

# はり中間部腹板のせん断崩壊を伴う 鋼2層門形ラーメンの非弾性地震応答解析

Inelastic Earthquake Response Analysis of Steel two-story  
Frames with Shear Collapse in Middle of Beam

酒造 敏廣\*, 山田 宰\*\*

Toshihiro MIKI and Osamu YAMADA

\* 工博 大同工業大学 教授 工学部建設工学科 (〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

\*\* 大同工業大学大学院前期博士課程 建設工学専攻在学中 (〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

The inelastic response analysis is presented on the steel two-story portal frames subjected to horizontal ground motion. In order to evaluate the onset of shear yielding of web plates in the middle of beam with lateral load, an approximate method is explained in detail. The damage mechanism of two-story frames is discussed through the collapse patterns of frames with or without shear collapse of web plates in beam. The importance is that the cumulative plastic strain of the column base parts, panel zones and column cross-section near panel zones decreases due to the shear collapse of web plates in beam. Furthermore, it should be noted that the strain rate of such shear panels in the plastic range is so high compared with that of column cross-sections. The proposed approach is available for practical design use when checking whether the web plates in beam reach significant inelastic range or not during earthquake.

**Key Words:** two-story frame, shear collapse of beam, earthquake response, variable cross-section

## 1. まえがき

地震動を受ける鋼製ラーメン橋脚<sup>1)</sup>の非弾性応答性状は、はり・柱部材の変断面性によって少なからず影響を受ける<sup>2)</sup>。兵庫県南部地震で観察されたはり中間部腹板のせん断座屈や柱の断面変化位置の付近に発生した塑性変形・局部座屈は、変断面ラーメンに特有な損傷パターンであると言える。

筆者らは、これまでに1層門形ラーメンを対象にして、せん断を受けるはり腹板の損傷発生を要因を探り、地震応答性状を数値解析により明らかにしてきた<sup>3)</sup>。具体的には、はり中間部に鉛直荷重が作用しない場合<sup>3)</sup>と作用する場合<sup>4)</sup>について、はり腹板の塑性化の発生を予測する方法について検討した。そして、せん断を受けるはり腹板と隅角部腹板の塑性化を関連づけることにより、はり腹板のせん断崩壊を伴うラーメンの崩壊モードを簡単なパラメータで推定できることを示した。また、はり腹板が塑性化したときの損傷メカニズムの特徴として、隅角部とその近傍の柱断面の塑性変形集中がかなり抑えられること、はり中央腹板では、せん断耐力が小さいために非常に大きな塑性変形が起こることを示した。

本研究は、文献 2)~4)の解析手法を2層門形ラーメンに応用し、はり中間部腹板の塑性化を伴うときの非弾性地震応答解析を行ったものである。まず、せん断を受け

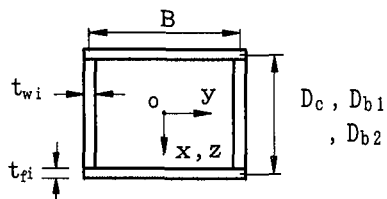
るはり腹板の塑性化を判定するために、文献 4)で提案された方法を用いて、一つの基本パラメータの算出手順を具体的に示す。つぎに、2層ラーメンの非弾性地震応答解析を行って、はり中間部腹板の塑性せん断変形がラーメン各部の変位やひずみ応答に及ぼす影響を調べる。また、塑性変形箇所のひずみ速度の応答から、はり中間部腹板が塑性化する際のラーメンの損傷メカニズムの特徴をまとめる。最後に、2層ラーメンのはり腹板の塑性せん断変形の予測方法について考察する。

## 2. 鋼2層門形ラーメンの解析モデルと非弾性地震応答解析法

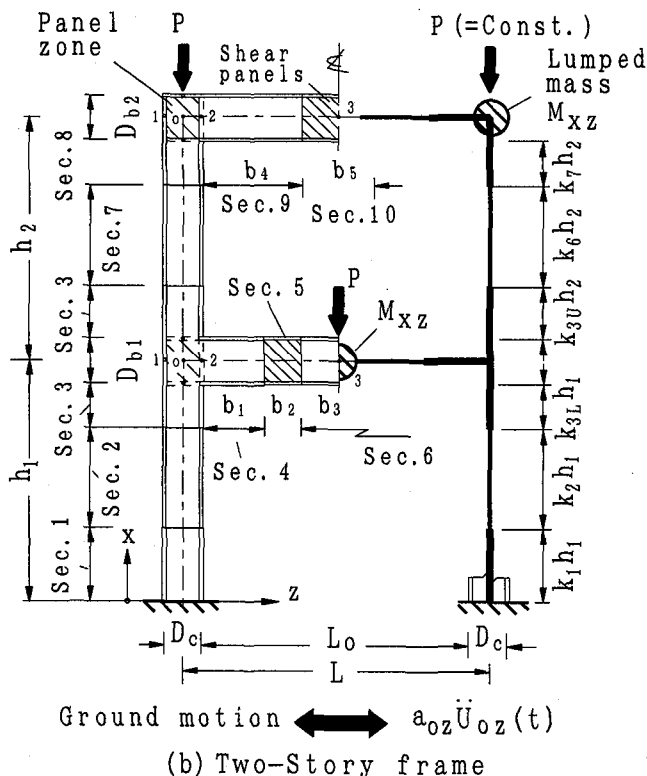
### 2.1 解析モデル

本研究では、Fig.1に示すように、2層目の柱頭部と1層目はり中央に上部工の死荷重に相当する定鉛直荷重  $P$  が作用した状態で、水平地動  $a_{ox}\ddot{U}_{ox}(t)$  を受ける2層1径間の門形ラーメンを対象とした。柱とはりは、断面 Sec.1~Sec.10 からなる。Sec.5 と Sec.10 は、腹板に塑性せん断変形の発生を想定した断面 (*Shear panels*) である。なお、以下では、はり中間部に作用する鉛直荷重を中間横荷重と呼ぶことにする。

解析モデルの寸法諸元と降伏点 ( $\beta_{pl}=1$ , 式(2)参照)等を Table 1 に示す。解析では、Sec.5 と Sec.10 のせん断



(a) Cross-section of Sec.  $i$  ( $i=1, 10$ )



(b) Two-Story frame

Fig.1 Numerical model of portal frame subjected to horizontal ground motion

変形域の長さは、それぞれ  $D_{b1}$  および  $2D_{b2}$  としている。ここに、 $D_{bn}$  は  $n$  層目のはりの腹板高さである。

## 2.2 解析方法

動的応答解析は、文献 2)~4) に示した方法に従っている。解析では、部材要素の質量ならびに減衰の影響を無視し、鉛直荷重の作用位置に鉛直・水平並進運動に対する集中質量  $M_z$  を仮定し、ラーメンを 6 自由度の振動体にモデル化した。本研究で解析した 2 層ラーメン (Table 1 参照) では、仮定した質量に対して、弾性 1 次固有周期  $T_0$  = 約 1.1s である。

弾塑性せん断変形を仮定した隅角部とはり中間部では、腹板を囲むフランジ・プレートやダイアフラムによる枠組効果は無視できるものとして、一定せん断ひずみの弾塑性要素にモデル化している。

鋼材の応力  $\sigma$  - ひずみ  $\varepsilon$  曲線には、文献 3), 4) と同様に Fig.2 に示すような Bi-Linear モデルを用いた。図中、 $E$  はヤング係数 ( $=2.05 \times 10^5$  MPa) であり、等方・移動硬化を簡易的に考慮できるように負勾配 ( $= -E/200$ ) の補助境界線を仮定している<sup>9)</sup>。

Table 1 Dimension and yield point of numerical model with a parameter  $\beta_{py}$  of 1.0

Cross-section $i$	Thickness (cm)		Yield point $\sigma_{fy}$ ( $\sigma_{wy}$ ) (MPa)
	$t_{fl}$	$t_{wi}$	
Sec.1	3.20	2.56	353 (353)
Sec.2 and Sec.7	2.60	2.28	314 (314)
Secs.3-4 and Secs.8-9	3.60	2.88	563 (563)
Sec.5 and Sec.10 (Shear panels)	—	0.90	— (445)
Sec.6	3.60	2.88	563 (563)
Panel zones	—	2.88	— (564)

Notes:  $h=30$ m,  $h_1=h_2=15$ m,  $L_0=11.04$ m,  $L=12$ m,  $D_c=96$ cm,  $B=D_{b1}=D_{b2}=120$ cm,  $b_1=2.567D_{b1}$ ,  $b_2=D_{b1}$ ,  $b_5=2D_{b2}$ ,  $M_z=1.09 \times 10^5$ kg,  $P=0.1N_{y2}$ ,  $N_{y2}$ : Squash force of Sec.2,  $\sigma_{fy}$  and  $\sigma_{wy}$ : Yield point of flange and web plates, respectively, of Sec. $i$ ,  $k_1=0.23$ ,  $k_2=0.652$ ,  $k_{3L}=0.078$ ,  $k_{3U}=0.04$ ,  $k_6=0.84$  and  $k_7=0.04$ .

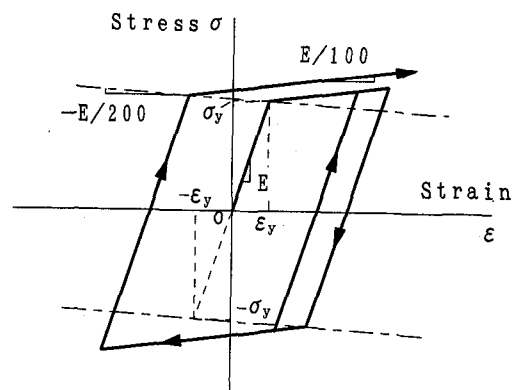


Fig.2 Relationship between stress  $\sigma$  and strain  $\varepsilon$

## 3. せん断を受けるはり中間部腹板の塑性化判定方法

### 3.1 はり腹板の塑性化判定のためのパラメータ $\beta_{py}$ <sup>9)</sup>

文献 4) では、水平地動を受ける門形ラーメンの隅角部とはり腹板の塑性化を関連づけて、隅角部がせん断降伏したときに、はり腹板が弾性状態に留まっているという条件から、次の基本条件式が誘導されている。

i) 隅角部腹板のせん断降伏が先行するとき

$$\beta_{py} > 1 \quad (1a)$$

ii) はり中間部腹板のせん断降伏が先行するとき

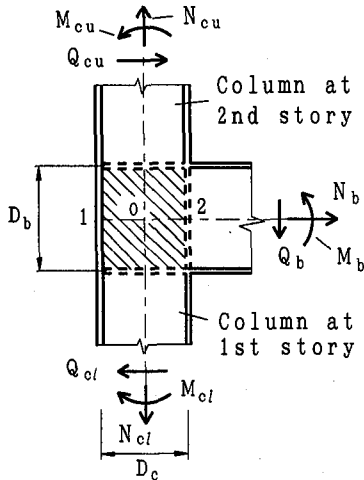
$$\beta_{py} < 1 \quad (1b)$$

ここに、

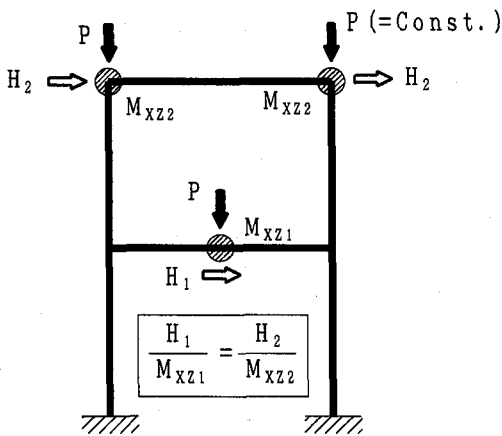
$\beta_{py}$ : 塑性化判定パラメータ

$$\beta_{py} = \frac{1}{2\xi} \frac{L_0}{D_c} \frac{Q_{by}}{Q_{sy}} \quad (2)$$

$L_0$ ,  $D_c$ : 左右の柱の内側フランジ・プレート間のスパンと柱の腹板高さ (Fig.1 参照)。



(a) Stress resultants applied to panel zone on 1st story



(b) Frame subjected to conventional horizontal loads corresponding to ground motion

Fig.3 Stress-resultants applied to panel zone and static numerical model subjected to ground motion

$\xi$  : 中間横荷重と地震動の影響を考慮するためのパラメータ

$$\xi = 1 + \frac{m_{qcE} D_c}{M_{py}} + \frac{1}{2} \frac{L_o}{D_c} \frac{|Q_{bL}|}{Q_{sy}} - \frac{|Q_{sL}|}{Q_{sy}} \quad (3)$$

水平地動の項      中間横荷重による項

$m_{qcE}$  : 隅角部腹板がせん断降伏するときに、水平地動によって生ずる柱のせん断力成分を用いて定義された分布モーメントである。

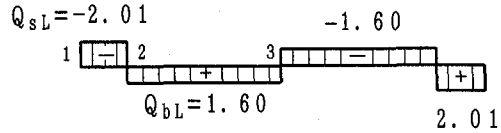
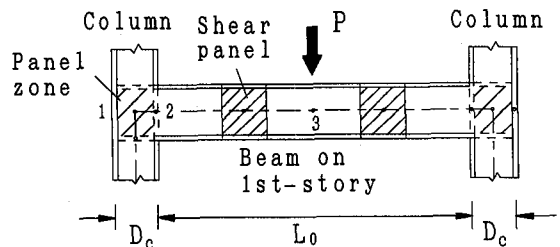
$$m_{qcE} = \frac{1}{2} \frac{D_b}{D_c} (Q_{clE} + Q_{cuE}) \quad (4)$$

$Q_{clE}$ ,  $Q_{cuE}$  : 隅角部に隣接する上下の柱断面に生じるせん断力であり、水平地動による成分を表す。

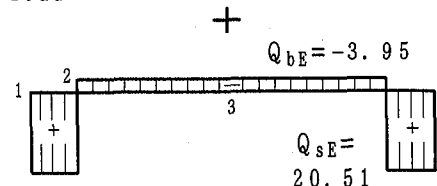
$Q_{bL}$ ,  $Q_{sL}$  : はりと隅角部腹板に作用するせん断力であり、中間横荷重による成分 ( $Q_{bL}$ ,  $Q_{sL} < 0$ ) を表す。

$Q_{by}$  : はり腹板の降伏せん断力

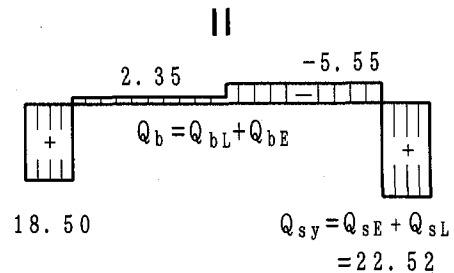
$$Q_{by} = 2D_b t_{wb} \tau_{by} \quad (5)$$



(a) Shearing force due to lateral load



(b) Shearing force due to conventional horizontal loads corresponding to ground motion



(c) Total shearing force

Fig.4 Shearing force diagram of beam on 1st story by lateral load and ground motion (Unit: MN)

$Q_{sy}$  : 隅角部腹板の降伏せん断力

$$Q_{sy} = M_{py} / D_c \quad (6)$$

$M_{py}$  : 隅角部腹板の塑性モーメント

$$M_{py} = 2D_b D_c t_{ws} \tau_{sy} \quad (7)$$

### 3.2 パラメータ $\xi$ の計算

式(2)の  $\beta_{py}$  に含まれるパラメータ  $\xi$  (式(3)) を決定するためには、隅角部腹板がせん断降伏するときのラーメン各部のせん断力を求める必要がある。

そこで、Table 1 の2層ラーメンの1層目は中間部腹板に着目し、 $\xi$  を求める手順を以下に説明する。ここで、計算例で用いた力と長さの単位は、それぞれ MN および cm である。

(1) 中間横荷重の項 : 式(3)の右辺第3, 4項

中間横荷重 (柱頭部の鉛直荷重も含む) を作用させて、ラーメンの弾性線形解析を行い、隅角部とはり腹板の作用せん断力  $Q_{sL}$  と  $Q_{bL}$  を求めると、Fig.4(a)のようになる。ここで、隅角部腹板のせん断力  $Q_{sL}$  は、Fig.3(a)の断面力の記

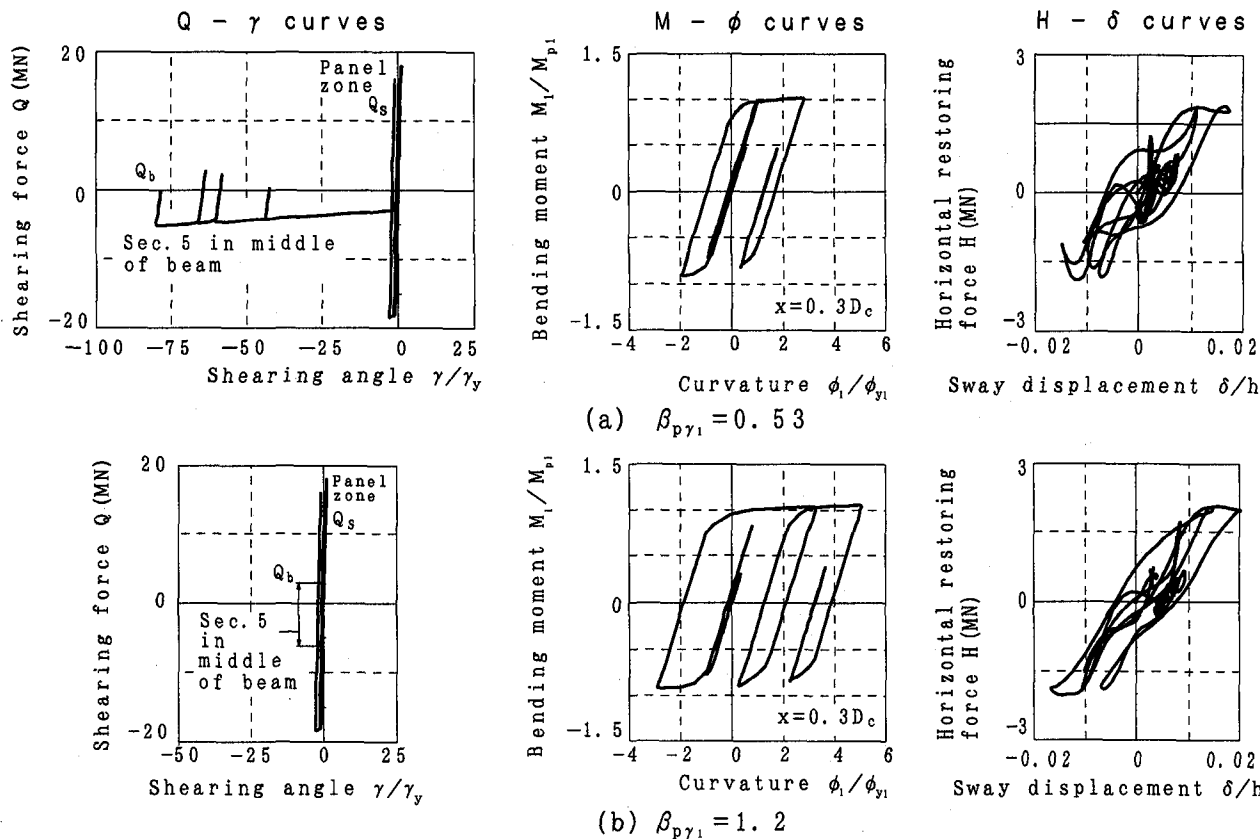


Fig.5 Inelastic earthquake responses of two-story frames ( $\beta_{py1}=0.53$  and 1.2)

号を用いると、次式で与えられる<sup>4),6)</sup>。

$$Q_{sL} = \frac{M_{cL} - M_{cuL}}{D_c} + \frac{1}{2}(N_{cL} - N_{cuL}) - Q_{bL} \quad (8)$$

ここに、上式右辺の各諸量は解析で得られた断面力であり、下添え字  $L$  は、中間横荷重によることを示す。

すると、式(3)の右辺第 3,4 項は、具体的に次のように求められる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{L_o}{D_c} \frac{Q_{bL}}{Q_{sy}} - \frac{Q_{sL}}{Q_{sy}} \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{1.104}{96} \times \frac{1.60}{22.52} - \frac{2.01}{22.52} = 0.319 \end{aligned}$$

(2) 水平地動の項：式(3)の右辺第 2 項

中間横荷重が作用した状態から、任意の水平地動が作用した場合を対象にして、隅角部腹板がせん断降伏するときのラーメン各部のせん断力を厳密に求めることは難しい。そこで、Fig.3(b)に示すように、柱頭部の鉛直荷重とはり中間部で横荷重が作用する位置で、集中質量  $M_{xx}$  に比例する水平荷重  $H$  (Conventional horizontal loads とも記す) を仮定して、弾性線形解析 (静的) を行う<sup>4)</sup>。

水平荷重を漸増させて、隅角部腹板がせん断降伏するときのはり部材のせん断力図は、Fig.4(c)のように得られる。同図(a)とのせん断力差は同図(b)のようになり、隅角部腹板がせん断降伏するときの水平地動によるせん断力成分を表す。

同図(b)のせん断力に対応する水平荷重によって、隅角部上下の柱に生じるせん断力  $Q_{cLE}$  と  $Q_{cuLE}$  を求めると、式(4)の分布モーメント  $m_{qcE}$  は次のように計算できる。

$$\begin{aligned} m_{qcE} &= \frac{1}{2} \frac{D_b}{D_c} (Q_{cLE} + Q_{cuLE}) \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{120}{96} \times (2.122 + 1.414) = 2.210 \text{ MN}\cdot\text{cm/cm} \end{aligned}$$

したがって、式(3)の右辺第 2 項は

$$\frac{m_{qcE} D_c}{M_{py}} = \frac{2.21 \times 96}{2,162} = 0.098$$

となり、式(3)の  $\xi$  は次のようになる。

$$\xi = 1 + \frac{0.098}{\text{水平地動の項}} + \frac{0.319}{\text{中間横荷重による項}} = 1.417$$

$\xi$  値に及ぼす中間横荷重の影響が大きいことがわかる。

上述の Table 1 に示した寸法諸元と降伏点を用いると、1 層目のはり中間部腹板の  $\beta_{py1}$  は、最終的に次のように得られる。

$$\begin{aligned} \beta_{py1} &= \frac{1}{2\xi} \frac{L_o}{D_c} \frac{Q_{by}}{Q_{sy}} \\ &= \frac{1}{2 \times 1.417} \times \frac{1.104}{96} \times \frac{5.55}{22.52} = 1.0 \end{aligned}$$

なお、2 層目のはり腹板に対しても、同様に計算すると、 $\xi=1.072$ ,  $\beta_{py2}=1.32$  となる。

次章では、以上の手順に従って  $\beta_{py}$  を算出し、解析結果

を整理している。 $\beta_{py}$ によって、はり中間部腹板の塑性せん断変形の発生をどの程度の精度で予測できるかは、最後に考察している。

#### 4. はり腹板のせん断崩壊を伴う2層門形ラーメンの非弾性地震応答特性

Table 1 に示した寸法諸元を持つラーメンの地震応答解析を行った。1層目のはり中間部腹板の塑性化パラメータ $\beta_{py1}$ が約0.5~1.4の範囲内に入るように、1層目のはり中間部腹板 (Sec.5)の降伏点を変化させた。2層目のはり腹板 (Sec.10)の降伏点には、1層目と同じ値を仮定した。

ここで、はり腹板 Sec.5, Sec.10 の幅厚比を約133に設定したため、腹板は塑性変形だけでなく、せん断座屈を起こす領域にある。この点は、文献 7)の隅角部腹板に関する実験結果を参考にして、腹板が塑性せん断座屈した後も、せん断応力 $\tau$ -せん断ひずみ $\gamma$ 関係は、Bi-Linearで近似できるとものとして計算を進めた。

水平地動加速度については、El Centro 波(1940)のNS成分記録の最初の8秒間を $a_{oz}$ 倍に増幅して用いた。増幅率 $a_{oz}$ が3以下の場合でラーメンが非弾性応答を呈するときは、柱基部の塑性変形が小さな範囲に留まって、はり腹板の塑性せん断変形の影響を十分に捉えられなかったため、 $a_{oz}=4$ として解析した。

また、解析の結果から、2層目のはり中間部腹板 Sec.10 は弾性域に留まったため、以下では、1層目のはり中間部腹板の塑性化に焦点をあてて、パラメータ $\beta_{py1}$ によって変動するラーメンの崩壊性状を考察することとした。

なお、変位に関する結果は骨組高さ $h$ や断面深さ $D$ で無次元表示し、せん断変形角 $\gamma$ 、曲率 $\phi$ および曲げモーメント $M_i$ は、それぞれ降伏せん断ひずみ $\gamma_y$ 、降伏曲率 $\phi_y$ および全塑性モーメント $M_{pi}$ で無次元表示している。ここに、下添え字 $i$ は断面 Sec. $i$ を意味する。

##### 4.1 断面力-ひずみ曲線と水平復元力-変位曲線

まず、 $\beta_{py1}=0.53$ と1.2のときに代表させて、断面力-ひずみ曲線と水平復元力-変位曲線を整理した。1層目の隅角部とはり中間部腹板 (Sec.5)のせん断力 $Q$ -せん断変形角 $\gamma$ 曲線、柱基部 (Sec.1,  $x=0.3D_c$ )の曲げモーメント $M$ -曲率 $\phi$ 曲線、および、水平復元力 $H$ -柱頭部の水平変位曲線を Fig.5 にまとめる。ここで、水平復元力 $H$ は、左右柱基部の水平反力の平均値に負符号を乗じて求めている。

同図(a)の $Q$ - $\gamma$ 曲線から、 $\beta_{py1}=0.53$ のとき、はり腹板 Sec.5 のせん断変形が著しく大きくなり、隅角部腹板は弾性応答を示していることがわかる。

一方、同図(b)からわかるように、 $\beta_{py1}=1.2$ のときは、はり腹板 Sec.5 は弾性応答の範囲にあり、隅角部腹板が塑性域に入っている。また、柱基部の $M$ - $\phi$ 曲線のループは、 $\beta_{py1}=0.53$ のときと比べて、約2.5倍の大きさになっている。このことから、はり中間部腹板の塑性せん断

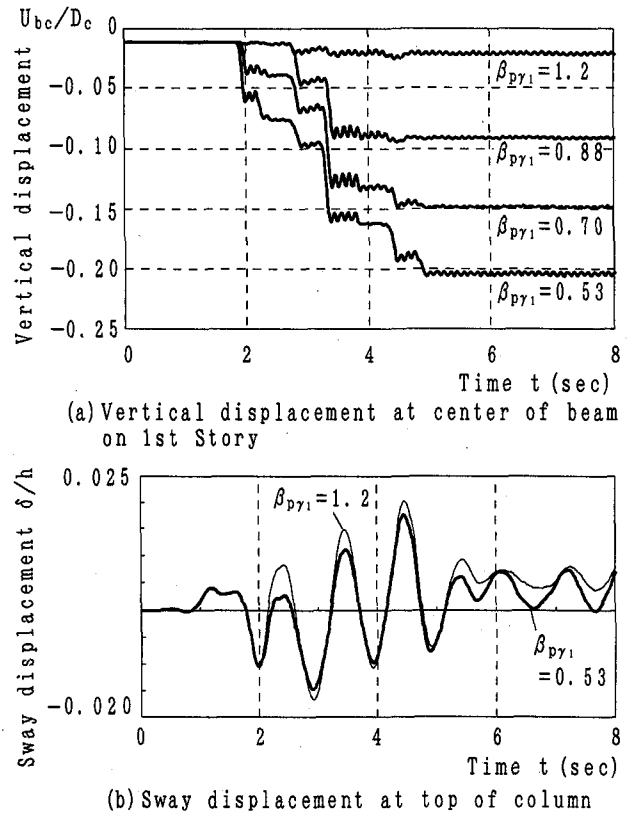


Fig.6 Time history of displacements

変形により、柱基部の塑性化がかなり小さくなることがわかる。

なお、 $H$ - $\delta$ 曲線は、 $\beta_{py1}=1.2$ よりも0.53の場合に、変動が激しく複雑なものになっている。これは、 $\beta_{py1}=0.53$ のときは、はり中間部腹板の塑性化に起因して、はり部材の曲げ・せん断振動が大きくなり、これが水平復元力に影響を及ぼすためである。

以上の $Q$ - $\gamma$ および $M$ - $\phi$ 曲線の変動特性は、文献 4)で示した1層ラーメンの場合とほぼ同様な傾向にある。

##### 4.2 変位の時刻歴応答

###### (1) 1層目はり中央の鉛直変位応答 (Fig.6(a))

この図から、 $\beta_{py1}<1$ のとき、 $t$ 約2~5s範囲で、横荷重載荷位置の鉛直変位応答 $U_{bc}$ が大きくなっており、はり腹板の塑性せん断変形が進行していることがわかる。この変位は、はり腹板の塑性せん断変形が生じることによって鉛直下方向に累積し、 $\beta_{py1}$ が小さくなると著しくなっている。

###### (2) 2層目柱頭部の水平変位応答 (Fig.6(b))

この図から、はり腹板が塑性化した時刻 $t$ 約2~5sの範囲において、 $\beta_{py1}=0.53$ の水平変位応答は、 $\beta_{py1}=1.2$ のときよりも若干小さくなっていることがわかる。

この水平変位応答の大小については、文献 4)でも指摘したように、崩壊メカニズムの違いが減衰性状に及ぼす影響を明らかにして、検討する必要がある (4.4 参照)。

##### 4.3 柱基部とはり腹板の塑性ひずみの時刻歴応答

はり腹板 Sec.5 の塑性せん断ひずみ $\gamma_p$ と左側柱基部の

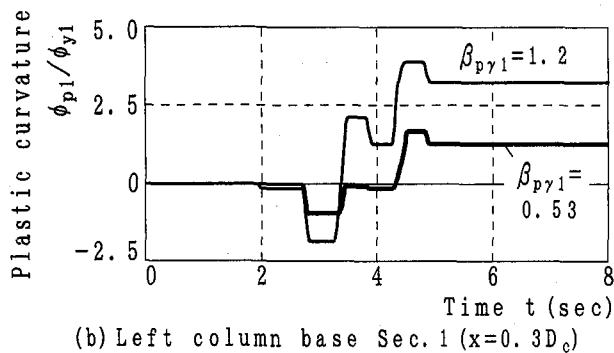
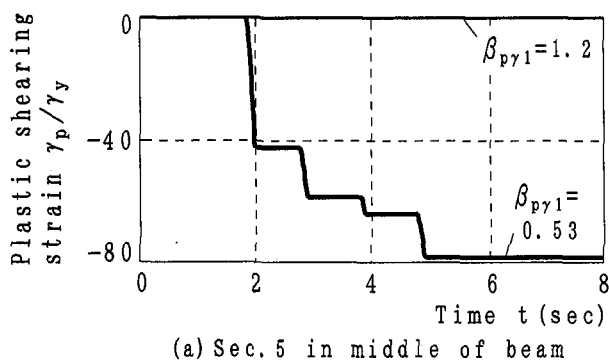


Fig.7 Time history of plastic strains

塑性曲率 $\phi_p$  ( $x=0.3D_c$ )の時刻歴応答を Fig.7 に比較する。

この図から、 $\beta_{p\gamma_1}=0.53$  の場合、柱基部の塑性曲げ変形よりも、はり中間部腹板の塑性せん断変形が先行して起こっていることがわかる ( $t$ =約 1.9s)。同図(b)を見ると、はり腹板の塑性化により、柱基部の塑性変形応答が小さくなるがよくわかる (Fig.5 参照)。

#### 4.4 塑性化が著しい箇所のひずみ速度の時刻歴応答

上述の結果からも明らかなように、柱基部とはり腹板は、わずかな時間内に塑性変形し、そのときの両者の累積ひずみ量には、かなり大きな差異がある。

この点を考察するために、柱基部 Sec.1 ( $x=0.3D_c$ )の曲率速度 $\dot{\phi}$ とはり腹板 Sec.5 のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の時刻歴応答を調べた。その結果を Fig.8 に示す。

同図からわかるように、柱基部のひずみ速度 $\dot{\phi}$ は $\beta_{p\gamma_1}$ の減少に伴って小さくなり、はり腹板のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は逆に大きくなっている。 $\dot{\phi}$ は高々 0.001/cm/sec であるのに対して、 $\dot{\gamma}$ は $\beta_{p\gamma_1}=0.53$ のときに約 0.7 rad/sec に達している。

ここで、柱基部 Sec.1 の降伏曲率は $\phi_{y1}=3.571 \times 10^{-3}$ /cm であり、0.001/cm/sec の速度は、曲げ降伏ひずみを起こすのに要する時間に換算すると約 0.036sec になる。一方、

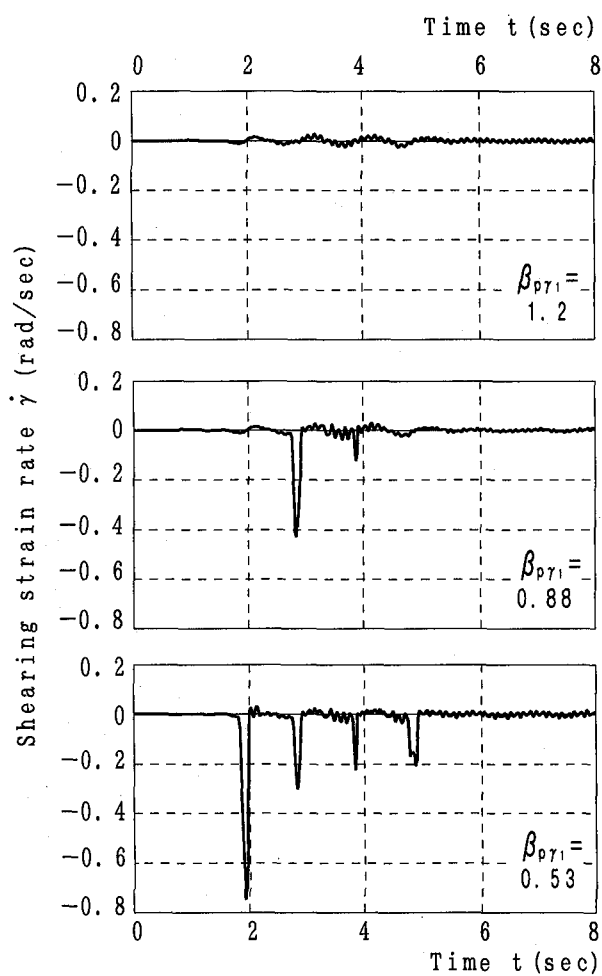
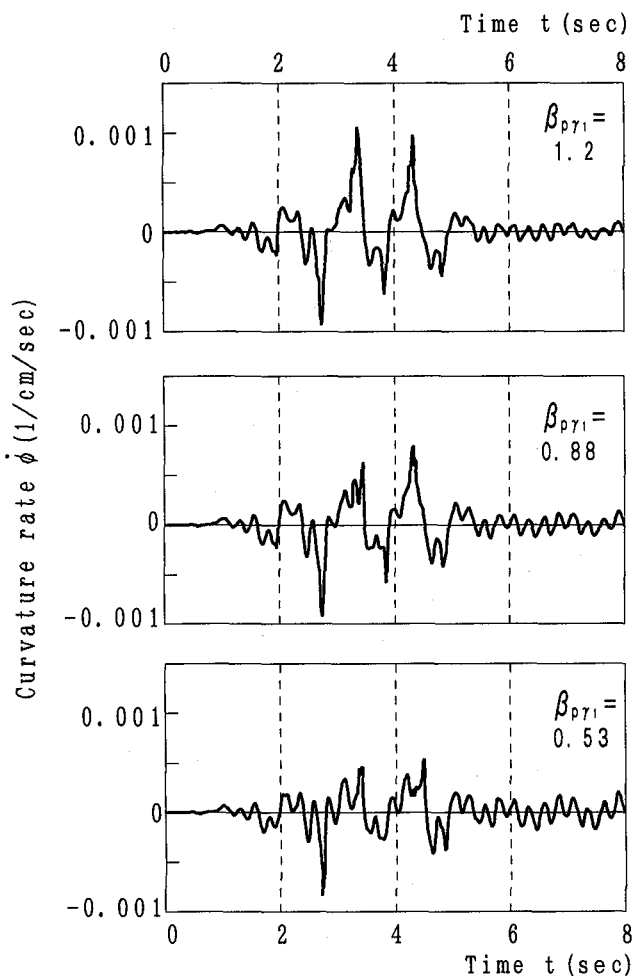


Fig.8 Time history of strain rates at column base part and middle of beam

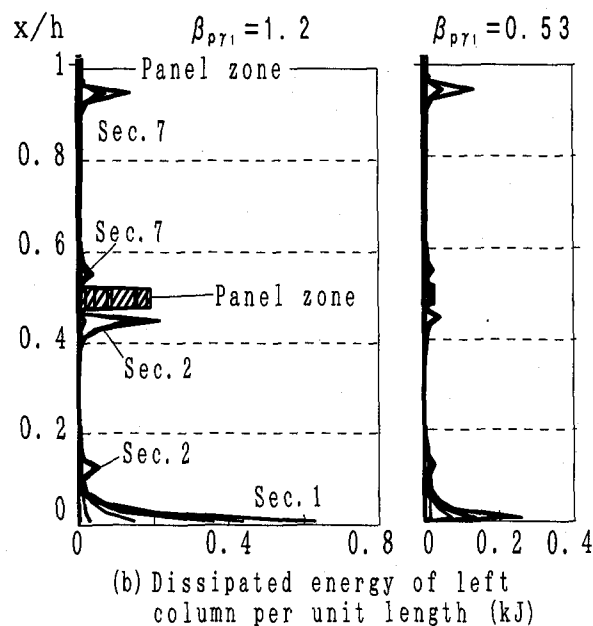
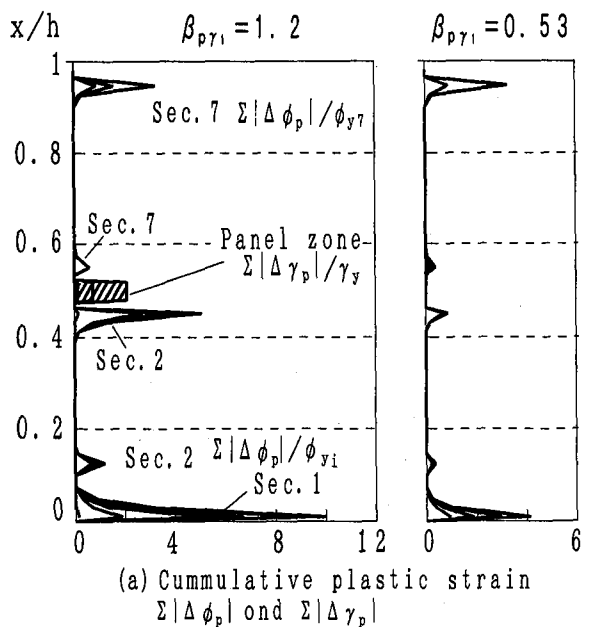
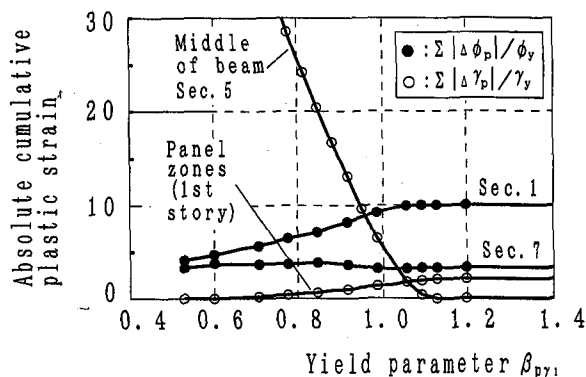


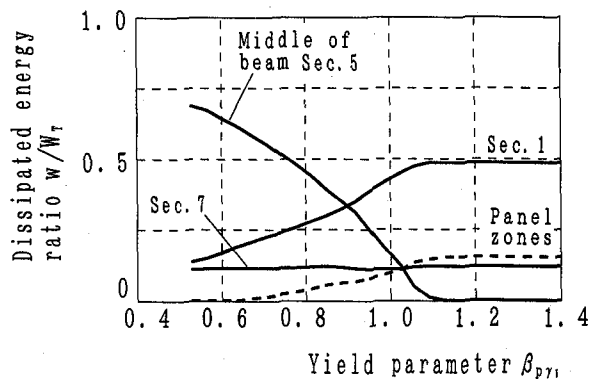
Fig.9 Distribution of cumulative plastic strain and dissipated energy of left column

$\beta_{py1}=0.53$  のとき、腹板 Sec.5 の降伏せん断ひずみは  $\gamma_y=0.00171\text{rad}$  であり、 $0.7\text{rad/sec}$  の速度は、 $\gamma_y$  を生じさせる時間に換算して、約  $0.0024\text{sec}$  となる。この結果から、はり中間部腹板が塑性化する際のせん断ひずみ速度は、曲率速度に比べて、かなり大きくなると言える。

したがって、はり腹板で塑性せん断変形を起こすラーメンの非弾性地震応答については、ひずみ速度の影響を考慮した数値解析や実験を行う必要があると考える。とくに、ひずみ速度の影響によって、せん断力  $Q$ -せん断変形角  $\gamma$  の履歴ループが変動し、はり中間部腹板の履歴減衰（履歴エネルギー）に差違が現れて、4.2(2)で示した水平変位応答はかなり異なったものになることが予想される。はり中間部腹板の塑性せん断変形の良否を議論していく上で、今後の重要な検討課題である。



(a) Absolute cumulative plastic strain



(b) Dissipated energy ratio of each cross-section

Fig.10 Variation of plastic strain and dissipated energy of each cross-section of frames with parameter  $\beta_{py1}$

#### 4.5 柱の各断面の塑性ひずみと消費エネルギーの分布

ラーメンの左柱に着目し、柱頭部の水平変位が反転するときの塑性ひずみの累積量と消費エネルギーの分布を調べた。その結果を Fig.9 に示す。ここに、塑性ひずみについては、隅角部腹板の増分塑性せん断変形角、ならびに、柱断面 Secs.1-3 と Secs.7-8 の増分塑性曲率の最大値の各絶対値和をとり、それぞれ  $\Sigma|\Delta\gamma_p|$  および  $\Sigma|\Delta\phi_p|$  と表している。また、エネルギーについては、隅角部も含めて、柱部材の単位長さあたりの消費エネルギーを求めた。

同図(a)からわかるように、はり腹板 Sec.5 が弾性状態にある  $\beta_{py1}=1.2$  の場合、柱基部と柱断面 Sec.2 上部に塑性変形が集中し、また1層目の隅角部腹板も塑性化している。しかし、はり腹板が著しく塑性化した  $\beta_{py1}=0.53$  のときには、1層目の柱の塑性変形は25%程度に小さくなり、隅角部腹板は弾性域に留まっている。はり腹板が大きく塑性化したことの影響が大きいことがわかる。

また、2層目の柱断面 Sec.7 を見ると、 $\beta_{py1}=0.53$  と  $1.2$  の塑性ひずみは、ほとんど変化していない。このことから、1層目のはり腹板の塑性せん断変形が2層目の柱の塑性変形に及ぼす影響は小さいと言える。

同図(b)から、消費エネルギーの分布は、塑性ひずみの累積分布にほぼ対応していることがわかる。

#### 4.6 パラメータ $\beta_{py}$ によるラーメンの崩壊モードの変動と はり中間部腹板の塑性化の判定に関する考察

##### (1) ラーメンの崩壊モードの変動

本文で解析した結果から、柱基部 Sec.1 と 2 層目の断面 Sec.7, および、1 層目の隅角部腹板に着目し、塑性ひずみの累積量と消費エネルギー分担率の変動を調べた。塑性ひずみとしては、4.5 と同様に、増分塑性ひずみの絶対値和をとり、Sec.1 と Sec.7 内ではその最大値をとった。エネルギーについては、柱断面 Sec.1 と Sec.7, 隅角部腹板(1,2 層目), および、はり腹板 Sec.5 の消費エネルギーを求めて、ラーメン全体の履歴エネルギー  $W_T$  に対する割合を整理した。

式(2)から求めたパラメータ $\beta_{py}$ によって、これらの諸量がどのように変動するかを Fig.10 にまとめる。

同図から、 $\beta_{py}$ によるラーメン各部の塑性ひずみの累積とエネルギー分担の変動特性として、前節までの結果と同様のことを考察できる。すなわち、1 層目はり腹板の塑性せん断変形は、柱基部と 1 層目の隅角部腹板の塑性ひずみの累積を小さくする効果大きい。とくに、 $\beta_{py}=0.53$  のときには、ラーメンは、1 層目のはり中間部腹板でのみ塑性変形するような傾向にある。

##### (2) $\beta_{py}$ によるはり中間部腹板の塑性化判定に関する考察

Fig.10(a)から、はり中間部腹板 Sec.5 は、 $\beta_{py}>$ 約 1.1 の範囲で弾性域にあり、 $\beta_{py}<$ 約 1.1 の範囲で非弾性域に入っていることがわかる。とくに、 $\beta_{py}<$ 約 1 の範囲では、塑性ひずみの累積量が著しく大きくなる傾向がある。

これらの結果は、はりに中間横荷重が作用する 1 層ラーメンについて解析した文献 4) の結果とほぼ同様である。したがって、はり腹板が非弾性域に入るときの $\beta_{py}$ を正確に捉えることは難しいが、 $\beta_{py}>$ 約 1.1 とすれば、はり腹板をほぼ弾性状態に留めることができる。また、 $\beta_{py}<$ 約 1 の範囲では、塑性変形の累積が著しくなる。

なお、 $\beta_{py}$ を求めるときに、水平地動に関係する  $m_{qe}$  (式(4), 3.1(2)参照)を弾性線形解析(静的)から算出したが、2 次以上の振動モードがラーメンの弾性応答に及ぼす影響が大きいときは、想定する地動加速度ごとに応答解析を行って、はり腹板の塑性化を直接判定する必要があると考える<sup>4)</sup>。この点は今後の検討課題である。

最後に、4.4 で指摘したように、はり腹板の塑性せん断変形を伴うラーメン崩壊モード(損傷モード)は、ひずみ速度の影響を受けることが予想される。この点を考慮した実験や解析が今後必要になる。

## 5. 結論

本研究は、2 層門形ラーメンの地震応答解析を行い、1 層目はりの中間部腹板において、塑性せん断変形が起こるときの非弾性性状について明らかにしたものである。本文で得られた主な結論は以下のとおりである。

1) はり中間部の塑性せん断変形を調べるためのパラメー

タ $\beta_{py}$ の算出手順を具体的に示した。

- 2) 1 層目のはり中間部で塑性せん断変形が著しくなると、1 層目の隅角部腹板の変形挙動をほぼ弾性応答の範囲に留めて、かつ、1 層目の柱基部の塑性変形を小さくする効果が大きい。
- 3) 1 層目のはり中間部腹板の塑性せん断変形が 2 層目の柱の塑性変形性状に及ぼす影響は小さい。
- 4) はり中間部腹板の塑性変形が著しくなると、そのせん断ひずみ速度は、柱基部の曲率速度に比べて、かなり大きくなる。
- 5)  $\beta_{py}>$ 約 1.1 に設定すれば、1 層目はり腹板はほぼ弾性状態に留まり、 $\beta_{py}<$ 約 1 の範囲では塑性せん断変形が集中し始める。
- 6) 上記 4) の結果から、はり中間部腹板の塑性せん断変形を伴ったラーメンの損傷メカニズムをより正確に捉えるためには、今後、腹板の塑性せん断変形の数値効果を考慮して、解析・実験を進めていく必要がある。

謝辞：本研究は、平成 10 年度の文部省科学技術研究費・基盤研究(C)、ならびに、大同工業大学の平成 10 年度特別研究費の補助を受けたことを付記し、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 中井 博, 河井章好, 吉川 紀, 北田俊行, 酒造敏廣：鋼製ラーメン橋脚の実績調査(上), (下), 橋梁と基礎, Vol.16, No.6, pp.35~40, 1982 年 6 月, および, Vol.16, No.7, pp.43~49, 1982 年 7 月。
- 2) 酒造敏廣：水平地動を受ける鋼変断面片持ち柱の動的弾塑性挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.501, pp.75~84, 1994 年 10 月。
- 3) 酒造敏廣, 事口壽男, 長田好夫：鋼変断面ラーメンの非弾性地震応答性状と崩壊モードに関する研究, 構造工学論文集, Vol.43A, 土木学会, pp.205~216, 1997 年 3 月。
- 4) 酒造敏廣：せん断崩壊型はり部材を有する鋼門形ラーメンの非弾性地震応答性状に関する研究, 構造工学論文集, Vol.44A, 土木学会, pp.169~178, 1998 年 3 月。
- 5) 若林 實, 柴田道生：筋違部材の座屈後の挙動に関する研究(その 4), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 16 号, pp.201~204, 1976 年 6 月。
- 6) 中井博, 酒造敏廣, 橋本良之：せん断遅れ現象を考慮した鋼製ラーメン隅角部の限界状態設計法について, 土木学会論文集, No.455/I-21, pp.95~104, 1992 年 10 月。
- 7) 酒造敏廣, 事口壽男：鋼製ラーメン隅角部の崩壊性状と変形性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.37A, 土木学会, pp.121~134, 1991 年 3 月。

(1998 年 9 月 18 日受付)