

鋼管コンクリート構造を架設用支保工に適用した コンクリートアーチ橋の施工と施工時実橋試験 —合成アーチ巻立て工法—

CONSTRUCTION AND PERFORMANCE TEST OF CONCRETE ARCH BRIDGE APPLIED THE STEEL TUBE FILLED CONCRETE

大浦 隆* 加藤 雅史** 佐藤 靖***
By Takashi OHURA, Masafumi KATO and Yasushi SATO

Joushi Bridge are constructed by new construction method which is named "CLCA Method" (Concrete Lapping method with pre-erected Composite Arch). This is one method to construct the concrete arch rib using rectangular steel tube in which the concrete is filled, as the embedded type of arch centre. Using this construction method it can be possible to reduce the steel material because of high strength against axial force compared with Arch Centre Method and Melan Arch Method. Firstly we report about the design and construction of this method, secondly we inform a performanse test excuted during the arch rib construction.

1. はじめに

コンクリートアーチ橋は完成系構造が合理的であるばかりでなく、景観にも優れた構造である。したがって、その歴史も古く、架設法も種々提案されている。支間150m以上の長大コンクリートアーチ橋は、プレストレストコンクリート技術を応用した斜吊り工法などで、ある程度その工法が確立してきているようである。しかし接地式支保工を設置できない、支間50m～100m程度の中規模アーチ橋は依然としてセントル工法が主流となっており、経済性、施工性などの面で橋梁計画の障害となっている。

標記工法は、これらの障害を取り払い、かつ150m程度まで有効な施工法として開発されたもので、アーチリブの施工に際し架設用アーチ支保工に鋼管コンクリート構造を適用した新しい施工法（合成アーチ巻立て工法：CLCA工法）である。

* 工修 ピー・エス・コンクリート（株）第1技術部（〒100 東京都千代田区丸の内3-4-1）

** 工博 名古屋大学講師 工学部土木工学科（〒464-01 名古屋市千種区不老町）

*** 新潟県新発田土木事務所 維持管理課（〒957 新潟県新発田市豊町3-3-2）

筆者らは、文献2)においてこの新工法を実橋に適用する際の問題点を実験的に検討し、その適用の可能性を示唆した。今回、新潟県佐渡島において、本工法によりアーチスパン8.2mの城址橋が施工され、また各施工段階ごとに変位、応力等の計測を行った。これにより模型実験等より得られた架設時の一連の設計法を検証し、本架設工法の安全性、施工性の確認を行った。

本文では、まず合成アーチ巻立て工法の設計・施工法の概要を述べ、つぎに試験概要および試験結果等について報告する。

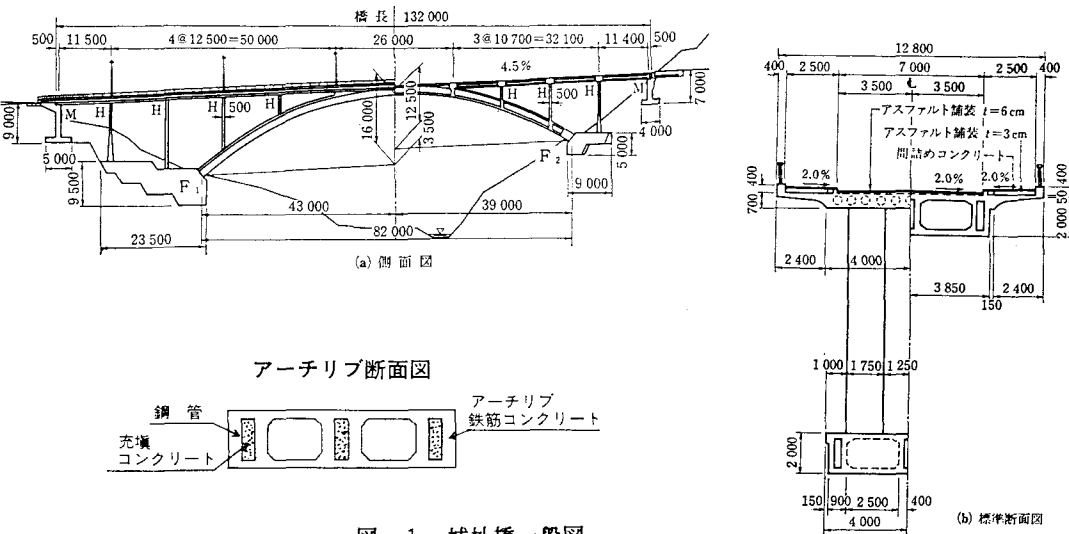


図-1 城址橋一般図

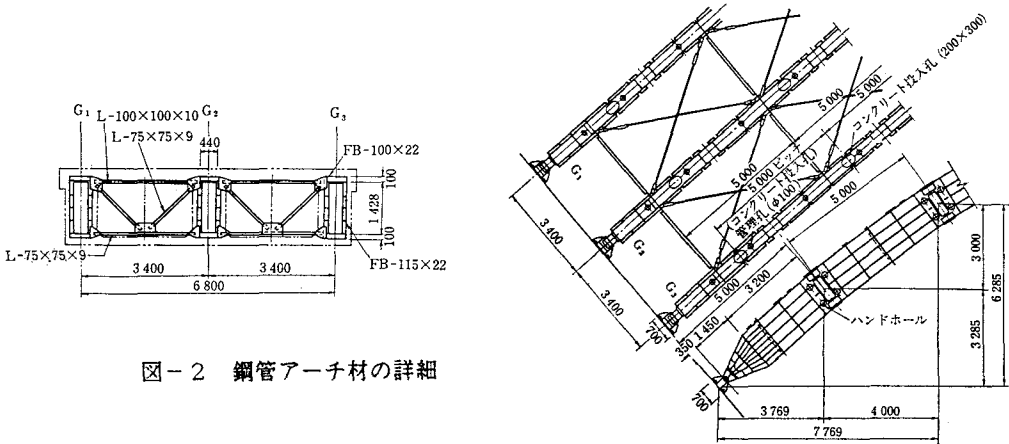


図-2 鋼管アーチ材の詳細

2. 合成アーチ巻立て工法

本工法は合成柱の構造理論をコンクリートアーチ橋の構築方法に応用した施工法である。すなわち薄肉角形鋼管をアーチリブ軸線に架け渡した後、鋼管内にコンクリートを充填し、より剛性の高い鋼とコンクリートの合成構造とし、これを支保工として特殊移動作業車によりアーチリブコンクリートを順次巻立てていく

ものである。鋼管コンクリート構造の軸方向力に秀れた性質が生かされ、セントル工法やメラン工法に比較して鋼材量を大幅に減少できることが最大の特徴である。その他、次のような利点を有している。

- 1) 施工の初期の段階で鋼管を閉合するため、耐震、耐風安定性に優れ、さらにコンクリートが充填された合成アーチは、強固な構造となるので、アーチリブの施工は、極めて安全性の高いものとなる。
- 2) 鋼アーチ→合成アーチ→RCアーチと段階的な施工法であるが、トラス工法、ピロン工法などのカンチレバー工法のように、大きく構造系が変化することがないため、設計、施工管理が容易である。
- 3) アーチリブ施工用のワーゲンが、前方でも支持できることから、軽量化でき、またブロック長を大きく取れることから工期の短縮を図ることができる。
- 4) 合成アーチはSRC部材として有効に働き、靱性に優れ最終耐力が向上する。

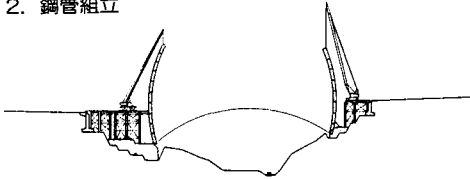
3. 施 工

概略施工順序図を図-3に示す。以下、施工順序にしたがって簡単に説明する。

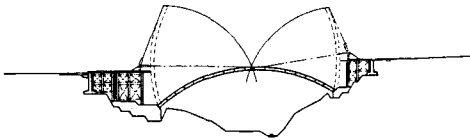
1. 橋台設置



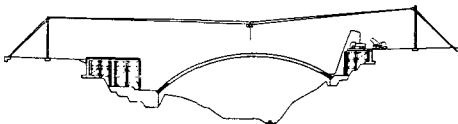
2. 鋼管組立



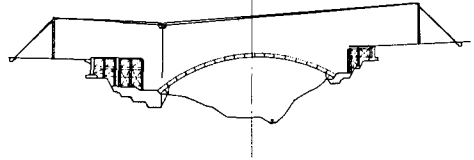
3. 鋼管回転接合



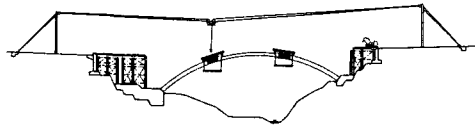
4. 充填コンクリート打設



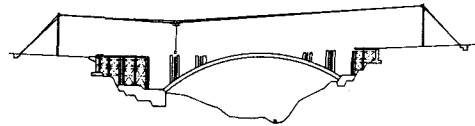
5. スプリング部支保工施工



6. ワーゲン組立、施工



7. 鉛直材施工



8. 上床版施工

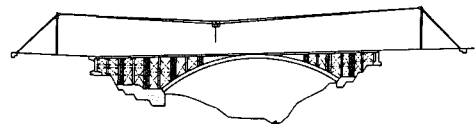


図-3 概略施工順序図

3-1 鋼管アーチ材の架設

鋼管アーチ材の架設は、規模が大きい場合は斜吊り工法が一般的と考えられるが、城址橋のような中規模アーチでは、ロアリング工法が工期の短縮、安全性の面から有利となる。ロアリング工法とは写真-1に見られるように、両岸に鉛直に組立てられた鋼管をロアリング装置を用いて徐々に回転降下させ、アーチ形状にするものである。城址橋では緊張装置としてセンターホールジャッキ、送り出し材としてPCストランドを使用している。なお、支承は回転査であり、この据え付け精度が閉合精度に大きな影響を与える。



写真-1 ロアリング状況

3-2 充てんコンクリートの施工

鋼管へのコンクリート充てんは、鋼管の上面に約5mピッチで設けられた充てん孔より行い、左右のスプリングよりほぼ同じ速度で打上げられる。打上がり速度は、施工性と鋼管へ作用するコンクリートの側圧より決定される。

コンクリート打設はケーブルクレーンを使用したバケットによる打設やポンプ車による打設があり、打設量により経済性や施工性を考慮して選択される。城址橋では、3主構のうち2主構分100m³を時間当たり8～9m³で打設するためポンプ車を使用している。充てんの確認は鋼管上面のコンクリート管理孔で行い、充てんを確認後、順次ふたを閉じていく。締固めは棒状バイブレータで行い、スランプは12cm程度あれば充てん性が良い。

クラウン部付近の水平部分はブリージングによる空隙が予想され、鋼とコンクリートの一体性が損なわれる可能性がある。これに対しては、その部分にジベル等のズレ止めを設ける方法やグラウトを注入する方法等がある。城址橋では、計画当初グラウト注入を予定していたが、硬化後の充てん確認では注入するほどの空隙は認められず、鋼管の局部座屈や合成効果に及ぼす影響は無視できると判断し、グラウトは行っていない。

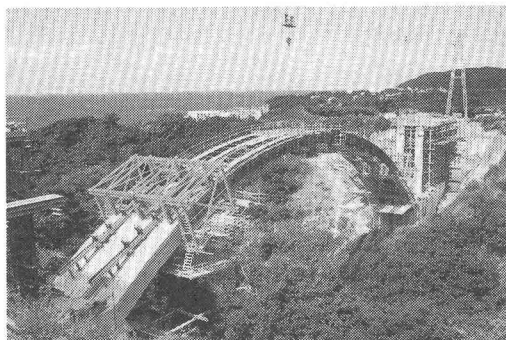
コンクリートの養生は、密閉構造ゆえに水分の逸脱がなく、また雨や風に対する対策も必要なく、条件としては良好である。ただし、通常は特別な養生は必要ないと考えられるが、厳寒期や夏季の直射日光が強い場合は、温度管理上何等かの対策が必要である。城址橋では、真夏の施工であるため、この対策として鋼管アーチ材上面に散水パイプを配管している。

3-3 巻立てコンクリートの施工

初めに、スプリング部の約5mを接地式支保工により打設する。これにより、アーチアバットと合成アーチが剛結され固定アーチとなる。またこの部分に、移動作業車が設置可能となりPC橋の張出し施工のように以後のコンクリートブロックの打設が行われる。しかしながら、部材が傾斜しているため、型枠・鉄筋配置・作業車の移動が煩雑で、またコンクリート打設時に型枠に作用する水平力に対する処置等、桁橋の張出し施工にはない問題もある。

移動作業車は合成アーチ上で前方が支持できるため、ブロック長が大きくとれ、工期短縮に有利である。

コンクリート打設は両アバットからクラウンに向けて左右同時あるいは交互に行われる。一般に、応力的には同時施工が良いが、養生期間中も作業の休止のない交互打設が有利である。コンクリートは工程短縮のため早強セメントが良く、また大きな圧縮力に抵抗するため高強度のものが有利である。城址橋では $\sigma_{ck}=400\text{ kg/cm}^2$ のコンクリートを使用している。



写真－２ 巻立てコンクリート打設

４．設計方法

コンクリートアーチ橋の完成時の設計は、従来のものと変わらないので、ここではアーチリブ架設時の設計について述べる。

４－１ 充てんコンクリート打設時

鋼管の設計は道示Ⅱ（鋼橋編）により鋼部材として計算する。構造系は２ヒンジアーチで、考慮する荷重は①鋼管及び充てんコンクリート重量、②温度変化、③作業荷重、④地震荷重、⑤風荷重である。また面内、面外の座屈に対する安全性も照査する。

充てん時、コンクリートの側圧による鋼管の応力度、はらみ量についても照査する。アーチは斜部材であり、そのまま適用できる側圧の算出式はないが、コンクリート標準示方書施工編１１章に示されている柱部材に対する式を準用できる。

４－２ 巻立てコンクリート打設時

巻立てコンクリート打設時は、巻立てが終了したコンクリートアーチリブ部材と未だ終了していない合成アーチ部材の両方でアーチが構成されている。コンクリートアーチリブ部材は通常のＲＣ部材として設計される。

合成アーチ、つまり鋼管コンクリート部材の設計法については、

①全断面を有効とした計算、②鉄筋コンクリート理論による計算、③累加強度式による計算等がある。著者らは、文献７）、８）等により②の鋼管を鉄筋に換算した鉄筋コンクリート理論が適当と考えている。城址橋の設計でもこのＲＣ理論を採用しており、その際ヤング係数比 n を１５としている。

なお、たわみや断面力の算出は文献２）より、実ヤング係数比を使用した全断面を有効とした断面定数を用いて行う。せん断力に対しては鋼管ウェブのみが抵抗するものとして照査する。

４－３ 合成アーチ部材の鋼・コンクリート合成効果

本工法は合成柱の構造理論を適用したものである。合成柱の構造特性は、

- １）鋼管とコンクリートの共働効果による耐力の増加
- ２）鋼管とコンクリートの共働効果による剛性の増加
- ３）曲げ変形能力、すなわち曲げを受けるときの靱性が大きい

4) 鋼埋め込み桁、プレビーム等と同様に鋼断面積に対する付着面積の比が極めて大きい。

しかしながら、本工法においての合成アーチ部材の検討を許容応力度法で行っている限り、1)、3)の特性は、潜在的な能力としてはあるものの直接設計に関係するものではない。2)、4)が直接関係するものである。

一般に、鋼・コンクリート合成部材はずれ止めを用いて合成効果を確保する。本橋では以下の理由により、特にずれ止めの必要性はないものと判断した。

- (1) 架設時の一時的な部材であり、永久構造物ではない。
- (2) アーチ形状の特性で、合成アーチ部材のせん断力が小さい。
- (3) 4)で述べたように付着面積が大きい。
- (4) 密閉構造ゆえに乾燥収縮の影響は無視できる。

5. 実橋試験

本試験は、城址橋のアーチリブ施工時における各段階ごとの変位、応力等を計測し、設計手法の検証、安全性の確認を目的として行ったものである。城址橋のコンクリート強度および弾性係数は表-1に示すとおりである。

弾性係数の測定値は圧縮強度から想定される値より小さい値であった。

材令 28日		単位 kg/cm ²	
	圧縮強度	曲げ強度	弾性係数
充てんcon.	387	—	244,000
巻立てcon.	494	47	312,000

表-1 コンクリート強度および弾性係数(平均値)

5-1 測定項目と測定点

測定項目は以下のとおりである。

1) コンクリート充てん時

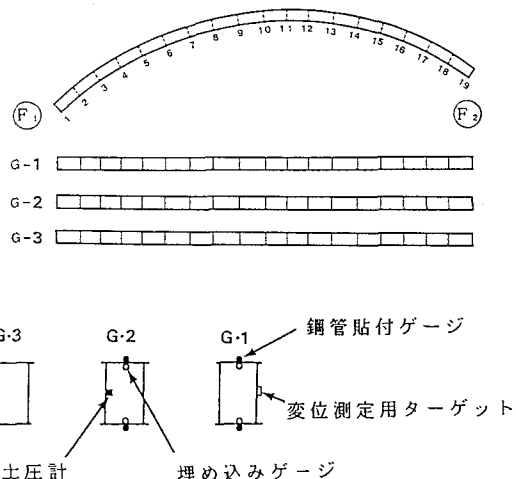
- a) コンクリートによる鋼管の側圧
- b) コンクリートの温度
- c) 鋼管応力度
- d) 変位

2) コンクリート巻立て時

- a) 鋼管応力度
- b) 充てんコンクリート応力度
- c) 変位

測定項目	測定節点	
コンクリート温度 上縁、中央、下縁	G-1	4, 6, 8, 11, 15
	G-2	4, 6, 8, 11, 15
コンクリート側圧	G-1	なし
	G-2	1, 6, 15, 19
鋼管応力 上縁、下縁	G-1	4, 6, 8, 11, 15
	G-2	4, 6, 8, 11, 15
コンクリート応力 上縁、下縁	G-1	4, 6, 8, 11, 15
	G-2	4, 6, 8, 11, 15
変位	G-1	2~18
	G-2	なし

図-4 測定項目と測定点



変位、鋼管及びコンクリート応力度、コンクリートによる鋼管の側圧の測定点は、図-4に示すとおりである。変位はG-1桁の側面17カ所を測定点とし、応力度はG-1、G-2桁の図-4に示す10カ所で上縁、下縁それぞれ測定した。コンクリートによる鋼管の側圧はコンクリート充てん時にG-2桁の4カ所で測定し、温度はG-1、G-2桁の計10カ所でコンクリートの上縁、中央、下縁それぞれ測定した。

なお変位の測定は、CCDカメラとその駆動装置により多くの測点を自動撮像し、パソコンにより画像処理を行って変位を算出、管理する「光学式変位測定装置」を使用した。(図-5、文献9)を参照)

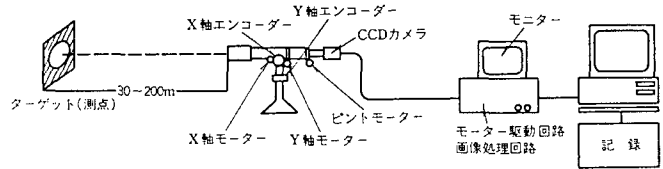


図-5 光学式変位測定装置

5-2 試験結果

以下に施工順序に従って試験結果を述べる。

1) 充てんコンクリートの側圧

図-6に、スプリングと1/4点の打設後12時間までの側圧を示した。最大値は柱部材として仮定した計算値におよそ一致したが、1/4点ではかなり小さくなった。またスプリング、1/4点ともF側の勾配の大きいほうが大きい値を示した。これは、コンクリートの毎時の打設量を一定としても、部材が傾斜しているため、打上がり速度が相対的に低下することや、底面の摩擦の影響等が一つの理由ではないかと考えられる。本設計では、水平リブ、垂直リブがコンクリートの側圧により決まっている部分が多いので、1/4点より以上はリブの数を低減できると考えられる。

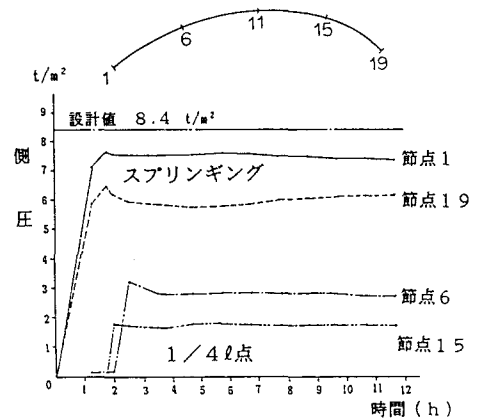


図-6 充てんコンクリートによる側圧

2) 充てんコンクリート打設後のコンクリート温度

コンクリート充てん時のコンクリート温度の測定値の一例を図-7に示す。これはG-2桁のアーチクラウン部のコンクリート打設終了からの時間変化を示している。最高温度で45℃であり、またコンクリート中央と下縁部での最大温度差で10℃程度と小さかった。これは構造上、コンクリート断面がそれほど大きくなく、また鋼管は周囲から外気温で冷やされ易いことによるものと考えられる。なお打設当日はほぼ曇天日であり、直射日光の影響は少なかった。

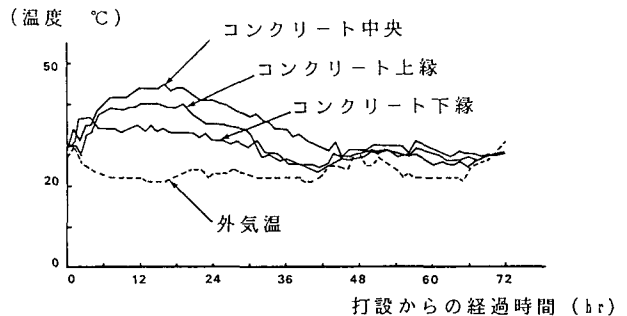


図-7 充てん後のコンクリート温度

3) 充てん時の鋼管応力度

充てん終了時の鋼管上縁および下縁の応力度の実測値と計算値を図-8に示した。G-1、G-2主構とも両者は良く一致した。

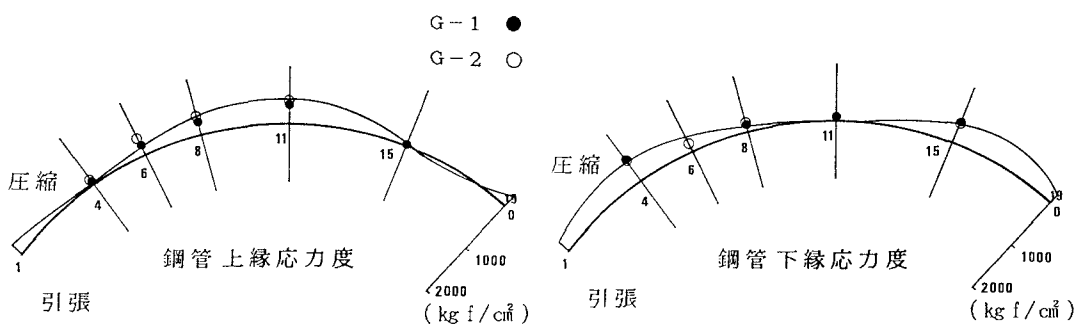


図-8 充てん終了時の鋼管応力度

4) 充てん時の鋼管の変位

変位の計算値および実測値を図-9に示す。実測値は、光学式変位測定装置による値、レベル測量による値両方ともほぼ計算値どおりである。これにより、充てん開始から終了までの約5時間の範囲内では、当初懸念されたコンクリート硬化初期の剛性の影響は無視できることが実橋においても確認された。

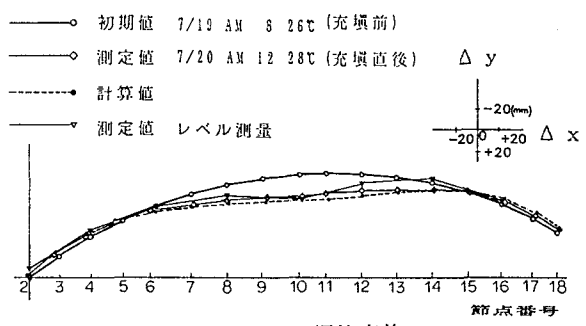


図-9 充てん終了時の鋼管変位

5) コンクリート巻立て時の鋼管および充てんコンクリートの応力度

図-10に巻立て施工段階と巻立てブロック番号の対応を、図-11～12に主要点の施工段階毎の応力度の変化を示す。計算値は比較の意味で、計算書に使用した $n=15$ のRC理論の他に実ヤング係数比 $n=7$ のRC理論と全断面を有効とした計算値も示した。

曲げモーメントによる応力度が圧縮となる部分、例えばクラウン部の下縁や1/4点の上縁は鋼管および充てんコンクリートともに、ヤング係数比 n が同じなら全断面有効理論とRC理論ではおおよそ同じである。曲げモーメントによる応力度が引張となる部分は両理論による応力度に差が生じ、逆に n が異なってもほとんど同じ値を示す。

(図-11の鋼管上縁応力度参照)

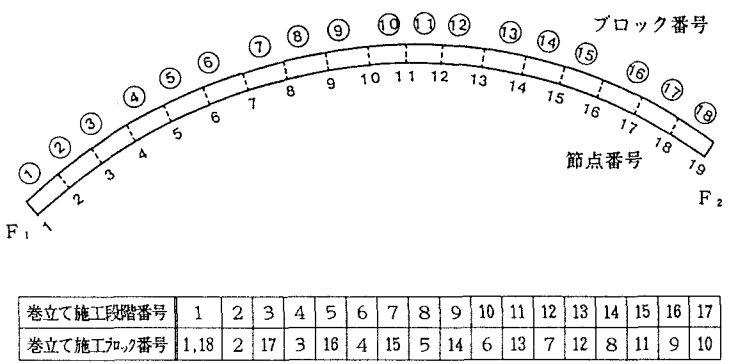


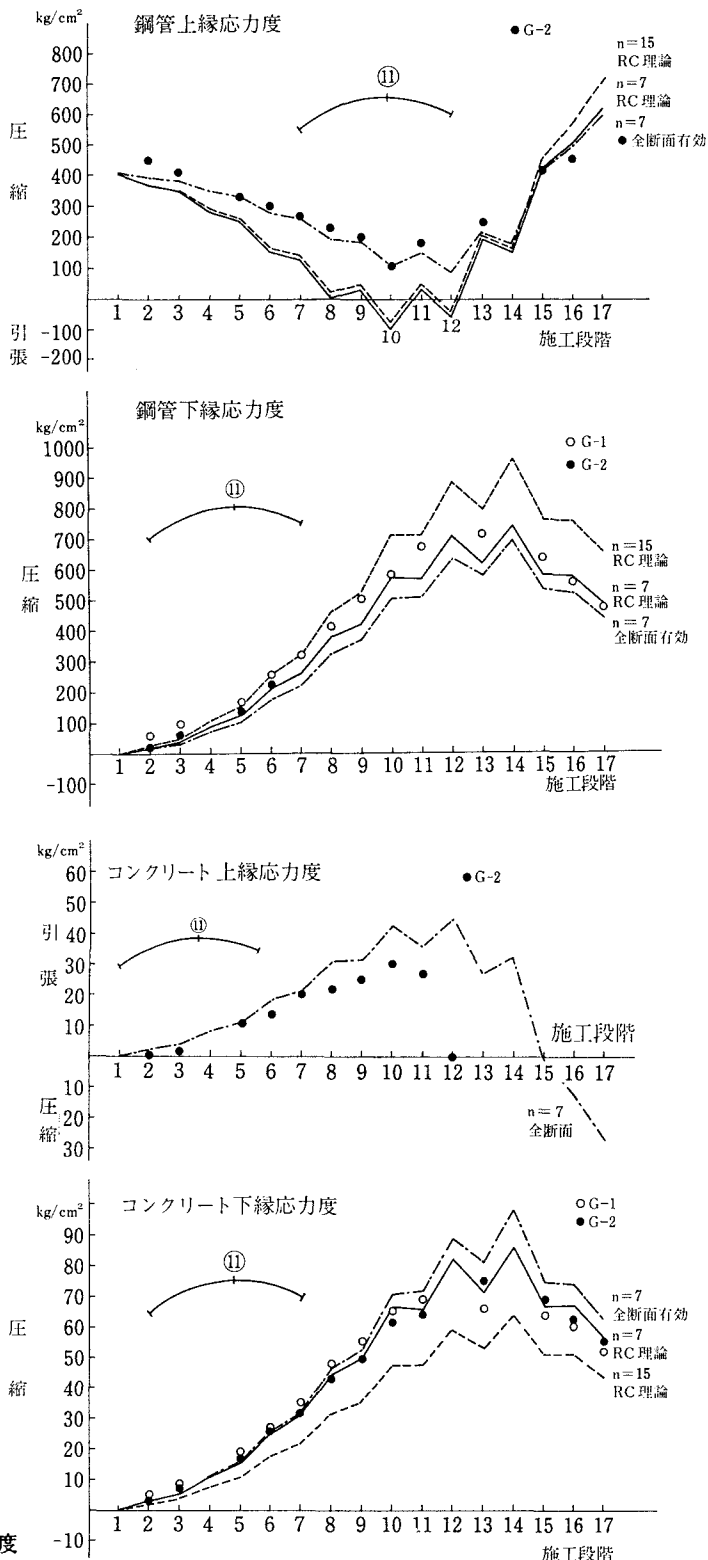
図-10 巻立て施工段階と打設ブロック番号

実測結果をみると、どの部分も実ヤング係数比を使用した計算値に近い値を示した。両理論による差が顕著に現れる曲げにより圧縮側となる鋼管の応力度をみると、クラウン部や1/4点では全断面有効に近い値を示している。これは図-11と図-12の引張部のコンクリート応力度に見られるように、充てんコンクリートが後半の施工段階まで引張応力度を負担していることから裏付けられる。ただし、クラウン部の鋼管上縁ではクラックが入った施工段階12以降はRC理論の方に近づいている。またクラウン部の下縁の鋼管およびコンクリートの応力度もどちらかといえば実ヤング係数比によるRC理論に近い値を示している。

どの測点でも鋼管上縁、下縁、コンクリート上縁、下縁の応力度に大きな矛盾はなく、それぞれの理論値にほぼ一致している。全断面有効およびRC理論の差があるにせよ、鋼管とコンクリートがほぼ一体となって外力に抵抗していることは明らかである。

外主構と内主構との間に何らかの差があるかどうかを調べたが、両主構そろってゲージが最後まで正常に作動したものが少なかったこともあって、はっきりとしたことは分らなかったが、図-11のコンクリート下縁、図-12の鋼管上縁でみる限りは有意差はないようである。設計の際の検討では、横構の存在により分配はほぼ均等であったので、本結果と一致している。

図-11
巻立て時のクラウン部の応力度



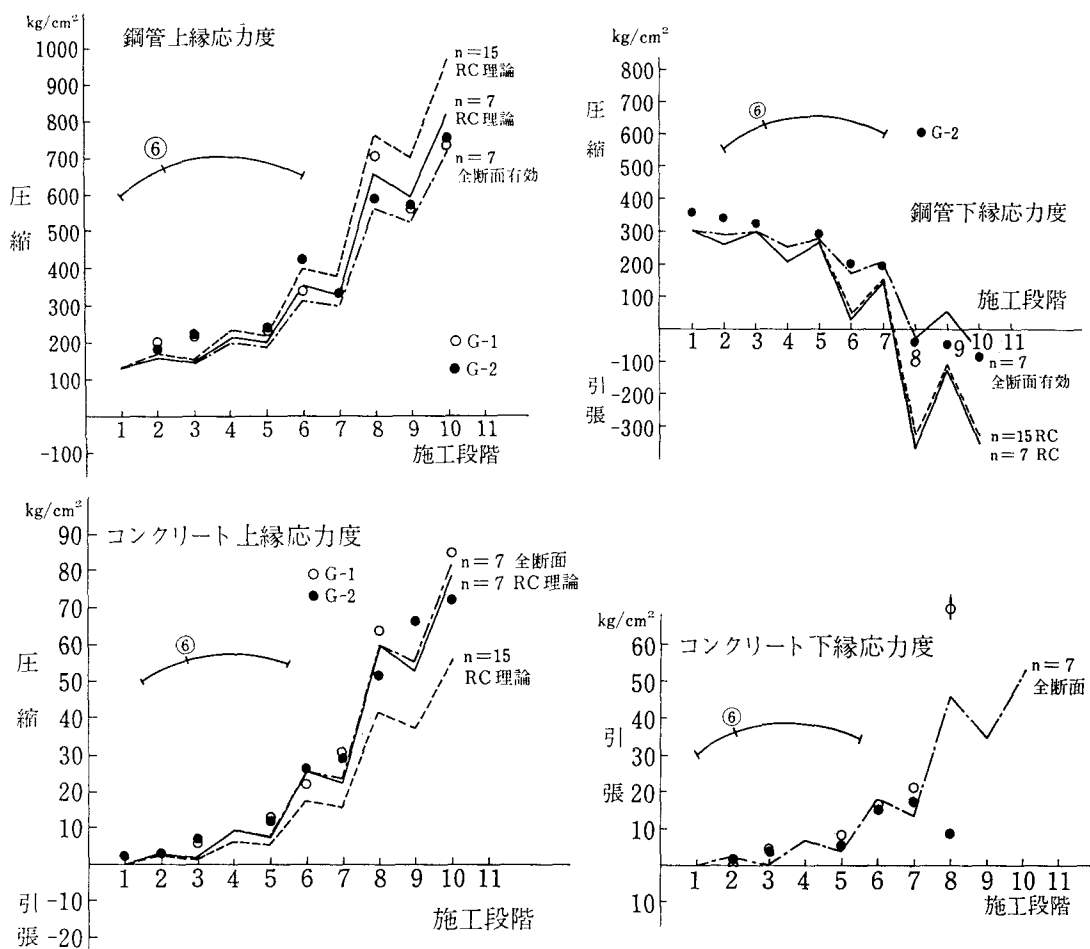


図-1 2 巻立て時1 / 4点 (節点6) の応力度

6) 巻立て時の合成アーチのたわみ

巻立て時は固定アーチ構造となり、また剛性の大きいコンクリートアーチリブも抵抗部材となるため、たわみは小さい値を示す。図-1 3にクラウン部のたわみが最大になる施工段階10の合成アーチのたわみを、図-1 4にクラウン部の施工段階毎のたわみの推移を示した。たわみの絶対値が最大でも2cmと小さいので、はっきりしたことは言えないが、問題となるような大きなたわみは生じておらず、傾向としては計算値に近い動きを示していると考えられる。

巻立て施工時のアーチリブ鋼管のたわみ図
ステージ10

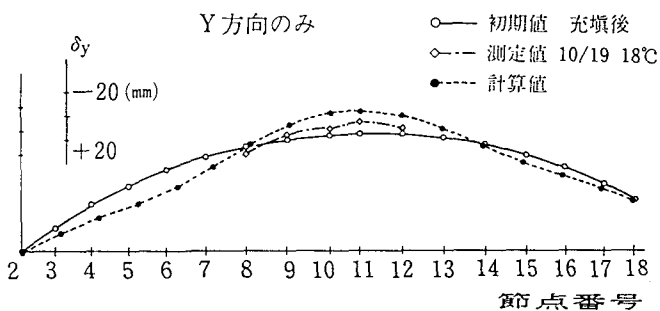


図-1 3 巻立て時のたわみ (施工段階10)

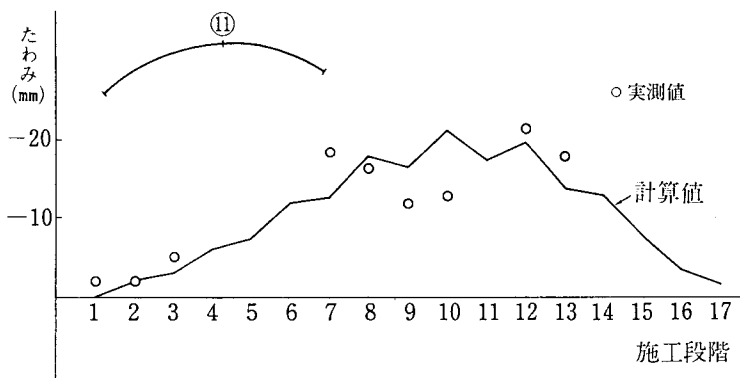


図-14 クラウン部のたわみの推移

6. まとめ

以下に、試験結果のまとめと考察について述べる。

6-1 充てんコンクリート打設時

- 1) コンクリート充てん時の変位および鋼管の応力度は計算値どおりで、充てん時間5時間程度では、コンクリート硬化初期の剛性の影響は無視できる。
- 2) 充てんコンクリートの温度については、問題となるほどの大きな温度上昇は見られなかった。これはコンクリートに対して鋼管が十分な放熱効果を持っていると言える。
- 3) コンクリートの側圧の最大値は計算値と良く一致したが1/4点ではかなり小さくなった。これは部材の傾斜による打上がり速度の変化や底面の摩擦の影響等が関係していると考えられる。従って1/4点以上は補強リブの数量を低減できるものと考えられる。

6-2 巻立てコンクリート打設時

- 1) たわみは小さくて誤差の範囲内と言えるほどであるが、実測値はおおよそ計算値に一致しており、本設計で用いた計算法は妥当であったと考えられる。
- 2) 合成アーチ部材の応力度については、以下のとおりである。
 - ・鋼管とコンクリートは一体とした挙動を示し、実測値は $n=15$ のRC理論値には一致せず、実ヤング係数比を使用した全断面有効あるいはRC理論による計算値に近い値を示した。
 - ・主構間の荷重の分配はほぼ均等であったと推定される。

結果的には、実ヤング係数比による全断面有効による計算が試験結果と良く一致した部分が多かったが、設計計算に用いる計算法としては実ヤング係数比を用いたRC理論が以下の理由により適当と考えられる。

- (1) 合成アーチ部材は、鋼管の圧縮応力度でほとんど断面が決まり、この圧縮応力度にたいしてRC理論のほうが全断面有効による計算値より安全側の値を与える。
- (2) 本橋の合成アーチ部材は、 $\sigma_{sk}=400\text{ kg/cm}^2$ の高強度コンクリートを使用しており、また架設時の一時的な構造部材であるので、一般のRC理論の低強度コンクリート、永久荷重時のクリープの影響を考慮して定められた $n=15$ を使用する必要はない。

7. あとがき

合成アーチ巻立て工法による城址橋のアーチリブの設計・施工および実証試験について概略を述べた。本工法は新工法ゆえに有識者による技術検討会を持つ等の他、計測管理を行う等万全の体制で工事ののぞんだ。結果的には、特別な対策や変更・修正等することなく無事に工程どおり工事が進捗した。このことは、本工法の持つ施工性、安全性の優秀性が実証されたものと考えている。

なお、本工法は偏心軸方向力を受ける構造物全般に应用できることから用途は広いと思われる。本報告が類似の構造物を計画する際の参考になれば幸いである。

最後に、合成アーチ巻立て工法の設計・施工・試験等他方面にわたって御指導をいただいた名古屋大学島田、田辺両教授および城址橋の関係各位に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤・佐川・小林 : 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ー城址橋ー、コンクリート工学 Vol.27、No.6
- 2) 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 1984.12
- 3) 大浦・加藤・河村 : コンクリートアーチ模型の破壊試験、コンクリート工学、Vol.23、No.9 1985.9
- 4) 「鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン」 土木学会
- 5) 合成柱(充てん方式)を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案) 昭和61年3月 阪神高速道路公団
- 6) 加藤・佐藤・大浦: 合成アーチ巻立て工法の城址橋における実証試験 土木学会第44回年次学術講演会
- 7) 日本建築学会 : 鋼管コンクリート構造設計基準 1967年
- 8) 鋼管コンクリート部材 曲げー軸力 試験 : ビー・エス・コンクリート(株) 社内技術資料
- 9) 大浦・岡沢・鈴木 : 光学式自動変位測定装置による計測管理 土木施工 VOL.30、NO.10 1989.12
(1989年10月2日受付)