

神戸市立工業高等専門学校 正会員 ○酒造敏廣
和歌山工業高等専門学校 正会員 山田 幸

大同大学工学部 正会員 水澤富作
大同大学大学院 学生会員 戸田智規

1. まえがき

地震動を受ける鋼製ラーメン橋脚の非弾性応答性状は、はり中央のせん断崩壊の有無によって大きく影響を受ける場合がある。筆者らは、オンライン実験手法を用いて、ラーメンの地震応答解析を行い、せん断座屈する腹板の斜め張力場発生による抵抗せん断力の変動とそれに対応する地震応答の特徴を調べてきた¹⁾。

本研究では、はり中央がせん断崩壊する一層ラーメンを対象として、汎用 FEM ソフトを用いて地震応答解析を行い、フランジ・プレートの縦補剛材の有無がラーメンの地震応答性状に及ぼす影響を調べている。

2. 汎用 FEM コード MARC を用いた門形ラーメンの地震応答解析

はり中央部がせん断座屈する門形ラーメンを図 1(a)に示すようにモデル化する。柱頭部には水平並進運動に対応する集中質量 m 、はり中間部には回転慣性 J を仮定する。はり中間部は、同図(b)に示すように、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、はり中央を区間 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 FEM モデルとした。

運動方程式の数値積分には α -OS 法を用いる²⁾。時刻 t_{n+1} において、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⁾。

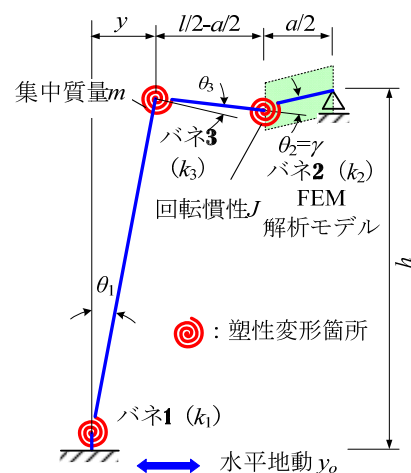
$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_{n+1} + (1+\alpha)\mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}_{n+1} - \alpha\mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}_n + (1+\alpha)(\mathbf{K}^I\mathbf{d}_{n+1} + \mathbf{K}^E_{n+1}\tilde{\mathbf{d}}_{n+1}) - \alpha(\mathbf{K}^I\mathbf{d}_n + \mathbf{K}^E_n\tilde{\mathbf{d}}_n) \\ = (1+\alpha)\mathbf{P}_{n+1}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

ここに、 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ ：質量と減衰マトリックス、 $\mathbf{K}^I$ 、 $\mathbf{K}^E$ ：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)、 $\mathbf{d}$ 、 $\tilde{\mathbf{d}}$ 、 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{d}_0$ 、 $\tilde{\mathbf{d}}$ ：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。FEM モデルには、予測子変位からせん断変形角に相当する強制変位を与え、復元せん断力 S を求めて修正子変位を計算する。柱基部と隅角部は、パイリニアのモーメント M —回転角 θ 関係によって弾塑性判定を行う。

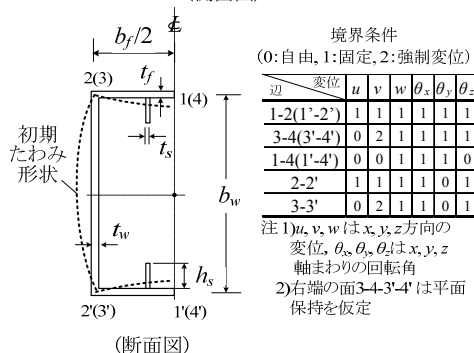
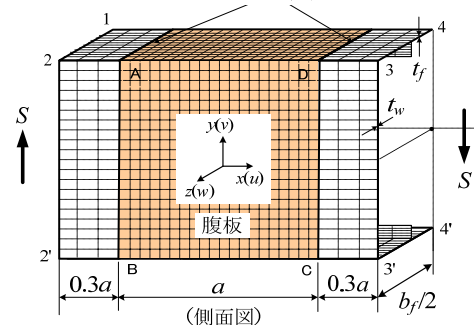
表 1 一層門形ラーメンの基本データ

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)
44.7	4.18	49.4	95.5	7.16	3.58	13.1	2,000	13.2	2,300
									30

注 1) $l=10\text{m}$ 2)固有周期 $T_1=1\text{s}$, $T_2=0.001\text{s}$ 3) M — θ 曲線の塑性域勾配 $\mu_1=\mu_2=0.01$ 4)質量 $m=1.98\times 10^4\text{kg}$, $J=156\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$ 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 $\tau_y=136\text{MPa}$



(a) 弾塑性回転バネを組み込んだ解析モデル
ダイヤフラム位置



(b) はり中央のパネル延長 FEM モデル

図 1 鋼一層門形ラーメンの解析モデル

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．入力地動加速度には，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．ラーメンの弾性最大変位応答が柱基部の降伏に相当する変位の 6 倍になるように加速度を増幅している．

まず，時刻 $t=15\text{s}$ のはり中央部の変形を図 2 に示す．つぎに，はり中央のせん断力 S －せん断変形角 γ 曲線，柱基部の復元モーメント M_1 －回転角 θ_1 曲線と絶対累積塑性ひずみの時刻歴応答，および，ラーメンの水平復元力 H －変位 y 曲線を図 3 に示す．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．ここで，柱基部の絶対累積塑性ひずみは，増分塑性回転角 $\Delta\theta_{p1}$ の絶対値和 $\sum|\Delta\theta_{p1}|$ を降伏回転角 θ_{y1} で除して表している．

この図から，はり腹板のせん断座屈に起因して，復元せん断力がバイリニア解析の結果に比べて，大きく低下していることがわかる．これは，幅厚比が大きい無補剛フランジ・プレートの Case 1 で顕著であり，せん断座屈後の耐力上昇も小さい．一方，フランジ・プレートを縦補剛材で補剛した Case 2 は，座屈後に復元せん断力がほぼ降伏せん断力のレベルにまで上昇している．補剛フランジ・プレートが，せん断座屈した腹板の斜め張力場形成時のアンカーとして働いている．

4. まとめ

門形ラーメンの地震応答解析を行い，箱形ばり中間部のフランジ・プレートの補剛・無補剛による地震応答性状の変動を明らかにした．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）と神戸市立高専の平成 22 年度研究援助金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．

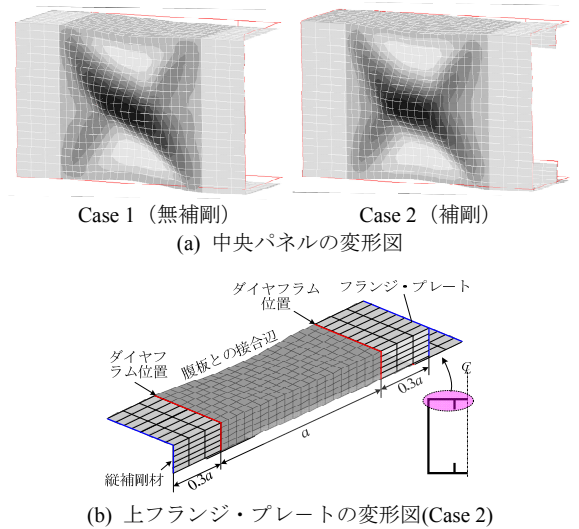


図 2 はり中央の変形図 ($t=15\text{s}$ ，倍率：3 倍)

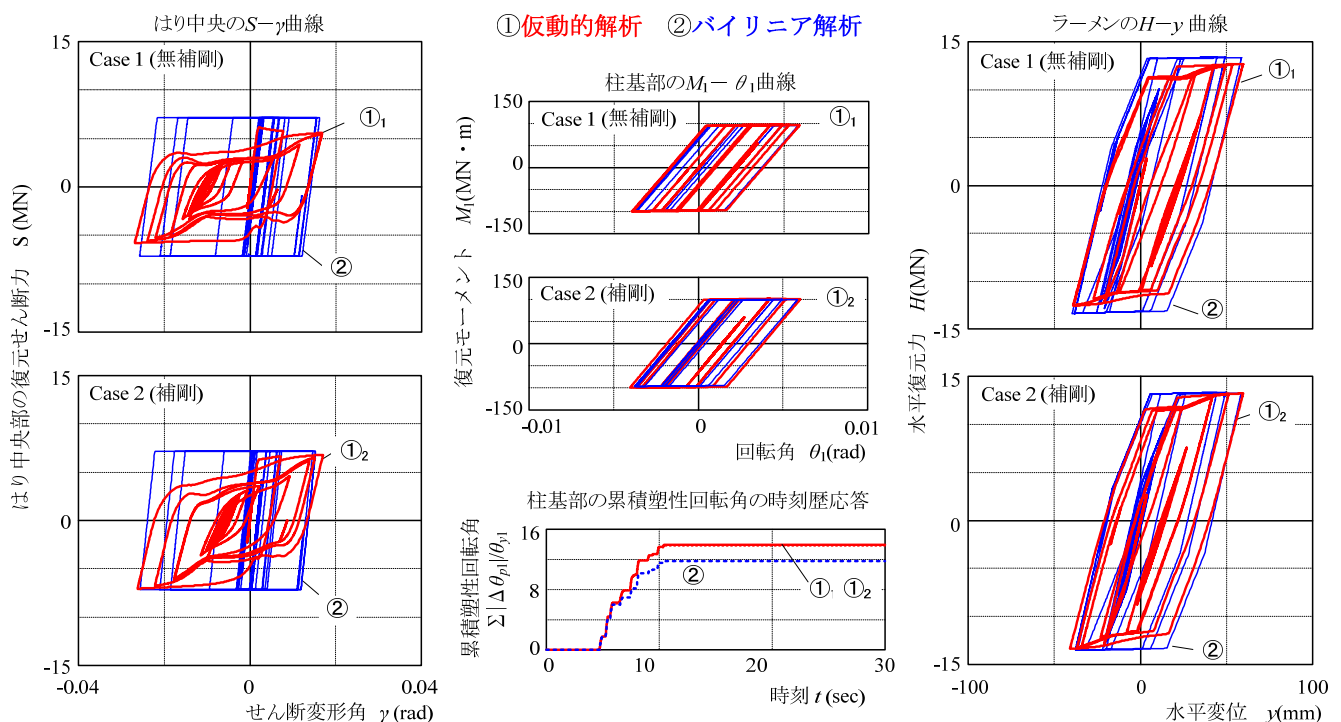


図3 補剛箱形ばりのせん断座屈崩壊を伴う一層門形ラーメンの地震応答性状 ($y_{maxE}/y_{p1}=6, y_{p2}/y_{p1}=0.5$)