

5号湾岸線における長大橋梁部の復旧工事

阪神高速道路公団 石崎 浩*
阪神高速道路公団 澤登 善誠**

阪神高速道路5号湾岸線は、阪神間の埋立地を結ぶ連続高架橋である。昭和55年もしくは平成2年の道示に基づき設計されていたことから、兵庫県南部地震に対して全体的には、比較的軽微な損傷ですんでいるが、いくつかの長大橋梁では支承の損傷が引き金となって主構部が損傷を受けた。支間長252mのニールセンローゼ橋である西宮港大橋では、支承の脆性破断が生じた。中央支間長485mの鋼斜張橋である東神戸大橋では、ウインド支承の損傷により、ペンデル支承の破損と路面の段差が生じた。支間長217mのローゼ桁橋である六甲アイランド橋では、主構が支承より脱落し、3.1mの横移動があった。主要幹線道路である湾岸線を早期交通開放するべく、上記3橋を含む長大橋梁およびその他の橋梁の復旧工事を行い、8月末までに全線開放することができた。

1. はじめに

阪神高速道路5号湾岸線（大阪市中島～神戸市六甲アイランド）には、西宮港大橋（ニールセンローゼ橋：支間長252m）、東神戸大橋（鋼斜張橋：中央支間長：485m）、六甲アイランド橋（ローゼ桁橋：支間長217m）など世界でも有数の長大橋梁が架設されている（図-1）。

これら3橋には、兵庫県南部地震による大型支承の損傷に起因する2次的な主桁の浮上がりや横移動が生じた。このような長大橋梁の被災はこれまでに例がなく、また被災状況も各橋梁で異なることから、それぞれの被災状況に応じた補修工法を検討した。

本報告は、これら3橋について橋梁の概要と特徴ならびに被災状況、復旧工事の概要について述べるものである。

2. 西宮港大橋

(1) 橋梁の概要

西宮港大橋は、甲子園浜と西宮浜を結ぶバスケットハンドル型ニールセンローゼ橋であり、世界有数の規模を誇る橋梁である。写真-1に橋梁全景写真を、図-2に橋梁一般図を示す。

キーワード：湾岸線、長大橋梁、兵庫県南部地震

* 阪神高速道路公団神戸第二建設部 078-360-8141

** 阪神高速道路公団神戸第二建設部 078-360-8143



図-1 橋梁位置図

(a) 橋梁諸元

上部工形式 : 鋼床版ニールセンローゼ桁橋
支間長 : 252m
幅員 : 31.243m~27.277m
アーチライズ : 42.0m (ライズ比: 1/6)
橋脚形式 : 鋼製ラーメン橋脚
基礎形式 : ニューマチックケーソン
基礎寸法 : 甲子園浜側 40.0×13.0×23.0m
(縦、横、深さ) 西宮浜側 42.0×22.0×23.0m

(b) 橋梁の特徴

上部工形式は、①西宮浜側のランプによる幅員変化および甲子園浜側の平面曲線、②両側埋立地の地盤沈下量の相違、③航路高と縦断線形による桁高の制約などの条件を考慮し、支間長252mに適用しうる橋梁形式として単純下路アーチ橋が採用された。

上部工の特徴は、橋梁北側に2車線の湾岸側道が補鋼桁からブラケットにより添架されていることで

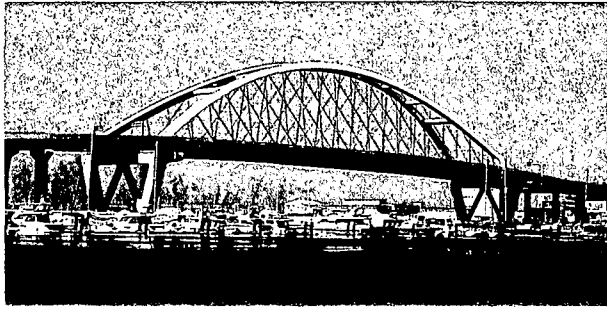


写真-1 西宮港大橋全景

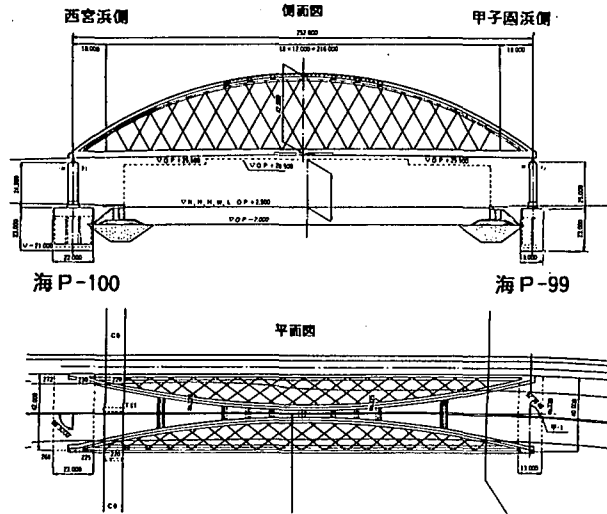


図-2 西宮港大橋一般図

ある。この湾岸側道は、西宮市鳴尾浜から神戸市深江浜間の各埋立地を結ぶ連絡道路として計画された一般県道であるが、この側道の添架により両主構の剛性が著しく異なっている。

橋脚形式は、①側道を含む総幅員が50mを越えている、②上部工に作用する橋軸直角方向水平荷重によって西宮浜側固定橋脚にねじりが生じるなどにより、斜材を持つ鋼製ラーメン橋脚となっている。

基礎工形式は、剛性が高く、護岸構造物との近接施工が可能なニューマチックケーソンとなっている。

なお、海P-100橋脚（西宮浜側）の支承条件を固定としている。

(c) 設計時における耐震性検討

上部工および橋脚は平成2年道示に準拠し、設計水平震度0.3を用いている。基礎工は基本的に昭和55年道示に基づき設計されており、基礎と周辺地盤をモデル化したFEM動的解析から得られた応答値を基に、ケーソンの設計に換算震度0.1を設定している。

(2) 被災状況

主な被災状況は以下のとおりである。

(a) 支承の破損

海P-100橋脚上の2つの固定支承のうち、山側支承の上沓が脆性破壊し半分に割れた。割れた上沓は、橋脚上の化粧板（厚さ9mm、リブ付き）を突き破り、路下に落下した。上沓と下沓間の金属面は溶着し、ソールプレートにもひび割れが入っていた。

海側支承は破断には至らなかったが、非破壊検査により上沓内部に潜在ひび割れが確認され、セットボルトは全損していた。

写真-2、3に山側支承の破壊状況を示す。

山側支承の割れの方法は、ほぼ橋軸直角方向であり、破断面は鉛直方向に対し約15°の角度をなしている。ボス付け根部に応力集中が生じたために破断したと推測され、破断に至るのに必要な水平力は材料検査の結果約6000~7000tfと推測される。設計水平震度に相当する水平力が約2800tfであることから、設計値の2~2.5倍の地震応答があったと考えられる。

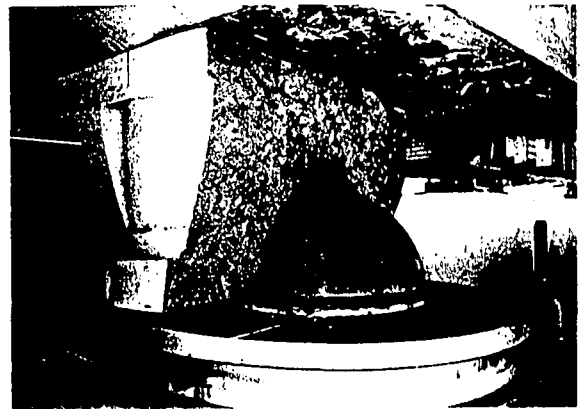


写真-2 支承の脆性破壊

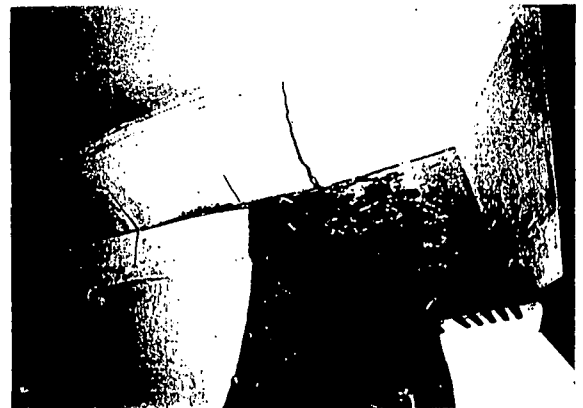


写真-3 支承ソールプレートの割れ

(b) 橋脚の変位

橋脚前面の護岸が1~2m海側に流動したのに伴い、橋脚がともに海側に移動した。基礎天端での水平移動量は両側橋脚とも数cmである。

(c) ケーブルの損傷

ケーブルシムの脱落により、ケーブル張力が抜けたものが1本確認された。また、多数のケーブルでシムプレートのずれが確認された。

(d) その他の損傷

耐震連結ピンの破損、耐震連結装置取付けダイヤフラムの座屈が多数確認されるとともに、橋脚上伸縮継手の段差があった。

(3) 補修工事概要

(a) 海P-100橋脚支承の取替え

橋脚の支承条件が固定であることを考慮し、取替え作業を行った。作業手順は以下のとおりである。

- ①資材搬入：本線上に20tfの油圧クレーンを据え付け、橋脚上に資材搬入した。
- ②仮受け架台設置：支承鉛直反力から1200tfの油圧ジャッキを1支承あたり6台セットした。
- ③水平反力受け架台設置：固定支承を撤去することから、水平反力受け架台を設置した。
- ④アーチ端部嵩上げ：支承のボス深さが13cmであることから油圧ジャッキ6台を連動させ、アーチ隅角部を15cm嵩上げた。
- ⑤下沓・調整プレートのはつり
- ⑥支承引き出し：チルホールにて脚上空間に支承を引き出した。
- ⑦支承搬出：本線上に設置した80tfの油圧クレーンにより、上下沓一体で搬出した。
- ⑧新規支承搬入：新規支承設置は、搬出と逆手順で行った。なお、引込みは支承とソールプレートを一体化して行った。

(b) ケーブル定着部の補修の取り替え

張力の抜けに対し、シムプレートの調整は油圧ジャッキ2台を連動させて行った。

- ①準備工：ケーブル引込み治具の製作を行った。
- ②止水シールの撤去：張力調整の支障となるため下弦材側ケーブル止水シールを撤去した。
- ③ケーブル引込み：100tf油圧ジャッキ2台を連動して行った。
- ④ケーブル張力計測：温度条件を考慮し、計測は夜間とした。

(c) その他の補修

耐震連結ピンの損傷は、全数新規部材に取り替え

た。耐震連結装置取付けダイヤフラムの座屈などは、損傷部を切断撤去し、新規部材を設置した。

伸縮装置の段差は、伸縮装置自体には損傷が無かったため、プレートを取り外し段差修正を行った。

3. 東神戸大橋

(1) 橋梁の概要

東神戸大橋は、深江浜と魚崎浜にはさまれた東神戸水路を横断する全長885mの3径間連続鋼斜張橋である。上下3車線の2層構造となっている。

水路の奥にはフェリーターミナルがあることから大型フェリーが頻繁に航行し、その航路条件より中央径間長485mとなっている。形態的にも優れた世界でも有数の長大斜張橋である。写真-4に橋梁全景写真を、図-3に橋梁一般図を示す。

(a) 橋梁諸元

上部工形式	：3径間連続鋼斜張橋
支間長	：200m+485m+200m
幅員	：13.5m×2層
主塔形式	：鋼製H型塔(146.5m)
主桁形式	：純ワーレントラス(主構高9m)
ケーブル形式	：2面12段ハープ型
基礎形式	：ニューマチックケーソン(主塔) 杭基礎(端・中間橋脚)
基礎寸法	：深江浜側 35.0×32.0×25.0m (縦、横、深さ) 魚崎浜側 35.0×32.0×26.5m

(b) 橋梁の特徴

全体構造形式：本橋は主桁の橋軸方向に対する支持条件を全支点可動とし、主桁はケーブルを介して主塔に弾性固定されるオールフリー構造となっている。これにより、橋軸方向の固有周期が、長周期化(4.4秒)し、橋梁に作用する地震慣性力の軽減

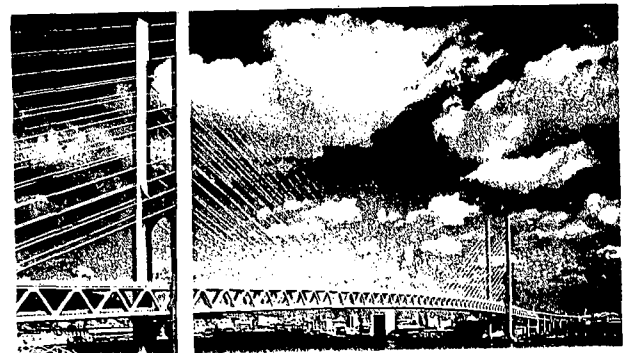


写真-4 東神戸大橋全景

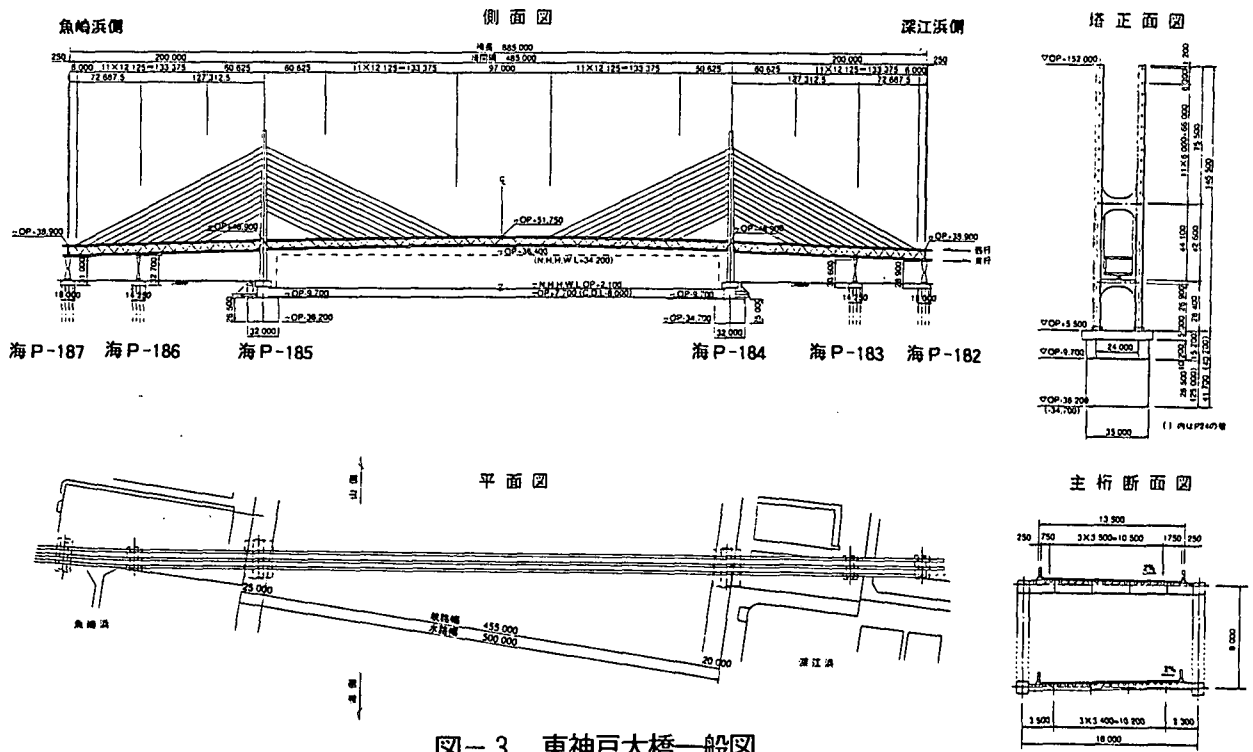


図-3 東神戸大橋一般図

が図れることから、塔柱と基礎を小さくすることが可能となった。

ケーブル：ケーブルはハープ型となっており、主桁水平方向移動量を拘束し、塔柱の座屈強度を高める上で有効に働いている。

主塔：斜張橋の象徴ともなる主塔は、上段水平材を比較的低い位置に取り付け、形状に円曲線を用いることにより、従来にない斬新な形状となっている。

主桁：鉛直材を持たないシンプルなワーレントラスとしている。床組と主桁は合成されており、鋼重の軽減を図っている。

橋脚：橋梁全体の剛性増加を図るため、端橋脚の他に中間橋脚が配置されている。端橋脚には常時約690tf、中間橋脚には約1260tfのアップリフトが作用するためペンデル支承を設置している。

基礎：橋梁付近は支持層が比較的深く、砂礫層と粘土層が複雑な互層をなしていることから、主塔の基礎は確実な支持力が期待できるニューマチックケーソンとしている。

(c) 設計時における耐震性検討

基本的には昭和55年道示に準拠し設計されているが、詳細な解析検討が行われている。

上部工の耐震設計では、本橋の振動特性に応じた適切な応答の評価を行うため、応答スペクトル法による動的解析が行われた。設計スペクトルは、実測

地震波（タフト、エルセントロ、八戸）を用い、地盤と構造物との動的な相互作用も考慮したFEM動的解析によって得られる、塔基部での応答波形を基に設定されている。なお、地震波は深度1000mの岩盤位置から入力し、長周期部での応答が増幅されるようにモデル化を行っている。基盤位置での地震波最大加速度としては、100年再現期待値として160galを与えている。設計加速度応答スペクトルを図-4に示す。

下部工の耐震設計では、基礎と周辺地盤をモデル化したFEM動的解析結果より、ケーソンの設計に換算震度（直角方向0.1、橋軸方向0.2）を設定している。

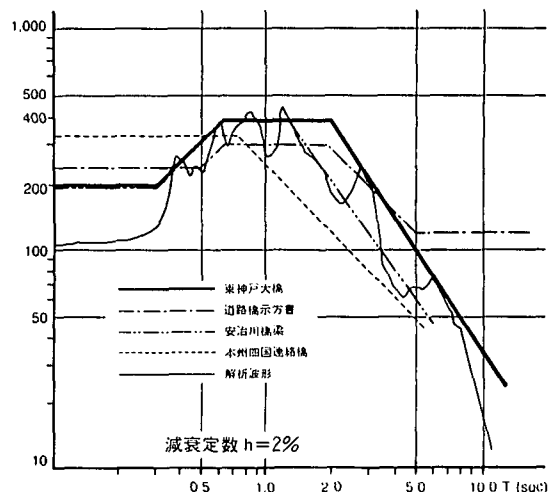


図-4 設計加速度応答スペクトル

(2) 被災状況

主な被災状況は以下のとおりである。なお、主塔およびケーブルには損傷が見受けられなかった。

(a) 支承の損傷

魚崎浜側端橋脚（海P-187）上で特に被災が大きかった。

ウインド支承の上沓セットボルトが破断した。このため横方向の拘束を失い、ペンデル支承アイプレートが橋軸直角方向振動のために、こじ開けられたように変形していた（写真-5）。山側支承のピンがはずれ、海側支承のピンも半抜けの状態であった。

大変位を抑制するために取り付けられていたベーンダンパー支承も破損していた（写真-6）。

ウインド支承のセットボルトは、山側が引張り、海側がせん断で切れていることから、桁が山側に動こうとしたときにセットボルトの破断が生じたと考えられる。

他の端橋脚および中間橋脚には、ウインド支承のセットボルトに伸びが認められた。

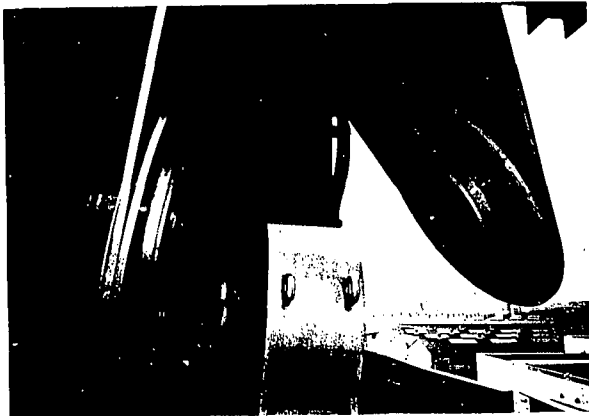


写真-5 ペンデル支承の破損



写真-6 ベーンダンパー支承の破損

(b) 路面の損傷

アップリフトを受け持っていたペンデル支承が破損したことから、側径間端部に約40cmの浮き上がりが生じた。隣接桁用の上沓が脱落したと併せて、結果的に橋面上で約52cmの段差が生じ、高欄が損傷した（写真-7）。

(c) 端橋脚の局部座屈

海P-187橋脚には、下段水平梁にウェブせん断座屈が生じ、脚基部のフランジに曲げ座屈が生じている。同じような水平梁のウェブせん断座屈は隣接桁の橋脚にも発生していた。

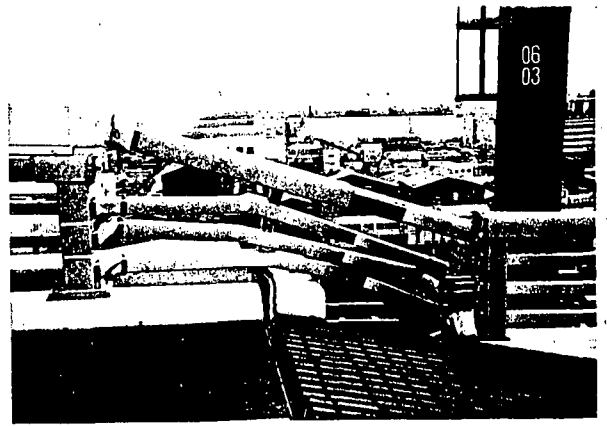


写真-7 高欄の破損

(3) 補修工事概要

(a) 支承の補修

ウインド支承については、早期交通開放を考慮して、損傷した上沓を撤去し工場にて修復整形し、暫定的に取り付けた。交通開放後、あらためて新規製作支承に取り替えた。

ダンパー支承については、損傷が激しく修復が不可能であったため、現地にて分解撤去し、新規製作支承に取り替えた。搬出は、トロリーによる主構外への横持ち後、クレーンにより行った。

ペンデル支承は、橋脚側エンドリンクボス部のみ再利用し、損傷の激しい主構側ピンプレートはガスにて切断撤去後、工場にて修復した。フレームは新規製作した。

(b) 主構の引き下げ

側径間端部の主構引き下げは、100tワイヤークランプジャッキ8台で行った。目標引き下げ力は650tである。橋軸直角方向のずれが生じることが想定されるので、横引き設備としてジャッキ架台

を端橋脚上に設置した。

ジャッキダウンは桁の挙動が安定する夜間に行った。なお、引き下げ力の余裕として別にカウンターウェイト130t（引き下げ力の20%）を主桁上に設置した。

(c) 端橋脚の補修

脚基部などの局部座屈が生じている個所は、加熱修正および補強材取付けで対処した。

下段水平梁の全体座屈が生じている海P-187橋脚は、ベントで仮受け後、水平梁箱内にトラス補強材を取付けるとともに、損傷ウェブを切断撤去し、新規ウェブに取替えた。

4. 六甲アイランド橋

(1) 橋梁の概要

六甲アイランド橋は、魚崎浜と六甲アイランドを結ぶダブルデッキローゼ桁橋である。写真-8に橋梁全景写真を、図-5に橋梁一般図を示す。

(a) 橋梁諸元

上部工形式 : 非平行弦ダブルデッキローゼ桁橋
支間長 : 217m
幅員 : 13.5m~19.0m
アーチライズ : 36.0m (ライズ比: 1/6)
橋脚形式 : 鋼製ラーメン橋脚
基礎形式 : ニューマチックケーソン
基礎寸法 : 魚崎浜側26.0×30.0×21.0m
(縦、横、深さ) 六甲アイランド側25.0×21.0×25.0m

(b) 橋梁の特徴

上部工形式は、①魚崎浜側に縦断勾配の異なるランプ桁を有していること、②航路高と縦断線形による桁高の制約などの条件を考慮し決定されている。

上部工の特徴は、補剛桁がダブルデッキ構造となっている点と、アーチ主構がバチ状配置になっている点である。また、アーチ部材の曲線景観を損なわないよう、上路側径間の受け梁をアーチ部材に設ける架け違い構造を採用しているが、アーチ端部の立体FEM解析を行い、安全性を検証している。

基礎工形式は、支持地盤が薄層粘土層が互層に介在する砂礫層であるため、支持力の確認が確実なニューマチックケーソンとしている。

(c) 設計時における耐震性検討

上部工および橋脚は平成2年道示に準拠し、基礎

工は昭和55年道示に基づき設計されている。

設計水平震度は上部工0.3、橋脚0.24とし、基礎工は西宮港大橋に準じ、0.1を用いている。

(2) 被災状況

主な被災状況は、以下のとおりである。

(a) 主構の脱落

六甲アイランド側の海P-214橋脚（可動側）で主構が支承より脱落し、橋体が橋軸直角方向に東へ約3.1m横移動した。

このため、東側支点は橋脚からはみ出し、西側支点は橋体西側ジャッキアップ架台に乗り上げた形になった。また、下路端横桁が東側ジャッキアップ架台に乗り上げ大きく変形した。図-6および写真-9、10に損傷状況を示す。

(b) 橋脚のねじれ

魚崎浜側の海P-213橋脚（固定側）の支承は健全であったが、橋体の移動により橋脚がねじれた状態となっていた。検討の結果、橋体移動量3.1mの内訳は、海P-213橋脚ねじれ変形分2.3

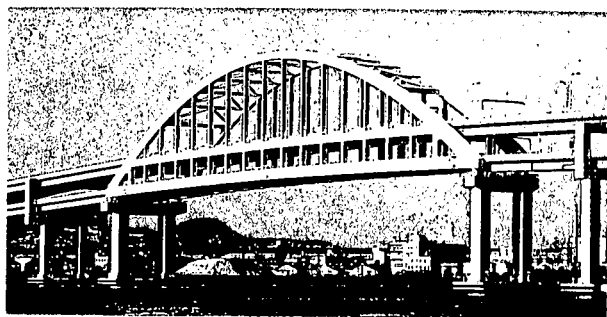


写真-8 六甲アイランド橋全景

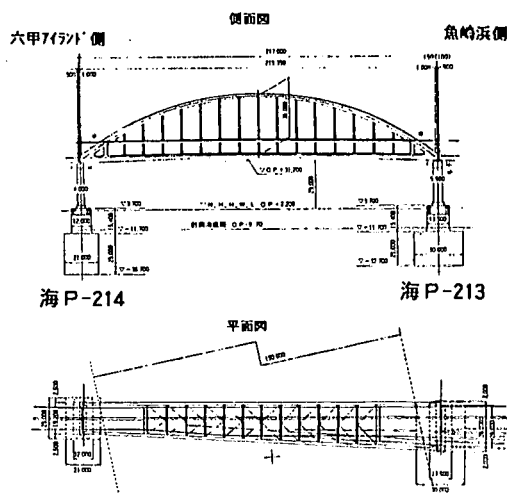


図-5 六甲アイランド橋一般図

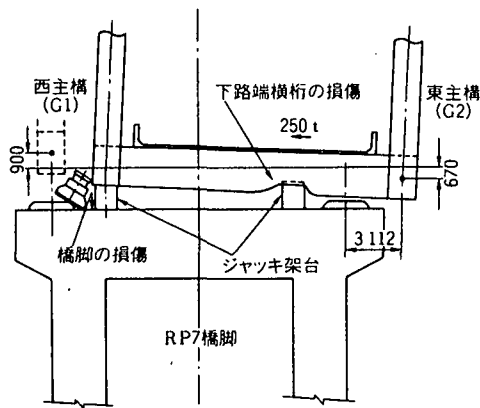


図-6 端横桁部の損傷状況

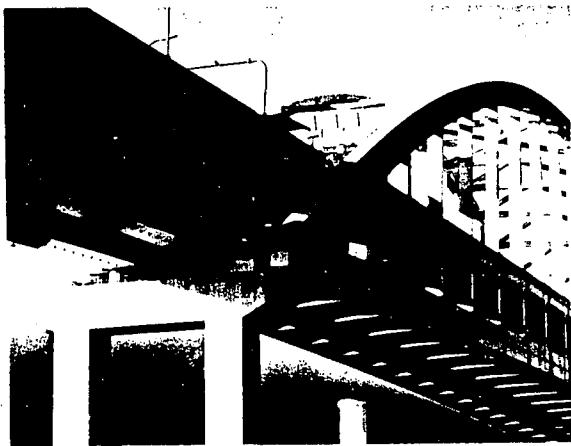


写真-9 主構の脱落

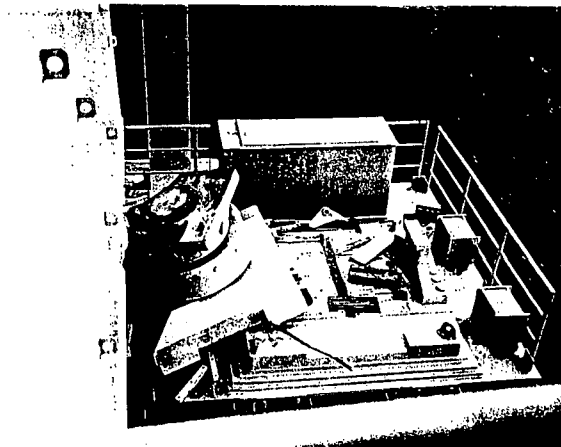


写真-10 支承の転倒

m、基礎の回転(0.15度)分0.6m、その他0.2mとなる。

橋脚ねじれ変形量から海P-213橋脚天端上に約2000tfの隅力が作用していると推定され、この状態での脚柱の応力は、降伏応力に近いものの弾性範囲内であることが判明した。このため、このねじれ変形は、橋体の横ずれ(2.3m)を元に戻そうとする復元力として内在していると考えられる。

(c) 上横構の損傷

橋体の傾きにより、上横構5本と斜材1本が座屈変形した(写真-11)。

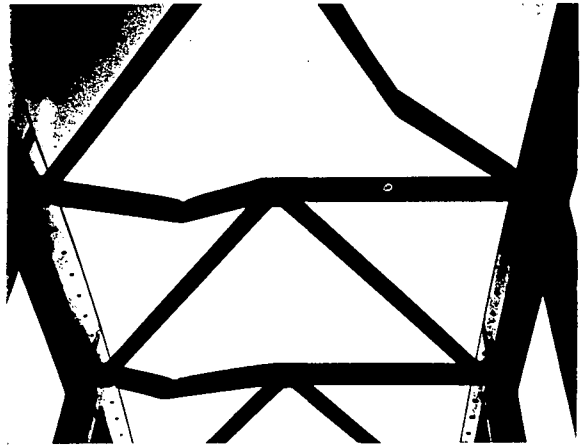


写真-11 上横構の損傷

(3) 補修工事概要

構造細目の目視点検および溶接部非破壊検査の結果、その他には特に異常が認められなかったため、橋体を元の位置に戻し、損傷を受けた部材は取替え補修して、現橋を復旧することとした。

(a) 橋体移動工法

橋体移動の工法は、工程短縮を考慮してフローティング・クレーン(FC)を用いることとした。

本橋は、FC3隻相吊りによる一括架設工法で架橋したが、①海P-213橋脚の固定支承は健全であること、②橋体は建設当時より舗装、高欄等が加わり重くなっておりFC3隻相吊りが不可能であることから、海P-213橋脚側は支承に橋体をあずけた状態で、FC2隻相吊りで吊上げ、移動することにした。写真-12に吊上げ状況を示す。

復旧手順は以下のとおりである。

FCによる吊上げ、移動、仮置き



損傷端横桁、上横構取替え



橋面工仮復旧(1車線開放)



新設支承設置、その他損傷部補修



橋体ジャッキダウン



橋面工本復旧(全車線開放)

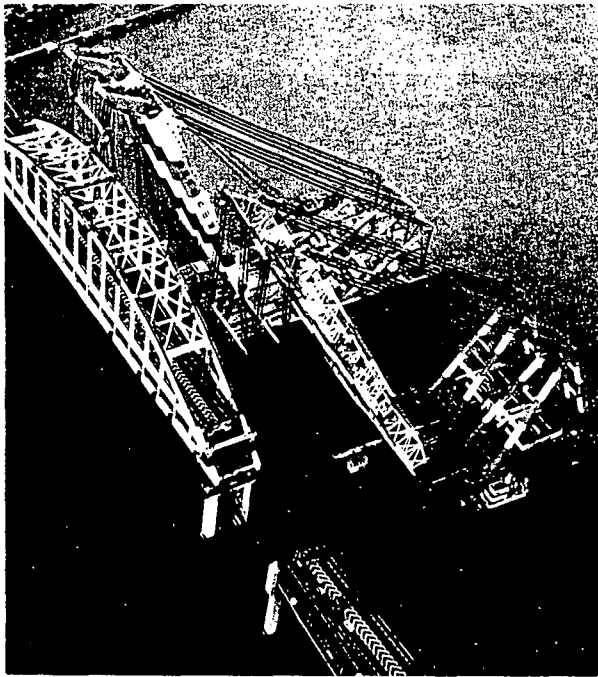


写真-12 FCによる橋体吊上げ状況

(b) FCワイヤリング要領

FCは、海P-214橋脚支点付近で2点吊り、アーチ中央部で荷重分散のため8点吊りとした。

吊点付近の端横桁、上横構が損傷していることから、橋軸直角方向荷重が掛からないように吊天秤を使用した。

(c) 吊上げ時の橋体移動防止

FCで橋体を吊上げ、地切りするとき、ジャッキアップ架台との摩擦で静止していた橋体が西側に戻ろうとする。これを制止するためワイヤクランプで橋体を固定した。

(d) 橋体移動

海P-213橋脚のねじれが復元するまで、ワイヤクランプ張力を徐々に緩め、橋体を西側に戻した。

アーチ桁支承位置の損傷が著しいため、橋体は一度仮受け架台上の支承に仮置きした。

(e) 損傷部材取替え

橋体仮置き後、損傷した上横構、斜材、端横桁を撤去し、新規製作部材と取替えた。なお、上横構取替え時の安全性確認のために弾塑性有限変位解析を行った。

5. おわりに

兵庫県南部地震により被災した長大橋梁については、その損傷メカニズムの究明もさることながら、復旧工事の施工にあたってさまざまな検討を行った。特に、六甲アイランド橋の復旧では、総重量約9200tにも及ぶ橋体を、片側だけ吊上げて横移動するという過去に例を見ない工法を採用した。

5号湾岸線は、阪神間の主要幹線道路であることから、復旧工事はまさに時間との戦いであった。このような状況のなか、西宮港大橋と東神戸大橋が4月10日に、六甲アイランド橋が8月末に無事復旧工事を完了し、交通開放することができた。ここにあらためて工事関係者に感謝する次第である。

【参考文献】

- 1) 阪神高速道路公団：東神戸大橋工事誌、1994年5月

REPAIR WORK OF LONG SPAN BRIDGES OF HARBOR HIGHWAY , HANSHIN EXPRESSWAY

by Hiroshi ISHIZAKI and Yoshinobu SAWANOBORI

Harbor Highway of Hanshin Expressway, comprises of continuous elevated structures, runs through reclaimed islands along the rim of Osaka bay. Most of the structures performed relatively well as a whole when hit by the Great Hanshin Earthquake, because the structures are based on the design specifications which were revised in 1980.

On the other hand, defects can be found at primary members of some long span briges as a result of dislocation of steel bearings. The repair work had been completed without accident as of the end of August 1995.