

## 論文 AE法を用いたプレストレストコンクリート梁の破壊性状の検証

渡辺 健<sup>\*1</sup>・二羽淳一郎<sup>\*2</sup>・横田 弘<sup>\*3</sup>・紫桃孝一郎<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では、プレストレストコンクリート(PC)梁におけるせん断圧縮破壊現象に着目し、PC梁に形成される圧縮ストラットの形状を、実験的に検証することを目的とした。検討では、PC梁の載荷実験を行い、主にアコースティック・エミッション(AE)法を利用し、AEの発生源位置を標定した。そして、コンクリート種類および繊維混入量の変化に伴う、PC梁に形成された圧縮ストラットの形状変化を実験的に把握した。

キーワード：プレストレストコンクリート, AE最大振幅値, せん断圧縮型破壊

## 1. はじめに

せん断補強されていない鉄筋コンクリート(RC)梁の破壊形態は、梁のせん断スパン有効高さ比( $a/d$ )に依存して異なる。通常、 $a/d$ が3.0以上であるRC梁では、斜めひび割れの発生とともに終局に至る、斜め引張型破壊が観察される。しかし、プレストレストコンクリート(PC)梁では、 $a/d$ が3.0以上であっても、せん断圧縮型破壊が生じることが確認されている<sup>1)</sup>。既存のPC梁のせん断耐力算定手法には、このせん断圧縮型破壊が考慮されておらず、PC梁の曲げとせん断の安全のマーヅンには大きな違いがある。より合理的にPC梁のせん断耐力を評価するためには、PC梁の破壊形態を適切に考慮することが必要である。

本研究では、PC梁におけるせん断圧縮破壊現象の発生形態を、実験的に把握することを目的とする。実験では、天然砕石を粗骨材として用いたコンクリート(以下、普通コンクリートと称す)、および高性能軽量粗骨材を使用したコンクリート(以下、軽量コンクリートと称す)を用いたPC梁を作製した。また、軽量コンクリートに合成繊維を混入したPC梁も作製した。そして、PC梁の載荷実験を行い、PC梁に形成される圧縮ストラットの形態に関して、アクリルロッド法およびアコースティック・エミッション(AE)法により評価

した。これは、RCディープビームのせん断圧縮型破壊に関するさまざまな見解が、アクリルロッド法およびAE法を利用することで得られていることに基づいている<sup>2)</sup>。それぞれの手法の適用可能性を検討するとともに、コンクリート種類および繊維混入量の変化に伴う、圧縮ストラットの発生形態の変化を実験的に把握した。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体および載荷概要

図-1に、試験体片側スパンの概要図を示す。試験体は、せん断スパン( $a$ )3750mm、有効高さ( $d$ )1000mmおよび幅350mmである。したがって、せん断スパン有効高さ比( $a/d$ )は3.75である。また、断面下縁に導入する目標プレストレス量は、 $5.0\text{N/mm}^2$ とした。引張鋼材には、直径32mmの異形PC鋼棒を6本配置した。引張鋼材比は1.378%である。表-1に、使用した鋼材の材料特性を示す。載荷点には幅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、テフロンシートの中にシリコングリスを挟んだ減摩パッドを挿入した。

載荷は、対称2点載荷とし、曲げひび割れ発生を確認した後、一度0kNまで除荷した。その後、

\*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 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)

\*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 日本道路公団試験研究所 道路研究部橋梁研究室長(正会員)

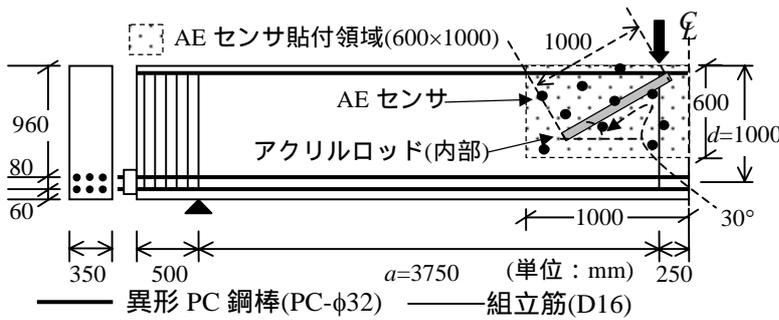


図 - 1 試験体片側スパン概要図

終局に至るまで単調載荷を行った。

## 2.2 使用材料

表 - 2 に、試験体名、使用したコンクリートの配合および使用材料の物理特性を示す。軽量コンクリート(LC)、普通コンクリート(NC)とも、材齢 28 日での目標圧縮強度は  $50\text{N/mm}^2$  とした。また、ピニロン繊維(VL)およびポリプロピレン繊維(PP)を、体積の 1.0% および 2.0% 混入した試験体も作製した。使用した繊維の物性値を表 - 3 に示す。

## 2.3 測定項目

梁支間中央および支点部に変位計を設置することで、載荷点変位(以下たわみと称す)を計測した。LC-0.0 の両せん断スパンの内部には、ひずみゲージを 80mm 間隔で貼付したアクリル製角棒(アクリルロッド:長さ 1000mm)を、載荷点付近に試験体軸方向から角度 30 度で設置した(図 - 1)。これは、既往の実験<sup>1)</sup>に基づき予想された、斜めひび割れの位置を考慮して決定したものである。

また、計 17 個の AE センサ(共振周波数 150kHz)を、試験体の支間中央上部を中心にした領域に適度に配置することで、AE 計測を行った(図 - 1)。計測には、2 台の AE 記録装置を片側スパンごとに使用した。ただし、AE 記録装置ごとに AE 検出感度が異なったことから、表 - 4 に示す通りそれぞれ異なる増幅率およびしきい値を設定することで、感度の差異を補正した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 試験体破壊状況

実験結果を表 - 5 に示す。また、荷重 - たわみ関係およびひび割れ状況を図 - 2 および図 - 3 に示す。終局に至った試験体では、せん断圧縮型

表 - 1 鋼材の材料特性

名称	断面積 (mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D16	198.6	200	383
PC-φ32	804.2	203	1047*

\*: 0.2% オフセット値

表 - 2 示方配合

試験体名 <sup>*1</sup>	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 <sup>*2</sup> (kg/m <sup>3</sup> )						
				W	C	S	G1	G2	SP	AE
NC-0.0	25	42.5	38.5	143	336	711	1149	0	6.79	2.02
LC-0.0	15	38	45.2	145	382	803	0	440	2.67	2.29
LC-PP1.0	15	38	52.3	163	429	870	0	359	3.22	2.15
LC-PP2.0	15	38	61.8	186	489	944	0	264	3.42	0.98
LC-VL1.0	15	38	58.5	175	461	925	0	296	3.00	4.15
LC-VL2.0	15	38	58.5	175	461	925	0	296	3.00	3.69

\*1 試験体名は、[コンクリート種類]-[繊維種類・混入量(体積比%)]。

\*2 C: 早強ポルトランドセメント(密度:3.14kg/l)

S: 大井川産川砂(表乾密度:2.62kg/l)

G1: 大井川産川砂利(表乾密度:2.65kg/l)

G2: 高性能軽量粗骨材(表乾密度:1.17kg/l)

SP: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)

AE: AE 剤(変性アルキルカルボン酸化合物)

表 - 3 短繊維の物性値

材質	ピニロン (VL)	ポリプロピレン (PP)
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	860	340
アスペクト比	45.5	43.3
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	23.0	4.4
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.30	0.91
断面長さ(mm)	φ0.66	1.2×0.4
長さ(mm)	30	30

表 - 4 AE 測定条件

	記録装置	記録装置
センサ数	8	9
増幅率 (dB)	60	40
しきい値 (dB)	60	65

破壊が観察された。すなわち、載荷に伴い荷重  $P_{1st}$  で支間中央に曲げひび割れが発生し、その後、ウェブに斜めひび割れが発生(荷重:  $P_{sh}$ )した。そして、タイドアーチ的耐荷機構を形成することで、耐力を保持したまま徐々に変位が増大し、支間中央上部のコンクリートが圧壊することで終局に至った(荷重:  $P_{max}$ )。PC 梁の初期剛性は、使用した粗骨材種類ごとにほぼ同一であったが、曲げひ

表 - 5 実験結果

試験体名	下縁プレストレス量(MPa)	$P_{1st}$ (kN)	$P_{sh}$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	斜めひび割れ角度*2 (°)	コンクリート			
						圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 ×10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
NC-00	5.8	510	950	1239	25	65.3	4.77	5.97	3.39
LC-00	5.4	465	850	1023	28	44.2	3.03	5.04	2.16
LC-VL10	5.5	410	970	1272	23	50.9	3.80	5.91	2.33
LC-VL20	5.6	460	未確認	>1500*1	未確認	52.1	4.36	6.19	2.33
LC-PP10	5.4	450	950	1382	20	47.7	3.69	5.22	2.38
LC-PP20	5.6	410	1150	>1500*1	20	51.8	3.79	5.10	2.59

\*1: 試験機の載荷能力(1500kN)を超えたため、終局に至らなかった。

\*2: 終局時に観察された最も顕著な斜めひび割れを対象に、梁上端より 1/2d の位置を中心に高さ 1/3d の範囲で直線近似した角度 (図 - 3 参照)

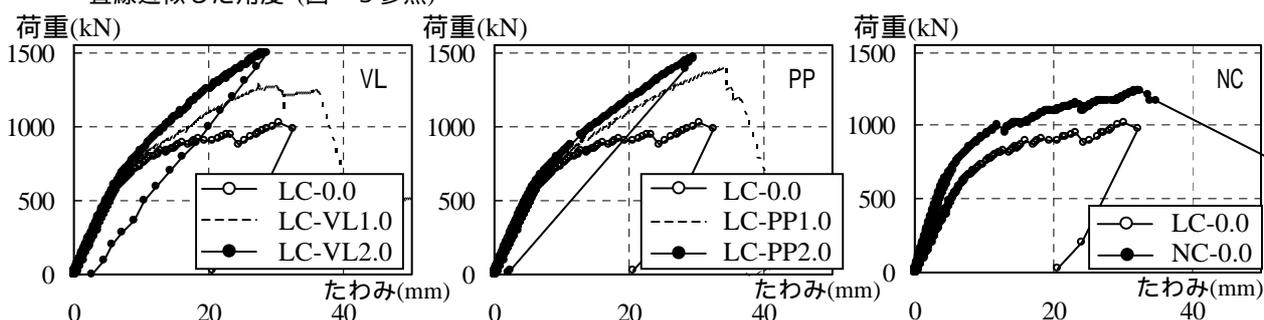


図 - 2 荷重 - たわみ関係

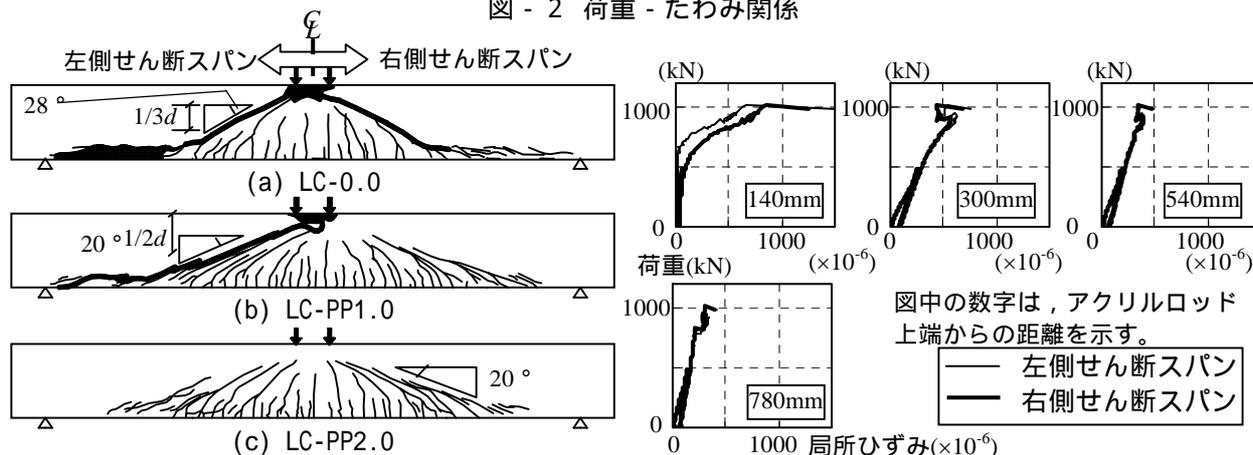


図 - 3 ひび割れ図(終局時, 数字は斜めひび割れ角度) 図 - 4 荷重 - 局所ひずみ関係(LC-0.0)

ひび割れ発生以降, 剛性は繊維混入量に依存して大きく異なった。また, 荷重の最大値( $P_{max}$ )は, 繊維混入量の増加に伴い増加し, 特に繊維 2.0% 混入した PC 梁の耐力は, 試験機の載荷能力(1500kN)を超えたため, 測定できなかった。一方, 目視により観察された斜めひび割れ角度は, 繊維混入量の増加に伴い低下した。

### 3.2 荷重 - 局所ひずみ関係

図 - 4 に, LC-0.0 より得られた荷重 - 局所ひずみ関係を示す。局所ひずみを測定したアクリルロッドは, 斜めひび割れとほぼ平行に, 約 80mm 離れた位置に設置されていた。一様に圧縮ひずみが

増加し, 特に,  $P_{max}$  付近(以下ピークと称す)で, いずれの位置においても急増した。ピーク以降, 破壊が脆性的に生じひずみゲージが切断されたため計測ができなかったが, 以上の結果から, アクリルロッドに沿って圧縮力が作用していたことが確認できた。また, ひずみの増加の割合は均一ではなく, 特に 600kN に達した以降, 支間中央上面よりアクリルロッドに平行な 300mm 以内の領域では, 荷重 - 局所ひずみ関係は非線形挙動を示しており, 徐々にひずみがこの領域に集中したことが確認できる。

このひずみの局所化は, 同様の破壊形態を示す

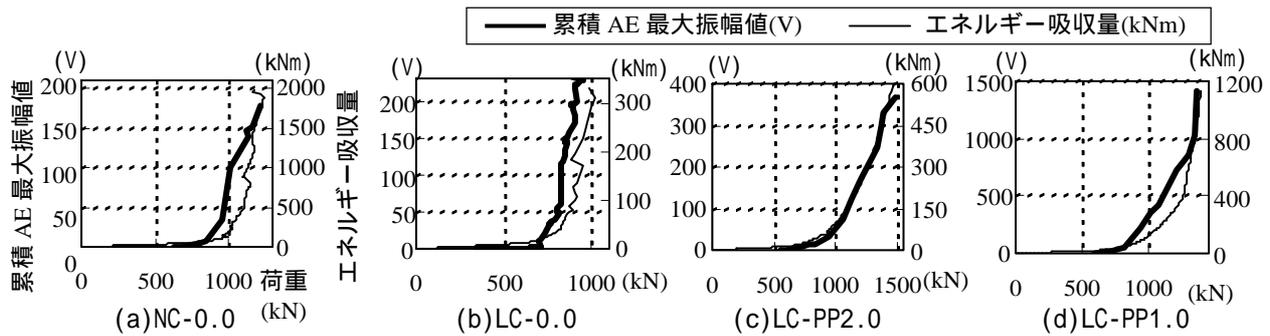


図 - 5 荷重増加に伴うエネルギー吸収量および累積 AE 最大振幅値の変化

RC ディープビームにおいても確認されている<sup>2)</sup>。RC ディープビームでは、強度に関する寸法効果が報告されているが、これはこの圧縮ひずみの局所化に起因した、寸法ごとのエネルギーバランスの相違により説明付けられる。同様の観点から、圧縮ストラットにおけるひずみの局所化が確認された本実験の結果は、PC 梁においても、せん断強度に関する寸法効果が存在する可能性のあることを示していると考えられる。

### 3.3 アーチ部分における AE イベント

検出された AE 波形パラメータを、荷重 - たわみ関係と関連づけて検討する。

#### (1) AE イベントの抽出

AE 法を利用した研究では、AE イベントの測定結果からノイズを的確に除去し、破壊源から発生した AE のみを抽出して検討に用いることが重要である。ただし、その手法は明確に定義されていない。そこで本研究では、AE パラメータを参考に、1) 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)を用いて簡易的に識別された AE<sup>3)</sup>、および 2) カウント数(1つの AE 波形において、振幅がしきい値を越えた回数)が 1 である AE、を棄却した。このような AE は、ノイズあるいは試験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と考えられるからである。

さらに、1つの AE が発生し試験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 検出数の合計と AE 発生数は明らかに異なる。そこで、コンクリート中の AE 伝播速度(4000m/s)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の微小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) AE 最大振幅値の累積値と吸収エネルギー

筆者らは、特にコンクリートの破壊の規模と相関を持つ、AE の振幅の最大値(以下 AE 最大振幅値と称す)に着目することで、圧縮下のコンクリートの損傷程度が把握できることを確認している<sup>3)</sup>。そこで、同様の観点から、ここではプレピーク域において PC 梁のエネルギー吸収量と、抽出した AE 最大振幅値の累積値の関連性を検討する。ここで、プレピーク域の PC 梁におけるエネルギー吸収量を求めるにあたり、除荷剛性は初期剛性と同じであると仮定して、荷重 - たわみ曲線下の面積から除荷曲線下の面積を控除した。

荷重に伴う AE 最大振幅値とエネルギー吸収量累積値を、図 - 5 に示す。その結果、いずれの試験体においても、AE 最大振幅値の累積値とエネルギー吸収量は、発生した時期およびその後急激に発生量が増加する点に関して、ほぼ一致した傾向が見られた。エネルギー吸収量に対する累積 AE 最大振幅値に関して、試験体ごとに絶対値が異なったが、図 - 5 の関係は、普通コンクリート試験体の一軸圧縮破壊試験より得られた既往の結果<sup>3)</sup>と同じ傾向である。除荷剛性を一定とした、PC 梁のエネルギー吸収量の算出方法には改善の必要があると考えるが、この絶対値の相違は、主にコンクリート種類に依存した AE 発生挙動の変化、あるいは PC 梁のタイドアーチの形状変化によるものと考えられる。したがって、圧縮卓越型破壊を示した PC 梁の破壊形態に関して、今後、各種

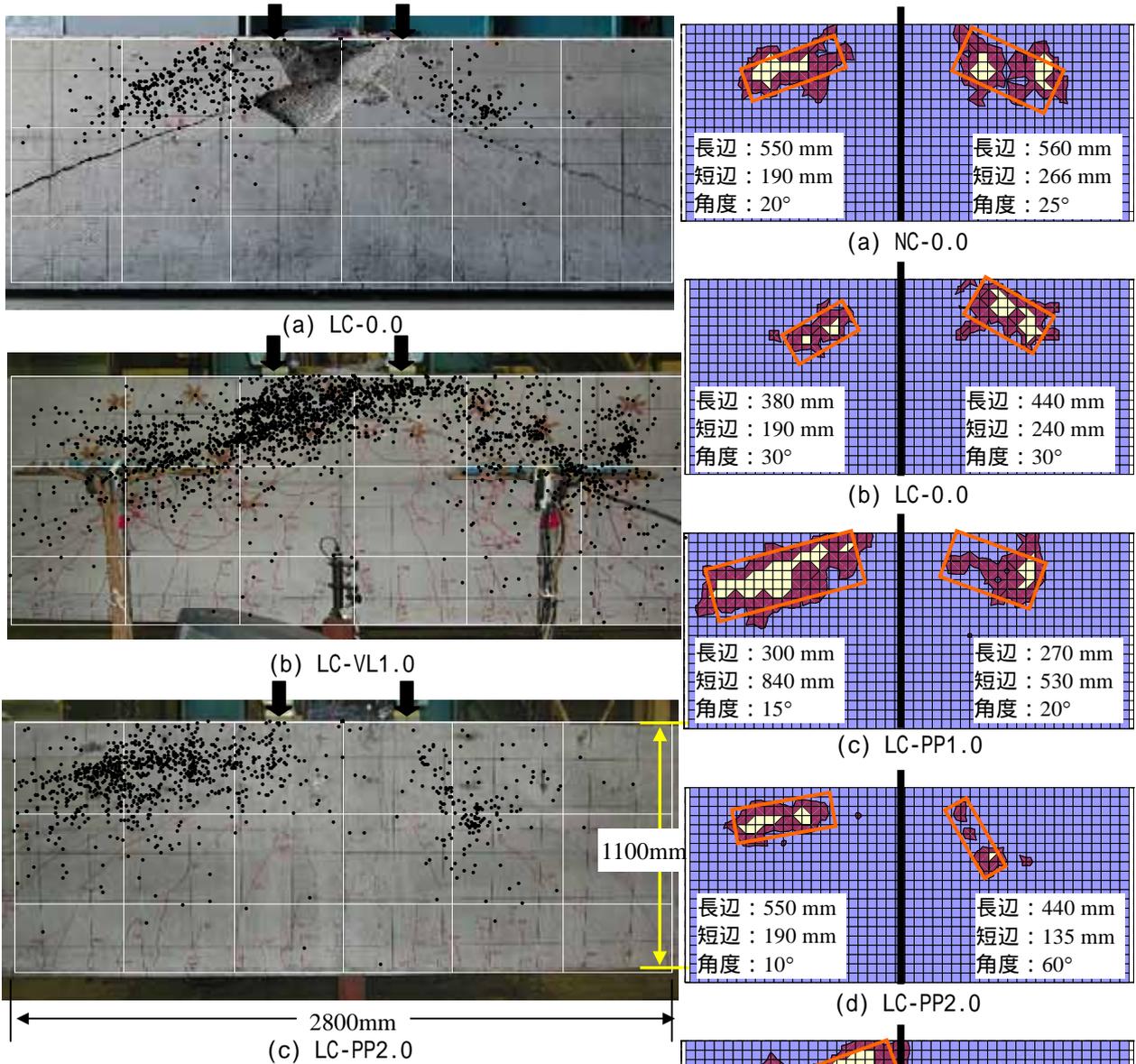


図 - 6 支点間中央部における AE 発生源位置標定結果  
(ただし、斜めひび割れ発生以降、終局に至るまで)

コンクリートの一軸圧縮試験結果より示される累積 AE 最大振幅値とエネルギー吸収量の関係が確立できれば、AE 法を用いることで、圧縮ストラットにおけるエネルギー吸収量に関して、定量的見解が得られると考えられる。

### 3.4 AE 発生源位置標定

LC-0.0, LC-VL1.0 および LC-PP2.0 において、斜めひび割れ発生後終局に至るまでに特定できた AE 発生源位置を 図 - 6 に標定した。ただし、標定の際には、測定した全ての AE のパラメータを計算に使用している。LC-0.0 では、支間中央部のコンクリートが圧壊したにも拘わらず、AE が標定されなかった。これは、それぞれのせん断ス

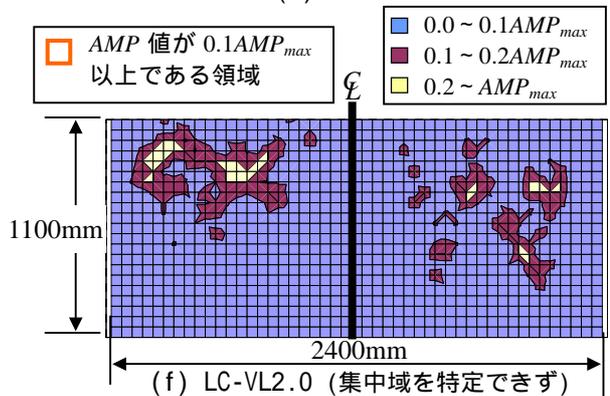


図 - 7 支点間中央部における累積 AE 最大振幅値の分布

パンごとに AE 測定機器を設置して計測したため、支間中央部では位置標定を行う上で必要な数の AE データが得られなかったことによる。

標定の結果、AE は局所的に集中して発生しており、LC-0.0 と LC-VL1.0 の標定結果を比較すると、繊維混入量の増加に伴い、AE 発生数が増加したことがわかる。ただし、LC-PP2.0 は、斜めひび割れが発生したものの終局に至らなかったため、LC-VL1.0 と比較して AE 標定数は少ない。しかし、標定位置は、他の試験体同様、局所的に集中して分布している。また、LC-VL1.0 では支間中央上部より AE が発生・伝播したが、LC-0.0 および LC-PP2.0 では、載荷に伴う AE 発生位置の推移に、特徴的な傾向は把握できなかった。

次に、標定された AE 位置を、それぞれの AE の最大振幅値で重みづけすることで、さらに検討を行う。各試験体において、図 - 6 に示した対象範囲を 50×50mm の正方形をした複数の要素で構成されていると仮定し、それぞれ要素において標定された AE の、最大振幅値の累積値(AMP)を算出した。そして、AE 測定機器に依存した AE 検出感度の違いの可能性を考慮して、それぞれのスパンごとに(測定装置ごとに)、AMP を AMP の最大値(AMP<sub>max</sub>)で除すことで正規化した。

図 - 7 に、全ての試験体の AE 位置標定結果を基に得られた、支間中央部における正規化された AMP 値を色で区分して示す。その結果、斜めひび割れが形成されなかった LC-VL2.0 では、AE が分散して発生しているが、その他の試験体では、両側のせん断スパンにおいて AE が集中して発生している状況が認められる。AE は載荷に伴うコンクリートの破壊に起因する現象であることを踏まえると、この AE 発生集中域は、斜めひび割れ発生後に形成された、圧縮ストラットの形状と関係があると思われる。

図 - 7 において、AMP<sub>max</sub> の 10% 以上を示す領域を長方形で近似した。区別された長方形の長辺、短辺および角度を図中に示す。これらの値は、それぞれ PC 梁中に形成された圧縮ストラットの損傷長さ、幅および角度を示すものとみなすことが

できる。それぞれの絶対値は、上記に示した定義 (AMP<sub>max</sub> の 10% 以上) に依存して変化するため、検討の余地があるが、終局に至った 4 体の実験結果を比較すると、繊維の混入に伴い圧縮ストラットの幅(短辺長さ)が増加し、角度が低下する傾向が確認できる。したがって、この現象は、繊維混入量の増加に伴い、PC 梁の最大荷重 P<sub>max</sub> が増加した一つの要因であると考えられる。

#### 4. まとめ

- (1) アクリルロッドを使用して圧縮ストラットにおける局所ひずみを測定した結果、ひずみは均一でなく局所的に集中して発生した。
- (2) PC 梁の載荷に伴う、AE 最大振幅値の累積値と荷重 - たわみ関係より算出されるエネルギー吸収量には、強い相関関係があった。
- (3) AE 発生源位置標定を行うことで、PC 梁に形成された圧縮ストラットの幅および角度が推定できた。その結果、繊維混入量の増加に伴い圧縮ストラットの幅の増加および角度の減少が確認できた。

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) 田村 聖, 濱田 譲, 前堀伸平, 二羽淳一郎：高性能軽量コンクリートを用いた大型PC梁のせん断耐荷特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.709-714, 2001.6
- 2) 渡辺 健, 岩波光保, 横田 弘, 二羽淳一郎：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.175-180, 2002.6
- 3) 渡辺 健, 岩波光保, 横田 弘, 二羽淳一郎：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.163-168, 2003.7