

日本伸銅協会技術標準

銅及び銅合金管の残留応力測定方法

Measuring methods for residual stress of copper and copper alloy tube

序文 この規格は、日本伸銅協会の残留応力研究委員会において、平成8年6月～平成11年3月にわたり残留応力測定法が検討され、その結果を規定とした日本伸銅協会(JBMA)技術標準である。ここでは、銅及び銅合金管の平滑円管の残留応力を測定するためのクランプトン法について規定した。

1. 適用範囲

- a) この方法は、銅および銅合金製平滑円管の、管円周方向の残留応力測定に適用する。
- b) 形状は、直状平滑円管に適用し、寸法範囲は2.による。

2. 供試材 供試材の寸法は、外径 $\phi 8\sim 100\text{mm}$ とし、外径に対する肉厚の比は、0.01以上0.2以下とする。

3. 測定方法

3.1 測定方法の区分 測定方法は、3.1.1または3.1.2のいずれかによる。

3.1.1 外径変化直接測定法 図1に、切開部、測定位置及び符号を示す。

- a) 試験片の数は、ばらつきを考慮し、同一供試材より3本以上とする。
- b) 試験片の長さは、外径の3倍とする。
- c) 各試験片の肉厚を $1/100\text{mm}$ の精度で測定する。
- d) 試験片の肉厚最小部を、管軸に対し平行に、マーキングする。
- e) マーキング中央部の直交外径部 D_0 を、マイクロメーターまたはその他の寸法測定器(レーザー式外径測定器、三次元形状測定器など)にて、 $1/100\text{mm}$ の精度で測定する。
- f) マーキング部をワイヤーカット、砥石切断、メタルソーなど、残留応力測定に有害な熱影響や応力を与えない方法にて切開する。
- g) 切開後、3.1.1 e)と同じ位置の外径 D_1 を同一の測定機器にて、 $1/100\text{mm}$ の精度で測定する。

3.1.2 外径変化間接測定法 図2に、切開部、測定位置及び符号を示す。

- a) 試験片の数は、ばらつきを考慮し、同一供試材より3本以上とする。
- b) 試験片の長さは、外径の3倍とする。
- c) 各試験片の肉厚を $1/100\text{mm}$ の精度で測定する。
- d) 試験片の肉厚最小部を、管軸に対し平行に、マーキングする。

- e) マーキング中央部の直交外径部 D_0 をマイクロメーターまたはその他の寸法測定器（レーザー式外径測定器、三次元形状測定器など）にて、1/100mmの精度で測定する。
- f) ハイトゲージにより、各試験片のマーキング部が中央になるように、2本の平行線を約4mm間隔でけがく。
- g) 投影機などで、2本のけがき線間隔を試験片の両端 W_{a1} 、 W_{a3} および中央 W_{a2} を1/100mmの精度で測定し、平均のけがき線間隔 W_a を計算する。
- h) マーキング部を管軸に平行にワイヤーカット、砥石切断、メタルソーなど、残留応力測定に有害な熱影響や応力を与えない方法にて切開する。
- i) 切開後、3.1.2g)と同じ位置のけがき線の間隔 W_{b1} 、 W_{b3} および中央 W_{b2} を同一の測定機器にて1/100mmの精度で測定し、平均のけがき線間隔 W_b を計算する。
- j) 以下の計算式より、切開後の外径 D_1 を算出する。

$$D_1 = D_0 + \frac{\Delta W}{\pi}$$

ここに、 D_0 : 切開前の外径 (mm) D_1 : 切開後の外径 (mm)

ΔW : 切開前後の平均のけがき線間隔の差

$$\{\Delta W = W_b - W_a\}$$

W_b : 切開後のけがき線間隔の平均値…[3.1.2 i)]

W_a : 切開前のけがき線間隔の平均値…[3.1.2 g)]

3.2 残留応力計算 残留応力の計算は、次の式による。

$$\sigma_t = \frac{E}{1 - \nu^2} \times t \times \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_1} \right)$$

ここに、 σ_t : 残留応力 (N/mm²)

E : ヤング率

ν : ポアソン比

t : 管の平均肉厚 (mm)

D_0 : 切開前外径 (mm)

D_1 : 切開後外径 (mm)

例 りん脱酸銅管 : ポアソン比…0.34 ヤング率…118kN/mm²

黄銅 : ポアソン比…0.35 ヤング率…103kN/mm²

4. 計算値の取扱い 得られた残留応力の有効数字は、3桁までとする。

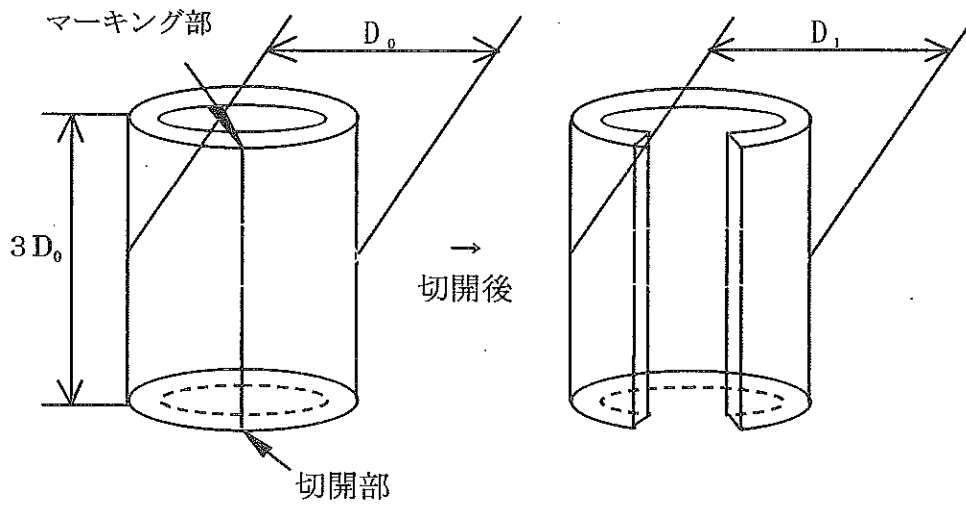
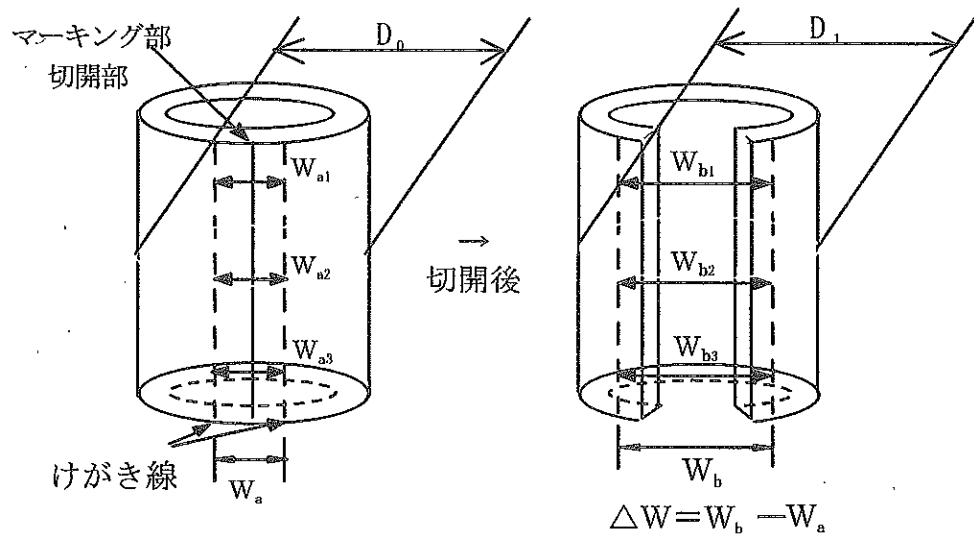


図1 外径変化直接測定法



備考 W_1 、 W_3 は、管端より10%以内とする。

図2 外径変化間接測定法

銅および銅合金管の残留応力測定方法 解説

この解説は、本体に規定した事柄、並びにこれらに関連した事柄を説明するもので、技術標準の一部ではない。

1. 制定の主旨及び経緯 円管の残留応力を測定する方法に関しては、諸外国で検討、提案された方法として、Davidenkov 法、Sachs-Espey 法、Birger 法他の詳細法と Crampton 法等の簡便法がある。前者は材料を曲がり梁、真直はり等とみなして内外表層削除量と肉厚方向軸力の釣り合いから残留応力式を導出したものであり、肉厚方向における残留応力値の分布詳細を示すことができるが、エッチングや機械加工等による表面削除方法がやや困難であると同時に、計算式に微分項、積分項が含まれており、図式計算が必要なため、正確な残留応力の算出は容易ではなく、現時点での標準化には幾多の課題が有り適当ではない。

これに対して、後者の簡便法では外径、肉厚の測定や切断に関する基本的な作業方法を取り決めることで標準化が容易であり、測定者間の残留応力測定結果のばらつきを小さくすることが可能である。また、銅および銅合金管においては、管表面に対し切削やエッチング加工により肉厚の寸法管理をすることは通常行われず、後工程に支障がでる様な変形等の影響を考慮することが少ない為、肉厚方向の残留応力分布を求めることは必ずしも必要でない。

従って、銅および銅合金管の残留応力測定方法として Crampton 法を選び、測定方法標準化の為の条件を委員会で決定した。

なお、本標準を作成した残留応力 JBMA 標準作成専門委員会管分科会の構成を、末尾に示す。

2. 制定に当たり考慮された主な事項

2.1 適用範囲(本体の) この標準は銅および銅合金管の平滑円管に対して適用するもので、内外表面溝付管や角管等では各部での残留応力が異なるため適用を除外した。また、直管以外のコイル管等には曲げ応力等の影響があるので適用しない。

残留応力の方向に関しては、応力腐食割れに代表される様に割れは管軸方向に生じる傾向が強いため、標準化の対象は管円周方向の残留応力測定方法に限定する。

2.2 供試材(本体の) 材料の寸法は Crampton 法の適用が容易であり、一般市場で流布しているサイズ⁶⁾の範囲を記述した。

2.3 測定方法(本体の)

2.3.1 測定方法の種類について Crampton 法において管の外径を切断前後で測定するのに、

マイクロメータで直接計る方法と、切断前にけがいた2本の管軸平行線の切断後距離変化から外径変化量 ΔD を求めて切断後の相当外径を計算する方法がある。前者は管のT/Dやマイクロメータ圧力の影響を受けるため、残留応力値が真値よりも低めにできることがあるが、現実的に最も簡単な外径測定方法である。一方、後者は平行線の引き方や材料の固定、移動投影機による焦点設定方法等に精度が要求され面倒ではあるが、非接触測定のため前者で生じる様な誤差は発生しないので習熟すればより正確な測定ができると考えられる。(委員会の測定結果によると、同一供試材にて後者の方法では前者よりも10~20%程度残留応力値が大きくなるがあった。その例を解説表1に示す。)

何れの方法でも残留応力計算に用いる式は同一であるものの、計算値に差が生じることから、標準化にはどちらか一方を選択すべきと思われるが、より簡便な方法として前者を、精度の高い方法としての後者をそれぞれ独立して標準化することとした。

2.3.2 外径変化直接測定法(本体の3.1.1)

- a) 試験片の切断端面付近において、切断前に作用していた軸方向の残留応力が解放されるため、付加的応力がかかる(端末効果)。従って、この影響を無くするために試験片の長さは、管外径の3倍以上とすることとした。
- b) 切開位置は、残留応力により最も変形を受けやすい肉厚最小部を、切開位置とした。
- c) 外径、肉厚測定精度は、残留応力計算値の精度を確保するため、マイクロメータで1/100mm単位で測定する。
- d) 切断作業自身による残留応力解放を極力さけるため、熱影響や振動を少なくし、切断巾を小さくすることが望ましい。切開方法の影響について、委員会で測定した結果では、ワイヤット、砥石、タムラ-間での明確な有意差は確認できなかったため、それぞれ利用可能な方法を選択することとした。(共同実験データを解説表2~3に示す。)

2.3.3 けがき巾変化による外径測定法(本体の3.1.2) けがき線の引き方は、ハイトゲージ等を用いて2本の平行線を4mm間隔でけがく。けがき線の太さは、0.2mm前後が望ましい。けがき線が太すぎたり、太さが一定でないときがき線間隔を正確に測定することが難しくなる。

3. 共同実験結果

- a) 外径直接測定法と外径間接測定法との比較試験結果を解説表1に示す。
- b) 切開位置の違いによる残留応力比較試験結果を、解説表2に示す。
- c) 切開方法の違いによる残留応力比較試験結果を解説表3-(1), 3-(2)に示す。

解説表 1 外径直接測定法と外径間接測定法との比較試験

材料寸法 (mm)	T/D	切断方法	外径直接測定法		外径間接測定法	
			No.	残留応力 (N/mm ²)	No.	残留応力 (N/mm ²)
φ 65×t0.85 (H3300-C1220T-H)	0.013	砥石切断	1	158	1	162.6
			2	160	2	162.9
			3	157.8	3	160.7
			4	163.7	4	162.6
			5	153.9	5	151.6
			平均値	158.7	平均値	160.1
			σ n	3.57	σ n	4.82
φ 19×t0.4 (H3300-C1220T-H)	0.021	同上	1	29.8	1	43.7
			2	37.6	2	41.3
			3	44.5	3	43.4
			4	37.1	4	42.1
			5	37.6	5	43
			平均値	37.3	平均値	42.7
			σ n	5.20	σ n	0.99
φ 27.2×t2.8 (H3300-C2700T-H)	0.103	同上	1	95.7	1	111.1
			2	95.7	2	125.6
			3	93.6	3	103.3
			4	93.2	4	101.4
			5	92.8	5	108.5
			平均値	94.2	平均値	110.0
			σ n	1.40	σ n	9.56

解説表 2 切開位置 (肉厚最大部と肉厚最小部) の違いによる残留応力値の差

材料寸法 (mm)	T/D	測定方法	切断方法	残留応力 N/mm ² (1)	
				肉厚最大部	肉厚最小部
φ 18×t1.0 (H3300 C1220T-H)	0.056	マイクロメータ	砥石	n=10 42.9 (39.6~46.9)	n=10 47.8 (44.8~53.8)
φ 20×t1.0 (H3300 C2700T-H)	0.050	マイクロメータ	メカソー	n=15 143.5 (139~147)	n=15 137.0 (134~140)
φ 22×t0.8 (H3300 C2700T-H)	0.036	マイクロメータ	砥石	n=10 156.8 (151~159)	n=10 153.3 (150~155)

備考 残留応力値は、平均値であり、カッコ内数値は、測定レンジを示す。

解説表 3-(1) 切開方法 (ワイヤカットと砥石切断) の違いによる残留応力値の差

材料寸法 (mm)	T/D	測定方法	残留応力(N/mm ²)		
			No.	ワイヤカット	砥石
φ 65×t0.85 (H3300-C1220T-H)	0.013	マイクロメーター	1	164.2	158.0
			2	153.1	160.0
			3	152.8	157.8
			4	158.9	163.7
			5	159.0	153.9
			平均値	157.6	158.7
			σ n	4.76	3.57
φ 19×t0.4 (H3300-C1220T-H)	0.021	マイクロメーター	1	43.1	29.8
			2	34.5	37.6
			3	38.3	44.5
			4	44.8	37.1
			5	43.0	37.6
			平均値	40.7	37.3
			σ n	4.24	5.20
φ 27.2×t2.8 (H3300-C2700T-H)	0.103	マイクロメーター	1	93.2	95.7
			2	93.7	95.7
			3	91.0	93.6
			4	95.6	93.2
			5	92.6	92.8
			平均値	93.2	94.2
			σ n	1.67	1.40

解説表 3-(2) 切開方法（砥石、丸鋸、手鋸）の違いによる残留応力値の差

材料寸法 (mm)	T/D	測定方法	残留応力(N/mm ²) (2) n=各 10		
			砥石	丸鋸	手鋸
φ 22×t0.8 (H3300 C2700T-H)	0.036	マイクロメーター	153.3 (150~155)	154.7 (152~157)	155.8 (152~160)
		レーザー式 外径測定器	158.9 (156~162)	159.2 (156~165)	160.4 (157~164)

備考 残留応力値は、平均値であり、カッコ内数値は、測定レンジを示す。

参考文献

- a) 米谷 茂 : 残留応力の発生と対策 (養賢堂)
- b) G.Sachs and G.Espey : A New Method for Determination of Stress Distribution in Thin-walled Tubing (A.I.M.E Oct.1941)

以上