

円形鋼管曲げ座屈終局耐力の実験資料

—追加実験と既往の実験結果

正会員○越智健之

1. はじめに 日本国内においては冷間成形材が主に構造用鋼材として用いられているが、欧米では冷間成形の後に熱間工程(Stretch reducing mill)により冷間成形前と同等の素材特性に戻している。この工程は経済的な側面から再検討が行われており、欧米においても一部のメーカーによって冷間成形材が製造され、熱間成形材と冷間成形材の優劣について議論が始まっている。

曲げ座屈終局耐力については多くの研究がある。冷間成形材と熱間成形材の違いについては、Eurocode 3において、角形鋼管部材の成形後の平均降伏応力を曲げ座屈耐力の設計に使用することが可能となっている。しかし、円形鋼管部材については明快な規定はなく、実験資料に基づいた十分な検討がなされていない。

冷間成形鋼管は成形時に受ける塑性加工の影響から、構造要素としては熱間成形材よりも劣るとされている。しかし、降伏応力が高いことは構造要素として不利な要因とはならず、最近になって注目されている降伏比の問題も定量化までには至っていない。ここでは、冷間成形材を用いた場合に、塑性加工によって生じる残留応力やひずみ硬化の影響が顕著にあらわれる中心圧縮柱の最大耐力に関する実験資料を設計基準と比較することにより、冷間成形材と熱間成形材の違いについて考察する資料を与える。また、既往の実験のみでは不十分な実験資料の領域があるために、追加実験を行っている。

2. 実験 追加実験は欧州で製造されている円形鋼管(外径89.3mm,厚さ3.2mm)を用いた。実験は36本の長柱と素材試験としてそれぞれの材料から採取した短柱圧縮試験と引張試験を行った。実験変数は曲げ座屈終局耐力に関係すると考えられる製造方法と鋼種および細長比としている。材料は冷間成形材(CF)と熱間成形材(HF)を用いて、それぞれにEurocode 3で定められている鋼種の43Cおよび50Cを使用している。細長比 L/r は46,69,92とし、曲げ座屈の耐力の違いが如実にあらわれるように比較的細長い部材としている。

2. 1. 引張試験 試験装置はZwickの材料試験専用の試験機を用いて、変位制御により破断までの平均応力-ひずみ関係を自動測定した。試験片はBS(British Standard)に準じて作成し、一断面から3本の試験片を採取している。応力-ひずみ関係の代表的な例を図1.に示す。冷間成形材では非線形性が熱間成形材よりも強くあらわれている。熱間成形材はひずみの小さい領域で弾塑性型の挙動を示している。引張試験結果の特性値を表1.に示す。ただし、この数値は同一鋼種についての平均値であり、後に使用する各部材の特性値とは異なる。表1.によれば、同一鋼種で比較すると冷間成形材が熱間成形材に比較して降伏応力が高く、引張強さには製造方法による違いがあらわれていない。冷間成形材の破断伸びは熱間成形材よりも小さい値であるが、その違いは2%程度である。

2. 2. 短柱圧縮試験 試験機はMannの柱試験装置を用いて、平押し条件下で変位制御により载荷した。試験体長さは外径の3倍とし、材軸方向中央部にひずみゲージを4枚貼付した。また、変位計により軸長さの変化を測定している。

すべての実験はちょうちん型の局部座屈を生じて断面耐力が低下した。平均応力-平均ひずみ関係を図2に示す。引張試験結果と比較して熱間成形材は非線形性があらわれており、この原因には残留応力の影響が考えられる。耐力の低下を始めるひずみは冷間成形材と熱間成形材には大きな違いがあり、変形性能には両者に大きな違いがあることがわかる。

2. 3. 長柱試験 試験装置はMannの柱試験装置を用いて両端のピンはローラ形式の特殊治具を作成した(図3.)。実験結果の例を図4.に示す。製造方法による終局耐力の違いは大きく、終局耐力には終局耐力以前の挙動が影響するために、冷間成形材の非線形性がその違いの要因である。終局耐力については素材の平均応力-ひずみ関係を与えた古典解が実験値とよく一致している。その方法に必要な圧縮の平均応力-ひずみ関係はRamberg-Osgood式を変形した式を用い

熊本大学・助教授・学博

て応力-ひずみ関係における0.1% offset値と0.2% offset値を通るように近似した。この方法は冷間成形材と熱間成形材の両者とも同じである。近似結果を図5. に示す。近似結果は冷間成形材と熱間成形材の両者とも良好である。ただし、これは図5. に示したような曲げ座屈耐力に関係するひずみの小さい領域における比較であり、降伏棚やひずみ硬化領域の存在する熱間成形材では、1本の曲線でひずみの大きな領域までは近似できない。

この近似結果を使用したTangent modulus modelの曲線を図6. に示す。冷間成形材と熱間成形材の実験結果をあわせて示している。冷間成形材の実験値に対してモデルの曲線はよく一致しており、実験値自体の分散も小さい。熱間成形材に対しては下限に近い値となり、実験値の分散も大きい。

2. 4. 実験資料 文献1)において行った実験資料の収集結果に、高強度材料を用いた実験2)を加えた。実験資料の原本は文献1)の参考文献に掲げてある。冷間成形STK41相当の部材については、その応力-ひずみ関係の一般モデルの提案および曲げ座屈耐力の変動を説明するモデルの提案をすでに行っている。ここでは主に、熱間成形材と高強度部材の実験資料について考察する。

冷間成形STK41相当の材料を用いた実験を図7. に、熱間成形あるいは熱処理のSTK41相当の材料を用いた実験を図8. に、冷間成形材のSTK41材よりも鋼種の高い材料(STK50, STKT55, STKT60, HT80)を図9. に、高い鋼種の実験結果で熱間成形材料あるいは熱処理材の実験を図10. に示している。それらの図において(a), (b), (c)は引張の降伏応力 $\sigma_{y,t}$, 圧縮の降伏応力 $\sigma_{y,c}$ および公称の降伏応力 $\sigma_{y,n}$ をそれぞれ用いた無次元化細長比 λ' とそれぞれの降伏応力 σ_y に対応する降伏軸力 N_y を用いて無次元化している。また、図7. ~10. 中の曲線はEurocode 3に示される曲げ座屈耐力の設計曲線である。

図7. ~10. の(a)は引張の降伏応力を縦軸、横軸の計算に用いている。引張の降伏応力は公称の降伏応力を定める場合に、重要な数値であり、基礎的な比較である。また、豊富な実験資料に基づいてその統計的な性質も把握している。それらの図によれば、冷間成形鋼管は曲線dを下回る実験値もあり、設計曲線との

対応は良くない。その現象は、鋼種に関係がない。熱間成形された材料では曲線aを上回る実験結果が多く、冷間成形材との違いは顕著である。

図7. ~10. の(b)は無次元化に短柱圧縮試験の降伏応力を用いている。これは前述のTangent modulus modelに用いた応力-ひずみ関係が短柱の圧縮試験結果を近似したものであることから考えて、この降伏応力を用いることは物理的な意味がある。そのために、(a)図と比較して、座屈曲線との対応もまとまりがある。冷間成形材では鋼種によらず、実験値の下限値は曲線cに近い。熱間成形材のすべての実験値は曲線aを超えている。

図7. ~10. の(c)図は公称の降伏応力を用いて縦軸、横軸を計算している。本来、Eurocode 3の座屈曲線は公称の降伏応力を用いた場合に実験値と比較できるものである。これらの図から冷間成形材の実験結果は曲線bを上回り、熱間成形材の実験結果は曲線aを上回ることがわかる。

3. まとめ 製造方法、鋼種および細長比を変数として中心圧縮柱の実験を行った。既往の実験結果を含めて、無次元化した耐力をEurocode 3の座屈耐力設計曲線と比較した。熱間成形鋼管では比較したすべて変数において実験値は曲線aを上回り、冷間成形材との違いがあらわれた。これらの比較は鋼種の違う場合においても同様であった。ただし、熱間成形の材料は実験資料が冷間成形材に比較して乏しい。そのため、追加実験あるいは、解析的な考察が必要である。

謝辞 実験は連合王国のNottingham大学で行った。著者の連合王国における滞在経費はBritish Councilが支給した。実験に関する費用はNottingham大学が負担した。実験に使用した材料はBritish SteelとN G Tが提供した。実験に際してはB.S.Choo博士の援助を得た。実験結果をまとめる際にはD.A.Nethercot教授の助言を受けた。ここに記して関係諸氏に感謝の意を表します。

参考文献 1) 越智健之、黒羽啓明：冷間成形円形鋼管部材の耐力と変形能の統計的評価、日本建築学会構造系論文報告集、第391号、pp.59-71,1988.9

2) 高梨晃一、福島暁男、小松 博、嶋脇典助、桑村仁：高張力鋼中心圧縮材の曲げ座屈耐力、構造工学論文集、Vol.37B, 1991.3

表 1. 素材試験の特性値 (平均値)

Name	Forming	Steel grade	Tensile Test			Stub Column σ_y (MPa)
			σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	EL (%)	
HF43	Hot Finished	43C	311	485	38.6	287
HF50	Hot Finished	50C	389	544	36.3	378
CF43	Cold Formed	43C	390	489	35.3	334
CF50	Cold Formed	50C	428	496	33.6	370

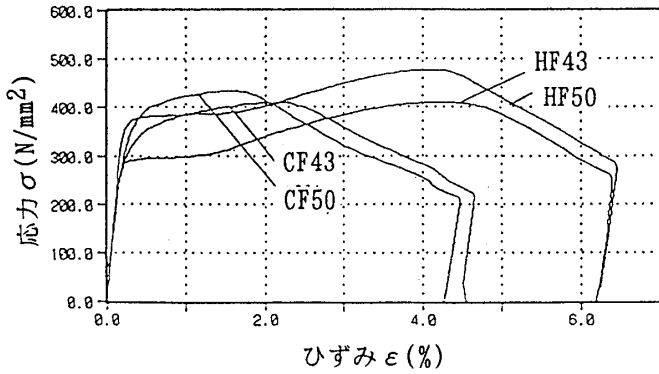
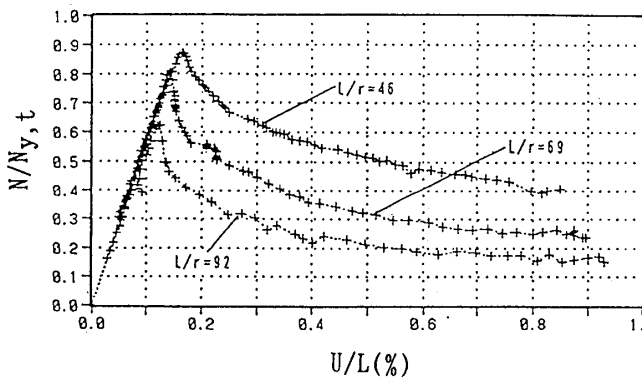
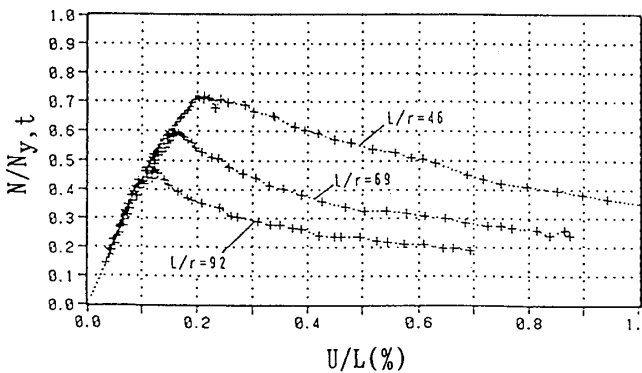


図 2. 圧縮試験結果



(a) HF43



(b) CF43

図 4. 実験結果

$N_{y,t} = \sigma_y A$ σ_y = Tensile Yield Stress
 U = Axial Deformation L : Column Length

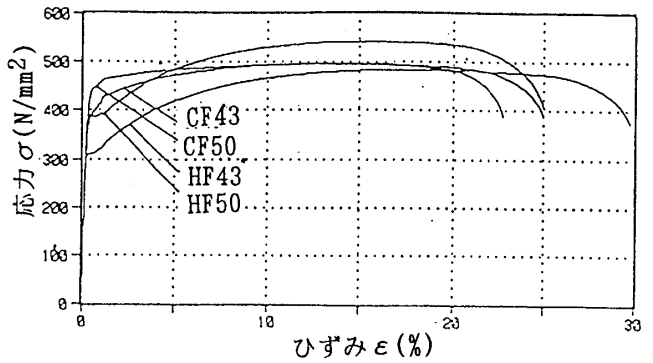


図 1. 引張試験結果

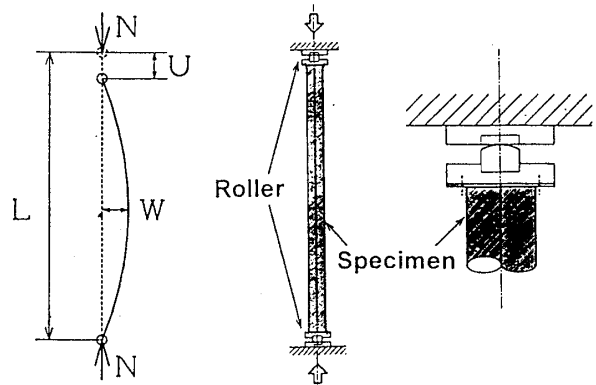


図 3. 試験装置概要

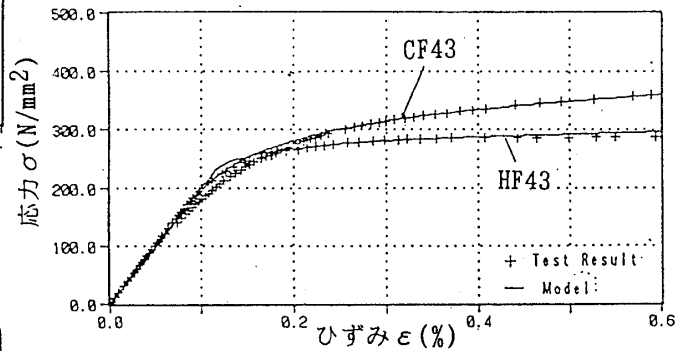
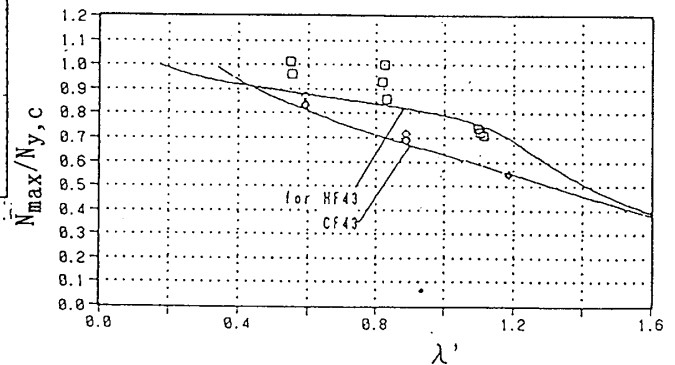


図 5. 短柱圧縮試験の応力-ひずみ関係と近似結果



$N_{y,c} = \sigma_y A$ σ_y = Yield Stress of Stub Column Test
 □ HF43 ◇ CF43 — Tangent Modulus Curve

図 6. 終局耐力と無次元化細長比の関係

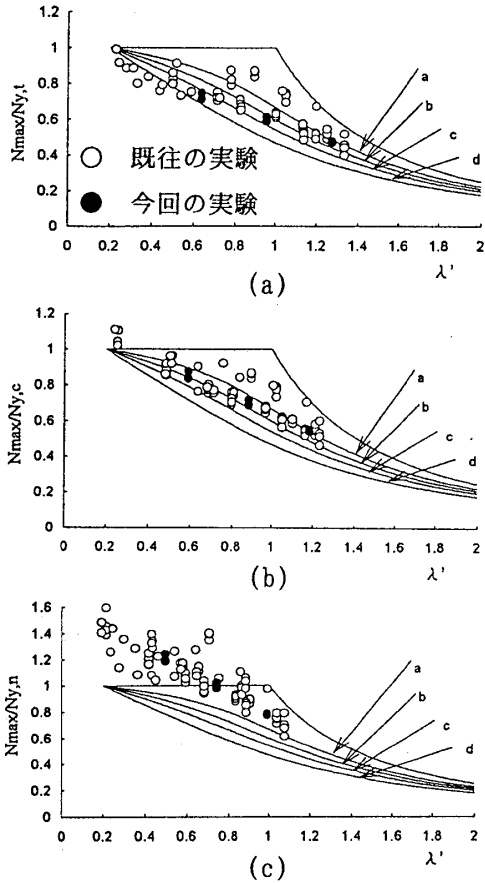


図7. 終局耐力と無次元化細長比の関係 (STK41, 冷間成形材)

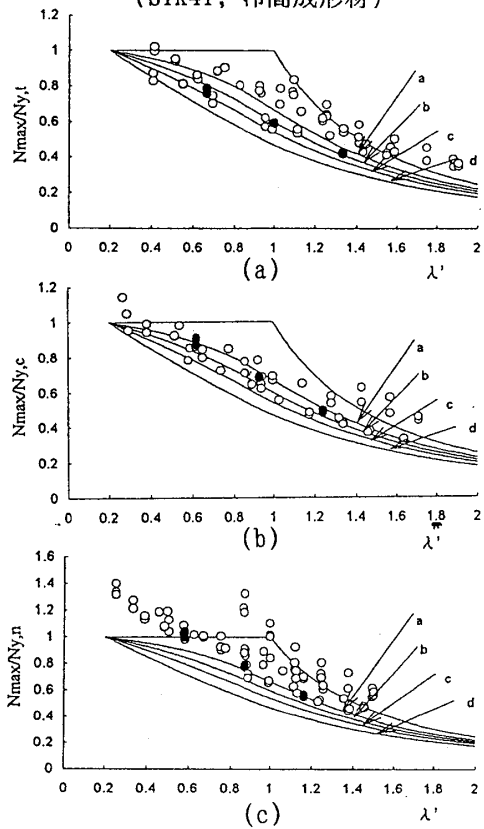


図9. 終局耐力と無次元化細長比の関係 (高強度, 冷間成形材)

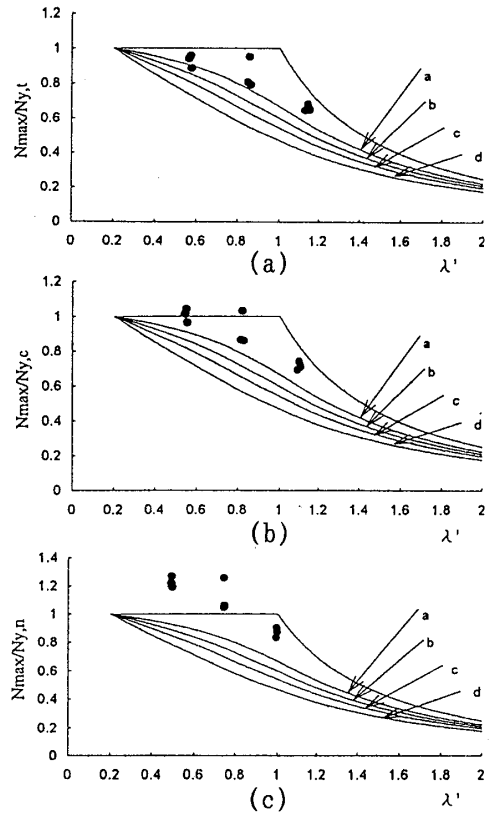


図8. 終局耐力と無次元化細長比の関係 (STK41, 熱間圧延材)

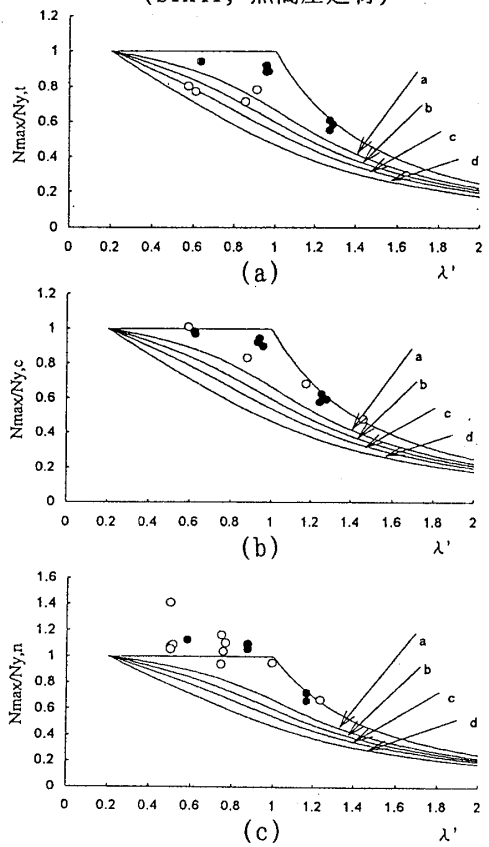


図10. 終局耐力と無次元化細長比の関係 (高強度, 熱間圧延材)