

7. 船舶衝突による合成桁斜張橋の損傷と補修

—ベトナム・ビン橋における主桁部分取替えとケーブル取替えの実施報告—

企画委員会 国際小委員会

7. 船舶衝突による合成桁斜張橋の損傷と補修

—ベトナム・ビン橋における主桁部分取替えとケーブル取替えの実施報告—

企画委員会 国際小委員会 井谷達哉

1. はじめに

2010年7月17日、ビン橋¹⁾(写真-1)に3隻の貨物船が衝突し、損傷を与えるという事故が発生した。本橋は2005年に、ベトナム第三の都市ハイフォン市に建設された斜張橋である。衝突したこれらの貨物船はハイフォン港近くの造船所に、修理の為に係留されていたもので、この日ベトナムを襲った台風1号の影響で、約1km上流に流され本橋に衝突した。

写真-2のように、デッキより上部(艦橋等)



写真-1 ビン橋全景



写真-2 衝突状況

と橋桁が衝突し主桁とケーブルが大きく損傷した。幸いにも床版、横桁、ケーブル定着部の損傷は軽微であったため、落橋するような大事故にまでは至らなかった。

事故直後、現地の管理事務所から当協会会員会社が協力要請を受け損傷の調査と評価を行った。その後、ODAの緊急援助対象となり、2012年5月に工事着手し、同年12月竣工した。

本橋はコンクリート床版を有する鋼-コンクリート合成桁として設計された斜張橋で、主桁の応力性状が施工ステップに影響される逐次合成桁となっている。そのため、施工ステップを再現した解析モデルを作成し、主桁の損傷部については、詳細に施工段階を反映した解析を行い、安全性を確かめながら施工することによって、無事に桁とケーブルの取替えを行うことが出来た。

合成桁斜張橋の主桁とケーブルを取替える工事は、世界的にも事例が少ない貴重な工事と考えられるため、以下に報告する。

2. 損傷概要

主な損傷箇所は、下流側の主桁下フランジと腹板(橋軸方向長さ約22.5m)、ケーブル(2本)、高欄、および航路標識板などの付属品である(図-1)。

主桁腹板は、桁高の半分程の高さから下側が面外方向に変形し、下フランジも面外変形して傾いていた(写真-3)。桁の内側の補剛材は座屈し、S字形に湾曲したものもあった(写真-4)。

ケーブルはポリエチレン被覆(以下PE被覆と記す)が完全に剥がれ、素線が剥き出しとなり、素線表面のメッキも損傷が確認された(写真-5)。台風時の塩分を含んだ風雨に曝されたため、事故の数日後には既に白錆も発生していた。内部まで塩分を含んだ水が浸透しているものと推測され、ベトナム当局により取替が必要と判断された。

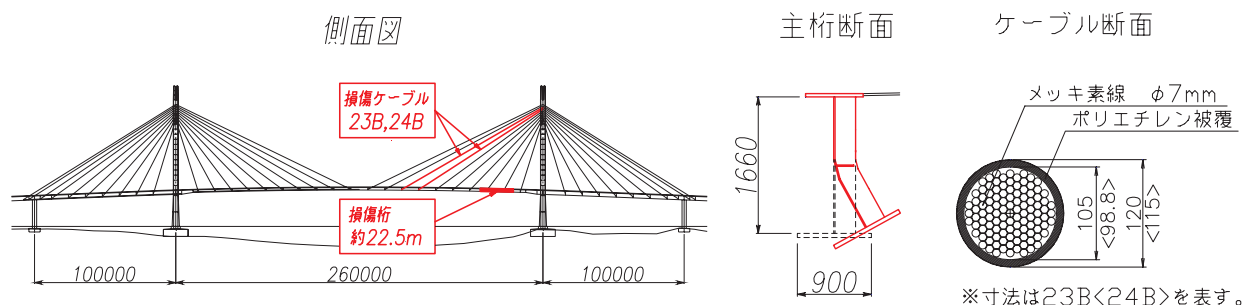


図-1 損傷位置



写真-3 主桁外側損傷状況



写真-4 主桁内側損傷状況



写真-5 ケーブル損傷状況

3. 2 桁の損傷評価

主桁の下フランジは、船舶が衝突したことにより、大きくたわみ、残留変形が残っている状態であった。腹板は下フランジに引っ張られた形で面外変形した状態であった。ケーブル定着部近傍の腹板は部分的にき裂が生じ、板厚(20mm)程度の板面外へのズレが確認できた(写真-6)。主桁内側の補剛材も下フランジに押し上げられた形で座屈し、取替えは困難な状況であった(写真-7)。



写真-6 腹板のき裂

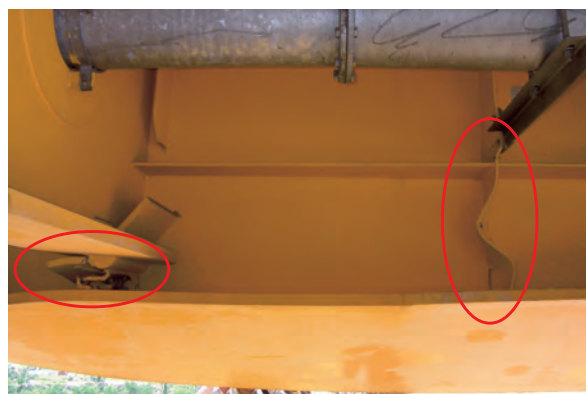


写真-7 補剛材の座屈

3. 損傷度評価

3. 1 緊急交通規制

事故後、安全性が確認されるまでは、損傷した下流側の2車線と歩道、および上流側の1車線を通行止めにし、上流側の1車線と歩道を使って、2輪車のみ対面通行とする処置をした。その後、損傷した主桁断面の下半分を欠損断面と考えた場合の解析を実施し、多少の応力余裕を確認できたので、重量2tf以内の乗用車に限り、上流側の1車線と歩道部を通れるように規制緩和した。

補修工事が始まった2012年5月からは、架設用クレーンなどの重機を載せる必要があるため、乗用車の乗り入れは終日禁止し、補修工事用の架設機材以外の重量物を制限した。車はこの規制期間中、臨時運航のフェリーもしくは、上流5km地点にある別の橋梁をう回することになった。

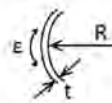


写真-8 表面曲率計測時の様子

鋼板のじん性確保の観点から、シャルピー吸収エネルギーが鋼材の要求性能以上²⁾ということを目標に、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編1.6にある冷間曲げ半径5t($\epsilon=10\%$)を目安とし、下記の(1)式によって、板のひずみに換算して評価した(写真-8)。

$$\varepsilon = t / (2R) \cdots \cdots (1)$$

t : 板厚, R : 内側表面での曲率半径



この方法で簡易的にひずみを評価すると、かなりの部分は3% (曲率半径が15tに相当, t:板厚)以下のひずみで問題無いレベルであった。しかし、残留変形が目立つ部分も取替え対象範囲とすることとし、最終的に、橋軸方向に約22.5m、桁高の約半分強の、下から1050mmの範囲を取替えた(補剛材を含む)。ケーブル定着部は主桁に比べ剛であるため変形はないが、その周囲は変形が大きいためできる限り取替える方針とし、慎重に取替え範囲を決定した(図-2)。

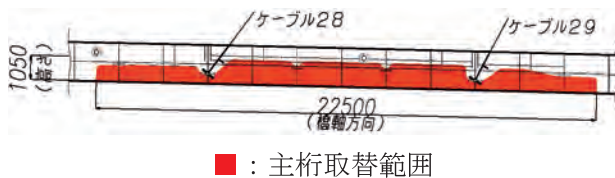


図-2 主桁取替範囲 (単位: mm)

3. 3 ケーブルの損傷評価

損傷したケーブルは、素線の破断は確認されなかったため、引張り強度の低下は問題ないと判断した。しかしながら、素線表面の傷と腐食は疲労強度を左右し、斜張橋にとってケーブルの耐久性は橋梁全体の耐久性を意味するので、ケーブルの損傷は、可及的速やかに対策すべきとベトナム当局へ提案した。

(1) 傷の影響について

PE被覆が剥がれてむき出しになった素線表面では、部分的ではあるが、爪にひっかかる程度の傷が観察された。傷形状は軸方向についており、鋼材が素線表面を滑ったことが容易に想像された。

素線の疲労強度については、傷の形状にもよるが、100μm程度の深さの傷でも強度低下する場合があります。傷がついた素線の疲労強度は低下していると想定した。ただし、傷がついた素線は最外層だけであり、内層の素線は健全であると考えられるため、腐食の影響を無視してケーブルの疲労照査をする場合は、内層素線だけでケーブルに作用する荷重を受け持つものとする。

(2) 腐食の影響

PE被覆が剥がれてむき出しになった素線表面には、白錆が発生していることより、PE被覆が剥がれた後に、雨水がかかったことが判る。また、鋼線束には雨水が浸み込み、ケーブル下部に雨水が溜まっていることも考えられた。

亜鉛メッキ鋼線の亜鉛層(最小300g/m²)は、海水浸漬の場合、早ければ1年程度で腐食消失する。また亜鉛消失後は、鋼線の腐食が進行し、疲労強度が低下していく。

しかしながら、本橋のケーブルの将来にわたる耐久性評価は難しく、長期の品質保証をすることは出来ないため、損傷ケーブルの取替を提案し、当局は取替を決断した。

4. 設計・解析

4. 1 設計方針

主桁損傷部を部分的に取替えるに当たり、本橋施工時の逐次合成を考慮した解析による断面力を調べ、現状の損傷状態の応力を把握するところから検討を始めた。事故前の応力状態を推定することは可能だが、事故後に、損傷部位がどの程度剛性低下し、どのような応力再配分が起きているのかを推定するのは困難である。

そこで、補強方針としては、損傷部分が受け持っていた断面力を代わりに受け持ち、かつ健全時と同等の断面剛性を確保できるバイパス材を取り付けた状態で、損傷部分を切断、取替えることとした。

断面力をバイパスさせる補強材の設計方針としては、損傷を受けた桁の下フランジと腹板が、事故後も健全時の応力を負担していたと仮定した時に、損傷部を切断することで開放される応力が、バイパス補強材と、既設桁の残置部分に再配分されると仮定し、バイパス補強材の必要断面を設計した。

損傷を受けた断面の応力照査にあたっては、変形した下フランジや腹板も相当の応力負担をしていると考えられるが、安全側の評価として、桁の下側半分は欠損したものとして評価した。

ケーブルの取替えについては、ケーブルを1段取り外した状態での解析を行い、橋体の安全性の確認を行った。

4. 2 補強構造

補修工事にあたり、損傷した桁の直上に設置可能なクレーンは、1000kN吊り油圧クレーン程度が限界であった。しかも、ケーブルの間をクレーンのブームを通して作業するため、1部材あたりが小さく軽い三角形断面のトラス構造(テンポラリーバイパストラス、以下TBトラス)で補強することとした(図-3)。

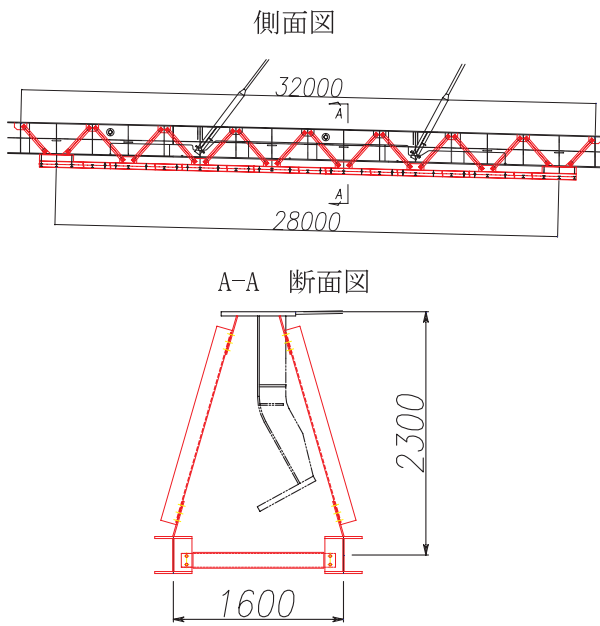


図-3 TB トラス概要 (単位: mm)

4. 3 解析モデル

解析モデルは斜張橋全体の3次元立体骨組みモデルに、TB トラス部材を組み込んだモデルを作成し(図-4)、施工ステップ毎に変動荷重を载荷する逐次解析を行い、断面力を足し合わせて評価した。しかし、骨組み解析から得られる断面力で応力照査するだけでは、桁の切断形状などの局所的な影響や、床版の有効幅なども正確には考慮できないため、桁取替え部については、ケーブル定着部、TB トラスを考慮したFEモデルを作成し(図-5)、前述の骨組みモデルから得られる断面力を作用させて、局所的な応力評価も行った。

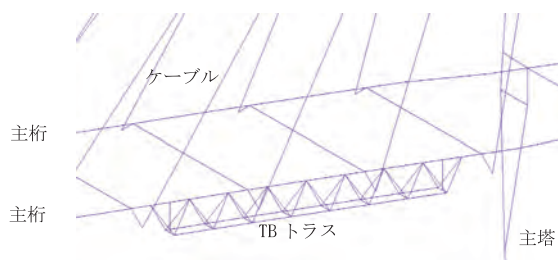


図-4 3次元立体骨組みモデル

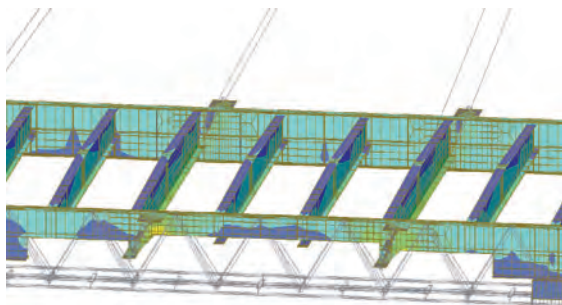


図-5 FEモデルと応力分布

5. 補修工程

補修工程としては、主桁取替、ケーブル取替、付属物補修の順序で行った(図-6)。

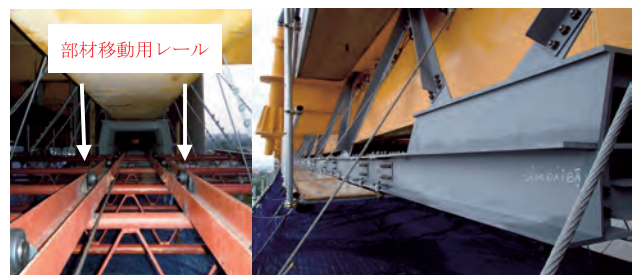
	6月	7月	8月	9月	10月	11月
主桁取替	足場設置	■				
	TBトラス設置		■			
	置き		■			
	切断			■		
	部材製作			■		
	取付・溶接			■		
	塗装			■		
ケーブル取替	足場撤去			■		
	足場設置				■	
	24B撤去				■	
	24B取付				■	
	23B撤去					■
	23B取付					■
	ダンパー取付					■
付属物補修					■	■

図-6 工程表

6. 主桁取替手順

6. 1 足場設置、TB トラス設置

主桁取替手順としては、まず足場、次にTB トラスを設置する。その後、基準ラインと桁切断ラインを主桁にマーキングする。足場やTB トラスには、部材横移動用として、溝形鋼にローラーを付けたレールを配置した(写真-9)。



(a) 部材移動用レール (b) TB トラス

写真-9 TB トラスの設置状況

6. 2 水平補剛材設置

損傷部の腹板を切断すると、残置された腹板下側が自由端となり、切断により開放された応力が、腹板の自由端付近に再配分され、腹板の自由突出部に局部座屈が生じることが懸念された。そのため、損傷部材の切断前に、腹板の自由端になる付近に、水平補剛材を追加し補強した。

6. 3 応力モニタリング

実際に発生している応力について、設計計算値との対比が出来るように、主桁上下フランジとTB トラスに一軸ひずみゲージを貼付して、施工段階毎に応力計測を行い、安全を確認した。また、路面高についても主要施工段階毎に計測して、異常が無いことを確認した。

6. 4 桁切断・開先加工

桁の損傷部分は取回しを考慮し、2m 程度に分割して切断した（写真-10）。



写真-10 桁切断の状況

6. 5 主桁部材の製作・取り付け

切断形状を正確に計測し、新設の主桁部材製作へ反映した。製作は現場近くにある IHI の工場にて行い（写真-11）、現地へ搬入、開先調整後に溶接を行った（写真-12）。



写真-11 主桁部材工場製作の状況



写真-12 主桁部材の取付け・溶接の状況

7 ケーブルの取替え

7. 1 制約条件

斜張橋のケーブル取替えは、世界的にもまだ実績は少なく、弊社でも初めての試みであった。計画当初は、通常のケーブル架設手順の逆をたどれば、ケーブル撤去は可能と考えられた。つまり、桁側のケーブルソケットにテンションロッドを付け、センターホールジャッキで張力を抜き、桁上に配置した大型クレーンでケーブルのサグ取りをしながら、徐々にケーブル張力を抜いてゆく。水平力が無くなるまでケーブル張力を緩めていけば、塔側のケーブルソケットもはずせるようになり、ケーブルを取替えることが出来る。

しかしながらこの方法では、桁上にサグ取り用の大型クレーンと、桁側ケーブルソケットを抜くためのクレーンが必要になり、ケーブルを水平方向に引っ張るウインチ設備も必要になる。更に、サグ取りクレーンでも代用は可能だが、塔側のソケットを抜いてからケーブルを下ろしてくる為のクレーンも必要になる。

また、今回の工事では、取替えるケーブルは上から3段目、4段目のケーブルなので、取替えケーブルの更にも健全なケーブルが存在し、クレーンでのサグ取りや、塔側ソケットを抜き取る時には、上側のケーブルが邪魔になり、施工できないという問題があった。

その上、ケーブルを1本抜き取った状態では、施工時としての耐荷力が落ち、桁上に載せられる架設機材重量も制限する必要があった。

7. 2 ケーブル取替え手順

今回の工事では、取替えるケーブルの上段のケーブルをサグ取り用及びガイドケーブルとして有効利用できるように、以下のようなケーブル取替え工法を考案した（図-7）。

- ① 桁側、塔側に足場を設置する。
- ② 桁側ケーブル定着部に、ラムチェアー、センターホールジャッキ、テンションロッドを設置する。
- ③ ウインチによる巻上げ巻下げ設備を設置する。
- ④ 取替えるケーブルの1段上のケーブルにケーブル移動滑車を設置し、そこからケーブル補助索（以下、仮ハンガー）を吊り下げる。
- ⑤ 取替えケーブルに、仮ハンガーをバンドで固定し、仮ハンガーに張力を入れることで、取替えケーブルの自重を負担させる。
- ⑥ 桁側ソケットをセンターホールジャッキで張力除荷する。
- ⑦ 桁側ソケットを抜き取る。
- ⑧ 塔側ソケットを抜き取る。
- ⑨ ウインチ操作でケーブル移動滑車ごとケーブ

ルを下ろす。

⑩ 上記の逆の手順で新設ケーブルを設置する。

写真-13 にケーブル撤去時の状況を示す。

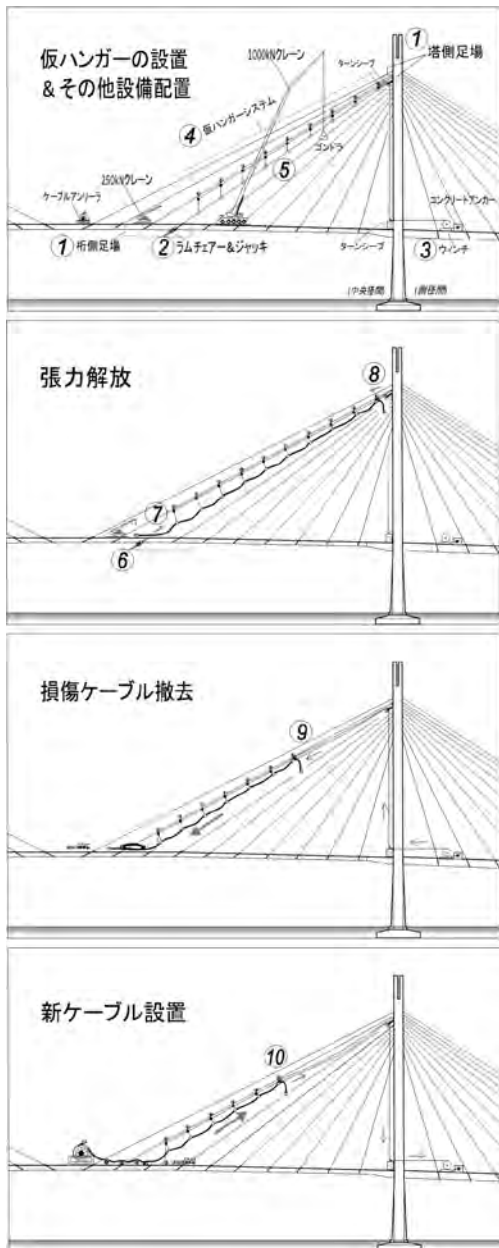


図-7 ケーブル取替え手順



写真-13 ケーブル撤去

8. 応力モニタリング

施工中の安全性の確認のため、主桁上下フランジと TB トラスにひずみゲージを貼付して、モニタリングを行った (図-9)。

モニタリングは、TB トラス設置時、桁切断時、新設桁溶接時、TB トラス撤去時の 4 段階とした。

- Step1 : TB トラス設置時
- Step2 : 損傷桁切断時
- Step3 : 新設桁溶接時
- Step4 : TB トラス撤去時

図-8 に補修時に下フランジ及び TB トラスに流れる力の概念を示す。

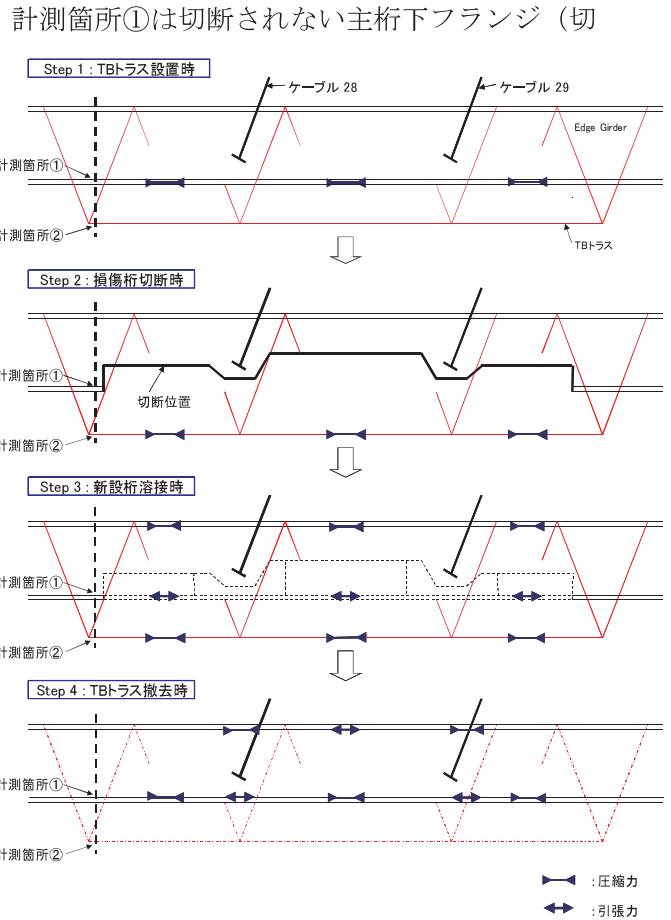


図-8 下フランジ及び TB トラスに作用する力の概念図

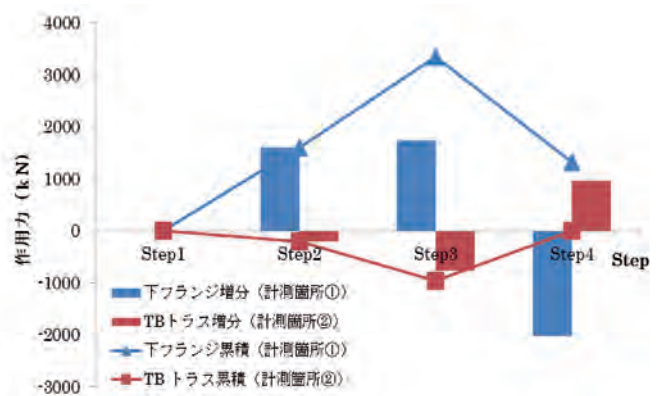


図-9 作用力の変化

断位置近傍)、計測箇所②はTBトラスの下弦材格点である。縦軸に作用力、横軸にStepをとり、縦棒は各Stepにおける下フランジ、TBトラスの力の変動を示し、折れ線はその累積値である。

桁面外方向に変形していた下フランジを切断すると、残留応力が開放されて、主桁の面外変形が元に戻るような挙動が見られた。モニタリングによる実測結果でもTBトラスの上流側と下流側とで面外変形による応力差が確認できた。

実測値は、上流側と下流側の値を平均してプロットしており、面外変形による力の影響を除いて表現している。

TBトラスは、設置時(Step1)無応力状態であるが、主桁には常時圧縮力が作用していると考えられる。Step2では主桁を切断することによって、切断箇所作用していた圧縮力が床版およびTBトラスに再分配されるため、TBトラスは圧縮力を受ける。Step3では新設主桁の溶接により、溶接縮みが発生し、主桁全体として縮む方向に動く。そのためTBトラスには圧縮力が働く。また、溶接した新設の下フランジに関して溶接線に向かって引張力が発生する。Step4では、TBトラスの撤去によりTBトラスに作用していた圧縮力が解放され、主桁・床版に分配される。新設した下フランジに、最終的に分配された作用力は溶接による残留応力も含めて約1000kN(応力度として約22N/mm²(断面900mm×50mm))であった。

以上の結果から、TBトラスが主桁に作用していた圧縮力を受け持ち、十分に機能していたことが確認できる。

9. 損傷ケーブルの開放調査

損傷ケーブル取替後、24Bのケーブル素線の腐食状況について開放調査を実施した。このケーブルは、ソケットから約5.7mが桁定着部のパイプ内にあり、そこからPE管の露出部分約7.6mの被覆が損傷し素線が露出した。ケーブルは台風時の降雨が進入したと推定され、損傷後4日後に仮カバーで覆っている。

調査では、ソケット口金からポリブタジエンゴム充填1.5mの部分を含んで約1.7mを切り取り、最外層の素線の腐食状況を目視観察した(写真-14)。

結果は、口元から約1.2mまでは素線は新品同様の部分があったが、ゴム充填区間でも、ケーブルの上側に垂鉛の白錆が確認された。また一部茶色(わずかな赤錆)の部分も認められた。3.3で述べたように、ケーブルの腐食の影響の評価は難しく、本橋では長期の安全性を考慮し、事故後の早い段階で取替えが決断された。内部調査により、被覆カバー損傷後、2年経過したワイヤから腐食が確認されたことで、被覆ケーブルが損傷した場合は、なるべく早く補修し、水の浸入を防ぐ必要



写真-14 ケーブル開放調査の様子がある。

10. まとめ

今回の補修工事は、以下の特徴があげられる。

- (1) 桁の補修については、施工時の補強部材として三角形断面のTBトラスを採用し、損傷桁の切断、取付け、溶接を安全に施工することができた。
- (2) 複雑な構造を、骨組み解析とFE解析を併用し、施工ステップを忠実に再現した組み立て計算をすることで、構造物の応力挙動、変形挙動を把握し、安全に施工することができた。
- (3) 桁の補修では、応力モニタリングを行い、安全性を確認しながら、施工することができた。
- (4) ケーブル面内の一部のケーブルを取替えるために、移動滑車を用いた仮ハンガーシステムを考案・採用し、安全に精度よくケーブルを取替えることができた。今後、老朽化した斜張橋のケーブル取替え工事等に、応用、発展できるものとする。
- (5) ケーブル解放調査(事故後、約2年経過)により、損傷したケーブルに白錆(一部は赤錆)の発錆が確認された。被覆ケーブルが損傷した場合は、速やかに補修し、水の浸入を防ぐ必要がある。

[参考文献]

1) 松野憲司、山本裕一、中山真明、大山篤生、上島秀作、藪野真史:ビン橋(ベトナム)の建設工事の概要 橋梁と基礎 Vol.40 2006年9月 pp18-23

2) 本間宏二、三木千壽、征矢勇夫、笹尾英弥、奥村健人、原修一:冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究 土木学会論文集 No.570/I-40 1997.7 pp153-162