

# 論文 建物基礎により柱中間部を拘束された鉄道高架橋の地震被害に関する一考察

藤原 寅士良<sup>\*1</sup>・津吉 毅<sup>\*2</sup>・荻原 郁男<sup>\*3</sup>・青戸 拓起<sup>\*4</sup>

**要旨** : 2004年10月23日に発生した新潟県中越地震において、上越新幹線第三和南津高架橋 R2 ラーメンの端部列柱がせん断破壊に至った。本論では、地震による被害状況を報告するとともに2次元有限要素解析を実施し、せん断破壊に至った原因は、高架橋下を設備室として利用するために建設された建物基礎や埋め戻し土が柱中間部を拘束した点であることを検証した。

**キーワード** : 新潟県中越地震, 鉄道高架橋, 建物基礎, せん断破壊

## 1. はじめに

2004年10月23日17時56分頃、新潟県中越地方を震源とする M6.8 の地震が発生した。本地震は、「平成16年(2004年)新潟県中越地震」と命名され、本震の最大震度は7が観測された。

本地震により、新幹線の脱線やトンネル覆工コンクリートの大規模な崩落等が生じた他、一部のラーメン高架橋でも大きな被害が発生した。

本論では、ラーメン高架橋下を設備室として利用し、消雪設備用土間コンクリートと支持杭・地中梁構造(以下、建物基礎と称する。)により柱中間部が拘束されていた上越新幹線第三和南津高架橋の R2 ラーメンの被害状況を報告する。また、本高架橋の端部列柱がせん断破壊したため、その原因について2次元 FEM 解析により考察を加えたので、その結果を報告する。

## 2. 第三和南津高架橋の概要

### 2.1 震央との位置関係および構造形式

第三和南津高架橋は、17時56分の本震の震央位置から南東方向に約2km、その後の余震の震源域からも非常に近い位置となっている。高架橋位置と本震の震央位置の概略図を図-1に示



図-1 第三和南津高架橋と震央位置

す。第三和南津高架橋 R2 ラーメンの一般図を図-2に示す。高架橋は、三径間の一層ラーメン高架橋で、基礎形式は直接基礎である。地震後に行った付近のボーリング調査結果から、GLより約5mの深さのN値50以上の砂礫層が、良好な支持層となっており、フーチング底部は砂礫層上に構築されている。

### 2.2 柱中間部を拘束した建物基礎

第三和南津高架橋 R2 ラーメンの柱高さは、約8.0mで、柱高さの約半分となる4.0m程度が土に

\*1 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務部 構造技術センター 課員 (正会員)

\*2 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務部 構造技術センター 課長 (正会員)

\*3 東日本旅客鉄道株式会社 設備部 耐震技術 PT 課長

\*4 株式会社フォーラムエイト 大阪支店

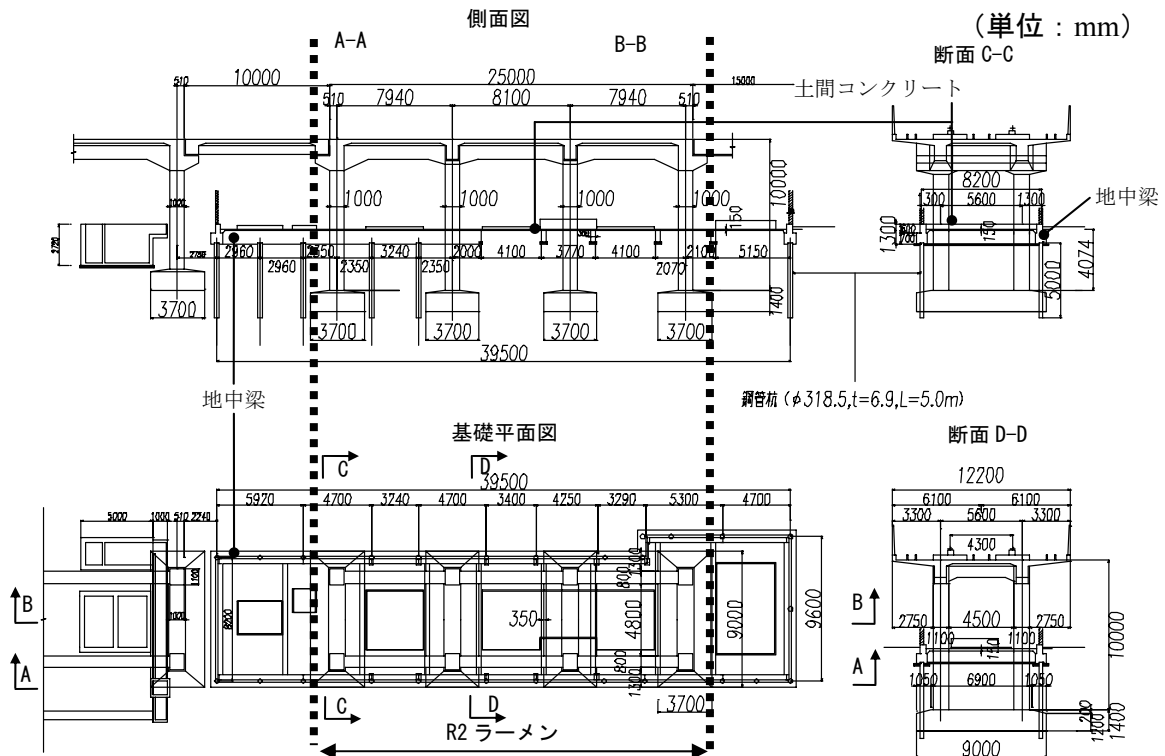


図-2 第三和南津高架橋 R2 ラーメン 概略一般図

表-1 端部柱のせん断耐力比表

条件	柱長さ(mm)	$V_{cd}$ (kN)	$V_{yd}$ (kN)	$V_{mu}$ (kN)	$M_{ud}$ (kN・m)	$V_{yd}/V_{mu}$
柱中間部拘束	3800	774	920	2156	4096	0.43

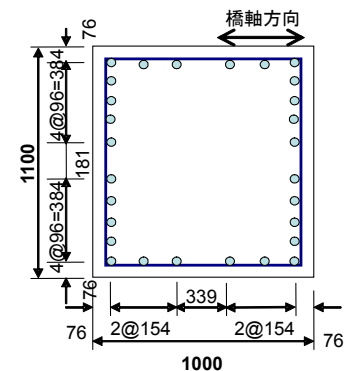
より埋め戻されている。R2 ラーメンの高架下は、高架橋上の散水消雪用機械の設備室として活用され、厚さ約 15cm の土間コンクリートと消雪用機械の荷重を高架橋へ伝達させないように地中梁・杭が設置されている。杭は、径 318.5mm、長さ約 5.0m の鋼管杭で、線路方向両側に約 3.5m 間隔で設置されている（図-2 参照）。なお、土間コンクリートと柱の間は、硬質の瀝青系目地材が約 20mm の幅で設置されており剛結されていない。

### 2.3 第三和南津高架橋 R2 のせん断耐力比

第三和南津高架橋 R2 橋軸直角方向の端部柱において、建物基礎により拘束されている柱中間部が完全固定であると仮定した場合のせん断耐力比を参考までに表-1 に示す（柱部配筋略図図-3 参照）。

端部列柱のせん断耐力比  $V_{yd}/V_{mu}$  ( $V_{yd}$ : 棒部

材の設計せん断耐力,  $V_{mu}$ : 部材が曲げ耐力 ( $M_{ud}$ ) に達するときのせん断耐力)は、0.43 と算出され著しく小さいが、実現象は拘束部が完全固定ではないと考えられるため、埋め戻し土や建物基礎の影響を過大に評価した値である。なお、本値を算出するにあたり、せん断補強鋼材を用いない部材の設計せん断耐力  $V_{cd}$  は、材料強度としては設計基準強度を用い、鉄道構造物等設計標準<sup>1)</sup>に基づき、安全係数を全て 1.0 として算出した。



端部列柱断面 配筋略図

主筋:  $\circ$  D32

帯筋: D10 ctc 300・150

図-3 柱配筋略図

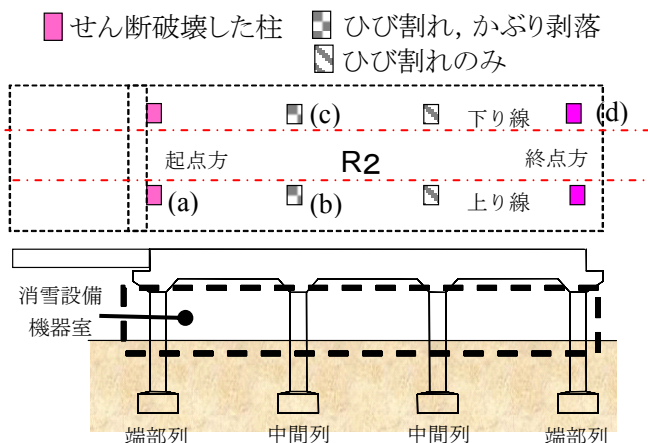


図-4 被害状況模式図

### 3. 第三和南津高架橋 R2 の被害状況

#### 3.1 柱の地上部の被害状況

R2 上部工の被害状況の模式図を図-4 に示す。

R2 では、端部列柱が大きくせん断破壊しており、起点方中間列柱は曲げひび割れとかぶり剥落、終点方中間列柱は曲げひび割れのための損傷であった。

以下に、R2 柱部分で見られた特徴的な損傷の写真を列挙し、状況を報告する。

・柱 (a) (上り線側起点方端部列柱) (写真-1)

柱は地上部でせん断破壊し、主筋が大きく曲がり、せん断補強鉄筋がはずれていた。内部コンクリートもはらみ出しがみられ、損傷の卓越方向も明確に判断できないほど、大きく損傷している様子が伺える。なお、同様の損傷は、R2 の端部列柱の全てに見られた。

・柱 (b) (上り線側起点方中間列柱) (写真-2)

ハンチ部の付け根部分でかぶりコンクリートが剥落し、柱の 45 度方向に斜め方向に幅数 mm 程度のひび割れが発生する損傷となった。端部列と比較して、軽微な損傷であった。

・柱 (c) (下り線側起点方中間列柱) (写真-3)

ハンチ部の付け根部分の線路直角方向に大きいもので幅数十 mm のひび割れが確認された。コンクリートの剥落は見られないものの、コンクリート浮きが見られ、線路直角方向に斜めひび割れが発生していた。

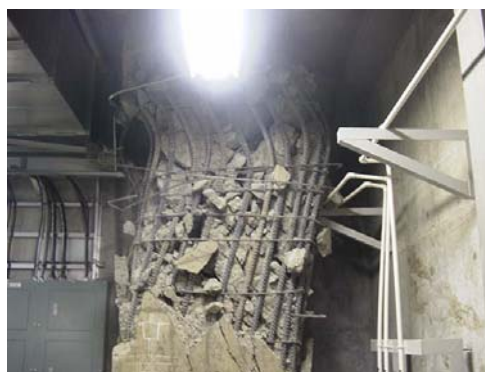


写真-1 柱 (a) 損傷状況



写真-2 柱 (b) 損傷状況



写真-3 柱 (c) 損傷状況

#### 3.2 柱の土中部の被害状況

柱が、埋め戻し土により埋まっている箇所についても、ひび割れ損傷の調査を行った。

図-4 示す柱 (d) (下り線側終点方端部列柱) に対して、柱基部まで掘削し目視により被害状況を調査したところ、柱下端の隅角部にコンクリートの剥落や浮きを確認されたとともに、曲



写真-4 柱 (d) 基部損傷



写真-5 柱 (d) 基部損傷

げひび割れも確認された。柱は、埋め戻し土や建物基礎により拘束されているものの、地震により、地中部でもある程度の変形が生じ損傷が発生したと判断できる（写真-4、写真-5）。

#### 4. 被害検証解析

本高架橋の端部柱が受けた被害を検証するために、静的非線形解析を行った。解析ケースは、建物基礎や埋め戻し土を含めモデル化したケース（CASE1）、建物基礎や埋め戻し土を省略したケース（CASE2）の2種類である。

##### 4.1 解析モデル

解析モデル図を図-6に示す。

解析に用いたコンクリート強度や鉄筋強度は、被災した構造物から採取したサンプルより圧縮強度試験や引張試験を行い確認した値を用いている（表-2）。ただし、建物基礎の土間コンクリート・鋼管材は図面記載材料に基づき強度を設定した。

表-2 各材料要素諸元

	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )
高架橋	39.4	359.9
土間 コンクリート	21	360
	鋼材降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	
鋼管杭	288	

ここで、解析モデルの立体イメージ図を図-7に示す。2次元解析だが、土間コンクリートと柱間は剛結となっていないため、土間コンクリート要素と柱要素間に柱幅のジョイント要素を設置し、柱と接していない箇所の土間コンクリート要素は連続体と考慮するようモデル化した。ジョイント要素とは接触方向に大きな剛性を持ち剥離方向には小さな剛性を有する要素である。せん断抵抗は、剥離時にはなく、接触時のみせん断抵抗が生じるように設定した。なお、本解析では、各々のジョイント要素に対して、接触

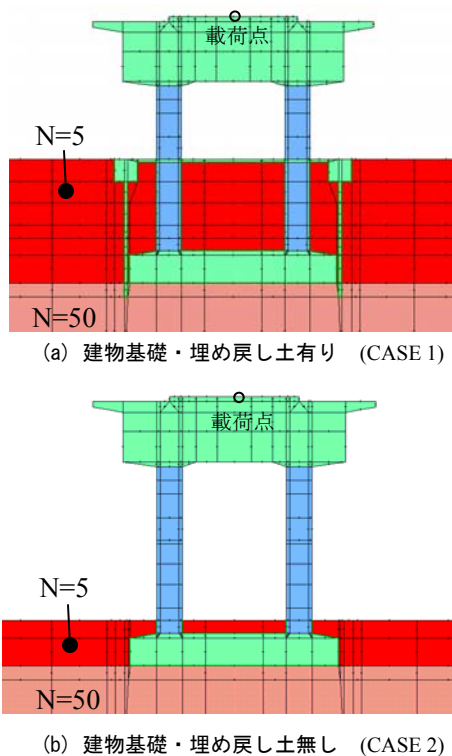


図-6 解析モデル

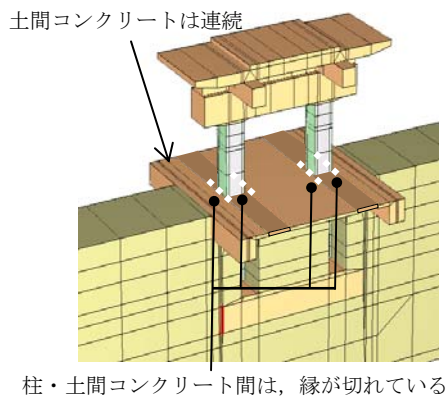


図-7 解析モデル立体イメージ図

剛性 10.0kN/mm<sup>2</sup>/mm, 剥離剛性 0.1kN/mm<sup>2</sup>/mm, せん断抵抗 0.1N/mm<sup>2</sup>/mm と設定した。

地盤要素のモデル化は、地震後の現地でのボーリング調査の結果から、支持地盤より上部の土（フーチング下端以浅）は N=5, 支持地盤（フーチング下端以深）は N=50 と設定した。なお、地震後のボーリング調査では、埋め戻し土は砂質土でありフーチング下端までの N 値が 6-9 程度の値が得られたが、地震後に土間コンクリートの下に空隙が観察されており、地震発生前はボーリング調査時よりも地盤が緩かった点が想定されるため、小さめの N=5 を解析に用いた。

表-3 土要素各諸元

	N=5	N=50
$G_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	42.62	258.90
$S_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.039	0.244
$E_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	115.1	699.1
$V_s$ (m/sec)	152.3	362.9
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.7	20.3

また、地盤要素は、柱・建物基礎杭により不連続であると仮定し、柱・土間コンクリート要素と地盤要素の間はジョイント要素を設けている。

本解析は 2 次元解析であるため、解析上、構造物に対し影響する地盤要素の奥行き幅を仮定する必要がある。今回は、埋め戻し箇所の上部分の奥行き幅は、フーチング上端以深はフーチング幅とし、フーチング上端以浅は、柱幅の 3 倍と仮定した。解析範囲横方向幅は、文献<sup>2)</sup>に倣い地盤深さの 5 倍に設定し、側面の境界条件は反射波の影響を消去する混合境界とした。

土間コンクリート、地中梁、支持杭は、地震被害調査から損傷が見られなかったため弾性要素とし、また、解析の便宜上、上部工およびフーチングは弾性要素とした。部材奥行き幅は R2 ラーメン高架橋線路方向柱の支間長とした。今回の被害検証解析における解析プログラムは、岡村・前川らによって開発された『WCOMD』<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>を用いた。

#### 4.2 解析諸元

解析に用いた荷重条件は、対象高架橋が新幹線の標準的な形状であるため、標準設計に用いる荷重条件とした<sup>5)</sup>。次に、解析で使用した N=5, N=50 の地盤要素におけるせん断剛性 ( $G_0$ )、せん断強度 ( $S_u$ )、変形係数 ( $E_0$ )、せん断波速度 ( $V_s$ )、埋め戻し土の単位体積重量 ( $\gamma$ ) の各値を表-3 に示す。地盤要素のせん断応力-せん断ひずみ特性は、大崎モデルを採用しており、履歴則は Masing 則に従っている<sup>6)</sup>。

#### 4.3 解析結果

各ケース毎に、静的非線形解析を実施した。

載荷方法は、図-6 の○印で示す箇所を載荷点とし、水平方向に左から右へ 0.2cm 刻みの変位

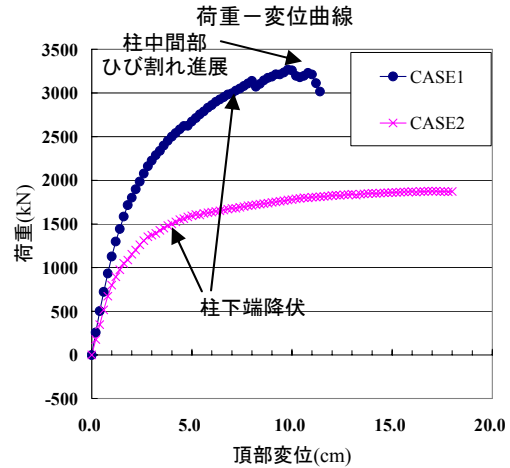


図-8 荷重変位曲線

制御により変形させている。なお、これ以降本載荷点における変位を頂部変位と称する。

図-8 に静的非線形解析の荷重変位結果を示すとともに、以下、各ケースにおけるひび割れが大きく進行した時点のひび割れ進展図を示し、損傷経緯を詳述する。

##### (1) CASE1

CASE1 では、頂部変位が 1.8cm の時点で柱上部が降伏、7.4cm の時点で土中の柱下端が降伏し、10.0cm から 10.4cm となる時点で、上層梁と基礎スラブの間の柱中間部で斜め方向のひび割れが大きく進展し、せん断破壊していると考えられる結果が得られた (図-10)。

本ひび割れ図は、土中部の柱下端に曲げによるひび割れが見られる点、せん断ひび割れの入る位置等被害状況が一致していることから、実際に観察された被害状況を再現していると考えられる。

##### (2) CASE2

CASE1 がせん断破壊に至ったと考えられる頂部変位が 10.4cm の時点、柱上端部のコンクリートひずみ (ひび割れ直角方向) が 0.3%に達した時点の頂部変位が 18.0cm のひび割れ図を図-11 に示す。CASE2 のひび割れ進展図は、CASE1 と同様に柱上下端が曲げ降伏し、その後も明らかに曲げひび割れが卓越している。なお、柱上端は頂部変位が 2.4cm、柱下端は 3.8cm の時点で降伏している。

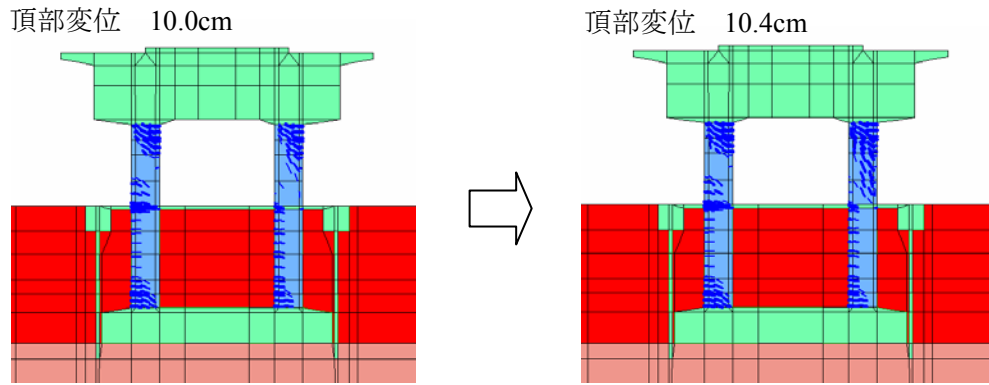


図-10 CASE1 ひび割れ進展図

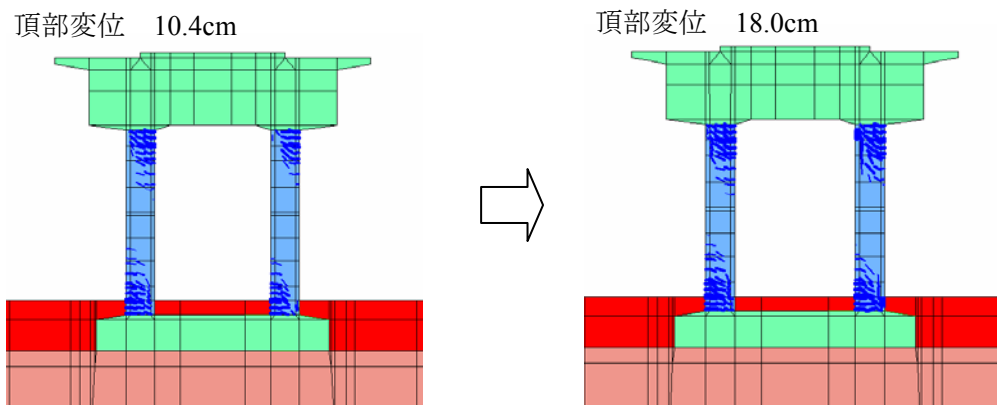


図-11 CASE2 ひび割れ進展図

## 5. まとめ

平成16年新潟県中越地震により被害を受けた第三和南津高架橋 R2 の被害状況を述べるとともに、被害検証解析を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 高架橋の被害調査および FEM 解析結果から、土中の柱基部が曲げ降伏した後、埋め戻し土・建物基礎の影響により地上の柱部でせん断破壊したと考えられる。
- (2) 埋め戻し土・建物基礎が高架橋の地震時応答を拘束し、柱をせん断破壊に至らしめる場合があることを解析的に検証した。今後、耐震診断において、それらの影響を考慮することが必要である。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、東京大学 前川宏一教授より解析に対する有益なご助言をいただきました。ここに記し感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善，pp.142-150，2004.4
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 阪神淡路大震災の被害文責に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証 - 解析手法の適用と比較 -，土木学会，pp19-23，2002.12
- 3) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂，1991.5
- 4) 株式会社フォーラムエイト：UC-1 WCOMD ユーザーズマニュアル，1999.
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー114 2003年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害解析，丸善，pp.A16-A17，2004.11
- 6) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Chapter 4 Nonlinear soil-structure interaction, Spon Press, 2003