

# 論文 地震被害を受けたラーメン高架橋柱の破壊性状に関する実験的研究

田所 敏弥\*<sup>1</sup>・谷村 幸裕\*<sup>2</sup>・岡本 大\*<sup>3</sup>・宇野 匡和\*<sup>4</sup>

**要旨:** 平面形状が不整形, または整形であっても質量配置が不均等なラーメン高架橋においては, 地震時において RC 柱にねじりが作用する可能性が解析的検討により指摘されている。本研究では, 既設のラーメン高架橋の RC 柱を対象に, ねじりの有無をパラメータとした載荷実験を行い, ねじりが RC 柱の耐力および破壊性状におよぼす影響について検討した。そして, 載荷実験における RC 柱の破壊性状と過去の地震における構造物の被害状況の比較から, 質量配置が不均等なラーメン高架橋は, 地震時において 3 次元的に挙動し, RC 柱にねじりが作用する可能性があることを示した。

**キーワード:** 地震被害, ラーメン高架橋, RC 柱, ねじり, 破壊性状

## 1. はじめに

近年の地震により被害を受けた鉄道高架橋は, 兵庫県南部地震を契機に見直された現行の技術基準である鉄道構造物等設計標準(耐震設計)(以下, 耐震標準という)<sup>1)</sup>が制定される以前に建設されたものであり, 一般に帯鉄筋量が少ない構造物である。これらのラーメン高架橋においては, 過去の地震において, RC 柱が損傷した事例が多くみられる。しかしながら, 地震による構造物の損傷は, 載荷実験で観察される破壊性状と異なる場合が少なくない。実構造物における損傷は, 構造物の形状, 地震波の特性, 入力方向など様々な影響を受けるため, 損傷のメカニズムは必ずしも明確になっていない。

ところで, 鉄道高架橋は主として立体ラーメン構造が用いられるが, 設計においては地震時の3次元挙動に関する検討が行われていないのが現状である。しかしなが

ら, 実構造物においては, 図-1に示す駅分岐部の高架橋の幅が変化する区間で用いられるバチ型や斜角を有するラーメン高架橋などの不整形な平面形状の構造物が存在するため, 地震時の3次元挙動が無視できない場合があると考えられる。また, 幅員の比較的大きな道路を跨ぐ桁を支持する部分によく用いられている1径間のラーメン構造物であるラーメン橋台などの質量配置が不均等な構造物においても同様の状況が考えられる。

既往の研究<sup>2), 3)</sup>において, 平面形状が不整形な構造物や整形であっても質量配置が不均等な構造物においては, 構造物の重心と剛心が一致しないため, 地震時に構造物に回転が生じ, RC柱にねじりが作用する可能性があることが解析により示されている。そこで, 本研究では, 帯鉄筋量が比較的小さい既設のラーメン高架橋を対象に, ねじりがRC柱の損傷におよぼす影響について実験的

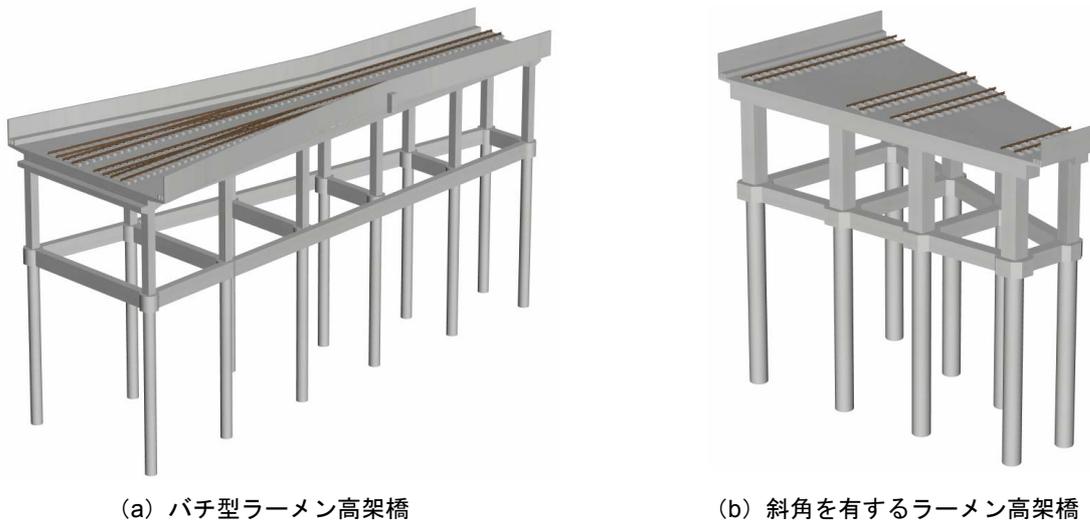


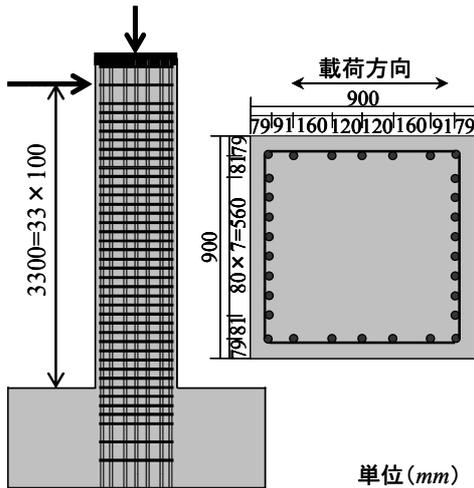
図-1 不整形なラーメン構造物の例

\*1 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 副主任研究員 博 (工) (正会員)  
 \*2 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究室長 博 (工) (正会員)  
 \*3 (財) 鉄道総合技術研究所 耐震構造 主任研究員 修 (工) (正会員)  
 \*4 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 副主任研究員 修 (工) (正会員)

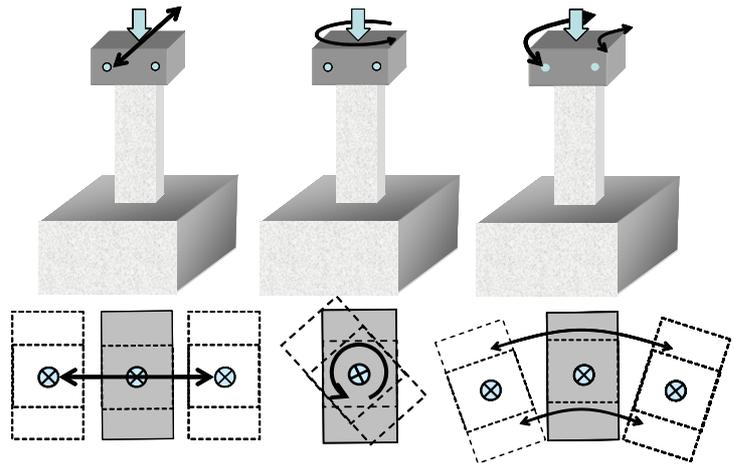
表-1 供試体一覧

供試体	断面 (mm)	$f'_c$	$E_c$	$l_a$	引張鉄筋			帯鉄筋			$\sigma'_n$	荷重方法
					径-本数	$p_s$	$f_{sy}$	径-ctc(mm)	$p_w$	$f_{wy}$		
No.1	900×900	30.0	25.7	3300	D32-10	1.07	380	D13-100	0.28	374	3.87	曲げ荷重
No.2	900×900	26.6	22.0	3300	D32-10	1.07	381	D13-100	0.28	389	3.87	荷重1→荷重2

$f'_c$ : 柱コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $E_c$ : 柱コンクリートのヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>),  $l_a$ : せん断スパン (mm),  $p_s$ : 引張鉄筋比 (%),  $f_{sy}$ : 引張鉄筋の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $p_w$ : 帯鉄筋比 (%),  $f_{wy}$ : 帯鉄筋の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma'_n$ : 軸圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>), 荷重1: ねじりのみ荷重 (図-3(a)参照), 荷重2: 曲げとねじり同時荷重 (図-3(c)参照)



(No.1は基部から1800mm以上の帯鉄筋は150mm間隔)  
図-2 供試体形状および寸法 (共通)



(a) No.1 (b) No.2 (荷重1) (c) No.2 (荷重2)  
図-3 荷重点の履歴

に検討し、過去の地震被害と比較することによって、実構造物におけるRC柱の損傷のメカニズムについて検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験方法

本研究では、ねじりの有無をパラメータに、RC柱の正負交番荷重実験を行い、ねじりがRC柱の耐力および破壊性状におよぼす影響について検討した。なお、本実験においては、ねじり特性に関する荷重(荷重1)を行った後、曲げとねじりの同時荷重(荷重2)を行った。ただし、荷重1においては、帯鉄筋のひずみを降伏ひずみの1/2におさえ、また、残留ねじり変位が生じないことから、荷重2の実験結果に影響がないと考えられる。

### 2.2 供試体概要

ねじりがRC柱の耐力および破壊形態におよぼす影響について検討するため、同一諸元の供試体による荷重実験を行った。供試体は、一般的な鉄道高架橋のRC柱の実大モデルとし、柱断面は900×900mmとした。帯鉄筋比は、既設のラーメン高架橋を対象としたため、0.28%と比較的小さいRC柱である。また、供試体は土木学会コンクリート標準示方書(構造型態照査編)<sup>4)</sup>にしたがって算定したせん断耐力と曲げ耐力時のせん断力の比

(以下、曲げせん断耐力比という)が0.98 (No.1), または1.02 (No.2)となるRC柱である。

供試体の諸元, 材料試験値, および荷重方法を表-1, 供試体の形状および寸法を図-2に示す。なお, No.1については, 既往の研究<sup>5)</sup>における実験結果を用いたため, 材料試験値については, No.2と若干異なる値を示している。また, 帯鉄筋の接合は, No.1は鋭角フック, No.2はフラッシュバット溶接により行った。ただし, No.1, No.2ともに帯鉄筋の破断, またはフックの解除は生じていないことから, 帯鉄筋の接合方法の相違による影響はないと考えられる。また, 鉛直荷重は, 標準的なラーメン高架橋のRC柱における地震時の軸力変動を考慮し, 軸圧縮応力を3.87N/mm<sup>2</sup>とした。

### 2.3 荷重方法

No.1については, 降伏変位 $\delta_y$  ( $\delta_y$ : RC柱の最外縁の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達したときの荷重点変位)を基準変位とした正負交番3回繰返し荷重である。一方, No.2については, ねじりひび割れ発生変位を基準変位としたねじりのみによる正負交番1回繰返し荷重(荷重1)を行った後, 曲げとねじりの同時荷重(荷重2)を行った。荷重点におけるNo.1とNo.2の荷重点履歴を図-3に示す。また, 荷重2において作用させたねじり量は, 0.07deg./m/ $\delta_y$ とした。これは, 標準的なラーメン橋台に

において片側柱のみが耐震標準における限界値であるN点（N点：降伏荷重を維持できる最大変位）まで変形した場合に、反対側のRC柱に想定されるねじり量である。このため、標準的なラーメン高架橋を想定した場合、若干大きなねじり量と考えられる。

曲げとねじりを同時に作用させた荷重2は、図-4に示すように、反力床に固定した供試体の上端を2台の水平ジャッキにより異なる変位をあたえることによって行った。また、正負交番荷重における基準変位は、2台の水平ジャッキの平均変位である部材軸における変位とした。なお、実験におけるおもな測定項目は、荷重点の荷重と変位、および鉄筋のひずみである。

### 3. 実験結果

#### 3.1 RC柱のねじり特性

No.2における荷重1と荷重2により得られたRC柱のねじりモーメント-ねじり角の関係を「コンクリート構造の限界状態設計法指針（案）」<sup>6)</sup>にしたがってもとめた算定値とともに図-5に示す。図-5より、ねじりモーメント-ねじり角関係の算定値は、ねじりのみ荷重した荷重1の結果を概ね評価できることがわかる。ねじり剛性が大きく低下するねじりひび割れ発生荷重  $M_{tc}$  は、帯鉄筋比が0.79%の曲げ破壊型のRC柱を対象とした既往の研究<sup>7)</sup>と同様に算定値の1.5倍程度あり、履歴特性はこれまでに経験した最大点、および原点を指向するタイプであることがわかる。また、ねじりひび割れは、ねじり角が約0.03deg/mに達したとき、柱高さ中央に発生した。なお、帯鉄筋に発生した最大ひずみは、降伏ひずみの1/2の1000 $\mu$ 、作用した最大ねじり量は約0.13deg/m/ $\delta_y$ であり、RC柱の残留ねじり変位はほとんどなかった。

一方、曲げとねじりを同時に作用させた荷重2においては、軸方向鉄筋が降伏し、ねじり変形が柱基部に集中するため、ねじり剛性が大きく低下することがわかる。つまり、曲げ降伏するRC柱においては、ねじり破壊する可能性は極めて小さいといえる。

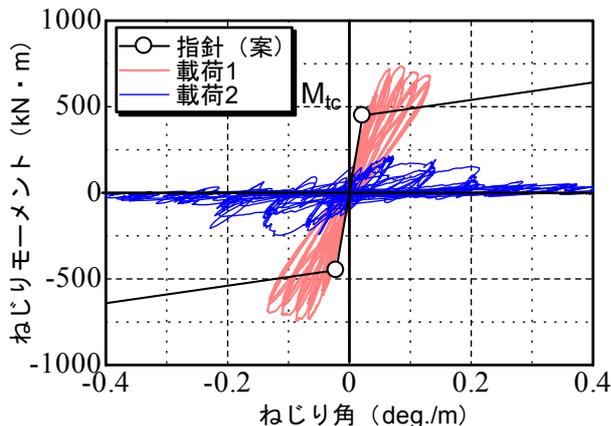


図-5 ねじりモーメント-ねじり角関係 (No.2)

#### 3.2 ねじりを受けるRC柱の変形性能

曲げのみ受ける No.1 と曲げとねじりを同時に受ける No.2 の荷重実験より得られたRC柱の荷重-変位関係を耐震標準にしたがって算定される限界値であるY点、M点、N点（Y点：降伏変位、M点：最大荷重を維持できる最大変位、N点：降伏荷重を維持できる最大変位）からなる骨格曲線とともに図-6に示す。

供試体は、曲げ降伏後のせん断破壊の可能性のある曲げせん断耐力比がほぼ1のRC柱であるため、No.1において、M点変位に達した3 $\delta_y$ の繰返しによって荷重の低下がみられた。また、曲げとねじりを同時に受けるNo.2においては、M点変位に達する前の2 $\delta_y$ の繰返しによって荷重の大きな低下がみられた。そして、3 $\delta_y$ の繰返し終了時においては、最大荷重の50%程度まで低下し、4 $\delta_y$ の繰返しにより破壊に至った。このように、曲げと同時にねじりが作用することによって、荷重の低下が顕著になることがわかった。

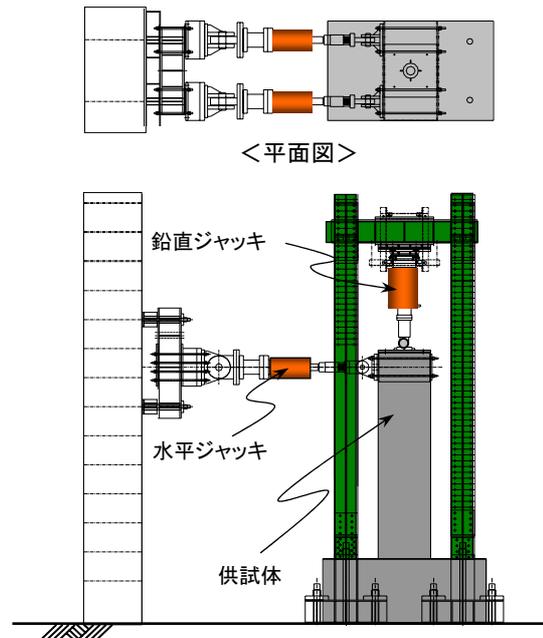


図-4 荷重装置図

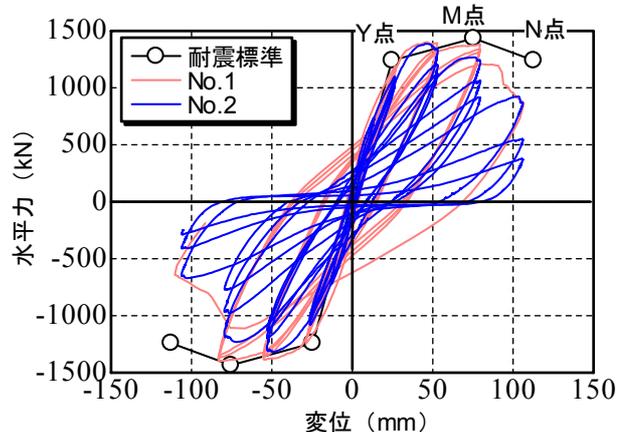
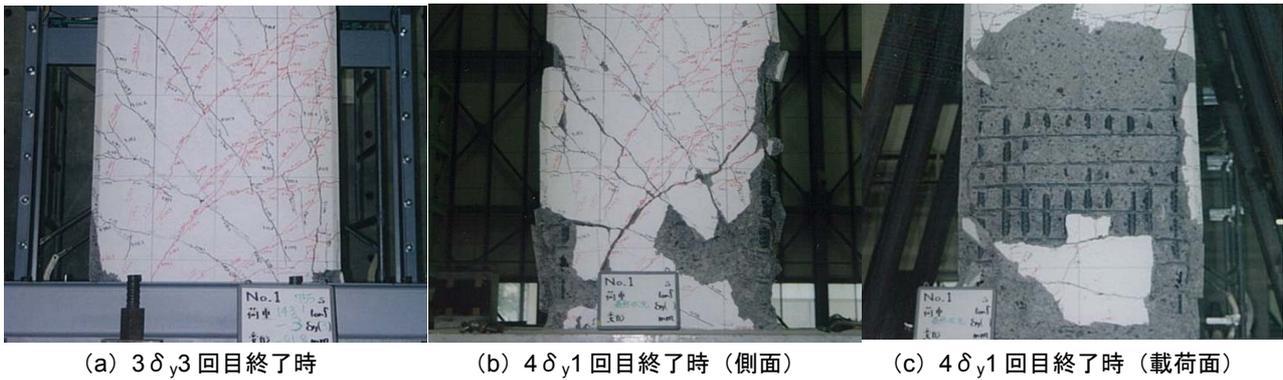
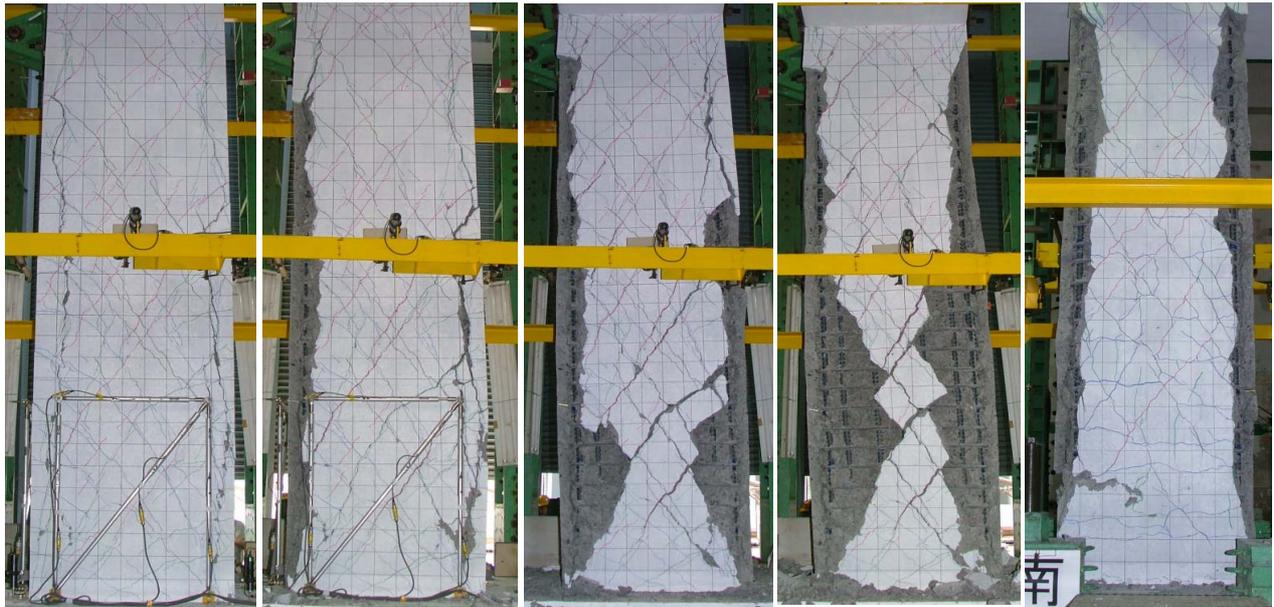


図-6 水平力-変位関係 (No.1, No.2)



(a)  $3\delta_y$  3回目終了時 (b)  $4\delta_y$  1回目終了時 (側面) (c)  $4\delta_y$  1回目終了時 (載荷面)

図-7 No.1の破壊状況



(a)  $2\delta_y$  3回目 (側面) (b)  $3\delta_y$  1回目 (側面) (c)  $4\delta_y$  1回目 (側面) (d)  $4\delta_y$  2回目 (側面) (e)  $4\delta_y$  1回目 (載荷面)

図-8 No.2の破壊状況

### 3.3 ねじりを受ける RC 柱の破壊形態

曲げのみ受ける No.1 においては、 $2\delta_y$  の繰返しにおいて柱基部の圧壊が発生したが、軸方向鉄筋の座屈、および帯鉄筋の降伏はみられなかった。ここで、 $3\delta_y$  以降の損傷状況を図-7 に示す。 $3\delta_y$  の繰返しにおいて、柱高さ中央付近の帯鉄筋の降伏、柱基部のコンクリートのはく離、はく落がみられ、荷重が低下した。そして、 $4\delta_y$  の 1 回目の繰返し載荷によって柱基部 1.5D (D: 柱幅) 程度の範囲のコンクリートが大規模にはく離、はく落し、破壊に至った。また、軸方向鉄筋の座屈長は、1D 程度と大きく、座屈の程度は小規模であった。なお、帯鉄筋は、柱基部から柱高さ中央までの鉄筋が降伏に至った。

一方、曲げとねじりを同時に受ける No.2 においては、 $2\delta_y$  において柱基部のコンクリートの圧壊と同時に、載荷側面において最外縁の軸方向鉄筋に沿った鉛直ひび割れが柱基部から発生した。ここで、 $2\delta_y$  以降の損傷状況を図-8 に示す。図-8 (a) に示すように  $2\delta_y$  の 3 回目の繰返し載荷において、柱高さ全長にわたる顕著なひび割れへと進展した。この鉛直ひび割れの進展に起因し

て、 $2\delta_y$  の繰返し載荷において荷重が大きく低下したと考えられる。そして、図-8 (b) に示すように  $3\delta_y$  の 1 回目の繰返し載荷において、4 隅のコンクリートが柱全長にわたってはく落した。また、帯鉄筋は柱基部から 1D 位置の帯鉄筋のみ降伏に至った。さらに、図-8 (c) (d) に示すように  $4\delta_y$  の繰返し載荷において、載荷側面のコンクリートが大規模にはく落し、かぶりは全面にわたりはく離した状況であった。一方、載荷面については、曲げのみ載荷した No.1 のように、柱基部において、軸方向鉄筋の座屈、およびコンクリートのはく離、はく落がみられないことが、図-8 (e) からわかる。また、 $3\delta_y$  の繰返し載荷によって新たに降伏に至った帯鉄筋はみられなかった。なお、ねじりによる載荷直角方向の変形量は、 $3\delta_y$  の載荷時においても数 mm 程度であることから、面外曲げの影響は小さいと考えられる。

このように、ねじりの有無をパラメータとした載荷実験により、ねじりにより RC 柱の破壊性状が大きく影響を受けることがわかった。また、ねじりによって、RC 柱には、ねじりひび割れの発生とともに 4 隅の軸方向鉄

筋に沿った鉛直ひび割れが発生し、耐力が大きく低下することがわかった。

#### 4. 過去の地震による実構造物の被害

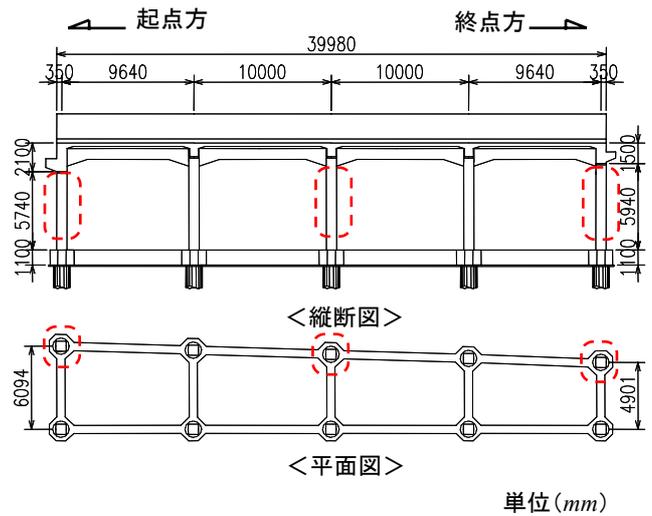
RC 柱の載荷実験により、帯鉄筋比の小さい既設のラーメン高架橋の RC 柱においては、破壊性状がねじりの有無に大きく影響を受けることがわかった。そこで、過去の地震被害から、RC 柱にねじりが作用したと考えられるラーメン高架橋の損傷について検討した。

対象としたラーメン高架橋の一般図を図-9 に示す。当該の構造物は、昭和末期に設計された駅部のバチ型の4径間ラーメン高架橋である。また、駅分岐部に位置するため、高架橋幅が起点方と終点方で異なる不整形な平面形状の構造物といえる。なお、RC 柱の帯鉄筋比は0.3%程度であり、材料強度の推定値から算定した曲げせん断耐力比は1程度と本研究における供試体と同等である。

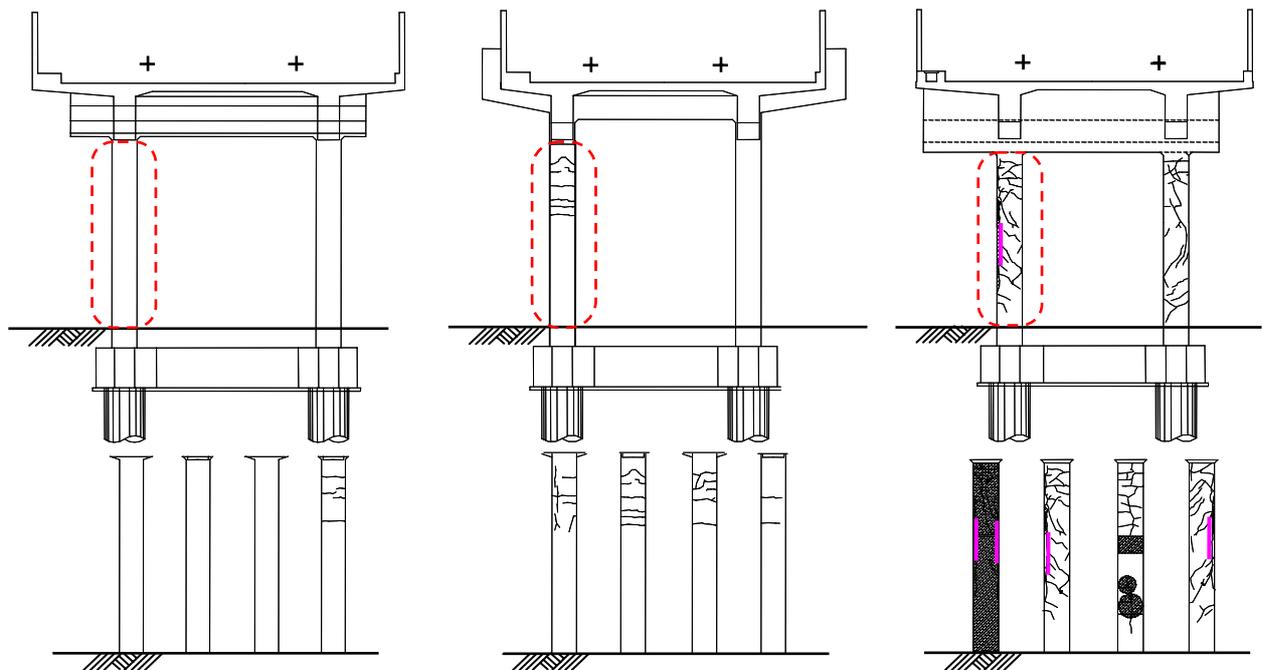
起点方、中間部、および終点方の RC 柱における損傷状況を図-10 に示す。当該のラーメン高架橋の損傷は、高架橋幅の小さい終点方の端部の RC 柱に集中しており、起点方に向かうにしたがって、損傷の程度が徐々に小さくなり、起点方の端部の RC 柱においては、損傷がほとんどみられなかった。また、損傷の程度が大きい終点方の RC 柱においては、柱高さ中央に斜めひび割れが多数みられた。このことから、地震時において終点方の RC 柱にねじり変形が生じた可能性が考えられる。さらに、

当該のラーメン高架橋においては、図-10 からわかるように桁受け部、および片持ちスラブについても、左右の張出し長さが異なっていることから、橋軸直角方向においても、質量配置が不均質な構造物といえる。これも、ねじりが作用する要因のひとつと考えられる。

ねじりが作用した可能性がある終点方の RC 柱においては、図-11 に示すように柱高さ中央において、4隅の軸方向鉄筋に沿った鉛直ひび割れ、および4隅のコンクリートのはく落がみられた。そして、RC 柱の橋軸直角方向面においては、大規模なかぶりのはく離がみられた。



単位(mm)  
 ○ 図-10 において損傷を示した RC 柱  
 図-9 対象としたラーメン高架橋一般図



(a) 起点方の端部左柱 (4 面)

(b) 中間部左柱 (4 面)

(c) 終点方の端部左柱 (4 面)

図-10 ラーメン高架橋の損傷図



(a) 4 隅の軸方向鉄筋に沿った鉛直ひび割れ

(b) 4 隅のコンクリートのはく落

図-11 終点方の端部左柱の損傷状況

一方、載荷実験においても、曲げとねじりを同時に受ける場合においては、図-8 に示したように 4 隅の軸方向鉄筋に沿った鉛直ひび割れが発生し、そして、鉛直ひび割れの進展にしたがって 4 隅のコンクリートがはく落した。さらに、RC 柱の載荷側面においては、全面にわたりコンクリートのはく離、およびはく落がみられた。

このように、ねじりが作用した可能性がある実構造物における RC 柱の損傷は、曲げとねじりの同時載荷による載荷実験により観察された破壊性状と類似するものであった。このことから、平面形状が不整形、または質量配置が不均等なラーメン高架橋の RC 柱においては、地震時にねじりが作用する可能性があると考えられる。また、ねじりにより実際に損傷する可能性があることが、載荷実験と地震被害の破壊性状の検討によりわかった。ただし、曲げとねじりによりラーメン高架橋の RC 柱が、このような損傷に至る詳細なメカニズムの解明については、さらなる実験、および解析的な検討が必要であるとされる。

## 5. まとめ

曲げとねじりを同時に受ける RC 柱の載荷実験、および実構造物における地震被害の検討により以下の知見を得ることができた。

- (1) 帯鉄筋比が比較的小さい RC 柱においては、ねじりの有無により破壊性状が大きく異なることがわかった。
- (2) 帯鉄筋比が比較的小さい RC 柱においては、曲げと同時にねじりを受けることによって、曲げ降伏後の耐力低下が顕著になることがわかった。
- (3) 曲げ降伏する RC 柱においては、ねじり変形が柱基部に集中するため、ねじり剛性が大きく低下する。このため、ねじりが作用しても、RC 柱がねじり破壊する可能性は極めて小さいと考えられる。

(4) 既往の研究における構造物の地震時挙動に関するシミュレーションと同様に、不整形な平面形状、または質量配置が不均等な実構造物の RC 柱においては、地震時にねじりが作用する可能性があることがわかった。

(5) ねじりが作用した可能性があるラーメン高架橋の RC 柱の損傷は、曲げとねじりの同時載荷による RC 柱の載荷実験で観察された破壊性状と類似するものであった。

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）、丸善、1999
- 2) 黒川浩嗣，谷村幸裕，田所敏弥，松橋宏治，渡邊忠朋：不整形鉄道ラーメン高架橋の 3 次元動的解析，第 61 回年次学術講演会講演概要集，I -194，pp.387-388，2006
- 3) 黒川浩嗣，谷村幸裕，田所敏弥，松橋宏治，渡邊忠朋：駅部ラーメン高架橋の地震時応答解析における解析モデルの影響，第 10 回地震時保有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，pp.91-98，2007
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編），丸善，2002
- 5) 渡邊忠朋，谷村幸裕，瀧口将志，佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.31-45，2001
- 6) コンクリート構造の限界状態設計法指針（案）：土木学会コンクリートライブラリー第 52 号，1983
- 7) 田所敏弥，谷村幸裕，岡本大，曾我部正道，進藤良則：曲げとねじりを同時に受ける鉄筋コンクリート柱の性能について，第 62 回年次学術講演会講演概要集，V -340，pp.679-680，2007