

塑性加工に起因する円形鋼管の初期不整が耐荷力に及ぼす影響に関する一考察

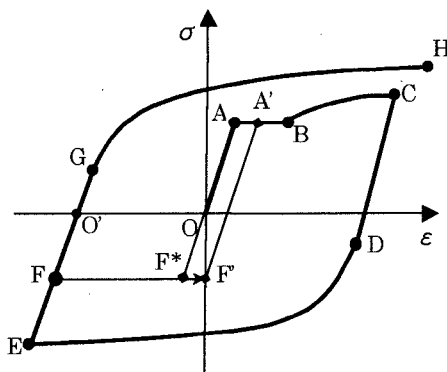
岐阜大学工学部 正員 ○村上 茂之

岐阜大学工学部 正員 奈良 敬

1. はじめに 円形鋼管は複雑な塑性加工工程を経て製作されるため、残留応力などの材料学的な初期不整が存在する。製造工程で受ける塑性ひずみが、降伏応力度の上昇のみならず材料の応力—ひずみ関係にも影響を与えることは、構成則に関して行われてきた研究^{1), 2)}からも明らかである。しかし、塑性ひずみ履歴の影響で変化した鋼材の応力—ひずみ関係の、極限強度に対する影響は明らかではない。そこで、従来から考慮されてきた残留応力に加えて、製造工程で受けた塑性ひずみを初期不整として考慮した弾塑性有限変位解析を行ない、耐荷力に対する影響について検討した。

2. 塑性加工により生じる初期不整 塑性加工により、鋼管断面に導入される初期不整として、(1) 降伏応力度の変化 (2) 管軸の残留応力・ひずみ (3) 管周方向の残留応力・ひずみ、が挙げられる。これらの初期不整量は、鋼管断面の製造寸法 (板厚、外径) や製造方法から、容易に推定できる。特に、残留応力・ひずみは、製造方法が異なれば、その分布も大きく異なることが知られている³⁾。例えば、鋼管の冷間成形と溶接行程の間に除荷が生じない電縫鋼管の残留応力・ひずみは、鋼管外縁で引張り、内縁では圧縮となる。一方、曲げ加工と溶接行程の間に除荷が生じる、比較的外径の大きなアーク溶接鋼管では、電縫鋼管とは逆に、外縁で圧縮、内縁で引張りとなるような残留応力分布をする。また、溶接による残留応力・ひずみとは異なり、塑性加工に起因する初期不整は、板厚方向で変化していることが特徴である。

3. 残留ひずみの影響 残留ひずみを考慮しない場合には、製造時の塑性ひずみ履歴の影響が考慮されず、従って初期载荷の段階ではハウシंगा一効果の影響が生じない。また、板厚方向には異なる塑性履歴を受けたにも関わらず同一の応力—ひずみ関係を用いることになる。しかし、実際には製造時の塑性加工の影響で、鋼材の応力—ひずみ関係は、板厚方向で変化しており、また初期载荷の段階からハウシंगा一効果の影響が現れる。図—1を用いて模式的に表現する。図—1の点OからA→B→C→D→E→Fを通るような塑性履歴を受けた場合を考える。この後载荷を継続した場合、実際には、応力—ひずみ関係はF→G→Hという経路をたどる。切断法などでは、一般にF→O'に至るまでに解放されるひずみが測定される。この測定ひずみから点Fにおいて内包されていた残留応力が算出される。数値解析における初期不整として、残留応力のみを考慮した場合には、点Fではなく実際には点F'を想定していることになる。従って、载荷した場合には、F'→A'→B→Cなる経路をたどることになり、降伏応力度は一致するものの、降伏棚が短くなり、先に述べた実際の挙動とは若干異なる。またこの場合、初期不整として降伏応力度の変化を考えると、実際の応力—ひずみ関係とは大きく異なる経路をたどることが容易に予測できる。



図—1 応力—ひずみ経路の概念図

一方、残留ひずみを考慮する場合には、点F*からの载荷を想定することになり、F*→O→A→B→Cなる経路をたどる。また、点Fに至るまでの塑性履歴を考慮すれば、経路F→G→Hを原点Oを通過するように平行移動することにより求められる経路をたどることになる。

4. 数値計算例 極限圧縮強度に対する残留ひずみの影響を弾塑性有限変位解析により検討した。

Model I : 初期不整を全く導入しないモデル

Model II : 予ひずみによる降伏応力度の上昇を考慮したモデル

Model III : 残留ひずみを考慮しないモデル

Model IV : 残留ひずみを考慮したモデル

解析モデルは、外径 $\phi=128.0\text{mm}$ 、板厚 $t=3.2\text{mm}$ 、管長 $L=100.0\text{mm}$ の電縫鋼管とした。製造工程で導入される初期不整（降伏応力度の上昇，残留ひずみ，残留応力）の算出方法は，文献3）に従う。なお，解析には，著者が開発した，8節点アイソパラメトリックシェル要素を用いた弾塑性有限変位解析プログラムを用いた。このプログラムには，西村らによる，繰り返し塑性履歴を受けた鋼材の構成則モデル²⁾が組み込まれている。なお，対称性を考慮し1/2モデル（軸方向16割，周方向8分割 計128要素）で解析した。境界条件は，両載荷辺を固定とした。

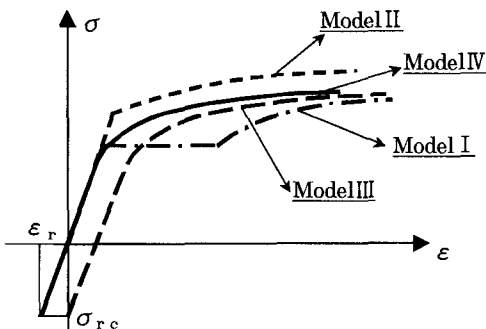
図一3に，解析結果を示す。図の縦軸および横軸は，塑性加工の影響を考慮していない降伏応力度，すなわち鋼管に成形する以前の降伏応力度および降伏ひずみで無次元化した軸圧縮応力および軸圧縮ひずみである。

Model II, III, IVにおいて圧縮強度が降伏応力度を大きく上回っているのは，塑性加工の影響により降伏応力度が上昇しているためである。また，Model IIが Model III, IVに比べて高い圧縮強度である理由は，バウシinger効果の影響を考慮していないためである。Model IIIと Model IVを比較すると，圧縮強度自体には顕著な差は認められない。しかし圧縮残留ひずみが存在した領域が，引張り残留ひずみが存在した領域に比べて早期に塑性化するため，特に降伏ひずみ近傍における応力-ひずみ関係が異なっている。

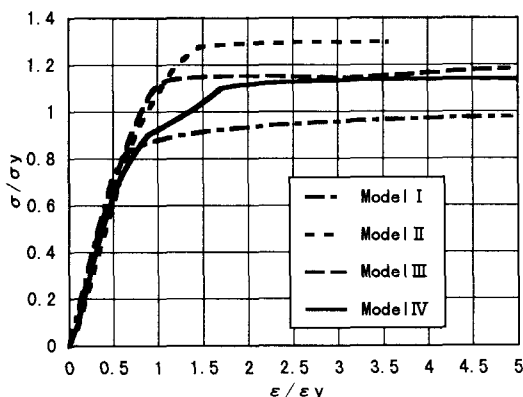
5. おわりに 塑性加工により成形される円形鋼管では，製造時の塑性ひずみ履歴を考慮した鋼材の応力-ひずみ関係を用いて極限強度解析を行うことが望ましい。この塑性ひずみ履歴の影響は，初期不整に対しては降伏応力度の上昇と残留ひずみとして考慮することができる。従来のような応力成分のみを考慮した場合と，この残留ひずみを考慮した場合とでは，塑性化の進行状況が異なるため，圧縮強度自体には顕著な差が生じないものの，極限状態に至る応力-ひずみ，あるいは荷重-変位経路において顕著な差が生じることが解析的に確認された。

【参考文献】

- 1) C. Shen, E. Mizuno and T. Usami: A generalized two-surface model for structural steels under cyclic loading, *Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol.10, No2, pp.22-33, 1993.
- 2) 西村宣男, 小野潔, 池内智行: 単調載荷曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式, 土木学会論文集, 第513号, pp.27-38, 1994.
- 3) (財) 災害科学研究所: 鋼管の製作・製造工程による鋼材特性の変化と部材圧縮強度への影響, 平成9年, 2月.



図一2 応力-ひずみ関係の模式図



図一3 鋼管短柱の応力-ひずみ関係の比較