

1. 複合斜張橋の設計と施工 — 銚子大橋（斜張橋部） 上部工工事 —

技術委員会 設計小委員会
青木大輔 増田高志 小塚正博

1. はじめに

昭和 37 年に建設された一級河川の利根川に架かる一般国道 124 号銚子大橋は、千葉県東総地域と茨城県鹿行地域を結ぶ数少ない幹線道路として、地域の発展を担ってきた（図-1）。しかし、塩害等による橋の損傷が著しく、20tf 超の大型車の通行規制や耐震性の問題がある上に、幅員が狭く歩道がなく、歩行者への安全性向上の観点からも架替えを行うこととなった。

形式選定では、国内初のエッジガーダータイプの複合斜張橋が採用された。ここでは、構造概要、ケーブル定着部および鋼コンクリート合成床版の検討を記す。さらに、主塔、上部工およびケーブルの施工について報告する。



図-1 位置図

2. 橋梁概要

新橋は、現橋に並行して約 20m 上流に架設され、航路上の 4 径間連続複合斜張橋、茨城側の 6 径間連続鋼床版桁橋、銚子側陸上部の 4 径間および 2 径間連続 I 桁橋から構成される。これらの内、斜張橋部の橋梁諸元を以下に示す。

所在地：千葉県銚子市～茨城県神栖市

発注者：千葉県 県土整備部

道路規格：第 3 種第 2 級

設計速度：60km/h

橋長：473.7m（全長 1209.1m）

支間長：106.3+192.6+107.4+65.45m

幅員構成：車道：7.5m + 歩道：3.5m

橋梁形式：4 径間連続複合斜張橋（RC 主塔）

基本風速： $U_{10}=45\text{m/s}$

地盤種別：II 種地盤（地域区分 A, $C_z=1.0$ ）

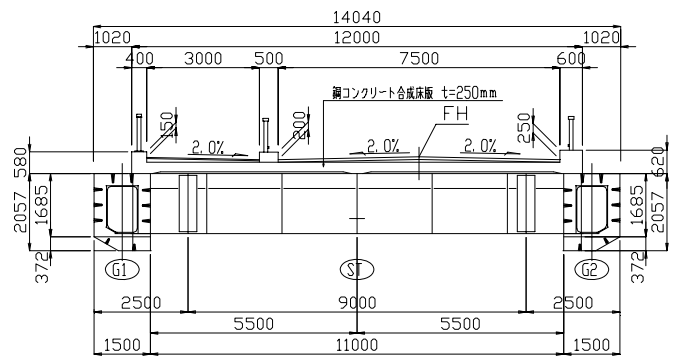


図-2 主桁断面図

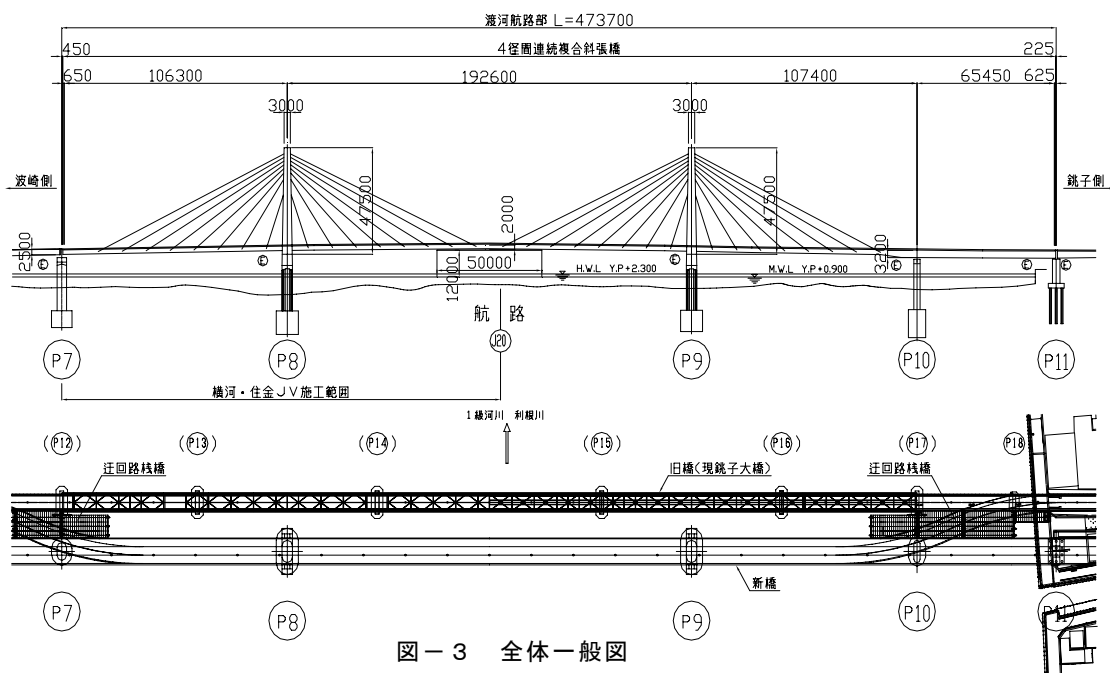


図-3 全体一般図

3. 鋼2主桁複合斜張橋の採用

新橋の選定条件として、建設費が低コストであること、トラス橋迂回までの工期短縮（早期迂回）が可能な構造形式であることが求められた。そこで、制約の厳しい橋脚配置条件の中で、河川内の橋脚の基数を最小とすることにより工期を短縮でき、かつ経済的な橋梁として海外で施工実績の多いエッジガーダータイプの鋼2主桁複合斜張橋を採用した。

3. 1 構造概要

鋼2主桁複合斜張橋は、Alex Fraser 橋（カナダ）を始め、Owensboro 橋（米国）、Rion-Antirion 橋（ギリシャ）等の施工実績がある¹⁾。この形式は、RC主塔と幅員の両外側に配置された鋼I断面のエッジガーダーを有し、主桁の上フランジに取り付けたコネクションプレートを介してケーブルで支持する構造である。床版は、縦桁と横桁で構成された床組にプレキャストRC床版を配置し、ループ継手部に後打ちコンクリートを打設して、連続化を図っている。

本形式を銚子大橋に適用するために、国内の設計規準に準拠した構造への改良をはじめ、現地の特性に配慮した耐風安定性や耐震性に対する検討を行った。その結果、国内で施工実績の多い少数主桁橋や細幅箱桁橋の構造および設計手法を斜張橋に応用した。特徴を部位別に整理すると、以下のとおりである。

① 主桁：ケーブル定着部や添架物が箱桁内に収まり、耐風安定性に優れた断面を設定しやすい箱断面とした。

②床組構造：床版支間を橋軸直角方向とし、維持管理の観点から構造の簡素化を目的に、主桁間に1本の縦桁を設置し、橋軸方向に11.4mのケーブル定着点間隔で横桁を配置した。

③床版：海外事例による方式では、後打ちコンクリート部のひび割れ発生に起因する耐久性の低下が懸念されるため、鋼コンクリート合成床版を採用し、コンクリートは主桁閉合後に一括して打設することで連続性を確保した。また、主桁との合成作用に対するひび割れ幅の照査を行い、鉄筋により補強を行った。

④ケーブル定着部：海外の施工事例では、図-4(a)に示す定着構造が一般的である。本橋では、定着部の防錆の向上と応力伝達をスムーズにして疲労耐久性の向上を図るため、箱桁内に定着梁を設け、定着する構造を採用した（図-4(b)）。

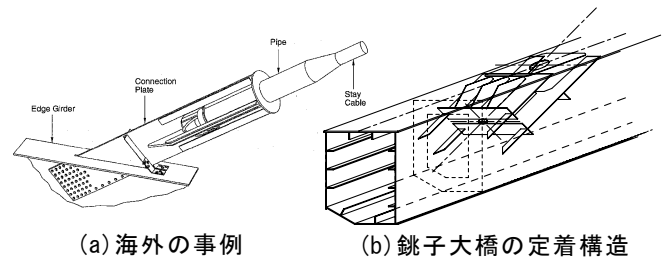
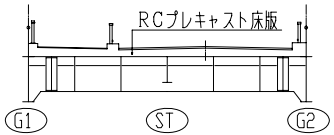
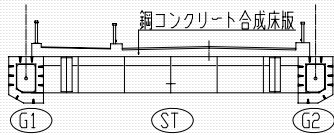
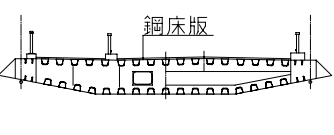


図-4 ケーブル定着構造の概略図

海外の鋼2主桁複合斜張橋と本橋の構造形式、および既往の鋼斜張橋との比較を、表-1に示す。鋼重では300kg/m²と既往の鋼斜張橋の600kg/m²に比べ半分となった。海外での実績が多い鋼I断面のエッジガーダーの適用が可能な条件であれば、さらなる鋼重の削減も可能である。

表-1 構造形式の比較

比較項目	海外における施工実績	銚子大橋	既往の鋼斜張橋
主桁形状			
床版	プレキャストRC床版+ 場所打ちコンクリート	鋼・コンクリート合成床版	鋼床版
床版支間	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸・橋軸直角方向
床組み構造	橋軸方向に4~5m 間隔で横桁配置	主桁間に縦桁1本 横桁間隔は11.4m	橋軸方向に2.5m 間隔で横リブ配置
定着部構造	桁より上で定着	箱桁内で定着	箱桁内で定着or アンカー方式・・・等
ケーブル	現場施工型ケーブル	現場施工型ケーブル	工場製作ケーブル
主塔	RC製	RC製	鋼製
鋼重	180~220kg/m ²	300kg/m ²	500~700kg/m ²
桁高支間比	1/150~1/250	1/100	1/150~1/250

3. 2 耐風安定性の検討

海外の施工事例では、鋼2主桁複合斜張橋には、耐風安定性を確保するためにフェアリングや整流板等の2次部材が設置される例が多い。しかし、2次部材はコスト増となり、腐食環境下における耐久性にも課題がある。

そこで、2次部材を設置せず、風洞実験による剥離干渉法²⁾により、主桁の断面形状を改良することで、耐風安定性を確保した。

主桁配置および断面形状を、図-5に示すパラメータで変化させ、耐風安定性に及ぼす影響を調べた。低風速域にて渦励振が発生したが、その大きさは θ_d の影響を受け、 $\theta_d=30^\circ$ で最も振幅が小さく、 $\theta_u=30^\circ$ 、 $\theta_d=30^\circ$ 、 $p/D'=0.38$ とした断面形状が最も耐風安定性に優れていた。

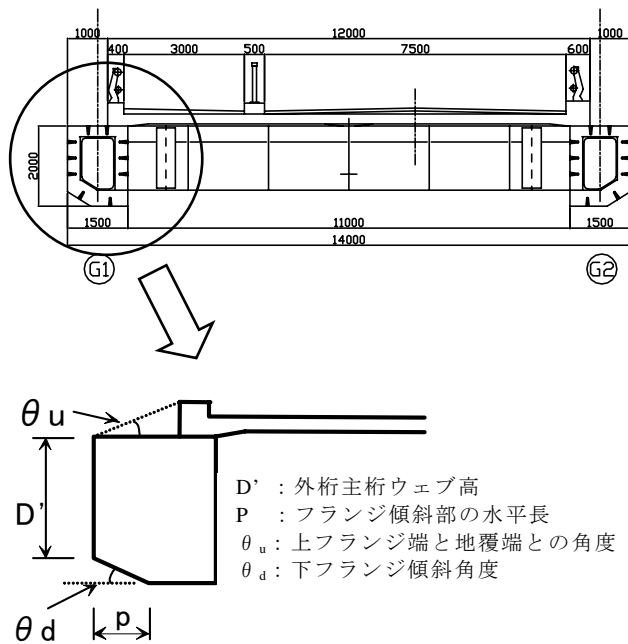


図-5 パラメータの設定

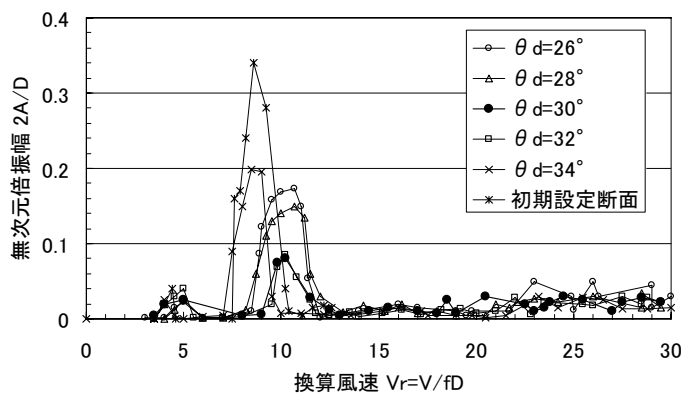


図-6 θ_d 毎のたわみ振動応答

4. 工場製作

4. 1 ケーブル定着部の検討

ケーブル定着部は、細幅な箱桁内に定着梁を収め、現場施工型ケーブルを桁内で緊張する構造とした。主桁断面が幅1.5m×高さ2.0mと非常に狭隘な桁内で、1本ごとのストランド緊張作業と全ケーブル緊張後の張力調整作業を行う必要があるため、ケーブル架設時の作業性を検討する必要があった(ケーブル架設の際に使用したジャッキを表-2に示す)。

そこで、工場製作およびケーブル緊張の作業性を考慮したケーブル定着部構造の見直しを行い、安全性確認のため、本四公団のガイドライン(案)³⁾を参考にFEM解析を実施した。解析結果より、主桁ウェブのダイヤフラム付近の定着梁に応力集中が確認されたため、定着梁ウェブを主桁ダイヤフラムまで延長する構造に変更することで対処した。なお、定着梁自体には構造変更による応力集中は、確認されなかった(図-7)。

表-2 使用ジャッキ

	シングルストランド ジャッキ	マルチストランド ジャッキ
使用状況	ストランド架設時 ケーブル張力調整(増引き)時	ケーブル張力調整(引戻し)時
形状	200φ×900mm	570φ×445mm
重量	25kg	610kg
作業性	○	×



写真-1 シングルストランド
ジャッキ



写真-2 マルチストランド
ジャッキ

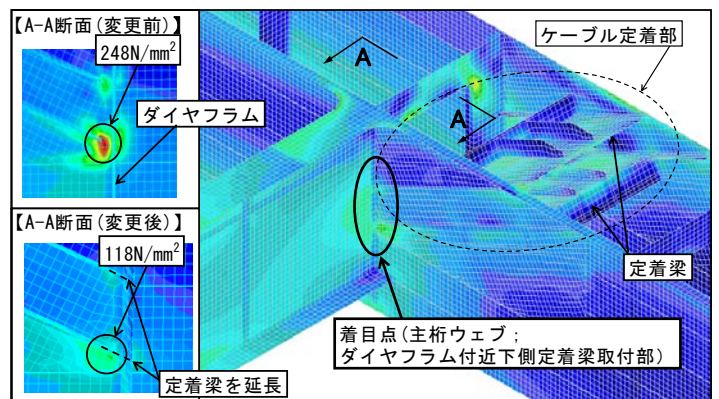


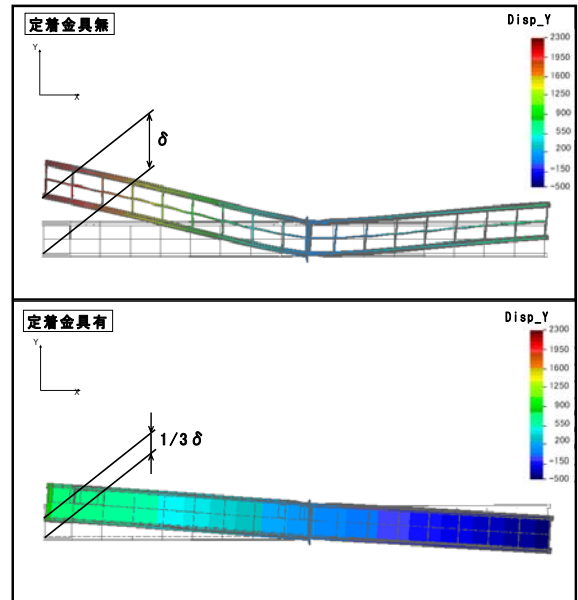
図-7 ケーブル定着部FEM解析結果

4. 2 鋼コンクリート合成床版の構造検討

床版の形式は、経済性・施工性・維持管理性の観点から比較検討した結果、鋼コンクリート合成床版（パワースラブ）を採用した。主桁断面は、剛性が小さく、かつバラシング架設工法を採用しているため、一般的には架設時の耐風対策として横構が必要となる。しかし、このような部材は厳しい腐食環境下においてさび易く、防食上の弱点となりやすい。

そこで、開断面箱桁橋に実績のある定着金具を設置し、合成床版鋼板パネルと主桁、縦桁を連結することで、横構と同等以上の剛性を確保し、架設時の耐風安定性を向上させた（写真－3）。

定着金具の設置による耐風安定性の効果は、FEM解析にて確認した。定着金具の設置により、耐風安定対策のために横構等を設置することなく、主桁最大張出し時の風による桁先端の水平変位は約1/3程度に低減し、架設安全性が確保できた（図－8）。また、定着金具の設置により、鋼板パネルが主桁断面と合成挙動をすることも予測されたため、鋼板パネルが主桁キャンバーに与える影響についても検討を行った。

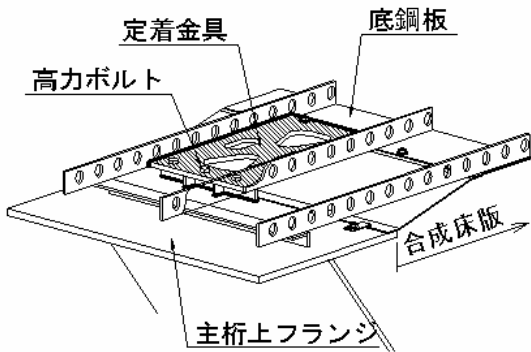


図－8 水平変位比較

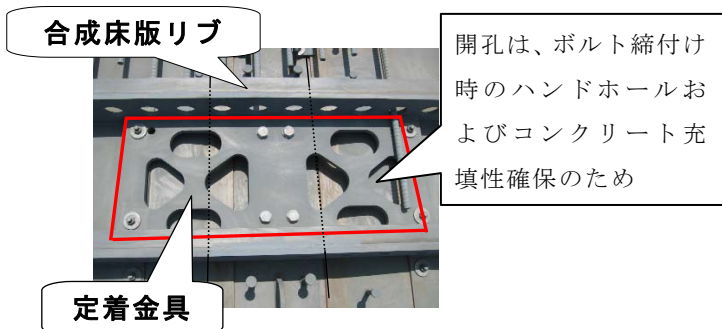
5. 主塔施工

5. 1 概要

河川内に構築するRC構造の主塔施工に際し、大型の資機材の運搬は平台船を使用し、作業員の出入りやコンクリート圧送は仮栈橋を利用した。施工では、一年を通じて強い風が吹くことや現橋（トラス橋）より高い位置での作業であったことから、資材等の飛来落下に細心の注意を払った。

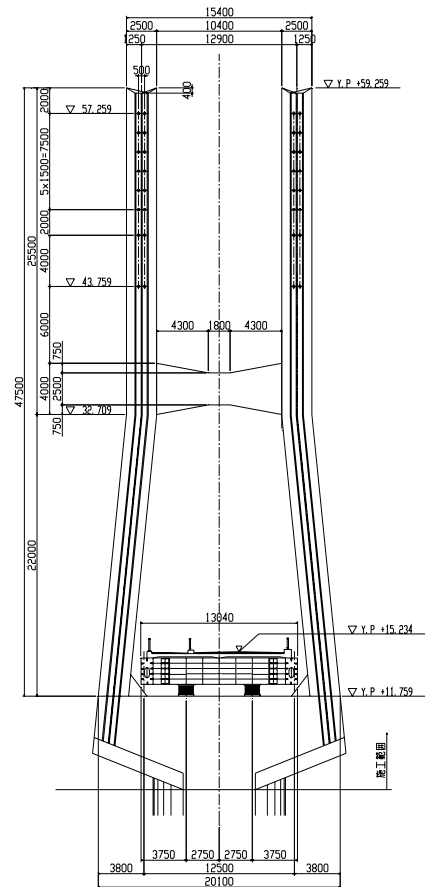


a) 概念図（開断面箱桁の例）



b) 設置状況（縦桁部）

写真－3 主桁と合成床版との連結構造



図－9 主塔図

5. 2 塩害対策

塩害対策として、コンクリートかぶり是一般部で100mm以上を確保し、鉄筋は全てエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した。また、型枠を固定するセパレータは、耐久年数100年後の腐食限界塩化物濃度の検討⁴⁾により、躯体表面から300mm以内をステンレス製とした。

5. 3 コンクリート配合

梁・中間梁は鉄筋量が非常に多く、かつ圧送距離は水平管換算で最大約300mもあった。したがって、ワーカビリティを確保するには筒先でスランプ12cm程度とする必要があったため、施工ではポンプロス6cm見込み、生コン車荷卸し時でスランプ18cmとした。

5. 4 梁部の温度応力解析

梁部の平面寸法は、約5m×20m、厚さが4.5～6.4mのマッシュな構造、かつ設計基準強度は40N/mm²であり、温度ひび割れの発生が懸念されたため、コンクリート温度応力解析を実施して適正な配合を検討した(図-10)。また、配合では、高性能AE減水剤を添加して、コンシステンシーを十分に確保した上で水セメント比を最小限に抑え、さらに膨張材を添加し、ひび割れの抑制を図った。

さらに施工では、2回打ちによる発熱量の低減、養生の工夫による内外温度差の低減により、ひび割れ発生リスクを最小限とした。

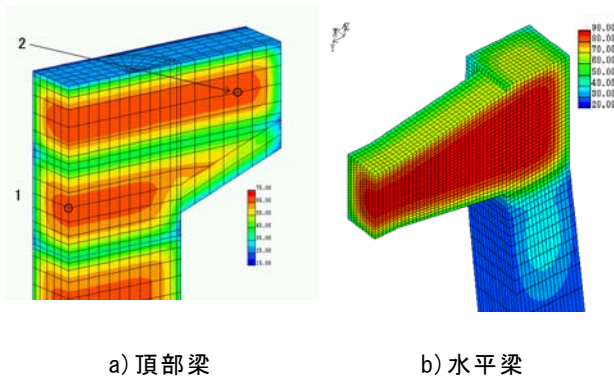


図-10 温度応力解析結果

6. 上部工架設

6. 1 架設概要

架設工法の選定では、①全長に渡り海上に位置する、②中央径間部の50mの航路を確保する、③漁業に影響を与えない架設工法とする等の制約条件があった。これらの条件を満足させるため、150t吊クローラ台船を用いた両側張出しのバランス架設工法および現場施工型ケーブルを採用した。

6. 2 バランシング架設工法

主桁の架設は、主塔から左右均等に張出していくバランス架設工法を採用した(図-11、写真-4)。当初計画では、鋼桁架設開始からケーブル架設完了までの片側1架設サイクルは6日間であり、その内訳は、鋼桁架設3日、ケーブル架設3日であった。そこで、工程短縮の工夫として、片側張出し部で鋼桁架設作業を行いながら、反対側の張出し部でもケーブル架設作業を同時施工することにより、1架設サイクルを3日にできた。

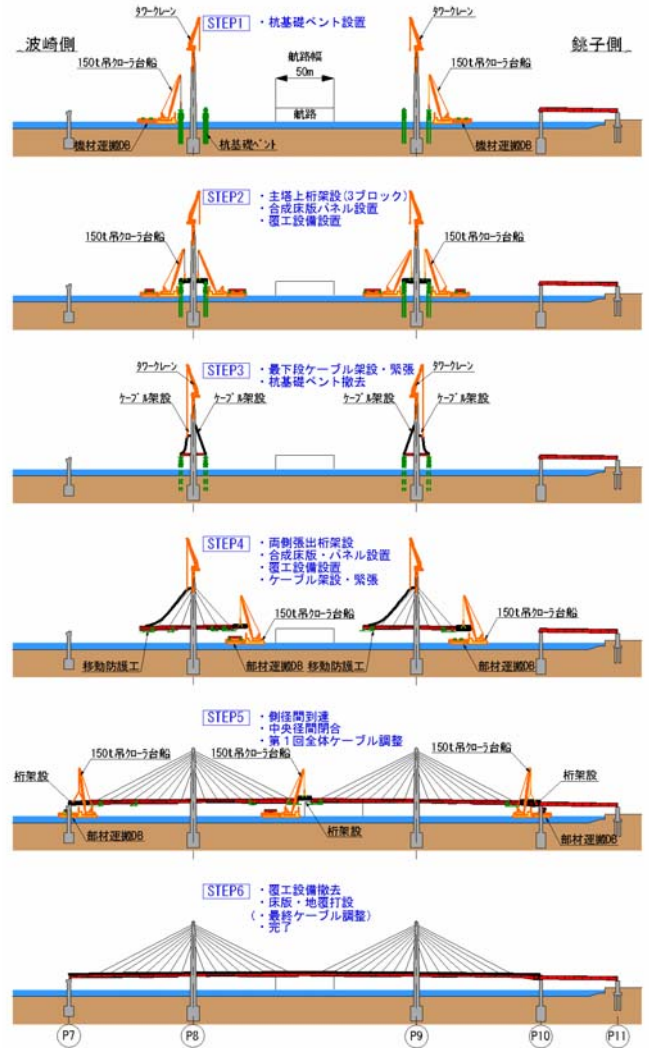


図-11 バランシング架設ステップ図



写真-4 バランシング架設状況

6.3 現場施工型ケーブル⁵⁾

RC 構造の主塔は、鋼製主塔に比べ、寸法精度が低いため、現場施工型ケーブルの特徴を生かして、ケーブル張力を架設時張力に合わせ、同時に形状も管理していく方法で、ケーブル架設を行った。ケーブルの張力管理は、1本目のストランドにロードセルを設置し、その測定値に合わせて2本目以降のストランドに張力を導入していく方法（ロードセル法）で行った（写真-5）。

ケーブル張力の測定方法は、各ケーブルの第1ストランドに取り付けたロードセルの値に、ストランド本数を乗じ、ケーブル1本の張力とした。

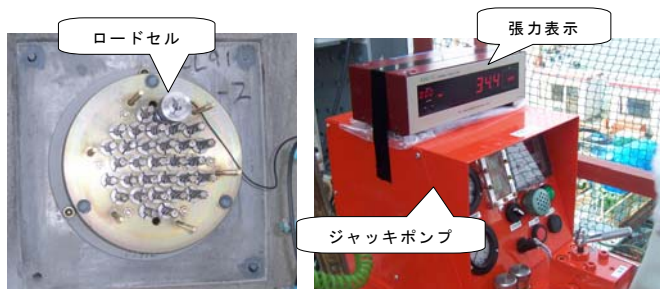


写真-5 主塔側定着部およびケーブル張力管理設備

コンクリート打設前の合成床版鋼板パネル上は、平坦ではなく、架設機材の配置やケーブルを展開できないため、合成床版鋼板パネル上に、覆工板を敷設して架設ヤードとし、ケーブル架設後に撤去した。

ケーブル張力および形状の算出には、三次元骨組モデルによる解体計算を行い、各施工ステップにおけるケーブル張力および主桁鉛直キャンバーを管理値とした。解析精度を上げるため、サグを有するケーブル要素を使用し、架設機材の重量と位置を可能な限り、解析モデルに反映した。

現場施工型ケーブルは、1次緊張（架設時設計張力の60%）まで昼間作業で行い、2次緊張（架設時設計張力の80%）、3次緊張（架設時設計張力の100%）は夜間作業とした（図-12）。これは、日照の影響がある昼間はストランド群に温度差が生じ、導入張力にばらつきが生じるためであり、温度が一定となる夜間に2次緊張、3次緊張を実施し、ストランド群の張力を一定とした。

また、張力が均一に導入されていることを確認するため、全ストランドの張力導入後に、全てのストランドを再度ジャッキで引っ張り、張力を計測するリフトオフ作業を行った。計測された張力のばらつき誤差は、5%以内に管理した。ケーブル架設状況を、写真-6に示す。

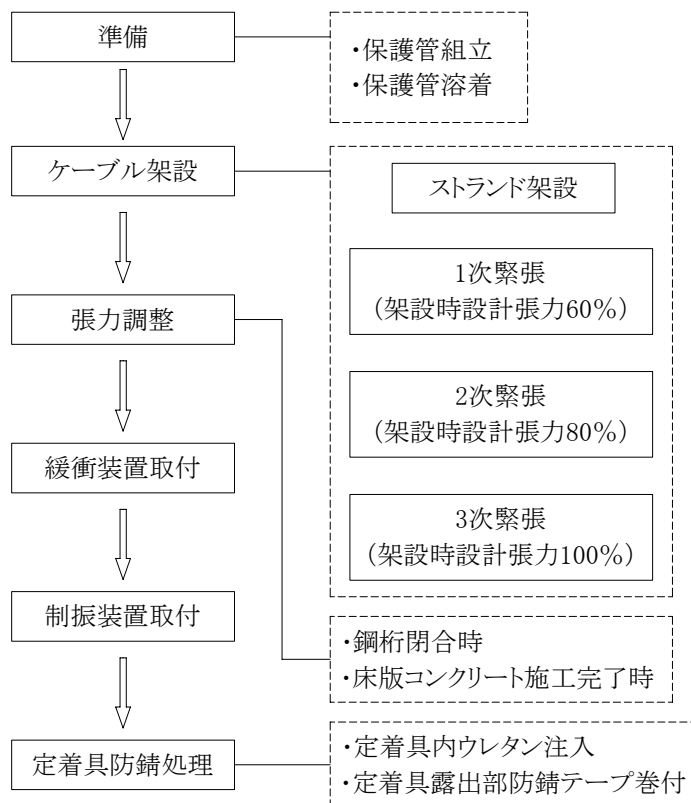


図-12 ケーブル張力フロー



a) 橋面上

b) 主桁内

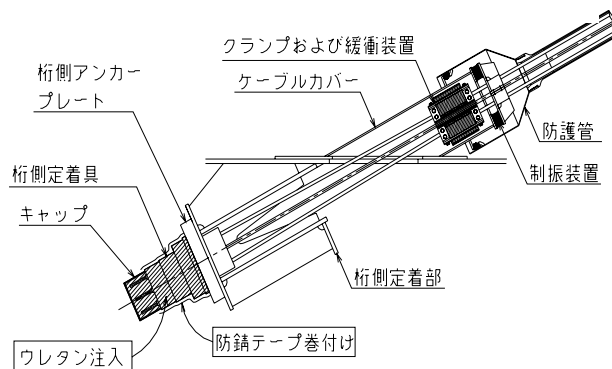


写真-6 ケーブル架設状況写真

鋼床版形式の斜張橋の場合、主桁架設時の死荷重状態が完成系に近いいため、ケーブル張力は完成系に近い状態で調整が可能である。しかし、本橋では鋼コンクリート合成床版が採用され、コンクリート打設前は、全死荷重の約40%程度の状態（表-3）でケーブル張力や主桁高さを調整しなければならない、張力誤差を把握することが困難であ

る。また、架設時の誤差を残した状態で、床版コンクリートの後死荷重を載荷した場合、ケーブルが応力超過する恐れがあった。そこで、ケーブルの応力超過を防ぎ、鋼桁キャンバーを許容値に収める目的で、主桁架設完了時に1回、床版コンクリートの死荷重が載荷され、ケーブル張力が最終に近い状態になった状態で1回、合計2回の全体張力調整を行い、許容誤差内に収めることとした。

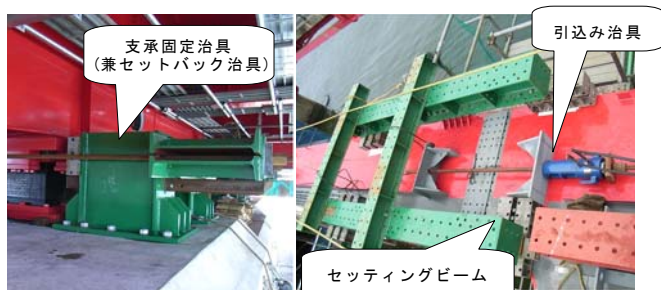
表－3 施工段階毎のケーブル張力例

最下段ケーブル(22H)の場合

荷重状態	斜材張力	ストラッド1本当たりの張力	設計張力に対する割合
ケーブル架設時	58.2 t	2.6 t	39 %
主桁閉合時	53.1 t	2.4 t	36 %
床版・地覆打設後	134.8 t	5.7 t	90 %
設計張力(D+Ps)	149.5 t	6.8 t	100 %

6. 4 中央径間閉合要領

主桁の閉合は、側径間、中央径間の順で行った。中央径間架設時は、主塔上の支承固定治具を利用して P8 側のみを約 50mm 側径間の方にセットバックし、落とし込み桁上には閉合設備として、セッティングビームと引込み治具（センターホールジャッキ）を設置し、最終ブロックの閉合作業を行った（写真－7）。



写真－7 支承固定治具および桁上閉合設備

6. 5 出来形管理

桁架設完了時、床版コンクリート打設完了時の出来形管理項目を、表－4 に示す。ケーブル張力は、過去の類似工事を参考に規格値を決定した。

表－4 出来形管理項目

管理項目	計測機器	計測位置	規格値・適用
主桁キャンバー	レベル	格点の主桁鉛直キャンバー	$\delta a = \pm 25 + (L/2)$
ケーブル張力	ロードセル	架設済みの全てのケーブル	・死荷重設計張力に対する±10%以内 ・ケーブル張力許容値以下
温度	熱電対	主桁・主塔・ダミーケーブル	標準温度からの差を設計値に反映

架設中の形状管理は、主桁キャンバーおよびケーブル張力、主塔の倒れを架設ステップ毎に計測し、設計値（＝解体計算結果）との誤差を逐一修正しながら架設を行った。両側張出し時では、ケーブルの微小な張力調整でも、軽量な主桁の形状

は大きく変動したが、ケーブル架設時において厳しい形状管理を行ったことにより、結果的に桁架設完了時、床版コンクリート打設完了時での主桁キャンバー、ケーブル張力ともに、規格値以内に収まった。

また、架設完了時のケーブル張力のばらつき誤差による主塔の残留断面力が懸念されたため、実際に導入された張力による主塔の応力照査も行き、十分な安全率を確保していることを確認した。

7. おわりに

本橋は、鋼2主桁とRC主塔を組合せた複合斜張橋であり、また鋼コンクリート合成床版、バラシニング架設工法、現場施工型ケーブルを採用した非常に複雑な形式の橋梁である。これらを組み合わせて設計・施工した橋梁は過去に例がなく高度な技術を必要とされたが、様々な検討や議論、現場での努力の積重ねにより無事完成させることができた。

現銚子大橋が千葉県東総地域と茨城県鹿行地域の発展を担ってきたように、今回新たに建設された銚子大橋が地域の発展に大いに寄与することを願うものである。本報告が、今後の工事の参考となれば幸いである。

最後に、本工事の施工を進めるにあたり、御協力いただきました千葉県海匝地域整備センター銚子整備事務所ならびに地元関係各方面の方々に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1)長井正嗣、岩崎英治、奥井義昭：合成斜張橋の動向と技術的課題、橋梁と基礎、Vol.35、pp27～33(2001.11)
- 2)鈴木泰之、久保喜延、佐野啓介、加藤九州男、木村吉郎：剥離干渉法を用いた鋼2主桁斜張橋の耐風安定性に関する検討、日本風工学会論文集、第31巻第2号、pp.51～61(2006.4)
- 3)本州四国連橋公団：鋼上部構造の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン(案)、pp.71～72(1993.8)
- 4)土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]、pp24～28(2002.3)
- 5)中村泰博、坂本弘明、日比野智明、坂本敏彦、牟田圭造、松原薫：鷹島肥前大橋の上部工施工、橋梁と基礎、Vol.43、pp5～10(2009.4)