

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

山田 幸¹, 酒造 敏廣²

¹ 学生会員 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)

² 正会員 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)

本研究は、せん断崩壊型はり部材を有する1層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性について論じたものである。まず、単調増加の水平荷重下でラーメンの弾塑性解析を行い、はり中央腹板と柱基部が塑性化して崩壊メカニズムを形成後に、隅角部も塑性化する崩壊メカニズムが現れることを指摘した。つぎに、地震応答解析を行い、復元力特性、各部の累積塑性ひずみ、および履歴エネルギー分担から、ラーメンの崩壊メカニズムの変動性状を調べた。これらの結果から、はり中央腹板がせん断崩壊するとき、復元力特性や隅角部の損傷は、柱基部と隅角部の塑性モーメント比によって大きな影響を受けることを示した。

Key Words: portal frames, collapse mechanism, shear collapse of beam, earthquake response

1. まえがき

鋼製ラーメン隅角部では、作用せん断力がはり部材のそれに比べて数倍大きく、かつ、その補強範囲ではせん断遅れや応力集中現象を緩和するために板厚の大きな鋼板が用いられている。そのため、はり部材の弾塑性性状には、隅角部域を含めて変断面構造としての特徴が現れる¹⁾。たとえば、せん断耐力の小さいはり中間部腹板のせん断降伏が先行すると、兵庫県南部地震で見られたように、はり腹板に著しい塑性変形やせん断座屈が起こる。

これまで、筆者らは、1層および2層門形ラーメンについて非弾性地震応答解析を行い、地震応答性状について調べてきた^{1)~3)}。そして、はり中央腹板の塑性化は隅角部腹板や柱基部の塑性化を抑える効果があること、および、はり腹板は大きなひずみ速度で塑性変形することを指摘した。

本研究は、はり中央で著しい塑性せん断変形を伴う1層門形ラーメン¹⁾²⁾の非弾性応答解析を行ったものである。具体的には、単調増加の水平荷重を作用させた弾塑性解析と地震動を仮定した応答解析を通じて、はり中央、隅角部、および、柱基部で塑性化するラーメンの崩壊メカニズムの変動性状を調べ、各部の損傷に影響を及ぼすパラメータについて考察する。

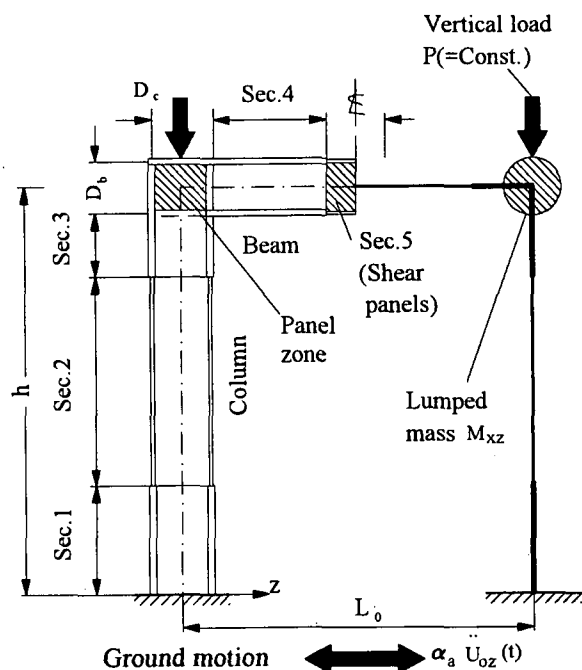


Fig.1 Numerical model of portal frame subjected to horizontal ground motion

2. 解析モデルと崩壊メカニズムに関する パラメータ^{2),3)}

(1) 解析モデル

Fig.1 に示すように、柱頭部に定鉛直荷重 P が作用した状態で、水平地動 $\alpha_a \ddot{u}_{oz}(t)$ を受ける1層1径間の門形

ラーメンを解析対象とした。

はり・柱は Sec.1～5 からなる。Sec.5 は腹板に塑性せん断変形を仮定した断面 (*Shear panel*) である。鉛直荷重作用位置に集中質量 M_c を仮定し、はり・柱の質量については、簡単のため無視した。柱頭部に作用させる鉛直荷重は、柱基部断面の圧壊荷重の約 0.15 倍としている。なお、解析では、Sec.2～4 は弾性状態を保つものとし、柱基部、隅角部腹板、および、はり中央の 3ヶ所の塑性化と崩壊メカニズムについて考察することとした。

(2) 応力-ひずみ関係

鋼材の応力 σ - ひずみ ε 曲線には、文献 1)～3) と同様に Bi-Linear モデルを用いた。弾性域の傾きを E ($= 2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$)、塑性域の傾きを $E/100$ とした。また、等方・移動硬化を簡易的に考慮できるように負勾配 ($= E/200$) の補助曲線を仮定した。

(3) 崩壊メカニズムに関するパラメータ

解析では、以下の 2つのパラメータを考慮した。

- a. 隅角部と柱基部の全塑性モーメント比 α_{pl} ¹⁾

$$\alpha_{pl} = \frac{M_{py}}{M_{pl}} \quad (1)$$

ここで、 M_{py} ：隅角部腹板の塑性モーメント、 M_{pl} ：柱基部断面の全塑性モーメント。

- b. はり中央腹板の塑性化判定パラメータ β_{pr} ^{2,3)}

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

ここで、 L_o ：柱内側フランジ間のスパン、 D_c ：はりの腹板高さ、 Q_{by} 、 Q_{sy} ：はり腹板と隅角部腹板の降伏せん断力である。また、 ξ は地震動の影響を考慮するために導入したパラメータ^{2,3)}であり、次式で与えられる。

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

ここに、 D_b ：はりの腹板高さ、 Q_{clE} ：隅角部腹板が降伏するときに隅角部直下の柱断面に作用するせん断力の内、地震動によって生じる成分。

ちなみに、はり中央腹板の塑性化が隅角部腹板のそれに先行するのは、 $\beta_{pr} < \text{約 } 1.1$ のときである^{2,3)}。

3. 門形ラーメンの崩壊メカニズムの変動性状に関する解析結果と考察

式(1)の α_{pl} と式(2)の β_{pr} を変化させてラーメンの非弾性解析を行い、崩壊メカニズムの変動を調べた。ラーメンの寸法諸元と柱基部の降伏点はすべて同一であり、

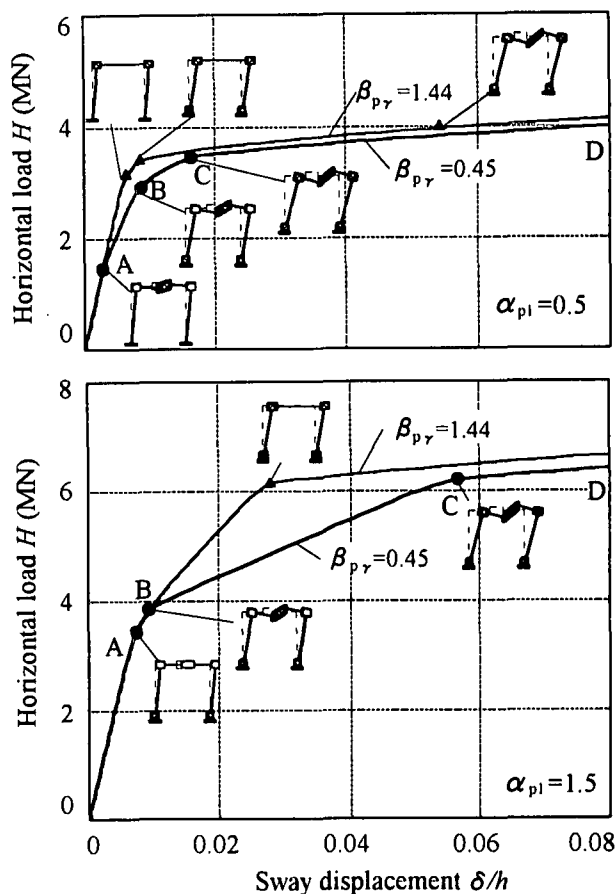


Fig.2 Relationship between restoring horizontal force and displacement

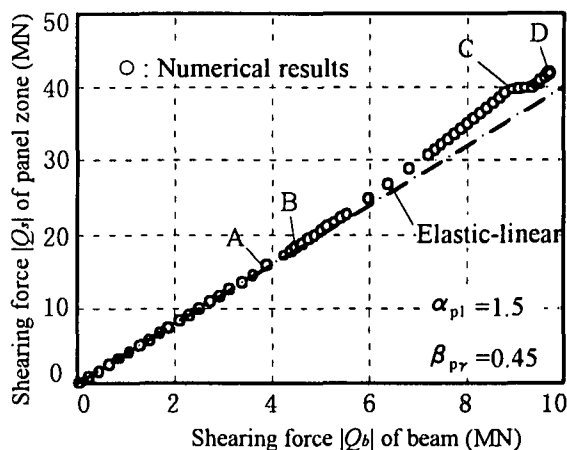


Fig.3 $Q_s - Q_b$ relationship under condition of increasing horizontal load

隅角部とはり腹板の降伏点を変化させて、 α_{pl} と β_{pr} を設定している。なお、 $\beta_{pr} = 0.45$ のとき、はりと隅角部腹板の降伏せん断力比 Q_{by}/Q_{sy} は 1/10 である。

(1) 単調増加の水平荷重下における崩壊モード

まず、単調増加の水平荷重 H を受けるラーメンの荷重 H - 水平変位 δ 曲線を Fig.2 に示す。

この図からわかるように、 $\beta_{pr} < 1$ のラーメンでは、変位 δ が増加すると、柱基部と隅角部の塑性モーメント

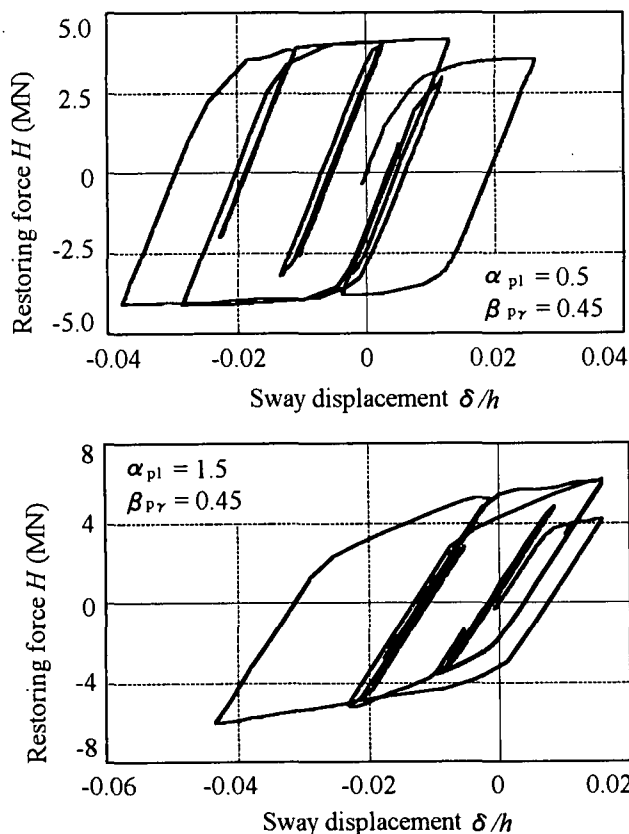


Fig.4 H- δ curves by earthquake response analysis

比 α_{pl} の大きさによって、はり中央、柱基部、隅角部の塑性化発生順序が異なっている。とくに、 α_{pl} にかかわらず、柱基部とはり中央で塑性化して崩壊メカニズムを形成後（点 B）、 δ が增大すると隅角部腹板も塑性化してしまうことがわかる。

この点を調べるため、 $\alpha_{pl}=1.5$ 、 $\beta_{pr}=0.45$ のときの隅角部とはり中央腹板のせん断力、それぞれ Q_s と Q_b の関係を Fig.3 に示す。この図からわかるように、 $|Q_s|-|Q_b|$ 関係は、図中に示した弾性線形解にほぼ従っている。しかし、はり中央が塑性化し始めた点 B 以降では、隅角部のせん断力 Q_s の割合が徐々に大きくなる傾向にある。これは、非弾性応答の範囲にあること、および、はり中央腹板のせん断耐力がひずみ硬化によって上昇することに起因していると考ええる。

(2) 門形ラーメンの非弾性地震応答解析

水平変位応答が大きく現れるように、水平地震動 El-Centro NS 成分(1941)を増幅し、 $\beta_{pr}=0.45$ で $\alpha_{pl}=0.5$ 、1.5 の場合について、ラーメンの非弾性地震応答解析を行った。そして、はり中央腹板がせん断崩壊するとき、上述した崩壊メカニズムの変動が地震応答にどのように現れるかを調べた。

a. 水平復元力 H-変位 δ 曲線

まず、水平復元力 H-変位 δ 曲線を Fig.4 に示す。

この図からわかるように、柱基部と隅角部の塑性モ

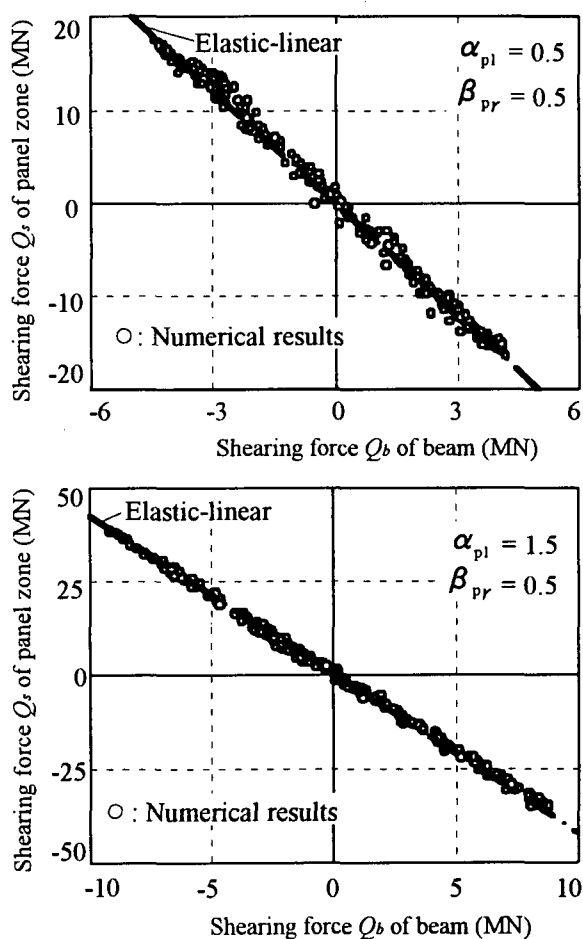


Fig.5 Q_s - Q_b relationship by earthquake response analysis

ーメント比 α_{pl} の大きさによって、H- δ 曲線の履歴ループに差異が現れている。すなわち、はり腹板の塑性化が早期に起こっても柱基部の塑性化が遅い $\alpha_{pl}=0.5$ の場合は Bi-Linear 型、また柱基部とはり腹板が早期に塑性化する $\alpha_{pl}=1.5$ のときは Tri-Linear 型に近いループになっている。これらの関係は、ほぼ上で示した単調増加の水平荷重作用下における崩壊メカニズムから説明できるものである。

b. 隅角部とはり中央腹板のせん断力の関係

つぎに、はり中央腹板のせん断力 Q_b と隅角部のせん断力 Q_s の関係を Fig.5 に示す。

この図から、2つのせん断力は、上述した単調増加解析の結果と同様に、ほぼ線形関係にあることがわかる。これより、ラーメンが非弾性応答を呈した場合でも、はり中央と隅角部腹板のせん断力は、ほぼ弾性線形解で近似できるように考える。

c. 累積塑性ひずみと履歴消費エネルギーの時刻歴応答

柱基部、はり中央、および、隅角部の塑性ひずみと履歴消費エネルギーの時刻歴応答を Fig.6 に示す。塑性ひずみとしては、柱基部では増分塑性曲率の絶対値和 $\sum |\Delta \phi_p|$ 、はり中央と隅角部では腹板の増分塑性せん断変形角の絶対値和 $\sum |\Delta \gamma_{pl}|$ をとり、それぞれ降伏曲率 ϕ_y と降伏せん断ひずみ γ_y で無次元化している。

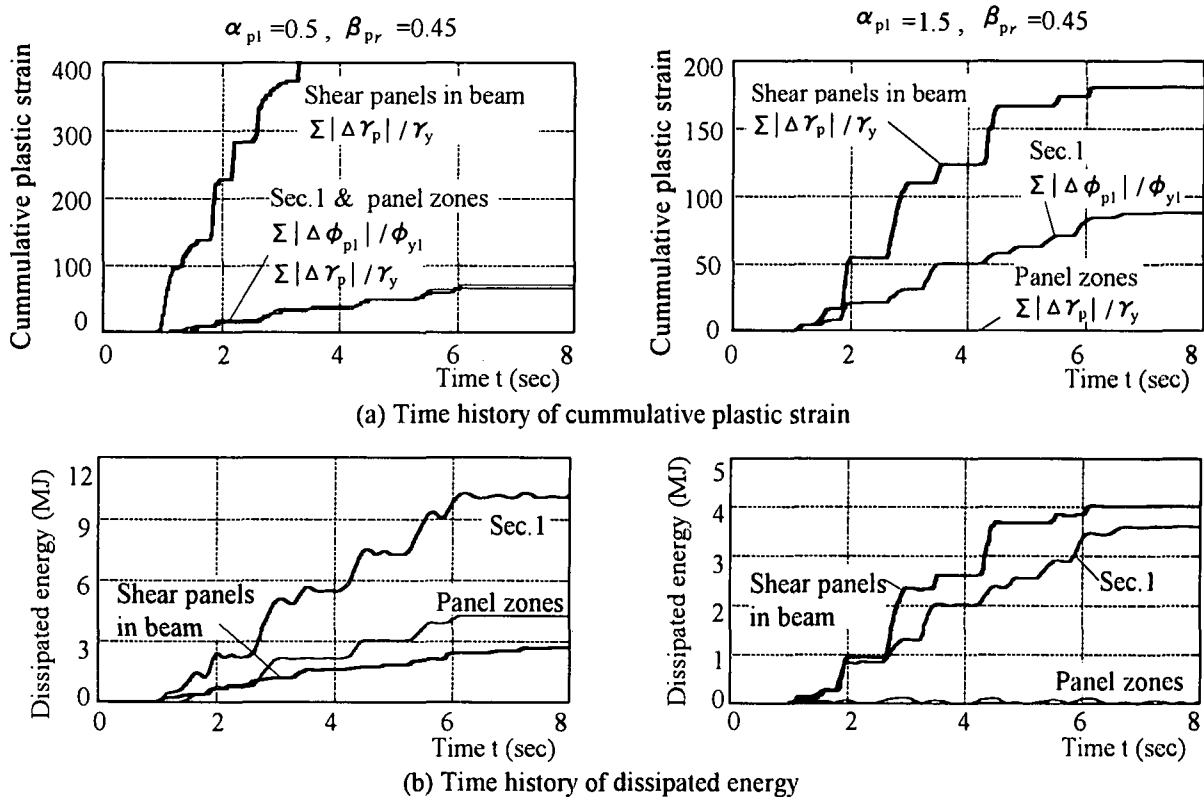


Fig.6 Time history of plastic strain and dissipated energy

まず、 $\alpha_{pl}=0.5$ のとき、はり腹板の累積塑性ひずみが著しく大きくなっていることがわかる。しかし、履歴エネルギーの消費は、抵抗断面力の大きな柱基部と隅角部による分担が大きい。

一方、 $\alpha_{pl}=1.5$ のとき、はり腹板の累積塑性ひずみは $\alpha_{pl}=0.5$ のときの 20%程度になり、柱基部の塑性ひずみも $\alpha_{pl}=0.5$ のときより若干小さい。また、隅角部については、ほぼ弾性範囲に留まっている。履歴エネルギーは、柱基部とはり腹板で、ほぼ半分ずつ分担している。

したがって、はり中央腹板の塑性せん断変形を利用して、隅角部の損傷を小さく留めることを期待するためには、柱基部の塑性化が早期に起こるように、柱基部と隅角部の塑性モーメント比 α_{pl} についても検討する必要がある。

4. まとめ

本研究は、はり中央腹板のせん断崩壊を伴った 1 層門形ラーメンの崩壊メカニズムの変動性状を調べたものである。主な結論は以下のとおりである。

- 1) ラーメンは、柱基部とはり中央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挙動を呈するメカニズムが起こる場合がある。
- 2) この崩壊メカニズムは、塑性化したはり中央腹板のひずみ硬化が関係するため、実際の崩壊挙動を実験

で確認していく必要がある。

- 3) はり腹板と隅角部腹板のせん断力は、非弾性域においても、ほぼ線形関係にある。
- 4) はり中央腹板が塑性化するとき、ラーメンの復元力特性は、柱基部が早期に塑性化する場合とそうでない場合で、かなり異なったものになる。
- 5) 隅角部の損傷は、柱基部と隅角部の塑性モーメント比 α_{pl} によって影響を受ける。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、平成 10～11 年度の文部省科学技術研究費・基盤研究 C 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) 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。
- 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，構造工学論文集，Vol.45A，土木学会，pp.227～234，1999 年 3 月。