

ワイヤーロープ牽引によるテーパー鋼管の曲げ加工法研究

朱, 雪峰 / ZHU, Xuefeng

(発行年 / Year)

2008-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2008-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2007 年度

修士論文

ワイヤーロープ牽引による
テーパー鋼管の曲げ加工法研究

RESEARCH OF BENDING METHOD DRAWING BY WIRE
ROPE FROM TAPERED STEEL TUBE

指導 直井 久 教授
主査 直井 久 教授
副査 大澤 泰明 教授

大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

シュ セツホウ

06 R 1118 朱 雪峰

目次

第1章 緒論	
1.1 研究の背景	---3
1.2 テーパー鋼管の製造方法について	---4
1.3 本研究の目的	---5
第2章 実験方法	
2.1 供試管の機械特性	---6
2.2 供試管の寸法と形状	---8
2.3 ワイヤロープ牽引式曲げ加工法	---9
2.4 チャック A、B の寸法と形状	---10
2.5 金型断面の寸法と形状	---11
2.6 牽引拡げ加工による整形試験	---12
2.7 測定項目と測定法	---17
第3章 実験結果及び考察	
3.1 チャック形状と管先端の成形性	---18
3.2 金型形状と管の曲げ内側表面のしわ	---22
3.3 円形状金型と供試管肉厚による 扁平率と曲げ内側のしわ	---23
3.4 牽引拡げ加工と供試管の変形挙動	---26
3.5 曲げモーメントの解析	---30
第4章 自動調心式先端チャックの提案	---34
第5章 結論	---37
参考資料	---38
謝辞	---39
付録	---40

第一章 緒論

1.1 研究の背景

照明用街灯は私たちの生活に必要不可欠であり、その街灯用の柱は、テーパースタイル鋼管から成形されている。テーパースタイル鋼管は全体的に軽量であるばかりでなく、上部程軽量である形状となっている。また、地震に対して振動が抑制でき、且つ疲労強度にも優れる等の特性が必要である。従って、本鋼管の曲げ加工において管の先端の成形性向上、曲げの内側に発生したしわの防止、断面扁平の抑制、及び肉厚の確保等は重要である¹⁾。図1に長円形テーパースタイル鋼管の応用例を示す。



図1 長円形テーパースタイル鋼管の実用例

1.2 テーパー鋼管の製造方法²⁾について

一般にテーパー鋼管は，図 2(a) に示すように台形に切断された鋼板をプレス等により円錐状に成形し，衝き合せ部を外側から溶接して製造されている。しかし、本研究で用いたテーパー鋼管は図 2(b) に示すように，加熱した鋼管を回転する成形ロールで縮径加工することによりテーパー鋼管を製造する技術（温間スピニング加工技術）により製造されている。

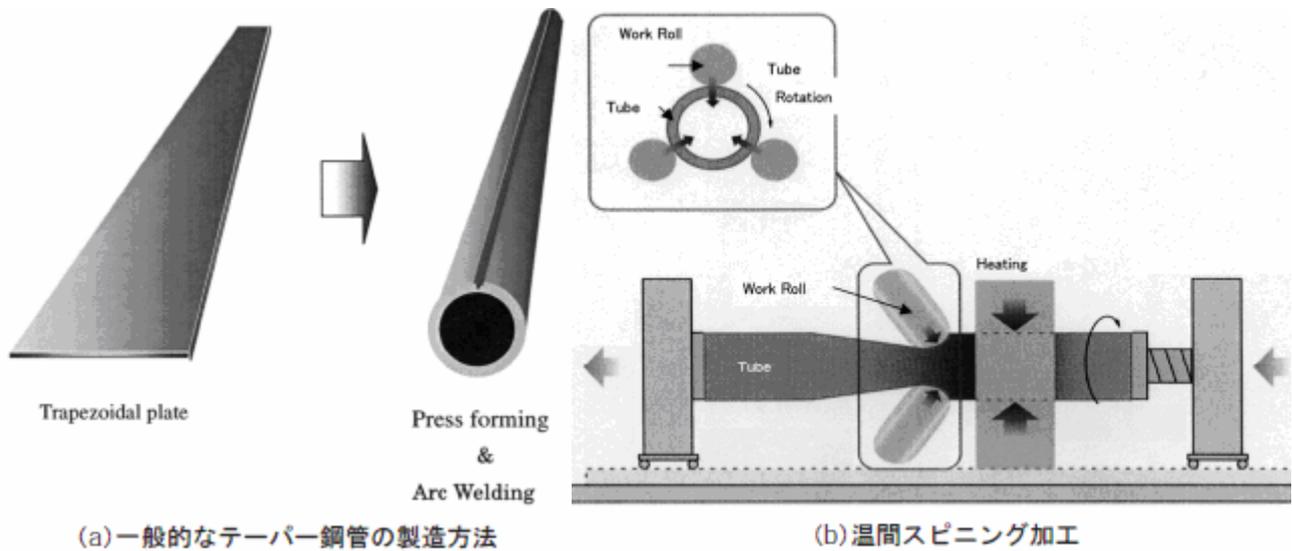


図2 テーパー鋼管の製造方法

1.3 研究の目的

本研究では温間スピニング加工により製造されたテーパ鋼管の曲げ加工における管先端成形性の向上、曲げ内側に発生するしわの抑制について検討する。また、牽引拡げ加工による扁平化したテーパ鋼管の整形を行い、製品の品質向上を目指す。

2 実験方法

2.1 供試管の機械特性

本実験で用いた供試管は鋼種が一般構造用炭素鋼STK400である。材料の機械特性を算出するために供試管からJIS 12B³⁾号に基づき試験片を切り出し、引張り試験機で引張り実験を行った。また試験に用いた試験片の概略図を図3に示す。

ただし、 σ : 応力 ϵ : ひずみ n :加工硬化指数 F :塑性係数

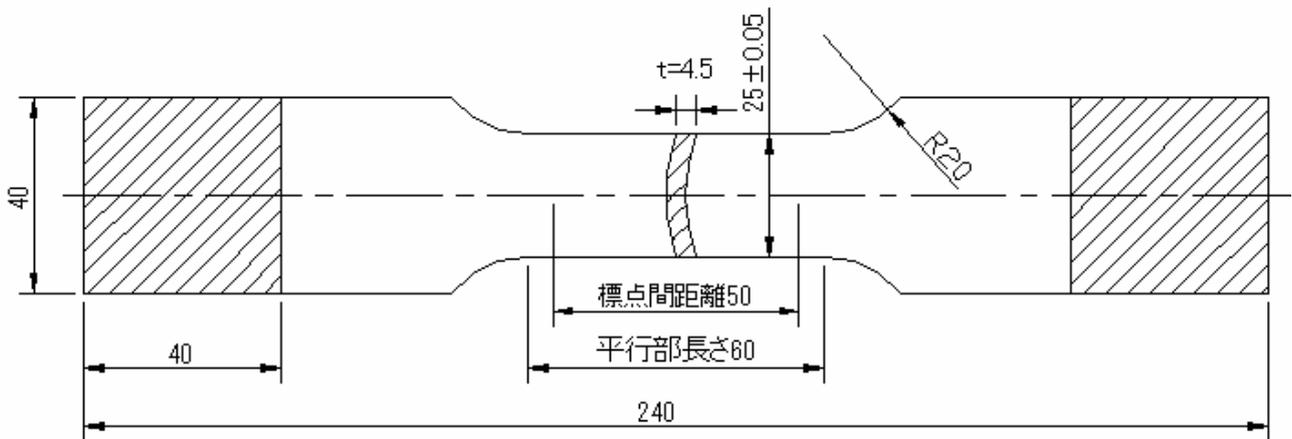


図3 JIS 12号 B試験片

特性地のうち降伏点、引張り強さ、 n 値、 F 値については試験結果から応力 - ひずみ 線図を作成し求めた。ただし、一様伸びは最高荷重点までの伸びとし、 n 値は $\sigma - \epsilon$ 線頭上における弾性域を除いた最高荷重点までの応力、ひずみより求めた。応力とひずみの関係は以下の式で表される。

$$\sigma_T = (1 + \epsilon_T)^n \quad \text{--- (1)}$$

$$\epsilon_T = \log(1 + \epsilon_T) \quad \text{--- (2)}$$

また
$$\sigma_T = F \cdot \epsilon_T^n \quad \text{--- (3)}$$

$$\ln \sigma_T = n \ln \epsilon_T + \ln F \quad \text{--- (4)}$$

よって
$$n = \frac{\ln \sigma_T}{\ln \epsilon_T} \quad \text{--- (5)}$$

が成立する。

求めた機械的特性を測定して表1に示す。また、STK400における $\sigma - \epsilon$ 線図を図4に、 $\sigma_T - \epsilon_T$ 線図を図5に、 n 値は $\ln \epsilon_T - \ln \sigma_T$ を線図上における弾性域を除いた最高荷重点までの応力、ひずみより求めた。

表 1 STK400の機械的特性

降伏点 (Mpa)	引張り強さ (Mpa)	伸び (%)	F値	n値
440	470	35	890	0.258

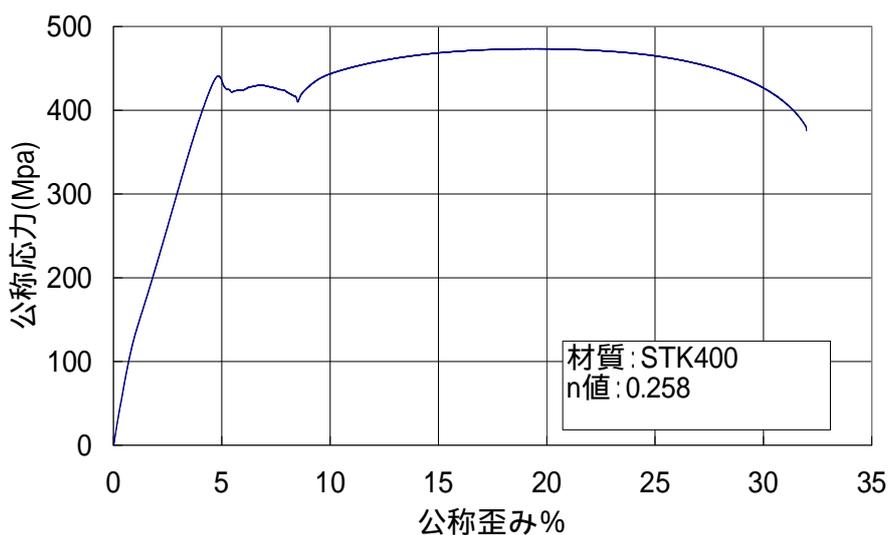


図4 応力-ひずみ線図

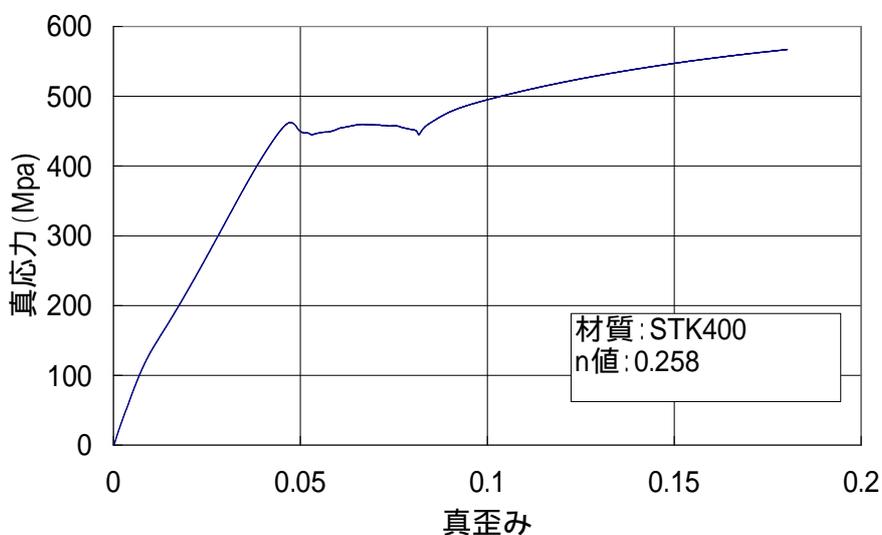


図5 真応力-真ひずみ線図

2.2 供試管の寸法と形状

本実験で用いた供試管は先端外径が 75mm、肉厚が4.5mm、長さが10800mmで1/100のテーパ率がついた直管である。図6に点線の供試管と実線の長円形テーパ鋼管製品の寸法形状⁴⁾をそれぞれ示す。供試管成形後の先端形状は長軸が2175mmで短軸が1087.5mmである楕円の一部分であり、供試管先端接線角度が5°である傾きを持つ形状をしている。

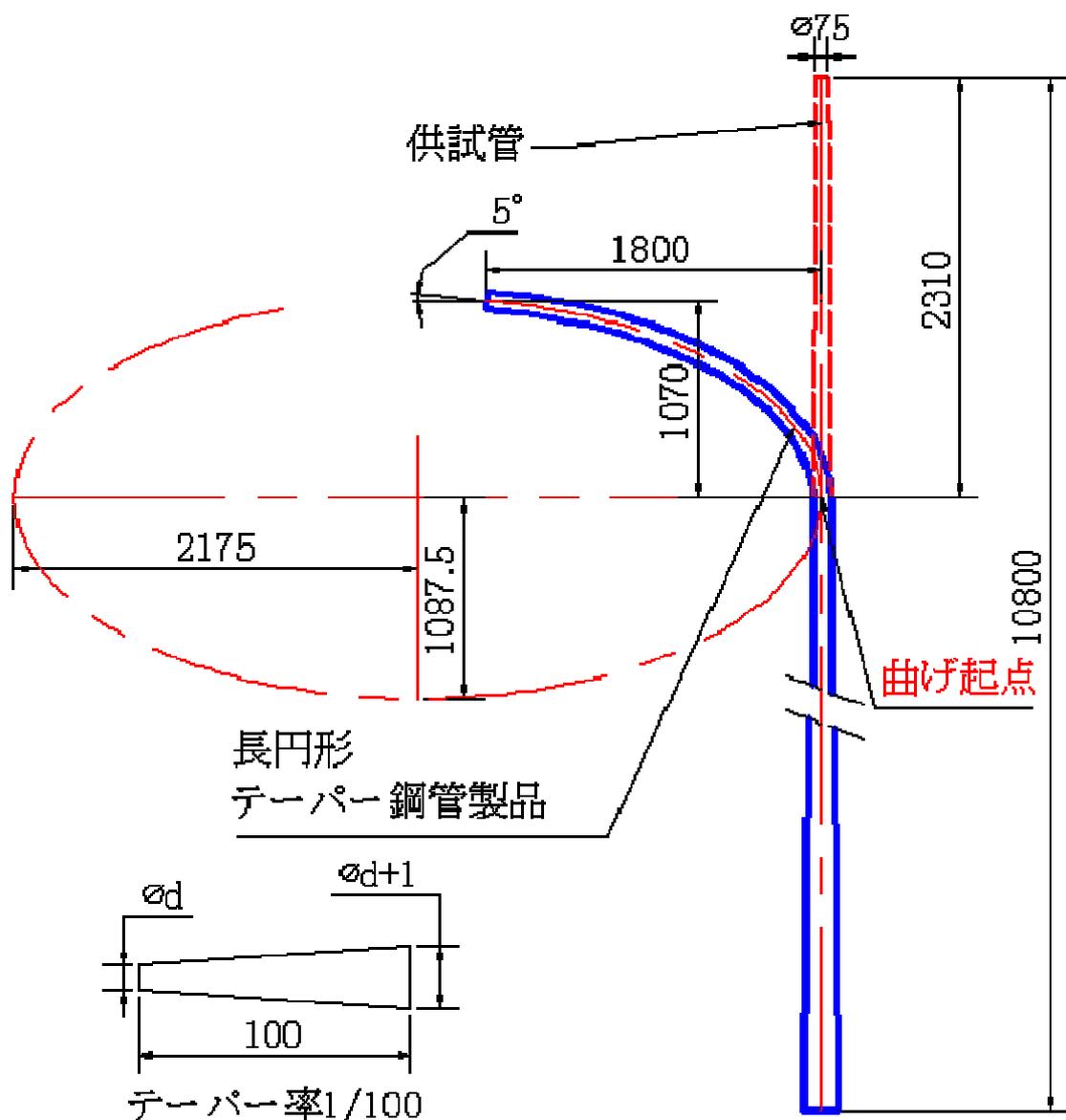


図6 供試管及び製品成形部の寸法と形状 単位：mm

2.3 ワイヤロープ牽引式曲げ加工法

本研究で供試管の成形はワイヤロープ牽引式曲げ加工によって行う。ワイヤロープ牽引式曲げ加工を図 7 に示す。供試管先端から 2310mm をクランプ治具により拘束し、管先端にチャックを取り付け、チャックにワイヤロープを取り付けてから、ウィンチを起動し動滑車を矢印方向へ引張り、供試管を金型に接触させて成形する方法である。

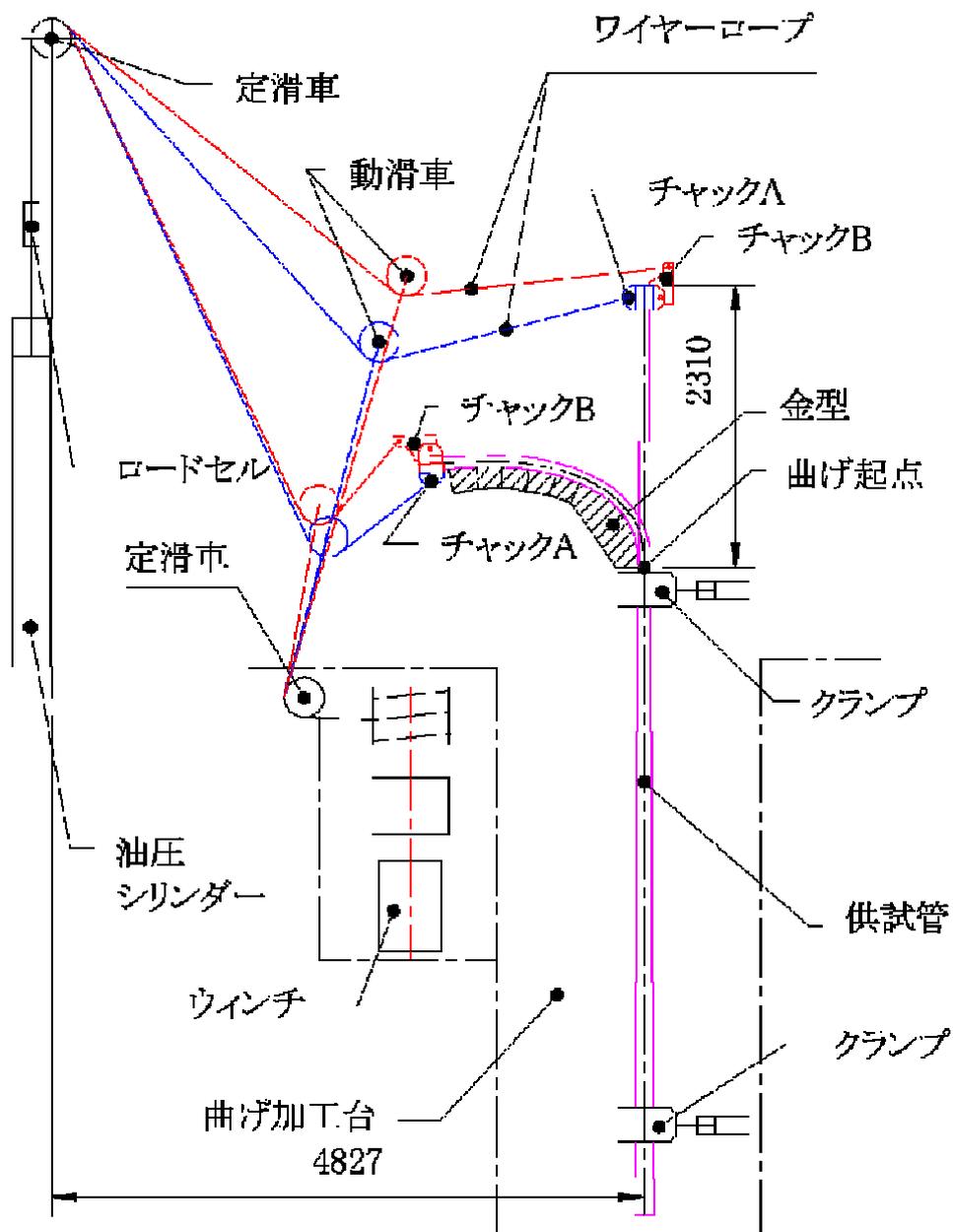


図 7 ワイヤロープ牽引式曲げ加工機の概略図

2.4 チャック A、B の寸法と形状

供試管は曲げ加工後、チャックの荷重点が管の先端成形性に及ぼす影響を調べる為に図 8 に示す様に 2 種類のチャック A と B を準備し、それぞれのチャックと引張荷重の連結点をチャック A では荷重点 a、チャック B では荷重点 b とした。また、チャック A は荷重点 a が管の中心線から曲げ内側へ 139mm と先端から 100mm の位置にあるに対し、チャック B の荷重点 b は荷重点 a を基準に曲げ外側へ 339mm と管の先方方向 250mm の位置に設定した。さらに、それぞれの曲げ初期荷重方向と管の交点をチャック A で交点 c、チャック B で交点 d、曲げ後期においては交点 c'、交点 d' とした。図 9 にチャックを取り付けた状態を示す。

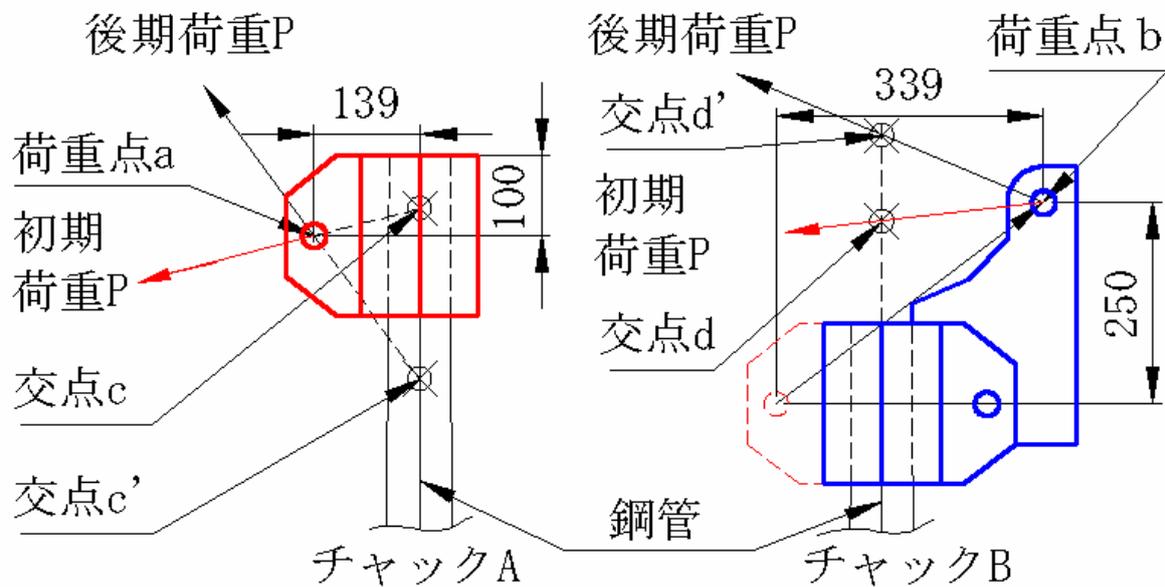


図 8 チャックの寸法形状



図 9 チャック A 及び B を取り付けた状態

2.5 金型断面の寸法と形状

本曲げ加工による供試管のしわは主に管先端から1700mm～2200mmの間の曲げ内側で発生しやすい。よって、本試験では円形状および小判形の金型を2種類準備し、当該部分の金型断面寸法を表2に示す。表2中のアルファベットをまとめて図10に示す。図10は金型断面形状を三次元寸法測定器で計測し、CADソフトにより近似させて作成したモデル断面図である。また、円形状金型においては肉厚が4.5mmの供試管以外に4.0mmと7.1mmの供試管を3本と1本それぞれ用意し、扁平率としわに及ぼす影響を調べた。

表2 金型断面調整前後の寸法 単位 (mm)

先端からの位置		1700	1800	1900	2000	2100	2200
供試管の外径		89.7	90.7	91.7	92.7	93.7	94.7
共通寸法	A	18.7	17.8	18.4	18.1	17.1	17.7
	B	5.4	4.1	3.4	2.4	1.4	0
	R	44	45	46	47	48	49
円形状	C	62.1	62.2	63.3	63.5	63.8	64.9
	D	37.8	40.8	40	34	39.5	50.3
	E	22.5	28.3	25.5	15.2	24	38.3
小判形	C	59.6	59.2	58.3	58.5	60.8	63.9
	D	42	46	47.5	46	44	44.5
	E	24	35	36	30	28	32

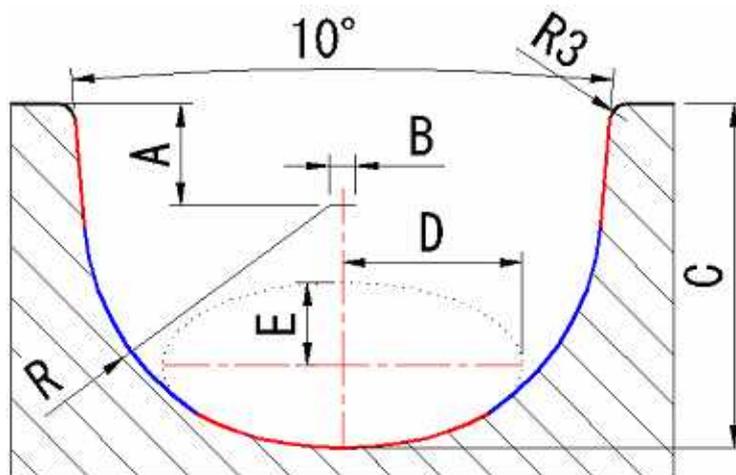


図10 金型断面の寸法形状

2.6 牽引拡げ加工による整形試験

牽引拡げ加工に用いた各パーツと加工試験の概略を図 11 に示す。牽引拡げ加工試験は先ず、ワイヤーロープに拡管芯金ストッパー、拡管芯金、ガイド芯金の順に取り付ける。次にガイド芯金の外側に内、外側ダイスを取り付け、扁平した供試管に挿入する。最後、牽引方向後部ではみ出した内、外側ダイスにストッパー鋼板を当ててワイヤーロープを牽引することで扁平した供試材の断面を抑制する方法である。

図 12, 図 13, 図 14, 図 15, 図 16 及び表 3 に牽引拡げ加工に用いた各部品の寸法形状と図 17, 図 18 に牽引拡げ加工の各部品と実験の様子を示す。

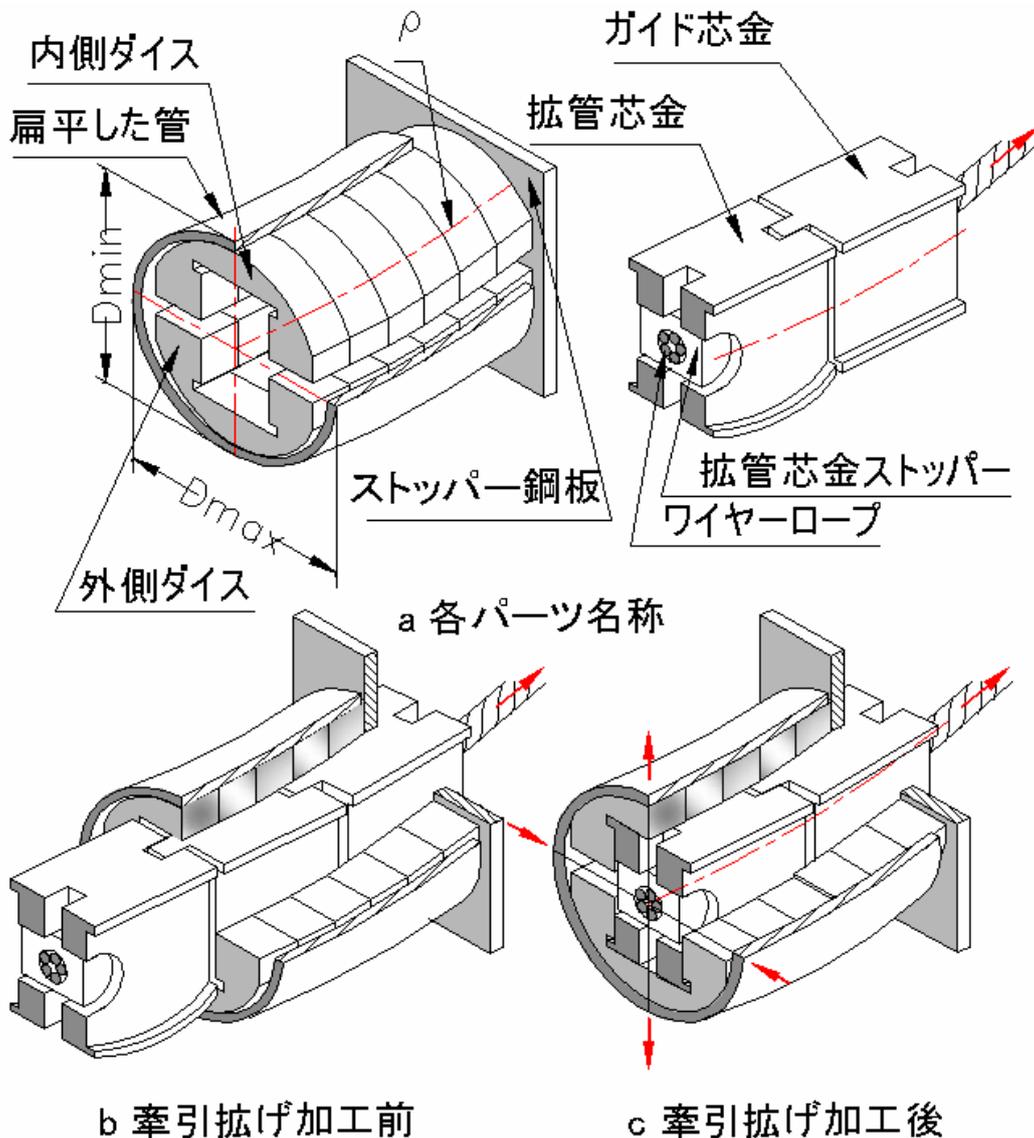


図 11 牽引拡げ加工法

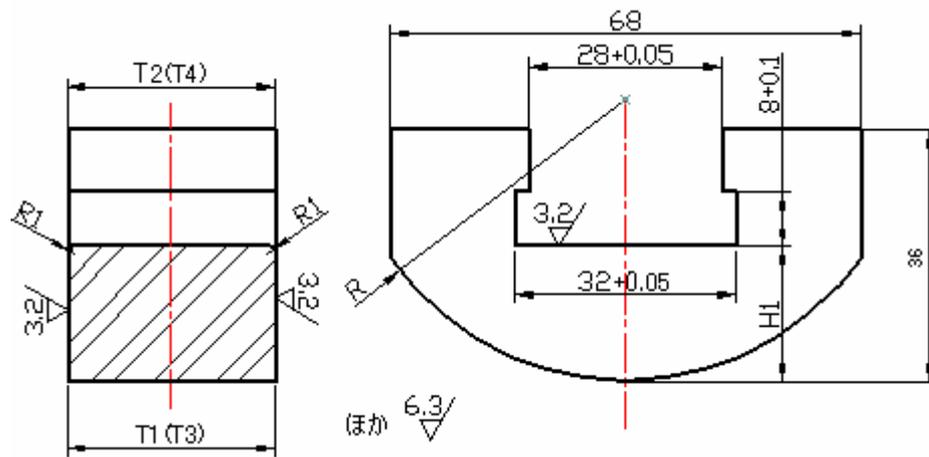


図 14 拡管ダイスの共通寸法

表 3 各ダイスの寸法

位置	半径		外側ダイス		内側ダイス	
	R	H1	T1	T2	T3	T4
1707.5	40.54	19.54	15.44	14.95	14.45	14.94
1722.5	40.61	19.61	15.46	14.95	14.43	14.94
1737.5	40.69	19.69	15.47	14.95	14.42	14.93
1752.5	40.76	19.76	15.48	14.95	14.4	14.93
1767.5	40.84	19.84	15.49	14.95	14.39	14.93
1782.5	40.91	19.91	15.51	14.95	14.37	14.93
1797.5	40.99	19.99	15.52	14.95	14.35	14.92
1812.5	41.06	20.06	15.54	14.95	14.34	14.92
1827.5	41.14	20.14	15.55	14.95	14.32	14.92
1842.5	41.21	20.21	15.57	14.95	14.3	14.91
1857.5	41.29	20.29	15.59	14.95	14.28	14.91
1872.5	41.36	20.36	15.6	14.95	14.26	14.91
1902.5	41.51	20.51	31.25	29.91	28.46	29.8
1932.5	41.66	20.66	31.32	29.91	28.37	29.78
1962.5	41.81	20.81	31.4	29.91	28.28	29.77
1992.5	41.96	20.96	31.47	29.92	28.2	29.75
2022.5	42.11	21.11	31.54	29.92	28.11	29.73
2052.5	42.26	21.26	31.62	29.92	28.02	29.71
2082.5	42.41	21.41	31.69	29.93	27.93	29.69

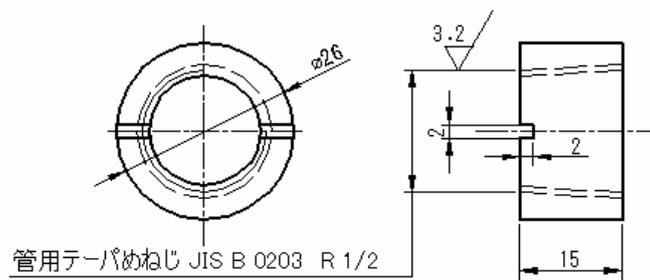


図 15 管用テーパめねじ寸法

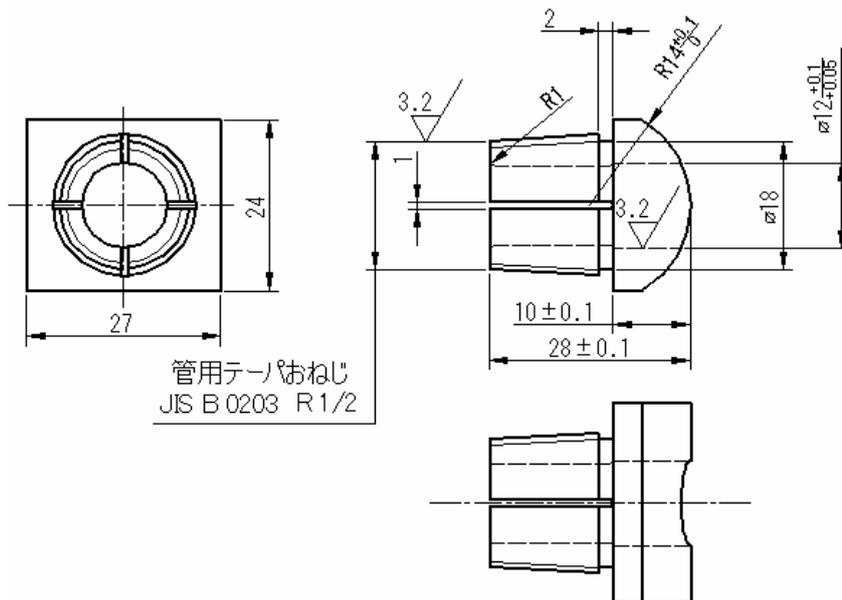


図 16 拡管芯金ストッパーのおねじ寸法



図 17 牽引拡げ加工に用いた各部品



図 18 牽引拡げ加工実験の状況

牽引拡げ加工試験では、肉厚 4.5mm で管先端 1.7m から 2.05m の間で扁平率 6% のしわつき曲げ管一本、1.77m から 2.05m の間で扁平率 13% のしわなし曲げ管一本および 1.8m から 0.1m 刻み毎に裁断した扁平率 12% のしわなし曲げ短管 3 本、計 5 本を拡管用供試材とし、拡管荷重と扁平率(しわなし曲げ短管においては扁平率だけ)及び曲率の変化を調べた。また、拡管ダイス長さ L が、拡管荷重と拡管後の管外表面の外観に及ぼす影響を調べるために 1.7m から 1.87m の間に長さ 15mm の内、外側ダイスを 12 対と 1.87m から 2.09mm の間に長さ 30mm の内、外側ダイスを 7 対と計 19 対を設けた。

2.7 測定項目と測定法

(a)曲げモーメント： 本曲げ加工機では成形荷重 P と供試管の傾き角を測定して算出した。成形荷重 P は図 2 に示すように油圧シリンダーと定滑車間のワイヤーロープに設置したロードセルで測定した。供試管の傾き角は供試管先端中心の軌跡を図 19 に示すように各滑車の中心及び管先端中心にポテンショメータ式変位変換器を設置してワイヤーロープ初期長さ X1,2,3,4 からの各変位量 1,2,3,4 を測定し微分幾何学⁵⁾から算出した。

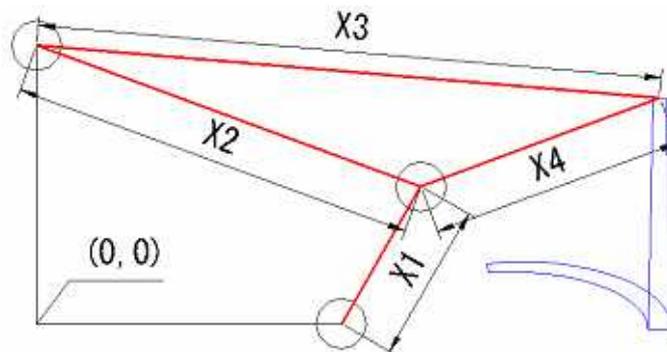


図 19 ワイヤーロープ変位の定義

(b) 寸法・形状： 曲げ加工後、管の先端 300mm から 100mm 刻みごとに扁平率を測定した。加工前外径 D 及び加工後短径 D1、長径 D2 をノギスにて測定し、測定値より、次式を用いて、扁平率 D/D^{ϕ} を求めた。

$$D/D^{\phi} = (D_2 - D_1) / D \quad (6)$$

また、上記と同一断面位置における曲げ外側の曲げ半径を 3 点曲率計で測定し、その値から $D_1 / 2$ を引いた値を簡易的に管中心の曲げ半径とした。

さらに供試管を曲げ加工後、先端 1700mm から 2200mm 以内に発生したしわの高さ h とピッチ p をノギスにて測定し、しわの高さ h を、しわ大 ($h \geq 1.0\text{mm}$)、しわ小 ($0.1\text{mm} < h < 1\text{mm}$)、目視や触覚で感知するしわ微小 ($h \leq 0.1\text{mm}$) と分類した。

(c) ひずみ： 曲げ過程中、軸方向ひずみの変化は、管の先端 200mm の曲げ外、内側外表面の軸方向に塑性ひずみゲージを貼り付けて軸方向ひずみを測定した。

3 実験結果および考察

3.1 チャック形状と管先端の成形性

チャック形状が曲げ過程中、管の成形荷重へ及ぼす影響を図 20 に示す。チャック A が曲げ後期に成形荷重が急激に増加するに比べ、チャック B は成形荷重が低く、緩やかに増加し且つワイヤーロープ変位 X が 340mm 大きい事が分かった。これはチャック B の荷重点 b をチャック A の荷重点 a より 250mm 管の先方と 339mm 曲げの外側へ位置を設定した事により、管の先端から特に 500mm 以内に存在する断面の曲げに必要な成形荷重がテコの原理で小さくなり、動滑車の初期位置が変化した為と考えられる。

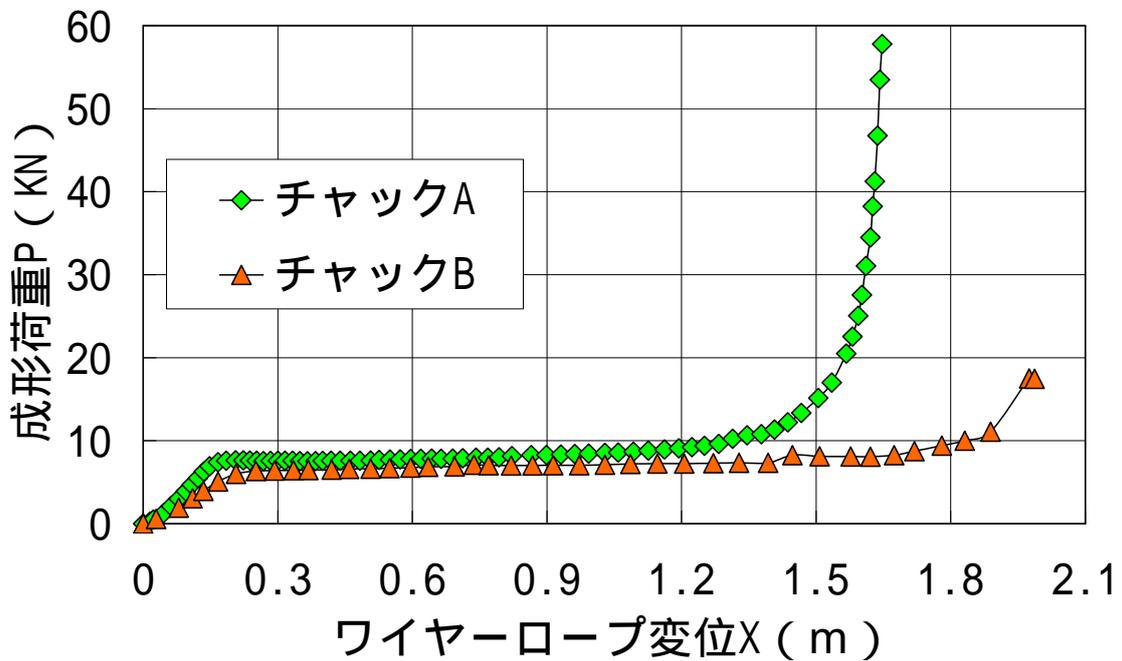


図 20 チャックの種類と成形荷重

図 21 にチャック形状が曲げ過程中、管先端から 200mm 位置における曲げ外、内側外表面の軸方向ひずみへの影響を示す。チャック A による管の曲げにひずみの逆転現象が現れたが、チャック B による管の曲げではその現象が現れず、且つ曲げ進行につれ大きなひずみが見られた。ひずみ逆転現象はチャック A が曲げ初期から荷重方向と管が図 8(図 7 も参考)に示すように交点 c を持ち、その交点が曲げ進行につれ曲げ起点方向の c' に移る際、曲げモーメントの符号が正から負へ変化したとされる。一方、チャック B を用いた管は曲げ最初から荷重方向との交点 d が管の先方に存在し、後期には交点 d より更に遠い交点 d' に移り、低目でも緩やかに増加する荷重により管の先端でひずみが大きくなったと考えられる。

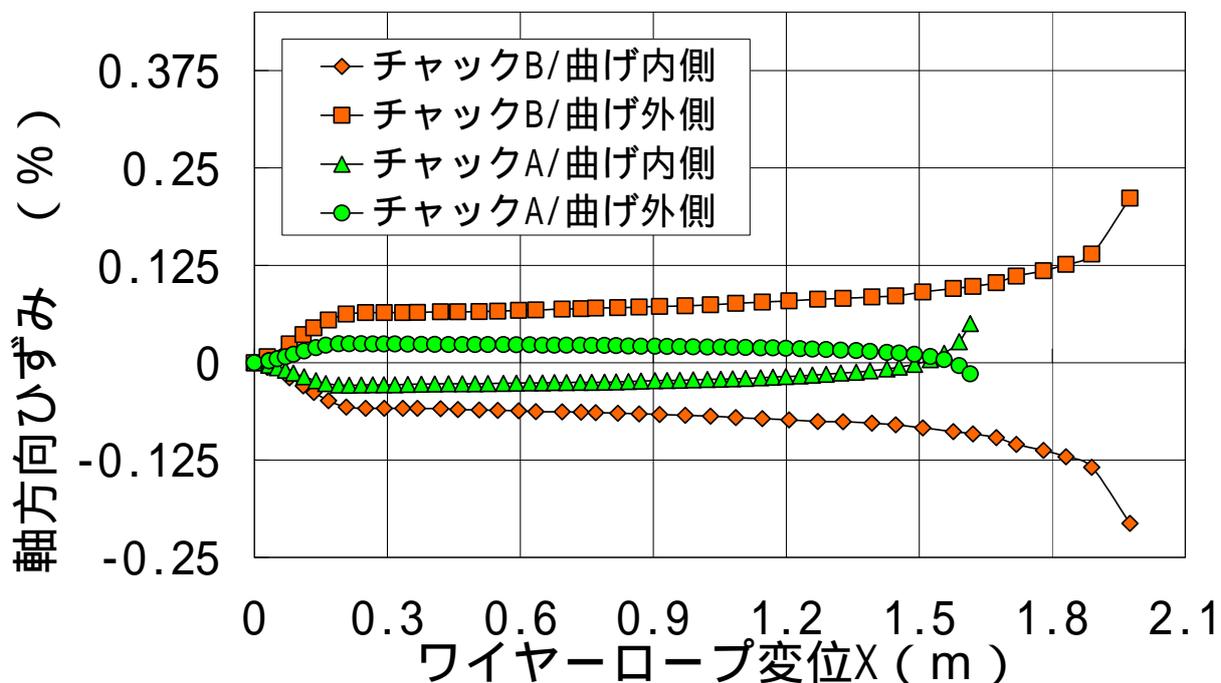


図 21 チャックの種類と軸方向ひずみ

図 22 にチャック形状が管先端の曲率に及ぼす影響を示す。ここで、製品理論形状において除荷後の曲率を理論 $1/\rho_0$ 、除荷前の曲率を理論 $1/\rho_1$ とする。なお、その算出手法は 3.5 節の曲げモーメントの解析で詳細に述べる。成形後、チャック A を用いた管は先端 300mm の位置で -0.03 の曲率を示し、チャック B を用いた管は先端 300mm の位置で僅かながら 0.008 の曲率を示し、且つ曲率が全面的に大きくなった。これは管の曲げ後期においてチャック B によるひずみがチャック A によるひずみに比べ、ひずみの逆転現象がなく且つ大きいために管先端を金型により広範囲に接触したためと言える。次に、チャック A, B による曲率は理論 $1/\rho_0$ に比べ、ともに管先端から 0.6m 弱以内においては小であり、且つ先端から 0.3m 以内においては測定値がないことがわかる。これは管先端がほとんど成形されていない事を示し、またチャックのつかみ長さ 0.2m の影響を受け、測定を省略した事にある。

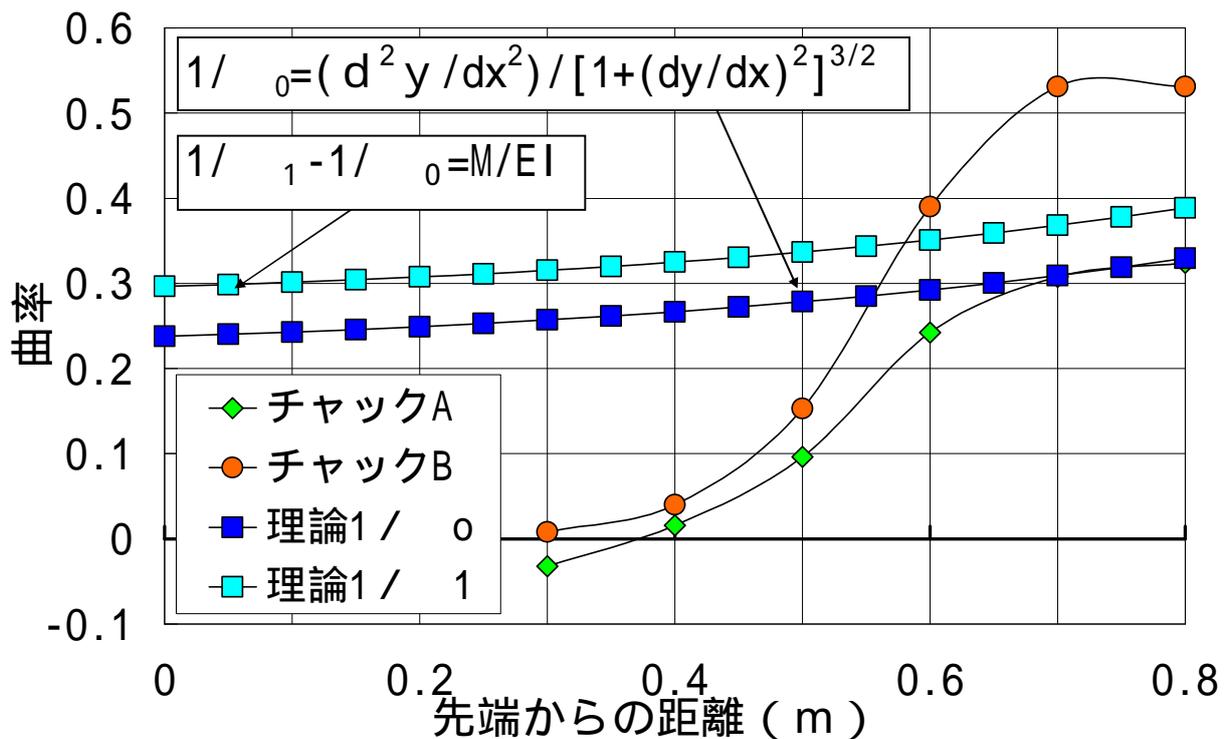


図 22 チャックの種類と管先端曲率

図 23 に除荷前のチャック A、B における金型と管先端の接触状況を示す。チャック B による管先端はチャック A による管先端比べより広範囲で金型に接触している事がわかる。これにより、チャック B は管先端の成形性においてチャック A より有効であることが言える。図 24 にチャック A、B による曲げ管先端の成形状態を示す。曲げ後の管は両方ともその先端が成形されていない事が確認できる。この事はチャックの形状を変えた事により管先端と金型の接触状態を向上させることは出来るが先端金型の配置を調整しない限り、管先端の成形が見込まれないとも言える。今後、金型の配置について更なる研究が必要である。

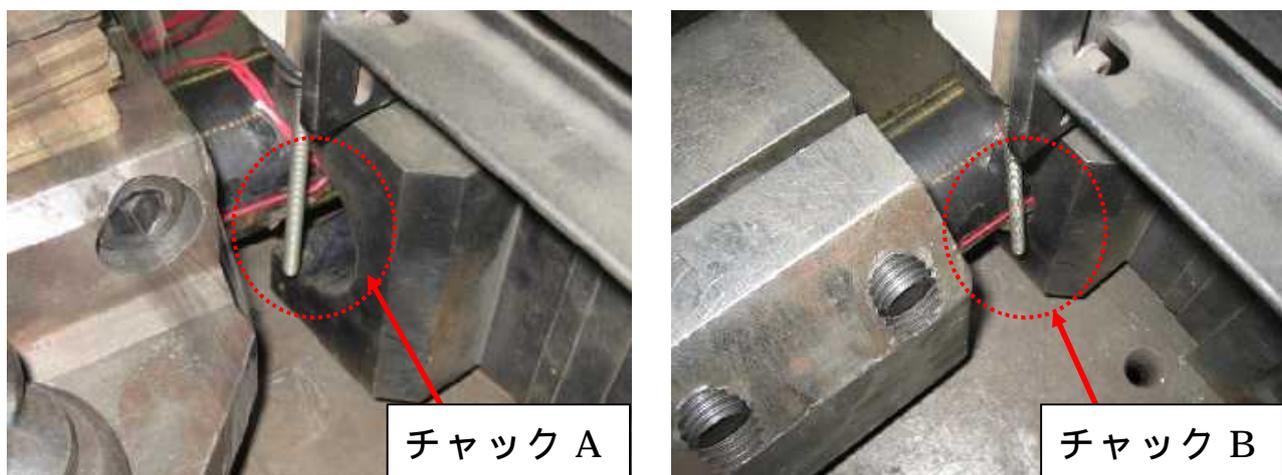


図 23 除荷前のチャックの状態

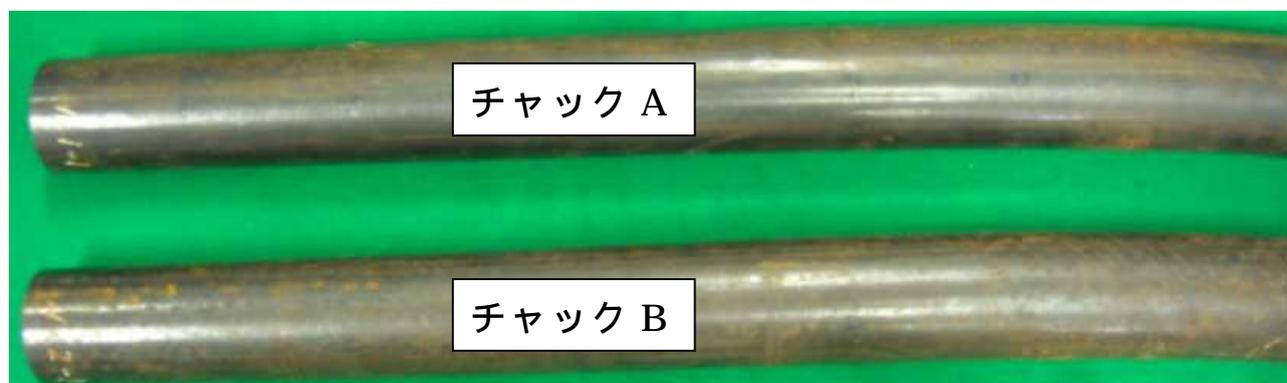


図 24 曲げ後の管先端の状況

3.2 金型形状と管の曲げ内側表面のしわ

金型形状による曲げ内側に発生したしわ状況と拡大図を図 25 示す。円形状の金型を用いた管は先端から 1700mm ~ 2200mm 位置の曲げ内側でしわが発生し、2.05m で最大のしわ高さ 2.8mm を記録した後、そのしわから離れるほどしわが小で、しわのピッチが 40mm ~ 55mm の間で不均一に変化した。一方、小判形の金型を用いた管は曲げ内側に生じたしわは測定が不可能で管の上で手を滑らせると感じる僅かなしわがあった。また、図 4 において円弧 R がついている部分にて管と円形状金型の間にクリアランスが確認された。一方、管と小判形金型の接触は広範囲接触であった。この事から円形状金型と管の部分的接触によるクリアランスが、しわが生じる原因の一つと考えられる。

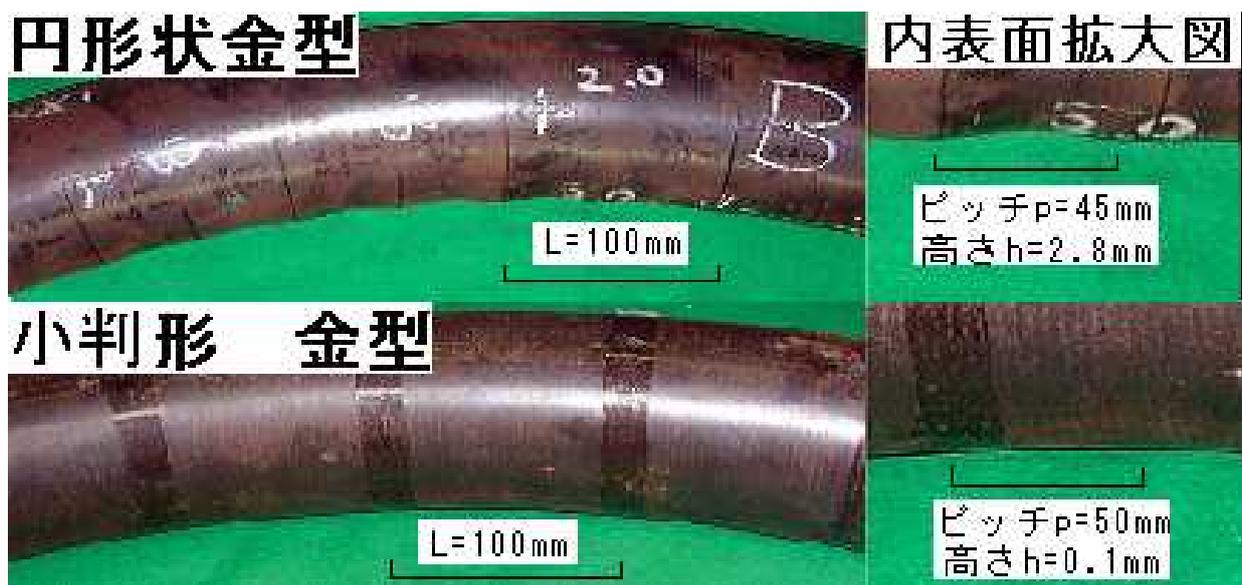


図 25 金型形状としわ発生状況

3.3 供試管肉厚による扁平率と曲げ内側のしわ

肉厚が扁平率としわ高さに及ぼす影響を図 26 に示す。ここで、グラフにおいて同色の棒グラフと線グラフは同一供試管の扁平率としわ高さをそれぞれ示し、小判形金型により曲げ加工された供試管の肉厚を $t_1=4.5\text{mm}$ とする。また、円形状金型により曲げ加工された他の供試管肉厚を t とする。まず、肉厚が 4.5mm の供試管において、金型断面形状が円形状と小判形である時、最大扁平率はそれぞれ 6% と 12% 程であり、最大しわ高さはそれぞれ 2.8mm と微小且つ滑らかである事（図 25 を参考）がわかる。その理由として、円形状金型を用いた管において発生したしわの山がちょうど扁平率測定箇所当たり且つしわの高さが徐々に変化した事である、小判形金型を用いた管において金型との接触面積が広範囲で且つ扁平率が増加した事によりしわ高さが微小且つ滑らかになったと言える。次に、肉厚が 4.0mm で塑性屈服なし供試管と 7.1mm の供試管において、最大扁平率はそれぞれ 27% と 7% 程であり、最大しわ高さはそれぞれ 1.2mm とほぼ 0mm に近く触覚でやっと感じる程である。これは肉厚の減少する事により供試管の扁平増加が原因で、金型との接触が広範囲接触から徐々に金型入口付近へと移る事で、管の中心が金型の外側に浮いて曲率が減少し、しわ高さが低くなったと言える。最後、肉厚 4mm の供試管において残り二本は 1700mm から 1900mm の区間で塑性屈服が生じる現象が現れた。塑性屈服は扁平率の増加により供試管の扁平が金型断面入り口幅を越えた接触点において、なお曲げ加工の進行につれて増加する曲げモーメントが供試管の曲率を局部的に著しく増加させた事により起こったと言える。図 27 に塑性屈服の拡大図を示す。図中金型入り口による圧痕と曲率が急増した箇所が鮮明に残っていた。

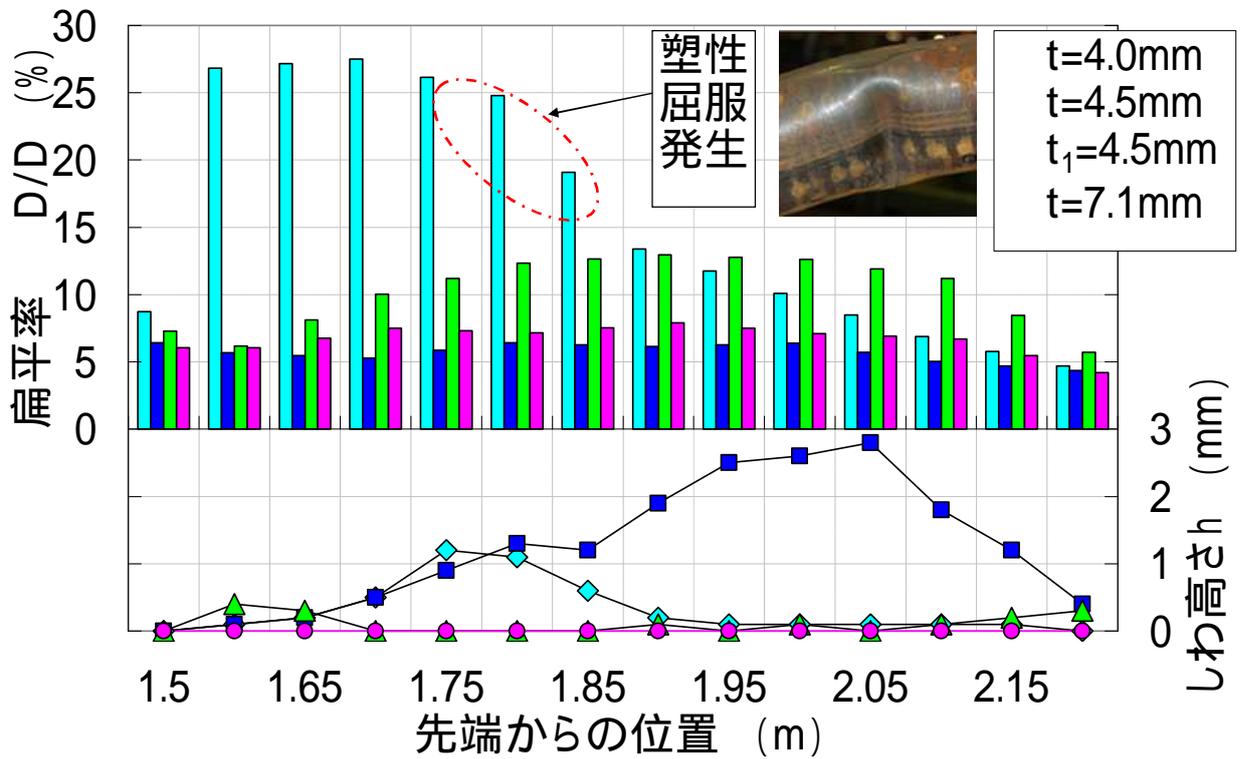


図 26 肉厚が扁平率としわ高さに及ぼす影響

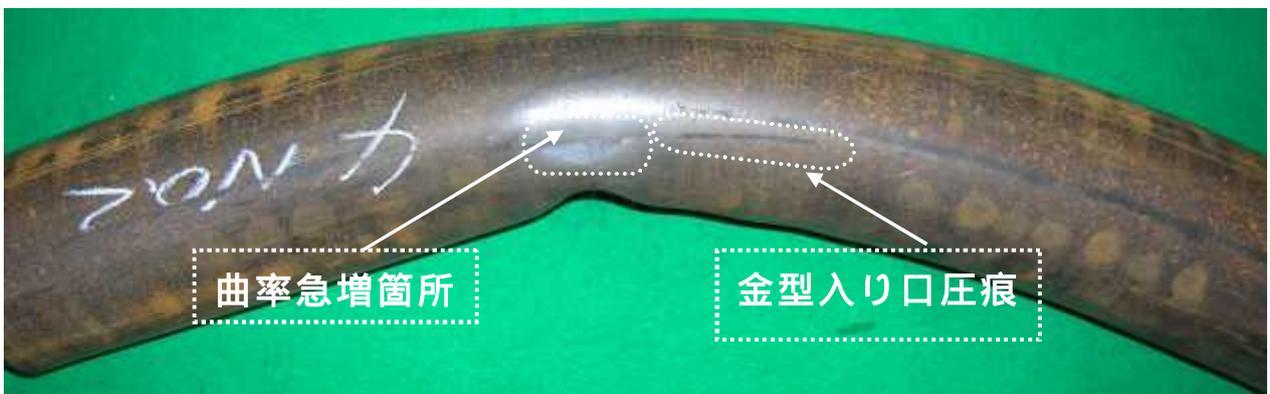


図 27 塑性屈服が生じたテーパ鋼管

管先端 1700mm から 2200mm の区間における肉厚 7.1mm と塑性屈服なしの肉厚 4.0mm の供試管に発生したしわの状況（肉厚 4.5 mmの供試管は図 25 を参考）を図 28 に示す。肉厚 4.0mm の供試管において、1700mm から 1750mm の間に 1.2mm、1750mm から 1800mm の間に 1.1mm の大しわと 1800mm から 1900mm の間に 0.6mm と 0.2mm の小しわと 1900mm から曲げ起点までは 0.1 未満の微小しわがピッチ 40mm から 45mm の間隔で不均等に分布しているに対して、肉厚 7.1mm の供試管には触覚で感知できる微小しわが僅かにあった。この事より、管は肉厚が減少すると扁平率が増加し、しわが発生しやすいと言える。

以上で述べたように円形状金型において供試管肉厚の減少は扁平率の増加を伴い、しわ高さが微小から大となり、さらに扁平率が増加すると供試管と金型の接触状況が著しく変化し、しわ高さが大から小となるか若しくは塑性屈服が生じるような変形挙動を示すと言える。



図 28 供試管肉厚と表面のしわ

3.3 牽引拡げ加工と供試管の変形挙動

図 29 にしわつき管としわなし管の拡管荷重の結果を示す。その一として、しわつき管はしわなし管より拡管荷重が低い事がわかる。この事はしわつき管において扁平率がしわなし管よりも 7 % 低い事あると考えられる。その二として、荷重は小振幅で区間 A から区間 B の中期まで滑らかに増加、区間 B の末期まで安定を辿っていることがわかる。これは区間 A に置いて拡管末端効果により荷重が穏やかに増加していると考えられる（拡管末端効果とは通常、管は拡管において荷重の安定区間に入ると、未拡管部と拡管完了部のスプリングバックによる両方の抵抗を受けるが拡管初期においては未拡管部抵抗だけ、拡管末期においてはスプリングバックによる抵抗だけを受け、荷重が増加と減少の一方を辿る事を言う）。また、区間 A と B において荷重の変化幅が小さい事は拡管ダイスの長さが比較的短いことにより荷重の伝達が滑らかになったと考えられる。その三として、区間 C において、荷重の変化幅は激しくなり且つ徐々に減少している事がわかる。また、しわなし管においては急激な荷重低下が見られる。これは拡管ダイスの長さが区間 A, B のダイスより長いことにより荷重の伝達が不連続となり、荷重の変化幅が大きくなり、且つ拡管末端効果に荷重が減少したと考えられる。また、しわなし管においては荷重の急な低下部は実験中、拡管芯金ストッパーが滑り出したため、再実験データのつないだためである。最後、しわつき管の荷重変化幅がしわなし管に比べより激しい事がわかる。これはしわつき管において管の外表面のしわが原因でしわの高さが大であるほど荷重が急激に下がると考えられる。

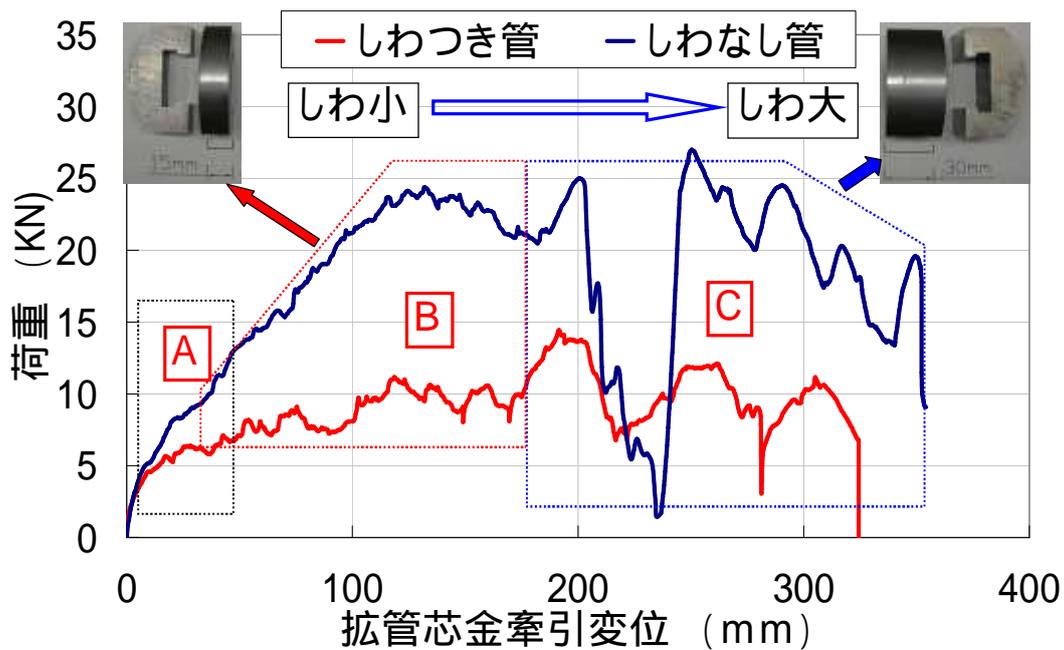


図 29 牽引揚げ加工における拡管荷重 P

拡管加工による断面の扁平率変化を図 30 に示す。拡管後のしわありとなしの管は断面の扁平率拡管前に比べ大幅縮小し 3%以下に収まっているが真円の断面になっていない事がわかる。これは拡管芯金が内、外側ダイスを通す事により、真円に戻された管の断面がスプリングバックの影響を受けることが原因の一つだといえる。

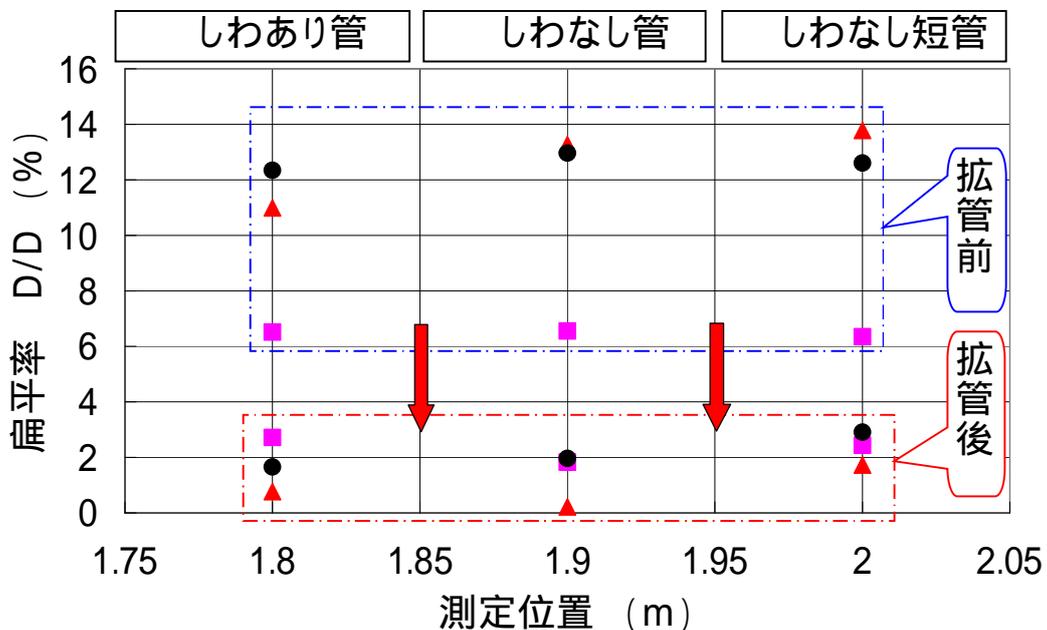


図 30 拡管による断面扁平率変化

図 31 に管先端から 1.8m 位置のしわなし短管の拡管前、後における断面状況を示す。扁平率が大幅減少したのが確認できる。図 32 に拡管後の曲げ外側表面の状況を示す。外表面には拡管ダイスによる痕跡がまったく現れなかった。図 33 に長さ 15mm と 30mm の拡管ダイスにより拡管された管内側表面の状態を示す。

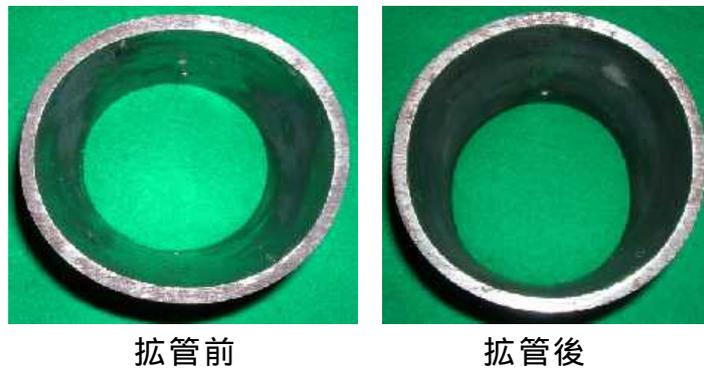


図 31 先端 1.8m 場所、管断面の拡管前後の状況



図 32 拡管後、管の曲げ外側表面状況



図 33 15mm と 30mm の拡管ダイスによる管内部のダイス圧痕

拡管による管の曲率変化を図 34 に示す。拡管後の管の曲率は拡管前に比べ小さくなっている事がわかる。これは管の扁平率が小さくなった事により曲率が減少したといえる。

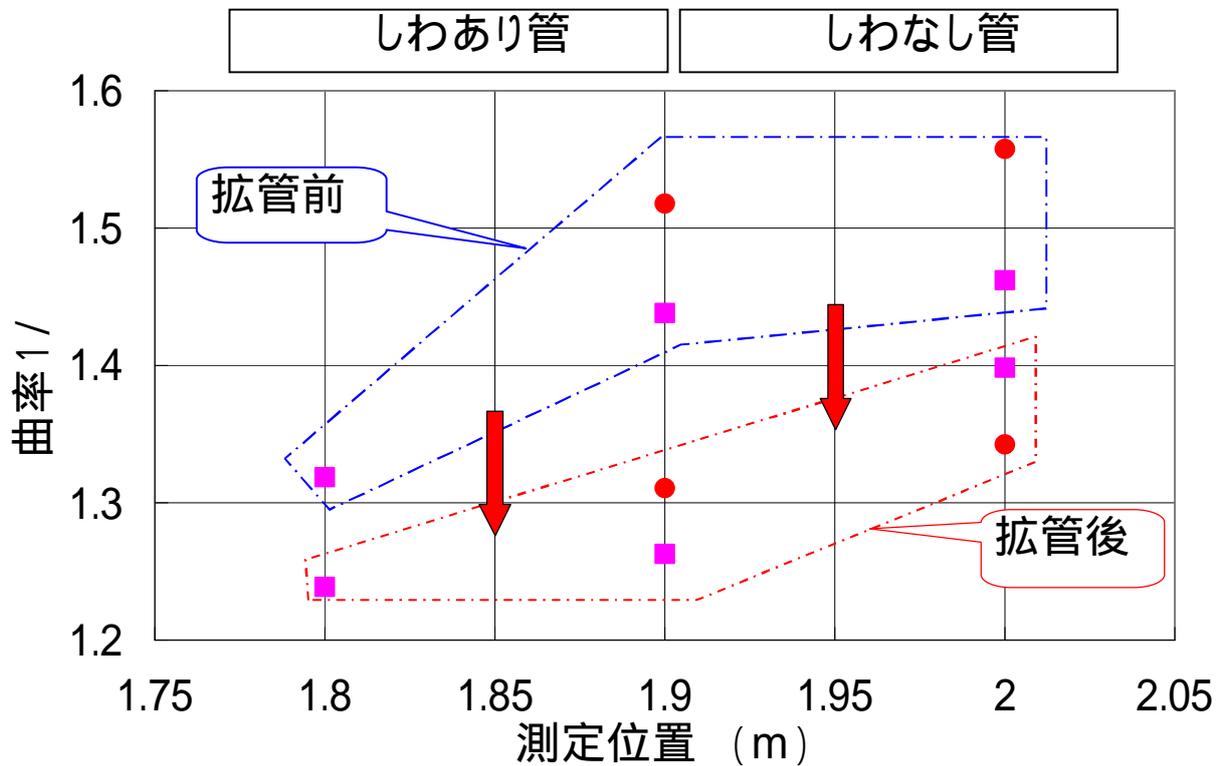


図 34 拡管による曲率変化

実験室による牽引拡げ加工において、断面の扁平抑制は有効であると言える。また、実験室での牽引拡げ加工は垂直に吊るした状態での実験であることから、水平状態の拡管において拡管ダイスの垂直沈下防止の対応策が必要である。よって、曲げ加工機実機において供試管の負荷状態における扁平率の変化が曲率に及ぼす影響、拡管荷重に及ぼす影響などについては、今後、更に研究を進める必要がある。

3.5 曲げモーメントの解析

供試管は先端 1100mm から 2300mm の区間を成形終了まで、軸方向応力が計算上 2MPa 未満の圧縮応力から 3MPa 未満の引張り応力に変化する。軸方向応力が材料の引張強さ 470MPa より十分に微小である事から、本研究で供試管は純曲げを受ける片持ち梁と近似し、且つ横断面が曲げ後も原型を保つと仮定した。

曲げモーメントの解析⁶⁾に使われた供試管先端から L 距離の場所の各パラメータを図 35 に示す。実験結果の整理に便宜を図り、曲げ半径

$$= R - R \quad (7)$$

を採用し、その逆数 $1/$ を実測曲率と呼び、更に供試管外半径を R として

$$= R/ \quad (8)$$

を無次元曲率と、肉厚 h を供試管外半径 R で除した無次元量

$$H = h/R \quad (9)$$

を肉厚比とした。

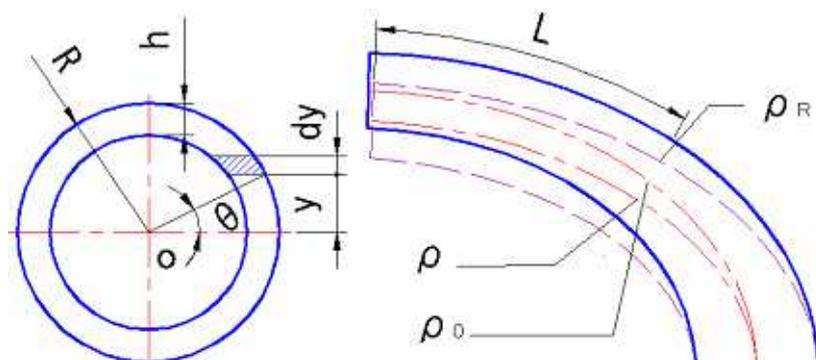


図 35 各パラメータの定義

初等理論によって曲げモーメント M を計算すると

$$M = 4 \left\{ \int_0^R \sigma_\theta \cdot y \sqrt{R^2 - y^2} \cdot dy - \int_0^{R-h} \sigma_\theta \cdot y \sqrt{(R-h)^2 - y^2} \cdot dy \right\} \quad (10)$$

となる。ここで材料は n 乗べき硬化塑性体とし

$$\sigma = F \cdot \epsilon^n \quad ; \quad \epsilon = \frac{y}{R} \quad (11)$$

とおけば

$$M = C \cdot R^3 \quad (12)$$

となる。但し C は曲率に無関係な定数で

$$C = 2 \cdot F \cdot R^3 \{1 - (1 - H)^{3+n}\} \cdot B\left(\frac{2+n}{2}, \frac{3}{2}\right) \quad (13)$$

$B(\)$ はベータ関数である。また、製品最終形状の理論曲率を微分幾何学でよく知られた一般の平面曲線の曲率⁷⁾式

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2} \bigg/ \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (14)$$

で求め（式 14 の dy 、 dx は楕円方程式微分を示す）、式（5）を用いて理論曲げモーメントを算出し、除荷前の理論曲率⁷⁾ $1/\rho_0$ を

$$\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_0} = \frac{M}{EI} \quad (15)$$

で求めた。

図 36 に実測荷重により算出した計算 M 、式（12）を用いて実測曲率 $1/\rho_1$ と理論形状における除荷前の理論曲率 $1/\rho_0$ を代入し算出した解析 M と理論 M 及び曲率関係をそれぞれ示す。計算 M の算出手法は付録一で述べる。まず、計算 M は理論 M と解析 M が楕円の徐々に変化する曲率に

対応して供試管先端に近づくにつれ減少している事に比べ、非常に大きい事がわかる。これは曲げ加工の進行により図 37 に示すように 1 番から 2 番までのワイヤーロープの伸びと 2 番の供試管が荷重方向へのたわみ(付録二を参考)による変位がポテンシオメータ式変位変換器(図 19 を参照に)の測定結果に影響を与える事により算出した供試管先端中心座標が真の座標に比べ、より座標原点に近い事が計算 M の算出場所を供試管先端方向へ移したのが原因の一つだと考えられる。また、ロードセルによる測定荷重 P は油圧シリンダー側の定滑車と動滑車の摩擦荷重が加わった事により、実際の荷重よりも高く測定された事にも原因があると言える。つまり、各場所の計算 M の真の位置は供試管先端から更に遠い場所にある事である。次に、供試管先端 1800mm から 2100mm の間において計算 M が解析 M より低い事がわかる。これは供試管横断面の扁平化が計算 M の低下をもたらしたと考えられる。最後に、実測曲率 $1/R$ は理論曲率 $1/R_0$ に比べ、供試管先端から 0.7m の間では低く、1.1m と 1.4m から 2m の間では高く、2m から 2.2m の間では低い事がわかった。この事は金型の配置箇所が理論曲率 $1/R_0$ の分布と一致していない事に原因があると考えられる。よって、今後は金型の配置箇所について更に研究する必要がある。

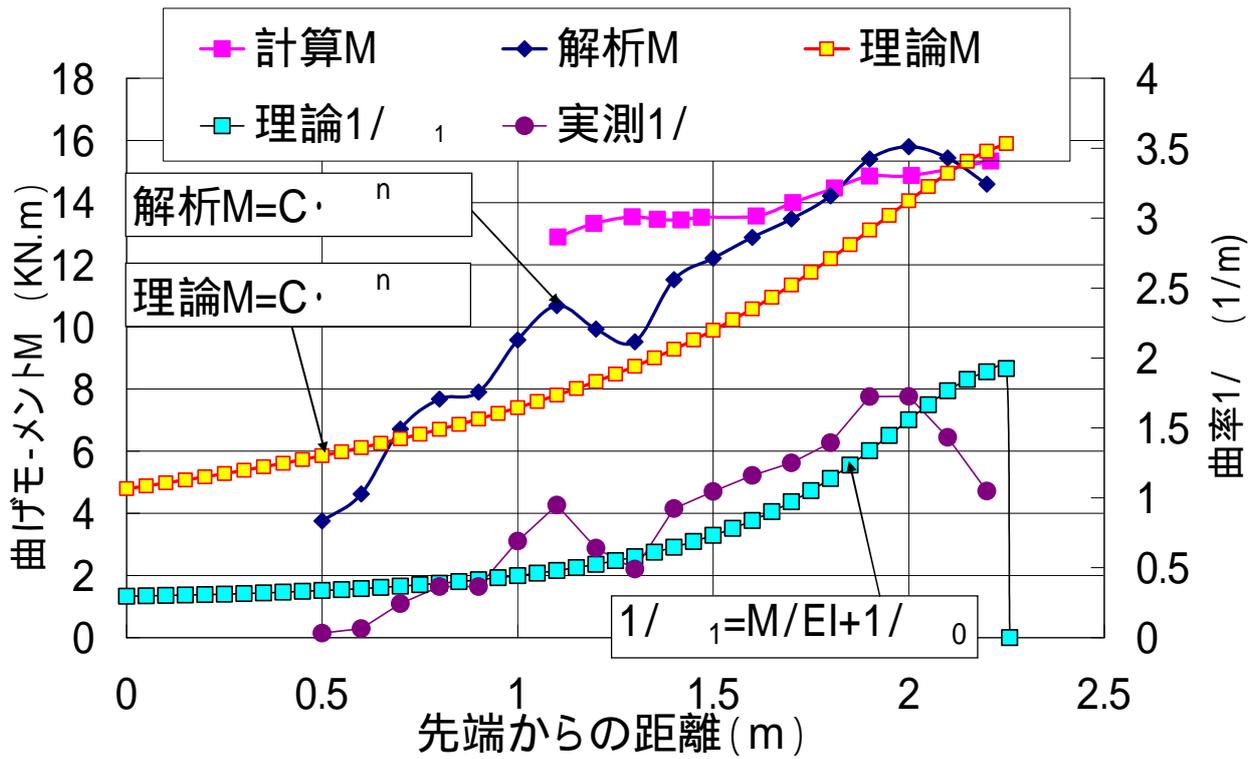


図 36 曲げモーメントと曲率の分布

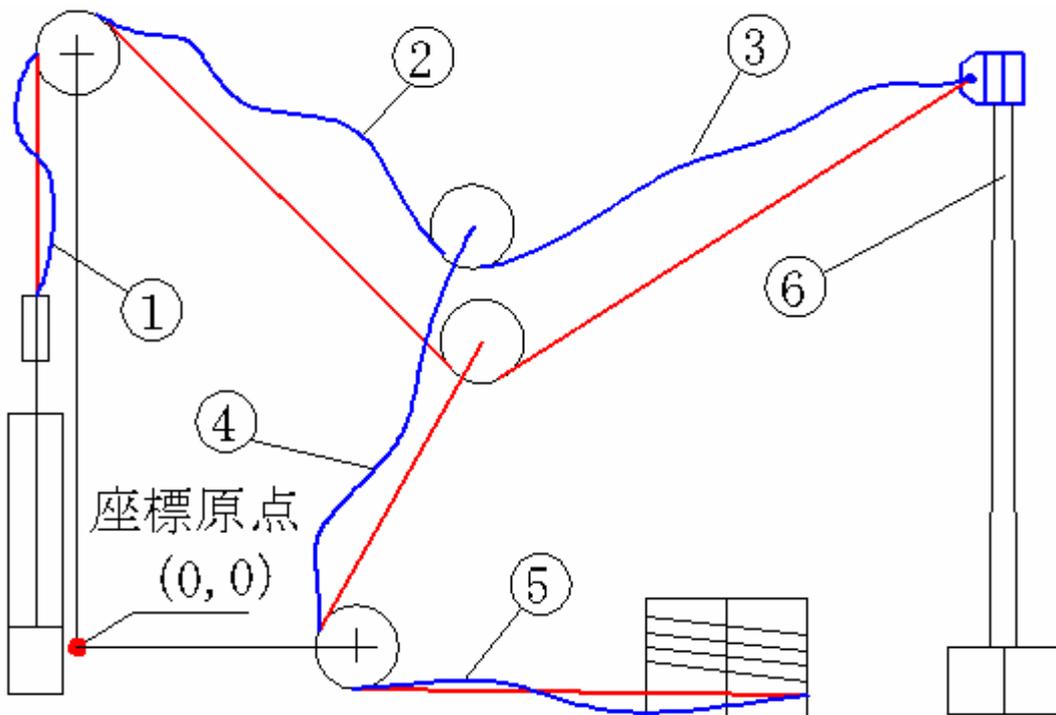


図 37 実測 M に影響を及ぼす各変位要素

4 自動調心式先端チャックの提案

上記実験結果と考察から本研究では自動調心式先端チャックを用いたテーパ鋼管曲げ加工法を提案し、曲げ加工機構造、自動調心式先端チャックの空間位置と内部構造の概略を図 38、39、40 にそれぞれ示す。本曲げ加工機は図 7 で紹介した曲げ加工機の構造を主に生かしながら H 形鋼とローラー及び自動調心式先端チャックを用いた構造にする事でテーパ鋼管に純曲げ加工力を与える事ができる。また、曲げ加工の進行につれ成形荷重を減少するのが最大の特徴でもある。理由その一、ワイヤーロープによる牽引荷重はローラーを通し、自動調心式先端チャックに純曲げ加工力を、H 形鋼に軸方向の荷重と分散される。その二、H 形鋼の回転中心をテーパ鋼管中心線から約 0.4m、テーパ鋼管先端から 2.31m 離れた場所に設ける事によりワイヤーロープの牽引によって H 形鋼が回転すると、ローラーが自動調心式先端チャックの先端方向にスライドされ、曲げ加工の進行につれてモーメントスパンが次第に大きくなり、曲げ後期において約 1m のモーメントスパンを確保し、ワイヤーロープの牽引荷重を引き下げる事が出来る。

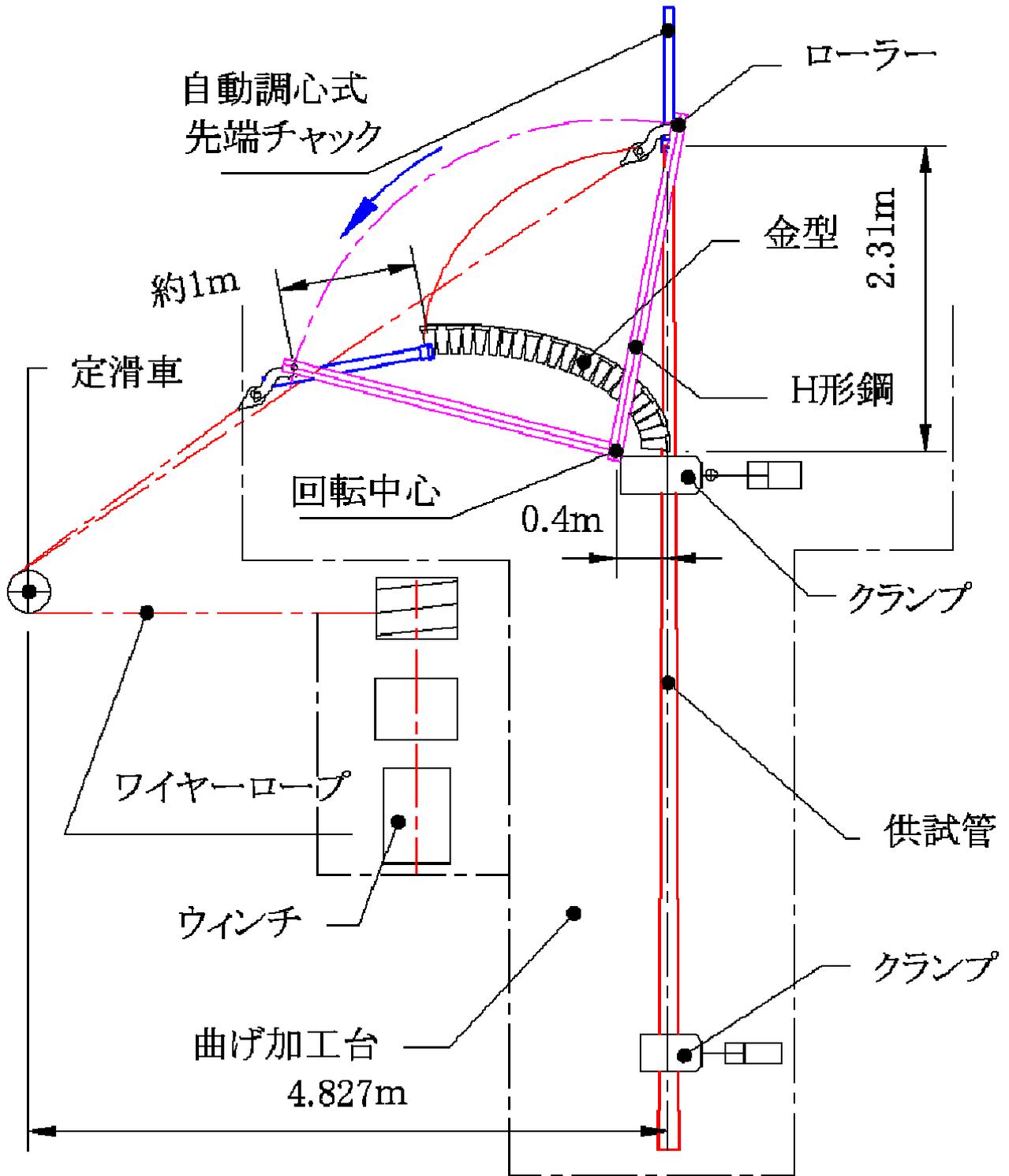


図 38 自動調心先端チャックを用いたテーパ鋼管曲げ加工機概略図

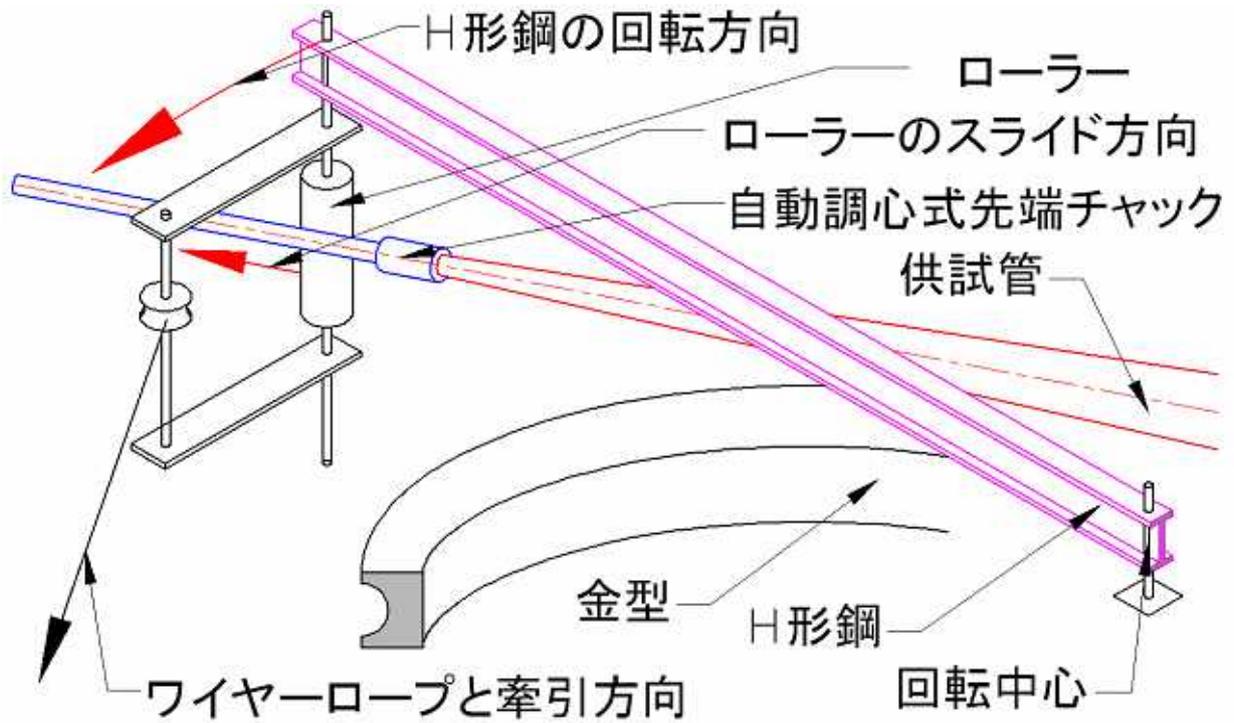


図 39 自動調心式先端チャックの空間的位置と自動調心機構概略図

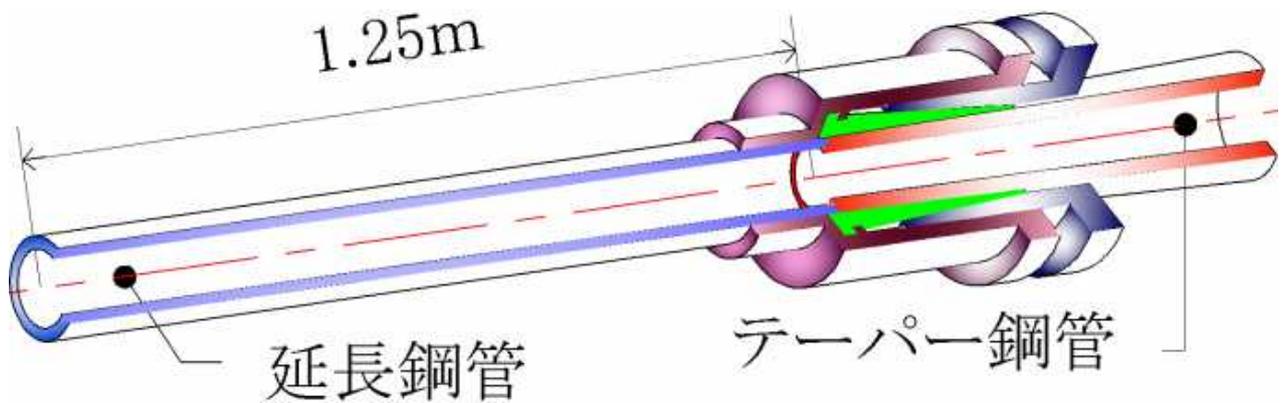


図 40 自動調心式先端チャックの内部構造概略図

5 結言

- 1) 管の先端成形性においてチャック A の荷重点 a をチャック B の荷重点 b に移した事により成形荷重が低くなり、管先端のひずみと曲率が増加した。
- 2) しわが生じる位置の金型断面形状を円形状から小判形に変えた事によりクリアランスとしわを減少、扁平率が増加、しわ高さが小となった。
- 3) 肉厚が減少すると管は扁平率が増加すると共にしわ高さが微小から大へ、更に扁平率が増加するとしわ高さは大から小となる変形挙動が判明した。
- 4) 牽引拡げ加工は管の扁平率を抑える事ができ、管の曲率も減少させた事が出来た。
- 5) 自動調心式先端チャックを用いたテーパ鋼管の曲げ加工法を提案、基本構造設計をした。

参考文献

- 1) 朱雪峰、直井久、塩原秀夫, 第 58 回塑性加工連合会論文集, pp563-564, 2007
- 2) 近藤哲己、杉本雅一, 新日鉄技報第 380, pp95-96, 2004
- 3) 大西清, JIS にもとづく第 10 版, 理工学社, pp5-12, 2003.12.10
- 4) 新日本製鐵(株), テーパー鋼管カタログ, pp12, 2003.5
- 5) 矢野健太郎, 石原繫, 微分積分, 裳華房 pp41, 74, 207, 1991
- 6) 室田忠雄、遠藤順一, 円管の均等曲げにおける塑性変形, 塑性と加工, pp391-398, vol.23 no.255, 1982-4
- 7) 鵜戸口英善、川田雄一、倉西正嗣, 材料力学, 裳華房, pp215, 313, 2005

< 謝辞 >

本研究及び論文作成にあたり、御指導、御鞭撻を賜った法政大学大学院工学研究科機械工学専攻 直井 久教授に心より厚く御礼申し上げます。また、研究に使用した供試材の提供と、本実験を行うにあたって多大なる御協力をいただきましたヨシモトポール株式会社 塩原 秀夫様、川原 晃様、上相 隆様、佐藤 直紀様、法政大学中央工作室小山さん、藤巻さん、機械工学科の尾形先生に深く感謝の意を申し上げます。

付録

1、計算曲げモーメントの算出について

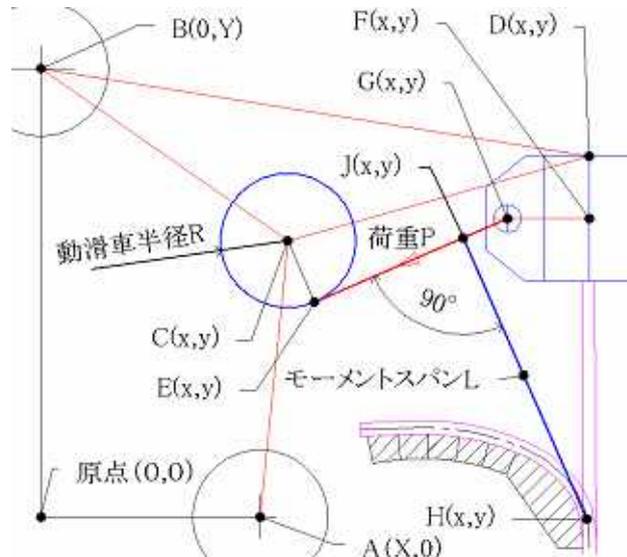


図 41 ロープ牽引による曲げ加工におけるパラメータと座標系

計算曲げモーメント M は

$$M = P * L \quad (16)$$

で求めた。 P はロードセルによる実測荷重で L はモーメントスパンである。図 41 にモーメントスパン L の算出に使われた各パラメータと座標を示す。ここで、油圧シリンダー側の定滑車中心から引いた垂線とウィンチ側の定滑車中心から水平線との交点を座標原点(0,0)とした。そして、 A はウィンチ側の定滑車中心、 B は油圧シリンダー側の定滑車中心、 C は動滑車中心、 D は供試管先端中心、 E はワイヤーロープと動滑車の接点、 F はチャックのピン中心が供試管への投影点、 G はチャックのピン中心、 H は供試管と金型の接点、における各々の座標とし、且つすべての初期座標値は曲げ加工機により与える。また、ワイヤーロープ初期長さ $X_{1,2,3,4}$ からの各変位量を $1,2,3,4$ とする。モーメントスパン長さ L はワイヤーロープの変位を測定し、算出が可能である*。

ワイヤーロープの初期変位 $X_{1,2,3,4}$ が有った時、まず(図 19 も参考) C の座標を連立方程式⁴⁾

$$\frac{(x_c - X_A)^2 + (y_c - 0)^2}{(x_c - 0)^2 + (y_c - Y_B)^2} = \frac{(X1 - 1)^2}{(X2 + 2)^2} \quad (17)$$

で求める。以下も同様に B と C の座標から D の座標を算出する。ここで、金型の断面中心線配置を予め一般平面曲線で近似させておく。そして、座標 D から近似線に接線を引き接点 H の座標を求め、さらに座標 D と座標 H により直線方程式を立て、座標 D を中心に距離 100mm** を半径とする円の方程式と連立し座標 F を求める。座標 F を求めたら、座標 F を中心に 139mm** を半径とする円の方程式を立て、座標 F を通り且つ直線 DH と垂直である直線方程式を求め、連立し、座標 G を求める。座標 G を求めたら、座標 C を中心に動滑車半径 R で円の方程式を立て、座標 G から動滑車への接点座標 E を求める。そして、直線 EJ の方程式を立て、接点 H から直線 EJ に垂線方程式を立て交点座標 J を求める。よって、モーメントスパン長さ L が点 J と点 H の距離を数学的に算出できる。

*この計算方法は金型に触れていない供試管の部分に剛体とし且つワイヤーロープも軸方向に伸びがないと言う仮定で算出できる。ワイヤーロープは曲げ加工において水平方向から見ると垂直方向にかなりたるんでおり、荷重の増加とともに伸びが徐々に増える特徴を持っており、その伸びを測定するのが極めて困難である。

** は図 8 を参考。

2、曲げ荷重による供試管先端のたわみ

供試管先端のたわみ算出を便宜化するために図 7 により曲げ初期荷重が供試管となる角は約 75° で、図 20 により成形荷重は曲げ初期から上昇し、約 7400N で弾性変形から安定した塑性変形区間に入るとする。これを基に供試管先端のたわみを算出すると以下のようなものである。

供試管は 1/100 のテーパ率を持っているので、先端平均直径を D_m と供試管先端からの距離を X とし、断面二次モーメントを

$$I \approx \frac{1}{8} \left(D_m + \frac{X}{100} \right)^2 t \quad (18)$$

で近似させ、弾性変形によるたわみを

$$\iint \frac{d^2 y}{dx^2} = \iint \frac{p}{EI} x \quad (19)$$

で求めれば、供試管先端のたわみは約 225mm である。

注：本研究報告書に載った拡管各パーツの設計図面は設計当初の図面であり、実験中に起こった不具合を解消するために部分修正を行なったパーツに関しては図中に記入していないことを示す。