

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

Collapse Mechanism and Inelastic Earthquake Response of
Steel Portal Frames with Collapse of Beam

酒造 敏廣*, 山田 幸**

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工学研究科修士課程 建設工学専攻在学中 (〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

This paper studies the inelastic earthquake response of steel portal frames with the collapse of beam. The variation of the collapse mechanisms of frames with sway response is investigated under the condition of increasing horizontal loads as well as seismic load. The numerical results demonstrate the fundamental plastic mechanism of frames with the shear collapse in the middle of beam and another collapse mechanism, which includes the shear yielding of panel zones in the beam-to-column connections. This mechanism is caused by the increase in shearing force due to strain hardening in the middle of beam. Then, the plastic bending deformation of the partially tapered sections set in beam near the beam-to-column connections can delay the increase in shearing force in beam. The resulting panel zones of connection remain almost elastic state.

Key Words: portal frame, shear collapse of beam, partially tapered member, earthquake response

1. まえがき

兵庫県南部地震では、従来指摘されていなかった鋼製ラーメン橋脚¹⁾の損傷の一つとして、はり中央腹板(以下、*Shear panels*とも記す)のせん断崩壊がクローズアップされた。

筆者らは、この損傷に着目して、これまでに、1層および2層門形ラーメンの非弾性地震応答解析を実施し^{2)~5)}、はりと隅角部のせん断力を関連づけて、その発生要因を調べてきた。そして、変断面ばり中央のせん断崩壊は、せん断耐力が小さいはり中央のせん断降伏が、耐力の大きい隅角部腹板(以下、*Panel zone*とも呼ぶ)のそれに先行したことに起因することを指摘した。また、この種の損傷が予測されていなかった理由として、非弾性応答を呈するラーメン各部の塑性化発生の順序が耐震設計の中で十分に考慮されていなかったことを挙げた。さらに、はり中間部に作用する鉛直荷重の有無を考慮してはり中央腹板の塑性化判定方法を提案し、そのせん断降伏が起こると隅角部近傍の塑性化が軽減されること等、基本的な弾塑性応答特性を明らかにした。

ところで、はり中央腹板のように、地震時に繰り返しせん断力を受ける桁あるいは鋼板の弾塑性履歴性状については、武田^{6),7)}、高橋、品部⁸⁾、福本⁹⁾らの実験的研

究がある。武田、福本らは、幅厚比が約110~200の間にある軟鋼あるいは低降伏比点鋼からなる腹板の弾塑性挙動の特徴として、せん断座屈後の斜め張力場発生により、スリップ型の履歴曲線が顕著に現れることを示している。また、高橋らは、種々な幅厚比の鋼板に対して、繰り返しによる耐力上昇~履歴ループの拡大~スリップ型履歴曲線に移るまでのせん断変形性状を考察している。とくに、幅厚比が小さいと、せん断耐力は、ひずみ硬化によって、降伏せん断力の約2.5倍にも達する場合があることが示されている。

このような腹板の耐力上昇は、はり中央がせん断降伏したラーメンの早期の崩壊メカニズムとその後のメカニズムをかなり異なったものにし、各部の損傷に大きな影響を及ぼす可能性がある⁵⁾。この点については、損傷を一つの部材に集中させて、その他の部材の損傷を軽微に留める一種のヒューズ機能を持たせた耐震設計法を模索していく上で明らかにしておく必要がある^{2)~4)}。

本研究は、主として、はり中央腹板がせん断降伏する1層門形ラーメンに着目し、曲げを受けて塑性変形が一樣に広がる部分テーパー構造^{10)~12)}を隅角部近傍のはり断面に用いることも考えて、はりのせん断耐力の変動によって起こる崩壊メカニズムの変化を数値解析によって究明するものである。

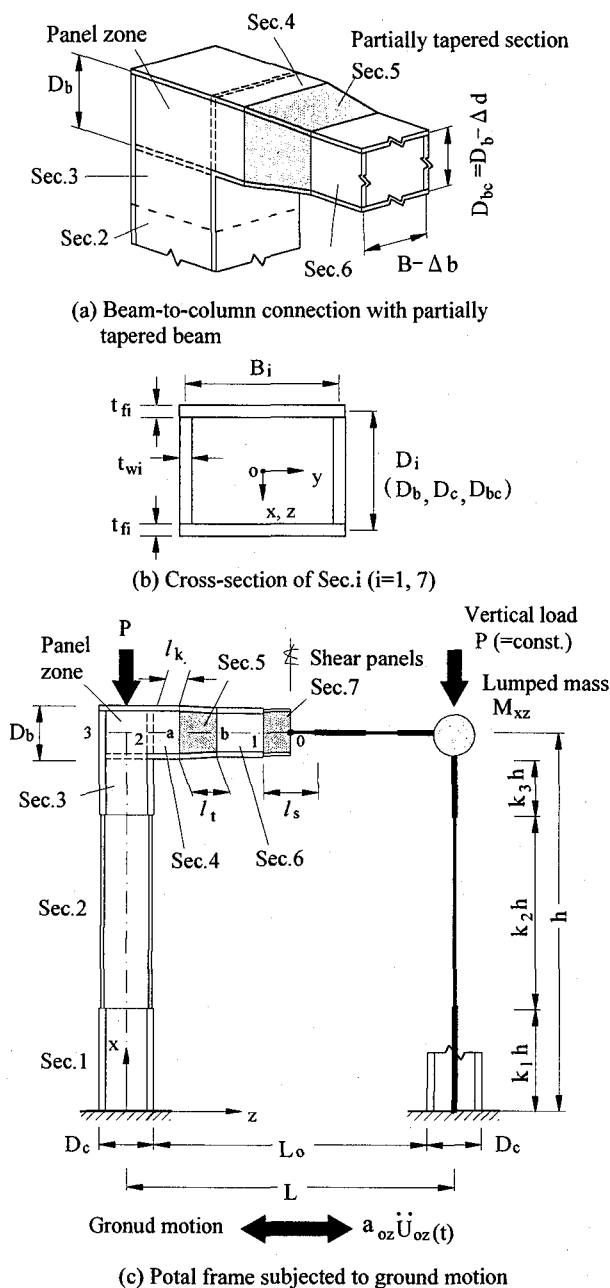


Fig.1 Numerical model of portal frame with partially tapered beam

まず、漸増水平荷重を受けるラーメンの弾塑性解析を行う。そして、はり中央のせん断降伏とその後のひずみ硬化、ならびに、はりの部分テーパ部の塑性化により、ラーメンの崩壊メカニズムがどのように変化するかを調べる。

つぎに、この結果を踏まえて、地震応答解析を行い、はり中央とテーパ部の塑性化に起因するラーメン各部の塑性ひずみや消費エネルギーの変動特性を調べる。

最後に、脆性破壊の危険性がある隅角部の塑性化を回避するという観点から¹³⁾、はり崩壊型ラーメンの崩壊メカニズムと損傷について考察する。

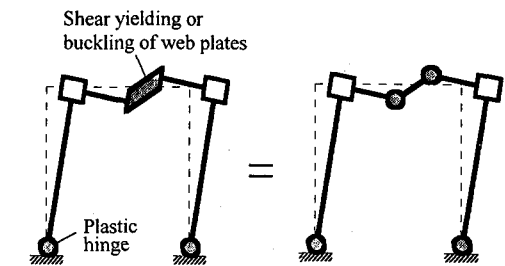


Fig.2 Fundamental rigid plastic mechanism of portal frames with shear collapse in middle of beam

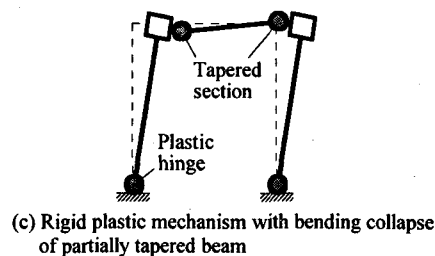
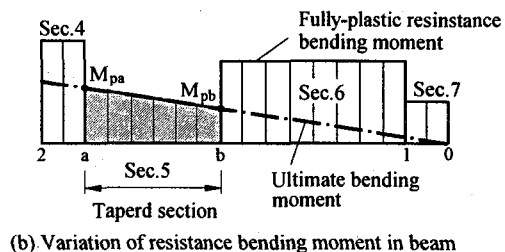
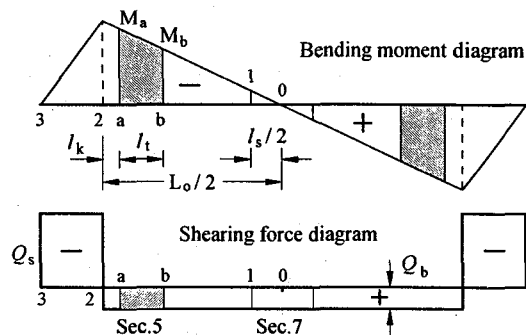


Fig.3 Bending collapse of beam with partially tapered section

2. はり崩壊型門形ラーメンの解析モデルと非弾性応答解析法

2.1 対象とするラーメンと解析モデル

本研究では、Fig.1に示すように、1層目の柱頭部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 $a_{oz}\ddot{U}_{oz}(t)$ を受ける1径間門形ラーメンを研究対象とする。鉛直荷重がはり中間部に作用して腹板が塑性せん断変形する場合については、曲げ・せん断振動が著しくなること等、予期できない問題が発現する可能性があり^{3),4)}、ここでは対象としないこととする。

柱とはりは、無補剛箱形断面 Sec.1~Sec.7 からなる。Sec.5 は、同図(a)に示すように、フランジ・プレート幅や腹板高さを一様に変化させたテーパ断面である(2.3(2)参照)。Sec.7 は、塑性せん断変形の発生を想定

Table 1 Dimension and yield point of portal frame (Case 2)

Items Cross-section <i>i</i>	Width <i>B_i</i> (cm)	Depth <i>D_i</i> (cm)	Thickness (cm)		Yield point σ_{fyi} (σ_{wyi}) (MPa)
			<i>t_{fi}</i>	<i>t_{wi}</i>	
Sec.1	137	110	3.20	3.2	314 (314)
Sec.2	137	110	3.20	2.56	(Elastic)
Secs.3	137	110	5.06	5.06	(Elastic)
Panel zone	—	—	—	5.06	— (353)
Sec.4	137	85	5.06	5.06	(Elastic)
Sec.5a	137	85	3.2	2.5	314 (314)
Sec.5b	87.1	85	3.2	2.5	314 (314)
Sec.6	87.1	85	3.3	2.5	(Elastic)
Sec.7 (Shear panels)	—	85	—	1.0	— (235)

Notes: $h=15\text{m}$, $L_0=10.9\text{m}$, $L=12\text{m}$, $M_{xz}=2,169\text{kg}$, $P=0.1N_{y1}$, N_{y1} : Squash force of Sec.1, σ_{fyi} and σ_{wyi} : Yield point of flange and web plates, respectively, of Sec.*i*, $k_1=0.3$, $k_2=0.62$, $k_3=0.04$, $l_k=0.5B_i$, $l_f=1.1B_i$, $l_s=0.88B_i$, $\beta_{py}=0.47$, $k=1$ and $\xi_{cp}=1$.

Table 2 Yield point of Sec.5 and Sec.7 (Cases1, 3, 4 and 5)

Items Case	Yield point σ_{fyi} (σ_{wyi}) (MPa)	
	Sec.5a and Sec.5b	Sec.7
1	(Elastic)	— (235)
3	(Elastic)	— (540)
4	(Elastic)	— (235)
5	314 (314)	(Elastic)

したはり中央腹板であり、せん断座屈が起こらないように十分に補剛されていると仮定している。

ここで、これまでの研究^{2)~4)}を参考にすると、はり中央腹板が塑性せん断変形し、柱基部が塑性曲げ変形したラーメンの崩壊メカニズムは Fig.2 のように描ける。

また、Fig.3 は、曲げモーメントが卓越する隅角部近傍のテーパ断面 Sec.5 の全域が塑性化する場合で、はり中央 (点 0) から隅角部内側 (点 2) までの断面 Secs.4 ~7 の抵抗曲げモーメントと作用断面力^{3), 17)}の関係、および、テーパ部と柱基部が塑性化する崩壊メカニズム (同図(c)) を示したものである。

本文では、これら 2 つの崩壊メカニズムに着目して、はり崩壊型ラーメンの非弾性応答性状を調べていく。具体的には、以下に示す 5 つのラーメンを解析する。

- 1) Case 1 : テーパー断面 Sec.5 は弾性状態を保ち、はり中央腹板 Sec.7 が早期にせん断降伏するラーメン。
- 2) Case 2 : はり中央腹板 Sec.7 で早期にせん断降伏が起こり、テーパ断面 Sec.5 の抵抗曲げモーメントを Fig.3(b) のように設定したラーメン。
- 3) Case 3 : はり中央腹板の降伏点が高く、かつ、部分テーパ断面 Sec.5 は弾性状態を保つラーメン。
- 4) Case 4 : Case 1 のせん断降伏するはり中央腹板に完全弾塑性の応力-ひずみ曲線を仮定したラーメンで、はり中央のひずみ硬化の影響を調べる。

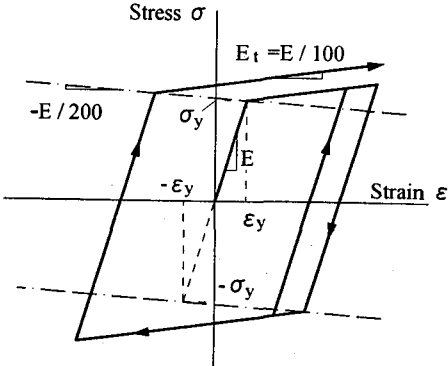


Fig.4 Stress σ - strain ε relationship

5) Case 5 : はり中央腹板は弾性状態を保ち、テーパ断面 Sec.5 の抵抗曲げモーメントを Fig.3(b) のように設定したラーメンで、テーパ部の塑性化の影響を調べる。

Case 2 の解析モデルの寸法諸元と降伏点を Table 1 に示す。骨組寸法とはり、柱の断面寸法は実績調査¹⁾を参考にして決定した (テーパ部については、2.3(2)参照)。Cases 1~5 の寸法諸元は同一であり、柱基部、はり中央、隅角部およびテーパ部の塑性化によるラーメンの崩壊メカニズムの変動を捉えるため、Sec.2, Sec.3, Sec.4 および Sec.6 は、降伏点の高い鋼板を用いる代わりに、弾性状態を保つと仮定している。

解析では、Table 2 に示すように、はり中央 Sec.7 とテーパ部 Sec.5 に対して、降伏点を変化させるか、弾性状態を保つと仮定し、弾性域における剛性が等しく、水平耐力と崩壊メカニズムが異なるラーメンの弾塑性性状を比較できるようにした。

なお、Sec.2 のような柱中断面に塑性化を認めることの良否については、文献 2), 14) および 18) で詳細に検討している。塑性変形する断面の抵抗断面力の大小によるエネルギー消費効率という点からは、Sec.2 を弾性状態に保つ方が耐震上好ましいことを指摘している。

2.2 解析方法

本研究では、ラーメンが漸増水平荷重を受ける場合と水平地動を受ける場合について非弾性応答解析を行う。

解析方法は概ね文献 2) および 3) に従っている。動的解析ではラーメンの幾何学的・材料学的非線形性を考慮し、数値積分法には平均加速度法 ($\beta=0.25$) を用いた。主な解析条件を説明すると以下のとおりである。

- 1) 部材要素の質量ならびに減衰の影響を無視する。
- 2) 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_{xx} を仮定する。Table 1 に示した M_{xx} に対して、解析モデルの弾性 1 次固有周期 T_0 は約 1s となる。
- 3) 弾塑性せん断変形を仮定した隅角部とはり中間部は、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する²⁾。
- 4) 軸力と曲げモーメントを受けて塑性化するはり・柱部

Table 3 Plastically deformed portions and corresponding sway displacement δ/h

Case	1st	2nd	3rd	4th	Reference
1	○ Sec.1-R&L (0.0081~0.0085)	□ Sec.7 (0.0092)	■ P.Z. (0.0278~0.0292)	—	1) Sec.5 : Elastic
2	○ Sec.1-R&L (0.0081~0.0085)	□ Sec.7 (0.0092)	▼ Sec.5-R&L (0.0136~0.0149)	■ P.Z.-R&L (0.0952~0.0955)	—
3	○ Sec.1-R&L (0.0081~0.0085)	■ P.Z.-R&L (0.0174~0.0175)	□ Sec.7 (0.1194)	—	1) Sec.7 : $\sigma_{wy}=540\text{MPa}$ 2) Sec.5 : Elastic
4	○ Sec.1-R&L (0.0081~0.0085)	□ Sec.7 (0.0092)	■ P.Z.-L (0.0761)	■ P.Z.-R (0.1147)	1) Sec.7 : $E_f=0$ 2) Sec.1 at $x=0$ in right column and left side of panel zone show unloading behaviour at $\delta=0.0654h$.
5	○ Sec.1-R&L (0.0081~0.0085)	▼ Sec.5-R&L (0.0108~0.0116)	■ P.Z.-R&L (0.0861~0.0867)	—	1) Sec.7 : Elastic

Notes ; 1) P.Z. means panel zone. 2) Notations ○, □, ■ and ▼ correspond to those of Fig.5. 3) L and R indicate left and right hand side of frames. 4) Values in parenthesis indicate sway displacement δ/h .

材では、要素長を腹板高さ D_b , D_c の 0.1~0.3 倍に変化させて、塑性域の広がり考慮できるようにした。

5) はり中央 Sec.7 と隅角部腹板の弾塑性判定には、せん断応力とせん断ひずみを用いた。その他のはり・柱部材に対しては、細分化した要素内の垂直応力と垂直ひずみを用いて弾塑性判定を行った。

6) 鋼材の応力 σ -ひずみ ε 曲線には、文献 2)~4) と同様に、Fig.4 に示すような Bi-Linear モデルを用いた¹⁸⁾。図中、 E はヤング係数 ($=2.05 \times 10^5 \text{MPa}$) 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¹⁵⁾。ただし、Case 4 の解析では、はり中央腹板 Sec.7 は、完全弾塑性 ($E_f=0$) の σ - ε 曲線を用いる。

なお、本文で用いた σ - ε 曲線は、繰返し力を受ける鋼部材の履歴挙動に対して比較的精度のよい結果を与えることが文献 15) に示されている。ラーメン全体の解析方法の妥当性については、せん断変形域¹⁹⁾を持つはり・柱やラーメンの弾性および塑性解析の結果²⁰⁾と比較することにより確かめている²⁾。

2.3 はり部材の塑性化に関するパラメータ

(1) はり中央腹板の塑性化判定パラメータ β_{py} ^{3), 4)}

文献 3), 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に関連づけて、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るという条件から、以下の基本条件式を提示した。

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、

β_{py} : はり中間部腹板の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)。

ξ : 地震動の影響を考慮するためのパラメータ

$$\xi = 1 + \frac{1}{2} \frac{D_b Q_{clE}}{M_{py}} \quad (3)$$

Q_{clE} : 水平地動によって隅角部に隣接する柱断面に生じるせん断力。

Q_{by} : はり中央腹板の降伏せん断力

$$Q_{by} = 2D_{bc} t_{wb} \tau_{by} \quad (4)$$

Q_{sy} : 隅角部腹板の降伏せん断力

$$Q_{sy} = M_{py} / D_c \quad (5)$$

M_{py} : 隅角部腹板の塑性モーメント

$$M_{py} = 2D_b D_c t_{ws} \tau_{sy} \quad (6)$$

文献 3) の Appendix を参考にすると、式(3)の ξ は 1.075 となり、Case 1, 2 および 4 では β_{py} = 約 0.47, Case 3 では β_{py} = 約 1.4, および、Case 5 では $\beta_{py} = \infty$ となる。

(2) 部分テーパばりの無次元テーパ率 ξ_{cp}

隅角部近傍でテーパを付けたはり断面 Sec.5 の弾塑性曲げ性状は、文献 10)~12) を参考にして、次の無次元テーパ率を用いて表している。

$$\xi_{cp} = \frac{1}{k} \left(1 - \frac{M_{pb}}{M_{pa}} \right) \quad (7)$$

ここに、 k はテーパ部の長さ l_i に関する無次元パラメータであり、次式で定義している。

$$k = \frac{l_i}{L_0 / 2 - l_k} \quad (8)$$

また、 M_{pa} と M_{pb} は、テーパ部 Sec.5 両端の断面の全塑性モーメントである ($M_{pa} \geq M_{pb}$, Fig.1 と Fig.3 参照)。

式(7)は、はり部材に Fig.3(a) のような曲げモーメントが作用して、テーパ部両端の断面が同時に全塑性状態

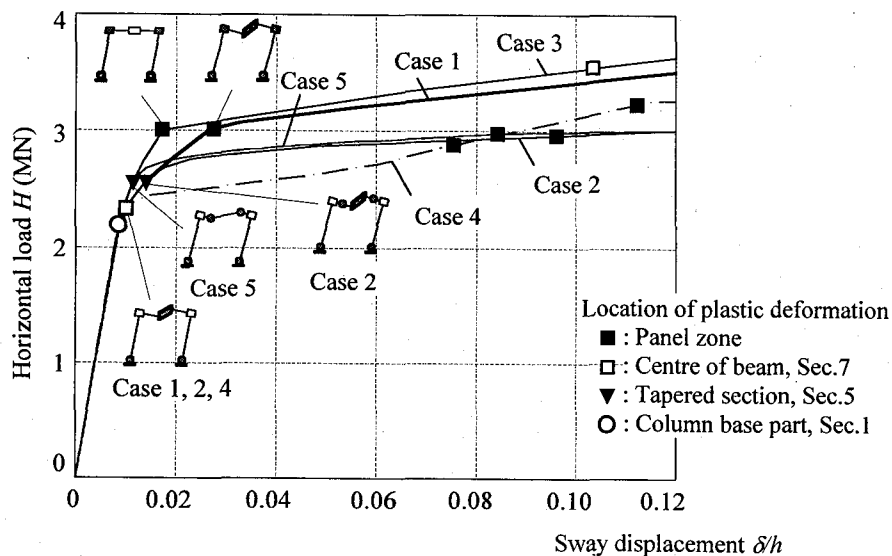


Fig.5 Horizontal load H — sway displacement δ curves

に達するという条件から導いたものである。すなわち、 $\xi_{cp}=0$ のとき、Sec.5 はテーパー無しの等断面構造であり、 $\xi_{cp}=1$ のときはテーパー有りで、テーパー部全体が同時に全塑性状態になることを示す。また、同式で $\xi_{cp}=1$ とおくと、テーパー部の全塑性モーメント比 M_{pb}/M_{pa} は $1-k$ で表される。そのため、テーパー部が長くなると、小断面 Sec.5b をかなり小さくしなければならない。

これらの点を踏まえて、解析モデルのテーパー部 Sec.5 はフランジ・プレート幅のみ変化させて、 $k \approx 0.3$ とした。また、テーパー部の塑性化の影響を調べる Cases 2, 5 の解析モデルでは、 $\xi_{cp}=1$ 、 $M_{pb}/M_{pa} \approx 0.7$ となる (Table 1 参照)。

3. 漸増水平荷重を受ける門形ラーメンの崩壊メカニズムの変動

まず、2.1 で説明した Cases 1～5 の門形ラーメンに対して、柱頭部に $H/2$ ずつの漸増水平荷重を作用させて弾塑性解析を行う。はり中央腹板 Sec.7 の塑性化に起因する崩壊メカニズムの変動特性を調べ、テーパー部 Sec.5 の塑性化がそれらに及ぼす影響を考察する。

なお、数値解析結果のうち、ひずみに関する結果は、文献 2)～4) を参考にして、柱基部 Sec.1 とテーパー断面 Sec.5 の増分塑性曲率、および、隅角部とはり中央腹板 Sec.7 の増分塑性せん断変形角の各絶対値和、それぞれ $\sum |\Delta\phi_{pi}|$ および $\sum |\Delta\gamma_{pi}|$ として整理した。以下において、これらは対応する断面の塑性曲率 ϕ_{pi} と降伏せん断ひずみ γ_{pi} で無次元表示している (以下、総称して累積塑性ひずみと呼ぶ)。

3.1 水平荷重 H —水平変位 δ 曲線

Cases 1～5 のラーメンの水平荷重 H —水平変位 δ 曲線を Fig.5 に示す。また、柱基部 Sec.1、隅角部腹板、はり中央腹板 Sec.7 およびテーパー部 Sec.5 の塑性ひずみ

の発生状況から、主な塑性変形箇所と崩壊メカニズムを求めて図中に示し、塑性化の順序を Table 3 にまとめる。

これらの図表から、各ケースにおけるラーメンの弾塑性性状は、変位 δ の増大とともに、以下のように変動することがわかる。

a) Case 1: はり中央腹板が塑性化し、テーパー部は弾性

このラーメンは、柱基部 Sec.1 に続いて、はり腹板 Sec.7 が早期に塑性化し、Fig.2 に示した崩壊メカニズムを形成後、 $\delta \approx 0.028h$ のときに、隅角部腹板も塑性化するメカニズムを呈している。

b) Case 2: はり中央腹板に続いて、テーパー部が塑性化

このラーメンでは、はり中央腹板と柱基部が塑性化後、Sec.5 が塑性曲げ変形し、変位が大きい $\delta \approx 0.095h$ のときに隅角部腹板が非弾性域に入っている。Sec.5 の塑性化後の耐力上昇は Case 1 よりも小さく、隅角部腹板の塑性化をかなり遅延させている。

c) Case 3: 柱基部と隅角部が早期に塑性化

Case 1 よりも隅角部の塑性化が早期に起こっている ($\delta \approx 0.017h$)。この点は、はり中央腹板の塑性化の影響について論じた文献 2) および 3) で指摘したとおりである。このラーメンでは、はり中央腹板の降伏点を高く設定しており、はり中央で塑性せん断変形が生じない範囲にある ($\beta_{py} \approx 1.4, 2.3(1)$ 参照)。しかし、 $\delta \approx 0.11h$ のときに、はり中央腹板も非弾性域に入っている。これは、塑性化した隅角部のひずみ硬化でせん断耐力が上昇し、これにほぼ比例するはりの作用せん断力が大きくなったことによると考える (3.2, Fig.6 参照)。

d) Case 4: はり中央腹板が完全弾塑性体

柱基部とはり中央腹板の塑性化後、耐力上昇は Case 1 に比べて小さい ($\delta \approx 0.06h$)。約 $0.008h \leq \delta \leq 0.07h$ の間で荷重 H が上昇するのは、Case 1 との比較から、主として柱基部のひずみ硬化によると考えられる。このことから、Case 1 で隅角部腹板が非弾性域に入るメカニズ

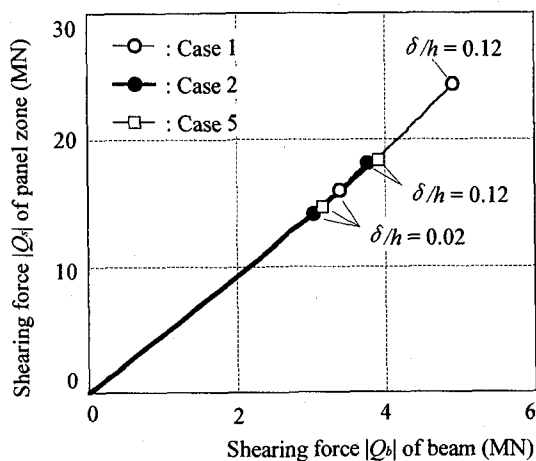


Fig. 6 Shearing forces Q_s - Q_b relationship (Cases 1, 2 and 5)

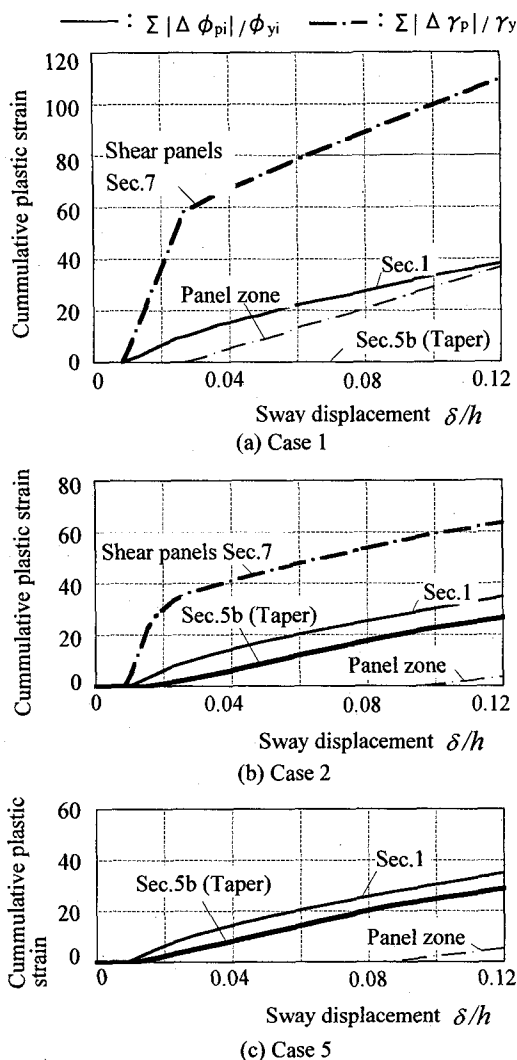


Fig. 7 Variation of cumulative plastic strain of Sec. 1, panel zone, Sec. 5 and Sec. 7 with sway displacement (Cases 1, 2 and 5)

ムの発生は、はり中央腹板のひずみ硬化によるせん断耐力上昇に起因するものであると言える。

なお、Table 3 の備考に示すように、このラーメンでは、塑性化した片側隅角部と柱基部が弾性域に戻る除荷現

象が現れた。これは、Case 1 と比べるとわかるように、完全弾塑性の σ - ϵ 曲線を仮定したはり中央腹板の弾塑性性状に原因するものである。

e) Case 5 : テーパー部が塑性化し、はり中央腹板は弾性

このラーメンでは、テーパー部 Sec. 5 で早期に塑性曲げ変形が起こり、Case 2 とほぼ同様な H - δ 曲線を呈している。隅角部は δ = 約 $0.086h$ のときに塑性化し、これは Case 1 よりも遅く、Case 2 より若干早い。したがって、テーパー部を塑性化させれば、はり中央腹板を塑性化させないで、隅角部が早期に非弾性域に入るのを防ぐことができる。

3.2 隅角部腹板とはりのせん断力の関係

Cases 1, 2 および 5 について、隅角部腹板のせん断力 Q_s とはりのせん断力 Q_b の関係を Fig. 6 に示す。

この図からわかるように、Cases 1, 2, 5 のいずれの場合も、 Q_s と Q_b はほぼ線形関係にある。また、Case 1 では、はり腹板のひずみ硬化の影響を受けて Q_s , Q_b の増加が大きくなっている。これにより、上述した隅角部腹板の塑性化が起こったと説明できる。

一方、はりのテーパー断面 Sec. 5 が塑性曲げ変形する Cases 2 と 5 では、はりおよび隅角部のせん断力上昇が抑えられていることがわかる。Case 5 のせん断力は Case 1 のそれよりも数%大きいだけである。

3.3 ラーメン各部の累積塑性ひずみの変動

Cases 1, 2, および 5 の結果から、はり中央腹板が塑性化した後、テーパー断面 Sec. 5 の塑性化の有無、ならびに、変位 δ の増大により、柱基部、はり中央腹板およびテーパー部の累積塑性ひずみが、どのように変動するかを Fig. 7 にまとめる。

この図から、Cases 2 と 5 のようにテーパー部 Sec. 5 が塑性曲げ変形すると、上述したように、隅角部腹板が塑性化するときの水平変位がかなり大きくなることがわかる。また、 δ/h = 約 0.12 のとき、Case 2 のはり中央腹板の塑性ひずみは Case 1 の約 70% に小さくなるが、柱基部の塑性ひずみに与える影響はわずかである。これより、はりテーパー部の塑性化は、はり中央と隅角部腹板の塑性変形を抑える効果が大きいことがわかる。

Cases 2 と 5 において、柱基部とテーパー部に着目すると、 δ/h = 約 0.12 のとき、Case 5 の塑性ひずみは Case 2 のそれよりも数%大きいだけで、両者の差異は小さい。これは、エネルギー消費能力が小さいはり中央腹板の塑性変形 (Case 2) は、エネルギー消費能力が大きいテーパー部と隅角部のわずかな塑性変形 (Case 5) で分担されたことを示している²⁾。

4. はり崩壊型門形ラーメンの非弾性地震応答、崩壊メカニズム、および損傷に関する考察

上で用いた解析モデルのうち、①隅角部が早期に非弾性域に達した Case 1、②はり中央腹板 Sec. 7 とテーパー

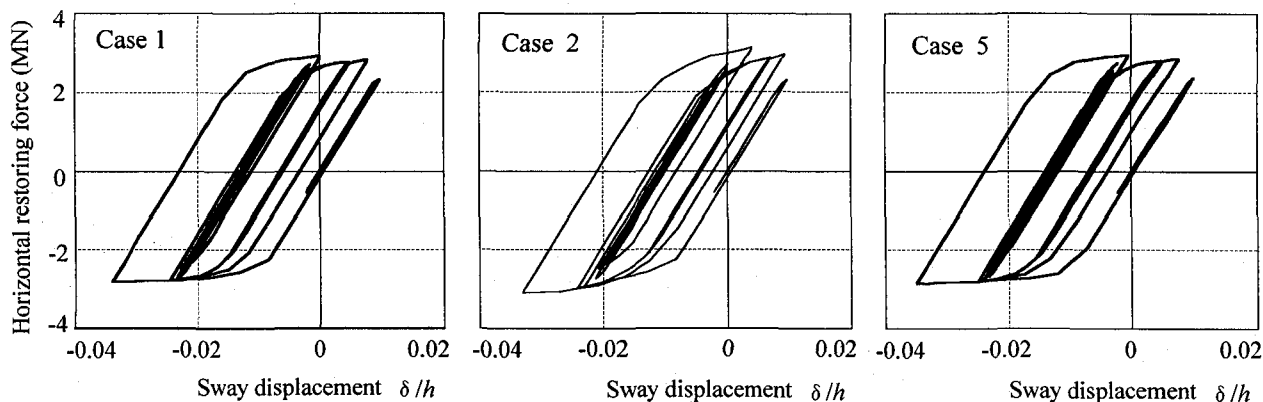
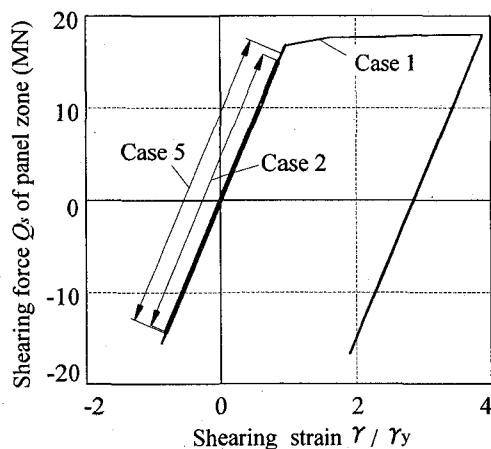
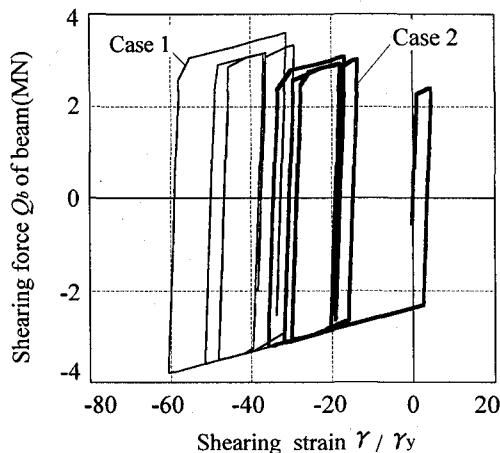


Fig.8 Horizontal restoring force H –sway displacement δ curves (Cases 1, 2 and 5)



(a) Q - γ curves of left panel zone



(b) Q - γ curves of shear panels, Sec.7, in middle of beam

Fig.9 Shearing force Q – shearing angle γ curves of panel zone and shear panels Sec.7 in middle of beam

断面 Sec.5 が塑性化した Case 2, および, ③はり中央が弾性状態にあり, テーパー断面 Sec.5 が塑性化した Case 5 のラーメンの地震応答解析を行った.

水平地動加速度 $a_{oz}\ddot{U}_{oz}(t)$ としては, El Centro 波 (1940) NS 成分記録の最初の 8 秒間を用いた. ただし, ある特定の地震加速度波に対して, ラーメン各部が適度に塑性変形するように, 寸法諸元や降伏点を決めることが煩雑であるので, Case 1 のラーメンにおいて, 隅角部腹板が非弾性域に入る崩壊メカニズムが現れるように, 加速度倍率を大きくして解析を行っている ($a_{oz}=6$).

なお, El Centro 波以外の模擬地震波を用いても, ラーメンが呈する崩壊メカニズムについては, 基本的に同じになると考えている.

4.1 水平復元力 H – 水平変位 δ 曲線

ラーメンの水平復元力 H と柱頭部の水平変位 δ の関係を Fig.8 に示す.

この図からわかるように, 解析の範囲内では, Case 1, 2 および 5 の H - δ 曲線, ならびに, 変位の最大応答値に大きな違いは見られず, 次に述べる崩壊メカニズムの差異による影響はあまり現れていない.

4.2 ラーメン各部の断面力-ひずみ関係

はり中央腹板 Sec.7 と隅角部腹板のせん断力 Q – せん断変形角 γ 曲線, および, 柱基部 Sec.1 とテーパー部 Sec.5 両端の曲げモーメント M – 曲率 ϕ 曲線を Figs.9~10 に示す.

(1) 隅角部腹板の Q - γ 曲線 (Fig.9(a), Cases 1, 2, 5)

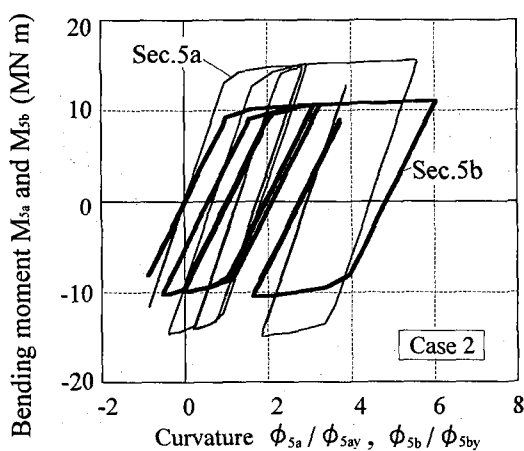
隅角部腹板は, Case 1 の場合に非弾性域に入っているが, Cases 2 と 5 では弾性域に留まっていることがわかる.

(2) はり腹板 Sec.7 の Q_s - γ 曲線 (Fig.9(b), Cases 1, 2)

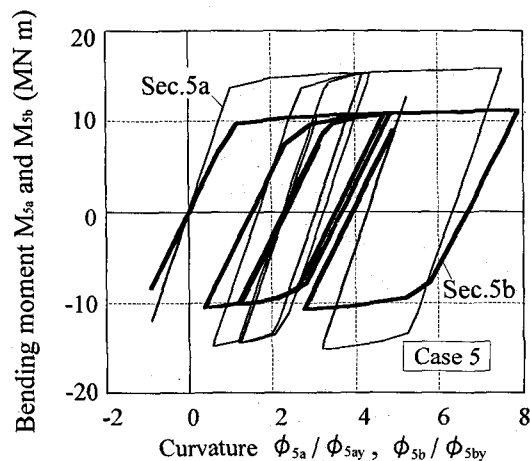
Case 2 では, はり中央腹板のせん断変形角の最大応答が, Case 1 の約 60% に抑えられており, テーパー断面 Sec.5 の塑性化の影響が大きく現れている. また, Case 1 のせん断力の最大応答値は, Case 2 のそれに比べて, ひずみ硬化の影響で約 20% 大きくなっている. 前章の結果を踏まえると, Case 1 では, このせん断力とほぼ比例関係にある隅角部腹板の作用せん断力が大きくなって塑性化が起こったと考えてよい (同図(a)参照).

(3) テーパー部 Sec.5 の M - ϕ 曲線 (Fig.10(a), (b), Cases 2, 5)

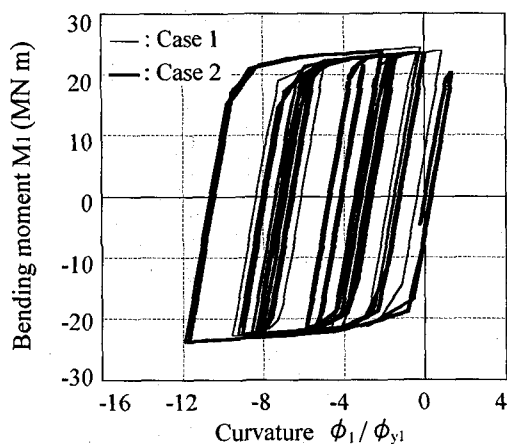
これらの図は, はりの左側 Sec.5 の M - ϕ 曲線を示し



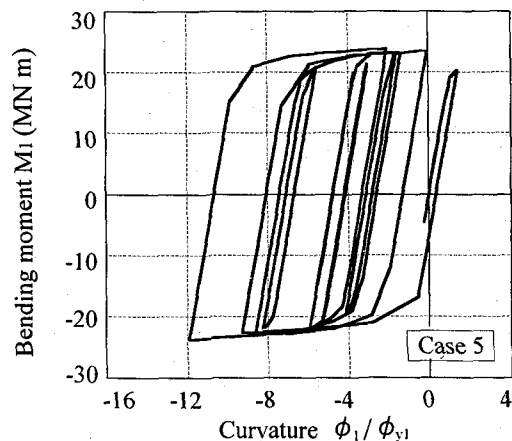
(a) M-φ curves in partially tapered section (Sec.5a, Sec.5b)



(b) M-φ curves in partially tapered section (Sec.5a, Sec.5b)



(c) M-φ curves in Sec.1 ($x \simeq 0$, left column)



(d) M-φ curves in Sec.1 ($x \simeq 0$, left column)

Fig.10 Bending moment M - curvature ϕ curves of partially tapered section Sec.5 and column base part Sec.1

ている。テーパー部両端 (5a, 5b) では, Cases 2, 5 ともに, ほぼ同程度の塑性曲げ変形を生じており, 無次元テーパー率 $\xi_{tp}=1$ に対応して, ほぼ一様に塑性化していることがわかる (2.3 (2)参照)。また, Case 5 の曲率 ϕ の最大応答値は, Case 2 よりも約 25% 大きくなっている。これは, はり中央腹板が弾性域に留まった分だけ, テーパー部で塑性化が進んだと考えられる。

(4) 柱基部下端の M - ϕ 曲線 (Fig.10(c), (d), Cases 1, 2, 5)

柱基部下端の M - ϕ 曲線については, Cases 1, 2 および 5 の差異は小さく, はり中央腹板 Sec.7, あるいは, テーパー部 Sec.5 が塑性化したことによる影響はあまり現れていない。この点は, 単調荷重の水平荷重の下で解析した前章の結果と同じである。

4.3 ラーメン各部の累積塑性ひずみの時刻歴応答

ラーメン各部の累積塑性ひずみの時刻歴応答を Fig.11 に示す。柱基部 Sec.1, 隅角部腹板およびテーパー断面 Sec.5b については, ラーメン左右で塑性ひずみの大きい方をプロットしている。

同図(a)からわかるように, Case 1 では, 柱基部 Sec.1, はり中央腹板 Sec.7, 隅角部腹板の順に塑性化し, はり中

央腹板で塑性ひずみの累積が著しくなっている。ちなみに, 隅角部腹板は, $t \simeq 5.4s$ のときに塑性化している。

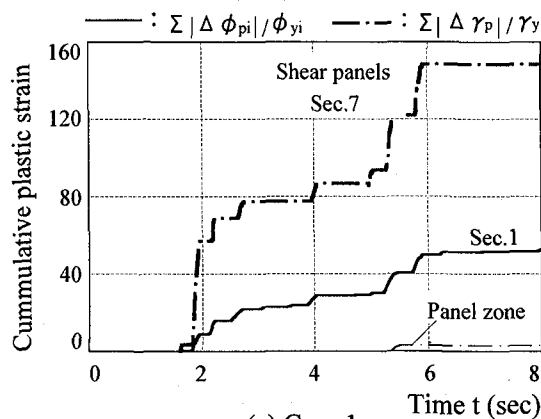
一方, 同図(b)から, Case 2 では, 柱基部, はり中央, はりテーパー部の順に塑性化しているが, 隅角部腹板は弾性域に留まっていることがわかる。また, テーパー部が塑性化したために, はり中央腹板と柱基部の累積塑性ひずみは, $t=8s$ のとき, Case 1 と比べて, それぞれ約 20% および約 10% 小さくなっている。柱基部については, 3.3 で示した単調漸増荷重の場合と同様に, テーパー部の塑性化の影響はあまり受けていない。

さらに, 同図(c)からわかるように, Case 5 では, テーパー部 Sec.5 の塑性ひずみが Case 2 のそれよりも約 25% 大きくなっている。柱基部 Sec.1 のひずみは, 数% 大きくなっているだけで, Case 2 との差異は小さい。また, 隅角部は塑性化していない。

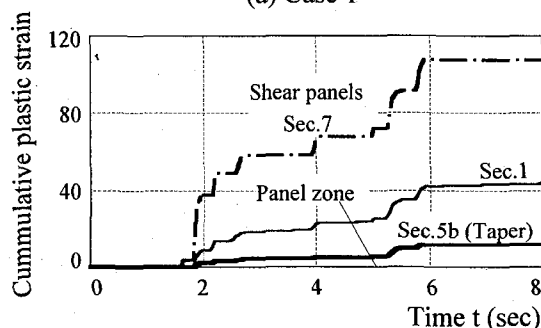
4.4 ラーメン各部の履歴消費エネルギーの時刻歴応答

Fig.12 は, 塑性変形したラーメン各部の消費エネルギーの時刻歴応答を Fig.11 に対応させてまとめたものである。

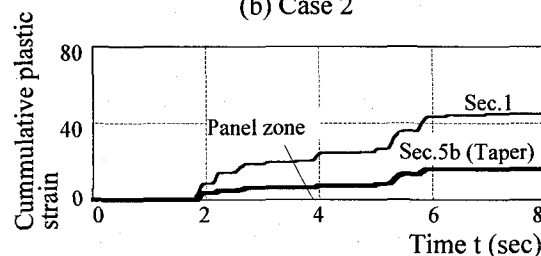
まず, Case 1 のラーメンでは, 塑性断面性能が大きい



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 5

(a) Time history of cummulative plastic strains

Fig.11 Time history of cummulative plastic strain in column base part Sec.1, panel zones, tapered parts Sec.5 and shear panels Sec.7 in middle of beam

柱基部 Sec.1 の消費エネルギーが最も大きく、全消費エネルギーの約 80%を占めている。はり中央腹板 Sec.7 では、塑性ひずみが大きく累積しているにもかかわらず、せん断耐力が小さいため、エネルギー消費は柱基部よりもかなり小さい^{2)~4), 16)}。また、隅角部腹板では、累積塑性ひずみが小さいため消費エネルギーも小さいが、せん断耐力が大きいため、はり中央腹板よりもエネルギー消費の効率がよい。

一方、Case 2 の場合、柱基部、はり中央腹板の消費エネルギーは、Case 1 のそれらよりも、それぞれ約 20%および約 25%小さくなっている。Sec.5 では、テーパ部全体が塑性化するため、累積ひずみの大きさから見た消費エネルギーの割合が大きく、Case 1 のはり中央腹板よりも大きなエネルギーを消費している。

さらに、テーパ部が塑性化して、はり中央が弾性状態に留まる Case 5 のラーメンでは、柱基部 Sec.1 のエネルギーは、Case 2 のそれよりも数%大きいだけである。

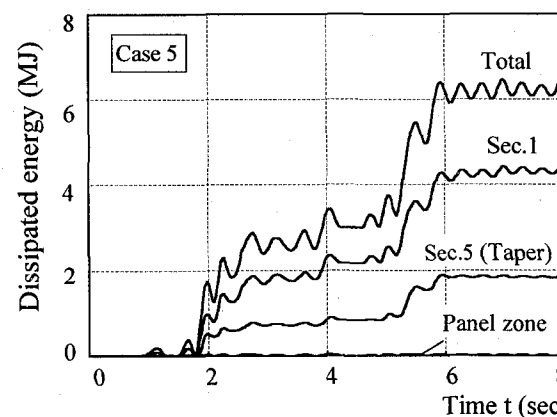
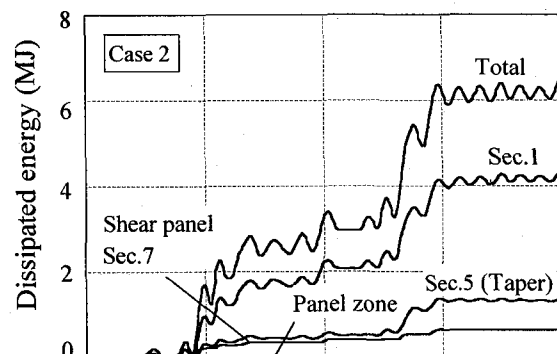
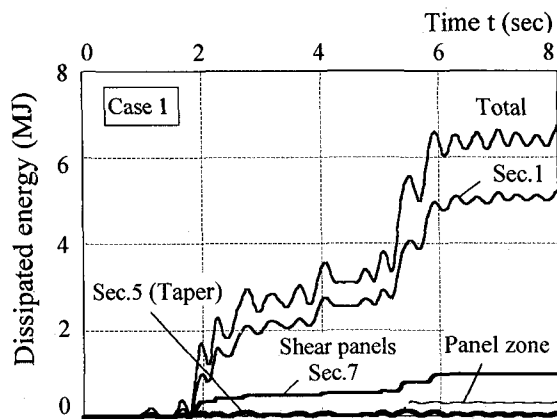


Fig.12 Time history of dissipated energy of column base parts Sec.1, panel zones, tapered parts Sec.5 and shear panels Sec.7 in middle of beam

テーパ部 Sec.5 については、Case 2 よりも、約 20%大きなエネルギーを消費している。したがって、Case 2 のはり中央腹板で消費されたエネルギーのほとんどは、テーパ部 Sec.5 によって分担されていることになる。

なお、ラーメン全体の消費エネルギーを比較すると、Case 1, 2, および 5 の差異は小さい。これは、ラーメンの崩壊メカニズムが異なっても、塑性変形箇所の消費エネルギーの増減があるだけで、全体の履歴エネルギーはあまり変化しないことを意味している。

4.5 はり崩壊型ラーメンの損傷に関する考察

ここまでの結果を踏まえて、はり中央腹板がせん断崩壊、あるいは、隅角部近傍のはり断面が塑性曲げ変形するはり崩壊型ラーメンの損傷について考察すると、以下

のとおりである。

(1) はり中央腹板の耐力上昇に起因した損傷箇所の変動

はり中央腹板がせん断降伏すると、その後のひずみ硬化に起因して、はり部材の作用せん断力が大きくなる。すると、隅角部腹板に作用するせん断力も増加して、隅角部が非弾性域に入る可能性がある。

また、本文では触れていないが、はり中央腹板がせん断降伏後に座屈すると、斜め張力場が形成されて、幅厚比によっては、その後耐力が上昇する⁸⁾。このようなとき、上と同様に隅角部が塑性化するメカニズムが起こると考えられる。

(2) 隅角部近傍のはり部材をテーパ構造にする利点

一般に、隅角部腹板では、せん断耐力が大きいため、うまく塑性化させれば、小さな塑性変形で大きなエネルギーを消費できる^{2), 16)}。しかし、著しいせん断遅れ¹⁷⁾や応力集中に対処するために、極厚鋼板が用いられており¹⁾、そのフランジ・プレートや腹板には、三木ら¹³⁾が指摘しているように、非弾性域に及ぶ地震応答時に脆性破壊の危険性がある。

この観点から、曲げモーメントが卓越する隅角部近傍のはり部材の一区間を部分テーパ構造にして、塑性曲げ変形させることが有効になると考える。すなわち、

- i) はり中央腹板の耐力上昇が隅角部腹板を塑性化させない範囲の非弾性応答を呈するとき、ラーメンは柱基部とはり中央で損傷する崩壊メカニズムを示す。
- ii) その後、ひずみ硬化や斜め張力場の影響でせん断耐力が上昇すると、隅角部が塑性化する前に、テーパ部が塑性化して、耐力上昇を抑える役目を果たすようになる。その結果、隅角部の塑性化をかなり遅らせることができる。

ただし、Case 5 の解析結果からも明らかなように、はり中央腹板を塑性化させないで、隅角部近傍のテーパ部のみを塑性曲げ変形させることによって、隅角部の早期塑性化を防ぐことができる。ラーメンの損傷を小さくするために、はり中央腹板のせん断崩壊を利用する方法、部分テーパ構造を用いる方法、および両者を組み合わせた方法のいずれを選択するのがよいかは、今後の検討課題である。

本文の解析では、隅角部の補強範囲（フランジ・プレート幅の 1/2）に隣接するはり部材の一区間で部分テーパ構造を仮定した。今後、曲げモーメントが卓越する隅角部の柱フランジ・プレート内側から、補強範囲も含めて、フランジ・プレートの幅方向、あるいは、腹板高さ方向に直接にハンチを付けたテーパ構造について検討できるように考える。

5. 結 論

本研究は、はり中央で塑性せん断変形し、部分テーパ断面で塑性曲げ変形するはり崩壊型門形ラーメンの

非弾性応答解析を行い、崩壊メカニズムの変動特性とそれに対応するラーメン各部の塑性変形性状を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) はり中央腹板がせん断降伏するラーメンは、柱基部とはり中央腹板で塑性変形が卓越する崩壊メカニズムを形成後、隅角部腹板も非弾性域に入るメカニズムを呈する場合がある。
- 2) この崩壊メカニズム発生は、塑性化が著しくなるはり中央腹板のひずみ硬化によるせん断耐力上昇により、ほぼ線形関係にある隅角部の作用せん断力が大きくなることに起因する。
- 3) 隅角部近傍で曲げモーメントが卓越するはり断面をテーパ構造にして塑性曲げ変形させると、はり中央腹板の塑性化の有無にかかわらず、隅角部腹板が塑性化するメカニズムの早期発生を抑えることができる。
- 4) ラーメンが異なった崩壊メカニズムを呈すると、塑性変形箇所の塑性ひずみ量とエネルギー消費量が増減する。しかし、全体の履歴エネルギー量は、崩壊メカニズムによって、あまり影響を受けない。
- 5) 非弾性範囲で地震応答が予想されるラーメンの損傷を小さくする方法として、隅角部近傍のはり断面をテーパ構造にして塑性化させることが有効である。

謝辞：本研究の実施にあたり、平成 10～11 年度の文部省科学研究費・基盤研究(C)、平成 10～11 年度の大同工業大学・特別研究費、ならびに、平成 11 年度の(社)鋼材倶楽部・土木鋼構造教育助成金の補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

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, 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。
- 3) 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。
- 4) 酒造敏廣, 山田 宰：せん断崩壊型はり部材を有する鋼 2 層門形ラーメンの非弾性地震応答解析, 構造工学論文集, Vol.45A, 土木学会, pp.227～234, 1999 年 3 月。
- 5) 山田 宰, 酒造敏廣：せん断崩壊型はり部材を有する

- 鋼製ラーメンの崩壊メカニズム, 第 25 回地震工学研究発表会・講演論文集, E2-5, pp.953~956, 1999 年 7 月.
- 6) 武田八郎: せん断パネルの非弾性交番座屈実験, 鋼構造年次論文報告集, 第 2 巻, pp.1~8, 1994 年 11 月.
- 7) 武田八郎: せん断を受ける桁パネルの非弾性交番座屈試験, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第 32 号, pp.74~78, 1997 年.
- 8) 高橋泰彦, 品部祐児: せん断降伏型薄板鋼板の復元力特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.494, pp.107~114, 1997 年 4 月.
- 9) 福本嘯士: 土木鋼構造物のダクティリティ向上のためのせん断型塑性リンクの開発, 平成 9 年度~10 年度科学研究費補助金 (基盤研究 B(2)), 研究成果報告書, 1999 年 3 月.
- 10) 酒造敏廣: テーパー付き柱基部を有する鋼変断面柱の非弾性地震応答性状に関する研究, 第 24 回地震工学研究発表会・講演論文集, D8-3, pp.1041~1044, 1997 年 7 月.
- 11) 酒造敏廣, 川田真也, 岩村俊幸: テーパー付き柱基部を有する変断面柱の弾塑性履歴崩壊性状に関する研究, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, F1-15, pp.2151~2156, 1998 年 10 月.
- 12) 酒造敏廣, 川田真也: 部分テーパー付きはり柱の弾塑性履歴性状に関する基礎的実験, 土木学会論文集 (投稿中).
- 13) 三木千寿, 四十沢利康, 穴見健吾: 鋼製橋脚ラーメン隅角部の地震時脆性破壊, 土木学会論文集, No.591 / I -43, pp.273~281, 1998 年 4 月.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 酒造敏廣, 長田好夫: 鋼変断面ラーメンの非弾性地震応答性状と断面構成法に関する研究, 第 23 回地震工学研究発表会後援概要, 土木学会 pp.469~472, 1995 年 7 月.
- 19) 日置興一郎, 中本嘉彦, 平野朝則: 接合部パネルのせん断変形を考慮した塑性を含む撓角法, 日本建築学会論文報告集, No.115, 1965 年 9 月, pp.1~5.
- 20) 谷 資信: 骨組構造の解析, 建築物の構造解析シリーズ II, 技報堂, 1976 年 12 月, pp.27~41.

(1999 年 9 月 17 日受付)