ホプキンソン棒法による低温用特殊試験法*

谷 村 真 治^{*1}, 木 村 則 秀^{*2}
海 津 浩 一^{*1}, 五十鈴川 浩児^{*3}

Modified Split Hopkinson Bar Method for Low Temperatures

Shinji TANIMURA, Norihide KIMURA,
Koichi KAIZU and Kohji ISUZUGAWA

The dynamic strength of industrial materials at low temperatures, especially lower than the temperature of liquid nitrogen, has attracted special interest. In this paper, as an approach to examining the dynamic properties of materials at these low temperatures, a modified split Hopkinson bar method is proposed. In the method, a narrow gap is made between a pressure bar and a specimen. By this method, it is possible to shut off heat conduction between them and to control the temperature of the specimen accurately. Theoretical conditions for good measurement by this method have been examined thoroughly. By carrying out an experiment under these conditions, the effectiveness of this method has been confirmed.

Key Words: Experimental Method, Dynamic Property, Low Temperature, Split Hopkinson Bar, Stress Waves

1. 結 言

近年、核融合炉や磁気浮上列車などの超電導技術の発展はめざましいものがある。これらに用いられる液体ヘリウムを貯蔵する容器や支持材は極低温にさらされるので、それらの安全性や信頼性を確保するためには、使用される構造材料の極低温域での静的強度だけではなく動的強度も調べるのが重要となってきた。低温域での低温用材料の動的強度に及ぼすひずみ速度の影響⁽¹⁾に関する報告もいくつかなされているが、これらは液体窒素から室温までの低温度域のものが多く、極低温域での報告はあまりないようである。これは極低温下での衝撃実験が非常に難しいためであると思われる。

衝撃荷重下での材料の動的強度を調べるために多くの計測法が提案されている。それらの中でも、最も広く用いられているのが、ホプキンソン棒法⁽²⁾である。ところが極低温下での実験にこのホプキンソン棒法を用いようとするとき、従来の方法では応力棒と試料が

密着しているため、応力棒と試料との間の熱伝導のために、試料の温度制御を精度よく行うことが困難となる。

本研究では、圧縮式のホプキンソン棒法を応用し、応力棒と試料の間の熱伝導を遮断するために、応力棒と試料との間にわずかなすきまを設けた不完全接合試験法を考案し、この方法により有効な計測を行うための条件を理論的に考察した。また、この方法による衝撃圧縮試験を行い、その有効性を確かめた。

2. 実験法の概要

図1に実験装置の概略と各弾性棒中を伝ばする応力波の様子を表した $x-t$ 線図を示す。ここで、実線は圧縮波、破線は引張波を表す。実験装置は打撃棒、2本の応力棒(入力棒、出力棒)および吸収棒からなり、図のように、一直線上に設置されている。試料は図2のように2本の応力棒の間に初期すきま Δl を開けて設置する。

打撃棒を一定の速度で入力棒に衝突させると、入力棒および打撃棒にそれぞれ圧縮の応力波が伝ばする。入力棒を伝ばする入射波は自由端である試料側端面で引張波として反射する。このときに、この端面が出力棒側へ動き、入力棒、試料および出力棒が密着してす

* 原稿受付 平成元年10月25日。

^{*1} 正員、大阪府立大学工学部 (〒591 堺市百舌鳥梅町4-804)。^{*2} 准員、住友電工(株) (〒541 大阪市中央区北浜4-5-33)。^{*3} 大阪府立大学工学部。

きまがなくなると、入力棒へ伝ばする反射波と試料を透過して出力棒へ伝ばする透過波に分かれる。一方、打撃棒側に伝ばする応力波はその他端で反射し、除荷波として入力棒へ伝ばする。したがって、試料はすきまが零になった時点から除荷波が来るまでの間、変形を受けることになる。

入力棒および出力棒にはそれぞれ応力波検出用のひずみゲージが貼ってあり、入力棒側のひずみゲージで入射波および反射波を、出力棒側のひずみゲージで透過波を検出する。図1にはランプ状の立上りの入射波が伝ばするときのこれらのひずみゲージ位置で観測される応力波形の例を併せて示してある。ただし、左側に圧縮応力を、右側に引張応力をとって表している。応力、ひずみ速度、ひずみなどの試料の様子はこれらの応力波形から求めることができる。

3. 装置設計のための条件

立上り時間 t_r のランプ状の立上りを有する入射波が伝ばするとき、入力棒の試料側端面の移動速度 v_l の時間変化を図3に示す。ここで、 t_l は入射波が入力棒の試料側端面に達する時刻を起点としたときの応力棒と試料との間のすきまがなくなる時刻であり、 v は入射波のフラットな部分に対応する棒中の粒子速度である。図3(a)は立上りの途中ですきまがなくなる場合であり、図3(b)は立上りの後ですきまがなくなる場合である。図の斜線部の面積は端面が動き始めて

図1 ホプキンソン棒法の概略

図2 試料部分

から、すきまがなくなるまでの端面の移動量を表し、初期すきま Δl に等しい。したがって、初期すきまとすきまがなくなる時刻との関係はそれぞれ次のように与えられる。

$$\Delta l = \begin{cases} vt_l^2/t_r & (t_l < t_r) \\ v(2t_l - t_r) & (t_l \geq t_r) \end{cases} \quad (1)$$

試料に除荷波の到達する時刻を t_2 とすると、試料は t_l から t_2 の間に変形を受ける。試料の両端面での応力が等しいとすると、試料の変形量 u_s は次式で与えられる。

$$u_s = \frac{2}{\rho_2 c_2} \int_{t_l}^{t_2} \{\sigma_i(t') - \sigma_t(t')\} dt' \quad (2)$$

ここで、 ρ_2 , c_2 は応力棒の密度および弾性波の伝ば速度、 σ_i は入射応力、 σ_t は透過応力、 $\sigma_i - \sigma_t$ は反射応力である。

図4(a), (b)はそれぞれ $t_l < t_r$ および $t_l \geq t_r$ の場合のひずみゲージ1で観察される反射波形である。ただし、試料は弾完全塑性体を想定しており、 σ_{im} , σ_{tm} はそれぞれ入射波形および透過波形のフラットな部分の応力である。また図の斜線部の面積が式(2)の積分値に対応している。 $t_l < t_r$ の場合の斜線部の面積は次のように与えられる。

(a) $t_l < t_r$

(b) $t_l \geq t_r$

図3 入力棒の試料側端面の移動速度

$$s_1 = \frac{1}{2}(\sigma_{im} - \sigma_{tm}) \left(\frac{t_1}{t_r} + 1 \right) (t_r - t_1)$$

$$s_2 = (\sigma_{im} - \sigma_{tm}) (t_2 - t_r)$$

$$\dots\dots\dots (3)$$

いま、打撃棒が入力棒に衝突する時を考えると、入力棒に生じる応力⁽³⁾は次式で与えられる。

$$\sigma_i = \frac{A_1 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{A_1 \rho_1 c_1 + A_2 \rho_2 c_2} v_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ρ_1 , c_1 , A_1 は打撃棒の密度、弾性波の伝ば速度および断面積、 ρ_2 , c_2 , A_2 は入力棒の密度、弾性波の伝ば速度および断面積、 v_0 は打撃棒の衝突速度である。このときの入力棒の衝撃端面の移動速度 v は次式で与えられる。

$$v = \frac{A_1 \rho_1 c_1}{A_1 \rho_1 c_1 + A_2 \rho_2 c_2} v_0 \dots\dots\dots (5)$$

また、試料両端面の応力を等しいとすると次式が成り立つ。

$$\sigma_{tm} = r_1 \sigma_D \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 r_1 は試料と応力棒との断面積比、 σ_D は試料の動的強度である。有効計測時間 t_2 は応力波が打撃棒を一往復する時間に等しいことから次式となる。

$$t_2 = 2l_1 / c_1 \dots\dots\dots (7)$$

ここで l_1 は打撃棒の長さである。

よって、式(1)～(7)より、試料の変形量は次式で与えられる。

$$u_s = \frac{1}{\rho_2 c_2} \left(\frac{r_2 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{r_2 \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} v_0 - r_1 \sigma_D \right)$$

$$\times \left(\frac{4l_1}{c_1} - t_r - \frac{r_2 \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}{r_2 \rho_1 c_1 v_0} \Delta l \right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで r_2 は打撃棒と応力棒との断面積比である。

また、 $t_1 \geq t_r$ の場合の斜線部の面積は次のように与えられる。

$$s_3 = (\sigma_{im} - \sigma_{tm}) (t_2 - t_1) \dots\dots\dots (9)$$

同様に、試料の変形量は $t_1 < t_r$ の場合と同じ式(8)で与えられる。これを整理すると次式のような t_1 と t_r の大小関係に依らない打撃棒長さの関係式が得られる。

$$l_1 = \frac{r_2 \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}{4 r_2 \rho_1 v_0} \Delta l + \frac{c_1 t_r}{4}$$

$$+ \frac{c_1 \rho_2 c_2 (r_2 \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2) u_s}{4 r_2 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2 v_0 - 4 r_1 (r_2 \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2) \sigma_D}$$

$$\dots\dots\dots (10)$$

ただし、ここでの l_1 は試料に u_s の変形量を与えるための最小打撃棒長さを表す。

次に、有効な波形解析を行うための条件を決定する。入射波形と反射波形が重なると、波形解析が行えなくなるので、入射応力が除荷された時刻から反射波が立上り始める時刻の間に応力が零のフラットな区間が現れるようにする。このフラットな区間に対する十分な波形解析のための最小必要時間を t_a とすると、次式が得られる(図1)。

$$x \leq l_2 - \frac{c_2}{c_1} l_1 - \frac{c_2 (t_r + t_a)}{2} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 x は入力棒の打撃棒側端面からのひずみゲージ位置で、 l_2 は入力棒の長さである。また、入力棒の打撃棒側端面で反射された応力波が反射波形を乱さないために、反射応力が除荷し始める時刻から t_b 以上の時間をおいて、この応力波がひずみゲージ位置に到達するものとすれば次式が得られる(図1)。

$$x \geq \frac{c_2}{c_1} l_1 + \frac{c_2 t_b}{2} \dots\dots\dots (12)$$

以下に上述の理論式による計算例を示す。打撃棒および入・出力棒には炭素鋼を用いるとし、 $\rho_1 = \rho_2 = 7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $c_1 = c_2 = 5000 \text{ m/s}$, $r_2 = 0.9$ とした。試料には長さ 10 mm, $r_1 = 0.2$ のものを用いる場合とした。

図5は試料に20%の圧縮変形を与える場合の、試料の動的強度をパラメータとした初期すきまと最小打撃棒長さとの関係を表す。この図は打撃棒長さを決定する目安となる。それぞれの場合の直線より上の領域で打撃棒長さを選べば、設定した変形量が得られることになる。図6は動的強度が200 MPaの試料に20%の圧縮変形を与える場合の初期すきまをパラメータとした入力棒長さとのひずみゲージ位置の有効選択範囲を示している。ただし、 $t_a = 20 \mu\text{s}$, $t_b = 10 \mu\text{s}$ とした場合である。図の2直線で挟まれた領域で入力棒

図4 ひずみゲージ1で観測される反射波形

長さとしずみゲージ位置を選べば、有効な波形解析が行えることになる。

4. 実験および考察

これまでに述べてきた理論的条件より、打撃棒長さ 0.46 m、入力棒長さ 1.7 m および入力棒のひずみゲージ位置 0.85 m と定め、不完全接合試験法による衝撃圧縮試験を行った。図 7 に試料付近の概略および計測システムを示す。試料には直径 10 mm、長さ 9 mm

図 5 初期すきまと最小打撃棒長さの関係

図 6 ひずみゲージ位置と入力棒長さの有効選択範囲

図 7 計測システム

の円柱状のジュラルミンを用いた。入・出力棒は熱伝導率の小さい SUS 304 鋼とし、直径が 20 mm のものを用いた。打撃棒には直径 19 mm の黄銅(BSB)を用い、高圧空気によって発射させた。ここでは打撃棒の衝突速度を $v_0 = 11.5$ m/s とした。波形解析は試料の両端面での応力が等しいとした。すきまが零になった時刻、すなわち試料が変形し始める時刻からの経過時間 t における試料の平均の応力、ひずみ速度、ひずみは次式で与えられる。

$$\sigma = \sigma_i / r_1 \dots \dots \dots (13)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{2}{\rho_2 c_2 l_s} (\sigma_i - \sigma_t) \dots \dots \dots (14)$$

$$\epsilon = \int_0^t \dot{\epsilon} dt$$

$$= \frac{2}{\rho_2 c_2 l_s} \int_0^t (\sigma_i - \sigma_t) dt \dots \dots \dots (15)$$

ここで l_s は試料の長さを表す。

図 8, 9 に初期すきまがそれぞれ 0.06 mm および 1 mm の場合の実測波形を示す。それぞれ上に示した波形が入力棒側ひずみゲージで観測した応力波形であり、入射波形とそれに続く反射波形を示している。下

図 8 実測波形 (Δl = 0.06 mm)

図 9 実測波形 (Δl = 1 mm)

表 1 理論値と実験値の比較

	Experimental Result		Theoretical Result	
	$\Delta l=0.06\text{mm}$	$\Delta l=1.0\text{mm}$	$\Delta l=0.06\text{mm}$	$\Delta l=1.0\text{mm}$
$t_a (\mu\text{s})$	42.5		41	44
$t_b (\mu\text{s})$	72.5		70	
$t_1 (\mu\text{s})$	19.9	124.9	15	120
$\epsilon (\%)$	13.7	8.8	13.6	8.6

に示した波形は出力棒側ひずみゲージで観測した応力波形で、透過波形を示している。図 8 より、初期すきまを 0.06 mm とした場合は、立上りの途中ですきまがなくなっていることがわかる。また図 9 より、初期すきまを 1 mm とした場合は、立上りの後ですきまがなくなっていることがわかる。いずれの反射波形も図 4(a), (b) で示した模式的な反射波形とよく一致している。ただし、これらの図とは上下が逆に示されている。

表 1 は実測波形と波形解析によって得られた種々の実験値と理論値の比較をまとめたものである。ここでの理論値は先に述べた条件式より得られた値であり、 ϵ は時刻 t_2 までに得られたひずみ量である。計算に用いた各値は次のとおりである。

$$l_1=0.46\text{ m}, l_2=1.7\text{ m}$$

$$\rho_1=8.39\times 10^3\text{ kg/m}^3, \rho_2=7.93\times 10^3\text{ kg/m}^3$$

$$c_1=3\,383\text{ m/s}, c_2=4\,936\text{ m/s}$$

$$r_1=0.25, r_2=0.902\,5$$

$$x=0.85\text{ m}, v_0=11.5\text{ m/s}, t_r=30\,\mu\text{s}$$

表 1 からわかるように、実験値と理論値は良い精度

で一致していることがわかる。したがって、試料と応力棒の間にわずかなすきまを設けた場合でも、必要な条件を満たしていれば、良好な計測が行えることがわかる。

5. 結 言

極低温下での材料の動的強度をホプキンソン棒法により調べる際に、試料の温度制御を精度よく行うことを目的とし、応力棒と試料の間にすきまを設ける不完全接合試験法を考案した。また、この方法により有効な計測を行うための条件を理論的に導出した。さらに、この方法による衝撃圧縮試験を行い、必要な条件を満たすことにより良好な計測が行えることを示し、この方法の有効性を明らかにした。

文 献

- (1) 例えば、石川・ほか 3 名, 材料, 37-423(1988), 48.
- (2) 例えば、田中・ほか 3 名, 機論, 31-226(1965), 883.
- (3) 中原, 応用弾性学, (1977), 194. 実教出版.