

# AE法を適用したコンクリートの 曲げ破壊の追跡に関する実験的研究

## Experimental Study on Trace of Bending Fracture of Concrete by Acoustic Emission Technique

山田 和夫  
Kazuo YAMADA

*ABSTRACT* In this study, the acoustic emission method was applied to trace the fracture process of plain concrete and steel fiber reinforced concrete subjected to bending moment. The relationships between the fracture mechanics parameters, such as parameters in the bi-linear tension softening model, and the crack propagation behavior were discussed. Following results were obtained in this study:

1) In the case of concrete beam having notch, the release of fracture energy is concentrated at the tip of notch, but is dispersed into the whole of maximum bending moment region, in the case of concrete beam having no notch.

2) The cracking zone of steel fiber reinforced concrete is disposed to spread in the whole specimen than that of plain concrete, because the cracking is arrested by the steel fiber.

3) The crack propagation behaviors are closely related to the first slope in the bi-linear tension softening model estimated from the load ( $P$ )-displacement ( $d$ ) relationship.

### 1. はじめに

筆者らは、従来からコンクリートの微視的破壊機構を解明するためにAE法を適用し、静的載荷時のAE挙動や繰返し載荷時のカイザー効果並びにAEの周波数特性など、コンクリート内部で発生するAEの基礎的特性を調べるとともに、AE法による破壊源探査や微視的破壊過程の追跡、AEの原波形解析などを行い、AE法の妥当性や可能性を確かめる

ための一連の検討を行ってきた<sup>1)~8)</sup>。本研究では、曲げを受けるプレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの破壊過程の追跡に対するAE法の適用性についての検討、並びに壊力学パラメータとコンクリートの微視的破壊挙動、とりわけひび割れ進展挙動との関係について考察を行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験の概要

本実験では、プレーンコンクリートおよび鋼繊維

Table 1 Specimens

Kind of concrete	Specimen size b×h×l	depth of notch	bending span
Plain	10×10×40	—	30
	15×15×53	—	45
	25×25×100	—	75
	50×50×200	—	150
	10×10×40	5.0	30
Steel fiber	15×15×53	7.5	45
	10×10×40	—	30
	15×15×53	—	45
	25×25×100	—	75
	50×50×200	—	150
	10×10×40	5.0	30
	15×15×53	7.5	45

[Unit:cm]

補強コンクリートはりの曲げ破壊挙動に及ぼす試験体寸法の影響を調べるために、はり断面が10×10、15×15、25×25および50×50cmの4種類の角柱試験体を用いた。試験体長さは、原則として断面寸法の4倍（ただし、15cm角断面の試験体は3.53倍）とし、10、15および25cm角断面のものについては各3体、50cm角断面のものについては2体製作した。なお、10および15cm角断面の試験体については、幅が2mmで、深さをはりせい1/2に設定したノッチ入り試験体を各3体同時に製作した。試験体の種類および寸法の一覧を表-1に示す。試験体の製作に際しては、普通ポルトランドセメント、猿投産の山砂（最大寸法=5mm、比重=2.57）、猿投産の山砂利（最大寸法=10mm、比重=2.60）、AE減水剤および両端せん断型フック付きスチールファイバー（断面：0.5mm角、長さ：30mm）を使用した。コンクリートの調合は、水セメント比(W/C)を55%、設計スランプを18cmに設定して試し練りによって決定した。本実験で用いたコンクリートの調合表を表-2に示す。なお、試験体は、コンクリート打設後試験体脱型までの1週間は日に2回の散水による湿布養生、試験体脱型後試験時までには日に1回の散水による湿布養生を行った。試験材令は4~5週とした。

## 2.2 荷重および計測方法

本実験では、はり試験体の曲げ荷重は、原則としてJIS A1106の規定に準じた3等分点荷重としたが、鋼繊維補強コンクリートはりの最大耐力以降の荷重速度については、たわみ速度が曲げスパンに対して1/1500/min.となるように荷重した。なお、加力・支持点の境界条件は、一方がピンで他方がローラーとなるように設定した。測定項目は、ノッチ無し試

Table 2 Mix proportions  
(a) Plain concrete

W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Slump (cm)	Air (%)
	Water	Cement	Sand	Gravel	Admixture		
55	182	331	876	876	0.132	18.0	4.1

(b) Steel fiber reinforced concrete

W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						Slump (cm)	Air (%)
	Water	Cement	Sand	Gravel	Admixture	Fiber		
55	178	324	847	858	0.132	78.5	16.2	2.5

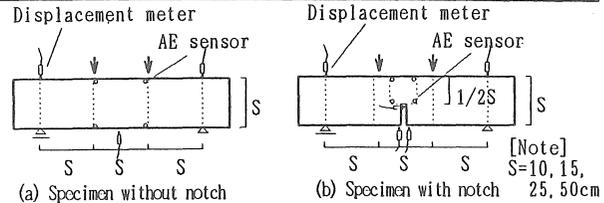
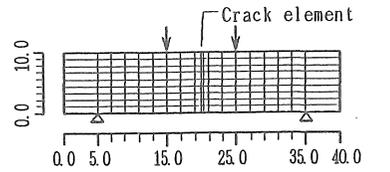


Fig.1 Sizes and proportions of specimens

験体が荷重および中央たわみ、ノッチ入り試験体が荷重、中央たわみおよびノッチ先端における開口変位とし、荷重および各変位データは、動ひずみ計およびデジタル・データレコーダ（サンプリング速度=2000点/秒）を使用して取り込むとともに、X-Yレコーダで同時記録させた。また、4チャンネルのAE計測システムを用いてAE法による2次元破壊源探査を行った。なお、破壊源探査に必要な縦波速度は、ファンクション・ジェネレータによって2.5μsの矩形パルスを試験体に入力することによって計測した（プレーンコンクリート:3900m/s、繊維補強コンクリート:3700m/s）。各試験体のAEセンサーの取付位置を図-1に示す。

## 2.3 引張軟化特性の推定方法

本研究では、コンクリートの引張軟化特性を求めるときの方法として、コンクリートはりの曲げ破壊実験で得られた荷重(P)-中央たわみ(d)関係と有限要素解析によって得られたP-d関係とが最もフィットするような引張軟化則パラメータを求める逆解析法<sup>9)</sup>を採用した。図-2および図-3に、本解析で用いたコンクリートはりの有限要素モデルおよびひずみ軟化モデルを示す。なお、最適化の対象としたひずみ軟化則パラメータは、引張強度(F<sub>t</sub>)、ヤング係数(E)、A、Bおよび最終開口変位(W<sub>c</sub>)の5種類とし、非線形最適化手法として準ニュートン法を用いた。



[Notes] Unit:cm, 190 elements and 220 nodes model

Fig. 2 Example of analytical model

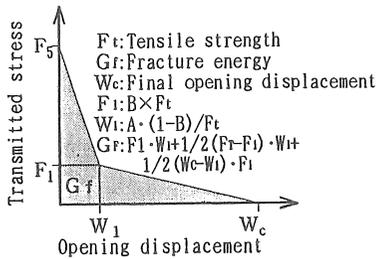
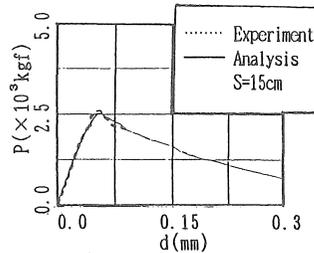
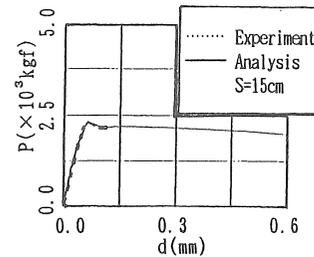


Fig. 3 Bi-linear tension softening model



(a) Plain concrete



(b) Steel fiber reinforced concrete

Fig. 4 P-d relationship

3. 実験結果とその考察

3.1 引張軟化特性

図-4は、それぞれプレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートのP-d関係に関する実験結果と最適化された引張軟化則パラメータ値を用いて行った有限要素解析の結果とを比較したものである。これらの図によれば、いずれの試験体も実験結果と解析結果とは良く一致しており、本研究で採用した2直線モデルはコンクリートの引張軟化モデルとして妥当であったことがわかる。表-3に、逆解析手法を用いて算定したコンクリートの引張軟化モデルのパラメータを一覧表にして示してある。この表によれば、 $G_f$ 値は一般に試験体寸法が大きくなるほど増大する傾向を示しているが、これはG. V. Guineaら<sup>10)-12)</sup>が指摘しているような実験上生じる各種のエネルギー消費の影響によるものと思われる。図-5(a)および(b)は、それぞれ逆解析によ

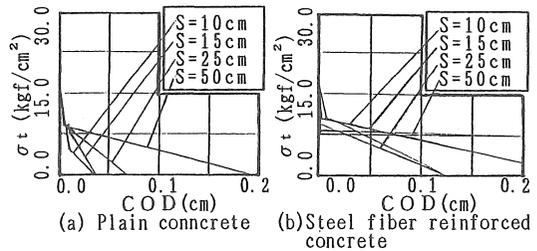


Fig. 5 Tension softening characteristics

って得られたプレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの引張軟化特性(図では、引張応力度( $\sigma_t$ )-開口変位(COD)関係)を示したものである。ところで、2直線モデルにおける第1勾配領域と第2勾配領域は、いずれもコンクリートの特徴的な破壊過程と密接な関係があり、前者がマイクロクラッキング域に後者がブリッジング域にそれぞれ対応しているとされている<sup>13)</sup>。まず、プレーンコンクリ

Table 3 Optimized parameters in bi-linear tension softening model

Kind of concrete	$G_f$ (kgf/cm)	A	B	$F_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$W_1$ ( $\times 10^{-2}$ cm)	$W_c$ (cm)	$F_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Young's modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )
Plain	0.181	0.250	0.251	5.01	0.936	0.035	20.0	$2.85 \times 10^5$
	0.228	0.123	0.398	9.89	0.297	0.038	24.9	$2.75 \times 10^5$
	0.352	0.120	0.476	9.46	0.316	0.068	19.9	$3.01 \times 10^5$
	0.943	0.148	0.406	9.17	0.389	0.196	22.7	$2.86 \times 10^5$
Steel fiber	0.749	0.339	0.598	10.64	0.766	0.128	17.8	$2.25 \times 10^5$
	1.435	0.172	0.540	10.53	0.406	0.265	19.6	$2.27 \times 10^5$
	0.626	0.057	0.571	9.52	0.147	0.129	16.7	$1.98 \times 10^5$
	8.044	0.078	0.618	8.21	0.224	1.956	13.3	$2.17 \times 10^5$

[Notes]  $G_f$ : Fracture energy,  $A = F_1 / (1 - B) \cdot W_1$ ,  $B = F_1 / F_t$ ,  $F_1$ ,  $W_1$ : Break points in bi-linear tension softening model (see Fig. 3),  $W_c$ : Final opening displacement,  $F_t$ : Tensile strength.

ートについて注目してみると、図-5 (a)に示すように、第1勾配は10cm角断面の試験体が他の試験体と比較して若干小さくなっているのを除けば、試験体寸法にかかわらずほぼ同じ値を示しているが、第2勾配は一般的に試験体寸法が小さくなるほど増大しており、骨材の噛み合せ効果などに関連するブリッジング域の性状が試験体寸法に応じて相違し、一般的に試験体寸法の増大に伴って骨材の噛み合せ効果も増大することを示している。次に、鋼繊維補強コンクリートの結果を示した図-5 (b)によれば、引張軟化モデルの第1勾配は試験体寸法が大きくなるほど増大していることがわかる。

このことは、鋼繊維によるマイクロクラ

ックの進展に対する拘束効果が試験体寸法の増大に伴って低下することを意味している。しかし、第2勾配に及ぼす試験体寸法の影響については明確な傾向を認めることができない。これは、鋼繊維補強コンクリートに対しては、本解析で用いた有限要素モデルの分割が十分ではなかったためと思われる。

3.2 AEの発生状況

図-6および図-7は、それぞれプレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの試験体寸法の異なるノッチ無し試験体によって得られた荷重お

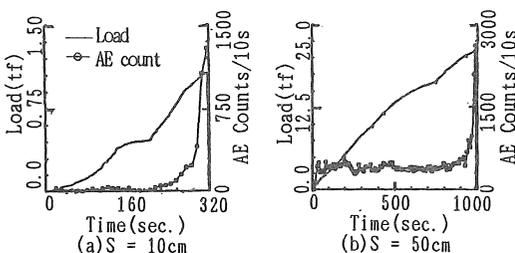


Fig. 6 Relationship between load, AE counts and time (Plain concrete)

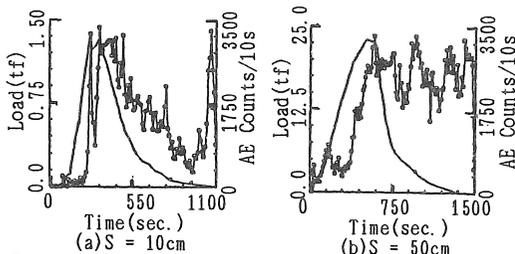


Fig. 7 Relationship between load, AE counts and time (Steel fiber reinforced concrete)

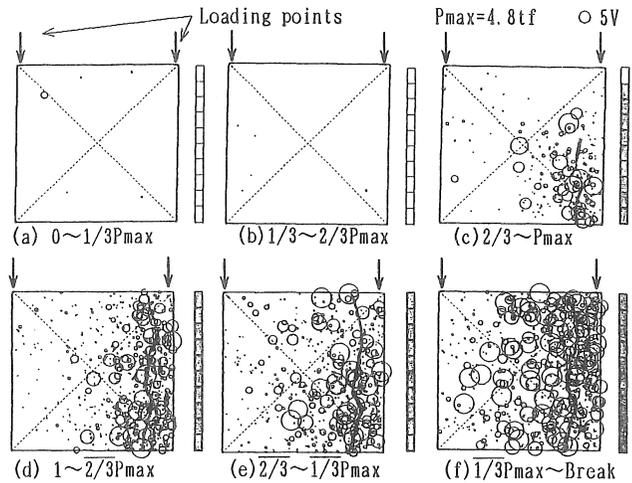
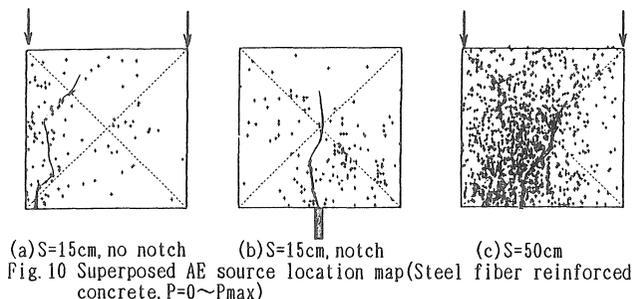
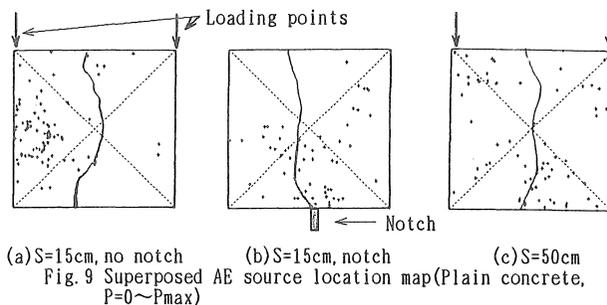


Fig. 8 Superposed AE source location map (Steel fiber reinforced concrete, S = 25cm)

よびAE発生頻度と載荷時間との関係を示したもので、図(a)が10cm角断面、図(b)が50cm角断面の試験体の結果である。まず、プレーンコンクリートについて示した図-6に注目してみると、いずれの試験体も最大耐力の少し手前からAEが頻発し始めて破壊に至っているのがわかる。また、AEイベント数は50cm角断面の試験体の方がかなり大きくなっており、かつ載荷初期の段階からAEが発生する傾向を示している。これは、試験体寸法の増大に伴って試験体内部の欠陥が増加し、巨視的な破壊とは直接関係しない微視的ひび割れが低応力レベルから発生しているためと思われる。なお、鋼繊維補強コンクリート(図-7参照)の場合についても、プレーンコンクリートの場合と同様に最大荷重の少し手前からAEが頻発して破壊に至っているのがわかる。

3.3 破壊源探査

図-8(a)~(f)は、25cm角断面の鋼繊維補強コンクリート試験体で得られたAE法による2次元破壊源探査結果の一例を示したものである。なお、図における円の中心は破壊源位置を、直径はAEの振幅を表している。また、各図の右側にある棒グラフは、有限要素解析によって求められた各荷重レベルでのひび割れ進展状況を示している。これらの図によれば、最大荷重の2/3までの範囲(図(a)および(b)参照)ではAEは殆ど発生していないが、これ以上の荷重レベル(図(c)参照)の範囲になると、AEは試験体下方に集中して発生するようになり、



かつ比較的規模の大きなAEが発生しているのが読み取れる。これに対して、最大耐力以降の範囲(図(d)~(f)参照)では、ひび割れの進展に伴ってAEの発生位置は次第に試験体の下方から上方に移動しているのが読み取れる。以上のように、AE法による破壊源探査を適用することによって、ひび割れの発生・進展過程をある程度正確に追跡することができる。図-9および図-10は、それぞれ試験体寸法の異なるプレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートに対する最大荷重までの範囲における破壊源探査結果を示したものである。まず、図-9に示したプレーンコンクリートの場合には、ノッチ無しの15cm角断面試験体(図(a)参照)のAE発生位置はそれほど規則性は認められないが、ノッチ入りの15cm角断面試験体(図(b)参照)では、ノッチ先端近傍にAEが集中して発生しているのが観察される。このことは、ノッチ入り試験体では、試験体内部に蓄えられたひずみエネルギーの解放がほぼノッチ先端で行われているのに対して、ノッチ無し試験体では、最大曲げモーメント区間内のいたる場所でエネルギーの解放が行われていることを意味している。また、50cm角断面試験体(図(c)参照)のAE発生位置は、広範囲に分布しているものの15cm角断面試験体のそれと比較すると巨視的なひび割れ発生位置近傍に集中しているのがわかる。一方、図-

10に示した鋼繊維補強コンクリートの場合には、ノッチ無しおよびノッチ入りの15cm角断面試験体(図(a)および(b)参照)のAE発生位置は、ひび割れの開口に対する鋼繊維の拘束効果のために、プレーンコンクリートと比べて試験体全体に分散している。これに対して、50cm角断面試験体(図(c)参照)では、ノッチ無しの15cm角断面試験体(図(a)参照)と比べてAEは巨視的なひび割れ発生位置近傍に集中して発生する傾向を示している。これは、おそらく鋼繊維によるクラックアレスト効果が試験体寸法の増大に伴って低下したためであろう。これらの傾向は、前掲の図-5(b)に示した鋼繊維補強コンクリートの引張軟化モデルの第1勾配の傾向とも合致する。

#### 4. 結論

本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) ノッチ入り試験体では、エネルギーはノッチ先端部で集中して解放されるが、ノッチ無し試験体では、エネルギーの解放は最大曲げモーメント区間で分散される。
- 2) 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ発生位置は、鋼繊維によるクラックアレスト効果のためにプ

レーンコンクリートに比べて試験体全体に分散する傾向がある。

- 3) コンクリートのひび割れ進展状況と引張軟化モデルの第1勾配とは密接な関係がある。

#### 【謝 辞】

実験および計測に際して御助言を頂きました東急建設(株)の山本俊彦氏、石川雅美氏および豊田将文氏、(有)日本計測の藤瀬克彦氏に謝意を表します。また、実験および実験結果の整理に際して御助力を得た愛知工業大学大学院生の浅井陽一君および渡部憲君、並びに愛知工業大学工学部建築学科・山田研究室卒業生諸君に謝意を表します。なお、本研究費の一部は東急建設(株)の奨学寄付金によったことを付記し、謝意を表する。

#### 【引用文献】

- 1) 谷川恭雄・山田和夫・桐山伸一：コンクリートのアコースティック・エミッションの周波数特性、コンクリート工学年次講演会講演論文集、Vol. 2, pp. 129-132, 1980. 6
- 2) 小阪義夫・谷川恭雄・山田和夫：コンクリートのアコースティック・エミッション特性と破壊挙動に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、Vol. 358, pp. 22-34, 1985. 12
- 3) 山田和夫・小阪義夫：コンクリート内部で発生したアコースティック・エミッションの伝播特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 9, No. 1, pp. 499-504, 1987. 6
- 4) 山田和夫・小阪義夫：コンクリート中を伝ばするアコースティック・エミッションの減衰特性、材料、Vol. 36, No. 406, pp. 716-722, 1987. 7
- 5) 山田和夫・土田崇仁・小阪義夫：コンクリート内部で発生するA Eの原波形解析、セメント技術年報、Vol. 41, pp. 331-334, 1987. 12
- 6) 山田和夫・土屋宏明・小阪義夫：コンクリートの伝達関数に及ぼす各種要因の影響、セメント技術年報、Vol. 42, pp. 259-262, 1988. 12
- 7) 山田和夫・山本正岳・浅井陽一：A E法を適用したコンクリートの劣化度評価に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 1, pp. 691-696, 1992. 6
- 8) 山田和夫・渡部憲・浅井陽一・山本俊彦・石川雅美：コンクリートの曲げ破壊挙動の寸法依存性に関する実験的研究、日本建築学会東海支部研究報告集、第31号、pp. 49-52, 1993. 2
- 9) 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、No. 416, pp. 9-16, 1990. 10
- 10) Guinea, G. V., Planas, J. and Elices, M.: Measurement of the fracture energy using three-point bend tests (Part 1-Influence of experimental procedures), Materials and Structures, Vol. 25, pp. 212-218, 1992
- 11) Planas, J., Elices, M. and Guinea, G. V.: Measurement of the fracture energy using three-point bend tests (Part 2-Influence of bulk energy dissipation), Materials and Structures, Vol. 25, pp. 305-312, 1992
- 12) Elices, M., Guinea, G. V. and Planas, J.: Measurement of the fracture energy using three-point bend tests (Part 3-Influence of cutting the P- $\delta$  tail), Materials and Structures, Vol. 25, pp. 327-334, 1992
- 13) Nomura, N., Mihashi, H. and Izumi, M.: Correlation of Fracture Process Zone and Tension Softening Behavior in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 21, pp. 545-550, 1991

(受理 平成5年3月20日)