

「管材の管端増肉加工に関する研究」

呉工業高等専門学校 / 水村 正昭

1. はじめに

近年、自動車業界においては自動車の安全性と燃費向上を両立するために、高強度かつ軽量化に有利な材料の適用が進んでいる¹⁾。そのため、同一質量で強度や剛性に優れた管材の適用が拡大しているが²⁾、さらなる軽量化のために適材適所の肉厚配置を可能にする技術も進んでいる。例えば、板材の場合は異なる板厚の鋼板を溶接で結合したテーラードブランク³⁾の自動車部品への適用が拡大しているが、管材においても偏肉管の研究が活発に進められている⁴⁾。特に管端は他の部材と接合されることが多く、構造的に応力が集中しやすい。また、溶接される場合、ある程度の厚みが必要となる。そのため管端のみ増肉させることのニーズは多い。しかし、管端増肉加工は古くから熱間のアプセット加工に関する研究例は多いが⁶⁾、冷間での研究例は少ない。近年、冷間での研究例もあるが、厚肉の管を対象としたものがほとんどである⁷⁾。そこで、自動車のボディーやシャシーに適用されるような比較的薄肉の管を対象として管端を増肉させる加工法の研究を進めてきた。

2. 目的

これまで、管端をパンチで押し込んで管の外側に増肉する外側増肉加工法や、管端を拡管した後に管端からパンチを押し込んで内側に増肉させる拡管後内側増肉加工法を検討してきた⁸⁾。これらの方法により最大 1.60 の増肉率 λ (= 縮管後の肉厚/素管肉厚) が得られたが、管端を固定してもう片方の管端を軸方向に圧縮する加工のため、増肉部の座屈を抑制することが困難であった。そこで軸方向の圧縮による増肉ではなく、縮管による増肉を利用する方法に着目した。すなわち、管端を縮管して増肉し、次にその増肉箇所を反対側からパンチを押し込んで拡管する方法である。本年の研究では、まず第 1 工程である縮管加工において増肉や耐座屈に対して有利となる加工条件を実験と数値解析の両面から検討する。その後、縮管後の拡管工程についても数値解析を開始し、実験の準備も進める。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

前述のように、自動車のさらなる軽量化のために偏肉管のニーズは極めて高い。特に、薄肉管の管端を増肉させることが可能になると、ボディーやシャシーなど、管端を他部品と溶接するような部品には有利となり、実用的な価値は非常に高い。しかも、本研究では縮管による増肉を利用する技術のため、圧縮を主体とする増肉加工よりも座屈が生じにくく実用化の可能性も高いと推定される。

4. 研究内容の詳細

4.1 実験による縮管工程の検討

4.1.1 供試材

供試材は機械構造用炭素鋼鋼管 STKM13A を用い

た。寸法は外径 12.5 mm、肉厚 1 mm、長さ 30 mm である。

4.1.2 実験方法

実験には当校保有の多軸変形試験機を用いた。当該装置は、管材に引張・圧縮・ねじり・内圧が負荷できる試験機であるが、本研究では圧縮機構のみを使用した。実験用の金型の概略を図 1 に示す。上下に分割されたダイの間に管を装着し、片側から軸押しシリンダでパンチを押し込む。パンチの押込み量 δ は最大 20 mm とし、押込み速度は 0.5 mm/sec とした。

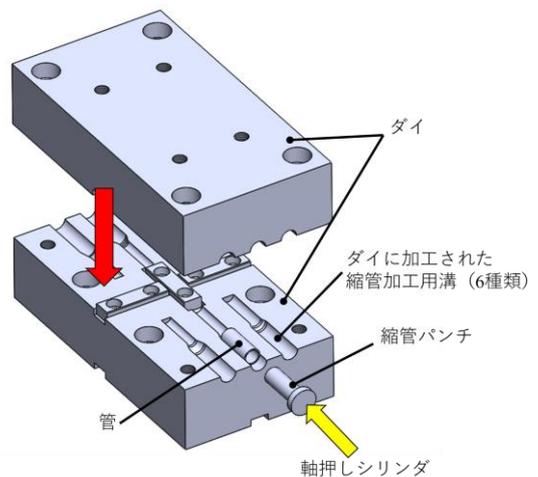


図 1 縮管加工の実験用金型の概略図

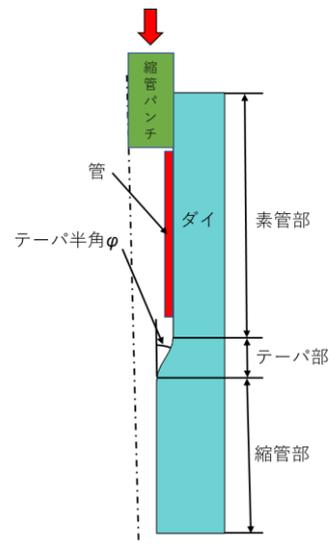


図 2 縮管加工の概略図

縮管加工の概略を図 2 で説明する。まずダイの素管部に管を装着する。次に管の上端より縮管パンチで押し込んでいく。管の下端はテーパ部及び縮管部へ押し込まれることで縮管され、同時に増肉される。このテーパ半角 ϕ と縮管率 κ (= 縮管後の外径/素管外

径)を各種変えてその影響を調査した。テーパ半角 ϕ は、 15° 、 20° 、 25° 、 30° の4種類とし、縮管率 κ は、58%、67%、75%の3種類とした。表1に縮管率 κ とテーパ半角 ϕ を各種変えた6種の実験条件を示す。なお、この6種類の条件に相当する溝形状が、図1の上下のダイにそれぞれ加工されている。また、摩擦係数 μ は小さい方が材料の流入が良くなるため、比較的摩擦係数 μ の小さい二硫化モリブデン MoS_2 を管の外表面に塗布して実験した。

表1 縮管工程の実験条件

条件	縮管率 κ [%]	テーパ半角 ϕ [°]
A	58	15
B	58	25
C	58	30
D	58	20
E	67	20
F	75	20

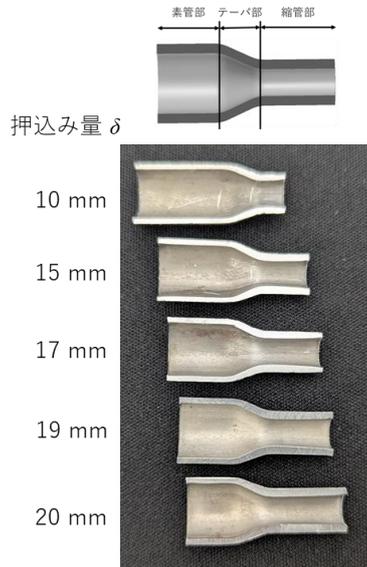


図3 各押し込み量 δ における縮管工程の断面推移 (条件E)

4.1.3 変形挙動

条件E(縮管率 $\kappa = 67\%$ 、テーパ半角 $\phi = 20^\circ$)において、押し込み量 $\delta = 10 \text{ mm}$ 、 15 mm 、 17 mm 、 19 mm 、 20 mm で途中止めた試験片の断面を図3に、各試験片の増肉率 λ の分布を図4に示す。これより、管はテーパ部で増肉されながら縮管部に押し込まれていくが、管端はほとんど増肉されないで押し込まれていくことが分かる。また、縮管率 κ が大きく、テーパ半角 ϕ が小さい場合は、縮管部、テーパ部、素管部ともしわは発生しなかったが、縮管率 κ が小さく、かつ、テーパ半角 ϕ が大きい条件Bと条件Cでは素管部にしわが発生した。特にしわの大きい条件C(縮管率 $\kappa = 58\%$ 、テーパ半角 $\phi = 30^\circ$)の変形挙動を図5に示す。これより、押し込み量 $\delta = 17 \text{ mm}$ で小さなしわが発生し始め、 20 mm に達するとしわはかなり大きくなる。テー

パ半角 ϕ が大きくなるとテーパ部に入り込む際の抵抗が大きくなり、素管部に留まった肉が圧縮されることでしわが発生したと考えられる。よって、テーパ部から先の縮管部にはいずれの条件でもしわは発生しなかった。また、過去の研究例では縮管部には軸方向に縦のしわが入る成形不良が報告されているが⁹⁾、今回の実験では観察されなかった。

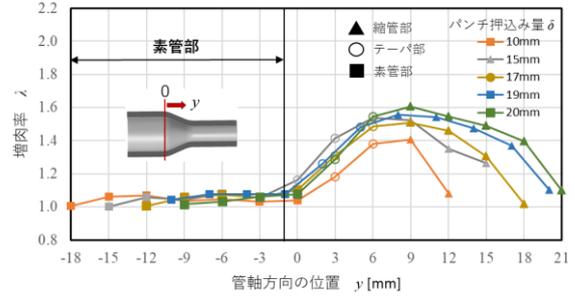


図4 縮管工程における増肉率 λ の分布

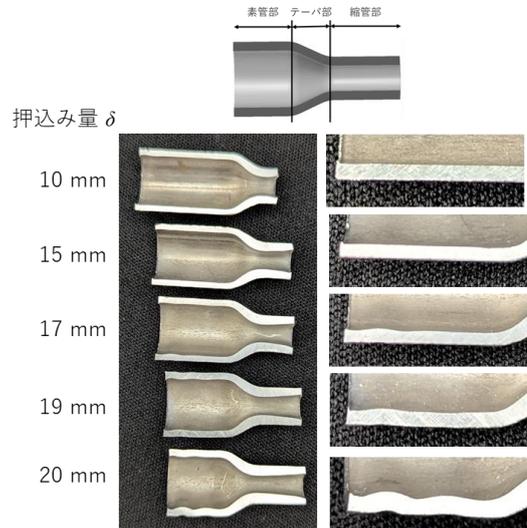


図5 縮管工程で素管部にしわが発生する場合の断面推移(条件C)

4.1.4 縮管率の影響

縮管率 κ を変えた場合の断面形状の比較を図6に示す。これより、縮管率 κ が小さいほど増肉が大きくなり、管の長さは短くなった。縮管率 κ が小さいと押し込まれる管への抵抗が大きくなることで圧縮され、内側に増肉した分短くなったと考えられる。



図6 縮管率 κ を変えた場合の断面形状の比較

増肉率 λ の管軸方向分布に及ぼす縮管率 κ の影響を図7に示す。増肉率 λ は縮管率 κ によらずテーパ部と縮管部の境界付近で最大となり縮管部側の管端に向かって減少した。また、縮管率 κ が小さいほど増肉率 λ は高く、 $\kappa = 58\%$ では増肉率 $\lambda = 1.85$ になった。ただし、素管部は縮管率 $\kappa = 67\%$ 、 75% の場合にはほとんど増肉されていないが、 $\kappa = 58\%$ の場合には $\lambda = 1.2$ に増肉されている。これは管端増肉という本来の目的からは好ましくない。図8に縮管後の素管部の平均肉厚に対する実質的な増肉率 λ_a の分布を示す。これより、 $\kappa = 58\%$ と 67% の λ_a の最大値はほぼ同等であり、縮管部全体ではむしろ $\kappa = 67\%$ の方が高くなった。以上の結果より、縮管率 $\kappa = 67\%$ が管端増肉加工としては好ましいと考えられる。

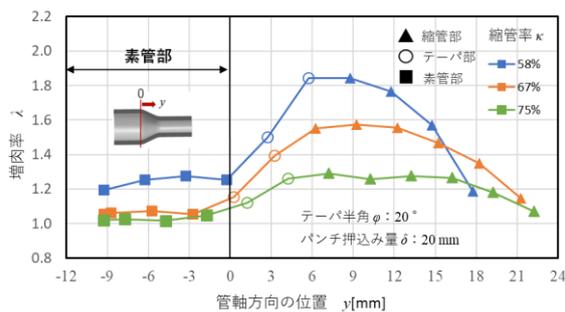


図7 縮管工程の増肉率 λ に及ぼす縮管率 κ の影響

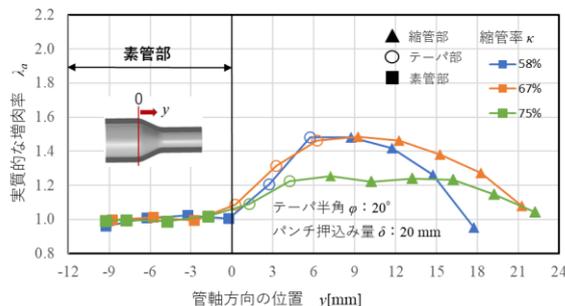


図8 縮管工程の実質的な増肉率 λ_a に及ぼす縮管率 κ の影響

4.1.5 テーパ半角の影響

テーパ半角 ϕ を変えた場合の断面形状の比較を図9に示す。なお縮管率 $\kappa = 58\%$ 、パンチ押込み量 $\delta = 20\text{ mm}$ に統一した。これより、テーパ半角 ϕ が大きいほど増肉が大きくなり、管の長さは短くなった。テーパの角度が大きくなると押込まれる管への圧縮力が大きくなって内側に増肉された分短くなったと考えられる。テーパ半角 ϕ が増肉率 λ の軸方向分布に及ぼす影響を図10に示す。テーパ半角 ϕ の増加に伴い増肉率 λ の最大値は増加したが、縮管部ではほとんど同じ増肉率 λ であった。前節と同様に実質的な増肉率 λ_a で整理すると図11のようになる。実質的な増肉率 λ_a では 15° を除く 20° 、 25° 、 30° の分布がほぼ重なった。テーパ半角 ϕ が 20° 以上であれば、ほぼ同等の増肉率を示すが、実際には図9に示すように、テーパ半角 $\phi = 25^\circ$ 、 30° で素管部にしわが発生した。よってテーパ半角 $\phi = 20^\circ$ が適していると言える。

縮管率 $\kappa = 58\%$ 押込み量 $\delta = 20\text{ mm}$



(a) 条件A ($\phi = 15^\circ$) (b) 条件D ($\phi = 20^\circ$) (c) 条件B ($\phi = 25^\circ$) (d) 条件C ($\phi = 30^\circ$)

図9 テーパ半角 ϕ を変えた場合の断面形状の比較

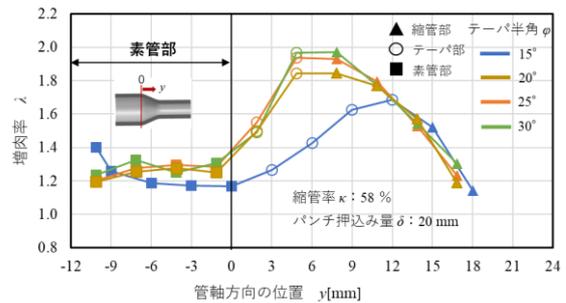


図10 縮管工程の増肉率 λ に及ぼすテーパ半角 ϕ の影響

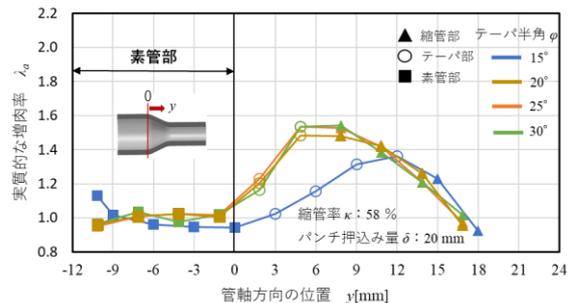


図11 縮管工程の実質的な増肉率 λ_a に及ぼすテーパ半角 ϕ の影響

4.1.6 2段階縮管

縮管率 κ が小さいほど増肉率 λ は高くなるが、小さ過ぎると素管部が増肉し、しわが発生した。そこで一度縮管率 κ の大きい条件で縮管してから、さらに小さい条件で縮管する2段階縮管を検討した。条件Eの縮管率 $\kappa = 67\%$ で増肉させ、その後さらに縮管率 $\kappa = 58\%$ の条件Cで2段階目の縮管を実施した。

図12に条件E, C, E→Cの断面形状の比較を示す。1段階縮管でしわが発生した条件Cでも2段階縮管ではしわが発生しなかった。図13と図14に増肉率 λ 及び実質的な増肉率 λ_a の分布を示す。これより、条件Eで $\kappa = 67\%$ に縮管した後に条件Cでさらに縮管すると増肉率 λ は全体的に高くなったが、条件Cの1段階縮管と比べると増肉率 λ の最大値は低くなった。しかし、1段階縮管では素管部でも増肉率 λ が高くなるため、実質的な増肉率 λ_a の最大値は2段階縮管の方が高くなった。これは、1段階縮管の縮管率 κ よりも2段階縮管の各段階における縮管率 κ の方が大きいからだと考えられる。最終的に同じ縮管率 $\kappa = 58\%$ に加工する場合でも2段階縮管E→Cは一度条件Eで

$\kappa = 67\%$ に縮管することで次の条件Cで $\kappa = 58\%$ に縮管する際の縮管率 κ を緩和できる。これにより各段階での縮管時の抵抗が小さくなるため条件Cを1段階で縮管するよりも縮管部の増肉率 λ は低下するが、素管部の増肉は抑えられる。また、2段階縮管 E→C は1段階縮管の条件Cよりも縮管部が長くなった。2段階縮管では、しわが発生しないことと増肉率 λ が低くなることで、肉が管軸方向に延ばされたからだと考えられる。以上により、2段階縮管は素管部の増肉やしわを抑制するための有効な手段と言える。



(a) 条件 E (κ = 67%) (b) 条件 E→C (κ = 67%→58%) (c) 条件 C (κ = 58%)

図 12 縮管工程における1段階縮管と2段階縮管の断面形状の比較

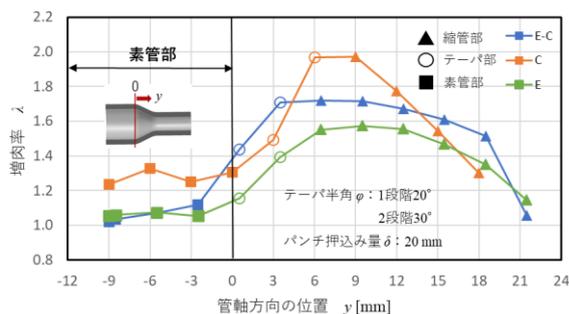


図 13 縮管工程における1段階縮管と2段階縮管の増肉率 λ の比較

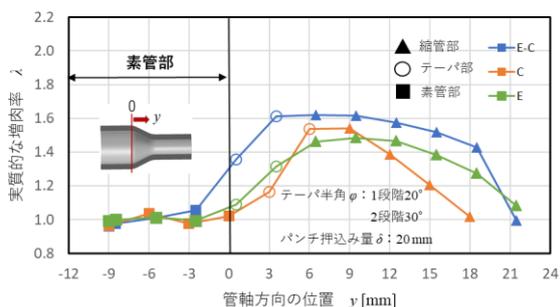


図 14 縮管工程における1段階縮管と2段階縮管の実質的な増肉率 λ_a の比較

4.2 実験結果の再現性の良い FEM 手法の検討

4.2.1 FEM 解析方法

縮管工程の変形メカニズムの詳細な検討や縮管後拡管工程における適正な加工条件を探索するため、縮管工程の実験結果をよく再現できる FEM 手法を検討した。

解析には動的陽解法の市販ソフト LS-DYNA を使

用した。図 15 に示すように、二次元の軸対称モデルで解析した。メッシュサイズは、管が 0.1 mm 角、その他は 0.3 mm 角とした。管の加工硬化特性は引張試験で得られた応力-ひずみ曲線より、Swift の式 $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$ で近似し、各定数の値は $K = 585 \text{ MPa}$, $n = 0.107$, $\epsilon_0 = 0.0626$ とした。管と各ダイとの間の摩擦係数 μ についての詳細は後述するが、ここでは一旦、二硫化モリブデン相当の 0.06 とした。

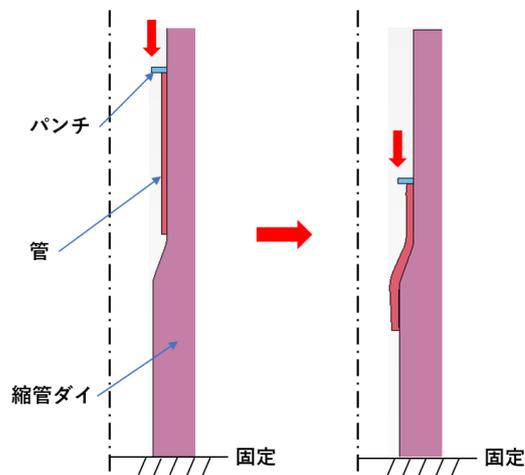


図 15 縮管工程の FEM モデル

4.2.2 実験と FEM との比較

図 16 に条件 D でパンチ押し込み量 $\delta = 20 \text{ mm}$ における縮管後の断面形状の実験結果と FEM 結果を示す。これより、全体的な形状は両者とも同様の形状であったが、縮管部の長さが、解析の方が若干短くなった。

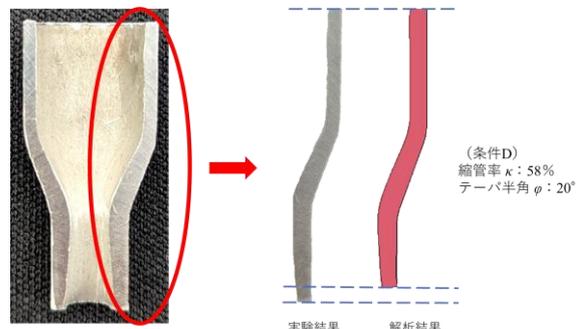


図 16 実験と解析の縮管後の断面形状の比較 ($\mu = 0.06$)

また、図 17 に実験と解析の増肉率 λ の比較を示す。これより、解析の増肉率 λ は素管部では実験値より大きくなり、縮管部では小さくなった。この原因の一つは縮管加工時のダイの変形であると推定した。すなわち、縮管の実験中、縮管部ではダイが広がり、解析よりも材料が流入しやすくなって増肉率 λ が増加したと考えた。過去の軸方向に圧縮する管端増肉法でも実験と解析で増肉率 λ に差異が生じていることが報告されている⁸⁾。その際にもダイの変形が原因と推定し、ダイを弾性体にして解析したが、実験と解析との一致は良くなかった。上下割型のダイを使用していたため、ダイの変形が想定以上に大きかったと思われる。そこで、

ダイに強制的にクリアランスを設けて解析した結果、実験の増肉率 λ に近づけることができた。しかし、今回の縮管工程で金型形状を変えると縮管率 κ が変わってしまうため、解析上で摩擦係数 μ を下げることで実験との合わせこみを検討した。図18に、摩擦係数 μ を0.03、0と仮想的に低下させた場合のFEM結果と実験結果との比較を示す。これより、摩擦係数 μ を低下すると、増肉率 λ や縮管部の長さが実験結果に近づいた。金型変形によって材料が流入しやすくなる現象が摩擦係数 μ を低下させたFEMで模擬的に再現できたとと思われる。特に摩擦係数 $\mu=0$ の方が、実験結果との一致が良かったため、以後、摩擦係数 $\mu=0$ にして縮管工程の解析を行う。

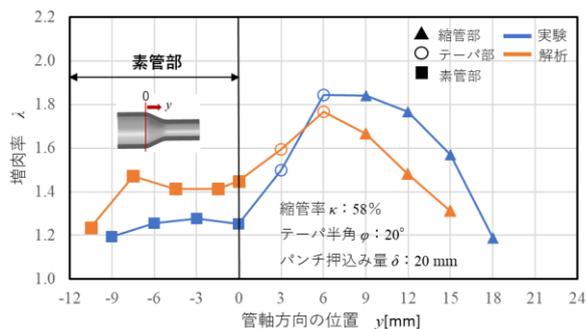


図17 縮管工程における実験と解析の増肉率 λ の比較 ($\mu=0.06$)

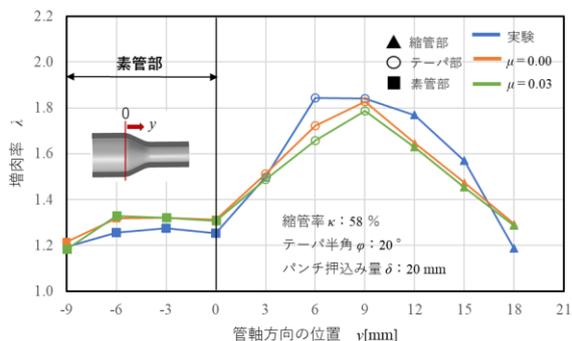


図18 縮管工程の増肉率 λ に及ぼす摩擦係数 μ の影響

4.3 FEMによる拡管加工の検討

本管端増肉加工は、縮管工程で加工した増肉部を元の素管外径に戻すため反対側から円錐状のマンデルを押し込んで拡管する。ただし、図19に示すように、解析上では縮管工程と同様に固定された円錐状マンデルに向かって管の上端からパンチで下方に押し込んでいく。

現在拡管工程の検討は開始したばかりであるが、その解析結果の一例を以下に示す。まず条件D(縮管率 $\kappa=58\%$ 、テーパ半角 $\phi=20^\circ$)で縮管加工し、その後で外径が元の外径となるように円錐状マンデルで縮管増肉部を拡管した。なお、この時の円錐状マンデルのテーパ半角 ϕ_e は 10° とした。結果を図20に示す。これより、縮管増肉された箇所が、拡管によって全長で元の外径にはほぼ戻っている。図21に縮管と縮管後拡管の増肉率 λ の比較を示す。これより、拡管によって素管部の肉厚はほとんど変わらないが、テーパ

部や縮管部では増肉率 λ が減少した。今後、縮管工程の条件も含めて各種条件を変えて解析し、最終的な増肉率 λ を向上するための適正加工方法を検討する。

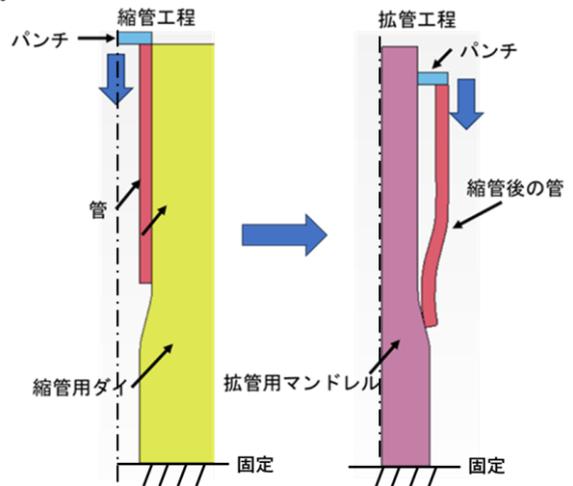


図19 縮管後拡管工程の概略図

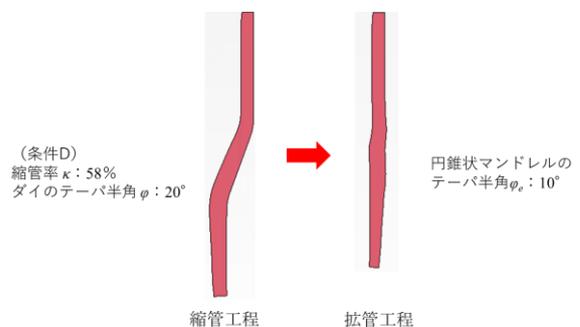


図20 縮管後拡管加工の各工程における断面形状の比較(FEM)

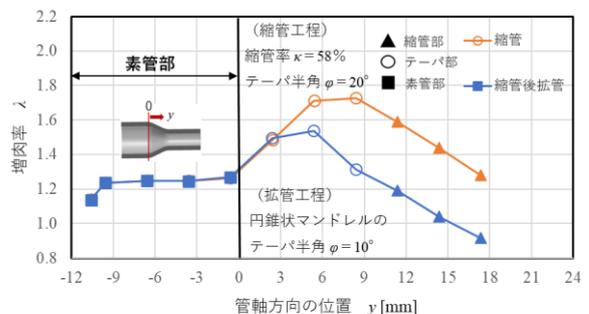


図21 縮管後の拡管による増肉率 λ の変化(FEM)

5. まとめ(結言)

縮管後拡管による管端増肉加工に関して、実験とFEM解析の両面から検討し、以下の結論を得た。

- (1) 縮管工程の実験結果より、縮管率 κ は小さいほど、増肉率 λ は増加したが、縮管率 κ が極端に小さい $\kappa=58\%$ の場合は、素管部も同時に増肉されるため、実質的な増肉率で比較すると $\kappa=67\%$ が適していた。また、ダイのテーパ半角 ϕ が大きいほど、増肉率 λ は増加したが、 $\phi=25^\circ$ を超えるとしわが発生するため、 $\phi=20^\circ$ が今回の中では最も適していた。
- (2) 縮管工程を2段階に分けると、素管部の増肉とし

わを抑制することができた。

- (3) 縮管工程では、摩擦係数 μ を小さくして解析すると実験を精度よく再現することができ、本検討では、摩擦係数 $\mu=0$ が最も適切であった。

なお、拡管工程については、今後 FEM を用いて適正な加工条件を探索し、金型を製作した後、実験による検討を進める。

6. 参考文献等

- 1) 片桐知克, ほか 12 名: 車体材料の技術動向, 自動車技術会シンポジウム, pp.46-59, 2006.7.
- 2) 真鍋健一: チューブフォーミング技術の現状と展望, ふえらむ, Vol.9, No.11, pp.777-782, 2004.8.
- 3) 片桐知克, ほか 12 名: 車体材料の技術動向, 自動車技術会シンポジウム, pp.46-59, 2006.7.
- 4) 古島剛, ほか 1 名: 鋼管の局所加熱援用ダイレス引抜きによる可変肉厚加工の可能性, CAMP-ISIJ, Vol.34, pp.20-21, 2021.9.
- 5) 峯村一輝, ほか 1 名: せん断—圧縮複合応力負荷による金属円管の局所増肉加工法の開発, CAMP-ISIJ, Vol.35, pp.50-53, 2022.9.
- 6) 三原豊, ほか 1 名: 管端アプセット変形(基本変形挙動第 1 報), ISIJ, Vol.68, No.12, pp.S1220-S1220, 1982.12.
- 7) 五島一輝, ほか 3 名: 管端部の増肉工程の削減, 第 71 回塑性加工連合講演会, pp.29-30, 2020.11.
- 8) 富原海斗, ほか 4 名: 管端増肉加工の変形挙動に関する研究, 第 73 回塑性加工連合講演会, pp.355-356, 2022.11.
- 9) 栗山幸久, ほか 18 名: チューブフォーミング—軽量化と高機能化の管材二次加工—, コロナ社, 2019.7.
- 10) 土田紀之, ほか 3 名: 鉄鋼材料の応力—ひずみ曲線, 鉄と鋼, Vol.100, No.10, pp.1191-1206, 2014.4.