

# 長大吊橋の架設(長寿命化対策)

2023年(令和5年)2月22日

㈱横河ブリッジ

古田 富保

2023/1/18

## 目次

1. 長大吊橋のケーブル架設
2. 海外の施工例
3. 国内の施工例

## 1. 長大吊橋のケーブル架設

1. 大鳴門ケーブル
2. 下津井ケーブル
3. 明石ケーブル



以下、〇〇橋ケーブル工事  
→〇〇ケーブルと略

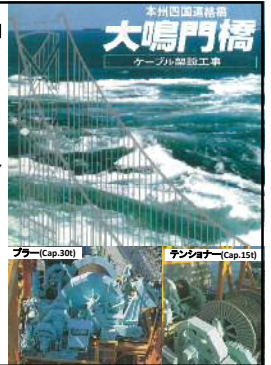
### 1. 大鳴門ケーブル: S56年1月~S58年1月

本四公団⇒新日鉄・神戸製鋼JV⇒横河・宮地・川田(YKM)3社JV

1. 諸元: 橋長1,629m、中央支間長876m、側径間330m+93m、ケーブル直径840mm、ケーブル重量12,000tf
2. 平行線ケーブル: フレハブ・ワイヤ・ストランド(PWS)工法  
127本/ストランド、素線径5.37mm、154ストランド/ケーブル
3. 渡海工法: 曳船によるフリーハンク工法
4. ホーリングシステム: プルテン(プラー&テンショナーの略)式/ケーブル  
大型特殊ウインチ2台による、いわゆる喧嘩巻を開発・採用
5. 架橋地点の条件: 潮流の速さが最大10ノット(大潮時)、また平均20m/s程度の風が年間を通じて吹いている。
6. 所在地: 徳島県・兵庫県
7. 完成年: 昭和60(1985)年6月
8. 1.2万tfのケーブル架設に4ヶ月の工期(0.3万tf/月)

CJV(新日鉄・神戸)の人達は、「因島は幼稚園、大鳴門は大学院」でケーブル架設技術の集大成と言っていた。

**\* 吊橋のケーブル工事が初めての一職員には、まったく意味が分からなかった。後年、長大橋のケーブル架設に大きな技術的進歩があったと知った。**





**2. 下津井ケーブル: S59年1月~S61年1月**

本四公団⇒新日鉄・神戸製鋼JV⇒宮地・川田・横河(MKY)3社JV

- 諸元: 橋長1,447m、中央支間長940m、側径間230m、ケーブル直径940mm、ケーブル重量13,000tf
- 平行線ケーブル・新エア・スピニング(AS)工法、4清車 552本/ストランド、素線径5.37mm、44ストランド/ケーブル
- 渡海工法: FCI(起重機船)によるフリーハンク工法
- ローリングシステム・ASはループ式(曳索駆動装置)/ケーブルいわゆる、エンドレスウインチによるスキーマのリフト
- 架橋地点の条件  
本四Dルートの最も本州側の海峡(下津井瀬戸)に架橋、瀬戸内海国立公園の鷲羽山にトンネルカー式定着、昼夜2交代でAS、航路閉鎖を行わずFCIにより渡海
- 所在地: 岡山県・香川県
- 完成年: 昭和63(1988)年4月
- 1.3万tfのケーブル架設に6ヶ月の工期(0.2万tf/月)

**\* 下津井のAS工法と大鳴門・南備のPWS工法で競争した結果は、明石ケーブルの架設方法に影響**

本州四国連絡橋  
**下津井瀬戸大橋**  
ケーブル工事

鷲羽山  
トンネルカー式



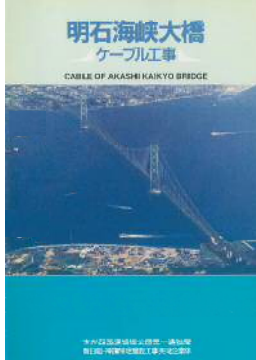


### 3. 明石ケーブル: H5年11月~H10年4月

本四公団⇒新日鉄・神戸製鋼JV⇒横河・宮地・川田(YKM)3社JV  
(西ケーブル)三菱・石橋・鋼管(MIN)JV

1. 諸元: 橋長3,911m、中央支間長1,991m、側径間960m、ケーブル直径1,122mm、ケーブル重量50,500tf
2. 平行線ケーブル: フレハブ・ワイヤ・ストランド(PWS)工法 127本/ストランド、素線径5.23mm、290Xストランド/ケーブル
3. 渡海工法: ヘリコプターによるフリーハンギング工法
4. ホーリングシステム: レシプロ(2プルテン)式/ケーブル いわゆる大型クレーンの喧嘩巻2ライン/ケーブル(全橋で4ライン)
5. 架橋地点の条件  
最大風速60m/s、基本風速46m/sの風が年間を通じて吹く。  
潮流の速さが最大9ノット(春秋の大潮時)、  
1日約1,400隻と頻繁な海上交通を有する海峡上
6. 所在地: 兵庫県
7. 完成年: 平成10(1998)年4月
8. 5万tfのケーブル架設に5ヶ月の工期(1万tf/月)

**\* 比較検討の結果、明石ケーブル架設はPWS工法**




**\* 引出は4本/日!?**

1994(平成6)年6月24日No.1ストランド引出開始



**\* PWS最大・最速!?**

1994(平成6)年11月28日No.290ストランド引出完了

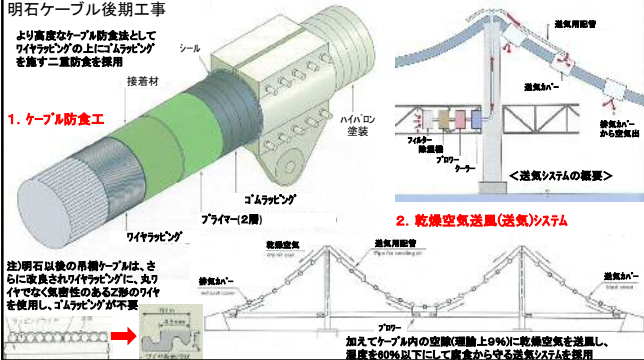


**\* 従来の防食対策は不十分!?**

### 明石ケーブル後期工事

より高度なケーブル防食法としてワイヤラッピングの上ゴムラッピングを施す二重防食を採用

1. ケーブル防食工
2. 乾燥空気送風(送気)システム

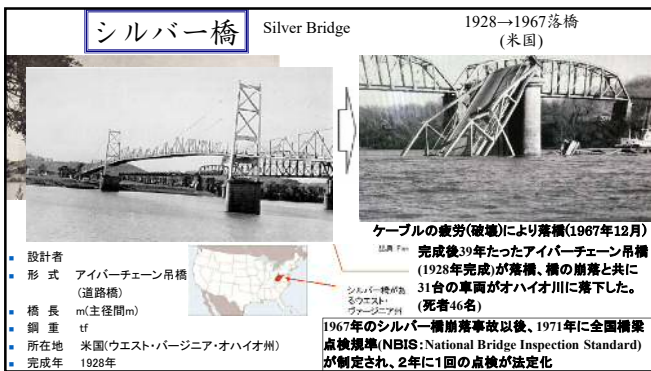
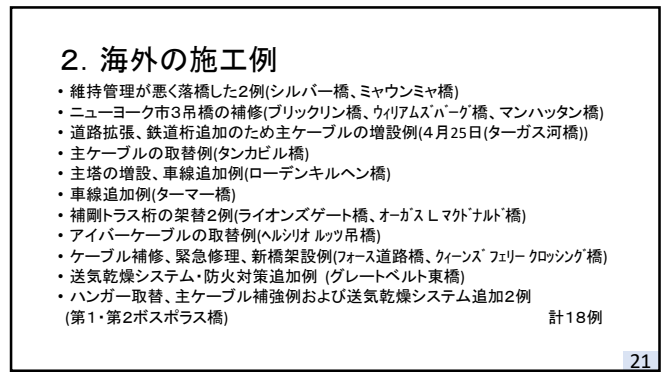
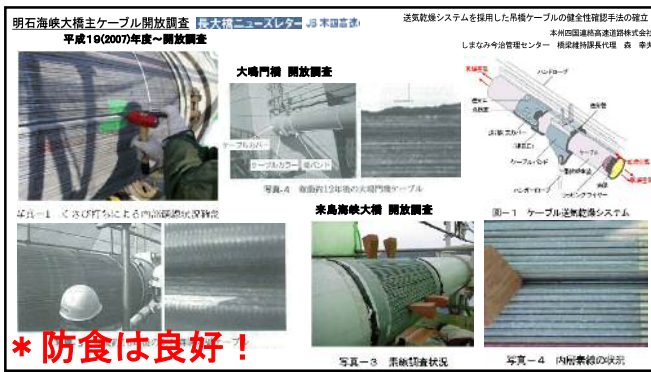
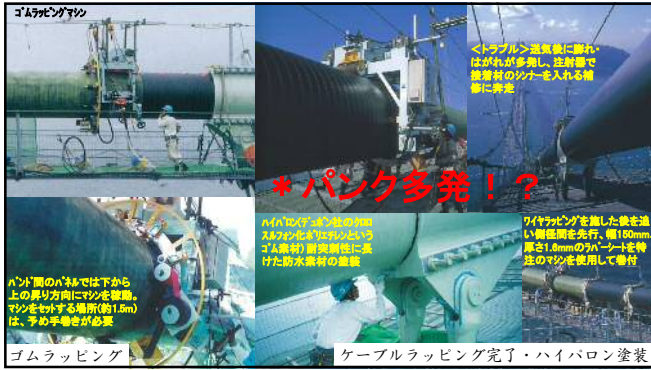


注) 明石以後の吊橋ケーブルは、さらに改良されワイヤラッピングに、よりワイヤでなく気密性のあるZ形のワイヤを使用し、ゴムラッピングが不要

加えてケーブル内の空隙(理論上9%)に乾燥空気を送風し、湿度を80%以下にして腐食から守る送気システムを採用



**\* 雨水を入れるな!?**





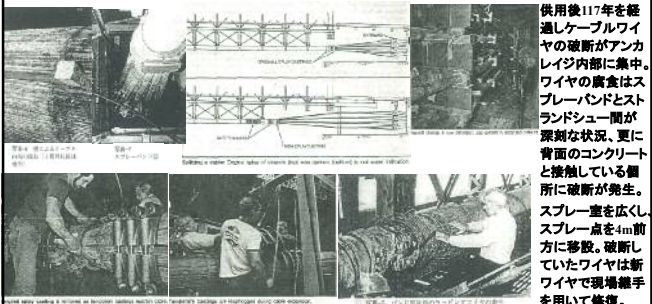
**ブルックリン橋** Brooklyn Bridge 1883 (米)



- 設計者 ジョン・A・ローブリック
- 形式 3径間2ヒンジ補剛
- 橋長 1,057m(支間284+ (幅員25.7m)
- 鋼重 12,000t(桁8,400t)
- 所在地 米(ニューヨーク市)
- 完成年 1883年

世界で初めて500ft越えの最大支間486m 供用後140年目

**ブルックリン橋** 1883→1990大規模な補修・補強 (米)



供用後117年を経過しケーブルワイヤの破断がアンカレイジ内部に集中。ワイヤの腐食はスプレーバンドとストランドシュー間が深刻な状況、更に背面のコンクリートと接触している個所に破断が発生。スプレー塗を広くし、スプレー点を4m前方に移設。破断していたワイヤは新ワイヤで現場継手を用いて修復。

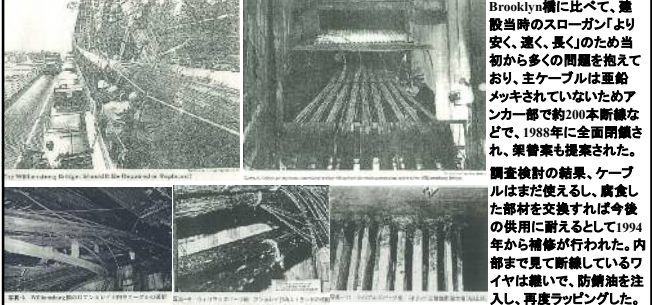
**ウィリアムズバーグ橋** Williamsburg Bridge 1903 (米)



- 幅員 34.6m
- 鋼重 26,031t
- 所在地 米(ニューヨーク市)
- 完成年 1903年

完成時1903年 - 1924年、世界最大支間486m

**ウィリアムズバーグ橋** 1903→1994大規模なケーブル補修 (米)



Brooklyn橋に比べて、建設当時のスローガン「より安く、速く、長く」のため当初から多くの問題を抱えており、主ケーブルは重鉛メッキされていないためアンカー部で約200本断線などで、1988年に全面閉鎖され、架設案も提案された。調査検討の結果、ケーブルはまだ使えるし、腐食した部材を交換すれば今後の供用に耐えるとして1994年から補修が行われた。内部まで見て断線しているワイヤは纏いで、防錆油を注入し、再度ラッピングした。


**マンハッタン橋** Manhattan Bridge 1909 (米)



- 所在地 米(ニューヨーク市)
- 完成年 1909年

世界で初めてたわみ理論での設計

**マンハッタン橋** 1909→1989ケーブル定着部の補修、補剛トラスの補強 (米)



供用後80年の、1989年にアンカレイジ内部で腐食したワイヤとアイバーを取り替えた。腐食したアイバーは平均で約30%断面欠損し、900本以上のワイヤが腐食し、破断もあった。バイパスのトランスを張り、新しい支持ガーダーを設置し、定着された。床版の取替と両側に電車が通るためねじり剛性の不足により疲労亀裂が発生、補剛トラスの補強も実施

**4月25日(ターガス河)橋** Tagus River Bridge 1966 (ポルトガル)



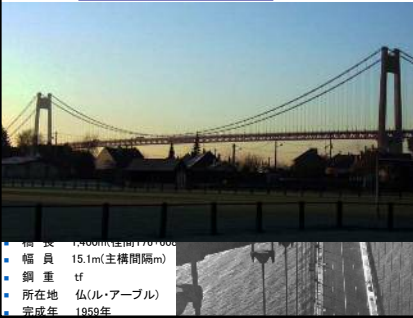
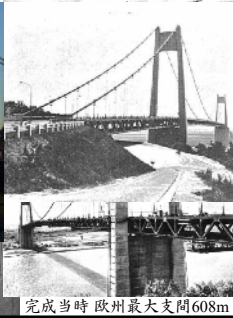

- 設計者 シュタインマン
- 形式 6径間連続補剛吊橋 (道路橋→道路鉄道併用橋)
- 橋長 2,278m(径間99+483+1,013+483+100+100m)
- 幅員 17.2m(ケーブル間隔23.5m)
- 鋼重 38,030t(桁16,340t、塔13,960t、ケーブル7,730t)
- 所在地 ポルトガル
- 完成年 1966年

**4月25日(ターガス河)橋** 1966→1997改築 (ポルトガル)




供用後31年目に、道路拡張、鉄道桁追加のためケーブル増設

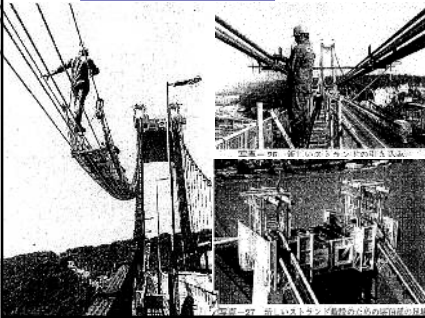
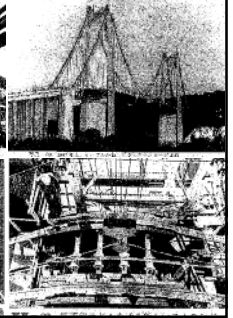
**タンカビル橋** Tancarville Bridge 1959 (仏)

- 橋長 1,900m(径間170+600)
- 幅員 15.1m(主橋間隔m)
- 鋼重 tf
- 所在地 仏(ル・アーブル)
- 完成年 1959年

完成当時 欧州最大支間608m

**タンカビル橋** 供用後38年に、1959→1997改築 主ケーブル取替 (仏)

**タンカビル橋** 供用後38年に、1959→1997改築 主ケーブル取替 (仏)





**ローデンキルヘン橋** Lodenkiruhen Bridge 1954 (独)




- 設計者
- 形式 3径間補剛吊橋(道路橋)
- 橋長 m(径間+378+m)
- 幅員 26.0m(ケーブル間隔23.5m)→
- 鋼重 tf
- 所在地 ドイツ
- 完成年 1954年→1994年拡張




**ローデンキルヘン橋** 1954→1994改築  
主塔の増設、車線追加 (独)



下流側 ← 23.4 ← 26.4 → 上流側

**ターマー橋** Tamar Bridge 1961 (英)

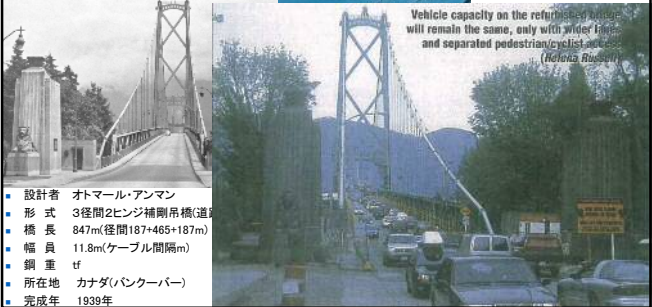


- 設計者 クリーブランド社
- 形式 3径間2ヒンジ補剛吊橋(道路橋)
- 橋長 563m(径間114+335+114m)
- 幅員 m(ケーブル間隔m)
- 鋼重 tf
- 所在地 英(プリマス-サルタッシュ)
- 完成年 1961年

**ターマー橋** 1961→2002改築  
車線の増設 (英)



**ライオンズゲート橋** Lions Gate Bridge 1939 (カナダ)



Vehicle capacity on the refurbished bridge will remain the same, only with wider lanes and separated pedestrian/cyclist areas. (Helena Russell)

- 設計者 オトマール・アンマン
- 形式 3径間2ヒンジ補剛吊橋(道路橋)
- 橋長 847m(径間187+465+187m)
- 幅員 11.8m(ケーブル間隔m)
- 鋼重 tf
- 所在地 カナダ(バンクーバー)
- 完成年 1939年

**ライオンズゲート橋** 1939→2002改築  
全補剛トラスの架替 (カナダ)



**アンガス L.マクドナルド橋** Angus L. Macdonald Bridge 1955→2015改築 (カナダ)



全補剛トラスの架替  
ライオンズゲート橋に続く2番目の補剛トラス架替工事。供用後60年目に同じようにストランドジャッキ搭載トラペラで施工

- 設計者 American Bridge
- 形式 3径間2ヒンジ補剛吊橋
- 橋長 1,347m(径間)
- 幅員 m(ケーブル間隔)
- 鋼重 tf
- 所在地 カナダ(Halifax)
- 完成年 1955.4.2→2015.10.1

**ヘルシオリッツ吊橋** Hercilio Luz Suspension Bridge 1926→2018改築  
アイバーケーブルの取替 (ブラジル)

- 形式 3径間2ヒンジ補剛アイバー吊橋(道路)
- 橋長 858m(径間259+340+259m)
- 幅員 m(ケーブル間隔m)
- 鋼重 5,000tf
- 所在地 ブラジル(Florianopolis)
- 完成年 1926年

**TOP DOWN**  
供用後92年目に、古くなり薄んだアイバーのケーブルを取替のため支保工を設置し、修繕

**フォース道路橋** Forth Road Bridge 1964 (英)

- 設計者 オトマール・アンマン
- 形式 3径間2ヒンジ補剛吊橋(道路)
- 橋長 全長2,512m, 1,823m(径間400)
- 幅員 36.3m(ケーブル間隔23.8m)
- 鋼重 18,800(30,480tf)(塔6,096tf、)
- 所在地 英(スコットランド)
- 完成年 1964年9月4日

**フォース道路橋** 1964→1990主塔・筋交い補強、2000ハンガー交換、2009送気乾燥システム設置(英)

フォース道路橋は、2000年代に入ると設計荷重の増加や交通量の増大から、ダメージが顕著になり主要部材の補強と想定以上の量と頻度の維持作業が必要となった。1990年に主塔と筋交いの補強を行い、交通開放しながら2000年までに全数768本のハンガーロープを交換した。

2003年からケーブルの検査を行い、強度の8~10%低下がわかった。その後の2006年にケーブルの音響監視(エコーステック)検査を行うと断線が見つかり位置も特定された。開放調査の結果、腐食もひどく補修の必要性も出てきたため、送気乾燥システムを2009年に2.5年かけ780万ポンドの費用で設置。一部は継手された

**フォース道路橋** 1964→2015エンドリンク破断、2016緊急修理、2018伸縮装置・エンドリンク交換(英)

2015年12月の定期検査で、主塔北東部と下部トラスの連結部エンドリンクのピンが引掛かり、トラス端に亀裂を生じていることが分かった。緊急閉鎖。欠損が発見された場所と同じ構造の残り7か所の補強工事が連日400人体制で作業され、3カ月後の2016年2月20日に車両通行が再開された。2017年9月4日の新橋の開通後に修理のため閉鎖され、両方の主塔部の伸縮継手とトラスエンドリンクの交換が行われた。2018年2月1日から公共交通回復としての供用を再開した。

**クィーンズフェリークロスング橋** Queens Ferry Crossing Bridge 2017 (英)

フォース道路橋が想定以上の交通量の伸びとなり、主ケーブルの腐食もひどく交通規制の必要性も出てきたため第二のフォース道路橋として、2007年に政府として新橋架設の意思決定、2011年秋に着工

2017年9月4日開通

**グレート・ベルト東橋** Great Belt East Bridge 1998 (デンマーク)

- 設計者 COWI・フリーマンフォックス・レオンハルト
- 形式 3径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋(道路橋)
- 橋長 6,790m、主橋梁部2,694m(径間535+1,624+535m)
- 幅員 31m(有効幅員27.0m)(ケーブル間隔30.4m)4車線
- 鋼重 29,680tf
- 所在地 デンマーク(グレートベルト東海峡)
- 完成年 1998年

明石海峡大橋より2ヶ月遅れて開通、完成時、世界第二位の支間長



### グレート・ベルト東橋 1998→2015送気乾燥システム設置 (デンマーク)

現地の厳しい気象条件を考慮してケーブル送気乾燥システムを設置

### グレート・ベルト東橋 1998→2019防火対策の設置 (デンマーク)

2018年に3種類の異なる防火対策を施した5mの鋼管を用いた試験を実施

防火対策の設置が行われた。

### 第1ボスポラス橋 First Bosphorus Bridge 1973 (トルコ)

- 設計者 フリーマンフォックス
- 形式 3径間2ヒンジ補剛吊橋(道路橋)
- 橋長 1,560m(径間231+1,074+255m)
- 幅員 26m(ケーブル間隔28m)
- 鋼重 19,000(21,900)t(桁8,710t、塔4,790t、ケーブル5,450t)
- 所在地 トルコ(ボスポラス海峡)
- 完成年 1973年

### 第1ボスポラス橋 1973→2016大規模補修 (トルコ)

斜めハンガーを、鉛直ハンガーに取替

### ハンガー取り替え手順

- 発注者 トルコ共和国運輸省道路総局(道路庁)
- 施工者 IHIインフラシステム・MAKYOL(トルコの大手ゼネコン)JV
- 発注年 2013年、2014年4月から着手
- 完成年 2016年3月→2019年(2期工事追加)

完成時

### 送気乾燥システムの概要

送気乾燥システム配置図

完成時

**吊橋主ケーブルの劣化調査**

**主ケーブル補修方法**

・主ケーブルの安全率：設計値=2.40 ⇒ 現況後=1.93  
 ・健全な吊橋としての必要安全率=2.5 > 1.93 NG  
 全ての吊橋で主ケーブル補修工事は二期工事を実施することが決定

日本橋梁建設協会 橋梁安全委員会  
 【中村 隆 会長】

**第2ボスポラス橋** 2nd Bosphorus Bridge 1988 (トルコ)

設計者 W.C.ブラウン  
 形式 3径間2ヒンジ補剛吊橋(道路橋)  
 橋長 1,510m(径間210+1,090+210m)  
 幅員 35.8m(ケーブル間隔33.8m)  
 鋼重 19,000(31,700)tf(桁14,000tf、塔6,700tf)  
 所在地 トルコ(ボスポラス海峡)  
 完成年 1988年

開通後、ファティ・スルタン・ムハメット橋と命名

**第2ボスポラス橋** 1988→2019大規模補修 (トルコ)

主ケーブル送気乾燥システム設置工

**3. 国内の施工例**

- ・車線追加(4車線化)・主ケーブル補修(若戸大橋)
- ・送気乾燥システムの追加2例(レインボーブリッジ橋、関門橋)

57

**若戸大橋** 昭和37(1962)年 (福岡)

わが国最初の長大吊橋  
 完成当時、東洋一の吊橋支間長  
 昭和37年(1962)9月27日開通

橋長627m、支間367m、幅員19.6m、鋼重9,262tf

**若戸大橋** 1962→1990 4車線拡幅 (福岡)

所在地 北九州市  
 完成年 1962→1990年

2018年 鋼床版連続化も実施



### 若戸大橋

橋梁50年を経過した若戸大橋ケーブル関係の健全性  
平成23(2011)年度～開放調査 北九州市道路公社

写真-1 主ケーブル材質  
写真-2 主ケーブル材質  
写真-3 主ケーブルからの取水  
写真-4 ラッピングワイヤー設置  
写真-5 アルミファイラー取付  
写真-6 くさび打ち込み

ケーブル外観は塗装剥れもあり、露水も確認された。ラッピングワイヤーとアルミファイラーを取り除き、くさびを打ち込んでマイクロスコープで内部を調査。スパイロブの形状もレプリカにすり置いたが健全であった。

### 若戸大橋

橋梁50年を経過した若戸大橋ケーブル関係の健全性  
平成23(2011)年度～開放調査 北九州市道路公社

写真-17 索結破断(格点41)  
写真-18 索結破断(格点63)  
写真-19 中央9本の索結破断(格点61)

11格点	幅員	
平均深	1722	27
掘削時	1670	30

中央9本の格点61は5本、主塔と中央の中心の格点41は、61本の索結が破断。補修の済ませで影響を与えかねないこと、引張強さも落ちておらず断面減少率も0.6%程度で問題ないと判断し補修しなかった。

ケーブルバンド内側の状況。溶加工の角が索結に干渉し破断につながったと推定

### 若戸大橋

1962→2011 平成の大修理 (福岡)

平成23(2011)年9月  
から平成の大修理  
北九州市道路公社→日立造船

### 若戸大橋

リベットによる復旧工 1962→2011 平成の大修理 (福岡)

### 若戸大橋

1962→2011 平成の大修理 (福岡)

### 若戸大橋

1962→2011 平成の大修理 (福岡)

**若戸大橋** 1962→2011 平成の大修理 (福岡)

若戸大橋開通50周年記念写真集「家族になった、赤いつり橋」北九州市道路公社より

**レインボーブリッジ** 平成5年(1993) (東京)

橋長798m,支間570m,幅員29m,鋼重47,867tf 1993(平成5)年8月26日開通

**レインボーブリッジ** 1993→平成25～28年度 (2013～2016)(東京)

レインボーブリッジ主ケーブル送気乾燥システム 首都高速道路橋梁東京東局→YBC, IHI

写真1 トリプル足場  
写真2 リーフドワイヤの乾燥  
写真3 乾燥設備の設置  
写真4 送気乾燥システム  
写真5 送気乾燥システム  
写真6 送気乾燥システム  
写真7 送気乾燥システム

**関門橋** 昭和48(1973)年 (山口・福岡)

完成当時、東洋一の吊橋支間長 橋長1,068m,支間712m,幅員26m,鋼重22,469tf 1973(昭和48)年11月14日開通

**関門橋** NEXCO西日本→YBC・IHI JV 1973→2015へリフレッシュ工事中 (山口・福岡)

関門橋リフレッシュ工事 (主ケーブル送気システム導入について)

写真1 送気システム全体の全貌 (上・下橋)  
写真2 送気乾燥システム  
写真3 送気乾燥システム  
写真4 送気乾燥システム  
写真5 送気乾燥システム  
写真6 送気乾燥システム  
写真7 送気乾燥システム  
写真8 送気乾燥システム  
写真9 送気乾燥システム  
写真10 送気乾燥システム

**むすびに**

- 長大吊橋は、交通の要所に多額の費用をかけて建設された重要な社会的インフラの一つである。
- それらの架設される場所は、諸条件も厳しく再び作り直すのが困難であることが多い。
- しかも気象条件も悪いことが多く、その中で常に健全な状態で維持することは極めて難しい。
- さらに、設計条件の変更や利便性の確保や交通渋滞の解消などのために、さらなる改良も必要とされる。
- これらを考慮して「新設」と「保全」という観点で設計、製作および維持管理の方法を学び工夫し、生じる問題へ対処していくのが橋梁技術者の大きな使命である。



**御静聴ありがとうございました!!**

**最後に、皆さんへ**

**架設技術は伝承できる!!**

**架からなかった橋はない!**

**長大吊橋はいつまでも残せる!**

**ご安全に!**

72