

ISSN 0389-4010
UDC 620.179.
620.168
629.7.023
629.7.018.4

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1089

応力塗料を用いたCFRP桁・リブ要素の強度試験

野原利雄・江川幸一

1990年12月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	2
2. 応力塗料（自然乾燥型）の適用に関する実験	3
2.1 実験目的	3
2.2 供試応力塗料および実験方法	3
2.3 実験結果	4
2.3.1 実験場内の温・湿度変化	4
2.3.2 膜厚とひずみ感度	7
2.3.3 乾燥温度とひずみ感度	8
2.3.4 乾燥時間とひずみ感度	9
2.3.5 水冷増感効果	11
2.4 負荷時の温・湿度条件下で最適のひずみ感度を与える 応力塗料の一選定法	13
2.5 応力塗料の適用に関する実験のまとめ	14
3. CFRP 桁・リブ要素の解析	14
3.1 供試体および実験方法	14
3.2 実験結果および考察	15
a) 応力塗料	15
b) ひずみゲージ	17
c) 疲労試験および残留強度試験結果との比較検討	17
4. まとめ	19

応力塗料を用いたCFRP桁・リブ要素の強度試験*

野原利雄*¹ 江川幸一*¹

Application of Brittle Lacquer Techniques to the Strength Test of CFRP Spar/Rib Element.

Toshio NOHARA and Koichi EGAWA

Abstract

Research was conducted to find a technique for applying brittle lacquer coating in a large experimental area in which, for example, a large airplane can be tested.

The brittle lacquer coating method has the advantages of easy application, even on complicated shaped structures, and of easy discovery of stress distribution, especially for the direction of principal stresses, in a wide area. But it requires comparatively strict temperature and humidity control in drying the sprayed lacquer, and one can not easily satisfy those conditions in a large experimentation area.

So initial research was conducted to finding a selection standard for a suitable lacquer for use where temperature and humidity are not controlled. Then to verify the validity of the selection standard, the stress distribution of several models of spars and ribs of airplane structure made of carbon fiber reinforced plastic and coated with brittle lacquer selected by the standard was measured. The utility of the new method was clarified by these experimental results.

Keywords: Strain measurement, Brittle lacquer techniques, Brittle lacquer, Carbon fiber reinforced plastic spar, Strength test, Fracture mode.

概 要

応力塗料膜法は、複雑な構造物に対して比較的簡単に適用でき、しかも広い範囲に亘って応力分布と主応力方向を求めることができる特長を有するが、その使用に当っては温度と湿度を標準使用温・湿度範囲に保持する必要がある。しかし、一般に大型構造物の試験を行うような広い実験場では温度と湿度を正しく管理することが困難な場合が多くある。

本研究では、大型構造物試験への本法の適用を目的として、まず、温度と湿度の制御を行わずに応力塗料膜法を実施するための条件を求めた。次に、この条件を立証するために、炭素繊維強化複合材料の桁・リブ要素に本法を適用して強度試験を実施し、その有用性を確認した。

*平成2年9月12日 受付 (received 12 September 1990)

*¹機体部 (Airframe Division)

1. まえがき

構造物や部材に発生する応力あるいはひずみを実験的に解析する目的は、それらの強度の確認、すなわち、その安全性を確かめることにある。近年、電子計算機による構造解析法の発展により、かなり多くの構造物の強度の確認が計算により実施されるようになってきた。

しかしながら、これらの計算に含まれる諸仮定が実際に成立しているか否かを検証すること及び材料に内在もしくは製作時に生ずる欠陥などを考慮することが難しいなどのため、個々の構造について実験的に解析し、その強度的合理性を確認することは依然として重要である。

一方、従来の実験応力・ひずみ解析では、設計時の計算により示された高応力点についてのみ測定し、その結果から構造強度を評価するのが一般的である。このため、実験応力・ひずみ解析の本来の目的であるところの設計時に予測しえない個所に危険が存在するか否かの確認を、十分に行っているとは言えないのが現状である。

各種構造物の応力・ひずみ計測を現場、すなわち、そのおかれた環境下で実施する場合は、電気抵抗ひずみゲージが多く使用されている。それは主としてひずみゲージの汎用性によるものであるが、その計測はあくまで点計測 (Point-by-point) であり、既述の観点からは決して十分であるとは言えない。

一方、航空機やロケットの構造体への複合材料の進出は、近年目ざましく航空機の主要構造部材にも使用されるようになってきた。これは、複合材料が比強度特性に優れ、構造の軽量化が可能となるからである。

繊維強化型複合材料は高強度繊維を樹脂を媒体として成形した材料であるため、従来使用していたアルミニウム合金などに比べて、材料の均質性に乏しく、また、その成形が主として手作業により行われている現状では、成形中に気泡や部分的な非接着部欠陥などを含むことが予想される。また同時に、新材料であるため使用実績が少なく、設計資料が不十分である。そのため、その強度の

確認には実験応力・ひずみ解析を併用する必要があるが、その際には、すでに述べた応力・ひずみ計測本来の姿勢を失わないことが肝要であると考えた。

このような観点から、ここでは全面視野測定可能な応力・ひずみ測定の適用について検討した。特に、大面積を対象とする測定法には、現在のところ応力塗料膜法と光弾性皮膜法とがある。光弾性皮膜法は皮膜の形成にかなりの経験と工数を要し、しかも複雑な形状の面への適用が難しい上に、試験後の皮膜の除去が著しく困難な欠点がある。応力塗料膜法は複雑な形状に対しても塗膜の形成および除去がきわめて容易であり、しかも測定面上での高応力個所を見落とすことなく、全体の応力分布を求めることができる。このため、ひずみゲージを併用して測定を行う場合でも信頼度が高く、その上経済的に測定が実施できる。以上の理由からここでは、自然乾燥型の応力塗料膜法を採用することとした。

応力塗料のひずみ感度は塗料膜の乾燥中および負荷時の温度ならびに湿度により影響を受ける。一方、ここでの試験対象である航空機の部材や部分構造は、一般の試験片などに比べてかなり大型となるものが多く、その負荷試験は航空機がそのまま格納できるような大型実験場で行われることも多い。このような実験場では厳密な温度および湿度の調節ができない場合が多いので、そのような環境での応力塗料膜法の実施について検討することとした。そこで、塗料は日本国内での温・湿度環境に適合した国産の製品で、しかも使用が簡便な自然乾燥エーロゾル式の応力塗料を用いることとした。本塗料の標準温・湿度状態での特性に関しては菅野らにより詳細に調査されているので^{1)~3)}、ここではそれらを参照しつつ、また著者らの経験も活用して⁴⁾⁵⁾、大型実験場内での本塗料の最適使用条件を求めることとした。もとよりこの条件は実験場のある地理的条件によって異なるので、統一的な最適使用条件を与えるものではないが、ここで行った方法によれば、他の実験場でもその最適使用条件を容易に求めうるものと思われる。

以上の観点より求められた塗料の乾燥条件に従って、炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の波板ウェブを持つ桁・リブ要素のせん断試験に応力塗料を適用し、ここで求めた使用条件が有用であることが確認でき、また、応力塗料膜法による解析と静強度試験による破壊様相との比較検討を行うことができたので、それらの詳細について報告する。

2. 応力塗料 (自然乾燥型) の適用に関する実験

2.1 実験目的

塗膜き裂の生成は、塗膜の乾燥及び負荷時の温度と湿度により影響される。そのため、使用時の温・湿度に適合する数種類のグレードの応力塗料が市販されており、各グレードの使用温度範囲は標準使用温度に対して約 +5°C ~ -1°C である。

応力塗料の乾燥時間は通常 28 時間と長く、一昼夜を要し、実験場の室温の変動は、一般に上記の範囲を越える場合が多い。このような環境中では、ひずみ感度が悪化し、最悪の場合には、塗膜き裂が発生せず、あるいは逆に塗膜乾燥中に乾燥割れ (一般に焼割れと呼ばれる) を生じ、測定不能となる場合もある。

そこで、ここでは温・湿度のコントロールが困難な大型実験場において、自然乾燥のみで良好なひずみ感度を得るための応力塗料の使用法を見出すことを目的として、約 1 カ年間にわたって実験を行い、各季節における最適な応力塗料の選定法および使用法を求めた。

2.2 供試応力塗料及び実験方法

本実験に使用した応力塗料は、図 1 に示すマークテック(株)製の自然乾燥エーロジル式 CRUX シリーズで、各グレード別の標準使用温・湿度範囲を表 1 に示す。また、被塗装体としては、ここでの実験目的、すなわち自然乾燥で良好なひずみ感度を得ることに適い、しかも簡便に使用できる検定試験片を使用して実験した。本実験に使用した検定試験片はアルミニウム合金材、CFRP 一方向材及び CFRP 織物材である。その形状寸法は板幅 20mm、長さ 210mm、板厚 3mm である。



図 1 応力塗料 (エーロジル型)

表 1 応力塗料 CRUX の塗料番号と標準使用温・湿度範囲

塗料番号	温度範囲 (°C)	湿度範囲 (%R.H.)
SC-10	以上 未満 9~14	47~55
SC-15	14~19	
SC-20	19~24	
SC-25	24~29	
SC-30	29~34	

塗膜のひずみ感度は、図 2 に示す感度検定器と曲げ検定試験片を用いて測定した。検定試験片の塗装方法も供試構造物に対して一般に行われる方法と変わらないが、それは、塗膜き裂の観察をより容易にするための下塗り塗料 (CRUX-UC) をまず塗装し、約 3 時間自然乾燥後、応力塗料 (上塗り塗料ともいう) を塗装する。応力塗料の塗装方法は、試験片の塗装面にほぼ垂直にノズルを向

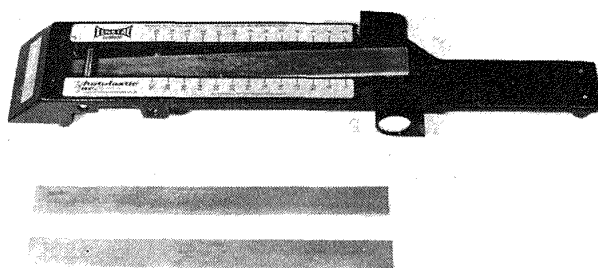


図 2 感度検定器と曲げ検定試験片

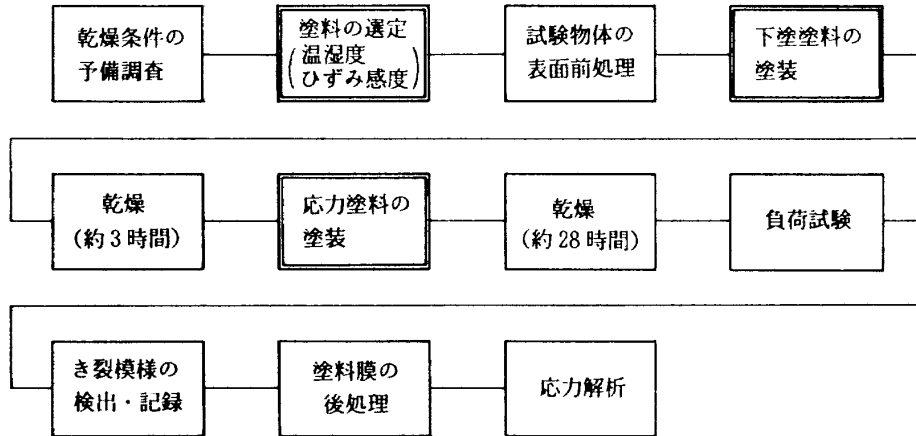


図3 応力塗料の実験手順

け、塗装面との距離を 20~30cm に保ち、一定速度でスプレーする。この要領で標準膜厚になるまで、1~2分おきに数回重ね塗りをする。標準膜厚としては、下塗り塗料が 0.03mm、上塗り塗料が 0.09~0.12mm の範囲が適当とされている。

約 28 時間自然乾燥後、図 2 に示すように検定器に設置し、試験片の一端を親指でストッパーに当るまで押し込む。このとき試験片は片持梁として一定のたわみを付与され、その表面に生成したき裂の位置から次式によりひずみ感度 ϵ が求められる。

$$\epsilon = (3/2) (hl_0/l^3) \delta \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- h : 試験片の板厚
- l_0 : 負荷点よりき裂発生限界位置までの距離
- l : 負荷点より試験片固定端までの距離
- δ : 負荷点の垂直変位

検定器にはき裂発生位置に対応したひずみ値が目盛っており、式(1)の計算を行わずに、直接ひずみ感度値を読み取ることができるようになっている。

実験方法のおおよその手順を図3に示すが、詳細については参考文献⁹⁾を参照して頂きたい。

ここでは本方法により、膜厚、乾燥温度、乾燥時間などと塗膜のひずみ感度との関係を調べた。また、これとは別に水冷による増感法についても検討した。

2.3 実験結果

2.3.1 実験場内の温・湿度変化

塗料膜のひずみ感度は乾燥時の温度と湿度によってかなり異なる。適合温度より高い場合には感度が悪化し、逆に低場合には感度が上昇するが、低過ぎると乾燥過程において、内部応力や熱応力により塗膜に不規則なき裂、いわゆる焼割れが発生して測定できなくなる。

前述のように、塗膜の乾燥には一昼夜を要するため、その間に温度と湿度がかなり変化する。そこでまず、実験場（東京都三鷹市、調布飛行場隣り）での温・湿度の変化の実態を知るために、各

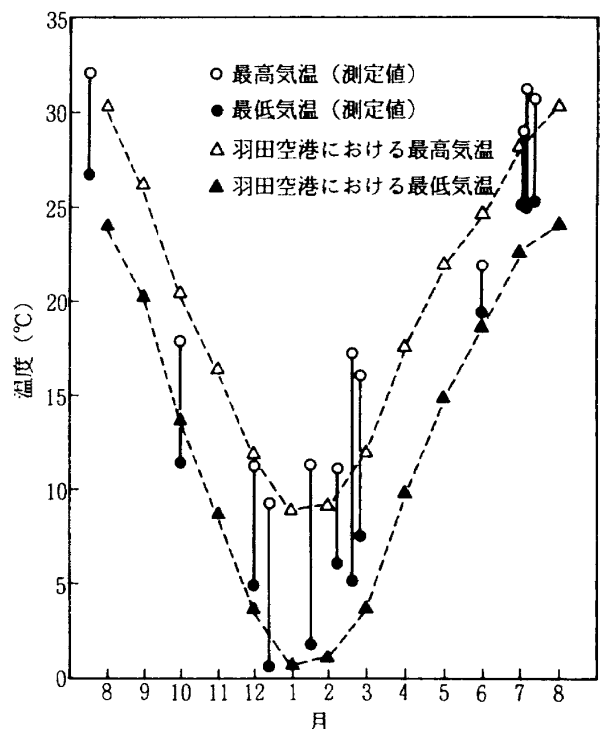


図4 実験場の気温

季節ごとの温・湿度の変化を自動記録計を用いて計測した。図4は一昼夜の温度変化を1ヶ年間を通して図示したもので、○印は計測日の最高温度、●印は最低温度を示している。図に示すように、昼夜の温度差は5～10℃に達し、冬期の方が比較的大きい。また、図に示す点線は羽田空港の月別

最高平均気温および最低平均気温である”。これから、本実験値はこの平均気温に近い値を示していることがわかる。

図5(a)～(h)は本実験場の一昼夜にわたる温度と湿度の変化を例示するもので、それぞれ8月、10月、12月、1月、2月、3月の実測例である。

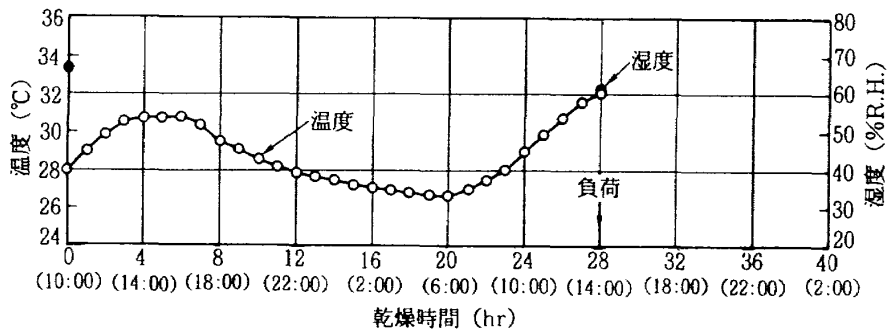


図5(a) 塗膜の乾燥中の温・湿度 (8月)

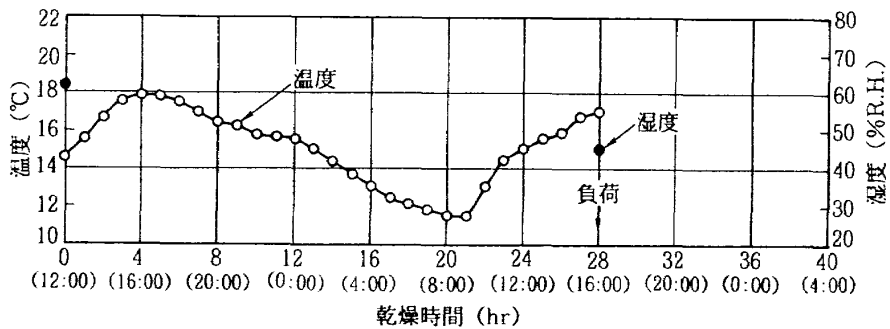


図5(b) 塗膜の乾燥中の温・湿度 (10月)

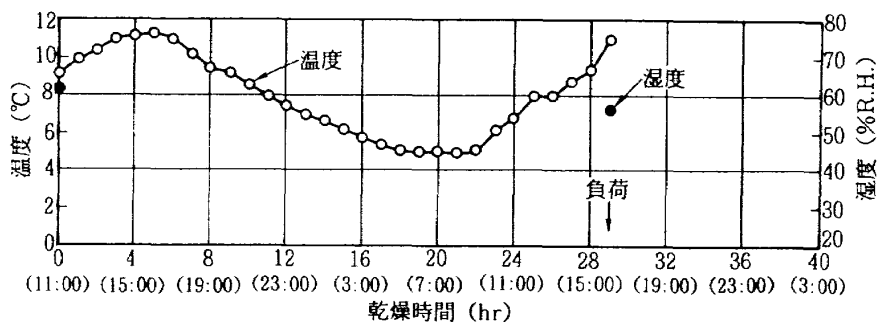


図5(c) 塗膜の乾燥中の温・湿度 (12月)

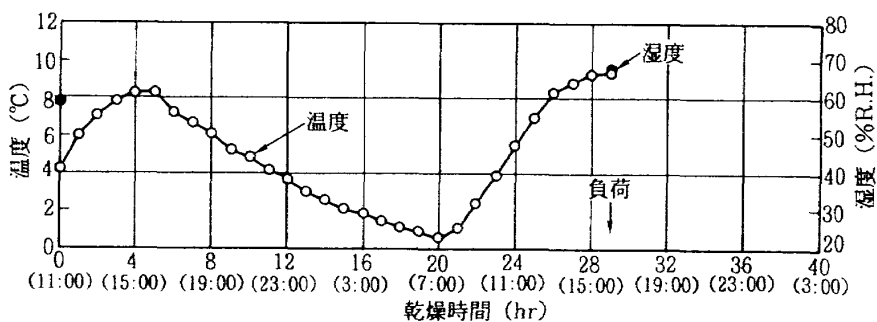


図5(d) 塗膜の乾燥中の温・湿度 (1月)

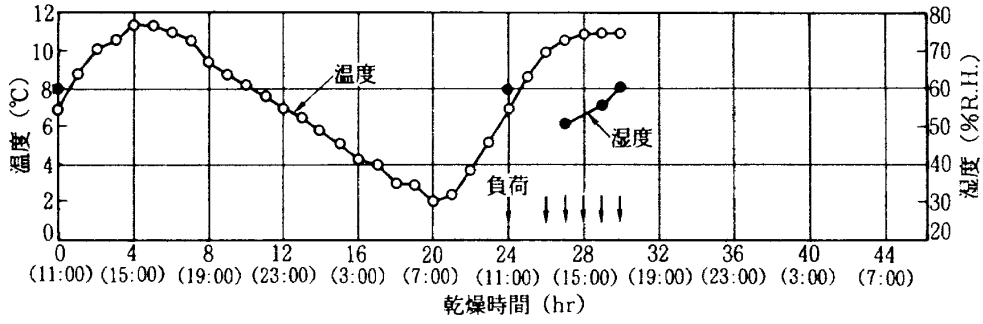


図 5 (e) 塗膜の乾燥中の温・湿度 (2 月)

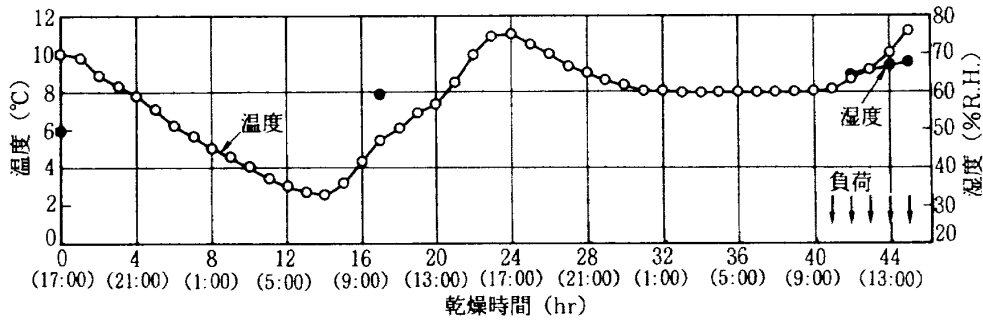


図 5 (f) 塗膜の乾燥中の温・湿度 (2 月)

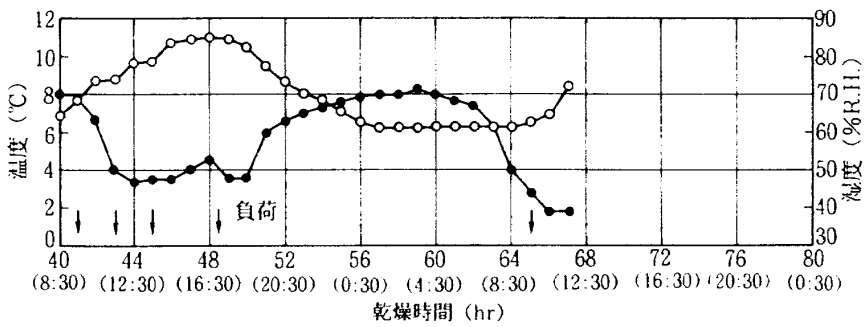
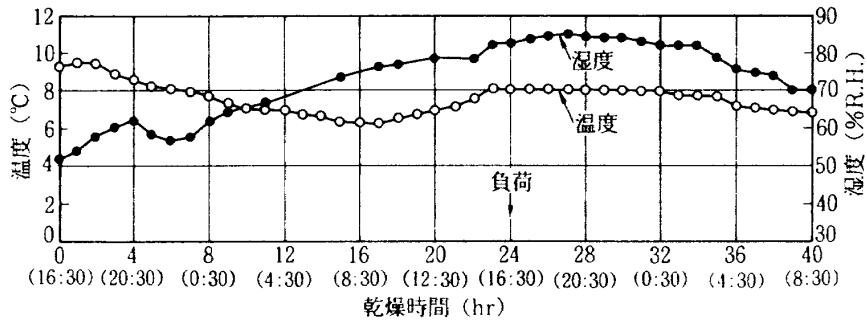


図 5 (g) 塗膜の乾燥中の温・湿度 (3 月)

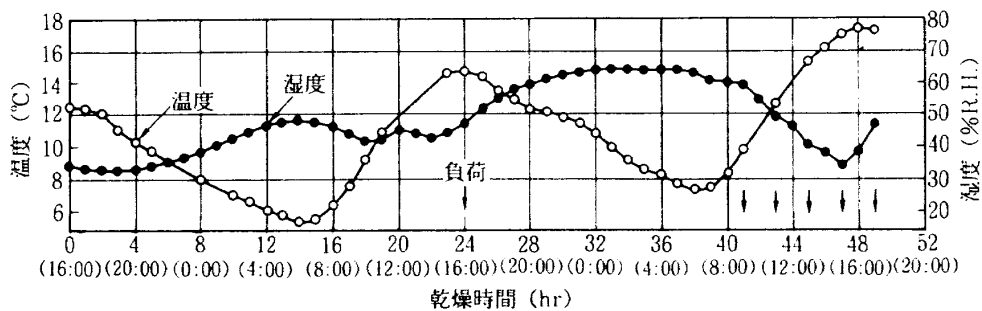


図 5 (h) 塗膜の乾燥中の温・湿度 (3 月)

また、横軸の括弧内は標準時間を示す。なお、図 5 (g)で湿度が 70~85% R.H.と高くなっているのは、降雨のためである。応力塗料の標準使用湿度範囲は表 1 に示すように、47~55% R.H.とされており、このように湿度の高い場合はひずみ感度はかなり悪化するものと考えられる。

2. 3. 2 膜厚とひずみ感度

標準使用温・湿度範囲で乾燥させた場合には膜厚は一般に 0.09~0.12mm が適当とされている。しかし、本実験場のように温・湿度が大きく変動する環境では、まず温度低下による焼割れを防ぐ必要があり、焼割れを発生させずに良好なひずみ感度を得るにはどの程度の膜厚が最適であるかを調べるために、膜厚を 0.05~0.25mm の範囲で

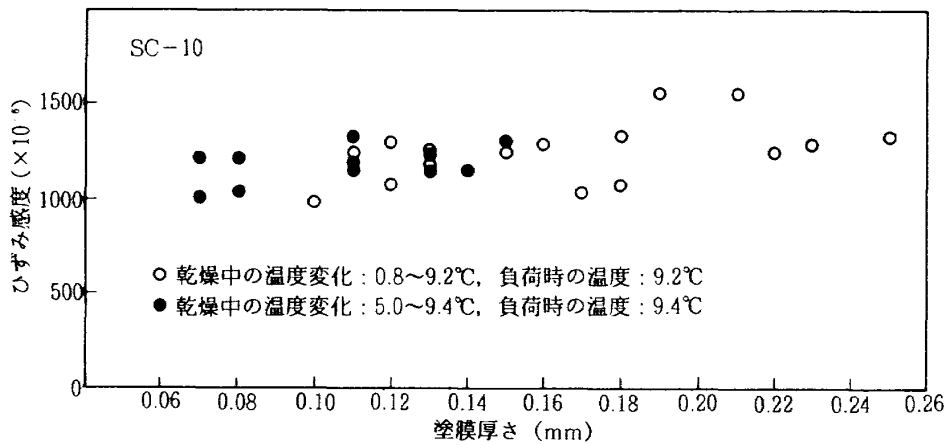


図 6 (a) 塗膜厚さとひずみ感度

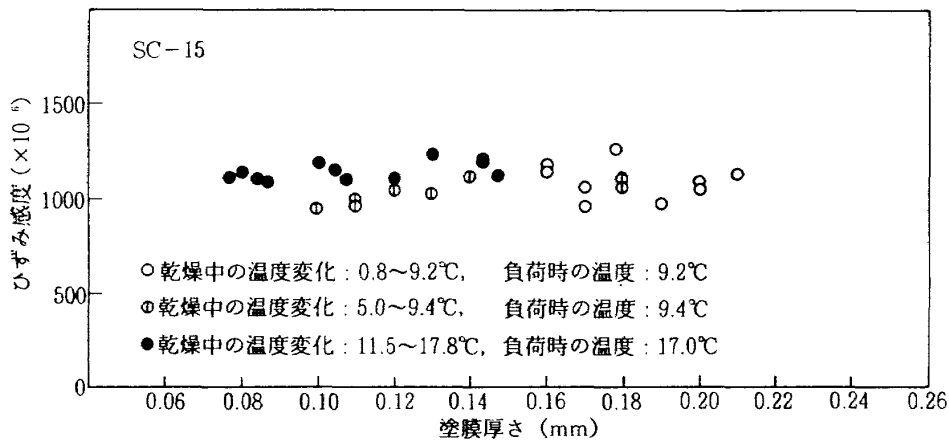


図 6 (b) 塗膜厚さとひずみ感度

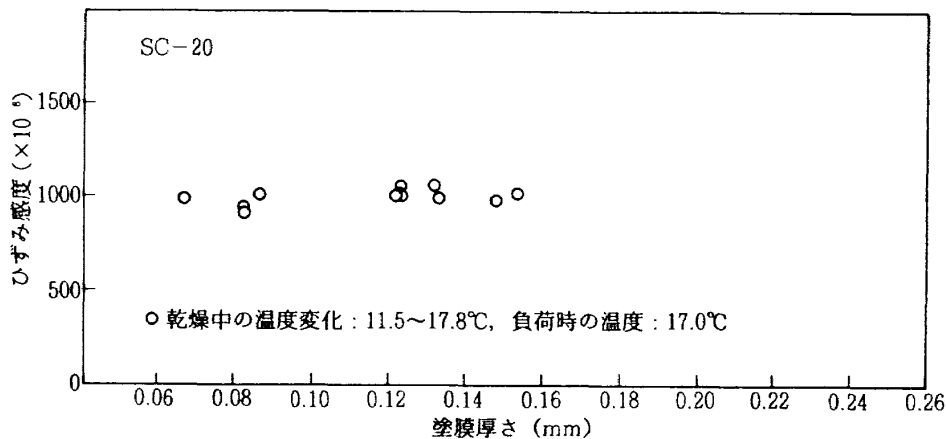


図 6 (c) 塗膜厚さとひずみ感度

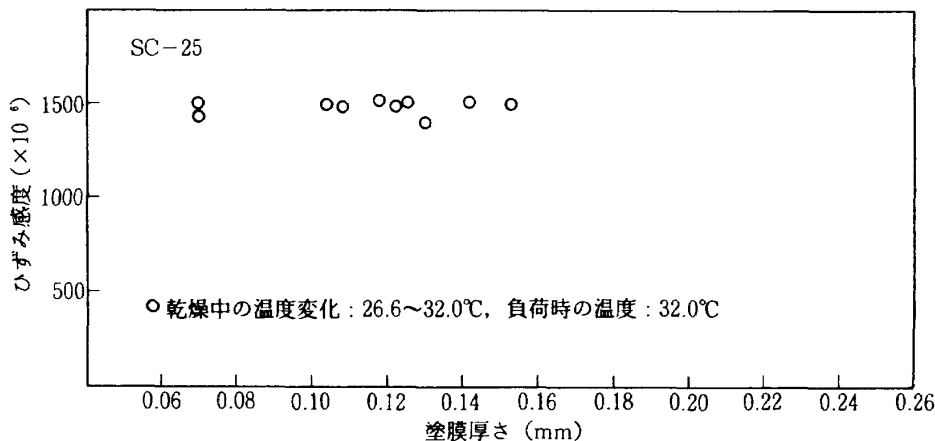


図 6 (d) 塗膜厚さとひずみ感度

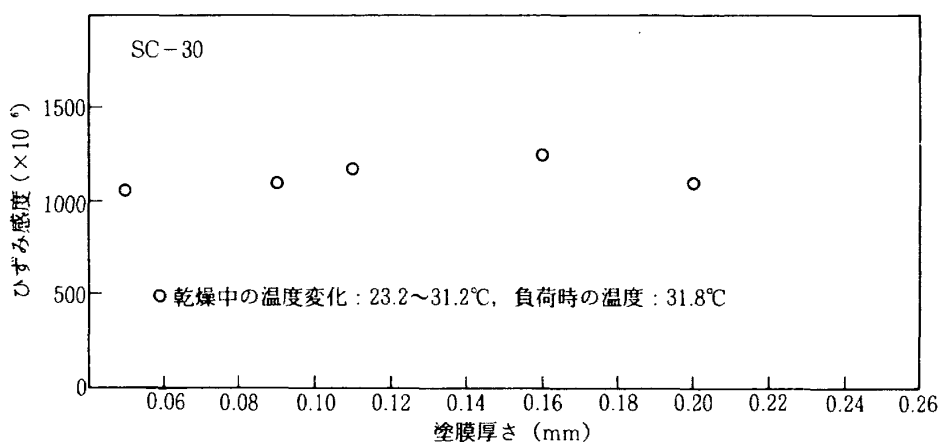


図 6 (e) 塗膜厚さとひずみ感度

変えて実験を行った。膜厚とひずみ感度の関係を応力塗料のグレード毎に図 6 (a)~(e)に示す。実験した膜厚の範囲内では SC-10 から SC-30 までの各グレードの塗料とも、ほぼ 1,000 マイクロストレンの感度で、膜厚による感度の変化はほとんど見られなかった。ただ SC-25 の負荷時が 32℃ と高く、感度が 1,500 マイクロストレンと悪化していて、むしろ温度の影響の大きさが目立った。一般に膜厚の薄い方がひずみ感度は多少良好であった。膜厚が 0.09mm 以下の場合に焼割れが発生したものがあつた (図 8 (b)参照)。

2. 3. 3 乾燥温度とひずみ感度

約 1 年間を通じてひずみ感度の測定を行い、乾燥中の温度および負荷時の温度とひずみ感度の関係を調べた。表 2 にその測定結果を示す。その一例を図 7 に示す。図の横軸は負荷時の温度と各グレードの標準使用温度との差をとってある。また、図中の記号の丸印と三角印は乾燥温度がそれぞれ同じものを示している。この図から標準使用

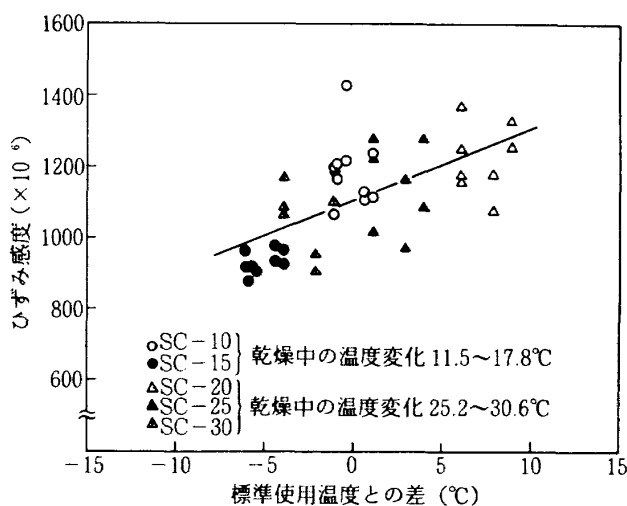


図 7 乾燥温度に対するひずみ感度

温度での感度は、この場合およそ 1100~1200 マイクロストレンであること、標準温度との正負の差に対してひずみ感度はほぼ直線的に変化する、すなわちグレードの異同に拘らず差が負の場合には感度が向上し、正の場合には感度が低下し、感度変化の割合はおよそ 170 マイクロストレン/5

表2 ひずみ測定結果

No.	実験期日	乾燥時の室温	乾燥時の湿度	使用した 応力塗料	ひずみ感度 ×10 ⁻⁶	膜厚 (mm)
1	55.8.14~15	26.6~32℃	62%	SC-20	—	0.16
				SC-25	1400~1500	0.07~0.15
2	55.10.30~31	11.5~17.8	45%	SC-15	1100~1220	0.08~0.14
				SC-20	910~1050	0.08~0.14
3	55.12.25~26	5~11.3	—	SC-10	1180	0.07~0.14
				SC-15	1030	0.07~0.15
4	56.1.8~9	0.7~9.3	—	SC-10	1240	0.12~0.22
				SC-15	1060	0.11~0.18
5	56.2.9~10	2~11.4	51~61	SC-10	1270~1500	0.15~0.21
				SC-15	920~1320	0.16~0.26
6	56.2.12~14	26~11.2	49~64	SC-10	1070~1460	0.12~0.17
				SC-15	880~980	0.14~0.18
7	56.3.3~6	6.3~11.0	39~86	SC-15	830~1400	0.06~0.09
8	56.3.17~19	5.3~17.2	32~61	SC-10	1070~1280	0.08~0.11
				SC-15	1020~1230	0.09~0.14
9	56.3.25~28	7.2~16.0	32~81	SC-10	700~1370	0.09~0.14
				SC-15	690~1290	0.15~0.18
				SC-20	510~1290	0.14~0.15
10	56.7.2~4	19.4~21.8	82.5~96	SC-20	1300~1560	—
				SC-25	1350~2060	—
11	56.7.29~8.1	25.4~29.6	62~85.5	SC-25	930~1360	—
				SC-30	800~1280	—
12	56.7.3~6	23.2~31.2	43~73	SC-30	470~1250	—
13	56.8.11~14	25.2~30.6	56~83	SC-20	1160~1370	—
				SC-25	1020~1280	—
				SC-30	910~1180	—

℃≒35 マイクロストレン/℃になることがわかる。データは乾燥温度 11.5~17.8℃の場合が良くまとまっているのに対し、25.2~30.6℃の場合はいずれのグレードでもかなりばらついているが、その原因については不明である。

2.3.4 乾燥時間とひずみ感度

塗膜の標準乾燥時間は約 28 時間となっているが、負荷時間が遅延する場合、それがひずみ感度に及ぼす影響について検討した。使用した塗料は

SC-10 と SC-15 で、膜厚 0.065~0.25mm の範囲で 10 種類とし、塗装より約 28 時間後および約 42 時間後に感度を測定した。測定結果を図 8 (a)~(c)に示す。図 8 (a)は膜厚 0.15~0.25mm の範囲で実験しているが、乾燥時間が 42 時間まで遅延してもいずれも感度はさほど変化していない。図 8 (b)では膜厚 0.08~0.14mm、(c)では 0.065~0.09mm であるが、いずれも感度はわずかに低下していることがわかる。

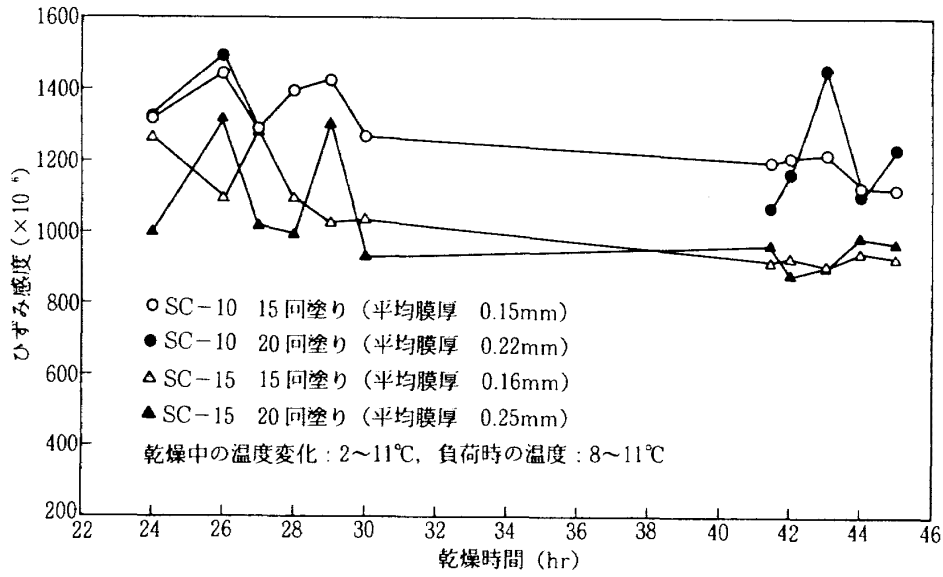


図 8 (a) 乾燥時間とひずみ感度

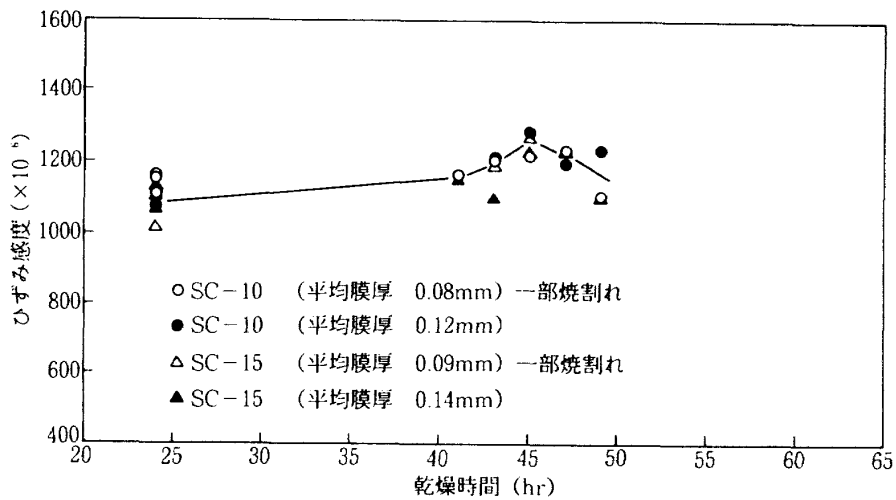


図 8 (b) 乾燥時間とひずみ感度

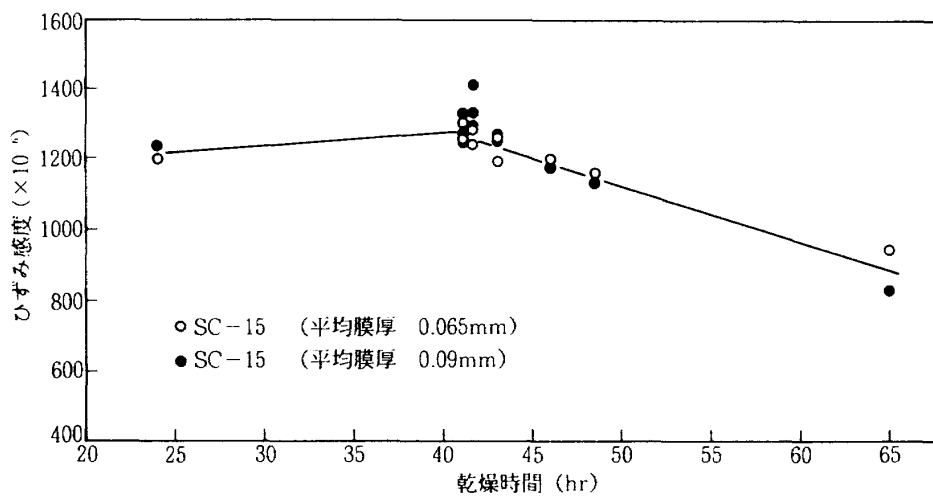


図 8 (c) 乾燥時間とひずみ感度

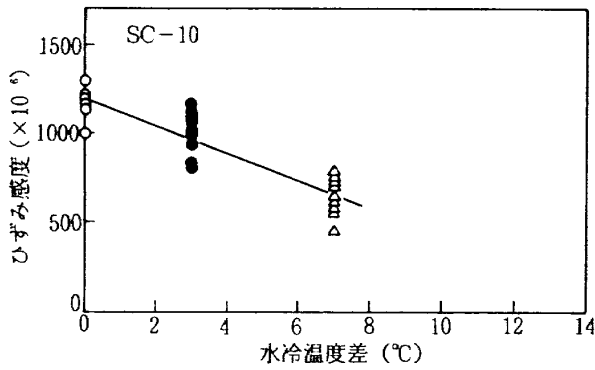


図 9 (a) 水冷増感した場合の温度差とひずみ感度

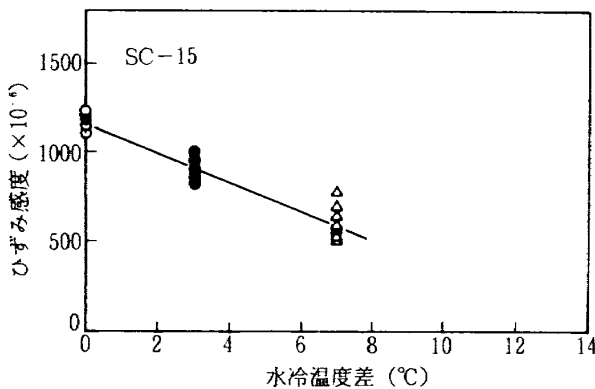


図 9 (b) 水冷増感した場合の温度差とひずみ感度

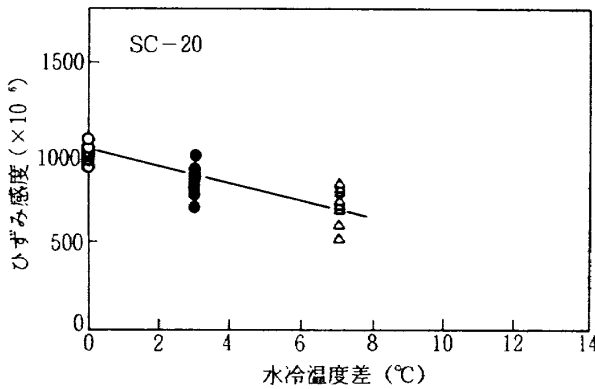


図 9 (c) 水冷増感した場合の温度差とひずみ感度

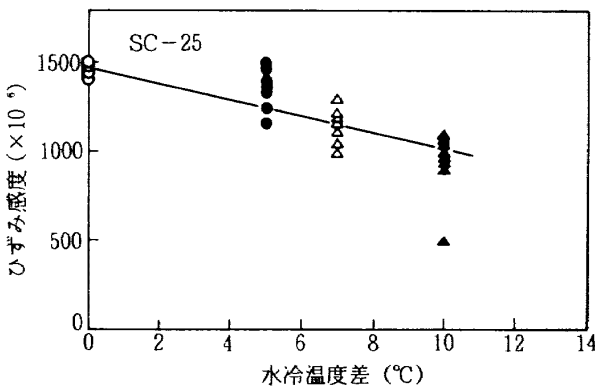


図 9 (d) 水冷増感した場合の温度差とひずみ感度

2.3.5 水冷増感効果

実機の強度実験では、ひずみ値が小さ過ぎて塗膜にき裂が発生しない場合がある。その場合に、なんらかの方法によって塗膜のひずみ感度を向上させ、試験時にき裂を発生させる必要がある。この増感法には、空冷、水冷およびその他の方法があるが、ここでは、最も簡便な水冷による増感法を試みた。すなわち、気温より低い水に脱脂紙を浸漬し、これを供試体に直ちに貼付して温度を下げる方法をとった。水冷温度差を3~10°Cの範囲とし、グレードSC-10, 15, 20 および 25 の4種類の塗膜について水冷温度差とひずみ感度との関係を求めた。実験結果をグレード順に図9(a)~(d)に示す。これらの図から、水冷温度差が大きい程、ひずみ感度は向上し、その関係はほぼ直線的と見なすことができる。

なお、水冷直前の空気中におけるひずみ感度が同一ではない、測定したひずみ感度のばらつきが非常に大きい、また、水冷増感法自体が塗膜のみ

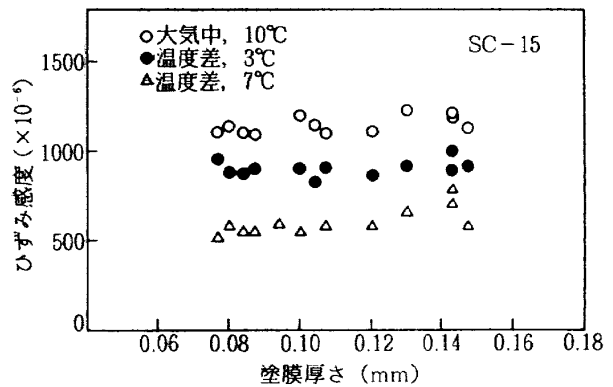


図 10(a) 水冷増感法による感度向上と塗膜厚さとの関係

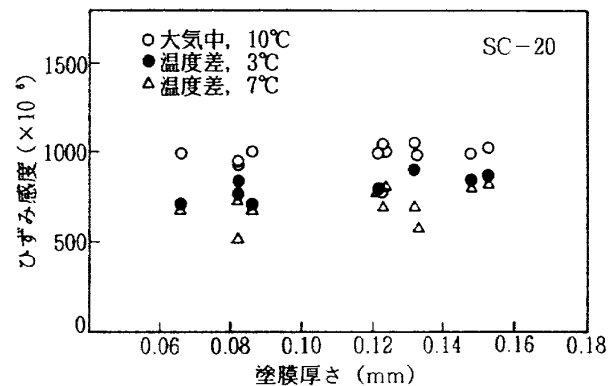
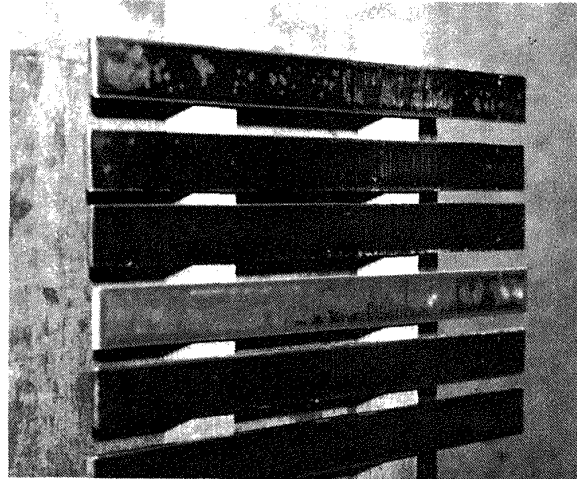


図 10(b) 水冷増感法による感度向上と塗膜厚さとの関係

を急冷して増感効果を得るため、増感効果を得ることは容易であるが、塗料相互の増感効果の大小について論じるには技術的に難かしいなどの理由から、ここでは、これらの結果から4種類の塗料の増感度の比較は行っていない。

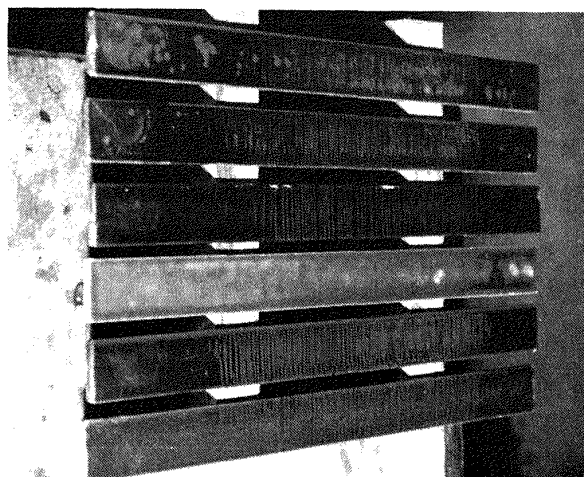
また、水冷増感法による増感と膜厚との関係について調べた。実験結果の一例を図10(a)および(b)に示す。膜厚0.065~0.155範囲では、増感効果は膜厚と無関係と判断されるが、膜厚0.14以上では若干増感効果が鈍るものと思われる。本実



(a) 大気中 (10°C) での負荷時のき裂



(b) 水冷 (7°C) によるき裂



(c) 水冷 (3°C) によるき裂

図11 試験片に発生した塗膜き裂

験結果の一例を示す塗膜き裂の写真を図11(a)～(c)に示す。同図には、SC-10とSC-15について、膜厚がそれぞれ異なる3種類の試験片を示しているが、膜厚の厚い方(20回塗り)がき裂が鮮明に観察されることがわかる。

2.4 負荷時の温・湿度条件下で最適のひずみ感度を与える応力塗料の一選定法

ひずみ感度は塗料膜の乾燥中の温度変化のほか、負荷時の湿度にも影響される。まず図12に負荷時の温度とひずみ感度の関係の一例を示すが、同一グレードの塗料を使用しても負荷時の温度(試験温度)によってひずみ感度が異なることがわかる。

したがって、負荷時の温度に対するひずみ感度の関係を各グレードの応力塗料について求めておけば、負荷時にひずみ感度が最適となる応力塗料を選定するのに大変便利である。

負荷時の温度とひずみ感度は、ここでの実験結果から多少のバラツキがあるが次式のような直線関係で表わしうるものと考えた。

$$\epsilon = \alpha T + \beta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

ϵ : ひずみ感度 ($\times 10^{-6}$)

T : 負荷時の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

α, β : 応力塗料のグレードによる定数

この関係式は中村、晴山らによっても提案されている⁹⁾。

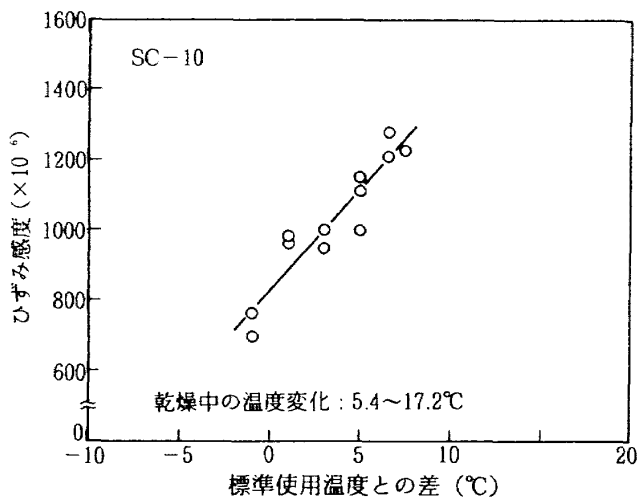


図12 温度とひずみ感度

このように、負荷時の温度とひずみ感度の関係を単純化することについては、特に乾燥中の温度変化を全く考慮していないなどの難点はあるが、ここでは、図4に示すように乾燥中の温度変化が年間を通じて5～10 $^{\circ}\text{C}$ の場合にはこの関係が成立するものと考えた。

さらに先に述べたように実験場内は温度と共に湿度も大きく変化する(図5(g)および(h)参照)。そこで、湿度がひずみ感度に及ぼす影響をも考慮し、式(2)で表わされるひずみ感度をより一層正確に求めうるように修正することを考えた。ここでは、湿度50% R.H.を基準として、負荷時の湿度 R との差をとり、それに塗料のグレードによって定まる補正係数 B を乗じたものを補正項として導入することとした。また温度についてはここでの実験結果に基づいて標準使用温度 T_s との差をとることとした。すなわち、湿度の影響も考慮したひずみ感度 ϵ_R を次式のように表わすこととした。

$$\epsilon_R = A(T - T_s) + B(R - 50) + C \dots\dots (3)$$

ここで、 A, C : 応力塗料のグレードによる定数

B : 湿度による補正值の係数

R : 負荷時の湿度 (%R.H.)

T_s : 標準使用温度 ($^{\circ}\text{C}$)

ここでの係数 A, B, C の決定は次のように行う。

すなわち、横軸に T をとり、まず、同一グレードの応力塗料の湿度ほぼ50% R.H.(表1に示す標準使用湿度範囲内)におけるデータを用いて直線を引き、 A と C とを定める。これは式(3)が湿度50% R.H.を基準としていること及び式(3)は基本的には式(2)の変形であることによる。次に、横軸に $(R - 50)$ をとり、試験温度 T をパラメータとしてデータを記入し、それぞれの T における直線の傾きの平均的な傾向から B を定める。図13はグレード10の応力塗料についての実験結果で、湿度がおよそ40～70% R.H.のデータを用いて B を決定した一例を示している。ここで提案した式(3)で $(R - 50)$ を一つの変数と考えれば

$$\epsilon_R = B(R - 50) + A(T - T_s) + C \dots\dots (4)$$

表 3 式(3)の定数

塗料番号	A (× 10 ⁻⁶)	B (× 10 ⁻⁶)	C (× 10 ⁻⁶)
SC-10	57.3	18.0	829
SC-15	47.3	-	1096
SC-20	30.4	-	1076
SC-25	88.9	-	848
SC-30	79.4	-	997

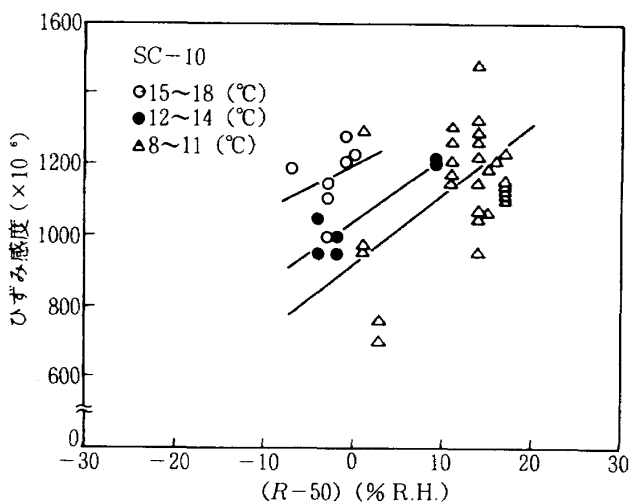


図 13 (R-50) とひずみ感度との関係

となり、温度 T が異なる場合、すなわち、 T_1 と T_2 とでは、 $\epsilon_R(T_1)$ と $\epsilon_R(T_2)$ の直線はほぼ平行になることがわかる。図 13 に示すように、この関係は実験結果でもほぼ満されている。

このようにして、各グレードの応力塗料について同様に係数 $A, B, C, \dots, A_n, B_n, C_n$ を求めておけば、負荷時の温度と湿度を予測することにより塗膜のおよその感度を知り得るので、応力塗料の選定に大変便利である。

5 種類のグレードの塗料について、ここでの実験データを用いて計算した A, B, C の値を表 3 に示す。

2.5 応力塗料の適用に関する実験のまとめ

自然乾燥で形成された塗膜を焼割れを発生させずに、良好な感度を得る目的で、その特性をいくつかの要因について調べた。膜厚については、ひずみ感度は膜厚の薄い方が若干良好であったが大差はなかった。乾燥温度については、同じ乾燥条件でも負荷時の温度が標準使用温度より低いと感

度は向上し、高いと低下し、その関係は標準使用温度との差が $-5^{\circ}\text{C} \sim +10^{\circ}\text{C}$ の範囲ではほぼ直線的で、感度変化率はおよそ 35 マイクロストレン/ $^{\circ}\text{C}$ であった。乾燥時間は標準時間 (28 時間) より遅延して長くなってもひずみ感度はあまり変らなかった。増感法については水冷増感を行ったが、水冷により増感が生じ、 $3 \sim 10^{\circ}\text{C}$ の温度差の範囲では、温度差が大きいほど増感効果は大きく、その関係はほぼ直線的で感度変化率はおよそ 45 マイクロストレン/ $^{\circ}\text{C}$ であることが認められた。

以上の実験結果から、応力塗料膜法を温度と湿度の管理なしでの乾燥条件下で適用するには、まず塗膜に焼割れを発生させないことが必須条件であり、そのためには、ひずみ感度が多少悪くなるが標準使用温度より高い温度で使用する、具体的には塗料のグレードを 1 段下げたものを使用することおよび膜厚を少し厚くすることが有効なことがわかった。グレードを 1 段下げるとひずみ感度が 200 マイクロストレンほど落ちるが焼割れがなく使用でき、低下したひずみ感度は負荷直前の水冷増感法によって回復できるので実用上大きな支障とはならないことが明らかになった。

実際の実験に当っては、まず実験場の温・湿度から、先に求めてある諸係数を用いて、式(3)により使用塗料のグレード番号を求め、そのグレードを 1 段下げた塗料を用いて塗膜を形成し、負荷時には適当な増感法を採用して感度の回復を計ることとなる。

3. CFRP 桁・リブ要素の解析

3.1 供試体および実験方法

実験に用いた供試体は、中央部に波板ウェブを

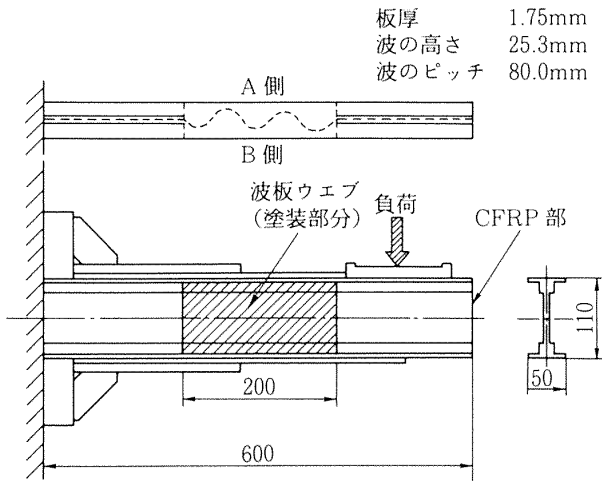


図14 試験片の形状

持つ桁・リブ要素で、その形状・寸法の概略を図14に示す。供試体はCFRP（炭素繊維強化複合材料）の積層材で、試験部分（波板ウェブ部分）の構成は、中央に90°方向（桁の長手方向に直交する方向）の一方向材1層があり、これを夾んで±45°方向の織物材がそれぞれ2層づつとなっている。成形時の1プライ当りの標準板厚は一方向材が0.15mm、織物材が0.4mmである⁹⁾。

試験は供試体の波板ウェブ部分のせん断強度を調べる目的で、次のように行った。図15に示すように供試体の両端に剛性の非常に大きい鋼鉄製金具を取付け、さらに、フランジ部分に破壊が発生しないように厚い鋼板を取付けた。このようにした結果、試験部分の長さは図14に示す200mmから125mmとなった。供試体の一端を固定端とし、他端に油圧ジャッキによって荷重を与えた。荷重を負荷する状況を図16に、実際の試験状況

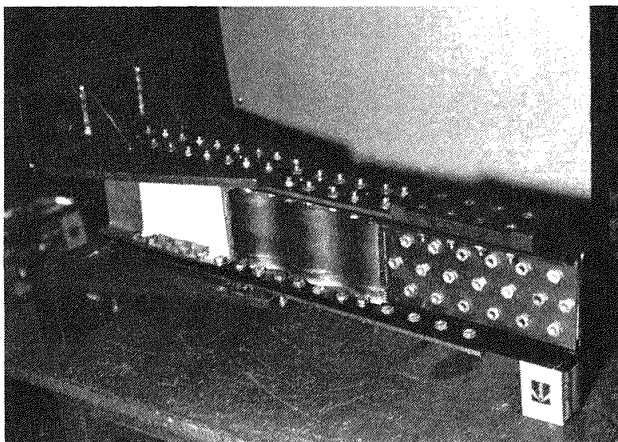


図15 CFRP 桁・リブ要素

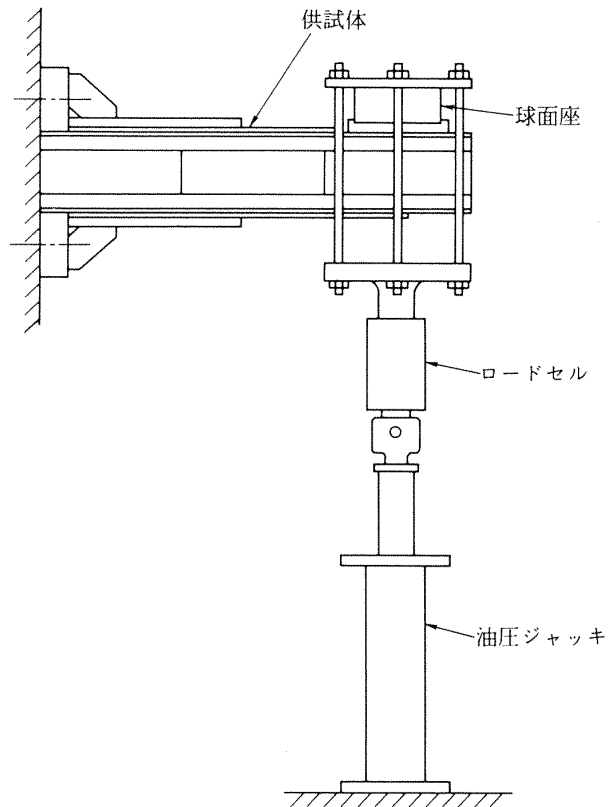


図16 試験状況

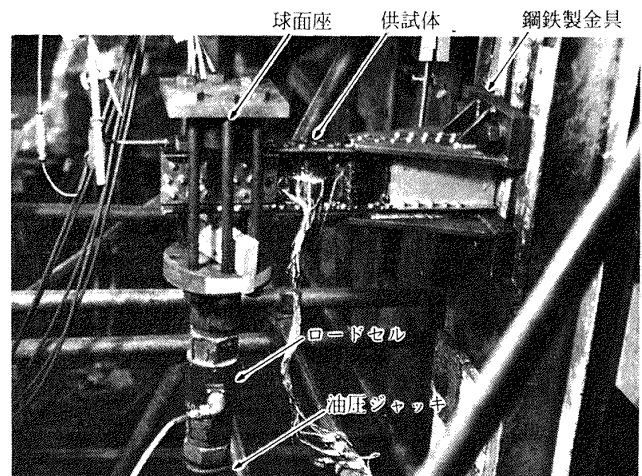


図17 疲労試験状況

を図17に示す。荷重負荷点は球面座とし、鉛直荷重のみが作用するようにした。荷重の大きさはロードセルを介してペン書きオシログラフに常時記録させた。

3.2 実験結果および考察

a) 応力塗料

使用すべき応力塗料の選定のために、まず、実験場の気温の測定を行った。実験場の気温は昼夜で6~13℃で、その差も7℃とかなりあった。こ

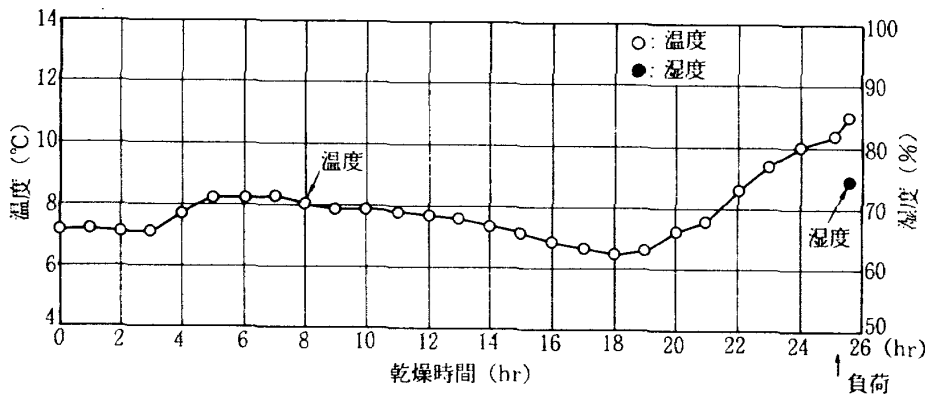


図 18 塗膜の乾燥中の温・湿度

の条件下で先に求めた塗料の選定法により計算すると SC-10 が最適塗料となったので、グレードを 1 段下げて SC-5 を用いるべきであったが、このグレードの塗料は市販されていないので SC-10 を選定した。塗装は、供試体の測定面が波形の曲面になっているので、均一の膜厚になるように 1 回ごとの塗装厚さを薄くし、回数を多くするように工夫した。すなわち、標準的な塗装回数 7 ~ 8 回に対して本塗装では 18 回塗りとした。

応力塗料の塗装終了後、乾燥期間中の実験場の夜間の気温が先に行った気温の測定値に基く推定値より大幅に低下し、また結露することが予測された。そこで急いで供試体全体をビニールで囲い、さらにランプにより保温して焼割れの発生を防いだ。乾燥期間中の温（湿）度の変化を図 18 に示す。乾燥期間中の温度は 6.5 ~ 11°C であり、ビニールで囲って保温をしたことが適切であったことがわかった。乾燥時間 18 時間以降に温度が上昇し始めたのは外気温の上昇による。

使用した応力塗料のひずみ感度を求めるために、供試体と同時に塗装した CFRP 一方向材と織物材の感度検定試験片を用いてひずみ感度を測定した。ひずみ感度は測定の結果、その平均値として、CFRP 一方向材では 770 マイクロストレン、織物材では 820 マイクロストレンが得られた。これは前章で求めた塗料の選定法、すなわち乾燥中の焼割れ防止のために 1 段下位のグレードの塗料を選定することがこの場合実行できず、乾燥時および負荷時温度 6 ~ 13°C に対して SC-10 を選定したため、表 1 に示す標準使用温・湿度範囲に適合する塗料を結果として選んだこととなった。このた

め前章で示した種々の実験結果における塗膜感度よりはるかに良好な感度を得られたものである。このことは応力塗料の取扱いに習熟することにより、一般の実験者でも容易に 700 ~ 800 マイクロストレンの感度を得られることを示すものである。また、環境条件が整っている場合には 500 マイクロストレン台のひずみ感度を得られることが報告されている⁹⁾。なお、本実験での焼割れ防止はビニールで囲うことによる保温によりなされた結果となった。

次に、供試体に 19.6kN の曲げ荷重を負荷し、塗膜き裂の測定を行った。発生した塗膜き裂のスケッチを図 19 に示す。塗膜き裂は A 面の凸部分に特に多く発生していることがわかる。き裂の方

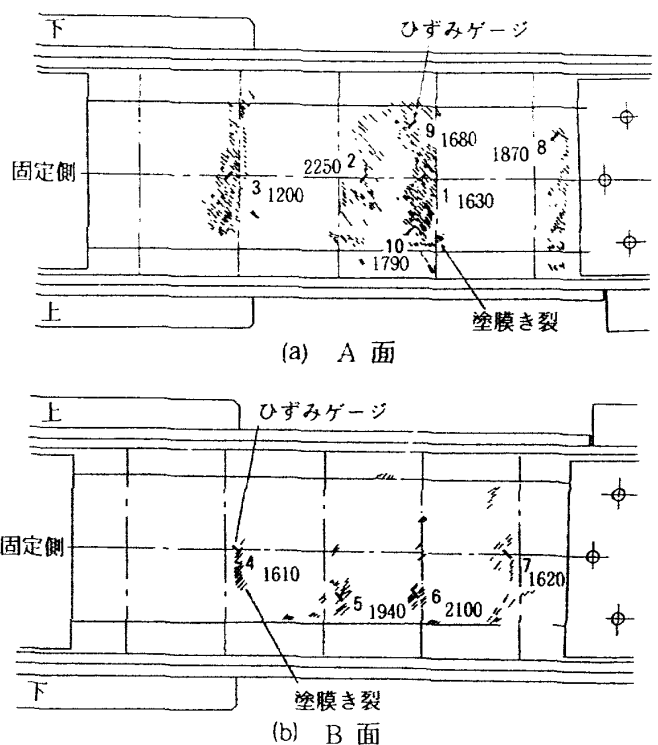


図 19 塗膜き裂およびひずみ測定値

向は約 45° になっており、この方向は鉛直荷重により発生したせん断変形による引張方向に対応している。また、き裂が短かくとぎれているのは、本供試体の最外層が織物材の織目模様になっているため、その織目に沿ってき裂が発生したためと考えられる。発生したひずみの大きさは、供試体表面が感度検定試験片と類似の CFRP 織物材であることから 820 マイクロストレン以上であると推定できる。塗膜き裂の写真撮影の一例を図 20 に示す。

図 19 および 20 に示す実験結果から、塗膜き裂の発生位置、方向、密度がわかるが、高密度な個所が大きなひずみの発生部分である。

以上の所見を得た後、さらに、供試体に水冷増感法の適用を試みた。すなわち、気温より 3℃ 低い水に脱脂紙を浸漬し、これを供試体に直ちに貼付して温度を下げる方法をとった。この増感法により、供試体のほとんど全面にき裂が発生した。

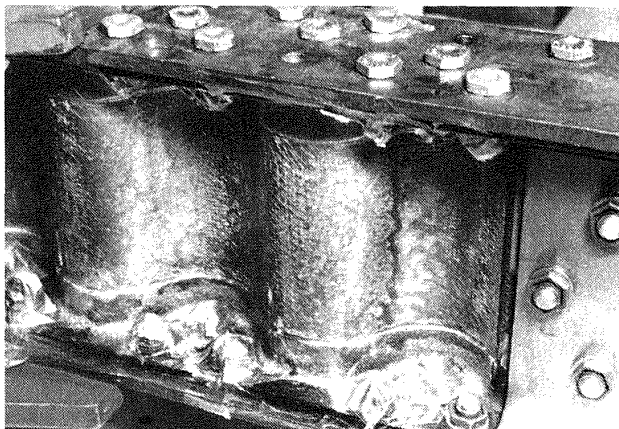


図 20 供試体に発生した塗膜き裂

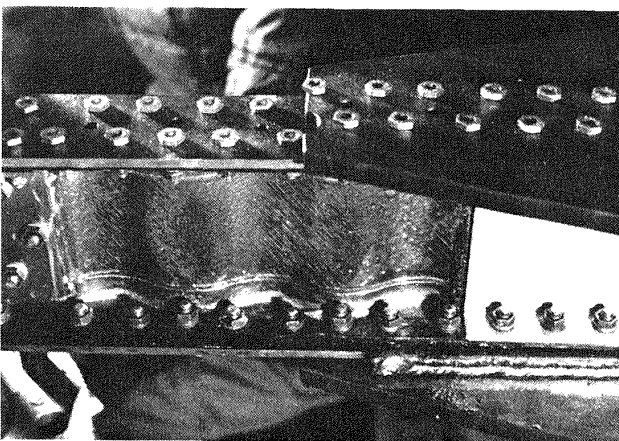


図 21 水冷増感後の塗膜き裂

水冷増感後のき裂の写真を図 21 に示す。

b) ひずみゲージ

応力塗料による実験で求められた大きなひずみの発生個所に単軸ゲージを接着してひずみを測定した。ゲージの接着位置を図 19 に示す。接着方向は全ゲージとも塗膜き裂に直交する方向、すなわち鉛直線に対して約 45° の方向とした。これは類似の桁・リブ要素について 3 軸ロゼットゲージを用いて行った測定結果から、0° (桁の長手方向)、±45°、90° 方向のひずみのうち ±45° 方向が他の方向のひずみに比べて卓越して大きかった事実⁹⁾ も合せ考えてこのように決定した。

負荷は応力塗料による実験の場合と同じ 19.6 kN を与えた。発生したひずみの大きさをゲージ番号 (太字) と共に図 19 に示す。ひずみ値はいずれも 1200 マイクロストレン以上を示しており、検定試験片で求めたひずみ感度 820 マイクロストレンより大きな値となっている。これは塗膜き裂発生時の最小ひずみ値が約 800 マイクロストレンであり、これより大きなひずみ発生個所では全てき裂が発生する。ここではき裂密度の高い個所にゲージを接着しているため、800 マイクロストレンよりは大きな値となることは当然である。

c) 疲労試験および残留強度試験結果との比較検討

本供試体は応力塗料を用いた負荷試験終了後、疲労試験および残留強度試験を行った⁹⁾。

疲労試験の概要は以下の通りである。試験荷重は最大荷重 29.4 kN、最小荷重 2.94 kN (応力比 0.1) の片振り引張負荷であり、繰返し速度は約 2 Hz である。

また、損傷状況を調べる一手段として、供試体に接着したひずみゲージの指示値の変化を調べた。その際、疲労試験を一時中断して静的荷重 19.6 kN を負荷し、ひずみを測定した。測定点の位置は図 19 に示す 10 点である。静荷重試験で特に大きなひずみを示したゲージ No. 2 と No. 6 および No. 6 のほぼ背面にあたるゲージ No. 1 の繰返し数に対するひずみの変化を図 22 に示す。ひずみは試験初期にはほとんど変化がなかったが、繰返し数約 2×10^6 回から多少変化が現われている。

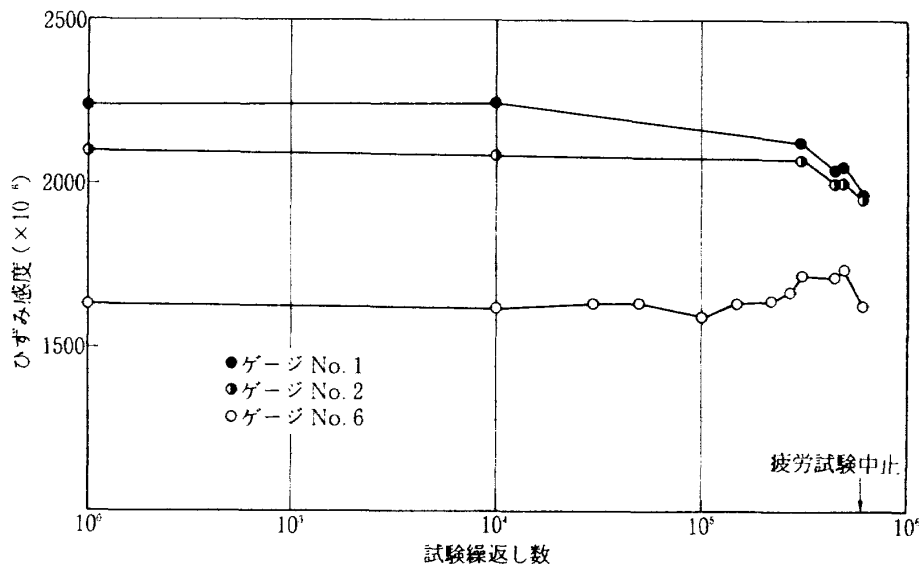


図 22 静荷重 2Ton 負荷時のひずみ

しかし、供試体の外部には目視による損傷は発見できなかった。繰返し荷重を 6×10^6 回負荷しても損傷を発見できなかったため、疲労試験を中止し、残留強度を求めることにした。

残留強度試験では、荷重を静的に増加していき、供試体を破壊させた。破壊荷重は 51.5kN であった。残留強度試験における荷重とひずみとの関連をゲージ No. 2, No. 6 および No. 1 について図 23 に示す。ひずみはほとんど直線的に増大し、破壊に至っている。供試体の破壊状況のスケッチを図 24 に、写真を図 25 に示す。

この破壊様相に対する検討は以下の様に行った。まず、供試体の試験個所の積層構成が 90° の一方向材一層（標準板厚 0.15mm）を挟んで $\pm 45^\circ$ の織物材各 2 層（標準板厚 1 層 0.4mm）となって

いることから、ここでは負荷に対する $\pm 45^\circ$ の織物材の挙動を主として破壊の考察を行っても大きな過ちは生じないものと考えた。そして、先に行った応力塗料による実験結果を用いて検討し、その結果、破壊は次のように進展したものと推定した。すなわち、せん断変形により、塗膜のき裂によって示された位置および方向に引張り応力による繊維とマトリックスの分離が発生し、この分離が負

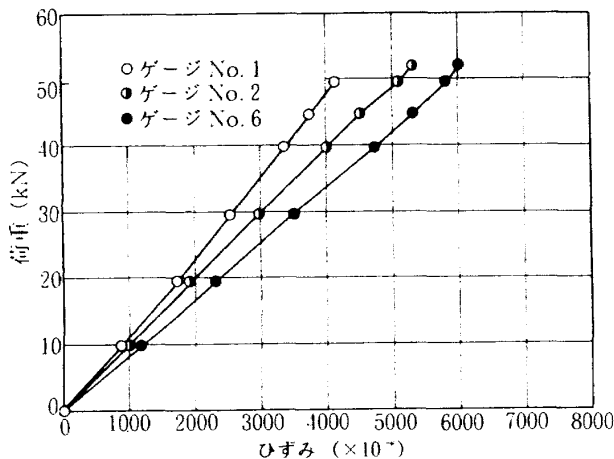


図 23 荷重とひずみの関係

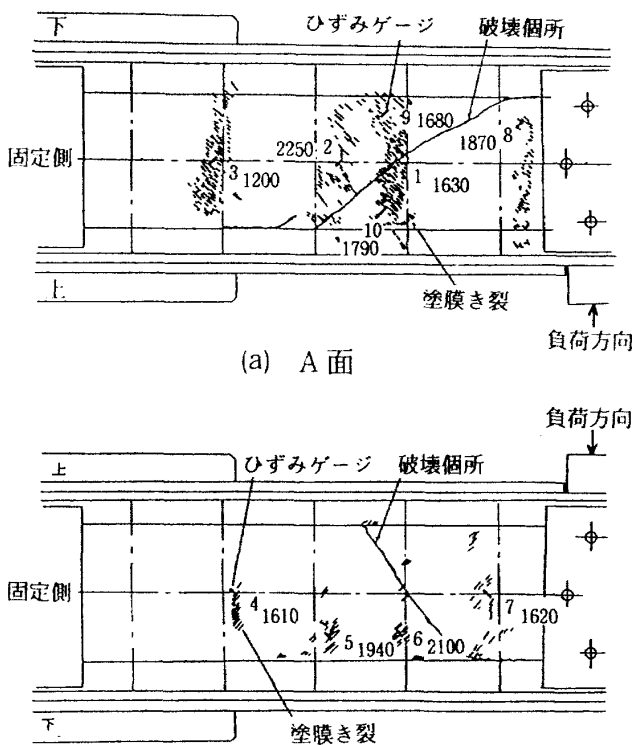
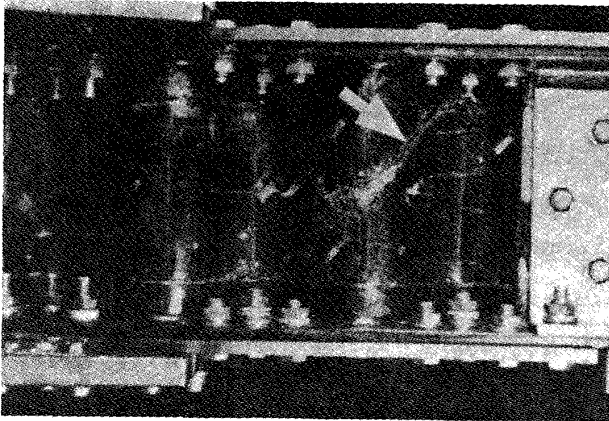
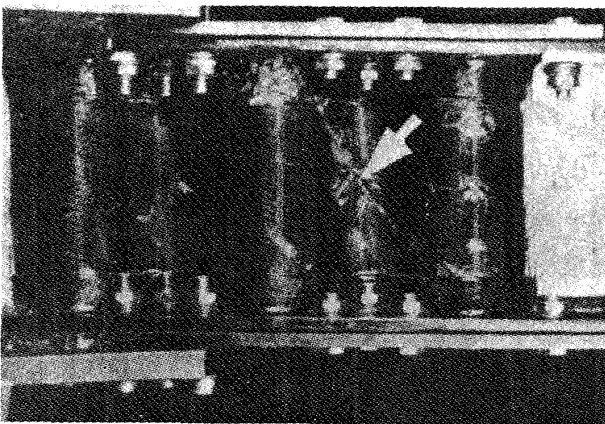


図 24 供試体の塗膜き裂



(a) A面



(b) B面

図 25 供試体の破壊状況 (矢印 破壊部)

荷重の増大と共に徐々に進行した後、引張り応力とほぼ等価で位相が 90° ずれた圧縮応力により繊維が圧壊したものと推定した。この推定によれば、最終破壊は塗膜のき裂方向とほぼ直交する。試験の結果、破壊は図 24 および 25 に示すように塗膜き裂の最も密な個所に、かつ塗膜き裂と垂直方向に発生しており、応力塗料の実験結果からの予測と一致している。

4. まとめ

強度計算により設計された構造物においても、その構造物や部材内のひずみや応力を実験的手法によって求め、それらの強度の確認と構造の安全性を確かめることは依然として重要である。本報告は、実験的手法のうち、複雑な形状の構造物に対しても全体の応力あるいはひずみの分布を簡単に求めることができる応力塗料膜法を適用した結果について述べたものである。

まず、温湿度のコントロールが困難な大型実験場における自然乾燥による応力塗料の最適使用条件を求め、次に、形状の複雑な構造物の一例として、炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の波板ウェブを持つ、桁・リブ要素のせん断試験に、ここで求めた最適使用条件により応力塗料を選定して応力塗料膜法を適用し、大きなひずみの発生個所とその方向を見出した後に疲労試験と残留強度試験を実施し、そこでの供試体の破壊様相について、先に求めた応力塗料膜法により得られた結果を適用して検討を行った。

以上の結果、次の結論が得られた。

1. 最適使用条件について

- (1) 年間の温度および湿度の変化 $0^\circ\text{C}\sim 32^\circ\text{C}$ 、 $35\%\sim 85\%\text{ R.H.}$ の範囲内で実験を行ったが、温・湿度の管理を行わない条件下では、乾燥中の塗膜の焼割れを防止することが先ず肝要である。そこで、焼割れは塗膜が最高感度となる乾燥状態を超えて一層乾燥した状態と考え、逆に感度を低下させた状態で塗膜の乾燥を終了させれば、焼割れは発生しないものと考えた。そして塗膜感度が温度により敏感にしかもほぼ直線的に増減することに着目し、感度を低下させるために塗料を標準使用温度より高い温度で使用する事とした。具体的には標準使用温・湿度条件で定められる使用塗料のグレードを1段下げて、すなわち 20°C 、 $50\%\text{ R.H.}$ において本来なら SC-20 が適当であるのに対して SC-15 を選定することにより、感度を低下させて焼割れ防止を計り、そして実験時には増感法を適用して低下した感度の回復を計り、十分な精度で有用な測定結果を得ることとした。
- (2) 実験前の塗料の選定については温度のみでなく湿度の影響をも考慮しうる塗膜感度の予測のための式を導いた。
- (3) 実験の実施に当っては、本式を用いて適正な感度を与える塗料を求めた後に、さちにグレードを1段下げたものを選定することにより、ここでの実験条件にかなう塗料を求め、これを使用して塗膜を形成し、負荷時には適当な増感法を用いて感度の回復を計ることが、このような

温・湿度条件下での実験法として適切であることが認められた。

2. 構造物への応力塗料膜法の適用について

- (1) 炭素繊維強化複合材料の波板ウェブを持つ、桁・リブ要素のせん断試験に、応力塗料膜法を適用した結果、負荷荷重によるせん断方向と一致した塗膜き裂が発生し、大きなひずみの発生個所が発見できた。
- (2) 続いて行った疲労試験後の残留強度試験において、発生した破壊個所および破壊様相はいずれも応力塗料膜法により得られた塗膜き裂密度の高い個所を通過しており、また、破壊方向は塗膜き裂に対して垂直方向に一致しており、供試体の破壊個所の推定に応力塗料膜法が有用であることが認められた。

謝 辞

本研究を行うにあたり、応力塗料の使用法、特性など全般にわたりご教示いただいた日本非破壊検査協会 410 小委員会委員長京都工芸繊維大学菅野昭教授ならびに有益な討論をいただいた委員各位に感謝いたします。また、本法の適用のために種々の御便宜をいただいた当所機体部多田保夫部長に、さらに、複合材製桁・リブ要素の負荷試験に多大の労を払われた構造力学部小野幸一部長、工作課坂本健の各氏に厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 菅野：応力塗料膜のき裂特性に関する研究（膜厚の影響について），材料，21-228，(1972)，P. 846~868.
- 2) 菅野：応力塗料膜とその応用，非破壊検査，25-5，(1976)，P. 252~260.
- 3) 菅野，井上：応力塗料膜のき裂特性に関する研究（負荷時間の影響），材料，30-330，(1981)，P. 89~94
- 4) 江川，野原：応力塗料を用いた FRP 円筒結合部の強度試験，非破壊検査，28-8，(1979)，P. 506~517.
- 5) 野原，江川，野口：応力塗料を用いた FRP 円筒結合部の強度試験，航技研報告，TR-627，(1980).
- 6) 菅野：最近の応力塗料とその応用，機械の研究，33-10，(1981)，P.1127~1134.
- 7) 伊藤：航空気象，東京堂出版，(1971)，P. 406.
- 8) 中村，晴山，ほか：応力塗料膜の水冷増感法の応用について，第12回応力・ひずみ測定法シンポジウム前刷集，(1980)，P. 5~8.
- 9) 竹内，多田，ほか：炭素繊維複合材（CFRP）桁・リブ要素模型試験，航技研報告，TR-663，(1981).

航空宇宙技術研究所報告1089号

平成2年12月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊦182

印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17
