

本邦技術活用のためのインフラ輸出 競合国施工技術の特徴

道路・交通部 上席調査役 保田 敬一
道路・交通部 研究員 樋口 大貴

1. はじめに

インフラシステム輸出を経済成長の柱としながら、日本企業の海外インフラ案件の受注機会を増やしてきた結果、受注実績は2018年に約25兆円となっており、増加基調を維持しているといえる¹⁾。現在は経協インフラ会議においてインフラ海外展開を進めていくために、「インフラシステム海外展開戦略2025」が策定されている¹⁾。また、国土交通省では「国土交通省インフラシステム海外展開行動計画2022」を策定し、我が国の強みを活かした案件形成などを今後取り組む主な施策として位置付けている²⁾。しかし、インフラ海外展開を取り巻く環境が急速に変化する現状を踏まえると、今後日本企業の受注機会を確保していくために、案件組成段階での本邦技術活用機会を拡大、相手国との政策対話を通じた本邦技術の導入促進、本邦技術の紹介及び個別プロジェクト案件支援などの方策が提案されている。本邦技術を有効に展開していくためには競合国の技術情報の収集が不可欠であるが、施工実績調査は定期的に実施されているわけではなく、案件形成の段階で採用予定の本邦技術に該当する競合国の実績をその都度調査しているのが現状である。

本稿では、インフラ輸出競合国の施工実績を調査し、競合国が適用している技術を俯瞰し、日本の類似プロジェクトとの比較を行う。対象とするインフラは橋梁とし、中国を対象とする。

2. 調査方法

本邦技術を網羅している資料から全ての本邦技術を対象にして競合国の施工実績を調査することは非効率であるため、公開されている競合国のプロジェクト情報を引用しつつ、各プロジェクトで適用されている技術を収集整理し、その技術と本邦技術とを比較して考察す

ることとした。技術情報は主に国際会議での文献から収集した。

主な技術論文を以下に示す。

- ・IABMAS(橋梁の管理・安全に関する国際会議)第1回(2002年)から2018年まで
- ・IABSE(国際構造工学会)で発表された論文集
- ・鋼・複合構造に関する国際会議(European Conference on Steel and Composite Structures)
- ・海峡横断に関する国際シンポジウム

3. 調査結果

(1) 調査結果一覧

本稿で紹介する橋梁調査結果一覧を表-1に示す。この中には、本邦優位技術の情報を修正する必要がある技術、中国独自で展開している新形式、新技術、世界一の規模・スケールの橋梁などがある。

表-1 橋梁調査結果一覧

橋梁名	技術名称, 特徴	日本の類似橋の実績
蕪湖長江二橋 (The Second Wuhu Bridge)	プレキャストセグメント形式・PC連続箱桁, 総延長: 27.8km	ラックフェン橋 (L=4.43km)
南昌朝陽橋 (Nanchang Chaoyang Bridge)	7径間連続PC斜張橋(波型鋼板WEB), L=79+5@150+79=908m	豊田アローズブリッジ(4径間連続PC・鋼複合斜張橋, L=173.4+235+235+173.5)
Dongtiao 橋	自碇式吊橋(主塔が傾斜した斜張橋と吊橋の混合形式), L=75+228+75=378m	此花大橋(中央径間長300m)
鴨池河大橋	鋼3径間連続斜張橋(径間部:コンクリート桁, 中央径間:鋼トラス桁: L=800m), 補剛桁の架設にケーブルクレーンを使用	事例無し
港珠澳大橋	世界最長の海上橋(延長=22.8km), 他人工島, 沈埋トンネル(L=6.7km)	東京湾アクアライン (L=4.38km)
蘇通長江公路大橋 (Sutong Bridge)-2	7径間連続鋼箱桁斜張橋(中央径間長1088mは当時世界一)	多々羅大橋(中央径間長890m)

(2) Dongtiao Bridge

本橋の概要は以下に示すとおりである³⁾。側面図・平面図を図-1 に示す。

- ・形式:3 径間連続自碇式吊橋(鋼・コンクリート複合)
- ・橋長:378m, 最大支間長:228m
- ・総幅員:41.6m
- ・所在地:中国 湖州市
- ・供用年月:2015 年 11 月

本橋の特徴は、主塔を側径間側に 20 度傾斜させている点と、側径間にメインケーブルを 7 本に分離して斜張形式にして自碇式吊橋を構成している点にある。

比較設計段階で代替案の抽出と最終形式の決定をどのようにしたのかという資料がない³⁾。主塔を傾斜させた理由と自碇式(側径間を斜張形式, 中央径間を吊り形式と変えている)にした理由がコストも含めて不明である³⁾。中央支間長 228m なら通常の斜張橋で十分対応可能(経済性、施工性など)と考えられる。構造解析自体はそれほど難しくない。主塔を傾斜させている理由や主塔頂部を梁構造ではなく円形にしているのは景観上の配慮からと推察される。また、主塔のメンテナンスのための進入路が塔内にあるかどうかは未確認である。主塔の詳細図が無いため確認できないが、曲面の溶接加工はかなり大変であろうと推察される。

計画・設計段階から 3D モデルによる解析(BIM)を適用していたかどうかは未確認である。

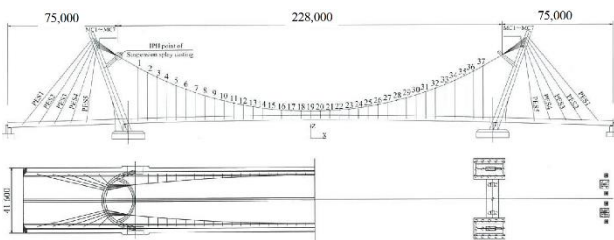


図-1 Dongtiao Bridge 側面図・平面図³⁾

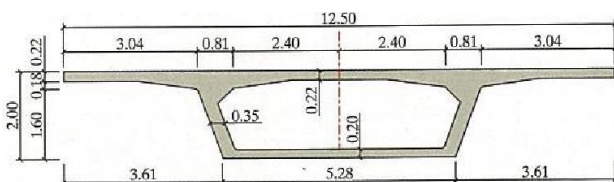


図-2 第二蕪湖長江橋・PC 箱桁断面図
(幅員:12.50m)⁴⁾

日本での自碇式吊橋の実績として、此花大橋(大阪市此花区)がある。形式はモノケーブル 3 径間連続自碇式吊橋、橋長:540.00m、支間長:120.00m + 300.00m + 120.00m、幅員:23.50m、1990 年完成である。

海外の実績としては、青島海湾大橋の大沽河航道橋(2 径間)は世界初の海上大型自碇式吊橋であるといわれているが詳細は不明である。

施工面からは、足場を設置せずに桁を架設する仮設のガーダーアンカレッジ工法「P-G TAM 工法」³⁾の詳細は引用した文献からは確認できないが、桁を架設する前にケーブルを先に架設する方法は吊橋では一般的(自碇式吊橋では桁を先行して架設するという決まった架設方法があるのか不明)である。ハンガーに角度がついているため(鉛直ではない)、施工時にハンガーには座屈損傷が発生する可能性がある。この対処法かどうかは不明であるが、変形制御法(TCM)という方法を提案しているが、詳細は引用している文献からは確認できない³⁾。

(3) Dongtiao Bridge The Second Wuhu Bridge (第二蕪湖長江橋)

本橋の概要は以下のとおりである⁴⁾。PC 箱桁断面図を図-2 に示す。

- ・形式:斜張橋+PC 連続箱桁
- ・PC 連続箱桁総延長:27.8km
- ・幅員:12.5~16.25m(片側), 25~32.5m(両側)
- ・所在地:中国安徽省
- ・供用年月:2017 年 12 月 30 日

本橋の特徴は約 28km の PC 連続箱桁をプレキャストセグメント方式で施工した点にある。特徴を以下に示す。

下部構造のコスト削減を目指し、上部構造の支間長は 30m, 40m, 55m の 3 種類の構造を採用している(上下部工の標準化)⁴⁾。外ケーブルはウェブ内やフランジ内には配置せず、全て箱桁内部空間に配置している⁴⁾。施工時の効率性を実現するため、上フランジとウェブの面取り角度を拡大するとともに、下フランジとウェブの面取り(ハンチ)をなくしている⁴⁾。

延長約 28km の連続高架橋を 4 年で完成させる工程 (規模感) が妥当なものであるのか (材料の調達の問題、作業員の確保、所定の品質管理を行いながら本当に実現できるのか) は、別途専門家からの評価が必要と思われる。

高架橋で工期が限定されている場合、プレキャストセグメント工法は妥当な選択肢と考えられる。

さらに、箱桁内部鉄筋配置が複雑なため、BIM 技術を活用して鉄筋配置および干渉のチェック、必要に応じて溶接継手や機械式継手を併用し、作業効率向上を実現している⁴⁾。

セグメントの製作は日本でもよく行われているショートラインマッチキャスト方式を採用している⁴⁾。橋梁の規模が非常に大きいゆえに工程管理を徹底しないと工期遅れに直結するため、各セグメントの効果的なマッチ誤差の調整を行うためのインターネットプラットフォームを開発することで関係者間のデータ共有と工程管理の効率性が向上している⁴⁾。

海外での我が国企業のプレキャストセグメント橋の実績としては、ラックフェン橋 (ベトナム、ハイフォン) がある。橋梁区間: 5.4km、総幅員: 16.0m、橋形式/PC 箱桁橋 (プレキャストセグメントスパン/バイスパン方式)、完成: 2017 年 5 月、幅員 15.6m、桁高 3.2m、セグメント長 2.0~3.0m、最大重量は 80 トン、標準部 1405 個、支点部 90 個、総数 1495 個のセグメントを製作している。

(4) Nanchang Chaoyang Bridge (南昌朝陽橋)

本橋の概要は以下に示すとおりである⁵⁾。断面図を図-3 に示す。

- ・形式: 7 径間連続 PC 斜張橋
- ・橋長: 3.1118km (斜張橋区間と両側の接続橋で構成)
- ・最大支間長: 150m
- ・支間割: 79m+5@150m+79m=908m (斜張橋区間)
- ・幅員: 37m (航行可能径間部), 16~28.7m (航行不能径間部)
- ・車線数: 両側 8 車線 (設計速度 60km/h),
- ・歩行者デッキ部あり

- ・所在地: 中国 南昌市
- ・供用年月: 2015 年 1 月

波型鋼板 WEB 形式は、従来の PC 橋の 30% を占めるウェブを軽量の波形鋼板にすることによって自重の軽減が図れるためスパンの長大化と施工の省力化が可能となる。また、上部工重量の影響が大きい橋梁において、基礎や下部工への負担が減るため下部工や基礎工の規模が小さくて済み、橋梁全体のコスト縮減が可能となるなど利点が多い。当初はコンクリート床版と波型鋼板 WEB との境界から水が浸入し、鋼材の腐食が発生することが懸念されていたが、この問題も国内では解決済みである。本橋を引用した文献からはこの RC 床版と波型鋼板の境界面の処理には記載がなかった。

形式選定では特に日本で実施している方法 (形式・径間数を変えて上下部工を総合評価、第 1 次選定、第 2 次選定) と変わりなく行われている。中央径間長 150m の連続斜張橋も日本国内での実績は多数ある。

採用している補剛桁の構造 (コンクリート製の上下スラブと波形鋼のウェブ) は日本では波型鋼板 WEB 形式

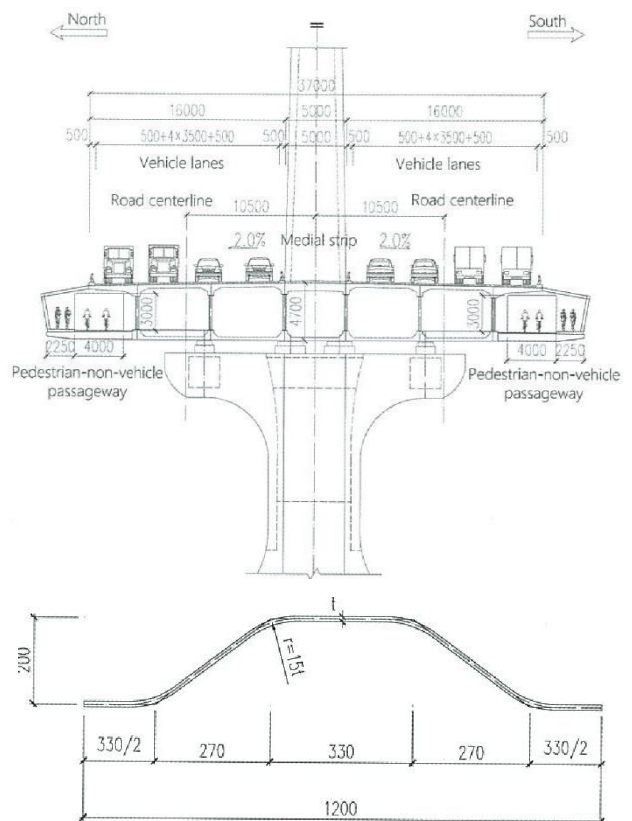


図-3 南昌朝陽橋・断面図および波型鋼板⁵⁾

として認識されている形式である。特に広幅員での6本ウェブ構造は珍しく、第二東名高速道路の豊田アローズブリッジ(4 径間連続 PC・鋼複合斜張橋、橋長:820m, 支間割:173.4m+2@235.0m+173.4m, 幅員:43.8~37.167m)で確認できる程度である。波型鋼板 WEB 形式の実績は国内でも少ないが、中国もこの南昌朝陽橋での採用が初めてということなので、本邦技術の展開を考えるのであれば架橋条件なども考慮して案件形成を行っていく必要があると考える。

この南昌朝陽橋のために、Autodesk Revit をプラットフォームにして BIM 技術を別途開発している点の特徴がある⁵⁾。3DGIS と BIM を用いて、建設・運用・管理システムを構築することにより、信頼性の高い施工計画と運用・維持管理戦略が構築されている⁵⁾。

施工面では、文献中に記載が無いため工程管理の詳細が不明である。安全管理も同様である。文献の写真を見る限り、施工法に関しては特に問題はないと考えられる。

(5) Yachihe Bridge (鴨池河大橋)

本橋の概要は以下に示すとおりである⁶⁾。側面図を図-4 に示す。

- ・形式:7 径間鋼・コンクリート複合斜張橋
- ・橋長:1,240m
- ・支間長:2@72m+76m+800m+76m+2@72m
- ・所在地:中国貴州省貴陽市
- ・供用年月日:2016 年 7 月

本橋の特徴は、中央径間長 800m の補剛トラス形式の斜張橋で、補剛桁の架設に主塔を利用したケーブルクレーンが採用されている点にある。中国国内で、斜張橋の補剛桁架設にケーブルクレーンが採用された

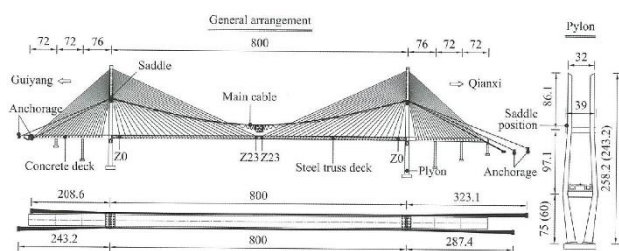


図-4 鴨池河大橋・側面図⁶⁾

初めての事例であると紹介されている。このため、施工時の品質や安全性を確保するため、様々な試験施工や FEM 解析(特にケーブルクレーンのサドルなど)を積極的に適用している⁶⁾。

形式選定段階において、アーチ橋では規模的(支間長 800m に対応)に無理なので、吊形式(吊橋、斜張橋)を選定せざるを得ない。補剛桁をトラス形式にしたのは自重軽減と耐風対策と考えられる。峡谷に架橋する場合、谷底からの高さが高い場合、下から部材を吊り上げることは難しくなり、峡谷両側の取付け道路から部材輸送する方法がとられることが多い。現場の写真を見る限り峡谷の深さがかかなりあり、この橋も峡谷両側の取付け道路からの部材搬入を選択していると推察される。

風による振動の影響と対策は文献では確認できないが⁶⁾、地形(峡谷)からすると、風の影響は少なからず存在すると考えられる。理想的には風洞実験を行って桁やケーブルへの影響などを確認した方がよい。地震荷重の影響は文献では確認できない⁶⁾。

ケーブル耐風対策や防食対策は施工されていると思われるが、文献では確認できない⁶⁾。支承構造、落橋防止装置の有無なども文献では確認できない⁶⁾。

維持管理のために補剛桁に設置される検査路・点検通路の有無、主塔内部における点検通路などの有無も文献では確認できない⁶⁾。

設計面では特に困難となる事項はないと考えられる。

施工面で、高所作業での安全性確保のための対策をどうやっているのかは文献では確認できない。

ケーブルクレーンと橋梁が同じタワーで共有されるので、ケーブルクレーンがセグメントを吊り上げ中央径間へと移動する際、中央径間部と側径間部の間のケーブルの張力の水平成分が不均衡となる。よって、タワーが中央径間部の方向に変形するため、仮設の接地式バックステイを側径間部に設置している⁶⁾。

施工上の課題として、①ケーブルクレーンの FEM 解析と施工前載荷実験の併用、②橋梁の形状へのケーブルクレーンの影響の具合、③温度変化に伴うケーブルクレーンと橋梁の変形の不一致、④長さ 16m のセグメントの架設時の形状管理、⑤橋梁のケーブルの張力

管理などが取り上げられている⁶⁾。

以上、これらは本邦技術でも十分対応可能と考えられる。

(6) China Sutong Changjiang Highway Bridge (蘇通長江公路大橋大橋)⁷⁾

本橋の概要は以下のとおりである⁷⁾。側面図を図-5に示す。

- ・形式:7 径間連続鋼箱桁斜張橋
- ・橋長:2,088m
- ・支間長:2@100m+300m+1088m+300m+2@100m
- ・幅員:34m(6車線)
- ・施工期間:2003年6月～2008年6月
- ・主塔高さ:300m
- ・所在地:中国蘇州市と南通市を結ぶ
- ・供用年月:2008年5月

本橋は完成当時、最大支間長が世界最大であった。中央支間長 1,088m の本斜張橋は現在世界第 3 位である。第 1 位はロシアのルースキー島連絡橋 (Russky Island Bridge) で最大支間長は 1,104m、2012 年の竣工である。第 2 位は中国の滬通鐵路長江大橋 (Hutong Railway Yangtze River bridge) で最大支間長=1,092m、完成年は 2020 年、第 3 位が中国の蘇通長江大橋 (Sutong Yangtze River Highway bridge)、最大支間長=1,088m、完成年は 2008 年、第 4 位が中国の昂船洲橋 (Stonecutters bridge)、最大支間長=1,018m、完成年が 2009 年となっている。また、第 5 位～第 7 位までも全て中国の斜張橋が占めている (いずれも最大支間長 900m 超え)。斜張橋の最大支間長上位 20 橋を見ると、上位 20 橋中、中国の施工は 15 橋と全体の 75% を占めるに至っている。

日本では多々羅大橋 (中央支間長:890m、完成年:

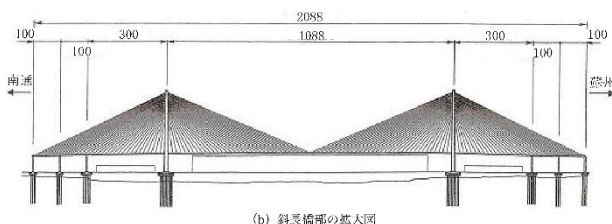


図-5 蘇通長江公路大橋大橋・側面図⁷⁾

1999) が最長である。近年、国内では長大斜張橋の計画はほとんどない。

本橋の特徴として、大河川内 (川幅約 6km) での施工、大深度基礎 (最大水深 50m)、深い支持地盤 (水面下約 300m)、大空間航路 (主航路幅:981m、航路高さ:62m 以上)、気象条件 (最大風速 20m/s 以上の日数が年 108 日) が挙げられる⁷⁾。また、長大橋特有の対策も実施している。耐風安定性向上のための構造的処置として、主桁上へのフラッターの取り付け、施工時における架設橋脚の設置を実施している⁷⁾。さらに、ケーブル制振対策として、ケーブル端部オイルダンパー装置を改良かつ、ケーブル表面に一樣な粒度を加工するような風荷重対策を実施している⁷⁾。

本州四国連絡橋でも実施している動態観測に類するモニタリングを本橋では構造ヘルスマニタリング (SHM) という名称で行っている。内容は、①橋梁周辺の環境および荷重の変動状況測定、②橋梁主要部材の応力分布・変形状況測定、③台風、地震、重量超過車両および船衝突といった想定外の荷重記録、④橋梁主要部材に関する損傷状況の監視、⑤構造的応答における非常時緊急速報の発信、⑥橋梁主要部材の潜在損傷リスクの予測、⑦橋梁耐荷力の推定、設計施工過程・設定係数の検証、⑧橋梁および主要部材の余寿命の初期予測、⑨橋梁運営や維持管理に資するデータの提供、である⁷⁾。

施工面からは、部材据付に用いている SHM は日本でも長大吊橋で適用されている技術である。また、粘性ダンパーも同様である。

(7) Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (港珠澳大橋)

このプロジェクトは海域に設置された人工島 (209ha)、海底沈埋トンネル (L=6.7km)、および海上に構築された橋梁 (L=22.8km) からなる。

橋梁は 3 つの斜張橋と、その他区間は連続桁橋で構成される⁸⁾。

a) 斜張橋:

① 青洲航道大橋 (Qingzhou Channel Bridge)

径間長:110m+126m+458m+126m+110m

② 江海航道大橋(Jianghai Channel Bridge)

径間長:110+129+258+129+110=994m

③ 九州港航道(Jiuzhou Channel)

径間長:85m+127.50m+268m+127.5m+85m

・施工期間:2009年12月～2018年10月

・幅員:上下6車線(片側3車線)

b) 連続桁橋:1径間の長さは60～80m(浅い水深)と90～120m(深い水深)で区分される。文献からは鋼床版箱桁と推察される。

プロジェクトの規模が大きく、周辺環境への影響なども考慮して様々な取組みを行っている⁸⁾。

・海洋生物への影響を最小限にするため、「プレキャストとプレハブ技術」を積極的に採用している⁸⁾。例えば、RC橋脚は躯体～フーチングまでを岩壁ヤードで施工した後(プレキャスト化)、橋脚設置位置まで海上運搬し、事前に杭施工した上に別途設置した鋼殻締め切りの中に躯体を落とし込むなど、海域でのコンクリート打設を極力減らすような取組みもあわせて行っている⁸⁾。

・杭頭、鋼桁、鉄塔などの鋼部材は工場で製造し、岸壁のヤード等で接合・組立してから現場へ船で運搬された後、架設する⁸⁾。

・現場での溶接作業を大幅に削減し、工期短縮、品質確保と架設時の安全性向上をはかるため、「大ブロック一体架設工法」を積極的に採用している⁸⁾。

・アプローチ橋の橋脚数は約130あり、基礎は約1,100本の大口径杭である。メインの斜張橋と同様に、工期短縮を目的として上部工は鋼桁を採用し、大ブロック一体架設を採用している⁸⁾。

日本でこの港珠澳大橋と類似のプロジェクトは東京湾アクアラインである。海底トンネル9.5km、海ほたる(人工島)0.6km、橋梁4.4kmで、川崎市から木更津市を結ぶ高速道路である。開通は平成9年12月18日である。

海上橋としての港珠澳大橋の規模は東京湾アクアラインをはるかに凌ぐスケールであるが、採用されている技術は特に新しいものではない。工期を短縮するために鋼橋を積極的に採用するなど設計面の工夫が目立つ程度である。

4. おわりに

本稿では、インフラシステム輸出を推進していくために、円借款事業における案件形成段階にて本邦技術を有効活用するための前提条件となる競合国の技術情報や施工実績調査を実施した。これまで本邦技術として認識していた技術が競合国でも実績があることが判明したり、日本を凌ぐ実績であったり、日本には実績がなく新たな技術を採用した橋梁の存在などが明らかになった。本邦技術活用機会の拡大に向けて、競合国の施工実績調査は重要かつ必須事項ではあるが、様々な制約があり容易には実施できない面もあるため、更なる検討が必要である。

今後のインフラ輸出海外展開における活動の参考になれば幸いである。

参考文献:

- 1) 経協インフラ戦略会議:インフラシステム海外展開戦略2025(令和3年6月改訂版), 令和3年6月17日
- 2) 国土交通省:国土交通省インフラシステム海外展開行動計画2022, 2022.6.
- 3) Xiaoming Wang, Chengshu Wang, Minfang Zhang, Yuanxio Xu, Xioming Lei : Innovative Design Construction Process for a Self-Anchored Suspension and Cable-Stayed Cooperation Bridge in China Structural Engineering International, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) , Vol28 no2 page 178-184, May 2018.
- 4) Ke Hu, Xuefei Shi, Xin Ruan, Changhai Liang, Zhiquan Liu: The Second Wuhu Bridge: An Industrialized Application of External Pre-stressed Box-Girder Bridge in China, Structural Engineering International, Vol 27, pp.315-320, May 2017.
- 5) Fangjian Hu, Yuanchun Lu, Xiaosong Zhang, Yu Zhang: General Design and Key Technology of Nanchang Chaoyang bridge Structural Engineering

International, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Vol. 29, No. 2, pp. 319-325, May 2019.

- 6) Xiangmin Yu, Dewei Chen: Innovative Method for the Construction of Cable-Stayed Bridge by Cable Crane, Structural Engineering International, Vol.28 pp.498-505, November, 2018.
- 7) Zhishen WU, Jiandong ZHANG, Jien LIN, Bei YAO: 世界最大斜張橋の建設とその取り組み～蘇通長江公路大橋(中国)～, 土木学会論文集F, Vol.65, No.2, pp.163-178, 2009.
- 8) 香港特別行政局政府 運輸及房屋局: WEB pages <https://www.hzmb.gov.hk/en/main-bridge.html>

上記は、令和2年度に実施した「令和2年度 海外社会資本整備に係る建設技術調査業務」(発注機関:国土交通省総合政策局海外プロジェクト推進課)の結果に基づいてとりまとめたものである。