

# 被災した橋梁の復旧に関する構造提案と建造

玉田 和也<sup>1</sup>・石原 純<sup>2</sup>

<sup>1</sup>舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 (〒625-8511京都府舞鶴市宇白屋234)

<sup>2</sup>養父市 まち整備部 建設課 (〒667-0101兵庫県養父市広谷250-1) .

兵庫県養父市に、重要な観光資源である天滝があり、その天滝に向かう遊歩道にある木造の橋梁が、2017年2月に大雪によって落橋し、養父市は2018年内に新たな橋梁に架け替えることを決定した。本研究では、短期間(6ヶ月)で設計から架設まで実施でき、一つの部材重量が20kg以下という制限を満足できる橋梁を提案するとともに、地域参加によって完成に至った経緯について報告する。

キーワード 復旧橋梁, 可搬橋梁, ピントラス, ボウストリングトラス, ポニートラス

## 1. はじめに

兵庫県養父市に日本の滝100選に選ばれている「天滝」がある(写真-1)。その天滝に向かう遊歩道に位置する筏天滝線9号橋が2017年2月に大雪によって落橋した。筏天滝線9号橋は1993年に供用開始した橋長8.85m幅員1.5mの単純木製2主桁橋であった(写真-2)。養父市が2016年7月に点検を行い、主桁・横桁・床版に腐食が見られたが、激しい損傷ではなかったため補修は必要ないと判断していた橋梁である。しかし、激しい積雪により主桁



写真-1 天滝



写真-2 旧筏天滝線9号橋

の支間中央付近で破壊が発生し鉛直方向に崩壊した(写真-3)。その後、仮設で造られた仮橋も2017年9月の台風18号によって流され、応急措置として仮設の足場を設置して抜本的対策の検討を進めることにした(写真-4)。

養父市にとって天滝は重要な観光資源であるため、恒久的な橋梁が必要だと判断し、安全性が高く長期的に使用できる橋梁の架設計画が持ち上がった。現地は毎年1月には積雪があり通行できなくなるため、12月末日までに橋梁を完成させる必要があった。また、図-1に示す位置図にあるとおり架設場所は遊歩道を約800m登った地点にある。そのため、車両類による輸送はできず、2018年に多発した豪雨災害対策のためヘリコプターの確保が困難であることから、部材輸送は人力で行う必要があった。



写真-3 落橋状況と仮橋(背後は鼓滝)

(出典 <http://masuseki.com/> )



写真-4 台風後の状況



図-1 遊歩道・位置図(★印)

(出典 <https://tendaki.jp/>)

上記の状況の下、2018年6月に養父市から舞鶴高専に橋梁構造検討の依頼があり、舞鶴高専と養父市において「社会インフラ維持管理連携協力に関する協定」を締結し事業を推進することになった。本事業は「観光施設現年単独災害復旧事業費」によるものであり、構造提案・設計計算・製作図作成までを舞鶴高専が担当し、材料調達・製作までを養父市役所と市内業者が、輸送は神戸大学山岳部・山岳会が担当した。現地での下部工の復旧と上部構造の架設は市内業者が担当した。維持管理については、点検マニュアルの作成を舞鶴高専が、日常の点検は地域の団体である「天滝を生かす会」が担当する。

天滝への遊歩道を復旧するためならば、という産官市民の熱い想いが原動力となって非常に短い工期内で事業の完成に至った。以下に、被災した橋梁の復旧に関する構造提案と建造について報告する。

## 2. 設計条件の策定

本橋を設計するにあたり設計条件を以下のように策定した。

- ① 現地踏査の結果、桁掛かり長の確保と橋台の脆弱性を考慮し、橋梁の支間長を10.0mとし、幅員は1.0mとする。
- ② 旧橋の落橋原因を踏まえ、2mの積雪にも耐えられる強靱な橋梁とする。そのために主構の材料には鋼材を用いることを前提とする。

- ③ 天滝渓谷は「氷ノ山後山那岐山国定公園」内にあるため、景観を考慮したデザイン・色彩とする。
- ④ 架設現場は遊歩道を800m登った地点にあり、人力での輸送となるため、1部材当たりの重量を20kgf以内とする。
- ⑤ 半年以内での完成を求められていること、また維持管理や今後の補修等を考慮し、部材の材料調達や製造・架設は養父市内で完結できること。

## 3. 橋梁形式の選定・検討

策定した5つの設計条件を満足できる橋梁形式を桁橋、トラス橋、アーチ橋から選定することにしたり<sup>2)</sup>。いずれの場合も台風等による増水が予測されるため下路タイプとして桁下空間を確保することとした。また、吊橋・斜張橋についてはケーブル定着ブロックの建造や維持管理に懸念があり設計条件⑤が満足できないと判断し、検討から除外した。

### (1) 桁橋

桁橋は、人力による運搬を考慮し部材(H形鋼)の重量を20kgf以下に抑えるとブロック数が増大し、その連結板(普通ボルト継手)も膨大な量となる。そのため、運搬量が増え人力輸送に困難が伴う。また、橋の全長にわたってボルトが配置されるため防錆機能の低下を招きやすく維持管理や景観面で問題が出てくる可能性がある。

### (2) トラス橋

トラス橋は、レトロな構造<sup>3)</sup>を復活させて格点の構造にピン結合を採用することで、部材の分解と持ち運びが容易にできる利点がある。部材(L形鋼)の重量を20kgf以下でかつ部材長を2m以内に収めることが可能となり人力輸送が可能となる<sup>4)</sup>。主構の連結がピン結合なので、高力ボルト接合が不要となり、床組・横構は普通ボルト接合で対処できる。

下路トラス橋であるため、背景の鼓滝や山との対比によりインスタ映えする景観を提供できる可能性がある。

### (3) アーチ橋

アーチ橋は、構造的な形状から景観性に優れ、スレンダーながら力強さを感じさせる橋梁形式である。ただし、アーチリブは軸力と曲げモーメントに抵抗するため、現場継手部は高力ボルト接合となるため、部材の運搬を考慮すると桁橋と同様の結果となる。また、主構のアーチの製作等を考えると設計条件⑤が満足できない可能性が大きい。

### (4) 橋梁形式の詳細

橋梁形式の検討の結果、設計条件を満足できる可能性

の一番高いトラス橋を採用することとした。

トラス橋は上、下弦材とそれらを結ぶ腹材が鉛直荷重に耐える主要な構成要素で、腹材のトラス組みによって種々のタイプがある。主なタイプには、ワーレントラス、プラットトラス、ハウトラス、Kトラス等が挙げられる。

様々な構造形式を有するトラス橋<sup>9)</sup>の中で、アメリカで鉄の父といわれるホイップルが1840年に広めたボウストリングトラスがある。ボウストリングトラスとは、支点及び上弦の格点が放物線あるいはそれに近い曲線上に配置されたトラスのことである。そのため、景観性に優れており、曲げモーメントの形状に合わせて上下弦材の間隔が変化しているため、全ての弦材で軸力が等しくなり同じ断面形状で構成できるという特徴がある。

ボウストリングトラスには、アメリカ流とドイツ流があり、日本では、1890年代にドイツで開発されたハーコート製のプレハブ式のもの導入された。ハーコート製のピントラスシステムの最大の特徴は、現場における各部材の接合は全てピンあるいはボルトナットで行われ、熟練したリベット工なしで短時間のうちに桁の組立・架設が実行できる点にあった。これらの特徴はまさに本橋に適合するものであり、レトロな橋梁形式を現代に復活させることにした。



写真-5 綾部大橋 全景



写真-6 構造検用模型

比較的支間長が短いトラス橋では、主構高さが低くなるため建築限界を確保するために上弦材を繋ぐ支材や上横構を設置しないポニートラスがある。本橋でもポニートラス形式を採用することとした。この場合、圧縮力が発生する上弦材の座屈対策が必要となる。これについては1929年に建造された同形式の綾部大橋を参考とすることとした(写真-5)。

ボウストリングトラスの放物線形状の決定は、支間長10.0m、上下弦材の離隔を2.0mとして形状を検討した。橋軸方向にx軸、高さ方向にy軸をとり、次式により上弦材の形状を決定した。

$$y = -0.08x^2 + 0.8x$$

#### 4. 詳細設計

##### (1) 構造模型の作成

詳細設計と並行して1/20スケールの橋梁模型を作りながら橋全体の形状バランスや構造詳細(格点部の板の重なり、部材の取合い)の検討を行った。上下弦材と斜材の山形鋼を2つ組み合わせる部材断面の検討、横桁と主構の接合、支承構造、床組の構造イメージを確認しながら本橋の実現性を検証した(写真-6)。

##### (2) 詳細設計

下弦材の長さを2m以下にするため、支間長を6等分して横げたを配置した。床組みは、横げた間に木製(厚さ100mm)の床版を張り渡す構造とした。上弦材は先述の放物線式により求めた座標に格点を配置し、斜材の配置はワーレン形式とした。

レトロな橋梁の復活であることから、荷重、断面力、断面計算、ピン結合、床組、上弦材の座屈防止材等の計算は基本的に手計算で行った。荷重は、雪荷重と自重を考慮した。トラスは節点法を用いて解き、部材軸力を計算し、局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度から、主構部材断面を決定した。ピン結合の計算は、支圧応力度と曲げ引張応力度を算出し照査した<sup>7)</sup>。具体的にはピンとアイバーのピン孔の間に発生する応力集中を参考文献を参照し現場の施工性も考慮しつつ検討しピンの直径を27mm、孔径を29mmに決定した。

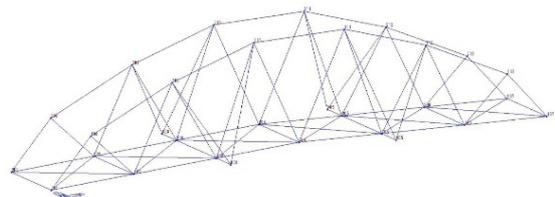


図-2 立体解析モデル図

詳細設計では、上弦材の座屈防止材の効果を検証するために、立体骨組モデルを用いた線形座屈解析を実施しその安全性の確認を行った(図-2)。

## 5. 製作・輸送・架設

市内の鋼材業者が設計の進捗に合わせて形鋼やボルト類の材料を確保し、鋼部材の製作と仮組立を実施した。下弦材の格点では最大10枚の鋼板をピン結合するため、現場での施工性についての懸念が架設業者から挙がっていた。これに対し、ピンの先端をテーパ加工するなど工夫も行い、仮組立により施工可能であることを実証して現場架設に臨むことができた。写真-7に仮組立の状況を示す。

資材の輸送については、神戸大学山岳部・山岳会が担当し、輸送する資材は、架設用の単管や足場板類、セメント、砂、砂利、橋梁本体の鋼部材、塗料など合計8.8tonであった。距離800m、標高差150mの狭い登山道を利用し8日間で現役大学生から最高齢69歳の山岳部OBも含め、延べ60名がかりで人力による輸送を担っていただいた(写真-8)。

架設については市内業者が実施した。橋台の修復、架設用足場、橋梁本体の架設、塗装、架設資材を流用した橋詰の整備全般について施工した。写真-9に架設状況を写真-10に工事完成時(2018年12月)の状況を示す。

## 6. 維持管理マニュアル

本橋の架橋場所は滝の飛沫や積雪のため、湿気が多く、鋼材や木材に腐食が発生しやすい状況にある。トラス本体(格点部、支承部、橋座部、連結板やボルト角部)、木床版、橋台のそれぞれの部位ごとに点検ポイントと着目箇所をまとめ、本橋の特徴を反映した維持管理マニュアルを策定した。維持管理マニュアルにある点検チェックリストでは、点検箇所の異常の有無のチェックに加え点検箇所の写真撮影のチェックや必要な対策についてのチェックも行う内容とした。

維持管理マニュアルに記載している維持管理方針を以下に示す。本橋は、地元の総力を結集して構築した橋梁であるため、日常の見守りと定期的な点検を実施し、適切な対策・修繕を継続して実施していくことを前提に設計寿命を100年間としている。これを実現するために必要な事柄を以下に示す。

① 鋼部材は特に格点部を注意して点検する。塗装が施されていない箇所に着目し、さび汁が出ていないか定期的に目視点検を行う。さび汁の確認は、桁の上からと桁下から実施する。ピン結合部にさび汁が確認された場合は、現場の状況を見守り、必要に応じ



写真-7 仮組立



写真-8 人力輸送(ポッカ)状況



写真-9 現場架設



写真-10 架設完了

てグリスやシール材を塗布する。

- ② 木材は、10年～15年のスパンで取り換える。ただし、腐食の進行が著しい部材や、鋼部材に悪影響を与える部材は早めに交換する。
- ③ 橋台と橋座部は、橋全体のバランスに大きく影響を及ぼすため、洗堀や橋台側面の崩壊には特に注意して点検する。橋台側面の損傷が見つかった場合は、即修復する。
- ④ 支点部は植物の繁茂により風通しが悪くなりがちであり長寿命化に及ぼす影響が大きいため、植生の伐採を継続して行うこと。

7. おわりに

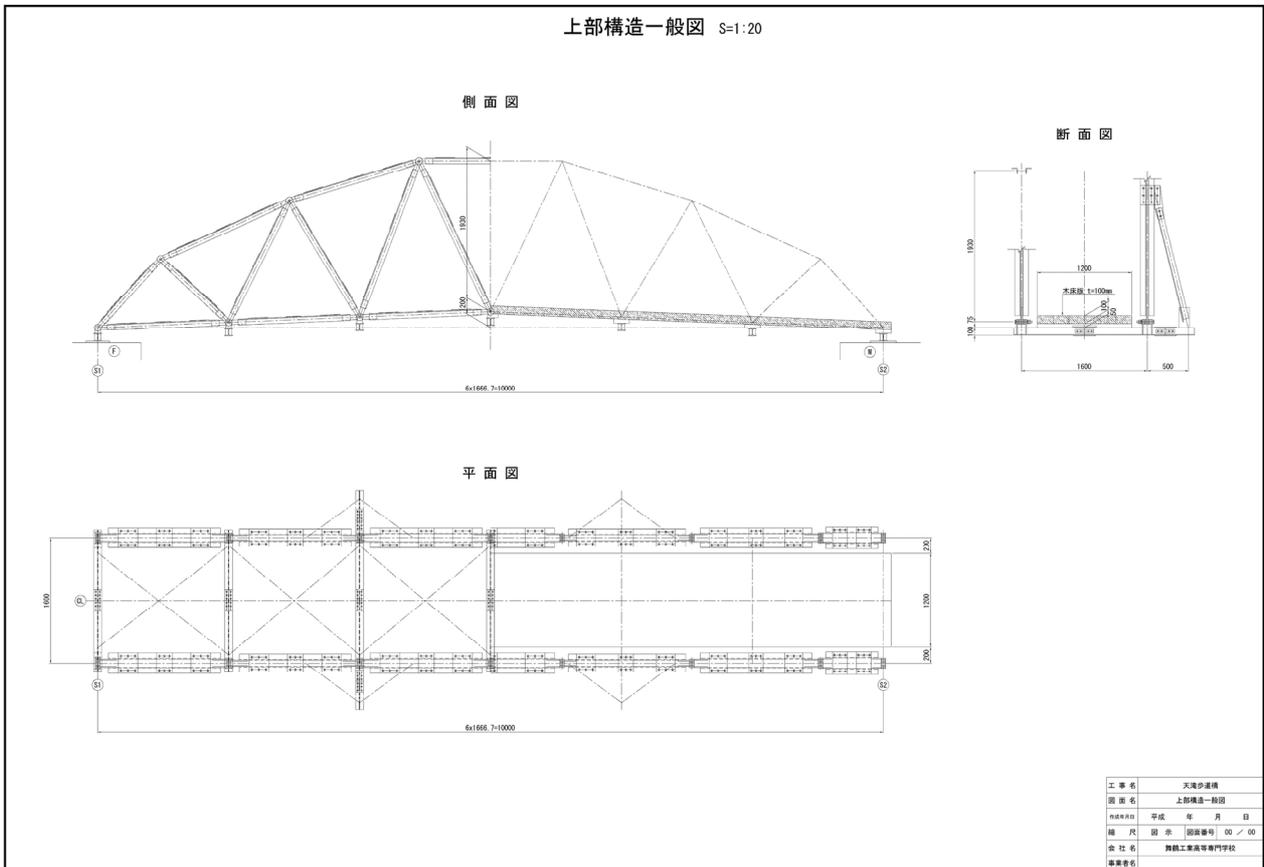
本橋は地元の総力を結集して構築した橋梁であり定期的な点検を実施し、適切な対策・修繕を継続することを前提に設計寿命を100年間とした。100年後の人々に本橋を無事に手渡すことができるよう、関係各位において奮起していただきたいと考える。

下記に橋梁一般図を次頁に維持管理マニュアルに記載している点検チェックリストを添付する。

**謝辞：**本橋の建造に係っていただいた全ての方々に感謝いたします。そして、本橋の維持管理に係わっていただく全ての方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 伊藤學：改訂 鋼構造学，コロナ社，2002.3.25.
- 2) 長井正嗣：橋梁工学（第2版），共立出版株式会社，2006.9.15.
- 3) 成瀬輝男：鉄の橋百選（近代日本のランドマーク），東京堂出版，1994.9.30.
- 4) 日本橋梁建設協会：‘11 デザインデータブック，2011.4.
- 5) 小西純一，西野保行，淵上龍雄 共著：わが国におけるドイツ製鉄道橋梁－歴史と現状－，土木史研究 第12号，1992.6.
- 6) 鋼橋技術研究会：鋼橋の技術史研究部会「平成7・8年度活動報告書」，1998.12.
- 7) 吉町太郎一：鋼橋の理論と計算，石崎書店，1952.1.20.
- 8) S.P.ティモシェンコ：弾性論，コロナ社，1979.7.10.



橋梁名		点検実施年月日時刻	天候	点検者氏名			
天滝歩道橋		年 月 日 時 分					
調査箇所	調査項目	チェック			写真		
		有	無	写真撮影			
ピン (下弦材)	上流側	割ピンは外れていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		アイバーの重なっている所にさび汁は出ていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		アイバーに断面欠損は生じていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		桁下からさび汁が出ていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	下流側	割ピンは外れていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		アイバーの重なっている所にさび汁は出ていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		アイバーに断面欠損は生じていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		桁下からさび汁が出ていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
ピン (上弦材)	上流側	割ピンは外れていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		アイバーの重なっている所にさび汁は出ていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		アイバーに断面欠損は生じていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	下流側	割ピンは外れていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		アイバーの重なっている所にさび汁は出ていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		アイバーに断面欠損は生じていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
支点部	天滝側	土砂の堆積はないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		草木の繁茂, 落葉の集積はないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	駐車場側	土砂の堆積はないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		草木の繁茂, 落葉の集積はないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
ボルト	連結板	ボルト角にさびが生じていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		ボルトにゆるみはないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		ボルトの脱落はないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	ターンバックル 取り付け部	ボルト角にさびが生じていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		ボルトにゆるみはないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		ボルトの脱落はないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	横桁継手部	ボルト角にさびが生じていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		ボルトにゆるみはないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		ボルトの脱落はないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
横桁	端部の横桁がさびていないか(砂利で埋まっている)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
木床版	雨水による腐食はないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
	木床版の取付ボルトにゆるみはないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
	床材と横桁継手部の隙間に腐食はないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
橋台	天滝側	橋台前面は洗掘されていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		橋台側面に損傷は生じていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	駐車場側	橋台前面は洗掘されていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		橋台側面に損傷は生じていないか	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
合計(個)							
対策		自由記述					
グリスやシールの塗布		<input type="checkbox"/>					
橋座部の掃除		<input type="checkbox"/>					
ボルトの修繕		<input type="checkbox"/>					
木材の交換		<input type="checkbox"/>					
橋台の修復		<input type="checkbox"/>					