

論文 AE解析によるコンクリートの引張軟化過程の考察

山ノ内正司*1・岸野佑次*2・新関茂*3

要旨：破壊進行領域が拡大していく損傷過程を調べるために、コンクリートの3点曲げ試験を行い、8チャンネルによるAE解析と、引張軟化曲線の逆解析を行った。AE発生源と破断面のクラック分布図との対比により、引張軟化過程における準微視的レベルの破壊メカニズムを明らかにした。また、引張軟化に伴う累積AEエネルギーの変化と力学モデルから求められるクラック形成エネルギーの変化が同じ構造をしていることが明らかになり、新たに提案したAEエネルギーが、引張軟化に伴う微細なひび割れの累積過程を定量的に評価できることを示唆する結果が得られた。

キーワード：引張軟化過程, AE位置標定, AEエネルギー, クラック形成エネルギー

1. はじめに

コンクリートのひび割れ進展の特徴は、微細なひび割れが空間的に累積し、拡大していく点にある。巨視的なひび割れ面を形成する領域では、微細なひび割れの発生に始まり、それらが成長、累積することにより、次第に領域の平均的な結合応力が失われていく。このような微細なひび割れの累積過程を力学モデルとして表したものが引張軟化則であり、コンクリート構造物のひび割れ過程を数値解析する際の構成則として重要な役割を担っている。

この引張軟化過程をAE解析によって明らかにすることができれば、AE手法がコンクリートの引張軟化過程に及ぼす準微視的レベルの要因をより詳細に解明できる有力な手段となるとともに、準微視的レベルの力学特性や構造特性を考慮した損傷モデルによって引張軟化過程を表すことができるものと考えられる。そのためには、引張軟化に伴う微細なひび割れの累積過程を定量的に評価し得るAEパラメータの検討が必要になる。

本論では、コンクリートばりの3点曲げ試験

における8チャンネルAE解析と引張軟化曲線の逆解析を行い、AE発生源の空間分布と新たに提案したAEエネルギーに基づいて、コンクリートの引張軟化過程における準微視的レベルの破壊メカニズムを考察した。

2. 実験方法

表-1に示す配合で、寸法20cm×10cm×90cmの高強度コンクリート供試体を作成し(水中養生28日)、図-1のように、中央部に幅1mm、長さ2cmのノッチを入れた。

3点曲げ試験は、容量2,000kNの油圧型耐圧試験機を用いて行い、供試体が不安定破壊に至らないように、AE事象数が急増し始めた後に除荷し、再び載荷する履歴載荷方式を採用した。中央点下部のたわみ、ノッチ部の肩口開口変位(CMOD)、支点上部の変位、荷重を2秒間隔で計測した。

AE計測は図-2に示すように、8チャンネルのAEセンサーで検出した波形の内、1~4チャンネルの波形については、ローカルプロセッサによって最大振幅や継続時間などのAE

*1 福島工業高等専門学校助教授 建設環境工学科 工博(正会員)

*2 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博

*3 東北大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博(正会員)

表-1 配合表および力学諸量

Gmax mm	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)					高性能AE減水剤	圧縮強度 MPa	割裂強度 MPa	弾性係数 GPa
			W	C	S	G					
20	29.6	35.6	148	500	600	1,136	9	70.9	5.2	10.9	

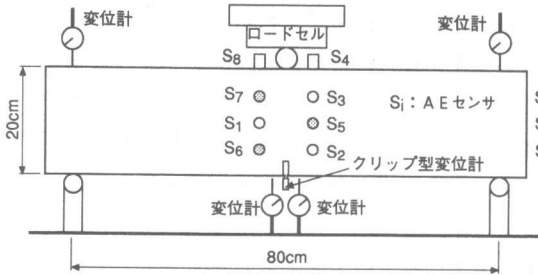


図-1 はりの3点曲げ試験とAE計測

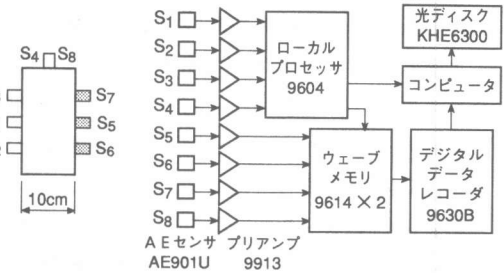


図-2 8チャンネルAE計測システム

パラメータの抽出を行っている。AEセンサーの共振周波数は 140 kHz である。ウェーブメモリのサンプリングタイムは 0.2 μsec，波形長は 1kWord とした。ウェーブメモリの容量は各チャンネル共に、1MWord である。

実験終了後、破断面の割れのタイプ、すなわち、骨材とモルタルの剥離（ボンドクラック）、モルタル部の割れ（モルタルクラック）、骨材の割れ（骨材クラック）を目視により観察し、クラック分布図を作成した。またダイヤルゲージによって破壊面の形状を 5mm 間隔で測定した。

3. AE エネルギーの定義

検出波形の AE パラメータだけから AE エネルギーを求める方法では、多チャンネル計測の場合、破壊源までの距離が検出点ごとに異なるため、距離減衰の効果によりチャンネルごとに異なった AE エネルギーを与えることになる。ここでは、AE 波形の最大振幅に及ぼす、センサーの共振特性の影響と表面波や反射波の成分が含まれることによる影響を考慮して距離減衰の効果をも弱め、1 事象の AE エネルギー E_{AE} を次式により定義した。

$$E_{AE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{pi} / K_i)^2 \cdot R_i \quad (1)$$

ここに、 V_{pi} はセンサー番号 i の AE 波形の最大振幅、 R_i はセンサー番号 i から破壊源までの距離、 K_i はセンサーの相対感度、 n はローカルプロセッサにおいて AE をヒットしたチャンネル総数を表している。

4. 結果および考察

4.1 荷重～変位曲線および引張軟化曲線

図-3 に、荷重～肩口開口変位（CMOD）曲線、および累積 AE 事象数の変化を示す。数字は履歴荷重のサイクル数を表している。

引張軟化曲線の逆解析は、多直線近似法¹⁾により行った。荷重～肩口開口変位曲線の非線形領域に入る最初の点を用いて、弾性係数を $E = 10.9 \text{ GPa}$ ，引張軟化開始応力を $\sigma_0 = 5.88 \text{ MPa}$ と定めた。推定された引張軟化曲線を、図-8 に示す。引張軟化曲線下の面積から破壊エネルギーを求めると、 $G_f = 234 \text{ N/m}$ となった。

位置標定計算においては、8チャンネルの内 1チャンネルずつ除外して位置標定を行うことにより、標定結果の信頼性を表す指標を定め、信頼性の低い結果は除外した。荷重サイクル 17 までに記録された波形のうち、位置標定可能な 5,007 事象について解析を行い、3,526 事象の AE 発生源を決定した。

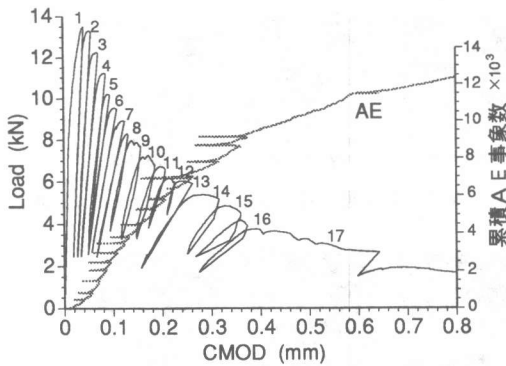


図-3 荷重～CMOD 曲線、累積 AE 事象数曲線

4.2 AE 発生源の空間分布と引張軟化特性

図-4 は、一例として、10 サイクル目の載荷過程で発生した AE 発生源と AE エネルギーの空間分布および引張軟化特性を表したものである。XZ 平面は、はりの破断面を表しており、YZ 平面は、はりを側面から見たものである。

図-4 (a) の網かけのパターンは、試験終了後に破断面の割れのタイプを観察して得られたクラックの分布図を表しており、記号 b はボンドクラックを、m はモルタルクラックを、a は骨材クラックを表している。円の中心が AE 発生源の座標を、面積が AE エネルギーの大きさを表している。全ての AE 発生源が確認できるように、円は AE エネルギーの大きい方から降順

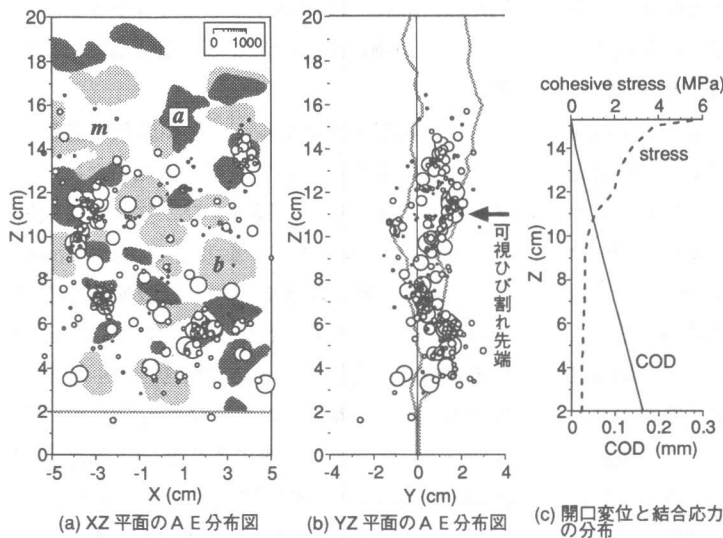


図-4 載荷サイクル 10 の AE 発生源の空間分布と引張軟化特性

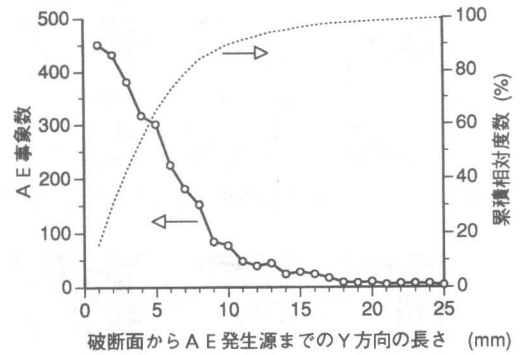


図-5 破断面から AE 発生源までの Y 方向の長さの度数分布

で描いている。図-4 (b) の 2 本の線は、破断面を YZ 平面へ投影した時の最大値と最小値をそれぞれ高さ方向に結んだものであり、全ての破断面はこの 2 本の線内にあることを示している。図-4 (c) は多直線近似解析により推定された破壊進行領域内の開口変位と結合応力の分布を示したもので、グラフの上部が破壊進行領域の先端位置を表している。

XZ 平面内の AE 発生源分布の特徴としては、断面内に一様に分布しているのではなく、内部構造に応じて局所的に発生する傾向を示している。

図-4 (b) と図-4 (c) より、計算上の破壊進行領域の長ささと AE 分布長さは良く一致していることがわかる。また、多くの AE が最終破断面の近傍から発生している。

図-5 は、載荷サイクル 16 までに発生した 2,892 事象の AE について、破断面から AE 発生源までの Y 方向の長さの絶対値の度数分布を示したものであり、破断面から 5 mm 以内に約 60 % の AE が、7 mm 以内では約 80 % の AE が発生していたことがわかる。破断面座標の測定精度や AE 位置標定の信頼性を総合すれば、これらは巨視的な破断面形成に関係した AE であると考えられる。

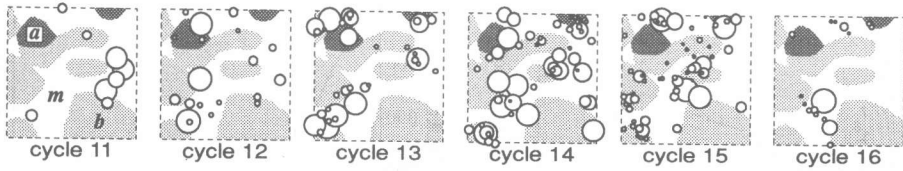


図-6 ボンドクラック近傍からのA E発生状況 [表示領域のX Z座標：左下(0, 8.5)～右上(4, 12.5)]

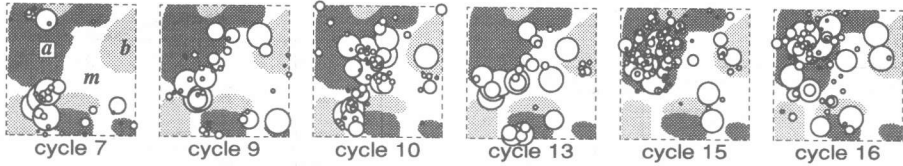


図-7 骨材周辺および骨材からのA E発生状況 [表示領域のX Z座標：左下(-5, 9)～右上(-1, 13)]

図-6は、いくつかのボンドクラックが密集した領域のA E発生状況を示したものである。荷重サイクル11～12でボンドクラックからモルタル部への微細なひび割れの発生が始まり、この領域の結合応力を伝達していると考えられるモルタル部に沿って、A E発生源が徐々に右上に進行している。荷重サイクル15で、この領域の引張軟化過程はほぼ終了したと見なせるが、引張軟化曲線の逆解析結果から、 $Z=10\text{cm}$ ではまだ 0.47MPa の結合応力が残っていた。これは、 $(X, Z)=(-3\text{cm}, 9\text{cm})$ に存在する骨材の効果によるものと考えられる。

図-7は、骨材周辺および骨材からのA E発生状況を示したものである。A E発生源の動きを見ると、荷重サイクル6～7で骨材下部のモルタル部から活性化し始めたA Eが、その後、荷重サイクル10まで骨材に沿うように上部に移動し、次に、骨材近傍のモルタル部の結合応力が失われたと考えられる荷重サイクル13から再び骨材下部の領域が活性化し始め、荷重サイクル15～16では骨材内部に集中していく様子が見て取れる。このように、骨材周辺部のA Eが活性化した後、骨材を中心とした局所的なA E発生が続くことは、引張軟化曲線のテール部において、骨材によるブリッジング機構がA E発生現象として顕現したものであり、引張軟化後期においては、ブリッジング機構が支配的であることが確認された。

4.3 累積A Eエネルギーによる引張軟化過程の考察

本節では、高さが一定の帯状の長方形領域から発生した累積A Eエネルギーと引張軟化過程の定量的な関係について考察する。

まず、計算処理を簡単にするために、図-4(a)の破断面を 5mm 間隔で区切ってクラックの分布をデジタル化し、A E発生源を近似的に同定した。すべてのA Eが最終破断面形成に関与したものであるとは断定できないが、図-5の度数分布図から判断すれば、全体の傾向を著しく変化させるほどではないと考えられる。図-9以降に現れる記号 m/b , a/m , a/b は、例えば、 a/m は骨材クラックとモルタルクラックの2つの割れが混在していた領域を表している。

次に、累積A Eエネルギーと引張軟化過程との定量的な関係について考察するためには、力学モデルに基づいて、微細なひび割れの累積過程に対応したエネルギーを考える必要がある。ここでは図-8に示すように、引張軟化過程途中の点 i までに消費されたエネルギー G_f^* を、 i 点と残留開口変位 w_{ri} を結ぶ直線上の面積として定義した。このエネルギー G_f^* を、Schorn^ら²⁾に従って、クラック形成エネルギー (energy of crack formation) と呼ぶことにする。残留開口変位 w_{ri} は、引張軟化曲線の履歴特性を考慮して決定した。

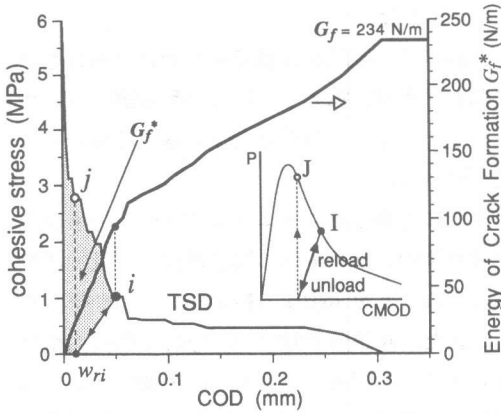


図-8 クラック形成エネルギーの定義

図-9は、高さ方向の座標 $Z=3\text{ cm}$ を中心とする高さ 2 cm 、幅 10 cm の長方形領域から発生したAEについて、クラック別累積AEエネルギーの開口変位の増加に伴う変化を示したものであり、積み重ね折れ線グラフとして表している。また、開口変位は長方形領域の中心の値を用いた。図より、AEエネルギーの累積過程とクラック形成エネルギーの変化がほとんど同じ構造をしていることが明らかになった。AEエネルギーとクラック形成エネルギーの物理的な対応関係は未だ明らかにされていないが、両者の構造が良く一致することから、ここではクラック形成エネルギーのスケールを図のように定めた。

図-10は同様に、 $Z=10\text{ cm}$ を中心とする長方形領域から発生したAEの、クラック別累積AEエネルギーの変化を示したものである。

2つの図より、引張軟化初期 ($\text{COD} \leq 0.06\text{ mm}$) の開口変位の増加に伴う累積AEエネルギーの変化は、クラック形成エネルギーと同じである。他の領域でもこの傾向が確認されており、その点までの総AEエネルギー量は、おおよそ $12,000 \sim 14,000$ であった。このことは、本研究で提案したAEエネルギーが、引張軟化過程における損傷を定量的に評価できることを示唆するものであり、特に注目される。

はりの下部にあたる $Z=3\text{ cm}$ の領域ではAEエネルギーの累積過程とクラック形成エネルギー

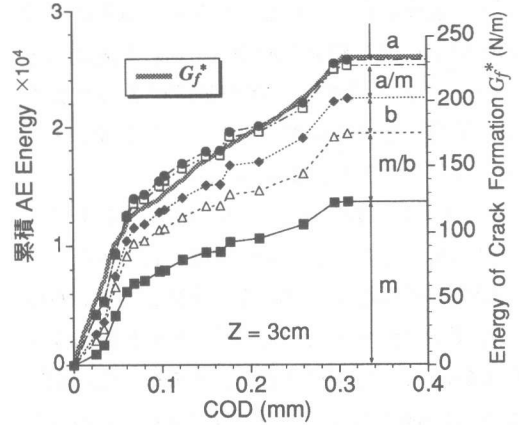


図-9 $Z=3\text{ cm}$ を中心とする領域の累積AEエネルギーの変化

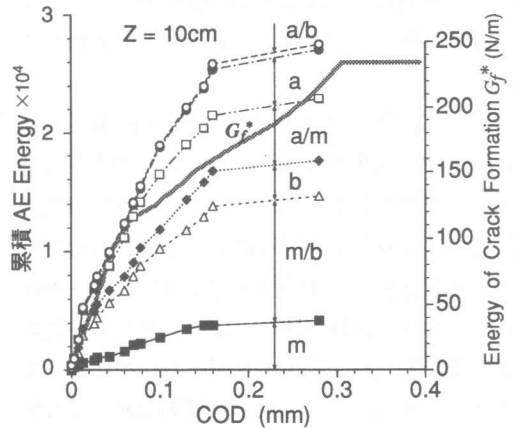


図-10 $Z=10\text{ cm}$ を中心とする領域の累積AEエネルギーの変化

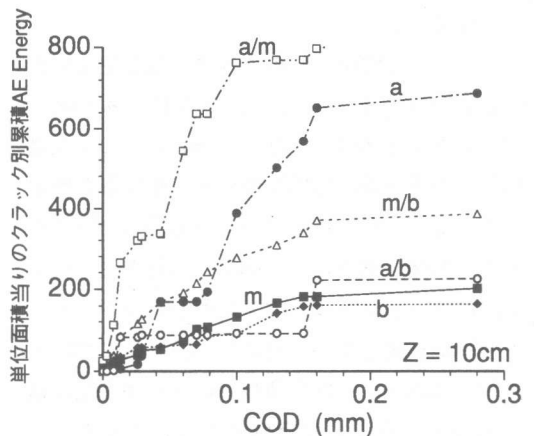


図-11 $Z=10\text{ cm}$ を中心とする領域の単位面積当たりのクラック別累積AEエネルギーの変化

ギーの変化が良く一致しているが、はりの上部の領域では開口変位が約 0.06 mm を越えるとブリッジング機構の程度が領域によって異なり、累積 A E エネルギーがクラック形成エネルギーよりも大きくなる傾向にあった。

図-11 は、Z=10cm の長方形領域における単位面積当りのクラック別累積 A E エネルギーの変化を示したものである。骨材とモルタルの混在領域（記号 a/m）からの A E が開口変位 0.04 mm まで急激に増加し、その後、開口変位が 0.08 mm になると骨材（記号 a）からの A E が活性化している。骨材とモルタルの境界領域から骨材へと、A E 発生源が時間的な位相差を伴って移動していることは、骨材のブリッジング機構が作用していることを表しているものである。

従って、骨材とモルタルの混在領域（記号 a/m）から発生する A E の内、骨材からの A E エネルギーが急激に活性化する以前のは実質的にはモルタルの割れによるものと判断される。その結果、引張軟化初期においては、骨材とモルタルの剥離破壊およびモルタルの破壊によって発生した A E エネルギーの合計はおおよそ 10,000 となり、引張軟化初期に発生した総 A E エネルギーの約 3/4 に相当する。この結果は、引張軟化初期では、マイクロクラッキングが卓越している³⁾ という結論を定量的に表したものである。

また、単位面積当りのモルタル部が完全に結合応力を失うまでに発生する A E エネルギーは、おおよそ 200~350 であった。その発生過程は、内部構造の影響を受けず、漸増傾向を示している。これに対して骨材が関係した領域からの A E 発生過程は内部構造の影響を受けやすく、Z=10cm の領域のように骨材のブリッジング機構が作用している場合は、段階的に急増する傾向にある。単位面積当りの骨材が完全に結合応力を失うまでに発生する A E エネルギーは、モルタルのおおよそ 2~3 倍であった。

5. まとめ

本論では、破壊進行領域内において微細なひび割れが累積、拡大していく過程を調べるために、コンクリートの曲げ試験に基づく解析と考察を行った。

新たに提案した A E エネルギーが、引張軟化に伴う微細なひび割れの累積過程を定量的に評価できることを示唆する結果がいくつか得られた。また、A E 発生源の空間分布や単位面積当りのクラック別 A E エネルギーの変化から、引張軟化初期ではマイクロクラッキングが卓越し、軟化後期では骨材のブリッジング機構が卓越していることが、より直接的に明らかになった。

さらに各種コンクリートに関する実験と解析を行い、骨材寸法やモルタル強度の違いが引張軟化特性に及ぼす影響を準微視的レベルから明らかにしていきたいと考えている。また、A E 発生源の同定の問題や、引張軟化領域の有効面積の減少度に対応した A E パラメータについて検討することも今後の重要な課題である。

参考文献

- 1) Kitsutaka, Y. : Fracture Parametares for Concrete based on Poly-Linear Approximation Analysis of Tension Softening Diagram, Fracture Mechanics of Concrete Structures, FRAMCOS 2, ed. by Wittmann, F.H. , AEDIFICATIO Publishers, Germany, Vol.I, pp.199-208, 1995
- 2) Schorn, H. and Kopp, St. : Detecting Freeze-Thaw Deterioration of Concrete by a Fracture Mechanics Method, Fracture Mechanics of Concrete Structures, FRAMCOS 3, ed. by Mihashi, H. and Rokugo, K. , AEDIFICATIO Publishers, Germany, Vol.III, pp.1695-1704, 1998
- 3) 野村希晶, 三橋博三, 鈴木 篤, 和泉正哲 : 非線形破壊力学手法に基づく高強度コンクリートの脆性化機構の考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, pp.9-16, 1990.10