

繰返し力を受ける鋼管トラスの終局挙動 (続報) (その2 解析)

X 5. 載荷実験	Y 1. 鋼管 Y 3. トラス節点 Y 6. トラス	Z 2. 最大耐力 Z 3. ポスト・バックリング
-----------	-----------------------------------	------------------------------

正会員 ○山成 實¹ 同 小川厚治² 同 牧野雄二² 同 黒羽啓明³
同 仲宗根淳⁴ 同 坂本 傑⁵ 同 山下正弘⁶

1. 序 本報では、相対的に弦材が強く弦材座屈が生じないような鋼管トラスに関する非線形解析法を示し、前報で報告した試験体 T-3 の実験結果と比較する。

2. 非線形解析法 解析方法は、荷重と変形の微小増分間の線形関係を仮定した剛性マトリックス法で、各節点に構面内の並進変位と回転の 3 自由度を考慮するとともに、斜材材端には斜材材軸方向の継手変形を表す自由度を考慮している。以下では、各構造要素のモデル化について述べるが、幾何学的非線形性としては、節点の有限変形による力の釣合状態の変化のみを考慮している。

2-1) 弦材 弦材のモデル化に際しては、一般化塑性ヒンジの概念を用いた。ただし、断面の軸力 N -曲げモーメント M 降伏条件式としては、次式を用いている。

$$|M/M_p| - \cos(\pi N/2N_y) = 0 \quad (1)$$

2-2) K 継手の耐力 K 継手の終局耐力は、図 1 のように 2 つの斜材の軸力を表す 2 次元応力平面上で考え、図 1 のような耐力多角形で定義した。この耐力多角形は、次のような既往の実験データ^{1), 2)}に基づいている。

- I) 一方の斜材の軸力が零のときの継手耐力は、Y 継手の圧縮耐力 yN_{u1} 、引張耐力 yN_{u1}' で表される。
- II) 2 つの斜材の軸力の弦材垂直方向成分が釣合う場合には、圧縮斜材の最大軸力は K 継手の耐力 kN_u となる。しかし、圧縮斜材が上記最大軸力を維持した状態で引張斜材の軸力は更に上昇可能で、その上界はパンチングシアー耐力 kN_p である。圧縮斜材軸力の上界としては、

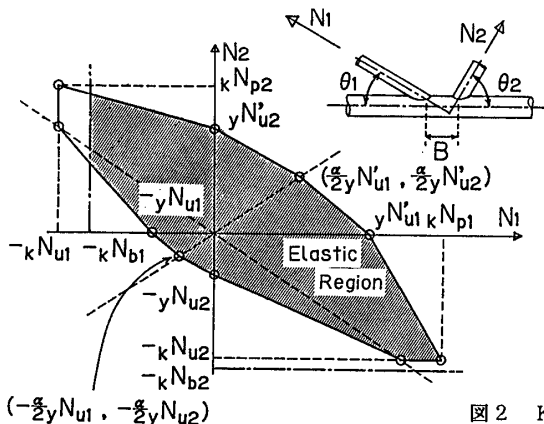


図 1 K 継手の耐力多角形

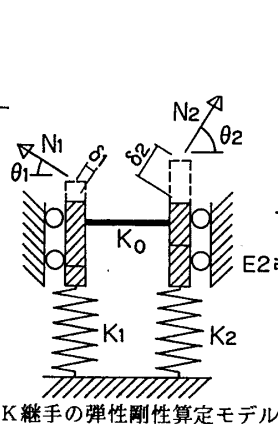


図 2 K 継手の弾性剛性算定モデル

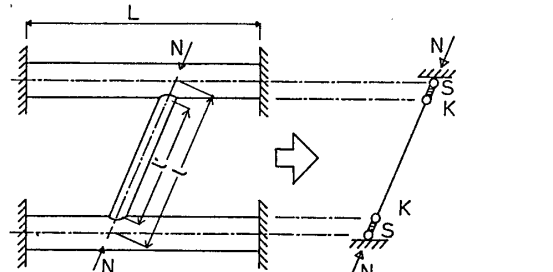


図 3 斜材座屈長さ算定モデル

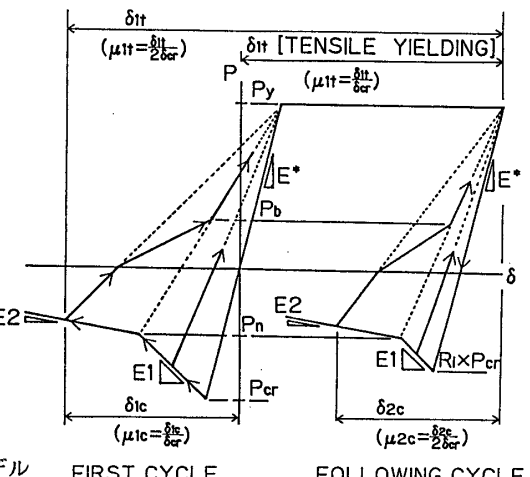


図 4 中心圧縮柱履歴モデル

局部座屈耐力 kN_b も存在する。

III) 2 つの斜材の軸力の符号が等しいような K 継手の実験データはないが、リブ補強継手と同様に考えると、2 つの斜材の軸力の弦材垂直方向成分が等しいとき、その和は T 継手の耐力の α 倍となる。 α は、2 つの斜材の材軸の弦材管壁上距離 B によって次の値をとる。

$$\alpha = 1 + B/4D \quad \text{ただし、} 1 \leq \alpha \leq 2 \quad (2)$$

2-3) 継手の剛性 T 継手の軸方向弾性剛性 τKa としては、次式を既に提案している³⁾。

$$\tau Ka = 1.43ED(T/D)^2 \cdot \exp(2.77d/D) \quad (3)$$

K 継手の軸方向剛性については、未だ十分な研究成果がないので、継手局部変形が弦材管壁に鉛直の方向にし生じないと仮定し、図 2 に示すようなせん断バネ K_0 と弦材管壁に垂直な軸方向バネ K_1, K_2 からなるモデルでその剛性を考えた。このバネ系の 1 方にのみ外力が作用したときの剛性は (3) 式の値となると考え、両方に等しい外力が作用したときの剛性は (2) 式に示した α 倍と

なると仮定すれば、K継手の弾性剛性は次式となる。

$$\begin{Bmatrix} N1 \\ N2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (K1+K0) / \sin^2 \theta_1 & -K0 / \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 \\ -K0 / \sin \theta_1 \sin \theta_2 & (K1+K0) / \sin^2 \theta_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta 1 \\ \delta 2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

塑性化した継手の剛性は、上式と前項の耐力多角形および塑性流動則を用いて誘導した。

2-4) 斜材 考察対象とする斜材を除く全ての斜材による弦材の変形拘束を無視した図3に示すモデルで斜材の構面外座屈を考えた。ただし、Sは節点の回転剛性であり、Kは継手の回転剛性である。Sの下界として、ねじれ剛性を用いると、次式を得る。

$$S \geq 4 G I_p / L \quad (5)$$

ここで、 $G I_p$ は弦材のねじり剛性、Lは弦材のねじれ変形拘束点間距離である。また、Kの下界としてT継手の構面外剛性 τK_0 を考え、 τK_0 として次式を用いる³⁾。

$$K \geq \tau K_0 = 2040 D^3 \exp((2.65d/D-11)(D/T)^{0.15}) \quad (6)$$

(5),(6)式を用いて図2のモデルから座屈長さを求めれば、座屈長さの上界が得られる。

このようにして斜材の細長比を算定し、斜材の軸力一軸方向変形は図4に示す履歴則に従うと仮定して、斜材の座屈後挙動を解析した。図4のモデルは、MarshallおよびShermanによる鋼管中心圧縮柱の履歴モデルを筆者らが実験値を元に若干の修正を加えたものである。図中の記号については、文献4)を参照されたい。

3. 解析結果と考察 図5~7に試験体T-3の解析結果を破線で示し、実線で示した実験結果と比較する。

図5は節点4の鉛直変位 Δ とジャッキ荷重Pの関係を示している。解析においても最大荷重時に斜材5が座屈しており、実験における斜材3の最大軸力は11.2ton、処女載荷時除荷点での軸方向変形は9.0cmであり、解析ではそれぞれ11.2ton、8.0cmである。解析結果が、実験結果をよく近似していることが分かる。

図6は、実験において材端部で破断した斜材3の軸力

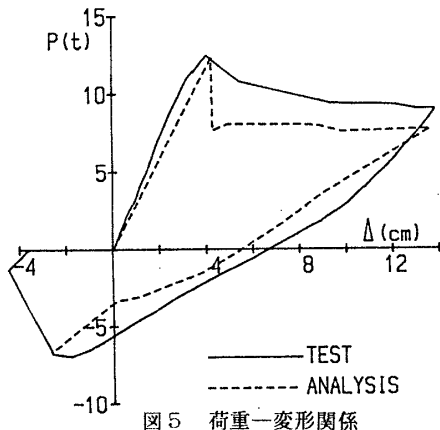


図5 荷重-変形関係

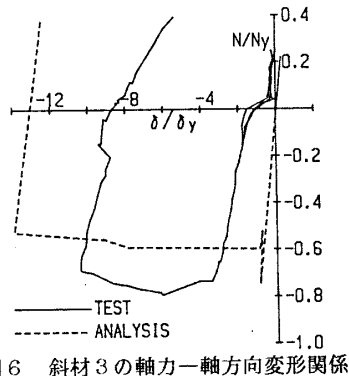


図6 斜材3の軸力-軸方向変形関係

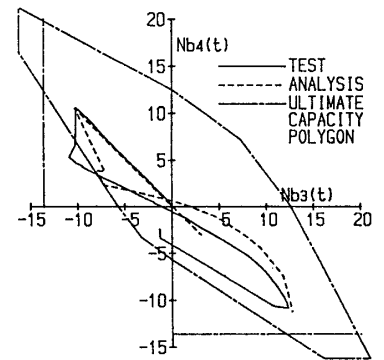


図7 節点7・K継手の応力履歴

一軸方向変形関係である。ただし、軸方向変形は材端節点間距離の変化量であり、継手部の変形を含んでいる。実験結果、解析結果いずれもが、処女載荷時に概ね一定の圧縮軸力下で比較的大きな塑性変形を生じていることを示している。解析結果におけるこの軸方向塑性変形は継手の局部変形によるが、実験においても斜材3に貼付したひずみゲージにはさほど大きなひずみ度は現れず、この塑性変形が継手部に生じたと考えられる。このように処女載荷時から大きな継手局部変形を生じたことが、逆載荷時に節点7の斜材3材端部に亀裂が生じた原因であろう。

図7は、節点7の2つの斜材の軸力履歴を示したものであり、鎖線は前節で定義したK継手の耐力多角形である。ただし、継手耐力は弦材軸力によって変動するので、処女載荷時除荷点での弦材軸力を用いて継手多角形を求めている。図7の解析結果によれば、斜材5の座屈による応力の再配分過程で斜材4の引張軸力が小さくなり、この斜材4の軸力低下が節点7におけるK継手の圧縮斜材(斜材3)の耐力低下を招き、継手が塑性化していることが分かる。実験値も概ね同様の応力経路をとっており、前節に示した耐力多角形の合理性を示唆している。

<謝辞> 本研究の実験データ整理に関しては卒論生河津伸宜君、酒井弘文君をはじめとする黒羽研究室の皆様の大御協力を得た。また研究の遂行に当たっては文部省科学研究費一般研究Cの援助をうけた。

<参考文献> 1) Kurobane, Y., Makino, Y. and Ochi, K., "Ultimate Resistance of Unstiffened Tubular Joints", JI. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 110, No. 2, Feb. 1984 2) Kurobane, Y., Ogawa, K., Ochi, K. and Makino, Y., "Local Buckling of Braces in Tubular K-Joints", Thin-Walled Structures, Vol. 4, No. 1, 1986, pp. 23-40 3) 坂本・箕島: 八角形鋼管T形分岐継手の力学性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭54.9 4) Matumoto, T., Yamashita, M., Murase, Y., Harada, H., Hashinaka, I., Sakamoto, S. and Iida, T., "Post-Buckling Behavior of Circular Tube Brace under Cyclic Loadings", Proc. Int. Meeting on Safety Criteria in Design of Tubular Structures, Tokyo, March 1987

・1熊本大学助手 ・2同助教授・工博 ・3同教授・工博 ・4同大学院生 ・5住友金属工業(株)・工博 ・6三菱重工業(株)