

箱形ばり中央のせん断崩壊による門形ラーメンの柱基部の履歴エネルギー分担特性

和歌山工業高等専門学校 正会員 ○山田 幸 神戸市立工業高等専門学校 正会員 酒造敏廣
川田工業株式会社 戸田智規 大同大学工学部 正会員 水澤富作

1. まえがき

鋼門形ラーメン橋脚のはり中間部腹板では、比較的幅厚比が大きい鋼板が用いられているため、地震時にせん断座屈崩壊する可能性がある。筆者らは、オンライン実験の手法を応用して、はり腹板のせん断座屈崩壊を伴うラーメンの地震応答を調べてきた。そして、腹板の抵抗せん断力の変動が柱基部の損傷や履歴エネルギー分担に少なからず影響を及ぼすことを明らかにしてきた。

本研究は、オンライン実験の実験プロセスを対象とした箱形ばりを汎用 FEM コードで仮想化し、はりせん断座屈崩壊を考慮したラーメンの地震応答解析を行うものである。

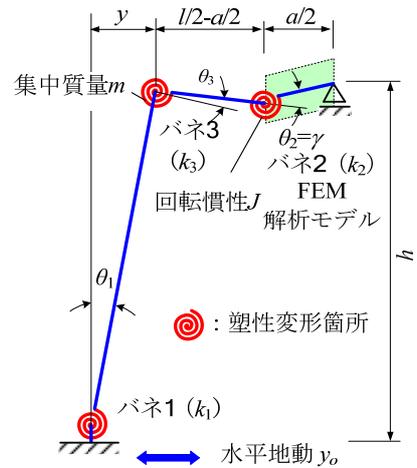
2. 汎用 FEM ソフトを活用したラーメンの仮想的な地震応答解析法

図 1(a)に示すように、はり中央部がせん断座屈する門形ラーメンをモデル化した逆 L 型ラーメンを解析対象とする。柱頭部には水平並進運動に対応する集中質量 m 、および、はり中間部には回転慣性 J を仮定する。せん断崩壊するはり中間部は、同図(b)に示すように、腹板、フランジ・プレート、および、縦補剛材ともに 4 節点の薄肉シェル要素でモデル化し、MARC で弾塑性有限変位解析を行う。ここで、縦補剛材を持つフランジ・プレートと腹板をはり中央の区間 a で取り出すと、縦補剛材の面内変位を拘束するので、両側に $0.3a$ だけパネルを延長した箱形ばりを解析対象としている。

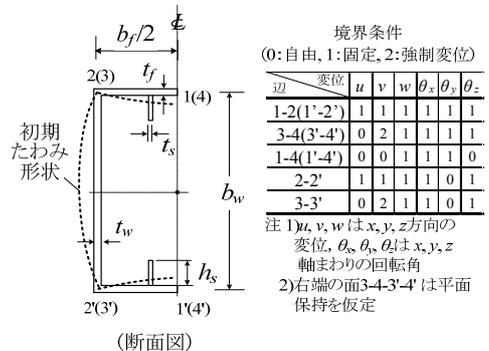
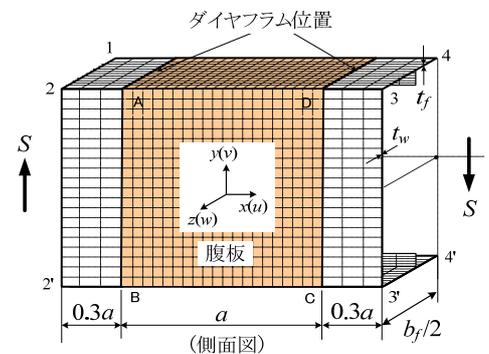
運動方程式の数値積分法には α -OS 法を用いる²⁾。時刻 t_{n+1} における修正子変位ベクトル \mathbf{d}_{n+1} に関する運動方程式は次式で与えられる²⁾。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_{n+1} + (1+\alpha)\mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}_{n+1} - \alpha\mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}_n + (1+\alpha)(\mathbf{K}^L\mathbf{d}_{n+1} + \mathbf{K}^E\mathbf{d}_{n+1}) - \alpha(\mathbf{K}^L\mathbf{d}_n + \mathbf{K}^E\mathbf{d}_n) \\ = (1+\alpha)\mathbf{P}_{n+1} - \alpha\mathbf{P}_n - (1+\alpha)\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_{0,n+1} + \alpha\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_{0,n} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} ：質量と減衰マトリックス、 \mathbf{K}^L 、 \mathbf{K}^E ：線形・非線形部分の剛性マトリックス、 α ：数値減衰パラメータ(=-1/3)、 \mathbf{d} 、 \mathbf{d}_0 、 \mathbf{d} ：加速度、速度、水平外力、水平地動加速度、および、予測子変位の各ベクトルである。応答解析は MARC のユーザサブルーチンの中で進める。はり中間部では、予測子変位からせん断変形



(a) 弾塑性回転バネを組み込んだ解析モデル



(b) はり中央の FEM モデル

図-1 一層門形ラーメンの解析モデル

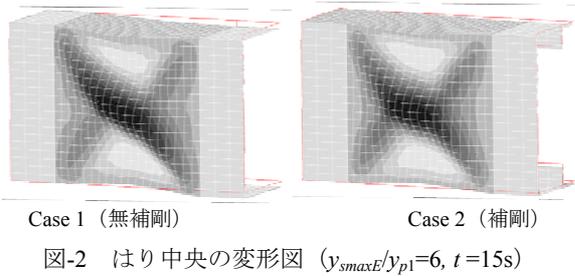
表-1 一層門形ラーメンの基本データ

ラーメンの地震応答解析モデル						箱形ばり中央の FEM モデル				
バネ定数 (GN・m)			塑性モーメント (MN・m)			崩壊荷重 H_p (MN)	腹板		フランジ・プレート	
k_1	k_2	k_3	M_{p1}	M_{p2}	M_{p3}		b_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)
44.7	4.18	49.4	95.5	7.16	3.58	13.1	2,000	13.2	2,300	30

注 1) $h=l=10\text{m}$ 2)固有周期 $T_1=1\text{s}$, $T_2=0.001\text{s}$ 3) $M-\theta$ 曲線の塑性域勾配 $\mu_1=\mu_2=0.01$
4)質量 $m=1.98 \times 10^7\text{kg}$, $J=156\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$ 5)せん断変形区間長 $a=2\text{m}$ 6) R_f :腹板の無次元幅厚比(=1.34) 7) R_f :フランジ・プレートの無次元幅厚比 Case1: 1.36, Case 2: 0.45 8)ヤング係数 $E=206\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu=0.3$, せん断弾性係数 $G=79.2\text{GPa}$ 9)はり中央の降伏点 $\sigma_y=235\text{MPa}$, せん断降伏点 $\tau_y=136\text{MPa}$

キーワード はりのせん断崩壊, 門形ラーメン, 地震応答解析, 汎用 FEM コード

連絡先 〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島 77 TEL 0738-29-8456 FAX 0738-29-8469



角に相当する強制変位を FEM モデルに与え、弾塑性有限変位解析を行う。復元せん断力 S を計測し、不つり合い力項、修正子変位を計算する。柱基部、隅角部については、モーメント M —回転角 θ 関係をバイリニアモデルで仮定して弾塑性判定を行う。

3. 地震応答解析の結果と考察

ラーメンの寸法諸元等を表 1 に示す。はり中央のフランジ・プレートが無補剛の Case 1, 縦補剛材で補剛した Case 2 の 2 ケースを解析した。地動加速度には、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波の NS 成分を用いた。柱頭部の弾性最大変位応答 y_{smaxE} が柱基部の降伏に相当する変位 y_{p1} の何倍になるかを指定して加速度を増幅している。

まず、はり中央部の変形図を図 2 に示す。また、増幅パラメータ $y_{smaxE}/y_{p1}=3, 4, 6$ および 10 の結果から、 y_{smaxE}/y_{p1} と柱基部の履歴エネルギー分担率 R_{E1ep} (=柱基部の履歴エネルギー/ラーメン全体の履歴エネルギー) の変動を図 13 に示す。Case 2 では、縦補剛材の曲げ剛比 γ_l を必要剛比 γ_{lreq} の 3, 5 倍を考えている。図中の $R_{E1max}=0.73$ の境界線は柱基部のエネルギー分担率である¹⁾。0.77 の境界線は、腹板のせん断降伏点 τ_y の代わりにせん断座屈応力 τ_{cr} を用いた R_{E1max} の参考値である。また、同図には、バネ 2 に完全弾塑性の M — θ 関係を仮定したバイリニア解析の結果も示している。

この図から、柱基部のエネルギー分担率はバイリニア解析の結果を大きく上回っており、箱形ばりのせん断座屈崩壊に起因して塑性変形が大きくなっていることがわかる。また、フランジ・プレートの縦補剛材の曲げ剛比 γ_l / 必要剛比 $\gamma_{lreq}=3, 5$ の結果を比較すると、両者の差異は非常に小さい。

Case 2 の半サイクル毎の履歴ループ(図 4 参照)の大小によって、柱基部とはり中央部の履歴エネルギー分担がどのように変動するかを図 5 にまとめる。地動加速度が大きくなると、柱基部の履歴エネルギー分担は大きくなり、はり腹板によるエネルギー吸収の割合は小さくなっている。

4. まとめ

はり中央が早期にせん断座屈するとき、地震動が大きくなると、はり腹板の抵抗せん断力の低下・変動が著しくなり、はり中央には柱基部の塑性変形を抑えるエネルギー吸収部材としての効果を期待できない。最後に、本研究には、平成 20~22 年度の科学研究費補助金・基盤研究 C (課題番号 20560452) の補助を受けたことを付記する。

参考文献 1)山田, 酒造: 土木学会論文集 A, Vol.65, No2, pp.348~361, 2009 年 4 月. 2)中島, 赤澤, 阪口: 日本建築学会構造系論文集, 第 454 号, pp61~71, 1993 年 12 月.

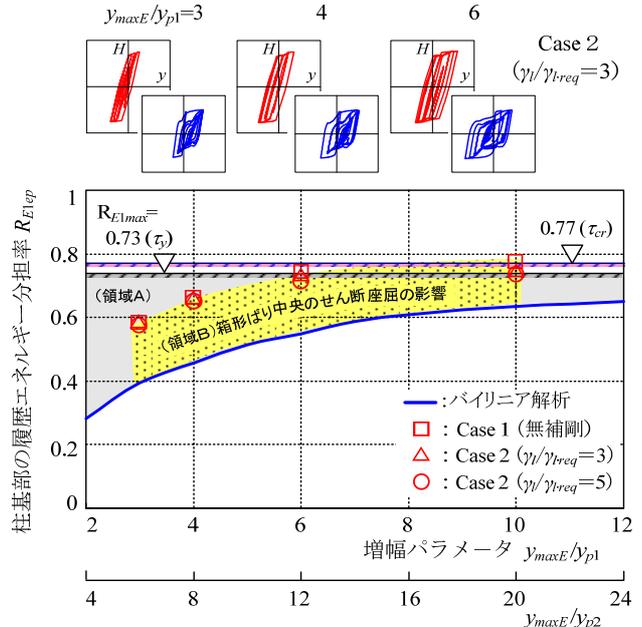


図 3 はり中央がせん断崩壊するときの柱基部の履歴エネルギー分担率の変動 ($y_{p2}/y_{p1}=0.5$)

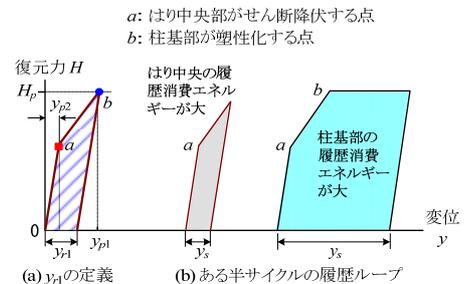


図 4 復元力—変位曲線と変位応答スパン

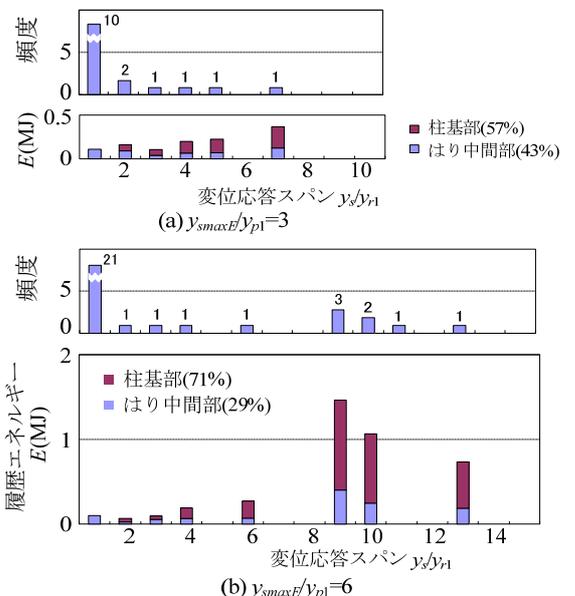


図 5 変位応答スパンとラーメン各部の履歴エネルギー分担率 (Case 2, $y_{p2}/y_{p1}=0.5$)