

I-73 I形曲線桁におけるフランジ及びウェブ部の幾何学的非線形挙動について

早稲田大学大学院 学生会員 ○ 末 武 義 榮
早稲田大学理工学部 正会員 平 嶋 政 治
早稲田大学理工学部 正会員 依 田 照 彦

[1] まえがき

I形曲線桁に関する研究は従来から数多く報告されているが、それらは主としてウェブパネルのみを円筒シェルパネルと見なし解析したものであり、フランジの影響を考慮した研究報告は少ない。しかし、実際のI形曲線桁の力学的挙動に及ぼすフランジの影響は無視できず、最近ではフランジを含めた全体的な構造解析がなされるようになってきた。例えば、倉西・植渡¹⁾はフランジの剛性を考慮したウェブ部の幾何学的非線形挙動を報告しており、藤井・大村²⁾はウェブ部の挙動だけでなくフランジの回転についても幾何学的非線形解析を行っている。両者とも有限要素法、特に変位法を用いた研究である。

本報告では、解析手法としてHerrmannの混合法を用い、鉛直補剛材で囲まれたウェブパネルに上下フランジを接続して解析し、ウェブ部だけでなくフランジ部の非線形挙動についても詳細な検討を行った。荷重条件はフランジ部で一様、ウェブ部で線形分布する応力を与えて曲げを作用させ、ウェブ両端の境界条件は単純支持（面外変位及びモーメントを零）とした。このような荷重条件、境界条件のもとでフランジの厚さ、曲率半径、桁高などを変化させ、I形曲線桁の全体的な幾何学的非線形挙動を定量的に調べた。

[2] 解析手法

解析手法としてはHerrmannの混合法を用い、増分法とNewton-Raphson法を組み合わせて収束計算を行った。有限要素定式化は、相補仮想仕事の原理と仮想仕事の原理を組み合わせ³⁾、変位-ひずみ関係における非線形項を残して“非線形要素マトリックス”を導出し、さらにその増分形をとることによって“増分要素マトリックス”を導出した。収束計算過程では前者を不平衡力の算出に用い、後者を各増分区間での計算に用いた。収束計算は不平衡力の大きさが与えられた増分荷重の1.0%以下になるまで実施した。また、フランジとウェブの接合辺で曲げモーメントが不連続になるため、フランジとウェブの要素の接合はLagrangeの未定乗数法を用いて行った。

[3] 解析モデル

解析対象としたI形曲線桁のモデルは図1に示したとおりである。解析モデルは、曲率半径 R 、中心角 θ 、桁高 h に関し次の3種類に大別する。

Case 1 : $R = 30$ [cm], $\theta = 0.05$ [rad], $h = 150$ [cm]

Case 2 : $R = 100$ [cm], $\theta = 0.015$ [rad], $h = 150$ [cm]

Case 3 : $R = 30$ [cm], $\theta = 0.033$ [rad], $h = 100$ [cm]

その他の寸法は、いずれの場合も次のとおりである。

フランジ幅 : $b = 60$ [cm] , ウェブ厚 : $t_w = 1.0$ [cm],

フランジ厚 : $t_f = 1.5, 2.0, 2.5, 3.5$ [cm],

アスペクト比 : $R\theta/h = 1.0$.

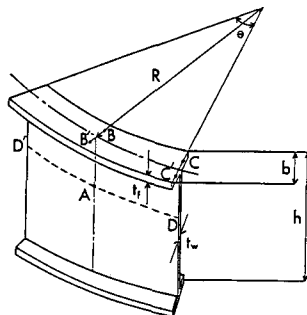


図1 I形曲線桁全体図

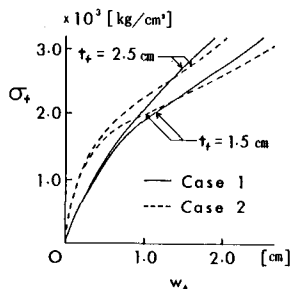


図2 A点の面外変位挙動(a)

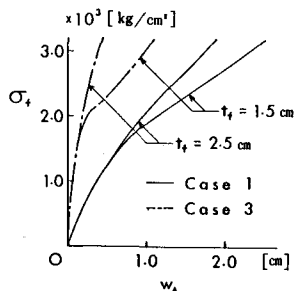


図3 A点の面外変位挙動(b)

また、材料定数はYoung率 $E = 2.1 \times 10^4 [\text{kg/cm}^2]$ 、Poisson比 $\nu = 0.3$ とした。解析は対称性を利用してモデルの右半分についてのみ行った。モデルの有限要素分割は、上下フランジとも40分割、ウェブを100分割とし、フランジについては半径方向に内側、外側とも2段に分けた。

[4] 結果及び考察

解析結果を図2～8に示す。尚、フランジ厚 $t_f = 2.0, 3.5 [\text{cm}]$ のものについては、図に示した荷重レベルの範囲内では $t_f = 2.5 [\text{cm}]$ のものとの差違が小さいので省略した。図2及び図3は、図1のA点の面外変位挙動を示している。図2から明らかに、荷重が $Q_f = 2000 [\text{kg/cm}^2]$ 程度までは桁高が同一でも曲率半径が小さくなると面外変位が大きくなる。また、曲率半径が同じでも、桁高を低くするとウェブの剛性が増し、面外変位が小さくなること図3からわかる。さらに、図4、5を参考に、図2、3を観察すると、Case 1, 2, 3いずれの場合もフランジが座屈した後のウェブの面外変位挙動は、 $t_f = 1.5 [\text{cm}]$ とそれ以外の場合で著しく異なっている様子が見られる。図4、5では、横軸に図1のB-B'辺とC-C'辺の相対的な回転角 ϕ をとって、圧縮フランジのねじれ挙動を表現した。いずれの場合も、 $t_f = 1.5 [\text{cm}]$ のときにはフランジが座屈していることがわかる。また、フランジの座屈挙動は曲率半径が変化してもあまり変わらないが、ウェブの剛性が増すと座屈荷重が大きくなると言える。図6及び図7はウェブの圧縮フランジとの接合辺における応力分布を示している。2つの図からわかるように、 $t_f = 1.5 [\text{cm}]$ の場合フランジが座屈すると、応力分布の符号が反転する。また、フランジを厚くしたとしても、荷重が大きくなると接合辺端部での曲げ応力は大きくなる。図8にはD-D'辺(図1)に沿う面外変位モードを、Case 1の荷重レベル $Q_f = 2500 [\text{kg/cm}^2]$ のものについて示してある。図8から、フランジが座屈するとウェブの3次モードが発生しなくなることがわかる。

[5] まとめ

以上のことから、次の結論が得られる。

- (1) フランジの挙動は、変位の大きさ、3次モードの発生という点でウェブの面外変位挙動に大きく影響する。
- (2) 座屈発生以前では、曲率半径が小さいとウェブの面外変位が大きくなる。
- (3) 荷重の増大に伴い、接合辺端部の応力も無視できない程大きくなる。

参考文献

- (1) 穂波, 倉西: 曲げを受けるI型断面弾性曲線プレートガーダーの有限変位挙動について, 土木学会論文集, 1984-10 (英文)。
- (2) 藤井, 大村: 曲線桁断面変形の非線形有限要素解析, 広島大学工学部研究報告, 1983-1。
- (3) 和田・滝, 他: 混合要素を用いた板、かくの増分法による幾何学的非線形解析, 日本機械学会論文集(A), 1980-4。

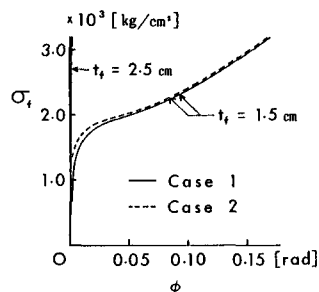


図4 圧縮フランジのねじれ(A)

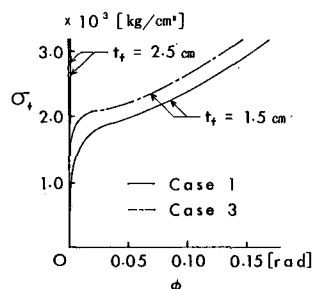


図5 圧縮フランジのねじれ(B)

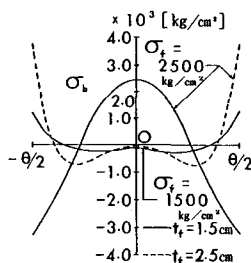


図6 接合辺に沿う曲げ応力分布 (Case 1)

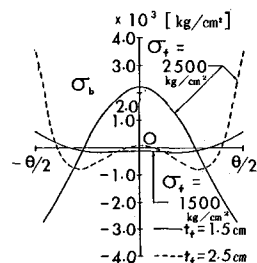


図7 接合辺に沿う曲げ応力分布 (Case 2)

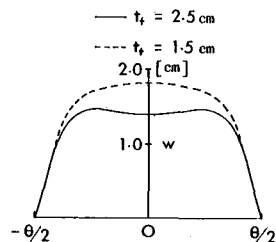


図8 面外変位モード
(D-D'辺, Case 1,
 $Q_f = 2500 [\text{kg/cm}^2]$)