斜角探触子を用いた超音波による接触圧力測定*

水口 義久**, 小泉 堯***, 渋谷 寿一***

Contact Pressure Measurement by Means of Ultrasonic Waves Using Angle Probes

by Yoshihisa MINAKUCHI, Takashi KOIZUMI, and Toshikazu SHIBUYA

A quantitative measurement of contact pressure by means of ultrasonic waves using angle probes has been proposed to measure contact pressure distributions between two elastic beams. At first, in a proposed calibration method, the relation between mean contact pressure and sound pressure of reflected waves is obtained for various surface roughnesses by using calibration blocks made of the same material as the beams. Both sides of the laminated beams are compressed under locally uniform pressure, and the sound pressure of reflected waves is measured. The experimental results agree fairly well with the theoretical ones and the experimental ones obtained by a normal probe. It is clarified that the proposed ultrasonic method is practically useful.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Contact Pressure, Ultrasonic Waves, Quantitative Measurement, Angle Probe, Laminated Beams

1. 緒 言

機械構造物はボルトやリベットなどによって部品と部品が組立てられており、その結合部の強度設計に際しては接触面の圧力分布を正確に把握することが工学上重要である。そのため、これまでに種々の接触圧力測定法が試みられているが、なかでも超音波を利用した測定法は、測定すべき接触面の状態や性質を変化させることなく真実接触面積の変化を超音波による反射波音圧として検出するため、真の接触圧力を測定できる可能性のある方法として最近注目されている。特にこの測定法を実際問題に応用する際には、接触圧力を定量的に測定できることが重要である。超音波による接触圧力の定量測定に関する研究はこれまでに垂直探触子を用いた場合についてかなり実用性のある結果が得られているが^{(1)~(4)}、垂直探触子では測定が困難な接触面の圧力測定に便利な斜角探触子を用いた場合についてははまだあまり見当たらないようである⁽⁵⁾。

そこで本研究では、斜角探触子を用いた超音波による接触圧力の定量測定法を確立することを試みた。ま

ず定量測定を行うため、接触部の表面あらかさが異なる数種類の較正ブロックを製作し、これらを圧縮してあらかじめ接触圧力と反射波特性との関係を示す較正曲線を求め、接触部の表面あらかさが較正曲線に及ぼす影響を調べた。次に板厚が異なる二つの重ねはりを圧縮し、一方のはり上に取付けられた斜角探触子により接触面の反射波音圧を測定した。そしてこの測定曲線と較正曲線との関係より重ねはりの接触圧力の定量値を算出した。このようにして得られた実験結果を解析結果⁽⁶⁾や前報⁽³⁾で得られた垂直探触子による実験結果と比較し、本測定法の実用性について検討した。

2. 実験方法

2.1 較正実験 斜角探触子を用いて超音波により接触圧力を定量的に測定するには、あらかじめ較正ブロックにより接触圧力と反射波特性との関係を明らかにしておく必要がある。しかしこの方法によるには、接触部の表面あらかさが反射波特性に及ぼす影響を調べなければならない。そのために図1に示すような較正ブロック(I)、(II)を製作した。較正ブロックの接触面は研削加工後ラップ仕上げして表面あらかさを変化させた。表1は実験に用いた較正ブロック(I)、(II)の性質を示す。

* 昭和59年11月28日 第929回講演会において講演、原稿受付 昭和59年5月28日。

** 正員、山梨大学工学部(〒400 甲府市武田4-3-11)。

*** 正員、東京工業大学(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

図2は較正ブロック(I), (II)の圧縮方式を, また図3は較正実験用圧縮装置を示す。送信と受信用斜角探触子は較正ブロック(I)の左右の位置に圧縮ばねによって4.9 Nで圧着した。負荷は上部のナットを締付けて作用させ, その大きさはロードセルによって検出した。一方, 較正ブロックを負荷した時の接触面での反射波音圧は超音波探傷器のブラウン管上に現れる第一反射波の波高値を読み取り, 接触圧力と反射波特性との関係を示す較正曲線を作成した。

使用した斜角探触子は周波数 f : 5 MHz, 屈折角: 45°, 振動子サイズ: 10 mm×10 mmであり, その接触媒質にはグリセリンを用いた。また較正ブロック(I)材中の音速は3 200 m/sに設定した。

2・2 重ねはりの圧縮実験 2・1節で提案した較正ブロックによる本測定法の実用性を調べるため, 図4に示すような板厚が異なる重ねはりが圧縮された実験モデルについて, 垂直探触子では測定が困難な負荷近傍の接触圧力を斜角探触子を用いて定量的に測定した。ここで, 圧縮荷重は幅 $2a$ に等分布圧力 p が作用するものとし, E_1, E_2 および ν_1, ν_2 はそれぞれはり(I), (II)の縦弾性係数およびポアソン比を示す。実

験に用いたはり(I), (II)の寸法は $2b=240$ mmで, 奥行き45 mmである。はりの上下面は研削加工後接触面をラップ加工し, 表面あらさが $1.3 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ になるように仕上げた。表2は実験に用いたはり(I), (II)の形状と性質を示す。

重ねはりの圧縮は図4に対応するように, 断面寸法が $2a=20$ mm, 奥行き45 mmの鋼製圧縮ブロック(S 45 C)を重ねはりの上下面に取付けて行った。そして図5に示すおもり(2.94 N)を用いて斜角探触子を重ねはりの上面に取付け, 図6に示す実験装置によりナットで締付けて荷重 W を作用させた。この時, 荷重の大きさはロードセルによって検出した。一方, 接触面における反射波音圧は各接触圧力測定位置において荷重を変化させ, 超音波探傷器のブラウン管上に現れる第一反射波の波高値を読み取り, 荷重と反射波特性との関係を示す測定曲線を作成した。

なお, 接触圧力は表2の重ねはりの組合せに対して斜角探触子を用いて測定可能な $x=0, 10, 20, 30$ mmの位置で測定した。またはり材中の音速は3 200 m/sに設定した。

表 1 較正ブロック(I), (II)の性質

No.	Block	Condition of contact surfaces			Material
		Roughness $\mu\text{m } R_{\text{max}}$	Flatness μm	Machining method	
1	I	0.4	0.5	Lapping	S45C
	II		0.4		
2	I	1.0	0.8		
	II	0.9			
3	I	1.3	1.0		
	II				
4	I	1.8			
	II	1.9			
5	I	2.3			
	II				
6	I	3.4			
	II	3.8			
7	I	4.4			
	II	4.5			
8	I	5.0			
	II	5.5			
9	I	7.0			
	II

図 2 較正ブロックの圧縮方式

図 1 較正ブロック(I), (II)の寸法

図 3 較正実験用圧縮装置

3. 実験結果および考察

3・1 較正曲線 図7は表1の較正ブロックを用いて得られた平均接触圧力 p_m と反射波特性 E_R^* との関係を示す較正曲線である。横軸の p_m は較正ブロックの接触面圧力を一様分布とみなし、荷重をその断面積 ($225 \pi \text{ mm}^2$) で除した値を示す。また縦軸の E_R^* は

$$E_R^* = 1 - \frac{h_e}{h_{eo}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

を示し、 h_{eo} , h_e はそれぞれ無負荷および負荷時の接触面における反射波の波高値である。図より、接触部の表面あらさが大きくなるにつれて負荷の増加に対する E_R^* 値が小さくなり、反射波音圧の変化量が少なくなることがわかる。またこれらの結果は負荷の増加と減少時における E_R^* 値の差があまりなく、ほぼ直線的な関係が得られた。

図8は図7の較正結果をもとに表面あらさと p_m/E_R^* との関係を示したものであり、表面あらさは較正ブロック(I)と(II)の平均値を採用した。この曲線より、表面あらさが大きくなるにつれて p_m/E_R^* 値が増加していく傾向がわかる。したがって、測定物の接触圧力はその表面あらさに相当する p_m/E_R^* 値を用いることによって定量値が求められる。

3・2 重ねはりの測定曲線 図9は表2中のNo. 2の組合せによる重ねはりを圧縮した時の反射波特性 E_R^* の測定曲線である。横軸の圧力 p は圧縮荷重 W を

圧縮ブロックの断面積 ($20 \times 45 \text{ mm}^2$) で除した値を示す。各接触圧力測定位置での負荷と反射波特性との関係はほぼ直線的に変化しており、負荷部より遠くなるにつれて負荷の増加に対して E_R^* 値が小さくなっていく様子がわかる。

3・3 重ねはりの接触圧力分布の算出 重ねはりの接触圧力分布ははりの接触部表面あらさが $1.3 \mu\text{m}$ R_{max} であるので、これと同じ表面あらさの較正曲線 [図7(a)のNo. 3] と図9の測定曲線との関係より算出した。また他の組合せの重ねはりの接触圧力分布も同様にして求めた。なお、用いた較正曲線の測定ゲインが 25 dB であるのに対し、斜角探触子を取付ける側のはりの板厚が 30, 45, 60 mm の場合の測定ゲインはそれぞれ約 26.5, 31.5, 41 dB であった。これらの測定ゲインの相違は主に送信波が受信されるまでの音波の減衰量の差によるものと考えられる。しかし、ゲインの増加によって雑音が発生しなかったことより、測定ゲインの相違による測定結果への影響はここでは無視して取扱った。

3・4 重ねはりの接触圧力分布 図10は重ねはりの接触圧力分布を示し、○, △, □印は斜角探触子を用いた実験結果、●, ▲, ■印は前報⁽³⁾で得られた垂直探触子による実験結果、また実線は図4の実験モデル

表2 はり(I), (II)の形状と性質

No.	Beam	h_1 h_2 mm	Material	E_1 E_2 Gpa	ν_1 ν_2	Condition of contact surfaces		
						Roughness $\mu\text{m} R_{\text{max}}$	Flatness μm	Machining method
1	I	30	S45C	206	0.3	1.3	2.0	Lapping
	II	30						
2	I	30						
	II	45						
3	I	30						
	II	60						
4	I	45						
	II	45						
5	I	60						
	II	60

図4 実験モデル

図5 斜角探触子とそのおもり

図6 実験装置

ルに対して文献(6)によりフーリエ級数を40項として計算した結果である。図10(a)は縦弾性係数比を $E_2/E_1=1$ と一定にして板厚比 h_2/h_1 を変化させた場合、図10(b)は $h_2/h_1=1$, $E_2/E_1=1$ と一定にして板厚のみを変化させた場合の結果である。これらの結果より、重ねはりの板厚比や負荷が接触面の圧力分布に及ぼす影響がわかる。また、斜角探触子による実験結果は計算結果や垂直探触子による実験結果とかなりよく一致している。このことより、本測定法による接触圧力の定量測定は、較正ブロックと測定物との表面あらさや平面度に注意して実験すれば、十分な実用性を

有することがわかった。

4. 結 言

斜角探触子を用いた超音波による接触圧力の定量測定法を提案し、定量化に採用した較正ブロックの表面あらさが較正曲線に及ぼす影響を調べた。さらに、板厚が異なる重ねはりが圧縮された場合について接触圧力分布を定量的に測定し、本測定法の実用性を検討して次のような結論が得られた。

- (1) 実験結果は解析結果や垂直探触子による実験結果とかなりよく一致したことより、本測定法はかなり実用性があるといえる。
- (2) 接触面の表面あらさが大きくなると超音波の反射波音圧の変化量は少なくなる。
- (3) 負荷に対する反射波音圧の変化量が少なかった

(a) 表1中のNo.1~4の場合

(b) 表1中のNo.5~9の場合

図7 較正ブロックによる平均接触圧力 p_m と反射波特性 E_R^* との関係

図8 表面あらさと p_m/E_R^* との関係

図9 重ねはりを負荷した時の反射波特性 E_R^* の測定曲線(表2中のNo. 2)

(a) 板厚比の影響 ($E_2/E_1=1$) (b) 板厚と荷重幅との比の影響 ($h_2/h_1=1$, $E_2/E_1=1$)

図 10 接触面の圧力分布

め、斜角探触子の接触圧力が一定になるようにして反射波音圧を正確に測定する必要がある。

最後に、実験試料の平面度を測定していただいた山梨県機械金属工業指導所の中山信一氏、並びに実験に協力いただいた山梨大学卒研究生の小川英二君に感謝の意を表する。

文 献

- (1) Tsutsumi, M., ほか 2 名, 28th Nat. Des. Eng. Conf. ASME, 81-DE-7 (1981), 1.
- (2) 水口・ほか 2 名, 非破壊検査, 32-12 (昭 58), 956.
- (3) 水口・ほか 3 名, 機論, 50-453, A (昭 59), 953.
- (4) 水口, 機論, 50-457, A (昭 59), 1668.
- (5) 堤・ほか 3 名, 機講論, No. 820-13 (昭 57-10), 247.
- (6) 水口・ほか 3 名, 機論, 48-431, A (昭 57), 924.