

# 被災 R C 橋脚の残留変位に関する研究

幸左賢二<sup>1</sup>・小野紘一<sup>2</sup>・藤井康男<sup>3</sup>・田中克典<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 Ph. D. 阪神高速道路公団 工務部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学工学部 教授

<sup>3</sup>正会員 阪神高速道路公団 工務部

<sup>4</sup>正会員 八千代エンジニアリング(株) 大阪支店

被災橋脚に生じた残留変位の特徴を明らかにするために、残留変位の地域分布や方向性について分析した。その結果、橋脚の残留変位は、橋軸方向で神戸側、橋軸直角方向で山側に残留している橋脚が多く、変位量が大きいものは被災地域の東側で多く認められた。また、橋軸直角方向の橋脚残留変位と上部工と橋脚の偏心量の間には相関性が認められた。ついで、残留変形が大きな被災地域東側を対象に、航空写真を用いた分析による、地盤、建物、桁と橋脚の残留変位を比較した結果、エリアごとのばらつきはあるものの、ほぼ神戸方向に残留する傾向が認められた。

*Key Words: residual displacement, seismic resistance, ductility, failure mechanism*

## 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号神戸線の兵庫県域の区間においては、5箇所で落橋に至るなどの大きな被害を被った。RC橋脚の損傷度は震災直後に実施した主として地上部の外観調査および写真判読に基づき、損傷度をAsからDまでの5ランクに区分している。判定区分は道路震災対策便覧(震災復旧編)<sup>1)</sup>による構造物別被災度の判定手法に基づいているが、対象RC橋脚943基のうち、その15%の142基が比較的損傷の大きなAs、Aランク、35%の327基が比較的軽微な損傷のB、Cランクであった。橋脚の復旧は、フーチング以下は健全であったことからすべて既存のものを再利用し、外観調査結果に基づく橋脚の損傷レベルに応じて、As、Aランクのものは既存橋脚を撤去して再構築し、B、C、Dランクのものは既存橋脚を補修・補強することとした。しかしながら、復旧工事に伴う詳細調査により、地上よりの目視による外観調査の損傷程度が小さいにもかかわらず、残留傾斜量が大きな橋脚も多く発見された。これらの橋脚のうち、外観調査上はB、C、Dランクであったにもかかわらず傾斜角が1度あるいは脚天端水平変位が15cmを超えたものについては、橋軸直角方向の傾きでは、縦断線形や支咎高さの調整が必要となり、橋軸方向の傾きでは、支咎位置の変更、桁かかり長の補正といった橋梁の

機能上の問題を生じるため撤去・再構築に変更されている。地震により生じる構造物の残留変位については建築の分野ではすでに数多くの研究が実施されているが、橋梁の分野においては解析的検討はいくつかあるものの<sup>2)</sup>、実橋梁に生じた残留変位についての研究は極めて少ない<sup>3), 4)</sup>。そこで、本研究では、まず実橋脚に生じた残留変位の特徴を明らかにするために、残留変位の地域分布や方向性などについて分析した。ついで、橋脚残留変位と橋脚形状、上部工との偏心量、地盤の残留変位などとの相関を実測値との対比や解析的手法を用いて分析し、その発生メカニズムを推定した。

## 2. RC橋脚の詳細調査

### (1) 3号神戸線構造物の概要

図-1に主な被害発生箇所を示すが、調査範囲は被害の比較的大きい震度階7の帯にほぼ沿った武庫川～月見山間(27.7km)とした。この区間の橋脚の多くは、昭和39年(1964年)制定の鋼道路設計示方書に基づいて1960年代後半に設計されており、国道43号および2号上を占用することからRC単柱形式が比較的多く、設計地盤種別は砂層または砂礫層地盤から構成されるⅡ種地盤が多い。基礎形式は全体の84%が杭基礎であり、12%が直接基礎である。上部工は、鋼桁が86%を占めており、そのうち単純I桁が全体の80%と圧倒的に多く、その他は単純箱桁が10%、連続箱桁、連続I桁がそれぞれ5%となっている。橋脚の

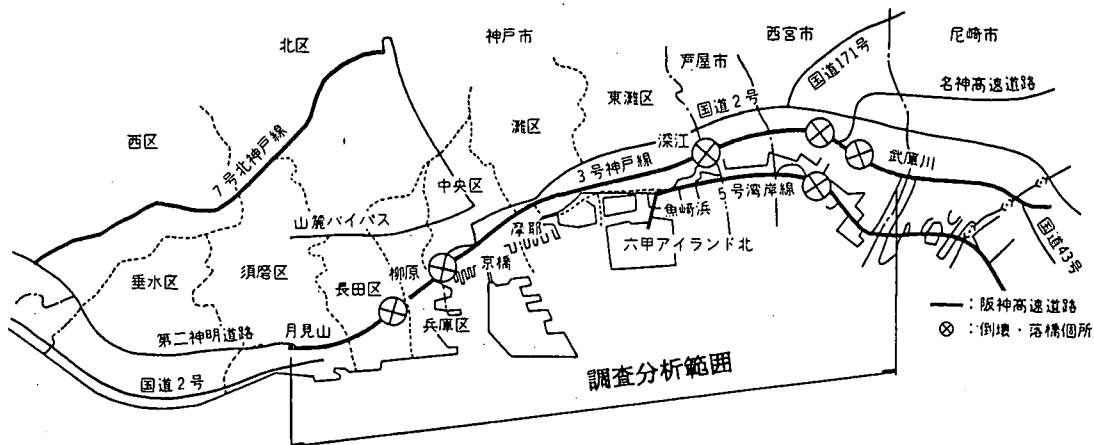


図-1 阪神高速道路の主な被害発生箇所

設計水平震度は0.2が採用されていた。また、当時のコンクリートの許容せん断応力度は $0.7\text{N/mm}^2$ 程度と昭和55年以降の道路橋示方書（以下道示という）の $0.42\text{N/mm}^2$ に比べて大きく、一般にコンクリート断面のみで十分なせん断耐力を有していると考えられていた。このため、帯鉄筋は最小鉄筋量の規定に基づきD16程度が15～30cmピッチに配筋されていた。

## (2) 詳細損傷調査<sup>9)</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。

### ① 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>9)</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<sup>9)</sup>。図-2に、本線RC単柱のうち分析対象とした443基について、当初実施された外観調査と詳細調査結果の対比を示す。また、図-3に損傷ランクが上昇した橋脚のランク変化と主たる損傷位置を示す。図-2より、外観調査でBランク以下の橋脚がより詳細なデータをもとに細分化されている

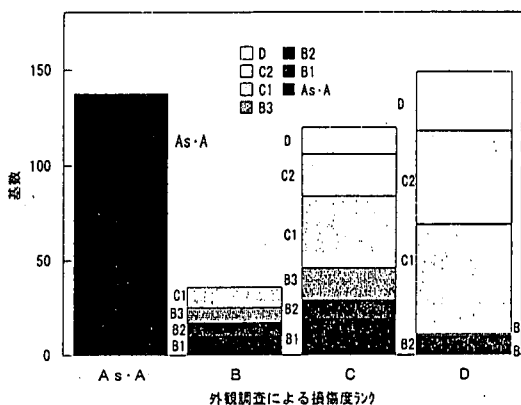


図-2 外観調査結果との対比

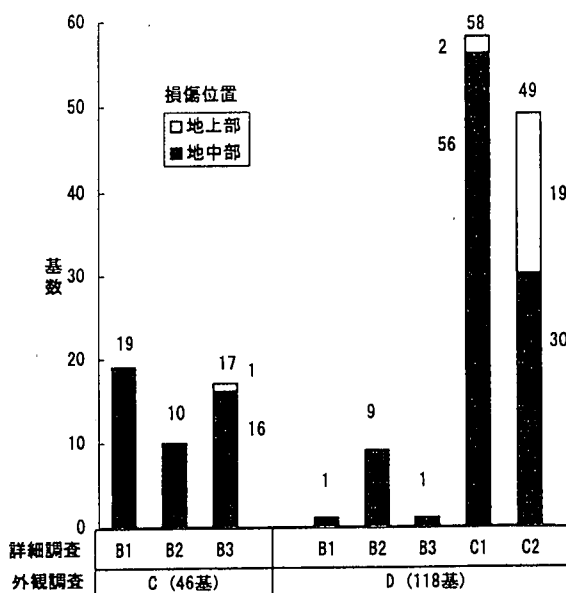


図-3 橋脚の損傷位置

ことがわかるが、特に外観調査でC、Dランクであった橋脚で鉄筋座屈による取り替えが必要となったBランクがかなり発生している。図-3より、外観調査でC、Dランクであったものが、詳細調査でB3ランク以上となった橋脚は、それぞれ46基および11基あるが、そのほとんどが新たに発見された地中部の損傷が卓越していたためであることがわかる。このことは傾斜により撤去された橋脚は、緊急に撤去されたため詳細調査が実施されていないので断定できないが、地中部の橋脚基部で損傷を生じている橋脚が数多く含まれていることを示唆している。

### ②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-4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（3m程度）離れた位置の鉛直線からの水平距離δを橋軸、橋軸直角の2方向について測定している。計測橋脚は1.0～1.5mの土かぶりを有しており、断面幅の1/2程度が地中部に埋設されている。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As、Aランクの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。

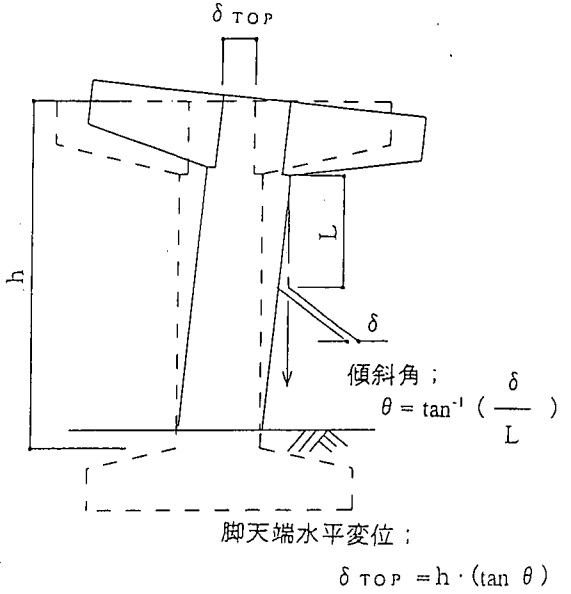


図-4 残留傾斜角の計測

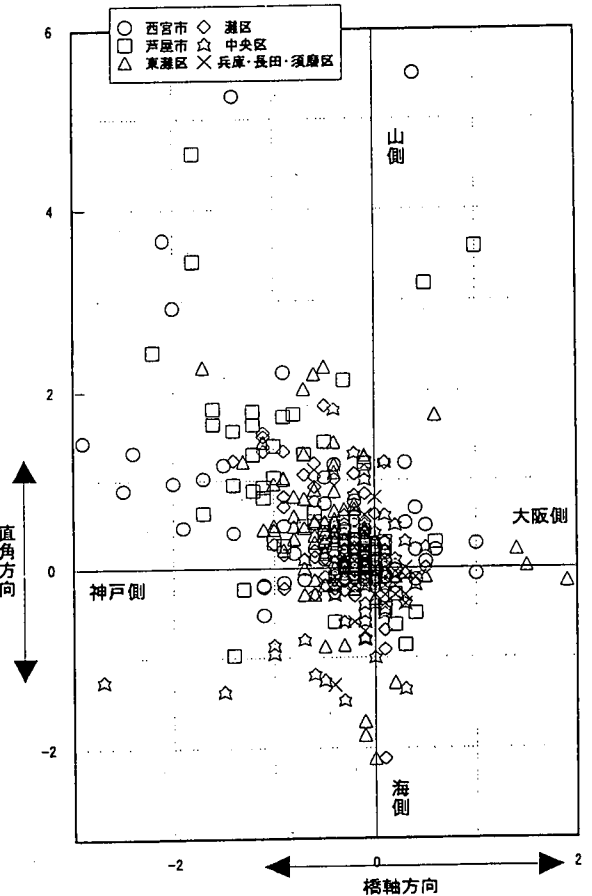


図-5 傾斜角と地域区分

## 3. 橋脚の残留変位

### （1）残留変位の全体的な特徴

図-5は、残留変位の方角とその大きさを行政区域別にプロットしたものである。図より以下のことが分かる。

- ①橋軸方向は神戸側に残留傾斜している橋脚数が圧倒的に多い。
- ②橋軸直角方向についても海側よりも山側へ残留傾斜している橋脚数が多く、山側かつ神戸側に残留傾斜している橋脚の傾斜量が他の方向よりも大きくなっている。
- ③残留傾斜角の大きい橋脚は、西宮市や芦屋市など被災地域の東側で比較的大きくなっている。

## (2) 損傷位置に関する検討

図-6は、残留変位(残留傾斜角)の大きさ別に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。外観調査によるランクとしたのは、傾斜が大きく撤去されたため、詳細調査によるランク付けができない橋脚を含むためである。全体の傾向としては、残留傾斜が大きくなると損傷度ランクの高い橋脚が占める割合も大きくなることがわかる。これは、Aランク以上の橋脚のように、大きな塑性変形を受けた結果、残留変形も大きくなったためと考えられる。これに対して図-6でも明らかなように、損傷ランクがBランク以下の橋脚でありながら、残留傾斜1度を超える橋脚が約90基含まれている。そこで、これらの橋脚の残留変位について以下の考察を行う。

表-1は外観調査でB, C, Dランクで橋脚傾斜が1°あるいは橋脚天端変位量が15cmを超え、撤去・再構築された橋脚基数を集計したものである。橋軸方向、橋軸直角方向で基準値を超えるものはそれぞれ59基および62基とほぼ同様となっている。この内約半数の31基は両方向で15cmを超えている。また、損傷ランクは外観調査では、Bランク26基、Cランク38基、Dランク30基となっており、外観上の損傷ランクの低い橋脚でも大きな残留変位を生じていたことがわかる。これら橋脚は、最終的にはほとんどが撤去・再構築橋脚となり損傷状況のひびわれや座屈鉄筋状況の詳細調査は実施されていないが、このうち撤去した橋脚7基に対しては基部の写真によって損傷状況が判読できた。その結果を表-2、地中部の損傷状況の代表例を写真-1に示すが、いずれも地中部の基部付近に鉄筋の座屈やひびわれが観察されており、損傷度ランクとしてはBランクに近いものであったと考えられる。

ついで、地中部のひびわれ状況が明らかとなっている存置された橋脚のうち、0.7~1.2°と比較的大きな傾斜の橋脚を対象に、柱基部損傷による回転変位を算定し、これを残留傾斜角として評価した。具体的には、回転中心を柱中心線と仮定し、基部付近に発生した累積ひびわれ幅を用いて、基部回転角および基部回転による橋脚天端変位を算定した。その結果を表-3に示すが、実測値が0.7~1.2°であるのに対して計算値は0.6~1.2°と、変位のほとんどが柱基部回転によるものと考えられる結果となった。

以上のことから、地上部のみの外観損傷ランクが比較的軽微であるにもかかわらず、橋脚天端に大きな残留変位を生じた原因は、橋脚基部付近の曲げ損傷に伴う一方方向の回転変位によるものが一般的であると考えられる。

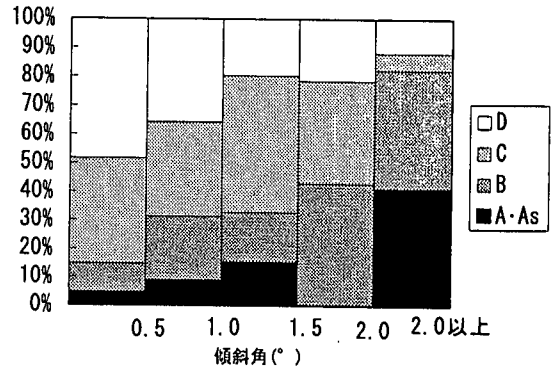


図-6 傾斜角と損傷度ランク (外観調査)

表-1 傾斜橋脚一覧表

		橋軸直角方向				合 計	
		15cm以上		15cm以下			
橋軸方向	15cm以上	B	11	B	5	B	16
		C	8	C	9	C	17
		D	12	D	14	D	26
	15cm以下	B	9	B	1*	B	10
		C	18	C	3*	C	21
		D	4	D	0	D	4
合 計		B	20	B	6	B	26
		C	26	C	12	C	38
		D	16	D	14	D	30

注)\*は傾斜1°以上(歪角方向)で再構築

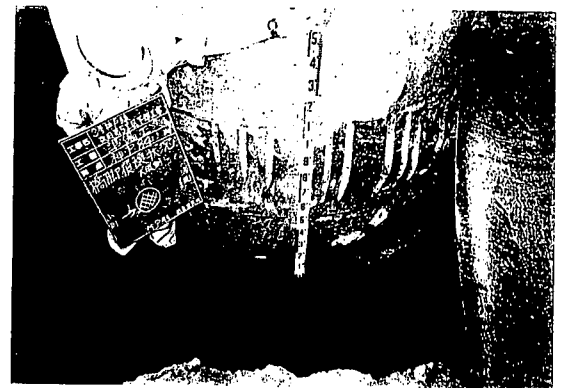


写真-1 基部損傷状況写真

#### 4. 橋軸直角方向に対する分析

##### (1) 概要

橋脚損傷ランクが比較的軽微なC、Dランクであるにもかかわらず、橋軸直角方向の傾斜量の大きい橋脚では、図-7に示すように一方に曲げひびわれを生じ、反対側に圧壊によるコンクリートの剥離を生じている橋脚が多く認められた。これらの損傷状況から、上部工と橋脚の偏心あるいは地震力が一方方向に卓越したことにより、残留傾斜が大きく生じたことが推測される。そこで、本線部全RC橋脚を対象に橋軸直角方向の残留変形に対する分析を行った。図-8は偏心量と平均傾斜角の分布を示すが、偏心量が大きくなるにつれて平均傾斜角が大きくなること、偏心方向と傾斜方向はかなり明確な正の相関が認められること、および2m程度の大きな偏心のあるものは、ないものの2倍程度の傾斜量が認められる。なおここで、偏心量は上部工図心位置と橋脚柱中心位置とのずれ量を表している。また、3号神戸線のRC単柱式橋脚では、偏心量が比較的小さいことから主鉄筋は、断面内で同一配筋となっている。以上のことから、橋軸直角方向に傾斜を生じた要因として、橋脚の偏心による影響の大きいことが考えられる。そこで、過去の実験結果を用いた評価および動的解析を実施した。

##### (2) 実験結果を用いた評価

運上ら<sup>9)</sup>は、張出しが一方方向に長い逆L字形のRC橋脚のように偏心曲げが常時作用している橋脚を対象に、偏心曲げを受けるRC橋脚の地震時振動特性を検討している。具体的には、 $\gamma_M$  (曲げモーメント比) を式(1)のように定義し、 $\gamma_M$  をパラメータとした実験を実施している。

$$\gamma_M = \frac{M_E}{M_E + M_0} \quad (1)$$

ここで、

$\gamma_M$ : 偏心曲げモーメント比

$M_E$ : 設計地震力(震度法)により橋脚基部に生じる曲げモーメント (tf・m)

$M_0$ : 橋脚が逆L字型のために桁および梁の自重により橋脚基部に生じる曲げモーメント (tf・m)

図-9は、 $\gamma_M$ が0.70の場合の実験結果である。これを実橋単柱式橋脚に換算すると概ね偏心量が2m程度の値に対応している。ここでは、地震力が極端な方向性を持っている場合や地震作用時の途中段階において支承の破壊などにより構造系が変わり、作用力が極端に変化する場合を想定して残留変位を算出した。すなわち、図において、終局変位近傍の5 $\delta$ 、

表-2 傾斜により撤去した橋脚基部損傷状況例

橋脚番号	損傷ランク (外観調査)	残留傾斜角 <°>		基部損傷状況
		橋軸方向	直角方向	
※ P-70	D	1.4 (※)	0.4 (山)	基部コンクリート剥離
※ P-85	C	1.4 (※)	1.6 (山)	基部鉄筋座屈
※ P-101	D	2.2 (※)	2.4 (山)	基部鉄筋座屈
※ P-102	D	1.2 (※)	1.3 (山)	基部鉄筋座屈
※ P-103	D	1.1 (※)	0.8 (山)	基部鉄筋座屈
※ P-110	D	1.3 (※)	0.2 (海)	基部コンクリート剥離
※ P-112	C	1.2 (※)	1.8 (山)	基部鉄筋座屈

表-3 傾斜角とひびわれ幅より推定した傾斜角

橋脚番号	損傷ランク (外観調査)	損傷ランク (詳細調査)	残留傾斜角 (橋軸神戸方向)	計算傾斜角 (橋軸神戸方向)
※ P-50	C	C1	0.9°	1.0°
※ P-51	C	C1	1.2°	0.7°
※ P-89	D	C1	1.1°	1.2°
※ P-92	D	C2	0.7°	0.6°

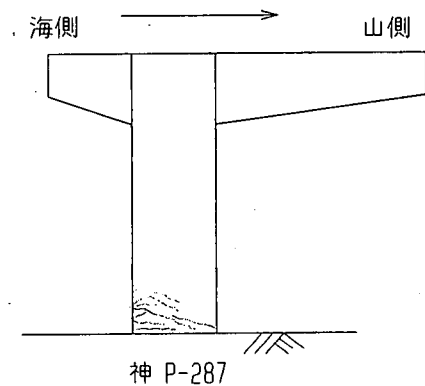


図-7 ひびわれ状況図

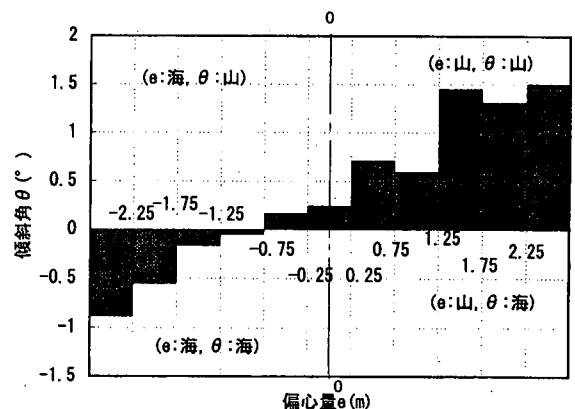


図-8 残留傾斜角と偏心量

到達曲線において、荷重を除去した点の変位を求めると5.6cm となる．これを残留変位とみなして，傾斜角を求めると，約 1.3° となる．同様に偏心なしの実験では，傾斜角は約 0.8° となり，偏心荷重により1.6 倍程度残留変位が大きくなる結果となっている．以上のように，偏心荷重が残留変位に与える影響が比較的大きいことが分かる．

### (3) 動的解析による評価

#### ①解析対象橋脚

非線形動的解析により橋脚直角方向の偏心が残留変位に与える影響の検討を行った．解析対象橋脚の神P-178は図-10に示すように標準的なRC単柱であるが，上部工中心は柱中心から約1m海側に偏心しており，被災後の詳細調査では海側に約0.9° の残留変位が認められた．断面幅は3x3mの円柱形状で主鉄筋はD32が62本の2段配筋となっている．また，詳細調査によると損傷形態は曲げに分類され，損傷ランクはB<sub>3</sub>であった．

#### ②解析条件

解析モデルは図-10に示すように柱の非線形特性（武田モデル）を考慮した，柱下端固定条件の梁-マスモデルを仮定し，柱部材の特性は，復旧仕様に基づくトリリニヤ型のM-φ関係を用いた．なお，柱の構造減衰としては，h=2%のレーリ型減衰を仮定した．解析は直角方向を対象に，上部工質量位置に偏心モーメントを静的に作用させた状態を作成し，これを初期条件とした場合と，初期荷重を作用させない場合の2ケースについて非線形動的解析結果を比較した．入力地震動としては，Ⅱ種地盤の代表例としてJR鷹取駅のNS成分記録を用いた．ただし，補強前の既設橋脚を対象としているので，実波形を用いると柱の終局耐力を大幅に超過することが予想されたため，上記記録を1/2 にスケールダウンして用いている．

#### ③解析結果

偏心モーメントの有無による最大応答値の比較を表-4に示す．偏心方向に最大変位および曲げモーメントが大きくなる傾向が現れるが，上部工加速度およびせん断力の最大値に対しては偏心の有無による影響は少ない．偏心無視の橋脚の柱下端部曲げモーメントの最大値は，M<sub>y</sub>（3270tf・m(32000kN・m)）を超えるが，終局モーメント(4660tf・m(45700kN・m)）には達していない．これに対して，偏心モーメント（M<sub>0</sub>=789tf・m(7700kN・m)）を考慮すると，図-11に示すように偏心方向に変位が累加され終局モーメントを超える結果となるが，偏心方向前面（海側）が引張りとなる方向の曲げモーメントは M<sub>y</sub> にも至っ

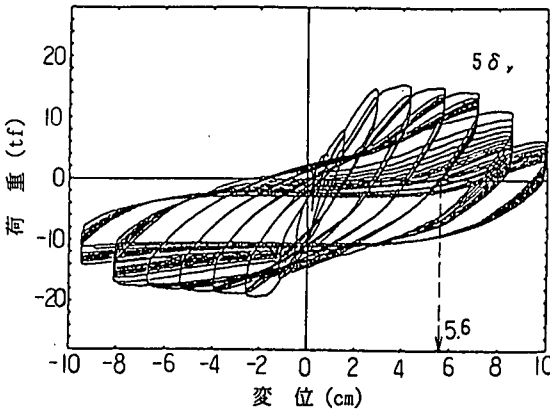


図-9 荷重-変位曲線

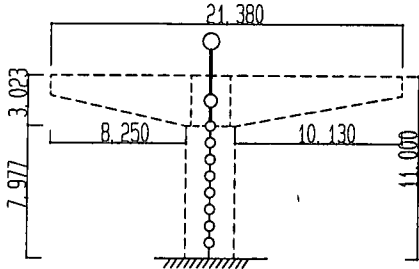


図-10 解析モデル（単位：mm）

表-4 最大応答値の比較

		偏心なし	偏心あり
最大応答値	上部工加速度 (gal)	4 0 2	4 3 5
	上部工変位 (cm)	8 . 8	2 1 . 8
	柱下端曲げモーメント(tfm)	4 1 3 7	5 3 3 9
	柱下端せん断力 (tf)	3 7 3	3 7 1
柱耐力	柱下端降伏モーメント(tfm)	3 2 7 1	
	柱下端終局モーメント(tfm)	4 6 6 0	

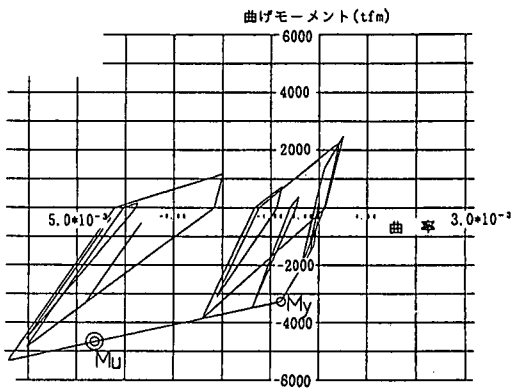


図-11 柱下端部曲げモーメント-曲率履歴曲線

てない。実際の損傷は偏心方向の背面に当たる山側のみ鉄筋が座屈しているが、これは山側の鉄筋が降伏点を超えて大きな引張りずみを生じているのに対し、海側の鉄筋は引張りずみが降伏点に至っていないためと考えられる。図-12に示すように偏心モーメントを無視した解析では、残留変形は0.7cmとほとんど生じていないのに対し、実際の偏心モーメントを考慮すると上部工慣性力作用位置において約17cmの残留変位、傾斜角にすると0.8°の残留が生じる結果となった。

## 5. 橋軸方向に対する分析

### (1) 橋脚形状に着目した分析

上記のように橋軸直角方向については、橋脚の偏心の影響が大きいことが明らかとなった。そこで、橋軸方向について同様に橋脚形状が残留変位に及ぼす影響を以下に考察した。一般に橋脚の残留変位は、地震時に塑性化した場合の最大応答変位との相関が予想される。図-13に示すように、完全弾塑性の1質点系における非線形最大応答変位 ( $\delta_{max}$ ) は次式で求まる。

$$T = 2\pi \sqrt{W / (K_y \cdot g)}$$

$$\delta_y = (K_u \cdot W) / K_y = (K_u \cdot T^2 \cdot g) / 4\pi^2$$

$$\delta_{max} = \mu \cdot \delta_y = (K_u \cdot T^2 \cdot g \cdot \mu) / 4\pi^2 \quad (2)$$

ここで、

T: 固有周期 W: 等価重量  $\delta_y$ : 降伏変位  
 $K_u$ : 柱の降伏剛性  $\mu$ : じん性率

図-14は残留変位が測定されているBランク以下の橋脚について、降伏剛性相当の固有周期と残留変位の関係をプロットしたものである。同図には参考として1質点系における塑性率 $\mu=8$ の最大応答変位 $\delta_{max}$ と、これに相当する道路橋示方書算定式<sup>7)</sup>に基づく残留変位 $\delta_R$ も示している。なお、塑性率 $\mu=8$ は既設RC橋脚における曲げ破壊レベルに相当するものと考えられる。同図から、実際の残留変位と固有周期および損傷ランクには相関性が少なく、また固有周期が長くなるとともに橋脚残留変位量が大きくなるような予想された傾向は認められない。これは、橋脚が塑性化するような橋軸方向の大きな地震力を受けた場合、例えば隣接桁との干渉など（実際に、桁の玉突き状態が認められる）の複雑な地震時挙動であったことが推測され、各橋梁単位毎の振動特性だけでは説明できないと考えられる。

次に、橋脚上の桁の重量（具体的には桁長）のアンバランスに着目した以下の分析を実施した。図-

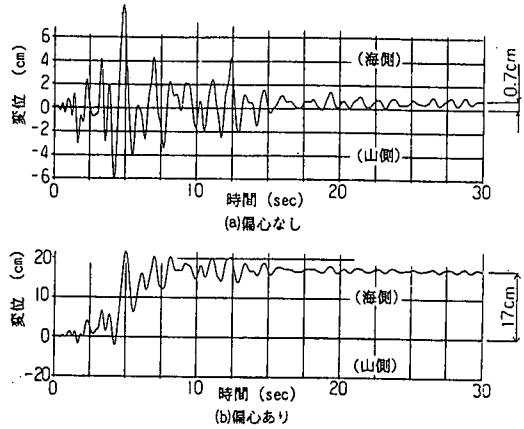


図-12 上部工変位応答波形

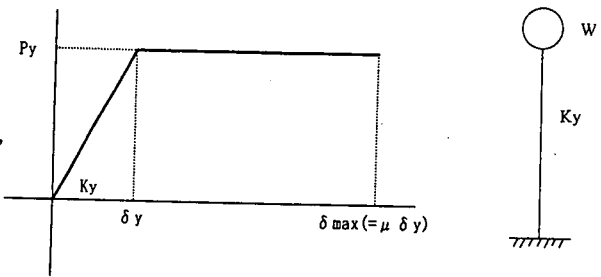


図-13 最大応答変位と残留変位模式図

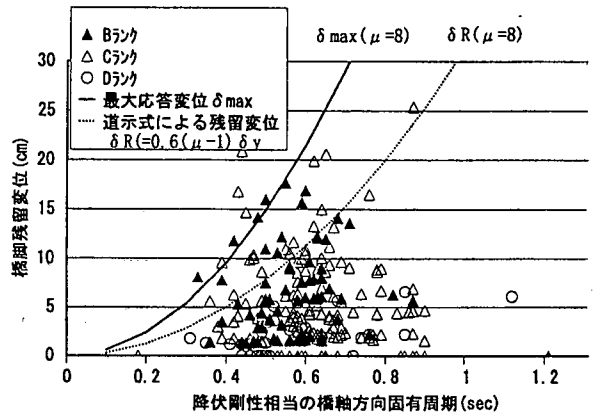


図-14 固有周期と残留変位の関係

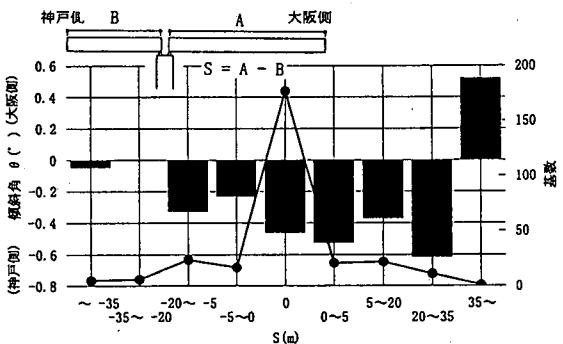


図-15 傾斜角と上部工アンバランス量の関係

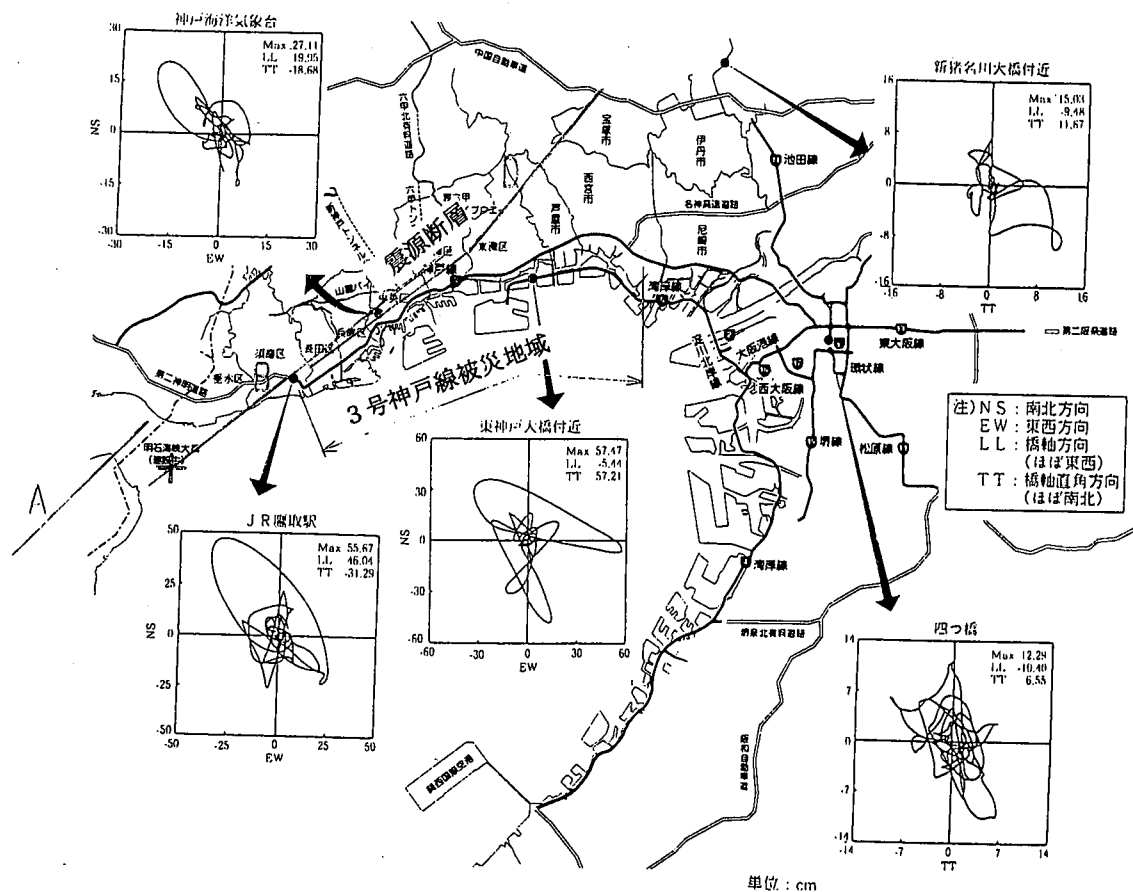


図-16 3号神戸線と震源断層

15は橋軸方向の残留傾斜角の大きさと橋脚が支持する左右上部工のアンバランス量(大阪側支間長より神戸側支間長を引いたもの)である。なお、対象としたのは連続桁の中間橋脚を除く換え違い橋脚である。この図から、アンバランス量と橋脚の残留変位には相関が認められず、ほぼ一様に神戸側に残留傾斜していることがわかる。

以上のように、橋脚形状に着目した分析からは橋軸方向における橋脚残留変位の方向やばらつきが生じた原因は見いだせなかった。しかしながら、橋脚の残留変位の大きなものはほとんどが神戸側に生じていることから、地盤の残留変位などに着目したマクロ的な分析を実施した。

## 6. 残留変位に関するマクロ的な検討

### (1) 概要

橋脚に大きな残留変位を生じた原因としては、上記で検討した橋脚形状などの構造的要因以外にも、入力地震の特性などが考えられる。ここで対象としている3号神戸線と、余震分布、測地データおよび

強震動記録による地面も揺れの軌跡を満足するように決められた震源断層との位置関係を 図-16 に示す<sup>8)</sup>。同図によれば、明石海峡直下の発震点から北西に進んだ破壊は、ほぼ既往の活断層帯の南端に沿って北東方向へ伝播していったものと推測されており、神戸市須磨区～灘区において3号神戸線と接近してほぼ平行関係にある。神戸市東灘区から芦屋市、西宮市へ移るに従い、3号神戸線はほぼ東西方向となるため、震源断層との距離が離れると同時に、両者の角度も変化し、西宮市域の3号神戸線はほぼ震源断層直交方向となっている。また、今回の地震動記録において特徴的なパルス波は、断層破壊の伝播方向に依存した“指向性”と呼ばれるものであり、断層直交方向の水平動に顕著な大振幅のパルス状震動が認められており、これが構造物被害の主要原因となった可能性が指摘されている。一方、3号神戸線のRC単柱橋脚の損傷は、全方向に損傷している橋脚が多いものの全体的には直角方向の損傷が目立つが、東に位置する西宮市内では逆に橋軸方向の損傷が多くなっている。このことから、上記の断層直交方向に見られるパルス波が構造物の損傷に大きく影

響し、震源断層と3号神戸線の位置関係によって構造物の損傷方向に影響していることが窺われる。さらに、震災直後の調査に基づく支承損傷度は、芦屋市および西宮市の損傷度ランクが比較的高くなっており、この地域では支承破壊に伴う上部工の橋軸方向神戸側への玉突き現象が多く見られ、地震動の方向性が構造物の被災状況に関係していると考えられる。したがって、残留変位についても個々の橋脚における構造的な要因原因以外の影響が推察されるため、橋脚の残留傾斜だけでなく、周辺地盤や桁（上部工）の残留変位を加えたマクロ的な検討を行うこととした。そこで、まず3号神戸線近傍の構造物を対象として、地震発生前後における航空写真測量を用いて、地盤（マンホールなどの地表面の小構造物の変化）・橋脚・桁・比較的大きな5階程度の建物などの座標の差異を読み取り、これを残留変位とみなして比較した。ついで、被災地域の西側および東側の代表的波形を入力して残留変位の差異を評価した。残留変位計測対象範囲は、橋軸方向の残留変位が比較的大きな武庫川～深江間とした。精度的には最大10cm程度の誤差を有しているが、平均残留変位量が30cm程度はあることから、定性的には評価できうと考えられる。

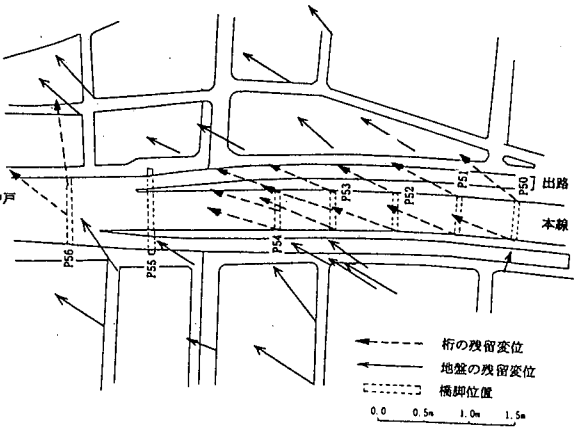


図-17 航空写真から求めた残留変位

(2) エリア分割とその特徴

図-17に計測例を示す。図に示すように桁は、各橋脚の道路両端点（山側と海側）と道路中央1点を測定した。各橋脚上でこのようにして求めたものの平均値を橋脚上における桁の残留変位と定義した。地盤変位はマンホールなどの地上の固定物に着目し、地震前後の座標の差異より得られた値を地震による残留変位とした。

また、建物の残留変位は構造物のコーナー部4点の平均値を採用した。図-17に示すように、各橋脚近傍の地盤の動きをみると移動量の大小はあるものの、同方向を示すものが多かった。そこで、計測対象区域において同方向を示す地域を同一エリアとみなして14区間に区分した。エリア間では、ある境界から方向性が大きく変化する場合が多かったが、方向性が逆転する区域では錯綜して方向性が不明となる場合も認められた。図-18に分割したエリアおよび残留変位の方向、図-19にエリアごとの平均残留変位を示す。図-18に示すように、地盤は全体としては神戸方向に移動している。しかしながら、エリアによっては、全く異なる動きも認められた。たとえば、エリア4と5、5と6、6と7、9と10の境界では方向性が逆転している。また、残留変位の大きさを比較すると、地盤と建物は40cm程

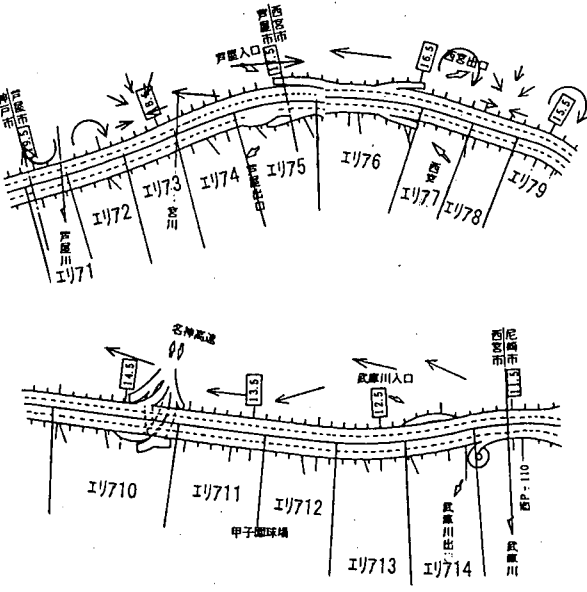


図-18 エリア分割図

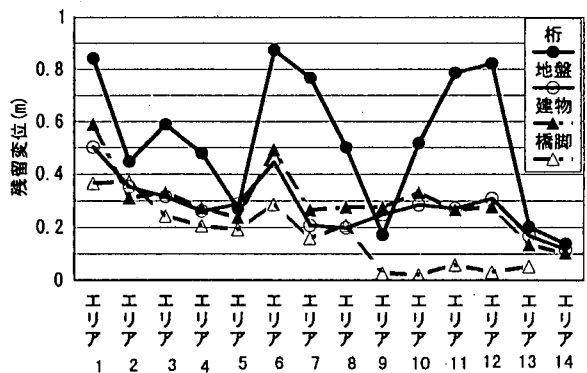


図-19 エリアごとの平均残留変位分布

度の変位を示している。これに対して、桁の変位は、地盤に比べて増幅されたものとなるとともに、エリアにおけ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の方向性などの特性が直接反映するが、桁の残留変位には橋脚の傾斜による変位が付加されたり、支承の損傷により桁の移動が増幅されるなどの要素が付加されるためと考えられる。また、図において桁の残留変位が比較的小さいエリアは5, 9, 13, 14であるが、これらのうち5, 9は地盤の変位方向が逆転するエリアであり、エリア13, 14は地盤変位も小さいエリアである。図-20は各エリアにおける平均残留変位が分布する範囲を包絡した模式図である。大きなばらつきはあるが、橋脚の残留変位と同じく、桁、地盤、建物も神戸側に残留していることが分かる。特に、桁の残留変位は神戸側および山側に大きく増幅されている。以上の点から、地震動が神戸側に残留変形を生じやすいなどの地域的な特性があったものと推定される。そこで、残留変形の大きな被災東側地域の波形を用いて、構造物に生じる残留変位の特性を評価した。

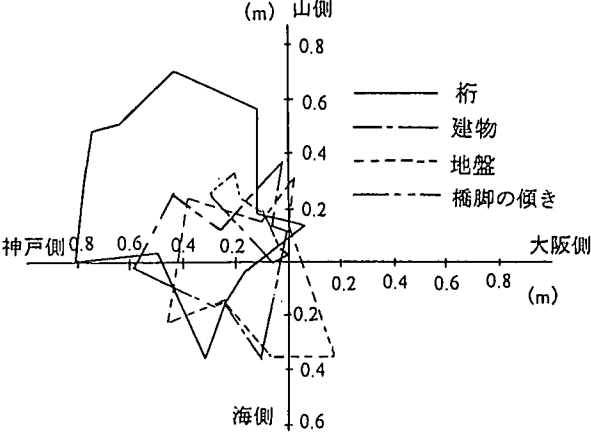


図-20 残留変位包絡図

表-5 解析波形 (単位: cm)

波 形	尼崎- EW		尼崎- NS		鷹取 E-W	
	通常波形	2倍波形	通常波形	2倍波形	通常波形	2倍波形
最大変位	3.27	19.8	2.20	16.8	7.97	28.0
残留変位	0.33	5.95	0.29	2.38	0.29	1.43

### (3) 動的解析による評価

橋軸直角方向の分析で用いた3号神戸線の神P-178の橋軸方向を対象に3種類の測定された加速度波形とそれぞれ2倍にスケールアップしたものを組み合わせた6種類の波形を用いて橋軸方向の非線形動的解析を行い、それぞれの波形による残留変形の違いを比較した。解析波形は表-5に示すとおり、対象地域の西側としてJR鷹取駅の波形を用い、東側として港湾技研の尼崎港波形を用いた。なお、波形の特性を比較するために、鷹取波形では尼崎EWの最大加速度に振幅調整した波形を標準とした。具体的には鷹取最大加速度672.7galを尼崎EWの最大加速度471.9galに合わせてこの比で変換した。図-21に橋脚天端における応答変位波形を示す。同表より、尼崎EW波形は、鷹取駅波形に比べて最大変位は小さいのに残留変位を生じやすいことが分かる。特に2倍波形では、最大応答が終局モーメントを超えることもあり、残留変位は神戸方向に約6cmと鷹取2倍波形の3倍近い残留変位を示している。以上のように、橋脚の橋軸方向の残留変位が大きな領域である被災東側の芦屋・西宮市域については、橋脚・地盤や建物の残留変位も神戸側に卓越する傾向が認められるとともに、代表波形を用いた動的解析においても、東側で記録された尼崎(EW)波形を入力した場合が最も橋脚の残留変位が大きくなることが認められた。このように、入力地震動の特性の違いが橋脚の残留変位に影響する可能性が認められた。

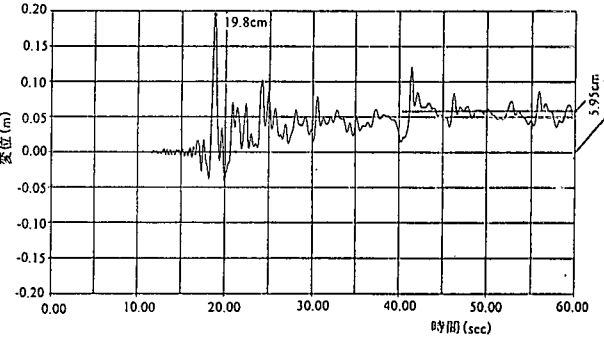


図-21 橋脚天端の変位応答波形

## 7. まとめ

実橋脚に生じた残留変形に対する分析結果を以下にまとめる。

- ①橋脚の残留変位は、橋軸方向で神戸側、橋軸直角方向で山側に残留している橋脚が多く、また変位量が大きいののは被災地域の東側で多く認められた。
- ②地上より上の外観調査では比較的損傷が軽微であ

るにもかかわらず、橋脚天端に大きな残留変位を生じた橋脚が多く認められた。詳細分析の結果、これは地中部の橋脚基部に曲げ損傷が生じたことによる一方向に卓越した回転変位によるものが一般的であると考えられる。

③橋軸直角方向の橋脚残留変位と偏心量の間には、相関性が認められた。また、実験結果の評価および動的解析により、偏心荷重が残留変位に与える影響が比較的大きいことが明らかとなった。

④橋軸方向の橋脚残留変位の大きさに影響を与える構造物の形状的な特徴は見いだせなかった。そこで、航空写真を用いた分析による、地盤、建物、桁と橋脚の残留変位を比較検討した結果、エリアごとのぼらつきはあるものの、ほぼ神戸方向に残留の傾向が認められた。

⑤そこで、被災地域東側および西側の代表波形を用いて橋脚に生じる残留変位を比較した結果、東側波形の方が残留変位の大きくなる傾向が認められた。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋震災対策便覧（震災復旧編），1988. 2.

- 2) Kawashima, K., MacRae, G. A., Hoshikuma, J. and Nagaya, K.: Residual Displacement Response Spectra and its Application, Proceedings of the 11th U. S.-Japan Bridge Engineering Workshop, pp. 437-458, 1995. 5.
- 3) 川島一彦, Gregory A. MacRae, 星隈順一, 長屋和宏: 残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学会論文集, No. 501/I-29, pp. 183-192, 1994. 10.
- 4) 運上茂樹, 向秀毅: 偏心曲げを受ける鉄筋コンクリート橋脚の地震時振動特性, 土木技術資料, Vol. 37-7, pp. 26-31, 1995.
- 5) 田中克典, 林秀侃, 幸左賢二, 安田扶律: R C 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, 1996. 7.
- 6) 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, pp. 71-76, 1995. 11.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 1996. 12.
- 8) 阪神高速道路公団: 復旧工事誌, 1997. 9.

(1998. 11. 20 受付)

## ANALYSES OF RESIDUAL DISPLACEMENT AT EARTHQUAKE-DAMAGED PIERS

Kenji KOSA, Kouichi ONO, Yasuo FUJII and Katunori TANAKA

The characteristics of residual displacement developed at earthquake-damaged piers were analyzed. Residual displacement in the transverse direction was found to have a good correlation with the eccentricity between the center of the pier and the center of the girder. The analyses utilizing aerial photographs showed that ground, buildings, girders and piers all had same residual direction to the west (Kobe side).