

論文 AE 法を用いたコンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する研究

渡辺 健^{*1}・岩波 光保^{*2}・横田 弘^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

要旨:コンクリート供試体の一軸圧縮荷重を行い、破壊に伴う AE(アコースティック・エミッション)発生挙動を調べ、アクリル製角棒を用いて得られた圧縮破壊領域長さ(L_p)と比較することで、AE 法を用いた圧縮破壊領域の推定の可能性を検討した。その結果、検出された AE の最大振幅値や AE エネルギー値に着目することにより、破壊領域と非破壊領域を区別することが可能であることが明らかとなった。

キーワード:圧縮破壊の局所化、破壊領域長さ、AE 法、最大振幅値

1. はじめに

圧縮力を受けるコンクリートは、荷重が進むにつれて圧縮軟化する破壊領域と除荷される非破壊領域に区別できる。この圧縮破壊の局所化が構造物全体の力学挙動に影響を及ぼすと考えられる。しかし圧縮破壊は、(1)引張時のような面的な破壊でなく、ある体積を持って破壊すること、(2)破壊形態が供試体寸法やコンクリート強度、荷重条件等に強く依存することなど、その複雑な破壊性状のため、圧縮破壊領域の定量的な評価方法は十分には確立されていない。

この破壊領域のスケールを把握する試みとして、最近では、破壊片を大きさ別に区別する方法¹⁾、アクリル製角棒を用いることにより局所的なひずみを測定する方法^{2,3)}などが検討されてきた。特に後者の方法については、平井らの研究²⁾により、異形に加工した一辺 10mm のアクリル製角棒(以後アクリルバーと称す)の長さ方向にひずみゲージを貼付し、これを供試体内部中央に設置することで、最大荷重に達した以降(ポストピーク域)のコンクリートの局所的な力学挙動を評価できることが示されている。筆者らもこれまで、同様の測定方法によりコンク

リート供試体の一方向繰返し圧縮荷重を行ってゐる。その結果、得られた供試体の局所的なエネルギー吸収推定量から、供試体の全吸収エネルギー量を求め、この 15%以上を吸収した領域を破壊領域と定義し、その長さを破壊領域長さ(L_p)とした。この L_p は圧縮強度、および供試体形状に依存せず断面積(A_c)に依存すると判断されたことから、式(1)を提案している³⁾。

$$\begin{aligned} L_p/D^* &= 1.36 && ; D^* < 100 \\ &= -3.53 \times 10^{-5} D^{*2} + 1.71 && ; 100 \leq D^* \leq 180 \\ &= 0.57 && ; D^* > 180 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $D^* = \sqrt{A_c}$ (等積正方形の辺長, mm)

本研究では、より簡便に圧縮破壊領域を推定することを目的として、AE 法を用いることを試みた。その理由として、AE 法を用いることで、(1)アクリルバーを用いる場合と異なり、供試体に細工を必要としないので、測定に際し供試体の挙動に全く影響を与えない、(2)測定方法が容易であり、特殊な形状の構造物にも応用が可能である、(3)ポストピーク域においても、あ

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室 工博 (正会員)

*3 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室室長 工博 (正会員)

*4 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

る程度供試体の内部情報を収集できる，ことがあげられる。

コンクリートの一軸圧縮載荷を行い，目視による観察結果，アクリルバーを用いて得られた式(1)の結果，および AE 測定結果を相互に比較することで，AE 法による破壊領域長さ L_p の推定を試みた。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に用いた供試体形状を表-1に示す。断面寸法が 100mm または 150mm の円柱および角柱供試体を 7 体用意した。既往の研究^{1)~3)}から，破壊の局所化をより明確に再現するため，供試体最大幅 (D) に対する高さ (H) の比 H/D が 4 の供試体を 6 体とした。そのうちの 2 体には L_p の確認のため，ひずみゲージを貼付したアクリルバーを内部に設置した。また，破壊が局所化しない H/D が 1 のケースも，比較のために 1 体実験を行った。

使用したコンクリートの配合を表-2に示す。早強セメントを使用し，粗骨材最大寸法 G_{max} は 20mm とした。実験時の平均圧縮強度は 34MPa であった。供試体は縦打ちとし，打設後 6 時間後にセメントペーストにて端面のキャッピング処理を行った。24 時間後に脱型し，6 日あるいは 7 日間の水中養生後，載荷を行った。

2.2 載荷方法

載荷実験の概要を図-1に示す。供試体を設置する際には一軸圧縮状態をより忠実に再現するために，2 枚のテフロンシート(厚さ 0.05mm)の間にシリコングリスを挟んだ減摩パッドを供試体端面と載荷板の間に挿入した。載荷は 2000kN 変位制御式試験機を使用し，載荷速度 0.002mm/s で一方向単調圧縮荷重を作用させた。最大荷重の 10% まで荷重が低下した段階を終局状態として，載荷を終了した。

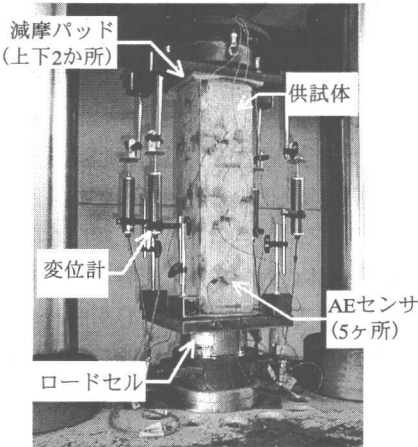
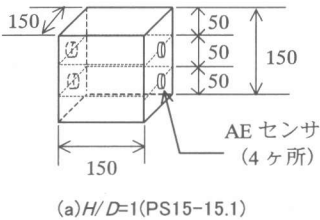
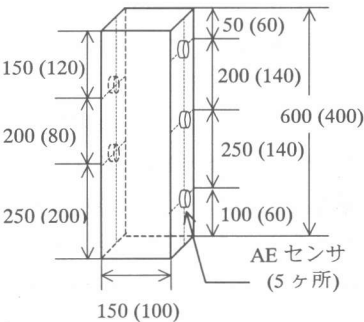


図-1 載荷状況



(a) $H/D=1$ (PS15-15.1)



注) $D=150\text{mm}$ 供試体の場合
(カッコ内は $D=100\text{mm}$ の場合)

(b) $H/D=4$

図-2 AE センサ配置図(mm)

表-1 供試体形状

	断面形状 (mm)	最大幅 D (mm)	高さ H (mm)	アクリルバー 設置	供試体名
角柱	150×150	150	150	—	PS15-15.1
			600	—	PS15-60.1
				○	PS15-60.ac
	100×100	100	400	—	PS10-40.1
			○	PS10-40.ac	
円柱	φ 150	150	600	—	C15-60.1
			—	C15-60.2	

表-2 示方配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G(mm)	
						5~13	13~20
20	50	45	185	370	799	494	494

2.3 測定項目

供試体全体の縦方向の平均ひずみを測定するための変位計の出力、およびアクリルバーに貼付したひずみゲージより得られる局所ひずみを動ひずみ計に記録するとともに、各供試体において AE 計測を行った。AE センサの貼付状況を図-2に示す。供試体の荷重軸方向の局所的な破壊領域長さを把握するために、荷重軸方向に計4あるいは5個のセンサ(共振周波数 150kHz)を 50~100mm 間隔で配置した。測定はしきい値を 60dB とし、増幅度はプリアンプ 40dB、メインアンプ 20dB、合計 60dB で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果の妥当性

(1) 破壊形態

表-3に各供試体の破壊形態を示す。なお各供試体の最大応力 ($\sigma_{\max}$) は、標準圧縮試験体

表-3 破壊形態

供試体名	破壊形態	AE による L_p (mm)	式(1) (mm)
PS15-15.1	全壊	150	—
PS15-60.ac C15-60.1	割裂	—	—
PS15-60.1	局所化	126	137
PS10-40.1		102	138
PS10-40.ac		102	138(103) [*]
C15-60.2		122	142

* () は今回アクリルバーより得られた L_p

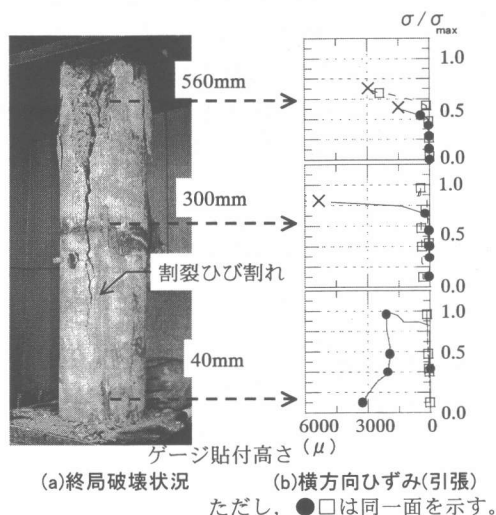


図-3 割裂状に破壊した例(C15-60.1)

($\phi 100 \times 200\text{mm}$)を用いて得られた圧縮強度と比較して約 30~40%程度の低下が見られたことから、減摩パッドを挿入したことで端部の摩擦は十分除去され、一軸圧縮状態を再現できたと考えられる。

次に、供試体の破壊状況を観察したところ、 $H/D=4$ のケース 6 体のうち、4 体は明らかに破壊が局所化した。残りの 2 体(PS15-60.ac, C15-60.1)は、最大応力の 50%程度で供試体上部から荷重軸方向の割裂ひび割れが生じ、最大応力の 60%程度でこのひび割れが供試体の中心にまで達した(図-3(a))。これは、供試体表面に荷重軸と直角方向に貼り付けたひずみゲージの測定結果からもうかがえる(図-3(b))。終局時には上部の破壊集中域の他に、供試体全体を荷重軸方向(縦方向)に 4 つに分割する大きな破壊面が形成された。そのためこれらの供試体は、今回着目している圧縮破壊の局所化とは言い難いと考え、以下の考察では取り扱わないこととした。破壊形状が他と異なった理由としては、今後検討が必要であるが、端部の拘束条件の違い、供試体の不均質性の違いなどが考えられる。

(2) 繰返し荷重と単調荷重の比較

式(1)はピークに達すると同時に除荷する一方向繰返し圧縮荷重に基づく結果であるため、今回行う単調荷重とは荷重方法が異なる。そこで、角柱 $150 \times 150 \times 600\text{mm}$ の供試体を例に、応力-ひずみ関係について、単調荷重時と繰返し荷重時の包絡線を比較した結果の一例を図-4に示す。これより、繰返し荷重を行ったケ

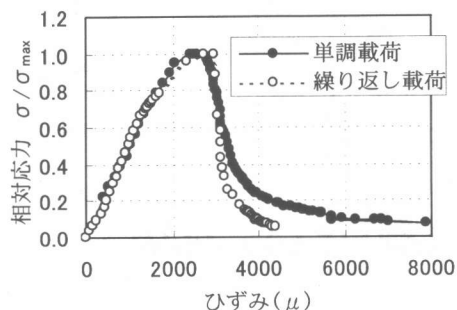


図-4 単調荷重と繰返し荷重の応力-ひずみ関係の比較

ースがいくらか脆性的になったものの、両者はほぼ一致した。したがって、今回行った単調載荷の場合と繰返し載荷の場合で、圧縮破壊性状はおおむね一致するものと考えられる。

(3) AE発生挙動

本研究ではコンクリート供試体中の AE 伝播速度を一般的な値である 4000m/s とした。また、AE センサ貼付位置間の距離を考慮して、AE が最初に到達した時間から一定時間内に検出された AE を同一イベントとして捉え、そのうち、最初に到達した AE のみに着目することとした(図-5(b))。PS10-40.ac の供試体を例に図-5(c)に AE のイベント数と平均応力-平均ひずみ関係を示す。最大応力に達するまで(プレピーク域)において AE イベント数は徐々に増加していた。特に応力-ひずみ関係の変曲点付近で AE が急激に発生していることから、検出された AE が供試体内部の破壊現象を適切に表現しているものと思われる。

3.2 圧縮破壊の局所化発生時期

目視観察の結果、プレピーク域において、ひ

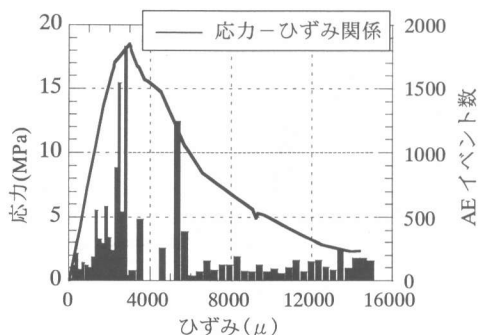
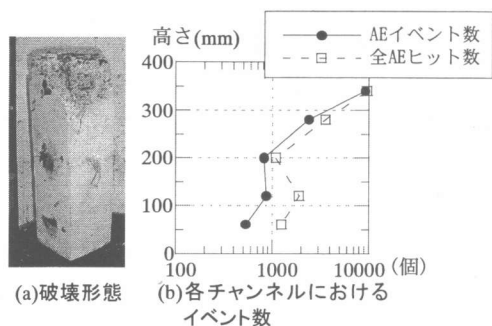


図-5 AE 検出結果(PS10-40.ac)

び割れの発生が破壊領域で認められた。図-6にアクリルバーに貼付したひずみゲージより得られた破壊領域および非破壊領域における平均応力-局所ひずみの関係を示す。この図から、非破壊領域においてはピークに達するまで初期剛性が保たれているが、破壊領域では σ/σ_{max} が 60% に達した以降、徐々に軟化し始めている。変位計より得られた供試体全体の平均応力-平均ひずみ関係と比較しても、軟化の始まる時期はほぼ同時であり、局所的な破壊領域の挙動が供試体全体の挙動に影響していることがわかる。なお、局所ひずみと平均ひずみの初期剛性の相違は、特に変位計より得られたひずみに端部に挿入した減摩パッドの変形およびセメントベーストによるキャッピング部分の変形等が含まれていることによると考えられる。

また、次に示す AE の累積イベント数とセンサ貼付位置の関係(図-7(d))から、明らかにプレピーク域より局所的に AE が発生していることがわかる。

以上のことから、コンクリートが圧縮力を受けると、プレピーク域より徐々に局所的に破壊が始まり、応力が増加していくにつれて破壊が進展し、ピークに達した後、供試体としての耐力を失っていくものと思われる。

3.3 AE 法による破壊領域長さの推定

次に破壊の局所化が明確に現れたケースとして PS10-40.ac を例に議論する(図-7)。供試体の破壊状況の目視観察結果より、破壊は供試体上部より約 100mm 程度の領域に生じていた。

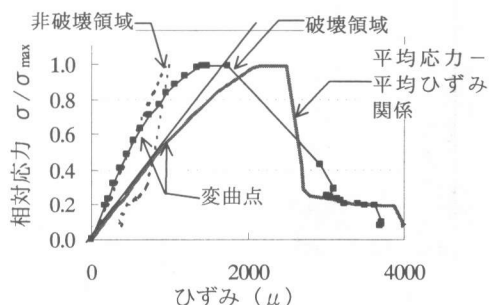
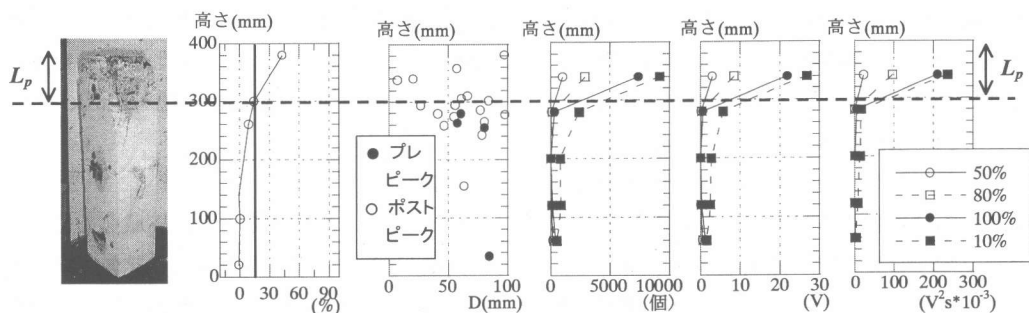


図-6 平均応力-局所ひずみ関係と平均応力-平均ひずみ関係の比較



(a)破壊形態 (b)局所エネルギー (c)発生源位置標定 (d)イベント数 (e)最大振幅値 (f)AE エネルギー

図-7 局所破壊が生じたときの各項目の高さ方向の分布, $H/D=4$ (PS10-40.ac)

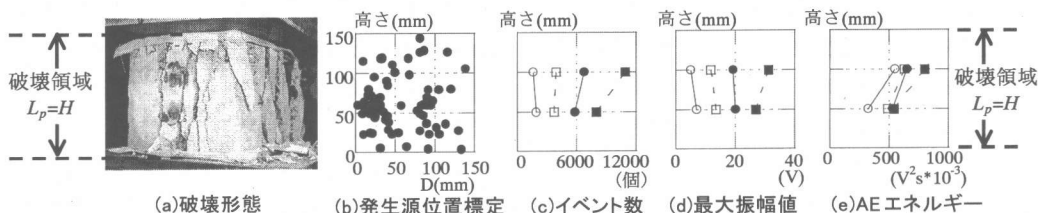


図-8 供試体全体で破壊が生じたときの各項目の高さ方向の分布, $H/D=1$ (PS15-15.1)

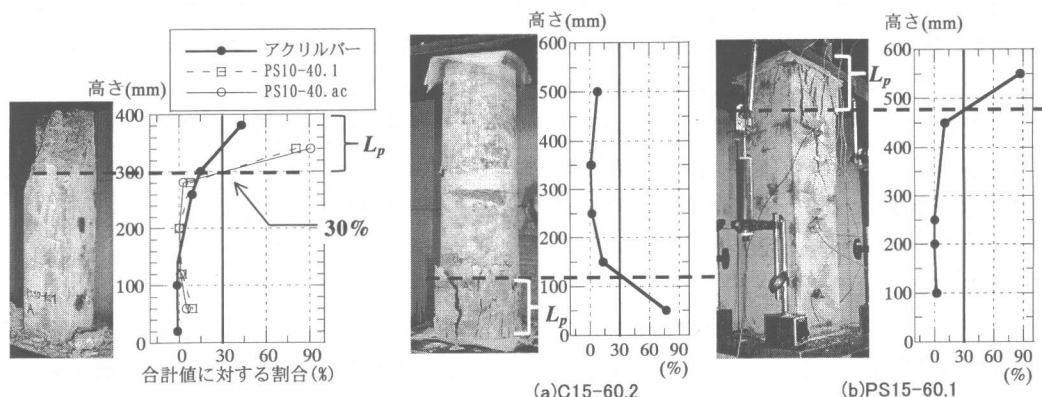


図-9 最大振幅値の分布と破壊領域

図-10 破壊形態と最大振幅値の分布

また、図-7(b)に、アクリルバーより得られた局所ひずみから、Torsak らの方法³⁾に基づいて算定した局所エネルギーの、供試体全体で吸収されたエネルギーに対する割合の分布を示す。これより $L_p=103\text{mm}$ となった。ただし、この値は式(1)より求まる $L_p=138\text{mm}$ より、若干小さな値となった。

次に、図-7(d)~(f)に AE センサごとに検出された AE のイベント数、最大振幅値(V)、エネルギー ($\text{V}^2 \times \text{s}$) の荷役段階ごとの累積値(50%: 荷役開始~ $0.5 \sigma_{\max}$, 80%:荷役開始~ $0.8 \sigma_{\max}$,

100%:荷役開始~ $\sigma_{\max}$, 10%:荷役開始~荷役終了)とセンサ貼付高さの関係を示す。ただし、(AE エネルギー)=(最大振幅値)²×(継続時間)である。これらの結果から、設置したセンサのうち、破壊領域では荷役が進むにつれて各値が急激に増加する一方、非破壊領域ではそれほど顕著な増加は見られなかった。しかし、供試体全域で破壊した PS15-15.1 において同様の検計を行った結果、センサ位置に依存せず供試体全域で各値が増加した(図-8)。したがって、これらの検出値の違いに着目することで、供試体

を載荷軸方向に2つに区別できるものとする。特に破壊の規模と相関を持つ最大振幅値や AE エネルギーに着目することが望ましいと思われるが、今回の実験結果では両者とも分布に大きな違いは見られなかったため、本研究では最大振幅値のみに着目することとした。また、ポストピーク域ではひび割れ進展が顕著となり AE 測定が困難となるため、ピークまでの累積値(図-7(e)の100%にあたる)に着目することにした。

図-9に、供試体載荷軸方向に、アクリルバーを用いて得られた局所エネルギー分布とピークに達するまでに検出された AE の最大振幅値の累積値を示す。ただし、どちらも全域で検出された値の合計値に対する割合(%)で表示している。またこの図には、同一形状寸法である PS10-40.1 の結果も参考までに示してある。これらを比較してみると、アクリルバーより得られる破壊領域と非破壊領域を区別する境界線は、PS10-40.1 および PS10-40.ac とともに約30%であった。そこで試みにこの30%という基準値を用いることにして、供試体形状の異なる他の供試体($D=150\text{mm}$)に当てはめ(図-10)、得られた L_p の結果を表-3に示す。式(1)で得られた結果と比較すると10~30mm程度小さくなったが、大きな差は見られなかった。

したがって、ピークに達するまでに発生した最大振幅値の累積値に着目することで局所化破壊の区別ができる可能性が示された。今回行った4体の供試体では全センサの合計値の30%以上検出された領域を破壊領域とみなすことができた。30%という基準値の妥当性については、今後より多くの供試体を対象にして検討していきたいと考える。

3.4 AE発生源位置による破壊領域の判断

AE の発生源の載荷軸方向断面における2次元位置標定を行い、それぞれの AE エネルギー等を解析することで破壊領域の推定⁴⁾を試みた。しかし、破壊領域のある程度は把握できたものの、検出できる AE イベント数が極めて少なく、また供試体によって検出数もまばらであったた

め定量的な考察は行えなかった。参考に PS10-40.ac および PS15-15.1 において特定された AE 発生源を図-7(c)および図-8(b)に示す。

4. まとめ

コンクリート供試体の一軸圧縮載荷を行い、5つの AE センサを載荷軸方向に供試体表面に貼付し、AE の測定を行った。検出時間より最初に到達した AE のみに着目し、既往の研究および同時に測定したアクリルバーのひずみ測定結果と比較することで、以下のような結論を得た。

- (1) 破壊領域と非破壊領域では、AE イベント数、最大振幅値、AE エネルギーに明らかな違いが見られた。
- (2) ピークに達するまでに検出された AE の最大振幅値の累積値に着目することで破壊の局所化の有無が判定できた。すなわち、供試体形状に依存せず全センサの合計値の30%以上を示す領域とアクリルバーから得られた L_p とがほぼ一致した。
- (3) プレピーク域から破壊の局所化が生じていることが、アクリルバーおよび AE のいずれの測定結果からも推定できた。

参考文献

- 1) 畑中重光, 水野英二, 小池狭千朗, 谷川恭雄: 供試体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.5, No.1, pp.65-73, 1994.1
- 2) 平井 圭, 中村 光, 檜貝 勇: コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.2, pp.339-344, 1995.6
- 3) Torsak, L., WATANABE, K., MATSUO, M. and NIWA, J.: Experimental Study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.309-321, 2001.2
- 4) 木村 聡, 大塚浩司, 伊達秀文: AE によるコンクリートの引張破壊進行領域の検出, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.145-150, 1999.6