九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

# 軸力と水平力を受ける鉄骨系柱材の弾塑性挙動に関 する研究

津田, 惠吾

https://doi.org/10.11501/3070078

出版情報:九州大学, 1993, 博士(工学), 論文博士 バージョン: 権利関係:

# 第4章 一定軸力と変動水平力を受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動

### § 4.1 序

前章では、円形鋼管柱が一定軸力と変動水平力を受ける時の弾塑性性状について述 べ、径厚比が大きい円形鋼管柱は局部座屈により全塑性モーメントを期待出来ないこ ともあることを示した.本章では、同じく閉鎖型断面である角形鋼管を対象とし、角 形鋼管柱材の弾塑性性状についてのべる.角形鋼管は1981年に改訂された新耐震設計 法で、層間変形角の確認をする必要が出来てから、急速に柱材として使用されるよう になってきている.また、角形鋼管は2方向に対して、剛性、耐力が等しいため、従 来のH形鋼を柱材に使っていたときのように弱軸方向にプレースをいれる必要がなく、 平面計画上の自由さもあり、現在では鋼構造の柱材として一般に使用されている.

本章での研究目的は局部座屈現象を支配する幅厚比と柱の軸力比をおもな実験変数 にとり、一定軸力と変動水平力を受ける角形鋼管片持ち柱の実験を行うことにより、 1)耐力、変形能力に及ぼす幅厚比、軸力比の影響を調べること、2)断面の曲げ耐 力の評価方法を示すこと、また3)塑性設計で使われている柱材の設計式<sup>4.1)</sup>の妥当 性について検討することである.

角形鋼管に関係する既往の研究としては,角形鋼管の機械的性質を調べたものとし て,五十嵐・辻岡ら<sup>4,2),4,3</sup>)は冷間成形角形鋼管に対して,残留応力,断面各部の 強度を測定し管軸方向で外面は引張,内面は圧縮,管周方向では,外面圧縮,内面引 張の残留ひずみがあること,溶接部,角部の降伏応力,引張り強さは平板部よりも大 きくなっていることを示している.同様な実験結果を田淵・金谷ら<sup>4,4)</sup>も示している. 加藤・青木ら<sup>4,5),4,6)</sup>は角部の降伏応力度は平板部より40~50%程度大きくな っており,また角部での引張り強さ時のひずみはコイル原板の1~2割しかないこと を示している.また,残留応力を測定し管軸方向の残留応力が管周方向よりも大きく, 降伏応力度の半分程度あることを示している.加藤・青木<sup>4,7)</sup>,辻・北川<sup>4,8)</sup>らは冷 間成形角形鋼管の製造過程をモデル化し,解析的に残留応力を求め断面の板厚方向の 残留応力分布は単純な3角形や長方形分布とはならず複雑な分布となることを示している.

圧縮材に対しては、加藤・西山<sup>4.9),4.19)</sup>は角形鋼管の局部座屈耐力、変形能力の 予測式を実験的に求めている。川島・西村<sup>4.11)</sup>、森脇・榊原ら<sup>4.12)</sup>は3種類の製法 の異なる角形鋼管の残留応力を測定し、残留応力の影響を考慮した柱曲線を求めてい る。加藤・李<sup>4.13),4,14)</sup>は冷間成形角形鋼管の座屈実験および数値解析により、非 焼鈍材はSSRCのカーブ2でよい一致を示すことを示している。辻・北川<sup>4.15),4.</sup> <sup>16)</sup>は冷間成形角形鋼管材の製造過程における塑性加工履歴の影響を考慮して 座屈挙 動解析を行っており、また座屈実験を行っている。

曲げ材あるいは柱材の性状を調べたものとして,加藤・秋山ら<sup>4.17)-4.19)</sup>は4枚 の鋼板を溶接して製作した角形鋼管柱に対して,短柱圧縮試験,曲げ試験,一定軸力 下での曲げ試験を行うことにより,荷重-変形関係を与える実験式を提案している. また、冷間成形角形鋼管に対して短柱圧縮試験、曲げ試験を行うことにより、荷重-変形関係の実験式を示している<sup>4.28)</sup>. 鈴木・酒井ら<sup>4.21)-4.23)</sup>も鋼板を溶接により 組み立てた角形鋼管に対して一定軸力の下で曲げ試験を行い、軸力比、細長比が挙動 に及ぼす影響を調べ、また塑性変形を改善するために、塑性ヒンジ部および全長を補 強した角形鋼管の実験を行っている.山田・辻ら<sup>4.24)-4.28)</sup>,山田・河村ら<sup>4.29)-4</sup> <sup>-34)</sup>, 辻・北<sup>4.35)</sup>は一定鉛直荷重の下で複曲率曲げを受ける冷間成形角形鋼管の実 験を、幅厚比、軸力比、変位振幅を実験変数にとり行い、弾塑性性状を検討している. 五十嵐,辻岡ら<sup>4.36)-4.39)</sup>は、等曲げ、一定軸力と等曲げ、片持ち柱の柱頭にせん 断力を載荷する実験を幅厚比等を実験変数として行い、弾塑性性状に及ぼす実験変数 の影響を検討している.また、角形鋼管柱材の変形能力に着目した研究として、三谷 ら<sup>4.40</sup>)は既往の実験結果より変形能力を推定する実験式を提案し、加藤<sup>4.41)</sup>は短柱 圧縮試験の統計的評価値に基づき、幅厚比と部材の変形能力の関係式を求め、実験値 と比較している.

しかしながらこれらの研究は比較的幅厚比が小さい範囲の角形鋼管を用いたものが 多く、また本章で目的とする角形鋼管柱の耐力や変形能力に及ぼす幅厚比、軸力比の 影響や、幅厚比制限値を超える断面を含めた角形鋼管の耐力評価方法、柱材の設計式 の妥当性については明らかにされているとは言えない.以上のことから、本章では幅 厚比と柱の軸力比を主な実験変数にとり、載荷実験を行うことにより上述の研究目的 に対する検討を行う.また、局部座屈後挙動を追跡するための解析を、三谷ら<sup>4.431</sup> がH形鋼柱材に対して行った極限解析を適用し、行った.

# §4.2 実験

# 4.2.1 実験計画

ー定鉛直荷重の下で,変動水平力を受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動を調べるために, (1)角形鋼管の板要素の幅厚比B/t(B:鋼管の全幅,t:板厚)

: 22, 25, 31, 33, 47, 58,

60, 75, 94

(2)軸力比n(=P/Py, P:一定鉛直荷重, Py:柱断面の降伏軸力)
 :0.1, 0.3, 0.45, 0.5, 0.6

を実験変数として,実験計画をたてている.試験体数はこれらの変数を組み合わせて, 合計38体の実験を行った.なお,降伏軸力Pyは角形鋼管の断面積に降伏応力度を 乗じて求めた.

実験条件を表4.1に示す.同表における試験体名は,実験条件を表し,最初の2 桁の数字で角形鋼管の幅厚比を,最後の数字で軸力比を10倍した値を示している. 試験体名の最初にHがついている試験体は高張力鋼鋼板より製作した角形鋼管試験体 であることを示す、試験体名の最後にCがついている試験体は繰返し加力を行ったも のであり、Aのついたものは焼きなましを行っている.また、Dのついた試験体は鋼 管の溶接シーム部がフランジ面となるように設置したものである.なお,No.27 ~38の試験体は次章のコンクリート充塡鋼管柱の幅厚比制限値に関する研究に対し て実験されたものである。

表中の(2)および(3)はそれぞれ, 鋼構造設計規準4.42)(以下規準)の幅厚 比制限値と鋼構造塑性設計指針4.1)(以下指針)の幅厚比制限値である(本論文では, 角形鋼管の幅厚比を鋼管全幅/板厚と定義している。規準の幅厚比制限値は角形鋼管 の平板部分に対して規定されているが、本論の幅厚比と対応させるために、鋼管隅角 部の円弧部の半径が板厚中心で板厚tの1.5倍であることより、値4を加えている) この表より、規準の制限値を満足する幅厚比は22,25,31,33のもの、指針 の幅厚比制限値を満足するのは幅厚比が22のものであることがわかる.

(3):指針の幅厚比制限値 表4.1 実験条件と鋼材の機械的性質 σy:降伏応力度 λ:細長比(2ℓ/i;ℓは材長, iは細長比)

(1):公称幅厚比 (2):規準の幅厚比制限値

σu:引張り強度 Y:降伏比 εu:伸び

|  |  |                  |                        | Est:ひずみ硬化開始時のひずみ度 |                  |            |  |                |                |                |                |              |              |  |  |  |
|--|--|------------------|------------------------|-------------------|------------------|------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--|--|--|
| No.  | 試験体  | 公称<br>幅厚比<br>(1) | 74<br>1 0 y + 4<br>(2) | (1)<br>(2)        | 47<br>√σy<br>(3) | (1)<br>(3) | 触力比<br>n   | 細長比入           | σy<br>(t/c∎²)  | συ<br>(t/c∎²)  | Υ<br>(σy/σu)   | е и<br>(%)   | e st<br>(%)  |  |  |  |
| 1<br>2<br>3  | 221<br>223<br>225  | 22. 2            | 41. 3                  | 0. 53             | 23.7             | 0. 94      | 0. 1<br>0. 3<br>0. 5   | 37.8           | 3. 93          | <b>4</b> . 30  | 0. 92          | 20.6         | 1. 08        |  |  |  |
| 4 5 6 7  | 251 (1)<br>251 (2)<br>253<br>253C  | 25. 0            | 38. 3                  | 0. 65             | 21.8             | 1. 15      | 0. 1<br>0. 1<br>0. 3<br>0. 3   | 25. 1          | 4. 65          | 5. 27          | 0. 88          | 15. 0        | 2. 39        |  |  |  |
| 8<br>9   | 311<br>313   | 31. 2            | 39. 8                  | 0. 78             | 22. 7            | 1. 37      | 0. 1<br>0. 3   | 37. 5          | 4. 28          | 4. 83          | 0. 89          | 20. 2        | 2. 39        |  |  |  |
| 10<br>11<br>12<br>13<br>14<br>15                               | 331<br>333<br>335<br>331C<br>333C<br>335C  | 33. 3            | 38. 9                  | 0.85              | 22. 2            | 1. 50      | 0. 1<br>0. 3<br>0. 45<br>0. 1<br>0. 3<br>0. 45                                       | 24. 9          | 4. 49          | 5. 12          | 0. 88          | 17. 7        | 2. 70        |  |  |  |
| 16<br>17<br>18<br>19<br>20<br>21<br>22<br>23<br>24<br>25<br>26 | 471<br>473<br>473D<br>475<br>476<br>471A<br>473A<br>475A<br>471C<br>473C<br>473C<br>476C | 46. 9            | 44. 7                  | 1. 04             | 25. 8            | 1. 82      | 0. 1<br>0. 3<br>0. 5<br>0. 6<br>0. 1<br>0. 3<br>0. 5<br>0. 1<br>0. 3<br>0. 3<br>0. 6 | 24. 7          | 3. 31          | 4. 74          | 0. 70          | 27. 1        | 0. 85        |  |  |  |
| 27<br>28   | 471<br>473   |                  | 41.6                   | 1. 12             | 23. 9            | 1. 96      | 0. 1<br>0. 3   | 24. 9          | 3. 87          | 4. 88          | 0. 79          | 19.0         | 1. 40        |  |  |  |
| 29<br>30   | <b>6</b> 01<br>603   | 60. 0            | 41. 3                  | 1. 45             | 23.7             | 2. 53      | 0. 1<br>0. 3   | 24. 7          | 3. 94          | 4. 59          | 0. 86          | 21. 5        | 1.97         |  |  |  |
| 31<br>32   | 751<br>753   | 75. 0            | 42. 9                  | 1. 74             | 24. 7            | 3.04       | 0.1<br>0.3   | 24. 7          | 3. 62          | 4. 42          | 0. 82          | 22. 9        | 1.68         |  |  |  |
| 33<br>34   | 941<br>943   | 93. 8            | 42. 9                  | 2. 18             | 24. 7            | 3. 80      | 0. 1<br>0. 3   | 24. 7          | 3. 63          | 4. 54          | 0. 80          | 26. 3        | 1.72         |  |  |  |
| 35<br>36   | H-471<br>H-473   | 46. 9            | 37.0                   | 1. 27             | 21. 1            | 2. 22      | 0. 1<br>0. 3   | 24. 9          | 5. 03          | 6.09           | 0. 83          | 16. 3        | 0. 85        |  |  |  |
| 37<br>38   | H-581<br>H-583   | 57.7             | 37. 2                  | 1. 55             | 21.0             | 2. 75      | 0. 1<br>0. 3   | 24. 9<br>25. 1 | 4. 97<br>4. 96 | 6. 16<br>6. 15 | 0. 81<br>0. 81 | 17.6<br>16.6 | 1.10<br>1.05 |  |  |  |

-57-

# 4.2.2 試験体

試験体は,前章と同様に骨組が水平力を受けるときの柱材の反曲点と材端の間を抽 象化したもので,一端固定,他端自由となる片持ち柱である.

試験体に用いた角形鋼管は、公称断面せい(D)および幅(B)が100mm(B/ t=22,31)または150mm(B/t=25,33,47,58,60,75, 94)である。板厚tは6mm(B/t=25),4.5mm(B/t=22,33), 3.2mm(B/t=,31,47),2.6mm(B/t=58),2.5mm(B/t =60),2.0mm(B/t=75),1.6mm(B/t=94)の7種類である。

幅厚比が22,25,31,33の角形鋼管は市販の電縫鋼管であり,幅厚比が4 7,58,60,75,94のものは鋼板から溝形断面を成形し,つぎに一対の溝形 断面を突合せ溶接することによって制作した.いずれも,鋼管角部の円弧部は板厚中 心の半径が板厚の1.5倍である.熱処理は行っていないものを基準としたが,幅厚 比が47の角形鋼管については,焼きなましを行った試験体3体を含めている.

図4.1に試験体の形状・寸法を示す.試験体の上端部には,試験体を球座に取り 付けるため,下端部には,試験体を加力装置に固定するために鋼板を溶接している. 固定端と球座の中心までの距離は75cmである.

各試験体の実験条件および鋼材の機械的性質を表4.1に示す.鋼材はJIS1号 引張試験片3本の平均値である.



図4.1 試験体

# 4.2.3 加力装置および加力方法

加力装置を図4.2に示す.これは第3章の装置と全く同様である.実験は,鉛直 荷重Pを試験体に500tアムスラー型試験機で加え,一定に保持したあとにオイル ジャッキで準静的に水平力Hを加えた.試験体の柱脚部は支持ビームにPC鋼棒を用 いて固定されている.水平力の載荷方法は,単調加力用の試験体には,加力装置の能 力の範囲内あるいは試験体に載荷した軸力が維持できる限りできるだけ大きい水平変 位を与えた.繰返し載荷用の試験体は,柱部材角( $\delta / \varrho$ )で制御し,まず部材角± 1 / 150の一定振幅で水平力を4サイクル加えた.その後,変位振幅を4サイクルごとに1 / 150づつ増加させた.ただし,抵抗力が低下し始めた変位振幅では,その変位振幅で抵抗力が50%程度低下するまで繰返し水平力を与えた.なお,試験体のセットは鋼管の溶接シーム部分がウェブ位置となるように設置したが,表4.1の473D(No.18)のみは,溶接シーム部分がフランジ位置となるように設置した.

# 4.2.4 測定方法

鉛直荷重 P は試験機の計測部,水平力H はジャッキ先端部にとりつけたロードセル で測定した.水平変位 δ は,支持ビームと加力盤の相対変位を支持ビーム上に設置し た変位計で計測した.



図4.2 加力装置

# 4.2.5 実験結果

(1)単調挙動 図4.3に単調載荷を受ける試験体の水平力(H) - 水平変位 (δ)関係を示す.(a)~(m)の各図には同じ幅厚比で軸力比が異なる試験体の 結果を示している.図中に視察により確認したウェブおよびフランジの座屈発生点を 記号f,wで示している.また,一点鎖線で剛塑性崩壊直線を示す.剛塑性崩壊直線 は,前章と同様に柱脚部に塑性ヒンジが生じるとして求めた.塑性ヒンジ点での曲げ モーメントMpcは次式で求めた.なおMpcの算定には角形鋼管隅角部の円弧部分は直 線に置換している.

塑性中立軸がウェブ内にあるとき、

 $Mpc = B \cdot t \cdot (D - t) \cdot \sigma y + 2 \cdot (x n - t) \cdot (D - t - x n) \cdot t \cdot \sigma y$  (4. 1)

ただし、中立軸位置を表す xn(圧縮側最外縁から中立軸までの距離)は次式で与えられる.

$$x_{n} = \frac{P + 2 \cdot \sigma y \cdot D \cdot t}{4 \cdot t \cdot \sigma y}$$
(4.2)

塑性中立軸がフランジ内にあるとき

 $Mpc = B \cdot (D - xn) \cdot xn \cdot \sigma y \qquad (4.3)$ 

 $xn = P / (2 \cdot \sigma y \cdot B) - t \cdot (D - 2 \cdot t) / B + (D - t) (4.4)$ 

ここで, B:角形鋼管の幅, D:鋼管のせい, t:鋼管の板厚, σy:鋼管の降伏応 力度, である.

試験体251(1), (2)は柱脚の溶接熱影響部に亀裂が発生し,抵抗力を失っ た.その他の試験体は,柱脚部にフランジの座屈が発生し,それに引き続くウェブの 座屈のあと抵抗力の低下が生じた.軸力比が大きくなるほど,抵抗力の低下は小さい 変位で生じ,耐力後の抵抗力の低下も大きいこと,またフランジ,ウェブが座屈する ときの変位が小さいことがわかる.剛塑性崩壊直線と実験結果の関係は,軸力比,幅 厚比が大きくなるにつれて剛塑性崩壊直線が示す耐力に到達しにくくなることがわか る.

亀裂が生じなかった試験体に関しては、幅厚比の違いによって局部座屈の発生点と 水平力-水平変位関係の間におおむね以下の3種類の関係が観察される. a)幅厚 比が小さい角形鋼管(幅厚比B/t=22, 25)はフランジの座屈からウェブの座



図4.3 水平力(H) - 水平変位(δ)関係(つづく)



図 4.3 水平力(H) -水平変位(δ)関係(つづき)

屈まである程度の塑性変形をして抵抗力が低下する. b)幅厚比が31,33,4 7の角形鋼管はフランジが局部座屈したあと、ウェブの局部座屈がすぐに、あるいは 同時に生じて急激な抵抗力の低下が生じる. c)幅厚比が58を超える角形鋼管で は、フランジの局部座屈が小さい変形で生じ、その後多少の抵抗力の上昇が起こった のち、ウェブの座屈で急激に抵抗力が低下する.

以上の事は、幅厚比が小さいとき(幅厚比22,25)にはフランジが局部座屈し た後のフランジの抵抗力の低下が少なく、ウェブが負担する圧縮力の大きさに大きな 変化がないことによりウェブの座屈までにある程度変形をすることが出来、幅厚比が 33,47程度の板要素ではフランジが座屈した後のフランジ板要素の抵抗力低下が 激しく、ウェブに急激に圧縮力が作用することによりウェブもすぐに局部座屈したも のと考えられる.幅厚比が60以上の試験体では、後述するようにほぼ弾性域で座屈 を生じており、板の座屈後耐力で抵抗力が上がったあと、ウェブの座屈で抵抗力が低 下するものと考えられる.

局部座屈の波形はフランジ面とウェブ面が交互に凹凸になるモードであった.

(2) 繰返し挙動

図4.4に繰返し載荷を受ける試験体の水平カー水平変位関係を示す.図4.3と 同様にf,wでフランジおよびウェブの局部座屈が発生した点を示している.繰返し を受ける試験体も、単調挙動と同様に、フランジの局部座屈、ウェブの局部座屈が発 生し、抵抗力の低下が生じた.ウェブの局部座屈発生が観察された時点より抵抗力の 低下が顕著となることが、観察される.

幅厚比が小さい試験体(253C),あるいは軸力比が小さい試験体(331C) では、抵抗力の低下が生じる変位振幅は $\delta = 1$ .5 cm(柱部材角 $\delta / \ell = 3 / 15$ 0)であるのに対して、幅厚比が大きい、または軸力比が大きい試験体では $\delta = 1$  c m( $\delta / \ell = 2 / 150$ )とより小さい変位振幅で抵抗力の低下が生じている.

剛塑性崩壊直線の示す耐力には幅厚比が33の試験体までが到達し,47の試験体 は到達できていない。



-63-

# §4.3 局部座屈後挙動の解析

# 4.3.1 解析モデルと解析仮定

本節では、軸力と単調水平力を受ける角形鋼管柱が局部座屈を生じたあとの挙動を 予測するための局部座屈崩壊形を仮定した極限解析を行う. 三谷ら<sup>4,43</sup>,4 H形鋼 柱に対して局部座屈後の挙動を解析しているが、本節の解析はフランジの崩壊形の仮 定の違いを除けば、三谷らの解析と同様である.

軸力と変動水平力を受け、局部座屈した状態を図4.5に示すようにモデル化する。 問題は「塑性ヒンジの抵抗モーメントM-回転角の関係を求める」ことである。解析 に用いた仮定を以下に記す。

- 崩壊機構は図4.6に示すものを仮定する.図中,太線部,斜線部および縦線 部に実挙動における塑性変形を集約する.ウェブとフランジの交線はピンとする
- 2. 材料はMisesの降伏条件を満たす完全剛塑性材料である
- 3. 図4. 5のせん断力Qのする仕事は無視する
- 4. 変形は微小である
- 5. 圧縮側フランジのひずみの算定に際して、板厚は断面せい、幅に比較して小さいとして無視する



 $(\eta > 1)$ 



図 4.5 柱部材のモデル化



# 図4.6 局部座屈崩壊機構

図4.6の崩壊形で材はC点を中心にして回転するものとしている.また、フラン ジ部分のAP, RS, BQ, AS, BS, ウェブ部分のAD, BD, AC, CD, B C, DI等は塑性関節線であり、この部分で板要素は折れ曲がっている.また、 $\triangle -$ ASB, ADB, EFIはフランジとウェブの交線回りに回転しながら変形する部分,  $\triangle - CGH$ , CEF, CGHは板要素の面外変形を伴わずに変形する部分である.

図中に記号を示しているが、*と、* $\phi$ ,  $\kappa$ ,  $\eta$  は崩壊形を規定するパラメータで、*と* はフランジの材長方向変形部分の長さ、 $\phi$ ,  $\kappa$  は塑性関節線の方向、 $\eta$  は C 点から圧 縮側フランジまでの距離を表す. なお、 $\kappa$  は幾何学的関係から*と*,  $\eta$  により表現でき、 独立な変数は*と*,  $\phi$ ,  $\eta$  である. また、フランジ半幅をb、ウェブせいをd、フラン ジおよびウェブの板厚を t とする.

4.3.2 解析方法

図4.5に示すように塑性ヒンジがθ回転した状態での抵抗モーメントMを塑性学の上界定理に基づき算定する.モーメントMは,θから仮想の回転増分δθを考え, その時の外力のなす仮想仕事増分と仮定した崩壊形の変形部分でのエネルギー散逸率 δDPを等値することにより求める.すなわち,下式が基礎式となる.

 $\mathbf{M} \cdot \delta \,\theta + \mathbf{P} \cdot (\eta - 0 \, . \, 5) \cdot \mathbf{d} \cdot \delta \,\theta = \delta \, \mathbf{DP} \tag{4.5}$ 

ここで, Pは一定軸力(圧縮を正), dはウェブせいである. この式をモーメントMについて解くことにより, 次式が得られる.

 $M = -P \cdot (\eta - 0.5) \cdot d + \delta DP / \delta \theta \qquad (4.6)$ 

式(4.6)中のるDPは、図4.6中のある1つの塑性関節線のエネルギー散逸率 をるDH、フランジとウェブの交線まわりの回転を伴いながら軸方向変形が生じる部分 の1つをるDS、板面内で軸方向変形が生じる部分の1つをるDNとすれば、るDPはこ れらの総和で、下式で得られる.

 $\delta DP = \Sigma \delta DH + \Sigma \delta DS + \Sigma \delta DN \qquad (4.7)$ 

ここで、塑性ヒンジの回転角 $\theta$ および崩壊形を規定するパラメータである図4.6 中に示すく、 $\phi$ 、 $\eta$ を与えてやれば、モーメントMは式(4.6)により求めること ができる、塑性学の上界の定理より、式(4.6)による抵抗モーメントMは精解に 対して上界を与えることから、Mを最小とするように、く、 $\phi$ 、 $\eta$ を選んでやればよ い.

以下に,各塑性変形部分でのエネルギー散逸率を求める.なお,応力,ひずみに関して符号は圧縮を正とする.

a) 塑性関節線におけるエネルギー散逸率δDH

a. 1 一般式 まず一般的に、図4.7に示すような材軸と角度φをなす塑性関節 線のエネルギー散逸率δDHを求める。塑性関節線が生じた板要素の板厚をt, 塑性 関節線の長さを lhとし、平面応力状態を仮定して、 塑性関節線に直角方向の垂直応 力度をσX, 関節線方向の垂直応力度をσY, せん断応力度をτとする.

塑性関節線は剛体部分に接していることより、lh = -定、すなわち $\varepsilon Y = 0$ の条件 より、 塑性関節線におけるエネルギー散逸率 $\delta$ DHは次式で得られる. なお、積分は 塑性関節線を形成する部分の体積に関するものである.

 $\delta D H = \int (\sigma X \cdot \delta \varepsilon X + \tau \cdot \delta \gamma) d V \qquad (4.8)$ 

ここで, 塑性関節線での崩壊機構を図4.8のように仮定し, 関節線での回転角増 分をδρとすると, 関節線に垂直な方向のひずみ増分δεxは次式で得られる.

 $\delta \varepsilon \chi^{\pm} \pm \delta \rho / 2 \qquad (4.9)$ 

平面応力におけるミーゼスの条件は、降伏応力度をσyとすると、下式となるから、

 $\mathbf{F} = \sigma \,\mathbf{X}^2 + \sigma \,\mathbf{Y}^2 - \sigma \,\mathbf{X} \cdot \sigma \,\mathbf{Y} + 3 \,\tau^2 - \sigma \,\mathbf{y}^2 = 0 \tag{4.10}$ 

式(4.8)の $\delta \epsilon X$ に対応する応力 $\sigma X$ ,および $\sigma Y$ ,せん断応力度 $\tau$ は,次式の 塑性流れ法則と、 $\sigma Y$ は $\delta \epsilon Y = 0$ より、 $\sigma Y = \sigma X / 2$ であるから、式(4.12)で  $\sigma X$ ,  $\tau$ ,  $\sigma Y$ は表せる( $\lambda$ は非負の定数).

 $\delta \varepsilon \chi / (\partial F / \partial \sigma \chi) = \delta \varepsilon \chi / (\partial F / \partial \sigma \chi) = \delta \gamma / (\partial F / \partial \tau) = \lambda$ (4.11)

 $\sigma X = (2 / 3) \cdot \lambda \cdot \delta \varepsilon X$   $\tau = (1 / 6) \cdot \lambda \cdot \delta \gamma$  $\sigma Y = (1 / 3) \cdot \lambda \cdot \delta \varepsilon X$ 

(4.12)



図4.7 塑性関節線

これらの応力度で降伏していることより、上式をミーゼスの降伏条件式(4.10) に代入して、 $\lambda$ を求め式(4.12)に代入すると、 $\sigma$ X、 $\tau$ は次式となる.

$$\sigma \lambda = (2/3) \cdot \delta \varepsilon \lambda \cdot \sigma y / \sqrt{(\delta \varepsilon \lambda)^2 / 3 + (\delta \gamma)^2 / 12}$$

$$\tau = (1/6) \cdot \delta \gamma \cdot \sigma y / \sqrt{(\delta \varepsilon \lambda)^2 / 3 + (\delta \gamma)^2 / 12}$$
(4.13)

以下に、式(4.8)の $\delta$ DHの算定に必要な $\tau$ 、 $\delta \gamma$ と式(4.9)で求められる  $\delta \varepsilon X$ の関係を求める.

板要素に作用する軸方向応力度をnav· $\sigma$ yとすると、 $\tau$ および $\sigma$ Xの平均値 $\sigma$ Xavは 力の釣合よりそれぞれ次式となる.

| τ =          | n av· $\sigma$ y·sin $\phi$ ·cos $\phi$     | (4. | 1 | 4) |
|--------------|---|-----|---|----|
| $\sigma$ Xav | $=$ nav· $\sigma$ y·sin <sup>2</sup> $\phi$ | (4. | 1 | 5) |

 $\sigma Y = \sigma X/2 \varepsilon$ ,式(4.10)に代入し $\sigma X \varepsilon \tau$ の関数として求め,式(4.14) を代入すると、次式となる.

$$\sigma \stackrel{\pm}{\chi} = \pm 2 \sqrt{\sigma y^2 - 3 \tau^2} / \sqrt{3}$$

$$= \pm 2 \sigma y \cdot \sqrt{1 - A} / \sqrt{3}$$
(4.16)

ここで,

$$A = 3 \cdot (n_{av} \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi)^{2} \qquad (4. 17)$$

式 (4.12) より、 $\delta \gamma = (4\tau / \sigma X) \cdot \delta \varepsilon X$  であるから、式 (4.14)、 (4.16) を代入することにより、 $\delta \gamma \delta \delta \varepsilon X$ の関数として次式で表現できる.

$$\delta \gamma^{\pm} = \pm 2 \cdot \sqrt{3} \cdot n \operatorname{av} \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \delta \varepsilon \chi^{\pm} / \sqrt{1 - A}$$

 $\equiv \pm \mathbf{K} \cdot \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\chi}^{\pm}$ 

(4.18)

 $zz \vec{c} \quad K = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot n \operatorname{av} \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi / \sqrt{1 - A}$ 

塑性関節線での中立軸位置を表すパラメータを図4.8に示すように、 $\eta$ hとすると、塑性関節線での圧縮側、引張側の体積がそれぞれ( $\eta$ h・t)<sup>2</sup>・ $\Omega$ h, (1 –  $\eta$ h) <sup>2</sup>・t<sup>2</sup>・ $\Omega$ hであることに注意して、式(4.8)に式(4.9),(4.13), (4.18)を代入することにより、 $\delta$ DHは次式で得られる.

$$\delta DH = (1/3) \cdot \sqrt{12 + 3K^2} \cdot \sigma y \cdot (\delta \rho / 2) x$$

$$\{ (\eta h \cdot t)^2 \cdot \ell h + (1 - \eta h)^2 \cdot t^2 \cdot \ell h \}$$

$$(4. 19)$$

ここで,板要素の圧縮縁からの中立軸比 η hは,塑性関節線に垂直方向の力の釣合より,次式がえられ,式(4.21)となる.

$$\mathbf{t} \cdot \eta \, \mathbf{h} \cdot \sigma \, \mathbf{X} \, + \, \mathbf{t} \cdot (1 - \eta \, \mathbf{h}) \, \cdot \sigma \, \mathbf{X} = \, \mathbf{t} \cdot \sigma \, \mathbf{X} \, \mathbf{av} \tag{4.20}$$

 $\eta h = 0.5 + \sqrt{3} \cdot n av \cdot sin^2 \phi / 4 / \sqrt{1 - A}$  (4.21)

式(4.21)を式(4.19)に代入して、 SDHは下式となる.

 $\delta DH / (b \cdot d \cdot t \cdot \sigma y) = 1 / (8 \cdot \sqrt{3}) \cdot \ell h \cdot t \cdot \{4 + 3 \cdot n \text{ av} \cdot \sin^4 \phi / (1 - A)\} \cdot \delta \rho / \sqrt{1 - A} / b / d$  (4, 22)

上式が材軸と角度¢傾斜している塑性関節線のエネルギー散逸率である.以下に仮 定した崩壊形で式(4.22)を算定するのに必要な諸量を記す.

**a.** 2 塑性関節線の回転角 $\rho$  図4. 6の塑性関節線APの回転角 $\rho$  APは、S点の 面外変位を  $\Delta S$  (= t ·  $\delta$  s) とすると、変形が微小であるとして近似的に次式でもとま る.

 $\rho AP = t \cdot \delta s / (\zeta \cdot b) \qquad (4.23)$ 

他の塑性関節線の回転角も、図4.6におけるD点、I点の面外変位をそれぞれΔ D(≡δD·t), ΔI(≡δI·t)とすると、塑性関節線に垂直な3角形を考え、その 幾何学的な関係より求めることができる。

D点およびI点の面外変位 ΔD, ΔIは回転中心 Cからの距離に比例し, ΔD, ΔIは S点の面外変位 ΔSで表すことができる.

$$\Delta D = [1 - \{\zeta \cdot b / (\eta \cdot d)\} \cdot \tan \kappa] \cdot \Delta S$$

(4.24)

 $\Delta I = [1 + \{\zeta \cdot b / (\eta \cdot d)\} \cdot \cot \kappa] \cdot \{(\eta - 1) / \eta\} \cdot \Delta S$ 

したがって、すべての塑性関節線の回転角ρij(i, jは塑性関節線の端部の位置 を示す)は、塑性関節線APの回転角ρAPで表現でき、以下の式で得られる。

 $\rho RS = \rho CD = \rho ID = 2 \cdot \rho AP$ 

 $\rho AR = \rho BR = \rho AP / \sin \phi$ 

 $\rho AC = \rho BC = [1 - \{\zeta \cdot b / (\eta \cdot d)\} \cdot \tan \kappa] \cdot \cot \kappa \cdot \rho AP \qquad (4. 25)$   $\rho AD = 2 \cdot [1 - \{\zeta \cdot b / (\eta \cdot d)\} \cdot \tan \kappa] \cdot \cos \kappa \cdot \cot \kappa \cdot \rho AP$   $\rho EI = 2 \cdot \{\tan \kappa + \zeta \cdot b / (\eta \cdot d)\} \cdot \sin \kappa \cdot \rho AP$ 

これらの増分を考えることにより、全ての塑性関節線の回転角増分が、塑性関節線 A Pの回転角増分δρAPを用いて表現できることになる.

**a**. 3  $\delta \rho AP o$  算定  $\delta D H \delta$  表す式(4.22)には、塑性関節線の回転角増分  $\delta \rho AP o$  算定  $\delta D H \delta$  表す式(4.22)には、塑性関節線の回転角増分  $\delta \rho AP \delta$  思想になった。一方、 抵抗モーメントMは式(4.6)で表せるから、 $\delta \rho AP \delta$  塑性関節の回転角増分  $\delta \theta$ と関係づける必要がある。以下に $\delta \rho AP \delta$  算定方法を示す。

図4.6中のS'S"を長さ2ζ・b,断面せいt,幅1の断面よりなる両端固定の 圧縮材と考える.この圧縮材の中央点のたわみが $\Delta S (\equiv t \cdot \delta S)$ の時の両端の相対軸 方向変位を  $\Delta X (\equiv 2 \zeta \cdot b \cdot \epsilon X)$ ,塑性関節に生ずる軸方向縮みの総和を  $\Delta h (\equiv 2 \zeta \cdot b \cdot \epsilon h)$ とする.端部の塑性関節の回転角は $\rho AP$ である.

図4.9より次式が得られる.

| $\cos \rho AP = (1 - \varepsilon X) / (1 - \varepsilon h) = 1 - \varepsilon X + \varepsilon h$                         | (4. | 26) |
|--|-----|-----|
| $\sin \rho AP = t \cdot \delta S / \{ \zeta \cdot b \cdot (1 - \varepsilon h) \} = t \cdot \delta S / (\zeta \cdot b)$ | (4. | 27) |

ここで、 EXは、

 $\varepsilon X = \eta \cdot d \cdot \theta / (2 \cdot \zeta \cdot b)$ 

(4.28)

であるから、上式を式(4.26)に代入して、次式が得られる.



-69-

回転角とひずみ度

| $\cos\rho  \mathrm{AP} = 1  -  \eta  \cdot  \mathrm{d}  \cdot  \theta  ,$ | $(2 \cdot \zeta \cdot b) +$ | εh | (4. | 29) |
|---|-----------------------------|----|-----|-----|
|---|-----------------------------|----|-----|-----|

したがって,上式から

$$-\rho AP \cdot \delta \rho AP = -\eta \cdot d \cdot \delta \theta / (2\zeta \cdot b) + \delta \varepsilon h \qquad (4.30)$$

δ ε h と δ ρ APの関係は、軸力と曲げを受ける長方形断面の降伏関数,式(4.31) に、塑性流れ法則,式(4.32)を適用して,式(4.33)となる.

 $F = (N / N y)^{2} + (M / M p) - 1 = 0 \qquad (4.31)$ 

 $(\delta \Delta h/4) / (\partial F/\partial N) = \delta \rho AP / (\partial F/\partial M) \qquad (4.32)$ 

$$\delta \varepsilon h = \delta \Delta h / (2 \cdot \zeta \cdot b) = \{ t \cdot n f / (\zeta \cdot b) \} \cdot \delta \rho AP \qquad (4.33)$$

ここで、N (= n f · N y) は軸力、N y は降伏軸力、M p は全塑性モーメントである. また、 $\delta$   $\Delta$ hは軸方向塑性縮みの増分の総和である.

上式を式(4.30)に代入しすると、次式が得られる.

 $\delta \rho AP = \{ \eta \cdot d / (2 \cdot \zeta \cdot b) \} \cdot \delta \theta / \{ \rho AP + t \cdot n f / (\zeta \cdot b) \}$  (4. 34)

ここで、 $\rho$  APは式(4.23)で、得られる.また、nfは両端固定の圧縮材の中央 点での曲げモーメントの釣合式M=t・ $\delta$ S・N/2を式(4.31)に代入することに より、次式で求まる.

 $n f = \sqrt{\delta S^2 + 1} - \delta S$ 

(4.35)

a. 4 板要素に作用する軸方向応力度と降伏応力度σyの比nav 式(4.22) の中の板要素に作用する軸方向応力度 n avについて以下に記す.

フランジに作用する平均軸方向応力度 n avf は, n f  $\sigma$  y と降伏応力度  $\sigma$  y の平均値 と近似して, 次式で表せるものとする.

n avf = (1 + n f) / 2 (4.36)

ウェブに作用する軸方向応力度の平均値 n avwも同様にして,次式で表せるものとする.

n avw = (1 + nw) / 2

(4.37)

ここに、nwは次式で表せる.

 $\mathbf{n} \mathbf{w} = \sqrt{\delta \mathbf{D}^2 + 1} - \delta \mathbf{D}$ 

(4.38)

b) フランジとウェブの交線回りの回転を伴いながら軸方向変形が生じる部分のエネ ルギー散逸率δ DS

△-ABS部分のエネルギー散逸量δDS1を求める. この部分は,図4.10に示す ようにσX,σYで降伏しているものと考えられる(座標軸の定義は図4.10参照). したがって,この部分のエネルギー散逸量δDS1は次式となる.

 $\delta DS1 = \int (\sigma X \cdot \delta \varepsilon X + \sigma Y \cdot \delta \varepsilon Y) dV \qquad (4.39)$ 

塑性流れ理論より、応力 σX, σYは次式で与えられる.

 $\sigma X = (2 \cdot \delta \varepsilon X + \delta \varepsilon Y) / (3 \cdot \lambda)$ 

(4.40)

 $\sigma Y = (\delta \varepsilon X + 2 \cdot \delta \varepsilon Y) / (3 \cdot \lambda)$ 

上式を降伏条件,式(4.10)に代入し,λを求めると次式となる.

 $1 / (3 \cdot \lambda) = \sigma y / \sqrt{3} / \sqrt{\delta \varepsilon \chi^2} + \delta \varepsilon \chi \cdot \delta \varepsilon \chi + \delta \varepsilon \chi^2 \qquad (4. 41)$ 

上式を式(4.40)に代入し、 $\delta \in X$ および $\delta \in Y$ に適合する応力 $\sigma X$ 、 $\sigma Y$ を求め、 式(4.39)に代入することにより、 $\delta D s1$ は以下の式で表せる.

 $\delta D s 1 = 2 \cdot \sigma y \cdot / \sqrt{3} \cdot \int \sqrt{\delta \varepsilon X^2 + \delta \varepsilon X \cdot \delta \varepsilon Y + \delta \varepsilon Y^2} dV \qquad (4.42)$ 



図4.10 圧縮側フランジの応力と変形

ここで, εXは次式となる.

 $\varepsilon X = \eta \cdot \mathbf{d} \cdot \theta / (2 \cdot \zeta \cdot \mathbf{b})$ 

(4.43)

また、 $\triangle$ -ABS部分の材軸と直角方向のひずみ度  $\epsilon$  Yは、図4.10を参照とし、 また圧縮を正としているから次式で与えられる.

 $\epsilon Y = - (\Delta S / b_2)^2 / 2$  (4.44)

したがって,

 $\delta(\epsilon Y) = - (\Delta S / b 2) (\delta(\Delta S) / b 2) \qquad (4.45)$ 

以下,式(4.42)の算定に必要なδεχとδεγの関係を求める.

S'S"を圧縮材と考えると、 $\varepsilon$ Xは、幾何学的軸方向ひずみ成分 $\varepsilon$ gと、塑性軸方向ひずみ成分 $\varepsilon$ hの和となり、 $\varepsilon$ g= { $t \cdot \delta$ S/( $\zeta \cdot b$ )}<sup>2</sup>/2を考慮して、次式で表現できる.

| $\varepsilon X = \varepsilon g + \varepsilon h$              | (4.46) |
|--|--------|
| $= \{ \Delta S / (\zeta \cdot b) \}^{2} / 2 + \varepsilon h$ | (4.47) |

したがって、両辺の増分を考えると、次式となる.

 $\delta \varepsilon X = (\Delta S / (\zeta \cdot b)) \cdot (\delta (\Delta S) / (\zeta \cdot b)) + \delta \varepsilon h \quad (4.48)$ 

したがって,式(4.45)と式(4.48)より,δεΥは次式で求められる.

 $\delta \varepsilon Y = (\zeta \cdot b / b 2)^{2} \cdot (\delta \varepsilon h - \delta \varepsilon X) \qquad (4.49)$ 

ここで、 $\alpha \equiv \delta \varepsilon h / \delta \varepsilon X$ ,  $\beta \equiv (b 2 / \zeta \cdot b)$  と定義すると、

 $\delta \varepsilon Y = (\alpha - 1) \cdot \delta \varepsilon X / \beta^{2} \qquad (4.50)$ 

となる. 上式を式(4.42)に代入することにより, δDS1は次式で得られる.

 $\delta DS1 = \{2 \cdot \sigma y \cdot g (\alpha, \beta) / \sqrt{3}\} \cdot \int \delta \varepsilon \lambda \cdot d v \qquad (4.51)$ 

ここで, g (α, β) は次式となる.

g  $(\alpha, \beta) = \sqrt{(1-\alpha)^2 - (1-\alpha) \cdot \beta^2 + \beta^4} / \beta^2$  (4.52)

以下に上式に含まれる $\alpha$  (=  $\delta \epsilon h / \delta \epsilon X$ )を求める.式(4.26)の増分関係は、次式で得られる.

 $\rho AP \cdot \delta \rho AP = \delta \varepsilon X - \delta \varepsilon h \qquad (4.53)$ 

上式と式(4.33)より, δρAPを消去すれば,

 $\alpha = \{ (t \cdot nf) / (\zeta \cdot b) \} / \{ \rho AP + t \cdot nf / (\zeta \cdot b) \}$ (4.54)

上式に式(4.23), (4.35)を代入すると, αはδSの関数として, 次式で 得られる.

 $\alpha = 1 - \delta S / \sqrt{\delta S^2 + 1} \tag{4.55}$ 

以上で $\triangle - ABS$ 部分のエネルギー散逸率 $\delta Ds1$ はもとまった.  $\triangle - ABD$ ,  $\triangle - EIF$ の部分のエネルギー散逸率 $\delta Ds2$ ,  $\delta Ds3$ は, 塑性関節線AC等は材軸に直角 でないので, 変形後のD点等はD'D"上になく $\delta Ds1$ の場合の議論がそのままは当 てはまらないが,  $\delta Ds2$ ,  $\delta Ds3$ とも式(4.51)の形式で得られるものと考える. 以上をまとめると, エネルギー散逸率は次式となる.

 $\delta \text{ Ds1} / (b \cdot d \cdot t \cdot \sigma \text{ y}) = 2 \cdot \eta \cdot \zeta \cdot \tan \phi \cdot g (\alpha 1, \beta 1) \cdot \delta \theta / \sqrt{3}$   $\delta \text{ Ds2} / (b \cdot d \cdot t \cdot \sigma \text{ y}) = 2 \cdot \eta \cdot \zeta \cdot \tan \kappa \cdot g (\alpha 2, \beta 2) \cdot \delta \theta / \sqrt{3}$   $\delta \text{ Ds3} / (b \cdot d \cdot t \cdot \sigma \text{ y}) = 2 \cdot (\eta - 1)^{-2} \cdot \zeta \cdot \cot \kappa \cdot g (\alpha 3, \beta 3) \cdot \delta \theta / \sqrt{3}$  $\int (\sqrt{3} \eta)$ 

(4.56)

上式のなかの,  $\alpha$ 1は式(4.55),  $\alpha$ 2,  $\alpha$ 3はそれぞれ, 式(4.55)の $\delta$ Sを  $\delta$ D,  $\delta$ 1に置き換えたものである.また,  $\beta$ 1,  $\beta$ 2,  $\beta$ 3は次式となる.

 $\beta 1 = \tan \phi$   $\beta 2 = \tan \kappa$   $\beta 3 = \cot \kappa$ (4.57) c) 面外変形を伴わない部分のエネルギー散逸率 SDN

 $\triangle - C G H$ , C E F では,  $\sigma x = \pm \sigma y$ ,  $\sigma Y = \tau = 0$  で降伏していると考えられ, エネルギー散逸率  $\delta D N$ は次式で得られる.

 $\delta DN = \int \sigma X \cdot \delta \varepsilon X d V$ 

(4, 58)

上式中の $\delta \epsilon X d \delta \theta$ と関係づけられ、引張を受ける部分、圧縮を受ける部分でそれ ぞれ、次式となる.

| $\delta \epsilon X = - \delta \theta / 2$  | (引張部分) | (4. | 59) |
|--|--------|-----|-----|
| $\delta \epsilon \lambda = \eta \cdot d \cdot \delta \theta / (2 \cdot \zeta \cdot b)$ | (圧縮部分) | (4. | 60) |

したがって、δDNは次式で得られる.

η≤1のとき

 $\delta DN / (b \cdot d \cdot t \cdot \sigma y) = \{2 \cdot (1 - \eta) + t / d + d \cdot (1 - \eta)^{2} / b\} \delta \theta$ (4. 61)

η>1のとき

 $\delta DN / (b \cdot d \cdot t \cdot \sigma y) = \{2 \cdot (1 - \eta)^2 \cdot d / t - 2 \cdot (\eta - 1) + t / d\}$  $\cdot \delta \theta \qquad (4.62)$ 

d) 解法

a) ~ c) よりエネルギー散逸量  $\delta$  DPを求め、式(4.6) に代入すると、 抵抗 モーメントMは $\zeta$ ,  $\phi$ ,  $\eta$ ,  $\delta$ Sの関数となる.

く、 $\phi$ および $\eta$ を仮定すると、S点の無次元化面外変位 $\delta$ Sを与えることにより、 以下に示すように対応する塑性関節の回転角 $\theta$ と抵抗モーメントMを求めることがで きる. したがって、 $\delta$ Sを漸増する事により、モーメントー回転角関係を求めること ができる.

塑性学における上界定理よりモーメントMの最小値が精解となることから、ここで は、 *C* を 0. 0 2 5、  $\phi$  を 0. 1 ×  $\pi$  / 4 間隔で変化させ、  $\theta$  /  $\theta$  pc = 5 で M が最小 となる、 *C*、  $\phi$  を 用いて、  $\delta$  s を 順次増加させることにより、 崩壊曲線を求めた.  $\eta$ の値は各  $\delta$  S に対してモーメント M が最小となるように試錯的にもとめた.

以下に、S点の無次元化面外変位δSと回転角θの関係を示す。

塑性関節の回転角は,式(4.43)より次式となる。

$$\theta = 2 \cdot \zeta \cdot \mathbf{b} \cdot \varepsilon \, \chi / \, (\eta \cdot \mathbf{d}) \tag{4.63}$$

上式より、 $\varepsilon X \varepsilon$ 算定できれば回転角 $\theta$ は計算できるが、 $\varepsilon X$ は式(4.47)より、  $\varepsilon h \varepsilon$ 算定すれば求まる.式(4.33)をnに関する微分と見なすことにより、 $\varepsilon h$ は次式で求まる.

$$\varepsilon h = t / (\zeta \cdot b) \cdot \{ \int_{ncr}^{nf} (n f \cdot \rho AP)' d n f - \int_{ncr}^{nf} \rho AP \cdot d n f \}$$
(4.64)

ここで、n cr は 板 要素が 座 屈 するときの n f の 値 で あり、 $\rho$  AP は 式 (4.35) を  $\delta$  S について 解き、その 結果を式 (4.23) に 代入 する こと に より、次式 と なる.

$$\rho AP = t \cdot (1 / nf - nf) / (2 \cdot \zeta \cdot b) \qquad (4.65)$$

上式を,式(4.64)に代入し,ncr=1とすると E hは次式となる.

$$\varepsilon h = -(2 \ln (nf) + nf^2 - 1) \cdot t^2 / (2 \cdot \zeta \cdot b)^2$$
 (4.66)

また、δSを与えれば、δDpが算定できるから、式(4.6)より、抵抗モーメントMを算定できる.

§ 4. 4 考察

# 4.4.1 弹塑性举動

図4.3の水平カー水平変位関係では、軸力が存在することによる抵抗力の低下が 含まれているため、以下では前章と同様に柱脚のモーメントMと部材回転角のの関係 で示す.

# (1) 幅厚比の影響

図4.11に幅厚比の影響を示す。

無次元量Mpcは式(4.1)あるいは(4.3)で,弾性限回転量 $\theta$ pcは前章と同様にして求めた.図4.11(a),(c)は断面幅が10cm,(b),(d)は 15cmの試験体の結果である.ただし,焼きなましをしたもの,溶接シーム位置を フランジ位置にした試験体の結果は記していない.(f),(g)は高張力鋼の場合 である.

図4.11(a)~(e)の普通鋼の場合,幅厚比の影響は顕著であり,幅厚比が 大きくなるにつれて耐力,変形能力が低下することが観察される.一点鎖線で示す全 塑性モーメントを軸力比の値にかかわらず期待できる試験体は,幅厚比が31までの 角形鋼管であり,鋼構造設計規準の幅厚比制限値を満足する幅厚比が33の角形鋼管 でも軸力比が0.3の場合には全塑性モーメントを期待できていない.幅厚比が47 を超えるものでは軸力比にかかわらず全塑性モーメントを期待出来ない.

図4.11(f), (g)の高張力鋼の場合は,最大耐力は幅厚比の小さい方が大きくなっているが,耐力,変形性状とも大きな差はない.



-76-



図4.11 幅厚比の影響(つづき)

# (2)軸力比の影響

図4.12に軸力比の影響を示す.

図4.12の各図は同一角形鋼管で軸力比のみが異なった場合の結果である.図より,幅厚比が22~33の試験体では軸力比の値によって最大耐力はそれほど変化はしないが,軸力比が大きくなるにつれて変形能力の低下が見られる.それに対して,幅厚比が47を超える場合には,軸力比が大きくなるにつれて変形能力だけでなく,最大耐力も低下することが観察される.これは,幅厚比の大きいものは局部座屈にその挙動が支配されており,軸力比が高いほど局部座屈の発生が小さい変形で生じることによる.





図4.12 軸力比の影響(つづき)

# (3) 熱処理の影響および鋼管シーム位置の影響

図4.13(a)~(c)に熱処理の影響を示す.実線が焼きなましを施していないもの,破線が焼きなましをした結果である.図より,熱きなましを行った試験体の角形鋼管の方が耐力は高いが,最大耐力時の変形は小さくなっている.しかし耐力後の変形が大きくなった状態では,焼きなましの影響は少ない.

図4.13(d)に溶接シーム位置の違いによる比較をしている.破線は試験体4 73Dの結果で溶接シーム位置をフランジ位置にしたものであるが、ウェブ位置に設 置したものより最大耐力が大きい.この原因は、残留応力が溶接シーム部分では引張 りになっていること、溶接シームによる断面積増加による座屈補剛効果、さらに溶接 による降伏応力度の増大が考えられる.



図4.13 熱処理の影響および鋼管シーム位置の影響

# (4) 鋼材質の影響

図4.14に鋼材質の影響を示している.図4.14(c),(d)は幅厚比が5 8,60で異なるが参考のため示した.

図4.14(a), (b)より,同じ幅厚比であるが,降伏応力度が大きいほど最 大耐力は小さくなることがわかる.

図4.14(c),(d)より,降伏応力度を考慮した幅厚比は60の方が小さい が,幅厚比58の方が耐力が高く,また大変形域でも抵抗力が大きくなっている.こ の理由は明確ではないが,降伏比が0.81(幅厚比58)と0.86(幅厚比60) と異なっていることが一因であると考えられる.



図4.14 鋼材質の影響

# (5) 単調挙動と繰返し挙動の対応

図4.15に単調および繰返し載荷を受ける試験体のモーメントー回転角関係を示 す.図中●印は単調載荷,実線は繰返し載荷の結果である.繰返し載荷の結果は,荷 重-変形関係の正側での荷重-変形関係を原点を移動して加えあわせたものである. また,破線で繰返し載荷の結果で前回の変位反転点時の荷重より小さい部分を除いて, 荷重-変形関係をつなぎあわせたものを示す.

図より,破線で示した曲線は単調載荷を行った試験体の最大耐力,および耐力時の 変位と比較的良く対応していることがわかる.





-

# 4.4.2 座屈発生時のひずみ度

図4.16に単調載荷を受ける試験体のフランジ座屈発生時のひずみ度と幅厚比の 関係を示す.縦軸は座屈発生時のひずみ $\varepsilon$  crを降伏ひずみ度 $\varepsilon$  yで無次元化したもの, 横軸は降伏応力度を考慮した幅厚比 $\beta$  (=(B/t) $\sqrt{\sigma$  y/E}) である.ひずみ度はスト レインゲージにより測定した結果である.試験体943は軸力載荷時に座屈したので 図には記入していない.

図中に破線で板の載荷辺に均等応力を受け,非載荷辺が単純支持の場合の弾性座屈 ひずみの理論値を示している(ポアソン比レは0.3とした).また,図中○は軸力 比が0.1,●は軸力比が0.3以上の結果を示している.

図より,幅厚比が大きくなるにつれて,座屈時のひずみ度は小さくなることがわかる。鋼構造塑性設計指針の幅厚比制限値を満足する幅厚比22の角形鋼管では, $\varepsilon$  cr / $\varepsilon$ yは7.7~17.8であり,鋼材はほぼひずみ硬化域に入って座屈したと考え てよいと思われる.また,指針の幅厚比制限値は $\varepsilon$  cr / $\varepsilon$ yの値が平均4程度を期待し ているが,それを満足している.

規準の制限値を満足する幅厚比25 ~33では1.1~2.5となってお り、規準の制限値を満足すれば、降伏 応力度に達することが期待できる.ま 20 た,溶接シーム位置をフランジ位置に した473Dの座屈時のひずみ度が他 のものに比べて大きい事がわかる.

規準の幅厚比制限値を満足しない場合には,点線で示す理論値の下側に沿っていることが観察される.ほとんどが理論値のひずみより小さいひずみ度で座屈しているが,この理由は板の元たわみ,残留応力が考えられる.

軸力比の影響は,幅厚比が小さい場合には顕著ではないが,幅厚比が大き くなると軸力比が大きい方が座屈時の ひずみが小さい傾向がある.



図4.16 圧縮側フランジ座屈時のひずみ度

### 4.4.3 耐力

(1) 終局曲げ耐力

図4.17に最大耐力Mmax/Mpcと幅厚比の関係を示す.表4.2にMmax/Mpcの値を示す.●印は普通鋼(No.1~34),○印は,高張力鋼管(No.35~ 38)であること示す.

Mmaxは柱脚部での最大モーメントの $実験値であり、 <math>(H \cdot l + P \cdot \delta)$  の最 大値として算定した. 図4.17の幅厚 Mmax/Mpc 比は, 鋼管の降伏応力度を考慮した $\beta$  (  $=(B/t)\sqrt{\sigma y/E}$ )をとっている.また, 破線で鋼構造設計規準と鋼構造塑性設計 指針の幅厚比制限値を示している.但し, 0.5 規準では,鋼管の平板部分の幅dと板厚 tの比として幅厚比制限値 (d / t)1 imを規定しているので, 図4.17に 示した規準の制限値 (B / t)1imは角 部の板厚中心の半径を板厚の1.5倍と して次式で求めている.



図4.17 曲げ耐力-幅厚比関係

$$(B/t) \lim \sqrt{(\sigma y/E)} = \{ (d/t) \lim +4 \} \sqrt{(\sigma y/E)}$$
$$= \{74/\sqrt{\sigma y}+4 \} \sqrt{(\sigma y/E)}$$
$$= 74/\sqrt{E}+4 \sqrt{(\sigma y/E)}$$
(4.67)

但し,降伏応力度 $\sigma y$ ,ヤング係数Eの次元は [t/cm<sup>2</sup>] であり,許容応力度を決めるための基準値Fを降伏応力度 $\sigma y$ としている.式(4.67)の $\sigma y$ は,普通鋼の降伏応力度の平均値3.97t/cm<sup>2</sup>を用いた.この時,幅厚比制限値の $\beta$ の値は1.8となる.

また、鋼構造塑性設計指針の幅厚比制限値は鋼管全幅で規定され、 47/ $\sqrt{\sigma_y}$ で 与えられているので、降伏応力度を考慮すれば、

$$(B/t) \lim \sqrt{(\sigma y/E)} = (47/\sqrt{\sigma y}) \cdot (\sqrt{\sigma y/E})$$
  
= 47/\sqrt{E}  
= 1.03 (4.68)

となる.

図4.18(a), (b)にそれぞれ規準の幅厚比制限値を満足する場合( $\beta \leq 1$ . 8)と満足しない場合( $\beta > 1$ .8)のMmax/Mp-N/Ny相関関係を示す. Hmax:最大水平力 δ max:Hmax時の水平変位
 Hpl:指針の耐力式による耐力
 Hy':有効幅を用いた指針の耐力式による耐力
 Mmax:曲げ耐力
 Mpc:全塑性モーメント

表 4.2耐力の比較および変形能力Mpc:全塑性モーメントMyc': 有効幅を用いた降伏曲げモーメント

R95: 変形能力

| No.   | 試験体    | 幅厚比           | Hnax   | δmax  | Hp1   | Hy'   | Mmax  | Mmax  | Hmax  | Hmax  | R95   |
|-------|--------|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |        |               | (ton)  | (CE)  | (ton) | (ton) | Mpc   | Myc   | npi   | ny    |       |
| 1     | 221    |               | 3, 37  | 2,65  | 2.76  | 2.34  | 1.16  | 1. 50 | 1. 22 | 1.44  | 5.84  |
| 2     | 223    | 22. 2         | 2.71   | 2.00  | 1.95  | 1.66  | 1.18  | 1.76  | 1.39  | 1.63  | 4.39  |
| 3     | 225    |               | 1.86   | 1.43  | 1.19  | 1.01  | 1.29  | 2.08  | 1. 56 | 1.84  | 4.79  |
| -     |        |               |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 4     | 251(1) |               | 11. 47 | 2.63  | 9.96  | 8. 52 | 1.08  | 1. 38 | 1.15  | 1. 35 | 4. 20 |
| 5     | 251(2) |               | 11.05  | 2.15  | 9.87  | 8. 44 | 1.04  | 1.33  | 1.12  | 1. 31 | 2.76  |
| 6     | 253    | <b>25</b> . 0 | 9. 82  | 2.05  | 7.43  | 6.36  | 1.11  | 1.64  | 1. 32 | 1.54  | 4.33  |
| 7     | 253C   |               | 10.04  | 1. 51 | 7.36  | 6.29  | 1.10  | 1.63  | 1. 36 | 1.60  | -     |
| 8     | 311    | 31 2          | 2 51   | 2.02  | 2.11  | 1.82  | 1.08  | 1, 38 | 1, 19 | 1, 38 | 2, 36 |
| 9     | 313    | 01.2          | 1. 98  | 1.66  | 1. 43 | 1. 23 | 1.08  | 1.60  | 1. 38 | 1.61  | 1.93  |
| -     |        |               |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 10    | 331    |               | 8.04   | 1.78  | 7.33  | 6. 33 | 1.02  | 1. 30 | 1.10  | 1.27  | 2.46  |
| 11    | 333    |               | 6. 41  | 1.42  | 5.43  | 4.69  | 0.97  | 1.42  | 1.18  | 1. 37 | 1.85  |
| 12    | 335    | 33. 3         | 5. 47  | 1.06  | 4.12  | 3.56  | 1.01  | 1. 57 | 1.33  | 1.54  | 1.86  |
| 13    | 331C   |               | 8.12   | 1. 52 | 7.26  | 6.28  | 1.01  | 1.28  | 1.12  | 1.29  | -     |
| 14    | 333C   |               | 7.00   | 1.00  | 5.43  | 4.69  | 1.03  | 1.51  | 1. 29 | 1.49  | -     |
| 15    | 335C   |               | 5. 20  | 0.84  | 4. 11 | 3. 55 | 0.93  | 1.45  | 1. 27 | 1.46  | -     |
| 16    | 471    |               | 3 96   | 89.0  | 4 07  | 3 36  | 0.90  | 1 19  | 0.97  | 1 18  | 2.66  |
| 17    | 473    |               | 3.01   | 0.91  | 3.09  | 2. 52 | 0.86  | 1. 33 | 0.97  | 1, 19 | 1.92  |
| 18    | 4730   |               | 3 62   | 0.98  | 3.10  | 2.51  | 0.96  | 1.49  | 1.17  | 1.44  | 1.59  |
| 19    | 475    |               | 1.87   | 0.62  | 2.17  | 1.71  | 0.69  | 1. 18 | 0.86  | 1.09  | 2.40  |
| 20    | 476    |               | 1. 23  | 0. 34 | 1.72  | 1.30  | 0. 58 | 1.04  | 0.72  | 0.95  | 1.36  |
| 21    | 471A   |               | 4. 42  | 1.14  | 4.10  | 3. 38 | 0.99  | 1. 32 | 1.08  | 1. 31 | 1.60  |
| 22    | 473A   |               | 3, 58  | 0.64  | 3.12  | 2.53  | 0.92  | 1.43  | 1.15  | 1.42  | 1.05  |
| 23    | 475A   | 46.9          | 3.01   | 0. 59 | 2.16  | 1.69  | 1.05  | 1.80  | 1.39  | 1. 78 | 1.09  |
| 24    | 471C   |               | 3, 75  | 0.98  | 4.07  | 3.36  | 0.85  | 1.13  | 0.92  | 1.12  | -     |
| 25    | 473C   |               | 3.24   | 0.60  | 3.12  | 2. 53 | 0.84  | 1.31  | 1.04  | 1.28  | -     |
| 26    | 476C   |               | 1. 21  | 0. 29 | 1.71  | 1. 31 | 0.54  | 0.96  | 0. 71 | 0. 92 | -     |
|       | 471    |               | 0.74   | 1.40  | 4.02  | 2.00  | 0.72  | 0.00  | 0.77  | 0.07  | 2 10  |
| 21    | 4/1    |               | 3. 14  | 1.40  | 4.03  | 3.00  | 0.72  | 0. 99 | 0.77  | 1 00  | 1 90  |
| 28    | 4/3    |               | 2. 04  | 1.09  | 3.05  | 2.03  | 0.00  | 1. 07 | 0.70  | 1.00  | 1.00  |
| 29    | 601    | 60.0          | 2.70   | 0.96  | 3.84  | 2. 41 | 0.65  | 1.13  | 0.70  | 1.12  | 1.75  |
| 30 ** | 603    |               | 1.48   | 0.55  | 2.90  | 1.53  | 0.39  | 0.92  | 0.51  | 0.97  | 0.56  |
| -     |        |               | 1.00   | 0.00  | 0.01  | 1.47  | 0.55  | 1.15  | 02.0  | 1.14  | 0.70  |
| 31    | /51    | 75.0          | 1.08   | 0.08  | 2.81  | 1.4/  | 0. 33 | 1.15  | 0.00  | 1.14  | 0.70  |
| 32    | 753    | and a         | 0.72   | 0.33  | 2.13  | 0.82  | 0.27  | 0.87  | 0. 34 | 0.00  | 0.00  |
| 33    | 941    | 93. 8         | 1. 20  | 0.44  | 2.24  | 0. 92 | 0.49  | 1.31  | 0.54  | 1.30  | 0.53  |
| 34    | 943    |               | 0.56   | 0.24  | 1.70  | 0.37  | 0. 27 | 1.51  | 0.33  | 1.51  | 0.00  |
| -     |        | 40.0          | 4.80   | 1.00  | C 04  | 4 40  | 0.70  | 1.00  | 0.70  | 1.05  | 1.50  |
| 35    | H-471  | 46.9          | 4.73   | 1. 38 | b. 24 | 4. 49 | 0.70  | 1.06  | 0.76  | 1.05  | 1.50  |
| 36    | H-473  |               | 3. 26  | 1.00  | 4. 62 | 3.05  | 0.58  | 1.09  | 0. /1 | 1.07  | 1.06  |
| 37    | H-581  | 57.7          | 3, 60  | 1. 37 | 4.97  | 2, 95 | 0.67  | 1. 23 | 0.72  | 1. 22 | 1.33  |
| 38    | H-583  |               | 2.48   | 0.82  | 3.65  | 1.75  | 0.55  | 1.40  | 0.68  | 1.42  | 0.56  |
|       | 1      |               |        |       |       |       |       |       |       |       |       |





図4.17より試験体は幅厚比が大きくなるにつれて、曲げ強度は小さくなること がわかる.規準の制限値以内( $\beta \leq 1$ .8,幅厚比22~33)の試験体は、表4. 2よりMmax/Mpcの平均値は1.07であり、規準の制限値を満足すれば全塑性モー メントでほぼ曲げ耐力を評価してよいと考えられるものの、全塑性モーメントを期待 できない場合(2体)もあり、注意が必要である.しかし、塑性設計指針の幅厚比制 限値以内のものは全塑性モーメントを期待できる.

規準の制限値を超えた幅厚比をもつ試験体は、ほとんどが全塑性モーメントを期待できない.規準の制限値を超えた板要素よりなる断面ではMmax/Mpcの値が規準の 制限値以内の断面よりバラッキが大きい事が観察されるが、これは規準の制限値を超 えた断面では局部座屈により耐力が支配されるが、局部座屈荷重は軸力比や残留応力 の大きさによって左右されるためであると考えられる。

規準の幅厚比を超える板要素よりなる角形 鋼管の曲げ耐力の評価について以下に記す. 図4.19に示すように,有効幅の概念を用 いて規準の幅厚比制限を超えた部分(図中斜 線部)を無効とした断面を想定し,その断面 の軸力を考慮した降伏モーメントをMyc', 降伏軸力をNy'とする.軸力のないときの 降伏モーメントをMy'とすると, Myc'は 次式で与えられる.

$$Myc' = (1 - N / Ny') \cdot My'$$
  
(4. 69)





図4.20 曲げ耐力-幅厚比関係

図4.17おいて、規準の幅厚比制限値を超える場合( $\beta > 1$ .8)にはMyc'で 無次元化した曲げ耐力Mmaxと幅厚比の関係を図4.20に示す.また、規準の幅厚 比制限値を超える試験体に対して、Mmax/My'-N/Ny'関係を図4.21に示す. これらの図より、規準の幅厚比を超えた角形鋼管の曲げ耐力は、有効幅の考えを用い た断面に対する降伏モーメントMyc'で評価すれば概ね安全側に曲げ耐力を評価でき る事がわかる.

図4.22および,表4.3に,既往の研究(71試験体)を含めた耐力と幅厚比の関係を示している.表4.3中の荷重条件は図4.23に示したものである.

○で本研究の実験結果を、■で既往の研究の結果を示している.他の研究の試験体は冷間成形だけでなく、4枚の鋼板を溶接して製作した角形鋼管もあるが、まとめて示している.

図4.22(a)は全ての試験体について示している。他の研究では、規準の制限 値を超えるものはないが、本章の実験結果は他の研究の結果と平均的な所に位置して いる。他の研究を含めて考察しても、指針の幅厚比制限値を満足すれば全塑性モーメ

-86-

ントMpcを期待できることがわかる. 図4.22(b)には,無次元化幅厚 比が1~2までの耐力と幅厚比の関係 を示している.図中の破線は3次関数 で近似した耐力と幅厚比の関係である. この図より,規準の制限値を満足して もMpcで曲げ耐力を期待できない試験 体もあり,Mpcを期待するには無次元 化幅厚比で1.4程度以下に抑える必 要があると考えられる.

図4.22 曲げ耐力-幅厚比関係







(1)

(b) Mpcを期待できる幅厚比

図4.23 荷重条件(表4.3)

# (2) 鋼構造塑性設計指針による設計式の検討

鋼構造塑性設計指針の柱材の設計式は次式である.

 $P / Ncr + C M \cdot M 1 / \{ (1 - P / NE) \cdot Mcr \} = 1$  (4. 70)

指針による水平耐力Hplの算定に際しては,前章と同様にして求めた.

図4.24にHmax/Hpl-幅厚比関係, 図4.25(a), (b)にそれぞれ規 準の幅厚比制限値を満足する場合としない場合のN/Ncr-M1/Mp関係を実験値と ともに示している. 表4.2に実験よりえられた最大水平耐力(Hmax)およびその時 の水平変位(δmax)を示す. 同表中には,式(4.70)による水平耐力Hplも示 している.

図4.25(a)より規準の幅厚比制限値を満足すれば、指針の柱材の設計式で安全側に耐力を評価できることがわかる。しかしながら、図4.25(b)より指針の設計式では規準の制限値を超えた断面では、危険側となる場合が多いことが観察される.
 B<sub>-47</sub>





-87-



(a) 規準制限値を満足

(b) 規準制限值外



規準の幅厚比制限値を超えた板要素よりなる角形鋼管柱材の耐力として,式(4. 70)中のNcr, NE, Mcrの算定に際し, 終局曲げ耐力の項で示した有効幅の考え を用いた図4.19の斜線部を除いた断面を想定して、それぞれ座屈強度Ncr',オ イラーの座屈荷重NE',降伏モーメントMy'を対応させ水平耐力を算定した.

図4.24において規準の幅厚比制限値を超えたものに対しては上記のようにして 求めた Hmax/Hpl-幅厚比関係を図4.26に示す.また,図4.27に規準の幅 厚比制限値を超える角形鋼管に対してN/Ncr'-M1/My'関係を示している.

数例危険側となる場合もあるが、 式(4.70)で、Ncr、NE、Mcrに有効幅を 考えた上記の量と置き換えることにより、概ね安全側に耐力を評価できることがわか る. また,図4.25(b)に比べて,実験値とのバラッキが少ないことが観察され 3.



図4.26 Hmax/Hpl-幅厚比関係

# 表4.3 曲げ耐力および変形能力(既往の研究結果を含む)

| 1         1         2         4         3         1  | 連番   | 文献              | 試験体名       | 載荷         | σγ     | σц     | σγ   | В   | t    | B/t | (B/t)√€y | n    | λ  | Mmax  | R95   | Rprd  | 熱処理 鋼管製法    | 荷重条件         |
|--|------|-----------------|------------|------------|--------|--------|------|-----|------|-----|----------|------|----|-------|-------|-------|-------------|--------------|
| 2         x         2.25         HU3         3.9         4.18         4.9         4.69         ML         APRD+46CE         O           4         x         2.51         H124         3.95         4.3         0.81         1.18         4.93         4.65         ML         APRD+46CE         O           5         x         2.51         H124         3.07         ML         APRD+46CE         O           5         x         2.51         H124         3.07         ML         APRD+46CE         O           5         x         2.51         H134         4.25         5.27         0.85         5.8         6.1         2.0         0.10         1.0         -6.8         APRD<46CE   |      | 本章              | 221        | 単調         | 3.93   | 4.3    | 0.91 | 100 | 4.5  | 22  | 0.97     | 0.10 | 38 | 1.16  | 5.84  | 6.57  | 無し 冷間       | 0            |
| 3         4         7         255         4         3         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1         0         1  | 2    | 本章              | 223        | <b>開</b>   | 3.93   | 4.3    | 0.91 | 100 | 4.5  | 22  | 0.97     | 0.30 | 38 | 1.18  | 4.39  | 4.69  | 無し 冷間-10成形  |              |
| 4         x         251(1)         HEL         AGE         5.2         5.1         22         0.10         25         1.08         4.0         0.07         HEL         AGE         0           6         x         23         HEL         AGE         5.2         5.8   | 3    | 本章              | 225        | 単調         | 3.93   | 4.3    | 0.91 | 100 | 4. 5 | 22  | 0.97     | 0.50 | 38 | 1.29  | 4. 79 | 4.69  | 無し 冷間-ル成形   |              |
| s $\pi \alpha$ 251 (2)         HII         6.6         5.27         6.3         6.3         6.1         22         0.10         25         1.10         4.30         2.0         MIL         Andmu-AGEE         0           7 $\pi \alpha$ 233         MAX         4.40         5.27         0.40         5.1         2.1         2.0         30         2.1         1.0         4.33         2.0         MIL         Andmu-AGEE         0           9 $\pi \alpha$ 313         HUIN         4.40         5.12         0.6         1.3         2.1         4.6         0.0         35         1.68         1.8         0.5         MIL         Andmu-AGEE         0           10 $\pi \alpha$ 333         HUIN         Andmu-AGE         0         1.5         3.5         1.62         0.10         2.5         1.01         1.6         0.13         MIL         Andmu-AGEE         0         1.5         1.6         0.15         1.6         0.15         1.6         0.15         1.6         0.16         2.5         0.5         1.6         0.15         1.6         0.15         1.6         0.15         1.6         0.15         1.6         0.15   | 4    | 本章              | 251(1)     | 開開         | 4.64   | 5.27   | 0.88 | 150 | 5.8  | 26  | 1.22     | 0.10 | 25 | 1.08  | 4.20  | 3.07  | 無し 冷間-10成形  |              |
| 6 * A**       253       1423       1.6 6       5.2 7       0.8 15       5.8 2       1.2 2       0.0 3       25       1.1 1       4.33       2.20       ML       Action 2.35       0.0       0.0  | 5    | 本章              | 251(2)     | 里理         | 4.64   | 5.27   | 0.88 | 150 | 5.8  | 26  | 1.22     | 0.10 | 25 | 1.04  | 2.76  | 3.07  | 無し 冷間 成形    |              |
| 7         本電         11         HSI         4.4         5.25         1.20         0.3         1.21         1.00         2.5         1.00         2.5         ML         Pathere         D           9         水電         313         HJJJ         4.28         4.88         0.80         3.13         2.1         1.46         0.03         38         1.08         1.03         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         7.1         ML         Pathere         D         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         5.0         7.0         ML         Pathere         D         D         5.0         5.0         7.0         ML         Pathere         D <tdd< td=""><td>6</td><td>本章</td><td>253</td><td>開開</td><td>4.64</td><td>5.27</td><td>0.88</td><td>150</td><td>5.8</td><td>26</td><td>1.22</td><td>0.30</td><td>25</td><td>1.11</td><td>4.33</td><td>2.20</td><td>無し 冷間ロール成形</td><td>0</td></tdd<> | 6    | 本章              | 253        | 開開         | 4.64   | 5.27   | 0.88 | 150 | 5.8  | 26  | 1.22     | 0.30 | 25 | 1.11  | 4.33  | 2.20  | 無し 冷間ロール成形  | 0            |
| 8       A*W       311       H34       4.28       4.80       0.80       310       3.   | 7    | 本章              | 253        | 繰返し        | 4.64   | 5. 27  | 0.88 | 150 | 5.8  | 26  | 1.22     | 0.30 | 25 | 1.10  | -     | -     | 無し 冷間 成形    | 0            |
| 9         x         313         H 343         4.28         4.38         4.20         4.30         32         1.46         0.30         33         1.08         1.93         7.80         8.80         7.80         7.80         7.80         8.80         7.80         7.80         8.80         7.80         8.80         8.80         8.80         8.80         8.80         8.80   | 8    | 本軍              | 311        | 甲調         | 4.28   | 4.83   | 0.89 | 100 | 3.1  | 32  | 1.46     | 0.10 | 39 | 1.08  | 2.36  | 0.83  | 無し冷間ール成形    | 0            |
| $ \begin{array}{                                    $  | 9    | 本草              | 313        | 単調         | 4. 28  | 4.83   | 0.89 | 100 | 3.1  | 32  | 1.46     | 0.30 | 39 | 1.08  | 1.93  | 0.59  | 無し 冷間ロール以北  | 0            |
| $ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$  | 10   | 4               | 331        |            | 4. 49  | 5.12   | 0.00 | 150 | 4. 3 | 35  | 1.02     | 0.10 | 20 | 1.02  | 2.40  | 0.27  | 無し、行间にかりの   |              |
| 11       3.7 mg       3.2 mg       4.4 mg       5.1 mg       0.0 mg       1.0 mg  | 11   | <b>本早</b><br>大會 | 335        | 出現         | 4.49   | 5.12   | 0.00 | 150 | 4. 3 | 35  | 1.62     | 0.30 | 25 | 1 01  | 1.05  | 0.19  | 無」 冷問       |              |
| 14       4.49       5.12       0.88       1.50       1.52       0.30       25       1.63   | 13   | 大會              | 331        | <b>退返</b>  | 4 49   | 5 12   | 0.88 | 150 | 4 3  | 35  | 1.62     | 0 10 | 25 | 1 01  | -     | -     | 無1、冷間の-1成形  | (I)          |
| 15       末空       335       編集       4.4       5.12       0.8       1.6       0.45       25       0.93       -       編L       冷酷か (1)       (1) <th< td=""><td>14</td><td>本宣</td><td>333</td><td>緑返し</td><td>4.49</td><td>5.12</td><td>0.88</td><td>150</td><td>4.3</td><td>35</td><td>1. 62</td><td>0.30</td><td>25</td><td>1.03</td><td>-</td><td>-</td><td>無し 冷間-10形</td><td>(I)</td></th<>   | 14   | 本宣              | 333        | 緑返し        | 4.49   | 5.12   | 0.88 | 150 | 4.3  | 35  | 1. 62    | 0.30 | 25 | 1.03  | -     | -     | 無し 冷間-10形   | (I)          |
| 15       本案       411       [11] [13]       3.31       4.74       0.70       150       3.2       477       1.88       0.10       25       0.80       1.80       0.00       250       0.86       1.90       260       ML       2817       1.628       0.00       20   | 15   | 本章              | 335        | 緑返し        | 4.49   | 5.12   | 0.88 | 150 | 4.3  | 35  | 1.62     | 0.45 | 25 | 0.93  | -     | -     | 無し 冷間ロール成形  | 0            |
| 17       本電       473       田淵       3.31       4.74       0.70       150       3.2       477       1.88       0.00       25       0.66       1.52       0.00       無し、治雨でいなびき       ①         18       本電       475       田淵       3.31       4.74       0.70       150       3.2       477       1.88       0.50       25       0.66       1.55       0.00       無し、治雨でいなびき       ①         20       本電       475       田淵3       3.31       4.74       0.70       150       3.2       477       1.88       0.50       25       0.66       0.50       25       0.65       0.50       25       0.51       0.50       0.50       25       0.51       0.50       0.50       25       0.51       0.50       0.50       25       0.51       0.50       0.50       25       0.51       0.50       0.50       25       0.51       0.50       0.50       25       0.51       0.51       0.50       0.50       25       0.51       0.50       0.50       25       0.51       0.50       0.50       25       0.51       0.50       0.50       0.50       0.50       0.50       0.50       0.50       0.50       0.50 </td <td>16</td> <td>本章</td> <td>471</td> <td>単調</td> <td>3.31</td> <td>4.74</td> <td>0.70</td> <td>150</td> <td>3. 2</td> <td>47</td> <td>1.88</td> <td>0.10</td> <td>25</td> <td>0.90</td> <td>2.66</td> <td>0.00</td> <td>無し 冷間プレス成形</td> <td></td>  | 16   | 本章              | 471        | 単調         | 3.31   | 4.74   | 0.70 | 150 | 3. 2 | 47  | 1.88     | 0.10 | 25 | 0.90  | 2.66  | 0.00  | 無し 冷間プレス成形  |              |
| 18       本電       (472)       田辺       3.31       4.74       0.70       150       3.2       4.74       1.88       0.00       25       0.59       1.59       0.00       11  | 17   | 本章              | 473        | 単調         | 3.31   | 4.74   | 0.70 | 150 | 3. 2 | 47  | 1.88     | 0.30 | 25 | 0.86  | 1. 92 | 0.00  | 無し冷間プレス成形   |              |
| 19       本常       475       単型       3.31       4.74       0.70       150       3.2       47       1.88       0.50       25       0.65       2.40       0.00       無し       ○結問       ○公司       ※       ○○       ※       ○○       ◇>       ◇>       ○○       ◇>       ◇>       ○○       ◇>       ◇>       ◇>       ○○       ◇>       ◇>       ◇>       ○○       ◇>       ◇>       ◇>       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<       ◇<      <   | 18   | 本章              | 473D       | 民用         | 3.31   | 4.74   | 0.70 | 150 | 3. 2 | 47  | 1.88     | 0.30 | 25 | 0.96  | 1.59  | 0.00  | 無し 冷間プレス成形  | D            |
| 20 本電         476         相望         3.31         4.74         0.70         150         3.2         477         1.88         0.60         25         0.58         1.58         0.00         素し         大品野         ①           22 本電         473A         相望         3.31         4.74         0.70         150         3.2         47         1.88         0.30         25         0.92         1.05         1.09         0.00         素り         六日         六元         (※)         <   | 19   | 本章              | 475        | 民用         | 3.31   | 4.74   | 0.70 | 150 | 3.2  | 47  | 1.88     | 0.50 | 25 | 0.69  | 2.40  | 0.00  | 無し 冷間プレス成形  | 0            |
| 21 本電       (71A       1413       3.31       4.74       0.70       150       3.2       4.7       1.88       0.10       25       0.59       1.65       0.00       8.9       74DP 1262F       ①         23 本電       473A       H133       3.31       4.74       0.70       150       3.2       47       1.88       0.50       25       1.05       1.05       0.00       8.9       74DP 1267F       ①         24 本電       4716       H432       3.31       4.74       0.70       150       3.2       47       1.88       0.50       25       0.64       0.80       0.00       #1       74DP 1267F       ①         25 本電       4715       H433       3.87       4.875       0.79       150       3.3       46       1.97       0.3       25       0.66       1.80       0.00       #1       24DP 1267F       ①         28 本電       473       H433       3.84       4.859       0.86       150       2.5       60       2.59       0.66       1.80       0.00       #1       24DP 1267F       ①       3.3       3.3       4.51       2.5       0.5       0.55       0.00       #1<24DP 1267F  | 20   | 本章              | 476        | 単3月        | 3. 31  | 4.74   | 0.70 | 150 | 3.2  | 47  | 1.88     | 0.60 | 25 | 0.58  | 1.36  | 0.00  | 無し冷間プレス成形   | 0            |
| 22 本集       473       4134       413       3.31       4.74       0.70       150       3.2       47       1.88       0.50       25       1.09       0.00       あ9       76110       VARDE       0         24 本集       4756       4132       4126       4126       4126       1.01       150       3.2       47       1.88       0.50       25       0.84       0.80       0.00       50       51       76110       VARDE       0         25 本集       476       4132       1.84       0.70       150       3.2       47       1.88       0.50       25       0.84       0.80       0.00       #L       ARDE       0         27 本集       471       4133       3.87       4.875       0.79       150       3.3       46       1.97       0.1       25       0.56       1.80       0.00       #L       ARDE       0       28       4.1       3.94       4.589       0.86       150       2.5       60       2.59       0.3       25       0.57       0.00       #L       ARDE       0.00       #L       ARDE       0.00       #L       ARDE       ARDE       ARDE       ARDE       ARDE       ARDE  | 21   | 本軍              | 471A       | 甲調         | 3. 31  | 4.74   | 0.70 | 150 | 3. 2 | 47  | 1.88     | 0.10 | 25 | 0.99  | 1.60  | 0.00  | あり伶間フレス成杉   | 0            |
| 3 本本       4104       3.31       4.74       0.70       150       3.2       4.7       1.68       0.00       25       1.05       1.05       0.00       25       7.60       0.00       25       7.61       0.00       25       0.00       25       0.84       0.85       -  | 22   | <b>本単</b>       | 473A       | 甲調         | 3. 31  | 4. 74  | 0.70 | 150 | 3.2  | 47  | 1.88     | 0.30 | 25 | 0.92  | 1.05  | 0.00  | あり、冷間アレス成形  | 0            |
| 4 110       4110       4110       4110       4110       4110       4100       4110       4100       4110       4100       4110       4100       4110       4100       4110       4100       4110       4100       4110       4110       4100       4110  | 23   |                 | 473A       | 41.51      | 3. 31  | 4. 14  | 0.70 | 150 | 3. 6 | 41  | 1.00     | 0.50 | 25 | 1.05  | 1.09  | 0.00  |             |              |
| 25 本電       1150  | 25   | 本書              | 4730       | 線版し        | 3 31   | 4.74   | 0.70 | 150 | 3.2  | 47  | 1.00     | 0.10 | 25 | 0.03  | 0.80  | 0 00  | 無し冷問プレス成形   |              |
| 27 本章       471       単調       3.87       4.875       0.79       150       3.3       46       1.97       0.1       25       0.72       3.10       0.00       無し       六間町       vatp       0         28 本章       401       単調       3.84       4.885       0.75       1.50       2.5       60       2.59       0.1       25       0.65       1.75       0.00       無し       六間町       vatp       0       無し       六間町       vatp       0       無し       六間町       vatp       0       1.5       1.0       0.75       3.11       0.1       25       0.55       0.00       無し       六間町       vatp       0       無し       六間町       vatp       0       無し       六間町       vatp       0       1.0       78       1.11       1.1       25       0.55       0.00       無し       六間町       vatp       0       5.5       0.10       1.0       3.5       3.5       0.27       0.00       0.00       無し       六間町       vatp   | 26   | 本重              | 4760       | 緑返し        | 3. 31  | 4.74   | 0.70 | 150 | 3.2  | 47  | 1.88     | 0 60 | 25 | 0.54  | -     | -     | 無し冷間 以成形    | ()<br>()     |
| 28       本車       473       単調       3.87       4.875       0.79       150       3.3       46       1.97       0.5       25       0.66       1.80       0.00       無し 冷問が いなび形       ①         29 本車       601       単調       3.94       4.589       0.86       150       2.5       60.3       25       0.55       0.75       0.1       25       0.55       0.75       0.00       無し 冷問が いなび形       ①         31 本車       7151       単調       3.615       4.19       0.82       150       2.0       75       3.11       0.1       25       0.55       0.76       0.00       (0.00       無し 冷問が いなび形       ①         33 本車       941       単調       5.625       0.83       150       1.6       95       3.94       0.1       25       0.49       0.53       0.05       0.00       (0.40)       (0.40)       (0.40)       (0.40)       (0.40)       (0.40)       (0.40)       (0.40)       (0.40)       (0.41)       (0.40)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41)       (0.41) </td <td>27</td> <td>本章</td> <td>471</td> <td>開開</td> <td>3.87</td> <td>4.875</td> <td>0.79</td> <td>150</td> <td>3. 3</td> <td>46</td> <td>1.97</td> <td>0.1</td> <td>25</td> <td>0.72</td> <td>3.10</td> <td>0.00</td> <td>無し冷間 い成形</td> <td>Ũ</td>              | 27   | 本章              | 471        | 開開         | 3.87   | 4.875  | 0.79 | 150 | 3. 3 | 46  | 1.97     | 0.1  | 25 | 0.72  | 3.10  | 0.00  | 無し冷間 い成形    | Ũ            |
| 29 本章       601       単調       3.94       4.589       0.86       150       2.5       60       2.59       0.1       25       0.56       0.00       無し 冷問が いなび形       ①         30 本章       603       #133       3.94       4.589       0.86       150       2.0       75       3.11       0.1       25       0.55       0.76       0.00       無し 冷問が いなび形       ①         32 本章       753       #33       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.1       25       0.55       0.76       0.00       無し 冷問が いなび形       ①         33 本章       941       #433       3.615       4.419       0.82       150       1.6       95       3.94       0.1       25       0.27       0.00       0.00       無し 冷問が いなび形       ①         34 本章       943       #133       3.626       4.55       0.81       1.56       3.3       46       2.24       0.1       25       0.77       1.56       0.00       無し 冷問が いなび形       ①         35 本章       HT-WMA11       #33       3.74       #33       3.84       0.3       25       0.76       1.3       25       0.76       1.30  | 28   | 本章              | 473        | <b>開</b>   | 3.87   | 4.875  | 0.79 | 150 | 3.3  | 46  | 1.97     | 0.3  | 25 | 0.66  | 1.80  | 0.00  | 無し 冷間プレス成形  |              |
| 30       本車       603       単調       8.4       4.589       0.86       150       2.5       60       2.59       0.3       25       0.39       0.56       0.00       無し       24DT       0.00       第し       24DT       0.00       第し       24DT       0.00       第し       24DT       0.00       第し       24DT       25       0.27       0.00       0.00       無し       24DT       24DT       24DT       24DT       24DT       24DT       25DT       25       0.78       0.00       8.00       0.00       無し       24DT       24DT       24DT       24DT       25DT       25DT       0.00       8.00       8.00       150       1.6       95       3.94       0.1       25       0.77       0.00       0.00       #L       24DT       24DT       24DT       24DT       24DT       24DT       24DT       24DT       25DT  | 29   | 本章              | 601        | <b>開</b>   | 3.94   | 4.589  | 0.86 | 150 | 2.5  | 60  | 2.59     | 0.1  | 25 | 0.65  | 1.75  | 0.00  | 無し 冷間プレス成形  |              |
| 31         本車         753         単調         5.615         4.119         0.82         150         2.0         75         3.11         0.1         250         0.55         0.76         0.00         無し         冷晶が vack形         0           32         本車         941         単調         3.615         4.119         0.82         150         2.0         75         3.11         0.3         250         0.53         0.00         無し         冷晶が vack形         0           34         本車         941         単調         3.625         0.80         150         1.6         95         3.94         0.3         25         0.77         0.00         0.00         無し         冷晶が vack形         0           35         本車         HT-VMA14         単調         5.025         0.87         0.83         150         3.4         0.24         0.1         25         0.58         0.06         0.00         無し         冷晶が vack形         0           37         本車         HT-VM381         単調         8.615         0.79         10         3.25         1.58         0.00         無し         冷晶が vack形         0           37         本車         HT-VMA81         単調  | 30   | 本章              | 603        | 民用         | 3.94   | 4. 589 | 0.86 | 150 | 2. 5 | 60  | 2.59     | 0.3  | 25 | 0.39  | 0.56  | 0.00  | 無し 冷間プレス成形  |              |
| 32       本車       753       再33       本車       941       再33       515       4.419       0.82       150       2.6       95       3.94       0.1       25       0.27       0.00       0.00       無し 冷間が いるだ形       ①         33       本車       943       再33       526       4.535       0.80       150       1.6       95       3.94       0.1       25       0.27       0.00       0.00       無し 冷間が いるだ形       ①         35       本車       HT-WM471       再33       55       0.83       150       3.3       46       2.24       0.1       25       0.27       0.00       無し 冷間が いるだ形       ①         36       本車       HT-WM471       再34       458       159       0.81       150       2.6       57       2.76       0.3       25       0.56       0.00       無し 冷間か いるだ形       ①         38       本車       HT-WM81       再34       4.585       0.86       150       2.5       57       2.76       0.3       25       1.11       12.78       -       無し 冷間か いるだ形       ①         39       5章       CM473       再33       3.61       4.419       0.82       150       2.0       75<   | 31   | 本章              | 751        | <b>単</b> 調 | 3. 615 | 4.419  | 0.82 | 150 | 2.0  | 75  | 3.11     | 0.1  | 25 | 0.55  | 0.76  | 0.00  | 無し 冷間プレス成形  |              |
| 33 本章       941       甲34       5.26 4.535       0.80       150       1.6       95       3.94       0.1       25       0.27       0.00       無し       冷間か いるの形       ①         34 本章       943       単33       5.262       4.535       0.80       150       1.6       95       3.94       0.3       25       0.27       0.00       無し       冷間か いるの形       ①         35 本章       HT-WMA71       単33       5.025       6.087       0.83       150       3.3       46       2.24       0.3       25       0.58       1.06       0.00       無し       冷間か いるの形       ①         37 本章       HT-WM83       単34       9.68       6.15       0.81       150       2.6       57       2.76       0.1       2.5       0.00       無し       冷間か いるの形       ①         38 本章       HT-WM83       単33       8.61       4.859       0.86       150       2.5       60       2.5       1.11       12.76       -       無し       冷間か いるの形       ①       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       1.60       <  | 32   | 本章              | 753        | 単調         | 3.615  | 4.419  | 0.82 | 150 | 2.0  | 75  | 3.11     | 0.3  | 25 | 0.27  | 0.00  | 0.00  | 無し冷間」は成形    | 0            |
| 33<本章  | 33   | 本章              | 941        | 甲調         | 3.626  | 4. 535 | 0.80 | 150 | 1.6  | 95  | 3.94     | 0.1  | 25 | 0.49  | 0.53  | 0.00  | 無し冷間フレス成形   | Û            |
| 35 本章       H1 - WA11       単34       9,025 0.06 1.05       150 3.3 46       2.24       0.1 25       0.10       1.50       0.00       無し 冷問び いなの形       ①         36 本章       HT-WA15       単33       0.25 0.07       0.13       150       3.3 46       2.24       0.1 25       0.55       1.06       0.00       無し 冷問び いなの形       ①         38 本章       HT-WA15       単33       0.86       6.159       0.81       150       2.6       57       2.76       0.3 25       0.55       0.56       0.00       無し 冷問び いなの形       ①         39 5章       CM473       単33       3.87       4.875       0.79       150       3.3       46       1.97       0.3 25       1.11       12.78       一       無し 冷問び いなの形       ①         40 5章       CM4751       単33       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.1 25       1.11       17.65       -       無し 冷問び いなの形       ①       17       43       5       100       100       100       100       100       100       100       100       100       100       100       110       100       150       100       100       100       100       100 <td>34</td> <td>4早</td> <td>943</td> <td></td> <td>3. 626</td> <td>4. 535</td> <td>0.80</td> <td>150</td> <td>1.6</td> <td>95</td> <td>3. 94</td> <td>0.3</td> <td>25</td> <td>0.27</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>無し 冷間 いかい</td> <td>0</td>                            | 34   | 4早              | 943        |            | 3. 626 | 4. 535 | 0.80 | 150 | 1.6  | 95  | 3. 94    | 0.3  | 25 | 0.27  | 0.00  | 0.00  | 無し 冷間 いかい   | 0            |
| 35       本本       11       <  | 35   | 本早 大吉           | HT_VM473   | 出国         | 5.025  | 6.087  | 0.03 | 150 | 3.3  | 40  | 2.24     | 0.1  | 25 | 0.70  | 1.06  | 0.00  | 無し、冷間がいない   |              |
| 11         1   | 37   | 大言              | HT-VM581   | 曲頭         | 4 968  | 6 159  | 0.81 | 150 | 2 6  | 57  | 2 76     | 0.5  | 25 | 0.50  | 1 33  | 0.00  | 無1、冷間 以成形   |              |
| 39         5車         CM473         単調         3.87         4.875         0.79         150         3.3         46         1.97         0.3         25         1.11         12.78         -         無し         冷間方         以及成形         ①           40         5車         CM603         単調         3.94         4.589         0.86         150         2.59         0.3         25         1.09         7.08         -         無し         冷間方         以及形         ①           41         5車         CM751         単調         3.615         4.419         0.82         150         2.0         75         3.11         0.1         25         1.11         17.56         -         無し         冷間方         以及形         ①           42         5車         CM753         単調         3.615         4.419         0.82         150         2.0         75         3.11         0.4         25         1.05         4.61         -         無し         冷間方         以及成形         ①           43         5車         CM43         単調         3.62         4.535         0.80         150         1.6         95         3.11         0.4         25         1.05         .61   | 38   | 本宣              | HT-VM583   | 曲頭         | 4. 964 | 6.15   | 0.81 | 150 | 2.6  | 57  | 2.76     | 0.3  | 25 | 0. 55 | 0. 56 | 0.00  | 無し 冷間 以成形   | 0            |
| 40       5章       CM603       単調       3.94       4.589       0.86       150       2.5       60       2.59       0.3       25       1.09       7.08       -       無し       冷間7 12007       ①         41       5章       CM751       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.1       25       1.08       6.16       -       無し       冷間7 12007       ①         43       5章       CM754       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.4       25       1.08       6.16       -       無し       冷間7 12007       ①         44       5章       CM754       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.4       25       1.08       7.08       -       無し       冷間7 12007       ①         44       5章       CM751       単調       3.626       4.585       0.79       150       3.25       1.00       -       -       #       1.01       1.02       1.01       1.03       25       1.01       -       -       #       1.01       1.02       1.01  | 39   | 5章              | CM473      | 単調         | 3.87   | 4.875  | 0.79 | 150 | 3.3  | 46  | 1. 97    | 0.3  | 25 | 1.11  | 12.78 | -     | 無し冷間プレス成形   | 0            |
| 41       5章       CM751       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.1       25       1.11       17.56       -       無し       冷間がな成形       ①         42       5章       CM753       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.4       25       1.08       6.16       -       無し       冷間がな成形       ①         43       5章       CM754       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.4       25       1.08       6.16       -       無し       冷間がな成形       ①         44       5章       CM943       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.4       25       1.08       7.08       -       無し       冷間がな成形       ①         45       章       CC473       編返し       3.615       4.419       0.82       150       2.5       60       2.59       3.34       0.3       25       1.05       -       -       無し       冷間がな成形       ①         45       章       CC433       繰返し       3.65<   | 40   | 5章              | CM603      | 単調         | 3.94   | 4. 589 | 0.86 | 150 | 2.5  | 60  | 2.59     | 0.3  | 25 | 1.09  | 7.08  | -     | 無し 冷間プレス成形  |              |
| 42       5章       CM753       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.3       25       1.08       6.16       -       無し 冷間プレス応死       ①         43       5章       CM754       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.4       25       1.08       6.16       -       無し 冷間プレス応死       ①         44       5章       CM943       単調       3.615       4.419       0.82       150       1.6       95       3.94       0.3       25       1.08       7.08       -       無し 冷間プレス応死       ①         45       5章       CC473       繰返し       3.87       4.875       0.79       150       3.3       46       1.97       0.3       25       1.00       7       -       無し 冷間プレス応死       ①         46       5章       CC473       繰返し       3.626       4.535       0.80       150       1.6       95       3.94       0.3       25       1.05       -       -       無し 冷間プレx応死       ①         47       5章       CC943       繰返し       3.626       6.835       0.81       150       2.6  | 41   | 5章              | CM751      | <b>馬油</b>  | 3.615  | 4.419  | 0.82 | 150 | 2.0  | 75  | 3.11     | 0.1  | 25 | 1.11  | 17.56 | -     | 無し冷間プレス成形   |              |
| 43 5章       CM754       単調       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.4       25       1.05       4.61       -       無し冷間がな成形       ①         44 5章       CM943       単調       3.625       4.855       0.80       150       1.6       95       3.94       0.3       25       1.08       7.08       -       無し冷間がな成形       ①         45       5章       CC473       繰返し       3.87       4.875       0.79       150       3.3       46       1.97       0.3       25       1.00       -       -       無し冷間がな成形       ①         46       5章       CC473       繰返し       3.615       4.419       0.82       150       2.5       60       2.59       0.3       25       1.05       -       -       無し冷間がな成形       ①         47       5章       CC943       繰返し       3.615       4.419       0.82       150       2.6       53       3.11       0.3       25       1.05       -       -       無し冷間がな成形       ①         48       5章       CC943       繰返し       3.05       6.087       0.83       150       2.6       57       2.76       0.  | 42   | 5章              | CM753      | 民用         | 3.615  | 4.419  | 0.82 | 150 | 2.0  | 75  | 3.11     | 0.3  | 25 | 1.08  | 6.16  | -     | 無し 冷間プレス成形  | 0            |
| 44 5章       CM943       単調 3.626       4.535       0.80       150       1.6       95       3.94       0.3       25       1.08       7.08       -       無し 冷間が いた成形       ①         45 5章       CC473       繰返し       3.87       4.875       0.79       150       3.3       46       1.97       0.3       25       1.00       -       -       無し 冷間が いた成形       ①         46 5章       CC603       繰返し       3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.3       25       1.05       -       -       無し 冷間が いた成形       ①         47 5章       CC943       繰返し       3.626       4.535       0.80       150       1.6       95       3.94       0.3       25       1.05       -       -       無し 冷間が いた成形       ①         48 5章       CC943       繰返し       3.626       4.535       0.80       150       1.6       95       3.94       0.3       25       1.01       7.15       -       無し 冷間が いた成形       ①         50       5章       HT-CM473       4.948       6.159       0.81       150       2.6       57       2.76       0.3       25       0.98       - <td>43</td> <td>5章</td> <td>CM754</td> <td>民用</td> <td>3.615</td> <td>4. 419</td> <td>0.82</td> <td>150</td> <td>2.0</td> <td>75</td> <td>3.11</td> <td>0.4</td> <td>25</td> <td>1.05</td> <td>4.61</td> <td>-</td> <td>無し 冷間プレス成形</td> <td>0</td>  | 43   | 5章              | CM754      | 民用         | 3.615  | 4. 419 | 0.82 | 150 | 2.0  | 75  | 3.11     | 0.4  | 25 | 1.05  | 4.61  | -     | 無し 冷間プレス成形  | 0            |
| 45<5章  | - 44 | 5章              | CM943      | 単調         | 3.626  | 4. 535 | 0.80 | 150 | 1.6  | 95  | 3.94     | 0.3  | 25 | 1.08  | 7.08  | -     | 無し冷間プレス成形   | 0            |
| 46       5       CC003       練返し3.94.4.389       0.86       150       2.5       60       2.39       0.3       25       1.07       -       -       無した       2617       2007         47       5       CC753       繰返し3.615       4.419       0.82       150       2.0       75       3.11       0.3       25       1.05       -       -       無した       2617       2007       0         48       5       CC753       繰返し3.615       4.419       0.82       150       1.6       95       3.94       0.3       25       1.05       -       -       無した       2617       2007       0         49       5       年       HT-CM473       単33       5.025       6.087       0.83       150       3.3       46       2.24       0.3       25       1.01       7.15       -       無した       2617       2007       0       0       3.55       0.81       150       2.6       57       2.76       0.3       25       0.98       -       -       無した       2617       2007       10       10       10       10       10       10       10       10       10       10       10       10  | 45   | 5耳              | CC473      | 緑返し        | 3.87   | 4.875  | 0.79 | 150 | 3.3  | 46  | 1.97     | 0.3  | 25 | 1.10  | -     | -     | 無し冷間フレス成形   | 0            |
| 47       5車       CC733<   | 40   | 5 4             | CC603      | 親返し        | 3. 94  | 4. 589 | 0.80 | 150 | 2. 5 | 00  | 2. 59    | 0.3  | 25 | 1.07  | -     | -     | 無し 冷間7 以政形  | 0            |
| 49 5章       HT-CM473       単調       5.025 6.087       0.83       150       3.3       46       2.24       0.3       25       0.96       6.27       -       無し       冷間7 以成形       ①         50 5章       HT-CM583       単調       4.968       6.159       0.81       150       2.6       57       2.76       0.3       25       0.96       6.27       -       無し       冷間7 以成形       ①         51 5章       HT-CC473       繰返し       5.025       6.087       0.83       150       3.3       46       2.24       0.3       25       0.91       -       -       無し       冷間7 以成形       ①         52 5章       HT-CC473       繰返し       5.025       6.087       0.83       150       2.6       57       2.76       0.3       25       0.91       -       -       無し       冷間7 以成形       ①         53 4.17       B20-15       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.00       15       1.45       44.2       40.61       無し       冷接組立       ②         54 4.17       B20-20       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30   | 41   | 5 1             | 00133      | 報送し        | 3. 610 | 4. 413 | 0.02 | 150 | 2.0  | 15  | 3.11     | 0.3  | 25 | 1.05  |       |       | 無し、つ目がんなが   |              |
| 10       0.0       0   | 49   | 5 1             | HT-CM473   | 単調         | 5 025  | 6 087  | 0.83 | 150 | 3 3  | 46  | 2 24     | 0.3  | 25 | 0.96  | 6 27  | _     | 每1 冷問7 12成形 |              |
| 51<5章       HT-CC473       繰返し5.025       6.087       0.83       150       3.3       46       2.24       0.3       25       0.91       -       無し冷間プレス成形       ①         52<5章       HT-CC473       繰返し4.968       6.159       0.81       150       2.6       57       2.76       0.3       25       0.91       -       無し冷間プレス成形       ①         53       4.17       B20-15       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.00       15       1.45       44.2       40.61       無し       冷間プレス成形       ①         54       4.17       B20-20       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.00       15       1.45       44.2       40.61       無し       浴程組立       ②         54       4.17       B30-15       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       15       1.08       16.2       9.17       無し       浴程組立       ②         55       4.17       B30-30       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14  | 50   | 5章              | HT-CM583   | 単要         | 4. 968 | 6.159  | 0.81 | 150 | 2.6  | 57  | 2.76     | 0.3  | 25 | 1.01  | 7.15  | _     | 無し 冷間7 以成形  | <sup>O</sup> |
| 52<5章       HT-CC583       繰返し4.968       6.159       0.81       150       2.6       57       2.76       0.3       25       0.98       -       -       無し冷問がた30米       ①         53       4.17       B20-15       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.00       15       1.45       44.2       40.61       無し       浴接組立       ②         54       4.17       B20-20       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.00       15       1.45       44.2       40.61       無し       浴接組立       ②         55       4.17       B30-15       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       15       1.08       16.2       9.17       無し       浴接組立       ②         56       4.17       B30-20       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       20       1.07       11.5       7.94       無し       浴接組立       ②         57       4.17       B30-30       単調       3.05       4.48       0.68  | 51   | 5 1             | HT-CC473   | 繰返し        | 5.025  | 6.087  | 0.83 | 150 | 3.3  | 46  | 2. 24    | 0.3  | 25 | 0. 91 | -     | -     | 無し 冷間プレス成形  | Ō            |
| 53       4.17       B20-15       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.00       15       1.45       44.2       40.61       無し       溶接組立       ②         54       4.17       B20-20       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.00       20       1.35       26.7       35.17       無し       溶接組立       ②         55       4.17       B30-15       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       15       1.08       16.2       9.17       無し       溶接組立       ②         56       4.17       B30-20       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       20       1.07       11.5       7.94       無し       溶接組立       ②         56       4.17       B30-30       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       30       1.07       1.5       7.94       無し       溶接組立       ②         58       4.17       B40-15       単調       3.05<   | 52   | 5章              | HT-CC583   | 繰返し        | 4. 968 | 6.159  | 0.81 | 150 | 2.6  | 57  | 2.76     | 0.3  | 25 | 0.98  | -     | -     | 無し 冷間プレス成形  |              |
| 54 4.17       B20-20       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.00       20       1.35       26.7       35.17       無し       溶接組立       ②         55       4.17       B30-15       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       15       1.08       16.2       9.17       無し       溶接組立       ②         56       4.17       B30-20       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       20       1.07       11.5       7.94       無し       溶接組立       ②         56       4.17       B30-30       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       20       1.07       11.5       7.94       無し       溶接組立       ②         58       4.17       B40-15       単調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       15       1.07       3.6       1.51       無し       溶接組立       ②         59       4.17       B40-20       単調       3.05       4   | 53   | 4.17            | B20-15     | <b>開</b>   | 3.05   | 4.48   | 0.68 | 120 | 6.0  | 20  | 0.76     | 0.00 | 15 | 1.45  | 44.2  | 40.61 | 無し 溶接組立     | 2            |
| 55 4.17       B30-15       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       15       1.08       16.2       9.17       無し       溶接組立       ②         56       4.17       B30-20       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       15       1.08       16.2       9.17       無し       溶接組立       ②         56       4.17       B30-20       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       20       1.07       11.5       7.94       無し       溶接組立       ②         57       4.17       B30-30       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       30       1.07       6.7       6.48       無し       溶接組立       ②         58       4.17       B40-15       単調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       15       1.07       3.6       1.51       無し       溶接組立       ②         59       4.17       B40-20       単調       3.05       4.4   | 54   | 4.17            | B20-20     | 民用         | 3.05   | 4. 48  | 0.68 | 120 | 6.0  | 20  | 0.76     | 0.00 | 20 | 1.35  | 26.7  | 35.17 | 無し 溶接組立     | 2            |
| 56 4.17       B30-20       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       20       1.07       11.5       7.94       無し       溶接組立       20         57 4.17       B30-30       単調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       20       1.07       11.5       7.94       無し       溶接組立       20         58 4.17       B40-15       単調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       15       1.07       3.6       1.51       無し       溶接組立       20         59 4.17       B40-20       単調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       20       1.10       1.6       1.31       無し       溶接組立       20         60       4.17       B40-30       単調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       30       1.06       1.4       1.07       無し       溶接組立       20         61       4.17       B40-30       単調       3.05       4.48       0.68       120   | 55   | 4.17            | B30-15     | 民用         | 3.05   | 4.48   | 0.68 | 180 | 6.0  | 30  | 1.14     | 0.00 | 15 | 1.08  | 16.2  | 9.17  | 無し 溶接組立     | 2            |
| 57 4.17       B30-30       申調       3.05       4.48       0.68       180       6.0       30       1.14       0.00       30       1.07       6.7       6.48       無し       溶接組立       (2)         58 4.17       B40-15       申調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       15       1.07       3.6       1.51       無し       溶接組立       (2)         59 4.17       B40-20       申調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       20       1.10       1.6       1.31       無し       溶接組立       (2)         60 4.17       B40-30       申調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       30       1.06       1.4       1.07       無し       溶接組立       (2)         61 4.17       BC20-20-03       申調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.30       20       1.37       16.4       15.99       無し       溶接組立       (2)         62 4.17       BC20-20-06       申調       3.05       4.48       0.68       120       6.   | 56   | 4.17            | B30-20     | 用3月        | 3.05   | 4. 48  | 0.68 | 180 | 6.0  | 30  | 1.14     | 0.00 | 20 | 1.07  | 11.5  | 7.94  | 無し溶接組立      | 2            |
| 30 4.17       B40-10       単調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       15       1.07       3.6       1.51       無し       溶接租立       22         59       4.17       B40-20       単調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       20       1.10       1.6       1.31       無し       溶接租立       22         60       4.17       B40-30       単調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       30       1.06       1.4       1.07       無し       溶接組立       20         61       4.17       BC20-20-03       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.30       20       1.37       16.4       15.99       無し       溶接組立       20         62       4.17       BC20-20-06       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.60       20       1.77       23.6       15.99       無し       溶接組立       20         62       4.17       BC20-20-06       単調       3.05   | 57   | 4. 17           | B30-30     | 申33        | 3.05   | 4. 48  | 0.68 | 180 | 6.0  | 30  | 1.14     | 0.00 | 30 | 1.07  | 6.7   | 6. 48 | 無し 浴接組立     | 2            |
| 35 4.17       B40-20       単調       3.05       4.46       0.66       20       1.52       0.00       20       1.10       1.6       1.31       無し       密接組立       ②         60 4.17       B40-30       単調       3.05       4.48       0.68       240       6.0       40       1.52       0.00       30       1.06       1.4       1.07       無し       溶接組立       ②         61 4.17       BC20-20-03       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.30       20       1.37       16.4       15.99       無し       溶接組立       ②         62 4.17       BC20-20-06       単調       3.05       4.48       0.68       120       6.0       20       0.76       0.60       20       1.77       23.6       15.99       無し       溶接組立       ②  | 58   | 4.17            | B40-15     | 日に日日       | 3.05   | 4.48   | 0.68 | 240 | 6.0  | 40  | 1. 52    | 0.00 | 15 | 1.07  | 3.6   | 1.51  | 無し 浴接組立     | 0            |
| 61 4. 17 BC20-20-03 単調 3. 05 4. 48 0. 68 120 6. 0 20 0. 76 0. 30 20 1. 37 16. 4 15. 99 無し 溶接組立 ②<br>62 4. 17 BC20-20-06 単調 3. 05 4. 48 0. 68 120 6. 0 20 0. 76 0. 60 20 1. 77 23. 6 15. 99 無し 溶接組立 ②   | 59   | 4.17            | B40-20     | 中間         | 3.05   | 4.48   | 0.08 | 240 | 0.0  | 40  | 1. 52    | 0.00 | 20 | 1.10  | 1.0   | 1. 31 | 無し、冷悸祖立     | 0            |
| 62 4.17 BC20-20-06 単調 3.05 4.48 0.68 120 6.0 20 0.76 0.60 20 1.77 23.6 15.99 無し 济接組立 ②   | 61   | 4.17            | BC20-20-03 | 田田         | 3 05   | 4 48   | 83.0 | 120 | 6.0  | 20  | 0.76     | 0.00 | 20 | 1.00  | 16.4  | 15 99 | 無し 法接租立     |              |
|  | 62   | 4. 17           | BC20-20-06 | 里里         | 3.05   | 4. 48  | 0.68 | 120 | 6.0  | 20  | 0.76     | 0.60 | 20 | 1. 77 | 23.6  | 15.99 | 無し 溶接組立     | 2            |

表4.3 耐力および変形能力(つづき)

| 連番  | 文献    | 試験体名           | 載荷              | σу     | σu     | σγ    | В   | t    | B/t | (B/t)√ <i>ε</i> y | n    | λ  | Mmax  | R95  | Rprd  | 熱処理                                    | 理 鋼管製法     | 荷重条件       |
|-----|-------|----------------|-----------------|--------|--------|-------|-----|------|-----|-------------------|------|----|-------|------|-------|--|------------|------------|
| 63  | 4.17  | BC30-15-03     | HI.E            | 3.05   | 4. 48  | 0.68  | 180 | 6.0  | 30  | 1.14              | 0.30 | 15 | 1.15  | 4.5  | 4.17  | 無し                                     | 溶接組立       | (2)        |
| 64  | 4.17  | BC30-20-03     | 単調              | 3.05   | 4. 48  | 0.68  | 180 | 6.0  | 30  | 1.14              | 0.30 | 20 | 1.07  | 4.3  | 3.61  | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 65  | 4.17  | BC30-20-06     | 単調              | 3.05   | 4.48   | 0.68  | 180 | 6.0  | 30  | 1.14              | 0.60 | 20 | 1.02  | 4.1  | 3.61  | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 66  | 4.17  | BC30-30-03     | 単調              | 3.05   | 4.48   | 0.68  | 180 | 6.0  | 30  | 1.14              | 0.30 | 30 | 1.05  | 2.3  | 2.95  | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 67  | 4.17  | BC40-20-03     | 民用              | 3.05   | 4.48   | 0.68  | 240 | 6.0  | 40  | 1.52              | 0.30 | 20 | 1.04  | 0.9  | 0.60  | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 68  | 4. 20 |                | 単33             | 3.25   | -      | -     | 150 | 6.0  | 25  | 0.98              | 0.00 | 20 | 1.22  | 9.6  | 14.26 | 無し                                     | 冷間ロール成形    | 2          |
| 69  | 4.20  |                | 単調              | 3.4    | -      | -     | 200 | 6.0  | 33  | 1.34              | 0.00 | 15 | 1.17  | 5.8  | 4.02  | 無し                                     | 冷間ロール成形    |            |
| 70  | 4.20  |                | 単調              | 3.4    | -      | -     | 200 | 6.0  | 33  | 1.34              | 0.00 | 20 | 1.14  | 4.4  | 3.48  | 無し                                     | 冷間-100形    | 2          |
| 71  | 4. 20 | 1.1.1.1        | 甲調              | 3.45   | -      | -     | 200 | 6.0  | 33  | 1.35              | 0.00 | 30 | 1.01  | 2.8  | 2.71  |  | 行间中-100水   |            |
| 12  | 4.20  | M 25 00        |                 | 3.23   | 4 41   | 0 72  | 250 | 6.0  | 46  | 1.04              | 0.00 | 20 | 1.11  | 2. 5 | 0.30  |  | で同日の       | 0          |
| 74  | 4. 21 | M-25-15        | 44-34<br>(#) 94 | 3 24   | 4. 41  | 0. 13 | 150 | 5.1  | 26  | 1.03              | 0.00 | 24 | 1.14  | 19.1 | 10.97 | fer l                                  | 於接組立       | Ø          |
| 75  | 4 21  | M-25-30        | 曲四              | 3 24   | 4 41   | 0.13  | 150 | 5 7  | 26  | 1.03              | 0.10 | 24 | 1 19  | 3 9  | 4.99  | ······································ | 法接組立       |            |
| 76  | 4 21  | M-30-00        | 用四              | 3 24   | 4 41   | 0.73  | 150 | 5 7  | 26  | 1 03              | 0 00 | 29 | 1 12  | 11 9 | 9.96  | 無し                                     | 济接組立       | 2          |
| 11  | 4. 21 | M-30-15        | 単調              | 3. 24  | 4. 41  | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.15 | 29 | 1.16  | 4.8  | 4.53  | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 78  | 4.21  | M-30-30        | 単調              | 3.24   | 4. 41  | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.30 | 29 | 1.21  | 2.6  | 4.53  | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 79  | 4.21  | M-35-00        | 開開              | 3.24   | 4.41   | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.00 | 36 | 1.06  | 6.4  | 8.96  | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 80  | 4.21  | M-35-15        | 単調              | 3.24   | 4.41   | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.15 | 36 | 1.05  | 2. 9 | 4.07  | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 81  | 4. 21 | M-35-30        | 単調              | 3. 24  | 4.41   | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.30 | 36 | 1.14  | 2.5  | 4.07  | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 82  | 4.21  | C-25-30(3)     | 緑返し             | 3.24   | 4. 41  | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.30 | 24 | 1.19  | -    | -     | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 83  | 4. 21 | C - 30 - 00(3) | 緑返し             | 3. 24  | 4.41   | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.00 | 29 | 1.12  | -    | -     | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 84  | 4. 21 | C - 30 - 00(6) | 繰返し             | 3.24   | 4.41   | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.00 | 29 | 1.13  | -    | -     | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 85  | 4. 21 | C - 30 - 30(3) | 緑返し             | 3. 24  | 4.41   | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.30 | 29 | 1.20  | -    | -     | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 86  | 4.21  | C-30-30(6)     | 線返し             | 3.24   | 4. 41  | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.30 | 29 | 1.17  | 2.9  | 4. 53 | 無し                                     | 态接租工       | 2          |
| 87  | 4. 21 | C-35-15(3)     | HAL BEL         | 3. 24  | 4. 41  | 0.73  | 150 | 5.7  | 26  | 1.03              | 0.15 | 36 | 1.05  | -    | -     | 業し                                     | 俗接租工       |            |
| 88  | 4. 22 | A-20-15        | 甲調              | 2.99   | 4.65   | 0.64  | 175 | 9.0  | 19  | 0.73              | 0.15 | 21 | 1. 52 | 24.4 | 17.81 | 無し                                     | 府按租业       |            |
| 00  | 4.22  | A-20-30        | 44-34<br>(#)94  | 2.33   | 4.03   | 0.04  | 175 | 5.0  | 20  | 1 13              | 0.30 | 21 | 1.30  | 13.3 | 3 66  | 無し                                     | 济培组立       | 0          |
| 90  | 4.22  | A-30-30        | 曲四              | 3.17   | 4.46   | 0.71  | 175 | 6.0  | 29  | 1.13              | 0.15 | 21 | 1.20  | 5.6  | 3.66  | fee l                                  | 法接組立       | 0          |
| 92  | 4 22  | A-30-45        | 用明              | 3.17   | 4 46   | 0.71  | 175 | 6.0  | 29  | 1.13              | 0.45 | 21 | 1.45  | 4 9  | 3.66  | 無し<br>細し                               | 济接組立       | 2          |
| 93  | 4. 23 | A-20           | 単調              | 3.49   | 4.49   | 0.78  | 180 | 9.0  | 20  | 0.82              | 0.31 | 20 | 1.09  | 9.7  | 12.31 | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 94  | 4.23  | A-30           | 単調              | 3. 54  | 4. 52  | 0.78  | 180 | 6.0  | 30  | 1.23              | 0.29 | 20 | 0. 92 | 2.4  | 2.48  | 無し                                     | 态接租立       | 2          |
| 95  | 4. 23 | A-40           | 単調              | 3.1    | 4. 69  | 0.66  | 180 | 4.5  | 40  | 1.54              | 0.25 | 20 | -     | -    | -     | 無し                                     | 溶接組立       | 2          |
| 96  | 4. 27 |                | 単調              | 4.19   | 4.82   | 0.87  | 125 | 3. 2 | 39  | 1.74              | 0.33 | 30 | 0.78  | 1.1  | 0.00  | 無し                                     | 冷間成形       | 3          |
| 97  | 4.27  |                | 開調              | 4.19   | 4.82   | 0.87  | 125 | 3.2  | 39  | 1.74              | 0.17 | 30 | 0.82  | 1.6  | 0.00  | 無し                                     | 冷間成形       | 3          |
| 98  | 4.27  |                | 単調              | 4.19   | 4.82   | 0.87  | 125 | 3.2  | 39  | 1.74              | 0.00 | 30 | 0.86  | 2. 3 | 0.00  | 無し                                     | 冷間-16成形    | 3          |
| 99  | 4. 27 |                | 単調              | 3.73   | 4.56   | 0.82  | 125 | 4.5  | 28  | 1.17              | 0.33 | 31 | 1.01  | 3.8  | 2.50  | 無し                                     | 冷間成形       | 3          |
| 100 | 4. 27 |                | 単調              | 3.73   | 4.56   | 0.82  | 125 | 4.5  | 28  | 1.17              | 0.17 | 31 | 1.01  | 5.2  | 2.50  | 無し                                     | 冷間-100形    | 3          |
| 101 | 4.27  |                | 単調              | 3.73   | 4.56   | 0.82  | 125 | 4. 5 | 28  | 1.17              | 0.00 | 31 | 0.97  | 3.7  | 5.49  | 無し                                     | 冷間-1-60形   | 3          |
| 102 | 4.27  |                | 単調              | 3. 52  | 4.49   | 0.78  | 125 | 6.0  | 21  | 0.85              | 0.33 | 31 | 1.29  | 9.6  | 8.47  | 無し                                     | 伶間         | 3          |
| 103 | 4.27  |                | 甲調              | 3. 52  | 4.49   | 0.78  | 125 | 6.0  | 21  | 0.85              | 0.17 | 31 | 1.19  | 10.7 | 8.47  | 無し                                     | 合間1-10以北   | 3          |
| 104 | 4.21  |                | 単語              | 3. 52  | 4.49   | 0.78  | 125 | 6.0  | 21  | 0.85              | 0.00 | 31 | 1.07  | 11.1 | 18.63 | 無し                                     | 「市間リールの以下ジ | 3          |
| 105 | 4. 20 |                | 間に区し            | 3.13   | 4. 50  | 0.82  | 125 | 4. 5 | 20  | 1.17              | 0.33 | 31 | 1.01  |      | -     | 400 H                                  |            | 3          |
| 107 | 4 31  |                | 编版              | 4 19   | 4. 82  | 0.02  | 125 | 3 2  | 39  | 1.11              | 0.33 | 30 | 0.77  | -    | -     | 無<br>任                                 | 冷間一版形      | 3          |
| 108 | 4 31  |                | 縁返し             | 4 19   | 4 82   | 0.87  | 125 | 3.2  | 39  | 1.74              | 0.33 | 30 | 0.80  | -    | -     | 無し                                     | 冷閒-1成形     | 3          |
| 109 | 4. 36 |                | 単調              | 4.464  | 5.118  | 0.87  | 100 | 3.1  | 32  | 1.49              | 0.00 | 10 | 0.96  | -    | -     | 無し                                     | 冷間成形       | •          |
| 110 | 4.36  |                | 単調              | 3.96   | 4. 763 | 0.83  | 100 | 3.1  | 32  | 1.41              | 0.00 | 10 | 0.97  | -    | -     | あり                                     | 冷間-10成形    | 4          |
| 111 | 4. 36 | and the second | 単調              | 4. 464 | 5.11   | 0.87  | 100 | 3.1  | 32  | 1.49              | 0.00 | 10 | 0.99  | -    | -     | 無し                                     | 冷間-1-6成形   | 4          |
| 112 | 4. 36 | -              | 単調              | 4.608  | 5.256  | 0.88  | 100 | 4.2  | 24  | 1.10              | 0.00 | 10 | 1.03  | -    | -     | 無し                                     | 冷間-14成形    | ٢          |
| 113 | 4. 36 |                | 単調              | 3.852  | 4.66   | 0.83  | 100 | 4.2  | 24  | 1.01              | 0.00 | 10 | 1.04  | -    | -     | あり                                     | 冷間 成形      | 4          |
| 114 | 4.36  |                | 開開              | 4.608  | 5.256  | 0.88  | 100 | 4.2  | 24  | 1.10              | 0.00 | 10 | 1.01  | -    | -     | 無し                                     | 冷間-16成形    | 4          |
| 115 | 4. 36 |                | 開開              | 4. 373 | 5.037  | 0.87  | 100 | 5.7  | 18  | 0.81              | 0.00 | 10 | 1.09  | -    | -     | 無し                                     | 冷間 成形      | 4          |
| 116 | 4.36  |                | 民用              | 3. 729 | 4.614  | 0.81  | 100 | 5.7  | 18  | 0.74              | 0.00 | 10 | 1.12  | -    | -     | あり                                     | 冷間1成形      | 4          |
| 117 | 4.36  |                | 里里              | 4.373  | 5.037  | 0.87  | 100 | 5.7  | 18  | 0.81              | 0.00 | 10 | 1.14  | -    | -     | 無し                                     | 冷間         | <b>(4)</b> |
| 118 | 4. 37 |                | 繰返し             | 4.464  | 5.118  | 0.87  | 100 | 3.1  | 32  | 1.49              | 0.00 | 10 | 0.97  | -    | -     | 無し                                     | 冷間-10形     | 4          |
| 119 | 4.37  |                | 線返し             | 4.464  | 5.118  | 0.87  | 100 | 3.1  | 32  | 1.49              | 0.00 | 10 | 0.94  | -    | -     |  | 一个间口-10以北  |            |
| 120 | 4. 37 |                | 報返し             | 4. 608 | 5. 256 | 0.88  | 100 | 4.2  | 24  | 1.10              | 0.00 | 10 | 1.02  | -    | -     |  | 一日日の一小の文が  |            |
| 121 | 4.31  |                | 開き              | 4.608  | 5.119  | 0.88  | 100 | 4.2  | 24  | 1.10              | 0.00 | 10 | 1.04  | -    | -     | ##{し<br>##FI                           |            |            |
| 122 | 4. 30 |                | 44.36           | POP .P | 5 256  | 0.07  | 100 | J. 1 | 24  | 1.49              | 0.25 | 10 | 1 01  | -    | -     | fer l                                  | 冷間中止成形     |            |
| 123 | 4. 30 |                | 4434            | 4. 272 | 5.027  | 0.00  | 100 | 5 7  | 19  | 1.10              | 0.25 | 10 | 1.01  |      |       | 4mm I                                  |            |            |
| 124 | 4. 30 |                | 4.94            | 1. 515 | 5.051  | 0.01  | 100 | 5.1  | 10  | 0.01              | 0.25 | 10 | 1.13  | _    |       | mtu                                    |            |            |

# 4.4.4 変形能力

図4.28に示すように前章と同様に定義して求めた変形能力R95と幅厚比の関係 を図4.29に示す.また,表4.2に本章の,表4.3に既往の研究を含めた変形 能力の値を示している.既往の研究の変形能力は,各文献の図表から読み取ったもの であり,無次元量のpcは鋼管の実際の降伏応力度を用いて算定した.

図中に本章の実験結果を○印で,既往の研究によるものを□印で示している.図4. 29(a)は,全試験体について,図4.29(b)は無次元化幅厚比が1.8を超 える試験体は全塑性モーメントを期待出来ないので,無次元化幅厚比が2までの試験 体の変形能力を示している.

図より、本実験の結果はほぼ既往の研究と同じ辺りに位置していることがわかる. また、変動は大きいが、幅厚比が大きくなるにつれて変形能力は小さくなることがわ かる. 図中に一点鎖線で変形能力が6の値を示しているが、塑性設計指針の幅厚比制 限値を持つ試験体でも、変形能力6を期待できない場合もある.



図4.28 変形能力の定義



(a)全試験体

(b) 無次元化幅厚比の値(0-2)



角形鋼管柱材の変形能力の評価に関しては,三谷ら<sup>4.48</sup>)が変形能力予測式を提示 している.変形能力の予測値 R prd は次式で表現される.

Rprd = 
$$(6.8 / \beta^3 - 1.4) \cdot C / \sqrt{\lambda n}$$
 (4.71)

ここで,

 $\beta = (B/t)\sqrt{\sigma y/E}, \quad \lambda n = \lambda \cdot \sqrt{\sigma y/E}$   $C = 2 \cdot 2 - 8 n \quad (n \le 0 \cdot 1 \cdot 5)$  $C = 1 \quad (n > 0 \cdot 1 \cdot 5)$ 

図4.30に本章の実験結果と式(4.71)を比較している.図中の●印,○印 は、それぞれ軸力比nが0.1および0.3以上の実験値であり、実線は式(4.7 1)において、軸力比を0.1としたもの、破線は軸力比が0.15以上のものであ る.図4.30(a)は細長比がおよそ38の試験体、(b)は細長比が25の試験 体の結果である.降伏応力度は、図中に記した試験体の平均値を用いている.図より、 式(4.71)は、無次元化幅厚比が1.4より大きい場合は、過小評価しているが、 1.2以下では比較的良い評価をしていることがわかる.

図4.31には,既往の研究を含めた実験より得られたR95と式(4.71)のR prdの比較を示す.図4.31(a)は,全試験体を,図4.31(b)は変形能力が 20までの比較をしている.また,表4.3にはRprdの値を示している.

図中の実線はRprd=R95を、破線はRprd±2を示す.既往の実験を含めて試験体数78体のうち、22体がRprd±2の範囲には入らないが、耐震設計上重要と思われるR95 $\leq$ 10となる試験体では、この範囲に入らない試験体は66体中12個であり、変形能力R95が10以下となるものでは、式(4.71)は比較的よく変形能力を推定している.







- 4.4.5 解析結果の考察

図4.32に単調挙動を受ける試験体の実験結果と解析結果を示す.図より,幅厚 比が小さい試験体(B/t=22~31)では解析結果は局部座屈後耐力を過小評価 すること,幅厚比が大きい試験体(B/t=60~94)では過大評価することが観 察されるが,幅厚比が33,47の試験体では,比較的よく実験の座屈後挙動を予測 している.

幅厚比が小さいものでは、ひずみ効果の影響により抵抗力が上昇していること、幅 厚比が大きいものでは、弾性域で局部座屈が生じていることが、幅厚比が小さい場合、 大きい場合の解析結果と合わない原因であると考えられる.

本解析で全塑性モーメントに達した後,すぐに局部座屈を生じて抵抗力の低下をす る範囲(幅厚比33~47)の角形鋼管の局部座屈後挙動は比較的よい精度で予測で きる.

図4.35に図4.33に示す柱材が角形鋼管(幅厚比47),はり材がH形鋼よ りなる1層1スパン骨組の水平力-水平変位関係<sup>4.44)</sup>を示す.実験結果を●印で, 解析結果を実線および点線で示している.この骨組は柱脚が固定されており,柱頭お よび柱脚にヒンジができる柱崩壊型骨組である.角形鋼管の鋼材は本章の幅厚比47 (No.16-26)と同じものである.また骨組の柱頭には降伏軸力の30%の鉛直荷重が 作用しており,本章の試験体473(No.17)に対応している

解析方法は塑性ヒンジ法によるが、ヒンジ形成点でのモーメントー回転角関係は図 4.34に示すように3種類を与えた(解析方法の詳細は4章の付録に示している). 図4.34に示す実線(1)は、曲げ耐力は有効幅を考えてMyc'で与え、耐力後の 挙動は§4.3による解析結果(図4.28(m)の破線)を用いたものである.実 線(2)は曲げ耐力を全塑性モーメントMpcで評価し、その後の挙動は実線(1)と 同じものを用いた.点線(3)は、本章の試験体473(No.17)の結果である.図 4.35中の数字は、図4.34の数字に対応している.また、一点鎖線は骨組を線 材とした時の、剛塑性崩壊曲線である.



図4.32 解析結果と実験結果の比較(つづく)





図4.34 想定するM-θ関係



(a) M - θ 関係(1)、(3)
 (b) M - θ 関係(2)、(3)
 図 4.35 水平カー水平変位関係

図4.35より,実験によるモーメントー回転角関係をヒンジ部の特性として用い た破線(3)の結果は,実験挙動をよく追跡していることがわかる.解析によるモー メントー回転角関係を用いた解析は,図4.34(1)のMyc'で曲げ耐力を評価し た場合は,骨組の耐力を安全側に評価し,図4.34(2)のMpcで曲げ耐力を評価 した場合は過大評価している.しかしながら,実線(1),(2)とも最大耐力後の 挙動は,局部座屈を考慮していない崩壊曲線に比べると,よく追跡している.モーメ ントー回転角関係として図4.34の(1)を使用すると,幅厚比が33~47程度 の角形鋼管よりなる骨組の挙動を安全側に評価できると考えられる.

# §4.5 粘論

幅厚比が22~94よりなる角形鋼管柱の実験を38体行い,弾塑性挙動を調べた. 実験結果より次の結論が得られた.

1)角形鋼管柱は、フランジの局部座屈に引き続くウェブの局部座屈により抵抗力 が低下する.実験変数の影響は、a)軸力比の大きさは、幅厚比が小さい場合には変 形能力に影響をあたえ、幅厚比が大きくなると、変形能力だけでなく抵抗力にも影響 を与える.b)幅厚比の影響は、耐力および変形能力に影響を与える.

2)繰返し載荷の荷重変形関係で前回の変位反転点の荷重より小さい部分を除いて つなぎあわせた荷重変形関係は単調載荷の最大耐力,耐力時の変位とよく対応してい る.

3)鋼構造塑性設計指針の幅厚比制限値を満足する場合には、曲げ耐力は全塑性モ ーメントを期待できる.鋼構造設計規準の幅厚比制限値を満足しても、全塑性モーメ ントを期待出来ない場合もあり、完全に全塑性モーメントを期待するには、無次元化 幅厚比を1.4程度に抑える必要がある.

4) 鋼構造設計規準に規定されている幅厚比制限値を超える角形鋼管の終局曲げ耐 力は,図4.19に示す部分を有効として降伏モーメントを算定すればほぼ安全側に 評価できる.

5) 規準に規定されている幅厚比を満足すれば, 柱材の耐力は鋼構造塑性設計指針の柱材の設計式を使うことで安全側に評価できる.

6)規準に規定されている幅厚比制限値を超える中空鋼管柱材の耐力は、式(4.70)の基準量を有効断面に対するものに置き換えれば、ほぼ安全側に耐力を評価できる。

7)角形鋼管柱の変形能力は、三谷らの提案した変形能力予測式で評価できる。

8) 三谷らがH形鋼に対して行った局部座屈崩壊形を仮定した極限解析を角形鋼管 柱材に対して適用すると,幅厚比が33~47程度の角形鋼管の局部座屈後挙動を比 較的よく予測できる.しかし幅厚比が小さい角形鋼管は本解析では耐力を過小評価し, 大きいものでは過大評価する.

# 付録:1層1スパン骨組の局部座屈後挙動解析

4章の「§4.3局部座屈後挙動の解析」で柱材のモーメントー回転角関係を求めた.ここでは、部材の局部座屈を考慮した一定軸力と変動水平力を受ける1層1スパン骨組の水平力-水平変位関係の算定方法を示す.

解析仮定を以下に示す.

- 1.1層1スパン骨組は柱崩壊形であるとし,骨組は図A.1のようにモデル化する
- 2. 部材のせん断変形,軸方向変形は考慮せず,曲げ変形だけを考える
- 3. 柱はり接合部は弾性せん断変形をすると考える
- 4. 塑性ヒンジは1点に出来るとし、ヒンジ点でのモーメントー回転角関係は既知 であるとする(§4.3の解析,あるいは柱材の実験により求める)
- 5. 部材の剛性に及ぼす軸力の影響は考慮しない. すなわち柱材のモーメント図は 直線である. また, はりのせん断力による変動軸力も考慮しない.

解析仮定より,数学的モデルは図A.2(a)のようになる.図A.2(b)中に 計算に必要な諸量を定義している.

すなわち,

h : 骨組の階高 1: 骨組のスパンの半分

lrc:柱はり接合部パネルのせい/2 lrb:柱はり接合部パネル幅/2

x0:柱材の柱脚から反曲点までの距離

E :鋼材ヤング係数(=2100t/cm<sup>2</sup>) Ic :柱の断面 2 次モーメント

Ib:はりの断面2次モーメント k:骨組を線材とした時の剛比

G :鋼材のせん断弾性(=810t/dm<sup>2</sup>) (=lb·h/lc·l)

Mc : C点の曲げモーメント Mb : B点の曲げモーメント

Ma:柱はり接合部パネル中心でのモーメント

 $\theta cp: C点でのヒンジの回転角 <math>\theta dce: D点での弾性たわみ角(図A.3参照)$   $\theta bb: B点でのパネルの回転角(図A.3参照)$ 

 $\theta$  bp: B点でのヒンジの回転角  $\theta$  dbe: D点での弾性たわみ角(図A. 3参照)



図A.1 1層1スパン骨組の肘形骨組へのモデル化

θ ce: C 点での弾性部材角(図A.3参照)
 θ be: B 点での弾性部材角(図A.3参照)
 γ :パネルのせん断変形角 α : (=θ bb)
 β : γ - α t w :パネル部の

tw:パネル部のウェブの板厚の和



図A. 2 数学的モデル

間題を「図A.2のC点のモーメントMcを与えて, 水平力Hと水平変位δを求めること」と設定すると解析手順は次のようになる.

- 1. C点のモーメントMcを与える.
- 2. 解析仮定4より, Mcに対応するC点でのヒンジの回転角θ cpを求める.
  - 3. 柱の反曲点位置を柱脚よりx0とすると、 仮定5より柱頭B点でのモーメント Mbがx0をパラメータとして表現できる.
  - 4. 柱頭ヒンジ点 Bのモーメント Mbよりパネル部分の回転角 $\alpha$  (= $\theta$  bb), ヒンジ の回転角 $\theta$  bp, 弾性回転角 $\theta$  beが計算できる.
  - 反曲点 D でのたわみ角の連続条件は次式となる(図A.4参照).
     ここで、θ dce、θ dbeは図A.3に示すように、柱脚にそれぞれMb、Mcが作用する時の片持ちはりの先端のたわみ角である.

 $\theta \text{ cp} + \theta \text{ dce} = \theta \text{ bb} + \theta \text{ bp} + \theta \text{ dbe}$ 

(A. 1)



# 図A.3 諸量の定義

6. 上式より,反曲点位置x0を求めることができ,

7. 柱頭の水平変位δおよび水平力Ηは次式で求められる.

 $\delta = (\theta \operatorname{cp} + \theta \operatorname{ce}) \cdot x 0 + (\theta \operatorname{bb} + \theta \operatorname{bp} + \theta \operatorname{be}) \cdot (h - x 0 - 1 \operatorname{rc})$  $-\beta \cdot 1 \operatorname{rc} \qquad (A. 2)$ 

$$H = 2 \cdot (Ma + Mc) / h - 2 \cdot P \cdot \delta / h \qquad (A. 3)$$

以下に連続条件およびH, δの算定に必要な諸量の算定法を示す.

1)連続条件に必要な諸量 ( $\theta$  cp,  $\theta$  dce,  $\theta$  bb,  $\theta$  bp,  $\theta$  dbe)

 $\theta$  cpはモーメント解析仮定4よりMcに対応して求めることができる.  $\theta$  dceは長さ x 0の弾性片持ちばりの固定端のモーメントがMcの時の自由端のたわみ角であるから, 仮定2より次式となる.

 $\theta \, dce = Mc \cdot x \, 0 / (2 \cdot E \cdot I c)$ 

(A. 4)

モーメント図は直線であることより、MbはMcの関数として次式でえられる.

 $Mb = (h - 1 rc - x 0) \cdot Mc / x 0$ 

(A. 5)

 $\theta$  bpはMbに対応するヒンジの回転角であるから、 $\theta$  cpと同様に求めることができる.  $\theta$  dbeは $\theta$  dceと同様にして次式でえられる.

$$\theta \text{ dbe} = \text{Mb} \cdot (h - 1 \text{ rc} - x 0) / (2 \cdot \text{E} \cdot 1 \text{ c})$$
$$= \text{Mc} \cdot (h - 1 \text{ rc} - x 0)^2 / (2 \cdot \text{E} \cdot 1 \text{ c} \cdot x 0)$$
(A. 6)

 $\theta$  bb (=  $\alpha$ ) は以下のようもとまる. 接合部でのせん断変形角  $\gamma$  は図A. 5より

$$\gamma = \alpha + \beta = \frac{Mb - Qf \cdot 1 rb}{4 \cdot G \cdot t w \cdot 1 rc \cdot 1 rb}$$
(A. 7)

また、はり部材と柱はり接合部を図A. 6のように考え、はりの微分方程式をE点 でたわみが0、 F点でたわみが1 rb・a、たわみ角が $\beta$ の境界条件の下でとくと、 a と  $\beta$ の関係式が式(A. 8)で得られる.

 $(1 - 1 \text{ rb})^2 \cdot \text{Mf}/3 + \text{E} \cdot \text{Ib} \cdot (1 - 1 \text{ rb}) \cdot \beta = 1 \text{ rb} \cdot \alpha \cdot \text{E} \cdot \text{Ib}/2$ (A. 8)

式 (A. 8) 式右辺の MfをMcで表し、式 (A. 7)、 (A. 8) より、  $\alpha$ を求めると、  $\alpha$  (=  $\theta$  bb) は下式で表現できる.

 $\alpha = \theta$  bb =

$$\frac{h \cdot (1 - 1rb/1)^3 \cdot (h - x0) \cdot Mc}{3 \cdot k \cdot E \cdot Ic \cdot x0} + \frac{(1 - 1rb)}{8 \cdot 1rb \cdot 1rc \cdot G \cdot tw} \cdot \left\{2 \frac{h - 1rc - x0}{x0} \cdot Mc - \frac{21rb(h - x0) \cdot Mc}{1 \cdot x0}\right\}$$

(A. 9)





(a)はり、柱端の断面力 (b)パネル部のせん断力図A.5 柱はり接合部パネル部に作用するせん断力

図A.6 はり及びパネル部の変形

またβは下式で求まる.

$$\beta = \gamma - \alpha \tag{A. 10}$$

これらの値をD点での連続条件式(A.1)に代入すると,反曲点高さx0は次式で 表現される.

x 0 =

 $\frac{\operatorname{Mc} \cdot h^2 \cdot \{2 \cdot (1 - \ln b/1)^3/k + 3 \cdot (1 - \ln c/h)^3\}/6 \cdot E \cdot Ic + 2 \cdot \eta \cdot \operatorname{Mc} \cdot h \cdot (1 - \ln c/h - \ln b/1)}{\theta \operatorname{cp} - \theta \operatorname{bp} + \operatorname{Mc} \cdot h \cdot \{2 \cdot (1 - \ln b/1)^3/k + 6 \cdot (1 - \ln c/h)\}/6 \cdot E \cdot Ic + 2 \cdot \eta \cdot \operatorname{Mc} \cdot (1 - \ln b/1)}$ 

(A. 11)

ここで

 $\eta = \frac{(1-1rb/1)}{8 \cdot 1rb \cdot 1rc \cdot G \cdot t}$ 

上式中の諸量の諸量は、既知量であるのであるので、x0を算定することができる.

2) Hおよびるの算定に必要な諸量 ( $\theta$  cp,  $\theta$  ce,  $\theta$  bb,  $\theta$  bp,  $\theta$  be,  $\beta$ , x0, Ma)

 $\theta cp, \theta bb, \theta bp, \beta, x 0 d [1] 連続条件に必要な諸量」で求めた。<math>\theta ce, \theta be$ はそれぞれ長さx0, (h-x0-1 rc), 固定端のモーメントがMc, Mbである弾性片 持ちばりの部材角であるから(図A.3参照),次式で表せる.

 $\theta ce = Mc \cdot x 0 / (3 \cdot E \cdot I c)$  (A. 12)

 $\theta be = Mb \cdot (h - 1 rc - x 0) / (3 \cdot E \cdot I C)$  (A. 13)

Maはモーメント図が直線であることより、次式であらわせる.

 $M_a = (h - x_0) \cdot M_c / x_0$  (A. 14)

以上より,水平力H,水平変位δの算定ができる. C点でのモーメントを順次与えることにより,骨組の水平力-水平変位関係がもとまる.

# 第4章の参考文献

4.1)日本建築学会:鋼構造塑性設計指針, 1975.11.

- 4.2) 五十嵐定義, 辻岡静雄他: 冷間成形角形鋼管の軸引張・軸圧縮挙動に関する実験 的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1361-1362, 1983.10.
- 4.3) 五十嵐定義, 辻岡静雄他:冷間成形角形鋼管の材料強度特性について, 日本建築 学会大会学術講演梗概集, pp.1487-1489, 1984.10.
- 4.4)田淵基嗣,金谷弘,上森博:冷間ロール成形角形鋼管の材料特性と部材および接 合部の弾塑性性状-その1 鋼管の材料特性-,日本建築学会大会学術講演梗概 集,pp.969-970,1988.10.
- 4.5)加藤勉・青木博文:冷間成形角形鋼管の断面内における機械的性質に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1489-1490, 1984.10.
- 4.6)Kato B., Aoki H. and Narihara H. : Residual Stresses in Square Steel Tubes Introduced by Cold-Forming and the Influence on Mechanical Properties, International Meeting on Safety Criteria in Design of Tubular Structures, 1986.7.
- 4.7)加藤勉,青木博文,黒沢隆志:冷間成形角形鋼管の塑性ひずみ履歴と残留応力, 日本建築学会構造系論文報告集,第385号,pp.39-48,1988.3.
- 4.8) 辻文三,北川陽子:冷間成形角形鋼管材の材料特性,日本建築学会大会学術講演 梗概集,pp.1029-1030,1989.10.
- 4.9)加藤勉,西山功:冷間成形角形鋼管の局部座屈強さおよび変形能力,日本建築学 会論文報告集,第294号,1980.8.
- 4.10)Kato B. and Nishiyama I. : Inelastic Local Buckling of Cold-Formed Circular-Hollow Section and Square-Hollow Section Members, US-Japan Seminar on Inelastic Instability of Steel Structures and Structural Elements, 1981
- 4.11)川島義克,西村誠:角形鋼管柱の座屈耐力に関する研究(溶接および冷間成形の 影響),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.1007-1008, 1973.10.
- 4.12) 森脇良一,榊原秀雄他:角鋼管柱の座屈耐力に関する研究(中心圧縮の場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1011-1012, 1973.10.
- 4.13)加藤勉, 李明宰: 角形鋼管柱の最大耐力に関する研究, 日本建築学会大会学術講 演梗概集, pp.1359-1360, 1983.9.
- 4.14)Kato B. and Lee M. J. : Column Strength of Cold-Formed Square and Circular Hollow Section Members, 構造工学論文集, Vol.31B pp.135-142, 1985.3.
- 4.15) 辻文三,北川陽子:冷間成形角形鋼管材の座屈荷重と座屈後挙動,日本建築学会 大会学術講演梗概集, pp.1485-1486, 1990.10.
- 4.16) 辻文三, 北川陽子:冷間成形角形鋼管柱の中心圧縮座屈挙動, 日本建築学会大会 学術講演梗概集, pp.1307-1308, 1991.9.
- 4.17)加藤勉,秋山宏,北沢進,谷口元:箱型断面部材の塑性変形能力に関する実験的

研究 (その1,実験報告),日本建築学会関東支部研究報告集,pp.185-188, 1977.

- 4.18)加藤勉,秋山宏,北沢進,谷口元:箱型断面部材の塑性変形能力に関する実験的研究(その2,荷重-変形関係を表す実験式),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.1369-1370,1977.10.
- 4.19)加藤勉,秋山宏,北沢進,局部座屈を伴う箱型断面部材の変形,日本建築学会論 文報告集,第268号, pp.71-76, 1978.6.
- 4.20)加藤勉,秋山宏,北沢進,桜井史朗:箱型断面部材の塑性変形能力に関する実験的研究 (その3,冷間成形箱型断面部材の場合),日本建築学会大会学術講演 梗概集,pp.1309-1310,1978.9.
- 4.21)鈴木敏郎, 酒井新吉, 真家秀夫, 木村克次: 箱形断面部材の弾塑性挙動に関する 実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1153-1154, 1980.9.
- 4.22) 鈴木敏郎, 酒井新吉, 青木俊夫, 鵜飼司郎, 木村克次: 箱形断面部材の弾塑性挙 動に関する実験的研究(その2.リブによる補強効果について), 日本建築学会 大会学術講演梗概集, pp.2069-2070, 1981.9.
- 4.23)鈴木敏郎,酒井新吉,青木俊夫,鵜飼司郎,木村克次:スチフナ補剛箱形断面柱 部材の変形性状について:日本建築学会大会学術講演梗概集,pp1919-1920.
   1982.10.
- 4.24)山田稔, 辻文三, 徳田京誠: 複曲率曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性変形挙動および崩壊性状に関する研究(I:一方向載荷:N=1/3Ny):日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1923-1924, 1982.10.
- 4.25)山田稔, 辻文三, 徳田京誠: 複曲率曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性変形挙動および崩壊性状に関する研究(II:一方向載荷:t=3.2mm:N/Ny=0,1/6,1/3):日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.213-216, 1983.6.
- 4.26)山田稔, 辻文三, 徳田京誠: 複曲率曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性変形挙動および崩壊性状に関する研究(III:一方向載荷:t=3.2mm:N/Ny=0,1/6,1/3):日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1363-1364, 1983.9.
- 4.27)山田稔, 辻文三, 徳田京誠: 複曲率曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性変形挙動お よび崩壊性状に関する研究(IV:一方向および繰返し載荷):日本建築学会近 畿支部研究報告集, pp. 373-376, 1984.6.
- 4.28)山田稔, 辻文三, 徳田京誠: 複曲率曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性変形挙動お よび崩壊性状に関する研究(V:一方向および繰返し載荷):日本建築学会大会 学術講演梗概集, pp.1345-1346, 1984.10.
- 4.29)山田稔,河村広,谷明勲,山中耕一:複曲率交番繰り返し曲げを受ける角形鋼管 柱の弾塑性変形挙動および崩壊性状に関する研究(I:定変位振幅曲げ:N=1/3 Ny,δA=±30mm,±45mm):日本建築学会近畿支部研究報告集,pp.381-384, 1984.6.
- 4.30)山田稔,河村広,谷明勲,山中耕一:複曲率交番繰り返し曲げを受ける角形鋼管 柱の弾塑性変形挙動および崩壊性状に関する研究(ΙΙ:定変位振幅曲げ:N=1 /3Ny,δA=±30mm,±45mm):日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.1347-

1348, 1985.10

- 4.31)山田稔,河村広,谷明勲,山中耕一:複曲率交番繰り返し曲げを受ける角形鋼管 柱の弾塑性変形および崩壊性状に関する研究(ΙΙΙ:定変位振幅曲げ:N=1/3 Ny, b/t=35.1,δA=±20mm,±30mm):日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.469-472,1985.
- 4.32)山田稔,河村広,谷明勳,山中耕一:複曲率交番繰返し曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性変形ならびに崩壊性状に関する研究(IV:定変位振幅曲げ:N=1/3Ny, b/t=35.1,δA=±16.5mm,±20mm,±30mm):日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.679-680,1985.10.
- 4.33)山田稔,河村広,谷明勳,山中耕一:複曲率曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性 変形ならびに崩壊性状に関する研究(Ⅵ:定変位振幅曲げ,N/Ny=1/3,柱頭・柱脚 部に完全弾性回転バネを考慮した解析),日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1109-1110,1986.8.
- 4.34)山田稔,河村広,谷明勳,中川貴詞:複曲率曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性変形ならびに崩壊性状に関する研究(WI:一方向載荷:N=2/3Ny),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.1111-1112,1986.8.
- 4.35) 辻文三,北芳男:冷間成形角形鋼管柱の弾塑性挙動,日本建築学会大会学術講演 梗概集,pp.1305-1306,1991.9.
- 4.36)五十嵐定義,辻岡静雄,矢島悟,杉山茂徳:冷間成形角形鋼管断面の弾塑性曲げ 挙動に関する実験的研究(その1.単調載荷),日本建築学会大会学術講演梗概 集,PP.1349-1350, 1984.10.
- 4.37)五十嵐定義,辻岡静雄,矢島悟,杉山茂徳:冷間成形角形鋼管断面の弾塑性曲げ 挙動に関する実験的研究(その2.繰返し載荷),日本建築学会大会学術講演梗 概集,PP.1351-1352,1984.10.
- 4.38) 五十嵐定義, 辻岡静雄, 杉山茂徳, 伊田健二:冷間成形角形鋼管断面の定軸圧下 での弾塑性曲げ性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.677-678, 1985.10.
- 4.39) 辻岡静雄,五十嵐定義,杉山茂徳:冷間成形角形鋼管部材の弾塑性曲げ性状に関 する実験的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1113-1114, 1986.8.
- 4.40) 三谷勲, 松井千秋, 津田恵吾:角形鋼管柱の塑性変形能力評価式, 日本建築学会 大会学術講演梗概集, pp.1299-1300,1984.
- 4.41)加藤勉:閉断面部材の局部座屈と変形能力,日本建築学会構造系論文報告集,第 378号,1987.8.
- 4.42)日本建築学会:鋼構造設計規準, 1970.5.
- 4.43) 三谷勲,牧野稔,松井千秋:H形鋼柱の局部座屈後の変形性状に関する解析的研究,その1 単調荷重を受ける場合,日本建築学会論文報告集,第296号, pp. 37-47,1980.10.
- 4.44) 松井千秋,池崎正浩:鉛直荷重と水平力を受けるコンクリート充塡角形鋼管構造 骨組の弾塑性性状について,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.2123-2124, 1981.9.