

構造不連続部のひずみ集中挙動の支配因子と
弾性追従係数による記述
(研究報告)

1998年12月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
してください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

構造不連続部のひずみ集中挙動の支配因子と弾性追従係数 による記述

(研究報告)

笠原 直人¹⁾ 高正 英樹²⁾

要 旨

高速増殖炉等の高温低圧の機器では、繰り返し熱応力によるクリープ疲労き裂の発生が主要な破損モードとなる。特に構造不連続部では、材料の弾塑性クリープ変形によるひずみ集中が生じ、これがクリープ疲労強度を低減させるため、適切な集中挙動予測法が必要とされている。

ひずみ集中のメカニズムを説明するものとして、構造物中の応力ひずみ再配分特性を弾性追従係数により統一的に記述する弾性追従モデルがある。本モデルでは、弾性追従係数が得られると、弾性解析結果と材料の応力-ひずみ関係とから構造物の弾塑性とクリープによるひずみ集中挙動を予測することが出来る。

本研究では、一般構造物に対する弾性追従係数の定量化を目的として、構造不連続部のひずみ集中挙動に対する、負荷レベル、応力緩和時間、および材料の構成方程式の影響を調べ、これらの因子と弾性追従係数との定量関係を明らかにした。

負荷レベルが増加すると弾性追従係数も増加する傾向が観察された。この傾向は非弾性領域の拡大に伴う弾性領域の拘束力低下によって説明することが出来る。弾塑性とクリープとでは非弾性領域の大きさが同じ場合には、弾性追従係数も一致した。

応力緩和の過程においても、時間と共に非弾性領域が拡大し、弾性追従係数が増加した。また非弾性領域の分布が類似する弾塑性変形による弾性追従係数と一致した。

材料の構成方程式に関しては、クリープひずみ式が異なる場合でも同一荷重からの応力緩和の軌跡は同じであり、軌跡上の同じ点のクリープひずみ分布と弾性追従係数は一致した。また、弾塑性解は同一荷重からの応力緩和曲線上に存在し、弾性追従係数と塑性ひずみ分布は構成方程式に依らず軌跡上の同じ位置におけるクリープのそれと一致した。

以上の結果から、構造物の弾性追従特性は負荷レベルや緩和時間によって変化し、その理由は非弾性ひずみ分布の変化によって説明できることが分かった。さらに、弾性追従特性の変化は、応力緩和曲線または非弾性ひずみ-弾性追従係数の関係で表現される塑性とクリープ共通のマスターカーブで定量記述できることが明らかになった。

1) 大洗工学センター システム技術開発部 構造材料技術開発グループ

2) 常陽産業株式会社

Strain concentration at structural discontinuities and its quantification by elastic follow-up parameter

Naoto Kasahara¹⁾ Hideki Takasho²⁾

Abstract

Elevated temperature structural design codes pay attention to strain concentration at structural discontinuities due to creep and plasticity, since it causes to enlarge creep-fatigue damage of material. One of the difficulties to predict strain concentration is its dependency on loading, constitutive equations, and relaxation time.

This study investigated fundamental mechanism of strain concentration and its main factors. It was clarified that strain concentration was caused from strain redistribution between elastic and inelastic regions, which can be quantified by the elastic follow-up parameter. As a function of inelastic strain, the elastic follow-up parameter can describe variation of strain concentration during incremental loading and relaxation process, caused by transition of strain distribution from peak strain concentration to secondary stress redistribution

Structures have their own elastic follow-up characteristics as a function of inelastic strain, which is insensitive to constitutive equations. It means that application of inelastic analysis is not difficult to obtain elastic follow-up characteristics.

1) Structure and Material Research Group, System Engineering Division, OEC, JNC

2) Joyo Industries Co. Ltd.

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 ひずみ集中のメカニズムと弾性追従概念	2
第3章 構造不連続部のひずみ集中挙動	5
3.1 負荷レベルの影響評価	5
3.2 応力緩和時間の影響	8
3.3 材料の弾塑性構成方程式およびクリープひずみ式の影響評価	11
第4章 ひずみ集中挙動の弾性追従係数による記述	16
第5章 結 言	18
謝辞	19
参考文献	20
付録A Yピース最大応力発生位置における応力-ひずみ線図	21
付録B Yピース相当塑性ひずみおよび相当クリープひずみコンター図	39
付録C Yピース最大応力発生位置における全ひずみ-弾性追従係数曲線	43

表リスト

List of Tables

Table.1	Analysis case of Y-piece(1)
Table.2	Analysis case of Y-piece(2)
Table.3	Analysis case of Y-piece(3)

図リスト

List of Figures

Fig.1	Cyclic Thermal transient strength test
Fig.2	Comparison of stress-strain behaviors among Load-Controlled Condition, Displacement-Controlled Condition, and Elastic Follow-up Condition
Fig.3	Isochronous stress-strain curve
Fig.4	Y-piece structure due to loading
Fig.5	Comparison of stress-strain curve under different load level
Fig.6	Equivalent creep and plastic strain contour under different load level
Fig.7	Stress relaxation process and elastic plastic stress-strain curves
Fig.8	Inelastic strain contour at stress relaxation process and elastic plastic deformation
Fig.9	Stress relaxation curve based on different creep strain equations
Fig.10	Stress-strain curve based on various constitutive equations
Fig.11	Equivalent creep and plastic strain contour at the same inelastic strain
Fig.12	Elastic follow-up model considering constitutive equations
Fig.13	Effect of load level to elastic follow-up characteristics
Fig.14	Effect of constitutive equations to elastic follow-up characteristics

第1章 緒 言

高速増殖炉に代表される高温低圧の機器では、運転温度の変動に伴う繰り返し熱応力によるクリープ疲労き裂の発生が主要な破損モードとなる。特に構造不連続部では、ひずみ集中により強度が低減するため設計上留意する必要がある。

例として、プラント機器を模擬した構造物試験体(Fig.1)の熱過渡強度試験結果を示す。Fig.1のように構造不連続部を含む試験体に600°Cと250°Cの液体ナトリウムを3時間のサイクルで交互に1000回流入させることにより、繰り返し熱応力を発生させた。その結果、構造不連続部である、胴板接合部(A部)では深さ5.2mmの貫通き裂が、Yピース(B部)には不朝0.75mmの微小き裂が生じた[1]。一方、当該部位における弾性解析による応力変動範囲はA部が1229Mpa, B部が1211Mpaでほぼ同じであった。そこで、クリープによる構造物の非弾性特性を調べるために、600°Cにおける応力緩和挙動を調べたところ、Fig.1右上のように、A部はB部に比べて緩和中にひずみの拡大が生じることが分かった。こうしたひずみ集中挙動により両者の破損形態に違いが生じたものと考えられことから、適切な評価手法が必要とされる。

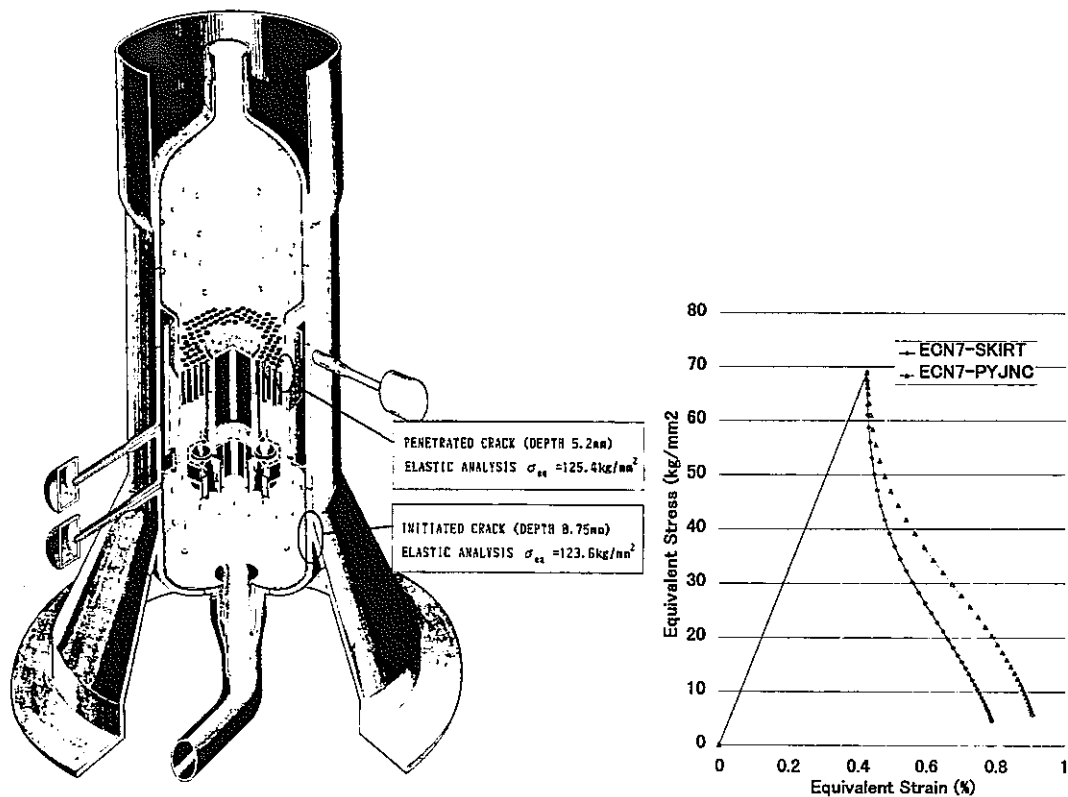


Fig.1 Cyclic Thermal transient strength test

第2章 ひずみ集中のメカニズムと弾性追従概念

構造不連続におけるひずみ集中のメカニズムについて考えてみる。Fig.2 に示すように、①棒の端部に死荷重を与えた場合、②変断面棒の端部に強制変位を与えた場合、および③棒の端部に強制変位を与えた場合の、クリープ挙動を以下に比較する。①のケースでは外部の荷重との釣り合いにより生じる一定の応力の下でひずみが時間と共に増加することから、荷重制御型と呼ばれる。一方、②のケースは変形による適合条件を満たす為に規定される一定のひずみの下で応力が緩和することから変位制御型と呼ばれる。これに対し、③の高剛性低応力部と低剛性高応力部からなる変断面棒の端部に変位を加え高温で保持すると、応力とひずみの非線形性により専ら低剛性高応力部で生じたクリープ変形の結果として生じる応力緩和によって高剛性低応力部に除荷が生じ、高剛性低応力部の変形の弾性回復分だけ低剛性高応力部の歪或いは変形が増加する。この現象は、低剛性部が高剛性部の変形に追従するように捉えられることから、弾性追従と呼ばれている[2]。構造不連続部では、構造全体には変位制御型の荷重が加わった場合であっても、低剛性高応力部においては周辺の高剛性低応力部に対する弾性追従によりひずみが集中する。

ひずみ集中のメカニズムがFig.2からも分かる通り応力とひずみの連成現象であることから、これを直接解くには、釣り合い条件、適合条件、および材料の応力ひずみ関係を連立させた非弾性解析が必要となるが、決定的な構成方程式が存在しないことや負荷履歴設定の難しさから、部分的な適用が試みられている段階である。そこで従来、原子力の設計の分野では簡易解析法が利用されてきた[3]。

原子力機器の構造設計の基本思想となった「解析による設計 (Design by Analysis)」は、構造健全性への影響の違いから応力を、荷重制御型の一次応力 P 、変位制御型の二次応力 Q とピーク応力 F との三成分に分類し、異なる許容値を与えている[4]。 F は Q に比べて局所に限定される応力のため健全性への影響の差から区別されている。弾性追従挙動は、応力-ひずみ線図上では Fig.2 に示すように荷重制御型と変位制御型の間中に位置するため、その何れかに近いかを表すのに、弾性追従係数 q なる指標が用いられてきた[5]。

$$q = \frac{\varepsilon - \sigma / E}{\varepsilon_e - \sigma / E} \quad (1)$$

但し、 q は弾性追従係数、 ε 、 σ は実際のひずみと応力、 ε_e は弾性解析によるひずみ、 E はヤング率である。

弾性解から傾き q の線を引き材料の応力ひずみ曲線との交点を求めると、非弾性状態の応力とひずみを求めることが出来る。ここで弾塑性応力-ひずみ曲線を使用すれば、弾塑性解が、また一定温度、一定時間の下で応力をパラメータとして得たクリープ試験結果から Fi.3 の手順で作成した等時応力-ひずみ線図[4]を使用すれば弾塑性クリープ解が得られる。

$$\varepsilon = \left\{1 + (q_p - 1) \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_e}\right)\right\} \varepsilon_e \quad (2)$$

但し、 σ_e と ε_e は弾性解析から得られる応力とひずみ、 σ と ε は実際の応力とひずみである。

さらに q が応力緩和に寄与する弾性ひずみの現象とクリープひずみの割合であることに着目すると、クリープ損傷計算に必要な応力緩和速度が計算できる。

$$\dot{\sigma} = -\frac{1}{q} E \dot{\varepsilon}_c \quad (3)$$

一般構造に対しても等価な弾性追従係数が定義できれば設計解析に利用できるため、多数の実験と非弾性解析の経験に基づき、工学的判断によって保守的な係数が定められた。但し、この様に定められた弾性追従係数は、あくまでおよその目安を与えるものと理解されてきた。又、その適用方法も、普遍的に応用できる様一般化されたものではなかった。そこで本研究では、一般的構造物に対する弾性追従係数の定量化を目的として、構造不連続部のひずみ集中挙動に対する、負荷レベル、応力緩和時間、および材料の構成方程式の影響を調べ、これらの因子と弾性追従係数との定量関係を明らかにすることにした。

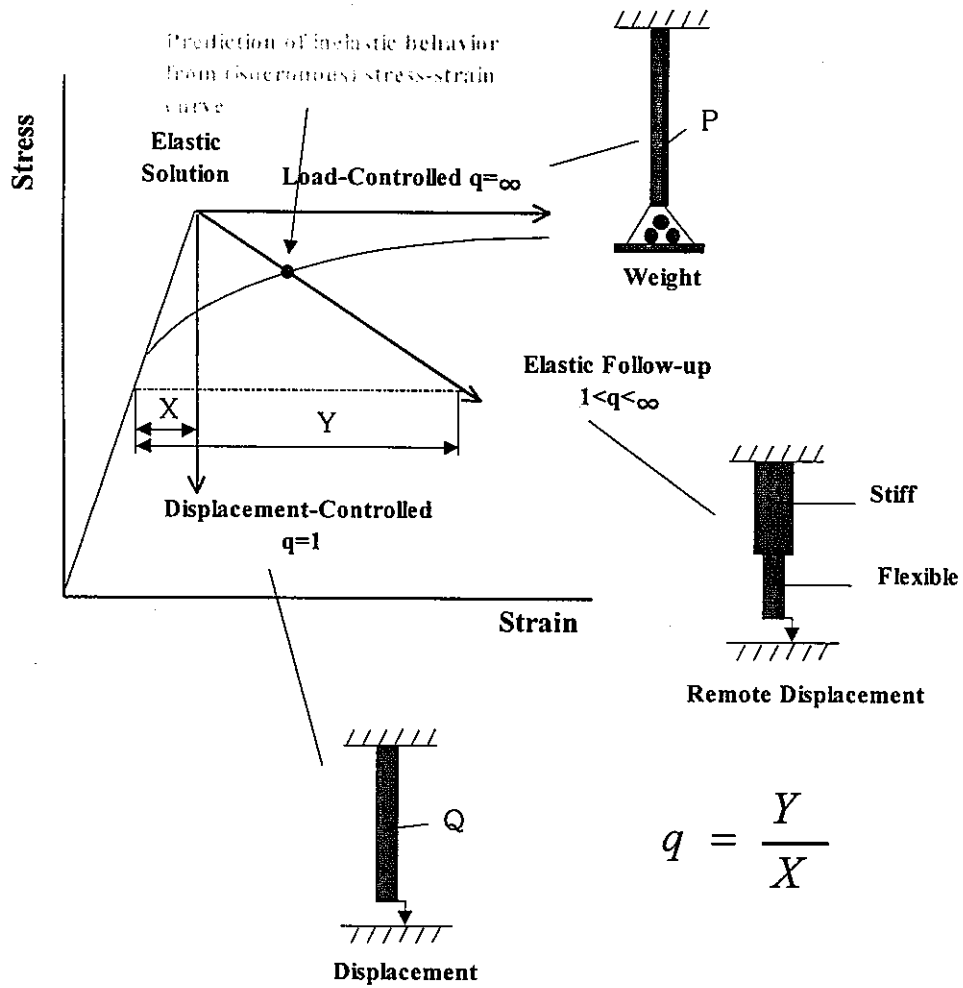


Fig.2 Comparison of stress-strain behaviors among Load-Controlled Condition, Displacement-Controlled Condition, and Elastic Follow-up Condition

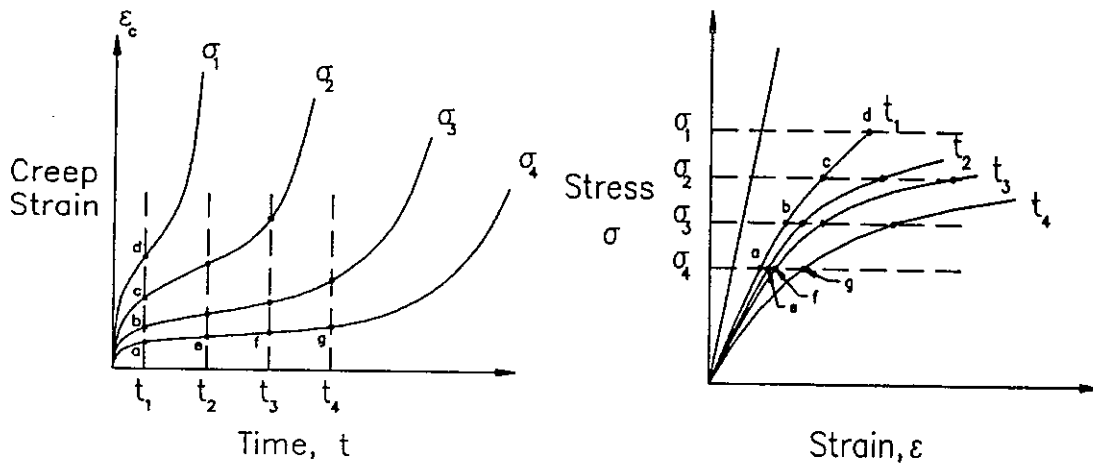


Fig. 3 Isochronous stress-strain curve[4]

第3章 構造不連続部のひずみ集中挙動

3.1 負荷レベルの影響評価

代表的な構造不連続部としてYピース(Fig.4)を取り上げ、クリープと弾塑性によるひずみ集中挙動を調べた。Yピースは、高剛性部（接合部）と低剛性部（スカート部）との結合体と捉えることができ、両者の間に二次応力 Q が生じる。また、その接合部には局所的な形状不連続によりピーク応力 F が重畳する。プラント機器の典型的な不連続部であるノズル、管板・胴の接合部、および胴板接合部等も類似の挙動を示すことから、Yピースにより主なプラント機器構造を代表することが出来る。

同じ構造でも二次応力 Q とピーク応力 F とでは弾性追従挙動が異なることが分かっている[1]。そこで、負荷レベルを変化させると二次応力 Q とピーク応力 F の重畳割合が変化することに着目し、スカート端部を 50°C に保ったまま、円筒胴内表面を 217°C まで昇温した場合 ($1/3 \sigma_{\max}$)、同じく円筒胴内表面を 383°C まで昇温した場合 ($2/3 \sigma_{\max}$)、および円筒胴内表面を 550°C に昇温した場合 (σ_{\max}) の3種類の熱荷重を加え、弾性追従への影響を調べた。

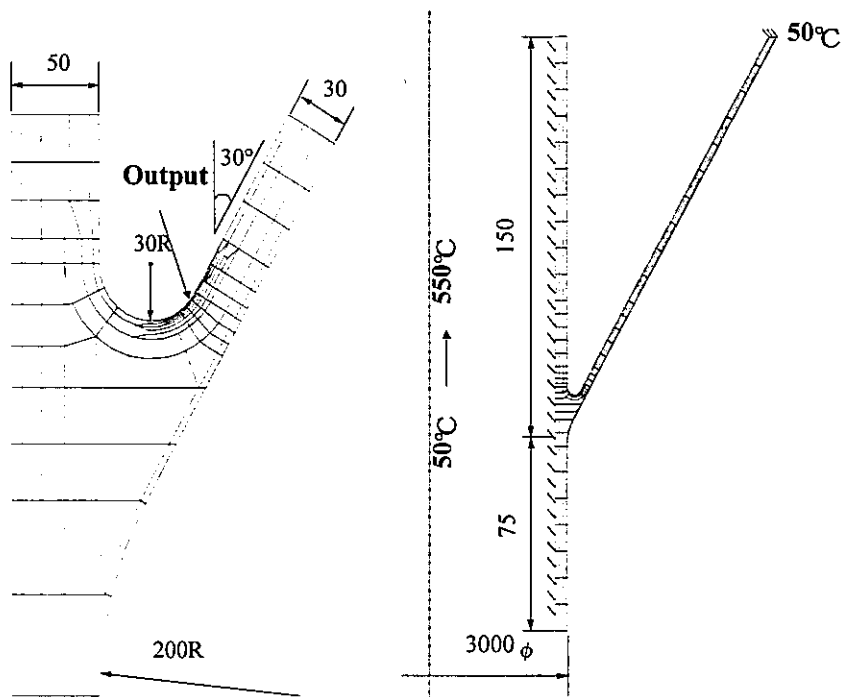


Fig.4 Y-piece structure due to thermal loading

材料特性に関しては、弾性追従の主要因である応力ひずみの非線形性を簡明に記述できる Norton 則によるクリープひずみ式と、Ramberg-Osgood 型の弾塑性応力ひずみ式を使用し、プラント寿命時間中の応力緩和解析、および弾塑性解析を行った。解析ケースを Table 1 に示す。

$$\dot{\varepsilon}_c = B\sigma^m \quad (B=5.86 \times 10^{-15}, m=5) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \sigma / E + A\sigma^n \quad (E=16200, A=1.0 \times 10^{-8}, n=5) \quad (5)$$

Table 1 Analysis case of Y-piece(1)

Case	Analysis	Constitutive	Power	Loading
TE	Elastic	Elastic	n=1	σ_{\max}
C5-1/3	Elastic-Creep	Norton's Law	m=5	1/3 σ_{\max}
C5-1/2	Elastic-Creep	Norton's Law	m=5	2/3 σ_{\max}
C5	Elastic-Creep	Norton's Law	m=5	σ_{\max}
P5	Elastic-Plastic	Ramberg-	n=5	σ_{\max}

Table 1 に示すケースの解析結果を、応力-ひずみ線図上で比較した。Fig.5 において、P5 の弾塑性応力-ひずみ線図上の 1/3 σ_{\max} 、2/3 σ_{\max} 、 σ_{\max} の各荷重に相当する位置に口印をした。これらの結果から同じ大きさの負荷に対する弾塑性解析の結果は、弾性クリープ解析の応力緩和曲線上に存在し、塑性とクリープでは同程度のひずみ集中が生じることが分かる。

応力緩和解析では時間の経過とともに緩和速度が低下し、応力-ひずみ線図上の弾塑性解の近傍でほぼ一定の状態に至る。そこで、3段階の荷重レベルに対する応力緩和後のクリープひずみ分布と塑性ひずみ分布を比較した。結果は Fig.6 のように両者は相似であり、応力緩和に対してもいわゆる Hoff の類似が成立している。また、負荷の増大に伴い塑性・クリープ共に非弾性ひずみが局所に限定されるピークひずみ集中から広域に及ぶ二次応力再配分型へ拡大していることが分かる。このことから、負荷レベルと共に弾性追従係数が大きくなる理由は、ピークひずみ集中から二次応力再配分へと非弾性領域が広がるに伴い、周囲の弾性領域による拘束力が弱くなるためであると考えられる[6]。

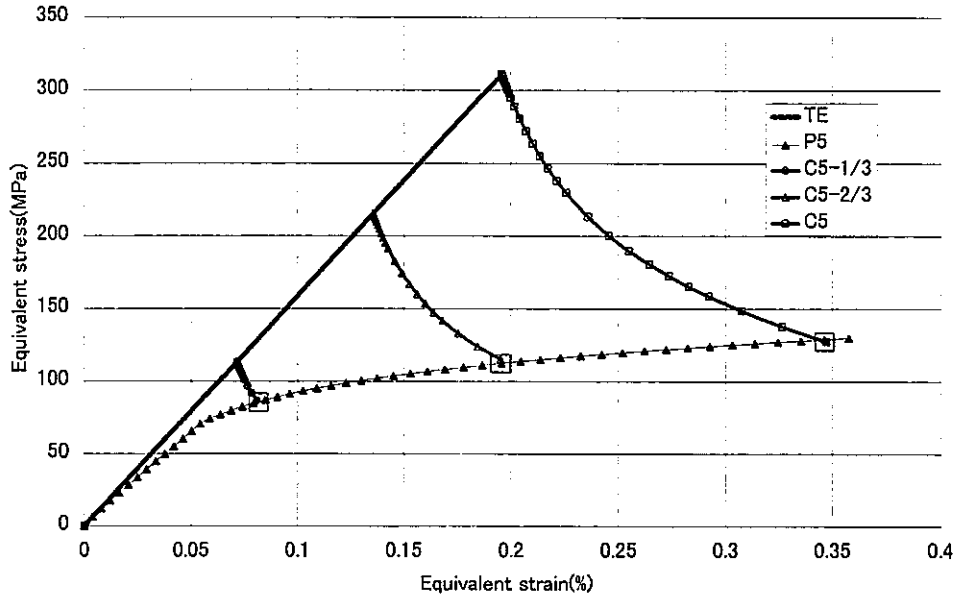


Fig.5 Comparison of stress-strain curve under different load level

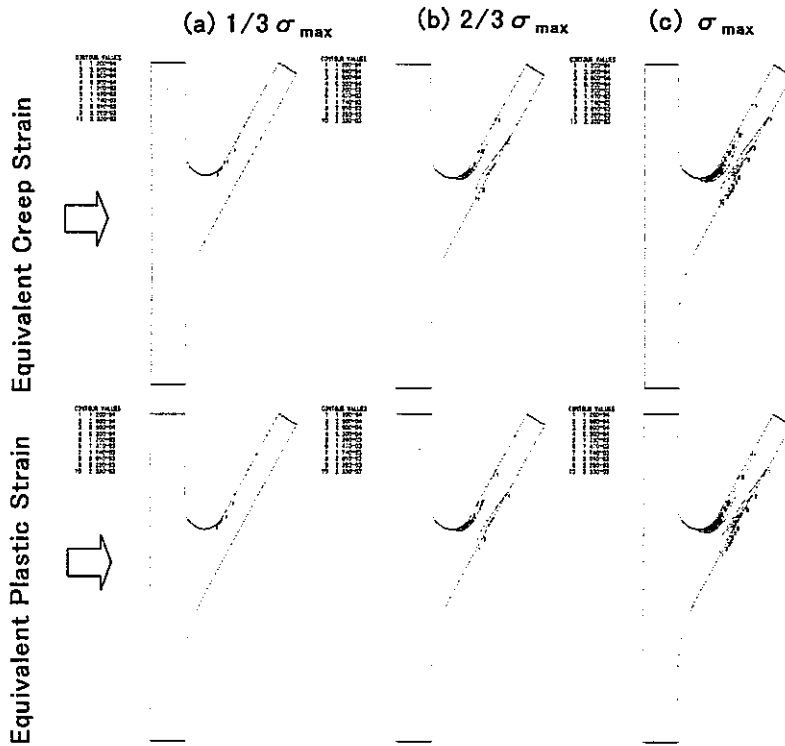


Fig.6 Equivalent creep and plastic strain contour under different load level

3. 2 応力緩和時間の影響

一般の構造では応力緩和の過程においても時間と共に弾性追従係数が変化することが知られており[1]、緩和クリープ損傷の計算において留意する必要がある。

本節では、Fig.4 の Y ピースに対して負荷条件をスカート端部 50°C、円筒胴内表面 550°C に固定し応力緩和中の挙動を調べる。クリープひずみ式は、式(4)において $m=7$ とした。

緩和曲線を応力-ひずみ線図上にプロットすると Fig.7 のように緩和時間が経過するに従い勾配が緩くなり、弾性追従特性が変化することが分かる。

この理由を考察するため、図中の Time 1 ~ Time3 におけるクリープひずみ分布を調べた。Fig.8 上段に示すように緩和時間と共にクリープひずみ領域の拡大が観察され、負荷レベルの影響と同様、周囲の弾性領域による拘束力の低下が弾性追従特性変化の要因となっていると考えられる

この仮定を確かめるため、弾塑性変形の場合との比較を行った。式(7)の弾塑性構成方程式において、 $n=3,5,7$ と変化させ、応力緩和のケースと同一の負荷に対する弾塑性解析を行った。応力緩和と弾塑性に関する Table 2 に示す5ケースの解析結果の比較を Fig.7 に示す。図のように、P3,P5, P7 の結果は C7 の応力緩和曲線上に載り、それぞれ緩和中の Time 1 ~ Time3 の時点と同一の弾性追従特性を示すことが分かる。そこで、P3 から P7 の塑性ひずみ分布を Fig.8 下段のように調べ、上段の緩和中のクリープひずみ分布と比較した。P3、P5、P7 の塑性ひずみ分布は緩和曲線上の Time 1 ~ Time3 におけるクリープひずみ分布とほぼ一致しており、塑性・クリープに係らず、非弾性ひずみ分布が同じであれば弾性追従特性も同一となることが理解出来る。

以上の結果から、緩和中の弾性追従係数の変化は、応力緩和時間の経過に伴う非弾性領域の拡大によって生じるものでり、弾性追従係数の大きさは当該時点におけるクリープひずみ分布に応じて定まるものであると結論付けられる。

Table 2 Analysis case of Y-piece(2)

Case	Analysis	Constitutive Equation	Power	Loading
TE	Elastic	Elastic	$n=1$	σ_{max}
C7	Elastic-Creep	Norton's Law	$m=7$	σ_{max}
P3	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	$n=3$	σ_{max}
P5	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	$n=5$	σ_{max}
P7	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	$n=7$	σ_{max}

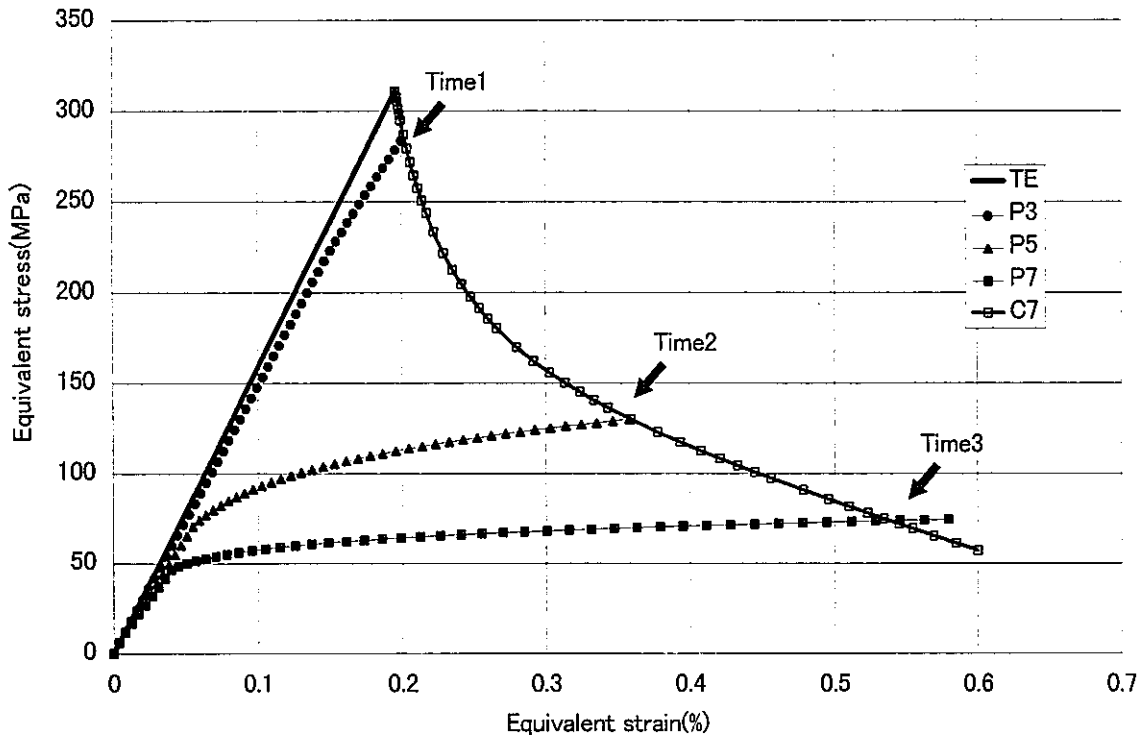


Fig.7 Stress relaxation process and elastic plastic stress-strain curves

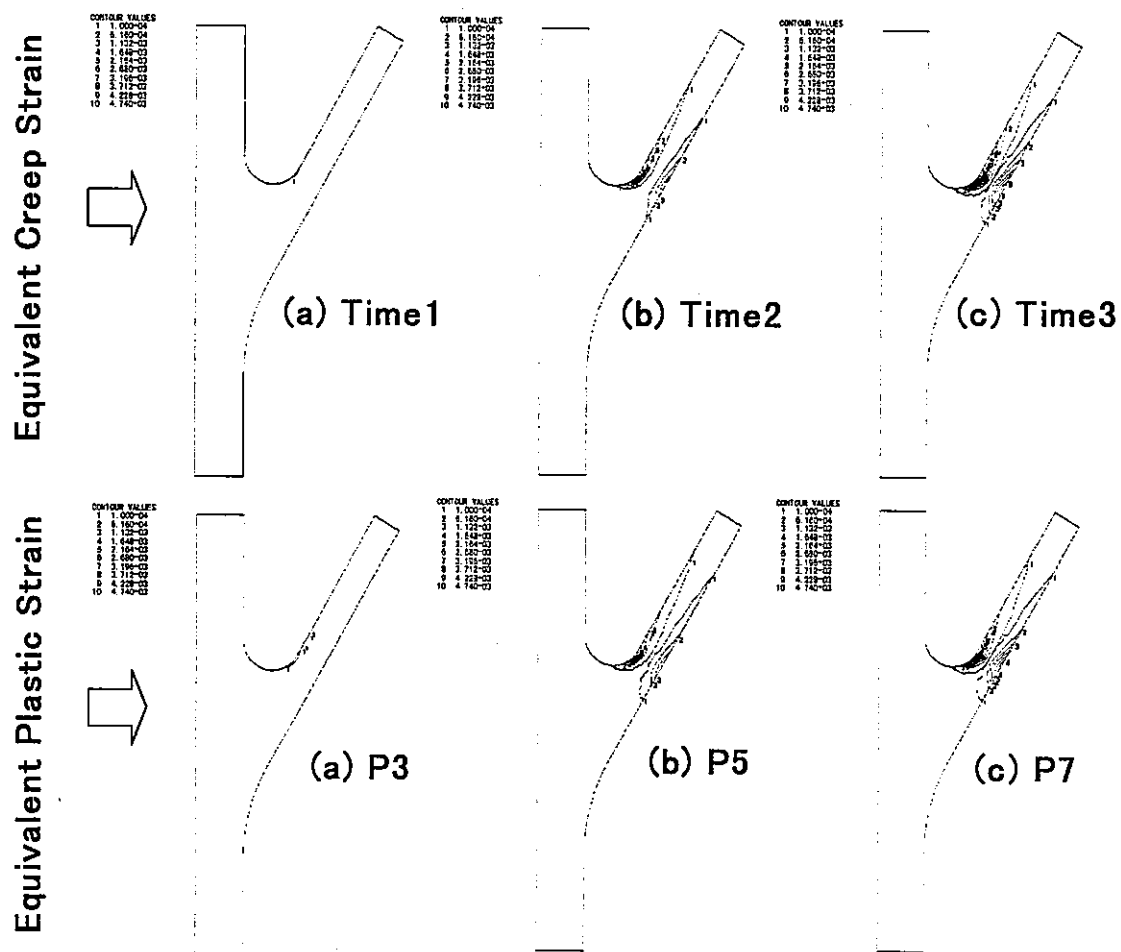


Fig.8 Inelastic strain contour at stress relaxation process and elastic plastic deformation

3. 3 材料の弾塑性構成方程式およびクリープひずみ式の影響評価

構造物の弾性追従係数は、材料特性の影響を受ける[1]ことから、本節では Y ピース(Fig.4)のひずみ集中挙動に対する、材料の弾塑性構成方程式およびクリープひずみ式の影響を分析する。負荷条件は、スカート端部を 50℃に保ったまま、円筒胴内表面を 550℃に昇温した場合とした。

クリープひずみ式は、式(4)において $m=3,5,7$ とする他、次の Blackburn 型の特性式を使用した場合の影響を調べた。

$$\varepsilon_c = C_1(1 - e^{-n't}) + C_2(1 - e^{-n't}) + \varepsilon_m \quad t \quad (6)$$

また、弾塑性構成方程式には式(5)において $n=3,5,7$ とした場合の他、以下に示す Ludwik 型の応力-ひずみ関係式、弾完全塑性体、2種類の想定ひずみ範囲に対する2直線応力ひずみ関係式、2直線応力ひずみ関係式と移動硬化側による倍の負荷による繰り返し荷重の場合を調べた。解析ケースの一覧を Table 3 に示す。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left\{ \frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right\}^m, \quad (\sigma > \sigma_y) \quad (7)$$

Table 3 Analysis case of Y-piece(3)

Case	Analysis Type	Constitutive Equation	Power
E	Elastic	Elastic	n=1
C3	Elastic-Creep	Norton's Law	m=3
C5	Elastic-Creep	Norton's Law	m=5
C7	Elastic-Creep	Norton's Law	m=7
P5-C7	Elastic-Plastic-Creep	Norton's Law Ramberg-Osgood	m=7 n=5
CBL	Elastic-Creep	Blackburn	—
P3	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=3
P5	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=5
P7	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=7
PL3-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=3
PL5-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=5
PL7-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=7
PP	Elastic-Plastic	Perfectly plastic	∞
PB	Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=0.5\%$)
PB-10	Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=1.0\%$)
CYPB	Cyclic Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=0.5\%$)

Table 3の解析ケースの中で、クリープ解析の結果を、応力-ひずみ線図上で比較した。Fig.9に示すように、応力緩和の最終値はクリープひずみ式に依存するが、応力緩和の過程は材料特性に依らず同一の軌跡を描いており、構造特有の緩和特性が存在することが分かる。次に、各弾塑性解析の結果を、応力緩和曲線(C7で代表)と共に応力-ひずみ線図上で比較した。Fig.10より、弾塑性ひずみの大きさは構成方程式により異なるが、変形の最終状態はほぼ応力緩和曲線上に存在することが分かる。

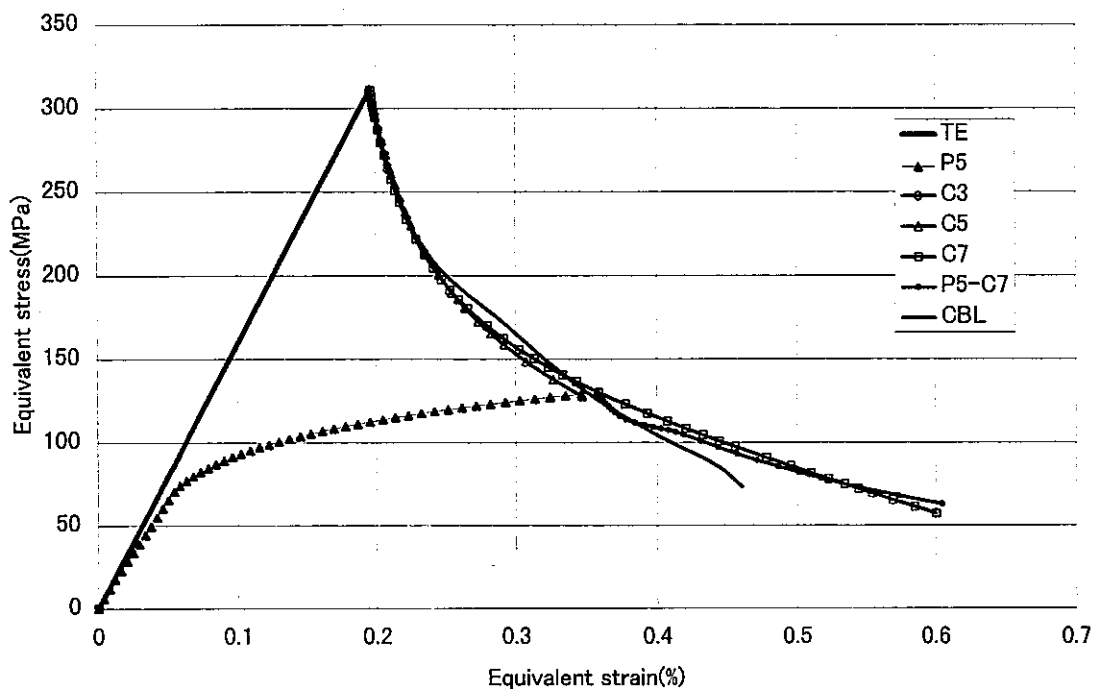


Fig.9 Stress relaxation curve based on different creep strain equations

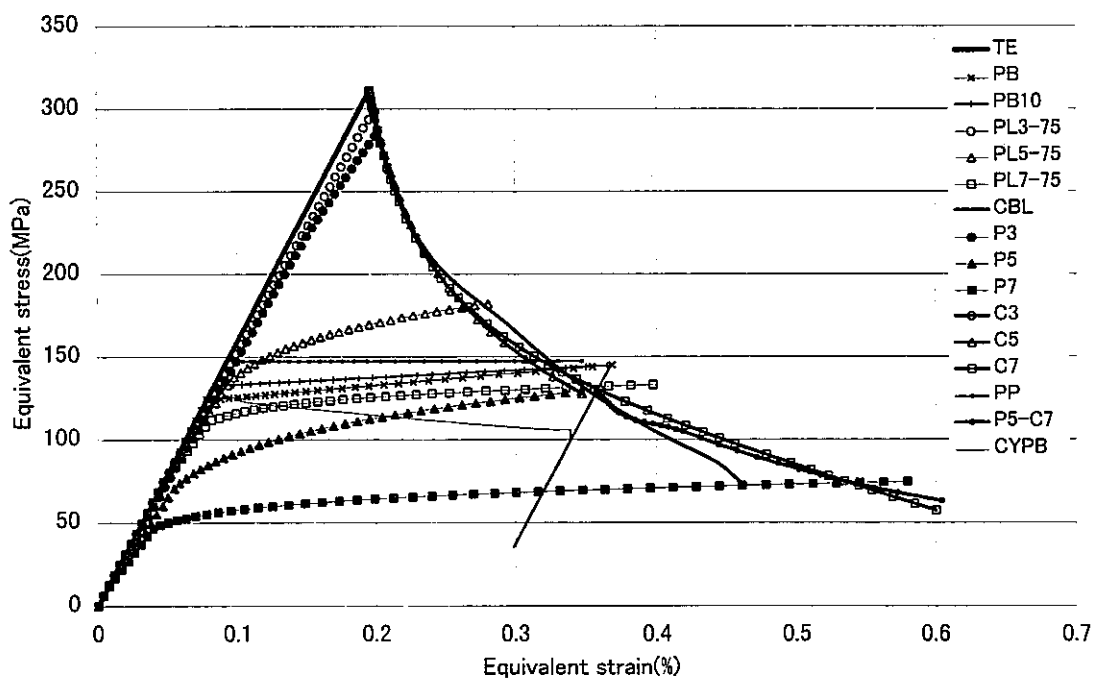


Fig.10 Stress-strain curve based on various constitutive equations

応力-ひずみ線図上で、弾塑性とクリープの解が構成方程式に依存せずに同じ位置にくる理由を調べるため、非弾性ひずみが 0.27%となった時点の解析ケース P5,C5,CBL の非弾性ひずみ分布を比較した。Fig.11 より、いずれのケースも、周辺をほぼ同じ大きさの弾性領域に囲まれていることが分かる。

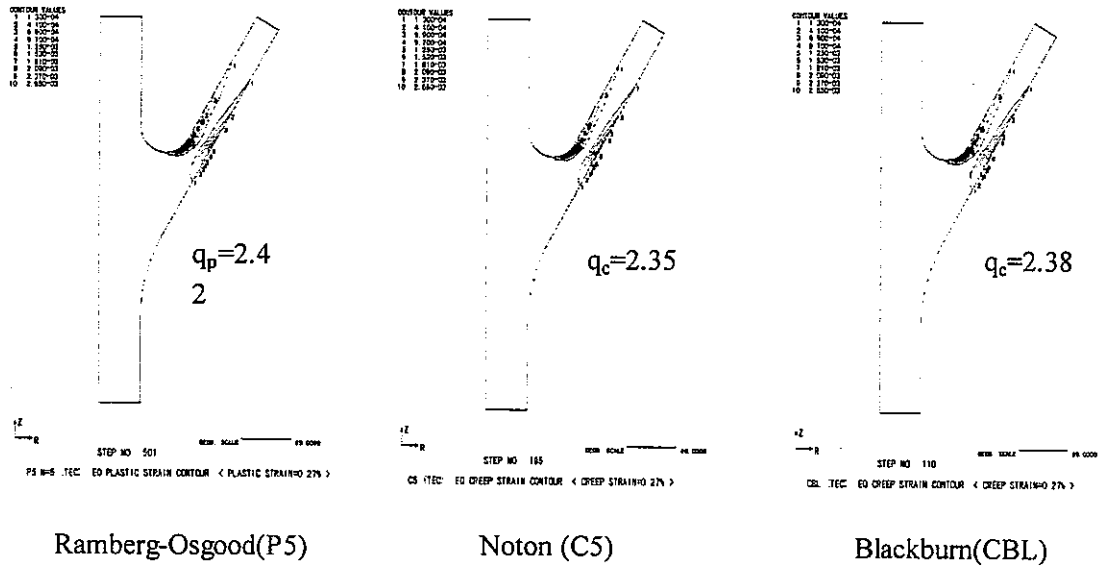


Fig.11 Equivalent creep and plastic strain contour at the same inelastic strain

弾性領域の影響を調べるため、弾性追従の基本モデルであるの2本の棒 $i(i=1,2)$ を接続した変断面棒(Fig.12)を用いた考察を行う。クリープひずみ式に Norton 則、

$$\dot{\epsilon}_c = B_i \sigma^m \quad (i=1,2) \tag{8}$$

および弾塑性構成方程式に Ramberg-Osgood 式、

$$\epsilon = \sigma / E_i + A_i \sigma^n \quad (i=1,2) \tag{9}$$

を仮定して、変断面棒のクリープおよび弾塑性の q 値を計算するとそれぞれ、

$$q = \frac{1 + (E_1 / E_2)(l_2 / l_1)(a_1 / a_2)}{1 + (B_2 / B_1)(l_2 / l_1)(a_1 / a_2)^m} \quad (\text{クリープ}) \tag{10}$$

$$q = \frac{1 + (E_1 / E_2)(l_2 / l_1)(a_1 / a_2)}{1 + (A_2 / A_1)(l_2 / l_1)(a_1 / a_2)^n} \quad (\text{弾塑性}) \tag{11}$$

と材料特性をパラメータとした類似の関数型として求まり、Hoff の類似が成立する[3]。

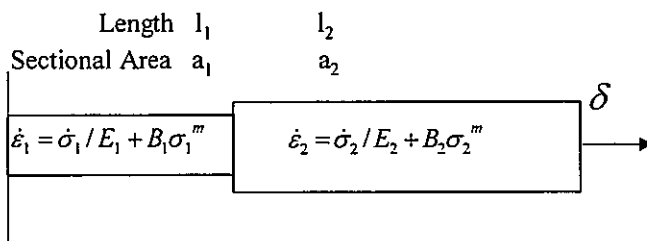


Fig.12 Elastic follow-up model considering constitutive equations

そこで式(8)および式(9)において $B_2 = A_2 = 0$ として棒2を弾性体にすると、弾性追従係数は剛性だけの関数となり構成式に依存しなくなることが説明できる。尚、一般の構造設計では、シェイクダウン基準等により構造物中に弾性領域(弾性核)が存在するように応力を制限する。弾性領域が存在すると弾性追従係数は構成方程式に鈍感となるため、非弾性解析により安定した値を計算することが出来ると考えられる。

第4章ひずみ集中挙動の弾性追従係数による記述

Fig.5 の結果を、弾性追従係数を用いて定量化するため、式(1)の定義による弾性追従係数の負荷レベルに応じた変化を調べた。Fig.13 のように、弾性追従係数を非弾性ひずみの大きさとの関係において整理すると、ピークひずみ集中から二次応力再配分への遷移による弾性追従係数の変化は、クリープの場合は負荷ごとに独立の曲線となるが、最終結果は一本の弾塑性の曲線上に載ることが分かった。これは、負荷に依存しない構造特有の弾性追従特性の存在を意味しており、さらにその特性曲線が一回の弾塑性解析によって求められることを示している。

さらに Fig.9 と Fig.10 の特性を定量化するため、非弾性ひずみとq値の関係を整理した。Fig.13 のように、q値は非弾性変形の進行と共に増加するが、弾塑性変形の最終状態は、構成方程式に依らず応力緩和による曲線(C7)と重なる。この特性を利用すると、一回の応力緩和解析から求めた弾性追従特性によって、他の材料特性に関するq値を評価することも可能となる。

構造物には、構成方程式に鈍感な特有の弾性追従特性があることを利用すると、簡易非弾性解析によりその特性を求めることが出来る。

また、ひずみ分布によって決まることを利用すると、ピークひずみと2次応力再配分に考慮して弾性解析からその分布を予測することにより等価なモデルに置き換えることも可能である。これについては、続報で報告する予定である。

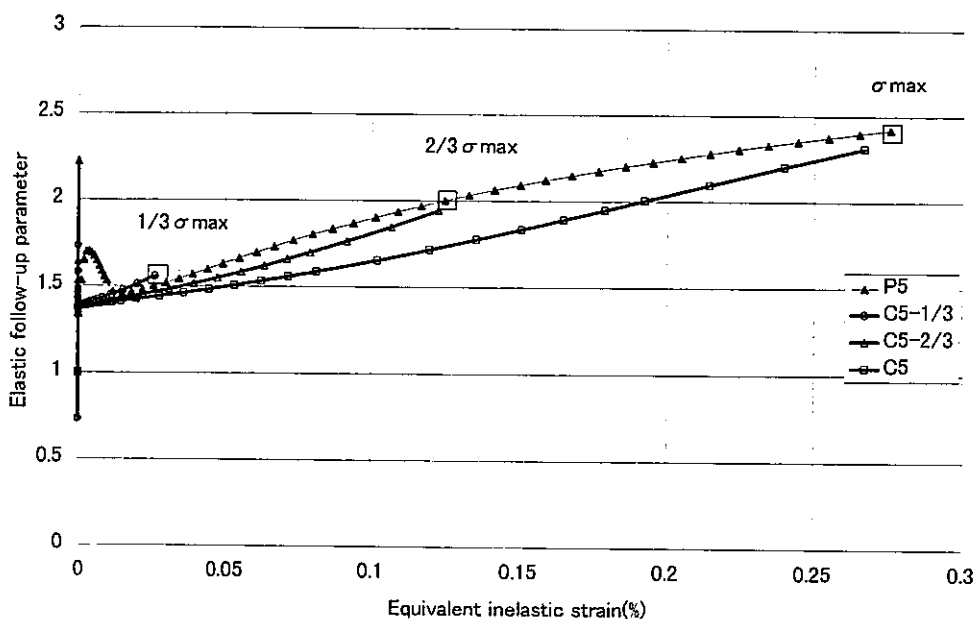


Fig.13 Effect of load level to elastic follow-up characteristics

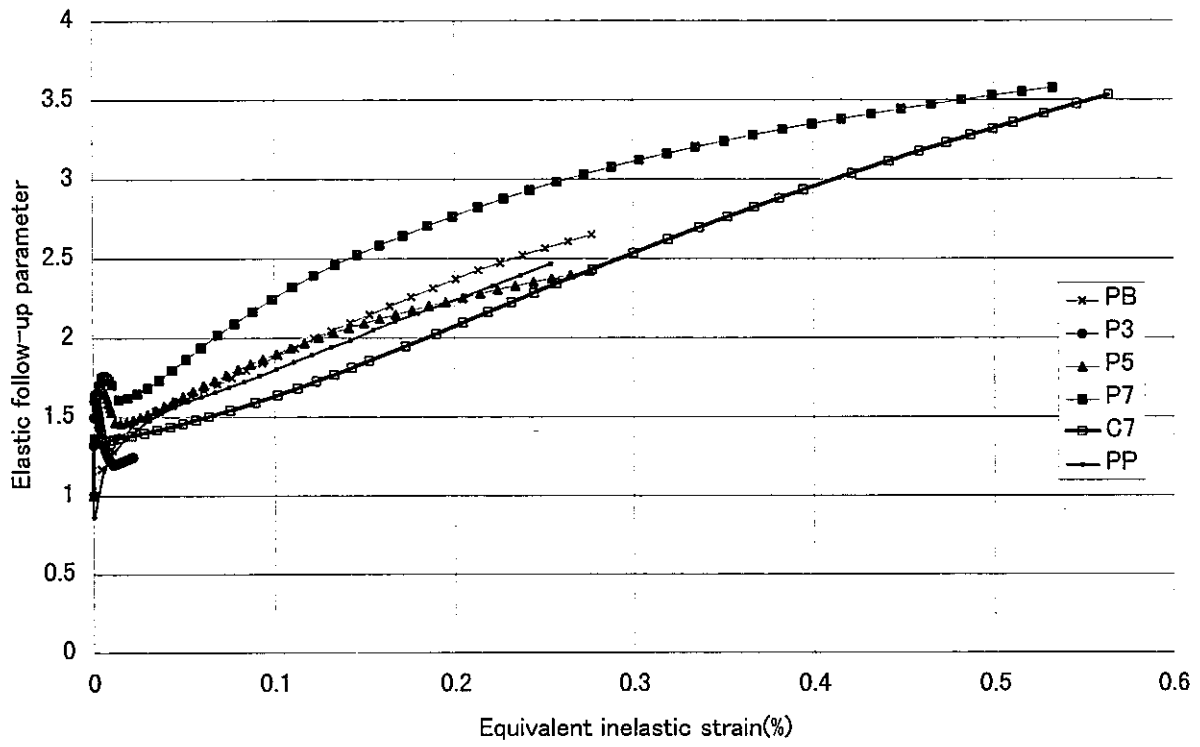


Fig.14 Effect of constitutive equations to elastic follow-up characteristics

第5章 結 言

一般構造物に対する弾性追従係数 q の定量化を目的として、構造不連続部のひずみ集中挙動に対する、負荷レベル、応力緩和時間、および材料の構成方程式の影響を調べ、これらの因子と弾性追従係数との定量関係を明らかにした。

負荷レベルが増加すると弾性変形および応力緩和時の弾性追従係数も増大する。この理由は、ピークひずみ集中から二次応力再配分へと非弾性領域が広がるに伴い周囲の弾性領域による拘束力が弱くなるためである。

応力緩和の過程においても、時間と共に弾性追従係数が増加する。これは緩和時間の経過に伴う非弾性領域の拡大によるものであり、弾性追従係数の大きさは当該時点におけるクリープひずみ分布に応じて決まる。

材料の構成方程式の影響に関しては、これによって弾性追従係数自体の大きさは変化するが、同一荷重に対する弾塑性変形の結果と応力緩和の過程は、構成方程式に依存しない一本のマスターカーブ上に存在することが確認された。さらに、マスターカーブ上で弾塑性解とクリープ解析の結果が一致する点においては、弾性追従係数とひずみの分布が類似のものとなることが分かった。

以上の結果から、負荷レベルや緩和時間によって変化する構造物の弾性追従特性は、非弾性ひずみ分布の変化によって説明できると結論づけられる。さらに、塑性とクリープの弾性追従特性は、応力緩和曲線または非弾性ひずみ－弾性追従係数の関係で表現されるマスターカーブによって定量記述できることが明らかになった。

このマスターカーブは、荷重レベルが既知の場合はクリープ解析により、材料が既知の場合は弾塑性解析により、また荷重と材料が未知の場合は応力－ひずみの非線形性を大き目に想定した弾塑性解析により評価する方法が、合理的であると考えられる。

謝 辞

構造物の応力分類の考え方および弾性追従概念に関しまして、東京大学の朝田泰英教授より高い視点からのご助言を受けましたことに、厚く御礼いたします。

参考文献

- [1] Kasahara,N.,Nagata,T.,Iwata,K.,and Negishi,H. (1995), 'Advanced Creep-Fatigue Evaluation Rule for Fast Breeder Reactor Components : Generalization of Elastic Follow-up Model', NED 155, pp499/518

- [2] Robinson, E.L.(1955),'Strain piping design to minimise creep concentration', Trans.of ASME,77, pp1147/1162

- [3] 笠原直人, '高温構造解析における簡易解析法の最近の動向', 圧力技術, Vol.36, No.6, pp13/18, (1998)

- [4] ASME, 'Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel CODE for Design by Analysis in Section III and Section VIII, Division 2', ASME, New York, (1964)

- [5] Iida, K. et al., 'Simplified analysis and design for elevated temperature components of MONJU', NED 98, pp305/317, (1987)

- [6] 笠原直人, '構造不連続部のひずみ集中挙動の支配因子と弾性追従係数による記述 (1) 負荷形態の影響評価', 機械学会, 76 期全国大会講演論文集, (1998)

- [7] 笠原直人, '構造不連続部のひずみ集中挙動の支配因子と弾性追従係数による記述 (2) 材料の弾塑性構成方程式およびクリープひずみ式の影響評価', 機械学会, M&M98 材料力学講演会論文集, (1988)

付録 A Y ピース最大応力発生位置における応力-ひずみ線図
(各成分をオーバープロット)

Table A Analysis case of Y-piece

Case	Analysis Type	Constitutive Equation	Power
E	Elastic	Elastic	n=1
C3	Elastic-Creep	Norton's Law	m=3
C5	Elastic-Creep	Norton's Law	m=5
C7	Elastic-Creep	Norton's Law	m=7
P5-C7	Elastic-Plastic-Creep	Norton's Law Ramberg-Osgood	m=7 n=5
CBL	Elastic-Creep	Blackburn	—
P3	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=3
P5	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=5
P7	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=7
PL3-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=3
PL5-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=5
PL7-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=7
PP	Elastic-Plastic	Perfectly plastic	∞
PB	Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=0.5\%$)
PB-10	Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=1.0\%$)
CYPB	Cyclic Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=0.5\%$)

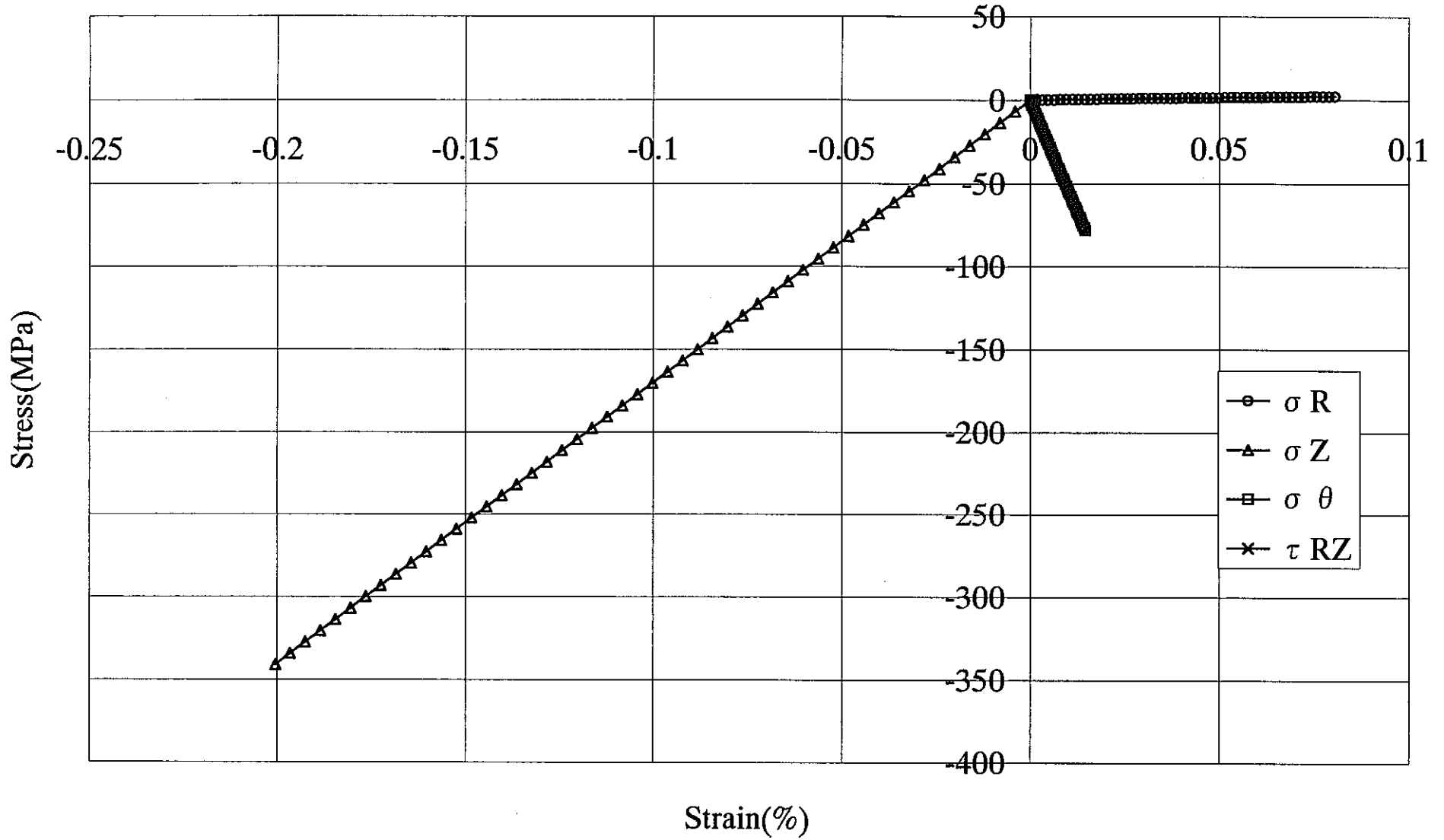


Fig.A.1 Strain-Stress curve (TE)

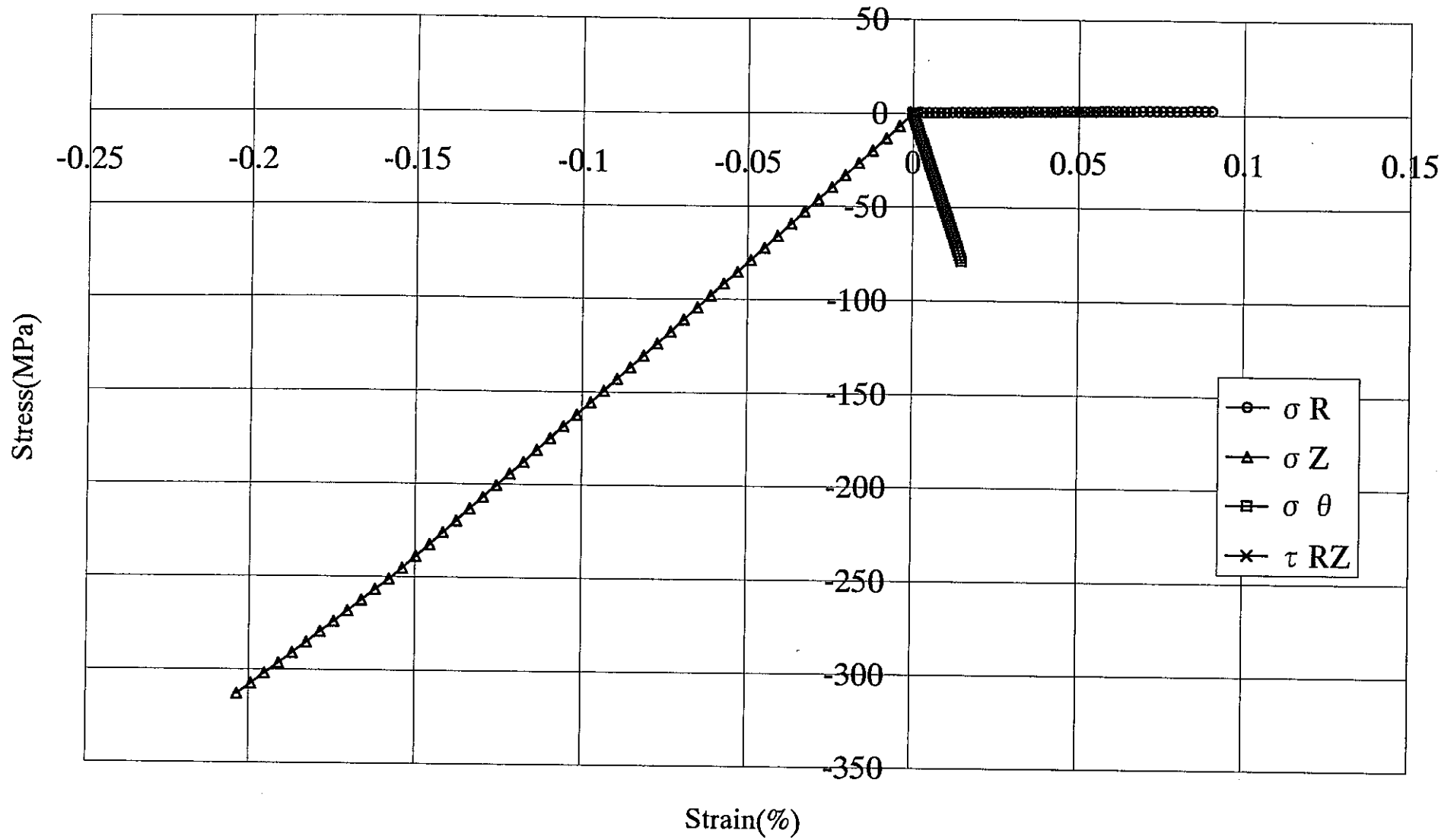


Fig.A.2 Strain-Stress curve (P3)

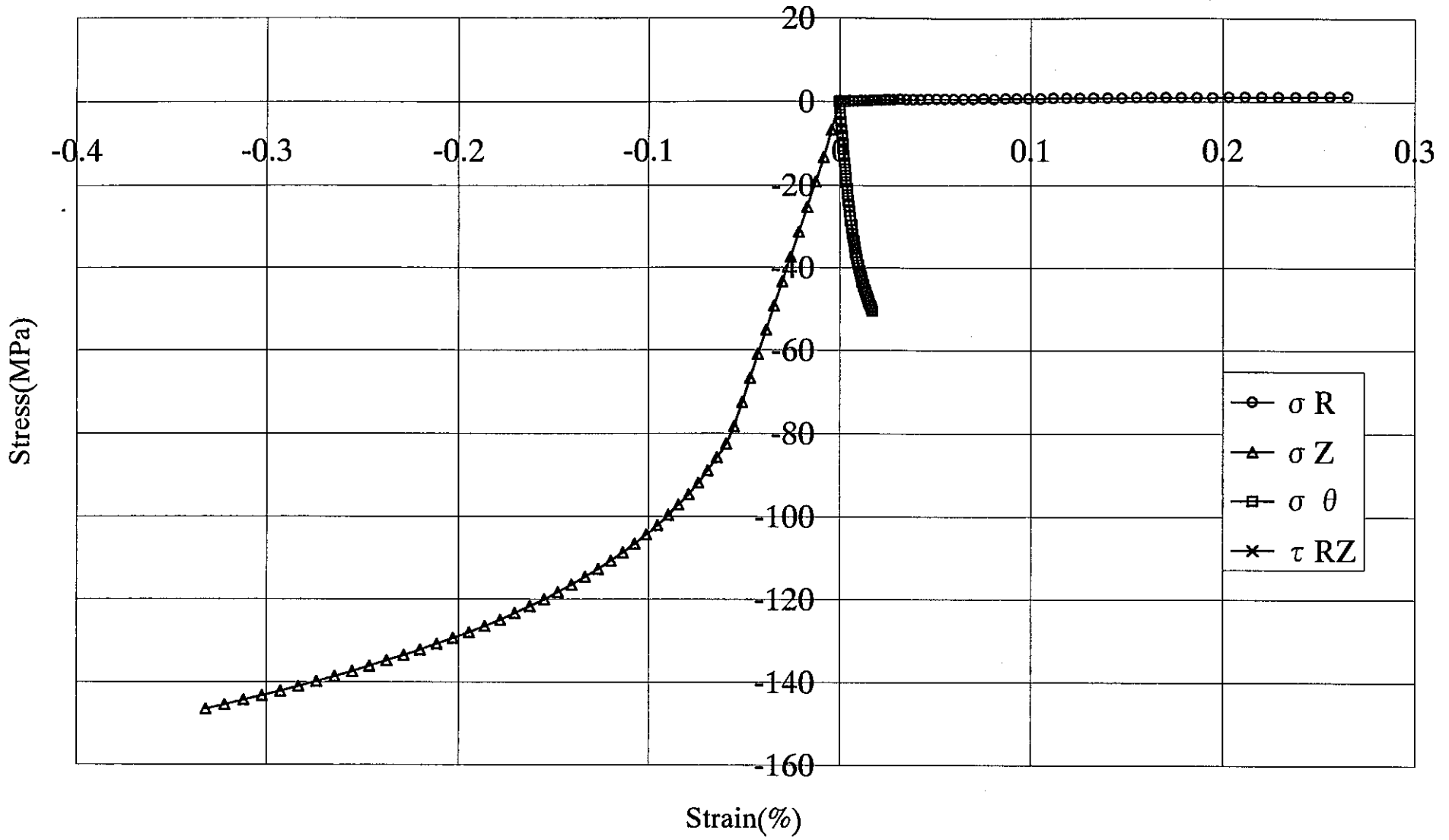


Fig.A.3 Strain-Stress curve (P5)

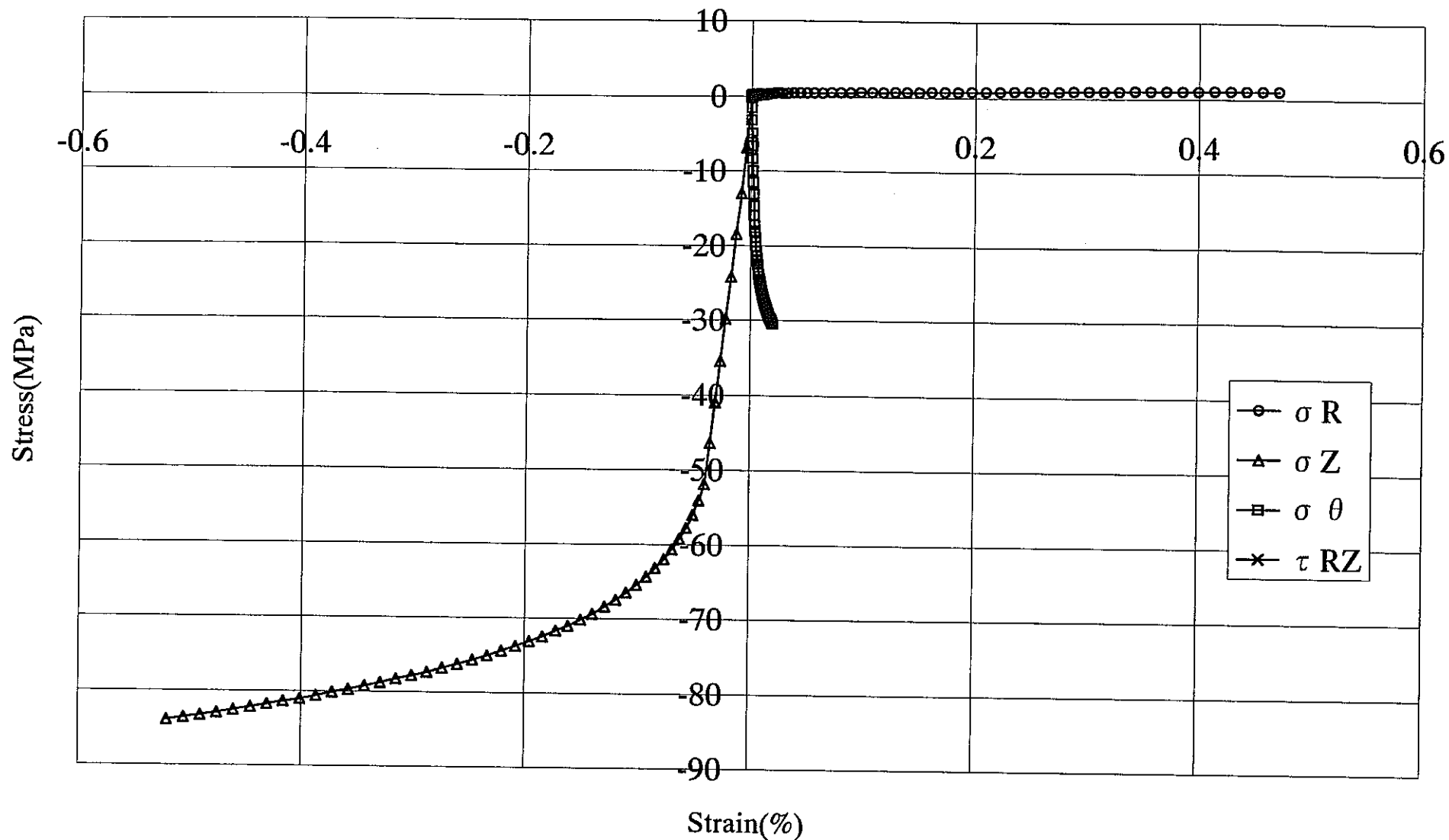


Fig.A.4 Strain-Stress curve (P7)

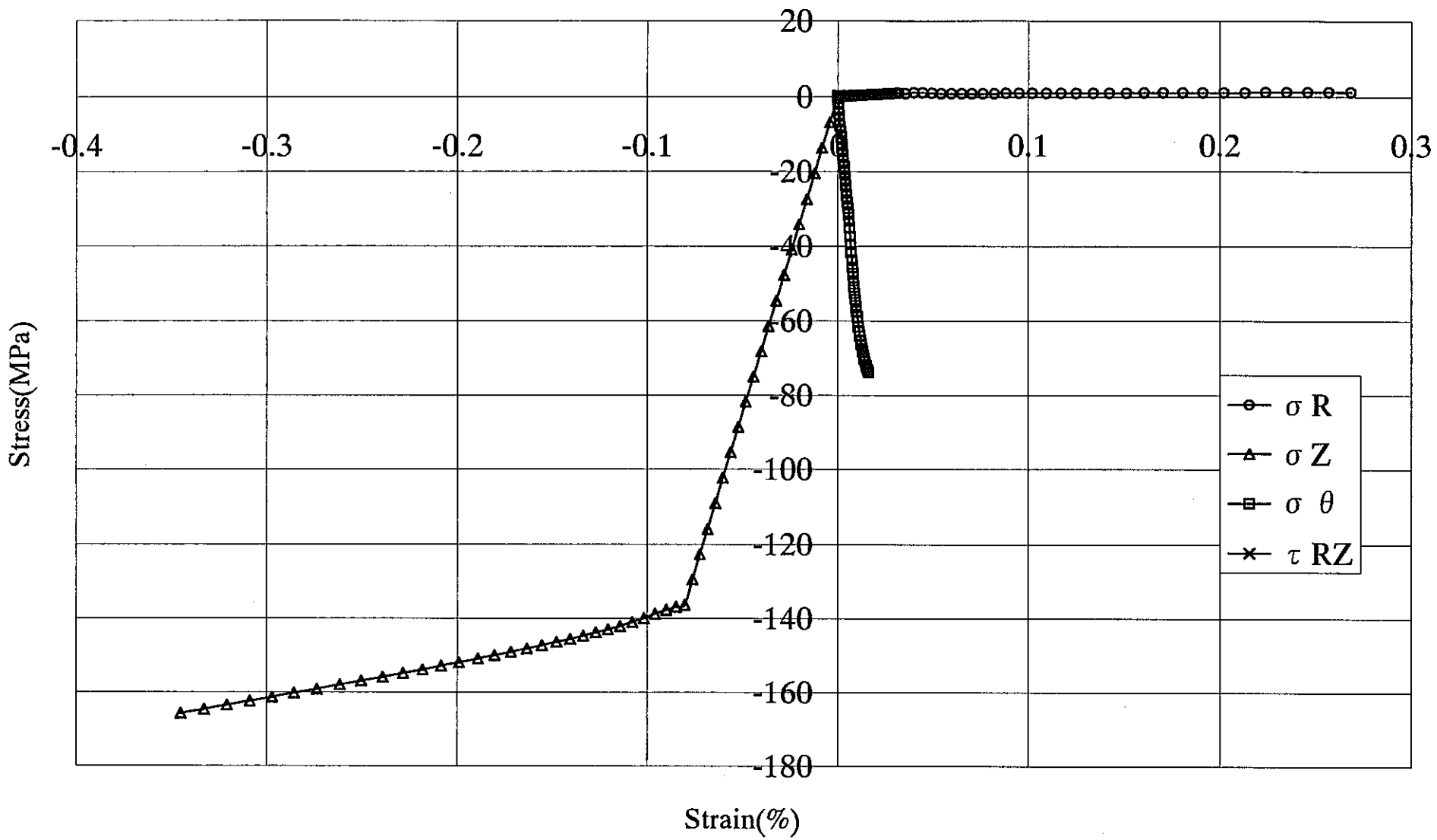


Fig.A.5 Strain-Stress curve (PB05)

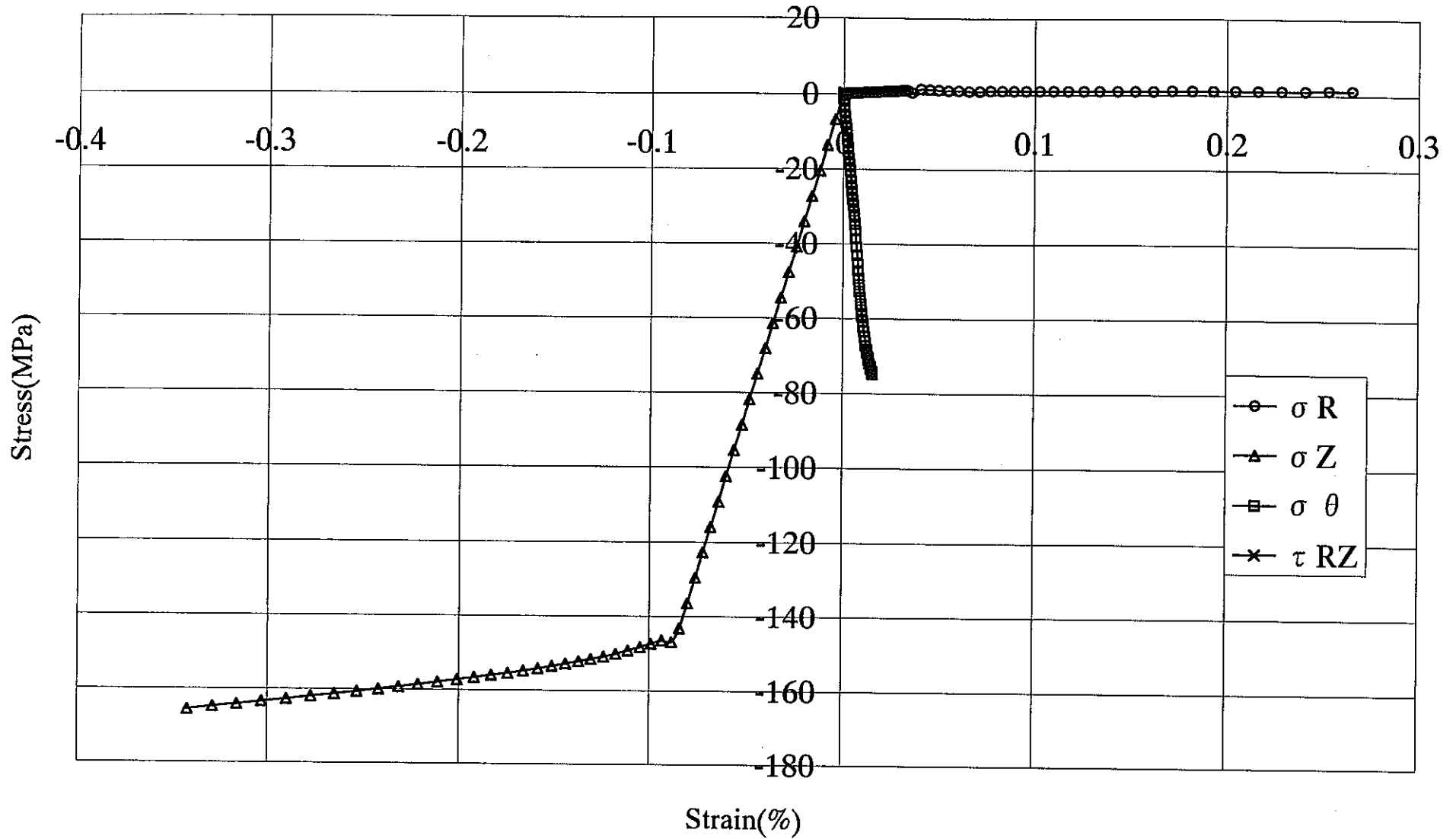


Fig.A.6 Strain-Stress curve (PB10)

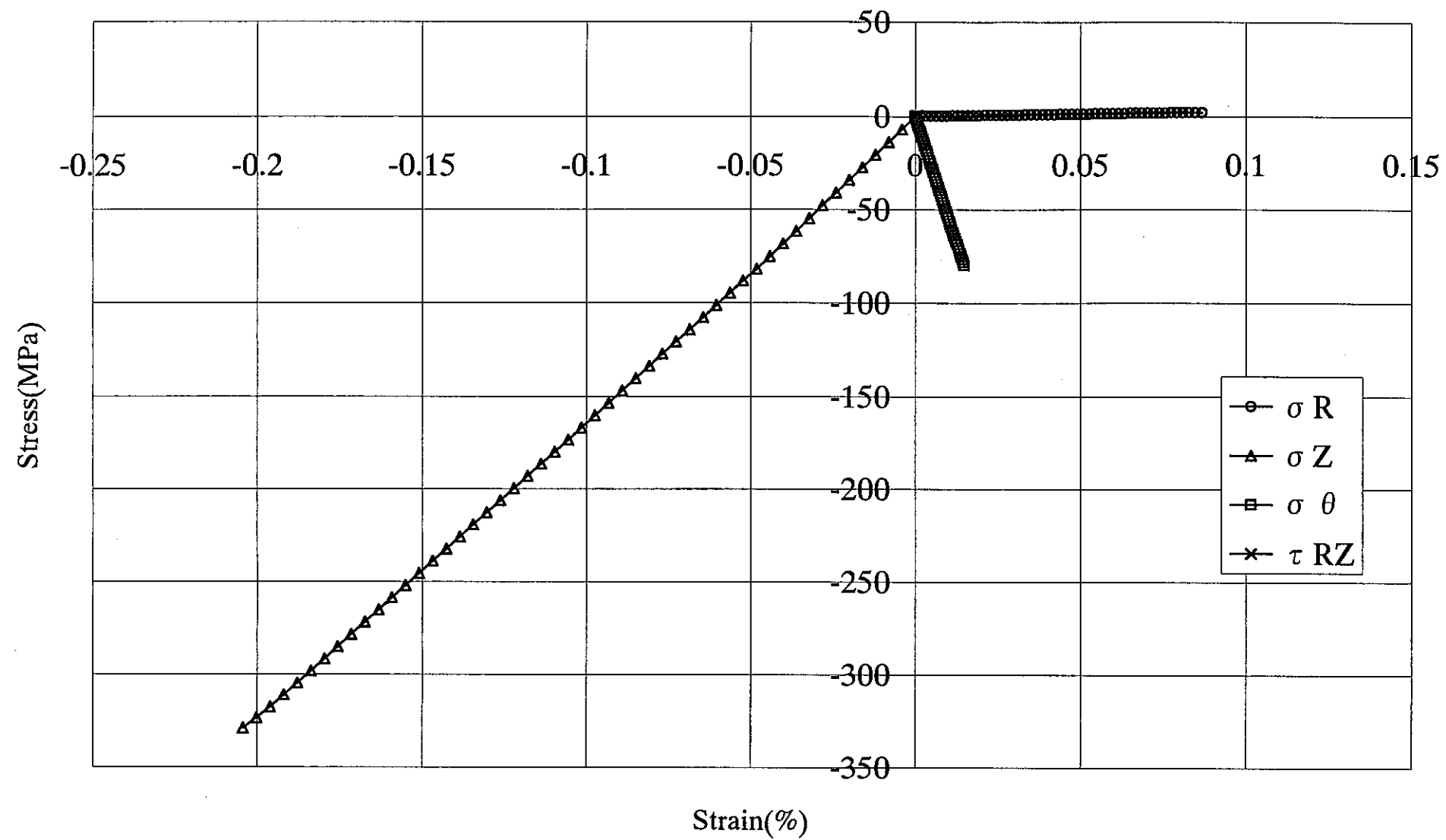


Fig.A.7 Strain-Stress curve (PL3-75)

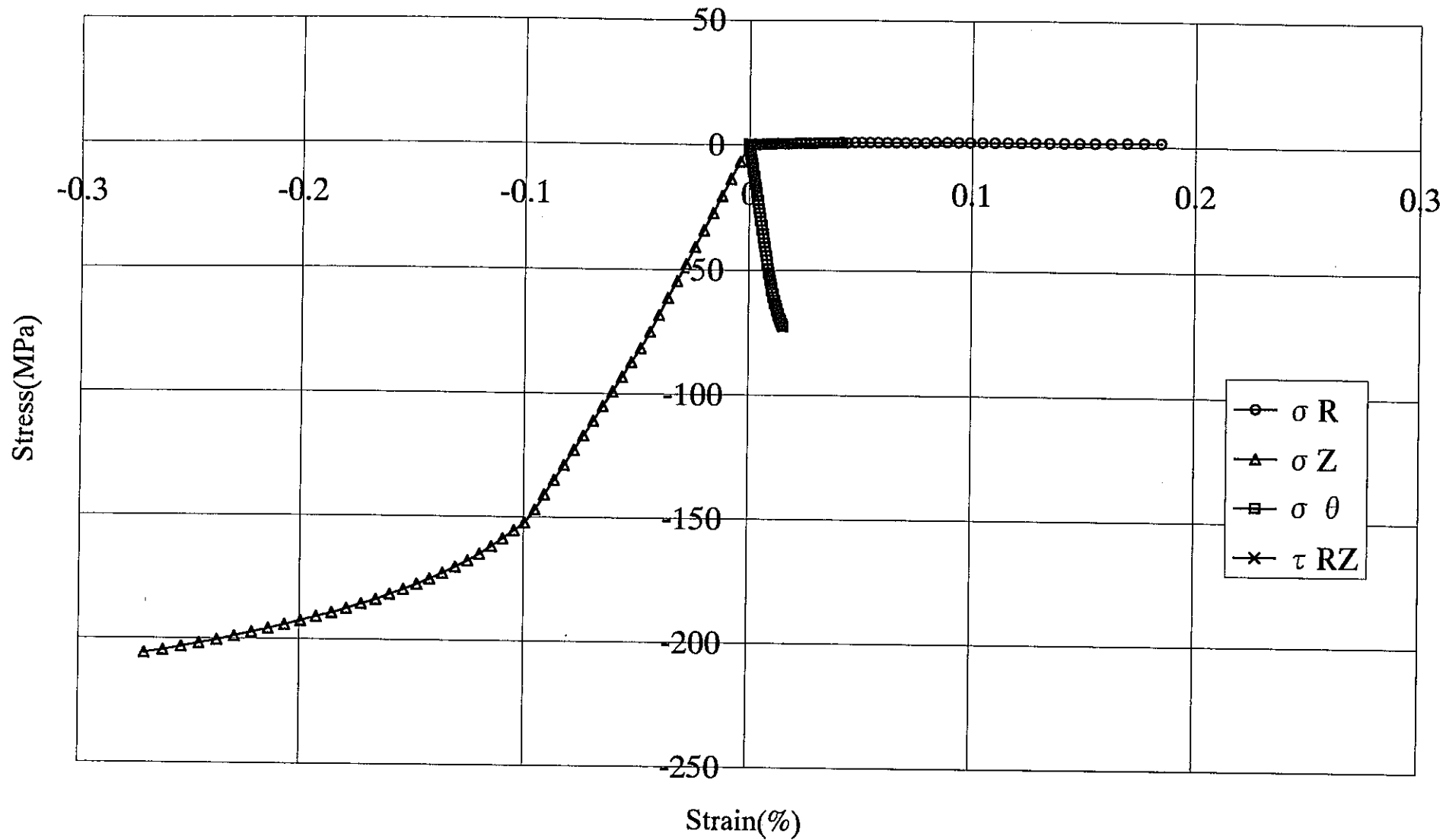


Fig.A.8 Strain-Stress curve (PL5-75)

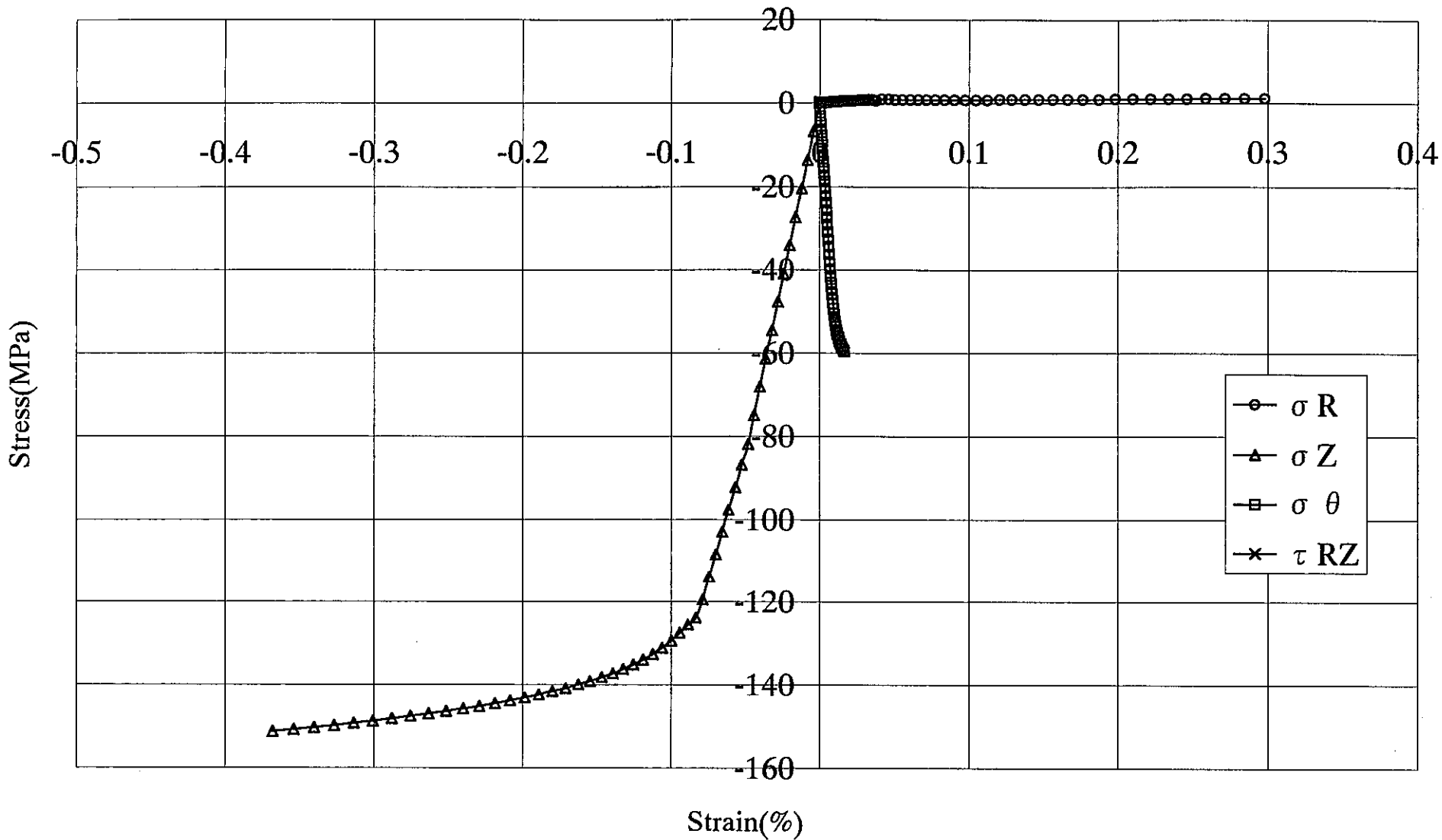


Fig.A.9 Strain-Stress curve (PL7-75)

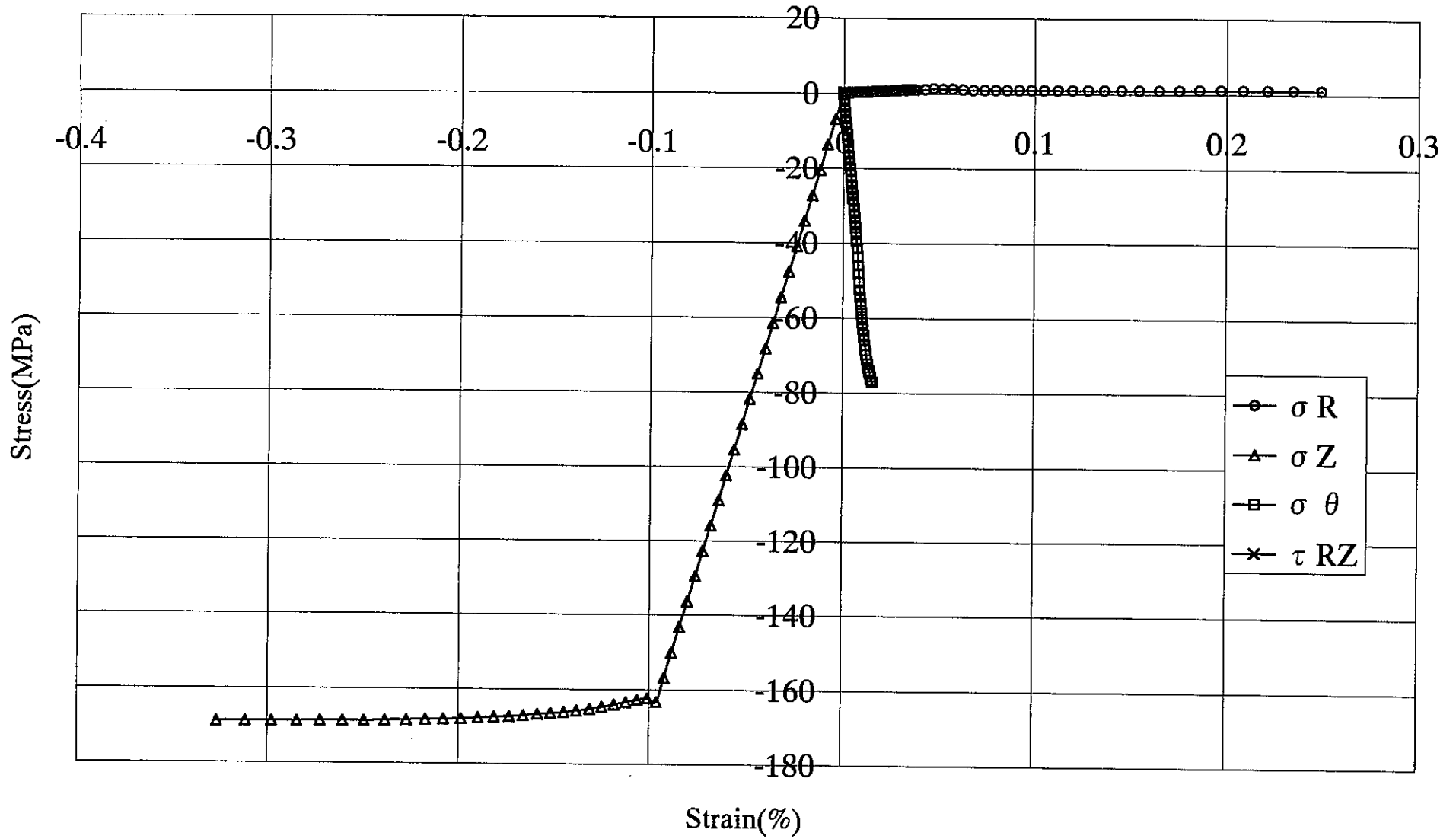


Fig.A.10 Strain-Stress curve (PP)

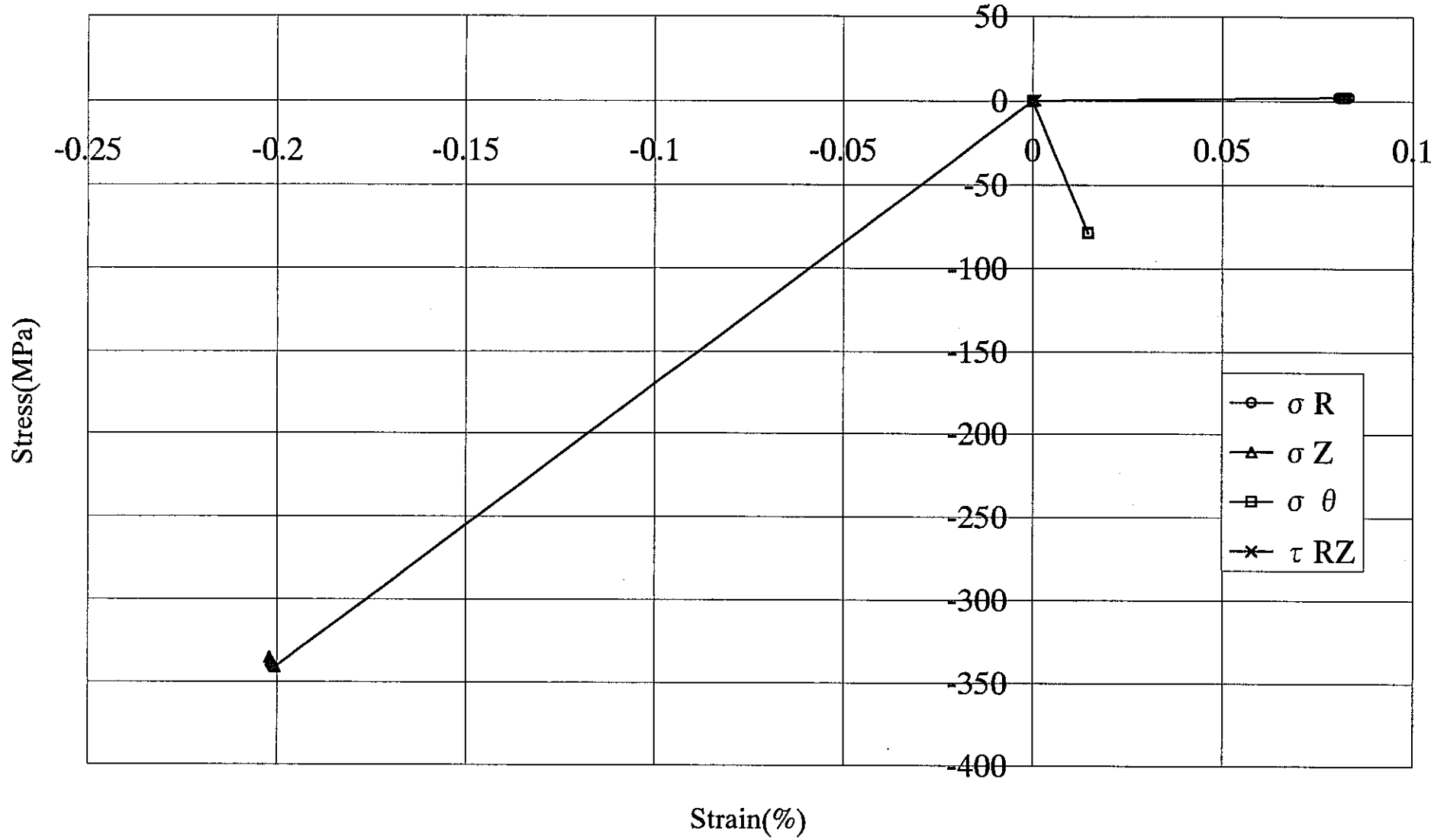


Fig.A.11 Strain-Stress curve (C3)

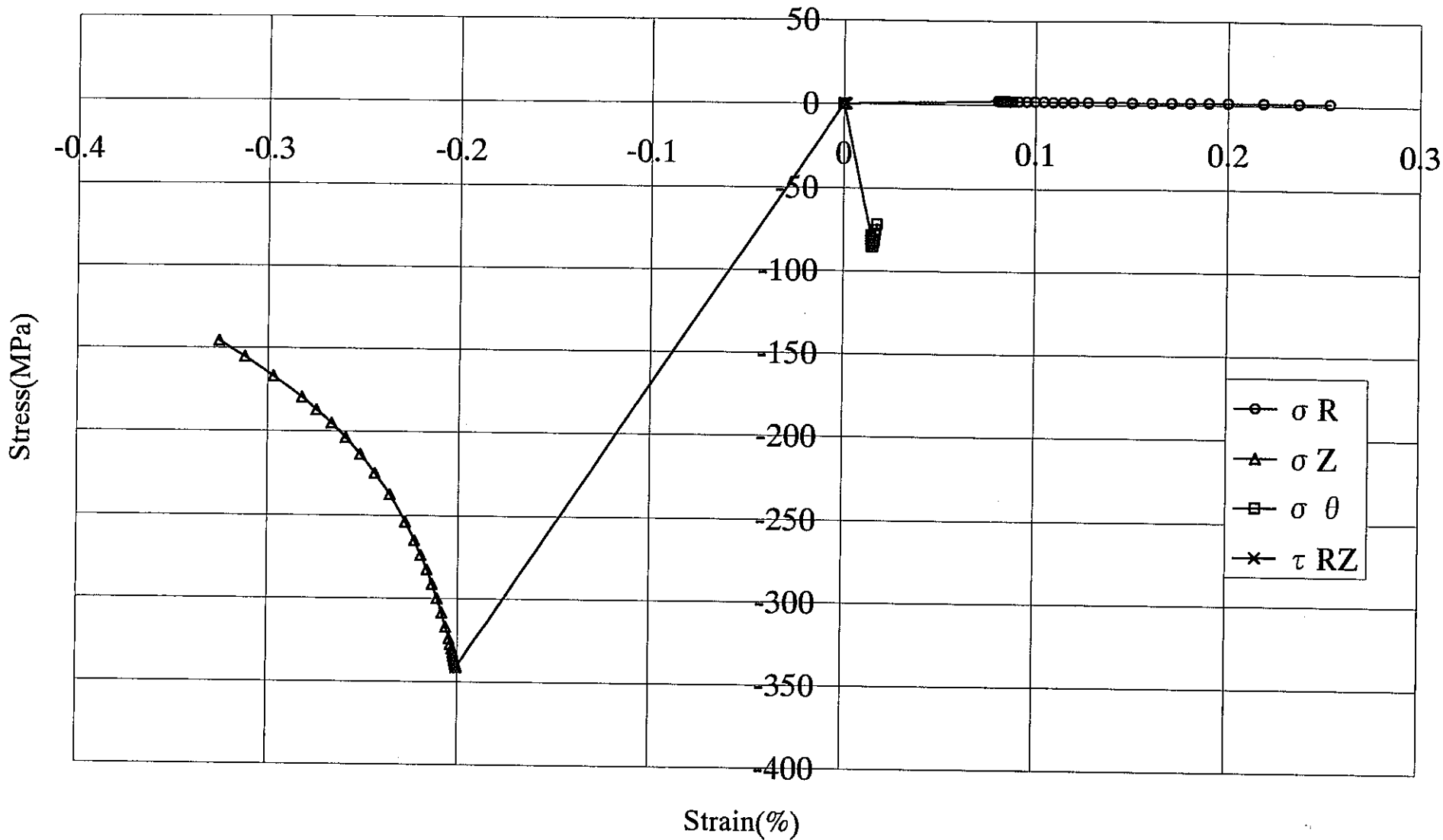


Fig.A.12 Strain-Stress curve (C5)

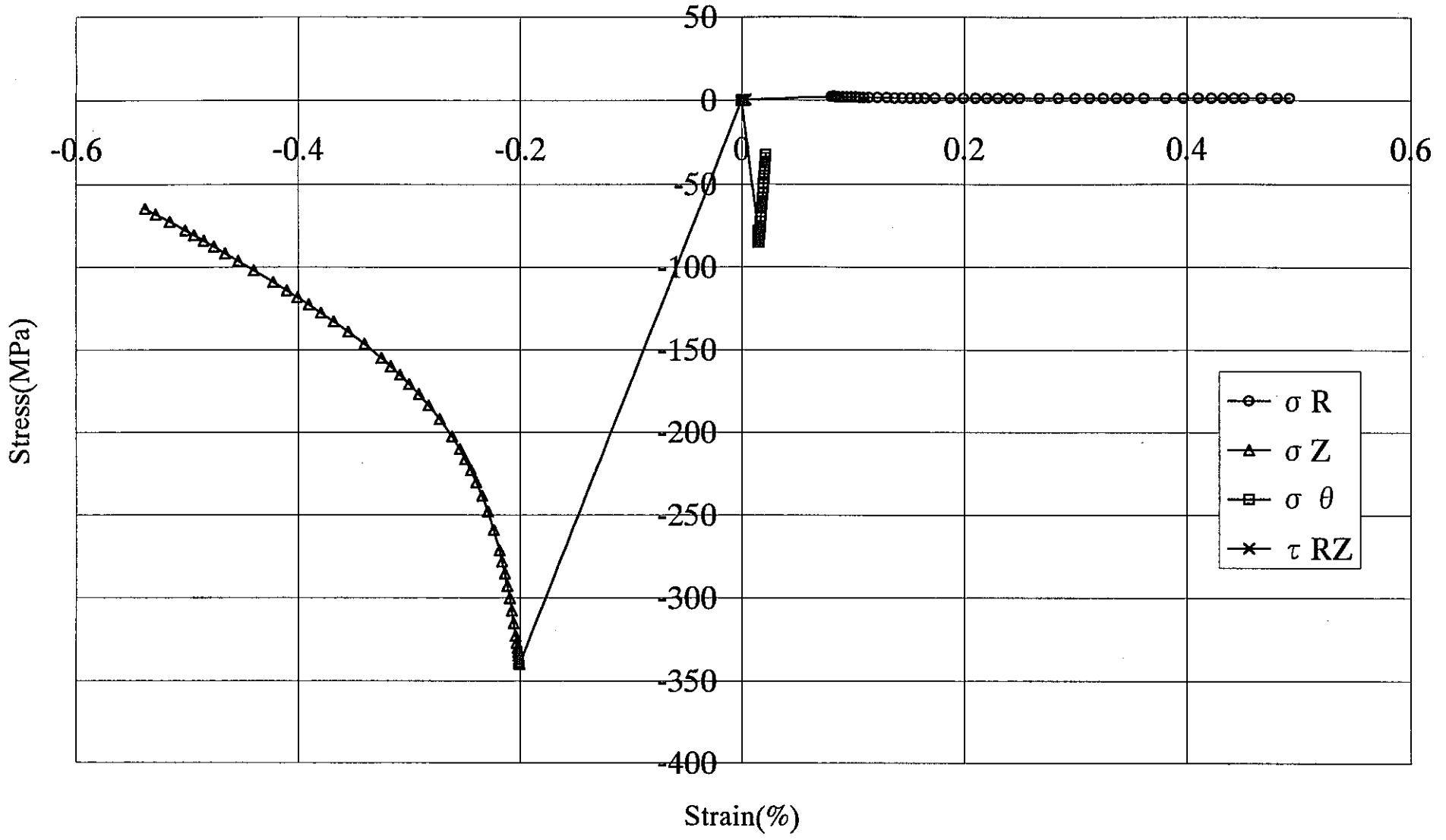


Fig.A.13 Strain-Stress curve (C7)

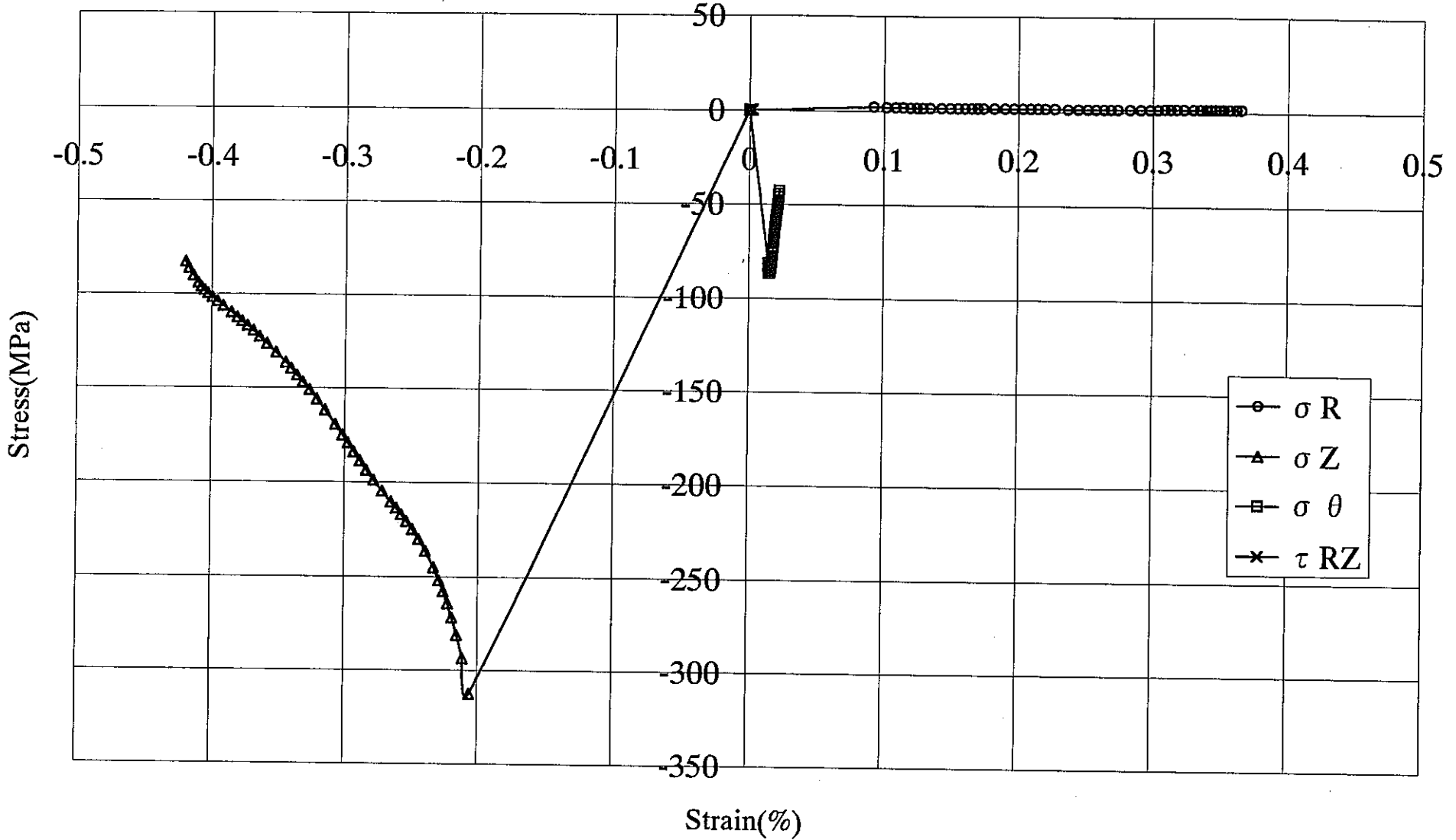


Fig.A.14 Strain-Stress curve (CBL)

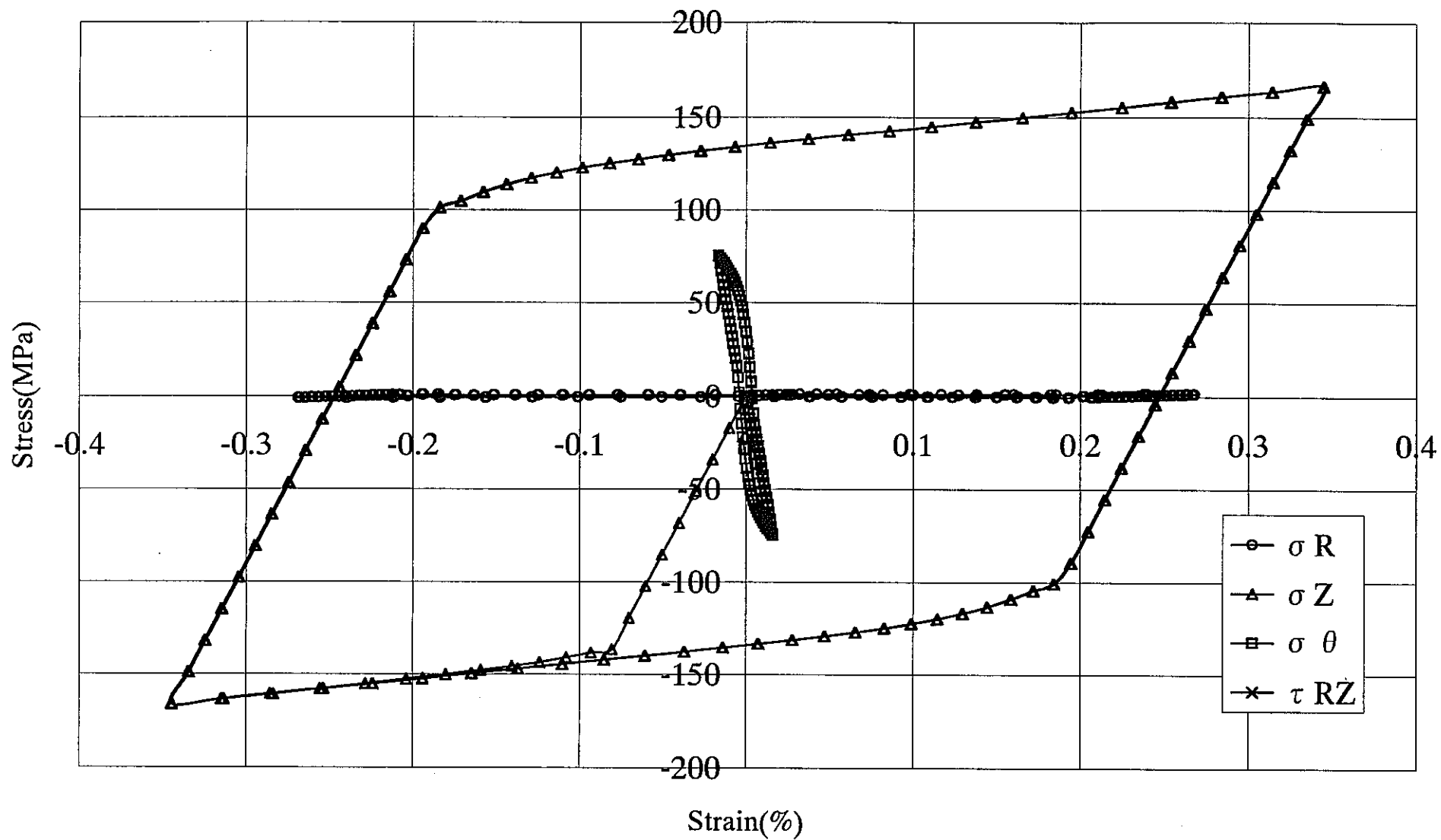


Fig.A.15 Strain-Stress curve (CYPB)

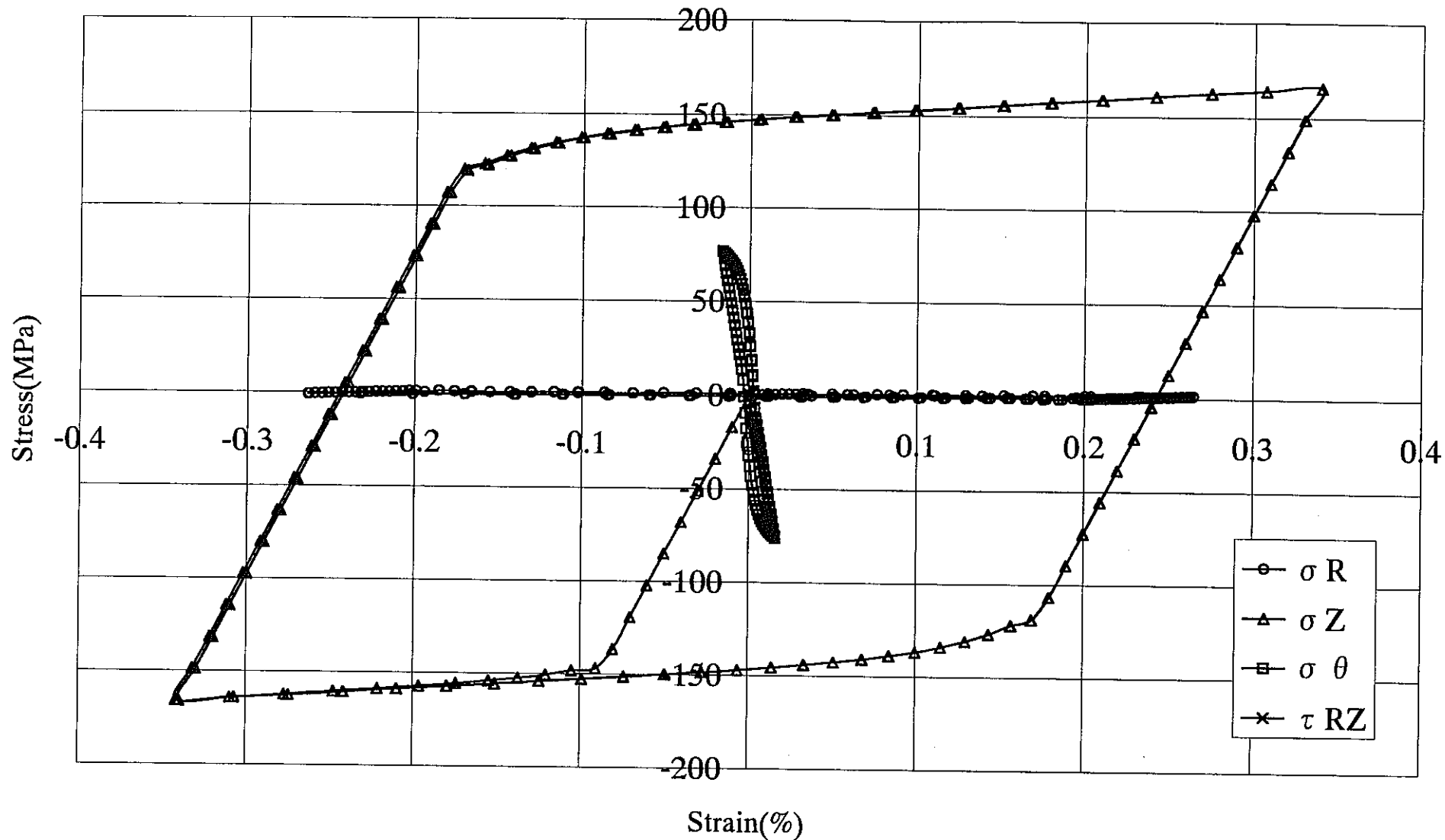


Fig.A.16 Strain-Stress curve (CYPB10)

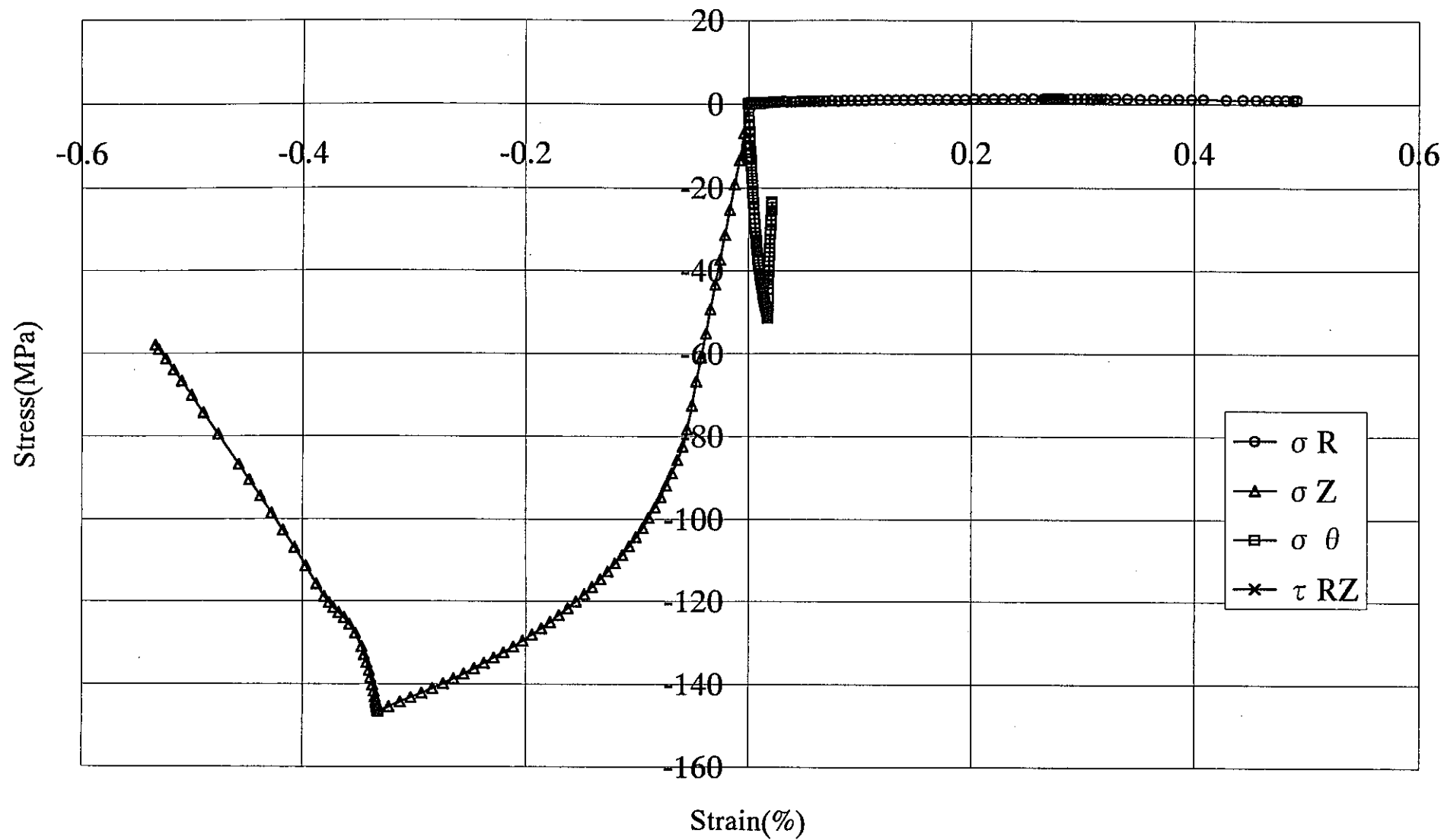
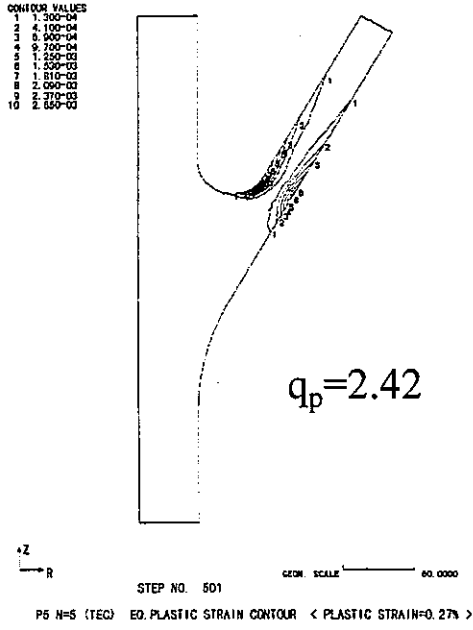


Fig.A.17 Strain-Stress curve (P5-C7)

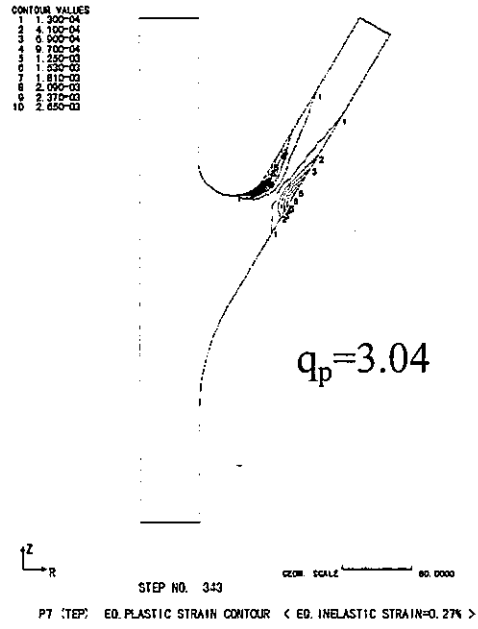
付録B Yピース相当塑性ひずみおよび相当クリープひずみコンター図
(各ひずみレベル)

Table B Analysis case of Y-piece

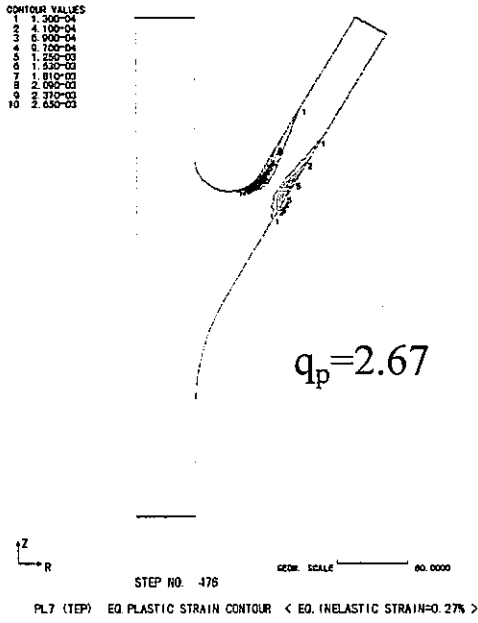
Case	Analysis Type	Constitutive Equation	Power
E	Elastic	Elastic	n=1
C3	Elastic-Creep	Norton's Law	m=3
C5	Elastic-Creep	Norton's Law	m=5
C7	Elastic-Creep	Norton's Law	m=7
P5-C7	Elastic-Plastic-Creep	Norton's Law Ramberg-Osgood	m=7 n=5
CBL	Elastic-Creep	Blackburn	—
P3	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=3
P5	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=5
P7	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=7
PL3-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=3
PL5-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=5
PL7-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=7
PP	Elastic-Plastic	Perfectly plastic	∞
PB	Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=0.5\%$)
PB-10	Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=1.0\%$)
CYPB	Cyclic Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=0.5\%$)



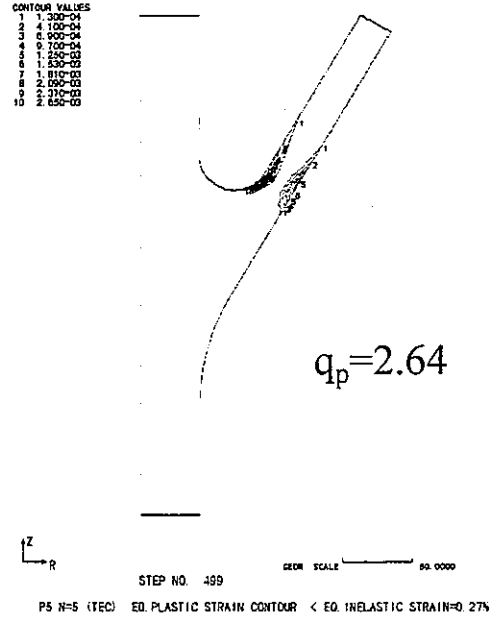
P5



P7

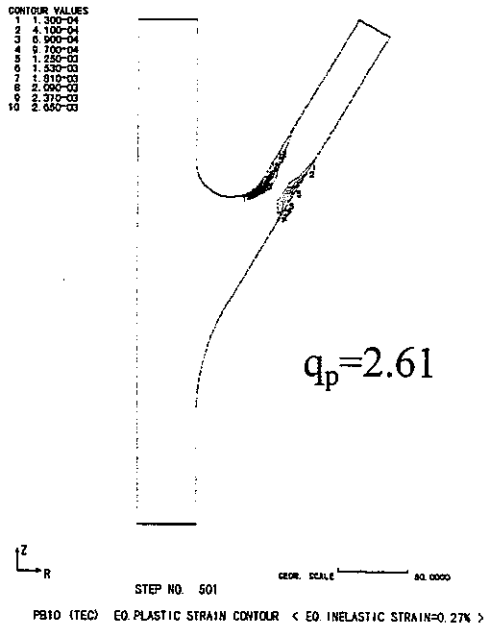


PL7-75

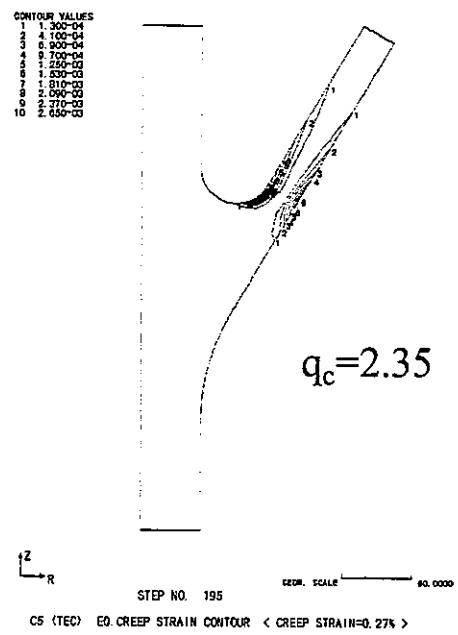


PB

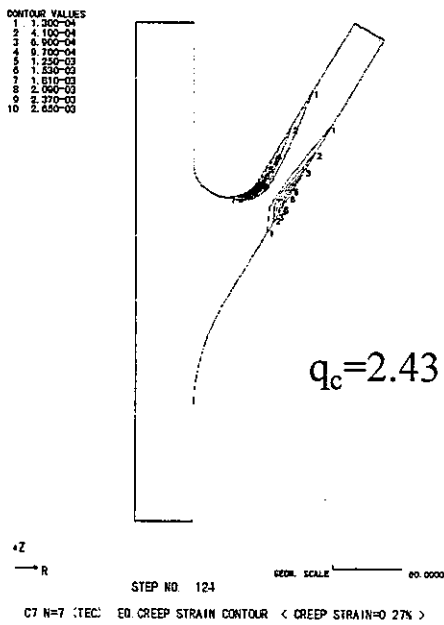
Fig.B.1 Inelastic strain contour ($\epsilon_{\text{inelastic}}=0.27\%$)



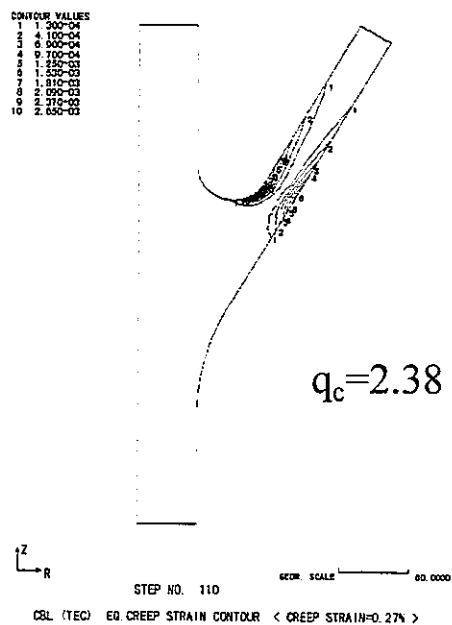
PB10



C5

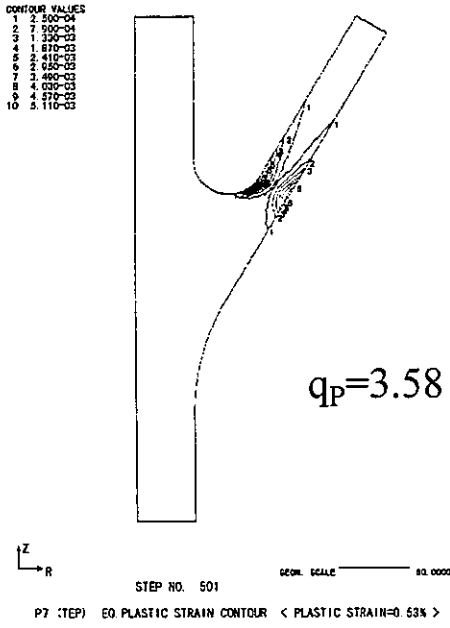


C7

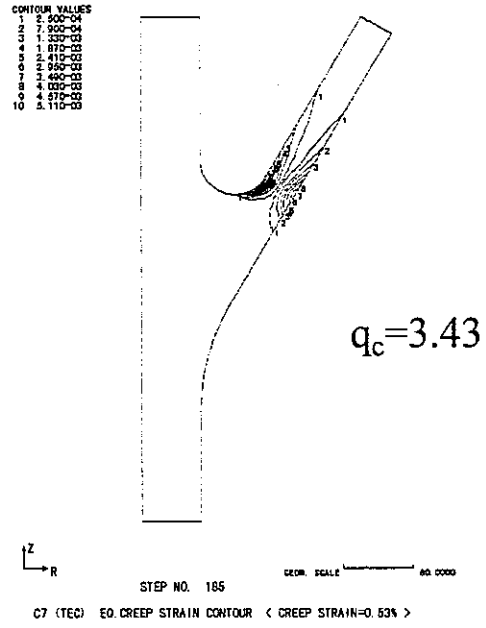


CBL

Fig.B.2 Inelastic strain contour ($\epsilon_{\text{inelastic}} = 0.27\%$)



P7



C7

Fig.B.3 Inelastic strain contour ($\epsilon_{\text{inelastic}}=0.53\%$)

付録C Yピース最大応力発生位置における全ひずみ-弾性追従係数曲線

Table C Analysis case of Y-piece

Case	Analysis Type	Constitutive Equation	Power
E	Elastic	Elastic	n=1
C3	Elastic-Creep	Norton's Law	m=3
C5	Elastic-Creep	Norton's Law	m=5
C7	Elastic-Creep	Norton's Law	m=7
P5-C7	Elastic-Plastic-Creep	Norton's Law Ramberg-Osgood	m=7 n=5
CBL	Elastic-Creep	Blackburn	—
P3	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=3
P5	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=5
P7	Elastic-Plastic	Ramberg-Osgood	n=7
PL3-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=3
PL5-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=5
PL7-75	Elastic-Plastic	Ludwik	n=7
PP	Elastic-Plastic	Perfectly plastic	∞
PB	Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=0.5\%$)
PB-10	Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=1.0\%$)
CYPB	Cyclic Elastic-Plastic	Bi-linear	($\Delta t=0.5\%$)

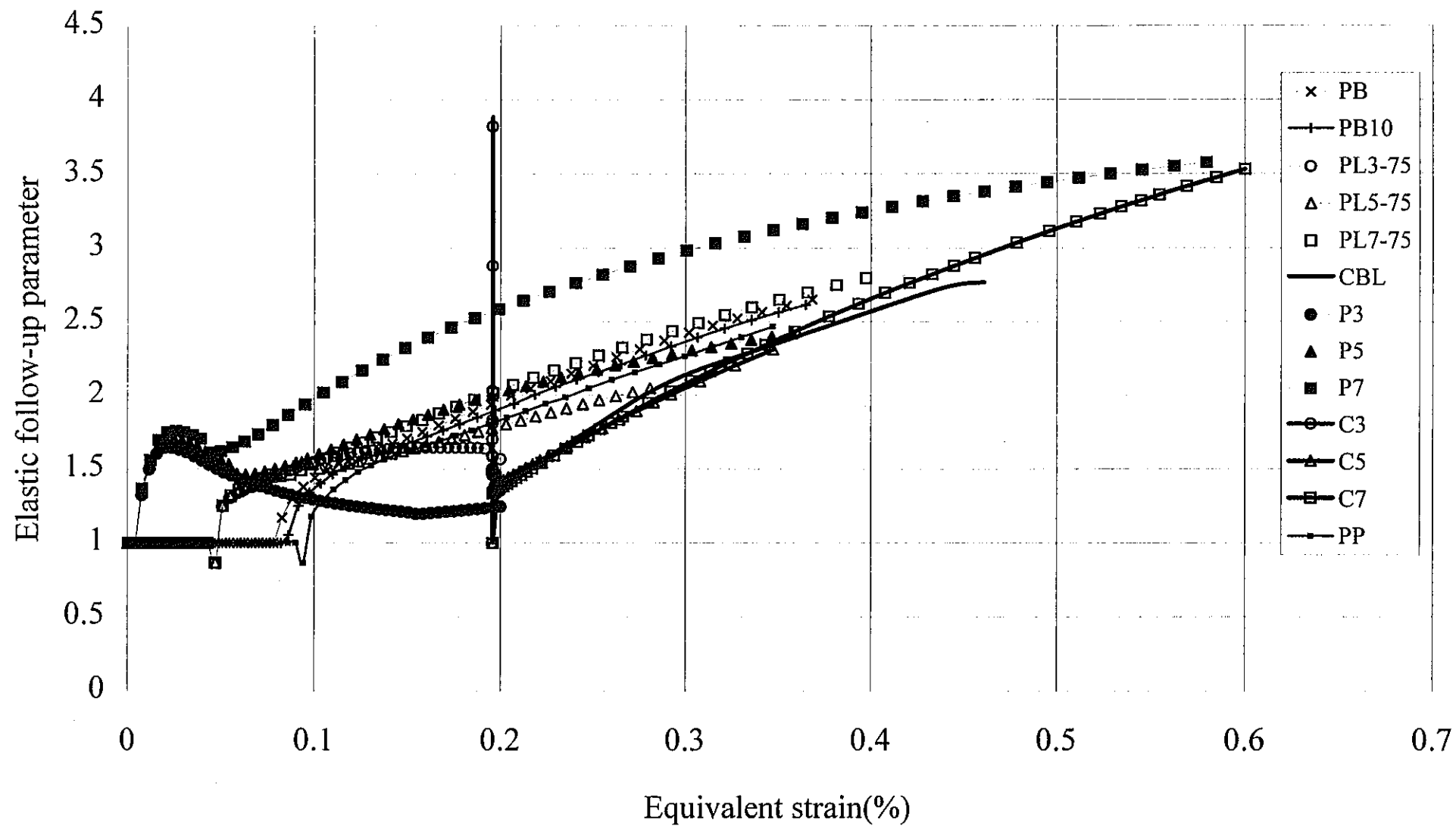


Fig.C.1 Elastic follow-up parameters and equivalent strains