

## 鉄筋コンクリート梁部材内の破壊き裂の変形および進展挙動に関する研究

On Extension and Deformation Behavior of Fracture Cracks in Reinforced Concrete Member

橋本堅一\*, 杉本環\*\*, 鱸 洋一\*\*\*, 矢富盟祥\*\*\*\*

Ken-ichi HASHIMOTO, Tamaki SUGIMOTO, Yoichi SUZUKI and Chikayoshi YATOMI

\*博士(工学) 徳山工業高等専門学校助教授, 土木建築工学科 (〒745-8585 徳山市久米高城 3538)

\*\* 金沢大学大学院, 自然科学研究科地球環境科学専攻博士過程 (〒920-8667 金沢市小立野 2 丁目 40-20)

\*\*\* 博士(工学) 金沢大学助手, 工学部土木建設工学科 ( 同上 )

\*\*\*\* Ph.D 金沢大学教授, 工学部土木建設工学科 ( 同上 )

Cracks in reinforced concrete show an interesting behavior for its deformation and extension by the steel constraint. The four point bending member was chosen as the subject of this study and the property of extension and deformation for cracks in the reinforced concrete was investigated. Considering the bending crack and the inclined crack in the specimen, we discuss the crack extension property using the maximum energy release rate criterion. The crack length, the angle of crack inclination, some ratios of shear span to effective ratio, etc. were considered as the parameter of the analytical models. The energy release rate was calculated for each crack by the E-integral method. The numerical results gave the various interesting behavior for crack kinking and the existence of the area that the extension of the bending crack or the inclined crack was dominant for the various ratios of shear span to effective depth.

*Key Words*: RC member, bending crack, inclined crack, energy release rate, crack extension

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート梁部材内の破壊き裂の発生と進展状況は4点曲げ載荷長方形断面部材に限ってもせん断スパン長さと有効高さの比 ( $a/d$ ), 引張り鉄筋比 ( $\rho$ ), せん断補強筋などによりさまざまな挙動を示す。鉄筋コンクリート部材の耐力については多くの議論があり, 最近では有限要素法を用いた様々な数値解析的手法でその破壊挙動を含めた解析が可能になっている。鉄筋コンクリート梁部材の破壊を破壊力学の立場から議論する場合, 発生したき裂に破壊エネルギーを考慮することが一般的となっているが, き裂の進展が破壊を支配するクライテリオンを用いた本来の破壊力学の立場から議論することは興味のあるところである。破壊力学では初期き裂の存在を仮定するため, 鉄筋コンクリート梁部材の破壊の発生を含めて総合的に考えることは困難である。しかし, 発生したき裂を複数仮定してそのき裂のうち, どのき裂が進展しやすいか, あるいはいつ, どの方向に進むかについて議論することは鉄筋コンクリート梁部材の破壊メカニズムを考察するうえで, 有効な資料となるものと考えられる。

破壊力学におけるクライテリオンは多く提案されており, 最大周応力説<sup>1)</sup>, 最小ひずみエネルギー密度量説<sup>2)</sup>,

最大エネルギー解放率説などが従来からよく用いられている。最近では純開口様式(モードI)の破壊靱性 ( $K_{Ic}$ ) と純せん断様式(モードII)の破壊靱性 ( $K_{IIc}$ ) を用いた実験により得られたクライテリオン<sup>3)</sup> も用いられており, それぞれのクライテリオンの考え方には一長一短がある。すなわち, 各種材料により, 適用可能なクライテリオン, あるいは適用できないクライテリオンが存在し, すべての材料に適用可能な絶対的なクライテリオンは現在のところ存在していない。

鉄筋コンクリート梁部材における斜めき裂の発生は, 曲げせん断ひび割れについても, ウェブせん断ひび割れについても梁の中央付近から発生し, 急激に上下に進展して部材の破壊を起こす。曲げせん断ひび割れは曲げき裂のき裂先端付近から発生するが, 発生すると曲げき裂とは独立に斜めに進展する場合が多い。したがって, この斜めき裂の進展挙動をそのときに存在する曲げき裂の進展挙動と関連させて議論する事は重要である。

筆者らは先に最大エネルギー解放率クライテリオンを用いて鉄筋コンクリート梁部材内のき裂をきわめて単純に仮定してその進展挙動を解析した<sup>4)</sup>。これは, 解析的には容易な等方線形弾性体に弾性係数を変えた鉄筋部を考慮した連続体を4点曲げ部材として考え, 曲げに支配されるき裂を部材中央に1本, いわゆるせん断に支配され

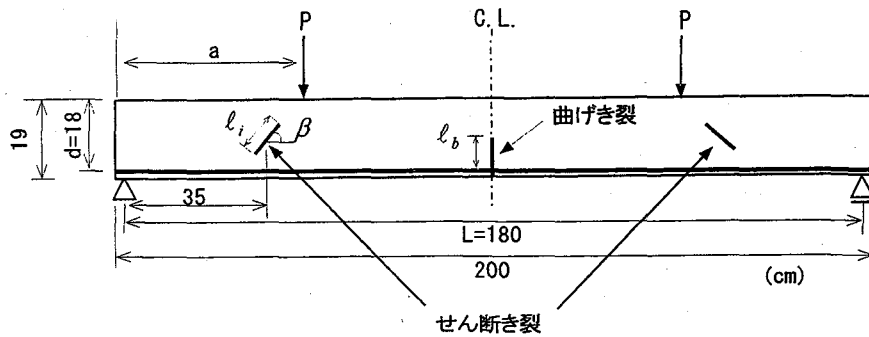


図-1 解析モデル概要図

る斜めき裂を支点と載荷点間に1本(左右対称として半分の領域を解析しているので実際には2本となる)仮定してそれぞれのき裂の進展挙動を解析したものである。主に变化させたパラメータはせん断スパン長さと有効高さの比(a/d)であったが、その選択によりそれぞれのき裂が進展しやすい領域があることや、境界条件が比較的単純であるにもかかわらず、き裂が大きく折れ曲がって進まないような破壊力学的には珍しい挙動が示されることなどを明らかにした。

本研究では上記の先に報告した結果を踏まえて、支点と載荷点の間に与える斜めき裂の長さを変化させたモデル、その斜めき裂の角度を変えたモデルの他、実験等では複数の曲げき裂が発生することを考慮して、中央のき裂より短い長さのき裂を他に1本考慮したモデルを考え、曲げき裂と斜めき裂の進展挙動について考察した。

鉄筋コンクリート部材の解析についてはコンクリートや鉄筋の構成関係、鉄筋とコンクリート間の付着の近似、ひび割れのモデル化等を十分考慮して解析する必要がある、それらを考慮した報告も数多く見られるが、主とした目的が鉄筋コンクリート部材の耐力を問うものではなく、仮定したき裂の変形挙動や進展挙動のメカニズムを破壊力学的に考察することにあるので、モデルは等方線形弾性体とした。

## 2. 解析手法と解析モデル

### 2.1 解析手法

エネルギー解放率を計算する評価式には次式に示す、補ひずみエネルギー型のE積分公式<sup>4)</sup>を用いた。

$$E(\ell) = \frac{\partial}{\partial \ell} \left[ \int_{\Gamma} (\frac{1}{2} \mathbf{s} \cdot \mathbf{u}) ds \right] - \int_{\Gamma} \left( \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \ell} \cdot \mathbf{u} \right) ds \quad (1)$$

ここで $\ell$ はき裂長さ、 $\Gamma$ はき裂先端を含む閉領域の境界、 $C^*$ は閉領域内のき裂上下面である。また $\mathbf{s}$ および $\mathbf{u}$ はそれぞれ表面力ベクトルと変位ベクトルである。この式を

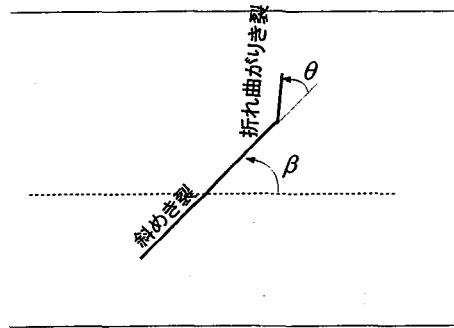


図-2 斜めき裂の角度 $\beta$ と、き裂折れ曲がり角度 $\theta$

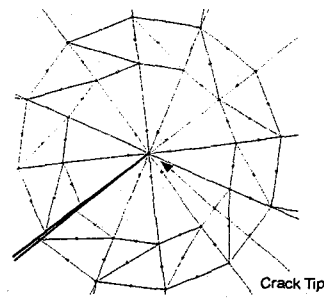
数値解析して計算する場合、き裂長さ $\ell$ のモデル(以下、基本モデルと呼ぶ)と、き裂が微小長さ $\Delta\ell$ 伸びたモデル(以下、き裂進展モデルと呼ぶ)の2つのモデルの解析を行い、き裂長さによる偏微分項は2点差分近似することにより、また経路積分は表面力と変位をそれぞれ離散化した等価節点表面力 $s_i$ と節点変位 $u_i$ を用い、積分経路上の全節点で和をとることにより求めた。すなわち次式を解析に用いた。

$$E = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{s_i(\ell + \Delta\ell) \cdot u_i(\ell + \Delta\ell) - s_i(\ell) \cdot u_i(\ell)}{2\Delta\ell} - \frac{s_i(\ell + \Delta\ell) - s_i(\ell)}{\Delta\ell} \cdot u_i(\ell) \right\} \quad (2)$$

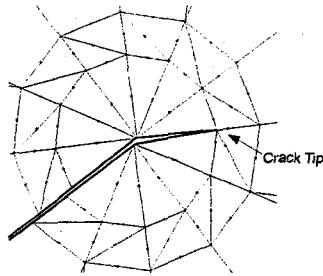
ここで $n$ は積分経路上の節点数であり、 $(\ell)$ および $(\ell + \Delta\ell)$ はそれぞれ基本モデル、き裂進展モデルの物理量であることを示している。

### 2.2 解析モデル

図-1に示すように基本的なモデルとして解析対象とした梁の寸法は19cm×200cmで有効高さ $d$ を18cm、支点間距離 $L$ を180cmとした。せん断補強は考えず、荷重はせん断スパン $a$ と有効高さ $d$ の比であるせん断スパン比 $a/d$ が約1.9~4.0となる位置に集中荷重 $P$ を載荷し、その大きさは9.8kNとした。供試体下部に配置した鉄筋とコンクリートとの境界は完全付着であると仮定

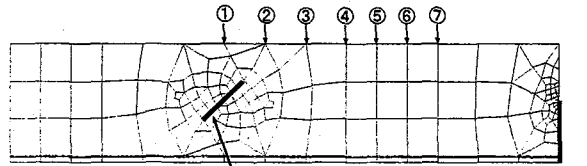


(a) 基本モデル



(b) き裂進展モデル

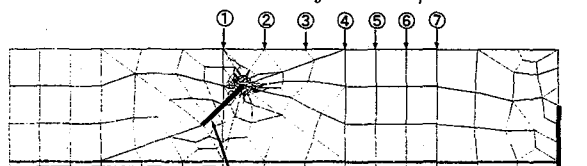
図-3 基本モデルとき裂進展モデルのき裂先端近傍の要素分割



- ① a/d=1.94    ② a/d=2.32    ③ a/d=2.69    ④ a/d=3.06  
 ⑤ a/d=3.33    ⑥ a/d=3.61    ⑦ a/d=3.89

要素数 192, 節点数 624

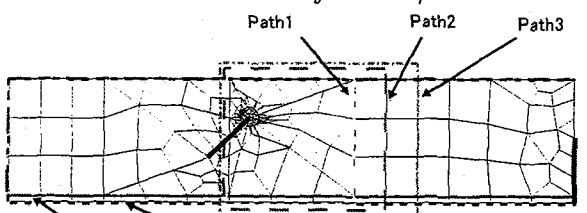
(a) 曲げき裂モデル ( $l_b=9\text{cm}$ ,  $l_s=9\text{cm}$ )



- ① a/d=1.94    ② a/d=2.32    ③ a/d=2.69    ④ a/d=3.06  
 ⑤ a/d=3.33    ⑥ a/d=3.61    ⑦ a/d=3.89

要素数 307, 節点数 885

(b) 斜めき裂モデル ( $l_b=9\text{cm}$ ,  $l_s=9\text{cm}$ )



(c) 積分経路図

図-4 標準モデルの有限要素図

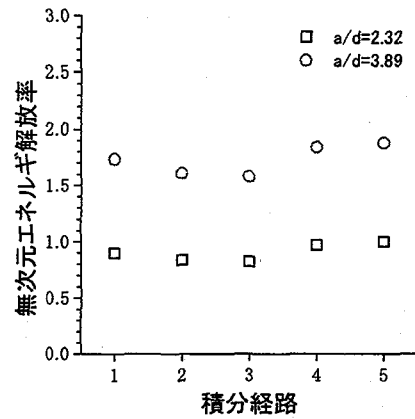


図-5 経路独立性

し、一体で挙動すると考えた。引張鉄筋比を 1.2%とし、コンクリートのヤング率を 34.3GPa, ポアソン比を 0.3, 鉄筋のヤング率を 205.9GPa, ポアソン比を 0.3 とした。梁の中央下部に曲げき裂を、支点から 35cm のところの梁中央に斜めき裂を仮定し、曲げき裂の長さを  $l_b$ , 斜めき裂の長さを  $l_s$  とした。図-2 に示すように、斜めき裂の梁軸からの角度を  $\beta$  とし、斜めき裂先端でのき裂折れ曲がり角度を  $\theta$  とした。き裂折れ曲がり角度はき裂が元のき裂と同方向に進展した場合を  $\theta=0$  度とし、反時計回りに正とした。解析は左右の対称性を考慮して左半領域を解析対象とした。要素は 8 節点アイソパラメトリック要素を基本的に用いて要素分割を行い、三角形となるところは 6 節点のアイソパラメトリック要素を用いた。き裂先端にはき裂の有限要素解析では汎用的な、 $r^{-1/2}$  と  $r^{-1}$  ( $r$  はき裂先端からの距離) の特異性のオーダーを表現できる特異要素<sup>5) 6)</sup>を用いた。き裂進展モデルにおいてもき裂先端に特異要素が配置できるようにき裂先端近傍を図-3 のように要素分割を行った。

本研究ではき裂面に接触問題を考慮した E 積分法<sup>7) 8)</sup>を用いるため、き裂を微小長さ進展させたモデルの解析が必要となり、き裂先端近傍をかなり細かいメッシュとしなければならない。また、接触条件を導入すると剛性マトリクスが非対称となり、さらに接触節点で接触状態を判定するための繰り返し計算が必要になるため、節点数が増えると著しく計算時間を要す。そこで、斜めき裂進展用の解析モデルと曲げき裂進展用の解析モデルを個々に作成し解析した。曲げき裂の長さ  $l_b$  が 9cm, 斜めき裂の長さ  $l_s$  が 9cm, 斜めき裂の角度  $\beta$  が 45 度のモデルを標準モデルとし、その際の使用した有限要素モデルは、曲げき裂モデルが図-4 (a), 斜めき裂モデルが図-4 (b) である。曲げき裂モデルにおいては拘束を解除する事により、き裂の進展をモデル化するため基本モデル、き裂進展モデル共に要素数 192, 節点数 624 である。斜めき裂モデルにおいては要素辺を図-3 のよう

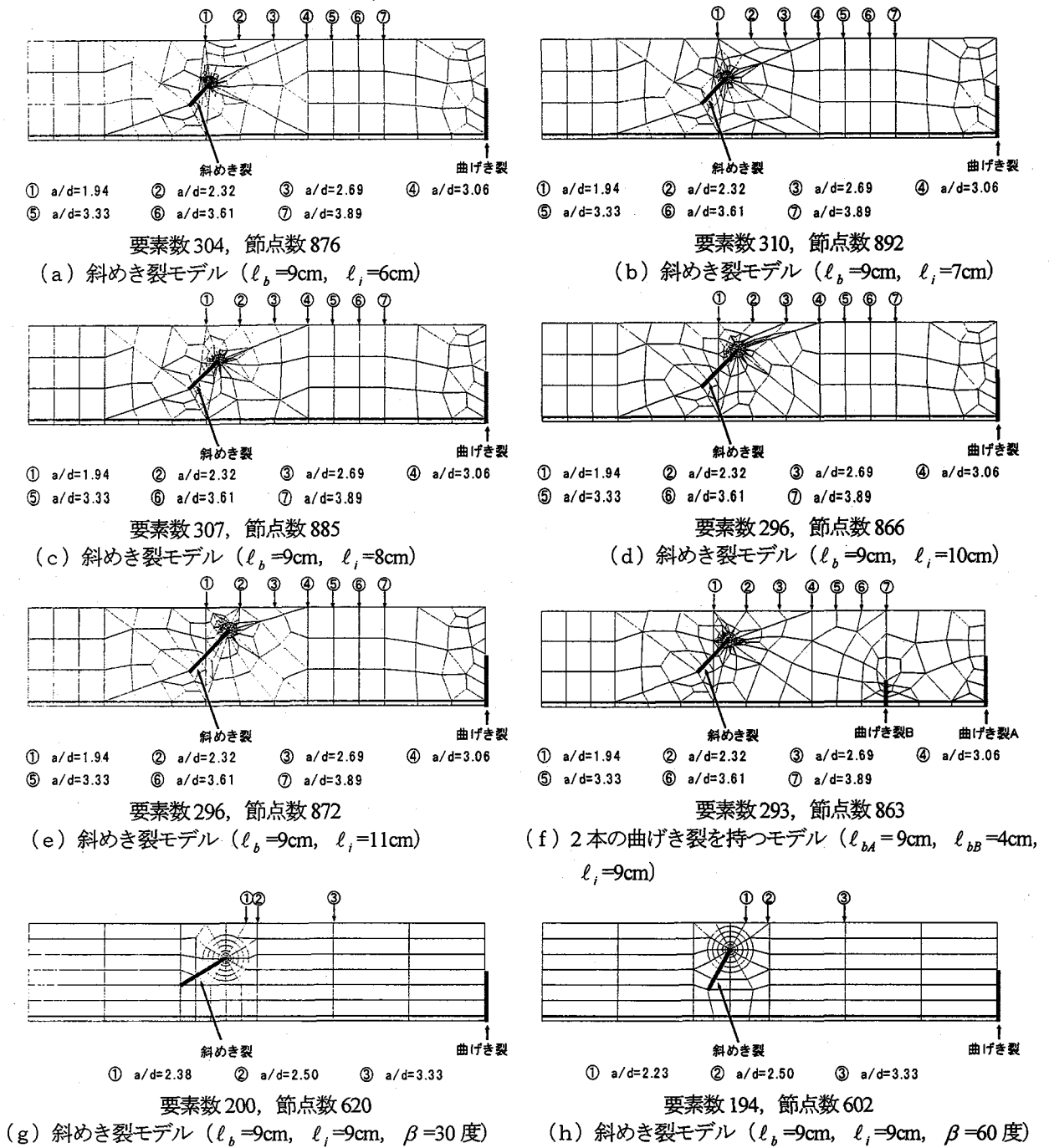
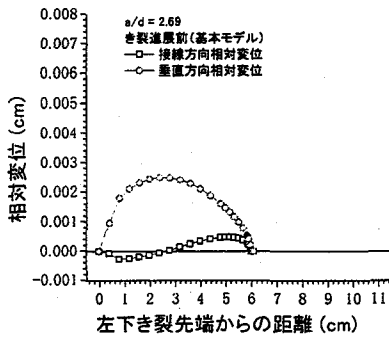


図-6 有限要素モデル図

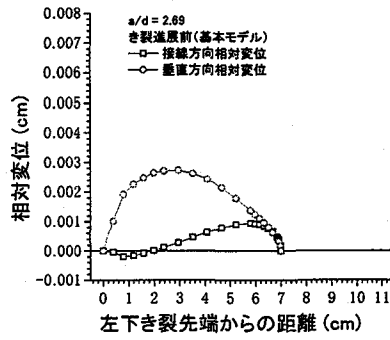
に分離することによりき裂の進展をモデル化するため、基本モデルにおいては要素数 307, 節点数 885 であるが、き裂進展モデルでは要素数は同数であるが、節点数は 2 つ増え 887 となる。なお、き裂面が接触した場合の摩擦条件としては Coulomb の摩擦条件を用い、その際の摩擦係数は 0.3 とした。

標準モデルにおいて式 (1) の経路積分を実行する積分経路は図-4 (c) のような斜めき裂の右進展側先端を囲む経路 1, 2, 3 と、斜めき裂両側先端を囲む経路 4, 5 の計 5 本とした。集中荷重を a/d が 2.32 および 3.89 の位置に載荷した際に斜めき裂右上先端が元のき裂と同方向 ( $\theta=0^\circ$ ) に進展した場合の各積分経路でのエネル

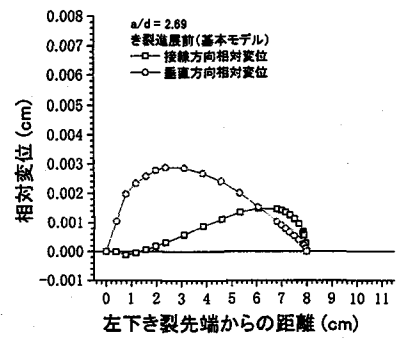
ギ解放率を示したものが図-5 である。ここで、図中のエネルギー解放率は a/d が 2.32 の場合の経路 5 の値で無次元化してある。図のように荷重載荷点や支点などで応力集中が起きるためと推測される原因により若干の経路誤差を含むようであるが、本論文の趣旨が部材の耐力を予測する事ではなく、部材内のき裂の変形状態やどのき裂がどの方向に進むかというき裂の進展挙動を考察する事にあるので問題無い程度の誤差であると考えた。よって以後、すべてのモデルにおいて物体境界上に設定した経路 5 の値を持って議論を進めることとする。また以後、エネルギー解放率は、 $l_i$  が 9cm,  $l_b$  が 9cm,  $\beta$  が 45 度であるこの標準モデルにおいて a/d が 2.32 の位置に載荷



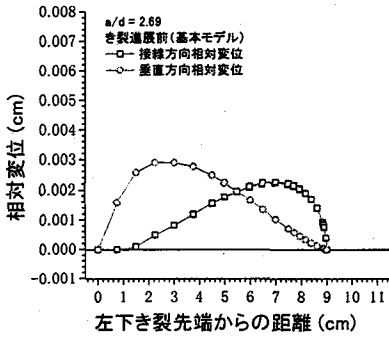
(a)  $l_b=9\text{cm}$ ,  $l_i=6\text{cm}$ ,  $\beta=45$  度



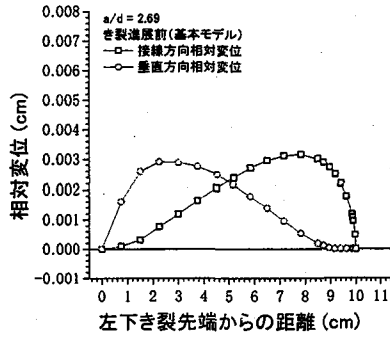
(b)  $l_b=9\text{cm}$ ,  $l_i=7\text{cm}$ ,  $\beta=45$  度



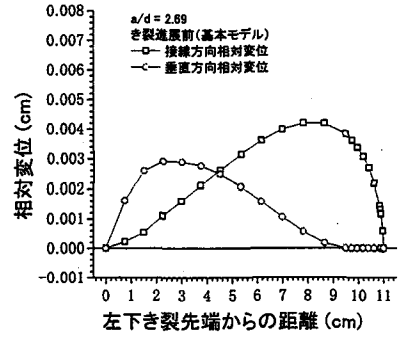
(c)  $l_b=9\text{cm}$ ,  $l_i=8\text{cm}$ ,  $\beta=45$  度



(d)  $l_b=9\text{cm}$ ,  $l_i=9\text{cm}$ ,  $\beta=45$  度



(e)  $l_b=9\text{cm}$ ,  $l_i=10\text{cm}$ ,  $\beta=45$  度



(f)  $l_b=9\text{cm}$ ,  $l_i=11\text{cm}$ ,  $\beta=45$  度

図-7 斜めき裂の長さが異なる場合の、斜めき裂面上の接線方向および法線方向相対変位； $a/d=2.69$ ,  $l_i=6, 7, 8, 9, 10, 11$ ,  $\beta=45$  度。

された場合に、斜めき裂が元のき裂と同方向 ( $\theta=0$  度) に進展した際のエネルギー解放率で無次元化をすることとする。

### (1) 斜めき裂の長さを考慮したモデル

仮定した斜めき裂の長さによる影響を調べるため、標準モデルと同様に、曲げき裂の長さ  $l_b$  は 9cm、斜めき裂の角度  $\beta$  を梁軸から 45 度のまま変化させないで、斜めき裂の長さ  $l_i$  を 6cm から 11cm まで 1cm 毎に変化させた 5 つのモデルを考えた。その際、標準モデルの斜めき裂の左下先端の位置を変えず、右上先端の位置を変化させる事で斜めき裂の長さを変化させた。用いた有限要素モデルを図-6 (a) ~ (e) に示す。

### (2) 複数の曲げき裂を考慮したモデル

供試体下部に発生する曲げき裂が複数存在する場合の影響を調べるために、標準モデルに対して供試体中央から 20cm のところに長さ  $l_{bB}=4\text{cm}$  の曲げき裂 B を導入したモデルを考えた。用いた有限要素モデルは図-6 (f) である。

### (3) 斜めき裂の角度を考慮したモデル

仮定した斜めき裂の角度の影響を調べるために、標準モデルと同様に、曲げき裂の長さ  $l_b$  を 9cm、斜めき裂の長さ  $l_i$  を 9cm とし、斜めき裂の角度  $\beta$  を 30 度、60 度と

変化させたモデルを考えた。  $\beta$  が 30 度の時のモデルを図-6 (g)、  $\beta$  が 60 度の時のモデルを図-6 (h) に示す。

## 3. 解析結果

### 3.1 斜めき裂の長さを考慮したモデル

図-7 に斜めき裂の長さ  $l_i$  を 6cm から 11cm まで 1cm 毎に変化させた時の基本モデルにおける斜めき裂面上の相対変位を示す。  $a/d$  が 2.69 の場合についてまとめている。図の横軸は斜めき裂左下先端からの距離であり、図中口はき裂上下面での接線方向 (モード II 的) 相対変位を表し、○は垂直方向 (モード I 的) 相対変位を表す。接線方向相対変位が正のときはき裂面が右にずれている事を示し、負のときは左にずれている事を示している。また垂直方向相対変位が正の時はき裂面が開いていることを示している。

斜めき裂の長さ  $l_i$  が 6cm の場合、左右両先端でちょうど逆向きのせん断を受けた混合モードである事が推測できる。

$l_i$  が 7cm, 8cm になると斜めき裂の右上先端がモード II 型、左下先端がモード I 型の変形が卓越して行き、  $l_i$  が 9cm になるとモード I 型の変形とモード II 型の変形

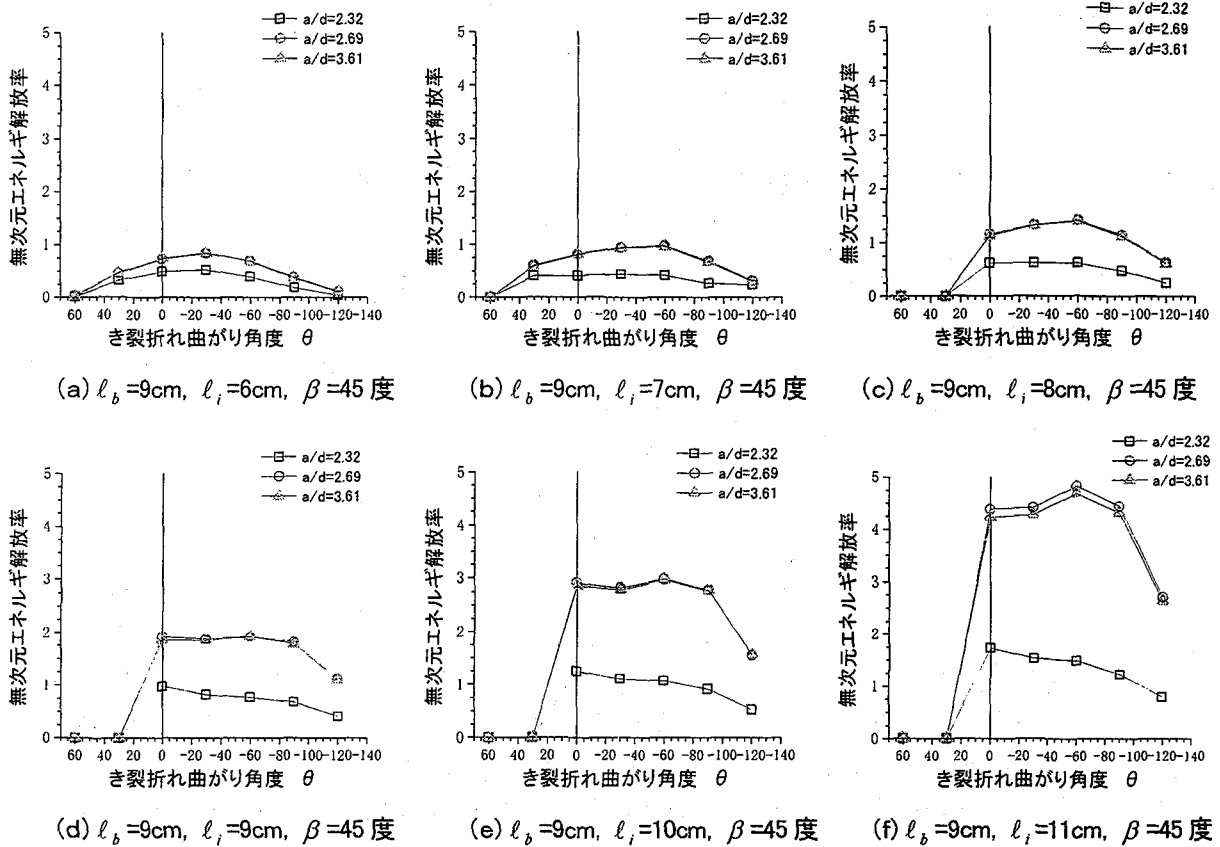


図-8 斜めき裂のき裂折れ曲がり角度とエネルギー解放率の関係

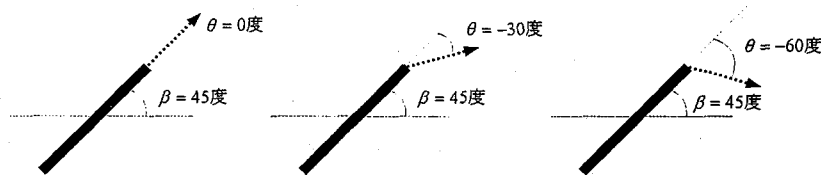


図-9  $\beta = 45$ 度の斜めき裂と、き裂折れ曲がり角度

が中央付近で折かえしたような左右反対称形をしており、左下き裂先端はモードI状態、右上き裂先端はモードII状態であると推測できる。

$l_i$ が10cm, 11cmになると右上き裂先端付近で垂直方向相対変位がゼロとなり接触しながらせん断を受けている状態となっている。

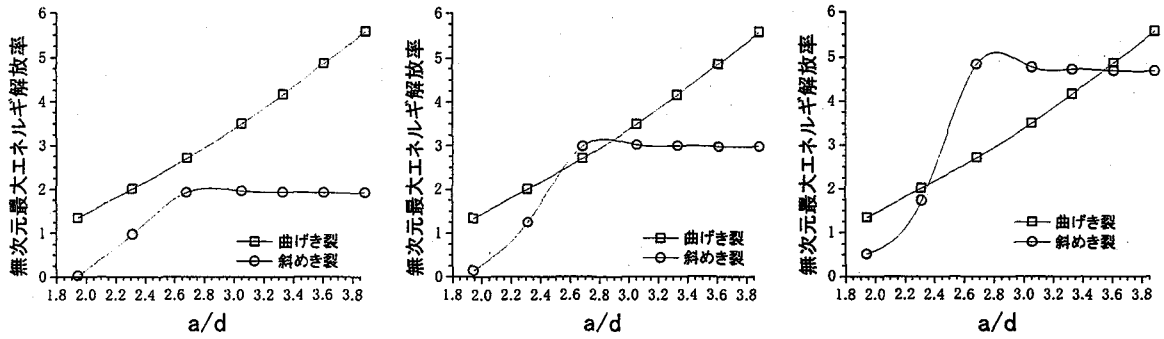
図-8に斜めき裂の長さ $l_i$ を6種類変化させた場合の、き裂折れ曲がり角度に対するエネルギー解放率を示す。それぞれ、せん断スパン比 $a/d$ が2.32, 2.69および3.61の結果を示してある。ここで、斜めき裂の長さ $l_i$ が6cmから9cmまでは、曲げき裂進展時のエネルギー解放率が大きい、はり全体の破壊として危険なせん断破壊に関連する斜めき裂が進展すると仮定し議論する。

$l_i$ が6cmでは、どの $a/d$ であっても-30度あたりでエネルギー解放率が最大になるため、元のき裂から約30度右

側に傾いて進展することになる。

$l_i$ が7cmであると $a/d$ が2.69と3.61の荷重位置では-60度あたりでピークを持つため、 $l_i$ が6cmのモデルよりさらに右に大きく折れ曲がって進む。 $a/d$ が2.32の荷重位置では40度から-60度あたりまで扁平になるため、どの方向に進展してもおかしくない状態となる。また $a/d$ が2.69の荷重位置ではき裂折れ曲がり角度が60度でエネルギー解放率が0になっており、このときのき裂進展後の状況としてはき裂の折れ曲がり部が接触している状態となっていた。

$l_i$ が8cmのモデルになると $a/d$ が2.69と3.61の荷重位置では、 $l_i$ が7cmで $a/d$ が2.69と3.61の場合と、き裂折れ曲がり角度が-60度でエネルギー解放率が最大となる傾向は変わらないが、 $a/d$ が2.32の荷重位置では、き裂折れ曲がり角度30度で前述の傾向が見られるためエネルギー解放率が0になり扁平な領域が狭くなった。



1)  $l_b=9\text{cm}, l_i=9\text{cm}, \beta=45^\circ$     2)  $l_b=9\text{cm}, l_i=10\text{cm}, \beta=45^\circ$     3)  $l_b=9\text{cm}, l_i=11\text{cm}, \beta=45^\circ$

図-10 せん断スパン比と最大エネルギー解放率の関係

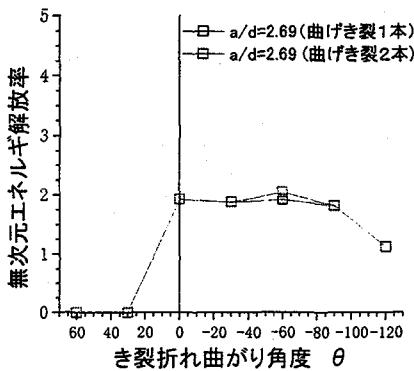


図-11 曲げき裂を追加した際の斜めき裂のき裂折れ曲がり角度とエネルギー解放率の関係 ;  $a/d=2.69$ .

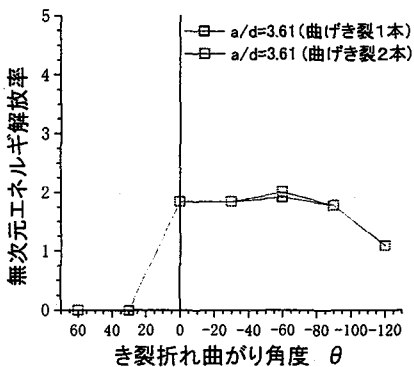


図-12 曲げき裂を追加した際の斜めき裂のき裂折れ曲がり角度とエネルギー解放率の関係 ;  $a/d=3.61$ .

$l_i$  が 9cm のモデルになると  $a/d$  が 2.69 と 3.61 でも扁平な領域が存在するようになるが、 $a/d$  が 2.32 では 0 度で最大になり、元のき裂と同方向に進展する挙動を示す。この傾向は  $l_i$  が 10cm のときでも同じであった。

$l_i$  が 11cm の傾向は、ほぼ同じで  $a/d$  が 2.32 では元のき裂と同方向に進展するが、他の 2 つの  $a/d$  では -60 度あたりにピークを持つようになり、大きく折れ曲がっ

て進展することになる。

斜めき裂は、実験ではその発生位置や進展方向が限定できないが、この解析から判断する限り、 $l_i$  が 6cm と 7cm では、き裂折れ曲がり方向に対してエネルギー解放率は平坦な領域を持ち、どの方向に進展するかはコンクリートの破壊特性の非均質性に関係してくるものと考えられる。

図-10 には斜めき裂の長さ  $l_i$  が 9cm から 11cm のモデルに対して、せん断スパン比  $a/d$  を 7 種類変化させた時の最大エネルギー解放率の変化を曲げき裂、斜めき裂双方についてまとめた。斜めき裂の長さ  $l_i$  が 9cm のモデルでは斜めき裂のエネルギー解放率は、曲げき裂のそれを上回ることはなく、斜めき裂が進展することはないが、 $l_i$  が 10cm になると斜めき裂の最大エネルギー解放率が曲げき裂のそれより大きくなる部分が現れ、その領域に対しては斜めき裂が進展することになる。斜めき裂の長さが長くなるほどその領域は広くなり、エネルギー解放率の大きさそのものも考慮すると斜めき裂の長さが長くなるほど斜めき裂は進展しやすくなることがわかる。

以上の事を総合的に解釈すると、 $l_i$  が 6cm と 7cm では最大エネルギー解放率の値が変わらないので、このあたりの長さでは、き裂は荷重に対して安定的に進展するが、それ以上の長さになると最大エネルギー解放率は大きくなり、荷重に対して不安定に進展する。この事は斜めき裂の急激な進展を表現していると考えられる。また  $a/d$  が 2.69 の載荷位置で、 $l_b=9\text{cm}, l_i=10\text{cm}, \beta=45^\circ$  であると、斜めき裂のエネルギー解放率が曲げき裂のエネルギー解放率より大きく、元のき裂と同方向に進展する事が予想される結果が得られた。またその際の斜めき裂の先端付近では、接触しながらせん断を受ける状態である事が分かった。このようにせん断破壊と関連すると考えられる斜めき裂が急激に進展する条件が、破壊力学的な手法により見出せる可能性が示唆されている。

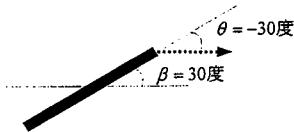
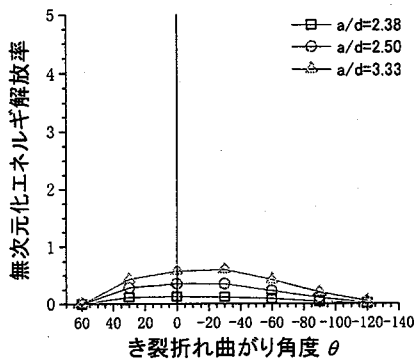


図-13 斜めき裂の角度を 30 度とした時の斜めき裂のき裂折れ曲がり角度とエネルギー解放率の関係

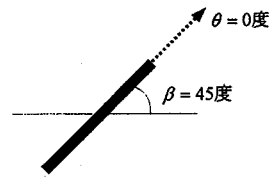
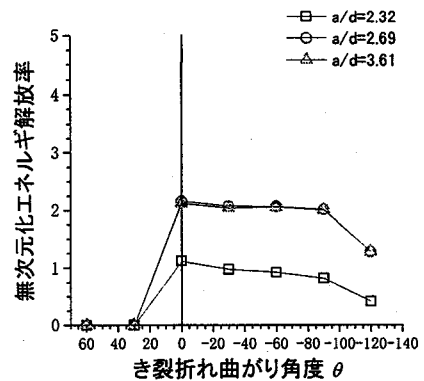


図-15 引張り鉄筋比を 5%とした時の斜めき裂のき裂折れ曲がり角度とエネルギー解放率の関係

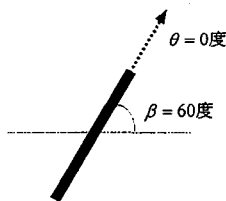
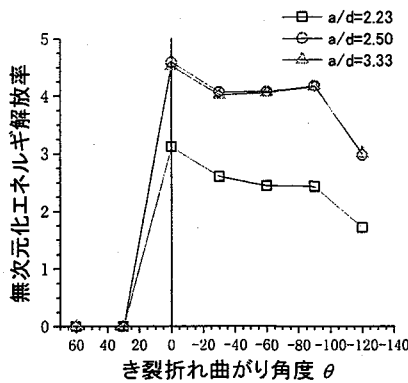


図-14 斜めき裂の角度を 60 度とした時の斜めき裂のき裂折れ曲がり角度とエネルギー解放率の関係

なる。しかしその違いはわずかで、前にも述べたようにコンクリートの破壊特性の非均質性を考慮すると、き裂の進展方向は 0 度から -90 度の間のどの方向にも進展する可能性を持つ。

### 3.3 斜めき裂の角度を考慮したモデル

図-13は斜めき裂が梁軸に対して 30 度の角度を持つ場合のエネルギー解放率をき裂折れ曲がり角度に対して表したものである。せん断スパン比  $a/d$  は 2.38, 2.50, 3.33 としたが、いずれも -30 度あたりでピークを持っており、もとのき裂の方向から右に 30 度程度傾いて（すなわちほぼ水平の方向へ）進展することがわかる。

図-14は斜めき裂の傾きが 60 度の場合である。 $a/d$  は 2.23, 2.50, 3.33 の場合を考えたが、き裂折れ曲がり角度が 0 度でピークを示し、元のき裂と同方向に進んでいくことが分かる。斜めき裂が 60 度の角度を持つような例は、実験では斜めき裂が十分に発達したときに多く見られる状況である。60 度の角度を持つき裂は 45 度の角度を持つき裂より大きな最大エネルギー解放率を示し、斜めき裂が進展してこの角度を持つ場合には、き裂は 45 度で伸びる場合に比べて、さらに進展しやすい状況になる。

### 3.2 複数の曲げき裂を考慮したモデル

図-11, 図-12は 2.2 (2) で示したような、標準モデルにさらに曲げき裂を追加した場合の、斜めき裂先端でのエネルギー解放率とき裂折れ曲がり角度の関係である。図中に示すように  $a/d$  は 2.69 と 3.61 についてまとめた。ここでは実験でよく見られるような曲げき裂の閉塞は見られなかった。実際に曲げき裂が閉塞するようなモデルを解析するには曲げき裂 B をもう少し供試体中央に近づける必要があるようである。斜めき裂先端でのエネルギー解放率に関しては、曲げき裂を追加する事により -60 度でのエネルギー解放率に影響が出て、その方向で最大と

### 3.4 引張り鉄筋比を変化させたモデル

最後に引張り鉄筋比を 5%として解析を行った結果が図-15である。曲げき裂、斜めき裂とも 9cm で  $a/d$  は 2.32, 2.69, 3.61 であり、エネルギー解放率を折れ曲がり角度に対して示している。ここでは引張り鉄筋比が 1.2%のときは異なり、き裂先端から離れた荷重位置  $a/d$  が 3.61 の場合でも元のき裂と同方向に進展する時のエネルギー解放率が最大となった。また 5%のモデルが 1.2%モデルより



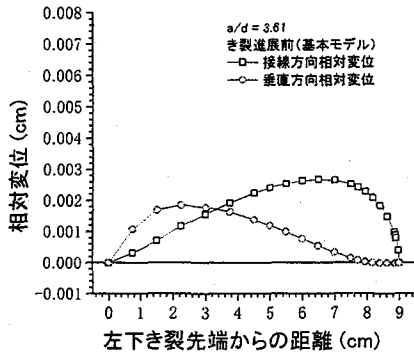


図-16 引張り鉄筋比を5%, a/dを3.61とした時の斜めき裂面上の接線方向および法線方向相対変位図

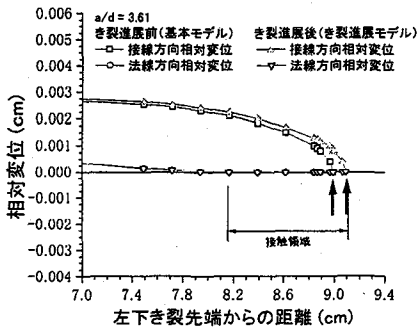


図-17 引張り鉄筋比を5%, a/dを3.61とした時の斜めき裂右上先端付近での接線方向および法線方向相対変位図

若干エネルギー解放率が大きくなるため、斜めき裂に対しては引張り鉄筋比を上げるにより若干き裂が進展しやすくなることになる。なお本研究では斜めき裂の急激な進展にのみ着目しており、最終的な耐荷力を予測する目的ではないので、鉄筋のダウエル効果などの鉄筋の影響は考えていない。当然、最終的な耐荷力まで議論する場合は、その影響を十分に考慮する必要がある。

その時のき裂面上およびき裂先端付近の相対変位を示したものが図-16, 図-17である。図の横軸は斜めき裂の左下き裂先端からの距離を表しており、縦軸はき裂上下面での接線方向(モードⅡ的)および垂直方向(モードⅠ的)相対変位を表している。図-16より斜めき裂左下先端付近では垂直方向(モードⅠ的)相対変位が支配的な混合モード状態にあることが分かる。右上先端付近では垂直方向相対変位はゼロとなっており、接線方向(モードⅡ的)相対変位のみである事が分かる。つまり接触しながらせん断的な変形をする圧縮せん断状態であることが分かる。

図-17は斜めき裂左上先端付近のき裂進展前(基本モデル)および、き裂進展後(き裂進展モデル)の相対変位を表したものである。この図から、き裂進展前、進展後共に同一の場所から接触しており、せん断的(モードⅡ的)に直進方向に進展する事が分かる。

図-18は引張り鉄筋比を3%および5%とした場合のa/dと最大エネルギー解放率の関係である。ここで鉄筋比が

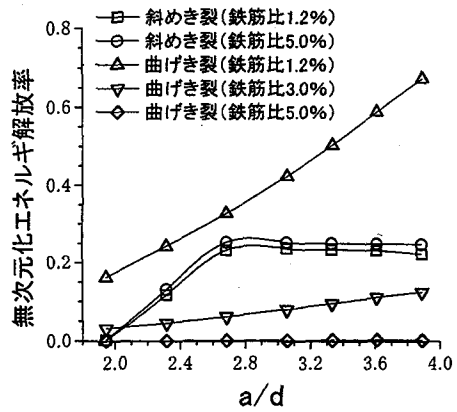


図-18 引張り鉄筋比を5%とした時のせん断スパン比と最大エネルギー解放率の関係

3%の時の曲げき裂のエネルギー解放率は、鉄筋比が12%の時より大きく低下している事が分かる。さらに鉄筋比5%では曲げき裂のエネルギー解放率は、ほぼゼロとなり曲げき裂は停留し、斜めき裂が進展する事が分かる。また斜めき裂のエネルギー解放率は5%のモデルが12%のモデルより若干大きくなるため、斜めき裂に対しては引張り鉄筋比を上げる事により若干き裂が進展しやすくなる事になる。このあたりがカーニによるせん断の谷を表現するまでは言及できないが、さらに多くの種類のき裂を解析することにより、その可能性を持つ。

#### 4. おわりに

1. 斜めき裂の長さが長くなるにつれ、き裂先端付近ではき裂面が開き左右両先端で逆方向のせん断を受ける混合モード状態から、左下き裂先端がモードⅠ型、右上先端がモードⅡ型の変形が卓越して行き、最後に右上先端が接触しながらせん断を受ける圧縮せん断へと移り変わることが分かった。
2. 斜めき裂の長さが10cmのとき、曲げき裂より斜めき裂が進展し易いa/dの領域が生じ、さらに長くなるとその領域が拡大する傾向が見られた。
3. 曲げき裂を追加することにより、斜めき裂が-60度の方角に進展し易い傾向が見られた。
4. 梁軸に対しての斜めき裂の角度を変えることにより30度の傾きを持つ斜めき裂は-30度の方角に進展し、60度の傾きを持つ斜めき裂は、元のき裂と同じ方向に進展しやすいことが分かった。
5. 鉄筋比を上げることにより、曲げき裂より斜めき裂が進展し易くなることが分かり、またその際、斜めき裂は圧縮せん断の状態で元のき裂と同方向へ進展していくことが分かった。

以上のように解析したそれぞれのモデルにおいて興味を持つ変形、進展挙動を見出した。鉄筋コンクリートの破壊を、その破壊モードを含めて考察するには、解析用

に評価した破壊靱性を用いての、き裂の進展、その時の鉄筋応力の監視等が重要になる。今後はさらに進んだ議論が必要になろう。

#### 参考文献

- 1) Erdogan, F. and Sih, G. C. : On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *ASTM, J. of Basic Engng.*, Vol. 85, pp. 519-527, 1963.
- 2) Sih, G. C. : Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems, *Int. J. Fract.*, Vol. 10, No. 3, pp. 305-321, 1974.
- 3) 佐藤 清 : モード I ・モード II 組合せ応力負荷の下での建築材料の破壊, *材料*, 第 34 巻, 第 447 号, pp. 1676-1681, 1990.
- 4) 橋本堅一, 鱸 洋一, 矢富盟祥 : 鉄筋コンクリート梁内のき裂の進展挙動と破壊モードに関する研究, *応用力学論文集*, Vol.2, pp.21-28, 1999.
- 5) Barsoum, R.S. : On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 10, pp. 25-37, 1976.
- 6) Barsoum, R.S. : Triangular quarter-point elements as elastic and perfectly-plastic crack tip elements, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 11, pp. 85-98, 1977.
- 7) 鱸洋一, 矢富盟祥 : 荷重履歴に伴う摩擦力が存在する進展き裂の E 積分の有限要素解析, *応用力学論文集*, Vol.1, pp.45-53, 1998.
- 8) 矢富盟祥, 鱸洋一 : 圧縮荷重下にある進展き裂の E 積分によるエネルギー解放率の有限要素解析, *土木学会論文集*, No.612, I-46, pp.251-263, 1999.

(1999年9月17日受付)