

分置

316FR溶接継手の強度評価法の開発

— 第1報 力学モデルの開発 —

1996年1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)

316FR溶接継手の強度評価法の開発

—第1報 巨視的応力・ひずみ集中に基づく評価—

浅山 泰、長谷部 慎一*

要　　旨

高速炉の大型化に伴い、原子炉容器液面近傍等のクリープ疲労損傷の厳しい部位にも溶接継手の適用範囲を拡大し、高価な鍛鋼品の使用を避けることにより経済性を向上させることが必要となる。このため著者等は溶接継手のクリープ疲労評価法の開発を進めている。本報では大型高速炉の有力候補材料である316FRの溶接継手について、疲労およびクリープ疲労下の破損位置と破損寿命の予測モデル（「3要素モデル」）を開発した。このモデルを用いて小型丸棒試験片、大型丸棒試験片（いずれも機械負荷）および熱過渡試験片の疲労およびクリープ疲労の破損位置と破損寿命を予測し、破損位置についてはほぼすべての場合に正確な予測が可能であること、破損寿命についてはファクター3程度の精度で予測が可能であるが、やや危険側の評価となる傾向があることを明らかにした。さらに予測精度を向上するためには、予測に用いる溶接金属と熱影響部の低ひずみ範囲における動的応力ひずみ関係および溶接金属の低ひずみ範囲における疲労強度をさらに高精度化する必要がある。このためには低ひずみ範囲において溶接金属および熱影響部の高サイクル疲労試験を行う必要がある。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 構造・材料技術開発室

Creep-fatigue life prediction method of 316FR welded joints
-Part I Prediction based on macroscopic stress and strain concentration-

Tai ASAYAMA and Shinichi HASEBE*

Abstract

From the viewpoint of cost reduction, it is necessary to avoid using expensive forged rings by adapting weldments in the parts where relatively large creep-fatigue damage is expected such as the part of pressure vessel to which the sodium surface contacts. Therefore the authors have been developing a creep-fatigue life prediction method for weldments. This report presents the newly developed prediction method ('3-element model') which describes the creep-fatigue life as well as the location of failure for 316FR weldments which is a candidate material for large scale FBRs. It was shown that the model satisfactorily predicts the location of failure and that the prediction of life is possible within an accuracy of factor of 3 with a tendency of slight unconservatism for the results of mechanical fatigue/creep-fatigue tests with small and large specimens as well as for the thermal fatigue/creep-fatigue tests. Improvement of the accuracy of prediction is considered to be achieved by using more accurate dynamic stress-strain curve of weld metal and HAZ at lower strain range and more accurate fatigue strength of weld metal at lower strain range which are the base of the prediction. Thus fatigue tests of weld metal and HAZ at lower strain ranges are needed.

* Structure and Material Research Section, Advanced Technology Division, OEC

目次

| | |
|----------------------------------|----|
| 1. 緒言 | 1 |
| 2. 316FR溶接継手の破損位置と破損寿命 | 2 |
| 2. 1 溶接継手の仕様 | 2 |
| 2. 2 溶接金属の力学的特性 | 2 |
| 2. 3 溶接継手の疲労／クリープ疲労破損位置と寿命 | 2 |
| 3. 解析モデルおよび解析結果 | 3 |
| 3. 1 解析モデル | 3 |
| 3. 2 解析対象 | 3 |
| 3. 3 溶接金属と母材硬化部の材料特性 | 3 |
| 3. 4 解析方法 | 3 |
| 3. 5 解析結果 | 3 |
| 4. 考察 | 5 |
| 4. 1 破損位置と寿命の予測精度 | 5 |
| 4. 1. 1 予測精度 | 5 |
| 4. 1. 2 予測精度の評価 | 5 |
| 4. 2 予測精度を向上するために必要な事項 | 6 |
| 4. 2. 1 疲労寿命の予測精度向上 | 6 |
| 4. 2. 2 クリープ疲労寿命の予測精度向上 | 6 |
| 4. 2. 3 溶接金属の異方性 | 6 |
| 5. 結言 | 8 |
| 謝辞 | 9 |
| 参考文献 | 10 |

List of Tables and Figures

| | |
|---|----|
| Table 2.1 Chemical compositions of base and weld metals | 11 |
| Table 2.2 Mechanical properties used in the analysis | 12 |
| Table 3.1 Creep-fatigue life prediction results | 13 |
| Fig. 2.1 Creep strength, fatigue strength and creep-fatigue strength of 316FR weld metal | 14 |
| Fig. 2.2 Summary of creep-fatigue test results | 17 |
| Fig. 3.1 Dynamic stress-strain curve used in the analysis | 18 |
| Fig. 3.2 FEM mesh | 19 |
| Fig. 3.3 Strain distribution | 20 |
| Fig. 3.4 Stress distribution | 23 |
| Fig. 3.5 Distribution of fatigue damage | 26 |
| Fig. 3.6 Distribution of creep damage | 29 |
| Fig. 3.7 Result of life prediction using FEM2-and 3-element model | 32 |
| Fig. 4.1 Anisotropy of stress-strain response and fatigue strength of 316FR weld metal | 33 |

1. 緒言

高速炉の大型化に伴い、原子炉容器液面近傍等のクリープ疲労損傷の厳しい部位にも溶接継手の適用範囲を拡大し、高価な鍛鋼品の使用を避けることにより経済性を向上させることが必要となる。このため著者等はSUS304、改良9Cr-1Mo鋼などの構造材料の溶接継手のクリープ疲労評価法の開発を進めてきた[1-8]。本報では大型高速炉の有力候補材料である316FRの溶接継手について、まず小型および大型材料試験、厚肉円筒熱過渡試験の結果に基づき疲労およびクリープ疲労の破損メカニズムを明らかにすること、次に継手各部（母材、溶接金属、母材硬化部）の非弾性応力ひずみ応答の差異に起因するひずみと応力の集中という概念を基礎に試験片形状・寸法、負荷形態、負荷条件に依存せず破損位置と破損寿命を予測するための基礎的な力学モデルを開発すること、最後にこの基礎的なモデルの予測精度をさらに向上するために必要な課題を明らかにすることを目標とした。316FRの溶接継手のクリープ疲労強度評価法を最終的な形でまとめるためには、本報の検討を出発点としてさらに、力学モデルの高精度化、形状不連続との重畠効果、溶接金属の高温長時間使用にともなう組織の劣化による強度低下、余盛り形状によるひずみと応力の集中、残留応力が疲労およびクリープ疲労に与える影響等を別途評価し、ひとつの体系として組み上げる必要がある。これらは次報以降の課題となる。

2. 316FR溶接継手の破損位置と破損寿命

本章では、解析対象とした316FR溶接継手について試験条件と試験結果をまとめる[9-11]。

2. 1 溶接継手の仕様

供試材として用いた溶接継手は、316FRの狭開先TIG溶接継手で、溶接金属は共金系である。母材および溶接金属の化学成分を表2. 1に示す。

2. 2 溶接金属の力学的特性

溶接金属のクリープ強度、疲労強度、クリープ疲労強度を図2. 1に示す。

2. 3 溶接継手の疲労／クリープ疲労破損位置と寿命

試験は、小型丸棒試験（直径10mm、GL20mm、溶金/GL比約0.5）、大型丸棒試験（直径30mm、GL100mm、溶金/GL比約0.1）（以上単軸引張圧縮、550°C一定温度）、厚肉円筒熱過渡試験（外径93.5mm、内径53.5mm、内面に550°Cと300°Cのナトリウムをそれぞれ5時間、1時間交互に流す）である。小型丸棒試験ではGL内には溶接金属と母材硬化部のみが含まれる（溶接金属/GL比=0.5）。大型丸棒試験片ではこれに加えて母材一般部が含まれる（溶接金属/GL比=0.13、母材硬化部/GL比=0.28）。

これらの試験の破損位置は、小型丸棒試験は疲労、クリープ疲労とともに溶接金属、大型丸棒試験は疲労、クリープ疲労とともに母材、厚肉円筒熱過渡試験は溶接金属であった。

大型丸棒試験片の寿命を小型丸棒試験片の寿命と比較すると、疲労寿命は2倍程度、クリープ疲労寿命は同等程度となっている。

これらの試験結果を図2. 2に示す。

3. 解析モデルおよび解析結果

3. 1 解析モデル

316FR溶接継手について「3要素モデル」を開発した。これは、316FR溶接継手では、SUS304溶接継手とは異なり溶接熱影響部が母材に対して硬化するため、SUS304溶接継手について開発された「2要素モデル」では破損位置および寿命を妥当な精度で予測できないことを考慮し、「2要素モデル」に、母材硬化部を加えたものである。

3. 2 解析対象

小型材料試験片と大型材料試験片の疲労、クリープ疲労強度と熱過渡試験について解析を行なった。

3. 3 溶接金属と母材硬化部の材料特性

「3要素モデル」では、溶接金属と母材硬化部の材料特性（クリープ強度、クリープひずみ曲線、疲労強度、動的応力ひずみ関係）を与える必要がある。溶接金属については、クリープ試験と疲労試験の結果から平均傾向を求め、これを用いた。母材硬化部については、試験データがないことから、クリープ強度、クリープひずみ曲線、疲労強度については母材と同一と仮定した。これらをまとめて表2. 2に示す。動的応力ひずみ関係については、「3要素モデル」を用いて、溶接継手の動的応力ひずみ関係からFEM解析により推定した。解析に用いた動的応力ひずみ関係を図3. 1に示す。

3. 4 解析方法

「3要素モデル」を用いて試験片表面のMises型の応力分布とひずみ分布を求めた。これに基づきクリープ損傷と疲労損傷の分布を求め、これらの損傷の分布から疲労およびクリープ疲労の破損位置と破損寿命を評価した。

応力とひずみの分布はFEM(FINAS)を用いて解析した。いずれの試験体についても軸対象8節点要素を用いた。FEMメッシュを図3. 2に示す。小型丸棒試験片、大型丸棒試験片についてはGLをモデル化し、ひずみ範囲の1/2の引張ひずみを与え、クリープ疲労の場合にはこれを保持した。厚肉円筒試験片については試験片全体をモデル化し、内面にコールドショックを与えた。

3. 5 解析結果

小型丸棒試験片、大型丸棒試験片、熱過渡試験片のそれぞれについて、試験片表面におけるひずみ(Mises型の相当ひずみ)の分布、応力(Misesの相当応力)の分布を示す(図3. 3～3. 4)。最大ひずみは、母材硬化部を含まない小型試験片ではひ

ずみ範囲に依存せず溶接金属で生じているのに対し、母材硬化部を含む大型試験片ではひずみ範囲に依存し、0.3%、0.5%では母材一般部、1.0%では溶接金属となっている。熱過渡試験では溶接金属で生じている。これは図3.1に示した動的応力ひずみ関係を反映した結果となっている。次に最大応力については、小型試験片、大型試験片では母材硬化部で生じるのに対し、熱過渡試験片では母材一般部で生じている。また、熱過渡試験では小型および大型試験と比較して応力が相対的に高くなっている。これは小型および大型試験片が単軸応力であるのに対し熱過渡試験では等二軸状態であることによる。

これらのひずみと応力の分布に基づき求めた疲労損傷の分布、クリープ損傷の分布を示す（図3.5～3.6）。クリープ疲労寿命は線形損傷則から求めた。母材と熱影響部の破損クライテリアはCampbell型（限界値として $(D_f, D_c) = (0.3, 0.3)$ をとる）を用いた。溶接金属については、Campbell型と308系溶接金属について提案されたクライテリア（Campbell型の限界値を $(D_f, D_c) = (0.1, 0.1)$ [1]に置き換えたもの）の両方を用いた。後者の限界値は溶接金属の高温使用にともなう組織変化による強度低下[15,16]を簡易的に見込むためのものである。溶接金属のクリープ疲労破損クライテリアについては別途詳細なR&Dを実施している。

以上の結果をもとに、溶接継手の破損位置と破損寿命の予測結果をまとめると、表3.1および図3.7のようになる。この結果、破損位置については大型試験片のクリープ疲労で限界値を0.1とした場合を唯一の例外として試験と解析は一致した。破損寿命についてはやや過大評価となる傾向が観察されたもののすべての条件においてfactor of 3の予測ができ、本「3要素モデル」の有効性を示すことができた。

4. 考察

4. 1 破損位置と寿命の予測精度

4. 1. 1 予測精度

表3. 1に基づき破損位置と寿命の予測精度を検討する。

まず、破損寿命を検討する。疲労試験については、小型試験片のひずみ範囲0.3%、0.5%、大型試験片のひずみ範囲0.5%で寿命を過大評価している。小型試験片のひずみ範囲0.3%では実測寿命が144800サイクルであるのに対し、予測寿命は384172サイクルである。小型試験片のひずみ範囲0.5%ではそれぞれ4026サイクル、11909サイクルである。大型試験片のひずみ範囲0.5%ではそれぞれ8985サイクル、12645サイクルであった。ひずみ範囲1.0%については適切な予測寿命となった。

クリープ疲労試験については、小型試験片のひずみ範囲0.5%で実測寿命と予測寿命はそれぞれ3728サイクル、6689サイクル(Campbell型クライテリアの場合)、2790サイクル(308系溶接金属のクライテリアを用いた場合)で前者の場合は過大評価、後者の場合は適切な予測寿命となった。大型試験片のひずみ範囲0.5%では、実測寿命と予測寿命はそれぞれ3992サイクル、11590サイクル(Campbell型クライテリアの場合)、9417サイクル(308系溶接金属のクライテリアを用いた場合)で、いずれのクライテリアを用いた場合でも過大評価となった。

熱過渡試験については、試験停止時のサイクル数が1600サイクルでこの時点で板厚の*%の長さのき裂が発生していたのに対し、予測寿命は4080サイクル(Campbell型クライテリアの場合)、2812サイクル(308系溶接金属のクライテリアを用いた場合)であり、前者の場合は過大評価となった。

次に、破損位置を検討する。疲労試験については、小型試験はひずみ範囲に係わらず溶接金属破損であり、予測結果はこれと一致した。大型試験は母材破損であり、予測結果はこれと一致した。

クリープ疲労試験については、小型試験では実験、予測ともに溶接金属破損となった。大型試験については、溶接金属のクライテリアをCampbell型クライテリアとした場合は実験、予測ともに母材破断となったが、308系溶接金属のクライテリアを用いた場合は予測は溶接金属破断となった。

4. 1. 2 予測精度の評価

破損位置については、大型試験片のクリープ疲労で破損クライテリアを308系溶接金属のクライテリアとした場合(試験では母材破断であるが予測では溶接金属破断)をのぞき試験と予測は一致した。破損寿命については、ファクター3程度の精度で評価できたが、小型試験片の2点(疲労でひずみ範囲1%の場合とクリープ疲労で溶接金属のクライテリアを308系溶接金属のクライテリアとした場合)をのぞき危険側の評価となつた。

これより、本報で提案した「3要素モデル」は、破損位置、破損寿命ともにおおむね妥当に予測できることが分かった。ただし破損寿命についてはやや危険側の評価となる傾向があることが分かった。モデルを高度化することによりさらに予測精度を向上させる必要がある。このために必要な事項を次節で検討する。

4. 2 予測精度を向上するために必要な事項

4. 1に基づき、予測精度を向上するために必要な事項を整理すると以下の通りである。

4. 2. 1 疲労寿命の予測精度向上

疲労試験については低ひずみ範囲（0.5%以下）で疲労寿命を過大評価する。これは、低ひずみ範囲でひずみ集中を過少評価している可能性および／または溶接金属の疲労強度を過大評価している可能性を示唆している。このため、低ひずみ範囲域で母材、溶接金属、熱影響部の動的応力ひずみ関係を高サイクル疲労試験によりさらにきめ細かく取得し、動的応力ひずみ関係を高精度化する必要がある。さらに低ひずみ範囲域の溶接金属自体の疲労強度を高サイクル疲労試験によりさらにきめ細かく取得し、クリープ疲労に用いる溶接金属の疲労強度を高精度化する必要がある。

4. 2. 2 クリープ疲労寿命の予測精度向上

クリープ疲労については破損クライテリアとしてCampbell型クライテリアを用いると寿命を過大評価する。これは、溶接金属自体のクリープ疲労評価が、Campbell型クライテリアを用いると過大評価になることに起因する。この原因はクリープ疲労試験中に生じる溶接金属の材質劣化であると考えることができる。この現象および評価については参考文献[1,13-16]に詳しい。溶接継手のクリープ疲労強度評価の観点からは、これらの研究により溶接金属のクリープ疲労評価の精度を向上させ、これを力学モデルに組込み体系化することが必要となる。

4. 2. 3 溶接金属の異方性

316FR溶接金属は異方性を示すことが指摘されている[17]。参考文献[17]では、316FR共金系溶接金属の疲労強度および動的応力ひずみ関係の異方性を550°Cにおいて試験により検討している。これによると、疲労強度、動的応力ひずみ関係とともに異方性が存在する。疲労強度についても動的応力ひずみ関係についても異方性はひずみ範囲の増加とともに顕著になる。疲労強度については、ひずみ範囲1.0%、0.3%でそれぞれ溶接線方向の疲労強度が溶接線直角方向の疲労強度を3倍、1.5倍程度上回る結果となっている。動的応力ひずみ関係については、ひずみ範囲1.0%、0.3%でそれぞれ溶接線方向の応力範囲は溶接線直角方向の応力範囲の1.2倍程度、ほぼ同等程度となっている（図4. 1）。この傾向から判断して、0.5%以下の低ひずみ範囲では異方性は小さいと判断できる。本報の解析では、溶接金属の異方性を考慮しておらず、すべての溶接継手の評価において溶接線方向の強度・挙動特性を使用している。この異方性が本

報の解析結果が非安全側になった原因になりうるかどうかを考える。本報では、疲労強度予測結果がやや非安全側になったが、この傾向は低ひずみ範囲で顕著であった。溶接金属の異方性が非安全側の予測を与えた主因であるとすれば高ひずみ範囲でこの傾向が顕著になるはずであるが、解析結果は逆の傾向を示しており、異方性は本報の予測結果が非安全側になった主因ではないと考えることができる。

5. 結言

大型高速炉の構造材料として有望視されている高速炉構造用316の溶接継手（316FR溶接継手）の疲労強度およびクリープ疲労強度を、「3要素モデル」により評価した。このモデルは、SUS304溶接継手について開発された「2要素モデル」をベースとして、316FR溶接継手の特徴である母材に対して硬化した熱影響部をモデルに取り込んだものである。これにより次の結論を得た。

(1) 「3要素モデル」は、316FR溶接継手の破損位置を試験片寸法、負荷の種類を問わずほぼ正確に予測できる。疲労寿命およびクリープ疲労寿命についても試験片寸法、負荷の種類を問わずファクター3程度の精度で予測できる。ただし予測はやや非安全側となる傾向がある。

(2) 破損位置、寿命の予測精度をさらに向上させるためには、解析に用いる低ひずみ範囲（0.5%以下のひずみ範囲）の溶接金属および熱影響部の動的応力ひずみ関係および低ひずみ範囲の溶接金属の疲労寿命をより精緻化することが必要である。このためには溶接金属および熱影響部の高サイクル疲労試験を行うことが必要である。

謝辞

本報の解析に係わる計算機作業は構造・材料技術開発室に常駐する(株)常陽産業の
加藤猛彦氏が実施した。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 香川他、材料、39-440(1990) 503.
- [2] Asayama et al, SMiRT-11, Trans. L (1991) 185.
- [3] 浅山他、Mod.9Cr-1Mo鋼溶接継手の強度評価法－第1報 疲労強度評価法－、動燃事業団成果報告書、PNC ZN9410 92-148 (1992).
- [4] 浅山他、日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集 (1992) 487.
- [5] Asayama et al, SMiRT-12, Trans. L (1993) 123.
- [6] 笠原、冶金的不連続と形状不連続を考慮した溶接構造物クリープ疲労評価法の開発、動燃事業団成果報告書、PNC ZN9410 95-213 (1995).
- [7] Kawahara, N et al, Application of Elastic Follow-up Model to Evaluate Cyclic Transient Strength of Welded Vessels, ASME PVP-Vol.313-2 (1995) 481.
- [8] Wada,
- [9] 小峰他、材料特性データ集－高速炉構造用316（溶接継手）の大気中疲労特性 No.B06、動燃事業団成果報告書、発行予定。
- [10] 加藤他、材料特性データ集－高速炉構造用316（溶接継手）の大気中引張特性 No.B04、動燃事業団成果報告書、発行予定。
- [11] 加藤他、材料特性データ集－高速炉構造用316（溶接継手）の大気中クリープ特性 No.B05、動燃事業団成果報告書、発行予定。
- [12] 田中他、高速炉構造用SUS316鋼溶接継手供試体の熱クリープ疲労試験解析、動燃事業団成果報告書、PNC ZN9410 93-209 (1993).
- [13] 長谷部他、ステンレス鋼溶接金属の長時間加熱によるミクロ組織変化、動燃事業団成果報告書、PNC ZN9410 95-240 (1995)
- [14] 長谷部他、ステンレス鋼溶接金属のミクロ破損機構に関する検討、日本材料学会 第33回高温強度シンポジウム前刷集 (1995) 75.
- [15] 浅山他、ステンレス鋼溶接金属の材料微視構造を考慮したクリープ疲労強度評価法の開発－第1報 基礎解析－、動燃事業団成果報告書、PNC ZN9410 94-307 (1994).
- [16] 浅山他、ステンレス鋼溶接金属の材質劣化を考慮したクリープ疲労評価、日本材料学会第33回高温強度シンポジウム前刷集 (1995) 80.
- [17] 日本溶接協会FME小委員会、平成7年度受託研究報告書、高速炉構造用SUS316の評価研究（その1）、(1996)

Table 2.1 Chemical compositions of base and weld metals

| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | N |
|------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Base metal | 0.01 | 0.52 | 0.86 | 0.024 | 0.004 | 10.59 | 16.58 | 2.14 | 0.08 |
| Weld metal | 0.01 | 0.41 | 1.32 | 0.022 | 0.003 | 11.27 | 18.68 | 2.12 | 0.089 |

Table 2.2 Mechanical properties used in the analysis

| | 溶接金属 | 熱影響部 |
|-----------|--------------------|----------|
| 動的応力ひずみ関係 | 実験結果を近似 | FEMにより推定 |
| クリープひずみ曲線 | 定常クリープ速度を 2直線近似 | 母材と同一 |
| 疲労強度 | 母材と同一 | 母材と同一 |
| クリープ強度 | $\alpha R=5$ | 母材と同一 |

Table 3.1 Creep-fatigue life prediction results

| | | 小型試験片 | 大型試験片 | 熱過渡試験 |
|--------|---|--------------------------------------|-------------------------------|--|
| 疲労 | 0.003 0h | 144800 溶接金属 (384172) (溶接金属) | | |
| | 0.005 0h | 4026 溶接金属 (11909) (溶接金属) | 3995 母材 (12645) (母材) | |
| | 0.01 0h | 1493 395 溶接金属 (1216) (溶接金属) | | |
| クリープ疲労 | 0.005 1h | 3728 溶接金属 (6689) (溶接金属) | 3992 母材 (11590) (母材) | |
| 熱過渡 | 550-30 5h-1h (最大ひずみは溶接金属 部で0.73%) | | | [1600] 溶接金属 (4080) (溶接金属) (2812) (溶接金属) |

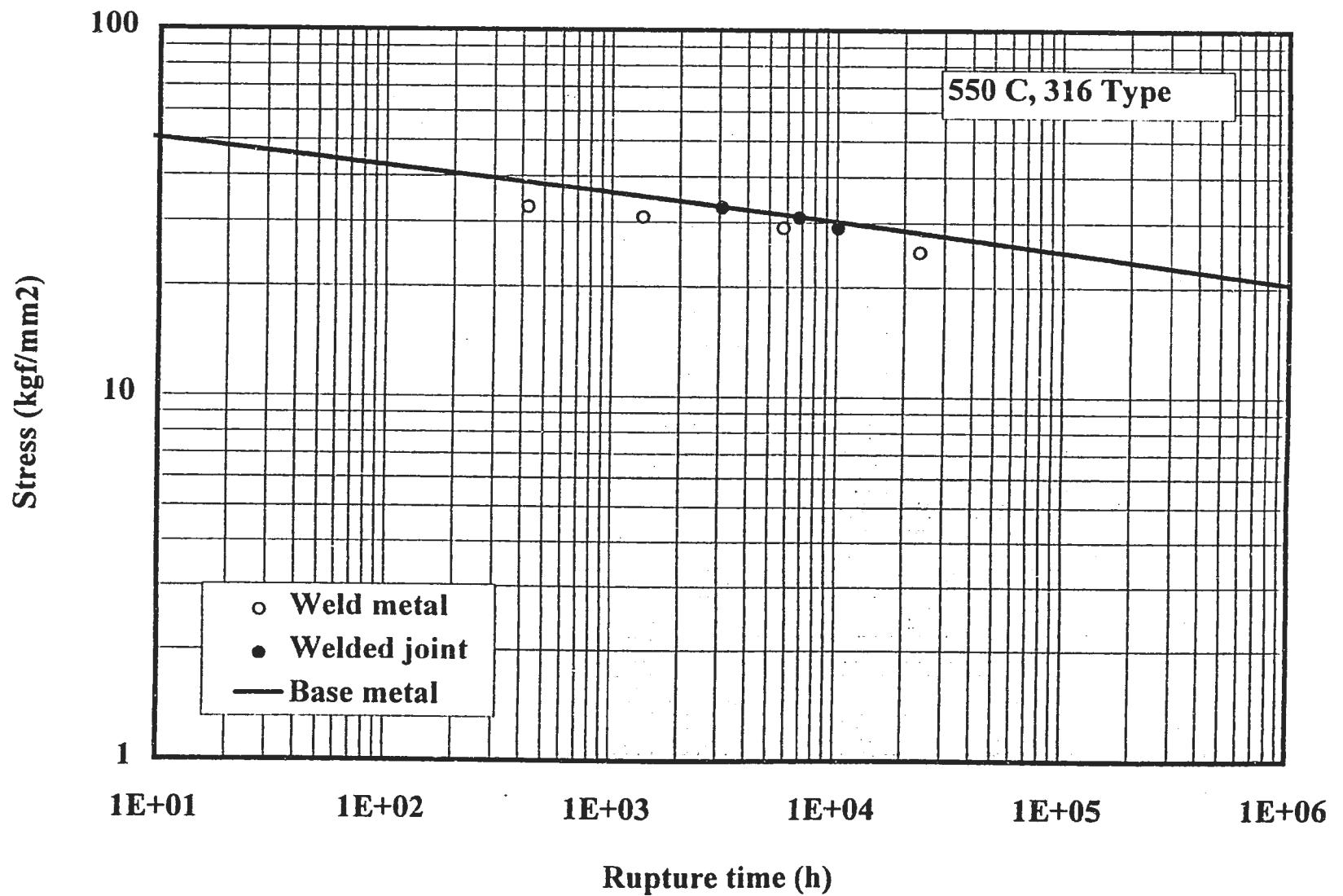


Fig. 2.1(a) Creep strength of 316FR weld metal

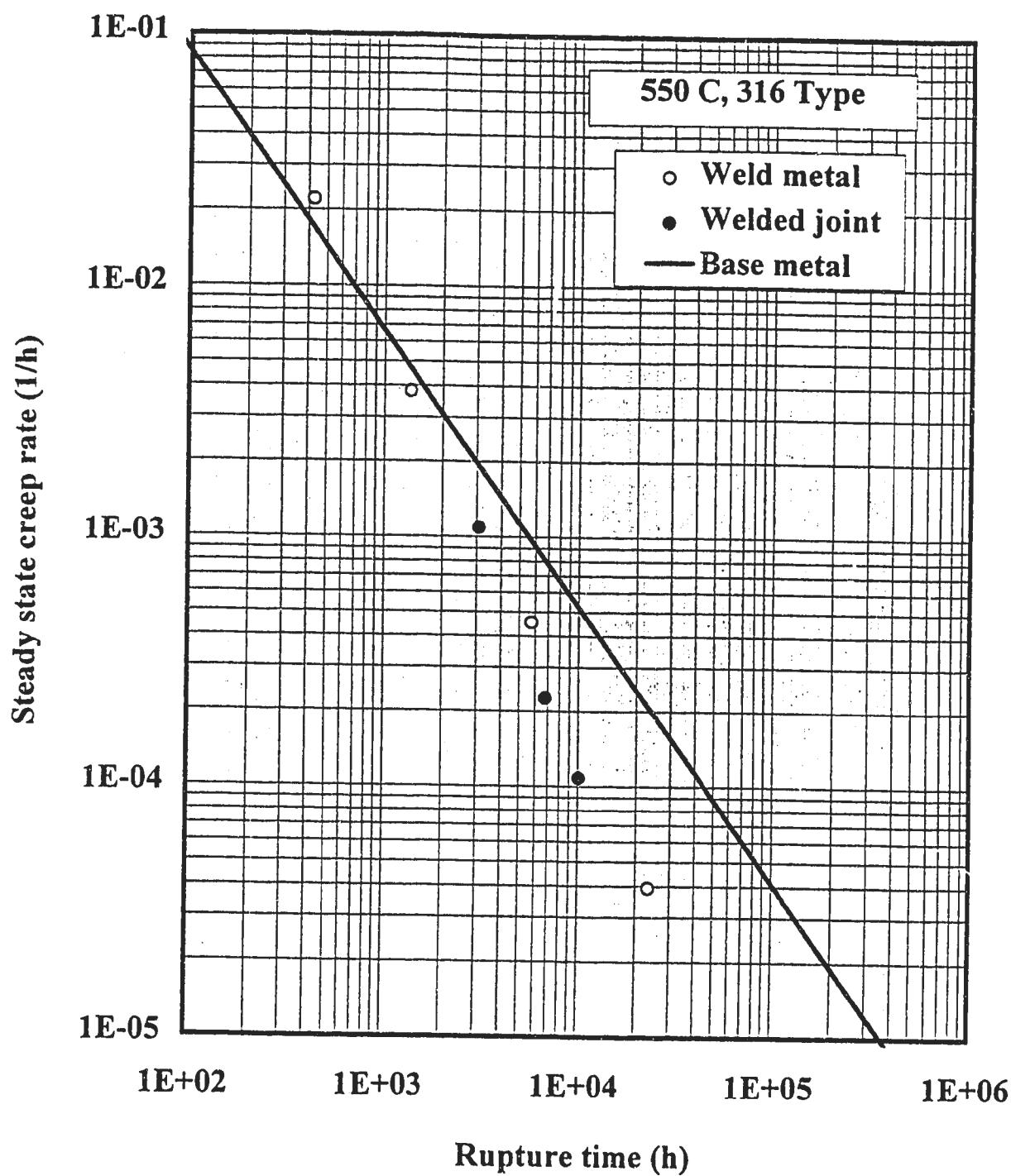


Fig. 2.1(b) Steady state creep rate of 316FR weld metal

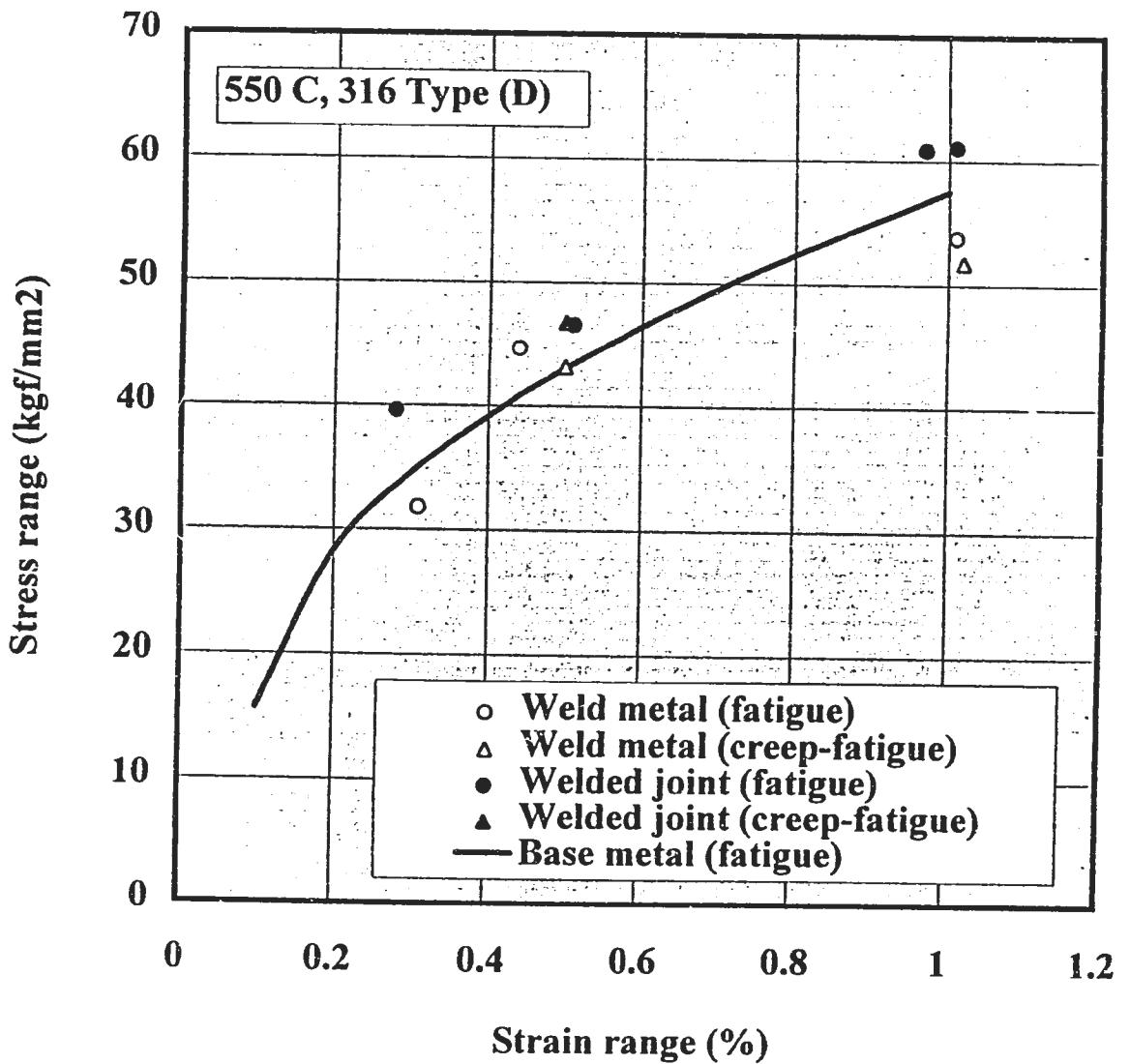


Fig. 2.1(c) Dynamic stress-strain response

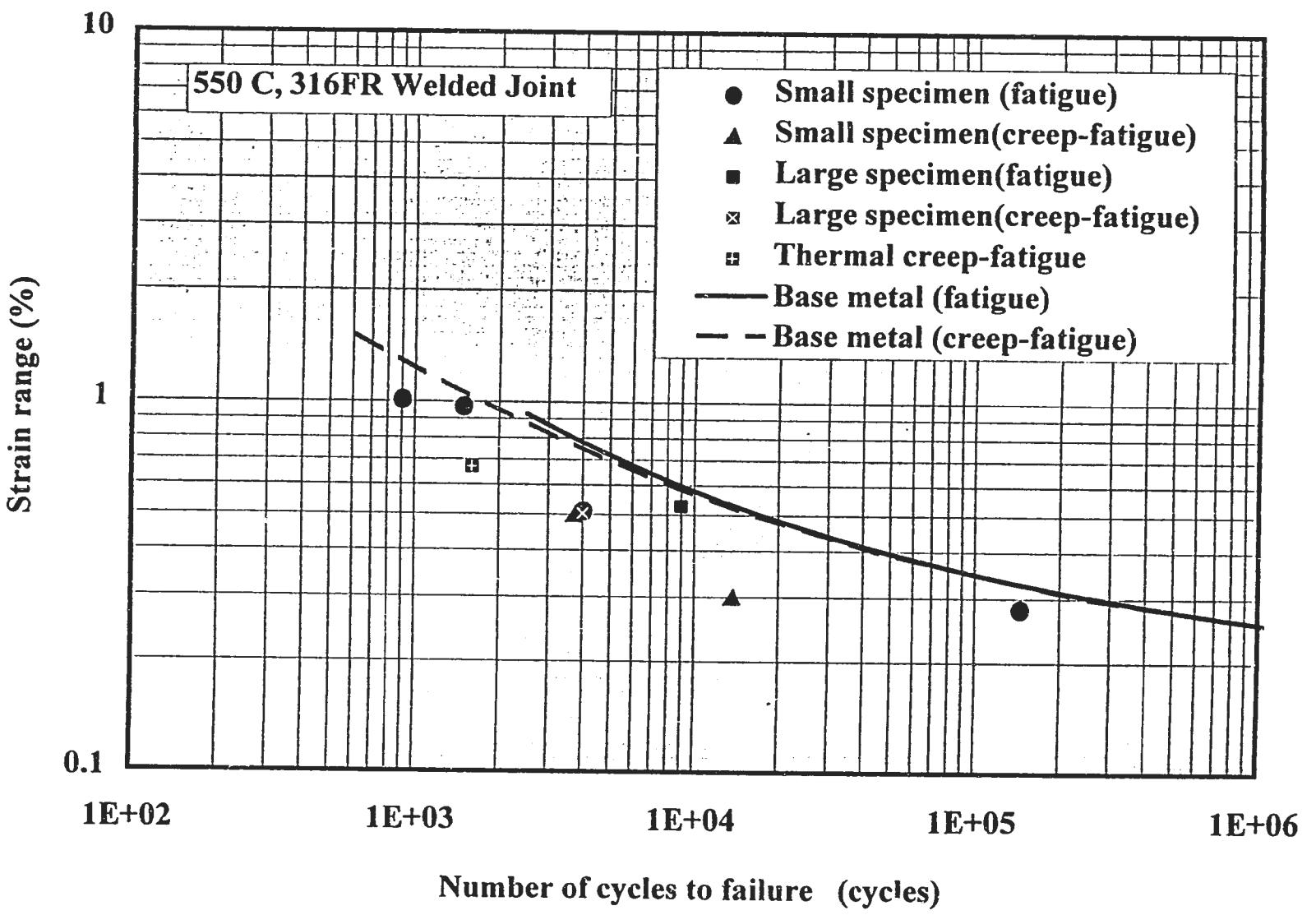


Fig. 2.2 Summary of creep-fatigue test results

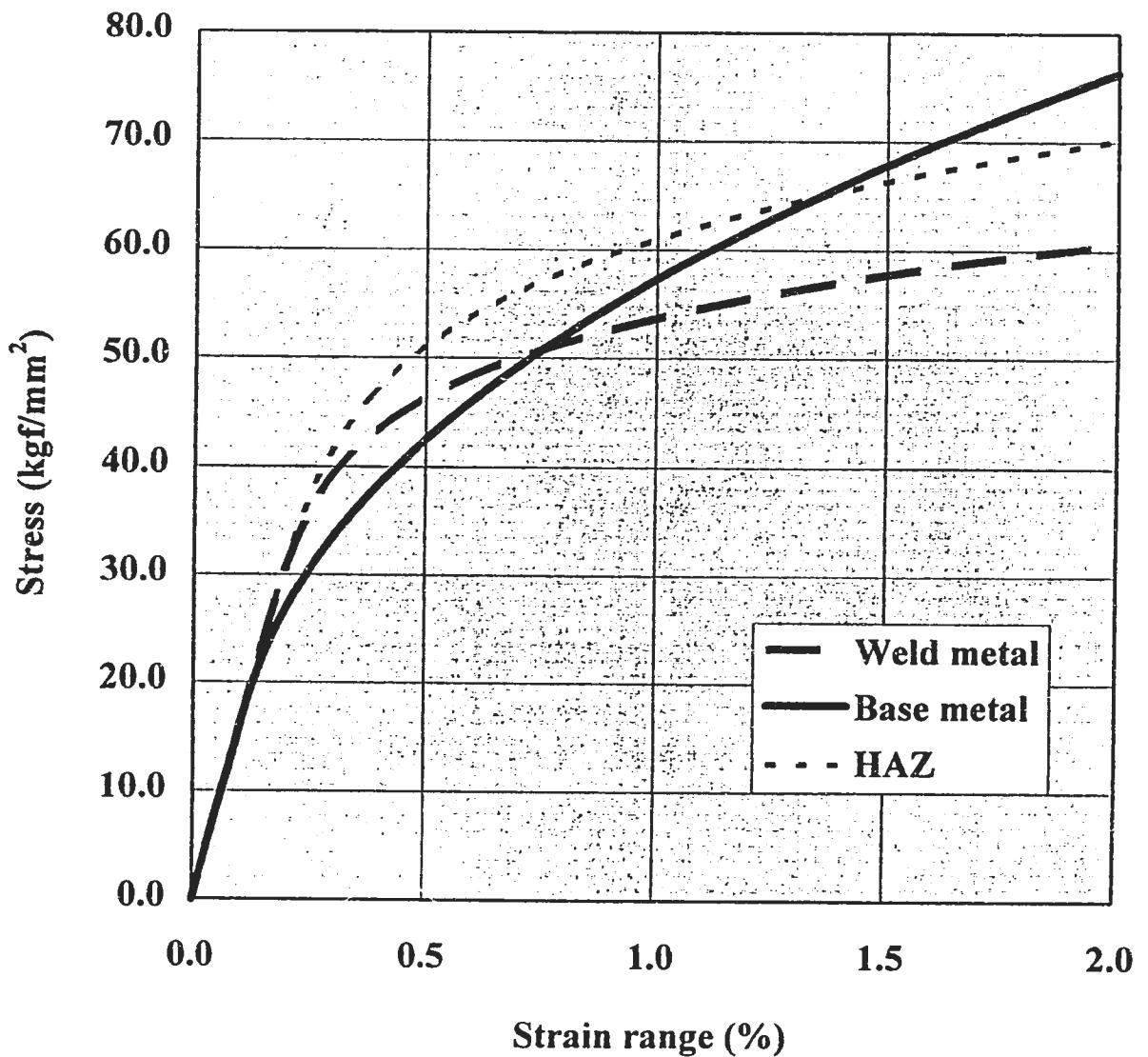
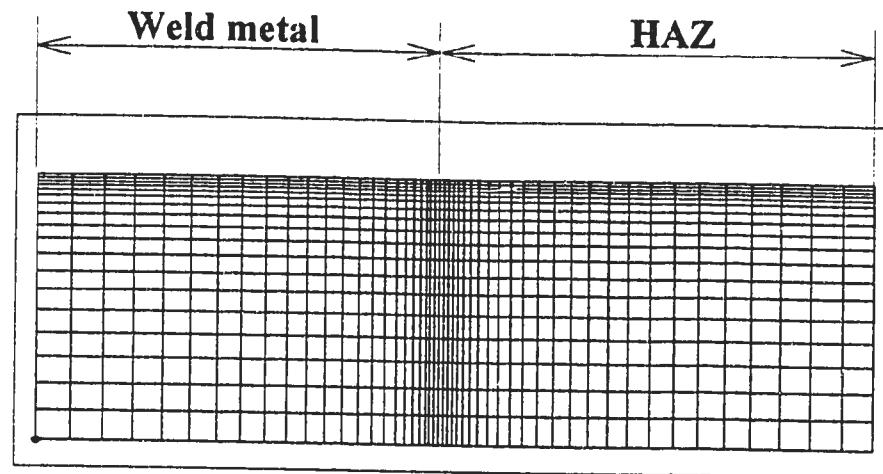
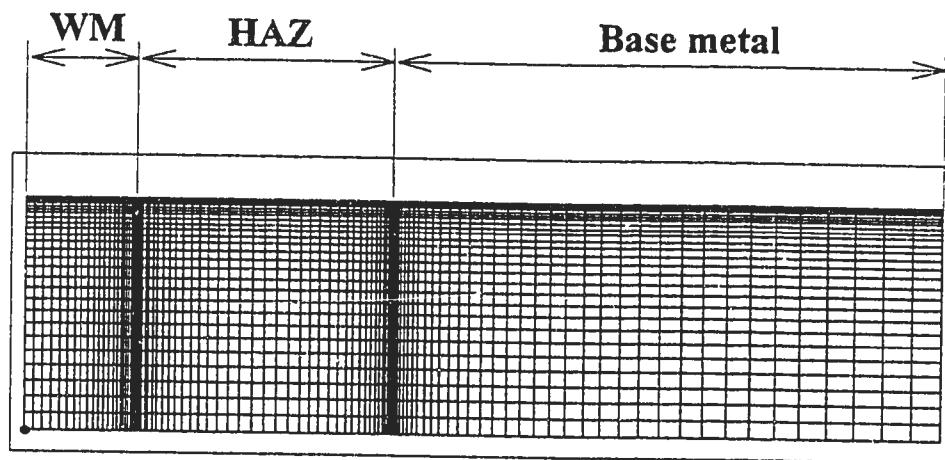


Fig. 3.1 Dynamic stress-strain curve used in the analysis



(a) Small specimen



(b) Large specimen

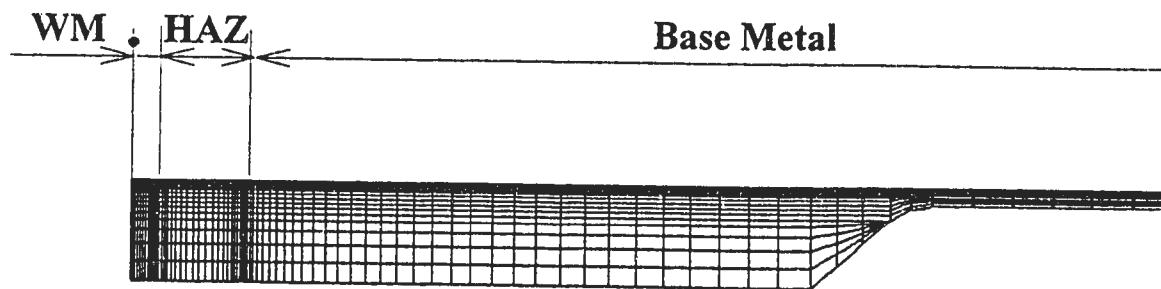


Fig. 3.2 FEM mesh

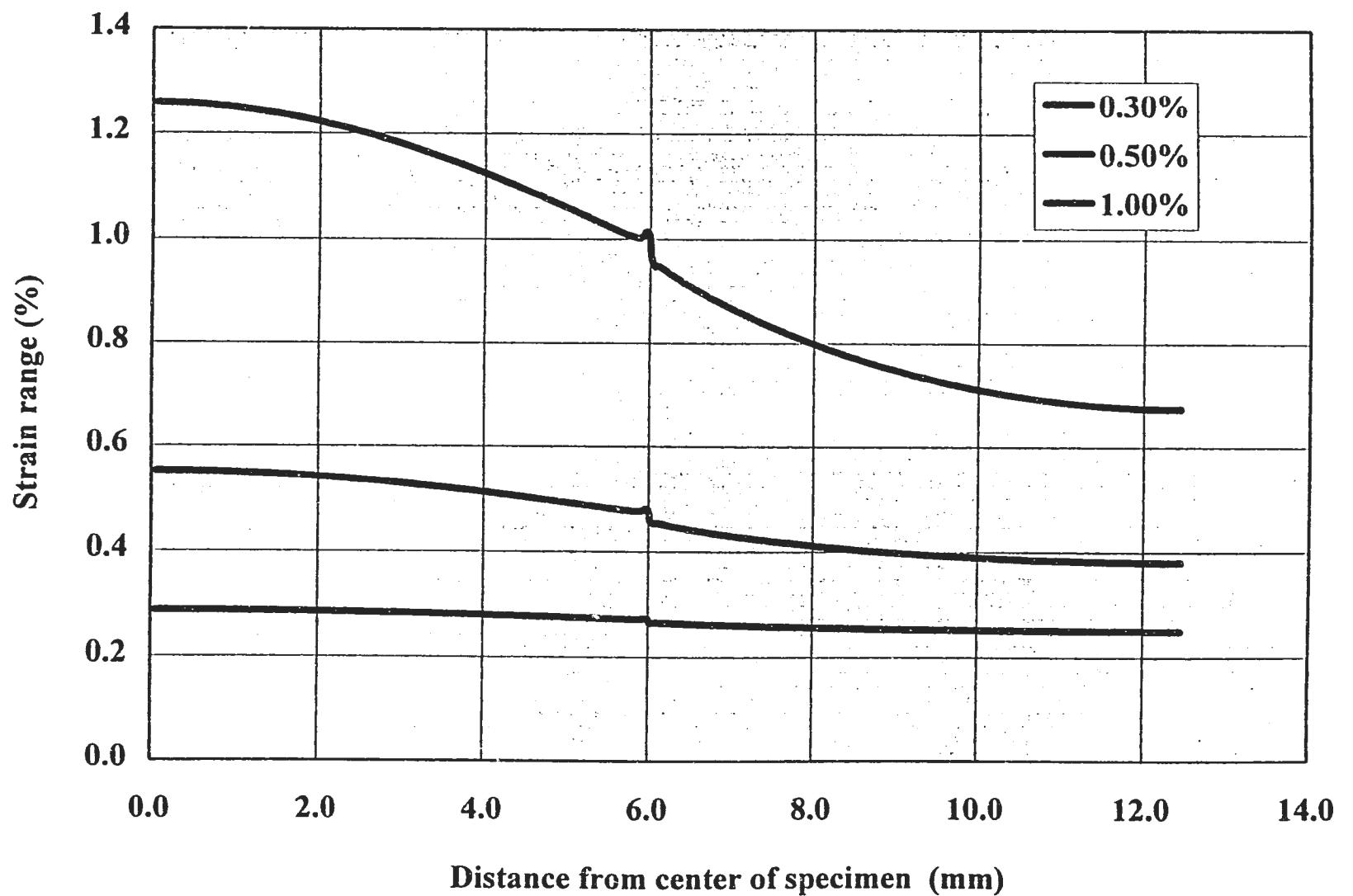


Fig. 3.3(a) Strain distribution (small specimen)

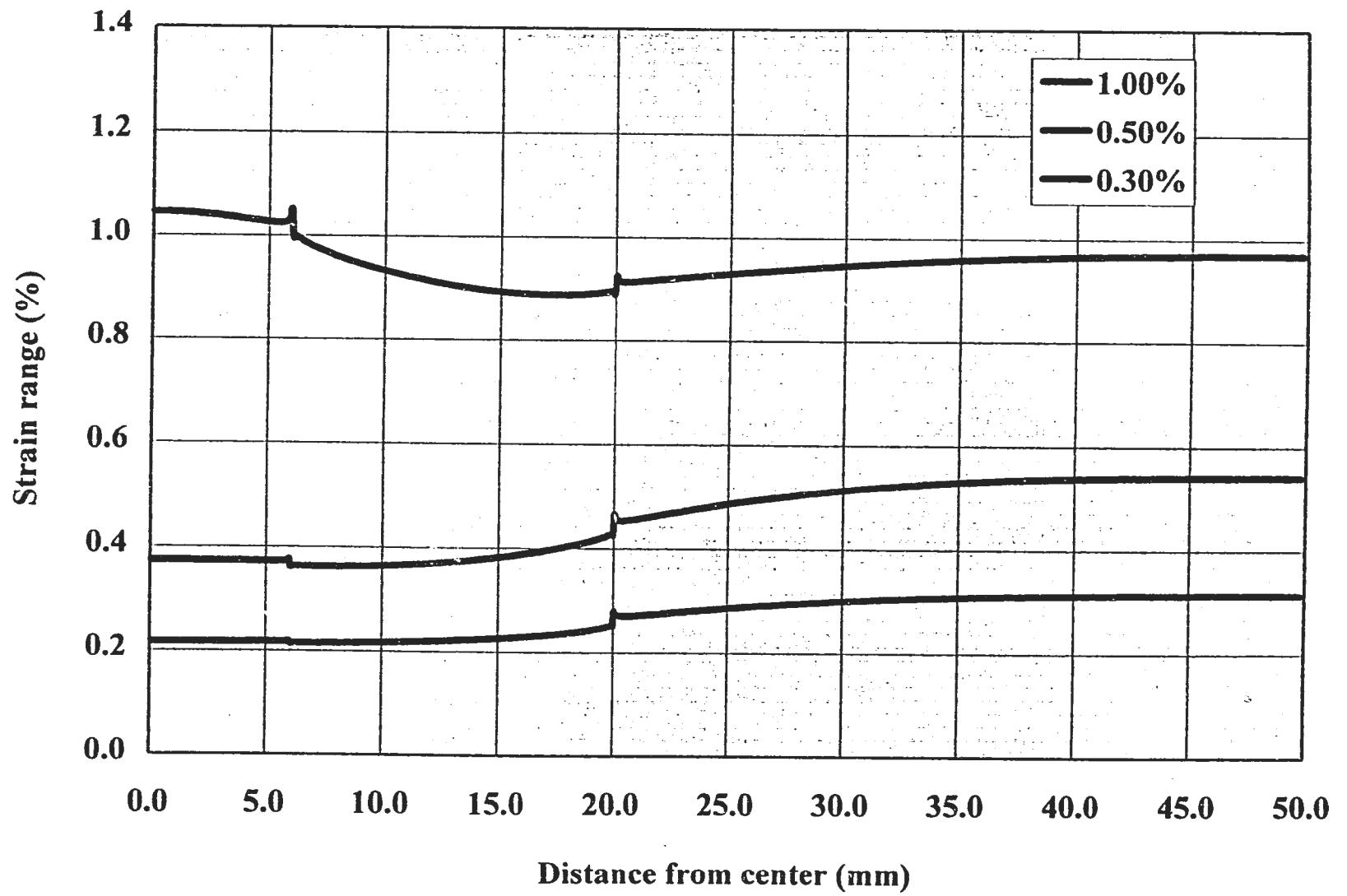


Fig. 3.3(b) Strain distribution (large specimen)

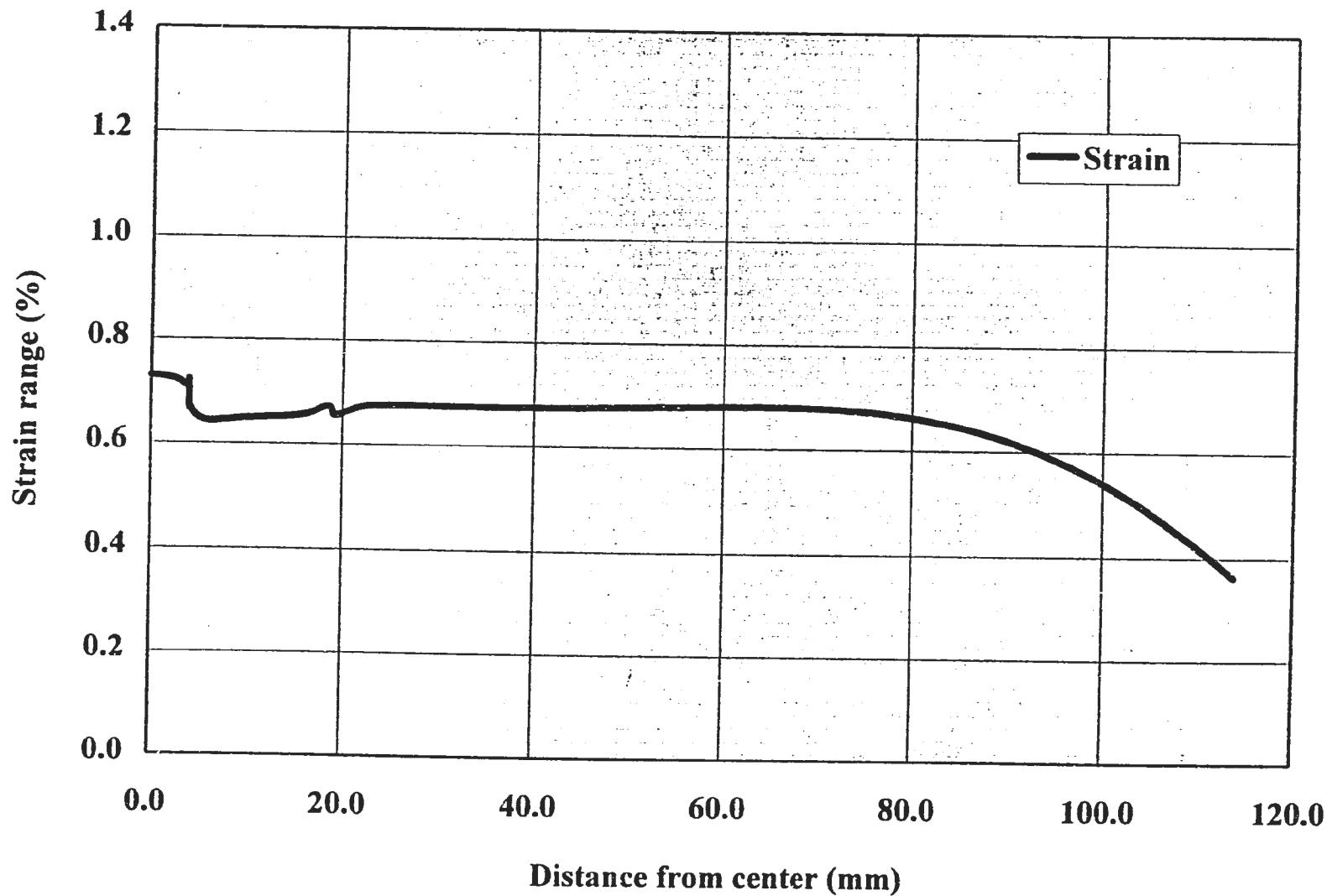


Fig. 3.3(c) Strain distribution (Thick tube, thermal load)

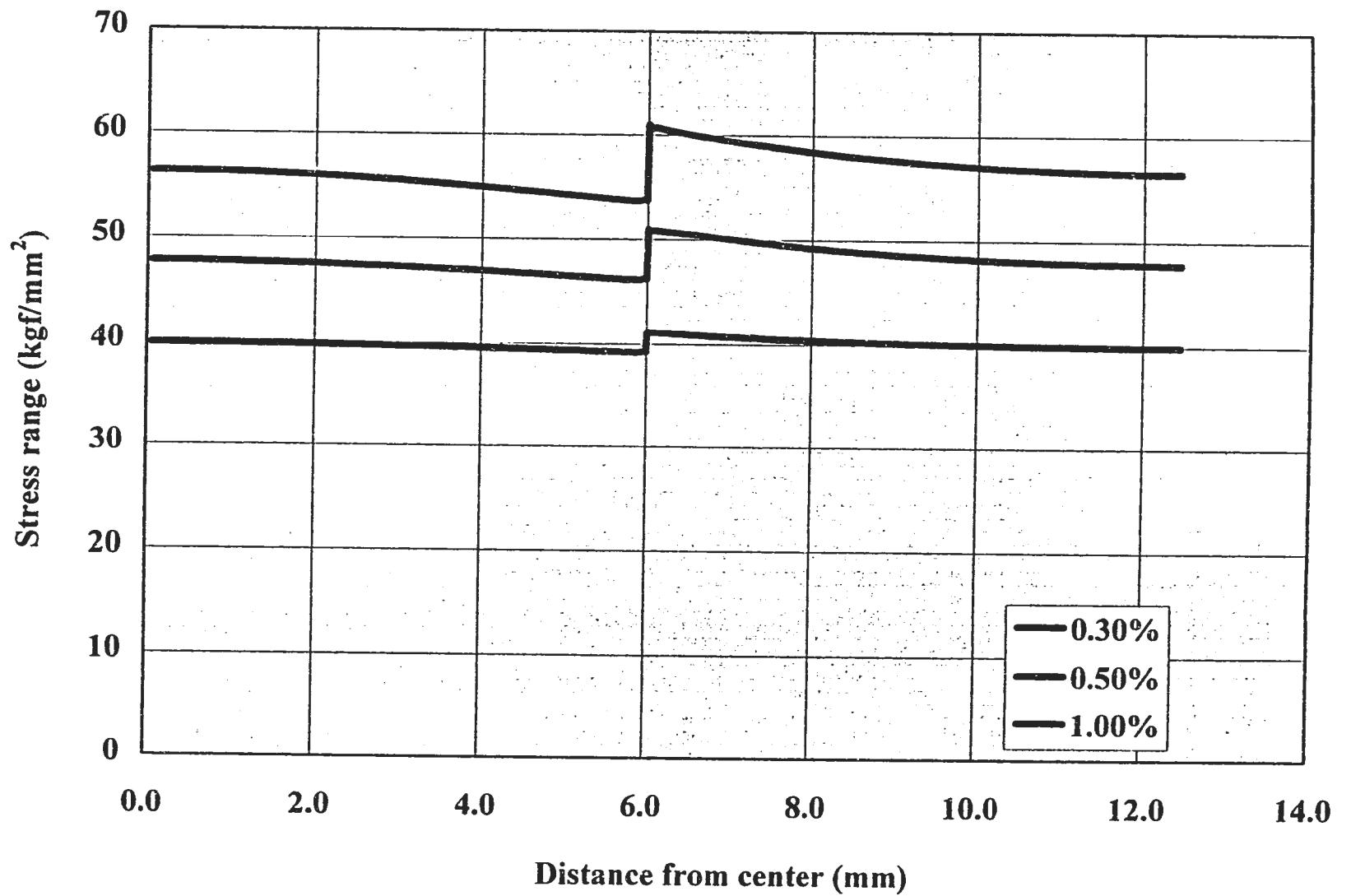


Fig. 3.4(a) Stress distribution (small specimen)

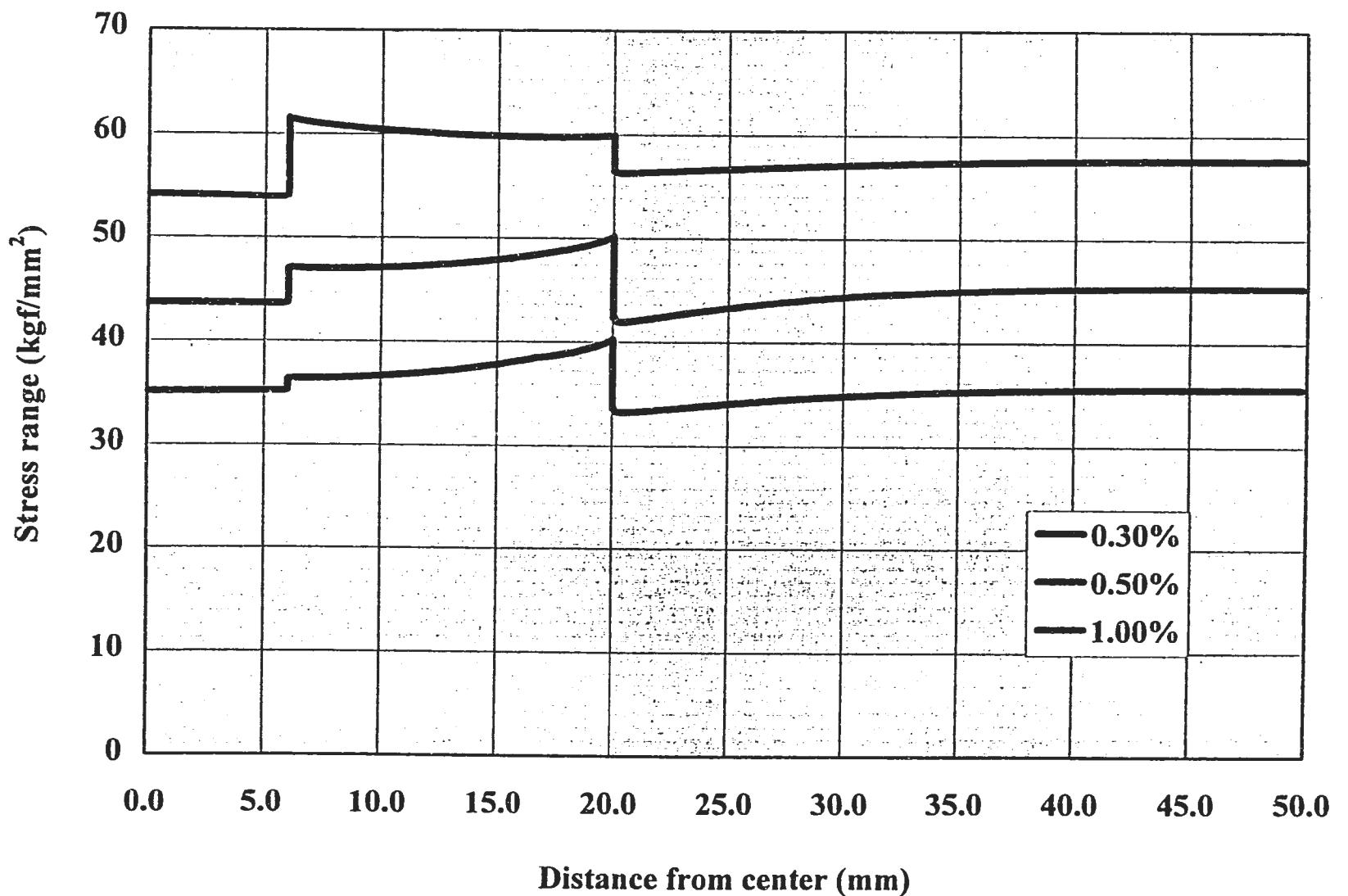


Fig. 3.4(b) Stress distribution (large specimen)

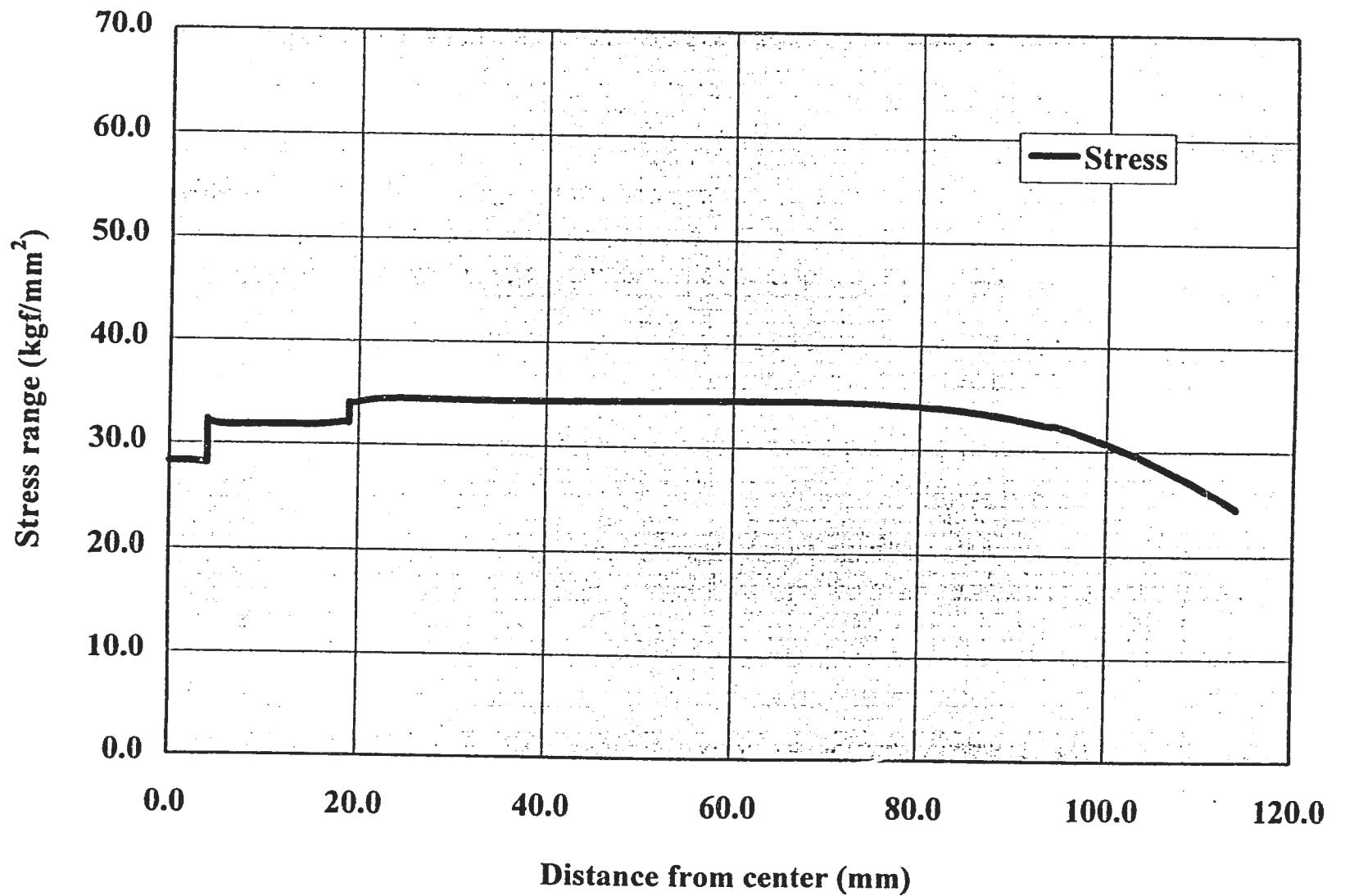


Fig. 3.4(c) Stress distribution (Thick tube, thermal load)

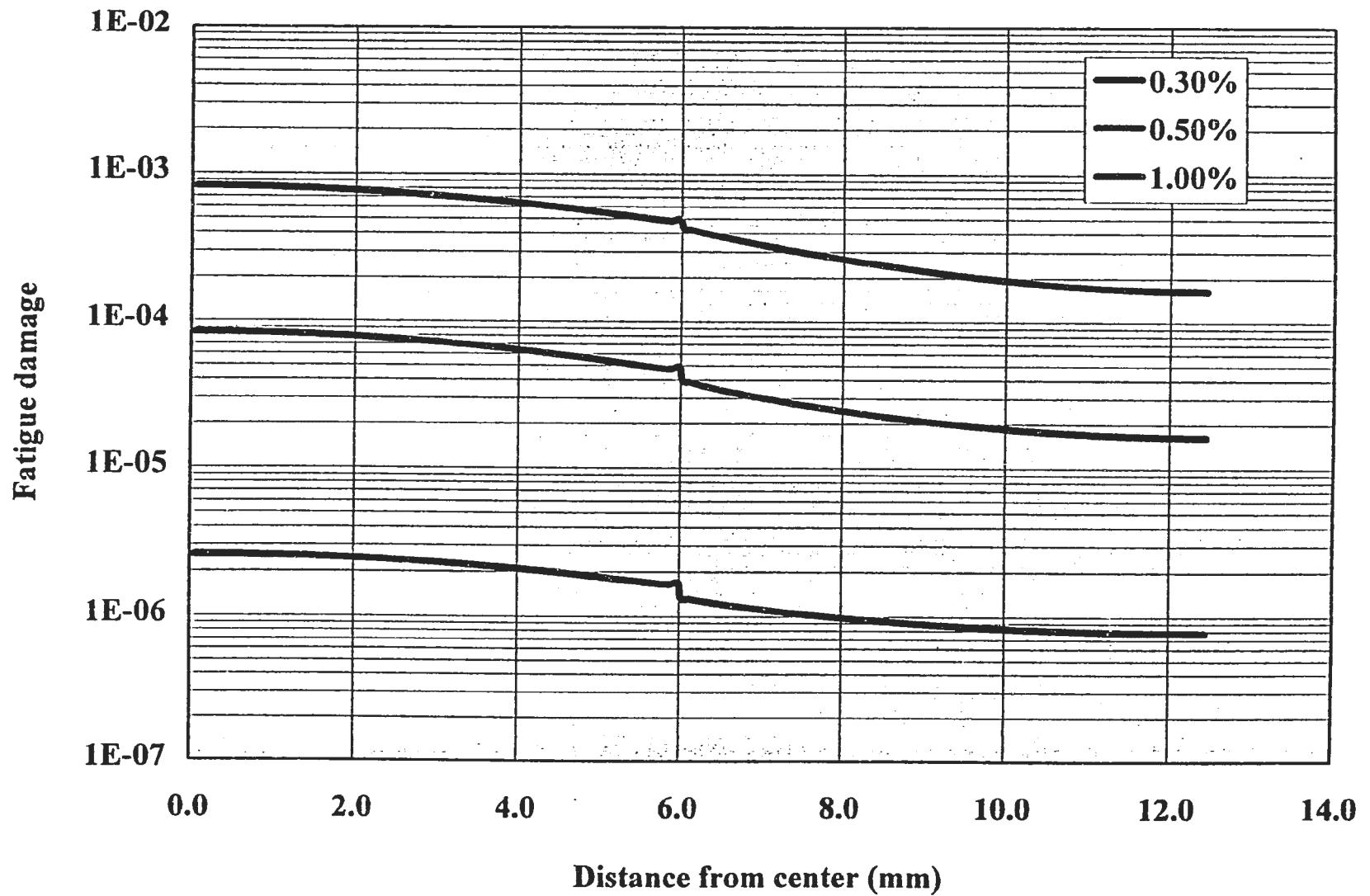


Fig. 3.5(a) Distribution of fatigue damage (small specimen)

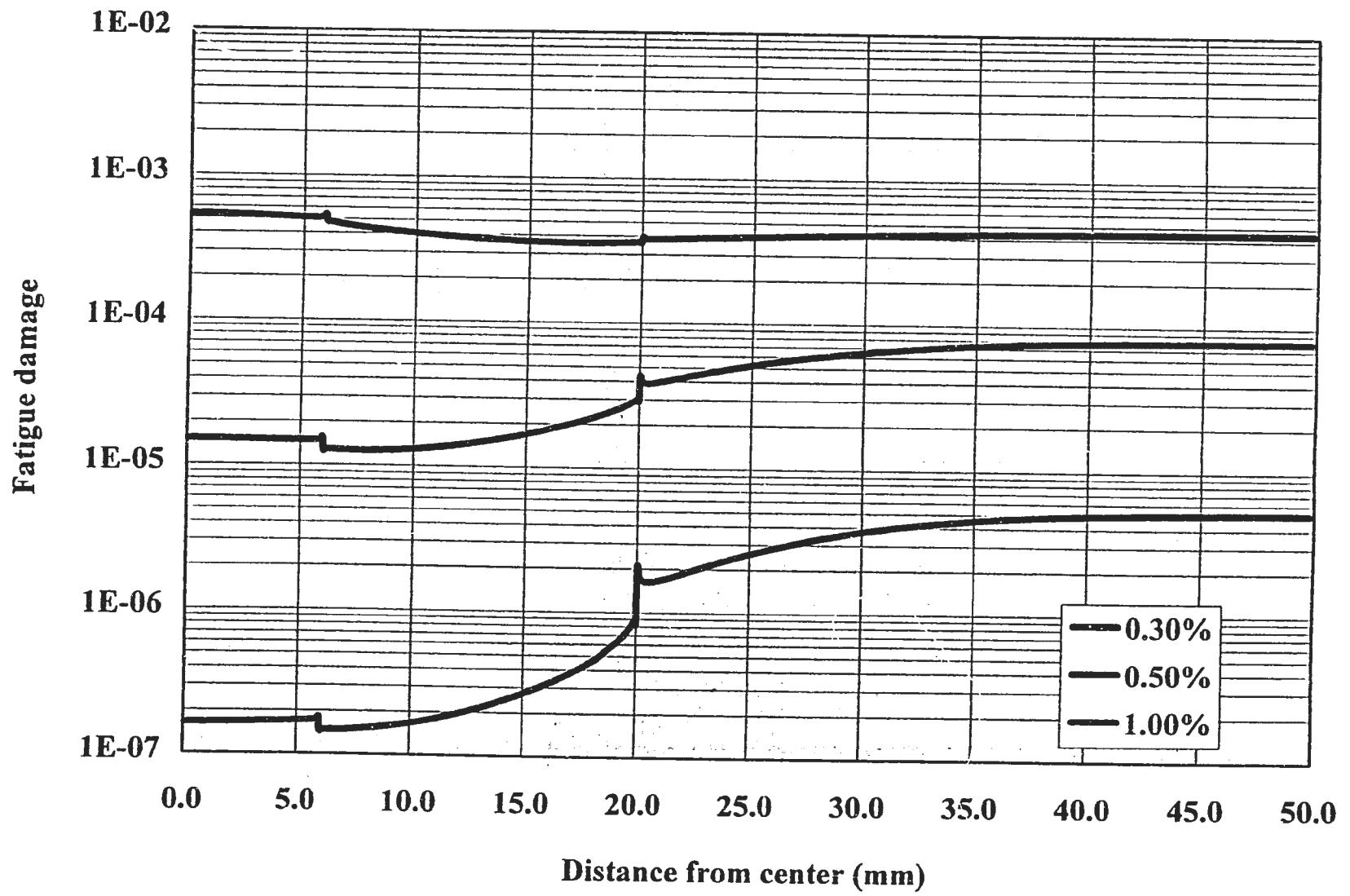


Fig. 3.5(b) Distribution of fatigue damage (large specimen)

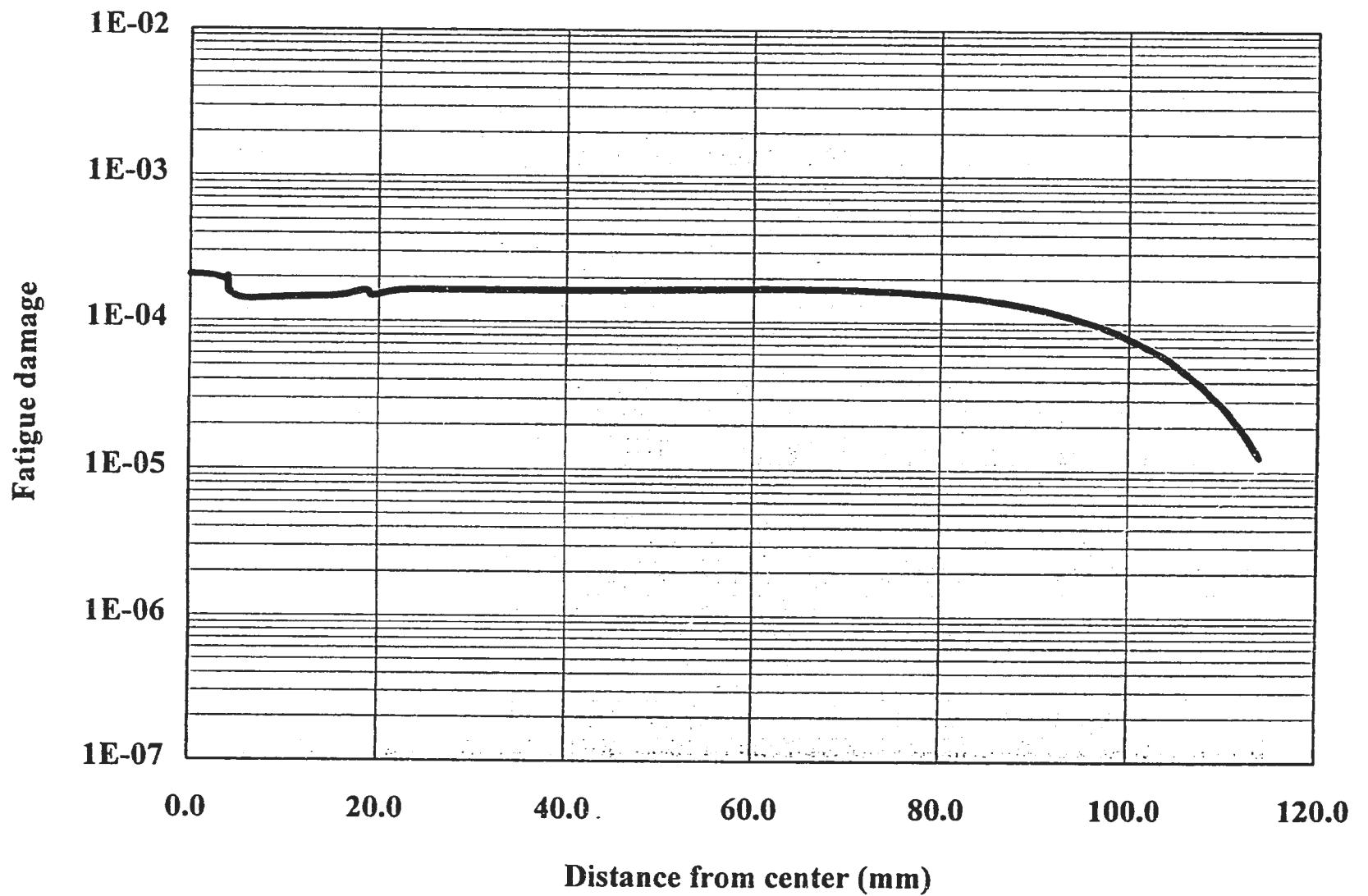


Fig. 3.5(c) Distribution of fatigue damage (Thick tube, thermal load)

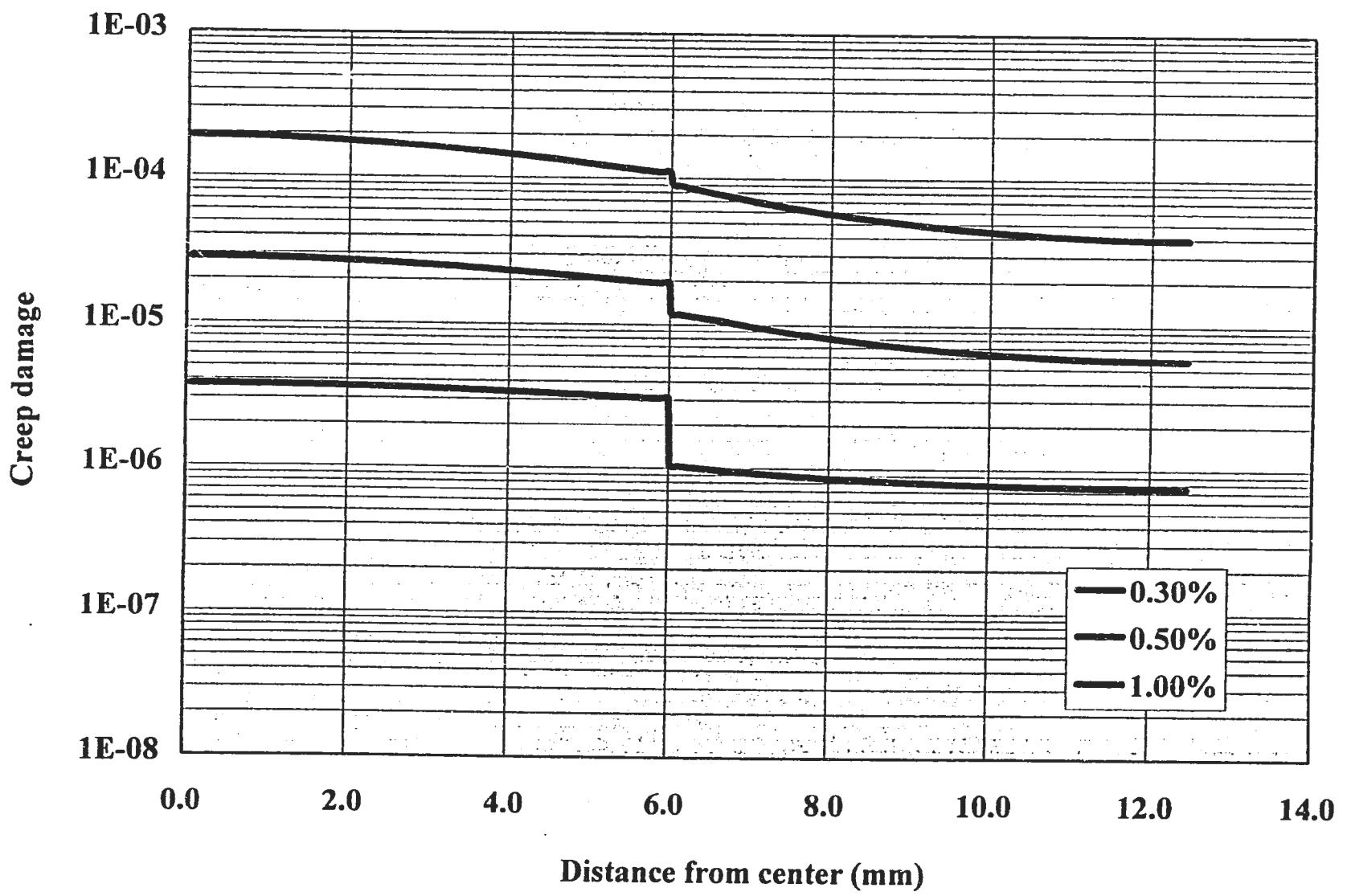


Fig. 3.6(a) Distribution of creep damage (small specimen)

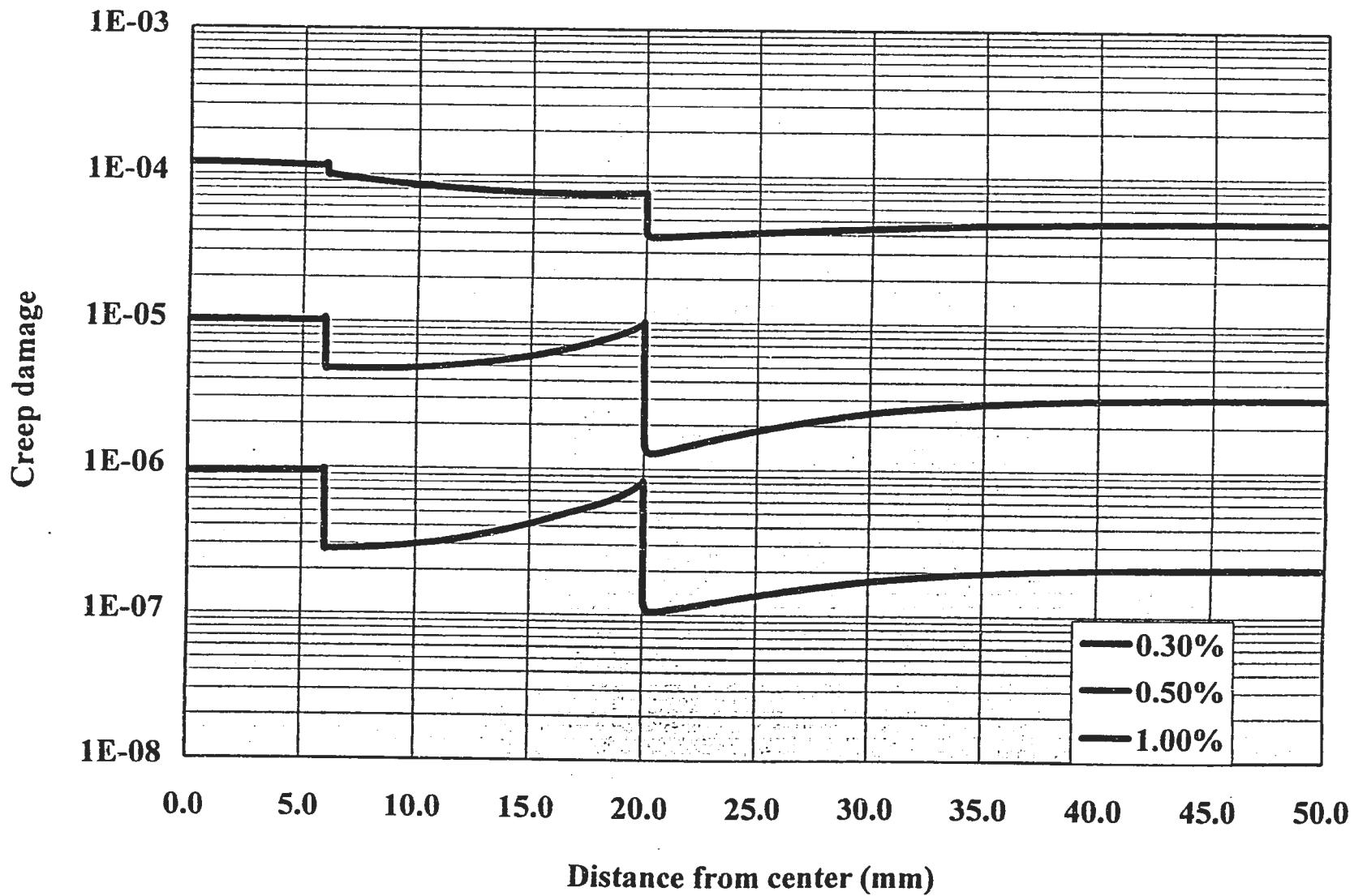


Fig. 3.6(b) Distribution of creep damage (large specimen)

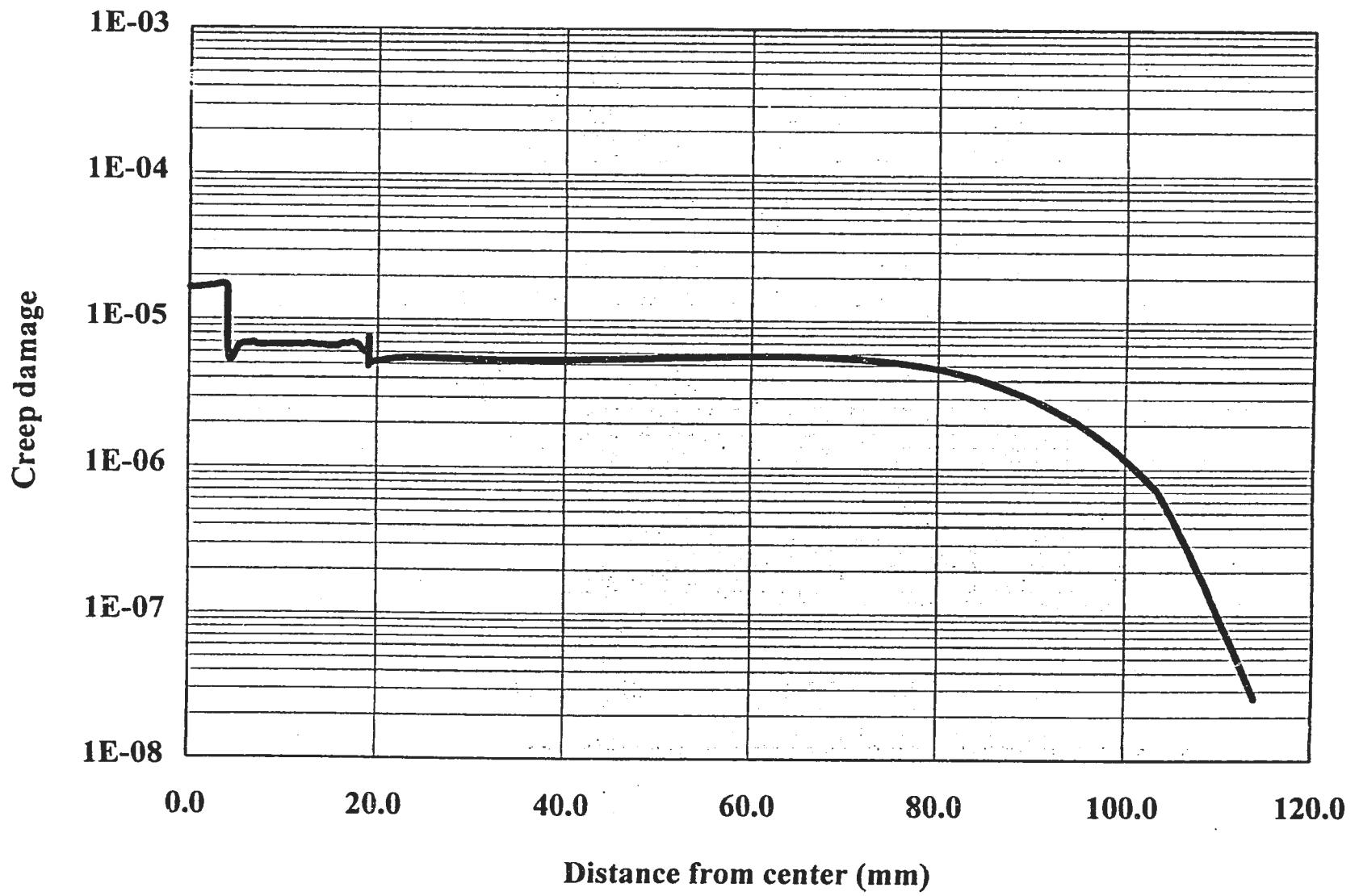


Fig. 3.6(c) Distribution of creep damage (Thick plate, thermal load)

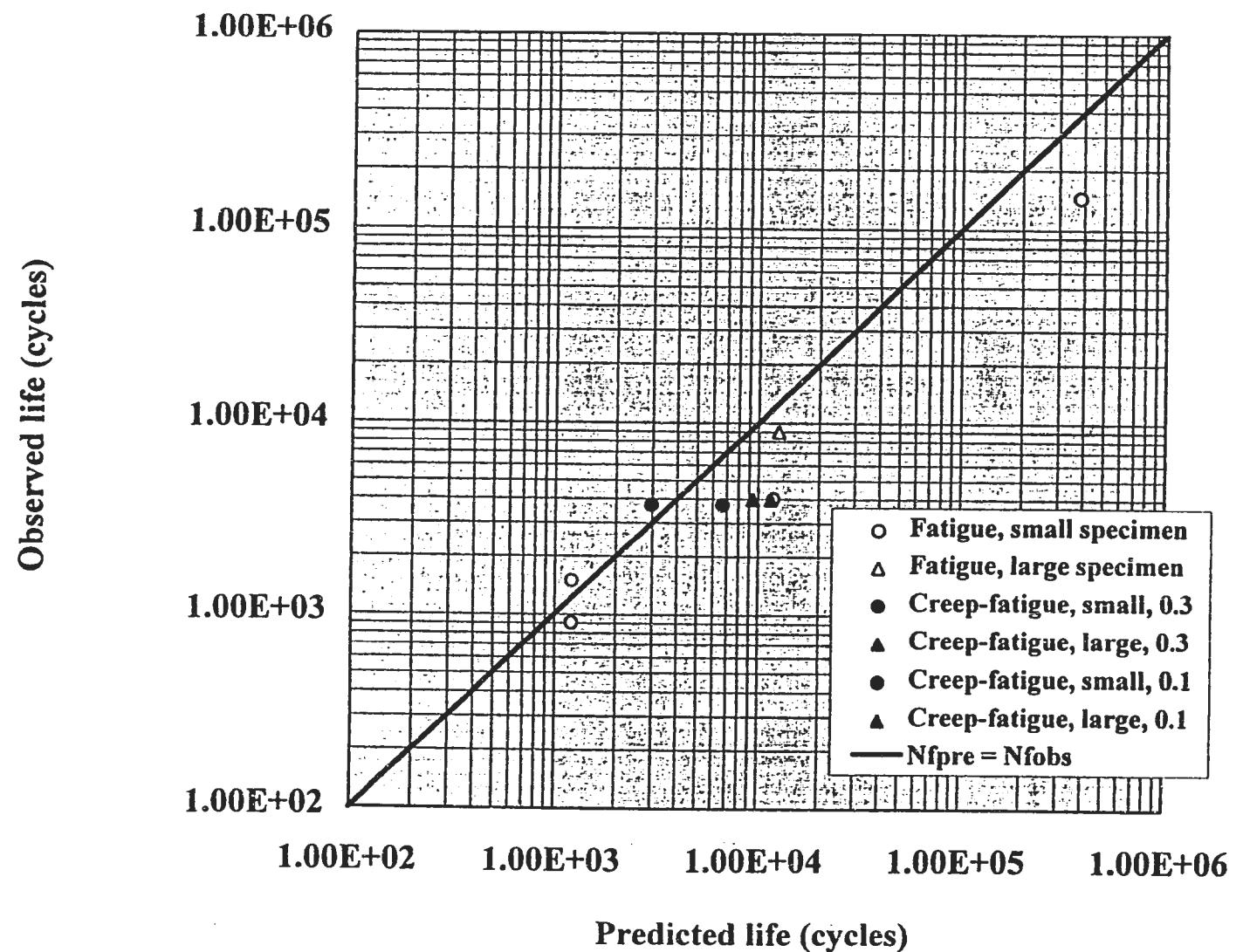
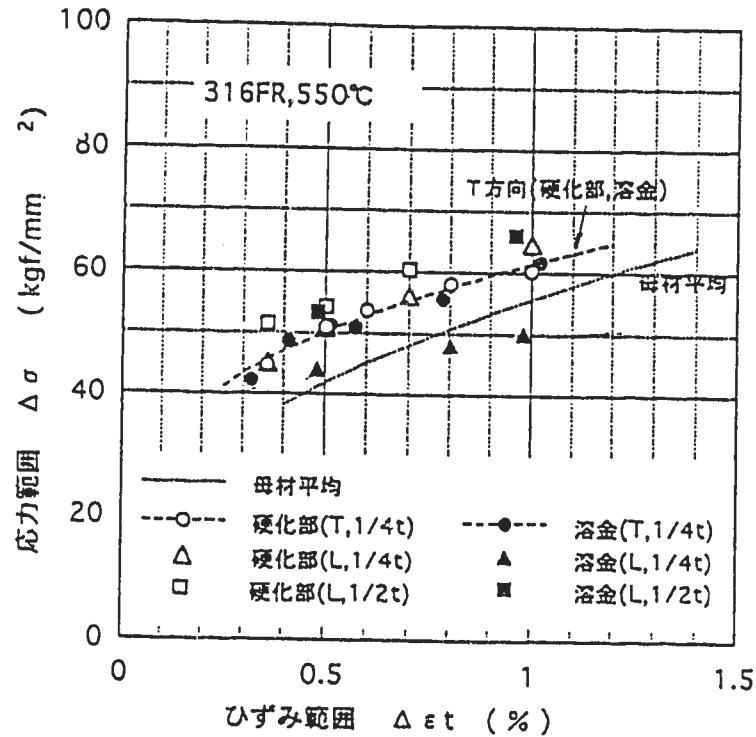
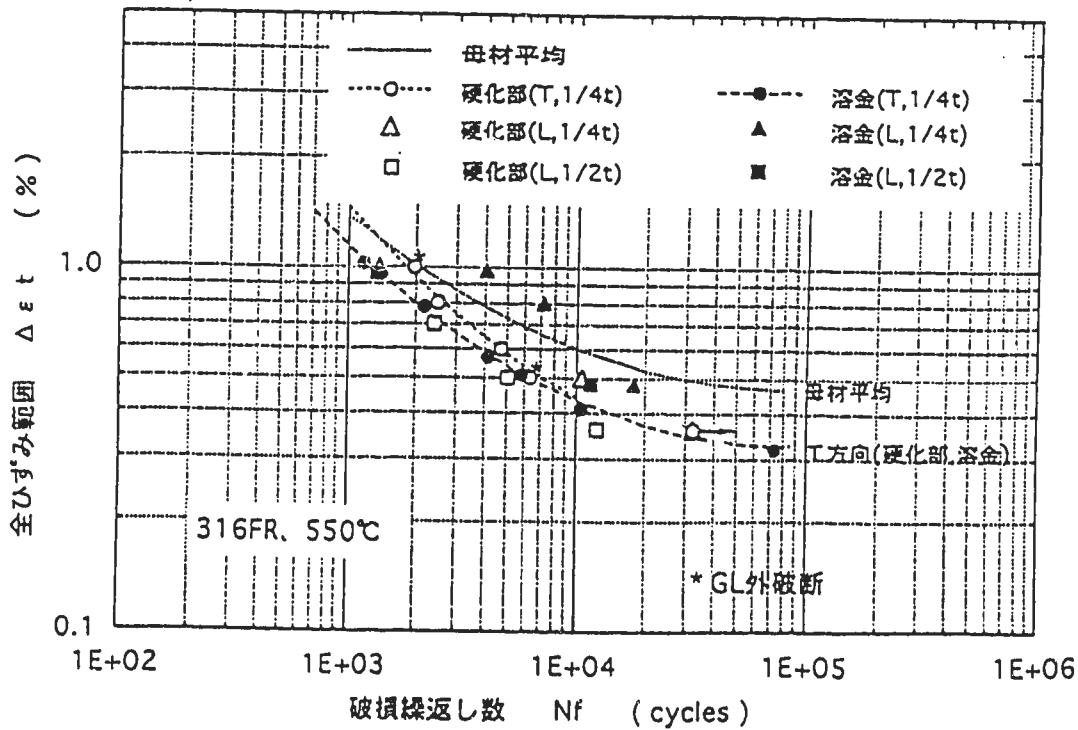


Fig. 3.7 Result of life prediction using FEM 2- and 3- element model



(a) Stress-strain response



(b) Fatigue strength

Fig. 4. 1 Anisotropy of stress-strain response and fatigue strength of 316FR weld metal