

# 梁部のせん断非線形性の鋼製ラーメン橋脚面内方向挙動 に及ぼす影響の検討

工 務 部 設 計 課 長 沼 敏 彦  
大阪建設局 建設企画部 設計課 金 治 英 貞  
大阪管理部 大阪第一維持事務所 鈴 木 英 之

## 要 旨

鋼製ラーメン橋脚面内方向のレベル 2 地震に対して、梁部を弾性範囲内に抑えるよう設計を行った場合、梁部の板厚が非常に大きくなることもあり、また、柱部への負担も大きくなるため合理的ではない。このため、レベル 2 地震時に梁部が降伏することを許容する設計法を構築するために、これまでに梁部材の非線形挙動に関する研究を行っており、設計に用いるための曲げ及びせん断の非線形挙動を考慮した骨組解析モデルを構築している。

本研究では、この骨組解析モデルを用い、異なる形状を有する 3 つの鋼製ラーメン橋脚に対して面内方向の静的弾塑性解析と動的応答解析を行った。その結果、相対的に梁部が短く梁部においてせん断力が卓越する橋脚では、梁部のせん断非線形性考慮の有無が橋脚全体の挙動に影響を及ぼし、せん断非線形性を考慮すると地震時に梁部で大きなエネルギー吸収が得られ、応答が低減することがわかった。一方で相対的に梁部が長く梁部において曲げモーメントが卓越する橋脚では、せん断非線形性考慮の有無によって橋脚の挙動が変化しないことがわかった。また、梁部においてせん断力が卓越する橋脚では、上部構造によって梁部が拘束されることによる影響も大きく、上部構造を適切にモデル化する必要があることがわかった。

キーワード: 鋼製ラーメン橋脚, 面内方向, 梁, せん断非線形性

## 1. はじめに

兵庫県南部地震では、ラーメン形式の橋脚でさえも多くの損傷が報告されている。このため、阪神高速道路公団では、兵庫県南部地震以降、鋼製ラーメン橋脚の面内方向の弾塑性挙動を解明するために、図-1(a)に示す P1 橋脚を対象とし、載荷実験および弾塑性有限変位解析を行い、これらの結果から軸力変動を考慮した骨組解析モデルを構築している<sup>1)</sup>。

さらに、より合理的な設計を行うために、面内方向のレベル 2 地震に対して、梁部の非線形挙動

を適切に評価し梁部の塑性化を許容した設計を行うために、梁部材を対象とした弾塑性有限変位解析を行い、フランジの局部座屈を抑制した断面を持つ梁部材では、せん断非線形特性をバイリニアモデルでモデル化できることを明らかにしている<sup>2)</sup>。このせん断非線形モデルを上述した軸力変動を考慮した骨組解析モデルに取り込むことにより、軸力変動とせん断非線形挙動を考慮した骨組解析モデルを構築した<sup>3)</sup>。

本研究では、梁部のせん断非線形性、および上部構造による拘束効果が、代表的な形状の鋼製ラーメン橋脚面内挙動へ及ぼす影響及び本解析モデ

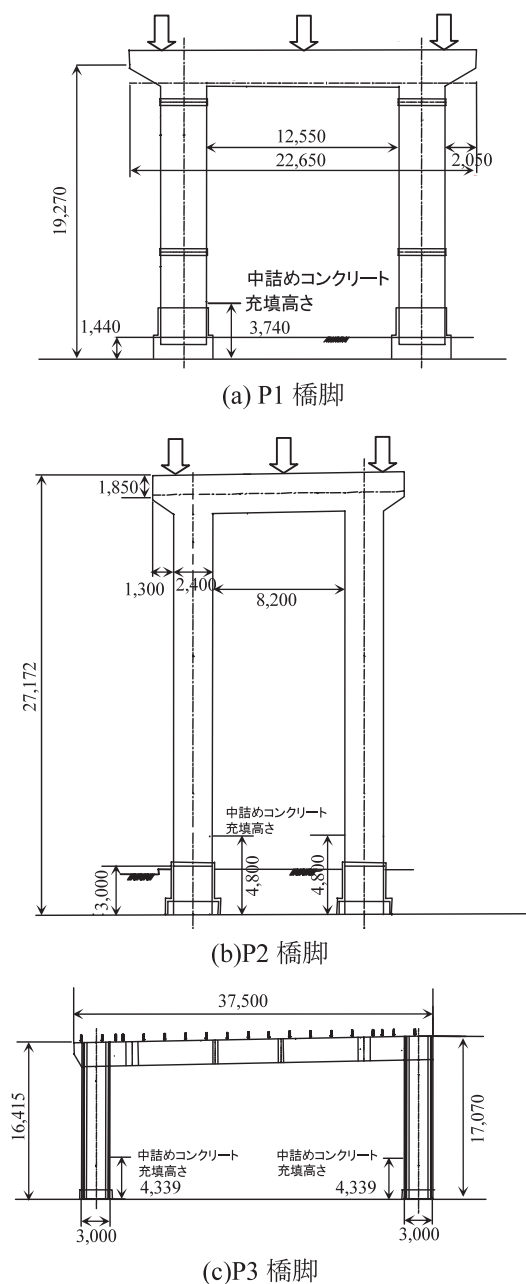


図-1 解析対象橋脚

ルの動的解析への適用上の問題点を明らかにするために、本解析モデルを用い、3つの鋼製ラーメン橋脚を対象として、面内方向の静的弾塑性解析および時刻歴応答解析を行った。

## 2. 対象橋脚および解析モデル

### 2-1 対象橋脚

本検討で用いた3つの異なる形状を有する鋼製ラーメン橋脚を図-1に示す。これらの橋脚を対象

表-1 検討ケース

	せん断非線形性	上部構造による拘束効果
Case1	考慮せず	考慮せず
Case2	考慮	考慮せず
Case3	考慮	ピン結合
Case4	考慮	剛結

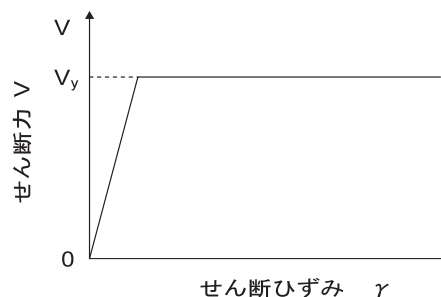


図-2 梁部せん断非線形特性

として、梁部のせん断非線形性、ならびに上部構造の拘束効果の面内挙動への影響について検討を行った。

対象橋脚は、標準的な形状を有する既存の鋼製ラーメン橋脚であるP1橋脚、柱部が梁部に比べ相対的に長いP2橋脚、および梁部が柱部に比べ長いP3橋脚である。本検討では、補剛板の局部座屈を抑制し、所定の変形性能を確保するため既存断面の補強を前提としている。図中の矢印は支承位置を表す。なお、各橋脚の基部にはコンクリートが充填されている。

### 2-2 検討ケース及び解析モデル

本検討で行った検討ケースを表-1に示す。Case1とCase2については、上部構造による拘束効果を考慮せず、梁部のせん断非線形性の考慮の有無について検討を行う。また、せん断非線形性を考慮したケースについては、上部構造による拘束効果を2通り(Case3, Case4)想定し、その影響を調べた。

また、解析に用いたモデルは、曲げとせん断の非線形性及び軸力変動を考慮した骨組解析モデルとし、上部構造による拘束については、支承位置を剛部材によってつなぐことによって考慮した。以下に解析モデルの詳細について述べる。

(1) 梁部のせん断非線形性

梁部に用いたせん断非線形特性 ( $V-\gamma$  関係) を 図-2 に示す. せん断非線形特性は,  $V_y$  を非線形挙動の開始点としたバイリニアモデルでモデル化した. ここで, 図中の  $V_y^{4)}$  は, 式(1)により算出した降伏せん断力である.

$$V_y = 2t_w B_w \tau_y \quad \text{式(1)}$$

ここで  $t_w$ : ウェブ板厚 (mm)

$B_w$ : ウェブ幅 (mm)

$\tau_y$ : 鋼材のせん断降伏応力 ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )

なお, 梁部のせん断非線形性の考慮の有無にかかわらず, せん断変形の弾性変形量については考慮するものとした.

(2) 上部構造の拘束の影響

実際の橋梁では, 上部構造によりラーメン橋脚梁部の変形が拘束されることが考えられる. そこで, 図-3 に示すように, 上部構造の拘束を考慮しないモデル, および上部構造慣性力の作用位置を剛部材で結ぶことにより上部構造による拘束効果を考慮したモデルについて検討を実施した. なお, 橋脚と上部構造の慣性力の作用位置との結合方法は, ピン結合と剛結合の2ケースを設定した.

(3) 軸力変動を考慮した曲げ非線形性

本検討では, 梁部のせん断非線形特性と柱部の軸力変動を考慮した曲げ非線形特性を考慮した骨組解析モデルを用いた. 曲げ非線形特性については, 図-4 に示す  $M-\phi$  関係によって定義した.

圧縮軸力が作用した部材の  $M-\phi$  関係は, 降伏時, 側板引張降伏時, および終局時の3点を結んだトリリニア型とした. ここで降伏時とは, 圧縮側縁端ひずみが降伏ひずみに達した状態, 側板引張降伏時 (STATE I) とは, 断面が降伏時から終局時に移行するまでに, 側板の引張側縁端ひずみが降伏ひずみに達した状態, 終局時 (STATE II) とは圧縮側縁端ひずみが終局ひずみに達した状態と定義した.

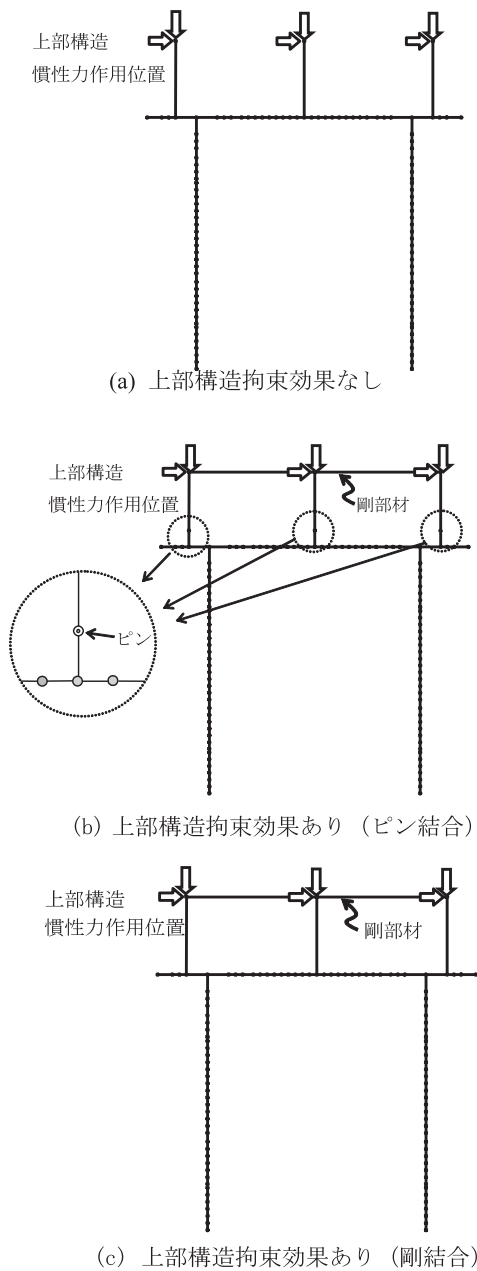


図-3 解析モデル, および荷重載荷方法

一方, 引張軸力が作用した部材の  $M-\phi$  関係は, 降伏時, 側板圧縮降伏時, および終局時の3点を結んだトリリニア型とした. ここで降伏時とは, 引張側縁端ひずみが降伏ひずみに達した状態, 側板圧縮降伏時 (STATE I) とは, 断面が降伏時から終局時に移行するまでに, 側板の圧縮側縁端ひずみが降伏ひずみに達した状態, 終局時 (STATE II) とは引張側縁端ひずみが終局ひずみに達した状態と定義した.

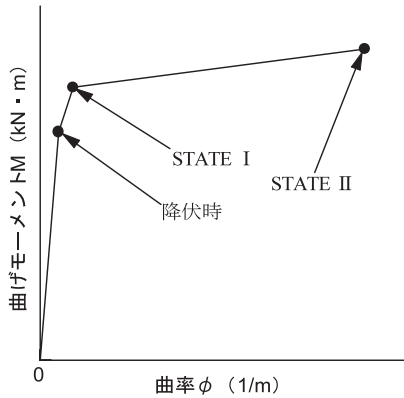


図-4 曲げ非線形特性 (M- $\phi$ 関係)

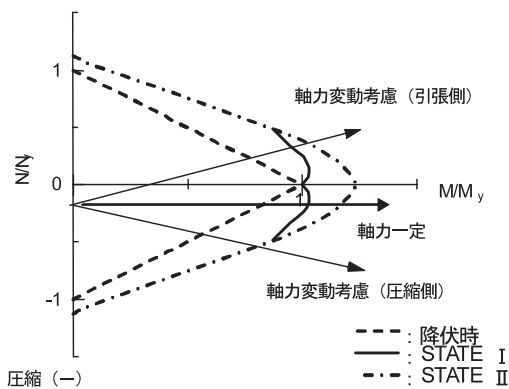
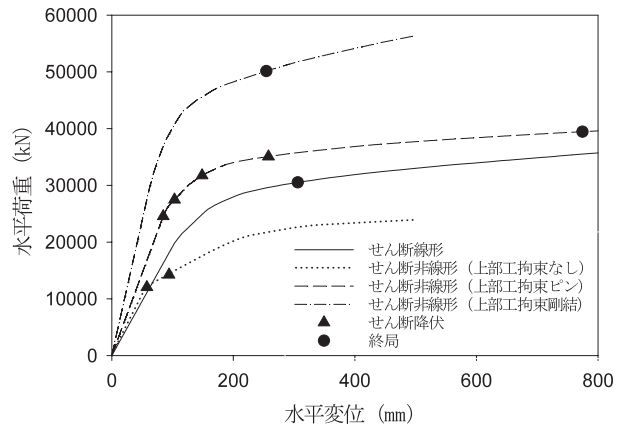


図-5 鋼製橋脚の M-N 相関曲線

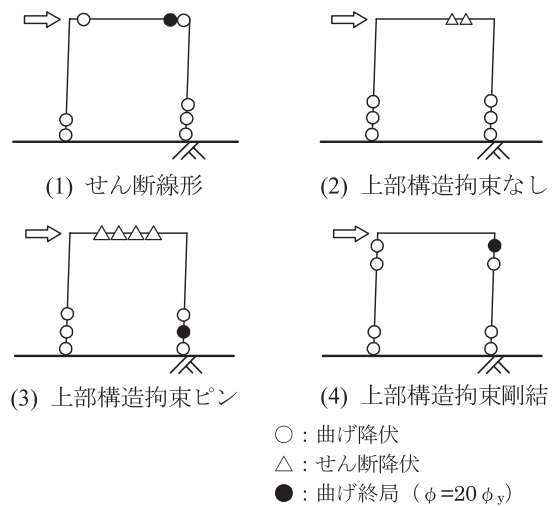
図-5 は、任意の軸力のもとで降伏時、STATE I および STATE II の状態における曲げモーメントを算出し、同じ状態の点を結ぶことで作成した M-N 相関曲線である。部材の M- $\phi$  関係の設定においては、まず線形解析を行い、部材に作用する曲げモーメント、および軸力比（以下、M-N 比）を算出した。次に図-5 に示す M-N 相関曲線と M-N 比一定として引いた直線との交点を算出し、各交点における曲げモーメント M と曲率  $\phi$  との関係を出し、M- $\phi$  関係を作成した。上記の方法で算出した M- $\phi$  関係を用いることによって軸力変動の影響を考慮した。なお、本検討において、終局ひずみ  $\epsilon_u$  は、降伏ひずみ  $\epsilon_y$  の 20 倍とし、また鋼材の降伏後のひずみ硬化は、 $E^*/E=1/150$  とした。

### 3. 静的弾塑性解析

本章では、各橋脚の面内方向の挙動を把握するために、静的弾塑性解析を実施した。荷重方法は



(a) 水平力-水平変位関係



(b) 損傷部位

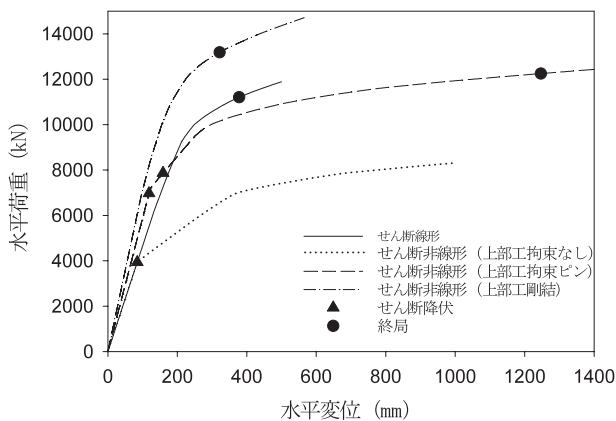
図-6 P1 橋脚静的解析結果

単調荷重とした。

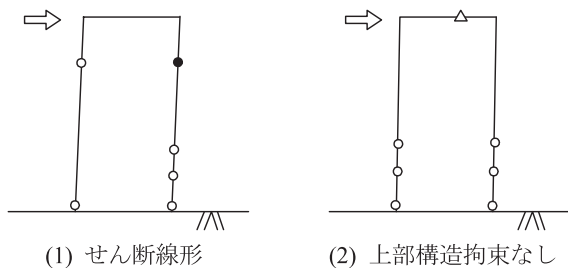
図-6～図-8 に各橋脚の荷重載荷点における水平力-水平変位関係、および橋脚の損傷部位を示す。

P1 橋脚、および P2 橋脚については、せん断非線形性を考慮した場合、せん断非線形性を考慮しなかった場合と比べて、最大耐荷力が小さくなり、変形量が大きくなっている。これは、梁部のせん断非線形性を考慮したことにより、梁部のせん断変形が卓越し、柱部に発生する曲げモーメントが増加しないために、橋脚面内方向の耐荷力が低減したものと考えられる。

また、上部構造の拘束効果の有無に着目すると、上部構造による拘束効果をピン結合により考慮し

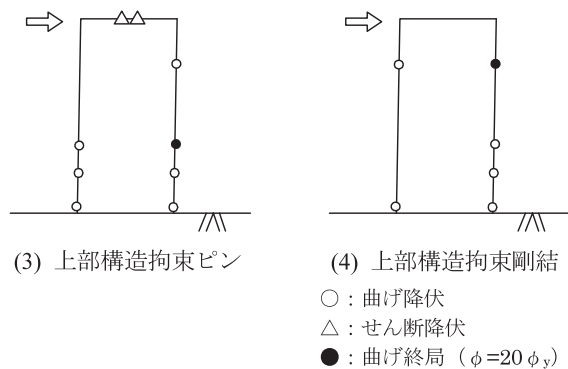


(a) 水平力-水平変位関係



(1) せん断線形

(2) 上部構造拘束なし



(3) 上部構造拘束ピン

(4) 上部構造拘束剛結

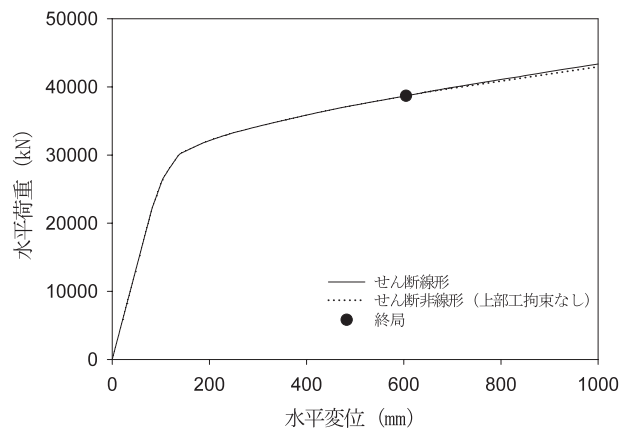
○：曲げ降伏  
△：せん断降伏  
●：曲げ終局 ( $\phi=20\phi_y$ )

(b) 損傷部位

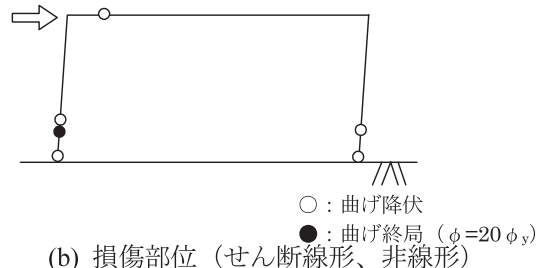
図-7 P2 橋脚静的解析結果

たケースでは、梁部でせん断降伏しており、変形量が大きくなっている。そして、上部構造と剛結合したケースでは、梁部で降伏に達しておらず最大耐荷力は大きくなっており、終局変位が小さくなっている。これは上部構造が梁部を拘束することによって、ラーメン橋脚全体の耐荷力が大きくなったためであると考えられる。

一方、P3 橋脚については、せん断非線形性を考慮してもせん断降伏は発生せず、せん断非線形性の考慮の有無による違いは現れなかった。これは、P3 橋脚の梁部が長く、せん断力に比べ曲げモーメ



(a) 水平力-水平変位関係



(b) 損傷部位 (せん断線形、非線形)

図-8 P3橋脚静的解析結果

ントが卓越するためせん断降伏に至る前に曲げ降伏に至ったためと考えられる。

また、各検討ケースについて損傷部位を比較すると、梁部のせん断非線形性の考慮の有無、ならびに上部構造の拘束効果の考慮の有無により、損傷部位が大きく異なることが明らかとなった。

よって、鋼製ラーメン橋脚の面内方向解析を行う際には、梁部のせん断非線形性を考慮するとともに、上部構造の支承を介して橋脚に及ぼす影響を、適切にモデル化する必要があると考えられる。

#### 4. 時刻歴応答解析

本章では、梁部のせん断非線形性を考慮した場合としなかった場合、および上部構造による梁部の変形の拘束を考慮した場合、および考慮しなかった場合について、鋼製ラーメン橋脚面内方向の面内挙動の比較を行った。

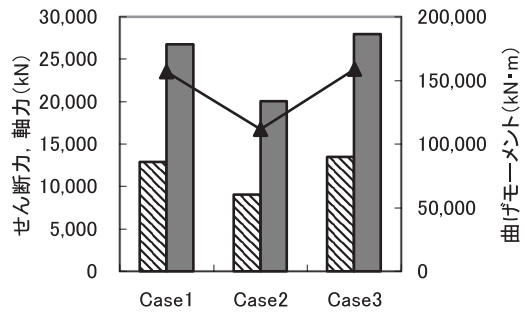
対象橋脚は、上述の3橋脚とし、入力地震波には道示標準波タイプII3種地盤地震波を用いた。なお、時刻歴応答解析における上部構造の拘束効

表-2 上部構造応答値

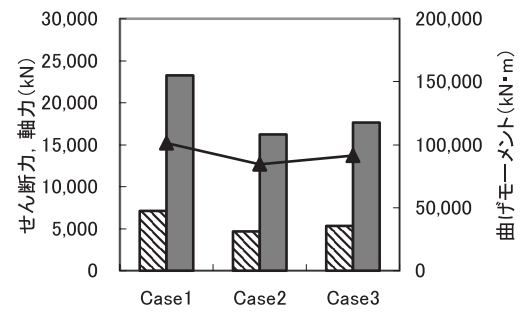
(a) P1 橋脚			
	Case1	Case2	Case3
加速度(gal)	G1:1,663	G1:1,774	G1:1,546
	G2:1,590	G2:1,349	G2:1,546
	G3:1,632	G3:1,387	G3:1,546
速度(m/sec)	G1:1.365	G1:1.187	G1:1.203
	G2:1.143	G2:0.893	G2:1.203
	G3:1.364	G3:1.202	G3:1.203
変位(cm)	G1:15.7	G1:11.9	G1:13.1
	G2:12.6	G2:10.5	G2:13.1
	G3:15.4	G3:11.6	G3:13.1

(b) P2 橋脚			
	Case1	Case2	Case3
加速度(gal)	G1:1,006	G1:917	G1:750
	G2:1,120	G2:976	G2:755
	G3:983	G3:947	G3:756
速度(m/sec)	G1:1.946	G1:1.602	G1:1.752
	G2:1.878	G2:1.667	G2:1.754
	G3:1.929	G3:1.627	G3:1.756
変位(cm)	G1:47.2	G1:49.4	G1:47.4
	G2:46.5	G2:48.6	G2:47.4
	G3:48.2	G3:49.2	G3:47.4

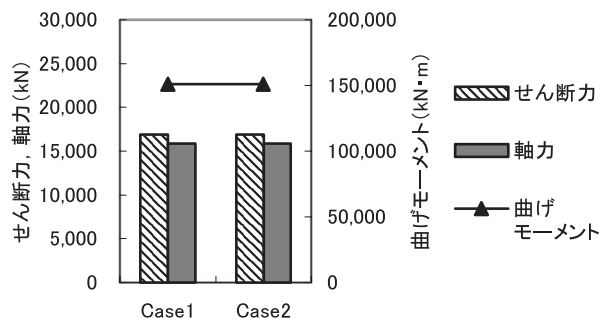
(c) P3 橋脚		
	Case1	Case2
加速度(gal)	G1:1,938	G1:1,938
	G2:1,676	G2:1,676
	G3:1,794	G3:1,794
速度(m/sec)	G1:1.545	G1:1.545
	G2:1.095	G2:1.095
	G3:1.412	G3:1.412
変位(cm)	G1:14.3	G1:14.3
	G2:10.0	G2:10.0
	G3:13.5	G3:13.5



(a) P1 橋脚



(b) P2 橋脚



(c) P3 橋脚

図-9 柱基部の発生断面力（絶対値）の最大値

果は、ピン結合としてモデル化した。

#### 4-1 橋脚の最大応答値の比較

時刻歴応答解析結果のうち橋脚基部の発生断面力の最大値を図-9に、上部構造の最大応答値を表-2に、また、各部材の損傷状況を図-10に示す。表-2中のG1, G2, G3は桁の位置を表し、左からG1, G2, G3とする。

図-9, および表-2より、各部の応答値を比較すると、P1橋脚, P2橋脚ともにせん断非線形性を考慮した場合には、上部構造の応答値および橋脚基部の発生断面力が小さくなる傾向がある。ただし、上部構造の応答変位は、P2橋脚において、若干大きくなっている。

図-10より損傷状況に着目すると、P1橋脚, お

よびP2橋脚においては、せん断非線形性を考慮しない場合、梁部で曲げ降伏が発生しており、せん断非線形性を考慮した場合、梁部のせん断降伏が曲げ降伏よりも先行して発生していることがわかる。また、P2橋脚では、梁部のせん断非線形性を考慮した場合、考慮しなかった場合と比べ、柱部での降伏箇所が減少している。よって、梁部のせん断非線形性を考慮することによって、地震時における断面力の発生状況が大きく変わる可能性があることがわかった。次に、上部構造の拘束効果の有無について比較すると、P2橋脚において、柱部の損傷状況に差異が見られた。また、P1橋脚においては、橋軸直角方向の耐荷力が大きく、柱部には降伏箇所は発生しなかったため、上部構造の



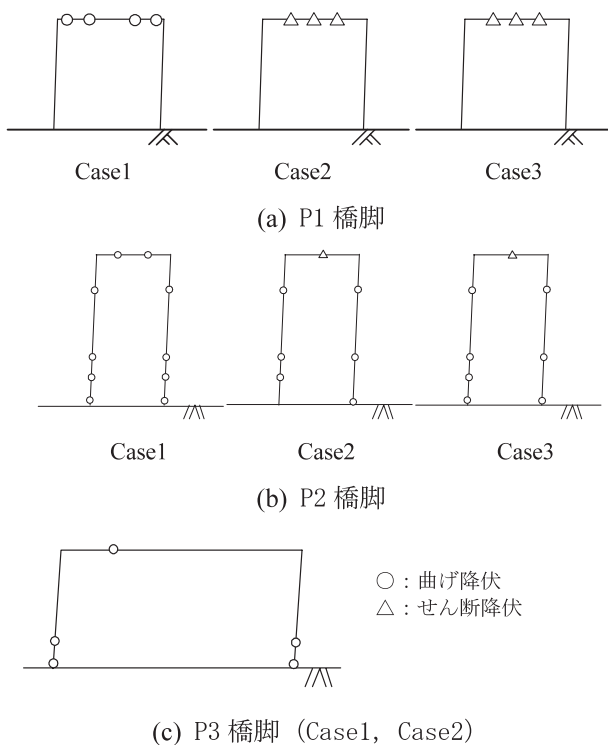


図-10 時刻歴応答解析における損傷状況

拘束効果の有無による差異は見られなかった。P3 橋脚では静的弾塑性解析時と同じく梁部にせん断降伏が発生していないため、せん断非線形性の考慮の有無によっては全く違いが現れなかった。

これらの結果から、鋼製ラーメン橋脚の面内方向解析を行う際には、梁部の非線形特性を考慮しなければ、地震時における断面力の発生状況を適切に把握することができないと考えられる。また、上部構造の拘束効果の有無により損傷状況に差異が出る可能性があるため、上部構造についても適切にモデル化する必要があると考えられる。

#### 4-2 累積ひずみエネルギー量の比較

本節では、地震時の各部材でのエネルギー吸収量を比較するため、梁部でせん断降伏した P1 橋脚と P2 橋脚について、各部材ごとの累積吸収エネルギー量を算出した。各断面に生じるひずみエネルギーは、図-11 に示すように履歴曲線の積分値とし、累積ひずみエネルギー量は、各要素が塑性領域に入ることによって吸収されるエネルギーの総和とした。

図-12 には、P1 橋脚と P2 橋脚の動的応答解析に

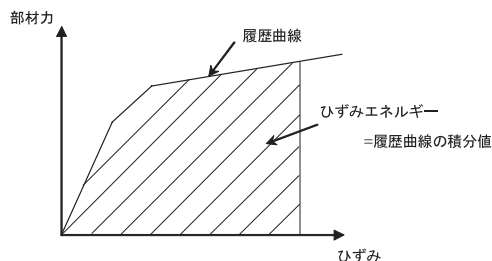


図-11 ひずみエネルギーの算出

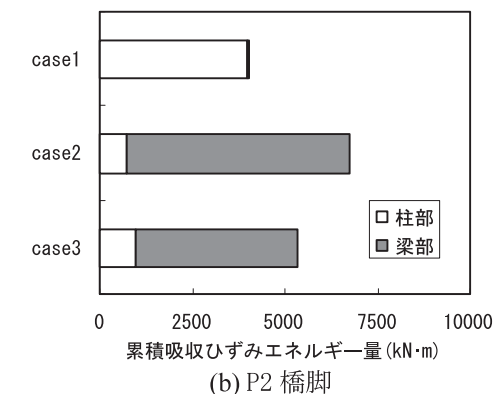
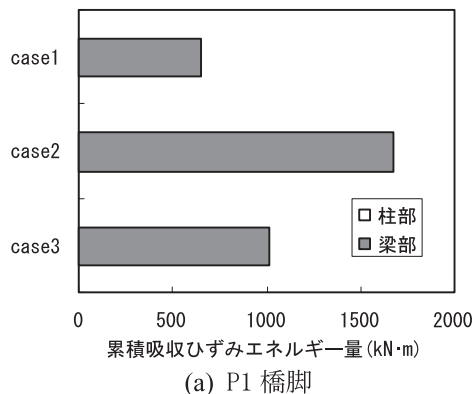


図-12 累積吸収ひずみエネルギー量の比較

における累積吸収ひずみエネルギー量を示す。図-12 より、せん断非線形性を考慮すると、せん断非線形性を考慮しない場合に比べ梁部での累積吸収エネルギー量が増大し、橋脚全体としての累積吸収エネルギーも増大していることがわかる。次に上部構造の拘束効果の有無について比較すると、上部構造の拘束を考慮したほうが、考慮しなかった場合と比べ、累積吸収ひずみエネルギー量が小さくなっていることがわかる。これは、上部構造の拘束が梁の変形を拘束したためと考えられる。

また、P1 橋脚と P2 橋脚の累積吸収エネルギー量を比較すると、梁部においてせん断力が卓越し、大きなせん断変形が生じた P2 橋脚の方が大きな

エネルギー量を吸収している。

以上の結果から、梁部に大きなせん断塑性変形が生じた場合、橋脚の吸収ひずみエネルギー量の増大が図れることがわかった。

## 5. まとめ

### 5-1 静的弾塑性解析

梁部のせん断非線形性の考慮の有無，ならびに上部構造の拘束効果の考慮の有無により，橋脚の水平力-水平変位関係，崩壊メカニズム等が異なることがわかった。よって，鋼製ラーメン橋脚の面内方向解析では，梁部のせん断非線形性を考慮するとともに，上部構造の拘束効果の影響を適切にモデル化する必要があると考えられる。

### 5-2 時刻歴応答解析

(1)せん断非線形性考慮の有無や上部構造の拘束効果の有無により，各部の応答値や損傷状況に差異が見られることがわかった。

(2)梁部にせん断非線形が生じる場合，橋脚の吸収ひずみエネルギー量の増大が図れることがわかった。

### 5-3 今後の課題，および展望

(1)本検討においては，動的応答解析時にせん断非

線形の履歴特性として移動硬化則を用いている。しかし，せん断非線形における履歴特性を適切に設定し，検討する必要があると考えられる。

(2)本検討により，梁部のせん断非線形の発生に伴い，橋脚のエネルギー吸収量の増大を図れることが分かった。今後，橋脚梁部のせん断非線形を積極的に利用することにより，面内方向挙動において，優れた変形性能を有する橋脚を設計することができる可能性がある。

## 参考文献

- 1) 秦健作，内田諭，長尾圭介，永田和寿，渡邊英一：鋼製ラーメン橋脚における地震時面内方向非線形挙動に関する解析的検討，土木学会 第26回地震工学研究発表会講演論文集，2001.
- 2) 足立幸郎，吉村敏志，陵城成樹，長尾圭介，渡邊英一：鋼製ラーメン橋脚梁部材のせん断座屈と変形性能に関する解析的検討，第57回年次学術講演会講演論文集，土木学会，2002.
- 3) 鈴木英之，陵城成樹，内田諭：鋼製ラーメン橋脚梁部における面内方向の力学的基本特性と骨組モデルの適用性検討，土木学会 第6回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2003.
- 4) 座屈設計ガイドライン：土木学会，1987.

## ANALYTICAL STUDY ON INFLUENCE OF SHEAR NON-LINEARITY OF BEAM ON BEHAVIOR OF A RIGID FRAMED STEEL PIER IN PLANE DIRECTION

Toshihiko Naganuma, Hidesada Kanaji, and Hideyuki Suzuki

In this study, static and dynamic elasto-plastic analysis using frame analysis models focused on three rigid framed steel piers was carried out. According to these results, in the case of piers whose beam is relatively short, shear non-linearity of beam make large influence on the behavior of piers. And in these cases, the amount of absorption at the beam is large and very effective to the reduction of seismic response. On the other hands, in the case of beam relatively long, the influence of shear non-linearity is small.