

I-16

曲げと曲げねじりを受ける I 形断面桁の実験的研究

北海道大学工学部 学生員 植木広行
 北海道大学工学部 正 員 平沢秀之
 北海道大学工学部 正 員 林川俊郎
 北海道大学工学部 正 員 佐藤浩一
 北海道大学工学部 正 員 及川昭夫

1. はじめに

構造物の終局挙動の解析の際には、塑性ヒンジ法が広く用いられているが、塑性ヒンジ法は塑性域の広がりを無視することを仮定して計算する方法であるため、塑性域を越えてからの部材の剛性を過大に評価して解析することになる。著者らは参考文献1)、2)において、曲げモーメントと曲げねじりモーメントを受ける I 形断面部材の塑性域の広がりや応力分布を種々仮定し、部材の剛性の徐々の低下を考慮に入れた数値計算を行った。本研究では、断面に生じる応力の分布及び塑性域の広がりを実験により求め、解析値と比較検討した。実験供試体については、曲げねじりの影響が顕著に現れるように断面を I 形とし、比較的支間長の短いものを用いた。数値解析の際に必要な材料定数については、材料試験を行って得た値を用いた。

2. 解析方法

I 形断面はりが曲げと曲げねじりを受けて塑性域が広がると、部材のもつ曲げ剛性、純ねじり剛性、曲げねじり剛性は低下する。したがって増分荷重に対する部材の接線剛性は刻々と変化し、剛性マトリックスも塑性ヒンジを生じるときの剛性マトリックスに漸近してゆく。ここでは、塑性域の広がりに伴う剛性マトリックスの低減について簡単に触れることとし、詳細な定式化等については参考文献3)を参照されたい。

今、塑性域が広がっている部材 ij (両端の節点番号 ij) を考え、これを n 分割したうちの 1 要素について考える。この要素の曲げ剛性、純ねじり剛性、曲げねじり剛性は一定であるとし、両端の節点番号を k、k+1 とするとこの要素について次式が成り立つ。

$$\{y_{k+1}\} = [K_{Bk}]\{y_k\} \quad (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} \{y_{k+1}\} &= \{v_{k+1} \ \theta_{k+1} \ \phi_{k+1} \ \phi'_{k+1} \ S_{k+1} \ M_{k+1} \ T_{k+1} \ W_{k+1}\}^T \\ \{y_k\} &= \{v_k \ \theta_k \ \phi_k \ \phi'_k \ S_k \ M_k \ T_k \ W_k\}^T \end{aligned} \quad (2a, b)$$

v: たわみ θ: たわみ角 φ: ねじり角 φ': ねじり率

S: せん断力 M: 曲げモーメント T: ねじりモーメント W: 曲げねじりモーメント

である。また $[K_{Bk}]$ は曲げねじりを考慮した剛性マトリックスを $\{y_k\}$ 、 $\{y_{k+1}\}$ に対応させて並べ替えたものである。式(1)は $k = 1 \sim n$ についても成立するので、結局部材 ij に関しては次式が成り立つ。

$$\{y_j\} = [K_{Bn}][K_{Bn-1}] \cdots [K_{B2}][K_{B1}]\{y_i\} = [K_B]\{y_i\} \quad (3)$$

式(3)の両辺における $\{y_j\}$ 、 $\{y_i\}$ を節点力と節点変位に分離して並び替えそれぞれ $\{X\}$ 、 $\{u\}$ とおくと、次式の剛性方程式を得ることができる。

$$\{X\} = [K_c]\{u\} \quad (4)$$

ここで

$$\begin{aligned} \{X\} &= \{S_i \ M_i \ T_i \ W_i \ S_j \ M_j \ T_j \ W_j\}^T \\ \{u\} &= \{v_i \ \theta_i \ \phi_i \ \phi'_i \ v_j \ \theta_j \ \phi_j \ \phi'_j\}^T \end{aligned} \quad (5a, b)$$

である。また $[K_c]$ は $[K_B]$ を $\{X\}$ 、 $\{u\}$ に対応させて並べ替えたものである。式(4)を用いて構造物に関する

Experimental Study of I-shaped Cross Section Beam Subjected to Bending Moment and Warping Torsion
 by Hiroyuki UEKI, Hideyuki HIRASAWA, Toshiro HAYASHIKAWA, Koichi SATO and Akio OIKAWA

る剛性方程式を解けば、剛性の低下を考慮した曲げと曲げねじりを受ける構造物の解析が可能である。

3. 実験概要

3.1 材料試験

材料試験に用いたテストピースはJIS規格に基づき14号B試験片を使用し、テストピースが破断するまで実験を行い、得られたデータから弾性域におけるヤング率E、ポアソン比 ν 、降伏応力 σ_y 、せん断弾性係数Gを求めた。ポアソン比については、2軸ゲージを用いて測定した。

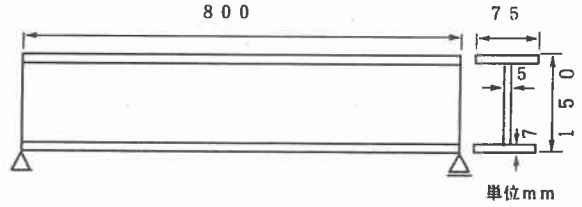


図 - 1 寸法と支持条件

3.2 曲げ試験

図 - 1 に示した I 形断面を有するスパン 80 [cm] の直線部材について、支点の支持条件を単純支持として上フランジの部材中央に鉛直荷重を載荷した。載荷した荷重の範囲は、弾性域のみの試験のため最大で 4 [tf] までとした。測定項目は図 - 2 の位置の断面におけるひずみと部材中央点のたわみである。ひずみの測定については、図 - 2 の①の位置の断面には 1 断面につき上下フランジは各 13 枚、ウェブは 5 枚のひずみゲージを貼り付けて測定を行い、図 - 2 の②・③の位置の断面には、下フランジにのみ 13 枚のひずみゲージを貼り測定を行った。ひずみ及びたわみは 1 [tf] ごとに測定を行い、得られたデータからそれぞれの断面ごとの応力の分布と部材中央点におけるたわみを算出し解析値と比較した。

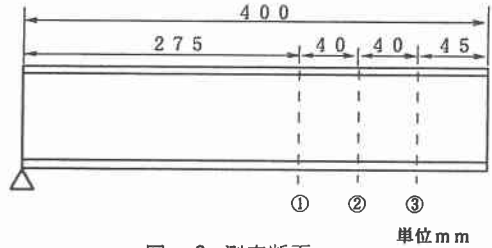


図 - 2 測定断面

表 - 1 材料定数

ヤング率 E	2.01×10^6 [kgf/cm ²]
ポアソン比 ν	0.273
降伏応力 σ_y	3216 [kgf/cm ²]
せん断弾性係数 G	7.89×10^5 [kgf/cm ²]

3.3 曲げ及び曲げねじり試験

曲げ試験と同じ部材を用い、支点の支持条件を単純支持として上フランジに載荷装置を設け、部材の中立軸から距離を 4.0 [cm] だけ偏心させて荷重を載荷した。載荷する荷重の範囲は、部材が塑性崩壊するまでとした。測定項目はひずみと部材中央点のねじり角で、ひずみの測定に使用するひずみゲージを貼り付ける断面及び位置については曲げ試験と全て同じとした。ひずみ及びねじり角の測定については、載荷する荷重が 3 [tf] を越えるまでの範囲内では 0.5 [tf] ごとに、また 3 [tf] を越えた後は 0.25 [tf] ごとに測定し、得られたデータからそれぞれの断面ごとに応力の分布と部材中央点におけるねじり角を算出し解析値と比較した。

4. 実験結果及び解析値との比較

4.1 材料試験

得られた材料定数の値は表 - 1 の通りである。これらの値は数値計算の際に用いた。

4.2 曲げ試験

曲げ試験のたわみ、及び応力の分布についての実験結果と解析値と

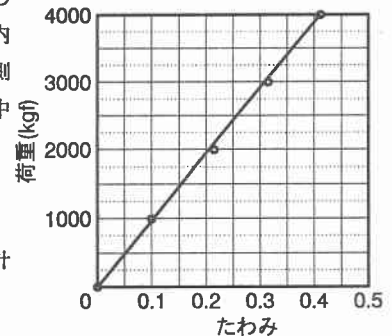


図 - 3 たわみ

の比較は、図 - 3 ~ 図 - 6 に示す通りである。実線は解析値を、○印は実験結果を示している。図 - 3 はたわみについてのグラフで、実験結果と解析値はよく一致していると言える。図 - 4 (a), (b), (c) はそれぞれ順に図 - 2 の①, ②, ③の位置の断面における下フランジの応力分布で、載荷荷重が 4 [tf] のときのグラフである。実験結果と解析値は①と②の断面ではほぼ一致しているが、③の断面は載荷点近傍で、フランジ中

中央と縁端部とで値が若干異なり、せん断遅れの現象が現れたものと思われる。図-5は①の位置の断面における下フランジの載荷荷重が1 [tf]~4 [tf]までのときの実験結果と解析値のグラフである。各荷重において応力の増加の割合は全てほぼ等しく、実験結果と解析値はよく一致していると言える。図-6は、載荷荷重が4 [tf]の時のウェブの応力分布であるが、中立軸の位置及び応力の分布はかなりよく一致している。

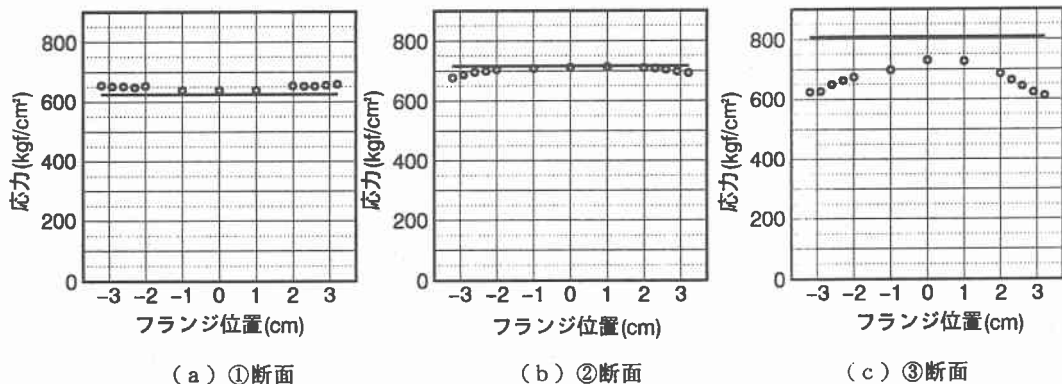


図-4 下フランジの応力分布

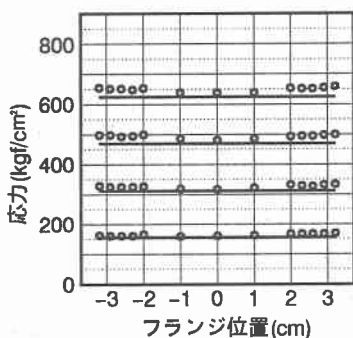


図-5 ①断面の応力分布

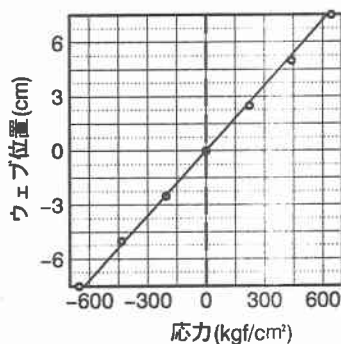


図-6 ウェブの応力分布

4.3 曲げ及び曲げねじり試験

曲げ及び曲げねじり試験のねじり角及び応力の分布の実験結果と解析値との比較は、図-7~図-10に示す通りである。図-7はねじり角のグラフであるが、弾性域においてはねじり角は直線的に増加している。図の○印を越えると塑性域に入りねじり角の増加率も徐々に大きくなっている。図-8(a),(b),(c)は図-2の①,②,③の位置の断面における下フランジの応力分布で、鉛直荷重が7.2 [tf]の時のグラフである。図-8(c)及び図-9(a),(b)は、図-2の③位置の断面における応力分布を表したものであり、図-8(c)は鉛直荷重が7.2 [tf]、図-9(a)は鉛直荷重が4.0 [tf]、(b)は鉛直荷重が5.5 [tf]のグラフである。図-10は①の位置の断面におけるウェブの応力分布のグラフである。どのグラフも実験結果と解析値はほぼ一致している。塑性域の広がりについては図-8(a),(b),(c)から荷重が7.2 [tf]の時の解析値の塑性に達した部分と実験結果の塑性に達した部分はほぼ一致している。また、図-8(c)及び図-9(a),(b)から荷重の増加に対する塑性域の広がり具合も一致している。このことから、実験結果と解析値の塑性域の広

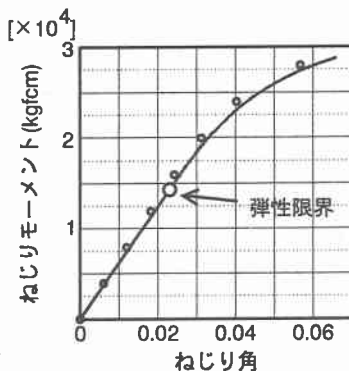
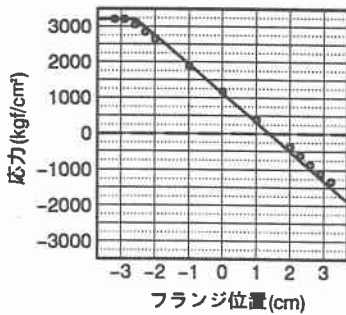
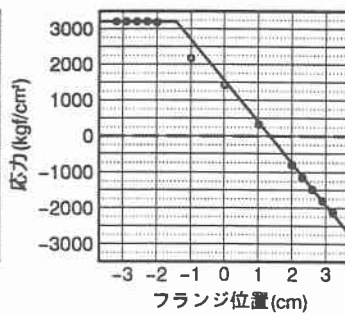


図-7 ねじり角

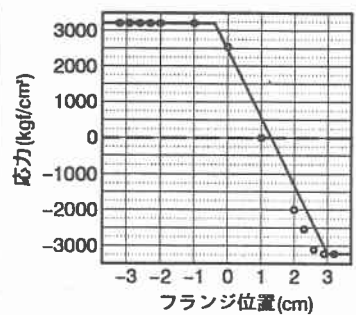
がりについては図-8(a),(b),(c)から荷重が7.2 [tf]の時の解析値の塑性に達した部分と実験結果の塑性に達した部分はほぼ一致している。また、図-8(c)及び図-9(a),(b)から荷重の増加に対する塑性域の広がり具合も一致している。このことから、実験結果と解析値の塑性域の広



(a) ①断面

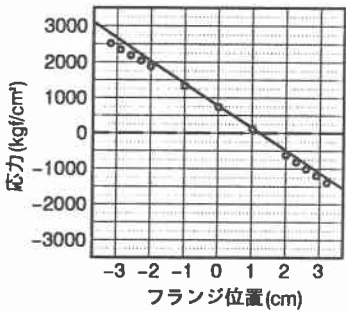


(b) ②断面

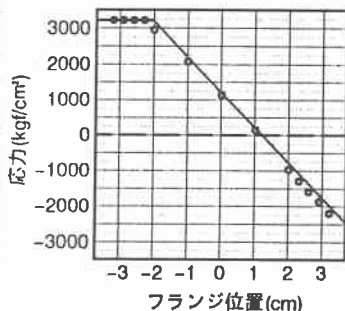


(c) ③断面

図 - 8 下フランジの応力分布



(a)



(b)

図 - 9 ③断面の応力分布

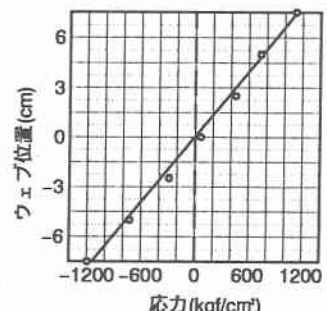


図 - 10 ウェブの応力分布

がりは一致していると言える。

5. 終わりに

本研究では曲げと曲げねじりを同時に受ける I 形断面桁の応力分布、たわみ、ねじり角、塑性域の広がりについて、実際に実験を行って得た結果と解析値との比較を行い、破壊までの桁の塑性崩壊挙動を全過程において追跡した。本報告では、その一部分の実験結果と解析値との比較のデータを載せたが、これらのデータから著者らが解析の際に仮定した桁の塑性崩壊と、実際の塑性崩壊がきわめてよく一致していることがわかる。また、実験結果だけを見ても、断面の応力分布や、中立軸の一致などがよく現れており、実験結果もかなり良好であるといえる。今後の課題としては、1つの部材だけでなく曲線格子桁等の多数の部材からなる、曲げねじりを受ける骨組構造物に適用し、解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 平沢秀之、鈴木淳一、林川俊郎、佐藤浩一：曲げと曲げねじりによる I 形断面部材の塑性域について、土木学会北海道支部論文報告集、第51号、pp. 30 - 33、1995。
- 2) 平沢秀之、林川俊郎、佐藤浩一：曲げと曲げねじりによる I 形断面部材の相関曲線と塑性域、鋼構造年次論文報告集、第3巻、pp. 349 - 353、1995。
- 3) 平沢秀之、林川俊郎、佐藤浩一：塑性域の広がりによる剛性の低下を考慮した剛性マトリックスの誘導、土木学会北海道支部論文報告集、第52号、1996。