

改良された3次元AE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

ANALYSES OF MICROCRACKS IN FRACTURE PROCESS ZONES IN MORTAR AND CONCRETE BY IMPROVED THREE-DIMENSIONAL AE SOURCE LOCATION

新関 茂* 三橋博三** 野村希晶***

By Shigeru NIISEKI, Hirozo MIHASHI and Noriaki NOMURA

Recently, it is well-recognized that the fracture process zone including a great number of microcracks exist in the vicinity of a macrocrack tip in concrete, rock, etc. In most cases up to now, the fracture process zone in concrete is observed on the surface of specimen. However, cracks on free surfaces are generally different from those interior regions. Nevertheless, at present, the methods observing interior regions in concrete specimens are limited to the three-dimensional AE source location, X-ray method, etc. This paper is devoted to the analyses of microcrack distributions in the fracture process zones in mortar and concrete by using the three-dimensional AE source location, which is improved to reduce the effect of scattered arrival time due to inhomogeneity in specimens and clarifies the relations of maximum sizes of aggregate to widths of fracture process zones and fracture energy G_F , etc.

1. ま え が き

近年、コンクリートや岩石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分布する破壊進行領域が存在することが認識され、このような領域の観察やモデル化が行われている。現在までの破壊進行領域のほとんどの観察は、コンクリートの表面におけるものに限られている¹⁻³⁾が、Slate と Hover 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⁴⁾。しかしながら、現在、コンクリート内部で進展中の巨視的クラック先端近傍に3次元的に分布する微視的クラックを観察する方法は、3次元AE位置標定やX線などの極く小数の方法に限定されており、破壊進行領域がもつ力学的性質については、不明確な点が多い。

コンクリートのような複合材料における3次元位置標定では、材料の構成粒子のサイズが大きくなるにともない、各チャンネルに入力するAE波の速度のバラツキが大きくなり、精度が低下する。

本論文では、初めに、AE波到着時刻の読み取りを自動化すると共に、上記のようなAE波の速度のバラ

*	工博	東北大学助手	工学部土木工学科	(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)
**	工博	東北大学助教授	工学部建築学科	(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)
***	工博	東北大学助手	工学部建築学科	(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

ツキによる位置標定精度の低下を防止する3次元位置標定の改良法を提案し、次に、この改良された方法を用いて、破壊靱性試験中のモルタル及びコンクリート供試体の破壊進行領域内の微視的クラックの統計的分布を解析し、最大骨材粒径と破壊進行領域の幅及び破壊エネルギーなどの関係の研究を行う。

2. 3次元A E位置標定方法の改良と精度の検証

A E源の統計的分布の性質を調べるためには、大量のA E発生源の位置の解析を行う必要がある。また、コンクリートのような複合材料における3次元位置標定では、A E波の伝播する媒体を構成する粒子のサイズが大きくなるにつれて、各チャンネルに入力するA E波速度のバラツキが大きくなり、位置標定の精度が低下する。ここでは、コンピュータによる大量のA E波到着時刻の自動読み取り法及び媒体の構成粒子サイズが、A E波到着時刻のバラツキに及ぼす影響を除去する方法を提案し、この方法の精度の検証を行った例について説明する。

最初に、コンピュータによるA E波到着時刻の自動判定法について説明する。目視による経験から、A E波の到着時刻は、A E波振幅の絶対値がいき値 T_h を最初に越える点を捜し、その点からA E波を時間的に早い方向（逆方向）にたどり、次の条件を満たす点とする。

- (1) 振幅の絶対値がいき値 T_h を越えなくなった場合、その点から時間的に遅い最初の極小点をA E波到着時刻とする（図-1 (a)）。
- (2) 振幅の絶対値が時間的に遅い点より早い点の方が大きい場合、これらの2つの振幅間の極小点をA E波到着時刻とする（図-1 (b)）。

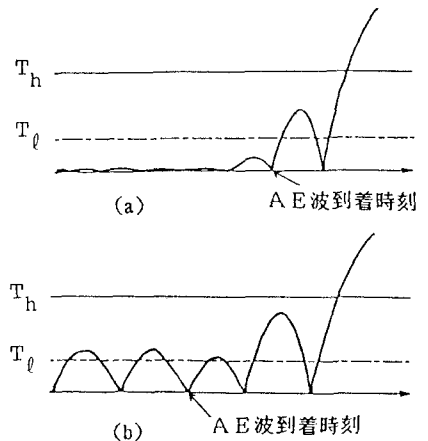


図-1 A E波到着時刻の判定

次に、3次元A E位置標定における最小2乗法による反復解析法の精度改良について説明する。前もって、解析対象領域を適当なサイズの小領域に分割し、この各小領域内に想定した擬似A E源と各トラスデューサー間のA E波到着時間差のマイクロゾーニング・マップ中の最も近い到着時刻の点をA Eの第1次近似値とする。また、1個の基準チャンネルだけからA E波の到着時間差を評価するのではなく、全てのチャンネルを基準チャンネルとして到着時間差を評価し、最小2乗法による反復解析法で非線形連立方程式の解析とA E発生源の平均化が同時に行われる。次に、この求められA E源を基準として、逆に、トラスデューサー間のA E波の到着時間差を計算し、この到着時間差と直接実験から得られた到着時間差を比較し、著者らの過去の経験から、両者の隔たりの大きな到着時間差を除外して再解析を行って、最終的なA E発生源とした。

8チャンネルのA E計測システムを用いて記録したデータに、上述した3次元A E位置標定方法で作成したソフトウェアを応用して解析した例について説明する。表-1 (a), (b) 及び (c) は、それぞれ、モルタル供試体（サイズ 150x150x150 mm, 最大骨材粒径 2 mm）、コンクリート供試体A（サイズ 100x100x100mm, 最大骨材粒径 15 mm）、コンクリート供試体B（最大骨材粒径 30 mm）の上部表面より擬似A E源としてのパルスを、それぞれ、50回、26回、21回入力し、3次元A E位置標定を行って求められた擬似A E発生源の位置の平均値、標準偏差、平均誤差及び最大誤差を示したものである。なお、表-1 (c) のコンクリート供試体

Bにおける3次元位置標定結果は、破壊靱性試験に用いたサイズ 600 mm (高さ) x440 mm (幅) x120 mm (厚さ) のコンクリート供試体の角の部分を用いて行ったものである。表一1 (a), (b) 及び(c) から明のように、平均誤差は 5 mm 以下であり、また、最大誤差は、10 mm 程度である。一般に、Z方向の最大誤差が大きいが、擬似AE源としてのパルス入力位置がZ方向の供試体表面にあり、8個のトランスジューサーで取り囲まれた位置からはみ出しているためと考えられる。最大骨材粒径が大きく、内部構造の不均一性が高くなるにつれて、AE波動伝播速度のバラツキが大きくなる傾向があるにもかかわらず、改良された方法では、最大骨材粒径に 2 ～ 30 mm の違いがあっても、平均誤差及び最大誤差にはほとんど差異が現れていない。これは、特定のチャンネルを基準とした到着時間差ではなく、全チャンネルを基準としたAE波の到着時間差を

(a) モルタル (最大骨材粒径：2 mm, Sample数：50)

	入力位置	平均値	標準偏差	平均誤差	最大誤差
X	75.0	79.1	2.5	4.8	9.1
Y	75.0	77.9	0.8	3.1	5.0
Z	150.0	148.9	1.9	2.2	6.6

(単位 :mm)

(b) コンクリートA (最大骨材粒径：15 mm, Sample数：26)

	入力位置	平均値	標準偏差	平均誤差	最大誤差
X	50.0	52.2	1.24	2.2	3.9
Y	60.0	59.8	0.77	0.6	1.7
Z	100.0	97.7	2.75	2.7	10.0

(単位 :mm)

(c) コンクリートB (最大骨材粒径：30 mm, Sample数：21)

	入力位置	平均値	標準偏差	平均誤差	最大誤差
X	-10.0	-8.1	2.4	2.7	6.6
Y	0.0	3.9	1.8	4.0	6.1
Z	120.0	117.1	3.3	3.4	10.1

(単位 :mm)

表一1 改良された3次元AE位置標定法の精度の検証例

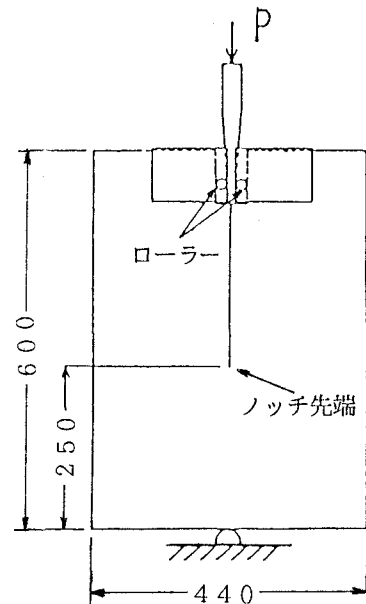
採用し、擬似A E源の位置を平均化しているために、材料内部の非均質性により、各チャンネルに生じるA E波の到着時刻のバラツキが相殺され、均一に近い材料で3次元位置標定を行っているような効果が生じているためと考えられる。位置標定の精度も、特定の1個のチャンネルを基準としたA E波の到着時間差を用いる場合⁵⁾と比較して、2～3倍の向上がみられる。また、本研究で提案したA E到着時刻の読み取り方法の精度は、人間が目視で行った場合と比較してほとんど差異がないことが確認されている⁵⁾。

3. 改良された三次源位置標定法のコンクリートの破壊靱性試験への適用

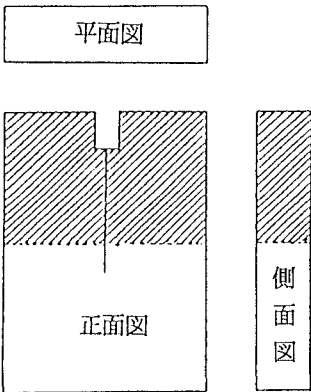
コンクリートの破壊は、ほとんどクラックの発生・進展によって支配されている。ここでは、前節の改良された3次元位置標定法を用いて、破壊靱性試験中に生じる破壊進行領域内の微視的クラックの統計的分布を解析する。

初めに、実験方法について説明する。破壊靱性試験には、表－2の配合Ⅰのモルタル及び配合ⅡとⅢのコンクリートを用いて作成した二重片持梁供試体を使用した。また、セメントはポルトランドセメントである。コンクリート及びモルタル供試体は同一寸法であり、厚さは120 mmで、ノッチに沿って深さ10 mm、幅20 mmのV字型のクレープ (Groove) を表面及び裏面に有している。図－2に示すように、供試体の下端は、1点支持とし、片持梁の部分に作用する荷重は、供試体の上部に取りつけた金具のローラーを介して載荷した。荷重は、毎分0.02 mmの変位制御で載荷し、トランスデューサーは、供試体の表面と裏面にそれぞれ4個配置し、巨視的クラックの進展に伴って、実験中に少なくとも1度トランスデューサーの位置を変えて、可能な限り巨視的クラックの先端を取り囲むように配置した。A E波形は100 nsecでデジタル化し、1事象 (1チャンネル当り1 KWで全体で8 KW) のデータを光ディスクに記憶するのに必要とする時間は約1.2 secである。

次に、3次元位置標定結果について説明する。図－4 (a), (b) 及び(c) は、それぞれ表－2 の配合Ⅰ, Ⅱ 及びⅢの供試体の破壊靱性



図－2 供試体と実験方法



図－3

表－2 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Ⅰ	5	40	—	296	750	1162	—
配合Ⅱ	20	40	44	186	466	722	939
配合Ⅲ	30	40	44	174	684	672	1066

W :水 C:セメント S:細骨材 G:粗骨材 a:全骨材

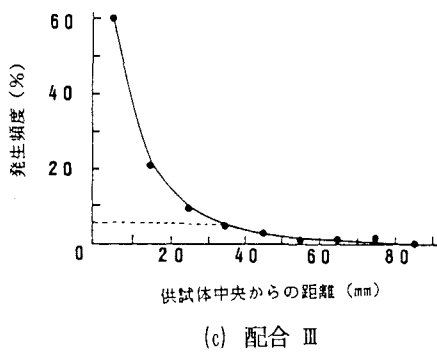
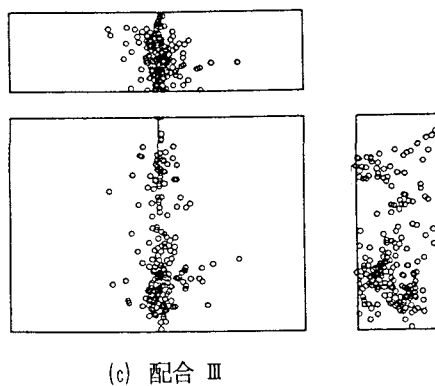
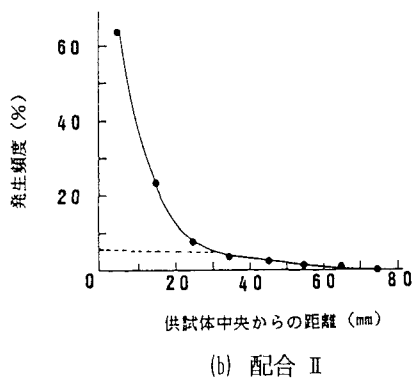
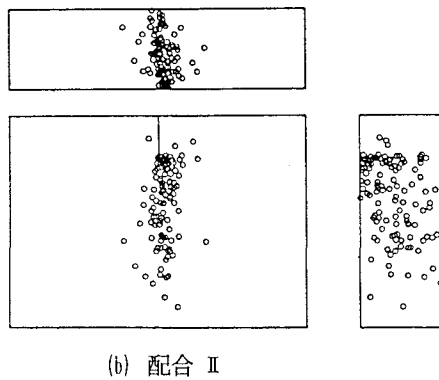
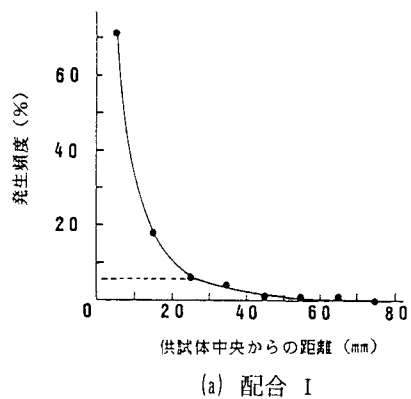
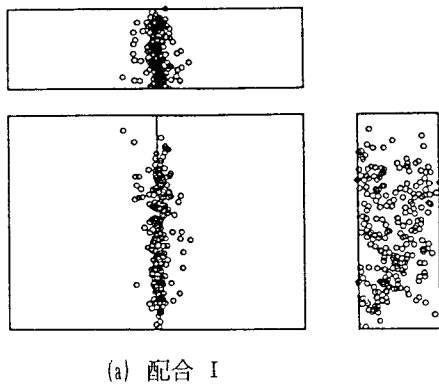
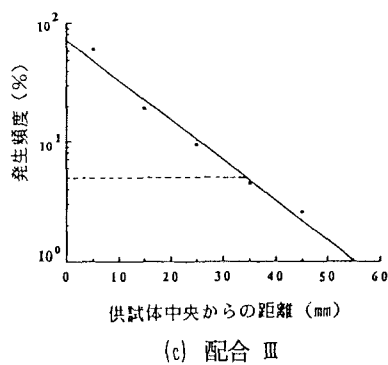
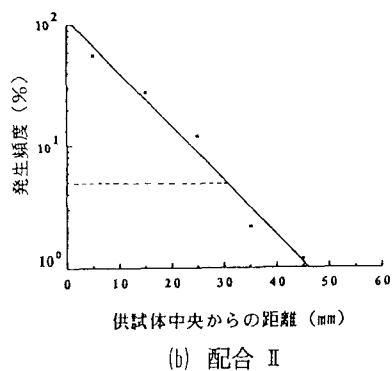
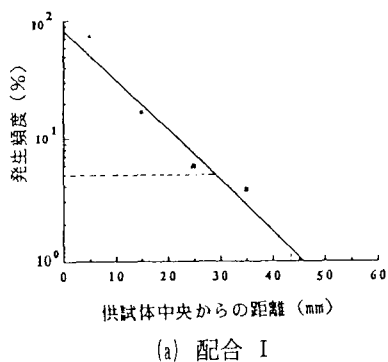
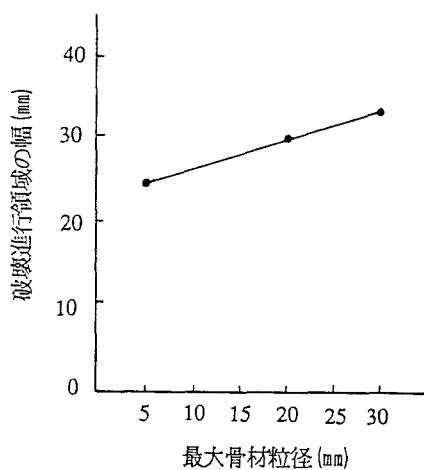


図-4 全AE事象の発生源分

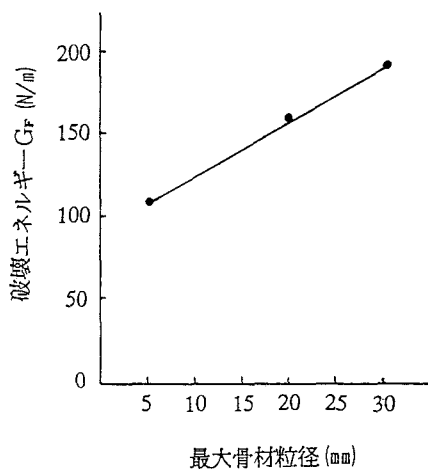
図-5 供試体中央からのAE発生源の頻度分布



図一 6 供試体中央からのAE発生源の頻度分布の指数関数近似



図一 7 最大骨材粒径と破壊進行領域の幅の関係



図一 8 最大骨材粒径と破壊エネルギーの関係

試験中に発生したAE発生源の3次元位置標定結果を示したものである。図-3に例示したように、それぞれAE発生源の正面図、平面図、側面図を示したものであり、図-4の正面図及び側面図では、紙面の都合上AE発生源のない図-3の斜線部分が省略されている。1AE事象を光ディスクに記憶させるのに約1.2 secの時間を必要とするので、破壊靱性試験中に生じた全てのAE事象を記録することはできないが、記録可能であったAE事象数は配合I、II及びIIIの各供試体で、それぞれ、791、492及び765個であった。これらのうち位置標定可能であったAE事象数は配合I、II及びIIIの各供試体で、それぞれ、268、161及び272個であり、平均位置標定率は約34%であった。コンクリートやモルタルのような極めて非均質な材料の場合、個々のAE事象ではなく、ある程度まとまったAE事象の統計的集合が、通常、連続体力学で問題とする現象に対応していると考えられるので、AE発生源も統計的に解釈するのが適切であると考えられる。図-5は、配合I、II及びIIIの各供試体の正面図中央からの10mmごとの全AE発生源の頻度分布を百分率で表示したものである（・印で示した百分率の合計が100%）。また、図-6の実線は、図-5のAE発生源の10mmごとの頻度分布を対数表示し、最小2乗法で近似したものであり、巨視的クラック面から垂直な方向の距離を r 、AE発生源の頻度を N とすれば、 a 、 b を定数として、

$$N(r) = a \cdot \exp(-b r) \quad (1)$$

で表現される。AE発生源が微視的なクラックの発生に対応するものとすれば、図-5及び図-6は、巨視的クラック面に垂直方向の破壊進行領域内の微視的クラックの発生頻度分布を表している。これらの図中の点線は、AE事象の発生頻度が5%の点を表している。図-5(a)、(b)及び(c)のAE発生頻度曲線の裾野は長く伸びているが、上記の5%の点を対象とした場合、巨視的クラック面に垂直方向の破壊進行領域の広がり、配合I、II及びIIIの各供試体で、それぞれ25、30及び33mmである。すなわち、供試体の正面図の中央より0～25mm、0～30mm及び0～33mmの領域に95%のAE事象が生じている。図-7は、最大骨材粒径とAE事象の95%が生じている破壊進行領域の幅の関係を示したものであり、図-8は最大骨材粒径と破壊エネルギー G_F ⁶⁾の関係を示したものである。これらの図から明のように、供試体内の細大骨材粒径が大きくなるにつれて、破壊進行領域の幅と破壊エネルギーは増加する。すなわち、水セメント比(W/C)の同じモルタルやコンクリートでは、破壊エネルギー G_F は、破壊進行領域の幅によって支配されている。

4. むすび

3次元位置標定法におけるAE波到着時刻のコンピューターによる自動読み取り法、全てのチャンネルを基準チャンネルとするAE波の到着時間差を用いることによる3次元位置標定精度の改良方法及びこの改良された方法による破壊靱性試験中に生じる破壊進行領域内の微視的クラックの解析結果について説明した。

本研究の結果を要約すれば次の通りである。

- (1) コンピュータによるAE波到着時刻の読み取りは、目視による場合とほとんど同等な精度を与える。
- (2) 3次元位置標定における通常の最小2乗法による反復解法では、モルタルやコンクリート供試体内の最大骨材粒径が大きくなるにともない誤差が増大するが、全チャンネルを基準チャンネルとするAE波の到着時間差を用いることによって改良された方法では、最大骨材粒径の影響をほとんど受けず、精度は2～3倍向上する(表-1(a)、(b)及び(c))。
- (3) 巨視的クラック面から垂直な方向の距離を r 、AE発生源の頻度を N とすれば、 a 、 b を定数として、 N と r の関係は $N(r) = a \cdot \exp(-b r)$ によって近似できる(図-6)。

- (4) 供試体中の最大骨材粒径にほぼ比例して、破壊進行領域の幅及び破壊エネルギー G_F は増加する（図-7及び8）。

謝 辞

本研究の実施中の御助言と励ましに対して、元東北大学工学部土木工学科（現在 東北学院大学工学部土木工学科）佐武正雄教授及び東北大学工学部建築学科和泉正哲教授に謝意を表します。

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 of strain, ed. by J. Harding, Inst. Phys. 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-RLEM Int. Conf., June, pp. 199-204, 1987
- 4) Slate, F. O. and Hover, K. C. : Microcracking in concrete, Fracture mechanics of concrete, ed. by A. Carpinteri, et al., Martinus Nijhoff Publisher, pp 137-159, 1984
- 5) 佐武正雄：A Eによるコンクリート構造物の破壊箇所の識別と破壊レベルの予測法の開発，文部省科学研究費試験研究 (I) 研究成果，1986，pp. 24-31
- 6) 三橋博三，野村希晶：人工岩石（コンクリート）の破壊靱性と引っ張り軟化則に及ぼす非均質生の影響，阿部博之編，岩石破壊力学とその応用に関する研究，日本機械学会，P-SC120 調査研究分科会成果報告書，1990，pp. 114-124

(1991年 9月30日)