

# 復水器冷却管の拡管部の疲れ強さ

大内田 久\* 楠本 韶\*\*

## Fatigue Strength of Expanded Condenser Tube

By Hisashi Ouchida and Sho Kusumoto  
Hitachi Laboratory, Hitachi, Ltd.

### Abstract

The failure of the condenser tube from fatigue is caused in most cases by the vibration from neighbouring machines or repeated thermal expansion of the tube itself. The writers have conducted an experimental investigation recently to see the influence of the expansion in varied degrees, annealing temperatures of tube ends and corrosion on the resistivity of the expanded condenser tube against fatigue.

The results of the test are as given below:

- (1) The fatigue strength reduction factor of an expanded condenser tube turned out to be about 2.8.
- (2) Condenser tubes annealed at 650°C and 750°C had smaller tensile strength and accordingly smaller fatigue strength when they were of unnotched type, but in case of an expanded tube specimen it showed nearly the same fatigue strength as compared with the one annealed at 550°C.
- (3) The variation in degree of expanding had scarcely any influence on the fatigue strength.
- (4) The failure from fatigue initiated from the surface of the end part of the tube which is in contact with the head plate. This might be due to the fretting corrosion accelerated by minute relative slips between tube and plate and the difference of hardness between the outer and inner surfaces of the tube caused by expansion. Corrosion of the interior of the tube had little effect on the fatigue strength.
- (5) When the length of expanded part of tube is longer than that of the tube seat, the fillet radius at the edge of hole in head plate increases adding to the fatigue strength of the expanded tube.

### 〔I〕 緒 言

蒸気タービンなどの復水器において最近冷却管が両端とも管板に拡管してとりつけられるようになった。復水器に蒸気が流入するとき生ずる渦流や外部の機械の振動による励振および熱膨脹収縮によつて冷却管が繰返し曲げを受け、拡管部端に高い応力を生じこの部から疲れ破損を起すことがある。設計上は一応このような場合の対策として管群に隔板を設けて振動を防止することが行われているが、冷却管の強さを論じて設計する場合または

現場で拡管する場合、この拡管された冷却管の疲れ強さを知っておくことは重要なことである。本文は冷却管を管板に拡管してとりつけする場合に種々の拡管度、管端の拡管作業のために行う焼なましの温度、管板の冷却管とりつけ穴の縁の丸みなどが冷却管の疲れ強さにおよぼす影響および管内に腐蝕液を通した場合の疲れ強さにつき実験し、設計および現場作業の資料をえようとしたものである。このような冷却管拡管部の強さを論ずる場合は当然拡管による残留応力や塑性変形と腐蝕に原因する応力腐蝕割れ、時期割れも問題となるが、これについては別の機会に述べることとし、本文に疲れ強さの上から

\* \*\* 日立製作所日立研究所

のみ検討したものである。

〔II〕 研究の方法

(1) 試料

復水器の冷却管として一般に用いられている商品名アルブラックおよびアルミブラスの両管種を用い、管板材としてはネーバルブラスを用いた。これらの材料の化学的成分は第1表に示す。

冷却管を管板に拡管してとりつける際、拡管作業を容易にし残留応力を小さくするために管端を焼なましするが、その焼なまし温度は管種によつて異なるから、第2表に示す種々の焼なまし温度についてその機械的性質を求めるとこの表の通りになる。この実験では焼なましには電気炉の温度を所定の焼なまし温度にしておき、管を炉内に入れ、管の温度が炉温になつてからそれぞれ表に

示した時間だけ焼なましすることにした。機械的性質は管状のまま引張つて求めた。この結果から焼なまし温度を高くすれば機械的性質が弱くなることがわかる。なおネーバルブラスの機械的性質は第2表の通りである。

冷却管の焼なまし温度をかえると第1図の顕微鏡組織にみられるようにアルブラック、アルミブラスとも結晶粒子の粗大化をきたしその大きさをA.S.T.Mできめた鋼の粒度番号で示すと次ぎのごとくなる。

アルブラック	550°C	焼なまし	No. 6
	750°C	焼なまし	No. 2
アルミブラス	550°C	焼なまし	No. 8
	650°C	焼なまし	No. 6

(2) 試験片および試験機

第2図に示すように試験用冷却管を外径90mm厚さ28mmのネーバルブラス製管板の中心穴に拡管して

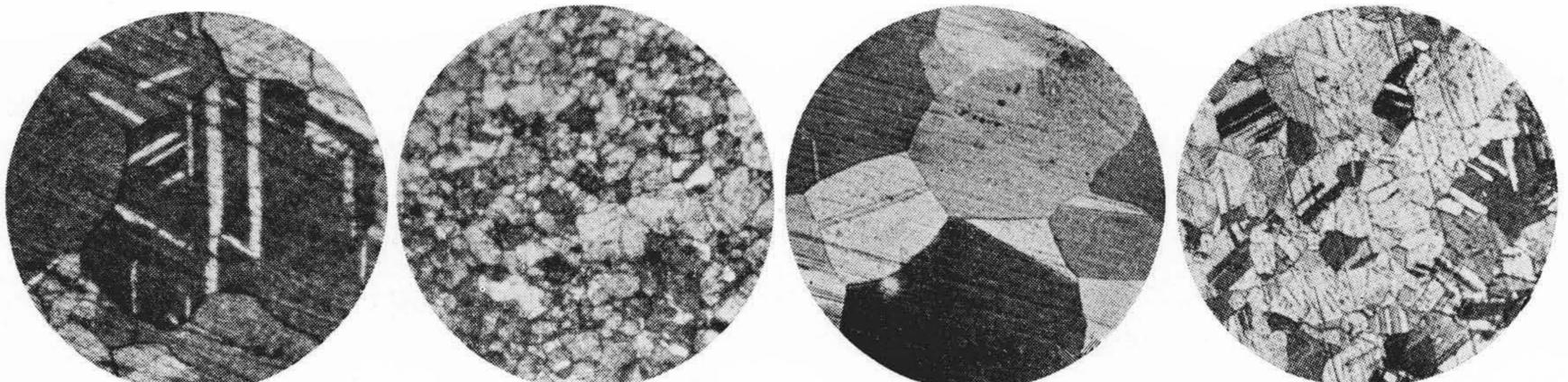
第1表 冷却管の化学的成分  
Table 1. Chemical Composition of Test Tubes

管種	Cu	Al	Si	Mn	Cr	As	Pb	Fe	Sb	Zn
アルブラック	78.6	2.23	0.28	—	—	0.06	tr	0.05	0.05	残部
アルミブラス	78.3	2.24	—	0.16	0.16	0.05	tr	0.02	—	残部

第2表 冷却管および管板の機械的性質  
Table 2. Mechanical Properties of Test Tubes and Plate

材料	焼なまし条件		降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸率 (%)	絞率 (%)
	温度(°C)	時間(min)				
アルブラック	*550	10	23.9	45.8	45.3	—
	750	10	14.1	33.8	39.0	—
アルミブラス	550	2	26.4	43.8	37.0	—
	*650	30	22.4	41.3	25.7	—
ネーバルブラス	—	—	17.9	42.2	44.0	52.0

\*は管製造者指定の焼なまし温度



(a) アルミブラス 650°C 30 min 焼なまし (×400) (b) アルミブラス 550°C 30 min 焼なまし (×400) (c) アルブラック 750°C 10 min 焼なまし (×110) (d) アルブラック 550°C 10 min 焼なまし (×110)

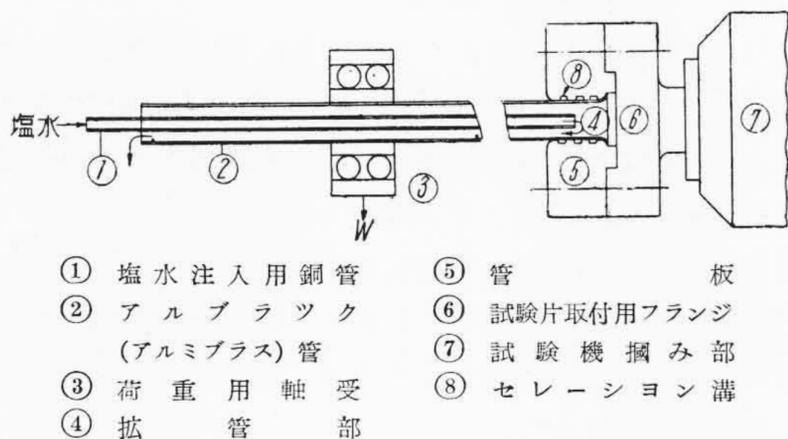
第1図 復水管の焼なまし組織  
Fig.1. Annealed Structures of Condenser Tubes

とりつけ、この試験片を片持梁式回転曲げ疲労試験機(1,700 rpm)の掴部にボルト締めしてとりつけた。管板は第3図に示すようにセレーション溝が3箇所つくられている。

荷重は図のように球軸受を介して重錘により加える。この試験で腐蝕を回転曲げと同時に行うときには図示の径5mmの銅管を冷却管中に拡管部まで挿入し、この銅管に3%の塩水を50cc/minの割合で流しつゝ疲れ試験を行った。

(3) 拡管の方法

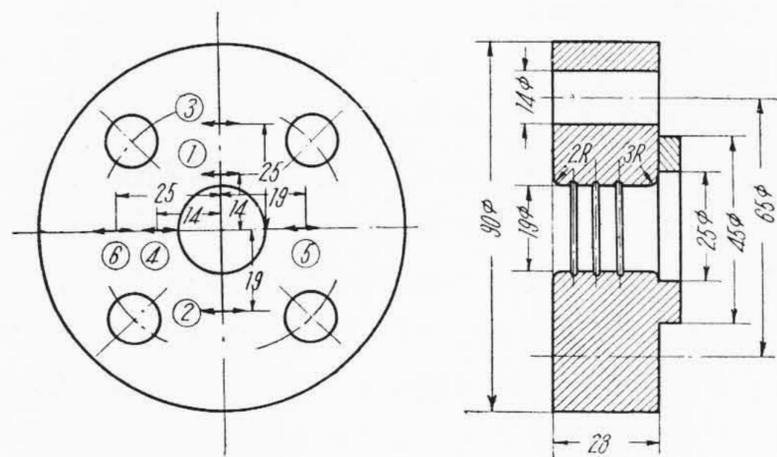
拡管は熟練作業者を指定し同一人に行わせることと



- ① 塩水注入用銅管
- ② アルブラック(アルミプラス)管
- ③ 荷重用軸受
- ④ 拡管部
- ⑤ 管板
- ⑥ 試験片取付用フランジ
- ⑦ 試験機掴み部
- ⑧ セレーション溝

第2図 試験片および荷重装置

Fig. 2. Diagram of Test Specimen and Loading Apparatus



第3図 管板の寸法および歪測定装置

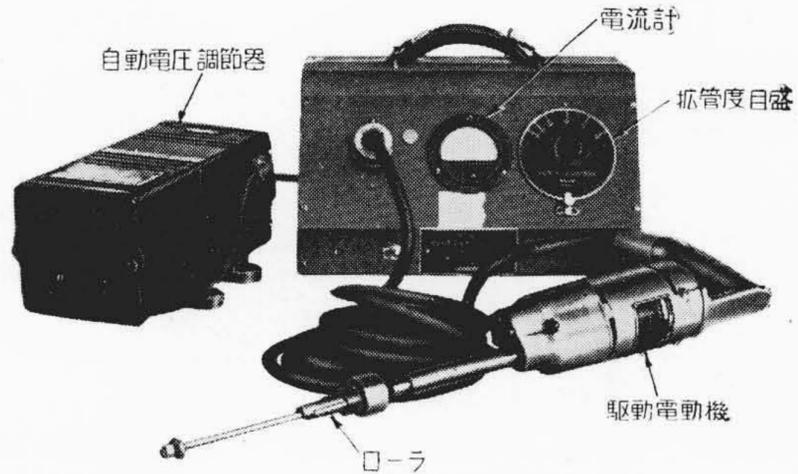
Fig. 3. Dimension of Tube Plate and Strain Measuring Positions

し、拡管機は最近輸入した Duddley 電気式および従来の空気式拡管機を使用した。Duddley 電気式拡管機は第4図に示すようなもので、管種、管径によつて適当に定められた拡管力まで拡管すると自動的に拡管機駆動用電動機の電流が遮断され、スピンドルの回転が停止するようになっている。これによつて外径 19.0mm の冷却管を管板穴径 19.0mm に拡管とりつけした。穴径 19.2 および 19.5mm の穴に対しては電気式では疲れ試験に耐えうる十分な固着力がえられなかつたので空気式を使用した。

(4) 拡管による管板および管の歪測定

管を各種の管板穴径に対して拡管とりつけする際管板に生ずる拡管時および拡管後の歪変化および拡管前後の管の寸法変化をしらべた。

電気式拡管機により 19.0mm の拡板穴径に管を拡管度目盛 B, C, E とかえて拡管とりつけした場合の管板の第3図に示す位置と方向の歪変化を抵抗線歪計で測定した。そのオッシログラフの一例を第5図に示す。これをみると拡管機のスピンドルを回転させつゝローラを管中に挿入すると、それにしたがって拡管による管板の歪は次第に増大し、拡管度目盛に応じた拡管力まで達すると拡管機の電動機の電流が遮断されローラは回転を停止す



第4図 Duddley 電気式 拡管機

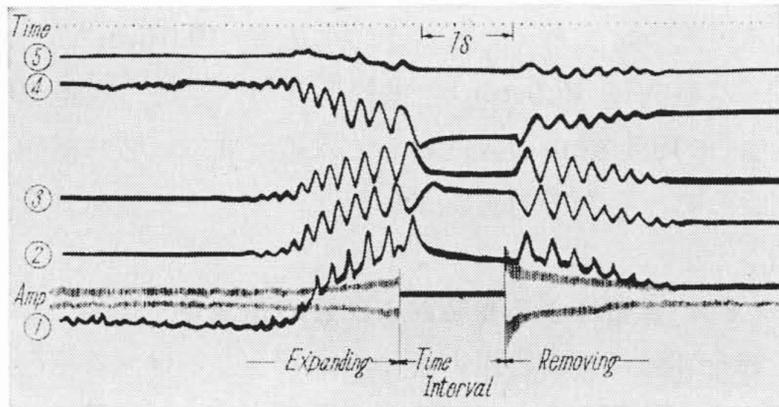
Fig. 4. Duddley Type Electrical Expanding Machine

第3表 拡管による管板の歪測定結果  
Table 3. Measurement Results of Strains due to Expanding in the Plate

試料番号	拡管尺度	電流 (A)	拡管中の最大歪 ×10 <sup>-6</sup>						拡管後の残留歪 ×10 <sup>-6</sup>					
			①	②	③	④	⑤	⑥	①	②	③	④	⑤	⑥
92	B	10.9	265	215	100	34.8	85.3	—	120	100	28.7	26	34.8	—
102	C	12.3	260	175	98	35.5	133	—	100	63	29.7	35.5	75.5	—
112	E	13.7	300	—	111	39.1	117	65	150	—	37	34.8	69.6	30

①, ②...⑤, ⑥ は第3図の測定点を示す。

る。つぎにスピンドルを逆回転しつゝ徐々に後退させると、それにしたがって管板の歪は減少し、スピンドルを抜去ると拡管のための残留歪が残る有様がわかる。これらの試験結果から拡管時の管板の最大歪と残留歪を求める



第5図 拡管時の管板の歪と拡管機の負荷電流  
Fig.5. Oscillogram Showing Strains in Expanded Tube Plate and Load Current of Expanding Machine

第4表 種々の管板穴径に拡管した場合の引抜力

Table 4. Measuring Results of Extruding Force of Tubes

管板穴径 (mm)	I		II		使用せる 拡管機
	試片番号	引抜力 (kg)	試片番号	引抜力 (kg)	
19.0	435	1,520	525	900	電気式
	445	1,220	535	1,250	
	455	930	545	1,060	
19.2	465	1,210	555	830	空気式
	475	1,050	565	970	
	485	1,260	575	650	
19.5	495	1,320	585	1,290	空気式
	505	1,260	595	1,340	
	515	1,190	605	1,080	

第5表 復水管拡管部部の疲れ試験結果  
Table 5. Fatigue Strength of Expanded Condenser Tubes

管種	焼なまし温度 (°C)	管板穴径 (mm)	疲れ限度		$\sigma_{wa}/\sigma_B$	$\beta = \sigma_{wo}/\sigma_{wa}$
			$\sigma_{wo}$	$\sigma_{wa}$		
アルブラック	550	19.0	20.6	7.5	0.16	2.75
	750	19.0	13.5	7.5	0.22	1.80
アルミブラス	550	19.2	20.2	7.5	0.17	2.70
	550	19.5	20.2	6.0	0.14	3.37
	650	19.0	18.6	8.6	0.21	2.48
	650	19.2	18.6	9.0	0.22	2.06
	650	19.5	18.6	8.5	0.21	2.20

(注)  $\sigma_{wo}$ : 平滑試験片の疲れ限度 (kg/mm<sup>2</sup>)       $\sigma_B$ : 引張強さ (kg/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_{wa}$ : 拡管試験片の疲れ限度 (kg/mm<sup>2</sup>)       $\beta$ : 切欠係数

と第3表(前頁参照)の通りになり、管板の穴縁から約4.5mm離れた位置の切線方向の残留歪は拡管度目盛では $100 \sim 150 \times 10^{-6}$ 程度で大差なく、後述のように空気式によつて強く拡管した場合の残留歪約 $360 \times 10^{-6}$ に比べるとはるかに小さい。

冷却管については拡管前後における管厚の変化、管の円周長さの変化および軸方向の長さの変化を測定した。また管内面に歪計を貼つておき管板を二つ割にして拡管後の残留歪から応力を求めた。その値は切線方向で圧縮、軸方向で引張で約 $3.0 \text{ kg/mm}^2$ 程度のものであることがわかつた。

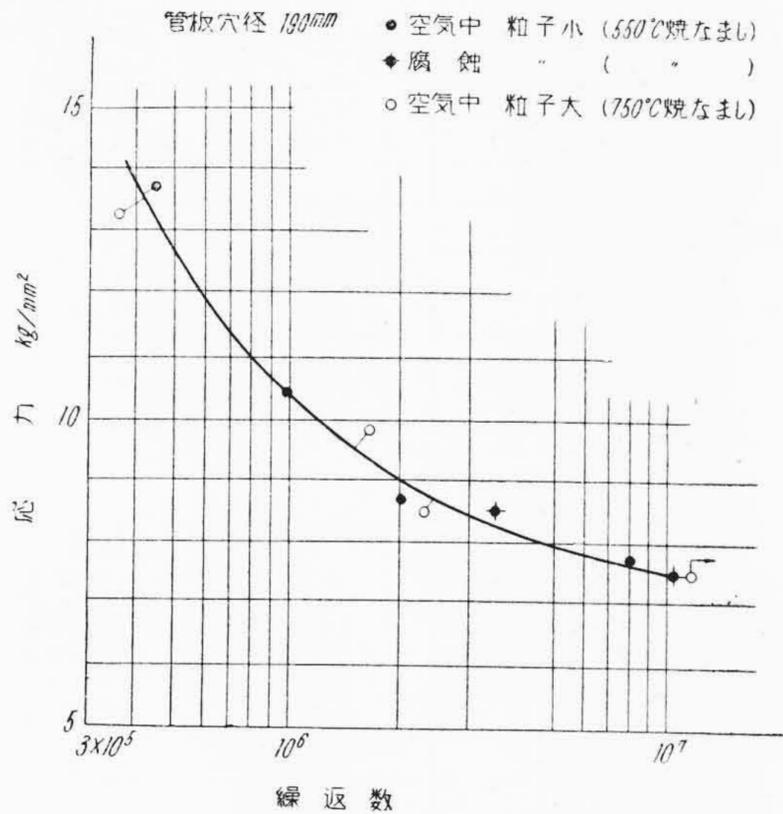
(5) 固着力の測定

外径19.0mmのアルミブラス管を19.0, 19.2および19.5mmの管板穴径に拡管とりつけしたものをアムスラー試験機で冷却管を引抜きその力を求めた。その結果は第4表のように求まり、穴径と引抜力の関係について統計的考察を加えると有意性が認められず、その信頼度は200kg程度である。したがつてこの程度の拡管度の違いでは固着力は大差なくその差は施工によるばらつきの範囲にあるとみられる。

[III] 疲れ試験結果

(1) 管端焼なまし温度の影響

アルブラックおよびアルミブラス管を管端の焼なまし温度を種々かえ、種々の管板穴径に拡管とりつけしたものに付き疲れ試験した結果は第5表のように求まつた。またそれらのS-N線図は第6図および第7図に示す。これらからアルブラック管については焼なまし温度550°Cに比し750°Cのものは機械的性質が低下するにもかかわらず疲れ限度は同じで約 $7.5 \text{ kg/mm}^2$ である。アルミブラス管については焼なまし温度の高い650°Cの場合の方が550°Cのものよりかえつて疲れ限度は高く約 $8.5 \text{ kg/mm}^2$ である。二つ管種についての拡管部の



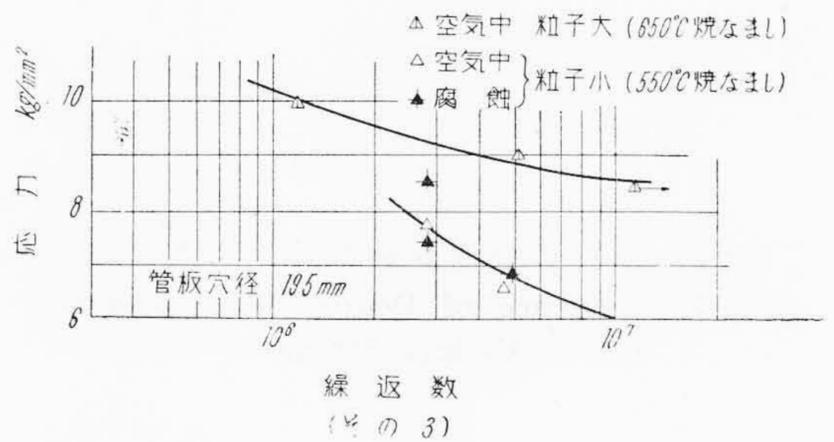
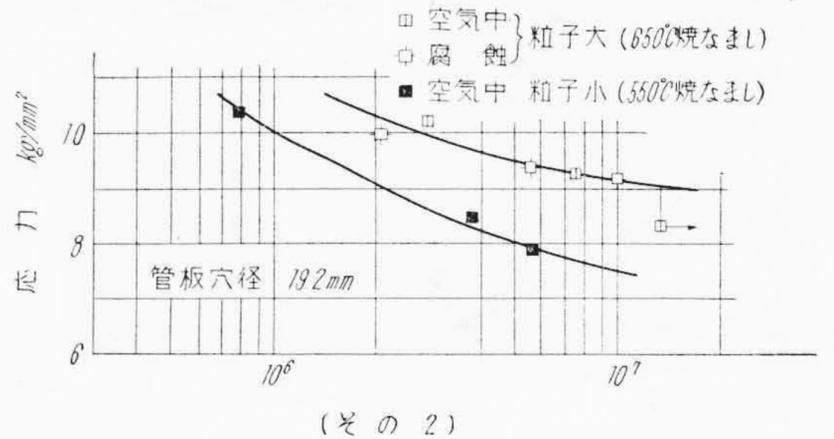
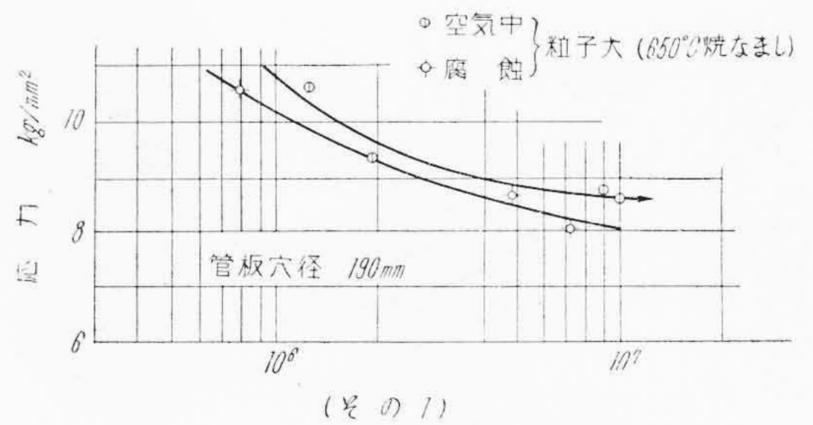
第6図 アルブラック管の疲れ曲線  
Fig.6. S-N Curves for Albrac Tube Specimens

疲れ試験結果から、冷却管を管板に拡管とりつけした場合の疲れ限度は夫体管材の引張強さの約 0.16 倍で、切欠係数は約 2.8 と見積ればよいことになる。なおアルミプラス管については焼なまし温度が 550°C の場合は管板穴径が大きくなると疲れ強さがかなり低下する傾向にある。この点この管種の拡管時の焼なまし温度が 650°C に指定されているのは意味がある、すなわち 650°C では穴径をかえてもほとんど疲れ限度が変わらずしかも 550°C のものより高い値を示すから最適といえる。

拡管部の破損は常に拡管部端で穴縁の丸みの終った少し管板内に入った管の表面より生ずる。第5表の切欠係数は同一管材について平滑試験片の疲れ限度を引張強さの 0.4~0.45 倍として求め、この値と拡管部の疲れ限度との比から求めたものである。

(2) 腐蝕の影響

冷却管に 50 cc/min の割で塩水を流しつゝ疲れ試験を行つた結果は第6図および第7図に示すように求ま



第7図 アルミプラス管の疲れ曲線  
Fig.7. S-N Curves for Alumibrass Tube Specimens

り、アルブラックおよびアルミプラス管とも空気中の疲れ強さとほとんど差がなく、腐蝕の影響は認められない。またアルミプラスの場合については焼なまし温度をかえても腐蝕疲れの強さは空気中の疲れ強さと大差ないことがわかる。

(3) 拡管度の影響

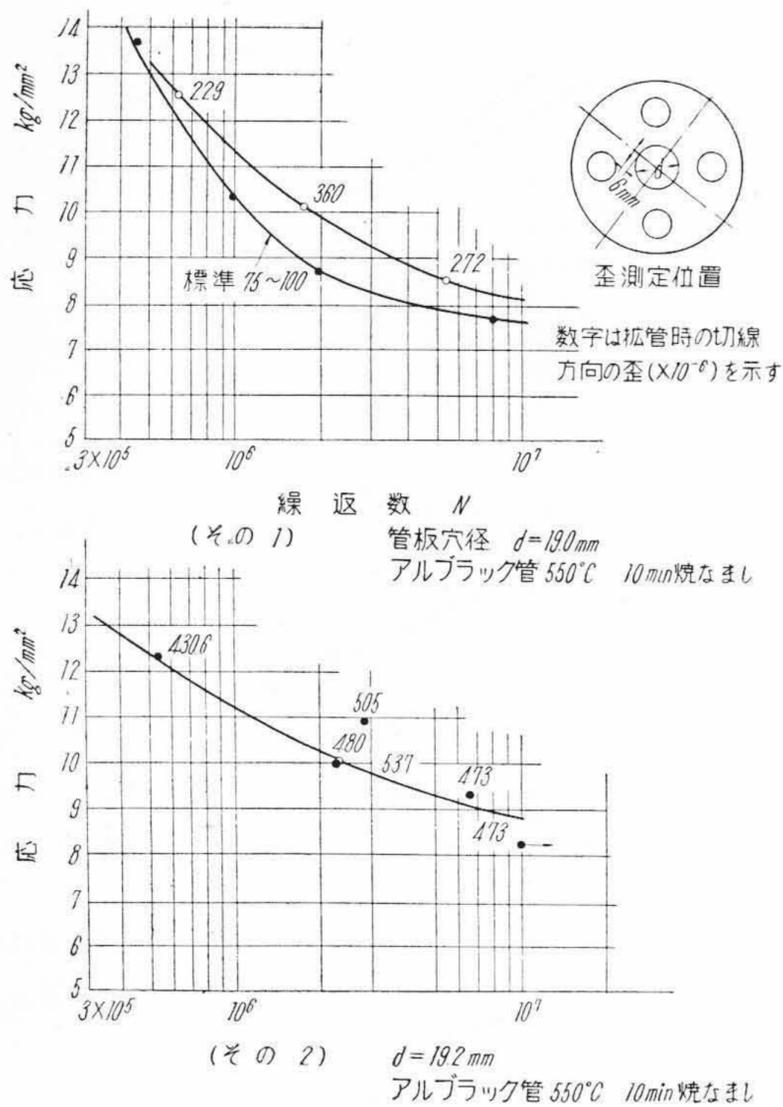
650°C 焼なましのアルミプラス管を管板穴径 19.0,

第6表 拡管度の疲れ強さにおよぼす影響  
Table 6. Influence of the Degree of Expanding

管板穴径 D (mm)	管の歪変化			管板の残留歪		把握圧力 $\rho$ (kg/mm <sup>2</sup> )	疲れ限度 $\sigma_{wa}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	備考
	$1+\epsilon_r$	$1+\epsilon_t$	$1+\epsilon_z$	$\gamma_r$	$\gamma_t$			
19.0	0.981	1.011	1.016	75	80	5.61	8.6	アルミプラス管 650°C 焼なまし
19.2	0.979	1.030	1.022	82	128	4.90	9.0	
19.5	0.924	1.045	1.030	133	156	6.07	8.5	

\*  $\gamma$  は管板穴縁より半径方向 5 mm の点の値を示す。×10<sup>-6</sup>

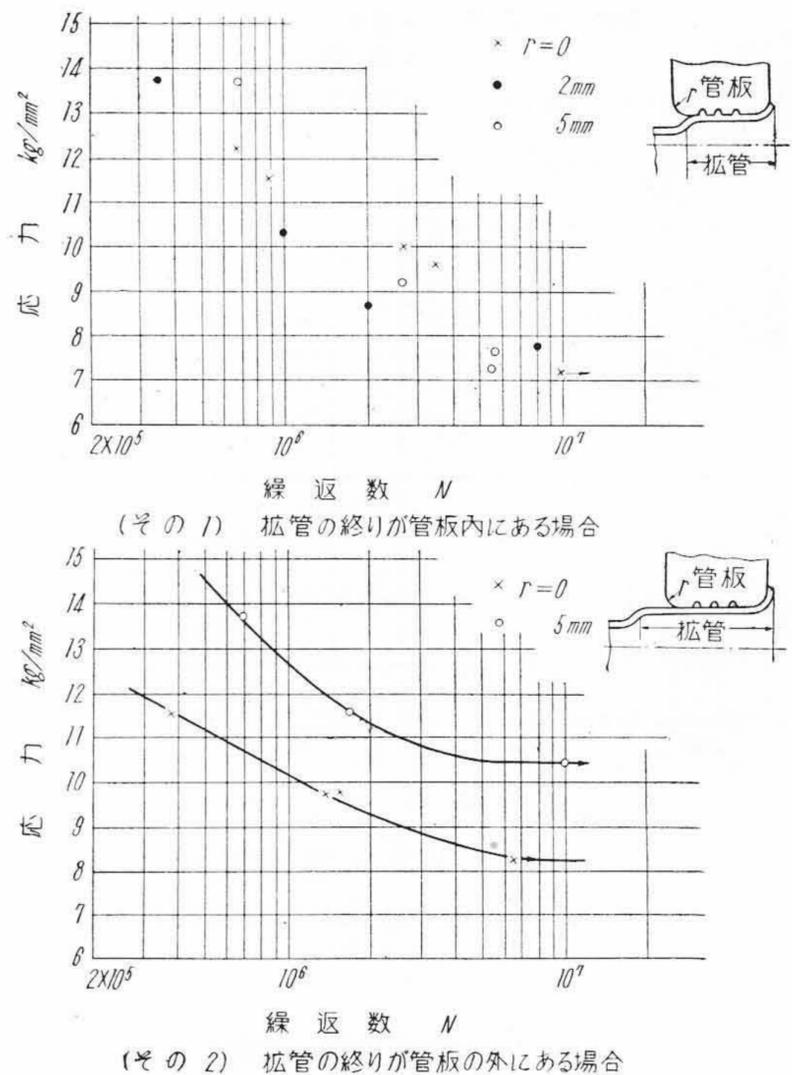
\*\* 記号 r, t, z はそれぞれ半径方向, 円周方向, 軸方向を示す



第8図 拡管度の疲れ強さにおよぼす影響  
Fig.8. Influence of Degree of Expanding on the Fatigue Strength

19.2 および 19.5mm に拡管とりつけした場合管の寸法変化、穴縁から 5mm 半径方向に離れた位置における半径方向および切線方向の残留歪および管の引抜き力から摩擦係数を 0.15 として算出した把握力は第6表(前頁参照)の通り求めた。これらの場合に対する疲れ試験の結果は第7図および第6表の通りとなり、この程度の実用範囲内での多少の拡管度の差は疲れ強さにほとんど影響しないとみてよい。しかし焼なまし温度の低い 550°C のものについては前述のように拡管度が大きくなると疲れ強さは低下するから、焼なまし温度を 650°C にすることはアルミブラスの場合は強さの上から大切なことであろう。

さらに 550°C に焼なまししたアルブラック管につき、管板穴径を 19.0 および 19.2mm とし現場作業者に過度に強く拡管させたものにつき疲れ試験を行った。その結果を第8図に示す。図中の数字は管板穴縁から 6mm はなれた位置における切線方向の残留歪を示し、標準のものに比しかなり強く拡管されたことがわかる。疲れ強さは標準拡管度のものよりもむしろ若干強くなる傾向を示している。このことから冷却管を強く拡管し把握力を大きくした方がこのような拡管部の繰返し曲げに対して



第9図 管板穴縁の丸みの疲れ強さにおよぼす影響  
Fig.9. Influence of the Fillet Radius at the Edge of Hole in the Tube Plate on the Fatigue Strength

は有利であるといえる。これは後述するような拡管部端の Fretting corrosion による破損に対して好ましい結果をあたえるものである。しかし過度の拡管は応力腐蝕や時期割れの原因となるから注意を要する。

(4) 管板穴縁の丸みの影響

拡管部端で管板と管とが接触する部分の穴縁の丸みの疲れ強さにおよぼす影響をしらべた。第9図(その1)は拡管の範囲が管板の厚み内で終わっている場合、(その2)は管板の厚みよりも長く拡管が行われた場合で、穴縁の丸みは 0, 2 および 5mm とした。その疲れ試験の結果は第9図のように求まり、拡管の範囲が管板内で終る場合は縁の丸みの影響は(その1)に示すようにほとんどなく、管板の厚みよりも長く拡管された(その2)の場合は丸み半径の大きくなるにしたがい疲れ強さも増大し、丸みのない場合に比し 5mm の丸みでは約 30% 疲れ限度が増大し、(その1)の場合に比し約 38% の増大となる。これは管板内で拡管が終っている場合には丸みの部分が拡管された冷却管の表面に接触しないので当然影響がないもので、管板の厚みよりも長く拡管された場合は拡管された管の表面に穴縁があたり繰返し荷重により摩擦を生じ Fretting corrosion を生じ縁の丸みが破損に

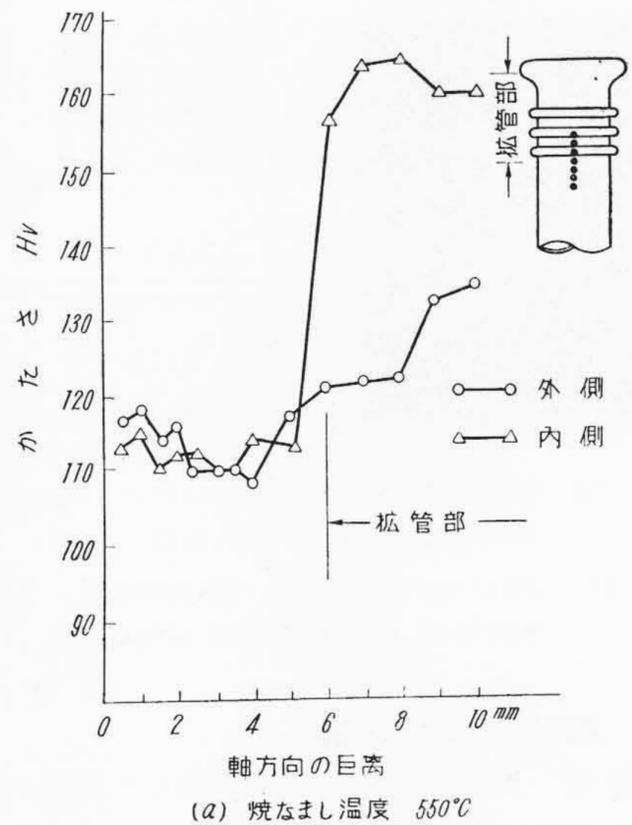
利いてくることになる。拡管の長さを長くし管板の外方まで行うことは腐蝕のことを考えると余り好ましくないかもしれないが、疲れ強さの点では拡管部の把握力を強くして好ましいことになる。

[IV] 結果の検討

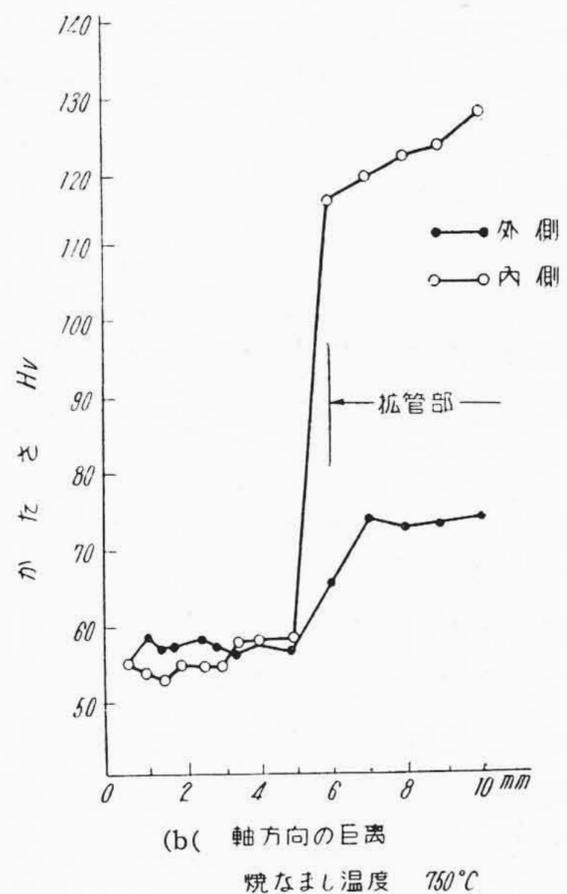
(1) 管端焼なまし温度と疲れ強さの関係

前述のように管端の焼なまし温度を高くすると冷却管の結晶粒子の粗大化をきたすとともに機械的性質が低下するにもかかわらず、拡管部の疲れ強さはアルブラック管では 550°C と 750°C 焼なましでは大差がない。このことは応力集中のない平滑な試験片では結晶粒子の大きいものの方が弱いけれども応力集中のある試験片では疲れ強さに大差ないことになる。拡管部端では拡管による応力集中のほかに繰返し曲げによっても応力の集中を生ずる。結晶粒子の大小が応力集中に対する切欠感度を異にし、応力集中のある試験片では粒子の大きいものの応力集中のための疲れ強さの低下率すなわち切欠係数が、粒子の小さいものに比し小さいため、応力集中のない平滑試験片での疲れ強さの差を減殺して同じ程度の疲れ強さを示すことになったものと解釈できる。したがって種々の焼なまし温度によりその材料の静的強さ、平滑材の疲れ強さが変わるとともに応力集中のある試験片の疲れ強さも変わるわけである。応力集中のある部分では応力勾配があるので、その部分の表面の1箇の結晶粒子の受ける応力は、粒子の小さいものの方が大きいものより平均して高く苛酷な条件になる。繰返し荷重による破損に対しても応力集中部に露出した粒子の平均応力が高いことは、不利な条件となり、切欠感度 (Notch sensitivity) は粒子の小さいものの方が大きいものより大となる。アルミブラック管についての実験結果 550°C 焼なましのものの方が 650°C 焼なましのものより疲れ強さが低いのも要するにこの結晶粒子の大きさによる機械的性質と疲れ破損に対する切欠感度の二つの性質の総合された結果である。

一方拡管部の疲れ破損に対しては焼なまし温度の相異により、拡管ならびに繰返し荷重のための冷却管の加工硬化の程度の差が影響することも考えられる。アルブラック管につき 550°C、750°C の二種の温度で焼なましを行い拡管とりつけた試験片を応力 8.0 kg/mm<sup>2</sup> で 5×10<sup>5</sup> 回荷重を繰返し加えた後試験を中止し、冷却管の拡管部の管板端部附近の管の内外表面のかたさ分布をしらべた。その結果は第10図のように求まり、焼なまし温度の相異にかかわらず何れも管の内面の方が外面よりも拡管部におけるかたさの増大が著しいことがわかった。これは冷却管の破損が拡管部端で管の表面より起つた一



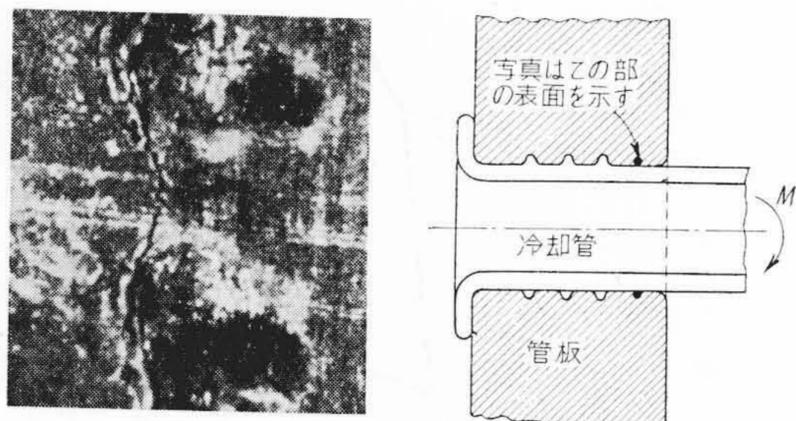
(a) 焼なまし温度 550°C



(b) 軸方向の距離 焼なまし温度 750°C

第10図 拡管された部分の管表面のかたさ  
Fig.10. Hardness of the Tube Surface at the Expanded Part

つの原因と考えられる。焼なまし温度 550°C のものは管内外面とも 750°C のものよりもかたさが大であり、したがってこの部分の材料の静的強さは拡管や繰返し荷重を受けた後も焼なまし温度の低い方が強いといえる。それにもかかわらず疲れ強さは両焼なまし温度のものが大差ないということは、結局拡管部端の応力集中と粒子の大小による切欠感度の差が材料の強さの差を減殺したものと考えるべきである。このほかに考えられる拡管部の残留応力は約 3 kg/mm<sup>2</sup> 程度であるので大きな破損の原因とは考えられない。



第11図 拡管部端の管の表面における Fretting corrosion の痕と疲れ亀裂 (×20)

Fig. 11. Photograph of Expanded Tube Surface Fretted and Cracked

### (2) 拡管部端の破損

実験結果によれば拡管部に塩水を流して腐蝕させた場合も、その疲れ強さは空気中の値と大差ないことがわかった。これは使用した冷却管が耐蝕性の強いものであること、 $10^7$  回程度の繰返し数では腐蝕の影響が顕著でないことも考えられる。

一方拡管部端の破損状況を考えると、管の外表面が管板から把握された状態で繰返し曲げを受けて管板内壁面との接触面で微小な相対的たりを生じ、管の外表面は拡管部端の応力集中部で引張圧縮を繰返し次第に磨耗し、第11図のように赤錆状の Cocoa と称する磨耗痕を生ずる。

疲れ亀裂はこの Cocoa の管板内側方向の端部に沿って発生して破損する。この疲れ亀裂が発生し破損に至らぬ前に試験を中止し、冷却管の拡管部の内外表面をしらべてみると、外表面に発生した亀裂の長さに比し内表面の亀裂は短く、しかも外表面の同一円周上の他の位置に発生した短い亀裂は内面まで貫通していないことがわかった。このことから疲れ亀裂はあきらかに管の外表面で管板と接触している拡管部端から発達したことになり、この亀裂の発生に繰返し曲げのため拡管部端に起る相対的たりによる Fretting corrosion が大きな役目をなしていると考えられる。したがって管内面に腐蝕液を通して疲れ試験を行ってもこの実験程度の時間での腐蝕では管内面に著しい腐蝕はみられずピットの生成に至らず、腐蝕は管の表面に Fretting corrosion fatigue によって亀裂が発生後、亀裂が管断面全体に伝播し破損に至るまでの期間利用して、亀裂の進展をはやめる程度にとどまる。この結果、疲れ試験結果えられた  $10^7$  回における疲れ強さは空気中のものと大差ないことになったと考える。このように拡管部の破損が主として Fretting cor-

rosion fatigue であると考えることによつて、ある程度拡管度を強くしたり、拡管の範囲を長くして拡管部の把握力を強くしたことが、疲れ強さに好影響を与えたこともうなづける。

## 〔V〕 結 言

蒸気タービン復水器の冷却管が外部からの励振、熱膨脹などによつて繰返し曲げを受ける場合の拡管部の疲れ強さの資料をうるために、アルブラックおよびアルミプラスチック管を用いて回転曲げ疲れ試験を行つた結果つぎのことがわかった。

(1) 冷却管をネーバルプラスチック製管板に拡管とりつけた場合の疲れ限度は、管材の引張強さの 0.16 倍、切欠係数は約 2.8 と見積ればよくその値は  $7.5 \text{ kg/mm}^2$  程度である。

(2) 拡管のための冷却管端の焼なまし温度を  $550^\circ\text{C}$  より  $650^\circ\text{C}$ ,  $750^\circ\text{C}$  に高めると結晶粒子の粗大化をきたし引張強さは低下するが、拡管部の疲れ強さはほとんど変わらない。これは拡管部のような応力集中部に対しては粒子の大きいものの方が切欠感度が小さく素材の静的弱さを補うからである。

(3) 外径  $19.0 \text{ mm}$  の冷却管を管板穴径  $19.0 \sim 19.5 \text{ mm}$  に拡管しても、また同一穴径に対して少々強く拡管しても、疲れ強さはほとんど変わらない。たゞしアルミプラスチックで  $550^\circ\text{C}$  焼なましのものは大きな穴径に拡管するにしたがい疲れ強さは低下する。

(4) 冷却管の拡管部における破損は、管と管板とが接触している端部の管の外表面より生じ、これは Fretting corrosion fatigue と拡管により管内面のかたさが外面より高くなつたためである。したがって管内を腐蝕しつつ疲れ試験を行つても疲れ強さにはほとんど腐蝕の影響はみられない。

(5) 拡管の範囲が管板の厚み内で終つている場合は、管板穴縁の丸みは疲れ強さに影響しないが、管板の厚みよりも長く拡管すると疲れ強さは増し穴縁の丸みが大きくなるにしたがい強くなり、丸みのない場合に比し  $5 \text{ mm}$  の丸みをつけると疲れ限度が約 30% 増大する。

終りに本研究に対し有益な助言を頂いた九夫石橋教授、終始御鞭撻下さつた馬場重役、兼先前所長ならびにタービン設計課製作課各位に深く感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- (1) R.W. Karry and T.J. Dolan: Proc. A.S.T.M 53, 789/804 (1953)