矩形開口を有する鋼製 H 形断面材の終局耐力 (Ⅱ)

—開口補強時の実験的考察—

正 会 員 福 島 暁 男*
正 会 員 小 松 博**

§1. 序

矩形開口を有する H 形断面材の耐力評価に当たり、前報^{1),2)}ではせん断、曲げ+せん断および軸力+曲げ+せん断の各応力下での、無補強開口を対象とした実験ならびに解析について述べた。これらの結果、はり材への矩形開口設定は部材の耐荷能力を著しく低下させ、実用上耐力の確保にはなんらかの開口補強を必要とする状況にある。特にせん断降伏時の耐力 (Q_e/Q_0) の低下²⁾は曲げ降伏時のそれに比べ極めて高く、形状比 α (開口部の縦と横の比率) が 2 の矩形中心開口で開口率 a/h (はりせいに対する開口せいの比) 30 % では $Q_e/Q_0 = 0.48$, 40 % で 0.32, 50 % で 0.19, 60 % で 0.10 となっている。ここに開口補強の必要性和その有効性が問われてくる。

一般に開口補強の形態としては、開口縁周辺に補強材を設ける方法 (以下開口縁補強という)、開口部周辺のウェブ面に補強材を施す方法 (以下ウェブ面補強という) およびこれら両者を併用する方法 (以下複合補強という) が考えられる。これらの補強法は補強材の設置状況から見て、設定外力に対しその力学的特性が若干異なる。したがって、開口部の応力状態に適応した補強法の選択が必要となる。

H 形断面材の矩形開口設定にかかわる開口補強の研究としては、開口部の上下に水平スチフナを配した補強形状を取り扱ったものが主で、これは Redwood³⁾ や Cooper⁴⁾ らによって報告されている。その他の開口補強に関しては単発的な報告⁵⁾ は見られるものの組織的・系統的な研究報告はなく、補強方法も限られたものとなっている。特に、せん断補強として有効と考えられるウェブ面補強あるいは複合補強に関する力学的特性は十分解明されていないのが現状である。したがって一般性のある資料の欠乏が矩形開口設定時の補強設計を制約している。

本研究は補強法の開発として、数多くの補強形状を対

本報の一部は昭和 57 年～60 年日本建築学会大会学術講演梗概集に発表している。

* 日本大学 助教授

** 日本大学 助手

(1988 年 4 月 10 日原稿受理, 1989 年 1 月 10 日採用決定)

象に実験研究を進め、実用性のある補強法の確立を意図したもので、本報ではまず矩形開口設定において耐力低下の著しいせん断降伏型の実験を主体に報告し、併せて耐力評価を行うための耐力式の誘導を行ったのである。

ここに実験は無開口または無補強開口との対比を図る関係上、前報²⁾の実験 C と同じ内容に沿って行い、一方単調載荷によるせん断実験とした。

§2. せん断耐力

2.1 耐力式

図—1 に示す開口縁補強とダブルプレート補強とを組み合わせた複合補強時のせん断耐力を無補強開口時¹⁾の解析に準拠して求める。よって応力場の設定および解析上の仮定は文献 1) に従う。ここに開口部に与える曲げモーメントとせん断力を図—2 としたとき、その関係は

$$Q = Q_1 + Q_2 \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau M_2 - \tau M_1 &= 2 \alpha a Q_1 \\ {}_B M_2 - {}_B M_1 &= 2 \alpha a Q_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \tau M_1 + {}_B M_1 \\ M_2 &= \tau M_2 + {}_B M_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

図—1 補強開口形状および設定外力

図—2 開口部の曲げ-せん断関係

$$\begin{aligned}
 {}_1F_{12} &= \beta A_r \sigma_{r0} + (1-\beta) A_s \sigma_{s0} + (1-\beta) \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \frac{A_{wr}}{2} \sigma_1 \\
 {}_1F_{22} &= \beta A_r \sigma_{r0} + (1-\beta) A_s \sigma_{s0} + \frac{1}{2} (1-2\beta) \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \frac{A_{wr}}{2} \sigma_1 + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right) \frac{A_{wr}}{2} \sigma_2 \\
 {}_2F_{12} &= \beta A_r \sigma_{r0} - \beta A_s \sigma_{s0} - \beta \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \frac{A_{wr}}{2} \sigma_1 \\
 {}_2F_{22} &= \beta A_r \sigma_{r0} - \beta A_s \sigma_{s0} + \frac{1}{2} (1-2\beta) \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \frac{A_{wr}}{2} \sigma_1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right) \frac{A_{wr}}{2} \sigma_2
 \end{aligned}$$

図-3 最大せん断力時の応力分布 (1)

$$\begin{aligned}
 {}_1F_{12} = {}_1F_{22} &= \beta A_r \sigma_{r0} - (1-\beta) \alpha \frac{a}{h} \frac{A_{wr} \sigma_{w0}}{2\sqrt{3}} \left(1 + \frac{a}{1-\frac{a}{h}} \nu_2\right) \\
 {}_2F_{12} = {}_2F_{22} &= \beta A_r \sigma_{r0} - \beta \alpha \frac{a}{h} \frac{A_{wr} \sigma_{w0}}{2\sqrt{3}} \left(1 + \frac{a}{1-\frac{a}{h}} \nu_2\right) \\
 S_1 &= \beta A_s \sigma_{s0} - \beta \alpha \frac{a}{h} \frac{A_{wr} \sigma_{w0}}{2\sqrt{3}} \left(1 + \frac{a}{1-\frac{a}{h}} \nu_2\right) \\
 S_2 &= \beta A_s \sigma_{s0} - (1-\beta) \alpha \frac{a}{h} \frac{A_{wr} \sigma_{w0}}{2\sqrt{3}} \left(1 + \frac{a}{1-\frac{a}{h}} \nu_2\right)
 \end{aligned}$$

図-4 最大せん断力時の応力分布 (2)

これより開口両端部 Sec.1, Sec.2 の曲げモーメントは、

$$M_2 = M_1 + 2 \alpha a Q \quad (2.4)$$

にあり、かつ Sec.1, Sec.2 での開口部上下断面内の垂直応力の合力は等しいとする。これらの与条件に基づき、開口部分に与え得るせん断力の最大の値を、開口断面上の応力場より求める。

開口補強率 ν_1 と ν_2 は、 A_w , σ_{w0} をそれぞれ無開口ウェブの断面積と降伏応力度としたとき次のように定義する。開口縁補強に対し

$$\nu_1 = 2 A_s \sigma_{s0} / \left(\frac{a}{h} A_w \sigma_{w0} \right) \quad (2.5)$$

上式中 A_s , σ_{s0} はそれぞれ補強材の断面積と降伏応力度。ダブルプレート補強に対し

$$\nu_2 = \left(1 - \frac{a}{h}\right) A_r \sigma_{r0} / \left(\frac{a}{h} A_w \sigma_{w0} \right) \quad (2.6)$$

上式中 A_r , σ_{r0} はそれぞれ補強材の断面積と降伏応力度。耐力式の誘導は補強率に対し以下の範囲にて行う。

$$a) \quad \nu_1 \leq \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \left\{ 1 + \frac{a}{h} \nu_2 / \left(1 - \frac{a}{h}\right) \right\}$$

図-2 の曲げ-せん断関係に基づき、開口両端部

Sec.1, Sec.2 における応力場を文献1) に従い図-3 のように設定する。この図において開口部上下断面の補強ウェブ部分に生ずる等価せん断応力度 τ_1 , τ_2 をせん断力 Q_1 , Q_2 に対し下式で与える。

$$\begin{aligned}
 \tau_1 &= \frac{Q_1}{\left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \frac{A_{wr}}{2}} \\
 &= \frac{2 \left(1 - \frac{a}{h}\right) \sigma_{w0} \frac{Q_1}{Q_0}}{\sqrt{3} \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \frac{\nu_2}{\gamma_r}\right)} \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_2 &= \frac{Q_2}{\left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right) \frac{A_{wr}}{2}} \\
 &= \frac{2 \left(1 - \frac{a}{h}\right) \sigma_{w0} \frac{Q_2}{Q_0}}{\sqrt{3} \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right) \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \frac{\nu_2}{\gamma_r}\right)} \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

ここに Q_0 : 無開口ウェブ断面の降伏せん断力, A_{wr} : 補強後のウェブ断面積 ($A_w + A_r$), γ_r : ダブルプレートとウェブの降伏応力度の比 (σ_{r0}/σ_{w0})。これより補強ウェブの等価垂直応力度 σ_1 , σ_2 は Mises の降伏条件より

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{w0}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \frac{\nu_2}{\gamma_r}\right)} \sqrt{\left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \frac{\nu_2}{\gamma_r}\right)^2 - 4 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)^2} \quad (2.9)$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_{w0}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right)\left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \nu_2\right)} \sqrt{\left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \nu_2\right)^2 - 4 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \left(\frac{Q_2}{Q_0}\right)^2} \dots (2.10)$$

で与えられる。この応力場と開口両端間の曲げ-せん断関係からせん断力 Q_1 , Q_2 は

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left[\left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right)^2 \sqrt{\left\{ \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{a}{h}\right)^2 \right\} \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \nu_2\right)^2 - \left[2 \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right) \nu_1 \right]^2} \right. \\ \left. + \frac{4}{\sqrt{3}} \alpha \left(\frac{a}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right) \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \nu_1 \right] / \left[2 \left(1 - \frac{a}{h}\right) \left\{ \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{a}{h}\right)^2 \right\} \right] \dots (2.11)$$

$$\frac{Q_2}{Q_0} = \left[\left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right)^2 \sqrt{\left\{ \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{a}{h}\right)^2 \right\} \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \nu_2\right)^2 - \left[2 \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right) \nu_1 \right]^2} \right. \\ \left. + \frac{4}{\sqrt{3}} \alpha \left(\frac{a}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right) \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right) \nu_1 \right] / \left[2 \left(1 - \frac{a}{h}\right) \left\{ \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{a}{h}\right)^2 \right\} \right] \dots (2.12)$$

として求まり、補強開口部のせん断耐力は両者の和で与えられる。

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_1}{Q_0} + \frac{Q_2}{Q_0} \dots (2.13)$$

この場合の開口両端部の曲げ耐力 (M_1/M_0), (M_2/M_0) は

$$\frac{M_1}{M_0} = \frac{1}{1 + 2\rho \frac{2A_f}{A_w}} \left[2(1 - 2\beta)\rho \frac{2A_f}{A_w} \right. \\ \left. - 2 \frac{a}{h} \left(2 - \frac{a}{h} - 2\beta\right) \nu_1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \right. \\ \left. \cdot \left(5 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h} - 8\beta\right) \left(1 + \frac{\frac{a}{h}}{1 - \frac{a}{h}} \frac{\nu_2}{\gamma_r}\right) \frac{\sigma_1}{\sigma_{w0}} \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right)^2 \left(1 + \frac{\frac{a}{h}}{1 - \frac{a}{h}} \frac{\nu_2}{\gamma_r}\right) \frac{\sigma_2}{\sigma_{w0}} \right] \dots (2.14)$$

$$\frac{M_2}{M_0} = \frac{1}{1 + 2\rho \frac{2A_f}{A_w}} \left[2(1 - 2\beta)\rho \frac{2A_f}{A_w} \right. \\ \left. - 2 \frac{a}{h} \left(\frac{a}{h} - 2\beta\right) \nu_1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right) \right. \\ \left. \cdot \left(3 + \frac{a}{h} - \frac{b}{h} - 8\beta\right) \left(1 + \frac{\frac{a}{h}}{1 - \frac{a}{h}} \frac{\nu_2}{\gamma_r}\right) \frac{\sigma_1}{\sigma_{w0}} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right)^2 \left(1 + \frac{\frac{a}{h}}{1 - \frac{a}{h}} \frac{\nu_2}{\gamma_r}\right) \frac{\sigma_2}{\sigma_{w0}} \right] \dots (2.15)$$

となる。ここに M_0 : 無開口断面の全塑性モーメント, A_f : フランジの断面積, ρ : フランジとウェブの降伏応力度の比 (σ_{fo}/σ_{w0})。なお β は開口部におけるせん断力 (最大せん断力) が一定の基で, Sec. 1, Sec. 2 の曲げモーメントが図-2 で示す下側引張 ($\beta=0$) の状態から上側引張 ($\beta=1$) に推移する場合の係数で次式で与える。

$$\beta = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{M_1 + M_2}{M_1^0 + M_2^0}\right) \dots (2.16)$$

この場合の M_1^0 , M_2^0 は $\beta=0$ のときの Sec. 1, 2 のモーメント。

$$b) \quad \nu_1 > \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{a}{h} \nu_2 / \left(1 - \frac{a}{h}\right) \right]$$

この範囲の補強率に対する応力場は図-4 で表され、開口部上下断面のウェブ部分はせん断降伏状態となる。

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{A_w + \gamma_r A_f}{A_w + A_f} \frac{\sigma_{w0}}{\sqrt{3}} \dots (2.17)$$

したがって、補強開口部のせん断耐力は下式で与えられる。

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 - \frac{a}{h} (1 - \nu_2) \dots (2.18)$$

また開口両端部の曲げ耐力は

$$\frac{M_1}{M_0} = \frac{1}{1 + 2\rho \frac{2A_f}{A_w}} \left[2(1 - 2\beta)\rho \frac{2A_f}{A_w} \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{a}{h}\right)^2 (1 - 2\beta) \nu_1 - \frac{4}{\sqrt{3}} \alpha \frac{a}{h} \right. \\ \left. \cdot \left[1 - \beta \left(1 + \frac{a}{h}\right) \right] \left(1 + \frac{\frac{a}{h}}{1 - \frac{a}{h}} \nu_2\right) \right] \dots (2.19)$$

$$\frac{M_2}{M_0} = \frac{1}{1 + 2\rho \frac{2A_f}{A_w}} \left[2(1 - 2\beta)\rho \frac{2A_f}{A_w} \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{a}{h}\right)^2 (1 - 2\beta) \nu_1 - \frac{4}{\sqrt{3}} \alpha \frac{a}{h} \right. \\ \left. \cdot \left[\frac{a}{h} - \beta \left(1 + \frac{a}{h}\right) \right] \left(1 + \frac{\frac{a}{h}}{1 - \frac{a}{h}} \nu_2\right) \right] \dots (2.20)$$

となる。

2.2 単独補強時の耐力

開口縁補強またはダブルプレート補強を単独補強として用いる場合のせん断耐力を比較する。この場合、補強率 ν に対する耐力推移は式 (2.13), (2.18) において

図—5 単独補強時の耐力推移

$\nu_2=0$ または $\nu_1=0$ と置いて与えられ、図—5 の関係を得る。すなわち耐力は $\nu \leq \nu_0$ と比較的補強率の小さい範囲で開口縁補強が、 $\nu > \nu_0$ ではダブルプレート補強が上回る状態にある。ここに ν_0 は下式で与える。

a) $\nu \leq \alpha/\sqrt{3}$ の場合

$$X_1\nu_0^3 + X_2\nu_0^2 + X_3\nu_0 + X_4 = 0 \quad (2.21)$$

ここに、

$$X_1 = \left(\frac{a}{h}\right)^4 \left[\left\{ E^2 + 4 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 (A^4 D^2 + B^4 C^2) \right\}^2 - 64 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^4 A^4 B^4 C^2 D^2 \right] \quad (2.22 a)$$

$$X_2 = 4 E \sqrt{CD} \left(\frac{a}{h}\right)^3 \left(1 - \frac{a}{h}\right) (A^2 \sqrt{D} + B^2 \sqrt{C}) \cdot \left\{ E^2 + 4 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 (A^4 D^2 + B^4 C^2) \right\} \quad (2.22 b)$$

$$X_3 = 4 CD \left(\frac{a}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \left[\left\{ (A^2 \sqrt{D} + B^2 \sqrt{C})^2 + A^2 B^2 \sqrt{CD} \right\} E^2 + 4 A^2 B^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \cdot \left\{ \sqrt{CD} (A^4 D^2 + B^4 C^2) + A^2 B^2 CD (C + D) \right\} \right] \quad (2.22 c)$$

$$X_4 = 8 A^2 B^2 C^2 D^2 E \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right)^3 (A^2 \sqrt{D} + B^2 \sqrt{C}) \quad (2.22 d)$$

なお

$$A = 1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}, \quad B = 1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h} \quad (2.23 a, b)$$

$$C = \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{b}{h}\right)^2 + \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{a}{h}\right)^2 \quad (2.23 c)$$

$$D = \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{b}{h}\right)^2 + \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{a}{h}\right)^2 \quad (2.23 d)$$

$$E = \sqrt{CD} (A^2 \sqrt{D} + B^2 \sqrt{C}) - \frac{4}{\sqrt{3}} \alpha \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right) (AD + BC) \quad (2.23 e)$$

b) $\nu > \alpha/\sqrt{3}$ の場合

$$\nu_0 = \frac{\left(1 - \frac{a}{h}\right) \left\{ 2 \left(1 - \frac{a}{h}\right) \sqrt{CD} - (A^2 \sqrt{D} + B^2 \sqrt{C}) \right\}}{\frac{a}{h} (A^2 \sqrt{D} + B^2 \sqrt{C})} \quad (2.24)$$

図—6 各補強時のせん断耐力と補強率の関係

2.3 複合補強時の最適補強量

複合補強時の補強率 $\nu = \nu_1 + \nu_2$ において、式 (2.13) を最大とする ν_1 と ν_2 の最適設定条件は $\nu_2 = \nu - \nu_1$ と置くことにより、 ν に対する ν_1 の占める割合として以下の関係を得る。

$$p = \frac{A^2 D \left[C \left\{ 1 - \frac{a}{h} (1 - \nu + \nu_1) \right\} + 4 \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \nu_1 \right]}{\sqrt{C \left\{ 1 - \frac{a}{h} (1 - \nu + \nu_1) \right\}^2 - 4 \left(\frac{a}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \nu_1^2}} + \frac{B^2 C \left[D \left\{ 1 - \frac{a}{h} (1 - \nu + \nu_1) \right\} + 4 \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \nu_1 \right]}{\sqrt{D \left\{ 1 - \frac{a}{h} (1 - \nu + \nu_1) \right\}^2 - 4 \left(\frac{a}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \nu_1^2}} \quad (2.25)$$

ここに、

$$p = \frac{4}{\sqrt{3}} \alpha \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right) (AD + BC) \quad (2.26)$$

ただし、 ν_1 は $0 \leq \nu_1 \leq \nu$ の範囲で成立する。上記により設定した複合補強と各単独補強の耐力推移を図—6 に示す。これより複合補強は常に同一補強量に対し単独補強を上回る耐力関係を与える。この場合 $\nu < \nu_p$ の範囲では $\nu_2 = 0$ にあり、 $\nu \geq \nu_p$ において ν_2 が設定される。ここに ν_p は式 (2.13) において $\nu = \nu_1$ として求めた補強率である。なお図中 ν_1 と ν_2 の関係を破線で示した。

§3. 実験

3.1 補強形状

本実験では補強方法に多様性を持たせ、開口縁補強として5種類、ウェブ面補強1種類、複合補強2種類の補強形状について取り扱う。以下に各補強形状の概要を示す。

1) 開口縁補強 (図—7(a))：開口部上下縁に沿って水平スチフナを配したものの (以下水平スチフナ補強という：A タイプ)、開口縁周辺に沿いボックス形に補強プレートを配したものの (以下ボックス補強という：B タイプ)、開口部上下縁の水平スチフナと側縁の垂直スチフナを組み合わせたものの (以下水平・垂直スチフナ補強という：G タイプ)、開口部側縁の垂直スチフナと上下縁の水平スチフナを組み合わせたものの (以下垂直・水平スチフナ補強という：H タイプ) および開口縁周辺に角形鋼管を設置したもの (以下角形鋼管補強という：P

図-7(a) 開口縁補強

図-7(b) ウェブ面補強

図-7(c) 複合補強

タイプ)

2) ウェブ面補強 (図-7(b)): 開口部周辺のウェブ面に補強プレートを重ね合わせたもの (以下ダブルプレート補強という: C タイプ)

3) 複合補強 (図-7(c)): ボックス補強+ダブルプレート補強 (D タイプ), 角形鋼管補強+ダブルプレート補強 (PC タイプ)

補強材はダブルプレート補強, 角形鋼管補強を除き板厚 $t_s=6\text{ mm}$ の鋼板 (SS 41) を用い, 開口縁補強における補強材相互の接合を突合わせ溶接とし, 補強材とウェブまたはフランジとの接合をすみ肉溶接とした。また, 角形鋼管補強には一般構造用角形鋼管 (STKR 41) □-150×80×6 および □-200×100×6, 複合補強には □-150×80×4.5 および □-200×100×4.5 を, ダブルプレート補強ははりせい方向ウェブフィレット先端部までに対し板厚 $t_r=3.2\text{ mm}$, 4.5 mm , 6.0 mm , 9.0 mm の鋼板 (SS 41) を用い, とともにウェブとの接合をすみ

肉溶接とした。なお余長 R は予備実験の結果⁶⁾ はりせいの $1/4$ で十分応力の伝達が可能との確認を得ているので, ここではこれに相当する 50 mm として与えた。

開口形状は, 各開口補強とも補強材によって囲まれた開口部分が, 無補強時と同じ開口になるように補強材を設置する。すなわち開口形状を表す開口せい $2a$, 開口幅 $2a_0$ は図-8 に示す無補強時の開口形状との対応を考慮し, 補強材の内側寸法をもって表す。

3.2 試験体の形状・寸法および材質

試験体の形状を図-9 に, 寸法および形状比 (α), 開口率 (a/h), 偏心率 (b/h) を表-1 に, 機械的性質を表-2 に示す。なお紙面の都合上実験結果を併せて表-1 の末尾に示す。

試験体は前報²⁾ 実験 C (せん断実験) の無補強開口 (RHS・Type) と同様, H 形鋼 H-200×100×5.5×8 (SS 41) を使用し, 形状比, 開口率および偏心率の設定もそれに従う。ただし, 角形鋼管を使用した補強形状

図-8 無補強時の開口形状

図-9 試験体の形状

表一 試験体寸法・開口形状および実験結果

試験体名	材質	試験体寸法 (mm)				開口形状			補強率		実験値				解析値	
		2H	B	t _w	t _f	α	a/h	b/h	ν_1	ν_2	Q _e (t)	Q _{max} (t)	Q _e Q ₀	Q _{max} Q ₀	Q _a Q ₀	Q _e Q ₀
RHS-40R-00	I	200.4	98.4	5.59	7.53	2.02	0.355	0.003	—	—	9.40	14.75	0.427	0.514	0.397	1.08
RHS-40R-20	I	200.3	98.6	5.64	7.51	2.01	0.356	0.209	—	—	9.65	13.65	0.435	0.471	0.407	1.07
RHS-50R-00	I	200.4	98.5	5.62	7.52	2.13	0.457	0.006	—	—	5.35	9.30	0.242	0.322	0.236	1.03
RHS-40-00-As ₁	I	200.4	98.4	5.51	7.52	1.99	0.416	0.002	0.64	—	11.15	19.25	0.514	0.680	0.487	1.06
RHS-40-00-As ₂	I	200.4	98.5	5.58	7.52	2.00	0.414	0.002	0.97	—	12.40	19.15	0.564	0.668	0.551	1.02
RHS-40-20-As ₁	I	200.4	98.7	5.61	7.51	2.00	0.414	0.213	0.60	—	11.30	18.35	0.512	0.637	0.484	1.06
RHS-40-20-As ₂	I	200.3	98.7	5.65	7.53	2.01	0.413	0.215	0.93	—	12.40	19.70	0.558	0.679	0.548	1.02
RHS-40-00-Bs ₁	II ₁	201.0	100.3	5.44	7.43	1.99	0.418	0.005	0.51	—	9.50	15.70	0.453	0.580	0.446	1.02
RHS-40-00-Bs ₂	II ₁	201.1	100.2	5.45	7.47	2.00	0.417	0.017	0.73	—	10.30	16.90	0.490	0.623	0.504	0.97
RHS-40-00-Bs ₃	II ₁	201.0	100.2	5.45	7.51	1.98	0.419	0.014	1.16	—	10.40	17.70	0.495	0.653	0.548	0.90
RHS-40-20-Bs ₁	II ₁	201.0	99.5	5.47	7.47	2.00	0.417	0.201	0.52	—	9.70	15.75	0.460	0.579	0.454	1.01
RHS-40-20-Bs ₂	II ₁	200.9	99.9	5.41	7.37	2.00	0.415	0.182	0.75	—	10.50	16.25	0.503	0.604	0.510	0.99
RHS-40-20-Bs ₃	II ₁	200.9	100.2	5.41	7.39	1.99	0.418	0.199	1.18	—	10.60	17.70	0.508	0.658	0.549	0.93
RHS-50-00-Bs ₁	II ₁	201.0	100.4	5.55	7.50	1.98	0.524	0.000	0.52	—	7.10	12.60	0.332	0.457	0.324	1.02
RHS-50-00-Bs ₂	II ₁	201.1	100.3	5.47	7.56	1.99	0.521	0.015	0.75	—	8.20	13.15	0.389	0.484	0.391	0.99
RHS-50-00-Bs ₃	II ₁	201.0	99.6	5.44	7.48	2.01	0.519	0.009	1.12	—	8.55	14.60	0.408	0.540	0.449	0.91
RHS-60-00-Bs ₁	II ₁	200.7	100.0	5.34	7.34	2.00	0.624	0.000	0.54	—	4.90	8.90	0.238	0.335	0.230	1.03
RHS-60-00-Bs ₂	II ₁	200.7	100.1	5.44	7.35	1.99	0.628	0.000	0.78	—	6.00	9.50	0.286	0.351	0.285	1.00
RHS-60-00-Bs ₃	II ₁	200.9	100.3	5.49	7.48	1.99	0.625	0.017	1.11	—	6.60	10.00	0.312	0.366	0.343	0.91
RHS-30-00-Cs	III	200.6	99.6	5.47	7.95	1.98	0.312	0.008	—	0.90	13.70	16.70	0.710	0.598	0.672	1.06
RHS-30-15-Cs	IV	200.2	100.3	5.04	7.22	2.00	0.311	0.155	—	1.00	13.10	15.35	0.717	0.616	0.699	1.03
RHS-30-30-Cs	IV	200.5	99.9	5.09	7.23	2.01	0.310	0.311	—	1.00	13.80	15.65	0.747	0.621	0.712*	1.05
RHS-40-00-Cs ₁	V ₁	201.1	99.8	5.47	7.77	2.00	0.415	0.003	—	1.03	11.60	14.30	0.558	0.527	0.527	1.06
RHS-40-00-Cs ₂	V ₂	200.9	99.7	5.38	7.69	1.99	0.416	0.008	—	1.51	13.65	17.15	0.667	0.643	0.631	1.06
RHS-40-20-Cs ₁	V ₁	200.9	99.7	5.28	7.64	2.00	0.416	0.202	—	1.06	12.30	15.05	0.613	0.575	0.561	1.09
RHS-40-20-Cs ₂	V ₂	200.8	99.6	5.35	7.65	2.00	0.416	0.208	—	1.52	14.10	18.25	0.693	0.688	0.667	1.04
RHS-50-00-Cs ₁	V ₁	201.1	99.9	5.43	7.78	2.00	0.521	0.005	—	0.62	6.50	9.50	0.315	0.353	0.296	1.06
RHS-50-00-Cs ₂	V ₂	200.9	99.6	5.37	7.63	2.00	0.519	0.001	—	0.92	7.80	11.15	0.382	0.418	0.357	1.07
RHS-50-00-Cs ₃	V ₃	201.0	99.9	5.48	7.74	2.00	0.518	0.001	—	1.13	9.00	12.95	0.432	0.476	0.399	1.08
RHS-60-00-Cs ₁	V ₃	200.8	99.6	5.33	7.61	2.00	0.622	0.004	—	0.66	4.30	7.25	0.212	0.274	0.201	1.05
RHS-60-00-Cs ₂	V ₄	201.0	99.9	5.41	7.73	2.00	0.622	0.000	—	0.98	5.60	10.10	0.272	0.376	0.251	1.08
RHS-40-00-Gs	II ₁	200.9	100.1	5.49	7.47	2.02	0.412	0.003	0.75	—	10.80	19.05	0.510	0.698	0.512	1.00
RHS-50-00-Gs	II ₁	200.9	99.5	5.51	7.45	1.98	0.522	0.014	0.73	—	8.50	15.95	0.400	0.582	0.386	1.04
RHS-60-00-Gs	II ₁	201.0	99.9	5.41	7.39	2.02	0.616	0.012	0.78	—	6.50	10.75	0.311	0.399	0.296	1.05
RHS-40-00-Hs	II ₁	200.8	100.0	5.41	7.34	2.01	0.412	0.016	0.75	—	10.60	18.05	0.508	0.671	0.513	0.99
RHS-50-00-Hs	II ₁	200.9	99.7	5.41	7.50	2.00	0.517	0.013	0.74	—	8.30	13.80	0.398	0.513	0.391	1.02
RHS-60-00-Hs	II ₁	201.0	99.7	5.35	7.49	2.00	0.623	0.017	0.76	—	6.05	9.20	0.293	0.346	0.285	1.03
RHS-40-00-Ps ₁	IV ₁	200.3	98.4	5.61	7.53	2.01	0.358	0.001	0.66	—	12.40	20.65	0.584	0.717	0.560	1.04
RHS-40-00-Ps ₂	IV ₁	200.4	98.3	5.63	7.54	2.01	0.358	0.010	0.93	—	13.30	20.90	0.624	0.723	0.604	1.03
RHS-40-00-Ps ₃	IV ₁	200.3	98.8	5.63	7.53	2.01	0.358	0.003	1.41	—	13.50	21.00	0.633	0.726	0.613	1.03
RHS-40-20-Ps ₁	IV ₁	200.5	98.5	5.65	7.52	2.02	0.358	0.203	0.66	—	12.80	20.15	0.598	0.694	0.562	1.06
RHS-40-20-Ps ₂	IV ₁	200.4	98.7	5.57	7.51	2.00	0.359	0.209	0.94	—	13.30	20.95	0.630	0.732	0.604	1.04
RHS-40-20-Ps ₃	IV ₁	200.5	98.8	5.64	7.57	2.02	0.357	0.199	1.42	—	13.90	21.10	0.651	0.728	0.614	1.06
RHS-50-00-Ps ₁	IV ₂	200.3	98.4	5.63	7.52	2.11	0.464	0.000	0.66	—	9.30	16.80	0.436	0.581	0.420	1.04
RHS-50-00-Ps ₂	IV ₂	200.3	98.4	5.68	7.54	2.11	0.462	0.000	0.95	—	10.60	18.10	0.493	0.621	0.486	1.01
RHS-50-00-Ps ₃	IV ₂	200.3	98.4	5.58	7.50	2.11	0.462	0.001	1.42	—	11.10	18.55	0.525	0.647	0.509	1.03
RHS-50-00-Ds	II ₂	201.0	99.2	5.42	7.47	2.03	0.513	0.030	1.00	0.70	14.00	17.60	0.670	0.653	0.660*	1.02
RHS-40-00-PCs	IV ₃	200.3	98.4	5.59	7.51	2.00	0.368	0.001	0.58	0.88	16.70	21.45	0.789	0.747	0.721*	1.09
RHS-40-20-PCs	IV ₃	200.3	98.5	5.61	7.49	1.96	0.373	0.209	0.59	0.86	16.70	20.95	0.786	0.727	0.719*	1.09
RHS-50-00-PCs ₁	IV ₄	200.3	98.5	5.59	7.48	2.10	0.473	0.005	0.76	0.86	15.40	21.50	0.727	0.749	0.668	1.09
RHS-50-00-PCs ₂	IV ₄	200.3	98.5	5.66	7.54	2.09	0.475	0.001	1.08	0.85	16.50	20.80	0.770	0.716	0.718*	1.07

*は無開口断面の耐力で決まる値

表二 試験体の機械的性質

材質	フ ラ ン ジ					ウ ェ ブ					開口縁補強材					ダブルプレート補強材				
	σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	ε_y (%)	E (t/cm ²)	ε_b (%)	σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	ε_y (%)	E (t/cm ²)	ε_b (%)	σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	ε_y (%)	E (t/cm ²)	ε_b (%)	σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	ε_y (%)	E (t/cm ²)	ε_b (%)
I	3.20	4.56	0.150	2130	26.0	3.68	4.88	0.173	2130	26.0	2.61	3.51	0.121	2160	36.0	—	—	—	—	—
II ₁	2.74	4.14	0.127	2160	30.2	3.59	4.63	0.166	2170	19.4	2.61	3.51	0.121	2160	36.0	—	—	—	—	—
II ₂	2.74	4.14	0.127	2160	30.2	3.59	4.63	0.166	2170	19.4	2.61	3.51	0.121	2160	36.0	2.61	3.51	0.121	2160	36.0
III	2.62	4.56	0.123	2140	28.8	3.31	4.79	0.155	2140	27.8	—	—	—	—	—	3.01	4.15	0.140	2150	41.6
IV	2.79	4.40	0.132	2110	26.2	3.38	4.61	0.160	2110	20.2	—	—	—	—	—	3.17	4.35	0.150	2110	39.1
V ₁	2.66	4.21	0.123	2160	31.7	3.55	4.63	0.164	2170	25.2	—	—	—	—	—	3.12	4.56	0.143	2180	31.1
V ₂	2.66	4.21	0.123	2160	31.7	3.55	4.63	0.164	2170	25.2	—	—	—	—	—	3.09	4.77	0.142	2180	32.1
V ₃	2.66	4.21	0.123	2160	31.7	3.55	4.63	0.164	2170	25.2	—	—	—	—	—	3.08	4.40	0.142	2170	30.4
V ₄	2.66	4.21	0.123	2160	31.7	3.55	4.63	0.164	2170	25.2	—	—	—	—	—	2.85	4.33	0.133	2140	31.8
VI ₁	3.20	4.50	0.150	2130	26.3	3.54	4.80	0.166	2130	26.1	3.62	4.58	0.169	2140	25.9	—	—	—	—	—
VI ₂	3.20	4.50	0.150	2130	26.3	3.54	4.80	0.166	2130	26.1	3.66	4.38	0.170	2150	24.8	—	—	—	—	—
VI ₃	3.20	4.50	0.150	2130	26.3	3.54	4.80	0.166	2130	26.1	3.20	4.02	0.148	2160	32.8	2.73	3.49	0.127	2150	38.2
VI ₄	3.20	4.50	0.150	2130	26.3	3.54	4.80	0.166	2130	26.1	4.11	4.71	0.191	2150	23.8	2.61	3.51	0.121	2160	36.0

図-10 実験装置

(P・PC タイプ) では定形の鋼管を使用するため、開口形状がほかの開口補強に比べ若干異なる。したがって、角形鋼管の内側形状と同形の開口を有する無補強材 (RHS-40 R-00, RHS-40 R-20 および RHS-50 R-00) の実験を併せて行う。なお、溶接による残留応力除去のため全試験体ともアニーリングを施してある。

ここに試験体記号で RHS は矩形開口 ($\alpha=2$) の単調荷重によるせん断実験を示し、2桁の数字は左より開口率および偏心率、添字 S 付のアルファベットは各開口補強形状、末尾の数字は補強率の相違を表す。また、開口率後の R 付の試験体は角形鋼管内側形状と同形の開口を示す。

3.3 荷重方法および測定方法

実験装置ならびに変位測定用の電気式変位変換器の位置は無補強時と同じ状況にあり、これを図-10、図-11に示す。実験は図-10に示すように、試験体の開口中央部に反曲点を設定した装置にて2点集中の逆対称荷重を与える。加力はサーボパルス装置による変位制御での単調荷重とした。また併せて解析上の応力場との対比を行うため、開口両端部 (Sec.1, Sec.2) 断面上のフランジ、ウェブおよび補強材のひずみ測定を行う。

3.4 考察

1) 耐力評価と補強効率

各試験体の補強率、実験結果および解析結果を表-1に示す。補強率は開口縁補強では式 (2.5) により、ダブルプレート補強は式 (2.6) により求めたものである。実験値 Q_e は開口部の降伏せん断力で無補強材¹⁾同様、開口部の $Q-\gamma$ 関係において等価剛性が初期剛性の $2/3$ となる位置の値を、また Q_{max} は開口部の最大せん断力、 Q_e/Q_0 は Q_e 時のせん断力比、 Q_{max}/Q_u は Q_{max} 時のせん断力比を示す。ここに Q_u は無開口断面の最大せん断力である。なお解析値として耐力式より求めた開口断

図-11 変位測定位置

面のせん断耐力 Q_a/Q_0 および実験値と解析値との耐力比 Q_e/Q_a を併せて記した。

まず解析値の実験値に対する対応であるが、 Q_e/Q_a は B タイプで最も補強率の高い B_{s3} を除き $0.97 \sim 1.09$ にある。補強形状によっては試験体数が少なく、定量的に比較を行うことができないものもあるが、一連の実験結果の推移状況からみて、耐力評価上十分満足される耐力予測を示し、かつ耐力式が各補強形状に適用可能であることを示唆している。なお B_{s3} は開口隅角部での応力集中の影響が大きく、補強材が負担すべき応力を十分処理できないことがひずみ分布からも示され、ほかの補強形状に比べ解析値を下回る結果にあり、この種の補強形状としては補強率が 1.0 を超す場合に補強効率上問題がある。

各補強形式の補強率 (ν) に対するせん断耐力 (Q/Q_0) の推移を開口率、偏心率別に図-12に示す。図は実験値とそれに対応する解析値とを併記したもので、実線で示した解析値は ν_1 と ν_2 の関係から式 (2.13) または式 (2.18) により算出した結果である。なお偏心開口時の破線は耐力式の簡略化を図った近似解で詳しくは Appendix に示す。一点鎖線は無開口時のせん断耐力である。

開口縁補強において本実験で用いた開口形状に対する耐力推移は、補強率が約 1.0 を超えると耐力は一定となり、以後補強率を増しても耐力の上昇は期待できない。すなわち開口断面上のウェブが負担できるせん断力の限界状態となる。この傾向は実験値と解析値の対応において明示されている。

ウェブ面補強におけるダブルプレート補強では、補強率に対しせん断耐力は直線的に増加する傾向にある。しかし、補強の増大に伴う過補強時で開口部の耐力が母材耐力を上回る場合は、当然耐力は母材で決まることになる。また開口縁補強に比べ補強率の増大が直接耐力の増加につながるが、図-5で見られるように補強率の低い範囲では開口縁補強を下回る耐力を示すため、補強率が 2.2 節で示した ν_0 を超えた場合にその補強効果が発揮される。

複合補強においては、図中実線および破線で示した解析値は、各試験体における ν_1 と ν_2 の比が一定の関係に

あるものとして求めたものである。なおダブルプレート補強同様、開口部の耐力が母材耐力を上回る場合は母材耐力で決定する。この補強法は ν_1 と ν_2 の関係が耐力に影響を及ぼすため、2.3 節で示した最適補強量を与えることにより同一の補強量でも単独補強を上回る耐力を得ることができる。本実験における ν_1 と ν_2 は最適補強量ではないが、RHS-40-20-PCs を除き同一補強量で単独補強を上回る範囲にある。

補強効果を明らかにするため無補強開口に対する補強開口の耐力上昇を、中心開口で形状比が 2.0、開口によるウェブ欠損断面と同じ断面を補強材により与えた補強

率 $\nu=1.0$ において解析値で比較する。ここに開口率 40 % の開口縁補強では約 1.8 倍、ダブルプレート補強では約 1.7 倍、最適補強量を与えた複合補強では約 1.9 倍となる。同様に開口率 50 % ではそれぞれ約 2.4 倍、2.0 倍、2.5 倍、また開口率 60 % で約 3.4 倍、2.5 倍、3.5 倍となる。このように無補強材に対しその効果は明白で、開口率が大きくなるほど各補強効果も増加する傾向にあり、これらは実験結果においても裏付けされている。なおここで示した開口形状での ν_0 は、開口率 40 % で 1.25、50 % で 1.52、60 % で 1.73 にあり、 $\nu=1.0$ は開口縁補強の耐力がダブルプレート補強を上回る範囲

図—12 $Q/Q_0-\nu$ 関係

図—13 垂直ひずみ分布

図—14 ひずみ測定位置

にある。

開口偏心時の耐力は無補強開口時と同様、開口縁補強、ダブルプレート補強、複合補強ともに偏心により若干上昇する傾向にある。

2) ひずみ分布性状

実験による垂直ひずみ分布の一例を図—13に、この場合のひずみゲージてん付位置を図—14に示す。なお図—13では両脇に解析上の応力場を付記した。無補強材における垂直ひずみ²⁾は、開口隅角部近傍において応力集中の影響を受け増大する傾向を示した。しかし、開口縁補強および複合補強においては、Bタイプで B_{s3} を除きウェブ面上のひずみはそれほどの進展を見ないが、開口縁補強材はフランジ同様ひずみの増大を示し、補強材の有効性が認められた。またダブルプレート補強に関しては無補強材のそれとほぼ同様の進展を見ている。

ひずみ分布と解析上の応力場との対応は、フランジ内におけるひずみの反転およびダブルプレート補強材あるいは開口縁補強材での進展において、応力場の応力方向とほぼ一致する。

3) 破壊状況と最大耐力

無補強開口時において最大荷重を決定した主な破壊性状は、開口部のせん断変形とそれに伴う開口隅角部での局部圧壊および亀裂の発生であった。これに対し開口縁補強で水平スチフナに余長を持たせたAタイプ・Gタイプは、スチフナが隅角部での変形を拘束するため、RHS-40-00-A_{s1}およびA_{s2}、RHS-60-00-G_sでは隅角部の亀裂により最大耐力を決定するが亀裂の進展は少なく、ほかは開口部周辺のウェブの局部変形により決定している。ここに最大耐力の評価はその崩壊型から Q_u との比をもって与えたが、この Q_{max}/Q_u はBタイプ、HタイプおよびCタイプに比較し若干高い値を示す。

Bタイプは開口隅角部の溶接破断により最大耐力が

決定し、以後亀裂はウェブへと進展を見る。HタイプもBタイプとほぼ同じ性状にあるが、垂直スチフナがフランジまで達しているため、亀裂の進展は少なく最大耐力は若干Bタイプを上回る。

Cタイプは、すべての試験体で無補強開口同様開口隅角部は圧壊および亀裂を生じ、かつ亀裂の発生はBタイプより若干早く、最大耐力はBタイプをやや下回る傾向にある。

Pタイプは補強材に角形鋼管を使用する関係で、開口隅角部は曲率を有しかつ一体構造のため亀裂を生ずることなく、せん断変形に伴う開口部周辺のウェブの局部変形により耐力を決定している。特にRHS-40 Rシリーズでは、補強率が最も小さい($\nu=0.66$)P_{s1}でも無開口材とほぼ同等の最大耐力を示している。

複合補強では本実験で取り扱う導入補強量に対し、RHS-40 RのPCタイプは開口部の変形が極くわずかであり、最大耐力は加力点近傍のフランジの座屈により決定する。また、RHS-50のDタイプおよびRHS-50 RのPCタイプにおいても、開口部での変形は少なくフランジの局部座屈が支配的となる。

以上のように最大耐力の決定要因として、開口隅角部での破壊を示すBタイプ、Cタイプについては取り扱い上問題を残すが、その他の単独補強については開口部のせん断変形は見られるものの、亀裂の進展を伴う破壊には至っていない。また複合補強では開口部における変形はほとんど見られず、無開口材と同様な破壊性状を示す。写真—1にその破壊状況の一例を示す。

4) 履歴特性と変形能力

開口部が主としてせん断降伏・せん断破壊する状況での変形能力の評価は、無補強開口同様、開口部に作用するせん断力と開口両端間のせん断変形との関係($Q-\gamma$ 関係)で与える。ここに対比を計る関係で無開口材(NHS-00)ならびに無補強材のそれを併せて、開口率および偏心率別に補強率が近似にある各補強形状の履歴を図—15に示す。なお図の横軸は、開口両端間の変位差と $2aa$ の比で与える見掛けのせん断ひずみ(γ)を、 Q_0 時の見掛けのせん断ひずみ(γ_0)で除して無次元化してある。

無補強材では早期に開口隅角部で亀裂が生じ耐力とともに変形能力を喪失するが、開口補強時は図に示すよう

写真—1 破壊性状

図—15 Q/Q_0 - γ/γ_0 関係

に耐力・変形能力とも改善されその効果が示される。このうち開口縁補強では降伏後も耐力は上昇し、かつ最大荷重時に至る変形量も無補強材の約4、5倍の変形能力を有する結果となる。しかし、無開口材に比べ開口部のせん断剛性・せん断耐力は低く、これを補うための補強

率の増大に対してもその効果に限りがある。特にBタイプは履歴特性にも示されるように、開口隅角部での溶接破断とそれに伴う亀裂の進展の影響を大きく受け、最大荷重後は急速な耐力低下をみる。

Cタイプは開口部ウェブの断面補強にあり、初期剛

性は開口縁補強を上回る。しかし、応力集中による開口隅角部での圧壊・亀裂およびその進展は開口縁補強より早く現れ、比較的低変形時で最大荷重に達している。また、亀裂発生後は速やかな耐力低下を示す。この履歴は図からも明らかなように無補強材のそれと相似にある。

複合補強は補強率 ν_1 と ν_2 の比率が問題となるが、PC タイプの補強率 ($\nu_1 + \nu_2$) とほぼ等しい補強率にある P タイプとの比較において、耐力・剛性とも P タイプを上回る結果を与える。特に履歴は RHS-40-PC_s、RHS-50-PC_s でほぼ無開口材のそれを追跡する。

D タイプの RHS-50-00-D_s は、開口部での変形は少なくせん断剛性は比較的確保されるが、加力点近傍のフランジの局部座屈とそれに伴うねじりが生じたため早期に最大耐力に達し、耐力としては無開口材に比べ若干低めの結果を示した。

以上のように、せん断耐力確保を目的とするせん断補強において、開口縁補強、ウェブ面補強では各々力学的に若干異なる性状を示す。特にせん断補強として有効と考えるダブルプレート補強は、同じ補強率にある開口縁補強に比べ初期の耐力・剛性は優れているものの、開口隅角部での応力集中に伴う亀裂の発生は、最大耐力後の変形能力を著しく低下させる結果を示す。

§4. 結 語

以上、補強矩形開口を有する H 形断面材の力学的挙動を実験より求め、耐力式との対応を行った。以下に開口補強時の耐力評価にかかわる力学的特性と補強効果をまとめる。

1) 解析法において仮定した応力場は実験によるひずみ分布とよい対応を示し、かつせん断耐力も実用上十分な精度で予測し得ることから、耐力式は各補強形状に適用可能である。また Appendix に記した近似解においても耐力式をよく追跡し、その使用法が簡便なことを考慮すると実用性の高い耐力評価法と考える。

2) せん断補強としての開口縁補強では、補強率 (ν) が $\alpha/\sqrt{3}$ 以上の導入においてせん断耐力の上昇は期待できず、開口断面上のウェブが負担できるせん断力の限界値をもって一定となる。これに対しダブルプレート補強は導入補強量に対して直線的な耐力上昇を示すものの、補強率が ν_0 以下では耐力は開口縁補強を下回る。また複合補強の耐力は最適補強量を与えることで単独補強を上回る結果を与える。なお各補強形状とも無補強材に対するせん断耐力の向上は著しく、開口率が大きくなるほど補強効果も増加する。

3) 開口部がせん断降伏・せん断破壊する状況において、開口縁補強は降伏後も耐力は上昇し、最大耐力に至る変形量も無補強材の 4、5 倍を超す変形能力を示すがせん断剛性は低い。ダブルプレート補強では最大耐力に至るまでのせん断剛性は開口縁補強を上回るものの、開

口隅角部の亀裂・圧壊が比較的早期に発生し復元力を失い変形能力は開口縁補強より劣る。また複合補強は $\nu_1 \equiv \nu_2$ で両者の和が 1.0 以上となる場合には、耐力のみならず高いせん断剛性も期待でき、RHS-40 R および RHS-50 R における PC タイプでは、補強率約 1.5 前後の導入に対しほぼ無開口材の履歴を追跡している。

4) 矩形開口はその形状から開口隅角部の圧壊または引張亀裂が生じやすい状況にあり、特にボックス補強およびダブルプレート補強に問題がある。しかし、隅角部に曲率を有する角形鋼管の使用は比較的応力集中の緩和が期待できる。本実験結果から矩形開口の設定におけるせん断補強としては、角形鋼管とダブルプレートとを組み合わせた複合補強が実用上最も適した補強法と考える。

次報では、開口部が曲げ降伏となる場合の耐力評価および補強効果を示す予定である。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、貴重な御助言を頂きました日本大学教授田中 尚博士に感謝の意を表します。

Appendix

開口補強に際し、前述の解析では耐力評価ならびに最適補強設定にかかわる単独補強時の ν_0 、複合補強時の ν_1 、 ν_2 の算出が多少面倒なものとなっている。ここで実用上の取り扱いを考慮して式の簡便化を試みる。開口部上下断面のせん断応力度はそれほど差が生じないことから、ここに $\tau_1 = \tau_2$ と置く。もちろん開口間での曲げ-せん断関係 $M_2 = M_1 + 2\alpha aQ$ は満足するとし取り扱う。これより

$$\left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 + \left(\frac{b}{h}\right)^2 = F, \quad \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 - \left(\frac{b}{h}\right)^2 = G \cdots (A \cdot 1 a, b)$$

$$\left(2\alpha \frac{a}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 + 3 \left\{ \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 + \left(\frac{b}{h}\right)^2 \right\}^2 = H \cdots (A \cdot 1 c)$$

と置き、 $\nu \leq \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \left\{ 1 + \frac{a}{h} \nu_2 / \left(1 - \frac{a}{h}\right) \right\}$ の範囲でのせん断耐力を求める。

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\sqrt{3}}{H} \left[4\alpha \left(\frac{a}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^3 \nu_1 + F \sqrt{H \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \nu_2\right)^2 - 12 \left(\frac{a}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^4 \nu_1^2} \right] \cdots (A \cdot 2)$$

ν_0 は $\nu \leq \alpha/\sqrt{3}$ で

$$\nu_0 = \frac{2 \left(1 - \frac{a}{h}\right) F \sqrt{H} \left\{ 4\alpha \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right)^3 - F \sqrt{H} \right\}}{12 \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right)^4 F^2 + \frac{a}{h} \left\{ 4\alpha \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right)^3 - F \sqrt{H} \right\}^2} \cdots (A \cdot 3)$$

$\nu > \alpha/\sqrt{3}$ では

$$\nu_0 = \frac{\left(1 - \frac{a}{h}\right) (\sqrt{H} - \sqrt{3} F)}{\sqrt{3} \frac{a}{h} F} \cdots (A \cdot 4)$$

で与えられる。また複合補強時の ν_1 の導入量は簡単な 2 次式で与えられる。

$$Y_1 \nu_1^2 + Y_2 \nu_1 + Y_3 = 0 \cdots (A \cdot 5)$$

ここに

$$Y_1 = \left(\frac{a}{h}\right)^2 \left[\left(2a\frac{a}{h}\right)^2 - 3 \left\{ F + 2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \right\} G \right] \\ \cdot \left\{ F + 2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \right\} G \dots\dots\dots (A \cdot 6 a)$$

$$Y_2 = \left(\frac{a}{h}\right) \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \nu\right) \left\{ F + 2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \right\} G \cdot H \dots\dots (A \cdot 6 b)$$

$$Y_3 = \left(1 - \frac{a}{h} + \frac{a}{h} \nu\right)^2 \left[\left(2a\frac{a}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \right. \\ \left. \cdot \left\{ F + 2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \right\} G - 3F \right] \dots\dots\dots (A \cdot 6 c)$$

このときの ν_p は

$$\nu_p = \frac{2a\frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right) \sqrt{\left\{ F + 2 \left(1 - \frac{a}{h}\right)^2 \right\} G - \sqrt{3} F}}{4\sqrt{3} \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right)^3} \\ \dots\dots\dots (A \cdot 7)$$

となる。これらは前述の解析に比べ中心開口ではまったく同じ値を与え、偏心開口で若干異なる値をとるがその差はわずかで、耐力評価では図-12の破線で示したように実験値との対応に十分満足すべき結果を得る。

参考文献

- 1) 福島暁男, 小松 博: 矩形開口を有する鋼製 H 形断面材の終局耐力 (I-1) — 無補強の場合 —, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 361 号, pp. 67~78, 昭和 61 年 3 月.
- 2) 福島暁男, 小松 博: 矩形開口を有する鋼製 H 形断面材の終局耐力 (I-2) — 無補強の場合 —, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 366 号, pp. 56~66, 昭和 61 年 8 月.
- 3) 例えば Congdon, J. G., Redwood, R. G.: "Plastic Behavior of Beams with Reinforced Holes", Proc. of ASCE, Vol. 96, ST 9, pp. 1933~1956, Sep. 1970.
- 4) 例えば Cooper, P. B., Snell, R. R.: "Test on Beams with Reinforced Web Openings", Proc. of ASCE, Vol. 98, ST 3, pp. 611~632, March 1972.
- 5) Senger, E. P.: "Reinforcement Requirements for Grider Web Openings", Proc. of ASCE, Vol. 90, ST 3, pp. 147~164, June 1964.
- 6) 福島暁男, 小松 博: 有孔 H 形断面材の終局耐力 (その 14), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 1133~1134, 昭和 63 年 10 月.

SYNOPSIS

UDC : 624. 014. 2 : 624. 072. 2 : 624. 042. 6

ULTIMATE STRENGTH OF STEEL H-SECTION MEMBERS WITH RECTANGULAR HOLES (II)

Experimental study on reinforced holes

by AKIO FUKUSHIMA, Assist. Prof. of Nihon Univ. and
HIROSHI KOMATSU, Assist. of Nihon Univ., Members
of A. I. J.

The effect of reinforcement of steel H-section members with reinforced rectangular holes were discussed through the experimental results, the strength, deformability and hysteresis characteristics. For a reinforced opening, the reinforcement has three types as follows :

- 1) Opening edge reinforcement with the reinforcement at the opening edge.
- 2) Double plated reinforcement attached to the reinforcement on the web face around the opening.
- 3) Reinforcement combined with 1) and 2) above.