

池田湖橋（仮称）の計画と設計

望月 秀次*1・飯束 義夫*2・湯川 保之*3

1. はじめに

池田湖橋（仮称）は、図-1に示す徳島自動車道美馬～川之江東JCT間（第11次整備区間）のうち、井川池田IC（仮称）の西方5kmに位置する橋長705mのPC5径間連続バランスドアーチ橋である。本橋は、図-2に示すように県道、一級河川吉野川池田ダム湖、吉野川運動公園、JR、国道、町道を横過し、その両端はトンネル構造という架橋条件となっている。このような複雑な交差条件のもとに、構造特性、施工性、経済性、維持管理、景観の観点から種々の橋梁形式を検討し、PC補剛桁を有する逆ランガー形式のバランスドコンクリートアーチ橋を採用した。なお、最大支間長200mを有する本橋はコンクリートアーチ橋としてはわが国最大級のものとなっている。

橋脚の基礎は、P1・P2がニューマチックケーソン工法、P3・P4が大口径深礎工法で施工する。このなかでP1に関しては、池田ダム湖中に位置することと非出水期間内の急速施工であることなどから、鋼製のケーソンをドライドッグで別途製作し、これを曳航・設置ののち、沈下掘削するという工法を採用している。また、上部工の架設は移動作業車を用いた張出し架設工法で施工するが、アーチ部の施工方法は補剛桁、アーチリブ、鉛直材および仮設用斜吊り材でトラスを構成しながら同時に両側に張り出すという、わが国で初めて行われるものである。本文は、池田湖橋の橋梁計画および上下部工の設計に関して報告するものである。

2. 計画概要

2.1 計画条件および交差条件

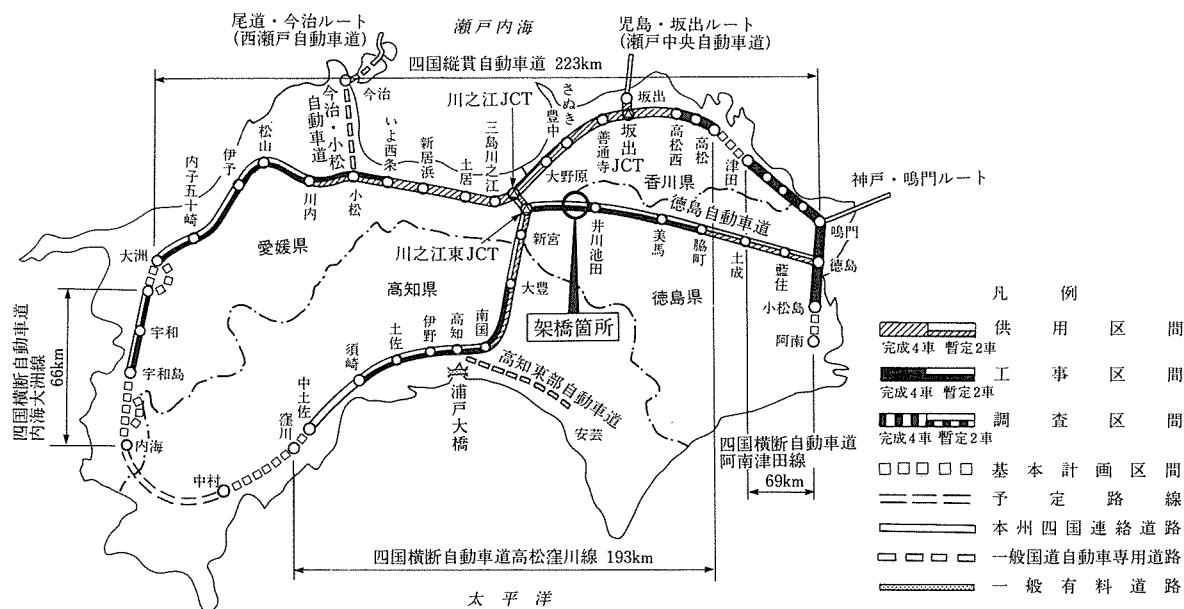


図-1 池田湖橋位置図

*1 Hidetsugu MOCHIZUKI：日本道路公団 四国支社 建設部 構造技術課 課長
 *2 Yoshio IIZUKA：日本道路公団 四国支社 池田工事事務所 構造工事区 工事長
 *3 Yasuyuki YUKAWA：日本道路公団 四国支社 建設部 構造技術課 課長代理

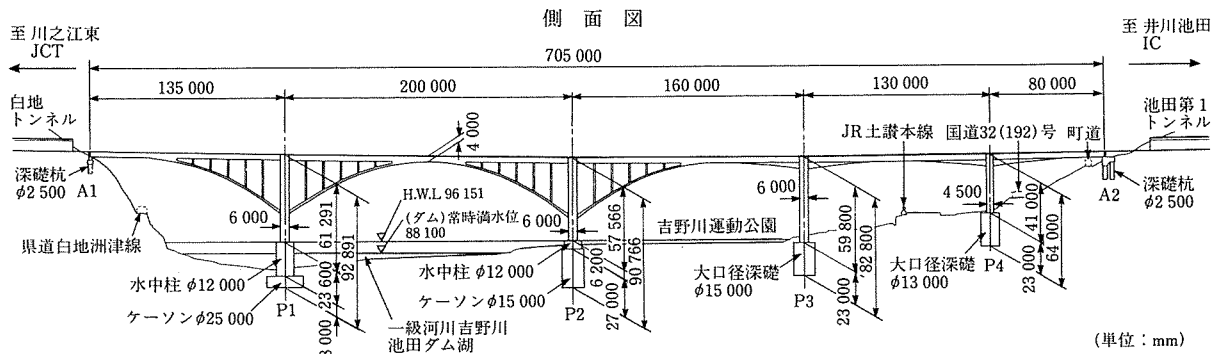


図-2 池田湖橋の一般図

下記に本橋の計画条件を示す。また、前述のとおり本橋は県道白地州津線、一級河川吉野川池田ダム湖、吉野川運動公園、JR土讃線、国道32号線、町道細野板野線を横過する交差条件となっており、景観等の配慮も必要である。

路線名：高速自動車国道 四国縦貫自動車道
 道路規格：第1種第3級B規格
 道路幅員：9.0m（暫定2車線施工）
 基本線形：平面線形 $R=\infty$ ，縦断線形 -2.39% から 2.00% ，横断勾配 2.00%
 設計荷重：B活荷重
 設計速度：80km/h

2.2 地形・地質条件

架橋地点は、北流していた吉野川が東方へ90度方向を転じる地点にある。吉野川北岸には和泉層群が分布し、水衝部となるため河床付近まで急峻な地形を呈しており、河川から山頂までの最大比高は約400m、山腹斜面の傾斜は60度に達する箇所が見られる。一方、吉野川南側には三波川変成帯が分布する。河川から国道32号線付近までは、吉野川により形成された段丘面がひろがっており、国道より南側には和泉層群由来の地すべり堆積物から構成される比較的緩傾斜を呈する山麓部となっている。

支持層は、A1およびP1基礎は和泉層群の砂岩、P2基礎は三波川結晶片岩上の湖成堆積層、P3およびP4基礎は三波川結晶片岩の泥質片岩、A2基礎は和泉層群移動堆積層としている。

2.3 橋梁形式の選定

本橋の橋梁形式は、PC連続箱桁形式、ケーブルトラス形式、エクストラロード形式、PC連続アーチ形式、斜張橋形式、トラス形式などを比較し、下記の理由に示すとおり総合的に検討し、アーチ部を3径間としたPC5径間連続バランスドアーチ橋を採用することとした。

(1) 交差条件

左岸部に基礎を設けずに、河川部および公園部を比

較的長支間のアーチで横過し、交差物件が確実にクリアできる。

(2) 構 造 性

張出し施工により構築されるアーチ橋で、施工時により断面決定される部分はあるが、完成系においては安定した構造物となる。

(3) 施工性および工期

アーチリブ・鉛直材の施工、および架設材である斜吊り材施工において若干施工性は劣るものの問題は少ないと考えられる。

(4) 経 済 性

連続桁形式と比較して経済的には大差ないものとなる。

(5) 景 観

アーチ形式の繰り返しによりリズムカルな印象を与え、周辺的环境に適合している。また、JRおよび国道上は箱桁形式としているため、桁下空間に開放感を与える。

2.4 橋梁の概要

(1) 上 部 工

上部工は、橋長705mの5径間連続コンクリート橋（PC補剛桁を有する逆ランガーアーチ+PC箱桁、支間割134.2m+200.0m+160.0m+130.0m+79.2m）である。PC補剛桁を有する逆ランガー形式のコンクリートアーチ橋は国内でも4橋の実績しかなく、いずれも単径間でアーチ支間も100m程度のものとなっている。本橋では最大支間長が200mとなり、5径間のうち主径間を有する3径間をバランスさせたアーチ構造とした。また、ラーメン箱桁部は、本橋のアーチ部補剛桁・箱桁部主桁の直線性を強調するために、主桁構造においてウェブ下縁側を斜めウェブにして陰影をつけ、桁高4mを一定に見えるようにした。なお、単径間アーチの場合、橋台側にアンカーをとり、補剛桁、アーチリブ、鉛直材および仮設用の斜吊り材でトラスを構成しながら移動作業車で片側に張出し架設する工法が採用されているが、ここでは橋脚から両側に同時に張出し架設する工法を採用している。

◇設計報告◇

(2) 基礎工および下部工

基礎工形式は、A1, A2を場所打ち杭（深礎杭）、P1をニューマチックケーソン（以下PNCと記す、 $\phi 25\text{m}$ （鋼製ケーソン））、P2をPNC（ $\phi 15\text{m}$ ）、P3, P4を大口径深礎（ $\phi 15\text{m}$, $\phi 13\text{m}$ ）とした。ここで、河川内の橋脚基礎P1は、築島方式または鋼製ケーソン方式によるNC、設置ケーソンが考えられたが、工程、環境、施工性などから、PNC（鋼製ケーソン）とした。その他の橋脚基礎は、PNC、場所打ち杭（深礎杭含む）、大口径深礎、直接基礎などを諸条件のもとに比較検討のうえ決定した。

下部工形式としては、A1, A2を逆T式橋台、P1~P4を柱式橋脚（中空橋脚）とした。なお、P4橋脚につい

ては他の橋脚に比較して高さが低く、端部に位置するため、その断面力に対処するためSRC構造とした。

2.5 架設概要

図-3に全体施工手順、図-4に基礎工施工手順、図-5に上部工施工手順を示す。以下に架設の概要を述べる。

(1) 全体的な施工の流れ

本橋梁を架設するための栈橋および基礎工（P1, P2）は、非出水期（10月1日から翌年6月30日まで）施工の制約がある。最初に栈橋の設置およびP2基礎の沈下掘削を開始する。同時に陸上部のP3およびP4の基礎工施工を並行して進める。次の非出水期にはP1基礎の沈下掘削、P2, P4の橋脚躯体構築を行い、その後は

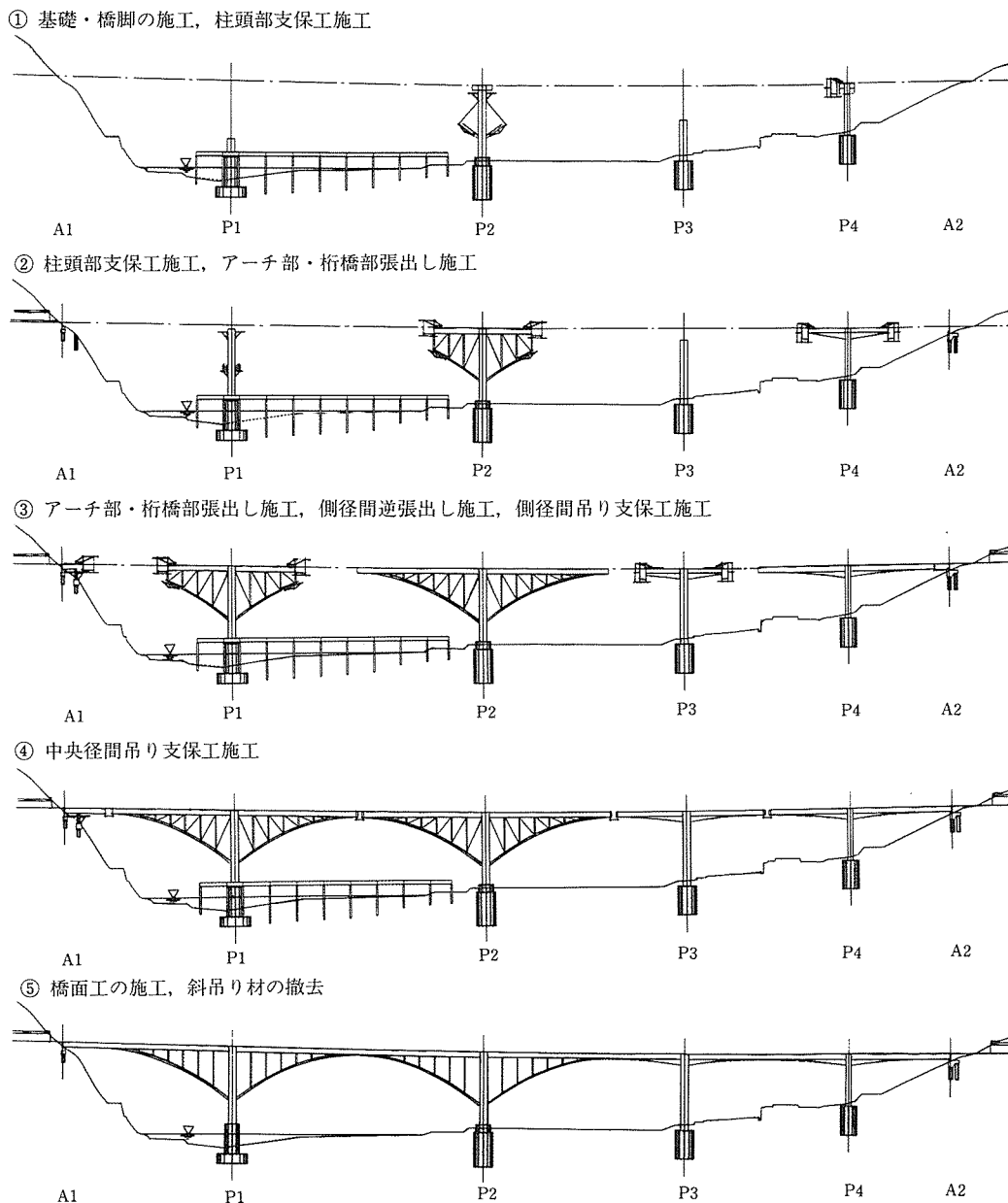


図-3 池田湖橋全体の施工手順

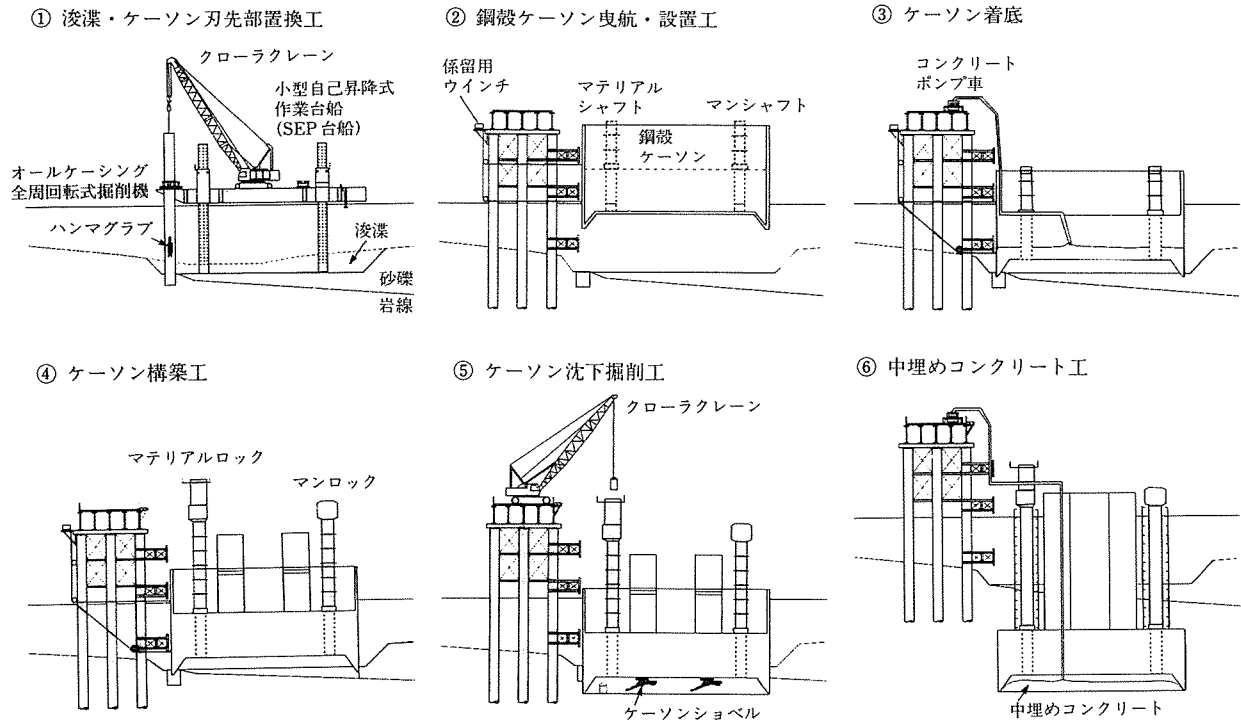


図-4 基礎工の施工手順

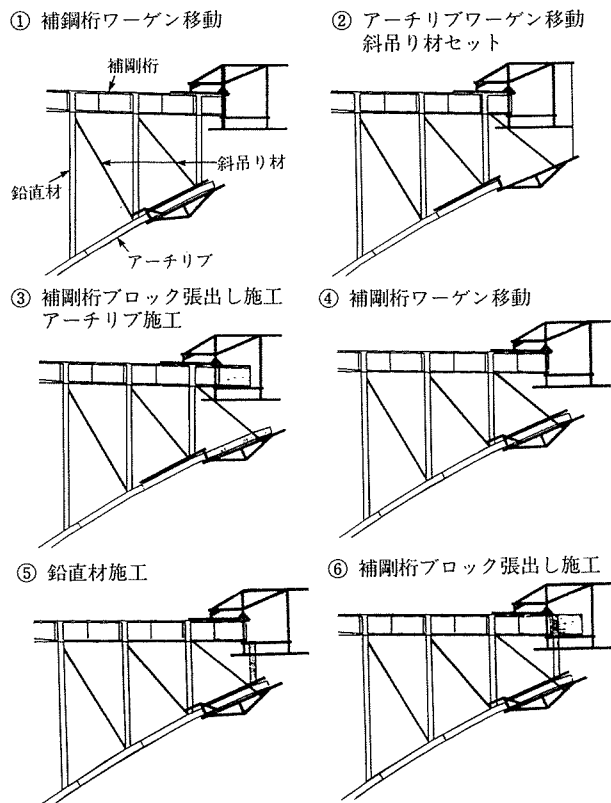


図-5 上部工の施工手順

P1, P3の橋脚躯体構築およびP2, P4の上部工の張出し施工を実施する。閉合はA2側からA1側に向けて順次行い、A2橋台での反力調整（ジャッキアップ）を行った

後に、A1から逆張出した側径間部と最終閉合して橋体工は完了となる。最後に橋面工の施工および斜吊り材の撤去を行って本橋の完成となる。

(2) 基礎工の施工 (P1基礎工)

P1基礎は、わが国でも有数の出水量の多い吉野川において、非出水期間内に急速施工が可能な工法として、鋼殻ケーソンを用いたPNC工法を採用している。河床部はやや傾斜しており、また硬質な岩も露頭している部分があるため、あらかじめ浚渫、ケーソン刃先部置換工を行う。次に吉野川運動公園内にドライドックを設け、鋼殻ケーソン（直径25.1m、高さ14.0m、全重量760tf）を製作し、曳船により当該地点に曳航、沈下させる。その後ケーソンの沈下掘削作業となるが、ここでは前述のとおり硬質岩があるため、発破を用いた施工となる。

(3) 上部工の施工 (アーチ部)

アーチ部の施工は、特殊大型移動作業車を用いて、補剛桁、アーチリブ、鉛直材および仮設用の斜吊り材でトラスを構成し、主橋脚から両側にバランスをとりながら張出し架設する工法で行う。特殊大型移動作業車は補剛桁施工用とアーチリブ施工用に分けており、クラウン部に近い箇所で一体化して使用することになっている。施工サイクルとしては概略的に（アーチリブ+鉛直材）の施工と補剛桁2ブロックの施工が並行して進行すると考えてよい。

3. アーチ構造の基本検討

上部工の基本構造の決定にあたっては、本橋の構造特性を把握するために諸々の詳細検討を実施した。以下にその検討結果の概要を述べる。

3.1 補剛桁とアーチリブの曲げ剛性が全体たわみに及ぼす影響

補剛桁とアーチリブが有している曲げ剛性が構造系全体のたわみに及ぼす影響を把握するため、簡易モデルを用い補剛桁高とアーチリブ厚を変化させて検討した。その結果を図-6に示すが、アーチリブ厚は1.25m程度以上あれば十分な剛性を有し、補剛桁高は4.0~5.0m程度あればたわみ抑制が期待できることが判明した。

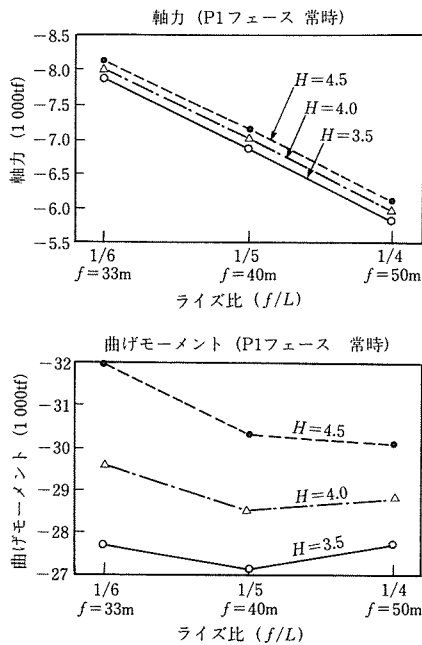


図-6 スパンライズ比と発生断面力

3.2 補剛桁高とアーチライズ

補剛桁の桁高とアーチライズの選定のため、これらをパラメータとしてP1橋脚位置の補剛桁の断面力に与える影響の予備検討を行った。桁高を大きくすれば桁断面力が増加し、アーチライズを大きくすれば桁に作用する断面力が減少するとともに曲げモーメントの変動も小さくなる。本橋においては、図-7に示す結果と、施工性および従来の施工実績も考慮に入れ、スパンライズ比1/5、補剛桁高4.0m、アーチライズ40mを基本とすることとした。

3.3 アーチリブの断面

アーチリブの軸線形状については構造および景観に配慮して決定した。アーチクラウン部においてアーチリブ下面と補剛桁下面とが連続するように軸線を設定し、

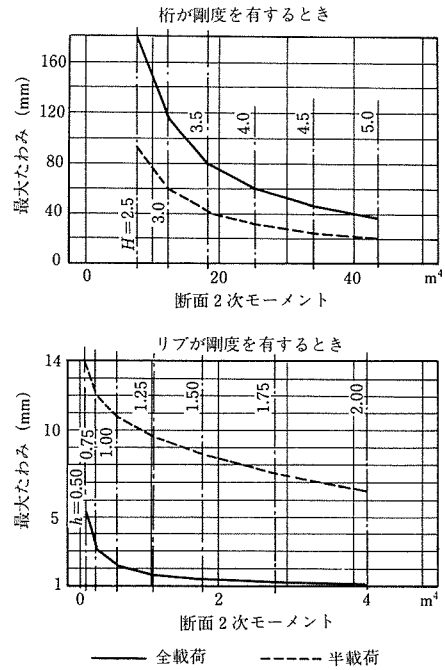


図-7 部材剛性とたわみの関係

形状は二次放物線とした。なお、部材は施工性の点から鉛直材支点間で直線とする多角形構造とした。アーチリブの断面はDINによる座屈照査とRC部材照査を行い、座屈安全率および配筋の施工性からアーチリブの標準厚を1.25mとした。

3.4 鉛直材

鉛直材は、完成系においては補剛桁を支持して荷重をアーチリブに伝達し、架設時においても張出し施工時の補剛桁を支持し、かつ仮設PC斜吊り状態においてはトラス形成部材となっている。この鉛直材は軸力部材であるとともに、上下端の拘束条件によっては曲げを受ける部材となる。構造選定にあたってはRC部材（現場打ち工法、プレキャストセグメント工法）、SRC部材（メラン先行コンクリート巻立て工法、鋼管先行コンクリート充填工法）を比較検討の結果、施工の急速化、景観、維持管理に優れたメラン先行コンクリート巻立て工法によるSRC部材を基本とした。なお、鉛直材の下端はすべて剛結合とし、上端は部材高により剛結合またはヒンジ結合とした。

4. 構造解析

本橋は、施工中の各部材の応力・変位状態を考慮し、仮設の斜吊りPC鋼材の緊張は3回に分けて行い、アーチクラウン部閉合後に一括して張力開放・斜材撤去する。ここで、1次緊張はアーチリブコンクリート打設による鉛直変位制御およびアーチリブ下端の曲げモーメント低減のために行う。また、2次緊張は鉛直材架設による変位補整、3次緊張は補剛桁に生じる曲げモーメント

低減を図るために行うものとした。

本設計では、上記の架設方法および径間閉合等の施工順序を考慮し、橋脚下端を固定とした平面骨組解析により逐次解析を行い、各構造系での増分荷重による断面力を累計して構造系完成時の断面力を算出した。また、クリープ・乾燥収縮による移行断面力は構造系完成後に生じるものとし、設計荷重時の応力照査はクリープ・乾燥収縮終了時について検討するものとした。

5. 上部工主方向の設計

5.1 補剛桁・主桁

軸力および曲げモーメントに対してはPC部材として全断面有効の曲げ応力度の検討を行い、引張領域は補強鉄筋の検討を行った。また、曲げ破壊に対しては後述の非線形時刻歴解析の結果を考慮し、鉄筋の補強を行った。一方、せん断に関しては、架設系（ワーゲン反力によるせん断、各施工段階でのせん断）および完成系の検討を行ったが、斜引張鉄筋量が多く配置も困難なことから、せん断PC鋼棒の配置で対処するものとした。

PC鋼材の配置および緊張時期については、各架設段階で必要な外ケーブル本数・緊張時期を決定し、張出し施工時および完成時に不足する分を補剛桁内のPC鋼材および斜吊り材で補うものとした。

5.2 アーチリブ

RC部材として設計荷重時および終局荷重時の検討を行い、座屈の照査はDIN1075およびDIN1045に従い実施した。なお、終局荷重時は2軸曲げの影響を考慮した。

5.3 鉛直材

鉛直材はメラン先行コンクリート巻立て構造としており、施工段階ごとに鉄骨構造、SRC構造に変化するとともに、鉛直材の上下端の剛結合部は鉄骨をPC鋼材により緊結しているため部分的にPRC構造となり、各施工段階の構造に対してそれまで発生した累加断面力により、2軸曲げおよび施工誤差を考慮に入れ設計を行った。

5.4 外ケーブル定着横桁

外ケーブルの定着および偏向は鉛直材直上の横桁とし、解析はシェル解析により行ったが、曲げ引張応力度が比較的大きくなるため、補強鋼材の配置・施工性等を考慮しPRC部材として設計を行った。

5.5 斜吊り材

斜吊り材は、①アーチリブ施工時に必要な張力、②張出架設中のトラス形成時の最大張力、③3次緊張に必要な張力を算出し、本数を決定した。この場合、斜吊り材の許容値は「仮設PC鋼材設計・施工マニュアル（案）」¹⁾に従い、 $0.5P_u$ とした。なお、補剛桁の斜吊り材定着位置は全て補剛桁内としている。

5.6 スプリングング

橋脚部材に関しては兵庫県南部地震クラスの大地震に対しても十分な耐震性能を保持できるように設計を行ったが、アーチリブのスプリングング部は非線形応答を許容しヒンジ化させるものとした。ヒンジ化（ヒンジ筋を配置）の状態は構造系全体を崩壊させるものではなく、他の各部材の安全性も確認している。

6. 上部工横方向の設計

床版の設計は上床版をPC部材、ウエブならび下床版をRC部材として行った。端横桁の設計は、横桁を梁部材としてモデル化し、横桁に直接作用する荷重による断面力と支点反力による断面力を算出し、PC部材として検討を行った。柱頭部の設計は下床版・横桁をディーブームとしてモデル化し横締め鋼材を配置した。

7. 局部応力解析

アーチスプリングング部は、アーチリブを介して大きな軸力が橋脚に作用する箇所であり、アーチ橋の構造上最も重要な部材のひとつである。一方、アーチクラウン部はアーチリブと補剛桁が一体化した構造となっているため、結合部近傍の断面力分担は複雑になっている。以上の部分については梁理論による構造解析および配筋の検討を行っているが、当該箇所は応力の集中・分配が生じる構造であるため、3次元立体ソリッドFEM解析を行い、応力の状況把握および補強の検討を実施した。

7.1 スプリングング部

解析結果の一例を図-8に示す。橋脚およびアーチリブに発生している引張力は引張鉄筋で対処されており補強の必要性はないが、完成直後のアーチリブ下端のコンクリート圧縮強度が許容値を超えるため、当初設計値

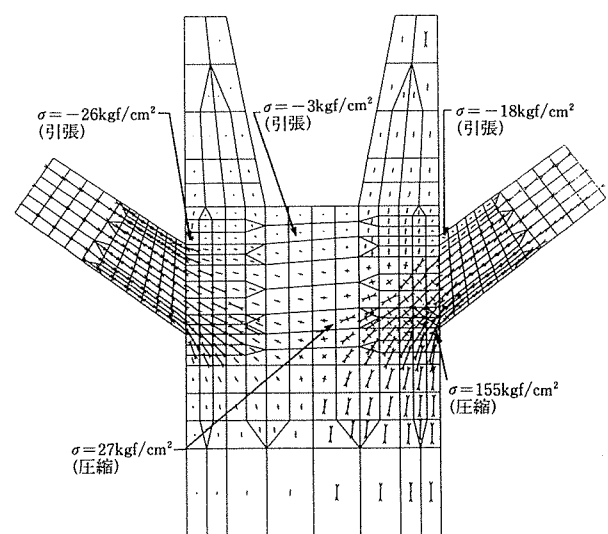


図-8 アーチスプリングング部主応力図(P,橋脚,死荷重時T=0)

(基本設計)である $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ から $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ に変更した。

7.2 アーチクラウン部

局部応力度の検討、平面解析モデルのモデル化の妥当性および外ケーブル定着横桁におけるシェル解析の妥当性を照査した。局部応力解析の結果の一例を図-9に示すが、ここでは以下の箇所で局部引張応力度の発生することが確認され、補強を行うこととした。

- (1) P1~P2クラウン部では、①結合部両端、②結合部補剛桁底板、③クラウン中央部の床版上縁、④クラウン中央部のウェブ
- (2) P2~P3クラウン部では、①結合部両端、②結合部補剛桁底板

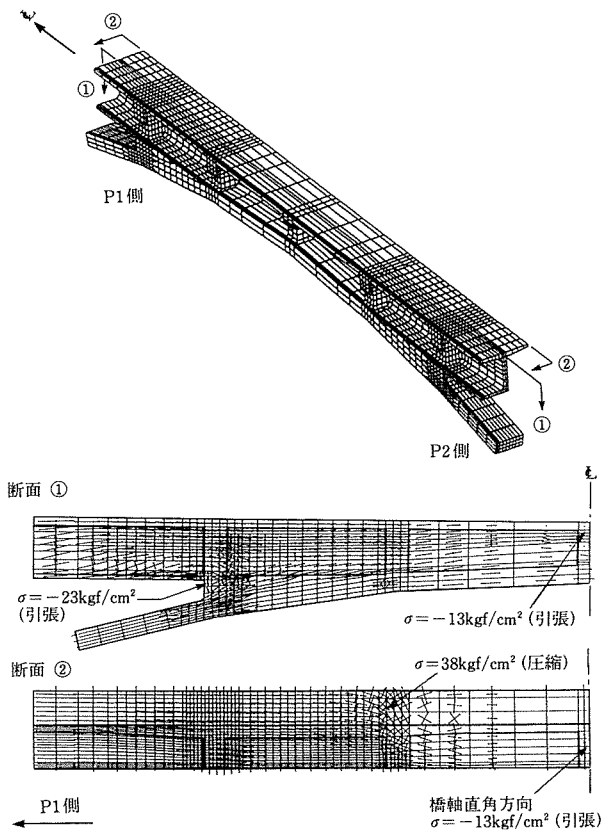


図-9 アーチクラウン部主応力図

8. 耐震解析

地震に対する検討は、静的解析(震度法)および動的解析(応答スペクトル法)により行った。動的解析については橋脚下端にバネを考慮したモデルにより行うものとし、さらに非線形時刻歴応答解析により、L2クラスの地震に対する橋脚、スプリング部および補剛桁・主桁の補強の検討を行った。以下にその概要を述べる。

8.1 応答スペクトル法による動的解析

補剛桁・主桁はアーチリブスプリング部(塑性ヒンジ化)の曲げ破壊安全率より高くなるように鉄筋で下床版を補強するものとした。アーチリブは、全体をM-φ要素として解析した結果を用い、安全側の設計を行った。鉛直材はせん断の影響を受けやすい部材であるが、ヒンジが発生した場合においても構造的に十分補強されたものとなっている。

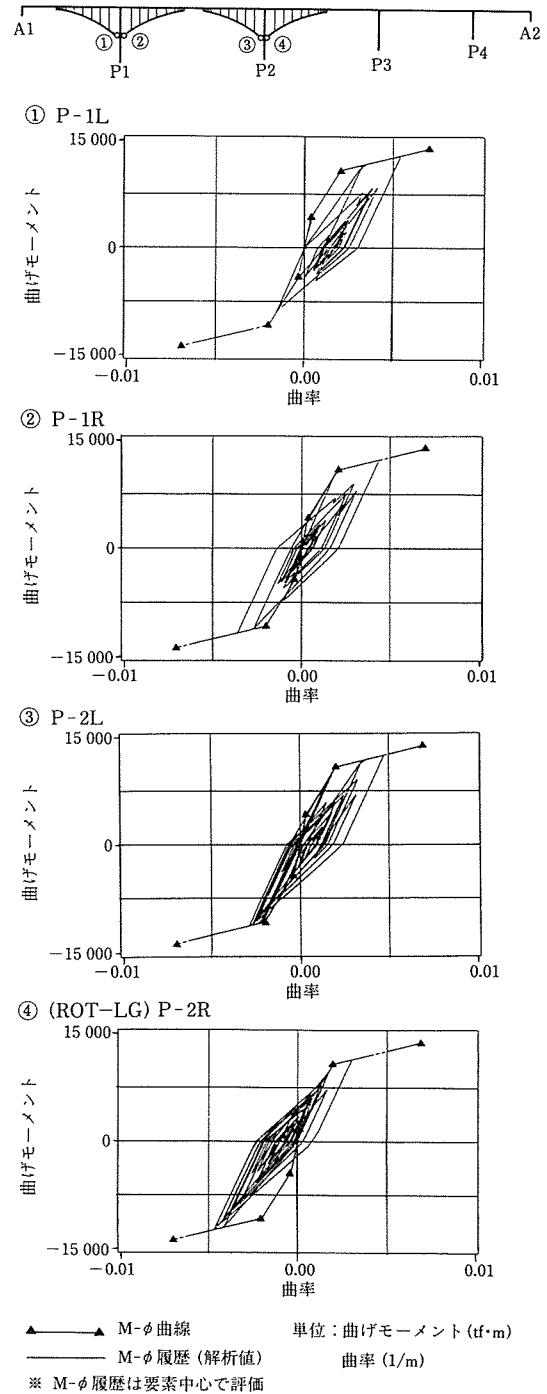


図-10 アーチスプリング部M-φ履歴図(橋軸方向,多点変位入力)

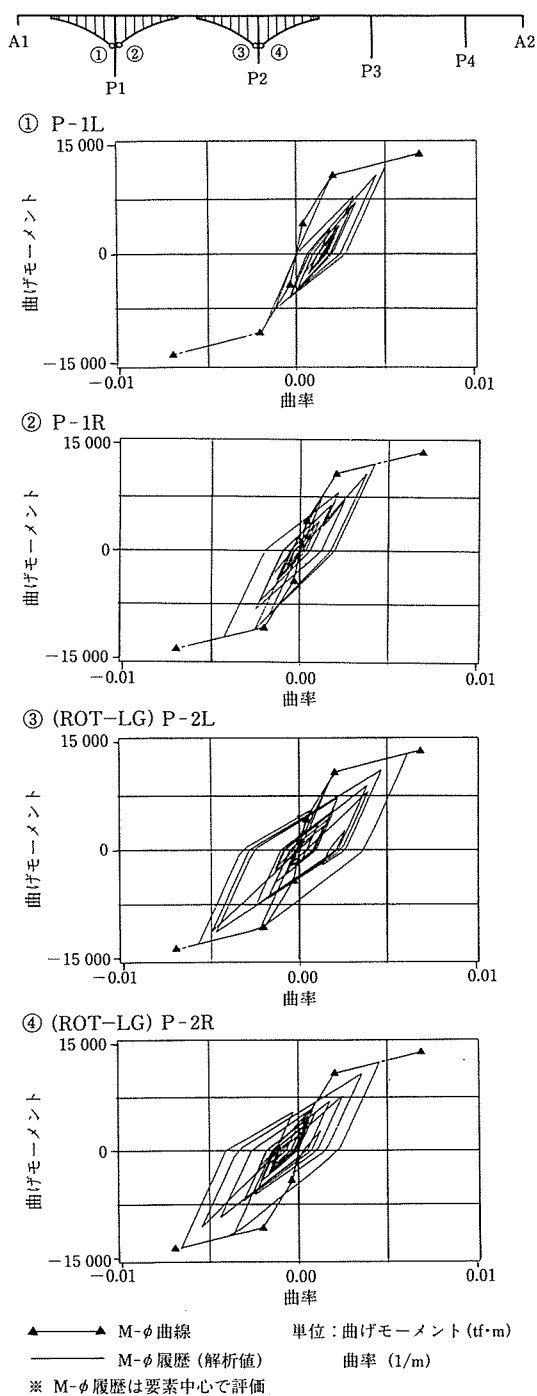


図-11 アーチスプリング部M-φ履歴図(橋軸方向, 一様加速度入力)

8.2 複合非線形動的解析

本橋は、アーチ構造とラーメン構造が連続することから地震時の応答は複雑になると予想された。また、P1とP2の地層構成が異なっていることから地震動の伝播や増幅も一様でない想定された。このため、本橋の地震安全性を照査することを目的に、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した地震動の再設定、および複合非線形(材料非線形と幾何学的非線形)を考慮した動的解析

を実施した。

本解析用入力地震波に関しては、加速度応答スペクトル結果によると、橋梁の主要固有周期帯で、神戸海洋気象台原波に比較し応答が大きくなる傾向にあった。この入力地震波により多点変位入力を行ったM-φ履歴結果を図-10に、原波形加速度を一様入力した結果を図-11に示す。この結果、 $\mu_u/\mu_d=1.04$ を示すが応答曲率は終局曲率以内にあり安全な結果となった。また、多点変位入力結果と一様加速度入力結果はほぼ同程度の応答値を示したが、地盤の詳細を考慮することにより応答が若干変化することもわかった。

9 橋脚の耐震設計

阪神・淡路大震災を契機として、RC橋脚の耐震性に対する関心が高まり、中間帯鉄筋の配筋が義務づけられるようになった。しかし、中空断面への適用については具体的な配筋方法が示されていないため、本橋では模型実験によりこれらの検討を行った。ここで実験の詳細2)については省略するが、実橋での横拘束筋の配置は図-12に示すとおりとした。中間帯鉄筋の加工形状は、コンクリートのかぶり、鉄筋組立ての作業性も考慮し、図のように内側帯鉄筋と外側柱筋を拘束するタイプとした。また、橋脚下端は1D区間を中実断面とし、通常のスターラップ形状の横拘束筋を部材軸方向に交互に配置した。

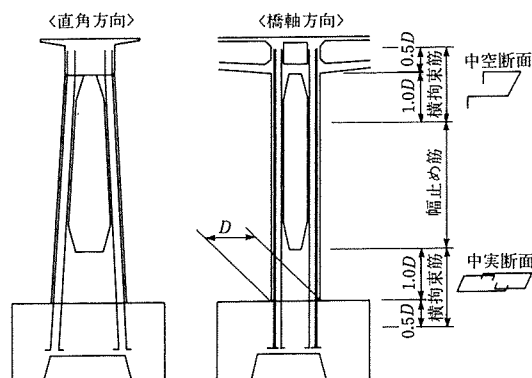


図-12 中間帯鉄筋配置方法

10. おわりに

現在、池田湖橋工事は基礎工をすべて完了し、橋脚の構築および上部工の一部架設を開始している。今後は、施工および安全管理に留意しながら工事の進捗に努め、徳島自動車道の早期供用を目指したいと考えている。

最後に、本橋の計画・設計にあたりご指導・ご助言を頂いた関係各位に深く感謝の意を表します。

◇設計報告◇

参 考 文 献

- 1) 高速道路調査会：仮設PC鋼材設計・施工マニュアル（案），
1996
- 2) 松田ほか：中空断面を有するRC橋脚の耐震性に関する模型実験，橋梁と基礎，Vol.30，No.11，建設図書，1996
【1997年6月2日受付】