

き裂と切欠きにおける大規模降伏条件下の力学的厳しさの尺度

藤崎, 渉

<https://doi.org/10.11501/3078956>

出版情報：九州大学, 1994, 博士（工学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：



第 4 章

非線形き裂力学

本章では大規模降伏条件下におけるき裂材の強度評価方法である非線形き裂力学の物理的背景を検討する。

4.1 緒言

本章では、線形き裂力学の拡張である非線形き裂力学の物理的背景を、まず引張りをうける中央き裂材を対象に有限要素解析により検討する^{(1)~(3)}。非線形き裂力学の有効性については、6章において検証する。

なお、本研究ではモードIのみについて基本的な考え方を示すが、この考え方は当然他のモードについても同様に適用できる。

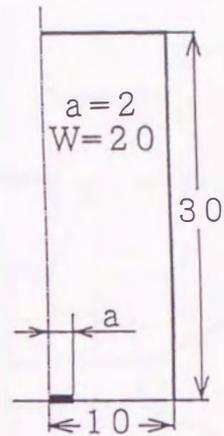
4.2 有限要素解析

本章において使用するひずみに関する記号を表4-1に示す。計算に用いた中央き裂材の形状は図4-1に示す通りである。 $2a/W=0.2$ (w :板厚, a :き裂半長)で、き裂半長 a を2.6mmと変えた相似形き裂材(図4-1のC-1材とC-2材)および $w=60\text{mm}$, $a=2\text{mm}$ のC-3材について計算を行った。なお、解析はMisesの降伏条件を用い、平面応力状態として行った。有限要素法により得られる値は必ずしも真の値ではないので、き裂材同士で比較するためには、き裂材のき裂先端近傍の要素分割方法は w , a とは無関係にそれぞれ同一にする必要がある(図4-2)。最小要素長はき裂材では0.037mmとした。真応力-対数ひずみ線図は図4-3に示す。非線形方程式の解法はニュートン・ラプソン法による増分解法を用い、大変形問題の定式化ではアップデート・ラグランジュ法を用いた。また、J積分の計算はPark'sの方法⁽⁴⁾によった。

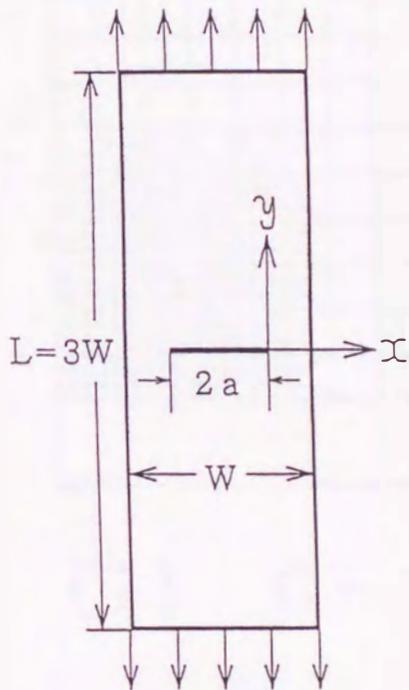
表 4-1 使用するひずみに関する記号の説明

ε_{\max}^p	maximum plastic strain
ε_y^p	plastic strain in tensile direction
$\varepsilon_{\max, FEM}^p$	plastic strain in the 1st element obtained by FEM
$\bar{\varepsilon}_{\max, FEM}^p$	equivalent plastic strain in the 1st element obtained by FEM

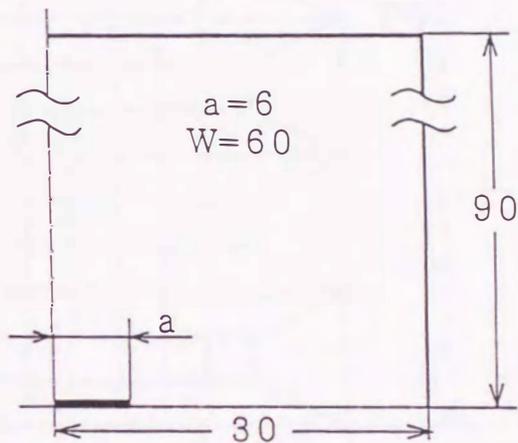
W mm	a mm	ρ mm
20	2	0
60	6	0
60	2	0



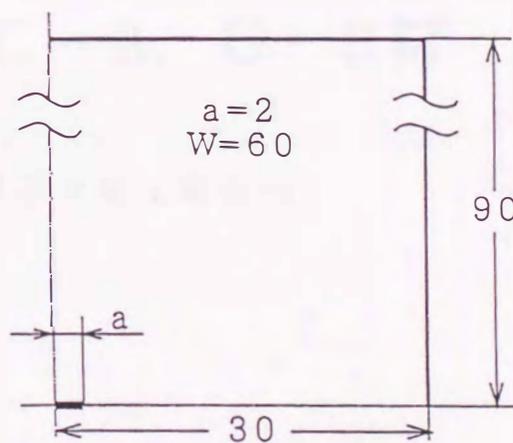
(i-a) C-1材



(i) き裂材 (C材)

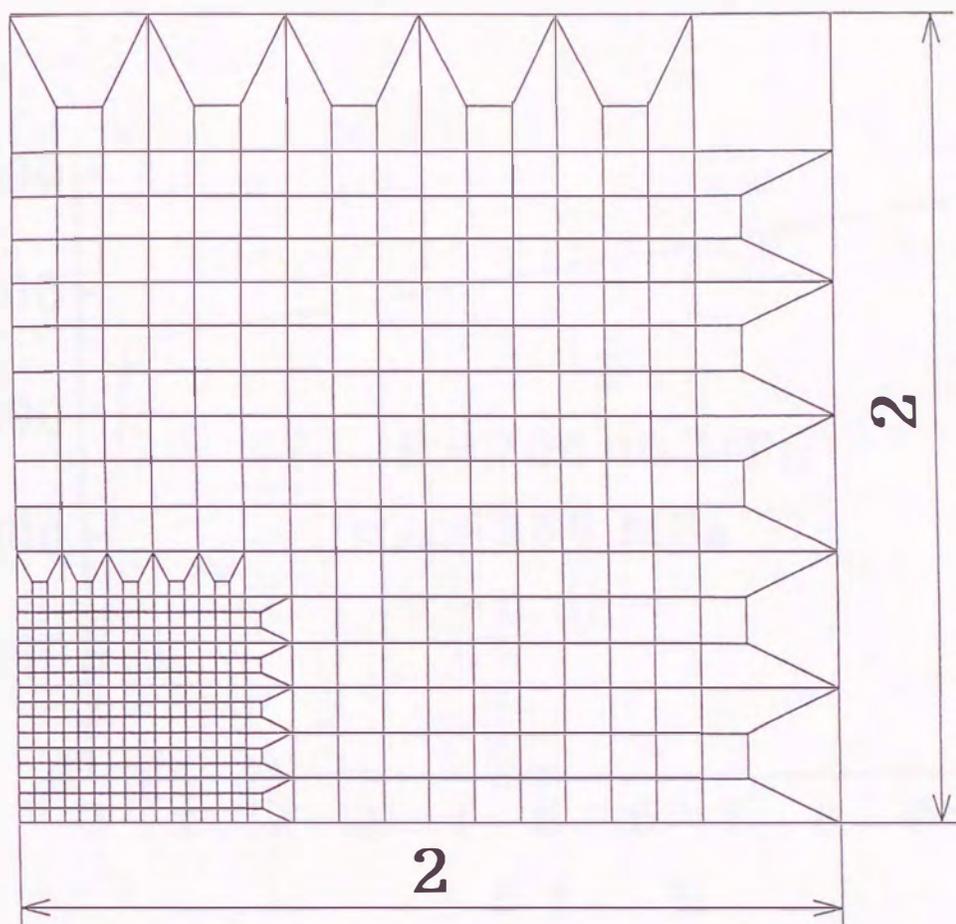


(i-b) C-2材



(i-c) C-3材

図4-1 FEM解析に用いたき裂材の形状・寸法 (単位 mm)



(i) C-1, C-2, C-3材

図4-2 き裂先端近傍の要素分割 (単位mm)

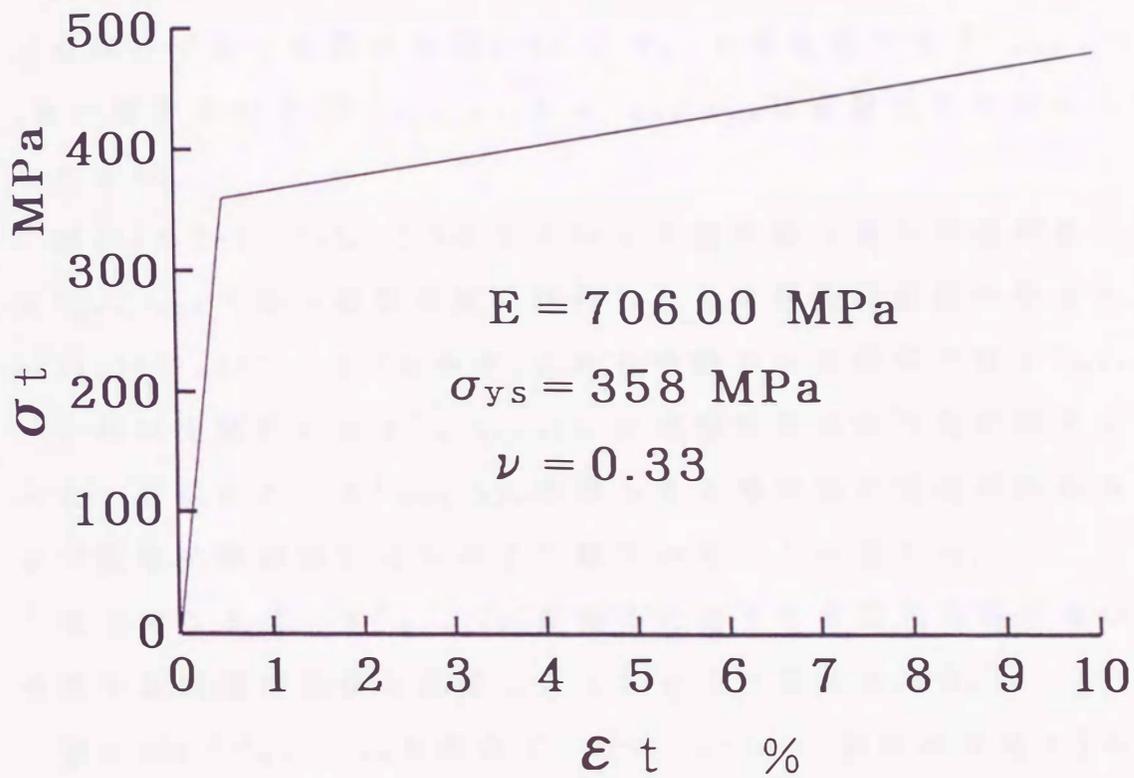


図4-3 FEM解析に用いた真応力-対数ひずみ曲線

4.3 $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ がき裂材における弾塑性応力場の支配因子

有限要素解析により得られた相似形き裂材 (C-1, C-2材) の公称応力-公称ひずみ曲線を図4-4に示す。ここで, 公称応力は遠方公称応力であり, 公称ひずみは図4-1のL間の平均ひずみである。

両き裂材のき裂先端の第1要素の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ と公称ひずみ ϵ の関係を図4-5に示す。き裂先端では $\bar{\epsilon}^P_{max}$ と ϵ^P_{max} は一致するので, $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ と $\epsilon^P_{max, FEM}$ は実質的には同一とみなしてよい。

図4-1のC-1, C-2, C-3材においてき裂先端の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ (第一要素の値) が同じときの塑性域進展の様子を図4-6(i), (ii), (iii), 4-7に示す。これらの図からき裂材では $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ (これは実質的には $\epsilon^P_{max, FEM}$) が弾塑性応力場の支配因子であること, すなわち, $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ を揃えると塑性域の発達状況はき裂長さや板幅に無関係に互いによく似ていることが分かる。

以上のことは, $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ を揃えたときのき裂先端付近のひずみ分布やき裂開口形状の比較によってさらに明確となる。

図4-8は $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ を揃えて, C-1, C-2, C-3材における ϵ^P の分布を比較したものである。また, 図4-9は $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ を揃えてき裂開口形状を両材において比較したものである。これらの図からわかるように, $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ が同一であれば, ϵ^P の分布もまたき裂先端付近の開口変位も板幅やき裂長さに無関係に互いに極めてよく似ている。

特に注目すべきことは, C-1材の全断面降伏後のひずみ分布および開口変位とC-2, C-3材の小規模降伏条件下のひずみ分布および開口変位とを比較してもそれぞれよく似ていることである(図4-8, 4-9の $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}=0.17$ 同士の比較)。

したがって, 図4-6(i), (ii), (iii)を比較することにより, $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}=0.05$ 以下では, 同一ひずみ分布が $K = \text{一定}$ でも, $J = \text{一定}$ でも保証されるのに対して, $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}=0.13$ 以上では, 同一ひずみ分布

が $\bar{\varepsilon}^P_{m \cdot x, FEM}$ = 一定では保証されるが, K = 一定でも, J = 一定でも保証されないことが分かる。

以上のことから, 大規模降伏条件下でも, $\bar{\varepsilon}^P_{m \cdot x, FEM}$ のみによってき裂材における弾塑性応力場が一意的に決まることが分かる。

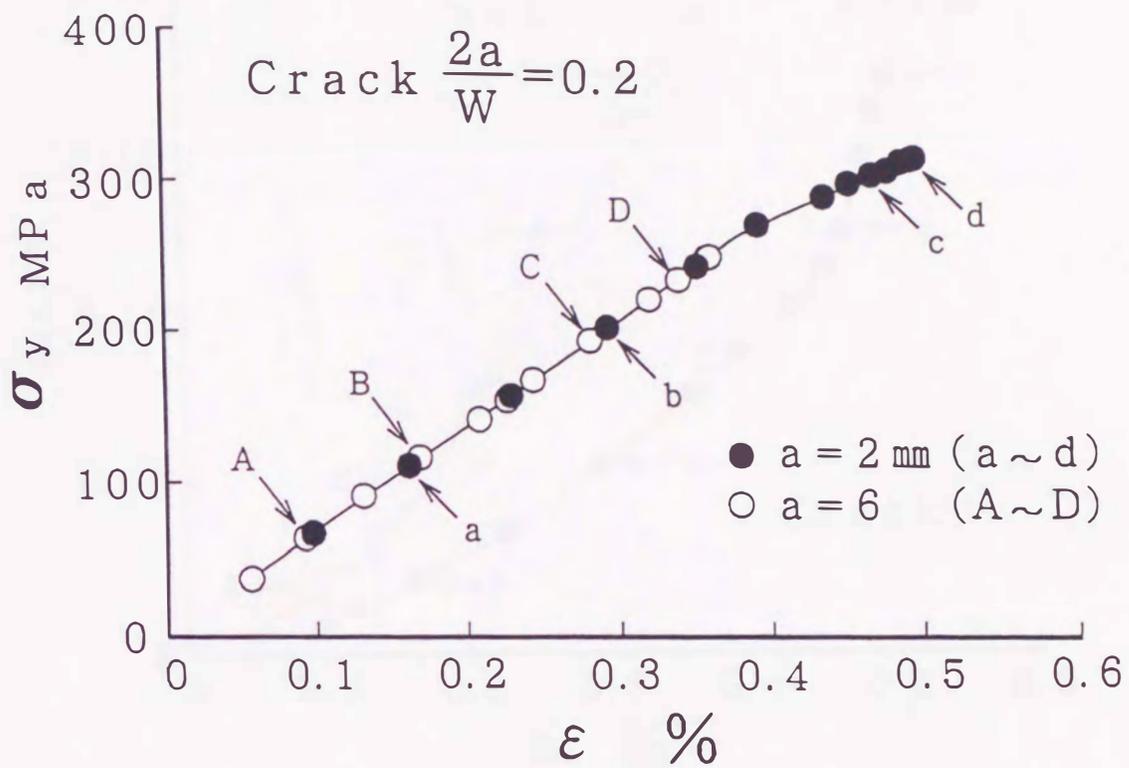


図4-4 き裂材の公称応力-公称ひずみ曲線 ($2a/W=0.2$, FEM)

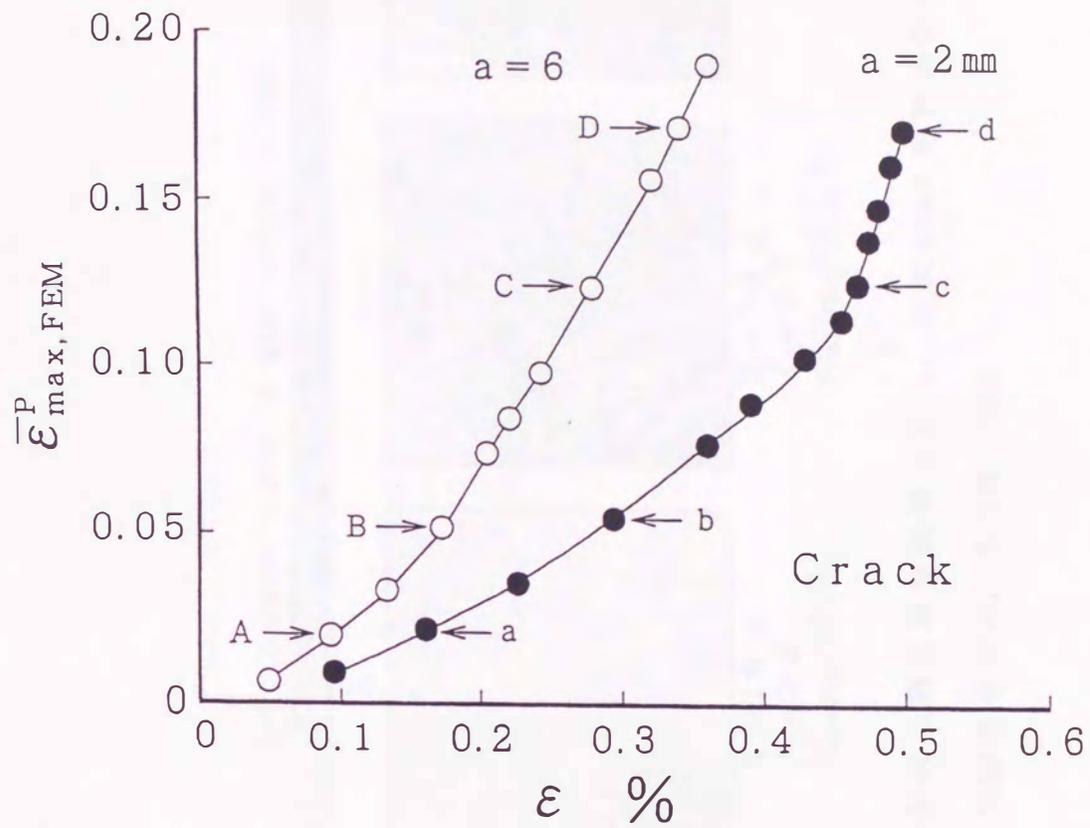


図4-5 き裂先端の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_{max, FEM}^P$ と公称ひずみ ϵ の関係 ($2a/W=0.2$, FEM)

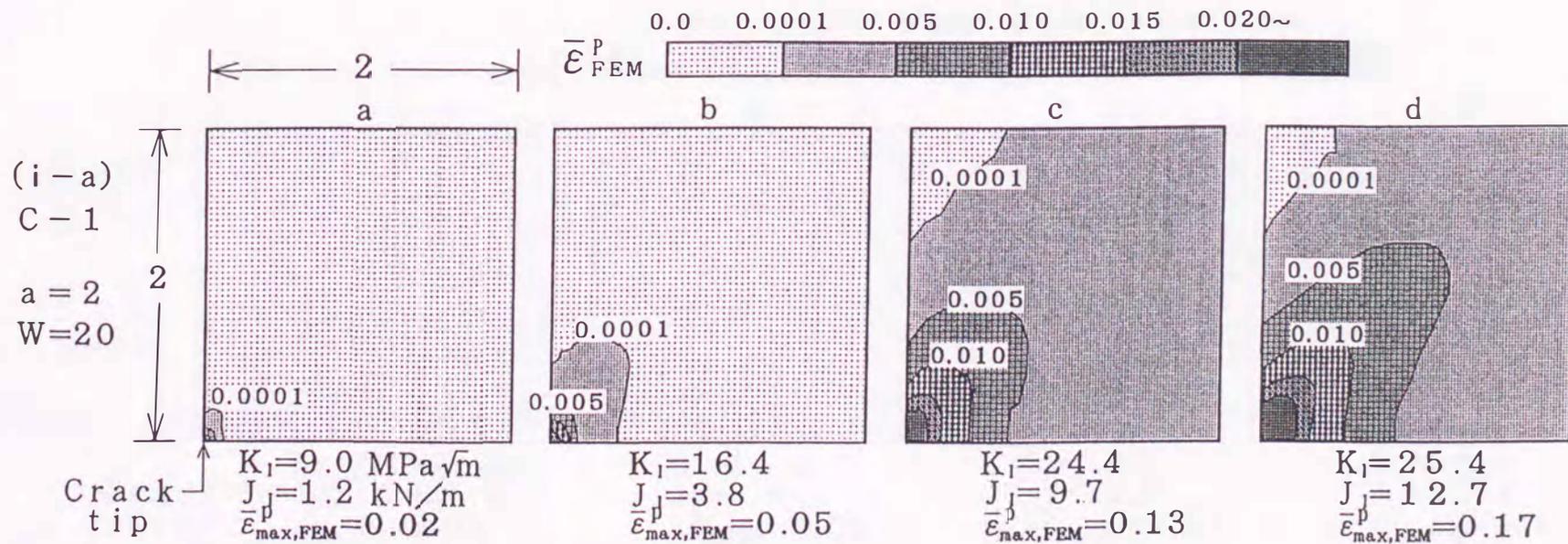


図4-6(i) き裂先端付近の塑性域の進展 ($\bar{\epsilon}_{FEM}^P$ はMisesの降伏条件に基づく相当塑性ひずみ, C-1材, FEM)

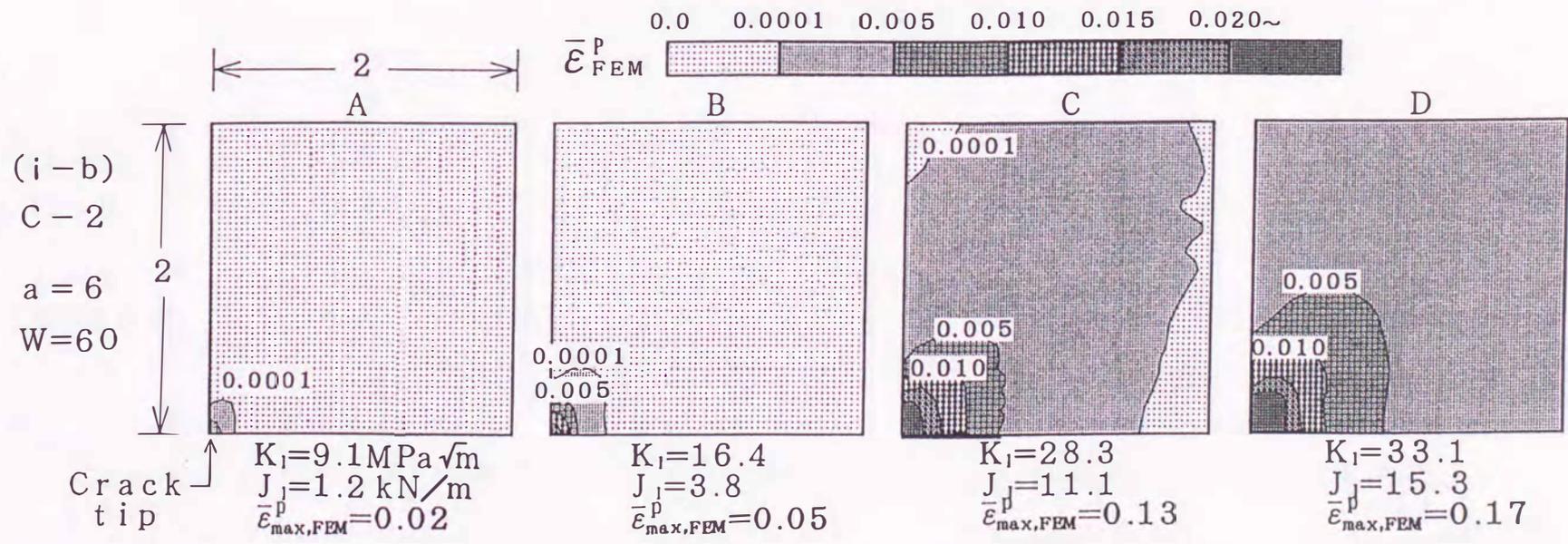


図4-6(ii) き裂先端付近の塑性域の進展 ($\bar{\epsilon}_{FEM}^p$ はMisesの降伏条件に基づく相当塑性ひずみ, C-2材, FEM)

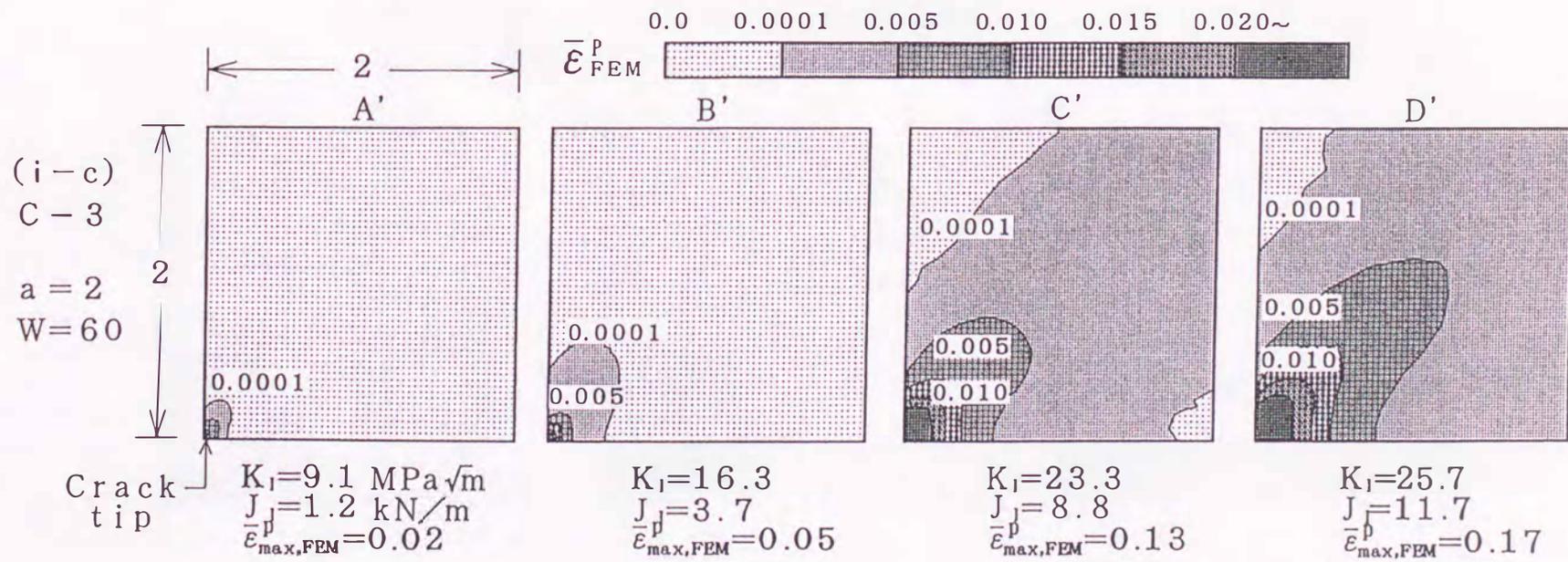


図4-6(iii) き裂先端付近の塑性域の進展 ($\bar{\epsilon}_{FEM}^p$ はMisesの降伏条件に基づく相当塑性ひずみ, C-3材, FEM)

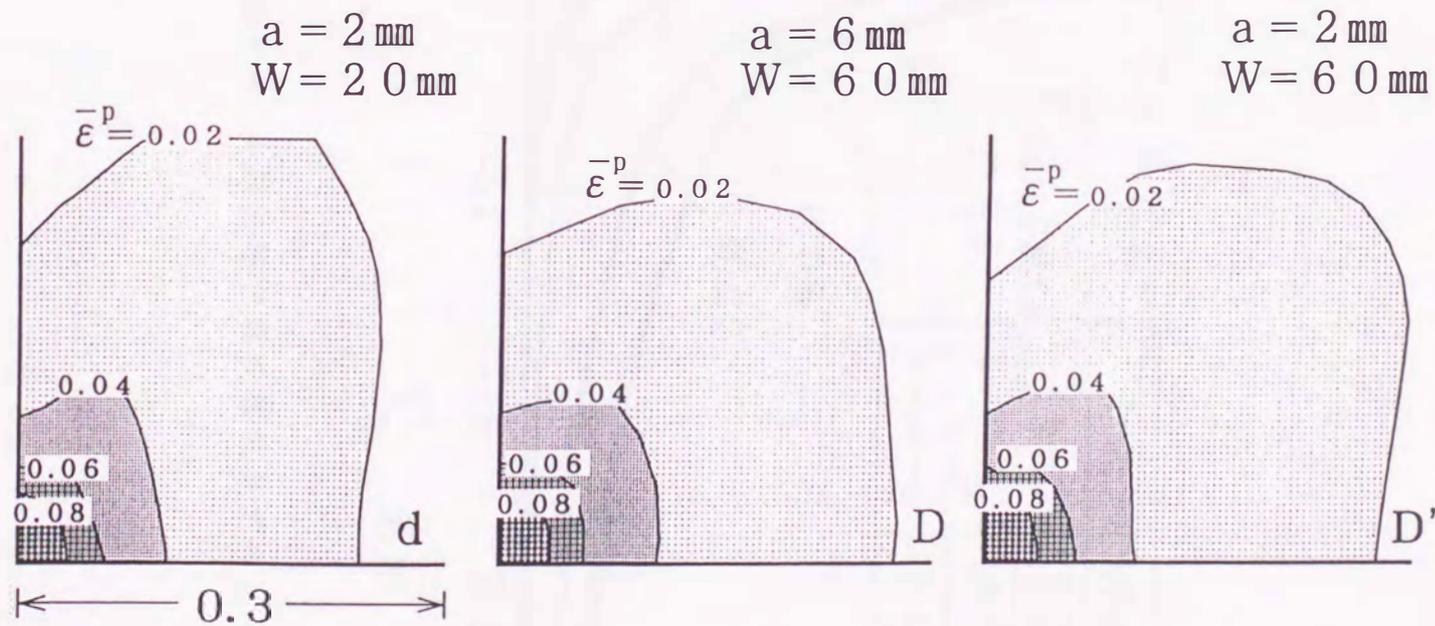


図4-7 き裂先端付近の塑性域(図4-6(i)d, (ii)D, (iii)D'の拡大図, FEM)

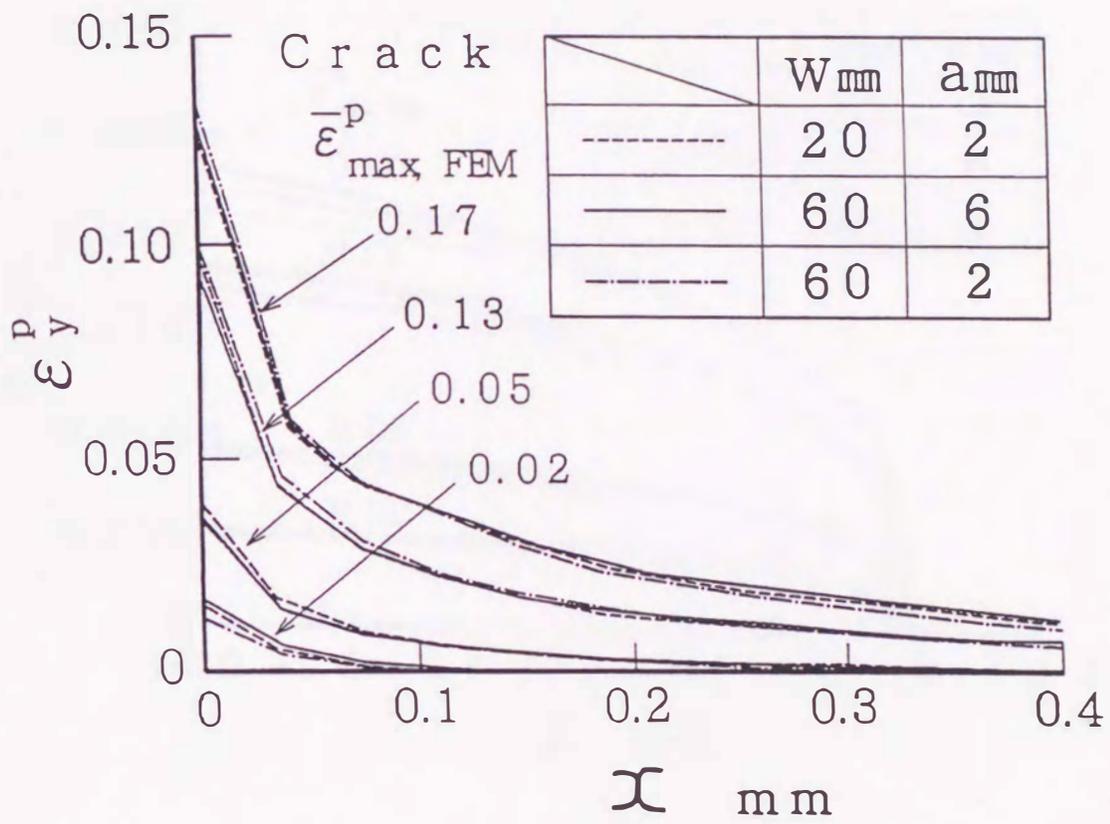


図4-8 き裂先端付近の塑性ひずみ ϵ^p の分布

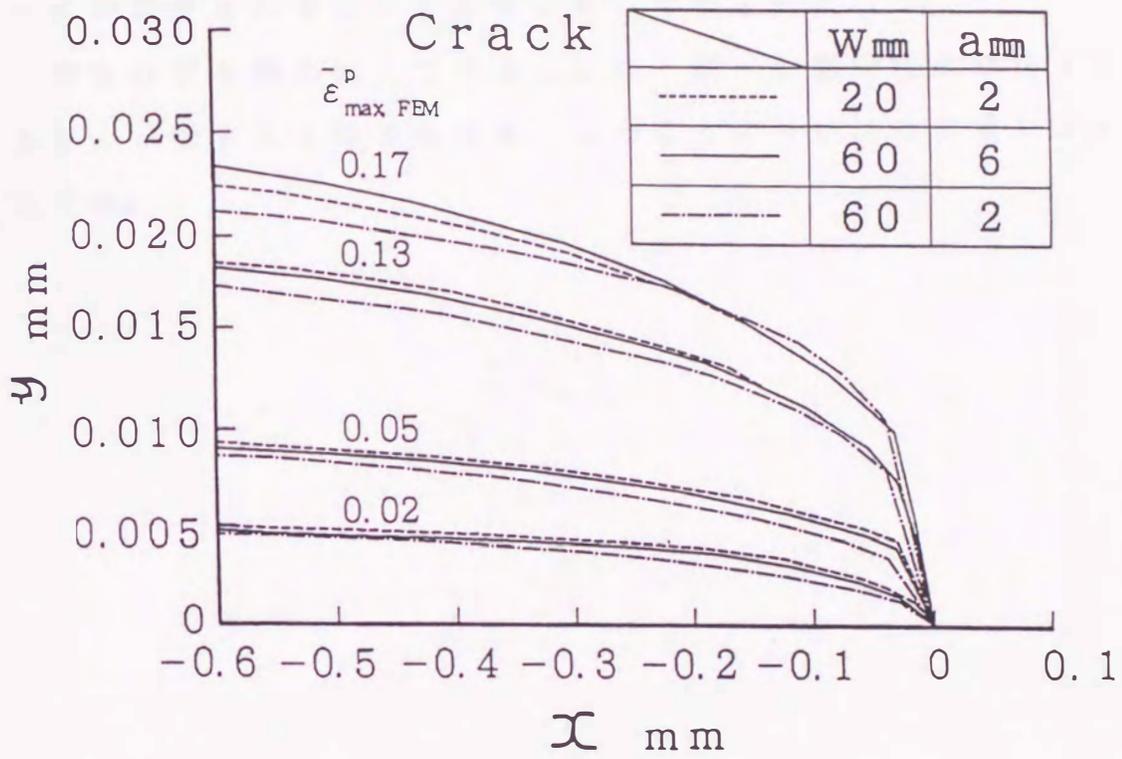


図4-9 き裂の開口変位

4.4 結 言

線形き裂力学の拡張である非線形き裂力学の物理的背景を有限要素解析を通じて明らかにした。まとめとして、非線形き裂力学の原理図を、線形き裂力学のそれと対比させて図4-10に示す。

試験片と実物で、最大塑性ひずみを揃えると、塑性ひずみ場の同一性が保証されることを本章において明らかにした。

塑性ひずみ場が同一であることは、同一の物理現象が生ずることを強く示唆するものであるが、このことについては6章において検証する。

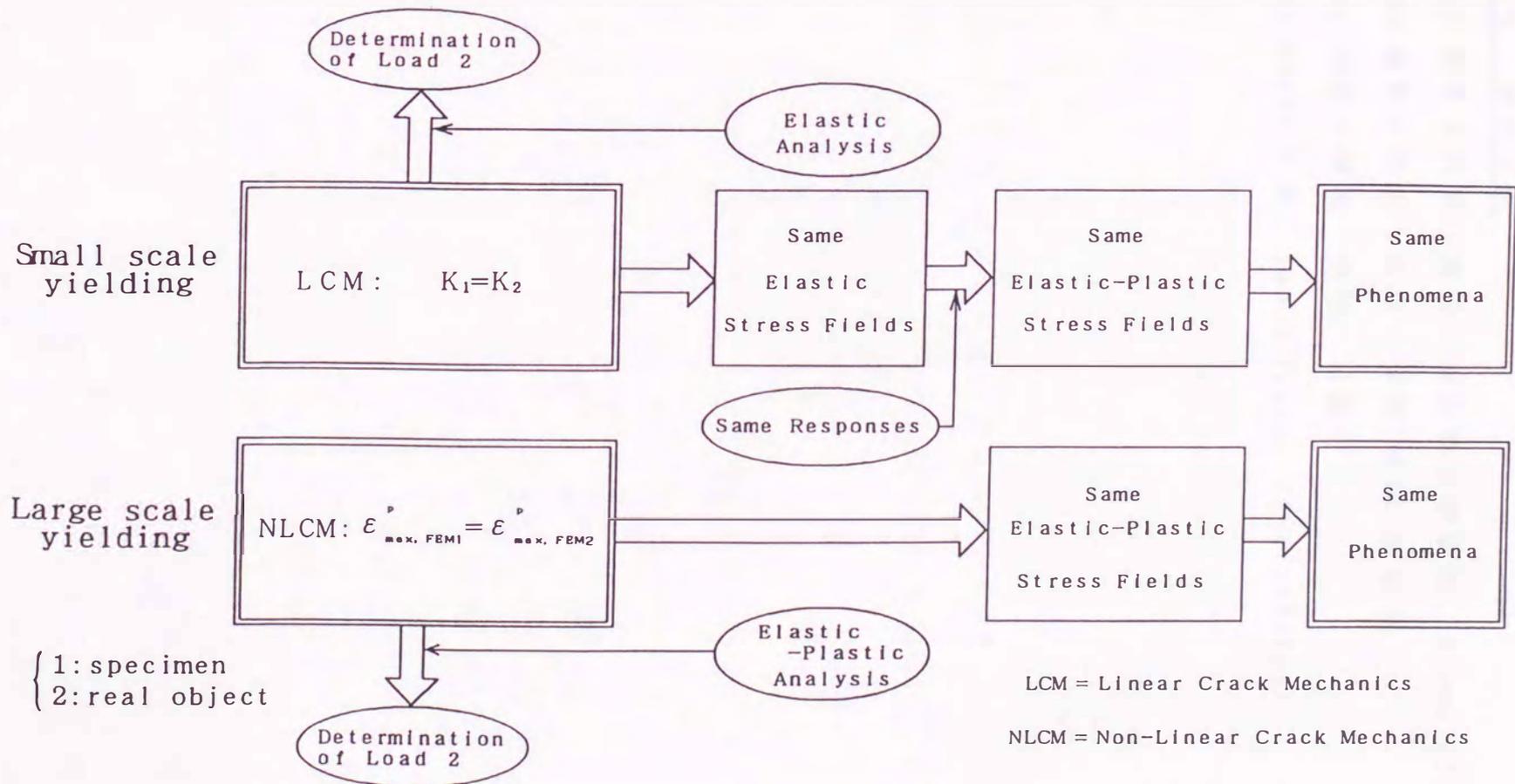


図4-10 非線形き裂力学の原理図

4.5 参考文献

- (1) 田中・秋田・高松, 材料強度学会誌, 13-4(1974)487.
- (2) 藤崎・西谷・田中・寺西, 機論, 投稿中.
- (3) 西谷・藤崎, 機論, 投稿中.
- (4) Parks, D.M., Int. J. Fract. 10-4(1974)487.

第 5 章

非線形切欠き力学

本章では大規模降伏条件下における切欠き材の強度評価方法である非線形切欠き力学の物理的背景を検討する。

5.1 緒言

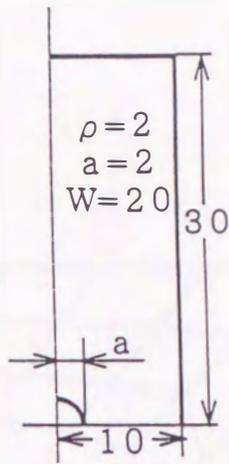
本章では、線形切欠き力学^{(1)~(4)}の拡張である非線形切欠き力学の物理的背景について、まず引張りをうける中央切欠き材を対象に有限要素解析により検討する^{(5)、(6)}。

非線形切欠き力学の有効性に関しては6章において切欠き材の引張り変形挙動のSEMサーボパルサによる連続観察と有限要素解析の比較により詳細に検証する。

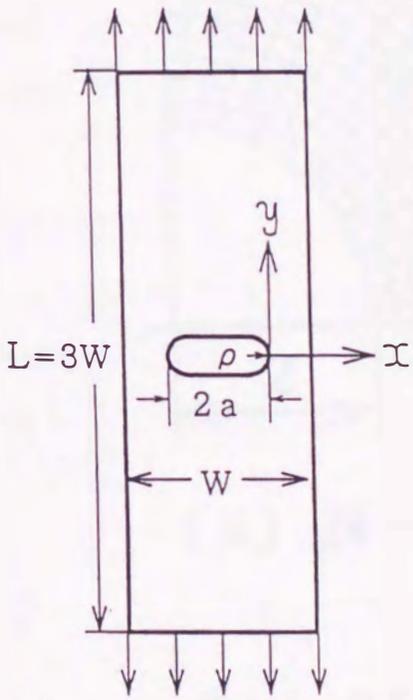
5.2 有限要素解析

本章において使用するひずみに関する記号はき裂材のそれと同じである(前章の表4-1)。計算に用いた中央切欠き材の形状は図5-1に示す通りである。切欠き半径 ρ が2mmと一定で、 $2a/W=0.2$ (w :板厚, a :切欠き深さ)で、切欠き深さ a を2.6mmと変えた相似形切欠き材(図5-1のN-1材とN-2材)および $w=60\text{mm}$, $a=2\text{mm}$ のN-3材について計算を行った。なお、解析はMisesの降伏条件を用い、平面応力状態として行った。有限要素法により得られる値は必ずしも真の値ではないので、切欠き材同士で比較するためには、切欠き材の切欠き底近傍の要素分割方法は w , a とは無関係にそれぞれ同一にする必要がある(図5-2)。最小要素長は0.2mmとした。切欠き材の真応力-対数ひずみ線図はき裂材のそれと同一である(図4-3)。非線形方程式の解法はニュートン・ラプソン法による増分解法を用い、大変形問題の定式化ではアップデート・ラグランジュ法を用いた。また、J積分の計算はPark'sの方法⁽⁷⁾によった。

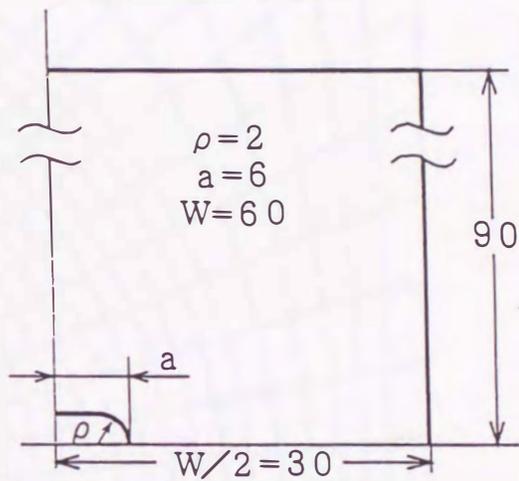
W mm	a mm	ρ mm
20	2	2
60	6	2
60	2	2



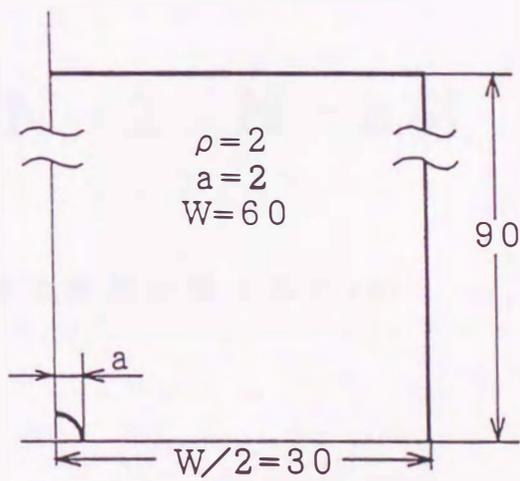
(ii - a) N - 1材



(ii) 切欠き材 (N材)

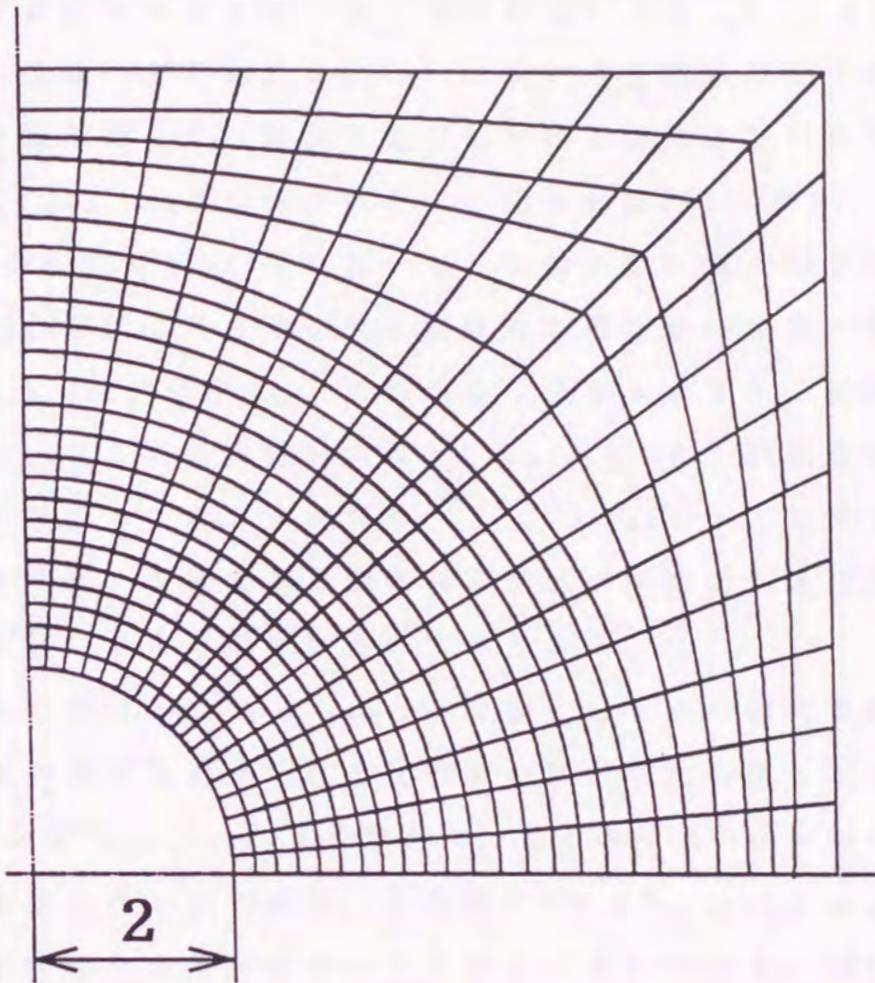


(ii - b) N - 2材



(ii - c) N - 3材

図 5-1 FEM解析に用いた切欠き材の形状・寸法 (単位 mm)



(ii) $N-1$, $N-2$, $N-3$ 材

図5-2 切欠き底近傍の要素分割 (単位■■)

5.3 $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ と切欠き半径 ρ が切欠き材における弾塑性応力場の支配因子

有限要素解析により得られた相似形切欠き材 (N-1, N-2材) の公称応力-公称ひずみ曲線を図5-3に示す(公称応力と公称ひずみの定義は4章と同じ)。両切欠き材における切欠き底の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ と公称ひずみ ϵ の関係を図5-4に示す。

図5-1のN-1, N-2, N-3材において, 切欠き底の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ が同じときの切欠き底付近の塑性域の進展の様子を図5-5(i), (ii), (iii)に示す。これから, 分かるように, 切欠き材では $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ (これは実質的には $\epsilon^p_{max, FEM}$) と ρ が弾塑性応力場の支配因子であること, すなわち, $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ と ρ (負荷を加える前の切欠き半径) を揃えると塑性域の発達状況は切欠き深さや板幅に無関係に互いによく似ていることが分かる。

以上のことは, $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ と ρ を揃えたときの切欠き底付近のひずみ分布や切欠き形状変化を比較すればさらに明確となる。

図5-6は $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ と ρ を揃えて, N-1, N-2, N-3材における ϵ^p の分布を比較したものである。また図5-7は $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ と ρ を揃えて切欠き形状変化を各材において比較したものである。図5-6, 7はいずれも全断面降伏後の状態を示している。両図から分かるように, $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ と ρ が同じであれば, ϵ^p の分布もまた切欠き形状変化も板幅や切欠き深さに無関係に互いに極めてよく似ている。

以上のことから, 大規模降伏条件下でも, $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ と ρ のみによって切欠き材における弾塑性応力場が一意的に決まることが分かる。

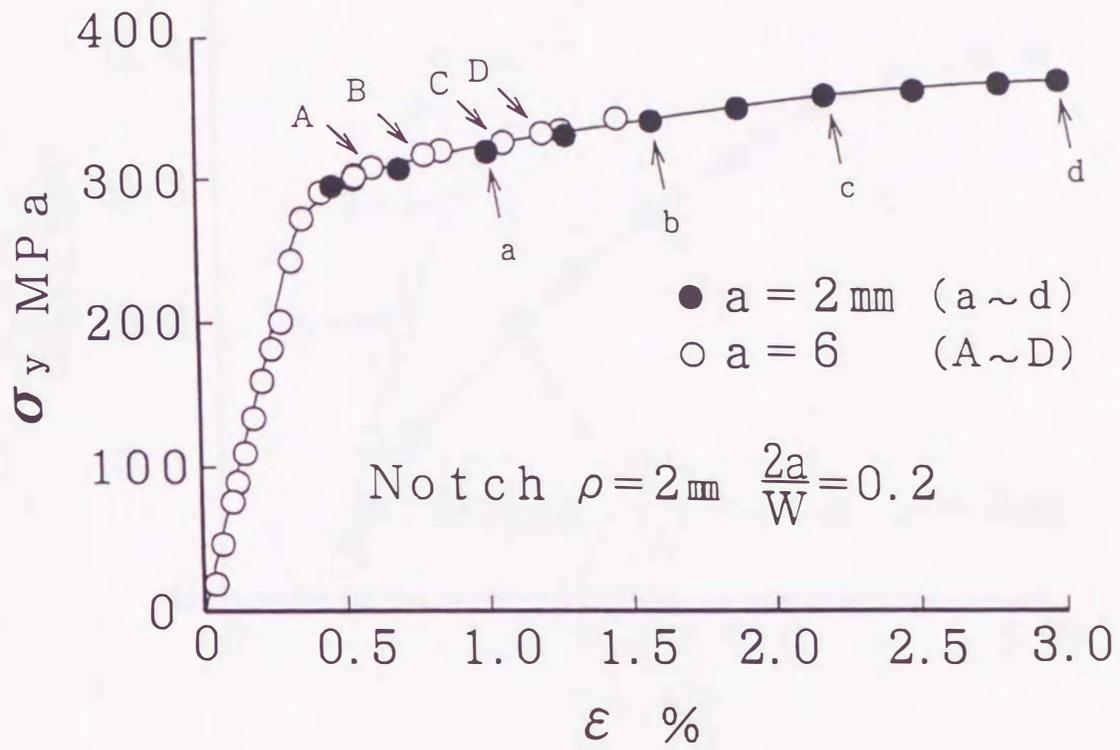


図5-3 切欠き材の公称応力-公称ひずみ曲線 ($2a/W=0.2$, FEM)

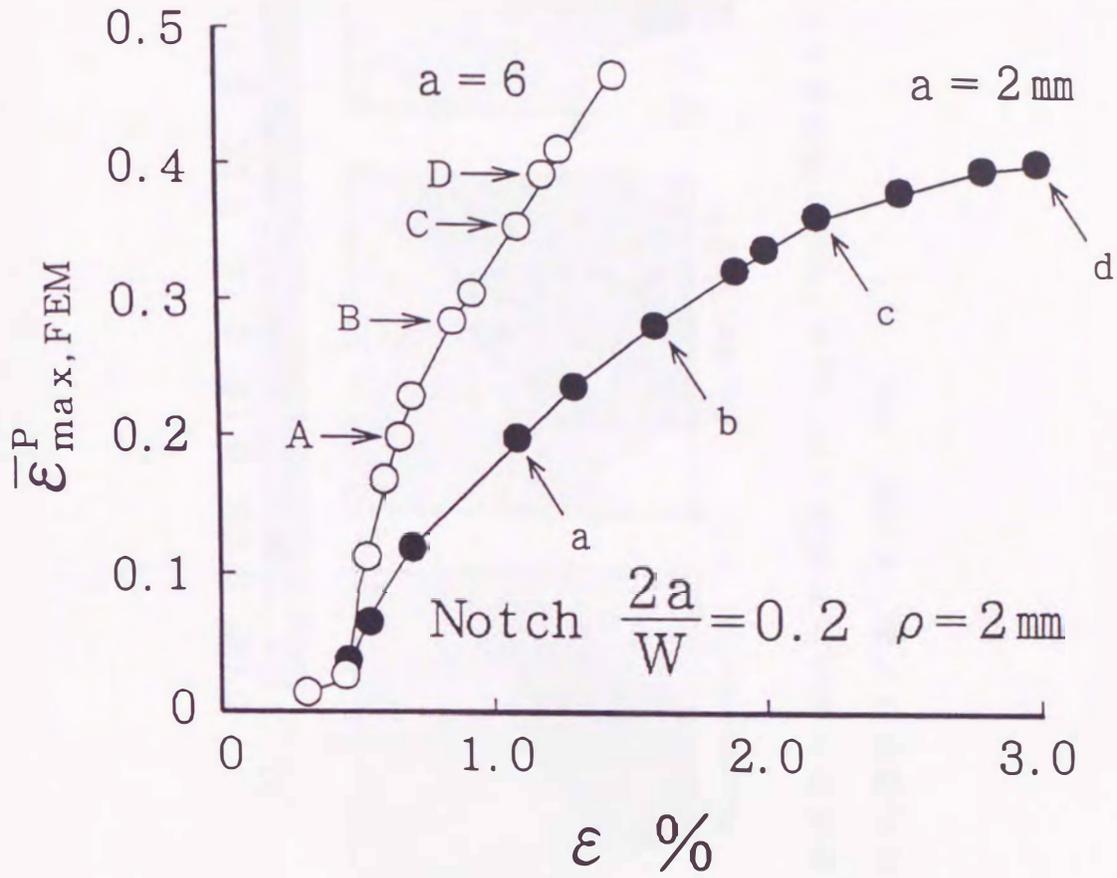


図5-4 切欠き底の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_{\max, \text{FEM}}^P$ と公称ひずみ ϵ の関係 ($2a/W=0.2$, FEM)

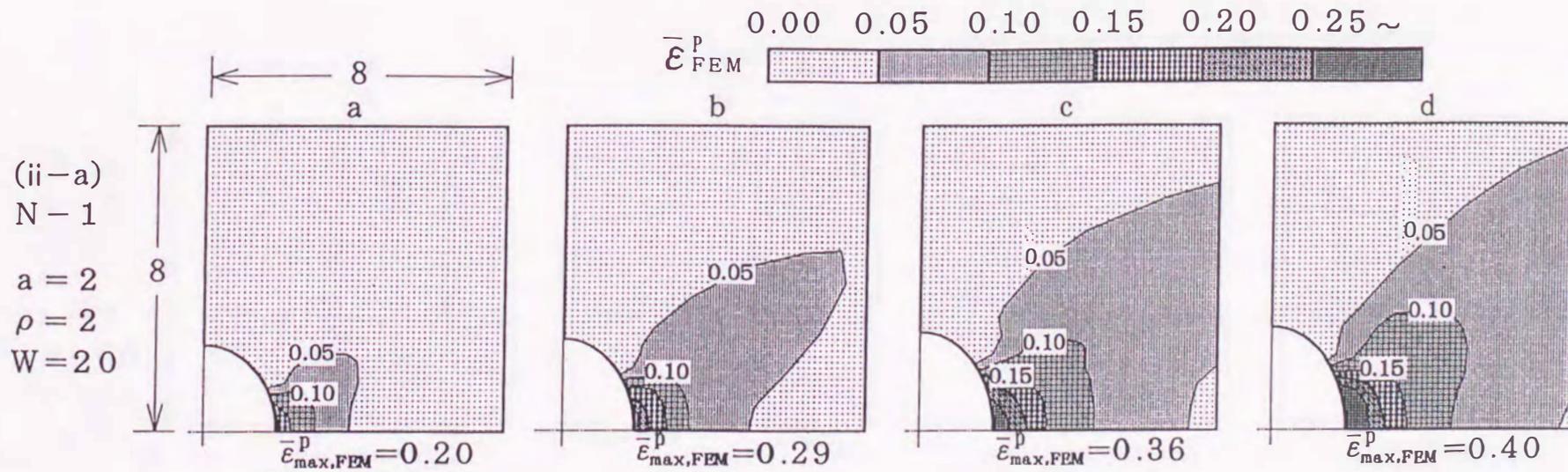


図5-5(i) 切欠き底付近の塑性域の進展 ($\bar{\epsilon}_{FEM}^p$ はMisesの降伏条件に基づく相当塑性ひずみ, $N=1$ 材, FEM)

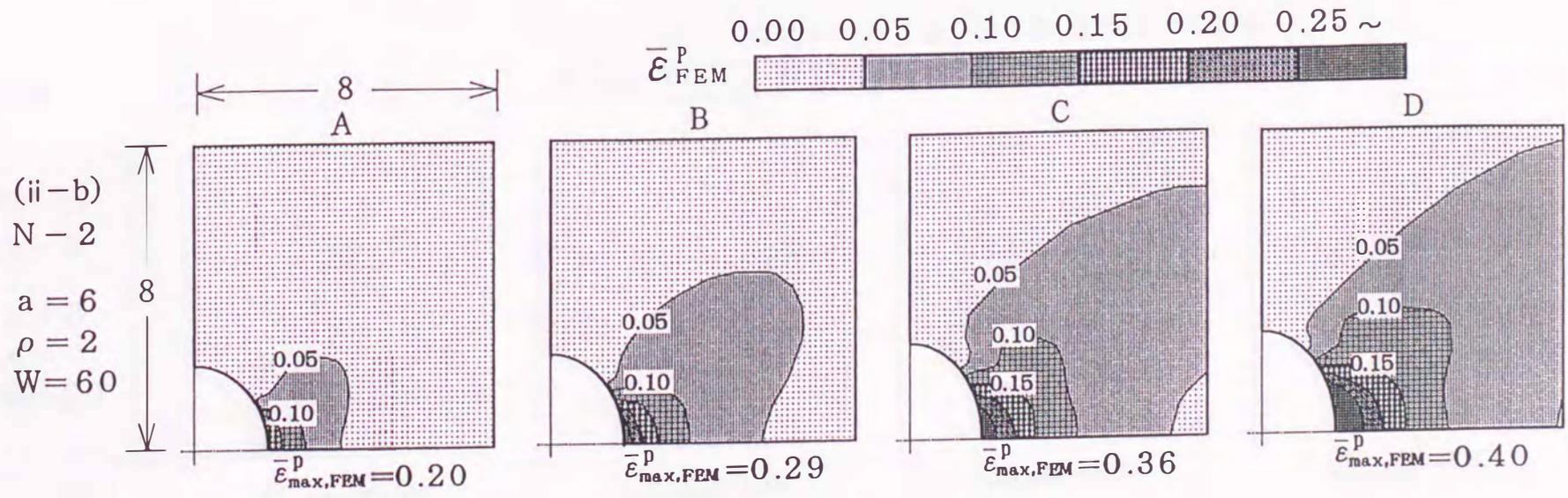


図5-5(ii) 切欠き底付近の塑性域の進展 ($\bar{\epsilon}_{FEM}^p$ はMisesの降伏条件に基づく相当塑性ひずみ, N-2材, FEM)

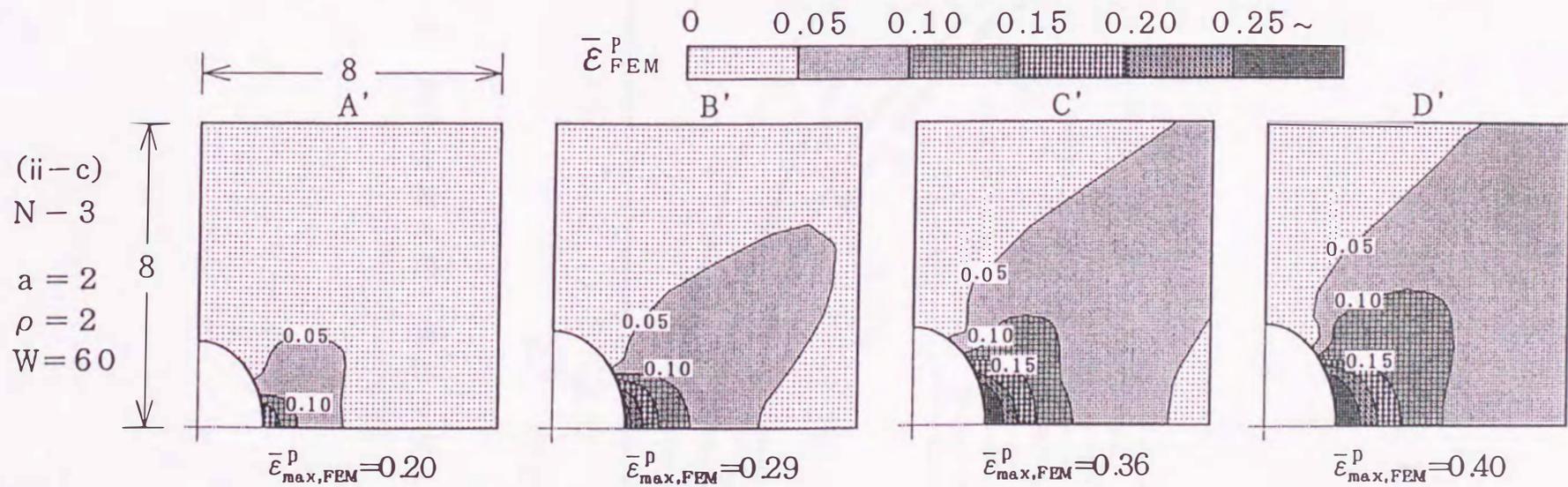


図5-5(iii) 切欠き底付近の塑性域の進展 ($\bar{\epsilon}_{FEM}^P$ はMisesの降伏条件に基づく相当塑性ひずみ, N-3材, FEM)

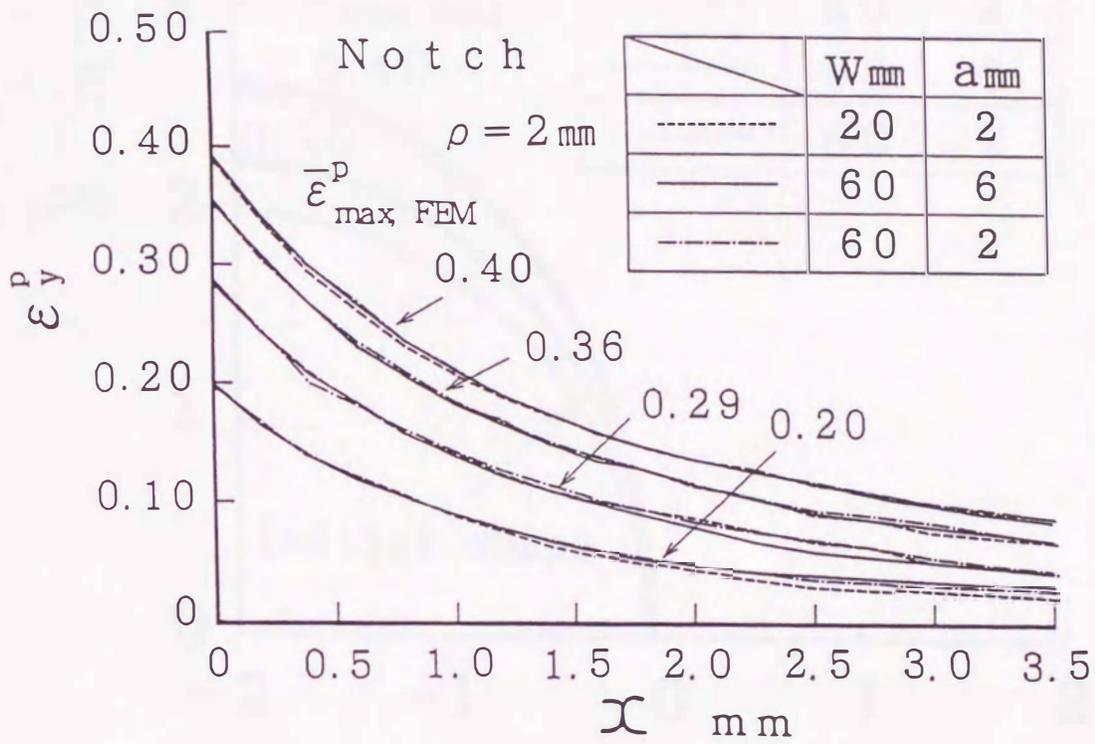


図5-6 切欠き底付近の塑性ひずみ ε^p , 分布 (FEM)

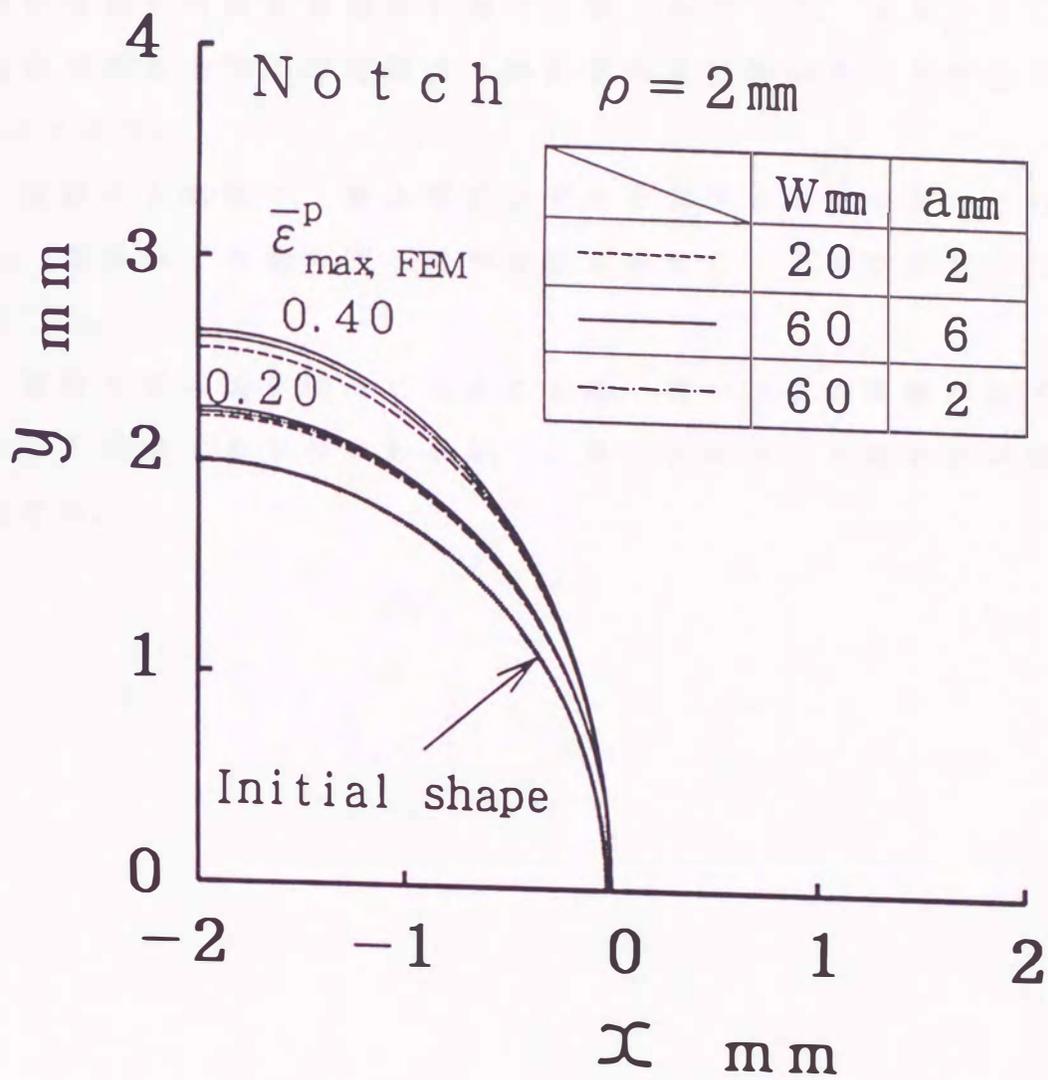


图 5-7 切欠き形状变化 (FEM)

5.4 結 言

線形切欠き力学の拡張である非線形切欠き力学を提案し、その物理的背景を有限要素解析を通じて明らかにした。まとめとして、非線形切欠き力学の原理図を、線形切欠き力学のそれと対比させて図5-8に示す。

試験片と実物で、最大塑性ひずみと切欠き半径をそれぞれ揃えると、塑性ひずみ場の同一性が保証されることを本章において明らかにした。

塑性ひずみ場が同一であることは、同一の物理現象が生ずることを強く示唆するものであるが、このことについては6章において検証する。

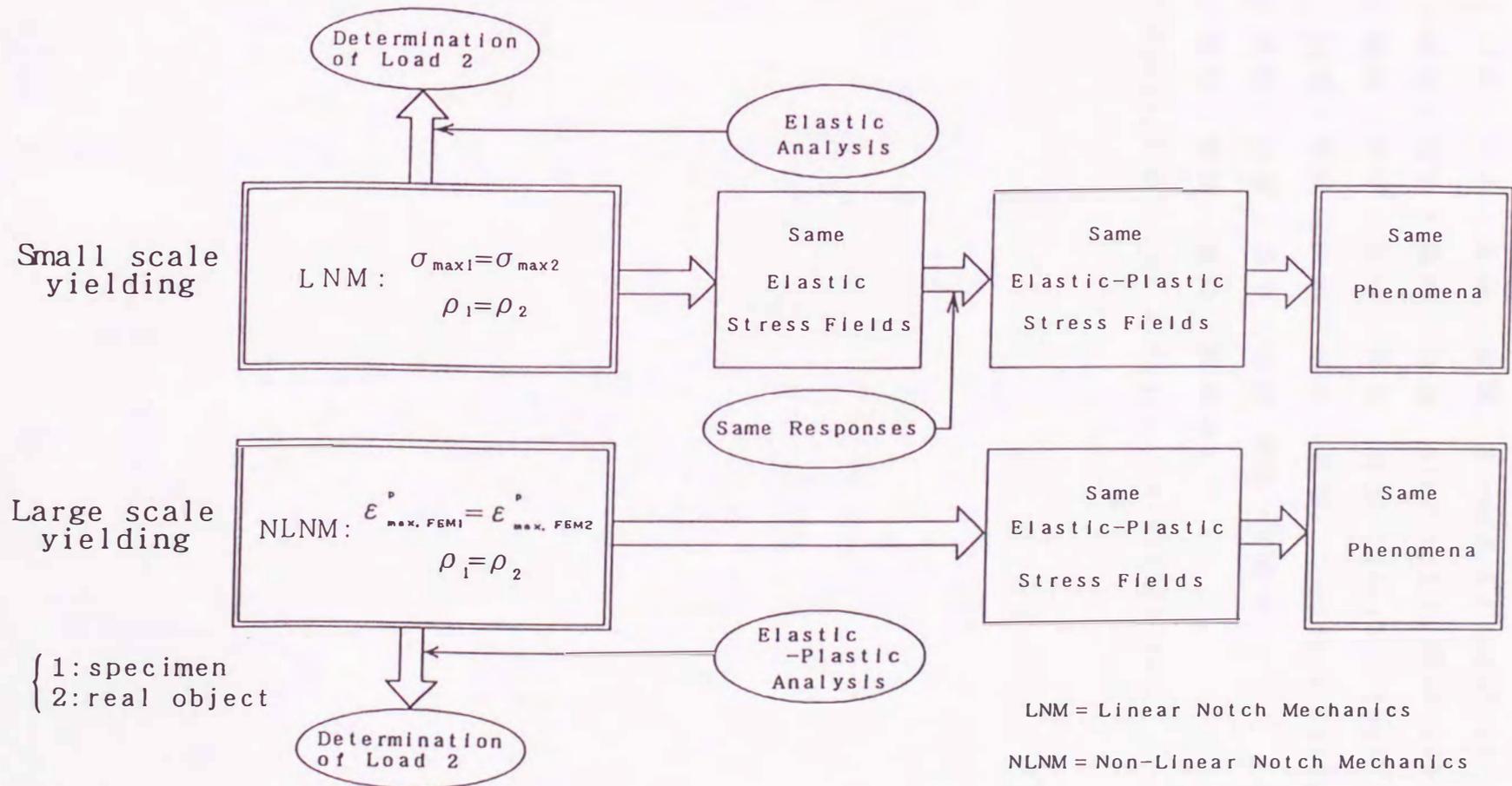


図 5-8 非線形切欠き力学の原理図

5.5 参考文献

- (1) 西谷・田中・藤崎, 機論, 51-462, A (1985) 421.
- (2) 西谷・田中・藤崎, 機論, 55-511, A (1989) 409.
- (3) 藤崎・野田・田中・西谷, 材料, 39-447 (1990) 1533.
- (4) 西谷・藤崎・田中・田中, 機論, 57-534, A (1991) 238.
- (5) 藤崎・西谷・田中・寺西, 機論, 投稿中.
- (6) 西谷・藤崎, 機論, 投稿中.
- (7) Parks, D. M., Int. J. Fract. 10-4 (1974) 487.