

論文 AEによるコンクリートの引張破壊進行領域の検出

木村 聰¹・大塚 浩司²・伊達 秀文³

要旨:本研究は、相似形で供試寸法の異なる4種類のコンパクトテンション型供試体を用いて引張試験を行い、コンクリートの引張破壊進行領域におけるAEの発生挙動などを、3次元位置標定により調べたものである。個々のエネルギーを解析した結果、AEイベントのエネルギーが大きいものはビノッチの先端付近に集中して発生することを明らかにした。全AEイベントのエネルギー総和の95%に相当するAEイベント群からなるAE有効発生領域を求めることができた。さらに、AE有効発生領域の長さ及び幅に及ぼす骨材寸法と供試体寸法との影響を明らかにした。

キーワード: AE(エクスティック・エミッション), 引張破壊進行領域, 3次元位置標定, AEエネルギー

1. はじめに

コンクリートが破壊する際、そのひび割れ先端近傍には多数の微細ひび割れの生じている破壊進行領域の存在することが知られている。この破壊進行領域についてこれまでに行われた研究は、コンクリート表面の観察によるものが多い。コンクリート内部における破壊進行領域の観察についても、X線造影撮影法を用いた研究^{1), 2), 3)}や、AE法を用いた研究^{4), 5), 6), 7)}などがある。X線造影撮影法による大塚の研究³⁾では、コンクリートの破壊進行領域の長さや幅に及ぼす、骨材寸法や供試体寸法の影響などについて明らかにしている。また、AE法による新関らの研究⁴⁾でも、3次元位置標定により破壊進行領域の長さや幅に及ぼす、骨材寸法の影響について明らかにしている。しかし、複雑な現象であり、コンクリートの破壊進行領域の性状を十分に解明したとは言えない。

そこで本研究は、コンクリートの引張破壊進行領域の性状を明らかにすることを目的とし、コンパクトテンション型供試体を用いた引張試験を行い、コンクリート内部に生じるAEの発生源を、3次元位置標定により検出し、荷重の増加に伴うその発生位置や発生領域の変化と、骨材の最大寸法及び供試体寸法の違いによるAE発生領域の変化を実験的に調べたものである。また、コンクリートのひび割れ発生状況を表面ゲージ法を用い

て調べ、内部の破壊状況との比較検討を行った。

2. 実験方法

2.1 AE法

本実験で使用したコンクリートの配合を表-1及び表-2に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、骨材は細骨材として川砂を、粗骨材として最大寸法10mm(d_{10})及び20mm(d_{20})の碎石を使用した。試験時のコンクリートの目標強度は、破壊性状に及ぼす骨材寸法の影響が調べやすい低強度の20N/mmとした。供試体寸法及び形状を図-1に示す。供試体はコンパクトテンション型供試体を用いて実験を行い、初期ひび割れを導くため、幅5mmのノッチを設けてある。供試体は打設後24時間で脱型し、7日間水中養生を行い、AEセンサーを取り付けるため、24時間、温度20°C湿度50%の恒温恒湿室中で乾燥させた後に実験に用いた。

表-1 コンクリートの配合 (d_{10})

W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位重量(kgf/m ³)			
				W	C	S	G _{5~10}
68	47	8±1	2±1	195	287	828	927

表-2 コンクリートの配合 (d_{20})

W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位重量(kgf/m ³)				
				W	C	S	G _{5~10}	G _{10~20}
68	47	8±1	2±1	195	287	828	556	371

*1 東北学院大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東北学院大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 東北学院大学教授 工学部機械工学科 工博

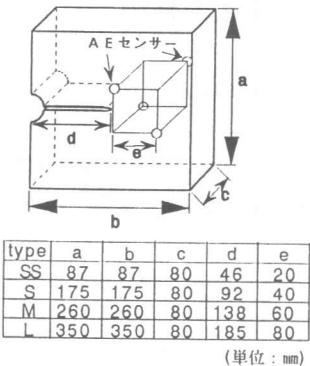


図-1 供試体寸法及び形状

本実験に用いた実験装置の概要を図-2に示す。載荷には万能試験機を使用し、引張載荷金具を取り付けてある。載荷はひずみ制御で行い、その際の載荷速度は、ノッチに取り付けたクリップゲージの開口変位が、毎分0.05mm開く速度に自動制御した。また、AE計測のためのセンサーの配置は、図-1に示すとおりであり、片面2個、両面で4個のセンサー（共振周波数140KHz）を供試体表面に取り付けた。AE計測条件については、弾性波速度を予備実験により3600m/sec、ディスクリレベルは、載荷を行っていない状態で発生している雑音を分離できる最低限の値とし80mV、増幅度はプリアンプで40dB、メインアンプで30dB、合計70dBの以上の条件で実験を行った。また、載荷金具に取り付けたロードセルより荷重を、供試体ノッチ部に取り付けたクリップゲージにより開口変位をそれぞれ計測しデータロガーに記録した。

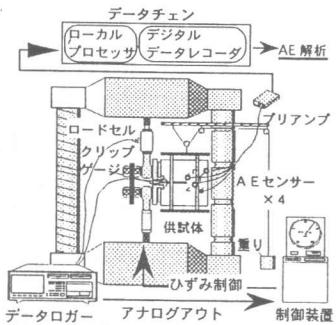


図-2 実験装置概要

2.2 表面ゲージ法

表面ゲージ法は、供試体表面に導電性樹脂を細

い平行線状に塗布し、その1本1本に配線を施しデータロガーに接続し、抵抗値の変化からひび割れ長さの進展の推定を行う方法である。表面ひび割れ測定に用いた供試体寸法は、AE法で用いた供試体のLタイプと同様の寸法であり、その形状を図-3に示す。

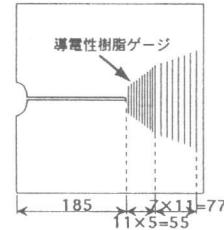


図-3 表面ひび割れ測定用供試体

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重の進展に伴うAE発生領域の変化

図-4は、Lタイプ、 d_{20} の供試体の実験により得られた、荷重-開口変位曲線の一例である。曲線上の点(T1からT6)は、以下に示すAE3次元位置標定結果の集計を行った点に対応している。

図-5は、図-4の曲線上のT1からT6までの各荷重段階における、荷重の増加に伴うAEイベント数の累積曲線である。図中の細線は発生したイベント総数であり、太線は3次元位置標定できたイベント総数を示している。イベント総数の約81.7%が位置標定できた。以後解析に用いるAEイベントの3次元位置標定結果は、荷重0段階からの累積ではなく、全て各荷重段階の間で集計されたAEイベントの位置標定結果である。図-5よりAEは、荷重段階T1までに既に少數発生しており、荷重段階T1から最大荷重点T3までは一定の増加傾向を示し、最大荷重段階T3以降は、やや急激な増加傾向を示していることが分かる。

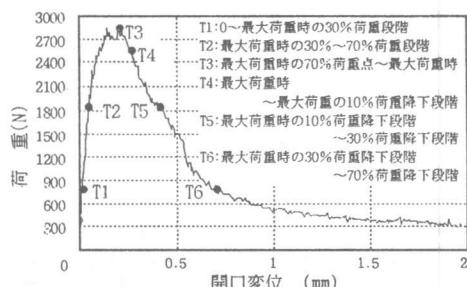


図-4 荷重-開口変位曲線（AE法）

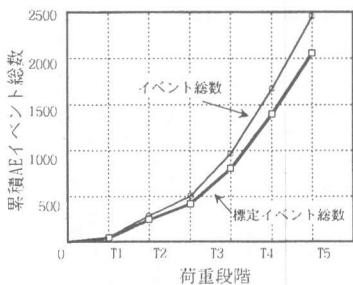


図-5 A-E累積イベント数

図-6(a)～(f)は、図-4の曲線上の各荷重段階に集計したA-E3次元位置標定結果を示す図である。A-Eは最大荷重の30%時から既に、ノッチ先端付近に集中して発生しており、その領域は荷重の増加に従って次第にノッチ先端部から広がり、最大荷重点を過ぎて最大荷重の70%に除荷した段階までは、かなり密集した領域を形成している。しかし、それを過ぎると発生領域はばらつきが生じ、かなり大きく広がる様子が見られた。

図-6(c)及び(d)の側面図と平面図より、A-Eの分布域の厚さ方向の相違はあまり大きくないものと考えられる。

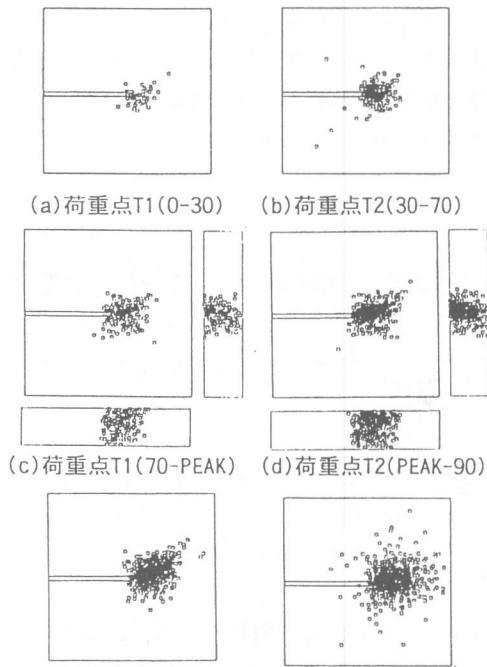


図-6 A-E 3次元位置標定結果

3.2 A-E有効発生領域の推定

A-Eイベント個々のエネルギーについて検討を行った。A-Eエネルギーは、図-7のA-E波形図に示すように波の振幅の2乗と継続時間との積によって次式(1)のように表すことができる。

$$A-E\text{エネルギー} = V^2 \times T \quad (1)$$

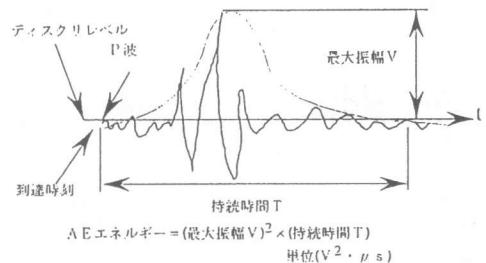


図-7 A-E 波形図

1つのイベントから発生したA-Eの波の振幅及び持続時間の大きさは、4つのセンサーで測定された時点でのほとんど大きな差ではなく、A-Eイベントのエネルギーの分布の検討には、4つのセンサーで測定された振幅及び持続時間の内、最大のものを用いている。

図-8(a)～(d)は、Lタイプ, d_{10} の供試体の実験により、荷重段階が0から最大荷重時までにおいて発生したA-Eイベントを、エネルギーの大きさで4段階に区分したものである。エネルギーを4段階に区分した内の最小のもの($100 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}$ 未満)を表している。また(b),(c)及び(d)のエネルギーの大きさは、それぞれ $100 \sim 999 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}$, $1000 \sim 9999 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}$ 及び $10000 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}$ 以上である。

図-8(e)は、(a)～(d)のA-E発生領域の最外側を結ぶ曲線をトレースし重ね合わせた模式図である。この図に見られるように、A-Eイベントの個々のエネルギーが大きくなるほど、ノッチ先端部の狭い範囲に集中する傾向がある。このように同一の荷重状態においても、A-Eエネルギーの大きいものと小さいものが混在しており、エネルギーの大きいものはノッチ先端部に集中して発生し、外側にいくにつれてエネルギーの小さいものが順次存在していることが分かる。

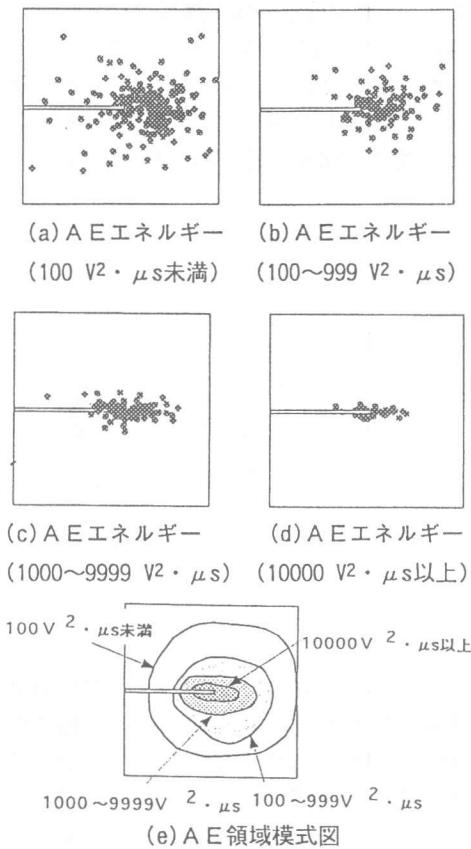


図-8 A-Eエネルギー別分布図(0-PEAK)

図-9は図-8の場合のA-Eイベントの各エネルギー段階のイベント数と、A-Eエネルギーの総和を百分率で示したものである。図中の網目の棒はA-Eエネルギーの百分率を、白棒はA-Eイベント数の百分率を示している。図よりA-Eエネルギーが100未満のものは、イベント数において、全体の47.8%を占めるのに対し、A-Eエネルギーにおいては、全体の0.6%と極微小である。このことより、A-Eエネルギーが100未満のイベントは、コンクリートの破壊形成にほとんど影響を及ぼさないA-Eイベントと考えられる。

本研究においては、A-EエネルギーがA-Eエネルギー総和の95%に相当するA-Eイベントを、コンクリートの破壊形成に影響を及ぼすA-E有効発生領域と定義した。その領域は、ほぼA-Eエネルギー $1000\text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}$ 以上の領域(図-8(c))に相当する。

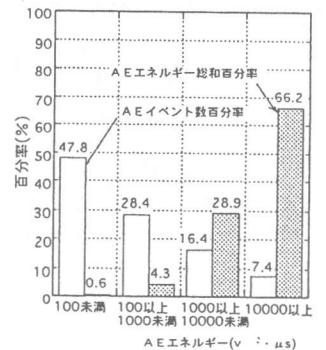
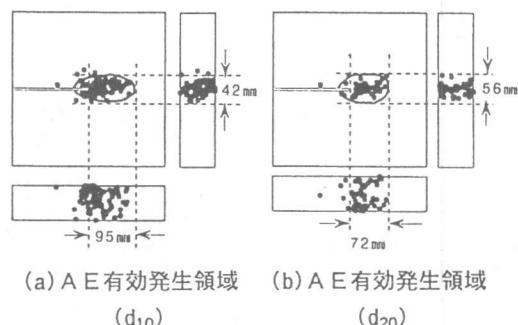


図-9 エネルギー別イベント数・エネルギー総和百分率(0-PEAK)

3.3 A-E有効発生領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響

図-10(a)及び(b)は、Lタイプ供試体について実験を行った際、荷重段階が0から最大荷重時までにおいて発生したA-Eの有効発生領域を示したものである。図中のA-E発生点の大部分を囲む線から、A-E有効発生領域長さ及び幅を求めた。

ここで、(a)と(b)のA-E有効発生領域長さ及び幅の比較をすると、骨材の最大寸法が大きくなると、A-E有効発生領域長さは短くなり、逆に幅は広くなる傾向がみられた。これは、骨材の最大寸法が大きくなると、ひび割れが骨材を大きく迂回するためだと思われる。同様の傾向がMタイプ、Sタイプの場合にもみられた。



(a) A-E有効発生領域 (d₁₀) (b) A-E有効発生領域 (d₂₀)

図-10 A-E有効発生領域

3.4 A-E有効発生領域の性状に及ぼす供試体寸法の影響

図-11(a), (b)及び(c)は、d₂₀のSタイプ、M

タイプ及びLタイプについて実験を行った際、その時の荷重段階が0から最大荷重時までにおいて発生したAEの有効発生領域を示したものである。図中のAE発生点を囲む線から、AE有効発生領域長さ及び幅を求めた。

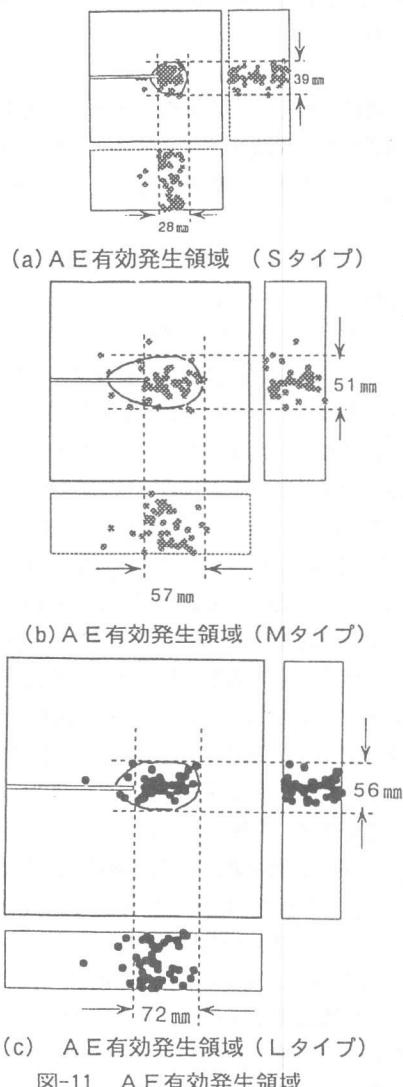


図-11 AE有効発生領域

表-3はAE有効発生領域の長さ及び幅を表したものである。この表より、供試体寸法比S:M:Lが1:1.5:2であるのに対して、AE有効発生領域の長さの比は、 d_{10} の時、1 : 1.64 : 2.44となり、 d_{20} の時、1 : 2.04 : 2.57となった。

また、AE有効発生領域の幅は、 d_{10} 及び d_{20} の

どちらの場合も、供試体が大きくなるにつれて、徐々に広くなる傾向がみられたが、その増加割合は供試体寸法比よりも小さかった。

表-3 各供試体のAE有効発生領域の比較

供試体寸法	直径 d_{10}			直径 d_{20}		
	Sタイプ	Mタイプ	Lタイプ	Sタイプ	Mタイプ	Lタイプ
AE有効発生領域長さ	72	57	28	95	64	39
AE有効発生領域幅	56	51	39	42	38	29

3.5 表面ゲージ法

図-12は、AE法のLタイプと同じ形状寸法で d_{10} の供試体を用いて、導電性樹脂塗料によって表面のひび割れ進展度を測定した際の、荷重-ひび割れ-開口変位曲線を示す。またこの図には、測定結果である荷重とひび割れ長さとの関係の一例を示している。最大荷重点以前ではゲージの抵抗値にわずかな変化が見られたが、ひび割れ発生とは判断できなかった。最大荷重点以降に急速な抵抗値の変化が見られ、ひび割れの進展が測定された。

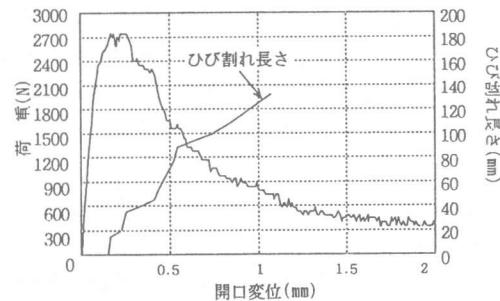


図-12 荷重-ひび割れ-開口変位曲線
(表面ゲージ法)

3.6 AE法と表面ゲージ法との比較

図-13は、AE法により検出された、AE有効発生領域の長さと表面ゲージ法により検出されたひび割れ長さとの比較を示すものである。この図から次のことが分かる。AE法では、最大荷重の30%の段階で既にノッチ先端に集中したAE有効発生領域が検出されるのに対して、表面ゲージ法では、最大荷重以後にひび割れが検出できる。同じ荷重段階で比べると、検出できるAE有効発生領域の長さは、表面ゲージ法よりも、AE法がかなり大きい。また、最大荷重以降2つの方法で測定した破壊進行領域は、急激に増大しそれらの差が小さくなる傾向が見られた。

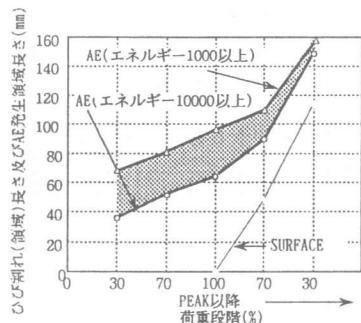


図-13 AE-表面ゲージ法 実験結果比較

4.まとめ

コンクリートの引張破壊進行領域における、AEの発生挙動を調べた結果、本実験の範囲内では次のようなことが言える。

(1) AEは、最大荷重の30%時以前から既にノッチ先端付近に集中して発生しており、その領域は、荷重の増加に従って次第に広がり、最大荷重点を過ぎて最大荷重の70%まで除荷した段階までは、かなり密集した領域を形成している。しかし、それを過ぎると発生領域のはらつきが生じ、かなり大きく広がる傾向が見られた。

(2) AEイベント個々のエネルギーの大きさの分布を調べた結果、イベントのエネルギーが大きくなるほど、ノッチ先端部の狭い範囲に集中する傾向があることが分かった。また、全AEイベントエネルギーの総和の95%に相当するAEイベント群からなる領域を、AE有効発生領域と推定した。

(3) 供試体寸法を一定とし、骨材の最大寸法を2倍にすると、AE有効発生領域の長さは短くなり、逆に幅は広くなる傾向がみられた。これは、骨材の最大寸法が大きくなると、ひび割れが、幅方向に大きく迂回するためだと思われる。

(4) 骨材の最大寸法を一定とし、供試体寸法を増加させると、AE有効発生領域の長さの比は、供試体寸法比より大きくなり、AE有効発生領域の幅の比は、供試体寸法比より小さくなつた。

(5) AE法及び表面ゲージ法により破壊進行領域の長さの検出を行い比較した結果、AE法の検出領域は表面ゲージ法に比べて、かなり大きいことが分かった。また、最大荷重以降それぞれの方法で測定した破壊進行領域の長さは、何れも急激に増大し、かつ両者の間の差が小さくなる傾向が見られた。

謝辞：実験に際し、東北学院大学工学部土木工学科大塚研究室大学院生、大沼礼亭、小野寺隆柔、並びに学生、齋藤浩一の協力を得た。ここに、感謝の意を表する。

[参考文献]

- 1) 大塚浩司 : X線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひび割れ検出に関する研究, 土木学会論文集, Vol.17, No.451, pp.169-178, 1992.5
- 2) 大塚浩司, 勝部宏明 : コンクリートの破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響, 土木学会論文集, Vol.21, No.478, pp.109-116, 1993.11
- 3) K. OTUKA : SIZE EFFECT IN FRACTURE PROCES ZONE OF CONCRETE, Size Effect in Concrete Structures, E&SPON, pp.47-56, 1994
- 4) 新関茂, 岸野佑次, 飯沼将之, 森隆宏 : 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幅の解析, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.541-547, 1995.3
- 5) 須藤泰孝, 大塚浩司, 古村豊 : 曲げを受けるコンクリート梁内の微視的破壊のAEの3次元位置標定, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, Vol.5, No.331, pp.662-663, 1996.9
- 6) 今野洋一, 大塚浩司, 栗田隆行 : コンクリートの引張破壊進行領域の性状に及ぼす部材寸法の影響に関する実験的研究, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, Vol.5, No.594, pp.1186-1187, 1996.9
- 7) K. OTUKA, H. Date, T. Kurita : Fracture Proces Zone in Concrete Tension Specimens by X-ray and AE Techniques, Proceedings of FRAMCOS-3, pp.3-16, 1998