

(11) 第二西海橋（仮称）へのコンクリート 充填鋼管の適用

田崎 智¹・茂呂 充²・吉村 光弘³

¹正会員 長崎県 県北振興局（〒857-0041 長崎県佐世保市木場田町3-25）

E-mail: s.tasaki@ma.pref.nagasaki.jp

²正会員 株式会社長大 構造事業部（〒114-0013 東京都北区東田端2丁目1番3号）

E-mail: moro-m@chodai.co.jp

³正会員 三菱重工業株式会社 長崎造船所（〒850-8610 長崎県長崎市飽の浦町1番1号）

E-mail:mitsuhiro_yoshimura@mhi.co.jp

現在長崎県内に建設中の第二西海橋（仮称）は、道路橋としては国内初の、アーチリブにコンクリート充填鋼管（CFT）を採用したアーチ橋である。アーチリブの設計にあたっては、曲げを考慮した合成柱として評価するとともに、地震応答解析、耐荷力解析などを実施して安全性の評価を行った。施工に先だって、コンクリート充填試験、シール試験、現地圧送試験を実施して、実施工における問題点の把握とその対応方法について検証した。コンクリートの充填は、6回に分けて実施し、作業時には鋼管内の圧力、温度を計測することにより充填状況および硬化反応の監視を行った。いずれも圧送管の閉塞や添接部からの漏水などのトラブルもなく無事に充填することができた。

Key Words : *Second Saikai Bridge, concrete filled tube(CFT), seismic analysis, buckling analysis, filling up examination,*

1. はじめに

近年、公共事業の縮減やそれに伴う構造の合理化の研究によって、新しい形式の橋梁の実用化が進んでいる。鋼管にコンクリートを充填したコンクリート充填鋼管（CFT：Concrete Filled Tube）を利用した橋梁もその一つである。CFTは、建築分野ではビルの柱材として10年以上の実績があるが、橋梁の分野における採用実績はそれほど多くはない。



写真1 第二西海橋近況（平成17年9月撮影）

長崎県内で建設中の第二西海橋（仮称、以下本橋と記す）は、「長崎県橋梁技術検討委員会」における審議の結果、道路橋としては国内で初めてのCFTを採用した中路アーチ橋である。本構造の採用にあたっては、設計、施工の各段階で様々な検証を実施しながら作業を進めた。架設工事においては、アーチリブの閉合後に、アーチリブ鋼管内に高流動コンクリートを充填した。

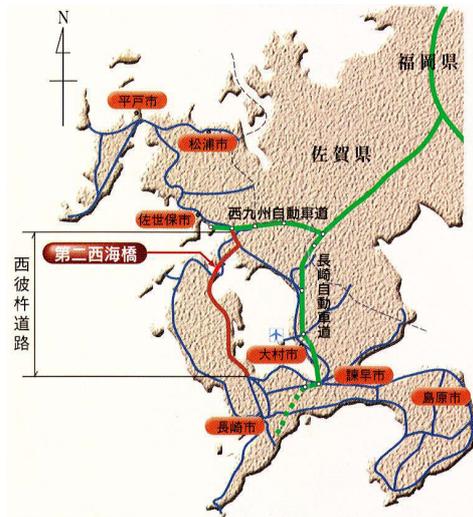


図1 第二西海橋架橋位置

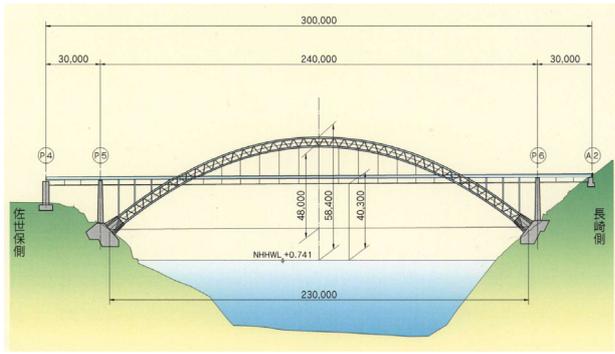


図1 一般図

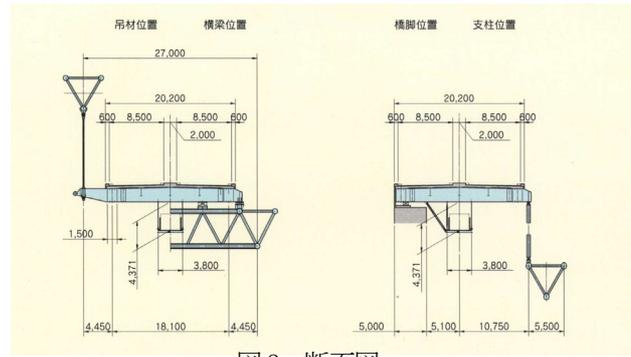


図3 断面図

表1 諸元

路線名	一般国道 202 号
計画場所	長崎県佐世保市針尾東町 ～西彼町小迎 (現西海市西彼町小迎)
形式	鋼中路ブレースドリブアーチ
道路規格	第1種第3級
設計速度	80km/sec
設計荷重	B活荷重
橋長	300.000m
幅員	20.200m
支間	30.000m + 240.000m + 30.000m
アーチ支間	230.000m
アーチライズ	48.000m
線形条件	平面：R=∞、縦断：0.600%
床版形式	合成床版

本報告では、本橋へのCFTの適用にあたって実施した、設計、施工に関する事前検討、施工の状況について報告する。

2. 本橋の概要

本橋は、長崎県佐世保市と長崎市を1時間で結ぶ地域高規格道路「西彼杵道路」の一部として計画し、平成17年度中の竣工を目指して架設工事中である。本橋は、長崎県佐世保市と西海市西彼町にかかる西海橋（昭和30年竣工）にほぼ平行している。架橋位置を図1に示す。また、本橋の平成17年9月現在の状況を写真1に、一般図を図2に、諸元を表1に示す。

本橋のアーチリブは、直径812.8mmの鋼管を弦材とする逆三角形断面のトラス構造であり、6本の弦材全てに高流動コンクリートを充填することによって、CFTを形成する。本橋の断面図を図3に示す。

また、桁下には添架歩道を設け、兩岸の県立公園を利用する観光客の利便性に配慮している。

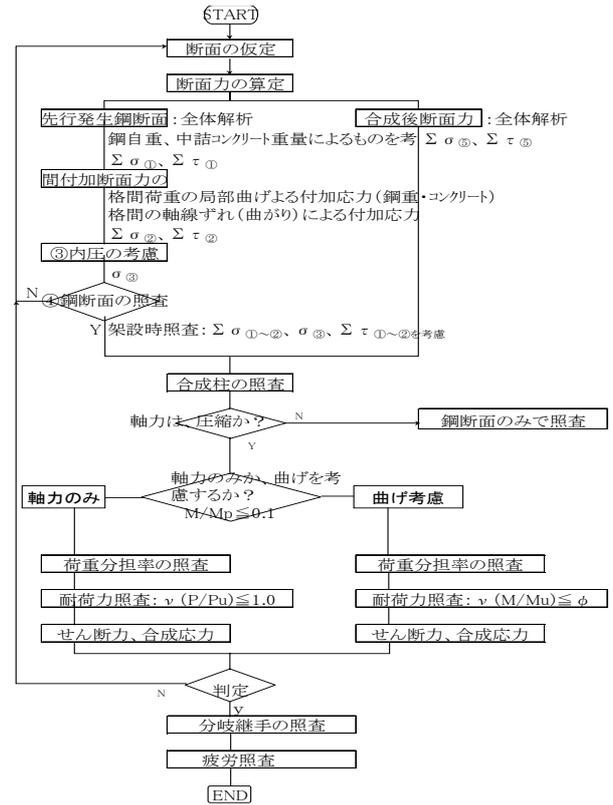


図4 鋼管断面照査フロー

3. アーチリブの設計

(1) 合成鋼管アーチリブの設計

我国における土木構造物のCFT設計基準は、角柱鋼製橋脚を対象とし累加強度に基づき規定された「阪神公団基準¹⁾」が基本になっている。「土木学会指針²⁾」も対象を円柱に広げてはいるが、基本的に「阪神公団基準」と同一水準である。従って、本橋設計においても「阪神公団基準」を準用するものとした。鋼管断面照査フローを図4に示す。

合成柱の断面は、以下の式で照査を行った。

軸圧縮力のみを受ける合成柱：

$$v (P/P_u) \leq 1.0$$

ここに P : 作用軸力 $P_u = \kappa (\sigma_{ck} A_s + 0.85 \sigma_{ck})$

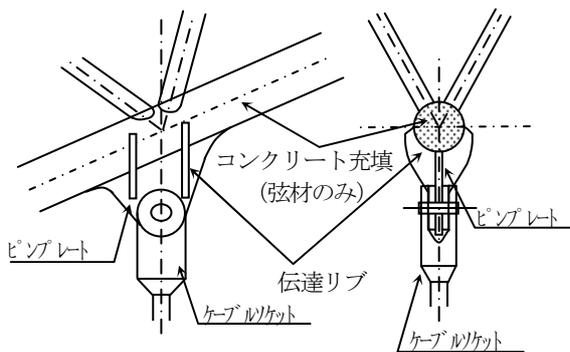


図5 取付け部概念図

κ : ECCS 曲線のうち”b”相当の曲線を用いて算定される係数で、座屈耐荷力の低減係数

軸圧縮力と曲げモーメントを受ける合成柱：

$$v \text{ (M/Mu)} \leq \phi$$

ここに M : 作用曲げモーメントで、2次曲げの影響を含むもの

Mu : 断面の破壊抵抗曲げモーメント

(2) 基準耐荷力曲線

照査式で問題となるのは、ECCS曲線で代表される基準耐荷力曲線の適用法である。「阪神公団基準」では、角柱橋脚を対象としているため、ECCS曲線”b”に対応する曲線を、「土木学会指針」では、円柱に対しECCSの”a”曲線を採用している。”a”曲線は、残留応力のほとんど無い円柱鋼管に対し実験値とよく適合することが示されている³⁾が、残留応力の値は、鋼管製造法によって、かなり異なると言われている。また、既存CFT柱の各種載荷実験では、残留応力の影響を排除するため、応力除去焼きなましが行われるのが通例であり、比較的大型の鋼管に対するこの種の影響を定量的に把握した研究は少ない。本橋では、この問題に対し、安全側になるよう「阪神公団基準」に従い”b”曲線相当の基準耐荷力曲線を採用した。

4. 吊材ケーブル取付部における局部応力照査

本橋のアーチリブと補剛桁は、下路部においてケーブルにより接続している。アーチリブとケーブルの取付部は、構造が複雑で(図5)、全体の応力の流れが不明確であり、局部的に大きな引張力が作用することが予想さ

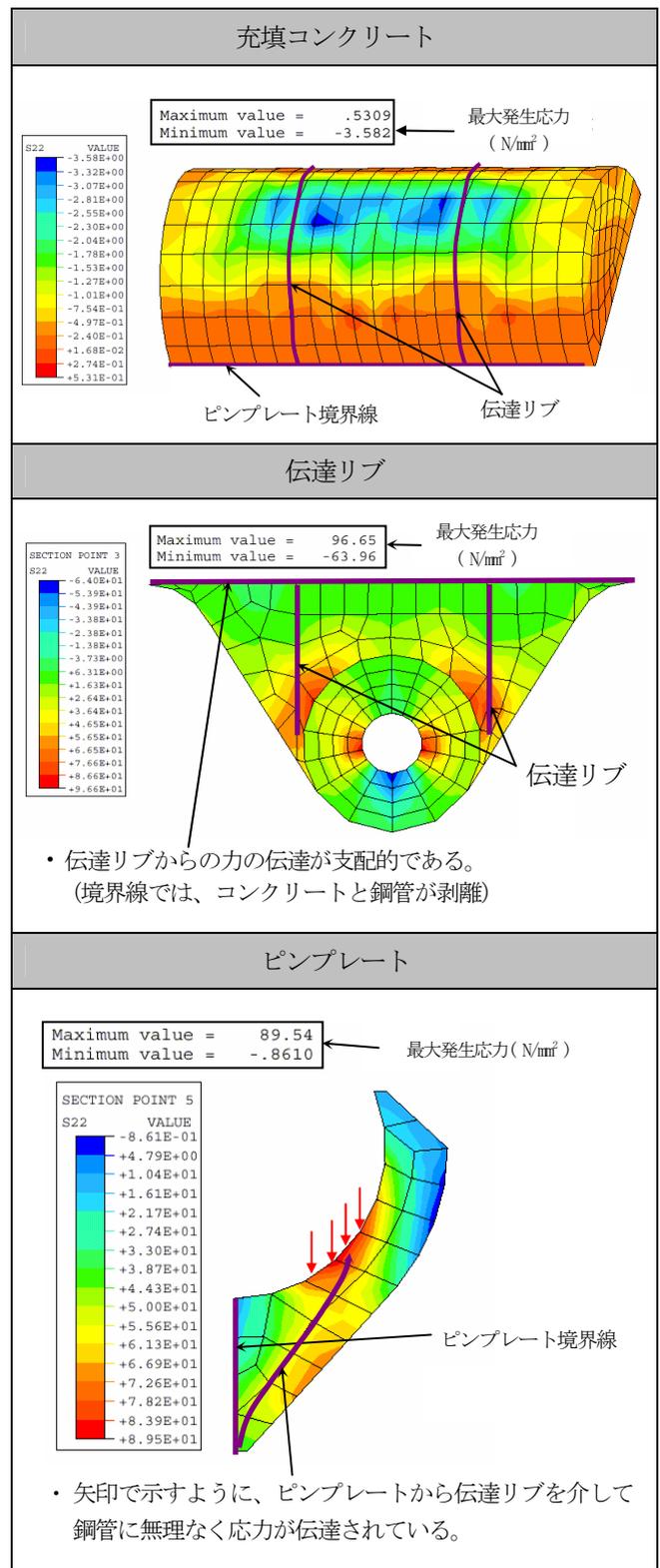


図6 吊材ケーブル取付部解析結果

れた。そこで、FEM 解析を行い、局部的な応力照査を行った。

解析の結果(図6)、過剰な応力集中は発生せず、また応力超過も生じなかったことから、構造の安全性を確認できた。

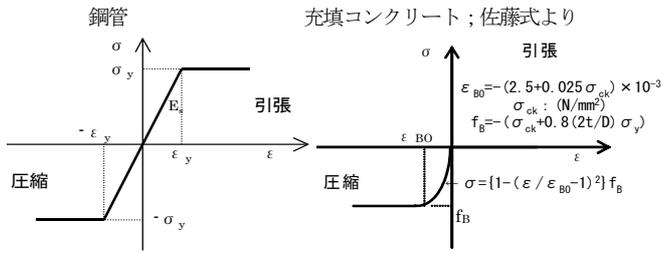


図7 材料特性

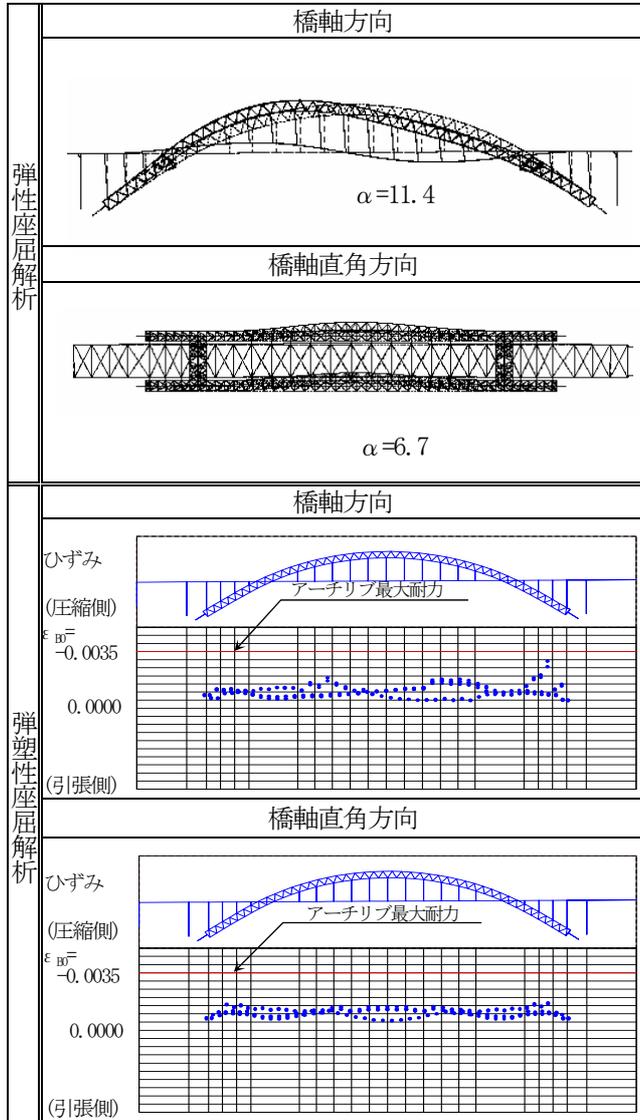


図8 座屈解析結果

5. アーチリブ耐荷力照査

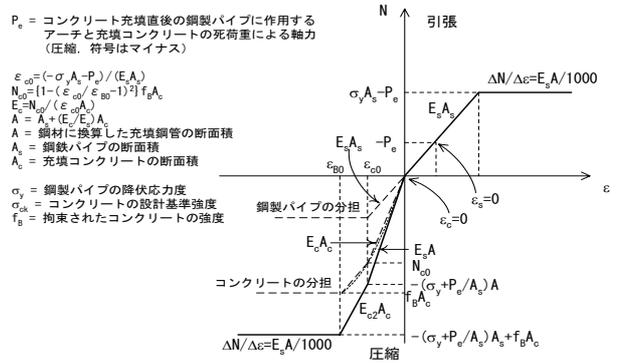
本橋のアーチリブは、支柱および吊材を介して補剛桁を支持しており、補剛桁自重および桁に作用する鉛直荷重により大きな軸圧縮応力が作用する。そこで、座屈に対する照査を行った。

なお、鋼管および充填コンクリートについては、図7に示す特性を用いた。

構造の安全性の照査に対しては、弾性座屈解析により、

表2 地震応答解析手法

動的解析手法	Newmark-β法による時刻歴応答解析
幾何学的非線形	死荷重時の軸力を考慮
入力地震動	標準加速度波形 I種地盤 (地震動2タイプ×3波×2方向) C地域(長崎県 補正係数=0.7)
減衰	低次2モードの固有振動数で2%となるRayleigh型の減衰



(1) アーチ完成状態からの軸力増分と軸ひずみの関係

図9 アーチ完成状態からの軸力増分と軸ひずみの関係

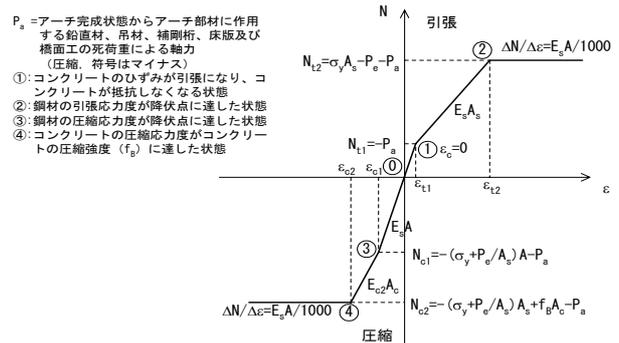


図10 橋梁完成状態からの軸力増分と軸ひずみの関係

死荷重(D)+活荷重(L)を不安定または断面が終局をむかえるまで、荷重を増加[(D+L)×α]させた。アーチリブ弦材の安全性の照査に対しては、弾塑性座屈解析により、α=2における状態に対して照査を行った。結果を図8に示す。

計算結果から分かるように構造の不安定、または部材の終局に対しα(安全率)=2.0以上を確保できていることによって、本橋の座屈に対する安全性を確認した。

6. 耐震検討

大規模地震時に対する照査については、静的解析によって決定した断面に対し、時刻歴応答解析による耐震性の確認を行った。解析条件を表2に、アーチリブの非線形特性を図9、図10に示す。

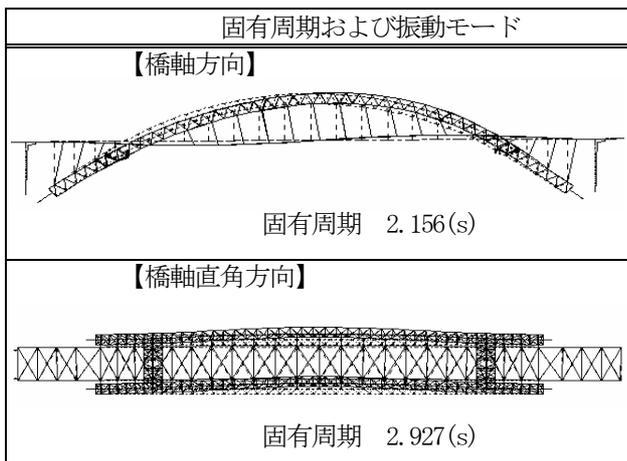


図 11 固有周期および振動モード

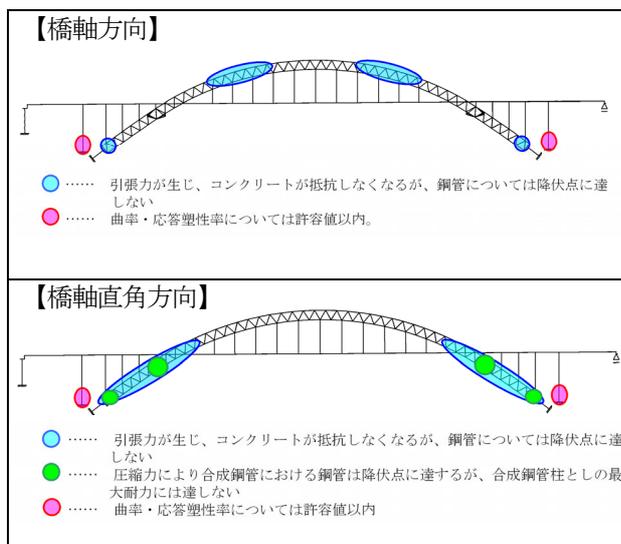


図 12 時刻歴応答解析結果の概要

固有振動解析の結果を図 11 に、時刻歴応答解析結果の概要を図 12 に示す。図より、アーチリブ弦材の合成構造としての耐震性を確認した。

7. コンクリート充填試験¹⁰⁾

アーチ状構造物へのコンクリート充填の施工例は国内では少ないことから、高流動コンクリートの充填性の確認、未充填箇所を発見方法の確認及び補修方法の妥当性などを目的としてコンクリート充填試験を実施した。

内部構造を再現した実物大模型（直径812.8mm、長さ10m）を2基製作し、試験模型の傾きをパラメータとして、以下の2ケースで試験を実施した。

Case-1： 30°（アーチリブの基部付近を想定）

Case-2： 5°（アーチリブの頂部付近を想定）

試験模型の設置状況を写真2に、計測項目を表3、表4に示す。

また、模型内部に充填欠陥箇所を意図的に設け、充填中、及び充填後に欠陥の存在を確認できるかを調査した。



写真 2 試験模型設置状況

表 3 計測項目（コンクリート受け入れ時）

項目	目標値	備考
スランプフロー	650±50mm	JSCE-F503-1999 準拠
500mm フロー到達時間	10±5 秒	ストップウォッチ使用
Vロート流下時間	10±5 秒	開口部寸法 75mm×65mm
空気量	4.5±1.5%	JIS A 1128 準拠
コンクリート温度	20°C程度	温度計使用

表 4 計測項目（コンクリート充填中、硬化後）

時期	項目	位置	計測点数
充填中	コンクリート圧送圧	コンクリート充填口	1ヶ所
	鋼管内側圧	鋼管内下部および中央部	2ヶ所
	コンクリート温度	内外面下部および中央部、気温	5点
	充填センサー	鋼管内に、2m おきおよび引張接合フランジ下側	5点
硬化後	圧縮強度	上部、中央部、下部	各 3 本採取

試験の結果、以下の内容が確認できた。

- ① あらかじめ設けた欠陥部以外は、いずれも充填状況は良好である。
- ② 圧送圧、側圧の最大値は、いずれも液圧として求めた値とほぼ等しい。硬化に伴う温度上昇は、事前に予想した結果とほぼ一致した。
- ③ 充填センサーによってコンクリートの到達確認が可能である
- ④ コンクリートの打音によりコンクリートの充填状況や欠陥の存在を確認可能である。
- ⑤ 万一、充填欠陥が生じた場合は、モルタル充填による補修が可能である。

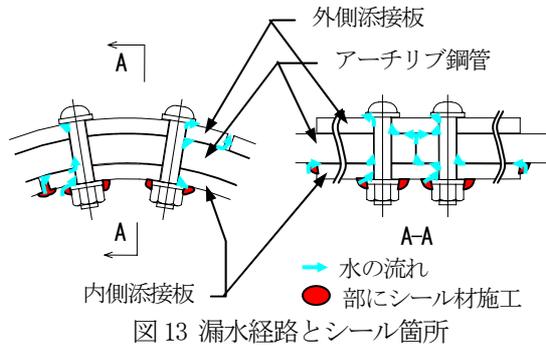


図13 漏水経路とシール箇所

表5 圧送試験時配合

Case	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	LP (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (%)	SP (kg/m ³)
1	165	300	262	855	748	1.45	8.15
2	161	300	262	859	748	1.45	8.15

W: 水 C: セメント LP: 石灰石微粉末
S: 細骨材 G: 粗骨材 SP: 高性能AE減水剤

8. シール試験

本橋のアーチリブ弦材の接合は、高力ボルトによる摩擦接合としている。通常、摩擦接合では、母材と添接板は完全に密着していると考えられている。一方、アーチリブにコンクリートを充填する際、充填区画の添接部から最上部の空気孔までの高低差が最大33.6mに達するため、鋼管内の圧力は最大で7Mpaに達する。摩擦接合箇所的一方からこのような高压にさらされるような構造はこれまでに例がなく、未硬化コンクリート中の水分が図13に示す経路を通過して外部に漏れることが懸念された。

本橋は海上橋であり、モルタル分を含んだ水を海上に滴下させられないこと、充填作業を途中で中断できないことから、図13中に示す位置にシールを施し、止水することを計画した。そして、実物大の試験体を製作して、加圧試験を行い、施工性およびシール性能を確認した。

なお、シールは水分の進入経路を考えると内側のみで十分であるが、実施工時には、施工不良などによる漏れの可能性を考慮して外側からもシールを施した。

9. 現地圧送試験

(1) 概要

コンクリート充填作業において、最も懸念されたのは、充填中の圧送管の閉塞やポンプ、バルブ類のトラブル、コンクリートの需要（充填作業）と供給のタイミングのずれなどによって作業が中断し、それ以降の充填ができなくなることである。特にP6側は、アーチ基部にミキサ一車が進入できないため、A2橋台背後からコンクリー

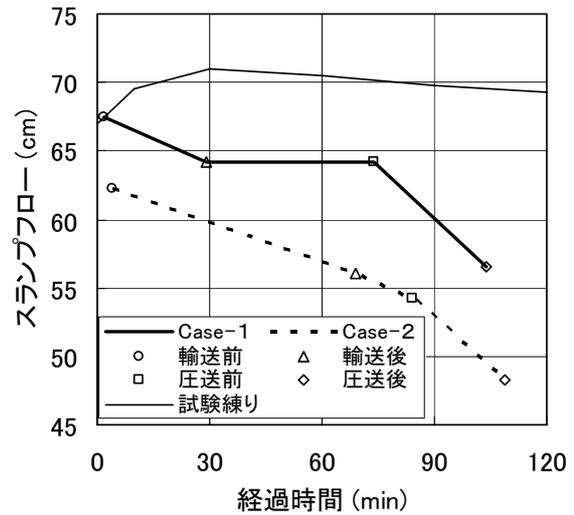


図14 圧送試験時スランプフロー

トを圧送する必要があり、配管経路が長く、しかも下向きの圧送となる。そこでコンクリート充填作業の実施に先立って、以下のような目的で高流動コンクリートを使用して現地圧送試験を実施した。

- ① 実施工時の問題点抽出
- ② 輸送および圧送に伴う自己充填性および材料分離抵抗性の変化の把握

試験は、コンクリートの配合を変えて2ケース実施し、実施工で用いる配合をCase-1、Case-1よりも若干流動性を落とした配合をCase-2として試験を実施した(表4)。

(2) 試験結果

(a) 圧送状況

Case-1、Case-2とも、配管の閉塞や異常な振動などを生じることなく圧送できた。これは、圧送が下向きで、配管の摩擦抵抗以外の圧力が発生しなかったこと、圧送先がバケットで圧力が完全に開放されていたことなども影響していると思われる。

また、バケットの容量が圧送コンクリートの総量よりも小さいため、途中で圧送を中断せざるを得なかった。このため、配管中に空気が入り込み、配管内で圧縮されてバケットへの吐出口ではじけるといった現象が確認された。このことから、実施工時には、コンクリートの供給がとぎれないようにプラントとの連絡を密にするとともに、練り混ぜたコンクリートは早めに輸送させて現場で待機させるようにした。

(b) スランプフロー試験

輸送前後および圧送前後にスランプフローを計測した。フローの計測結果を図14に示す。

図から、以下のことが分かる。

- ① 輸送の前後では、いずれのケースともスランプフローが3cm~6cm低下する。

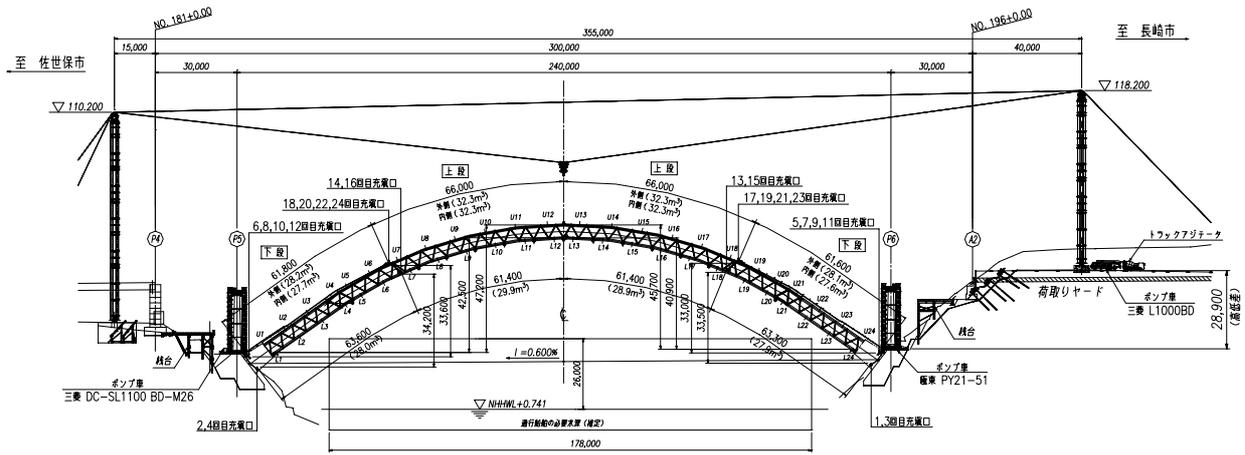


図 15 コンクリート充填作業計画図



写真 4 コンクリート充填作業実施状況

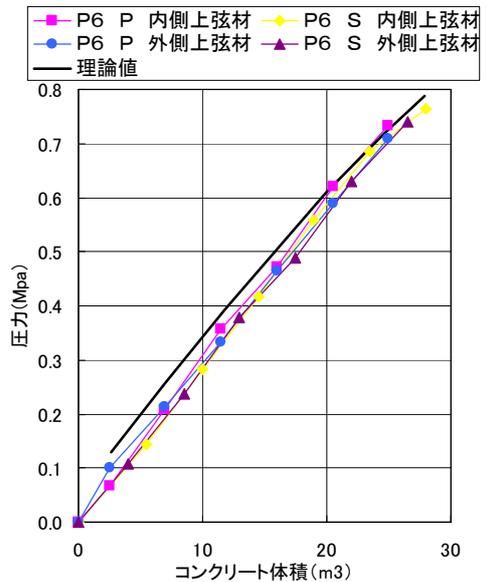


図 16 充填時圧力計測結果

② 圧送の前後では、輸送の場合同様スランプフローが低下し、その差は6~8cmである。

③ Case-1に比べてCase-2では、単位水量の減少量以上にスランプフローが大きく減少しており、水分量がスランプフロー値に与える影響が大きい。

以上の結果から、実施工時には表面水の管理を厳密に行い、プラント出荷時点ではスランプフローを規定値(65±5cm)の上限の70cm前後で管理することとした。

(c) 材料分離

圧送されたコンクリートやスランプフローの状況からは、材料分離は確認されなかった。

10. コンクリート充填作業

(1) 充填作業

コンクリート充填は、両岸のアーチ基部にそれぞれポンプ車を配置して実施した。P6側は配管経路が長く吐出圧が大きくなること、ミキサー車が基部近くまで進入

できないことから、A2橋台背面から基部に一旦コンクリートを圧送し、それをさらに鋼管内に圧送するという手法を採った。作業計画図を図15に充填作業状況を写真4に示す。

充填の状況は、ゲージの短絡を利用した充填確認センサー、圧力計で監視するとともに、ハンマリングによってコンクリート先端の位置確認を行った。

充填区画は全部で24箇所あり、新たに充填したコンクリートの荷重によってすでに充填した弱材令のコンクリートに引張が生じないように充填順序を設定した。

充填作業は、コンクリートの供給能力などから6回に分けて実施し、いずれも圧送管の閉塞や添接部からの漏水などの大きなトラブルなく終了した。

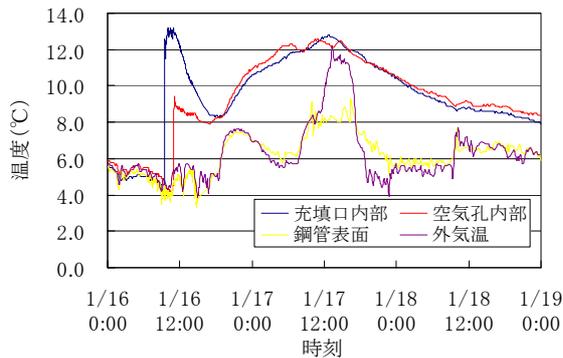


図 17 充填時温度計測結果

(2) 計測結果

(a) 概要

鋼管内の圧力は、充填孔近辺に圧力計を設置し、充填の進行に伴う圧力変化によって充填状況を監視した。

また、温度はアーチクラウンに気象観測装置を、下弦材表面（下側）および各充填区画内部の充填孔及び空気孔近辺に熱電対を設置して計測した。

(b) 圧力計測結果

計測結果を図16に示す。充填量の増加に伴う圧力上昇は理論値とほぼ一致しており、充填が順調に進行していることが確認できた。

(c) 温度計測結果

計測結果を図17に示す。充填前は、外気温、鋼管内外の温度はほぼ一致していたが、充填開始後、鋼管内の熱電対がコンクリート温度に上昇し、その後外気温によって一旦冷やされた後、コンクリートの硬化に伴う発熱によって再び上昇し、硬化の終了とともに再び外気温に漸近するという傾向を示した。なお、日中は日射の影響で鋼管外面温度と外気温に比較的大きな差が現れた。

11. おわりに

本橋は、平成17年1月にコンクリート充填作業を行った後、桁の架設作業を行い、5月に閉合式を迎えた。9月現在、年度内の供用開始を目指し、床版工事を施工中である。

本橋へのCFTの適用にあたり、設計、施工の各段階で行った検討や作業の内容を簡単に紹介した。本橋の施工実績が、今後の同形式の橋梁の普及につながれば幸いである。

謝辞：本橋の計画段階から長きにわたってご指導いただいた長崎県橋梁技術検討委員会（大橋昭光委員長）委員各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）、1986.3
- 2) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 平成9年版
- 3) 土木学会：座屈設計ガイドライン
- 4) 佐藤孝典：「円形断面の充填鋼管コンクリート構造におけるコンファインド効果のメカニズムとそのモデル化」、日本建築学会構造系論文報告集第452号、1993.10
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー93 高流動コンクリート施工指針
- 6) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針、1990
- 7) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針、1997
- 8) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1)、(2)
- 9) 社団法人 新都市ハウジング協会：CFT 構造技術指針・同解説、2000
- 10) 吉村光弘、田村一美、田崎 智、茂呂 充：コンクリート充填鋼管アーチ橋のコンクリート充填に関する実験的研究、土木構造・材料論文集 第20号、2004.12

APPLICATION OF CONCRETE FILLED TUBE TO SECOND SAIKAI BRIDGE

Satoshi TASAKI, Mitsuru MORO and Mitsuhiro YOSHIMURA

Second Saikai Bridge under construction in Nagasaki prefecture is an arch bridge to which concrete filled tube (CFT) is adopted first in Japanese Highway Bridge. Arch rib of this bridge is designed as composition pillar in consideration of bending. Seismic analysis and buckling analysis are carried out to evaluate safety of this bridge. Preceding construction of CFT, examination of filling up concrete to steel pipe, sealing, sending high fluidity concrete with pressure in field has carried out. Concrete filling up divided in six times is carried out with no trouble. The condition of filling up and hardening are watched by measuring pressure and temperature in steel pipe.