

鉛フリー銅合金鋳物材料の疲労強度に関する実験的研究

日大生産工 (研) ○茂木深太郎, 日大生産工 高橋清造
元日大生産工 森 康彦

1. はじめに

わが国では明治以来、鉛管が給水管として近年に至るまで全国的に使用されてきた。その後、地中に大量に投棄された廃棄電気製品のプリント基板などの半田付け部分からの鉛の溶出による地下水汚染の問題とともに、鉛給水管からの鉛の溶出が人の健康に与える影響が問題とされるようになった。このことについて、1992 (平成4) 年12月に厚生大臣 (当時) の諮問機関である生活環境審議会から「今後の水質基準のあり方について」の答申が出され、これによって、日本における水道水中の鉛の基準をそれまでの0.1mg/Lから0.05mg/Lに改正するとともに、概ね10年後の長期目標値を0.01mg/Lと設定した。この結果、鉛管のポリエチレン管やステンレス鋼管等への布設替え対策等が進められることになった。そして10年後の2003 (平成15) 年4月、鉛に関する水質基準は当初の目標に沿って0.01mg/Lと強化施行された¹⁾。

水栓バルブや継手などの給水装置器具類の材料には、鑄造性と耐食性に優れた、鉛を4~6%含有する青銅鋳物 (Cu-Sn-Zn-Pb系) CAC406 (JIS H 5120 (1977) 銅及び銅合金鋳物) が使用されてきた。しかしながら、上述2003年の水質基準の強化に伴い、給水機器材料にも鉛フリー対策が求められるところとなった。この結果、青銅鋳物に替わる鉛フリー銅合金鋳物として、ビスマス系青銅鋳物 (Cu-Sn-Zn-Bi系)、ビスマス・セレン青銅鋳物 (Cu-Sn-Zn-Bi-Se系) 及びシルジン青銅鋳物 (Cu-Si-Zn系) が開発された^{2~6)}。そして、これら新材料はJIS H 5120:2005 (銅及び銅合金鋳物) あるいはJIS H 5121:2006 (銅合金連続鑄造鋳物) に追加登録された^{7),8)}。そこで、これら新しい鉛フリー銅合金鋳物を使用する際、使用者と製造者の両者に対し便益を与えるように、これら合金の標準的な各種性質を明らかにしておくことが求められる。

機械的性質については、給水栓等の給水機器に使用する材料という観点から、引張強さや伸びなどの特性が基本的となるであろうが、ねじ部などを持つ機器の構造上、強度に及ばず切欠きの影響に関する情報も重要となる。そして、給水栓等は給水管と結合されて地中に埋設使用される場合も多いので、地上を走行する車両等による振動や地震動などによる繰返し荷重を受けることから、これに対する疲労強度についても検討しておく必要がある。そこで本報は、後者の疲労強度に主眼を置いて、各種鉛フリー銅合金鋳物について、切欠きの影響も考慮した疲労強度について検討したものである⁹⁾。

2. 試験の方法

2.1 供試銅合金鋳物材と機械的特性

試験した鉛フリー銅合金鋳物の種類を表1に示した。材料はJIS H 5120によるCAC記号で示してあり、ローマ字で表した参照記号 (Ref. Symbol) は鋳物の製造者に相当する。材料の主要化学組成は表1に示すとおりである。鑄造方法は、材料CAC903Cは連続鑄造であり、他は全てCO₂砂型Yブロック1型 (厚さ25mm, 幅225mm, 高さ40mm) による砂型鑄造である。

Experimental study on Fatigue Strengths of Lead Free Copper Alloy Castings

Shintaro MOGI, Seizou TAKAHASHI and Yasuhiko MORI

表 1 供試材の主要化学成分、鑄造方法と機械的性質

Material (JIS H 5120)	Ref. Symbol	Chemical composition (Cu-Bal.)	Casting	σ_B^{**} [N/mm ²]	δ^{***} [%]
CAC901	A	Cu-4.5%Sn-6%Zn-0.7%Bi	CO ₂ Y Block	206	24
	B	Cu-4.2%Sn-7.0%Zn-1.5%Bi	CO ₂ Y Block	204	26
CAC902	C	Cu-4.5%Sn-6%Zn-1.7%Bi	CO ₂ Y Block	199	27
	D	Cu-4.5%Sn-6%Zn-1.7%Bi	CO ₂ Y Block	178	19
CAC903A	F	Cu-4.5%Sn-7%Zn-2%Bi	CO ₂ Y Block	167	21
CAC903C*	G	Cu-4.5%Sn-7%Zn-3%Bi	Continuous	268	31
CAC911	H	Cu-4.5%Sn-5.5%Zn-1.8%Bi-0.2%Se	CO ₂ Y Block	176	16
	I	Cu-4%Sn-8%Zn-1.3%Bi-0.2%Se	CO ₂ Y Block	209	27
	J	Cu-4%Sn-8%Zn-1.3%Bi-0.3%Se	CO ₂ Y Block	215	23
CAC804	K	Cu-0.4%Sn-19%Zn-3%Si	CO ₂ -Y Block	346	22
	L	Cu-21%Zn-3%Si	CO ₂ Y Block	460	30
	M	Cu-21%Zn-3%Si	CO ₂ Y Block	402	23
CAC406	N	Cu-5%Sn-5%Zn-5%Pb	CO ₂ Y Block	194	30
	O	Cu-5%Sn-5%Zn-5%Pb	CO ₂ Y Block	180	24

* JIS H 5121, ** tensile strength, *** elongation

表 1 に示した引張強さ (σ_B) と破断伸び (δ) は、後述する平滑試験片の引張試験で得られた値である。これら鑄物の機械的性質には、給水装置部品としてCAC406並の機械的性質（引張強さ195MPa以上ならびに伸び15%以上）が要求されている。この規格値に対して供試材の機械的性質をみると、伸びは全ての材料で15%以上を示している問題ない。引張強さについては、材料D, F, Hで195MPaを若干下まわりますが、他の材料では概ね規格を満たす値が得られていた。

次に図 1 は、疲労試験に用いたと同じ図 2 (b), (c)の環状切欠き付丸棒試験片の引張試験を行い、切欠き材の破断応力 σ_N を平滑材の引張強さ σ_B で正規化し、切欠きの影響を整理した結果である。この結果、CAC406と、鉛フリーのCAC804のL材以外のCAC900系材料で、切欠き材の強さは平滑材の1ないし1.3倍、すなわち同程度ないし大きい値となっている。この原因は、延性的な材料によくみられる、切欠き底断面に塑性拘束によって高い引張 3 軸応力状態が生じた結果と考えられる。しかしながら、CAC902ではV溝試験片の強さがU溝試験片より高く、CAC903CやCAC911ではその反対となっていて、この現象を一概に整理できない。供試材の切欠き効果の定量的、物理的な検討にはより一層の考察が必要であるが、CAC406に代替すべく開発された鉛フリー銅合金鑄物としてみると、CAC406が示す切欠きの影響とほぼ同程度の範囲にあるといえるので、実用上の特性として示すにとどめておく。

2.2 疲労試験の方法

疲労試験には、図 2 に示すように、平行部の直径 6mm、長さ20mmの平滑丸棒試験片に加えて、切欠きの応力集中係数 α を2及び3.8とした2種類の環状切欠き付丸棒試験片（それぞれU溝、V溝

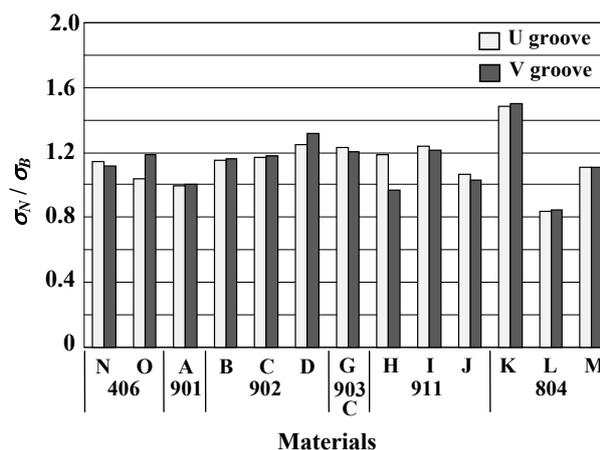


図 1 切欠き試験片の引張破断応力 σ_N を材料の引張強さ σ_B で正規化して整理した引張強さに及ぼす切欠きの影響

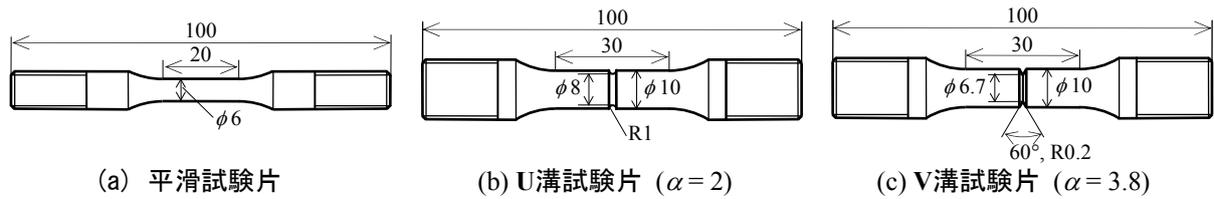


図2 疲労試験に用いた試験片の形状と寸法

試験片と呼ぶ)を選んだ。試験片はどれも鋳造のまま、熱処理は一切施していない。

疲労試験は室温・大気中で電気油圧式サーボ試験機を用い、繰返し負荷波形を正弦波とし、応力比 R (=最小応力 σ_{min} /最大応力 σ_{max})を0.1とした引張-引張の片振りで、異なる応力振幅 σ_a (= $(\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$)で試験片が疲労破壊するまで試験した。破断時の応力繰返し数 N_f と応力振幅 σ_a より $S-N$ 曲線を求めた。

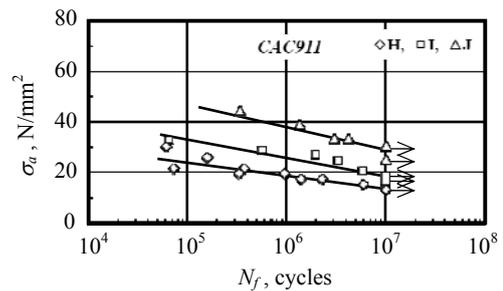
3. 試験の結果と考察

疲労破壊が起こる場合、 $S-N$ 曲線は、通常、 σ_a の減少に伴い N_f が大となる右下がりの曲線を示す。そして、ある応力レベルで水平に折れ曲がり、それ以下の応力をいくら繰返しても材料が破断にいたらない限界の応力振幅が存在する場合がある。これを疲労限度と呼び、一般に、繰返し数が 10^6 回ないし 10^7 回の間に見られることが多い。本実験では、銅合金鋳物材に果たして疲労限度が存在するか否かを限られた試験片の数で調べるために、疲労試験は応力振幅の小さい範囲を優先して行った。

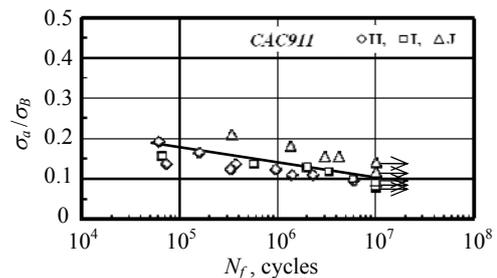
平滑材の疲労試験の結果をCAC911の材料H, I, Jについて図3に示した。同図(a)は、疲労試験の応力振幅 σ_a を試験片が破断するまでの応力繰返し数 N_f に対してプロットした $S-N$ 曲線である。同じCAC911系列であるが、材料(鋳造者)によって $S-N$ 曲線に差がある。そこで、応力振幅 σ_a をそれぞれの材料の引張強さ σ_B で正規化して整理すると図3(b)となる。すなわち、このように応力振幅を引張強さで正規化すると、他の系列の材料についても、系列ごとに一つの $S-N$ 曲線で近似することができた。

この結果、 $S-N$ 曲線は σ_a の減少とともに N_f が大となる右下がりの曲線であって、これに明瞭な折れ曲がりは見られない。疲労試験は 10^7 回の繰返しで終了しているので、その回数を超えてもなお下がり続ける曲線を示すのかどうか、疲労限度の有無を確実に指摘することはできないが、 $S-N$ 曲線の外挿を考えると、疲労限度は存在しないようである。他の供試材についても同様であった。そこで、 10^7 回時間強度を疲労強度 σ_f として扱うことにした。

次に図4は、切欠きの効果を試験したCAC911系列の材料H, Iについて平滑試験片、V溝及びU溝試験片の $S-N$ 曲線を一つにまとめて示した。この結果も応力振幅を引張強さで正規化すると、材料が異なっても平滑、U溝及びV溝試験片の $S-N$ 曲線は、それぞれかなりよく統一的に表すこ



(a) 応力振幅 σ_a で整理した $S-N$ 曲線



(b) 応力振幅 σ_a を引張強さ σ_B で正規化して整理した $S-N$ 曲線

図3 平滑試験片の $S-N$ 曲線(CAC911材)

とができる。

最後に、疲労試験の全ての結果を疲労限度比 σ_f/σ_B で整理して図5に示した。平滑材の場合、鉛フリーのCAC900系材料の疲労限度比は、それぞれの材料の引張強さの約15%を平均として10ないし20%の値であって、比較の対象とするCAC406のそれとほぼ同等であった。次に、切欠き材を試験した供試材CAC903CとCAC911、CAC804の結果についてみる。引張強さの高いCAC804の材料Lの切欠き材の疲労強度は平滑材より低く、切欠きの形状係数で整理できることは前に考察した。一方、CAC903Cの材料GとCAC911の材料H及びIでは、切欠き材の疲労限度比は平滑材よりも高い値を示している。これら材料の切欠き材の引張破断応力は、それぞれの引張強さよりも高い値を示すものであった(図1)。しかしながら、切欠き材の疲労強度比の上昇を、単純に材料の引張強さだけで説明することには難がある。疲労限度比は引張—圧縮の完全両振疲労試験の場合、大部分の鋼や銅合金(ただし、展伸材)では0.3~0.5と言われるが、負荷様式や材料の組織によって異なる値を示すことも知られている¹¹⁾。本研究の引張—引張試験による疲労限度比は平均0.15であったが、この値はCAC406と同程度であり、給水機器材料としての材料の使い方特に問題はないと考えられる。いずれにせよ、疲労に対する設計資料として、 10^7 回時間強度と引張強さの比、すなわち疲労限度比 σ_f/σ_B を材料個々の疲労限度を推定する指標として、与えることができたといえる。

4. まとめ

(1) 供試材の機械的性質は、規格外の小型試験片によるものであるが、引張強さと破断伸びに関する規格値をほぼ、あるいは十分に満たすものであった。

(2) 引張試験で切欠きの効果を試験した結果、BiあるいはBi-Se系のCAC900番台材料では、延性材料によくみられる切欠き底の塑性拘束によると考えられる強度の上昇が観察された。

(3) 一方、供試材の中で最も高い引張強さを持っていたシルジゲン(Si-Zn)系のCAC804では、切欠き材の強度は平滑材に比べて低下した。

(4) S-N曲線を試験した結果、疲労限度すなわちそれ以下の応力では疲労破壊が進行しない応力振幅の下限値の存在の有無は指摘できなかった。

(5) 10^7 回時間強度で定義した疲労強度と引張強さの比を疲労限度比とすると、疲労限度比は供試材の平均値として15%となった。

(6) 疲労強度に及ぼす切欠きの効果は、静的特性と同様にBiあるいはBi-Se系のCAC900番台材料では、切欠きによる強度の上昇が観察され、CAC804では、切欠き材の強度は低下した。

(7) CAC406の代替材料として供試材の強度を評価した結果、静的ならびに疲労強度に特に問題はなく、代替材料としての性能が十分であると判断された。

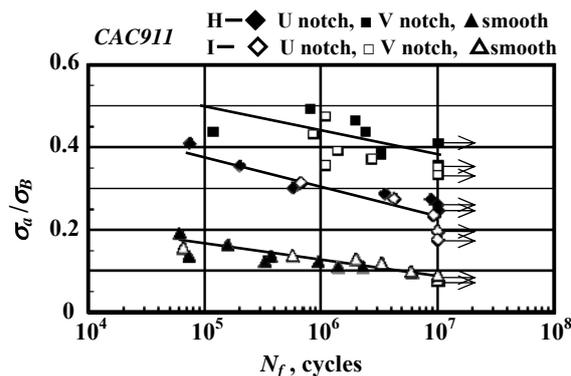


図4 疲労特性に及ぼす試験片の切欠きの影響 (CAC911-H, I 材)

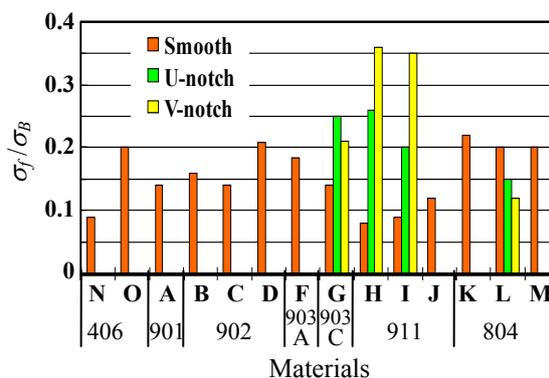


図5 供試銅合金鋳物材料の平滑試験片と切欠き試験片の疲労限度比