

H形鋼柱の弾塑性ねじり挙動に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON TORSIONAL BEHAVIOR OF
ELASTO-PLASTIC H-COLUMNS

山尾敏孝* 崎元達郎**

By Toshitaka YAMAO and Tatsuro SAKIMOTO

Torsional behaviors of elasto-plastic thin-walled H section columns are studied experimentally and theoretically. Five specimens are tested under axial compression and torsion. Attention is focused on the effects of warping constraint on the torsional behavior.

Evaluation of torsional rigidity and torque-strain relationship in the elasto-plastic range are studied. The test results are compared with the results of nonlinear analysis for the test specimen and good correspondence is found between them.

1. まえがき

鋼薄肉構造物は、最近、溶接技術の進歩に伴ってますます大型化、薄肉軽量化する傾向にある。そして構造物はその極限状態を規準に設計したほうがより合理的、経済的であるという考え方から、圧縮や曲げを受ける立体構造物の有限変位弾塑性解析がきかんに行なわれており、その座屈挙動や耐荷力特性が明らかにされてきた^{1)~5)}。

しかしながら、これらの耐荷力解析においては、ほとんどが閉断面部材に関するものであり、開断面部材に関しては非常に少なく、特に、軸力、曲げおよびねじりの組合せ応力を受けて部分的に降伏した断面のサンブナンのねじり剛度およびそりねじり剛度の評価は必ずしも明確にされていないのが現状である。また、ねじりに関する実験的研究としては、FarwellらのH形鋼の非弾性ねじり実験⁶⁾、木村らの薄肉矩形断面材の弾塑性ねじり実験⁷⁾、宇佐美のアンクル材を用いた軸力、曲げおよび一様ねじり実験⁸⁾等があるが、これらはねじり力のみを作用させたもの、あるいはそり拘束の影響を考慮していない。また、そり拘束については、木村らがH形鋼柱の弾塑性ねじり実験⁹⁾を行なって、降伏後のねじり挙動を調べている。さらに藤井らはH形鋼梁についてそり拘束の度合を実験的に調べている¹⁰⁾程度で、実験データは非常に少ないようである。

そこで本研究では、軸力部材のねじりを伴う座屈現象の解明に必要な基礎データを得ることを主眼に、そり拘束の影響が大きく、現実にも用いられる溶接H形断面材を供試体を選んで、軸力とねじり力を組み合わせ

* 工修 熊本大学助手 工学部土木工学科 (〒860 熊本市黒髪 2丁目39-1)

** 工博 熊本大学教授 工学部土木工学科 (同上)

て載荷し、両端部をそり拘束した時の弾塑性ねじり挙動についての実験を行なった。また、並行して進めていた薄肉弾性ばり理論を基にして誘導した有限変位弾塑性解析法¹¹⁾の仮定の妥当性やねじり剛性の評価法について検討した。なお、ねじり実験は特に次の点に注意して行なった。

- (a) そり拘束した時のH形鋼柱の弾塑性ねじり挙動の把握
- (b) 供試体端部の塑性化によるそり拘束度の変動の確認
- (c) 弾塑性状態でのせん断ひずみ挙動の把握
- (d) ひずみ硬化域の発生の有無と耐荷力の評価

表 1 供試体の断面諸量

No.	L	λ_z	h	b	t_f	t_w	A	α
HT-1	652.9	20	80.6	80.4	5.8	5.8	13.34	0.2
HT-2	1280.0	39	81.4	80.0	5.9	5.9	13.54	0.2
HT-3	1935.1	59	78.9	79.9	6.1	6.1	13.74	0.2
HT-4	1277.5	40	80.3	80.9	5.8	5.8	13.38	0.0
HT-5	1277.3	40	79.9	80.7	5.8	5.8	13.35	0.4
Remarks	λ_z : Slenderness ratio (= L/r_z) α : Axial load (= P/P_y)							

2. ねじり実験の概要

(1) 供試体の設計

供試体の基本寸法は次の点を考慮して決定した。

- 1) 断面構成板は最終状態まで局部座屈が生じない板厚である。
- 2) 溶接集成による残留応力が切断法により測定可能な程度に十分大きい寸法のH形断面である。
- 3) 部材の最高圧縮荷重は、現有のオルゼン試験機の載荷能力(100 ton)以内である。

以上の設計条件により決定した供試体の細長比 L/r_z (ここに、 L = 柱の長さ、 r_z = 強軸に対する断面二次半径)は20, 39, 59の3種類で、断面寸法は $80 \times 80 \times 6 \times 6$ のH形断面である。製作した供試体の実寸法と諸元を表1、図1に示す。

また、供試体名は表1のように付け、軸力 $\alpha = P/P_y$ (P_y は全断面降伏荷重)を一定にして細長比を20~59に変化させたケースと、細長比を一定にして軸力 α を0~0.4と変化させたケースの計5体について行なった。なお、与えた軸力は、軸力のみで降伏しないように部材の圧縮残留応力を考慮して、 $0.4 P_y$ 以下とした。

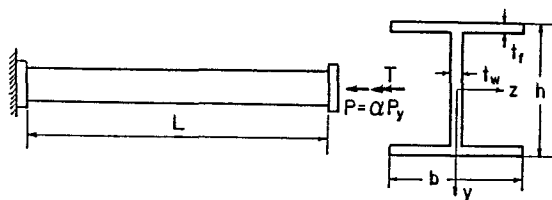


図 1 供試体の形状寸法

表 2 材料の機械的性質

Test Specimen	HT-1, 4, 5		HT-2, 3	
	Mill Sheet	Measured Value	Mill Sheet	Measured Value
Plate Thickness t mm	6.0	5.7	6.0	5.4
Young's Modulus E kg/cm ²	—	2.17×10^6	—	2.08×10^6
Strainhardening's Modulus E_{sl} kg/cm ²	—	1.11×10^4	—	5.33×10^4
Yield Stress σ_y kg/cm ²	2800	2810	3100	2975
Max. Strength σ_m kg/cm ²	4200	4354	4500	4230
Yield Strain $\epsilon_y \times 10^{-6}$	—	1460	—	1370
Strainhardening Strain $\epsilon_{sl} \times 10^{-6}$	—	18700	—	26700
Elongation δ %	33.0	33.0	27.0	45.5

(2) 予備試験

実験供試体を製作した鋼材(SS-41)についてJIS 5号試験片で引張試験を行なった。その結果を表2に示す。なお実験が2ケ年にわたった為表に示すように二種類の材料を使用することになったが、基本的な性質は大差なく、解析値との比較の上では支障がないと考えた。

次に溶接集成に際して導入された残留応力の大きさと分布形状を知るために、本実験供試体

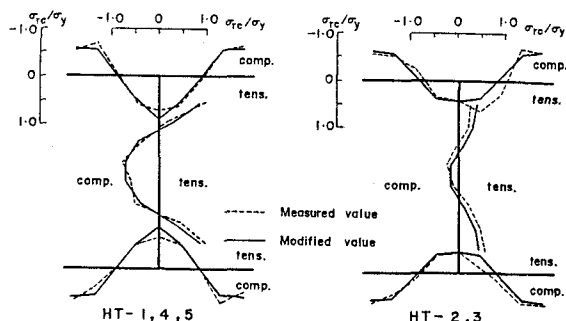


図 2 残留応力分布

と同一寸法，同一溶接条件の供試体を製作し，機械的切断による応力解放法を用いて測定した。測定値は自己平衡条件と二軸対称補正值により修正した。図2は両者を示しているが，修正した圧縮残留応力の最大値は，HT-1,4,5材では，フランジ部が $0.58\sigma_y$ ，(σ_y ；降伏応力)，ウェブ中央が $0.69\sigma_y$ であり，HT-2,3材では，フランジ部が $0.60\sigma_y$ ，ウェブ中央が $0.17\sigma_y$ であった。両材ともフランジ部では同じ程度の残留応力が存在している。また，初期たわみは，たわみ測定専用治具で測定した。部材として初期曲がりとは部材方向の両フランジ板の中心線上の値の平均値をとった。各供試体とも道路橋示方書¹²⁾の製作精度 ($L/1000$ 以下) を満足した。

(3) 荷重装置

現有のオルゼン試験機に荷重フレームを取り付けた。荷重は，図3に示すように圧縮ロードセルと，回転をスムーズにするためにスラストベアリングを通して軸力を与え，トルクTは，供試体上部に取り付けた回転円板の相対する2箇所に $\phi 6$ mmのワイヤーロープを取付け，これに引張ロードセルを連結して Rotation Lever で引張ることにより与えた。引張荷重の検出は，この引張型ロードセルにより行った。また，下端部には床桁を置き，その上にねじりロードセルを固定し，全体のトルク荷重を検出した。供試体の両端部にはそり拘束を可能にするため16mm厚の鋼板を溶接し，さらに25mm厚の押え板で止めている。供試体の下端板には軸偏心補正用として半径 $R = 76$ mmの弓形半球のついた固定端板を取り付けている。

なお，ここで用いたねじりロードセルおよび引張ロードセルは別途製作したものであり，実験前に念入りにキャリブレーションの測定を行った。

(4) 測定項目と方法

ひずみゲージは図4に示すように端部より20mm離れたA断面（固定端と呼ぶ）に三軸ゲージを32枚はり，柱の中央断面Cに一軸ゲージ14枚，三軸ゲージ10枚をはって，軸ひずみ及びせん断ひずみの測定を行なった。特に固定端部はフランジ部のせん断ひずみ分布測定のため密にはった。部材のねじり角は図5に示すように，軸方向5等分点にそれぞれ長さ30cmのアングル材の腕木を同じフランジ側に取り付け，腕木上に25cm間

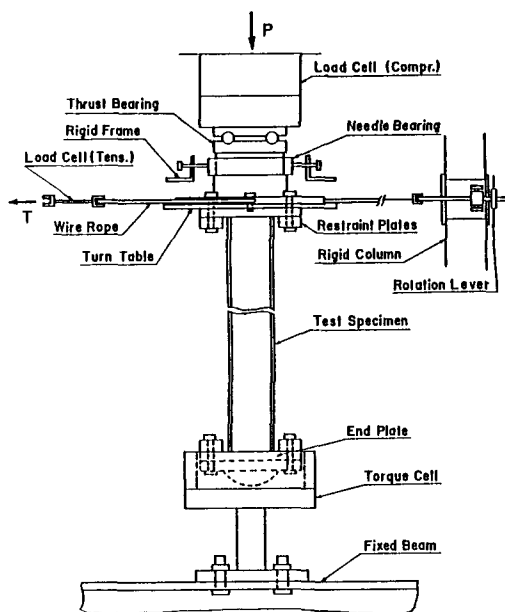


図3 実験装置

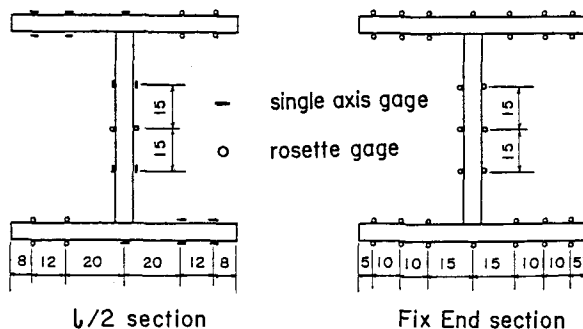


図4 ひずみの測定位置

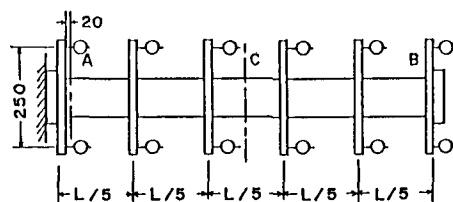


図5 変位計の取付け位置

隔で配した2個の電気抵抗式変位計(1/100mm)を1組とした6組、および回転材端部の反対側に取付けた1組の計7組とした。

(5) 実験方法

供試体を載荷装置の中心にくるようにセットした後一定の軸力を加え、供試体の固定端付近および中央断面の軸方向ひずみ分布により軸力が一定载荷されているか、及びねじり角が変化しないことを確認する。この調整後、所定の軸力を一定に保ちながら回転板に与えるトルクを生じさせる偶力(引張力)が等しくなるよう引張ロードセルを見ながら調整する。供試体全体にかかるトルクは下端部のねじりロードセルで判断する。この時軸力が変化していたら再調整する。以上の操作後5分以上放置して部材の変形を安定させる。途中変動がなければ測定を行い、次第にトルクを加えていくという方法で行なった。最初は荷重制御で行ない、断面降伏が進んでねじり変形が大きくなってからは変位制御でトルクを加えた。

3. 実験結果および考察

(1) 薄肉はり理論との比較

図6は、トルク荷重 $T=1.0\text{ t}\cdot\text{cm}$ における固定端および中央断面でのせん断およびそり拘束ひずみの実験値と薄肉弾性ばり理論値の比較を示したものである。固定端でのそり拘束ひずみ分布(表・裏の平均)および中央断面でのせん断ひずみ分布の測定値は、理論値とほぼ良い一致を示している。しかし、固定端フランジ部のせん断ひずみ(表側のみ)の分布は、理論値より多少大きめに測定されていることがわかる。そこでこの実験装置でのそり拘束の程度について、そり自由の場合と完全そり拘束場合のSt. Venantの一次せん断ひずみの値を全供試体について調べるとこの実験では拘束度が約95%であった。この不足分が一次せん断ひずみの増加となったと考えられる。

図7は、HT-1の $T=8.0\text{ t}\cdot\text{cm}$ におけるねじり角の材長方向に対する分布状態を、解析値と比較して示したものである。この解析値は、実験供試体と同じ形状寸法、同じ残留応力分布を用い、ひずみ硬化を考えたTri-linear型の応力-ひずみ関係を用いた有限変位弾塑性解析法¹¹⁾による結果である。なお、部材の分割数は12、断面要素分割数は、フランジ、ウェブとも幅方向に8、板厚方向に8の計192分割で行った。解析法の詳細については文献(11)に示してある。以下、図中の解析値はこの方法による計算結果であるが、この解析では、そり拘束は完全であるとしており端板の剛性の影響は考慮していない。 $T=8.0\text{ t}\cdot\text{cm}$ では一部塑性状態に入っているが、解析値は実験結果に非常に良く一致していることがわかる。

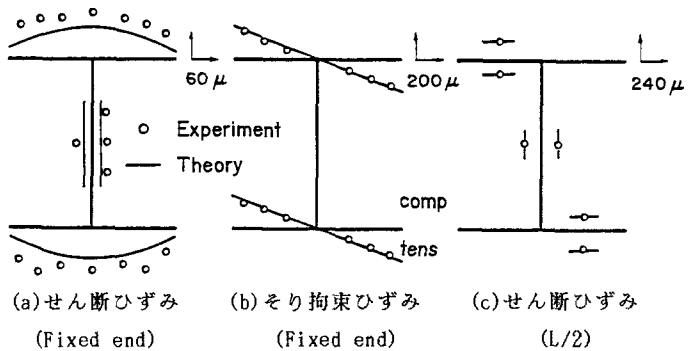


図6 ひずみ分布 (HT-1)

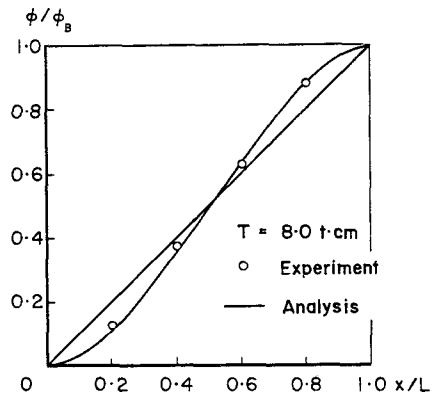


図7 ねじり角モードの比較
(HT-1)

(2) トルク-ねじり角関係

図8, 9は各供試体のトルク T と材端ねじり角 ϕ_b の関係を示したもので、破線が実験値で、実線は上記の解析法の結果である。図8は、軸力を一定($\alpha=0.2$)にして細長比を変化させた場合、図9は細長比を一定($L/r_z=40$)にして軸力を変化させた場合の結果を示している。

実験で用いた供試体はフランジ端で最大 $0.6\sigma_y$ の圧縮残留応力を有しており(図2参照)、しかも軸力を作用させるので $T=1.5\sim 2.0$ t·cmという比較的小さなトルク荷重でフランジ端に降伏域が発生している。そして、トルクが上昇して固定端フランジ部の塑性化が進むと、ねじり剛性の低下が大きくなっていることがわかる。また、固定端フランジが降伏するのに必要な T は、細長比が大きいほど小さいので、長いほど終局強度に到達する T は小さくなることがわかる。解析結果と比較すると、HT-3を除いて立ち上がりの勾配も良く一致している。しかし、解析値はトルクが10 t·cm前後付近から多少離れて安全側の値になっていることがわかる。

HT-3は、立ち上がりから多少両者が離れているが、これは供試体の材長が長くなり、製作不整が原因したのではないかと考えられる。HT-5では軸力 $\alpha=0.4$ を加えたので、圧縮残留応力が $0.6\sigma_y$ 存在することより軸力のみでフランジ端部が塑性化してしまい、材端ねじり角 ϕ_b が1.0 rad付近で最大強度に達しその後耐荷力が減少した。軸力 α が0~0.2の供試体においては、载荷した材端ねじり角1.5~2 rad程度では最大強度に達せず耐荷力は上昇し続けている。

図10はHT-2の供試体について、材長方向に対するねじり角モードを、弾性域($T=0.5$ t·cm)、弾塑性域($T=9.0$ t·cm)ひずみ硬化域($T=10.5$ t·cm)のそれぞれについて示したものである。弾性状態では、両端から $L/5$ 付近では多少拘束が不足しているが、理論値とほぼ良く一致している。しかし、トルクを加えていき弾塑性状態に入っても、その拘束が解除され単純ねじりの状態に移行するような現象^{9), 10)}は生じていないことがわかる。これは、図2に示すように、供

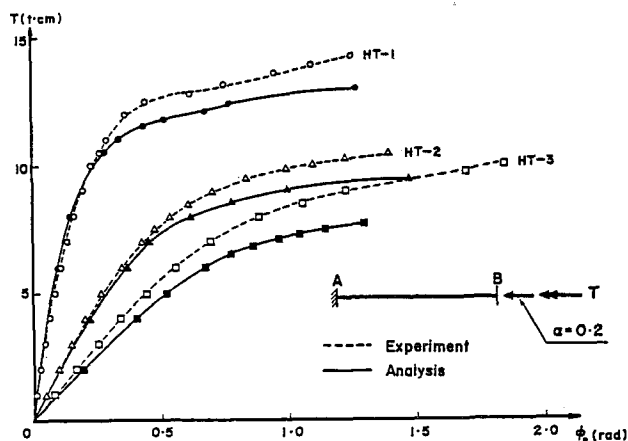


図8 トルク-ねじり角曲線(軸力一定)

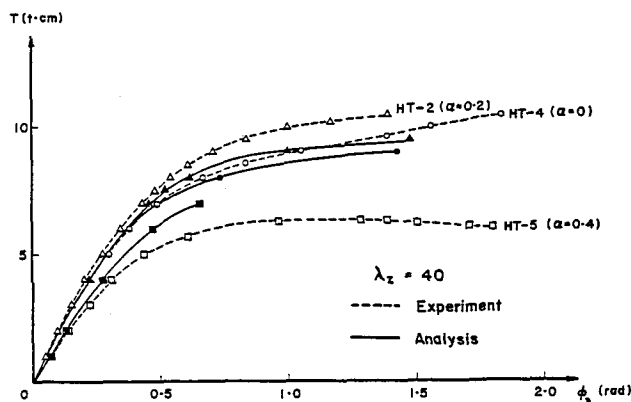


図9 トルク-ねじり角曲線(細長比一定)

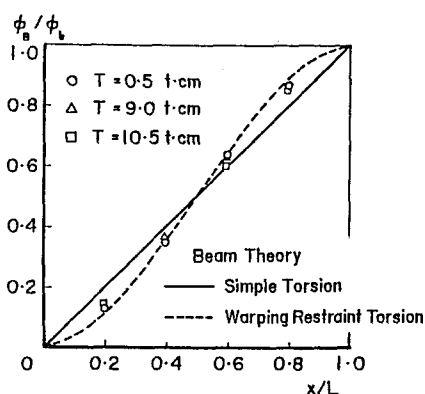


図10 ねじり角モード(HT-2)

試体に大きな圧縮残留応力が存在しているため、トルク荷重により引張力が加わる固定端のフランジ部分は、 $T=9.0\text{ t}\cdot\text{cm}$ に達してもまだ弾性状態であり、全断面が塑性化していないためねじり角モードに変化がなかったと考えられる。なお、他の供試体でも同様な傾向がみられた。

(3) トルク－ひずみ関係

図11はHT-1の固定端部におけるそり拘束ひずみ分布の測定結果を示したものである。以下、フランジ部の軸ひずみはすべて表・裏の平均である。弾性域ではほぼ線形であるが、トルク荷重によりフランジ先端部から徐々に塑性化するに従って非線形性が生じてくる。そしてウェブにも圧縮ひずみが生じていることがわかる。なお、フランジ部分の圧縮ひずみの乱れは、残留応力と軸力が載荷された状態にトルクが付加され、早期降伏に至ったためと考えられる。

図12はHT-1～3の中央断面における軸ひずみ分布の測定結果を示したものである。それぞれ $T=5.0\text{ t}\cdot\text{cm}\sim 10\text{ t}\cdot\text{cm}$ の変化であるが、HT-1ではフランジ両端部でねじり変形に伴ってのひずみ挙動が表わされているが、固定端部が全断面降伏に至っていないため、それほど変化はみられない。しかし、図8からわかるようにHT-2,3では、 $T=10\text{ t}\cdot\text{cm}$ で中央断面および固定端フランジ部分が降伏し、極めて大きなねじれ角が発生しているため、特にフランジ部およびウェブ部分の軸ひずみ分布に急激な変化がみられることがわかる。これは、大きなねじり変形による軸方向の繊維の伸びの影響と考えられる。またフランジ端部はいずれも引張となっている。

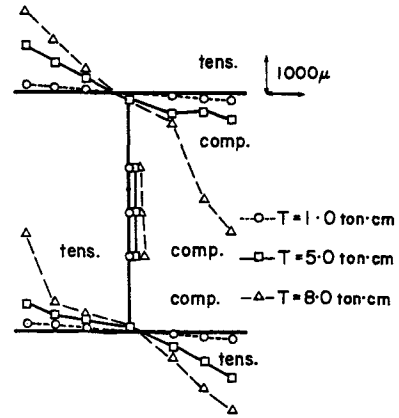


図 11 そり拘束ひずみ分布 (HT-1)

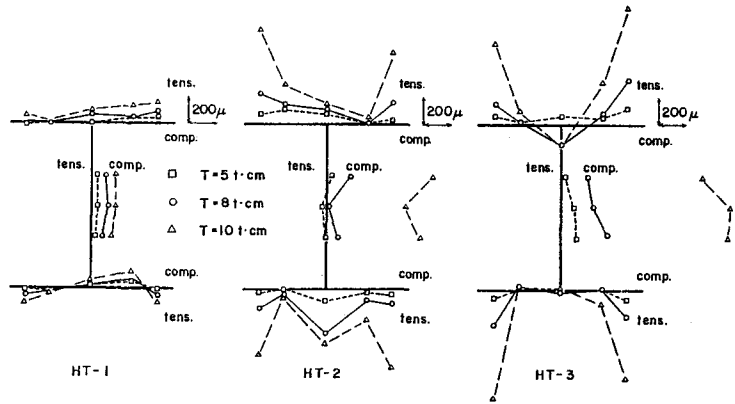


図 12 中央断面の軸ひずみ分布

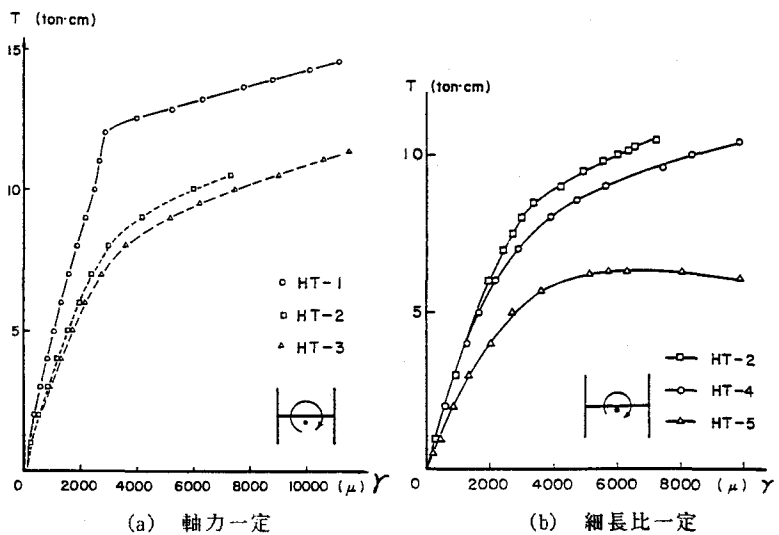


図 13 中央断面におけるトルク－せん断ひずみ曲線

図13は実験における各供試体のトルク T と中央断面のウェブにおけるSt. Venantのせん断ひずみ γ の関係を示したものである。この図より、軸力が一定の場合でも、細長比が一定の場合でも、中央断面のせん断ひずみは、降伏せん断ひずみ γ_y ($=\tau_y / G = \sigma_y / \sqrt{3} G = 1950 \sim 2150 \mu$)を越えても急激な増加はみられずにはば線形性を保っており、耐荷力の上昇が小さくなる頃から非線形性が生じていることがわかる。このことは、解析に於てSt. Venantのせん断ひずみが板厚方向に直線分布するとした仮定は、ほぼ妥当であることを示している。

(4) 塑性域分布図

断面の弾塑性状態およびひずみ硬化の状態の判定は、ひずみの測定結果より相当塑性ひずみを計算し、残留応力による初期ひずみとトルクによる付加ひずみの和が、降伏ひずみ ϵ_y およびひずみ硬化開始ひずみの ϵ_{st} を越えたかどうかで行なった。

図14は上記の判定により得られたHT-1の固定端と中央断面での塑性域の分布図を解析結果とともに示したものである。固定端では、フランジ端に圧縮残留応力が存在することから、早くから降伏が生じているが、解析結果もほぼ同様な傾向を示しており、塑性域の拡がる状態なども良く一致していることがわかる。また、中央断面では、実験では3ヶ所しか測定できなかったが、残留応力の大きいウェブ中央から降伏している様子は解析結果もよく表わしていると思われる。これらの結果より解析法の有効性が示されている。なお、固定端のフランジ端の一部はいずれの供試体もひずみ硬化域に達していたが、中央断面では達していないことがわかった。 図15は、HT-4のねじり変形後の状態を示したものである。

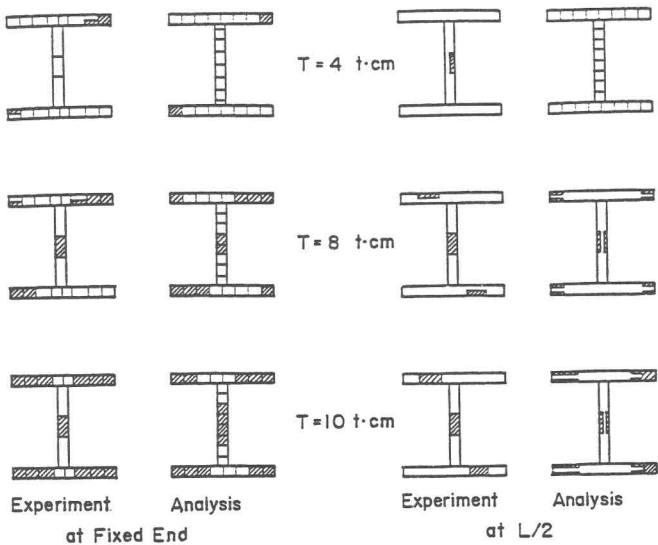


図 14 塑性域分布

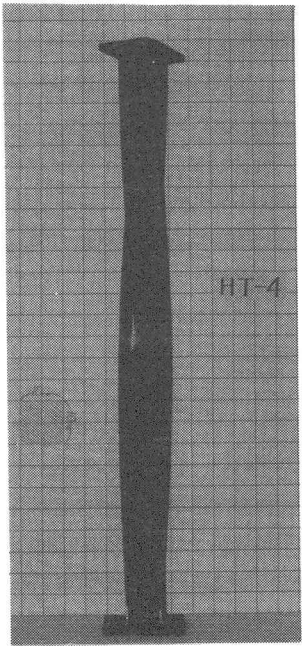


図 15 ねじり変形後の供試体
(HT-4)

4. 結 論

本実験の試験体のパラメータの範囲で得られた結果及び解析結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 弾性状態においては、測定結果はほぼそり拘束を満足しており、薄肉弾性ばり理論と一致した。
- (2) 断面に大きな残留応力が存在する本供試体の場合は、供試体端部が一樣に降伏しないので、端部のそり拘束の解除はさほどみられず、そり自由の状態に近づく現象は生じなかった。
- (3) そり拘束を考慮したH形鋼柱の弾塑性ねじり挙動は、弾性ばり理論を発展させた有限変位弾塑性解析法により十分解析でき、その妥当性が示された。
- (4) 軸力 P が $0.2P_y$ で細長比を20~60と変化させても耐荷力は徐々に上昇し、固定端部が塑性化しても耐荷力の低下はみられなかった。

謝 辞： 本研究の一部は昭和54年度文部省科学研究補助金(一般研究C)を受けた。また貴重な助言をいただいた熊本大学工学部平井一男教授、卒業研究として協力を得た八木弘氏(現在日本道路公団勤務)に記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Oran, C : Tangent Stiffnes in Space Frames, Proc. of ASCE, Vol.99, No.ST6, June, 1973. pp. 987~1001.
- 2) Bažant, Z.P. and Nimeiri, M.: Large-Deflection Spatial Buckling of Thin-Walled Beams and Frames, Proc. of ASCE, Vol.99, No.EM6, Dec., 1973.
- 3) Rajaskanan, S. and Murray, D.W. : Finite Element Solution of Inelastic Beam Equations, Proc. of ASCE, Vol.99, No.ST6, June, 1973, pp. 1025~1041.
- 4) Komatsu, S. and Sakimoto, T. : Nonlinear Analysis of Spatial Frames Consisting of Members with Closed Cross-Sections, Proc. of JSCE, No.252, Aug., 1976, pp. 143~157.
- 5) 前田幸雄, 林 正 : 立体骨組構造物の有限変位解析, 土木学会論文報告集, 第253号, 昭和51年9月.
- 6) Farwell, C.R. and Galambos, T.V. : Non Uniform Torsion of Steel Beams in Inelastic Range, Proc. of ASCE, Vol.95, No.ST12, Dec., 1969.
- 7) 木村 衛, 鈴木敏郎 : 薄肉矩形等断面材の弾塑性ねじり, 日本建築学会論文報告集, 第166号, 昭和44年12月.
- 8) 宇佐美勉 : 軸力, 曲げおよび一樣ねじりを受ける薄肉開断面の降伏後の挙動, 土木学会論文報告集, 第220号, 昭和48年12月, pp. 9~16
- 9) 鈴木敏郎, 木村 衛 : H形鋼の弾塑性ねじり, 日本建築学会論文報告集, 第180号, 昭和46年2月.
- 10) 藤井 堅, 大村 裕 : H形鋼梁の弾塑性ねじり実験, 橋梁と基礎, 昭和57年11月.
- 11) Sakimoto, T. Yamao, T. Kikuchi, R. and Sakata, T. : Nonlinear Analysis of Thin-Walled Frames and Members with Arbitrary Open Cross Sections, Proc. of JSCE, No.362/(I-4), Oct., 1985.
- 12) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, 昭和55年2月.
- 13) 山田嘉昭 : 塑性力学, 日刊工業新聞社, 昭和51年10月.

(1986年 1月 24日 受付)