

# 鋼製ラーメン橋脚の時刻歴応答解析の実例

小玉乃理子<sup>1</sup>・小野沢直<sup>2</sup>・依田照彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 早稲田大学助手 理工学部土木工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）  
<sup>2</sup>学生員 工学 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程 建設工学専攻土木工学専門分野（同上）  
<sup>3</sup>フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科（同上）

## 1. はじめに

都市部の既設箱形断面鋼製ラーメン橋脚に対し、近年耐震補強工事が行われている。既設ラーメン橋脚の中には、平成8年版以前の道路橋示方書<sup>1)</sup>に基づき設計されたために、比較的小さい補剛材剛比をもつ補剛板から構成された橋脚もあり、強震時には局部座屈の発生が懸念される。このような状況から、従来の補強は主として柱部の補剛板に対して行われてきた。

一般に変形は構造物の剛性が低い箇所に集中する傾向がある。したがって、構造物を補強する場合、補強されていない箇所は変形が集中する可能性がある。変形エネルギーを吸収するのに十分な耐力が要求される。鋼製ラーメン橋脚においては隅角部あるいは梁部がこれにあたる。

従来、隅角部は十分な板厚をもち変形が小さいとの認識から、また、梁部は軸力が比較的小さいとの認識から、耐震補強工事の対象とはされてこなかった。しかし、仮にこれらの箇所が十分な耐力を有していなかった場合、柱部の補強によりこれらの箇所の変形が増長されることとなる。したがって、適切な補強を施すためには、個々の部材の耐力のみならず、鋼製ラーメン橋脚全体の動的挙動を検討しておく必要がある。

そこで本論文では、強震時における箱形断面鋼製橋脚の挙動の実例をシェル要素を用いた時刻歴応答解析によって紹介する。本研究では複雑な形状をしたラーメン橋脚を実例として使用し、変形の挙動や座屈発生箇所について検討した。

## 2. 鋼製ラーメン橋脚の時刻歴応答解析

2種類のラーメン橋脚のシェル要素モデルを作成し、神戸海洋気象台・東神戸大橋で観測された兵庫県南部地震の地震波を橋脚基部に入力して、時刻歴応答解析を行った。本解析には汎用有限要素法コードABAQUS<sup>2)</sup>を使用し、要素には4節点1次厚肉シェル要素を、材料硬化則については移動硬化則を用いた。要素サイズは10(cm)四方の矩形要素を基本とし、総要素数は約2万5千(ハーフモデル)である。

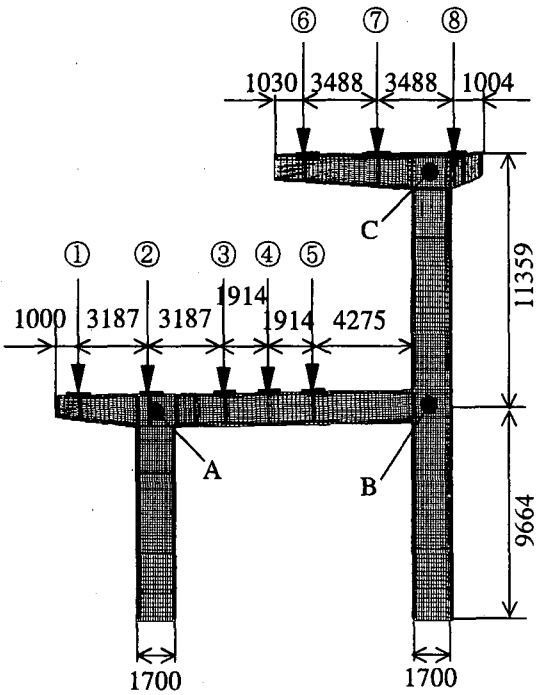


図2.1 シェル要素モデル(Model I)

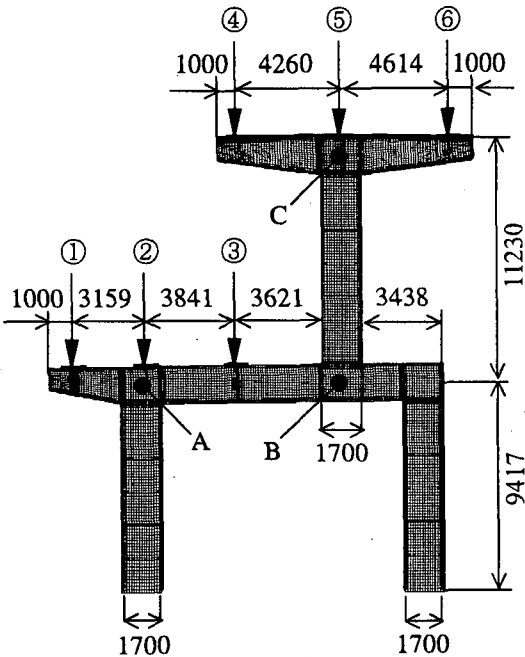


図2.2 シェル要素モデル(Model II)

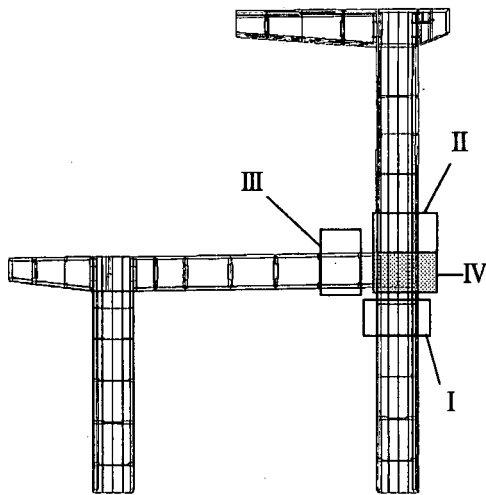


図 2.3 パラメータ抽出点(Model I)

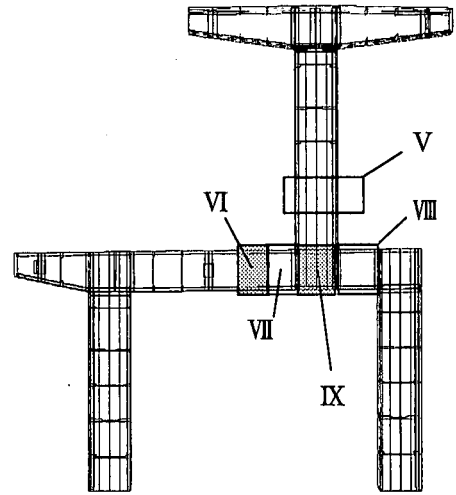


図 2.4 パラメータ抽出点(Model II)

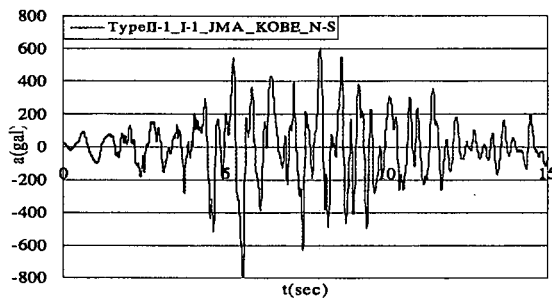


図 2.5 Model I 入力地震波(加速度)

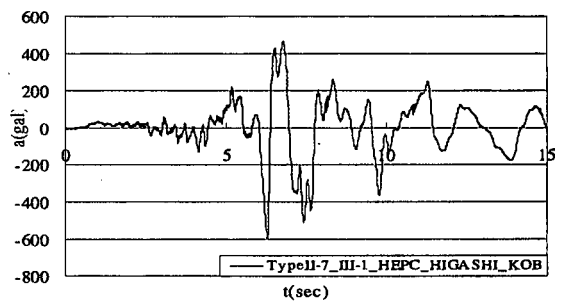


図 2.6 Model II 入力地震波(加速度)

表 2.1 上載荷重

|   | Model I | Model II |
|---|---------|----------|
| ① | 1069    | 1665     |
| ② | 899     | 1381     |
| ③ | 476     | 1667     |
| ④ | 514     | 1638     |
| ⑤ | 1118    | 1441     |
| ⑥ | 1182    | 1640     |
| ⑦ | 913     | —        |
| ⑧ | 1129    | —        |

表 2.3 幅厚比パラメータ・補剛材パラメータ

|      | フランジ  |       |                           | ウェブ   |       |                           | 隅角部 |
|------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|---------------------------|-----|
|      | $R_R$ | $R_F$ | $\gamma_f/\gamma_{l,req}$ | $R_R$ | $R_F$ | $\gamma_f/\gamma_{l,req}$ |     |
| I    | 0.3   | 0.8   | 0.4                       | 0.4   | 0.7   | 0.6                       | —   |
| II   | 0.4   | 0.7   | 0.5                       | —     | —     | —                         | —   |
| III  | 0.3   | 0.4   | 1.4                       | 0.5   | 0.4   | 2.1                       | —   |
| IV   | —     | —     | —                         | —     | —     | —                         | 0.7 |
| V    | 0.4   | 0.6   | 0.5                       | 0.6   | 0.5   | 1.3                       | —   |
| VI   | 0.4   | 0.5   | 0.8                       | 2.5   | 0.7   | —                         | —   |
| VII  | 0.3   | 0.5   | 0.9                       | 2.0   | 0.8   | —                         | —   |
| VIII | 0.3   | 0.7   | 0.5                       | 2.0   | 1.0   | —                         | —   |
| IX   | —     | —     | —                         | —     | —     | —                         | 1.1 |

注)  $R_R, R_F$ : 補剛板の幅厚比パラメータ

$R_P$ : 隅角部の幅厚比パラメータ

$\gamma_f/\gamma_{l,req}$ : 補剛材の剛比と必要剛比の比

表 2.2 I～IXにおける各諸元

|      | フランジ               |                     |               |         | ウェブ                |                     |               |         | 縦リブ                |                     | 横補剛材<br>間隔<br>$t_f$<br>(mm) |
|------|--------------------|---------------------|---------------|---------|--------------------|---------------------|---------------|---------|--------------------|---------------------|-----------------------------|
|      | 幅<br>$b_f$<br>(mm) | 板厚<br>$t_f$<br>(mm) | パネル数<br>$n_f$ | 材質      | 幅<br>$b_f$<br>(mm) | 板厚<br>$t_f$<br>(mm) | パネル数<br>$n_f$ | 材質      | 幅<br>$b_f$<br>(mm) | 板厚<br>$t_f$<br>(mm) |                             |
| I    | 1700               | 34                  | 4             | SM570   | 1700               | 28                  | 4             | SM570   | 140                | 14                  | 1710                        |
| II   | 1700               | 22                  | 4             | SM490YA | 1500               | 14                  | —             | SM490YA | 140                | 14                  | 1744                        |
| III  | 1700               | 25                  | 4             | SM400   | 1700               | 16                  | 4             | SM400   | 140                | 14                  | 1350                        |
| IV   | 1700               | 34                  | 4             | SM570   | 1700               | 28                  | 4             | SM570   | 140                | 14                  | 1500                        |
| V    | 1700               | 22                  | 4             | SM490YB | 1700               | 16                  | 4             | SM490YA | 140                | 14                  | 1500                        |
| VI   | 1700               | 22                  | 4             | SM490YB | 1700               | 15                  | —             | SM490YA | 140                | 14                  | 1207                        |
| VII  | 1700               | 28                  | 4             | SM570   | 1700               | 19                  | —             | SM570   | 134                | 14                  | 1207                        |
| VIII | 1700               | 28                  | 4             | SM570   | 1700               | 19                  | —             | SM570   | 140                | 14                  | 1738                        |
| IX   | 1700               | 28                  | 4             | SM570   | 1700               | 19                  | —             | SM570   | 140                | 14                  | 1700                        |

### (1) モデル概要

対象モデルの概要を図 2.1・図 2.2 に示す。また上載荷重の荷重値は表 2.1 に示す。

### (2) 補剛板パラメータ

図 2.3, 図 2.4 の I～IX の箇所における諸元を表 2.2 に示す。また、その補剛板パラメータ<sup>3)</sup>を表 2.3 に示す。ただし、IV・IX におけるパラメータは幅厚比パラメータを示す。幅厚比パラメータは式(2.1)によって求めた。

$$R_p = \frac{d_c}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\kappa_p} \frac{\tau_y}{E}} \quad (2.1)$$

ここで、 $d_c$ ：ウェブ高さ、 $t_w$ ：ウェブの板厚、 $\sigma_{yw}$ ：ウェブ材の降伏点応力度(N/mm<sup>2</sup>)、 $E$ ：ヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $\tau_y$ ：せん断降伏応力度(N/mm<sup>2</sup>)、座屈係数 $\kappa_p$ はせん断を受ける単純支持パネルの座屈係数を示す。

### (3) 入力地震波

解析に用いた東神戸大橋で観測された兵庫県南部地震の地震波を図 2.5, 図 2.6 に示す。解析では地震発生から最初の 15 秒間の地震波を入力した。

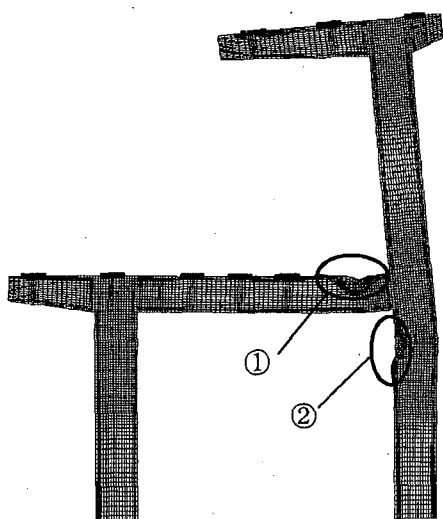


図 3.1 変形図(Model I・5 倍)

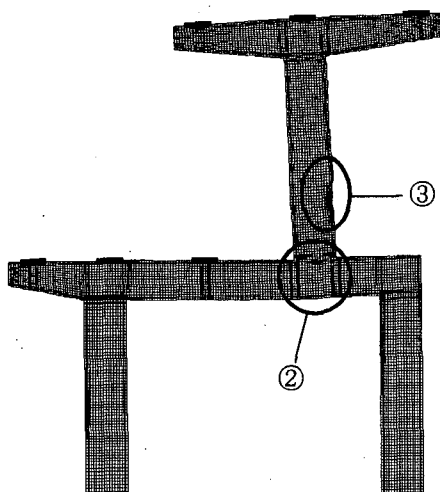


図 3.2 変形図(Model II・5 倍)

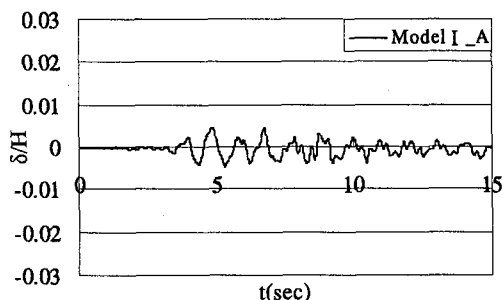


図 3.3 点 A での水平変位時刻歴(Model I)

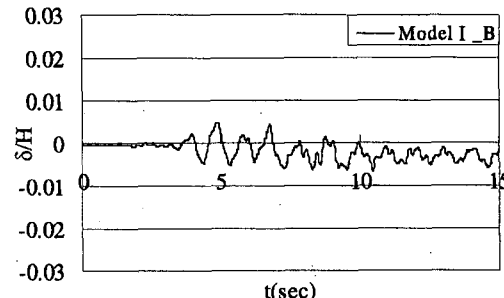


図 3.4 点 B での水平変位時刻歴(Model I)

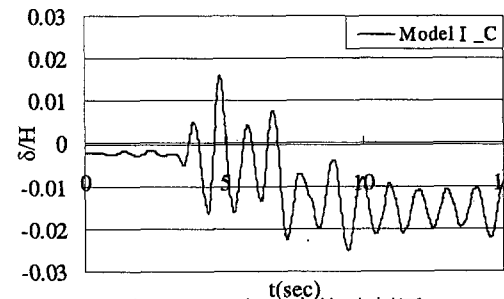


図 3.5 点 C での水平変位時刻歴(Model I)

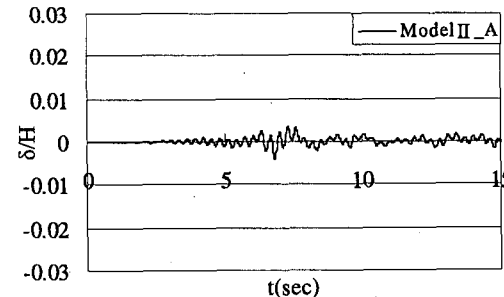


図 3.6 点 A での水平変位時刻歴(Model II)

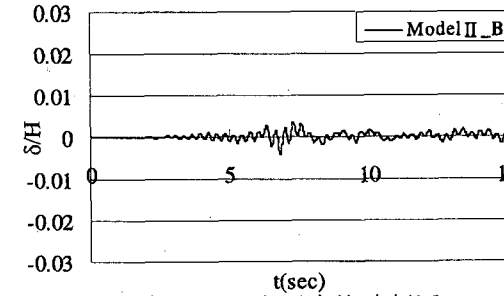


図 3.7 点 B での水平変位時刻歴(Model II)

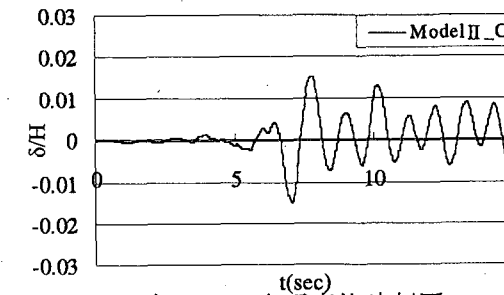


図 3.8 点 C での水平変位時刻歴(Model II)

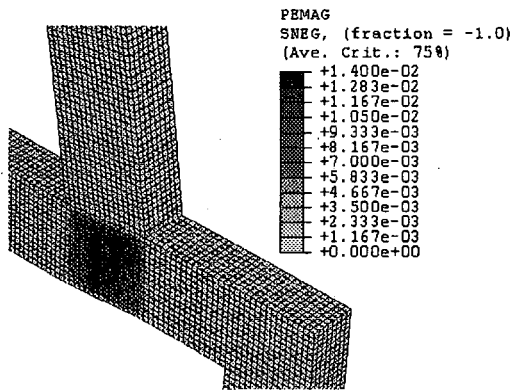


図 3.9 相当塑性ひずみ図( $t=7.0$ , 変形倍率 5 倍)

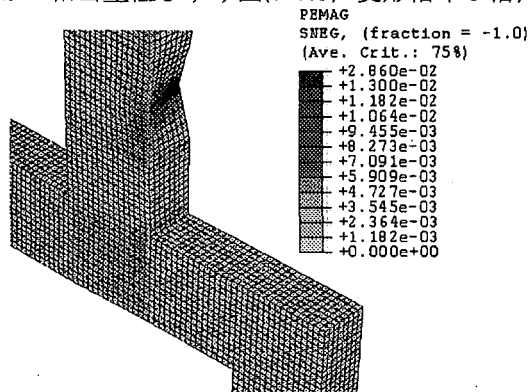


図 3.10 相当塑性ひずみ図( $t=15.0$ , 変形倍率 5 倍)

### 3. 解析結果

#### (1) 変形図

両モデルの解析終了後における変形図を図 3.1, 図 3.2 に示す。

Model I では、図中①で示したように、柱部以外に隣接する梁部において局部座屈が発生している。ラーメン橋脚上に延びる 2 階部分の慣性力が梁部の座屈に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

Model II では、(3)でも触れるが、地震波入力開始後およそ 7 秒ほどで図中②の隅角部ウェブパネルに塑性変形が発生し、その後図中③の 2 階部分の 1 本柱基部付近で局部座屈が生じた。

#### (2) 隅角部変位

図 2.1, 図 2.2 で設定した点 A~C の隅角部における変位の時刻歴応答値を図 3.3~図 3.8 に示す。図中で用いている  $\delta$  は水平方向の相対変位、 $H$  は橋脚基部からの高さである。

Model I では図 3.1 の図中①の箇所では座屈が発生した影響で、点 A, B での水平変位が大きく出ているが、図 3.5 から分かるように橋脚上部での最終的な残留変位は高さの 1(%)程度に落ち着いている。

一方、Model II ではラーメンの柱部に局部座屈が発生していないため、点 A, B での水平変位は小さい。図 3.8 より、点 C の変位に注目すると、図 3.2 の③の箇所に局部座屈が見られるものの、最大変位、残留変位はともに小さい。これは隅角部のせん断塑性変形と局部座屈が互いに上部一本柱の回転を打ち消

す方向に作用しているためであり、隅角部の変形性能が発揮された例と考えられる。

#### (3) Model II の相当塑性ひずみ図

図 3.9, 図 3.10 より、Model II では局部座屈が発生する前に、隅角部ウェブパネルにせん断塑性変形が発生した。本モデルでは隅角部のウェブ板厚は 19(mm)、フランジ板厚は 28(mm)である。通常隅角部に使用する鋼材の板厚と比較するとウェブの板厚が薄かったことが影響していると考えられる。

### 4. 結論

本論文で取り上げた 2 つのラーメン橋脚の、FEM 解析を用いた地震時時刻歴応答解析の結果から、以下の結論を得た。

- (1) Model I の解析結果より、ラーメン橋脚の梁部においても強震時に座屈する可能性のあることが確認された。座屈発生箇所は橋脚の形状や死荷重の大きさなどの諸条件によって決まるため、同一形状、または類似形状の橋脚すべてにおいて梁部に座屈が発生するとは考えられないが、橋脚補強工事では柱部だけでなく、梁部の補強についても注意を向ける必要がある。
- (2) Model II の解析結果より、ラーメン橋脚の梁部にある隅角部のウェブパネルが塑性変形する可能性が確認できた。通常、隅角部は塑性化やせん断座屈はしないように設計されているが、本モデルでは隅角部のウェブ板厚が他箇所と同等であったため、隅角部で塑性変形が生じた。このような場合にはせん断座屈を誘発する可能性があるため、ラーメン橋脚の補強方法には十分な注意が必要である。
- (3) 今後、橋脚の耐震補強工事を行う上で、補剛板の板厚の増加、リブの追加、中詰めコンクリートの充填長さの増加などの補強対策のみならず、支承にゴム支承を用いるなどして、強震時における上載荷重の慣性力を軽減する方策も一考に値すると考えられる。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編・II 鋼橋編，1973年2月
- 2) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. : ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.2, 2001
- 3) 長柱研究委員会編：弾性安定要覧，コロナ社，1969年8月