

# 高分子材料引張試験形状と応力-ひずみ曲線

日比貞雄・前田松夫・岡本誠・堀口泰郎・阿部健次

高分子工学科  
(1981年9月5日受理)

## Effect of the Shape of Polymer Specimen on the Results of Uniaxial Tensile Test

Sadao HIBI, Matsuo MAEDA, Makoto OKAMOTO, Yasuo HORIGUCHI and Kenji ABE

Department of Polymer Engineering

(Received September 5, 1981)

The effects of the shape of test specimen, belonging to three kinds of polymers PE, PB and polyester, on the stress and strain distributions as well as on the stress-strain curve during uniaxial stretch test are observed experimentally and analytically investigated with finite element method.

The results of the experiments and the investigations give a ground of the way of selection from standardized shapes of polymer specimens in JIS: i.e

1. dumbbell type (JIS No. 2) is adequate to the samples of PE and PB which show large deformation to the break.
2. the other dumbbell type with much shorter parallel part than JIS No.1 and No 2 is adequate to the samples of polymers having high stiffness.

### 1. 緒言

高分子フィルムあるいはシートの引張試験を行なう場合、それぞれの材料の試験片形状は JIS 規格<sup>1)</sup>で定められているダンベル形状を使用するのが通例である。各樹脂単体のフィルム及びシートでは、各々の高分子の種類について JIS 規格(形状)が定められているが、その理由及び各形状の利点については不明確で、経験的に形状決定されていると考えられる。さらに、高分子にガラス繊維や粒子等を充填した複合材料になれば高分子基材と、これら複合材との間には機械的性質の差異が著しく試験片のダンベル形状をどれにするかは、さらに不明確なのが現状である。

そこで本研究は、試料形状を選択するための理論的指針を得る第一段階として、硬度を異にする樹脂三種類を用いて、試料形状と一軸延伸時の応力-ひずみ曲線のあらわれかた及び試料内応力、ひずみ分布の進展状況の関係を検討し、これまで経験的に定められている試料形状の妥当性の是非を確かめたので報告する。

実験に際し、短冊状試料はその長さ:  $L$ 、及び幅:  $W$

の比を変化させると、 $L/W=6$  以上になれば、比較的クランプの把持の効果<sup>2)3)4)</sup>が薄れることが判明している。したがって短冊状の試料の比較的変形の小さい一軸延伸では、 $L/W$  の値を大きくとれば単軸均一応力下の変形として取扱うことが可能と考えられる。これに対し、ダンベル形状試料では応力、ひずみの集中が試料のくびれの部分から平行部にかけて生ずるので、試料形状により応力あるいは、ひずみの集中及び進展状況が異なり、各試験規格で定められているように平行部の標線間伸びからひずみを計算することの合理性について不明である。このような点を有限要素法解析(以後 FEM と略称する)を使用して、試料内応力、ひずみ分布の状況を計算し、応力、ひずみ分布から応力-ひずみ曲線を検討して、各高分子基材系に適切と考えられる試料形状の選択について報告する。

### 2. 実験

#### 2.1 実験用試料

高分子材料は硬度を異にする以下の三種類を使用した。特にゴム状高分子に近く、熱可塑性材料としてシンジオ

タクティック 1,2 ポリブタジエン (以後 PB と略称する) (日本合成ゴム株式会社製, RB 820, 結晶化度28%), 熱可塑性で中程度の硬度のものとして, 低密度ポリエチレン (三菱油化株式会社製, Yukalon PK-30,) (以後 PE と略称する) 及び高分子材料としてはもっとも硬く, かつ延性のない材料として熱硬化性ポリエステル (大日本インキ化学工業株式会社製, ポリライト FH-123-W) (以後 PE<sub>s</sub> と略称する) を使用した。

PB 及び PE 試料はプレス成型法で厚さ 1mm のシートを製作した。成型条件は圧力 50kg/cm<sup>2</sup>, 成型温度 150°C±1°C で行ない, 成型後水中に急冷したものを試料とした。

一方 PE<sub>s</sub> はポリライト 50cc に対し, メチルエチルケトンパーオキシド 0.35cc を加え, 30°C に保った恒温槽中で 15~20 分間攪拌し, 脱泡した後, 温度 50°C に保った加圧プレスの金型に流し, 圧力 10kg/cm<sup>2</sup> で, 厚さ 1mm のシートを製作し, 一次硬化後後述する各試料形状に打ぬいてから, 二次硬化は 40°C の恒温槽中で 60 分間行なって試料とした。

2.2 一軸伸張試験

まず単軸均一応力下を仮定できる引張試料形状として (L/W=10, クランプ間:L=10cm, 幅 W:1cm) を各高分子材料で使用して, それぞれの応力-ひずみ曲線から有限要素法に使用する材料特性データを得た。次に JIS 規格の形状を有する試験片について一軸引張試験を行っ

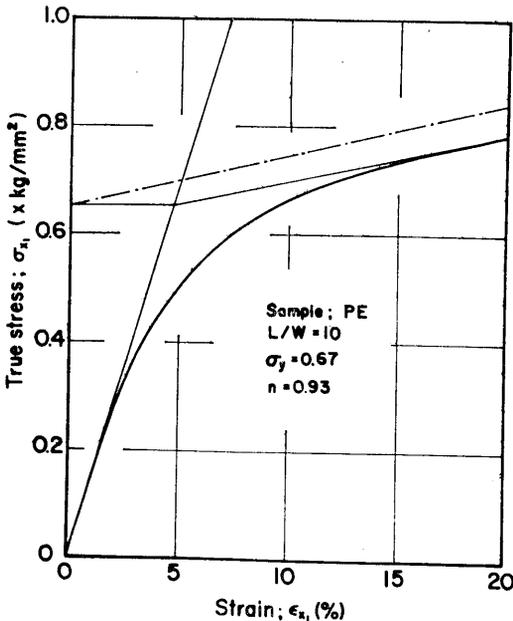


Fig. 1 Stress-strain curve of PE specimen: L/W = 10.

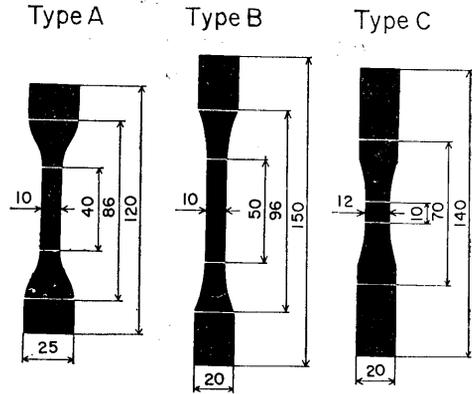


Fig. 2 Three types of dumbbell testpiece used in tensile testing.

た。伸張試験機は Tensilon UTM-5T (東洋ポールドウイン製) を使用し, 温度 23°C±1°C, 湿度 65%±2% の恒温恒湿下で測定した。伸張速度は PB 及び PE の場合 5mm/min で伸張したが, PE<sub>s</sub> の場合変形量が小さいので伸張速度は 0.5mm/min とした。

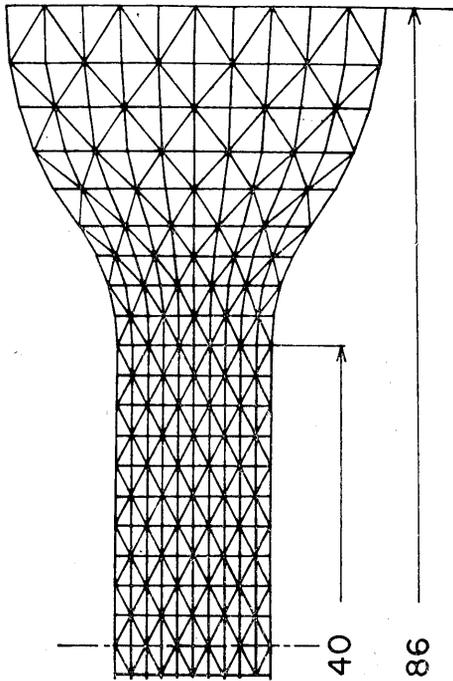
矩形形状試料の引張試験結果の一例として, PE 試料の応力-ひずみ曲線を Fig. 1 に示した。この図及び同じように PB 及び PE<sub>s</sub> に対しても単軸応力下を仮定してヤング率, 降伏応力  $\sigma_y$ , 及び硬化率  $n$  等を決定し有限要素法解析のインプットデータ (Table 1 参照) とした。一方, ダンベル試料は Fig. 2 に示す Type A (JIS 2 号形), Type B (JIS 1 号形) 及び Type C (現在は規格にない) を使用して, それぞれの高分子試料を上記の伸張速度で伸張し, PB 及び PE の場合試料中央部の端の標線間を写真によって追跡し, ひずみを求めるとともに, この標線間の変形を体積一定の変形と仮定して応力の換算を行ない, 真応力-ひずみ曲線を得た。

一方, PE<sub>s</sub> 試料は変形量が小さいので公称応力, クランプ間変位よりのひずみを採用した。

3. 有限要素法による試料内応力-ひずみ曲線と応力, ひずみ分布の解析

有限要素法解析は, 山田<sup>9)</sup>の方法を異方性材料再延伸時の応力-ひずみ曲線及び試料内応力-ひずみ分布の解析用<sup>9)7)8)</sup>に拡張したプログラムにより名古屋大学大型計算機 (Facom M200) により行なった。計算法は文献5) に詳述しているので簡単にのべるが, Fig 1 に示すように応力-ひずみ曲線を弾塑性近似して構成方程式をたて, 試料内の要素分割は, 一例として Type A (Fig. 3 参照) を示す要素数760個, 接点数429個とした。

インプットデータは Table 1 の各材料定数 (L/W=10)



Type A dumbbell      Element; 760  
Node; 429

Fig. 3 Division of the finite element in Type A dumbbell.

Table 1 Material constants used in the finite element method. (Kg/mm<sup>2</sup>)

	PB	PE	PE <sub>0</sub>
C <sub>11</sub>	4.37	1.63 × 10	2.58 × 10 <sup>2</sup>
C <sub>22</sub>	4.37	1.63 × 10	2.58 × 10 <sup>2</sup>
C <sub>66</sub>	1.09	4.90	0.84 × 10 <sup>2</sup>
C <sub>12</sub>	2.19	6.54	0.90 × 10 <sup>2</sup>
σ <sub>y</sub>	3.66 × 10 <sup>-1</sup>	6.72 × 10 <sup>-1</sup>	3.17
n	6.7 × 10 <sup>-1</sup>	9.30 × 10 <sup>-1</sup>	2.26 × 10 <sup>2</sup>

を用いて、それぞれの形状試料について計算を進めた。

#### 4. 実験結果と計算結果の比較

##### 4.1 試料の応力-ひずみ曲線

実験データの比較の上で、よく用いられる公称応力-ひずみの曲線で見ると、その試料形状によって、どのように差異があらわれるかを示す一例として、PEの例をFig. 4にあらわした。比較の変形量の少ない領域では3者の差異はみとめにくいのに対し、変形が進み塑性変形があらわれはじめると Type A, B, C の差ははっきり

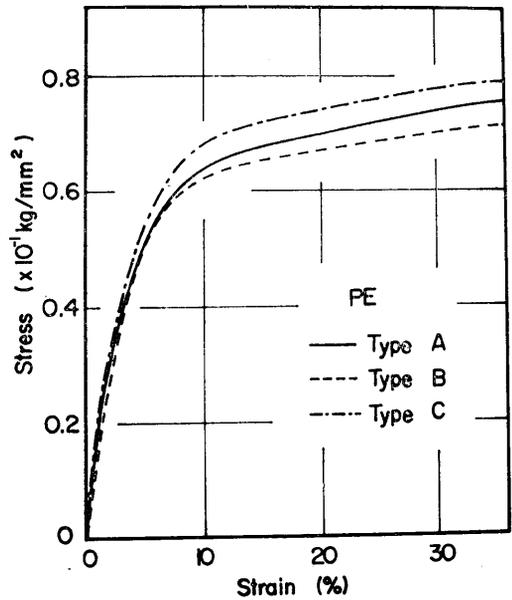


Fig. 4 Nominal stress-strain curves in tensile tests of three types of dumbbell testpiece; PE.

とあらわれはじめ、平行部の少ない順に同じひずみに対する応力値は高くなっている。これは、後ののべるように試料内での応力集中が顕著にあらわれる試料の応力が最も高くなるものと理解され、これは、局部的なひずみ硬化があらわれる例といえよう。

この公称応力-ひずみ曲線をそれぞれの材料系について前述のように、真応力-ひずみでプロットしなおした場合を Fig. 5 (a), (b) 及び (c) に示した。(Fig. 5 (c) に示した PE<sub>0</sub>の場合、規格として用いられているものが Type B, 以前用いられたものが Type C であることから、この両者の公称応力-ひずみ曲線で比較する)

もっとも軟かい PB の場合、測定される応力-ひずみ曲線は明確な変曲点が認められない、一方図中に有限要素法解析により求めた応力-ひずみの各変形段階でのプロット点を○印で示したが、Type B, C の場合、計算より求めた応力-ひずみのプロットには、明確な変曲点が認められる。これに対し Type A は両者が非常に近く、いずれも明確な変曲点を持たない。この Type A と Type B, C の挙動の相違には二つの理由が考えられる。① 計算では、クランプ把持部は完全接着型として理想化した。② 標線間の応力、ひずみにに対し、クランプ近傍の両者の値の差が小さい場合、PB のように大変形材料では、クランプ部よりの試料の滑り出しによる反力の低減が相対的に拡大して評価される。このような理由によれば PB の場合、変形量が大きくなって試料中央部の応力、ひずみがクランプ近傍よりはるかに大きい Type A 試料

形状では試料の滑り出しは、ほとんど認められず、①の条件に近い結果となり、したがって両者の挙動が似てくるものと考えよう。(これらの点については改めて、試料内の相当応力  $\sigma$  の進展状況で言及する)

次に PE の場合について考えよう。この材料は、結晶粒子内粒子間滑りに塑性変形が明らかな高分子で、その開始されるひずみも PB の半分以下と比較的小さい。このような試料では、その試料形状によるクランプよりの滑り出しは PB にくらべ減ぜられるので、実測と計算の曲線は比較的近いものとなってあらわれよう。ただ、問題として取上げなければならない点は、塑性変形の進展が測定に使用した標線間での確にあらわれうるか否かが、計算と実測の差異になってあらわれうると考えられるので、この点については試料内応力、ひずみ分布の考察の項にゆずる。

最後に、ひずみ量の非常に少ない PE、についてみてみる。公称応力-ひずみ曲線 (Fig. 5 (c) 参照) は計算で求めたものとよく一致しており、試料形状により差異は認

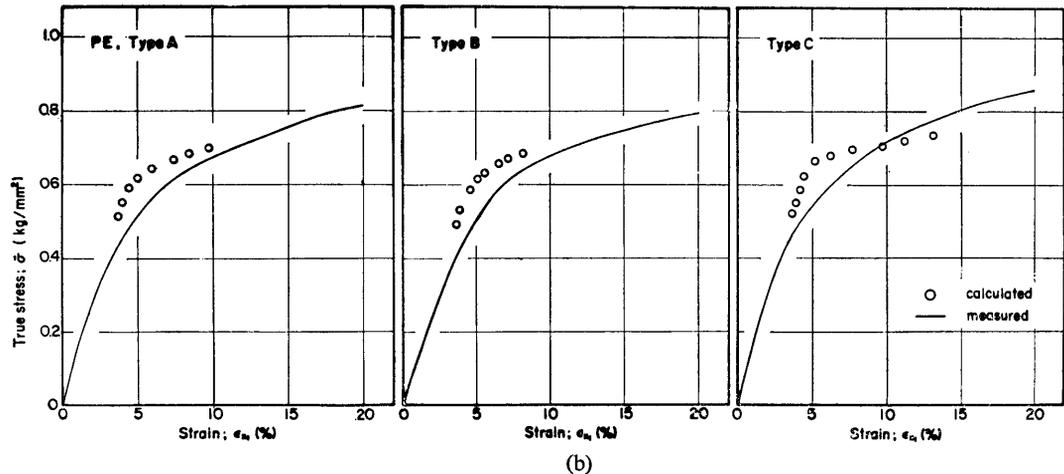
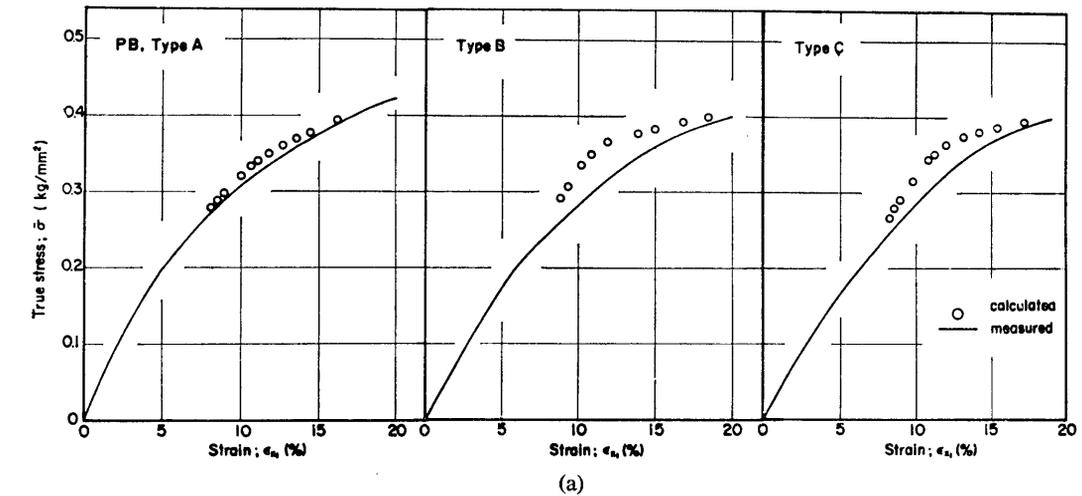
められず、ひずみの小さい高分子では試料中央近傍に応力集中できる形状であれば、充分であると結論できよう。

#### 4.2 試料形状と試料内応力、ひずみ分布

ここでは、応力-ひずみ曲線に及ぼす試料形状の効果をもう少し厳密に検討すべく、それぞれの試料系で、試料形状による塑性変形の進展の様子を検討し、標線間のひずみの追跡が適正なものか否かについて言及する。

##### a) PB 試料の応力分布の進展状況

Fig. 6 (a), (b) 及び (c) に PB の場合の各試料形状を異にする試料のひずみ (図中の  $E_x$  は有限要素法解析で求めた標線間の平均垂直ひずみをあらわす。) の増加とともに試料内相当応力  $\sigma$  の分布を示したものである。(なお、Fig. 2 にも示したように試料は上端固定、下端を変位させる方式の上下非対称変形が、一般の引張試験の方式である。又、図中の黒くぬりつぶした箇所は、試料内で塑性の領域に達していることを示す応力レベルの高い領域を示す。)



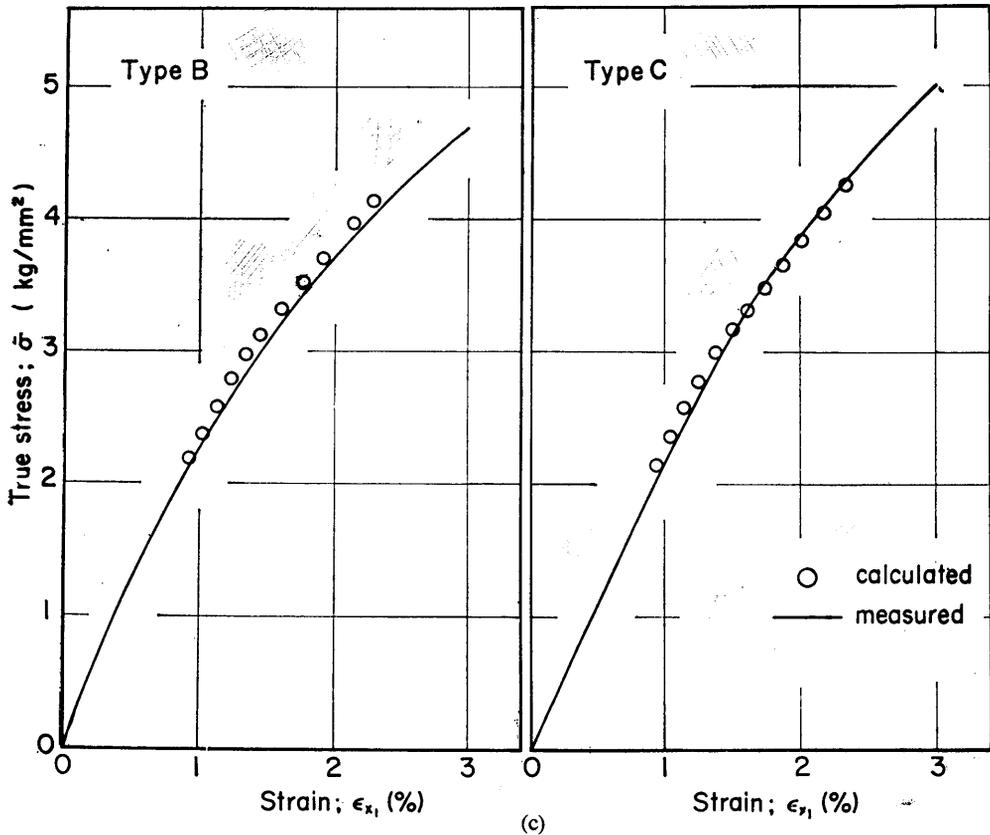


Fig. 5 Stress-strain curves with three types dumbbell  
(a) PB, (b) PE, (c) PES.

Type A の場合、変形初期に上部標線の内側（中央寄り）に塑性域があらわれ、それが中央に発展するのとさらに中央部より下側にも塑性域があらわれ拡大しているが、いずれも、標線間で塑性変形が進行していることが判る。これと良く似た応力分布は、Type B にもみられる。しかし、Type A と B の相違は、試料端と中央平行部の応力レベル差である。すなわち Type A では  $2 \sim 2.5 \times 10^{-1} \text{ kg/mm}^2$  以上の差が認められるのに対し、Type B では  $1 \sim 1.5 \times 10^{-1} \text{ kg/mm}^2$  と少ない。これは変形の大きい PB の場合にはクランプより（変形にともなう厚さ減少にともなう）の試料の滑り出しがあらわれやすい例が Type B といえよう。

一方 Type C では標線の外側に応力集中（局部的にひずみの大きい部分）が認められ、標線間へ塑性変形が拡大するのは非常に遅れる。これは、標線間のひずみと応力が真に対応できない悪い例といえよう。

このような結果が、Type C の場合の応力-ひずみ曲線が計算と実測の違いを顕著にするものといえよう。また、Type C も Type B 同様試料端と中央部の応力差が

小さいため、前述のような滑り出し現象が考えられ、結局、応力ひずみの高い部分を中央平行部分に適切にもたらしうる形状として PB のような大変材料では Type A と結論できよう。

#### b) PE 試料の応力分布の進展状況

PB 試料に比べ変形量が少なく、かつ塑性変形が比較的明確にあらわれるので、PE の場合、応力-ひずみ曲線は、Type A, B に差は明瞭に反映しないので、ここで、試料内応力分布から両者の比較を行なってみよう。Fig. 7 (a), (b) 及び (c) にそれぞれタイプの変形にともなう応力分布状態を示した。

Type A の場合、PB のときと同様、上側標線付近より中央部へ塑性変形が拡大し、標線間のひずみ追跡が妥当なものとなっており、この点は Type B でも満足されている。ただ、両者の違いは PB のところでのべたように試料中央部と試料端の応力レベル差の大小で、やはり Type A の方が応力差は大きく、変形を大きくしてもクランプよりの滑り出しは Type A の方が少なくなることが考えられる。したがって中程度の伸びを示す PE の場

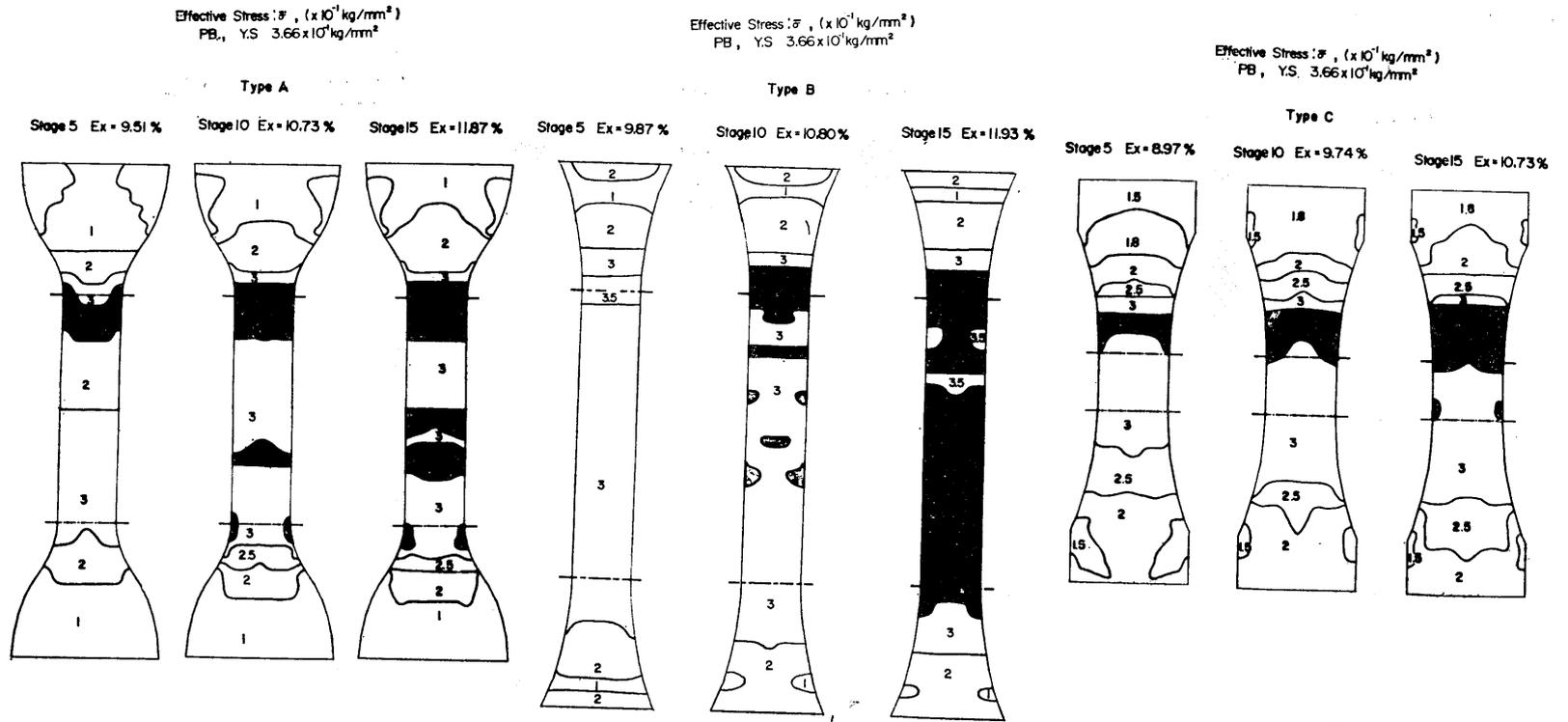
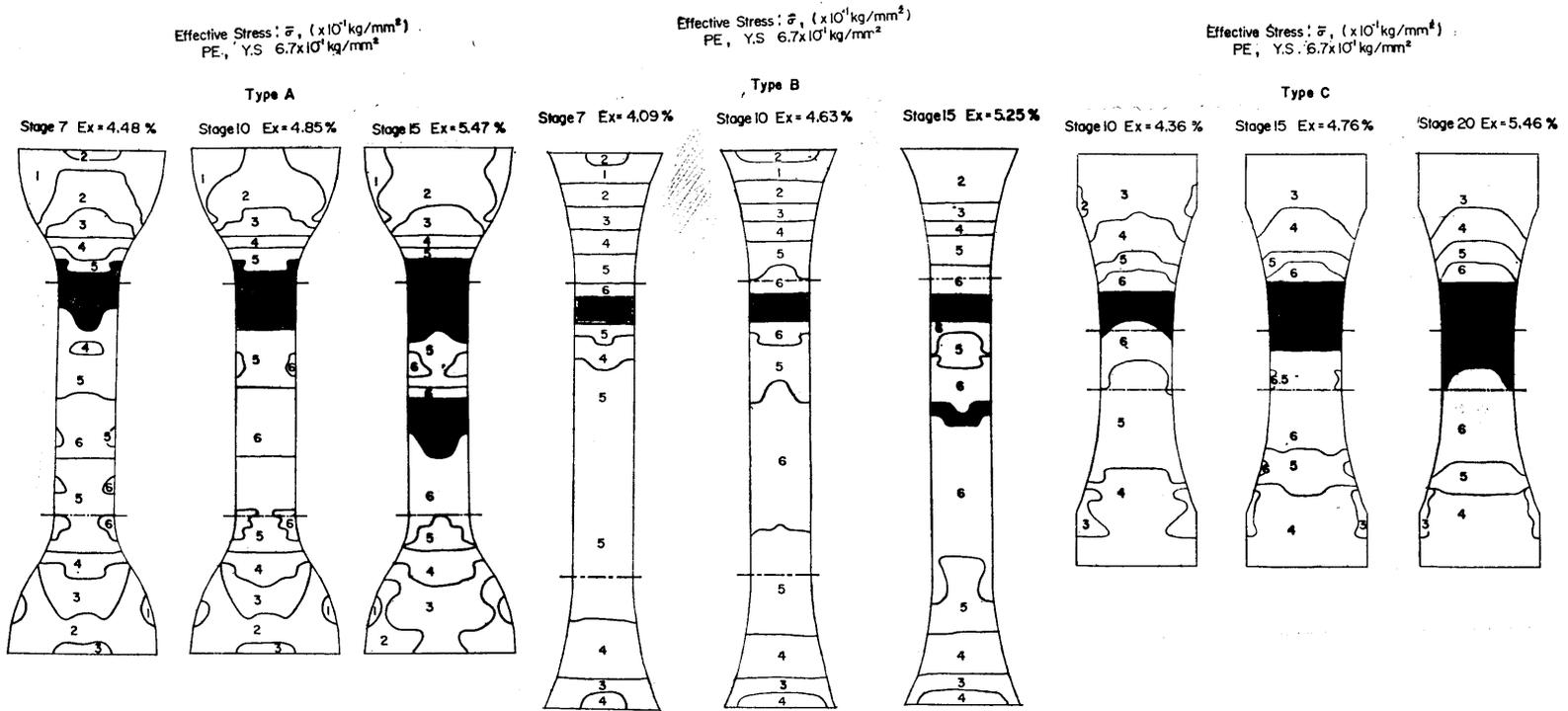


Fig. 6 Changes of effective stress distribution in the PB dumbbell testpieces with displacement; (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C,



**Fig. 7** Changes of effective stress distribution in the PE dumbbell testpieces with displacement;  
(a) Type A, (b) Type B, (c) Type C.

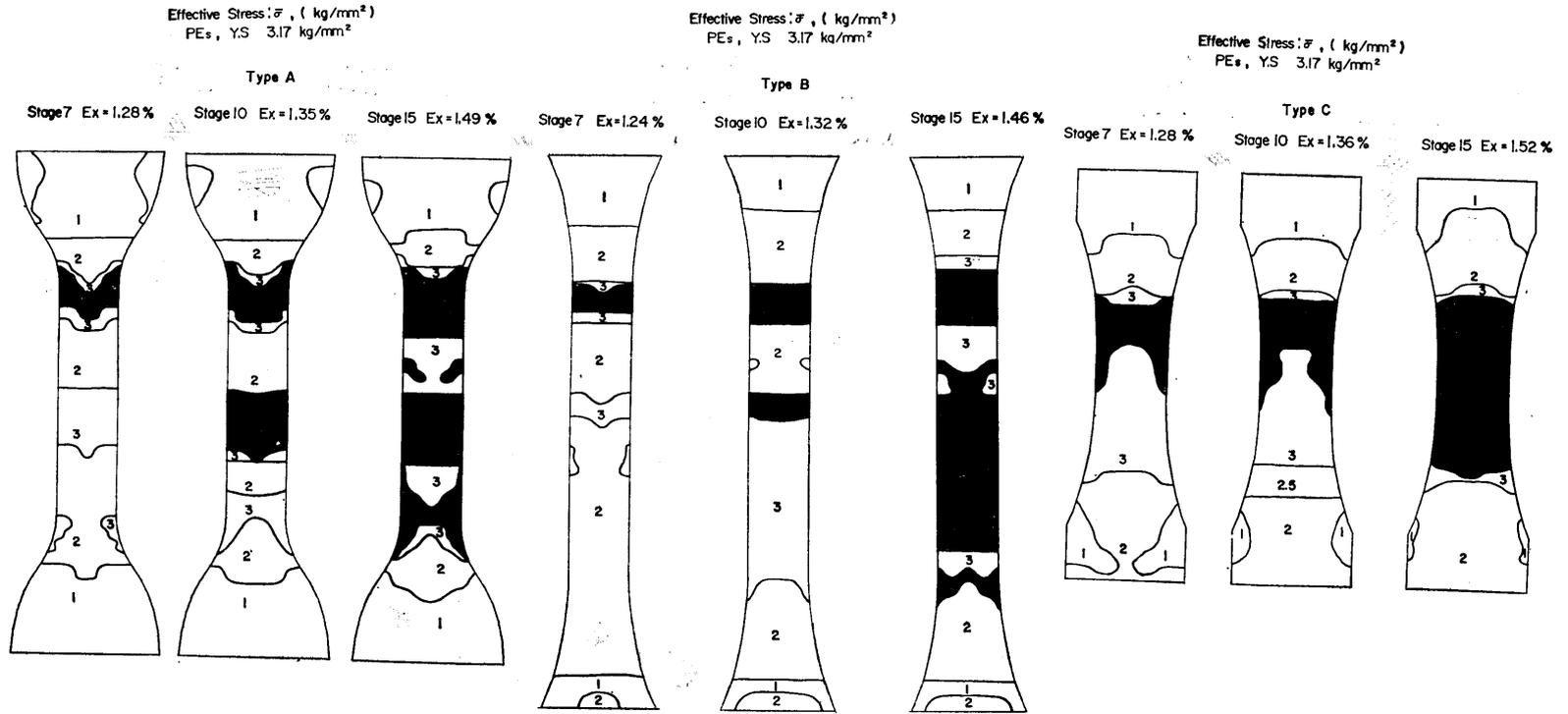


Fig. 8 Changes of effective stress distribution in the PES dumbbell testpieces with displacement;  
(a) Type A, (b) Type B, (C) Type C.

合も標線間応力分布の進展状況が同程度の両タイプである A, B をくらべると, A を使用する方が妥当といえよう。

一方, Type C はやはり標線の外側より内部へ拡大する様式は PB と同様で, 標線追跡を行う上で不適格な形状である。

c) PE<sub>2</sub> 試料の応力分布の進展状況

変形時のひずみが非常に少ない例として PE<sub>2</sub> 試料の各試料形状の応力分布状況を Fig. 8 (a), (b) 及び (c) に示した。

ひずみが小さい領域での破壊を起すため, 標線間追跡による補正が無理な試料であり, このような材料では公称応力, クランプ間変位によるひずみで表現せざるをえない。したがって, このような場合, 試料内応力分布に大きな差のあらわれる形状, すなわち Type A のように応力差の大きい形状は不均一変形することが計算からうなづけよう, これに対し Type B 及び C は応力差が小さい点では同等である。しかし Type B は平行部の長さが長いため, 破壊にいたるときの破壊点が定め難いきらいがある。これに対し, Type C の場合, 応力集中点固定し中央部へ応力レベルの高い状態が拡大し, その結果, 中央部での破壊が固定できる試料形状といえよう。

4.3 短冊状試料応力-ひずみ曲線とダンベル試料平行部より求めた応力-ひずみ曲線

Fig. 9 に例として PE 試料の場合の L/W=10 の応力

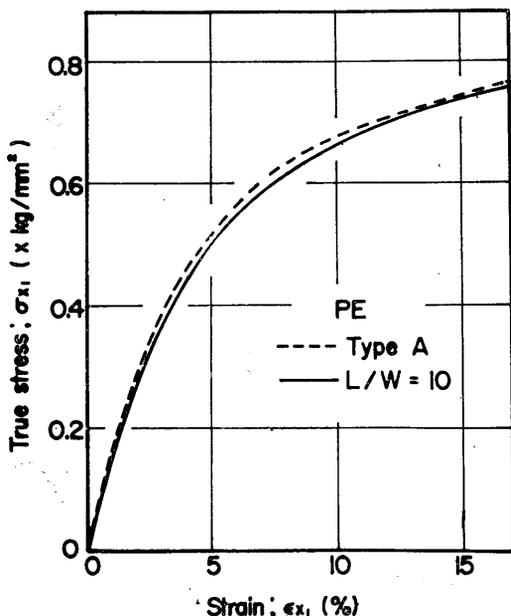


Fig. 9 Comparison between two stress-strain curves; dumbbell Type A and rectangular type L/W = 10, PE.

-ひずみ曲線と Type A 試料の真応力換算した応力-ひずみ曲線をそれぞれ実線と破線で示した。両曲線によく似かよっており, L/W=10 のように単軸均一応力下を仮定できるような長い試料形状とダンベルの平行部で標線追跡した結果が似ていることは, 試料として, ダンベル平行部追跡の有効性を証したものと見え, 特に破壊にいたる変形量が大きい PB 及び PE 試料では, 特に Type A 試料が有効な試料形状であるといえよう。

5 結 論

高分子材料を伸張する場合に使用されるダンベル試料形状がそれぞれ JIS, ASTM など規格化されているが, その規格の有効性を有限要素法解析による試料内応力分布の進展状況から調査し, それぞれ次の結論をえた。

1) 破壊迄にいたる変形量が大きい PB 及び PE 試料の場合等には, クランプ幅と平行部幅の比が大きい, Type A 試料形状が有効である。

2) 変形量の小さい熱硬化性樹脂の場合には, 試料中央部に高い応力レベル域をもたらすことが可能な Type C 試料の方がむしろ有効である。

3) ダンベル試料でも平行部標線追跡を行えば, 単軸下の応力-ひずみ曲線に近づけることが可能になる。

付記 本研究は昭和 54, 55 年度文部省科学研究補助金, 一般研究 (B) に負うことを付記し, 謝意を表す。

文 献

- 1) 日本規格協会編, JIS ハンドブック プラスチック, 11. P.334, K7113 (1980)
- 2) 平田慎治, 名工大修士論文
- 3) 前田松夫, 日比貞雄, 山名崇弘, 光石一太, 林拓己, 繊維学会昭和53年年次大会研究発表講演要旨集, P. 225 (1978)
- 4) R. R.Rizzo, J. Composite Mater., 3. 202 (1969)
- 5) 日比貞雄, 前田松夫, 山名崇弘, 光石一太, 村井博, 材料, 30, 770 (1981)
- 6) 山田嘉昭; コンピュータによる構造工学講座, II-2, A, “塑性・粘弾性” P. 173 培風館 (1972)
- 7) 平田慎治, 日比貞雄, 加藤美治, 前田松夫, 高分子学会予稿集, 25, 5, P.889 (1976)
- 8) 日比貞雄, 前田松夫, 繊維学会昭和54年年次大会研究発表会講演要旨集, P. 202 (1979)