s）を、杭体近傍での地盤内計測孔の場合は、計測孔中のAE伝播速度を

キーワード：アコースティック・エミッション，岩盤，健全性，コンクリート杭

連絡先：〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472，電話 0471(98)7553，Fax0471(98)7586

用いる。

AE 源の発生位置は、このように推定し、発生源の集中位置をもって「損傷位置」と推定する。ここで、本調査法は、コンクリート杭を対象として考案した調査法であり、対象は RC 杭、PHC 杭、場所打ちコンクリート杭である。また、対象深度は計測器械のチャンネル数の上限まで可能であるが、杭体への荷重伝達範囲まで、例えば重機により負荷を与える場合は 10m 程度までと考えるのが妥当といえる。

予め杭体に AE センサが配置できる場合、損傷を受ける時に生じる AE によりその進行状況が場所的・時間的に把握できるが、AE センサが配置されておらず、既に損傷を受けている杭を調査するには、AE の発生を励起させる外力や荷重変動が必要となる。短期的には、杭上部のフーチングや上部構造に起振機などにより荷重変動を与えることで AE の励起は可能であるが、このような荷重変動を与えることができない場合、長期的荷重変動に頼らざるを得なく、適用が困難なことが多い。

2.2 計測評価手順

図-2 に AE 計測評価フローを示す。

(i) 環境雑音を測定し、しきい値などの AE 計測条件を決定する。

(ii) 人為的に外力変動が期待できる場合は、その変動にともなう AE を検出する。それ以外の場合は、杭周辺地盤の長期的圧密などを期待し長期計測を実施する。

(iii) (ii)により測定された AE より外部雑音などを除去する。外部雑音には、電源からのノイズ、高出力違法無線、AE センサーケーブルのアンテナ効果によるラジオ等からの電波など調査地域の計測環境を十分検討し行わなければならない。計測とは無関係な場所（位置）に参照 AE センサーを設置し、同時計測を行うことも有効である。AE パラメータ特性や AE 波形特性を用いてフィルタリングを行う。

(iv) (iii)のフィルタリング後の AE を用いて二次元 AE 位置標定計算を行い、AE 発生位置を推定する。ソフトウェア上での位置標定計算は、各センサへの AE 波の到達時間差のみを用いることから、AE 波形記録を観察し、同一 AE 源から放出された AE であることを確認すれば、標定精度は向上する。

(v) AE 位置標定結果から、深さ方向の AE 源分布を描き、AE 集中位置を検討する。検討が困難な場合は、各 AE イベントが有する AE パラメータ（リングダウンカウント数、エネルギー）を用いて分布を重み付けし、検討する方法が良く、各深度の AE 平均リングダウンカウントや平均エネルギーを用いれば更に明確な結果が得られる場合がある。

2.3 直接 AE 計測・間接 AE 計測で得られる AE 波の特徴

当初、本調査法は、間接 AE 計測、つまり杭近傍の地盤に AE 計測孔を設け、孔内に AE センサを設置する方法により行ってきた。しかし、調査結果を直接検証できる比較事例がなく、地盤性状や計測対象杭に近接した他の杭での AE 以外の調査結果の比較検討が中心であった。結論として、得られる AE 調査結果は地盤性状から推測される杭の破壊様式や近接杭の損傷結果と良く合致し、杭自身の損傷箇所や損傷箇所周辺の地盤変形にともない放射される AE を検出しているものと考えられた。杭内と杭外に AE センサを設置することができたその後の適用事例から、杭内での AE 発現時間（ここでは、杭内 AE センサでの AE 検出時間）と杭外での

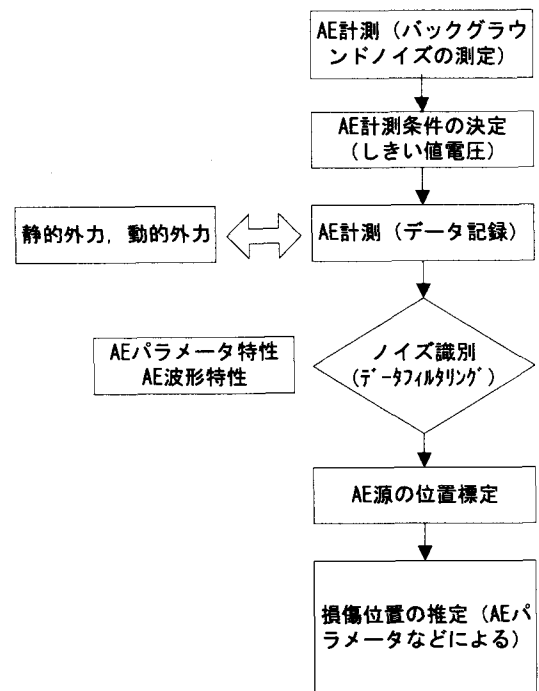


図-2 AE 計測評価フロー

AE 検出時間が許容される時間差がなく、杭外で検出された AE のほとんどが損傷箇所周辺の地盤の変形ともなう AE が主であることが確認された。さらに、このことを確認するため、杭外 AE センサを加速度計の範疇にある低周波型としたが、機械雑音の検出が主でこれまでの結果にはほど遠い「有意な弾性波に鈍感かつ雑音に敏感」な結果となった。これらのことから、杭外で計測される AE は、計測孔と周辺地盤の摩擦による AE 波が主であり、土粒子規模を考えれば、当然高い周波数特性を有するセンサ適用が必要と考えられた。これらの検討から、杭外 AE 計測に用いる AE センサは杭内と同様に従来通りの 60kHz 共振型が良いという結論に至った。杭外で計測される AE の発生メカニズムは、例えば、斜めき裂を 1 本有する杭の場合、図-3 のように考えられる。杭に杭頭より外力が作用すると、き裂上部の杭体は、き裂面に沿い斜め下方に変形する。このとき、杭外 AE 計測孔が地盤の変形領域内にある場合、最大ひずみ分布を描くように AE 源分布が得られ、損傷箇所付近が最大となり、損傷位置が概ね推定可能となる。この AE は地盤を構成する材料（粘土、砂、レキ・・・）と計測孔壁との摩擦により放射されるのが中心で、土粒子相互のひずみによる AE は検出されても少数といえる。また、杭外 AE を効果的な損傷調査とするためには、地盤に設ける AE 計測孔が必ず杭損傷部の変形に追従した地盤の変形領域内にある必要があり、領域外の計測孔では上述の理由により AE 検出、つまり損傷調査は不可能と考えられる。次に図-4 に示すように重度の水平き裂を液状化層と非液状化層の境界に有する杭について考える。地震動により液状化が生じ、杭は、地層境界深度に損傷を生じたとする。このとき、地盤のひずみは、地層境界を最大とする分布となり、地層境界周辺の地盤は液状化等により乱され、特に破壊した杭の周辺部は、地震後においても上部と比べて「不安定状態」にあると考えられる。このような状態にある杭に軸力を与え、杭外 AE 計測を実施するとき、不安定状態にある損傷箇所周辺の地盤は変形しやすく、杭近傍に設置した AE 計測により AE 発生源分布の集中位置として杭の損傷箇所が推定可能となる。

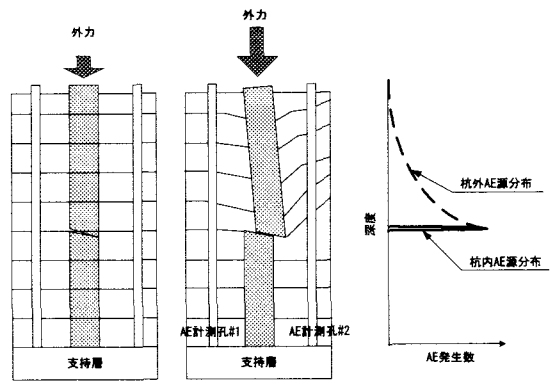


図-3 杭の変形と直接/間接 AE 計測で得られる AE 概念図

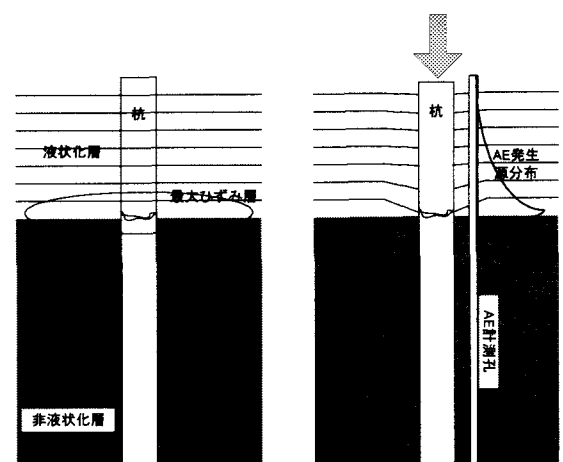
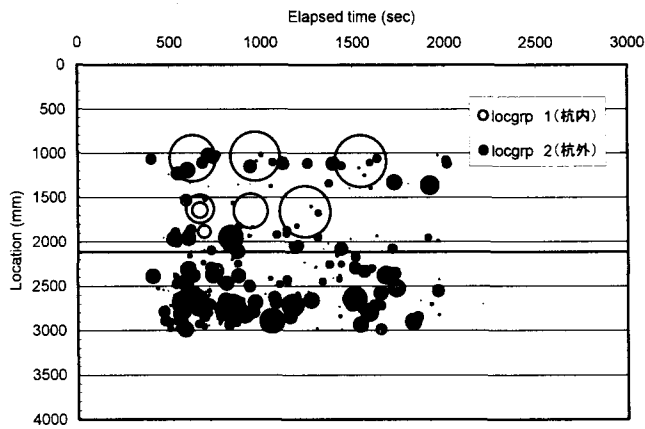


図-4 液状化により地層境界で損傷した杭の AE 発生メカニズム

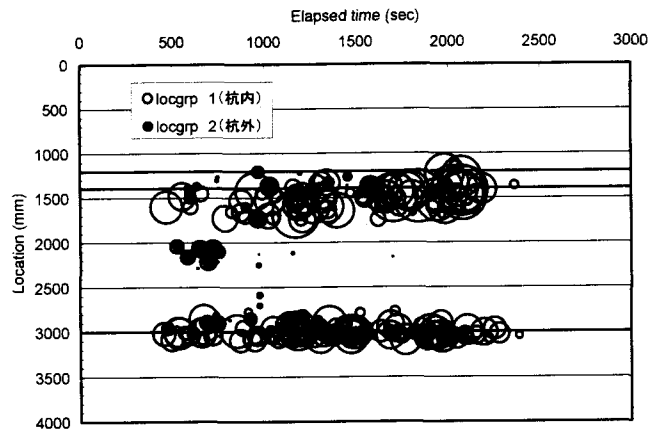
2.4 クラック傾斜と AE アクティビティー⁸⁾

杭頭から外力が与えられ、潜在き裂のずれ（摩擦）やマイクロクラックの連結、あるいは新たなマイクロクラックの生成などによる AE の検出が本調査法の特徴である。ここで、潜在き裂のずれが主要な発生要因となる AE について考える。この場合、AE アクティビティーにクラックの方向性が大きく関与する。特徴的な 2 例を図-5 に示す。

図-5 は、人工的に損傷を与えた既製 RC 杭の鉛直載荷試験での AE 計測結果である。AE 計測は杭内と杭外で行われ、図中の白抜き円が杭内 AE 計測結果である。A4 杭は、深度 2m 付近に 1 本の水平き裂を、A6 杭は、1.2, 1.4, 3.0m 付近に 3 本のき裂を有する（詳細なクラック状況は図-6 参照）。AE 計測結果から、A4 杭では、き裂位置に AE 源はほとんどなく、それよりもむしろ目視観察できない潜在マイクロクラックが生じているであろう上部の位置に確認された。



(a) 単一のクラックを有する場合 (A4 杭)



(b) 3本のクラックを有する場合 (A6 杭)

図-5 AE位置標定結果とクラックの方向性との関係 (白抜き円: 杭内AE計測結果, 塗りつぶし円: 杭外AE計測結果)

このことは、「杭上部からの荷重により水平き裂が閉口し、そのときのAEは小規模でかつ検出が容易でない」ことを意味している。A6杭は、上部のき裂に比べて中間き裂および、下部き裂の傾斜が大きく、荷重により中間、下部クラック面の一部に応力集中が予測される。AE計測の結果から、A4杭に比べA6杭では、AE発生数および規模が中間部、下部クラックに集中している様子が認められ、傾斜クラックにおける本手法の有効性が確認された。これらの事項から、杭体損傷箇所からのAE発生は、クラック幅よりも応力集中が生じやすいクラックかどうか、つまり、クラック分布範囲の杭長手方向への広がり「ずれ」に左右されると考えられる。

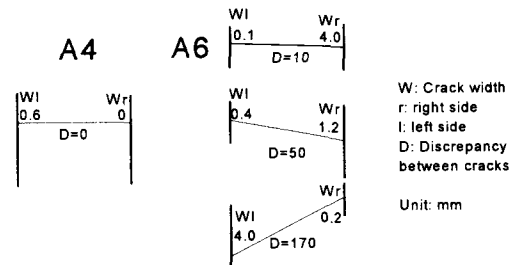


図-6 クラック幅と食違い量

2.5 適用事例 (大規模なフーチングに連結された場所打コンクリート杭への適用^{9) 10)})

(1) 調査目的

既に水平荷重試験が実施され、杭頭部を中心に損傷が認められている場所打ちコンクリート杭¹¹⁾を試験対象とし、重機により杭体へ静的荷重や動的荷重を与え、得られたAE源より、杭の損傷位置を推定し、杭内のボアホールカメラ観察や杭削孔で得られた採取コア観察、および杭体の速度検層結果と比較検討し、AE調査法の適用性を検討した。

(2) 試験対象杭およびAE計測孔

図-7に試験対象杭とAE計測孔の平面位置を示す。試験対象とした場所打コンクリート杭は既に水平荷重試験

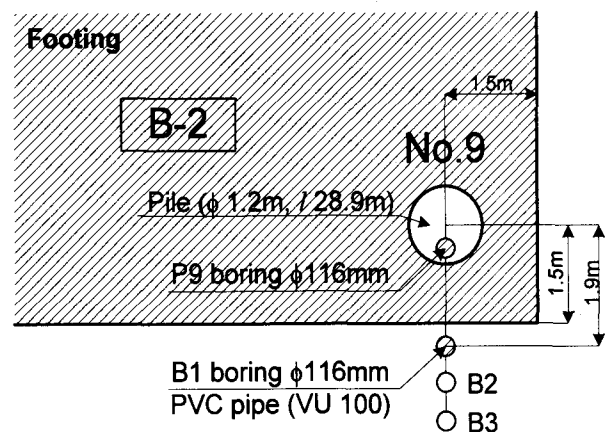


図-7 試験杭とAE計測孔平面図

が実施され、杭頭部を中心に損傷が認められていた。フーチング (9.0×9.0×2.3 m) に接合された9本の場所打ちコンクリート杭 (φ: 1.2 m, l: 28.9 m) のうち、その隅角に位置する杭: No. 9について試験を行った。AE計測は、杭自身に削孔を施し、AEセンサを設置する「杭内AE計測」と、対象杭近傍の地盤を削孔、塩化ビニル管を設置しAEセンサを設置する「杭外AE計測」により行った。杭内AE計測は特別に設計した取付け治具により、AEセンサを杭中の削孔壁に圧着して計測し、杭外AE計測は塩化ビニル管に専用の治具により

センサを所定の位置に固定、空隙を水充填することにより実施した。

図-8にAEセンサ群の配置図を示す。AE計測対象深度は、フーチング表面より11.5mで、「杭内AE計測」は、1つの計測範囲が2mとなるように、5個のAEセンサ（60kHz共振型）を50cm間隔で取付けたセンサ群を、基本的に50cmの重複を設けながら杭頭より挿入・固定して実施した。杭外のAE計測は、グラスファイバー棒に杭内計測と同種・同間隔のAEセンサを取付けたセンサ群を所定の深度に吊下げるように設置し、間隙を水で充填して行った。

AEセンサは杭内、杭外ともに、40dBの利得を有するプリアンプを内蔵した防水型AEセンサ（PAC社製）を用いた。AEセンサで検出された45dB以上のAE信号は、AEDSPカード（Mistras, PAC社製）を介し、そのAEパラメータおよびAE波形を記録した。AE波形は、4k wordsのデータ長、休止時間を10msとして収録した。

(3) 油圧ショベルによる荷重変動

杭損傷部からのAE放射を励起させる目的で、杭と接合された上部のフーチングへ油圧ショベル(バケット容量0.59m³, 重量11.8 tons)により小規模の静的荷重や動的荷重を与えた。基本的な一連の荷重変動を図-9に示す。

(4) AE調査結果

図-10にAE位置標定結果の深度に対するヒストグラムを示す。図-10(a)は、杭内累積AEヒット、(b)は杭内累積AEカウント（リングダウンカウント）、(c)は各深度における平均カウント数（(b)を(a)で除したもの）、(d)は杭外のAE位置標定結果の(c)と同種の図を示している。(a)、(b)より、フーチング内に多数のAEイベントがあり、AE集中深度は1.0-1.5m, 2.0mに見られた他、値は小さいが3.0-3.5m, 5.0m付近にも認められた。(c)のAEヒットの平均カウント数より、4.5-5.0mのAE集中が明瞭になる。(d)の杭外AE計測において1.8m, 3.2m, 4.8mにAE集中が認められる。これらは、杭内計測より判断された、杭の損傷箇所から放射されたAE波と時間的に同期していないが、AE集中深度はほぼ一致していた。

(5) 速度検層結果

図-11に、各AEセンサで得られた弾性波の到達時刻より求めた杭内の弾性波速度を示す。ここで、各プロットは、伝播速度算出に用いたセンサ間中心、つまり、深さ1.0m-1.5m間の伝播速度は、深さ1.25mの伝播速度として表している。ここでは極端に速度が低い深度のみに着目する。その場合、1.5-2.0m, 3.0-4.0m, 4.5-5.5m, 6.0-6.5mに低い速

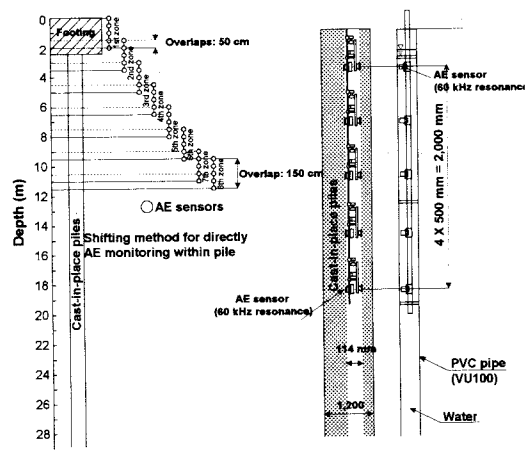
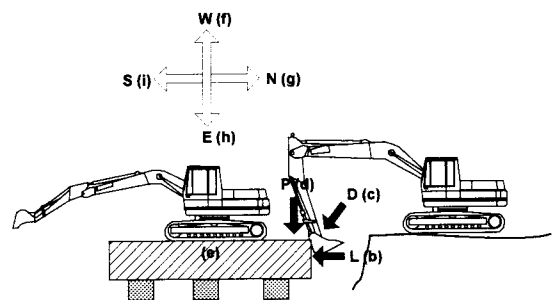


図-8 AEセンサ群配置図



- (a) BGN monitoring
- (b) Lateral load
- (c) Diagonal load
- (d) Perpendicular load
- (e) Placing machinery above footing
- (f) Arm expanding / up-and-down movements to the west
- (g) Arm expanding / up-and-down movements to the north
- (h) Arm expanding / up-and-down movements to the east
- (i) Arm expanding / up-and-down movements to the south
- (j) Leaving from the footing

図-9 油圧ショベルによる外力変動模式図

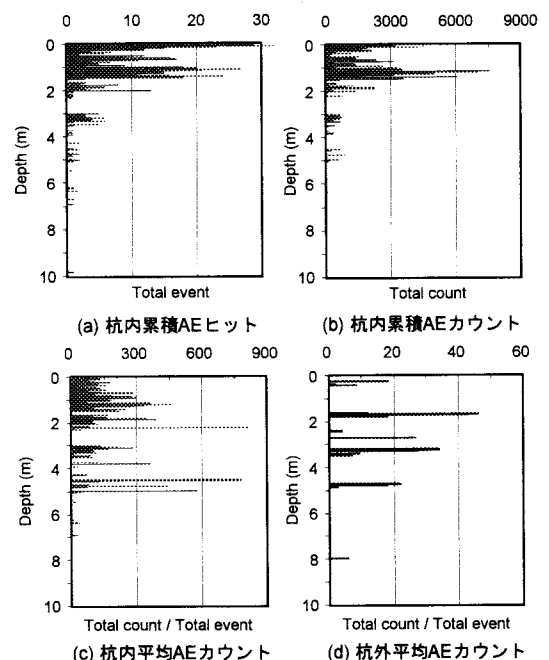


図-10 AE位置標定の深度に対するヒストグラム

度領域が認められ、これらの深度は杭内 AE 計測より推定された損傷位置、および杭外 AE 計測より推定された損傷位置に合致していた。

(6) 損傷位置推定結果のまとめ

AE 法、ボアホールカメラ・採取コア観察、速度検層より推定された損傷位置を図-12 にまとめる。ここで、ボアホールカメラ結果には、クラックは観察できたが、その幅が測定できなかったものも点線で追記している。以下の事項が認められた。

1) 杭頭付近の損傷がカメラから観察された。AE および速度検層から、フーチング内部での損傷が推定され、この位置はカメラ観察では認められなかったが、採取コアに多くの破断が確認された。

2) AE より約 3 m 深さに損傷が推定され、この位置は速度検層結果、コア観察結果より妥当であると判断された。しかし、カメラ観察からは認められなかった。

3) 5 m 深さの損傷が全ての手法で推定された。

4) 杭内 AE より、6.5 m～7.0 m 深さに損傷が推定され、この部位はコア観察および速度検層結果と概ね一致していた。また、クラック位置のみが確認できたカメラ結果とも合致していた。

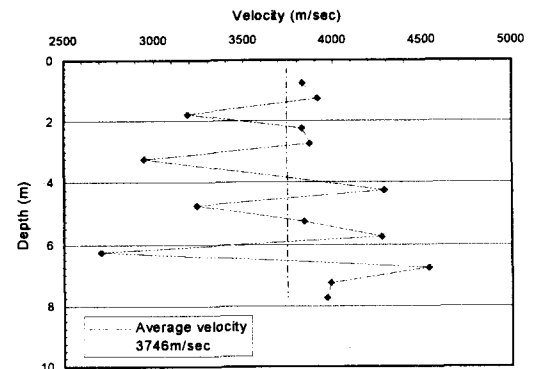


図-11 杭体の弾性波速度

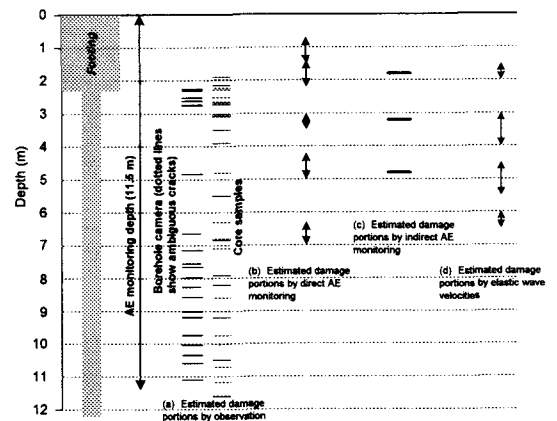


図-12 各手法による損傷推定結果

3. AE による岩盤斜面の安定性監視技術

AE の特徴を利用して、材料内部の破壊状態を推定し、終局破壊の予測の一助となるよう期待・研究されている分野の一つに岩盤の安定性監視¹²⁾がある。岩盤斜面の AE 計測を行う場合、岩盤内部で発生した AE 波の捉え方、つまり、「どのように岩盤内部で発生した AE 波を検出するか」という計測の第一段階が「岩盤内部の破壊挙動の推定と安定性評価」において重要となる。例えば、土砂斜面の計測に利用されてきたウェーブガイドによる AE 検出方法¹⁴⁾がある。このウェーブガイドは、鋼製、PVC、PVC+レジンなどから構成され、土塊の変形に追従した AE 波をウェーブガイド自身の破壊や土塊とウェーブガイドの摩擦による AE 波として検出するように考えられている。このようなウェーブガイドは、終局破壊に至るまで、ある程度の変形が予測される土砂斜面には効果的な方法であるが、脆性的挙動が予測される岩盤安定性監視には不向きといえる。また、AE 波動は限界状態に達したひずみエネルギーが解放されるとき、その一部が弾性波として放射される現象を示し、破壊情報は、換言すると「計測対象材料の限界ひずみ」に直接結びつけられる情報であることから¹⁵⁾、ひずみの積分値として得られる変形（変位）量とは間接的にしか結びつかないと考えられる。つまり、対象材料の破壊に起因した AE 波を直接的に捉えてこそ、材料内部の破壊状態が推定でき、ひいては終局的な破壊の予測の一助となるということが可能であると考えられる。そこで、多数のき裂を有し脆性的挙動を示す岩盤に適用でき、かつ岩盤内部の破壊を直接的に反映可能なウェーブガイド (WEAD) を発案し、実岩盤斜面に適用した。以下にその概念、基礎実験、適用例を述べる。

3.1 岩盤 AE 計測に用いるウェーブガイドの諸条件

1) 岩盤の潜在き裂の影響を受けず AE 波が検出できること、2) 計測サイトの自然環境に起因するノイズとして処理されるべき AE 波に鈍感であること、3) 岩盤の破壊を直接的に反映可能な AE 波動を検出できるこ

と、4) 検出された AE 波の特性から岩盤内部の破壊が評価可能であること、5) 岩盤内部の局所的破壊から岩盤全体の終局破壊に至るまで AE 波が検出・評価できること、などである。2)については既報¹⁶⁾¹⁷⁾を参照されたい。

3.2 WEAD の概念

図-13 に岩盤 AE 計測ウェーブガイド (WEAD¹⁸⁾: wave-guide for AE waves due to rock-deformation) の概念図を示す。WEAD では基本的に岩盤への削孔が必要となる。そして、採取コアの様々な物性試験を行い、最終的にインタクトな状態にあると考えられるコア物性を参照し、ボアホールに充填されるセメント系充填材料を決定する。設置手順とし

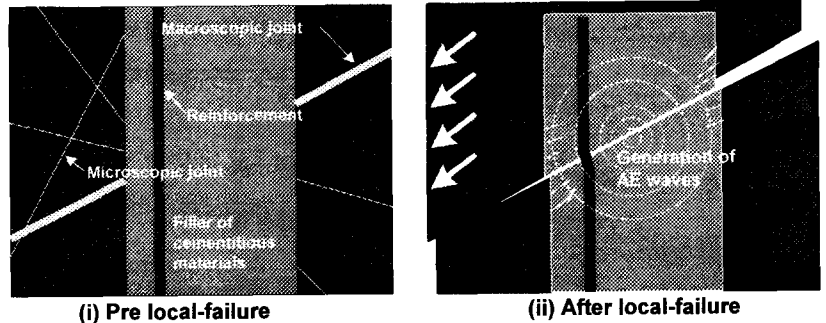


図-13 岩盤 AE 計測ウェーブガイド (WEAD) の概念

ては、まず、鉄筋に専用の治具によりある間隔に設置された複数の AE センサをボアホール内に設置する。その後、充填材料を投入する。岩盤の潜在き裂に沿う局所的破壊が生じた場合、WEAD 充填材料に同種・同形態の破壊が生じ AE 波が放射される。この時の AE 波を鉄筋に線上に配した複数の AE センサにより検出することで AE 源の一次元標定が可能となる。岩盤の破壊進展とともに、このような岩盤の破壊を直接的に反映した破壊が逐次 WEAD で生じ、最終的には周辺岩盤に近いき裂分布を示す結果となる。この場合、AE 伝播特性は著しく低下するが、局所破壊後に続いて生じる巨視的岩盤変形は「破壊形態・様式を直接的に反映していない AE 波」として、鉄筋を通じて検出可能となる。つまり、鉄筋は終局破壊まで追跡した AE 波を得るために設置された AE 伝播補助材料といえ、WEAD では終局破壊の評価において重要な役割を果たしている。

上述のように、WEAD は既知物性の材料から構成されているので、図-14 に示すように実験室での WEAD の種々の破壊試験を行い、破壊種別、破壊レベルによる AE 特性を検討することで、各サイト毎の破壊規準が構築できる。さらに、サイトから得られる AE データと破壊規準を参照検討することでサイトの安定性が評価可能となる。

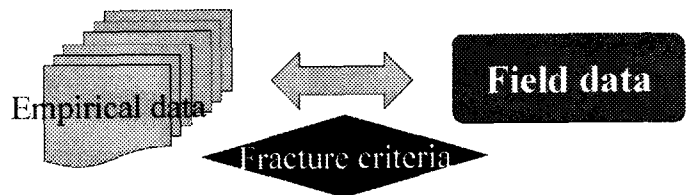


図-14 室内実験に基づく破壊規準と実サイトでの AE データ

3.3 WEAD の室内実験例 (曲げ・せん断破壊試験)

図-15 に試験概要と AE センサ配置を示す。実験室で充填材料を再現、中立軸上に鉄筋を配した角柱供試体 (10×10×100 cm) を作成し、4点曲げ载荷による「曲げ試験」、载荷点と片方の支持点を近づけた3点曲げ载荷による「せん断試験」を実施した。AE センサ (60 kHz 共振型) は AE 源の3次元位置標定とモーメントテンソル解析により破壊種別および方向が考慮できるように曲げで 10 ch, せん断で 8 ch 取付け、40 dB 以上の AE 信号の AE 特性パラメータと AE 波形を DSP ボードからなる AE 計測装置 (Mistras, PAC) で収録・解析する。

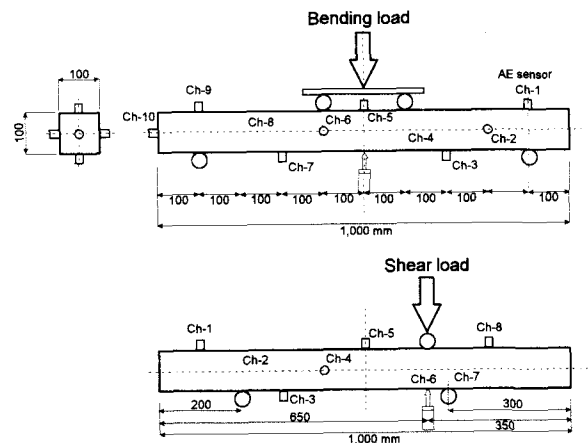


図-15 WEAD の室内曲げ・せん断実験概要

(1) 実験結果と考察

図-16 に平均エネルギーと荷重レベルとの関係を示す。平均 AE エネルギーは、全 ch で得られた値の平均値として表し、その標準偏差を付記している。ここで、エネルギーは、AE 波形の包絡線面積で与えられ、AE 検出条件となるしきい値に左右されない AE 源のエネルギーに密接に関連した

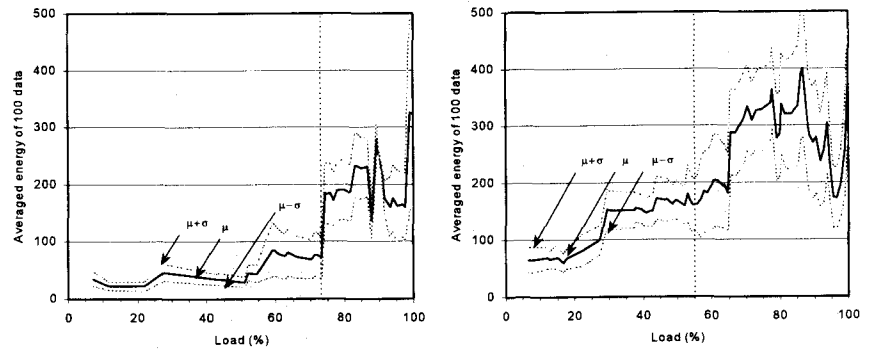


図-16 平均エネルギーと荷重レベル (左図：曲げ試験, 右図：せん断試験)

パラメータである。図-16 左図の曲げ試験の結果から、曲げにおいて初期の破壊レベルを与えるエネルギー値は、50 以下であり、この段階で供試体内部でモルタルクラックの主的発生が推測される。エネルギー値は、モルタルクラックの合体、進展が推測される中期破壊レベルで 50-100 を示す。さらに、曲げの終局的な段階を与えるエネルギー値は 100-200 程度となり、この値は、せん断初期の中期レベルまでのエネルギー値に相当する。このように破壊種別、破壊レベルが分類可能な AE エネルギーは、最終的なせん断面に沿う巨視的破壊を 300 以上のエネルギー値として与えることができる。同様な検討をリングダウンカウント、改良 b 値¹⁹⁾ (b 値は、地震学において、マグニチュード規模別頻度分布の負勾配として知られ、改良 b 値はその算出法を AE 最大振幅の頻度分布の負勾配とし、算出法を改めたパラメータ) 等で行うことで、例えば表-1 に示す AE パラメータによる破壊規準が構築可能となる。

表-1 AE パラメータによる破壊規準の例

AE parameters				Fracture levels estimated	Fracture conditions & patterns expected
Count	Energy	Ib-value [6]	Grade		
-40	-50	increase up to 0.06	10-	I	Early stage in bending
	50-100			II	Intermediate stage in bending
		decrease down to 0.04	5-10	III	Final stage in bending
40-	100-200	increase up to 0.06	0-5	IV	Final stage in bending & early stage in shear
	200-300			V	Intermediate stage in shear
	300-	decrease down to 0.04		VI	Final stage in shear

ここで、表-1 中の Grade は、AE 最大振幅値と AE 波の立上り時間 (AE 波が最大振幅を示すまでの経過時間) を用いて得られる「AE 波形の初期勾配を示すパラメータ」として著者らが岩盤の安定性評価に有効と考え提案している AE 複合パラメータ²⁰⁾ であり、既にコンクリート材料には Iwanami et al.²¹⁾, Uchida et al.²²⁾ が適用している。最終的な破壊に至るまでに予測される AE 波形形状と破壊形態の変化を図-17 に示す。一般的な材料の破壊で、その初期段階において、引張型のクラックが卓越して発生し、ついで引張型とせん断型が混合されたクラックが中間段階として主に発生し、最終的にはせん断型のクラックが卓越して発生すると考えられる²³⁾。このような主たる破壊形態の進行に対応する破壊速度 (fracture velocity) として、まずその範囲は、縦波伝播速度以内であり、

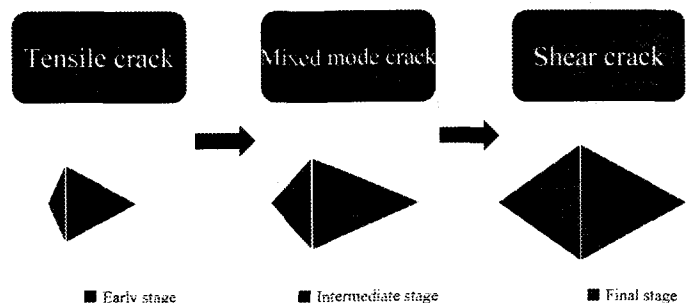


図-17 破壊の進行にともなう AE 波形形状の変化

このように主たる破壊形態の進行に対応する破壊速度 (fracture velocity) として、まずその範囲は、縦波伝播速度以内であり、

地震の場合、その大小によらず、横波伝播速度の0.72倍程度と考えられる²⁴⁾。この値が、図-17中の最終破壊形態およびその波形形状に対応していると考えれば、ずれによる破壊速度と引張りによる破壊速度は一般的には引張り破壊速度の方が大きいと考えて合理的と考える。つまり、引張り破壊が卓越する破壊初期に得られるAE波形は、短い持続時間で最大振幅値まで立上がり、その破壊速度はP波速度以内でかつS波速度の0.72倍以上となり、終局破壊を示すせん断破壊に近づくにつれて、S波速度の0.72倍程度まで小さくなり、これに対応したAE波の鈍い立上がりが見られるものと考えられる。次に、これらの推察される破壊種別・レベルとAE波初期波形勾配との関係を図-15の室内実験で得られたAEパラメータを用いて検討する。

図-18にGradeと荷重レベルの関係を示す。同左図の曲げ試験において初期レベルで大きな値を示すGradeが荷重レベルの増加とともに小さくなる様子が明らかである。Gradeは、AE波形の初期勾配を与えているので、前述の推察が概ね実験により検証されたことを示す。同様に、

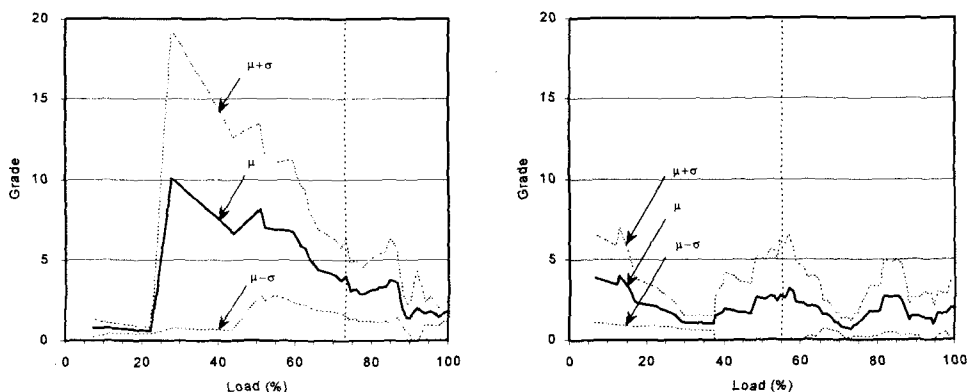


図-18 Gradeと荷重レベル (左図：曲げ試験、右図：せん断試験)

同右図のせん断試験の結果より、主にせん断が卓越する破壊形態において、安定した低いGradeを常に得ることができ、せん断破壊時のAE波形初期勾配が一定した値を示すこと、つまり、同速度のせん断破壊が繰返されていることを示唆している。

3.4 適用事例 (A 岩盤斜面でのAE計測²⁰⁾)

(1) 計測概要

図-19にAE計測岩盤斜面の概要図を示す。岩盤斜面はホルンフェルスからなり、約80°の急崖面に50°の受け盤き裂が数条にあり、このき裂に直交する流れ盤き裂が多数生じ、ブロック化が進行していた。不安定岩塊の除去後、岩盤内部のき裂性状の把握と各計器を設置するためにボーリングが施工された。ボーリングより採取されたコアの物性試験より、WEADの充填材を決定し、最深部のき裂面を貫通するように削孔した約10mの計測孔に孔底より約1.5m間隔で岩盤表面より約2.5mまで合計5chのAEセンサ(プリアンプ内蔵60kHz共振型)を設置し、40dB以上のAE信号をMISTRAS遠隔AE計測装置(PAC社製)により記録、遠隔監視した。また、背景雑音の確認を目的にAE計測小屋内部にも同種のAEセンサを設置し、岩盤に設置したAEセンサと同条件で計測した。ここで、岩盤表面に生じる機械的ノイズ(降雨、落石など)除去を目的に、AE計測孔表面から1m深度までを湿潤砂で充填するとともに、最上部のAE-5(ch-5)と斜面表面までの距離を約2.5mとした。本計測現場では、AE以外に地震計、3次元き裂計、孔内ひずみ計などが図-19

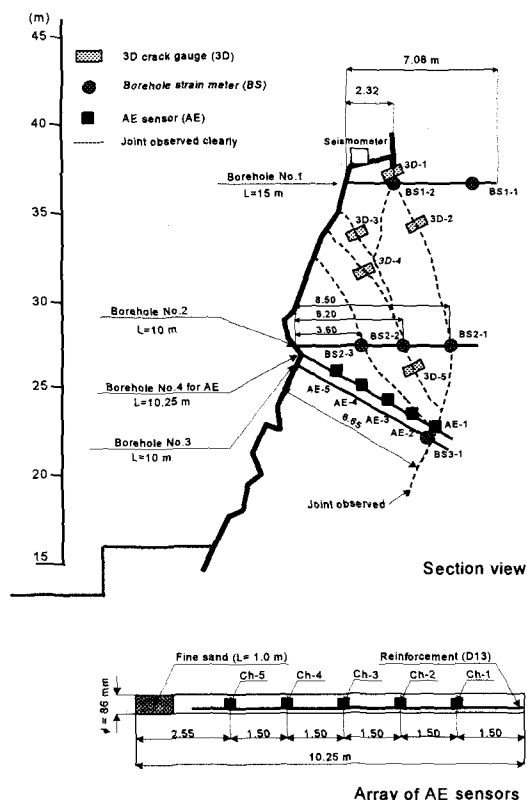


図-19 A 岩盤斜面のAE計測概要

に示すような位置に設置されている。

(2) 中間計測結果

図-20 に1999年4月から2000年2月までに得られた全チャンネルでの AE 発生率と降水量との関係を示す。図-20より、100 mm 以上の降水量が記録された(a)~(d)においてさえ AE アクティビティーは降水量に無関係であることが明らかである。つまり、得られた AE データは、斜面表面から打撃される降雨による AE に直接的に起因していないものといえ、本サイトで実施された降雨対策が効果的であったものと考えられる。

一次元に配置された AE センサと、物性が既知の充填材料からなる WEAD を用いることで、AE 計測孔上での一次元位置標定が可能となる。図-21 に AE 源の一次元標定結果の経時変化を示す。なお、同図中の円面積はリングダウンカウンタの平均値（第1到達波と第2到達波の平均値）を反映している。図-21より、12月初旬に計測孔底面より4 m~5 m (AE センサ ch-3 付近) に AE 源の集中が認められる。

図-22 に典型的な結果を示す ch-1 と AE 源集中位置に設置されている ch-3 の Grade 結果を示す。ch-1 の Grade 経時変化より、12月初旬に急激な低下が得られるものの、その値は10以上となり、表-1の破壊規準より曲げ破壊程度の破壊形態が予測される。一方、ch-3 の Grade 変化より、11月末頃と12月初旬に急激な10以下への低下が認められ、特に12月初旬の値は5程度となる。表-1より、5以下の Grade 低下はせん断破壊に対応していることから、この時期に瞬間的なせん断変形が岩盤内の局所(ch-3 付近)に生じた可能性が高いと考えられる。

ここで、AE 計測孔の直上に位置し、最深部のき裂付近より斜面表面に向い設置された孔内ひずみ計の経時変化に着目する。図-23 に最深部に設置されたひずみ計: BS2-1 と斜面表面に近く位置するひずみ計: BS2-3 の経時変化を示す。ここで、ひずみは、岩盤内温度変動のひずみへの影響を考慮し、AE 活動度と密接な関係を示す増分率²⁵⁾とし表している。図-23より、AE アクティビティーに対応した最深部のひずみ変動は認められず、それは BS2-3 ひずみと明らかに対応していることがわかる。このことから、12月初旬の高い AE アクティビティーは瞬間的ではあるが岩盤内部の局所変状に対応し、得られた AE パラメータから、せん断破壊に対応しているものと考えられた。

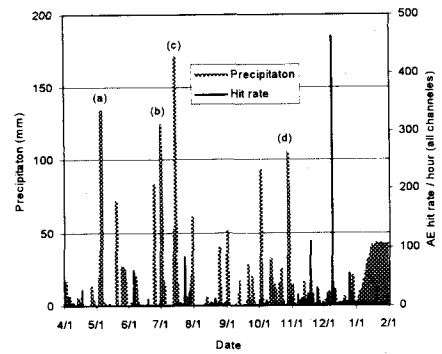


図-20 AE 発生率と降水量

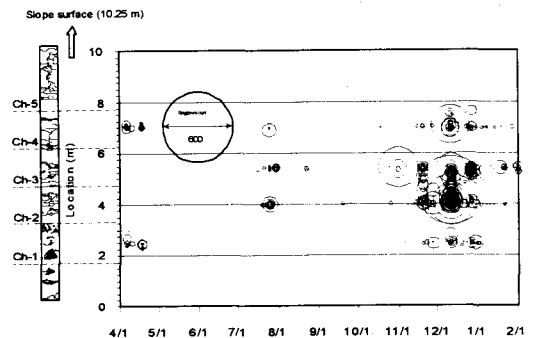
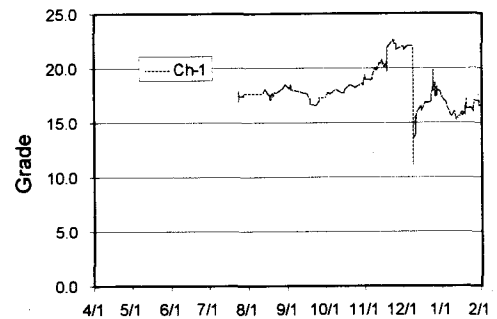
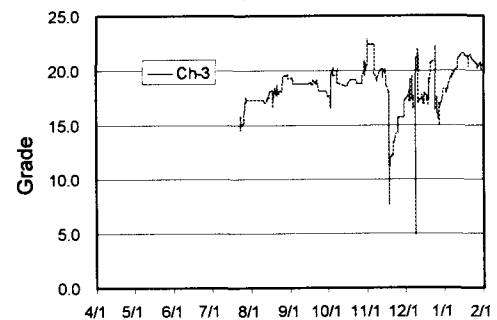


図-21 AE 源一次元位置標定結果



(a) ch-1



(b) ch-3

図-22 Grade 値の経時変化

3.5 結論

これまで用いられてきた土砂斜面で用いられるウエーブガイドの役割を明確にし、改めて岩盤 AE 計測に用いるウエーブガイドの諸条件を整理した。そして、これら諸条件を満たす岩盤 AE 計測の新しい AE ウエーブガイド (WEAD) を提案した。さらに、WEAD の特徴を利用した室内曲げ・せん断破壊実験を実施し、WEAD の破壊レベルと AE パラメータより、AE パラメータによる破壊レベル規準値を策定した。最後に、WEAD を導入した実岩盤サイトで得られた AE データに室内実験により策定した破壊レベル規準値を適用し、岩盤内部の破壊状態を評価した。その結果、AE パラメータより評価された岩盤内部の局所的破壊レベルは、ひずみ・変形より推定された岩盤内部挙動と調和的であることが確認された。

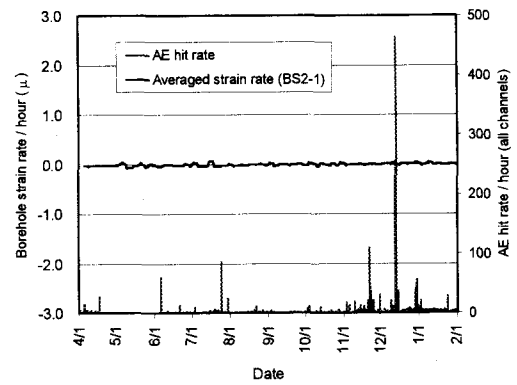
4. おわりに

本論文では、適用対象は異なるが両者ともに破壊現象に起因した AE を利用している点で共通である「AE を利用したコンクリート杭の調査診断技術」および、「岩盤斜面の AE による安定性監視技術」を紹介し、それらの健全性あるいは、安定性評価技術としての有用性を他の調査結果と比較検討することにより明らかにした。特に、評価までを十分考慮した AE 計測法を対象物に適用し、得られた AE の情報を適切に処理することで、コンクリート杭のクリティカルなクラックの状況が判断できること、AE パラメータ値の組み合わせから岩盤斜面の長期安定性監視が推定可能であることなどが示された。

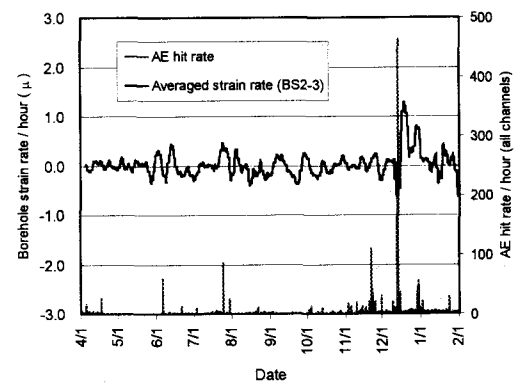
最後に、「AE を利用したコンクリート杭の調査診断技術」で示した実験結果は、建設省土木研究所、阪神高速道路公団、土木研究センターおよび民間 12 社による共同研究「橋梁基礎構造の調査方法の開発」の成果を一部引用した。「岩盤斜面の AE による安定性監視技術」は、北海道開発土木研究所および飛鳥建設 (株) との共同研究「岩盤斜面の挙動計測とその安定性の分析・評価に基づいた管理方法に関する研究」成果の一部を引用したことを追記し、末筆ながら関係各位に深く感謝する次第である。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会、兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書、1996. 7.
- 2) Shiotani, T., M. Shigeishi and M. Ohtsu, "Damage Evaluation of Prestressed Concrete-Piles by Acoustic Emission," JSCE, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No. 655/ V-48, pp. 133-141, 2000. 8.
- 3) 森伸一郎・塩谷智基：地震で被災したコンクリート杭に対する AE 法による破損度調査法の開発、土木学会論文集 No.605 /I-45, pp. 61-77, 1998. 10.
- 4) (社)地盤工学会北海道古平町国道 229 号岩盤崩落調査委員会：北海道古平町国道 229 号岩盤崩落調査委員会報告書、1997. 7.
- 5) 例えば、塩谷智基・藤井清司・青木朋也・天羽恵子：土質材料への AE 法の適用と破壊評価方法、資源・素材学会、第 5 回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集, pp. 40-47, 1993. 7.



(a) BS2-1



(b) BS2-3

図-23 ひずみレートと AE 発生率

- 6) 塩谷智基・三輪滋・池田憲二・中井健司・日下部祐基:岩盤 AE 計測おける新しい AE ウェーブガイド, 第 35 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 2491-2492, 2000. 7.
- 7) 森伸一郎・宇良成泰・塩谷智基・藤井清司:AE を利用したコンクリート杭の破損調査法, 土質工学会, 第 30 回土質工学会研究発表会平成 7 年度発表講演集, pp. 1581-1582, 1995. 7.
- 8) 塩谷智基・境野典夫・石橋晃睦・藤原鉄朗・市村靖光:損傷した既製 RC 杭より放射する AE 特性, 土木学会構造工学技術シリーズ No.5, 構造物の診断に関するシンポジウム論文集, pp. 113-120, 1998. 7.
- 9) 塩谷智基・三輪滋・市村靖光:フーチングを有するコンクリート杭の AE/衝撃弾性波による損傷調査, 土木学会, 第 3 回耐震補強・補修技術及び耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集, pp. 127-134, 1999. 7.
- 10) 塩谷智基・三輪滋・市村靖光:橋梁基礎構造の損傷調査<AE による損傷調査>, 土木学会構造工学技術シリーズ No.11, 構造物の診断に関するシンポジウム, pp. 151-156, 1999. 8.
- 11) 坂本眞徳・林秀侃・森田悠紀雄・笹尾昌靖:実杭を用いた 9 本群杭の大変形水平載荷試験, 第 29 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1603-1606, 1994. 6.
- 12) 建設省土木研究所・(財)砂防・地すべり技術センター:AE による斜面動態計測システムに関する共同研究報告書, 土木研究所資料第 228 号, 1999. 6.
- 13) 池田憲二・日下部祐基・中井健司・塩野康浩:岩盤斜面の AE 計測, 土木学会北海道支部論文報告集 第 56 号(A), pp. 792-797, 2000.
- 14) 塩谷智基・青木朋也・藤井清司・天羽恵子:AE 斜面崩壊予測におけるウェーブガイド設置方法, 第 29 回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 1817-1818, 1994.
- 15) 池田憲二・日下部祐基・塩谷智基・三輪滋:模擬岩盤斜面での岩盤変状と AE 計測, 土木学会北海道支部論文報告集 第 56 号(A), pp. 802-807, 2000.
- 16) 塩谷智基・三輪滋・門間敬一:岩盤 AE モニタリングに影響を与える雨滴の弾性波特性, 第 6 回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集, 資源・素材学会, pp. 7-12, 1999. 8.
- 17) Shigeishi, M., T. Shiotani and M. Ohtsu, "A consideration about the rainy influence in field AE measuring," JSNDI, Progress in Acoustic Emission X, pp. 177-182, 2000. 9.
- 18) Shiotani, T., Yuyama, S., Carlos, M. and Vahaviolos, S.J, "Continuous Monitoring of Rock Failure by A Remote AE System," Proceedings of 24th European Conference on Acoustic Emission Testing (EWGAE 2000), pp. 321-326, 2000. 5.
- 19) Shiotani, T., K. Fujii, T. Aoki and K. Amou, "Evaluation of Progressive Failure Using AE Sources and Improved b-Value on Slope Model Tests," JSNDI, Progress in Acoustic Emission VII, pp. 529-534, 1994. 1.
- 20) Shiotani, T., S. Miwa, M. Ohtsu and K. Ikeda, "Development of AE Wave-Guide for Rock Failure Monitoring," JSNDI, Progress in Acoustic Emission X, pp. 85-90, 2000. 9.
- 21) Iwanami, M., T. Kamada, and S. Nagataki, "Application of AE Technique for Crack Monitoring in RC Beams," JCA Proceedings of Cement & Concrete No. 51, 1997.
- 22) Uchida, M., T. Okamoto, N. Tsuj and M. Ohtsu, "NDT of Concrete Members by Ultrasonics," Proceedings of Structural Faults & Repair-99 (CD-ROM), 1999.
- 23) Yuyama, S., T. Okamoto, M. Shigeishi and M. Ohtsu, "Quantitative Evaluation and Visualization of Cracking Process in Reinforced Concrete Specimen by Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission," Progress in Acoustic Emission VII, JSNDI, pp. 347-354, 1994.
- 24) 金森博雄:地震の物理, 岩波書店, 1991. 9.
- 25) Shiotani, T. and M. Ohtsu, "Acoustic Emission Activity with Slope Behavior on a Model Slope of Rock," paper presented at AE Working Group 43rd Meeting, Seattle, 2000.