

論文 AE法を用いたディープビームにおける圧縮破壊領域の推定

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

要旨：せん断補強筋を有しないRCディープビームでは，せん断耐力に関して寸法効果が存在する。これは圧縮力を受けるコンクリートの破壊の局所化に起因するものと考えられる。したがって，RCディープビームにおいて局所化する圧縮破壊領域の大きさを特定することができれば，RCディープビームにおけるせん断耐力の寸法効果もより正確に予測でき，より合理的な設計が可能になると予想される。そこで本研究では，比較的操作が容易なAE法を用いることで，RCディープビームにおける圧縮破壊領域の推定を試みた。

キーワード：ディープビーム，寸法効果，圧縮破壊の局所化，破壊領域長さ，AE法

1. はじめに

圧縮力を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係は，同一材料においても，寸法の違いにより破壊が局所化することで，引張力を受ける時と同様，最大荷重に達した以降(以下ポストピーク域と称す)で異なる構造特性を示すということが指摘されている。この現象の解明を目的として，一軸圧縮力を受けるコンクリートの破壊力学特性値の定量的な評価を試みる研究が，これまで多く行われてきた。筆者らも，ひずみゲージを貼付したアクリル製角棒(以後アクリルバーと称す)を利用し，コンクリートの局所的な力学挙動を把握する一軸圧縮試験を行った¹⁾。その結果，局所化する破壊領域の長さ(L_p)は，材料および試験体形状に依存せず，断面積(A_c)に依存するという結論を得た。筆者らは，さらに非破壊試験技術の1つであるAE法を適用することで，複雑な圧縮破壊領域を把握することを試み，AE法の適用性を確認した²⁾。

さて，せん断スパン有効高さ比(a/d)が1以下であるRCディープビームでは，せん断補強筋を有しない場合，せん断耐力に関して大きな寸法効果が存在することが指摘されている³⁾。こ

れは，コンクリートの圧縮破壊の局所化に起因していると考えられる。よって，RCディープビームにおいて局所化する圧縮破壊領域の大きさを特定することが可能になれば，RCディープビームにおけるせん断耐力の寸法効果もより正確に予測でき，より合理的な設計が可能になる。この背景のもとに，近年RCディープビームに対しても，アクリルバーを用いた圧縮破壊領域の特定が試みられている⁴⁾。

本研究では，比較的操作が容易なAE法を用いることで，RCディープビームにおける圧縮破壊領域の推定を行った。AE法を用いることで，アクリルバーを用いる場合と異なり，試験体への事前の細工を必要としないので載荷に際し試験体の挙動に全く影響を与えないこと，および作用する力の方向に関係なく破壊現象を把握できることが利点としてあげられる。

これまでのアクリルバーを用いた結果およびAE法を用いた結果を参考にしながら，せん断補強筋を有しないRCディープビームの載荷試験を行い，2次元的に局所化する圧縮破壊領域を，AE法を用いて推定することを試みた。

*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)

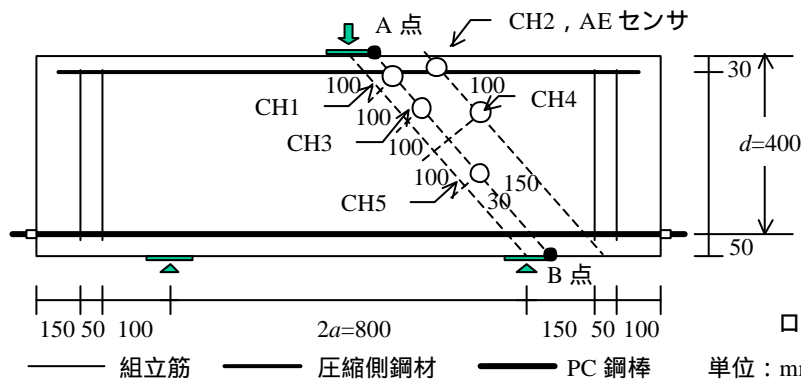


図 - 1 試験体概要(D400.1)

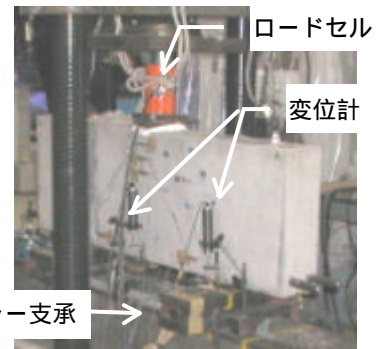


図 - 2 荷重状況

2. 既往の研究

2.1 アクリルバーを用いた手法

Lertsrisakulrat らは RC ディープビームの局所的な圧縮破壊領域を実験的に把握するために、アクリルバーを用いた手法を採用した⁴⁾。斜めせん断ひび割れ発生後に生じるアーチ機構の方向を考慮して、アクリルバーを荷重点と支点を結ぶ直線上に設置した。得られた結果から吸収されたエネルギーを算出し、全吸収エネルギーに対し一定値以上エネルギーが吸収された領域を破壊領域と定義した。その結果、圧壊は片方のせん断スパンに生じ、その長さは一軸圧縮試験結果と比較して大きめの値を得ている。既往の研究⁵⁾で設定されたアーチ幅(w_p)から、圧縮破壊領域体積($V_p=L_p \times w_p$)を推定することで、その破壊領域の単位体積に消費されたエネルギー(G_{Fc})が算出されるが、これは一軸圧縮下で算出された値¹⁾とほぼ同程度となることを報告している。

2.2 AE 法による圧縮破壊領域の特定

筆者らは、コンクリート試験体の一軸圧縮荷重の際、AE センサを荷重軸方向に配置することで、破壊に伴い発生する AE の計測を行った。得られた AE パラメータから圧縮破壊領域の特定を試み、その結果、AE 法を用いることで破壊の局所化をプレピーク域から十分に観察できた。すなわち、ピーク時にまでに検出された AE イベントの最大振幅値の累積値に着目し、試験体全域で検出された合計値の 30% 以上を示す領域を破壊領域と推定できることを見出した²⁾。

そこで、この手法を RC ディープビームに適用することで、RC ディープビームの 2 次元的な破壊領域を推定することにした。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

図 - 1 に実験に用いた試験体(D400.1)の概要を示す。これは、実験結果を比較するために Lertsrisakulrat らが用いた試験体(D400)を忠実に再現したものである⁴⁾。すなわち、破壊の局所化を明確に再現するために、試験体形状は支点間距離($2a$)を 800mm、有効高さ(d)を 400mm とした。したがってせん断スパン比(a/d)は 1 である。荷重点には幅 100mm の支圧板およびロードセルを設置した。一方、支点部分の拘束を取り除くために、ローラー支承を用い、支圧板と試験体の間には、テフロンシートの間にシリコングリスを挟んだ減摩パッドを挿入した(図 - 2)。支圧板幅有効高さ比(r/d)は 0.25、試験体幅(b)は 150mm、主鉄筋比(p_w)は 1.8%とした。なお、AE 計測を行うにあたって、弾性波である AE 波の伝播が物体の密度に大きく影響を受けることを考慮して、コンクリートに対して密度の異なるせん断補強筋は設置しなかった。

荷重はピーク以降の急激な耐力低下と変位増大が生じてもデータを記録できるように、最大荷重に達すると同時に 0kN まで除荷し、また荷重する、繰返し荷重を行った。荷重が低下しほぼ一定になった時点で荷重を終了した。

3.2 使用材料

使用したコンクリートの配合を表 - 1 に示す。早強セメントを使用し、7 日間の気中養生後載荷を行った。また、使用した鋼材の材料特性を表 - 2 に示す。引張側鋼材として PC- 25 の総ねじタイプの異形 PC 鋼棒を 2 本配置した。また圧縮側鋼材には普通丸鋼 6、組立補強筋には異形鋼棒 D6 を使用した。

3.3 測定項目

載荷点変位を計測するために、はり中央および支点部に変位計を設置し、出力をデータロガーに記録するとともに、AE 計測を行った。AE センサの貼付状況を図 - 1 に示す。センサ数が限られていること、およびせん断ひび割れ発生後も正確に AE 計測が行えるようセンサを配置した。すなわち、片方のせん断スパン側の載荷点と支点の中心を結ぶ直線から平行に 30mm 離れた線上(A 点 - B 点：距離 600mm)のはりのウェブ表面に、センサを 3ヶ所貼付した。また、AE 発生源位置標定を行うことで、アーチ部の 2 次元的な局所的破壊領域を把握するために、さらに直線 A - B から平行に 150mm 離れた直線上にセンサを 2ヶ所設置した。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。

4. 実験結果および考察

4.1 試験体破壊状況

実験結果を表 - 3 に示す。また、ひび割れ状況を図 - 3、荷重とスパン中央変位関係を図 - 4 にそれぞれ示す。なお、結果には Lertsrisakulrat らの行った D400 の値も参考に示すが、各値ともほぼ同一の結果を得たため、同様の破壊を再現できたと考える。

実験では、載荷に伴いスパン中央で曲げひび割れが発生し(P_{1st})、275kN でウェブにせん断ひび割れが発生(P_{sh})、381kN ではり上部に達した。その後、耐力を保持したまま 510kN で徐々に変位が増大し(P_{cr})、574kN でピークに達した(P_{max}) のち、AE センサを貼付したせん断スパン側の

表 - 1 コンクリートの配合

G_{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
13	50	49	190	380	853	898

表 - 2 鋼材の材料特性

名称	A_s (mm ²)	弾性係数 E_s (kN/mm)	降伏強度 f_y (N/mm ²)	引張強度 f_u (N/mm ²)
6	28.27	-	310	452
D6	31.67	-	331	509
PC- 25	506.7	200	1004	1130

A_s : 1 本あたりの断面積

表 - 3 実験結果

名称	P_{1st} (kN)	P_{sh} (kN)	P_{cr} (kN)	P_{max} (kN)	f_c' (MPa)
D400.1	147.4	274.8	510.1	573.9	35.7
D400 ⁴⁾	127.5	181.5	515.0	570.6	35.5

ウェブで圧縮破壊が生じ終局に至った。図 - 3 に目視による試験体のひび割れ状況を示すが、それぞれ図 - 4 に示す荷重 - 変位関係の変曲点と比較しても、ひび割れ発生と荷重レベルは一致している。

また、ピーク以降、包絡線からの除荷曲線の特徴は、最初荷重が大きく減少し、その後曲線は下に湾曲していくが、除荷開始時の変位が大きくなるほど大きく湾曲する傾向にある。除荷開始の変位と完全に除荷した時の残留変位の関係(図 - 5)は、ほぼ指数関数で近似でき、コンクリートの一軸圧縮載荷時の特性と同様の関係を示した。

また、再載荷時においては、載荷に比例して変位が増加するが、65kN 程度で傾きが変化し、やはり荷重に比例して(あるいはわずかに下に湾曲しながら)変位が増加する。この傾きの変化は、曲げから圧縮へ機構が変化しているためと考えられ、勾配は徐々に減少する。どの場合も最大荷重に達する 94%程度で軟化を開始した。

4.2 AE 発生状況

図 - 6 に(a)1 回目載荷時のせん断ひび割れ発生後に検出された AE イベント数、および(b)2

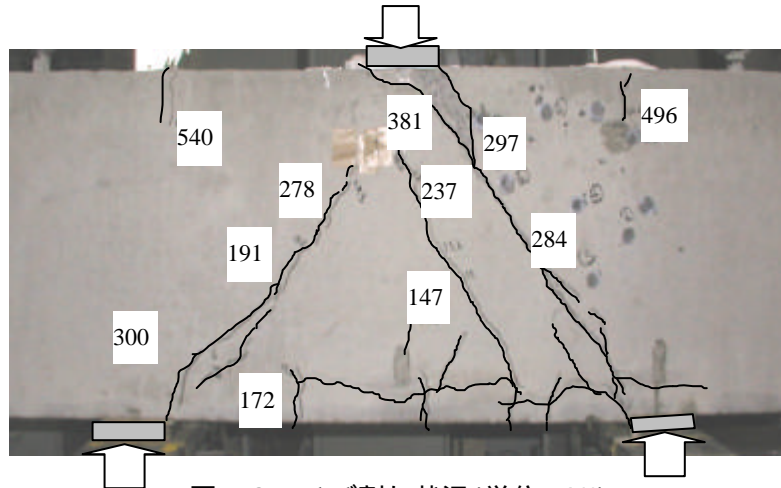


図 - 3 ひび割れ状況(単位 : kN)

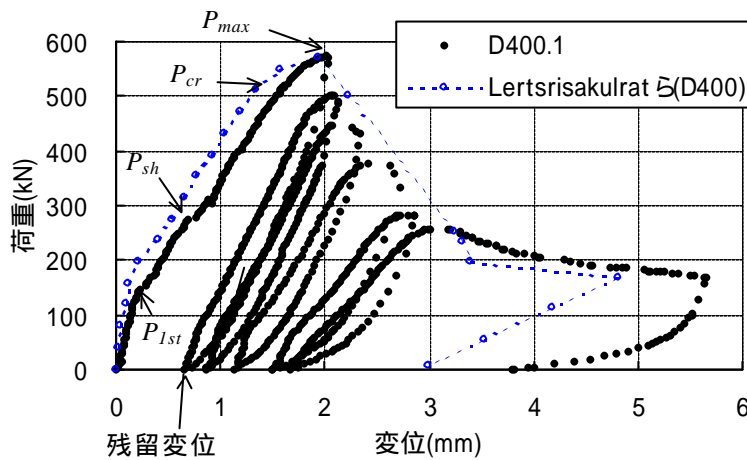


図 - 4 荷重 - 変位関係

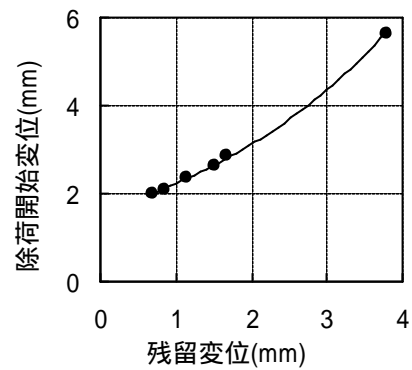
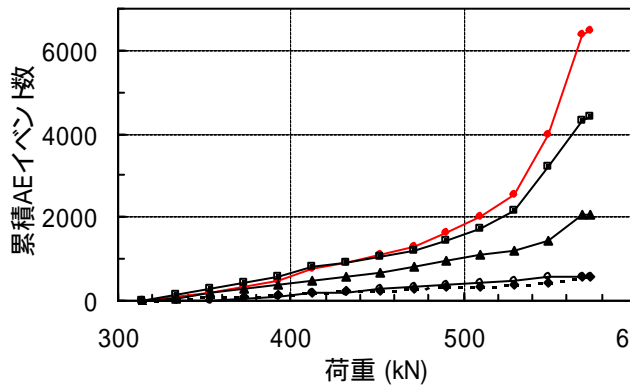
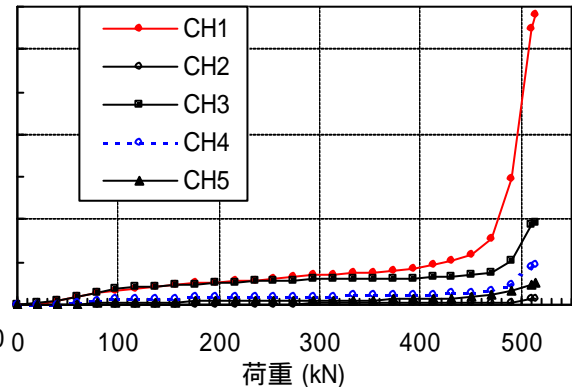


図 - 5 残留変位の増加



(a)せん断ひび割れ発生後(プレピーク)



(b) 2 回目の再載荷時

図 - 6 載荷に伴う AE イベント数

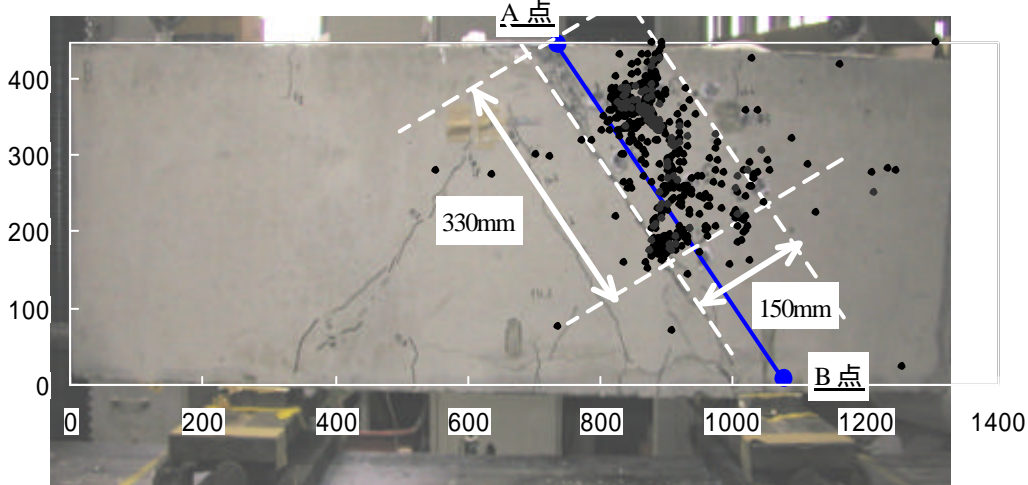
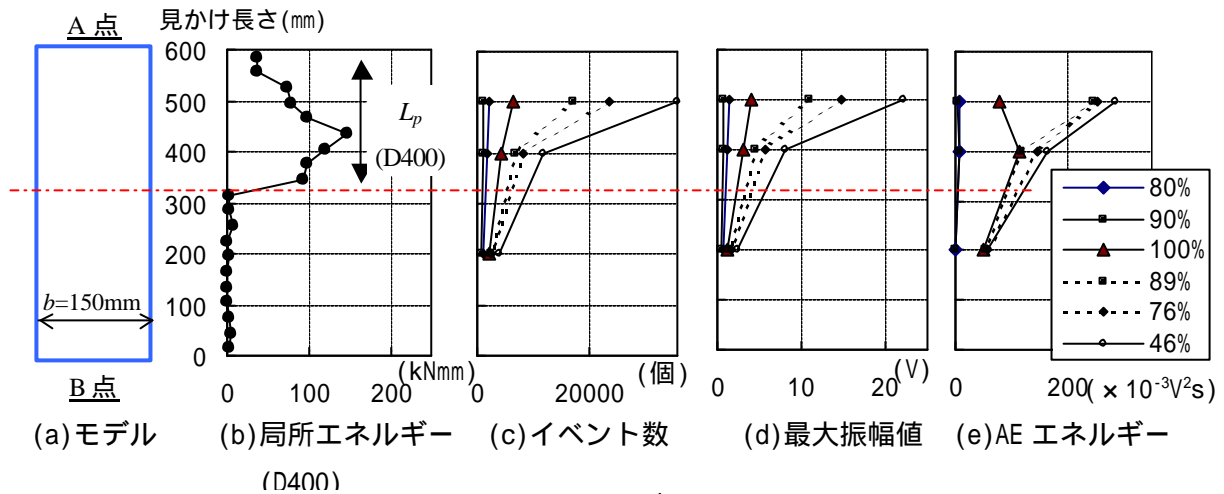
回目の再載荷時に検出された AE イベント数の累積を示す。なお、AE センサ貼付位置間の距離を考慮して、AE が最初に到達した時間から一定時間内に検出された AE を同一イベントとして捉え、そのうち、最初に到達した AE のみに着目することとした。パラメータはこの AE のものを用いている。また、繰返し載荷の際の除荷時に検出された AE は、ひび割れ面の接触

に伴い発生したノイズと考え、考察には用いていない。プレピーク域では斜めひび割れ発生後、RC ディープビームにアーチ機構が形成されるため、載荷とともに一定の割合で AE が発生していくが、上部に貼付したセンサで AE が多く検出された。特に 500kN 以上では CH1 および CH3 で AE が急増し始めるが、これは図 - 4 の荷重 - 変位関係と比較しても、軟化の開始時期

とほぼ同一であり、プレピーク域での局所的な破壊領域の挙動が試験体全体の挙動に影響していることがわかる。なお、CH2 および CH4 では AE はそれほど多く検出されず、このセンサ付近では破壊は生じていないものと推定される。再載荷時には(図 - 6 (b)), 50kN 程度で CH1 および CH3 でわずかに AE が検出されるが、これは既存のひび割れ面の摩擦によるノイズと思われる。その後はほとんど AE が検出されないカイザー効果が明確に現れ、やはり荷重 - 変位関係で示される軟化開始時期である最大荷重の 90% 程度で、特定のセンサの AE が急増した。試験終了までのいずれの再載荷時においても同様の傾向を示した。

次に、載荷板と支圧板の中心を結ぶ直線から平行に 30mm 離れた同一直線上(図 - 7 (f) の A

点 ~ B 点)にある 3 個のセンサで得られた AE パラメータの分布(図 - 7 (c) ~ (e)), および参考に Lertsrisakulrat らが行った D400 に設置した同位置のアクリルバーによる、局部的吸収エネルギーの分布も併せて示す(図 - 7 (b))。なお、縦軸は A 点から B 点を結ぶ長さを示し、図中の凡例はプレピークからポストピークにかけて最大荷重 P_{max} に対する荷重割合を示す。破壊域のひび割れが顕著でなかったことから、ポストピーク域でも十分 AE 計測が可能であり、その結果一軸圧縮荷時同様、アクリルバーの結果から示される破壊領域と非破壊領域において、各パラメータとも検出パターンに明らかな違いが見られた。特に、一軸圧縮試験では非破壊域での AE イベント数がほとんど増加しなかったことを考慮すると、200mm の位置にある AE センサ



(f) 各載荷中における AE 発生源位置評定

図 - 7 載荷に伴う累積 AE パラメータ

(CH5)は非破壊域の位置にあるものと考えられる。したがって、破壊の有無を区別する境界は見かけ高さ 400mm から 200mm の間にあると考えられるが、アクリルバーの結果で得られた破壊領域長さ L_p と同様、一軸圧縮載荷と比較して破壊領域は広くなる傾向にあった。これは、今後検討が必要であるが、一軸圧縮載荷と異なり、例えば載荷点の摩擦による拘束効果等により、大きめの結果になったのではないと思われる。

次に、試験体のスパン方向における 2 次元の AE 発生源位置標定を行った。この結果を図 - 7 (f) に示すが、AE 発生源は点在しているものの、明らかに局所的に集中していることがわかる。この集中域の範囲を検討すると、特に B 点から 250 ~ 500mm の約 250mm の範囲に集中していることが確認された。しかし、最上部が圧壊しているのにも拘わらず、AE 発生源位置が確認できないのは、載荷点下の斜めひび割れが顕著になり、位置標定を行うために必要な AE 情報が、CH2 ~ CH5 で得られなかったことによると思われる。これは AE センサを載荷点下に設置することで、この領域における AE 発生源位置が確認できると思われる。また、載荷に伴う AE 発生源の集中域の差違は見られなかった。

したがって、AE が検出されなかった載荷点直下の圧壊域も破壊領域に含まれると考えて、AE の集中域を白線で図 - 7 (f) 中に示すと、アーチ方向の長さ L_p は約 330mm 程度となった。ちなみにこの長さは Lertsrisakulrat ら⁴⁾の得た破壊領域長さ $L_p=270\text{mm}$ と比較すると、若干大きめの値である。これは AE 波速度の設定およびセンサ配置位置の誤差の影響も考えられるが、試験体数を増やした上でさらに検討を行う必要がある。また、その幅は 150mm 程度であるが、既往の研究⁵⁾により提案された式(1)で算出されたアーチ幅 $w_p=156\text{mm}$ と比較すると、ほぼ等しい値になった。

$$w_p=(r+0.3d) \times \sin 45^\circ \quad (1)$$

すなわち、既往の研究で提案されたアーチ部

の幅 w_p は、今回の実験ケースではほぼ妥当であることが示された。

5. まとめ

せん断補強筋を有しない RC ディープビーム ($d=400\text{mm}$, $a/d=1$) の載荷試験中に、AE 計測を行うことで、局所化する圧縮破壊領域の推定を試み、次の結論を得た。

- (1) AE パラメータの検出パターンを比較することで破壊の有無が区別され、特にプレピーク域から局所的な破壊領域が認められた。
- (2) 2次元 AE 発生源位置標定を行うことにより、破壊領域が可視化され、破壊領域長さ L_p は 330mm、幅 w_p は 150mm 程度となった。これは、アクリルバーで判断された L_p よりも若干大きい値であった。一方、幅は既往の研究による w_p にほぼ等しいことが確認された。

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, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.309-321, 2001.2
- 2) 渡辺 健, 岩波光保, 横田 弘, 二羽淳一郎: AE 法を用いたコンクリートの圧縮破壊の推定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.85-90, 2001.6
- 3) 松尾真紀, Lertsrisakulrat, T., 柳川明哲, 二羽淳一郎: せん断補強筋を有する RC ディープビームのせん断挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.961-966, 2001.6
- 4) Lertsrisakulrat, T., Niwa, J., Yanagawa, A. and Matsuo, M.: Concepts of Localized Compressive Failure of Concrete in RC Deep Beams, 土木学会論文集, No.697/V-54, pp.215-225, 2002.2
- 5) Niwa, J.: Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Deep Beams Based on FEM Analysis, Concrete Library of JSCE, No.4, pp.283-295, 1984.12