

「 Binh 橋 」 (ベトナムの合成桁斜張橋) の補修工事報告

Report on Rehabilitation Project of the “Binh Bridge” in Vietnam

藪野真史	株式会社 IHI インフラシステム	技術本部橋梁設計部	次長
山本裕一	IHI INFRASTRUCTURE ASIA CO., LTD.	技術部	部長
川端諭	株式会社 IHI インフラシステム	技術本部建設部	
得地智信	株式会社 IHI インフラシステム	技術本部橋梁設計部	
井谷達哉	株式会社 IHI インフラシステム	技術本部橋梁設計部	

「 Binh 橋 」は、ベトナムのハイフォン市に、2005年に完成した合成桁斜張橋である。2010年7月に、台風1号の影響で流された3隻の貨物船が衝突し、主桁とケーブルの一部が損傷を受けた。主桁はコンクリート床版との合成桁で応力状態が複雑なうえ、斜張橋のケーブル取替えも、IHIとしては初めての経験で、慎重に計画を進めた。事故直後からIHI、IIS、IIAがIHIグループとして協力し、2012年3月に補修工事を受注できた。今回、桁の補修とケーブルの交換を行ったので、この補修工事の概要を報告する。

“Binh Bridge”, located in Haiphong City, Vietnam, is a cable-stayed bridge with composite girders that was completed in 2005. In July 2010, parts of the main girder and several stay cables of the bridge suffered serious damage after three ships washed away by typhoon No. 1 collided with it. Rehabilitation works on the bridge were awarded to IIA in March 2012 following a collaborative emergency investigation within the IHI Group (IHI, IIS, IIA). This is the first time IHI undertook cable replacement works and the complex stress distributions in the composite girder necessitated extensive planning. This report describes the rehabilitation works carried out on the bridge, in particular the main girder repair and stay cable replacement.

1. 緒 言

IHI が 2005 年に、ベトナム第三の都市ハイフォン市に架設した「 Binh 橋 」⁽¹⁾に、2010年7月17日、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。これらの貨物船はハイフォン港近くの造船所に、修理のため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600m上流に流され、「 Binh 橋 」に衝突したものである。第1図に「 Binh 橋 」全景、第2図に衝突状況、第3図に損傷状況を示す。

事故の直後から、現地の管理会社から協力要請を受



第2図 衝突状況

Fig. 2 General view after ship collision



第1図 「 Binh 橋 」全景

Fig. 1 “Binh Bridge” upon completion



第3図 損傷状況

Fig. 3 Close-up photograph of damaged part

け、IHI の技術開発本部、株式会社 IHI インフラシステム (IIS), IHI INFRASTRUCTURE ASIA CO., LTD. (IIA) が IHI グループとして共同して損傷度合の調査と評価を行った。その後、補修方法についても提案していたが、ODA (Official Development Assistance : 政府開発援助) の緊急援助対象となり、2012 年 3 月に補修工事を受注し 5 月に工事着手できた。

本橋はコンクリート床版をもつ合成桁として設計された斜張橋で、主桁の応力性状は、施工ステップに影響される逐次合成桁となっており、解析も施工ステップを再現したモデルのもと、慎重な検討が必要であった。主桁の損傷部については特に慎重に、施工段階を忠実に反映した解析を行い、無事に桁の取替えを行うことができた。

合成桁斜張橋の主桁を取り替える工事は、おそらく世界で初めての試みである。また、斜張橋のケーブルを取り替えることも、IHI としては初めてであり、世界的にも事例が少なく、貴重な実績となったので、以下に報告する。

2. 損傷概要

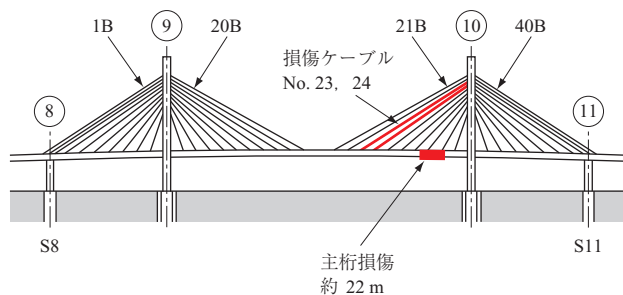
主な損傷箇所は、下流側の主桁下フランジおよび腹板 (約 22 m 区間)、斜材ケーブル (2 本)、高欄、航路標識板などの付属品である。第 4 図に損傷位置を示す。

船舶は空荷で、デッキより上部と橋桁が衝突したが、床版、横桁、ケーブル定着部の損傷は、軽微なものであったため、落橋するような大事故にまでは至らなかったと思われる。

主桁腹板は、桁高の半分くらい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。

桁の内側の補剛材は完全に座屈して、S 字に湾曲したのもあった。横桁と床版は、損傷を免れており、健全であった。第 5 図に主桁外側の損傷状況、第 6 図に主桁内側の損傷状況を示す。

ケーブルはポリエチレン被覆 (以下、PE 被覆と呼ぶ) が完全に剥ぎ取られ、素線がむき出しとなり、素線表面の



第 4 図 損傷位置
Fig. 4 Location of damage



第 5 図 主桁外側の損傷状況
Fig. 5 Steel girder damage (outer side)



第 6 図 主桁内側の損傷状況
Fig. 6 Steel girder damage (inner side)

めっきも損傷が確認された。台風時の塩分を含んだ風雨にさらされたため、すでに白さびも発生していた。これは、内部まで塩分を含んだ水が浸透しているためと推測され、将来的には取り替えなければならないと判断された。第 7 図にケーブルの損傷状況を示す。

3. 損傷度評価

3.1 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



第 7 図 ケーブルの損傷状況
Fig. 7 Stay cable damage

2車線分と歩道、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、質量20kN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。

3.2 桁の損傷評価

主桁の下フランジ側は、船が衝突したことによって、大きくたわみ、残留塑性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)程度の板面外のずれが確認できた。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。第8図に腹板のき裂、第9図に補剛材の座屈の様子を示す。

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⁾ということを目指し、道路

橋示方書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。

第10図に表面曲率の計測の様子を示す。

$$\epsilon = t/(2R) \dots\dots\dots (1)$$

t : 板厚

R : 表面曲率半径

この方法で簡易的にひずみ評価すると、かなりの部分は3%(15tに相当)以下のひずみで問題ないレベルだったが、結局は、き裂のある部分や、残留変形が目立つ部分を取替え対象範囲とすることにし、橋軸方向に約22.5m、桁高の約半分強の、下から1100mmの範囲を取り替えることにした。第11図に主桁取替え範囲を示す。

3.3 ケーブルの損傷評価

損傷したケーブルは、素線の破断までは確認されなかった。引張強度の低下は心配ないと判断した。ケーブルの耐久性については、疲労強度を左右する素線表面の傷と腐食の影響を受ける。斜張橋にとって、ケーブルの耐久性 = 橋梁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である。

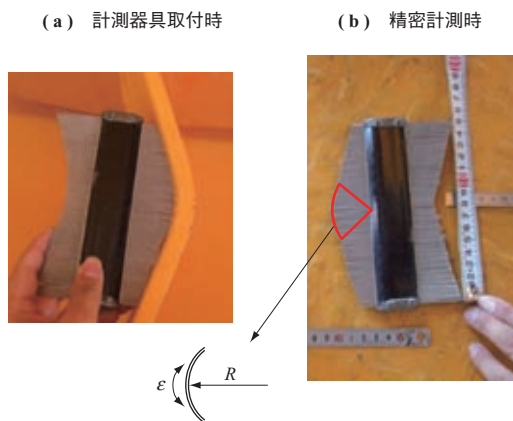
今回の調査では、PE被覆の損傷、ケーブル素線の傷およびめっき損傷と白さびの発生が確認された。それらはケーブルにとっては重要な問題と考えられる。



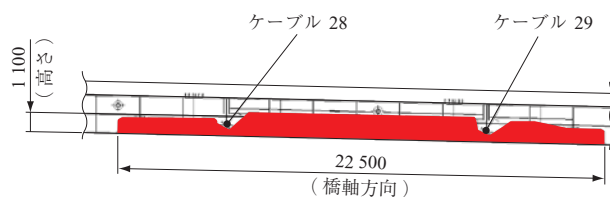
第8図 腹板のき裂
Fig. 8 Crack in web plate



第9図 補剛材の座屈
Fig. 9 Buckling of stiffeners



第10図 表面曲率の計測の様子
Fig. 10 Measurement of radius of bent plate



(注) ■ : 主桁取替え範囲

第11図 主桁取替え範囲(単位: mm)
Fig. 11 Range of main girder replacement (unit: mm)

3.3.1 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、爪に引っ掛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る。

素線表面の傷は小さいため、静的強度の低下はないと考えられる。素線の疲労強度については、傷の形状にもよるが、100 μm 程度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するべきである。ただし、傷がついた素線は、鋼線束の最外層だけであり、内層の素線は健全であると考えられる。そのため、腐食の影響を無視してケーブルを疲労照査する場合は、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考えればよい。

3.3.2 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、白さびが発生していることよって、PE 被覆が剥がれた後に、雨水が掛かったことが分かる。鋼線束には雨水が浸み込み、ケーブル下部に雨水がたまっていると考えられる。

亜鉛めっき鋼線の亜鉛層（最小 300 g/m²）は、早ければ、1 年程度の海水浸せきで腐食消失する。また亜鉛消失後は、鋼線の腐食が進行し、疲労強度も同時に低下していく。

「Binh 橋」は、潮風にさらされる河口付近に位置しており、ケーブル内に滞留した雨水には塩分が含まれていると想定される。そのため、PE 被覆を損傷した、上から 3 段目ケーブル (No. 23) と 4 段目ケーブル (No. 24) の雨水滞留部分では、早ければ 1 年程度で素線表面の亜鉛が消失し、ケーブルの疲労強度が低下し始める可能性が考えられた。

損傷したケーブルの正確な耐久性評価は難しく、また将来にわたり品質保証することはできないため、新しいケーブルに取り替えることにした。

3.3.3 ケーブルソケット部

そのほかのケーブルで 3 か所、ケーブルソケット部に鋼材が当たったような擦れた傷が確認された。これらのソケット本体には、端部コーナ部分に^{こん}圧痕が付いているものがあつたが、最も重要な定着体部分での異常はなかった。また、アンカーキャップの一部が変形し、ボルトが損傷しているものがあつた。

ケーブルソケットとシムプレート、およびシムプレートと座金間の部材境界部の塗装には、割れが観察されなかったことから、ケーブルソケットの回転あるいは移動はなかったものと考えられる。

以上の状況から、ケーブルソケットに傷があつた 3 本

のアンカー機能は健全であり、ケーブル取替えまでは必要ない、と判断した。

4. 桁の補修

4.1 補強方針

主桁損傷部を部分的に取り替えるに当たり、本橋施工当時の逐次合成を考慮した解析による断面力を調査し、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。本橋は合成桁であり、合成前応力、合成後応力の両方を足し合わせて応力照査をしている。これによって事故前の応力状態を推定することは可能であったが、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、結局、事故後の応力状態の把握は、正確にはできなかった。

そこで、補強方針としては、桁の部分切断をしてもその部分の断面力を受け持ち、かつ、変動荷重にも対応できるよう、健全時の主桁断面剛性以上の断面性能を確保したバイパスとしての補強を追加し、その状態で損傷部分を切断、取り替えることにした。

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ときに、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。

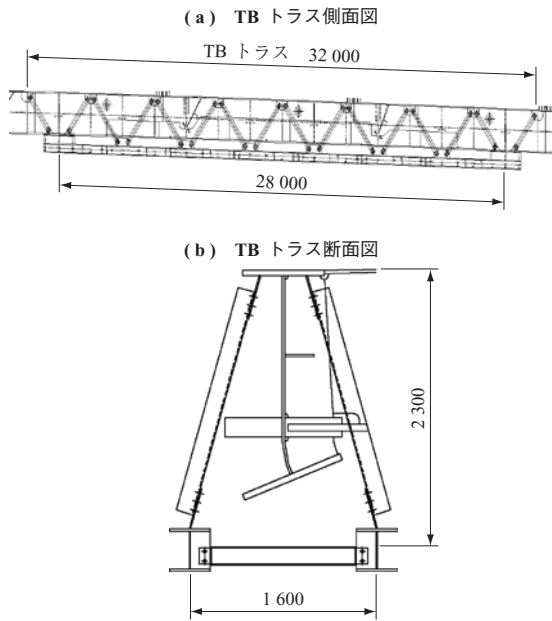
4.2 補強構造

主桁を部分的に切断・撤去して、新規部材に取り替えるには、いったん、断面力をバイパスさせる補強材を取り付ける必要がある。損傷した桁の直上には、あまり大きなクレーンを載せることはできず、1 000 kN 吊り油圧クレーン程度しか載せられなかった。しかも既存の斜材ケーブルがあり、その間をクレーンのブームを通して作業するため、あまり大きな部材搬入は困難であつた。限られたスペースと設備で補強しなければならなかったため、1 部材当たりの質量を軽くできる、トラス構造（テンポラリーバイパストラス：以下、TB トラスと呼ぶ）で補強することにした。第 12 図に TB トラス概要を示す。

4.3 主桁補修手順

4.3.1 足場設置、TB トラス設置

足場と桁補強材の TB トラスを設置する。桁切断ラインと、基準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、溝形鋼にローラを付けたレール



第 12 図 TB トラス概要 (単位: mm)
Fig. 12 Sketch of temporary bypass truss (unit: mm)

を配置した。第 13 図に足場と TB トラスの設置状況を示す。

4.3.2 水平補剛材設置

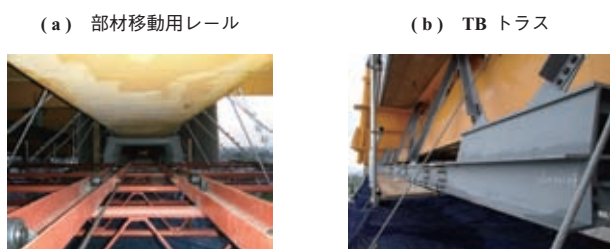
損傷部の腹板を切断すると、残置された側の腹板が自由端になり、損傷腹板の切断によって開放された応力が、残置された腹板の自由端付近に再配分され、腹板が局部座屈することが懸念された。そのため、損傷部材の切断前には、腹板の自由端になる付近に、水平補剛材を追加し補強した。第 14 図に追加水平補剛材による断面を示す。

4.3.3 応力モニタリング

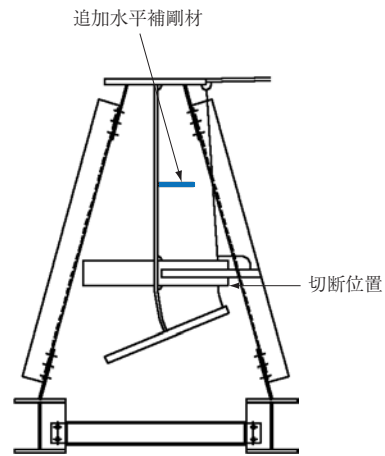
設計計算値との対比が可能のように、主桁上下フランジと TB トラスに一軸ひずみゲージを貼付し、施工段階ごとに応力ひずみ計測を行って安全を確認した。第 15 図にひずみ計測の様子を示す。また、主桁のエレベーションについても主要施工段階ごとに計測して、異常値がないことを確認した。

4.3.4 桁切断・開先加工

損傷部位の桁をガス切断し、開先加工を施した。第 16 図に桁切断と第 17 図に開先加工の様子を示す。

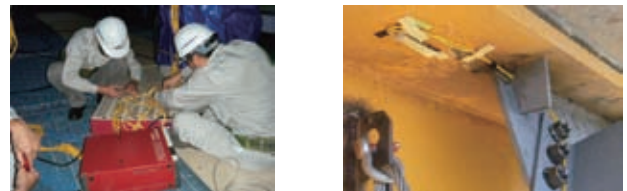


第 13 図 TB トラスの設置状況
Fig. 13 Installation of temporary bypass truss



第 14 図 追加水平補剛材による断面
Fig. 14 Cross sectional view of additional horizontal stiffener

(a) スイッチボックス (b) ひずみゲージ



第 15 図 ひずみ計測の様子
Fig. 15 Measurement of strain



第 16 図 桁切断
Fig. 16 Cutting of main girder



第 17 図 開先加工
Fig. 17 Grooved weld edge

4.3.5 主桁部材の製作・取付け

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。現場から車で30分程の位置にあるIHIグループのベトナム工場(IIA)で部材製作を行い、現地へ搬入、開先調整後に溶接を行った。第18図に主桁部材の工場製作、第19図に主桁部材の取付け溶接の様子を示す。

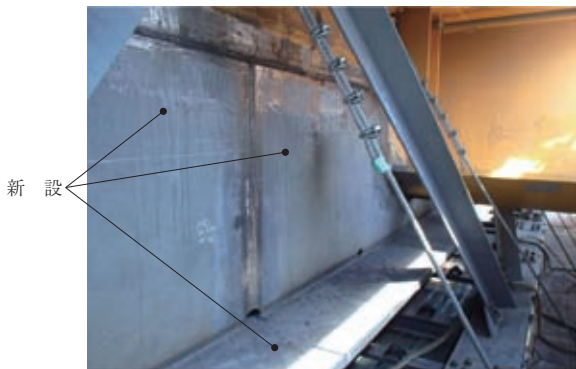
5. ケーブルの取替え

5.1 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、IHIグループ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(たるみ)取りをしながら、徐々にケーブル張力を抜いてゆく。水平力がな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、ケーブルを取り替えることができる。



第18図 主桁部材の工場製作の様子
Fig. 18 Fabrication at IIA



第19図 主桁部材の取付け・溶接の様子
Fig. 19 View of girder after replacement and welding

第20図に、計画当初に想定された、ケーブル架設の逆手順でケーブル撤去する場合の設備配置を示す。

しかし、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。さらに、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こるためのクレーンも必要になる。

また、今回の工事では、取り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、取替えケーブルのさらに上側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困難さがあった。

そのうえ、ケーブルを1本抜き取った状態では、桁の耐荷力が落ち、桁上に載せられる架設機材質量も制限する必要があった。

5.2 ケーブル取替え手順

今回の工事では、前述のような制約条件に配慮し、小型クレーンとウインチだけで施工できるように、また、上側のケーブルをサグ取り用とガイドケーブルとして有効利用し、以下のようなケーブル取替え工法を考えた。

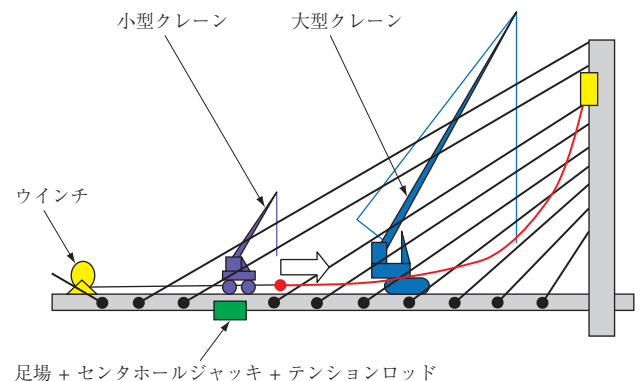
第21図にケーブル取替え手順の模式図を示す。第22図に実際のケーブル撤去時の様子を示す。

6. 設計・解析検討

6.1 設計・解析方針

6.1.1 設計断面力

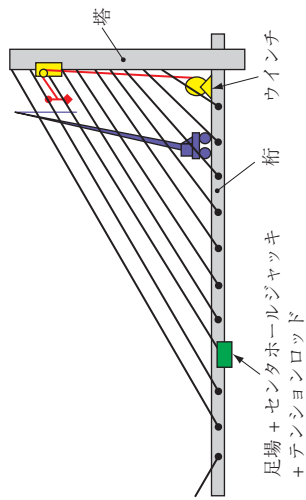
本橋は合成桁の斜張橋で、合成前応力、合成後応力の両方を足し合わせて応力照査する必要がある。しかも施工当時は、1ブロック張り出すごとにプレキャストコンクリート床版と合成させる、逐次合成張り出し架設を行っていた。



第20図 計画当初の設備配置
Fig. 20 Unorthodox cable installation procedure

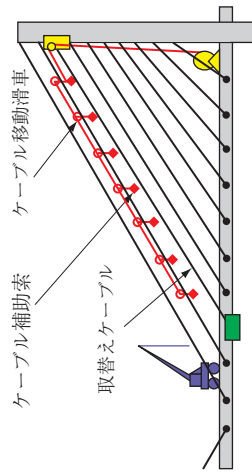
ステップ-1

1. 桁側、塔側に足場を設置する。
2. 桁側ケーブル定着部に、センタホールジャッキ、テンションロッドを設置する。
3. ウィンチによる巻上げ・巻下げ設備を設置する。



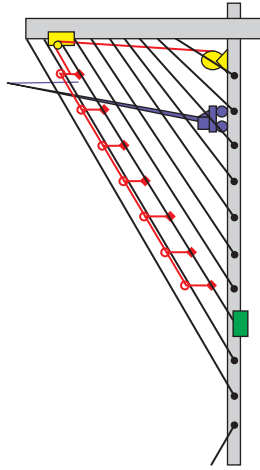
ステップ-2

1. ケーブル移動滑車を、取り替えるケーブルの1段上のケーブルに設置し、そこからケーブル補助索を吊り下げる。



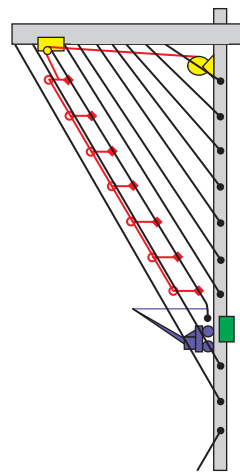
ステップ-3

1. 取替えケーブルに、ケーブル補助索をバンドで固定し、ケーブル補助索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。



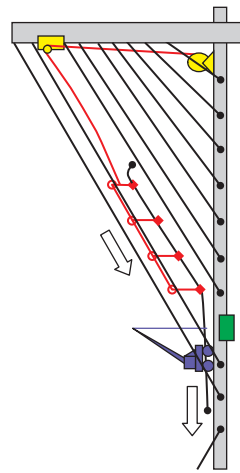
ステップ-4

1. 桁側ソケットをセンタホールジャッキで張力を除荷する。
2. 桁側ソケットを抜き取る。



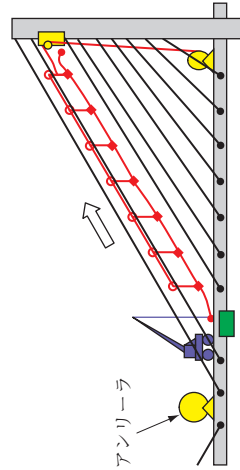
ステップ-5

1. 塔側ソケットを抜き取る。
2. ウィンチ操作でケーブル移動滑車ごとにケーブルを下ろす。



ステップ-6

1. 上記の逆手順で新設ケーブルを設置する。



第 21 図 ケーブル取替え手順
Fig. 21 Stay cable replacement procedure



第 22 図 ケーブル撤去時の様子
Fig. 22 Removal of stay cable

したがって、主桁の死荷重完成系応力を再現するには、各施工ステップを忠実に再現した、組立て解析を実施する必要があります。実際に施工当時に行っていた施工ステップ解析でも、部材の剛性変化を考慮できるように、実架設ステップに即して逐次合成を考慮した、架設系組立て解析を行っていた。

本橋は IHI で施工した橋梁であり、施工当時の架設系の桁応力照査時のデータが残っていたので、損傷前の死荷重完成系での応力状態の把握には、その合成前断面力の累計、合成後断面力の累計を参照して、主桁の応力度評価を行うことができた。

第 23 図に主桁（合成桁）の応力分布概念図を示す。主桁の損傷前の応力（ σ ）は、下記の（2）式で推定できる。

$$\sigma = \Sigma\sigma_{Ms} + \Sigma\sigma_{Ns} + \Sigma\sigma_{Mv} + \Sigma\sigma_{Nv} \dots\dots\dots (2)$$

$\Sigma\sigma_{Ms}$ ：合成前曲げモーメントによる応力累積値

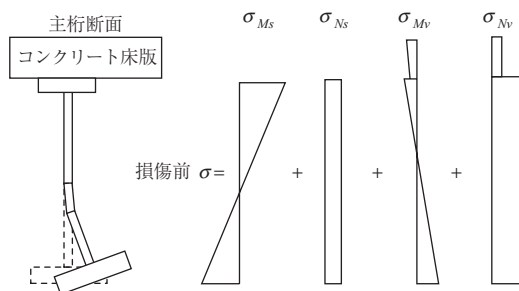
$\Sigma\sigma_{Ns}$ ：合成前軸力による応力累積値

$\Sigma\sigma_{Mv}$ ：合成後曲げモーメントによる応力累積値

$\Sigma\sigma_{Nv}$ ：合成後軸力による応力累積値

6.1.2 断面設計

事故後の断面照査は、桁高の下半分が欠損したとして、



第 23 図 主桁の応力分布概念図
Fig. 23 Illustration of stress in a composite girder

残された断面（上半分）だけで応力評価した。実際に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思われたが、取替を想定していない上半分の部材に対しての応力評価するためには、安全側の考え方として採用した。

4.2 節でも述べたように、主桁の補剛と、施工中の断面力をバイパスさせる目的で、TB トラス材を設計した。TB トラスの設計には、主桁下半分の損傷部については、健全時にその部分に作用していた応力が、残置された健全断面と TB トラスに再配分されるものと仮定して設計をした。また変動荷重による主桁変形を抑える意味でも、健全時の主桁断面剛性以上の剛性を確保するよう設計した。

6.1.3 合成桁の応力再配分

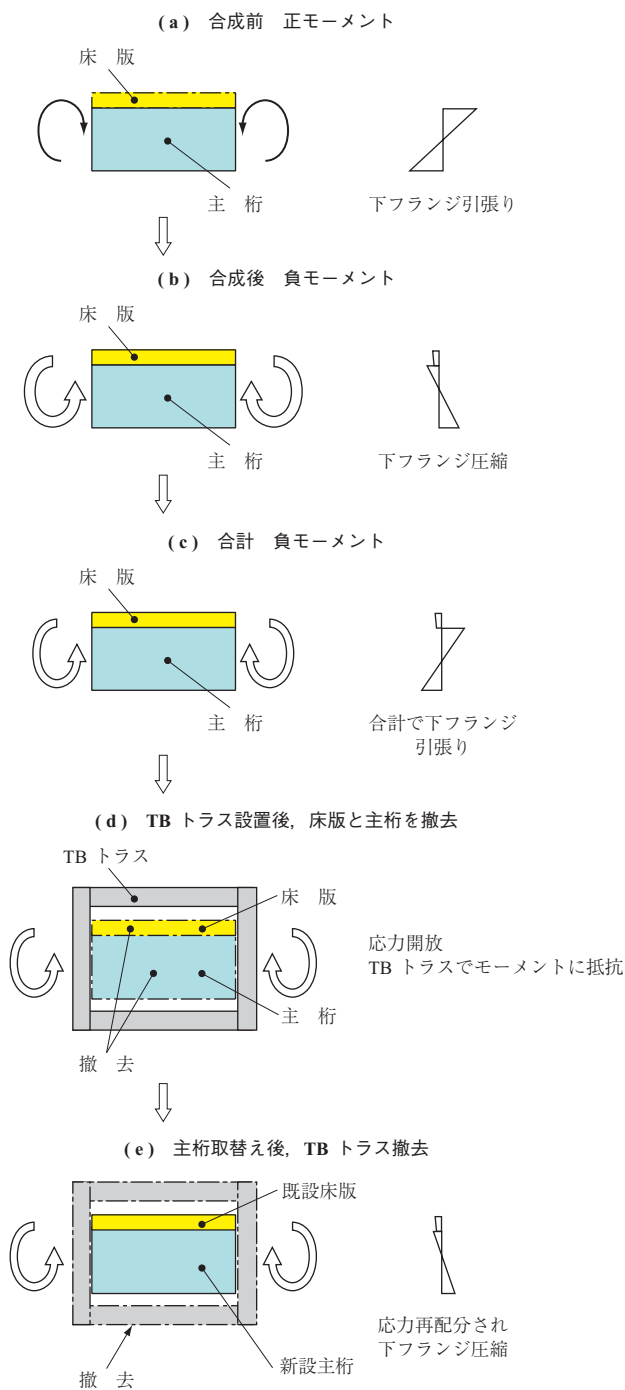
第 24 図に合成桁で桁を取り替えた場合の、応力再配分のイメージを示す。

損傷部の主桁は、断面によっては合成前に正モーメントが大きき部分もあり、合成後モーメントやケーブル張力による軸圧縮を考慮してもまだ、下フランジは引張応力になっている箇所が含まれていた。ただし、合成前 + 合成後の全体累計では負モーメントであり、応力がすべて再配分されると考えると、下フランジは圧縮応力にならない箇所でもあった。この部分の下フランジ（引張応力作用下）を切断すると、引張応力が開放されて TB トラスの下弦材には、その分、引張応力が増えると考えがちだが、全体のモーメントは負モーメントなので、これに釣り合おうとして、TB トラス下弦材は軸圧縮が作用する。

合成前モーメントの影響で下フランジが引張応力になっていただけで、断面全体を取り替えるような場合には（応力の再配分は）第 24 図に示すイメージのように、最終的な全体累計断面力で釣り合いを考えた方が良いことが分かる。ただし、今回の場合のように、断面の部分的な取替えの場合は、逐次施工ステップを反映した解析を行って、断面力の変化分を考慮していく計算をしないと、正確には求まらない。

また、骨組解析で断面力を逐次計算し応力を算出しても、フランジの有効幅の影響や局部応力まで反映して追跡することは困難で、ある程度余裕と安全代をもって解析・評価を行い、部材設計する必要がある。

以上のように、合成桁の応力再配分は非常に煩雑であり、不確定要素も多いため、安全性を優先して、TB トラスは引張材、圧縮材どちらになっても問題ないように、余裕をもたせて断面設計した。

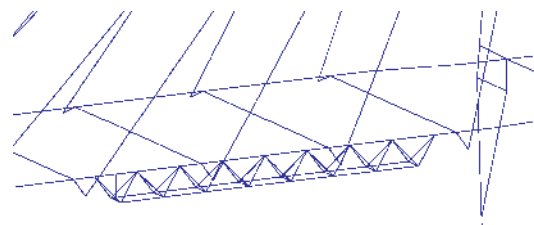


第 24 図 応力再配分のイメージ
Fig. 24 Illustration of re-distribution of stress

6.2 解析モデル

解析モデルは斜張橋全体の三次元骨組モデルに、TB トラス部材を組み込んだモデルを作成し、施工ステップごとに変動荷重を追跡する逐次解析を行って、断面力を足し合わせて評価した。第 25 図に三次元骨組モデルを示す。

骨組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ので、桁取替え部については、ケー

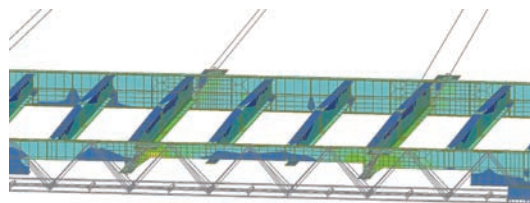


第 25 図 三次元骨組モデル
Fig. 25 Fish bone analysis model

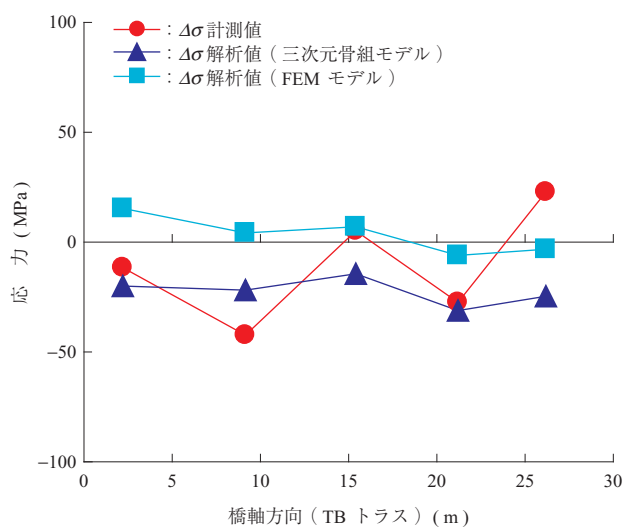
ブル定着部、TB トラスも考慮した FEM (Finite Element Method: 有限要素法) モデルを作成し、前述の骨組モデルから得られる断面力を作用させて、局所的な応力度評価も行った。FEM モデルでも逐次ステップを再現して安全性を確認した。第 26 図に FEM モデルを示す。

7. 応力モニタリング結果

解析結果の妥当性と、架設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、応力モニタリングも行った。TB トラス設置時を基準として、① 桁切断後 ② 新設桁溶接後 ③ TB トラス撤去後、の 3 段階でモニタリングした。第 27 図に桁切断後の TB トラスの応力モニタリング結果を示す。



第 26 図 FEM モデル
Fig. 26 FEM model for local analysis



第 27 図 応力モニタリング結果
Fig. 27 Results of stress measurements

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をした。応力モニタリングでも上流側の TB トラスと、下流側の TB トラスとで、面外変形による応力差が確認できた。第 27 図に示す TB トラスの実測応力値は、上流側と下流側の平均値をプロットしており、面外変形による応力をキャンセルさせて表現している。これは、骨組解析、FEM 解析とも、面外変形が戻ることによる応力までは想定していなかったため、解析値と同レベルで比較するためである。

骨組解析と FEM 解析とで計算値に差がでたのは、コンクリート床版のモデル上の分担力に、差がでた可能性がある。有効幅など検討の余地がある。

また、鋼材の許容応力に対して 1/4 ~ 1/5 程度の応力で、安全上の問題にはならないレベルだが、骨組解析や FEM 解析値よりも、ひずみゲージによるモニタリング結果の方が、引張りについても、圧縮についても値が大きく計測された箇所がある。ケーブル定着間での曲げ成分が大きいような結果になっているが、床版のクリープの影響や、または、TB トラスのひずみゲージ添付位置の局所的な板曲げの影響（TB トラスのウェブ片面にしかひずみゲージを貼付していなかったため）とも考えられるので、さらなる検討の余地がある。

8. 結 言

本来通行するはずのない大型貨物船が台風によって漂流して衝突し、主桁とケーブルを損傷するという重大事故が発生した。2 主合成桁の斜張橋において、主桁とケーブルが一部損傷するという、想定外の大事故であったが、幸いにも床版、横桁が健全であったため、予想外のリダンダンシーを発揮し、落橋には至らなかった。

今回の補修工事は、以下の特徴が挙げられる。

- (1) 桁の補修については、三角形断面のテンポラリーバイパストラス工法を採用し、桁の切断、新設、溶接を安全に施工することができた。
- (2) 複雑な構造を、骨組解析や FEM 解析を併用しながら、施工ステップを忠実に再現した組立計算をすることで、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、情報化施工を行えた。
- (4) ケーブル面内の一部のケーブルを取り替えるため、移動滑車を使った仮ハンガーシステムを採用し、安全に精度良くケーブルを取り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などに、応用、発展できるものと考えている。

— 謝 辞 —

本工事は ODA の緊急援助対象として補修工事が行われたもので、ベトナム政府およびハイフォン市人民委員会ならびに経済産業省および JICA（独立行政法人国際協力機構）など、日越政府機関の協力によって補修工事が行えたことは、両国の信頼関係維持・発展にも大いに役立ったと考えている。

事故後の緊急調査においては、神鋼鋼線工業株式会社の石川技術部長、IHI 技術開発本部の猪瀬主査、IIS 橋梁企画部の中村部長に貴重なご意見、アドバイスをいただきました。

また、補修工事の遂行に当たっては、工事監理として株式会社長大の栗野氏の指導のもと、IIS および IIA が、IHI グループとしての相乗効果を発揮して、この技術的にも難しい、合成桁斜張橋の主桁補修とケーブル取替え工事を、安全に行うことができた。工事関係各位と、ベトナム現地のスタッフ皆さまのご協力に対し、ここに記し、深く感謝いたします。

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 No. 477 2006 年 9 月 pp. 18 - 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 年 7 月 pp. 153 - 162