

はり中央のせん断座屈崩壊を考慮した鋼門形ラーメンの 地震応答シミュレーション

山田 幸¹, 篠瀬 圭介², 酒造 敏廣³

¹学生会員 工修 大同工業大学大学院工学研究科博士後期課程 材料・環境工学専攻 在学中
(〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

²学生会員 大同工業大学大学院工学研究科都市修士課程 環境デザイン学専攻 在学中
(〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

³正会員 工博 大同工業大学工学部都市環境デザイン学科 教授 (〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

1. まえがき

非弾性範囲で複雑な履歴挙動を呈する部材が構造物の中に存在するとき、構造物の地震時崩壊挙動を調べていく上で、実モデルを用いたオンライン実験(仮動的実験、ハイブリッド実験とも呼ばれる)が有効になる^{1)~5)}。しかし、この手法は実験プロセスを有するために、通常の実験解析で用いられる試行錯誤の収束計算法の適用が難しく、中央差分法等の数値積分法は安定条件が厳しいことから、自由度が高いサブストラクチャ・オンライン実験では、サーボアクチュエータの性能・制御限界が問題になることも指摘されている^{6)~9)}。

このような点を克服できる数値積分アルゴリズムとして、中島ら⁹⁾は、Huges¹⁰⁾らが非線形有限要素解析の計算時間短縮のために提示したオペレータ・スプリッティング(OS)法と高次振動モードに対して数値減衰を考慮できる α 法¹¹⁾とを組み合わせた α -OS法を提案している⁹⁾。

筆者らは、文献12)、13)において、はり中央腹板がせん断崩壊する一、二層の鋼門形ラーメンの地震応答解析モデルを示し、 α -OS法を適用したオンライン実験手法により、動的応答解析を実施した。これらの研究では、せん断座屈して複雑な履歴挙動を呈する鋼薄肉はり腹板^{14)~18)}をサブストラクチャ実験モデルに置換し、腹板のせん断座屈や斜張力場発生が柱基部の弾塑性性状やラーメン全体の復元力・履歴エネルギー等の応答に及ぼす影響について考察した。

本研究は、実験と数値解析を組み合わせたオンライン実験手法の考え方を応用して、 α -OS法による数値積分プログラムの中に汎用非線形構造解析ソルバーMarc¹⁹⁾(以下、MARCと略す)を組み込み、はり中央のせん断座屈崩壊を考慮して、一層門形ラーメンの地震応答解析

を行うものである。はり中央のフランジ・プレートが腹板のせん断崩壊挙動とラーメンの地震応答に及ぼす影響を調べ、先に実施したオンライン実験法^{12)、13)}で考慮できなかった点を補うことを目的としている。

まず、はり中央の部分構造FEMモデルを示し、 α -OS法を用いたラーメンの時刻歴応答解析法について述べる。つぎに、繰り返しせん断力を受ける腹板の履歴挙動をMARCを用いて予備解析し、せん断座屈後の腹板の斜張力場形成に及ぼすフランジ・プレートの影響を分析する。さらに、はり中央のせん断崩壊挙動をMARCによる解析で忠実に考慮しながら、ラーメンの地震応答解析を行う。最後に、解析結果とオンライン実験法の結果¹²⁾を比較の上、はり中央のフランジ・プレートが斜張力場形成後の腹板に引き込まれることによって、ラーメンの地震応答がどのように変動するかを考察する。

2. はり中央のせん断崩壊を考慮した鋼門形ラーメンの地震応答解析法

(1) 解析上の仮定と解析モデル

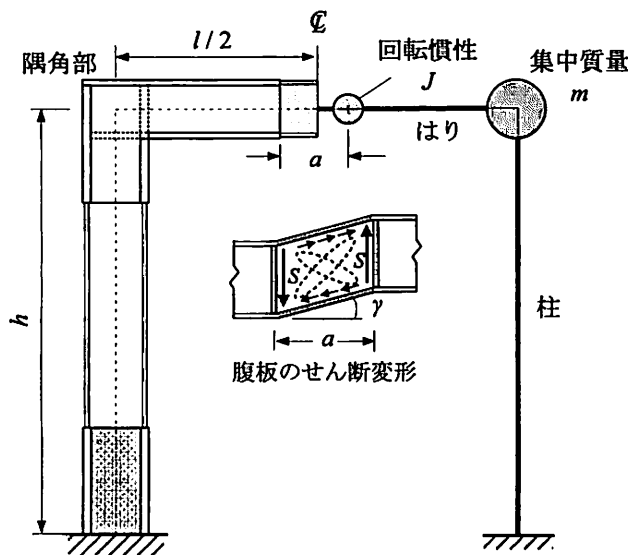
本文では、図-1(a)に示すように、水平外力と地動を受ける鋼一層門形ラーメンを研究対象としている。

a) 解析上の仮定

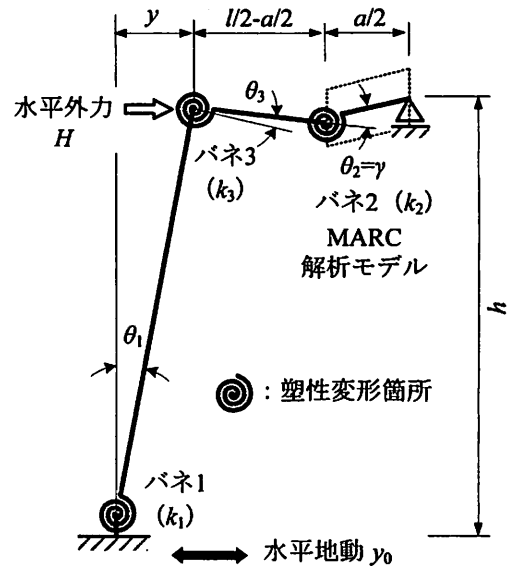
解析モデルを作成するにあたり、以下の仮定を設けた。

i) 曲げモーメントが卓越する柱基部、隅角部近傍のはり一柱部材、および、せん断力が卓越するはり中間部に回転バネを組み込んで、ラーメンの弾塑性挙動を考慮し(同図(b)参照)、回転バネ以外の部分は、剛体として取り扱う。

ii) 鉛直荷重の影響(P - Δ 効果)と柱の軸力変動は無視



(a) 門形ラーメン



(b) 弾塑性回転バネを組み込んだ解析モデル

図-1 はりがせん断崩壊する鋼一層門形ラーメンの解析モデル¹²⁾

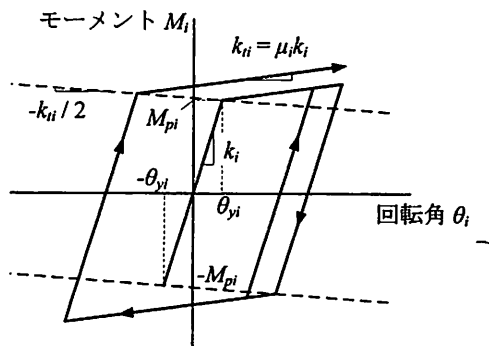


図-2 回転バネ k_i のモーメント M_i - 回転角 θ_i 関係 ($i=1,3$)

できる。

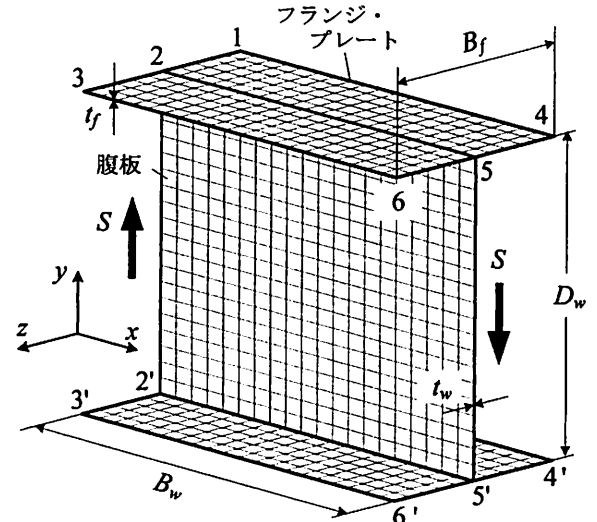
iii) はり中間部では、曲げモーメントに比べて、せん断力が卓越するため、フランジ・プレートと腹板からなる断面は単純せん断状態にあるとみなせる。

iv) せん断を受ける鋼板の幅厚比パラメータ R_t (式(3)参照) が等しいとき、降伏せん断応力 τ_y と降伏せん断ひずみ γ_y で無次元化した無次元平均せん断応力 - 無次元せん断変形角の関係は同一になるものとする。

b) 門形ラーメンの解析モデル

上記の仮定を用いて、図-1(b)に示すように、はり中央でローラー支持された二自由度系の逆L形ラーメンを解析モデルとする¹²⁾。柱頭部にはラーメンの水平並進運動に対応する集中質量 m を仮定し、かつ、運動方程式において、はり腹板のせん断変形角 γ ($=\theta_2$) を陽的に表すために、回転バネを組み込んだ位置に回転慣性 J を仮定している。

はり中間部の回転バネ 2 は、区間 a のせん断崩壊挙動を表し、(2)に述べる FEM 解析モデルに置換する。バネ



境界条件 (0: 自由, 1: 固定, 2: 強制変位)

節点	変位	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
1-2-3 (1'-2'-3')	1	1	1	1	1	1	1
4-5-6 (4'-5'-6')	0	2	1	1	1	1	1
2-2'	1	1	1	1	0	1	1
5-5'	0	2	1	1	0	1	1
2-5 (2'-5')	0	0	1	0	0	0	0

注 1) u, v, w は x, y, z 方向の変位, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ は x, y, z 軸まわりの回転角
2) 右端の面 4-5-6-4'-5'-6' は平面保持を仮定。

図-3 MARCで解析対象とするはり中間部 (バネ 2) の FEM 解析モデル (オンライン実験法モデル^{12),13)}

2 のモーメント M_2 と回転角 θ_2 は、腹板のせん断力 S 、せん断変形角 γ との間に次の関係がある。

$$M_2 = Sa/2 \quad (1)$$

$$\theta_2 = \gamma \quad (2)$$

柱基部と隅角部の回転バネ 1, 3 には、文献 12) と同様に、図-2 のバイリニア型の弾塑性 $M-\theta$ 関係を用いる。

なお、本研究では、解析結果を文献 12) の地震応答解析の結果と比較する際、解析方法を次のように表記して

表-1 はり中央部の寸法諸元等(オンライン実験モデル¹²⁾)

Model	B_w (mm)	D_w (mm)	t_w (mm)	B_f (mm)	t_f (mm)	I_f/I	$(B_f/2)/t_f$
1	200	200	1.35	124.8	6.24	0.95	10
2	200	200	1.35	51.0	2.55	0.75	10

区別している。

- ①MARC：はり中央部を FEM 解析モデル (図-3) に置換して、(3)に従って地震応答解析を行ったもの (本研究の方法)。
- ②オンライン実験法による応答解析 (単に、オンライン実験法と記す)：はり中央部をせん断力を受ける鋼腹板に置換して、オンライン実験法により地震応答解析を行ったもの (文献 12)の結果を引用)。
- ③バイリニア解析：はり中間部のバネ 2 に対して、完全弾塑性のバイリニア $M-\theta$ 曲線 ($\mu_2=0$) を用いて、地震応答解析を行ったもの (文献 12)の結果を引用。同文献では純数値解析と呼んでいた)。

(2) はり中間部の FEM 解析モデルと境界条件

MARC で解析対象とするはり中間部の FEM 解析モデルとその境界条件を図-3 に示し、その寸法諸元等を表-1 に示す。オンライン実験の供試体¹²⁾に合わせて、正方形腹板にフランジ・プレートが付いた I 形断面を仮定している。フランジ・プレートの大小による斜張力場の影響を考慮するため、I 形断面の断面 2 次モーメント I に占めるフランジ・プレートの断面 2 次モーメント I_f の割合が $I_f/I=0.95$ 、または、0.75 となるように、フランジ・プレート寸法を 2 種類に設定している。

腹板とフランジ・プレートは、ともに 4 節点の薄肉シェル要素でモデル化し¹⁹⁾、それぞれ、 20×20 、および、 20×10 に要素分割している。

解析モデルの材料特性は、文献 12)の供試体の値を参照して、ヤング係数 $E=2.07 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、降伏点 $\sigma_y=293 \text{MPa}$ (降伏せん断応力 $\tau_y=169 \text{MPa}$) としている。応力-ひずみ曲線は、塑性域の勾配を弾性域の $1/100$ とするバイリニア型とし、ひずみ硬化は、等方・移動の混合硬化則に従うものとした。

解析では、図-3 の左端の鉛直変位を固定し、平面保持する右端で、 y 方向に所定のせん断変形角 γ に相当する強制変位を与えて、せん断力を作用させる。その他の境界条件は同図に示したとおりであり、武田^{14),16)}によって実施された I 桁の実験結果から、せん断座屈して斜張力場を形成した腹板の崩壊状況を参考にしている。

なお、腹板のせん断座屈に対する幅厚比パラメータ R_t は、辺長比 1.0 の周辺単純支持板 (座屈係数 $k_s=9.34$) の場合、1.46 となる。

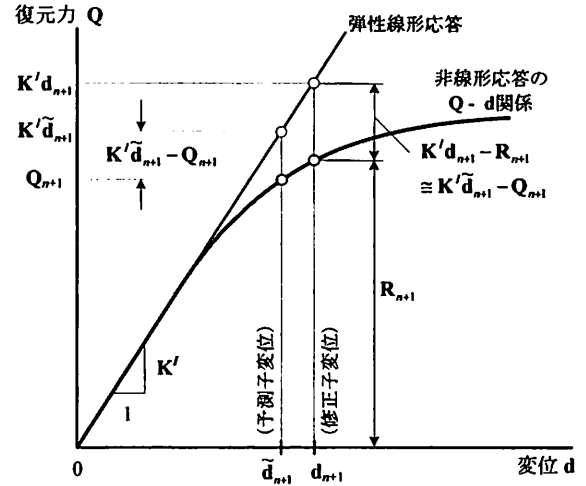


図-4 OS 法の予測子・修正子変位に対応する復元力と不釣り合い力 (時刻 $t=t_{n+1}$)^{8),9),20)}

$$R_r = \frac{D_w}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\tau_y}{k_s \pi^2 E}} \quad (3)$$

(3) ラーメンの運動方程式と数値積分法

地震応答解析に用いるラーメンの運動方程式と数値積分法には、文献 12), 13)と同様に α -OS 法⁹⁾を適用する。

a) 運動方程式

水平外力と地動加速度が門形ラーメンに作用するとき、時刻 t_{n+1} において、柱頭部の水平変位 y とバネ 2 の回転角 θ_2 を表す変位ベクトル $\mathbf{d}_{n+1}$ に関する運動方程式は、次式で与えられる⁹⁾。

$$\begin{aligned} & \mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}}_{n+1} + (1+\alpha) \mathbf{C} \dot{\mathbf{d}}_{n+1} - \alpha \mathbf{C} \dot{\mathbf{d}}_n \\ & + (1+\alpha)(\mathbf{K}^I \mathbf{d}_{n+1} + \mathbf{K}_{n+1}^E \tilde{\mathbf{d}}_{n+1}) - \alpha(\mathbf{K}^I \mathbf{d}_n + \mathbf{K}_n^E \tilde{\mathbf{d}}_n) \\ & = (1+\alpha) \mathbf{P}_{n+1} - \alpha \mathbf{P}_n - (1+\alpha) \mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}}_{0,n+1} + \alpha \mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}}_{0,n} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\ddot{\mathbf{d}}$, $\dot{\mathbf{d}}$, $\mathbf{d}$, $\mathbf{P}$, $\ddot{\mathbf{d}}_0$, $\tilde{\mathbf{d}}$ は、加速度、速度、修正子変位、外力、地動加速度、および、予測子変位の各ベクトルである。また、 $\mathbf{K}^I$ は弾性剛性マトリクス¹²⁾、 $\mathbf{K}^E$ はラーメンの弾塑性挙動の履歴に依存する剛性マトリクス (式(8)参照) である。

$$\mathbf{K}^I = \begin{bmatrix} \frac{k_1 + k_3}{h^2} & \frac{a}{lh} k_3 \\ \frac{a}{lh} k_3 & k_2 + \frac{a^2}{l^2} k_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

α は数値減衰に関するパラメータ ($=-1/3$)^{9),11)}、 $\mathbf{M}$ は質量マトリックスである。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \quad (6)$$

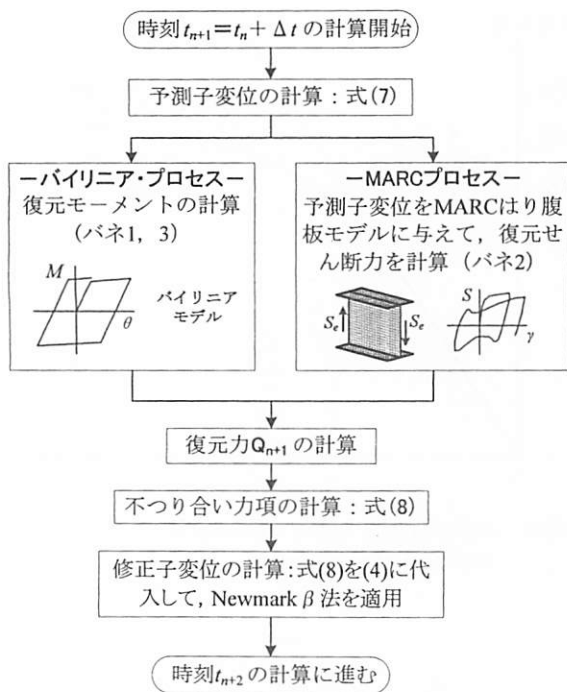


図-5 MARCによるFEM解析プロセスを含んだ門形
ラーメンの地震応答解析の流れ

減衰マトリックス C にはレーリー型²³⁾を仮定し、減衰定数を5%に設定している。

b) 予測変位ベクトルとそれによる復元力、および、修正変位の算定

まず、予測変位 $\tilde{\mathbf{d}}_{n+1}$ を次式で近似する⁹⁾。

$$\tilde{\mathbf{d}}_{n+1} = \mathbf{d}_n + \dot{\mathbf{d}}_n \Delta t + (1/2 - \beta) \ddot{\mathbf{d}}_n \Delta t^2 \quad (7)$$

ここに、 $\beta = (1 - \alpha)^2 / 4$ である。

つぎに、予測変位に対してラーメンの非線形剛性が分担する見かけ上の復元力(=不釣り合い力) $\mathbf{K}^E \tilde{\mathbf{d}}_{n+1}$ は、図-4を参考にすると、真の復元力 $\mathbf{Q}_{n+1}$ から弾性剛性によ

る復元力 $\mathbf{K}^I \tilde{\mathbf{d}}_{n+1}$ を差し引いて得られる。すなわち、

$$\mathbf{K}^E \tilde{\mathbf{d}}_{n+1} = \mathbf{Q}_{n+1} - \mathbf{K}^I \tilde{\mathbf{d}}_{n+1} \quad (8)$$

そして、同図に示すように、ラーメンが非線形挙動を呈するとき、修正変位に対して発生する不釣り合い力を予測変位に対するそれで近似し²⁰⁾、式(4)の運動方程式が成り立つように変位を修正する。すなわち、式(8)を式(4)に代入して整理すると、修正変位ベクトル $\mathbf{d}_{n+1}$ に関する運動方程式が誘導できる。これにNewmark β 法を用いると、時刻 t_{n+1} の加速度 $\ddot{\mathbf{d}}_{n+1}$ 、速度 $\dot{\mathbf{d}}_{n+1}$ 、および、修正変位 $\mathbf{d}_{n+1}$ の各ベクトルが求められる^{8), 9), 12)}。

以上に説明した地震応答シミュレーションの流れを図-5に示す。ラーメン全体の時刻歴応答解析プログラムはMARCのユーザー・サブルーチンに組み込んでいる。予測変位を計算する毎に、はり中央のせん断変形角 γ に相当する変位をMARCのFEM解析モデルに与えて、はり中央の復元せん断力を計算する。それをユーザー・サブルーチンの応答解析プログラムにフィードバックして、修正変位、速度、加速度の各ベクトルを計算していく。実験プロセスが図中のMARCプロセスに置き換わっている点で、オンライン実験法と相違する。

なお、MARCとバイリニアのプロセスから求めた復元せん断力や復元モーメントから、式(8)の復元力ベクトル $\mathbf{Q}_{n+1}$ を換算する方法は、文献12), 13)に詳しく述べている。ここでは、紙面の都合で割愛する。

3. はり中央がせん断座屈崩壊する鋼一層門形 ラーメンの地震応答シミュレーション

上述した方法に従って、門形ラーメンの地震応答解析を行う。はり中央のフランジ・プレートが、斜張力場発

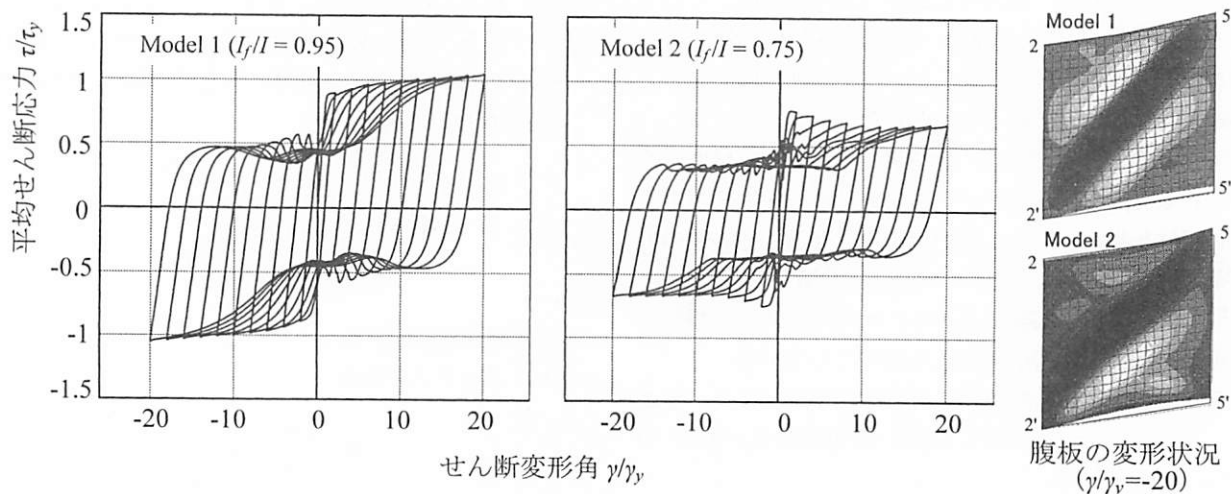


図-6 MARCによる弾塑性有限変位解析一漸増繰返し変位を受ける腹板のせん断応力-せん断変形角曲線と腹板の変形状況

生の後、腹板のせん断崩壊挙動、ならびに、ラーメンの地震応答に及ぼす影響を調べる。MARCを用いた地震応答解析の結果は、文献12)に示したオンライン実験法とバイリニア解析の結果と比較する。

(1) 鋼腹板のせん断崩壊挙動に関する予備解析

地震応答解析に先立ち、MARCを用いて、図-2のFEM解析モデルの弾塑性有限変位解析を実施した。降伏せん断ひずみ γ_y の2~20倍に相当する漸増繰り返し強制変位を与え、フランジ・プレートの付いた腹板の基本的な履歴崩壊挙動を調べた。

解析結果から、フランジ・プレートの剛性が異なる I_f/I

=0.95 (Model 1), 0.75 (Model 2) の腹板の平均せん断応力 τ -せん断変形角 γ 曲線と $\gamma = -20\gamma_y$ のときの腹板の変形状況を図-6に示す。

この図からわかるように、 τ - γ 曲線の履歴ループはスリップ型を呈し、せん断座屈発生による抵抗せん断応力の低下が顕著になっている。フランジ・プレートが小さいModel 2の履歴ループは、Model 1よりも30~40%程度小さくなっている。 $I_f/I=0.95$ のModel 1では、斜張力場の発生により平均せん断応力が徐々に上昇している。 $I_f/I=0.75$ のModel 2では斜張力場が発生しているにもかかわらず、大きな耐力上昇は見られず、繰り返し毎に最大抵抗せん断応力が低下している。

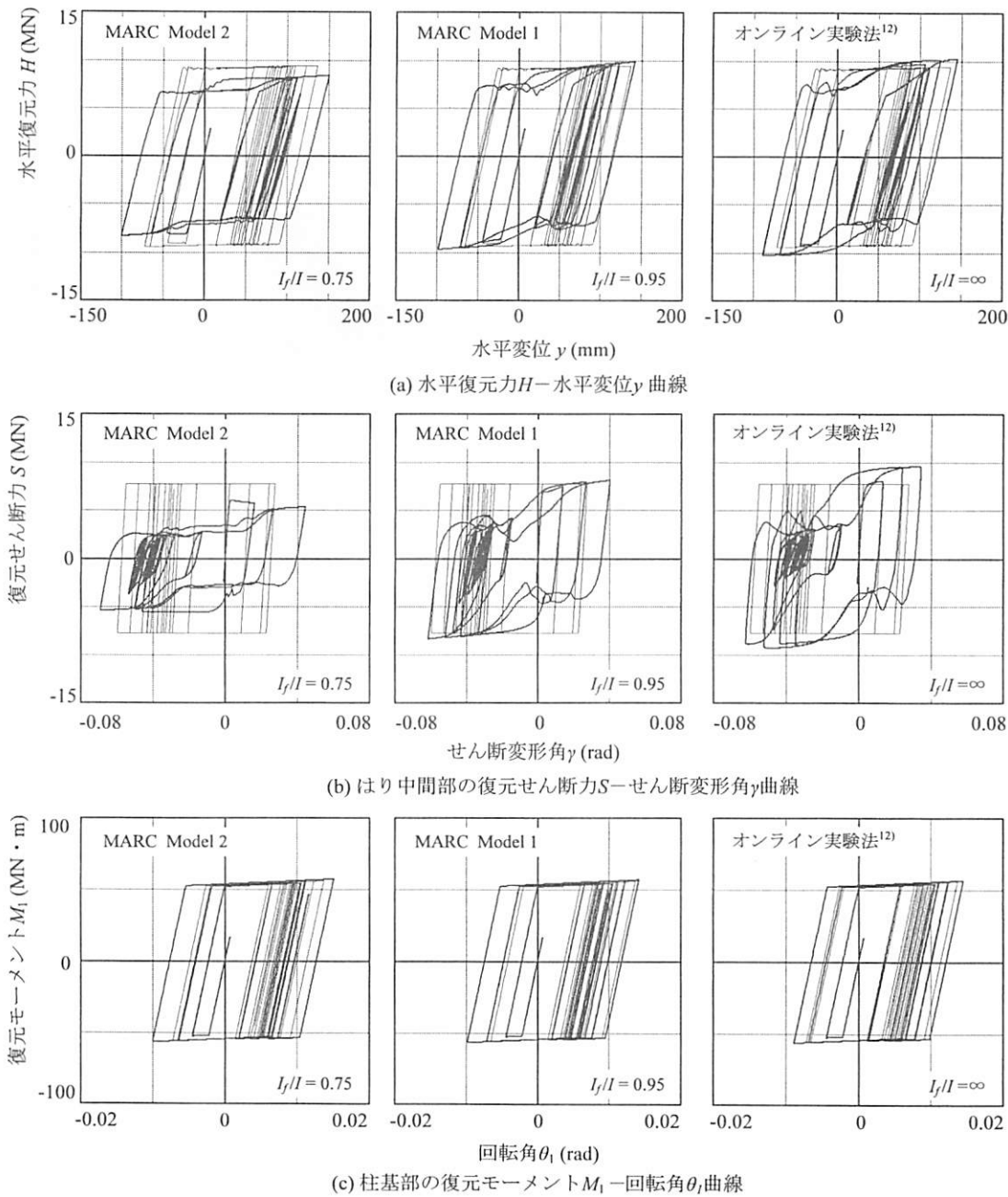


図-7 はり中央のせん断座屈崩壊を考慮したラーメンの地震応答解析結果 (その1) (細線: バイリニア解析¹²⁾)

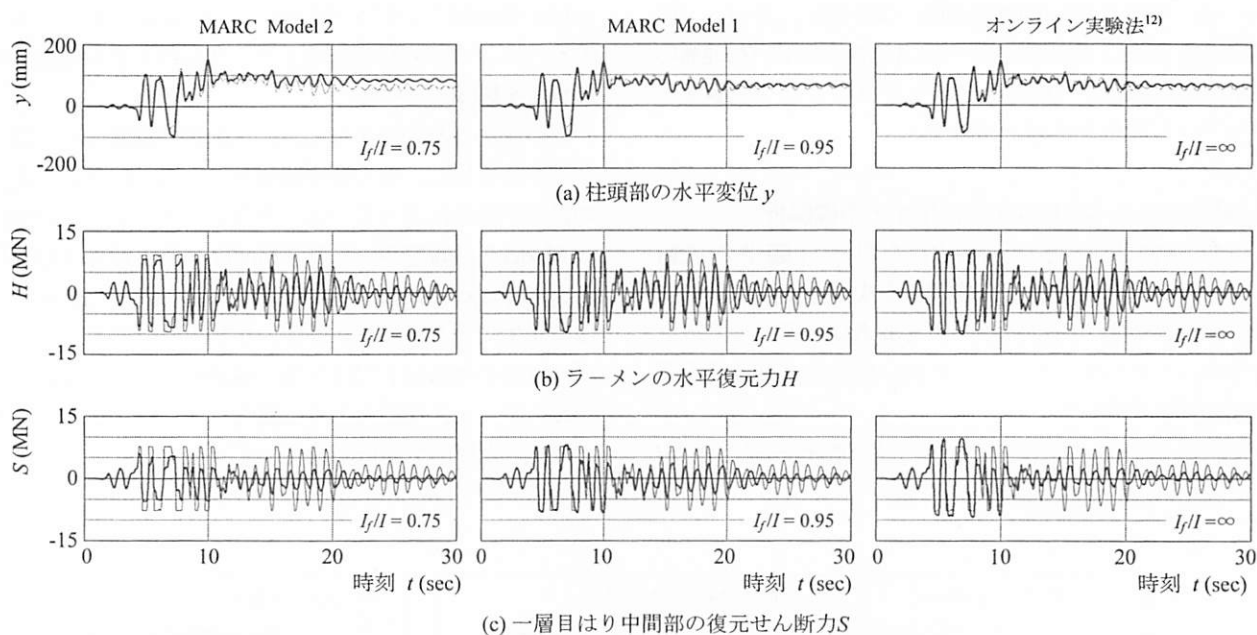


図-8 はり中央のせん断座屈崩壊を考慮したラーメンの地震応答解析結果（その2）（細線：バイリニア解析¹²⁾）

$\gamma = -20\gamma_y$ のときの変形状況を見ると、Model 2 ではフランジ・プレート（flange plate）の剛性が低いため、斜張力場の発生により、非載荷辺に大きな変形が観察され、フランジ・プレートが内側に引き込まれていることがわかる。これに伴って、Model 2 では対角線に対するせん断座屈たわみの対称性が大きく崩れている。

以上から、フランジ・プレートの剛性の違いは、腹板の斜張力場発生時の抵抗せん断応力の上昇やせん断座屈による面外変形状に大きな影響を与えと言えらる。

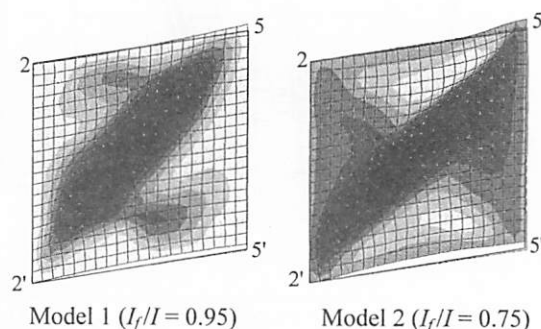


図-9 腹板の変形状況（ $t=30s$ ）

(2) 門形ラーメンの地震応答解析の各種諸元と解析条件

地震応答解析に用いるラーメンの寸法諸元等は、文献12)で行ったオンライン実験法のものをそのまま用いた。

骨組寸法 $h=l=10m$ 、せん断崩壊長さ $a=2m$ としている。集中質量 $m=1.04 \times 10^7 kg$ と回転慣性 $J=106.4 N \cdot m \cdot s^2$ であり、対応するラーメンの1, 2次固有周期 T_1, T_2 はそれぞれ $1s, 0.001s$ である。回転バネ i の弾性係数 k_i と塑性モーメント M_{pi} は、バネ 1 : $k_1=2.35 \times 10^7 kN \cdot m$ 、 $M_{p1}=5.15 \times 10^4 kN \cdot m$ 、バネ 2 : $k_2=3.31 \times 10^6 kN \cdot m$ 、 $M_{p2}=7.72 \times 10^3 kN \cdot m$ 、バネ 3 : $k_3=2.24 \times 10^7 kN \cdot m$ 、 $M_{p3}=7.85 \times 10^6 kN \cdot m$ である。ここで、 M_{p2} はバイリニア解析においてのみ用いた値である。

以上の値を持つラーメンが漸増水平荷重を受けるとき、柱基部のバネ1とはり中間部のバネ2が同時に塑性化し、隅角部のバネ3は弾性状態を保つ。

入力地動加速度には、1995年の兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の観測波のNS成分の最初の30秒間を用いた。その際、弾性最大変位応答が柱基部の降伏変位の12倍になるように増幅して解析を行った¹²⁾。

(3) 地震応答解析の結果と考察（その1）

まず、ラーメンの水平復元力 H －変位 y 曲線、はり中央のせん断力 S －せん断変形角 γ 曲線、および、柱基部の復元モーメント M_1 －回転角 θ_1 曲線を図-7にまとめる。

この図から、以下のことが考察できる。

a) はり中央のせん断力 S －せん断変形角 γ 曲線（同図(b)）

フランジ・プレートが小さい Model 2 ($I_f/I=0.75$) の S － γ 曲線の履歴ループは、Model 1 ($I_f/I=0.95$) とオンライン実験法 ($I_f/I=\infty$) のそれに比べて小さく、せん断座屈に起因した復元せん断力の低下が大きい。Model 1 とオンライン実験法の結果では、斜張力場の発生による抵抗せん断力の上昇が大きくなっている。

b) 水平復元力 H －変位 y 曲線（同図(a)）

柱基部とはり中間部が同時に非弾性域に入るラーメンが、その崩壊荷重の付近で腹板のせん断座屈を引き起こすことにより、 H － y 曲線には耐力低下がはっきり現れている。とくに、フランジ・プレートの剛性が低い Model 2

で顕著になっている。Model 1 とオンライン実験法による解析結果は比較的良好一致している。 $I_f/I=0.95$ のフランジ・プレートは、腹板の斜張力場形成時のアンカーの役割をほぼ果たしていることになる。

c) 柱基部の復元モーメント M_1 —回転角 θ_1 曲線（同図(c)）

MARC 解析とオンライン実験法の解析結果では、ともに M_1 — θ_1 の履歴ループがバイリニア解析のそれよりも大きくなっている。これは、はり腹板がせん断座屈した影響を受けて、柱基部の塑性変形が大きくなったと説明できる。

(4) 地震応答解析の結果と考察（その2）

水平変位 y 、水平復元力 H 、および、せん断力 S の時刻歴応答を図-8 に示す。また、MARC 解析終了時のはり中央腹板の変形状況を図-9 に示す。

まず、図-8(a)からわかるように、Model 2 の残留変位は Model 1 とオンライン実験法の結果よりも若干大きくなっており、フランジ・プレートの剛性が小さい影響が現れている。Model 1 とオンライン実験法の結果は、ほぼ一致している。

つぎに、同図(b)から、Model 1 とオンライン実験法の水平復元力 H の変動は比較的良好一致していることがわかる。これは、上述のように Model 1 のフランジ・プレートが張力場のアンカーとして十分に機能しているためである。一方、Model 2 では、オンライン実験法に比べて、時刻 $t \leq 10s$ の範囲で、復元力の低下が大きい。フランジ・プレートが腹板の変形に引き込まれ、復元力に大きな影響を及ぼしたと言える。

さらに、同図(c)に示した腹板のせん断力の応答は、せん断座屈による耐力低下と斜張力場の影響による耐力上昇が顕著に現れている。上記(3)で考察したとおりである。

最後に、図-9 から、はり中央の腹板には、大きなせん断座屈たわみが発生していることがわかる。とくに、フランジ・プレートの剛性が小さい Model 2 の場合、フランジ・プレートの接合辺（図中の上下辺）が腹板の内部方向に引き込まれていることがわかる。

(5) 今後の検討課題

本研究では、主として文献 12) で実施したオンライン実験法の解析モデルを用いて、門形ラーメンの地震応答解析を進めた。今後の検討課題として、以下の事項が考えられる。

a. 柱基部、隅角部、および、はり中央の塑性化パターン・順序を変化させて、せん断崩壊するはり中央のフランジ・プレートの剛性の違いがラーメンの地震応答に及ぼす影響を調べる。

b. はり中央断面をより実際の箱形断面にモデル化し、境界条件の検討も含めて、サブストラクチャとしての精度を高めること。

c. 門形ラーメン全体のモデル化を再検討し、 P - Δ 効果や柱の軸力変動を考慮できるようにすること。

d. 構造物の一部をサブストラクチャにモデル化して、 α -OS 法の数値積分アルゴリズムに MARC を組み込んだ地震応答解析法の応用範囲を検討すること。

4. まとめ

本研究は、実験と数値計算を組み合わせたオンライン実験手法の考え方を応用し、はり中央がせん断崩壊する一層門形ラーメンの地震応答解析を行ったものである。本文で得られた結論を以下にまとめる。

1) α -OS 法を用いた数値積分アルゴリズムの中に、MARC によるはり中央部の弾塑性有限変位解析のプロセスを組み込み、ラーメンの地震応答解析を行う方法を示した。

2) フランジ・プレートの剛性が小さいとき、腹板の抵抗せん断力の低下が大きくなり、斜張力場形成による耐力上昇も期待できなくなる。

3) フランジ・プレートの剛性が大きいとき、MARC を用いた地震応答解析で得られた復元力や変位の応答性状は、オンライン実験法による結果と比較的良好一致した。

4) 柱基部とはり中央が同時に降伏するような門形ラーメンでは、はり中央のフランジ・プレートの剛性が小さいとき、上記 2) が顕著になり、ラーメン全体の水平復元力の低下を招く可能性がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、平成 20 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。ここに記して謝意を表します。また、本研究の遂行には、大同工業大学大学院・都築 禅君のご協力を得ました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 伯野元彦，四俣正俊，原 司：計算機により制御されたはりの動的破壊実験，土木学会論文報告集，No.171，pp.1～9，1969 年 1 月。
- 2) 家村浩和：ハイブリッド実験の発展と将来，土木学会論文集，No.356，I-3，pp.1～10，1985 年 4 月。
- 3) 伯野元彦，岡田恒雄，高梨晃一，土岐憲三，池田尚治，家村浩和，片田敏行：ハイブリッド実験応用マニュアル，平成元年度科学研究費補助金（総合研究（A））

研究成果報告書, 1990 年 3 月.

- 4) 才塚邦宏, 伊藤義人, 木曾英滋, 宇佐美 勉: 相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察, 土木学会論文集, No.507, I-30 号, pp.179~190, 1995 年 1 月.
- 5) 小畑 誠, 後藤芳顕: 橋脚や柱等を対象とした 3 次元擬似動的実験装置の開発, 土木学会論文集, No.752, I-66 号, pp.253~266, 2004 年 1 月.
- 6) 神田 亮, 安達 洋, 白井伸明, 中西三和: サブストラクチャ・オンライン応答実験法に適用する初期応力法に基づく陰な積分法, 日本建築学会構造系論文集, 第 473 号, pp.75~84, 1995 年 7 月.
- 7) 大井謙一, 林 暁 光, 高梨晃一: 曲げせん断型鉄骨柔架構のための部分構造オンライン実験スキーム, 日本建築学会構造系論文集, 第 540 号, pp.49~55, 2001 年 2 月.
- 8) 中島正愛, 石田雅利, 安藤和博: サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文集, 第 417 号, pp.107~117, 1990 年 11 月.
- 9) 中島正愛, 赤澤隆士, 阪口 理: 実験誤差制御機能を有したサブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文集, 第 454 号, pp.61~71, 1993 年 12 月.
- 10) Huges, T.J.R. and Liu, W.K.: Implicit-explicit finite elements in transient analysis: Stability Theory, Journal of Applied Mechanics, Vol.45, pp.371~374, Jun 1978.
- 11) Hilber, H.M., Huges, T.J.R. and Taylor, R.L.: Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.5, pp.283~292, June 1977.
- 12) 山田 宰, 酒造敏廣: はりがせん断崩壊する鋼一層門形ラーメンのオンライン実験法による地震応答解析, 土木学会論文集 (投稿中).
- 13) 酒造敏廣, 山田 宰, 都築 禪: 一層目はり中央がせん断崩壊する鋼二層門形ラーメンのオンライン実験法による地震応答解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.55A (投稿中).
- 14) 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, JSSC, pp.147~154, 1994 年 11 月.
- 15) 葛西 昭, 渡辺智彦, 宇佐美勉, Chusilp, P.: せん断力を受ける無補剛箱形断面部材の強度と変形能, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.129~140, 2002 年 4 月.
- 16) Takeda, H.: A Fundamental study on simplified analysis of buckling load - carrying capacity and deformability of girders, Doctor Thesis (Kyoto University), 2004.
- 17) 酒造敏廣, 事口壽男, 今井慎吾: 動的せん断力を受ける鋼腹板の弾塑性性状に関する基礎的実験, 第 12 回鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, pp.107~114, 2004 年 11 月.
- 18) 酒造敏廣, 山田 宰, 樋口直紀: 繰返しせん断力を受ける鋼腹板の弾塑性応答性状に関する実験, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.53A, pp.117~124, 2007 年 3 月.
- 19) MSC Software: MSC MARC 2003, 日本語オンラインマニュアル, 2003 年.
- 20) Bursi, O.S., Shing, P.B.: Evaluation of some implicit time-stepping algorithms for pseudodynamic tests, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.25, pp.333~355, 1996.
- 21) 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.
- 22) Imai, S., Shimizu, S. and Miki, T: A Dynamic Elasto-Plastic Analysis on the Web Plates at the Center Part of Beam in a Steel Portal Frame, Proc. of 8th International Conference on Shell Structure, Theory and Application, Gdansk-Jurata, Poland, pp.476~480, Oct. 2005.
- 23) 柴田明德: 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981 年.