硬質塩化ビニール板の機械的性質について*

—引張および圧縮試験における特性—

中 川 有 三** 奥 田 聡**

An Experimental Research on the Mechanical Behaviour of Unplasticized Polyvinylchloride Sheet

Yūzō NAKAGAWA and Satoshi OKUDA

Mechanical properties of unplasticized polyvinylchloride under tension and compression were reported in this paper. The following results were obtained:

(1) This material shows a distinct yield point and the strain corresponding to this point becomes larger as the testing temperature becomes low, and reaches the maximum value at about $0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{C}$.

(2) The stress-strain curve up to the yield point is affected remarkably by the testing temperature and strain velocity which also greatly affect the total elongation at the breaking point.

(3) Regarding the process of cross-necking, a peculiar type of deformation is observed as shown in Fig. 12.

(4) A secondary test was made at a different temperature on a specimen stretched primarily at a certain temperature and the mechanical properties were examined.

a) Properties of the specimen stretched previously at a high temperature up to the yield point are in the second low temperature test not affected by the previous treatment.

b) When the primary elongation at high temperature is greater than the breaking elongation at low temperature, the specimen shows no new necking deformation in the second test (low temperature test) and is fractured in a brittle manner.

c) On the contrary, the specimen stretched previously at low temperature over the yield point, shows in the second stretching at high temperature no yield point and deforms according to its original stress-plastic deformation curve.

1. 緒 論

硬質塩化ビニールは装置および構造用材料として最近ますますその用途を拡大しつつあるが、その機械的性質は概略値しか与えられていない。プラスチックの通性として、温度および変形速度の影響を受けることが大きいことはもちろんであるが、引張および圧縮における本材料の機械的性質が、これらによつていかに変化するかは詳しく知る必要がある。筆者らは硬質塩化ビニールシート(厚さ約3mm)の高温ならびに低温における各種の機械的性質を調べてきたが、ここでは静的引張および圧縮試験における変形特性、さらに温度ならびに荷重の変動が履歴として、この材料の機

械的性質におよぼす影響について報告する。

2. 実験装置ならびに試験片

本研究に用いた試験片は長浜ゴム工業株式会社製のもので、次の配合による。

配合	PVC(商品名オパロン, P; 1150)	100部
	Tribase, DS-207 等安定剤	5部
	滑 剤	極く僅少
	可塑剤	0部

上記配合物をロールにて混練し、約1mm厚の素材シートを作り、これをプレス積層して、 $1\text{m}\times 2\text{m}\times 3\text{mm}$ の板を作るが、引張試験片はこの板の周辺を除いた中央の部分より採取したもので、ASTM規格に準じて定めたFig.1のような寸法の試験片を用いた。圧縮試験は20mm厚さの板より同じように採取し、旋

* 原稿受付 昭和31年5月24日, 昭和31年5月16日 第5期総会講演会において講演

** 正員 京都大学工学部

Fig. 1. Test piece.

盤で径 15 mm, 高さ 20 mm の円筒に仕上げた。

試験機はアムスラ万能試験機で、高温および低温試験に際しては、高温槽および低温槽を取り付けて実験を行った。Fig. 2 は引張試験用高温槽を示す。試験片は新たに製作したつかみに固定され、試験片を囲む薄板の金属円筒を通して、槽内に懸垂されたヒーターによつて間接的に温められる。ヒーター 2 箇所はそれぞれ別個に切替え調節が可能である。また、電圧調節器により電源電圧を降下させ、相当時間をかけると槽内の温度がその調節電圧に従つて定常状態に達し、容易に長時間その温度に保つことができることに着目して温度調節を図つた。試験片附近の温度分布もだいたい均一で $\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲内で一定温度に保つことができた。

Fig. 2. Air conditioning chamber (high temperature).

Fig. 3. Compression tool at high temperature.

Fig. 3 は高温圧縮試験装置を示す。電源電圧調節による前と同様な温度調節方式を用いた。変形量はダイヤルゲージを用いて 1/100 mm まで読んだ。次に、低温装置として Fig. 4 に示す装置を用いた。ドライアイスのアセトンに浸漬して急速に気化させ、冷媒液メタノールを冷却する。メタノールは魔法瓶中に貯蔵し、ポンプをもつて冷却管中を循環させる。冷媒液メタノールは -60°C まで充分冷却することができた。引張試験機に取りつける低温槽はコルク二重箱で、前記の低温装置を用いて -40°C までの低温試験を行うことができた。Fig. 5 は低温圧縮試験装置を示す。試験片は前記低温装置の冷媒液により直接冷却される。変形は同じくダイヤルゲージで 1/100 mm まで測定した。引張試験における変形量は、降伏点を越えた伸びの大きい部分に対しては、divider と物差、または自記装置により 1 mm の単位まで読んだが、降伏点以下の伸びの割合小さい部分に対しては、マルテンス、オクイエン、フッゲンベルガー、電気抵抗線歪計などの普通の金属材料測定用の歪計では敏感すぎて、このような伸びの大きい材料の歪測定には不適當である。本研究においては Fig. 6 に示すような電気抵抗線歪計を利用した π 型ゲージを用い、所期の目的を達した。ナイフエッジになつた両足間の距離は標点距離となり、標点距離の伸長に従つてゲージを貼附した磷青銅板は曲げを受ける。磷青銅板の厚さを変えることにより、適當な感度をもつて試験片の変形量を測定することができ

Fig. 4. Chilling unit.

Fig. 5. Compression tool at low temperature.

Fig. 6. π gage.

る。本研究において、この歪計の試験片に対する反力は 10 kg 以内で、測定荷重に較べて無視しうる。

3. 引張応力-歪関係

引張試験において、Fig. 7 に示すように、荷重を加えると変形量は増大し、最高荷重の点に至る。この点は炭素鋼の降伏点に似た性質を有し、この点に至ると試験片表面に 45° の方向に明確なすべり線が現れ、明

Fig. 7. Loading and unloading curve of rigid PVC at various temperature (strain velocity $\dot{\epsilon}=0.15/\text{min}$) (by tension test).

Fig. 8. Tensile strength versus strain velocity.

確な降伏点を有する緩慢な降伏現象を呈するとともに局部収縮を開始する。さらに、負荷しつづけると、後述のような変形を示し、応力-歪曲線、あるいは塑性曲線を形成する。上降伏点を越えたそれぞれの歪のところで除荷し、再び負荷すると、Fig. 7 に示すような履歴曲線を描き、ほぼ金属材料のそれと同じ傾向を示す。Fig. 8 は引張試験において、引張速度と抗張力との関係を示す。引張速度のきわめて緩慢な場合にはかなり抗張力の減少が予想される。Fig. 9 (1), (2) は π 型ゲージによる降伏点に達

Fig. 9. (1) Stress-strain curve up to yield point (Tensile speed $\dot{\epsilon}=0.075/\text{min}$, gauge length 35 mm).

Fig. 9. (2) Stress-strain curve up to yield point (Tensile speed $\dot{\epsilon}=0.15/\text{min}$, gauge length 35 mm).

Fig. 10. Plastic curve by compression at various temperature. (Strain velocity = 0.3/min).

Fig. 11. Plastic curve by compression at various strain velocity.

するまでの応力-歪関係を示す。この範囲は主として純弾性および遅延弾性による範囲で、温度および歪速度の影響をうけることが大きい。降伏点に対する歪量は高温より低温になるに従って大きく、零度以下においては再び幾分減少する。歪速度については、歪速度の大きいほど、曲線は上昇してくるが、これは降伏点附近の歪量の大きい部分が主であつて、曲線の最初の部分は歪速度により余り影響されない。Fig. 10 は圧縮試験における応力-歪曲線を Fig. 11 は種々の圧縮速度の応力-歪関係を示す。圧縮の場合にも明確な上下降伏点を示し、引張の場合とほぼ同じことが成り立つ。

4. 引張による塑性変形過程について

降伏点に至るまでは試験片の平行部は一

様に変形するが、降伏点を超えてさらに試験片を引張ると、局部収縮をおこす。Fig. 12 (2) は局部収縮ならびに伸長の様子を示す。Fig. 12 (3) は同じく試験片の長さ方向の各点における幅、厚さ、標点長さの変化を示す。Fig. 12 (1) はこの場合の公称応力-歪曲線および実応力-歪曲線を示す。これらの図から明らかなように、降伏点までは標点距離が一樣に伸長するが、降伏点を超えて、一度一部分がある程度まで局部収縮をおこし、相当量の塑性歪を生ずると、その部分の加工硬化がいちじるしく、荷重を加えてゆくと、未変形の別の部分に局部収縮をひき起こす。この新たに収縮を起こす部分は最初収縮した部分に隣接した部分であり、順次収縮部を展開してゆく。図からわかるように、一旦収縮した部分はある程度まで収縮変形すると、その後の変形率は少なく、したがって、塑性引張における伸びの増加は最初に収縮した部分の負荷による伸びの増加を示すのではなく、新しい部分の収縮変形による伸びの増加を意味している。Fig. 13 は各温度におけるその場合の実応力-歪線図を示す。この図からわかるように、破断が理想的に行われれば、破断の実応力はほぼ一定の値を有するようで $\sigma_t = 1100 \sim 1200$ kg/cm² の間にある。低温ほど σ_t - ϵ 曲線が上つてくるが、早く破断応力の値に達し、その場合の破断伸びが小さい。高温になるほど、歪の小さい部分に対する実応力が小さく、破断応力に達するためには充分伸びて断面積を縮小せねばならず、したがって、高温破断には大きい伸びが対応する。図中⊗印は 20°C の引張において各歪量に相当するだけ試験片を引張つて局部収縮変形をおこさせたものの、収縮変形部分から新しく試験片を削り出し、同じ歪速度で引張破断させた場合の抗張力を示し、既収縮変形部の加工硬化の程度を示す。これによると、一旦収縮した部分は脆性破断をなし、その加工硬化度はすでに破断応力とほぼ等しい。それに対して未収縮部の降伏応力は、はるかに小さいので ($\sigma_t = 600$ kg/cm², 20°C) 前述のように収縮変形を拡大してゆくのである。歪速度を増加させると、実応力-歪線図において曲線が上つてくるので、早く破

Fig. 12. (1) Load-elongation, true stress-strain diagram and measuring stage of deformation.

Fig. 12. (2) Process of cross-necking deformation.

Fig. 12. (3) Variation of thickness, width and gage length along length at each stage of deformation.

断応力に達し、破断歪が少なくなり、脆性化の傾向を示す。

5. 引張破断について

Fig. 14 は温度、歪速度と破断伸度との関係を示す。また、Fig. 15 は 10°C 、Fig. 16 は -10°C の種々の歪速度に対する破断試験片の写真を示す。また Fig. 17

Fig. 13. True stress-strain curve at various temperature.

Fig. 14. Breaking elongation versus strain velocity (gage length 40 mm).

は $0.15/\text{min}$ の歪速度で 10°C 以下の種々の温度で引張った破断試験片の写真である。Fig. 14～Fig. 17 からわかるように、低温になるにしたがつて、いちじるしい伸びの減少を示す。低温においては抗張力は相当大きくなるが、伸びがきわめて小さいことは本材料の特異な性質の一つであると思われる。Fig. 16 および Fig. 17 よりわかるように -10°C 以下においては、破断とともに破断面附近に亀裂を生じ、かなり脆い破壊の様相を呈する。この亀裂は、またさらに温度が下るに従つていちじるしくなる。Fig. 16 に示すとおり、歪速度が破断伸度及ぼす影響も相当大きく、歪速度が大きいほど脆性破断の様相を呈してくることは前項でも述べたことである。高温においては

前述のように変形が理想的に行われると、破断までに相当広い範囲にわたつて収縮変形を起こすが、このように理想的な変形を行うことは少なく、しばしば完全

Fig. 15. Specimens which were pulled off at 10°C .

- (1) strain velocity $\dot{\epsilon}=0.025/\text{min}$,
- (2) $\dot{\epsilon}=0.15/\text{min}$, (3) $\dot{\epsilon}=0.25/\text{min}$,
- (4) $\dot{\epsilon}=0.3/\text{min}$, (5) $\dot{\epsilon}=0.5/\text{min}$.

Fig. 16. Specimens which were pulled off at -10°C .

- (1) strain velocity $\dot{\epsilon}=0.02/\text{min}$,
 (2) $\dot{\epsilon}=0.075/\text{min}$, (3) $\dot{\epsilon}=0.15/\text{min}$,
 (4) $\dot{\epsilon}=0.25/\text{min}$, (5) $\dot{\epsilon}=0.4/\text{min}$.

Fig. 17. Specimens which were pulled off at various temperature.

- (1) 10°C , (2) 0°C , (3) -10°C ,
 (4) -20°C , (5) -30°C
 strain velocity $\dot{\epsilon}=0.15/\text{min}$ constant.

に伸長しないまま破断する。この破断の開始点は、材料の表面の“きず”または材料中に含まれているピンホールであることが多く、これらが材料の伸長とともに大きくなり、亀裂の起源となる。亀裂は常温以上においては Fig. 15 の(1)または(2)に見るように、試験片の一方の側から徐々に拡大して、最後に一部分のみ急激に分離破壊して破断を終るが、低温および歪速度の速い場合には分離破壊する割合が多くなる。

6. 温度履歴試験

実際の加工および使用に当つては変動する温度下で種々の大きさの荷重により変形が行われる。一定の温度下の変形特性はこれまで述べてきたが、種々の温度にさらされてきた材料が履歴として、どんな機械的性質の変化を示すかについては実用上興味ある問題である。温度履歴の条件として、初め高温にさらされた材料が次に低温で荷重をうける場合とその逆の場合が考えられる。

Fig. 18 は 1 次に高温(60°C)で種々の大きさの変形

Fig. 18. Tensile behaviour of rigid PVC at low temperature which was deformed previously on its plastic range at high temperature.

が与えられた試験片を 2 次に低温(10°C)で引張つた場合の公称応力—歪線図を示す。2 次試験の始まりにおける最小断面積で破断荷重を割つた値を実応力 σ_t として図に附記してある。この σ_t は 10°C の一定温度試験の σ_t と一致している。 60°C および 10°C の標準塑性曲線は図示のようにその破断伸びの値を相当異にしている。まず、1 次に高温で降伏点以内で負荷した材料は 2 次に低温で引張つても、何ら低温の応力—歪関係に影響を与えない。次に高温での歪が降伏点を超えて、低温での破断伸び以内の場合には、2 次の低温試験で再降伏を示し、幾分塑性収縮変形を示し、ほぼ低温の破断歪まで伸びる。ところが高温で与えた歪が低温の破断伸び以上の場合には、2 次の低温試験において、大きい弾性変形を示し、最高荷重点に達するや否や、それ以上収縮変形をおこすことなく脆性破断の様相を呈して破断する。このときの実応力は前述の破断実応力 $1100\sim 1200\text{ kg/cm}^2$ の範囲内にある。この場合、高温での一次試験の歪量が大きいほど、脆性破壊の様子が濃くなり、Fig. 19 の(5)に示すように、亀裂が試験片の縦方向に走る。変形部が広い範囲にわ

Fig. 19. Specimens which were deformed previously on its plastic range and pulled off secondly at low temperature.

(first extension at 60°C and second at 10°C , strain velocity $\dot{\epsilon}=0.15/\text{min}$ constant)

- first extension (1) $\epsilon=0.15$,
 (2) $\epsilon=0.85$, (3) $\epsilon=0.5$,
 (4) $\epsilon=1.00$, (5) $\epsilon=1.25$.

たつている場合には遠方までこの脆化した変形部に亀裂が伝わる。丁度このときの破断は竹を割つたときのような様相を呈し、変形部の脆性化と方向性を物語っている。(前述の低温引張における破断亀裂は方向性がなく、不規則で、未変形部分にわたって発生するのに対して、この場合の亀裂は方向性を有することと、変形部に限る点で違っている。) 次に 80°C 以上の高温で与えられた 1 次歪は 2 次の低温試験にほとんど影響を与えない。

Fig. 20 は 1 次に低温 (7°C および 11°C) で、その塑性収縮域まで歪を与えた試験片を 2 次に高温 (60°C) で引張つた場合の公称応力-歪線図を示す。この場合 2 次の高温引張では応力が高温の標準塑性曲線の応力に達するや否や、急速に方向転換して高温の本来の塑性曲線に従って変形する。Fig. 21 はこのときの破断試験片を示す。この場合は正常な破断をしている。

これは要するに、一定温度の引張において、その破

Fig. 20. Tensile behaviour of rigid PVC at high temperature which was deformed previously on its plastic range at low temperature.

Fig. 21. Specimens which were deformed previously on its plastic range and pulled off secondly at high temperature.

(first extension at about 10°C and second at 60°C , strain velocity $\dot{\epsilon} = 0.15/\text{min}$ constant).

- (1) first extension $\epsilon = 0.25$ at 7°C
 (2) " $\epsilon = 0.20$ at 11°C .

断伸びは、これが前歴として他のいずれかの方法によつてこの伸びの値まで変形されている場合には、新しい塑性歪を生ずることなく(新しい降伏点を示すことなく)脆性破壊すると考えられる。また、一旦前歴で今の温度での最高応力(降伏応力)を超えた応力で塑性変形した材料は、再び降伏点をその温度では示すことがない。

7. 結 言

硬質塩化ビニール板の引張および圧縮における機械的諸特性を実験的に検討した結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 引張および圧縮に対して明確な降伏点を示し、抗張力、抗圧力および応力-歪関係は温度および歪速度の影響をうけることが大きい。降伏応力に対する歪量は低温ほど大きい。引張においては $0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 附近に極大値がある。
- (2) 破断伸びもまた温度と歪速度の影響をうけることが大きく、 -10°C 以下では脆性亀裂を起こすようになる。
- (3) 降伏点を超えると局部収縮を起こすが、一旦収縮変形した部分は加工硬化のためその後の変形が少なく、既収縮変形部に隣接した新しい部分に収縮変形が拡大してゆき、遂に収縮部の最小断面積が一定の実応力を示す点に至つて破断する。この場合、破断の起点となるのは材料表面の切欠、"きず"およびピンホールである場合が多い。
- (4) 前歴の影響として
 - a. 降伏点以内で負荷された材料は、2 次に低温で負荷しても何ら低温の応力-歪関係に影響を与えない。
 - b. 高温での歪が低温の降伏歪を超えて、低温の破断伸び以内の場合には、2 次の低温試験で再び降伏を示し、ある程度の塑性変形を示す。
 - c. 高温での歪が低温の破断伸びを超える場合には、2 次の低温試験で脆性破壊の様相を呈して破断する。
 - d. 初め、低温で塑性収縮領域まで歪を与えた場合は 2 次の高温試験で、荷重が高温の標準塑性曲線に達すると、直ちに方向を変え、高温の元来の変形曲線に従って変形する。

本研究は長浜ゴム工業株式会社と協力のもとになされたものであり、同社の御好意に謝意を表す。また、試験機などにつき御援助頂いた京大工学部繊維化学教室藤野研究室の皆様へ感謝致します。