

本四連絡橋の長寿命化対策



平成28年6月22日

本州四国連絡高速道路(株) 長大橋技術センター 診断・構造グループ 森山 彰

- 本州四国連絡道路の概要
- 維持管理の基本方針
- 防食に関する取り組み
 - 塗装
 - ケーブル送気乾燥システム
- まとめ

本州四国連絡高速道路の概要



本州四国連絡高速道路の概要

路線名	延長	道路延長の内訳				主な施設数	
		土工	橋梁 ³⁾ 高架橋	海峡部 長大橋	トンネル	IC	SA・PA
神戸淡路鳴門自動車道	道路 89.0km	57.3km	18.8km (93橋)	5.5km (2橋)	7.4km (8箇所)	12	4
	鉄道 ¹⁾ 3.5km						
瀬戸中央自動車道	道路 37.3km	15.0km	13.8km (36橋)	7.0km (6橋)	1.5km (4箇所)	5	3
	鉄道 ²⁾ 32.4km						
西瀬戸自動車道	道路 46.6km	25.2km	8.8km (47橋)	9.7km (10橋)	2.9km (3箇所)	13	4
計	道路 172.9km	97.5km	41.4km (176橋)	22.2km (18橋)	11.8km (15箇所)	30	11
	鉄道 35.9km						

1) 本四淡路線：大鳴門橋共用部、鉄道は未供用
 2) 本四備讃線：瀬戸大橋共用部のみ保全対象、陸上部は保全対象外
 3) 橋梁・高架橋：ランプ橋は含まず

神戸・鳴門ルート(神戸淡路鳴門自動車道)

4 本四高速

明石海峡大橋 (1998年完成)



世界一の長大吊橋(支間長世界一)

橋長3,911m(支間長1,991m)

大鳴門橋

(1985年完成)

橋長1,629m(支間長876m)



路線名：一般国道28号

延長：89.0km



児島・坂出ルート(瀬戸中央自動車道・瀬戸大橋線)

5 本四高速



櫃石島・岩黒島橋

橋長790m(支間長420m)



(1988年完成)



南北備讃瀬戸大橋

北備：橋長1,538m(支間長990m)
南備：橋長1,648m(支間長1,100m)

路線名：一般国道30号

延長：37.3km

鉄道：本四備讃線

延長：32.4km



与島橋

橋長854m



道路・鉄道併用橋

尾道・今治ルート(西瀬戸自動車道・瀬戸内しまなみ海道)

6 本四高速



多々羅大橋 (1999年完成) (支間長890m)



路線名：
一般国道317号

延長：59.4km

(有料道路区間
46.4km)



来島海峡大橋 (1999年完成)



自転車歩行者道を併設



大三島橋 (1979年完成)

本州四国連絡橋の保全上の特徴

7 本四高速

巨大構造物



管理数量が膨大

新材料、特殊構造を採用



耐久性が未知の領域

海上にある橋梁



錆の発生などの劣化が速い



接近手段が限られている

代替道路がない



通行止はできるだけ回避

巨大で建設に巨額



架替えや大規模な修繕が困難

経営理念

8
本四高速

経営理念 Bridge: Communication & Technology

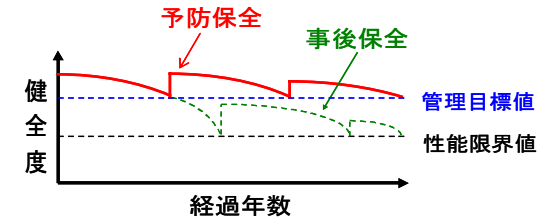
1. お客様に安全、安心、快適にご利用していただけるよう、サービスの充実に努めます
2. 200年以上の長期にわたり利用される橋をめざし、万全な維持管理に努めます
3. 橋梁技術のフロントランナーとして、技術の継承・高度化を推進します
4. 瀬戸内の美しい自然を大切に、環境に配慮します
5. 公正で効率的な運営により、経営の安定と成長をめざします

維持管理の基本方針

9
本四高速

国家的社会資本であり、長期にわたり健全な状態に保全する
・代替交通機関が少ないことから、長期間の通行止めを避ける
・厳しい腐食環境下であり、早期に対応する

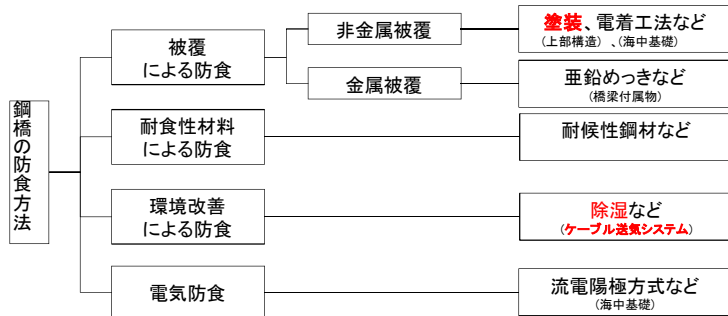
「**予防保全**」を維持管理の基本方針とする
・ライフサイクルコストの最小化を実現する



鋼橋の防食の種類

10
本四高速

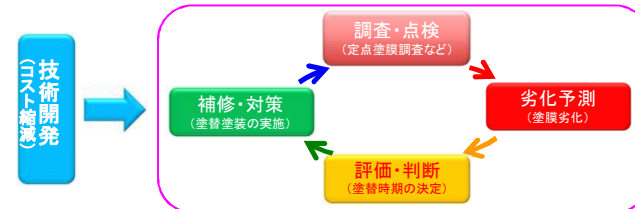
- 膨大な数量の部材を様々な劣化要因から守り、長期間にわたる**経済的な維持管理が必要**
- 橋梁群は**腐食環境の厳しい**海峡部に架かることから、「**防食**」は維持管理における最も重要な事項



塗装による防食の特長と管理方針

11
本四高速

- 本州四国連絡橋の**外面塗装面積は400万㎡**と膨大
- 長期的に鋼材の保護を行うため、外面塗装として世界に先駆けて、**重防食塗装系**を本格的に採用
- 犠牲防食作用を期待した下地の無機ジंकリッチペイントを採用
- 現地において無機ジंकリッチペイントの塗替えは困難
→ **上・中塗りのみを計画的に塗替える予防保全を採用**
- 塗膜消耗量、実橋における塗膜変状を把握し、劣化予測結果を総合的に評価して定期的な塗替えを実施



外面塗装仕様の適用経緯

12
本四高速

【新設時】

- 無機ジンクリッチペイント+フェノールジンクロメート+フェノールMIO+塩コム塗料
大三島橋(1979)
- 無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ポリウレタン樹脂塗料
因島大橋(1984)、大鳴門橋(1985)、瀬戸大橋(1988)、生口橋(1991)
- **ふっ素樹脂塗料**を採用(塗装基準改訂:1990)
明石海峡大橋(1998)、来島海峡大橋(1999)、多々羅大橋(1999)、新尾道大橋(1999)

【塗替え時】

- 全面塗替塗装(ふっ素樹脂塗料)
大三島橋、因島大橋、大鳴門橋、瀬戸大橋(実施中)
- **高耐久性ふっ素樹脂**を開発
瀬戸大橋(2011~)

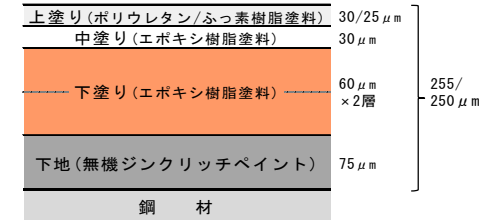
重防食塗装系の概要

13
本四高速

本州四国連絡橋の鋼製の主塔及び主桁の外面の防食には、**重防食塗装**を採用

【重防食塗装の特長】

1. 塗装の**下地処理**として**無機ジンクリッチペイント**を使用しており、亜鉛の犠牲防食作用により強い防錆力を有していること
2. **下塗りのエポキシ樹脂層**は水や酸素の供給を遮断する役割を有していること
3. **上塗りのふっ素樹脂層**及び**ポリウレタン樹脂層**は紫外線等に抵抗する役割を有していること



塗装におけるコスト縮減の取り組み

14
本四高速

予防保全でも、塗替塗装費が長大橋の維持管理費に占める比率は高い

塗替えサイクルを長期化し、塗替え回数を減らす

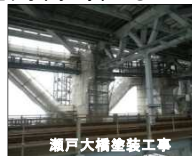
- ① **高い耐久性を有する塗料の開発、適用**
- ② **適切な塗替え時期の設定による塗替えサイクルの長期化**

適切な塗替え時期の設定には、下記が必要

- 塗膜消耗予測の精度の向上
- 消耗以外の劣化に対する塗膜の信頼性確保

その他の取り組み

- 塗装の作業の省力化
⇒ 塗装仕様は塗膜の機能ごとに、多層構造であるため、塗り手間が掛かる2層の機能を1層で実現できる、**省工程型塗料の開発**
- 足場の効率化
⇒ 施工数量の低減やユニット化による施工手間の低減
各種改良を行い、現場施工に適用



塗装におけるコスト縮減の取り組み

15
本四高速

局部腐食に対する取り組み

- 「予防保全」による塗替塗装を計画的に実施中
- 実橋では、面的な塗装劣化よりも、点的な「**局部的な腐食**」が一部で発生
- 腐食が進行すれば、減肉を生じ、橋の健全性を損なう
- 減肉を生じさせないために、「**局部補修塗装**」を実施
- 「局部補修塗装」を確実に実施することで、塗替塗装の長期化を実現
- 塗装の高耐久化によって、重要性が高く

局部腐食



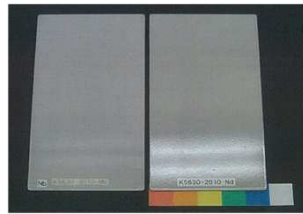
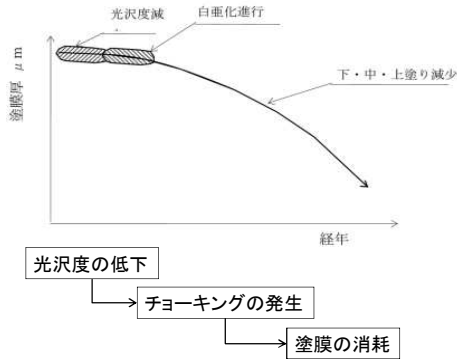
「局部補修塗装」のコスト縮減には、

- アプローチ方法の拡充
⇒ 作業車の改造、ユニット足場の開発等を実施中
- 補修塗装仕様の検討
⇒ 省力化(塗装回数の低減)と耐久性の両立を実現

高耐久性ふっ素樹脂塗料の開発

表面の光沢度が低下から始まり、最終的に塗膜厚が減少する

塗膜劣化のイメージ



光沢度の低下 (暴露試験体)



白亜化 (チョーキング) の発生

高耐久性ふっ素樹脂塗料開発の経緯

瀬戸大橋での暴露 宮古島・大鳴門での暴露

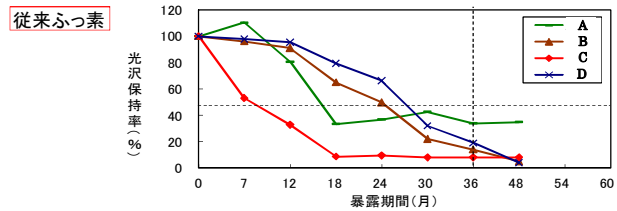
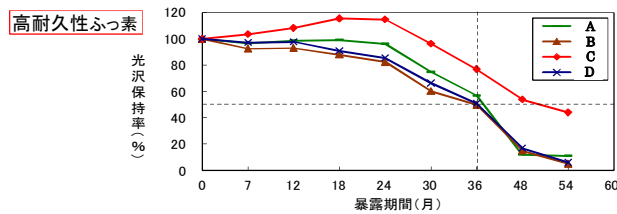
年	経緯
1999 (H11)	孫崎Vaで光沢度減少を確認
2000 (H12)	
2001 (H13)	
2002 (H14)	
2003 (H15)	
2004 (H16)	第1次改良型塗料の検証 GUV
2005 (H17)	瀬戸大橋 DMW
2006 (H18)	暴露試験 (宮古島・大鳴門)
2007 (H19)	第2次改良型塗料の検証 DMW
2008 (H20)	
2009 (H21)	
2010 (H22)	暫定規格制定

注: 第1次改良型塗料の検証 (GUV) は、DMWによる現地暴露試験の結果に基づき実施された。HBS規格化を目的として、促進耐候性試験に現地暴露試験を基本として実施された。促進耐候性試験だけでは評価が困難なため、現地暴露試験を基本とした。

GUV: 紫外線蛍光灯法促進耐候性試験, DMW: メタルハライドランプ法促進耐候性試験

高耐久性ふっ素樹脂塗料の性能

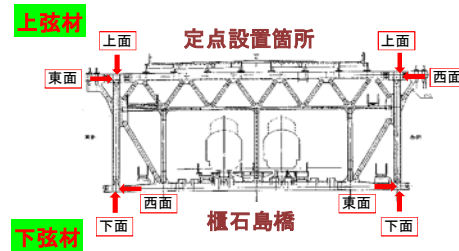
屋外暴露(宮古島JWTC)による光沢保持率の推移



高耐久性ふっ素樹脂塗料の性能

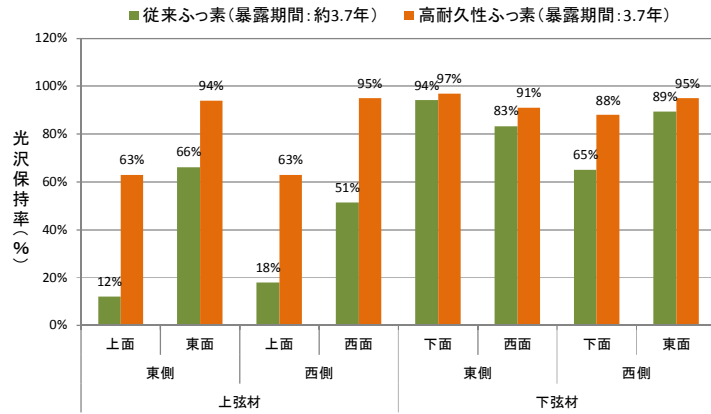
実橋(瀬戸大橋)における光沢保持率の推移

実橋での耐久性を確認するため、調査用の定点を設置(H23.3) 光沢度を追跡調査



定点設置作状況

実橋光沢度調査結果



日射の影響

大 中 大 中 小 小 小 小

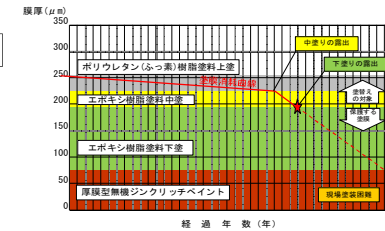
劣化予測技術の開発

1. 重防食塗装における塗替塗装は、上塗層と中塗層を対象とすることが基本 (予防保全)
2. 塗膜の劣化形態を把握し、適切な時期に塗替塗装を実施(無機ジンクリッチペイント層を劣化させない)
3. 塗膜の劣化速度、現地の残存塗膜厚を考慮した精度の高い劣化予測技術が必要

1橋の塗替えに多くの時間(10年程度)を要するため、塗替え最終年の塗膜状態を予測

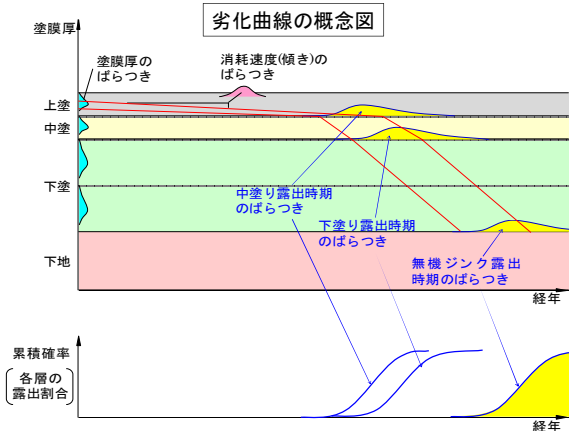
$$\text{基本式：塗膜消耗期間} = \frac{\text{残存塗膜厚}}{\text{予測消耗速度}}$$

劣化曲線の概念図



劣化予測(劣化曲線の概念図)

塗膜消耗速度、残存塗膜厚は「ばらつき」があり、1本の曲線で表現できない



劣化予測用基礎データ

上塗り塗膜の消耗速度と残存膜厚

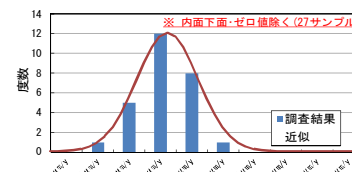
消耗速度: 0.7 μm/年程度

正規分布 (変動係数は0.3程度)

残存膜厚: 設計膜厚 (30 μm) 程度が残存 (供用から20年程度経過後)

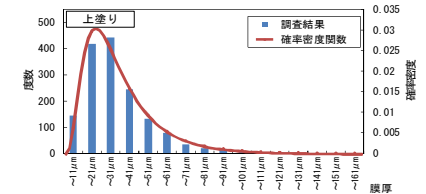
対数正規分布 (上塗りの変動係数は0.7程度)

上塗り消耗速度



(瀬戸大橋(5橋): ポリウレタン)

上塗り残存膜厚

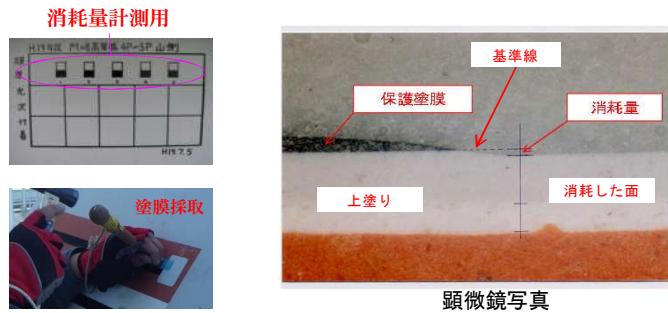


(瀬戸大橋(5橋): ポリウレタン)

塗膜消耗量計測(顕微鏡撮影)

24
本四高速

- ・塗膜表面の消耗度合いを調べるための保護塗膜の塗付
- ・保護塗膜部の塗膜を採取、その断面を顕微鏡で観察
- ・消耗速度は消耗量を経過年数で除して算出

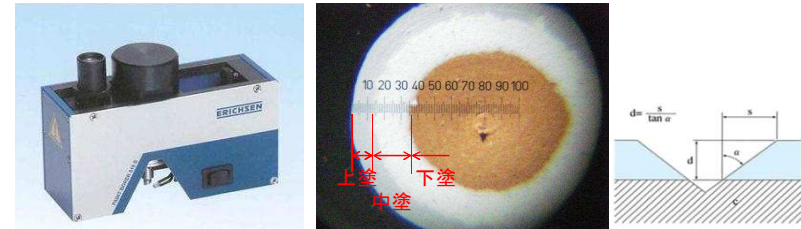


顕微鏡写真

残存塗膜厚計測(カット式膜厚計)

25
本四高速

- ・刃先の角度が既知のドリルを内臓
- ・ドリルで塗膜を削孔して各層の切削幅を読み取り、膜厚に換算



カット式膜厚計

膜厚の読み取り

膜厚の換算

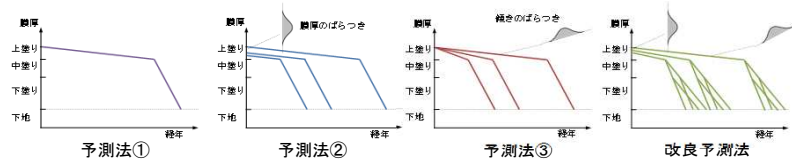
予測法の改良

26
本四高速

既往の予測法で考慮されていない**消耗速度と残存膜厚のばらつき**を考慮する計算法を検討

予測法の比較

項目	予測法①	予測法②	予測法③	改良予測法
上塗り消耗速度	平均値	平均値	分布モデル	分布モデル
上塗り残存膜厚	平均値	分布モデル	平均値	分布モデル
中(下)塗り消耗速度	平均値	平均値	平均値	分布モデル
中(下)塗り残存膜厚	平均値	平均値	平均値	分布モデル



予測手法の評価

27
本四高速

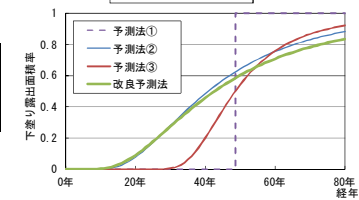
- ・ 4つの予測法を用い、劣化進行を試算
- ・ 各層の情報が少ない**予測は危険側**の結果を与える。
- ・ **残存膜厚**の考慮の仕方が重要。
 - ・ ※ 予測法①、予測法③(いずれも上塗り膜厚は平均値)の無機ジंक露出時期が大幅に遅れる。
 - ・ ※ 改良予測法、予測法②(上塗り膜厚のばらつき考慮)は下塗り露出面積率の推移が類似。

無機ジंकの露出

	予測法①	予測法②	予測法③	改良予測法
無機ジंक露出開始時期	67.1年	29.3年	46.5年	20.2年
上記時点の下塗り露出面積比	算定不可	26%	43%	10%

無機ジंक露出開始時期は、調査時点(2010年)からの経過年数

下塗りの露出



予測の目標精度

目標とする予測精度は、橋の塗替え期間(約10年と想定)及び調査・計画策定期間を考慮し、

- 15年後の塗膜の状態を予測する時の許容誤差を±1年以内と設定
→予測に用いるデータ取得の調査の精度が決まる

今後の劣化予測に向けた取組

- ・1橋あたり30点以上の**消耗量計測用定点を設置**
- ・1橋あたり300点以上の**残存膜厚調査の規定化**

所要の信頼度で平均値を求めるための調査

調査項目	変動係数	信頼度	許容誤差	必要調査数
消耗量計測	0.25	80%	±0.4 μm	26
残存膜厚計測	0.95		±2 μm	260

- ※ 変動係数は既往調査データより想定
- ※ 信頼度は調査費用等を勘案し設定
- ※ 許容誤差は予測の目標精度から算出

消耗計測用定点の追加

- ふっ素仕様橋梁を中心に消耗量計測用定点を設置
- 塗替えの判定に支配的となる面(トラス構造では部材上面及び海側側面)に限定して設置
- 5年毎に追跡調査を実施

塗膜消耗計測用定点の増設



定点の形状

(明石海峡大橋)

塗替塗装 課題

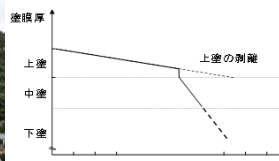
- 上塗塗料の高性能化(長寿命化)に伴い、**塗膜消耗以外の劣化要因**の把握と将来予測が必要
 - 上・中層間の付着力低下(層間剥離)
 - 無機ジंकの劣化(凝集破壊)

上・中塗りの層間剥離

上塗りの終局状態は剥離の可能性



上塗りの剥離



上塗り剥離の劣化曲線イメージ

無機ジंकの劣化

無機ジंकの塗替えは想定していない

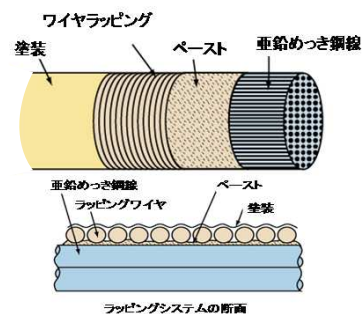


鋼床版表面の塗膜剥離

ケーブル送気乾燥システム

ケーブルは吊橋で最も重要な部材で、かつ、取替え困難なため確実な防食が必要
従来の「水を遮断する」では、防食が不十分
→新たな防食法を検討

従来のケーブル防食システム



ラッピングシステムの断面

供用後約10年経過時のケーブル開放調査

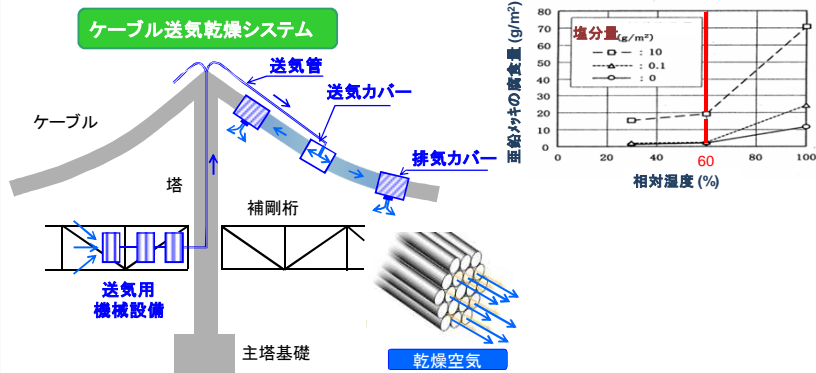


塗装のひび割れから内部に浸水し、滞留した水によりケーブル表面に腐食が発生

ケーブル送気乾燥システム(概要)

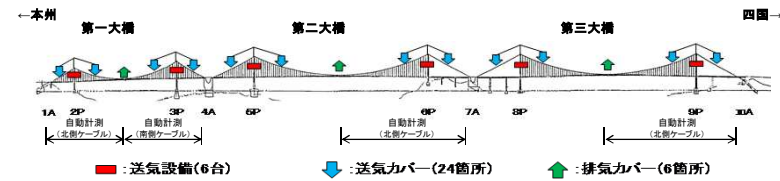
32
本四高速

鋼線は湿度60%以下では腐食しないことを実験で確認
→ 常にケーブル内の湿度が60%以下となるように乾燥した空気を送気
「ケーブル送気乾燥システム」を開発、全吊橋へ導入

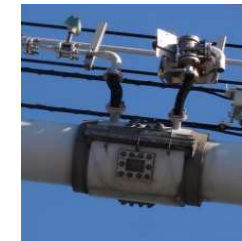


送気乾燥システム概略配置図(来島海峡大橋)

33
本四高速



送気設備(6台)



送気カバー(24箇所)

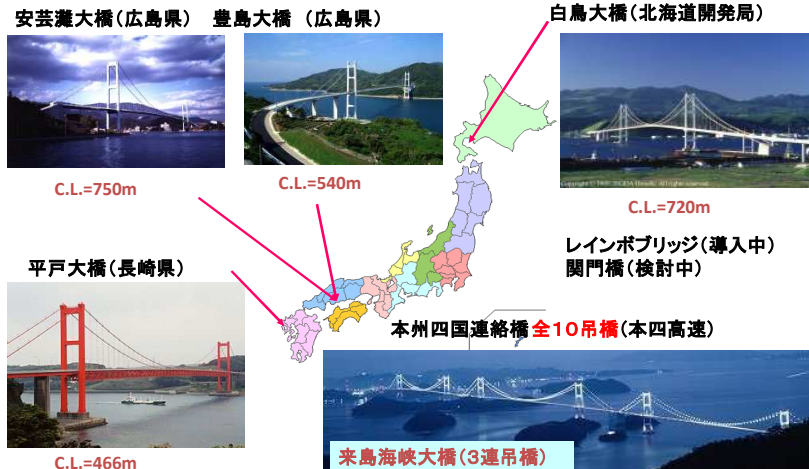


排気カバー(6箇所)

ケーブル送気乾燥システム <国内導入状況>

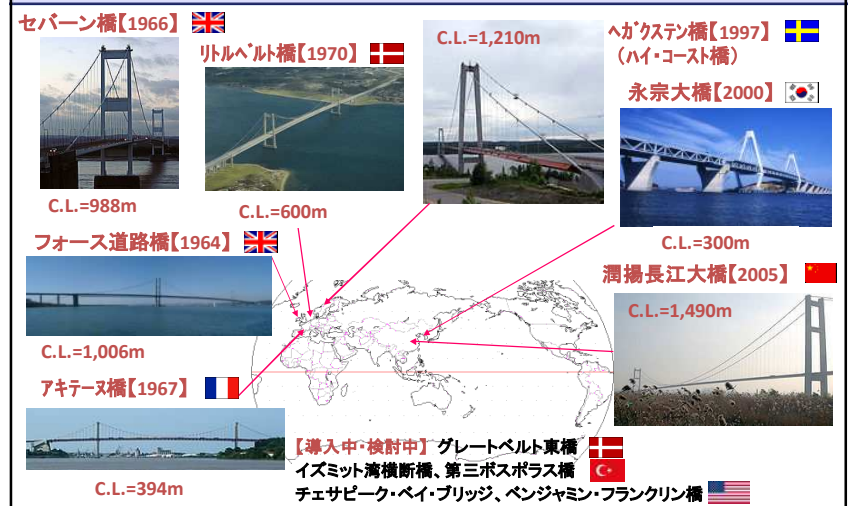
34
本四高速

本四連絡橋全10吊橋に導入、国内外の吊橋にも採用され、世界標準になっている。



ケーブル送気乾燥システム <海外導入状況>

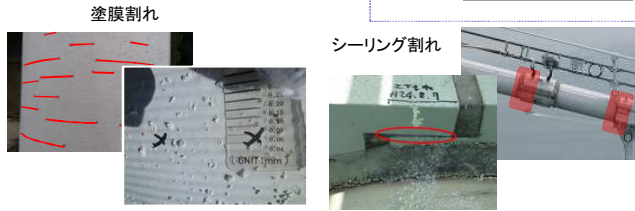
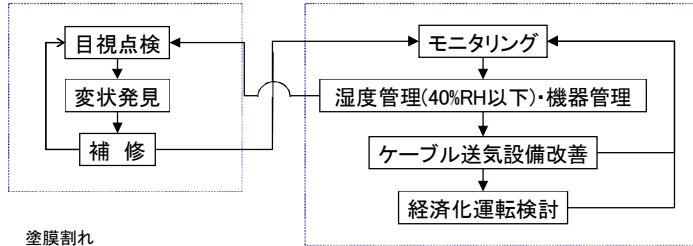
35
本四高速



ケーブル送気乾燥システムの維持管理フロー

ケーブル気密化による確実な防食

送気乾燥システムの効率的な運転



送気乾燥システムのモニタリング

送気モニタリング(手動計測結果)の経年変化(来島海峡第三大橋)

湿度測定結果(下り線側ケーブル、夏季)

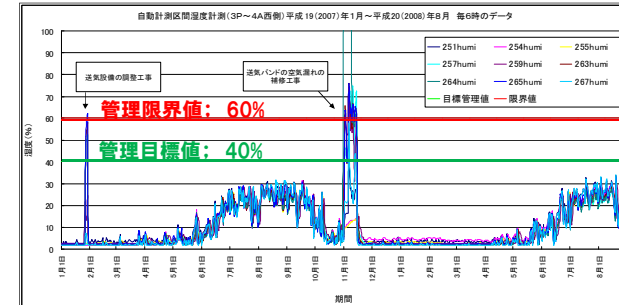
計測日	橋区間			中大区間												橋区間			備考
	モ-カブ1 -17	モ-カブ2 -9	モ-カブ3 -1	モ-カブ1 2	送気 13	モ-カブ2 24	モ-カブ3 34	送気 44	モ-カブ4 64	送気 64	モ-カブ5 75	モ-カブ6 86	送気 86	モ-カブ7 97	モ-カブ8 106				
2003/7/22	46.6	40.9	49.5	49.4	40.5	43.1	42.5	47.1	42.1	23.0	24.3	24.9	50.5	22.1	50.7	(BP送気設備稼働)			
2004/7/28	39.7	24.4	34.6	28.3	26.8	22.4	28.7	24.5	33.0	33.8	34.7	40.3	29.8	39.7	35.7	BP送気設備稼働			
2005/7/25	48.2	39.8	49.8	31.7	49.7	31.0	29.5	26.5	27.3	27.3	24.2	31.9	29.2	39.7	31.9				
2006/7/9	28.8	33.2	33.1	38.3	37.9	33.0	34.8	27.5	21.4	30.8	21.9	28.6	32.3	23.3	26.8				
2007/7/27	27.2	20.2	28.0	32.3	25.7	29.1	26.3	29.5	17.0	15.4	12.8	16.6	18.8	15.7	17.9				
2008/7/9	28.8	31.8	28.4	39.8	35.2	34.5	30.5	29.3	21.0	19.3	21.0	20.4	22.9	23.4	18.3				
2009/7/19	33.3	35.9	38.2	29.6	19.2	26.6	28.5	40.8	25.5	23.7	19.3	23.7	25.8	25.5	24.7				
2010/7/4	29.1	30.9	33.6	28.9	27.1	32.6	28.2	29.5	27.1	21.2	19.0	17.1	21.4	18.6	18.0				
2011/6/9	40.4	50.2	35.1	55.0	47.6	36.5	30.3	31.5	31.0	27.3	28.2	27.8	29.1	24.2	27.9	BP送気設備稼働停止			
2012/7/30	22.1	19.2	22.4	25.8	24.4	24.9	24.3	17.0	12.4	11.9	8.8	12.1	14.7	11.8	14.5	BP送気設備稼働停止			
2013/7/24	28.3	24.0	29.7	29.2	25.7	30.8	30.1	19.2	14.2	13.8	10.8	14.1	39.8	10.7	13.2	BP送気設備稼働停止			
2014/7/28	10.0	9.8	11.2	10.5	10.0	11.2	15.9	15.2	15.0	13.5	10.9	12.9	9.9	10.9	12.9	BP送気設備稼働停止			

定期的な点検員による手動計測を実施し、全区間の乾燥状態の確認と自動計測の検証を実施

送気乾燥システムのモニタリング

- システムが正常に稼働し、ケーブル内の湿度が所定の管理値以内に保たれているかを確認
- 送気用設備やケーブルラッピングシステム(塗装・ケーブルバンド部シール等)の改善のためのデータを収集

ケーブル内湿度モニタリング(自動計測)
(明石海峡大橋、H19.1~H20.8 毎6時のデータ)



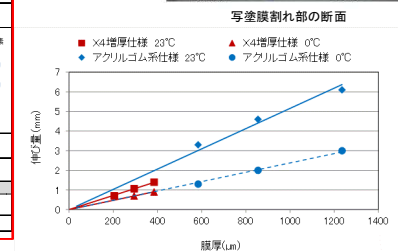
ケーブル気密化の取り組み(補修塗装仕様)

ケーブルの確実な防食には、ケーブルの気密化が重要
現塗装仕様では、ひび割れが発生している区間がある
塗膜割れ部から雨水が浸入し、ケーブル内湿度の雨天連動を確認

伸び性能が高い塗装仕様の検討
(必要の伸び量(ひび割れ幅)を検討中)

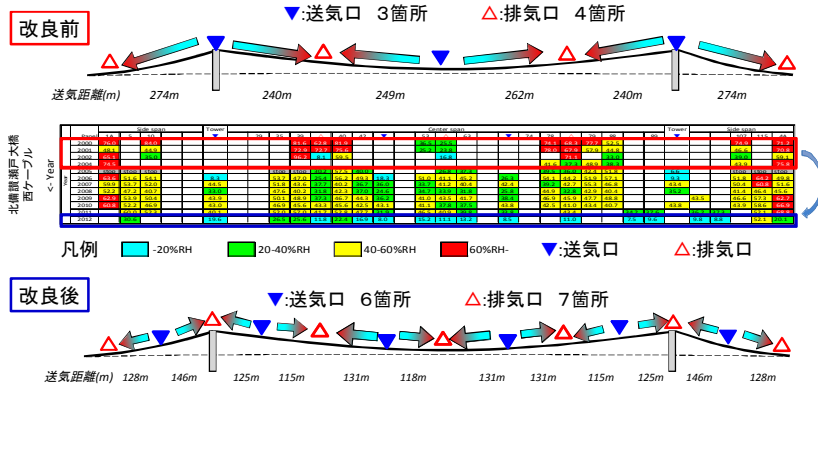


塗装場所 (塗装ハネ化数)	垂 敷 型 塗 装		アクリルゴム系仕様	
	現行(x4仕様)	x4増厚仕様	x4増厚仕様 (19ハネ化)	大増厚仕様 (19ハネ化)
建設時塗膜より上層の塗膜構成(施工年)	(H10制定)	H14 H5 H4 H3 H2 H1	H14 H5 H4 H3 H2 H1	H14 H5 H4 H3 H2 H1
塗膜厚(mm) (建設時塗膜より上層)	205	410	888+205	888+205
施工方法(実績)	はけ	はけ	ローラー	ローラー
H25現地調査結果				
・塗膜割れ	一部で多数	ほとんど無し	ほとんど無し	ほとんど無し
評価(大島建設仕様)	X	O	△	△

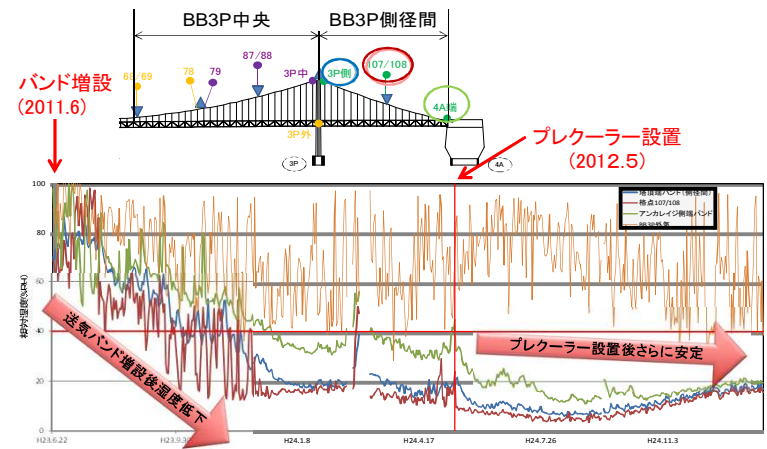


システムの改良(送気バンド増設)

送気口を増設することで、乾燥空気の送気距離を短くし、ケーブル内の環境を改善

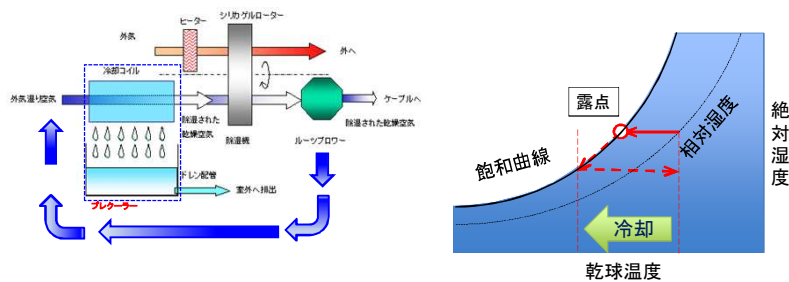


バンド増設の効果(北備讃瀬戸大橋)



ケーブル送気の効率化の取組み(除湿効率)

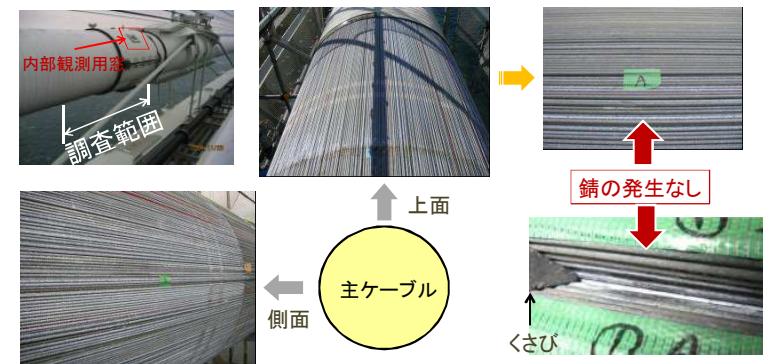
- プレヒーター導入による除湿効果の改善



- ① 外気を乾燥処理前にあらかじめ冷却する
- ② 冷却により空気中の水分が結露する
- ③ 結露水を排出することで、空気中の水分量が減り、乾燥空気の製造効率を改善する

ケーブル送気乾燥システム <有効性>

送気乾燥システム効果を検証するため、定期的にケーブルの状況を目視調査を実施



まとめ

- 本四連絡橋は、腐食環境の厳しい海峡部に架かる橋梁であることから、腐食から橋梁を守り、長期間にわたる経済的な維持管理が不可欠
- 本州四国連絡橋は、多くの部材で構成されており、部材毎に適した防食方法の採用が必要
- 特に莫大な面積を有する塗装は、劣化予測に基づく計画的な塗替えとより一層のコスト削減が必要
- 吊橋の最重要部材であるケーブルは、劣化要因を排除することによる確実な防食を実現、ただし、新たに開発した技術なため、システムの検証を継続的に実施し、改良を行う
- これらの維持管理上の課題を解決するため、社内に保全技術交流会議を設置し、本社と管理センター、グループ会社が連携した活動を積極的に推進

技術開発計画

維持管理の品質(耐久性、安全性、信頼性)向上、コストの削減に必要な技術開発計画を策定し実施。

技術開発の項目

お客様の安全性向上のための技術

- 地震動の見直し・耐震性能照査・補強設計
- 走行安全性の向上(鋼床版への高機能舗装の適用)

200年以上の万全な維持管理のための技術

- 塗替塗装の合理化
- マスコンクリート防食の合理化
- 吊橋主ケーブル送気乾燥システムの高度化
- 吊橋ハンガーロープ管理手法の確立
- 海中基礎防食手法の高度化
- 橋梁付属物の管理手法の高度化
- 点検手法の高度化

設計を検証するとともに維持管理コストを削減するための技術

- 耐風安定化部材等の見直し
- 疲労点検重点箇所図の作成などによる点検管理の合理化
- 吊橋ケーブルバンドボルト軸力管理の合理化
- 動態観測による設計検証と地震時の安全性評価

環境に配慮した技術

- 環境に配慮した塗装の実用化

おわりに

長大橋のライフサイクルコストを最小化するため、
予防保全による計画的かつ効率的な維持管理の実施

- 点検・補修履歴の集積・管理の一元化
- 点検・補修技術の融合とより高い保全技術の確立



吊橋、斜張橋、アーチ橋など色々な橋梁形式の長大橋を
200年以上の長期にわたり利用されることを目指して維持管理に努める



ご静聴ありがとうございました