

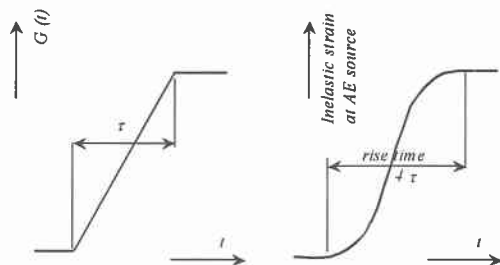
岩質材料の曲げ・せん断破壊時のアコースティック・エミッション特性

AE activity due to flexural and shear loads in rock materials

飛島建設(株)技術研究所 ○正員 塩谷 智基 (Tomoki Shiotani)
 飛島建設(株)技術研究所 正員 三輪 滋 (Shigeru Miwa)
 北海道開発局開発土木研究所 正員 池田 憲二 (Kenji Ikeda)
 北海道開発局開発土木研究所 正員 中井 健司 (Kenji Nakai)
 北海道開発局開発土木研究所 正員 日下部祐基 (Yuki Kusakabe)
 (株)構研エンジニアリング 正員 川瀬 良司 (Ryoji Kawase)

1. はじめに

材料の主破壊に至るまでの破壊進展過程は、破壊力学的に 1)微視的破壊、2)微視的破壊の連結、3)巨視的破壊面の形成、そして4)巨視的破壊面に沿う大規模主破壊として表現でき、その規模に着目し「ミクロ・メゾ・マクロ挙動の練成」として記述される場合もある。これら破壊規模に対応したそれぞれのクラックを適切に表現・可視化できる技術にアコースティック・エミッション(AE)がある。AEは破壊規模のみならず破壊形態にも対応した弾性波であるので、例えば、複数のAEセンサにより検出されたAE波のインバージョン解析²⁾を行うことで、AEを放射させる直接的要因である「クラックの種別・規模・方向性」が推定可能となる。



(a)地震のくいちがい時間関数 (b)AE源の変位時間関数

図-1 地震動とAE波の時間関数

ここで注意すべきは、AEセンサの周波数応答特性であり、例えば地震波動もAEと同種の弾性波動として取扱われているが、AEセンサは地震波動は検出できない。簡単には、地震波動をもたらず断層のくいちがいは、くいちがいの時間関数³⁾として、また、AE波動を励起させるクラックの発生は、ひずみの時間関数⁴⁾として図-1のように表現される。同図(a),(b)において重要となるのは、両者ともに変形の持続時間であり、地震波動の場合は、“数秒”単位、AE波動の場合は、“数マイクロ秒”単位である。周波数領域では、地震波動が1 Hz以下、AE波動が1 MHz以下となり、それぞれの周波数に対応したセンサの応答特性は、地震動が数 Hz、AE波動が数 MHzまでといえ、同じ弾性波を取扱う地震とAEの必要となる周波数特性が異なるわけである。

同様な理由で、例えば岩盤のAE計測を考えれば、既述の「微視的破壊、その連結、巨視的破壊面形成まで」に対応するAEセンサの周波数特性と「巨視的破壊面に

沿う大規模主破壊」を対象とするAEセンサの周波数特性は必然的に異なるほか、「前者の場合は、後者が対象としている破壊現象の検知に鈍感」であり、「後者の場合は、前者の破壊現象に鈍感」となる。つまり、岩盤のAE計測も“地震とAEとの関係”と同様に“微視的破壊を計測対象とするか、巨視的破壊を計測対象とするか”を見極めた上でのAEセンサの周波数特性選択が重要といえ、換言すると“AEセンサにより岩盤破壊現象の全てが計測・判断できるわけではない。”

著者らは上述の「微視的破壊、その連結、巨視的破壊面の形成まで」を主的計測対象とした“岩盤AE計測方法(WEAD: wave-guide for AE waves due to rock deformation)”を開発し、数多くの原位置AE岩盤計測に適用している。

2. WEADの概念

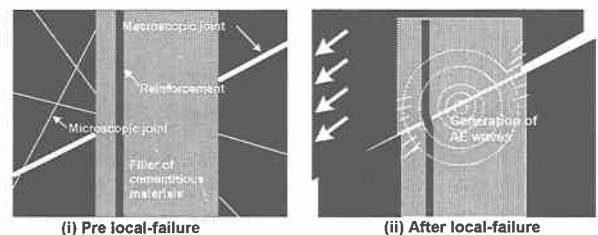


図-2 岩盤AE計測ウェーブガイド(WEAD)概念

WEAD⁵⁾⁶⁾は対象岩盤に削孔したボーリング孔内に周辺岩盤の物性を模したセメント系材料と鉄筋および、鉄筋に線上に配置した複数のAEセンサから構成される。図-2に示すように、岩盤内部に破壊が生じるとき、WEAD内部にも岩盤と同位置・同形態の破壊が生じ、き裂生成に消費されたひずみエネルギーの一部がAE波として放射される。このAE波を、複数のAEセンサで捉えることで「岩盤の破壊規模・形態を直接的に反映したWEAD内部の破壊にともなうAE波」として検出し、岩盤内部の破壊挙動が推定可能となる。ここで、上述のようにWEADは既知材料から構成されているので、実験室で再現可能となり、種々の破壊実験を行い、そのAEアクティビティを検討すれば、“対象岩盤ごとのAEアクティビティによる破壊基準”が構築できるわけである。

本論文は、種々の WEAD (岩質材料を模した鉄筋を配したモルタル) の曲げ・せん断実験により、AE アクティビティと破壊挙動を詳細に検討し、AE による破壊規準の妥当性を検証する。ここで、紙面の都合上曲げ破壊の挙動を中心に述べる。

3. 種々の WEAD の曲げ・せん断実験

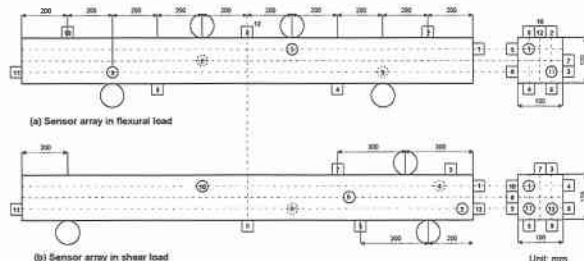


図-3 載荷方法と AE センサ配置

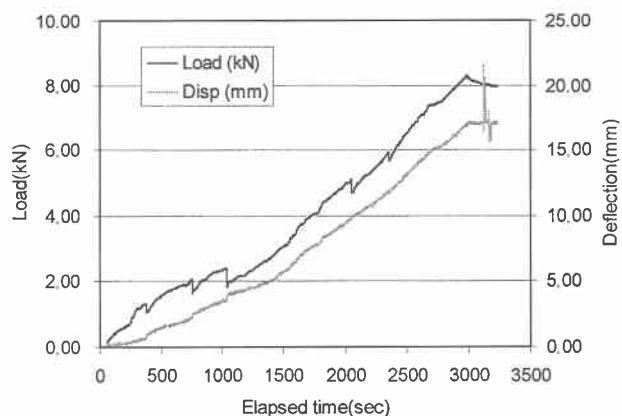
種々の物性を有する WEAD 角柱供試体 ($10 \times 10 \times 200$ cm) を W/C: 25%, 45%, 60% (以下順に H, M, L 供試体と略す) となるモルタルによりそれぞれ 6 体作成する。ここで、鉄筋 D13 は、供試体中立軸上に配置されている。各試験体の物性は、WEAD 試験体とともに作成した円柱供試体 ($\phi 5 \times 10$ cm) により試験時に測定する。図-3 に示すように曲げ破壊は、4 点曲げ載荷により、せん断破壊は 3 点曲げ載荷で、せん断スパンを小さくするパンチングシアールにより与える。

12 個の AE センサ (60 kHz 共振型) が図-3 に示すように、曲げ試験では供試体全体を囲むように、せん断試験ではせん断スパンを中心に計測できるよう配置されている。ここで、1 個の AE センサ (Ch-12) は擬似 AE 波 (超音波) 発信に用い、擬似 AE 波は試験前後に送信し、供試体の弾性波特性を検討する。各 AE センサで得られた AE 信号はプリアンプで 40 dB 増幅後、45 dB 以上の AE 信号を DSP から成る MISTRAS AE 計測システム (PAC 社製) で AE 波形と AE パラメータを収録する。

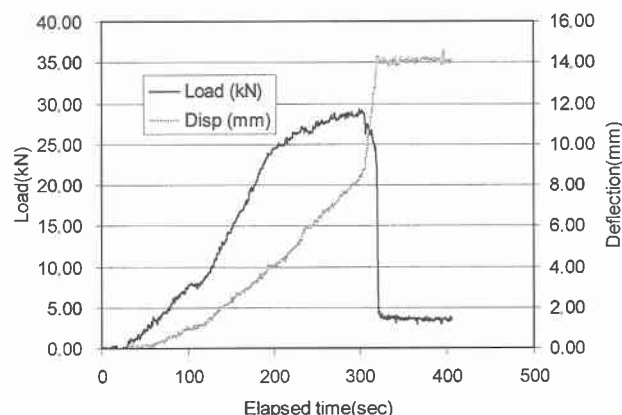
AE 信号の収録以外に載荷荷重をロードセルにより、中央部上端面の変位 (曲げ)、載荷点上端面の変位 (せん断) をレーザー変位計で測定する。なお、試験は手動油圧ジャッキにより荷重制御 (曲げ: 2.9 N/sec, せん断: 9.8 N/sec) で実施する。以下に紙面の都合上、代表的な曲げ試験結果とせん断試験結果 (W/C: 25% の曲げ FH1', W/C: 60% のせん断 SL2) を中心に検討を加える。

4. 実験結果と考察

図-4 に曲げ、せん断試験で得られた荷重と変位の経時変化を示す。図-4(a) の曲げ試験より、荷重、変位ともに最大荷重値 (8.3 kN) までほぼ連続的な単調増加を示す。ただし、荷重に着目すると、375 秒 (1.2 kN), 750 秒 (2.0 kN), 1040 秒 (2.4 kN), 2055 (5.1 kN) 秒, 2390 秒 (5.8 kN), 2655 秒 (7.2 kN) に明らかな荷重降下が認められる。これらは大規模なクラックの発生に対応していると考えられ、AE 源の位置標定および、AE パラメータとともに後述する。図-4(b) のせん断試験より、120 秒 (9 kN) までに荷重降下を数回繰返し、その後 200 秒 (25 kN)



(a) 曲げ試験



(b) せん断試験

図-4 載荷方法と AE センサ配置

まで単調増加傾向を示す。200 秒～300 秒に荷重速度は急激に低下し、変位の安定した増加が最大荷重 (29 kN) まで認められる。つまり、荷重は手動の油圧ジャッキにより 200 秒までは制御可能であったが、その後は、変形が荷重増加に比べ卓越し、変位制御を示す結果となった。

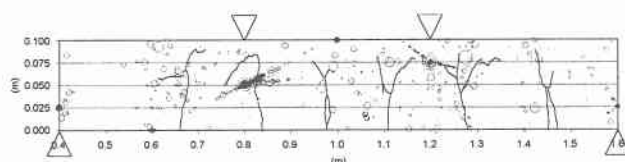


図-5 曲げ試験でのクラックスケッチと AE 源 2 次元位置標定 (実線: 正面観察, 点線: 背面観察, プロット面積は、第一到達 AE 波の AE エネルギーの大きさを反映している)

図-5 に曲げ試験で得られたクラックスケッチと AE 源 2 次元位置標定結果を示す。供試体正面クラックおよび背面クラックに対応した AE 源が観察される。

図-6 に AE 源を荷重レベルごとに分割して表す。(a) の 20% (～534 秒) までの荷重増加により中央部右側に AE 源が数多く認められ、図-5 のスケッチより背面に観察された曲げクラックの発生が卓越的であることがわかる。また、既述の通り最初の荷重降下がこの間に生じていることから供試体底面の引張クラックがその主因であることが推察される。また、規模は小さいが 0.7 m 右上方と 1.2 m 左上方に向い圧縮曲げクラックの形成が観察される。(b) の 21～40% (1561 秒) までの荷重増加により、観察クラックに一致した供試体中央部に AE 源が観察さ

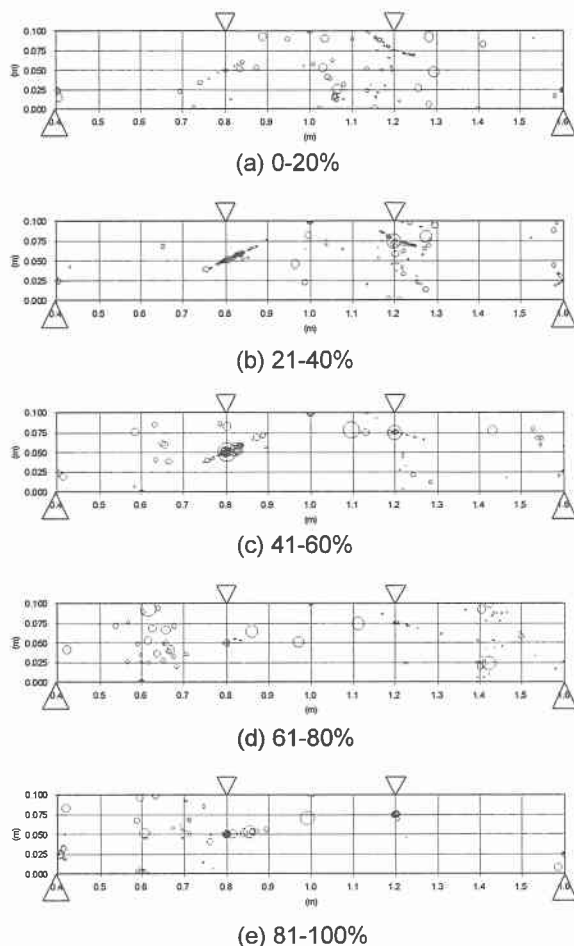
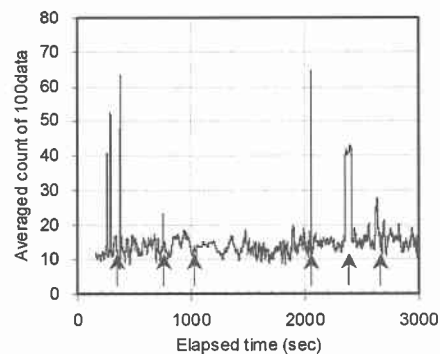


図-6 荷重レベルごとの AE 源推移

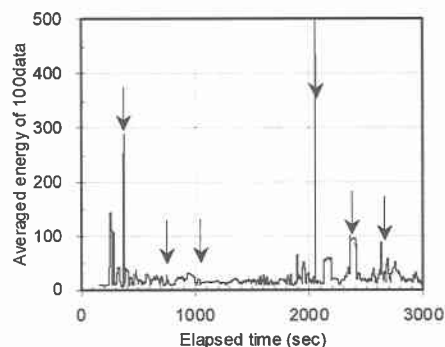
(実線：プロット面積は、第一到達 AE 波の AE エネルギーの大きさを反映している)

れる。底面 1.3 m 付近から左上方に向う AE 源も多数観察されており、この荷重レベルで生じた 2 つの荷重降下が、上述の 2 つのクラック発生により得られたことが推察される。(a)で指摘した 2 つの圧縮曲げクラックは、このレベルでも多数観察され、その進展が推定される。(c)の 41~60% (2019 秒) までの荷重増加により、供試体中立軸上の 0.8 m に大規模な右上方への圧縮曲げクラックの進展が観察され、その規模と方向および、図-4(a)の荷重の安定増加を考慮すると、圧縮曲げクラックの安定成長が予測される。(d)の 61~80% (2535 秒) までの荷重増加により供試体中央部のモルタル部で受持たれていた応力は、鉄筋部を中心に受持たれ、次の弱部となろう曲げスパン外のモルタルに作用し、0.6 m, 1.4 m に AE 源の集中が観察されたと考えられ、これらはクラック観察結果とも合致している。(e)の 81~100%において、モルタル部での AE 源は少なく、供試体中立軸の鉄筋部を中心に観察される。これらの AE 源は鉄筋とモルタルの付着破壊により得られたものと考えられ、モルタル部の破壊とは無関係と考えられる

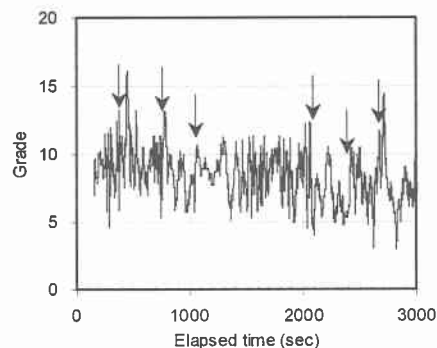
図-7 に曲げ試験で得られた AE パラメータ (リングダウンカウント、エネルギー、Grade, 改良 b 値) の経時変化を示す。図中、荷重降下が認められた時間を矢印で示す。ここで、Grade は AE 波形の初期勾配を意味し、



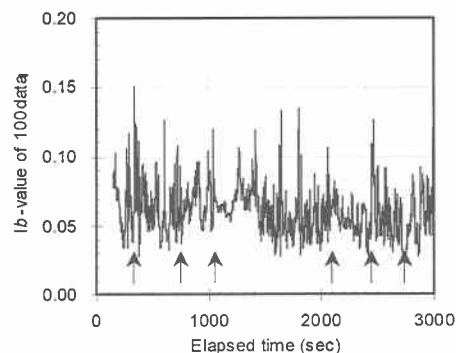
(a) AE ringdown count



(b) AE energy count



(c) Grade



(d) Improved b -value

図-7 AE パラメータ

大きい値が瞬間的な破壊現象 (引張卓越型) を示し、小さい値がせん断面に沿うずれ変形 (せん断卓越型) を示すと考えている⁵⁾。また、 b 値は元々地震学で定義される地震の規模別頻度分布の勾配を示し、改良 b 値⁷⁾は AE データのリアルタイム破壊評価が可能のように、その算

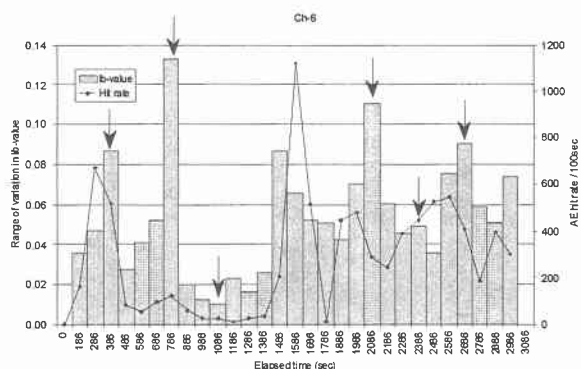


図-8 載荷方法と AE センサ配置

出法を改良したものである。

まず、AE リングダウンカウントとエネルギーについて検討する。最初の荷重降下 375 秒に対応した 60 以上のリングダウンカウント上昇、200～300 までのエネルギー上昇が認められ、これらは前述の AE 源の検討より、1.1 m のクラック発生によるものと考えられる。次の荷重降下 750 秒にエネルギーの顕著な変化が認められず、20 を超過するリングダウンカウント増加のみが得られる。これらは AE 源の検討より、供試体中央部のクラック発生と合致し、その規模が小さいものと考えられる。しかし、次の荷重降下 1040 秒に対応したリングダウンカウント、エネルギーの変化は認められず、この時間に得られた AE 源はなかった。したがって、1040 秒の荷重降下は試験装置の突発的ひずみに応じて得られた可能性が高い。2055 秒と 2390 秒の荷重降下に対応したリングダウンカウントとエネルギーの増加が認められる。これらは、AE 源の検討より、曲げスパン外の 0.6～0.7 m、1.4～1.5 m のクラック発生によるものと考えられ、これ以降、外力は全て鉄筋が受持つようになる。その後得られる 2655 秒の荷重降下とその後の僅かなクリープ変形は、AE 源の検討より、鉄筋とモルタルの付着破壊と考えられ、鉄筋に沿う断続的な破壊挙動に対応した荷重降下が生じているものと考えられ、それらに対応したリングダウンカウント、エネルギーの上昇が認められる。

次に Grade と改良 b 値に着目する。Grade は多数の増減を繰返しながら、時間経過とともに低下する。その値は、10 を中心に 1000 秒付近まで、8 を中心に 2000 秒まで、その後は 5 以下となる低下も認められる。これまでの著者らの検討より、供試体内部の破壊は、ほとんどが引張破壊で、後半にせん断破壊が得られているものと考えられる。改良 b 値より、リングダウンカウント、エネルギーと同様に 1040 秒を除き、応力降下前後に 0.1 を越えるまでの上昇と 0.05 以下への下降が認められ、荷重降下に対応したマクロ破壊の発生が示唆される。ここで、改良 b 値の上昇・下降にともなう変動幅を用いて改めて下記に検討を加える。

図-8 は AE 発生数が 100 個に達した後に、100 秒ごとの改良 b 値の最大、最小値より求めた「改良 b 値の変動幅」と 100 秒ごとの AE 発生率である。これまでの検討と同様に 1040 秒を除き、応力降下（矢印で示す時間帯）

と改良 b 値の大きな変動に合致が認められ、同図より 0.08 がその基準値となることがわかる。応力降下と b 値の大きな変動が大規模破壊の発生を示していると考えれば、AE 発生数と改良 b 値との関係より、AE 発生数の増加は、すなわち大規模破壊の発生を示唆しておらず、破壊規模と AE 発生数との直接的な関連性は低いものと考えられる。また、1000 秒以降に変動幅が大きい改良 b 値が連続的に得られており、これらは図-6(b), (c)に対応し、両載荷点近傍での安定した圧縮曲げクラックの斜め成長による変動であると考えられる。

5. まとめ

地震波動と AE 波動の周波数特性により、計測の破壊現象対象と AE センサの必要周波数特性を明確にした。そして、岩盤の微視的破壊を主目的とした AE 計測方法 (WEAD) を解説した。そして、WEAD (岩質材料を模した鉄筋を配したモルタル) の曲げ・せん断実験により、AE アクティビティと破壊挙動を詳細に検討し、AE による破壊規準の妥当性を検証した。その結果、AE 発生挙動により WEAD の破壊挙動が解釈可能であり、例えば AE 発生数のみで判断困難なマクロ破壊の発生が改良 b 値の変動幅により検討可能であることがわかった。

今後、せん断試験時の AE 特性検討を加え、AE パラメータによる破壊規準データベースを構築する予定である。

参考文献

- 1) 三橋博三・六郷恵哲：コンクリートの破壊の力学 魅力と展望、コンクリート工学第 37 巻 9 号、1999。
- 2) M. Ohtsu, "Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of Acoustic Emission Source: Application to in Situ Hydrofracturing Test," Journal of Geophysical Research, Vol. 96, No. B4, pp. 6211-6221. 1991.
- 3) 金森博雄：地震の物理、岩波書店、第 3 章 最近の震源理論、1991。
- 4) 肥後矢吉：周波数領域での AE 信号解析 (AE 周波数解析のメリット・デメリット)、日本工業出版、超音波 TECHNO 第 9 巻第 8 号、1997。
- 5) T. Shiotani, Shigeru Miwa and M. Ohtsu, "Development of AE Wave-Guide for Rock Failure Monitoring, JSNDI, Progress in Acoustic Emission X, pp. 85-90, 2000.
- 6) 池田憲二・中井健司・日下部祐基・塩谷智基・三輪滋・嶋倉一路：アコースティック・エミッション法による長期岩盤計測、土木学会北海道支部論文報告集、第 57 号、投稿中
- 7) 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.