

JAERI - M
92-085

高温工学試験研究炉用黒鉛・炭素材料の
弾性変形に関する実験と検討

1992年6月

荒井 長利・湊 和生・衛藤 基邦
奥 達雄*・依田 真一**

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ㈱原子力資料サービス

高温工学試験研究炉用黒鉛・炭素材料の弾性変形に関する実験と検討

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

荒井 長利・湊 和生・衛藤 基邦

奥 達雄・依田 真一**

(1992年5月15日受理)

高温工学試験研究炉の黒鉛構造物の製作には微粒等方性 IG-110 黒鉛，中粒準等方性 PGX 黒鉛および粗粒準等方性 ASR-ORB 炭素が使用される。これらの設計用材料データは「高温工学試験研究炉黒鉛構造設計方針」で規定されている。本書は，それらのデータの内，弾性変形の規定に含まれる設計用弾性係数およびポアソン比の設定根拠を詳しく説明する。即ち，各銘柄の応力-ひずみ関係，弾性係数およびポアソン比に関する試験データの詳細を示し，その弾性近似の考え方および設定結果を示した。

Experiment and Analysis on Elastic Deformation Properties of
Graphite and Carbon Materials ofr HTTR Core Components

Taketoshi ARAI, Kazuo MINATO⁺, Motokuni ETO
Tatsuo OKU* and Shinichi YODA**

Department of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 15, 1992)

Fine-grained isotropic graphite grade IG-110, medium-grained near-isotropic graphite grade PGX and coarse-grained baked carbon grade ASR-ORB are employed as structural materials for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR). The material properties for design are specified in Structural Design Code for Graphite Components of HTTR.

This report describes in detail the experiment on deformation behavior including stress-strain relationship, elastic modulus and Poisson's ratio of each grade. An analytical method for linear elastic approximation leads to the property values contained in the Code.

Keywords: HTTR, Graphite, Carbon, Deformation Property, Stress-Strain Relation, Elastic Modulus, Poisson's Ratio, Nonlinearity, Design Code

+ Department of Fuels and Materials Research

* Ibaraki University

** National Space Development Agency of Japan

目 次

1. はじめに	1
2. 実 験	1
2.1 供試材料と試験片	1
2.2 強度試験	2
3. 実験結果と検討	2
3.1 実験結果	2
3.2 検 討	3
3.2.1 検討の考え方	3
3.2.2 最適応力-ひずみ曲線の導出	4
3.2.3 線形弾性解析への適用	4
3.2.4 ポアッソン比とせん断弾性係数	5
4. 結 論	6
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	1
2.1 Materials Tested	1
2.2 Static Strength Tests	2
3. Results and Discussions	2
3.1 Experimental Results	2
3.2 Discussions	3
3.2.1 Approaches	3
3.2.2 Derivation of Best-fit Stress-strain Curves	4
3.2.3 Application to Linear Elastic Analysis	4
3.2.4 Poisson's Ratio and Shear Modulus	5
4. Conclusions	6
Acknowledgement	7
References	7

1. はじめに

現在、日本原子力研究所（以下、原研）が大洗研究所において建設中の高温工学試験研究炉（HTTR）は、我が国における最初の高温ガス炉である¹⁾。HTTRは、熱出力30MW、原子炉出口冷却材温度850～950℃を達成しようとするものであるが、その設計上の特徴として種々の新素材を採用している点が注目される。それらの内、炉心を構成する燃料体やその周囲に配置される反射体や高温部支持構造物に人造黒鉛や焼成炭素材料が使用される。それらは燃料である被覆粒子燃料と違って荷重支持機能が要求される。この機能を適切に達成させるために、構造設計の規格、基準に従って機械設計を行わなければならない。この趣旨のため原研は「高温工学試験研究炉黒鉛構造設計方針」²⁾（以下、「設計指針」）を作成した。これは、原研の関連研究室の成果をもとに（「多目的高温ガス実験炉黒鉛構造設計基準ワーキンググループ報告書」）、更に内外の黒鉛材料に関する知見や設計の考え方を精査検討した結果を受け、又、外部機関の検討をも経て完成したものである。「設計指針」の根幹をなすものは、応力の制限及び応力の解析に関することである。「設計指針」では、HTTR用指定黒鉛銘柄IG-110とPGX、炭素銘柄ASR-ORBに対して上記の設計用材料特性値を示している。それらのデータベースの概要は別に報告されている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。

本報告書は、この「設計指針」に定められている黒鉛材料の応力解析の方法に関する規定の内、未照射材の変形則、特に応力-ひずみ関係の規定に関し、そのデータベースとその設計への適用の考え方について詳細に述べることを目的としている。

脆性材料と見なされる黒鉛材料は、一般に、引張り変形は極めて脆性的であるが、圧縮変形においては塑性ひずみが大きく延性的である。しかし、「設計指針」では、後述する考え方に基づいて近似として線形弾性解析を標準的に採用することを規定している。従って、本書の技術的な要点は、どの様な実験データに基づき、どの様な根拠によりそのような規定を導出しているかにある。即ち、本書での具体的な検討事項は次の4項目である。

- (1) 応力-ひずみ関係の関数近似
- (2) 設計用縦弾性係数の設定
- (3) ポアッソン比とせん断弾性係数の評価

なお、応力-ひずみ関係も含め、指定3銘柄の変形則についての中性子照射効果、均一酸化効果、予応力または疲労効果のデータベースについては、上記の文献⁽²⁾およびその解説⁽³⁾⁻⁽⁶⁾等を参照されたい。

2. 実 験

2.1 供試材料と試験片

供試材料は石油コークス系微粒等方性黒鉛IG-110（東洋炭素(株)製）、石油コークス系中粒準等方性黒鉛PGX（UCAR社製）、及び、石炭ピッチコークス系粗粒準等方性焼成炭素

1. はじめに

現在、日本原子力研究所（以下、原研）が大洗研究所において建設中の高温工学試験研究炉（HTTR）は、我が国における最初の高温ガス炉である¹⁾。HTTRは、熱出力30MW、原子炉出口冷却材温度850～950℃を達成しようとするものであるが、その設計上の特徴として種々の新素材を採用している点が注目される。それらの内、炉心を構成する燃料体やその周囲に配置される反射体や高温部支持構造物に人造黒鉛や焼成炭素材料が使用される。それらは燃料である被覆粒子燃料と違って荷重支持機能が要求される。この機能を適切に達成させるために、構造設計の規格、基準に従って機械設計を行わなければならない。この趣旨のため原研は「高温工学試験研究炉黒鉛構造設計方針」²⁾（以下、「設計指針」）を作成した。これは、原研の関連研究室の成果をもとに（「多目的高温ガス実験炉黒鉛構造設計基準ワーキンググループ報告書」）、更に内外の黒鉛材料に関する知見や設計の考え方を精査検討した結果を受け、又、外部機関の検討をも経て完成したものである。「設計指針」の根幹をなすものは、応力の制限及び応力の解析に関することである。「設計指針」では、HTTR用指定黒鉛銘柄IG-110とPGX、炭素銘柄ASR-0RBに対して上記の設計用材料特性値を示している。それらのデータベースの概要は別に報告されている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。

本報告書は、この「設計指針」に定められている黒鉛材料の応力解析の方法に関する規定の内、未照射材の変形則、特に応力-ひずみ関係の規定に関し、そのデータベースとその設計への適用の考え方について詳細に述べることを目的としている。

脆性材料と見なされる黒鉛材料は、一般に、引張り変形は極めて脆性的であるが、圧縮変形においては塑性ひずみが大きく延性的である。しかし、「設計指針」では、後述する考え方に基づいて近似として線形弾性解析を標準的に採用することを規定している。従って、本書の技術的な要点は、どの様な実験データに基づき、どの様な根拠によりそのような規定を導出しているかにある。即ち、本書での具体的な検討事項は次の4項目である。

- (1) 応力-ひずみ関係の関数近似
- (2) 設計用縦弾性係数の設定
- (3) ポアソン比とせん断弾性係数の評価

なお、応力-ひずみ関係も含め、指定3銘柄の変形則についての中性子照射効果、均一酸化効果、予応力または疲労効果のデータベースについては、上記の文献⁽²⁾およびその解説⁽³⁾⁻⁽⁶⁾等を参照されたい。

2. 実 験

2.1 供試材料と試験片

供試材料は石油コークス系微粒等方性黒鉛IG-110（東洋炭素(株)製）、石油コークス系中粒準等方性黒鉛PGX（UCAR社製）、及び、石炭ピッチコークス系粗粒準等方性焼成炭素

ASR-ORBの（SIGRI社製）3銘柄である。この3種材料の代表的な性質をTable 1に示す。

本研究での実験ではFig. 1に示す形状の試験片を用いた。これらの試験片はそれぞれ次のような素材ブロックからのサンプリングにより製作した。IG-110黒鉛の原素材ブロック寸法は $\phi 380 \times 700$ mmであり、本試験片はその一部から切り出した一連の試験片の一部である。PGX黒鉛の原素材寸法は $\phi 1000 \times 1000$ mmで、その一部を分割したものを購入し、試験片を加工製作した。ASR-ORB炭素の原素材寸法は $\phi 1150 \times 550$ mmであり、これより各種特性評価用試料を切り出したが、本試験片はその一連の試料の内の一部である。何れの素材からも、異方性を調べるために、素材ブロックの中心軸に平行な試験片（L方向）、中心軸に垂直な試験片（T方向）の2種類を作成した。以後、それぞれL方向試験片、T方向試験片と呼ぶ。

2.2 強度試験

本強度試験には負荷容量500kgの汎用材料試験機を使用した。

ひずみ計測には、縦ひずみと横ひずみともにひずみゲージを各試験片の表面に接着剤を用いて貼付した。本試験のひずみ計測値は全て破断までの単純負荷過程での測定値である。これらの強度試験は室温、大気中で行った。尚、全試験片について超音波速度法により動的ヤング率 E_D を測定した。即ち、 E_D は近似的に次式で計算する。即ち、かさ密度を ρ 、超音波伝播速度を V として、 $E_D = \rho V^2$ より動的ヤング率を計算した。これによって応力-ひずみ曲線から得られる静的ヤング率 E_S とを比較することができる。超音波速度測定に用いた探傷器は型式UCL-35（クラウトクレマー社製）、探触子は5MHz型である。

3. 実験結果と検討

3.1 実験結果

各銘柄の引張り、4点曲げ及び圧縮試験によるL方向及びT方向の試験片毎に応力-ひずみ関係の全実験データをFig. 2～Fig. 11に示す。これらの図から、各銘柄の応力-ひずみ曲線に関しては次の諸点が実験事実として読み取れる。尚、曲げ試験での応力値は弾性計算に基づいている。

(1) IG-110黒鉛：

- 1) 単軸引張り試験によればひずみ範囲が0.4%以下ではL方向とT方向との有意な差は認められない。
- 2) 引張り破断が発生する直前のひずみ（約0.4%）における応力の変動幅は約±8%である。
- 3) 4点曲げ試験による引張り応力-ひずみ曲線は引張り試験によるそれよりも上側、即ち、弾性近似のために応力値が大きめになっている。引張り応力側と圧縮応力側との対称性については、低応力範囲において引張りひずみの測定誤差が大きい。

ASR-ORBの（SIGRI社製）3銘柄である。この3種材料の代表的な性質をTable 1に示す。

本研究での実験ではFig. 1に示す形状の試験片を用いた。これらの試験片はそれぞれ次のような素材ブロックからのサンプリングにより製作した。IG-110黒鉛の原素材ブロック寸法は $\phi 380 \times 700$ mmであり、本試験片はその一部から切り出した一連の試験片の一部である。PGX黒鉛の原素材寸法は $\phi 1000 \times 1000$ mmで、その一部を分割したものを購入し、試験片を加工製作した。ASR-ORB炭素の原素材寸法は $\phi 1150 \times 550$ mmであり、これより各種特性評価用試料を切り出したが、本試験片はその一連の試料の内の一部である。何れの素材からも、異方性を調べるために、素材ブロックの中心軸に平行な試験片（L方向）、中心軸に垂直な試験片（T方向）の2種類を作成した。以後、それぞれL方向試験片、T方向試験片と呼ぶ。

2.2 強度試験

本強度試験には負荷容量500kgの汎用材料試験機を使用した。

ひずみ計測には、縦ひずみと横ひずみともにひずみゲージを各試験片の表面に接着剤を用いて貼付した。本試験のひずみ計測値は全て破断までの単純負荷過程での測定値である。これらの強度試験は室温、大気中で行った。尚、全試験片について超音波速度法により動的ヤング率 E_D を測定した。即ち、 E_D は近似的に次式で計算する。即ち、かさ密度を ρ 、超音波伝播速度を V として、 $E_D = \rho V^2$ より動的ヤング率を計算した。これによって応力-ひずみ曲線から得られる静的ヤング率 E_S とを比較することができる。超音波速度測定に用いた探傷器は型式UCL-35（クラウトクレマー社製）、探触子は5MHz型である。

3. 実験結果と検討

3.1 実験結果

各銘柄の引張り、4点曲げ及び圧縮試験によるL方向及びT方向の試験片毎に応力-ひずみ関係の全実験データをFig. 2～Fig. 11に示す。これらの図から、各銘柄の応力-ひずみ曲線に関しては次の諸点が実験事実として読み取れる。尚、曲げ試験での応力値は弾性計算に基づいている。

(1) IG-110黒鉛：

- 1) 単軸引張り試験によればひずみ範囲が0.4%以下ではL方向とT方向との有意な差は認められない。
- 2) 引張り破断が発生する直前のひずみ（約0.4%）における応力の変動幅は約±8%である。
- 3) 4点曲げ試験による引張り応力-ひずみ曲線は引張り試験によるそれよりも上側、即ち、弾性近似のために応力値が大きめになっている。引張り応力側と圧縮応力側との対称性については、低応力範囲において引張りひずみの測定誤差が大きい。

両試験片グループのデータによっても、非対称性が系統的に認められるとは言えない。

4) 圧縮応力-ひずみ曲線では全てのひずみ範囲においてフローストレスはT方向の方がL方向よりも約5%大きい。即ち、異方性は僅少である。

5) 圧縮応力-ひずみ曲線の変動は1%ひずみにおいて約±5%である。

(2) P G X 黒鉛:

1) 単軸引張り応力-ひずみ曲線では明らかに異方性があり、0.1%ひずみにおいてフローストレスはT方向の方がL方向よりも約30%も高い。

2) 単軸引張り応力-ひずみ曲線(L方向)の変動はひずみ0.1%において約±3%である。

3) 曲げ試験による圧縮応力-ひずみ曲線でも明らかに異方性があり、0.1%ひずみにおいてフローストレスはT方向の方がL方向よりも約50%も高い。

4) 圧縮応力-ひずみ曲線によると、ひずみ0.2%における応力値は、引張り応力-ひずみ関係によるものよりやや大きい。つまり、引張り破壊ひずみ程度において塑性変形は引張りの場合よりも少ない。

(3) A S R - 0 R B 炭素:

1) 何れの負荷モードにおいても破断直前まで直線的な応力-ひずみ関係を示す。又、異方性は極めて少ない。

2) 圧縮応力-ひずみ関係における変動は、フローストレスが0.5%のとき約±5%である。

3.2 検討

3.2.1 検討の考え方

本検討では設計用弾性係数を設定することが最終目的であるが、それに至る前提となる共通の考え方及び方法を以下に述べる。

1) 参照するデータは銘柄、試験片方向(LとT)、試験モード(引張り、曲げ、圧縮)によって各々区別する。曲げ試験のデータは引張り応力のみ参考とする。曲げ試験の引張り応力-ひずみ関係は引張り試験によるそれよりも高ひずみまでを含むため、試験片のみならず構造物試験のデータ解析や実機構造物の破壊条件の把握のために有用であるからである。

2) 実験データの検討では、先ず応力-ひずみ($\sigma - \varepsilon$)曲線を多項式近似する。この多項式は、古くから黒鉛の $\sigma - \varepsilon$ 関係式⁽⁷⁾として用いられている次の表示形を採用した。

$$\varepsilon = A\sigma + B\sigma^2 + C\sigma^3 \quad (1)$$

ここでA,B,Cは最小自乗近似による係数である。なお、3次式は圧縮変形にのみ適用

した。但し、係数A（ヤング率の逆数）は各銘柄、方向では異なるが、引張り側、圧縮側とで同一の値となるようにした。そして、次節に述べる方法からヤング率として、次の値を用いた。

IG-110 黒鉛（L, T方向で同じ）	9.7 MPa
PGX 黒鉛（L方向）	7.9 MPa
PGX 黒鉛（T方向）	6.4 MPa
ASR-ORB 炭素（L方向）	8.1 MPa
ASR-ORB 炭素（T方向）	9.0 MPa

この様に引張り側と圧縮側とでヤング率ないし縦弾性係数を等しくする必要性は、実際の構造物の応力解析においては、非対称形応力-ひずみ関係は採用不可能であるためである。

3) 実験曲線の(1)式による近似では前述の線図から実験結果のばらつきを考慮し、その平均的な関係を離散的な数値データとしてそれを最小自乗近似することとした。この際次のように2つの応力範囲を区別し、2種類の近似式を作成した。

- a) 原点から破断応力まで
- b) 原点から暫定的な基準強さまで

後者の場合、各銘柄について定めた暫定的な基準強さ（Su, 引張り基準強さをSut, 圧縮基準強さをSucとする）とは、IG-110黒鉛で引張りが17MPa, 圧縮が57MPa, PGX黒鉛で引張りが5MPa, 圧縮が26MPa, 更に、ASR-ORB炭素で引張りが3.6MPa, 圧縮が40MPaである。なお、この応力の範囲は(1)式による近似を行うことにより、近似式の外挿上問題が無いことが次節の結果から分かる。

3.2.2 最適応力-ひずみ曲線の導出

上記a)とb)の場合の最小自乗近似計算の結果をそれぞれTable 2, Table 3にまとめた。又、上記のb)方式による最小自乗近似式の計算値と実験結果との比較をFig. 12 ~ Fig.14に示す。図中の太線が近似式による計算値である。何れの近似式も実験結果を十分正確に近似していることが分かる。

こうして得られた各銘柄の応力-ひずみ関係をFig. 15 ~ Fig.17に示す。

3.2.3 線形弾性解析への適用

原子力機器の機械設計における応力解析では、鉄鋼材料のような延性材料でも通常状態での使用条件を弾性範囲に制限するために、設計用材料データの一つとして縦弾性係数が決められる。この場合、比例限度以下の応力では応力-ひずみ関係は完全に直線である。しかし、前節までに示したように黒鉛材料の変形挙動には引張り変形においてすら比例限度とか弾性限度とかの概念は成り立たない。更に、重要な点は応力-ひずみ関係のばらつきも無視できないことである。この様な黒鉛特有の変形挙動を考慮して設計に用いるべき線形近似（設計用縦弾性係数）を考える場合、次のような候補が考えられる。

- a) 応力-ひずみ近似曲線の原点における勾配 E_D （ヤング率, 超音波速度法

又は共振法により近似値が得られる)

- b) 原点と $S_{ut}/4$ を結ぶ直線の勾配 (割線弾性係数 E_c)
- c) 原点と $S_{ut}/3$ を結ぶ直線の勾配 (割線弾性係数 E_c')
- d) 応力 $\pm S_u/4$ を結ぶ直線の勾配 (割線弾性係数 E')
- e) 応力 $\pm S_u/3$ を結ぶ直線の勾配 (割線弾性係数 E'')

ここで $1/4$ 又は $1/3$ を用いているのは、基準強さ S_u (引張り S_{ut} 、圧縮 S_{uc}) の $1/3$ 又は $1/4$ を「設計指針」での通常運転状態 (運転状態 I 及び II) の応力制限値とすることを想定しているためである。上記 a) ~ e) による弾性係数の大小関係はこの順に小さくなるのが、例えば IG-110 黒鉛の応力-ひずみ曲線によって容易に判断できる。それを定量的に調べるために、任意のひずみにおける縦弾性係数候補値を用いたときの応力値と応力-ひずみ近似式による応力値との比を求め Fig. 18 ~ Fig. 20 に各々の銘柄毎に示した。図の縦軸の値が 1.0 以上の時は線形近似計算の応力値が過大評価であり、1.0 より小さい時が過小評価となることを意味する。ASR-ORB 炭素の応力-ひずみ関係の非直線性が小さいために問題とならないが、黒鉛材料では非線形関係が計算応力値に相当の影響を及ぼすことが分かる。特に、原点の勾配すなわちヤング率 E_D を用いると実際の破壊状態に対しては 20 ~ 30 % 以上の過大評価となる。さて、設計計算の応力値は、応力制限値のみを考える場合には、過大に評価する方が安全側である。ここでの問題はどの程度安全側にすることが合理的であるかと言うことであらうが、答は簡単ではない。一つの考え方として、上記の b) または c) を採ることである。この場合、発生応力が小さく制限される通常運転状態では過小評価となるが、それ以上の応力が発生する運転状態 (運転状態 III 以上) において過大評価を与える。全体的には通常運転状態の評価を重視する考えである。なお、b) と c) とでは計算応力値の差が約 3 % であり、その他の工学的な応力解析のモデルにおける近似を考えれば無視できる程度のもので言えよう。又、もう一つの考え方は上記の d) または e) を採ることである。この場合は定義から分かるように各材料の基準強さまでの応力範囲に対して平均した縦弾性係数となり、全ての運転状態での評価を同等に扱うことに対応している。

以上のような検討に基づいて「設計指針」の適用に当たっては「炉心黒鉛構造物」用の IG-110 黒鉛については上記の d) を、又、「炉心支持黒鉛構造物」用の 3 銘柄については上記の e) を採用することとしている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。なお、繰り返しになるが、黒鉛構造物の健全性評価にとって影響の大きい大きな設計荷重が想定される運転状態ではこの線形近似解析法は相当の応力の過大評価となる。このため、「設計指針」では上記の応力-ひずみ関係の近似式を用いる非直線線形解析法の採用を許容している。実際的には、中性子照射効果が少なく構造物に局部的に 2 次応力が大きくなるケースに採用することが有効と考えられる。

3.2.4 ポアッソン比とせん断弾性係数

原子炉用黒鉛構造物の応力解析においては、通常、横等方性または等方性が仮定される。このことは例えば Table 1 に示したように H T T R 黒鉛の熱・構造力学的物性値の

素材ブロックのL方向とT方向とで与えられることから工学的に問題ないであろう。横等方性材料の弾性構成方程式には5つの材料定数が含まれる⁽⁸⁾。それらは、2つの縦弾性係数と1つのせん断弾性係数、2つのポアソン比である。ここでは、後者の3つの機械的性質を検討する。

先ず、Table 4 に実験データとして、各材料、荷重形式および試験片採取方向別に、超音波伝播速度法と静的応力-ひずみ関係の両者からヤング率、ポアソン比を示した。ここでIG-110黒鉛とPGX黒鉛の静的ヤング率はひずみ範囲が0～0.03%で定めたものである。この場合、両黒鉛の動的ヤング率と静的ヤング率とでは実験誤差範囲内で一致することが分かる。ポアソン比の測定値は精度2桁の範囲で一致している。又、方向依存性は±5%の範囲で一致している。従って、設計用のポアソン比は実験値の算術平均値とし等方性材料で近似することにしその結果を上記の表に示した。尚、黒鉛（横等方性）材料の熱・照射誘起応力に対するポアソン比の不確かさの影響が定量的に評価されており、通常の黒鉛材料で実測されている範囲0.1～0.2の変動の効果は僅少であることが分かっている⁽⁹⁾。

次に、せん断弾性係数はその直接的な測定によるものではなく、Table 4 から分かるように、又、前述のPGX黒鉛の応力-ひずみ関係の測定値でも応力が小さい範囲では異方性の効果も小さいこと等から、どの銘柄もほぼ等方的弾性変形を示している見なし、簡略法として、等方性材料のヤング率E、ポアソン比 ν 、せん断弾性率Gとの間の次の相関式により計算で定めることにした。

$$G = E / 2 (1 + \nu) \quad (2)$$

なお、設計値としてはEとして前節で導出した縦弾性係数を等方化した値を用いることとした。この様な手順で設定した「炉心支持黒鉛構造物」設計用のせん断弾性係数を上記の表に記載した。

4. 結 論

高温工学試験研究炉の黒鉛構造物の製作に使用されるIG-110黒鉛、PGX黒鉛およびASR-ORB炭素の機械的性質の内、未照射材の弾性構成方程式を記述するために必要な縦弾性係数、ポアソン比およびせん断弾性係数を検討した。即ち、先ず各銘柄に対する基本的な材料試験を参照し、データのばらつき、方向依存性（異方性）に留意して、それらの特徴を明らかにした。そして、それらにより設計のための応力解析で等方性または横等方性を仮定することを前提として、次の特性値を導出した。

- (1) 最適応力-ひずみ関係式
- (2) 設計用縦弾性係数
- (3) 設計用せん断弾性係数
- (4) 設計用ポアソン比

素材ブロックのL方向とT方向とで与えられることから工学的に問題ないであろう。横等方性材料の弾性構成方程式には5つの材料定数が含まれる⁽⁸⁾。それらは、2つの縦弾性係数と1つのせん断弾性係数、2つのポアソン比である。ここでは、後者の3つの機械的性質を検討する。

先ず、Table 4 に実験データとして、各材料、荷重形式および試験片採取方向別に、超音波伝播速度法と静的応力-ひずみ関係の両者からヤング率、ポアソン比を示した。ここでIG-110黒鉛とPGX黒鉛の静的ヤング率はひずみ範囲が0～0.03%で定めたものである。この場合、両黒鉛の動的ヤング率と静的ヤング率とでは実験誤差範囲内で一致することが分かる。ポアソン比の測定値は精度2桁の範囲で一致している。又、方向依存性は±5%の範囲で一致している。従って、設計用のポアソン比は実験値の算術平均値とし等方性材料で近似することにしその結果を上記の表に示した。尚、黒鉛（横等方性）材料の熱・照射誘起応力に対するポアソン比の不確かさの影響が定量的に評価されており、通常の黒鉛材料で実測されている範囲0.1～0.2の変動の効果は僅少であることが分かっている⁽⁹⁾。

次に、せん断弾性係数はその直接的な測定によるものではなく、Table 4 から分かるように、又、前述のPGX黒鉛の応力-ひずみ関係の測定値でも応力が小さい範囲では異方性の効果も小さいこと等から、どの銘柄もほぼ等方的弾性変形を示している見なし、簡略法として、等方性材料のヤング率E、ポアソン比 ν 、せん断弾性率Gとの間の次の相関式により計算で定めることにした。

$$G = E / 2 (1 + \nu) \quad (2)$$

なお、設計値としてはEとして前節で導出した縦弾性係数を等方化した値を用いることとした。この様な手順で設定した「炉心支持黒鉛構造物」設計用のせん断弾性係数を上記の表に記載した。

4. 結 論

高温工学試験研究炉の黒鉛構造物の製作に使用されるIG-110黒鉛、PGX黒鉛およびASR-ORB炭素の機械的性質の内、未照射材の弾性構成方程式を記述するために必要な縦弾性係数、ポアソン比およびせん断弾性係数を検討した。即ち、先ず各銘柄に対する基本的な材料試験を参照し、データのばらつき、方向依存性（異方性）に留意して、それらの特徴を明らかにした。そして、それらにより設計のための応力解析で等方性または横等方性を仮定することを前提として、次の特性値を導出した。

- (1) 最適応力-ひずみ関係式
- (2) 設計用縦弾性係数
- (3) 設計用せん断弾性係数
- (4) 設計用ポアソン比

本検討は、「高温工学試験研究炉用黒鉛構造物設計指針」で採用されている材料データの作成根拠を詳細に説明したものである。

謝 辞

本報告書の作成に当り大洗研究所高温工学試験研究炉開発部塩沢周策主任研究員から貴重なコメントを頂いた。記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 斎藤伸三、他；高温工学試験研究炉の設計と研究開発、日本原子力学会誌、32, 847
- 2) 高温工学試験研究炉設計室、他；高温工学試験研究炉用黒鉛構造設計方針、JAERI-M89-006 (1989).
- 3) 伊与久達夫、石原正博、豊田純二、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針の解説、JAERI-M91-083 (1991).
- 4) 伊与久達夫、石原正博、豊田純二、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針の解説、JAERI-M91-070 (1991).
- 5) 石原正博、伊与久達夫、豊田純二、佐藤貞夫、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針における設計用データの解説、JAERI-M91-154 (1991).
- 6) 石原正博、伊与久達夫、豊田純二、佐藤貞夫、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針における設計用データの解説、JAERI-M91-153 (1991).
- 7) G. M. Jenkins ; Brit. J. Appl. Phys., 13, 30 (1962).
- 8) 荒井長利、佐藤貞夫；高温ガス炉多重殻型燃料体の照射に伴う温度および応力変化の解析 計算コード MULSHES、JAERI-M5513 (1974).
- 9) 荒井長利、佐藤貞夫；機械的応力に対する黒鉛材料の異方性の効果、JAERI-M5998 (1975).

本検討は、「高温工学試験研究炉用黒鉛構造物設計指針」で採用されている材料データの作成根拠を詳細に説明したものである。

謝 辞

本報告書の作成に当り大洗研究所高温工学試験研究炉開発部塩沢周策主任研究員から貴重なコメントを頂いた。記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 斎藤伸三、他；高温工学試験研究炉の設計と研究開発、日本原子力学会誌、32, 847
- 2) 高温工学試験研究炉設計室、他；高温工学試験研究炉用黒鉛構造設計方針、JAERI-M89-006 (1989).
- 3) 伊与久達夫、石原正博、豊田純二、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針の解説、JAERI-M91-083 (1991).
- 4) 伊与久達夫、石原正博、豊田純二、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針の解説、JAERI-M91-070 (1991).
- 5) 石原正博、伊与久達夫、豊田純二、佐藤貞夫、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針における設計用データの解説、JAERI-M91-154 (1991).
- 6) 石原正博、伊与久達夫、豊田純二、佐藤貞夫、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針における設計用データの解説、JAERI-M91-153 (1991).
- 7) G. M. Jenkins ; Brit. J. Appl. Phys., 13, 30 (1962).
- 8) 荒井長利、佐藤貞夫；高温ガス炉多重殻型燃料体の照射に伴う温度および応力変化の解析 計算コード MULSHES、JAERI-M5513 (1974).
- 9) 荒井長利、佐藤貞夫；機械的応力に対する黒鉛材料の異方性の効果、JAERI-M5998 (1975).

本検討は、「高温工学試験研究炉用黒鉛構造物設計指針」で採用されている材料データの作成根拠を詳細に説明したものである。

謝 辞

本報告書の作成に当り大洗研究所高温工学試験研究炉開発部塩沢周策主任研究員から貴重なコメントを頂いた。記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 斎藤伸三、他；高温工学試験研究炉の設計と研究開発、日本原子力学会誌、32, 847
- 2) 高温工学試験研究炉設計室、他；高温工学試験研究炉用黒鉛構造設計方針、JAERI-M89-006 (1989).
- 3) 伊与久達夫、石原正博、豊田純二、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針の解説、JAERI-M91-083 (1991).
- 4) 伊与久達夫、石原正博、豊田純二、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針の解説、JAERI-M91-070 (1991).
- 5) 石原正博、伊与久達夫、豊田純二、佐藤貞夫、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針における設計用データの解説、JAERI-M91-154 (1991).
- 6) 石原正博、伊与久達夫、豊田純二、佐藤貞夫、塩沢周策；高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針における設計用データの解説、JAERI-M91-153 (1991).
- 7) G. M. Jenkins ; Brit. J. Appl. Phys., 13, 30 (1962).
- 8) 荒井長利、佐藤貞夫；高温ガス炉多重殻型燃料体の照射に伴う温度および応力変化の解析 計算コード MULSHES、JAERI-M5513 (1974).
- 9) 荒井長利、佐藤貞夫；機械的応力に対する黒鉛材料の異方性の効果、JAERI-M5998 (1975).

Table 1 Typical properties of IG-110, PGX graphites and ASR-ORB carbon.

Grade	IG-11 graphite	PGX graphite	ASR-ORB baked carbon
Manufacturer	Toyo Tanso (Japan)	UCAR (USA)	SIGRI (FRG)
Filler coke type	Petroleum coke, fine-grained	Petroleum coke, medium-grained	Coal tar pitch coke, coarse-grained
Coke grain size (mm)	0.02 (ave.)	0.8 (max.)	1.0 (max.)
Forming method	Isostatic mold	Mold	Vibration mold
Typical log size (m)	$\phi 0.4 \times 0.9$	$\phi 1.2 \times 0.8$	$\phi 1.1 \times 0.8$
Bulk density (g/cc)	1.78	1.74	1.65
Max. HTT (°C)	~3000	~3000	1100
Young's modulus (GPa)	L 10.1	L 6.6	L 9.5
		T 8.5	T 10.7
Tensile strength (MPa)	L 28	L 8.3	L 6.5
		T 9.2	T 6.8
Compressive strength (MPa)	L 81	L 31	L 58
		T 30	T 50

L, T : Parallel and Perpendicular to the vertical axis of the log

HTT : Heat treatment temperature

Table 2 Stress-strain relationships derived for stresses up to fracture.

Grade*	Load	Stress-strain equation
IG-110	Tension	$\epsilon = 1.003 \times 10^{-4} \sigma + 2.039 \times 10^{-6} \sigma^2$
	T Compression	$\epsilon = 1.003 \times 10^{-4} \sigma - 1.507 \times 10^{-7} \sigma^2 + 2.472 \times 10^{-8} \sigma^3$
	Bend	$\epsilon = 1.063 \times 10^{-4} \sigma + 7.874 \times 10^{-7} \sigma^2$
	L Tension	$\epsilon = 1.054 \times 10^{-4} \sigma + 2.000 \times 10^{-6} \sigma^2$
	L Compression	$\epsilon = 1.054 \times 10^{-4} \sigma + 6.035 \times 10^{-7} \sigma^2 + 1.728 \times 10^{-8} \sigma^3$
	L Bend	$\epsilon = 1.069 \times 10^{-4} \sigma + 1.162 \times 10^{-6} \sigma^2$
PGX	Tension	$\epsilon = 1.263 \times 10^{-4} \sigma + 7.268 \times 10^{-6} \sigma^2$
	T Compression	$\epsilon = 1.263 \times 10^{-4} \sigma + 1.761 \times 10^{-6} \sigma^2 + 7.791 \times 10^{-8} \sigma^3$
	Bend	$\epsilon = 1.002 \times 10^{-4} \sigma + 3.986 \times 10^{-6} \sigma^2$
	L Tension	$\epsilon = 1.563 \times 10^{-4} \sigma + 1.078 \times 10^{-5} \sigma^2$
	L Compression	$\epsilon = 1.563 \times 10^{-4} \sigma + 1.839 \times 10^{-6} \sigma^2 + 1.318 \times 10^{-7} \sigma^3$
	L Bend	$\epsilon = 1.554 \times 10^{-4} \sigma + 5.174 \times 10^{-6} \sigma^2$
ASR-ORB	Tension	$\epsilon = 1.114 \times 10^{-4} \sigma + 2.334 \times 10^{-6} \sigma^2$
	T Compression	$\epsilon = 1.114 \times 10^{-4} \sigma - 3.947 \times 10^{-8} \sigma^2 + 8.387 \times 10^{-9} \sigma^3$
	Bend	$\epsilon = 1.166 \times 10^{-4} \sigma + 1.630 \times 10^{-6} \sigma^2$
	L Tension	$\epsilon = 1.235 \times 10^{-4} \sigma + 4.536 \times 10^{-6} \sigma^2$
	L Compression	$\epsilon = 1.235 \times 10^{-4} \sigma + 1.443 \times 10^{-7} \sigma^2 + 6.653 \times 10^{-9} \sigma^3$
	L Bend	$\epsilon = 1.198 \times 10^{-4} \sigma + 2.708 \times 10^{-6} \sigma^2$

* T : Transverse (radial) orientation

L : Longitudinal (axial) orientation

Table 3 Stress-strain relationships derived for stresses up to specified ultimate strengths.

Grade*		Load	Stress-strain equation
IG-110	T	Tension	$\epsilon = 1.003 \times 10^{-4} \sigma + 2.140 \times 10^{-6} \sigma^2$
		Compression	$\epsilon = 1.003 \times 10^{-4} \sigma + 1.173 \times 10^{-6} \sigma^2$
	L	Tension	$\epsilon = 1.054 \times 10^{-4} \sigma + 2.093 \times 10^{-6} \sigma^2$
		Compression	$\epsilon = 1.054 \times 10^{-4} \sigma + 1.548 \times 10^{-6} \sigma^2$
PGX	T	Tensile	$\epsilon = 1.263 \times 10^{-4} \sigma + 6.706 \times 10^{-6} \sigma^2$
		Compression	$\epsilon = 1.263 \times 10^{-4} \sigma + 3.642 \times 10^{-6} \sigma^2$
	L	Tension	$\epsilon = 1.563 \times 10^{-4} \sigma + 1.130 \times 10^{-5} \sigma^2$
		Compression	$\epsilon = 1.563 \times 10^{-4} \sigma + 5.130 \times 10^{-6} \sigma^2$
ASR-ORB	T	Tension	$\epsilon = 1.114 \times 10^{-4} \sigma + 1.628 \times 10^{-6} \sigma^2$
		Compression	$\epsilon = 1.114 \times 10^{-4} \sigma + 2.704 \times 10^{-7} \sigma^2$
	L	Tension	$\epsilon = 1.235 \times 10^{-4} \sigma + 3.796 \times 10^{-6} \sigma^2$
		Compression	$\epsilon = 1.235 \times 10^{-4} \sigma + 4.034 \times 10^{-7} \sigma^2$

* T : Transverse (radial) orientation

L : Longitudinal (axial) orientation

Table 4 Poisson's ratio and shear modulus of grades IG-110, PGX and ASR-ORB.

Grade	Load type	Young's modulus * (GPa)		Radio E _D /E _s	Poisson's ratio		Shear modulus (GPa)			
		Dynamic E _D	Static E _s		Measured	Design value	Calculated	Design value		
IG-110	Tension	L	10.3/0.16	10.2/0.34	0.93	0.138	0.14	4.22	3.7	
		T	10.6/0.21	9.72/0.33	0.91	0.137		4.28		
	Bend	L	10.1/0.16	9.99/0.34	0.99	—		0.14		
		T	10.6/0.29	10.7/0.47	1.0	—				
PGX	Compression	L	9.84/0.12	9.38/0.70	0.95	0.143	0.11	4.10	2.7	
		T	10.4/0.17	10.2/0.86	0.98	0.135		4.51		
	Tension	L	5.84/0.04	6.21/0.40	1.1	0.102		0.11		2.82
		T	7.28/0.12	7.65/0.40	1.0	0.113				3.45
ASR-ORB	Bend	L	5.88/0.07	6.61/0.36	1.1	—	0.18	3.45	3.6	
		T	7.42/0.12	8.36/0.42	1.1	—				3.91
	Tension	L	8.09/0.091	8.12/0.49	1.0	0.178		0.18		
		T	8.89/0.055	9.28/0.21	1.0	0.193				
ASR-ORB	Bend	L	8.92/0.23	9.12/0.55	1.0	—	0.18		3.6	
		T	9.74/0.26	10.1/0.72	1.0	—				3.47
	Compression	L	9.35/0.11	8.08/0.49	0.86	0.167		0.18		
		T	9.47/0.26	8.67/0.72	0.89	0.173				3.69

* Mean/Standard deviation

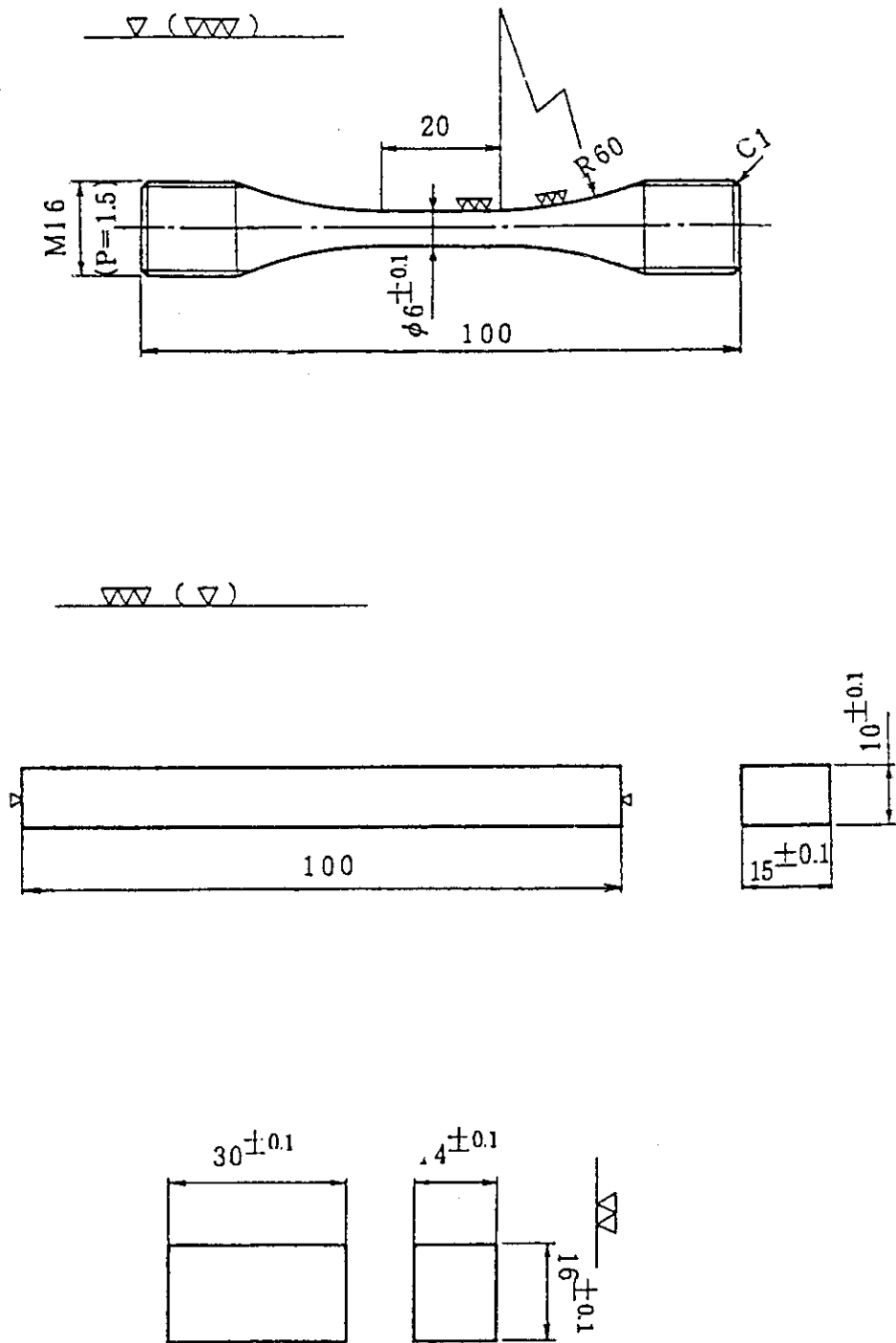


Fig. 1 Geometries of tensile, bending and compressive specimens for stress-strain measurements; (a) Tension, (b) Four-point bending, (c) Compression.

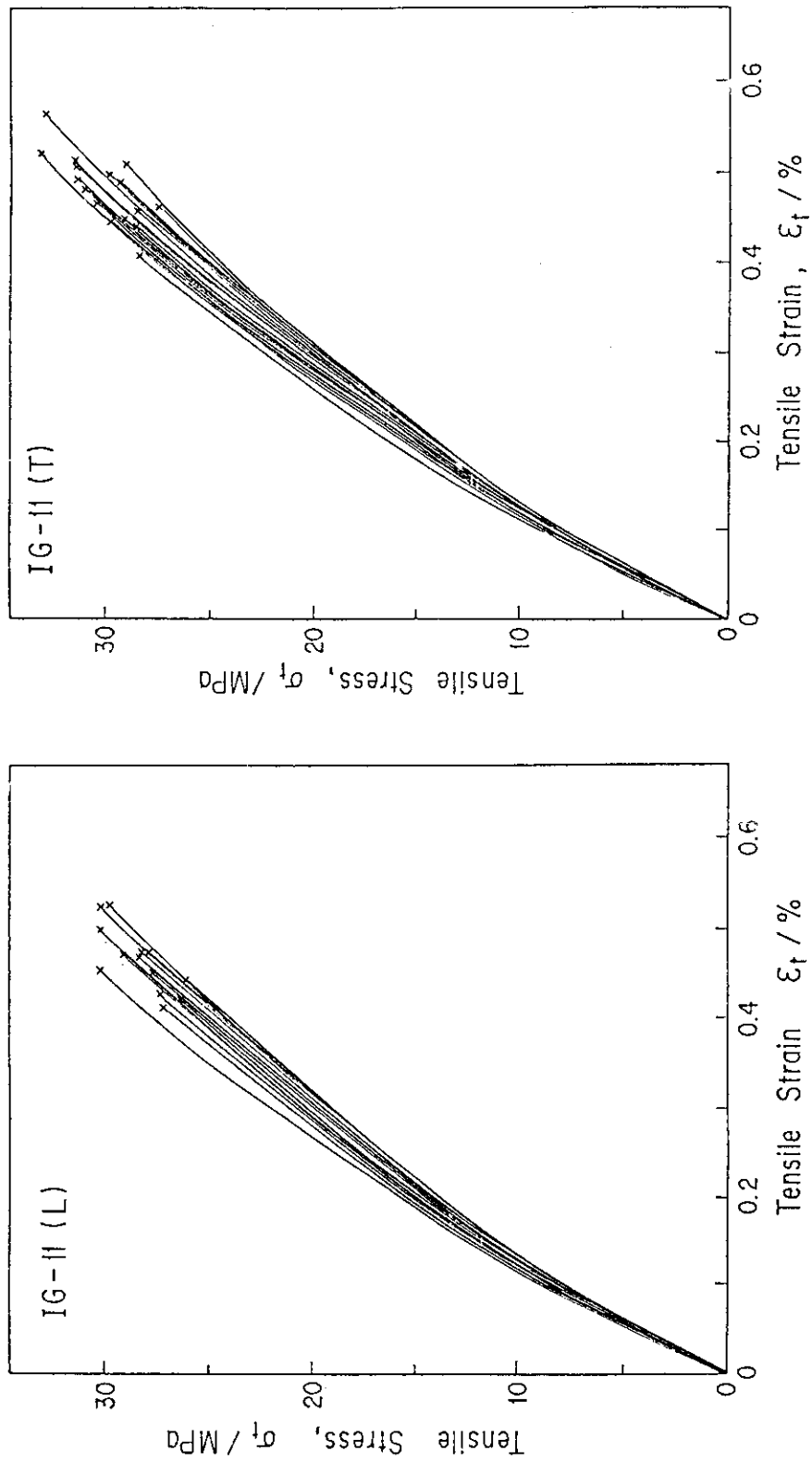


Fig. 2 Tensile stress-strain curves of IG-110 specimens; (a) L orientation (b) T orientation.

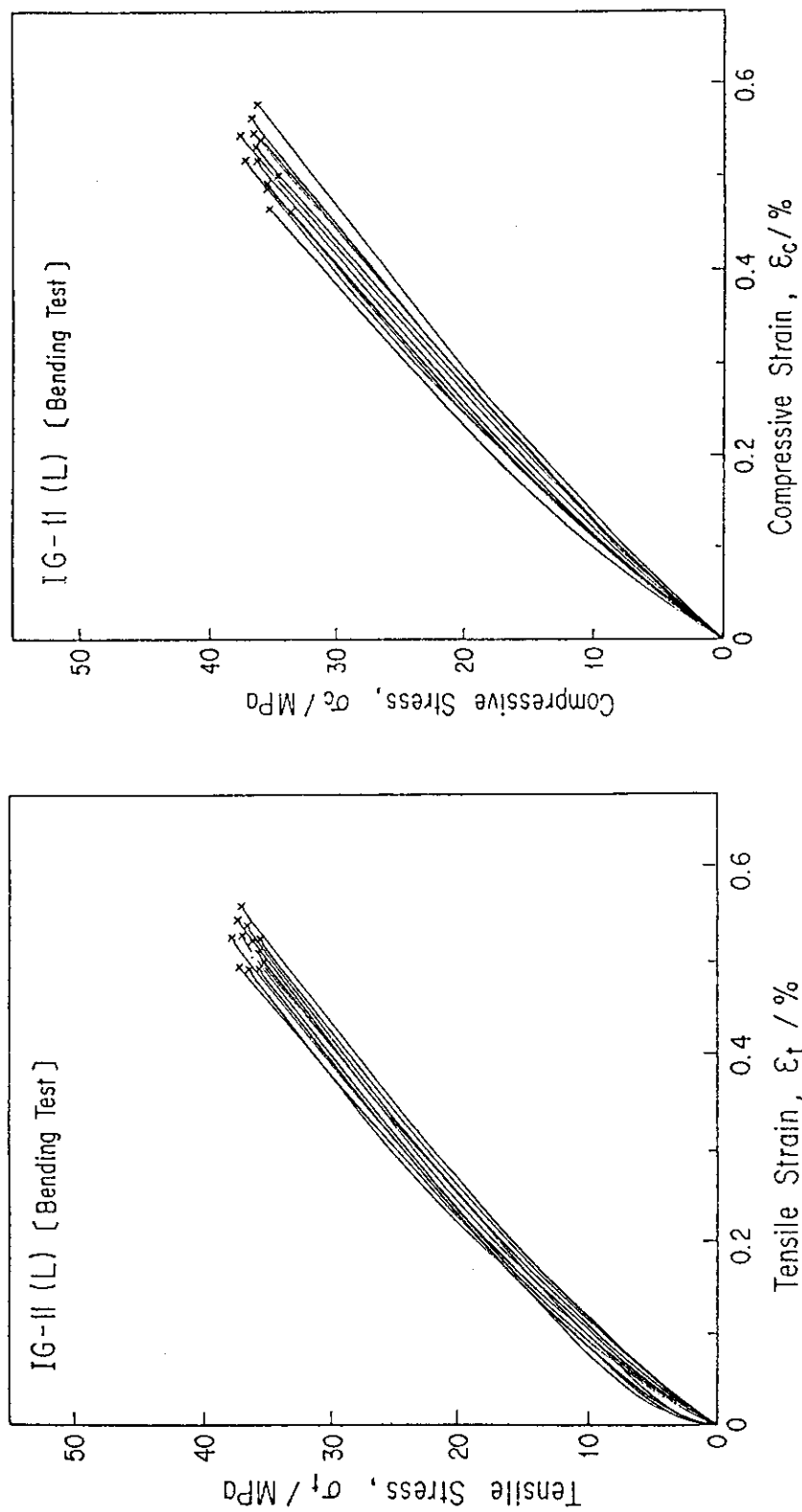


Fig. 3 Tensile and compressive stress-strain curves of IG-110 specimens (L orientation) obtained by bend tests; (a) Tension, (b) Compression.

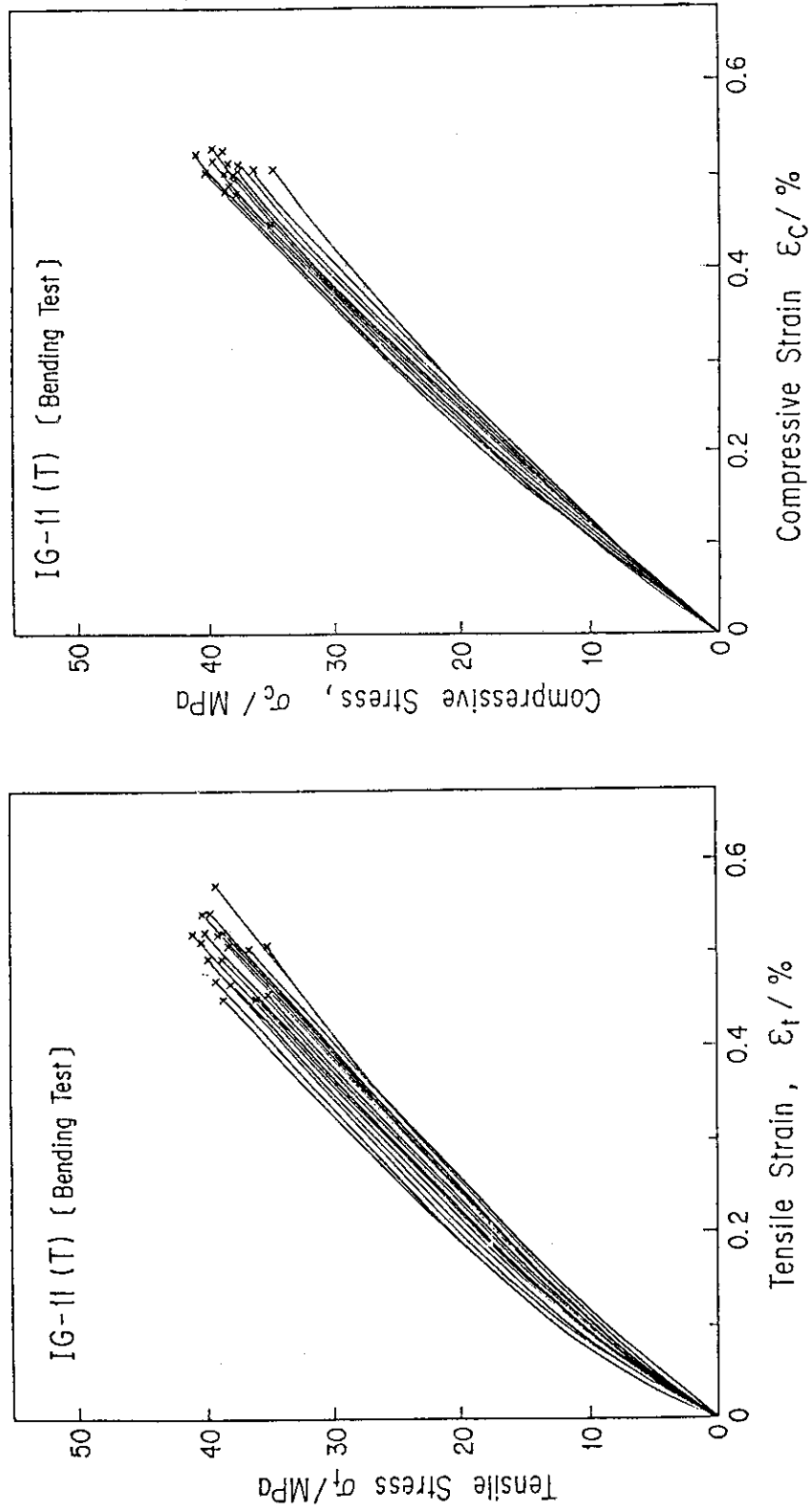


Fig. 4 Tensile and compressive stress-strain curves of IG-110 specimens (T orientation) obtained by bend tests; (a) Tension, (b) Compression.

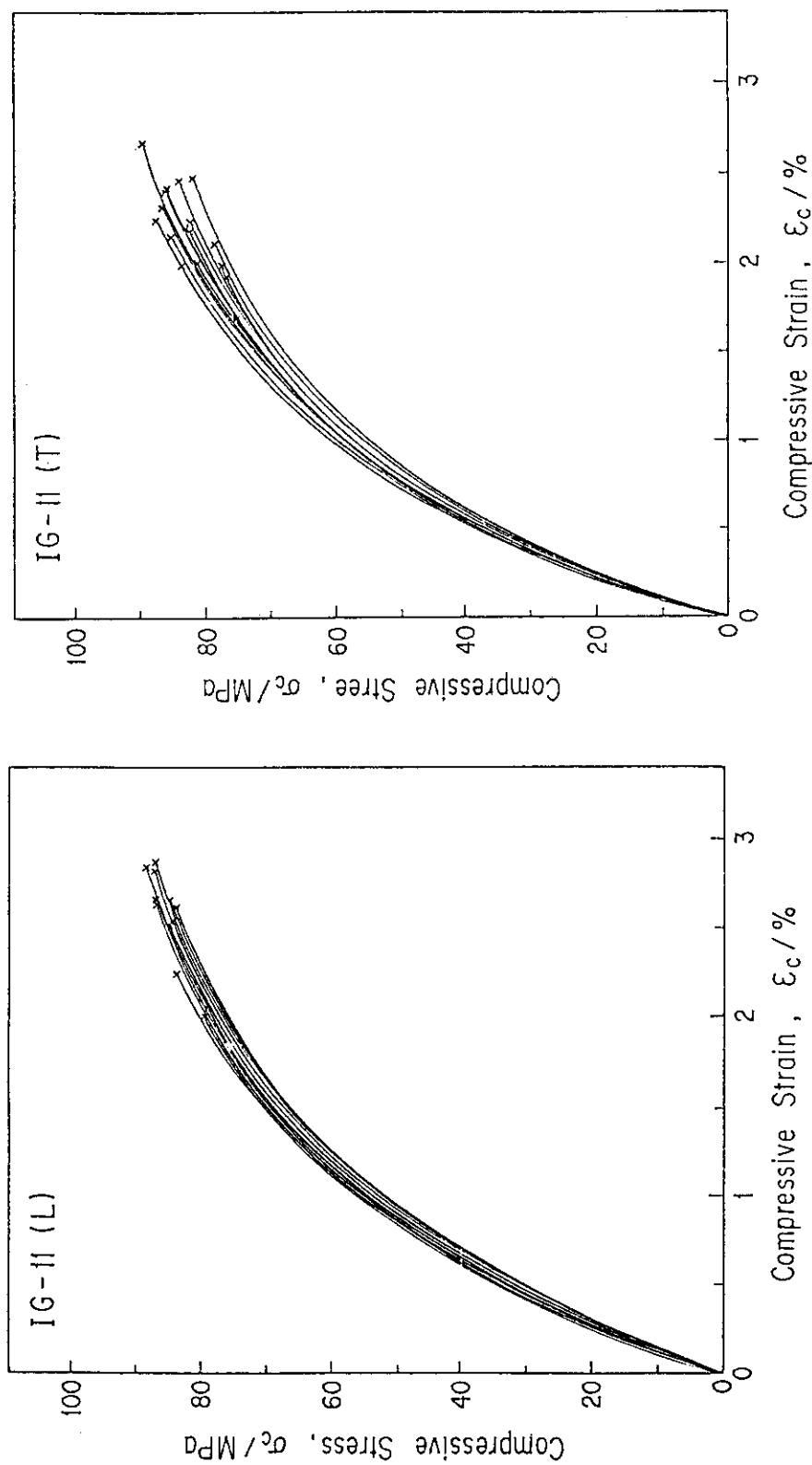


Fig. 5 Compressive stress-strain curves of IG-110 specimens; (a) L orientation (b) T orientation.

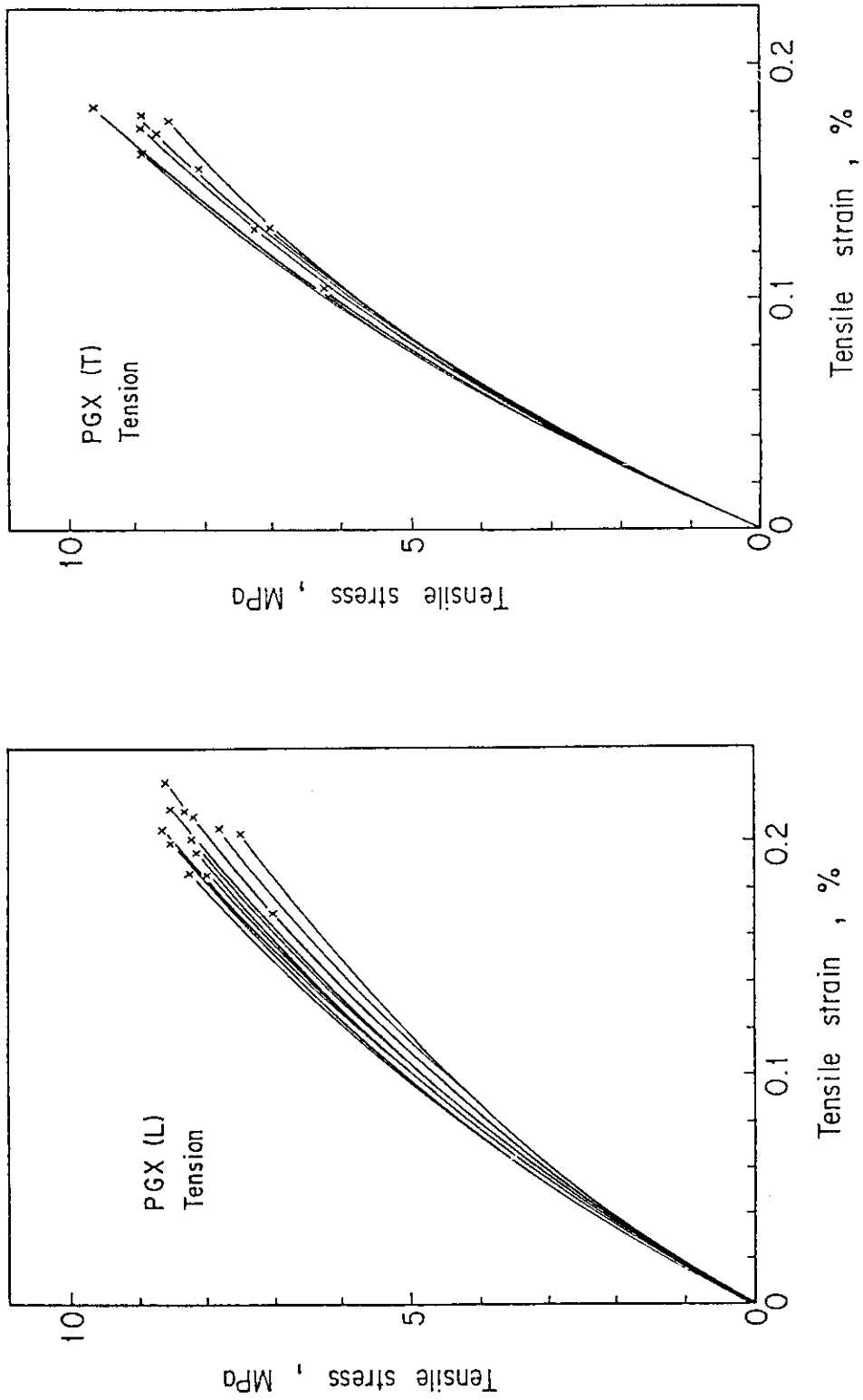


Fig. 6 Tensile stress-strain curves of PGX specimens; (a) L orientation (b) T orientation.

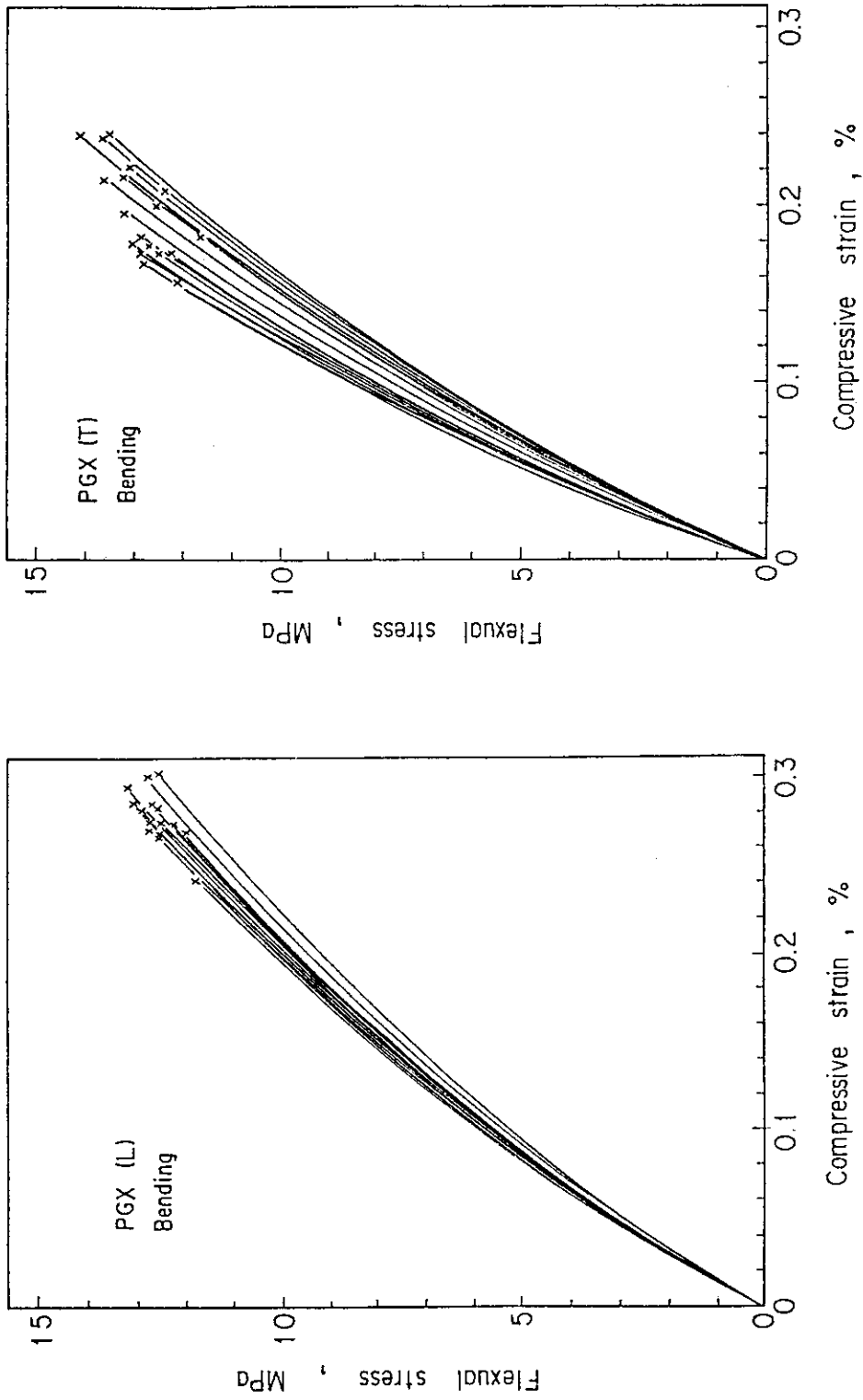


Fig. 7 Compressive stress-strain curves of PGX specimens obtained by bending tests; (a) L orientation (b) T orientation.

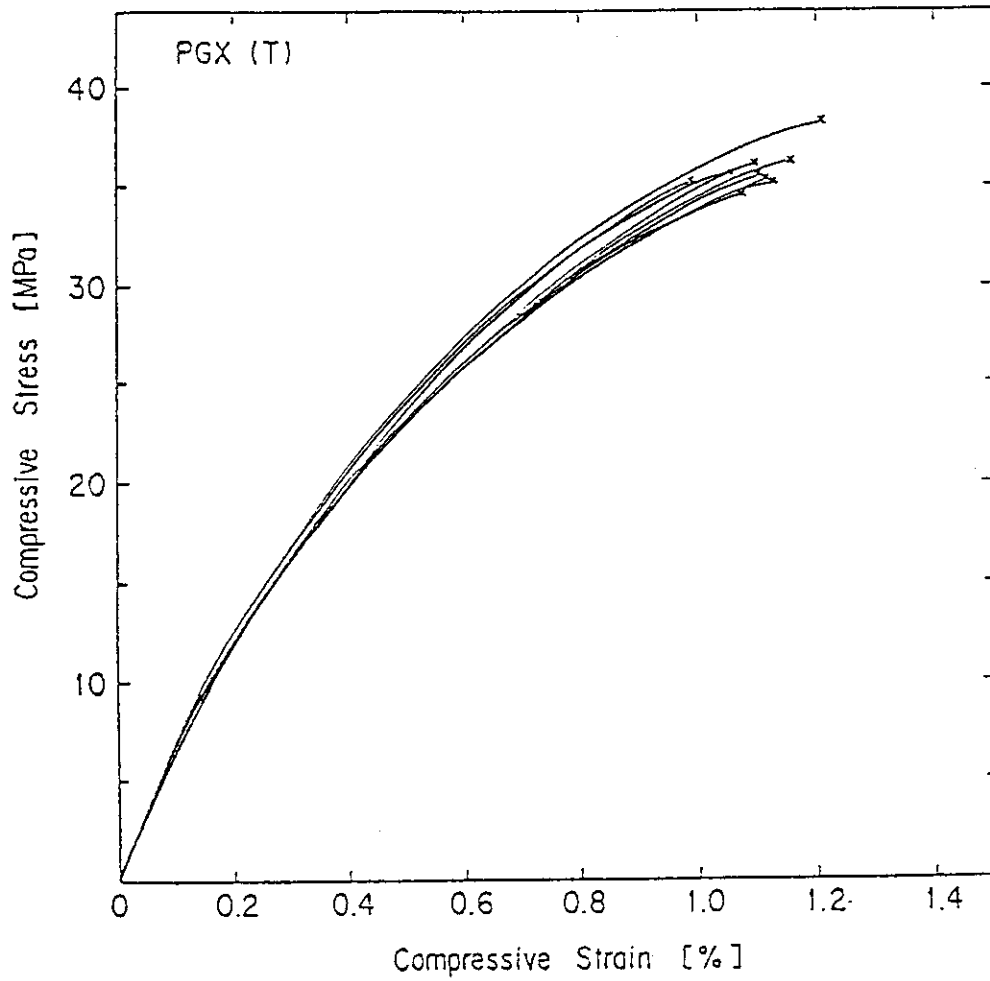


Fig. 8 Compressive stress-strain curves of PGX specimens (T orientation).

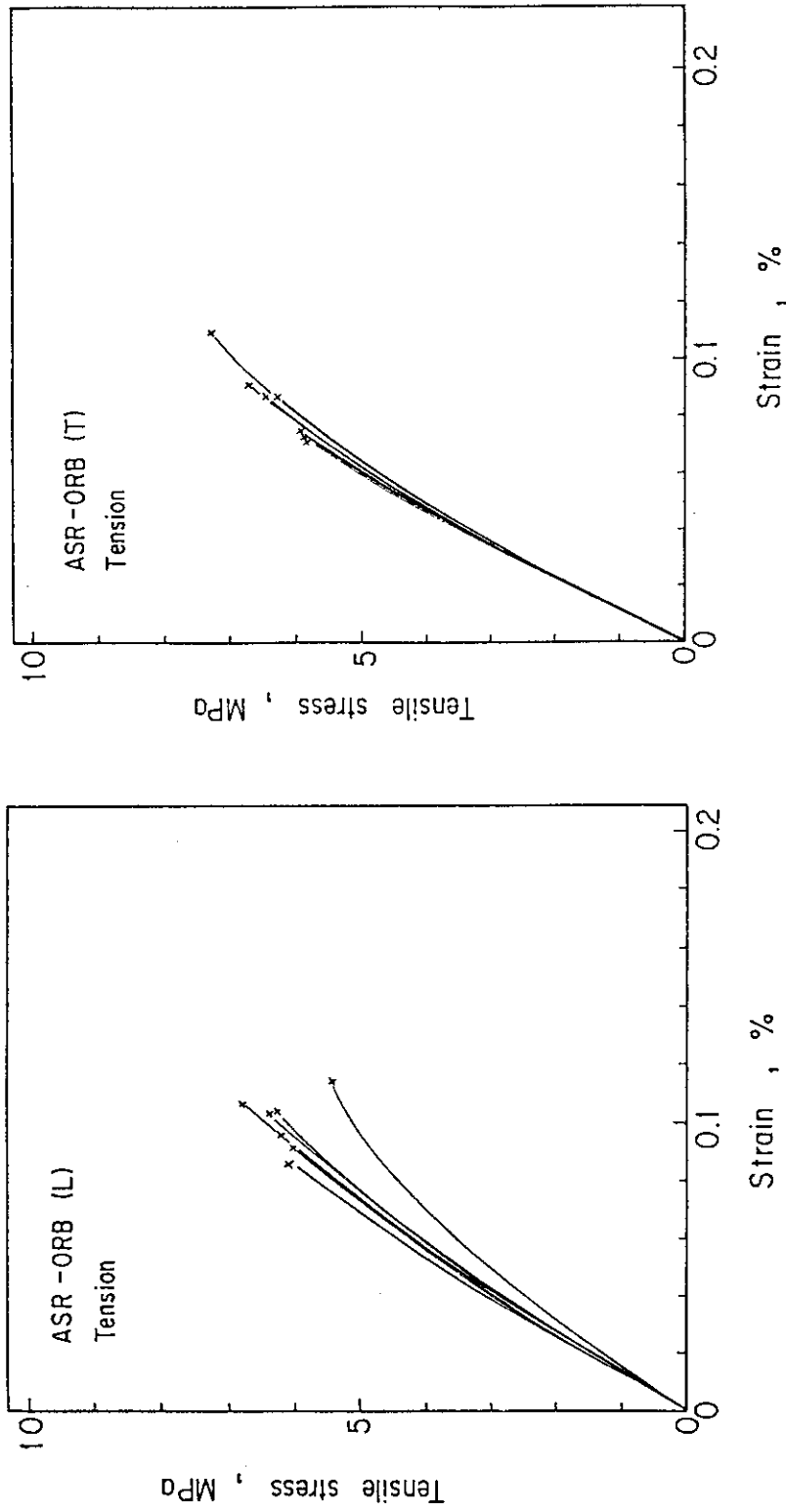


Fig. 9 Tensile stress-strain curves of ASR-ORB specimens; (a) L orientation (b) T orientation.

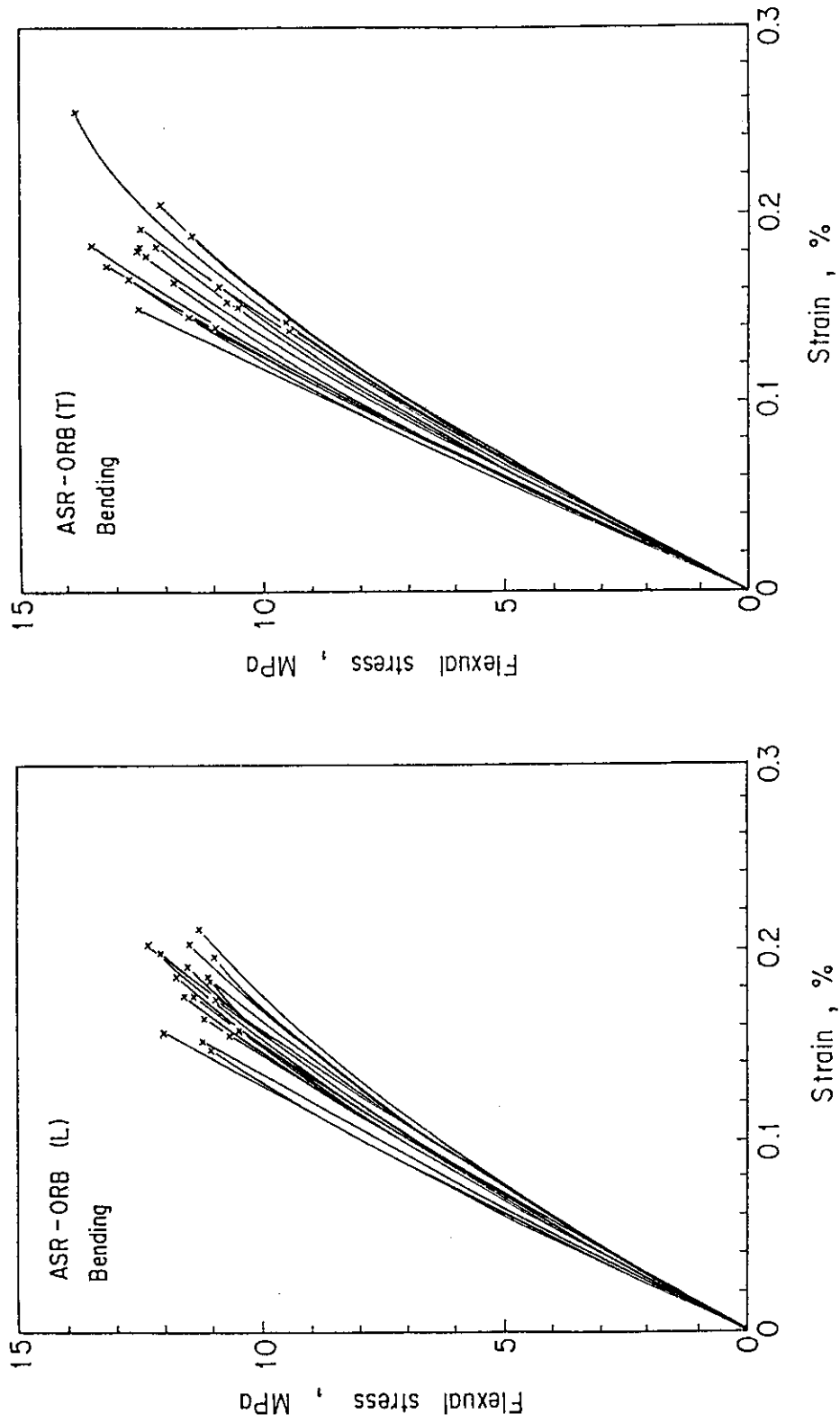


Fig. 10 Tensile stress-strain curves of ASR-ORB specimens obtained by bending tests;
(a) L orientation (b) T orientation.

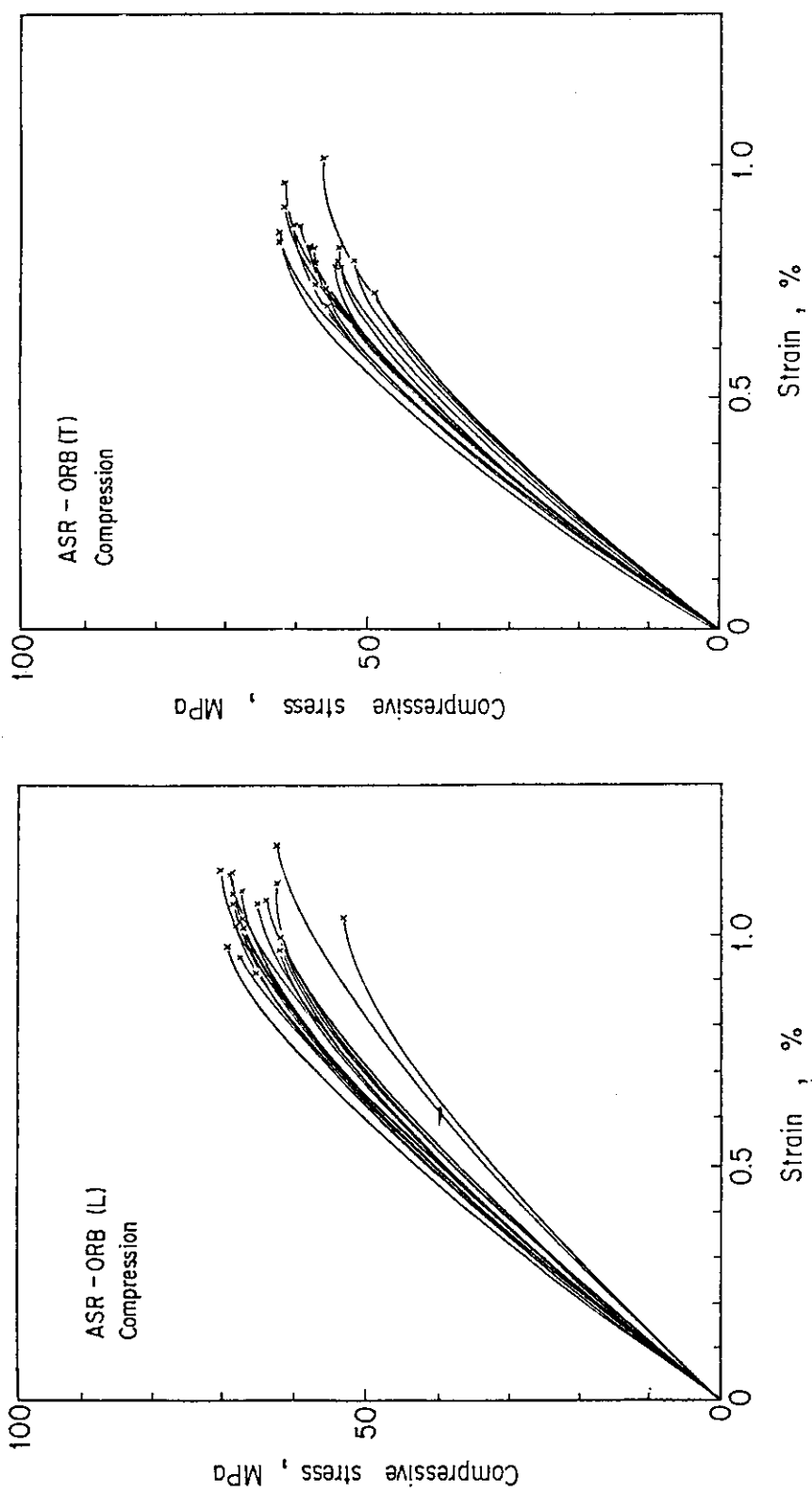


Fig. 11 Compressive stress-strain curves of ASR-ORB specimens; (a) L orientation (b) T orientation.

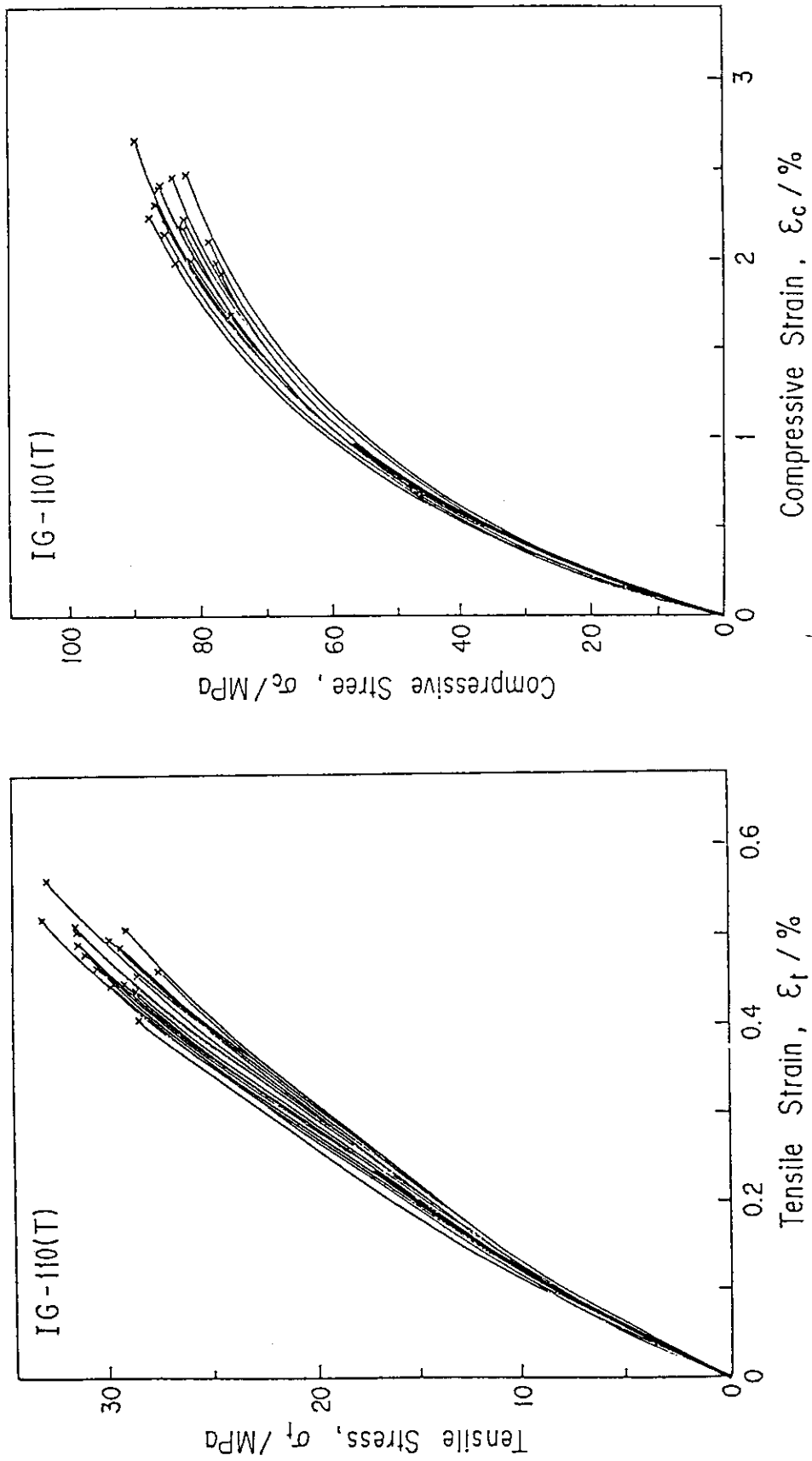


Fig. 12 Comparison of calculated stress-strain curves of IG-110 graphite with measurements;
(a) Tension, (b) Compression.

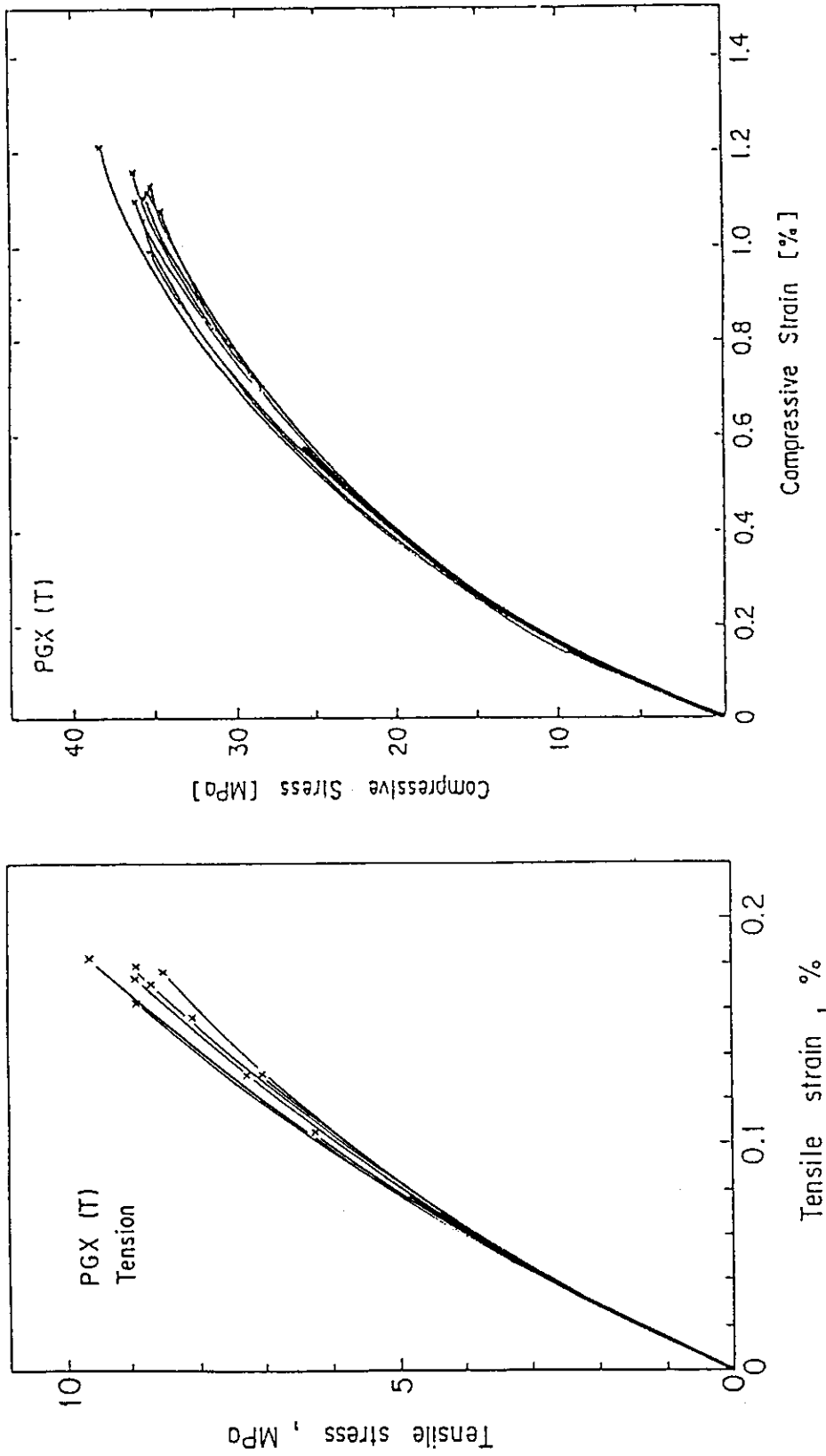


Fig. 13 Comparison of calculated stress-strain curves of PGX graphite with measurements; (a) Tension, (b) Compression.

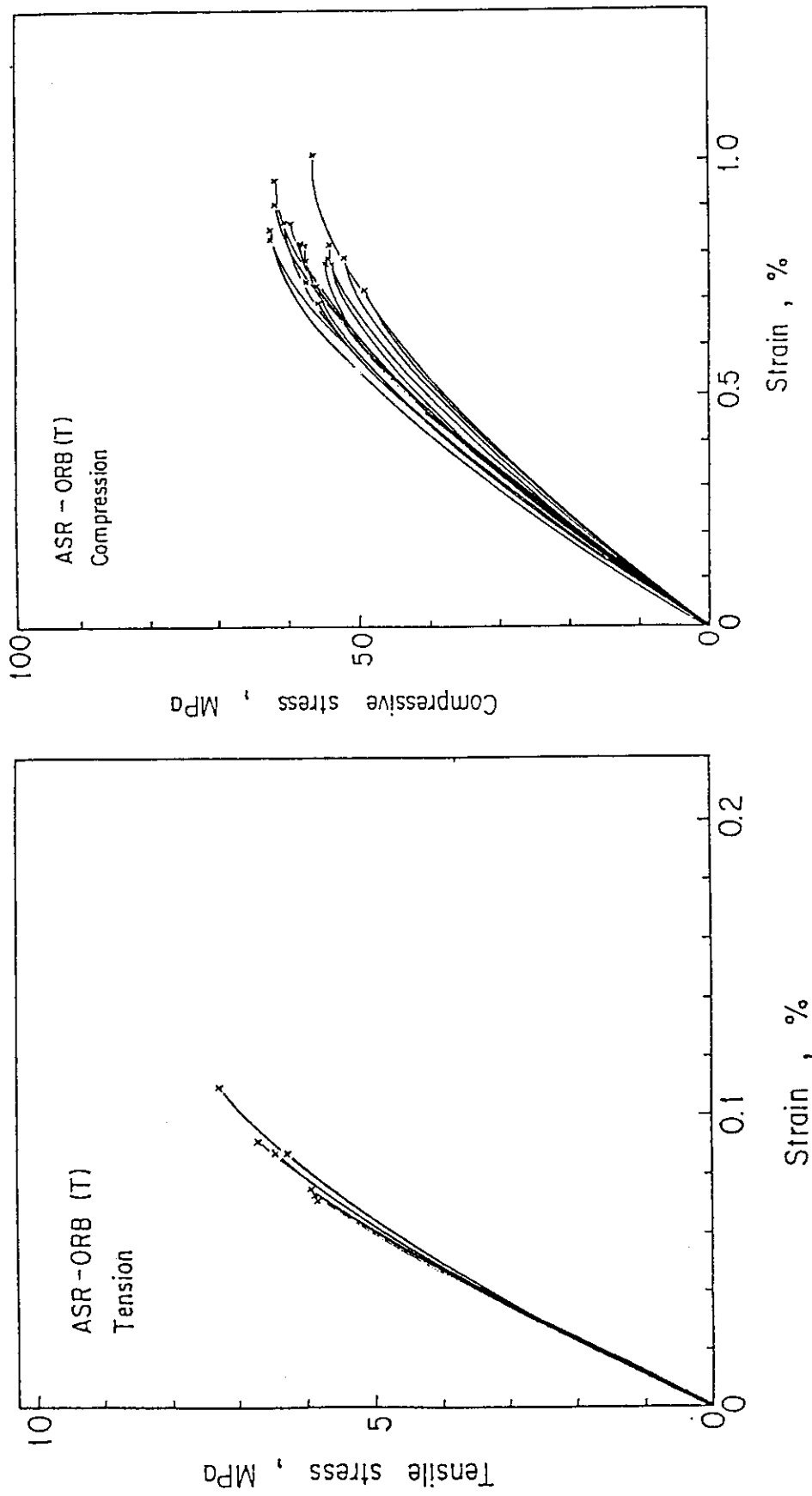


Fig. 14 Comparison of calculated stress-strain curves of ASR-ORB carbon with measurements;
(a) Tension, (b) Compression.

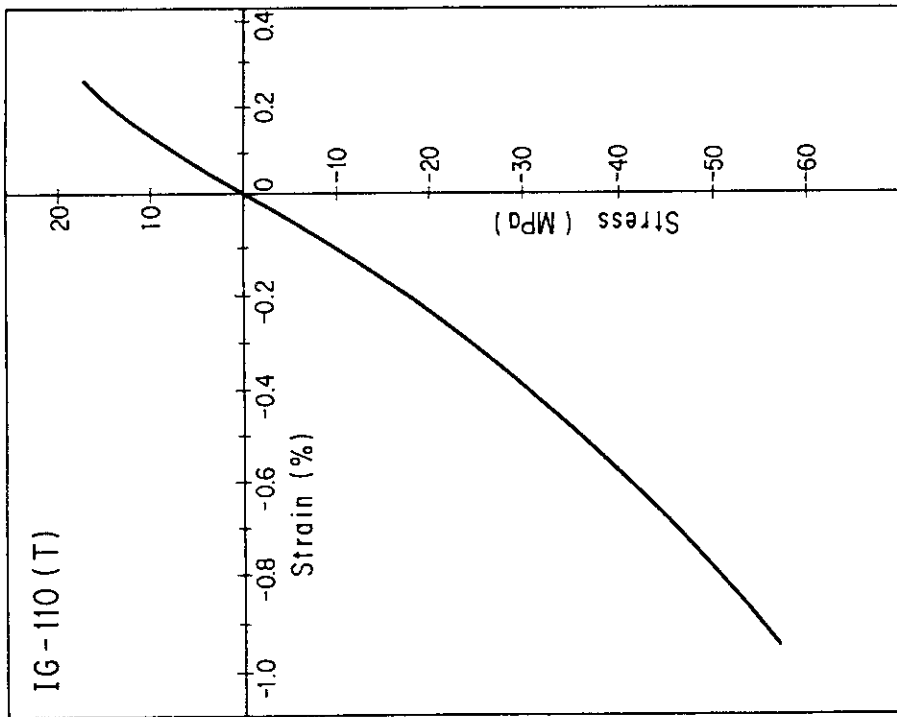
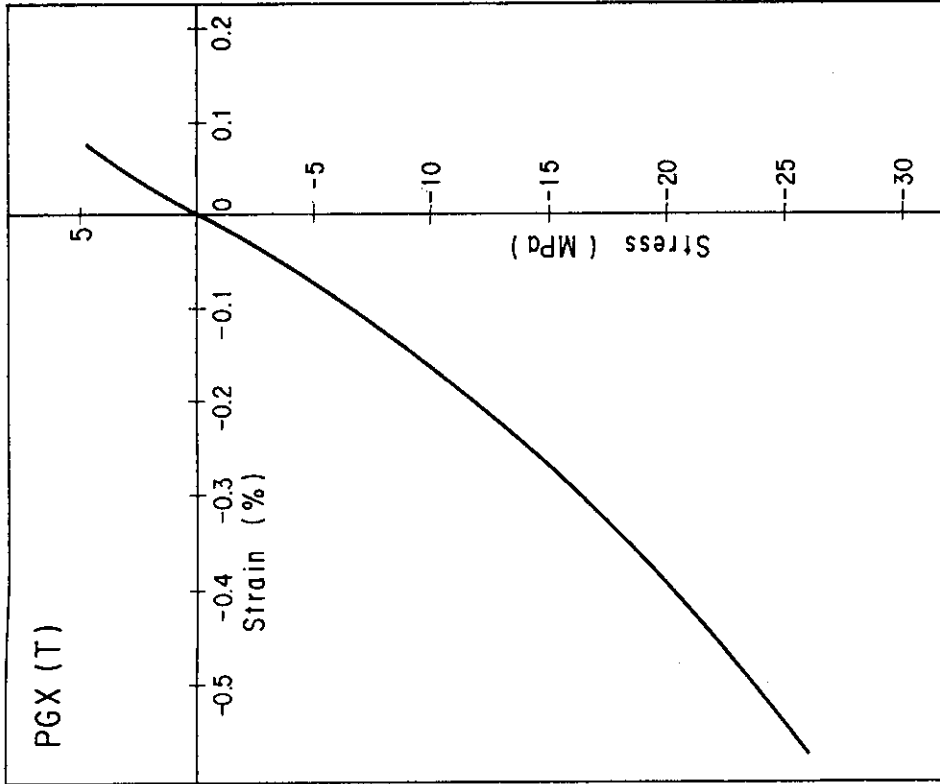


Fig. 15 Predicted stress-strain curve of IG-110 graphite. Fig. 16 Predicted stress-strain curve of PGX graphite.

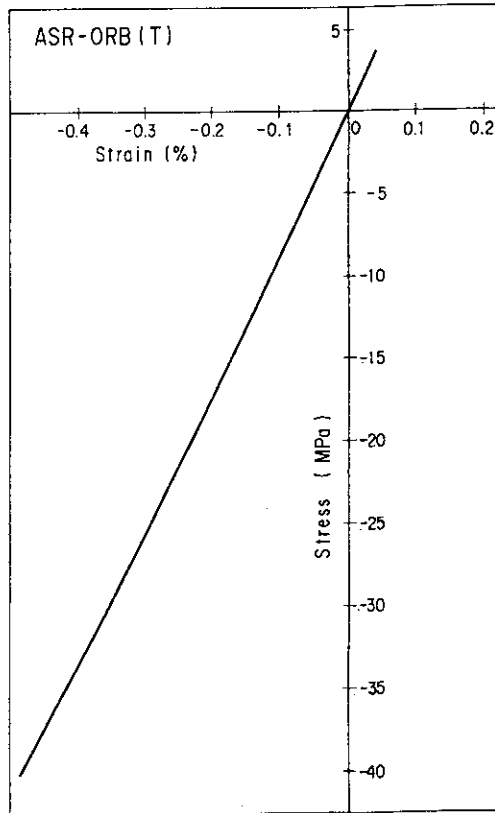


Fig. 17 Predicted stress-strain curve of ASR-ORB carbon.

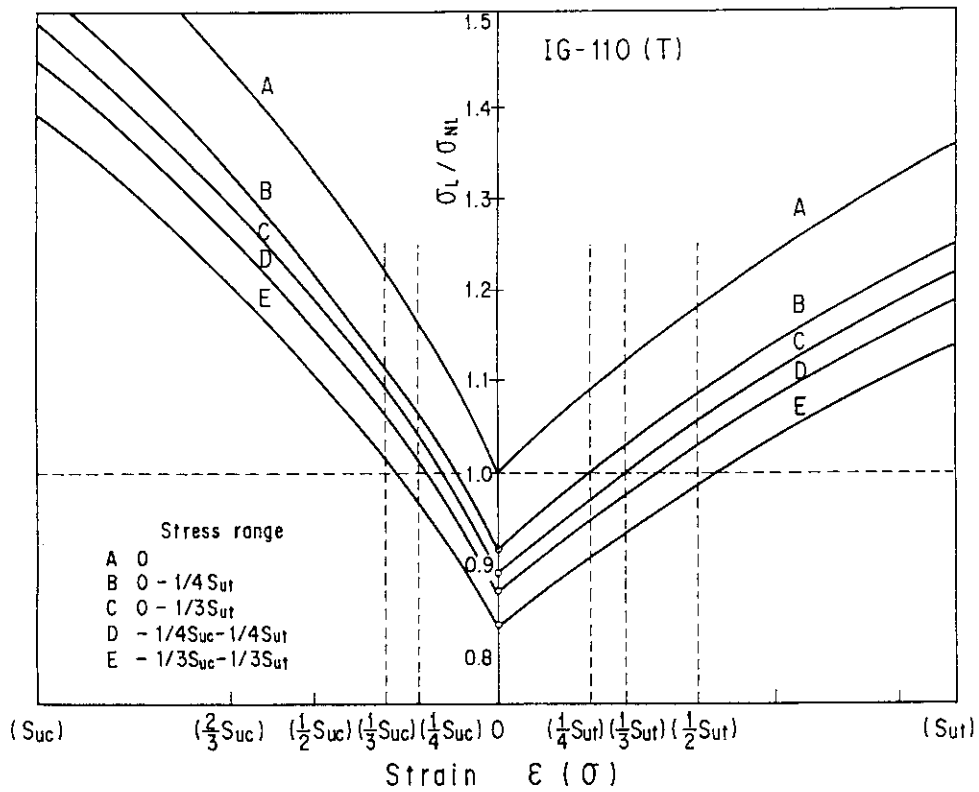


Fig. 18 Deviation of stress calculated by several linear approximations from that predicted by mean stress-strain curve of IG-110 graphite.

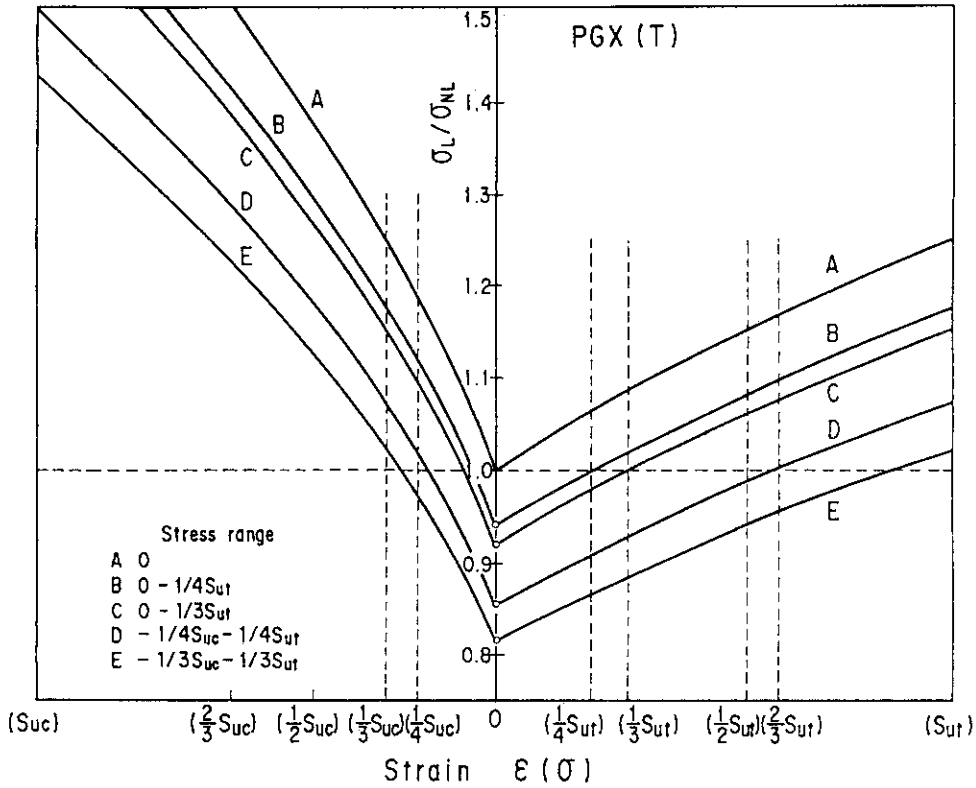


Fig. 19 Deviations of stress calculated by several linear approximations from that predicted by mean stress-strain curve of PGX graphite.

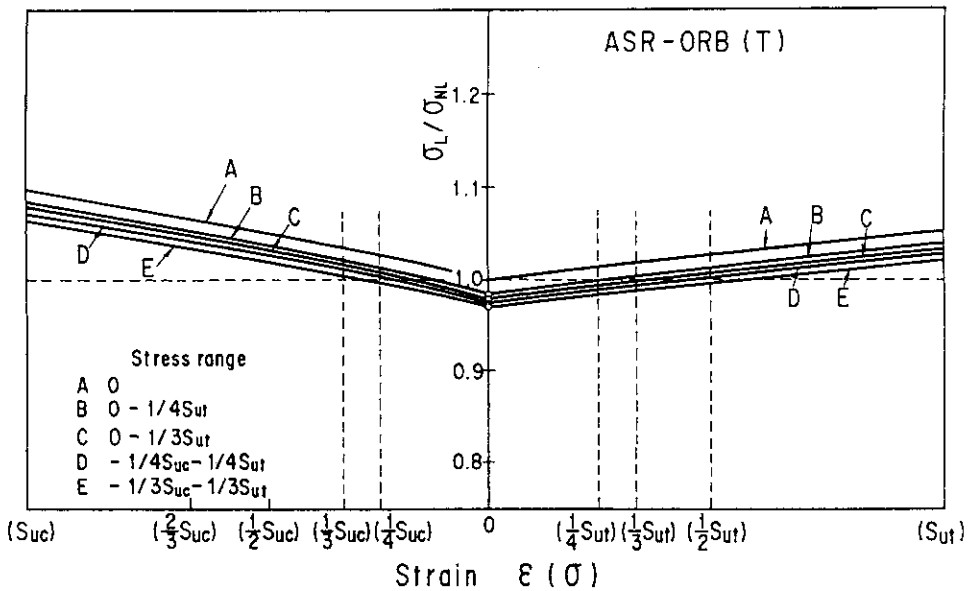


Fig. 20 Deviations of stress calculated by several linear approximations from that predicted by mean stress-strain curve of ASR-ORB carbon.