

論文 AE 法による切欠き高さが異なるコンクリートはりの破壊進行領域形成に関する考察

大野 健太郎^{*1}・川瀬 麻人^{*2}・宇治 公隆^{*3}・上野 敦^{*4}

要旨：切欠き高さが異なる無筋角柱コンクリート供試体の 3 点曲げ試験時にアコースティック・エミッション (AE) 計測を行い、破壊進行領域の把握と引張軟化曲線の推定を行った。その結果、破壊エネルギーは部材厚によらずほぼ一定の値を示し、推定された引張軟化曲線の初期結合応力が高くなることが明らかとなった。AE 計測の結果、マイクロクラックの形成モードは切欠き高さの違いに依存せず、切欠き高さからの距離によってのみ変化することが明らかとなった。また、AE 源位置標定結果から、部材厚が小さいほど破壊進行領域の幅が破壊エネルギーに大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード：AE 法、引張軟化曲線、破壊エネルギー、破壊進行領域、SiGMA 解析

1. はじめに

プレキャスト鉄筋コンクリート製品の性能照査、および合理的設計の観点から、製品の曲げ耐力を精度よく算定する手法が求められている。プレキャスト鉄筋コンクリート製品は、部材厚 200mm 以下の薄肉部材が多く、工場内で安定して製品を製造可能であることから、部材厚の小さな部材に対しても、20mm の最大粗骨材寸法が使用されている。筆者らは、薄肉鉄筋コンクリート部材の曲げ破壊性状に関する検討¹⁾を行っており、鉄筋比 0.3%程度とし、最大粗骨材寸法 20mm で部材厚が 70mm 以下の薄肉部材では、曲げひび割れ発生と同時に破壊に至ることを実験的に明らかにしている。

鉄筋コンクリート部材の曲げ破壊に関して、鉄筋比が小さい場合には、曲げひび割れ発生直後に部材が破壊に至り、無筋コンクリートと類似した破壊性状を示すことが知られている。そのため、土木学会コンクリート標準示方書「設計編」²⁾では、曲げモーメントが支配的な棒部材の最小鉄筋比は 0.2%以上と規定されている。ここで、鉄筋コンクリート部材の最小鉄筋比に関して、六車らは、コンクリートの圧縮強度と鉄筋の降伏点応力によって最小鉄筋比が得られることを解析的に示している³⁾。一方、島らは、実験的に検討を行い、コンクリートの曲げ強度の寸法依存性を考慮する必要性を示している⁴⁾。また、内田らは、寸法依存性を考慮した低鉄筋比の梁部材の曲げ耐力算定法に関して検討を行い、コンクリートの引張軟化特性を考慮することで曲げ耐力が推定できることを示している⁵⁾。しかし、これらの既往の研究では鉄筋比が 0.05~0.5%程度で断面厚が 75mm~600mm であり、部材厚 70mm 以下に関しては検討が行われていない。

本研究では、薄肉鉄筋コンクリート部材の曲げひび割れ耐力算定手法を提案する前段階として、最大寸法 20mm の粗骨材を使用した部材厚 70mm 以下の薄肉部材の引張軟化特性を明らかにすることを目的とし、同時に破壊進行領域について検討を行った。具体的には、部材厚を変化させた破壊エネルギー試験を行い、部材厚の違いが破壊エネルギー、および引張軟化曲線の形状に及ぼす影響を検討し、引張軟化曲線の 2 直線モデルと概形を比較した。また、アコースティック・エミッション (以下、AE とする) 法の位置標定結果から破壊進行領域の幅を推定し、破壊エネルギーとの関係について考察した。さらに、マイクロクラックの形成モードを SiGMA (Simplified Green's functions for moment tensor analysis) 解析⁶⁾を用いて考察した。

2. 実験概要

実験に使用したコンクリートの示方配合および力学的特性を表-1、表-2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には津久井産砕砂 (表乾密度 2.63g/cm³, 吸水率 1.25%, 粗粒率 2.68) および富津産山砂 (表乾密度 2.61g/cm³, 吸水率 3.32%, 粗粒率 1.55) を質量比 9:1 で混合した混合細骨材を、粗骨材には津久井産砕石 2005 (表乾密度 2.64g/cm³, 吸水率 1.26%, 粗粒率 6.34, 実積率 57.9%) を用いた。また、表-2 中の弾性波速度は、100×100×400mm の角柱供試体にて、ペンシルリードブレイク法により求めた。図-1 に供試体概要および AE センサ配置図を示す。供試体は、100×100×400mm の鋼製型枠に、図-1 中に示す h (部材厚) が 40, 50 および 70mm となるように、樹脂製 T 型スパーサ

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域助教 博士 (工学) (正会員)

*2 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境学科 (非会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域教授 博士 (工学) (正会員)

*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域准教授 博士 (工学) (正会員)

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤* <i>Ad</i>
20	8.0	56.7	5.5	44.0	174	307	758	1011	1.07

をスパン中央に固定した状態で、コンクリートを打設し、作製した。供試体数は、各部材厚につき 6 本ずつとし、計 18 本作製した。そして、打設後 1 日で脱型し、以後 20℃水中養生とし、材齢 28 日から 3 日間で破壊エネルギー試験を行った。試験機には容量 2000kN の耐圧試験機を用い、切欠き下部に設置したクリップゲージ（感度 1/1000mm）で切欠き先端の開口変位（Crack Mouth Opening Displacement, CMOD）を計測した。載荷は手動で行い、切欠き開口変位が 0.01mm/min となるよう制御した。なお、供試体の水平拘束をなくすことおよび、供試体と載荷治具との摩擦で発生する AE 信号を抑制するため、供試体と治具との間にはテフロンシートを挿入した。

3.1 破壊エネルギー試験結果

$$G_F = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (1)$$

表-3 より、破壊エネルギーは部材厚に依存せず、同等であり、示方書値の1.4倍～1.3倍高いとなった。また、図-2 に各供試体で得られた破壊エネルギーと示方書値の関係を示す。表-3 および図-2 より、部材厚 50 およ

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	弾性波速度 (m/s)
39.2	2.85	27.9	4200

部材厚 $h(\text{mm})$	40	50	70	示方書値
破壊エネルギー $G_F(\text{N/m})$	125	119	122	92.2
変動係数	0.305	0.125	0.103	—

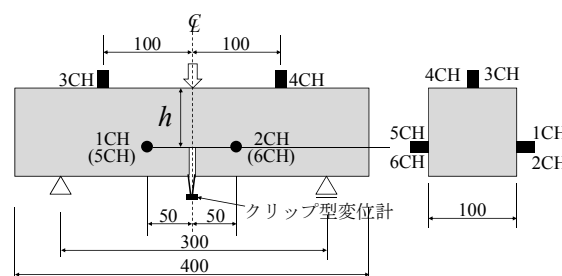


Figure 10 is a scatter plot showing the relationship between material thickness h (mm) on the x-axis and peak load G_p (N/m) on the y-axis. The x-axis ranges from 0 to 80 mm, and the y-axis ranges from 0 to 200 N/m. A horizontal dashed red line represents the design value of 92.2 N/m. Data points are plotted for three thicknesses: $h=40$ mm (blue diamonds), $h=50$ mm (grey circles), and $h=70$ mm (green triangles). The peak load generally increases with material thickness.

部材厚 h (mm)	破壊エネルギー G_p (N/m)
40	85
40	105
40	110
40	175
40	180
50	105
50	115
50	130
50	135
70	100
70	115
70	125
70	130
70	135

び 70mm の供試体においては、個々の供試体の試験結果の変動範囲が、比較的小さいことがわかる。しかし、部材厚 40mm の供試体においては、個々の供試体の試験結果の変動範囲が比較的大きいことがわかる。これは、部材厚に対する最大粗骨材寸法の比 (d_{max}/h) が大きくなるにつれて個々の測定結果の変動が大きくなること、すなわち、部材厚が試験結果の安定性に影響していることを示している。

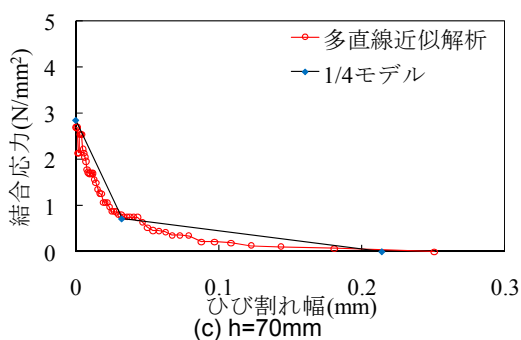
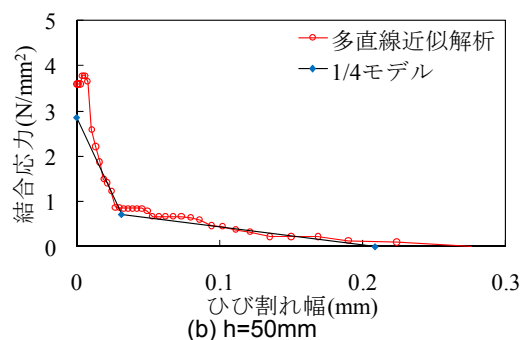
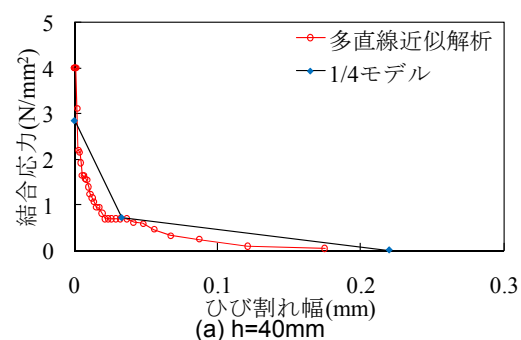


図-3 各部材厚の引張軟化曲線

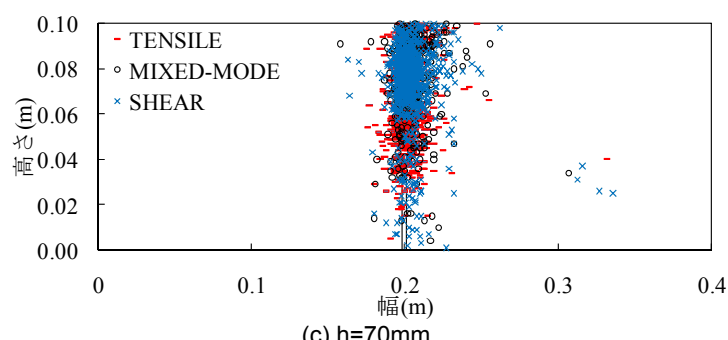
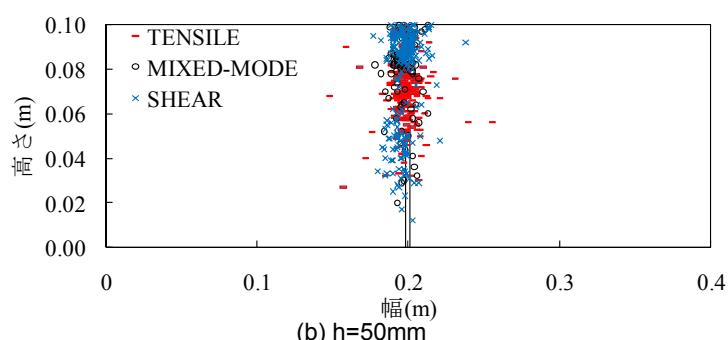
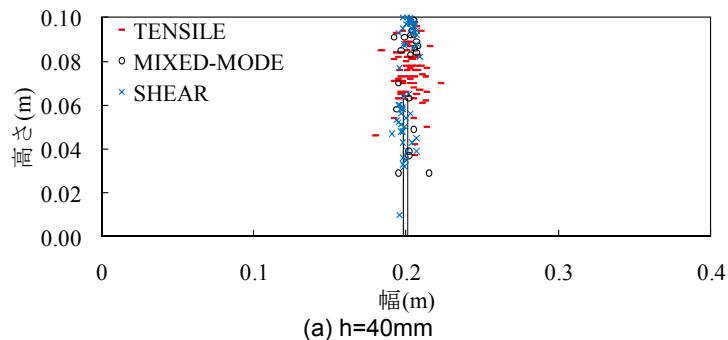


図-4 各部材厚のSiGMA解析結果

者：内田祐市)」により行った。なお、有限要素法の解析モデルは、各供試体に対応した部材厚に適宜変化させた。

図-3に、各部材厚の供試体の荷重-CMOD 曲線より得られた引張軟化曲線を示す。また、図-3 中には表-3 に示す各部材厚の破壊エネルギーとコンクリートの引張強度 (2.85N/mm^2) を使用して、示方書提示の 1/4 モデルの引張軟化曲線を併せて示している。

部材厚 70mm の供試体は、JCI 標準の破壊エネルギー試験法⁷⁾で規定されている供試体寸法であり、示方書提示の 1/4 モデルが、多直線近似解析結果と非常によく一致していることがわかる。しかし、部材厚が小さくなるにつれて、多直線近似解析結果の初期結合応力が高くなることわかる。この現象は、高強度コンクリートを使用した場合に得られる結果⁸⁾と類似しており、後述するモルタルマトリックスと骨材の付着が強いために、ひび割れが進展する際に骨材を割ってひび割れが進むためであると考えられる。ここで、内田ら⁹⁾が提案している梁の曲げ耐力算定法において、コンクリートの引張強度

を超えてから、コンクリートの引張軟化特性の概念を組み込み、耐力算定を行っているが、図-3 に示すように、割裂試験で得られる引張強度よりも初期結合応力が大きい薄肉部材の場合では、引張軟化開始点は部材厚によって変化させるべきであると考えられる。すなわち、部材厚が小さい場合は、部材下縁のコンクリートのひび割れ発生は、引張強度の 1.5 倍程度を超えたときとすべきであると考えられる。

3.3 AE 計測結果

(1) AE 位置標定結果とクラック形成モード

SiGMA 解析では、検出された AE 信号の到達時間と弾性波速度から、AE 発生源の位置標定を行い、その後、AE 波の初動振幅値を用いて、モーメントテンソル解析を適用することで、AE 発生源の形成モードを得ることができる。なお、本解析において、AE 波の到達時間および初動振幅値の決定は、自動読み取り法¹⁰⁾により行った。

図-4 に各部材厚における SiGMA 解析結果の代表例を示す。なお、他の供試体においても同様の結果を得て

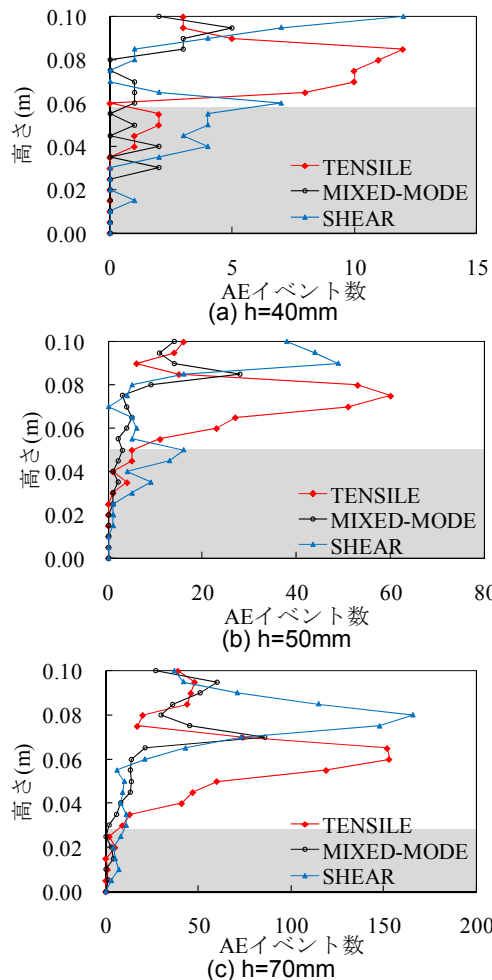


図-5 供試体高さに対するクラック形成モードの発生状況

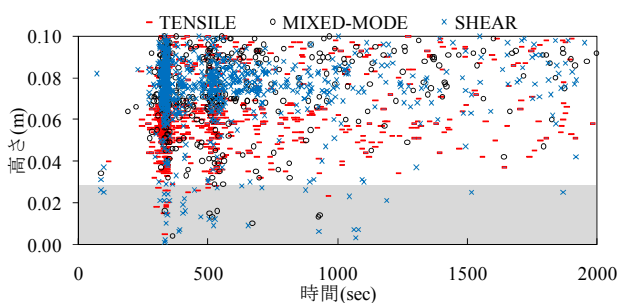


図-6 AE イベントの時間的発生状況(h=70mm)

いる。図より、部材厚が大きくなるほど、AE 発生源の分布幅が広範囲に及んでいることがわかる。大塚ら¹¹⁾、¹²⁾によれば、ひび割れ先端に形成される破壊進行領域は、骨材寸法や供試体寸法に依存して異なることが報告されており、本研究での結果は、これらの検討結果と整合している。また、図-4 中には、切欠き先端下部の破壊に直結しない領域に AE 発生源が位置標定されているが、これは後述の処理により、非常に規模の小さな AE イベントであることがわかっている。次に、図-5 に供試体高さに対するクラック形成モードの発生状況を、図-6 に代表例として部材厚 70mm の供試体の高さ方向に關す

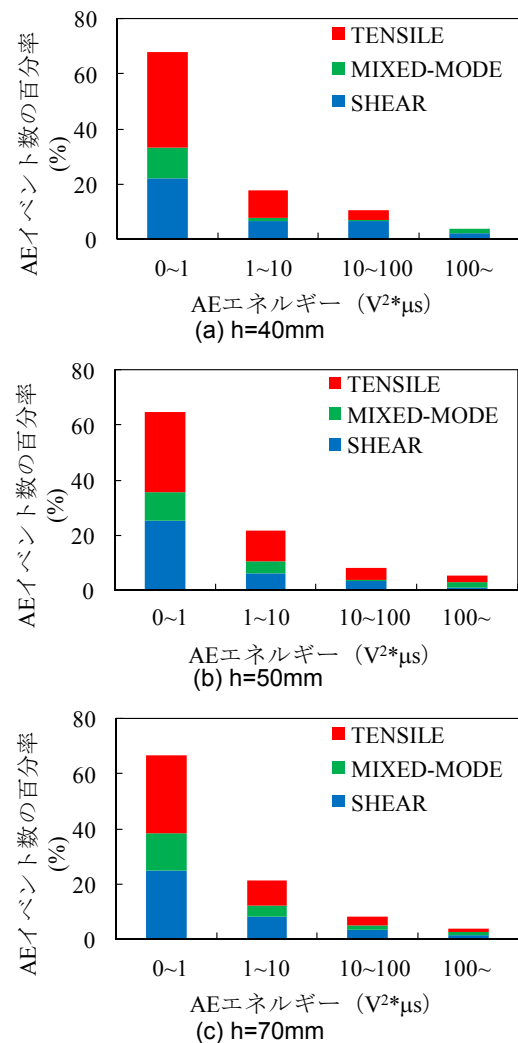


図-7 AE エネルギーの占める割合

る AE イベントの発生状況を示す。なお、図中の影は切欠き高さを表している。これらの図より、切欠き先端部では AE イベント数が比較的小さいことがわかる。これは、切欠き先端の破壊が波形のサンプリング間隔を超えて瞬間的に発生し、AE 計測装置で計測できなかった可能性があるものと推察される。また、図-6 において、荷重が最大に達したとき（約 300 秒）に AE イベントが切欠き先端部から供試体上面へ瞬間的に発生している。さらに、図-5 において、切欠き先端部から高さ方向に進むと、赤線で示す引張型の AE イベントが卓越して発生し、青線のせん断型の AE イベントは、引張型卓越領域より高い位置で多く発生していることが全ての部材厚で確認できる。また、黒線の混合型の AE イベントは引張型 AE イベントの発生が減少する領域、かつ、せん断型 AE イベントが増加傾向を示す領域でやや多く発生していることがわかる。すなわち、切欠き先端から供試体高さ方向にクラック形成モードが異なっており、切欠き先端から 25~30mm の領域では引張型 AE イベントが、35~40mm では混合型 AE イベントが、40~50mm ではせ

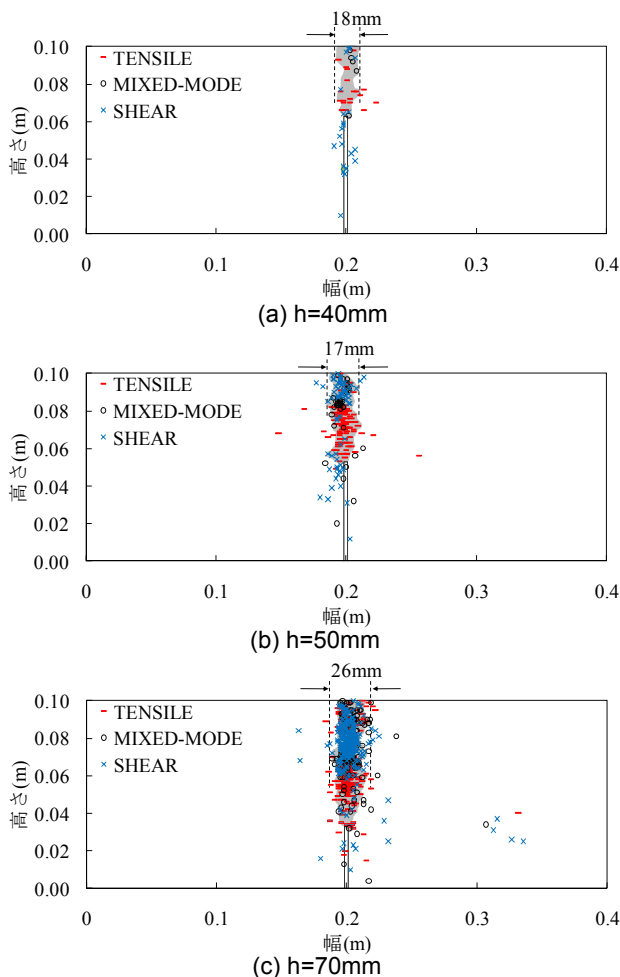


図-8 AE位置標定結果と破壊進行領域幅

ん断型 AE イベントが支配的となることが明らかとなった。このことは、切欠き先端では引張型破壊のモード I が卓越した破壊を起こし、その後、面内せん断型破壊のモード II または面外せん断型破壊のモード III がそれぞれ卓越して供試体が破壊していることを示していると考えられる。

(2) 破壊エネルギーと破壊進行領域幅の関係

大塚ら^{11), 12)}によれば、AE エネルギーが高い AE イベントと X 線造影撮影から得られたコンクリート中の破壊進行領域が非常によく対応する結果が報告されている。そこで、本研究においても、AE エネルギーの高さに着目し、AE イベントの幅について検討を行う。

AE エネルギーは AE 信号の最大振幅値の二乗と継続時間の積により式(2)のように表わされる。

$$E_{AE} = V^2 \times T \quad (2)$$

ここに、 E_{AE} : AE エネルギー ($V^2 \cdot \mu s$)、 V : AE 信号の最大振幅値 (V)、 T : AE 信号の継続時間 (μs)

図-4 に示した AE 位置標定結果は、6 個の AE センサ全てで同定された AE イベントであり、1 つの AE イベントに対する AE エネルギーは、6 個の AE 信号から得られる AE エネルギーの平均値とした。

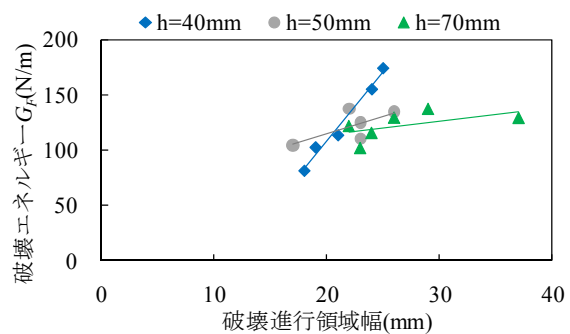


図-9 破壊進行領域幅と破壊エネルギーの関係



図-10 部材厚 40mm 供試体の破壊面

図-7 は、AE エネルギーの大きさを $0 \leq E_{AE} < 1$, $1 \leq E_{AE} < 10$, $10 \leq E_{AE} < 100$, $100 \leq E_{AE}$ の 4 段階に分け、AE イベント数の割合を示したものである。図より、部材厚の大きさにかかわらず、AE エネルギーが $1 V^2 \cdot \mu s$ より小さい AE イベントが 70% 程度占めていることがわかる。このことから、図-4 中の AE 位置標定結果は、非常に規模の小さな破壊が多数発生していることを表わしているものと考えた。また、AE エネルギーが $1 V^2 \cdot \mu s$ 未満の AE イベントの累積 AE エネルギーは、総 AE エネルギー量の 1% 未満であり、コンクリートのひび割れ進展に直接影響を与えたとは考えにくい。したがって、本研究では、AE エネルギーが $1 V^2 \cdot \mu s$ 以上の AE イベントのみを対象として、破壊進行領域幅の推定を行うこととした。

以上のようにして得られた AE 位置標定結果を、図-8 に示す。図-4 の AE 源位置標定結果と比較すると、AE イベントの分布幅が狭くなっていることがわかる。すなわち、ひび割れ形成面により近い位置のみの AE イベントが抽出された結果となっている。この図より、破壊進行領域と考えられる領域を影で示し、その幅が最も大きい箇所を最大破壊進行領域幅として図中に数値を示した。図より、部材厚が小さくなるにつれて破壊進行領域と考えられる領域が狭くなっていることがわかる。図-9 は、図-8 の破壊進行領域幅の推定を全ての供試体で行い、破壊エネルギーとの関係を示したものである。図-9 より、推定された破壊進行領域幅が大きくなるほど破壊エネルギーが大きくなっており、部材厚が小さいほど破壊進行領域幅が小さい値となることがわかる。これは、図-10 に示すように、部材厚 40mm では、ひび割れ

が骨材を迂回せずに貫通し、骨材が破断しており、部材厚が小さい供試体では、骨材とモルタルマトリックスの付着が強いために、微細ひび割れが骨材を迂回せずに貫通したためと考えられる。また、各部材厚におけるひび割れ幅と破壊エネルギーの関係では、部材厚が小さくなるにしたがって、近似曲線の傾きが大きくなり、部材厚が小さいほど破壊進行領域幅が破壊エネルギーに大きな影響を及ぼすことを示唆している。この結果は、碎石骨材を使用し、骨材寸法を変化させた場合のひび割れ幅と破壊エネルギーの関係¹³⁾に類似している。これらのことから、部材断面に対する粗骨材寸法の比 (d_{max}/h) がある値より大きくなると、微細ひび割れは、骨材を迂回せずに貫通する可能性があると考えられる。

4. 結論

本研究は、薄肉鉄筋コンクリート部材の曲げ耐力を算定する前段階として、部材厚を変化させたコンクリートの破壊エネルギー試験を行い、部材厚の低下による引張軟化特性の影響、および破壊進行領域の推定を行ったものである。以下に結論を示す。

- (1) 部材厚を 40, 50 および 70mm として破壊エネルギー試験を行った結果、破壊エネルギーは部材厚に依存せず、ほぼ一定の値を示すことが確認された。しかし、部材厚 40mm では部材厚 50 および 70mm の供試体と比較して試験結果の安定性が低下することがわかり、断面の不均一性が大きく影響することが示唆された。
- (2) 多直線近似解析により引張軟化曲線を推定した結果、部材厚 70mm では 1/4 モデルとほぼ同様の形状を示し、部材厚 40 および 50mm では初期結合応力がコンクリートの引張強度の 1.5 倍程度高くなることがわかった。このことから、薄肉部材のひび割れ発生強度は、コンクリートの引張強度の 1.5 倍程度高くなる可能性が示唆される。
- (3) 破壊エネルギー試験に AE 法を適用し、SiGMA 解析を行った結果、クラックの形成モードは切欠きからの高さによって変化し、切欠きから 25~30mm の位置で引張型、35~40mm の位置で混合型、40~50mm でせん断型の AE イベントが卓越することが明らかとなり、断面高さによって破壊性状が変化することが考えられる。
- (4) AE エネルギーが高い AE イベントのみを使用して AE 源位置標定を行った結果、破壊進行領域幅が推定可能となり、破壊進行領域幅が破壊エネルギーに大きく影響していることが示唆された。特に、部材厚 40mm の供試体では、その影響が顕著である。また、

部材断面に対する粗骨材寸法の比 (d_{max}/h) に依存して微細ひび割れの経路が決定される可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 大野健太郎, 宇治公隆, 國府勝郎, 清水和久: AE 法による薄肉鉄筋コンクリート部材の破壊進行過程の考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.637-642, 2010.
- 2) 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, pp.186-189, 2008.
- 3) 六車熙, 岸本茂規: 鉄筋コンクリート曲げ材の最小鉄筋比に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.172, pp.1-6, 1970.6
- 4) 島弘, 二羽淳一郎, 岡村甫: 曲げを受ける低鉄筋比はりにおける脆性破壊の防止に関する検討, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.231-237, 1987.2
- 5) 内田祐市, 瀬古繁喜, 六郷恵哲, 小柳洽: 寸法依存性に着目した低鉄筋 RC はりの曲げ破壊性状, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.129-138, 1992.8
- 6) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久: AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発, 非破壊検査, Vol.42, No.10, pp.570-575, 1993.
- 7) 日本コンクリート工学協会: 切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 JCI-S-001-2003.
- 8) 橘高義典, 中村成春: 高強度コンクリートの破壊パラメータに及ぼす粗骨材の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.490, pp.7-16, 1996.12
- 9) 内田祐市, 六郷恵哲, 小柳洽: コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.101-107, 1992.2
- 10) 大野健太郎, 下藺晋一郎, 沢田陽佑, 大津政康: AE 波初動部の自動読み取りの開発による SiGMA 解析の改良, 非破壊検査, Vol.57, No.11, pp.531-536, 2008.11
- 11) K.Otsuka, H.Date: Fracture process zone in concrete tension specimen, Engineering Fracture Mechanics, Vol.65, pp.111-131, 2000.
- 12) 木村聡, 大塚浩司, 伊達秀文: AE 法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, 1999.
- 13) 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.478/V-21, pp.109-116, 1993.1