

常吉連絡橋（仮称）の製作・架設

藤村 敏之¹⁾ 橋岡 康浩²⁾ 有村 英樹³⁾ 篠田 隆広⁴⁾

常吉連絡橋（仮称）は、大阪港北部の人工島である舞洲^{まいしま}と在来地を結ぶ全長539.65mの橋梁である。本工事は、本橋梁の海上部に位置する、橋長 340.8m の逆 Y 型 1 本タワーを有する 3 径間連続鋼斜張橋の製作・架設を行うものである。本橋の工事概要や設計の特徴については、本誌 Vol.17 「常吉連絡橋（仮称）の設計」にて報告した。

本文においては、本工事の鋼桁および塔の製作、現地架設ならびに架設精度管理について報告する。

まえがき

常吉連絡橋（仮称）は、扁平六角形断面の鋼床版箱桁と逆 Y 型の塔からなる鋼斜張橋である。図-1 にその位置を示す。本橋の特徴は、塔を挟んで 1 : 2.8 とアンバランスな径間比により端支点に生じる負反力を軽減するため側径間にカウンターウェイトとして重量コンクリートを充填すること、側径間部が曲線桁であること、地組立した塔柱部を SRC 構造の橋脚にフローティングクレーン（以下「FC」と示す）により一括架設すること、などである。本文では、ケーブル定着部や地組立を中心に製作における精度管理や、現地での架設状況、新しいシステムを採用したケーブル張力と形状の管理などについて報告する。

1. 工事概要

本工事の概要は次のとおりである。

施工場所：大阪市此花区常吉～北港白津

工 期：平成 8 年 9 月 20 日

～平成 11 年 3 月 31 日

道路区分：第 4 種第 1 級

活 荷 重：B 活荷重

形 式：3 径間連続鋼床版箱桁斜張橋

塔 形 状：逆 Y 型 1 本タワー

塔 高：80m

主桁形状：4 室構造鋼床版箱桁

桁 高：2.4m

ケーブル：ファン型 2 面 6 段マルチケーブル

φ 7 mm 素線 ノングラウトタイプ

素線数 295 本 (3 段), 499 本 (3 段)

橋 長：340.800m

支 間：24.000+65.000+248.850m

標準幅員：車道部 8.500m

歩道部 3.250m

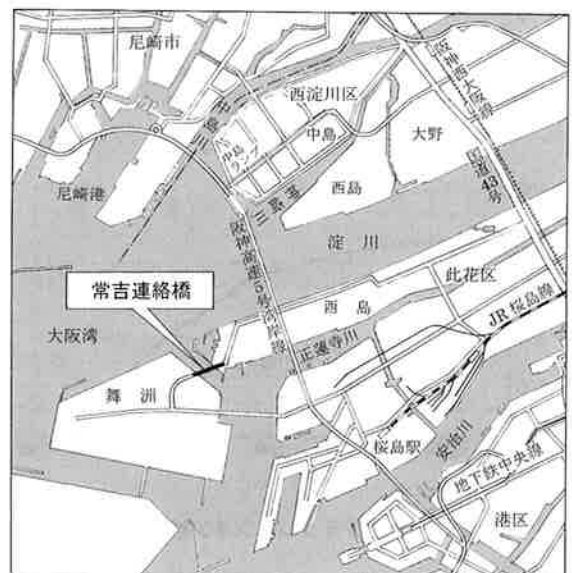


図-1 位置図

- 横断勾配：車道部 $i = 6.0 \sim \pm 1.5 \%$
歩道部 $i = 2.0 \%$
- 縦断勾配： $i = -3.0 \sim 3.0 \%$
- 平面曲線： $R = 200m \sim \infty$ (直線)
- 架設工法：FC 大ブロック架設
クローラクレーンベント架設
- 主要鋼種：SM570, SM520, SM490Y, SS400

2. 工場製作

本橋の主桁と塔の工場製作における精度管理について以下に述べる。

(1) 主桁の製作

本橋の主桁は、4室構造の鋼床版箱桁で、外側腹板はケーブル定着鋼管の橋軸直角方向の角度にあわせて傾斜させている。定着鋼管は腹板に割り込むように取り付けられるため、製作にあたっては、腹板の角度管理に高い精度が要求された。とくに、側径間部は、写真-1に示すように、短い区間に定着鋼管が集中しているうえ、 $R=200m$ の曲率半径を有する曲線桁であり、ケーブル角度は橋軸方向、橋軸直角方向とも大きく変化する。このため、定着鋼管の角度は1本毎に異なり、定着腹板の傾斜角度も連続的に変化するという複雑な構造となったが、定着鋼管の取付角度は $20'$ 以下の精度管理基準を設け、加工を行った。

大きな負反力を支える端支点部のペンデル支承は、連結ピンにより主桁の2枚のシャイベにある軸受部に固定される。この軸受部の精度を確保するため、連結ピンと同径に製作した仮ピンを挿入した状態で主桁の組立時から溶接完了までの作業を行った。また、本橋の水平支承は平面寸法が $1.6 \times 2.5m$ と大型であるため、ソールプレートの

平面度は通常よりも厳しい管理を行った。

主桁は、側径間部の一部を除き、工場製作後、地組立により5つの大ブロックにし、FCにより現地に架設した。地組立部の継手は、鋼床版および下フランジを地組立溶接、腹板やダイヤフラムなどを高力ボルト接合とした。地組立溶接部は全線にわたって、超音波自動探傷(AUT)による非破壊検査を実施した。

主桁の製作はJV各社の4工場で分担し、3ヶ所で地組立を行った。地組立では、一般の管理基準値以外に、表-1に示すように厳しい精度管理目標値を設けると共に、大ブロック間の継手部は重複仮組立を行うことにより、精度の確認を行った。

表-1 地組立時精度管理目標値

検査項目	管理目標値	備考
全長	$\pm 3\sqrt{N}$ (mm)	N: ブロック数
鉛直度	$H/1000$ (mm) 以下	H: 桁高 (mm)
デッキプレート全幅	± 10 (mm)	
キャンパー	$-5 \sim +10$ (mm)	
通り	$L/10000$ (mm)	L: 地組立長 (mm)
対角線長	$D1 - D2 \leq 10$ (mm)	D1, D2: 対角線長
現場継手の間隔	± 5 (mm)	

(2) 塔の製作

図-2に製作のフローチャートを示す。

塔のケーブル定着部は、図-3に示すように、ケーブル張力が定着座金を介してシャイベに溶接された支圧板へ伝達される構造のため、定着座金と支圧板との密着度が重要となる。このため、定着座金と支圧板との直角の製作精度管理目標値を $1/200$ として、定着座金と接触する支圧板の端面をフェーシングマシンによって、切削加工した。また、約1tfの定着座金は、写真-2に示すように部材組立時に所定の位置に組み込んだ。

塔は約9mの部材にて工場製作を行い、地組立



写真-1 ケーブル定着部主桁

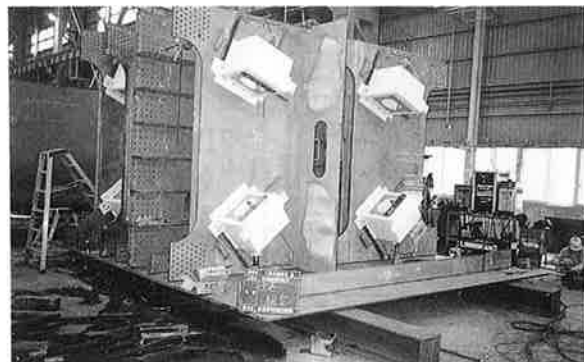


写真-2 定着座金の取付状況

により1つの大ブロック部材とし、FCで一括架設を行った。このため、架設時に塔の鉛直度を調整することが困難であり、地組立時の管理が重要であった。工場溶接完了後に各部材の芯出し作業を行い、各端面のコーナー部をフェーシングマシンによって切削加工した。また、部材検査によ

って部材長、断面直角度、断面のねじりを計測し、先行して製作した部材の計測結果を後続の部材の切削に反映させた。地組立時には、部材のコーナー部をメタルタッチとし、部材の四隅を拘束することで地組立溶接前の形状管理を行った。以上のような管理体制の結果、地組立溶接完了後の鉛直度は精度管理目標値を満たすものになった。

架設後の鉛直度確保のためには、塔柱の地組立精度の確保と共に、本工事に先立ち施工されたSRC橋脚の上端面の精度が問題となる。そこで、SRC上端面の実測を行い、計測結果にあわせて塔柱下端面の切削を行った。また、塔柱とSRC部の連結板もこの計測結果をもとに製作した。

地組立溶接部は、主桁と同様に全線をAUTによる検査を行った。また、景観に配慮して外面の溶接部はすべて仕上げを行った。

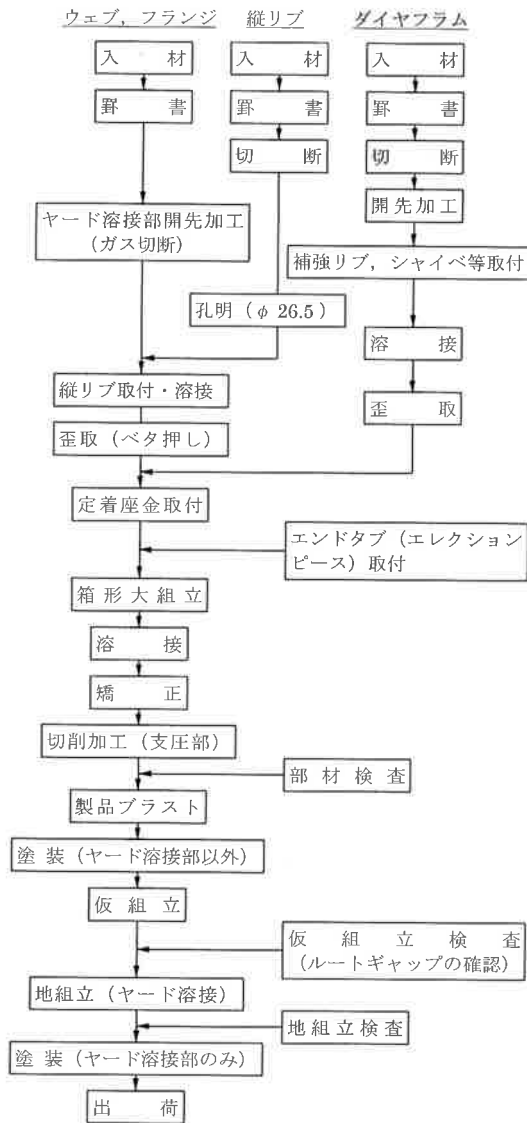


図-2 塔の製作フローチャート

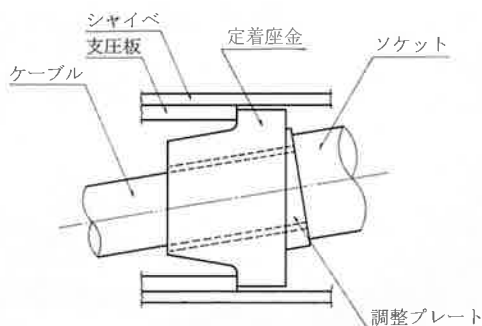


図-3 塔側定着部

3. 現場施工

(1) 施工計画

本橋の架設地点は主に小型船舶の航行路として利用されており、海上部の主桁架設は短期間で施工可能なFCによる大ブロック架設工法を採用した。陸上部となる側径間部の架設は、単材によるクレーンベント工法とした。図-4に主桁の架設概要図を示す。また、塔についてもFCによる大ブロック架設工法とした。

(2) 主桁の架設

1) 主桁の大ブロック架設

地組立をした主桁大ブロックは、各地組立場から台船と吊曳航により架設現場まで輸送した。

P3~P4径間を結ぶJ2~J7桁の架設は、各支点の水平支承を脚上に据え付け、鉛直支承は架設桁に付けた状態で架設を行った。基準は橋軸方向、橋軸直角方向とも固定となるP4水平支承とし、他の支承は橋脚ベースプレート上に設けたガイドにより遊間位置を調整した。

海上部には3基のベントを設置した。海上ベントの杭基礎は、設置場所が軟弱な地層であるため、第1天満層での先端支持力のみで設計した。また、架設完了後には杭を撤去する必要があるため、鋼管杭は使用せず、ベント1基あたり24本のH鋼杭を使用した。撤去作業は、引き抜き用として200tf吊クローラ台船+120kwパイプ

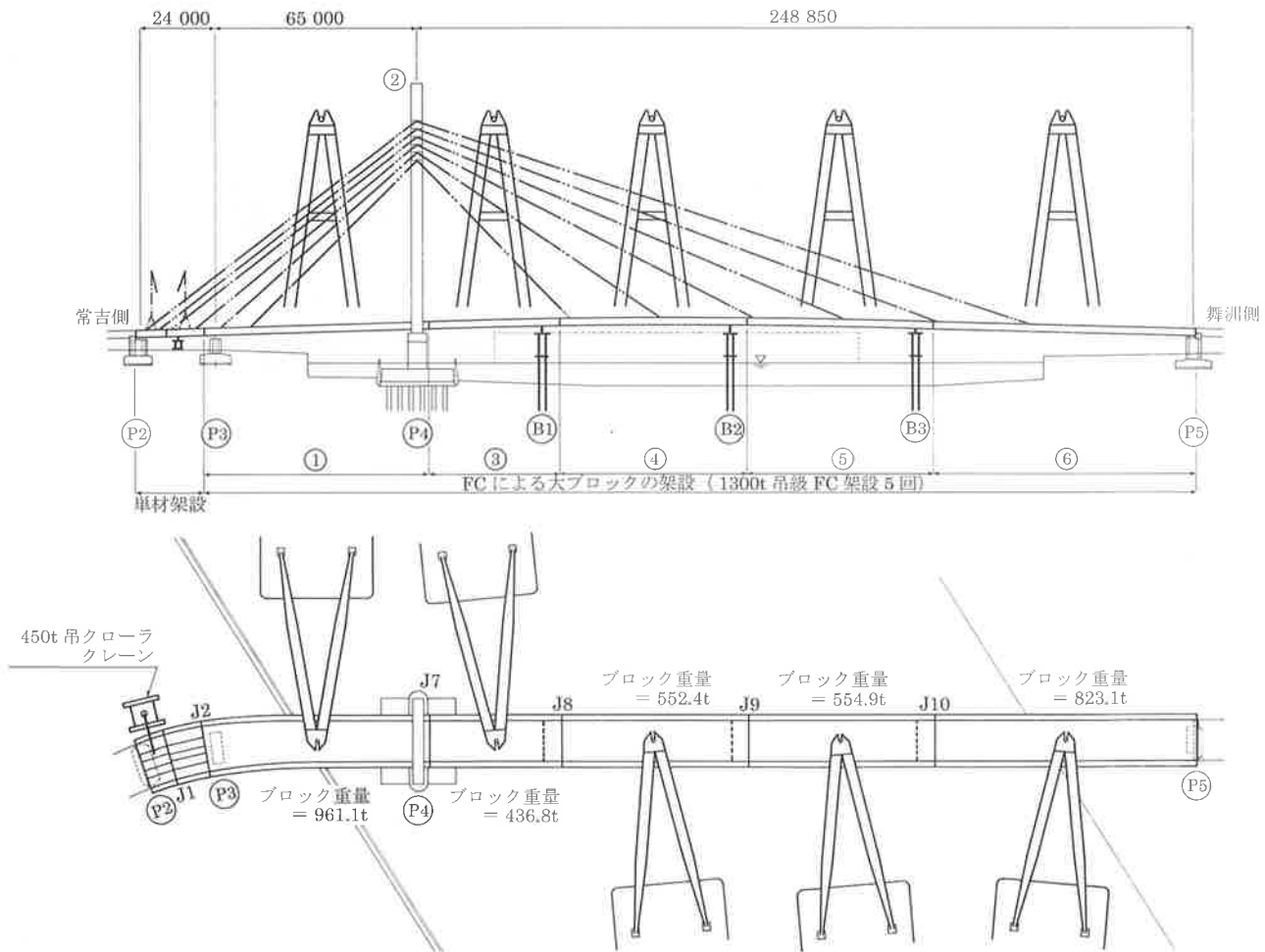


図-4 架設概要図

口、横持ち介錯用として50tf吊クローラ台船を使用し、平行に係留して作業を行った。また、撤去時には桁下作業高が10mしか確保できないため、3m単位で杭を切断しながら撤去した(写真-3)。

水路上となる桁大ブロック架設は、4ブロックともセッティングビームを使用したモーメント連結方式とした。架設に先立ち行った解体計算の結果、最終ブロックとなるJ10～P5桁の架設では、FCの荷重負荷が約30%となった時点

で継手仕口が合うため、図-5に示すようにセッティングビームとP5鉛直支承で荷重の一部を負担させ、仕口形状が合うまでFC荷重負荷を開放して架設した。

2) 主桁単材架設

P2～J2間の主桁は、10個の単材ブロックを450tf吊クローラクレーンによりベント架設した(写真-4)。このうち、端支定点部にあたる2ブロックにはペンデル支承の上側半分が工場で組み込まれており、1部材の重量は100tfであった。



写真-3 ベント杭の撤去状況

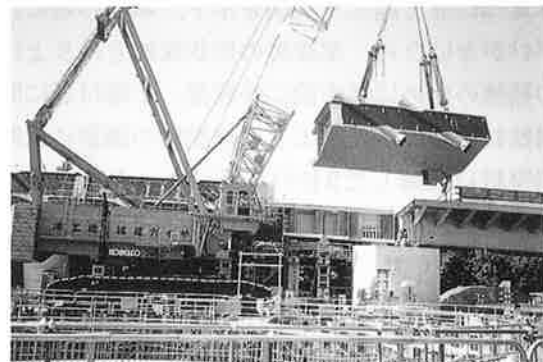


写真-4 主桁単材架設

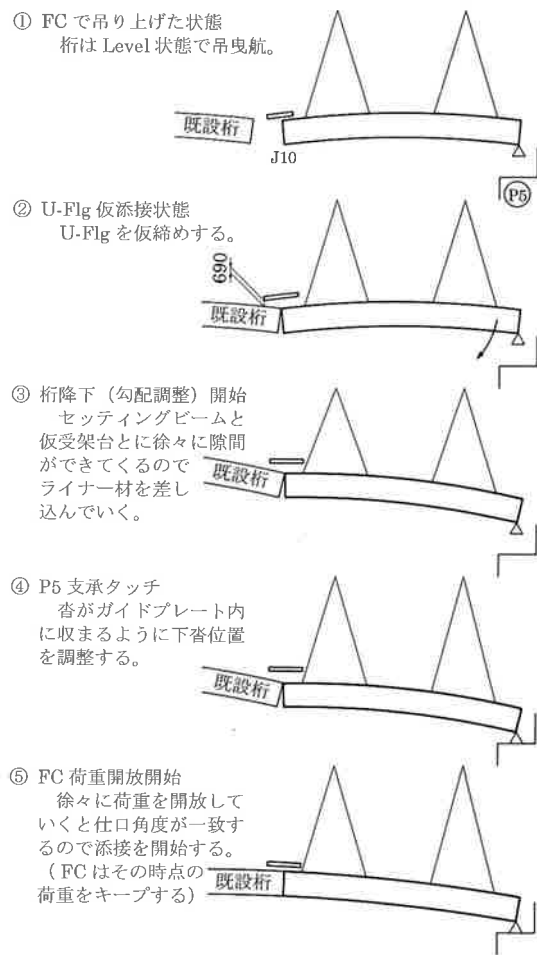


図-5 最終ブロックの架設

単材架設部の現場継手は、腹板、ダイヤフラムのすべてと鋼床版、下フランジの橋軸直角方向継手を高力ボルト継手とし、鋼床版、下フランジの橋軸方向継手は溶接継手とした。このため、桁の支持は溶接時の足場を兼ねた多柱式作業床とした。現場溶接はCO₂半自動溶接とした。

(3) 塔大ブロック架設

塔は地組立場で立て起こしを行い、FCにより現場まで吊曳航し、SRC橋脚上に一括架設した。写真-5に立て起こし状況を示す。本橋の塔には水平材がないため、架設時の形状保持と吊り上げ時の補強のために塔中段に架設梁、下端付近に間隔調整材を設けた。SRCとの連結時の調整には間隔調整材に設置した2台の油圧ジャッキを使用した。

塔架設後、架設梁は酸素ランスにて切断し、両側の梁はFCで、中央部は塔頂に設けた巻き上げ設備にて撤去した。なお、塔はケーブルの架設までの間、自立状態となる。風洞実験の結果、自立時には、風速20~50m/sまでの広い風速域で塔面

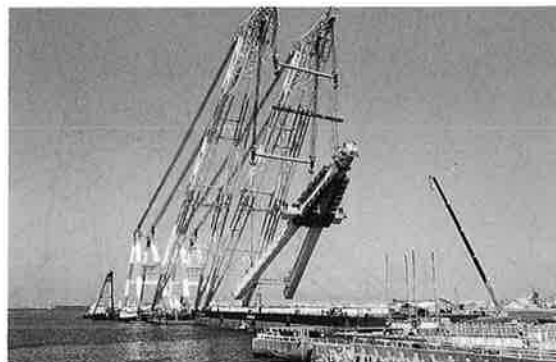


写真-5 塔立て起こし状況

外方向の限定振動の発生が予測された。そこで、架設時の制振対策として、塔頂部付近にTMD (Tuned Mass Damper) を設置した¹⁾。

(4) ケーブル架設

塔側のケーブル定着は、橋面上より定着部までの高さが65mあること、橋面の車道幅員が9.5mしかないこと、塔の形状が逆Y形で定着間隔が最上段ケーブルでは2.7mしかないことから、塔頂部にウインチ駆動による巻き上げ設備を設置した。図-6に示すようにウインチは陸上部に設置し、吊り上げ荷重の管理は滑車固定部に組み込んだロードセルで行い、荷重計をウインチ操作部に設置した。また、吊り上げ梁は支持梁上を各ケーブルの中心に移動できる構造とした。

ケーブルは桁側定着付近にアンリーラを設置し、塔側に向かって展開した。塔付近までの引出しには直引き3tfのウインチを使用した。塔付近から

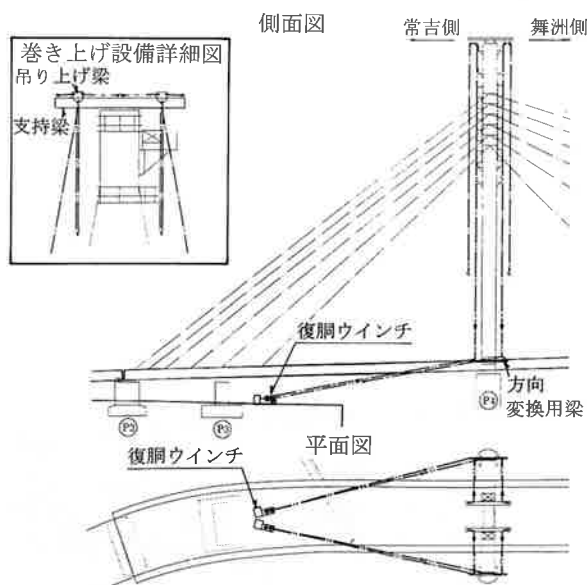


図-6 ケーブル巻き上げ設備図

は、ケーブル先端部分を巻き上げ設備で吊り上げながらリールから解放した。中間のサグとりには、ケーブル長に合わせて160tf吊から25tf吊までの油圧クレーンを2～5台適宜配置した（写真-6）。

なお、本橋のケーブルは景観を考慮し、フッ素系のコーティングにより白色に着色されており、ケーブル台車の転倒などによりケーブルを傷つけることがないように全台車を連結した。

架設時のケーブル張力は最大で800tfを超えることから、桁側の引き込みにはワイヤークランプを用いた1,000tfのセンターホールジャッキを使用した。1次引き込みは50tfまでとし、φ50mmのワイヤとワイヤークランプの組合せにて行った。また、1次～2次への盛り替え時に過引き込みによるトラブルを防ぐため、ワイヤ定着部には青、黄および赤の着色を施した。



写真-6 ケーブル架設状況

(5) カウンターウェイトコンクリートの施工
側径間端支点に生じる非常に大きな負反力を軽減するため、側径間に中間橋脚を設けると共に、側径間の主桁断面内には、カウンターウェイトとして、3,000tf以上のコンクリートを充填している。充填したコンクリートは、骨材に磁鉄鉱石を使用することにより、単位容積重量を3.8tf/m³程度とした重量コンクリートを使用した。重量コンクリートは、主に船舶のバラストやクレーンなどのカウンターウェイトとして利用され、一般にはスランプ8cm程度としている。しかし、本橋では、鋼床版上の打設孔から桁内に充填するため、高流動化した重量コンクリートを開発し使用した。

打設量は、桁上に設置した可搬式の軸重計で、打設前後のアジテータ車の重量を計測することにより管理した。橋梁全体の重量バランスを保つため、充填部を隔壁に囲まれた22のセルに分割し、各々のセル毎に設計打設量を設定し、充填する重

量コンクリートの重量を管理した。また、打設量の調整はコンクリート充填部の中央付近に調整セルを設けて行った。

重量コンクリートは特殊な配合であり、また、フレッシュ時の性状から一般の陸上コンクリートプラントでの生産が難しい。そのため、本施工はコンクリートプラント船（以下「CP船」と示す）を使用した。P4橋脚付近に係留したCP船で製造された重量コンクリートは、ベルトコンベアと運搬用バケットにより桁上に設置した中間ホッパーまで荷揚げした。中間ホッパーから打設箇所までは、アジテータ車で運搬し、打設ホッパーを介して桁内に打設した。なお、高流動化した重量コンクリートの開発や施工試験、実施工時の状況などについては、本誌「高流動化した重量コンクリートの開発および施工」で詳しく報告する。

4. 架設精度管理

(1) 架設精度管理概要

ケーブル系橋梁の中でも斜張橋は高次の不静定構造物であり、設計段階で力学的合理性や鋼桁自重の最小化を目指したプレストレスが設定される。このため設計時に想定した張力、形状の再現が不可欠となる。このとき、構造物の応力状態がケーブル張力に敏感に影響するので、ケーブル張力および形状を実測し、設計時の応力状態および形状をできるだけ設計時に近づけることを目的にケーブル調整が行われる。

当社では、このケーブル調整システムに人工生命技術の代表的な手法である遺伝的アルゴリズム（以下「GA」(Genetic Algorithm)と示す）を採用し、シム調整量の解候補の集合を提示することが可能なシステムを考案し採用した。本システムについては、本誌「遺伝的アルゴリズム法を用いたケーブル張力調整システムの開発」に詳しく報告する。

(2) 架設精度管理の方針

本橋の架設精度管理は、以下のステップに分けて実施した。

ステップー1 架設時の管理

各架設段階においては、海上ベントの反力計測の不確実性や現場工程により、ケーブル張力および形状の確認計測と位置付けた。ケーブルは1段

4本を1サイクルとして、下段から順に6段階に分けて架設される。各架設段階において、架設の完了しているすべてのケーブル張力、形状および橋体温度の計測を実施し、必要であればシムプレート量を調整する。

ステップー2 カウンターウェイト施工後の管理
張力調整の最終段階という位置付けで、張力、形状および橋体温度の計測を行う。

(3) 精度管理項目

架設精度管理で着目する項目を図-7に、計測に使用する機器を表-2にそれぞれ示す。

(4) 管理目標値

本橋の管理目標値は各種誤差解析の結果および過去の実績調査により表-3のように定めた。

(5) 精度管理要領

1) 管理要領

本橋の精度管理のフローチャートを図-8に示す。架設計画に基づき解体計算を行い、各計測ステップ毎に設計張力と形状を求める。前述のように計測は、架設途中段階の6ステップと、最終段階の2ステップに分けて計8回実施した。計測は張力および形状を同時刻に始め、計測終

表-2 管理項目と計測機器

管理項目	計測項目	計測機器
形状	主桁キャンパー 塔頂の倒れ	3次元光波測距儀
ケーブル張力	ケーブル張力	加速度計、加速度増幅器 オシロスコープ
温度	部材温度 ケーブル温度	熱電対 ダミーケーブル

表-3 管理目標値

管理項目	管理目標値
塔の倒れ δ	$\delta = \pm H/2000$ (mm) $= \pm 80000/2000$ $= \pm 40$ mm ただし H は塔高 (mm)
主桁 キャンパー δ_c	$\delta_c = \pm \{25 + 0.25(L-50)\}$ (mm) P2-P3 間: $\delta_c = \pm 19$ mm P3-P4 間: $\delta_c = \pm 29$ mm P4-P5 間: $\delta_c = \pm 75$ mm ただし L は支間長 (m)
ケーブル張力	$(D+PS) \times 0.15$ ただし D は死荷重張力, PS はプレストレス (tf)

了後、架設現場に設置し計測室において調整量の検討および決定を行う体制をとった。

2) 張力計測

本橋では計測の簡易性と計測精度を考え、短時間で比較的高精度な計測が可能なケーブルの固有振動数から張力を算出する振動法（強制加振または常時微動）にて計測した。

張力の算定にはこれまで新家²⁾らの算定式が用いられてきた。しかし、本橋のようなケーブ

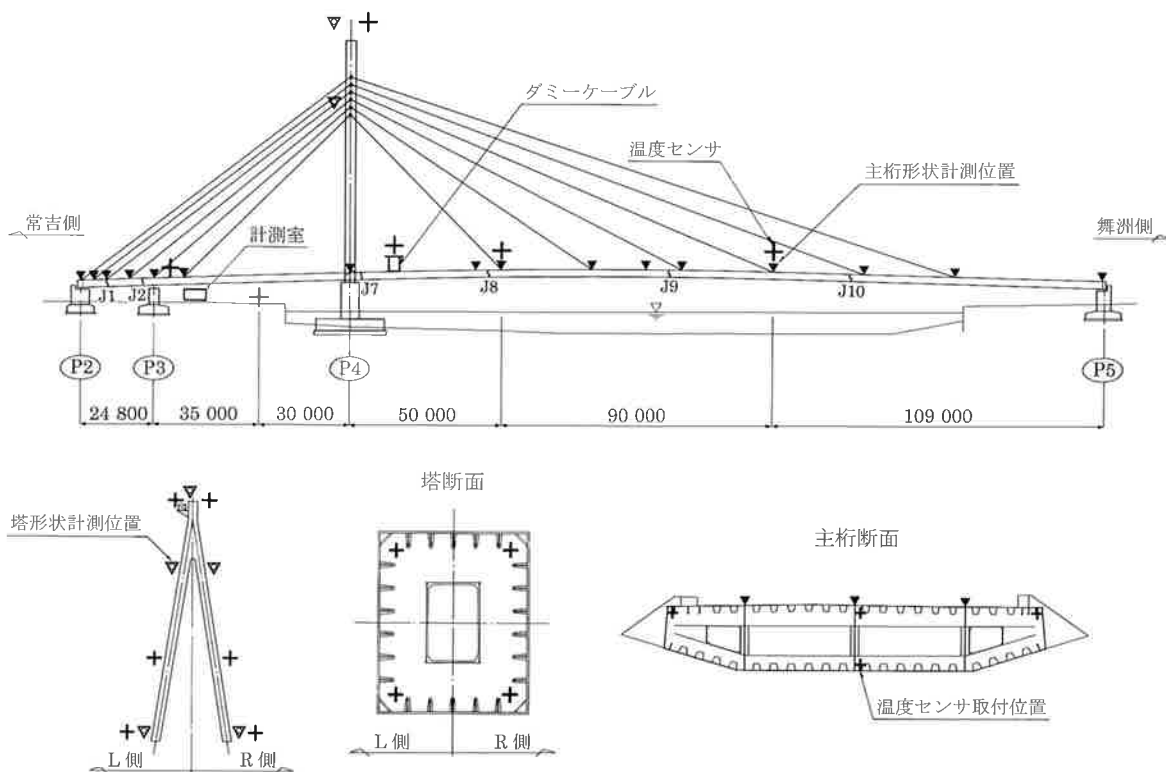


図-7 計測概要

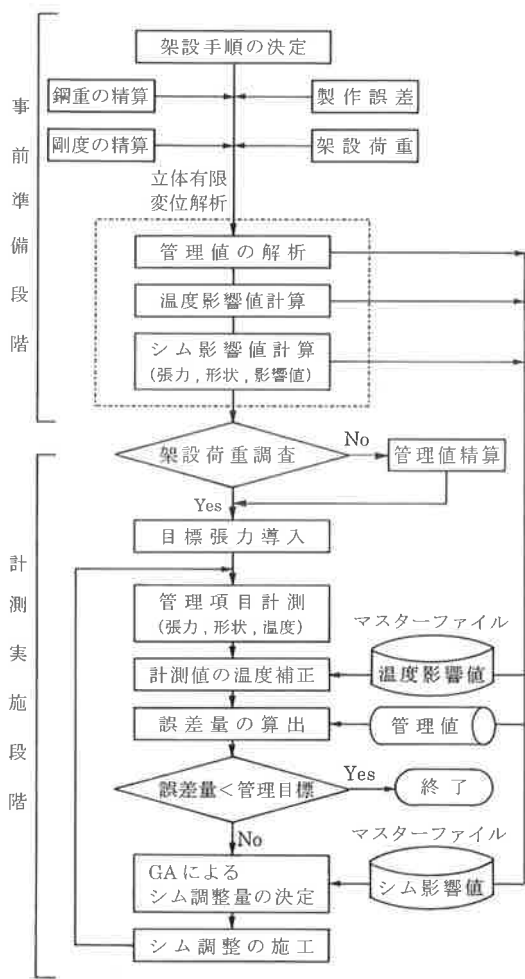


図-8 計測フローチャート

ル長が200mを超える場合、常時微動での計測は精度上問題となる。このため、頭井³⁾らは算定式に対して補正を行っており、本橋においても張力計測システムに取り入れた。

計測は計測機器を車載し主桁上を移動する体制をとり、1パーティで行った。この結果、24本のケーブル張力の計測を約2時間と短時間のうちに行うことができた。

3) 形状計測

形状計測は、主桁および塔とも3次元光波測距儀を使用した。各計測点に設置したターゲットの3次元座標を計測し、計測結果は塔基部を原点とする座標系に座標変換した。

4) 温度計測

張力および形状は橋体の温度差の影響を受けるため、橋体と塔付近の桁上に設置したダミーケーブルの温度を計測し、温度差の少ない時間帯を事前に選定し計測を実施した。

(4) 精度管理システム

本橋の解析、シム調整量計算には当社保有のケーブル系橋梁の架設精度管理システムCCS (Cable Control System)^{4),5)}を用いた。CCSは下記の一連のプログラムにより構成されている。

- ①立体有限変位解析プログラム (Finds)
- ②影響値計算プログラム (SENS)
- ③解体計算プログラム (Erection)
- ④最適シム決定プログラム (GA)

(5) 架設時張力調整

架設段階におけるケーブル張力調整は、調整対象ケーブルを先端の4本とし、架設途中の安全確認を主目的に微調整は行わずに架設段階毎に調整作業を行った。計測結果を図-9, 10に示す。

ケーブル架設が完了した段階での張力の誤差量としてはわずかな値であり、架設段階における張力調整は十分に目的を達成したと判断した。

主桁の形状は各計測ステップを通じて側径間、主径間とも全体的に高めの傾向が続いた。全ケーブル架設完了時における最大誤差は27.9mmと管理値75mmを満足する結果となった。

(6) 最終調整

最終調整は、カウンターウェイトの施工後に行った。

1) ケーブル張力

最終調整時における橋体温度の計測結果を図-11に示す。

最終調整量の決定にあたっては、前述のGAによる最適シム決定プログラムにより計算された解の集合の中から調整本数12本の解候補に着目した。調整対象となるケーブルのうち、架設段階の調整におけるケーブル張力の変動性能を考慮して、最終的に7本のケーブル調整することとした。最終調整前後のケーブル張力を図-12に示す。調整後の最大の張力誤差は9.9%となり、すべてのケーブルの張力が管理目標値以内に収めることができた

2) 形状

最終調整前後の形状計測結果を図-13に示す。調整直後の主桁形状は、全体的には高めの傾向がみられたが、最大誤差は25.2mmであった。塔頂部の誤差は39.5mmであった。

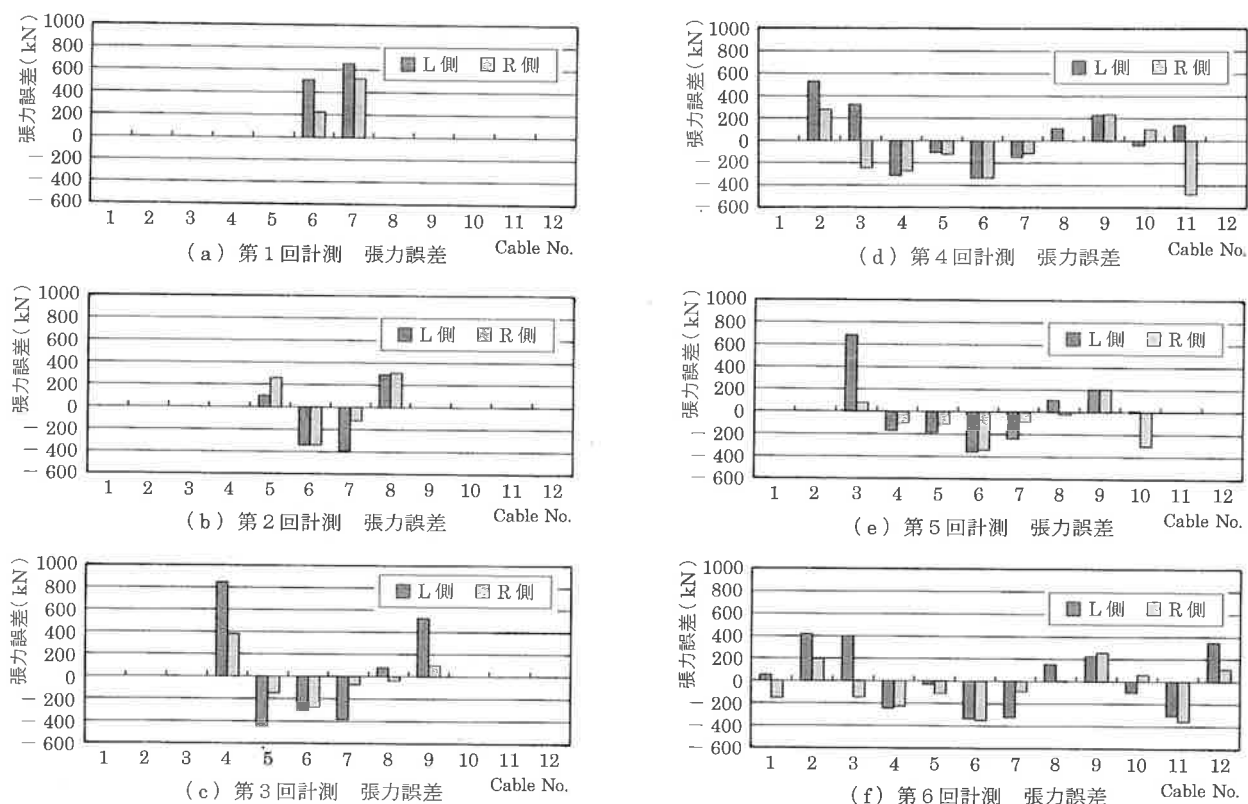


図-9 架設時 張力計測結果

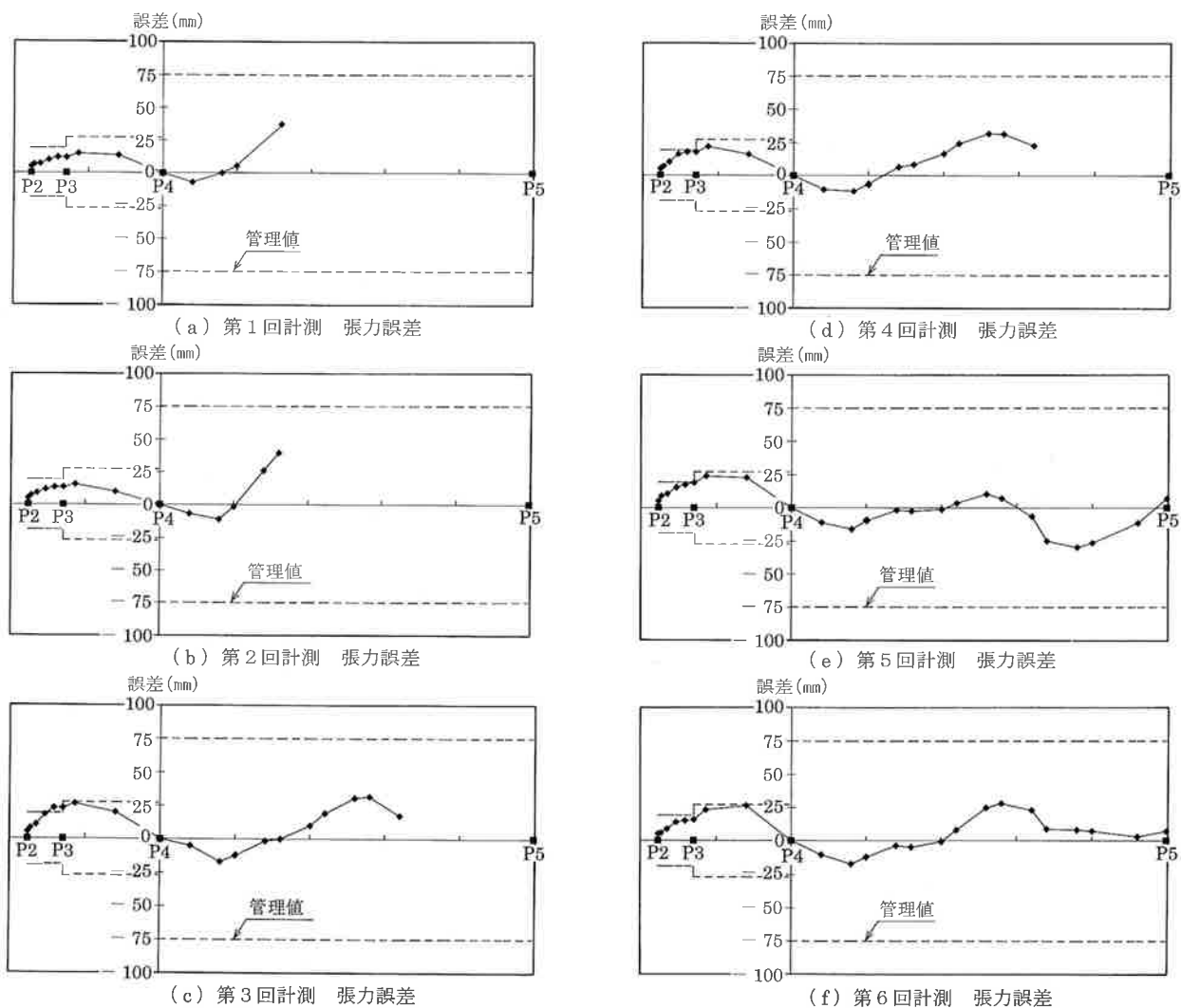


図-10 架設時 形状計測結果

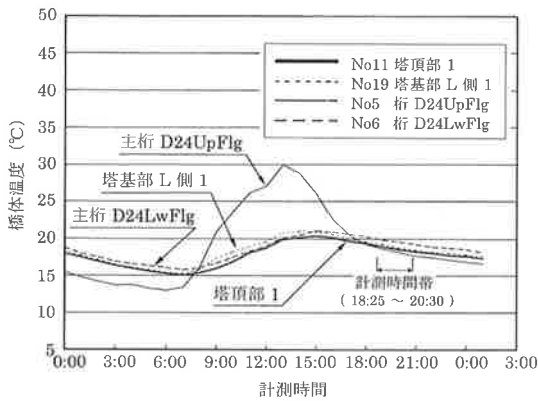
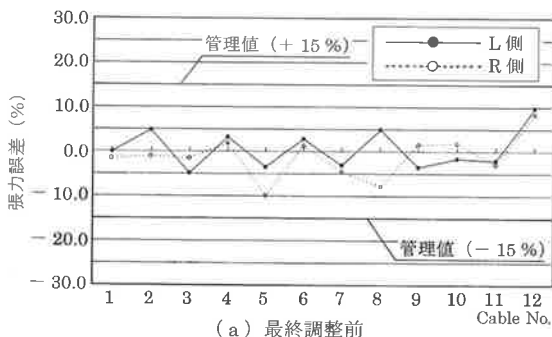
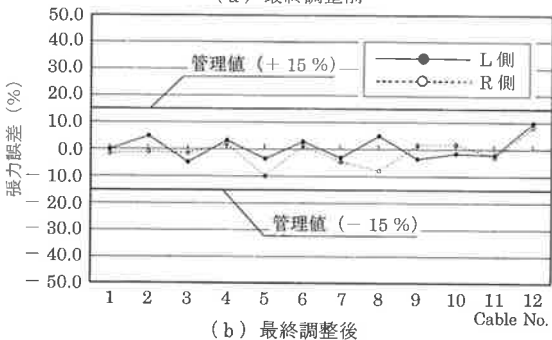


図-11 橋体温度計測結果

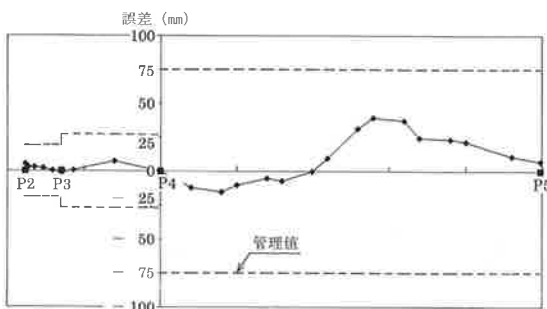


(a) 最終調整前

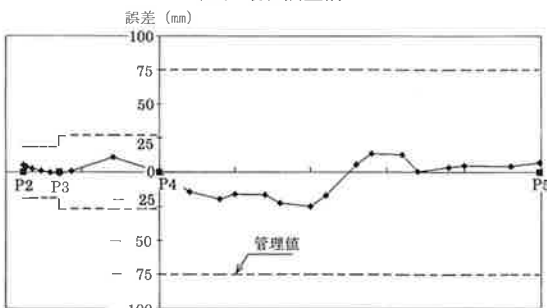


(b) 最終調整後

図-12 張力計測結果



(a) 最終調整前



(b) 最終調整後

図-13 形状計測結果

あとがき

本橋は斜張橋という形式から、ケーブル定着部など高い精度を必要とする部材が多く、製作にあたっては厳しい精度管理を行った。

架設では工事期間中、水路を全面閉鎖しての作業であり、限られた期間内で完了する必要があった。24時間体制で警戒船を配備し、第三者の進入がないよう厳重な監視を行う一方、限られた範囲内で複数の船舶を使用しての同時作業を行った。ケーブル架設に関しても架設完了日の夜間に張力などの計測、調整シム量の算出を行い、翌朝には調整作業を行うことにより途切れることなく作業を進めることができた。この結果、水路閉鎖期間は当初の予定より1ヶ月短縮することができた。

現場では現在、平成11年春の開通に向けて、橋面工の仕上げ作業を行っており、本誌が発行される頃には、供用が開始されている予定である。

本橋が、緑の多いヨットハーバーから、自然と人間との共生と調和を目指した舞洲スポーツアイランドを結ぶ人に優しい橋として、数多くの利用者に愛されることを期待してやまない。

最後に本工事の施工にあたり、多大なご指導、ご協力を賜った大阪市建設局の方々ならびに関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木場和義・小川路加・新田吉伸・幽谷栄二郎・細見雅生：TMDの開発－基本性能について、駒井技報，Vol.17，pp.74-80，1998.
- 2) 新家 徹・広中邦汎・頭井 洋・西村春久：振動法によるケーブル張力の实用算定式について、土木学会論文報告集，No.294，pp.25-34，1980.
- 3) 頭井 洋・新家 徹・濱崎義弘：振動法によるケーブル張力实用算定式の補正，土木学会論文集，No.525/I-33，pp.351-354，1995.
- 4) 有村英樹・玉田和也・細見雅生：Cable Control Systemの紹介(その1)，駒井技報，Vol.13，pp.53-61，1994.
- 5) 有村英樹・玉田和也・細見雅生：Cable Control Systemの紹介(その2)，駒井技報，Vol.14，pp.78-87，1995.