超音波による結合板間の接触圧力分布に
及ぼす平面度の影響評価*水口 義久^{*1}, 渋谷 寿一^{*2}, 小泉 堯^{*2}Evaluation of the Effect of Flatness on the Contact Pressure Distribution
between Jointed Plates by Means of Ultrasonic Techniques

Yoshihisa MINAKUCHI, Toshikazu SHIBUYA, and Takashi KOIZUMI

A contact pressure distribution in jointed plates has been investigated by using an ultrasonic technique, especially by varying the flatness of joint surfaces. At first, the relations between contact pressure and sound pressure of reflected waves by using a normal probe and angle probes are obtained by compressing calibration blocks under various surface roughnesses. Next, when two rectangular plates and two disks with a circular hole are compressed under various convex flatnesses of the joint surfaces, the sound pressure of reflected waves is measured by the normal probe or the angle probes. From these relations, the contact pressure distribution in these jointed plates is quantitatively assessed. The experimental results are presented graphically and compared with an analytical one. It is clarified that the contact pressure distribution is influenced significantly by the very small flatness deviation, thus the proposed ultrasonic method is practically useful for the measurement of contact pressure.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Ultrasonic Measurement, Contact Pressure, Bolted joint, Rectangular Plate, Flatness Deviation, Calibration Curve, Normal Probe, Angle Probe

1. 緒 言

機械や装置の結合部を強度設計するとき、接触圧力を正確に把握することは工学上極めて重要である。そのため、これらの基本形態をなす積層板の結合問題に関する応力解析は、弾性論や有限要素法などを用いて数多く行われているが、接触面の境界条件はほとんどが真平面で滑らかに接触していると仮定して解析されている。一方、接触圧力測定に関する研究は測圧ピン⁽¹⁾、感圧フィルム⁽²⁾、表面粗さの変化量⁽³⁾および超音波^{(4)~(13)}による方法等がある。

なかでも、超音波を利用する方法はKrächter⁽⁴⁾や益子・伊東⁽⁵⁾⁽⁶⁾によって取扱われて以来、測定面の状態を損なうことなく真の接触圧力を測定できる可能性のある方法として最も注目されている。しかも、最近になって超音波による接触圧力の定量測定法が堤ら⁽⁸⁾、著者ら^{(9)~(12)}および原ら⁽¹³⁾によって検討され、かなり実用性が明らかにされてきた。これらの中で、堤ら⁽⁸⁾はボルト結合体の接触面のうねりが接触圧力分布に大

きな影響を及ぼすことを指摘しているが、それらの相互関係についてはまだ明らかにされていないようである。

接触面におけるうねりや表面粗さの存在を考慮した結合板の応力解析は一般に困難であるので、本研究では結合板間の平面度が接触圧力分布に及ぼす影響について、超音波を用いて実験的に調べた。まず、これまでの一連の研究^{(9)~(12)}と同様に、接触圧力を定量的に測定するために、接触部表面粗さが異なる数種類の較正ブロックを圧縮し、実験に用いる垂直探触子と斜角探触子について、接触面での圧力と反射波特性の関係を示す較正曲線を求めた。次に、接触面の形状が種々の凸形からなる単一ボルト結合体および二層長方形板を圧縮し、それぞれの板上に取付けられた各探触子により、負荷時の接触面からの反射波音圧を測定した。そして、これらの測定結果を較正曲線の結果に基づき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⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾と比較し、接触面の平面度と接触圧力分布の関係について調べ、また本測定法の実用性についても検討した。

2. 測定原理

機械加工された清浄な二平面の接触部は、通常真実

* 昭和63年6月5日 第6回実験力学国際会議において講演、原稿受付 昭和63年12月21日。

^{*1} 正員、山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田4-3-11)。

^{*2} 正員、東京工業大学工学部 (〒121 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

接触部と空隙部より構成されている。超音波がこのような音響インピーダンスの異なる2媒質の境界面に垂直入射すると、一部は反射するが他は透過する。よって、反射波音圧 P_r と入射波音圧 P_i の関係は次式で定義される。

$$R_p = \frac{P_r}{P_i} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 R_p は音圧反射率であり、2媒質の音響インピーダンスがともに等しい固体接触状態の接触面では、真実接触部で $R_p=0$ 、非接触部で $R_p=1$ となる。

接触面に作用する垂直荷重と真実接触面積の関係は、接触部近傍が完全に塑性的な場合にはほぼ比例し⁽¹⁶⁾、また完全に弾性的な場合には比例する⁽⁵⁾とされている。したがって、超音波による接触圧力測定法はこれらの関係が成り立つと仮定し、超音波探傷器を用いて真実接触面積の変化を反射波音圧として検出する。

図1 較正ブロックの寸法

図2 較正ブロックの圧縮方式

3. 較正実験

3.1 較正ブロックの圧縮実験 超音波を用いて接触圧力を定量的に測定するには、あらかじめ接触部表面粗さが反射波音圧に及ぼす影響を調べておく必要がある。そのため、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、ラップ仕上げによって表面粗さを変化させた。表1は実験に用いた較正ブロックの表面状態と機械的性質を示す。

図2は垂直探触子および斜角探触子を用いたときの較正ブロックの圧縮方式を示す。超音波探触子は接触面での反射波音圧が安定して得られるように被測定物上に設置する必要がある。そのため、垂直探触子(周波数 $f: 5 \text{ MHz}$, 振動子直径 $d: \phi 5 \text{ mm}$)は垂直探触子用重りによって 2.2 N の負荷で圧着した。一方、送信と受信用斜角探触子(周波数 $f: 5 \text{ MHz}$, 屈折角: 45° , 振動子サイズ: $5 \times 5 \text{ mm}$)の場合は、較正ブロック(I)の左右の位置に圧縮バネによって 2.7 N で圧着した。また、較正ブロックは接触面圧ができるだけ一様となるように、鋼球を介して負荷した。負荷の大きさはロードセルによって検出し、その際の接触面における反射波音圧は、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、反射波特性と接触圧力との関係を示す較正曲線を作成した。なお超音波探触子の接触媒質にはグリセリンを使用し、垂直探触子および斜角探触子を用いた場合の音速は、それぞれ較正ブロック(I)材中の縦波速度を 5900 m/s 、横波速度を 3200 m/s に設定した。

3.2 較正曲線 図3, 4は表1の較正ブロックの圧縮実験によって得られた垂直探触子と斜角探触子における反射波特性と平均接触圧力との関係を示した較正曲線である。横軸の平均接触圧力 p_m は較正ブロックの接触面圧を一様分布とみなし、荷重を較正ブロック

表1 較正ブロックの表面状態と機械的性質

No.	Block	Surface condition		Material	E (GPa)	V
		Roughness ($\mu\text{m/Rmax}$)	Machining method			
1	(I)	0.4	Lapping	S45C	206	0.3
	(II)					
2	(I)	0.8				
	(II)					
3	(I)	1.2				
	(II)					
4	(I)	1.5				
	(II)					
5	(I)	2.0				
	(II)	2.2				
6	(I)	2.6				
	(II)	3.0				
7	(I)	3.8				
	(II)					

の断面積($225 \pi \text{ mm}^2$)で除した値を示してある。また、縦軸の反射波特性 E_R^* は次式を用いた⁽⁸⁾。

$$E_R^* = 1 - \frac{h_e}{h_{e0}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 h_e と h_{e0} はそれぞれ圧縮荷重を加えた場合と加えない場合における接触面での第一反射波の波高値である。図3、4より、接触部の表面粗さが大きくなるにつれて負荷の増加に対する E_R^* 値は小さくなり、反射波音圧の変化量が少なくなることがわかった。また、これらの結果は増加と減少時における E_R^* 値の差があまりなく、ほぼ直線的な結果が得られた。

図5は図3、4の較正結果をもとに、較正ブロック

図3 垂直探触子における平均接触圧力 p_m と反射波特性 E_R^* の関係

図4 斜角探触子における平均接触圧力 p_m と反射波特性 E_R^* の関係

(I)と(II)の表面粗さの平均値と p_m/E_R^* の関係を示す。図より、垂直探触子および斜角探触子を用いた場合とも表面粗さが粗くなるにつれて p_m/E_R^* 値は増加していくが、表面粗さに対する p_m/E_R^* 値は探触子によって異なることを示されている。結合板間の接触圧力の定量値を求めるには、図5より平板の接触部表面粗さに相当する p_m/E_R^* 値を用いればよい。

4. 二層平板の接触圧力測定

4.1 二層平板の圧縮実験 結合された二層平板

図5 表面粗さと p_m/E_R^* の関係

(a) 長方形板

(b) 有孔円板

図6 二層平板の実験モデル

間の平面度が接触圧力に及ぼす影響を調べるため、図6に示す二層からなる長方形板および有孔円板の実験モデルを用いて接触圧力測定を行った。圧縮荷重は全荷重が W である等分布圧力 p が作用するものとし、また図中の E , ν はそれぞれ各平板の縦弾性係数およびポアソン比を示す。

長方形板の寸法は、長さ $l=180$ mm, 厚さ $h=45$ mm, 奥行き $t=45$ mm であり、その上下面は研削加工後、接触面については表面粗さが $1\text{ }\mu\text{m} R_{\text{max}}$ で、種々の凸面形状にラップ加工した。また、有孔円板の寸法は外径 $2b=\phi 160$ mm, 内径 $2a=\phi 20$ mm, 厚さ $h=45$ mm であり、その上下面は長方形板と同様な加工を行った。これらの長方形板および有孔円板の寸法と機械的性質を表2に、またそれらの接触面形状を図7に示す。

まず、二層長方形板の接触圧力測定では図6(a)に対応するように、二層長方形板の上下面に断面寸法が幅 $2a=20$ mm, 奥行き $t=45$ mm の鋼製圧縮ブロックを設置した。そして長方形板(I)上に入射角と反射角が 45° となる位置に、送信と受信用の斜角探触子を重りにより 2.0 N の負荷で圧着し、二層長方形板に圧縮荷重 W を作用させた。このとき、荷重の大きさはロードセルによって検出した。また接触面における反射波音圧は、表2(a)に示した組合せについて、 $x=0, \pm 5, \pm 10, \dots, \pm 25$ mm の各位置で、荷重を段階的に変

化させたときの第一反射波の波高値を読取った。なお、音速は長方形板(I)材中の横波速度である 3200 m/s に設定した。一方、垂直探触子を用いた接触圧力測定では、斜角探触子のかわりに垂直探触子を 2.3 N の負荷で圧着し、上述と同様な方法で測定を行った。接触面における反射波音圧は $x=\pm 20, \pm 25, \pm 30, \dots, \pm 60$ mm の各位置で、左右対称に取付けた二つの垂直探触子を用いて測定した。また、音速は長方形板(I)材中の縦波速度である 5900 m/s に設定した。

二層有孔円板の圧縮は図6(b)に対応するように、板の上下面に $\phi 20$ mm のボルト座面に相当する内径 $2a=\phi 20$ mm, 外径 $2c=\phi 30$ mm の鋼製圧縮用円筒ブロックを取付けた後、荷重 W を作用させた。この場

表 2

(a) 長方形板(I), (II)の寸法と機械的性質

No.	Plate	h (mm)	2l (mm)	Condition of contact surfaces			Material	E (GPa)	ν
				Flatness deviation (μm)	Roughness ($\mu\text{m} R_{\text{max}}$)	Machining method			
1	(I)	45	180	0.4	1.0	Lapping	S45C	206	0.3
	(II)			0.5					
2	(I)			0.4					
	(II)			1.8					
3	(I)			0.4					
	(II)			3.2					
4	(I)			0.4					
	(II)			6.6					

(b) 有孔円板(I), (II)の寸法と機械的性質

No.	Disk	h (mm)	$\phi 2b$ $\phi 2c$ (mm)	Condition of contact surfaces			Material	E (GPa)	ν
				Flatness deviation (μm)	Roughness ($\mu\text{m} R_{\text{max}}$)	Machining method			
1	(I)	45	$\phi 2b=160$ $\phi 2c=20$	0.3	1.0	Lapping	S45C	206	0.3
	(II)			0.6					
2	(I)			0.3					
	(II)			1.8					
3	(I)			0.3					
	(II)			2.6					
4	(I)			0.3					
	(II)			5.4

(a) 長方形板 [表2(a)]

(b) 有孔円板 [表2(b)]

図7 二層平板の接触面形状

合の接触圧力測定は表 2(b) に示した組合せについて、二層長方形板の場合と同様に行った。なお、接触圧力は垂直探触子を $r=25, 30, 35, \dots, 65$ mm の位置に直径上に対向して取付け、また斜角探触子を $r=15, 20, 25$ mm で 180° 離れた位置に取付けて測定した。

4.2 二層平板の測定曲線 図 8 は表 2(a) 中の No.2 の組合せによる二層長方形板を圧縮したとき、斜角探触子および垂直探触子を用いて得られた反射波特性 E_R の測定曲線の一例である。横軸の圧力 p は圧縮荷重 W を圧縮ブロックの断面積 (20×45 mm²) で除した値を示す。各接触圧力測定位置での荷重と反射波特性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

くなっている。また $x=40$ mm の位置では測定曲線の傾きが水平となり、負荷時の反射波特性が無負荷時と同じことから、接触面の分離点になっていることがわかった。表 2 中の他の組合せによる二層長方形板および二層有孔円板を圧縮したときの測定曲線も、図 8 と同様な傾向を示した。

4.3 接触圧力分布の算出 図 8 に示した二層長方形板の接触圧力分布は、図 5 の較正曲線より、この板の接触部表面粗さである $1.0 \mu\text{m}$ R_{max} に対応する p_m/E_R 値に基づき算出した。他の組合せによる二層長方形板および二層有孔円板の接触圧力分布も同様に求めてみた。

4.4 二層平板の平面度が接触圧力分布に及ぼす影響 図 9, 10 はそれぞれ表 2(a), (b) で示した二層長方形板および二層有孔円板の組合せによる接触圧力分布の結果を示す。図中の $\circ, \Delta, \dots$ 等の記号は

真平面とみなした平板(I)と接触面を凸形に変化させた平板(II)の組合せによる実験結果であり、 $\circ, \Delta, \square, \diamond$ 印は斜角探触子を用い、 $\bullet, \blacktriangle, \blacksquare, \blacklozenge$ 印は垂直探触子を用いて得られた結果である。ここで、これらの結果は等距離での二つの測定値を平均して求めたものであり、破線は想定した曲線を示す。一方、実線は図 6 の実験モデルに対し、接触面が滑らかに全平面で接触していると仮定して得られた解析結果⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾をもとに数値計算した結果を示す。

図 9, 10 の実験結果を解析結果と比較するにあたり、結合平板間に存在する微小なうねりや表面粗さむらが実験結果に影響することが考えられる。そこで、表 3

図 8 二層長方形板の荷重 W と反射波特性 E_R の測定曲線 (表 2(a), No.2 の場合)

図 9 二層長方形板の接触圧力分布

図 10 二層有孔円板の接触圧力分布

表 3

(a) 二層長方形板の接触圧力分布の合力 S と圧縮荷重 W の比

Ratio	Flatness deviation ($\mu\text{m}/90\text{mm}$)			
	0.5	1.8	3.2	6.6
S/W	1.019	1.032	1.050	1.052

(b) 二層有孔円板の接触圧力分布の合力 S と圧縮荷重 W の比

Ratio	Flatness deviation ($\mu\text{m}/80\text{mm}$)			
	0.6	1.8	2.6	5.4
S/W	1.082	1.026	1.090	1.079

には図 9, 10 の実験結果をもとに求めた合力 S と圧縮荷重 W の比を示す。これらの値は正確な 1 に対してその誤差が 10 % 以下と少なく、実験結果としてはかなり妥当な結果であると判断し、図 9, 10 の解析結果と実験結果について比較検討を行った。

まず図 9 において、接触面がほぼ真平面とみなせる○、●印で示された実験結果は、解析結果による接触面の分離推定点より負荷部に近い位置で分離しているが、その他の領域では解析結果とよく一致している。一方、接触面が凸形に大きくなるにつれ最大接触圧力は大きくなり、接触面の分離位置が負荷部に近づくことがわかった。また、 $x/a=2, 2.5$ の位置で測定した垂直探触子と斜角探触子の実験結果はほぼ一致している。図 10 においては、接触面がほぼ真平面とみなせる○、●印で示された実験結果は負荷近傍で解析結果より少し大きな値を示し、接触圧力が小さい領域で解析結果より小さな値になっている。また、接触面が凸形に大きくなった時の接触圧力分布は二層長方形板の場合と同様な傾向を示した。

図 9, 10 の実験結果より、接触面の微小な平面度誤差が接触圧力分布に大きな影響を及ぼすことが明らかにされた。したがって、接触面からの油やガス漏れが大きな問題となる圧力容器や管フランジ結合体では、特に接触面の平面度に細心の注意を払って機械加工することが必要であるといえる。

5. 結 言

斜角探触子と垂直探触子を用いた超音波による接触圧力の定量測定法を用い、単一ボルト結合体および二層長方形板における接触面の平面度が接触圧力分布に及ぼす影響を調べ、次のような結論を得た。

(1) 実験結果は接触圧力が小さい領域を除けば解析結果とかなりよく一致した。これより本測定法の実用性が明らかになった。

(2) 二層平板の接触面が凸形になるに従い、最大接触圧力が大きくなるが、接触領域は狭くなる。また、接触面の微小な平面度誤差が接触圧力分布に大きな影響を及ぼす。

(3) 垂直探触子と斜角探触子を用いた実験結果はほぼ一致し、どちらの測定法でも接触圧力分布は正確に測定できる。

(4) 接触面における超音波の反射波特性は接触圧力とほぼ直線関係で与えられる。また、これらの傾向は接触部表面粗さが粗くなると反射波音圧の変化量は少なくなる。

最後に、本研究は昭和 62, 63 年度文部省科学研究費(一般研究 C)、および昭和 60 年度實吉奨学会助成金の援助のもとに遂行されたものであることを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) 水口・ほか 2 名, 非破壊検査, 31-11(1982), 843.
- (2) 伊藤・ほか 2 名, 機論, 50-458, C(1984), 1816.
- (3) 加藤・ほか 2 名, 機論, 44-381(1978), 1742.
- (4) Krächter, H., *Werkstatt Betr.*, 91-5(1958), 246.
- (5) 益子・伊東, 機論, 34-257(1968), 191.
- (6) 伊東・益子, 機論, 36-284(1970), 639.
- (7) Ito, Y., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Mech. Des.*, 101-2(1979), 330.
- (8) Tsutsumi, M., ほか 2 名, *28th Nat. Des. Eng. Conf. ASME*, 81-DE-7(1981), 1.
- (9) 水口・ほか 2 名, 非破壊検査, 32-12(1983), 956.
- (10) 水口・ほか 2 名, 機論, 50-453, A(1984), 953.
- (11) 水口, 機論, 50-457, A(1984), 1668.
- (12) 水口・ほか 2 名, 機論, 51-461, A(1985), 268.
- (13) 原・大石, 機論, 51-471, A(1985), 2646.
- (14) 水口・ほか 3 名, 機論, 48-431(1982), 924.
- (15) 水口・ほか 3 名, 機論, 48-433(1982), 1178.
- (16) 築添, 潤滑, 13-3(1968), 101.