阪神高速道路公団
技報第16号　1998

水晶山橋の設計・施工概要

交通環境室　環境技術課　冨　田　穣
神戸第一建設部　北神工事事務所　三浦　龍太郎
工　務　部　工務第一課　川上　順子

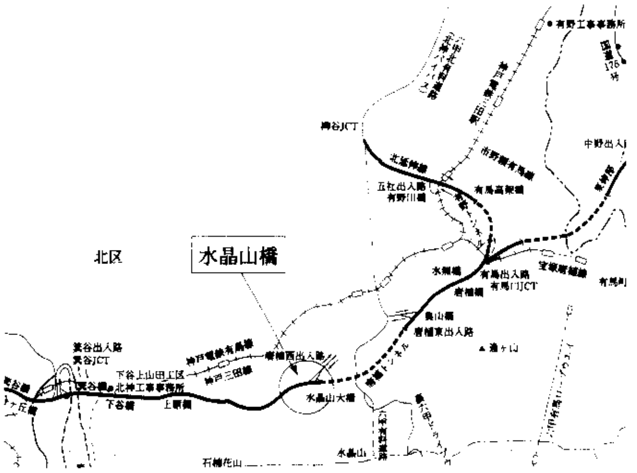
要　旨

水晶山橋は，7号北神戸線に建設された2径間連続RC固定アーチ橋で，RCアーチ橋としては国内有数の規模であり，2径間連続形式としては国内最大規模となっている。本報では，本橋の設計段階において明らかとなった設計上の検討概要を紹介するとともに，RCアーチ橋としての特徴について述べる。また，施工においては，これまでの最大規模である全支保工架設についてもあわせて報告するものである。

キーワード：2径間連続RC固定アーチ橋，全支保工架設

はじめに

7号北神戸線は，神戸市北部の六甲山系の北側に位置し，西は第二神明道路，東は東伸部を経て中国自動車道，北は有馬口で分岐し，神戸三田線に連結した後，六甲北有料道路に連結している．延長は伊川谷JCTから中国自動車道間までの32.3kmと，有馬口JCTから六甲北有料道路（柳谷JCT）へ北上する3.3km（北延伸部）の合計35.6kmである．このうち伊川谷JCTから柳谷JCT間は平成10年4月までに供用を開始している．



図－1　位置図

水晶山橋は，北神戸線の内，六甲山系のほぼ中央で，標高600～800mの山腹斜面の下方を横過しており，神戸電鉄有馬線「花山駅～大池駅」南東の丘陵地に位置する．図－1に位置図を示す．本橋は，西，東行き線分離の2径間連続RC固定アーチ橋で，橋長440m，アーチ支間150mの長大アーチ橋である．これはコンクリートアーチ橋として，国内でも7番目の支間長を誇るものであり，しかも2径間連続形式としては国内最大の規模を有している．

1．橋梁概要

1－1　橋梁諸元

構造諸元を表－1に，橋梁一般図を図－2に示す．

1－2　形式の選定

構造形式の選定に当たっては，以下の点に留意した．

表－1　構造諸元

項　目	仕　　様
上部工形式	2径間連続RC固定アーチ橋
橋　　　長	440m(20＋20＋2＊160＋30＋25＋25) 東行き・西行き2連
アーチ支間	150m
幅　　　員	東行き　9.5～18.5m 西行き　9.5～16.3m
アーチライズ	24m，27m
アーチ断面	スプリンキング部　9.5×2.8m クラウン部　6.9×1.7m(中空断面)
補　剛　桁	RC中空床版（支間長16.0m）
側　径　間	2,3,4径間連続PC中空床版橋
基礎形式	深礎杭基礎および直接基礎

（1）砂防指定区域および指定河川

石楠花谷川，黒岩谷川は砂防指定河川であり，両河川から橋脚基礎まで十分な離隔を確保するとともに，砂防指定区域内であるので基礎工掘削を極力少なくする必要があった．

（2）国立公園地域および風致地区

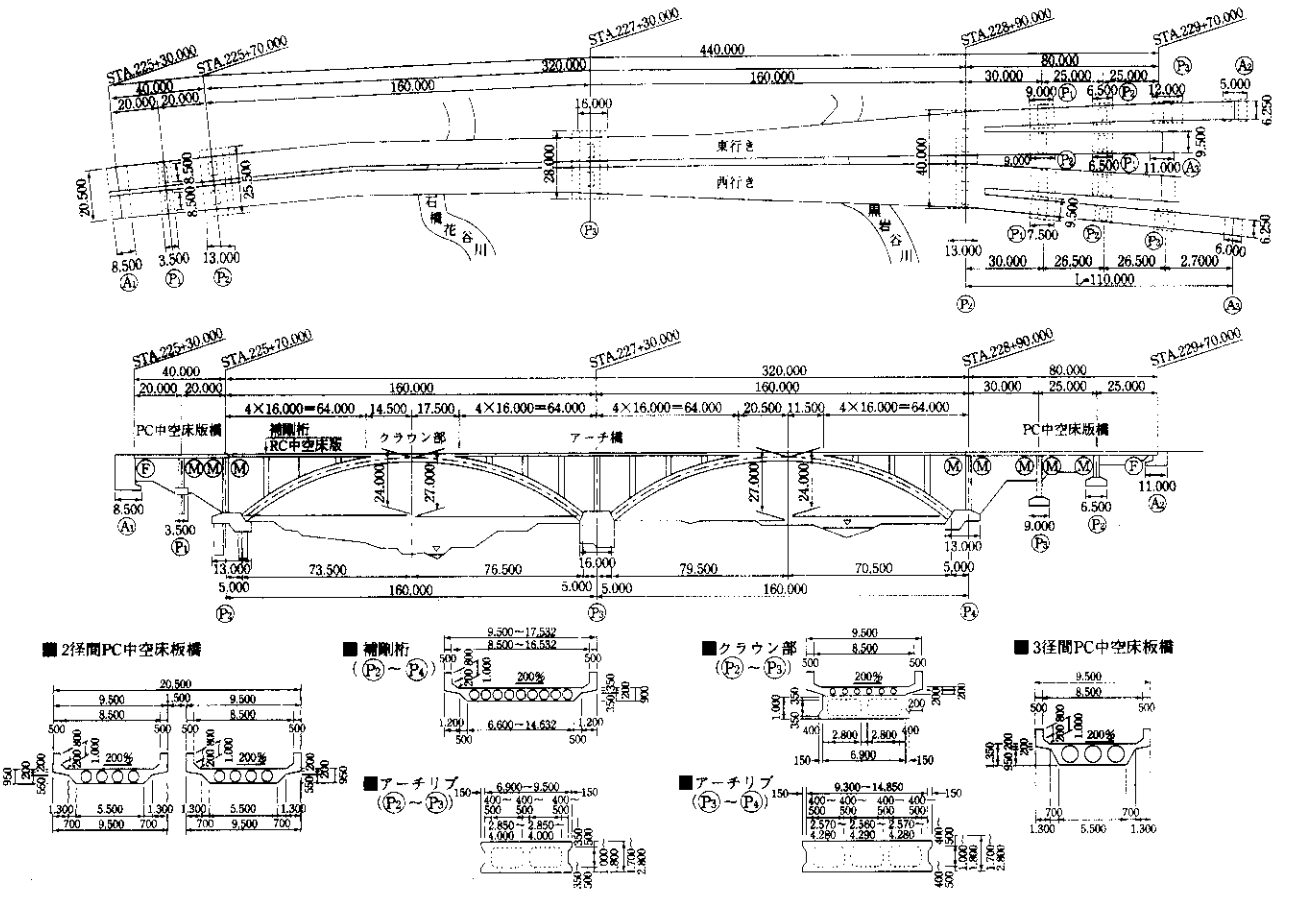
架設地点は瀬戸内海国立公園，および風致地区である．自然環境保護のため，樹木の伐採，中間橋脚本数を最小限にとどめる必要があった．

上記の制約条件を元に図－3に示す5案の構造形式(PC 4径間連続ラーメン箱桁橋，PC 4径間連続箱桁橋，RCアーチ橋，4径間PC斜版橋，2径間PC斜張橋）について比較を行った．

工費的には，2割程度高い2径間連続斜張橋を除いて他の案は数パーセント程度の差であった．自然環境保護の観点からは，永久構造物，および法面の占用面積をできる限り少なくする必要があり，国立公園内に橋脚が1本であるコンクリートアーチ橋，2径間連続斜張橋が望ましい．砂防の観点からは，出来るだけ河川から橋脚を離すことが望まれた．以上の項目を総合的に判断し，美観上も優れたコンクリートアーチ橋が選定された．

1－3　架設工法の選定

架設工法としては表－2に示すような，全支保



図－2　橋梁一般図

工工法，トラス・メラン工法，ピロン・メラン工法，合成アーチ巻立工法の4種類が考えられた．本橋の場合，架設地点が深い渓谷でないこと，山腹地形であるが支保工架設が可能であるため，経済的に有利であることから，全支保工架設を採用した．

2．設計条件

2－1　基本条件

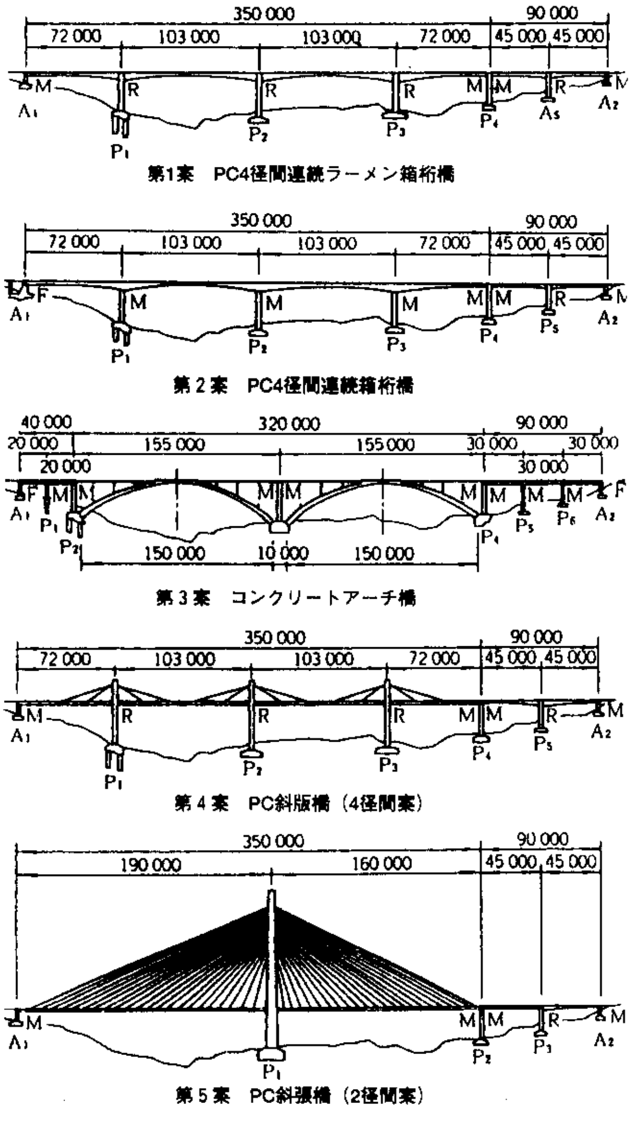
・路　線　名：神戸市道高速道路北神戸線

・道路規格：

本線部…第2種第2級，設計速度V＝60km/h

出入路…C規格ランプ，設計速度V＝40km/h

・橋　　種：鉄筋コンクリート道路橋



図－3　構造形式比較案

・構造形式：

2径間連続RC固定アーチ橋

（アーチスパン2×150.0m）

側径間部：2（3）（4）径間連続PC中空床版橋

・等　　級：1等級(TL-20)

・橋　　長：L＝440.0m

・支　間　長：アーチ部2×150.0m

・道路線形：縦断勾配1.464～0.50%

横断勾配2.00%

2－2　荷重

・活荷重　：TL-20

・衝撃係数：主桁i＝7／（20＋L）

床版i＝20／（50＋L）

・設計水平震度：道示V（昭和55年）

Kh＝0.18

3．アーチ構造

3－1　アーチライズの決定

橋脚位置が地形条件より決定された結果，アーチ支間は第1径間，第2径間とも150mとなった．

アーチライズは道路縦断高，河川との離隔，地盤条件から，各径間の左右ライズを24.0m，27.0mと決定した．

3－2　軸線の決定

本橋は支持条件が固定であり，また，アーチリングの剛性が高いことから，アーチ軸線の決定がより重要になる．アーチ軸線はアーチリングに作用する死荷重時のモーメントを極力抑えるられることが望ましい．

軸曲線としては，長大コンクリートアーチ橋であること，アーチリングの剛性が高いことから，次式のハイパボリック曲線を用いた．

$$y=f/(m-1)\cdot(\cosh K\xi-1)$$

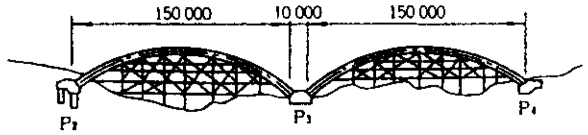
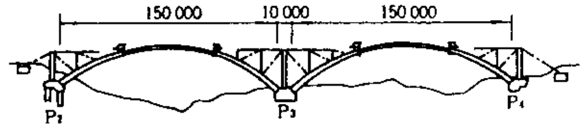
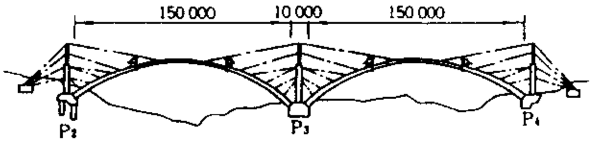
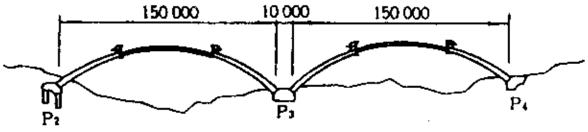
ここに，y：高さ（m）

f：ライズ高(m)

m：$\omega s/\omega c$

ωs：スプリキングにおける単位長さ当たりの死荷重（tf/m）

表－2　架設方法検討案

	施　工　概　要　図	設計・施工上の留意点	実　績
全支保工工　法		・アーチリングの拡幅に対しては，容易に対処できる． ・支保工の変形管理，および，横移動に対して十分な検討が必要である． ・地震，風荷重について検討が必要である． ・経済的である（1.00）．	大滝橋(100m) みどり橋(100m) 余理川橋(39m)
トラス・メラン工法		・アーチリブの拡幅に対しては，特殊ワーゲンが必要となる． ・斜め吊り材の緊張管理，およびアーチリブの変形管理が重要である． ・地震・風荷重に対して比較的安定している． ・(1.20)	別府橋(235m) 外津橋(170m) 赤谷川橋(116m)
ピロン・メラン工法		・アーチリブの拡幅に対しては，特殊ワーゲンが必要となる。 ・斜め吊り材の緊張管理，およびアーチリブの変形管理が重要である。 ・張出し架設時は全体構造系の鋼性が小さく地震・風荷重に対して多少不安定である． ・(1.20)	宇佐川橋(204m) 帝釈橋(145m)
合成アーチ巻立て工法		・アーチリブの拡幅に対しては，特殊ワーゲンが必要となるが，コンクリートの荷重は角形鋼管アーチに支持させるためワーゲン重量が小さい． ・アーチリブ巻立て時の合成アーチの変形，応力算定に十分な検討が必要である． ・張出し架設時は全体構造系の鋼性が小さく地震・風荷重に対して多少不安定である． ・(1.20)	城址橋(82m)

注）（　）内は全支保工を1.0とした場合の経済性を表す

ωc：クラウン部における単位長さ当たりの死荷重（tf/m）

$K = \mathrm{Cosh}^{-1} m = \log e\{m + (m^2 - 1)^{0.5}\}$

ξ：χ / L

L：支間長

χ：橋軸方向距離（m）

3－3　補剛桁の支間割り

本橋のようにアーチリングの剛性が高い構造では，補剛桁の自重をできる限り少なくすることが望ましいため，RC中空床版橋形式とした．支間長は左右対称となるように橋脚間を10等分し，支間長を16.0mの連続形式とした．支承条件は耐震性を考慮し，鉛直材上端はヒンジ構造とし，鉛直材下端は剛結構造を基本とした．しかしながら，クラウン部付近については温度拘束により生じる応力を低減するため，一部ヒンジ構造とした．

4．座屈照査

本橋の構造上特筆すべき点は，細長比λが従来のRC固定アーチ橋のλ＝40～60に比べてλ＝75と大きいことである．このような細長比が大きいタイプの橋梁では面内座屈に関する検討が必要となってくる．DINの規定を引用しているところの道路橋示方書では，λの値で照査法を区分しており，本橋のλ＝75では，不安定座屈に対する検討が

必要であった．

本橋の座屈照査として，幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮した複合非線形解析を行うとともに，アーチリングの1/15縮尺模型を用い載荷実験を行い，座屈挙動や複合非線形解析の妥当性を調べた．解析の結果からは，不安定な座屈が先行する結果となったが，これを示す最大荷重の後に荷重が激減している．これは最大荷重後には圧縮部のコンクリートが軟化域に入ったためであり，解析的には不安定座屈が先行するものの，曲げ破壊が不安定な座屈破壊にきわめて近接していることを表している．これは本橋のλがDINの規定に示されているとおり曲げ破壊と不安定な座屈破壊の境界付近に位置しているためで，両者の性状を伴って破壊したと考えられる．

また，模型実験の結果は解析値とよく一致しており，複合非線形解析自身の妥当性が確認された．

5．耐震性の検討

本橋については，上部工の施工が兵庫県南部地震発生後となったことより，本橋における耐震性について見直しを行った．

これまで行った耐震検討は以下のとおりである．

1．静的震度法による耐震設計（設計水平震度kh＝0.18）
2．弾性動的解析による照査（入力加速度α＝180 gal）
3．材料非線形を考慮した耐荷力照査
4．複合非線形（材料非線形・幾何学的非線形）解析による耐荷力照査

これらの結果の概要は以下のとおりである．

1）静的震度法と弾性動的解析よりほぼ地震時の鉄筋応力度がσs＝2000kgf/cm^{2}程度となるように配筋量を決定した．

2）1)の配筋量を基に材料非線形を考慮した耐荷力照査では，設計荷重に対して2.2倍程度の耐荷力を持つことを確認した．

3）複合非線形解析に基づく耐荷力照査では，道路橋示方書・同解説IIIコンクリート橋編（平成2年2月）に規定されている終局荷重時の荷重係数に対し，1.8～2.0倍の安全率があった．

このように，本橋に関しては順次解析レベルを上げて耐震性の評価を実施し，それぞれのレベルごとで十分な安全性が確認された．一方，耐震性向上を目的とする構造細目も見直しを行い，以下の点を変更した．

1）アーチリング軸方向鉄筋の段落し方法について，径の異なった鉄筋を継ぐ場合には「鉄筋継手指針：土木学会（昭和57年2月)」に従い，断面積の比が1/2以上となるようにし，継手の位置・配置など構造細目に関する検討は「耐震設計・施工要領（案）：日本道路公団（平成7年7月)」に準じた．

2）アーチリングのスターラップに被せ筋を新たに追加配置した．

6．施工概要

アーチ橋の施工法は，前述のとおり，全支保工架設である．図－4に施工ステップ，図－5にアーチリブブロック割図（図内数字はコンクリートの打設順序）を示す．

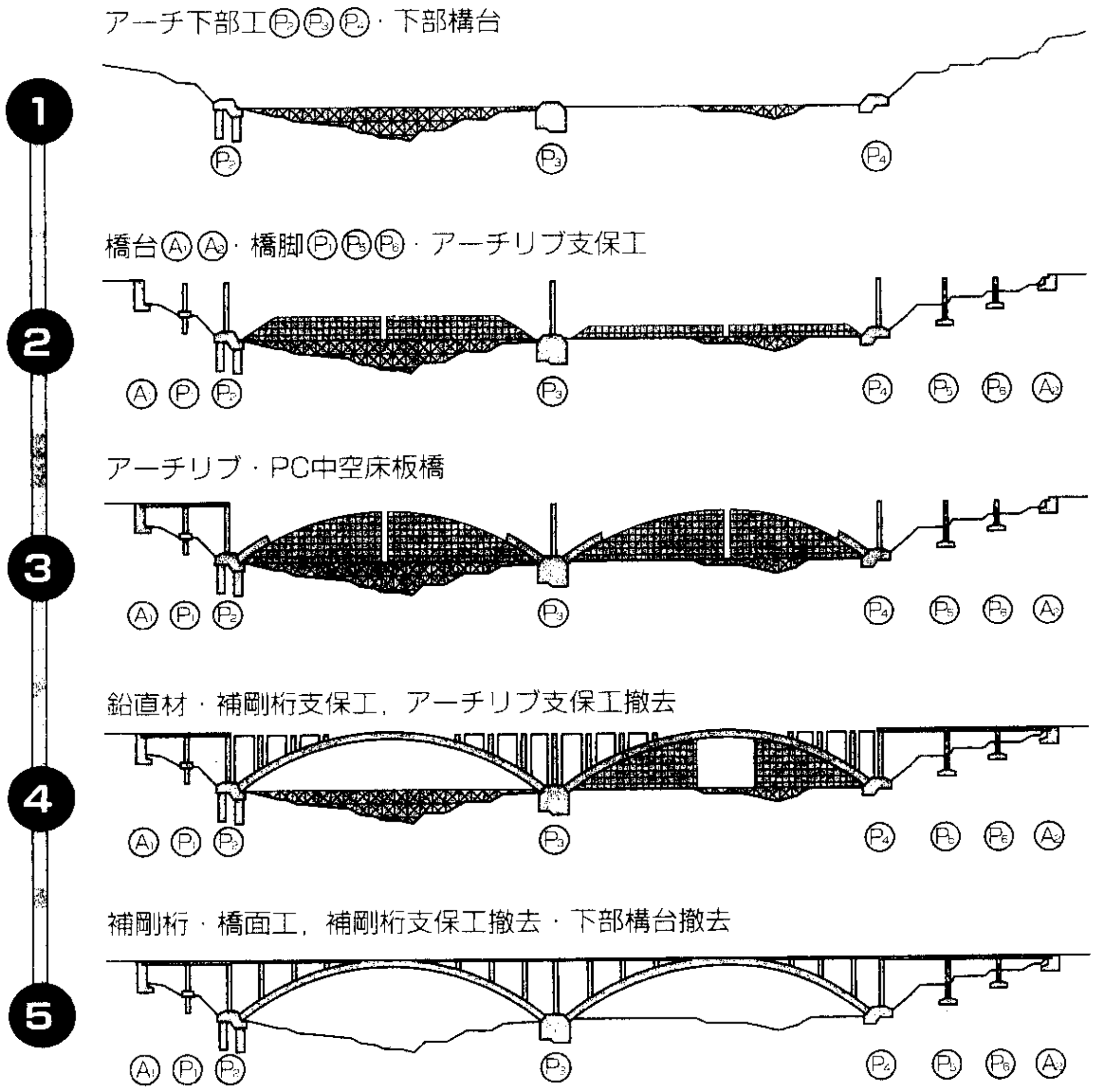
6－1　アーチリブ工

（1）支保工

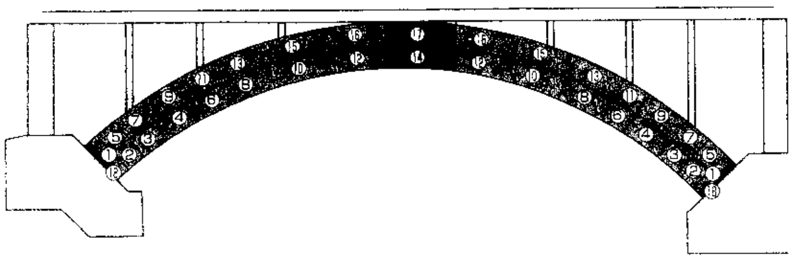
アーチリブの支保工は，パイプ状の高強度の支柱（許容軸荷重60tf/本，許容水平力5tf/本）をトラス状に組み上げたものある．予め仮設桟橋上で地組みし，クローラクレーンにて吊り上げ，H鋼杭にて構成される土台上に組み立てた．

（2）仮ヒンジ沓

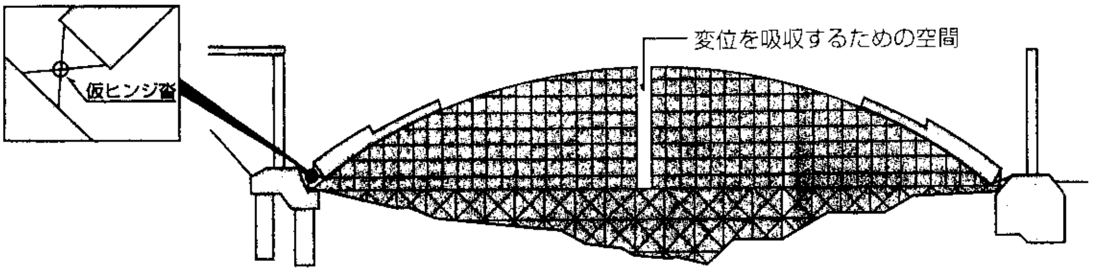
本橋は，主橋部では支間長が160mと大きく，アーチリブのボリュームも相当なものであるから，施工中の支保工のたわみにより曲げモーメントが発生し，設計以上の応力が発生する危険性がある．そこでスプリンキングに仮ヒンジ沓を設け，この施工中の応力を吸収させ，クラウン閉合後，コンクリートを打設し埋め殺した．図－6に設置要領図を示す．



図－4　施工ステップ



図－5　アーチリブブロック割図



図－6　仮ヒンジ沓および支保工設置要領

（3）コンクリート工

アーチリブは，応力分布と施工性を考慮して，高さ方向に2分割とし，全体を34ブロックに分け，フーチング側からクラウンに向かって順次打設した．

また，アーチリブは最大傾斜角38度の斜め部材であるため全面型枠となることから，コンクリートを確実に充填させるため流動化コンクリートとした．流動化コンクリートは現場配合のスランプが8cmのものに流動化剤を添加し，スランプを12cmとした．流動化剤の投入は，スランプロスを減らすために，現場内で打設直前に行い，投入量は，コンクリートミキサー車毎にベースコンクリートのスランプを計測して決定した．

（4）施工サイクル

アーチリブの1ブロック当たりの施工サイクルはスプリンキング部で約20日，クラウン部で約11日となっており，クラウン部はスプリンキング部の2倍の施工効率であった．このような差異が生じたのは，アーチリブの傾斜が異なることが最大の要因であった．また，作業員が施工ステップを踏むことによって熟練していったことも理由に挙げられる．つまり，この工法では作業員の技量に大きく左右されることが分かった．

6－2　鉛直材工

鉛直材の施工は4～5mを1ブロックとし，アーチリブに偏心荷重を与えないように左右対称に施工した．

6－3　補剛桁工

補剛桁はRC中空床版橋であり，鉛直材頭部とはメナーゼヒンジで連結，橋脚上はゴム支承で支持され，アーチクラウンに剛結された4径間連続桁である．1径間を1ブロックとしアーチリブに偏心荷重を与えないよう左右対称に施工した．支保工はスパン長が16mと短いのでトラス桁式支保工を採用した．

6－4　アーチ支保工動態観測

アーチ支保工は図－6に示すように，アーチ中央を境に，東西で独立した構造となっている．そこでアーチリブ施工時の支保工の変位は，このアーチ中央の空間に顕著に現れる．設計上，施工の各段階における支保工の変位は，フレーム計算により求めており，この設計値と比較して異常が見られた場合再検討を行う必要があるため，変位観測を実施した．

（1）測定方法

①各ブロックのコンクリート打設前後の鉛直方向変位

各ブロックのコンクリートを打設する前後に水準測量を行い，その差を調べた．すなわち，コンクリート打設位置に隣接する支保工上に設けた任意の点を基準とし，打設箇所に設置した測点の相対的な高さをコンクリート打設の前後で測量し，この値を比較することによって沈下量を把握した．観測頻度はアーチリブのコンクリート打設ごととした．

②支保工頂部での水平方向変位

水平方向については，支保工の頂部での東西支保工の間隔を計り，計算上の値と実測値を比較した．観測頻度は，原則として1ヶ月毎とした．

（2）計測結果

計測結果のデータから読みとれる特徴は，

①各ブロックのコンクリート打設前後の鉛直方向変位は，ほとんどなかった．（0～2mm）

②全コンクリート打設完了した時点での水平方向の平均変形量は設計値より大きく，その差は13mm～20mmとなっていた．

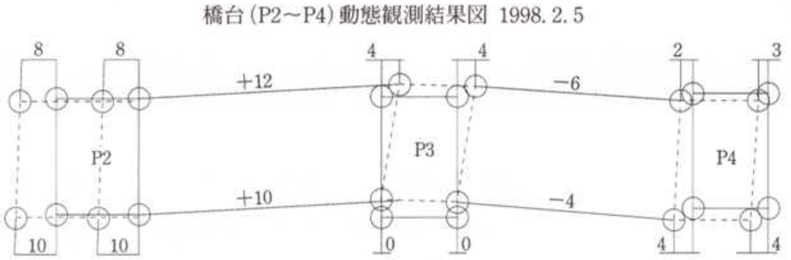
このように，支保工のたわみは鉛直方向より水平方向に顕著に現れたが，許容範囲内であることから，根本的な対策や，クラウン閉合時にジャッキアップなどによる調整の必要は生じなかった．

6－5　アーチ橋脚移動観測

アーチ橋は，荷重を受けて支間が広がる方向に支点，すなわち橋脚基礎が移動しないことが前提となる．そこで各橋脚に測点を設定し，その動態を観測した．

（1）観測方法

測点をフーチング上の4隅に設けて基準点より測定し，座標の変化で橋脚の動きを観測した．観測は水平方向と鉛直方向の双方について行った．



図－7　アーチ橋脚移動量

観測頻度は１ヶ月に１回程度とした．

（２）観測結果

図－７に観測結果の模式図を示す．各橋脚の基礎形式はＰ２が深礎杭，Ｐ３およびＰ４が直接基礎である．設計計算によるとＰ２橋脚が最も移動すると予想されていたので，上部工の設計上，30mm以下の移動は許容するよう考慮した．

観測結果によると，鉛直方向の変位は全般的に５mm以下であった．次に水平方向の変位については，アーチ支保工のジャッキダウンまではアーチリブの荷重を主として支保工で受けるため，変位はほとんど見られなかった．しかし，ジャッキダウン後は支点間距離に変化が見られ，平成10年１月には16mmまで広がった．その後，平成10年２月のデータによると再び支点間距離が短くなる傾向が見られた．また各橋脚の変位を見ると，アーチリブの荷重により主に橋軸方向に動き，その中で深礎杭形式であるＰ２橋脚の移動が最大となっていた．その値はすべての施工を完了した平成10年２月で10mmであり，問題視する必要はないと考えられるが，今後も逐次，観測を行う予定である．

あとがき

水晶山橋は平成５年に着工以来，５年余の歳月をかけ完成した．平成10年４月の北神戸線（北延伸部）の供用開始時には，その計画思想どおり，周辺の自然環境と調和した優美な姿を現した．のべ労働時間は10万時間にのぼり，この間無事故，無災害であったことは日々の安全管理の結果であることは勿論のことであるが，全支保工というしっかりした足場に守られた架設が施工性のみならず，安全管理上も優れているということの証明となったと思われる．

水晶山橋完成写真

参考文献

1）北沢正彦，幸左賢二，岩永巧，若狭忠雄：水晶山橋の設計，橋梁と基礎，1994.2
2）幸左賢二，渡邊尚夫，徳山清治：全体系模型によるRCアーチ橋耐荷性状確認実験，コンクリート工学年次講演会論文集，1995
3）浜本　博志，佐々木　一則，川上　順子：阪神高速北神戸線水晶山橋の施工計画，阪神高速道路公団第29回技術研究発表会論文集，平成８年度