

論文 損傷を受けた鉄筋コンクリートの低レベル動的載荷時における AE パラメータ解析

重石光弘^{*1}・辻 伸幸^{*2}・大津政康^{*3}

要旨: アコースティック・エミッション (AE) 法による供用中の鉄筋コンクリート構造物の健全度を診断する技術を開発するための基礎研究を行った。すなわち、単純な鉄筋コンクリート梁供試体を用いた曲げ破壊試験を行い、その際に発生した AE 波動を検出して AE パラメータの抽出を行った。そして、AE 波形解析を適用した AE 発生源の幾何学的諸量の逆解析の結果を考慮した AE パラメータの考察を行うことによって、鉄筋コンクリートの曲げ破壊時における力学的挙動に対する AE パラメータの定性化を試みた。

キーワード: アコースティック・エミッション, 診断, 非破壊検査, ひびわれ, 疲労

1. はじめに

アコースティック・エミッション (AE) とは、固体材料中で質量の急速な変位 (微小亀裂) が生じると、その箇所から弾性波 (AE 波) が発生し、その波が材料中を伝播する現象である [1]。既存ひびわれのような亀裂の進展に伴い、その先端部で内部エネルギーが AE 波として解放される現象は代表的な AE であるが、摩擦、破碎などによっても AE は観察される。これらの AE 波を検出し利用するのが AE 法で、リアルタイムによる連続観察と広範囲の監視が可能で、荷重下での動的な材料挙動を観測できるという利点があり、材料および構造物の内部挙動あるいは状態を推定、評価するための技術としての建設分野における利用価値は非常に高い [2]。

AE 法は、一般に AE パラメータ解析と AE 波形解析とに大別される。AE パラメータ解析は、膨大な量の AE イベントに対し高速に処理が可能で、しかも AE 計測ならびにデータ処理に必要なシステムも比較的安価である。しかしながら、その解析結果は定性的なものとなりがちで、正確な推定、評価を行うためには個々の計測対象に対し、経験的なデータベースが構築されている必要がある。一方、AE 波形解析では、AE の発生源の幾何学的諸量を定量的に逆解析できる [3] が、複雑な解析処理や高価な計測システム等の面で AE パラメータ解析に劣る。すなわち、広範なモニタリングや検査には前者が適し、詳細な検討、評価を行うには後者が適している。

重要建造物として使用されている鉄筋コンクリート構造物の診断を行う際には、その機能が損なわれることなく非破壊的に、またその機能の提供を停止することなく継続的に行われねばならない。本研究の目的は、供用中の鉄筋コンクリート構造物から発生する AE に着目し、AE パラメータ解析の利点を活かした鉄筋コンクリート構造物の診断技術の開発を行うことである。そこで、鉄筋コンクリート構造物が破壊する際の力学的挙動と AE パラメータとの関係を正確に把握するために、波形解析による AE 発生源の幾何学的諸量の逆解析結果に基づいて考察を試みた。

*1 熊本大学助手 工学部土木環境工学科, 博(工) (正会員)

*2 熊本大学学生 工学部土木環境工学科 (正会員)

*3 熊本大学教授 工学部土木環境工学科, 工博 (正会員)

2. 鉄筋コンクリートの曲げ破壊実験

2. 1 実験概要

実験に用いた鉄筋コンクリート梁供試体は、圧縮強度 $\sigma_p=49.5\text{MPa}$ 、弾性係数 $E=34.9\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.215$ の物性値を持つAEコンクリートを用いた。図-1に示すように標準角柱供試体中に1本のD10異形鉄筋を配した単純な構造で、下面には深さ10mm、幅約1mmのノッチを擬似的な既存ひびわれとして加工した。また、この供試体を使用したAEコンクリートの超音波伝播速度は、 4770m/sec であった。

図-2に示すような4点曲げ载荷によって、ノッチ先端部よりひびわれを進展させ、この間に発生したAEを、波形解析によるAE発生源の同定が可能な、6チャンネルのAE計測システムを使用して計測した。

AE波の検出には、図-3のように供試体表面に取り付けられた、 $200\sim1000\text{kHz}$ の周波数帯域での応答が平坦な広帯域型AEセンサ(Physical Acoustics社製 UT-1000)を使用し、センサ出力に対し 120mV にしきい値を設定したAE計測装置(Physical Acoustics社製 LOCAN320)によってリアルタイムでAEパラメータを採集した。

また、センサ#1をトリガチャンネルとして、これへの入力信号が設定しきい値を超えた時に、AE計測装置から波形記録装置に対してトリガ信号を出力させ、これを受けた波形記録装置(Physical Acoustics社製 TRA212)がAE信号を分解能 $10\text{bits}/1\text{MHz}$ にてA/D変換した 2048words/sample の波形として、6チャンネル同時に記録するようにした。

コンクリートのような複合材料にありがちな突発的なAE発生挙動のために、AE計測システムの処理速度の限界を超えてしまう事がないように、手動により緩やかに荷重を载荷し、AE発生挙動の緩速にあわせて、荷重速度を変化させ、その時の载荷荷重および载荷部の鉛直変位を、ロードセルおよび変位計によって計測した。

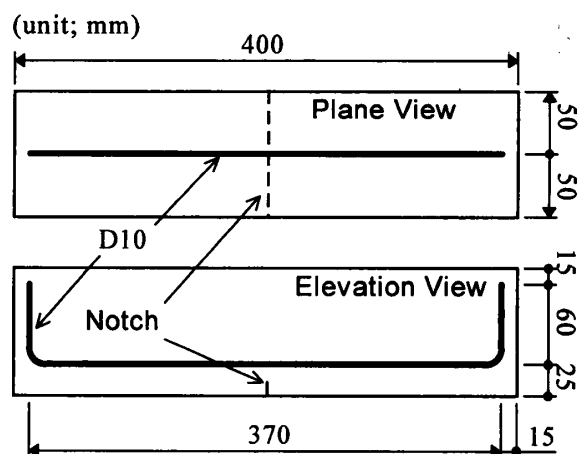


図-1 鉄筋コンクリート梁供試体

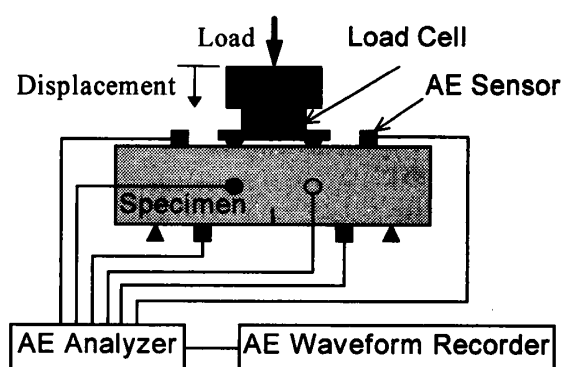


図-2 曲げ破壊試験におけるAE計測

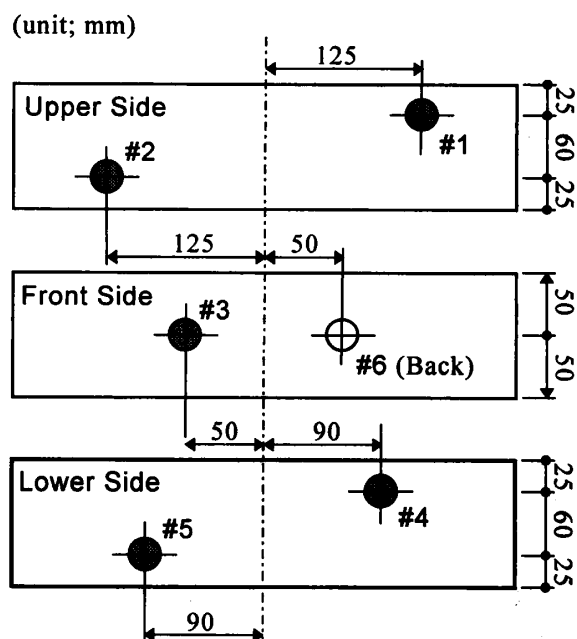


図-3 AEセンサの配置

実験における載荷荷重と載荷部における鉛直変位との関係を図-4上段に、イベント法により計数したA E発生数の累積と載荷部における鉛直変位との関係を図-4下段に示す。

載荷開始(図中①)から鉛直変位が0.5mmを超えた時点(図中②)で、荷重-鉛直変位曲線において最初の変化が見られるが、①-②間ではA E発生挙動は穏やかであり、供試体全体が弾性的に変形しているものと考えられる。変化点②では加工しておいたノッチ先端部よりのひびわれの発生が認められ、その予兆としてA Eの発生が見られた。

その後、最初の降伏(図中③)が見られるまでの②-③間では、荷重-鉛直変位の関係は線形的に推移している。この間、A Eは定常的に発生しており、コンクリート部では局所的な塑性領域、すなわち破壊進行領域[4]が形成、拡大しつつあるものと考えられ、ひびわれの進展も認められた。しかしながら、鉄筋の効果によって供試体全体としては弾性状態を保っている様子が伺えることから、鉄筋とコンクリートとの付着は依然として保たれているものと考えられる。

さらに載荷を進めると、荷重-変位曲線は小刻みな降伏を繰り返しながら、最終的に供試体全体が降伏(図中④)した。この③-④間での小刻みに繰り返されている荷重の上下変動は、鉄筋の付着領域における破壊が、幾つかの局所領域における小規模な破壊として、進行したと思われる。

本研究では、載荷の開始から降伏に至るまでの①-④間で検出されたA Eを解析対象とした。

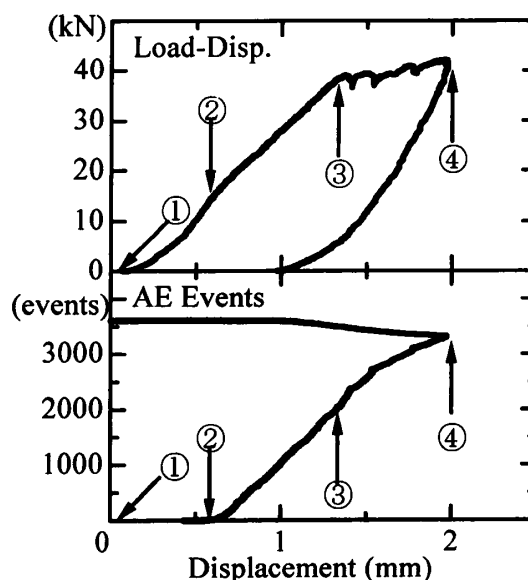


図-4 荷重・A E発生累積と鉛直変位との関係

3. A Eパラメータによる鉄筋コンクリートの曲げ破壊の観察

一般的なA E信号の特性パラメータには、(1)せん頭値(Amplitude): A E信号の最大振幅値、(2)立ち上がり時間(Rise Time): A E信号がしきい値を超えてから最大振幅値に至るまでの時間、(3)立ち上がり勾配(Rise Time Slope): 最大振幅を立ち上がり時間で割った値、(5)振動回数(Counts): A E信号の持続時間中にA E信号がしきい値を超えた回数(波数)、(6)持続時間(Duration): A E信号の包絡線がしきい値を超えている間の時間、(7)平均周波数(Average Frequency): 振動回数を持続時間で割って得られる見かけの周波数などがあり、これらを必要に応じて他のデータと組み合わせたり、関連付けて、A E挙動に関する特徴を見出すことがA Eパラメータ解析の目的である。図-5は、鉄筋コンクリート梁供試体が曲げ破壊を生じる際に検出されたA E信号のパラメータを、発生した時点における載荷部の鉛直変位で示したものである。

A Eせん頭値(図中左上段)は、A Eを発生させた事象、例えば変形や破壊、摩擦、破碎の度合いを知る尺度となるが、大きなせん頭値を持ったA Eは、ひびわれの進展過程である図-4に示す②-③間で比較的多く発生していることがわかる。

また、立ち上がり時間(図中左中段)、立ち上がり勾配(同左下段)、振動数(同右上段)、持続時間(同右中段)はいずれも、どのような事象によって発生したA Eか、その性質や構造に関する情報であると考えられる。立ち上がり勾配が大きなA E信号は、突発的な事象、例えば圧

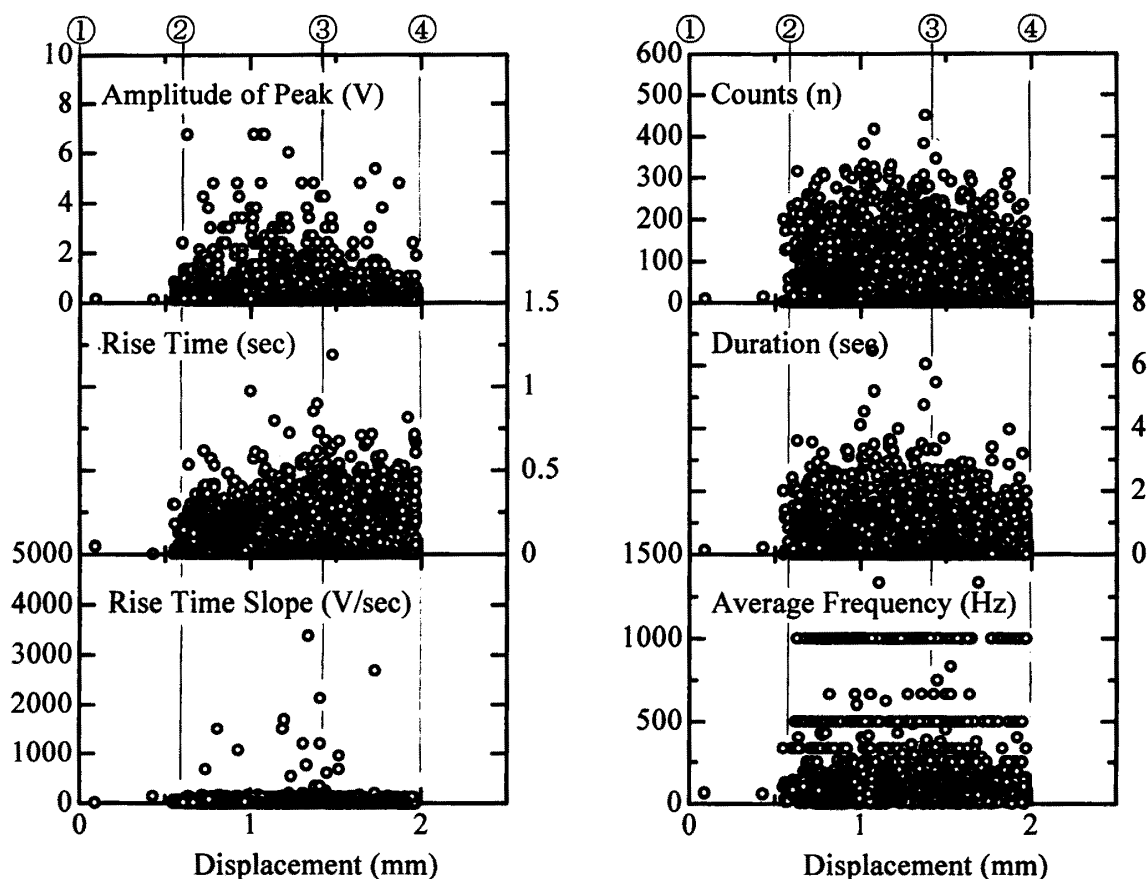


図-5 鉄筋コンクリートの曲げ破壊時におけるAEの特性パラメータ一覧

壊のような破壊があったことを示し、これらは、鉄筋の付着境界の破壊が始まったと思われる③の直前で生じたことがわかる。一方、立ち上がり時間や持続時間が長かったり、振動数が多いAE信号は、継続的な事象、例えば亀裂面のどうしの接触摩擦によるものであると考えられるが、これらの特徴をもつAEは、ノッチからのひびわれが進展した②-③間に発生したことがわかる。さらにこれらは、曲げ破壊の進行に伴って見られなくなっており、亀裂の成長によって亀裂面同士の距離が広がったために、接触摩擦が起こりにくい状態となったものと推定される。

コンクリートのような岩質複合材料では、AE波のような高周波波動は非常に減衰が大きく、しかも、材料が劣化すれば、組成粒子間結合の弛み、微小亀裂生成によってさらに弾性波の伝播距離は短くなる。したがって、せん頭値や立ち上がり時間などの波動振幅に依存するAEパラメータを利用することが、コンクリート工学上、困難なものとなっている。その点では、振動数や持続時間も同様に影響を受けるが、これらはAEの発生源から検出点までAE波が伝播する材料の性質に関する情報が含まれており、これらの利用価値は高いと思われる。実験結果からもこれらの平均的な傾向は、鉄筋コンクリートの曲げ破壊の進行に伴って減少しており、継続的に観察していれば材料の劣化が進んでいることを伺うことができる。

4. AE波形解析結果に基づくAEパラメータの考察

前章で述べたように、継続的にAEを計測していれば、各AEパラメータの時間的な分布を調べることによって、現象の特性付け、異なるAE発生要因の識別が可能である。しかしながら実際には、鉄筋コンクリート構造物の損傷度あるいは劣化度をその時点の検査結果のみによって診

断・評価できる技術が望まれる。

そこで、各AEパラメータ同士の相互関係のみで現象の特性を把握する従来のAEパラメータ解析とは逆に、いかなる現象が原因となって、いかなるAEパラメータが得られるかを確実に把握してデータベースとして構築し、実際のAE計測において得られたAEパラメータの特性から、その現象の原因を同定することを考え、AE波形解析法によって得られたAEの発生源の同定結果を利用して、AEの発生原因とAEパラメータとの相互関係を把握することを試みた。

図-6は、AE波形解析法SiGMA[5]によって得られた、鉄筋コンクリート梁供試体が曲げ破壊を生じる際のAEの発生源となった微小亀裂の位置、形成モード（せん断型・引張型）およびその微小亀裂の面の運動方向である。ただし、ここでは、載荷開始後から鉄筋付着部の破壊が生じたと思われる、鉛直変位が約1.5mmに達した間のAEを解析対象とし、形成モードがせん断成分率75%以上のせん断型微小亀裂およびせん断成分率25%以下の引張型微小亀裂を抜粋して図中上段から履歴順に示している。図中左側に示した正面から見た結果から、ノッチ先端から進展するひびわれの形成過程が正確に解析されていることがわかる。段階(i)から段階(iv)にかけて初期の段階では引張型亀裂が多数形成され、次第にせん断型亀裂が順次ひびわれの進展方向へ形成されていく様子が観察される。最後の段階(v)では、鉄筋位置周辺にもせん断型微小亀裂が存在しており、これらは鉄筋とコンクリートとの付着切断に寄与したものであることが伺える。

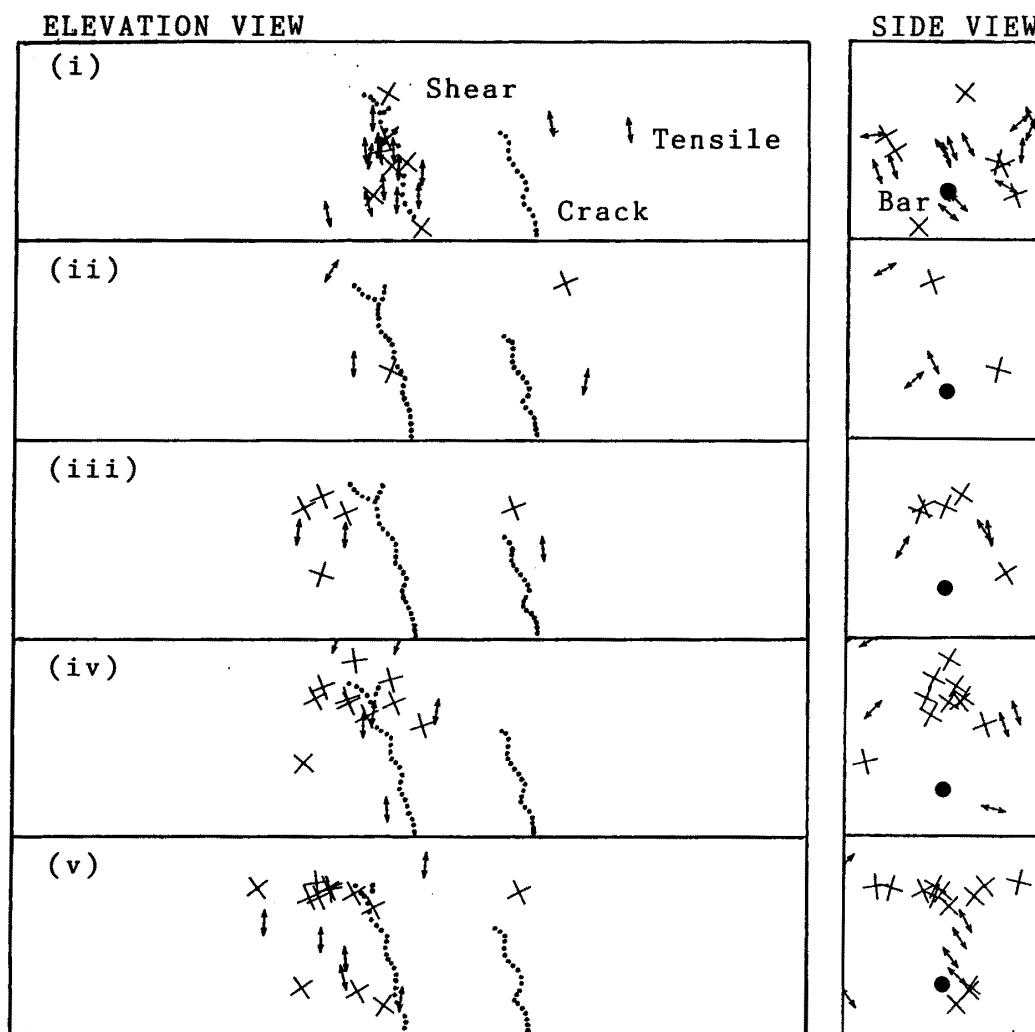


図-6 鉄筋コンクリート梁の曲げ破壊におけるAE波形解析結果

図-7上段には波動振幅に関するパラメータとして立ち上がり勾配の鉛直変位における分布を示し、同図中段には波動伝播に関するパラメータとして平均周波数の鉛直変位における分布を示した。さらに、新たな試みとして、同図下段にはA E信号の立ち上がりまでの平均周波数、すなわち、立ち上がり時間までの間にA E信号がしきい値を超えた回数を立ち上がり時間で割って得られる見かけの周波数（図中中段）をA Eパラメータとして、鉛直変位における分布を示した。

それぞれの図中において、○印のものは引張型微小亀裂が形成された際に発生したA E、一方、■印のものはせん断型微小亀裂が形成された際のA Eである。

ノッチ先端からのひびわれの進行段階にあたる②-③間においては、平均周波数および比較的高い立ち上がりまでの平均周波数で伝播したA Eは、鉄筋付着部の破壊段階③以降なると見られなくなっている。これは材料劣化によって高周波成分の減衰が大きくなったためと思われる。

また、せん断型A E、引張型A Eの種別によるパラメータの明確な特徴付けは困難であるが、比較的高い立ち上がり勾配が大きなせん断型微小亀裂の生成によるA Eは、いずれの段階においても見られるのに対して、引張型微小亀裂によるA Eは、ひびわれの進行とともに減少していく傾向が伺える。

5. まとめ

鉄筋コンクリート構造物を非破壊的に診断するための手法として、A E法の利点を活用した検査技術を開発するために、A E波形解析法による定量的なA E発生源の同定結果に基づいたA Eパラメータの定性化を提案し、また、鉄筋コンクリート梁供試体の曲げ破壊時におけるA E波形解析結果に基づいた、A Eパラメータの特徴付けを試みた。

参考文献

- [1]尾上 守夫 他：アコースティック・エミッションの基礎と応用，コロナ社，1976
- [2]アコースティック・エミッション，（社）日本非破壊検査協会，1990
- [3]大津 政康 他：アコースティック・エミッションの特性と理論，森北出版，1988
- [4]重石 光弘，大津 政康：A E波形解析によるコンクリート部材の曲げ破壊の観察，第10回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，pp. 159-164，1995
- [5]Ohtsu, M. : Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of Acoustic Emission Source, Journal of Geophysical Research, Vol. 96, No. B4, pp.6211-6221

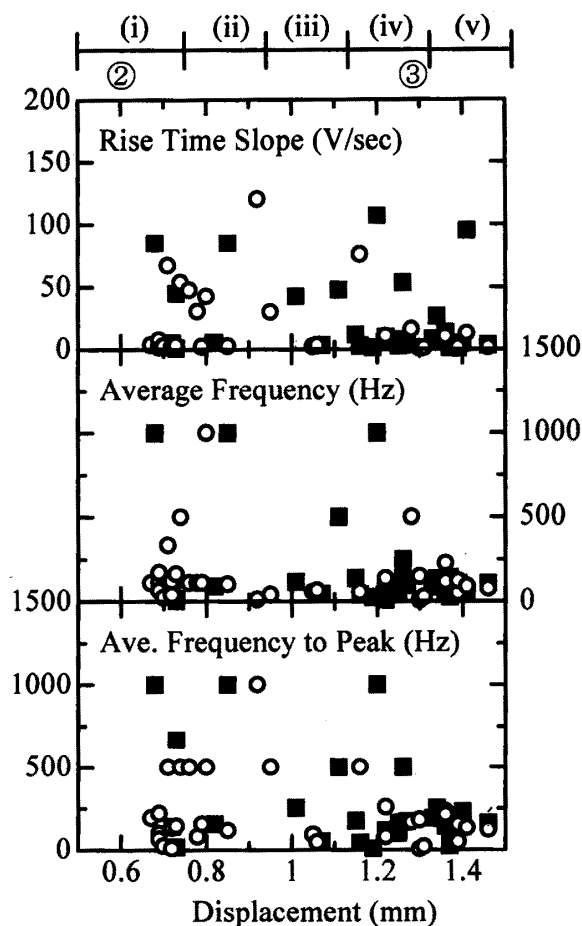


図-7 A Eパラメータのせん断率による分布