

3次元AE位置標定によるコンクリート梁内の破壊進行領域の長さとの幅の解析

ANALYSIS OF LENGTH AND WIDTH OF FRACTURE PROCESS ZONE IN CONCRETE BEAM BY THREE-DIMENSIONAL AE SOURCE LOCATION

新関 茂*, 岸野佑次**, 飯沼将之***, 森 隆宏****

Shigeru NIISEKI, Yuji KISHINO, Masayuki IINUMA and Takahiro MORI

- * 工博 東北大学助手 工学部土木工学科 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)
- ** 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)
- *** 東北大学大学院 博士課程前期課程 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)
- **** 住友銀行 (〒100 東京都千代田区丸の内1-3-2)

Observation of the fracture process zones including a great number of microcracks is essential to modeling its localization phenomenon in concrete, etc. In most cases up to now, they were observed on surfaces of specimens. However, the fracture process zones are three-dimensional and cracks on free surfaces are different from those in interior regions. In this paper, using a loading method based on the AE event rate, which makes possible to locate much more AE sources in a three-dimensional region than the usual loading one, we clarify the lengths and widths of the fracture process zones and relative frequencies of AE sources in the directions perpendicular to macrocrack surfaces.

Key Words : fracture process zone, 3-D, AE, source location, concrete, mortar, strain softening

1. まえがき

コンクリートや岩石内の巨視的クラック先端近傍には、多数の微視的クラックが生じる破壊進行領域が生じる。この破壊進行領域の観察やモデル化が行われているが、現在までの破壊進行領域の観察は、コンクリートの表面におけるものが多い¹⁻³⁾。Maji と Shah⁴⁾は、アコースティック・エミッション (AE) による2次元的な位置標定で、破壊進行領域の観察を行っているが、AE源の数も少なく、破壊進行領域内のAE源の統計的分布などの考察を行うにいたっていない。

本来、破壊進行領域は3次元の広がりを持ち、また、Slate と Hover⁵⁾は、コンクリートの内部と表面では、応力状態が異なるため、クラックの状況も内部と表面では異なることを指摘している。しかし、破壊進行領域の3次元の観察方法は、3次元AE位置標定やX線解析⁶⁾に限られるために観察例は少数で、規模や形状及び微視的なクラックの密度分布などについて、まだ、十分に解明されていない。

本論文は、コンクリート及びモルタルの3点曲げ供試体内の破壊進行領域を3次元的解明を目的として、荷重制御型の載荷装置の不備な点を補い、また、できるだけ多くのAE源の位置標定が可能のように、寺田ら⁷⁾が、岩石供試体の圧縮試験に用いたAE事象率を基準とする載荷方法を最大強度直前からひずみ軟化領

域において用いて、3次元AE位置標定を行い、モルタル及びコンクリート供試体内部の破壊進行領域の幅と長さやAE源の統計的分布を解析したものである。

2. 実験方法

実験に使用したコンクリート及びモルタルの配合を表-1に示す。この表の5~15mmの骨材は、玄武岩の碎石である。早強ポルトランドセメントを用いて作成した供試体は、7日間水中養生し、1日間空气中で乾燥した後に実験を行った。実験に用いた供試体は、表-1の配合A及びBについて、それぞれ9個で合計18個である。図-1は、3点曲げ試験に用いた寸法150

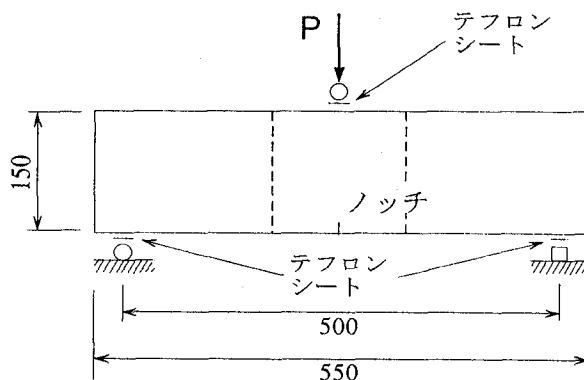


図-1 3点曲げ供試体

表-1 配合表

供試体	最大粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(Kg/m ³)			
				W	C	S	G
配合 A	15	50	50	205	410	815	920
配合 B	5	50	50	205	410	815	920

W：単位水量 C：単位セメント量 S：単位細骨材量
G：単位粗骨材量 W/C：水セメント比 S/a：細骨材率

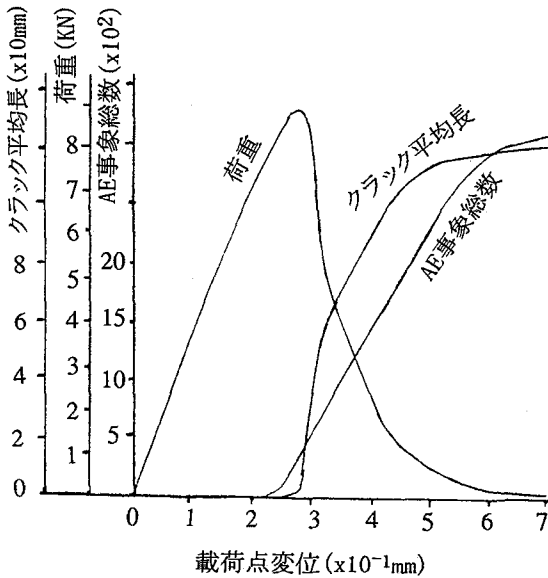


図-2 供試体A-1の荷重点変位-荷重
-クラック長-AE事象総数の関係

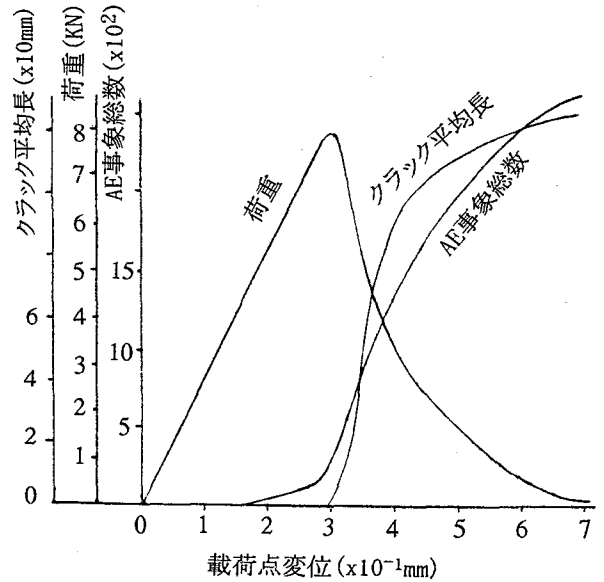


図-3 供試体B-1の荷重点変位-荷重
-クラック長-AE事象総数の関係

(高さ) × 550 (幅) × 94 (厚さ) mm の供試体と載荷方法を示したものであり、ノッチの深さは 10 mm である。最大強度直前からひずみ軟化領域において、荷重を 10 秒間に発生する AE 事象数が原則として 5~7 となるように手動で制御して載荷した。実験中には、載荷点の変位や供試体の表裏面のクラック進展長を約 2 倍の拡大率のルーペで観察した。AE 計測装置は、著者らが従来から、使用しているものである。また、3 次元 AE 位置標定方法も同様であり、この方法による位置標定精度は、骨材の最大粒径にほとんど依存せず、平均誤差は 4.8 mm 以下である⁸⁾。

3. 実験結果

図-2 及び 3 は、それぞれ、実験中に計測された供試体 A-1 と B-1 の荷重点変位-荷重-クラック長-AE 事象総数の関係を示したものである。クラック長は、供試体の表裏面の巨視的クラック長の平均値である。両図のいずれの場合にも、巨視的クラックが、進展を開始すると荷重は低下し始め、ひずみ軟化が開始している。図-2 のコンクリート供試体 A-1 の場

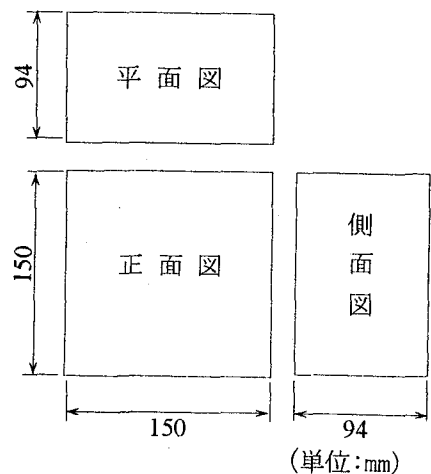
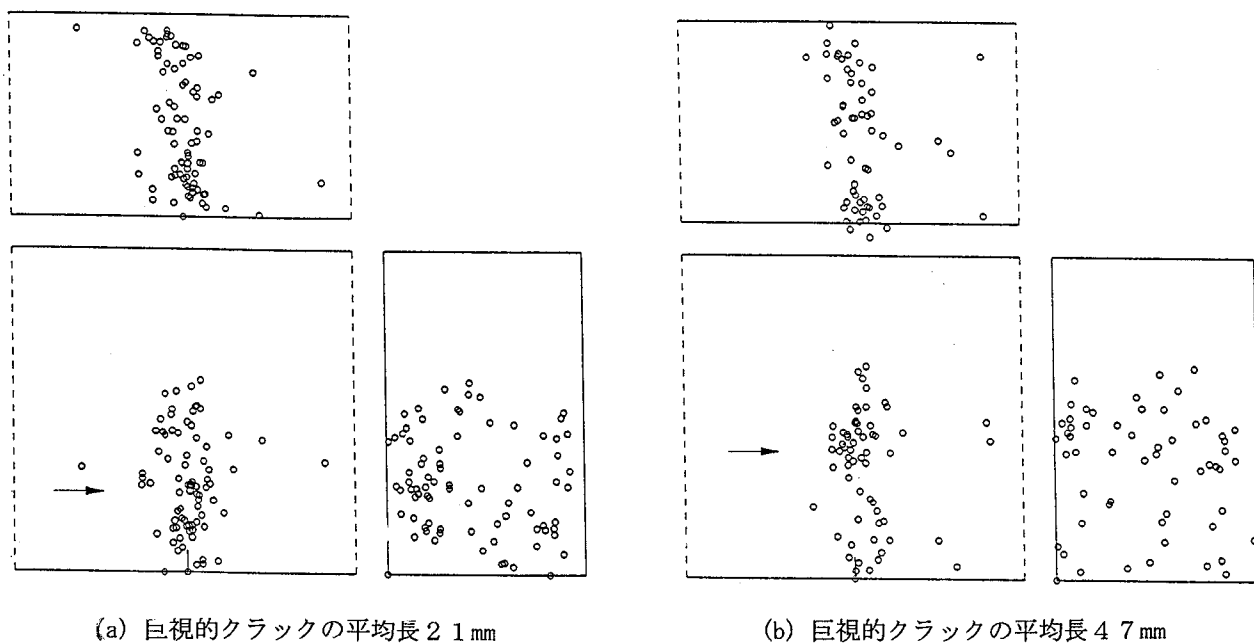
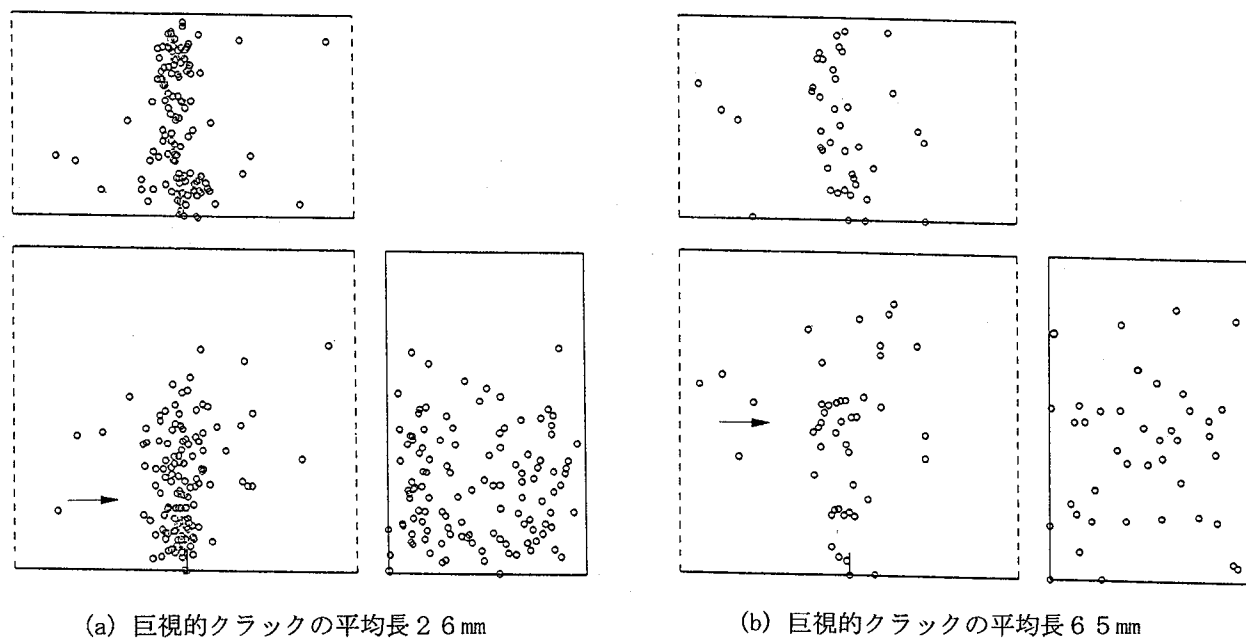


図-4 AE位置標定図の配置

合は、最大荷重直前から AE が発生し始め、クラックの進展と共に急増し、ひずみ軟化が進行して供試体の耐荷力がほとんど失われ、クラックの進展速度が低下すると共に、AE の発生が減少している。図-3 のモ



図－5 供試体A－1の3次元のAE源の分布と破壊進行領域
(矢印は巨視的クラックの平均長の位置)



図－6 供試体B－1の3次元のAE源の分布と破壊進行領域
(矢印は巨視的クラックの平均長の位置)

ルタル供試体B－1では、最大強度の約2分の1を少し越えた頃からAEが発生し始め、巨視的クラックの進展開始と共に急増している。

図－5は、例として、コンクリート供試体A－1の、表裏面の巨視的クラックの平均長が、21 mm と47 mm の場合のAE源の3次元位置標定結果を図－4の平面

図、正面図、側面図とそれぞれ対応させて示したものである。図－5（b）は、巨視的クラックの平均長が21 mm から 47 mm まで進展するまでに発生したAE源であり、図－5（a）に示したAE源は、含まれていない。

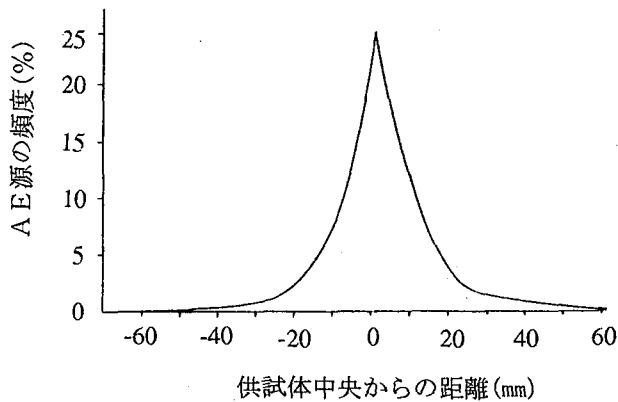
これらの場合のルーペで観察可能な巨視的クラック

表－２ コンクリートとモルタルの巨視的クラック
の先端前方における破壊進行領域の長さ

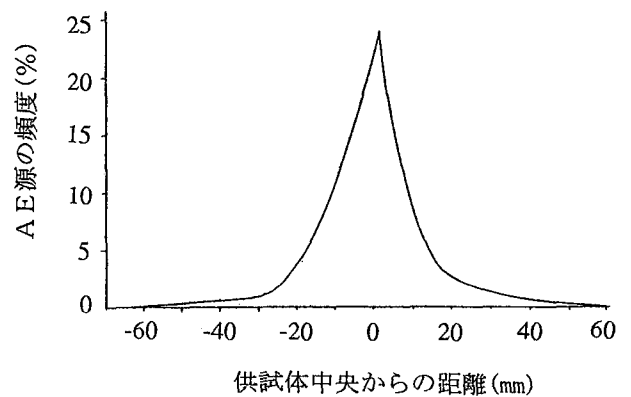
最大骨 材粒径 (mm)	供試体 シリーズ	巨視的クラ ックの平均 長さ(mm)	破壊進行領 域の長さ (mm)	破壊進行領域 の供試体別平 均長さ(mm)	破壊進行領域 のシリーズ別 長さ(mm)
15	A－1	21.0	50.0	49.0	50.5
		47.0	40.0		
		52.0	50.0		
		70.5	56.0		
	A－2	40.0	50.0	52.0	
		57.0	58.0		
70.0		48.0			
5	B－1	26.0	74.0	62.6	61.3
		65.5	58.0		
		81.0	56.0		
	B－2	32.0	60.0	60.0	
		53.0	50.0		
		61.5	70.0		

表－３ コンクリートとモルタルの破壊進行領域の幅

最大骨粒 径材 (mm)	供試体 シリーズ	AE発生頻度 1 % の 範囲 (mm)	AE発生頻度 1 % の幅 (mm)	AE発生頻度 1 % の平均幅 (mm)
15	A－1	-26.5 ～ 42.5	69	70.5
	A－2	-31.5 ～ 40.5	72	
5	B－1	-27.5 ～ 30.5	58	57.0
	B－2	-24.5 ～ 31.5	56	



図－ 7 供試体A-1におけるAE源の頻度分布



図－ 8 供試体B-1におけるAE源の頻度分布

先端前方の破壊進行領域の長さは、表－２に示したように、それぞれ 50 mm と 40 mm である。同様に、図－６は、モルタル供試体B－１において、巨視的平均クラック長が、26 mm と 65 mm の場合の３次元位置標定結果を示したものである。図－５及び６の中で矢印で示した供試体表裏面の巨視的のクラック平均長の位置から、AE源の先端までの長さで定義した破壊進行領

域の長さは、それぞれ 74 mm と 58 mm である。図－５(b)と図－６(b)の両図において、巨視的クラック先端後方においても、AE事象が観察される。表－２は、図－５と６に示したと同様な３次元位置標定結果を集約して、コンクリート供試体A－１と２及びモルタル供試体B－１及び２において、種々の巨視的クラックの平均長さに対応する破壊進行領域の長さとしてそれら

表－4 無筋コンクリート梁の3点曲げ試験における3次元AE位置評定状況

供試体	A－1	A－2	B－1	B－2	各供試体の平均
最大骨材粒径(mm)	15		5		----
デュアル・カウンタでの事象数	3,421	3,040	2,585	3,013	3,015
固定ディスクへの転送事象数	1,328	1,535	1,331	1,066	1,315
固定ディスクへの転送率	39%	50%	51%	35%	44%
位置評定された事象数	613	696	665	491	616
位置評定率	46%	45%	49%	46%	46%

の平均長を示したものである。最大骨材粒径が 15 mm と 5 mm のコンクリート及びモルタル供試体の破壊進行領域の長さの平均は、それぞれ 50.5 mm と 61.3 mm で図－7 と 8 は、例として、コンクリート供試体 A－1 とモルタル供試体 B－1 において、それぞれ位置標定された 613 個と 665 個の全ての AE 源の個数を 100% として、巨視的クラックと直角方向の AE 源の相対発生頻度分布を百分率で示したものである。表－3 は、図－5 と 6 及び同様な頻度分布図から、位置標定が可能であった全ての AE 源について、巨視的クラックと直交する方向における AE 源の統計的頻度分布を各供試体ごとに、AE 発生頻度が 1 % 以上の範囲とその幅及びそれらの平均幅値を示したものである。

最大骨材粒径が 15 mm と 5 mm のコンクリート及びモルタル供試体の破壊進行領域の平均幅は、それぞれ 70.5 mm と 57.0 mm である。最大骨材粒径が 15 mm と 5 mm の供試体では、破壊進行領域の平均長は、それぞれ、50.5 と 61.3 mm と最大骨材粒径が大きい方が短く、また、破壊進行領域の平均幅は、それぞれ 70.5 と 57.0 mm と最大骨材粒径が大きい場合のほうが広くなっている。本実験で用いた粗骨材は玄武岩であり、強度の高い天然骨材には、クラックの進展を阻止しようとするクラック・アレスト効果がある。また、微視的クラックが供試体上部に向かって進展する場合、小さい骨材よりも大きい骨材の方がクラックは骨材を迂回しにくいと考えられる。したがって、最大骨材粒径が大きいほど、微視的クラックは、進展しにくくなるため、破壊進行領域の長さは短くなり、また、最大骨材粒径が大きいほど、骨材を大きく迂回するため破壊進行領域の幅は大きくなるものと考えられる。

4. AE 事象率を基準とする載荷法の考察

AE 事象率を基準とする載荷法を寺田ら⁷⁾は、主として、ひずみ硬化状態の岩石供試体の一軸圧縮試験の載荷制御に用いているが、本研究では、不安定な挙動を示すひずみ軟化状態の制御に用いた。

図－2 と 3 の載荷点変位－平均クラック長の関係と AE 事象総数－平均クラック長の関係を比較すれば、明らかなように、クラックの進展開始直後は、わずか

な載荷点変位の増加に対し、クラックは急速に進展しているが、AE 事象総数の増加に対して、クラック長は相対的に緩やかに増加している。これは一定の載荷点変位速度で制御するよりも、一定の AE 事象率で制御する方が、クラックが緩やかに進展することを示している。また、クラックが供試体を貫通する直前では、載荷点変位の大きな変化に対して、クラックの進展速度は非常に遅いが、AE 事象総数の増加に対して、相対的に速いクラックの進展を示している。上記の事実は、一定の AE 事象率で制御する方が、一定の載荷点変位速度で制御するよりも、相対的に均等な速度でクラックが進展することを意味している。

図－2 及び 3 に示した関係を得るために用いた載荷装置は、旧型の通常の荷重制御型の万能試験機であり、高剛性の試験機ではない。このような載荷装置で、通常の荷重制御で無筋コンクリートや岩石などの梁の曲げ試験を行った場合、最大荷重点で一瞬にして、クラックが供試体を貫通して破壊してしまう。しかし、AE 事象率を監視しながら、載荷することにより、このような旧型の通常の試験機でも、高剛性の変位制御方式の試験機を用いたと同様な結果が得られる。更に、すでに説明したように、クラックの進展に関しては、一定の変位速度で載荷するよりも、優れた特徴がある。また、AE 事象率を規準として載荷する方法は、非常に脆性的な破壊ををするコンクリートの割裂試験においても安定した荷重－変位関係が求められることを確認している。

Hillerborg の fictitious crack モデルを用いる場合、コンクリートや岩石の引っ張り試験から求められるひずみ軟化曲線曲線を必要とするが、従来は、このひずみ軟化曲線曲線は、非常に高価な高剛性の試験機でしか求められなかった。供試体の端部を固定する装置がなく、まだ、未確認ではあるが、極めて不安定な破壊が生じやすい引っ張り試験にも AE 事象率を規準とする載荷方法は、応用可能であると考えられる。

一般に、AE 波をトランジェント・メモリから、パーソナルコンピュータの固定デスクに転送する場合、トランジェント・メモリとパーソナルコンピュータ間の GP-IB インターフェースにより、転送速度は厳しく

制限される。本実験の場合は、1 事象の A E 破のデータ 8 K B を転送するのに 1.2 秒の時間を必要とする。したがって、これ以上の速度で A E 事象が発生した場合には、A E 事象は記録することができず、位置標定される A E 源の個数などが著しく減少し、材料内部で生じている破壊現象などに関する貴重な情報が失われてしまうことになる。しかし、実験に長時間を必要とするが、A E 事象率を規準とする載荷方法を用いれば、GP-IB インターフェースのデータ転送速度に合わせて、載荷ができるので、非常に大量の A E 事象を記録することができる。本実験では、旧型の万能試験機を用いているため、A E 事象率を基礎とする荷重の手動制御、供試体の表裏面のクラック長の測定、載荷点変位の読みとりで最低で 3 名を必要とし、余り長時間かけることができず、載荷開始からクラックが供試体上端を貫通するまで、約 2 時間程度で行った。表-4 は、供試体 A-1, 2, B-1, 2 における 3 次元位置標定状況を示したものである。本実験では、原則として、10 秒間に 5~7 個の A E 事象が発生するように、手で試験機を制御したが、時々、10 秒間の A E 事象数が、20 個程度まで急増することがあった。10 秒間の最大転送 A E 事象数は約 8 個であるから、このような場合の A E 事象は、半数以上が固定デスクに転送されていない。また、デュアル・カウンタに表示される A E 事象数は、ディスクリミネータで A E 事象と判定されたものの総数であるが、これとは独立に、トランジェント・メモリでは、トリガーによって判定して、A E 波を記録させるようになっており、両者で A E 波としての判定の方法が異なっている。したがって、固定デスクへの A E 事象の転送率は、参考値であるが、両者の差異はそれほど大きくないと考えられる。

著者の一人が、以前、変位制御で行った D C B 供試体の破壊靱性試験での A E 位置標定⁸⁾に比較し、本実験で標定された A E 源の数は、平均でデュアル・カウンタに記録された事象数の約 25% が、位置標定されており、供試体内の単位体積当たりでは、約 4 倍に増加している。

5. あとがき

最大粒径が、それぞれ 15 mm 5 mm のコンクリート及びモルタルの 3 点曲げ供試体内の壊進行領域を 3 次元解明を目的として、A E 事象率を基準とする載荷方法を用いて、3 次元位置標定を行って得られた結果は次のよう要約される。

- 1) コンクリート及びモルタル供試体の目視可能な巨視的クラック先端前方の破壊進行領域の長さは、それぞれ、50.5 mm 及び 61.3 mm であった(表-2)。
- 2) コンクリート及びモルタル供試体の A E 発生頻度が 1% 以上の破壊進行領域の幅は、それぞれ、70.5 mm

2と 57.0 mm であった(表-3)。

- 3) A E 事象率を基準とする載荷方法は、非常に有効で、旧型の荷重制御方式の万能試験機においても、不安定な力学挙動を示すひずみ軟化領域の制御が容易である(図-2, 3)。

上記の結論 1) と 2) から、破壊進行領域は最大骨材粒径が大きい方が幅が広く、長さが短くなり、また、最大骨材粒径が小さい方が幅が狭く、長さが長くなる傾向がある。強度の高い天然骨材を用いているので、巨視的及び微視的クラックが、供試体下部のノッチから上に向かって進展する場合、最大骨材粒径が大きい方が、巨視的及び微視的クラックが骨材を迂回する距離が長くなるために、破壊進行領域の幅が広くなり、また、巨視的及び微視的クラックが骨材にぶつかった場合、最大骨材粒径が大きい方が、骨材のクラックアレスト効果が顕著なために破壊進行領域が短くなるためと考えられる。

A E 事象率を基礎とする載荷方法によるひずみ軟化領域の荷重制御は、曲げ試験以外は適用例が少ないが、変位制御が可能な剛性試験機が利用できない場合の載荷方法として有効であると考えられるので、今後、更に研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Kesler, C.E., Naus, D.J. and Lott, J.L. : Fracture mechanics - Its application to concrete, Mechanical Behavior of Materials, Vol. IV, Society of Materials, Japan, pp. 113-124, 1972
- 2) Schinker, M.G. and Doll, M. : Interference optical measurements of large deformation at a tip of a running crack in a glassy thermoplastic, Mechanical Properties of Materials at a High Rate Strain, ed by J. Harding, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 47, Chapter 2, pp. 224-232, 1979
- 3) Du, J. J. : Kobayashi, A. S. and Hawkins, N. M. : Fracture process zone of a concrete fracture specimen, Fracture of Concrete and Rock, ed. by S. P. Shah and S. E. Swartz, SEM-RILEM Int. Conf., June, pp. 199-204, 1987
- 4) Maji A. K. and Shah, S. P. : Process zone and Acoustic Emission Measurement in Concrete, Experimental Mechanics, Vol. 28, pp. 27-33, 1989
- 5) Slate, F. O. and Hover, K. C. : Microcracking in concrete, Fracture Mechanics of Concrete, ed. by Carpinteri, A. et al., Martinus Nijhoff Publisher, pp. 137-159, 1984
- 6) 大塚浩司, 庄司芳之 : X 線造影撮影によるコンクリートの破壊プロセスゾーンの検出, コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム, 日本コンクリート工学協会, pp. II-1-4, 1990
- 7) Terada, M., Yanagidani, T. and Ehara, S. : A.E. rate

controlled compression test of rocks, Acoustic Emission /Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, ed. by H. R. Hardy, JR. and F.W.Leighton, Trans Tech Publication, pp. 159-171,1984

8) 新関茂、三橋博三、野村希晶；改良された 3 次元 A E 位置標定法によるモルタルとコンクリートの破壊進行領域内の微視的クラックの解析、構造工学論文集、Vol. 38A, pp.383-390, 1992

(1994年9月14日受付)