

鋼製ウェブ板の繰返しせん断挙動に関する解析的研究*

三菱重工業 正会員 渡辺智彦[†]
名古屋大学 フェロー会員 宇佐美勉[‡]

1. 緒言

本研究は、鋼製ラーメンにおいてせん断力が卓越する隅角部および梁腹板ウェブパネルのせん断挙動を明らかにし、繰返し載荷の影響も含めたせん断パネルの破壊基準の構築を目指したものである。解析モデルには、フランジの剛性がウェブパネルのせん断挙動に与える影響も考慮できるように、ウェブパネルに実際にフランジも取り付け付けたモデルを採用し、構造解析用汎用プログラム ABAQUS による弾塑性有限変位解析を行った。無補剛ウェブに対して種々の検討を行い、せん断幅厚比パラメータを用いた変形能の推定式を提案する。

2. 解析概要

文献 (1) では、隅角部および梁腹板を一枚の板パネルに理想化した解析モデル (web モデル) についての考察を行っている。それに対し本研究では、ウェブパネルに実際にフランジを取り付けた解析モデル (web-flange モデル) を用い、web モデルとの比較を行うとともにフランジがウェブのせん断挙動に与える影響について考察する。

web-flange モデルを図 1 に示す。このモデルは、 z 方向に関しての対称性を考慮して半断面モデルを採用した。なお、図 1 において、 a = ダイアフラム間隔、 b_w 、 b_f はそれぞれウェブ幅、フランジ幅である。

境界条件は、まず、ウェブの周辺 4 辺 (辺② ⑤ ⑥ ⑨) のうち、ダイアフラムとの接合辺② ⑨に関しては、web モデルと同様に直線変形をするように拘束し、フランジとの接合辺⑤ ⑥は、フランジを実際にシェル要素を用いて表現しているため、特別な拘束は必要とせず、曲げ変形が生じる場合もある。また、ダイアフラムに接合されている辺① ② ③ ⑧ ⑨ ⑩は $\theta_x = 0$ とし、辺① ② ③に関しては、その x 方向の変位を拘束する。そして、辺①の y 方向の変位 Δ を固定し、載荷辺⑧の Δ を図 2 に示す単調載荷および繰返し載荷の 2 パターンのように変化させていくことでせん断変形を与えた。また、辺④ ⑦は、対称面上なので、対称条件 ($\theta_x = \theta_y = w = 0$) で拘束している。

初期たわみはウェブには式 (1)、
フランジは式 (2) に示す半正弦波を導入し、最大初期たわみは、
板幅の 1/150 倍とした。なお、構成則には名古屋大学で開発された修正二曲面モデルを用い、鋼材は SS400 材を使用する。

$$\delta = \delta_{pw} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{y}{b_w}\right) \quad (1)$$

$$\delta = \delta_{pf} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{z}{b_f}\right) \quad (2)$$

$$R_{\tau w} = \frac{b_w}{n \cdot t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k_s \pi^2}} \cdot \frac{\tau_y}{E} \quad (3)$$

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.0/\alpha_s^2 & (\alpha_s \geq 1) \\ 4.0 + 5.34/\alpha_s^2 & (\alpha_s \leq 1) \end{cases} \quad (4)$$

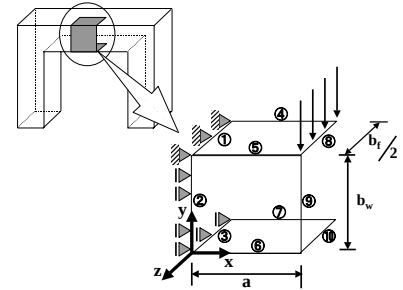
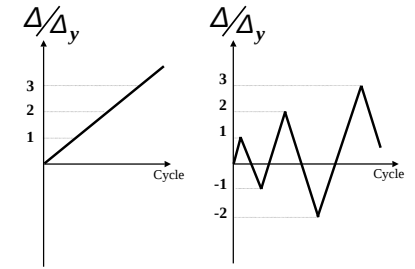


図- 1 web-flange モデルの解析モデル



(a) 単調載荷 (b) 繰返し載荷

図- 2 載荷パターン

ウェブ幅、アスペクト比は、 $b_w = 2000\text{mm}$ 、 $\alpha = 1.0$ と一定にし、せん断幅厚比パラメータ $R_{\tau w}$ は 0.5 ~ 5.0 の範囲で変化させた。また、フランジに関しては、フランジ幅 $b_f = b_w = 2000\text{mm}$ とし、フランジ厚 t_f は、ウェブ厚との比 t_f/t_w を 0.5 ~ 5.0 と様々に変化させて解析モデルを作成した。

3. 解析結果及び考察

図 3 に、単調載荷時の平均せん断応力 - 平均せん断ひずみ曲線を示す。まず比較的薄肉の場合であるが、図 3 (a) より、 t_f/t_w が大きくなるほど、強度劣化は緩やかになり、 $t_f/t_w = 3.0$ では、強度劣化の後に強度が上昇するようになるが、 $t_f/t_w = 5.0$ のプロットと大差ないことから、ある程度まで t_f/t_w を大きくすると、強度上昇の様子に大差は見られなくなるといえる。次に、比較的厚肉な場合においては、図 3 (b) より降伏棚が現れた後、いずれの t_f/t_w においても

* Key Words : ductility, width-thickness ratio parameter, cyclic loading

[†] 〒 100-8315 東京都千代田区丸の内 2-5-1 TEL 03-3212-3111

[‡] 〒 464-8603 名古屋市中千種区不老町 TEL 052-789-4617

ほぼ同じせん断ひずみを受けたときに、ひずみ硬化による強度増加現象が起こり、その度合いに関しては薄肉のときと同様に t_f/t_w を大きくする程大きくなっていくが、ある程度まで t_f/t_w を大きくすると、強度増加の度合いはそれ以上大きくならないといえる。また、図 3 から全般的に、web モデルは web-flange モデルよりも強度が低くなり、web モデルによる評価は安全側になるものと考えられる。

図 4 に、载荷パターンによる比較を示す。なお、繰返し载荷については履歴曲線における折り返し点を結んだ包絡線である。

図 4 より、比較的薄肉な場合には载荷パターンによる相違はほとんどないが、厚肉になると载荷パターンによる影響は大きくなり、ひずみ硬化現象による強度上昇が起きるのが、繰返し载荷を受けることでかなり早い段階で起こるようになることがわかる。

限界せん断ひずみ せん断変形能を示す限界せん断ひずみ γ_u を図 5 のように定義した。つまり、図 5 にみられるどの場合においても、第一ピーク τ_p から 95 % まで劣化したときのひずみを限界せん断ひずみと定義する。

上記のように定義した限界せん断ひずみと、せん断幅厚比パラメータの関係を図 6 に示す。図 6 は、縦軸に限界せん断ひずみ γ_u を降伏せん断ひずみ γ_y で無次元化したものを、横軸にせん断幅厚比パラメータ $R_{\tau w}$ をとったもので、web モデル、web-flange モデル双方の単調および繰返し载荷時の限界せん断ひずみ γ_u がプロットされており、web モデルと web-flange モデルの比較、および単調载荷と繰返し载荷の比較を行っている。なお、フランジの板厚は通常ウェブの板厚よりも大きいので、ここでは、web-flange モデルに対しては安全側とみて $t_f = t_w$ の結果がプロットされている。図 6 よりいえることは、web-flange モデルは web モデルに対して全体的に高い変形能を評価しているということである。web モデル、web-flange モデルのそれぞれは、 $R_{\tau w} = 0.6, R_{\tau w} = 0.85$ のとき、ほぼ一定の限界せん断ひずみを示しているが、その一定値は、どちらの载荷パターンも web-flange モデルの方が高い値となっており、フランジの剛性を考慮していない web モデルによる評価は安全側となっている。また、Krawinkler らは、ラーメン橋脚の隅角部における無補剛 web パネルが単調载荷を受ける際のせん断ひずみの最低値を $4\gamma_y$ と提案している²⁾。web-flange モデルの解析結果では、単調载荷時の最低値はそれより少し高くなっているが、繰返し载荷で

は、最低値が $4\gamma_y$ 程度となっており、耐震設計にはより厳しい载荷条件である繰返し载荷から得られた $4\gamma_y$ を無補剛ウェブパネルにおけるせん断ひずみの最低値とするのが適切であると考えられる。また、図 6 には、web-flange モデルの繰返し载荷のプロットを用いて得られた近似式もプロットしている。この式 (5) を、ラーメン橋脚梁腹板における、フランジの剛性も考慮した限界せん断ひずみ推定式として提案する。

4. 結言

web モデルによる限界せん断ひずみは、より実橋脚に近い web-flange モデルに比べて低い値となり、web モデルによる評価は安全側になる。また、web-flange モデルの解析結果より限界せん断ひずみの推定式を提案した。なお、補剛板に関しては、当日述べることとする。

参考文献

- 1) 天野麻衣ら、第 3 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集、57-62、2000.1。
- 2) Krawinkler, H. ら、Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST2, pp.373-391, 1982。

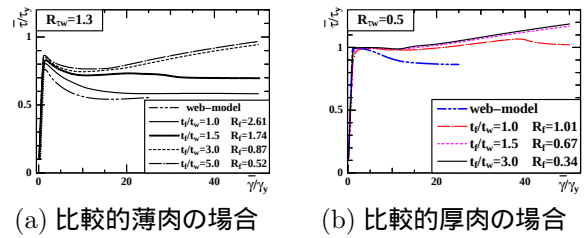


図- 3 単調载荷による無補剛 web-flange モデルの $\tau - \gamma$ 曲線 (板厚比 t_f/t_w の相違による比較)

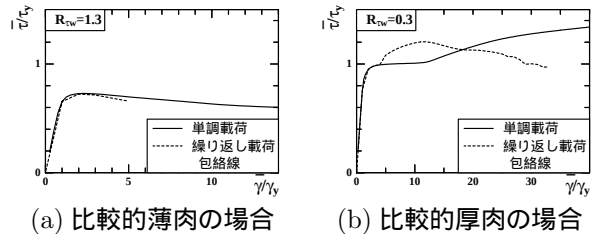


図- 4 载荷パターンの違いによる $\tau - \gamma$ 曲線の比較

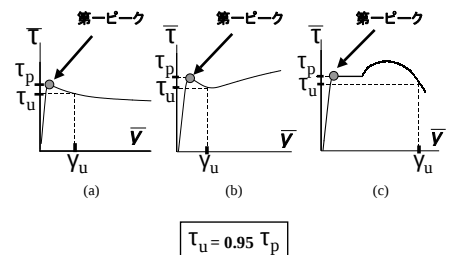


図- 5 限界せん断ひずみ γ_u の定義

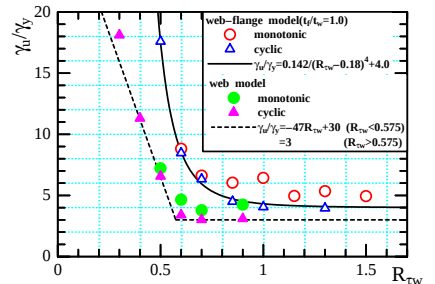


図- 6 $\gamma_u - R_{\tau w}$ 曲線

$$\frac{\gamma_u}{\gamma_y} = \frac{0.142}{(R_{\tau w} - 0.18)^4} + 4.0 \cdots (5)$$