

複合化によるコンクリートアーチ橋の長大化について

河村 哲男*1・池田 尚治*2

1. はじめに

アーチ橋は構造的に主に圧縮力が卓越するため、セグメントをアーチ状に組み上げれば荷重に耐えられる。メソポタミアでは3000年以上前、中国では2000年以上前から石造の簡単なアーチ構造を利用していた。古代ローマ時代の石造アーチ橋が数多く残っているように、人為的に破壊しなければ耐久性の高い構造であると言える。

40年ほど前に一度、再び20年ほど前からコンクリートアーチ橋の架設工法の革新がヨーロッパ、日本、さらに中国で行われ、解析理論、計算ツールの発展と相まって、またその耐久性、自然と融和する景観を重視する傾向にも押されて、30橋以上の支間200mを超える長大コンクリートアーチ橋が架けられている¹⁾。

コンクリートアーチ橋の長大化はアーチリブの架設工法の発展に大きく依存してきた。その中でジョセフ・メラン (Joseph Melan) が19世紀末にメラン工法を発明した。

合成アーチ巻立て工法 (以下、CLCA工法と称す) はメラン工法を発展させて、その鋼製トラスアーチを鋼製箱桁アーチに変更して、その中にコンクリートを充填し合成アーチ構造として剛性を増して、アーチ支間の長大化を目指したものであった。その後、2ヒンジ鋼函製アーチをコンクリートで巻立て、アーチリブを完成するのは同様である。

CLCA工法は通常アーチ支間が200mを超えると、鋼函箱桁アーチ内へのコンクリート充填時に座屈に対する安定性が問題となる。面内および面外ともに所要の座屈安全係数を保つために、板厚を張出し架設時に必要な値以上に厚くする必要が生じるため鋼材重量が増加する。また、鋼製箱桁をウェブに埋め込むため、アーチリブ断面積が大きくなり自重が増加する。これらの理由により、経済的な工法でなくなる特質があった。

ここで新たに提案する合成アーチハーフプレキャスト工法 (Composite Arch Partially Precast Method の略で以下、CAPP工法²⁾と称す) は、メラン工法の鋼製トラスアーチの上弦材および下弦材に箱形鋼管を用いて、その中にコンクリートを充填して合成構造とし、その剛性を増大させる。さらに、アーチリブの下床版コンクリートの下部にPCプレキャスト版を使用し、外ウェブ外側の一部にRCプレキャスト版を使用し移動作業車を省略した工法である。また、CAPP工法では、コンクリートアーチ橋を建設する場合にアーチ構造の長所を取り入れ、5段階にアーチリブを完成する。この工法の合理的な構造寸法および施工順序を見つ

けるために、アーチ支間300mの試設計と施工順序など、種々の比較検討を行い考察した。

その結果CAPP工法を使用すれば、コンクリート充填時の座屈に対する安全係数を確保できること、アーチリブの断面形状も長大アーチ橋を総足場施工する場合に近い値にすることが可能であることが示された。

本論文は以上に述べたように、アーチ支間の長大化の要請に対し、複合構造を適用する方式を中心に検討した結果を述べるものである。

2. コンクリートアーチ橋の施工法の発展

図-1にコンクリートアーチ橋の施工法の変遷を示した。この図に従ってアーチ橋の施工法の発展を概観する。

古代ローマおよび古代中国の石造アーチ橋は、多くが木杭基礎の上に地面から組み上げた木製の支保工法により建設されていた。切石の組み方は、中国では木造建築の影響から千鳥に組んだり、石にはぼを作ったりなど、数種類の組み方をしている。古代ローマでは、セメントおよびモルタルが使われていたが、円形アーチ形状の石造アーチの接着に使われていたか定かでない。

1774年にセヌ川に架かるヌイイ橋⁴⁾がジャン・ロドルフ・ペローネの指導とシェジーの監督のもとに完成した。この橋では、木製のセントルを本来のアーチの下側にアーチ状に組み立て、その上に切石が並べられ、石灰とセメントを混ぜたモルタルを接着剤として使用した。アーチ完成後のセントルの撤去は、巻上げ機と滑車を使用して短時間に次々と行われた。ヌイイ橋はアーチ支間39.8m、橋脚幅4.2m、橋面は水平で幅員14.6mであり、5径間の石造アー

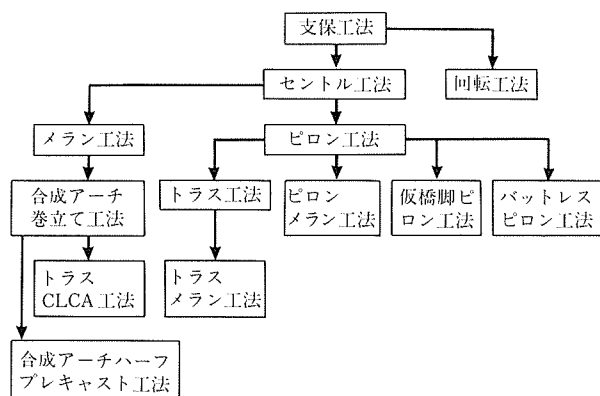


図-1 コンクリートアーチ橋の施工法の変遷

*1 Tetsuo KAWAMURA : (株)ピー・エス 技術研究所

*2 Shoji IKEDA : 本協会理事, 横浜国立大学大学院 工学研究院 教授

チ橋で軸線は多心円からなっていた。石造アーチ橋では、切石の大きさの制約、重い充腹アーチであったことおよび基礎の安定から、この程度のスパンが限界であったと考えられる。

ところが、2000年7月に中国山西省の晋一焦国道が丹河を越える支間146mの石造アーチ橋³⁾が支保工法により完成した。

セントル工法では、橋の下側に地面から支保工を組まないで、船などの通行を許し、河川の流水の影響も少なくなった。

ウジェヌ・フレシネー (Eugene Freyssinet) が1930年に支間180mの3連コンクリートアーチ橋、ブルガステル橋⁵⁾を建設するために、木製トラス構造のセントルをコンクリート製の浮き台船にその両端を乗せ、鋼線で繋いで運搬して完成させた。これは大型セントルを転用して長大アーチ橋を建設した画期的な例と言える。

メランが1892年に発明したメラン工法⁶⁾は、最初に3ヒンジの鋼製トラスアーチを架け渡した。次にそれを包み込むような形で型枠を作り、その中にコンクリートを打設した。スペインで1939年に完成したエスラアーチ橋⁷⁾はメラン工法で架設され、そのアーチ支間は190mであった。これはアーチ橋の複合化の始まりと言える。その鋼製トラスアーチはコンクリートアーチリブに埋め込むため、構造体としても抵抗するし、完成後撤去する必要がなくなった。

1960年代にニールセン (Nielsen, Christiani) がイギリスのウェールズでナント・ヒル橋とタフ・フェハン橋をピロン工法⁸⁾で最初に施工した。兩岸に支柱 (ピロンと呼ぶ) を立て、ケーブルを使用して斜吊りしながら張出し架設工法によりアーチ橋を完成した。ピロン柱を後方へバックステイクケーブルにより引っ張り、さらにグラウンドアンカーで定着し釣合いを保っている。橋の下の条件に左右されずに架設可能なので、アーチ支間の長大化に拍車をかけた。張出し架設には、桁橋と同じような移動作業車 (ワーゲンとも呼ぶ) を使用してセグメント施工する。

クロアチアで1980年にストジャディノビク (I. Stojadinovic) とシュラム (S. Sram) は、アーチ支間390mのカーク (Krk) 橋をトラス工法で完成⁹⁾した。このときのトラスの上弦材は架設鋼材であり、完成系の補剛桁はアーチリブ完成後PCプレキャスト部材を架設した。トラスの斜材はPCケーブルで後方のロックアンカーに定着している。トラス工法は長大アーチ橋の場合に、ピロン工法のピロン柱をなくすために開発されたと言える。また、張出し部がトラス構造となるので剛性が大きくなり、変形は小さくなる。

オーストラリアのアーチ支間183mのリップ橋と同時期に、日本では1974年に佐賀県で完成したアーチ支間170mの外津橋¹⁰⁾はトラス工法で張出し架設された。アーチリブ、斜吊り材、支柱の次に完成系の補剛桁となるPC連続中空床版橋を施工し、トラスを形成した。外津橋は2ヒンジコンクリートアーチ橋であった。

回転工法は、セントル工法のセントルを回転工法で架設していた経験より発展したと思われる。リカルド・モランディが1954年に南アフリカ共和国で完成したコンクリート

アーチ橋・ストーム川橋¹¹⁾を回転工法で架設した。両側のアーチリブを僅か施工した後、その先端部で約1/2コンクリートアーチリブを垂直に支保工で施工した後、鉛直にPCケーブルを用いて回転し閉合した。兩岸の陸上でアーチリブを鉛直に建設するので、橋下の河川などの影響を受けないが、グラウンドアンカー量は斜吊り角度からピロン工法より多くなる。中国では、1977年から1990年頃までの間に30橋以上のアーチ橋が水平回転および鉛直回転により架設されている。

ピロンメラン工法は、1978年に日本道路公団中国自動車道の帝釈橋¹²⁾に採用された工法であり、ピロン工法でアーチ支間の1/3ほど張出し架設した後、その先端間に鋼プレート桁 (メラン材) を架け渡し、アーチを連結した後、メラン材を巻き立てていく工法である。張出し架設による負の曲げモーメントを低減し、バックステイクおよびアンカーを低減した。その後、同じ路線で1983年に完成したアーチ支間204mの宇佐川橋もピロンメラン工法で施工された。2000年に完成した富山県の立山大橋¹³⁾は、アーチ支間188mでピロンメラン工法により施工したが、メラン材を直吊り一括架設して工期の短縮、架設材料の低減を図った。

トラスメラン工法は、1989年に完成した日本道路公団九州横断道のアーチ支間235mの別府明礬橋¹⁴⁾で採用された工法であり、トラス工法でアーチ支間の2/3ほど張出し架設した後、その先端間に鋼トラス桁 (メラン材) を架け渡し、アーチを連結した後、メラン材を巻き立てていく工法である。メラン材の役割は、トラス工法に比べ負の曲げモーメントの低減とバックステイクおよびアンカー量を低減し、早期のアーチ連結による構造の安定である。

仮橋脚ピロン工法は、フランスで1991年に完成したアーチ支間261mのシャトープリアン¹⁵⁾橋でCampeon Bernard社によって開発された工法であり、アーチ支間内に順次仮橋脚を建てアーチリブを支え、その上にピロン柱を立て張出し架設する工法である。バックステイクのアンカーはアーチアバット、またはすでに完成したアーチリブに定着してグラウンドアンカーを不要にした。また、ピロンによる張出し長さを小さくし、斜吊ケーブル量を少なくしている。第二東名自動車道のアーチ支間265mの富士川橋は、現在この工法で施工中である。1964年にパラガイとブラジル間のリオパラナ川に架けられたアミサデ橋¹⁶⁾は、セントル工法で施工されたが、このセントルを架設するときに仮橋脚ピロン工法を使用している。

バットレスピロン工法とは、スマトラ島と離島を連絡するバレラング5橋¹⁷⁾のうちの支間245mのアーチ橋でFreyssinet International社が開発した工法であり、2000年に完成した。取付け高架橋の橋台と橋脚をアーチの橋台とRC版で結合して、アーチ橋台後方全体をラーメン構造とすることによって、ピロン工法による主径間アーチ張出し架設時のバックステイク反力に抵抗する工法である。バットレスは永久構造物として、完成後もアーチの橋台の安定および法面として寄与している。アーチリブの張出し架設はピロン工法により施工した。

また、コンクリートアーチ橋の構造と施工法に関してプ

レキャストセグメント工法がある。その例として、1964年にオーストラリアのシドニーで完成したアーチ支間 304.8 m のグラデスビル橋¹⁸⁾がある。RCプレキャスト製のアーチリブセグメントを支保工上に並べた後、セグメント間の目地にコンクリートを詰めて、フラットジャッキによりアーチリブを浮き上がらせ支保工を撤去した。この工法は石造アーチ橋の延長と考えることができよう。

近年、スペインおよび中国で鋼・コンクリートの合成アーチ橋が建設されている。1997年に完成したりオジャ橋¹⁹⁾は4径間連続トラスアーチ橋であり、その上下弦材は鋼コンクリート合成構造で、斜材・鉛直材は鋼箱断面である。リコバヨアーチ橋²⁰⁾は、穴あき断面のアーチリブの外側は鋼版で、その中にコンクリートを充填している。その架設はトラス工法で張出し架設している。

現在、世界最長支間のコンクリートアーチ橋は1997年に完成した中国の万県長江大橋²¹⁾で、アーチ支間 420 m、有効幅員 24 m の道路橋である。アーチリブに鋼管トラスアーチを使用しコンクリートを充填した後、RC巻立てを行った複合アーチ橋である。CAPP 工法との違いは、主にプレキャスト版の使用によるアーチリブコンクリートの施工順序と支保工・型枠設備の有無、作業の安全性およびスプリング部の鋼管上下弦材の橋台への埋込み方法にある。

合成アーチ巻立て工法 (CLCA 工法) は第一著者が開発した工法で、1985年に 1/4 模型試験²²⁾によりその安全性を確認した後、1989年1月に旭橋²³⁾、²⁴⁾を完成した。続いて城址橋²⁵⁾など、日本で20橋のコンクリートアーチ橋がこの工法により完成している。この工法の施工法、構造的特徴は、メラン工法の鋼トラスアーチを鋼管充填コンクリートの合成アーチに変更し剛性を上げ、この合成アーチを両端より巻き立ててアーチリブを施工する工法で、3段階にアーチの剛性を上げながら架設する工法である。

トラスCLCA 工法は、トラス工法によりアーチ支間の一部分を張出し架設した後、その先端間に角形鋼管アーチを架設し、その鋼管内にコンクリートを充填して合成アーチ構造とする。その後、それをコンクリートで巻き立てていく工法である²⁶⁾。合成アーチ構造とすることによって鋼重量を低減した。1999年に宮崎県の青葉大橋²⁷⁾がこの工法で完成している。

合成アーチハーフプレキャスト工法 (CAPP 工法) は、CLCA 工法を改善して 200 m 以上の長大支間のコンクリートアーチ橋を対象にしており、今回提案する工法である。

以上のように、コンクリートアーチ橋の架設工法の発展によって長大支間化が図られてきた。今後の方向として、経済性・合理性を追求するには、架設材料を少なくすること、アーチリブの複合化、高強度化を一層進め、自重を軽くすることが必要と思われる。

鋼アーチ橋の世界では、アメリカのウエストバージニア州に1978年に架橋されたアーチ支間 518 m のニューリバーゴージ橋が世界最長の鋼トラスアーチ橋である。それ以前の最長支間鋼アーチ橋は、1931年にニューヨーク州に架けられたベイヨン橋で支間 503.5 m、1932年のシドニーハー

バー橋は支間 502.9 m の鋼トラスアーチ橋であった。

3. 合成アーチ巻立て工法

3.1 合成アーチ巻立て工法の特徴

CLCA 工法はコンクリートアーチリブの張出し架設工法の一つであるが、施工上の特徴は下記のようなのである。

図-2にCLCA 工法によって施工した橋のアーチリブの断面形状例を示した。その施工順序は以下ようになる。

- ① 複数の薄肉角形 (あるいは円形) 鋼管を、アーチの両アバット間に2ヒンジアーチの状態に架け渡す。
- ② 鋼管の中にコンクリートを充填し、充填形の鋼管コンクリート部材の2ヒンジアーチとする。この状態を合成アーチ構造と称する。
- ③ スプリング部に地盤から支保工を組み、アーチリブの第1セグメントを施工する。このときの構造は変断面の固定アーチである。
- ④ 両岸の第1セグメント上に移動作業車を組み立てた後、アーチリブコンクリートを巻き立て、順次クラウンに向けてセグメント施工する。
- ⑤ 移動作業車を撤去した後、アーチリブ閉合コンクリートを吊り支保工などで施工する。

CLCA 工法の構造上の特長は以下のようなのである。

- ① 鋼管アーチ→合成アーチ→RCアーチと、3段階で架設時自重の増加とともに剛性を上げながらアーチリブを完成する。
- ② 早期にアーチ構造を形成するので架設中の耐風・耐震安定性がよい。また、架設中のたわみ量が少なく施工管理が容易である。
- ③ 構造系の変化が小さいので、クリープによる断面力の移行量がじん性に優れている。

CLCA 工法の短所として、以下のことが挙げられる。

- ① 鋼管を箱形断面のウェブ部分に埋め込むためウェブ厚が大きくなり、コンクリート自重が重くなる。
- ② 図-3に示したように200 m以上の長大支間となると、鋼管にコンクリートを充填するときの面内・面外座屈に対する安全係数が小さくなり、座屈に対する補強のため鋼管板厚を厚くする必要から自重が大きくなる。

図-3はアーチリブの幅 7.5 m、スプリング部およびクラウンの高さ・スパン比は 1/40、1/55 で、スパンごとに軸力および曲げのみで決まる適切な鋼管断面を仮定し、コンクリート充填時の水平反力と安全係数 2 を考慮した座屈時の水平反力を比較した図である。

3.2 合成アーチ巻立て工法の設計思想

CLCA 工法で施工した20橋のアーチリブの設計方法は「道路橋示方書」に準拠しているため、設計荷重時 (供用時) は許容応力度法で照査し、架設時は許容値を25%増している。終局荷重時は、コンクリートの引張領域を無視した平面保持の仮定から求めたひずみにより材料の応力-ひずみ曲線を使用して応力度を求めて、鉄筋の降伏またはコンクリートが圧縮破壊していないことを照査している。その際、ウェブに埋め込まれた鋼管は設計荷重時に許容値を超えるため除外し、終局荷重時も考慮していない。試算によ

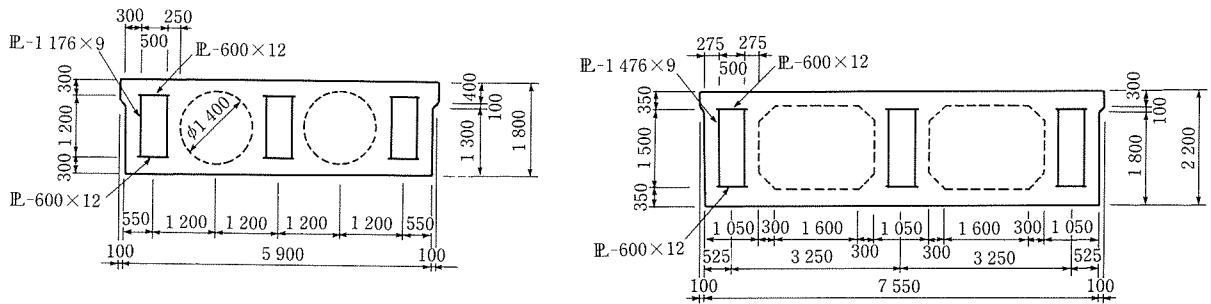


図-2 CLCA工法によるアーチリブ断面形状例

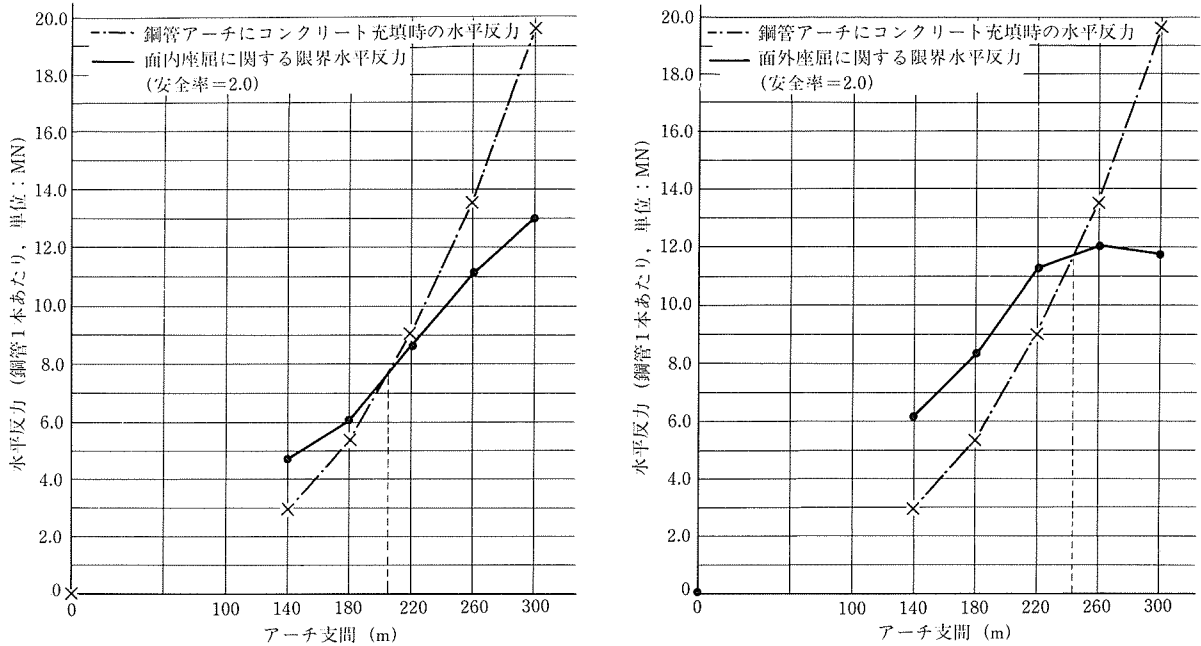


図-3 CLCA工法の経済的限界支間

れば、鋼管を考慮に入れると10数%の終局耐力の増加となる。

3.3 合成アーチ巻立て工法が採用された理由

CLCA工法で施工した20橋のうちコンクリートアーチ橋が採用された理由として一番多いのが、景観を重視したこと、周りの自然と融合するためであった。したがって、国立公園、県立公園内のように美しい自然がありそれに適合した橋を架けたい、あるいは観光地に憩いを与える場所を作りたい、またその土地のシンボルとなるような場所をしたい、などの施主側の希望があった。

次に、旧橋の幅員または支間を広げる必要があり、旧橋がコンクリートアーチ橋であったので同じ形式の橋として採用された。

また、水質の汚濁による漁業に対する悪影響を避けるため、河川中に橋脚を建てない工法であることにより採用された。山間地で比較的地盤がよいこと、コンクリートアーチ橋は耐久性があり維持費が少ないことも、採用の大きな理由となっている。

架設工法としてCLCA工法が採用された理由としては、セトルやピロン工法に比較して工事費が安い、工期が短い、河川部をまったく使用しないので水質を汚さない、ま

た早期にアーチが閉合し架設時の安定性が高い、施工管理が容易である、などであった。

3.4 合成アーチ巻立て工法により施工した橋の概要

CLCA工法により完成した橋の一覧表を表-1に示した。

No.14青葉大橋のアーチリブの施工はアーチ支間180mのうち、両アバットから61.5mは「トラス工法」により張出し施工し、中央部57mをCLCA工法により施工した。

鋼管アーチの架設方法は20橋のうち11橋は「ロアリング工法」と称し、アーチアバットの前面に1/2鋼管アーチを鉛直に組み立てた後、PC鋼材を連続的に送り出して回転下降させ、中央部で連結する工法である。2橋の鋼管アーチの架設方法は「アップリング」と称し、栈橋上などに1/2鋼管アーチを水平に組み立てた後、トラッククレーンで吊り上げて回転させる。また、5橋の鋼管アーチの架設方法は「斜吊り工法」と称し、ケーブルクレーンを使用して鋼管を運搬し、PCケーブルによって橋脚またはピロンから斜吊りしながら張出し架設し、中央で連結する方法である。

鋼管アーチ内へのコンクリートの充填は、いずれの橋もポンプ車を使用して鋼管上面に数メートル間隔であけられた投入孔より行った。コンクリートアーチリブは、両岸より2台の移動作業車を使用して数メートルのセグメント長

表-1 CLCA 工法により完成したコンクリートアーチ橋

No.	橋 梁 名	完成年月	橋 長 (m)	アーチ支間 (m)	ライズ (m)	有効幅員 (m)	アーチリブ高 (m)	鋼管アーチの架設法
1	旭 橋	1989. 1	63.7	58	14	14	1.4~1.0	ロアリング
2	城祉橋	1989.11	132	82	14.25	12	2.0	ロアリング
3	富貴畑橋	1993. 3	104	72	14	7.75	1.7	ロアリング
4	黄柳橋	1994. 1	47.4	44	11	12.75	1.0	ロアリング
5	奥名免橋	1994. 3	101.5	71	9.5	11	1.8~1.4	ケーブルクレーン, 斜吊り
6	五家荘大橋	1994.10	108	65	12	7	1.6	ロアリング
7	軽井沢橋	1994.10	108.5	75	15.5	10.5	1.8	ロアリング
8	パンナ公園橋	1995. 3	140	65.8	16.45	6.5	1.8~1.2	ロアリング
9	知原橋	1995. 3	217	94.38	22.68	9.25	2.2	アッパリング
10	石子屋橋	1996. 3	139	86	16	8.8		ロアリング
11	丹野橋	1996. 3	56	50	8.2	10	1.1	ロアリング
12	青柳大橋	1996. 8	88	76.4	14.57	12~15	2.0	ロアリング
13	新玉川温泉橋	1996.10	172	110	24	10	3.0~2.0	ケーブルクレーン, 斜吊り
14	青葉大橋	1996.12	270	180	27.5	9.75	4.0~3.0	ケーブルクレーン, 斜吊り
15	西風新都中央1号橋	1998. 7	220	110	27.5	13	2.5	支柱式支保工
16	川張橋	1999. 1	68	55	9.1	8.5	1.2	アッパリング
17	夢の橋	1999. 3	165	124	18	7	2.5~1.8	ケーブルクレーン, 斜吊り
18	日連橋	1999.12	170	100	18	12	3.0~2.0	ケーブルクレーン, 斜吊り
19	網木川大橋	2000. 8	78	70	11.5	8	1.8	ロアリング
20	下田原大橋	2001. 2	205	125	25	7.75	3.0~2.0	ロアリング

で合成アーチを巻き立て施工した。

アーチリブ上の支柱は1枚~2枚壁, 補剛桁はPCまたはRCの連続ホロスラブ橋が多かった。充填コンクリートおよびアーチリブコンクリートの強度は40 N/mm²の橋が多かったが, 青葉大橋は50 N/mm²を使用した。

4. 合成アーチハーフプレキャスト工法

4.1 合成アーチハーフプレキャスト工法の構造上の特徴

(1) 合成アーチの利用

図-4に合成アーチハーフプレキャスト工法(CAPP工法)を使用した場合のアーチリブの断面図を示した。鋼管にコンクリートを充填した後, 合成構造となる部分を鋼管トラスアーチ構造の上下弦材に2分割し, コンクリート断面積を小さくした。充填直後の座屈荷重を小さくすることができるため, 座屈安全係数が大きくなり, アーチ支間の長

大化が可能となった。

充填コンクリートが硬化すると合成構造となり, 剛性が大きくなり座屈耐力も増加する。

(2) アーチリブの5段階施工

5段階にアーチ構造の剛性を増大させながらアーチリブを完成する施工法をプレキャストPC, RC版を使用することによって合理的に可能とした。すなわち, ①2ヒンジ鋼管トラスアーチ, ②2ヒンジ合成トラスアーチ, ③固定下床版トラスアーチ, ④固定ウェブアーチ, ⑤固定RCアーチの5段階を経てアーチリブを完成させるので, 軸力が卓越し, 曲げモーメントおよび鉛直方向変位は小さいというアーチ橋の長所を5施工段階に取り入れた架設法であるといえることができる。

各施工段階でアーチ橋が完成するので, 架設中の軸力が卓越し, 曲げモーメントおよび鉛直方向変位は小さい。アー

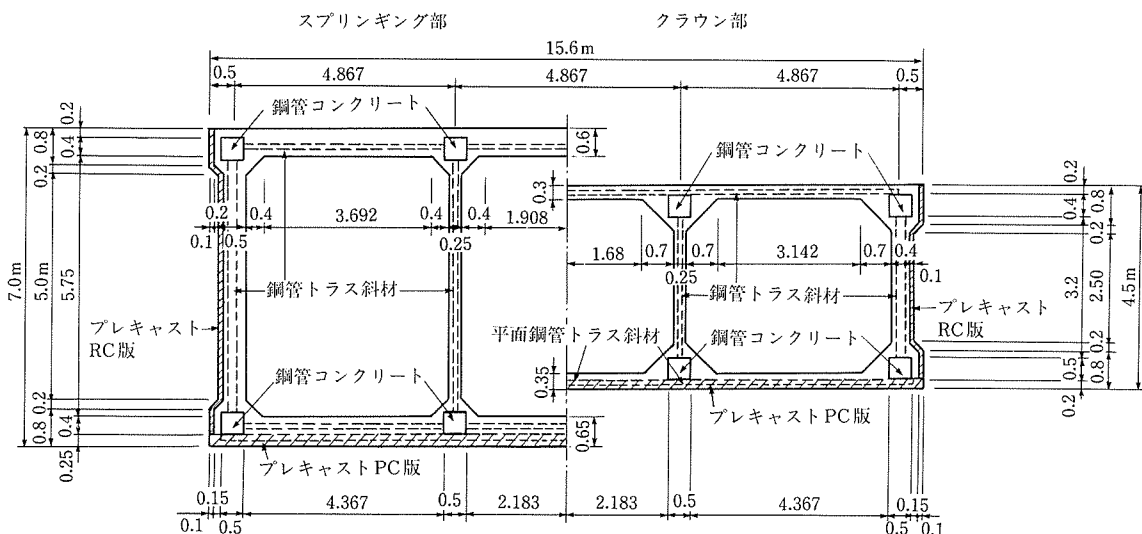


図-4 CAPP 工法によるアーチリブ断面図

チリブの使用材料を少なくし、また移動作業車を使用しないなど架設のための設備を小規模化させることが可能となった。

中国の万県長江大橋は、3室箱桁のアーチリブの中央の箱

桁を先に完成した後、両外側の箱桁を完成しており、基本的に3段階施工である。

図-5に鋼管アーチの2ヒンジ支承部の詳細図を示した。上下弦材の合成鋼管をアバットに埋め込んだ部分と端横桁

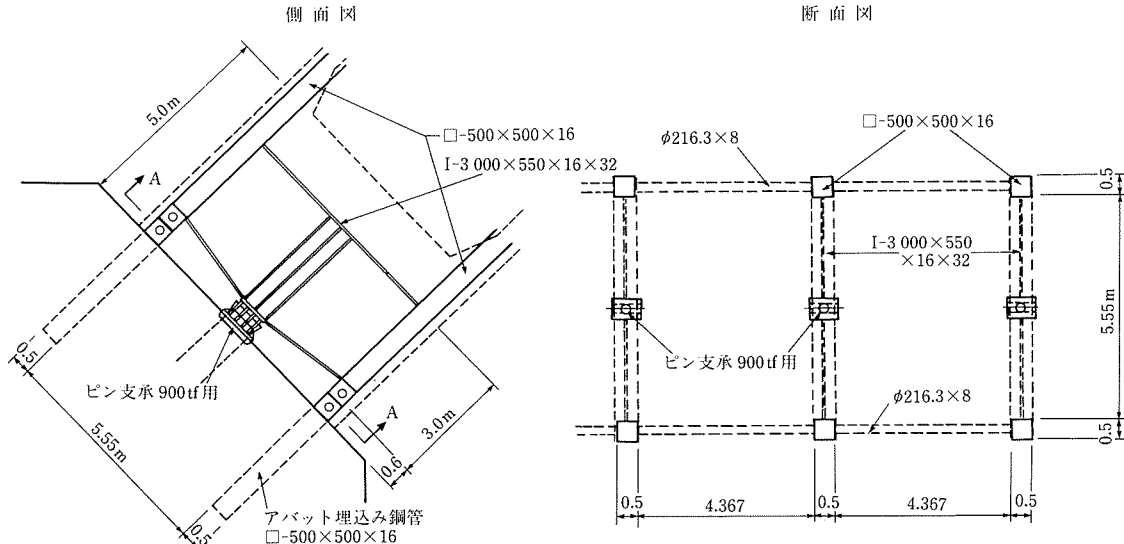


図-5 CAPP工法の鋼管トラスアーチのヒンジ支承部

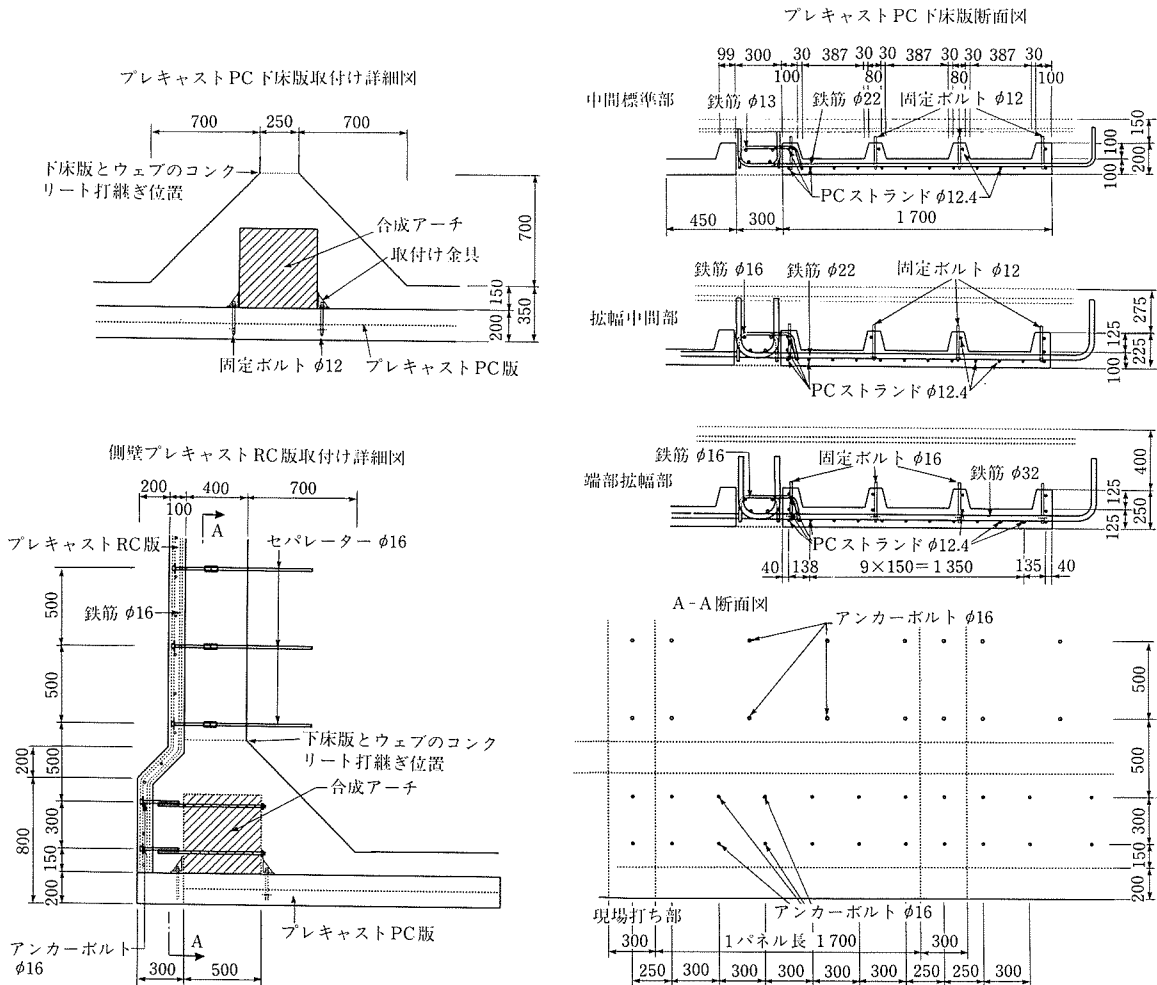


図-6 CAPP工法のプレキャストPC版・RC版

コンクリート打設前に溶接し、大きな負の曲げモーメントに抵抗させている。

図-6にプレキャストPC下床版の構造図を示した。完成系で3室箱形断面RCアーチリブの下床版コンクリートの下辺部分を構成するリブ付きPCプレキャスト版を合成トラスアーチの下弦材にボルト結合する。側面プレキャストRC版はPCプレキャスト下床版の上に載せ、合成トラスアーチの上下弦材にボルト結合する。その後、下床版鉄筋を組みコンクリートを現場打ちして下床版アーチを完成する。

(3) 高強度コンクリートおよび高流動コンクリートの活用
 アーチ支間 300 m くらいの長大コンクリートアーチ橋を設計するとき、自重を軽くするために部材厚さを薄くして断面積を小さくする。そうすると圧縮応力度が大きくなるので、 $50 \text{ N/mm}^2 \sim 60 \text{ N/mm}^2$ の高強度コンクリートをアーチリブおよびアーチリブ上の鉛直材に使用する場合が多くなる。高流動コンクリートの鋼管充填コンクリートをポンプ車を使用して、スプリング部よりクラウンに向かって数回に分割して充填すると施工性がよい。このとき締固めのためのバイブレーターは不要である。

4.2 合成アーチハーフプレキャスト工法の施工上の特徴

(1) CAPP工法の施工順序

CAPP工法の施工順序を図-7に示した。施工順序は通常、

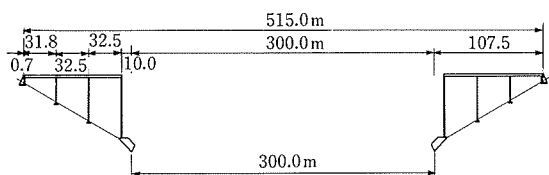
- ① アーチアバットおよび取付け高架橋の施工
- ② 鋼管アーチの架設
- ③ 上下弦材鋼管内に高流動コンクリートをポンプ圧送
- ④ 下床版アーチの施工
- ⑤ ウェブアーチの施工
- ⑥ 上床版アーチの施工、アーチリブの完成
- ⑦ アーチリブ上の支柱の施工
- ⑧ 補剛桁、橋面工の施工

となる。

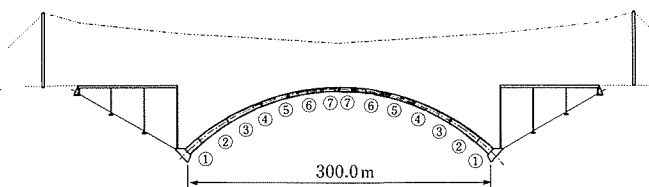
鋼管アーチの架設は、ケーブルクレーンを使用して行う場合、兩岸より橋軸方向長さ数メートルの多主構立体鋼管トラスアーチ部材をブロック架設して、橋脚およびピロン柱より斜吊りしながら張出し架設を繰り返す、中央で閉合する。

充填コンクリートは合成断面の剛性の増大効果をより活用するために、また1日の打設量から数回に分割して充填するのがよい。アーチの角折れの不安はないことが試設計を行った結果示された。

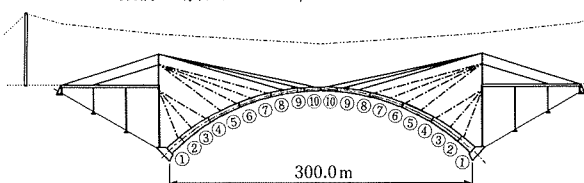
施工段階1：アーチ橋台、取付け高架橋の施工



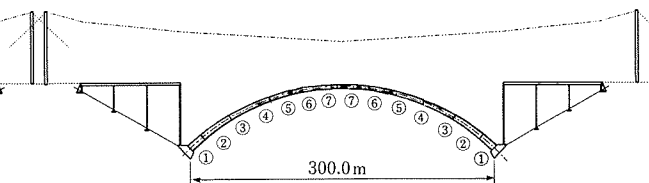
施工段階5：ウェブアーチの施工(番号順に7回コンクリート打設する)



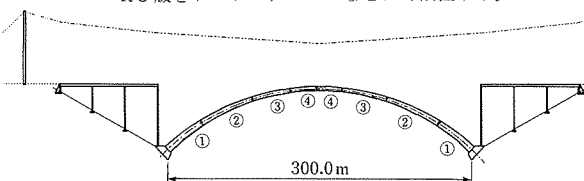
施工段階2：鋼管トラスアーチの架設(ケーブルクレーンにより運搬・架設し、PC鋼材により斜吊り張出し架設する。海上橋の場合はフローティングクレーンにより一括架設する)



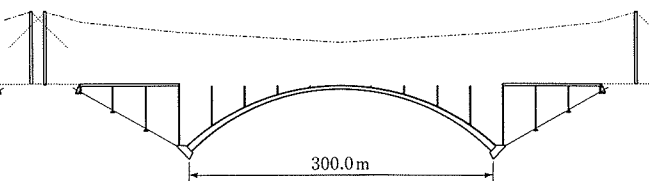
施工段階6：アーチリブの上床版コンクリートの施工(番号順に7回コンクリート打設する)



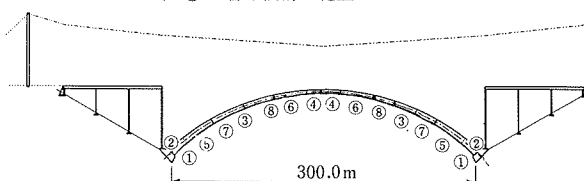
施工段階3：鋼管トラスアーチの上下弦材に高流動コンクリートを4回注入する。下床版PCプレキャスト版および側壁RC版をケーブルクレーンなどにて設置する。



施工段階7：アーチリブの中間横桁の施工後、支柱を施工する。



施工段階4：下床版アーチの施工(番号順に8回コンクリート打設する)、②は端部横桁の施工



施工段階8：上路鋼補剛桁の架設、PCプレキャスト床版の架設および橋面工の施工

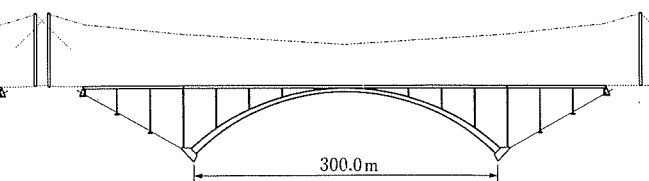


図-7 CAPP工法によるコンクリートアーチ橋の施工順序図

5.1で検討しているように、スプリング部付近の下床版コンクリート1を施工した後、端横桁コンクリートを打込み固定アーチ構造とする。ウェブアーチの施工範囲はウェブの鉛直部分のみとし、移動式の内型枠を使用する。上床版アーチの施工範囲はハンチ部分と上床版であり、移動式の内型枠を使用する。

(2) 移動作業車の不使用

従来、アーチリブを張出し施工する場合には、移動作業車を使用して両岸のスプリング部からクラウンに向かって、箱桁断面全体を数メートルの長さのセグメント施工を行っていた。CAPP工法ではプレキャストPC、RC版を使用するため、外型枠は不要となるので移動作業車を使用しなくても施工可能となる。したがって、大型移動作業車による大きな架設時断面力・変位はなくなり、また作業が単純化されるので、工期の短縮にも寄与する。

(3) 作業足場の不使用

下床版プレキャストPC版および側面プレキャストRC版の据付けは、2条のケーブルクレーンを用いてスプリング部よりクラウンに向かって1枚ずつ運搬・取付けを行う。したがって、局所的な作業足場が必要となるのみである。プレキャストPC版は上面に高さ10cmのリブが50cm間隔で付いており、踏み版となり急斜面での歩行および作業が容易となる。

(4) 工事中の安全の向上

従来のコンクリートアーチ橋の施工のような不安全作業の多い工事の改善は急務である。CAPP工法はアーチリブ施工時に底面および側面がプレキャストPC、RC版に囲まれており、落橋の心配がまったくないので、工事中の安全は

向上すると考えられる。

5. 合成アーチハーフプレキャスト工法の施工法および構造検討

5.1 施工順序の検討

試設計橋について各施工段階の施工順序の比較検討を行い考察する。試設計橋は、一般図を図-8に示したようにアーチ支間300m、ライズ60m、有効幅員16.5mのB活荷重道路橋である。

(1) 鋼管充填コンクリートの施工段階数の比較検討

鋼管トラスアーチの上下弦材(□500×16mm)に高流動コンクリートを左右対称にスプリング部からクラウンに向かって注入するとき、3区間に施工(ケース1)する場合と4区間に施工(ケース2)する場合とを比較検討した。クラウンにおける鉛直変位はケース2は71mmであり、ケース1の83%と小さくなった。打継目での角折れは目視できないほど小さい。

上弦材上縁の鋼管応力度は、ケース2の方が架設途中でクリティカルになるクラウン付近で小さくなり、また1/4点付近を除いて全体的に小さくなったので、細かく分割した4区間施工を採用した。

(2) PC・RCプレキャスト版の設置時期

PC・RCプレキャスト版の設置は充填コンクリート硬化後ケーブルクレーンなどを使用して行う。この理由は、下床版コンクリートを現場打ちするときに、移動作業車や型枠を不要とするためである。また、下床版コンクリートの打設順序を分散することができるためである。合成トラスアーチの断面力・変位は多少大きくなり不利となる。

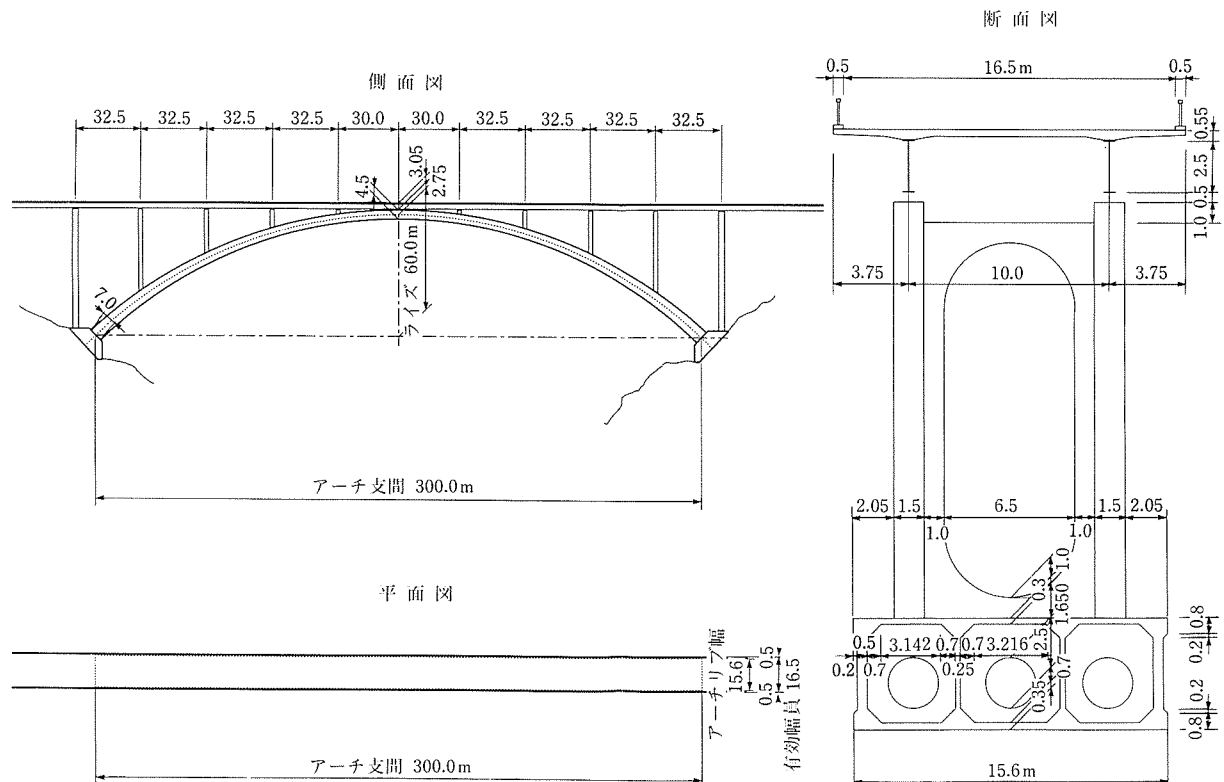


図-8 CAPP工法による試設計橋の一般図

(3) 端横桁コンクリートの打設時期

端横桁コンクリートの施工時期を下床版コンクリート1 (スプリング部付近) の次にした。この理由は、鋼管トラスアーチのピン支承と厚さ65 cmの下床版コンクリートの剛結合部との2カ所による支点拘束状態で下床版コンクリートの打設を続けていくと、下床版コンクリート1の圧縮応力度が過大となるためである。

端横桁コンクリートの打設時期を充填コンクリート硬化直後にすると、鋼管トラスアーチのピン支承を1/2程度に小さくできる。しかし、端横桁上縁の引張応力度が大きくなり、多量の鉄筋量を必要とするため、上記のような施工順序とした。

(4) 下床版コンクリートの打設順序

下床版コンクリートの打設順序を飛び飛びに打つ分離案 (ケース1) と、スプリング部よりクラウンに向かって順番に打設する連続案 (ケース2) とを、線材アーチ構造で比較検討した。

クラウンでの鉛直変位は分離案の方が151 mmと1.34倍大きい。鋼管上縁応力度は架設途中でクリティカルとなるクラウン付近で分離案は79.8 N/mm²となり0.87倍であり、スプリング部付近は59.1 N/mm²となり1.03倍で同程度であった。分離案は、乾燥収縮の影響を少なくすることができることも考慮し採用した。

(5) ウェブコンクリートの打設順序

ウェブコンクリートの打設順序を分離案 (ケース1) とス

プリング部よりクラウンに向かって順番に打設する連続案 (ケース2) とをトラスアーチ構造で比較検討した。その結果、クラウンでの鉛直変位は連続案が+38.5 mm、分離案が-37.2 mmとなり、鋼管上縁および下床版下縁のコンクリート応力度は連続案が小さくなり、連続案を採用した。

また、比較検討によりアーチ端部の負の曲げモーメントの低減に、上床版アーチを最後に完成することおよび端部横桁コンクリートを下床版コンクリート1の後に打ち込むという施工順序が、大きく寄与していることが示された。

5.2 微小変形解析と幾何学的非線形解析の比較検討

微小変形解析 (ケース1) と幾何学的非線形解析 (ケース2) の差が顕著に現れるのは、剛度が最小の2ヒンジ鋼管トラスアーチ構造に鋼管自重と充填コンクリート1を載荷した施工段階である。両者の検討結果を表-2に示した。そのときの最大変位を生じる1/8点付近の値は、ケース1が-43.14 mm、ケース2が-43.88 mmとなり、その差は1.7%

表-2 微小変形と幾何学的非線形解析の比較

変位 (mm)	位置	① 微小変形	② 非線形	②/①
		1/8 最大位置	-43.14	-43.88
クラウン		5.72	6.91	1.21
	1/8 最大			
応力度 (N/mm ²)	上弦材上縁	41.40	44.32	1.071
		6.19	4.05	0.654
	下弦材下縁	14.55	14.82	0.934
		28.72	28.53	0.965

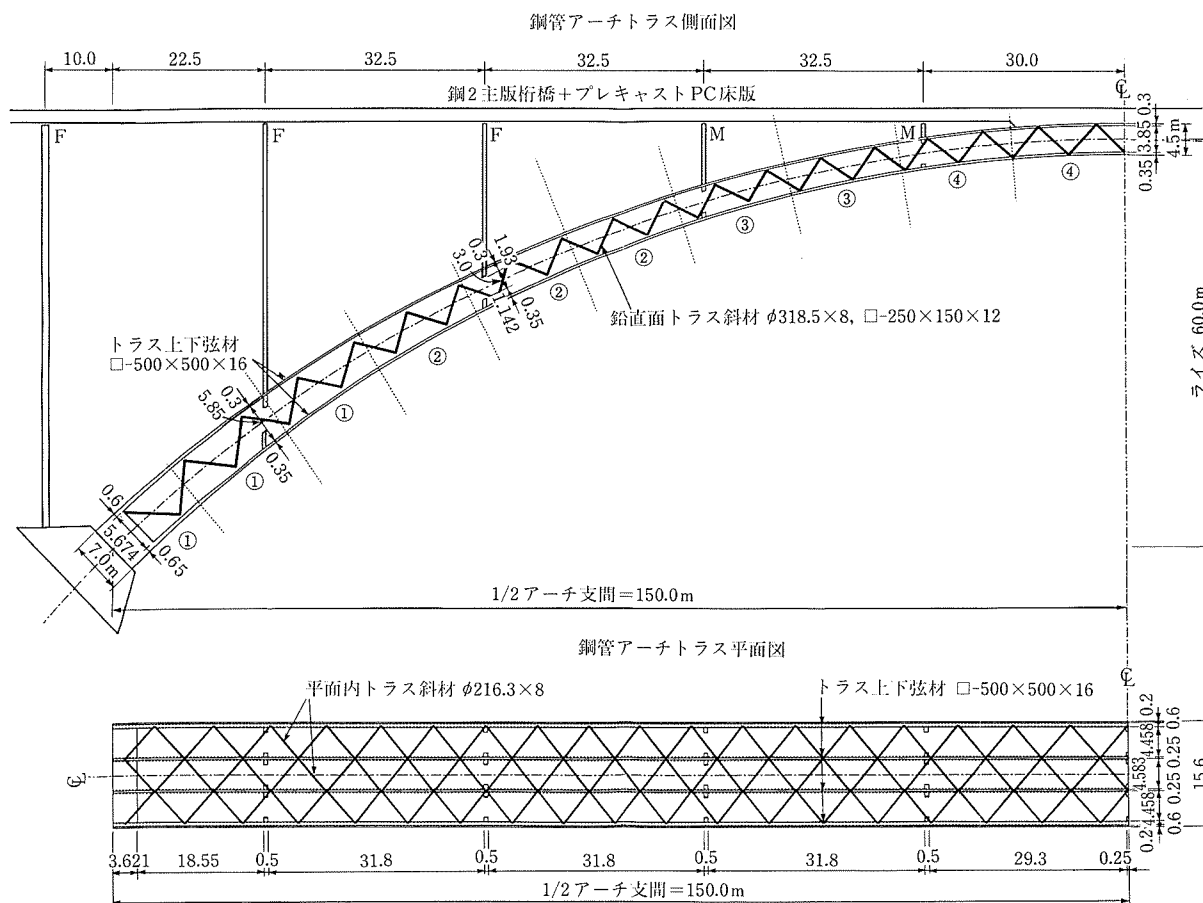


図-9 CAPP 工法による鋼管トラスアーチの構造図

である。支間中央位置の値は、ケース1が5.72 mm、ケース2が6.91 mmとなり、その差は21%となる。最大応力度を生ずる1/8点付近でケース2が約7%大きくなり、また下弦材下縁では65%の差となったが、絶対値の差は2 N/mm²であり、鋼管の降伏強度240 N/mm²と比較すると0.8%となり、その差は小さいと考えられる。軸力が卓越したアーチ構造の特徴を示した。以後の架設時、供用時の設計検討は微小変形によることとした。

5.3 鋼管トラスアーチの座屈解析

図-9に鋼管トラスアーチの配置図を示した。8個のヒンジ支承をもつ4主構の鋼管トラスアーチの3次元幾何学的非線形座屈解析を行った。その結果、1次モードは面内非対称モードで座屈荷重は自重の15.02倍の34.76 kN/mであった。

充填コンクリートを全アーチ支間の鋼管に一度に注入した場合、(34.76/7.36=) 4.72倍の安全係数となった。

2次元幾何学的非線形解析プログラムを使用した座屈荷重154.8 kN/mと実施工の充填コンクリート時の荷重29.4 kN/mと比較すると、座屈に対する安全係数は5.26倍となった。

また、2ヒンジ鋼トラスアーチを3次元線形座屈解析した。充填コンクリートを一度に充填したとき、座屈安全係数は表-3に示すように5.39で、座屈は面内非対称モードで中間主構面の支間1/4点の下弦材に生じる。非線形座屈解析した場合と比較して座屈安全係数は14%以上危険側となり、この規模の橋の座屈検討に対しては幾何学的非線形解析の必要性を示した。

表-3 鋼管トラスアーチの3次元弾性座屈解析結果

	1次モード	2次モード	3次モード	4次モード
座屈荷重 (kN/m)	39.66	(66.84)	(84.34)	(86.04)
座屈モード	面内非対称1次	面外対称1次	面内対称2次	面内1/8下弦材局部座屈
固有周期 (s)	9.54	7.35	6.54	6.47
座屈安全係数	5.39	(9.08)	(11.46)	(11.69)

6. 試設計の結果と考察

6.1 施工段階ごとの鉛直変位

アーチ支間300 mをもつ試設計橋の施工段階ごとのクラウンと1/4点における鉛直変位を表-4に示した。クラウンにおける供用時鉛直変位はアーチ支間の1/176と極めて小さい。

表-4 施工段階ごとの鉛直変位
(単位: mm)

荷重	クラウン	支間1/4点
充填コンクリート	-71	-56
下床版コンクリート	-151	-64
ウェブコンクリート	39	-37
上床版コンクリート	-30	-12
中間横桁・支柱	8	-9
補剛桁・橋面工	-36	-9
B活荷重最大値	-14	-18
供用時	-255	-205

6.2 供用時応力度

(1) 鋼管応力度

最もクリティカルとなる鋼管応力度は、上床版コンクリート打込み直前にスプリング部上弦材下縁で186 N/mm²となったが、冷間成形角形鋼管STKC490を使用するので、その架設時許容値204 N/mm²を満足する。

(2) アーチリブRC断面応力度

各架設段階および供用時の断面力に応じたアーチリブRC断面計算を行った。その結果、いずれも架設時に比べ供用時の応力度の方が大きかった。コンクリートの圧縮応力度がアーチ支間の1/8付近の下縁で供用時17.5 N/mm²と高い値となったが、設計基準強度60 N/mm²のコンクリートを使用するので安全である。このとき、温度変化と乾燥収縮量は考慮しているが、アーチアバットの移動は考慮していない。

アーチリブ断面内で分割施工しているので打継目位置においてクリープによりせん断力が生じるが、その値はアーチ構造の特徴で桁構造に比べ2桁のオーダーで小さい。

6.3 供用時ひび割れ幅

上床版コンクリートを打設し、総断面アーチとなった以降の荷重によるひび割れ幅の計算を土木学会「コンクリート標準示方書」(平成8年制定)の式に従って行った。供用時最大ひび割れ幅はスプリング部上縁で0.134 mmであり、許容値の0.2 mm以下となった。

6.4 終局荷重時の検討

終局荷重は「道路橋示方書」に従い、3ケースの死荷重と活荷重の組合せによる断面力を計算した。各断面の最大断面力を用いて破壊安全度の検討を行った。このとき鋼管アーチの上下フランジは鉄筋換算して抵抗部材に算入した。

最大コンクリート応力度はスプリング部下縁で35.01 N/mm²となり、設計基準強度60 N/mm²のコンクリートを使用するので終局荷重時の許容値46.1 N/mm²以下となる。そのときの圧縮鉄筋応力度は248 N/mm²となり、SD345の鉄筋を使用するので終局荷重状態で降伏に達していない。

6.5 試設計橋のその他の考察

支柱および上部補剛桁を含めた完成系の3次元弾性固有値解析を行い、「道路橋示方書V耐震設計編」に従い、震度法により耐震設計するときの水平震度を計算した。その結果を表-5に示した。I種地盤に対する設計水平震度の標準値を用いた。0.2の水平震度を用いて震度法による静的耐震設計を行い、橋軸および橋軸直角方向の鉄筋配置を行った。

表-5の結果を表-3の2ヒンジ鋼管トラスアーチと1次モードを比較すると、面内非対称が完成系では面外対称モードとなった。完成系でのアーチリブの座屈に対する照査をDIN1075(1981.4)に従って行った。曲げモーメントを考慮した面内座屈の安全係数はほぼ2.5であった。面外座

表-5 固有値解析と標準加速度応答スペクトル

	固有周期 (s)	モード	水平震度の標準値
1	3.67	面外対称1次	0.095<0.1
2	2.18	面内対称1次	0.13
3	2.03	面内非対称2次	0.14
4	1.59	面外非対称2次	0.16

表-6 試設計橋のアーチリブ材料表

種別	品質・規格	数量	摘要	単位あたり数量	T橋の単位数量
コンクリート	60 N/mm ²	6 136 m ³	プレキャスト版を含む	1.243 m ³ /m ²	1.989 (アーチリブ: 5 300 m ³)
鉄筋	SD 345	695.2 t		0.1133 t/m ³	2.54 (アーチリブ: 1 320 t)
PC鋼材	T 12.4 150/175	14.02 t	プレキャスト下床版	0.00228 t/m ³	0.494 (張出し架設用)
鋼管	□500×16, ○318.5×8 ○216.3×8, STKC 490	755.2 t		0.1231 t/m ³	1.034 (メラン鋼材+水平鋼材: 559.1 t)
支承	FC 250, ピン支承, 8個	14.12 t		0.00230 t/m ³	0

屈に対してアーチを水平柱に置換した方法で計算すると安全係数は55となり、十分安全であった。

試設計橋のアーチリブの使用材料を表-6に示した。単位あたりのコンクリート数量は有効橋面積あたりの値であり、そのほかはコンクリート容積あたりの数量である。鉄筋およびコンクリートともにアーチ支間300mの橋の数量としては少ない。数量の参考例としてアーチ支間260m、ライズ32.5m、有効幅員7.75mのコンクリートアーチ橋・T道路橋²⁸⁾の場合を示した。T橋はトラスメラン工法によって架設された。

7. 結 論

- ① コンクリートアーチ橋の施工法の発展をとくに近世以降についてその関連を考慮して概観した。アーチ支間の長大化に対して材料・設計法のほかに、架設工法の発展が寄与している。アーチ橋の架設工法は、世界各地で相互に影響・刺激を与えながら徐々に、着実に発展していると思われる。中でも、屈耐力・剛性の増大を意図した複合化による意義は大きい。
- ② CLCA工法は国内で普及したが、アーチ支間が200mを超えると自重が重くなり、コンクリート充填時に鋼管の座屈に対する安全係数も小さくなっていく。
- ③ 200m以上の長大コンクリートアーチ橋に対してCAPP工法を提案した。本工法はコンクリートアーチ橋を5段階にアーチの剛性を複合化により順次上げながら完成する工法で、曲げよりも軸力が卓越し変形も軸方向変形が主となるアーチの特長を全施工段階で取り入れている。
- ④ CAPP工法を使用した試設計により、支間300mのアーチ橋を総足場施工で一度に完成できると仮定した場合のアーチリブ断面形状に近い形状で設計可能であることを示すことができた。高強度コンクリートの使用、移動作業車の不要およびアーチリブコンクリート自重を大きく低減できたことは、その他の使用材料が少ないことと併せて、さらにアーチ支間が大きい橋に対してCAPP工法は有利であると思われる。

参 考 文 献

- 1) 河村：コンクリートアーチ橋の現状と展開，土木技術，Vol.55, No.11, pp.69~74, 2000.11
- 2) Kawamura, Ikeda：Evaluation and New Design Proposal for Concrete Arch Bridges with Filled and Wrapped Steel Tubes, Arch'01, Ponts et Chaussées, Paris, pp.907~916, Sep. 2001
- 3) C.-W. Hu, D.-L. Hu, S.-L. Liu, W. Zhou：The Longest Span Stone Arch Bridge in the World, Arch'01, Paris, pp.667~671, Sep. 2001
- 4) Heinrich, 宮本・小林(訳)：橋の文化史，桁からアーチへ，鹿島出版会，pp.152~187, 1991.6

- 5) J.A.Fernandes Ordonez, 池田尚治(監訳)：PC構造の原点フレッシュナー，建設図書，pp.132~140, 2000.5
- 6) Bert Heinrich, 宮本・小林(訳)：橋の文化史，桁からアーチへ，鹿島出版会，pp.274~275, 1991.6
- 7) M. Virlogeux, J. Mathivat, C. Lavigne, A. Leveille：Design and Construction of the Arch Bridge at La Roche Bernard, FIP Symposium London, pp.102~111, 1996
- 8) H.C. Peiretti：General Philosophy of Concrete Structures, fib 99 Prace, pp.253~263, 1999
- 9) 河村：世界最長支間のコンクリートアーチ橋，橋梁と基礎，Vol.25, No.8, pp.144~148, 1991.8
- 10) 崎，五十嵐：外津橋の設計・施工，橋梁と基礎，Vol.7, No.7, pp.8~14, 1974.7, Vol.7, No.8, pp.20~27, 1974.8
- 11) M. Latimer：Garden Route Bridges, South Africa, FIP Notes, pp.16~19, Mar.1997
- 12) 渡部，西田，三谷，荒船：中国道 帝釈橋の設計・施工(上)(下)，橋梁と基礎，Vol.11, No.3, pp.7~13, 1978.3, Vol.11, No.4, pp.7~11, 1978.4
- 13) 上坂，渡辺，川口：立山大橋の設計と施工，橋梁と都市，Vol.35, No.10, pp.10~16, 1999.10
- 14) 伊藤，一瀬：大分自動車道別府橋の計画と設計，同施工，橋梁と基礎，Vol.20, No.9, pp.23~30, 1987.9, Vol.21, No.6, pp.2~10, 1988.6
- 15) J.Mathivat, M.Virlogeux, H.Herman, C.Lavigne：The Arched Bridge over the Ranceriver, FIP CONGRESS La TECHNIQUE FRANCAIS, 1990
- 16) Wolfgang L. O. Stellmann：Brücke über den Rio Parana in Foz do Iguacu. Brasilien, Beton-und Stahlbetonbau, Heft 6, Jun.1966
- 17) Y. Gauthrr, J.P.Marquet, P.Mellier, R. Asma：Barelang5 Arch Bridge-Indonesia, The French Technology of Concrete, FIP 98 Congress
- 18) 2nd October 1964 Opening of Concrete Road Bridge 1000 FT. Arch Span over Parramatta River：Department of Main Roads New South Wales Australia
- 19) Composite-Truss Brodge over the River Ebro at San Vicente De La Sonsierra (La Rioja), Prestressed Concrete Structures in Spain 1994-1997, X IIIth FIP Congress & Exhibition Amsterdam 1998
- 20) Prestressing in the Ricobayo Arch Bridge, Prestressed Concrete Structures in Spain 1994-1997, X IIIth FIP Congress & Exhibition Amsterdam 1998
- 21) G. Yan, Z-H Yang：Wanxian Yangtze Bridge, China, Structural Engineering International, pp.164~166, Mar.1997
- 22) 大浦，加藤，田辺，島田：コンクリートアーチ橋架設用アーチ支保工への鋼管コンクリート構造の適用に関する実験的研究，コンクリート工学，Vol.22, No.12, pp.101~111, 1984.12
- 23) 川上，高橋，大浦，水城：合成アーチ巻立て工法によるコンクリートアーチ橋の施工と実証試験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11, No.1, pp.745~750, 1989
- 24) Kawamura, Fujimoto：Wrapping an Arch in Concrete, Concrete International, ACI, pp.26~31, Nov. 1990
- 25) 山本，佐川，小林，遠山：合成アーチ巻立て工法による城址橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.22, No.11, pp.1~9, 1989.1
- 26) Ikeda, Kawamura, Wada：Concrete Arch Bridges Using Composite Techniques, Composite Construction in Steel and Concrete II, ASCE, pp.592~607, Jun.1992
- 27) 大田原，若松，坂田，秋月：青葉大橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.29, No.7, pp.2~9, 1996.7
- 28) 松井ほか：高松大橋(仮称)の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.33, No.1, pp.7~14, 1999.1

【2002年2月16日受付】