論文 AE 法を用いた圧縮下コンクリートの破壊進展予測に関する一考察

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

要旨: 圧縮力作用下におけるコンクリートの破壊性状と,吸収されたエネルギーおよび載荷に伴う AE(アコースティック・エミッション)の発生挙動は,相互に強い関連があると考えられる。そこで本研究では,コンクリート供試体の一軸圧縮載荷試験を行い,AE 法およびアクリルロッド法を適用することでコンクリートに吸収されたエネルギーを測定した。そして得られた試験結果を用いて,AE 発生位置の標定を3次元的に行い,局所化する圧縮破壊域の進行過程を推定した。また,測定されたAE 波形パラメータおよび局所吸収エネルギーを比較することで,これらの関連について検討した。

キーワード:AE波形パラメータ,圧縮破壊,局所吸収エネルギー,破壊域,遷移域

1. はじめに

一般に圧縮材料として利用されるコンクリー トの圧縮破壊特性を解明することは、コンクリー ト構造物の力学挙動を正確に予測し、合理的な設 計を可能とする上で重要である。これまで、使用 材料あるいは作用応力条件など、様々な要因が圧 縮破壊特性へ及ぼす影響が指摘されてきた。特に、 圧縮破壊の局所化問題は、コンクリート構造全体 の力学挙動を精度良く把握する上で重要な課題 である。すなわち、圧縮破壊が局所化することで、 構造物の荷重一変位関係は、対象とする領域の位 置および範囲に強く依存し、その結果、局所化を 考慮しない単一の応力一ひずみ関係では、構造物 全体の荷重一変位関係の正確な推定を行うこと ができないのである。

このような背景の中で,筆者らは破壊力学的立 場に基づき,圧縮破壊の局所化現象を定量的に把 握することを目的とした検討を行ってきた¹⁾。そ の結果,コンクリート供試体の圧縮破壊性状と, 局所部に吸収されたエネルギー(以下,局所吸収エ ネルギーと称す)には強い相関があることが確認 され,局所吸収エネルギーを用いることで,破壊 域が特定可能であることを示した。この圧縮破壊 性状と吸収エネルギーの関係は,他の研究者によっても指摘されており,それぞれにおいて有意義な見解が得られている(図-1)。このことを踏まえ,著者らは圧縮破壊の局所化現象を考慮した応力 -ひずみ関係を提案した²⁾。

一方,コンクリート内部の破壊現象を可視化す る簡便な手法として,AE(Acoustic Emission)法が あげられる。これは,AE センサをコンクリート 表面に貼付し,載荷中に破壊に伴い発生した弾性 波(AE)を検出することで,破壊の有無を区別する 手法である³⁾。特にコンクリートを対象とする場 合,載荷に伴うAE 発生挙動は,徐々に発生・進 展するひび割れ挙動に対応していると考えられ る。したがって,コンクリート構造物の劣化度を 診断する非破壊試験技術としてAE 法の適用が強 く期待され,近年,活発な議論がなされている⁴⁾。

既往の研究において,筆者らは破壊と密接な関 係がある AE 発生挙動に着目し,AE 法によりコン クリートの局所的圧縮破壊域を特定する手法を 確立することを試みた。その結果,同一供試体に おいても測定位置に依存して異なる,局所吸収エ ネルギーと累積された AE 波形パラメータに相関 があることを確認した⁵⁾。

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 工修(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 構造強度研究室長 工博(正会員)
*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博(正会員)





表-1 供試体の種類

直径 D	高さH		W/C	σ _{max}	破壞	アクリルロッド	供試体
(mm)	(mm)	п/D		(MPa)	位置	設置	名称
φ 200	600	3	0.6	18.4	上部	0	20-3-0.6-1
				19.9	上部	—	20-3-0.6-2
			0.7	16.6	上部	0	20-3-0.7-1
φ 150	600	4	0.6	23.9	下部	0	15-4-0.6-1
			0.7	17.6	下部	0	15-4-0.7-1

表-2 示方配合

G _{max}	W/C	s/a		単位量	(kg/m^3)	
(mm)		(%)	W	С	S	G
12	0.6	51	193	322	909	883
15	0.7	53	193	280	959	860



図-2 載荷状況

そこで本研究では、一軸圧縮力が作用するコン クリートの破壊現象を対象としたこれまでの研 究の一環として(図-1)、相互に強い関連があると 思われる圧縮破壊性状あるいは吸収エネルギー と、AE 発生挙動の関係を確認することを目的と して実験的な検討を行った。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

試験に用いた供試体の種類を**表**-1 に示す。直 径(D)が150mm または200mmの円柱供試体を計5 体用意した。既往の研究¹⁾から,破壊の局所化を より明確に再現するため,直径(D)に対する高さ (H)の比 H/D を3 または4 とした。

使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。 早強ポルトランドセメントを使用し,水セメント 比を 0.6 または 0.7 とし,粗骨材最大寸法 G_{max} は 13mm とした。また,供試体は縦打ちとし,供試 体上部端面は,研磨あるいは打設後 6 時間後にセ メントペーストにてキャッピング処理を行うこと で平滑にした。そして,打設後 24 時間で脱型し, 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

載荷試験の概要を図-2 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。載荷は荷重制御式 2000kN 万能試験機を使用し、最大荷重到達と同時 に0kN まで除荷し、再び載荷を行う一方向繰返し 圧縮載荷とした。

2.3 測定項目

供試体作製の際に,載荷軸方向に 40 mm 間隔に ひずみゲージ(測定長:3 mm)を貼付したアクリル 製角棒(断面寸法 10×10mm;以下,アクリルロッ ドと称す)を,供試体上下端面より 10mm 離れた 供試体中央に鉛直に埋設した。測定されたひずみ は,ゲージを貼付した位置から載荷軸方向に上下 20 mm の範囲で均一と仮定し,この 40mm 間のひ ずみをコンクリートの局所ひずみと定めた。

また,高さ方向に計8個のAEセンサ(共振周波数:150kHz)を等間隔で螺旋状に配置した(図-

3(a))。一方,供試体 20-3-0.6-2 では,破壊域にお ける AE 発生挙動を詳細に把握するために,AE センサを供試体上部に集中して貼付した(図-3(b))。AE センサを用いて,AE を最大応力 σ_{max} に達するまで(以下,プレピーク域と称す)測定し たが,ひび割れが顕著となるポストピーク域では, AE がコンクリート中を伝播することが困難であ り,AE センサで正しく検出できないと考え,測 定を行わなかった。測定は,しきい値を 45dB と し,増幅度はプリアンプにて 40dB,メインアン プにて 20dB,合計 60dB とした。

なお,応力は載荷荷重を供試体初期断面積 で除すことにより得られる平均値を用いた。

試験結果および考察

供試体応力の最大値 σ_{max} は16.6~23.9MPaであり、全ての供試体において破壊が供試体上部あるいは下部に局所的に生じた(表-1)。

3.1 AE 発生源の3次元位置標定³⁾

図-4 および図-5 に,供試体 20-3-0.6-1 および 20-3-0.6-2 において標定された AE 発生源位置を, 供試体正面および断面方向に投影して示す。ただ し,図中には,AE エネルギーが 1.0×10⁻⁴V²s 以上 の AE の発生位置のみプロットしている。また, 標定に際し,コンクリート中を伝播する AE 波速 度は,実測値の 4800m/s とした。

供試体 20-3-0.6-1 は,最終的に破壊が供試体上 部で局所的に生じたが,AEの発生は,6MPa 程度 で供試体底面からの高さ 500mm 付近に,10MPa 程度で高さ 400mm 付近に集中して認められた。 それぞれの高さにおいて AE が集中して発生した 時点での応力と,図-6 に示す供試体の内部に設 置したアクリルロッドを用いて測定された,応力 ー局所ひずみ関係が変曲した時点での応力を比 較すると,ほぼ同一であった。すなわち,標定さ れた AE 発生位置と破壊源位置が,精度よく一致 しているものと思われる。

一方,AE が徐々に供試体断面中央に集中して 発生するケースも確認できた(図-5)。したがって, 位置標定の結果が,センサ配置に依存することが



確認できたため、この点については今後より多く の供試体を対象に検討していく必要がある。しか し、既往の研究^のおよび本研究の供試体の終局破 壊状況を目視観察した結果、水平断面内において もひび割れ密度分布の相違が確認でき、破壊が局 所化した可能性があると考える。

したがって、供試体高さ方向および断面内にお いて局所化する破壊域が、AE法を用いることで3 次元的に可視化できる可能性が示された。

3.2 検討に使用する AE の抽出

(1) イベント数とヒット数の区別

1つの AE が発生し供試体全域に伝播すると, 複数の AE センサで検出される。したがって,各 AE センサでの AE 検出数(以下,ヒット数と称す) の合計と AE 発生数(以下,イベント数と称す)は 明らかに異なる。これを区別するために,以降で は,AE 波速度および 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。

(2)「引張型」AE の抽出

本研究では、圧縮下で発生する破壊を対象とし ており、発生したひび割れ面の摩擦等により生じ たノイズを AE として検討に用いることは、妥当



ではない。そこで既往の定義に従い⁸⁾,検出された AE 波形パラメータのうち,RA 値(s/V)(=立上り時間/最大振幅値)と平均周波数(kHz)(=カウント数/継続時間)を用いて,AE を「引張型」および「せん断型」の2種類に簡易に識別して整理することで、「引張型」AE のみを抽出した(図-7)。

(3) カウント数が1 である AE の除去

載荷中,1つのAE波形において,振幅がしき い値を越えた回数として定義されるカウント数 が,1であるAEが測定された。このようなAE は、ノイズあるいは供試体中を伝播する間に減衰 したAEであると考えられ、発生源における破壊 特性に関する情報を測定した波形から判断でき ないため、棄却した。

全 AE 検出数(ヒット数)から,各条件により抽 出された AE 数の推移を図-8 に示す。以下,こ のようにして抽出された AE の波形パラメータを 用いて検討を行う。

3.3 AE 波形パラメータと吸収エネルギー

コンクリート供試体の一軸圧縮試験において, 測定された AE イベント総数と変位には強い関連 があることが報告されている⁴⁾。同様の観点から,





吸収エネルギー(=荷重×変位)と測定された AE 波 形パラメータは、やはり関係があると考えられる。 筆者らは既往の研究において、AE 波形パラメー タのうち、特に破壊の規模と相関を持つ最大振幅 値の累積値に着目することで、局所化する破壊域



を特定可能であることを確認している 5)。

そこで、図-9(a)~(c)および図-10(a)~(c) に、プレピーク域において、各 AE センサで検出 された AE の最大振幅値の累積値と、センサ付近 で測定された局所ひずみを用いて算出した局所 吸収エネルギーを、測定位置ごとに示す。なお局 所吸収エネルギーは、除荷剛性は初期剛性と同じ であると仮定して、応力-局所ひずみ曲線下の面 積から除荷曲線下の面積を控除し、局所域体積(= 水平断面積×40mm)を掛け合わせて算出した¹⁾。

また,こうして算出した局所吸収エネルギーを 用いて,既往の研究²⁾に従い供試体を破壊域およ び遷移域の2つの領域に区別した。それぞれの領 域に設置した AE センサおよびひずみゲージより 測定された,AE 最大振幅値あるいは局所吸収エ ネルギーを各領域で合計し,図-9(d)(e)および 図-10(d)(e)に示す。ここで,破壊域および遷移 域の局所吸収エネルギーの合計値を,それぞれの 領域において吸収されたエネルギーとする。

その結果,いずれの供試体においても,各高さ における AE 最大振幅値の累積値と局所吸収エネ ルギーは,発生した時期およびその後急激に増加 する点に関して,ほぼ一致した傾向が見られた。 このことは,図-9(d)(e)および図-10(d)(e)に 示す結果においても,より強い相関があることが 判断できる。

そこで,各供試体の破壊域および遷移域におい て測定された,吸収エネルギーと発生した AE 最 大振幅値の累積値を図-11 に示す。その結果,図 -11(a)において,載荷初期段階では,局所吸収エ ネルギーと比較して AE 最大振幅値が卓越して増 加したが,いずれの供試体も,破壊域および遷移 域に関係なくほぼ比例関係がみられた。すなわち, 累積 AE 最大振幅値とアクリルロッド法を用いて 測定した吸収エネルギーには,強い相関があるこ とを示している。

ところで,既往の研究では,圧縮下コンクリー ト供試体に吸収されたエネルギーと圧縮破壊性 状,あるいは発生したひび割れ総量は関連がある ことが指摘されている^{1),6),7)}。これらの知見および 図-11 を用いて得られた結果を総合的に捉えると, プレピーク域において,コンクリート中に生成し



たひび割れ総量は,AE 発生挙動にも反映されて おり,特にAE 最大振幅値の累積値は局所吸収エ ネルギーと深い関係があることが推測できる。

また、図-11(a)(b)を比較すると、吸収エネル ギーに対する累積 AE 最大振幅値に関して、値の 絶対値に違いが確認された。これは、供試体寸法 に依存した破壊形態の変化、あるいは AE 測定環 境の変化によるものと考えるが、この結果から、 AE 波形パラメータは供試体寸法を良く反映した 指標となる可能性が考えられる。したがって、AE パラメータと供試体寸法の関係に関する普遍的 解釈ができれば、コンクリートの圧縮破壊現象、 あるいは測定対象・環境が AE 測定結果へ及ぼす 問題を解明する一助になると考える。

4. まとめ

本研究では、コンクリート供試体の一軸圧縮載 荷試験を行い、累積 AE 最大振幅値に着目し、吸 収エネルギーと関連づけた。この AE 法を用いた 本手法は、供試体寸法およびコンクリート強度に より異なる、コンクリートの圧縮破壊現象を、実 験的に解明する手がかりになると考えられる。

謝辞:本研究の一部は,平成 14 年度科学研究費 補助金(基盤研究(A)(1),課題番号 14205064)によ って実施したものです。ここに謝意を表します。

参考文献

1) Lertsrisakulrat, T., Watanabe, K., Matsuo, M. and

Niwa, J. : Experimental Study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression, Journal of Materials, Concrete Structures, Pavements, JSCE, No.669/V-50, pp.309-321, Feb. 2001.

- 2) 渡辺 健,二羽淳一郎,横田 弘,岩波光保:圧 縮破壊を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関 係の定式化,土木学会論文集,No.725/V-58, pp.197-211,2003.2
- 大津政康:アコースティック・エミッションの特 性と理論,森北出版,1988
- 4)大津政康,藤岡泰作,時任哲郎:AE法と損傷力学 に基づいたコンクリートの劣化度評価,セメン ト・コンクリート論文集,No.51, pp.198-203, 1997
- Watanabe, K., Iwanami, M., Yokota, H. and Niwa, J. : Estimation of the localized compressive failure zone of concrete by AE method, Proc. of The first fib Congress 2002, Session13, pp.117-124, 2002.10
- 6)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
- 7) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, JCI-C51E Post-Peak Behavior of RC Structures subjected to Seismic Loads, Vol.2, pp.259-272, 1999
- 8) 内田昌勝, 辻 伸幸, 岡本享久, 大津政康: AE法 によるコンクリート構造物のひび割れ評価技術, 第12回AE総合コンファレンス論文集, pp.77-82, 1999.11