I－30

鋼板構造物の弾塑性有限変位解析法

岐阜大学大学院　学生員　笠間　慈弘
岐阜大学工学部　正　員　森脇　良一
岐阜大学工学部　正　員　奈良　　敬

1　まえがき

現在、世界的な傾向として、より合理的で実際の構造物の極限強度に基づいて安全性を評価し設計する限界状態設計法へ移行する動きがみられる。構造物の終局限界状態を定量的に評価するためには極限状態での構造物全体の挙動を知る必要がある。

この気運を受けて崎元らは東神戸大橋について全体解析を行い併せて主塔の局部座屈を考慮した解析法を用いて構造物全体の極限強度を評価している[1]。しかし数値計算の制約から全体挙動と局部座屈を同時に考慮したものではなく、橋梁全体の極限強度を近似的に評価するものである。したがって、板の座屈も考慮した構造物全体の連成挙動を解析する手法を開発することが望まれている。

よって本研究は、骨組構造に板要素を立体構成した構造を連結し、板の座屈を考慮した構造系全体の弾塑性挙動を解析できるようにし、より実際的に構造物全体の挙動を追跡し得る弾塑性有限変位解析数値計算法を開発することを目的としている。

2　解析法

図-1に示すような構造系全体を解析するため、図-2のように骨組要素部[2]と板要素部[3]を接合しその接合部には剛板を用いて変位の適合条件を満たすようにすることにした[4]。

図-3に示すように、この剛板に対し力の作用する点をRとし、この点での変位をu_r，θ_r、これに対応する力をそれぞれf_r，m_rとする。また、この点Rから各々の節点までのモーメントの腕の長さをそれぞれx_s，x_t，x_v，x_w（上向きに正）とすると式(1)～(6)のような関係が得られる。この関係式を使って剛板上の板要素並びに骨組要素の節点変位を剛板の変位に置換する。

$$u_s = u_r + x_s\theta_r \cdots(1) \qquad u_t = u_r + x_t\theta_r \cdots(2)$$

$$u_v = u_r + x_v\theta_r \cdots(3) \qquad u_w = u_r + x_w\theta_r \cdots(4)$$

$$f_r = f_s + f_t + f_v + f_w \cdots(5)$$

$$m_r = f_s x_s + f_t x_t + f_v x_v + f_w x_w \cdots(6)$$

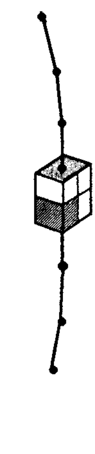

図-1解析対象図-2解析モデル

板要素部についての全体剛性マトリックスを$\mathbb{K}_{ss}$、骨組要素部についての剛性マトリックスを$\mathbb{K}_{bb}$とすると、板要素部および骨組要素部についてそれぞれ式(7)および式(8)に示す剛性方程式を得る。$\mathbf{f}_s$、$\mathbf{d}_s$、$\mathbf{f}_b$、$\mathbf{d}_b$はそれぞれ板要素部の節点力ベクトルと節点変位ベクトルおよび骨組要素部の節点力ベクトルと節点変位ベクトルである。板要素部と骨組要素を１つの剛性マトリックスにまとめると式(9)のように表すことができる。しかし、この状態では骨組部の挙動と板部の挙動は無関係なので剛板の挙動を板と骨組のモデルに伝えるために式(9)で得られた剛性マトリックスを式(1)～(6)の関係を使って修正する。　具体的には、式(1)～(4)の関係式を式(7)と(8)にそれぞれ代入し、それに式(5)と(6)の関係式を適応すれば剛板の自由度に関する剛性マトリックスが得られ、板要素部と骨組要素部の接合が可能になる。これにより図-2に示す構造物全体の剛性方程式が式(10)に示すように得られる。ここで$\mathbf{f}_R$と$\mathbf{d}_R$は式(11)に示すように剛板の節点力ベクトルと節点変位ベクトルである。

$$\mathbf{f}_s = \mathbb{K}_{ss}\cdot\mathbf{d}_s \qquad \cdots(7)$$

$$\mathbf{f}_b = \mathbb{K}_{bb}\cdot\mathbf{d}_b \qquad \cdots(8)$$

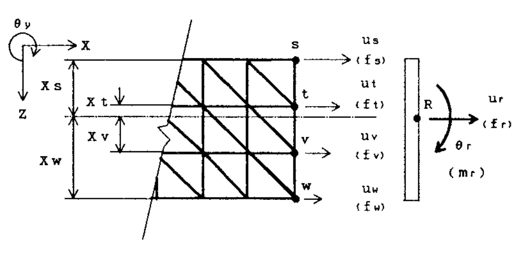

図-3　剛板モデル

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{f}_a \\ \mathbf{f}_b \end{Bmatrix} = \mathbb{K} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_a \\ \mathbf{d}_b \end{Bmatrix}, \quad \mathbb{K} = \begin{vmatrix} \mathbb{k}_{aa} & \emptyset \\ \emptyset & \mathbb{k}_{bb} \end{vmatrix} \qquad \cdots (9)$$

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{f}_a \\ \mathbf{f}_b \\ \mathbf{f}_R \end{Bmatrix} = \mathbb{K}' \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_a \\ \mathbf{d}_b \\ \mathbf{d}_R \end{Bmatrix}, \quad \mathbb{K}' = \begin{vmatrix} \mathbb{k}_{aa}' & \emptyset & \mathbb{k}_{aR} \\ \emptyset & \mathbb{k}_{bb}' & \mathbb{k}_{bR} \\ \mathbb{k}_{Ra} & \mathbb{k}_{Rb} & \mathbb{k}_{RR} \end{vmatrix} \qquad \cdots (10)$$

$$\mathbf{f}_R = \begin{Bmatrix} f_r \\ m_r \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{d}_R = \begin{Bmatrix} u_r \\ \theta_r \end{Bmatrix} \qquad \cdots (11)$$

3　解析結果とその考察

解析モデルとしては初期不整を有する２軸対称な箱形断面の長柱を用いる。図-2に示すように構造物全体を骨組要素でモデル化し、板の座屈挙動が生ずると思われる柱中央部を板要素で集合させたモデルに置き換える。図-4に板要素部の解析モデルと要素分割を示す。

長柱全体のたわみ波形として、載荷方向に半波形のたわみを与える。板要素モデルのたわみ波形としては、板幅方向（幅ＢまたはＤ）に半波形のたわみ、載荷方向に３半波長のたわみ波形が連続して生ずるものと仮定し、１節点６自由度の三角形平板要素の集合体としてモデル化を行う。なお以下では、幅ＢおよびＤの板要素をそれぞれフランジおよびウェブとよぶ。

図-4に示す板要素の解析モデルにおける剛板取り付け辺での境界条件は、軸方向変位を除き自由とした。圧縮荷重は、骨組部の支点において強制圧縮変位を導入することにより与えた。

解析モデルの諸元は次の通りである。B=21.4cm、D=14.3cm、A=64.2cm、L=251.0cm、t=0.446、L/r=40.0、b/t=44.3、R_f=1.229、σ_y=7590kgf/cm^2、E=2.19×10^{6}kgf/cm^2、ν=0.3、k=4.0、$r = (I_a/A_a)^{1/2}$。

板要素のたわみ波形と大きさはは次のように与える。

$$V(X,Z)=-V_0\sin(3\pi X/A)\sin(\pi Z/D) \qquad V_0 = 0.0034\times D$$

$$W(X,Y)=+W_0\sin(3\pi X/A)\cos(\pi Y/B) \qquad W_0 = 0.0034\times B$$

骨組モデルを含めた全体の初期たわみ波形は次のように与える。

$$W(X)=-W_0 SIN(\pi X/L) \qquad W_0 = L/5770$$

これらの諸元を用いて長柱の弾塑性解析を行った。

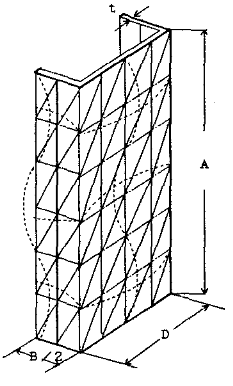

図-4　解析モデル

図-5は圧縮応力と柱の平均ひずみの関係を、それぞれ降伏応力および降伏ひずみで除して無次元化したもので表している。一点鎖線が実験結果の極限強度[5]、破線が宇佐美らの解析結果の極限強度[5]、□印が本解析法の計算結果を示している。実験結果の極限強度は 0.644、宇佐美らの解析結果は 0.687に対して、本解析法では0.601となった。このことから本解析法は十分妥当性があるものと判断できる。なお詳細な考察並びにその他の計算例については講演当日発表する予定である。

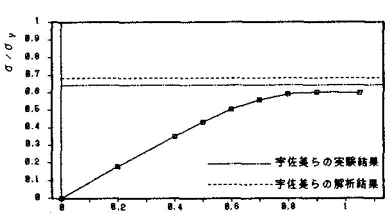

図-5　無次元化された応力ひずみ曲線

4　まとめ

以上の結果より本解析法の妥当性が証明できた。今後は骨組部を立体モデルとしたもの並びに補剛断面についても解析できるよう解析法を拡張して行きたい。

参考文献

1)崎元達郎，奈良　敬，小松定夫，北沢正彦：曲げが支配的な主塔を有する長径間斜張橋の耐荷力に関する研究，構造工学論文集，Vol.33A,1987年 3月.
2)上野智宏：骨組構造物の弾塑性有限変位解析法に関する研究，岐阜大学卒業論文，1990年2月.
3)岩木和洋：薄肉鋼板構造の立体弾塑性有限変位解析法に関する研究，岐阜大学卒業論文，1990年 2月.
4)岡田純一：圧縮板の極限強度に関する解析手法，大阪大学卒業論文，1975年3月.
5)宇佐美勉，福本啄士：鋼圧縮部材の連成座屈強度実験と有効幅理論による解析，土木学会論文報告集第326号，1982年10月.