

圧延H形鋼を用いた鉄骨梁ハンチのフランジ曲げ加工に関する研究

辻 岡 静 雄*

Bending of Bottom Flange in Haunched Rolled-H Section Beams

Shizuo Tsujioka

For a more economical design, the controlling of stiffness and the esthetic considerations, the haunched beams are frequently used. This paper is described and evaluated the flame cutting and the bending of the bottom flange in the actual shop fabrication. The bending tests were conducted on the flange plate cut off the rolled-H section member. The bending properties of the flange plate under the room temperature are examined. The occurrence of cracking on the plate bending and the level of plastic bending are found at the intersection of the haunch and the rolled-H section member.

1. はじめに

一般にハンチは経済設計や端部補強、柱梁仕口での取合いなどの点から設けられる。梁端にハンチを設けた場合、その製作においては切断、曲げ、溶接などの加工方法が用いられる。一般に、中高層建築物や大スパン構造物では鋼板の溶接組立の方法でハンチを製作することが多い。低層建築物ではファブ工場の現有設備や製品の納期の関係から圧延H形鋼の切り曲げ加工の上三角形鋼板を組み込む方法が安易に行われている。JASS6など^{1~3)}に照らせば好ましくない加工方法が行われ、リブやスチフナの欠落、大きなハンチ勾配、不溶着部や溶接ビード不整などが見受けられる。兵庫県南部地震において、この方法で製作されたハンチ付きブラケット部のハンチ開始部で圧延H形鋼の母材破断等の被害^{4, 5)}が生じていた。これはハンチ用プレート溶接部交点に不溶着部が存在していたためであるが、この部分に存在するガス切断や曲げ加工によるノッチや溶接による不溶着部などの欠陥についての基礎資料はない。また、切り曲げ加工における塑性加工が鋼材の伸び性能に及ぼす影響も考える必要がある。

本報告は、梁ブラケット部での圧延H形鋼を用いたハンチの製作方法における切り曲げ加工の現状と問題点を実験的に調べ、好ましいガス切断方法やフランジ材の塑性加工の程度を明らかにし、ハンチ付梁の力学性状や破壊性状を検討するための基礎資料を提示するものである。

2. ハンチ部フランジの曲げ加工

曲げ加工^{6, 7)}については常温加工と加熱加工がある。通常、常温で曲げ加工が行われ鋼材は塑性加工を大きく受けるので、JASS6では「板厚 t の鋼板の常温曲げ加工では内側曲げ半径 R を $2t$ 以上とすれば製品上支障はない（即ち、クラックは生じない）が、柱、梁およびブレース端のハンチな

* 建設工学科 建築学専攻

ど塑性変形能力を要求される部材では内側曲げ半径 R は $4t$ 以上に
する」との規定がある。なお、内側曲げ半径をこれより小さくす
るとき或いは曲げ角度が大きい場合には加熱曲げ加工とする必要
がある。

ここで、圧延H形鋼の切り曲げ加工を行う場合、即ち、フラン
ジに沿ってガス切断を行った後梁端に引張力を加えてガス切断先
端部のフランジに常温曲げ加工を施す方法を考える。曲げ加工を

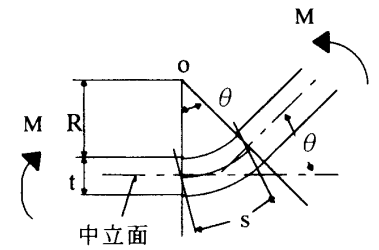


図1 鋼板の曲げ

図1に示すようにフランジ材が均等曲げを受けるものと単純化する。中立面を板厚中央と仮定すれ
ば、塑性化領域の長さ s と曲げ角度（ハンチ勾配に相当） θ の関係および外表面歪 ε_o は、次式で
得られる。

$$s = (R + 0.5 \cdot t) \cdot \theta \quad (1)$$

$$\varepsilon_o = 1 / (2R/t + 1) \quad (2)$$

この切り曲げ加工の場合、曲げ角度、板厚が大きくなれば、また、塑性化領域が短くなれば R/t
は小さくなり、結果として外表面歪は大きくなる。ちなみに、JASS 6 の規定の $R/t = 2, 4$ は各々
0.2、0.11 の表面歪に相当することになる。しかし、工場での圧延H形鋼を用いた製作方法では塑
性化領域が局所的で明確でないため、鋼板の溶接組立の場合のフランジのように曲げ加工を単純化
出来ないのが、表面歪 ε とハンチ勾配 θ との関係を実験的に求める必要がある。よって、H形鋼よ
り切出したウェブフィレット付フランジの曲げ試験を行い、ハンチ開始点でのフランジの表面歪性
状・亀裂発生状況などのフランジの曲げ加工に対する基礎資料を求めることとした。

3. フランジ材の単純梁実験Ⅰ（4点曲げ実験）

試験体は圧延H形鋼 H-400x200x12x22 (SN400B 材)か
ら切り出したウェブフィレット付フランジ材であり、中
央部にL形あるいは斜めの切り込みをガス切断により設
けた。その切り込み形式、先端位置と先端処理を実験変
数として6体製作した（図2、表1、写真1）。ただし、
内2体は実験Ⅱ（3点曲げ試験）用である。実験方法は
ウェブフィレット付フランジの4点曲げ単調加力試験で
ある。その概要を図3に示すが、中央切り込み部の相対
回転角 θ を変位計で、単純梁中央断面でのフランジ先端
と切り込み底近傍の表面歪

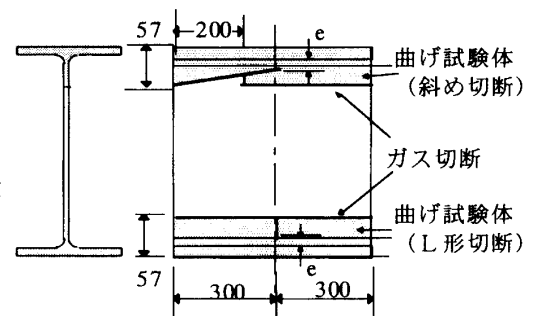
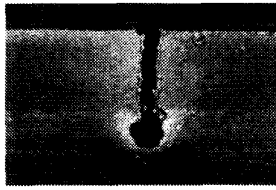


図2 試験体の加工

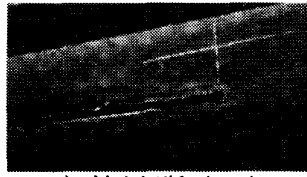
表1 試験体一覧

記号	断面	ガス切断方法	先端位置 e(mm)	先端孔加工	備考
A-3	CT-57x200x12x22	L形切断	3	有(ガス加工)	実験Ⅰ用
B-3	"	斜め切断	8	-	
C-3	"	L形切断	4	無	
D-3	"	斜め切断	10	-	
A-4	CT-57x200x12x22	L形切断	3	有(ガス加工)	実験Ⅱ用
B-4	"	斜め切断	8	-	

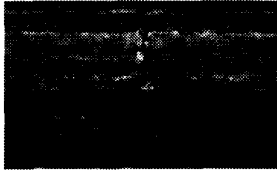
を貼付した歪ゲージで測定
した。また、その使用鋼材
の機械的性質を表2に示
す。



a) L形切断 (A-3)



b) 斜め切断 (B-3)



c) L形切断 (C-3)



d) 斜め切断 (D-3)

写真1 試験体のガス切断加工

表2 鋼材の機械的性質

鋼材	鋼種	降伏応力度 t/cm ²	引張強さ t/cm ²	伸び %
flange	SN400B	2.80	4.38	33.4
flange-web		2.56	4.32	33.2
web		3.17	4.50	28.3

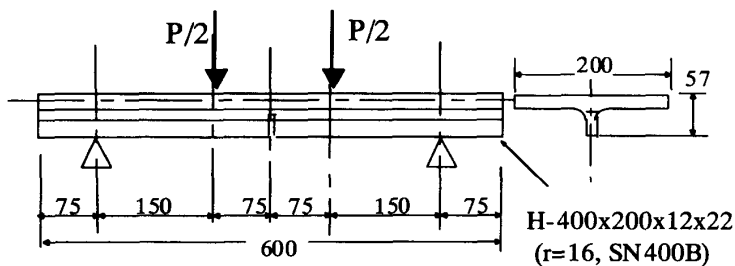
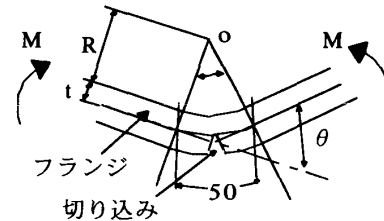


図3 試験体と荷重試験概要

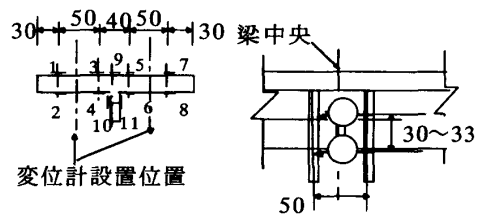

 歪ゲージ貼付位置
と変位計の設置

表3 実験結果

記号	実験値					計算値			実験値/計算値	
	K ₁ (tcm ²)	K ₂ (tcm ²)	eMy (tcm)	eMp (tcm)	Mm (tcm)	cEI (tcm ²)	cMp (tcm)	Mu (tcm)	K ₁ /cEI	eMp/cMp
A-3	41727	1048	65	74.6	130.1	38445	69.0	108	1.09	1.08
B-3	44371	983	63	73.0	120.0	41815	71.8	112	1.06	1.02
C-3	50425	1035	67.6	79.3	134.5	38967	69.5	109	1.29	1.14
D-3	45215	1115	71	77.6	134.7	43759	73.1	114	1.03	1.06

実験結果を表3に、図4に中央切り込み部の曲げモーメントMと平均曲率 ϕ の関係を示す。平均曲率は相対回転角 θ を測定長さ50mmで除したものである。M- ϕ 関係はBi-linear関係を呈している。弾性域、非弾性域を各々直線で近似した。その勾配を初期剛性 K_1 、2次剛性 K_2 とした。また、これらの2直線の交点の荷重レベルを崩壊モーメント eMp とし、初期剛性の1/3の接線剛性の荷重レベルを降伏モーメント eMy 、最大モーメントを Mm とした。さらに、表3には断面の弾性剛性 cEI 、塑性モーメント $cMp (=Zp \cdot \sigma_y)$ と最大モーメント $Mu (=Zp \cdot \sigma_b)$ の計算値も示すが、その際、中央切り欠き部の断面諸量を用いて算定した。

初期剛性、2次剛性とも大きな差異はない。これはフランジの曲げが支配的でウェブフィレットの影響は小さいと考えられるが、初期剛性ではL形で孔加工無しが最大で孔加工有りが最小であった。一方、曲げ剛性の計算値は斜め切断の方がいずれも大きい。実験値との比較ではC-3が大きく異なる。これは測定長さに比べ切り込み幅が小さいためウェブフィレットの影響が相対的に大きくなったことによる。

各切断方法では孔加工の無い方が、先端距離 e が大きいほうが崩壊モーメントは大きくなった。また、崩壊モーメントはいずれも切り込み部の塑性モーメントより大きくL形切断の方が差異は大

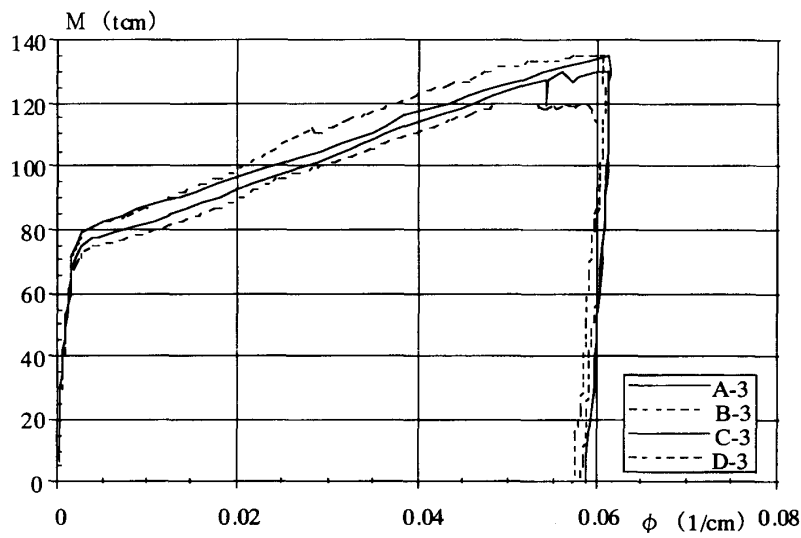


図4 M-φ関係

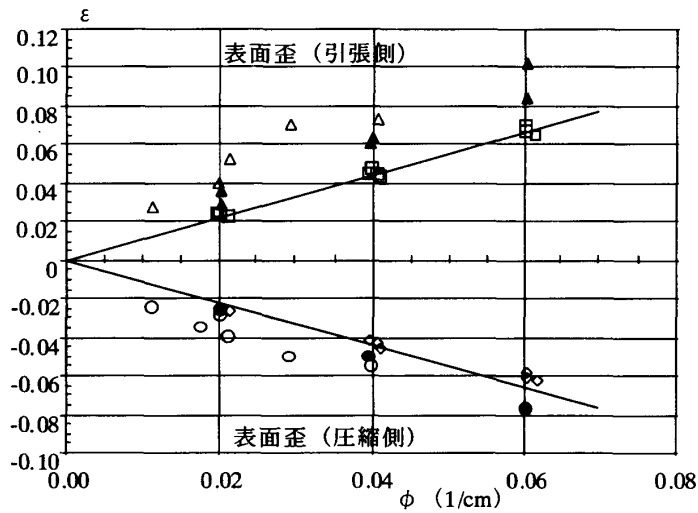


図5 ε-φ関係



a) 孔底部の亀裂 (A-3)



b) 先端とノッチ底の亀裂 (B-3)



c) 切欠き底の亀裂 (C-3)



d) 先端と切断面の亀裂 (D-3)

写真2 亀裂状況 (実験I)

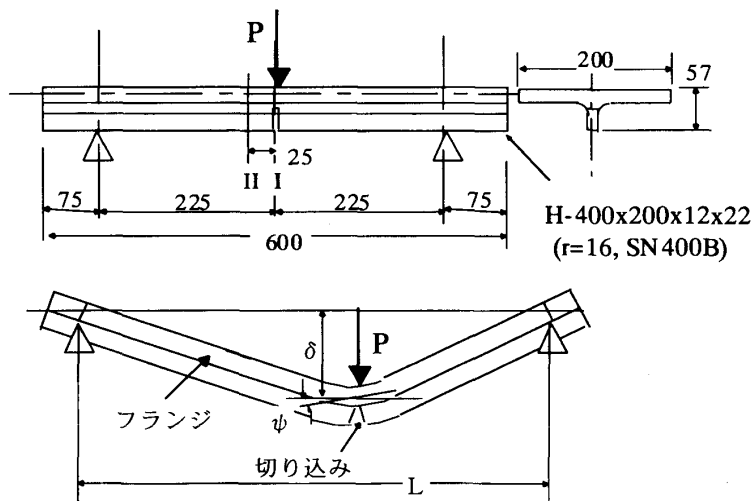
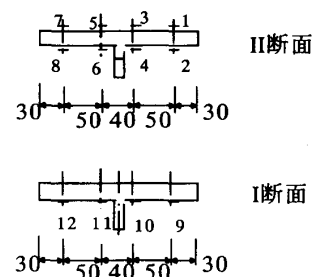


図6 試験体と载荷試験概要



きい。これは切り込み部分が局所的であるためである。一方、最大モーメントでは斜め切断では上限値が存在する。亀裂が大きく進展したことによるのか縁応力度が引張強さ σ_b に到達したためによるのかは不明である。曲げモーメントが塑性モーメントの1.6～2.0倍程度、平均曲率0.06（回転角0.3）程度まで曲げ加工を行ったが、L形切断で孔加工ありの場合切り込み底でのヘアークラックが、それ以外はいずれも切り込み先端において大きな表面亀裂が認められた（写真2）。

次に、中央断面の歪分布についてはフランジ上面（圧縮側）、下面（引張側）とも一様分布とならず、フランジ先端よりフランジ中央が大きくなった。図5に、塑性加工の程度を検討するため代表的な曲率でのフランジ先端（□、◇印）と中央（△、○印）の歪を示す。図中の▲、●印は斜め切断の値を、細線はフランジ板の縁歪と曲率の関係（ $\varepsilon = t \cdot \phi / 2$ ）を表す。これより、フランジ先端の歪は実線で予測可能であるが、中央においては斜め切断では引張側（切り込み先端近傍）ではフランジ先端の1.5倍程度、圧縮側では1.3倍程度となる。一方、L形切断では亀裂の発生や進展により曲率が0.02～0.04の範囲で中央の歪には大きな変動が見られるが、フランジ先端の2倍程度になるものと推察される。

4. フランジ材の単純梁実験Ⅱ（3点曲げ実験）

本実験は現実の加工方法に即した加力を受ける場合を想定したもので中央集中荷重を受ける単純梁の単調加力実験である（3点曲げ実験）。試験体は表1に示すがウェブフレット付フランジ材であり、中央部にL形切断で孔加工ありの場合と先端位置がフランジ面から8mmの斜め切断の2体である。実験方法の概要を図6に示す。また、中央部のフランジのたわみ δ と回転角 ψ を変位計と回転計で、中央断面でのフランジ先端と切り込み底近傍の引張側表面歪を貼付した歪ゲージで測定した。

表4 実験結果

記号	実験値				計算値			実験値/計算値	
	K_1 (tcm ²)	K_2 (tcm ²)	eMp (tcm)	Mm (tcm)	cK ₁ (tcm ²)	cMp (tcm)	Mu (tcm)	K_1/cK_1	eMp/cMp
A-4	7528	326.7	77.54	132.7	5126	69.0	108	1.469	1.124
B-4	5624	200.0	75.78	123.7	5575	71.8	112	1.009	1.055

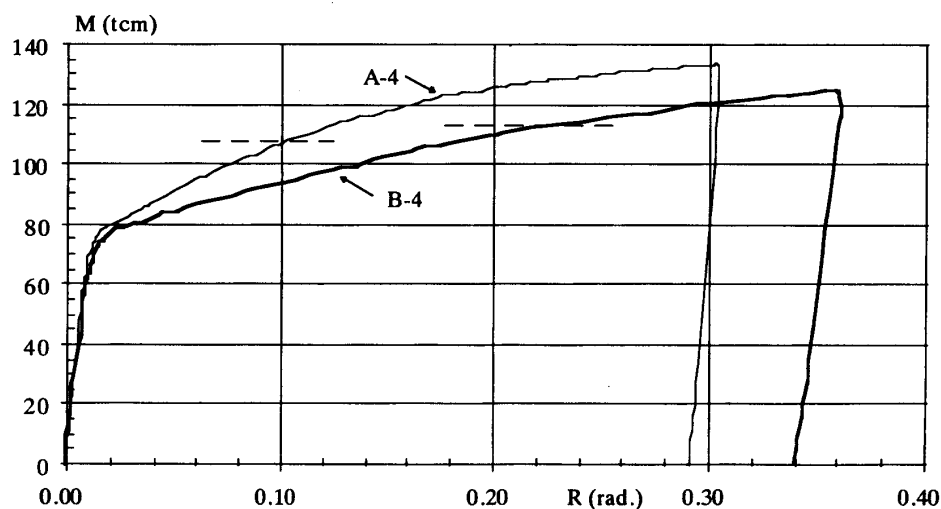


図7 モーメント - 回転角関係



a) 孔底部の亀裂 (A-4)



b) 先端と切断面の亀裂 (B-4)

写真6 亀裂状況 (実験II)

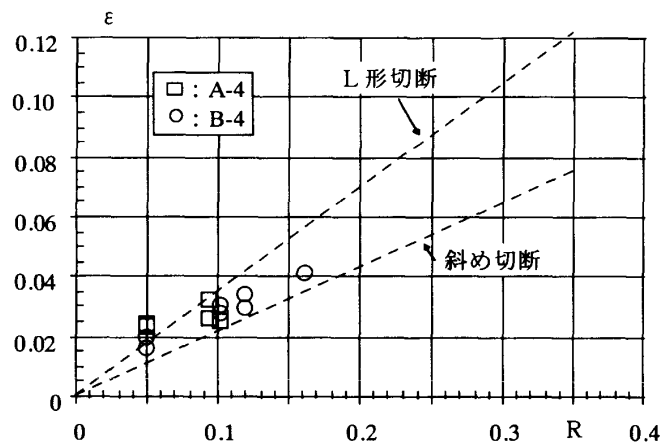


図8 ε - R 関係

表4に実験結果を、図7に中央断面の曲げモーメント M と部材角 R との関係を示す。ガス切断先端の亀裂状況を写真3に掲げる。ここに、部材角は加力点直下フランジのたわみ δ と回転角 ψ より $R = 2\delta/L + \psi$ で求めた。初期剛性の計算値 cK_1 は中央断面の断面諸量を用いて $6EI/L^2$ で算定した。

$M-R$ 関係は実験Iと同様大局的にはBi-linear関係を呈して、初期剛性、2次剛性ともL形切断の方が大きく、曲げ加工し難い。これは曲げ剛性が切り込み部分のみ小さく、塑性変形域が局所的であることによる。図中には中央断面の最大曲げモーメント M_u の計算値レベルを破線で示してあるがこのレベル近傍から2次勾配は小さくなる傾向がある。このときの部材角は0.1、0.2程度で、フランジ中央に亀裂が生じたものと考えられ、ハンチ勾配0.2程度ではどの方法でも切り込み部分には亀裂が存在するものと見做しうると言える。

崩壊モーメントには大きな差異はないが塑性モーメントの計算値に比べ大きく、特に、L形切断では上昇割合は大きい。この傾向は等曲げの場合と同様である。最大曲げモーメントについては等曲げ実験の最大モーメントレベルまで加力したが、部材角は0.3-0.35程度であった。この曲げ加工に対してL形切断では孔加工をしているにもかかわらず切り込み底においてヘアクラックと大きな表面亀裂が認められた(写真3)。これはモーメント勾配があるからである。一方、斜め切断では先端とガス切断ノッチ底に亀裂が生じていた。

次に、中央断面のフランジ先端の曲げ加工の程度について検討する。塑性域での曲げモーメント増分と曲率増分、部材角増分の関係を次式で近似すれば、

$$\Delta M = \alpha cEI \Delta \phi \quad (3)$$

$$\Delta M = \beta cK_1 \Delta R \quad (4)$$

$\alpha = 0.02-0.03$ 、 $\beta = 0.35-0.064$ の範囲となる。表面歪増分と曲率増分の関係は $\Delta \varepsilon = t/2 \cdot \Delta \phi$ であるからフランジ板の曲げ加工による引張側表面歪と部材角の関係が導かれる。

$$\text{L形切断加工: } \Delta \varepsilon = 0.347 \Delta R \quad (5)$$

$$\text{斜め切断加工: } \Delta \varepsilon = 0.215 \Delta R \quad (6)$$

図8に本実験での部材角と歪の関係掲げる。斜め切断では上式は過小評価し、L形切断ではほぼ評価するものと考えられ、曲げ加工の上限として(5)式が適用できよう。

5. 纏め

本報ではブラケット部におけるハンチの下フランジの製作品質を明らかにするために、圧延H形鋼より切り出したウェブフィレット付フランジの曲げ試験を行った。

得られた事柄を要約すれば以下ようになる。

- 1) モーメント勾配が無い場合、L形切断では切り込み幅が小さいため実験値と計算値の違いが大きい。
- 2) モーメント勾配が無い場合、フランジ先端の歪は予測可能であるが、中央においては斜め切断では引張側（切り込み先端近傍）ではフランジ先端の1.5倍程度、圧縮側では1.3倍程度となる。一方、L形切断ではフランジ先端の2倍程度になるものと推察される。
- 3) L形切断では先端の切込み底にヘアクラックが、特に、先端に孔加工が無い場合には切込み底に一本の開口の大きなクラックが生じた。斜め切断では先端にフランジに沿って大きな開口のクラックが生じた。一方、モーメント勾配がある場合にはガス切断方法、孔加工の有無にかかわらず先端に大きな開口のクラックが生じる。
- 4) モーメント勾配がある場合 $M - \theta$ 関係は大局的には Bi-linear 関係を呈して中央断面の最大曲げモーメント M_u のレベル近傍から2次勾配は小さくなる傾向があり、L形切断の方が曲げ加工し難い。
- 5) ハンチ勾配0.2程度では、どのガス切断方法でもハンチ開始部分の切り込み先端には大きな表面亀裂が生じ、ハンチ開始部のフランジの引張側表面歪は0.043-0.069程度となる。

以上より、ガス切断の先端の孔加工はあまり効果がなく、曲げ加工の程度や曲げ加工の容易さを考えれば”斜めガス切断”の方法が望ましいと言える。ただし、ガス切断面にノッチが生じないように配慮する必要がある。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事、1996.5.
- 2) 日本鋼構造協会：実例でわかる工作しやすい鉄骨設計、技報堂、1991.2.
- 3) 工作標準委員会編：図解鉄骨工作標準、鋼構造出版、1993.3.
- 4) 丸岡義臣：建築鉄骨の破断例と改善策（上）、鉄構技術（STRUTEC）、pp.47-53, 1995.10.
- 5) 木林長仁：鉄骨造建物の震害経験と設計の対応について、structure, No.65, pp.54-56, 1998.1.
- 6) 日本鋼構造協会：わかりやすい溶接の設計と施工、技報堂、1986.2.
- 7) 日本塑性加工学会編：曲げ加工 - 高精度化への挑戦 -, コロナ社、1995.1.

(平成13年11月22日受理)