

A E 解析によるコンクリートの引張軟化過程の考察

福島工業高等専門学校 正〇山ノ内正司

東北大学大学院工学研究科 正 岸野 佑次

東北大学大学院工学研究科 正 新関 茂

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。この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。

本研究では、引張軟化領域の微細なひび割れの累積過程を明らかにすることを目的に、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A E解析と引張軟化曲線の逆解析を行い、A E発生源の空間分布とA E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、3点曲げ試験を行った。供試体が不安定破壊に至らないように、A E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。A E計測の詳細は参考文献1）と同様であるため割愛する。

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A E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	

3. 結果および考察

図-1に、荷重～肩口開口変位（CMOD）曲線、および累積A E事象数の変化を示す。数字は履歴載荷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²⁾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 $E=10.9$ GPa、引張軟化開始応力を $\sigma_0=5.88$ MPaと定めた。推定された引張軟化曲線を、図-3に示す。

図-2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。網かけのパターンは、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。円の面積がA Eエネルギーの大きさを表している。本研究では、1事象のA Eエネルギー E_{AE} を式(1)により定義した。 V_{pi} はセンサー番号 i のA E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A Eをヒットしたチャンネル総数を表している。

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

A E発生源の動きを見ると、載荷サイクル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、載荷サイクル10か

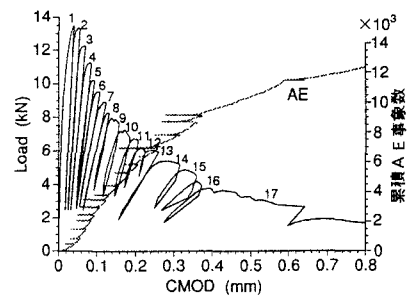
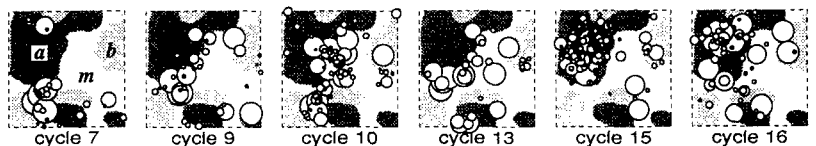


図-1 荷重～CMOD曲線および累積A E事象数曲線

図-2 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)

ら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載荷サイクル 13 から再び骨材下部の領域が活性化し始め、載荷サイクル 15~16 では骨材内部に集中していく様子が見て取れる。

次に、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、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。図-4、図-5 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要素からの A E であることを表している。

図-3 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³⁾ に従って、クラック形成エネルギーと呼ぶことにする。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-4 は、高さ方向の座標 $Z=3\text{cm}$ を中心とする高さ 2cm、幅 10cm の長方形領域から発生した A E について、クラック別累積 A E 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、A E 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。A E 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。

その結果、他の領域においても、引張軟化初期（開口変位 $\text{COD} \leq 0.06\text{mm}$ ）の開口変位の増加に伴う累積 A E 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り、その点までの総 A E エネルギー量は、おおよそ 12,000~14,000 であった。このことは、本研究で提案した A E 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る。

図-5 に、 $Z=10\text{cm}$ 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す。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 0.03mm まで急激に増加し、その後、開口変位が 0.08mm になると骨材（記号 a ）からの A E が活性化している。これは、図-2 の骨材のブリッジング機構を A E エネルギーによって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 であり、骨材の場合は、モルタルの 2~3 倍であった。

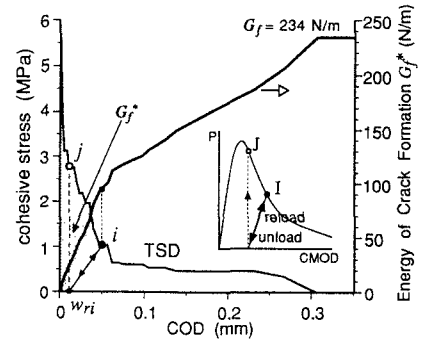


図-3 引張軟化曲線 (TSD) およびクラック形成エネルギーの定義

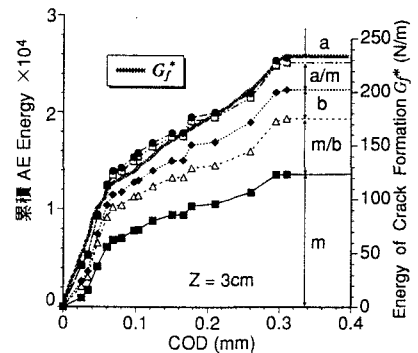


図-4 $Z=3\text{cm}$ を中心とする領域の累積 A E エネルギーの変化

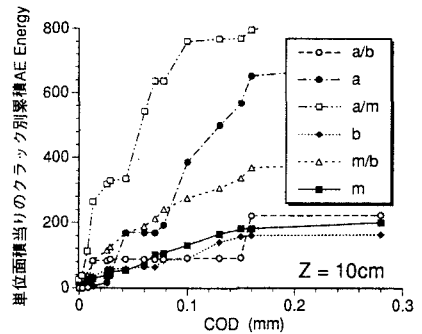


図-5 $Z=10\text{cm}$ を中心とする領域の単位面積当りのクラック別累積 A E エネルギーの変化

- 参考文献：1) 太田・山ノ内，平成 8 年度土木学会東北支部技術研究発表講演概要，pp.588-589, 1997
 2) Kitsutaka, Y., Fracture Mechanics of Concrete Structures, Vol.I, pp.199-208, 1995
 3) Schorn, H. and Kopp, St. d, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Vol.III, pp.1695-1704, 1998