

# ひずみ速度を考慮したはり崩壊型二層ラーメンの非弾性地震応答解析

酒造 敏廣

正会員 工博 大同工業大学教授 工学部都市環境デザイン学科 (〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

鋼材のひずみ速度依存性を考慮して、一層目はり中央部がせん断崩壊する二層門形ラーメンの非弾性地震応答解析を行っている。まず、余応力理論に従った一軸粘塑性応力-ひずみ曲線の概要を述べる。つぎに、二層ラーメンの地震応答解析を行い、一層目はり中央腹板に塑性せん断変形が集中するラーメンの損傷メカニズムの変動性状を調べる。主として、はり中央腹板の局所的な塑性変形によるひずみ速度増大によって、変位や復元力、柱基部や隅角部の累積ひずみとエネルギー消費の性状がどのように変動するかについて考察する。

**Key Words:** strain rate, elasto-viscoplastic, earthquake response, two-story steel frame, shear collapse of beam

## 1. まえがき

筆者らは、これまでに、一、二層門形ラーメン橋脚を対象にして、はり中間部腹板がせん断崩壊するときの地震応答性状を数値解析によって調べてきた<sup>1)~3)</sup>。その中では、この種の崩壊モードの利点として、はり部材断面の抵抗せん断耐力が頭打ちになるため、脆性破壊の危険性のある隅角部付近の塑性化を軽減できること、および柱基部の損傷も抑えられることをあげた。

また、せん断耐力が小さいはり中間部では塑性変形が局所的に大きくなるためにひずみ速度が著しくなる。この点に着目し、余応力理論<sup>4)~6)</sup>に基づいた一軸粘塑性応力-ひずみ曲線を誘導し、ひずみ速度依存性を考慮した一層門形ラーメンの地震応答解析を行い、ラーメン各部の非弾性応答に及ぼすひずみ速度の影響を明らかにした<sup>7)</sup>。このときの数値解析では、塑性せん断変形するはり腹板には、消費エネルギーが最大になる最適せん断耐力が存在することも指摘した。

本研究では、二層門形ラーメンの地震応答解析を行い、一層目はり中央部がせん断崩壊するときのひずみ速度上昇により、ラーメン各部の弾塑性応答性状がどのように変動するかを考察するものである。

## 2. 粘塑性応力-ひずみ曲線、解析モデル、および解析方法

### (1) 鋼材の粘塑性応力-ひずみ曲線<sup>4)~7)</sup>

本研究では、ひずみ速度変動による鋼材の降伏点上

昇や応力緩和を考慮するために、文献7)で表した粘塑性一軸応力 $\sigma$ -ひずみ $\varepsilon$ 曲線を用いている。

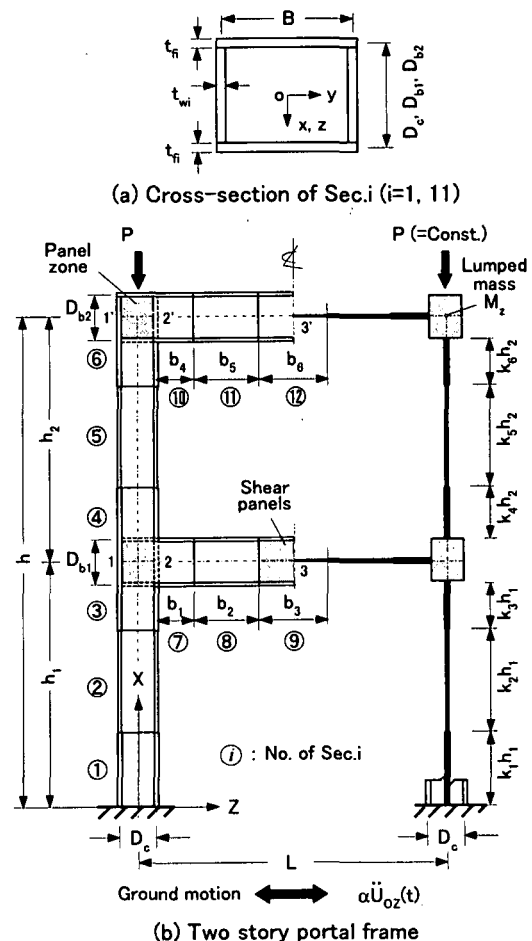


図1 中間はり崩壊型二層門形ラーメンの解析モデル

表1 二層ラーメンの寸法諸元と各部の降伏点 ( $\beta_{py1}=1$ )

Cross-section <i>i</i>	Items	Depth $D_i$ (cm)	Thickness (cm)		Yield point $\sigma_{fyi}$ ( $\sigma_{wyi}$ ) (MPa)
			$t_{fi}$	$t_{wi}$	
Sec.1		96	3.20	2.56	314 (314)
Secs.2, 5		96	2.60	2.08	314 (314)
Secs.3, 4, 6		96	5.06	5.06	564 (564)
Secs.7, 10		120	3.60	2.88	564 (564)
Secs.8, 11		120	3.60	2.88	314 (314)
Secs.9, 12		120	—	0.90	— (322)

Notes:  $h=30m, h_1=h_2=15m, L=12m, B=120cm, M_2=1.09 \times 10^5$  kg,  $P=0.08N_{y1}, N_{y1}$ : Squash force of Sec.1,  $\sigma_{fyi}$  and  $\sigma_{wyi}$ : Yield point of flange and web plates, respectively, of Sec.*i*,  $k_1=0.23, k_2=0.69, k_3=0.04, k_4=0.004, k_5=0.84, k_6=0.04, b_1=b_4=0.14L, b_2=b_5=0.27L, \text{ and } b_3=b_6=0.1L$ .

まず、静的な $\sigma$ - $\epsilon$ 曲線として、等方・移動硬化を簡易的に考慮したBi-Linear型を仮定する<sup>1)~3), 7)</sup>。

つぎに、一軸粘塑性を表す $\sigma$ - $\epsilon$ 関係の基本式として、次式を仮定する<sup>4)</sup>。

$$E \dot{\epsilon}_p = f(X) \quad (1)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_p$ は塑性ひずみ速度、 $E$ はヤング係数 ( $=2.05 \times 10^5$ MPa)、 $f(X)$ はひずみ速度関数である。また、 $X$ は粘塑性域でひずみ速度を考慮した応力 $\sigma$ と静的曲線 $g(\epsilon)$ との差を表す余応力である。

$$X = \sigma - g(\epsilon) \quad (2)$$

式(1)、(2)を用いると、 $X$ に関する一階微分方程式が次のように得られる<sup>4)~7)</sup>。

$$\dot{X} + f(X) = E(1 - \mu) \dot{\epsilon} \quad (3)$$

ここで、 $\mu$ は静的曲線 $g(\epsilon)$ の塑性域勾配 ( $=0.01$ ) である。

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に対応する余応力 $X$ の上限値 $X_s$ として、

$$X_s = S \cdot \ln\left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_*}\right) \quad (4)$$

を用いると、 $f(X)$ は次式で与えられる。

$$f(X) = E(1 - \mu) \dot{\epsilon}_* (e^{X/S} - 1) \quad (5)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_*$ 、 $S$ は材料定数であり、 $\dot{\epsilon}_* = 1.5 \times 10^{-5}/s$ 、 $S = 0.0193\sigma_y$ とおいている<sup>7)</sup>。

式(3)を解いて、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で時間 $t$ とともに変動する余応力 $X$ を求め、それを静的曲線に加えることにより、粘塑性域での応力 $\sigma$ が算定できる。

## (2) 解析モデル

本研究では、図1に示すように、定鉛直荷重 $P$ の作用下で水平地動 $\alpha \dot{U}_{ox}(t)$ を受ける二層門形ラーメンを解析対象とした。柱とはりは、断面Sec.1~Sec.12からなる。Sec.9は、腹板に塑性せん断変形の発生を想定し

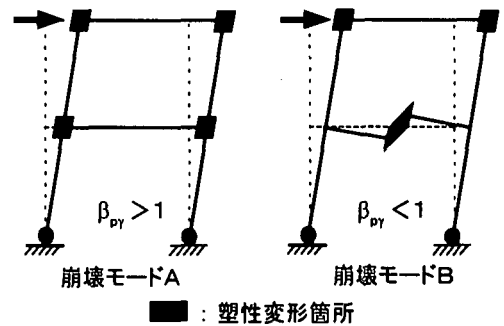


図2 パラメータ $\beta_{py1}$ で考慮したラーメンの塑性変形パターン (式(6)参照)

た断面 (Shear panels) である。

解析モデルの寸法諸元と降伏点等を表1 ( $\beta_{py1}=1$ )にまとめる。

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水平並進運動に対する集中質量 $M_2$ を仮定して、ラーメンを2自由度の振動体にモデル化した。質量 $2M_2$ を持つ1自由度系に置換すると、ラーメンの固有周期は約0.98sとなる。水平地動加速度としてはEl Centro波(1941)のNS成分記録の最初の8秒間を4倍 ( $=\alpha$ )に増幅して用いた。これは、はり腹板が弾性状態に留まるラーメンに対して、柱頭部の水平変位の弾性応答値が降伏変位の約2.8倍になる加速度に相当する。

## (3) 一層目はり中央腹板のせん断崩壊判定パラメータ $\beta_{py1}$

図2に示すように、ラーメンの塑性変形が①柱基部と一、二層目の隅角部で進むとき、②柱基部と一層目はり中央、および二層目隅角部で進むときの塑性崩壊荷重を比較することにより、一層目はり中央腹板にせん断崩壊が起こる条件を次のパラメータ $\beta_{py1}$ で表した。

$$\beta_{py1} = \frac{M_{p1} + M_{ps2} + 0.5(l/b_3)M_{pb1}}{M_{p1} + M_{ps1} + M_{ps2}} \cdot \frac{h - D_{b1} - 0.5D_{b2}}{h - 0.5D_{b2}} \quad (6)$$

ここに、 $M_{pi}$ : Sec.*i*の全塑性モーメント、 $M_{psi}$ : *i*層目の隅角部腹板の塑性モーメント、 $M_{pb1}$ : 一層目はり中央腹板の塑性モーメントである。

このパラメータを用いると、 $\beta_{py1} < 1$ の範囲で、一層目の隅角部腹板は弾性域に留まり、はり中央腹板に塑性せん断変形が集中する。

## (4) 解析方法

ラーメンの動的応答解析は、文献1)、7)に示した方法に従っている。本文では、 $\beta_{py1} = \text{約 } 0.68 \sim 1.2$ の範囲でパラメトリック解析を行う。ラーメンの弾性応答が同一になるように、部材寸法諸元を一定にして、 $\beta_{py1}$

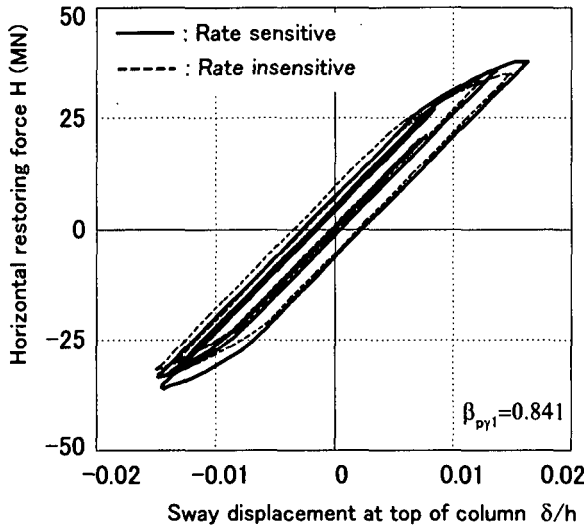


図3 水平復元力  $H$  - 水平変位  $\delta$  曲線

値に対応するように、一層目はり中央腹板 Sec.9 の降伏点を変化させている。

### 3. 解析結果と考察

#### (1) 水平復元力 $H$ - 水平変位 $\delta$ 曲線

まず、 $\beta_{py1} = 0.841$  のラーメンについて、ひずみ速度を考慮したときと考慮しないときの  $H$ - $\delta$  曲線を図3に比較する。ここで、 $\beta_{py1} = 0.841$  は、はり中央 Sec.9 が塑性化し、柱基部の損傷が  $\beta_{py1} = 1.2$  のときに比べて約40%に小さくなるラーメンに相当する ((4)参照)。

この図からわかるように、ひずみ速度を考慮すると、考慮しないときに比べて最大復元力が10~15%程度減少し、水平変位応答も若干小さくなっている。

#### (2) 一層目はり中央のせん断力 $Q$ - せん断変形角 $\gamma$ 曲線

上と同じ  $\beta_{py1} = 0.841$  のラーメンについて、はり中央のせん断力  $Q$  - せん断変形角  $\gamma$  曲線を図4に示す。

この図から、腹板のせん断変形角が著しくなっていることがわかる。ひずみ速度を考慮する場合としない場合では、正負の最大変形角の応答値に約30%の差異が見られる。しかし、 $Q$ - $\gamma$ の最大ループの大きさはほぼ同じであり、ひずみ速度を考慮すると  $Q$  -  $\gamma$  曲線が  $\gamma$  の正方向にシフトした形になっている。ひずみ速度を考慮すると抵抗せん断力が約5~15%大きくなっているが、ひずみ硬化による抵抗せん断力の上昇の方が大きくなる傾向がある。

#### (3) ラーメンの最大せん断変形速度と柱頭部の最大水平変位速度の変動

はり腹板 Sec.9 のせん断変形角速度  $\dot{\gamma}$  および柱頭部の水平変位速度  $\dot{\delta}$  の各絶対最大値と  $\beta_{py1}$  の関係を図5

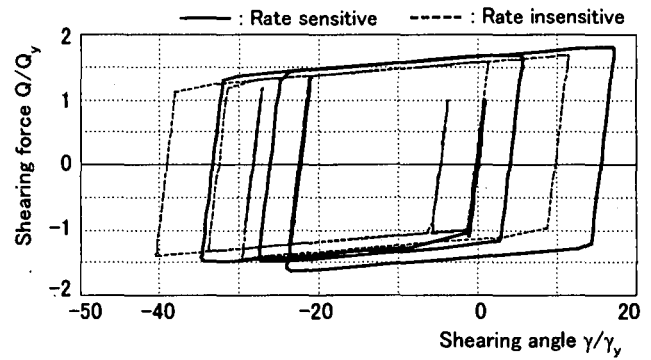


図4 一層目はり中央腹板のせん断力  $Q$  - せん断変形角  $\gamma$  曲線 ( $\beta_{py1} = 0.841$ )

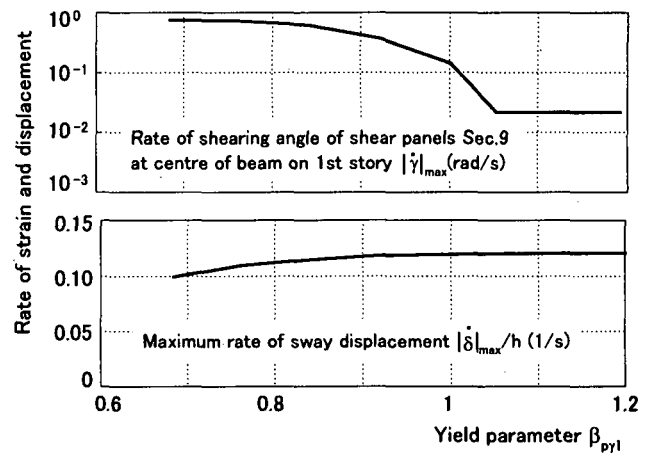


図5 一層目はり中央腹板の最大せん断変形速度と柱頭部の最大水平変位速度の変動

に示す。

この図から、はり中央腹板のせん断変形角速度は、塑性化し始める  $\beta_{py1} =$  約 1~1.05 のときに大きくステップし、その後は  $\beta_{py1}$  の減少とともに、約 0.8 rad/s まで漸増していることがわかる。

また、ラーメンの変形速度は  $\beta_{py1}$  の減少とともに小さくなり、最大で約25~30%も抑えられている。これは、一層ラーメンについて解析した文献7)の結果と同様である。はり中央腹板が塑性化することにより、はり部材の抵抗せん断力が頭打ちになり、その結果としてラーメンの水平変位応答が抑えられるのである。

#### (4) ラーメン各部の損傷と消費エネルギーの変動性状

ラーメン各部の損傷を表す指標として、増分塑性曲率とせん断変形角の絶対値和、それぞれ  $\Sigma|\Delta\phi_i|/\phi_{yi}$  および  $\Sigma|\Delta\gamma|/\gamma_y$  を用いる<sup>1)~3)</sup>。ここに、 $\phi_{yi}$  は Sec.  $i$  の降伏曲率、 $\gamma_y$  は隅角部とはり中央腹板の降伏せん断ひずみに対応する。

パラメータ  $\beta_{py1}$  によるラーメン各部の損傷と消費エネルギーの変動を図6にまとめる。

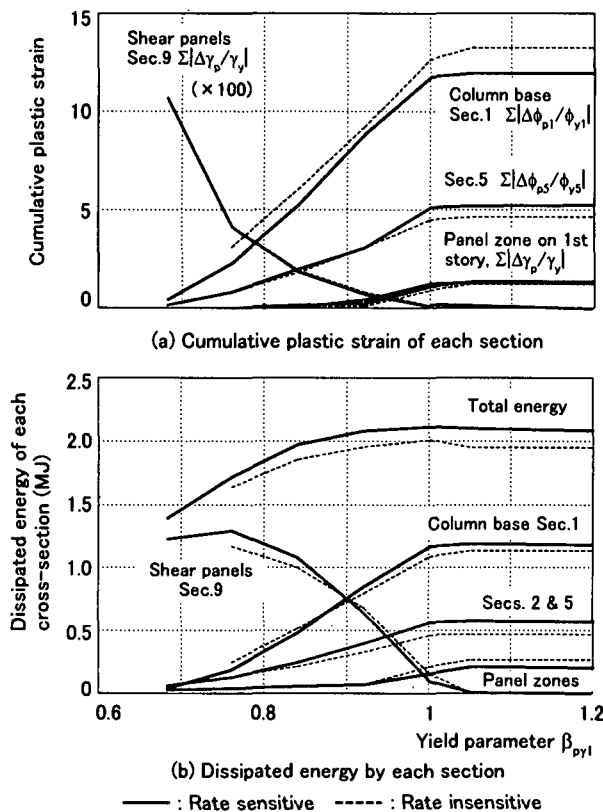


図6 ラーメン各部の損傷と消費エネルギーの変動

この図から以下のことがわかる。

まず、各部の累積ひずみとそれに対応する消費エネルギーの $\beta_{pyl}$ による変動は、ひずみ速度を考慮した場合、考慮しない場合ともに同様な傾向を呈している。ひずみ速度の影響を考慮すると各部の塑性変形量には約5~11%の増減が現れるが、その影響は比較的小さい。

つぎに、 $\beta_{pyl} < 1$ の範囲では、柱基部、一、二層目の隅角部とその近傍断面で塑性ひずみの累積量が小さくなっている。これは、はり中央Sec.9に塑性せん断変形が集中する効果により、一層目はり部材のせん断力が頭打ちになり、一層目隅角部に作用する曲げモーメント増大が抑えられるためである。

はり中央Sec.9に着目すると、 $\beta_{pyl} = \text{約} 0.77$ のときに消費エネルギーが最大になっている。 $\beta_{pyl} < \text{約} 0.77$ は腹板の塑性変形が大きくなるだけで消費エネルギーの増加が期待できない範囲になる。はり腹板に塑性せん断変形を認める設計法を模索するときには、このときの腹板のせん断耐力が下限値となり、腹板の板厚、鋼種を定めるのに目安になると考える。

#### (5) ラーメンの地震応答に及ぼすひずみ速度の影響

以上の結果から、一層目はり中間部の塑性せん断変形によるひずみ速度増大が二層ラーメンの地震応答性状に及ぼす影響は小さいと結論できる。

今後、はりのせん断崩壊型ラーメンの耐震設計法を

模索していくとき、実際に期待できる腹板の塑性変形性能に対応させて、はり腹板の最適な抵抗せん断力を $\beta_{pyl} < 1$ の範囲で設定することが必要になると考える。

#### 4. 結論

本研究は、ひずみ速度の影響を考慮して二層門形ラーメンの地震応答解析を行ったものである。本文で得られた主な結論を以下にまとめる。

- 1) 一層目はり中央腹板の塑性せん断変形速度は、0.8 rad/s まで大きくなった。
- 2) 塑性せん断変形するはり中央腹板には、消費エネルギーを最大にする下限のせん断耐力が存在する。
- 3) 一層目はり中央腹板の塑性せん断変形には、柱基部や一、二層目隅角部付近の損傷を小さくする効果がある。
- 4) 一層目はり中央腹板で塑性変形が集中してひずみ速度が増大しても、その抵抗断面力が小さく、見かけ上ひずみ硬化の影響が大きく現れるため、ひずみ速度によるせん断耐力上昇が二層ラーメン全体の地震応答に及ぼす影響は小さい。

#### 参考文献

- 1) 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, 1997年3月.
- 2) 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.
- 3) 酒造敏廣, 山田 幸: はり崩壊型門形ラーメンの崩壊メカニズムと非弾性地震応答性状に関する研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.663~673, 2000年3月.
- 4) Malvern, L.E.: The propagation of longitudinal waves of plastic deformation in a bar of material exhibiting a strain-rate effect, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol.18, No.2, pp.203-208, June 1951.
- 5) Manzocchi, G.M.E.: The Effect of strain rate on steel structures, MSc Dissertation, *Civil Engineering Department, Imperial College of Science, Technology and Medicine*, August 1991.
- 6) Izzuddin, B.A. and Fang, Q.: Rate-sensitive analysis of framed structures, Part I: Model formulation and verification, *An International Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol.5, No.3, pp.221-237, 1997.
- 7) 酒造敏廣: せん断崩壊型はり部材を持つ鋼門形ラーメンの非弾性地震応答に及ぼすひずみ速度の影響, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.47A, pp.771~782, 2001年3月.

(2001. 5. 25 受付)