異種金属層材の疲れ強さについて*

益 木 功** 玉置維昭** 飯沼勝彦**

Fatigue strength of laminated materials of dissimilar metals and alloys*

by Isao Masumoto**, Koreaki Tamaki** and Katsuhiko Iinuma**

Abstract

Various laminated bars and plates were made combining some steels and face centered cubic metals and alloys by adhesive-bonding, casting and hot rolling. The fatigue tests were performed on the notched bar and notched plate test specimens of these laminated materials, and effects of each surface material and joining method were compared. The experimental results obtained were as follows:

- (a) Adhesive-bonded laminated bars with core mild steel and surface materials of stainless steel, copper, 60/40 brass and aluminum showed larger fatigue strength than that of solid mild steel bar. With 1 mm in surface thickness, the laminated bar of stainless steel had the largest fatigue strength and that of aluminum the smallest of all the tested laminated bars, but with 0.5 mm in surface thickness, there was little difference between the fatigue strength of those kind of surface materials.
- (b) The fatigue strength of adhesive-bonded copper-80 kg/mm² high strength steel bar was larger than that of the same high strength steel bar, only when the copper thickness was smaller than 0.5 mm.
- (c) Cast laminated bar of 60/40 brass and mild steel had a little larger fatigue strength comparing with adhesive-bonded one.
- (d) Both cycles to failure and cycles to crack initiation of stainless clad steel increased with increment of stainless steel thickness. The stainless clad steel plate had larger fatigue strength than that of adhesive-bonded plate.
- (e) Rolled laminated plate of 2.5% nickel steel and mild steel had a larger fatigue strength than that of mild steel plate and, in a certain stress range, it showed rather larger fatigue strength comparing with 2.5% nickel steel plate.

1. 緒 言

構造用材料としての金属は一般に均質なものとして、設計されているが、実際にはたとえば圧延鋼板はパーライトおよびフェライトがせん維状に並んだ層材である。また材料を使用する立場から見て、かならずしもすべての金属材料が表面も内部も均質である必要はないように思われる。むしろ逆に性質のことなる2種の材料を層状に組合わせることによって、構造用材料としてもより性質のすぐれた、あるいはより経済的な材料を作り得る可能性が考えられる。

主として耐食性を目的とした各種クラッド鋼は従来から使用されているが、構造用材料としての金属層材の機械的性質を問題にした研究は少ないようである。もっとも最近では合成材料の発達からプラスチックを心材と

し、アルミニウムを表面材とした複合板¹⁾が生まれ、また金属材料の分野でも高炭素鋼と低炭素鋼との層材²⁾³⁾や、異種金

属薄層をはさんだ鋼層材⁴⁾⁵⁾などの報告が最近見られる。

本研究は上述の観点から、疲れ破壊のように材料表面の性質がとくに問題になる場合について、表面と内部で機械的性質のことなる材料の層材によって、どのような性質が得られるかという点を実験的にしらべたものである。金属の組合わせとしては、まず予備的な知識を得るため、極端に性質のことなる面心立方型の諸金属と鋼とを用い、接着、鋳込みおよび圧延によってこれらから種々の層材を作った。

2. 実験方法

本実験では表面層を延性にとむ面心立方型の金属とし、心材を軟鋼とした場合の疲れ挙動についてしらべた。試験材の層材は接着および鋳込みによる丸棒のものと、圧延および接着による板状のものとを作成した。丸棒の層材は能力 10 kg-m の小野式回転曲げ疲れ試験機

* 原稿受付 昭和45年4月14日 (昭和44年春季大会にて発表)

** 正 員 名古屋大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Nagoya University

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of steels for core materials of laminated bars

Materials	Tensile strength, kg/mm ²	Yield strength, kg/mm ²	Elongation, %	Chemical composition, %							
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	The others
Mild steel	51	27	38	0.23	0.08	0.73	0.009	0.022	—	—	—
80 kg/mm ² High strength steel	83	76	29	0.13	0.28	0.88	0.014	0.007	0.82	0.54	Cu 0.30 Mo 0.53 V 0.052 B 0.003

Table 2 Mechanical properties of drawn pipes for surface materials of laminated bars

Materials	Tensile strength, kg/mm ²	Yield strength, kg/mm ²	Elongation, %	Vickers hardness	Young's modulus, 10 ⁴ kg/mm ²
Mild steel	35	28	50	144	2.1
Stainless steel	64	24	58	174	1.9
Copper	31 (16)*	28 (10)*	31	113	1.3
60/40 Brass	46	41	27	147	1.1
Aluminum	14	13	20	44	0.7

* As annealed

により, また板の層材は能力 200 kg-m のシェンク式平板曲げ疲れ試験機で実験を行なった。

(a) 層材の作製

接着による丸棒層材には心材として Table 1 に示す軟鋼板 (20 mm 厚さ) および 80 kg/mm² 高張力鋼板 (20 mm 厚さ) から直径 9.8 mm の丸棒を削り出し, 表面材として Table 2 に示す軟鋼, 18-8 ステンレス鋼, 銅, 60/40 黄銅およびアルミニウムの内径 10 mm, 外径 16 mm の引板管を用いた。心材表面と管の内面とをエメリー紙で研磨し, 4 塩化炭素で洗滌した後, エポキシ系樹脂を塗布し, 80°C に 1 時間加熱して接着硬化させ, Fig. 1 のような丸棒層材を作製した。疲れ試験片は Fig. 1 の断面形状のものを全長 100 mm, 外径 1.5 mm に仕上げ, 表面材につけた V 型切欠きの深さを種々に変えて, 切欠底の表面材の厚さを 1.5~0 mm に変化させた。この場合切欠底での直径は 13~10 mm であり, 応力集中係数は 3.7~3.8 である⁶⁾。ただし以下の応力計算および実験結果の整理では, 上述の試験片における心材軟鋼の直径を 10 mm とし, 樹脂の厚さを無視して取扱っている。

Fig. 1 Laminated test bar adhesive-bonded with epoxy resin **Fig. 2** Fatigue test specimen of the brass-steel laminated material

鋳込み層材としては, Fig. 2 の (a) の形状の軟鋼丸棒を作り, アルゴン気流中で 900°C に予熱し, 直径 10 mm の部分を含む長さ約 80 mm をアルミナるつば中の 1000°C の 70/30 黄銅あるいは 60/40 黄銅浴に浸漬して 8 分間保持し, るつばとともに室温まで冷却して, 黄銅を溶着させた。そして Fig. 2 (a) のように端部に軟鋼を溶接して, 同図の寸法に仕上げ, 疲れ試験片を作製した。また鉛—すず合金 (はんだ) を溶融し, Fig. 2 (a) の軟鋼丸棒に接着させて, Fig. 2 (b) の形状に仕上げた試験片についても実験を行なった。

板状層材としては, Table 3 に示す市販のステンレス・クラッド鋼の他に, 軟鋼と 2.5% ニッケル鋼との熱間圧延による層材を作製して実験に供した。圧延層材の作製には巾 50 mm, 長さ 60 mm, 厚さ 10 mm の両材料の接合面を研磨後, エメリー紙で仕上げ, 4 塩化炭素で洗滌し, Fig. 3 のように重ね合わせて全周を溶接して圧延した。この場合予備実験により, 圧接結果の良好な条件を求め, 圧延温度は 900°C で圧下率は 20% とした。圧延後 2.5% ニッケル鋼の熱処理に準じ, 900° 焼ならし, 850° 水焼入れ, 575° 焼もどしの熱処理を施した。圧延層材はすべて超音波検査および切断面の観察によ

Table 3 Mechanical properties and chemical compositions of the steels for laminated plates

Materials	Thickness, mm	Tensile strength, kg/mm ²	Yield strength, kg/mm ²	Elongation, %	Chemical composition, %						
					C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Clad { Stainless steel	2.5	72	21	65	0.05	0.65	1.57	0.029	0.014	9.06	18.60
steel { Mild steel	12	46	25	36	0.11	0.27	0.68	0.022	0.022	—	—
2.5% Ni steel	12	64	51	37	0.13	0.24	0.59	0.012	0.007	2.25	—
Mild steel	12	51	31	40	0.20	0.23	0.60	0.021	0.023	—	—

Fig. 3 Preparation for hot rolling of 2.5% Ni steel-mild steel laminated plate

り、完全な接合を確かめて実験に供した。

圧延層材から Fig. 4 の A の部分を作り、B の部分の軟鋼板と表裏 2 層で CO₂-O₂ アーク溶接して、同図の形状寸法に仕上げ、全板厚を 10 mm 一定とし 2.5% ニッケル鋼側に半径 1 mm、深さ 1 mm の半円形切欠 (応力集中係数 2.2)⁷⁾ をつけて、疲れ試験片とした。切欠底での 2.5% ニッケル鋼厚さは 3 mm である。

さらに市販のクラッド鋼から Fig. 5 に示すような、全板厚を 12 mm として、ステンレス鋼厚さを種々変え

Fig. 4 Fatigue test specimen of 2.5% Ni steel-mild steel laminated plate **Fig. 5** Fatigue test specimen of stainless clad steel

た試験片を作り、半径 1 mm、深さ 1 mm の半円形切欠 (応力集中係数 2.2)⁷⁾ をつけ、切欠底のステンレス鋼厚さを 0~1.1 mm として実験に供した。

(b) 丸棒層材による表面材の応力測定

本実験の層材では表面材と心材のヤング率がことなるため、表面材にかかる応力を正確に求めることは、一般に困難と考えられる。そこで疲れ試験の前に平滑な層材試験片を用いて、表面材にかかる応力についての予備実験を行なった。

銅—軟鋼丸棒試験片の銅表面にひずみゲージ (ゲージ長さ 10 mm) をはりつけ、疲れ試験機にとりつけて 2 点荷重をかけ、曲げモーメントと表面ひずみとの関係を Fig. 6 のように求めた。図中の丸印は実測値であり、直線は後述の計算式から算出したものである。この実験では試験片の心材の直径を 10 mm 一定とし、表面材の銅の厚さを変えているので、モーメント一定の場合に、表面材の銅の厚さが増加すると、これにともなって試験片の全直径も増加し、表面の最大ひずみは減少している。同図によればひずみが約 12×10^{-4} 以下の範囲ではひずみとモーメントとは直線関係にあり、この範囲では計算値とよく一致している。また軟鋼から銅にわたってひずみ分布が連続で、直線的であると仮定すると、Fig. 6

Fig. 6 Maximum strain on surface of copper-steel laminated bars with various copper thicknesses

(a) Copper thickness 0.5 mm (b) Copper thickness 1.0 mm
Fig. 7 Stress distributions of copper-steel laminated bars with copper thickness 0.5 and 1.0 mm; bending moment 3 kg-m

の結果から層材断面のひずみ分布は Fig. 7 の点線のようにになり、これにヤング率(軟鋼 2.1×10^4 , 銅 1.3×10^4 kg/mm²)をかけることにより、応力分布は同図の実線ようになる。この図には層材と同一寸法の軟鋼一体材の応力分布 σ_M が2点鎖線で示されているが、層材の銅表面の応力は軟鋼一体材の表面応力にくらべてはるかに低い。

Fig. 8 Relation between copper thickness t and maximum stresses on copper surface of copper-mild steel bar comparing with solid mild steel bar

Fig. 8 は軟鋼心材の直径を一定とし、銅の厚さを変えた場合、軟鋼一体材と銅-軟鋼層材の表面の最大応力を比較したもので、黒丸印は層材についての実測値であり、実線および点線はそれぞれ層材および軟鋼についての計算値である。なお層材の場合、 $t=0$ mm の○印の位置には値は存在しない。この場合の計算値は次式によって求めた。

$$\text{一体材丸棒: } \sigma_1 \max = M/Z, \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Z = \pi r^3/4$$

$$\text{層材丸棒: } \sigma_2 \max = \frac{M}{Z} \cdot \frac{1}{1 + (1-t/r)^4 (E_2/E_1 - 1)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_1 \max / \sigma_2 \max = 1 + (1-t/r)^4 (E_2/E_1 - 1) \quad \dots\dots\dots(3)$$

t : 表面材厚さ

r : 試験片半径; 層材では r =心材の半径 (5 mm) + t

E_1 : 表面材のヤング率, (この場合銅: 1.3×10^4 kg/mm²)

E_2 : 心材のヤング率, (この場合軟鋼: 2.1×10^4 kg/mm²)

(3) 式によれば表面材が降伏しない範囲では、 t/r の比が減り、 E_2/E_1 の比が増すにしたがって、一体材と層材の表面の最大応力の比 $\sigma_1 \max / \sigma_2 \max$ は大きくなり、 E_2/E_1 の値に近づく。逆に t/r の比が増した場合は $\sigma_1 \max / \sigma_2 \max$ の値は小さくなり、1 に近づく。Fig. 8 の実験結果はこのことを示している。

また(2)式により、軟鋼心材直径 10 mm で、ステンレス鋼、60/40 黄銅、アルミニウムおよび軟鋼の表面材の厚さを 0.5 および 1 mm とした平滑丸棒の応力とモーメントとの関係(2)式による計算で求め、Fig. 9 に示す。Fig. 9 と同形状の試験片の表面最大応力は同図から読むことができる。

以下に述べる層材の疲れ試験結果では、種々の層材についての比較を簡単にするため、曲げモーメントを用いて S-N 線図を表わした。

(c) 平板層材による表面材の応力測定

Table 3 に示したステンレス・クラッド鋼板で Fig. 10 の断面形状の試験片を作り、平板曲げ疲れ試験機にかけて、曲げモーメントとステンレス鋼表面のひずみとの関係を実測した。その結果を Fig. 10 に示す。弾性範囲の一定のモーメントまでは次式による計算値とほぼ一致している。

Fig. 11 は全板厚 11 mm でステンレス鋼厚さ 1.1 お

Fig. 9 Calculated maximum stresses of various surface materials of laminated bars at different bending moments

Fig. 10 Relations between bending moment and measured strain on stainless steel of clad comparing with calculated strain

および 0.4 mm の場合につき、弾性範囲でモーメントと応力との関係を計算した結果である。Fig. 11 と同形状の試験片の表面最大応力は同図から読むことができる。

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z} \times \frac{0.5 h' / h \cdot E_1 / E_2}{E_1 / E_2 (h' / h)^3 + (1 - E_1 / E_2) (h' / h - t / h)^3 + (1 - h' / h)^3} \quad (4)$$

$$h' / h = 0.5 \left(\frac{t}{h} + \frac{1 - t / h}{1 - (E_1 / E_2) t / h} \right) \quad (5)$$

Fig. 11 Relation between bending moment and maximum stress on stainless steel surface of laminated plate, total thickness = 11 mm

$$Z = bh^2/6 \quad (6)$$

t : 表面材のステンレス鋼厚さ

h : 全板厚

h' : 表面材の表面から中立軸までの距離

b : 試験片巾

E_1 : 表面材のステンレス鋼のヤング率; 1.9×10^4 kg/mm²

E_2 : 軟鋼のヤング率; 2.1×10^4 kg/mm²

3. 実験結果

(a) 接着層材の疲れ強さにおよぼす表面材の影響
切欠付きの丸棒接着層材の疲れ試験結果を Fig. 12 および Fig. 13 に示す。図中の 2 点鎖線は軟鋼一体材の S-N 線である。Fig. 12 は切欠底の表面材厚さ t および全直径がそれぞれ 1 mm および 12 mm の場合であっ

Fig. 12 Fatigue strength of adhesive-bonded laminated bars with various surface materials; total diameter beneath notch 12 mm, $t=1.0$ mm

Fig. 13 Fatigue strength of adhesive-bonded laminated bars with various surface materials; total diameter beneath notch 11 mm, $t=0.5$ mm

て、いずれの層材も軟鋼一体材にくらべて疲れ強さは大きい。とくにステンレス鋼を表面材としたものは、軟鋼を表面材とした層材よりもはるかに疲れ強さは大きい。しかし銅およびアルミニウムを表面材としたものは、軟鋼の層材よりも疲れ強さは小さくなっている。

これに対して Fig. 13 は切欠底の表面材の厚さを 0.5 mm, 切欠底の全直径を 11 mm とした場合であって、表面材材質による疲れ強さの差が小さくなっており、また Fig. 12 の実験結果とは逆に、アルミニウムおよび銅を表面材としたものが、軟鋼を表面材としたものよりも疲れ強さが大きくなっている。

Fig. 14 は表面材厚さ t と 10^6 回における時間強さ（破断モーメント）との関係に、以上の実験結果を書き直したものである。同図によれば、アルミニウム—軟鋼およ

Fig. 14 Relations between the surface thickness (t), the ratio of surface thickness to total bar radius (t/r) and the fatigue strength at 10^6 cycles of various laminated bars with stainless steel, mild steel, copper and aluminum surfaces

び銅—軟鋼層材は、表面材厚さが小さい場合にのみ、軟鋼—軟鋼層材よりも疲れ強さが大になり、とくに $t=0$ すなわち切欠底が心材表面に達している場合にも疲れ強さが大になることがわかる。

Table 4 には以上の実験結果を総括し、さらに表面材の性質の影響を見るために、銅および軟鋼の表面材を焼なましした場合の実験結果も加え、同じ直径の軟鋼一体材の疲れ寿命との比較を示した。表面材として焼なまし銅を用いた場合には、引抜のままのものにくらべて疲れ寿命が減少しているが、軟鋼の表面材の場合には、焼なまし

Table 4 Comparison of fatigue lives of various adhesive-bonded laminated bars

Core materials	Surface materials	Thickness of surface material t (Total diameter d)			
		$t=0.5$ mm ($d=11$ mm)		$t=1.0$ mm ($d=12$ mm)	
		Cycles to failure, $\times 10^6$	Cycles of laminated bar	Cycles to failure, $\times 10^6$	Cycles of laminated bar
			Cycles of core steel bar		Cycles of core steel bar
Mild steel bar		Moment = 2.5 kg-m 0.3	1	Moment = 3.2 kg-m 0.3	1
Mild steel	Stainless steel	1.7	5.7	>10	>33
	Copper	1.6	5.3	0.5	1.7
	Copper (Annealed)	0.9	3.0	—	—
	60/40 Brass	1.7	5.7	—	—
	Aluminum	1.3	4.3	0.4	1.3
	Mild steel	0.8	2.7	0.9	3.0
	Mild steel (Annealed)	1.1	3.7	—	—
80 kg/mm ² high strength steel bar		Moment = 4 kg-m 0.3	1	Moment = 5.2 kg-m 0.3	1
80 kg/mm ² high strength steel	Copper	1.8	6.0	0.2	0.7

しによってむしろわずかに増加している。なお Table 4 において軟鋼—軟鋼層材が軟鋼—一体材にくらべ、寿命が 2.7~3.7 倍に増加しているのは、接着部におけるき裂の停留による効果であろうと考えられる。

Fig. 15 Crack propagation curves of copper-steel and steel-steel laminated bars; bending moment 2.6 kg-m, surface material thickness beneath notch 1.0 mm

Fig. 15 は層材丸棒試験片にモーメント 2.6 kg-m の荷重をそれぞれのくり返し数与えた後、試験片を長手方向に切断して、顕微鏡によってき裂長さを測定した結果である。同図は軟鋼および銅のいずれの表面材の場合も、表面材にき裂を生じ、エポキシ系樹脂の接着層まで進展したところでき裂は停留することを示している。なお同図に並記した銅—軟鋼層材のたわみは試験片を取付けた状態で、試験機を止めて測定したものであるが、表面材が破断した時点に対応してたわみが急激に増大することを示している。

つぎに銅—80 kg/mm² 高張力鋼層材についての実験

Fig. 16 Fatigue strength of copper-80 kg/mm² high strength steel laminated bar

結果を Fig. 16 に示す。同図の○印は切欠底の銅の厚さが 1 mm で、全直径が 12 mm の場合であって、同じ全直径の高張力鋼—一体材 (○印) よりも疲れ強さはやや小さい。これに対して△印は銅の厚さが 0.5 mm、全直径が 11 mm の場合であって、同じ全直径の高張力鋼 (▲印) よりも疲れ強さは大きい。銅の厚さ 0.5 mm のときに層材の疲れ強さが一体材よりも大きい点は銅—軟鋼層材と同様であるが、銅の厚さが 1 mm の場合は高張力鋼—一体材よりも疲れ強さがやや低く、これに対し軟鋼の層材では軟鋼—一体材よりも疲れ強さがやや高くなっている。Table 4 は一体材と層材との疲れ寿命の比を各層材について比較して示したものである。

(b) 鋳込み層材の疲れ強さ

Fig. 17 に示す表面材厚さ 0.5 mm の場合の実験結果によれば、60/40 黄銅を表面材としたものは、破線で示した 60/40 黄銅の接着層材にくらべると疲れ強さはわずかに小さい。70/30 黄銅は軟鋼—一体材とくらべていちじるしい差は認められない。また鉛—すず合金 (はんだ) を表面材としたものは時間強さでは軟鋼—一体材とほぼ同等であるが、疲れ限度は 60/40 黄銅の場合よりもむしろ大きいようである。

Fig. 17 Fatigue strength of cast laminated bars with various surface materials; total diameter beneath notch 11 mm, $t=0.5$ mm

上述の黄銅—軟鋼の鋳込み層材の疲れ寿命を接着層材と比較し、さらに 60/40 黄銅厚さ 1 mm、全直径 12 mm の場合の結果を加えて Table 5 に示す。黄銅厚さが 1 mm のときには黄銅表面材の効果が認められたが、黄銅厚さ 0.5 mm の場合、疲れ寿命は同一直径の一体材と同じであって、表面材の効果は認められない。また接着層材にくらべ、鋳込み層材では境界層での疲れき裂の停留がないので、疲れ寿命がやや小さいのは当然と考えられるが、その差はわずかである。ただし鋳込み層材の表面材は鋳造組織であって、引抜管の場合とはまったくことになっており、心材の軟鋼も熱影響を受けて変質しているので、上述の差が接着の影響のみによるものと見てこ

Table 5 Comparison of fatigue lives of cast 60/40 brass-mild steel laminated bars and adhesive-bonded bar

Types of laminated bars	Brass thickness t (Total diameter d)	Cycles to failure, $\times 10^6$	(Cycles of laminated bar) (Cycles of steel bar)
Mild steel bar ($d=11$ mm)		Moment = 2.5 kg-m 0.3	1
Cast	$t \approx 0.5$ mm ($d=11$ mm)	1.6	5.3
Adhesive bonded	$t \approx 0.5$ mm ($d=11$ mm)	1.7	5.7
Mild steel bar ($d=12$ mm)		Moment = 3.2 kg-m 0.3	1
Cast	$t = 1$ mm ($d=12$ mm)	0.3	1

Fig. 18 Effect of surface material thickness on the fatigue strength of stainless clad steel plate comparing with adhesive-bonded stainless steel-mild steel plate **Fig. 19** Crack propagation curves of stainless clad steel plates with various stainless steel thickness beneath notch t

とはできない。

(c) 圧延層材の疲れ強さ

Fig. 18 にステンレス・クラッド鋼板 S-N の線図を示す。この図のたて軸は前述の接着層材および鋳込み層材の場合と同様曲げモーメントで表示してある。Fig. 18 によれば、層材の疲れ強さは切欠底のステンレス鋼厚さ t の増加とともに増加している。そして $t=0$ すなわち切欠底が軟鋼台材表面に接している場合でも、軟鋼一体材よりも疲れ強さが大きくなっており、この実験結果はすでに述べた丸棒の接着層材の場合と一致している。

つぎに圧延層材についてき裂の進展状況を観察した。あらかじめ切欠部の側面をバフ研磨した圧延層材の板状試験片に一定の荷重を加え、一定のくり返し数ごとに試験機を止めて、切欠部側面に電子顕微鏡用の 5×12 mm のレプリカ膜を酢酸-メチルアルコールではりつけ、き裂をレプリカ膜に転写した。そしてこれをガラス板にはさんで、透過光による光学顕微鏡で測長した。実験結果を Fig. 19 に示す。ステンレス鋼厚さ t が増加すると、き裂発生までのくり返し数が増加し、進展速度は減少する。しかしき裂は接合部で停留したり、進展速度をかえたりすることなく、連続的に進行しており、この点では接着層材とことなっている。Photo. 1 はステンレス・クラッド鋼接合部の顕微鏡写真で、き裂は接合部をまっすぐに横切って進んでいる。

Fig. 18 の $\triangle$ 印および $\blacktriangle$ 印は接着によって作った板状のステンレス鋼-軟鋼層材について、比較のためステンレス・クラッド鋼と同様の実験を行なった結果である。すなわちステンレス・クラッド鋼からステンレス鋼だけの層と軟鋼だけの層をそれぞれ別に作り、これら両層をエポキシ系樹脂で接着した後、切削加工して圧延層材試験片と同一形状寸法の板状接着層材試験片 (Fig. 5) を作った。圧延層材にくらべて接着層材の疲れ強さはかえって低下している。この結果は接着層におけるき裂の停留の影響を認めた前述の 60/40 黄銅接着層材と鋳込み

×300×1/2

Photo. 1 Crack propagation of stainless clad steel plate

層材との比較の場合と、矛盾しているが、その理由は明らかでない。

上述の実験結果から、軟鋼一体材、圧延層材 ($t=0.4$ mm) および接着層材 ($t=0.5$ mm) の疲れ寿命を比較して Table 6 に示す。軟鋼一体材にくらべて圧延層材および接着層材の疲れ寿命はそれぞれ56倍および24倍になっている。

Table 6 Comparison of fatigue lives of stainless clad steel and adhesive-bonded plate

Types of laminated plates	Stainless steel thickness t (Total thickness h)	Cycles to failure, $\times 10^6$ (Moment = 16 kg-m)	(Cycles of laminated plate) (Cycles of base steel plate)
Mild steel plate ($h=11$ mm)		0.05	1
Clad	$t=0.4$ mm ($h=11$ mm)	2.8	56
Adhesive-bonded	$t=0.5$ mm ($h=11$ mm)	1.2	24

Photo. 2 は板状層材の疲れ破断した破面の写真である。Photo. 2 (a) の圧延層材の破面でははく離が見られないが、Photo. 2 (b) の接着層材の場合には接着面でははく離が認められる。

つぎに Fig. 20 は2.5%ニッケル鋼—軟鋼圧延層材の S-N 線図である。この場合の切欠底の2.5%ニッケル鋼厚さは3mm、全板厚は9mmとした。Fig. 20 によれば応力が $15\sim 20$ kg/mm² の範囲では、2.5%ニッケル鋼—軟鋼層材の疲れ強さは、ニッケル鋼一体材と軟鋼一体材のそれぞれの値の間にあるが、 20 kg/mm² より高応力側では層材の方が疲れ強さが大きく、また疲れ限度も2.5%ニッケル鋼と同程度である。そして層材の S-N 線は一体材にくらべて勾配が急になっている。Photo. 2 (c) はこの場合の破面を示し、前述のステンレ

(a)

(b)

(c)

- (a) Stainless clad steel, Moment=21 kg-m
(b) Adhesive-bonded stainless steel—mild steel, Moment=18 kg-m
(c) Rolled 2.5% Ni steel—mild steel, Stress=16 kg/mm²

Photo. 2 Fatigue fractured surfaces of stainless clad steel, adhesive-bonded stainless steel—mild steel and rolled 2.5% nickel steel—mild steel laminated plates

Fig. 20 S-N curves of 2.5% Ni steel plate, mild steel plate and rolled 2.5% Ni steel—mild steel laminated plate

ス・クラッド鋼と同様、はく離は見られず、き裂は接合面で停留することなく進展している。

5. 結 言

接着法、鋳込み法および圧延法によって、軟鋼および

高張力鋼と異種金属との丸棒層材および異種鋼材による板状層材を試作した。層材の切欠付試験片の疲れ試験を行ない、つぎのような結果を得た。

(b) 直径 10 mm の軟鋼丸棒を心材とし、ステンレス鋼, 銅, 黄銅およびアルミニウムを表面材とした接着層材の疲れ強さは, 軟鋼一体材にくらべて大きい。また表面材厚さが 1 mm 以上のときは, ステンレス鋼, 銅, アルミニウムの順で疲れ強さは大きくなる。しかし表面材厚さが 0.5 mm 以下のときは, これら表面材による差異はほとんどない, 高張力鋼を心材とし, 銅を表面材とした層材についてもほぼ同様の結果が得られた。

(b) 60/40 黄銅—軟鋼層材の場合には, 鋳込み層材は接着層材にくらべて疲れ強さがわずかに小さい。

(c) ステンレス鋼—軟鋼圧延層材では, ステンレス鋼表面材の厚さの増加とともに, 全寿命およびきれつ発生までのくり返し数は増加し, きれつ進展速度は減少する。しかし一旦発生したきれつは, 接合面で停留することなく, ほぼ同じ速度で軟鋼に伝播する。これに対して接着層材では接合面でのきれつの停留がみられた。しかし疲れ強さは圧延層材のほうが大であった。

2.5% ニッケル鋼—軟鋼層材では, ニッケル鋼一体材よりも疲れ強さがむしろ大きくなる場合がある。

終りに本研究を行なうにあたり, 疲れ実験について中部工業大学松田一男助教授ならびに名古屋大学工学部角谷行弘君および元尾昭彦君の熱心な協力を得た。とくに記して厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 荒内, 小川: “アルミニウムを面材とする複合板”, 住友軽金属技報, Vol. 6 (1965), No. 3, 52~57
- 2) P.L. Cairns, J.A. Charles, “Production of controlled martensite-ferrite microstructures in steel”, J. Iron & Steel Inst., Vol. 205 (1967), No. 10, 1044~1050
- 3) R.L. Cairns, J.A. Charles, “Mechanical properties of steels with controlled martensite-ferrite microstructures”, ibid., Vol. 205 (1967), No. 10, 1051~1055
- 4) J.D. Embury, et al., “The fracture of mild steel laminates”, Trans. AIME, Vol. 239 (1967), No. 1, 114~118
- 5) R.F. McCartney et al., “Fracture behavior of ultrahigh-strength-steel laminar composites”, Trans. ASM, Vol. 60 (1967), 381~394
- 6) 西田: 応力集中, 森北出版, 1967, p. 621
- 7) 同上, p. 572

日本工学会第28回見学会の催し

日 時: 昭和45年10月14日(水) 13.30~15.00 A班

15.00~16.30 B //

見 学 先: 日本電信電話公社展示センター(千代田区霞関 3-2-5 霞が関ビル30階)

この展示センターには, 各種のデータ宅内装置や端末機器が展示され, 中央装置と直結したオンライン方式により実演される外レザ—通信, カラーテレビ, 電話などの新技術が展示実演されており, 情報化社会の将来を目で見, 手で確かめられるようになっている。

定 員: A班 40名 } に限り先着順に参加証をお送りします。A, B 班に希望順位を付してお申込み下
B班 40名 } さい。

集 合: 当日 A班 13.20 } に展示センターに集合のこと。
B // 14.50 }

申込期限: 9月30日はがきに第28回見学会申込と書き, 氏名, 住所, 所属学会, 勤務先を記入し, 下記宛
申込むこと。

東京都港区芝罘平町35, 日本造船学会内
(社) 日本工学会 (Tel. 502-2049)