硬質塩化ビニル管の疲労強度[†]

百 武 秀* 萩 尾 照 俊*

Fatigue Strength of PVC Pipes

by

Hiizu HYAKUTAKE* and Terutoshi HAGIO*

The strength of unplasticized polyvinyl chloride (PVC) pipes being used widely was investigated by several kinds of tests. The static strength of PVC pipes was determined in tension tests by using the dumbbell shape specimens and the ring shape specimens. In order to study the fatigue strength of PVC pipes, flexural fatigue tests by plane bending for the dumbbell shape specimens taken from the pipe and pulsating internal pressure tests for PVC pipes were carried out at different temperatures in the range of 5°C to 50°C. An apparatus has been designed and constructed which allows the determination of the strength of circumferential direction of the pipe subjected to internal pressure. The experiments showed that the static strength in the circumferential direction of PVC pipes was about 90 % of that in the longitudinal direction. On the other hand, the fatigue strength in the circumferential direction determined by the pulsating internal pressure test for PVC pipes was much less than that in the longitudinal direction by the plane bending test for the dumbbell shape specimen. The experimental results mentioned above were discussed in terms of the effects of temperature and strain rate on the yield stress of PVC. The results were also used to construct the critical curves of fatigue strength for PVC pipes subjected to pulsating internal pressure in a wide temperature.

Key words : Fatigue strength, PVC, Pipe, Internal pressure test, Thermal effect

1 緒 言

硬質塩化ビニル (PVC) 管は、一般流体輸送配管用として広く使用されており、管の製造方法、種類、寸法および性能等が JIS K 6741 で詳細に規定されている。しかし、管の強度に関する情報はこの規定から十分に得られない。

PVC 管の使用歴はかなり長く、その強度については既にいくつかの報告がある。たとえば岩本¹⁾は、PVC 管の曲げ疲労試験を行い、山口²⁾らは PVC 管の静的外圧に対する強度を調べている。富家³⁾は PVC も含めたプラスチック管材の機械的性質を硬さ試験の結果から推定することを試み、これに関していくつか発表^{4), 5)}している。これらの研究はいずれも常温における PVC 管の、主として静的強度に関するものである。一方、PVC 自体の強度に関する研究は多数なされている。たとえば Bauwens らによる PVC の降伏応力 (静的引張りにおける) に及ぼすひずみ速度および試験温度の影響についての詳細な研究がある。しかし、これらの研究結果に基づいて実際の使用条件、すなわち広い温度範囲で、さらに流体圧が変動するような条件下での PVC 管の強度を予測することは困難と思われる。

本報は、市販の PVC 管について常温における静的強度のみならず、広い温度範囲にわたっての疲労強度

を、管材の平面曲げ疲労試験および管の繰返し内圧試験によって調べたものである。得られた結果に基づき特に管材の軸方向強度および円周方向強度を比較・検討した。

2 材料・試験片および試験方法

使用した PVC 管は市販の規格品、JIS の VP 40 で、内径 40 mm、厚さ 4 mm、長さ 4 m (商品名アロンパイプ) である。試験は受入状態で行った。試験項目は次のとおりである。

2・1 静荷重試験

(a) ダンベル状試験片の引張試験：試験片の形状と寸法を Fig. 1(a) に示す。これは管から切出したもので、管材の軸方向の強度を調べる。

(b) リング状試験片の引張試験：試験片の形状と試験装置を Fig. 1(b) に示す。試験片は管を所定の寸法 (幅 12 mm) に輪切りしたもので、これによって管材の円周方向の強度を調べる。

(c) 内圧試験：所定の長さ (150 mm) に切断した管を Fig. 2 に示す装置に取付け、内圧をかける。この装置では、内圧 p により管材の円周応力 σ_θ は約 $5p$ の引張応力となるが、軸方向にも $-p$ の圧縮応力が生ずる。この圧縮応力は、後述するように、管の円周方向の降伏には影響を及ぼさない。

以上の静荷重試験は、すべて常温 ($22 \pm 0.5^\circ\text{C}$) の

† 原稿受理 昭和63年3月5日 Received Mar. 5, 1988

* 正 会 員 福岡大学工学部 福岡市城南区七隈, Faculty of Engineering, Fukuoka University, Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka

Fig. 1. Test specimens; all dimension are in mm.

もとで行った。降伏点までの平均ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ /s となるように各試験装置の速度を設定した。

2・2 疲労試験

(a) 平面曲げ疲労試験：試験片の形状と寸法を Fig. 1(c) に示す。これによって管材の軸方向の疲労強度を調べる。疲労試験機には島津 UF15 を使用した。繰返し速度は 16.7 Hz (1000 rpm) である。この場合のひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1$ /s である。試験部分の全体を恒温槽に入れ、試験温度を 8, 15, 22, 25 および 35°C の 5 とおとした。

Fig. 2. Design of the apparatus for internal pressure test of pipe.

(b) 繰返し内圧試験：Fig. 2 に示した装置を用い、装置全体を恒温槽に入れる。試験温度は 5, 15, 30, 40 および 50°C の 5 とおとした。PVC 管に作用する内圧は手動ポンプを用いる。作動流体はスピンドル油の一種である。圧力 0 から所定の圧力に達するまでの時間を 10 秒とした。この場合のひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ /s である。

3 実験結果および考察

3・1 静荷重試験

Fig. 3 にダンベル状試験片 [Fig. 1(a)] の引張応力-

Fig. 3. Maximum principal stress-strain curves in tension and internal pressure test for PVC pipes.

Table I. Tensile properties of PVC pipes (VP 40).

Direction of tension	Shape of specimen	Yield stress (MPa)	Yield strain (%)
Longitudinal	Dumbbell	47.9	4.0
Circumferential	Ring	43.2	—
	Pipe	44.7	3.8

ひずみ線図 (○印) および PVC 管の内圧試験 (Fig. 2) で得られた円周方向の応力-ひずみ線図 (●印) を合せて示す。この図より、管材の軸方向 (○印) の強度は周方向 (●印) のそれよりも少し高いことが分かる。管の内圧による降伏は、管の変形の形態からみて円周方向の引張応力によって決まると考えられる。

Fig. 3 に矢印で示した位置を材料の降伏点とみなし、この点の応力とひずみを Table I に示す。いずれも試験片数本ずつの平均値である。この表から明らかなように、リング状試験片の引張り [Fig. 1(b)] における降伏応力は、管の内圧試験における円周方向の降伏応力にほぼ等しい。このことは、試験が比較的簡単なリング状試験片で管の内圧に対する強度が推定できることを意味する。また Table I に示すように、管材の円周方向の降伏応力は軸方向のそれに比べ約 10 % 低い。静荷重試験におけるこれら二方向の強度の差は疲労試験でも認められる。

3・2 疲労試験

3・2・1 平面曲げ疲労試験 Fig. 4 に、試験温度 8 ~ 35°C の範囲で行った平面曲げ疲労試験の S-N 曲線を示す。これは管材の軸方向の疲労強度を表す。破壊の過程は、図に示す応力と試験温度の範囲内ではすべて以下のとおりであった。試験片表面に発生したき裂が成長し、試験片の破断に至る。この場合、破面は管の軸方向に垂直である。

疲労強度に試験温度が影響を及ぼすことは、Fig. 4 で明らかに認められる。たとえば、破断までの繰返し数 $N_f = 10^6$ の場合、試験温度 35°C における疲労強度の値は、8°C における疲労強度の約 70 % まで低下している。

Bauwens⁶⁾ は PVC の静的引張りにおける降伏応

Fig. 4. Fatigue curves for dumbbell shape specimen under plane bending at various temperatures.

力 σ_y ($N_f=1$ の場合の強度) に及ぼすひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ および試験温度の影響を調べ、これら二つの因子を含めた σ_y の式を提示している。この式に従って、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1/s$ (この値は平面曲げ疲労試験の場合と同じである) で、試験温度 8°C および 35°C における降伏応力 σ_y を求めてみると、 35°C における σ_y の値は 8°C における σ_y の 76 % である。^{*1}

静的引張り (降伏) と疲労 (き裂の発生と成長による破壊) では破壊の形態は異なるが、これら両者において試験温度の増加による破壊時の応力 (強度) 低下の割合は、上述のように、大きな差はない。この点に関しては後でまた述べる。

3・2・2 繰返し内圧試験 Fig. 5 に、試験温度 $5 \sim 50^\circ\text{C}$ の範囲で行った繰返し内圧試験の結果を示す。図の縦軸 $\sigma_{\max}$ は最大内圧 p における管の円周応力で、前述のように $\sigma_{\max} \doteq 5p$ である。横軸は破壊までの繰返し数 N_f である。

繰返し内圧試験では破壊の形態は二種類あることが観察された。一つは Fig. 6(a) に示すように、円周方向の引張応力による降伏である。このタイプの破壊は、Fig. 5 に●印で示すように、試験温度が高い場合また

Fig. 5. Fatigue curves for PVC pipes under pulsating internal pressure at various temperatures.

*1 Bauwens らの提示式によれば、PVC についてひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ = 一定の場合の降伏応力は、試験温度 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ の範囲で温度とともに直線的に低下する。この傾きは $\dot{\epsilon} = 1 \sim 10^{-4}/s$ の範囲で、 $\dot{\epsilon}$ と関係なくほぼ一定である。

は破壊までの繰返し数が小さい場合に起こる。他の一つは Fig. 6(b) に示すように、円周方向の引張応力でき裂が生じたもので、このタイプの破壊は Fig. 5 に○印で示すように、試験温度が低い場合または破壊までの繰返し数が大きい場合に起こる。

Fig. 7 は Fig. 6(b) に示した PVC 管のき裂発生部分を管の内側から見たもので、き裂は管の内壁面上で軸方向に沿って発生している。このき裂によって生じた破面を Fig. 8 に示す。これより管の内壁面に発生したき裂の進展状況が観察される。

Fig. 9 は、Fig. 5 に示した繰返し内圧試験の結果を、破壊までの繰返し数 N_f = 一定の場合の、破壊時の最大応力 (強度) と試験温度との関係に書き改めたものである。この場合のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、前述したように $10^{-3}/s$ である。 $N_f=1$ は 1 回の内圧試験で破壊した場合で、これはすべて Fig. 6(a) に示すような降伏形

(a) Example of PVC pipe failure caused by yielding.

(b) Example of PVC pipe failure caused by crack.

Fig. 6. PVC pipe failed by pulsating internal pressure.

Fig. 7. Fatigue crack observed at the inner surface of PVC pipe which is shown in Fig. 6(b). Arrow indicates the longitudinal direction of pipe.

Fig. 8. Fatigue fracture surface of PVC pipe failed by pulsating internal pressure.

Fig. 9. Fatigue strength versus temperature for PVC pipes subjected to pulsating internal pressure.

の破損である。これに対して N_f が 10^2 以上の場合は、すべて Fig. 6(b) に示すようなき裂形の破損である。

Fig. 9 に示すように、試験温度が 50°C 以下の範囲では、PVC 管の強度（破損時における管の円周応力の最大値）は試験温度の増加とともにほぼ直線的に低下している。さらに、 N_f の値が異なる各強度-温度線図は互いにほぼ平行である。この線図から $N_f=1$ 、すなわち静荷重による降伏の場合について、試験温度 35°C における強度（降伏応力）を求めると、それは温度 8°C における強度の約 74 % まで低下している。これに対して、 $N_f=10^3$ 、すなわち繰返し荷重による疲労破壊の場合は、試験温度 35°C における強度は温度 8°C における強度の約 70 % である。このように試験温度の増加による強度低下の割合は破損までの繰返し数 N_f の広い範囲にわたってほぼ同じ程度である。このことは平面曲げ疲労試験の場合に予測したとおりである。

3・3 軸方向の疲労強度と円周方向の疲労強度との比較

PVC 管の軸方向の疲労強度を示す Fig. 4 と円周方向の疲労強度を示す Fig. 5 を比較すれば、後者の強度は前者のそれよりもかなり低いようである。たとえば試験温度 35°C のもとで破損までの繰返し数 $N_f=10^4$ の場合の疲労強度を、繰返し内圧試験と平面曲げ疲労

試験とで比べると、前者は後者の 50 % 以下である。しかし、これら二つの試験ではひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は互いに異なる。前述したように、繰返し内圧試験では $\dot{\epsilon}=10^{-3}/\text{s}$ であり、平面曲げ疲労試験では $\dot{\epsilon}=1/\text{s}$ である。

一定の試験温度のもとでは、強度はひずみ速度の減少とともに低下する。PVC について静的引張りにおける降伏応力 ($N_f=1$ の場合) とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係を Bauwens らの式に従って求めてみると、 $\dot{\epsilon}=10^{-3}/\text{s}$ における降伏応力の値は $\dot{\epsilon}=1/\text{s}$ におけるその約 70 % である。一方、 $N_f=10^4$ 、すなわち繰返し荷重による疲労破壊における強度とひずみ速度の関係は不明である。しかし PVC の場合、Fig. 9 に示すように、試験温度の増加による強度低下の程度は破損までの繰返し数 N_f の広い範囲にわたってほぼ同じ程度であることから、ひずみ速度の減少による強度低下の程度も N_f の広い範囲にわたってほぼ同じ程度であるとみなしてみる。この仮定によれば、試験温度 35°C のもとで破損までの繰返し数 $N_f=10^4$ の場合、 $\dot{\epsilon}=10^{-3}/\text{s}$ における疲労強度の値は $\dot{\epsilon}=1/\text{s}$ におけるその約 70 % 程度である。これに対して実験結果は上述のように 50 % 以下である。

以上の考察から、本報で用いた PVC 管における円周方向の疲労強度は軸方向の疲労強度に比べかなり低いと思われる。ひずみ速度一定のもとで測定した静荷重に対する強度（降伏応力）も、Table I に示すように円周方向の強度は軸方向の強度よりも約 10 % 低い。

4 結 言

市販の PVC 管、JIS K 6741 の VP 40 について、試験温度 $5 \sim 50^\circ\text{C}$ の範囲で管材の平面曲げ疲労試験および管の繰返し内圧試験を行い、管の軸方向および円周方向の強度を調べた。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 静的強度（降伏応力）に関しては、管の円周方向の強度は軸方向の強度よりも約 10 % 低い。

(2) 疲労強度に関しては、管の円周方向の強度は軸方向の強度よりもかなり低い。

(3) 繰返し内圧試験では破損の形態は二つある。一つは円周方向の引張応力によって生ずる降伏で、これは試験温度が高く、破損までの繰返し数が少ない場合に起こる。他の一つは管の内壁面に、円周方向の引張応力によって発生したき裂の成長によって起こる破壊である。

(4) 破損までの繰返し数 N_f —一定のもとで、疲労強度は試験温度の増加とともに直線的に減少する。 N_f の値が異なるこれらの各線図は、静荷重による降伏である $N_f=1$ の場合も含めて、すべて互いにほぼ平行である。

(5) 上記の諸結果は、実験に用いた PVC 管について得られたものである。一般に PVC も含めて熱可塑性プラスチックでは、分子量分布や成形条件によって力学的挙動や破壊の形態に違いが生ずることはよく知られている。したがって、上記の実験結果が PVC 管のすべてに対して一般的に広く成り立つものではない。

(昭和62年7月22日 日本機械学会久留米地方講演会にて講演)

- 2) 山口章三郎, 大柳 康, 辻川洋三郎, 高橋義男, 材料, **23**, 588 (1974).
- 3) 富家知道, 材料, **23**, 109 (1974).
- 4) 富家知道, 香川勝一, 材料, **24**, 720 (1975).
- 5) 富家知道, 森下忠衛, 香川勝一, 材料, **26**, 262 (1977).
- 6) Bauwens-Crowet, C., J. C. Bauwens and G. Homès, J. Polym. Sci., A-2, **7**, 735 (1969).

参 考 文 献

- 1) 岩本 貢, 村山昭平, 材料, **15**, 891 (1966).

書 評

“液 晶 高 分 子”

—その基礎と応用—

飯村一賀, 浅田忠裕, 安部明広 (編)

(1988年, (株)シグマ出版発行, 220×155 mm, 269ページ, 4000円)

本書は最近話題となっている高分子液晶について、その基礎と応用についてまとめられたものである。執筆は各分野の第一線研究者が担当され、研究と進歩の現状が概観されるよう編集されている。本書は6章から成り、液晶高分子の研究開発の歴史(1章)、液晶高分子の熱力学(2章)、液晶高分子の構造と性質(3章)、液晶高分子の高次構造と力学物性(4章)、液晶高分子のレオロジー(5章)、および液晶高分子の応用(6章)という構成となっている。1, 2, 4および6章は、なかなかの力作で、研究・開発の現状と問題点がよく分るよう解説されている。液晶高分子について広く知りたいと思うときのよい手引となる。書評を依頼された不幸か、書評の慣習に反し5章について少々述べる必要があると思う。この章は、レオロジーについて熟知していない限り、著者の心意気以外はほとんど理解できない。レオロジーをご存知の人が読まれると多くの誤りを発見されるであろう。また、他人の論文に掲載された図を文献なしで拝借するのは言語道断である。多くの執筆者によって書かれた書物の宿命かも知れないが、内容に大きい不均一が生じ、よく書かれた多くの部分がありながら、書物全体の価値が減じる場合がある。

(京都大学医用高分子研究センター 升田利史郎)