

弾性追従概念に基づく3次元構造物の応力分類

— 孔空き平板の応力分類 —

(研究報告)

1999年5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

弾性追従概念に基づく3次元構造物の応力分類

—孔空き平板の応力分類—

(研究報告)

笠原 直人¹⁾ 高正 英樹²⁾

要 旨

応力が複雑に分布する3次元構造物では、評価断面を使用した応力分類が困難となる。筆者らは、弾性追従係数が形状に依存せずに定義され、その大きさから1次応力と2次応力を、また変化率からピーク応力を分類できることに着目し、本概念に基づく3次元構造物の応力分類法の提案を行っている。

本報では、軸方向一様引っ張り荷重を受ける孔空き平板に本方法を適用し、孔縁の応力分類を行った。その結果、板幅に対する開口率が增大すると、孔縁のピーク応力成分の割合は減少し、また変位制御型境界条件の下でも応力が荷重制御型の性格を帯びるため、健全性に留意する必要があることが分かった。

さらに、孔空き平板に荷重制御型膜応力と変位制御型曲げ応力が繰り返し重畳した場合のラチェット変形の予測に上記応力分類の結果を適用し、有限要素法による弾塑性解析の結果と比較した。弾塑性解析の結果からは、弾性解析時の孔縁応力が同一であっても、開口率が大きいほどラチェット変形が生じやすいことが分かった。Bree 線図を用いた簡易解析では、弾性解析による孔縁応力をそのまま1次応力として用いた場合は上記傾向が予測できないが、弾性追従概念により分類された1次応力を使用すると定量的にも精度良く評価出来ることが確認できた。

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

**Stress categorization of three dimensional structures
based on elastic follow-up concept
- Stress categorization of plates with holes -**

Naoto Kasahara¹⁾ Hideki Takasho²⁾

Abstract

It is difficult to categorize stress of three dimensional structures by evaluation section, since they have complicated stress distributions. Authors propose a stress categorization method based on the elastic follow-up concept where primary and secondary stress of general structures can be categorized by value of an elastic follow-up parameter and peak stress can be distinguished by change ratio of its value.

In this study this method was applied to categorize stress at hole edges of plates with holes due to a monotonic membrane loading. The results reveals that the plates with larger holes have less ratio of peak stress and large elastic follow-up parameters, so that attention should be paid to their structural integrity.

Further more, categorized stresses and nonlinear FEM were applied to evaluation of ratchet deformation at hole edges of plates with holes due to a primary membrane stress plus cyclic secondary bending stress. F. E. results clarified that ratchet is easy to occur on plates with larger holes. Its tendency can be predicted rationally by Bree diagram with the categorized stresses based on the elastic follow-up concept.

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 弾性追従概念に基づく応力分類	2
2.1 1次応力Pと2次応力Qの分類	2
2.2 ピーク応力Fの分類	2
第3章 孔空き平板の応力分類	4
3.1 孔空き平板モデル	4
3.2 孔縁の弾性追従挙動と応力分類	6
第4章 孔空き平板のラチェット変形評価への適用	12
4.1 孔空き平板の弾塑性有限要素解析	12
4.2 応力分類とBree線図によるラチェット評価	19
第5章 結 言	21
参考文献	22
付録A 長ピッチの場合の解析結果	23
付録B 短ピッチの場合の解析結果	46

表リスト

List of Tables

Table.1	Analysis case to study influence of constitutive equations	7
Table.2	Ratio of primary stress to total stress at point a	10
Table.3	Load cases for ratchet analysis of plates with holes	12

図リスト

List of Figures

Fig.1	Comparison of stress-strain behaviors among load-controlled condition, displacement-controlled condition, and elastic follow-up condition	1
Fig.2	Independent behavior of peak stress from primary plus secondary stress	3
Fig.3	Ring plate model with evaluation point and evaluation sections	4
Fig.4	Shell finite element models of plates with holes	5
Fig.5	Relaxation behaviors at point a and section B	6
Fig.6	Equivalent creep and plastic strain contour under different load levels	8
Fig.7	Strain contours with various strain levels	8
Fig.8	Relaxation behaviors of plates with various holes	9
Fig.9	Relaxation behaviors of plates with various load levels	10
Fig.10	Elastic plastic behaviors at a hole edge $D/W=0.25$	13
Fig.11	Elastic plastic behaviors at a hole edge $D/W=0.5$	15
Fig.12	Elastic plastic behaviors at a hole edge $D/W=0.75$	17
Fig.13	Ratchet evaluation by Bree diagram ($D/W=0.25$)	19
Fig.14	Ratchet evaluation by Bree diagram ($D/W=0.5$)	20
Fig.15	Ratchet evaluation by Bree diagram ($D/W=0.75$)	20

第1章 緒言

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)」では、応力を一次応力 P、二次応力 Q、およびピーク応力 F の三成分に分類し、それぞれに対して異なる許容値を与えている[1]。ここで一次応力 P とは外力との釣り合いを満たすために構造内部に発生する応力成分であり、荷重制御型と呼ばれる性質を有する (Fig.1 参照)。また二次応力 Q は変形の適合条件を満足させる為に構造内部に発生する応力の成分であり、変位制御型の性質を持つ。ピーク応力 F は変位制御型である点で本来二次応力と同じものであるが、応力の発生する領域が二次応力 Q に比べて局所に限定され構造健全性に及ぼす影響が異なることから区別したものである。具体的な応力分類の方法としては、評価断面を用いた等価線形処理または典型的構造に対する分類表[2]が一般的に用いられている。これらの方法はいずれも軸対称構造を想定していることから、複雑な応力分布を有する 3次元構造物に対しては適用が困難となる。

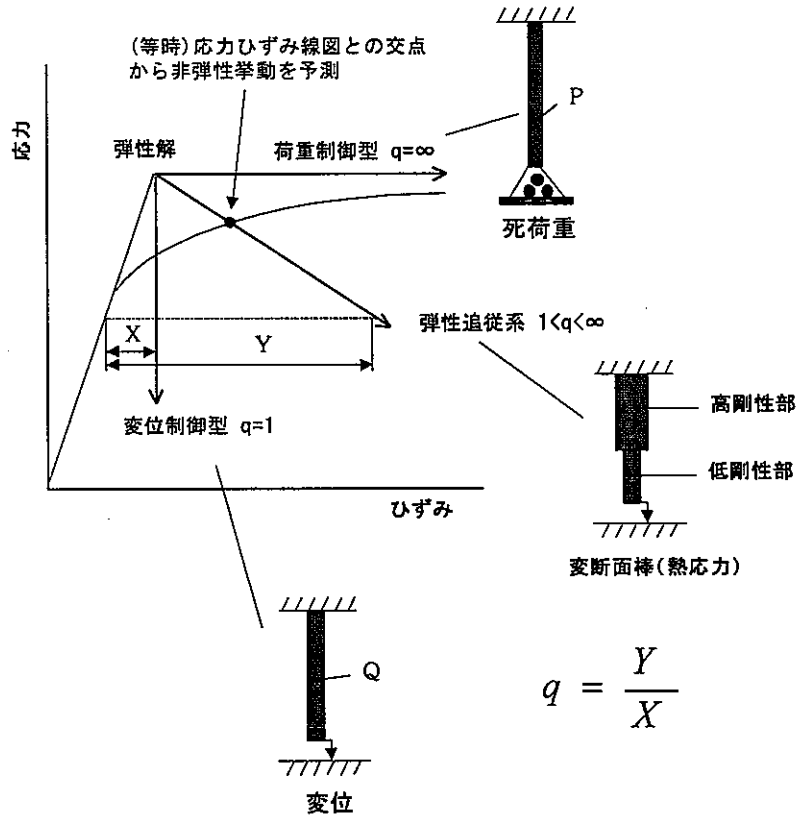


Fig.1 Comparison of stress-strain behaviors among load-controlled condition, displacement-controlled condition, and elastic follow-up condition

第2章 弾性追従概念に基づく応力分類

2.1 1次応力Pと2次応力Qの分類

荷重制御型と変位制御型の中間の状態を表すものとして弾性追従概念がある。本概念では、荷重制御型と変位制御型のいずれに近いかを記述するパラメータとして、以下の定義の弾性追従係数“q”を用いる (Fig.1 [3])。

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

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。

弾性追従係数は形状によらず一般的に定義され、その大きさによって荷重制御型と変位制御型の分類を行うことが可能である。実際に評価断面による応力分類が困難な配管クランプ部への適用例[4]がある。

2.2 ピーク応力Fの分類

ピーク応力 F は応力集中等によって局所に生じる応力であり、周辺が低応力高剛性部に拘束されていることから一般に変位制御型である。これに対し負荷の増大により塑性領域が広がったり応力緩和によりクリープ領域が拡大すると、次第に周囲の拘束が弱まり構造全体の剛性比が寄与する弾性追従挙動を示すようになる[5]。構造力学的に捉えると、応力集中部の周辺は不静定構造であることから、境界条件が一定であっても静力学的第一期クリープ[6]の状態から定常クリープへの遷移の過程で、構造内部の応力ひずみが再配分される。

このため、ピーク応力 F が存在する場合は、弾性追従係数も一定とならずに変化する[7][8]。

こうした弾性追従の変化特性は、構造特有の応力緩和曲線で記述出来ることが明らかにされてきている[7]。さらに応力緩和曲線は、ピーク応力 F が単独で関与する部分と、一次応力 P および二次応力 Q がこれに重畳する領域に、大まかに区分することができる[8]。例えば Fig.2 は切欠によるピーク応力 F ($q_L=2$ に相当) と変断面棒や境界条件によって各種の一次+二次応力 ($q_L=1, 2, \infty$ に相当) で記述されるが重畳した場合の応力緩和曲線であり、緩和曲線の前半に一次+二次応力の影響を受けない領域が存在することが分かる[9]。

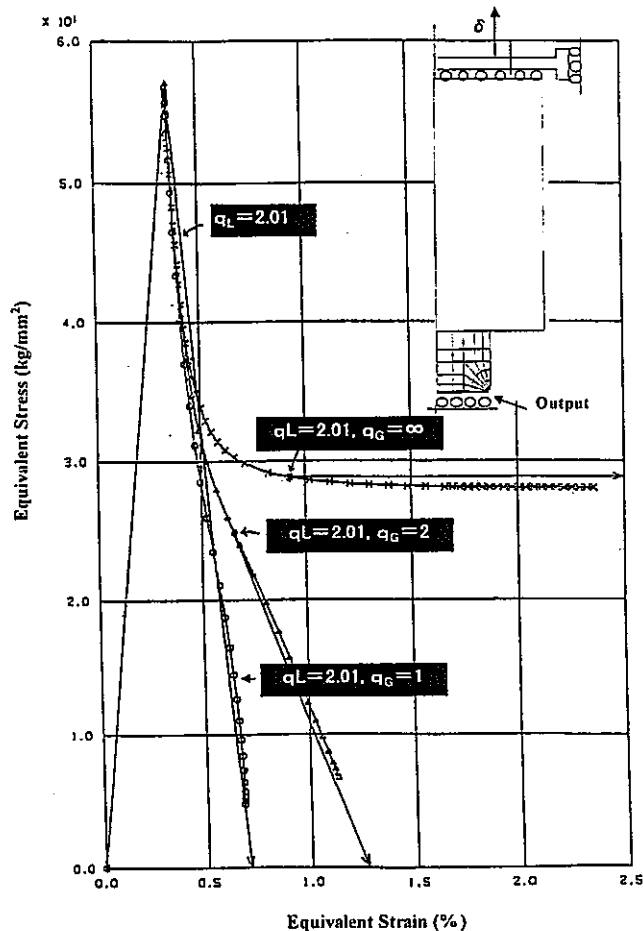


Fig.2 Independent behavior of peak stress from primary plus secondary stress

このように、応力緩和曲線がピーク応力 F に支配される領域から、一次+二次応力が重畳するまでの遷移特性を表していることを利用すると、以下の3通りの方法でピーク応力 F をそれ以外の成分から分離することが可能となる。

- (1) 着目部位の応力緩和曲線が、ピーク応力 F から2次応力 Q への明確な変曲点を持てば、変曲点までがピーク応力 F と判定。
- (2) 着目部位と周辺の応力緩和曲線を比較し、大きな差があれば着目部位は局所に限定されたピーク応力 F と判定。
- (3) 荷重条件を変化させ、着目部位の応力緩和曲線に影響を受けない部分が存在すれば、その範囲をピーク応力 F と判定。

第3章 孔空き平板の応力分類

3.1 孔空き平板モデル

原子力プラントで使用される3次元構造物の一つに孔空き平板がある。例として、高速炉原子炉容器内に液面揺動防止を目的に設置されるリングプレート(Fig.3 左)が挙げられる。リングプレート近傍では、原子炉スクラム時に温度成層界面が生じるため、容器との平均温度差による円周方向応力と上下面温度差による曲応力が加わり、応力集中部である孔縁の健全性に留意が必要となる。これに対し、孔縁では評価断面が Fig.3.の断面Aと断面Bのように一意に定まらないため、応力分類が難しくなる。

本研究ではリングプレートを模擬した Fig.3 右下の単位孔空き平板モデルの弾性追従挙動を調べ、評価断面に依存しない応力分類を試みる。

孔空き平板は、ピッチ $P=2000\text{mm}$ 、板幅 $W=500\text{mm}$ 、板厚 $t=25\text{mm}$ を共通条件とし、板幅に対する開口率 D/W が、0.25,0.5,0.75 と異なる3種類の形状について調べる。荷重は、孔縁の応力集中の影響を強く受ける端部引っ張り荷重(変位 δ または荷重 F)を加える。

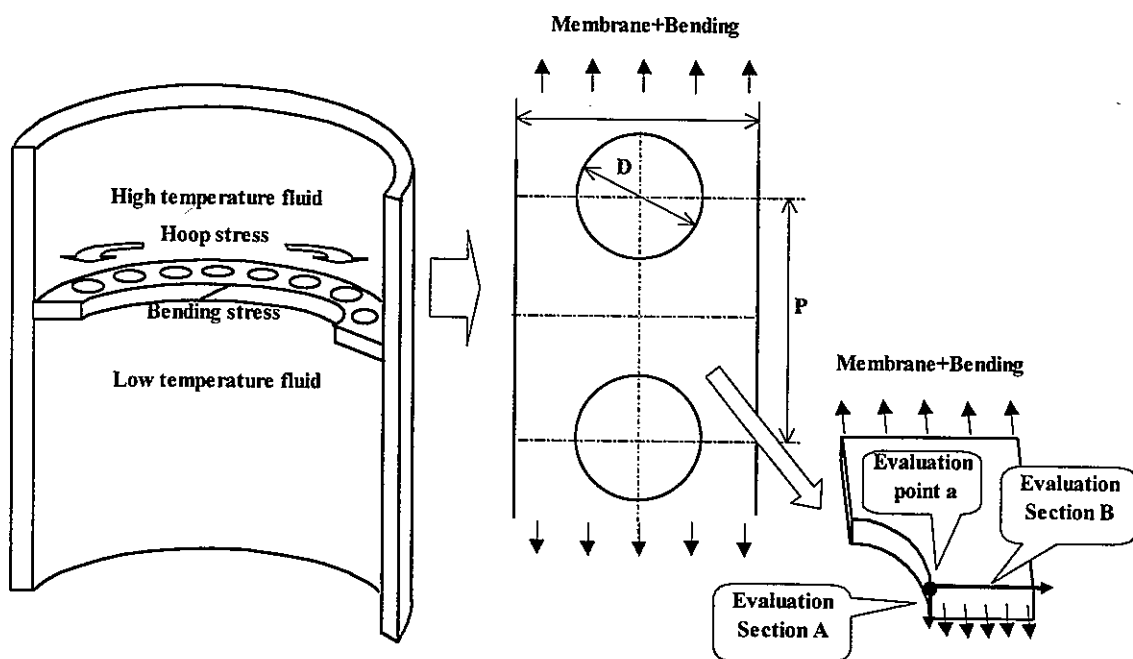


Fig.3 Ring plate model with evaluation point and evaluation sections

孔空き平板の解析は、非線形有限要素解析コード FINAS の 4 節点四辺形シェル要素 QFLA4S を使用した、四分の一対称モデル(Fig. 4)を使用する。荷重は端部に一様引っ張り荷重または一様変位を与える。

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、Ludwik 型の弾塑性応力ひずみ式を使用する。後者に関しては、 σ_p を0とすることにより Ramberg-Osgood 型に、また $n=\infty$ とすることによって弾完全塑性体を表現することが出来る。

$$\dot{\epsilon}_c = B\sigma^m \quad (m=3,5,7) \tag{2}$$

$$\epsilon_c = C_1(1 - e^{-nt}) + C_2(1 - e^{-nt}) + \epsilon_m \quad t \tag{3}$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left\{ \frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right\}^n, \quad (\sigma > \sigma_p) \quad (n=3,5,7,\infty) \tag{4}$$

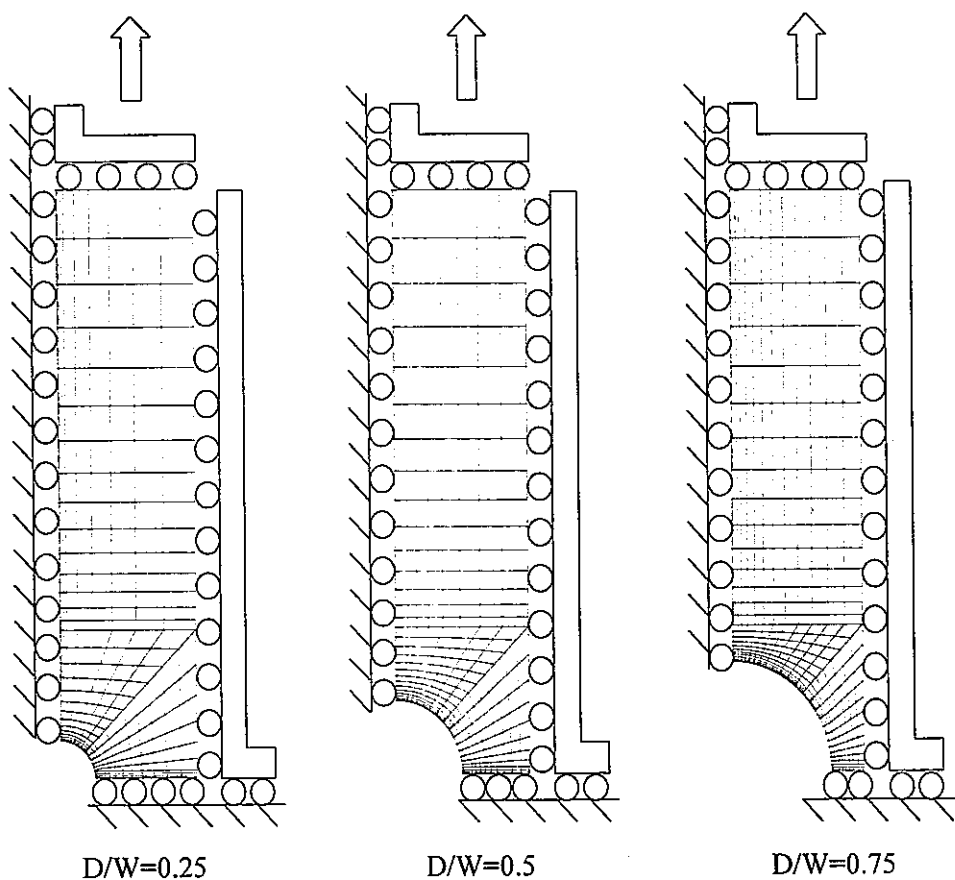


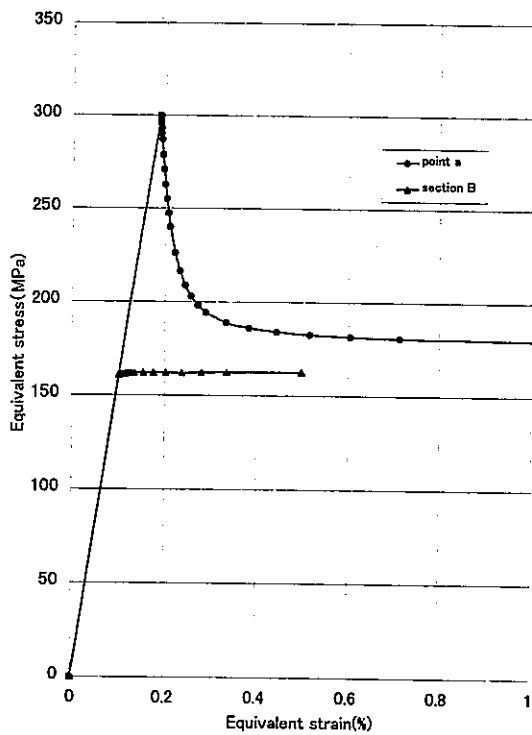
Fig.4 Shell finite element models of plates with holes

3. 2. 孔縁の弾性追従挙動と応力分類

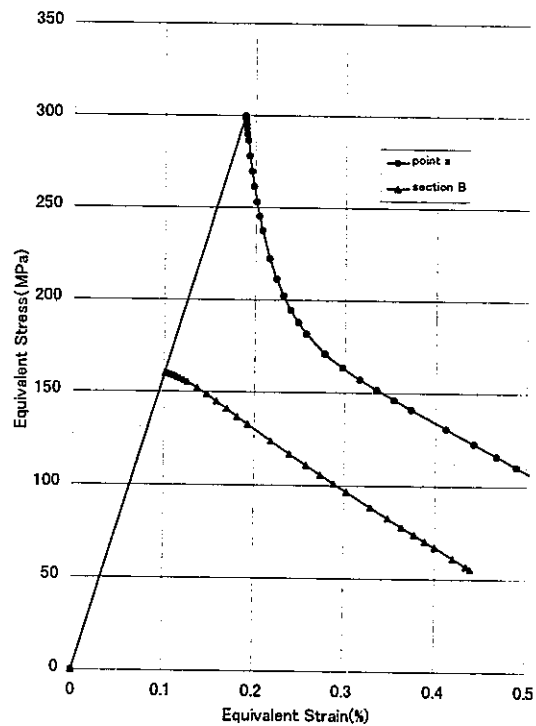
(1) 荷重条件の影響

D/W=0.5 の場合について、荷重条件として荷重制御型負荷、または変位制御型負荷を与えた場合の応力緩和挙動の比較を行う。Fig.5(a) は荷重制御型負荷の場合の孔縁 (point a) とリガメント最小断面平均応力 (section B) の応力緩和挙動である。point a の応力緩和挙動は 200MPa 近傍で明確な変曲点を有しており、200MPa 以上の領域の挙動は周囲の平均挙動を表す section B と定性的に異なっている。

Fig.5(b)の変位制御型負荷の場合は、荷重制御型負荷に比べて変曲点は明確でないが、200MPa 以上の領域では section B の挙動と異なる。また Fig.5(a)と Fig.5(b)の point a の挙動を比べると、変曲点の現れる 200MPa 程度までは、両者の挙動は類似であることが分かる。以上からおおよそ 200MPa 以上がピーク応力成分であると考えられる。



(a) Load-controlled



(b) Displacement-controlled

Fig.5 Relaxation behaviors at point a and section B

(2) 材料特性の影響

孔空き平板の弾性追従特性への材料の影響を調べるために、D/W=0.5 の平板に弾性解析による孔縁応力が 300MPa となる荷重制御型負荷または変位制御型負荷を加え、Table 1

に示す各種構成方程式による、弾塑性およびクリープ解析を行う。Fig.3 中の評価点aの応力緩和および弾塑性解析結果を、応力-ひずみ線図上で比較したところ、Fig.6 のように変曲点以上の領域では、弾塑性とクリープの両方で構成方程式の影響を受けないが、それ以下では影響が大きくなることが分かった。その理由として、Fig.8 に示すようにピークひずみ領域を拘束する弾性核の消失が考えられる[2]。

Table 1 Analysis case to study influence of constitutive equations

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
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	∞
CYPP	Cyclic Elastic-Plastic	Perfectly plastic	∞

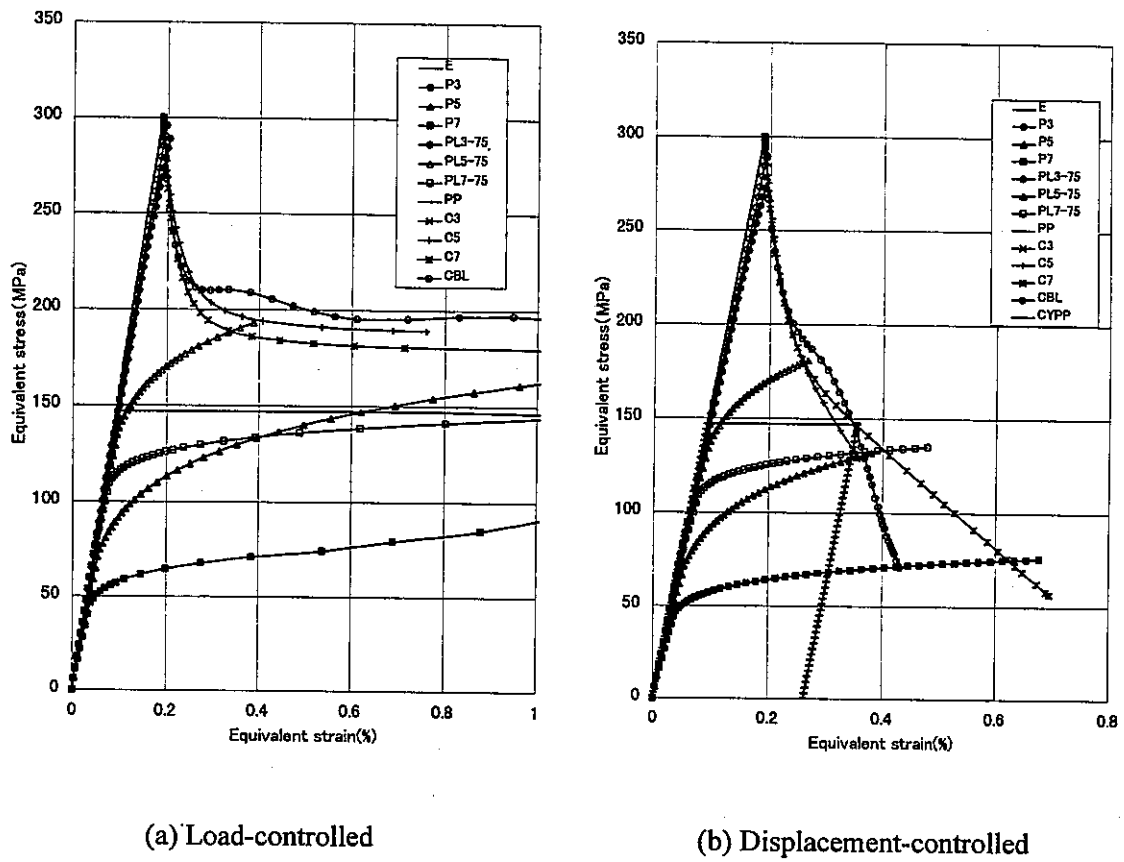


Fig.6 Equivalent creep and plastic strain contour under different load level

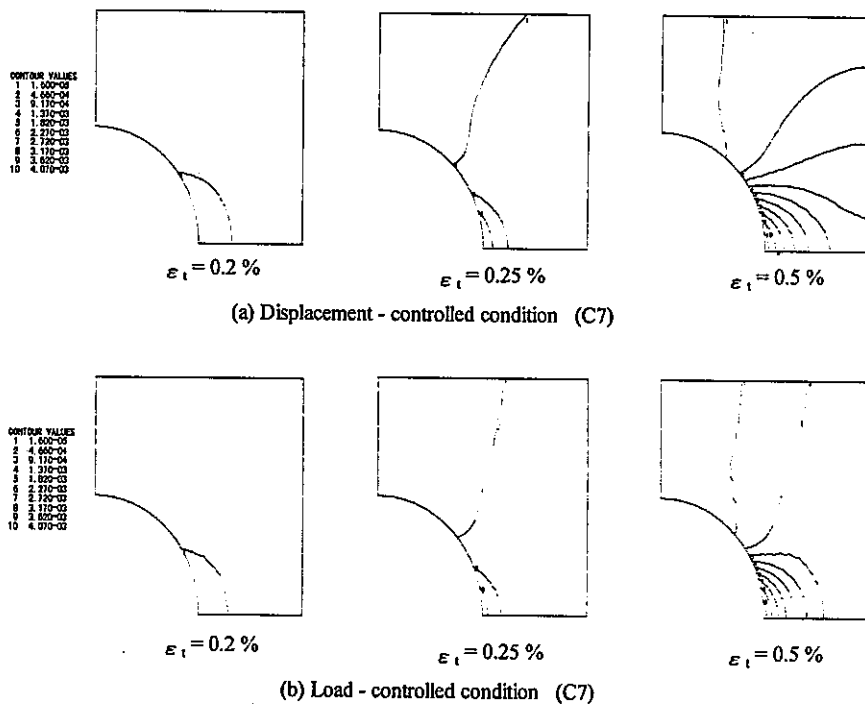


Fig.7 Strain contours with various strain levels

(3) 形状の影響

D/W を 0.25,0.5,0.75 と変化させた場合の point a の 300MPa からの緩和曲線を応力-ひずみ線図上で比較する。Fig.8(a)は荷重制御型、Fig.8(b)は変位制御型であり、どちらも D/W が大きくなるに従い、変曲点の位置は高くなりピーク応力の割合は下がることが分かる。

また、Fig.8(b)の変位制御型負荷に着目すると、D/W が大きいほど、弾性追従係数qも大きくなることから、端部境界条件が変位制御型であっても孔縁では弾性追従により荷重制御型に近い挙動を示すことが分かる。

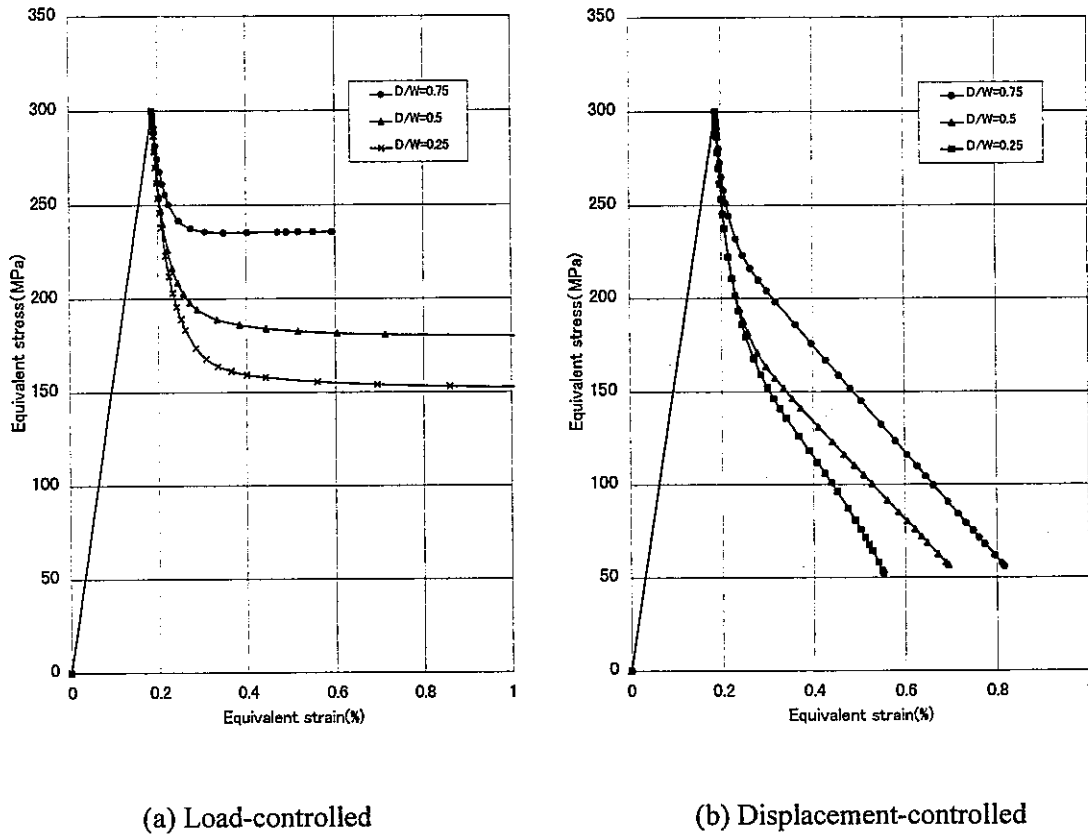


Fig.8 Relaxation behaviors of plates with various holes

(4) 荷重レベルの影響

これまでは point aの弾性解析による応力が 300MPa となる荷重の挙動を調べてきたが、ここでは荷重レベルの違いによる影響を調べる。

Fig.9 は評価点aの弾性解析による応力が 300MPa,102.9MPa,73.5MPa,44.1MPa となるように荷重制御型負荷を与えた場合の、D/W=0.25,0.5,0.75 の各形状における point aの応力緩和挙動である。

変曲点の位置から、ピーク応力を取り除いた1次応力成分の割合を計算すると Table 2 のようになり、1次応力成分の割合は荷重レベルによらず一定であり、形状に固有のものであることが分かる。

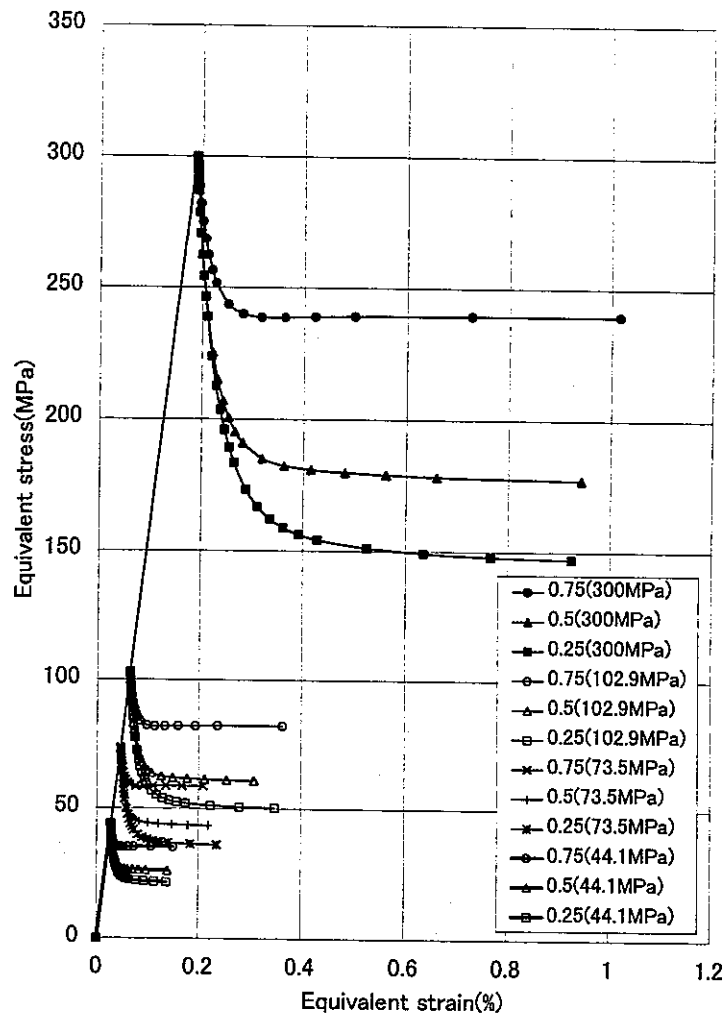


Fig.9 Relaxation behaviors of plates with various load levels

Table 2 Ratio of primary stress to total stress at point a

D/W	0.25	0.5	0.75
300MPa	0.489	0.589	0.798
102.9MPa	0.489	0.590	0.798
73.5MPa	0.489	0.590	0.798
44.1MPa	0.489	0.589	0.798

(5) 応力分類結果

これまでの検討から、孔縁応力の中でピーク応力 F の割合は、荷重レベルによらず 51%(D/W=0.25), 41%(D/W=0.5) 20%(D/W=0.75)である。

弾性追従係数 q も大きくなることから、端部境界条件が変位制御型であっても孔縁では D/W が大きいほど弾性追従により荷重制御型に近い挙動を示す。

第4章 孔空き平板のラチェット変形評価への適用

4.1 孔空き平板の弾塑性有限要素解析

第3章で、軸方向引っ張り荷重を受ける孔空き平板の応力分類を行ったが、プラント中の孔空き平板は Fig.1 に示すように、板厚方向温度勾配による繰返し曲げ荷重が重畳する。

本章では、 D/W が 0.25, 0.5, 0.75 の孔空き平板の孔縁に、Table 3 の組み合わせで荷重制御型の軸方向引っ張り荷重と、変位制御型の繰返し曲げ荷重が重畳した場合の、孔縁のラチェット評価を行う。なお、Table 3 の応力は、弾性解析時の孔縁応力を降伏応力 σ_y で規格化して表示したものである。また、曲げ荷重は板厚方向に線形温度分布を与えると共に、シェル要素の面外曲げ変形を拘束することによって与えた。

本節では、弾塑性有限要素解析により Table 3 の各条件に対するラチェット挙動の有無を確かめる。弾塑性構成方程式には降伏応力 147MPa の弾完全塑性体と移動硬化則を使用した。孔縁弾塑性挙動の解析結果を Fig.10 から Fig.12 に示す。

Table 3 Load cases for ratchet analysis of plates with holes

Load-controlled Membrane Stress	$0.3 \sigma_y$	$0.5 \sigma_y$	$0.7 \sigma_y$
Cyclic Displacement-controlled Bending	$3 \sigma_y$	$3 \sigma_y$	$3 \sigma_y$
Cyclic Displacement-controlled Bending	$5 \sigma_y$	$5 \sigma_y$	$5 \sigma_y$

σ_y : Yield stress

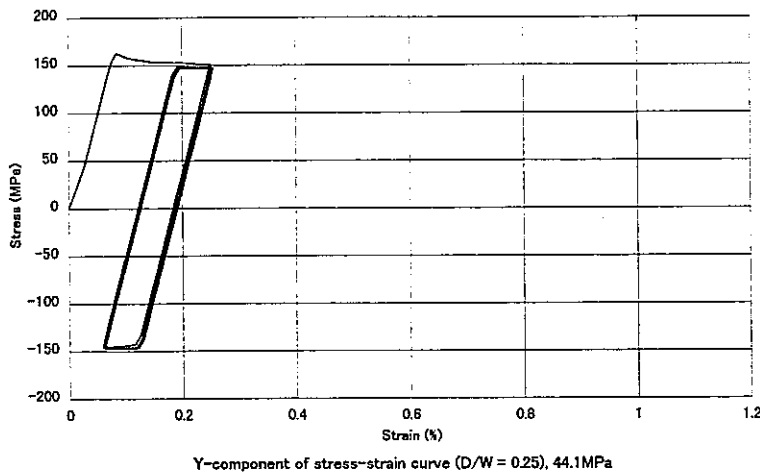


Fig.10(a) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.25 (Load-controlled $0.3 \sigma_y + 3 \sigma_z$)

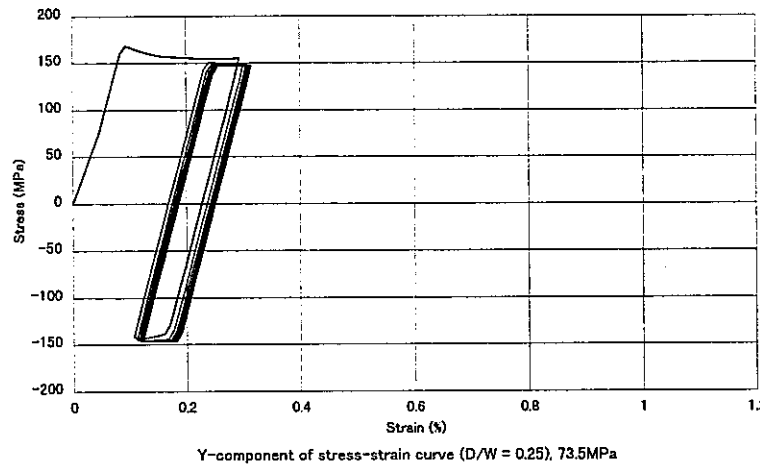


Fig.10(b) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.25(Load-controlled $0.5 \sigma_y + 3 \sigma_z$)

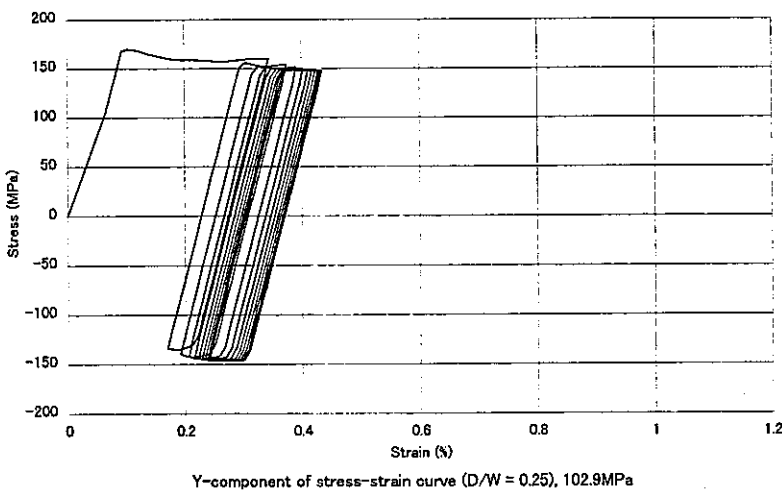
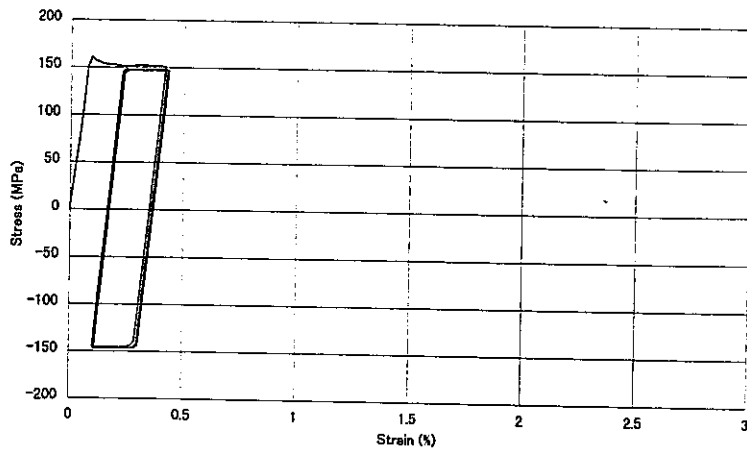
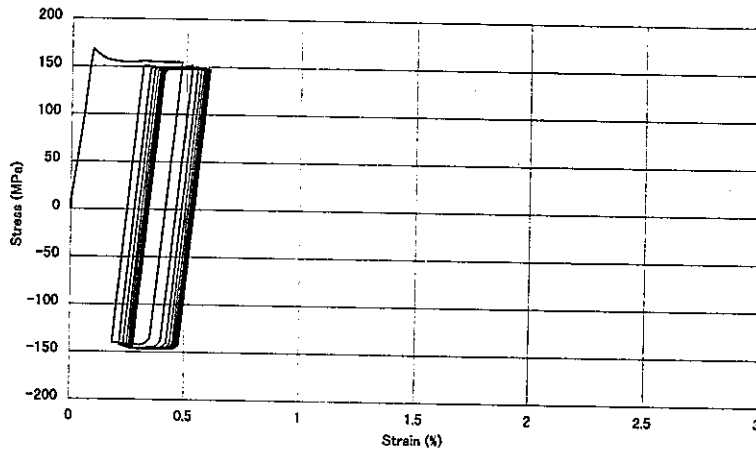


Fig.10(c) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.25(Load-controlled $0.7 \sigma_y + 3 \sigma_z$)



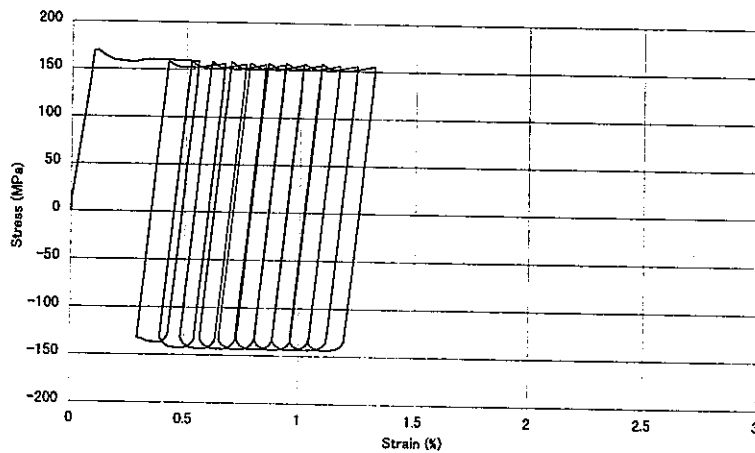
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.25), 44.1MPa

Fig.10(d) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.25 (Load-controlled $0.3\sigma_y + 5\sigma_y$)



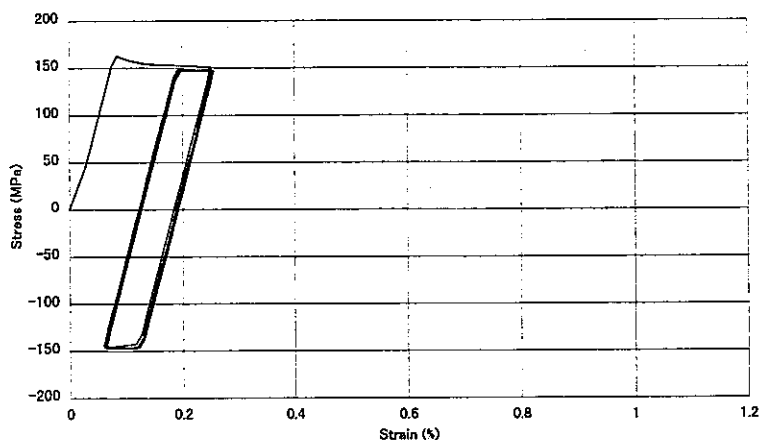
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.25), 73.5MPa

Fig.10(e) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.25 (Load-controlled $0.5\sigma_y + 5\sigma_y$)



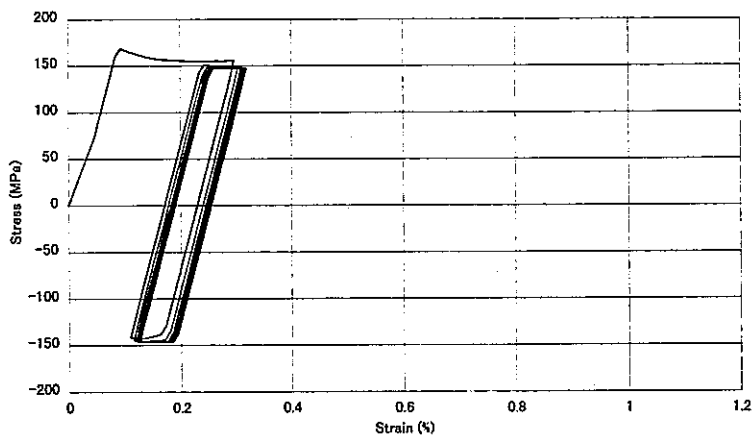
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.25), 102.9MPa

Fig.10(f) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.25 (Load-controlled $0.7\sigma_y + 5\sigma_y$)



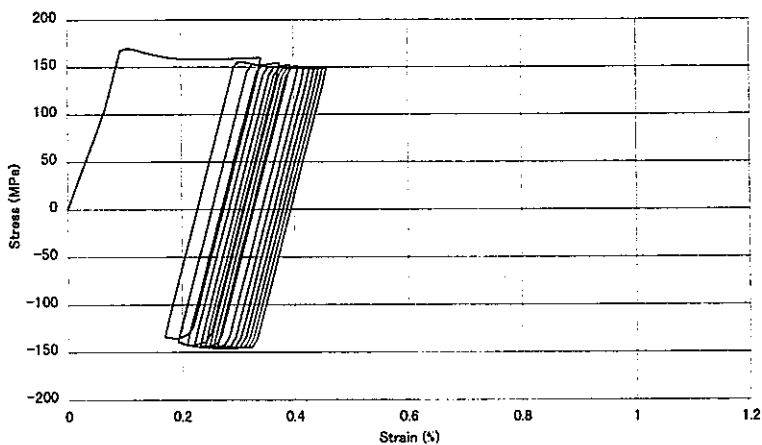
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.5), 44.1MPa

Fig.11(a) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.5 (Load-controlled $0.3 \sigma_y + 3 \sigma_z$)



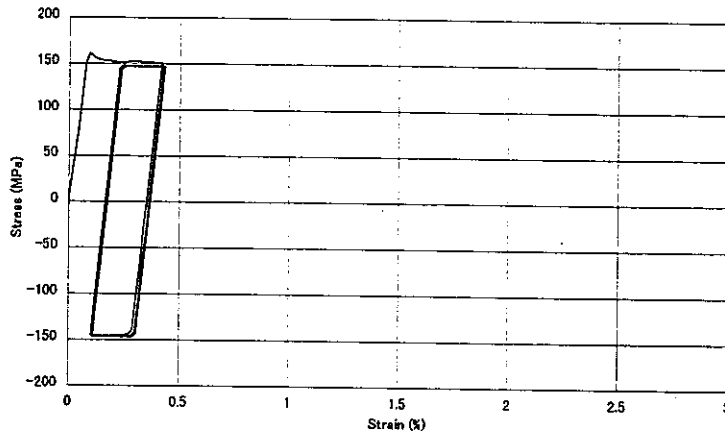
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.5), 73.5MPa

Fig. 11 (b) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.5(Load-controlled $0.5 \sigma_y + 3 \sigma_z$)



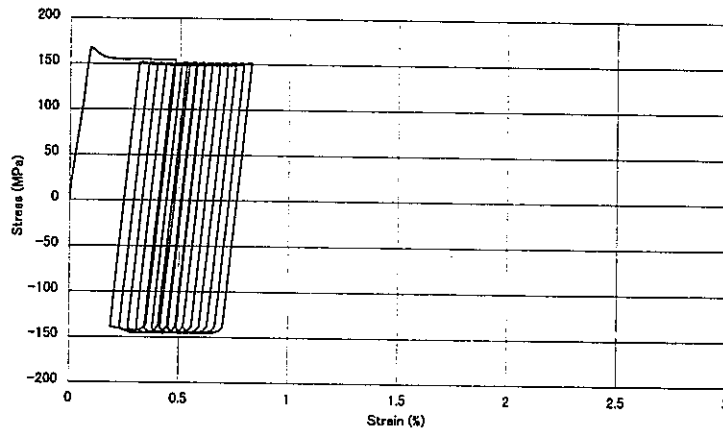
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.5), 102.9MPa

Fig. 11(c) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.5(Load-controlled $0.7 \sigma_y + 3 \sigma_z$)



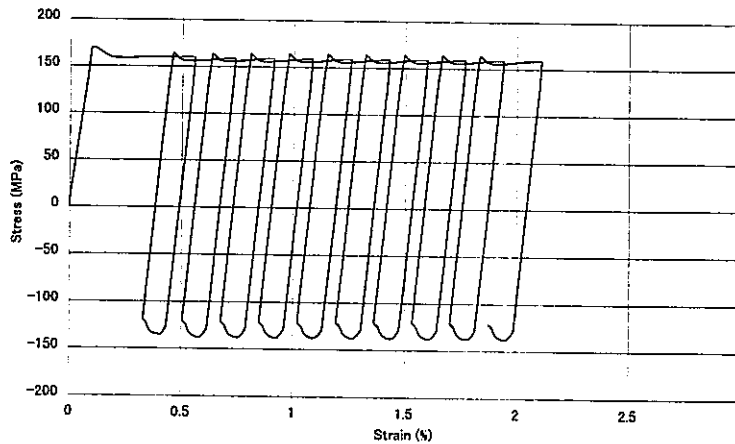
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.5), 44.1MPa

Fig. 11(d) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.5 (Load-controlled $0.3 \sigma_y + 5 \sigma_y$)



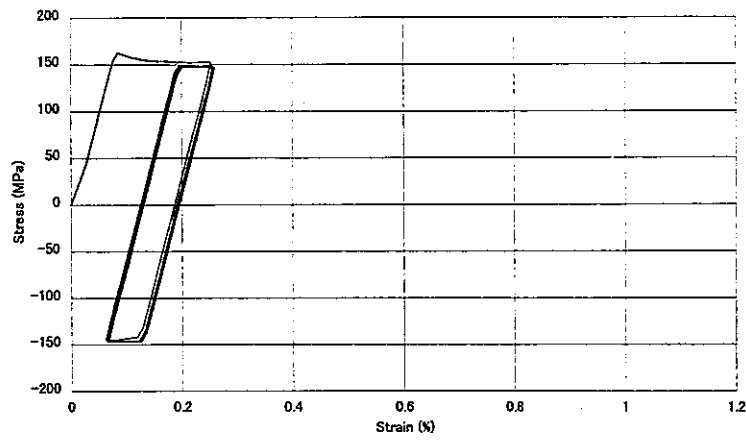
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.5), 73.5MPa

Fig. 11(e) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.5 (Load-controlled $0.5 \sigma_y + 5 \sigma_y$)



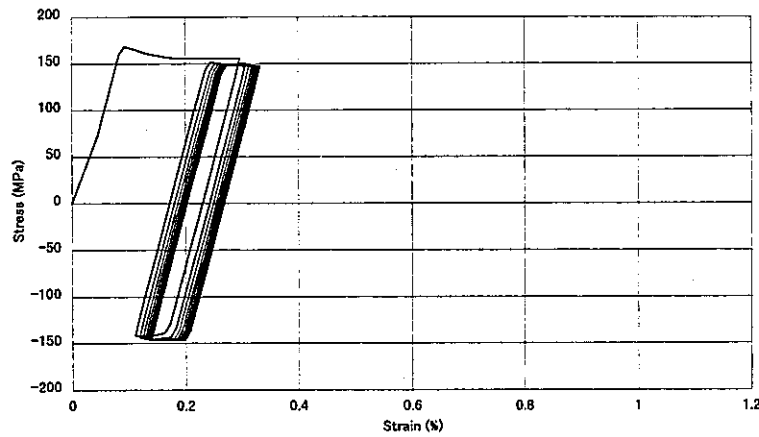
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.5), 102.9MPa

Fig. 11(f) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.5 (Load-controlled $0.7 \sigma_y + 5 \sigma_y$)



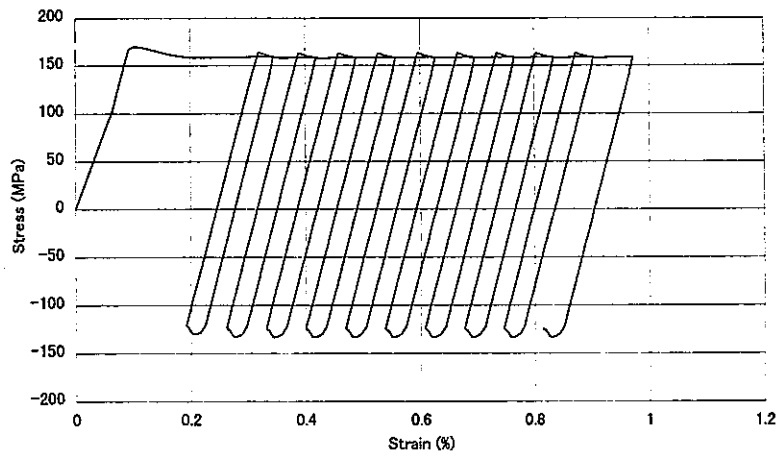
Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.75), 44.1MPa

Fig.12(a) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.75 (Load-controlled $0.3 \sigma_y + 3 \sigma_x$)



Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.75), 73.5MPa

Fig. 12(b) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.75(Load-controlled $0.5 \sigma_y + 3 \sigma_x$)



Y-component of stress-strain curve (D/W = 0.75), 102.9MPa

Fig. 12(c) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.75(Load-controlled $0.7 \sigma_y + 3 \sigma_x$)

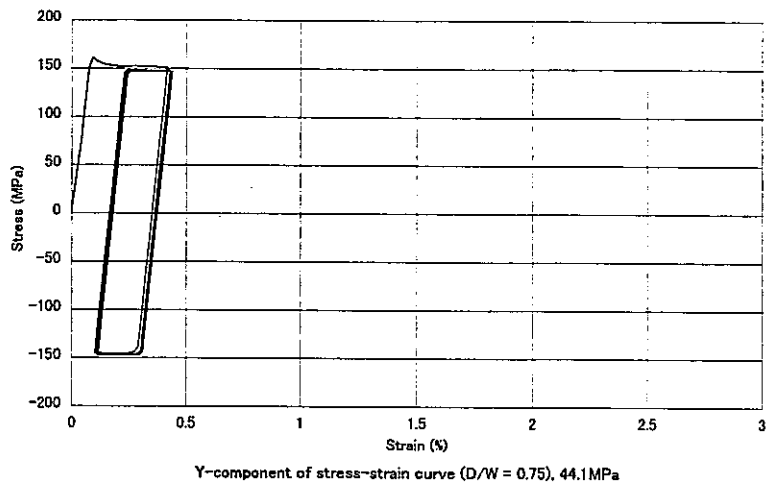


Fig.12(d) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.75 (Load-controlled $0.3 \sigma_y + 5 \sigma_z$)

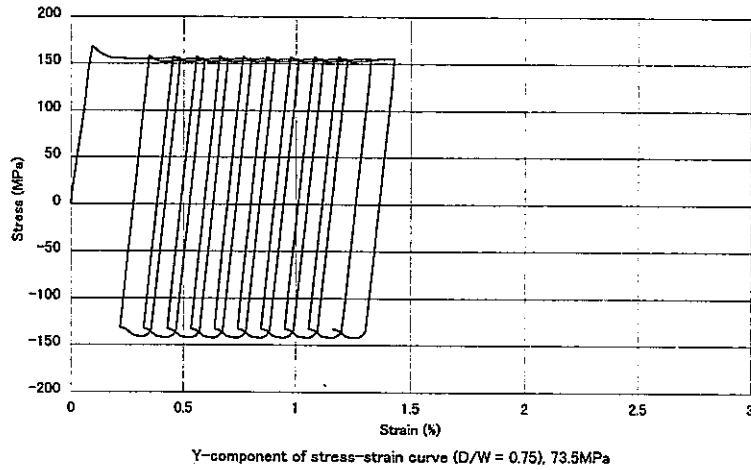


Fig.12(e) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.75 (Load-controlled $0.5 \sigma_y + 5 \sigma_z$)

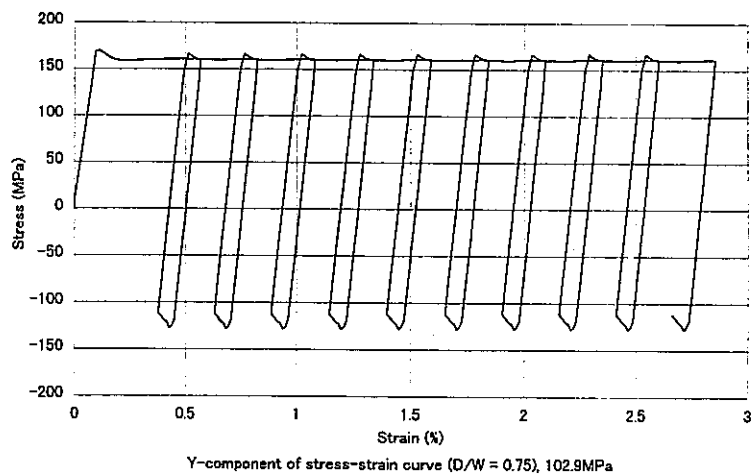


Fig.12(f) Elastic plastic behaviors at a hole edge D/W=0.75 (Load-controlled $0.7 \sigma_y + 5 \sigma_z$)

4. 2 応力分類とBree 線図によるラチェット評価

Table3 の条件に対して、Bree 線図[10]を用いてラチェット評価を行う。Fig.13～Fig.15 に示す Bree 線図の横軸は降伏応力で規格化した1次膜応力、縦軸は降伏応力で規格化した2次曲げ応力を表す。線図で R_1 または R_2 の領域に位置するとラチェットの発生が予測される。各図の左側(a)に提案法で応力分類した1次膜応力によりで評価した結果を、右側(b)には孔縁応力をそのまま1次膜応力として評価した結果を示す。さらに FEM 解析でラチェットが生じなかった場合を□、生じた場合を■のシンボルで区別した。これらの結果から、孔縁応力を1次膜応力とした場合は保守的な評価となるが、提案法はこれに比べ合理化されており適切な評価が行えることが分かる。

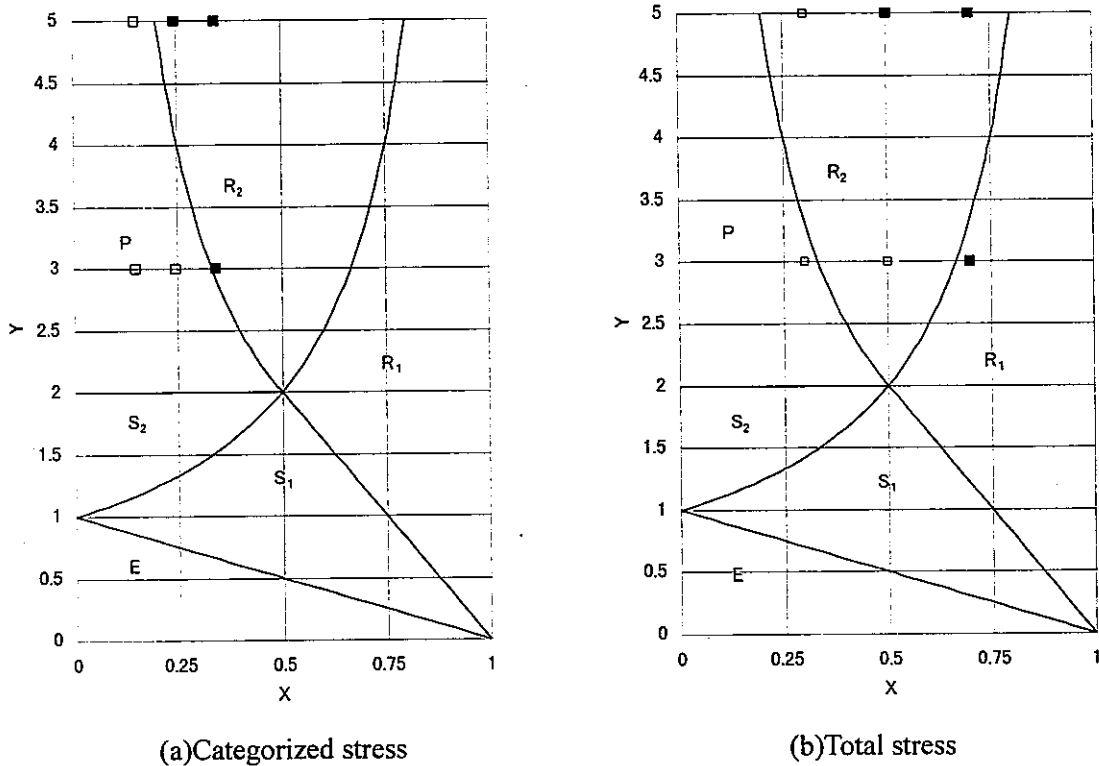
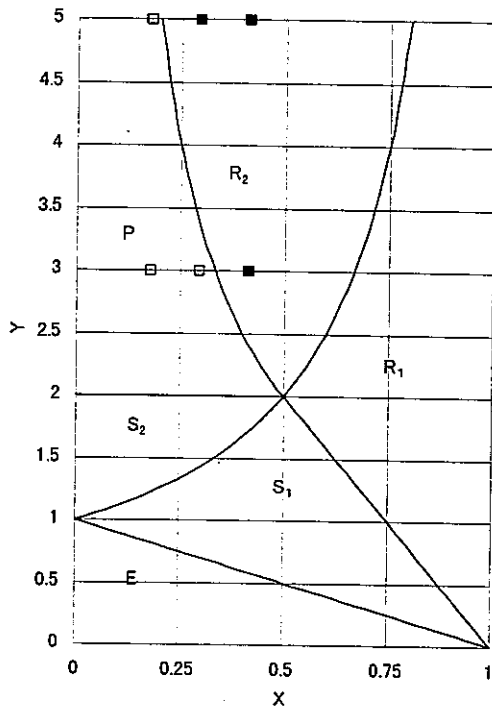
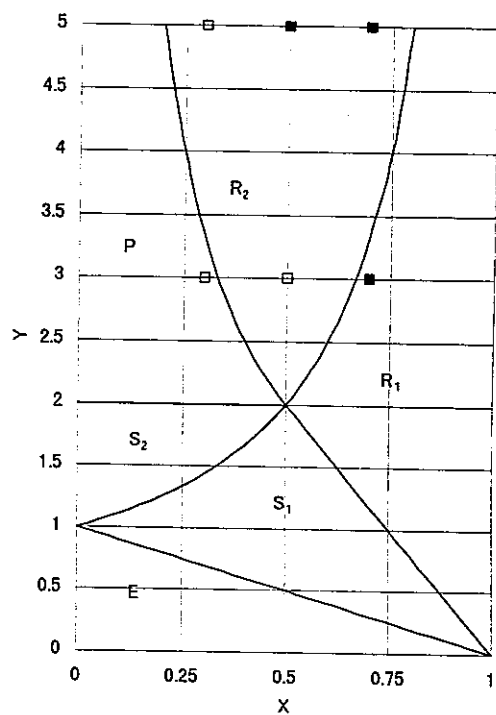


Fig.13 Ratchet evaluation by Bree diagram (D/W=0.25)

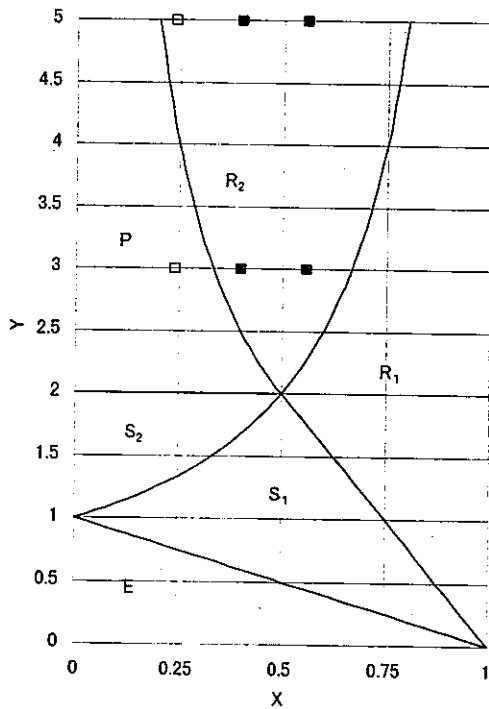


(a) Categorized stress

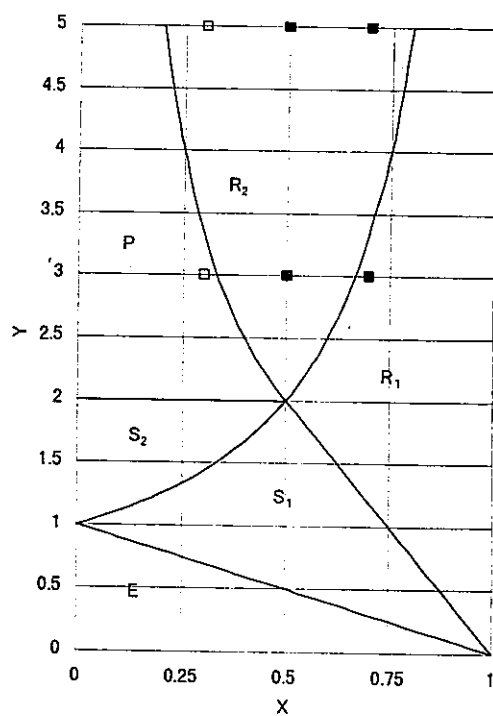


(b) Total stress

Fig.14 Ratchet evaluation by Bree diagram ($D/W=0.5$)



(a) Categorized stress



(b) Total stress

Fig.15 Ratchet evaluation by Bree diagram ($D/W=0.75$)

第5章 結 言

弾性追従概念に基づく3次元構造物の応力分類法を提案し、孔空き平板のラチェット評価に適用し、以下の結論を得た。

- (1) 形状によらず、弾性追従係数の大きさから荷重制御型応力（1次応力）と変位制御型応力（2次応力）を、また弾性追従係数の変化からピーク応力の分類が可能である。
- (2) 簡易弾クリープ解析による弾性追従係数を評価することによって、孔空き平板の応力分類が可能である。
- (3) 孔空き平板では、開口率が大きくなると孔縁におけるピーク応力の割合が低下し、端部における荷重が変位制御型であっても荷重制御型に近い応力が発生する。
- (4) 弾性追従概念に基づく応力分類結果と Bree 線図を使用することにより、孔空き平板のラチェット変形を合理的に評価することが出来る。

参考文献

- [1] 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)
- [2] ASME, 'ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Nuclear Components', New York,(1995)
- [3] Iida, K. et al., 'Simplified analysis and design for elevated temperature components of MONJU', NED 98, pp305/317. ,(1987)
- [4] A.K.Dhalla and G.L.Jones, 'ASME Code Classification of Pipe Stresses: A Simplified Elastic Procedure', Int. J. Pres. Ves. & Piping 26, (1986)
- [5] Kasahara, N., Nagata, T., Iwata, K., and Negishi, H., 'Advanced Creep-Fatigue Evaluation Rule for Fast Breeder Reactor Components : Generalization of Elastic Follow-up Model', NED 155, pp499/518,(1995)
- [6] Odqvist and Hult, 'Kriechfestigkeit Metallischer Werkstoffe', Springer-Verlag, (1962) [村上訳「クリープ強さの理論」, 培風館(1967)]
- [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 (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)
- [8] 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)
- [9] Negishi, H. et al., 'A Method for Creep-Fatigue Damage Evaluation at Structural Discontinuity Portions (1): Stress Analysis of Fundamental Models,' Trans.of 11th SMiRT, Vol.E,(1991)
- [10] Bree, J., 'Elastic-Plastic Behavior of Fluxes with Application to Fast Nuclear Reactor Fuel Elements, J.Strain Anal.,2,(1967)

付録A 長ピッチの場合の解析結果

孔ピッチが本文と同じ2000mmの平板 (Fig.A1) に、弾性解析時の孔縁の応力が300MPaとなるように、軸方向引っ張り荷重または変位を加えた場合の、応力ひずみ挙動を Fig.A2～Fig.A21に示す。使用した弾塑性構成方程式およびクリープひずみ式を Table A1に示す。

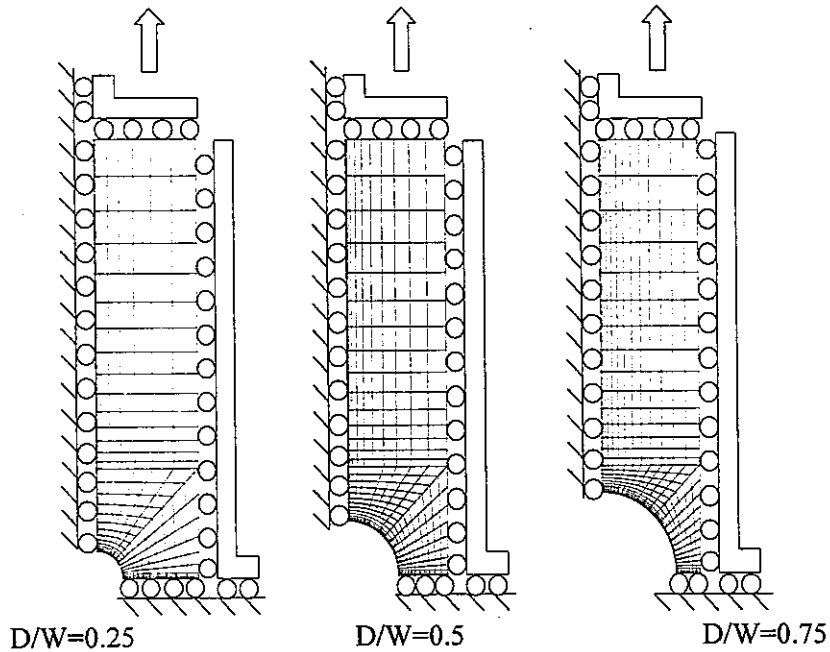


Fig.A1 Shell finite element models of plates with holes

Table A1 Analysis case to study influence of constitutive equations

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
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	∞
CYPP	Cyclic Elastic-Plastic	Perfectly plastic	∞

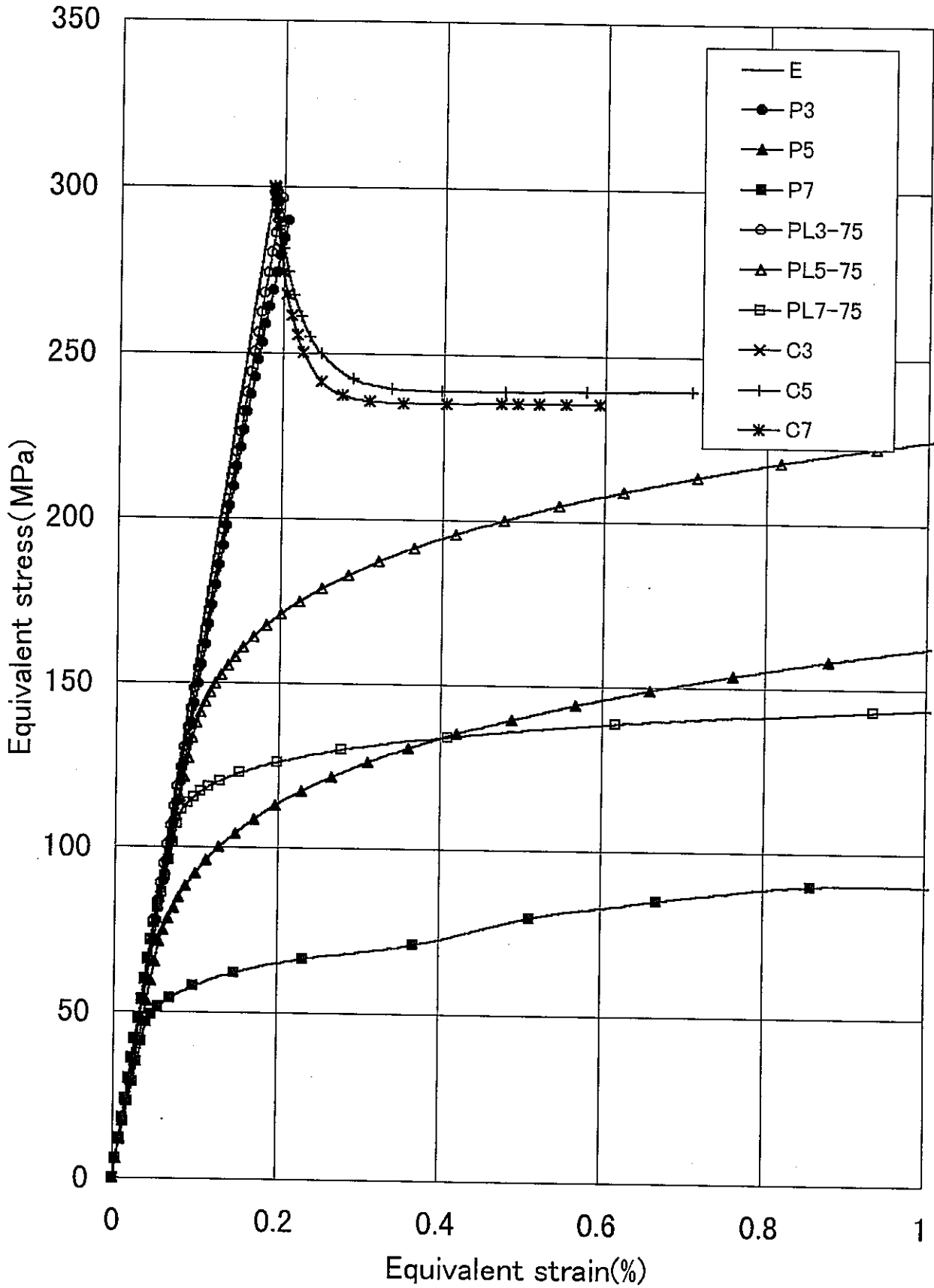


Fig.A2(a) Equivalent stress-strain curve at point a
 $D/W = 0.25$, (Load-Controlled Condition)

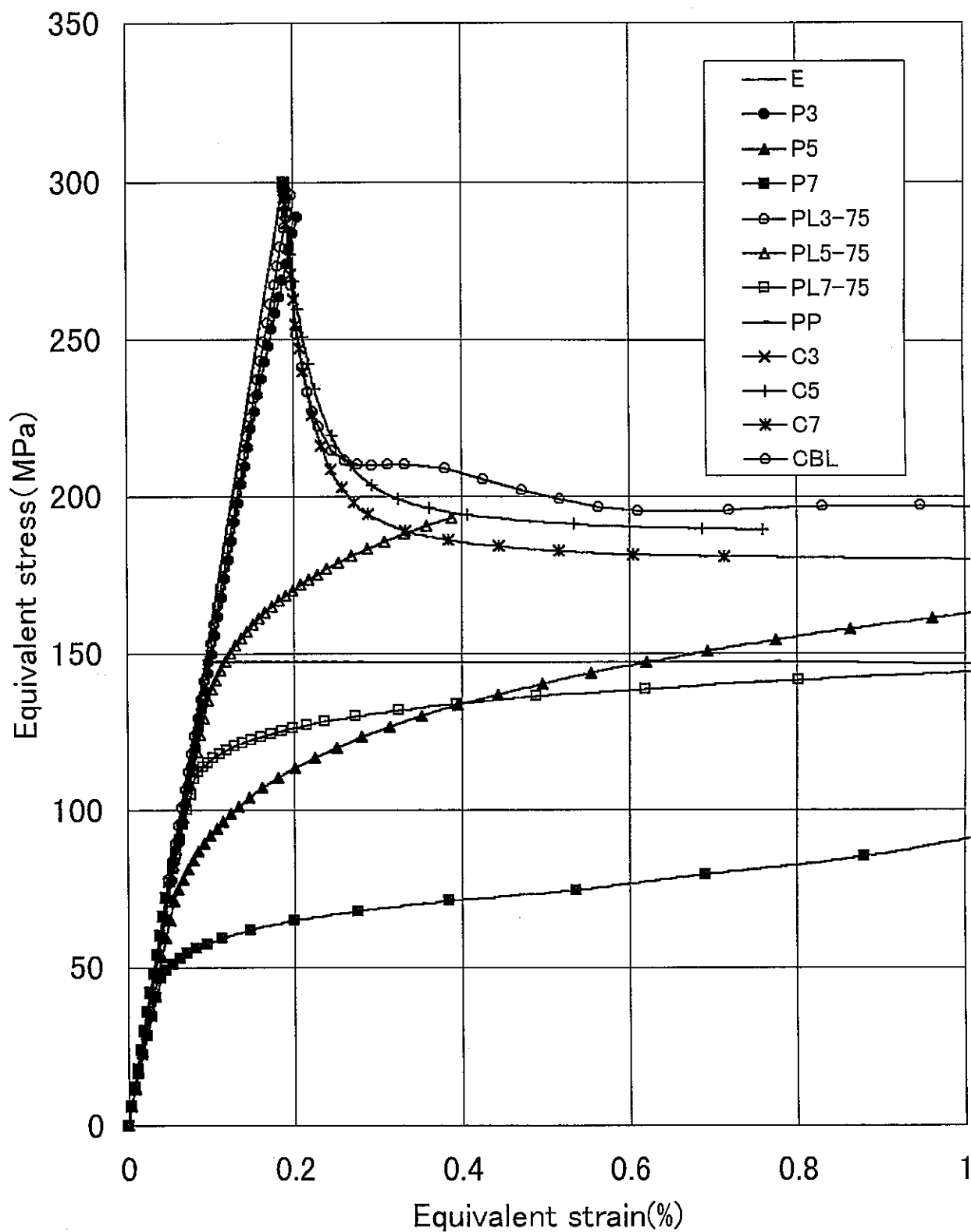


Fig.A2(b) Equivalent stress-strain curve at point a
 D/W = 0.5, (Load-Controlled Condition)

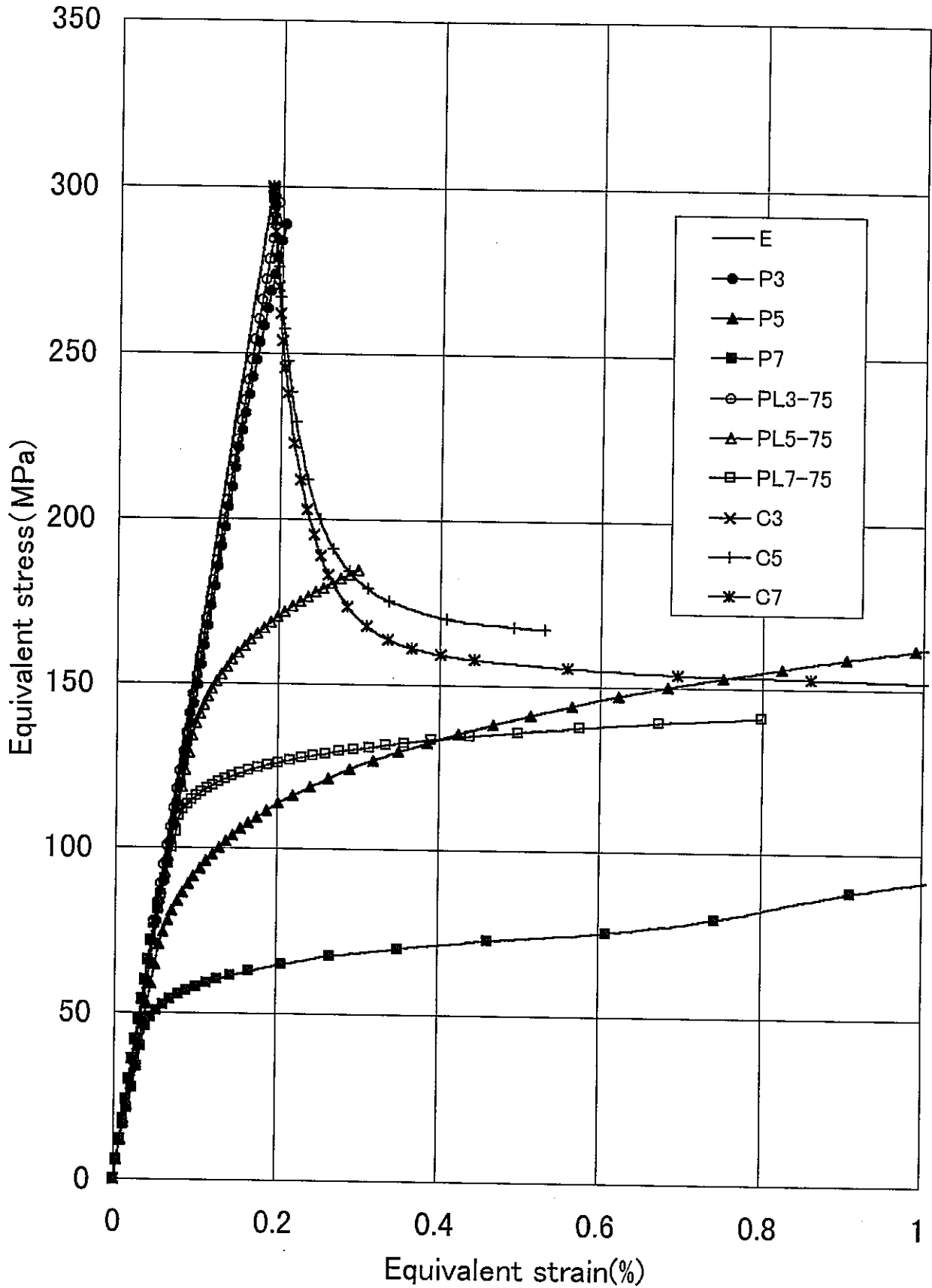


Fig.A2(c) Equivalent stress-strain curve at point a
 $D/W = 0.75$, (Load-Controlled Condition)

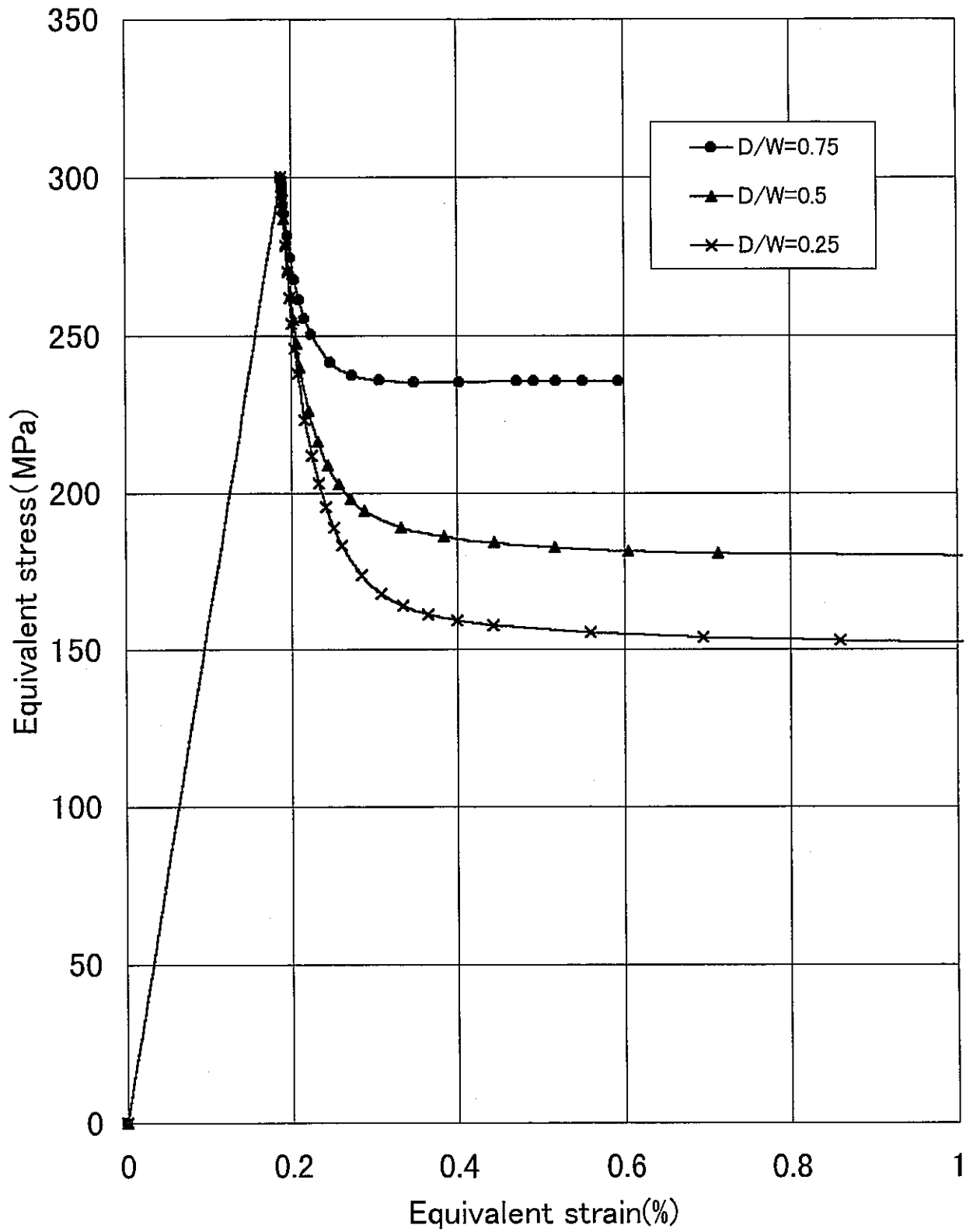


Fig.A3 Comparison of Equivalent stress-strain curve among the different models (Load-Controlled Condition C7)

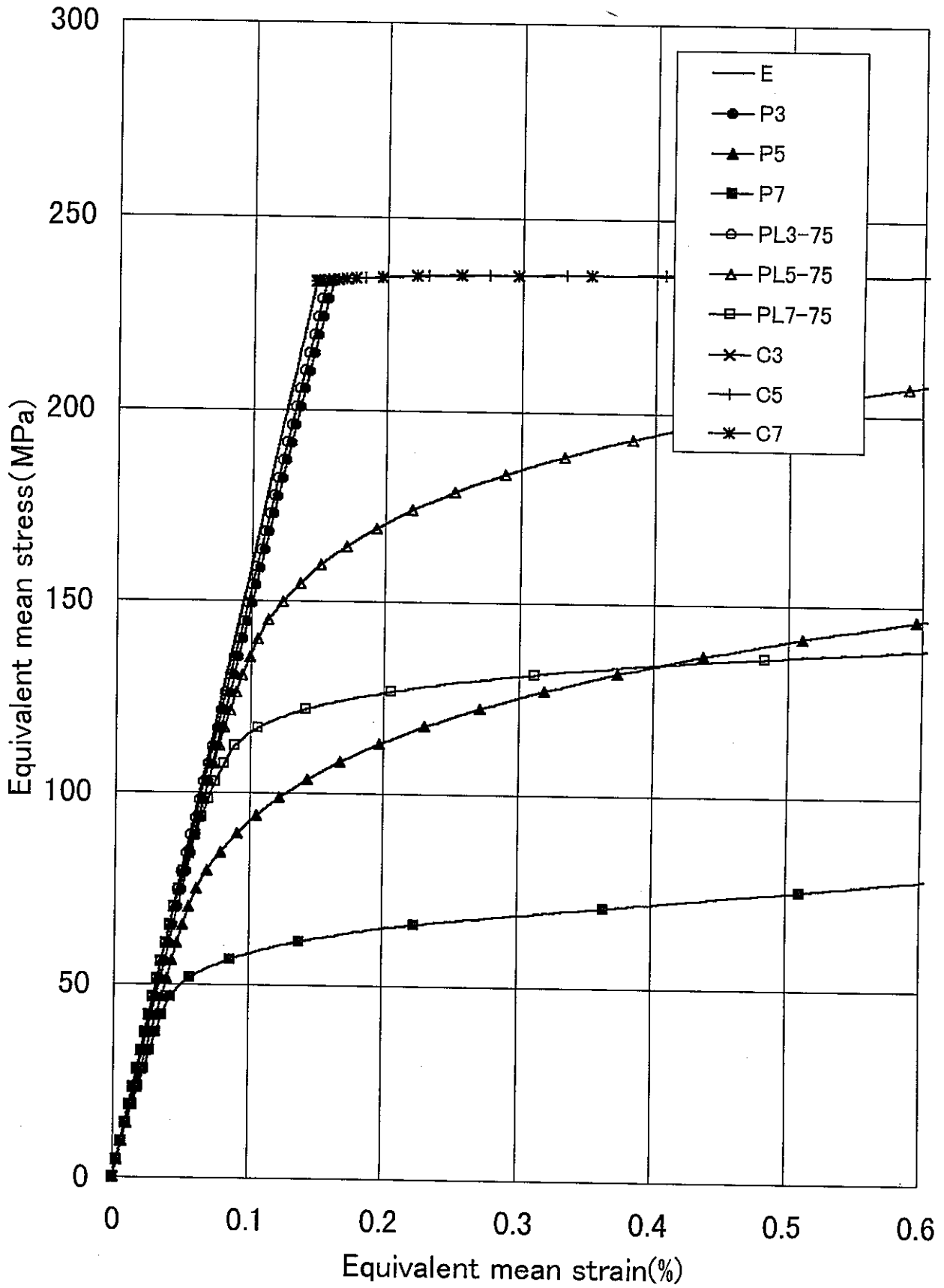


Fig.A4(a) Equivalent mean stress-strain curve along section B
 $D/W = 0.25$, (Load-Controlled Condition)

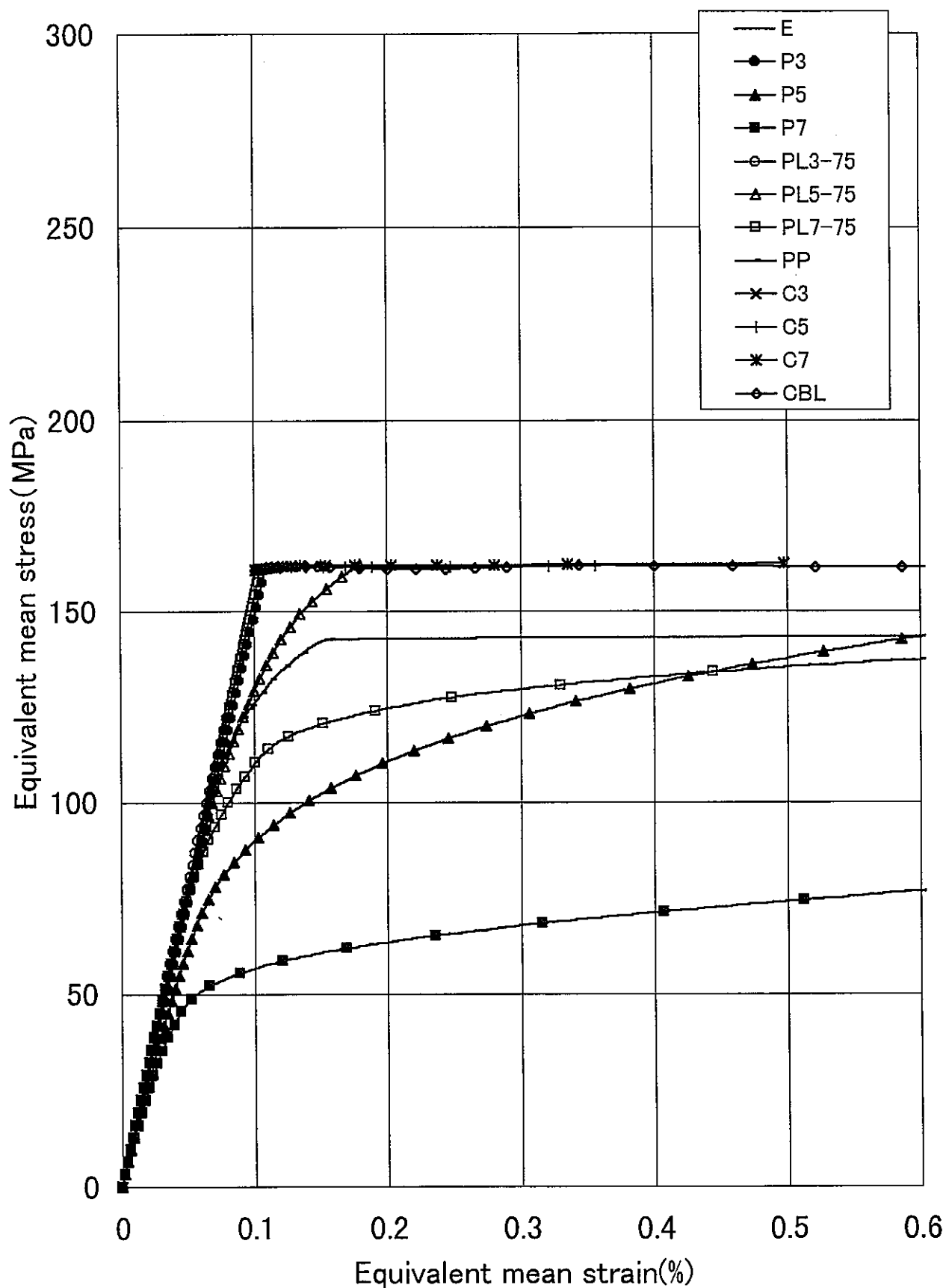


Fig.A4(b) Equivalent mean stress-strain curve along section B
 D/W = 0.5, (Load-Controlled Condition)

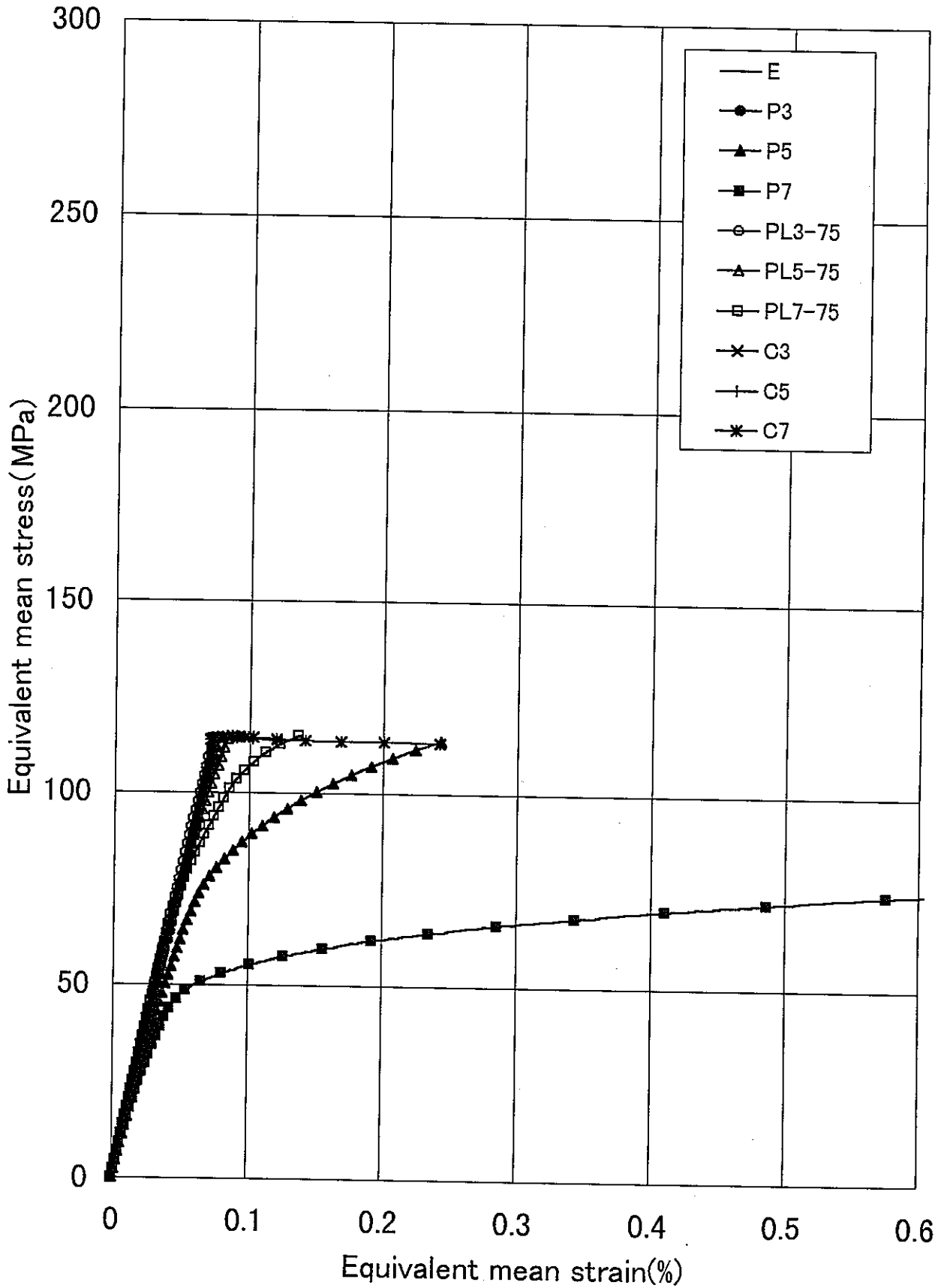
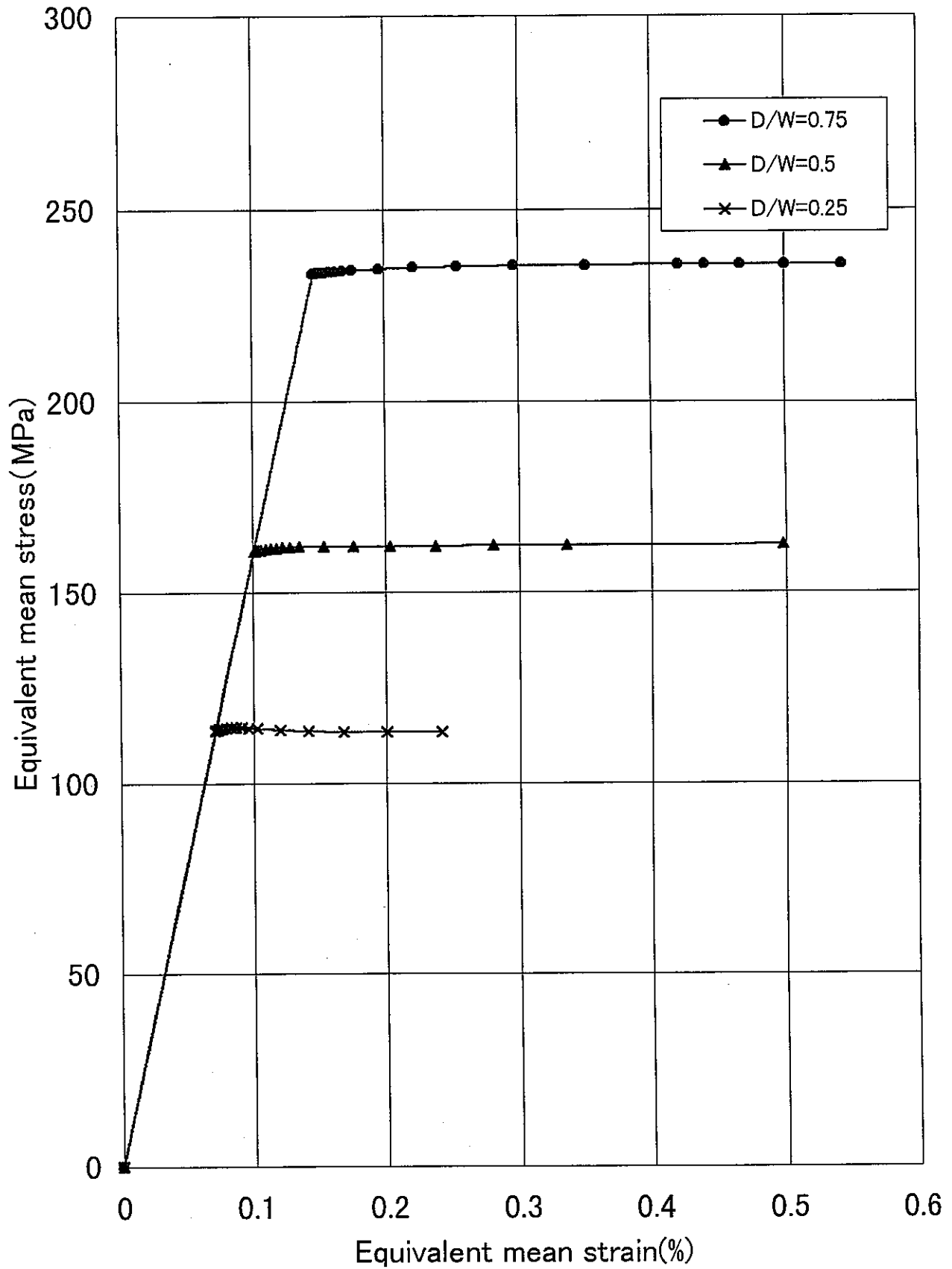


Fig.A4(c) Equivalent mean stress-strain curve along section B
 $D/W = 0.75$, (Load-Controlled Condition)



FigA5 Comparison of Equivalent mean stress-strain curve among the different models (Load-Controlled Condition C7)

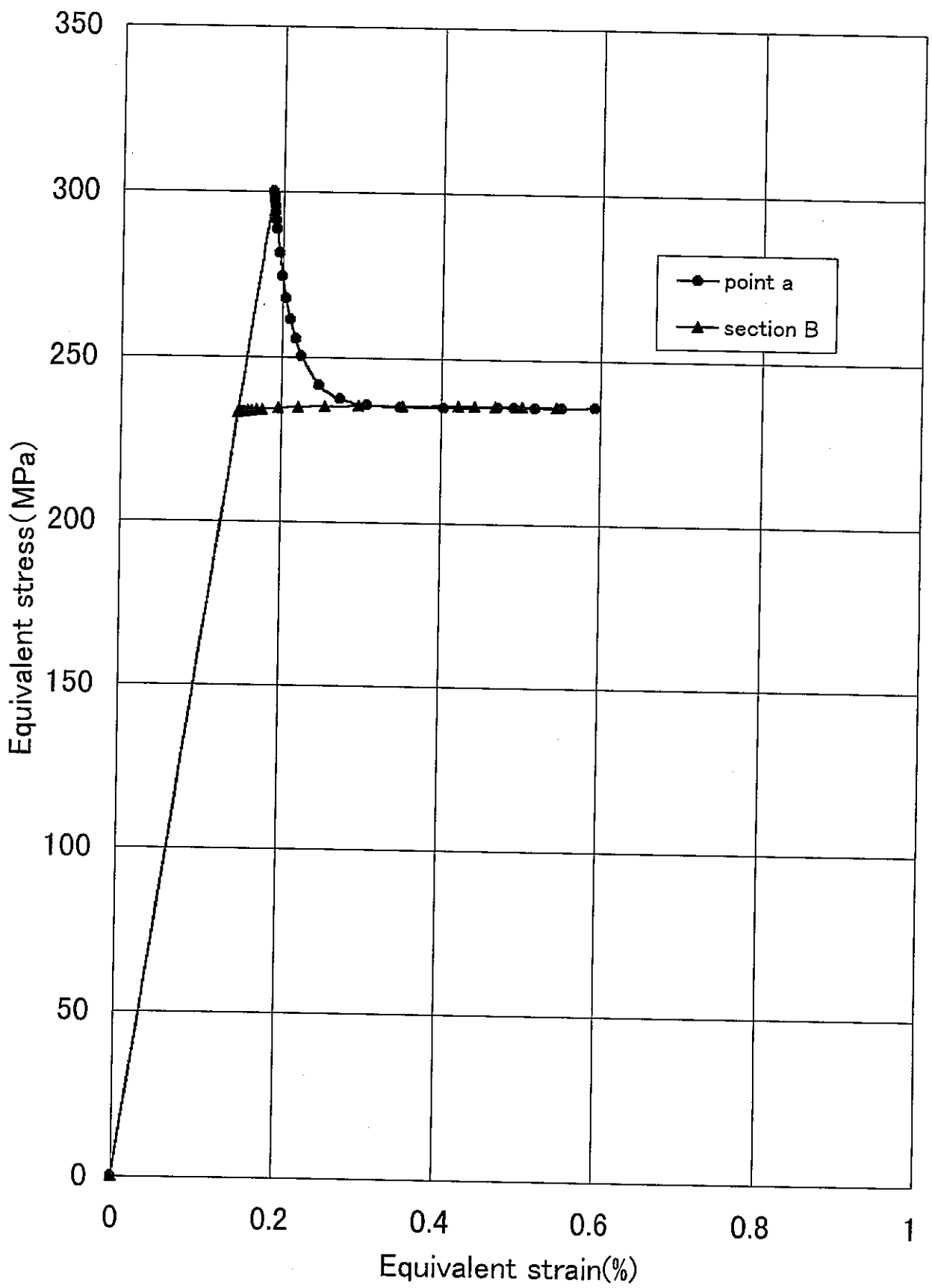


Fig.A6(a) Comparison of stress-strain curve between point a and section B
D/W = 0.25, (Load-Controlled Condition C7)

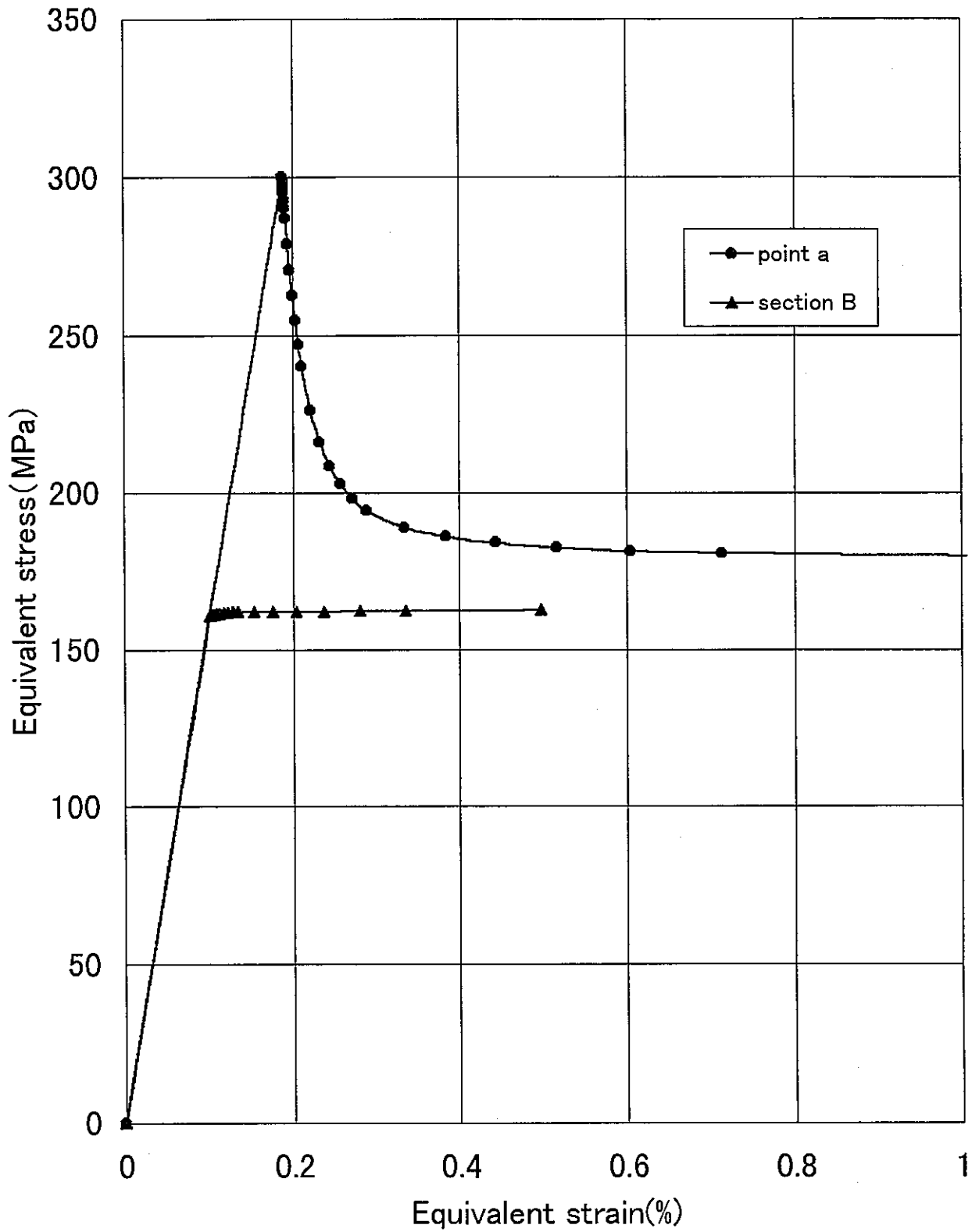


Fig.A6(b) Comparison of stress-strain curve between point a and section B
D/W = 0.5, (Load-Controlled Condition C7)

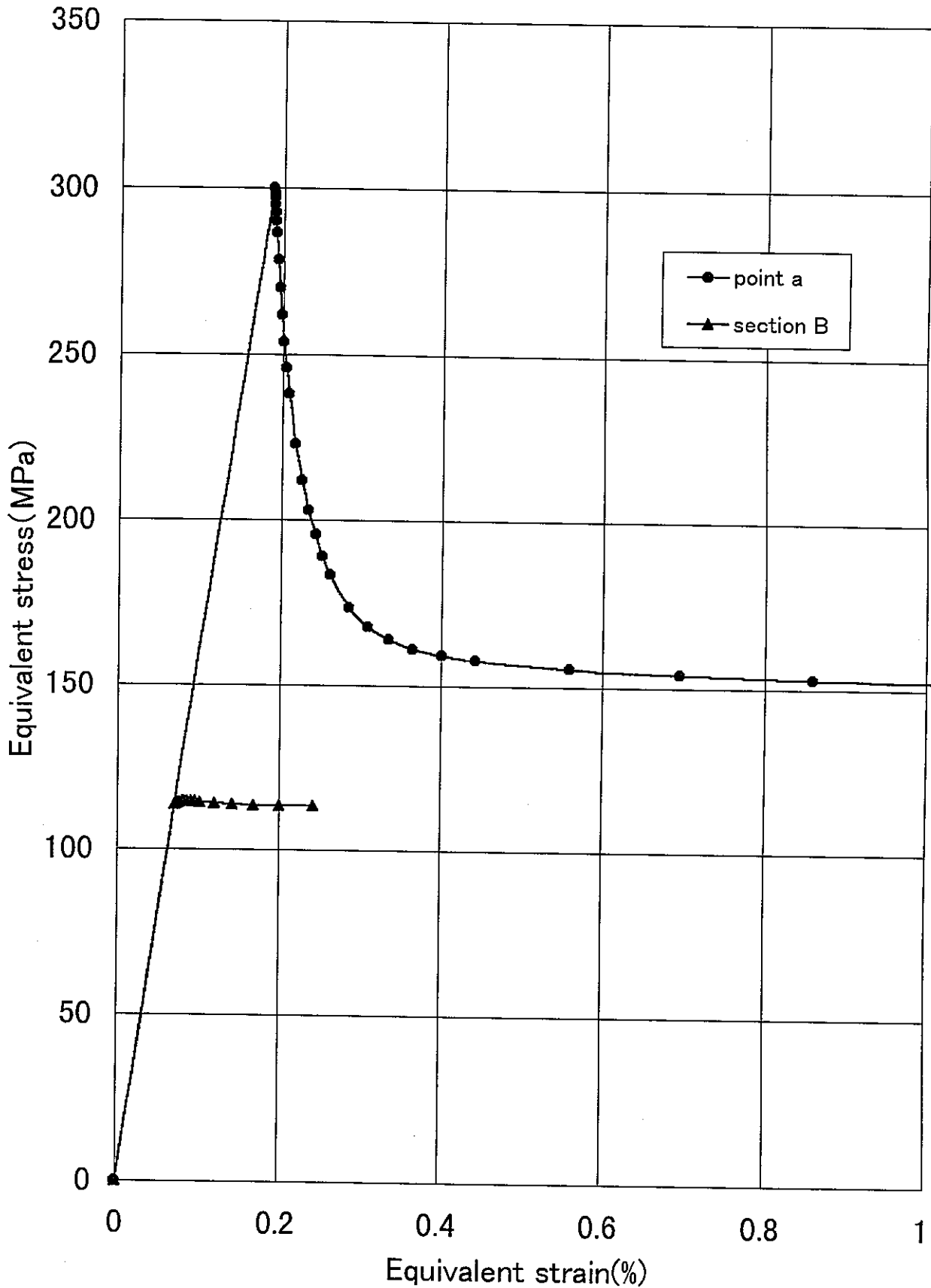


Fig.A6(c) Comparison of stress-strain curve between point a and section B
D/W = 0.75, (Load-Controlled Condition C7)

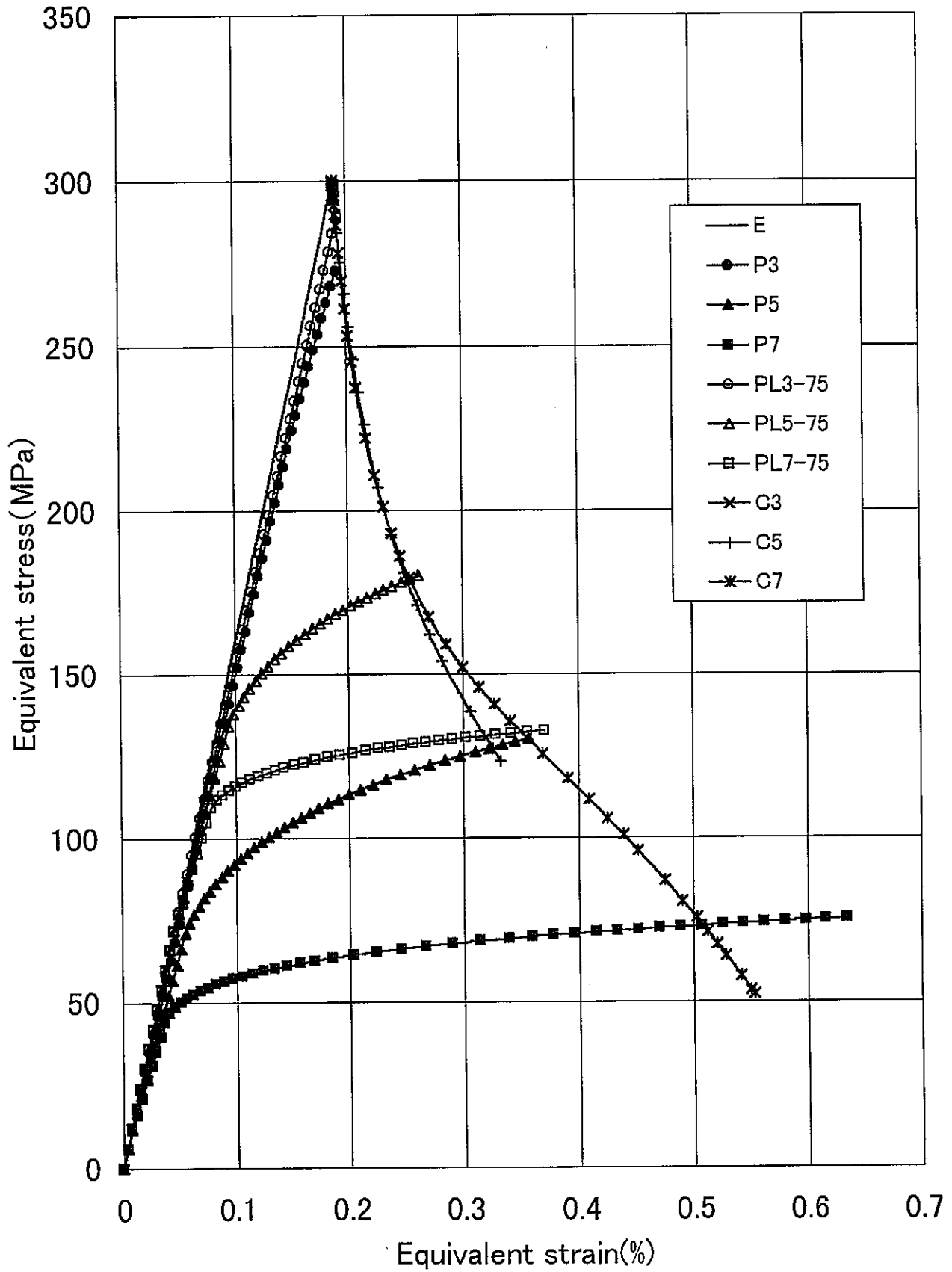


Fig.A7(a) Equivalent stress-strain curve at point a
 $D/W = 0.25$, (Displacement-Controlled Condition)

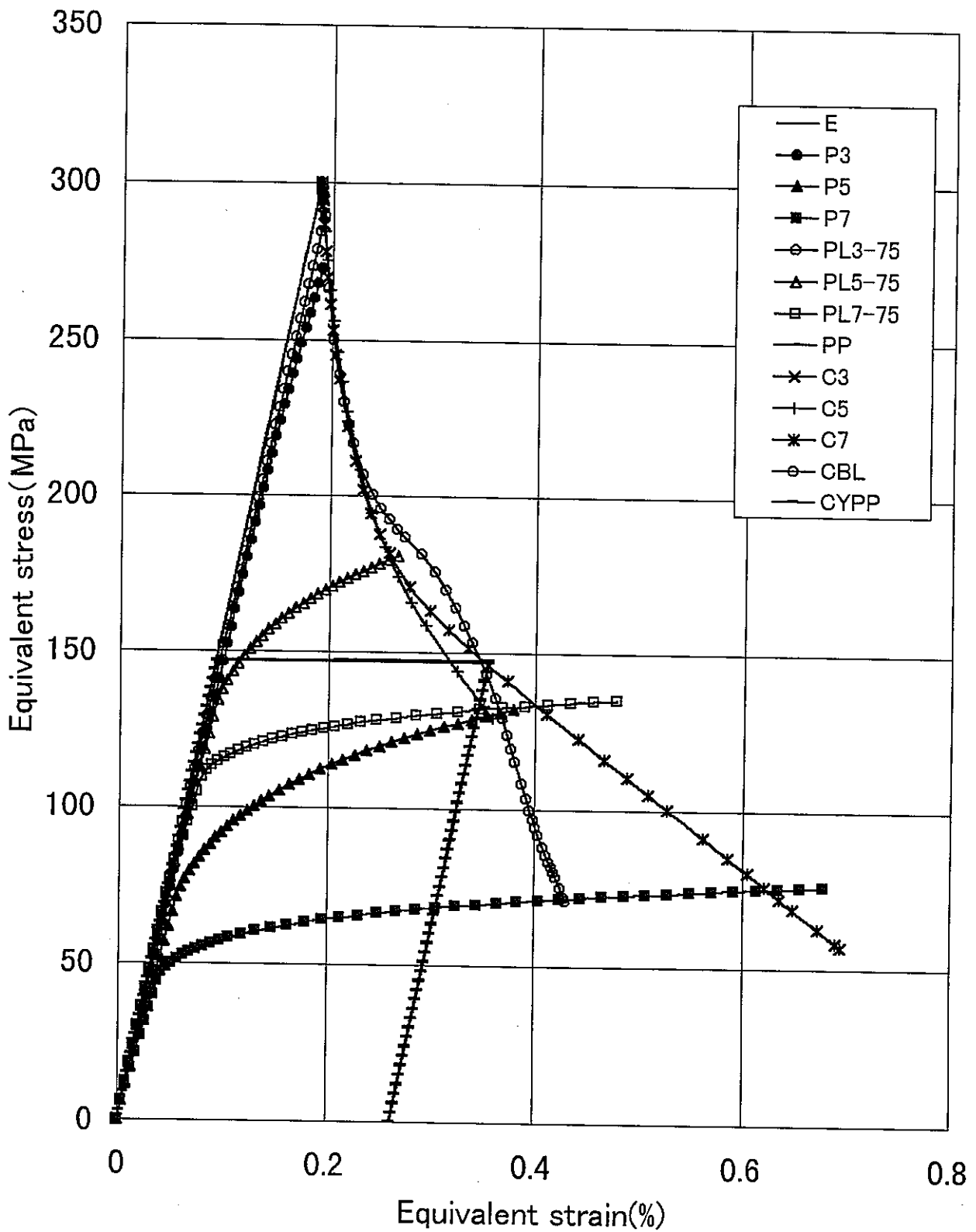


Fig.A7(b) Comparison of stress-strain curve between point a and section B
 $D/W = 0.5$, (Load-Controlled Condition)

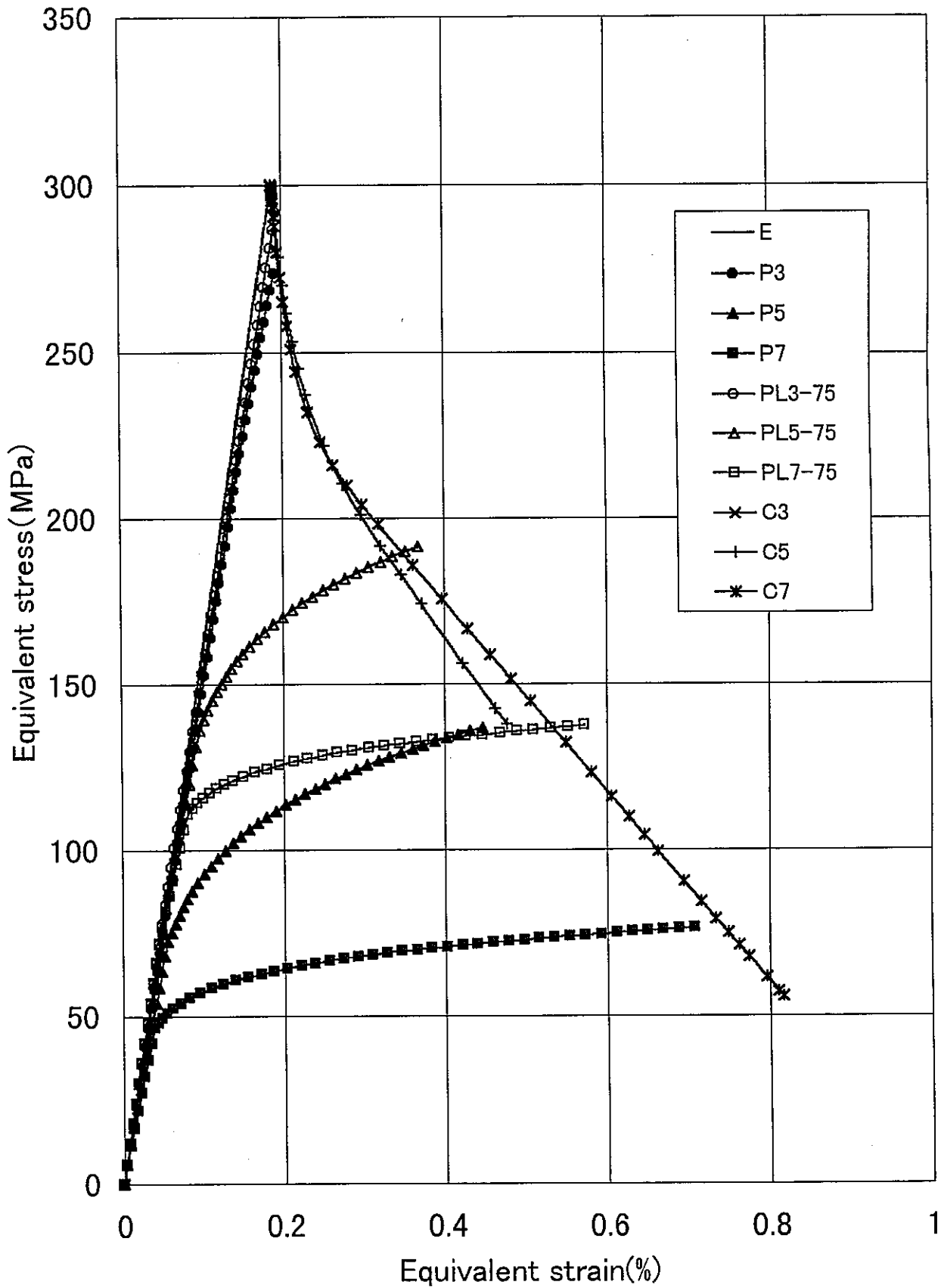


Fig.A7(c) Equivalent stress-strain curve at point a
 $D/W = 0.75$, (Displacement-Controlled Condition)

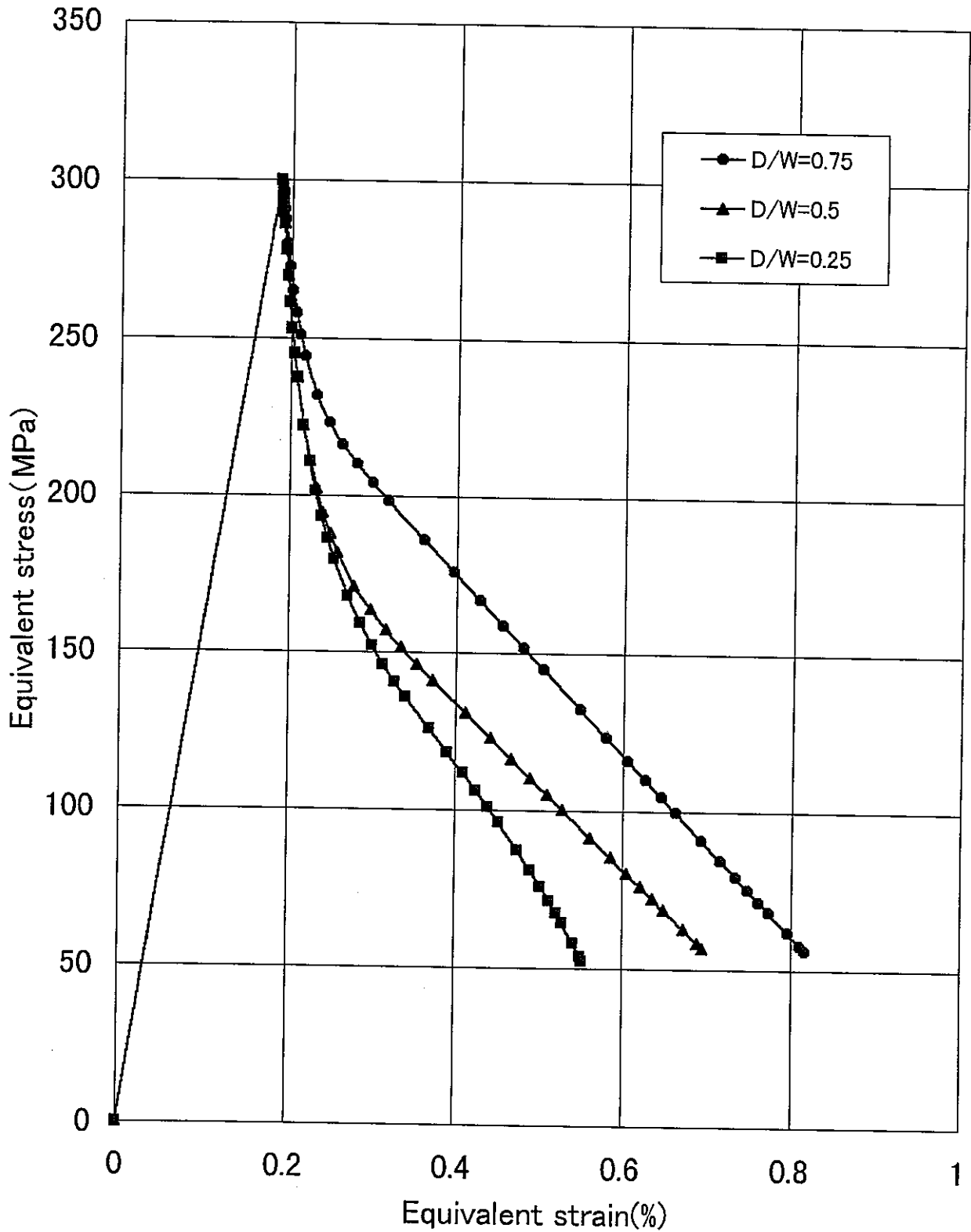


Fig.A8 Comparison of Equivalent stress-strain curve among the different models (Displacement-Controlled Condition C7)

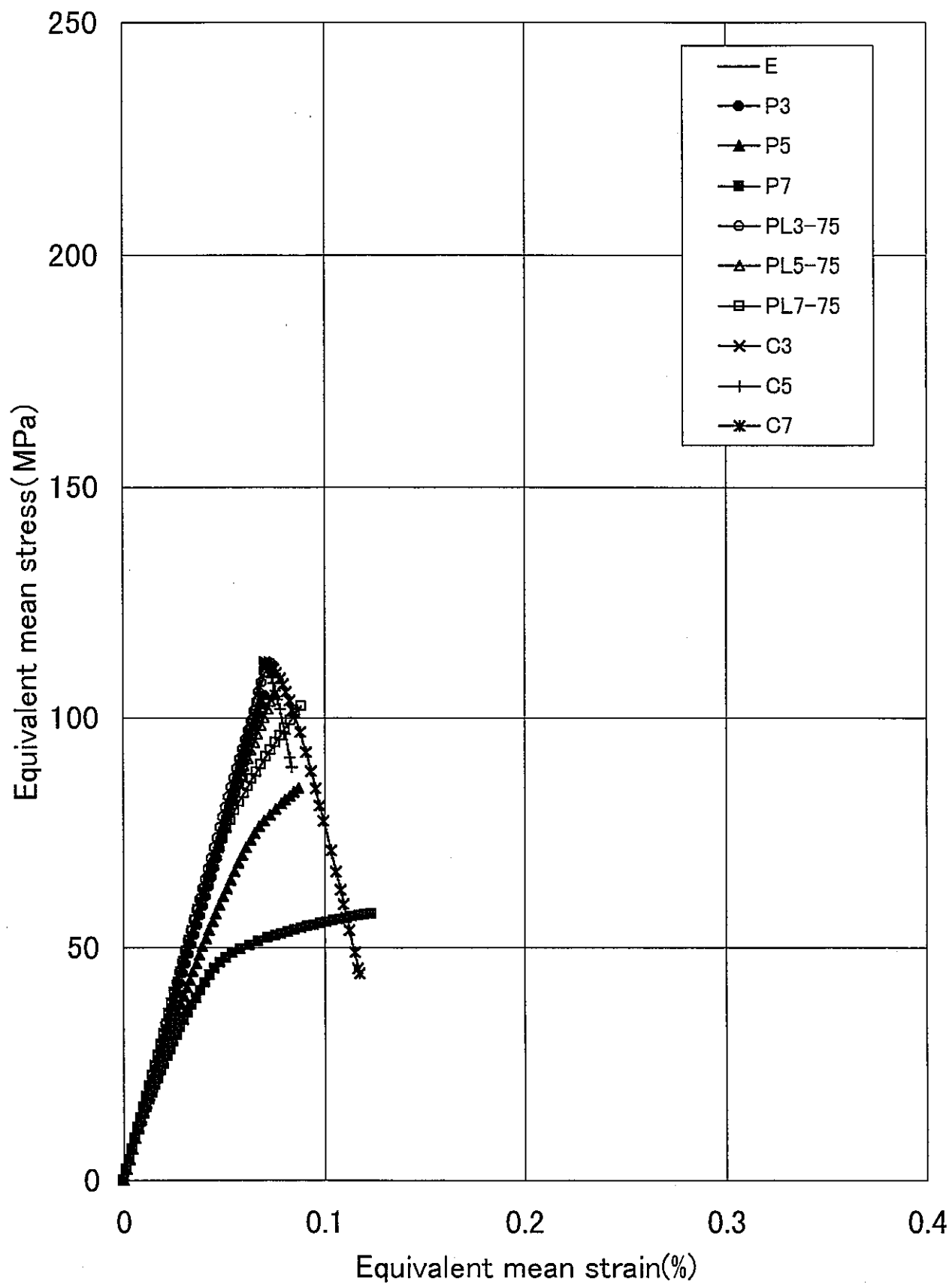


Fig.A9(a) Equivalent mean stress-strain curve along section B
 D/W = 0.25, (Displacement-Controlled Condition)

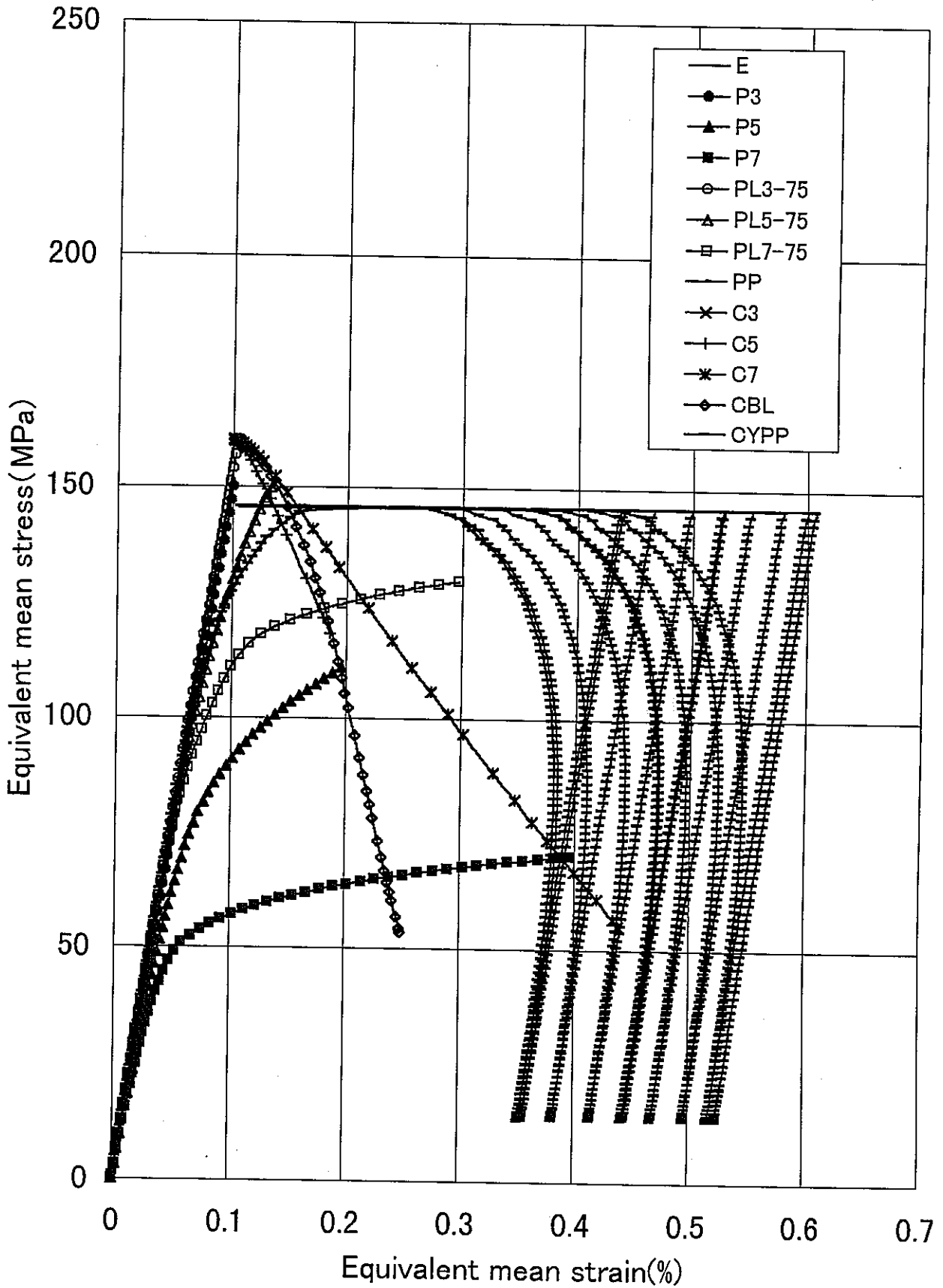


Fig.A9(b) Equivalent mean stress-strain curve along section B
 $D/W = 0.5$, (Displacement-Controlled Condition)

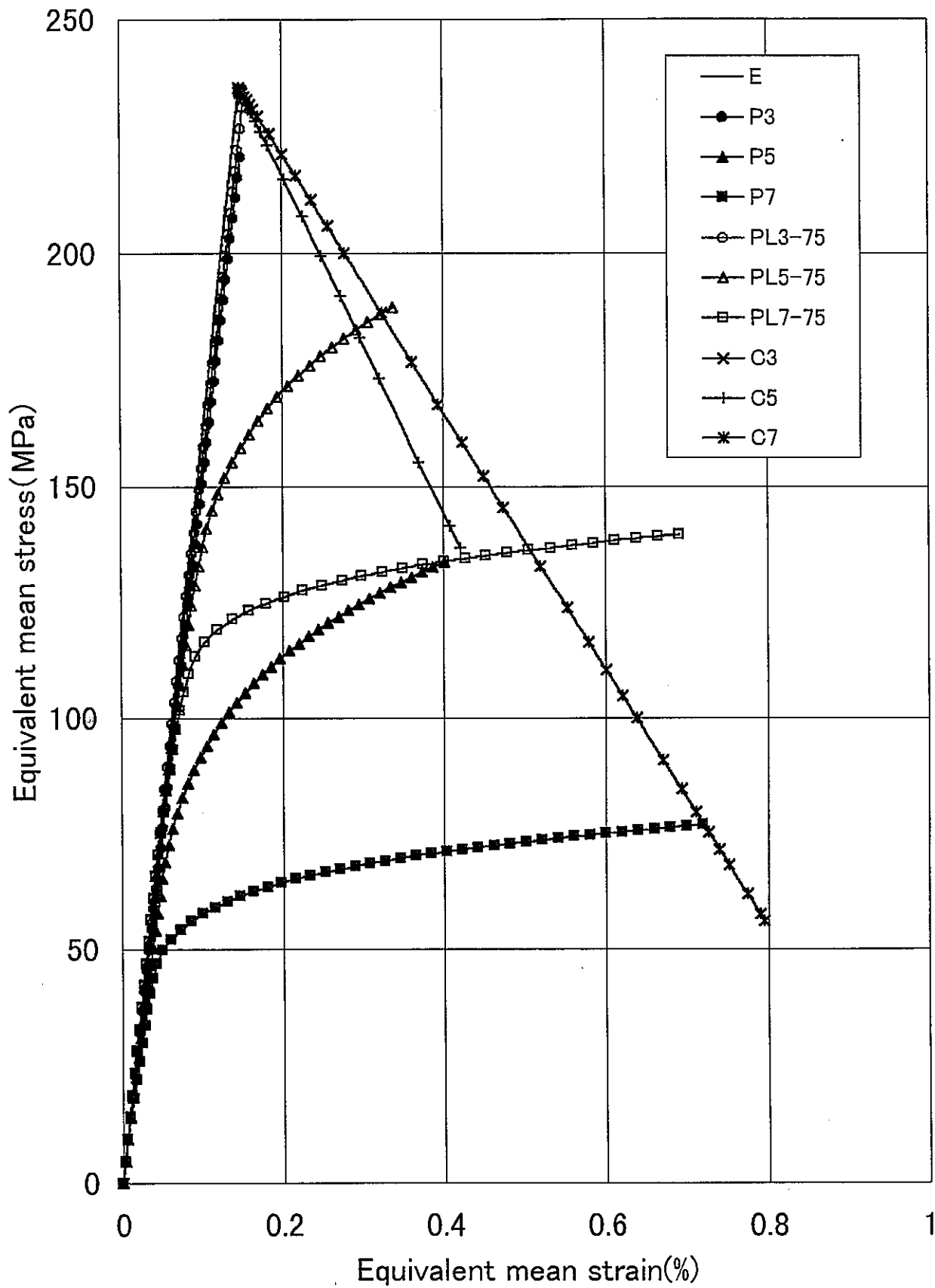


Fig.A9(c) Equivalent mean stress-strain curve along section B
 D/W = 0.75, (Displacement-Controlled Condition)

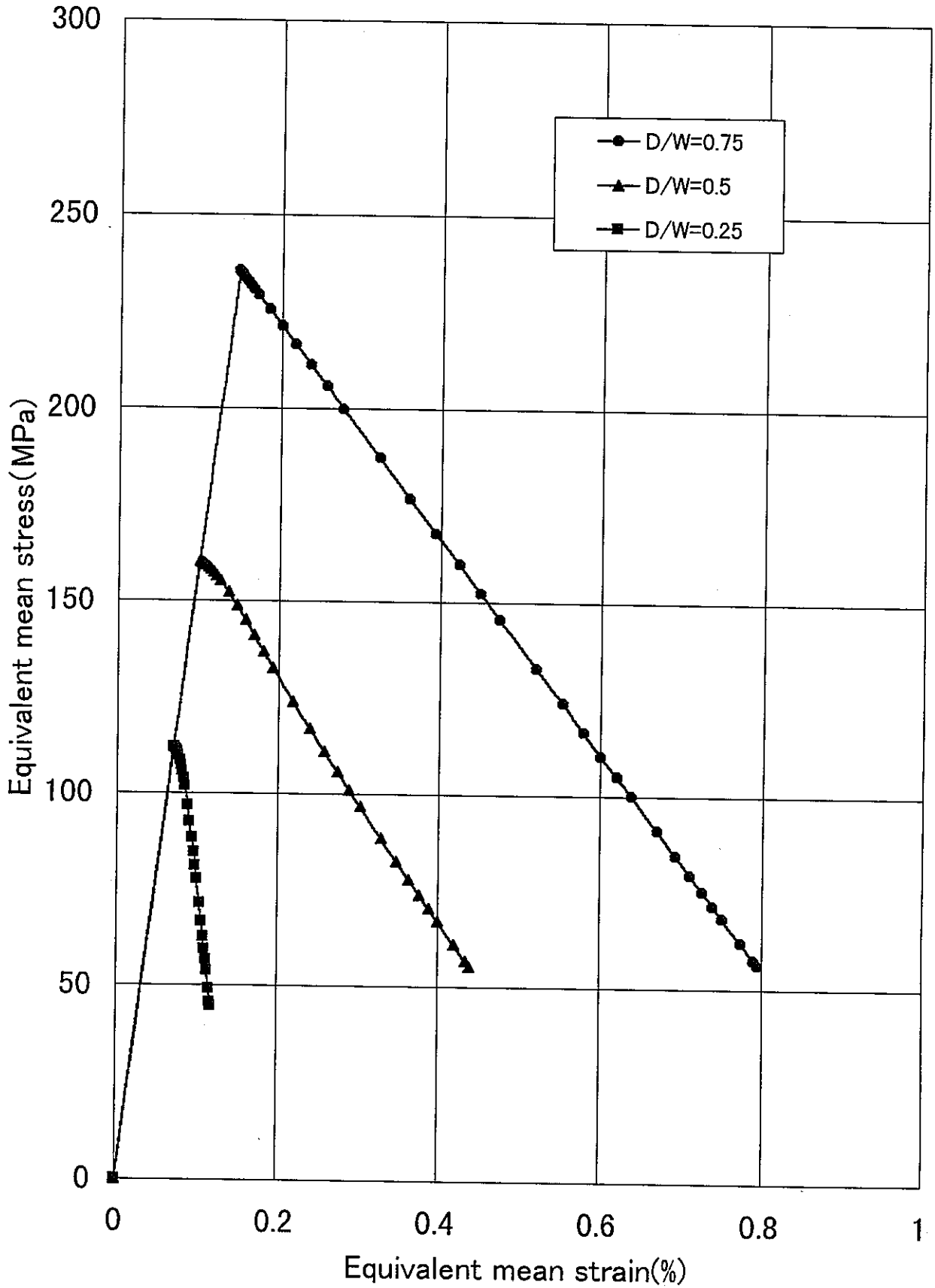


Fig.A10 Comparison of Equivalent mean stress-strain curve among the different models (Displacement-Controlled Condition)

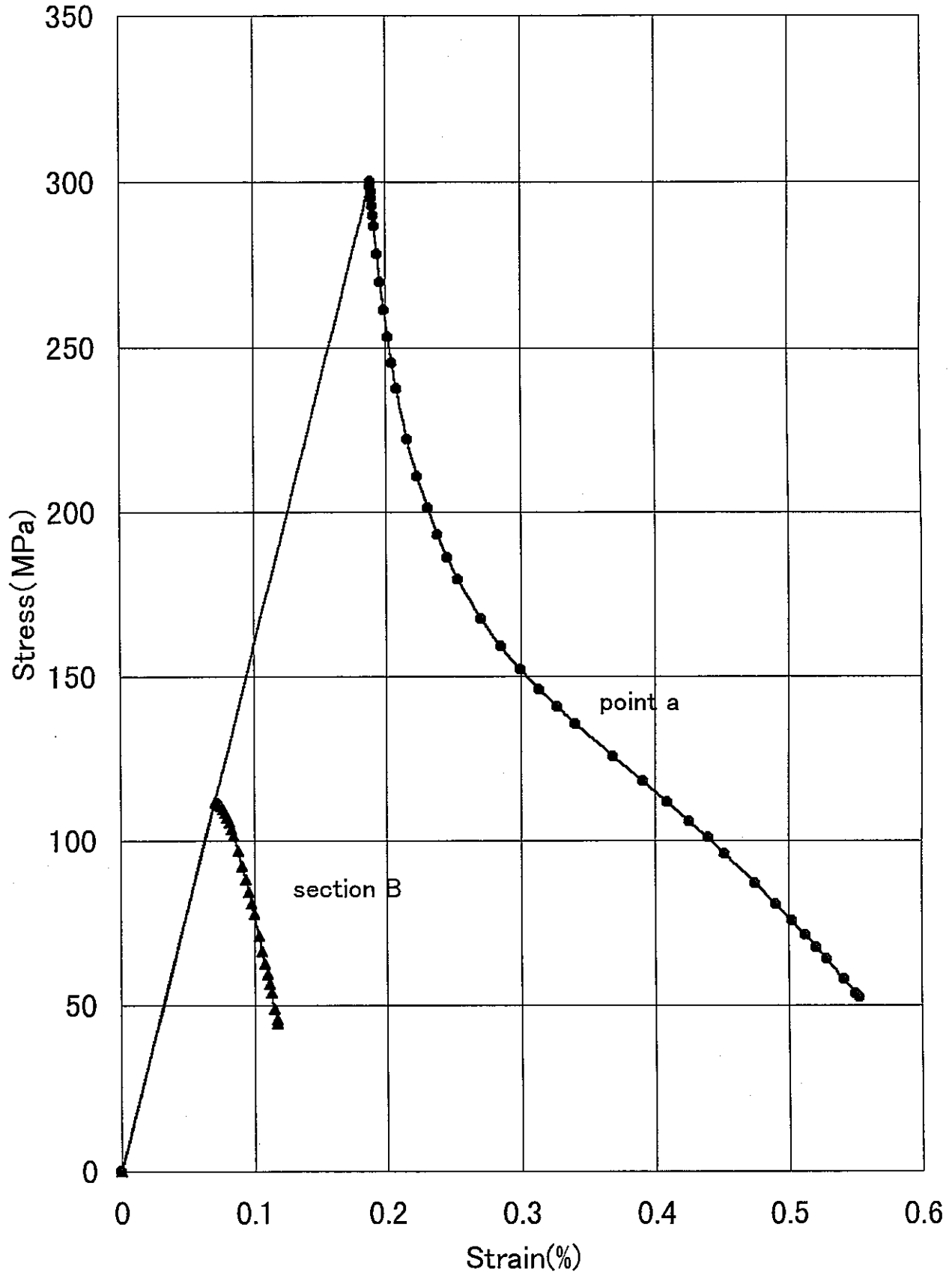


Fig.A11(a) Comparison of stress-strain curve
D/W = 0.25, (Displacement-Controlled Condition)

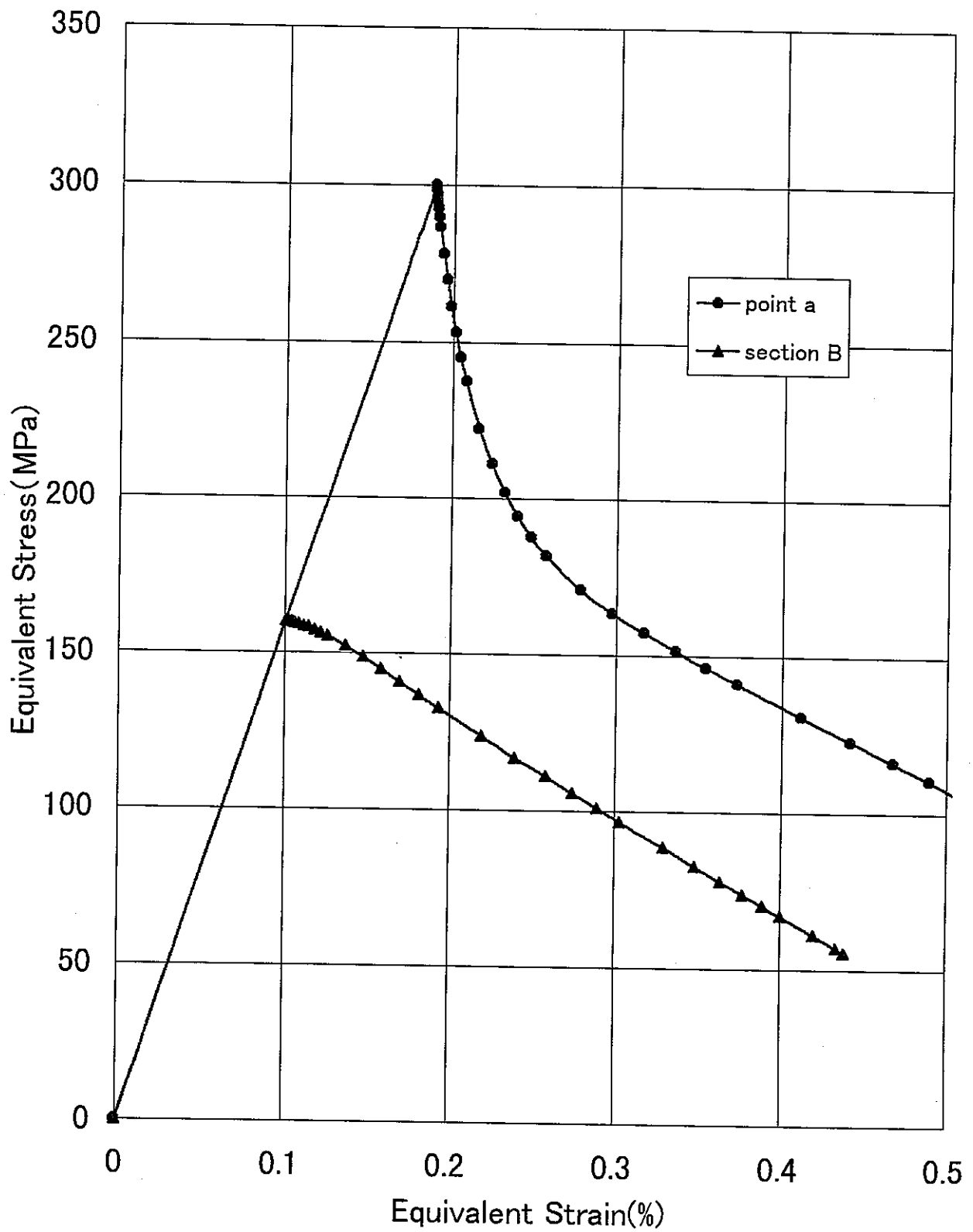


Fig.A11(b) Comparison of stress-strain curve
 D/W = 0.5, (Displacement-Controlled Condition)

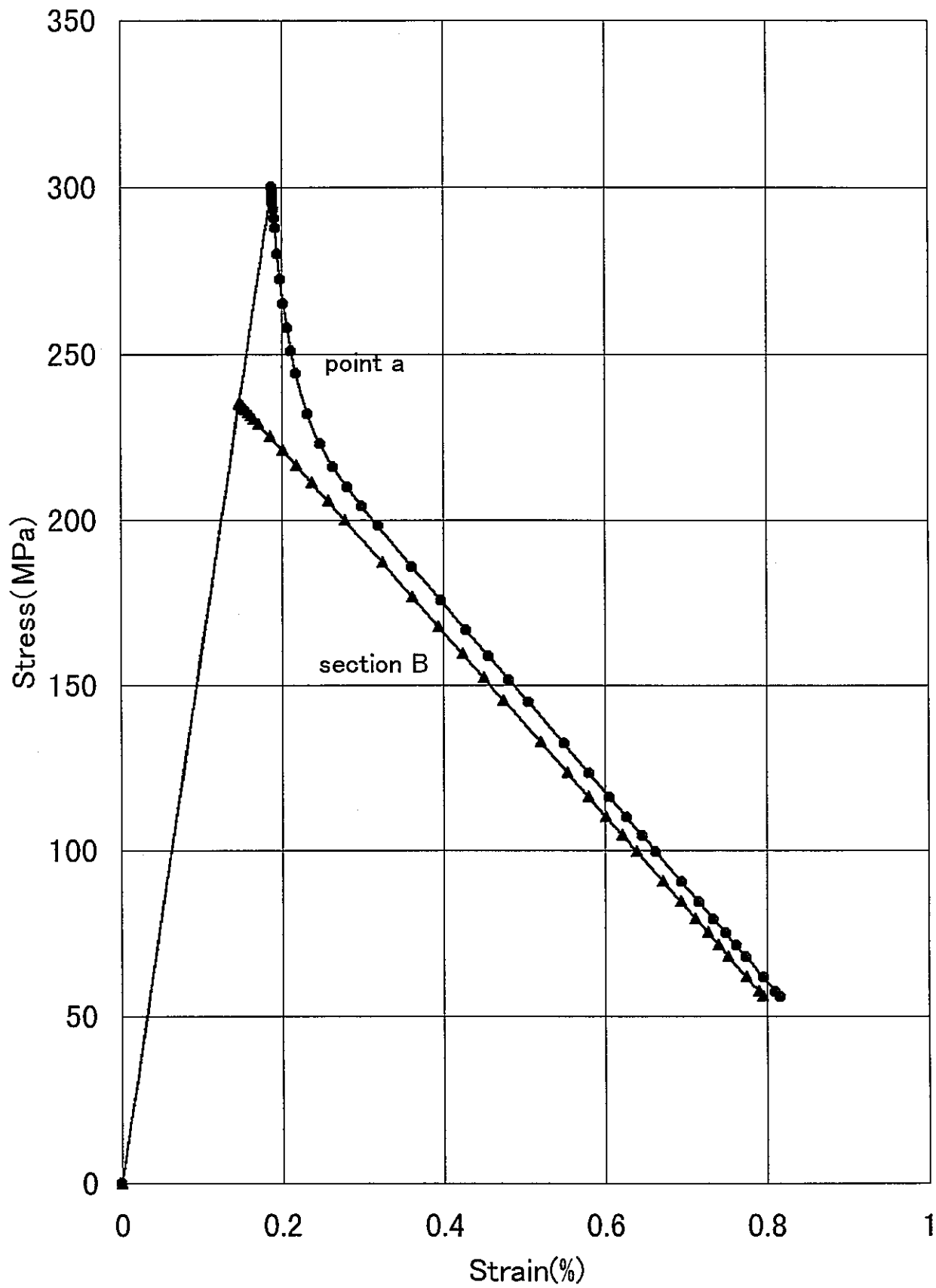


Fig.A11(c) Comparison of stress-strain curve
D/W = 0.75, (Displacement-Controlled Condition)

付録B 短ピッチの場合の解析結果

孔ピッチが板幅と同じ500mmの平板 (Fig.A22) に、弾性解析時の孔縁の応力が300MPaとなるように、軸方向引っ張り変位を加えた場合の、応力ひずみ挙動をFig.A23～Fig.A27に示す。使用した弾塑性構成方程式およびクリープひずみ式をTable A2に示す。孔ピッチが小さくなると、軸方向引っ張り変位に対する孔周辺の弾性追従特性が変化する。

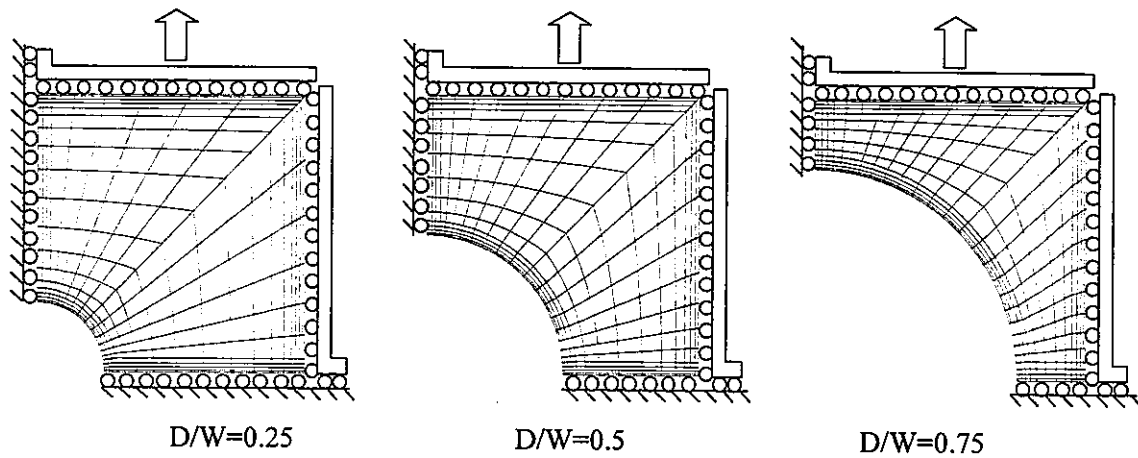


Fig.A12 Shell finite element models of plates with holes

Table A2 Analysis case to study influence of constitutive equations

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
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	∞
CYPP	Cyclic Elastic-Plastic	Perfectly plastic	∞

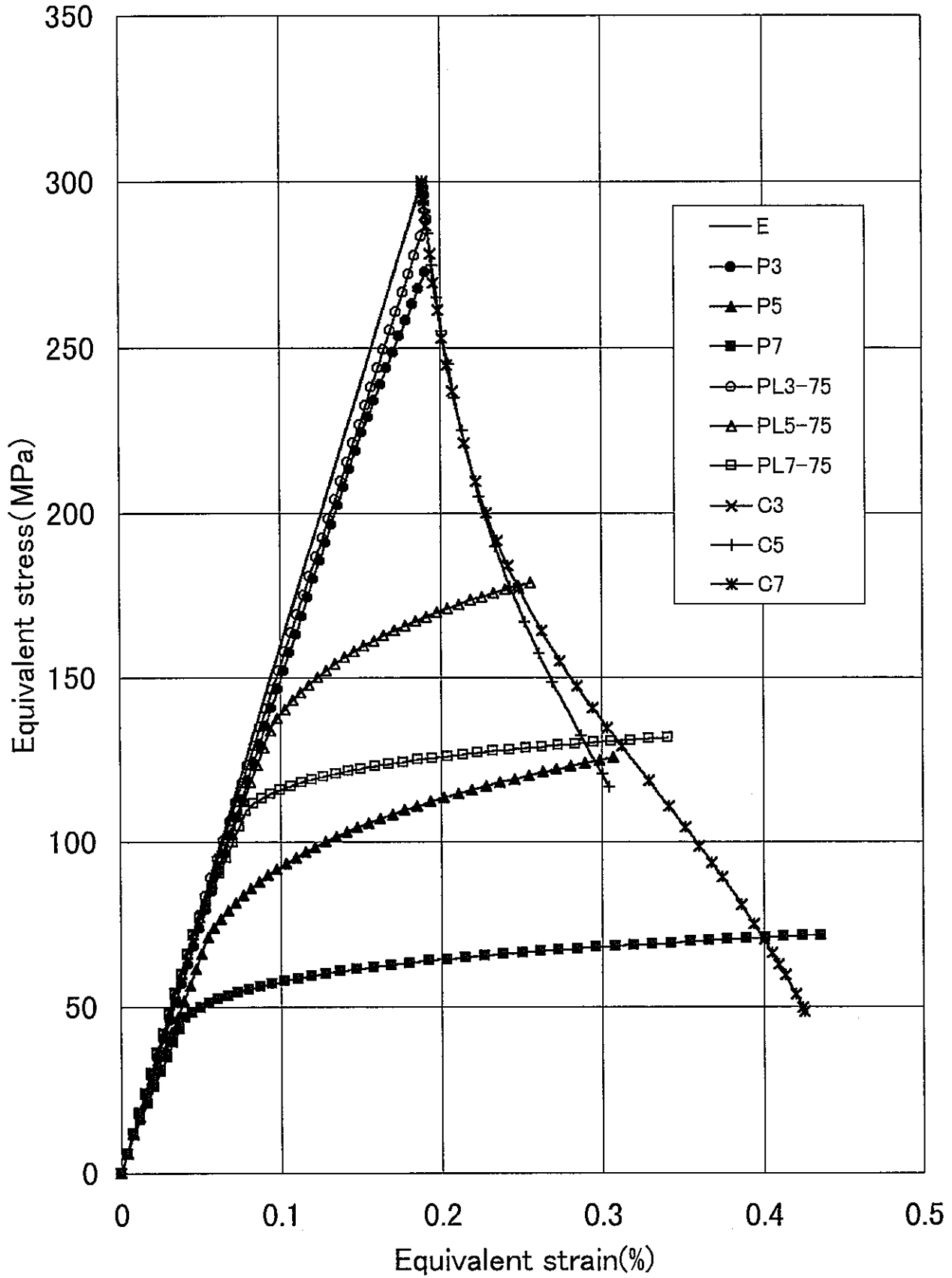


Fig.A13(a) Equivalent stress-strain curve at point a
 $D/W = 0.25$, (Displacement-Controlled Condition)

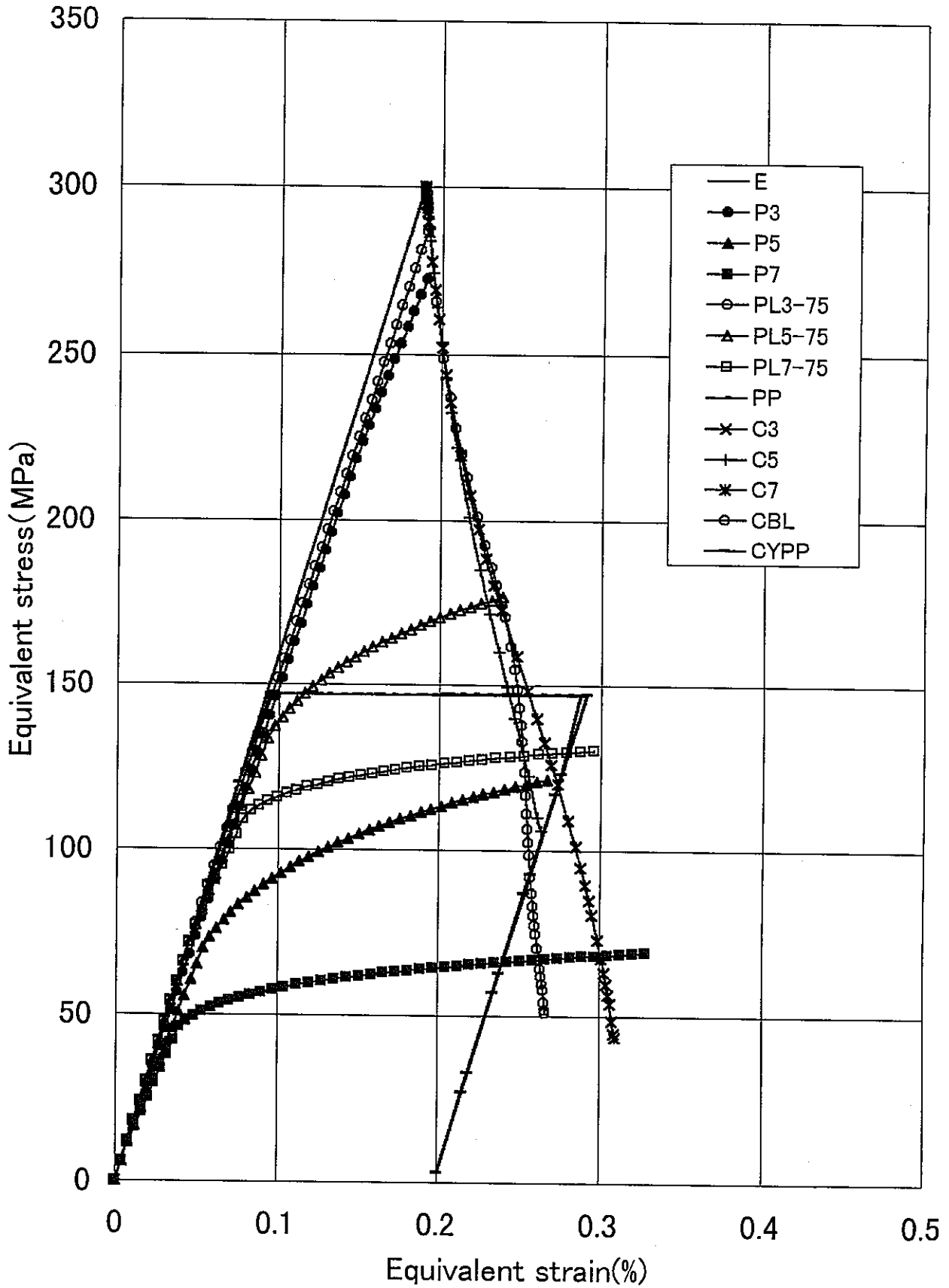


Fig.A13(b) Equivalent stress-strain curve at point a
 D/W = 0.5, (Displacement-Controlled Condition)

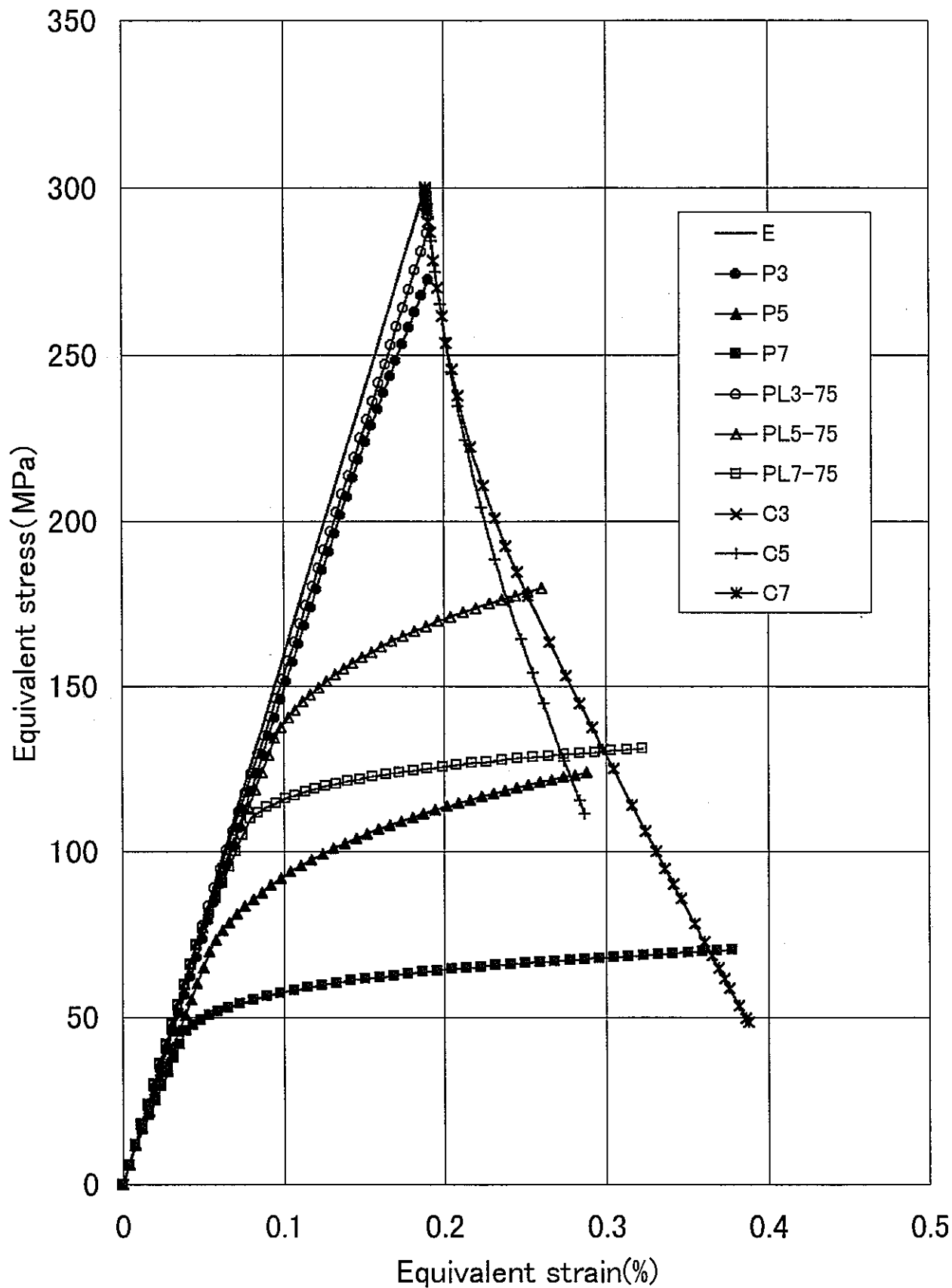


Fig.A13(c) Equivalent stress-strain curve at point a
 $D/W = 0.75$, (Displacement-Controlled Condition)

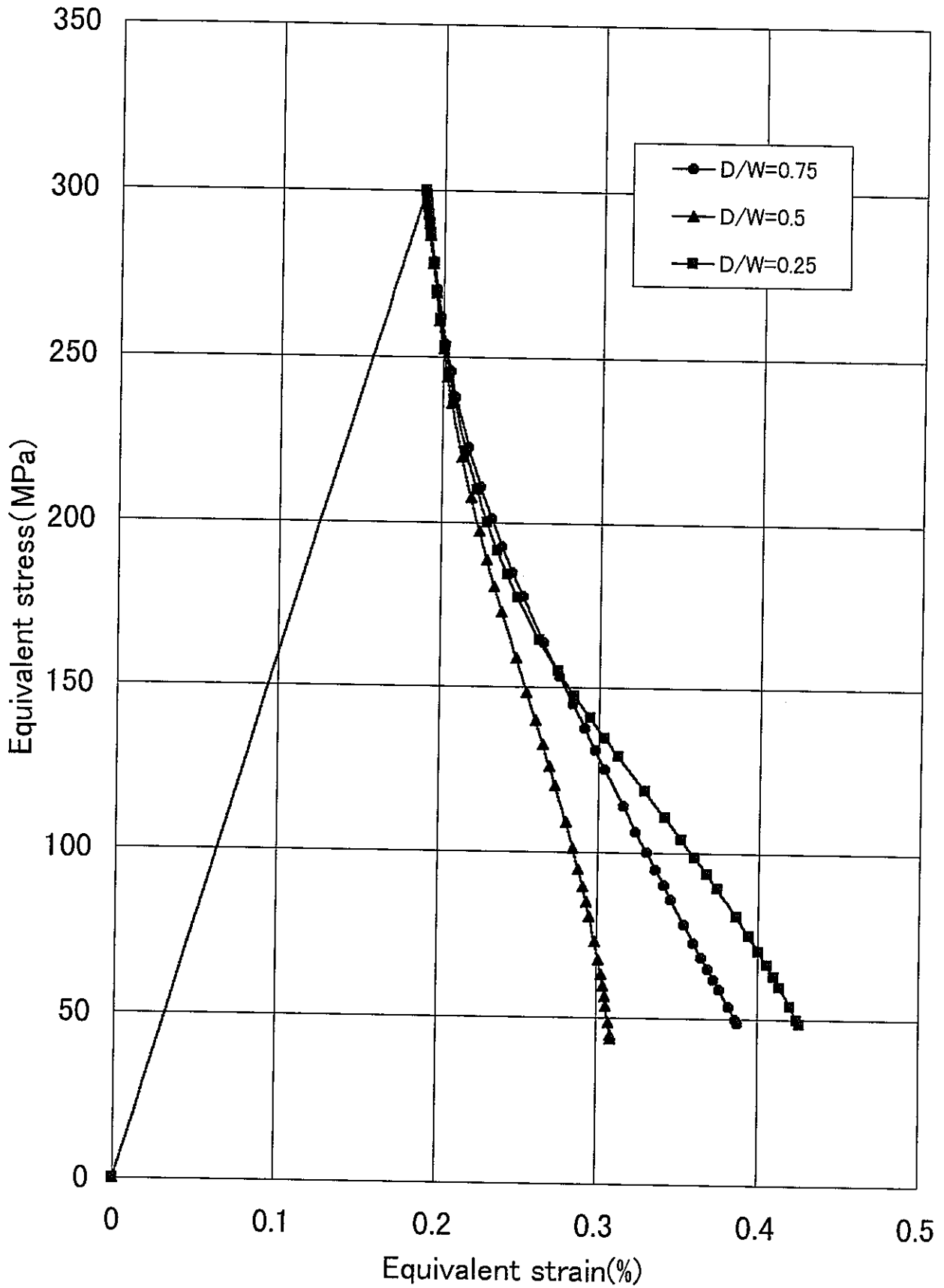


Fig.A14 Comparison of Equivalent stress-strain curve among the different models at point a (Displacement-Controlled Condition C7)

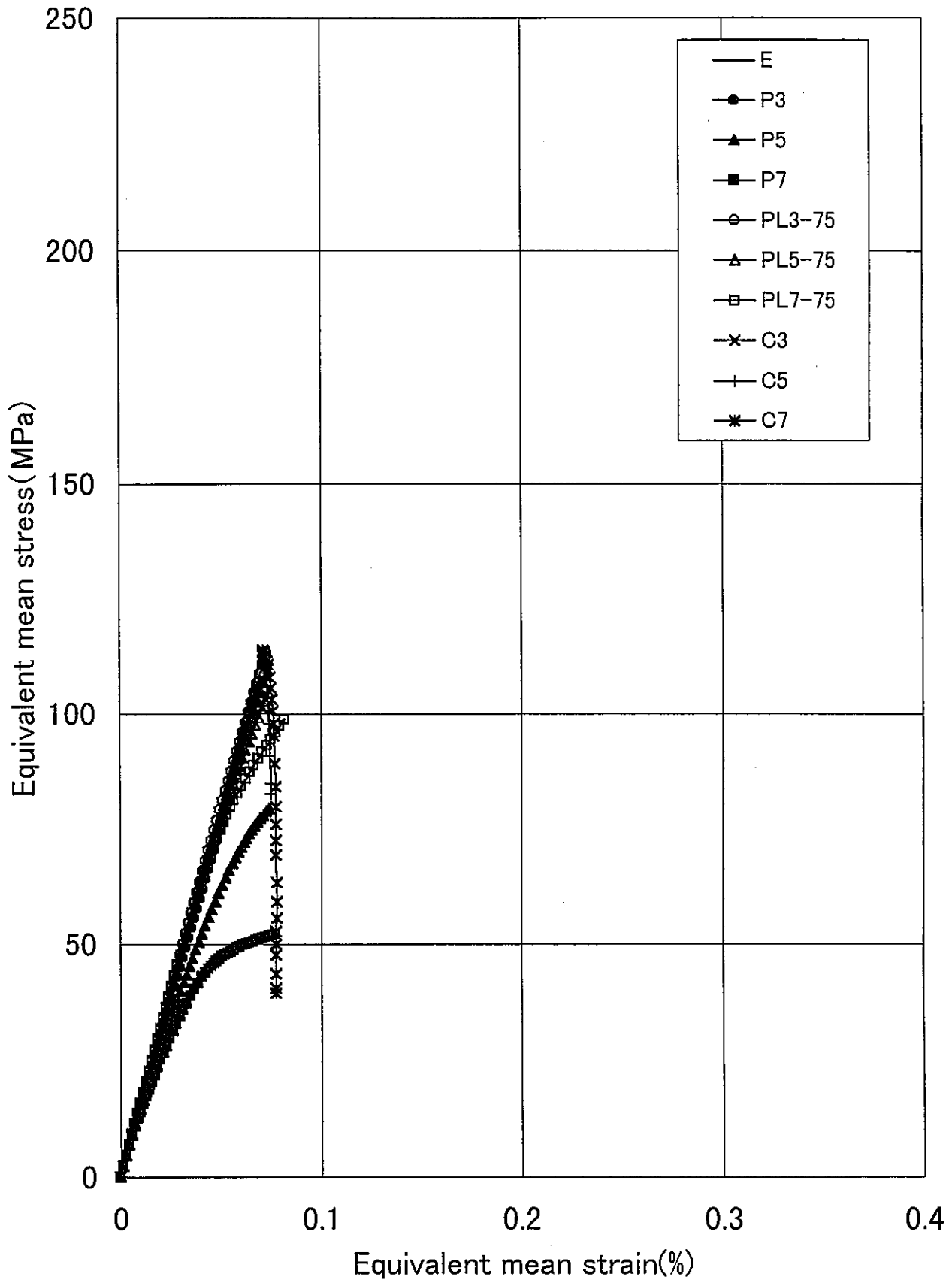


Fig.A15(a) Equivalent mean stress-strain curve along section B
 D/W = 0.25, (Displacement-Controlled Condition)

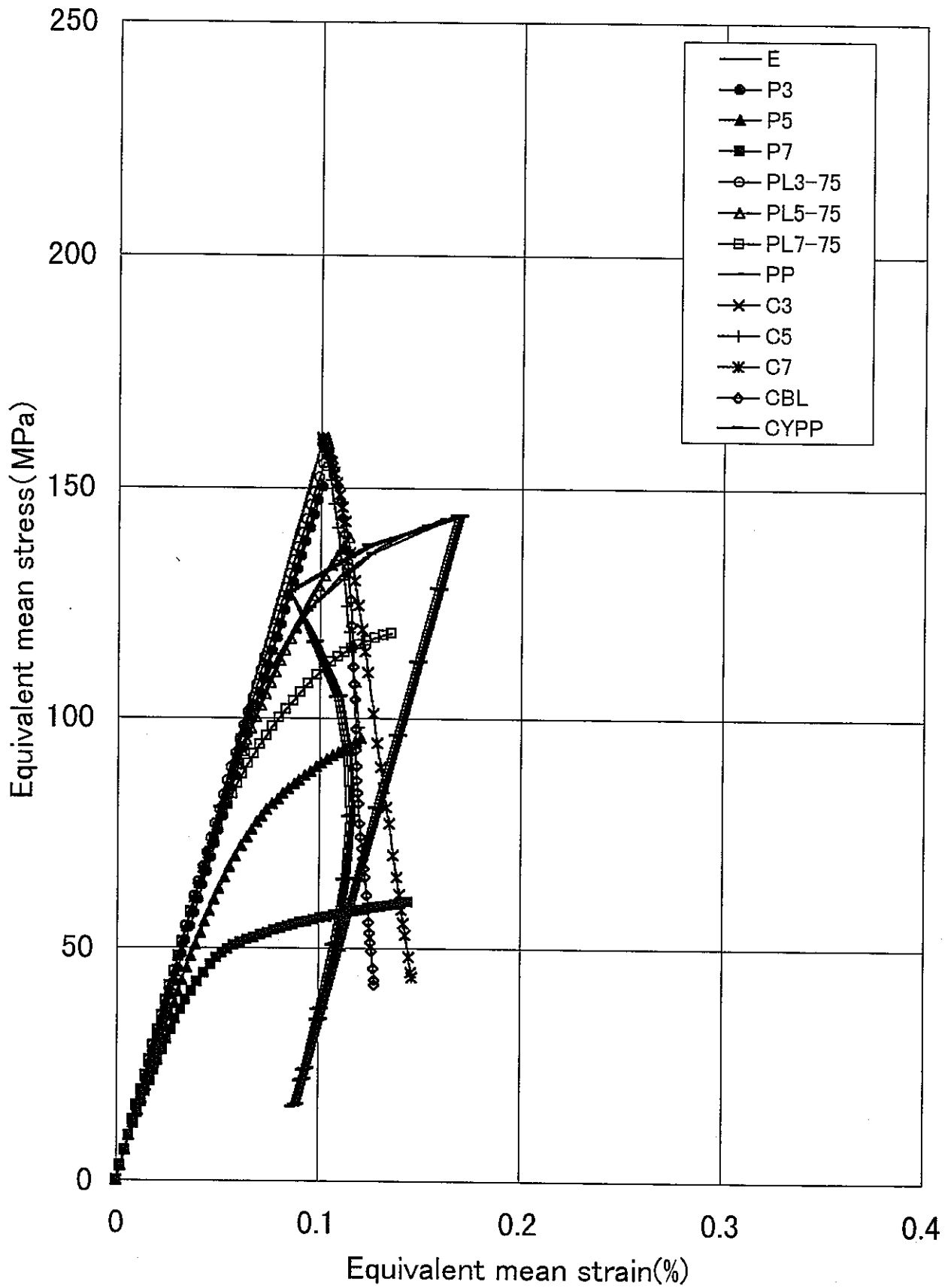


Fig.A15(b) Equivalent mean stress-strain curve along section B
 D/W = 0.5, (Displacement-Controlled Condition)

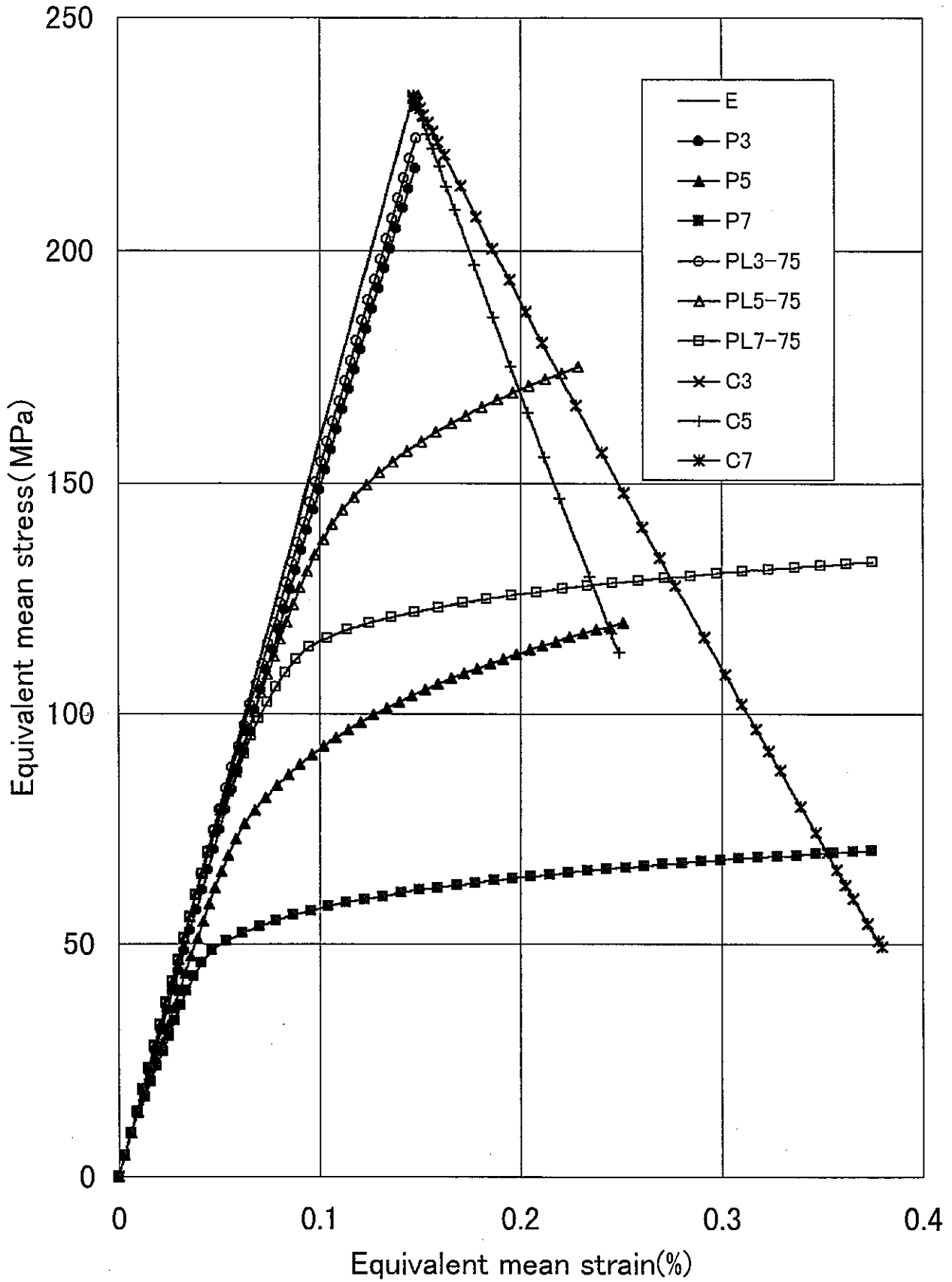


Fig.A15(c) Equivalent mean stress-strain curve along section B
 D/W = 0.75, (Displacement-Controlled Condition)

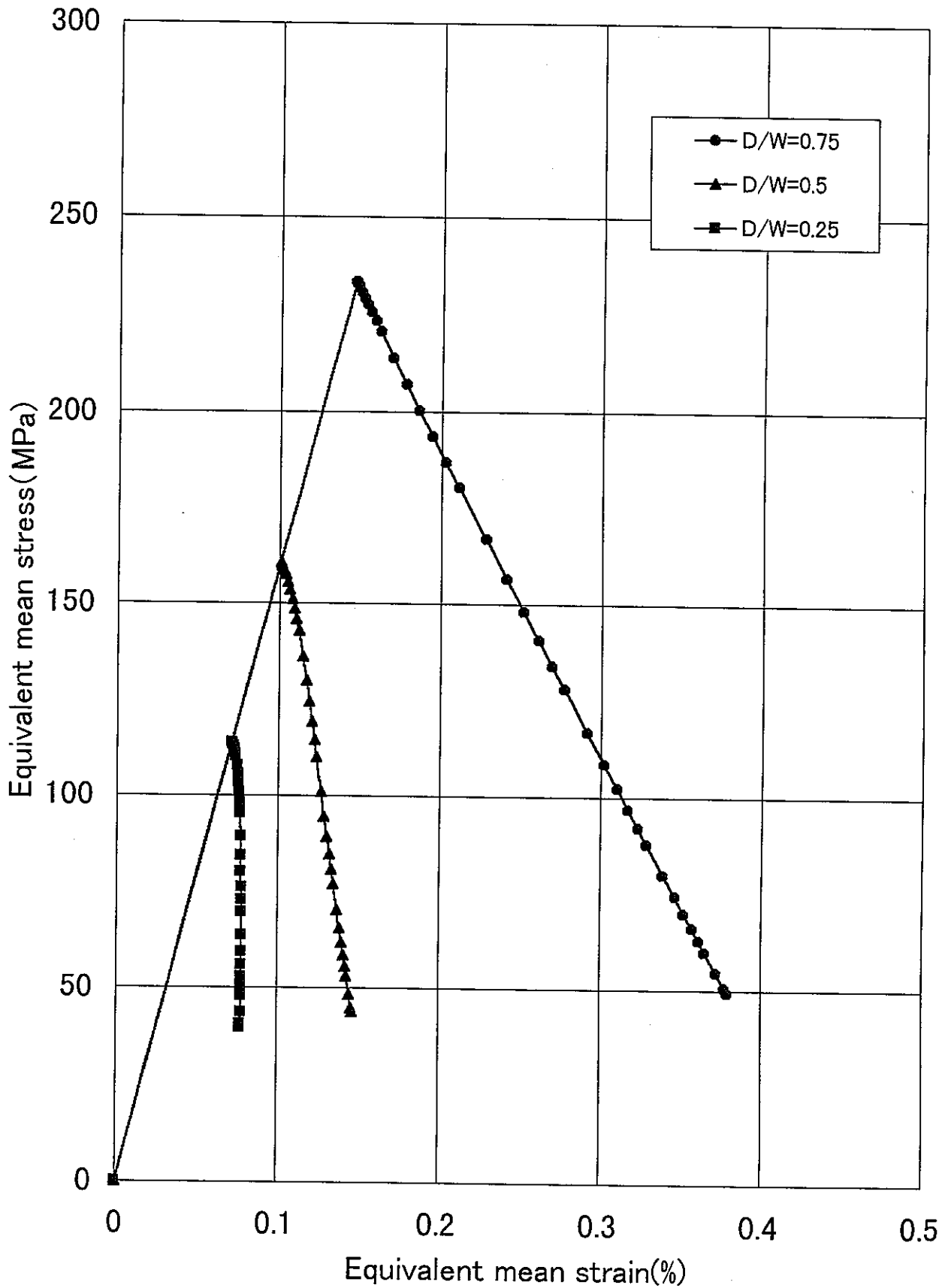


Fig.A16 Comparison of Equivalent mean stress-strain curve among the different models along section B (Displacement-Controlled Condition C7)

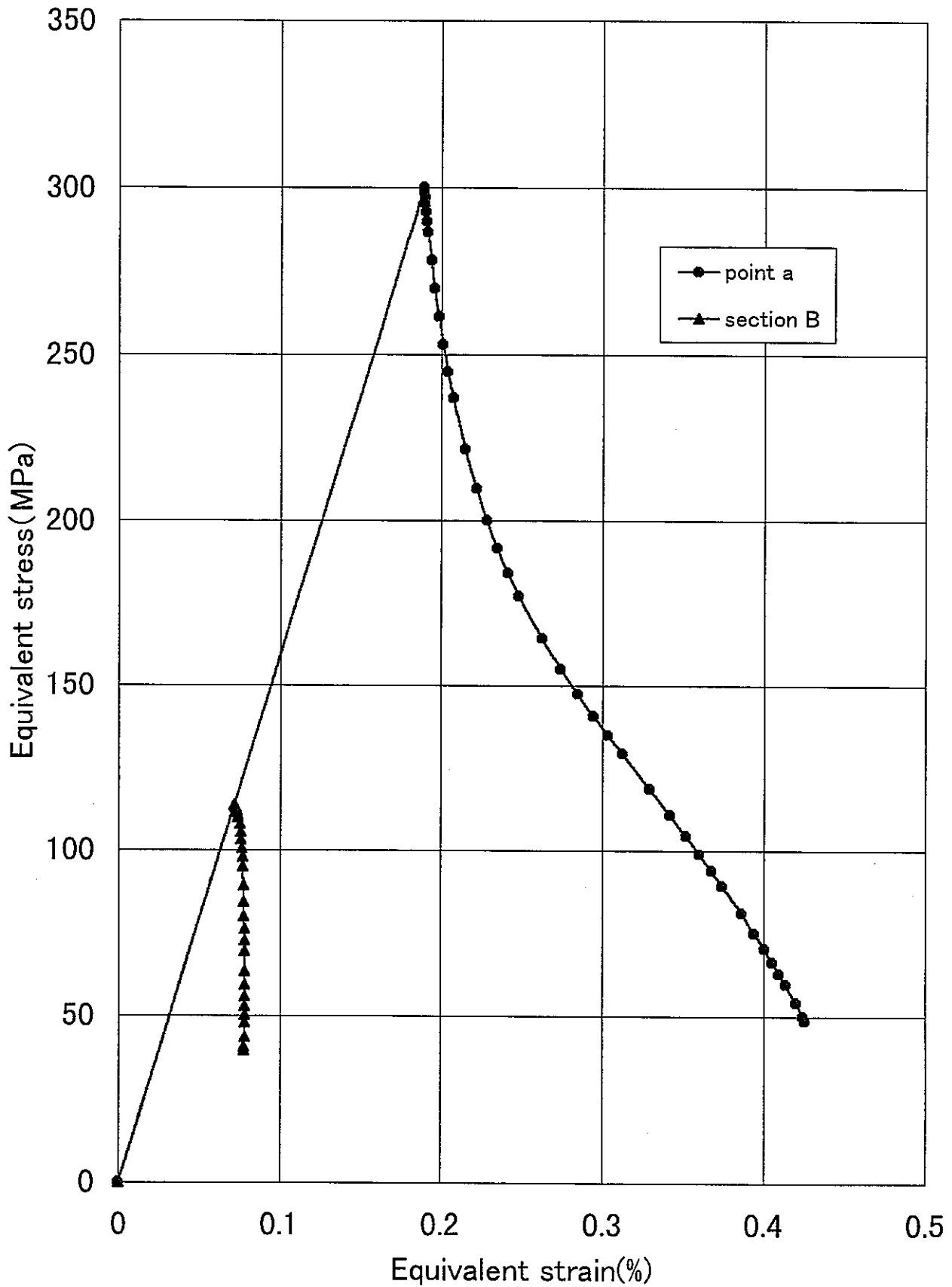


Fig.A17(a) Comparison of stress-strain curve between point a and section B
D/W = 0.25, (Displacement-Controlled Condition C7)

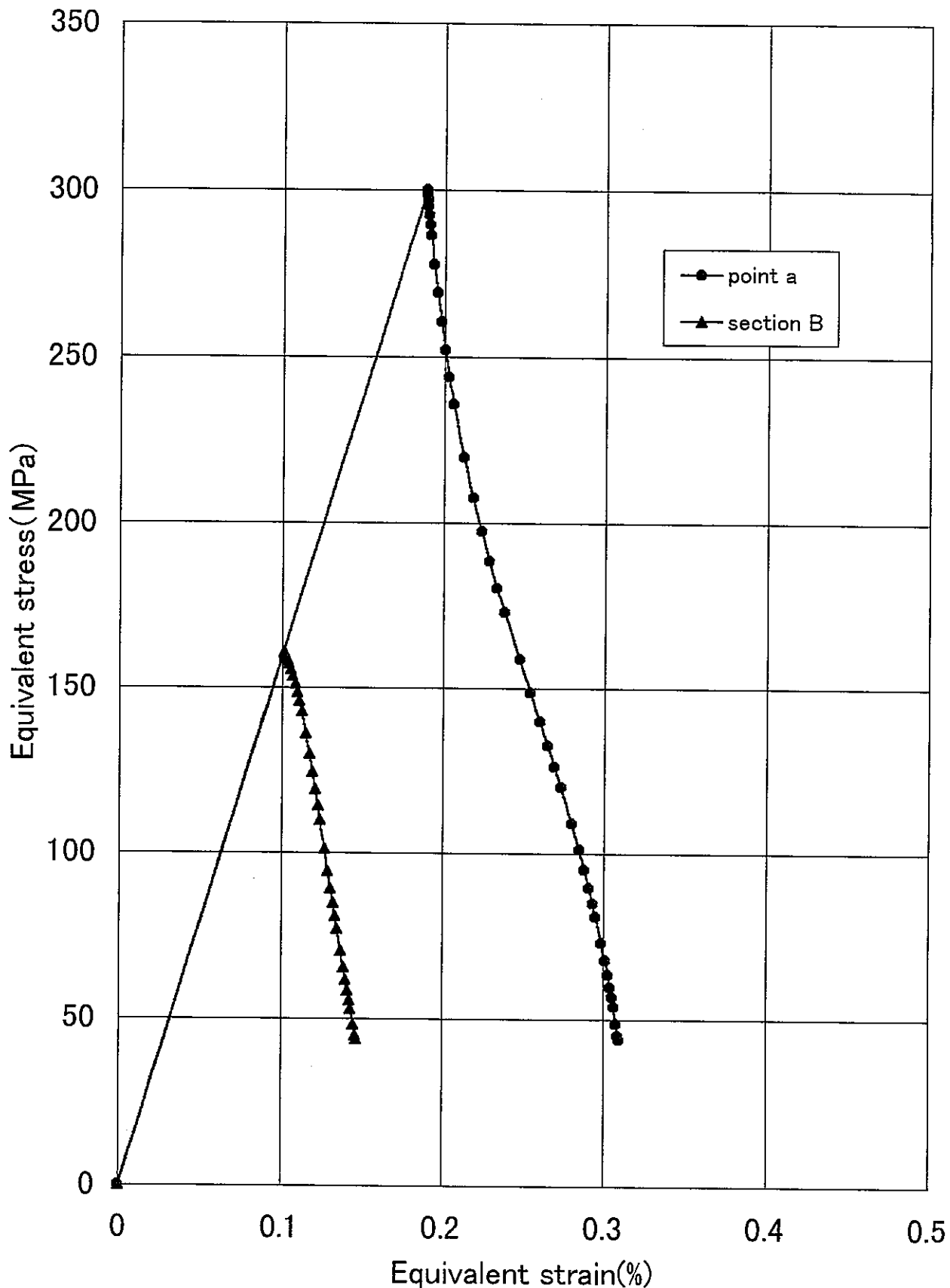


Fig.A17(b) Comparison of stress-strain curve between point a and section B
 D/W = 0.5, (Displacement-Controlled Condition)

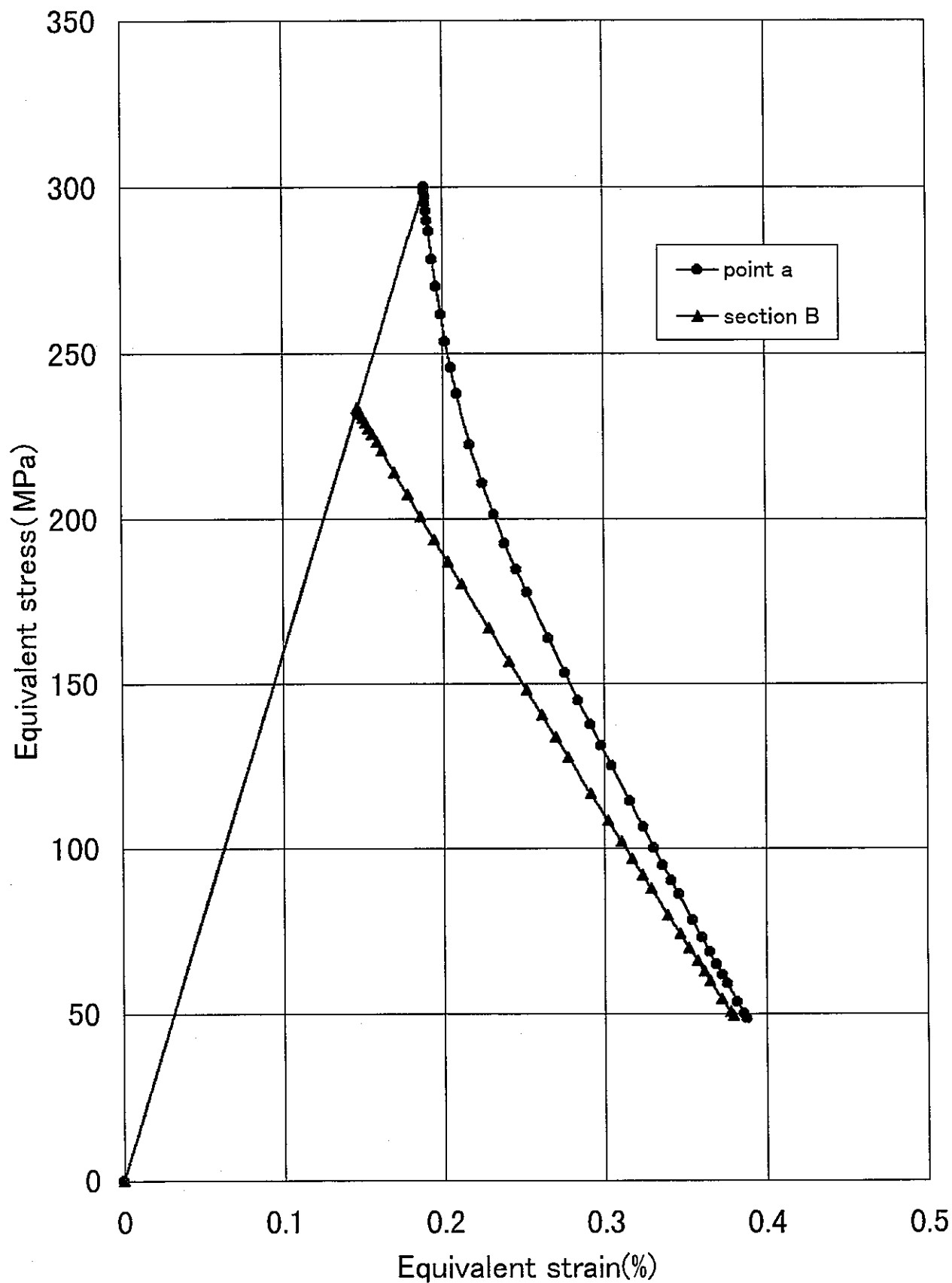


Fig.A17(c) Comparison of stress-strain curve between point a and section B
D/W = 0.75, (Displacement-Controlled Condition)