

論文 AE 法による薄肉鉄筋コンクリート部材の破壊進行過程の考察

大野 健太郎^{*1}・宇治 公隆^{*2}・國府 勝郎^{*3}・清水 和久^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート製品には、土木学会コンクリート標準示方書等の耐力計算で対象とされていない薄肉断面を有する製品が多数あり、これらの製品に対する曲げひび割れ強度算定式の適用が困難であることが報告されている。本研究では、薄肉鉄筋コンクリート部材の4点曲げ載荷試験時にアコースティック・エミッション (AE) 法を適用し、破壊進行過程の考察を行った。AE 源位置標定の結果、最大荷重の90%程度でコンクリートの引張軟化現象が顕著に現れることが明らかとなった。さらに、部材厚が小さいことから圧縮縁の破壊が引張縁の破壊よりも先行し、主破壊に至る可能性が示唆された。

キーワード：AE 法, 薄肉鉄筋コンクリート製品, 曲げひび割れ強度, 引張軟化, SiGMA 解析, *Ib*-value

1. はじめに

JIS A 5372 で規格されている鉄筋コンクリート製品の中で U 形側溝の性能照査法を例にとれば、製品の3点曲げ試験時に所定の荷重においてひび割れ幅 0.05mm を超えないことと規定されている。鉄筋コンクリート製品の多くは部材厚 200mm 以下かつ鉄筋かぶりが 20mm 程度である特徴を有する。既往の報告¹⁾によれば、部材厚 60mm 以下、主鉄筋のかぶりを 20mm とした薄肉鉄筋コンクリート部材において、曲げ破壊挙動はコンクリートの曲げひび割れの発生とともに破壊に至ることが報告されている。また、土木学会コンクリート標準示方書に規定されている曲げひび割れ強度算定式の適用範囲は部材厚 200mm 以上であり²⁾、100mm 以下の部材厚に対する曲げひび割れ強度算定の精度が悪くなることが報告されている³⁾。これは、部材厚が小さく、主鉄筋の配置が中立軸付近であるため、主鉄筋が力学的に機能せず破壊に至ると考えられる。このことから、薄肉部材の曲げ破壊進行過程が一般的な断面を有する部材の破壊過程と異なると考えられ、薄肉部材の曲げ破壊進行過程の把握が必要である。

コンクリートの破壊進行過程は、アコースティック・エミッション (以下、AE) 法により定量的に把握可能である。AE 法によれば、時間的、空間的に制約を受けることが比較的少なく、高い分解能でリアルタイムの観測が行える利点があり、コンクリート構造物の健全性診断に適用されている⁴⁾。また、検出される AE 信号からその発生源の位置標定や破壊領域の推定、およびコンクリート内部の破壊進行過程が SiGMA (Simplified Green's functions for Moment tensor Analysis) 解析⁵⁾により三次元で視覚的に把握可能である⁶⁾。

本研究では、薄肉鉄筋コンクリート部材が曲げ破壊に至る過程を把握するために、4点曲げ試験時に AE 法を適用し、微小ひび割れ (マイクロクラック) の進展状況から主破壊に至るメカニズムを考察した。実験に使用した供試体は、実際の鉄筋コンクリート製品を模擬するため、部材厚を 40mm, 70mm とし、主鉄筋の芯かぶりを一定 (20mm) とした。また、曲げひび割れ耐力に及ぼす乾燥の影響を考察するために、養生条件を気中養生と封緘養生に分けて実験を行った。これらの供試体の4点曲げ試験時に検出された AE 信号を SiGMA 解析および AE 振幅値分布 (Improved *b*-value, 以降 *Ib*-value と称する) 解析⁷⁾に適用し、薄肉部材の曲げ破壊進行過程の考察を行った。

2. 実験概要

本実験では、薄肉鉄筋コンクリート部材の曲げ破壊性状を把握するために、部材厚を 40mm, 70mm、主鉄筋の芯までのかぶりを 20mm として各2体の供試体を作製した。実験に使用したコンクリートの示方配合および力学的特性を表-1、表-2に示す。また、供試体形状、主鉄筋径および AE センサ設置位置を図-1、表-3に示す。供試体は材齢 28 日まで湿潤養生を行い、その後 28 日間気中養生 (20°C, 60%R.H.の恒温室)、および封緘養生 (温度管理なし) を行い、材齢 56 日に4点曲げ試験を行った。ここで、表-2より、封緘養生を行った供試体よりも気中養生を行った供試体の圧縮強度が高いことがわかる。これは、養生条件の違いによりコンクリートの含水率に差が生じ、新たに微細ひび割れを形成する際の表面エネルギーが低下するため^{8), 9)}であると推察される。4点曲げ試験は、荷重点間距離 50mm, 荷重速度

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域助教 博士 (工学) (正会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域教授 博士 (工学) (正会員)

*3 首都大学東京 名誉教授 工学博士 (正会員)

*4 コンクリート製品 JIS 協議会 (非会員)

表-1 コンクリートの示方配合

| 組骨材の最大寸法 (mm) | スランブ (cm) | 水セメント比 (%) | 空気量 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|---------------|-----------|------------|---------|----------|--------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 A |
| 20 | 8 | 55 | 4.5 | 42 | 170 | 309 | 758 | 1052 | 1.111 |

表-2 コンクリートの力学的特性

| 養生条件 | 材齢 28 日 | | | 材齢 56 日 | | |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 圧縮強度 (MPa) | 引張強度 (MPa) | 弾性係数 (GPa) | 圧縮強度 (MPa) | 引張強度 (MPa) | 弾性係数 (GPa) |
| 気中養生 | 37.2 | 2.80 | 28.4 | 48.1 | 2.94 | 27.5 |
| 封緘養生 | | | | 45.3 | 2.98 | 31.0 |

表-3 供試体寸法および養生条件

| No. | 部材厚 h (mm) | 幅 b (mm) | 主鉄筋 | かぶり c (mm) | 有効高さ d (mm) | スパン L (mm) | 長さ L' (mm) | 鉄筋量 As (mm ²) | 鉄筋比 p | せん断スパン有効高さ比 a/d | 養生条件 |
|-----|------------|----------|-------|------------|-------------|------------|------------|---------------------------|---------|-----------------|------|
| 1-1 | 40 | 240 | 2φ3.2 | 20 | 20 | 190 | 290 | 16.08 | 0.00335 | 3.50 | 気中養生 |
| 1-2 | | | | | | | | | | | 封緘養生 |
| 2-1 | 70 | 240 | 2φ5.0 | 20 | 50 | 400 | 500 | 39.27 | 0.00327 | 3.50 | 気中養生 |
| 2-2 | | | | | | | | | | | 封緘養生 |

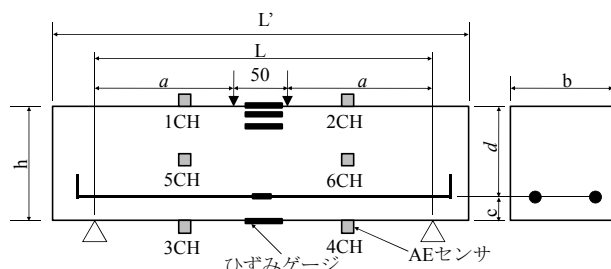


図-1 供試体寸法と AE センサ配置図

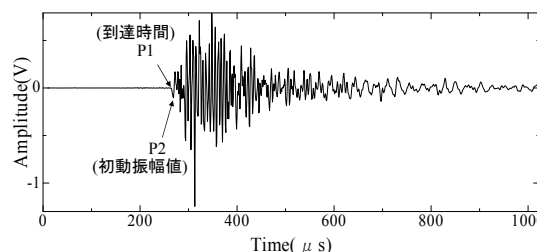


図-2 検出 AE 波形

を 1kN/min とし、0.1kN 毎に荷重およびひずみの計測をデータロガー（東京測器研究所製）により行った。また、供試体のひび割れ観察を 1kN 毎に行った。

AE 計測には 6 個の R15α センサ（共振周波数 150kHz, PAC 社製）を使用し、μSAMOS（PAC 社製、メインアンプ）にて周波数帯域を 1kHz~200kHz とし信号記録を行った。検出信号はプリアンプにて 40dB、メインアンプにて 20dB 増幅され記録し、設定しきい値を 40dB とした。また、検出波形をサンプリング周波数 1MHz で A/D 変換し、1 波形を 1024 個の振幅値データとして記録した。また、支点と供試体の間にテフロンシート（厚さ 0.3mm）を挿入し、摩擦による AE 発生を抑制した。

3. AE 解析理論

3.1 SiGMA 解析

検出される AE 波には、その発生源となった微小ひび割れ（マイクロクラック）に関する幾何学的諸量が含ま

れていると考えられ、弾性波動の基礎理論によれば、検出される AE 波の初動振幅値 $A(x)$ は以下の式により表わされる¹⁰⁾。

$$A(x) = C_s \frac{\text{Ref}(\gamma, t)}{R} \gamma_p \gamma_q M_{pq} DA \quad (1)$$

ここで、 C_s はセンサ感度も含めた物性値の係数、 R はひび割れ発生点 x' と検出点 x との距離、 γ_p, γ_q はその方向余弦を意味する。 $\text{Ref}(\gamma, t)$ は、センサ設置点での反射を考慮するための検出点への入射角を考慮した反射係数、 DA はクラック面の面積である。また、 M_{pq} は AE 波の発生源となったひび割れの種類や運動方向に関する情報を持ったモーメントテンソルである。したがって、このモーメントテンソルを解くことにより、発生しているひび割れの幾何学的諸量を定量的に得ることができる。

SiGMA 解析では、図-2 に示すような検出 AE 波形から AE 波の到達時間および初動振幅値を読み取り、AE 発生源の位置標定後、初動振幅値を式(1)左辺に代入する。

その後、モーメントテンソルの固有値解析により、ひび割れの種類と運動方向を得る。このとき、AE 波の初動部読み取りは、既報の自動読み取り法^{11), 12)}により行った。本研究では、ひび割れの種類を引張型ひび割れ (Tensile crack)、混合型ひび割れ (Mixed-mode crack)、せん断型ひび割れ (Shear crack) の3種類に分類した。

3.2 lb-value 解析

検出された AE 信号を適切に処理するために、AE パラメータ解析が広く用いられており、特に、AE 発生源での微小破壊の規模と関係しているパラメータとして AE 波の最大振幅値が用いられる。AE の発生総数 N と最大振幅 A' を両対数でプロットすれば、AE 波の振幅分布は次式で表わされる。

$$\log N = \alpha - b \log A' \quad (2)$$

ここで、 α , b は実験により定まる係数。

式(2)は、 b 値が小さいと規模の大きな現象の多い破壊過程、 b 値が大きいと規模の小さな現象の多い破壊過程を示している。ここで、式(2)のような振幅分布を用いて破壊規模の把握を行うには、対象とする AE 信号の選定が肝要である。そこで、過渡的な破壊現象を AE 振幅分布から評価するために「改良 b 値 (Improved b -value)」が提案されている⁷⁾。これは、 b 値決定の振幅分布の範囲を振幅母集団の平均値 μ と標準偏差 σ を用いて決定することにより、一意的に b 値が次式から求められる。

$$Ib = \frac{\log_{10} N_1 - \log_{10} N_2}{(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma} \quad (3)$$

ここで、 N_1 は振幅値 $\mu + \alpha_1 \sigma$ 以上の AE 累積数、 N_2 は振幅値 $\mu - \alpha_2 \sigma$ 以上の AE 累積数、 $(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma$ は振幅の範囲、 α_1 および α_2 は振幅値の範囲を指定する係数である。本研究では、平均値と標準偏差を算出するための母集団を 100 個の AE 振幅値とした。

4. 結果および考察

4.1 実験結果

4 点曲げ載荷試験の結果、全ての供試体において曲げ

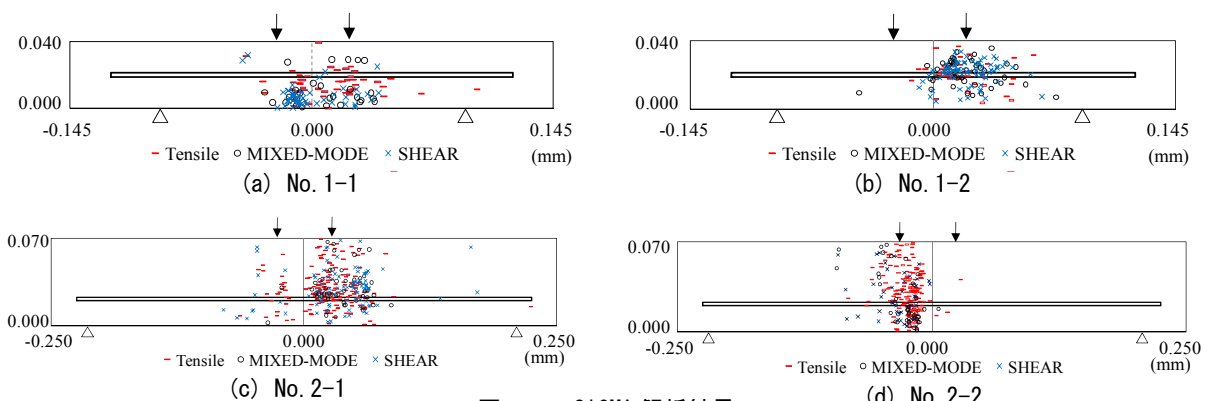


図-3 SiGMA 解析結果

ひび割れを目視確認する前に供試体は破壊に至った。表-4に実験結果を示す。表中の最大圧縮ひずみおよび最大引張ひずみは、図-1に示すようにそれぞれ破壊直前までに測定された曲げスパン中央のコンクリート上面および主鉄筋のひずみである。これらの結果より、終局状態直前の荷重においてもコンクリート上面のひずみおよび鉄筋ひずみが著しく小さいことがわかる。また、養生条件の違いにより、圧縮強度、終局曲げ耐力が異なることが表-2、表-4よりわかり、封緘養生と比較して気中養生を行った供試体の曲げ耐力が大きいことが確認された。

4.2 SiGMA 解析結果

SiGMA 解析に必要な弾性波速度の決定はペンシルリードブレイクにより行い、その結果気中養生の供試体では 4400m/s、封緘養生の供試体では 4350m/s と決定された。各供試体の SiGMA 解析結果を図-3に示す。全ての供試体において、AE 発生源と最終的に形成されたひび割れの対応が確認された。次に、同定された AE 発生源の時間的変化を図-4に示す。図より、部材厚 70mm の No.2-1 および No.2-2 では、引張型と同定された AE 発生源が先行して発生し、その後主破壊に至るのに対し、部材厚 40mm の No.1-1 および No.1-2 では、図中の破線で示したせん断型および混合型クラックが先行し、その後引張型クラックが発生することで主破壊に至ることがわかった。すなわち、部材厚の違いによって形成されるマイクロクラックの発生機構が異なることが

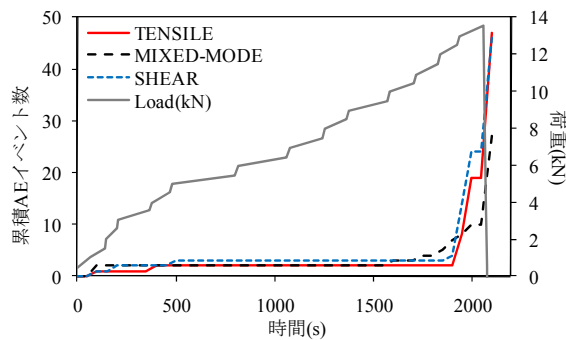
表-4 4点曲げ試験結果

| No. | 終局耐力 Mu (kN・m) | 最大圧縮 ひずみ $\epsilon'_{cu}(\mu)$ | 最大引張 ひずみ $\epsilon_s(\mu)$ |
|-----|----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1-1 | 0.474 | 246 | 112 |
| 1-2 | 0.448 | 338 | 127 |
| 2-1 | 1.14 | 266 | 285 |
| 2-2 | 1.05 | 248 | 378 |

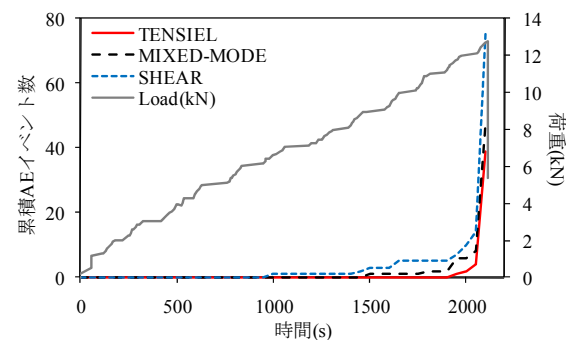
SiGMA 解析により明らかとなった。また、**図-5**に供試体高さ方向に関する AE 発生源位置の時間的推移を示す。**図-5**より、気中養生を行った供試体 No.1-1, No.2-1 では載荷初期段階で AE 発生源が同定されており、封緘養生を行った No.1-2, No.2-2 では破壊直前までほとんど AE 発生源は同定されなかった。このことから気中養生の供試体では封緘養生の供試体と比較して、乾燥による影響を受けた結果、コンクリート内部の空隙等における

応力集中により微小ひび割れの発生が促進され、載荷初期段階で AE の発生を生じたものと考えられる。しかし、本実験では全ての供試体に対し 28 日間湿潤養生を行っているため、その後の乾燥の影響による微小ひび割れが直接主破壊に繋がるものではなかったと考えられる。

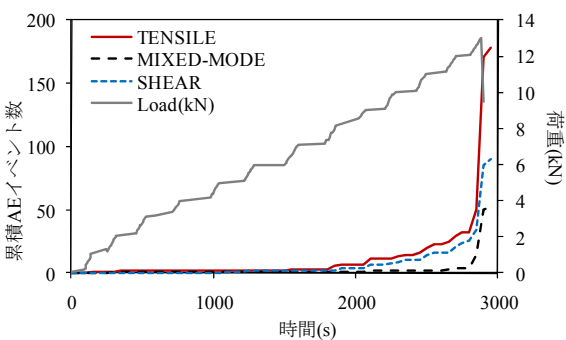
次に、全ての供試体において主破壊に至る直前、すなわち最大荷重に対して約 90%の載荷レベルで一度供試体底面から上面へ破壊が進行する様子が**図-5**中の破線



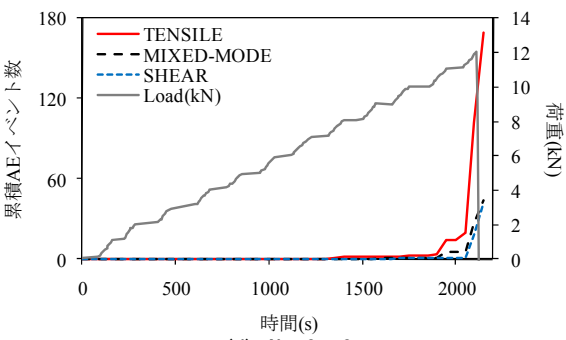
(a) No. 1-1



(b) No. 1-2

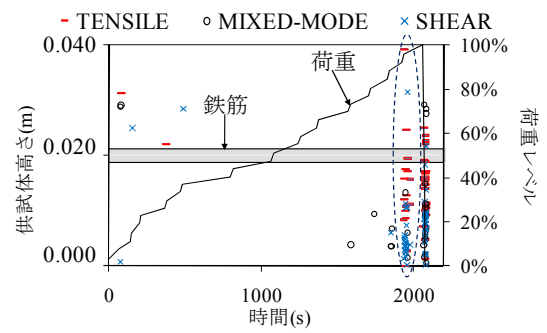


(c) No. 2-1

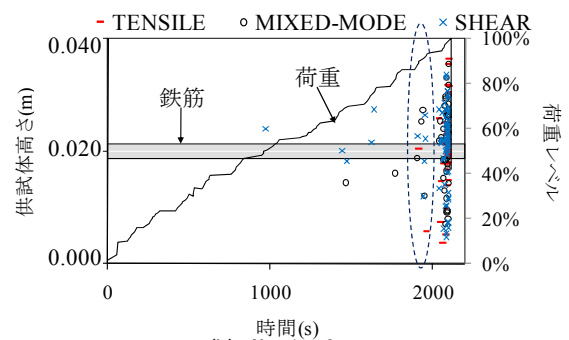


(d) No. 2-2

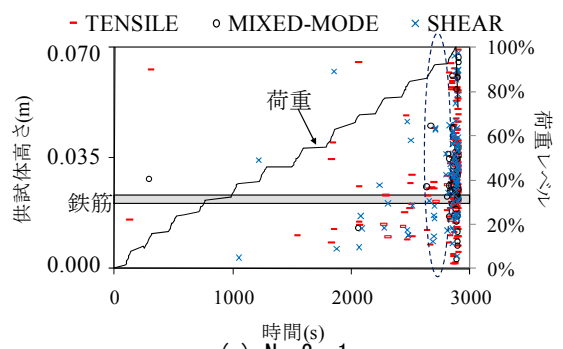
図-4 SiGMA 解析による AE 発生源の時間的変化



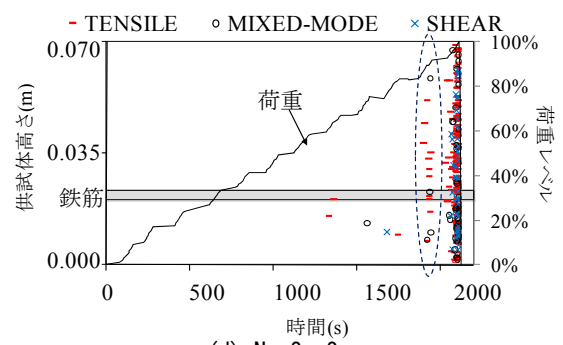
(a) No. 1-1



(b) No. 1-2



(c) No. 2-1



(d) No. 2-2

図-5 供試体高さ方向に関する AE 発生源の時間的推移

で示した部分より確認される。しかし、供試体はそのまま破壊に至らず、さらに荷重が増加して、主破壊へ至る。また、これまでの研究¹³⁾によれば、終局時の応力分布から、終局時に引張軟化特性が現れるという結果を得ている。したがって、これまでの研究成果および主破壊直前に得られた AE 発生源の分布状況より、荷重レベルが最大荷重の 90% に達したときコンクリートの仮想ひび割れに代表されるような局所的微小ひび割れが瞬時に発生、進展し、引張軟化現象が生じたものと考えられる。

4.3 Ib-value 解析結果

ここでは、圧縮縁に設置した 1CH, 2CH および引張縁の 3CH, 4CH で検出された AE 信号から、圧縮縁と引張縁での破壊進行過程の比較を *Ib-value* 解析を用いて行った結果を報告する。*Ib-value* 解析では、*Ib-value* の急激な低下が確認されるところで規模の大きな破壊が発生していると判断され、特に 0.05 以下では部材に大きな損傷をもたらされた結果である^{14), 15)}とされる。図-6 に全ての供試体に *Ib-value* 解析を適用した結果のうち、部材厚 40mm の No.1-1 と No.1-2 の結果を示す。図中の丸で示した部分が、供試体上面および底面の両方で規模の大きな破壊が発生したと考えられる部分であり、数値は *Ib-value* が低下した時刻を示している。これらの図からわかるように、供試体底面の破壊よりも上面の破壊が僅かに早いことが確認され、この傾向は部材厚 70mm の供試体でも確認された。この結果より、薄肉部材の曲げ破

壊過程では、供試体上面では微視的圧壊が先行し、下縁では引張軟化を呈すること、および部材厚が小さいためにひずみ勾配が大きく、ひび割れ進展が通常の断面を有する部材より早くなると推察される。また、鉄筋が中立軸近くに配置されていることから、引張力を鉄筋がほとんど負担せず、圧縮力および引張力の両者をコンクリートが負担し、瞬時に破壊に至るものと考えられる。このことから、薄肉鉄筋コンクリート部材の破壊形態はコンクリート上縁の微視的圧壊による作用と曲げモーメントによる作用が複合して破壊に至ると推察される。

次に、図-6 中の網掛け部分と図-5 の微小ひび割れが集中的に発生している部分が一致していることが確認された。したがって、ひび割れを目視確認する以前、すなわち最大荷重の約 90% 程度でコンクリート内部の破壊はかなり進んでおり、引張軟化現象が顕著に現れたと考えられる。

5. 結論

本論文では、薄肉鉄筋コンクリート部材の曲げ破壊挙動を明確にするために、4 点曲げ試験時に AE 法を適用し、薄肉部材が破壊に至る過程をマイクロクラックの進展状況から考察した。以下に結論を示す。

- (1) AE-SiGMA 解析により、薄肉鉄筋コンクリート部材内部の破壊進展過程をマイクロクラックの集積過程として視覚的に把握可能となった。
- (2) 部材厚の違いによって AE 発生源の発生機構が異なる

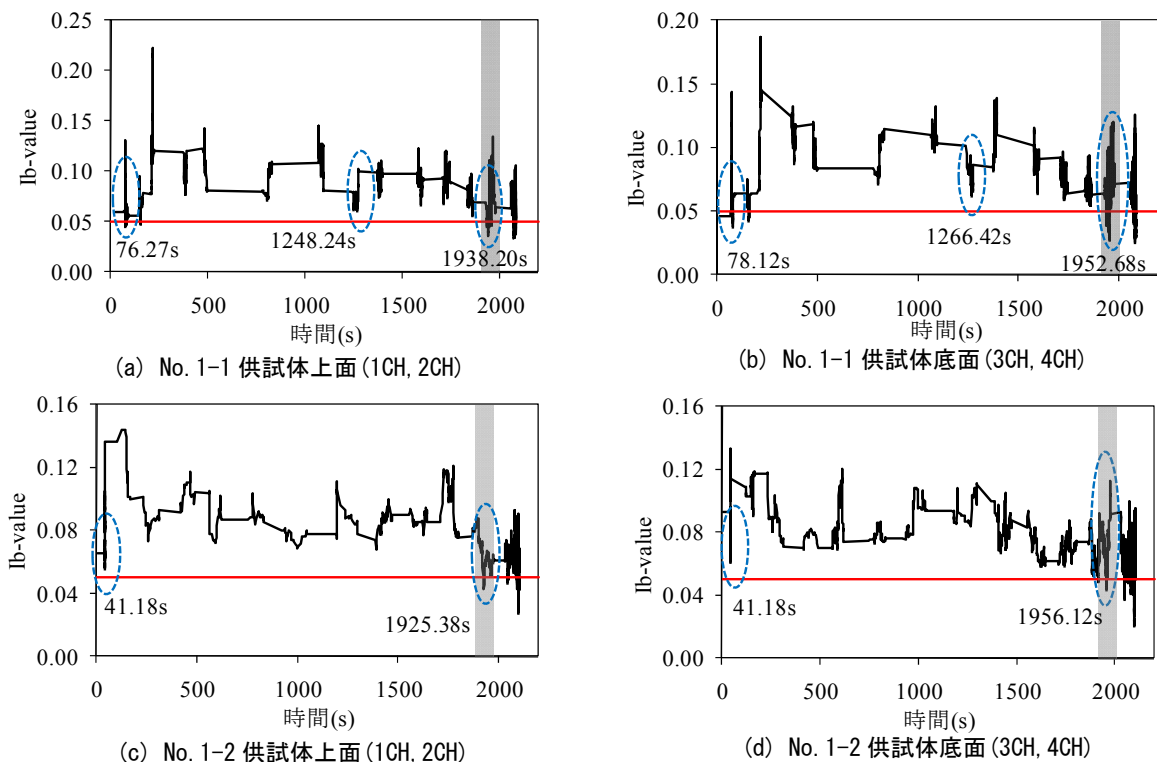


図-6 部材厚 40mm 供試体の *Ib-value* 解析結果

ることが AE-SiGMA 解析により明らかとなり、部材厚 70mm の供試体では引張型の AE 発生源が先行して発生したのに対し、部材厚 40mm の供試体ではせん断型の AE 発生源が先行して発生することがわかった。

- (3) AE 発生源の時間的推移より、薄肉部材が主破壊に至る過程で、最大荷重の約 90% でコンクリート中に局所的ひび割れが瞬時に発生、進展し、引張軟化現象が顕著に現れたと示唆される。これは、部材厚が小さいことと中立軸近くに鉄筋が配置されていることから、引張力を鉄筋がほとんど負担せず、圧縮力および引張力の両者をコンクリートが負担していると考えられる。
- (4) 養生条件の違いにより荷重初期段階で同定される AE 発生源の数に差があることが明らかとなったが、本供試体は 28 日間湿潤養生を行ったため、乾燥が強度発現に及ぼす影響は小さかったと考えられる。
- (5) *Ib*-value 解析の結果、薄肉部材の破壊進行では供試体底面の引張縁よりも圧縮縁の破壊がわずかに早いことが確認された。このことから、薄肉部材の曲げ破壊過程では、供試体断面高さが小さいことから供試体上面の微視的圧壊による作用と曲げモーメントによる作用が複合して破壊に至ると推察される。

謝辞

本実験の AE 計測を行うにあたって、日本大学生物環境工学科、鈴木哲也専任講師に協力を頂きました。また、首都大学東京大学院都市環境科学研究科の中嶋彩乃氏には、供試体作製から曲げ試験において協力を頂きました。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 田所雄治, 國府勝郎, 森田秀明, 宇治公隆: 薄肉鉄筋コンクリート製品の終局曲げ耐力, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, (CD-ROM, 5-592), pp.1183-1184, 2008.9
- 2) 2007 年制定土木学会コンクリート標準示方書【設計編】, pp.34-37, 2008.
- 3) 湯浅憲人, 國府勝郎, 森田秀明, 宇治公隆: 薄肉鉄筋コンクリート製品の曲げひび割れ耐力, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, (CD-ROM, 5-591), pp.1181-1182, 2008.9
- 4) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論 - 構造物の診断と破壊現象解析 - 第 2 版, 森北出版, 2005.
- 5) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久: AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発, 非破壊検査, Vol.42, No.10, pp.570-575, 1993.
- 6) Ohno, K., Shimozono, S., Sawada, Y. and Ohtsu, M.: Mechanisms of Diagonal-Shear Failure in Reinforced Concrete Beams analyzed by AE-SiGMA, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.2, No.4, pp.462-472, 2008.
- 7) Shiotani, T., Fujii, K., Aoki, T. and Amou, K.: Evaluation of progressive failure using AE sources and improved b-value on slope model test, Progress in Acoustic Emission VII, JSNDI, pp.529-534, 1994.
- 8) 堀素夫: 表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ, 窯業協会誌, Vol.70[7], C268-C273, 1962.
- 9) 尾上幸造, 松下博通: 液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度低下に関するエネルギー的考察, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.515-525, 2008.10
- 10) Ohtsu, M. and Ono, K.: A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Functions in a Half Space, Journal of Acoustic Emission, Vol.3, No.1, pp.27-40, 1984.
- 11) 大野健太郎, 下菌晋一郎, 沢田陽佑, 大津政康: AE 波初動部の自動読み取りの開発による SiGMA 解析の改良, 非破壊検査, Vol.57, No.11, pp.531-536, 2008.11
- 12) 沢田陽佑, 大野健太郎, 下菌晋一郎, 大津政康: AE-SiGMA 解析における AE 波初動部自動読み取り法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2101-2106, 2009.
- 13) 山邊亮, 宇治公隆, 國府勝郎, 森田秀明: 薄肉鉄筋コンクリート部材の耐荷挙動に関する研究, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, (CD-ROM, 5-568), pp.113-1134, 2009.9
- 14) Shiotani, T., Ohtsu, M., and Ikeda, K.: Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation, Construction and Building Materials, Vol.15, No.5-6, pp.235-246, 2001.
- 15) 塩谷智基, 河原田寿紀, 日高栄介, 中西康博, 西村毅: AE 法を用いた地下発電所空洞掘削時のゆるみ領域評価, 第 14 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.143-146, 2003.11