

クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の策定に係わる解析

第1報 切欠付き丸棒・フィレット付き帯板の解析

1989年6月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1989年6月

クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の 策定に係わる解析 (I)

根岸 仁* 谷川雅之* 霜越 穰*
永田 敬* 岩田耕司*

要 旨

高速炉主要機器の構造設計ではクリープ疲労損傷の制限が主たる設計支配因子となるため、信頼性及び経済性に優れた構造設計を行うには、合理的なクリープ疲労損傷評価法の策定が重要となる。しかし、局部的構造不連続と系全体の総体的構造不連続が重畳した場合の応力・ひずみ挙動に関する知見の蓄積は乏しく、また総体的構造不連続効果の評価に使用する弾性追従パラメータについて、現行規定値 ($q = 3$) を、構造・負荷に応じた合理的な値に変更することが期待されているが、その具体的方法 (合理的かつ保守的な評価方法) が見出されていないことなどにより評価法又は設計係数の高度化が妨げられている。

ここでは、基本的な形状、材料特性及び負荷に関するパラメータ解析を行うことにより、合理的クリープ疲労強度評価法の策定に必要な解析データベースの拡充を図った。

検討の結果以下の知見を得た。

- 1) 切欠き付き丸棒の場合 (タイプ I) とフィレット付き帯板又はフィレット付き変断面丸棒の場合 (タイプ II) とでは応力集中部のひずみ挙動が異なる。すなわち、弾塑性変形について、断面全体が降伏した場合、タイプ I ではひずみ集中が一層著しくなる (局部的構造不連続と総体的構造不連続の重畳が乗算型) のに対して、タイプ II ではひずみ集中が低減する傾向が示される (重畳効果が両者の最大値の使用で包絡できる。)。
- 2) 応力緩和挙動について、系の総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータを q 、弾性応力集中係数を K とするとタイプ I での応力緩和時のひずみ増大挙動は等価弾性追従パラメータ $q \times K^{3/4}$ で包絡できる。タイプ II の場合は q をそのまま使用可能。
- 3) 合理的且つ保守的な弾性追従パラメータは、材料特性として弾完全塑性体を想定することにより算出される見通しを得た。

今後は、上記の結果が実機についても適用できるかどうかを確認するため、簡易モデルと実機との対応を図る必要がある。

JUNE, 1989

Analysis on the Determination of Design Factors
for Creep-Fatigue Damage Evaluation

Hitoshi NEGISHI*, Masayuki TANIGAWA*, Minoru SHIMOKOSHI*,
Takashi NAGATA*, Koji IWATA*

Abstract

In the structural design for main components of FBR, it is important to determine the rational evaluation of creep-fatigue damage for the purpose of reliable and economical structural design, because limit to creep-fatigue damage is dominant factor. But the improvement of the evaluation methods have been disturbed by scarcely knowledge of the stress-strain behaviors at local structural discontinuity overlapped with gross structural discontinuity.

We performed inelastic parametric analysis concerned with the fundamental shapes, material properties and loads.

The results are as follows.

- 1) There are differences in the strain concentration behavior at the part of stress concentration between round bar with a U groove (TYPE I) and stepped flat bar with shoulder fillets, stepped round bar with a shoulder fillet (TYPE II). Namely In TYPE I, local strains are enlarged both by the local discontinuity and the gross discontinuity and their effects should be considered in the form of multiplication. In TYPE II, the effects can be evaluated by selection of the larger between them.
- 2) In TYPE I, the stress relaxation behaviors could be estimated conservatively by using the equivalent elastic follow-up parameter $q \times K^{3/4}$, where q is the elastic follow-up parameter for gross discontinuities and K is the elastic stress concentration factor. And the equivalent elastic follow-up parameter would be q in TYPE II.
- 3) It could be estimate rational and conservative elastic follow-up parameters to assumed to be elastic-fully-plastic material property.

As a next step, it is necessary to confirm the application of the previous results.

*Structural Engineering Section, Systems and Components Development Division,
Oarai Engineering Center

目 次

1.	緒言	1
2.	検討の流れ	2
3.	フィレット付き帯板の解析	8
3. 1	解析の目的	8
3. 2	解析の方法	8
3. 2. 1	解析モデル	8
3. 2. 2	材料特性	8
3. 2. 3	非弾性解析及び応力緩和解析の方法	9
3. 2. 4	アウトプット	9
3. 3	解析条件	10
1 3. 4	解析結果	17
3. 4. 1	リファレンス解析結果	17
3. 4. 2	材料特性の影響	25
3. 4. 3	負荷条件の影響	38
3. 4. 4	平面条件の影響	61
3. 4. 5	軸対称モデルとの比較	67
3. 5	考案	80
3. 5. 1	弾塑性解析によるひずみ集中挙動の検討	80
3. 5. 2	応力緩和時のひずみ増大挙動の検討	84
3. 6	まとめ	87
4.	切欠き付き丸棒の解析	91
4. 1	解析の目的	91
4. 2	解析の方法	91
4. 2. 1	解析モデル	91
4. 2. 2	材料特性	91
4. 2. 3	非弾性解析及び応力緩和解析の方法	92
4. 2. 4	アウトプット	92
4. 3	解析条件	93
4. 4	解析結果	101
4. 4. 1	リファレンス解析結果	101
4. 4. 2	材料特性の影響	109
4. 4. 3	切り欠き形状の影響	119
4. 4. 4	総体的弾性追従の影響	129
4. 4. 5	引張りクリープによる弾塑性挙動	139
4. 5	考案	145
4. 5. 1	ひずみ範囲評価法の検討	145
4. 5. 2	応力緩和時のひずみ増大挙動の検討	148

4. 6	まとめ	151
5.	結言	153
	謝辞	154
	参考文献	155
A	付録	157
A 1	降伏応力 σ_y の影響	160
A 2	単調と繰り返し負荷の比較	162

表 リ ス ト

表 3. 1	解析条件（フィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒）.....	11
表 3. 2	多直線近似材料特性（動的応力ひずみ関係 500℃相当）.....	12
表 3. 3	フィレット付き帯板における因子の影響度のまとめ.....	88
表 4. 1	解析条件（切欠き付き丸棒）.....	94
表 4. 2	切欠き付き丸棒における因子の影響度のまとめ.....	152

図 リ ス ト

図 2. 1	検討の流れ	4
図 2. 2	ひずみ範囲及び応力緩和評価法高度化検討の流れ	5
図 3. 0 (a)	フィレット付き帯板の弾塑性解析の流れ	6
図 3. 0 (b)	フィレット付き帯板の応力緩和解析の流れ	7
図 3. 1	解析モデル (フィレット付き帯板)	13
図 3. 2	寸法および要素分割	14
図 3. 3 (a)	境界条件 (引張り負荷)	15
図 3. 3 (b)	境界条件 (曲げ負荷)	16
図 3. 4. 1	相当応力・相当ひずみの履歴 (弾性解析およびCASE1-1-M)	20
図 3. 4. 2	ミーゼス相当応力コンター図 (弾性解析およびCASE1-1-M)	21
図 3. 4. 3	評価断面 1 の群細図	22
図 3. 4. 4	相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-1-M)	23
図 3. 4. 5	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-1-M)	24
図 3. 4. 6	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-1-M)	24
図 3. 4. 7 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (弾性解析および CASE1-1-M)	28
5 3. 4. 7 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (弾性解析および CASE1-2-M)	28
図 3. 4. 7 (c)	相当応力・相当ひずみの履歴 (弾性解析および CASE1-3-M)	29
図 3. 4. 7 (d)	相当応力・相当ひずみの履歴 (弾性解析および CASE1-4-M)	29
図 3. 4. 8 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (弾性解析および CASE1-5-M)	30
図 3. 4. 8 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (弾性解析および CASE1-6-M)	30
図 3. 4. 9	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-1-M, CASE1-2-M, CASE1-3-M, CASE1-4-M)	31
図 3. 4. 10	相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-1-M, CASE1-2-M, CASE1-3-M, CASE1-4-M)	32
図 3. 4. 11 (a)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-1-M)	33
図 3. 4. 11 (b)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-2-M)	33
図 3. 4. 11 (c)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-3-M)	34
図 3. 4. 11 (d)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-4-M)	34
3. 4. 12 (a)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-1-M)	35
図 3. 4. 12 (b)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-2-M)	35
図 3. 4. 12 (c)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-3-M)	36
図 3. 4. 12 (d)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-4-M)	36
図 3. 4. 13 (a)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-M)	37
図 3. 4. 13 (b)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-6-M)	37
図 3. 4. 14 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-2-M)	42
図 3. 4. 14 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-2-B)	42
図 3. 4. 14 (c)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-4-M)	43
図 3. 4. 14 (d)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-4-B)	43

図 3. 4. 15 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-5-M 膜応力場)	44
図 3. 4. 15 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-5-B 曲げ応力場)	44
図 3. 4. 15 (c)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-6-M 膜応力場)	45
図 3. 4. 15 (d)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-6-B 曲げ応力場)	45
図 3. 4. 16 (a)	ミーゼス相当応力コンター図 (弾性解析-膜応力場, 曲げ応力場)	46
図 3. 4. 16 (b)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-2-M, CASE1-2-B)	47
図 3. 4. 16 (c)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-3-M, CASE1-3-B)	48
図 3. 4. 16 (d)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-4-M, CASE1-4-B)	49
図 3. 4. 17 (a)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-2-M, CASE1-2-B)	50
図 3. 4. 17 (b)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-3-M, CASE1-3-B)	51
図 3. 4. 17 (c)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-4-M, CASE1-4-B)	52
図 3. 4. 18 (a)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-2-M 膜応力場)	53
図 3. 4. 18 (b)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-2-B 曲げ応力場)	53
図 3. 4. 18 (c)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-3-M 膜応力場)	54
図 3. 4. 18 (d)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-3-B 曲げ応力場)	54
図 3. 4. 18 (e)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-4-M 膜応力場)	55
図 3. 4. 18 (f)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-4-B 曲げ応力場)	55
図 3. 4. 19 (a)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-2-M 膜応力場)	56
図 3. 4. 19 (b)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-2-B 曲げ応力場)	56
図 3. 4. 19 (c)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-3-M 膜応力場)	57
図 3. 4. 19 (d)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-3-B 曲げ応力場)	57
図 3. 4. 19 (e)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-4-M 膜応力場)	58
図 3. 4. 19 (f)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-4-B 曲げ応力場)	58
図 3. 4. 20 (a)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-M 膜応力場)	59
図 3. 4. 20 (b)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-B 曲げ応力場)	59
図 3. 4. 20 (c)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-M 膜応力場)	60
図 3. 4. 20 (d)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-B 曲げ応力場)	60
図 3. 4. 21	ミーゼス相当応力コンター図 (一般化平面ひずみ, 平面ひずみ, 平面応力)	63
図 3. 4. 22	相当塑性ひずみコンター図 (一般化平面ひずみ, 平面ひずみ, 平面応力)	64
図 3. 4. 23 (a)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-1-M 一般化平面ひずみ)	65
図 3. 4. 23 (b)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-7-M 平面ひずみ)	65
図 3. 4. 23 (c)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-8-M 平面応力)	65
図 3. 4. 24 (a)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-1-M 一般化平面ひずみ)	66
図 3. 4. 24 (b)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-7-M 平面ひずみ)	66
図 3. 4. 24 (c)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-8-M 平面応力)	66
図 3. 4. 25	解析モデル (フィレット付き変断面丸棒)	72
図 3. 4. 26 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-5-M)	73

図 3. 4. 26 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE2-3-M).....	73
図 3. 4. 27 (a)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-1-M, CASE2-1-M).....	74
図 3. 4. 27 (b)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE2-2-M).....	75
図 3. 4. 28	相当塑性ひずみコンター図 (CASE2-1-M).....	76
図 3. 4. 29 (a)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-1-M).....	77
図 3. 4. 29 (b)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE2-1-M).....	77
図 3. 4. 30 (a)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-1-M).....	78
図 3. 4. 30 (b)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE2-1-M).....	78
図 3. 4. 31 (a)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-M).....	79
図 3. 4. 31 (b)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE2-3-M).....	79
図 3. 5. 1	ひずみ集中係数の設計係数による包絡 (フィレット付き帯板)	82
図 3. 5. 2	ひずみ集中係数の設計係数による包絡 (フィレット付き変断面丸棒)	83
図 3. 5. 3	応力緩和挙動の設計係数による包絡 (フィレット付き帯板)	85
図 3. 5. 4	応力緩和挙動の設計係数による包絡 (フィレット付き変断面丸棒)	86
図 4. 0 (a)	切欠き付き丸棒の弾塑性解析の流れ.....	89
図 4. 0 (b)	切欠き付き丸棒の応力緩和解析の流れ.....	90
図 4. 1	解析モデル (切欠き付き丸棒)	95
図 4. 2. 1	寸法および要素分割 ($\rho/d=1.0$).....	96
図 4. 2. 2	寸法および要素分割 ($\rho/d=4.0$).....	97
図 4. 2. 3	寸法および要素分割 ($\rho/d=10.0$)	98
図 4. 2. 4	寸法および要素分割 (総体的弾性追従パラメータ $q=2$).....	99
図 4. 2. 5	境界条件及び負荷.....	100
図 4. 4. 1	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-1-M).....	104
図 4. 4. 2	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-7-M).....	104
図 4. 4. 3	ミーゼス相当応力コンター図 (弾性解析)	105
図 4. 4. 4	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-1-M).....	105
図 4. 4. 5	相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-1-M).....	106
図 4. 4. 6	ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-1-M).....	107
図 4. 4. 7	弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M).....	107
図 4. 4. 8	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M).....	108
図 4. 4. 9 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-1-M).....	112
図 4. 4. 9 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-3-M).....	112
図 4. 4. 10 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-7-M).....	113
図 4. 4. 10 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-8-M).....	113
図 4. 4. 11 (a)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-1-M).....	114
図 4. 4. 11 (b)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-3-M).....	114

図 4. 4. 12 (a)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-1-M).....	115
図 4. 4. 12 (b)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-3-M).....	115
図 4. 4. 13 (a)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-1-M).....	116
図 4. 4. 13 (b)	ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-3-M).....	116
図 4. 4. 14 (a)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M).....	117
図 4. 4. 14 (b)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-3-M).....	117
図 4. 4. 15 (a)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-7-M).....	118
図 4. 4. 15 (b)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-8-M).....	118
図 4. 4. 16 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-1-M).....	123
図 4. 4. 16 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-4-M).....	123
図 4. 4. 16 (c)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-5-M).....	123
図 4. 4. 17 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-7-M).....	124
図 4. 4. 17 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-11-M)	124
図 4. 4. 18 (a)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-1-M).....	125
図 4. 4. 18 (b)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-4-M).....	125
図 4. 4. 18 (c)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-5-M).....	125
図 4. 4. 19 (a)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-1-M).....	126
図 4. 4. 19 (b)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-4-M).....	126
図 4. 4. 19 (c)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-5-M).....	126
図 4. 4. 20	ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-3-M, CASE3-4-M).....	127
図 4. 4. 21 (a)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M).....	128
図 4. 4. 21 (b)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-4-M).....	128
図 4. 4. 21 (c)	弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-5-M).....	128
図 4. 4. 22 (a)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-7-M).....	129
図 4. 4. 22 (b)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-11-M)	129
図 4. 4. 23 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-1-M).....	133
図 4. 4. 23 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-6-M).....	133
図 4. 4. 24 (a)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-9-M).....	134
図 4. 4. 24 (b)	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-10-M)	134
図 4. 4. 25 (a)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-1-M).....	135
図 4. 4. 25 (b)	ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-6-M).....	135
図 4. 4. 26 (a)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-1-M).....	136
図 4. 4. 26 (b)	相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-6-M).....	136
図 4. 4. 27	ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-1-M, CASE3-6-M).....	137
図 4. 4. 28	弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M, CASE3-6-M).....	137
図 4. 4. 29 (a)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-9-M).....	138
図 4. 4. 29 (b)	クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-10-M)	138
図 4. 4. 30	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-12-M, CASE3-13-M).....	142
図 4. 4. 31	ひずみ集中係数の比較 (CASE3-7-M, CASE3-12-M, CASE3-13-M).....	143

図 4. 4. 32	相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-9-M, CASE3-10-M, CASE3-12-M).....	144
図 4. 5. 1	ひずみ集中係数の設計係数による包絡 (切欠き付き丸棒)	147
図 4. 5. 2	応力緩和挙動の設計係数による包絡($q=1$) (切欠き付き丸棒)	149
図 4. 5. 3	応力緩和挙動の設計係数による包絡($q=2$) (切欠き付き丸棒)	150
図 A. 1. 1	降伏応力の影響 (CASE3-1-M, CASE3-20-M)	160
図 A. 2. 1	単調負荷と繰返し負荷の比較.....	162

1 緒 言

我が国の「もんじゅ用高温構造設計方針」は他国の類似基準に比べるとより合理的な評価法を規定しているが、構造物強度試験による検証では設計許容値と実際の破損発生時点とに大幅な隔たりがある場合も認められ、その高度化が期待されている。現在、構造・材料に係わる最新の研究開発の成果に基づく見直しを図られ、その高度化を図ったものとして高速炉用高温構造設計基準(案)⁽¹⁾⁽²⁾が作成されつつある。

高度化の対象としてクリープ損傷、液面近傍熱ラチェット、座屈等に係わる評価法が挙げられるが、なかでも高速炉主要機器の構造設計ではクリープ疲労損傷の制限が支配因子となっている場合が多いため、信頼性及び経済性に優れた設計を行なうには、合理的なクリープ疲労損傷評価法の策定が重要となる。しかし、切欠きのような局部的構造不連続と配管熱膨張応力に認められるような系全体の総体的構造不連続が重畳した場合の応力・ひずみ挙動に関する知見の蓄積が乏しく、さらには、総体的構造不連続効果の評価に使用する弾性追従パラメータについて、現行規定値($q=3$)を、構造・負荷に応じた合理的な値に変更することが期待されているものの、その具体的方法(合理的かつ保守的な評価方法)が見出されていないことなどにより評価法又は設計係数の高度化が妨げられている。

本報告書では、汎用非線形解析コードFINASを用いて基本的な形状、材料特性及び負荷に関するパラメータ解析を行うことにより、合理的クリープ疲労強度評価法の策定に必要な解析データベースの拡充を図った。また、得られた解析結果をもとにクリープ疲労評価に用いる設計評価式の定量化について検討を行った。

2 検討の流れ

クリープ疲労損傷評価の高度化では、局所的構造不連続と総体的構造不連続が重畳した場合の挙動の取扱いが問題となっている。ここでは、基本構造モデルを用いて、局所的及び総体的構造不連続重畳下において、形状、負荷、材料特性の差異がひずみ集中挙動に及ぼす影響に着目し、弾塑性解析および応力緩和解析を行う。図2. 1に検討のフローを示す。以下に手順を述べる。

- ① 実機ではノズルとシェルの交叉部やセーフエンドのY構造部に構造不連続が存在し、これらの部位では局所的ひずみ集中とシェルとしての総体的ひずみ集中が重畳すると考えられる。そこで、局所的構造不連続と総体的構造不連続が重畳する基本的な構造要素モデルとしてフィレット付き帯板（その回転体であるフィレット付き変断面丸棒を含む）及び切欠き付き丸棒の2種類をモデル化する。
- ② 形状因子については局所的構造不連続としてフィレット部のアール、切欠き部の幅ないしアールを考える。また、低応力部と高応力部の組合せによる総体的構造不連続効果の重畳を考える。また、フィレット付き帯板では平面条件の影響、軸対称との対比も調べる。
- ③ 弾塑性材料特性としては、弾完全塑性体と加工硬化を考慮した2直線近似及びn乗硬化則、さらにLudwik型を想定する。また、応力緩和解析ではクリープ特性としてノルトン則を仮定する。
- ④ 負荷はフィレット付き帯板については軸方向変位（膜応力場）及び角変位（曲げ応力場）を、切欠き付き丸棒については軸方向変位、軸方向荷重（クリープ）を考える。
- ⑤ 汎用非線形解析コードFINASを用いて、上述の構造、材料特性、負荷に対して弾性解析、弾塑性解析および応力緩和解析を行なう。

クリープ疲労損傷評価法を高度化する上では、ひずみ範囲評価法及び応力緩和評価法を合理化する必要がある。ここでは、得られた解析結果を現行設計基準による評価結果と比較し合理化された設計評価式の定量化を検討する。図2. 2に評価法高度化検討のフローを示す。以下に検討の手順を述べる。

（1）ひずみ範囲評価法

- ① 解析結果より応力レベルに対するひずみ集中係数 K_ε の履歴を求める。
- ② 現行設計基準で用いられている局所的構造不連続を表わすノイバー則及び総体的構造不連続を表わす弾性追従パラメータによるひずみ集中係数を①の結果にオーバープロットする。
- ③ 現行設計基準では、局所的構造不連続と総体的構造不連続の重畳効果は両者の最大値を用いることになっているが、弾性追従パラメータを構造・負荷に応じた合理的な値に変更した場合局所的構造不連続と総体的構造不連続の重畳効果を表しうる評価式の検討を行なう。
- ④ 高速炉用高温構造設計基準へ反映させる。

(2) クリープ損傷評価法(残留応力緩和評価法)

- ① 解析結果より応力緩和時の応力・ひずみ挙動の履歴図を求める。
- ② クリープ弾性追従パラメータ q_0 をパラメトリックにふり、①の結果に初期応力から包絡線をおろす。
- ③ 現行設計基準では、1次+2次応力に関する緩和クリープ損傷をクリープ弾性追従パラメータ $q_0 = 3$ として算出し、単純な応力緩和($q_0 = 1$)を想定するピーク応力による緩和クリープ損傷を2重に加算している。ここでは、1次+2次応力とピーク応力の統一的な取扱いについて検討を行なう。
- ④ 高速炉用高温構造設計基準へ反映させる。

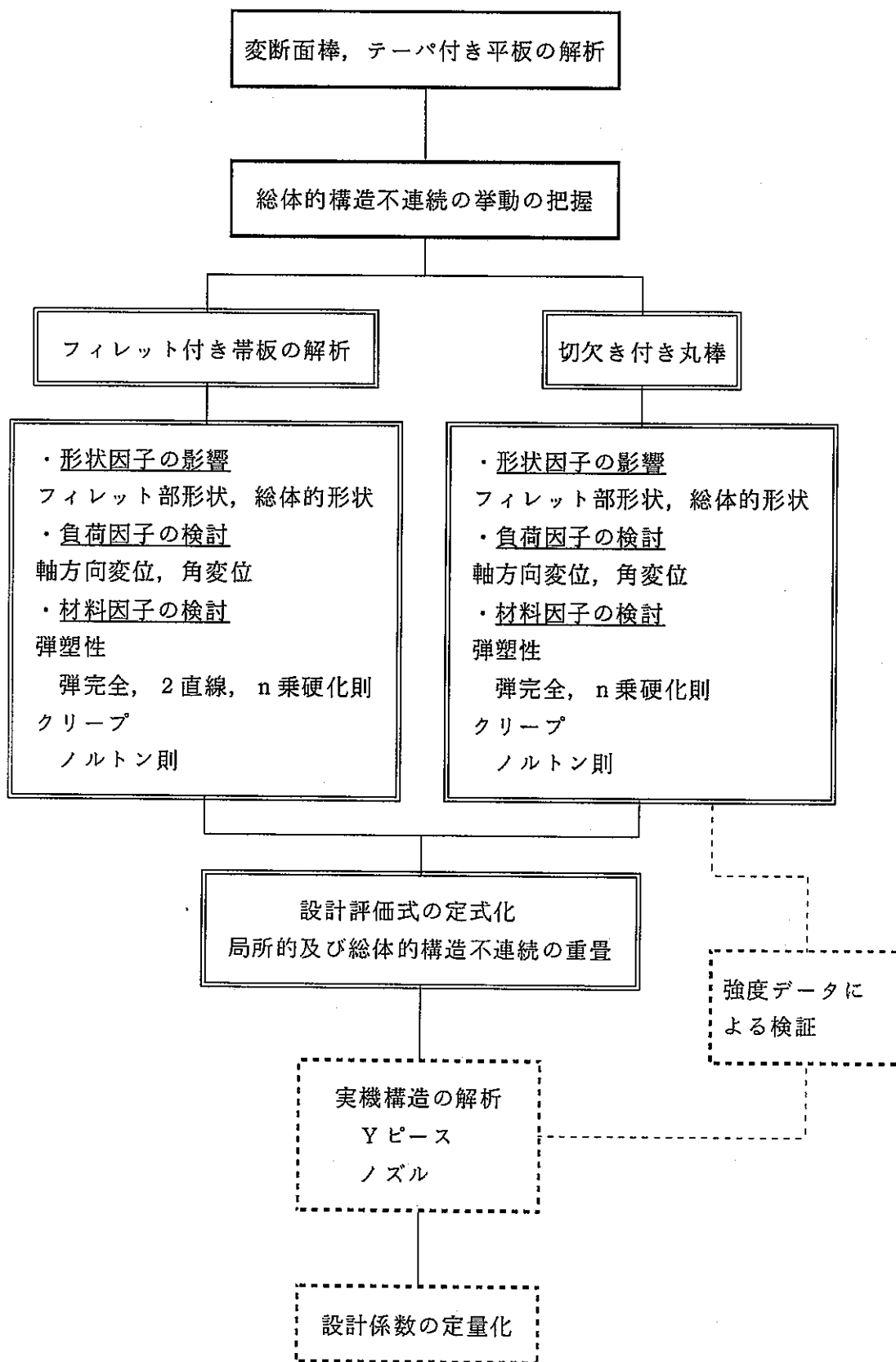


図2. 1 検討の流れ

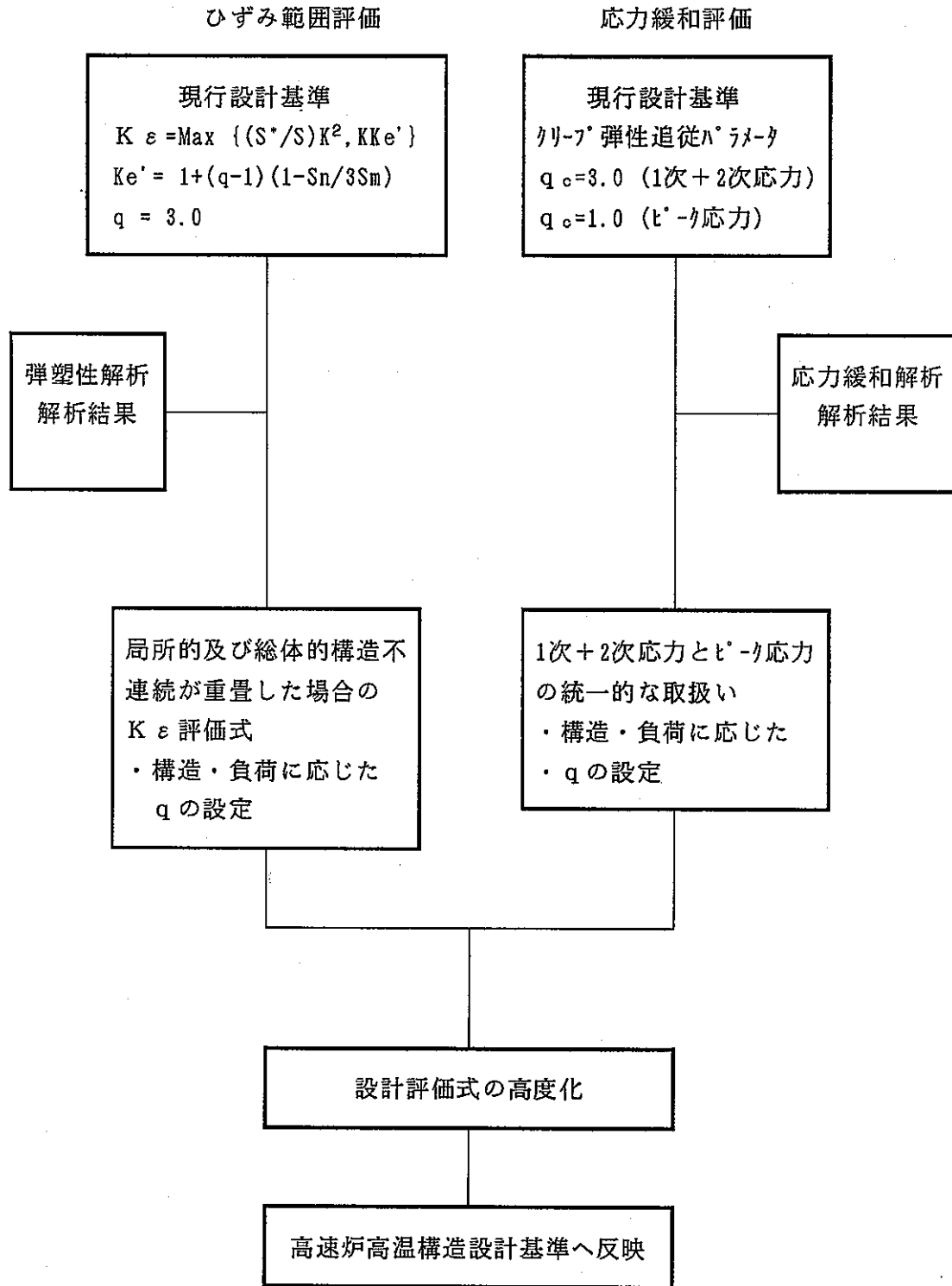


図2. 2 ひずみ範囲及び応力緩和評価法高度化検討の流れ

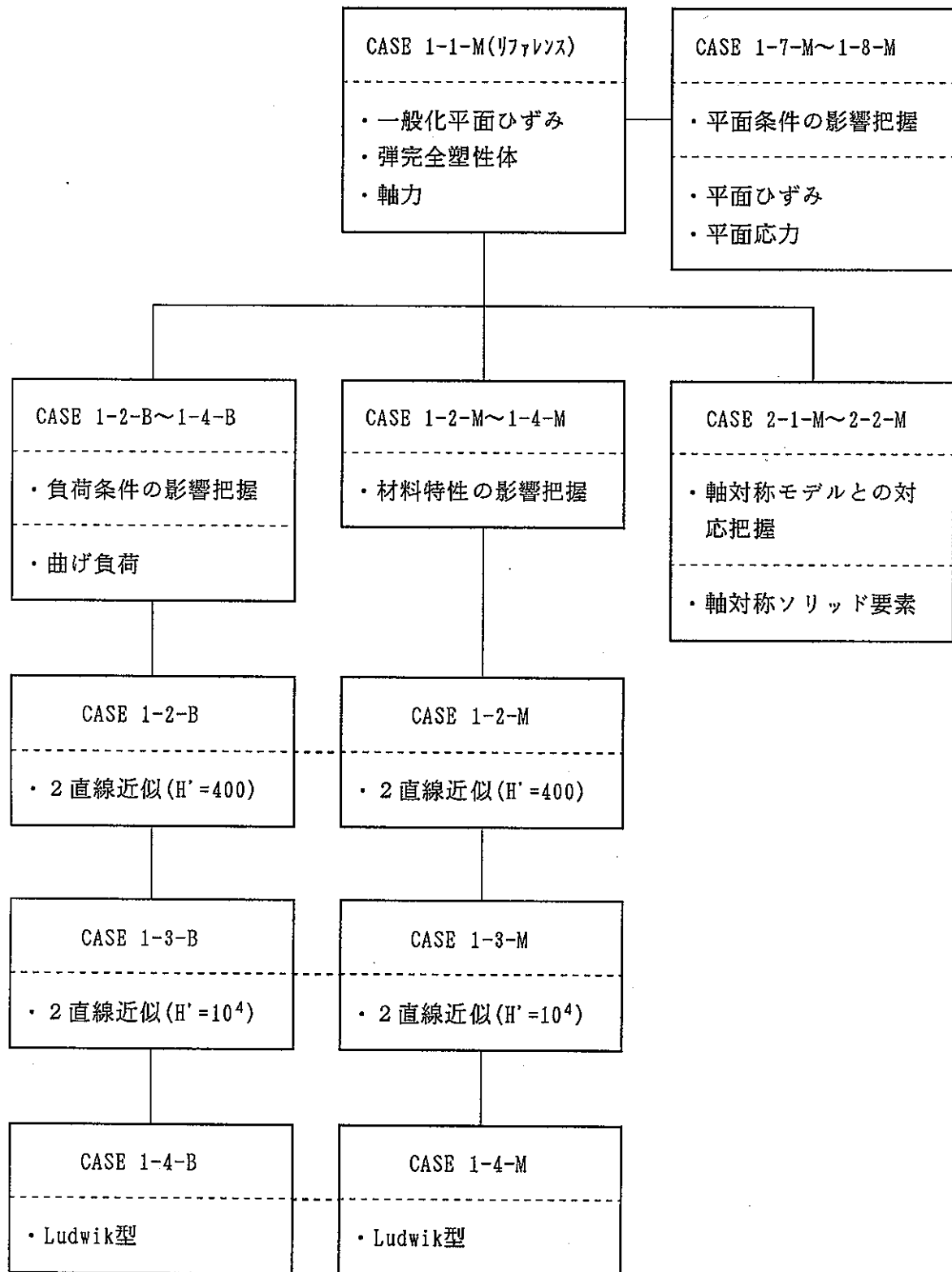


図3. 0 (a) フィレット付き帯板の弾塑性解析の流れ

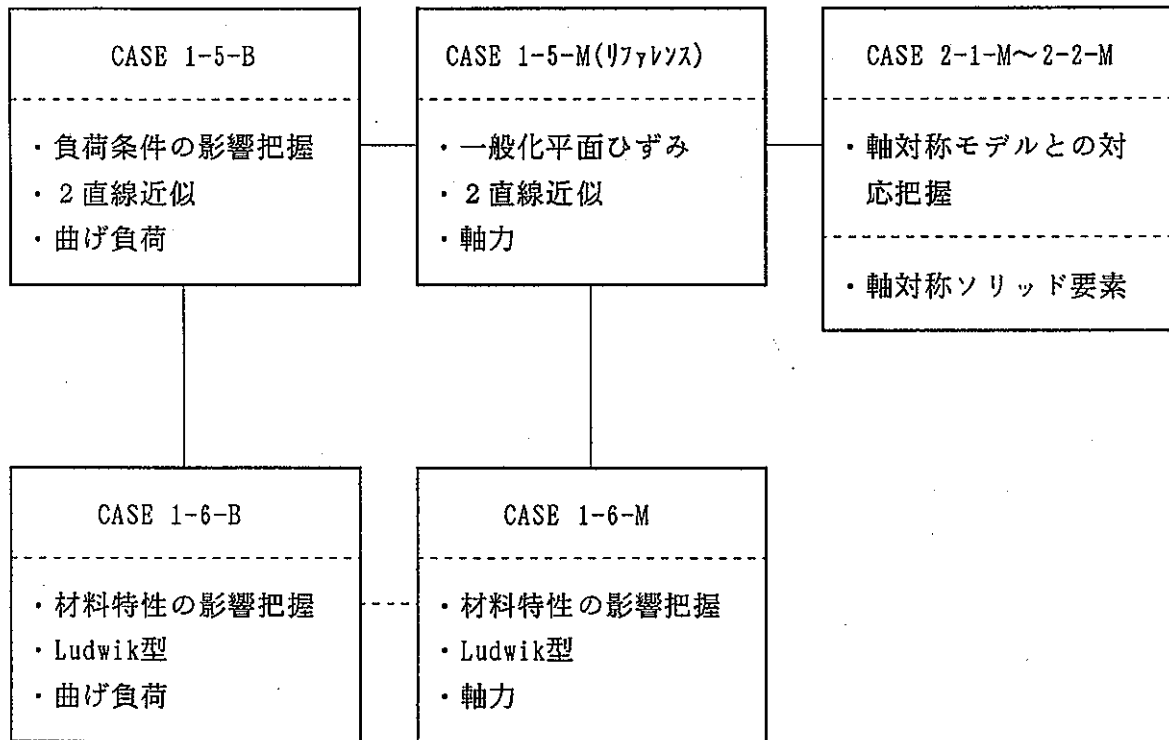


図 3. 0 (b) フィレット付き帯板の応力緩和解析の流れ

3 フィレット付き帯板の解析

3・1 解析の目的

総体的弾性追従場にピーク応力が重畳するフィレット付き帯板を用いて、構造不連続部におけるひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に対する形状、負荷、材料特性因子の影響を調べ、クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の形態把握と設計係数策定のための非弾性解析手法の検討を行う。

3・2 解析の方法

3. 2. 1 解析モデル

解析モデルを図3. 1に示す。

○寸法及び要素分割

寸法及び要素分割図を図3. 2に示す。

○要素の種類

フィレット付き帯板 ---- QPLAN9 (9節点4辺形一般化平面ひずみ要素)

○境界条件及び負荷

・弾塑性解析

拘束条件及び負荷を図3. 3 (a), 図3. 3 (b)に示す。

・応力緩和解析

実機でのシェイクダウン基準値 $3 S_m$ は 30 kg/mm^2 程度と考えられ応力振幅としては 15 kg/mm^2 となる。ここでは、加速効果を考え、平滑部の応力が 20 kg/mm^2 になるように強制変位を与え（拘束条件は弾塑性解析と同様）、その後 3×10^5 時間（30年相当）保持をした。

3. 2. 2 材料特性

○弾完全塑性体

縦弾性係数、ポアソン比はSUS304の500℃に相当する値をもとにして定めた。また、降伏応力は0.2%ひずみに対応する値とした。

縦弾性係数 $E = 16000 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.3$

降伏応力 $\sigma_y = 32.0 \text{ kg/mm}^2$ (付録A. 1 参照)

加工硬化係数 $H' = 16.0 \text{ kg/mm}^2$ (Eの1/1000の値を設定)

○2直線近似

以下の値はFINAS材料データライブラリ⁽⁵⁾におけるSUS304の500℃の繰返し特性に対する2直線近似データをもとに設定した。なお、最大想定ひずみレベル（振幅値に相当）は1)、2)それぞれについて1.5%、2.5%とした。

縦弾性係数 $E = 16000 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.3$

1)降伏応力 $\sigma_y = 40 \text{ kg/mm}^2$

加工硬化係数 $H' = 400 \text{ kg/mm}^2$

$$\begin{aligned} 2) \text{降伏応力} \quad \sigma_y &= 14 \text{ kg/mm}^2 \\ \text{加工硬化係数} \quad H' &= 10000 \text{ Kg/mm}^2 \end{aligned}$$

○Ludwik型

以下の値は 500℃におけるSUS304の動的応力ひずみ式⁽⁶⁾を振幅で表した値にもとづいて定めた。 ε_a はひずみ振幅、 σ_a は応力振幅を表す。なお、解析では多直線近似として塑性ひずみと加工硬化係数のテーブルとして与えた。数値を表3.2に示す。

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a - \sigma_y}{A} \right) \frac{1}{m} \quad (3.1)$$

$$A = 251$$

$$m = 0.44$$

$$\text{縦弾性係数} \quad E = 16000 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{ポアソン比} \quad \nu = 0.3$$

$$\text{降伏応力} \quad \sigma_y = 10.0 \text{ kg/mm}^2$$

○応力緩和解析

ノルトン則を使用。 $\dot{\varepsilon}_c = B \sigma^n$

$$B = 2.0589 \times 10^{-13}$$

$$n = 4.3247$$

SUS304の 500℃のクリープひずみ式⁽⁶⁾をもとに時間 10⁶hr、応力 5~40 kg/mm²として平均クリープひずみ法に基づきBESTX⁽⁹⁾により定めた。

3.2.3 非弾性解析及び応力緩和解析の方法

○非弾性解析

- ・等方硬化則を使用。弾塑性解析は1/4サイクル実施（単調負荷）。
（付録A.2参照）

○応力緩和解析

- ・クリープポテンシャルはMisesのクリープポテンシャルを使用。
- ・クリープに関する硬化則は時間硬化則を使用。

3.2.4 アウトプット

○評価断面

図3.1中に評価断面を示す。評価断面1はアール止端部付近の弾性解析による最大応力発生部に、評価断面2は形状不連続から十分離れた高応力側の平滑部に設定した。評価点1、2は評価ライン1、2の表面の点とする。

○相当応力相当ひずみ履歴

積分点の値を用いて外挿した表面の値を使用。

相当応力はMises型、相当ひずみは下式に基づいて算出する。

$$\Delta \varepsilon_{eq} = \frac{\Delta \sigma_{eq}}{E} + \Delta \varepsilon_{eq}^p \quad (3.2)$$

ここで $\Delta \sigma_{eq}$: Mises 型相当応力増分
 $\Delta \varepsilon_{eq}^p$: Mises 型相当塑性ひずみ増分
 E : 縦弾性係数

ここで、増分は負荷の状態（極値時点 A）を基準として算出する。最終負荷状態（極値時点 B）に対する増分が範囲となる。なお、相当応力増分、相当塑性ひずみ増分は成分毎の増分より算出した。また、ここでの解析は単調負荷で行っているため、相当応力増分値等は相当応力値等と一致する。

○ひずみ集中係数

ひずみ集中係数 K_ε は以下のように算出する。

$$K_\varepsilon = \frac{\Delta \varepsilon_{eq1}}{\Delta \varepsilon_{eq,e2}} \quad (3.3)$$

ここで $\Delta \varepsilon_{eq1}$: 評価点の相当ひずみ増分
 $\Delta \varepsilon_{eq,e2}$: 平滑部の相当ひずみ増分（弾性解析）

○弾性追従パラメータ

弾性追従パラメータ q_F 及びクリープ弾性追従パラメータ q_c は以下のように算出する。

$$q_F = \frac{\Delta \varepsilon_{eq} - \Delta \varepsilon_{eq,e} \cdot \Delta \sigma_{eq} / \Delta \sigma_{eq,e}}{\Delta \varepsilon_{eq,e} (1 - \Delta \sigma_{eq} / \Delta \sigma_{eq,e})} \quad (3.4)$$

$$q_c = \frac{\Delta \varepsilon_c \cdot E}{\Delta \sigma} \quad (3.5)$$

ここで $\Delta \varepsilon_{eq}$: 相当ひずみ増分
 $\Delta \varepsilon_{eq,e}$: 相当ひずみ増分（弾性解析）
 $\Delta \sigma_{eq}$: Mises 型相当応力増分
 $\Delta \sigma_{eq,e}$: Mises 型相当応力増分（弾性解析）
 $\Delta \varepsilon_c$: Mises 型相当クリープひずみ増分
 $\Delta \sigma$: 応力緩和開始時点と終了時点の Mises 型相当応力差の絶対値
 E : 縦弾性係数

3.3 解析条件

フィレット付き帯板の解析条件を表 3.1 に示す。

表 3. 1 解析条件 (フィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒)

解析ケース名	負荷の種類	弾塑性特性	E	σ_y	H'	解析条件	ノルトン則定数		平 面 条 件	(注1) 負荷の大きさ (kg/mm ²)	モ デ ル
							B	n			
CASE1-1-M	軸 力	弾完全塑性体	16000	32	16.0	弾 塑 性	—	—	一般化平面ひずみ	75	帯 板
CASE1-2-M	軸 力	2 直線近似	16000	40	400	"	—	—	"	75	"
CASE1-2-B	曲 げ	2 直線近似	16000	40	400	"	—	—	"	75	"
CASE1-3-M	軸 力	2 直線近似	16000	14	10000	"	—	—	"	75	"
CASE1-3-B	曲 げ	2 直線近似	16000	14	10000	"	—	—	"	75	"
CASE1-4-M	軸 力	Ludwik 型	16000	10	—	"	—	—	"	75	"
CASE1-4-B	曲 げ	Ludwik 型	16000	10	—	"	—	—	"	75	"
CASE1-5-M	軸 力	2 直線近似	16000	40	400	応力緩和	2.0589×10^{-13}	4.3247	"	30(注2)	"
CASE1-5-B	曲 げ	2 直線近似	16000	40	400	"	"	"	"	30(注2)	"
CASE1-6-M	軸 力	Ludwik 型	16000	10	—	"	"	"	"	(注3)	"
CASE1-6-B	曲 げ	Ludwik 型	16000	10	—	"	"	"	"	(注3)	"
CASE1-7-M	軸 力	弾完全塑性体	16000	32	16.0	弾 塑 性	—	—	平 面 ひ ず み	75	"
CASE1-8-M	軸 力	弾完全塑性体	16000	32	16.0	"	—	—	平 面 応 力	75	"
CASE2-1-M	軸 力	弾完全塑性体	16000	32	16.0	"	—	—	軸 対 称	100	フィレット付き 変断面丸棒
CASE2-2-M	軸 力	2 直線近似	16000	40	400	"	—	—	"	100	"
CASE2-3-M	軸 力	弾完全塑性体	16000	32	16.0	応力緩和	10^{-13}	5.0	"	25(注4)	"

(注1) 弾性解析による評価点 2 (平滑部) の相当応力範囲

(注2) 応力緩和開始時における評価点 2 (平滑部) の弾塑性解析による相当応力範囲

(注3) 2 直線近似による応力緩和解析 ($H' = 400$) と同じ変位を負荷して保持

(注4) 応力緩和開始時における評価点 2 (平滑部) の弾塑性解析による相当応力範囲

表3. 2 多直線近似材料特性 (動的応力ひずみ関係 500 °C相当)

i	塑性ひずみ振幅 ε_{pa} (mm/mm)	加工硬化係数 H' (kg/mm^2)
1	0	26108
2	0.00025	9310.3
3	0.00050	6315.2
4	0.001	4283.6
5	0.002	3182.7
6	0.003	2628.5
7	0.004	2280.7
8	0.005	2037.0
9	0.006	1854.5
10	0.007	1711.3
11	0.008	1595.2
12	0.009	1498.7
13	0.010	1381.7
14	0.012	1257.9
15	0.014	1160.8
16	0.016	1082.0
17	0.018	1016.6
18	0.020	926.06
19	0.025	827.13
20	0.030	753.01
21	0.035	694.87
22	0.040	647.74
23	0.045	608.56

Ludwik型 動的応力ひずみ式

$$\Delta\varepsilon = \Delta\sigma / E + \left(\frac{\Delta\sigma - 2\sigma_p}{K} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2} \Delta\varepsilon, \sigma_a = \frac{1}{2} \Delta\sigma \text{ として振幅で書き直すと}$$

$$\varepsilon_a = \sigma_a / E + \left(\frac{\sigma_a - \sigma_p}{A} \right)^{\frac{1}{m}}$$

ここで $A = 2^{m-1} \cdot K$
 SUS304, 500°Cの場合
 $\sigma_p = 10, K = 370, m = 0.44$

多直線で近似し, 塑性ひずみ振幅 ε_{pa} と加工硬化係数 H' のテーブルを作成する。

$$H'_i = \frac{A (\varepsilon_{pa(i)}^m - \varepsilon_{pa1}^m)}{\varepsilon_{pa(i)} - \varepsilon_{pa1}}^{\frac{1}{m}}$$

$$\text{ここで } \varepsilon_{pa1} = \left(\frac{\sigma_{a1} - \sigma_p}{A} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

FINAS

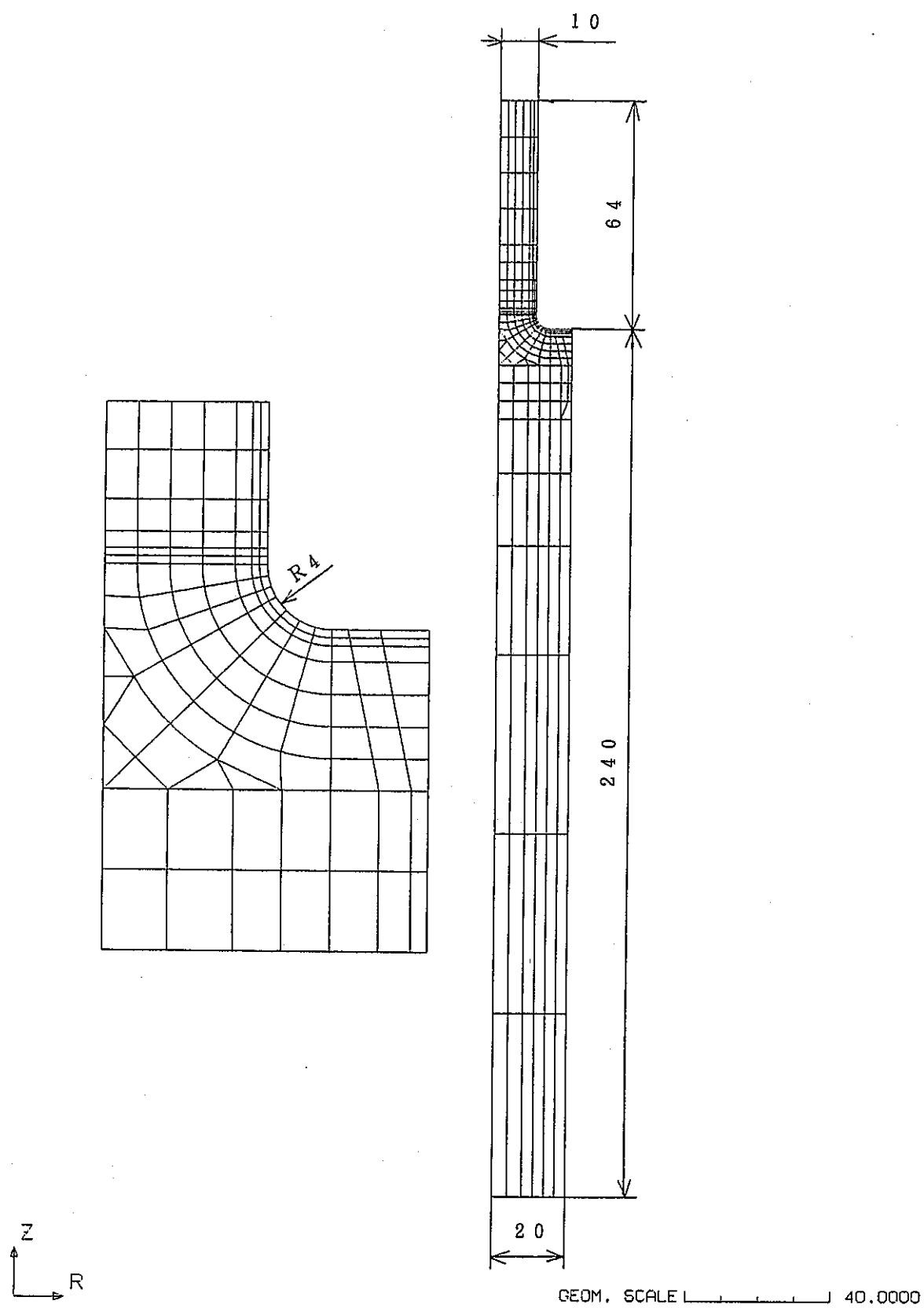


図 3.2

寸法および要素分割

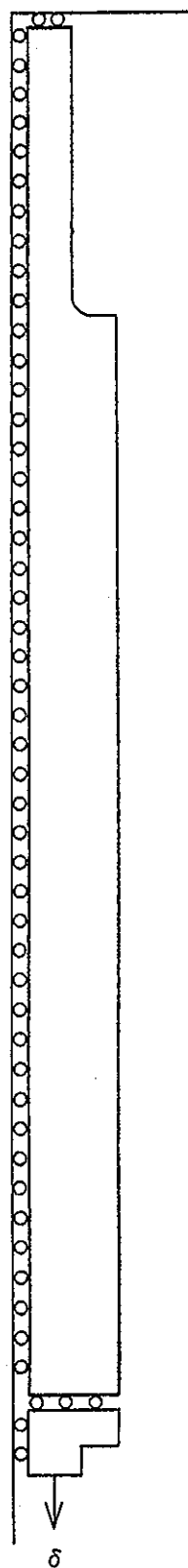


図 3.3 (a)

境界条件 (引張り負荷)

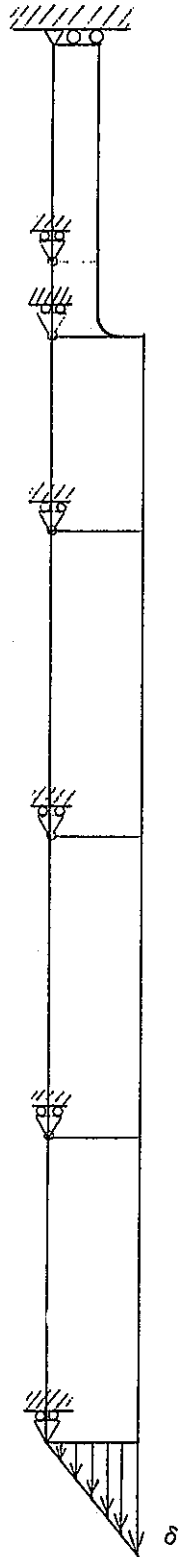


図 3.3 (b) 境界条件 (曲げ負荷)

3・4 解析結果

3. 4. 1 リファレンス解析結果

(1) 目的

フィレット付き帯板の構造不連続部におけるひずみ集中の基本挙動を把握する。

(2) 方法

代表的設計条件をより簡素化したものとして以下に示す様なリファレンス条件 (CASE 1-1-M) を設定し、弾性及び弾塑性解析を行なう。

○要素の種類

QPLAN9 (9 節点 4 辺形一般化平面ひずみ要素)

○材料特性

弾完全塑性体

$$E = 16000 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$\sigma_y = 32.0 \text{ kg/mm}^2 \text{ (付録 A. 1 参照)}$$

$$H' = 16.0 \text{ kg/mm}^2 \text{ (E の } 1/1000 \text{ の値を設定)}$$

○負荷

軸方向引張り負荷 (膜応力場)

(3) 結果

リファレンス条件におけるフィレット付き帯板についての解析結果を以下に示す。尚、負荷開始時点を極値時点 A、負荷終了時点を極値時点 B とする。

①相当応力相当ひずみの履歴

解析が正しく行われていることを確認するために、応力集中部及び平滑部における相当応力相当ひずみの履歴を弾性解析及び弾塑性解析の場合について図 3. 4. 1 示す。応力集中部については弾性解析の結果についても示す。図より以下のことがわかる。

○弾塑性解析の場合、応力集中部での降伏点において若干解が乱れているが、ほぼ仮定した応力ひずみ関係に従っており妥当な解析結果となっていることがわかる。なお、この乱れはステップとステップの間に降伏点が入ったことによると考えられる。

②Mises 相当応力コンター図

極値時点 B における弾性解析及び弾塑性解析の Mises 相当応力コンター図を図 3. 4. 2 に示す。なお、図は応力集中部付近を拡大してある。図より以下のことがわかる。

○応力集中部はフィレットのアール止端部よりややアール部側に生じる。

○弾塑性解析の場合、高応力部材側の平滑部では全断面降伏し、低応力部材側では弾性状態のままである。

○弾塑性解析の場合、フィレット付近の板幅中央部に低応力部が存在する。

ここで、評価断面 1 の詳細を図 3.4.3 に示す。評価点 1 は弾性解析における最大相当応力発生部位に相当する。

③ Mises 相当塑性ひずみコンター図

応力集中部降伏時、高応力側部材平滑部（評価点 2）降伏時及び極値時点 B における Mises 相当塑性ひずみコンター図を図 3.4.4 に示す。図より以下のことがわかる。

○相当塑性ひずみも応力集中部同様評価点 1 付近より発生する。

○平滑部降伏後評価点 1 付近ではあまり塑性化が進まず、平滑部の塑性化が急速に進む。

○極値時点 B では、平滑部で広範囲にわたり応力集中部を上回る相当塑性ひずみが生じている。

④ ひずみ集中係数 K_ε の履歴

評価点 1 及び評価点 2 におけるひずみ集中係数 K_ε の履歴を図 3.4.5 に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点 2 の相当応力範囲を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾塑性解析による評価点 1 及び評価点 2 の相当ひずみ範囲を弾性解析による評価点 2 の相当ひずみで無次元化したものである。図より以下のことがわかる。

○評価点 1 のひずみ集中は初期に急激に立ち上がりノイパー型の挙動を示す。

○評価点 1 のひずみ集中係数は評価点 2（平滑部）が降伏するまでは増加するが、それ以降（全断面降伏後）では減少する傾向が見られる。

○評価点 2 のひずみ集中係数は降伏後単調に増加し、評価点 1 の値を上回る。

⑤ 弾性追従パラメータ q_F の履歴

評価点 1 及び評価点 2 における弾性追従パラメータの履歴を図 3.4.6 に示す。図で横軸は弾性解析によるピーク応力強さ増分（評価点における相当応力増分） S_p を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾性追従パラメータである。図より以下のことがわかる。

○評価点 1 において、 $S_p/\sigma_y \approx 1.8$ （平滑部降伏）までは増加するがそれ以降では減少する傾向が見られる。

○評価点 2 では、評価点 1 の値を上回りほぼ直線的に増加する。

(4) まとめ

リファレンス条件についてフィレット付き帯板の弾塑性解析を行い、応力集中部におけるひずみ集中基本挙動を検討した結果をまとめると以下のようなになる。

○相当応力の分布をみると弾性状態ではフィレットのオール止端部付近（評価点 1）に集中が見られるが、弾塑性状態では平坦化し高応力側部材の平滑部（評価点 2）と同程度の値となる。

○塑性変形が充分進んだ状態における相当塑性ひずみの分布を見ると評価点 2 で最

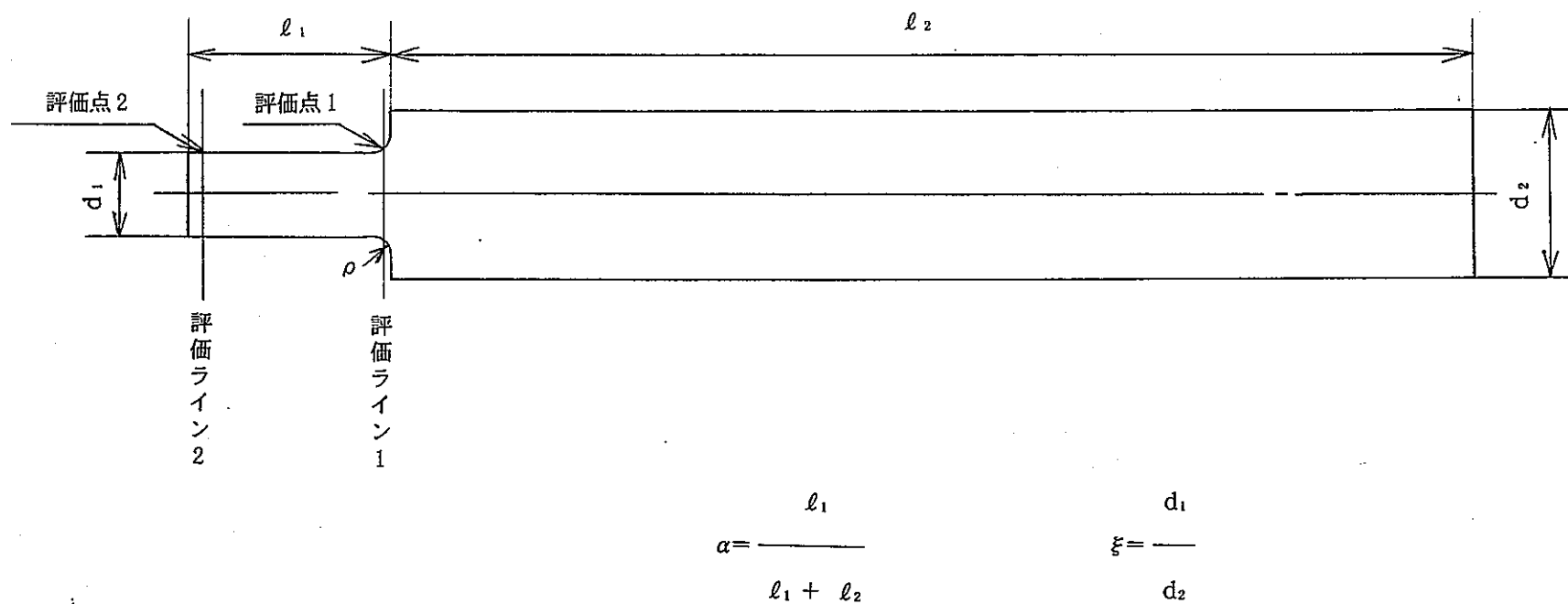


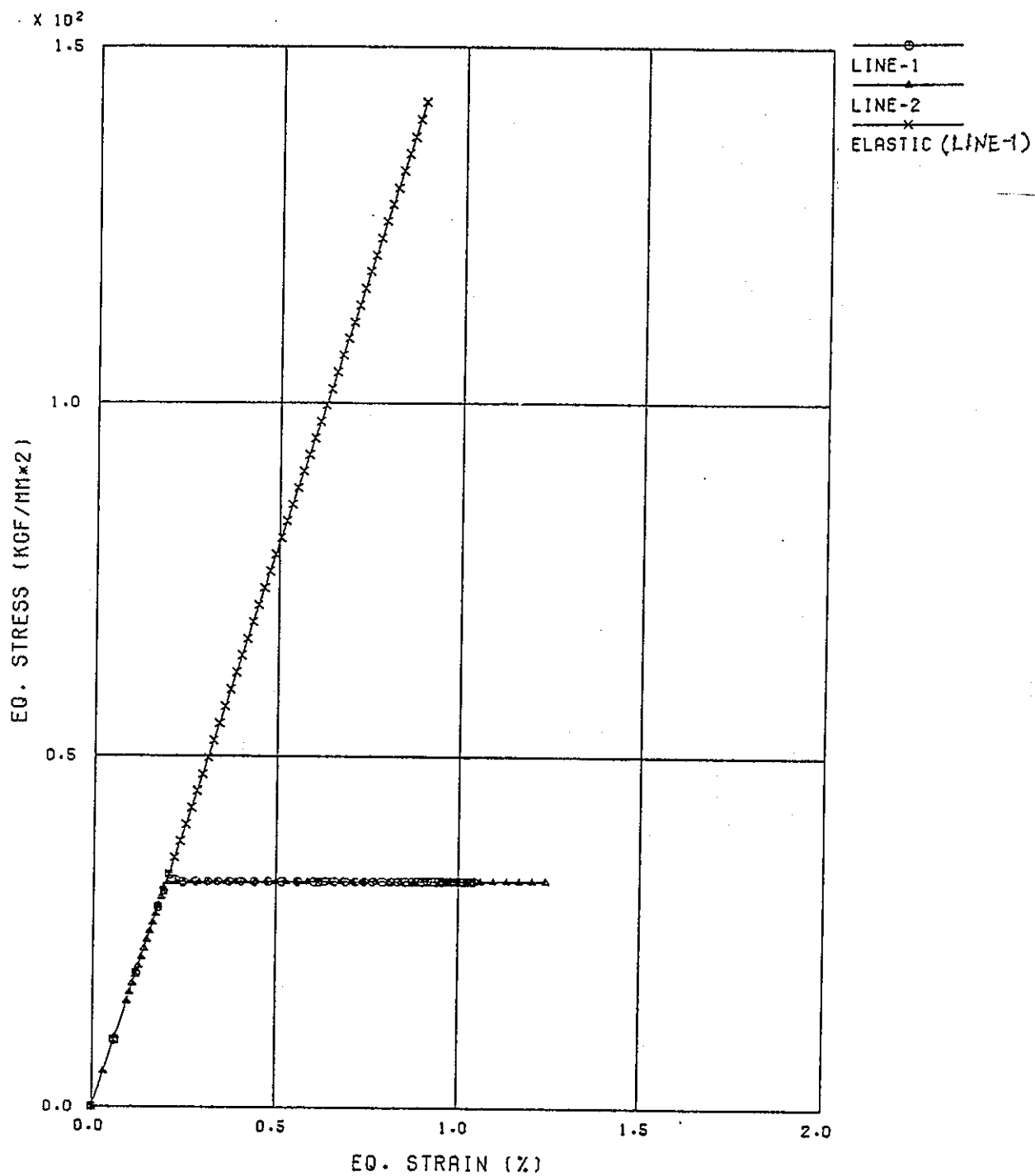
図 3. 1

解析モデル (フィレット付き帯板)

大となり、形状不連続部に近づくとともに減少し低応力側部材で0となる。なお、評価点1でも相当塑性ひずみの集中がみられるが、評価点2の値には及ばない。

- 評価点1のひずみ集中係数は降伏後急激に増大するが、評価点2の降伏後増大傾向が鈍化しその後減少に向かう。これは評価断面1では帯板の中心線付近が弾性状態にあるため変形抵抗を有するのに対し、評価断面2では全断面が降伏して変形抵抗を失い外部強制変位をすべて分担するためと考えられる。
- フィレット付き帯板のように、局所的構造不連続によるひずみ集中部（評価点1）と総体的構造不連続によるひずみ集中部（評価点2）が離れて存在する場合、最大ひずみ発生部が評価点1から評価点2に移行し、両者の重畳効果は乗算型ではなく最大値型で表しうると期待される。

FINAS



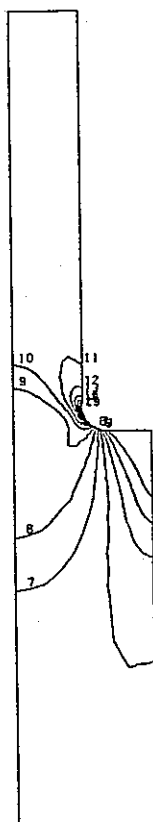
STRESS-STRAIN CURVE

図 3.4.1

相当応力・相当ひずみの履歴（弾性解析およびCASE1-1-M）

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES
1 4.600000
2 11.700000
3 18.800000
4 25.900000
5 33.000000
6 40.100000
7 47.200000
8 54.300000
9 61.400000
10 68.500000
11 75.600000
12 82.700000
13 89.800000
14 96.900000
15 104.0000
16 111.1000
17 118.2000
18 125.3000
19 132.4000
20 139.5000



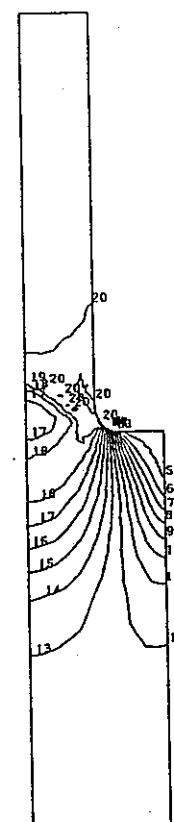
弾性解析

STEP NO. 52

VON-MISES STRESS CONTOUR

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES
1 1.800000
2 3.400000
3 5.000000
4 6.600000
5 8.200000
6 9.800000
7 11.400000
8 13.000000
9 14.600000
10 16.200000
11 17.800000
12 19.400000
13 21.000000
14 22.600000
15 24.200000
16 25.800000
17 27.400000
18 29.000000
19 30.600000
20 32.200000



弾塑性解析

STEP NO. 52

VON-MISES STRESS CONTOUR

図 3.4.2

ミーゼス相当応力コンター図 (弾性解析およびCASE1-1-M)

FINAS

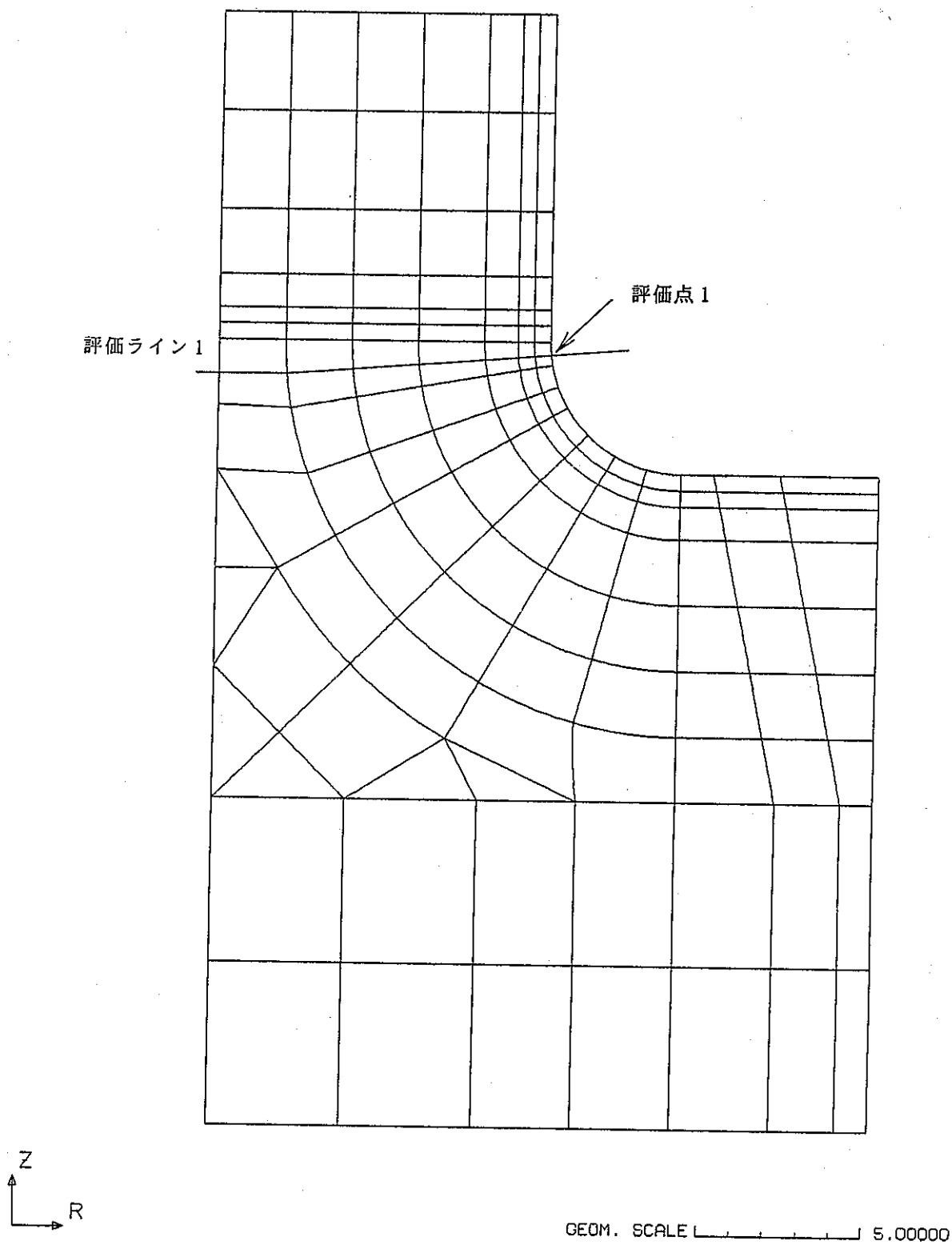
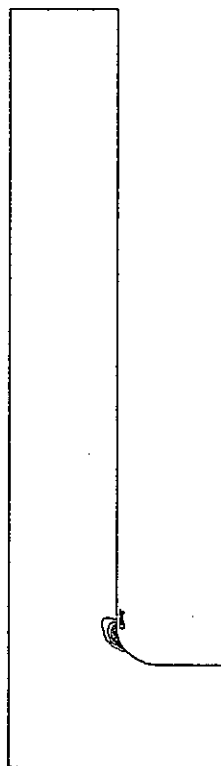


図 3.4.3

評価断面 1 の詳細図

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 5.000-04
2 1.000-03
3 1.500-03
4 2.000-03
5 2.500-03
6 3.000-03
7 3.500-03
8 4.000-03
9 4.500-03
10 5.000-03
11 5.500-03
12 6.000-03
13 6.500-03
14 7.000-03
15 7.500-03
16 8.000-03
17 8.500-03
18 9.000-03
19 9.500-03
20 1.000-02



Y
X

応力集中部降伏時

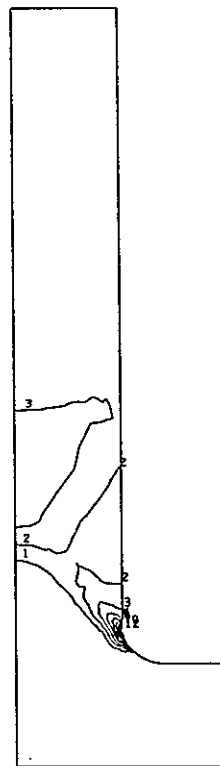
STEP NO. 16

GEOM. SCALE L

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 5.000-04
2 1.000-03
3 1.500-03
4 2.000-03
5 2.500-03
6 3.000-03
7 3.500-03
8 4.000-03
9 4.500-03
10 5.000-03
11 5.500-03
12 6.000-03
13 6.500-03
14 7.000-03
15 7.500-03
16 8.000-03
17 8.500-03
18 9.000-03
19 9.500-03
20 1.000-02



Y
X

平滑部降伏部

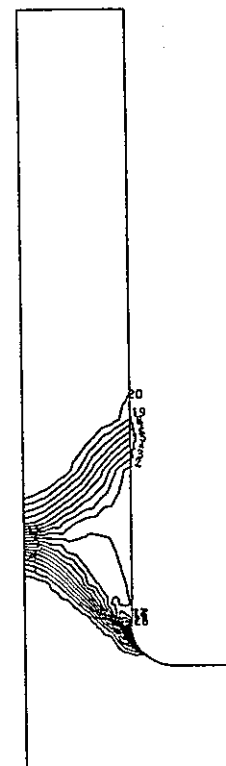
STEP NO. 24

GEOM. SCALE I

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 5.000-04
2 1.000-03
3 1.500-03
4 2.000-03
5 2.500-03
6 3.000-03
7 3.500-03
8 4.000-03
9 4.500-03
10 5.000-03
11 5.500-03
12 6.000-03
13 6.500-03
14 7.000-03
15 7.500-03
16 8.000-03
17 8.500-03
18 9.000-03
19 9.500-03
20 1.000-02



Y
X

極値時点 B

STEP NO. 52

GEOM. SCALE L

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

図 3.4.4

相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-1-M)

L

L

FINAS

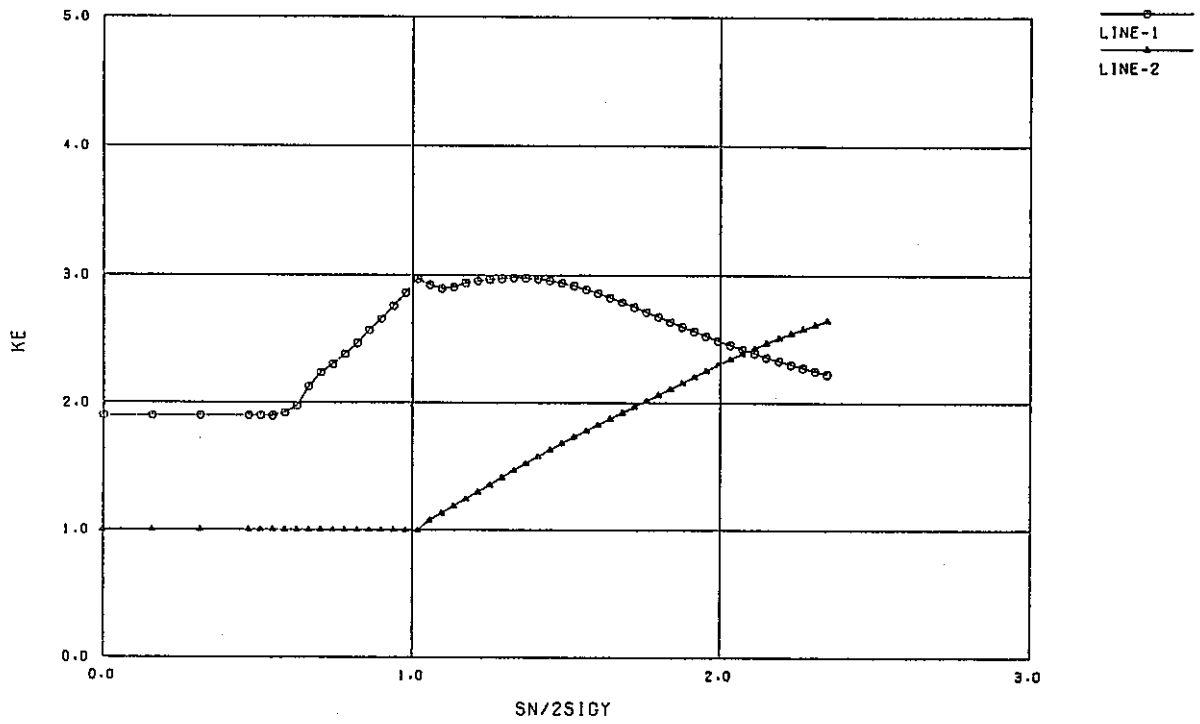


図 3.4.5 ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-1-M)

FINAS

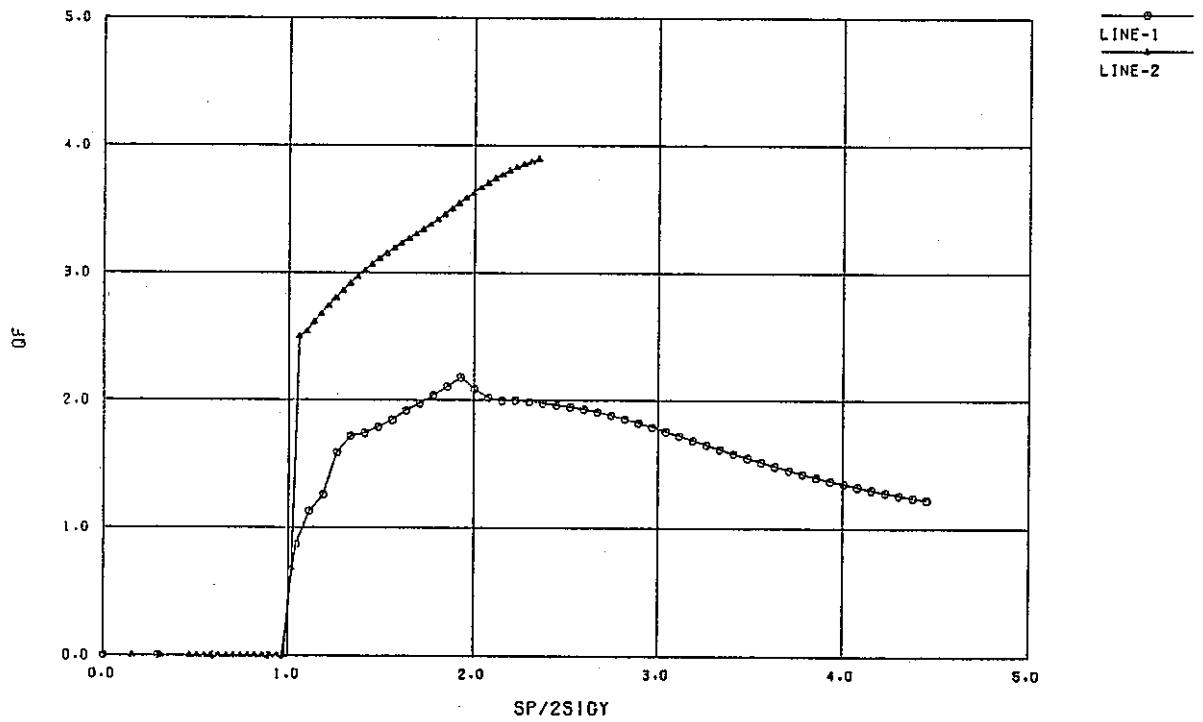


図 3.4.6 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-1-M)

3. 4. 2 材料特性の影響

(1) 目的

単軸ベースの材料データは存在するが、その材料データは構造物に対し適用し難い。非弾性材料特性因子である降伏応力と加工硬化係数を変えることにより材料特性が構造物における応力集中部のひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に及ぼす影響を調べる。

(2) 方法

材料特性として弾完全塑性体、2直線近似及びLudwik型を想定して弾塑性解析及び応力緩和解析を行う。ここで応力緩和解析に対してはCASE1-5-M をリファレンスとする。負荷はすべて軸方向引張り（膜応力場）である。

(3) 結果

①相当応力相当ひずみの履歴

材料特性を変化させた場合の、応力集中部及び平滑部における相当応力相当ひずみの履歴図を以下に示す。

1)弾塑性解析

- ・弾完全塑性体 (CASE1-1-M) 図 3. 4. 7 (a)
- ・2直線近似 (CASE1-2-M, $H' = 400$) 図 3. 4. 7 (b)
- ・2直線近似 (CASE1-3-M, $H' = 10000$) 図 3. 4. 7 (c)
- ・Ludwik型 (CASE1-4-M) 図 3. 4. 7 (d)

2)応力緩和解析

- ・2直線近似 (CASE1-5-M, $H' = 400$) 図 3. 4. 8 (a)
- ・Ludwik型 (CASE1-6-M) 図 3. 4. 8 (b)

これらの図より以下のことがわかる

- 2直線近似の場合もリファレンス（弾完全塑性体）同様、ステップの影響により応力集中部の降伏点で多少解が乱れているが、ほぼ妥当な解析結果となっている。
- Ludwik型の場合、降伏点付近でのステップが荒いために応力集中部の解に多少乱れが生じ平滑部の値よりも高い値となっている。また、図中に破線で仮定した応力ひずみ関係を記したが、平滑部の値も多少これより高めになっていることがわかる。弾塑性解析で得られたひずみ増大挙動は、解析ステップの粗さにより多少小さめとなる点に注意を払う必要がある。
- 2直線近似及びLudwik型の両者とも、評価点1における応力緩和時のひずみ増大挙動は総体的弾性追従よりも多少大きくなる。

②Mises 相当応力コンター図

材料特性を変化させた場合の極値時点 B におけるMises 相当応力コンター図を図 3. 4. 9 に示す。なお、図ではフィレット部付近を拡大してある。図より以下のことがわかる。

- 2直線近似で H' が小さい場合は弾完全塑性体に近い分布となるが、2直線近似で H' が大きい場合とLudwik型では弾性解析の値に近づく。
- 加工硬化が大きいほど応力集中部の勾配が急になり、領域が狭くなる。

○加工硬化を考慮した場合もフィレット部の板幅中央部に低応力部が存在する。

③ Mises 相当塑性ひずみコンター図

材料特性を変化させた場合の極値時点 B における Mises 相当塑性ひずみコンター図を図 3.4.10 に示す。図より以下のことがわかる。

○加工硬化の増加に伴い塑性ひずみ範囲は減少する。

○弾完全塑性体に近い材料特性では低応力側部材は弾性状態のままであるのに対し、加工硬化が大きくなるにつれて塑性領域が低応力側部材へ拡大する。

④ ひずみ集中係数の履歴

材料特性を変化させた場合の評価点 1 及び評価点 2 におけるひずみ集中係数 K_ε の履歴を以下に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点 2 の相当応力増分 S_n を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾塑性解析による評価点 1 及び評価点 2 の相当ひずみ増分を弾性解析による評価点 2 の相当ひずみ増分で無次元化したものである。

1) 弾塑性解析

- ・弾完全塑性体 (CASE1-1-M) 図 3.4.11 (a)
- ・2 直線近似 (CASE1-2-M, $H' = 400$) 図 3.4.11 (b)
- ・2 直線近似 (CASE1-3-M, $H' = 10000$) 図 3.4.11 (c)
- ・Ludwik 型 (CASE1-4-M) 図 3.4.11 (d)

これらの図より以下のことがわかる

○加工硬化を考慮した場合もリファレンスケース (弾完全塑性体) 同様、評価点 1 のひずみ集中係数の増分は評価点 2 降伏後鈍化する傾向を示すが、負荷レベルの増加に伴い ($S_n / 2\sigma_y > 2$) ひずみ集中係数が増加しつづけるケース (CASE 1-2-M, CASE1-4-M) と減少するケース (CASE1-3-M) がある。

○CASE1-3-M (2 直線近似, $H' = 10000$) の場合、評価点 1 だけでなく評価点 2 のひずみ集中係数も負荷レベルの大きい範囲で減少する傾向が見られる。これは、低応力側部材降伏が影響していると考えられる。

○Ludwik 型 (CASE1-4-M) のひずみ増大は弾性追従型 ($q \approx 1.5$) の挙動を示す。

○評価点 1 の極値時点 B におけるひずみ集中係数値は $H' = 400$ の場合と Ludwik の場合とで同程度となっている。

⑤ 弾性追従パラメータ q_F 及びクリープ弾性追従パラメータ q_c の履歴

材料特性を変化させた場合の評価点 1 及び評価点 2 における弾性追従パラメータ q_F の履歴を以下に示す。図で横軸は弾塑性解析で得られた評価点 1 及び評価点 2 の相当応力範囲を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾性追従パラメータ q_F である。また、クリープ弾性追従パラメータ q_c の履歴も以下に示す。図で横軸は時間であり、縦軸はクリープ弾性追従パラメータ q_c である。

1) 弾塑性解析

- ・弾完全塑性体 (CASE1-1-M) 図 3.4.12 (a)

- ・ 2 直線近似 (CASE1-2-M, $H' = 400$) 図 3.4.12 (b)
- ・ 2 直線近似 (CASE1-3-M, $H' = 10000$) 図 3.4.12 (c)
- ・ Ludwik型 (CASE1-4-M) 図 3.4.12 (d)

2) 応力緩和解析

- ・ 2 直線近似 (CASE1-5-M, $H' = 400$) 図 3.4.13 (a)
- ・ Ludwik型 (CASE1-6-M) 図 3.4.13 (b)

これらの図より以下のことがわかる

- 弾性追従パラメータ q_F の履歴はひずみ集中係数の履歴と同様の挙動を示す。
- Ludwik型 (CASE1-4-M) の場合、弾性追従パラメータは高負荷レベルまではほぼ一定値 ($q_F \approx 2$) を示し、ひずみ集中が弾性追従型挙動であることがわかる。
- 弾完全塑性体に近い材料特性の場合 (CASE1-1-M, CASE1-2-M)、評価点 2 の弾性追従パラメータはほぼ直線的に増加するのに対し、加工硬化の大きい材料特性 (CASE1-3-M, CASE1-4-M) では評価点 2 の弾性追従パラメータに減少する傾向が見られる。
- 弾塑性解析として 2 直線近似 (CASE1-4-M) を想定した場合のクリープ弾性追従パラメータ q_c は評価点 1, 2 共に 1000 時間ぐらいまではほぼ一定値であるが、それ以後は時間と共に増加する。
- 弾塑性解析として Ludwik型 (CASE1-5-M) を想定した場合のクリープ弾性追従パラメータ q_c は評価点 2 ではあまり大きな変化は見られないが、評価点 1 では時間と共に 1 から 2.8 程度まで増加する。

(4) まとめ

弾塑性材料特性として弾完全塑性体、2 直線近似及び Ludwik 型を想定して弾塑性解析を、クリープ特性としてノルトン則を想定して応力緩和解析を行うことにより、材料特性の違いが応力集中部におけるひずみ挙動にどのような影響を与えるかを調べた結果をまとめると以下のようになる。

- 弾塑性状態における相当応力の分布は加工硬化が小さい場合高応力部材側で平坦化するが、加工硬化が大きくなると弾性解析の応力分布形態に近づく。
- 相当塑性ひずみの分布は加工硬化が大きくなると低応力部材側へも広がる。
- 評価点 1 のひずみ集中係数は比較的小さな加工硬化係数 ($H' = 400$) を考慮することにより評価点 2 の降伏後増大傾向は鈍化するが減少傾向はなくなる。これは評価点 2 が全断面降伏後も加工硬化して変形抵抗を有するためと考えられるがさらに検討する必要がある。
- 加工硬化係数が大きくなると低応力側の部材でも全断面降伏が起こり、評価点 1、2 ともひずみ集中係数が減少する。
- 評価点 2 のひずみ集中係数は弾完全塑性体を想定することにより最も保守的になるが、評価点 1 では必ずしもそうならないことに留意する必要がある。
- 応力緩和における評価点 1 のクリープ弾性追従パラメータ値は評価点 2 の総体的なクリープ弾性追従パラメータ値を多少上回る。また、クリープ弾性追従パラメータの最終値は弾塑性特性の影響を受けにくい。

FINAS

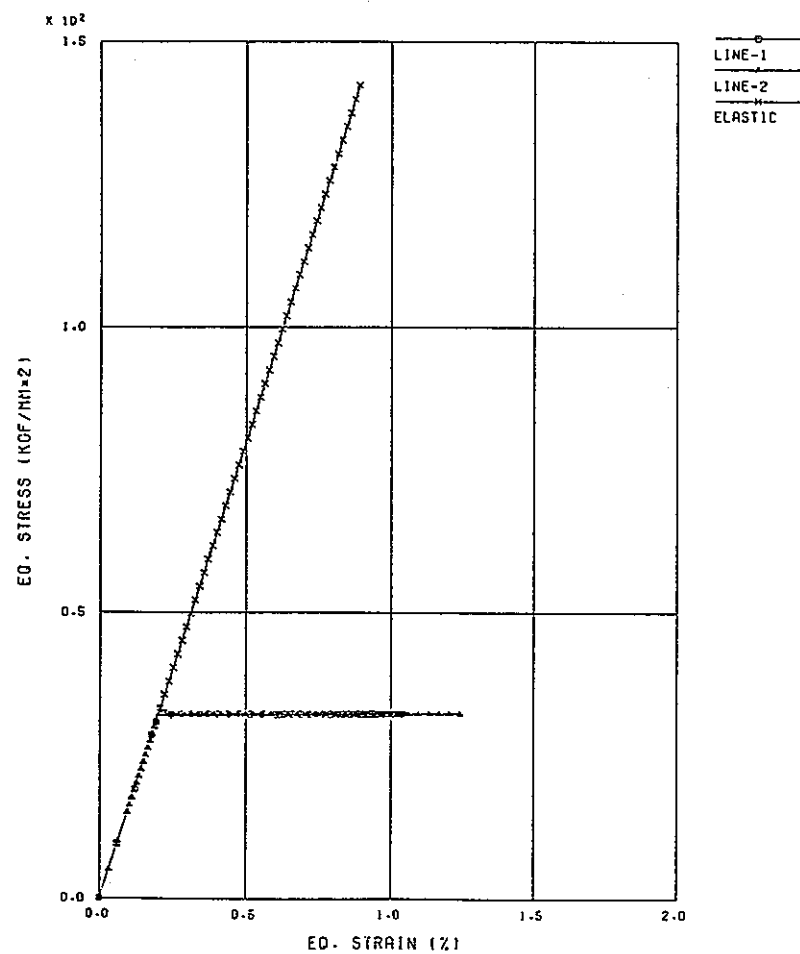


図3.4.7 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴
(弾性解析およびCASE1-1-M)

FINAS

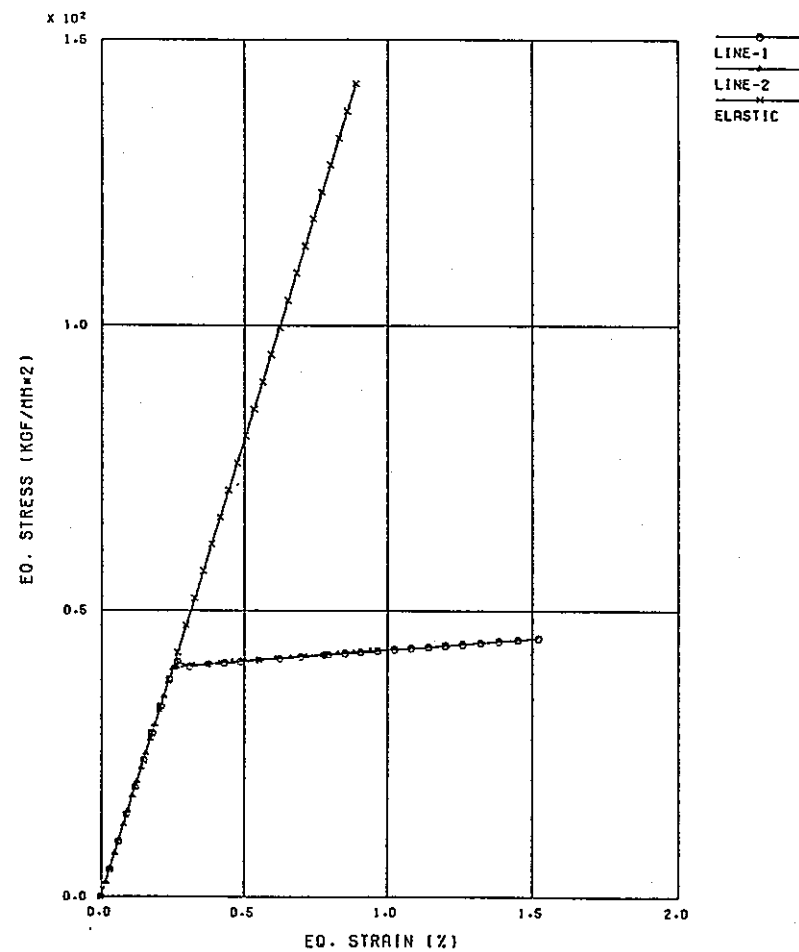


図3.4.7 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴
(弾性解析およびCASE1-2-M)

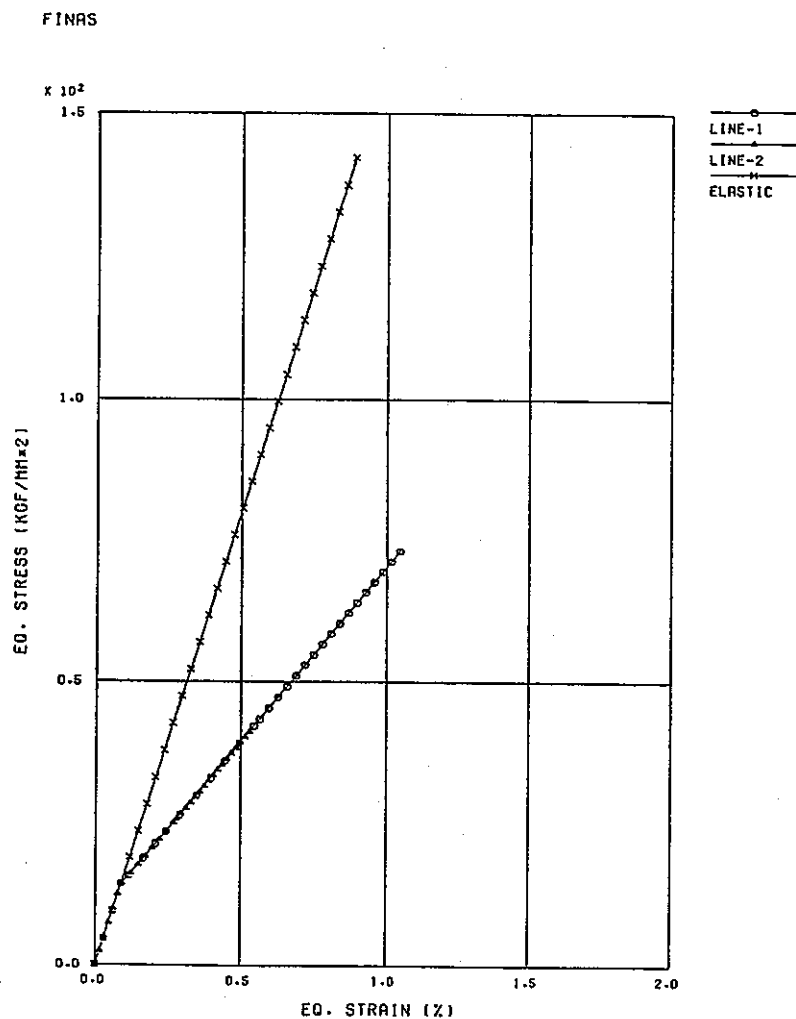


図 3.4.7 (c) 相当応力・相当ひずみの履歴
(弾性解析およびCASE1-3-M)

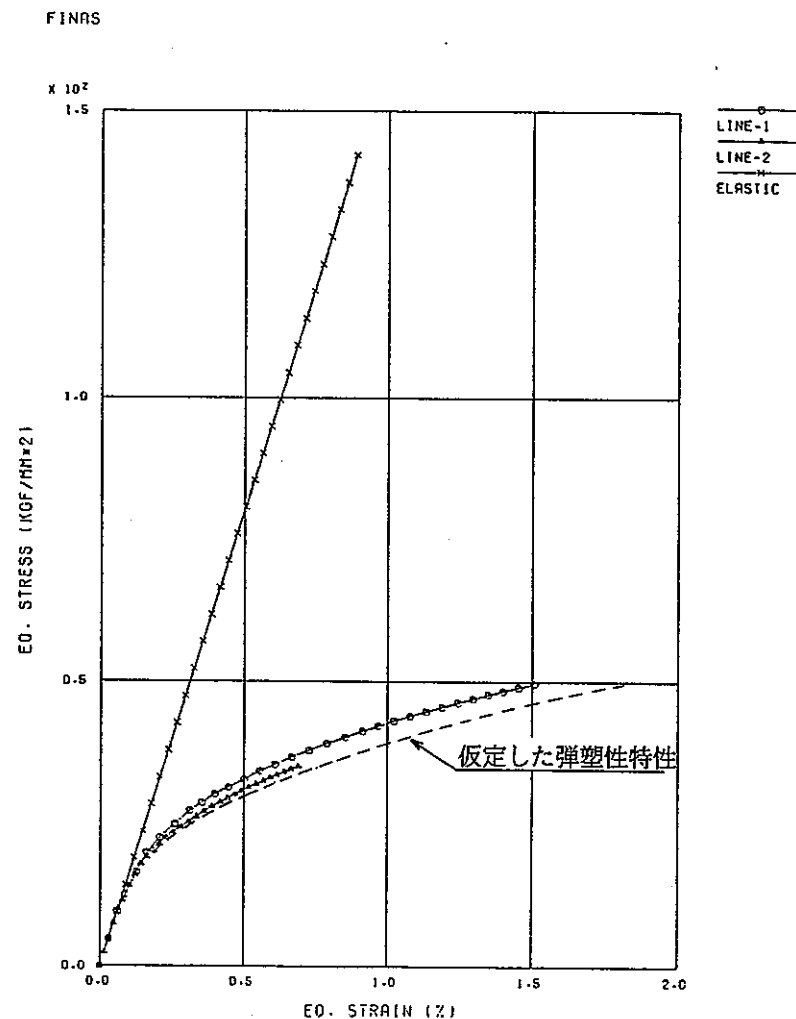


図 3.4.7 (d) 相当応力・相当ひずみの履歴
(弾性解析およびCASE1-4-M)

FINAS

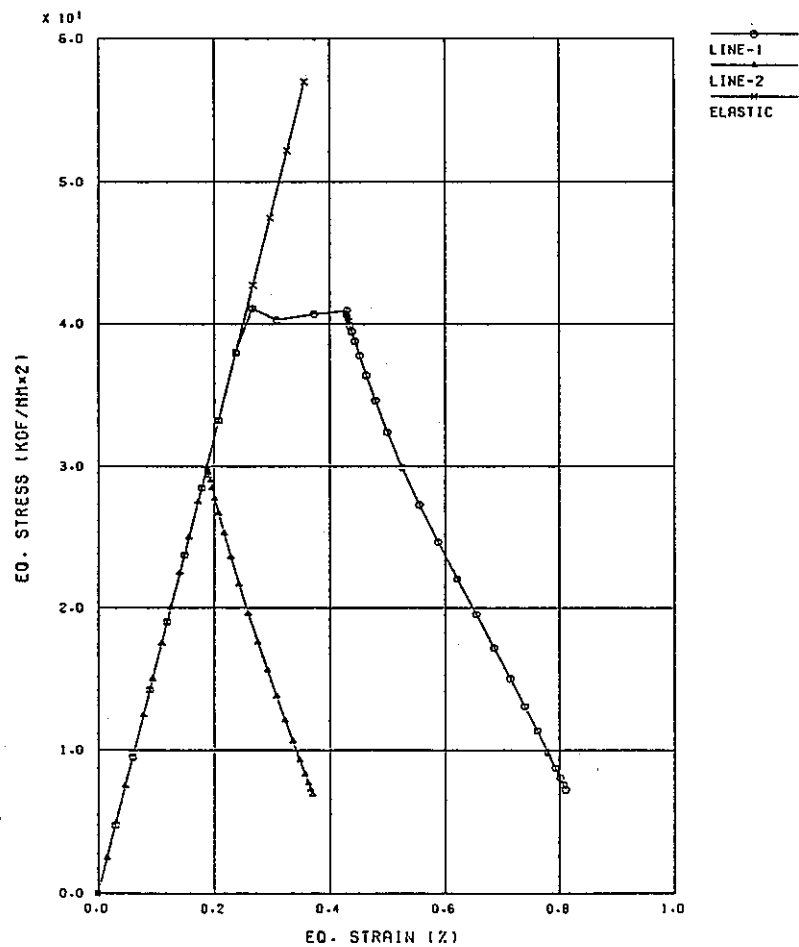


図3.4.8 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴
(弾性解析およびCASE1-5-M)

FINAS

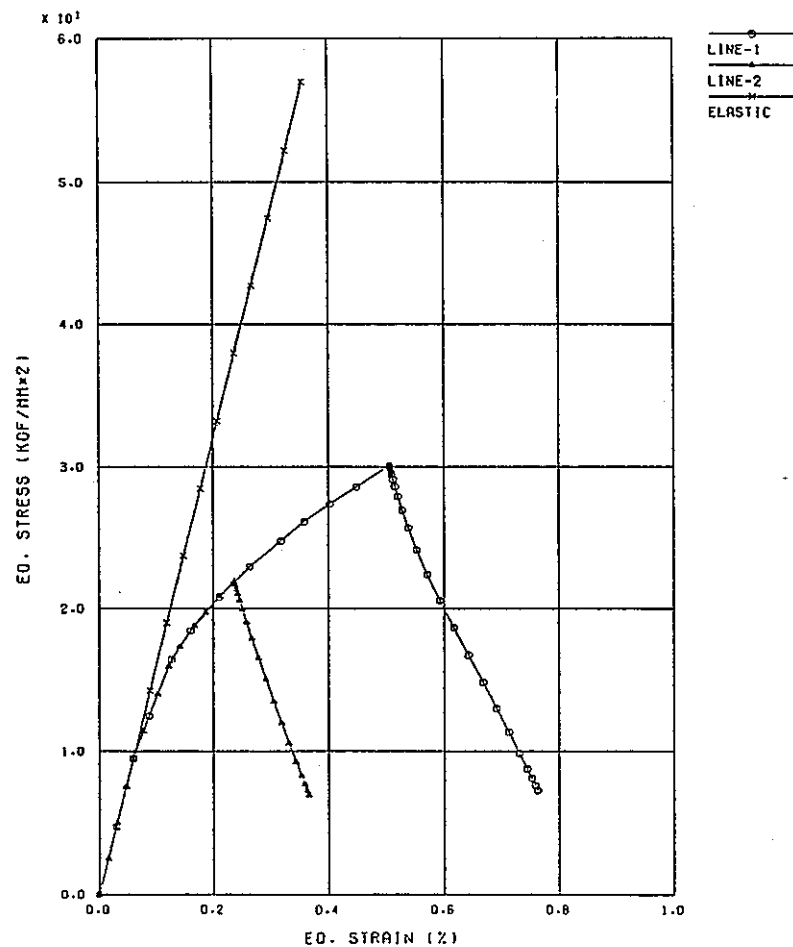
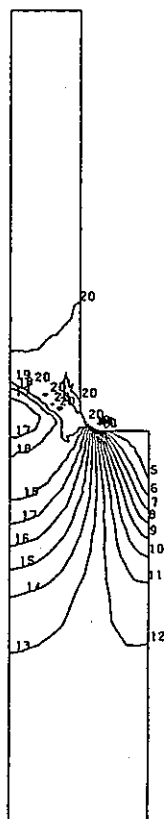


図3.4.8 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴
(弾性解析およびCASE1-6-M)

FINAS
VON MISES

CONTOUR VALUES
1 1.800000
2 3.400000
3 5.000000
4 6.600000
5 8.200000
6 9.800000
7 11.40000
8 13.00000
9 14.60000
10 16.20000
11 17.80000
12 19.40000
13 21.00000
14 22.60000
15 24.20000
16 25.80000
17 27.40000
18 29.00000
19 30.60000
20 32.20000



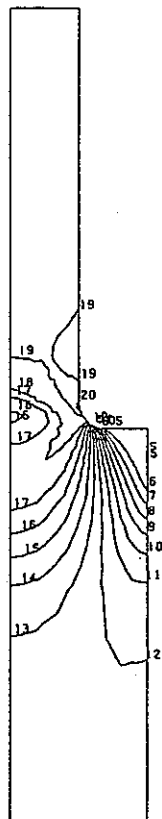
Y
X

弾完全塑性体

GEOM. SCALE

FINAS
VON MISES

CONTOUR VALUES
1 0.700000
2 3.000000
3 5.300000
4 7.600000
5 9.900000
6 12.20000
7 14.50000
8 16.80000
9 19.10000
10 21.40000
11 23.70000
12 26.00000
13 28.30000
14 30.60000
15 32.90000
16 35.20000
17 37.50000
18 39.80000
19 42.10000
20 44.40000



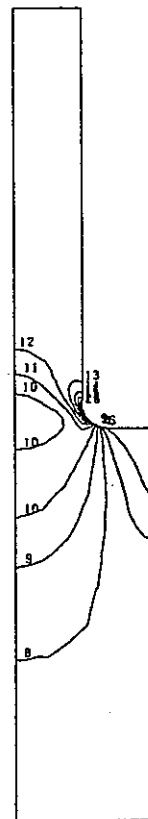
Y
X

2 直線近似 ($H' = 400$)

GEOM. SCALE

FINAS
VON MISES :

CONTOUR VALUES
1 -3.400000
2 0.500000
3 4.400000
4 8.300000
5 12.20000
6 16.10000
7 20.00000
8 23.90000
9 27.80000
10 31.70000
11 35.60000
12 39.50000
13 43.40000
14 47.30000
15 51.20000
16 55.10000
17 59.00000
18 62.90000
19 66.80000
20 70.70000



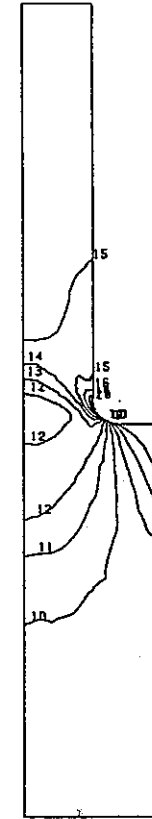
Y
X

2 直線近似 ($H' = 10000$)

GEOM. SCALE

FINAS
VON MISES E

CONTOUR VALUES
1 -2.80000
2 -1.00-01
3 2.600000
4 5.300000
5 8.000000
6 10.70000
7 13.40000
8 16.10000
9 18.80000
10 21.50000
11 24.20000
12 26.90000
13 29.60000
14 32.30000
15 35.00000
16 37.70000
17 40.40000
18 43.10000
19 45.80000
20 48.50000



Y
X

Ludwik型

GEOM. SCALE

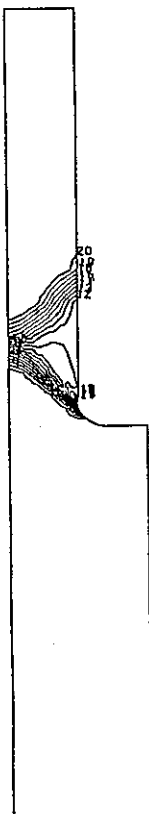
図 3.4.9

ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-1-M, CASE1-2-M,
CASE1-3-M, CASE1-4-M)

FINAS
EQUIVALENT

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.000-03
3	1.500-03
4	2.000-03
5	2.500-03
6	3.000-03
7	3.500-03
8	4.000-03
9	4.500-03
10	5.000-03
11	5.500-03
12	6.000-03
13	6.500-03
14	7.000-03
15	7.500-03
16	8.000-03
17	8.500-03
18	9.000-03
19	9.500-03
20	1.000-02



Y
X

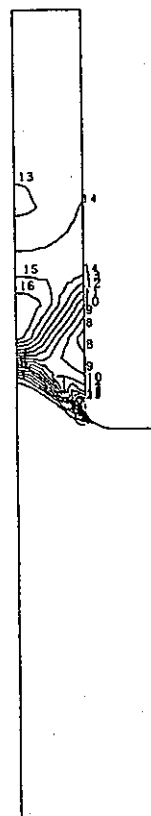
弾完全塑性体

GEOM. SCALE

FINAS
EQUIVALENT

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.000-03
3	1.500-03
4	2.000-03
5	2.500-03
6	3.000-03
7	3.500-03
8	4.000-03
9	4.500-03
10	5.000-03
11	5.500-03
12	6.000-03
13	6.500-03
14	7.000-03
15	7.500-03
16	8.000-03
17	8.500-03
18	9.000-03
19	9.500-03
20	1.000-02



Y
X

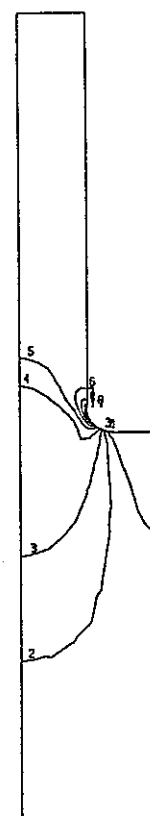
2 直線近似 ($H^*=400$)

GEOM. SCALE

FINAS
EQUIVALENT

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.000-03
3	1.500-03
4	2.000-03
5	2.500-03
6	3.000-03
7	3.500-03
8	4.000-03
9	4.500-03
10	5.000-03
11	5.500-03
12	6.000-03
13	6.500-03
14	7.000-03
15	7.500-03
16	8.000-03
17	8.500-03
18	9.000-03
19	9.500-03
20	1.000-02



Y
X

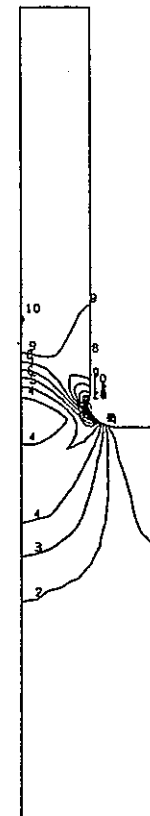
2 直線近似 ($H^*=10000$)

GEOM. SCALE

FINAS
EQUIVALENT

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.000-03
3	1.500-03
4	2.000-03
5	2.500-03
6	3.000-03
7	3.500-03
8	4.000-03
9	4.500-03
10	5.000-03
11	5.500-03
12	6.000-03
13	6.500-03
14	7.000-03
15	7.500-03
16	8.000-03
17	8.500-03
18	9.000-03
19	9.500-03
20	1.000-02



Y
X

Ludwik型

GEOM. SC

図 3.4.10

相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-1-M, CASE1-2-M,
CASE1-3-M, CASE1-4-M)

FINAS

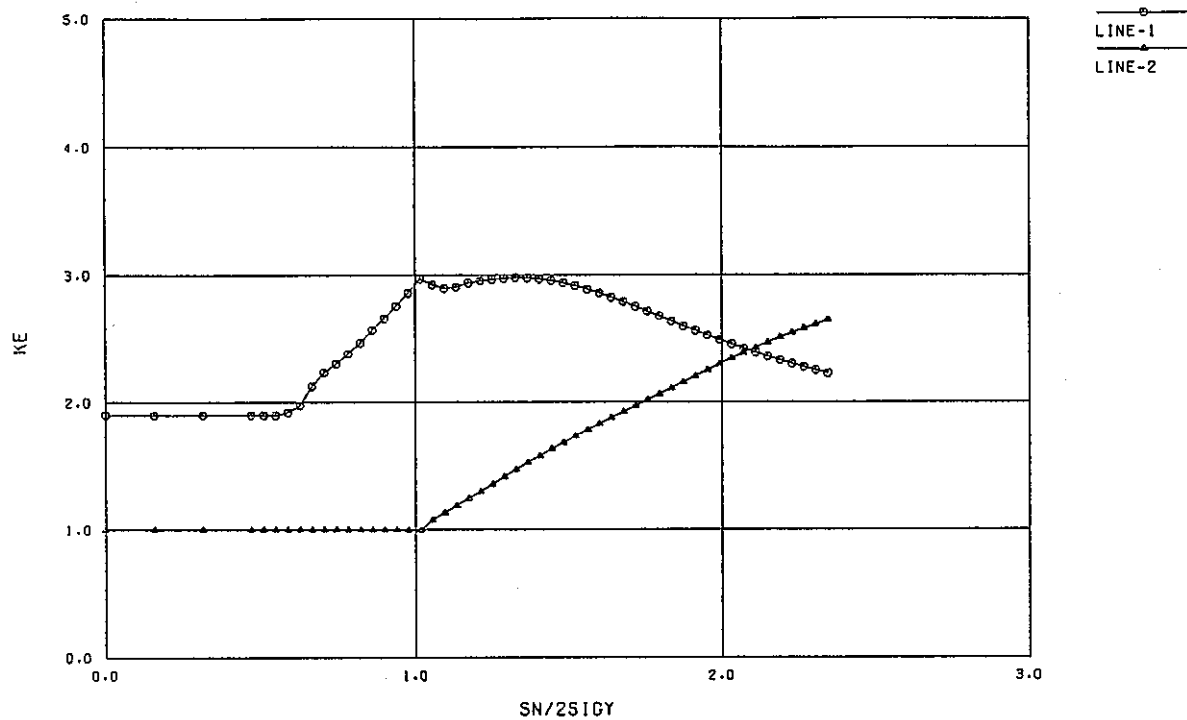


図 3.4.11 (a) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-1-M)

FINAS

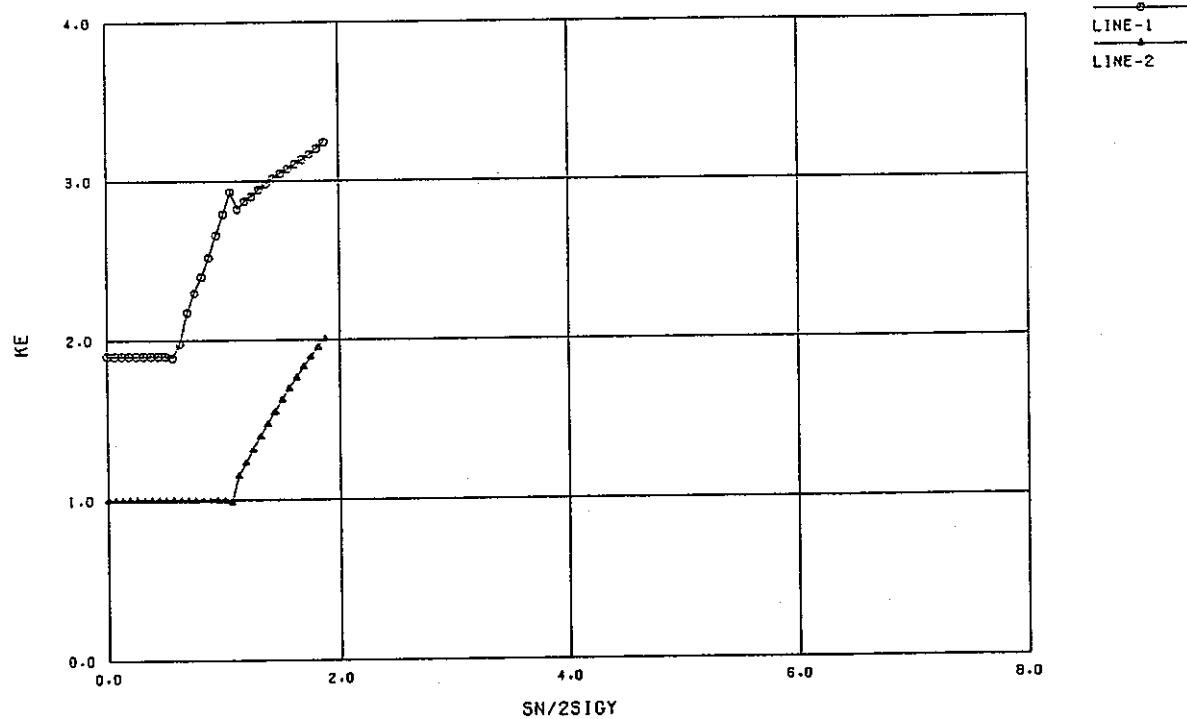


図 3.4.11 (b) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-2-M)

FINAS

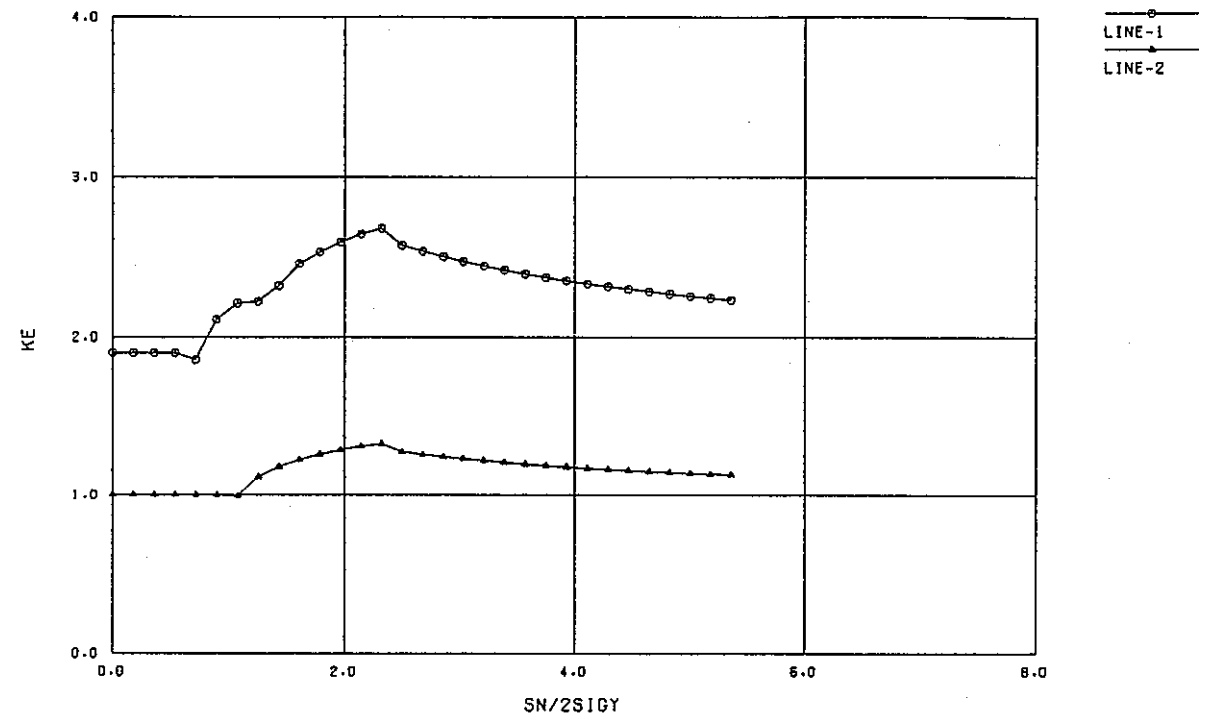


図 3.4.11 (c) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-3-M)

FINAS

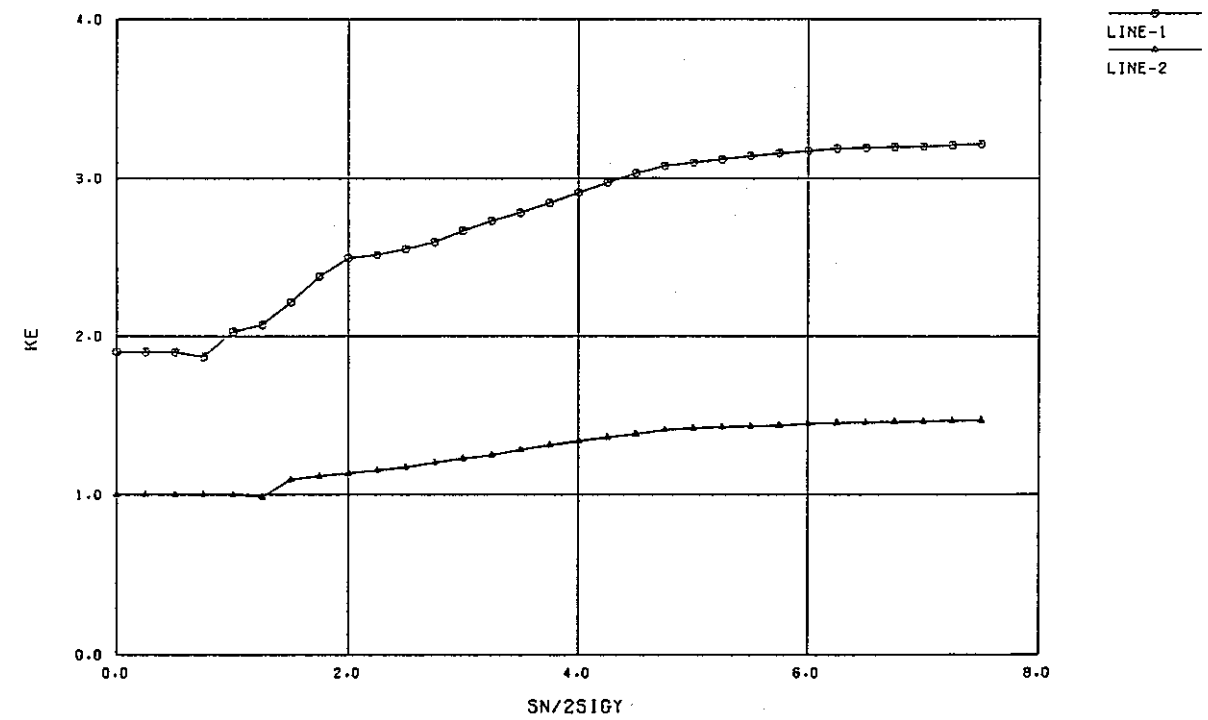


図 3.4.11 (d) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-4-M)

FINAS

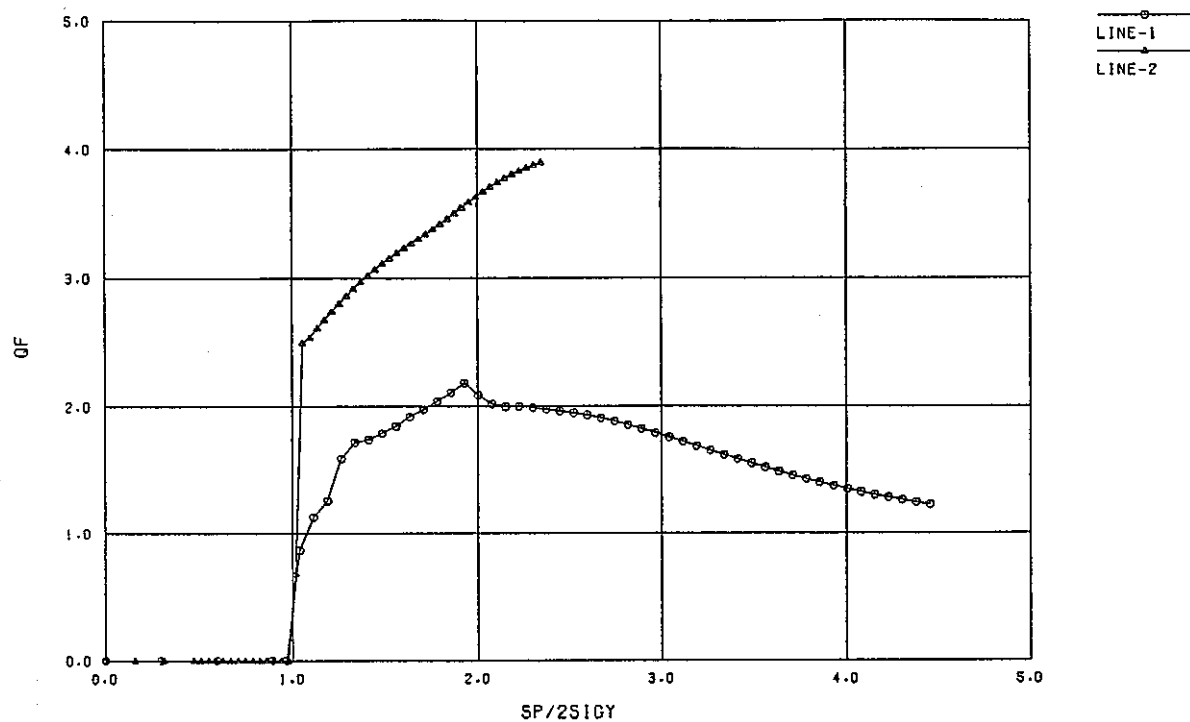


図 3.4.1 2 (a) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-1-M)

FINAS

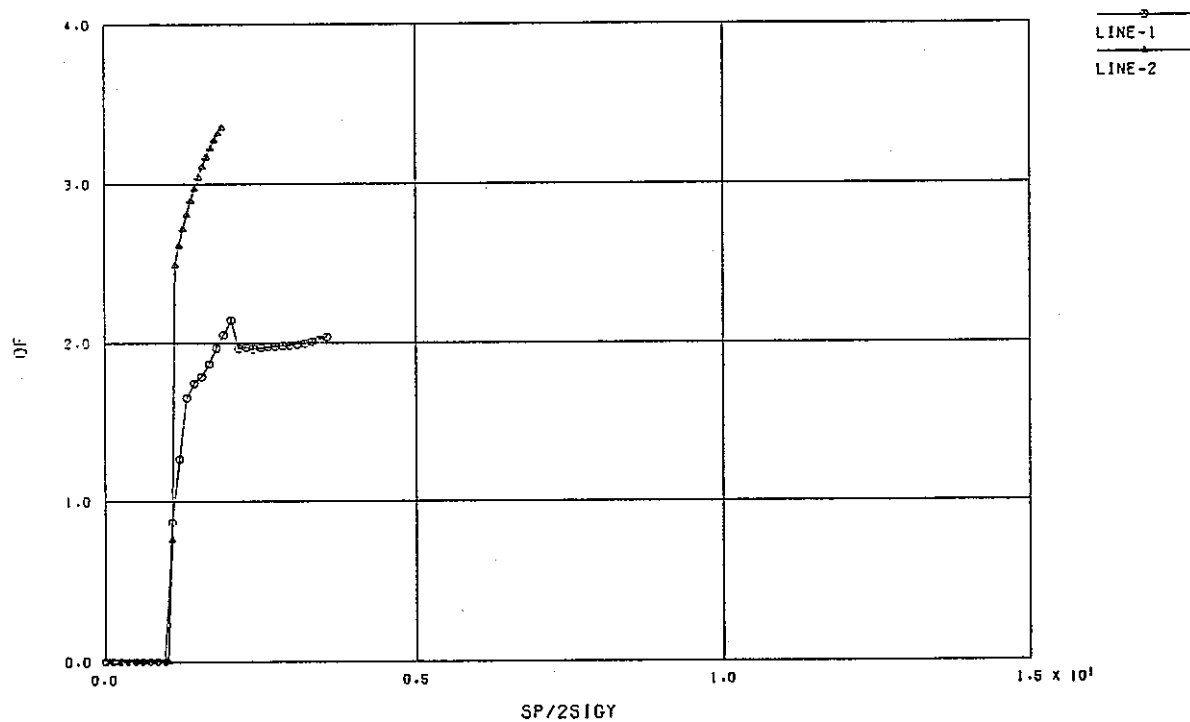


図 3.4.1 2 (b) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-2-M)

FINAS

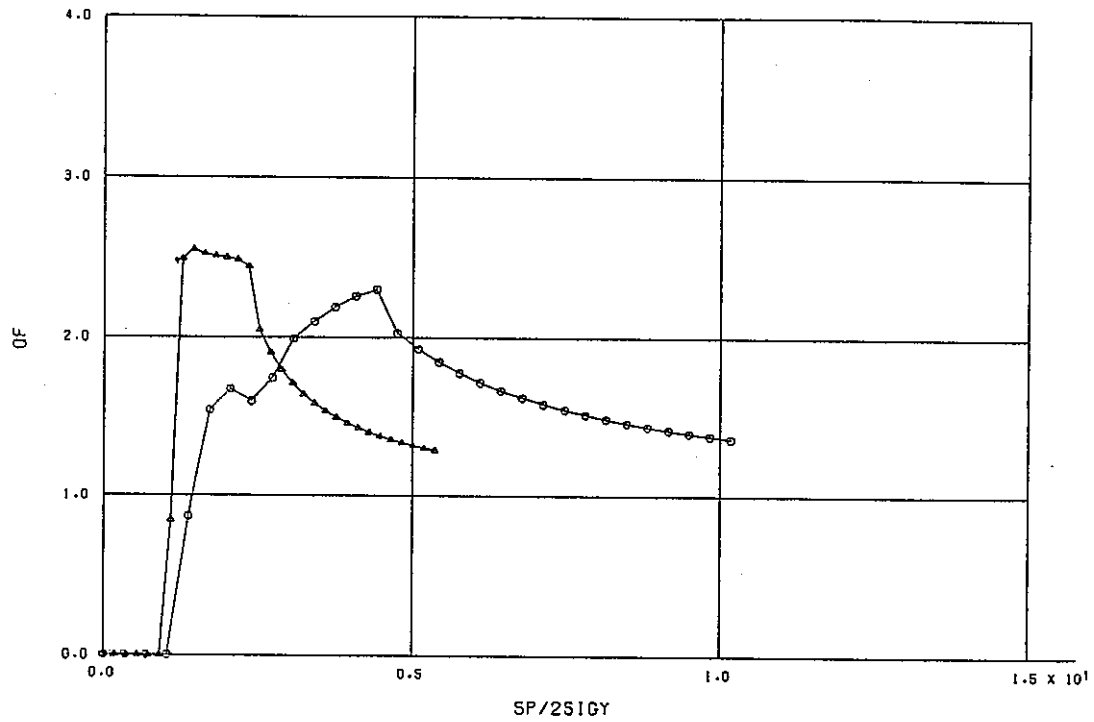


図 3.4.12 (c) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-3-M)

FINAS

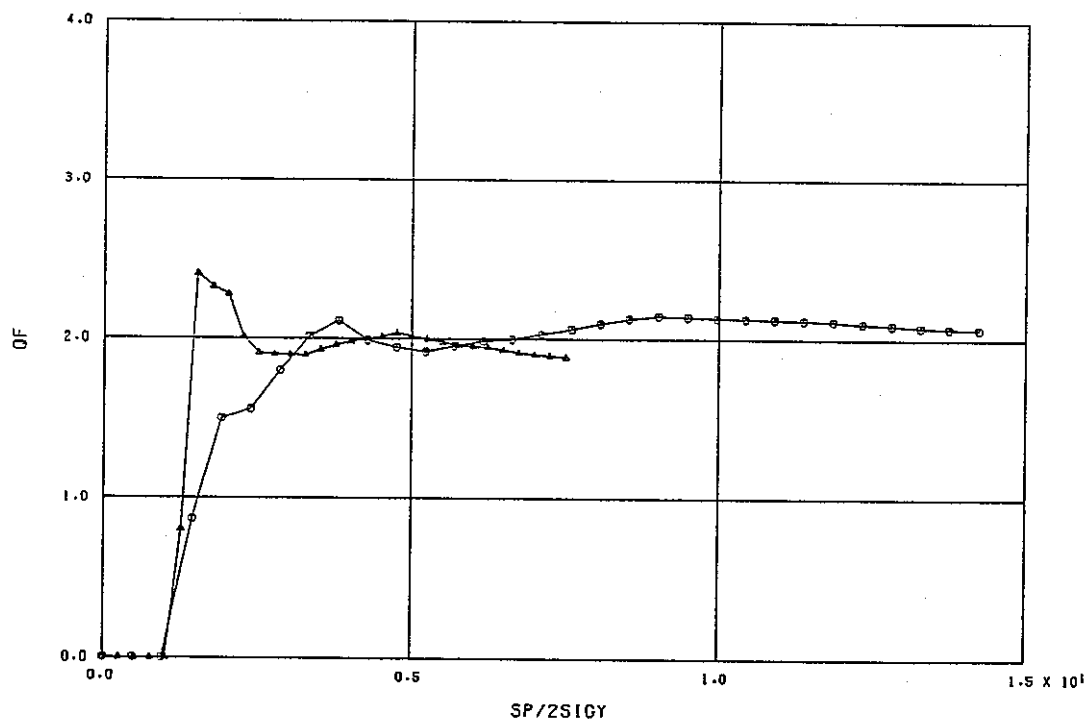


図 3.4.12 (d) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-4-M)

FINRS

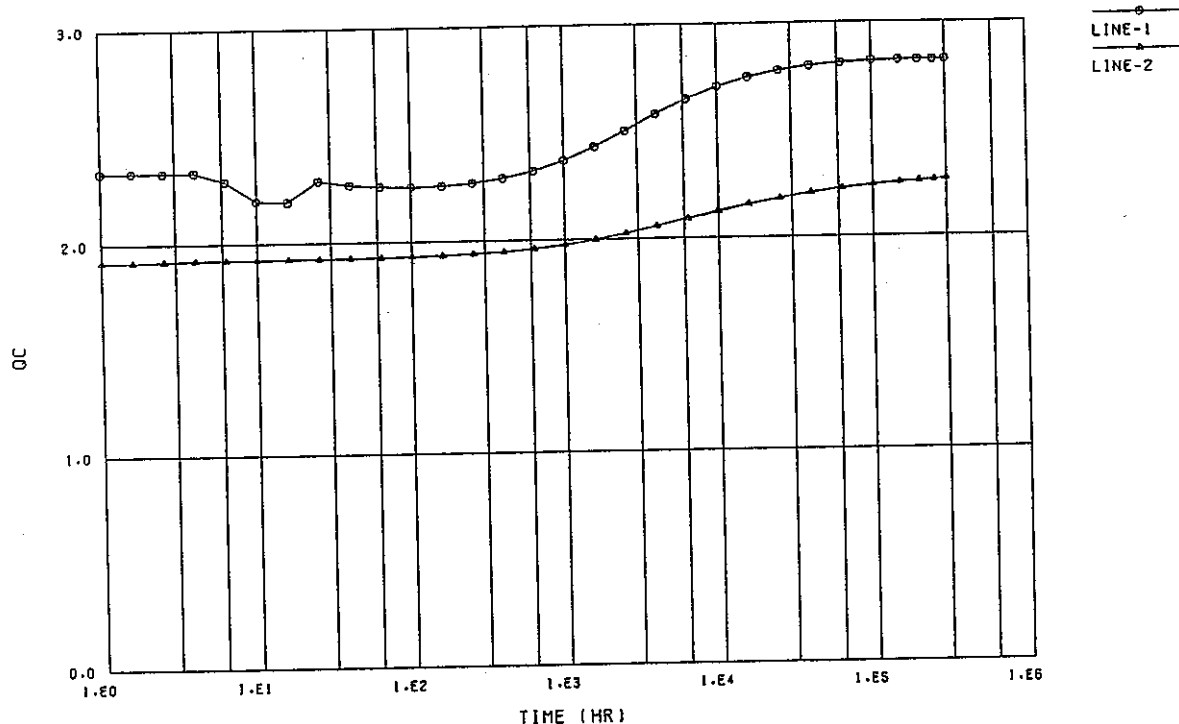


図 3.4.13 (a) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-M)

FINRS

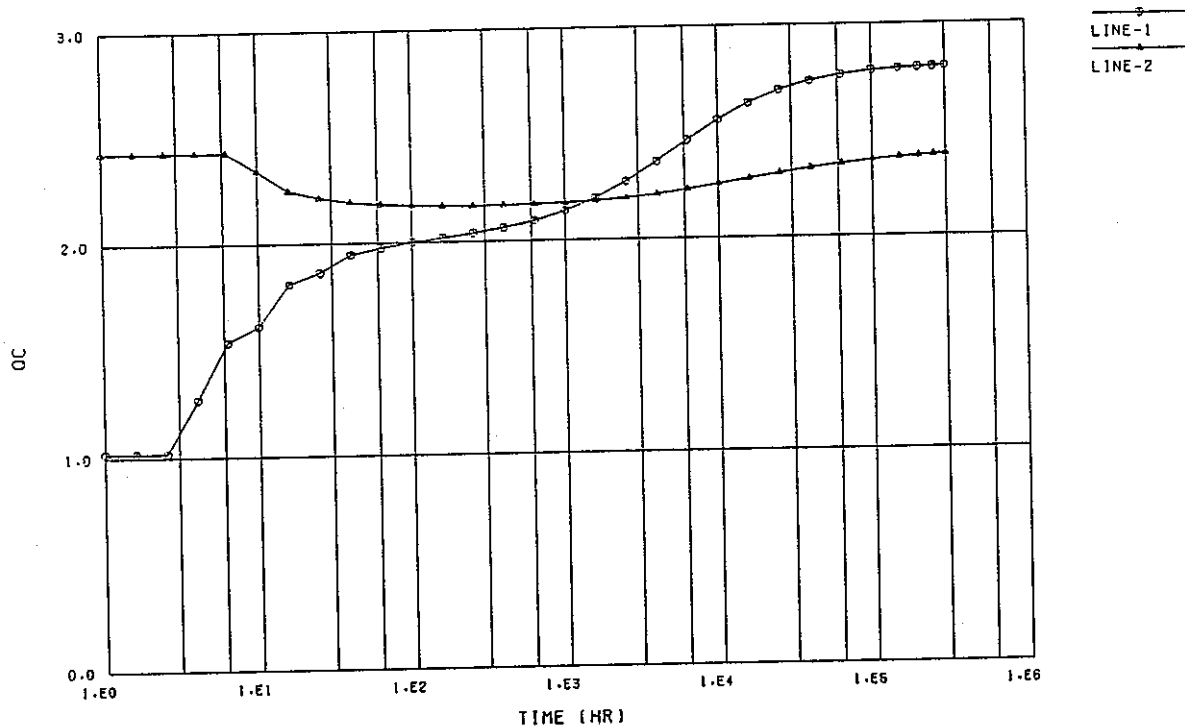


図 3.4.13 (b) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-6-M)

3. 4. 3 負荷条件の影響

(1) 目的

負荷条件が構造不連続部におけるひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に及ぼす影響を調べる。

(2) 方法

負荷条件として軸方向引張り（膜応力場）と曲げ（曲げ応力場）を考え、弾塑性解析及び応力緩和解析を行なう。

○軸方向引張り（膜応力場）	—	CASE1-2-M（2直線近似, $H'=400$ ）
		CASE1-3-M（2直線近似, $H'=10000$ ）
		CASE1-4-M（Ludwik型）
		CASE1-5-M（2直線近似, $H'=400$, 応力緩和）
		CASE1-6-M（Ludwik型, 応力緩和）
○曲げ（曲げ応力場）	——	CASE1-2-B（2直線近似, $H'=400$ ）
		CASE1-3-M（2直線近似, $H'=10000$ ）
		CASE1-4-B（Ludwik型）
		CASE1-5-B（2直線近似, $H'=400$, 応力緩和）
		CASE1-6-B（Ludwik型, 応力緩和）

(3) 結果

①相当応力相当ひずみの履歴

軸方向引張り（膜応力場）及び曲げ（曲げ応力場）を負荷した場合の、応力集中部及び平滑部における相当応力相当ひずみの履歴図を以下に示す。

1)弾塑性解析

- ・ 2直線近似（CASE1-2-M, CASE1-2-B） 図3.4.14 (a), (b)
- ・ Ludwik型（CASE1-4-M, CASE1-4-B） 図3.4.14 (c), (d)

2)応力緩和解析

- ・ 2直線近似（CASE1-5-M, CASE1-5-B） 図3.4.15 (a), (b)
- ・ Ludwik型（CASE1-6-M, CASE1-6-B） 図3.4.15 (c), (d)

これらの図より以下のことがわかる

- 曲げ負荷の方が弾性応力集中係数（評価点1と2の相当応力の比）は小さく、応力集中部の負荷レベルが小さくなる。
- 応力緩和時の応力集中部におけるひずみ増大は曲げ負荷の方が小さい。
- 応力緩和時における平滑部のひずみ増大は、軸方向引張りでは弾性追従型となるが、曲げ負荷では緩和開始直後は小さく長時間側では大きな値となる。

②Mises 相当応力コンター図

軸方向引張り（膜応力場）及び曲げ（曲げ応力場）を負荷した場合の応力集中部及び平滑部における相当応力コンター図を以下に示す。

1)弾性解析（膜、曲げ）

2) 弾塑性解析

図 3.4.16 (a)

・ 2 直線近似 (CASE1-2-M, CASE1-2-B)

図 3.4.16 (b)

・ 2 直線近似 (CASE1-3-M, CASE1-3-B)

図 3.4.16 (c)

・ Ludwik 型 (CASE1-4-M, CASE1-4-B)

図 3.4.16 (d)

これらの図より以下のことがわかる

○ 応力集中部のごく近傍の応力分布は軸力と曲げでほぼ同様な形態を示す。

○ 曲げ負荷の場合、板幅方向に応力が分布しており弾塑性状態では高応力側の部材で中性軸に近づく程急勾配で応力が低下する。

③ Mises 相当塑性ひずみコンター図

軸方向引張り（膜応力場）及び曲げ（曲げ応力場）を負荷した場合の応力集中部及び平滑部における相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。

・ 2 直線近似 (CASE1-2-M, CASE1-2-B)

図 3.4.17 (a)

・ 2 直線近似 (CASE1-3-M, CASE1-3-B)

図 3.4.17 (b)

・ Ludwik 型 (CASE1-4-M, CASE1-4-B)

図 3.4.17 (c)

これらの図より以下のことがわかる。

○ 軸方向引張り負荷では高応力側の部材で全断面降伏しているのに対し、曲げ負荷では応力集中部と高応力側部材の表面に近い側で塑性ひずみが生じ、帯板の中性軸付近と低応力側部材は弾性域として残る。

○ 曲げ負荷も加工硬化が大きい程、塑性領域が低応力部材に拡大していくが、その領域は小さい。

○ 曲げ負荷の場合、塑性領域は負荷レベルが増大すると、中性軸方向へ拡大していく。

④ ひずみ集中係数の履歴

軸方向引張り（膜応力場）及び曲げ（曲げ応力場）を負荷した場合の評価点 1 及び評価点 2 におけるひずみ集中係数 K_ε の履歴を以下に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点 2 の相当応力増分 S_n を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は評価点 1 及び評価点 2 の相当ひずみ増分を弾性解析における評価点 2 の相当ひずみ増分で無次元化したものである。

・ 2 直線近似 (CASE1-2-M, CASE1-2-B)

図 3.4.18 (a), (b)

・ 2 直線近似 (CASE1-3-M, CASE1-3-B)

図 3.4.18 (c), (d)

・ Ludwik 型 (CASE1-4-M, CASE1-4-B)

図 3.4.18 (e), (f)

これらの図より以下のことがわかる

○ 曲げ負荷における評価点 1 のひずみ集中係数は、軸方向引張り負荷に比べ小さい値を示し、降伏直後の立ち上がりも小さい。軸力の場合に比べてゆるやかなひずみ増大挙動を示す。

○ 曲げ負荷における評価点 2 のひずみ集中係数は、初期は軸力に比べて小さいが負荷レベルが大きくなると上回るようになる。

○ 曲げ負荷の場合、加工硬化が小さいと評価点 2 で降伏が生じた後、評価点 1 のひ

ずみ集中係数の増大が大きく鈍化する。これは評価点1での中性軸に近いかなりの部分が弾性域として残るのに対し、評価点2では中性軸の近くまで塑性化して変形抵抗を失い負荷される角変位の大部分を分担するようになるためと考えられる。

- なお、加工硬化係数が大きい場合に軸力と違ってひずみ集中係数が減少しないのは低応力側部材に塑性域が生じる前に高応力側部材において塑性域が中性軸近くまで進展してしまうためと思われる。

⑤弾性追従パラメータ q_F の履歴

軸方向引張り（膜応力場）及び曲げ（曲げ応力場）を負荷した場合の評価点1及び評価点2における弾性追従パラメータ q_F の履歴を以下に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点1及び評価点2の相当応力増分 S_p を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾性追従パラメータ q_F である。

- ・ 2直線近似 (CASE1-2-M, CASE1-2-B) 図3.4.19 (a), (b)
- ・ 2直線近似 (CASE1-3-M, CASE1-3-B) 図3.4.19 (c), (d)
- ・ Ludwik型 (CASE1-4-M, CASE1-4-B) 図3.4.19 (e), (f)

これらの図より以下のことがわかる

- 軸方向引張り負荷の場合、加工硬化を考慮すると評価点2の弾性追従パラメータが減少する傾向を示すが、曲げ負荷の場合は単調に増加する傾向を示す。
- 軸方向引張り負荷では値にかなりのばらつきが見られるが、曲げ負荷では概ね2に近い値を示す。

⑥クリープ弾性追従パラメータ q_C の履歴

軸方向引張り（膜応力場）及び曲げ（曲げ応力場）を負荷した場合の評価点1及び評価点2におけるクリープ弾性追従パラメータ q_C の履歴を以下に示す。図で横軸は時間であり、縦軸はクリープ弾性追従パラメータ q_C である。

- ・ 2直線近似 (CASE1-5-M, CASE1-5-B) 図3.4.20 (a), (b)
- ・ Ludwik型 (CASE1-6-M, CASE1-6-B) 図3.4.20 (c), (d)

これらの図より以下のことがわかる。

- 評価点1では曲げ負荷の方が軸方向引張り負荷より小さめの値を示すが、評価点2では長時間側で曲げ負荷の方が大きな値となる。
- 軸方向引張り負荷及び曲げ負荷とも時間と共に増加する傾向がある。
- 軸方向引張り負荷の場合 3×10^5 時間ではほぼ一定値に収束しているが、曲げ負荷ではまだ上昇傾向を示す。特に評価点2でその傾向が強い。

(4) まとめ

負荷条件として軸方向引張り負荷（膜応力場）及び曲げ負荷（曲げ応力場）をかけ弾塑性解析及び応力緩和解析を行うことにより、負荷条件がひずみ集中挙動にどのような影響を与えるかを調べた結果をまとめると以下のようなになる。

- 曲げ負荷の場合、加工硬化を考慮しても塑性領域は低応力側部材へはほとんど拡

大しない。

- 材料特性を考慮する必要があるが、評価点 1 では概ね曲げ負荷（曲げ応力場）のほうが軸方向引張り負荷（膜応力場）よりひずみの増大挙動がゆるやかである。評価点 2 では負荷が大きくなると軸力の場合を上回る。
- 応力緩和時のひずみ増大挙動は、軸力の場合より概ね q_0 は小さく、評価点 1 では q_0 のあまり変化しない弾性追従型の挙動を示すが、評価点 2 では応力が緩和するとともに q_0 が増大する傾向が強い。

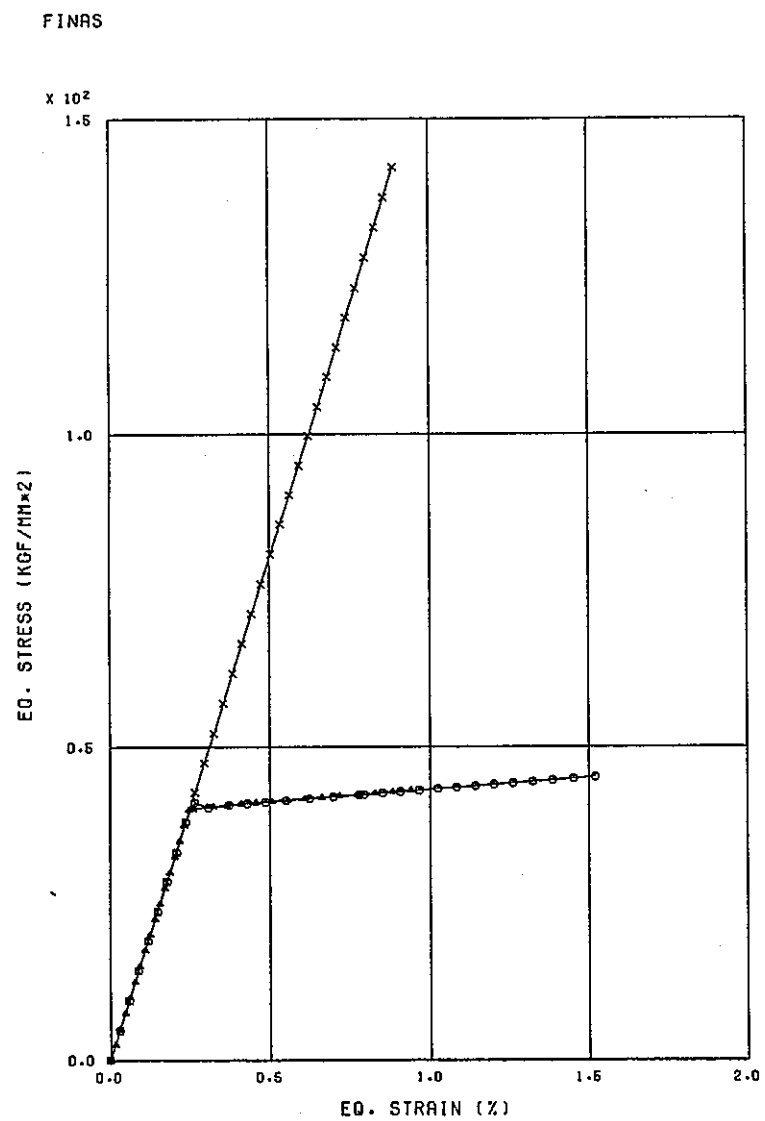


図3.4.14 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-2-M)

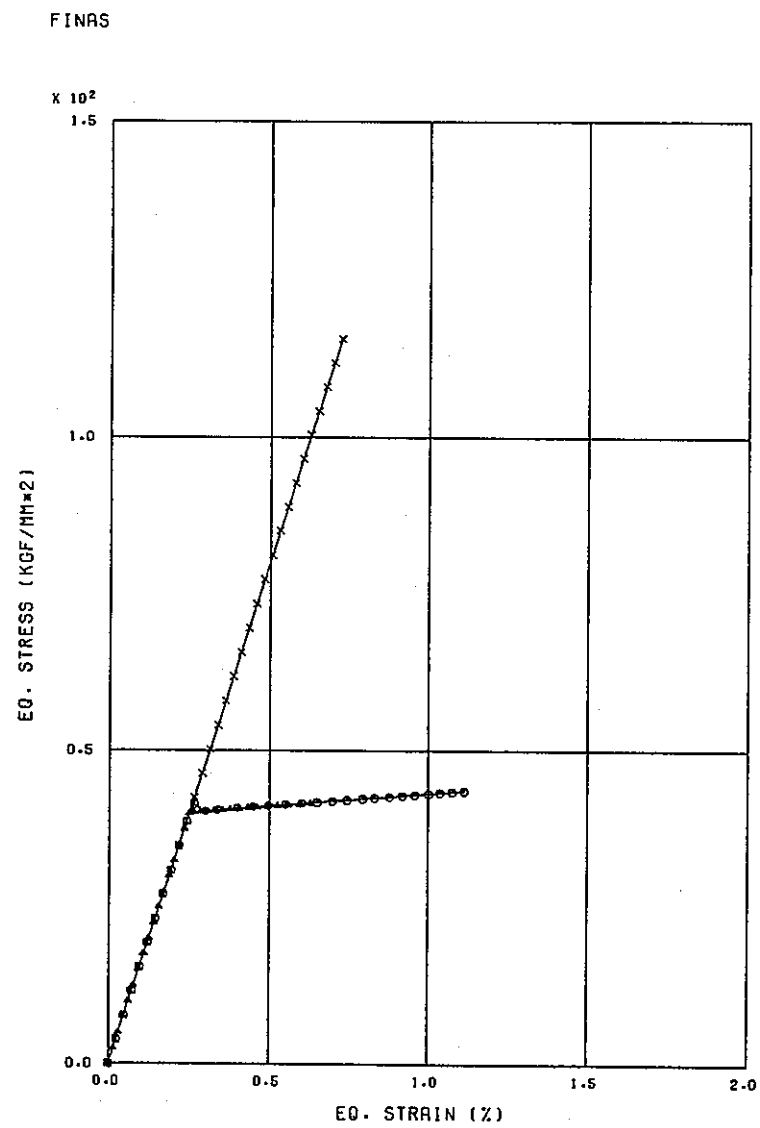


図3.4.14 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-2-B)

FINAS

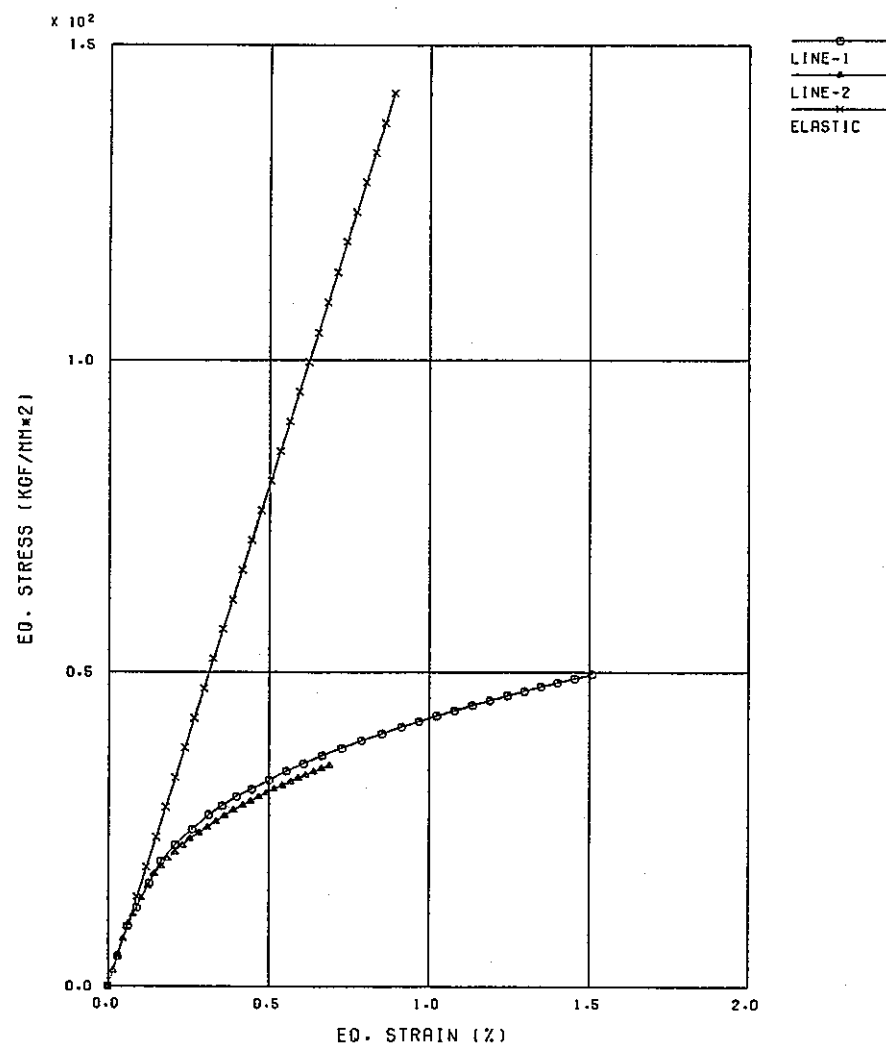


図3.4.14 (c) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-4-M)

FINAS

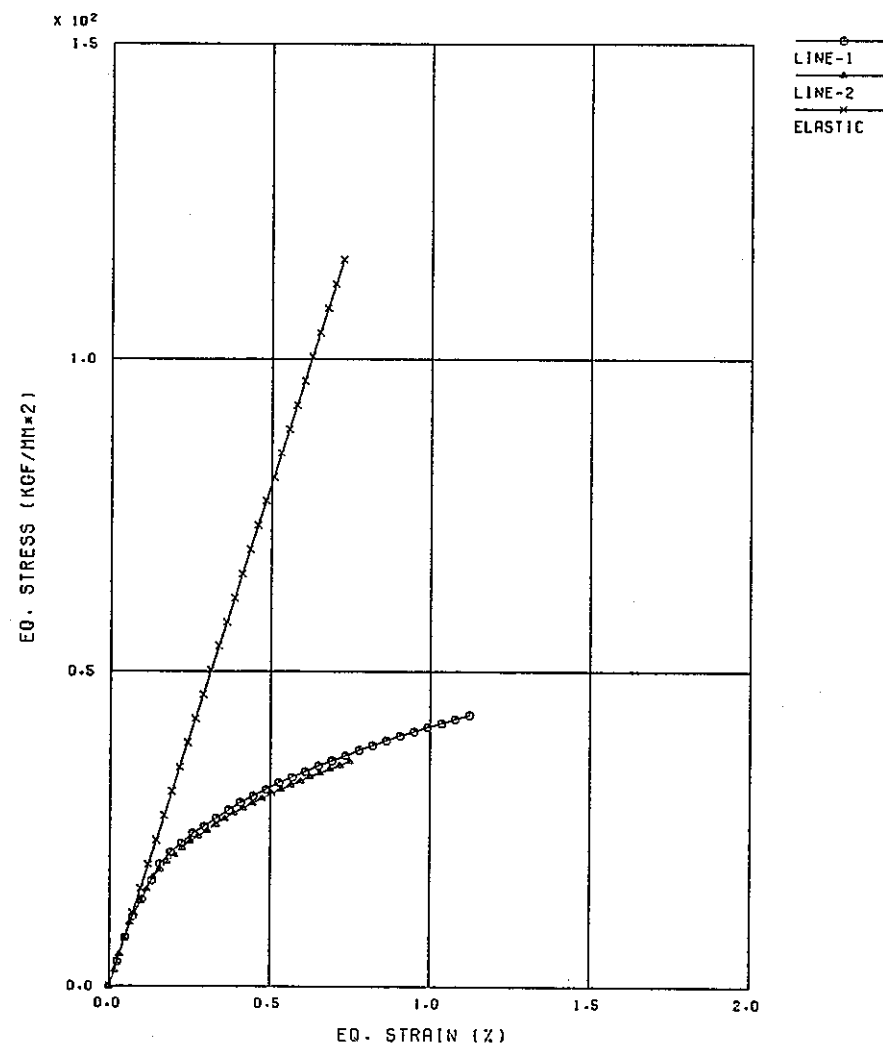


図3.4.14 (d) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-4-B)

FINAS

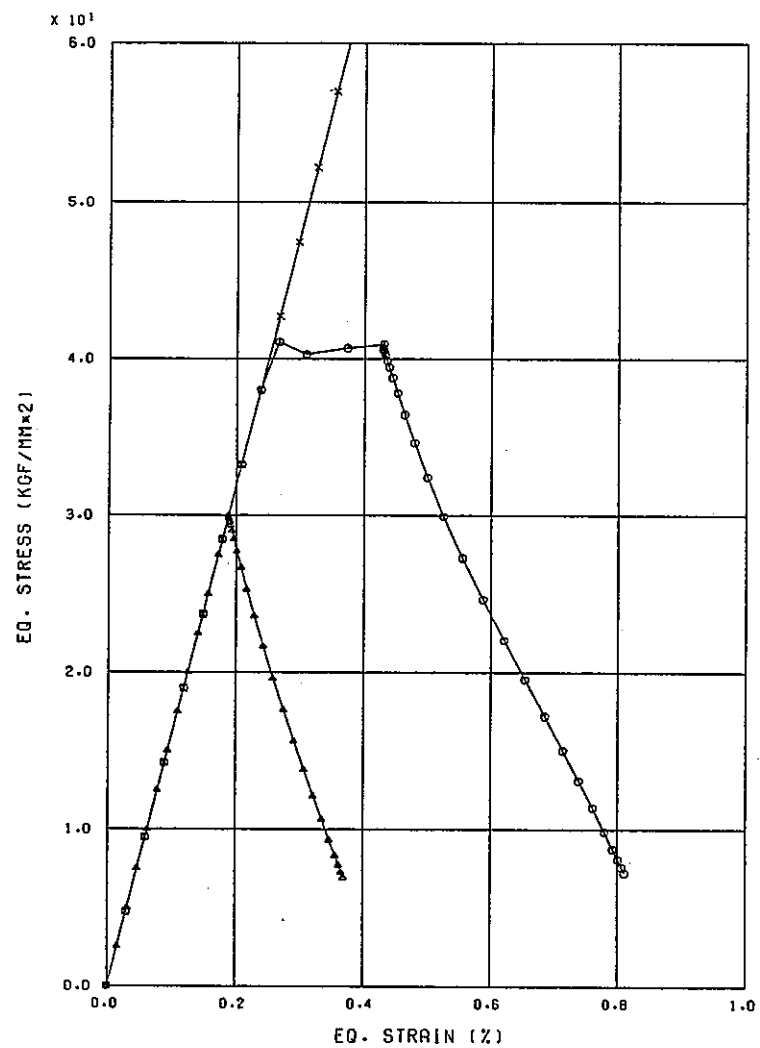


図3.4.15 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴
(CASE1-5-M 膜応力場)

FINAS

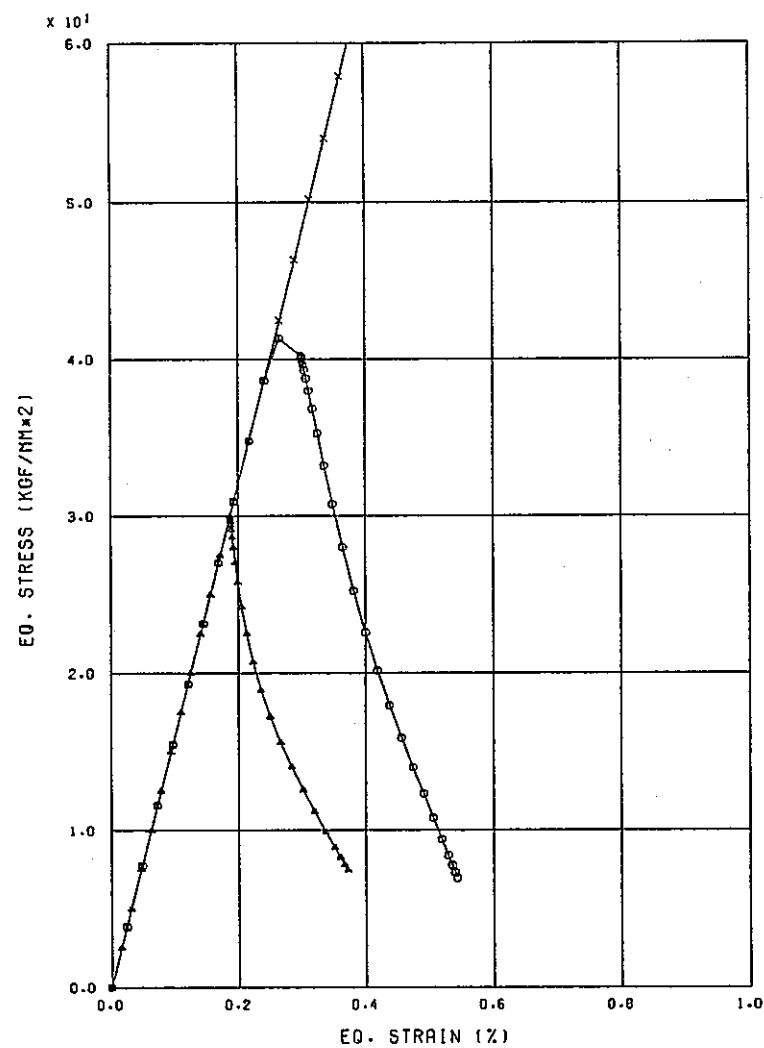


図3.4.15 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴
(CASE1-5-B 曲げ応力場)

FINAS

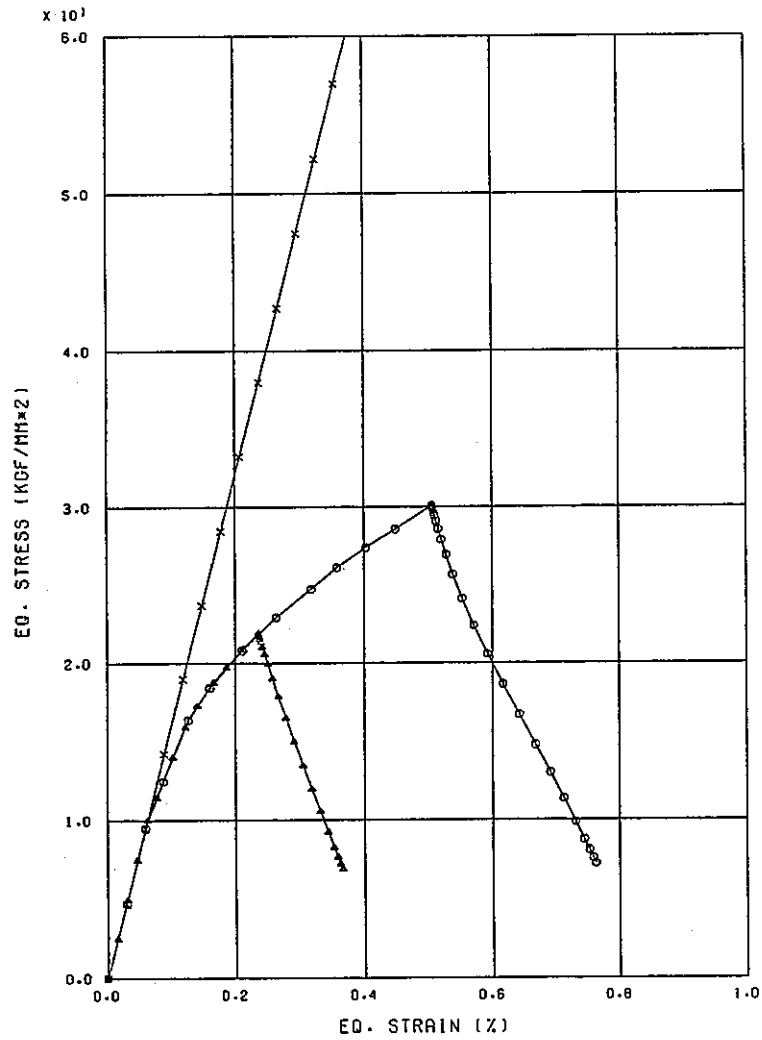


図3.4.15 (c) 相当応力・相当ひずみの履歴
(CASE1-6-M 膜応力場)

FINAS

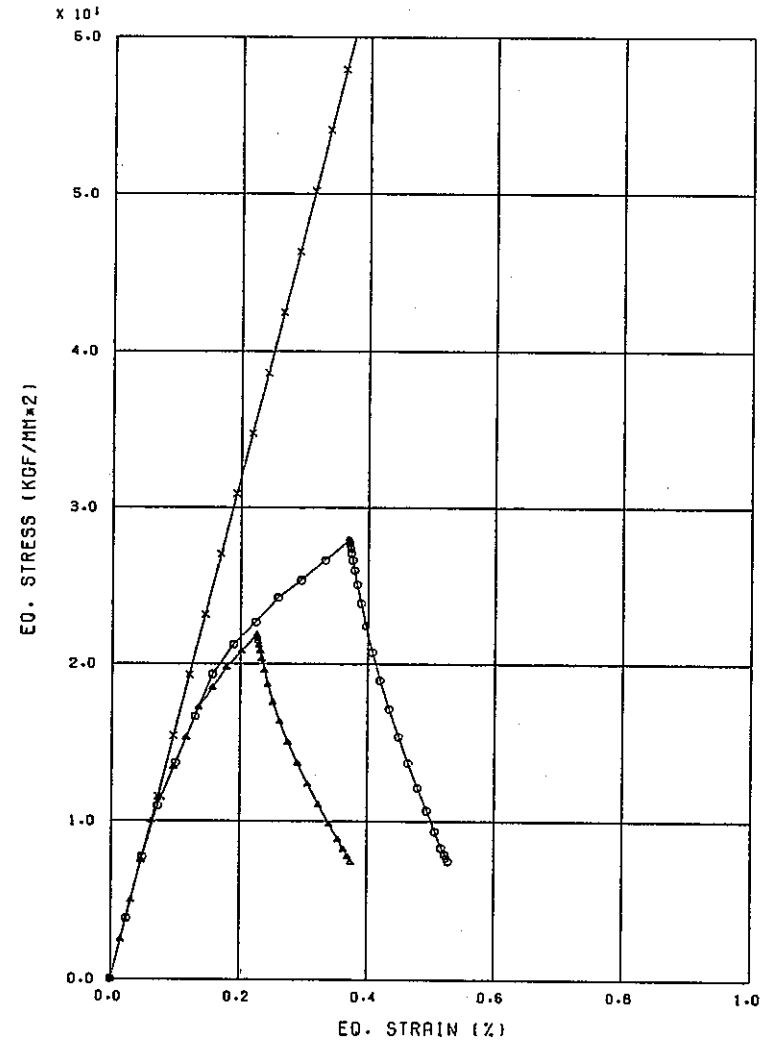
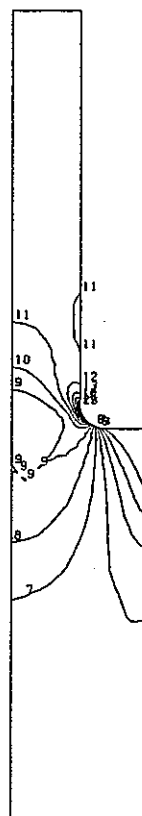


図3.4.15 (d) 相当応力・相当ひずみの履歴
(CASE1-6-B 曲げ応力場)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES
1 3.400000
2 10.500000
3 17.600000
4 24.700000
5 31.800000
6 38.900000
7 46.000000
8 53.100000
9 60.200000
10 67.300000
11 74.400000
12 81.500000
13 88.600000
14 95.700000
15 102.800000
16 109.900000
17 117.000000
18 124.100000
19 131.200000
20 138.300000



膜応力場

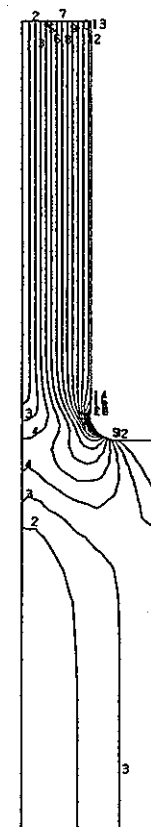
STEP NO. 31

GEOM. SCALE 20.0000

VON-MISES STRESS CONTOUR

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES
1 2.800000
2 8.600000
3 14.400000
4 20.200000
5 26.000000
6 31.800000
7 37.600000
8 43.400000
9 49.200000
10 55.000000
11 60.800000
12 66.600000
13 72.400000
14 78.200000
15 84.000000
16 89.800000
17 95.600000
18 101.400000
19 107.200000
20 113.000000



曲げ応力場

STEP NO. 31

GEOM. SCALE 20.0000

VON-MISES STRESS CONTOUR

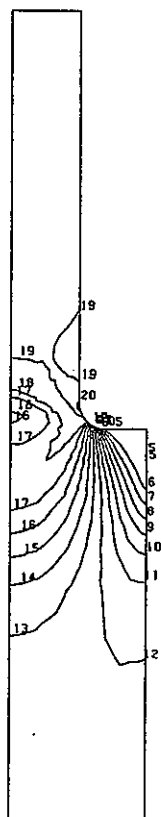
図3.4.16 (a) ミーゼス相当応力コンター図

(弾性解析-膜応力場, 曲げ応力場)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	0.700000
2	3.000000
3	5.300000
4	7.600000
5	9.900000
6	12.20000
7	14.50000
8	16.80000
9	19.10000
10	21.40000
11	23.70000
12	26.00000
13	28.30000
14	30.60000
15	32.90000
16	35.20000
17	37.50000
18	39.80000
19	42.10000
20	44.40000



膜応力場

STEP NO. 31

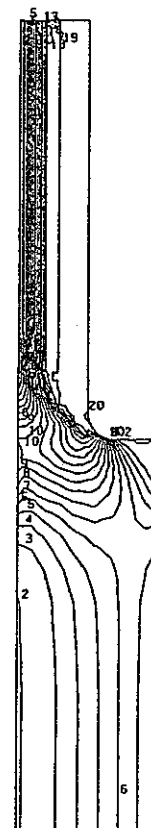
GEOM. SCALE 20.0000

VON-MISES STRESS CONTOUR

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	0.800000
2	3.000000
3	5.200000
4	7.400000
5	9.600000
6	11.80000
7	14.00000
8	16.20000
9	18.40000
10	20.60000
11	22.80000
12	25.00000
13	27.20000
14	29.40000
15	31.60000
16	33.80000
17	36.00000
18	38.20000
19	40.40000
20	42.60000



曲げ応力場

STEP NO. 31

GEOM. SCALE 20.0000

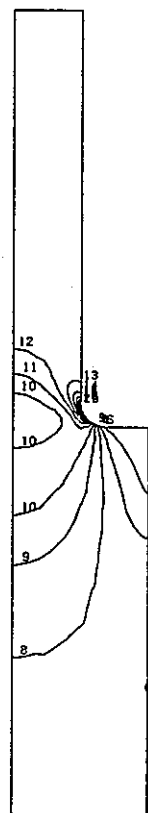
VON-MISES STRESS CONTOUR

図3.4.16 (b) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-2-M, CASE1-2-B)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	-3.40000
2	0.500000
3	4.400000
4	6.300000
5	12.20000
6	16.10000
7	20.00000
8	23.90000
9	27.80000
10	31.70000
11	35.60000
12	39.50000
13	43.40000
14	47.30000
15	51.20000
16	55.10000
17	59.00000
18	62.90000
19	66.80000
20	70.70000



膜応力場

STEP NO. 31

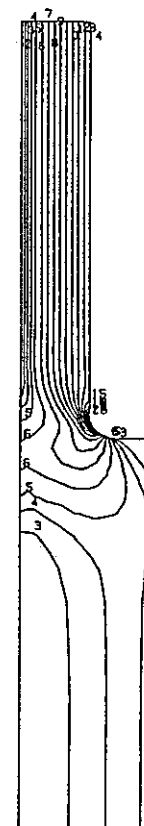
GEOM. SCALE 20.0000

VON-MISES STRESS CONTOUR

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	-1.40000
2	2.200000
3	5.800000
4	9.400000
5	13.00000
6	16.60000
7	20.20000
8	23.80000
9	27.40000
10	31.00000
11	34.60000
12	38.20000
13	41.80000
14	45.40000
15	49.00000
16	52.60000
17	56.20000
18	59.80000
19	63.40000
20	67.00000



曲げ応力場

STEP NO. 31

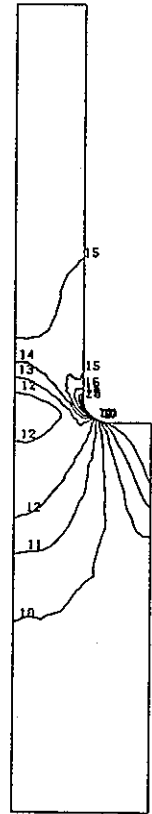
GEOM. SCALE 20.0000

VON-MISES STRESS CONTOUR

図3.4.16 (c) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-3-M, CASE1-3-B)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES
1 -2.80000
2 -1.00-01
3 2.600000
4 5.300000
5 8.000000
6 10.70000
7 13.40000
8 16.10000
9 18.80000
10 21.50000
11 24.20000
12 26.90000
13 29.60000
14 32.30000
15 35.00000
16 37.70000
17 40.40000
18 43.10000
19 45.80000
20 48.50000



膜応力場

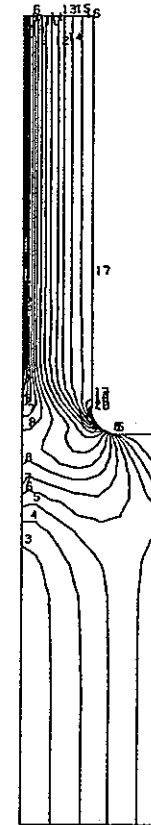
STEP NO. 31

GEOM. SCALE 20.0000

VON-MISES STRESS CONTOUR

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES
1 -1.10000
2 1.200000
3 3.500000
4 5.800000
5 8.100000
6 10.40000
7 12.70000
8 15.00000
9 17.30000
10 19.60000
11 21.90000
12 24.20000
13 26.50000
14 28.80000
15 31.10000
16 33.40000
17 35.70000
18 38.00000
19 40.30000
20 42.60000



曲げ応力場

STEP NO. 31

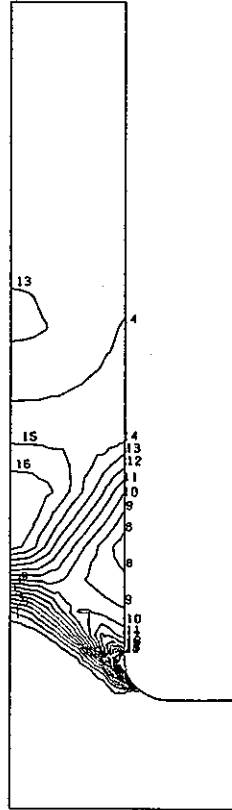
GEOM. SCALE 20.0000

VON-MISES STRESS CONTOUR

図3.4.16 (d) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-4-M, CASE1-4-B)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 5.000-04
2 1.000-03
3 1.500-03
4 2.000-03
5 2.500-03
6 3.000-03
7 3.500-03
8 4.000-03
9 4.500-03
10 5.000-03
11 5.500-03
12 6.000-03
13 6.500-03
14 7.000-03
15 7.500-03
16 8.000-03
17 8.500-03
18 9.000-03
19 9.500-03
20 1.000-02



膜応力場

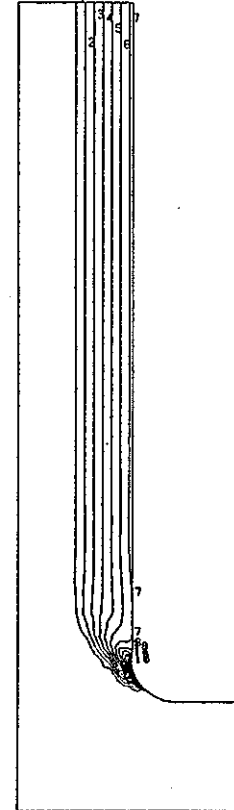
STEP NO. 31

GEOM. SCALE 10.0000

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 5.000-04
2 1.000-03
3 1.500-03
4 2.000-03
5 2.500-03
6 3.000-03
7 3.500-03
8 4.000-03
9 4.500-03
10 5.000-03
11 5.500-03
12 6.000-03
13 6.500-03
14 7.000-03
15 7.500-03
16 8.000-03
17 8.500-03
18 9.000-03
19 9.500-03
20 1.000-02



曲げ応力場

STEP NO. 31

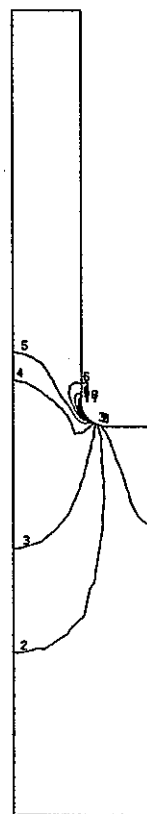
GEOM. SCALE 10.0000

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

図 3.4.17 (a) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-2-M, CASE1-2-B)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
 1 5.000-04
 2 1.000-03
 3 1.500-03
 4 2.000-03
 5 2.500-03
 6 3.000-03
 7 3.500-03
 8 4.000-03
 9 4.500-03
 10 5.000-03
 11 5.500-03
 12 6.000-03
 13 6.500-03
 14 7.000-03
 15 7.500-03
 16 8.000-03
 17 8.500-03
 18 9.000-03
 19 9.500-03
 20 1.000-02



膜応力場

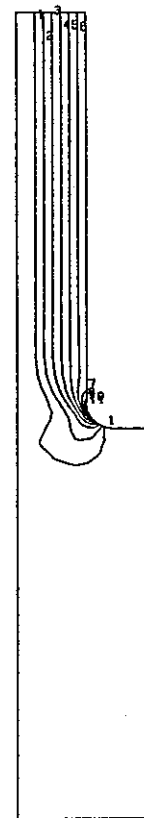
GEOM. SCALE 20.0000

STEP NO. 31

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
 1 5.000-04
 2 1.000-03
 3 1.500-03
 4 2.000-03
 5 2.500-03
 6 3.000-03
 7 3.500-03
 8 4.000-03
 9 4.500-03
 10 5.000-03
 11 5.500-03
 12 6.000-03
 13 6.500-03
 14 7.000-03
 15 7.500-03
 16 8.000-03
 17 8.500-03
 18 9.000-03
 19 9.500-03
 20 1.000-02



曲げ応力場

GEOM. SCALE 20.0000

STEP NO. 31

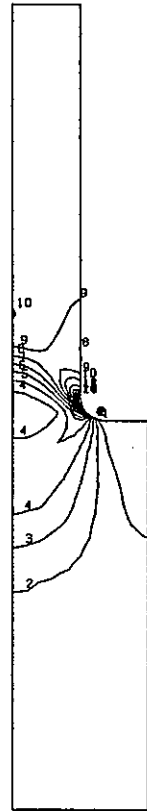
EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

図 3.4.17 (b) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-3-M, CASE1-3-B)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.000-03
3	1.500-03
4	2.000-03
5	2.500-03
6	3.000-03
7	3.500-03
8	4.000-03
9	4.500-03
10	5.000-03
11	5.500-03
12	6.000-03
13	6.500-03
14	7.000-03
15	7.500-03
16	8.000-03
17	8.500-03
18	9.000-03
19	9.500-03
20	1.000-02



膜応力場

STEP NO. 31

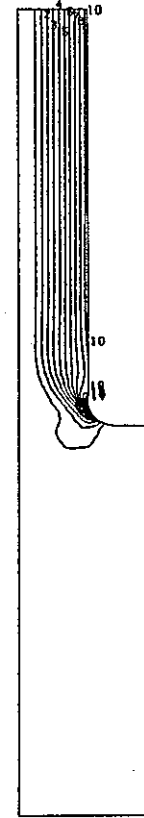
GEOM. SCALE 20.0000

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.000-03
3	1.500-03
4	2.000-03
5	2.500-03
6	3.000-03
7	3.500-03
8	4.000-03
9	4.500-03
10	5.000-03
11	5.500-03
12	6.000-03
13	6.500-03
14	7.000-03
15	7.500-03
16	8.000-03
17	8.500-03
18	9.000-03
19	9.500-03
20	1.000-02



曲げ応力場

STEP NO. 31

GEOM. SCALE 20.0000

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

図3.4.17(c) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE1-4-M, CASE1-4-B)

FINAS

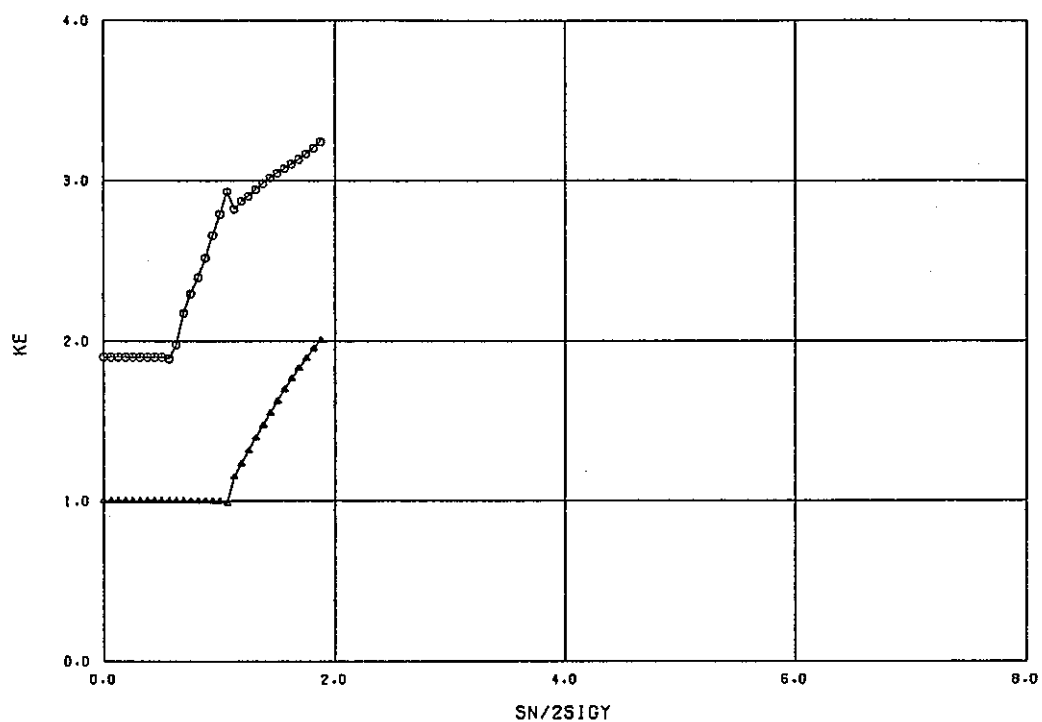


図 3.4.18 (a) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-2-M 膜応力場)

FINAS

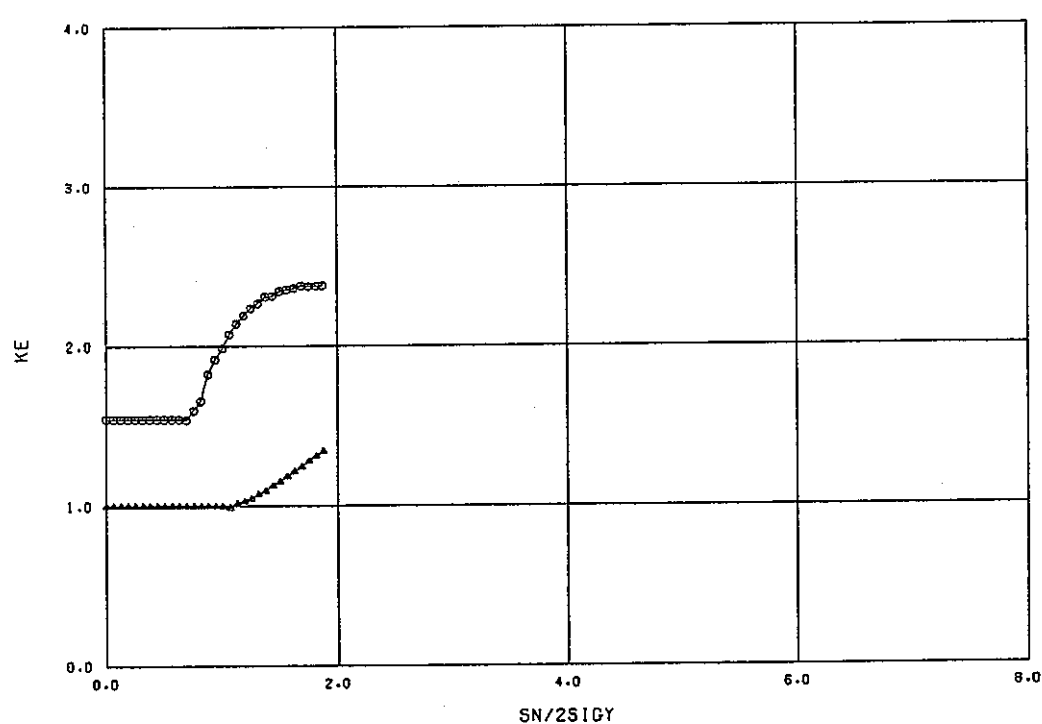


図 3.4.18 (b) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-2-B 曲げ応力場)

FINAS

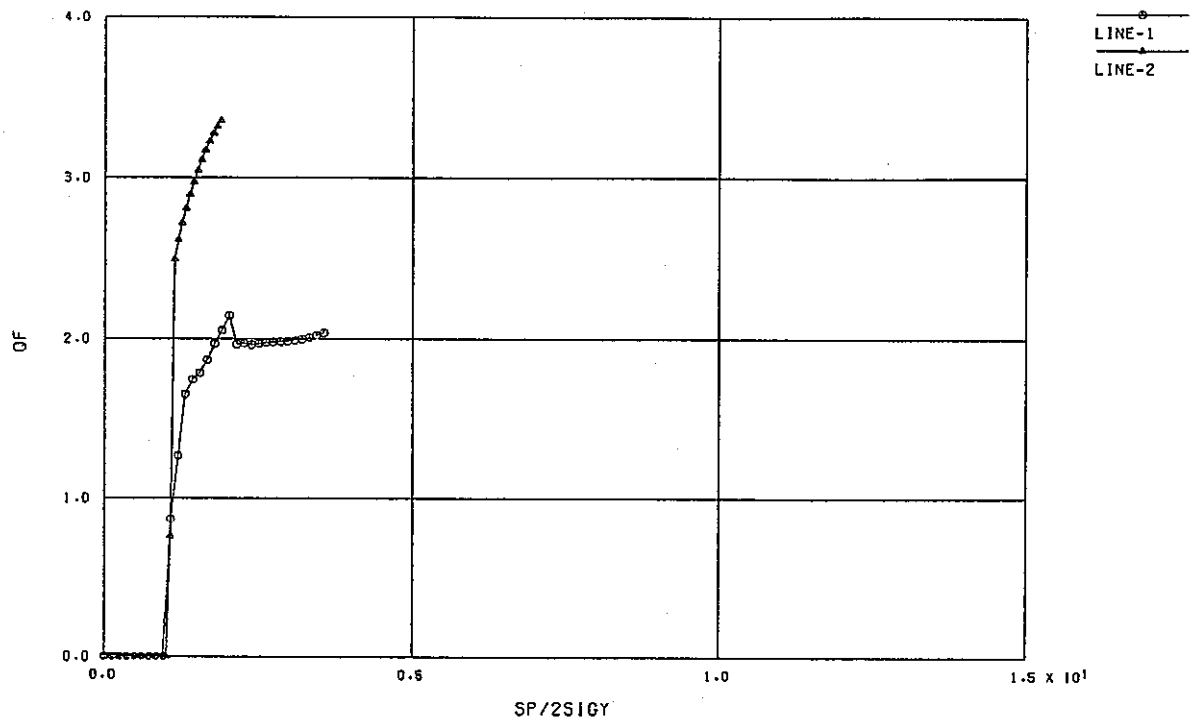


図3.4.19 (a) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-2-M 膜応力場)

FINAS

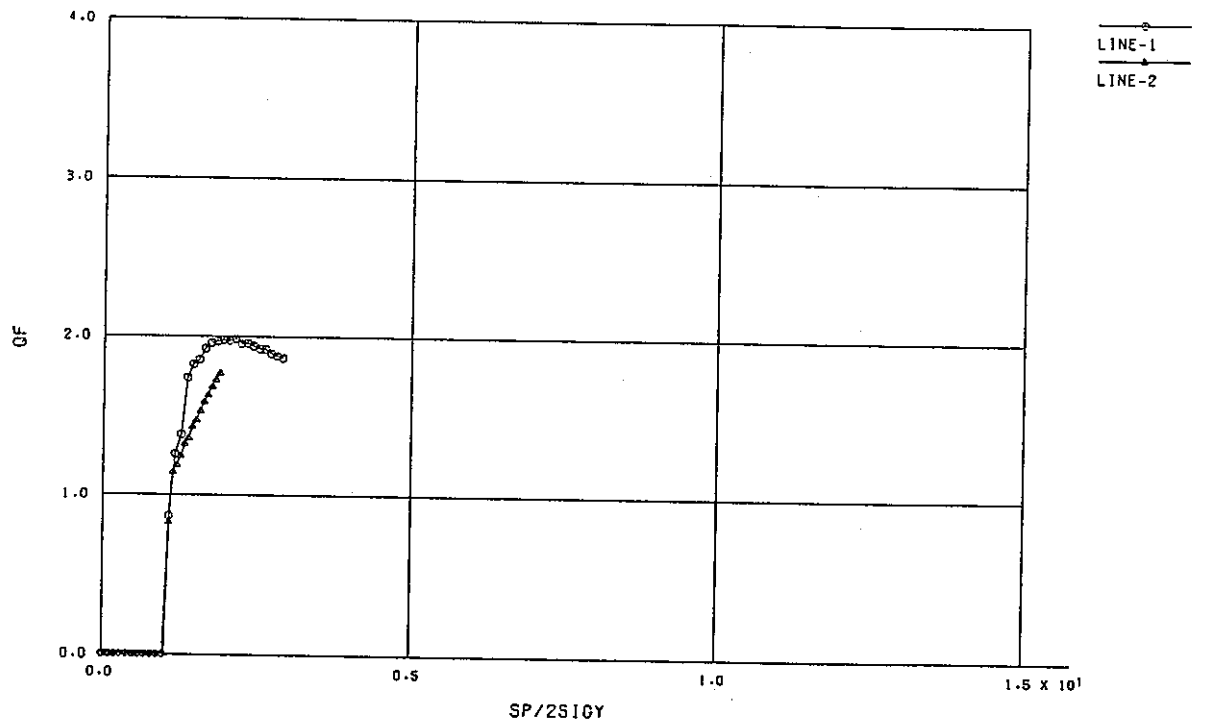


図3.4.19 (b) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-2-B 曲げ応力場)

FINRS

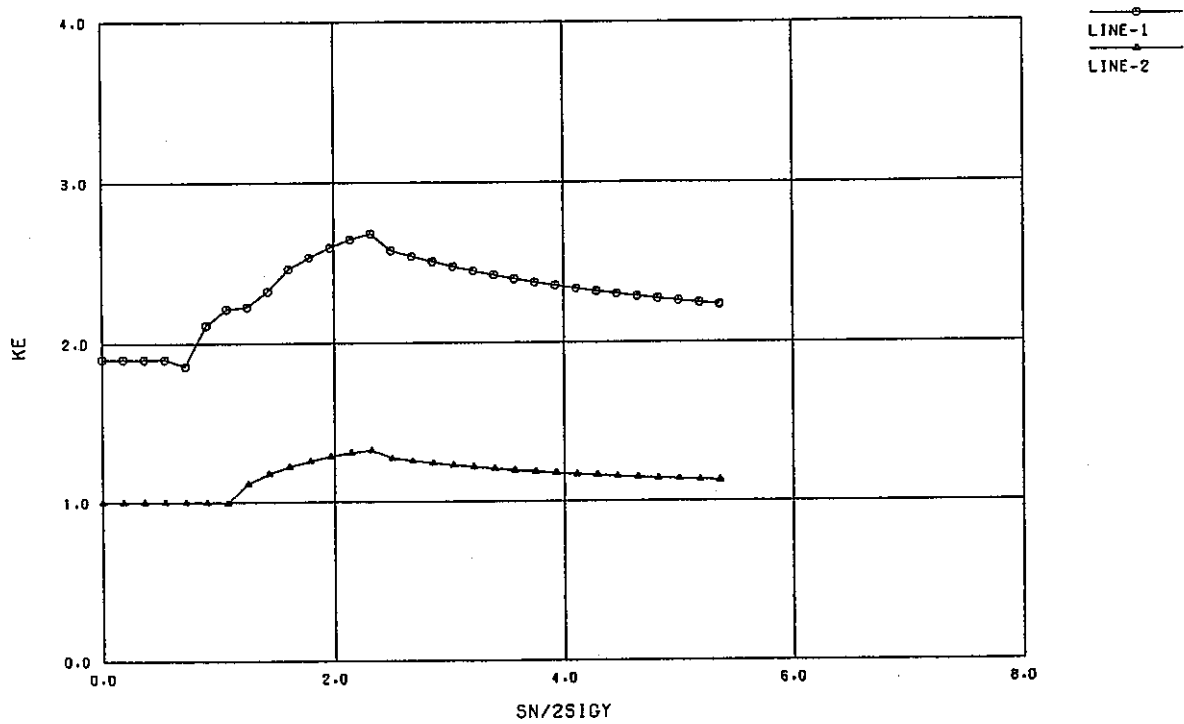


図 3.4.18 (c) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-3-M 膜応力場)

FINRS

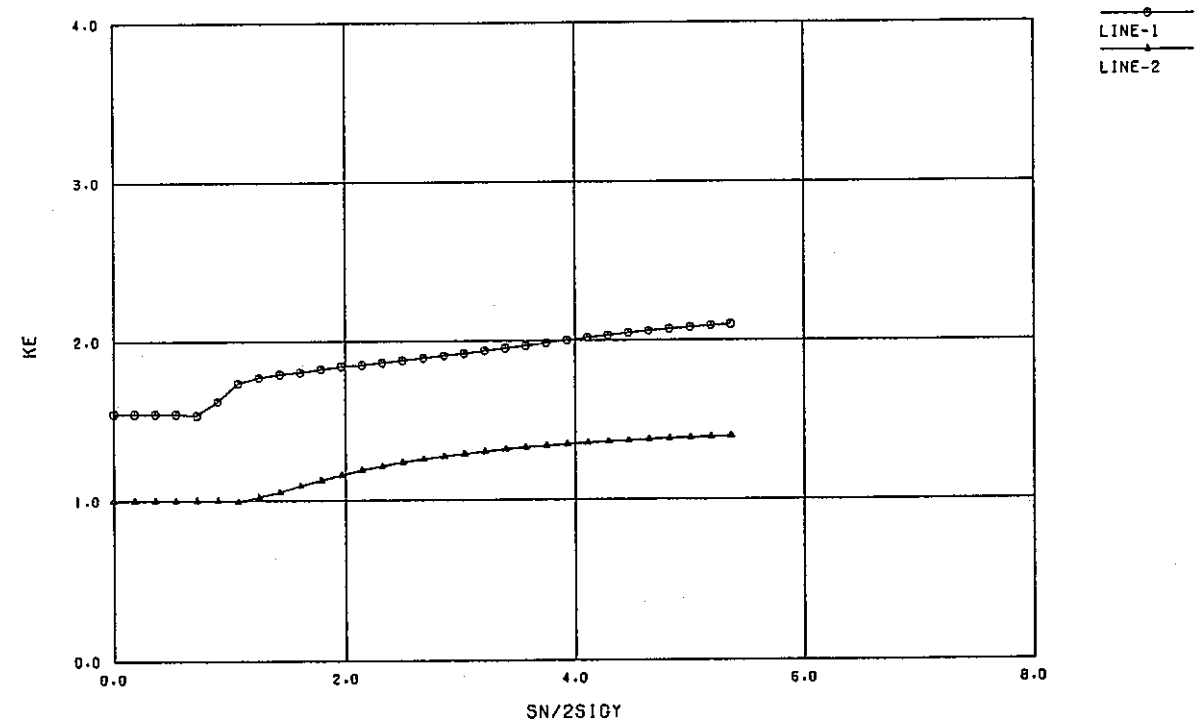


図 3.4.18 (d) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-3-B 曲げ応力場)

FINAS

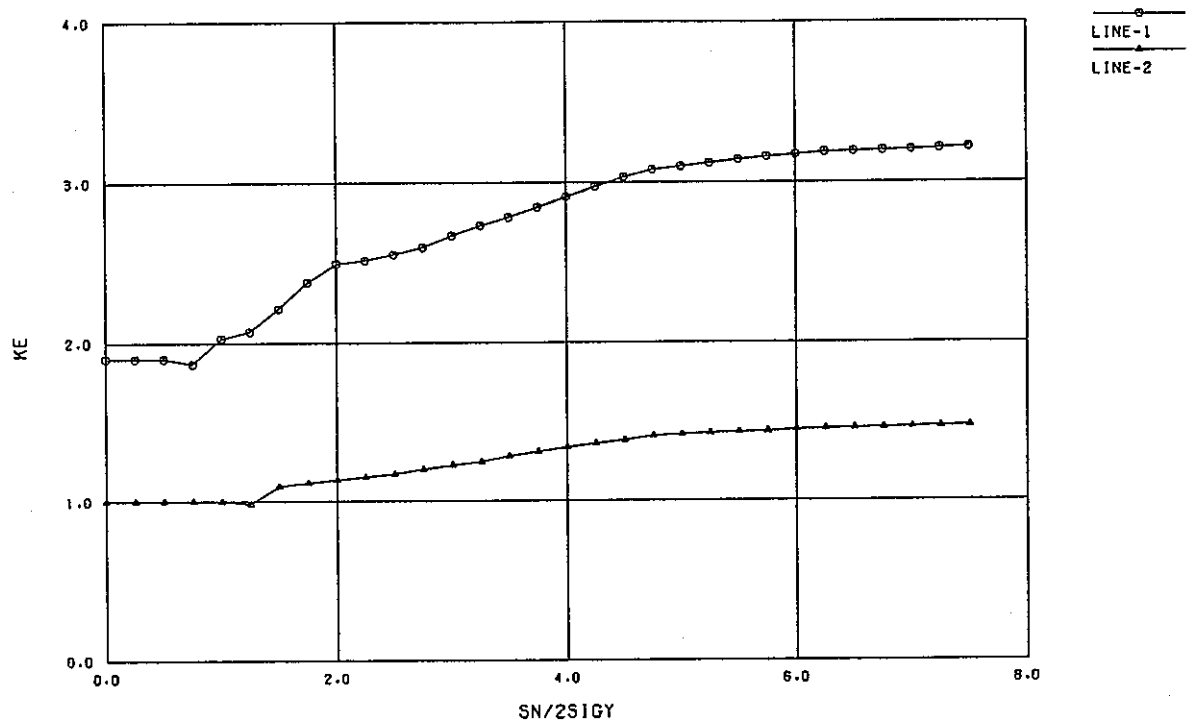


図 3.4.18 (e) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-4-M 膜応力場)

FINAS

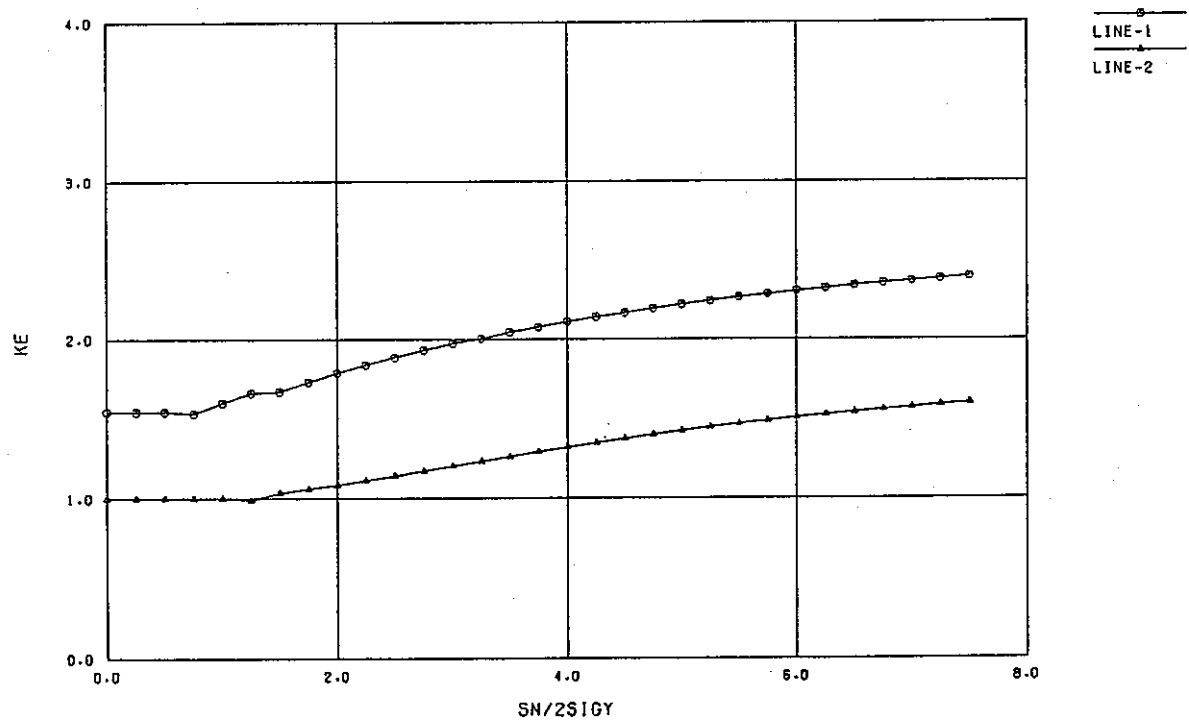


図 3.4.18 (f) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-4-B 曲げ応力場)

FINAS

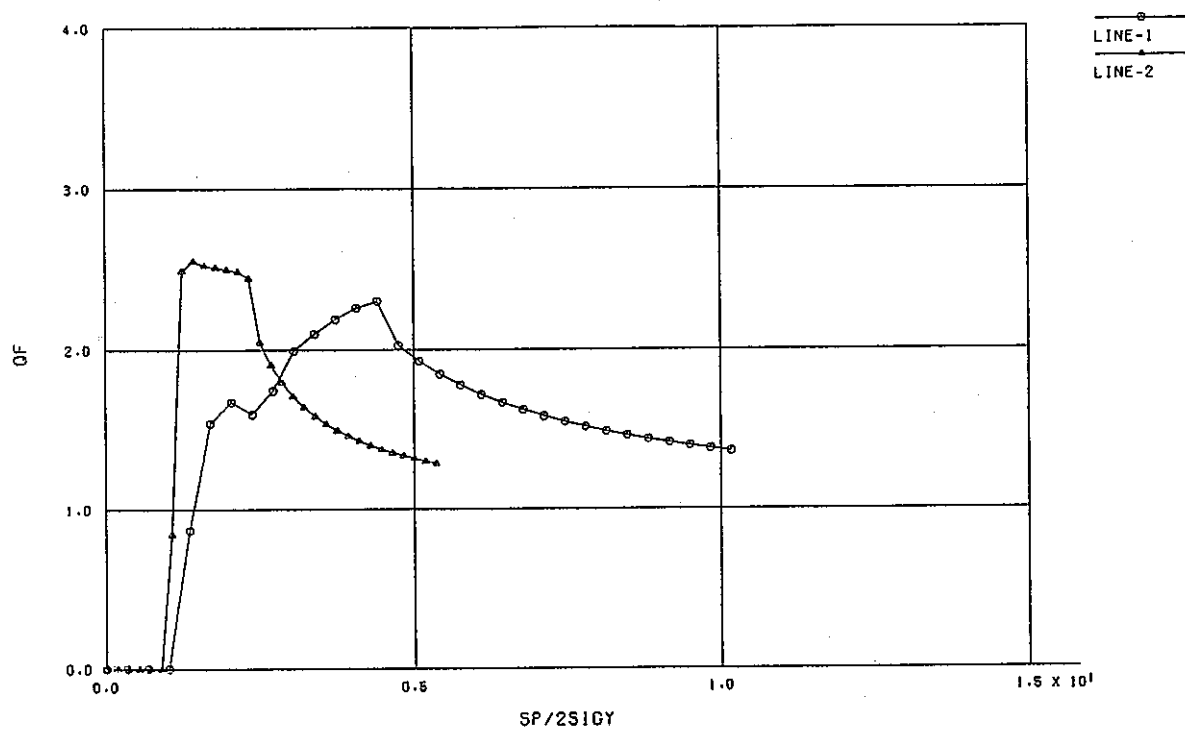


図3.4.19 (c) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-3-M 膜応力場)

FINAS

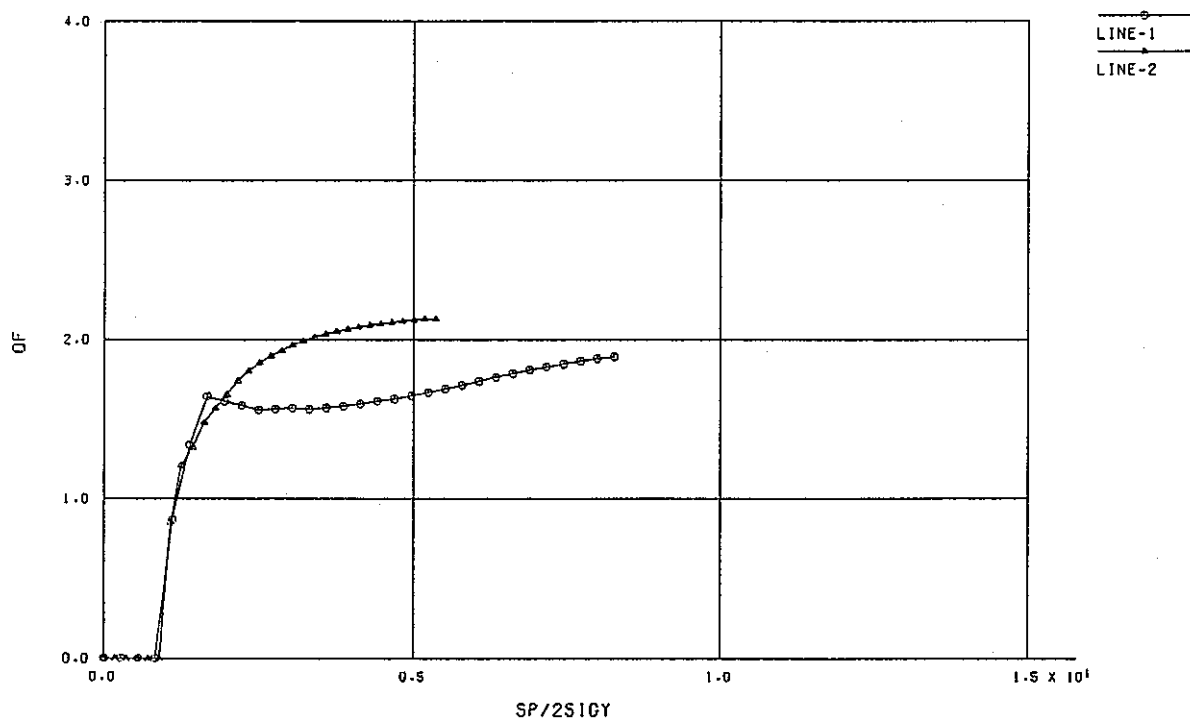


図3.4.19 (d) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-3-B 曲げ応力場)

FINRS

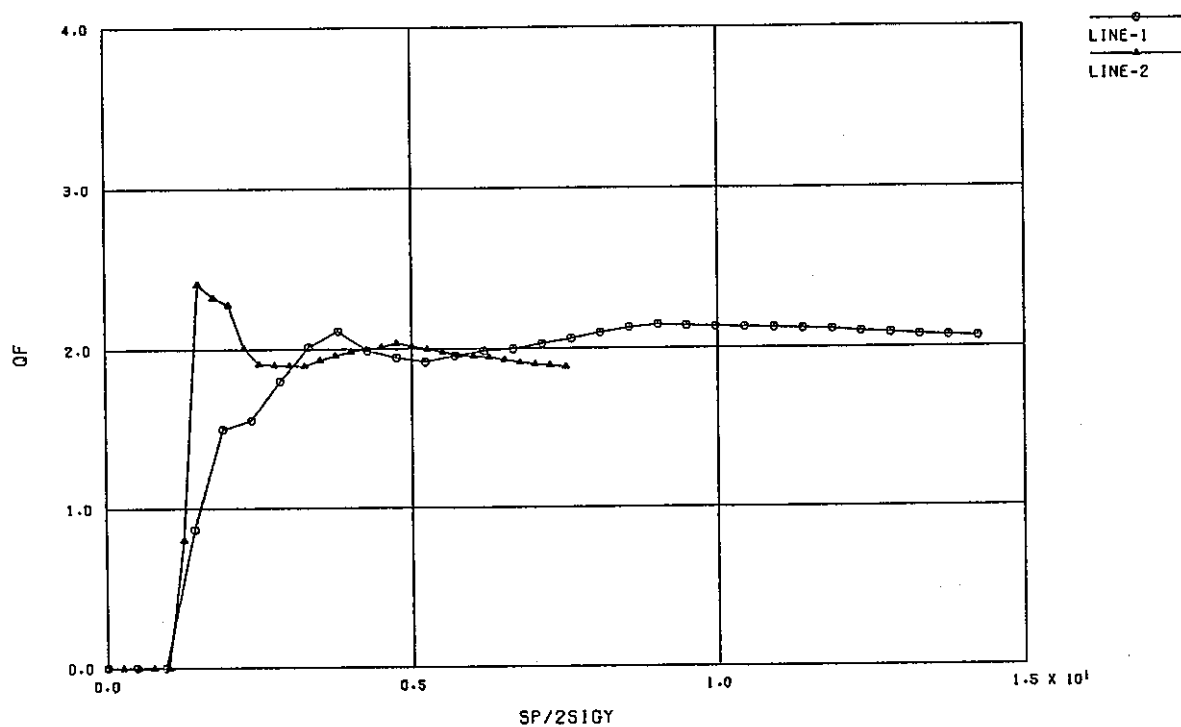


図3.4.19 (e) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-4-M 膜応力場)

FINRS

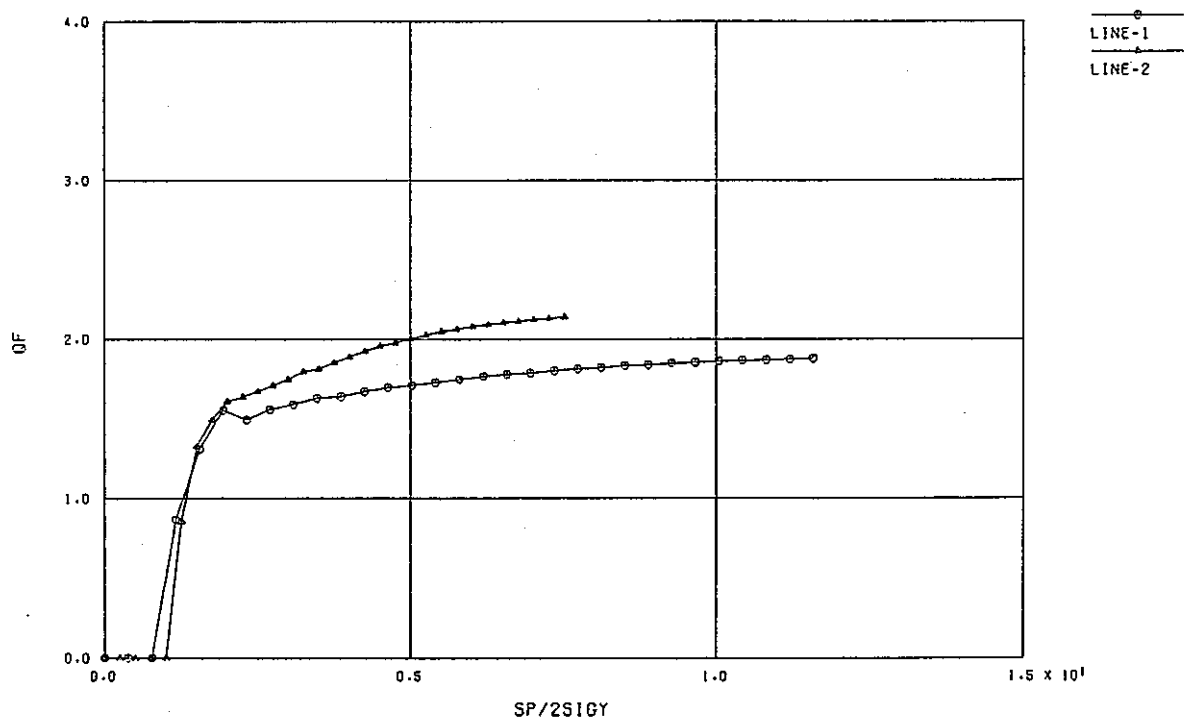


図3.4.19 (f) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-4-B 曲げ応力場)

FINAS

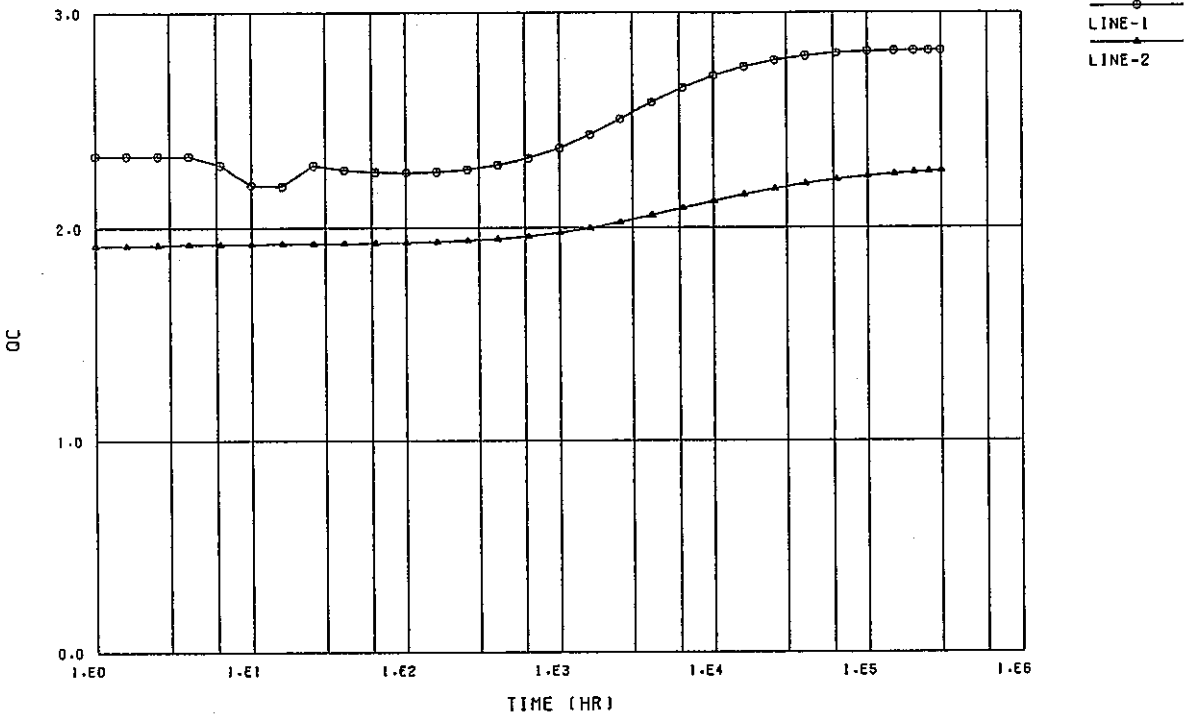


図 3.4.20 (a) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-M 膜応力場)

FINAS

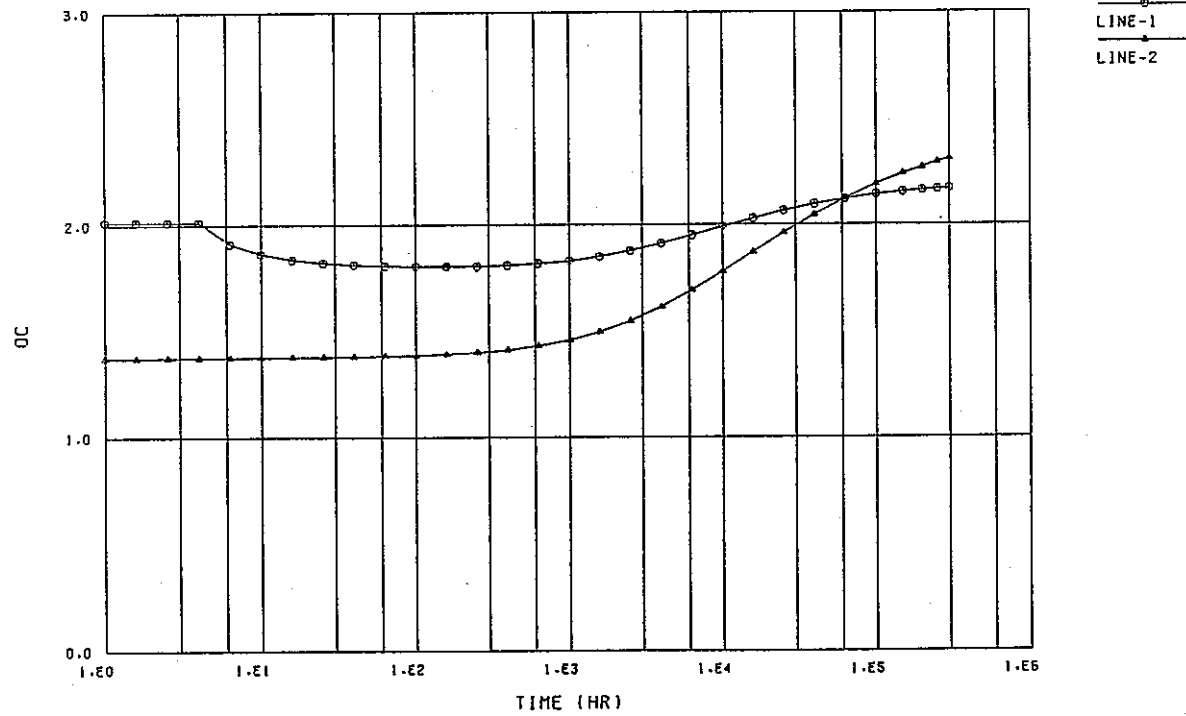


図 3.4.20 (b) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-B 曲げ応力場)

FINRS

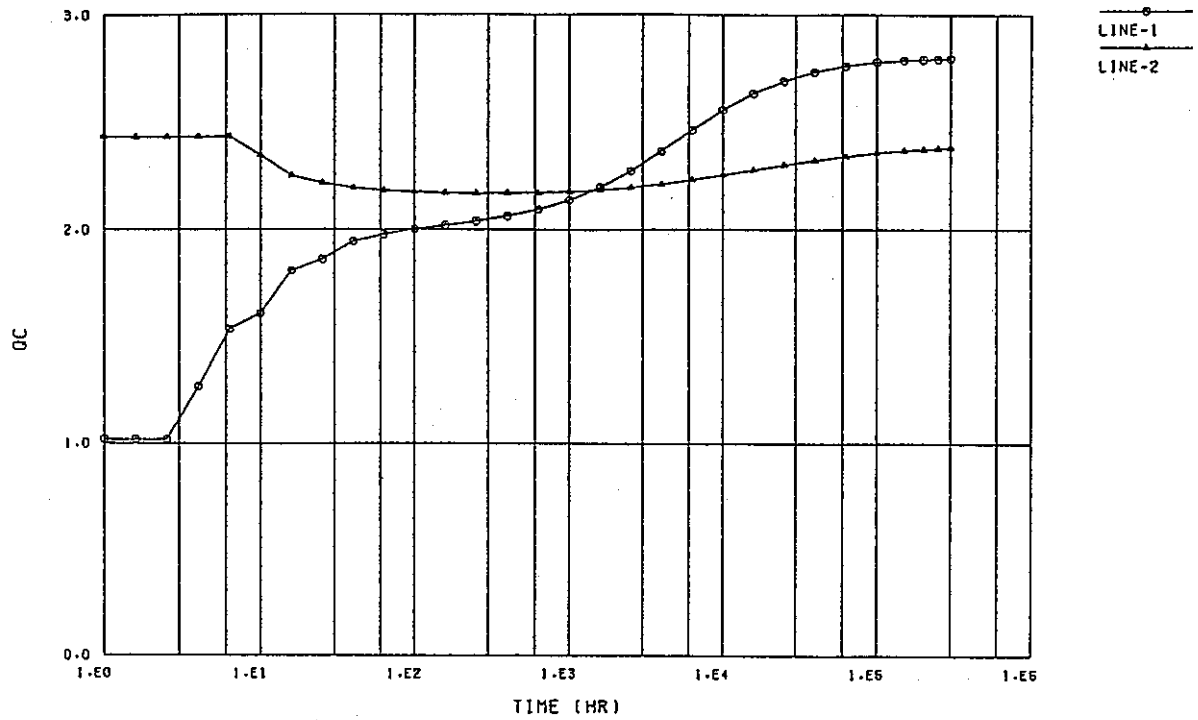


図3.4.20 (c) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-6-M 膜応力場)

FINRS

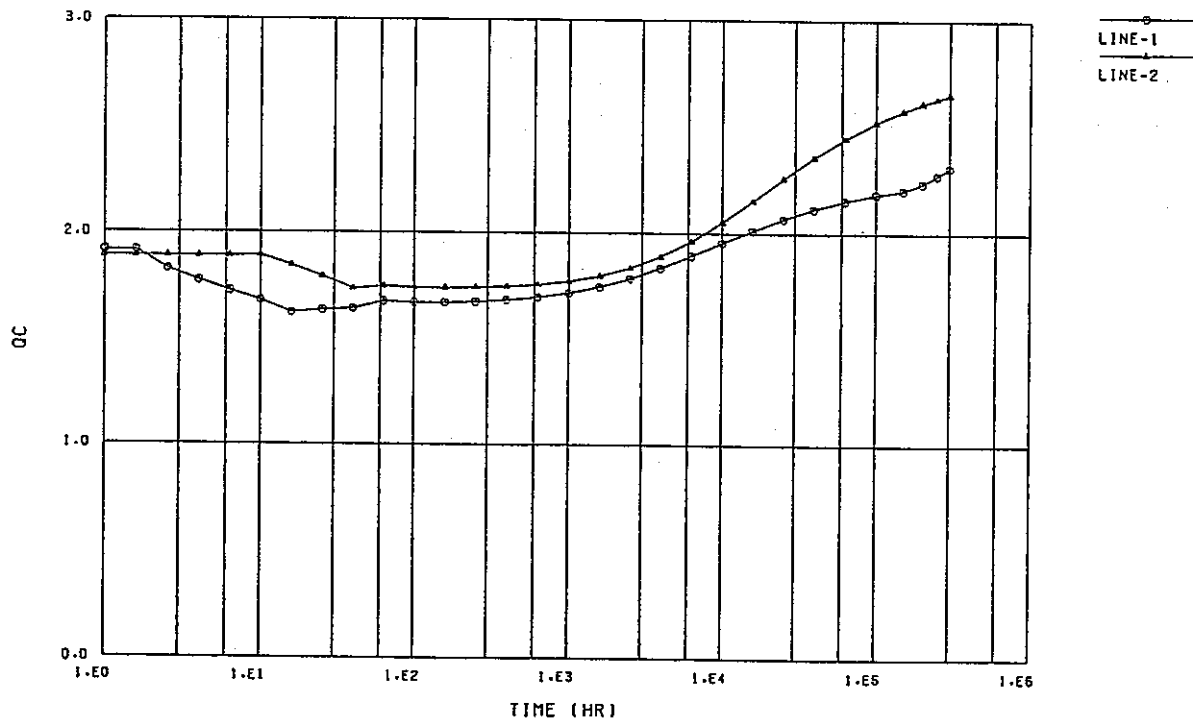


図3.4.20 (d) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-6-B 曲げ応力場)

3. 4. 4 平面条件の影響

(1) 目的

平面条件が構造不連続部におけるひずみ集中挙動に及ぼす影響を調べる。

(2) 方法

以下に示す3つの平面条件を仮定し弾塑性解析を行なう。

一般化平面ひずみ条件 — CASE1-1-M (弾完全塑性体)

平面ひずみ条件 — CASE1-7-M (弾完全塑性体)

平面応力条件 — CASE1-8-M (弾完全塑性体)

(3) 結果

① Mises 相当応力コンター図

平面条件を変化させた場合の極値時点 B における弾塑性解析の Mises 相当応力コンター図を図 3. 4. 2 1 に示す。なお、図はフィレット部近辺を拡大してある。図より以下のことがわかる。

○平面条件を変化させても応力分布の形態にはそれほど大きな影響を与えない。

○平面ひずみ条件の場合、フィレット部の板幅中央部における低応力部の応力が他の平面条件に比べ $4 \sim 5 \text{ kgf/mm}^2$ 低い。

○一般化平面ひずみ条件の場合、他の平面条件より全体的に高めの応力値を示す。

② Mises 相当塑性ひずみコンター図

平面条件を変化させた場合の極値時点 B における Mises 相当塑性ひずみコンター図を図 3. 4. 2 2 に示す。図より以下のことがわかる。

○平面条件を変化させても相当塑性ひずみの分布形態はそれほど大きな影響を受けない。

○平面応力条件の場合、一般化平面ひずみ条件及び平面ひずみ条件に比べ高応力部材側の平滑部全体にわたり相当塑性ひずみの値は小さい。

③ ひずみ集中係数の履歴

平面条件を変化させた場合の評価点 1 及び評価点 2 におけるひずみ集中係数 K_ε の履歴を以下に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点 2 の相当応力増分を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は評価点 1 及び評価点 2 の相当ひずみ増分を降伏ひずみで無次元化したものである。

一般化平面ひずみ条件 (CASE1-1-M) 図 3. 4. 2 3 (a)

平面ひずみ条件 (CASE1-7-M) 図 3. 4. 2 3 (b)

平面応力条件 (CASE1-8-M) 図 3. 4. 2 3 (c)

これらの図より以下のことがわかる。

○評価点 2 ではひずみ集中挙動に対する平面条件の影響を多少受ける。極値時点 B において平面ひずみでは平面応力に比較して 20% 近く大きめとなる。また、一般化平面ひずみは両者の中間となる。

- 平面条件にかかわらず評価点1のひずみ集中係数は平滑部（評価断面2）降伏後減少する傾向を示す。
- 平面ひずみ条件及び平面応力条件では、評価点1におけるひずみ集中係数は評価断面2の降伏後単調に減少するが、一般化平面ひずみ条件では一時増加したのち減少する。
- 評価断面1におけるひずみ集中係数は評価断面2の降伏時において平面応力による値が最も大きくなるが、極値時点Bでは一般化平面ひずみ条件による値が最大となる。

④弾性追従パラメータ q_F の履歴

平面条件を変化させた場合の評価点1及び評価点2における弾性追従パラメータ q_F の履歴を以下に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点1及び評価点2の相当応力増分 S_p を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾性追従パラメータ q_F である。

一般化平面ひずみ条件 (CASE1-1-M)	図3.4.24 (a)
平面ひずみ条件 (CASE1-7-M)	図3.4.24 (b)
平面応力条件 (CASE1-8-M)	図3.4.24 (c)

これらの図より以下のことがわかる。

- 平面条件に拘らず評価点2の方が評価点1よりも高い値を示す。
- 評価点1の弾性追従パラメータは、平面条件に拘らず平滑部（評価点2）降伏後減少する傾向を示す。
- 評価点1における弾性追従パラメータは、平面応力条件が最も大きな値をとるが、負荷の大きいところでは他の平面条件と同等の値を示す。
- 一般化平面ひずみ条件及び平面ひずみ条件における評価点2の弾性追従パラメータは単調に増加するが、平面応力条件の場合降伏直後パルス状に立ち上がるがそれ以降は比較的安定した傾向を示す。

(4) まとめ

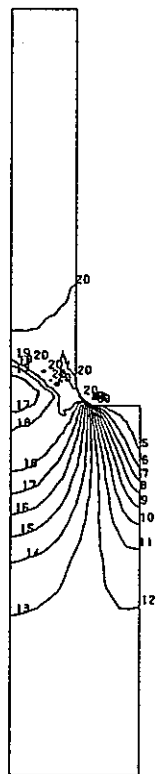
平面条件として一般化平面ひずみ条件、平面ひずみ条件、平面応力条件を考え、弾塑性解析及び応力緩和解析を行うことにより、平面条件がひずみ集中挙動にどのような影響を与えるかを調べた結果をまとめると以下ようになる。

- 一般化平面ひずみ条件と平面ひずみ条件のひずみ集中挙動はほぼ同様な傾向を示すが、平面応力条件の場合評価点1では大きめの、評価点2では小さめのひずみ集中係数を与える。
- 今後の解析を進めていくうえで、より実機に近い条件で行うため3つの平面条件について軸対称モデル等との比較検討をする必要がある。
- 一般化平面ひずみ条件では評価点1のひずみ集中挙動は必ずしも平面応力と平面ひずみの中間に来ないことに留意する必要がある。

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	1.800000
2	3.400000
3	5.000000
4	6.600000
5	8.200000
6	9.800000
7	11.40000
8	13.00000
9	14.60000
10	16.20000
11	17.80000
12	19.40000
13	21.00000
14	22.60000
15	24.20000
16	25.80000
17	27.40000
18	29.00000
19	30.60000
20	32.20000



一般化平面ひずみ

STEP NO. 52

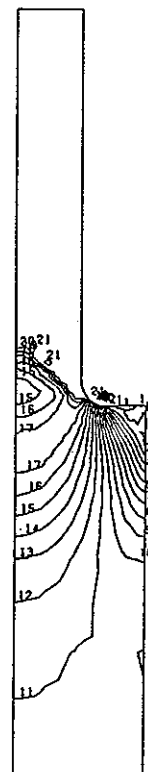
GEOM. SCI

VON-MISES STRESS CONTOUR

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	0.700000
2	2.300000
3	3.900000
4	5.500000
5	7.100000
6	8.700000
7	10.30000
8	11.90000
9	13.50000
10	15.10000
11	16.70000
12	18.30000
13	19.90000
14	21.50000
15	23.10000
16	24.70000
17	26.30000
18	27.90000
19	29.50000
20	31.10000
21	32.70000



平面ひずみ

STEP NO. 52

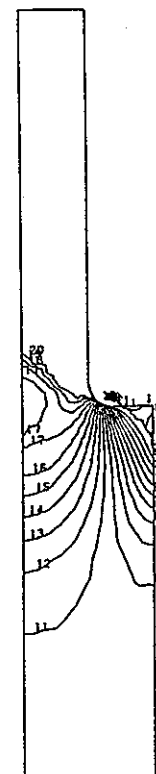
GEOM. SCALE

VON-MISES STRESS CONTOUR

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	0.700000
2	2.300000
3	3.900000
4	5.500000
5	7.100000
6	8.700000
7	10.30000
8	11.90000
9	13.50000
10	15.10000
11	16.70000
12	18.30000
13	19.90000
14	21.50000
15	23.10000
16	24.70000
17	26.30000
18	27.90000
19	29.50000
20	31.10000



平面応力

STEP NO. 52

GEOM. SCALE

VON-MISES STRESS CONTOUR

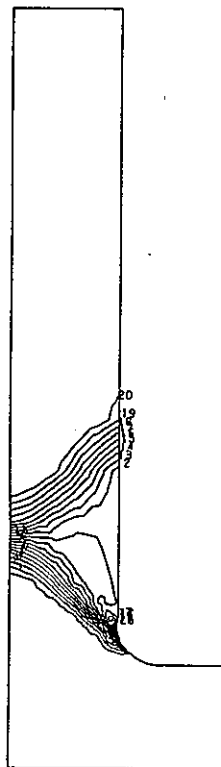
図 3.4.2 1

ミーゼス相当応力コンター図 (一般化平面ひずみ,
平面ひずみ, 平面応力)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1 5.000-04
2 1.000-03
3 1.500-03
4 2.000-03
5 2.500-03
6 3.000-03
7 3.500-03
8 4.000-03
9 4.500-03
10 5.000-03
11 5.500-03
12 6.000-03
13 6.500-03
14 7.000-03
15 7.500-03
16 8.000-03
17 8.500-03
18 9.000-03
19 9.500-03
20 1.000-02



一般化平面ひずみ

Y
X

STEP NO. 52

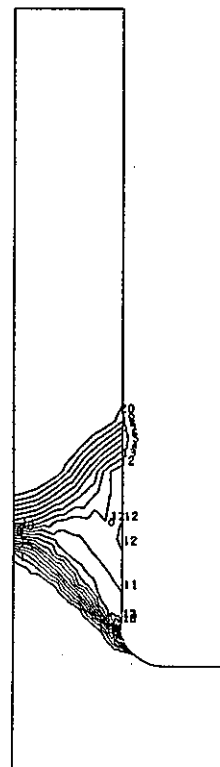
GEOM. SCALE L

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1 5.000-04
2 1.000-03
3 1.500-03
4 2.000-03
5 2.500-03
6 3.000-03
7 3.500-03
8 4.000-03
9 4.500-03
10 5.000-03
11 5.500-03
12 6.000-03
13 6.500-03
14 7.000-03
15 7.500-03
16 8.000-03
17 8.500-03
18 9.000-03
19 9.500-03
20 1.000-02



平面ひずみ

Y
X

STEP NO. 52

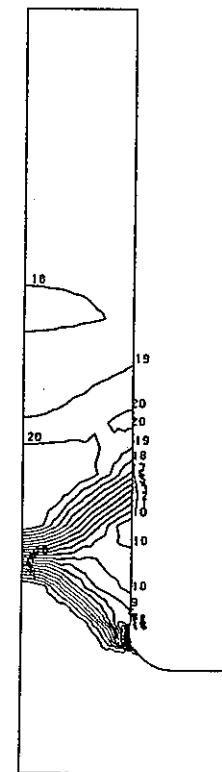
GEOM. SCALE L

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1 5.000-04
2 1.000-03
3 1.500-03
4 2.000-03
5 2.500-03
6 3.000-03
7 3.500-03
8 4.000-03
9 4.500-03
10 5.000-03
11 5.500-03
12 6.000-03
13 6.500-03
14 7.000-03
15 7.500-03
16 8.000-03
17 8.500-03
18 9.000-03
19 9.500-03
20 1.000-02



平面応力

Y
X

STEP NO. 52

GEOM. SCALE L

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

図 3.4.2.2

相当塑性ひずみコンター図（一般化平面ひずみ，
平面ひずみ，平面応力）

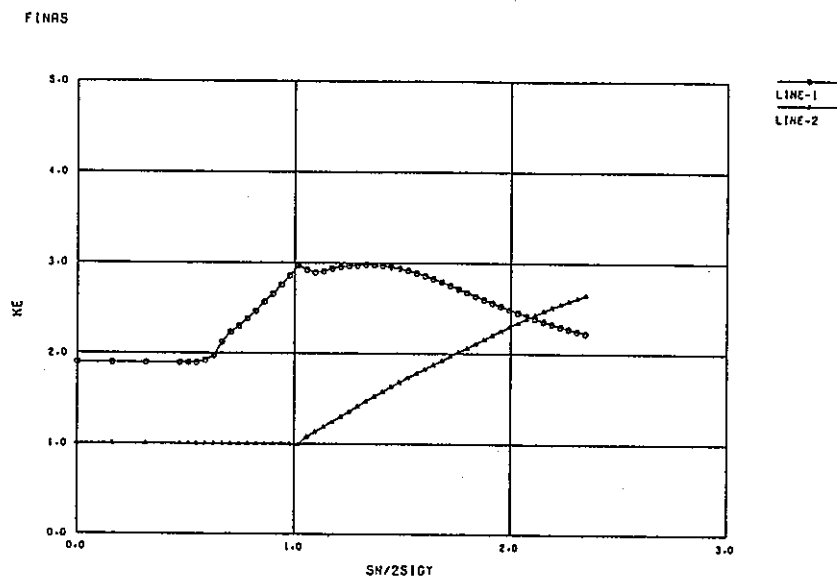


図3.4.23 (a) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-1-M 一般化平面ひずみ)

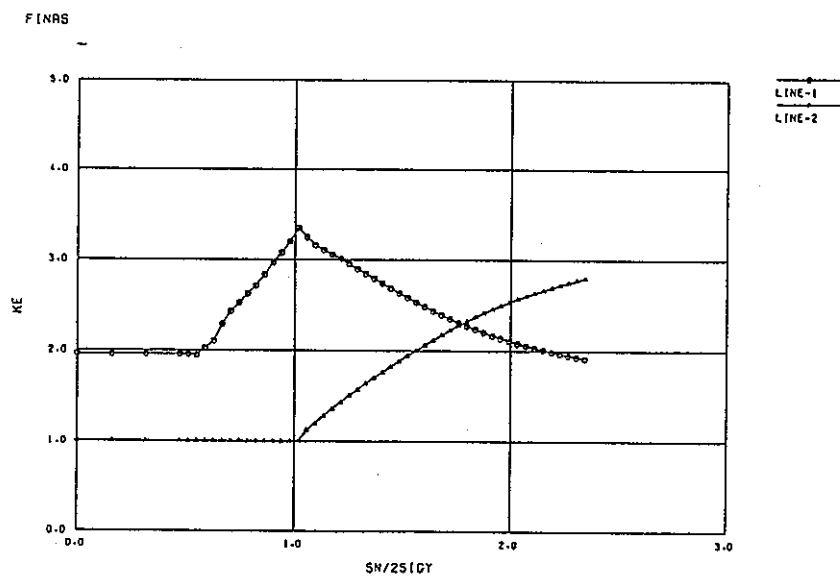


図3.4.23 (b) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-7-M 平面ひずみ)

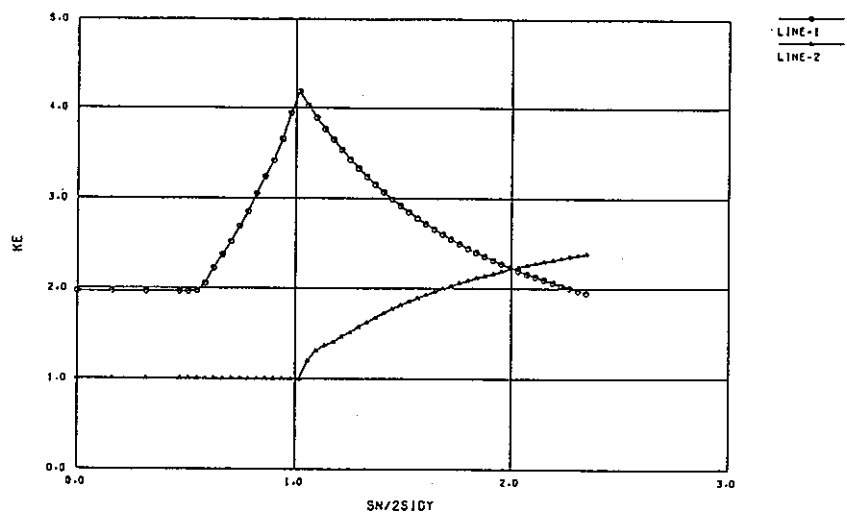


図3.4.23 (c) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-8-M 平面応力)

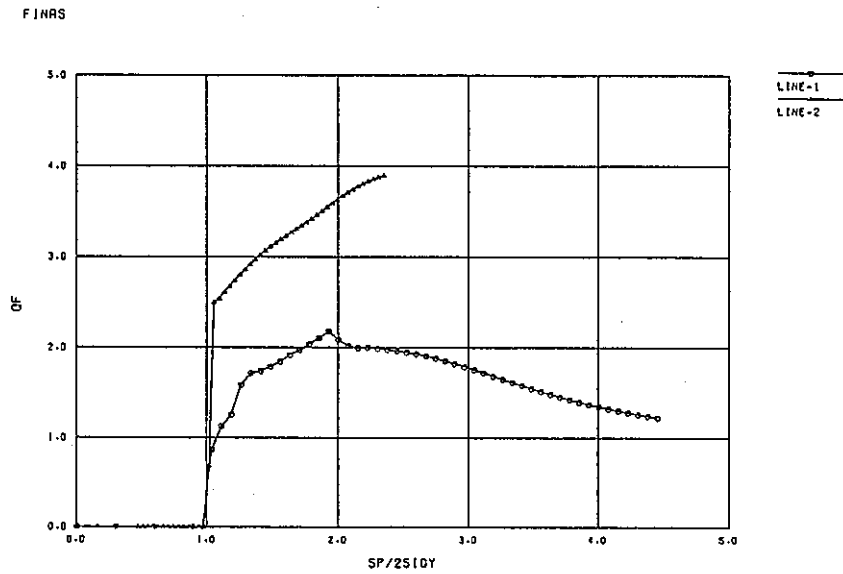


図 3.4.24 (a) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-1-M 一般化平面ひずみ)

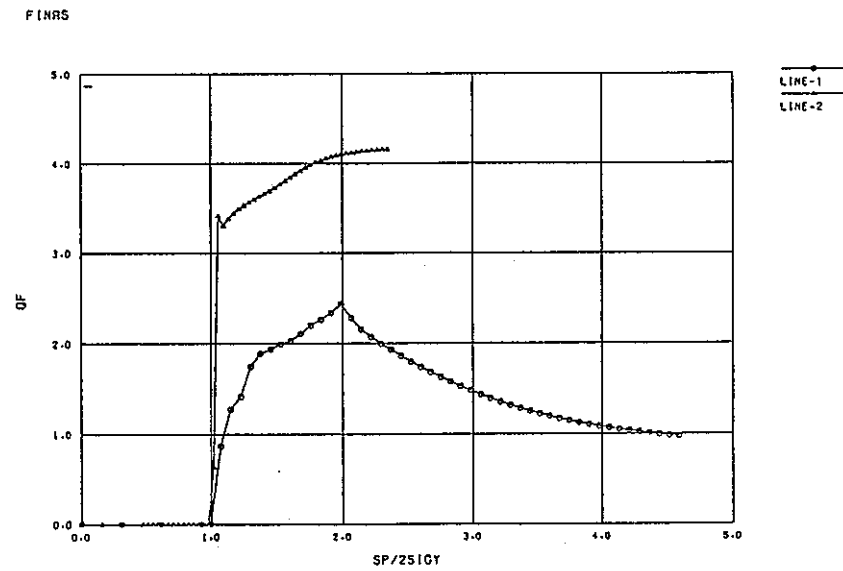


図 3.4.24 (b) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-7-M 平面ひずみ)

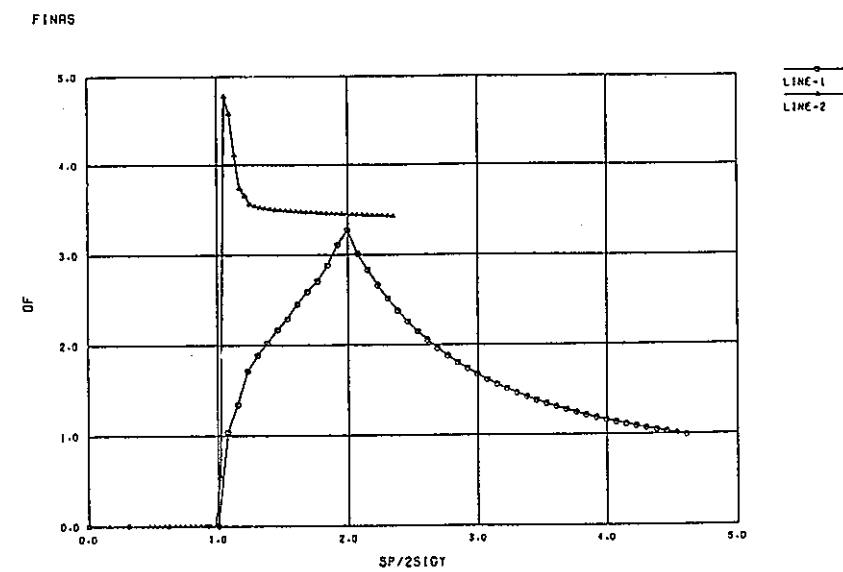


図 3.4.24 (c) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-8-M 平面応力)

3. 4. 4 軸対称モデル（フィレット付き変断面丸棒）との比較

(1) 目的

フィレット付き帯板よりもより実構造物に近いモデルとして軸対称モデルであるフィレット付き変断面丸棒（フィレット付き帯板の回転体）を用いて、平板モデルと軸対称モデルとの対応を調べる。

(2) 方法

① 軸対称解析モデル

軸対称解析モデルを図 3. 4. 2 5 に示す。解析モデルの縦断面形状はフィレット付き帯板と同一形状である。

○要素分割

フィレット付き帯板と同様。また、評価断面及び評価点もフィレット付き帯板と同様（図 3. 2 参照）。

○要素の種類

フィレット付き変断面丸棒—— Q A X 8（8 節点 4 辺形軸対称ソリッド要素）

○境界条件及び負荷

・弾塑性解析

フィレット付き帯板と同様（図 3. 3 参照）。

但し、軸方向引張り（膜応力場）のみ。

・応力緩和解析

弾塑性状態における平滑部（評価断面 2）の応力が 25 kgf/mm^2 になるまで端部に強制変位を与え、その後 3×10^5 時間保持をする。

② 材料特性

フィレット付き帯板と同様。

○弾完全塑性体

縦弾性係数 $E = 16000 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.3$

降伏応力 $\sigma_y = 32.0 \text{ kg/mm}^2$

加工硬化係数 $H' = 16.0 \text{ kg/mm}^2$ （E の 1/1000 の値を設定）

○2 直線近似

縦弾性係数 $E = 16000 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.3$

降伏応力 $\sigma_y = 40 \text{ kg/mm}^2$

加工硬化係数 $H' = 400 \text{ kg/mm}^2$

○応力緩和（ノルトン則）

$$\dot{\epsilon}_0 = B \sigma^n$$

1) フィレット付き帯板 $B = 2.0589 \times 10^{-13}$

$$\begin{aligned}
 n &= 4.3247 \\
 2) \text{ フィレット付き変断面丸棒 } B &= 1.0 \times 10^{-13} \\
 n &= 5.0
 \end{aligned}$$

③非弾性解析及び応力緩和解析の方法

○非弾性解析

- ・等方硬化則を使用。弾塑性解析は1/4サイクル実施。(単調負荷)

○応力緩和解析

- ・クリープポテンシャルはMises のクリープポテンシャルを使用。
- ・クリープに関する硬化則は時間硬化則を使用。

④解析ケース (表 3. 1 参照)

CASE2-1-M	弾完全塑性体
CASE2-2-M	2 直線近似
CASE2-3-M	弾完全塑性体+応力緩和

比較の対称となる帯板モデル

一般化平面ひずみ	平面ひずみ	平面応力
CASE1-1-M	CASE1-7-M	CASE1-8-M
CASE1-2-M	—	—
CASE1-5-M*	—	—

* 2 直線近似+応力緩和

④アウトプット

フィレット付き帯板と同様 (詳細は 3. 2. 4 参照)。

- 相当応力相当ひずみ履歴図
- 相当応力コンター及び相当塑性ひずみコンター
- ひずみ集中係数 K_ϵ
- 弾性追従パラメータ q_F
- クリープ弾性追従パラメータ q_C

(3) 結果

①相当応力相当ひずみの履歴

応力緩和時の応力集中部及び平滑部における相当応力相当ひずみの履歴図を以下に示す。

1) 応力緩和解析

- ・フィレット付き帯板 (CASE1-5-M) 図 3.4.26 (a)
- ・フィレット付き変断面丸棒 (CASE2-3-M) 図 3.4.26 (b)

これらの図より以下のことがわかる。

- 帯板の場合応力緩和が進むにつれて評価点 1 のひずみ増大挙動は弾性追従型より

も大きくなるが、軸対称モデルでは小さくなる傾向が見られる。

- 応力緩和終了時において帯板では評価点 2 のひずみは評価点 1 の半分以下であるのに対し、軸対称モデルでは評価点 2 で評価点 1 と同等の相当ひずみが生じている。
- なお、高応力部材の総体的な弾性追従パラメータの公称値は帯板の場合 3 であるのに対し、丸棒の場合は 2 である。これは、縦断面形状を一致させたため断面積比が異なる値となったことによる。

②Mises 相当応力コンター図

フィレット付き帯板(CASE1-1-M)とフィレット付き変断面丸棒(CASE2-1-M)の極値時点 B における弾塑性解析の Mises 相当応力コンター図を図 3.4.27 (a) に示す。また、フィレット付き変断面丸棒(CASE2-2-M)の相当応力コンター図を図 3.4.27 (b) に示す。図より以下のことがわかる。

- 帯板と軸対称モデルの応力の分布形態は類似しているが、フィレットより下部では軸対称モデルの方が応力が低く応力の値にかなりの差が見られる。
- 軸対称モデルの場合フィレット近傍の中心軸付近で軸方向に大きな応力勾配が生じている。
- 丸棒で多少加工硬化を考慮しても分布形態はあまり変化しない。

③Mises 相当塑性ひずみコンター図

フィレット付き変断面丸棒(CASE2-1-M)の応力集中部(評価点 1)降伏時、平滑部(評価点 2)降伏時及び極値時点 B における Mises 相当塑性ひずみコンター図を図 3.4.28 に示す。図より以下のことがわかる。

- 平滑部降伏までは評価点 1 の相当塑性ひずみ増分が最も大きい、最終的には平滑部のほうが大きな値となる。
- 軸対称の場合においても低応力側の部材は弾性状態のままである。

④ひずみ集中係数の履歴

フィレット付き帯板(CASE1-1-M)とフィレット付き変断面丸棒(CASE2-1-M)の評価点 1 及び評価点 2 におけるひずみ集中係数 K_ϵ の履歴を図 3.4.29 (a), (b) に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点 2 の相当応力増分 S_n を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は評価点 1 及び評価点 2 の相当ひずみ増分を降伏ひずみで無次元化したものである。図より以下のことがわかる。

- 全体的な傾向は類似していると考えられる。
- 評価点 1 においては軸対称モデルのほうがひずみ集中係数の値は弾性、断塑性とも小さくなる。。
- 評価点 2 におけるひずみ集中は、帯板の場合直線的に上昇していくのに対し、軸対称モデルでは弾性追従型挙動を呈し一定値に漸近する傾向を示す。
- 軸対称モデルの方が評価点 1 におけるひずみ集中係数低下の割合が大きい。

⑤弾性追従パラメータ q_F の履歴

フィレット付き帯板(CASE1-1-M) とフィレット付き変断面丸棒(CASE2-1-M) の評価点1および評価点2における弾性追従パラメータ q_F の履歴を図3.4.30(a), (b)に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点1及び評価点2の相当応力増分 S_p を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾性追従パラメータ q_F である。図より以下のことがわかる。

- 帯板、軸対称モデルとも評価点1よりも評価点2における弾性追従パラメータのほうが大きい値となる。
- 評価点1の弾性追従パラメータは、帯板、軸対称モデルともに平滑部降伏後減少する傾向を示す。
- 評価点1の弾性追従パラメータは、帯板モデルの場合単調増加しているのに対し、軸対称モデルでは初期に急激に立ち上がるがその後はなだらかに減少する。
- 軸対称モデルの場合、評価点1の弾性追従パラメータが1以下の値になっているのは、弾性解析結果よりもひずみが小さくなっていることを示す。

⑥クリープ弾性追従パラメータ q_c の履歴

フィレット付き帯板(CASE1-5-M) とフィレット付き変断面丸棒(CASE2-3-M) の評価点1および評価点2におけるクリープ弾性追従パラメータ q_c の履歴を図3.4.34(a), (b)に示す。図で横軸は時間であり、縦軸はクリープ弾性追従パラメータである。図より以下のことがわかる。

- 評価点1では帯板モデルよりも軸対称モデルの方が小さくなる。
- 評価点2では初期には軸対称モデルの方がやや大きいが応力緩和終了時には小さくなる。
- 帯板の場合、クリープ弾性追従パラメータは評価点1、2とも時間とともに増加していく傾向が見られるが、軸対称モデルの場合評価点1では多少減少する傾向を示すものの時間にはあまり依存せずほぼ一定値となる。

(4) まとめ

フィレット付き帯板よりもより実機に近いと考えられる軸対称モデルとしてフィレット付き変断面丸棒を考え弾塑性解析及び応力緩和解析を行うことにより、平板モデルと軸対称モデルの対応を検討した結果をまとめると以下のようになる。

- フィレット付き帯板と同一の縦断面形状を有するフィレット付き変断面丸棒では弾性応力集中係数、総体的弾性追従パラメータとも減少する。
- フィレット付き帯板と同一の縦断面形状を有するフィレット付き変断面丸棒ではフィレット付き帯板の方が応力集中部におけるひずみ集中挙動は厳しい。
- 軸対称モデルの評価点1(応力集中部)における弾塑性ひずみ集中挙動は3種の平面モデルの中では平面ひずみモデルに最も近い。
- 軸対称モデルの評価点2(平滑部)における弾塑性ひずみ集中挙動は3種の平面モデルの中では平面応力モデルに最も近い。

○軸対称モデルの評価点1（応力集中部）における応力緩和時のひずみ集中挙動は一般化平面ひずみモデルと異なり応力が緩和するとともにクリープ弾性追従パラメータは減少する。

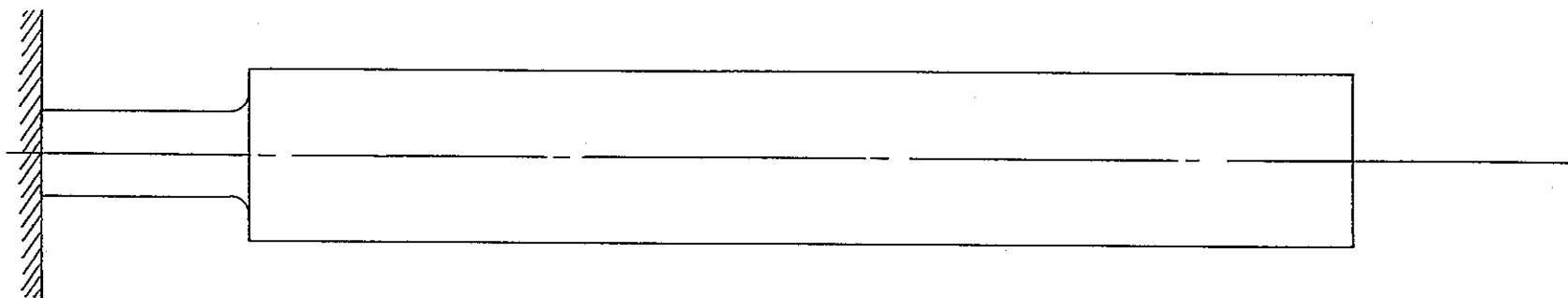


図 3.4.25 解析モデル（フィレット付き変断面丸棒）

FINAS

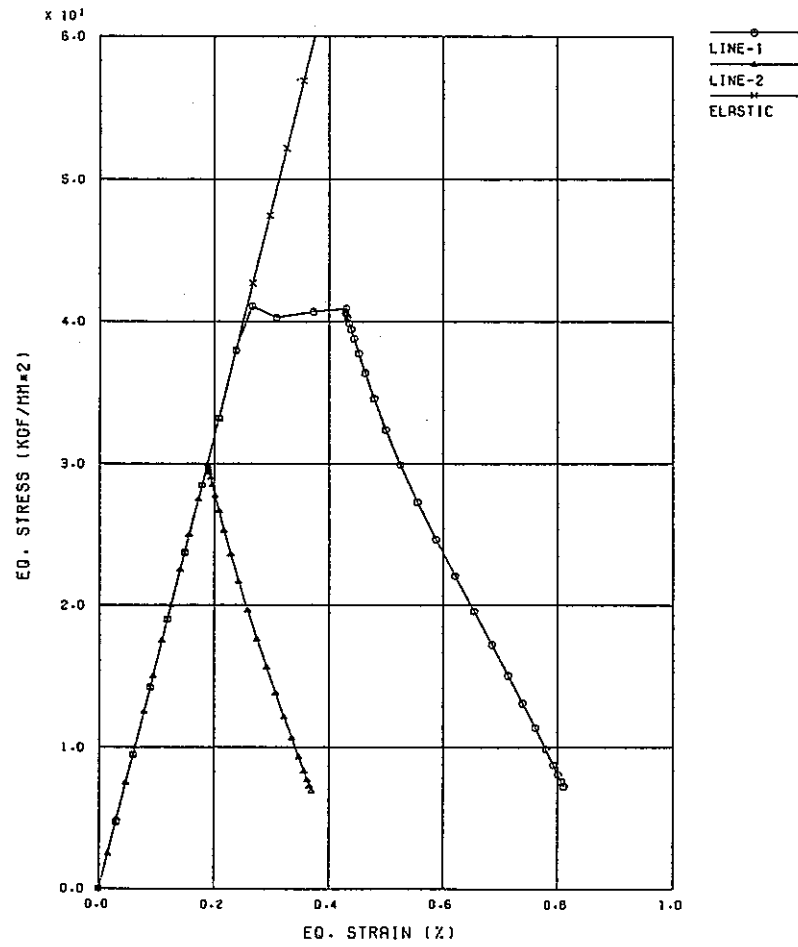


図3.4.26 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE1-5-M)

FINAS

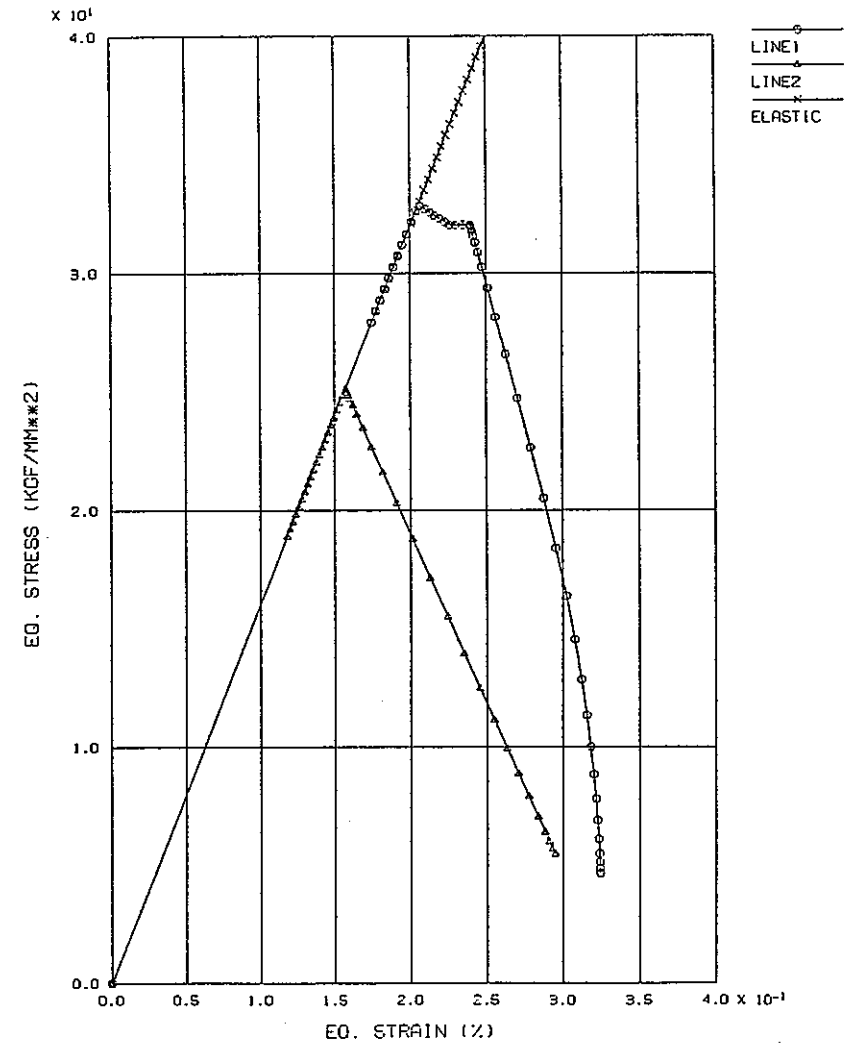
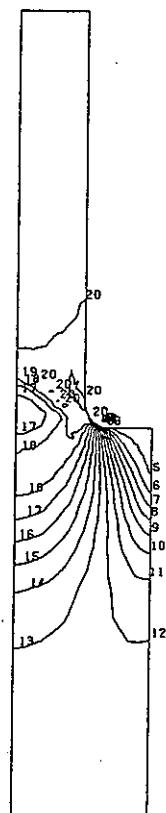


図3.4.26 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE2-3-M)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	1.800000
2	3.400000
3	5.000000
4	6.600000
5	8.200000
6	9.800000
7	11.40000
8	13.00000
9	14.60000
10	16.20000
11	17.80000
12	19.40000
13	21.00000
14	22.60000
15	24.20000
16	25.80000
17	27.40000
18	29.00000
19	30.60000
20	32.20000



フィレット付き帯板

STEP NO. 52

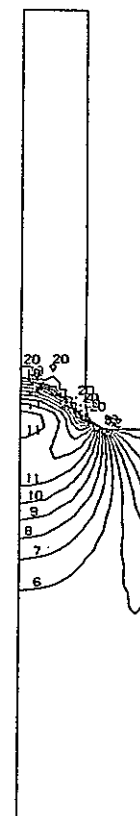
GEOM. SCALE 20.0000

VON-MISES STRESS CONTOUR

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	1.599999
2	3.199998
3	4.799996
4	6.399997
5	7.999997
6	9.599996
7	11.19999
8	12.79999
9	14.39999
10	15.99999
11	17.59999
12	19.19998
13	20.79997
14	22.39996
15	23.99995
16	25.59994
17	27.19993
18	28.79992
19	30.39992
20	31.99991



フィレット付き変断面丸棒

STEP NO. 130

GEOM. SCALE 20.0000

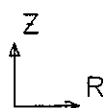
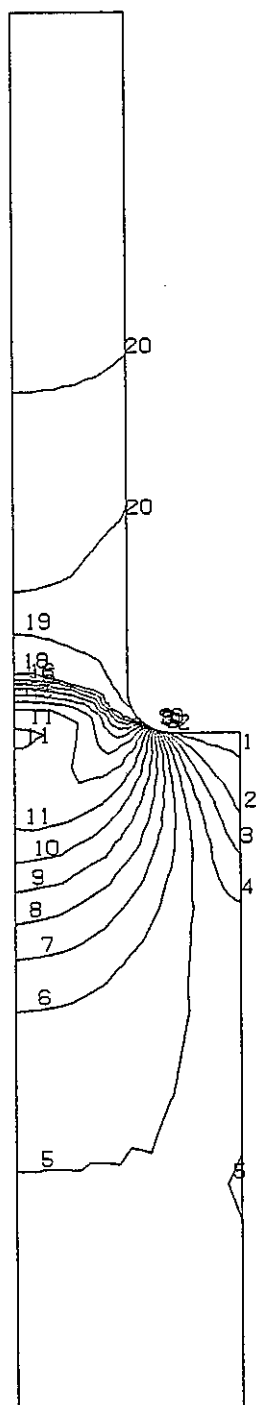
MISES EQ. STRESS CONTOUR (E-F-P)

図3.4.27 (a) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE1-1-M, CASE2-1-M)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	2.299998
2	4.499997
3	6.699995
4	8.899994
5	11.099998
6	13.299998
7	15.499999
8	17.699998
9	19.899997
10	22.099997
11	24.299997
12	26.499996
13	28.699997
14	30.899996
15	33.099996
16	35.299995
17	37.499996
18	39.699995
19	41.899995
20	44.099995



STEP NO. 130

GEOM. SCALE  20.0000

MISES EQ. STRESS CONTOUR (BI-LINEAR)

図3.4.27 (b) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE2-2-M)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	2.400-06
2	7.200-06
3	1.200-05
4	1.680-05
5	2.160-05
6	2.640-05
7	3.120-05
8	3.600-05
9	4.080-05
10	4.560-05
11	5.040-05
12	5.520-05
13	6.000-05
14	6.480-05
15	6.960-05
16	7.440-05
17	7.920-05
18	8.400-05
19	8.880-05
20	9.360-05



応力集中部降伏時

STEP NO. 11

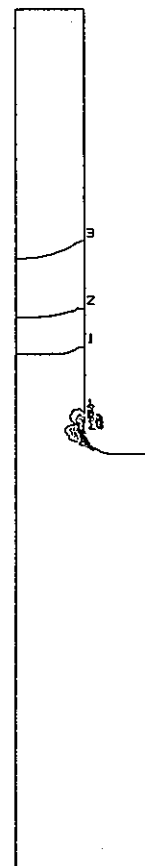
GEOM. SC1

EQ. PLASTIC STRAIN I

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-05
2	1.600-04
3	2.700-04
4	3.800-04
5	4.900-04
6	6.000-04
7	7.100-04
8	8.200-04
9	9.300-04
10	1.040-03
11	1.150-03
12	1.260-03
13	1.370-03
14	1.480-03
15	1.590-03
16	1.700-03
17	1.810-03
18	1.920-03
19	2.030-03
20	2.140-03
21	2.250-03



平滑部降伏部

STEP NO. 50

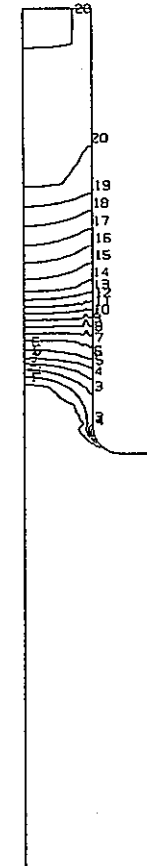
GEOM. S

EQ. PLASTIC STRAIN

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	3.700-04
2	1.120-03
3	1.670-03
4	2.620-03
5	3.370-03
6	4.120-03
7	4.870-03
8	5.620-03
9	6.370-03
10	7.120-03
11	7.870-03
12	8.620-03
13	9.370-03
14	1.012-02
15	1.087-02
16	1.162-02
17	1.237-02
18	1.312-02
19	1.387-02
20	1.462-02



極値時点 B

STEP NO. 130

GEOM. SCALE L

EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR

図 3.4.2 8

相当塑性ひずみコンター図 (CASE2-1-M)

FINAS

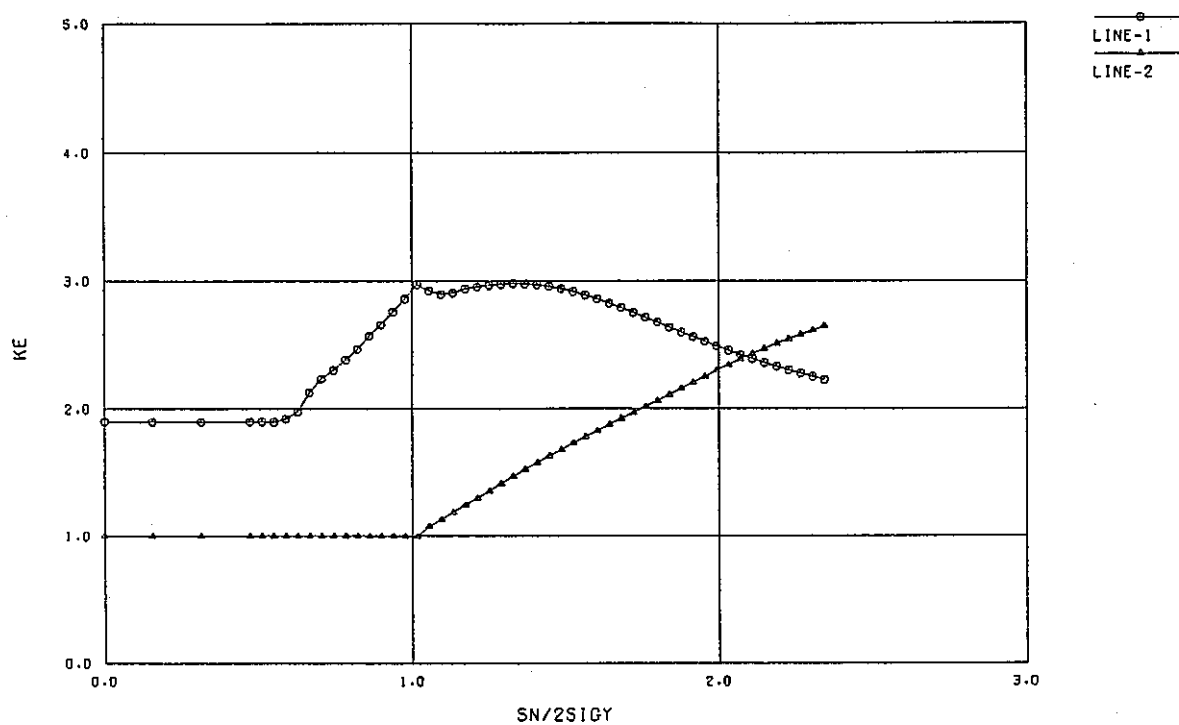


図 3.4.29 (a) ひずみ集中係数の履歴 (CASE1-1-M)

FINAS

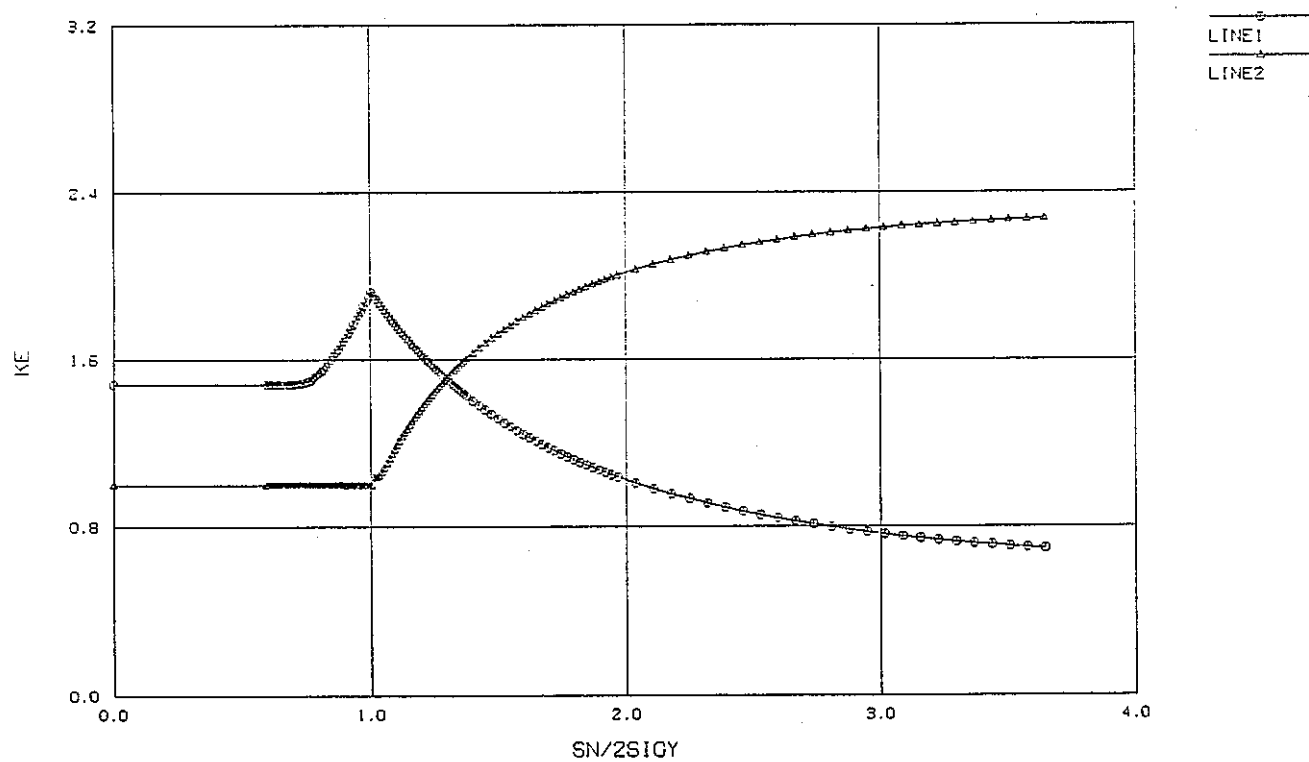


図 3.4.29 (b) ひずみ集中係数の履歴 (CASE2-1-M)

FINAS

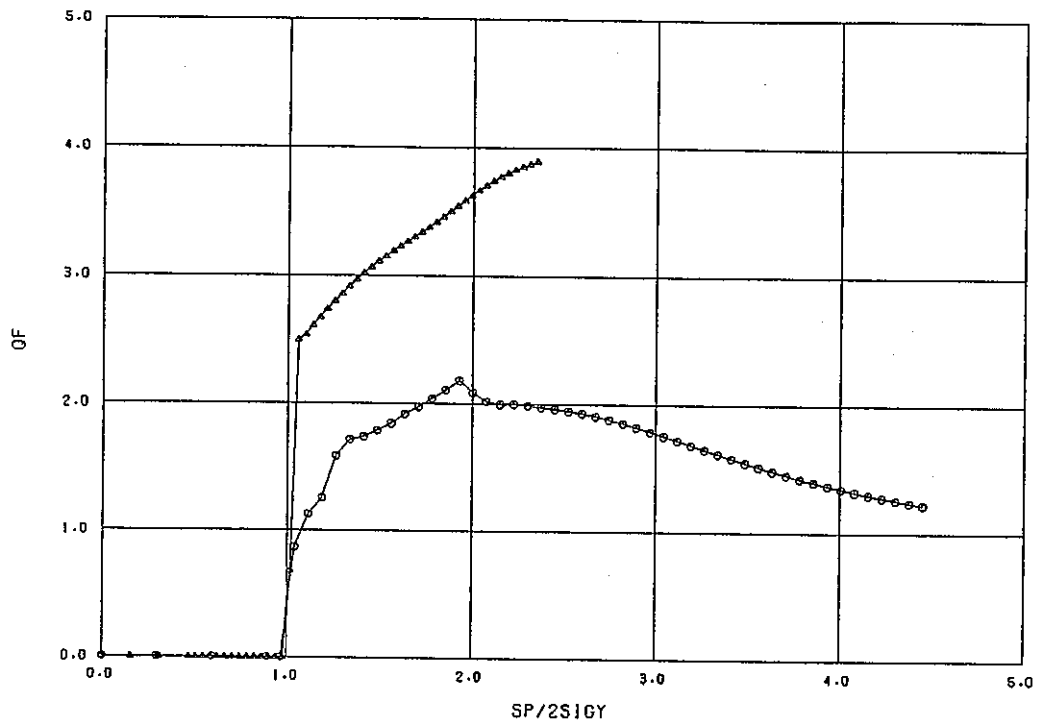


図 3.4.30 (a) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-1-M)

FINAS

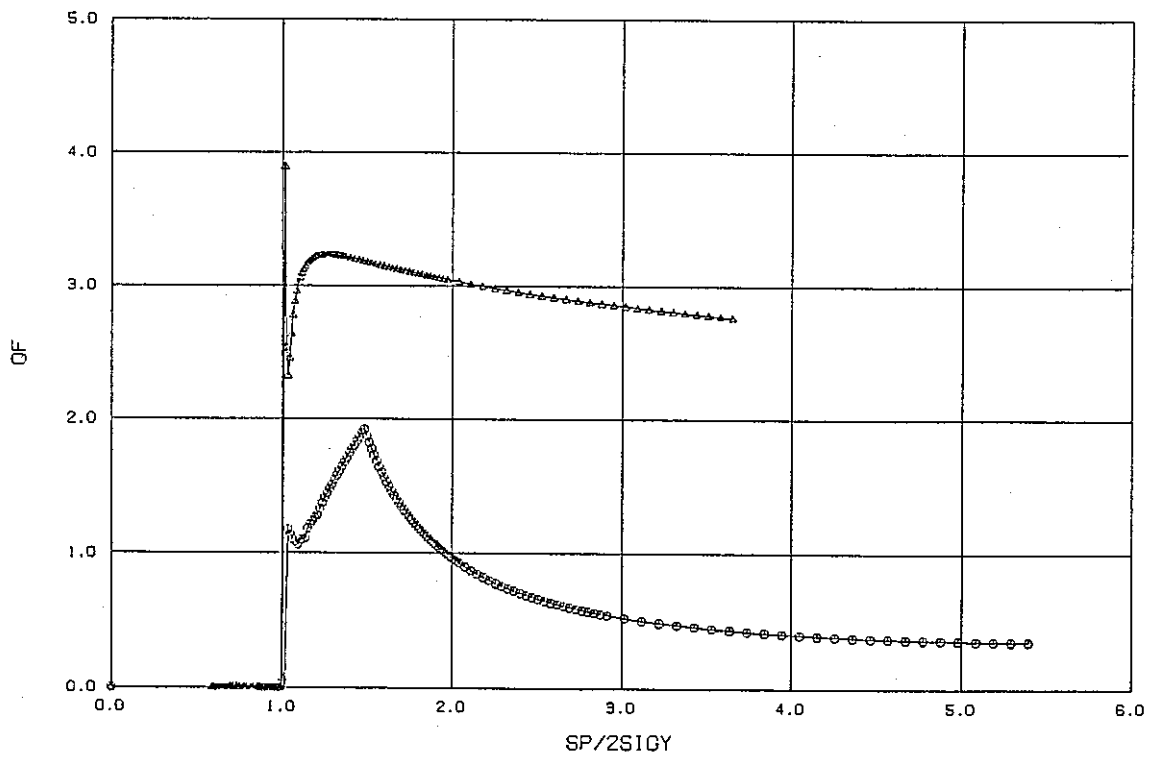


図 3.4.30 (b) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE2-1-M)

FINAS

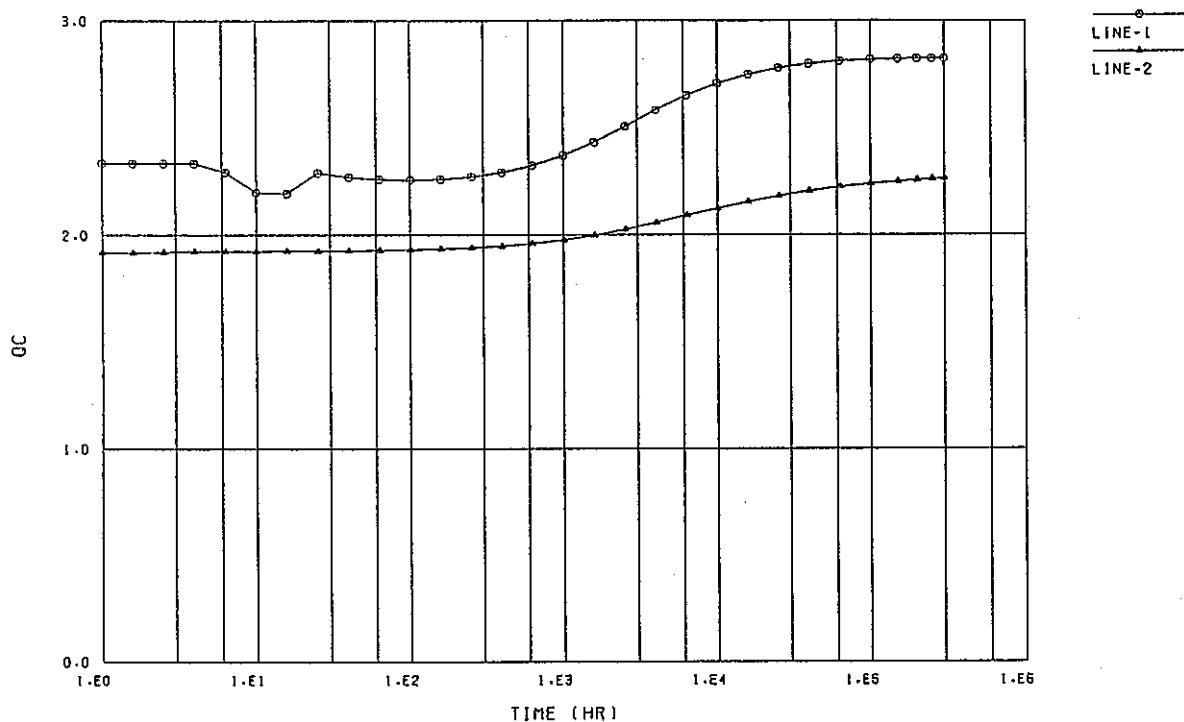


図3.4.31 (a) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE1-5-M)

FINAS

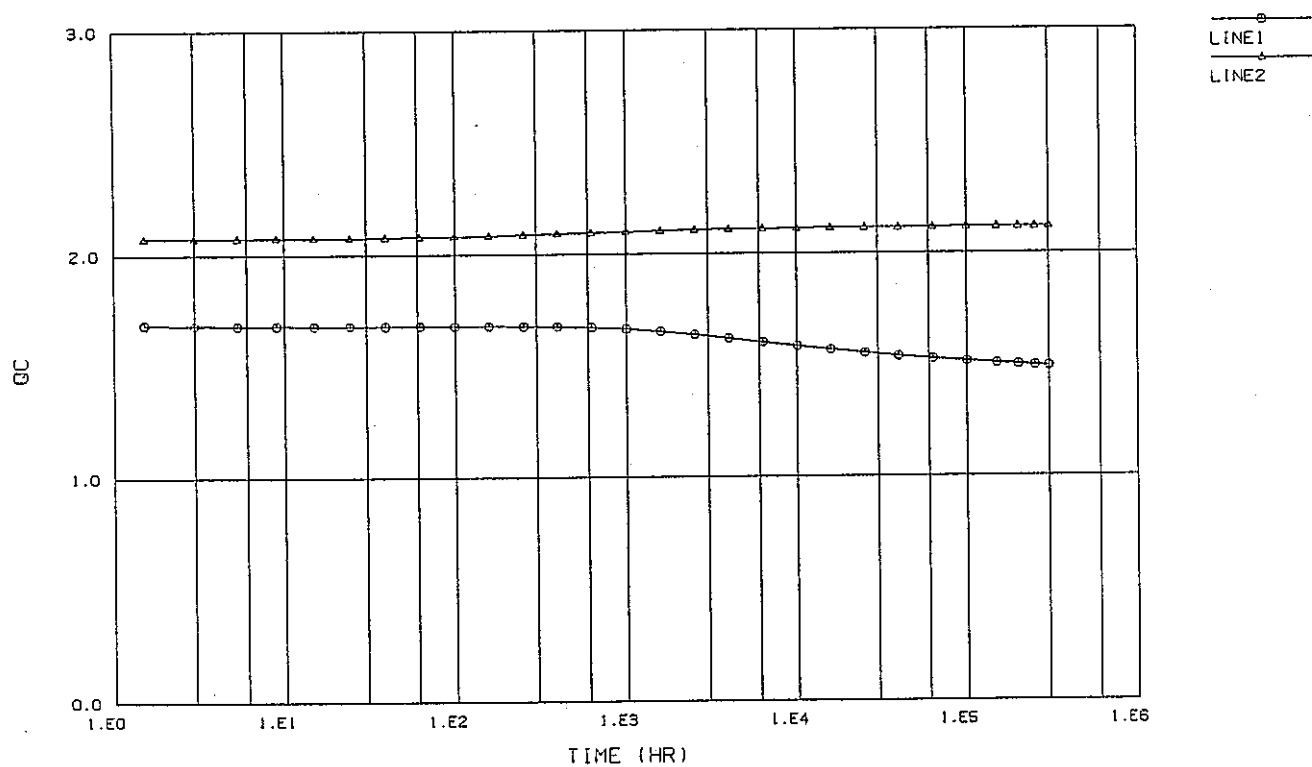


図3.4.31 (b) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE2-3-M)

3. 5 考 察

3. 5. 1 弾塑性解析によるひずみ集中挙動の検討

(1) 目的

クリープ疲労損傷評価に用いるひずみ範囲評価法について、フィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒のひずみ集中係数と現行設計基準とを比較することによりひずみ範囲評価法の合理化について検討する。

(2) 方法

前述の解析結果よりフィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒のひずみ集中は初期にノイバー型の挙動を示し、全断面降伏後は鈍化あるいは減少すること等がわかった。そこで解析結果と現行設計基準で用いられているノイバー則及び弾性追従パラメータを用いたひずみ集中係数とを比較し、その包絡性を図ることにより対象モデルに対するひずみ範囲評価法の合理化の検討を行う。

① ノイバー則

弾完全塑性体想定 of ノイバー則について以下に示す。

$$\varepsilon_t = K_\varepsilon \cdot \varepsilon_n$$

$$K_\varepsilon = (S^* / S) K^2, \quad K = S_p / S_n \quad (\text{弾性応力集中係数})$$

ここで

ε_t : 全ひずみ

K_ε : ひずみ集中係数

ε_n : S_n / E

$$\begin{aligned} S^* &= E \varepsilon_n & \varepsilon_n &\leq 2\sigma_y / E \\ &2\sigma_y & \varepsilon_n &> 2\sigma_y / E \\ S &= K E \varepsilon_n & K \varepsilon_n &\leq 2\sigma_y / E \\ &2\sigma_y & K \varepsilon_n &> 2\sigma_y / E \end{aligned}$$

② 弾性追従パラメータ q によるひずみ集中係数の定義を以下に示す。

$$\varepsilon_t = K_\varepsilon \cdot \varepsilon_n$$

$$K_\varepsilon = K K e'$$

$$K e' = 1 + (q - 1) (1 - 3 \overline{S_m} / S_n)$$

ここで

q : 弾性追従パラメータ (現行設計基準では q = 3)

3 $\overline{S_m}$: シェイクダウン基準値

S_n : 1 次 + 2 次応力強さ範囲

③ 現行設計基準

$$K_\varepsilon = \text{Max} \{ (S^* / S) K^2, K K e' \}$$

(3) 結果

フィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒のひずみ集中係数とノイバー則及び弾性追従パラメータによるひずみ集中係数を比較したものを図3.5.1, 図3.5.2に示す。但し、弾性追従パラメータは現行の $q=3.0$ に加え $q=2.0, 2.5$ の場合についても示してある。図より以下のことがわかる。

- 弾完全塑性体想定 of ノイバー則を用いることにより初期の急激な立ち上がりは包絡できる。
- フィレット付変断面丸棒の場合、評価点2のひずみ集中係数はノイバー則の値を上回るが現行設計基準を用いればかなり保守的に包絡できる。
- 弾性追従パラメータの値として総体的構造不連続に対する弾性追従パラメータの公称値（帯板3、丸棒2）を用いれば保守的となる。

(4) まとめ

前述の解析結果とノイバー則及び弾性追従パラメータを用いて推定したひずみ集中係数を比較し対象モデルに対するひずみ範囲評価法について検討を行った結果をまとめると以下ようになる。

- フィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒のひずみ集中挙動は現行設計基準（局所的構造不連続と総体的構造不連続の最大値の使用）で包絡できる。
- 弾性追従パラメータの値として現行の値（ $q=3.0$ ）を構造又は負荷に応じた合理的な値に変更できる見通しがある。

FINAS

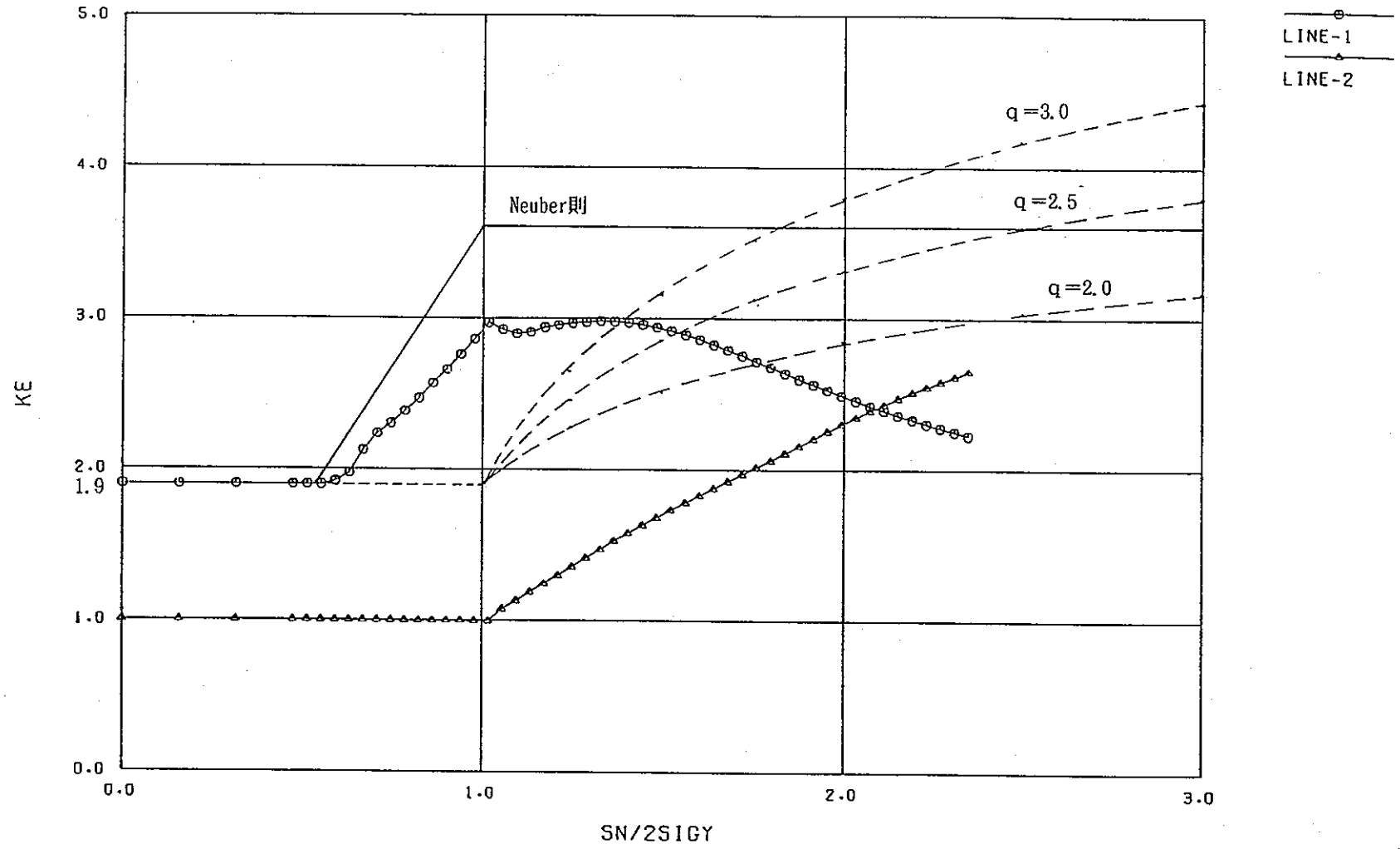


図3.5.1

ひずみ集中係数の設計係数による包絡
(フィレット付き帯板)

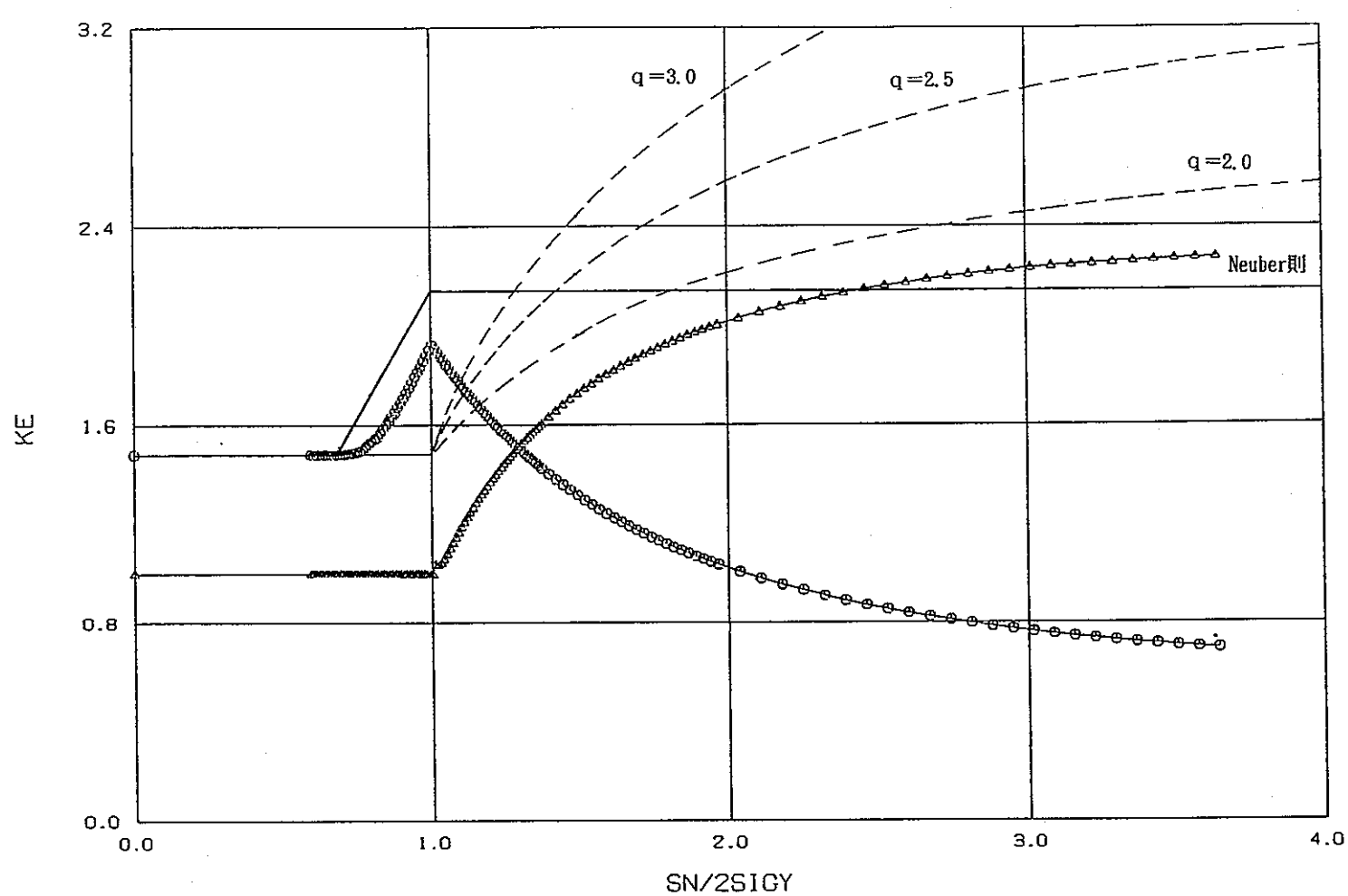


図 3.5.2

ひずみ集中係数の設計係数による包絡
(フィレット付き変断面丸棒)

3. 5. 2 応力緩和時のひずみ増大挙動の検討

(1) 目的

クリープ疲労損傷評価に用いる応力緩和評価法について、フィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒の応力緩和時のひずみ増大挙動と弾性追従パラメータを用いたひずみ増大挙動とを比較することにより応力緩和評価法の合理化について検討する。

(2) 方法

前述の解析結果よりフィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒の応力緩和時のひずみ増大挙動をクリープ弾性追従パラメータ q_c に基づくひずみ増大挙動と比較し、その包絡性を調べる。

クリープ弾性追従パラメータ q_c として以下の4種類に対して検討を行った。

$$q_c = 3.0, 2.5, 2.0$$

q_c = 総体的弾性追従パラメータ q (評価点2のひずみ増大率より求めた。)

(3) 結果

フィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒の応力緩和時のひずみ増大挙動とクリープ弾性追従パラメータによるひずみ増大挙動を比較したものを図3.5.3, 図3.5.4に示す。クリープ弾性追従パラメータの値としては $q_c = 3.0$ に加え、系の総体的弾性追従パラメータ、 $q_c = 2.0, 2.5$ の場合についても示してある。図より以下のことがわかる。

- 現行の $q_c = 3.0$ では過大なひずみ増大挙動評価となる。
- フィレット付き帯板の場合、クリープ弾性追従パラメータ q_c として系の総体的弾性追従パラメータ q を用いれば応力緩和時の平均的ひずみ増大挙動は表現できるが長時間側の挙動は包絡しきれない。但し、系の総体的弾性追従パラメータ q の設定方法及び初期応力の設定を検討することにより包絡の可能性はある。
- フィレット付き変断面丸棒の場合、 q_c として系の総体的弾性追従パラメータ q を用いることにより応力緩和時のひずみ増大挙動は包絡できる。

(4) まとめ

前述の解析結果とクリープ弾性追従パラメータを用いたひずみ増大挙動を比較し対象モデルに対する応力緩和評価法について検討を行った結果をまとめると以下のようになる。

- 応力緩和時のひずみ増大挙動は、系の総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータを q とすると等価弾性追従パラメータとして q そのものを使用することでほぼ包絡可能となる。
- 系の総体的弾性追従パラメータ q の設定方法及び初期応力の設定方法を検討する必要がある。

FINRS

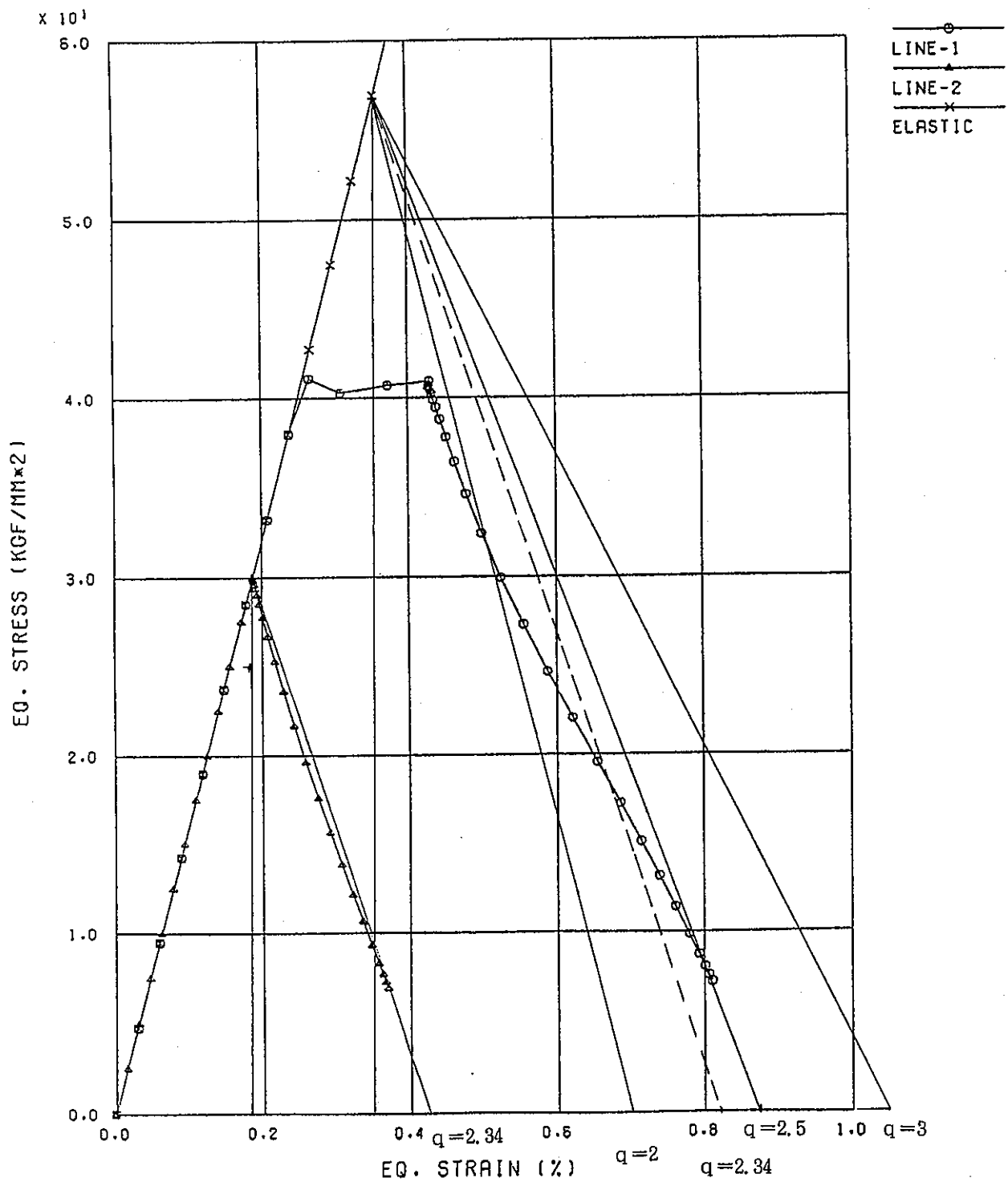
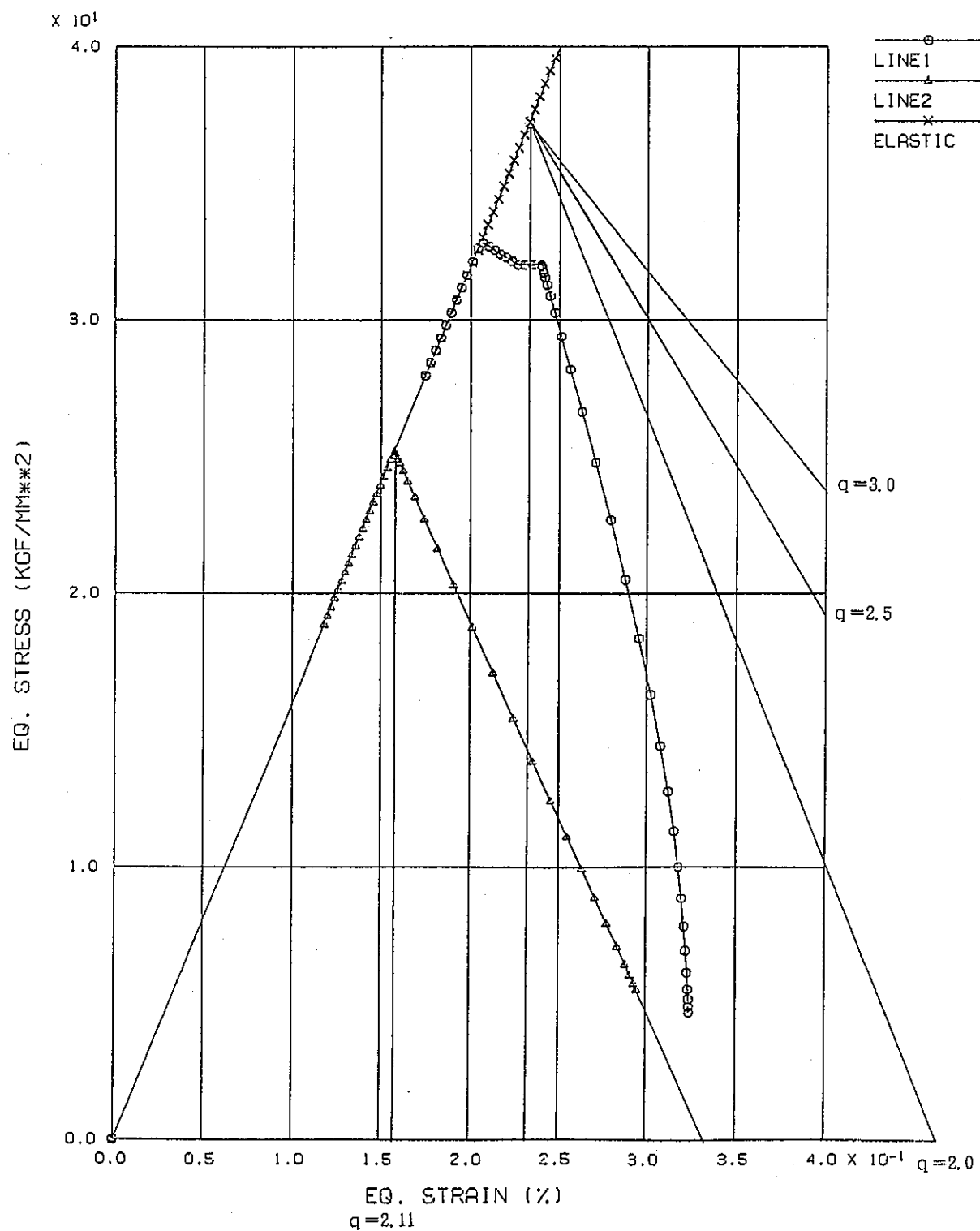


図 3.5.3

応力緩和挙動の設計係数による包絡
(フィレット付き帯板)

FINAS



(E-F-P)

図3.5.4

応力緩和挙動の設計係数による包絡
(フィレット付き変断面丸棒)

3. 6 まとめ

総体的構造不連続部に局所的構造不連続部が重畳するフィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒を用いて、構造不連続部におけるひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に対する形状、負荷、材料特性因子の影響を調べ、クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の形態把握と設計係数策定のための非弾性解析手法の検討を行った結果をまとめると以下のようになる。

- 断面全体が降伏すると応力集中部のひずみ集中は鈍化あるいは減少することからフィレット付き帯板のひずみ集中挙動に対する局所的構造不連続と総体的構造不連続の重畳効果は両者の最大値の使用で包絡できる。
- 応力緩和時のひずみ増大挙動は、系の総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータを q とすると等価弾性追従パラメータとして q そのものを使用することでほぼ包絡可能となる。
- 上記の挙動を示す構造をタイプⅡと呼ぶ。

なお、参考のためにリファレンス条件に対する各因子の影響を表3. 3にまとめた。表中で局所的構造不連続、総体的構造不連続、重畳はそれぞれ評価点1の初期応力、評価点2の挙動、評価点1の後期挙動に対応する。

表3. 3 フィレット付き帯板における因子の影響度のまとめ

		局 所 的 構 造 不 連 続	総 体 的 構 造 不 連 続	重 量
弾 塑 性	加工硬化	$K\varepsilon$ 低下	$K\varepsilon$ 低下	$K\varepsilon$ 増大
	曲 げ	q 増加	q 低下	q 低下
	平面条件	$K\varepsilon$ 平面応力>平面ひずみ>一般化平面ひずみ>軸対称	$K\varepsilon$ 平面ひずみ>一般化平面ひずみ>平面応力	$K\varepsilon$ 一般化平面ひずみ>平面応力>平面ひずみ>軸対称
応 力 緩 和	加工硬化(初期応力)	_____	影 響 小	影 響 小
	曲 げ	_____	初期 q_c 低下 後期 q_c 増大	q_c 低下
	平面条件	_____	_____	q_c 低下 (軸対称)

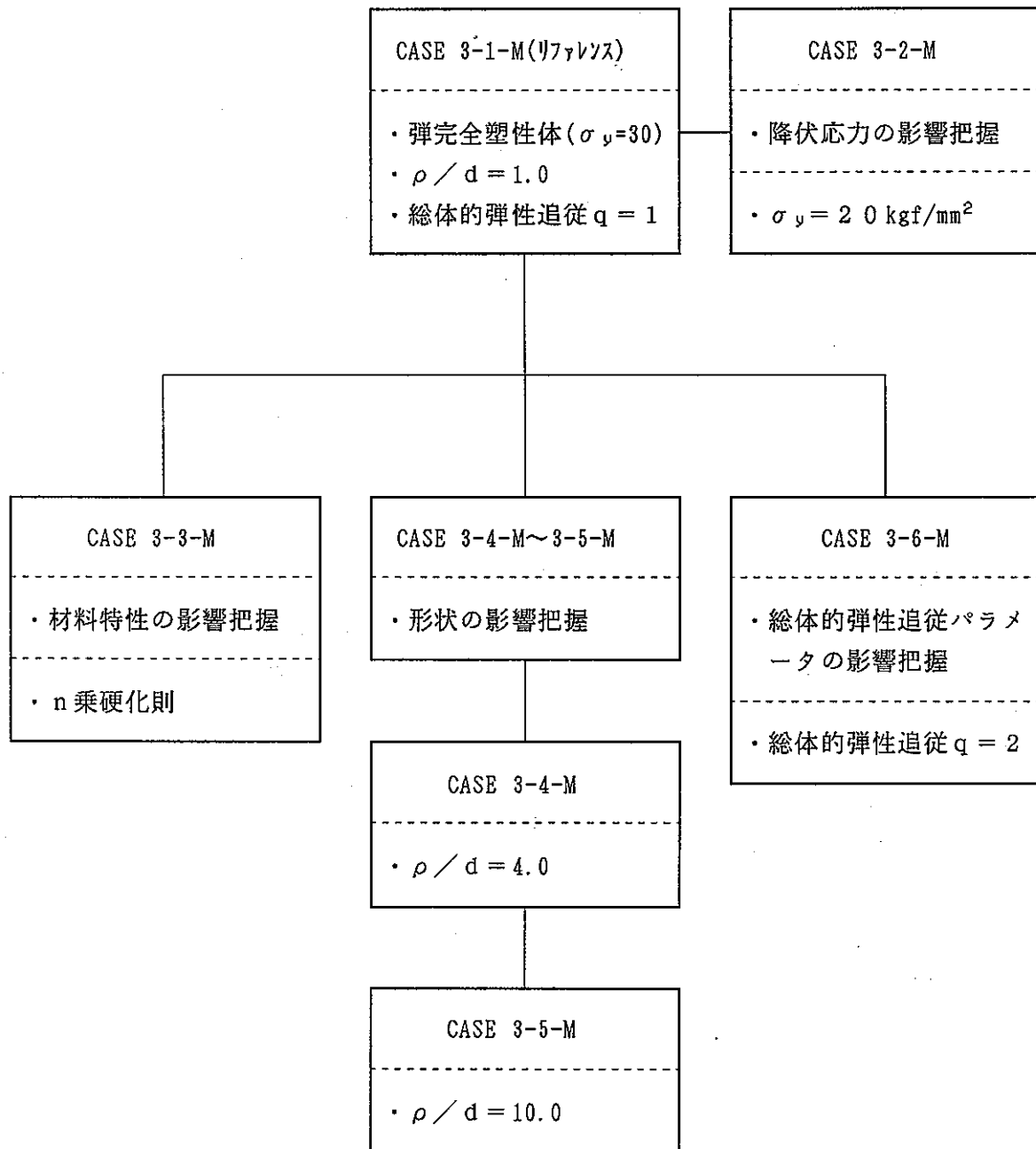


図 4. 0 (a) 切欠き丸棒の弾塑性解析の流れ

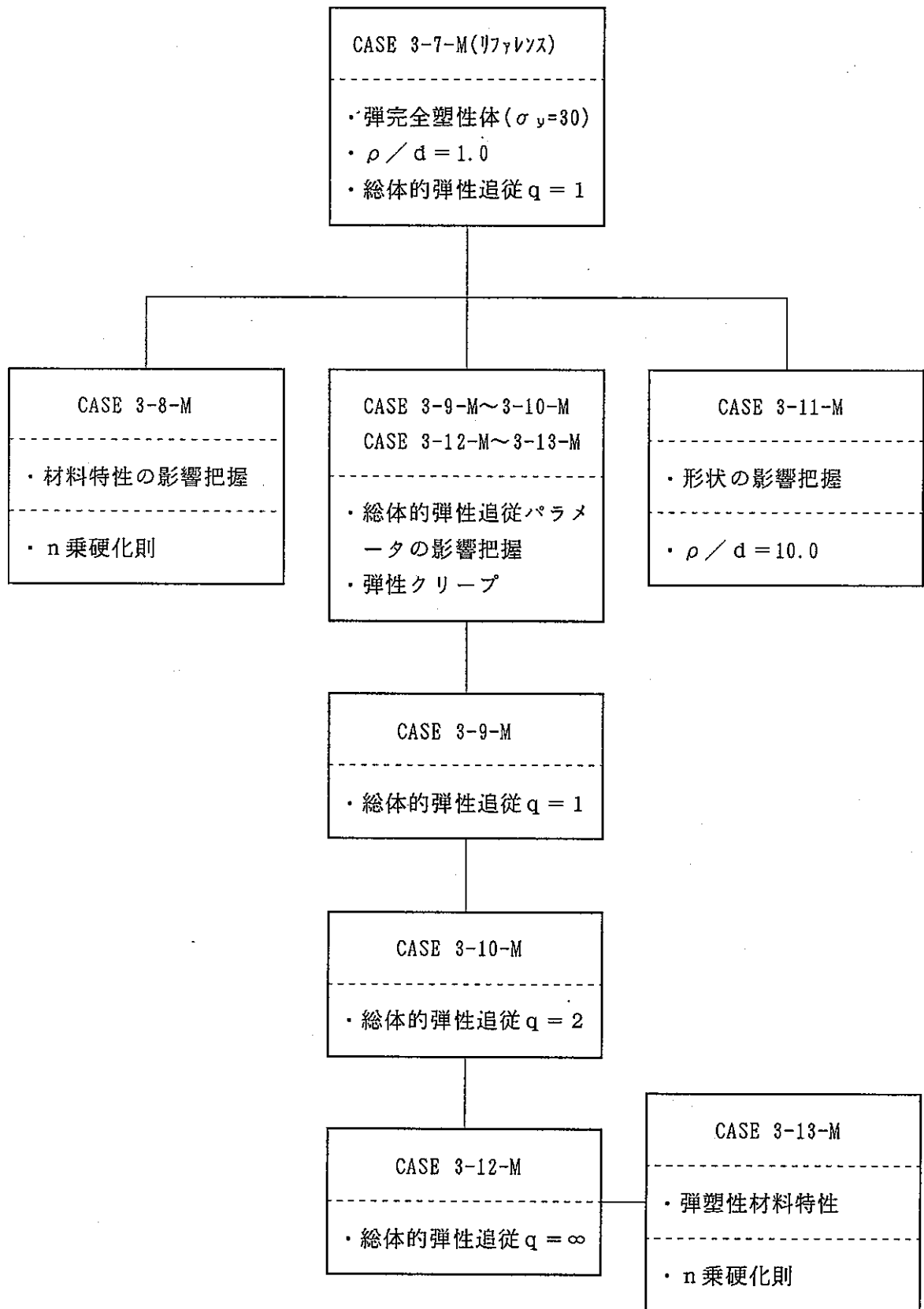


図4. 0 (B) 切欠き付き丸棒の応力緩和解析の流れ

4 切欠き付き丸棒の解析

4・1 解析の目的

フィレット付き帯板同様、総体的弾性追従場にピーク応力が重畳すると考えられる切欠き付き丸棒を用いて、形状不連続部におけるひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に対する形状、負荷材料特性因子の影響を調べ、クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の形態を把握する。また、材料特性として弾完全塑性体を用いることにより設計形数値の保守的定量化が図れることを確認する。

4・2 解析の方法

4. 2. 1 解析モデル

解析モデルを図4. 1に示す。

○モデル寸法及び要素分割

$\rho/d = 1.0$ 図4. 2. 1

$\rho/d = 4.0$ 図4. 2. 2

$\rho/d = 10.0$ 図4. 2. 3

$\rho/d = 1.0$ (総体的弾性追従パラメータ $q = 2$) 図4. 2. 4

図には評価ライン及び評価点も示してある。

○要素の種類

切欠き付き丸棒 ----- Q A X 8 (8節点4辺形軸対称ソリッド要素)

○境界条件及び負荷

・弾塑性解析

境界条件及び負荷を図4. 2. 5に示す。

・応力緩和解析

平滑部の応力が応力緩和開始時において 20 kg/mm^2 になるように強制変位を与え(境界条件は弾塑性解析と同様)、その後 3×10^5 時間保持した。

なお、総体的弾性追従パラメータは図4. 2. 4に示すような形状の弾性体を付加し次式により算出した。

$$q = 1 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \xi \quad (4.0)$$

ここで α は全長に対する切欠き部モデルの長さの比、 ξ は弾性体の断面積に対する切欠き部モデルの断面積の比である。

4. 2. 2 材料特性

○弾完全塑性体

縦弾性係数 $E = 16200 \text{ kg/mm}^2$ (SUS304 500℃相当)

ポアソン比 $\nu = 0.3$

降伏応力 $\sigma_y = 30.0 \text{ kg/mm}^2$ (弾性ひずみ0.2%相当)

加工硬化係数 $H' = 16.2 \text{ kg/mm}^2$ (Eの1/1000の値を設定)

○n乗硬化則

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + B_1 (\sigma - \sigma_y)^{n_1} \quad (4.1)$$

縦弾性係数 $E = 16200 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.3$

降伏応力 $\sigma_y = 1 \text{ kg/mm}^2$

$B_1 = 1.0 \times 10^{-9}$

$n_1 = 5.0$

上記の値はSUS304 650℃の動的応力振幅ひずみ振幅関係式に相当する。

○応力緩和解析

ノルトン則を使用。

$$\dot{\varepsilon}_0 = B_2 \sigma^{n_2}$$

ここで

$B_2 = 1.0 \times 10^{-13}$

$n_2 = 5.0$

上記の値はSUS304 500℃のクリープひずみ式より応力の範囲 5~30kg/mm² , 時間 10⁴ としてBESTX⁽⁹⁾ の平均クリープひずみ法で定めた値に基づいている。

4. 2. 3 非弾性解析及び応力緩和解析の方法

○非弾性解析

・等方硬化則を使用。弾塑性解析は1/4サイクル実施。

○応力緩和解析

・クリープポテンシャルはMises のクリープポテンシャルを使用。

・クリープに関する硬化則は時間硬化則を使用。

4. 2. 4 アウトプット

○相当応力相当ひずみ履歴

積分点の値を用いて外挿した表面の値を使用。

相当応力はMises 型、相当ひずみは下式に基づいて算出する。

$$\Delta \varepsilon_{eq} = \frac{\Delta \sigma_{eq}}{E} + \Delta \varepsilon_{eq}^p \quad (4.2)$$

ここで $\Delta \sigma_{eq}$: Mises 型相当応力増分

$\Delta \varepsilon_{eq}^p$: Mises 型相当塑性ひずみ増分

E : 縦弾性係数

○ひずみ集中係数

公称ひずみに関するひずみ集中係数 K_ε は以下のように算出する。

$$K_{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon_{eq1}}{\Delta \varepsilon_{eq,e2}} \quad (4.3)$$

ここで $\Delta \varepsilon_{eq1}$: 評価点1 (応力集中部) の相当ひずみ増分
 $\Delta \varepsilon_{eq,e2}$: 評価点2 (平滑部) の相当ひずみ増分 (弾性解析)

○弾性追従パラメータ

弾性追従パラメータ q_F 、 q_C は以下のように算出する。

$$q_F = \frac{\Delta \varepsilon_{eq} - \Delta \varepsilon_{eq,e} \cdot \Delta \sigma_{eq} / \Delta \sigma_{eq,e}}{\Delta \varepsilon_{eq,e} (1 - \Delta \sigma_{eq} / \Delta \sigma_{eq,e})} \quad (4.4)$$

$$q_C = \frac{\Delta \varepsilon_c \cdot E}{\Delta \sigma} \quad (4.5)$$

ここで $\Delta \varepsilon_{eq}$: 相当ひずみ増分
 $\Delta \varepsilon_{eq,e}$: 相当ひずみ増分 (弾性解析)
 $\Delta \sigma_{eq}$: Mises 型相当応力増分
 $\Delta \sigma_{eq,e}$: Mises 型相当応力増分 (弾性解析)
 $\Delta \varepsilon_c$: Mises 型相当クリープひずみ増分
 $\Delta \sigma$: 応力緩和開始時点と終了時点の Mises 型相当応力の差の絶対値
 E : 縦弾性係数

4.3 解析条件

切欠き付き丸棒の解析条件を表 4.1 に示す。

表 4. 1 解析条件 (切欠き付き丸棒)

解析ケース名	弾塑性特性	σ_y	E	H'	n乗硬化則の定数		ρ / d	q	ノルトン則定数		解析条件	負荷の大きさ (kg/mm ²)
					B ₁	n ₁			B ₂	n ₂		
CASE 3-1-M	弾完全塑性体	30	16200	16.0	—	—	1.0	1	—	—	弾 塑 性	120
CASE 3-2-M	弾完全塑性体	20	16200	16.0	—	—	1.0	1	—	—	弾 塑 性	120
CASE 3-3-M	n乗硬化則	1	16200	—	10. ⁻⁹	5.0	1.0	1	—	—	弾 塑 性	120
CASE 3-4-M	弾完全塑性体	30	16200	16.0	—	—	4.0	1	—	—	弾 塑 性	120
CASE 3-5-M	弾完全塑性体	30	16200	16.0	—	—	10.0	1	—	—	弾 塑 性	120
CASE 3-6-M	弾完全塑性体	30	16200	16.0	—	—	1.0	2	—	—	弾 塑 性	120
CASE 3-7-M	弾完全塑性体	30	16200	16.0	—	—	1.0	1	10 ⁻¹³	5.0	応 力 緩 和	58
CASE 3-8-M	n乗硬化則	1	16200	—	10. ⁻⁹	5.0	1.0	1	10 ⁻¹³	5.0	応 力 緩 和	58
CASE 3-9-M	弾 性	—	16200	—	—	—	1.0	1	10 ⁻¹³	5.0	応 力 緩 和	58
CASE 3-10-M	弾 性	—	16200	—	—	—	1.0	2	10 ⁻¹³	5.0	応 力 緩 和	58
CASE 3-11-M	弾完全塑性体	30	16200	16.0	—	—	10.0	1	10 ⁻¹³	5.0	応 力 緩 和	58
CASE 3-12-M	弾 性	—	16200	—	—	—	1.0	∞	10 ⁻¹³	5.0	引張りクリープ	58
CASE 3-13-M	n乗硬化則	1	16200	—	10. ⁻⁹	5.0	1.0	∞	10 ⁻¹³	5.0	引張りクリープ	58

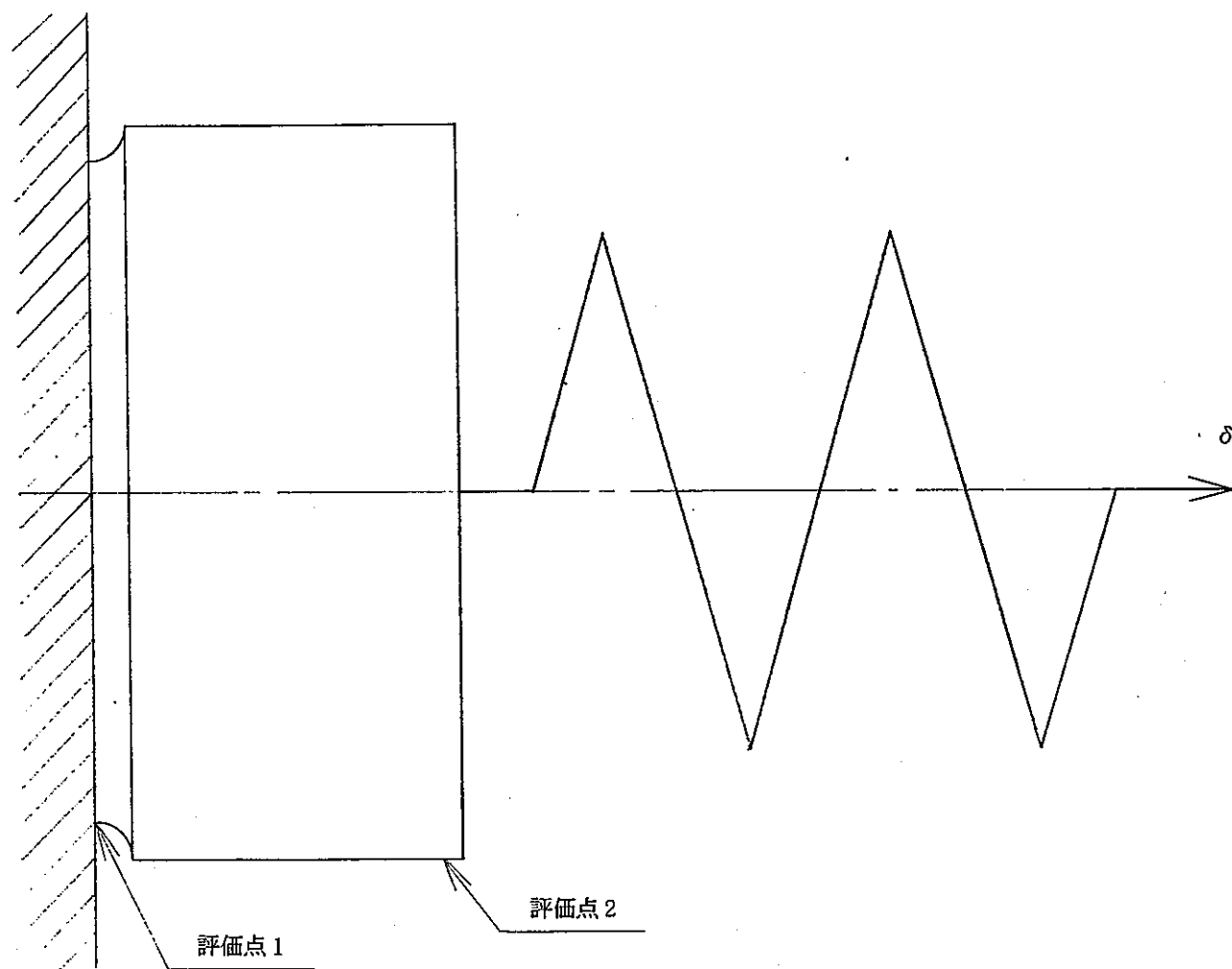


図 4.1

解析モデル (切欠き付き丸棒)

FINAS

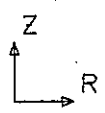
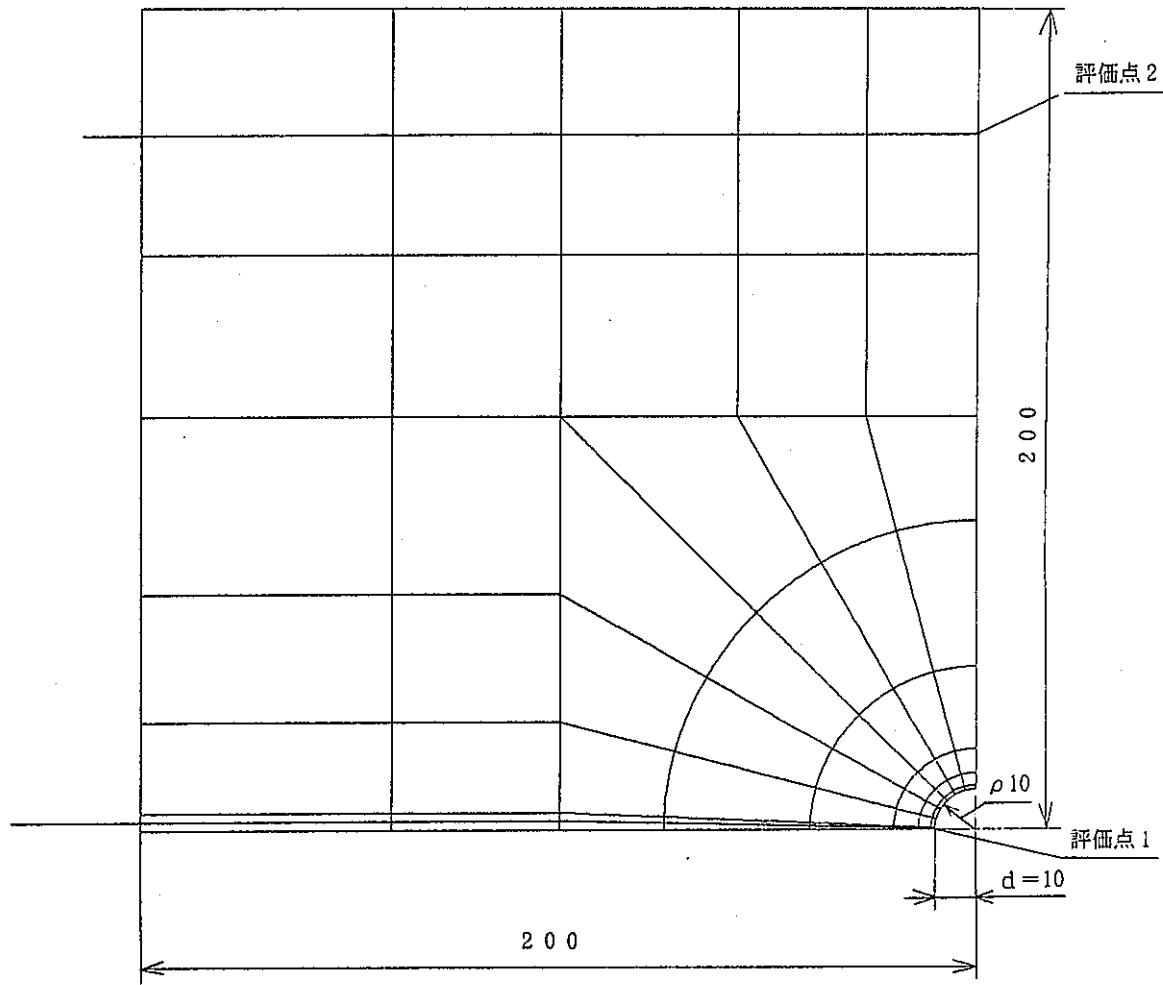


図 4.2.1

寸法および要素分割 ($\rho / d = 1.0$)

GEOM. SCALE 1 50.0000

FINAS

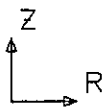
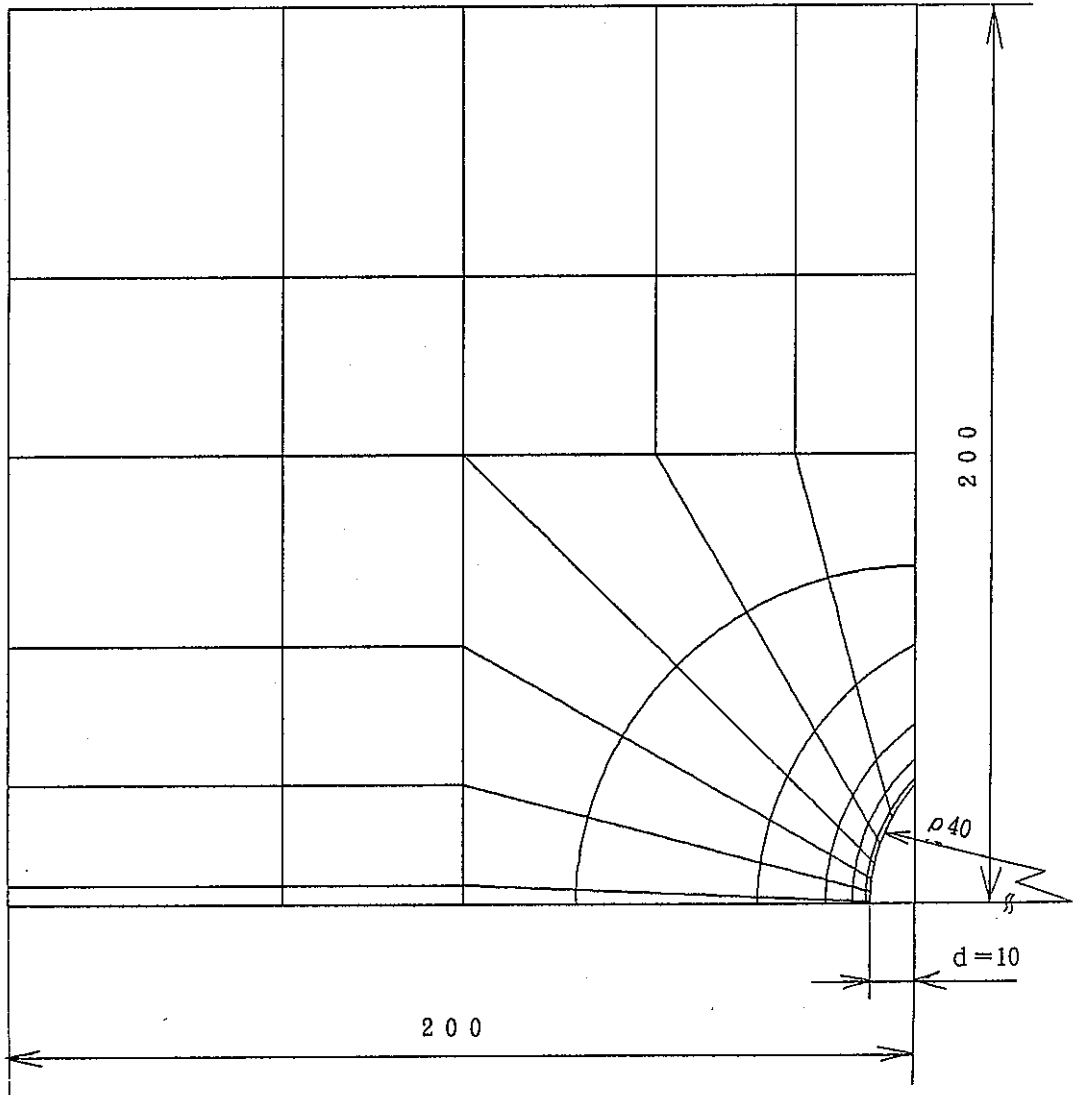


図 4.2.2

寸法および要素分割 ($\rho / d = 4.0$)

GEOM. SCALE 50,0000

FINAS

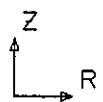
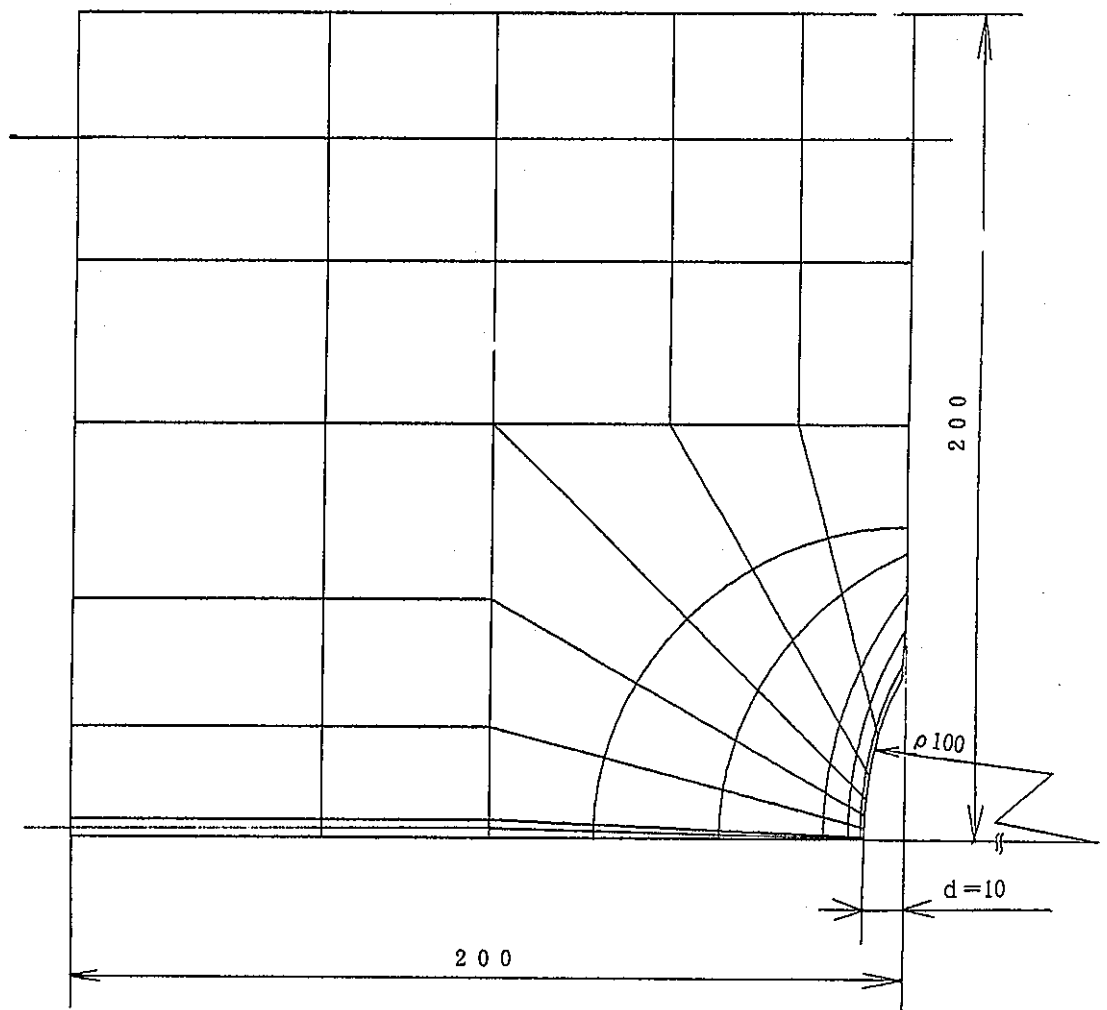


図4.2.3

寸法および要素分割 ($\rho/d = 10.0$)

GEOM. SCALE 1 50.0000

FINAS

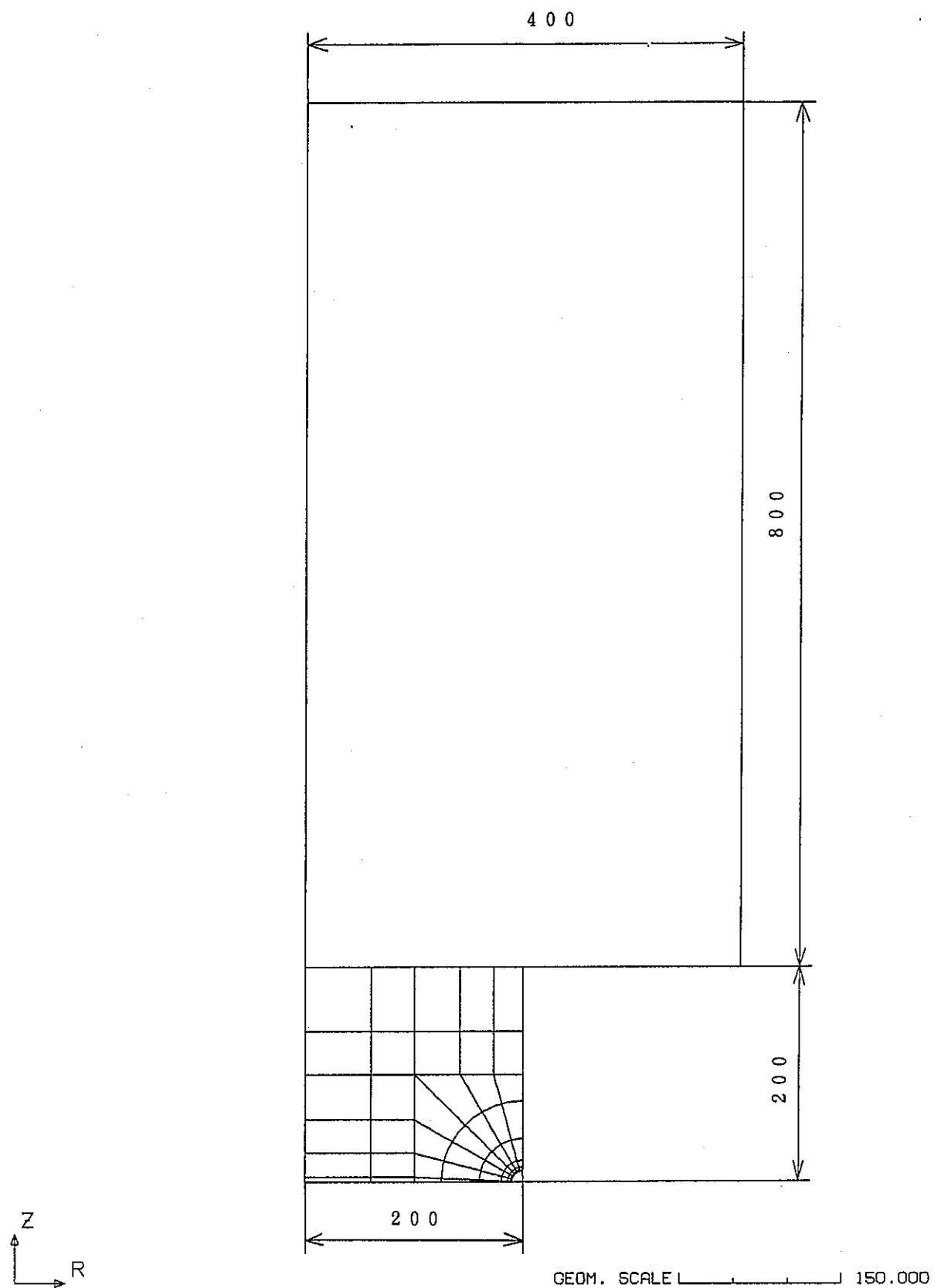


図 4.2.4

寸法および要素分割（総体的弾性追従パラメータ $q=2$ ）

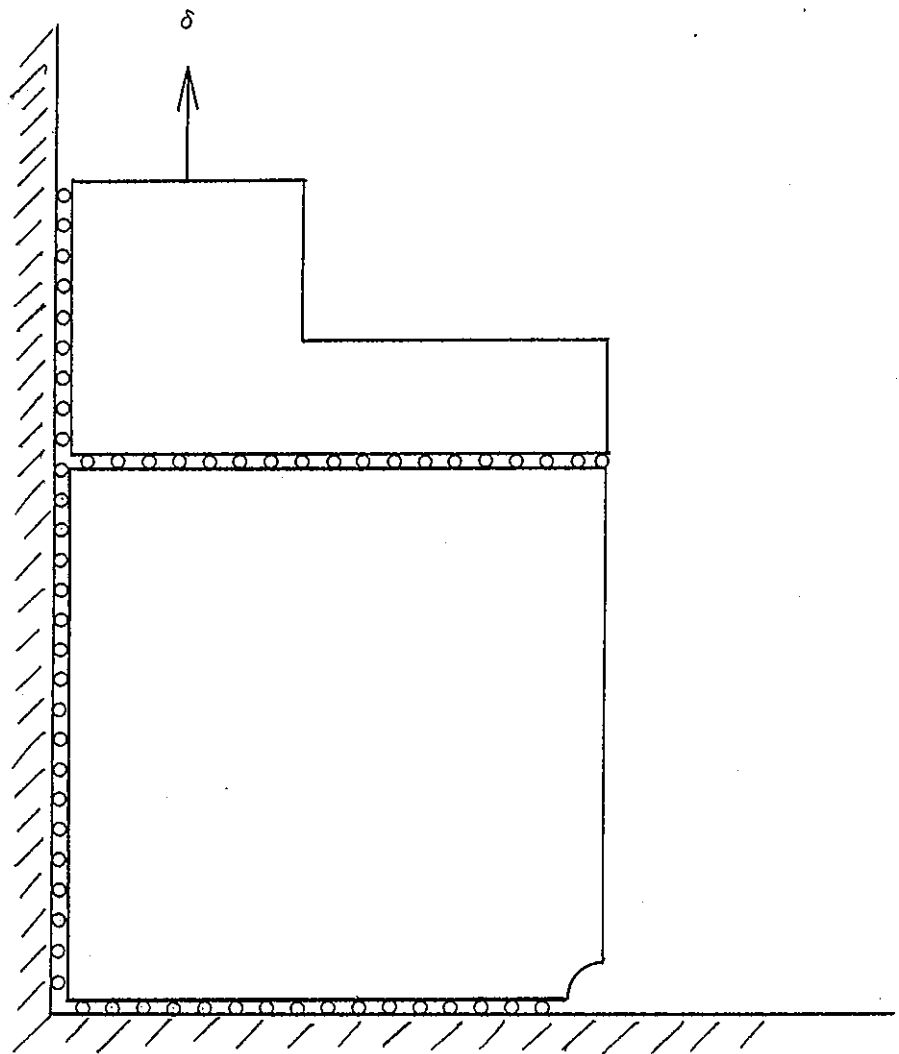


図 4. 2. 5

境界条件及び負荷

4・4 解析結果

4. 4. 1 リファレンス解析結果

(1) 目的

切欠き付き丸棒の構造不連続部におけるひずみ集中基本挙動及び応力緩和挙動を把握する。

(2) 方法

以下の条件をリファレンスとし弾塑性解析及び応力緩和解析を行なう。

総体的弾性追従パラメータ $q = 1$ 。

1) 弾塑性解析 (CASE 3-1-M)

2) 応力緩和解析 (CASE 3-7-M)

○要素の種類

Q A X 8 (8 節点 4 辺形軸対称ソリッド要素)

○材料特性

弾完全塑性体

$$E = 16200 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$\sigma_y = 30.0 \text{ kg/mm}^2$$

$$H' = 16.2 \text{ kg/mm}^2 \quad (E \text{ の } 1/1000 \text{ の値を設定})$$

○応力緩和解析

ノルトン則を使用。

$$\dot{\epsilon}_0 = B_2 \sigma^{n_2}$$

ここで

$$B_2 = 1.0 \times 10^{-13}$$

$$n_2 = 5.0$$

○負荷

軸方向引張り負荷 (膜応力場)

(3) 結果

リファレンス条件の切欠き付き丸棒についての解析結果を以下に示す。尚、負荷開始時点を極値時点 A、負荷終了時点を極値時点 B とする。

① 相当応力相当ひずみの履歴

解析が正しく行われていることを確認するため及び応力緩和時のひずみ増大挙動を把握するため応力集中部及び平滑部における相当応力、相当ひずみの履歴を弾性および弾塑性の場合について以下に示す。

1) 弾塑性解析

CASE 3-1-M (弾完全塑性体)

図 4. 4. 1

2) 応力緩和解析

CASE 3-7-M

図 4. 4. 2

これらの図から以下のことがわかる。

- 弾塑性における応力ひずみ関係は仮定した応力ひずみ線図に従っており解析が正しく行われていることがわかる。
- 応力緩和時のひずみ増大は、初期には一定の割合で増加するが長時間側では増加の割合が鈍化する。

②Mises 相当応力コンター図

極値時点 B における弾性解析及び弾塑性解析のMises 相当応力コンター図を図 4.

4. 3 及び図 4. 4. 4 に示す。図より以下のことがわかる。

- 弾性及び弾塑性解析とも最大応力は切欠き底で発生する。
- 弾性解析の場合、応力集中は切欠き部の近傍のみで生じ平滑部はほぼ一定の応力値となる。
- 弾塑性解析の場合、全断面降伏状態であり応力分布はほとんど平坦化しているが切欠き部と平滑部中心軸を結ぶ対角線上で応力が高くなっている。

③相当塑性ひずみコンター図

応力集中部降伏後、平滑部降伏後及び極値時点 B における相当塑性ひずみコンター図を図 4. 4. 5 に示す。図より以下のことがわかる。

- 最大応力発生部である切欠き底より降伏する。
- 切欠き底から平滑部中心軸に向けて対角線上に塑性域が拡大する。

④ひずみ集中係数 K_ϵ の履歴

評価点 1 及び評価点 2 におけるひずみ集中係数の履歴を図 4. 4. 6 に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点 2 の相当応力増分を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は評価点 1 及び評価点 2 の弾塑性解析による相当ひずみ増分を弾性解析による評価点 2 の相当ひずみ増分で無次元化したものである。図より以下のことがわかる。

- 評価点 1 のひずみ集中は、初期に急峻に立ち上がりその後ほぼ一定値を示しノイバー型に近い挙動を呈する。
- 評価点 2 では塑性ひずみは生じているものの弾性解析とほぼ同等な相当ひずみしか生じずひずみ集中は見られない。

⑤弾性追従パラメータ q_F

評価点 1 及び評価点 2 における弾性追従パラメータの履歴を図 4. 4. 7 に示す。図で横軸はピーク応力強さ増分を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾性追従パラメータである。図より以下のことがわかる。

- 評価点 1 の弾性追従パラメータ q_F は $S_p / 2 \sigma_y = 3$ までは急峻に増加するがそれ以降は除々に減少する傾向を示す。
- 総体的弾性追従 $q = 1$ であるため評価点 2 では $q_F \approx 1$ となる。

⑥応力緩和時のクリープ弾性追従パラメータ q_0 の履歴

評価点1及び評価点2におけるクリープ弾性追従パラメータの履歴を図4.4.8に示す。図で横軸は時間であり、縦軸はクリープ弾性追従パラメータである。図より以下のことがわかる。

- 評価点1のクリープ弾性追従パラメータ q_0 は時間と共に減少する傾向を示す。
- 総体的弾性追従 $q = 1$ であるため評価点2では $q_0 \approx 1$ となる。

(4) まとめ

リファレンス条件での切欠き付き丸棒の切欠き部におけるひずみ集中基本挙動及び応力緩和挙動を検討した結果をまとめると以下のようなになる。

- 切欠き付き丸棒の場合、フィレット付き帯板で見られる平滑部降伏直後の評価点1におけるひずみ集中係数の減少は生じない。
- 応力緩和時のクリープ弾性追従パラメータは緩和開始直後に大きな値となるが長時間側では減少する。

FINAS

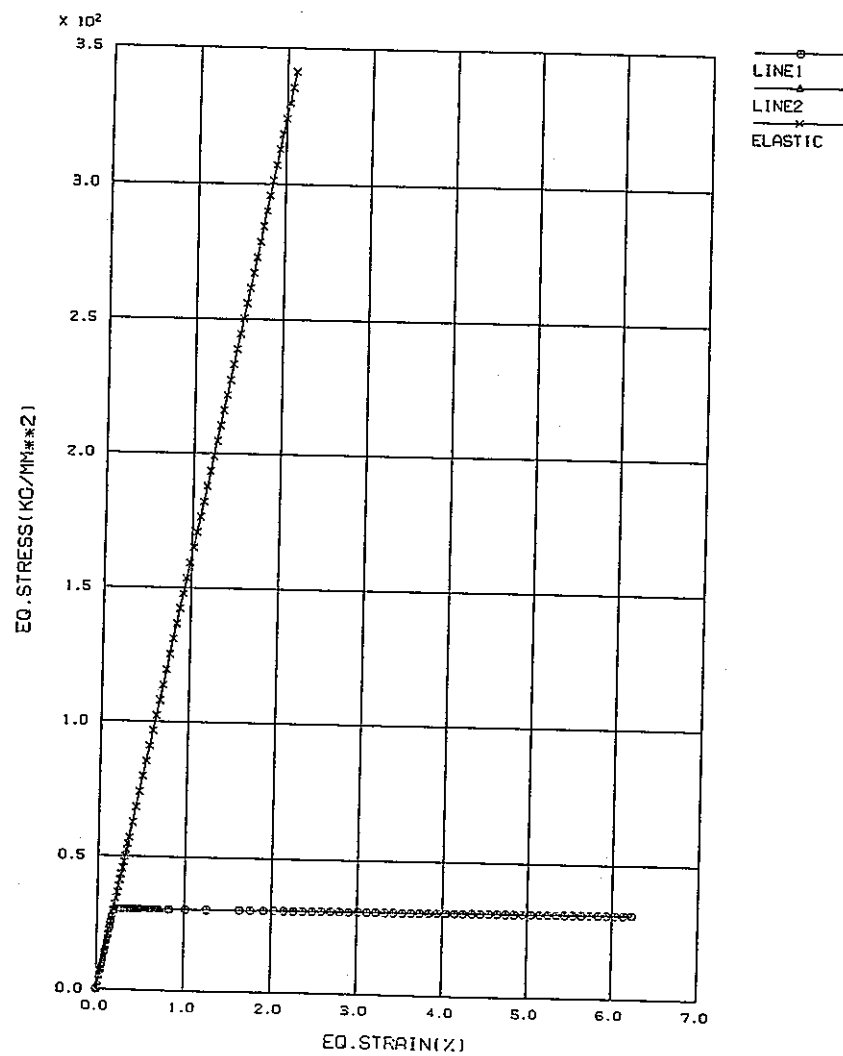


図 4.4.1 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-1-M)

FINAS

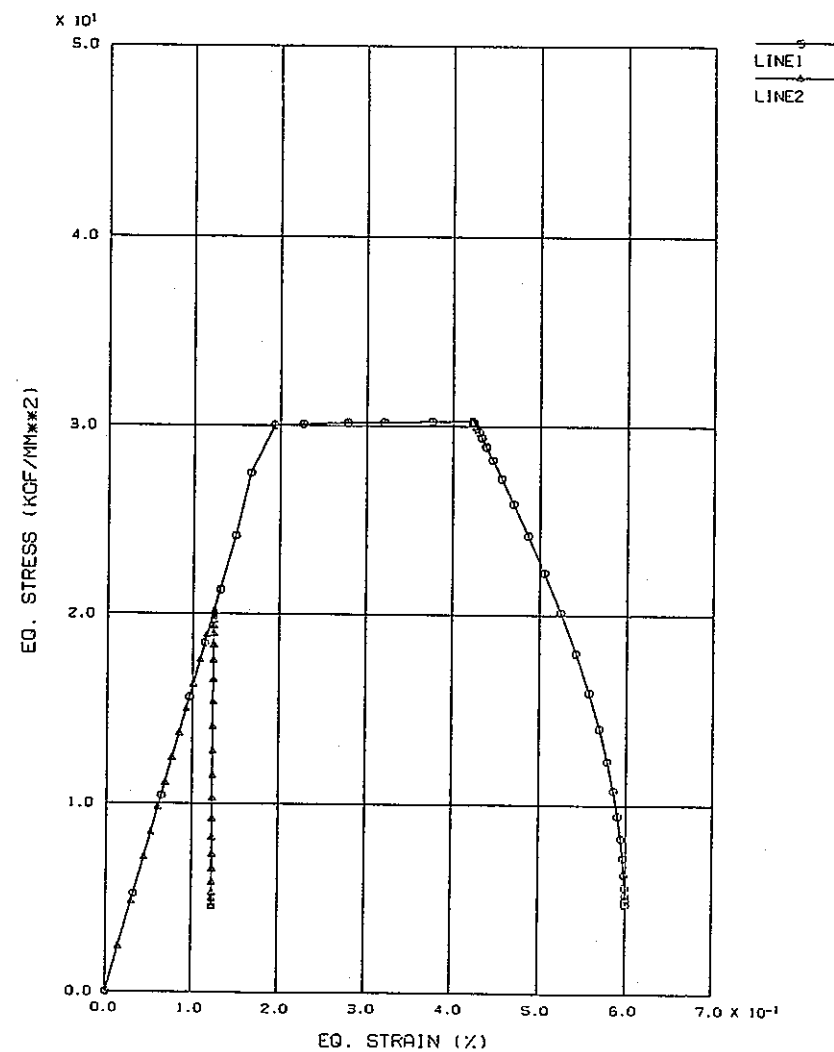
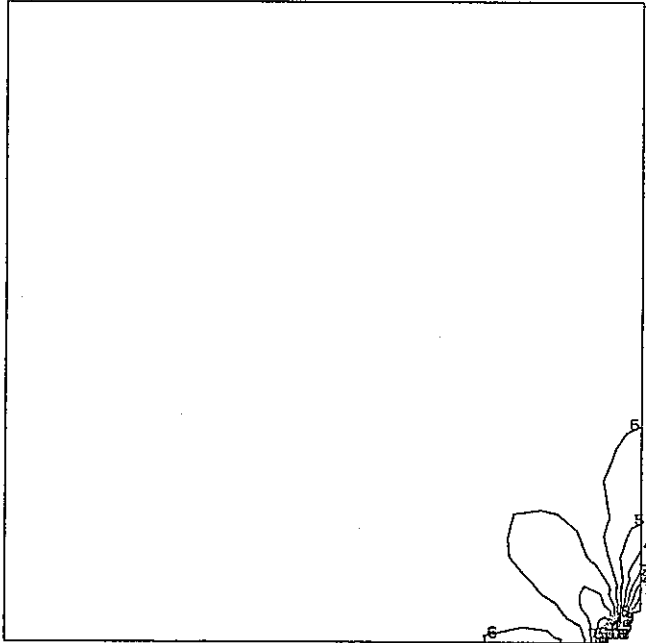


図 4.4.2 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-7-M)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

- 1 38.00000
- 2 53.00001
- 3 68.00001
- 4 83.00001
- 5 98.00002
- 6 113.0000
- 7 127.9999
- 8 142.9999
- 9 157.9999
- 10 172.9999
- 11 188.0000
- 12 202.9999
- 13 218.0000
- 14 232.9999
- 15 247.9999
- 16 263.0000
- 17 277.9999
- 18 293.0000
- 19 307.9999
- 20 323.0000
- 21 338.0000



STEP NO. 70

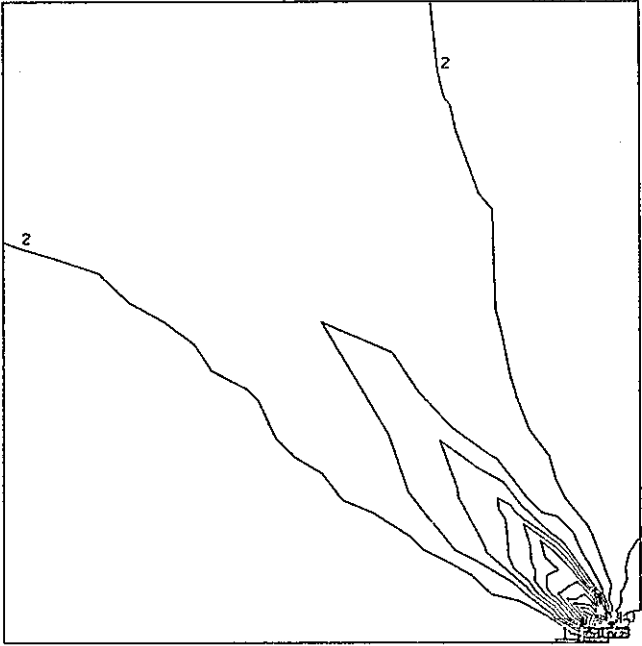
図 4.4.3

ミーゼス相当応力コンター図 (弾性解析)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

- 1 30.04396
- 2 30.09795
- 3 30.15192
- 4 30.20591
- 5 30.25990
- 6 30.31389
- 7 30.36787
- 8 30.42185
- 9 30.47584
- 10 30.52983
- 11 30.58382
- 12 30.63780
- 13 30.69178
- 14 30.74577
- 15 30.79976
- 16 30.85374
- 17 30.90773
- 18 30.96171
- 19 31.01570
- 20 31.06968



STEP NO. 70

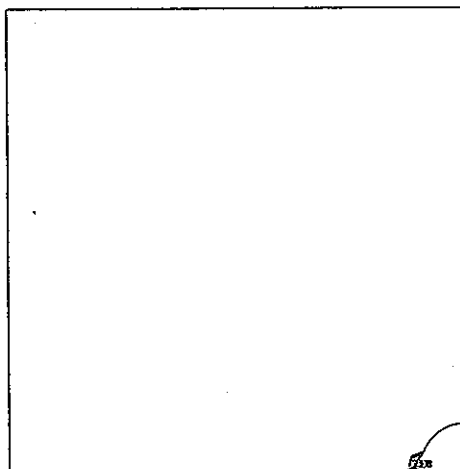
図 4.4.4

ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-1-M)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1 5.000-06
2 1.500-05
3 2.500-05
4 3.500-05
5 4.500-05
6 5.500-05
7 6.500-05
8 7.500-05
9 8.500-05
10 9.500-05
11 1.050-04
12 1.150-04
13 1.250-04
14 1.350-04
15 1.450-04
16 1.550-04
17 1.650-04
18 1.750-04
19 1.850-04
20 1.950-04
21 2.050-04



STEP NO. 12

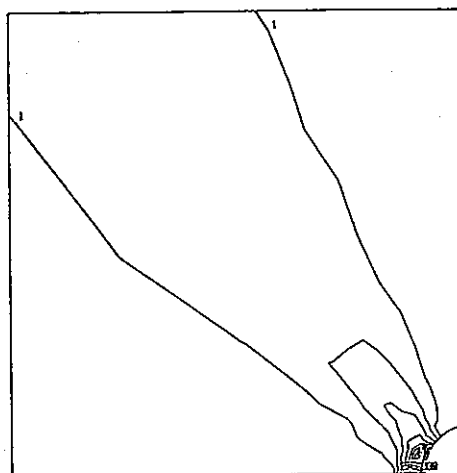
GEOM. SCALE 1 20.000

CASE-EP-ROW/D=1.0 EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR
応力集中部降伏時

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1 3.500-04
2 1.050-03
3 1.770-03
4 2.480-03
5 3.190-03
6 3.900-03
7 4.610-03
8 5.320-03
9 6.030-03
10 6.740-03
11 7.450-03
12 8.160-03
13 8.870-03
14 9.580-03
15 1.029-02
16 1.100-02
17 1.171-02
18 1.242-02
19 1.313-02
20 1.384-02



STEP NO. 28

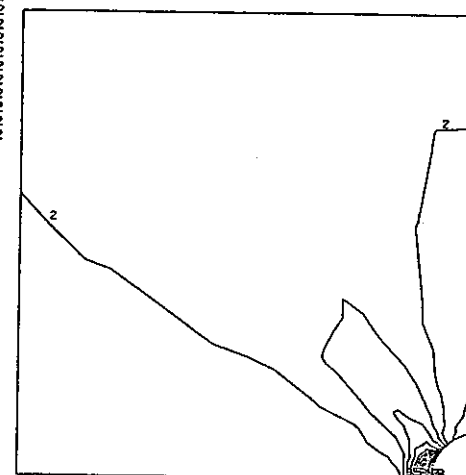
GEOM. SCALE 1 20.000

CASE-EP-ROW/D=1.0 EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR
平滑部降伏部

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1 2.400-03
2 4.500-03
3 7.400-03
4 9.500-03
5 1.240-02
6 1.490-02
7 1.740-02
8 1.990-02
9 2.240-02
10 2.490-02
11 2.740-02
12 2.990-02
13 3.240-02
14 3.490-02
15 3.740-02
16 3.990-02
17 4.240-02
18 4.490-02
19 4.740-02
20 4.990-02



STEP NO. 70

GEOM. SCALE 1 20.000

CASE-EP-ROW/D=1.0 EQ. PLASTIC STRAIN CONTOUR
極値時点 B

図 4.4.5

相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-1-M)

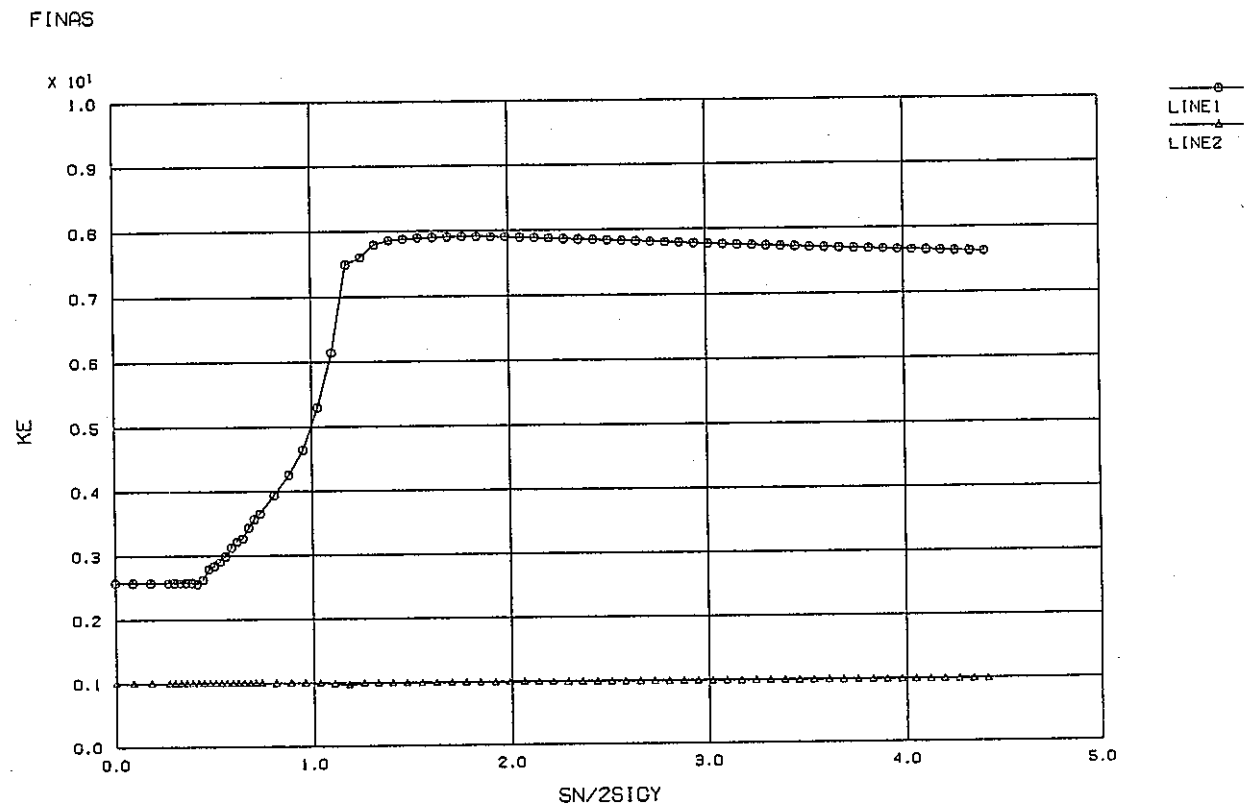


図 4.4.6 ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-1-M)

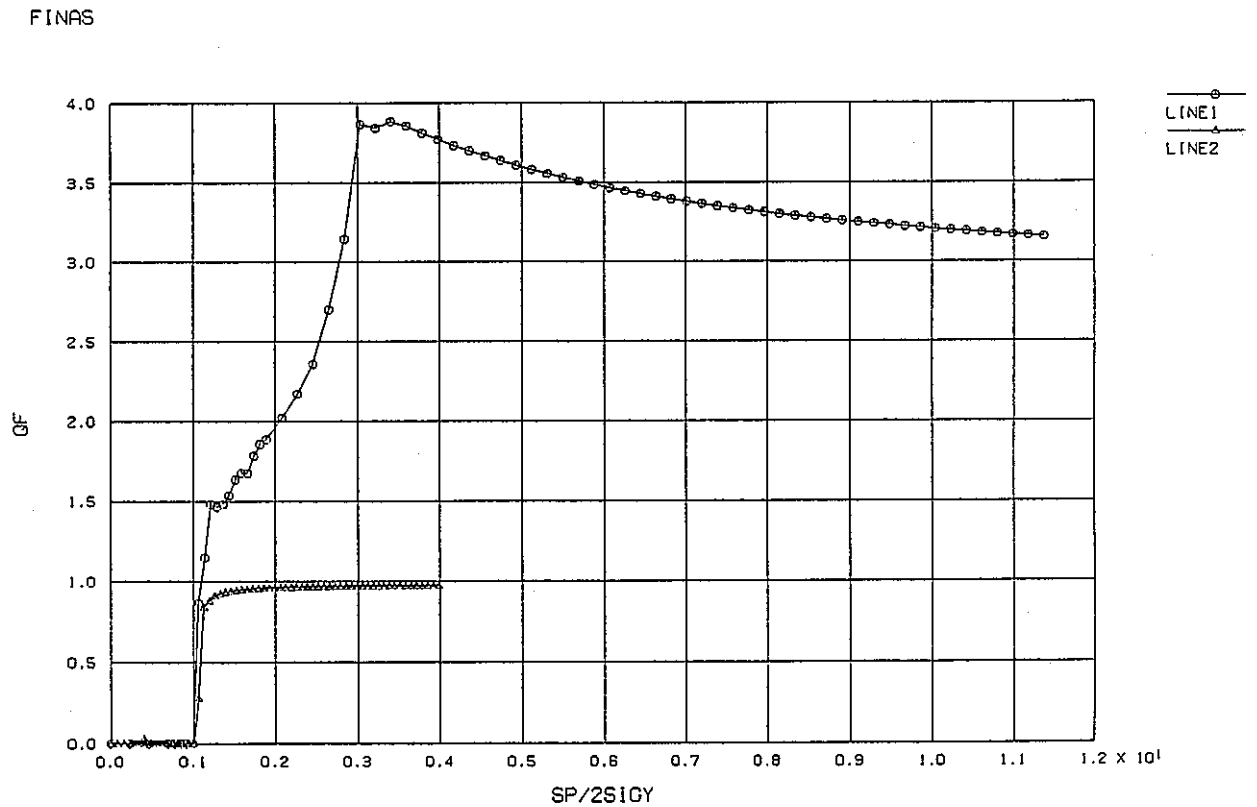


図 4.4.7 弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M)

FINAS

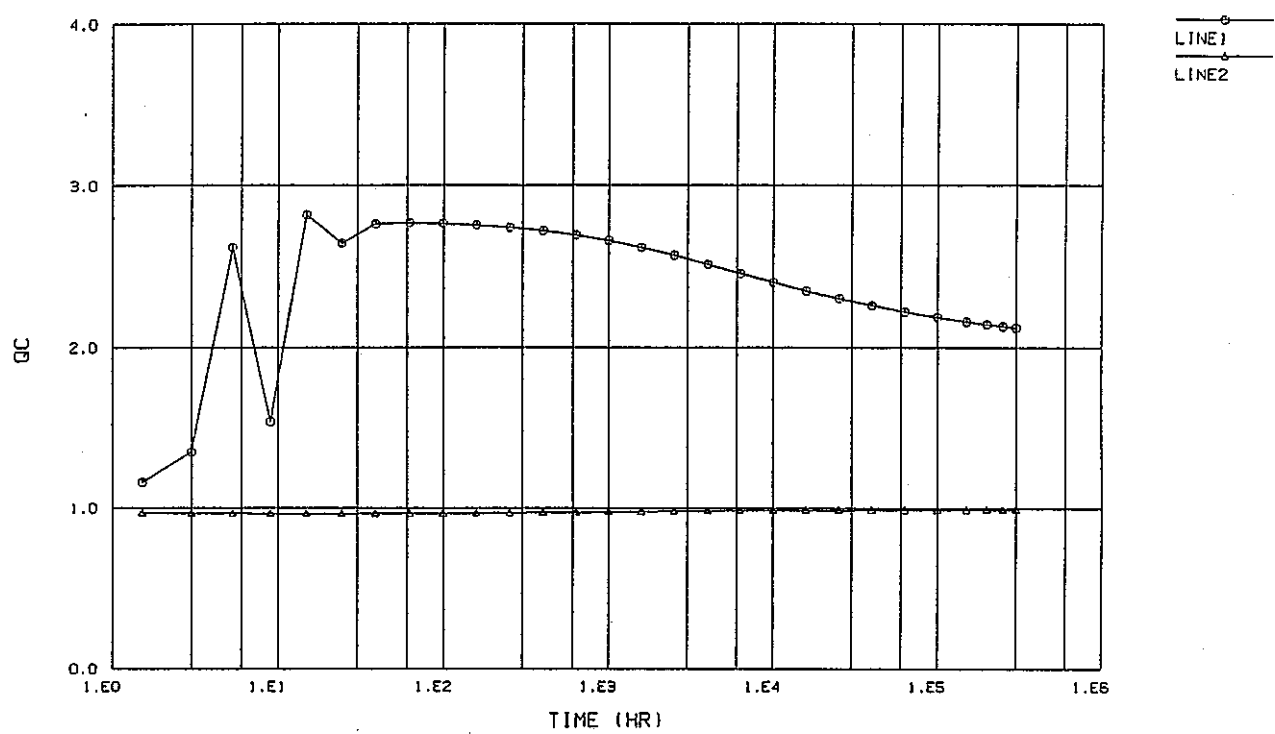


図 4.4.8

クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M)

- n 乗硬化則の場合も切欠き部と平滑部の中心軸を結ぶ対角線上で応力が高くなる傾向がみられる。

③Mises 相当塑性ひずみコンター図

材料特性を変化させた場合の極値時点における応力集中部及び平滑部における相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。

1)弾塑性解析

CASE 3-1-M (弾完全塑性体)

図 4.4.12 (a)

CASE 3-3-M (n 乗硬化則)

図 4.4.12 (b)

これらの図から以下のことがわかる。

- 相当塑性ひずみの値そのものは異なるが、切欠き部近傍のひずみ分布形態は類似している。
- 材料特性が変化しても塑性ひずみの大きい領域が切欠き部から平滑部の中心軸方向へ対角線上に拡大する傾向は同様に見られる。

④ひずみ集中係数 K_ϵ の履歴

材料特性を変化させた場合の評価点 1 及び評価点 2 におけるひずみ集中係数の履歴を以下に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点 2 の相当応力増分を降伏応力で無次元化したものであるが、 n 乗硬化則の場合は $\sigma_y = 1 \text{ kg/mm}^2$ 評価点 2 の相当応力増分そのものとなる。縦軸は評価点 1 及び評価点 2 の弾塑性解析による相当ひずみ増分を評価点 2 の相当ひずみ増分で無次元化したものである。

1)弾塑性解析

CASE 3-1-M (弾完全塑性体)

図 4.4.13 (a)

CASE 3-3-M (n 乗硬化則)

図 4.4.13 (b)

図より以下のことがわかる。

- n 乗硬化則も弾完全塑性体同様初期にノイバー型の挙動を示し、その後は徐々に漸近的に一定値に近づく。
- 加工硬化を考慮した n 乗硬化則での最大ひずみ集中係数は弾完全塑性体の半分程度となる。

⑤弾性追従パラメータ q_F の履歴

材料特性を変化させた場合の評価点 1 及び評価点 2 における弾性追従パラメータの履歴を以下に示す。図で横軸はピーク応力強さ増分を降伏応力で無次元化したものであるが、 n 乗硬化則の場合は評価点 2 のピーク応力強さ増分そのものとなる。縦軸は弾性追従パラメータである。

1)弾塑性解析

CASE 3-1-M (弾完全塑性体)

図 4.4.14 (a)

CASE 3-3-M (n 乗硬化則)

図 4.4.14 (b)

図より以下のことがわかる。

- 評価点 1 の弾性追従パラメータは、 n 乗硬化則の方が弾完全塑性体に比べ全体的

に低い値を示す。

- 評価点2の弾性追従パラメータは、材料特性による影響はなく $q_F \approx 1$ となる。
- n 乗硬化則も評価点1の弾性追従パラメータ q_F は、 $S_p / 2\sigma_y = 3$ まで急峻に増加しそれ以降は徐々に減少する傾向を示す。

⑥クリープ弾性追従パラメータ q_c の履歴

材料特性を変化させた場合の評価点1及び評価点2におけるクリープ弾性追従パラメータの履歴を以下に示す。図で横軸は時間であり、縦軸はクリープ弾性追従パラメータである。

CASE 3-7-M (弾完全塑性体)

図4.4.15 (a)

CASE 3-8-M (n 乗硬化則)

図4.4.15 (b)

図より以下のことがわかる。

- 全体的に加工硬化のある n 乗硬化則の方が低い値を示すが、保持時の変位の大きさが異なることが考えられる。
- 弾完全塑性体の場合、 q_c は時間の増加に伴い減少する傾向を示すが、 n 乗硬化則の場合 10^4 hr付近まで徐々に増加しその後減少する。
- 評価点2では $q_c \approx 1$ となり応力緩和時のひずみ増大挙動は見られない。

(4) まとめ

材料特性として弾完全塑性体及び加工硬化を考慮した n 乗硬化則を想定して弾塑性解析及び応力緩和解析を行い、材料特性が応力集中部におけるひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に及ぼす影響を調べた結果をまとめると以下のようになる。

- 加工硬化を考慮することにより弾塑性解析におけるひずみ集中率は減少する。
- 弾完全塑性体を想定することにより、弾塑性ひずみ集中係数として保守的な値が得られると考えられる。

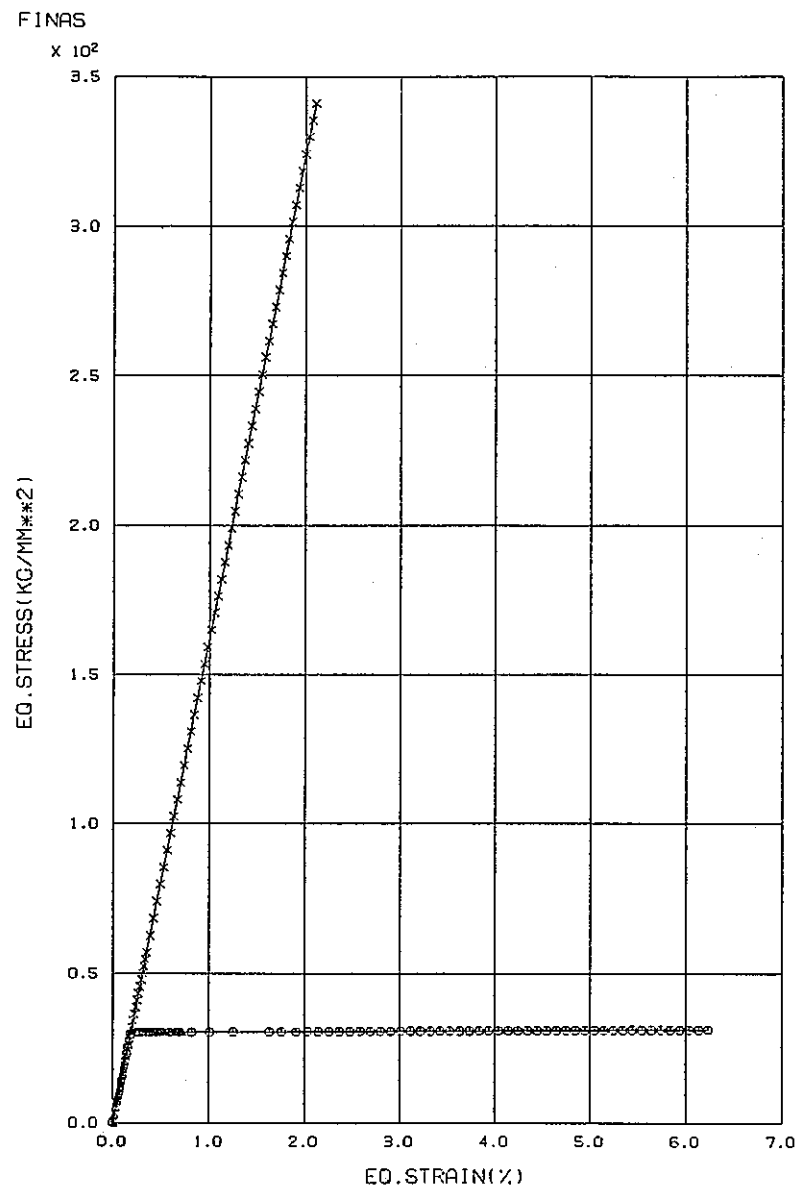


図4.4.9 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-1-M)

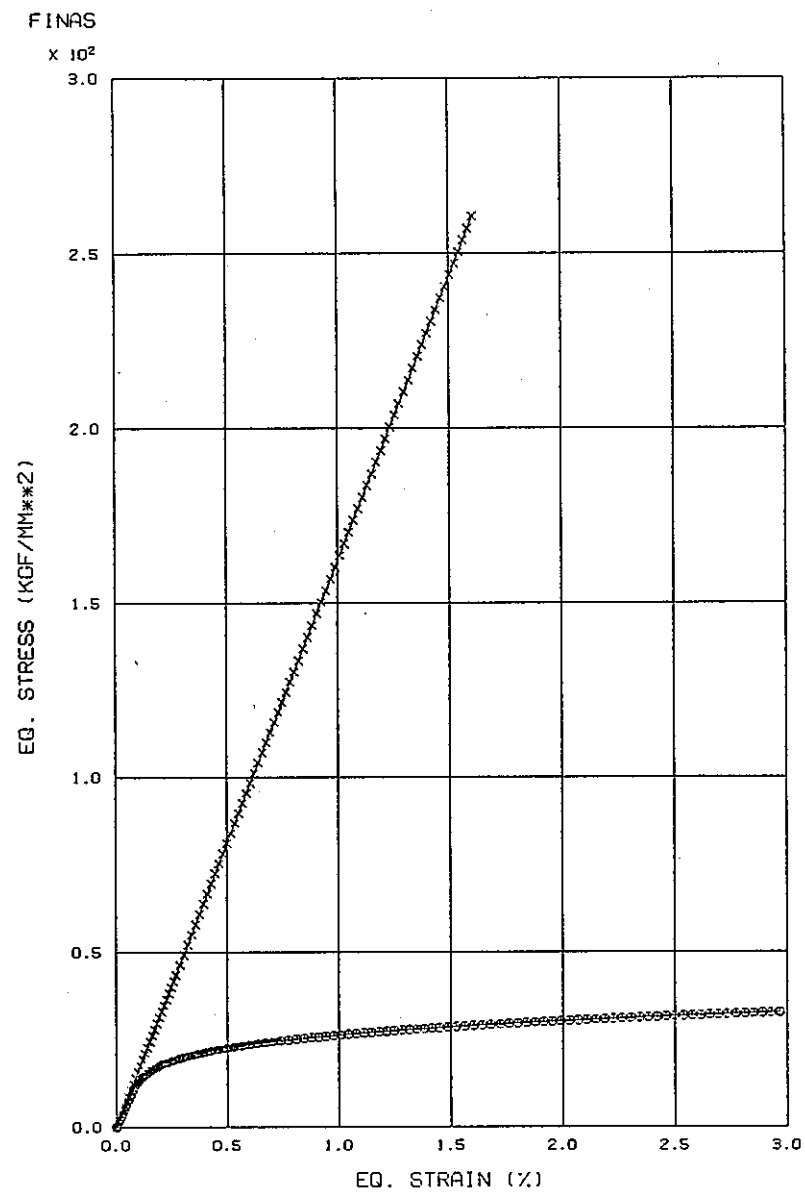


図4.4.9 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-3-M)

FINAS

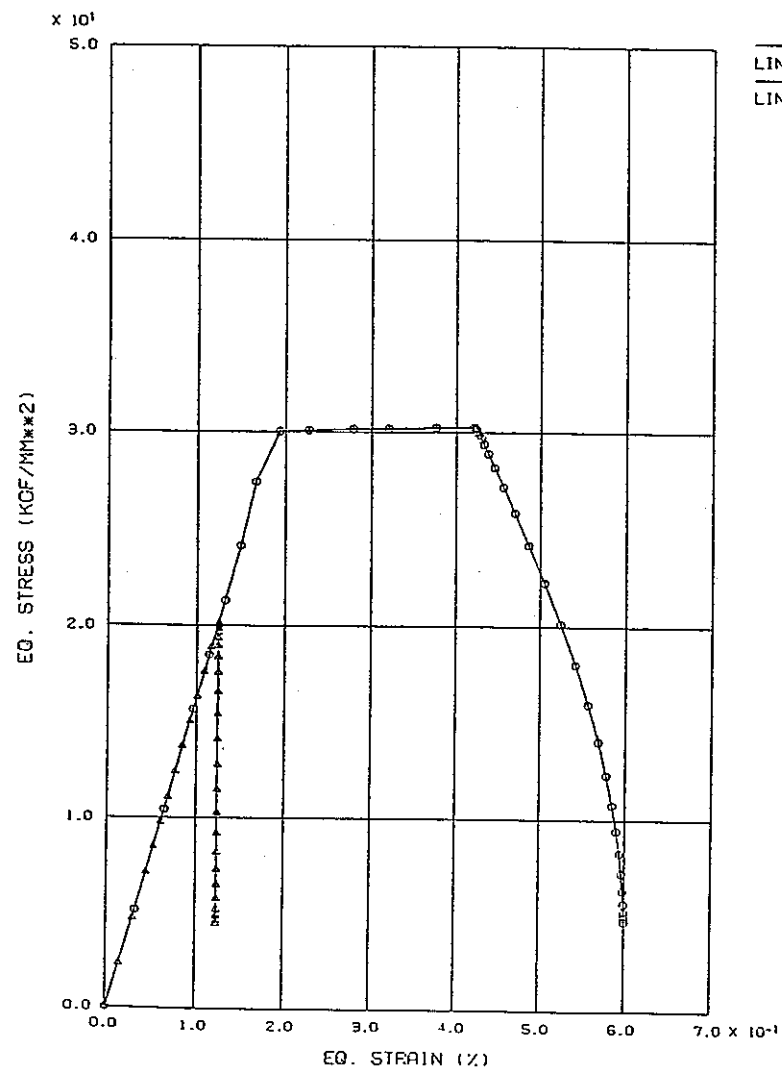


図 4.4.10 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-7-M)

FINAS

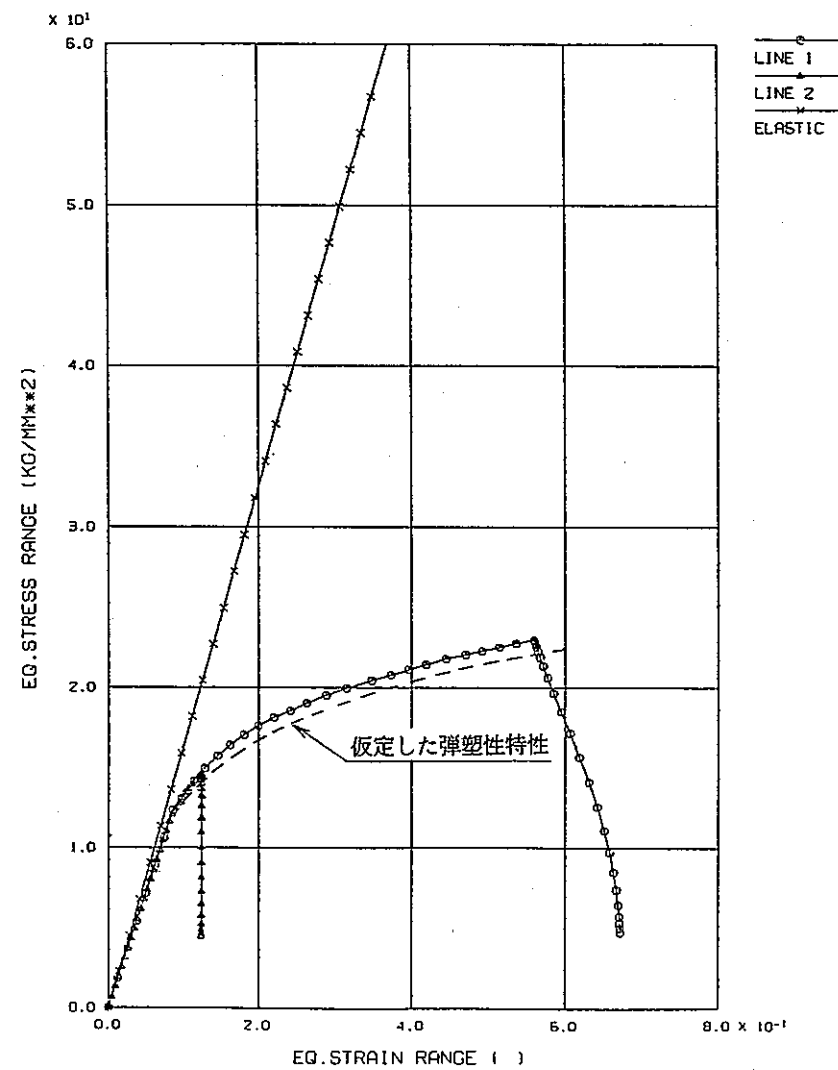
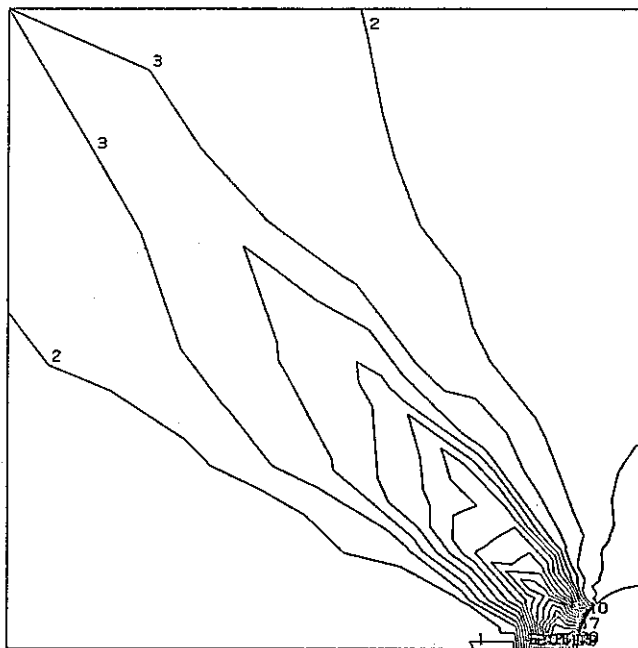


図 4.4.10 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-8-M)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	30.04396
2	30.09795
3	30.15192
4	30.20591
5	30.25990
6	30.31389
7	30.36787
8	30.42185
9	30.47584
10	30.52983
11	30.58382
12	30.63780
13	30.69178
14	30.74577
15	30.79976
16	30.85374
17	30.90773
18	30.96171
19	31.01570
20	31.06969



STEP NO. 70

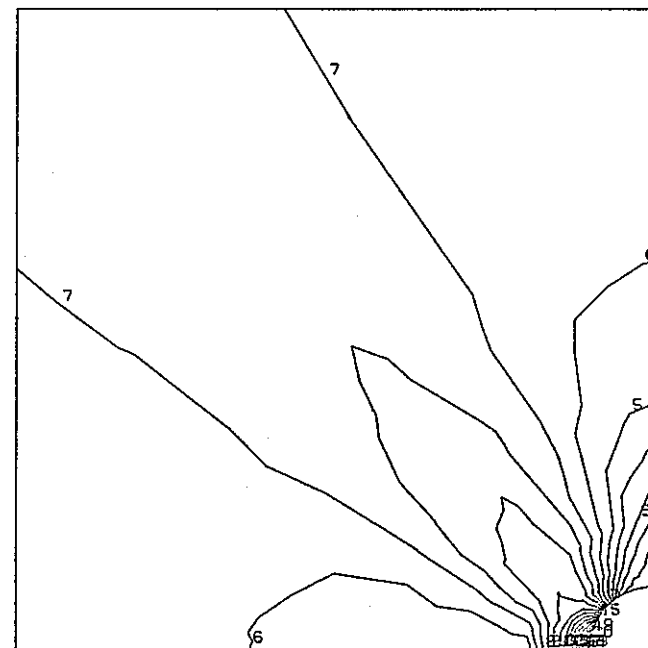
GEOM. SCALE 1 20.0000

図4.4.11 (a) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-1-M)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	20.22996
2	20.94995
3	21.66994
4	22.38992
5	23.10991
6	23.82989
7	24.54988
8	25.26987
9	25.98986
10	26.70984
11	27.42982
12	28.14981
13	28.86980
14	29.58978
15	30.30977
16	31.02975
17	31.74974
18	32.46973
19	33.18971
20	33.90970



STEP NO. 95

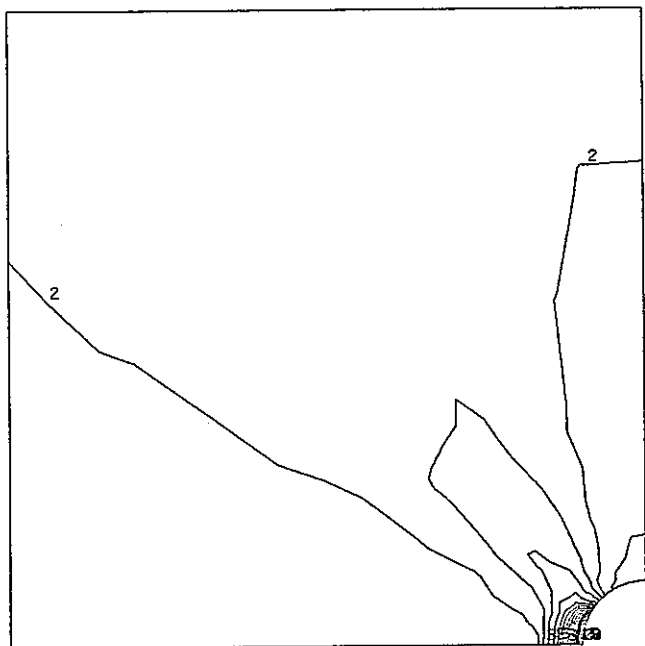
GEOM. SCALE 1 20.0000

図4.4.11 (b) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-3-M)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	2.400-03
2	4.900-03
3	7.400-03
4	9.900-03
5	1.240-02
6	1.490-02
7	1.740-02
8	1.990-02
9	2.240-02
10	2.490-02
11	2.740-02
12	2.990-02
13	3.240-02
14	3.490-02
15	3.740-02
16	3.990-02
17	4.240-02
18	4.490-02
19	4.740-02
20	4.990-02



STEP NO. 70

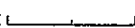
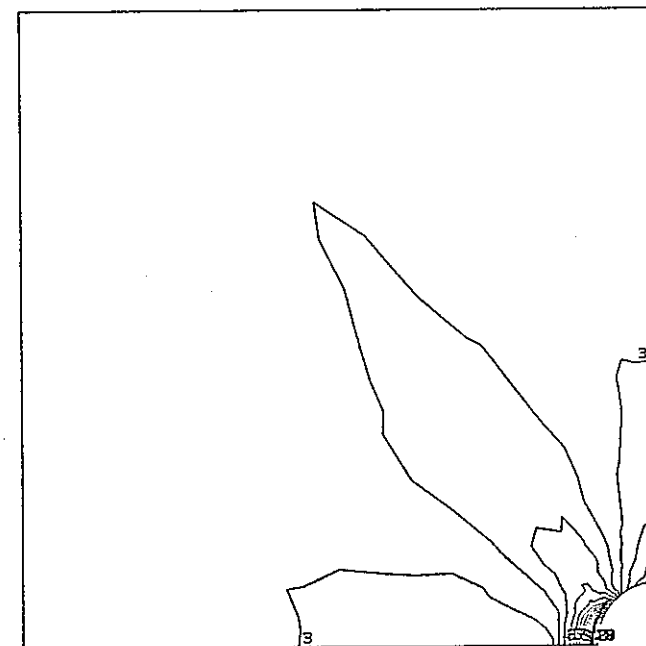
GEOM. SCALE  20.0000

図4.4.12 (a) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-1-M)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	2.600-03
2	3.900-03
3	5.200-03
4	6.500-03
5	7.800-03
6	9.100-03
7	1.040-02
8	1.170-02
9	1.300-02
10	1.430-02
11	1.560-02
12	1.690-02
13	1.820-02
14	1.950-02
15	2.080-02
16	2.210-02
17	2.340-02
18	2.470-02
19	2.600-02
20	2.730-02



STEP NO. 95

GEOM. SCALE  20.0000

図4.4.12 (b) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-3-M)

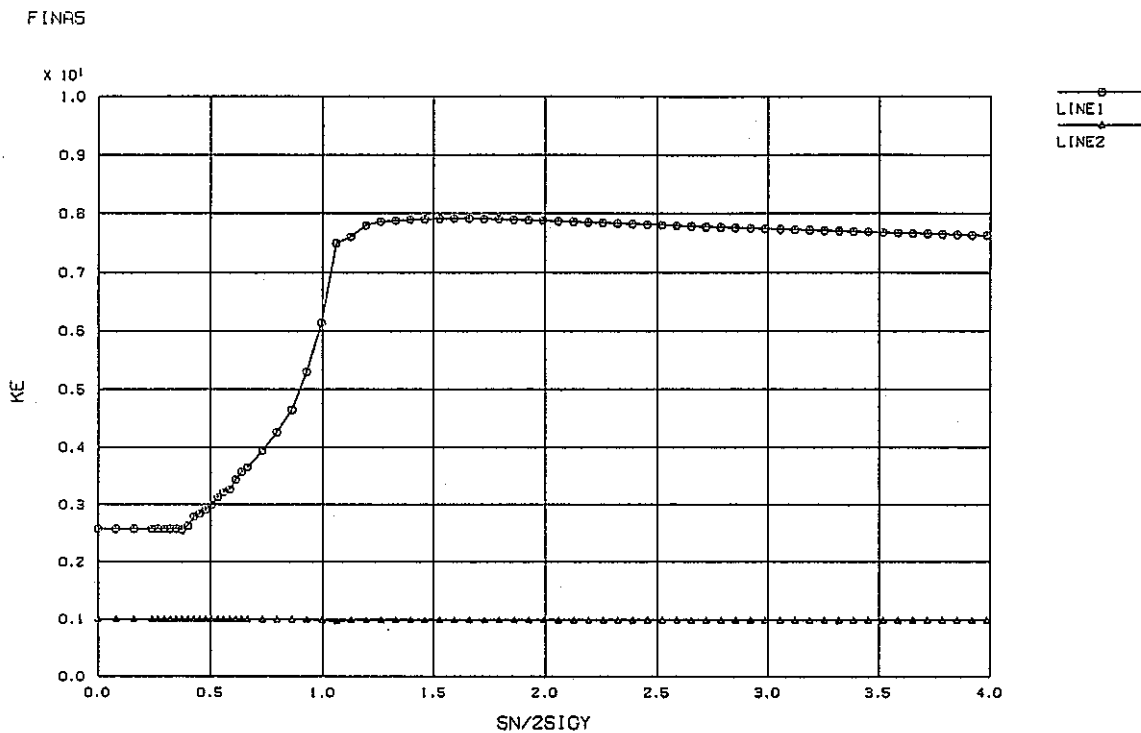


図 4.4.13 (a) ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-1-M)

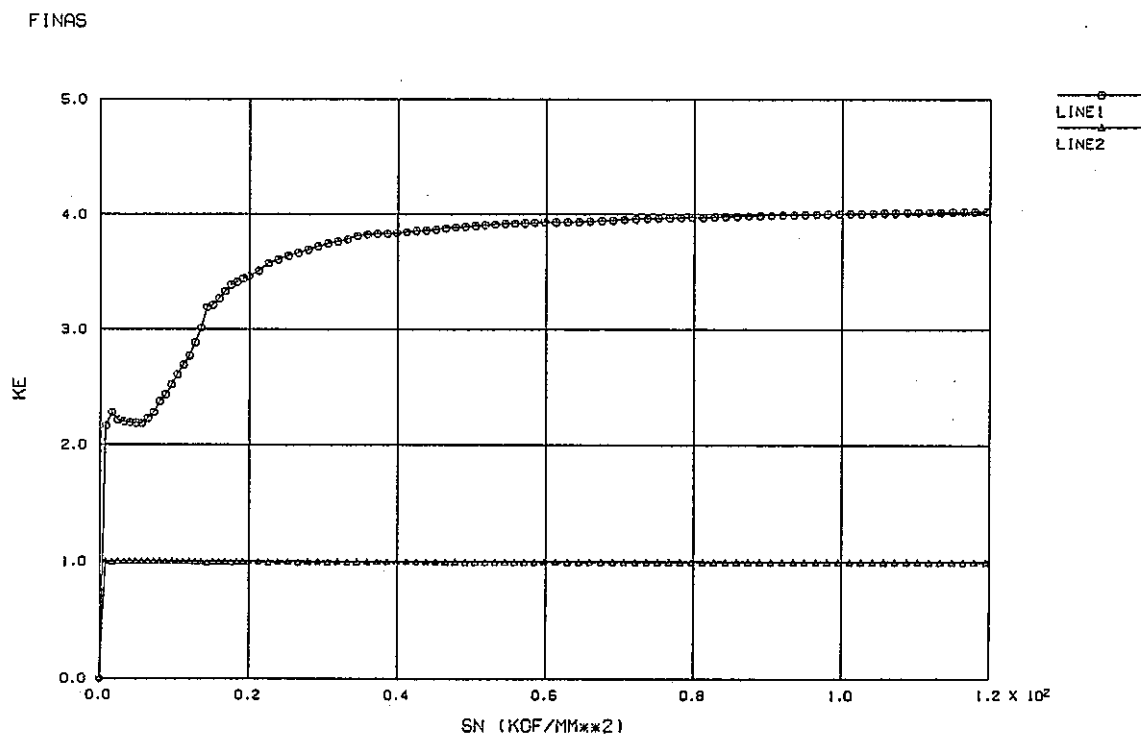


図 4.4.13 (b) ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-3-M)

FINAS

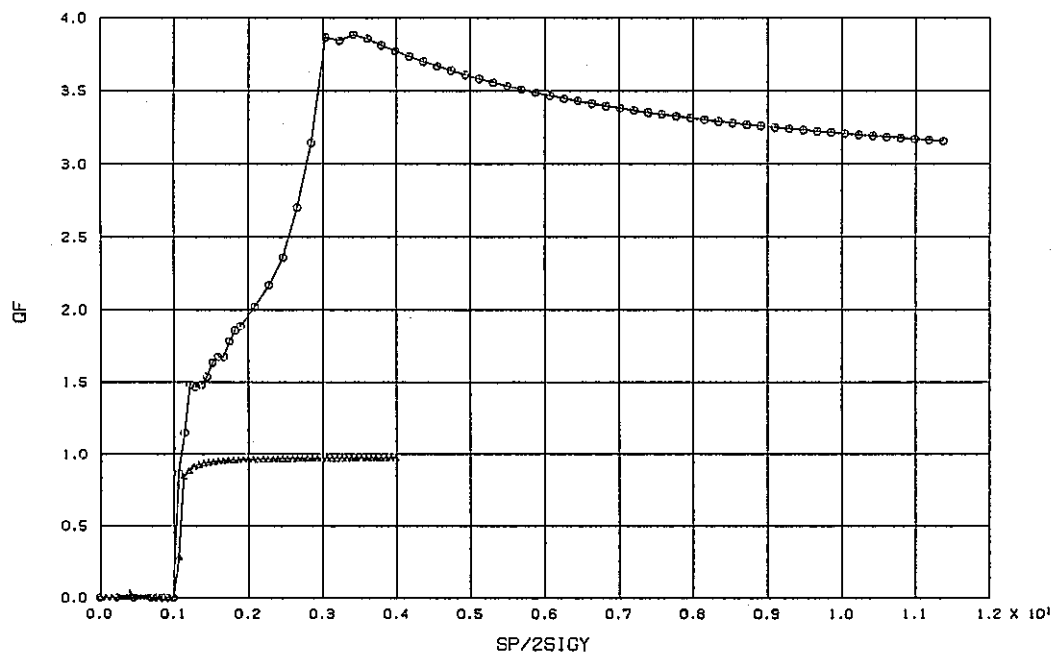


図 4.4.14 (a) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M)

FINAS

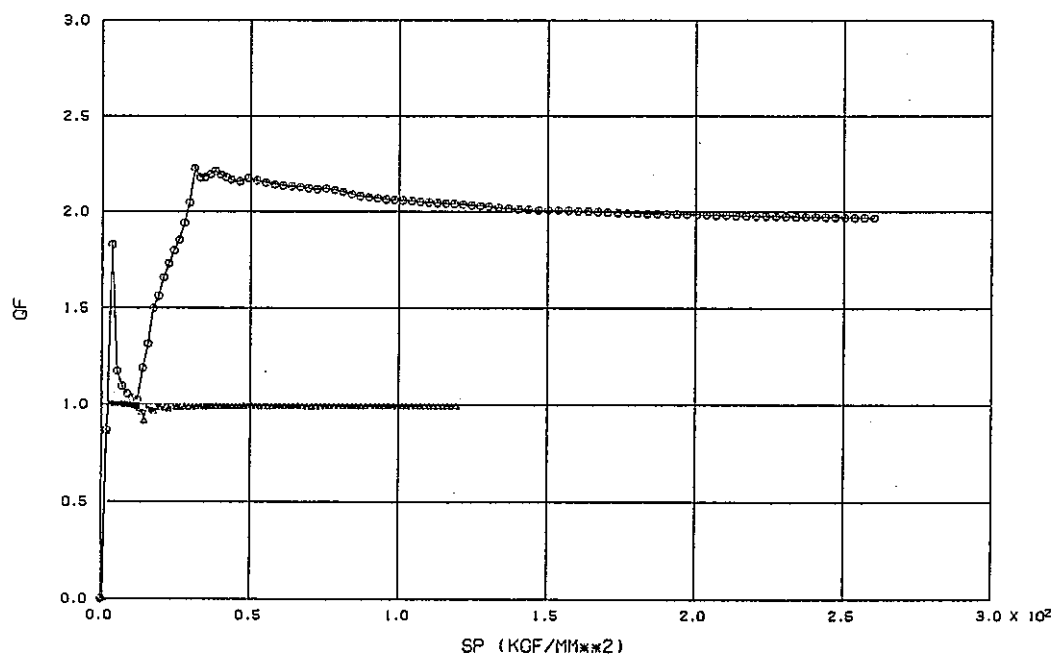


図 4.4.14 (b) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-3-M)

FINAS

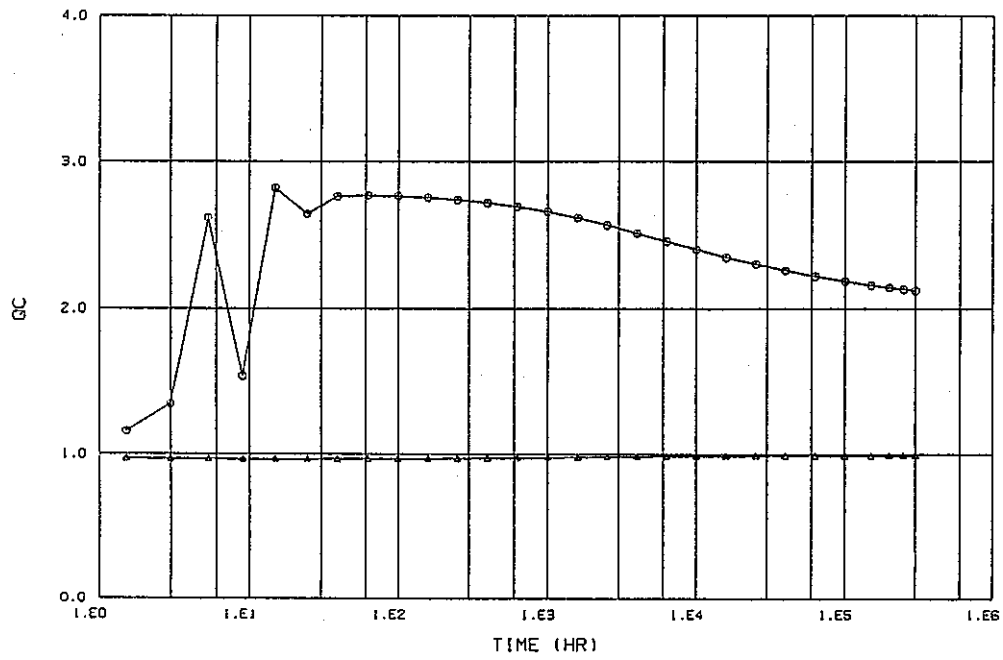


図 4.4.15 (a) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-7-M)

FINAS

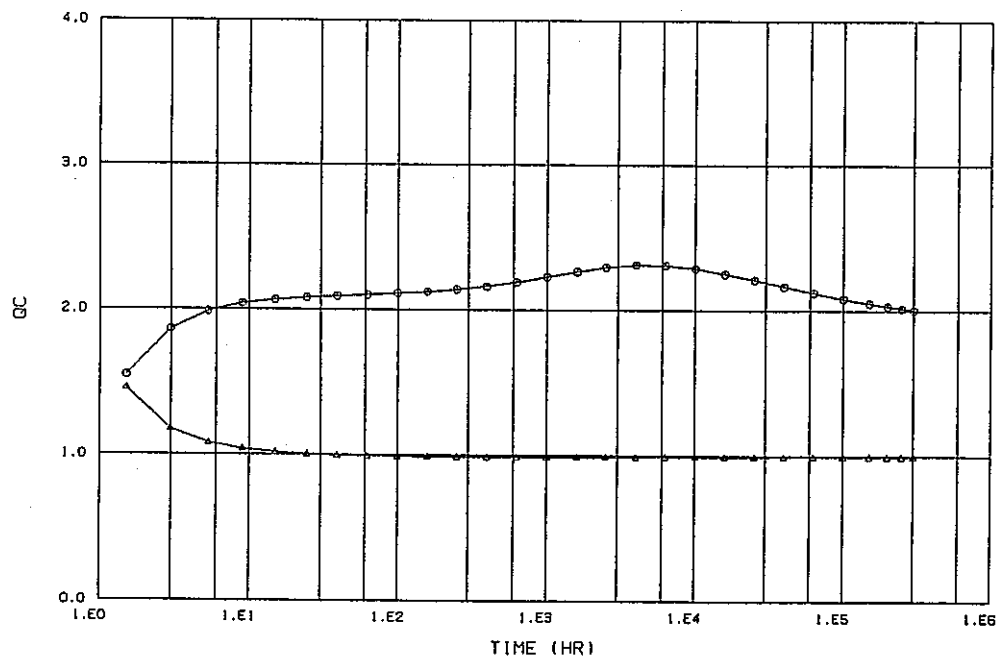


図 4.4.15 (b) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-8-M)

4. 4. 3 切欠き形状の影響

(1) 目的

切欠き形状を変化させることにより応力集中係数 K が応力集中部におけるひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に及ぼす影響を調べる。

(2) 方法

切欠きの深さが同じで幅の異なる以下の3つ形状について弾塑性解析及び応力緩和解析を行う。

①切欠き形状

図4.2.1 ~ 図4.2.3 参照。

②材料特性

1)弾塑性解析

弾完全塑性体。

縦弾性係数 $E = 16200$

降伏応力 $\sigma_y = 30 \text{ kgf/mm}^2$ ($\rho/d = 1.0$)

$\sigma_y = 20 \text{ kgf/mm}^2$ ($\rho/d = 4.0, 10.0$)

硬化係数 $H' = 16.2 \text{ kgf/mm}^2$

2)応力緩和

ノルトン則を使用。

$\rho/d = 10.0$ (CASE 3-11-M) の応力緩和では降伏応力 $\sigma_y = 30 \text{ kgf/mm}^2$ としている。

③対象ケース

1)弾塑性解析

$\rho/d = 1.0$ (CASE 3-1-M)

$\rho/d = 4.0$ (CASE 3-4-M)

$\rho/d = 10.0$ (CASE 3-5-M)

2)応力緩和解析

$\rho/d = 1.0$ (CASE 3-7-M)

$\rho/d = 10.0$ (CASE 3-11-M)

(3) 結果

①相当応力相当ひずみの履歴図

切欠き形状を変化させた場合の応力集中部及び平滑部における相当応力増分、相当ひずみ増分の履歴図を以下に示す。

1)弾塑性解析

CASE 3-1-M ($\rho/d = 1.0$) 図4.4.16 (a)

CASE 3-4-M ($\rho/d = 4.0$) 図4.4.16 (b)

CASE 3-5-M ($\rho/d = 10.0$) 図4.4.16 (c)

2)応力緩和解析

CASE 3-7-M ($\rho/d = 1.0$) 図4.4.17 (a)

CASE 3-11-M ($\rho/d = 10.0$)

図 4.4.17 (b)

これらの図から以下のことがわかる。

- 同じ強制変位 δ を与えても ρ/d が大きいほど応力集中係数 K が小さいため切欠き部の相当応力範囲及び相当ひずみ範囲は小さな値を示す。
- ρ/d が大きいほど応力緩和時のひずみ増大率は減少する。
- $\rho/d = 10.0$ の応力緩和の場合、評価点 2 でわずかながら除荷する傾向が見られる。

②Mises 相当応力コンター図

切欠き形状を変化させた場合の極値時点における相当応力コンター図を以下に示す。

1)弾塑性解析

CASE 3-1-M ($\rho/d = 1.0$)

図 4.4.18 (a)

CASE 3-4-M ($\rho/d = 4.0$)

図 4.4.18 (b)

CASE 3-5-M ($\rho/d = 10.0$)

図 4.4.18 (c)

これらの図から以下のことがわかる。

- ρ/d が大きくなるほど最大応力発生部が中心軸方向へ移行している。
- ρ/d が変化しても切欠き部と平滑部の中心軸を結ぶ対角線上で応力が高くなる傾向は同様に見られる。
- ρ/d が大きくなるほど切欠き部近傍の応力値は下がるが、その反面応力の高い領域が軸方向、半径方向ともに拡大している。

③Mises 相当塑性ひずみコンター図

切欠き形状を変化させた場合の極値時点 B における相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。

1)弾塑性解析

CASE 3-1-M ($\rho/d = 1.0$)

図 4.4.19 (a)

CASE 3-4-M ($\rho/d = 4.0$)

図 4.4.19 (b)

CASE 3-5-M ($\rho/d = 10.0$)

図 4.4.19 (c)

これらの図から以下のことがわかる。

- $\rho/d = 1$ では切欠き底近傍の狭い領域でひずみが集中しているが、 ρ/d が大きくなるほどひずみ集中部の領域が軸方向及び半径方向へと拡大する。
- ρ/d が変化しても塑性領域が切欠き部から平滑部の中心軸方向へ対角線上に拡大する傾向が同様に見られる。
- ρ/d が大きくなると切欠き表面付近に切欠きに沿ってひずみ範囲の大きくなっている領域が現れてくる。

④ひずみ集中係数 K_ϵ の履歴

切欠き形状を変化させた場合の評価点 1 におけるひずみ集中係数の履歴を以下に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点 2 の相当応力増分を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は評価点 1 及び評価点 2 の弾塑性解析による相当ひずみ増分を弾

性解析による評価点2の相当ひずみ増分で無次元化したものである。

・弾塑性解析（図4.4.20）

CASE 3-1-M ($\rho/d = 1.0$)

CASE 3-4-M ($\rho/d = 4.0$)

CASE 3-5-M ($\rho/d = 10.0$)

図から以下のことがわかる。

- ρ/d が大きいほどひずみ集中係数の値は小さくなる。
- ひずみ集中係数の値そのものは異なるが、 ρ/d が変化してもひずみ集中はノイバー型挙動を呈しほぼ相似形となる。

⑤ 弾性追従パラメータ q_F の履歴

切欠き形状を変化させた場合の評価点1及び評価点2における弾性追従パラメータの履歴を以下に示す。図で横軸はピーク応力強さ増分 S_p を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾性追従パラメータである。

1) 弾塑性解析

CASE 3-1-M ($\rho/d = 1.0$)

図4.4.21 (a)

CASE 3-4-M ($\rho/d = 4.0$)

図4.4.21 (b)

CASE 3-5-M ($\rho/d = 10.0$)

図4.4.21 (c)

これらの図から以下のことがわかる。

- ρ/d が大きいほど弾性追従パラメータ q_F の値は小さくなる。
- 評価点1において、 q_F が初期に急峻に立ち上がりその後徐々に減少し一定値に漸近していく傾向は、 ρ/d の値によらず同様に見られる。
- 評価点2では $q_F \approx 1$ となり、弾性追従は充分小さいと考えられる。

⑥ クリープ弾性追従パラメータ q_c の履歴

切欠き形状を変化させた場合の評価点1及び評価点2におけるクリープ弾性追従パラメータの履歴を以下に示す。図で横軸は時間であり、縦軸はクリープ弾性追従パラメータである。

・応力緩和解析

CASE 3-7-M ($\rho/d = 1.0$)

図4.4.22 (a)

CASE 3-11-M ($\rho/d = 10.0$)

図4.4.22 (b)

これらの図から以下のことがわかる。

- $\rho/d = 1.0$ の場合、評価点1のクリープ弾性追従パラメータは時間の増加に伴い減少する傾向を示すが、 $\rho/d = 10.0$ の場合はほぼ一定値 ($q_c \approx 1.3$) となる。
- 評価点2では $q_c \approx 1$ となり応力緩和時の弾性追従は充分小さいと考えられる。

(3) まとめ

切欠きの深さが同じで幅の異なる3つ形状について弾塑性解析及び応力緩和解析を行い、切欠き形状が応力集中部におけるひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に及ぼす影

響を調べた結果をまとめると以下のようなになる。

- ρ/d が大きいほど弾性応力集中係数が低下し、それに伴い弾塑性解析におけるひずみ集中率も減少する。
- 応力緩和時のひずみ増大挙動も ρ/d が大きいほど小さくなる。
- 弾塑性解析におけるひずみ集中挙動及び応力緩和時のひずみ増大挙動は切欠き部の応力集中係数の値に大きく影響される。

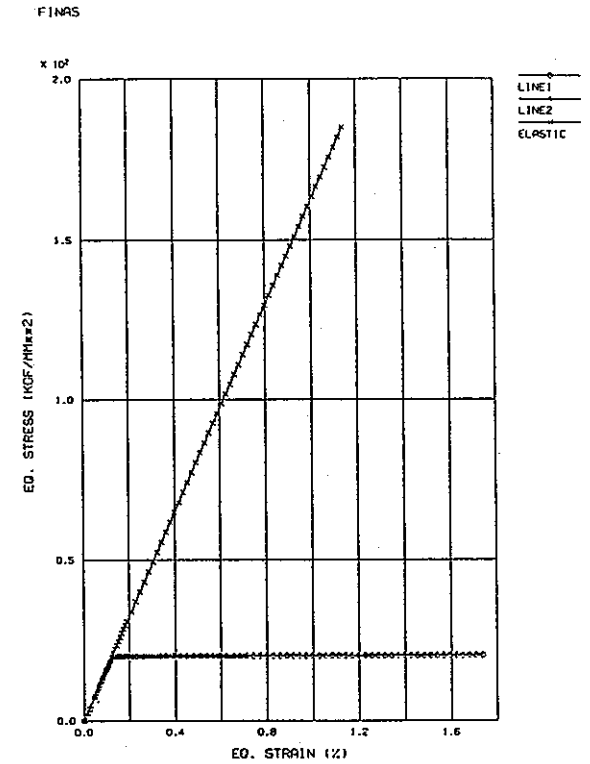
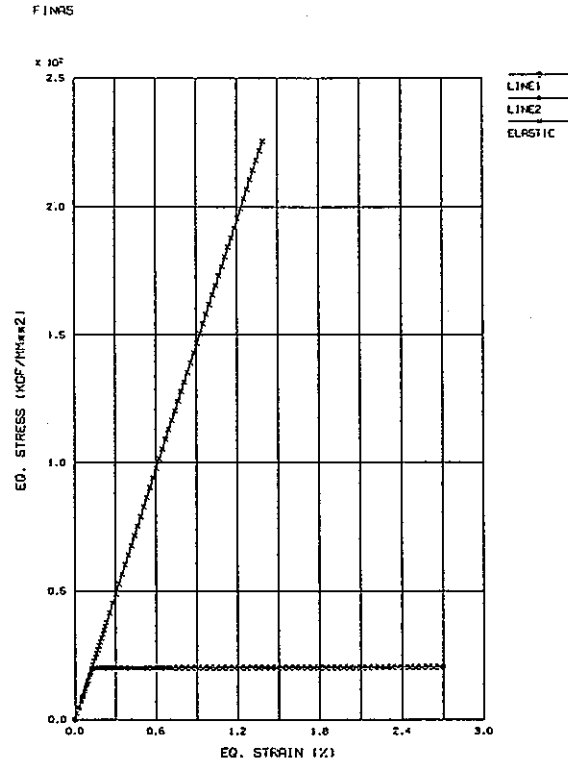
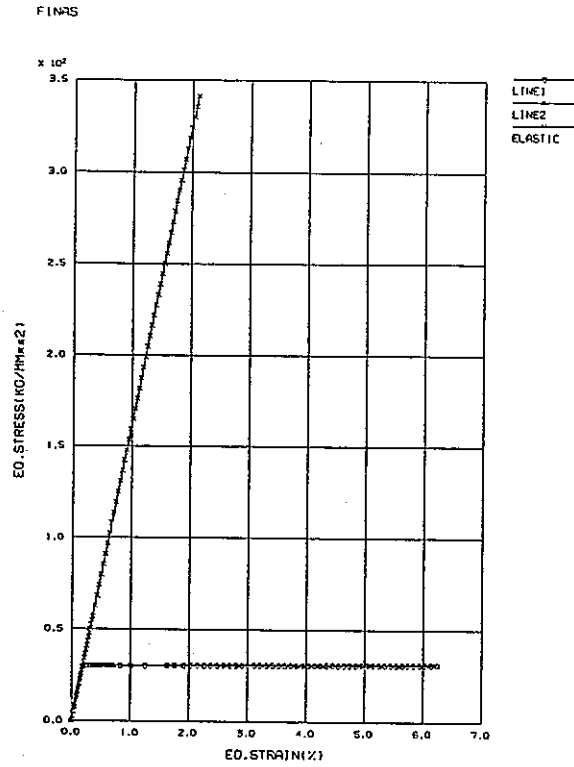


図4.4.16 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-1-M) STRESS-STRAIN CURVE (ROH/D=4.0) (E-F-P) 図4.4.16 (c) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-5-M)
 図4.4.16 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-4-M)

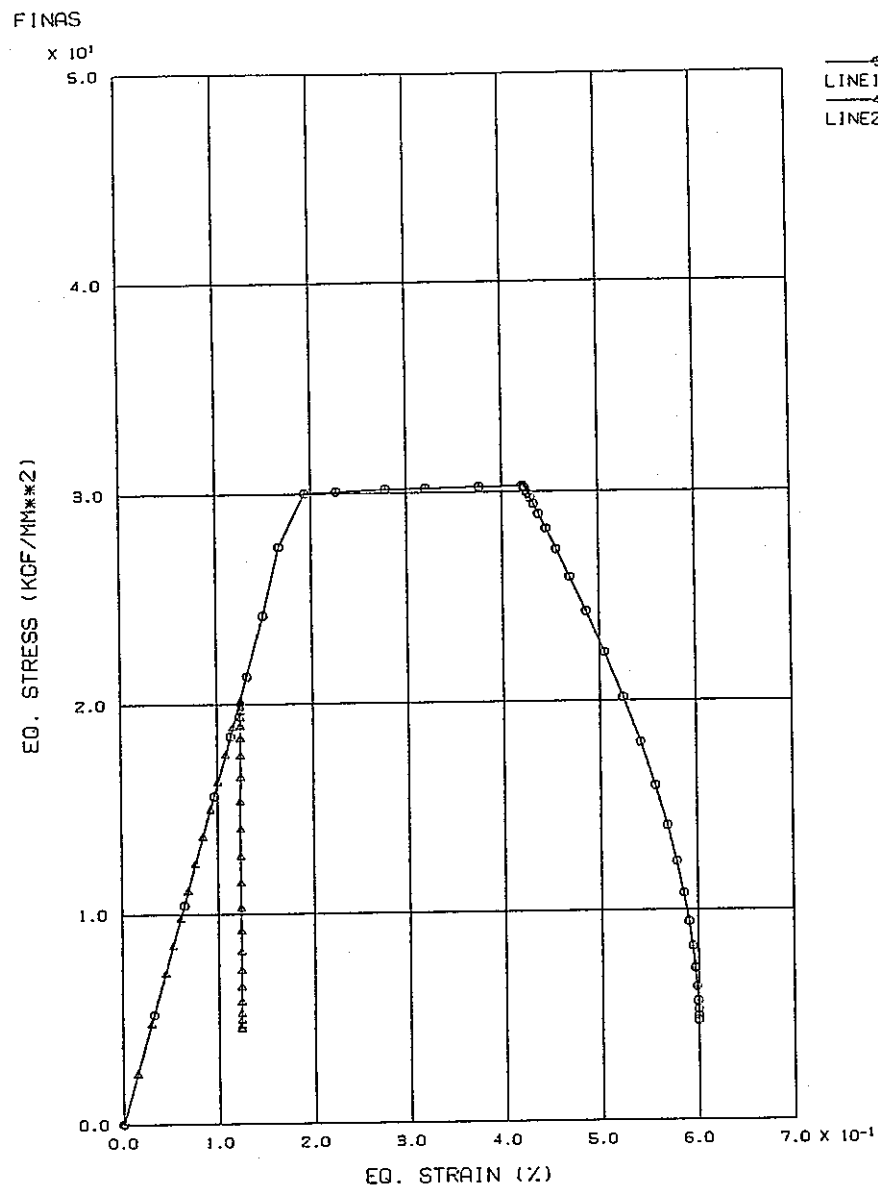


図4.4.17 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-7-M)

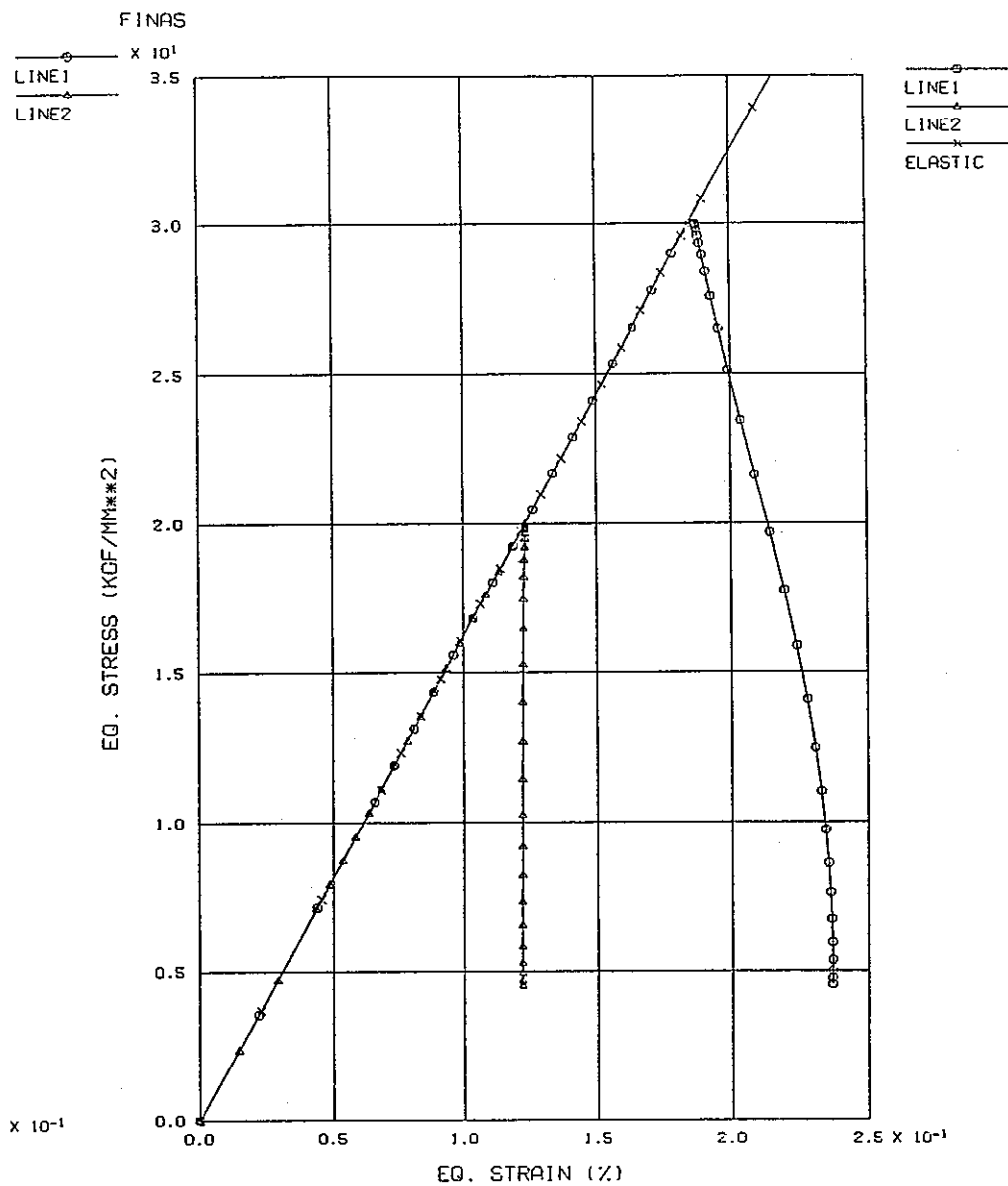
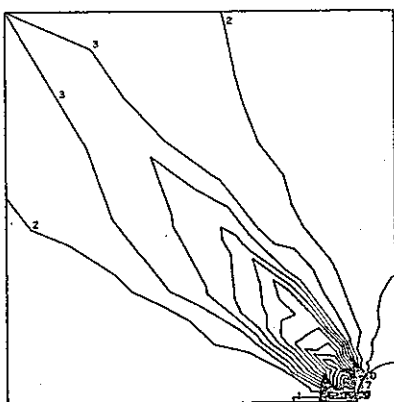


図4.4.17 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-11-M)

FINAS
VON MISES STRESS

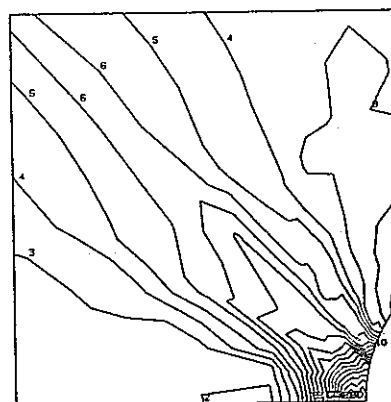
CONTOUR VALUES

1	30.04536
2	30.09795
3	30.15152
4	30.20581
5	30.25990
6	30.31989
7	30.38767
8	30.42185
9	30.47584
10	30.52983
11	30.58382
12	30.63780
13	30.69178
14	30.74577
15	30.79975
16	30.85374
17	30.90773
18	30.96171
19	31.01570
20	31.06968

FINAS
VON MISES STRESS

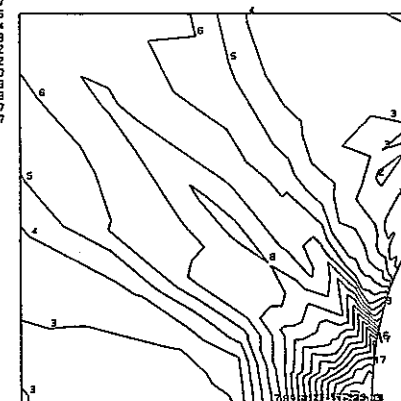
CONTOUR VALUES

1	20.04456
2	20.07095
3	20.09654
4	20.12292
5	20.14930
6	20.17469
7	20.20068
8	20.22686
9	20.25265
10	20.27883
11	20.30462
12	20.33031
13	20.35679
14	20.38278
15	20.40976
16	20.43475
17	20.46073
18	20.48672
19	20.51271
20	20.53869

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	20.05195
2	20.08994
3	20.08755
4	20.10592
5	20.12932
6	20.14190
7	20.15989
8	20.17788
9	20.19587
10	20.21387
11	20.23185
12	20.24984
13	20.26783
14	20.28582
15	20.30382
16	20.32180
17	20.33979
18	20.35776
19	20.37577
20	20.39377

Z
R

STEP NO. 70

GEOM. SCALE 20,000

図 4.4.18 (a) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-1-M) ISES EQ. STRESS CONTOUR (CASE-ROW/D=4.0)

Z
R

STEP NO. 70

GEOM. SCALE 20,000

図 4.4.18 (b) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-4-M)

Z
R

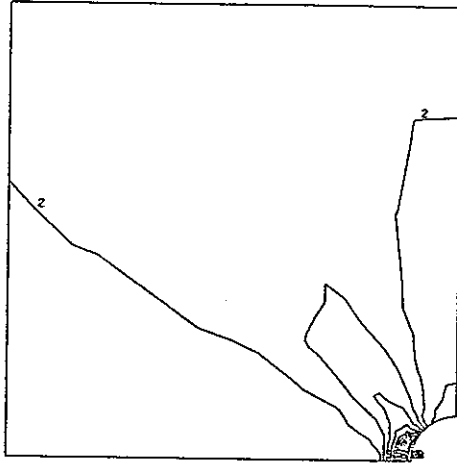
STEP NO. 70

GEOM. SCALE 20,000

図 4.4.18 (c) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-5-M)

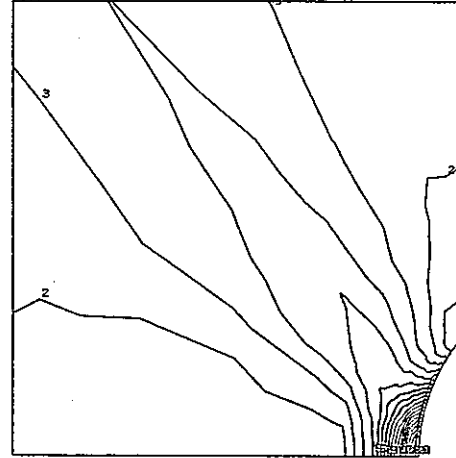
FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 2.400-03
2 4.900-03
3 7.400-03
4 9.900-03
5 1.240-02
6 1.490-02
7 1.740-02
8 1.990-02
9 2.240-02
10 2.490-02
11 2.740-02
12 2.990-02
13 3.240-02
14 3.490-02
15 3.740-02
16 3.990-02
17 4.240-02
18 4.490-02
19 4.740-02
20 4.990-02



FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 4.100-03
2 5.100-03
3 6.100-03
4 7.100-03
5 8.100-03
6 9.100-03
7 1.010-02
8 1.110-02
9 1.210-02
10 1.310-02
11 1.410-02
12 1.510-02
13 1.610-02
14 1.710-02
15 1.810-02
16 1.910-02
17 2.010-02
18 2.110-02
19 2.210-02
20 2.310-02
21 2.410-02



FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 4.950-03
2 5.490-03
3 6.030-03
4 6.570-03
5 7.110-03
6 7.650-03
7 8.190-03
8 8.730-03
9 9.270-03
10 9.810-03
11 1.035-02
12 1.089-02
13 1.143-02
14 1.197-02
15 1.251-02
16 1.305-02
17 1.359-02
18 1.413-02
19 1.467-02
20 1.521-02

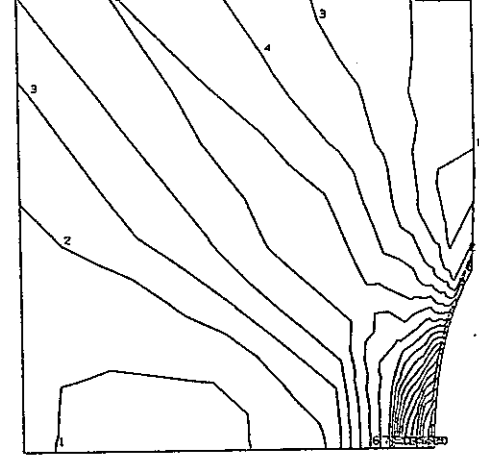


図4.4.19 (a) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-1-M) 1. PLASTIC STRAIN CONTOUR (CASE-ROW/D=4.01

図4.4.19 (c) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-5

図4.4.19 (b) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-4-M)

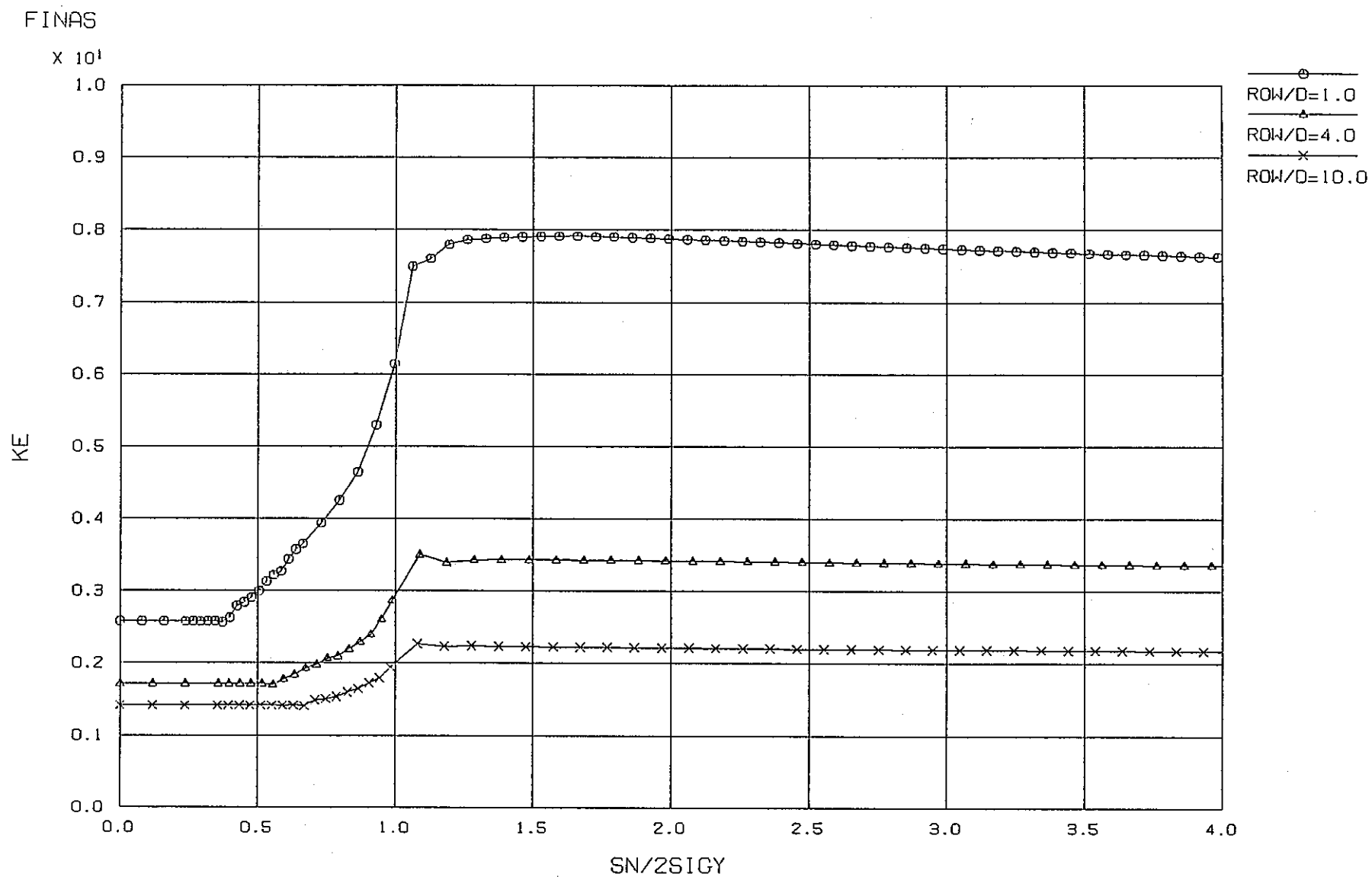


図4.4.20

ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-3-M, CASE3-4-M)

FINAS

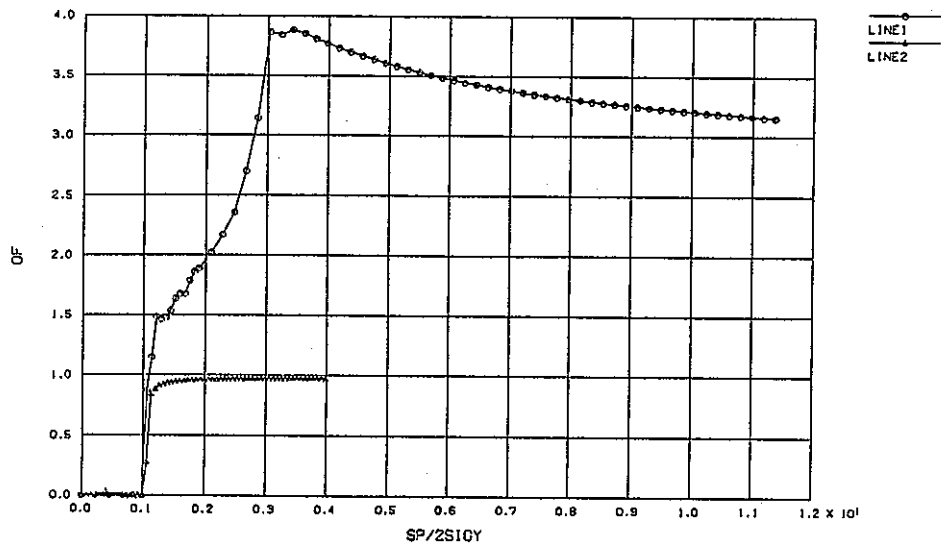


図 4.4.2 1 (a) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M)

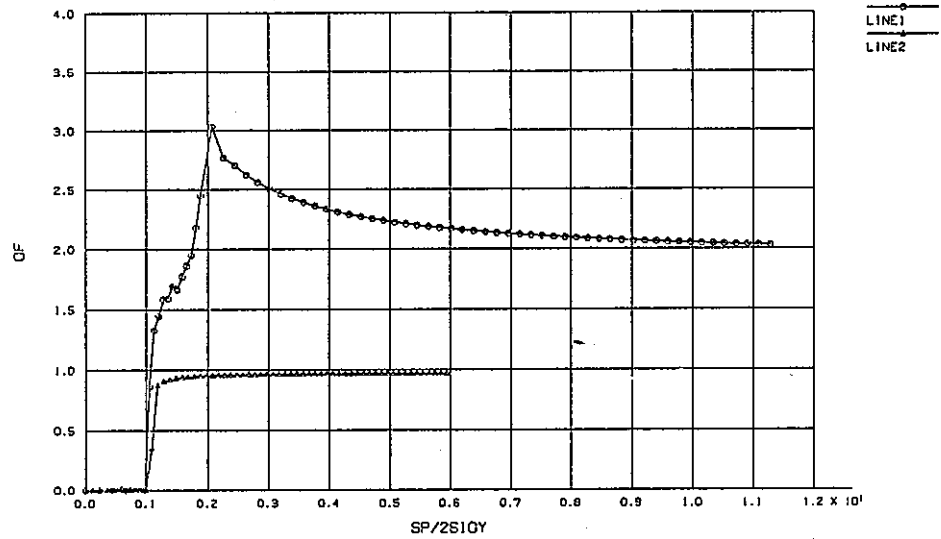


図 4.4.2 1 (b) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-4-M)

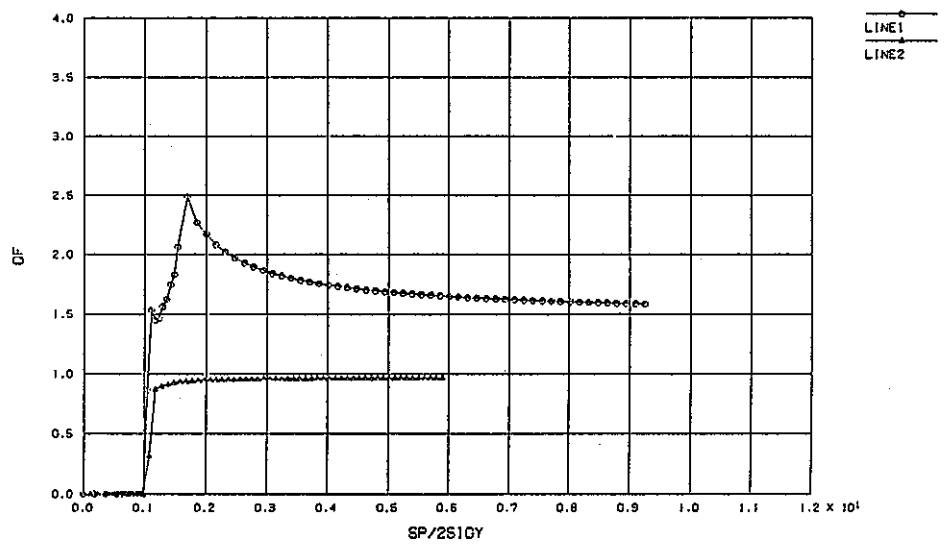


図 4.4.2 1 (c) 弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-5-M)

FINAS

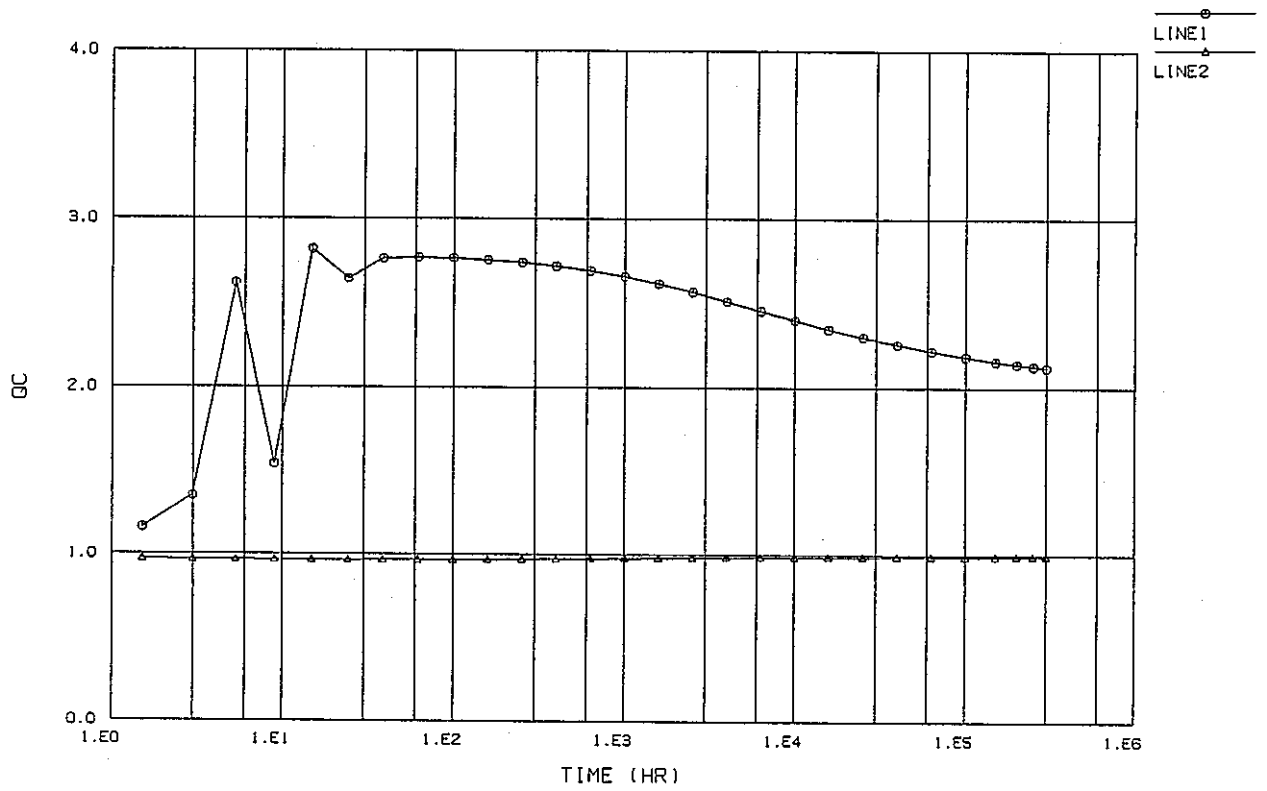


図4.4.22 (a) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-7-M)

FINAS

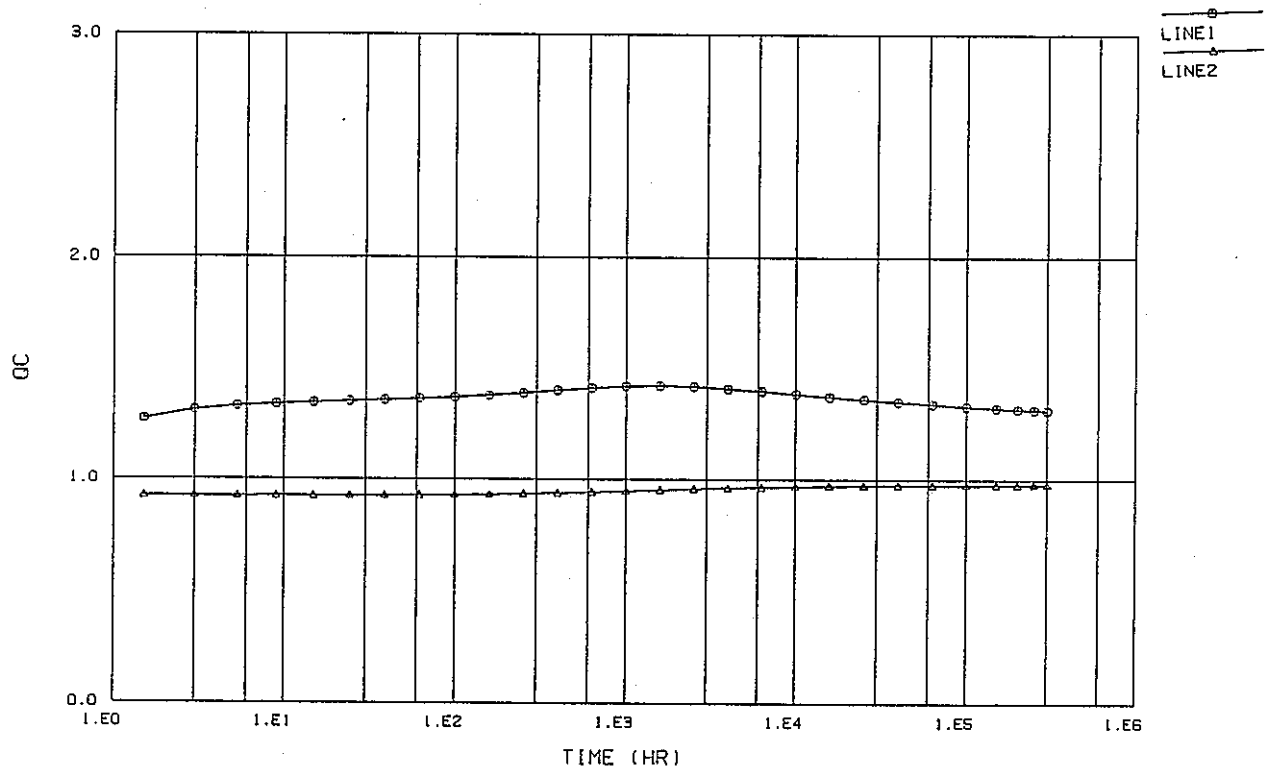


図4.4.22 (b) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-11-M)

4. 4. 4 総体的弾性追従パラメータの影響

(1) 目的

総体的弾性追従パラメータが応力集中部のひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に及ぼす影響を調べる。

(2) 方法

リファレンスのモデル形状に1要素でモデル化した弾性体を加えることにより総体的弾性追従パラメータ $q = 2$ とし、弾塑性解析及び応力緩和解析を行う。

○要素分割

図4.2.4参照。

○要素の種類

QAX8 (8節点4辺形軸対称ソリッド要素)

○境界条件及び負荷

・弾塑性解析

境界条件及び負荷－図4.2.5参照。

・応力緩和解析

4.2.1節参照。

(3) 結果

①相当応力相当ひずみの履歴

総体的弾性追従パラメータを変化させた場合の評価点1 (応力集中部) 及び評価点2 (平滑部) における相当応力増分、相当ひずみ増分の履歴図を以下に示す。

1)弾塑性解析

CASE 3-1-M ($q = 1.0$) 図4.4.23 (a)

CASE 3-6-M ($q = 2.0$) 図4.4.23 (b)

2)応力緩和解析 (弾クリープ)

CASE 3-9-M ($q = 1.0$) 図4.4.24 (a)

CASE 3-10-M ($q = 2.0$) 図4.4.24 (b)

これらの図から以下のことがわかる。

○弾塑性解析の場合、同じ端部変位を与えても対応する弾性解析の応力範囲はリファレンスに対して半分程度であるが、ひずみ範囲は80%と大きい。

○CASE 3-10-M($q=2.0$)の場合、総体的弾性追従が存在するため応力緩和時に平滑部でもひずみ増大がみられる。

○CASE 3-10-M($q=2.0$)の場合、応力緩和時における評価点1のひずみ増大は、緩和初期ではリファレンスに対し差が見られないが、それ以降ではひずみ増大率に大きな差が生じ最終的にリファレンスに対して2倍近いひずみ範囲を生じる。

②Mises 相当応力コンター図

総体的弾性追従パラメータを変化させた場合の極値時点Bにおける相当応力コンター図を以下に示す。

CASE 3-1-M ($q = 1.0$)

図 4.4.25 (a)

CASE 3-6-M ($q = 2.0$)

図 4.4.25 (b)

これらの図から以下のことがわかる。

- 負荷レベルは異なっても全断面降伏の状態まで達すれば総体的弾性追従の違いは応力分布形態には影響しない。

③ Mises 相当塑性ひずみコンター図

総体的弾性追従パラメータを変化させた場合の極値時点 B における相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。

CASE 3-1-M ($q = 1.0$)

図 4.4.26 (a)

CASE 3-6-M ($q = 2.0$)

図 4.4.26 (b)

これらの図から以下のことがわかる。

- 負荷レベルが異なることにより相当塑性ひずみの値には差が生じているが、分布形態では差異は見られない。

④ ひずみ集中係数 K_ϵ の履歴

総体的弾性追従パラメータを変化させた場合の評価点 1 及び評価点 2 におけるひずみ集中係数の履歴をリファレンスと共に図 4.4.27 に示す。図で横軸は弾性解析で得られた評価点 2 の相当応力増分を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は評価点 1 及び評価点 2 の弾塑性解析による相当ひずみ増分を弾性解析による評価点 2 の相当ひずみ増分で無次元化したものである。図から以下のことがわかる。

- CASE 3-6-M ($q=2.0$) の場合、総体的弾性追従が存在するため評価点 2 においてもひずみ集中が生じる。
- 切欠き部降伏から全断面降伏の間では、評価点 1 のひずみ集中係数に有意な差は見られない。
- 評価点 1 のひずみ集中において、リファレンスの場合全断面降伏後ではひずみ集中は鈍化しほぼ一定値となるのに対して、CASE 3-6-M ($q=2.0$) の場合では全断面降伏後ひずみ集中は鈍るもののひずみ集中係数は増加し続ける。

⑤ 弾性追従パラメータ q_F の履歴

総体的弾性追従パラメータを変化させた場合の評価点 1 及び評価点 2 における弾性追従パラメータの履歴を図 4.4.28 に示す。図で横軸はピーク応力強さ増分 S_p を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は弾性追従パラメータである。

図から以下のことがわかる。

- CASE 3-6-M の場合、総体的弾性追従 $q=2.0$ であるので、評価点 2 の弾性追従パラメータ $q_F \approx 2.0$ となっている。
- 評価点 1 の場合、平滑部降伏以前では総体的弾性追従の影響はほとんど見られない。
- リファレンスの場合、全断面降伏後に評価点 1 の弾性追従パラメータが減少する傾向が見られるが、CASE 3-6-M の場合増加率は減少するものの弾性追従パラメータ

タは増加し続ける。

⑥クリープ弾性追従パラメータ q_0 の履歴

総体的弾性追従パラメータを変化させた場合の評価点1及び評価点2におけるクリープ弾性追従パラメータの履歴を以下に示す。図で横軸は時間であり、縦軸はクリープ弾性追従パラメータである。

CASE 3-9-M ($q = 1.0$) 図4.4.29 (a)

CASE 3-10-M ($q = 2.0$) 図4.4.29 (b)

これらの図から以下のことがわかる。

- 評価点2のクリープ弾性追従パラメータは総体的弾性追従パラメータに近い値となる。
- 評価点1では、応力緩和初期において総体的弾性追従の影響は現れない。しかし、100 (hr)以降ではどちらのケースも時間とともに増加する傾向は見られるものの、その増加率はCASE 3-10-Mの方がはるかに大きい。
- 評価点1のクリープ弾性追従パラメータにおいて、CASE 3-9-Mでは1000(hr)付近ではほぼ一定値に漸近してしまうのに対し、CASE 3-10-Mでは 10^5 付近まで増加し長時間側でのひずみ増大が大きいことがわかる。

(3) まとめ

総体的弾性追従パラメータが応力集中部のひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に及ぼす影響を調べた結果をまとめると以下ようになる。

- 総体的弾性追従は応力分布及び塑性ひずみ分布の形態には影響を与えない。
- 弾塑性解析において、総体的弾性追従が重畳することにより応力集中部及び平滑部ともにひずみ集中係数が増大する。
- 総体的弾性追従が重畳することにより応力緩和時のひずみ増大率は長時間側で拡大する。

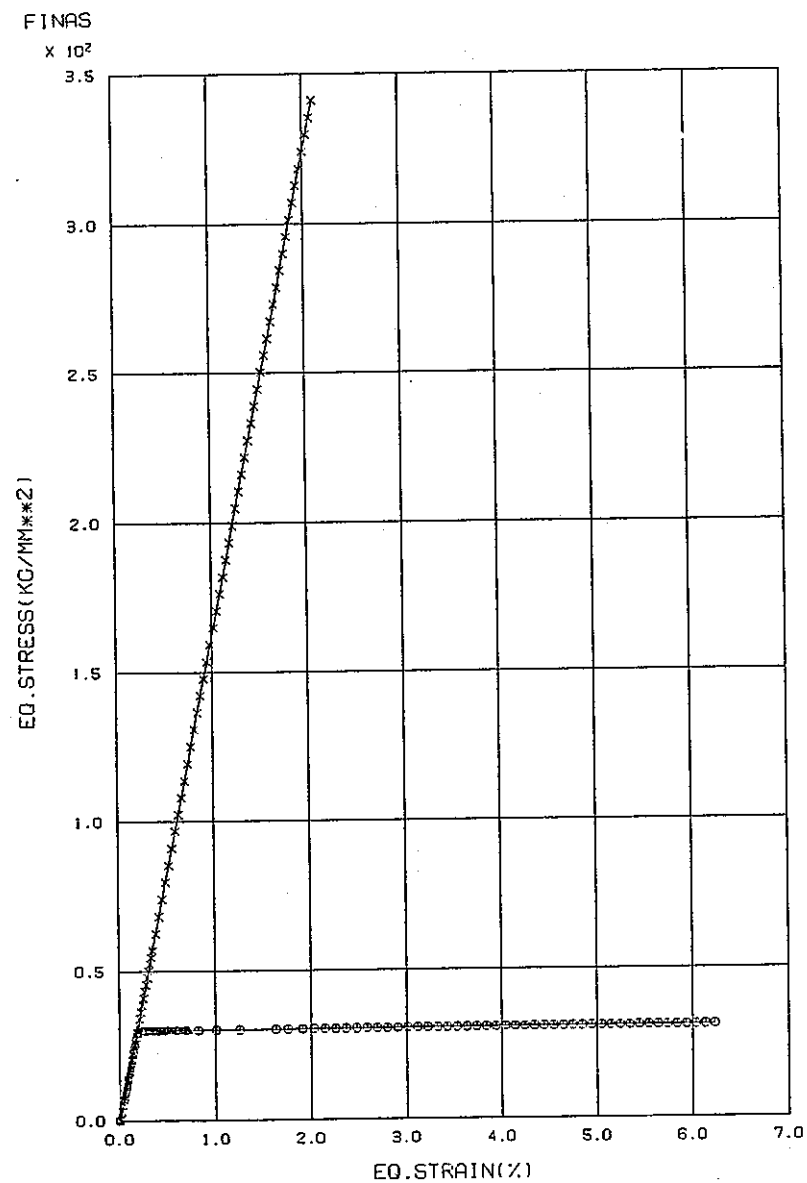


図 4.4.23 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-1-M)

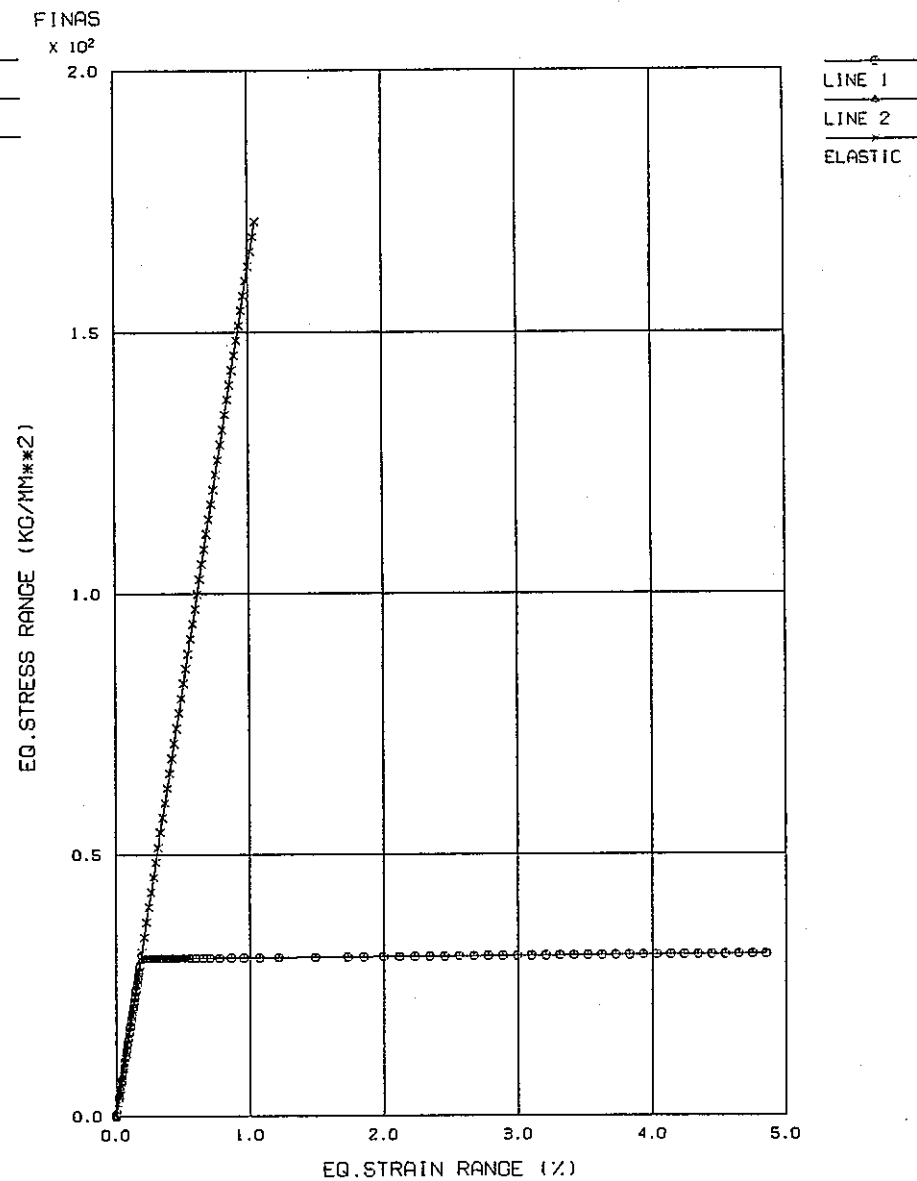


図 4.4.23 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-6-M)

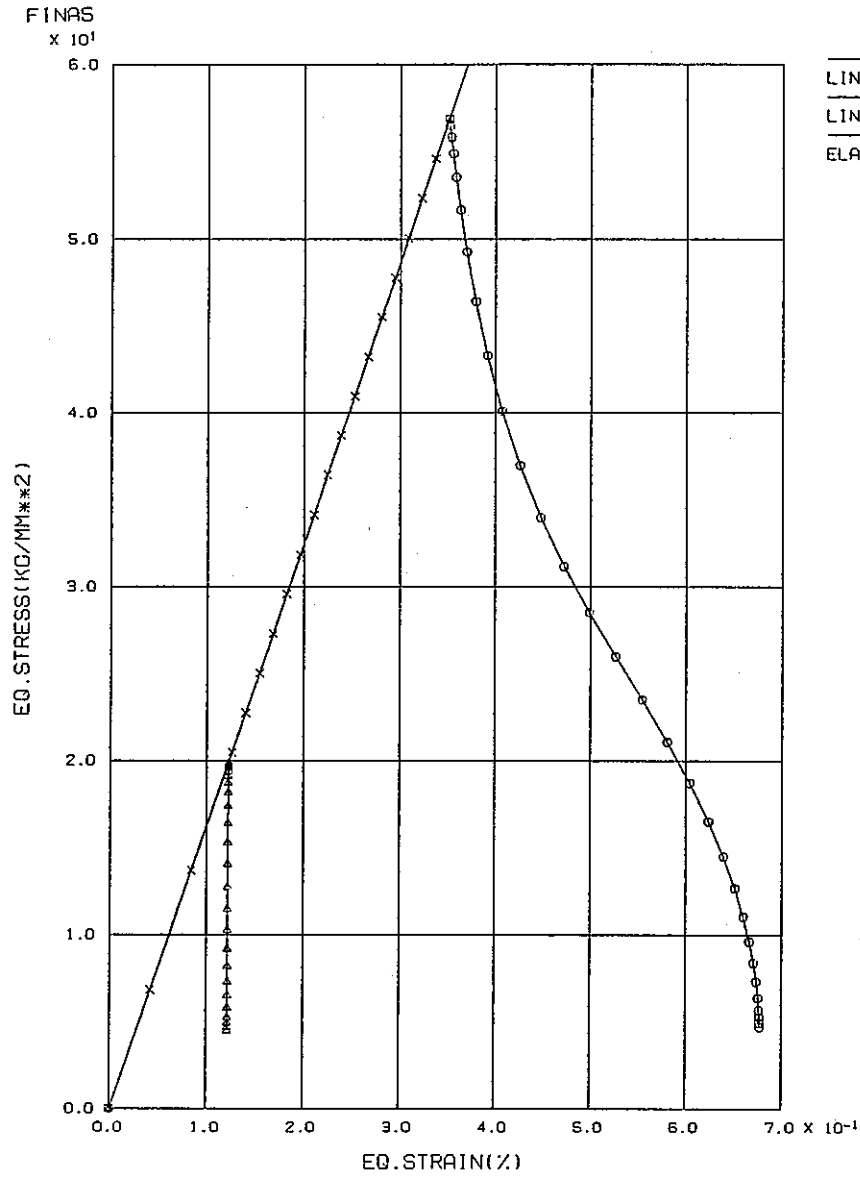


図 4.4.24 (a) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-9-M)

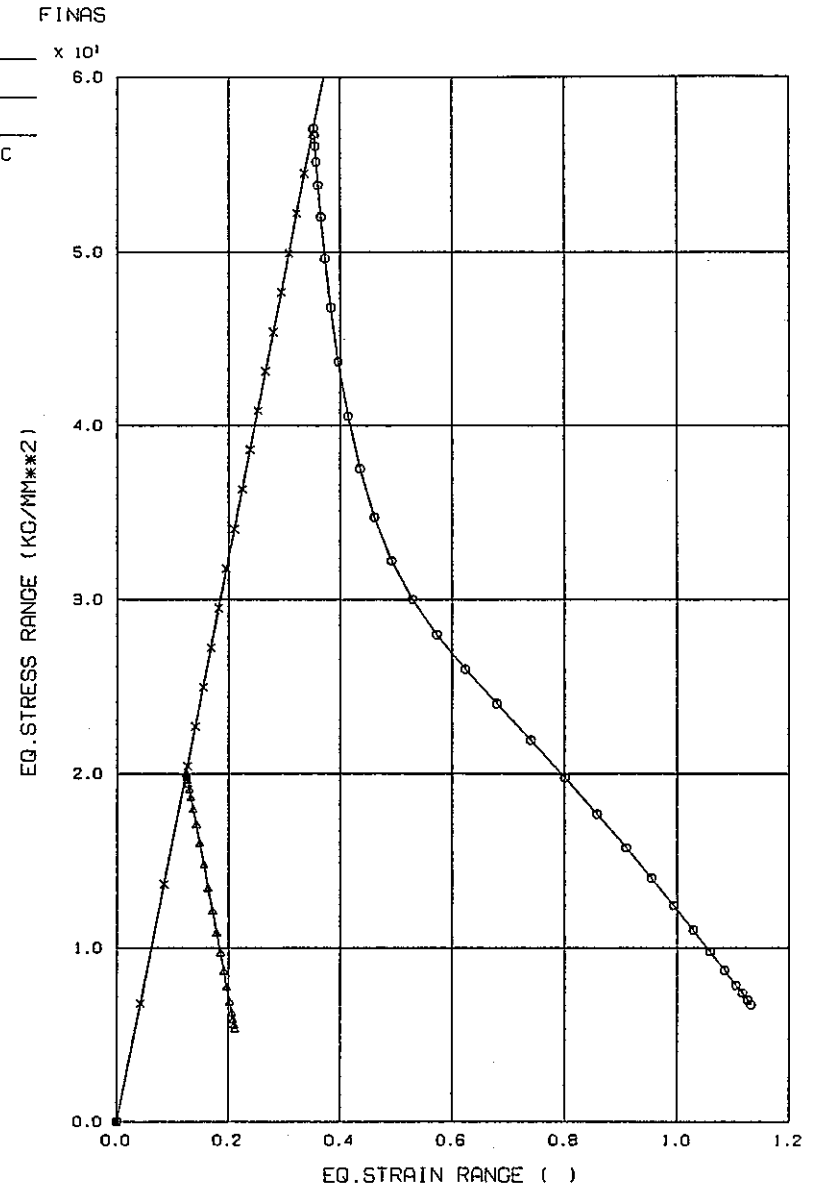
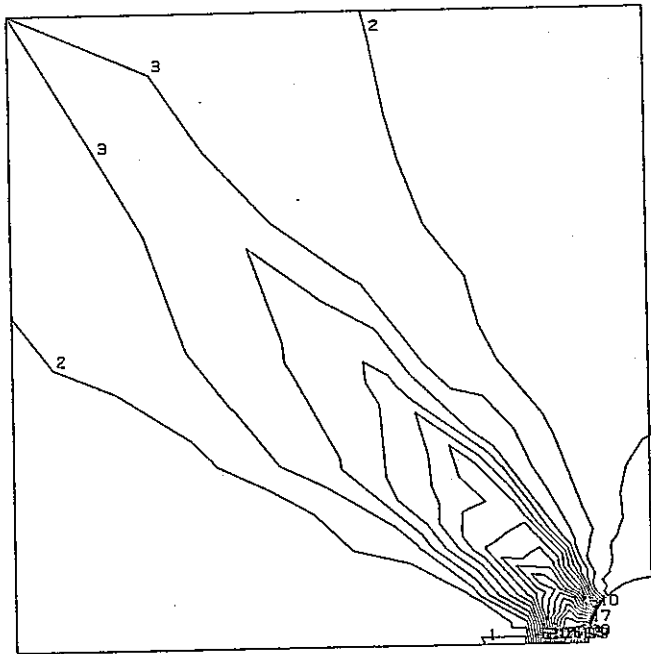


図 4.4.24 (b) 相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-10-M)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	30.04396
2	30.09795
3	30.15192
4	30.20591
5	30.25990
6	30.31389
7	30.36787
8	30.42185
9	30.47584
10	30.52983
11	30.58382
12	30.63780
13	30.69178
14	30.74577
15	30.79976
16	30.85374
17	30.90773
18	30.96171
19	31.01570
20	31.06968



STEP NO. 70

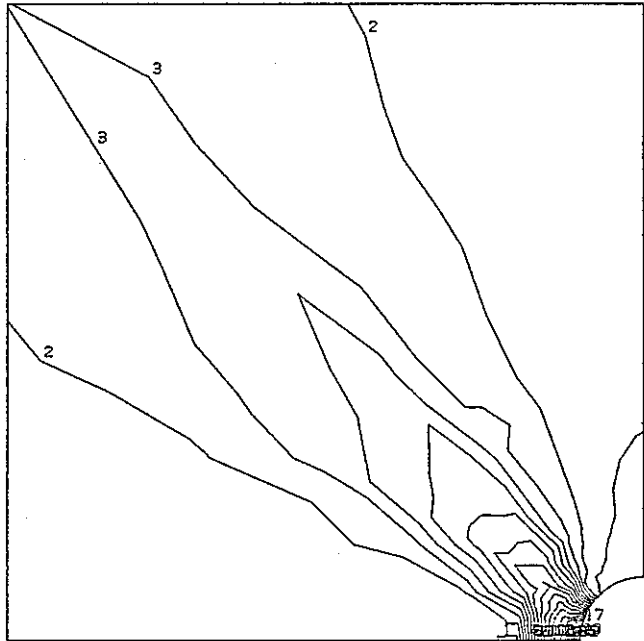
GEOM. SCALE 20.0000

図4.4.25 (a) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-1-M)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	30.02595
2	30.06995
3	30.11393
4	30.15792
5	30.20192
6	30.24591
7	30.28990
8	30.33389
9	30.37788
10	30.42187
11	30.46586
12	30.50986
13	30.55384
14	30.59783
15	30.64183
16	30.68582
17	30.72981
18	30.77380
19	30.81779
20	30.86178



STEP NO. 70

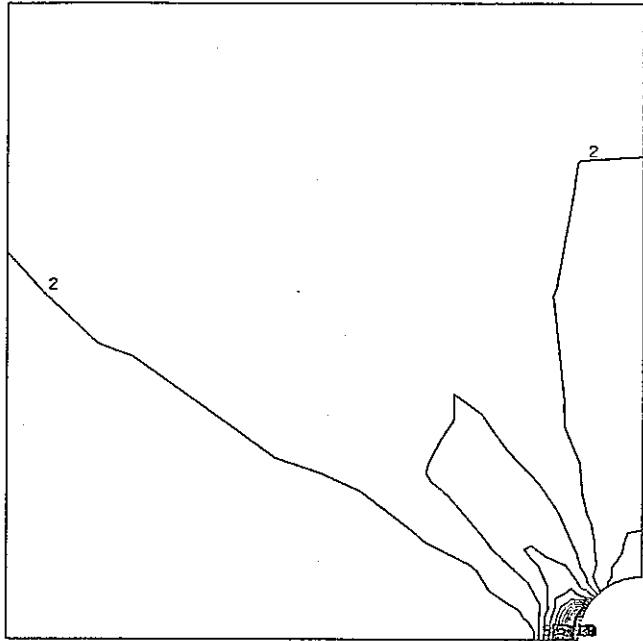
GEOM. SCALE 20.0000

図4.4.25 (b) ミーゼス相当応力コンター図 (CASE3-6-M)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	2.400-03
2	4.900-03
3	7.400-03
4	9.900-03
5	1.240-02
6	1.490-02
7	1.740-02
8	1.990-02
9	2.240-02
10	2.490-02
11	2.740-02
12	2.990-02
13	3.240-02
14	3.490-02
15	3.740-02
16	3.990-02
17	4.240-02
18	4.490-02
19	4.740-02
20	4.990-02



STEP NO. 70

GEOM. SCALE 1 20.0000

図 4.4.26 (a) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-1-M)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	1.200-03
2	3.100-03
3	5.000-03
4	6.900-03
5	8.800-03
6	1.070-02
7	1.260-02
8	1.450-02
9	1.640-02
10	1.830-02
11	2.020-02
12	2.210-02
13	2.400-02
14	2.590-02
15	2.780-02
16	2.970-02
17	3.160-02
18	3.350-02
19	3.540-02
20	3.730-02



STEP NO. 70

GEOM. SCALE 1 20.0000

図 4.4.26 (b) 相当塑性ひずみコンター図 (CASE3-6-M)

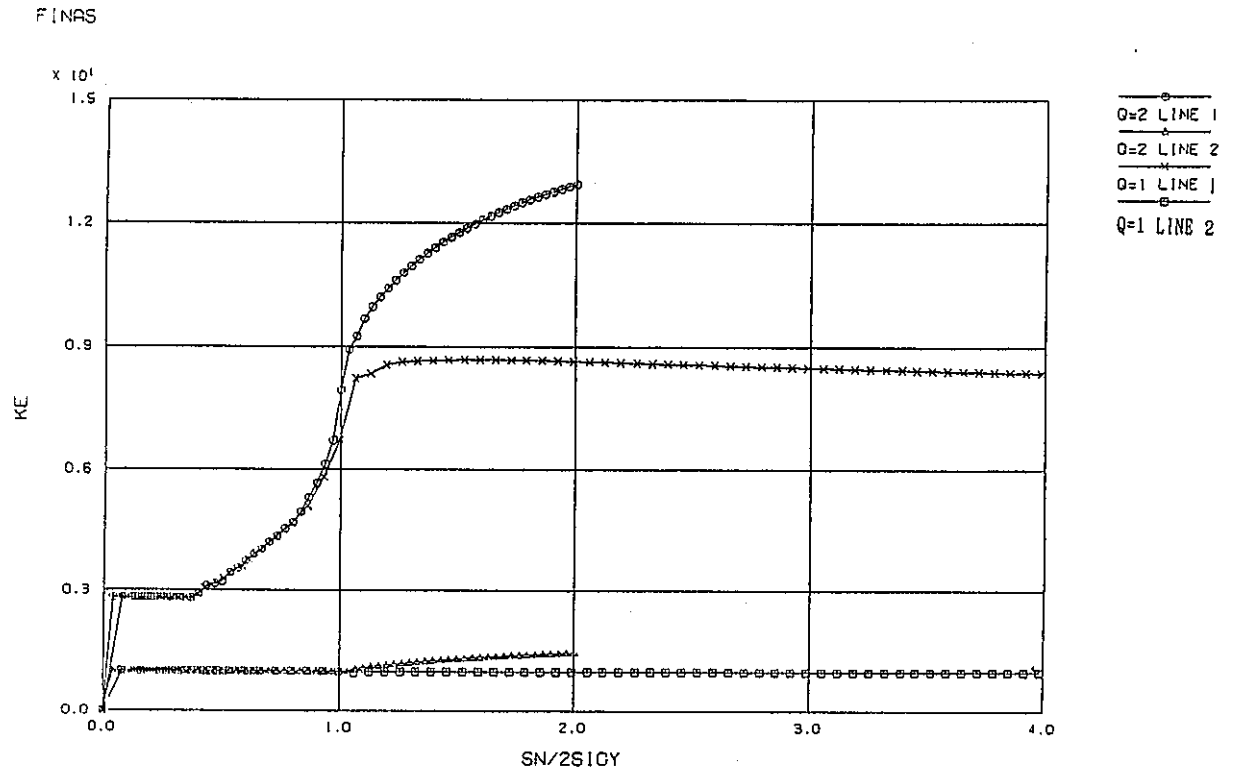


図 4.4.2.7 ひずみ集中係数の履歴 (CASE3-1-M, CASE3-6-M)

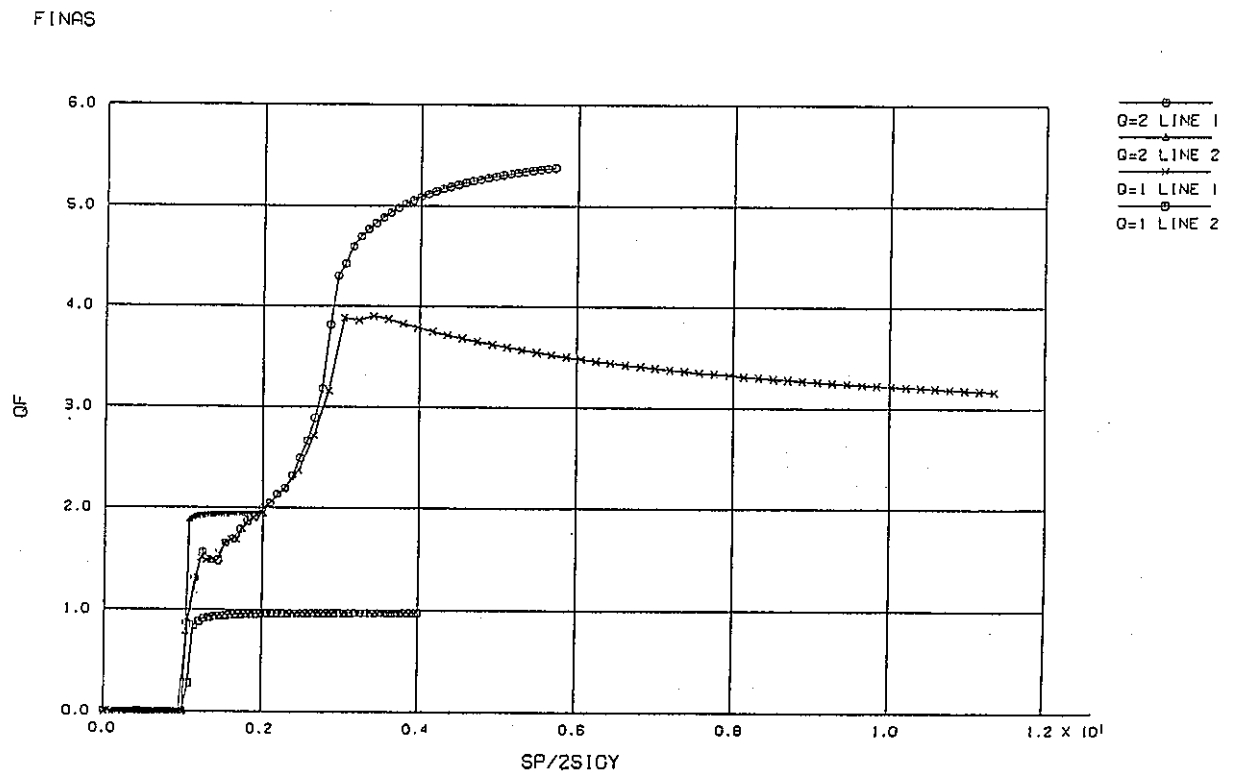


図 4.4.2.8 弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-1-M, CASE3-6-M)

FINAS

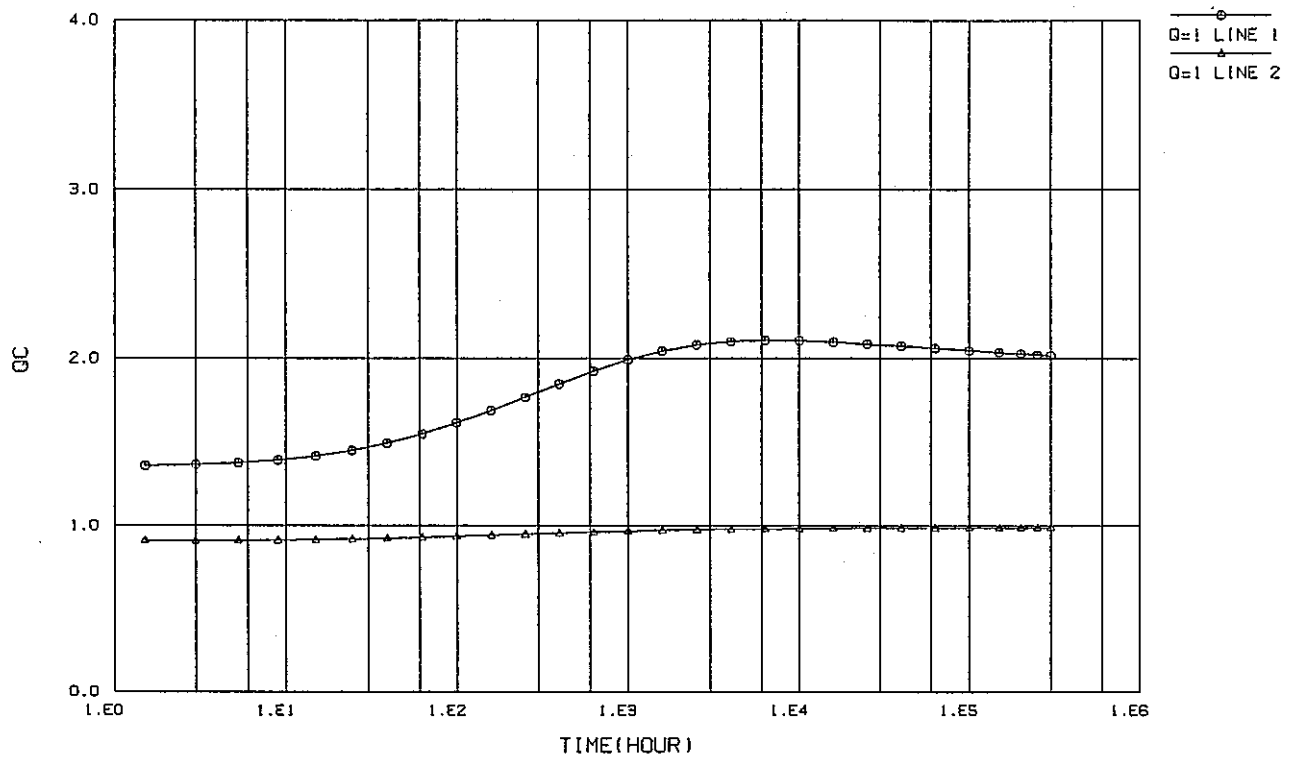


図4.4.29 (a) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-9-M)

FINAS

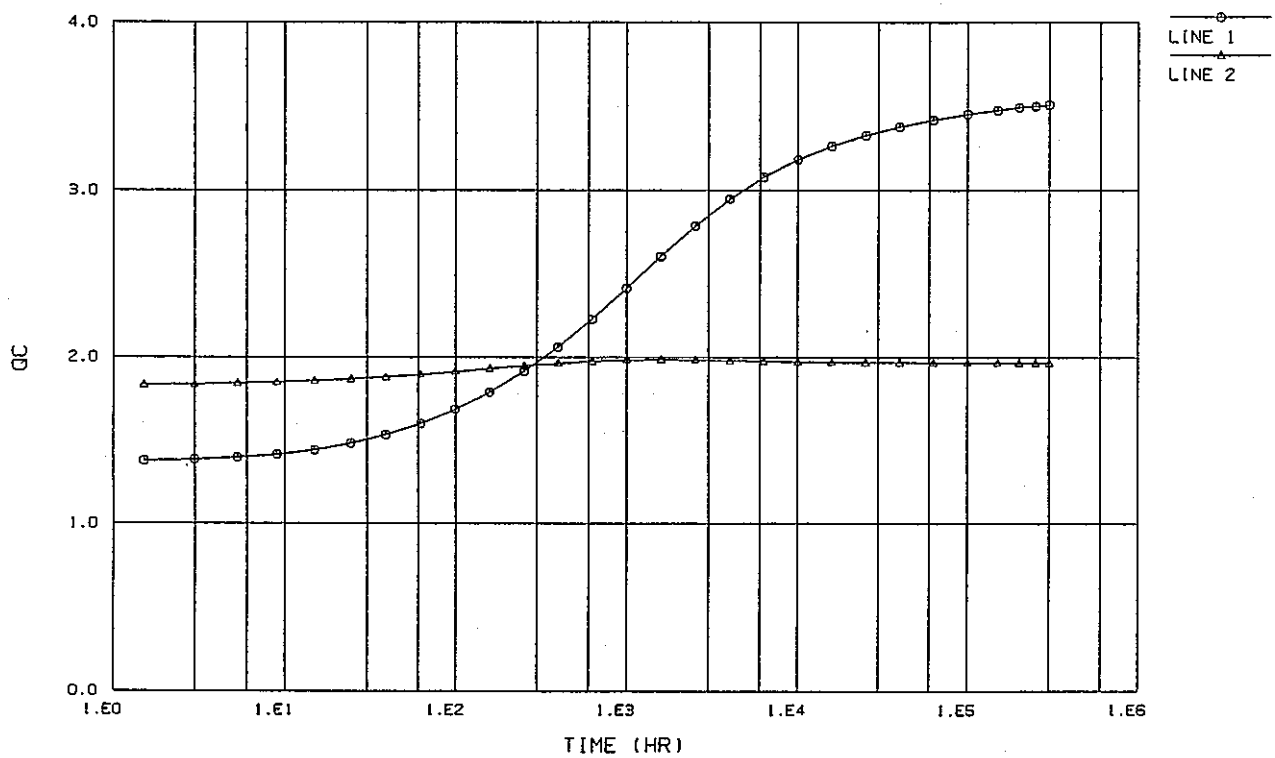


図4.4.29 (b) クリープ弾性追従パラメータの履歴 (CASE3-10-M)

4. 4. 5 引張りクリープによる弾塑性挙動

(1) 目的

総体的弾性追従パラメータ $q = \infty$ に相当する引張りクリープ（荷重一定）下における応力及びひずみ集中挙動を把握する。

(2) 方法

以下に示す条件の基で引張りクリープ解析を行い応力及びひずみ集中挙動を検討する。さらに応力緩和との比較を行う。

1) 弾性クリープ解析（弾性＋ノルトン則） CASE 3-12-M

・弾性

$$\text{縦弾性係数} \quad E = 16200 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{ポアソン比} \quad \nu = 0.3$$

・ノルトン則 $\dot{\epsilon}_c = B \sigma^n$

$$B = 1.0 \times 10^{-13}$$

$$n = 5.0$$

2) 弾塑性クリープ解析（n乗硬化則＋ノルトン則） CASE 3-13-M

・n乗硬化則（多直線近似）

$$\text{縦弾性係数} \quad E = 16200 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{ポアソン比} \quad \nu = 0.3$$

$$\text{降伏応力} \quad \sigma_y = 1 \text{ kg/mm}^2$$

$$\epsilon_p = B (\sigma - 1)^n$$

・ノルトン則 $\dot{\epsilon}_c = B \sigma^n$

$$B = 1.0 \times 10^{-13}$$

$$n = 5.0$$

3) 負荷条件及び解析時間

クリープ解析では、評価点2（平滑部）の応力が 20 kg/mm^2 になるように負荷をかけ続けた。

解析時間は 1.0×10^4 時間である。

(3) 結果

① 応力・ひずみ関係の比較

図4.4.30に弾性クリープ解析とn乗硬化則を用いた弾塑性クリープ解析の場合の応力集中部（評価点1）及び平滑部（評価点2）での応力・ひずみ関係を示す。横軸は相当ひずみ増分で縦軸は相当応力増分である。図より以下のことがわかる。

○弾性クリープ解析の場合、約1000時間までは急激な応力の低下が見られるがそれ以降ではほぼ一定値となる。

○弾塑性クリープ解析の場合、応力の低下は僅かでありクリープ開始後まもなく一定値に集束する。

○弾性クリープ解析と弾塑性クリープ解析とでは応力の最終値は一致する。

○弾塑性クリープ解析の方が弾性クリープ解析に比べ最終的には50%近くひずみ増分が大きくなっているが、クリープ開始時点からのひずみ増分はほぼ等しくなる。

②引張りクリープ解析 (CASE3-12-M) と応力緩和解析 (CASE3-9-M) との対比

図4.4.31に引張りクリープ解析 (弾性クリープ) の場合と応力緩和解析 (弾性クリープ) の場合のひずみ集中挙動を示す。また、図にはn乗硬化則を用いた弾塑性クリープ解析 (CASE3-13-M) のひずみ集中挙動も示してある。縦軸、横軸の定義を以下に示す。

1) 引張りクリープ解析 (CASE3-12-M)

縦軸 $K\varepsilon$: $(\varepsilon_1 / \varepsilon_{eq1})$

ε_1 : 評価点1の相当ひずみ (非弾性解析)

ε_{eq1} : 評価点1の膜+曲げひずみ (非弾性解析)

横軸 σ_i / σ_r

σ_i : 評価点1の緩和開始時に対応する応力 (弾性解析)

σ_r : 評価点1の相当応力 (非弾性解析)

2) 応力緩和解析 (CASE3-9-M)

縦軸 $K\varepsilon$: $(\varepsilon_t / \varepsilon_0) \times A_r$ ($A_r = A_1 / A_2$)

ε_t : 評価点1の全ひずみ (非弾性解析)

ε_0 : 評価点2の初期ひずみ (弾性解析)

A_1 : 評価ライン1の断面積

A_2 : 評価ライン2の断面積

横軸 σ_i / σ_r

σ_i : 評価点1の緩和開始時に対応する応力 (弾性解析)

σ_r : 評価点1の相当応力 (非弾性解析)

図より以下のことがわかる。

○引張りクリープ解析と応力緩和解析のひずみ集中は初期にはほぼ同様な挙動を示すが、負荷の増加に伴い引張りクリープ解析の方が応力緩和解析を上回る。

○ひずみ集中係数の集束値は応力緩和解析の方が大きな値となる。

○n乗硬化則を用いた弾塑性クリープのひずみ集中係数は、n乗硬化則想定弾塑性解析 (CASE3-3-M) におけるひずみ集中係数とほぼ等しい値となる。

③応力緩和挙動に及ぼす総体的弾性追従パラメータの影響

総体的弾性追従パラメータ $q = 1, 2$ (CASE3-9-M, CASE3-10-M) の比較は4.4.4節で述べたがここでは総体的弾性追従パラメータ $q = \infty$ に相当する引張りクリープと合わせて応力緩和挙動について検討を行う。図4.4.32に総体的弾性追従パラメータ $q = 1, 2, \infty$ の場合の応力緩和挙動を示す。図より以下のことがわかる。

○クリープ開始直後の応力・ひずみ挙動は総体的弾性追従パラメータ q の影響を受けない。

○応力緩和時のひずみ増大挙動より、局所的構造不連続に総体的構造不連続が重畳していることがわかる。

(4) まとめ

総体的弾性追従パラメータ $q = \infty$ に相当する引張りクリープ下における応力及びひずみ集中挙動を検討し、さらに応力緩和との比較を行った結果をまとめると以下になる。

- 応力緩和開始直後の応力・ひずみ挙動は総体的弾性追従パラメータ q には依存しないが、最終的には各総体的弾性追従パラメータごとに定常状態に落ち着く。
- 材料特性として n 乗則（ノルトン則， n 乗硬化則）を仮定すると、応力緩和解析と弾塑性解析とで類似性が認められ応力緩和解析と弾塑性解析の統一的な取扱いが期待できる。

FINAS

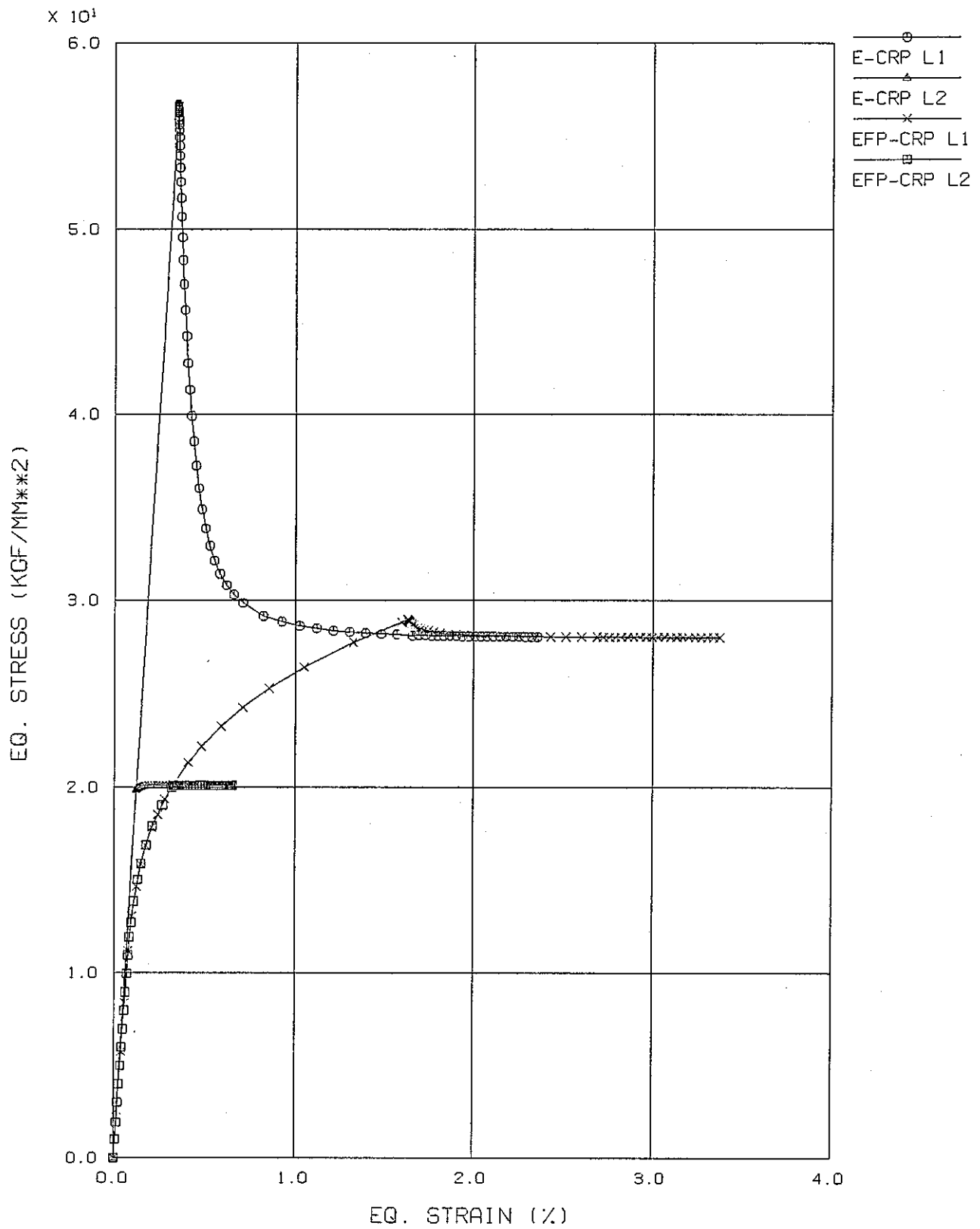


図 4.4.30

相当応力・相当ひずみの履歴 (CASE3-12-M, CASE3-13-M)

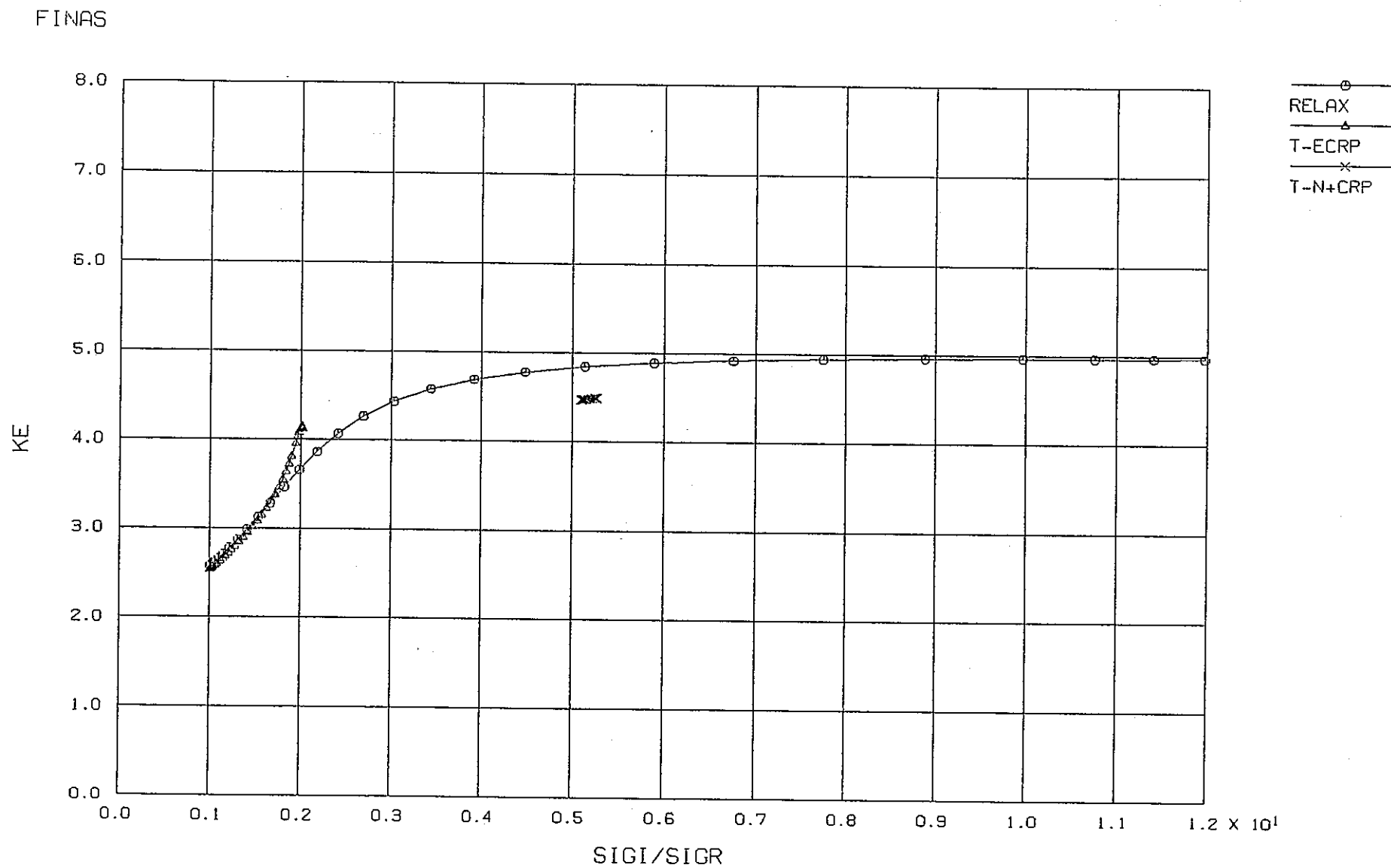


図 4.4.3 1

ひずみ集中係数の比較

(CASE3-7-M, CASE3-12-M, CASE3-13-M)

FINAS

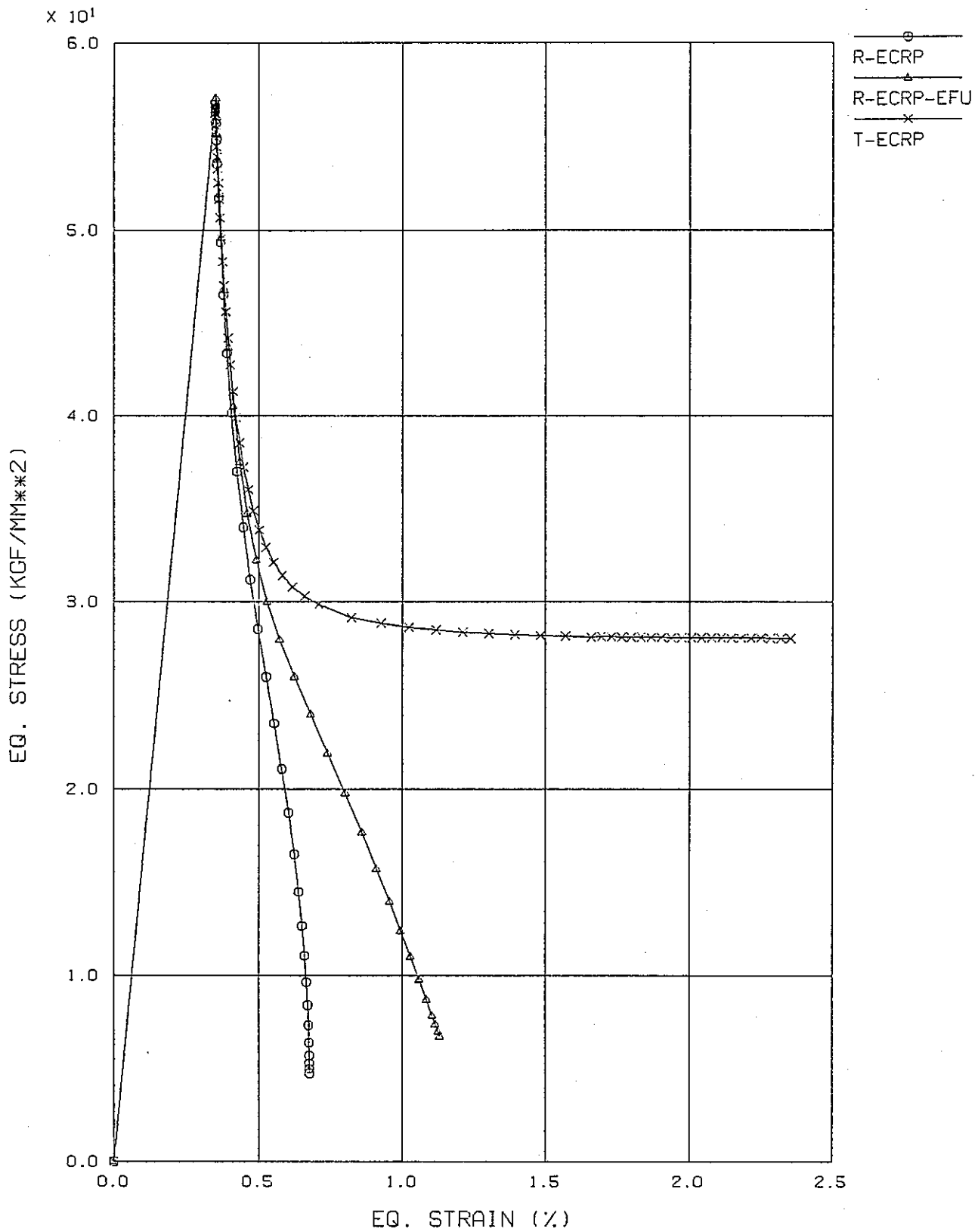


図 4.4.3 2

相当応力・相当ひずみの履歴

(CASE3-9-M, CASE3-10-M, CASE3-12-M)

4. 5 考察

4. 5. 1 ひずみ範囲評価法の検討

(1) 目的

クリープ疲労損傷評価に用いるひずみ範囲評価法について、切欠き付き丸棒のひずみ集中と現行設計基準とを比較検討することにより、現行設計基準におけるひずみ範囲評価法の合理化について検討する。

(2) 方法

前述の解析結果より切欠き付き丸棒のひずみ集中はノイバー型の挙動を示すことがわかった。そこで前述解析より得られたひずみ集中係数と現行設計基準で用いられているノイバー則及び弾性追従パラメータを用いたひずみ集中係数を比較し、その包絡性を調べることににより対象モデルに対するひずみ範囲評価法の合理化についての検討を行う。

①ノイバー則

弾完全塑性体想定 of ノイバー則について以下に示す。

$$\varepsilon_t = K \varepsilon \cdot \varepsilon_n$$

$$K \varepsilon = (S^* / S) K^2, \quad K = S_p / S_n \text{ (弾性応力集中係数)}$$

ここで

ε_t : 全ひずみ

$K \varepsilon$: ひずみ集中係数

ε_n : S_n / E

$$S^* = E \varepsilon_n \quad \varepsilon_n \leq 2 \sigma_y / E$$

$$2 \sigma_y \quad \varepsilon_n > 2 \sigma_y / E$$

$$S = K E \varepsilon_n \quad K \varepsilon_n \leq 2 \sigma_y / E$$

$$2 \sigma_y \quad K \varepsilon_n > 2 \sigma_y / E$$

なお、FEM解析では単調負荷で行ったため $2 \sigma_y$ として σ_y の値を用いる。

②弾性追従パラメータ q によるひずみ集中係数の定義を以下に示す。

$$\varepsilon_t = K \varepsilon \cdot \varepsilon_n$$

$$K \varepsilon = K K e'$$

$$K e' = 1 + (q - 1) (1 - 3 \overline{S_m} / S_n)$$

ここで

q : 弾性追従パラメータ

$3 \overline{S_m}$: シェイクダウン基準値 $2 \sigma_y$

S_n : 応力強さ範囲

③現行設計基準

$$K_{\varepsilon} = \text{Max} \{ (S^* / S) K^2, K K e' \}$$

④局所的構造不連続と総体的構造不連続の重畳効果の乗算型（設計基準高度化案）

$$K_{\varepsilon} = (S^* / S) K^2 \times K e'$$

（３）結果

切欠き付き丸棒（総体的弾性追従 $q = 1, 2$ ）のひずみ集中係数と現行設計基準で用いられているノイバー則及び弾性追従パラメータによるひずみ集中係数とを比較したものを図4.5.1に示す。弾性追従パラメータの値として現行規定値（ $q = 3.0$ ）のほかに $q = 2.0$ 、 $q = 2.5$ の場合も示してある。また図にはノイバー則と弾性追従パラメータによるひずみ集中係数の積 $K_{\varepsilon} = (S^* / S) K^2 \times K e'$ の値も示してある。図より以下のことがわかる。

- 弾完全塑性体想定 of ノイバー則を用いることにより全断面降伏までのひずみ集中挙動は包絡できる。
- 全断面降伏以降ではノイバー則より高い値を示すが概ね推定できる。
- 局所的構造不連続と総体的構造不連続の重畳効果は両者の乗算型にすることにより推定することが可能となる。
- 重畳効果を乗算型とした場合の弾性追従パラメータの値として、総体的弾性追従パラメータ値 $q = 2.0$ を用いると多少低めの値となるが概ね推定できる。推定値が低めになっているのはノイバー則による推定分が多少低めになっていることが原因と考えられる。
- 実際の構造材料ではある程度加工硬化が期待できることから弾完全塑性体を仮定した場合の挙動が概ね推定できれば設計係数としては保守的な値となると考えられる。

（４）まとめ

前述の解析結果と現行設計基準で用いられているノイバー則及び弾性追従パラメータを用いたひずみ集中係数とを比較し対象モデルに対するひずみ範囲評価法について検討を行った結果をまとめると以下のようになる。

- 切欠き付き丸棒のひずみ集中挙動における局所的構造不連続と総体的構造不連続の重畳効果は両者の乗算型となる。
- $K e'$ に用いる弾性追従パラメータとして $q = 3$ のかわりに総体的な弾性追従パラメータ値を用いることができる。

FINAS

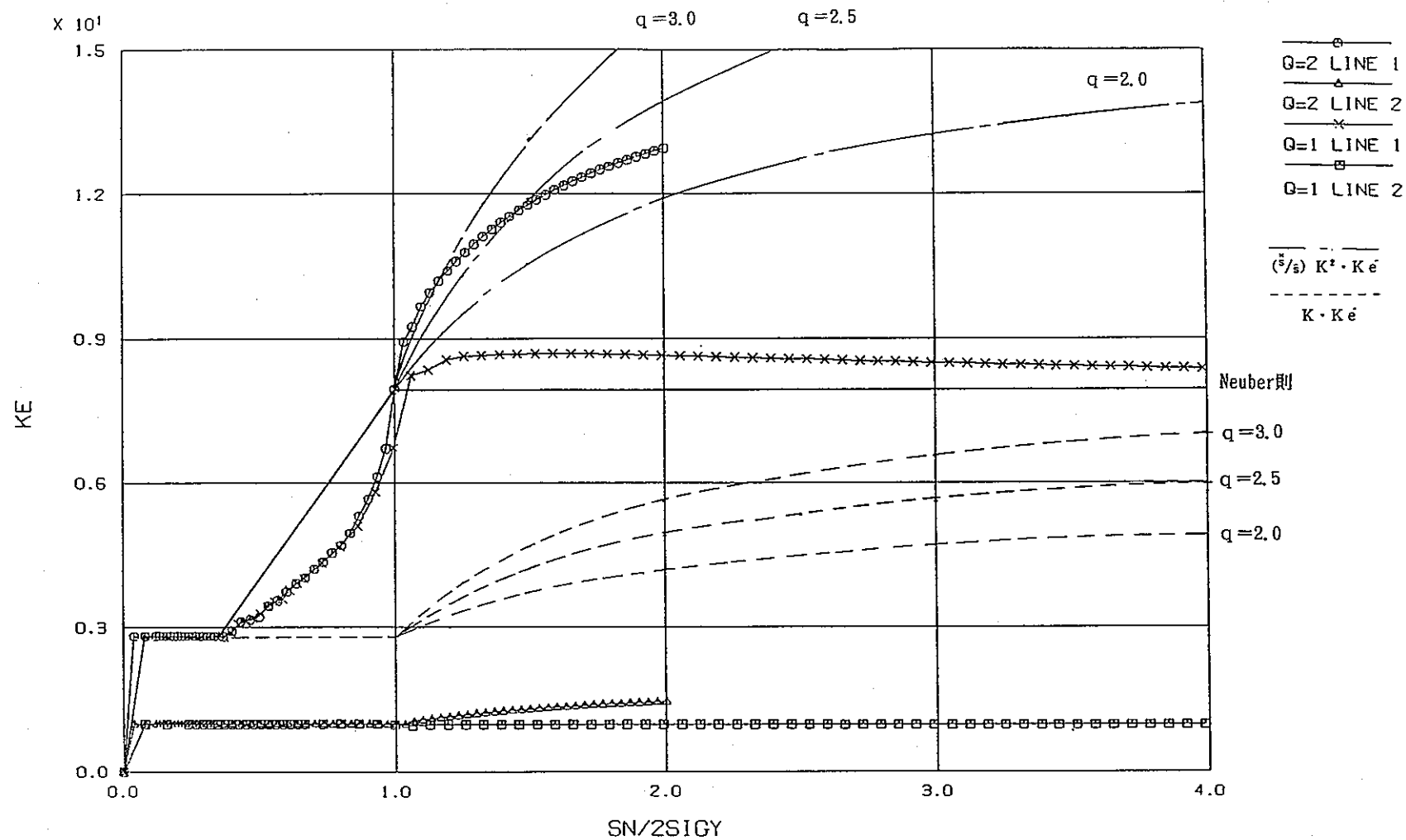


図 4.5.1

ひずみ集中係数の設計係数による包絡
(切欠き付き丸棒)

4. 5. 2 応力緩和時のひずみ増大挙動の検討

(1) 目的

クリープ疲労損傷評価に用いる応力緩和評価法について、切欠き付き丸棒の応力緩和時のひずみ増大挙動と弾性追従パラメータを用いたひずみ増大挙動を比較することにより応力緩和評価法の合理化について検討する。

(2) 方法

前述の解析結果における切欠き付き丸棒の応力緩和時のひずみ増大挙動とクリープ弾性追従パラメータ q_0 を用いたひずみ増大挙動とを比較し、その包絡性を調べることにより対象モデルに対する応力緩和評価法合理化のための検討を行う。

弾性追従パラメータ設定について以下に示す。

1) クリープ弾性追従パラメータ q_0

$$q_0 = 2.0, 2.5, 3.0$$

2) 等価弾性追従パラメータ q_0

弾性応力集中係数と総体的弾性追従パラメータを用いて以下の式より算出される弾性追従パラメータを等価弾性追従パラメータ q_0 とする。詳細は参考文献(7)を参照されたい。

$$q_0 = q \times K^{3/4} \quad (4.6)$$

ここで q : 総体的弾性追従パラメータ

K : 弾性応力集中係数

(3) 結果

切欠き付き丸棒(総体的弾性追従 $q = 1, 2$)の応力緩和時のひずみ増大挙動と弾性追従パラメータによるひずみ増大挙動を比較したものをも図4.5.2, 図4.5.3に示す。

○総体的弾性追従パラメータ $q = 1$ の場合、 $q_0 = 2.5, 3.0$ では過度に保守的な評価となる。平均的な挙動は $q_0 = 2.0$ で推定できる。

○総体的弾性追従パラメータ $q = 2$ の場合、 $q_0 = 3.0$ でも長時間側までは包絡できない。

○弾性応力集中係数と総体的弾性追従パラメータによる等価弾性追従パラメータ q_0 を用いることにより総体的弾性追従の差異によらず適度に包絡できる。

(4) まとめ

前述の解析結果と弾性追従パラメータを用いたひずみ増大挙動を比較し対象モデルに対する応力緩和評価法について検討を行った結果をまとめると以下ようになる。

○応力緩和時のひずみ増大挙動は、系の総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータ q 、弾性応力集中係数 K による等価弾性追従パラメータ $q \times K^{3/4}$ を用いることにより保守的に包絡することができる。

○応力緩和開始時点の初期応力の設定に留意する必要がある。

FINAS

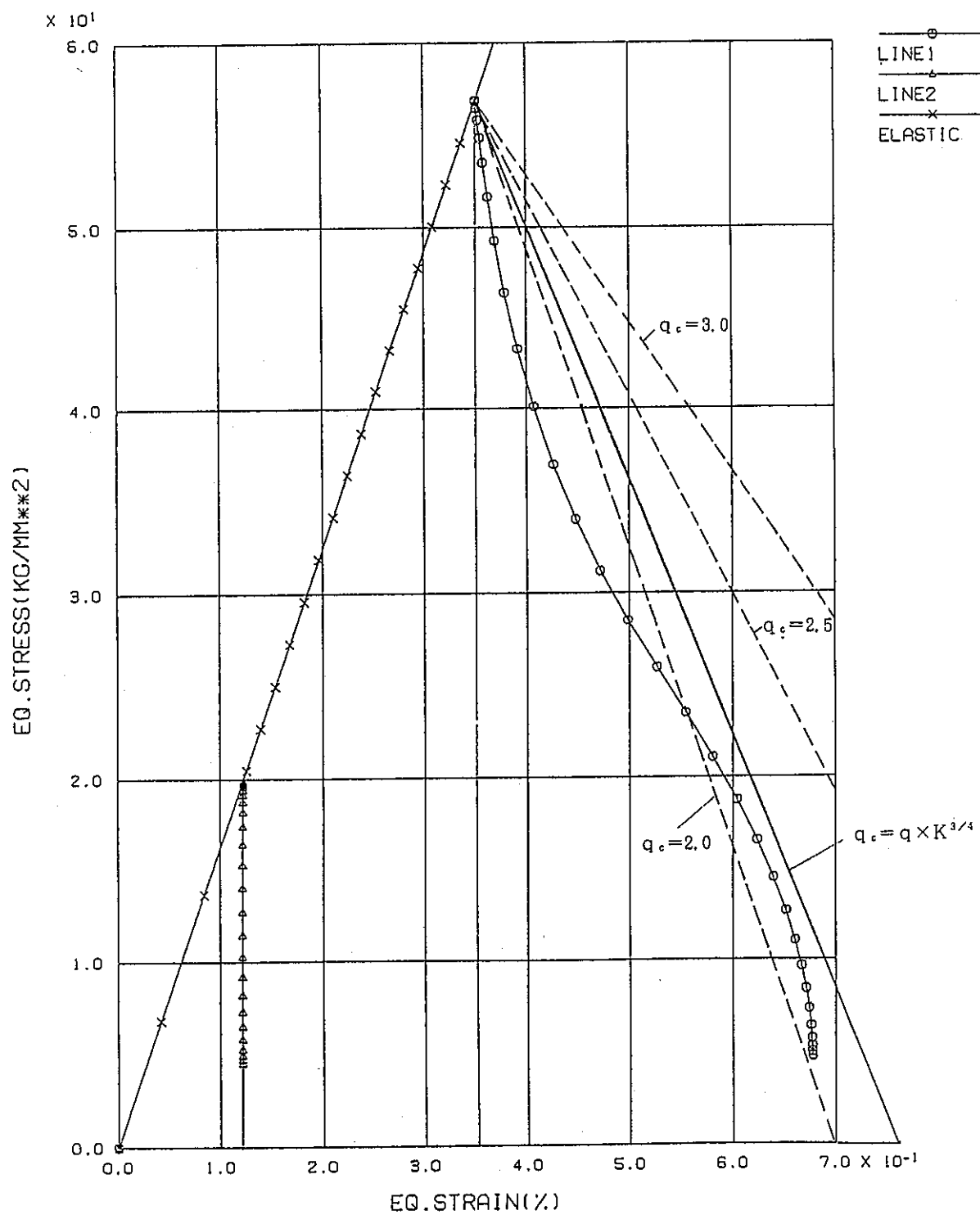


図 4.5.2

応力緩和挙動の設計係数による包絡 ($q=1$)
(切欠き付き丸棒)

FINAS

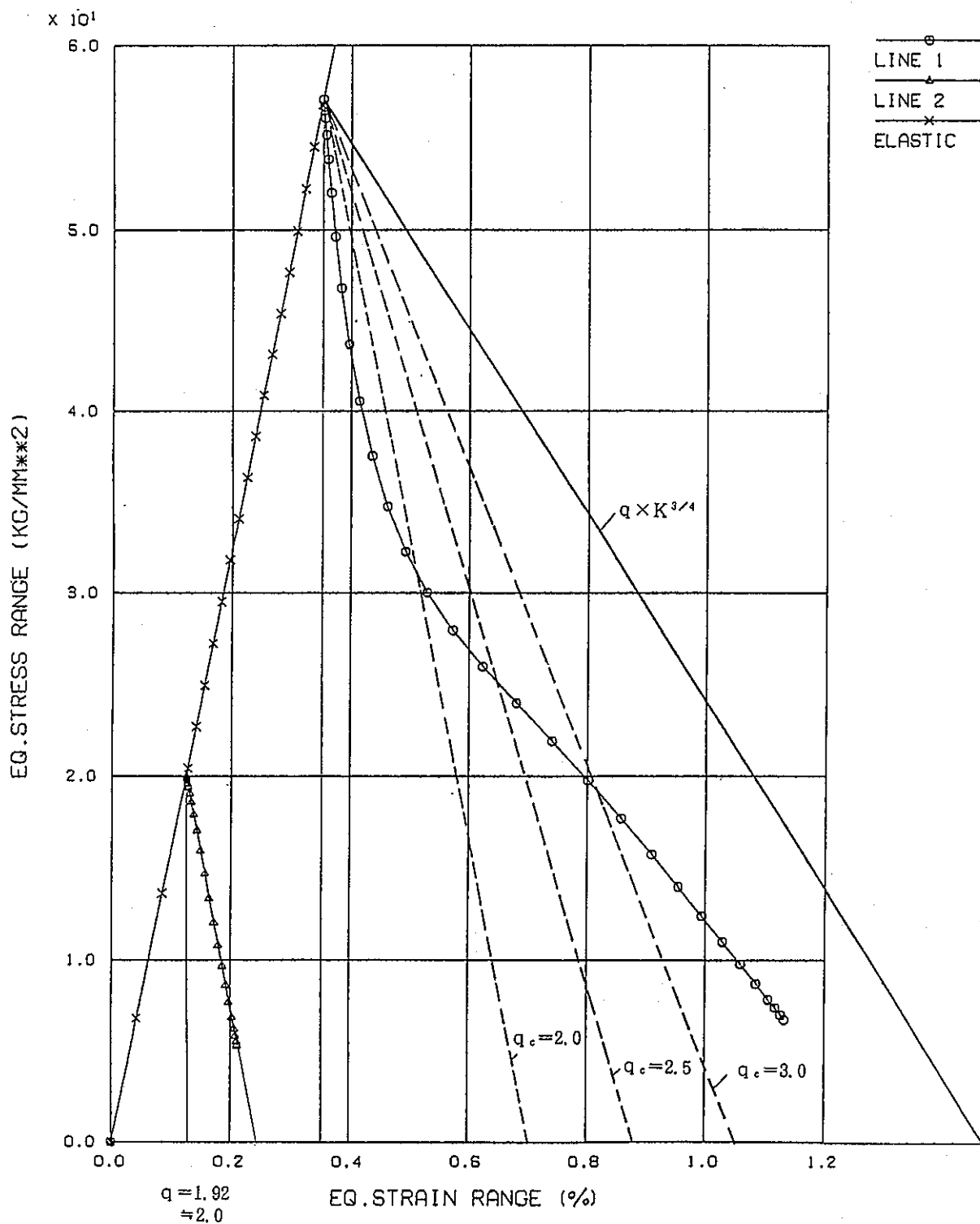


図 4.5.3

応力緩和挙動の設計係数による包絡 ($q=2$)
(切欠き付き丸棒)

4. 6 まとめ

総体的構造不連続部に局所的構造不連続部が重畳する切欠き付き丸棒を用いて、構造不連続部におけるひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に対する形状、負荷、材料特性因子の影響を調べ、クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の形態把握と設計係数策定のための非弾性解析手法の検討を行った結果をまとめると以下ようになる。

- 断面全体が降伏すると応力集中部におけるひずみ集中は一層著しくなることから、切欠き付き丸棒のひずみ集中挙動における局所的構造不連続と総体的構造不連続の重畳効果は両者の乗算型となる。
- 応力緩和挙動時のひずみ増大挙動は、系の総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータ q 、弾性応力集中係数 K による等価弾性追従パラメータ $q \times K^{3/4}$ を用いることにより保守的に包絡することができる。
- 上記の挙動を示す構造をタイプ I と呼ぶ。

なお、参考のためにリファレンス条件に対する各因子の影響を表 3. 3 にまとめた。表中で局所的構造不連続、総体的構造不連続、重畳はそれぞれ評価点 1 の初期応力、評価点 2 の挙動、評価点 1 の後期挙動に対応する。

表 4. 2 切欠き付き丸棒における因子の影響度のまとめ

		局 所 的 構 造 不 連 続	総 体 的 構 造 不 連 続	重 量
弾 塑 性	加工硬化	$K \varepsilon$ 低下	影 響 小	$K \varepsilon$ 低下
	切欠形状鈍	$K \varepsilon$ 低下	影 響 小	$K \varepsilon$ 低下
	総体的 q	$K \varepsilon$ 微増	$K \varepsilon$ 増大	$K \varepsilon$ 増大
応 力 緩和	(初期工応硬化)	—	影 響 小	影 響 小
	切欠形状鈍	q_c 低下	q_c 微減	q_c 低下
	総体的 q	影 響 小	q_c 増大	q_c 増大

5 . 結 言

総体的構造不連続部に局所的構造不連続部が重畳するフィレット付き帯板及び切欠き付き丸棒を用いて、構造不連続部におけるひずみ集中挙動及び応力緩和挙動に対する形状、負荷、材料特性因子の影響を調べ、クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の形態把握と設計係数策定のための非弾性解析手法の検討を行った結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 切欠き付き丸棒の場合（タイプⅠ）とフィレット付き帯板又はフィレット付き変断面丸棒の場合（タイプⅡ）とでは応力集中部のひずみ挙動が異なる。タイプⅠでは弾塑性変形について断面全体が降伏した場合、ひずみ集中が一層著しくなり、ひずみ範囲の増大挙動は、局所的構造不連続効果を表すひずみ集中係数と総体的構造不連続効果を表すひずみ集中係数の乗算型で包絡される。タイプⅡではひずみ集中が低減する傾向が示され、ひずみ範囲の増大挙動は両者の最大値の使用で包絡できる。
- (2) 応力緩和挙動について、系の総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータを q 、弾性応力集中係数を K とするとタイプⅠでの応力緩和時のひずみ増大挙動は等価弾性追従パラメータ $q \times K^{3/4}$ で包絡できる。一方、タイプⅠの場合は q をそのまま使用可能と期待される。
- (3) 合理的かつ保守的な弾性追従パラメータは、材料特性として弾完全塑性体を想定することにより算出される見通しを得た。

今後は、Yピース構造、ノズル構造等実機の代表的な構造、負荷についてタイプの分類、設計係数の定量化等を行う予定である。

謝 舌辛

本検討を進めるにあたり材料開発室 香川裕之氏、浅山泰氏、構造工学室渡士克己氏、笠原直人氏、(株)エイ・ティ・エス 古橋一郎氏には有益なご意見を頂きました。また、センチュリーリサーチセンタ(株) 吉田博治氏には多くの解析を精力的に進めて頂きました。

ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 永田、「高速炉用高温構造設計基準(案)」、PNC SN9410 88-074、
1988年6月
- (2) 永田、「高速炉用高温構造設計基準(案)解説」、PNC SN9410 88-074、
1988年6月
- (3) 谷川他、「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅱ)原子炉容器液面近傍縦
溶接継手の解析(2)」、PNC SN9410 88-081、1988年6月
- (4) 霜越他、「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅱ)
周溶接継手の解析(1)」、PNC SN9410 88-128、1988年9月
- (5) 「汎用非線形構造解析システム FINAS 使用説明書 VERSION10.0」、PNC N9520
87-004、1987年9月
- (6) KOM-MSSワーキング・グループ、「高速増殖炉高温構造設計基準材料強度基
準等の高度化に関する検討報告(Ⅰ)」、PNC SN9410 88-105、1988年4月
- (7) 谷川他、「クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数に係わる解析 第2報 応力緩
和評価に用いる設計係数の検討」、PNC SN9410 89-XXX、1989年6月
- (8) 構造工学室・設計基準Gr、「溶接継手クリープ疲労強度評価法の開発 関連技術
資料のまとめ(1)」、PNC 194310 89-003、1989年4月
- (9) 山里他、「原型炉一次冷却配管の信頼性に関する研究、
配管系簡易非弾性解析(第三報)」、PNC SN941 80-43、1980年4月

付 録

A. 1 降伏応力 σ_y の影響

A. 1. 1 目的

材料特性として弾完全塑性体を想定した場合、降伏応力の違いがひずみ集中挙動に及ぼす影響を調べる。

A. 1. 2 方法

降伏応力 $\sigma_y=30\text{kg/mm}^2$ であるリファレンス(CASE3-1-M)と降伏応力 $\sigma_y=20\text{kg/mm}^2$ の場合(CASE3-2-M)のひずみ集中挙動を比較する。解析条件を以下に示す。

1)解析モデル

切欠き付き丸棒(図4.2.1参照)

2)材料特性

弾完全塑性体

・CASE3-1-M $\sigma_y=30\text{kg/mm}^2$

・CASE3-2-M $\sigma_y=20\text{kg/mm}^2$

3)負荷

軸方向引張り(膜応力場)

A. 1. 3 結果

弾完全塑性体想定で降伏応力の異なる場合の応力集中部(評価点1)におけるひずみ集中挙動について比較したものを図A.1.1に示す。図で横軸は弾性解析により得られた評価点2の相当応力増分を降伏応力で無次元化したものであり、縦軸は相当ひずみ増分を降伏ひずみで無次元化したものである。図より以下のことがわかる。

○平滑部(評価点2)降伏直後まではひずみ増大率は増加するが、それ以降では一定値となる。

○降伏応力 σ_y が異なっても、応力増分及びひずみ増分を無次元化することにより応力集中部(評価点1)のひずみ集中挙動は同一となる。

A. 1. 4 まとめ

材料特性として弾完全塑性体を想定した場合、降伏応力の違いがひずみ集中挙動に及ぼす影響を調べ結果をまとめると以下ようになる。

○弾完全塑性体を想定した場合、降伏応力 σ_y が異なる場合のひずみ集中挙動は相似となり、応力増分及びひずみ増分を無次元化することにより1つに表わし得る。

○本報告書では弾完全塑性体を想定する場合、以下に示すように0.2%ひずみに相当する応力を降伏応力とする。

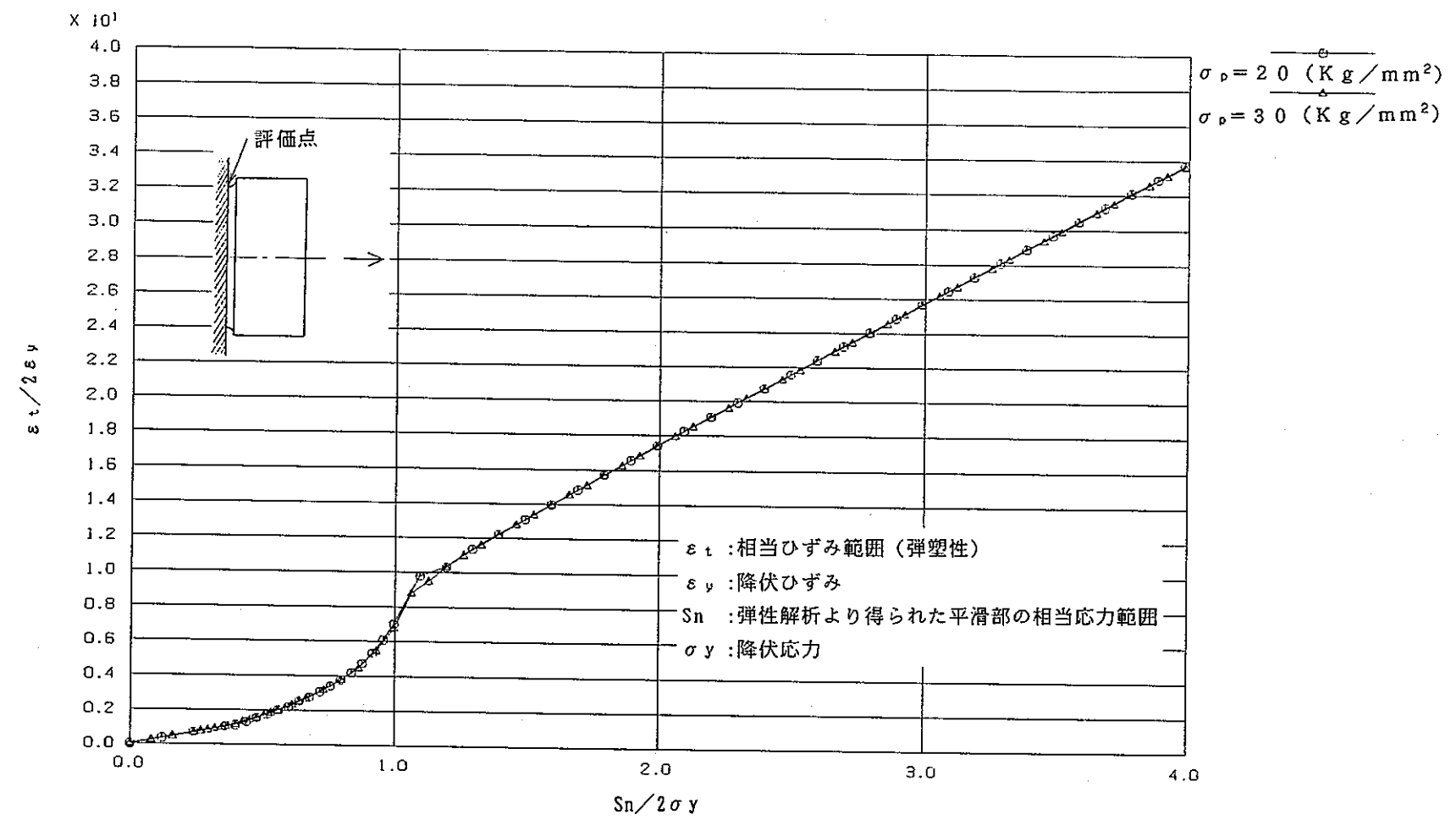
・フィレット付き帯板及びフィレット付き変断面丸棒

降伏応力 $\sigma_y=32\text{kg/mm}^2$

・切欠き付き丸棒

降伏応力 $\sigma_y=30\text{kg/mm}^2$

FINAS



EQ. STRAIN RANGE HISTORY (CASE ROW/D=1.0)

切欠付き丸棒

図A.1.1 降伏応力の影響 (CASE3-1-M, CASE3-20-M)

A. 2 単調負荷と繰り返し負荷の比較

A. 2. 1 目的

単調負荷と繰り返し負荷の違いがひずみ集中挙動に及ぼす影響を調べ、単調負荷による解析の妥当性について調べる。

A. 2. 2 方法

負荷として1サイクルを実施し、1/4サイクルにおけるひずみ増分と1サイクルにおけるひずみ範囲の半分を比較する。

1) 解析モデル

切欠き付き丸棒 (図4.2.1参照)

2) 材料特性

弾完全塑性体

3) 負荷 (軸方向変位)

- ・ 単調負荷 (1/4 サイクル)
- ・ 繰り返し負荷 (1 サイクル) --- 両振り

A. 2. 3 結果

図A.2.1に1サイクル負荷をかけた場合の評価点1 (応力集中部) における軸方向応力・軸方向ひずみの関係を示す。図で縦軸は応力、横軸はひずみである。図より以下のことがわかる。

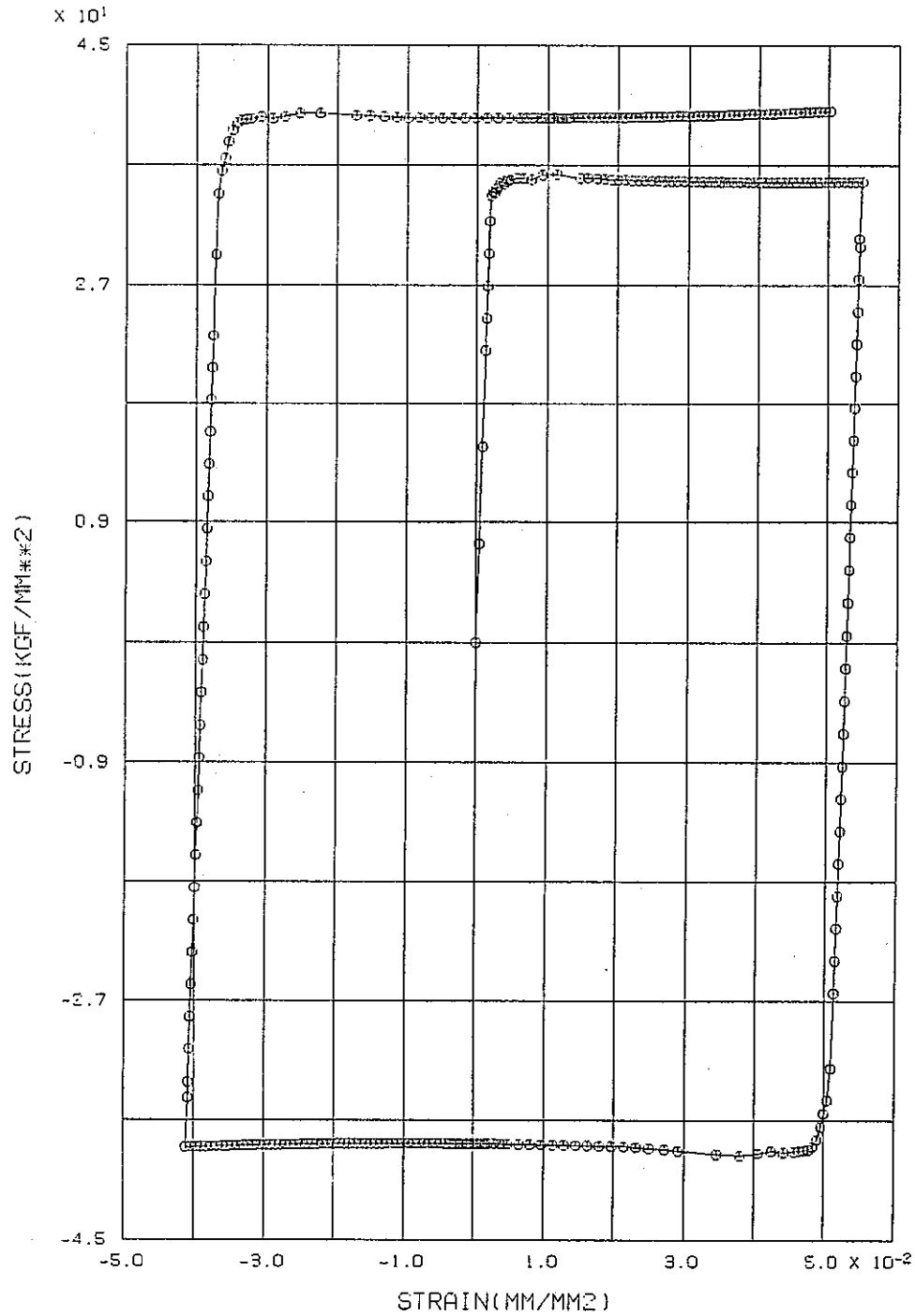
- 単調負荷 (1/4 サイクル) の場合のひずみ増分は繰り返し負荷 (1 サイクル) の場合のひずみ範囲の半分に比べると10%程度大きめとなるが、負荷サイクルは充分閉じていると考えられる。

A. 2. 4 まとめ

単調負荷と繰り返し負荷の違いがひずみ集中挙動に及ぼす影響を調べた結果をまとめると以下のようなになる。

- 負荷サイクルは充分閉じていると考えられ、また単調負荷 (1/4 サイクル) の方が繰り返し負荷 (1 サイクル) 大きめのひずみとなることより保守的になると考えられる。
- 本報告書では負荷サイクルとして1/4サイクルを実施する。

FINAS



CASE-EP-ROW/D=1.0 STRESS-STRAIN-CURVE E1-3

図A.2.1

単調負荷と繰返し負荷の比較