

# 論文 残留変位に着目した地震被災橋脚の検討

田中 克典\*<sup>1</sup>・林 秀侃\*<sup>2</sup>・幸左 賢二\*<sup>3</sup>・安田 扶律\*<sup>4</sup>

要旨：兵庫県南部地震において被災した阪神高速道路3号神戸線RC橋脚の補修・補強による復旧工事の際、地中部を含めた詳細な損傷調査が行われた。一方、橋脚の残留変位（残留傾斜）についても調査が行われ、損傷度が比較的軽微であるにも拘わらず、残留傾斜が大きいと撤去・再構築となった橋脚もかなりの数にのぼった。ここでは橋脚の残留変位に着目し、構造的な要因との関連性ならびに地震前後の航測写真の比較から得られた桁および地盤の残留変位に着目した検討を行った。その結果、橋軸直角方向の橋脚残留変位は橋脚の構造的な要因との相関が認められ、橋軸方向の落橋に対しては、上部構造形式や支承強度条件の影響が大きいことを推定できた。

キーワード：残留変位，偏心量，損傷度，地盤，耐震設計

## 1 はじめに

1995年1月17日早朝に発生した兵庫県南部地震は、阪神地方を中心に甚大な被害を与えた。阪神高速道路においても例外ではなく、特に3号神戸線の兵庫県の区間においては、5箇所落橋に至るなどの大きな被害を被った。RC橋脚の補修・補強による復旧の場合には、地中部を含めた詳細な損傷調査結果をもとに、より精度の高い損傷度評価を行っている。また、可能な橋脚については残留変位（残留傾斜）も計測され、撤去・再構築の必要性の判断材料とされている。ここでは主として橋脚の残留変位と橋脚の構造的な要因（直角方向の上下部工の偏心量）との関連性および地震前後の航測写真より読みとった桁および地盤の残留変位に着目した検討を加えた。

の橋脚については、補修・補強工事に伴い、地中部も含めたかぶりコンクリートの剥離、ひび割れ状況、軸鉄筋の損傷状況（座屈、はらみ出し量等）の詳細な調査が実施された。ただし、Bランク以下の橋脚であっても、残留傾斜が大きく撤去・再構築となった橋脚の詳細調査は行われていない。

### (a) 損傷度ランク判定

外観調査およびBランク以下で実施した詳細調査をもとに損傷度を8段階に区分した（As, A, B1, B2, B3, C1, C2, D）。撤去・再構築されたAs, Aランクの橋脚については危険度が高い

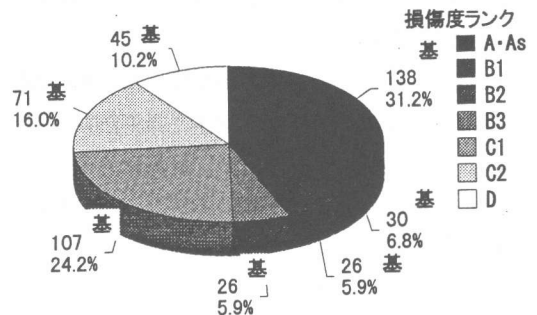


図-1 詳細調査による損傷度

## 2 RC橋脚の損傷調査

### 2.1 損傷調査<sup>1)</sup>

震災直後の外観調査（地上部の目視調査）により、比較的軽微な損傷であったBランク以下

\* 1 八千代エンジニアリング (株) 大阪支店  
 \* 2 阪神高速道路公団 保全施設部  
 \* 3 阪神高速道路公団 工務部  
 \* 4 阪神高速道路公団 工務部

ことから、緊急で鋼板巻き立てなどの応急対策を実施したため<sup>2)</sup>、詳細調査は実施されておらず、震災直後の判定ランクは変更していない。詳細調査では、Bランク以下の橋脚について、座屈損傷を受けた外周軸鉄筋の取り替え率によるランク区分 (B1, B2, B3) , かぶりコンクリート剥離、ひび割れ等によるランク区分 (C1, C2, D) を新たに行った。図-1 に As・A ランクと詳細調査が行われた RC 単橋脚合計443基の損傷度ランクの割合を示す。

### (b) 残留変位 (残留傾斜) の評価

被災後、多くの橋脚に残留傾斜が認められたため、傾斜量の計測も行われた。計測方法は、図-2 にあるように、振り下げあるいはトランシットを用いて、橋脚高さ方向に基準量L (3 m程度) 離れた位置の鉛直線からの水平距離 $\delta$ を橋軸、橋軸直角の2方向について測定している。これらの測定値から傾斜角度および橋脚天端の残留水平変位を計算した。傾斜角度1.0度以上もしくは橋脚天端の水平変位が15cm以上の橋脚については、損傷度ランクがBランク以下であっても補強による復旧が困難なことや傾きが視認され視覚的な不安感が生じることから原則として撤去・再構築となっている。なお、傾斜により撤去・再構築となっている橋脚も含め残留傾斜角は、423基で計測されている。計測されていない橋脚は、危険度が高く早期に撤去されたものや、仮受ベント等で物理的に計測不可能な橋脚である。

なお、これまで損傷度評価を行った上記443基の橋脚を対象に、損傷度ランクや損傷形態 (曲げ、曲げせん断、せん断) と、計算耐力値との関連から要因分析を行っているが<sup>1)</sup>、ここでは、主に残留変位に着目した分析を実施した。

## 3 橋脚の残留変位

### 3.1 残留変位の原因推定

図-3 は、残留変位 (残留傾斜角) の大きさに別に見て、外観調査の各損傷度ランクが占める割合を示したものである。同図において損傷度ランク

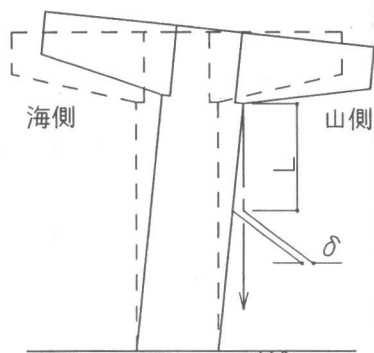


図-2 残留傾斜角の計測

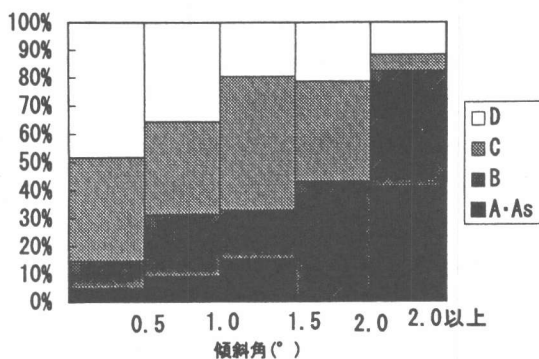


図-3 傾斜角と損傷度ランク (外観調査)

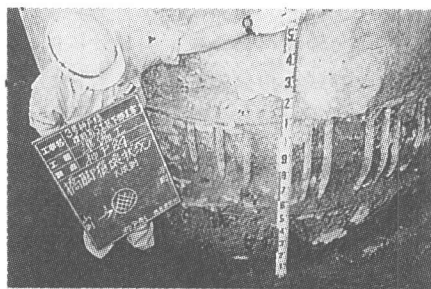


写真-1 地中部の損傷状況

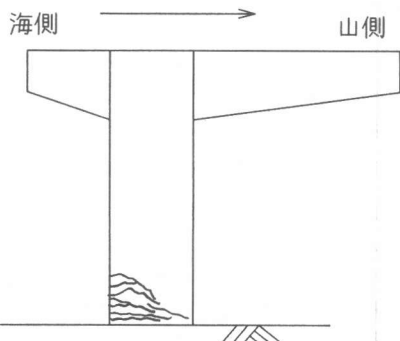


図-4 ひび割れ状況図

As・Aの橋脚と損傷度に関係なく傾斜角1度以上の橋脚が撤去・再構築となった橋脚である。その傾斜角1度以上の橋脚には、Bランク以下の橋脚も90基程度含まれている。A・Asランクの橋脚の場合、せん断や曲げせん断による激しい損傷を受け、損傷部より上方部分が大きく傾斜している橋脚が多く見られる。一方、Bランク以下で残留傾斜角が大きくなっている橋脚は、橋脚基部付近における塑性変形が残留したものと推定される（前述したようにBランク以下で撤去された橋脚の地中部の詳細な状況は不明であるが、数基について地中部の損傷写真が残っている（写真-1））。この結果から推察すると、外観調査でC・Dランクであった橋脚も地中部ではBランク相当の損傷を受けていたため、残留変位が大きくなった可能性が高いと考えられる。

また、図-4の様に片面のみ曲げ損傷が生じたため、傾斜量が大きくなっていると思われる橋脚も見受けられた。

### 3.2 残留変位の全体的な特徴

図-5は、残留変位の方向とその大きさを行政区別別にプロットしたものである。図より、橋軸方向は神戸側、直角方向は山側に残留変位している橋脚が多く見られる。特に橋軸方向では、神戸側に残留変位している橋脚数が圧倒的に多くなっている。また、残留変位の値が大きい橋脚は、西宮市や芦屋市など、被災地域の東側で比較的多くなっている。

### 3.3 直角方向における上部工偏心との相関

図-6は、各橋脚ごとの直角方向の残留変位と上下部工の偏心量との関係を示したものである。両者には相関性があり、偏心量が大きくなればその偏心方向への残留変位も大きくなる傾向にある。なお、ここでの偏心量とは上部工中心と橋脚中心の距離である（図-7）。

直角方向の残留変位と偏心量の相関性を検証するために、実橋脚を対象に、柱の非線形特性

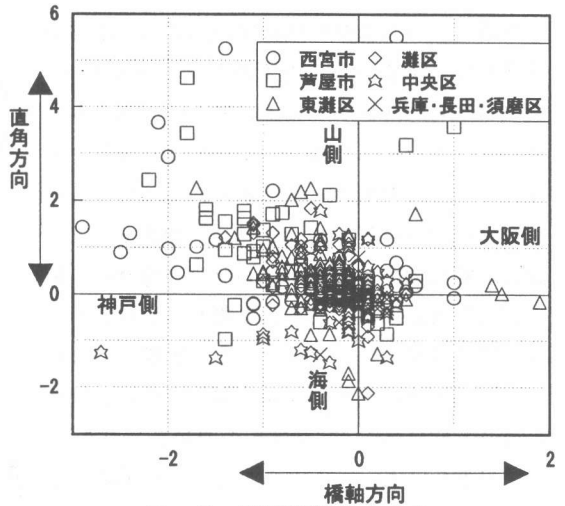


図-5 残留傾斜角と方向

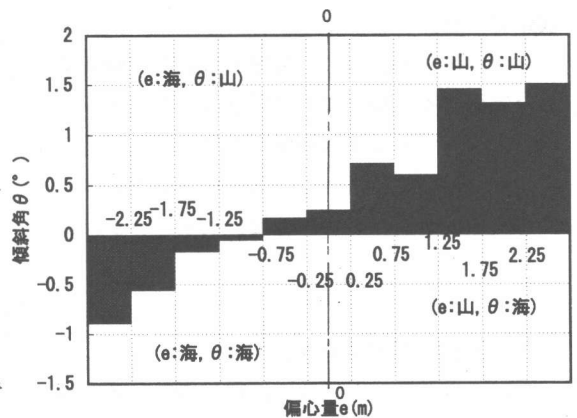


図-6 残留傾斜角と偏心量

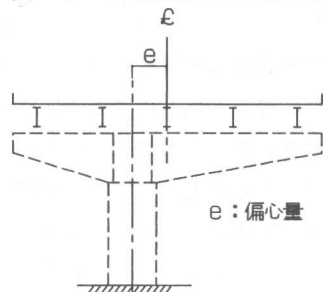


図-7 偏心量の定義

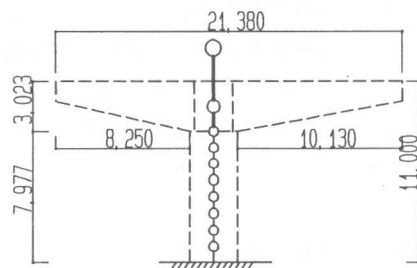


図-8 動的解析モデル図

を考慮し、兵庫県南部地震で記録された地震加速度波形（JR 鷹取駅 N/S 記録を1/2に縮小）を入力した動的解析を行った。解析は実際の偏心モーメントを初期荷重として与えた場合と、偏心モーメントをゼロとした場合について行った。図-8はそのモデル図、図-9、10は上部工の変位応答波形であるが、偏心なしの場合は、最大4δ程度変位しているにも拘わらずほとんど残留変位は生じていない。一方、実際の偏心モーメントを負荷した場合は、偏心方向に変位が累積し、約17cm（約0.8度）の残留変位が生じる結果となった。このことから、動的解析によっても残留変位と偏心量に相関性があることが検証された。

以上、直角方向では、構造的な偏心が残留変位を特徴付けるひとつの要因と考えられるが、橋軸方向において大多数の橋脚が神戸側（西側）に残留変位しているのは、構造的な要因以外の地震動や地盤条件などの影響があると推定される。

#### 4 桁および地盤の残留変位

橋脚の残留変位とは別に、地震発生前後における航測写真を比較することによる残留変位の計測も実施した。計測対象としては、各橋脚上の桁および路線近傍の地盤（マンホール等地上の固定物）に着目したものであり、地震前後の相対変位差を地震による残留変位としている。

なお、計測対象範囲は、3.2で橋軸方向の残留変位が比較的大きな、武庫川～深江の区間である。当然のことながら、ここでの桁の残留変位とは、橋脚基礎の変位、橋脚躯体の変位および橋脚天端と桁の相対変位が含まれている。以上、桁および地盤の残留変位は、地震前後の航測写真の比較であることから、精度的には誤差が大きいと思われるが、定性的な評価は可能であると考える。

##### 4.1 エリア分割とその特徴

地盤の残留変位の方向性に着目すると、ある

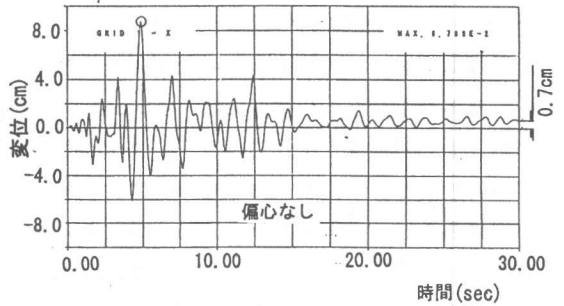


図-9 上部工変位応答波形（偏心なし）

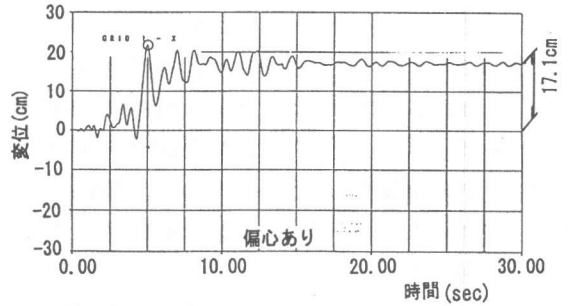


図-10 上部工変位応答波形（偏心あり）

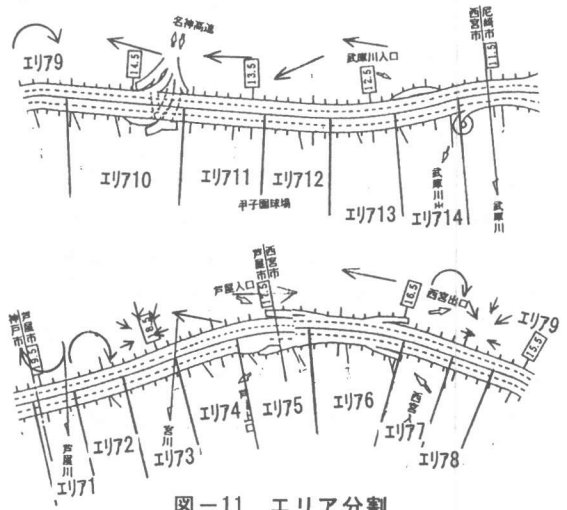


図-11 エリア分割

境界を境にして方向性が大きく変化する傾向が見られる。そこで地盤残留変位の方向性によって図-11の様に14個のエリアに分割した。図中の矢印は路線周辺の地盤残留変位の方向性を模式的に示したものである。図-12、図-13は各エリアごとの桁および地盤の平均残留変位の分布を示す。大きなばらつきはあるが、橋脚の残留変位と同じく、桁および地盤も神戸側に変位が残留しており、特に桁の残留変位はほとんど

のエリアで神戸側かつ山側である。図-14は地盤と桁の平均残留変位を比較したものである。桁の変位量は地盤に比べかなり大きくなり、エリアによるばらつきも大きい。これは、地盤の残留変位はほぼ地震動そのものに起因するが、桁の残留変位は橋脚や支承の損傷など構造的な要因が大きく影響しているためと思われる。ただし、地盤と桁の残留変位の大きさには若干の相関が認められる。例えばエリア1, 6, 12では地盤、桁とも残留変位が大きくなっているのに対し、エリア5, 9, 13, 14では両者とも残留変位が小さくなっている。この様に地盤の残留変位が構造物の地震時応答結果を示す桁の残留変位に影響を与えていることが窺える。

#### 4.2 落橋に関する考察

今回の地震によって、神P-40および神P-41橋脚上の神戸側可動支点の上部工が大阪側上部工の衝突も加わり、落橋に至っている。上記2橋脚上の支承は破壊しているが、橋脚損傷はいづれもCランクであり、損傷度としては比較的軽微であった<sup>3)</sup>。図-15に落橋の状況を示す。図-16は、神P-39～神P-43橋脚の残留変位、可動支点側の桁と橋脚天端の相対残留変位および実際の桁かかり長を示した図である。なお、橋脚の残留変位については、実測値とともに橋脚の塑性応答を考慮した式(1)による計算値(平成8年道示)<sup>4)</sup>をプロットした。

$$\delta_R = C_R (\mu_{R-1}) (1-\gamma) \delta_y \quad (1)$$

$C_R$  : 残留変位補正係数, RC橋脚では、0.6とする。

$\mu_R$  : 橋脚の応答塑性率で式(2)により算出する。

$$\mu_R = \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{k_{hc} W}{P_a} \right)^2 + 1 \right\} \quad (2)$$

$\gamma$  : 橋脚の降伏剛性に対する降伏後の2次剛性の比で、RC橋脚では0とする。

$\delta_y$  : 橋脚の降伏変位(m)

$k_{hc}$  : 地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度 (=1.75G)

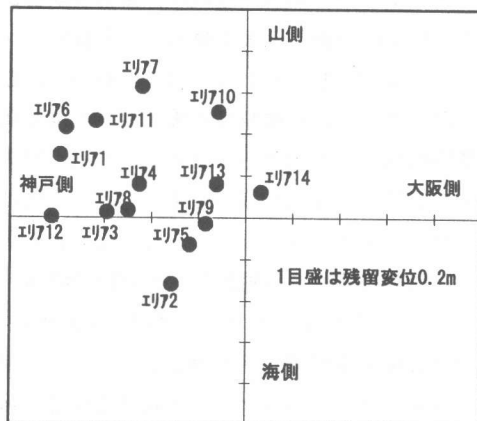


図-12 桁の残留変位

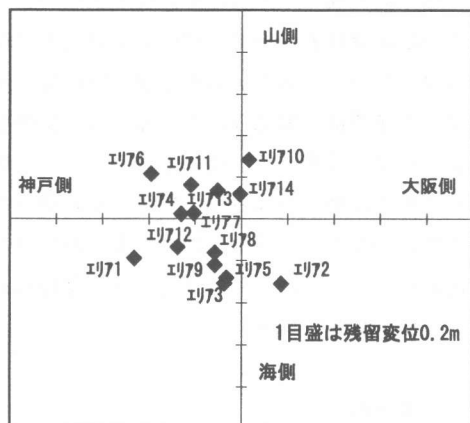


図-13 地盤の残留変位

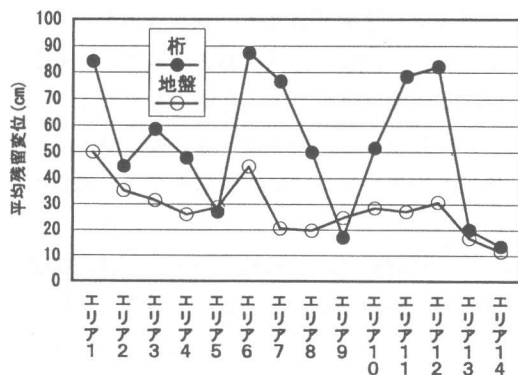


図-14 平均残留変位

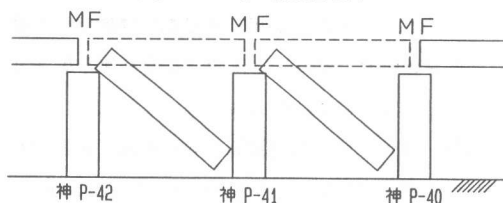


図-15 落橋の状況

大きなばらつきはあるものの、橋脚の残留変位については計算値と実測値の大きさは数センチメートルであり、似かよった値となっている。したがって、さらに強振時の最大応答変位や隣接橋脚の相対的な挙動を考えたとしても、橋脚自体の変形は落橋に結びつくような大きさにはならないと考えられる。しかしながら、桁と橋脚の相対残留変位の実測値は、神-42の神戸側で73cmと大きくなっており、強振時における最大応答変位量が桁かかり長をкаろうじて下回り、落橋に至らなかったものと推察される。当然のことながら神P-40、神P-41の可動支点側の上部工は落橋しているため、桁と橋脚の相対変位の最大値は桁かかり長120cmを越えている。以上のことから、橋脚躯体の耐震性が確保され、橋脚の応答変位が抑えられたとしても、隣接する上部構造形式や支承強度など条件によっては落橋に至る危険性が残されている。したがって、免震支承の採用や十分な桁かかり長の確保など、落橋防止システムにも留意することが落橋に対して重要であると考えられる。

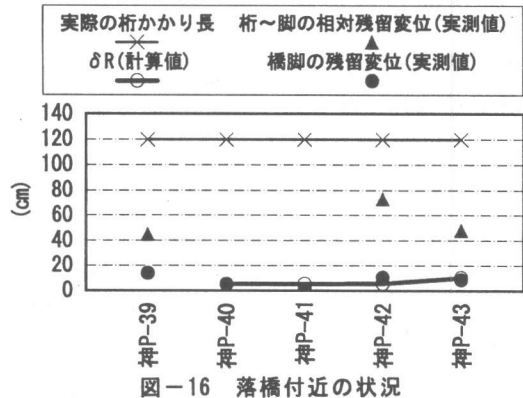
## 6 まとめ

ここで得られた結果を以下にまとめる。

- ① Bランク以下の橋脚にも、残留傾斜角が1度以上あり、撤去・再構築となったものも多い。この様な橋脚では、外観調査でC、Dランクであっても、地中部においてBランク相当の損傷を受けていた橋脚も多いと推察される。
- ② 橋脚の残留変位は、橋軸方向で神戸側、直角方向で山側に残留している橋脚が多く、変位

## 参考文献

- 1) 田中, 林, 幸左, 安田: RC橋脚損傷度の定量的評価, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 19, No. 2 pp. 393-398
- 2) 林 秀侃: 阪神高速道路3号神戸線の復旧設計の概要, 土木施工, Vol. 36, No. 12, pp71-76, 1995. 11



量が大きいのは被災地域の東側であった。

- ③ 直角方向の橋脚残留変位と偏心量の間には、量および方向ともに相関性が認められる。一方、橋軸方向では、構造的な要因以外の影響が考えられる。
- ④ 地盤の残留変位には、その方向性に地域特性が認められ、この様な方向性によるエリア分割を行った。
- ⑤ 桁および地盤ともに神戸側に変位が残留しており、特に桁の残留変位のほとんどが神戸側かつ山側であった。
- ⑥ 地盤の残留変位は、ほぼ地震動に起因すると思われるが、桁の残留変位には、橋脚や支承の損傷の影響が含まれていると考えられることから、地盤の残留変位に比べて桁の残留変位は、その絶対値のばらつきも大きくなっている。
- ⑦ 橋脚自体の応答変位が抑えられたとしても、隣接する上部構造形式や支承強度等の条件によっては落橋に至る危険性が残されており、落橋に対して十分留意する必要がある。