鉄骨梁貫通孔の梁端からの限界距離について

ON THE ACCESS LIMIT OF WEB PERFORATION TO STEEL BEAM END

加藤 勉*, 金子洋文**
Ben KATO and Hirofumi KANEKO

The basic condition of limit state design for beams is that beams show sufficient plastic deformation capacity by generating plastic hinges at the beam ends. Concerning beams with web perforation, this condition is also satisfied when opening located in a distance from the beam end is not damaged prematurely.

In this paper, design formulae for evaluating strength of opening part and limit distance of the opening from the beam end are proposed. And an experiment was performed for verifying the propriety of the design formulae and the plastic deformation capacity of the beams with web openings.

Keywords : perforated beam, M-Q interaction formula, location of openings, plastic deformation capacity

有孔梁, M-Q相関式, 孔位置, 塑性変形能力

1. はじめに

ウェブに貫通孔のあるH形断面梁の耐力に関する曲げ-せん断相関関係に関する研究は数多く発表されている。実際の設計に於ては、これらの研究成果^{1)~4)}を用いて、無孔部分と同等の耐力を有するよう孔周辺に補強を施し、一種の全強設計とするのが普通である。

梁の耐震設計（一般的には終局限界状態設計）の基本条件は、梁端に塑性ヒンジが生じて、十分な塑性変形能力を発揮することである。有孔梁の場合、孔部分に早期の損傷が生じて、この条件を阻害しないことが必要である。

骨組内の梁の曲げモーメント、せん断力は、材長に沿って変化するので、梁の終局限界状態に於て、任意の孔位置に作用する曲げモーメント、せん断力が、その孔部分のモーメント耐力、せん断耐力より小さいことが確認されれば、上記の条件は満足される。従って、全強設計の必要はない。

本論文では、最初に有孔部分の曲げ耐力とせん断耐力の相関関係に関する既往の研究成果を照査し、不十分な部分について補足する。次に終局限界状態における梁の曲げモーメント、せん断力分布を求め、任意の孔位置における曲げモーメント、せん断力が孔部分の曲げモーメント耐力、せん断耐力より小さいという条件から、有孔梁の孔位置や所要耐力に関する設計式を導く。最後に実験によって、この設計式の妥当性を検証する。

2. 有孔梁の設定条件

本論文で対象とする有孔梁の適用範囲を以下に示す。

①貫通孔は基本的には補強しないものとする。

②横座屈を拘束されている大梁は梁端で塑性ヒンジを形成し、十分な塑性変形能力を発揮できる幅厚比を有するものを対象とする。梁端が終局状態に達するまで、スパン中央部分の耐力は全塑性耐力以下であり、全塑性耐力まで耐力が低下しない程度に大きい幅厚比も対象とする。

③塑性化領域の梁端部に貫通孔を設ける場合にウェブ板厚 t_w があまり大きくなる場合には貫通孔を補強する。

④梁成に対して貫通孔は概ね中心に設ける。

⑤孔径 $2R$ (R :半径)はウェブ成 h ($=H-2t_f$) に対して $2R < 0.6h$ とする (図1参照)。

⑥複数孔の時は孔のピッチを $p > h$ とする (図1参照)。

⑦有孔、無孔に拘わらず、梁端の耐力が降伏せん断耐力で決まらないような梁とする。

3. 貫通孔の限界位置について

梁端が全塑性耐力に達した時に、有孔部の耐力がそこに作用する外力と同等となる梁端からの限界位置を限界距離と定義する。ここでは、先ず有孔部の耐力式を評価する。次にこの耐力式を基に貫通孔の限界距離を決定するための設計式を誘導する。

3.1 有孔部の耐力式

有孔梁の曲げ耐力とせん断耐力の相関関係を以下に示す。

3.1.1 梁端部の全塑性耐力

梁端部（無欠損部）の全塑性状態における曲げ耐力 M_e とせん断耐

本論文の一部は、参考文献7)~10)で発表している。

* 東洋大学工学部 教授・工博

** ㈱竹中工務店技術研究所 工博

Prof., Faculty of Engineering, Toyo Univ., Dr. Eng.

Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

図1 梁端面、貫通孔寸法

力 Q_E のM-Q相関関係を次式で近似する。(図2参照)

$$M_E = (M_P - M_{Pf}) \left(1 - \frac{Q_E}{Q_y}\right) + M_{Pf} \\ = M_P - (M_P - M_{Pf}) \frac{Q_E}{Q_y} \quad \dots \dots (1-a)$$

$$Q_E < Q_y \quad \dots \dots (1-b)$$

ここに、

$$M_P = M_{Pf} + M_{Pw} \quad : \text{H形断面の全塑性モーメント}$$

$$M_{Pf} = B t_f (h + t_f) \sigma_{yf} \quad : \text{フランジの全塑性モーメント}$$

$$M_{Pw} = \frac{1}{4} h^2 t_w \sigma_{yw} \quad : \text{ウェブの全塑性モーメント}$$

$$Q_y = \frac{1}{\sqrt{3}} h t_w \sigma_{yw} \quad : \text{ウェブの降伏せん断耐力}$$

$$\sigma_{yf} \quad : \text{フランジの降伏応力度}$$

$$\sigma_{yw} \quad : \text{ウェブの降伏応力度}$$

図2 梁端部のM-Q相関関係

3.1.2 無補強有孔部の全塑性耐力

ウェブ幅厚比が文献5)のFAランクあるいは文献6)の幅厚比区分P-I (十分な塑性変形能力を発揮できる幅厚比) の領域 (幅厚比Sと称する) に貫通孔を設ける場合、全塑性状態における有孔部の曲げ耐力 M_h とせん断耐力 Q_h のM-Q相関関係を求める。フィーレンディール効果を考慮した有孔部のウェブの降伏せん断耐力 Q_{Ph} と $Q=Q_{Ph}$ 時のフランジの全塑性モーメント M_{Phf} が文献3)に与えられている。ここでは、それを引用し、相関関係を次式で近似する。(図3参照)

$$M_h = M_{Ph} - (M_{Ph} - M_{Phf}) \frac{Q_h}{Q_{Ph}}, \quad Q_h < Q_{Ph} \quad \dots \dots (2)$$

ここに、

$$M_{Ph} = B t_f (h + t_f) \sigma_{yf} + \frac{1}{4} (h^2 - 4R^2) t_w \sigma_{yw}$$

: $Q=0$ の時の有孔部の全塑性モーメント

$$M_{Phf} = \left(1 - \beta \frac{h t_w}{2B t_f}\right) M_{Pf}$$

: $Q=Q_{Ph}$ 時の有孔部のフランジの全塑性モーメント

$$Q_{Pf} = \alpha (1 - 2\bar{R}) Q_y \quad : \text{有孔部のウェブの降伏せん断耐力}$$

$$\bar{R} = R/h$$

$$\alpha = 1 - 0.334 (1 - 0.93 \bar{t}_f) \bar{R} - 0.064 \left[(1 - 0.93 \bar{t}_f) \bar{R} \right]^2 - 2.336 \left[(1 - 0.93 \bar{t}_f) \bar{R} \right]^3$$

$$\beta = 0.568 (1 - 1.5 \bar{t}_f) \bar{R} - 0.252 \left[(1 - 1.5 \bar{t}_f) \bar{R} \right]^2 - 1.160 \left[(1 - 1.5 \bar{t}_f) \bar{R} \right]^3 \\ \bar{t}_f = t_f/h$$

図3 有孔部のM-Q相関関係

3.1.3 無補強有孔部の弾性限耐力

ウェブ幅厚比がFCランクあるいは幅厚比区分P-III (全塑性耐力まで耐力が低下しない程度の大きさの幅厚比) の領域 (幅厚比Lと称する) に貫通孔を設ける場合、有孔部の耐力を弾性限耐力とし、(2)式を修正する。弾性限耐力時における有孔部の曲げ耐力 eM_h とせん断耐力 eQ_h のM-Q相関関係を次式で近似する⁹⁾。(図4参照)

$$eM_h = M_{eh} - \frac{eQ_h}{Q_{eh}} (M_{eh} - M_{ehf}), \quad eQ_h \leq Q_{eh} \quad \dots \dots (3)$$

ここに、

$$M_{eh} = 0.87 M_{Ph} \\ = 0.87 \left[B t_f (h + t_f) \sigma_{yf} + \frac{1}{4} (h^2 - 4R^2) t_w \sigma_{yw} \right] \\ : Q=0の時の有孔部の弾性限モーメント$$

$$M_{ehf} = \left(1 - \beta \frac{h t_w}{2B t_f}\right) M_{ef} \\ : Q=Q_{eh}時の有孔部のフランジの弾性限モーメント$$

$$M_{ef} = 0.87 B t_f (h + t_f) \sigma_{yf} \quad : \text{フランジの弾性限モーメント}$$

$$Q_{eh} = 0.8 Q_{Ph} = 0.8 \alpha (1 - 2\bar{R}) Q_y$$

: 有孔部のウェブの弾性限せん断耐力

$$Q_y = \frac{1}{\sqrt{3}} h t_w \sigma_{yw}$$

図4 ウェブ幅厚比Lにおける有孔部のM-Q相関関係

3.1.4 補強有孔部の全塑性耐力

貫通孔をリングプレートにより補強する場合の有孔部の耐力は、ウェブ幅厚比Sの場合は全塑性耐力、ウェブ幅厚比Lの場合は弾性限耐力とする。

補強有孔部のM-Q相関関係式は無補強有孔部の式(2)あるいは式(3)と同形とし、 M_{phf} 、 P_{ph} 、 M_{ehf} 、及び Q_{eh} を下式によって修正する。リングプレートが存在する場合のフィーレンディール効果を考慮した有孔部のフランジの $Q=Q_{Ph}$ 時の全塑性モーメント M_{Phf} と降伏せん断耐力

図5 リングプレート補強有孔部

Q_{ph} は、文献1)に基づき、図5に示すように補強プレートもせん断応力及びフランジの軸応力に釣り合う応力を分担すると仮定して求める。

図中の σ_f はフィレンディール作用に釣り合うフランジ応力を示し、 σ_{fy} - σ_f は全体曲げに対するフランジ応力となる。 $V_{ph'}$ はフィレンディール作用を考慮したせん断耐力である。また、 P_t と P_R はそれぞれリングプレートの板厚と板幅のウェブ厚と孔径に対する係数である。これより、幅厚比 S のウェブにおける有孔部のフランジの $Q = Q_{ph}$ 時の全塑性モーメント M_{phf} と降伏せん断耐力 Q_{ph} は、

$$M_{phf} = (1 - \beta' \frac{h t_w}{2 B t_f}) M_{pf}$$

$$Q_{pf} = \alpha' (1 - 2 \bar{R}) Q_y$$

で表わされる。ここに、

$$\alpha' = A (R - 1) + \alpha$$

$$A = 12.98 \bar{R}^3 - 2.788 \bar{R}^2 + 1.754 \bar{R} - 0.033$$

また、 β' は孔径 $\bar{R}$ と係数 P_t をパラメーターとして図6より求める。

また、幅厚比 L の場合には、

$$M_{chf} = (1 - \beta' \frac{h t_w}{2 B t_f}) M_{cf}$$

$$Q_{ch} = 0.8 \alpha' (1 - 2 \bar{R}) Q_y$$

を用いる。

図6 係数 β' と無次元化孔径 $\bar{R}$ との関係

3.2 限界距離算定式

有孔部に作用する曲げモーメントとせん断力が、有孔部の曲げ耐力及びせん断耐力以下となるような貫通孔の梁端からの限界距離を求める。

3.2.1 梁に生じる応力分布

図7 梁に作用する外力

(1) 全塑性状態の応力分布

図7に示すような水平荷重と等分布荷重 w を受けるスパン L の梁が材両端でせん断力を考慮した全塑性状態になっている時の応力分布は、曲げモーメントとせん断力についてそれぞれ

$$M_x = (1 - \frac{x}{L}) M_{PL} - \frac{x}{L} M_{PR} + \frac{w}{2} x (L - x) \quad \dots \dots (4)$$

$$Q_x = \frac{\partial M_x}{\partial x} = -\frac{M_{PL} + M_{PR}}{L} + w (\frac{L}{2} - x) \quad \dots \dots (5)$$

と表わせる。ここに、 M_{PL} と M_{PR} はそれぞれ左端と右端の全塑性状態における曲げモーメントである。

ここで、スパン中間に最大モーメントが生じないことを前提とする。最大モーメント点では $\frac{\partial M_x}{\partial x} = Q_x = 0$ であり、 $Q_x = 0$ となる点がスパン領域内に無い条件 ($x \leq 0$) から

$$\frac{w L^2}{2} - (M_{PL} + M_{PR}) \leq 0 \quad \dots \dots (6)$$

を適用条件とする。

なお、(6)式を満たす時は(5)式の Q_x はスパン内で符号が変わらず負値をとるが、せん断力は絶対値を用いるので(5)式も絶対値(正号)を用いる。

$$Q_x = \frac{M_{PL} + M_{PR}}{L} - w (\frac{L}{2} - x) \quad \dots \dots (5')$$

で表わす。

(2) 全塑性状態における材端応力

(5')式で $x=0$ における Q_L と $x=L$ における Q_R は

$$Q_L = \frac{M_{PL} + M_{PR}}{L} - \frac{w L}{2} \quad \dots \dots (7-a)$$

$$Q_R = \frac{M_{PL} + M_{PR}}{L} + \frac{w L}{2} \quad \dots \dots (7-b)$$

となる。梁端の全塑性状態における曲げモーメント M_{PL} と M_{PR} は、(1)式の Q_E に Q_L と Q_R を代入すると M_{PL} と M_{PR} の連立一次方程式となり、それを解いて

$$M_{PL} = \frac{2}{2 + \sqrt{3} (h/L)} M_p + \frac{\sqrt{3}}{8} w h L \quad \dots \dots (8-a)$$

$$M_{PR} = \frac{2}{2 + \sqrt{3} (h/L)} M_p - \frac{\sqrt{3}}{8} w h L \quad \dots \dots (8-b)$$

を得る。ここで、(1)式の M_E は M_{PL} あるいは M_{PR} に対応する。(7)式と(8)式より、梁端の全塑性状態におけるせん断力 Q_L と Q_R は

$$Q_L = \frac{4 M_p}{[2 + \sqrt{3} (h/L)] L} - \frac{w L}{2} \quad \dots \dots (9-a)$$

$$Q_R = \frac{4 M_p}{[2 + \sqrt{3} (h/L)] L} + \frac{w L}{2} \quad \dots \dots (9-b)$$

となる。

(3) 梁端から距離dの位置に作用する力

d位置の作用せん断力 dQ_L と dQ_R は、(5')式で $x=d$ 、 $L-d$ と置き、また(8)式の M_{PL} 、 M_{PR} を用いて

$$dQ_L = \frac{4M_p}{[2 + \sqrt{3} (h/L)]L} - w \left(\frac{L}{2} - d \right) \quad \dots \dots (10-a)$$

$$dQ_R = \frac{4M_p}{[2 + \sqrt{3} (h/L)]L} + w \left(\frac{L}{2} - d \right) \quad \dots \dots (10-b)$$

と表わせる。d位置の作用曲げモーメント dM_{PL} と dM_{PR} は、(4)式で $x=d$ 、 $L-d$ と置き、(8)式の M_{PL} 、 M_{PR} を用いて(M_{PR} も絶対値をとる)

$$dM_L = \left[\frac{2 - 4(d/L)}{2 + \sqrt{3} (h/L)} \right] M_p + \frac{w}{2} \left[\frac{\sqrt{3}}{4} hL + d(L-d) \right] \quad \dots \dots (11-a)$$

$$dM_R = \left[\frac{2 - 4(d/L)}{2 + \sqrt{3} (h/L)} \right] M_p - \frac{w}{2} \left[\frac{\sqrt{3}}{4} hL + d(L-d) \right] \quad \dots \dots (11-b)$$

と表わせる。

図8 有孔梁の孔位置

3.2.2 限界距離 (図8参照)

(1) 幅厚比Sのウェブ

梁端から位置 ds に第1孔がある場合、(2)式の有孔部の曲げ耐力 M_h が(11)式の作用モーメント dM_L と dM_R に等しくなる時の有孔部のせん断耐力 Q_h は

$$Q_h = \frac{Q_{Ph}}{M_{Ph} - M_{Phf}} \left\{ M_{Ph} - \left[\frac{2 - 4(ds/L)}{2 + \sqrt{3} (h/L)} \right] M_p + \frac{w}{2} \left[\frac{\sqrt{3}}{4} hL + ds(L-ds) \right] \right\} \quad \dots \dots (12)$$

となる。この Q_h が(10)式の作用せん断力 dQ_L 、 dQ_R より大きいことが条件となり、限界距離 ds を求める次式を得る。

$$\frac{Q_{Ph}}{M_{Ph} - M_{Phf}} \left\{ M_{Ph} - \left[\frac{2 - 4(ds/L)}{2 + \sqrt{3} (h/L)} \right] M_p + \frac{w}{2} \left[\frac{\sqrt{3}}{4} hL + ds(L-ds) \right] \right\} > \frac{4M_p}{[2 + \sqrt{3} (h/L)]L} + w \left(\frac{L}{2} - ds \right) \quad \dots \dots (13)$$

ただし、有孔部のウェブのせん断耐力 Q_h が有孔部のウェブの降伏せん断耐力 Q_{Ph} より小さいことを確認しておく。ここで、 Q_h の値として(10)式を用い、(2)式で与えられる Q_{Ph} から

$$\frac{4M_p}{[2 + \sqrt{3} (h/L)]L} + w \left(\frac{L}{2} - ds \right) \leq \alpha (1 - 2\bar{R}) Q_y = \frac{\alpha}{\sqrt{3}} (1 - 2\bar{R}) h t_w \sigma_{yw} \quad \dots \dots (14)$$

となる。

(2) 幅厚比Lのウェブ

梁端から位置 dL に第1孔がある場合、(3)式の有孔部分の弾性限曲げ

耐力 M_{eh} が(11)式の作用モーメント dM_L と dM_R に等しくなる時の有孔部のウェブのせん断耐力 eQ_h は

$$eQ_h = \frac{Q_{eh}}{M_{eh} - M_{ehf}} \left\{ M_{eh} - \left[\frac{2 - 4(d_L/L)}{2 + \sqrt{3} (h/L)} \right] M_p + \frac{w}{2} \left[\frac{\sqrt{3}}{4} hL + d_L(L-d_L) \right] \right\} \quad \dots \dots (15)$$

となる。この eQ_h が(10)式の作用せん断力 dQ_L 、 dQ_R より大きいことから限界距離 d_L を求める次式を得る。

$$\frac{Q_{eh}}{M_{eh} - M_{ehf}} \left\{ M_{eh} - \left[\frac{2 - 4(d_L/L)}{2 + \sqrt{3} (h/L)} \right] M_p + \frac{w}{2} \left[\frac{\sqrt{3}}{4} hL + d_L(L-d_L) \right] \right\} > \frac{4M_p}{[2 + \sqrt{3} (h/L)]L} + w \left(\frac{L}{2} - d_L \right) \quad \dots \dots (16)$$

ただし、有孔部のウェブのせん断耐力 eQ_h が有孔部のウェブの弾性限せん断耐力 Q_{eh} より小さいことを確認しておく。これは(14)式と同じ形であるが、 ds を d_L に置き換え、 α の前に0.8の係数を掛ける。

4. 実験による検証

3節で示した貫通孔が幅厚比FAランク、幅厚比区分P-IあるいはFCランク、幅厚比区分P-IIIのウェブに設けられる場合、また、これら貫通孔がリングプレートで補強された場合の有孔部の耐力に関する理論式の妥当性を実験的に検証する。さらに、実験により有孔梁の塑性変形能力を把握する。

4.1 実験概要

ここでは、限界距離と孔位置の関係を明確にするために鉛直荷重 $w=0$ とし、水平荷重による逆対称曲げモーメントとせん断力が作用する荷重状態を扱う。

有孔部の耐力に関する理論式を検証するために、有孔部の降伏が先行するように孔位置を設定する。これは、(13)式ないし(16)式から決定される限界距離 d よりも梁端から孔位置までの距離 L_h を短くすればよい。ただし、梁全体としてせん断降伏が先行しないようにウェブの降伏せん断耐力 Q_y が(5')式の作用せん断力 Q_x 以上であることを確認する。この限界距離 d は、梁端と有孔部が同時に曲げとせん断を考慮した全塑性耐力（あるいはウェブ幅厚比がFCランクの有孔部は弾性限耐力）に達する時の孔位置である。そのため、孔位置が限界距離から離れるに従い有孔梁は無孔梁の性状に近づく。よって、貫通孔が $L_h=d$ に位置する有孔梁に対して、終局状態における塑性変形能力を把握する。

試験体の諸元を表1に示す⁷⁾¹⁰⁾。試験体の断面寸法を決定する上で、フランジ幅厚比は文献5)のFAランクの制限値より小さく、また、ウェブ幅厚比はFAランクあるいはFCランク（試験体NSとOWCシリーズ）の制限値に設定した。これは、フランジの局部座屈による早期崩壊の防止と、ウェブに対しては各制限値内で耐力、塑性変形能力等の最小値を得るためである。なお、幅厚比は表2の材料の機械的性質に示す引張試験より求めた実降伏応力度を基に公称値に換算した。貫通孔の開孔率はウェブ成の50~60%とした。有孔部と梁端の各せん断耐力を比較してその最小値が有孔梁の降伏先行形となる。例えば Q_{ph} が最小の場合には有孔部せん断降伏先行形、 Q_h が最小の場合には

表1 試験体の諸元

試験体名	断面寸法	長さL (mm)	開口率 2R/h	限界距離 d(cm)	孔位置 L _H (cm)	有孔部 Q _{ph} (t)	Q _h (t)	梁端 Q _{ps} (t)
OW1-3.5 FW-3.5 OW1-5.0 FW-5.0	BH-325×125 ×6×12 ($\frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{\sigma_y}{F}} = 58.5$)	1,160	0.54	26.6	24.4	13.58	15.87	16.12
			—	—	—	—	—	—
			0.54	29.2	24.4	13.58	11.45	11.79
			—	—	—	—	—	—
OWA	BH-300×125 (49.3) ×6×12	2,000	0.60	35.7	35.7	13.13	9.75	9.75
NSOW-R NSOW NSOW+R NSFW	BH-327×126 ×6×12 (60.0)	1,160	0.50	23.2	15.6	15.17	16.56	16.56
			0.50	23.2	23.2	15.17	16.56	16.56
			0.50	23.2	30.8	15.17	16.56	16.56
			—	—	—	—	—	—
NS-1 NS-2 NS-3	BH-375×125 ×6×9 (69.2)	1,500 3,000 1,000	0.60 0.60 0.60	66.7 99.8 —	40.0 40.0 —	10.75* 10.75* 10.75*	10.75* 5.48* 0	12.96* 6.48* 0
OWC-R OWC OWC+R OWCR	BH-365×125 ×6.9*×12 (60.9) L _g = 760	2,920	0.535	106.4	97.2	15.55*	9.28*	9.66
			0.535	106.4	106.4	15.55*	9.66*	9.66
			0.535	106.4	115.5	15.55*	10.08*	9.66
			0.535	61.6	93.0	33.10*	10.94*	9.66
OWR1 OWR2 FW	BH-325×125 ×6×12 (58.5)	1,160	0.540	18.5	24.4	22.46	16.78	15.86
			0.540	18.5	15.0	22.46	15.50	15.86
			—	—	—	—	—	—

() 換算幅厚比 * 孔部弾性耐力時 ** 加力点側ウェブプレート

有孔部曲げせん断降伏先行形、Q_{ps}が最小の場合には梁端部曲げせん断降伏先行形である。表1に示す限界距離とせん断耐力もまた、実降伏応力度を用いて算定した。

表1において、OWシリーズの試験体OW1-3.5とOW1-5.0はせん断スパン比をそれぞれ3.55と5.0とし、それぞれの孔位置は限界距離d_s(ウェブ幅厚比S)より短く、同じ位置に設けている。これより、OW1-3.5は有孔部でせん断降伏先行、OW1-5.0は有孔部で曲げせん断降伏先行となる。試験体OWAは限界距離d_sの位置に貫通孔を設けたものであり、端部と有孔部が同時に全塑性耐力になる。NSOWシリーズは、限界距離d_sの位置に貫通孔を設けた試験体NSOW、限界距離よりも孔径R分だけ限界距離より短い位置に貫通孔を設けた試験体NSOW-R、限界距離よりも孔径R分だけ限界距離より長い位置に貫通孔を設けた試験体NSOW+Rを設定した。ただし、全て有孔部でせん断降伏先行するものである。NSシリーズは幅厚比Lのウェブに貫通孔を設けたものであり、孔位置は限界距離d_Lより短い。弾性耐力の相関関係において試験体NS-1は有孔部がせん断降伏と曲げ降伏を同時に生じるもの、試験体NS-2は有孔部が曲げせん断降伏先行するもの、試験体NS-3は有孔部が曲げ降伏先行するものである。OWCシリーズは、梁端部のウェブ幅厚比S、中央部のウェブ幅厚比Lの有孔梁である。試験体OWCは限界距離d_Lに貫通孔を設けたもの、試験体OWC±Rは限界距離d_Lの±Rの位置に貫通孔を設けたものである。なお、OWCR試験体は図9に示す要領でウェブ両側の貫通孔を補強したものであり、孔位置は限界距離d_Lよりも長い。OWRシリーズは幅厚比Sのウェブに設けた貫通孔をウェブの片側のみに補強したものであり、試験体OWR1は貫通孔を限界距離d_sよりも短い位置に、試験体OWR2は貫通孔を限界距離d_sよりも長い位置に設けたものである。なお、各シリーズで試験体名にFWの付く試験体は無孔梁である。ここでは、補強板厚はウェブと同厚、リング幅は孔径2Rの1/4とした。

試験体は、図9に示すように両端単純支持、中央載荷(試験体NS-3は2点載荷の純曲げ)とし、スパン中央部が梁端を想定する加力点であり、片側スパンを加力治具としている。片側1/3スパン毎に横補剛材を設置した。

表2に材料の機械的性質、表3に各種算定耐力を示す。それぞれの

記号は3節で定義したものに对应する。なお、δ_pは梁端全塑性モーメントM_p時の加力点位置における弾性変位である。

4.2 理論式の妥当性

4.2.1 荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形関係を図10に示す。縦軸はスパン中央に加えた集中荷重2Pの1/2の値P、横軸はその点の鉛直変位δである。ただし、試験体NS-3には、単純支持点の両端から1/3の等スパン1,000mmの位置を2点載荷して有孔部の中央スパンに等曲げモーメントを加えた。この場合の荷重Pと変位δは2点載荷点の平均値である。

有孔部がせん断降伏先行形の試験体OW1-3.5とNSOWシリーズは、有孔部においてウェブがせん断座屈して張力場が形成された後、ウェブ面内方向にフランジの垂直座屈¹⁾が生じて耐力が低下した(写真1参照)。その変形状は、塑性化後に耐力上昇曲線の勾配が変形の進行

図9 試験体形状

表2 材料の機械的性質

試験体名	部位	板厚 t(mm)	降伏応力度 σ _y (t/cm ²)	引張強さ σ _B (t/cm ²)	破断伸び (%)
OW1-3.5, FW-3.5 OW1-5.0, FW-5.0	フランジ ウェブ	11.55 6.00	3.62 3.24	5.44 4.65	27.6 27.2
OWA	フランジ ウェブ	12.08 6.15	3.68 3.98	5.57 5.73	25.2 23.3
NSOW-R, NSOW NSOW+R, NSFW	フランジ ウェブ	11.65 5.94	3.64 3.30	5.56 4.68	26.0 27.2
NS-1, NS-2, NS-3	フランジ ウェブ	8.95 6.00	3.73 3.24	5.61 4.65	24.9 27.2
OWC-R, OWC OWC+R, OWCR	フランジ ウェブ	12.08 6.15±9.07	3.68 3.98±3.80	5.57 5.73±5.60	25.2 23.3±23.7
OWR-1, OWR-2, FW	フランジ ウェブ	11.60 6.10*	3.48 3.35*	5.47 5.05*	26.3 38.1*

*: リングプレートとウェブ共通

表3 各種算定耐力

試験体名	M _p (tcm)	M _{pf} (tcm)	Q _y (t)	M _{ph} (tcm)	M _{phf} (tcm)	Q _{ph} (t)	M _h (tcm)	Q _h (t)	M _{eh} (tcm)	M _{ehf} (tcm)	Q _{eh} (t)	δ _p (mm)
OW1-3.5 FW-3.5	2081	1638	33.88	1953	1526	13.58	1244	13.58	—	—	—	6.56
OW1-5.0 FW-5.0	—	—	—	—	—	—	1593	11.45	—	—	—	11.74
OWA	2066	1600	38.98	1898	1498	13.13	1601	9.75	—	—	—	19.62
NSOW-R NSOW NSOW+R NSFW	2139	1687	34.35	2026	1578	15.17	1523	15.17	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	1408	15.17	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	1292	15.17	—	—	—	6.72
NS-1 NS-2 NS-3	2147	1528	40.08	1924	1359	13.43	1182*	10.75*	1647	1182	10.75	—
	—	—	—	—	—	—	1424*	5.48*	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	1674*	0*	—	—	—	—
OWC-R OWC OWC+R OWCR	2962	1961	67.82	2468	1813	19.44	1807*	9.28*	2147	1577	15.55	—
	—	—	—	—	—	—	1793*	9.66*	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	1778*	10.08*	—	—	—	—
	—	—	—	2978	1543	41.38	2178*	10.94*	2591	1342	33.10	33.26
OWR1 OWR2 FW	2047	1581	35.61	1912	1411	22.46	1537	16.78	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	1566	15.50	—	—	—	6.51

*: 孔部弾性耐力時

図10 荷重-変形関係

とともに徐々に減少して最大耐力に至っている。有孔部が曲げせん断降伏先行形の試験体のうち、試験体OW1-5.0、OWA及びNS-1の崩壊形状はせん断降伏先行形の試験体のそれとあまり差は見られなかった。試験体NS-2、OWR-1及びOWR-2ウェブがせん断座屈するが、フランジにも局部座屈が生じて耐力が低下した。なお、OWRシリーズでは有孔部の耐力補強用のリングプレートが有孔部ウェブの局部座屈変形を拘束する効果がある（写真2参照）。OWCシリーズにおいて、試験体OWC-RとOWCは幅厚比 S の梁端部と幅厚比 L の有孔部のフランジに局部座屈が発生し（写真3参照）、試験体OWC+Rは梁端部のみフランジに局部座屈が発生し、その後、横補剛間隔内で横座屈変

形を伴い耐力が低下した。有孔部が曲げせん断降伏先行形の試験体及び曲げせん断崩壊形である無孔梁（FW）の変形性状は、塑性化後の耐力上昇曲線の勾配が最大耐力まではほぼ一定となる傾向がある。等曲げモーメントを受ける試験体NS-3は、ウェブに曲げによる局部座屈がわずかに見られるが、フランジの局部座屈変形の増大により耐力が低下した。各シリーズ毎の無孔梁に対する有孔梁の変形性状を比較すると、曲げせん断降伏先行形の試験体の方がせん断降伏先行形よりも塑性変形性能が良い。なお、孔位置を変化させた試験体の中で、NSOWとOWRのシリーズで孔位置が梁端に近い有孔梁の方が他の有孔梁よりも塑性変形性状が良好であるが、これは梁端から貫通孔までの距離

写真1 試験体OW1-3.5

写真2 試験体OWR1

写真3 試験体OWC

表4 各種耐力の実験値

試験体名	全塑性耐力			最大耐力			弾性限耐力		
	eMps (tcm)	eMphs (tcm)	eQps (t)	eMmaxs (tcm)	eMmaxhs (tcm)	eQmaxs (t)	eMes (tcm)	eMchs (tcm)	eQes (t)
OW1-3.5	—	1521	16.60	—	1732	18.90	—	—	—
FW-3.5	2320	—	20.00	2958	—	25.50	—	—	—
OW1-5.0	—	1795	12.90	—	2045	14.70	—	—	—
FW-5.0	2354	—	14.40	2959	—	18.10	—	—	—
OWA	2096	1722	10.48	2470	2029	12.35	—	—	—
NSOW-R	—	1736	17.29	—	1972	19.64	—	—	—
NSOW	—	1545	16.65	—	1772	19.10	—	—	—
NSOW+R	—	1500	17.60	—	1686	19.79	—	—	—
NSFW	2482	—	21.40	3270	—	28.19	—	—	—
NS-1	—	1575	14.32	—	1681	15.28	—	1370	12.45
NS-2	—	1862	7.16	—	2088	8.03	—	1620	6.23
NS-3	—	1960	0	—	2210	0	—	1705	0
OWC-R	—	2132	10.95	—	2418	12.42	—	1855	9.53
OWC	3282	2086	11.24	3659	2326	12.53	—	1815	9.78
OWC+R	3282	—	11.24	3571	—	12.23	—	—	—
OWCR	3294	—	11.28	3828	—	13.11	—	—	—
OWR1	2332	—	20.10	2842	—	24.50	—	—	—
OWR2	—	1909	18.90	—	2495	24.70	—	—	—
FW	2390	—	20.60	3167	—	27.30	—	—	—

添字h: 孔部位置

が梁成の1/2より短いので梁端プレート（加力プレート）により有孔部のウェブ局部座屈変形が拘束されたためである。

表4は実験より得られた各種耐力である。全塑性耐力は、有孔部が曲げせん断降伏先行形の試験体についてはgeneral yield法により、そして有孔部がせん断降伏先行形の試験体については割線剛性が初期剛性の2/3となった時の荷重-変形曲線の交点²⁾として求めた値である。弾性限耐力を対象とする試験体については、有孔部の全塑性耐力の曲げモーメント成分を(3)式に示す係数値0.87倍して弾性限の曲げモーメント及びせん断力を求めた。

4.2.2 M-Q相関関係

図11は有孔部の耐力に対する理論値と実験値の比較である。縦軸は曲げモーメント、横軸はせん断力であり、それぞれ梁端の無孔部における算定値の全塑性モーメント及び降伏せん断力で無次元化している。各試験体は(13)式あるいは(16)式で決定する限界距離がそれより加力点側に近い位置に貫通孔がある有孔梁である。プロットは実験値を示し、○印は全塑性耐力、●印は最大耐力、そして□印は弾性限耐力

図11 M-Q相関関係

力である。全塑性耐力あるいは弾性限耐力に関しては、理論値と実験値との対応は良好である。

4.3 有孔梁の変形能力

ここで対象とする有孔梁は、文献6)に示される構造区分S-I、または文献5)に示されるFAランクを満足するものであり、十分な変形能力を発揮することが要求される。

梁端に最も近い貫通孔の限界位置は、梁端が全塑性耐力に達した時に有孔部の耐力がそこに作用する外力と同等以上となる位置と定義しているが、梁の塑性変形能力は塑性域が梁端からスパン中央側にどの程度広がり得るかにによって決まる。このためには梁端部は全塑性耐力より大きな耐力を発揮する必要があるが、同時に梁端に近い有孔部もその全塑性耐力（弾性限耐力）よりも大きい耐力をもつことが要求される。ここでは、梁端部が全塑性耐力に達する時に、有孔部も全塑性耐力（弾性限耐力）となる場合、有孔部が耐力上昇することにより、有孔梁が耐力上昇して要求される塑性変形能力を満足するか調べる。

表5に孔位置と限界距離が同じ無補強の有孔梁試験体OWA、NSOW、及びOWC、そして孔位置がほぼ限界距離にあるリングプレート補強有孔梁試験体OWR1の最大耐力時の塑性変形能力 $R_{max} (= \delta_{max}/\delta_{p-1})$ と最大耐力後の耐力が90%まで低下した時の塑性変形能力 $R_{0.9} (= \delta_{0.9}/\delta_{p-1})$ を示す。構造区分S-Iで要求される部材の塑性

表 5 塑性変形能力

	Rmax	R0.9
OWA	5.62	7.91
NSOW	4.06	6.52
OWC	5.97	9.70
OWR1	8.97	17.19

変形能力の下限は3.8～4.5である。有孔部がせん断降伏形する試験体 NSOWのRmaxは4.06であり、要求性能の下限値の範囲内であるが、R0.9は6.52で十分な塑性変形能力である。その他の試験体は有孔部が曲げせん断降伏形であるが、これらはRmaxが5.62以上、R0.9が7.91以上あり、要求性能を十分満足している。試験体数は少ないが、有孔部がせん断降伏形よりも曲げせん断降伏形の方が変形能力に関しては優れていると考えられる。

ここに示した試験体は有孔部のせん断座屈とフランジの局部座屈により最大耐力に至っている。また、ウェブの幅厚比は降伏応力度を公称値の降伏応力度に換算して文献5)に示される各ランクの制限値とした。従って、限界距離以上梁端から離れた位置に貫通孔を設ける有孔梁の塑性変形能力は文献6)で与えられる要求性能を満足すると判断される。

5. おわりに

十分な塑性変形能力を発揮できるウェブ幅厚比の小さい領域の無補強の有孔部、全塑性耐力まで耐力が低下しない程度のウェブ幅厚比の大きい領域の無補強の有孔部、そしてそれぞれのウェブ幅厚比の領域で補強した有孔部の耐力式を設定し、孔位置の設計式を誘導した。これら有孔部の耐力式の妥当性と、本設計式に基づき貫通孔を設けた有孔梁の耐力・塑性変形能力について実験的に検討した。以下に本論文で得られた結論を示す。

- 1) 限界距離算定式(13)及び(16)を用いて有孔部の降伏が梁端の降伏に先行するように孔位置を設定した。実験値は全塑性耐力あるいは弾性限耐力の理論値を上回ることを示し、有孔部の耐力式を検証した。
- 2) 有孔梁の塑性変形能力が有孔部の性能に影響されることが考えられる限界距離に貫通孔を設けた有孔梁の塑性変形能力を実験的に検討した。ウェブの幅厚比は降伏応力度を公称値の降伏応力度に換算して文献5)に示される各ランクの制限値としたが、文献6)に示される要求性能を満足している。
- 3) 有孔部がせん断降伏形の有孔梁は、孔位置に関わらず耐力が無孔梁に達しない場合があること、塑性変形能力が曲げせん断降伏形に比べて小さいことから、有孔部が曲げせん断降伏形となるように設計することが望ましい。

引用文献

- 1) 福知保長，土井康生，細川裕司：円形孔を有するはりの耐力と設計法 1．無補強の場合の耐力，日本建築学会論文報告集，第296号，1980年10月，pp.27～36。
- 2) 福知保長，土井康生，釜江克宏：円形孔を有するはりの耐力と設計法 2．スリーブ管補強付の場合の耐力，日本建築学会論文報告集，第301号，1981年3月，pp.43～51。

- 3) 土井康生，福知保長：円形孔を有するはりの耐力と設計法 3．実用的耐力算定式の提案，日本建築学会論文報告集，第357号，1985年11月，pp.44～51。
- 4) 舟橋功男，小林昌一，山口育雄：鉄骨有孔梁に関する実験研究 その1－補強有孔板せん断試験－日本建築学会関東支部第38回学術研究発表会，1967年，pp.285～288。
- 5) 日本建築センター：建築物の構造規定－建築基準法施行令第3章の解説と運用一，新洋社，1994年9月20日。
- 6) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計規準（案）・同解説，丸善株式会社，1990年2月15日。
- 7) 広重隆明，加藤勉，木村衛，金子洋文，井ノ上一博，八木毅，関光雄：幅厚比が小さい鉄骨有孔梁の耐力と塑性変形性能（その1 孔位置の限界距離の定義），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），1994年9月，pp.1117～1118。
- 8) 八木毅，加藤勉，井ノ上一博，金子洋文，広重隆明，木村衛，関光雄：幅厚比が小さい鉄骨有孔梁の耐力と塑性変形性能（その2 孔位置の影響について），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），1994年9月，pp.1119～1120。
- 9) 松原由典，加藤勉，木村衛，金子洋文，佐々木照夫，八木毅：スパン中央部の幅厚比が大きい鉄骨有孔梁の耐力と塑性変形能力，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），1994年9月，pp.1121～1122。
- 10) 広重隆明，加藤勉，金子洋文，宇佐美徹，木村衛，伊藤武司：幅厚比が小さい鉄骨有孔梁の耐力と塑性変形性能（その1 リングプレート補強），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），1995年8月，pp.623～624。
- 11) 土木学会：座屈設計ガイドライン，鋼構造シリーズ2，1987年10月。

（1996年8月26日原稿受理，1997年2月13日採用決定）