

# ラーメン橋脚の耐荷力特性と地震時動的応答の数値解析

小玉乃理子\*, 依田照彦\*\*

\*工修 早稲田大学大学院理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

\*\*工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

本研究は、鋼ラーメン橋脚の動的応答解析を汎用FEMコードを用いて簡易に行う方法の提案を目的としている。矩形断面鋼製単柱橋脚を対象に、局部座屈による劣化の影響を考慮した梁要素を用いて動的応答解析を行うと、最大変位、残留変位ともに比較的精度よく再現されることをハイブリッド地震応答実験結果との比較により確認し、この手法を鋼ラーメン橋脚の局部座屈が発生する部材に対して応用した。このとき、梁要素のバイリニア応力-ひずみ関係は、シェル要素モデルを用いて計算された局部座屈を伴うプッシュオーバー解析時の橋脚先端水平荷重-変位関係を近似するように作成する。数値計算の結果、提案する手法により鋼ラーメン橋脚の地震時応答が精度よく再現できた。また、この手法は任意の形状をもつラーメン橋脚に対しても適用できる。

Key Words : Rigid Frame, Seismic Response, Simplified Dynamic Analysis

## 1. はじめに

鋼製橋脚の地震時動的応答を評価することを目的として、実験的研究やFEM解析、1次元ばね-質点系等の簡易解析などが広く行われてきた<sup>1),2)</sup>。しかし、鋼ラーメン橋脚の動的応答解析においては、強震後の残留変位に関する評価法が確立されていないのが現状であり、プッシュオーバー解析の結果を利用した非線形M- $\phi$ 関係をもつ線材による方法<sup>3)</sup>や等価1自由度モデルによる方法<sup>4)</sup>においても、最大応答変位は再現されるものの、残留変位についてはさらなる検討が必要とされている。

本研究では、鋼ラーメン橋脚を局部座屈による劣化の影響を考慮した梁要素によりモデル化し、汎用FEMコードを用いて動的応答解析を行う。中でも特に残留変位の評価を目的とする。

局部座屈により劣化した部材の挙動は、その部材のプッシュオーバー解析時の先端水平荷重-変位関係で代表されるものとした。解析手順の概要は次の通りである。①はじめにシェル要素を用いたFEM解析により、橋脚を構成する部材のプッシュオーバー解析時の水平荷重-変位関係を求め、②それを近似できるように調節したバイリニア応力-ひずみ関係を有する梁要素で部材をモデル化し直し、③その梁要素モデルを用いて動的応答解析を行う。

上述の手法を矩形断面鋼製橋脚2断面、加速度波形2種の計4ケースの動的応答解析に適用し、その有効性を確認した上で、鋼ラーメン橋脚の動的応答解析に応用した。解析には汎用FEMコードABAQUSを用いた。

## 2. 矩形断面鋼製橋脚の地震時動的応答解析

鋼ラーメン橋脚の動的応答解析に先立ち、矩形断面鋼製

橋脚のプッシュオーバー時の挙動から地震時動的応答の予測を試みた。

### 2.1 FEMによる矩形断面鋼製橋脚のプッシュオーバー解析

はじめに、シェル要素を用いたFEMにより矩形断面鋼製橋脚のプッシュオーバー解析を行い、局部座屈発生後の挙動を把握する。解析対象は、建設省土木研究所を中心に行われた矩形断面鋼製橋脚ハイブリッド地震応答実験<sup>5)</sup>のうち、構造パラメータの異なる供試体2種に関するものである。図-1に供試体の概略を、図-2に供試体の断面形状を示す。局部座屈が固定端近傍で発生すると予測されることから、荷重特性に与える影響は小さいものとして供試体上部に位置するダイヤフラムのモデル化は省略した。要素には8節点低減積分厚肉シェル要素(S8R)<sup>6)</sup>を用いた。図-3に解析モデル(1/2モデル)と8 $\delta y$ 時の変形状態を、図-4にこのときの先端水平荷重-変位関係を示す。

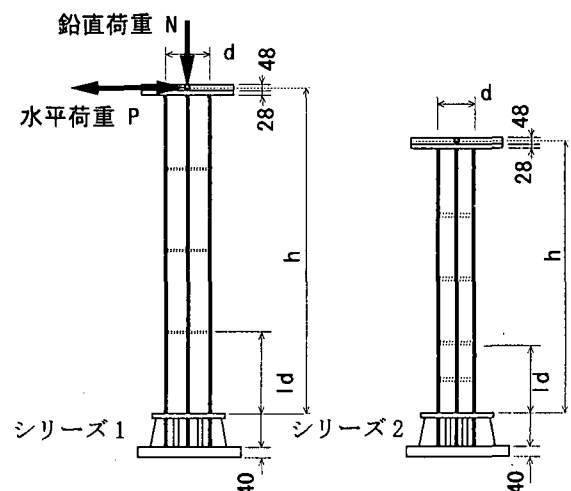
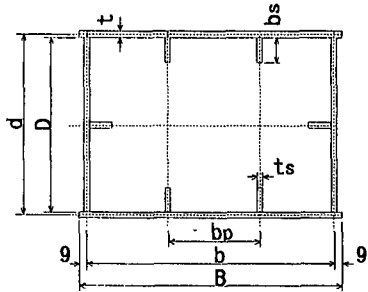


図-1 鋼製橋脚供試体概要<sup>5)</sup>



b: 断面幅      bs: 縦方向補剛材高さ  
d: 断面高さ    bp: パネル長  
t: 板厚        ts: 縦方向補剛材板厚  
h: 供試体長    ld: ダイアフラム間隔

断面	b	B	d	D	t	bs	ts	bp	h	ld
シリーズ1	437	449	287	281	6	34	6	141.6	1847	431
シリーズ2	334	346	218	212	6	34	6	107.4	1388	328

(単位: mm)

図-2 供試体形状<sup>5)</sup>

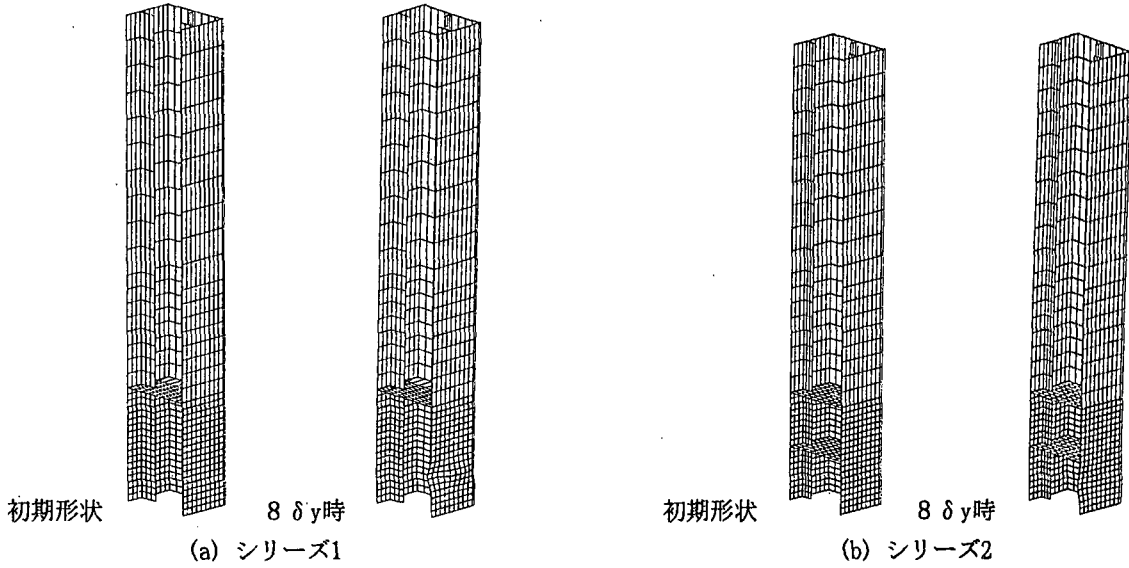


図-3 鋼製橋脚供試体のFEM解析モデルと8 delta y時の変形状態

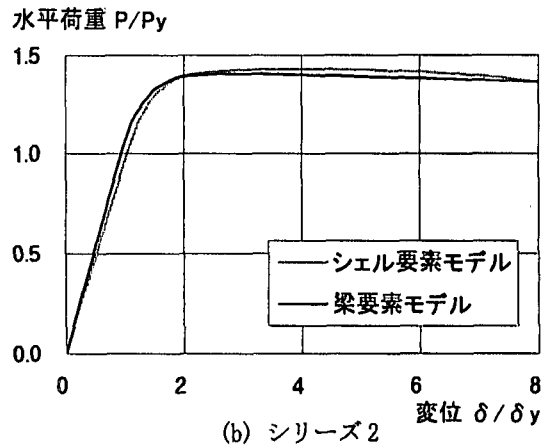
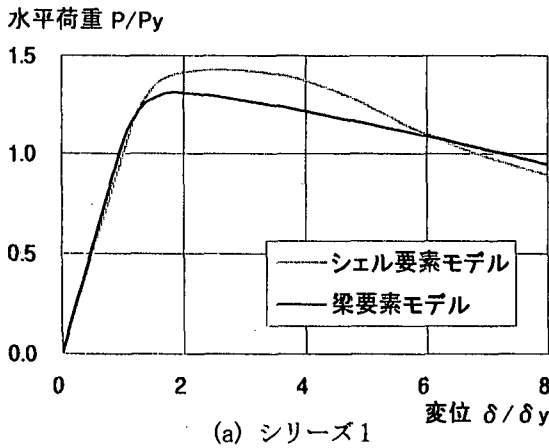


図-4 鋼製橋脚供試体プッシュオーバー時の先端水平荷重-変位関係

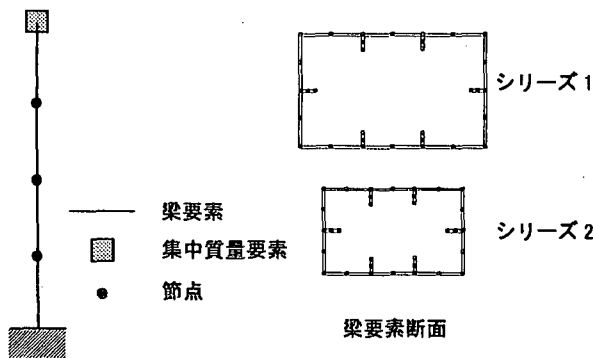


図-5 鋼製橋脚供試体の梁要素解析モデル

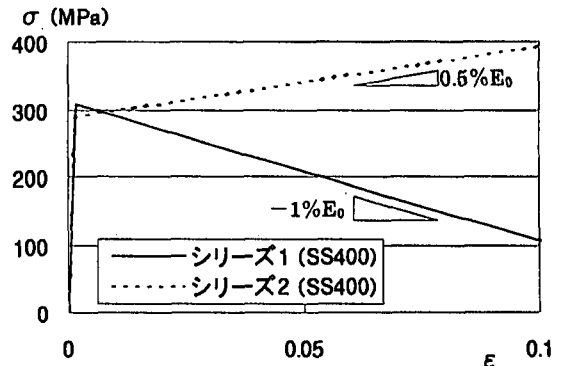


図-6 梁要素に用いた応力-ひずみ関係

## 2.2 劣化を考慮した梁要素による矩形断面鋼製橋脚のモデル化

前節でシェル要素を用いたFEM解析で求められた、矩形断面鋼製橋脚供試体の先端水平荷重-変位関係を参考に、梁要素に用いるバイリニア応力-ひずみ関係の塑性勾配を決定する。この勾配には、シェル要素を用いた解析であれば自動的に考慮される、局部座屈による劣化の影響が含まれているものとする。図-5に梁要素を用いた解析モデルを示す。断面四隅のウェブ付け位置の小さな差異は、曲げ剛性に影響を与えないと考えられるので、T字状のところを箱状としてモデル化した。要素には空間3次梁要素(B33)<sup>6)</sup>を用い、要素分割数はフランジ幅を基準とし4要素とした。断面内は38区間に分割し(図-5)、各区間を3点Simpson法で数値積分した<sup>6)</sup>。

図-4に梁要素によるプッシュオーバー解析で得られた先端水平荷重-変位関係を併せて示す。梁要素のバイリ

ニア応力-ひずみ関係の塑性勾配は、供試体シリーズ1では初期剛性の-1%とし、シリーズ2では初期剛性の+0.5%とした(図-6)。

## 2.3 矩形断面鋼製橋脚供試体のハイブリッド地震応答実験のシミュレーション

前節で定めた特性をもつ梁要素を用いて、矩形断面鋼製橋脚供試体のハイブリッド地震応答実験のシミュレーションを行った。供試体2種に対して、兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台と東神戸大橋の2地点で観測された地震波(それぞれ以下JMA, HKB)を入力して計4ケースの解析を行った。解析条件の詳細を表-1に示す。構造減衰係数 $\beta$ はいずれの場合も1%とした。

図-7に示した各ケースの時刻歴応答変位波形の実験結果と解析結果との比較より、最大変位の差は2~27%、残留変位の差は22~35%となり(表-2)、本解析法の結果は工学的に許容できる精度を有している。

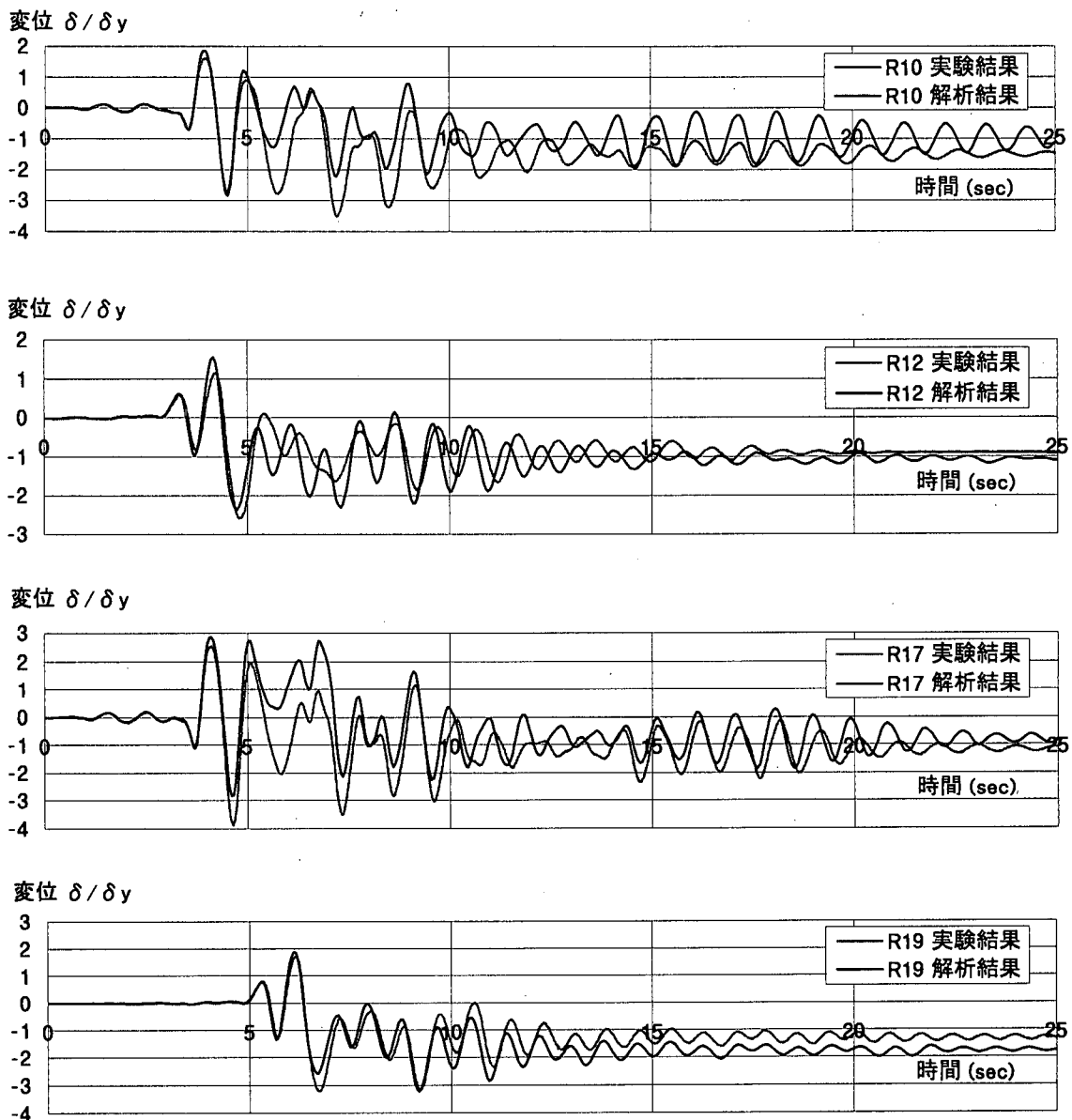


図-7 時刻歴応答変位波形

表-1 鋼製橋脚動的応答解析の解析条件<sup>5)</sup>

供試体断面	供試体番号	入力地震波	軸力比 $N/N_y$
シリーズ1	R10	JMA	0.152
	R12	HKB	0.113
シリーズ2	R17	JMA	0.176
	R19	HKB	0.131

表-2 鋼製橋脚供試体の最大変位および残留変位

供試体番号	最大変位 $ \delta_{max}/\delta_y $		残留変位 $ \delta_r/\delta_y $	
	実験結果	解析結果 (誤差)	実験結果	解析結果 (誤差)
R10	3.51	2.76 (21%)	1.50	0.98 (35%)
R12	2.58	2.36 (9%)	0.90	1.10 (22%)
R17	3.87	2.82 (27%)	1.16	0.79 (32%)
R19	3.16	3.21 (2%)	1.32	1.75 (33%)

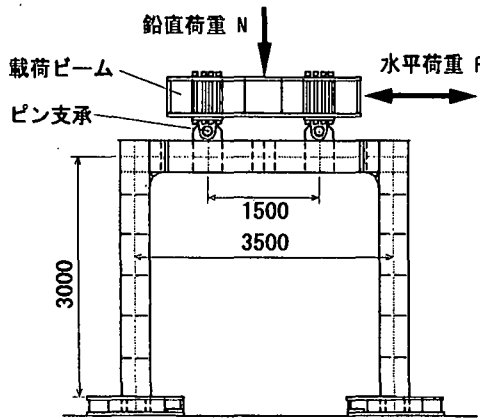
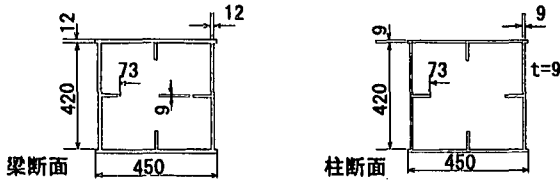
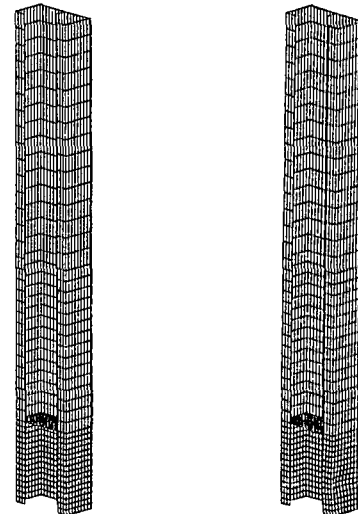


図-8 鋼ラーメン橋脚実験装置の概要<sup>3)</sup>



初期形状 5  $\delta_y$ 時

図-9 鋼ラーメン柱部柱部FEM解析モデルと5  $\delta_y$ 時の変形状態

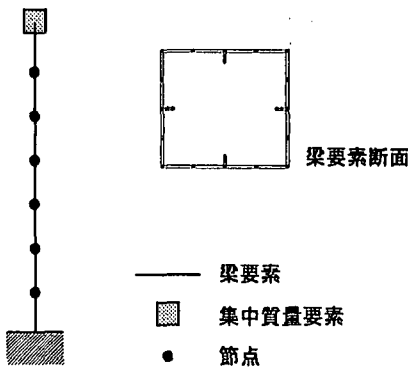


図-10 鋼ラーメン柱部の梁要素解析モデル

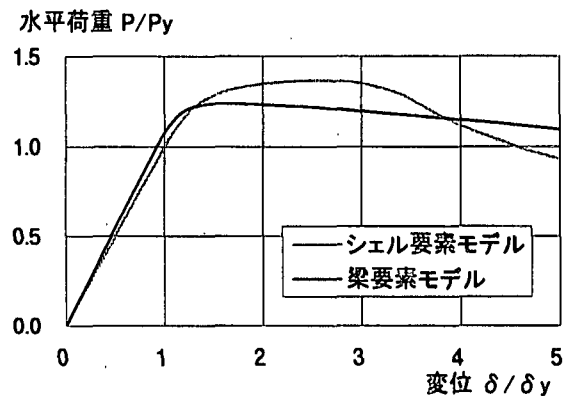


図-11 鋼ラーメン柱部プッシュオーバー解析時の先端水平荷重-変位関係

### 3. 鋼ラーメン橋脚の地震時動的応答解析

前章の鋼製橋脚の動的応答解析の手法を、鋼ラーメン橋脚に適用する。ここでは、大変形時に柱部に局部座屈が発生するラーメン橋脚を対象とし、柱部のプッシュオーバー解析時の挙動から鋼ラーメン橋脚全体の地震時動的応答を予測する。

#### 3.1 FEMによる鋼ラーメン橋脚柱部のプッシュオーバー解析

はじめに、シェル要素を用いたFEM解析により鋼ラーメン橋脚の柱部のプッシュオーバー解析を行い、局部座屈発生後の挙動を把握する。

解析対象は、鉄道総合技術研究所にて行われた、ラーメ

ン橋脚供試体のハイブリッド地震応答実験<sup>3)</sup>である。図-8に実験装置の概略を示す。図-9に柱部の解析モデル(1/2モデル)と5  $\delta_y$ 時の変形状態を示す。2.1と同様、局部座屈が固定端近傍で発生すると予測されることから、荷重特性に与える影響は小さいものとして供試体上部に位置するダイヤフラムのモデル化は省略した。

#### 3.2 梁要素による鋼ラーメン橋脚柱部のプッシュオーバー解析

2.2と同様にして、動的解析に用いる梁要素のパイリニア応力-ひずみ関係の塑性勾配を決定する。図-10に梁要素を用いた解析モデルを示す。要素分割数はフランジ幅を基準とし7要素とした。

図-11 にプッシュオーバー解析で得られた先端水平荷重-変位関係を示す。パイリニア応力-ひずみ関係の塑性勾配は、初期剛性の $-0.5\%$ とした(図-12)。

### 3.3 鋼ラーメン橋脚供試体のハイブリッド地震応答実験のシミュレーション

前節で定められた特性をもつ梁要素を用いて、鋼ラーメン橋脚供試体のハイブリッド地震応答実験のシミュレーションを行った。

解析モデルを図-13 に示す。軸力比 $N/N_y$ は $0.1$ であり、構造減衰係数 $\beta$ は $2\%$ とした。入力加速度は、鉄道総合技術研究所で設計地震動として用いられていたG2b波形<sup>7)</sup>である。

ここで、ラーメン橋脚のハイブリッド実験では、脚がボルト締めで固定されているため、基部の完全固定条件は満たされていない。したがって、解析モデルの脚の端部と固定面を弾性の回転ばねで拘束し、その回転剛性は弾性理論

値の $15\%$ とした。

図-14 に示した時刻歴応答変位波形の実験結果と解析結果との比較より、最大変位の差は $2\%$ 、残留変位の差は $4\%$ となり(表-3)、本解析法の結果は実験値に近いものとなった。

上述の動的解析法を、任意形状の鋼ラーメン橋脚に対して適用する際には、以下のような手順となる。①各部材を単柱として取り出し、変形が予想される方向へプッシュオーバーしたときの挙動を求め、②このときの先端水平荷重-変位関係を近似するように、梁要素の応力-ひずみ関係を決定し、③この梁要素を組み合わせたモデルを用いて動的解析を行う。今回解析を行った鋼ラーメン橋脚供試体は柱部材で局部座屈が先行するように設計されているが<sup>3)</sup>、任意の部材で局部座屈が発生する可能性のある場合には、すべての部材に対して前述①②の手順にしたがい梁要素の応力-ひずみ関係を決定する必要がある。

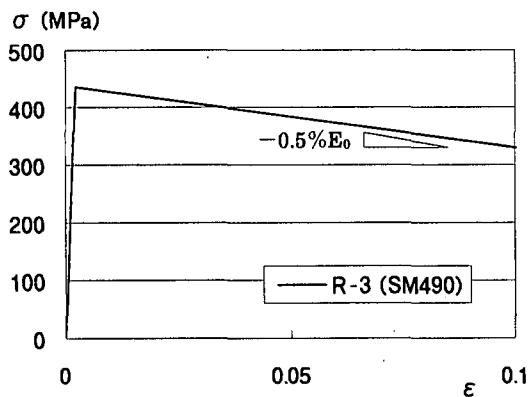


図-12 梁要素に用いた応力-ひずみ関係

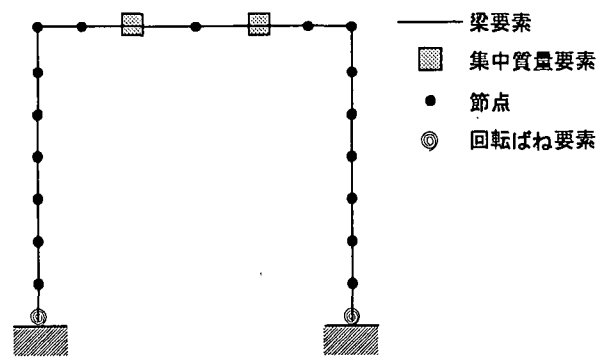


図-13 鋼ラーメン橋脚供試体の梁要素解析モデル

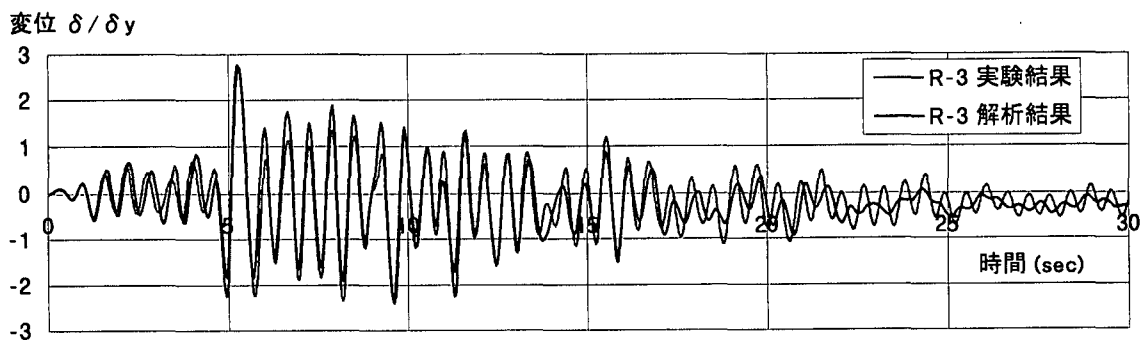


図-14 鋼ラーメン橋脚供試体の時刻歴応答変位波形

表-3 鋼ラーメン橋脚供試体の最大変位および残留変位

	最大変位 $ \delta_{max}/\delta_y $		残留変位 $ \delta_r/\delta_y $	
	実験結果	解析結果 (誤差)	実験結果	解析結果 (誤差)
鋼ラーメン橋脚	2.70	2.76 (2%)	0.24	0.25 (4%)

## 4. 結論

(1) 鋼ラーメン橋脚の地震時挙動は、各部材を単柱としてプッシュオーバー解析した場合の荷重-変位関係を

近似するような応力-ひずみ関係を有する梁要素のモデルにより、精度よく再現できる。この応力-ひずみ関係には、局部座屈による劣化の影響を含めること

が可能である。任意の形状をもつ鋼ラーメン橋脚であっても、同様のモデル化により動的応答解析を行うことができる。

- (2) 提案した動的解析法で用いる梁要素では、バイリニア型弾塑性応力-ひずみ関係を使用し、任意の断面形状を定義するが、これらの機能は多くの汎用コードに備わっており、汎用コードの既存の機能を用いた解析が容易に行える。本論文の計算例のように、鋼ラーメン橋脚供試体がボルト締めで固定されている場合には、基部の回転角を表現するために回転ばね要素も必要であるが、解析対象が実橋の場合には、通常基部はコンクリート基礎に埋め込まれているため、固定端として差し支えない。

#### 謝辞

鉄道総合技術研究所の池田学氏には、貴重な実験データ等をご提供いただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 依田照彦, 松尾礼子, 春日清志: 簡易非線形動的応答解析による鋼製橋脚の耐震性評価, 土木学会 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, pp. 51-58,

1997. 5

- 2) 渡辺浩, 石田貴顕, 崎元達郎: コンクリートを充填した鋼製橋脚のファイバー要素による動的解析, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集 第1部(B), pp. 2-3, 1999. 9
- 3) 池田学, 山田正人, 市川篤司, 安波博道, 冨永知徳, 寺田昌弘: 鉄道鋼ラーメン橋脚の耐震設計法に関する検討, 土木学会 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp. 143-150, 1998. 11
- 4) 宇佐美勉, 鄭沂, 葛漢彬: Pushover解析と等価1自由度モデルによる鋼製ラーメン橋脚の耐震照査法, 土木学会論文集, No. 626/I-48, pp. 231-240, 1999. 7
- 5) 建設省土木研究所, 首都高速道路公団, 阪神高速道路公団, 名古屋高速道路公社, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会: 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書 (VII), 1997. 4
- 6) Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.: ABAQUS/Standard User's Manual Version 5.8, Vol. II, 1998
- 7) 鉄道総合技術研究所編: 新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料, 共進, 1996. 3

(1999年11月19日受付)

## CHARACTERISTICS OF LOAD CARRYING CAPACITY AND SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF STEEL RIGID FRAMES

Noriko KODAMA and Teruhiko YODA

The purpose of this paper is to demonstrate a simple method for seismic response analysis of steel rigid frames by using general-purpose FEM codes. Seismic response of steel rigid frames was predicted by the present analysis using beam elements, in which the influence of the degradation due to local buckling is considered. Bi-linear stress - strain relation for the beam element is modified as to simulate load - displacement relation under the pushover analysis with local buckling, which is computed using the shell element model. The present technique can also be applied to rigid frames of arbitrary shape without any difficulty.