

I-69

交番荷重を受ける I 形断面曲線桁の複合非線形挙動

早稲田大学理工学部	正 員	○ 末武義崇
早稲田大学理工学部	正 員	平嶋政治
早稲田大学理工学部	正 員	依田照彦

1. まえがき

土木構造物や建築構造物は、地震、風、通行車両等により、種々の繰り返し変動荷重を供用期間中に受ける。このため、繰り返し荷重下における各種構造物の複合非線形挙動を調べることも、重要な研究課題の一つである。繰り返し荷重を受ける構造物の複合非線形挙動については、実験的な研究を中心として多くの報告がなされている。これに対し、解析的な研究については、骨組構造物に対し塑性ヒンジ理論を適用して解析を行った研究がいくつか見られるものの、薄板構造物、特に I 形断面曲線桁のような薄板集成構造物の繰り返し挙動を解析した例は極めて少ない。本報告では、繰り返し荷重を受ける構造物の中でも、交番曲げ荷重を受ける I 形断面曲線桁を解析対象として選択し、幾何学的非線形性と材料非線形性の両者を考慮した複合非線形解析を実施している。特に、有限要素法の数値解析手法を用いて繰り返し挙動を解析する場合、負荷・除荷の判定を明確に行う必要がある。本報告ではこの点に着目し、数値計算に適した形の負荷・除荷判定方法を提案するとともに、交番曲げ荷重を受ける I 形断面曲線桁の解析に適用した。そして、繰り返しサイクル毎の耐荷力の変化、変形挙動、塑性域の進展状況などについて調べた。

2. 負荷・除荷の判定

増分量を取り扱う数値計算においては、微分形式で記述された負荷・除荷の判定式を用いることは必ずしも適切でない。例えば、降伏曲面 $\phi=0$ 上のある点 P が、増分計算の後に後続の降伏曲面 $\phi^*=0$ 上の 1 点 Q に移った場合（図 1）を考えてみる。負荷・除荷の判定をすべき点は点 Q であるが、判定に際して必要な応力増分テンソル $\Delta \sigma_{ij}|_Q$ は、次の増分計算を実施しなければ求められないので、ここでは $\Delta \sigma_{ij}|_P$ （図 1）を代用した。そして、釣合径路の追跡方向に注意し、次のような増分判定式を考案した。

$$\left. \begin{aligned} & \phi|_Q \geq 0 \text{ かつ } \beta \frac{\Delta \phi^*}{\Delta \sigma_{ij}|_Q} \Delta \sigma_{ij}|_P \geq 0 \text{ の時負荷} \\ & \phi|_Q < 0 \text{ または } \beta \frac{\Delta \phi^*}{\Delta \sigma_{ij}|_Q} \Delta \sigma_{ij}|_P < 0 \text{ の時除荷} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 β は径路追跡の向きが正の向きと一致するとき 1、逆向きの時 -1 となるパラメータである。

3. 解析モデル

解析対象としたモデルは、図 2 に示したような I 形断面曲線桁である。寸法は曲率パラメータ $Z (=h^2 \sqrt{1-\nu^2}/R \cdot t_w) = 7.15$ 、ウェブ幅厚比 $h/t_w = 150$ 、フランジ幅厚比 $b/t_f = 12$ 、フランジ/ウェブ断面積比 $A_f/A_w = 1.0$ 、ウェブ縦横比 1 である。材料定数は Young 率 $E = 2.058 \times 10^5$ [MPa]、Poisson 比 $\nu = 0.3$ 、降伏応力 $\sigma_y = 235$ [MPa] とし、単軸状態の応力-ひずみ関係は、降伏後平坦な領域を経てからひずみ硬化を生ずる tri-linear な関係を

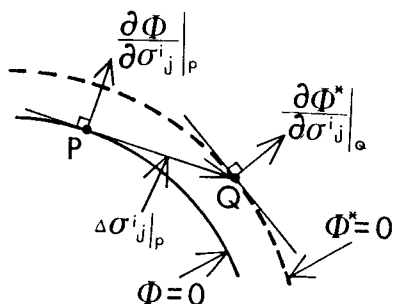


図 1. 増分区間における応力変化

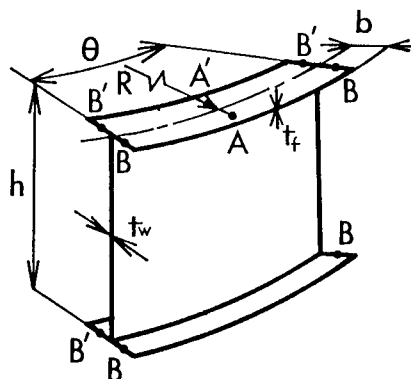


図 2. 解析モデル

想定している。境界条件については、ウェブ端辺の面外変位を零、ウェブおよびフランジ端辺に沿う板曲げモーメントを零としたほか、点B、B'（図2）の面外変位とウェブ端辺の伸縮を零としている。解析手法としてHerrmannの混合型有限要素法を用い、ひずみ増分理論に基づいて解析を行った。なお、板厚方向に9個の分点を設け、塑性域の深さ方向への広がり进行评估している。

4. 解析結果及び考察

解析結果を図3～5に示す。図3は、圧縮フランジ中央辺の繰返し回転挙動を表しており、縦軸にモデル端部に作用するモーメント M を降伏モーメント M_Y で割った無次元化モーメント、横軸に中央辺の回転角 ϕ をそれぞれとって図示したものである。図中、繰返し径路を①、②、③、④などとして示し、各径路上の最大荷重点を黒丸で表示した。図から明らかなように、繰返し回数が増すにつれて残留変形が増大し、履歴曲線の膨らみも大きくなっている。一方、耐荷力の大きさは繰返し回数が増す毎に漸減している。図4は、2つの最高荷重レベルにおける解析モデル全体の変形モード図であり、図3の点C、Dにそれぞれ対応している。モード図から明らかなように、繰返し回数の増加にともなってモデル全体にわたって変形の増大が認められる。モード図と同様に、図3の点C、Dに対応する塑性域の進展状況を図5に示す。両者とも鈎合径路上の最高荷重点における塑性化状況を表しているが、繰返しが進行すると除荷域の残留が著しくなる点が特徴的である。繰返しの進行に伴う変形量の増大が桁全体の剛性を低下させているため、塑性域の発達が不十分であってもこのように耐荷力に達するものと考えられる。また、繰返し回数が増加して桁の変形が漸増するにつれて、フランジとウェブとの接合部付近の要素の一部が、ひずみ硬化を生ずることが明らかになった。しかしながら、ひずみの大きさは高々3～4%であり、ひずみ硬化領域のモデル全体に占める割合も小さく、桁の挙動に及ぼす影響は小さいと考えられる。

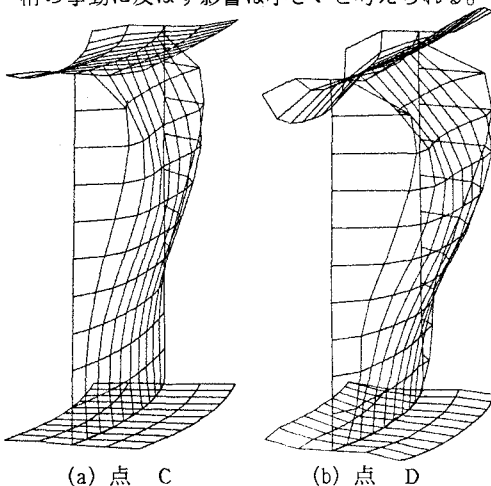


図4. 最高荷重点におけるモデル全体の変形モード

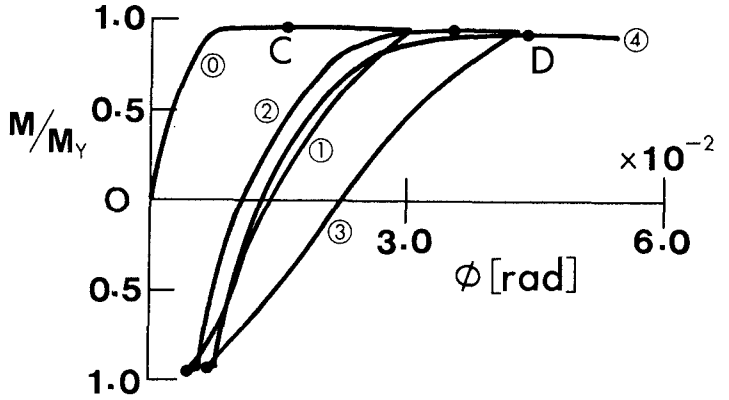


図3. 圧縮フランジ中央辺の繰返し回転挙動

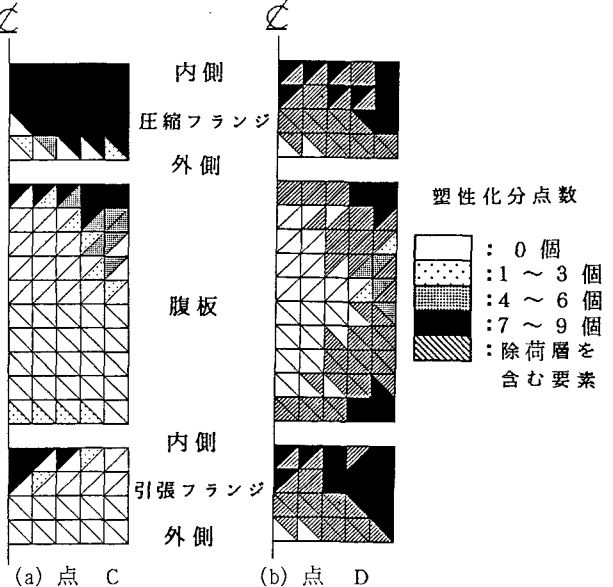


図5. 最高荷重点における塑性域の進展状況