
斜張橋ケーブルの耐久性評価と 今後の維持管理

平成30年1月29日

関西道路研究会 道路橋調査研究委員会
斜張橋ケーブルの耐久性評価と今後の
維持管理に関する研究小委員会

[発表者]

1. 本小委員会について

(委員長) 京都大学 白土博通

2. 斜張橋ケーブルの現状

神鋼鋼線工業(株) 大門英一
川田工業(株) 原 考志
(株)駒井ハルテック 吉浦健太

3. ケーブルの断面欠損による影響評価

日立造船(株) 清水晋作
(株)総合技術コンサルタント 渡邊裕規

4. 維持管理手法に関する現状調査と今後のあり方

阪神高速技術(株) 角 和夫

1. 本小委員会について

本小委員会のメンバー

委員長	白土 博通	京都大学	③
	八木 知己	京都大学	①
	橋本国太郎	神戸大学	②
幹事	渡邊 裕規	(株)総合技術コンサルタント	②
	大門 英一	神鋼鋼線工業(株)	①
	清水 晋作	日立造船(株)	②
	宇野津哲哉	阪神高速技術(株)	③
委員	入谷 琢哉	大阪市建設局	③
	清岡 直樹	(株)IHIインフラシステム	③
	角 和夫	阪神高速技術(株)	③
	原 考志	川田工業(株)	①
	本山潤一郎	エム・エムブリッジ(株)	③
	吉浦 健太	(株)駒井ハルテック	①

- ① 斜張橋ケーブルの現状調査WG
- ② 斜張橋ケーブルの断面欠損による影響評価WG
- ③ 斜張橋ケーブルの維持管理手法検討WG

本小委員会の開催日時

第 1回	平成24年 9月 25日(火)	15:30~17:30	京都大学桂キャンパス C1棟 312会議室
第 2回	平成27年12月 18日(金)	15:00~17:30	阪神高速技術(株) 第3,4会議室
第 3回	平成28年 3月 15日(火)	15:00~18:00	(株)総合技術コンサルタント 会議室
第 4回	平成28年 6月 23日(木)	14:30~17:30	阪神高速技術(株) 会議室
第 5回	平成28年 9月 5日(月)	15:30~17:30	(株)総合技術コンサルタント 会議室
第 6回	平成28年12月 19日(月)	15:00~17:30	京都大学 桂キャンパス C1棟 152会議室
第 7回	平成29年 5月 12日(金)	15:30~17:30	京都大学 桂キャンパス C1棟 315会議室
第 8回	平成29年 7月 27日(木)	15:30~17:30	阪神高速技術(株) 11階第4会議室
第 9回	平成29年10月 2日(月)	15:30~17:30	(株)総合技術コンサルタント 会議室
第10回	平成29年11月 30日(木)	15:30~17:30	(株)総合技術コンサルタント 会議室

目的：斜張橋ケーブルの今後の維持管理手法の検討

事例研究(豊里大橋(国道479号 大阪市))

点検や損傷事例の全国調査

“実務に即した”, “技術継承の種”を目指す

- 斜張橋ケーブルの現状把握(WG1)
- ケーブル素線の断面欠損による斜張橋全体の構造安全性への影響評価(WG2)
- 斜張橋ケーブルの維持管理手法に関する現状調査と今後のあり方(WG3)

- ① 斜張橋ケーブルの現状調査WG
- ② 斜張橋ケーブルの断面欠損による影響評価WG
- ③ 斜張橋ケーブルの維持管理手法検討WG

2. 斜張橋ケーブルの現状調査

【斜張橋ケーブルの損傷劣化の事例調査】

1) 調査方法

1. 調査対象: 斜張橋、エクストラード橋
道路橋、鉄道橋、歩道橋、水管橋など、
用途を限定せずに技術文献やHP等により選定
2. 調査方法: アンケート用紙を郵送して回答を集計・分析
3. アンケート先: 国土交通省整備局・開発局、
地方公共団体(県・政令指定都市・市町村)、
地方道路公社(広島、福岡・北九州)、
道路会社(NEXCO、首都高、阪高、本四)、
その他(JR各社、NTT等)

2) 調査内容

1. 橋梁名と諸元(橋梁形式、ケーブル種別など)
2. 定期点検手法
(点検要領・マニュアルの有無、頻度、近接目視or遠望目視)
3. 供用開始時点におけるケーブル制振対策
(オイルダンパーの設置, 空力的対策, ケーブルの連結)
4. ケーブルへのその他の対策
(維持管理・不測の事態に対する対策)
5. 供用中に発生した問題と対策
損傷・振動・その他不測の事態

3) 点検要領の変遷

① 橋梁点検要領(案) (S63年7月、土木研究所資料)



② 橋梁定期点検要領(案) (H16年3月、国交省道路局)



1回/5年の定期点検
(道路橋に関する基礎データ収集要領(案))
(H16年3月、国交省道路局)
笹子トンネル天井版崩落事故等
(H24年12月2日)



③ 道路橋定期点検要領 (H26年6月、国交省道路局)

(橋梁点検要領 (H26年6月、国交省道路局国道・防災課))

4) 各管理者が定期点検に適用している点検要領

1. 道路橋定期点検要領(国土交通省道路局) ⇒ 整備局、県など
2. ○○橋点検要領(案)、○○橋点検マニュアル、○○橋維持管理マニュアル
⇒ 道路会社、道路公社
3. ○○県道路定期点検要領、○○県道路橋点検マニュアル(案)
⇒ 県など
4. ○○市橋梁点検要領、○○市長大橋等の点検マニュアル(案)
⇒ 政令指定都市の一部
5. ○○市町村橋梁点検マニュアル(案) ⇒ 北海道
6. 水道維持管理指針(水管橋)、等 ⇒ 市(水道局)

5) 点検頻度

国交省・地方公共団体・道路会社・他:「5年に一度の定期点検」

例えば、道路会社Aでは1回/1年(概略点検)、1回/5年(詳細点検)

6) 適用されている点検要領の分析

A分類; 道路会社 (NEXCO中・西、首都高、阪高、本四)

①点検頻度; 5年毎の定期点検 (道路会社Aでは1回/年概略点検が入る)

②点検要領; 各社オリジナル (点検要領、オリジナル維持管理マニュアル)

③点検方法; 近接目視 (ロボット(中日本、阪高、本四)、高所作業車、等)

B分類; 国土交通省地方整備局、市町村

①点検頻度; 5年毎の定期点検 ②点検要領; 道路橋定期点検要領 (H26.6国交省道路局)

③点検方法; 近接目視 (高所作業車、双眼鏡等)

C分類; 都道府県、政令指定市

①点検頻度; 5年毎の定期点検

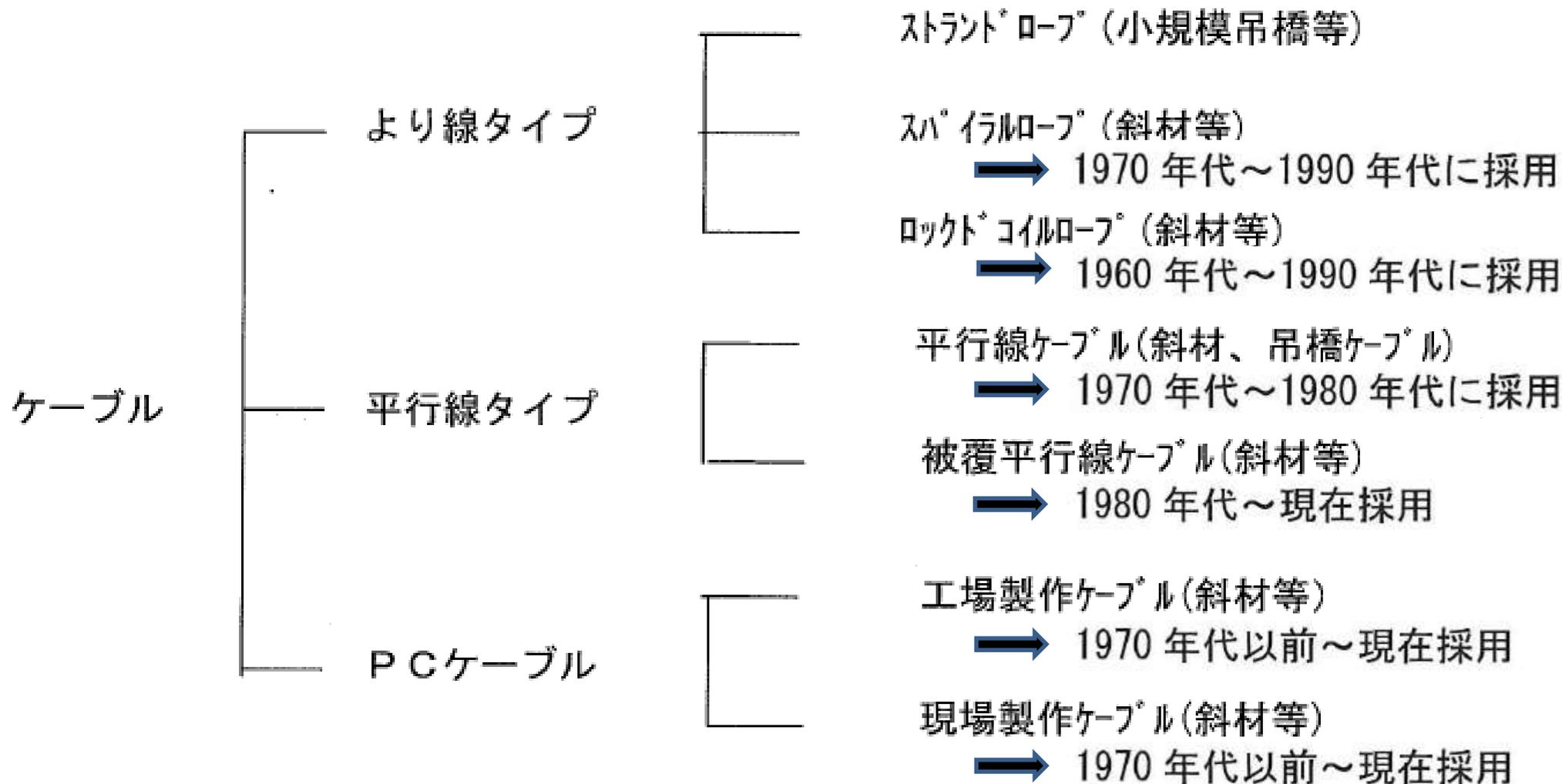
②点検要領; 定期点検要領、橋梁の点検要領 (東京都建設局・長野県・浜松市)、橋梁点検要領

・長大橋等の点検マニュアル(案)(大阪市)、歩道橋点検要領 (横浜市道路局)、

点検マニュアル (北海道・岐阜県・福井県・岡山県・佐賀県)

③点検方法; 近接目視 (高所作業車、双眼鏡等)

7) 使用ケーブル種別



8) ケーブル採用傾向

1. スパイラルロープ

中小規模の吊橋・斜張橋やニールセン橋に多い。歩道橋が多い

2. ロックドコイルロープ

黎明期の吊橋・斜張橋やニールセン橋に多い。防食上優れている

3. PWS

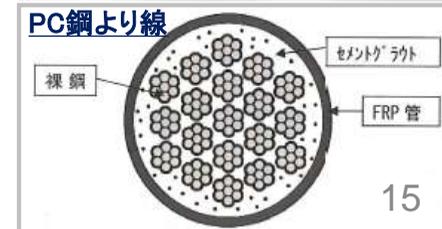
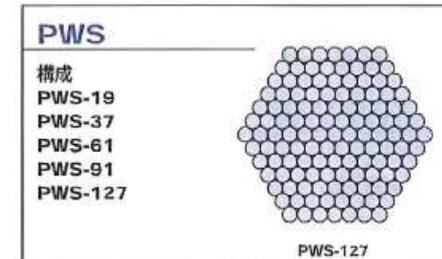
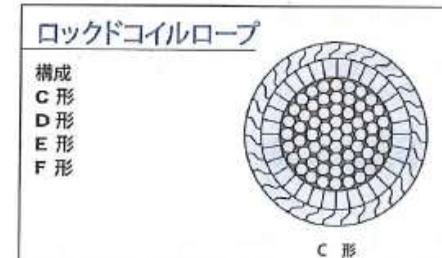
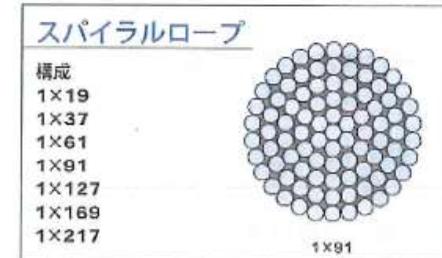
- ・工場収束型ケーブル(NEW-PWS、SPWC)が製作されるまでの長支間の斜張橋ケーブルに採用
- ・弾性係数が大きく、張力に対して素線本数の大小で対応できる

4. SPWC、NEW-PWS(グラウトタイプ、ノングラウトタイプ)

- ・近代の長支間斜張橋(鋼・PC・複合・混合)に採用
- ・工場収束のため、防食上非常に優れている

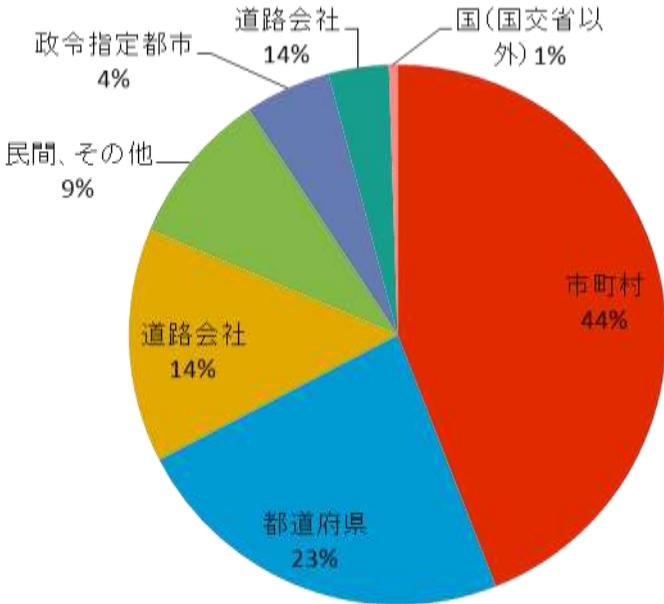
5. PC鋼より線

主として、PC張出工法橋での現場収束型ケーブルに採用



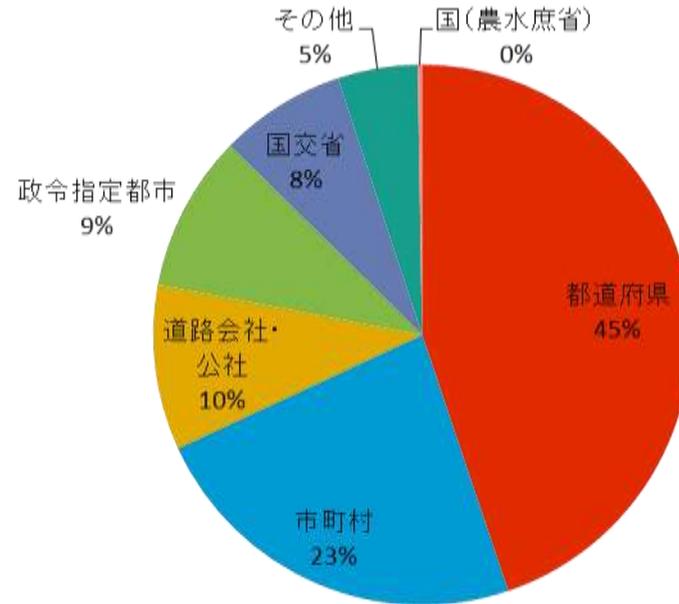
調査結果

1) 管理組織別 (調査対象全395橋)



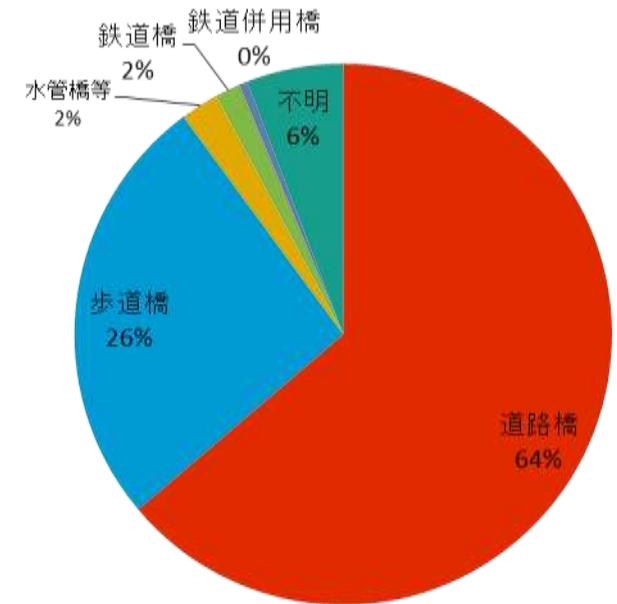
市町村	85
都道府県	45
道路会社	27
民間、その他	18
国交省	10
政令指定都市	7
国(国交省以外)	1

2) 管理組織別橋梁数 (調査対象全395橋)



都道府県	177
市町村	92
道路会社・公社	39
政令指定都市	37
国交省	30
その他	19
国(農水産省)	1

3) 用途別 (調査対象全395橋)

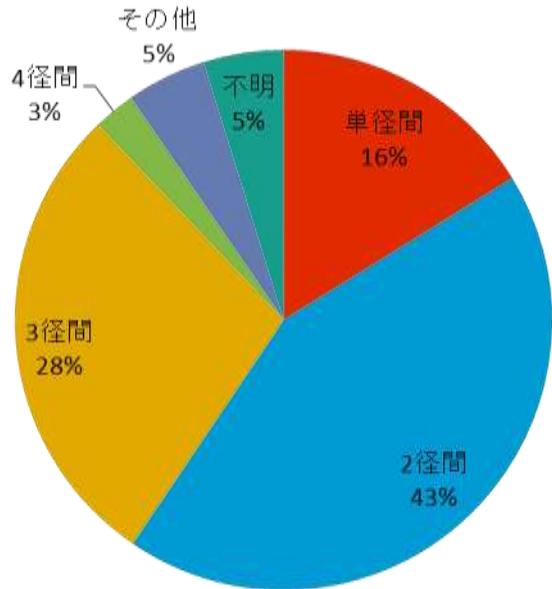


道路橋	186
歩道橋	89
鉄道橋	4
その他	10
不明	61

調査結果

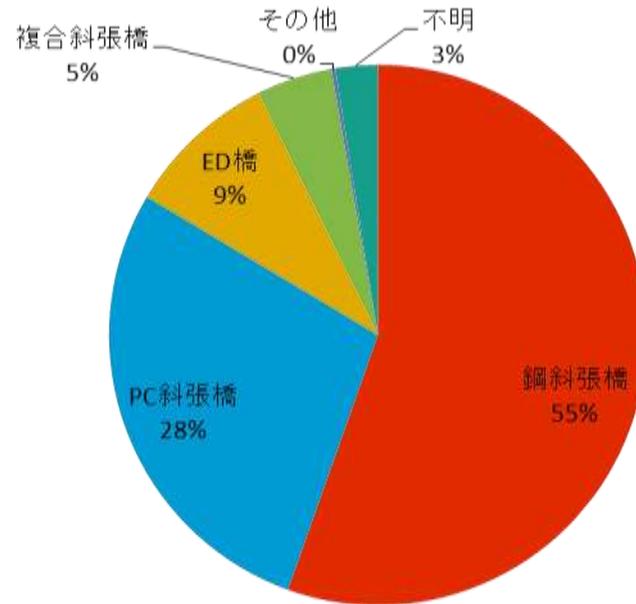
4) 橋梁形式等別 (調査対象全395橋)

① 径間数



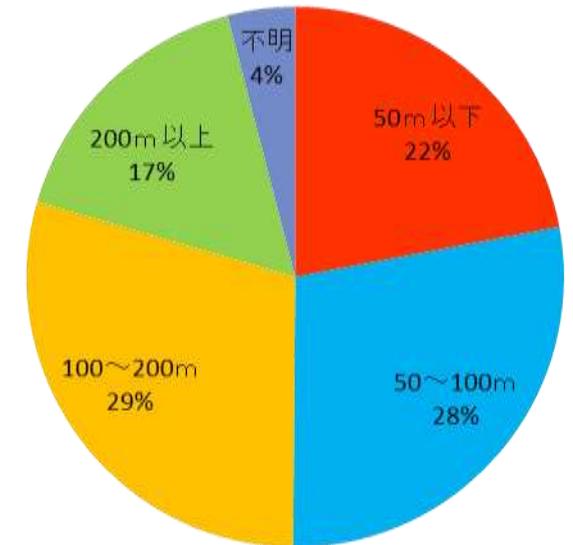
単径間	64
2径間	171
3径間	112
4径間	10
その他	19
不明	19

② 材料別



鋼斜張橋	219
PC斜張橋	111
ED橋	36
複合斜張橋	18
その他	1
不明	10

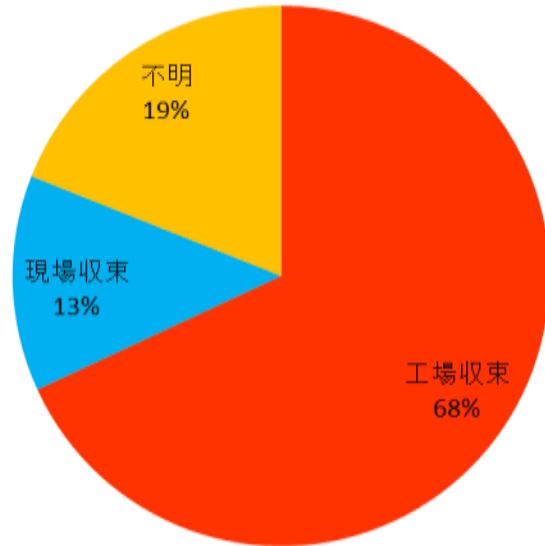
③ 最大支間長別



50m以下	87
50~100m	111
100~200m	116
200m以上	65
不明	16

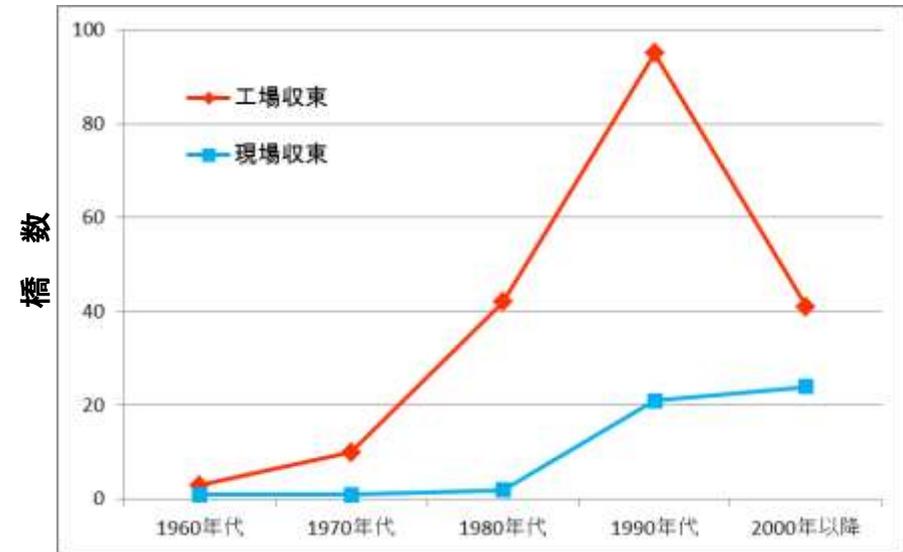
5) ケーブルタイプ別

①工場収束or現場収束 (調査対象全395橋)

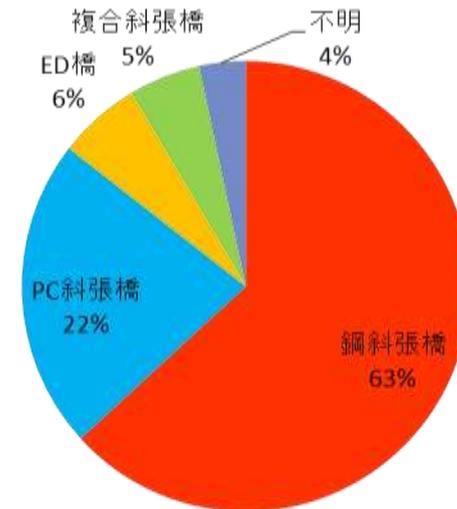


工場収束	269
現場収束	51
不明	75

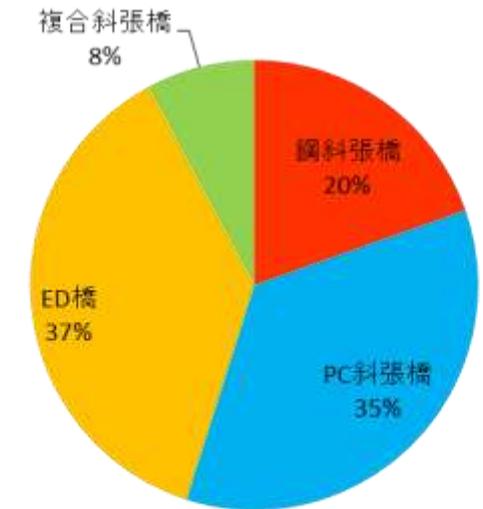
全体的には工場収束タイプの割合が多く、現場収束タイプはPC斜張橋に多い。



収束タイプの推移



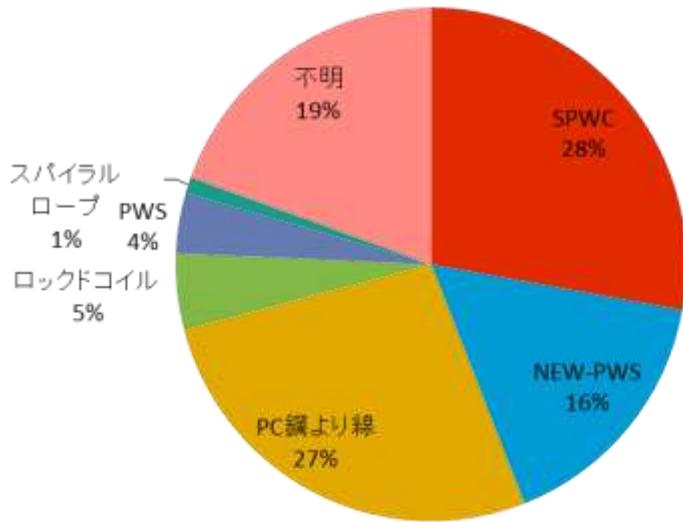
工場収束型の内訳



現場収束型の内訳

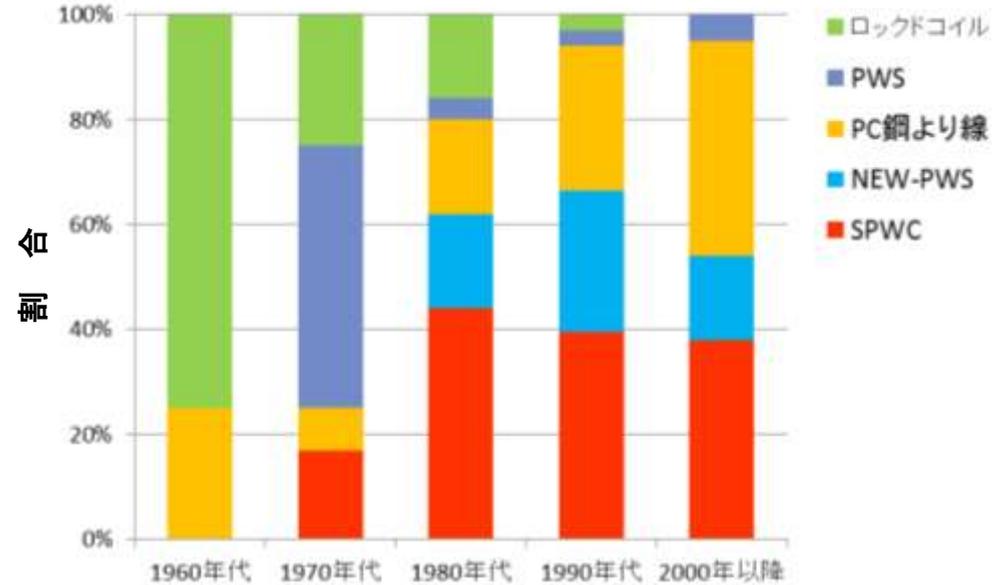
調査結果

②ケーブル種別 (調査対象全395橋)

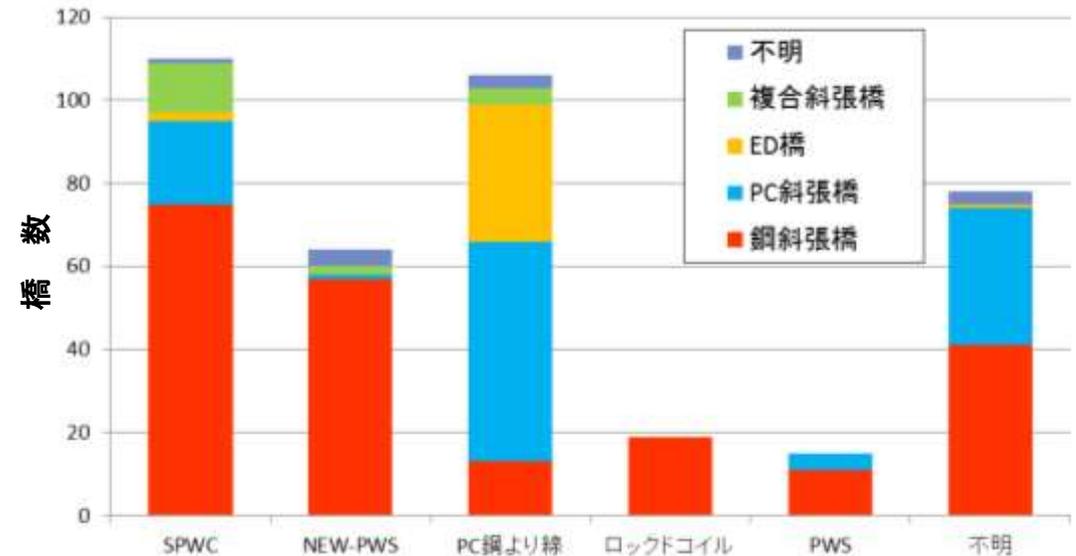


SPWC	110
NEW-PWS	64
PC鋼より線	106
ロックドコイル	19
PWS	15
スパイラルロープ	4
不明	77

- ・近年は被覆タイプの割合が高い。
- ・長大橋は防食性の高いノンゲラウトタイプ、小規模(歩道橋等)はロックドコイル、スパイラルロープの割合が高い。

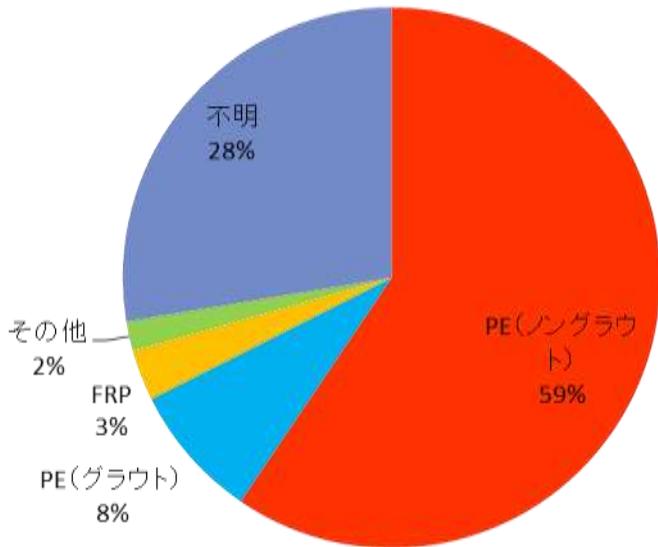


ケーブル種別の推移

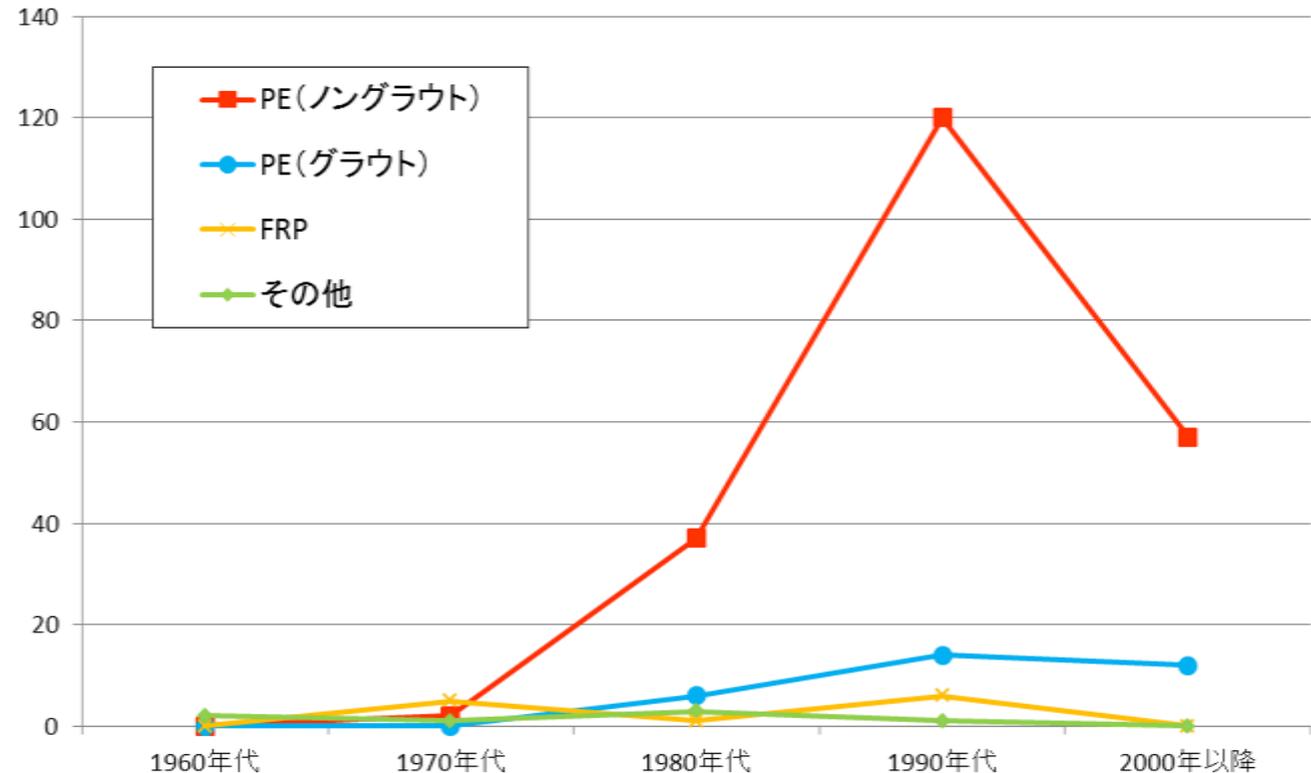


ケーブル種別と橋梁種別の関係

③防食工法(被覆) (調査対象全395橋)



PE(ノングラウト)	235
PE(グラウト)	32
FRP	12
その他	7
不明	109

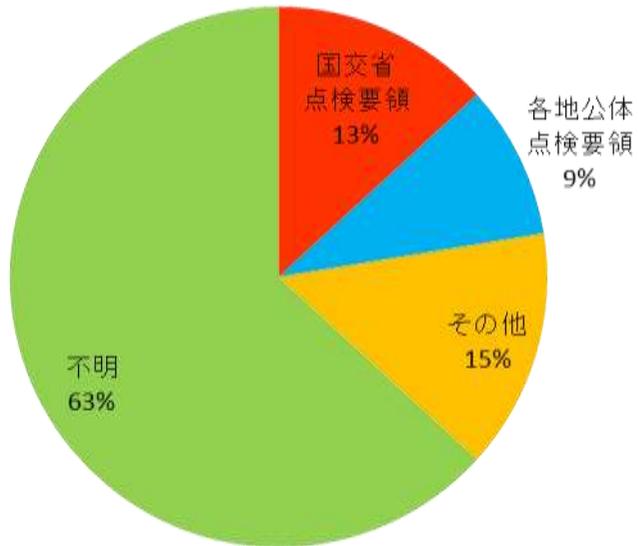


防食工法の推移

- ・ FRPはポリエチレン被覆（PE被覆）に推移している。
- ・ グラウト注入もあるが、ノングラウトに推移している。
- ・ 近年はノングラウトの割合が多い。

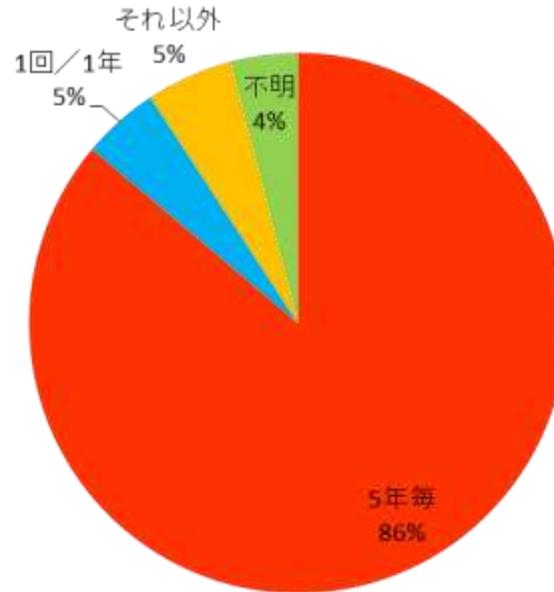
6) 点検要領(有効回答174橋)

①基準等



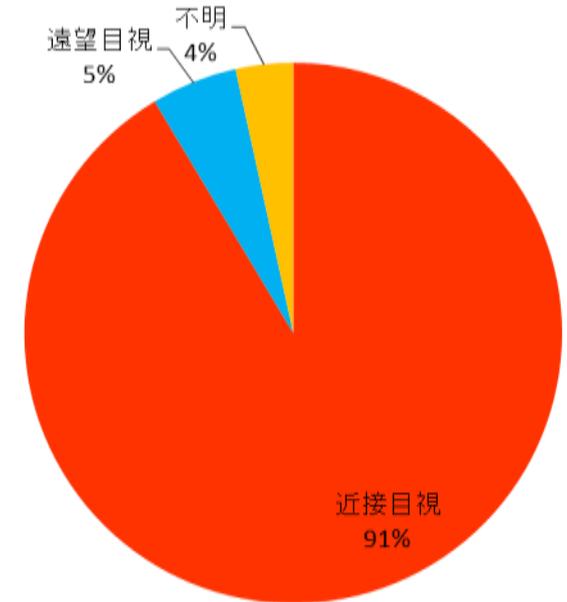
国交省点検要領	23
各地公体点検要領	16
その他	25
不明	110

②点検頻度



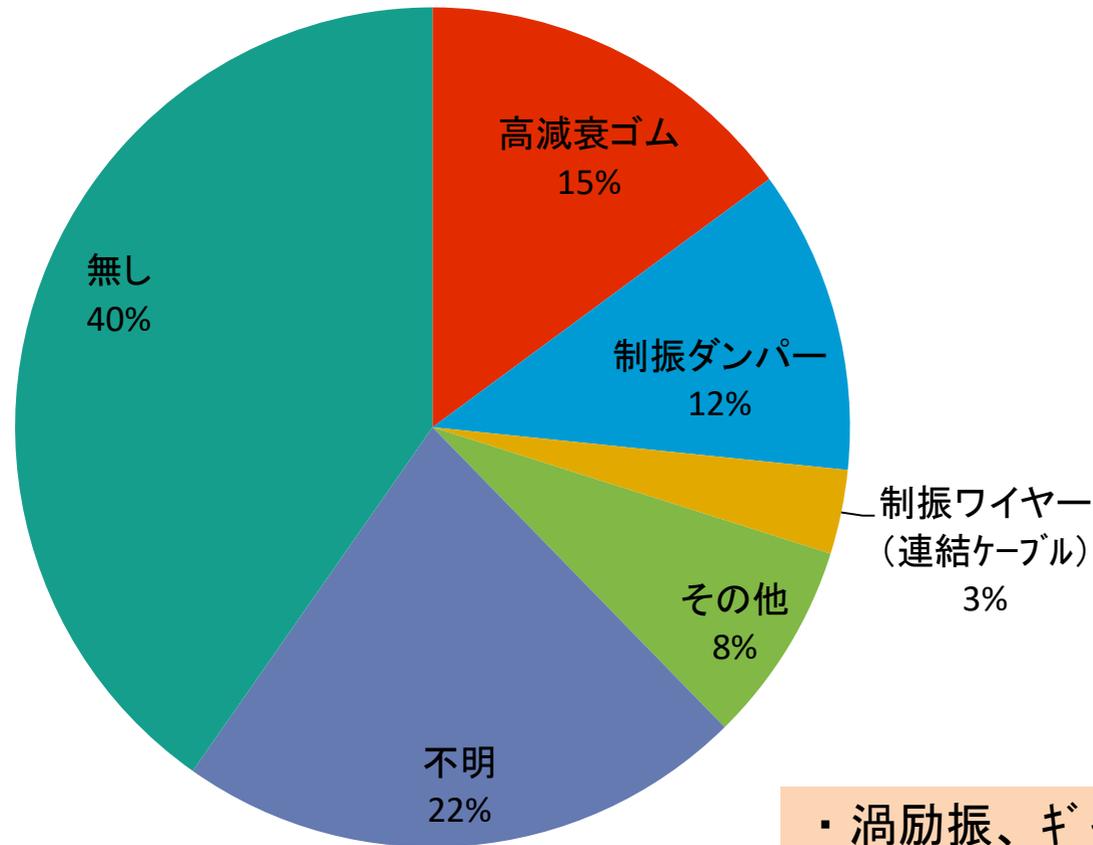
5年毎	150
1回/1年	8
それ以外	9
不明	7

③点検手法



近接目視	159
遠望目視	9
不明	6

7) 制振装置 (有効回答153橋)

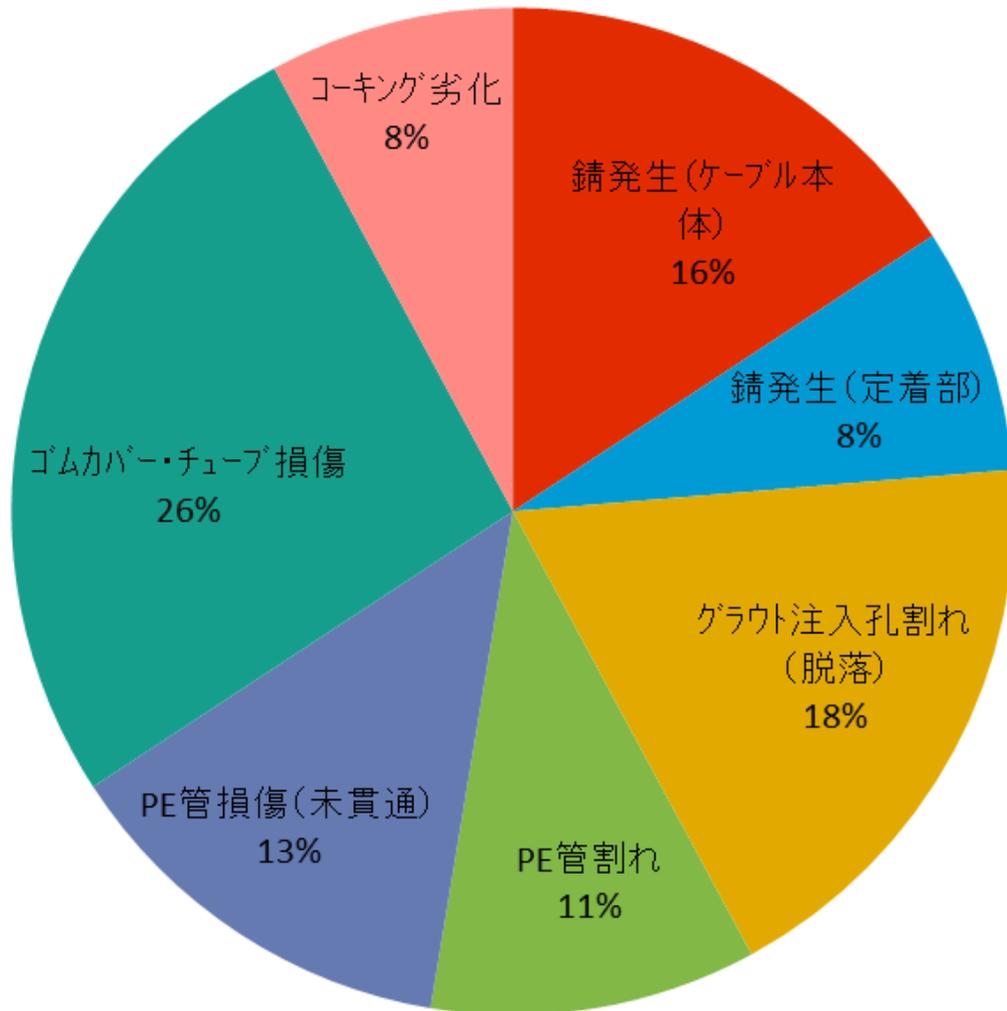


高減衰ゴム	23
制振ダンパー	18
制振ワイヤー(連結ケーブル)	5
その他	12
不明	34
無し	62

- ・ 渦励振、ギャロッピング、レインバ イブレーション、ウエイギャロッピング 対策が施されている橋梁がある。
- ・ 設計段階で技術的検討（道路橋耐風設計便覧による数値検討や風洞実験）が為された橋、供用中に制振対策が為された橋がある。

調査結果の分析(損傷)

1) 損傷の種類



錆発生(ケーブル本体)	6
錆発生(定着部)	3
グラウト注入孔割れ(脱落)	7
PE管割れ	4
PE管損傷(未貫通)	5
ゴムカバー・チューブ損傷	10
コーキング劣化	3

調査結果の分析(損傷)

2) 損傷種類と各種諸元

損傷種類と各種諸元		錆発生 (ケーブル本体)	錆発生 (定着部)	グ ラウト注入孔 割れ(脱落)	PE管割れ	PE管損傷 (未貫通)	ゴムカバー・ チューブ 損傷	コーキング 劣化
建設年	1970年代	4	1				1	
	1980年代	1	1	4	2	1	4	2
	1990年代	1		3	2	3	6	
	2000年代以降					1	1	1
種別	ロケットコイル	*1 2					1	
	PWS	4	1	4			1	
	SPWC, NEW-PWS		1		2	3	4	2
	その他、不明			3	2	2	4	1
防食	亜鉛メッキ	2						
	FRP	3	1				1	
	防食テープ							
	PE被覆(ノング ラウト)			*2		2	3	1
	PE被覆(グ ラウト)		1	6	4	3	2	1
	その他、不明	1		1			4	1

橋数に対する損傷の割合		錆発生 (ケーブル本体)	錆発生 (定着部)	グ ラウト注入孔 割れ(脱落)	PE管割れ	PE管損傷 (未貫通)	ゴムカバー・ チューブ 損傷	コーキング 劣化
種別	ロケットコイル	20% (2/10)					10% (1/10)	
	PWS	25% (4/16)	6.3% (1/16)	25% (4/16)			6.3% (1/16)	
	SPWC, NEW-PWS		0.7% (1/140)		1.4% (2/140)	2.1% (3/140)	2.9% (4/140)	1.4% (2/140)

- *1 ロケットコイル、PWSはケーブルの防錆機能が低下して錆が発生する事例が多い。
- *2 グ ラウト注入タイプ の場合、注入孔やPE管自体の割れが生じるケースが多い。
- *3 ロケットコイル、PWSは橋数に対して損傷数の割合が高い。
- *4 グ ラウトタイプ は総数が少ない割に損傷が多く、
ノング ラウトタイプ は総数が多い割に損傷が少ない。

調査結果の分析(振動)

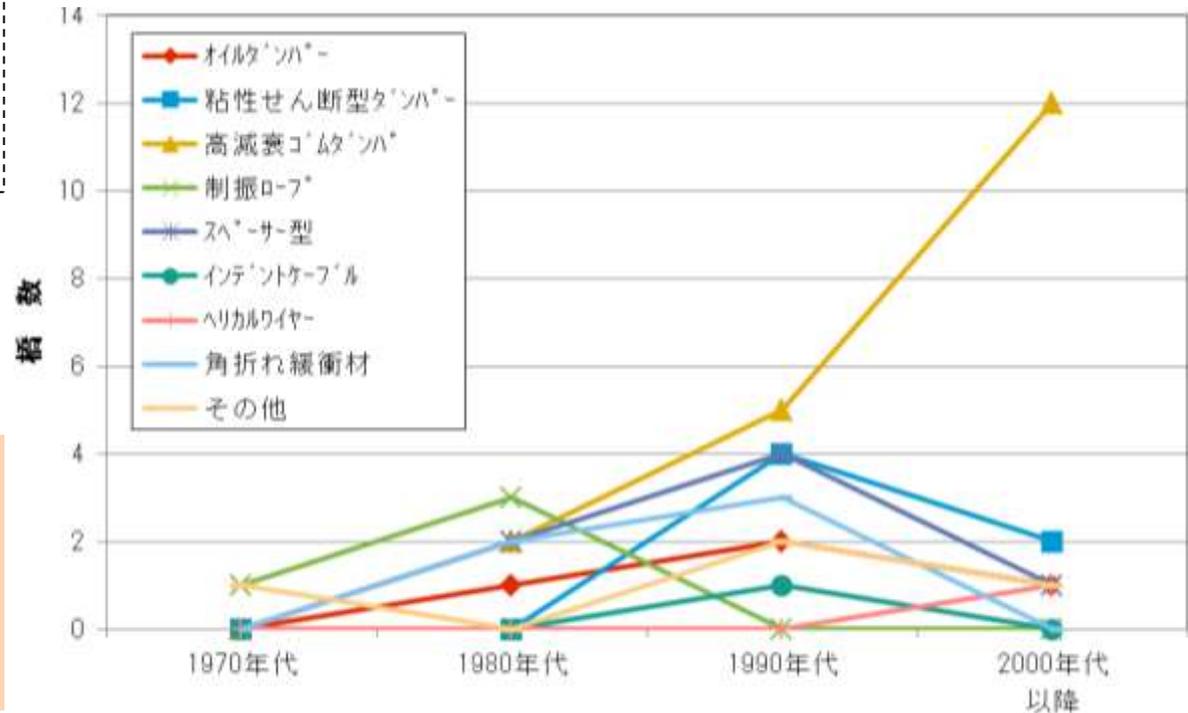
1) 損傷の種類

		レインパイプ レーション	ウェイク キャロッピング
建設年	1980年代	1	2
	1990年代	2	
橋長	100m以上	1	
	200m以上	2	2
最大 ケーブル長	50m以上	1	2
	200m以上	2	
種別	PWS	1	
	PWC	2	2
防食	PE被覆(ノングラウト)	2	
	PE被覆(グラウト)	1	2

2) 損傷種類と各種諸元

対策	供用年				合計
	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代 以降	
オイルダンパー	0	1	2	1	4
粘性せん断型ダンパー	0	0	4	2	6
高減衰ゴムダンパー	0	2	5	12	19
制振ロープ	1	3	0	0	4
スパーサー型	0	2	4	1	7
インテントケーブル	0	0	1	0	1
ハリカルワイヤー	0	0	0	1	1
角折れ緩衝材	0	2	3	0	5
その他	1	0	2	1	4

*1



*1 高減衰ゴムダンパーは、維持管理および設置取替えの容易性から採用事例が増加している。

国内・海外の損傷劣化事例(文献、HP)

*文献やHP等で公表されている事例を対象

No.	橋梁名	地域	橋梁形式	損傷原因	損傷内容	補修内容
1	雪沢大橋	秋田県	エクストラースト橋	融雪材を含んだ雨水	桁側定着部近傍のケーブル破断	ケーブル張替え
2	横浜ベイブリッジ	神奈川県	鋼斜張橋	振動等	ポリエチレン被覆の融解	緩衝部材の再設置
3	かもめ大橋	大阪府	鋼斜張橋	不動沈下	ケーブル張力の許容値超過	張力調整
4	Rion Antirion橋	ギリシア	斜張橋	落雷	最上段ケーブル破断	ケーブル張替え
5	Binh橋	ベトナム	斜張橋	船舶衝突	主桁とケーブルの一部損傷	ケーブル張替え
6	集鹿大橋	台湾	PC斜張橋	施工不具合	ケーブル・ソケットの損傷	ケーブル転用張替え(一部製作)
7	西海大橋	韓国	斜張橋	火災(落雷か?)	ケーブル1本破断	不明(調査中?)

ケーブル損傷事例の紹介①

H18HS委員会報告書より抜粋

橋梁名	構造形式	損傷内容
天保山大橋	斜張橋	ケーブル制震装置のオイル漏れ、ボルト損傷
		取付ボルト類の緩み
		PE管と上フランジの接触
		PE管の破損
大和川大橋	斜張橋	ケーブル定着部のボルト損傷
東神戸大橋	斜張橋	ケーブル被覆部の損傷
		ケーブルカバー、ケーブルゴムカバーの損傷
		定着座金のボルト損傷等
唐櫃新橋	エクストラドーズド橋	PE管の損傷
		定着部グラウトキャップのボルト欠損
		定着ブロックのひび割れ
大和川橋梁	斜張橋	ケーブル定着部のボルト損傷

ケーブル損傷事例の紹介②

損傷例:被覆面の損傷(ケーブルPE被覆塗装のはく離)

全景(HI666)



HI476



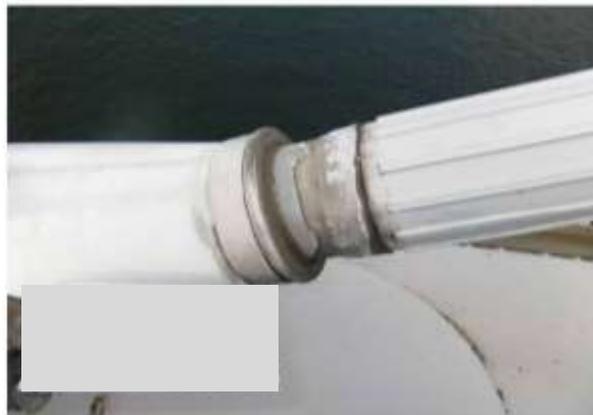
HI479



HI480



HI483



HI484



ケーブル損傷事例の紹介③

損傷例：定着ブロック(塗装はく離)、定着座金(ボルトの緩み)、
ケーブルカバーの損傷(座金さび)

H0803



H0801



H0796



II1360



II1477



II1478



損傷例:ケーブル定着部の損傷

13



YW5-11

14



YW5-21

15



YW5-22

16



YW5-28

17



YW5-29

18



YW5-33

ケーブル損傷事例の紹介⑤

損傷例: ケーブル部漏水跡

H0521



H1371



H0495



IT1355



IT1366



ケーブル損傷事例の紹介⑥

損傷例: グラウト注入孔からの錆、擦過傷 (ケーブル点検ロボット使用)

HIL-①



HIL-②



HIL-③



HIL-④



HIL-⑤



HIL-⑥



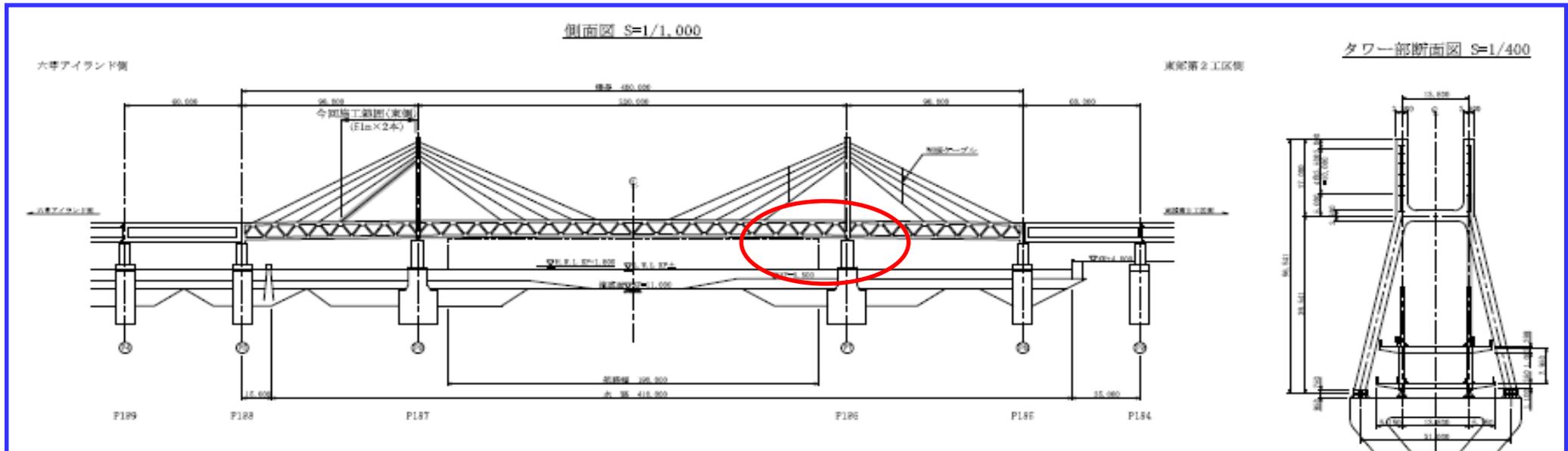
ケーブルの補修事例

No.	橋梁名	地域	構造形式	補修内容
1	A大橋		斜張橋	ペトロラタム+FRP、防食テープ
2	摩耶大橋	兵庫県	斜張橋	防食テープ巻き
3	豊里大橋	大阪府	斜張橋	防食テープ巻き(施工中)

ケーブルの補修事例①

A大橋の補修事例

- ①橋梁形式等 3径間連続ダブルデッキ斜張橋(90m+220m+90m)
- ②ケーブル諸元 5段、2面吊、並列ケーブル PWS217(φ85mm)、六角断面
- ③損傷経緯
 - 1) 供用開始時、ケーブル連結によるウエークギャロッピング対策
 - 2) その後、亜鉛メッキ鋼線の腐食を確認。
補強工事(ペトロラムペースト+FRP管⇒円形断面に変更)を実施
 - 3) 油漏れ確認
油漏れの原因となる連結ケーブルを撤去、防食テープで補修



ケーブルの補修事例②

摩耶大橋の補修事例



神鋼鋼線HPより引用

■写真は施工概略図

施工手順

- 1 下地の清掃
錆、水分を除く。
- 4 テープ巻き
テープを引っ張り加減にハーフラッピングする。



- 2 下塗り
プライマーを均一に刷毛塗りする。



- 5 テープ撫付け
テープ表面を手で撫付け密着させる。



- 3 凹部充填
凹部に充填材を詰めて平滑にする。



- 6 上塗り
テープを表面に均一に刷毛塗りする。



特性	工法	塗装工法	プラスチックカバリング工法	テープ巻き工法
施工概略図		<p>刷毛塗り ケーブル ケーブルバンド</p>	<p>樹脂注入 ガラスクロム P.Pフィルム</p>	<p>樹脂材 ケーブルバンド ケーブル テープ テープ</p>
防食性能		○	○	◎
施工性(施工費)		◎	×	○
耐久性		×	○	○
保守性(維持費)		△	△	○
総合判断		△	△	◎

豊里大橋(大阪府)の紹介

①構造形式:3 径間連続鋼床版箱桁斜張橋

②損傷内容:FRPカバーの劣化部から水が浸入し、ケーブルが腐食(詳細調査中)

③補修対策:

H24 定期点検でFRPカバーの劣化を発見

H25 FRPカバー劣化部など一部被覆を撤去し、レプリカを採取し断面欠損の状況確認・評価

H26~28 ケーブルの張替えも含めた対策検討

H29 全線の被覆を撤去した腐食状況調査、ケーブル張力、サグ、桁応力等の詳細調査を実施するとともに、構造解析を実施中。被覆復旧は防食テープ巻き工で行い、必要に応じて追加対策を実施予定

C8ケーブル腐食状況

H25詳細調査



3. ケーブルの断面欠損による影響評価

① 豊里大橋を対象とした、ケーブル断面欠損の影響調査

- 腐食によりケーブルに断面欠損を生じると、橋梁全体にどのような影響があるのか？
- 事前に危険な状態を把握することはできるのか？
- 小段数ケーブル斜張橋とマルチケーブル斜張橋に差があるか？

② ケーブル破断の可能性と安全性に関する検討

- ケーブル鋼線の破断はなぜ生じるのか？
- ケーブル破断の可能性はあるのか？
- ケーブル断面欠損が、橋全体の安全性に与える影響は？
- ケーブルが突然に破断した場合の影響は？

③ まとめ

- ケーブルの維持管理に考慮すべきこと

対象橋梁

- ▶ 供用から45年以上を経過し、調査でケーブルの腐食が確認されている斜長橋「豊里大橋(大阪市)」を対象
- ▶ ケーブル腐食による断面欠損が橋梁の全体性能に与える影響を検討



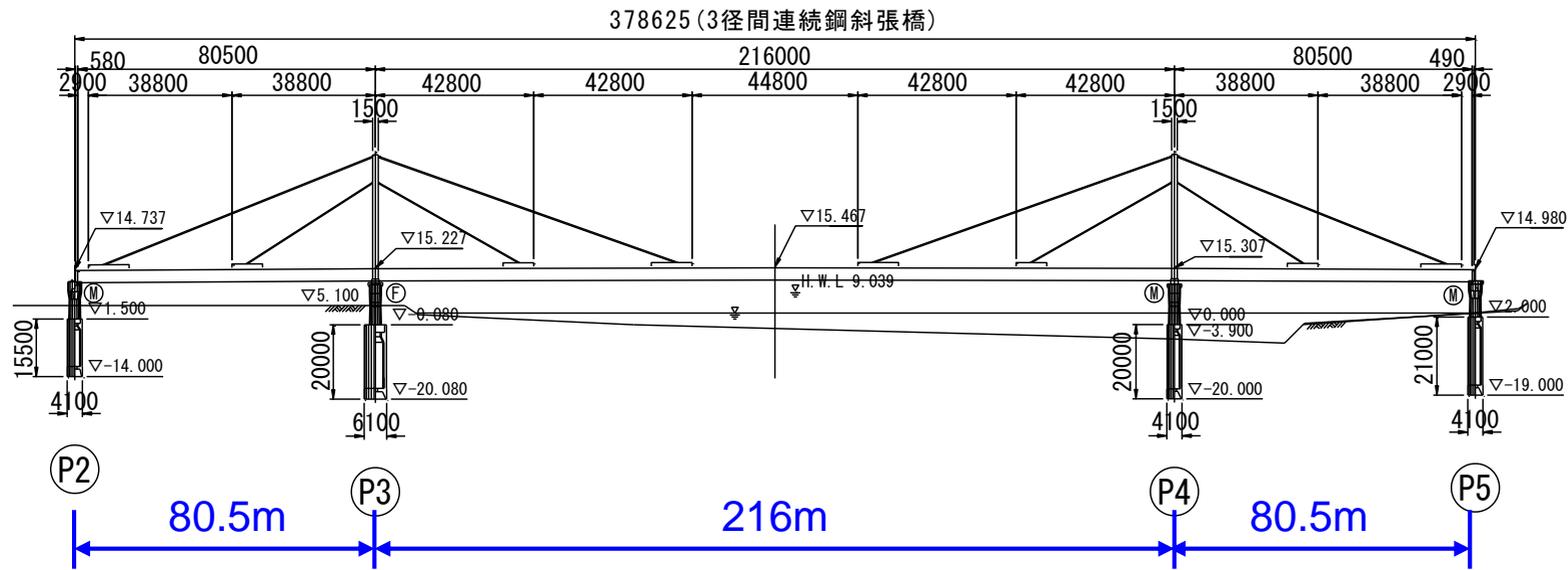
路線名	国道479号
竣工年	1970年(昭和45年)
上部工形式/床版	3径間連続鋼斜張橋/鋼床版
下部工形式	P2,P5: 壁式橋脚, P3,P4: 2柱式ラーメン橋脚
基礎工形式	ケーソン基礎
橋長/平面線形	378.625m/直線
支間割	80.5m + 216.0m + 80.5m
幅員	歩:6.61m+車:16.40m+歩:6.61m
適用示方書	昭和39年鋼道路橋設計示方書
活荷重	TL-20(25t対応済み)

豊里大橋の概要

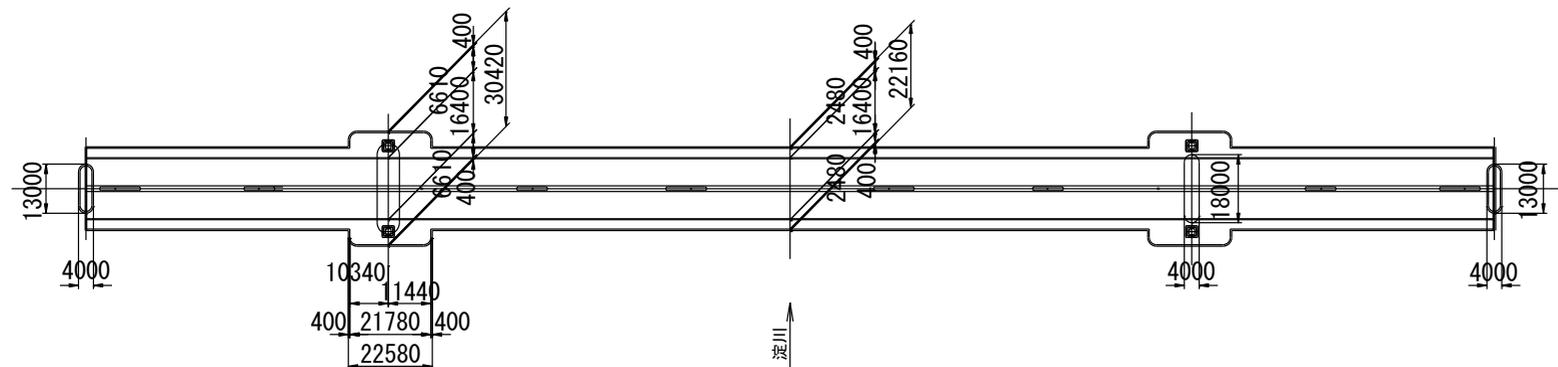
構造図

- 一面吊り, ファン型(ケーブル2段)
- 主桁: 逆台形箱桁(1BOX), 主塔: A型

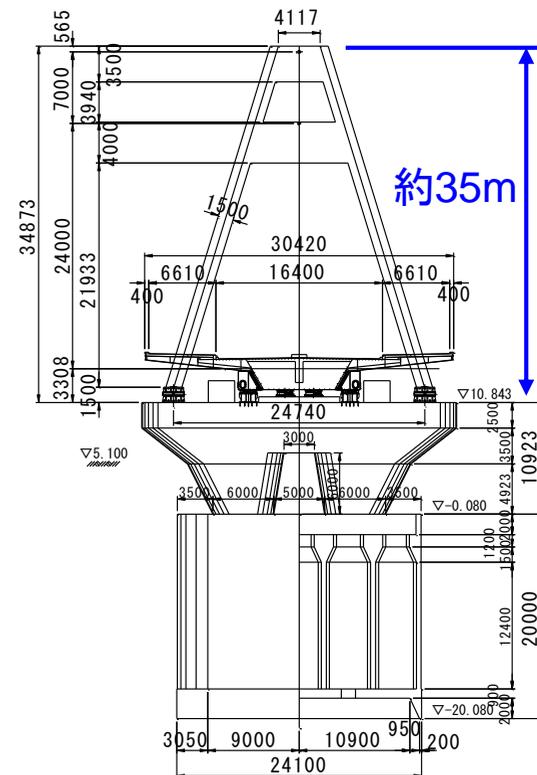
側面図



平面図



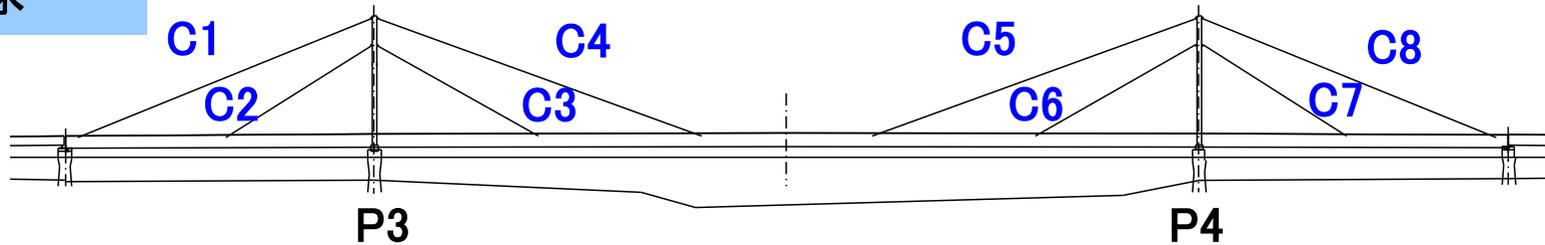
P3主塔



豊里大橋の概要

斜ケーブル仕様

➤ 平行線ストランド(PWS), 亜鉛メッキ鋼線Φ5mm

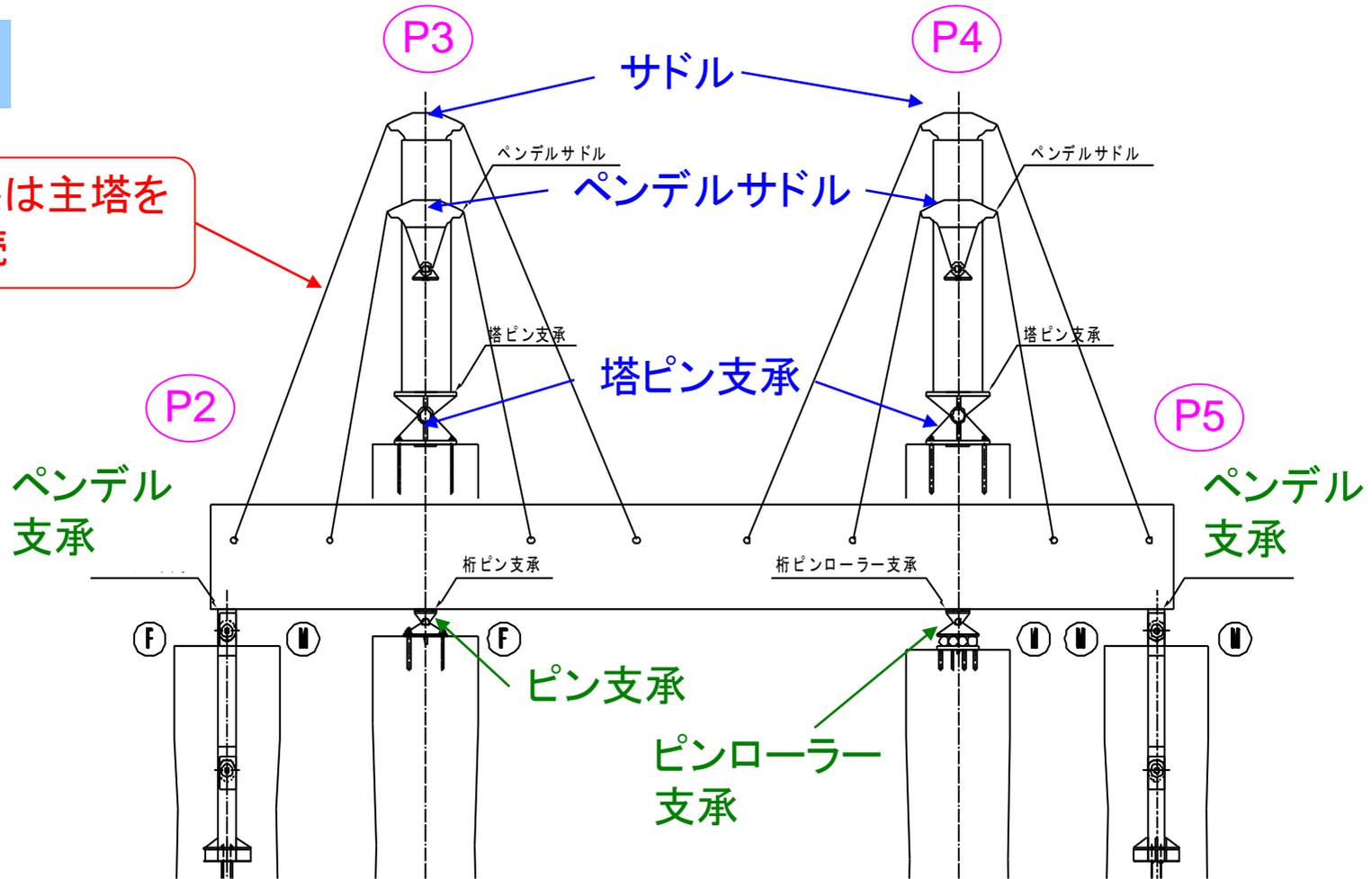


ケーブル種別	上段 16 × PWS-154	下段 12 × PWS-127
ケーブル断面	<p>Φ5mm亜鉛メッキ素線 (16 × 154 = 2464本)</p> <p>φ 272</p>	<p>Φ5mm亜鉛メッキ素線 (12 × 1227 = 1524本)</p> <p>φ 214</p>
ストランド断面	<p>70 65.6</p>	<p>65 57</p>

豊里大橋の概要

支点条件

ケーブルは主塔を
跨ぎ連続



部 位		変位			回 転		
		橋軸	橋直	鉛直	橋軸回り	橋直回り	鉛直回り
主塔	サドル	固定	固定	固定	固定	自由	固定
	ペンデルサドル	自由	固定	固定	固定	自由	固定
	塔ピン支承	固定	固定	固定	固定	自由	固定
主桁	P2, P5ペンデル支承	自由	固定	固定	固定	自由	固定
	P3ピン支承	固定	固定	固定	固定	自由	固定
	P4ピンローラー支承	自由	固定	固定	固定	自由	固定

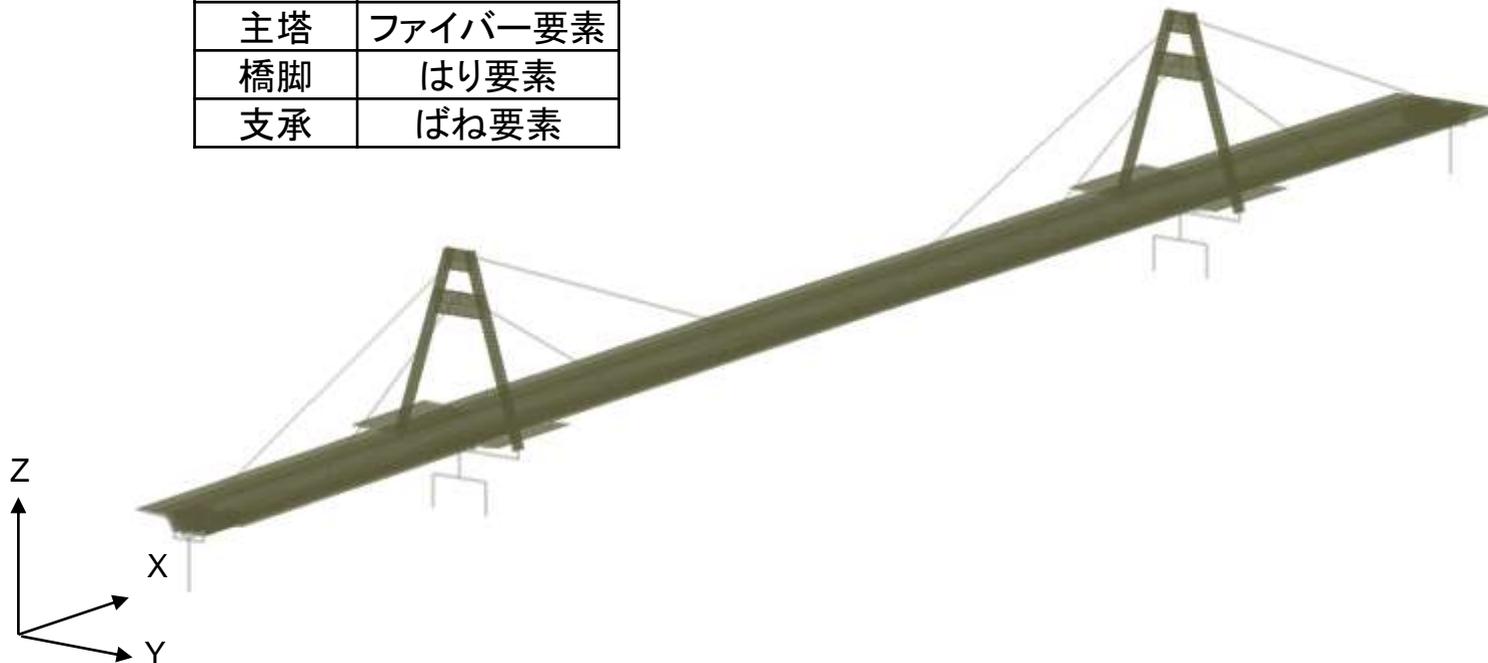
解析モデル

モデル化

- 全橋モデル解析モデルで検討
- 材料非線形性および幾何学的非線形性を同時に考慮した静的複合非線形解析
(汎用有限要素解析コードSean FEMを使用)

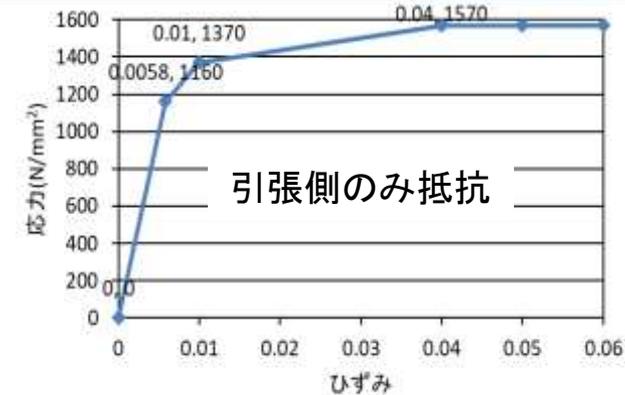
部材のモデル化

部位	モデル化
ケーブル	トラス要素
主桁	ファイバー要素
主塔	ファイバー要素
橋脚	はり要素
支承	ばね要素

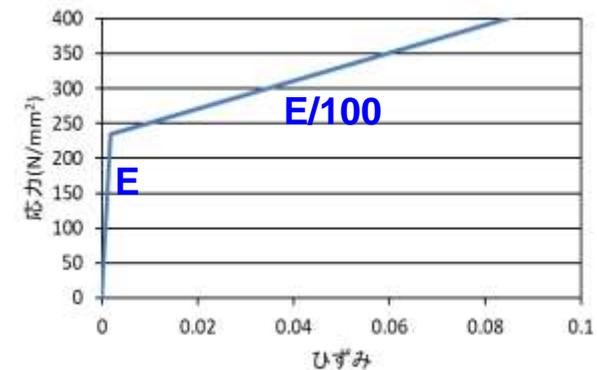


応力-ひずみ関係

(a) ケーブル



(b) 鋼板(SS400の例)



解析手法

載荷手順

STEP1 : ケーブル以外の部材に死荷重を載荷

STEP2 : ケーブルに死荷重を載荷

STEP3 : ケーブルにプレストレスを導入

STEP4 : 活荷重載荷

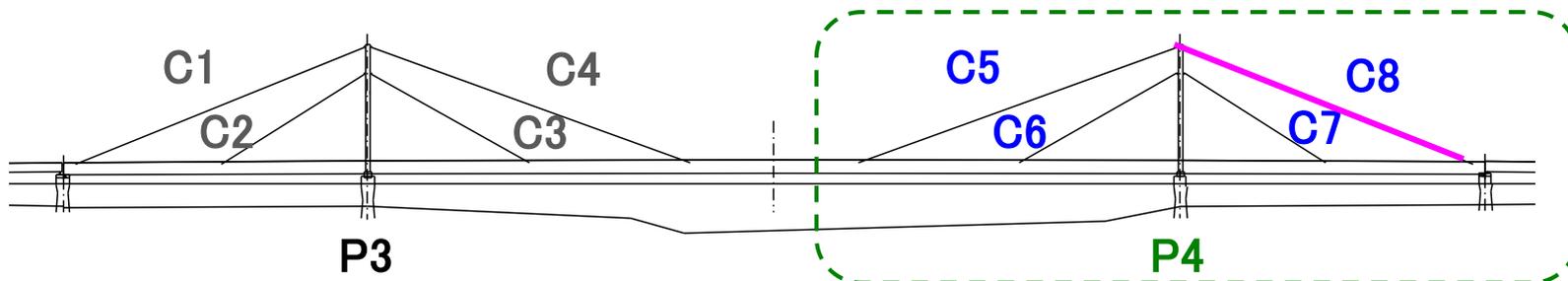
(対象ケーブルの負担が最も大きくなる位置にL荷重載荷)

STEP5 : ケーブルの断面積を徐々に減少(全長に渡り一様に欠損)

解析ケース

ケース	対象ケーブル	備考
ケース1	C5	
ケース2	C6	調査により腐食確認
ケース3	C7	
ケース4	C8	調査により腐食確認
ケース5	C6およびC8	

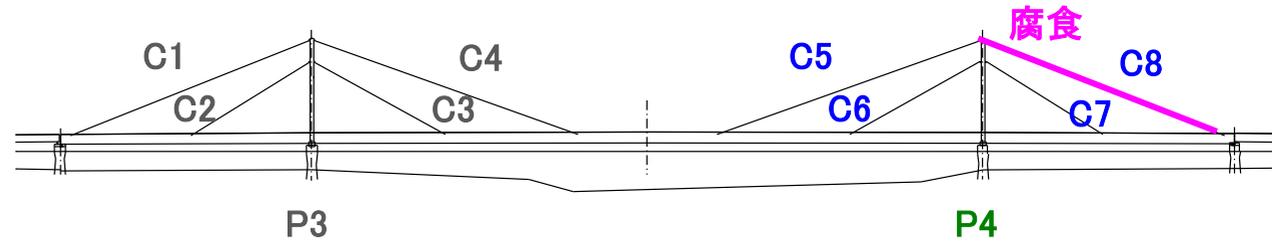
本発表では、C8を腐食させた解析結果を主に説明



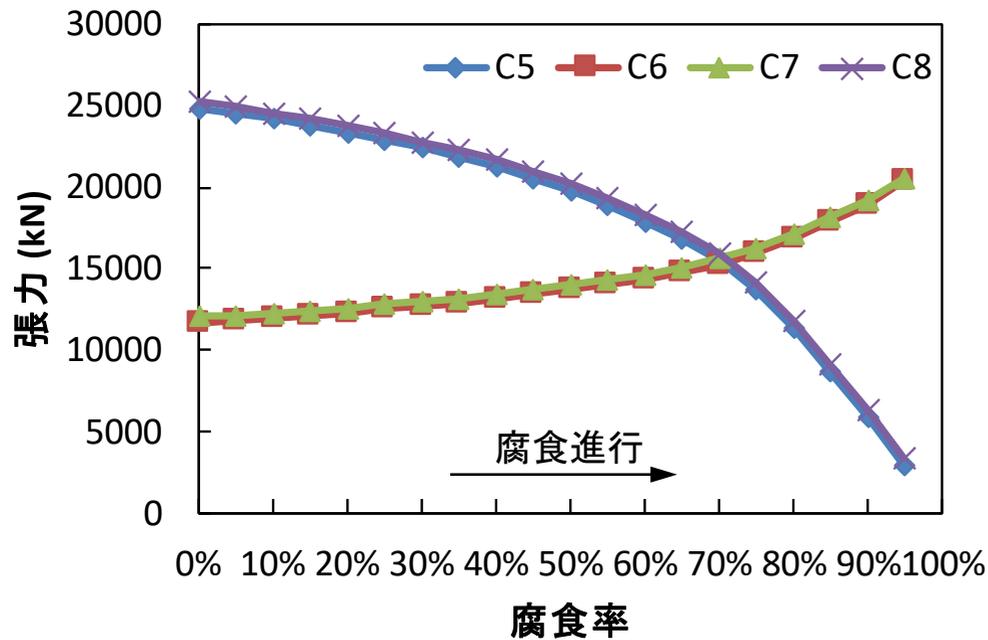
解析結果

ケーブル張力, 応力

断面欠損95%まで解析実施

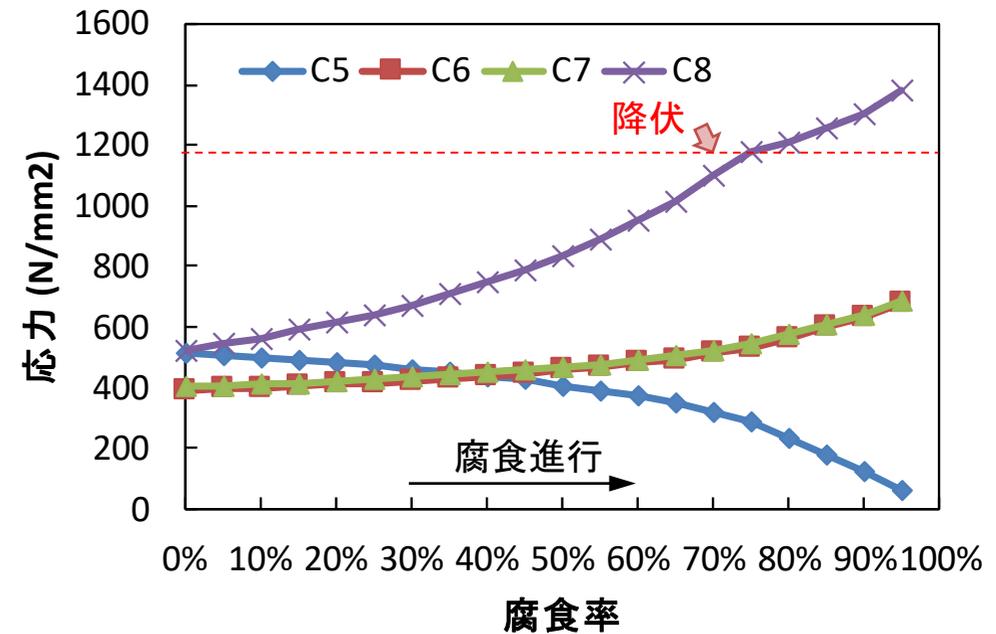


ケーブル張力



→ 上段ケーブルの張力が減少し, 下段の張力増加

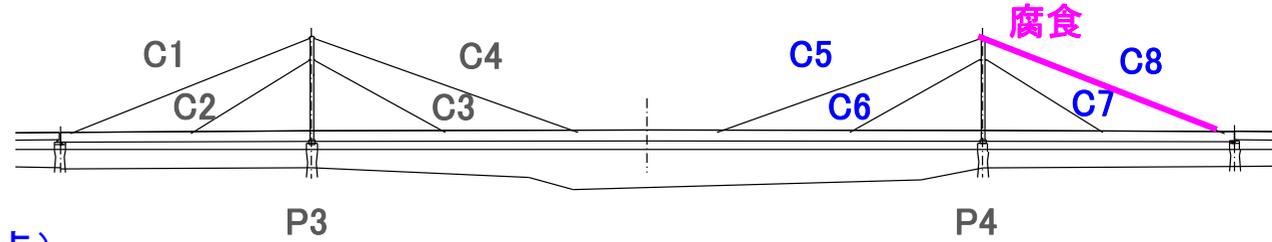
ケーブル応力



→ C8は断面欠損により応力が増加. 約75%で降伏

解析結果

変形状況

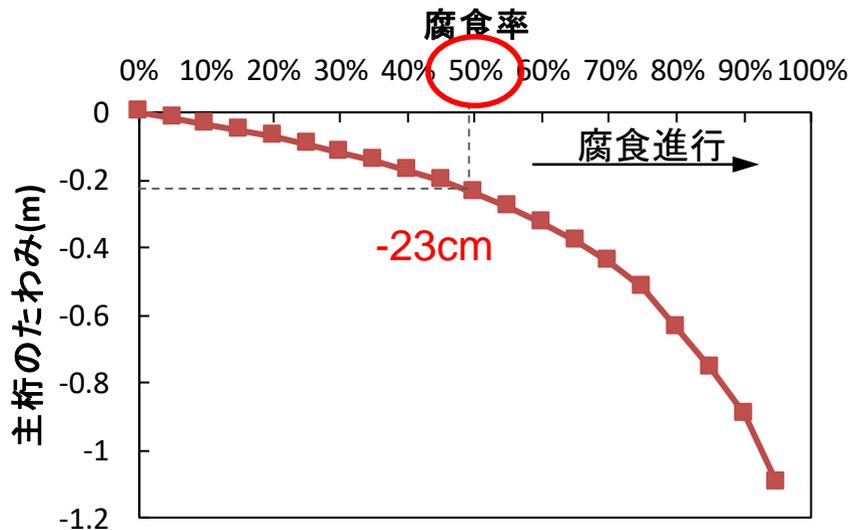
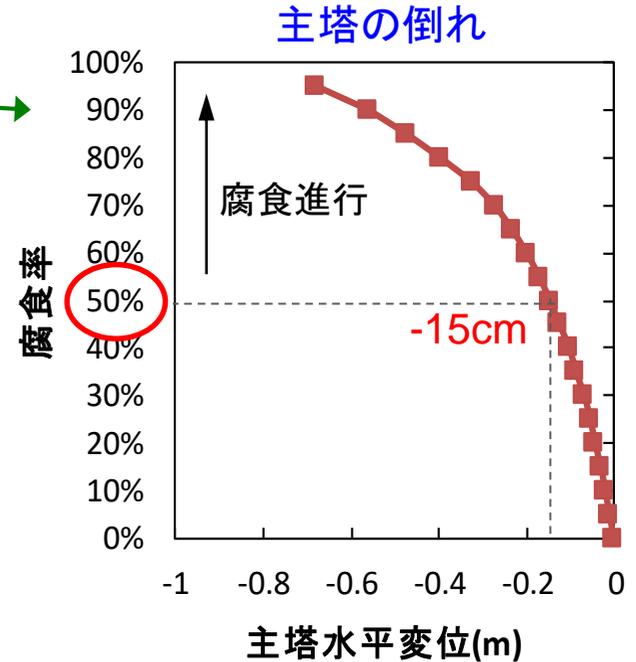


変形図(断面欠損95%時点)

主塔水平変位 68cm

主桁鉛直変位 -110cm

主桁のたわみ



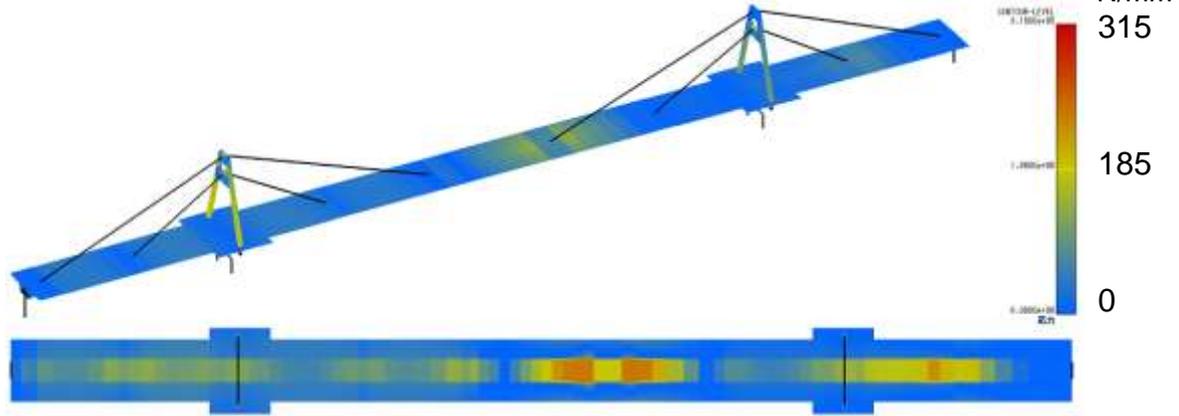
➔ 断面欠損により変形が急変するのは腐食率70%以降

➔ 腐食率50%でも20cm程度の変位と小さく、変状発見には常時モニタリングが必要

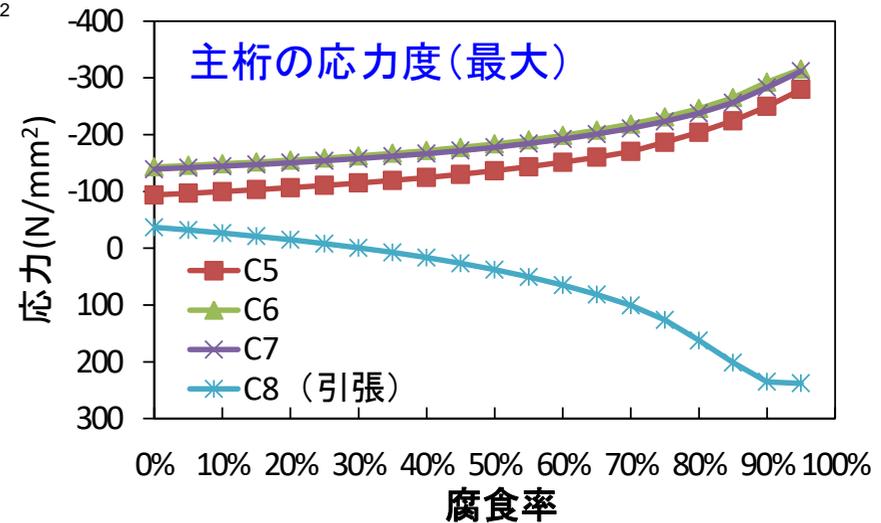
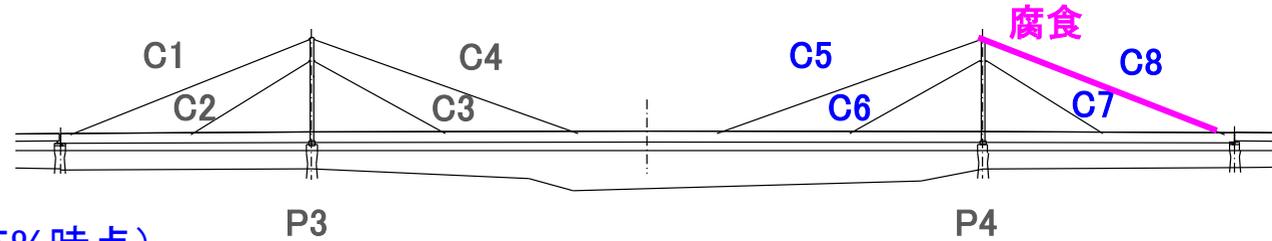
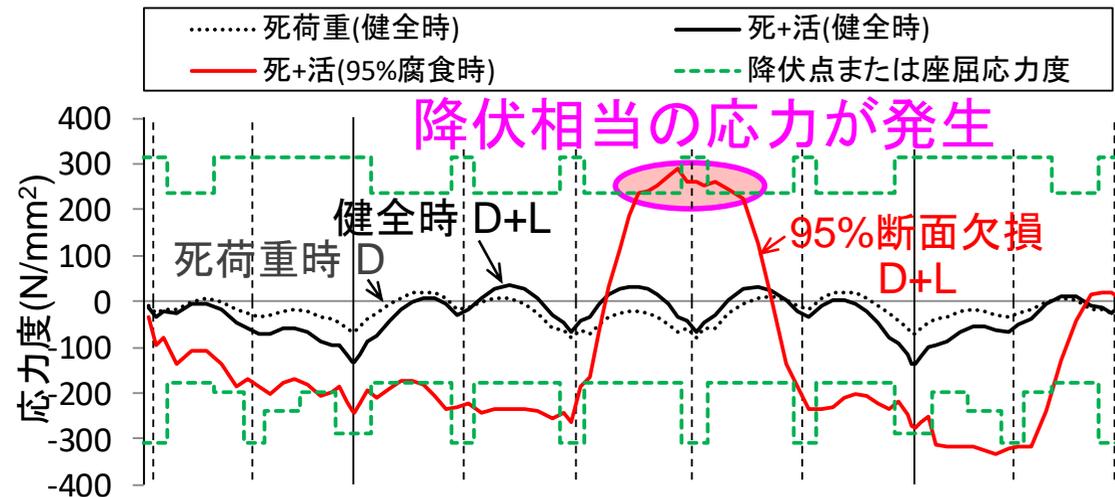
解析結果

主桁・主塔の応力状態

ミーゼス応力コンター図(断面欠損95%時点)



主桁下フランジ応力(断面欠損95%時点)

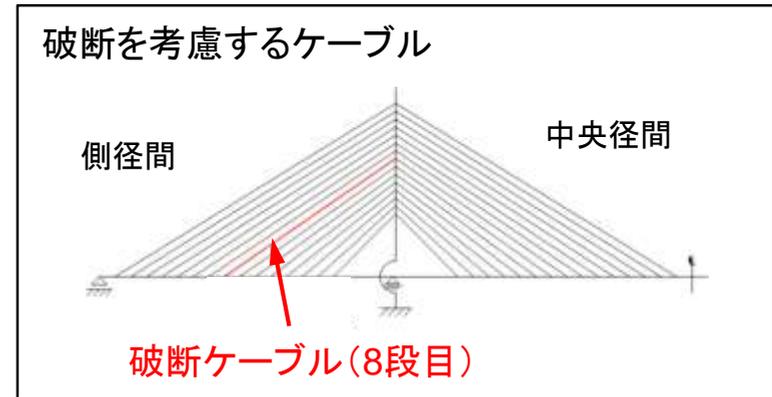
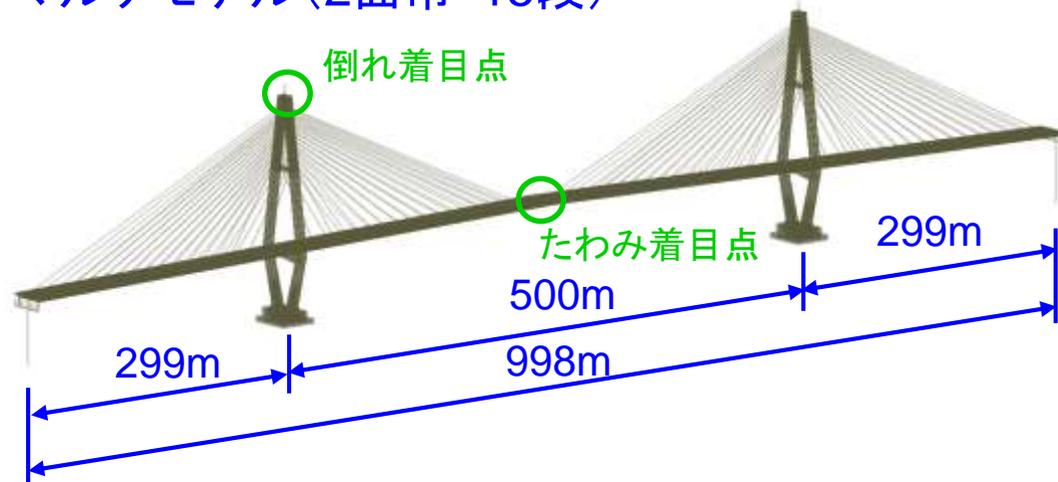


- ➔ 腐食率70%以下では応力増加は緩やか、腐食率95%程度で主桁の一部が降伏
- ➔ ただし、豊里大橋は主桁断面が比較的大きいことに注意が必要

マルチケーブル斜張橋の解析例

- 豊里大橋(小段数モデル)に比べ、ケーブル段数の多い斜張橋(マルチケーブルモデル)において**ケーブル腐食(破断)**を考慮した解析結果を示す。

マルチモデル(2面吊・15段)



死荷重および活荷重載荷時の変位量の比較

位置	健全時		1本ケーブル破断時
主桁たわみ(中央径間中央)	18cm	⇒	18cm
主塔倒れ(塔頂部)	5cm	⇒	6cm

➔ 1本ケーブルが破断しても影響は小さい

(豊里大橋では上段ケーブルが95%腐食すると主桁で100cmのたわみ)

耐荷力の観点からみた安全性の検討

耐荷力比較 死荷重+P.S.を導入した橋梁モデルに活荷重を漸増載荷

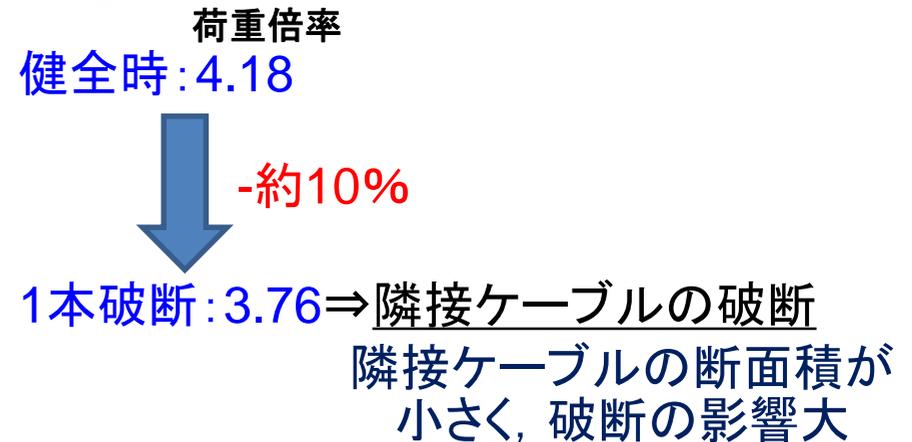
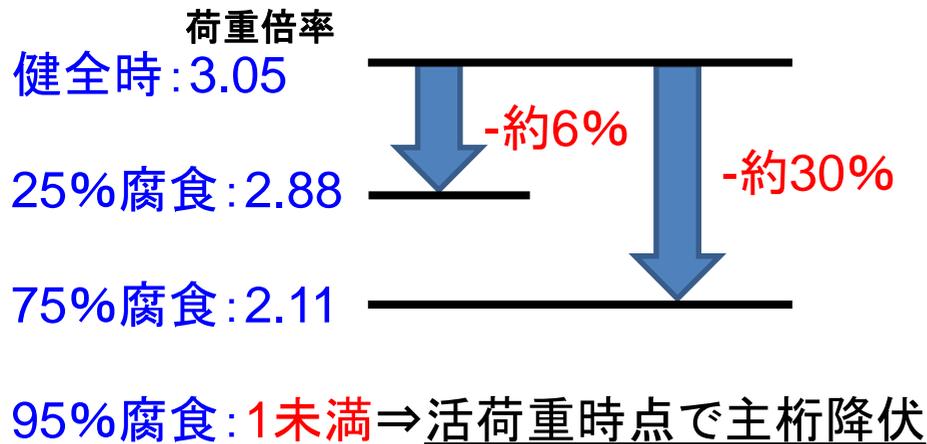
主荷重を着目ケーブルに、従荷重を橋梁全体に載荷⇒健全部材の損傷を耐荷力と定義

C8ケーブル腐食

豊里モデル(1面・2段)

最も耐荷力が低くなった
最小断面積ケーブルを腐食

マルチモデル(2面・15段)

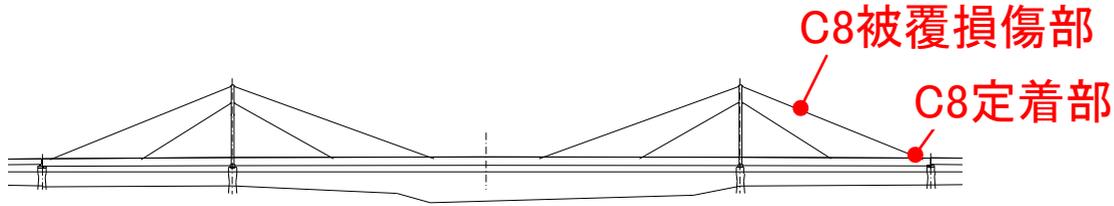


→少段数モデルの場合、ケーブル1本の破断が橋の耐荷力
に与える影響が大きい

ケーブル鋼線の破断(豊里大橋の事例)

豊里大橋の鋼線破断の状況

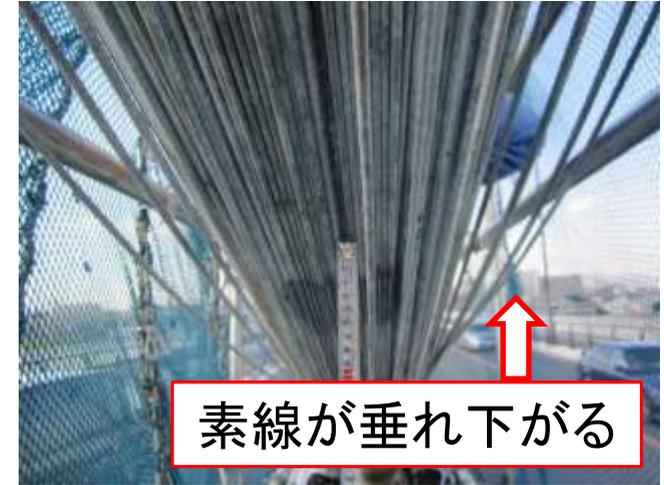
- ケーブルの部分解放調査が実施される
- 破断位置は特定できず



C8被覆損傷部



C8被覆損傷部



C8定着部

- ケーブル鋼線の破断はなぜ生じたのか？ ⇒ 疲労？ その他の要因？
- 急激に破断が進行する可能性はあるか？
- 安全性に与える影響は？

検討内容

① ケーブル鋼線の腐食が疲労強度に与える影響の調査

- 腐食により断面欠損したケーブルは、断面欠損部に応力集中を生じるため、疲労強度が低下すると考えられる
- 腐食ケーブルの疲労強度に関する研究事例を調査

② 道路橋示方書に基づくケーブルの疲労照査

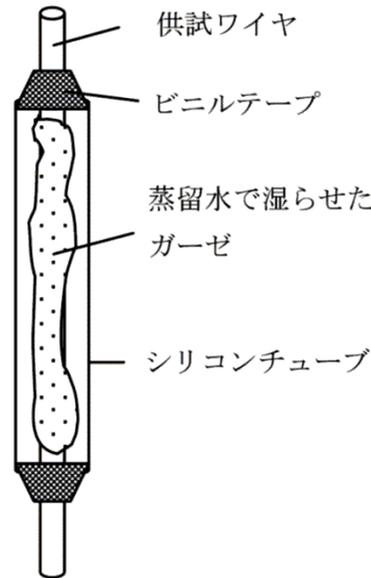
- 腐食ケーブルの疲労強度を考慮した、道路橋示方書に基づく疲労照査を実施
- 疲労によるケーブル鋼線の破断の可能性を考察

腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労強度

腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労強度の調査事例(鈴村ら)

腐食度の異なる鋼線の疲労強度を比較

- a. 新品
- b. 亜鉛めっきのみ腐食(レベル1)
- c. 地鉄の腐食が開始(レベル2)
- d. 地鉄腐食が進行(レベル3)



湿潤雰囲気における疲労試験方法

亜鉛めっき鋼線の供試材

No	腐食レベル	亜鉛めっき鋼線の外観	
		腐食外観	腐食生成物除去後
a	初期		
b	1		
c	2		
d	3		

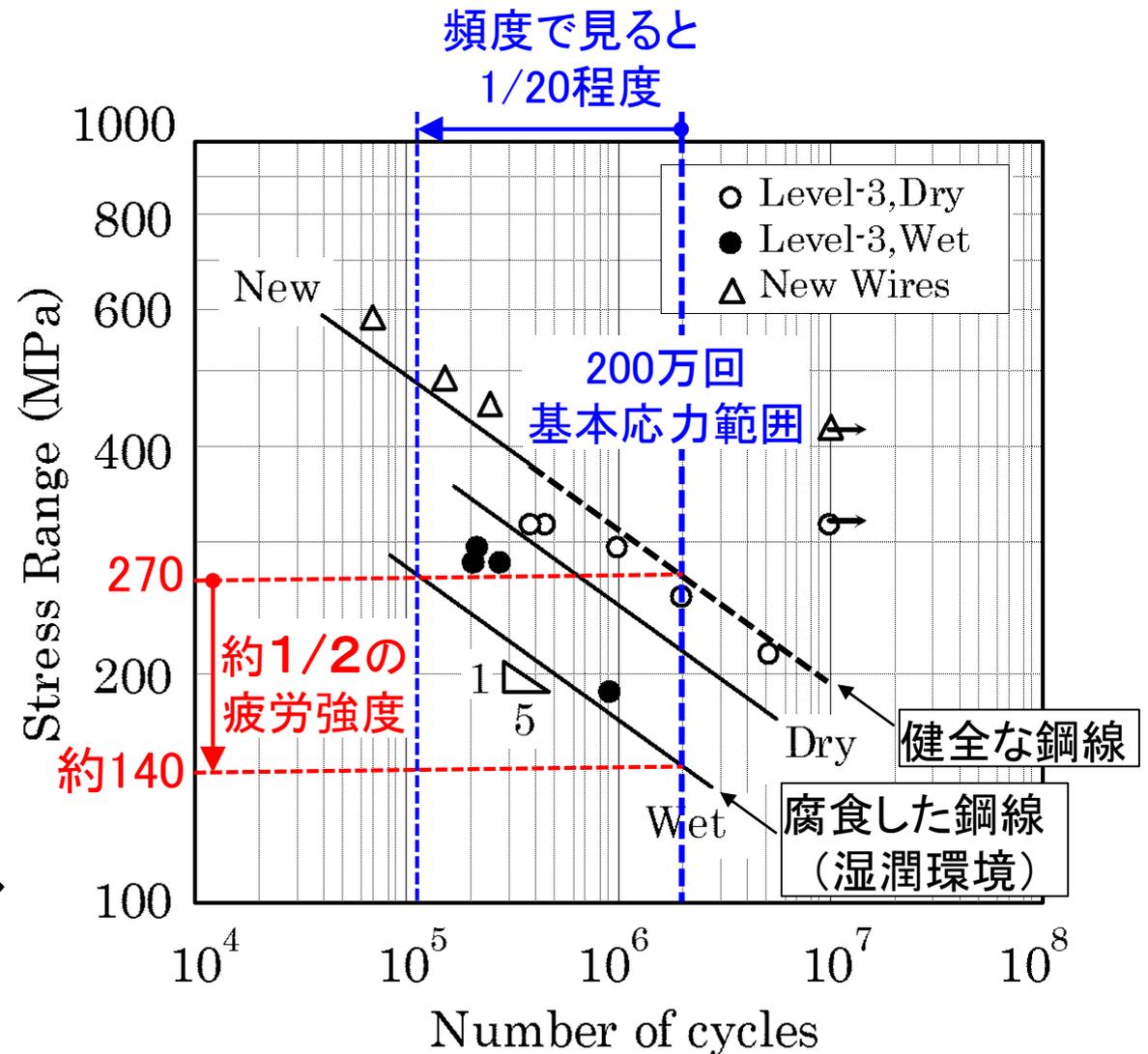
【出典】

- ① 鈴村,中村,樽井:腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労特性(土木学会論文集A Vol.62,No.3,2006.7)
- ② 岡本,中村,鈴村:橋梁用亜鉛めっき鋼線の腐食粗度計測および人工ピット付き鋼線の疲労強度(土木学会論文集A Vol.66,No.4,2010.12)

腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労強度

腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労強度の調査結果

- 腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労強度は大きく低下
- 湿潤環境では強度低下が顕著
- 速い周期(64Hz)の速度試験により調べた結果(繰返し回数500万回を24時間程度)
- 繰返し速度が小さい程、腐食する時間が長くなるため、疲労強度がさらに低下すると予想される



【出典】

① 鈴木,中村,樽井:腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労特性(土木学会論文集A Vol.62,No.3,2006.7)

② 岡本,中村,鈴木:橋梁用亜鉛めっき鋼線の腐食粗度計測および人工ピット付き鋼線の疲労強度(土木学会論文集A Vol.66,No.4,2010.12)

豊里大橋を対象としたケーブル鋼線の疲労照査

道路橋示方書に基づくケーブルの疲労照査

■ 疲労照査荷重

疲労照査荷重 = $200\text{kN} \times 3.0 \times 1.038 = 623\text{kN}$

T荷重補正係数 = 3.0 (影響線基線長33m以上)

衝撃係数 = $10 / (50 + 216) = 0.038$

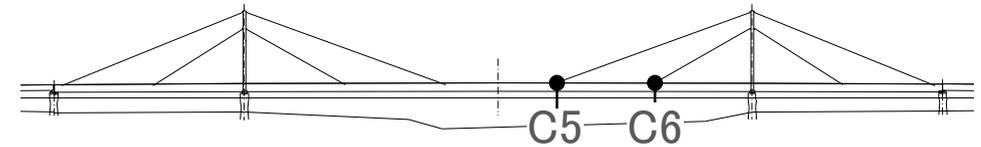
■ ケーブル本体の疲労強度

区分		2×10 ⁶ 回 基本許容 応力範囲 $\Delta\sigma_f$ (N/mm ²)	一定振幅 応力の打 切り限界 $\Delta\sigma_{ce}$ (N/mm ²)	変動振幅 応力の打 切り限界 $\Delta\sigma_{ve}$ (N/mm ²)	備考 (代表的な溶接構造)
直応力 を受ける ケーブル	K1	270	270	170	平行線ケーブル本体、平行線新定着法の定着部
	K2	200	200	126	ロープ本体、平行線垂鉛 鑄込みの定着部
	K3	150	148	68	ロープ垂鉛鑄込みの定 着部

■ ケーブル本体の疲労強度 (腐食+湿潤環境)

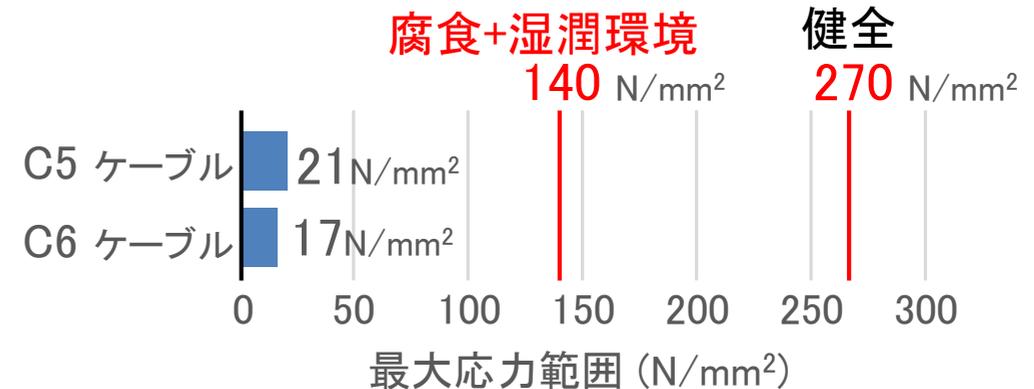
➢ 前項より、 $\Delta\sigma_{ce} = 140\text{N/mm}^2$ とする

■ 照査結果



ケーブルの疲労強度 (K1等級)

(一定振幅応力の打ち切り限界)



結論

➔ 疲労が原因でケーブルが損傷する可能性は小さい

➔ ではなぜ、鋼線は破断するのか？

検討内容

① 応力腐食割れに関する調査

- 応力腐食割れの種類とその特徴
- 応力腐食割れが原因とされるケーブル破断事例

② 突然のケーブル破断を想定した安全性の検討

- 動的増幅率に関する調査
- 動的な挙動を考慮した安全性の検討
(小段数ケーブル斜張橋)

環境脆化 (Environmental Degradation)

炭素鋼, 低合金鋼の環境脆化と応力腐食割れ

- 材料, 環境, 応力の協力効果によって生ずる金属材料の破壊, 脆化現象は, 環境脆化 (Environmental Degradation) と総称される
- 環境脆化は以下の通り分類されるが、必ずしも明確ではない

活性経路腐食 (Active Pass Corrosion, **APC**)

⇒ (狭義の) 応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, **SCC**)

水素脆性・水素脆化割れ (Hydrogen Embrittlement, **HE**)

遅れ破壊 (Delayed Fracture)

水素誘起割れ (Hydrogen Induced Cracking, **HIC**)

硫化物応力腐食割れ (Sulfide Stress Corrosion Cracking, **SSCC**)

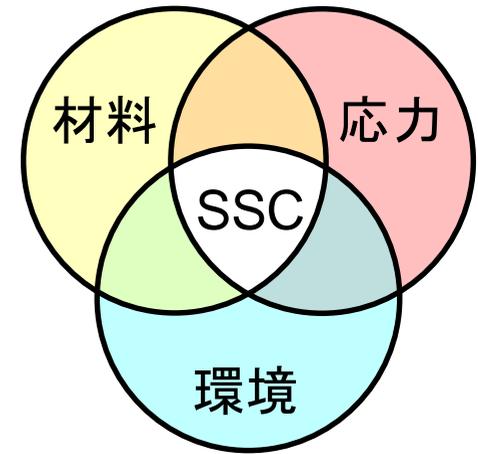
広義の
応力腐食割れ

腐食疲労 (Corrosion Fatigue)

液体金属脆化 (Liquid Metal Embrittlement)

応力腐食割れ(SSC)の特徴

- 応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking, **SCC**)は、**材料**、**環境**、**引張応力**の3因子の特異な組み合わせによって生ずる金属材料の破壊現象の一つ
- **ほとんどすべての金属材料**において生ずることが知られている
- 材料の機械的強度の観点では考えられない**低い引張応力下**によっても(例えば、炭素鋼において、数十MPa程度)破壊をもたらす
- 比較的**軽微な腐食環境**でも発生する可能性がある
- 一般の腐食と異なり、割れという形で**急速に起こる**
- 応力腐食割れの原因については、諸説があって明確ではない



応力腐食割れを支配する3要素

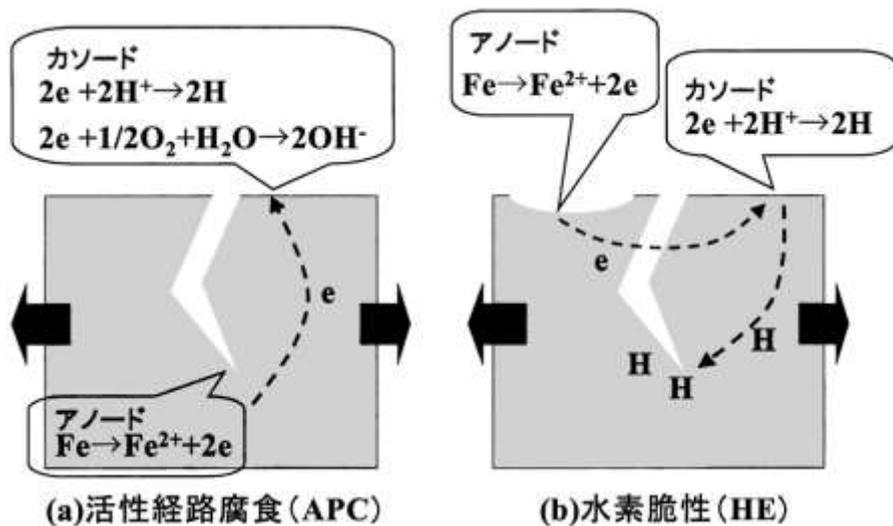
応力腐食割れ(SSC)の発生機構

活性経路腐食(APC)と水素脆性(HE)

- APC, HEともに、電気化学的な鉄の腐食反応がベースであり、アノード反応(1)と、それと等価に結ばれるカソード反応(2)から構成される



- 2つの割れ機構には強度依存性があるが、APCとHEは競合しており、材料、環境の組み合わせによって、一方が主体となる



環境	割れ機構	
屋外大気系 常温		HE
液体アンモニア系 常温	APC	HE
硫化水素系 常温	HE (HIC)	HE
COG系 60°C	APC	HE
硝酸塩系 120°C	APC	HE

500 1000 1500 2000
引張強度 MPa

応力腐食割れの2つの機構 (APC, HE) を示す模式図

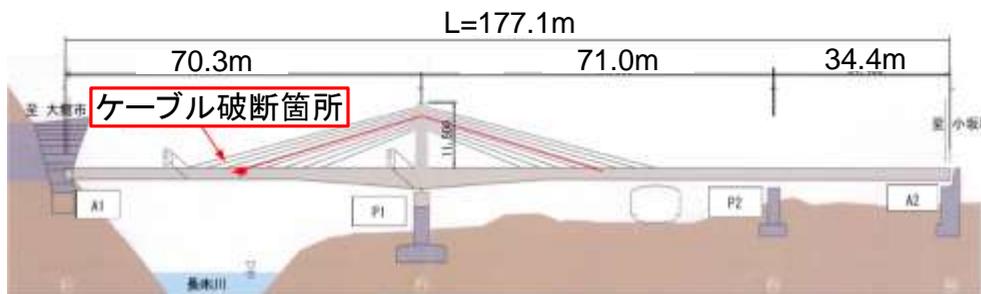
構造用鋼の割れ機構の強度依存性

応力腐食割れ(SSC)が原因とされるケーブル破断事例

ケーブルの応力腐食割れの事例

■雪沢大橋の事例

- 3径間連続エクストラドーズドPC箱桁橋(平成13年1月竣工)
- 平成23年6月6日(供用10年後)に1本のケーブルの破断を確認
- 破断の原因は、施工不良による定着部への**雨水の浸入**による応力腐食割れと推定されている



破断ケーブル



①応力腐食破断(60本) ②応力腐食破断(68本) ③しぼり破断(5本)

	凡例	形状	調査	抽出	
破面の種類	○		60	6	○
	●		68	6	●
	△		5	3	△
合計			133	15	

電子顕微鏡による破断面調査

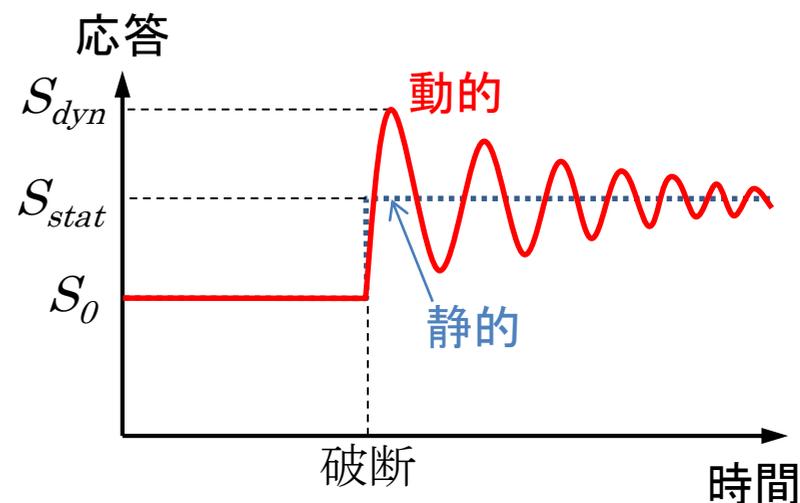
→ 応力腐食割れによるケーブル破断のリスクを考慮する必要がある

動的応答を考慮したケーブル破断時の挙動

動的増幅率

$$\text{動的増幅率 } DAF = \frac{S_{dyn} - S_0}{S_{stat} - S_0}$$

ここに、
 S_{dyn} : 動的解析の最大応答値
 S_{stat} : 静的解析の応答値
 S_0 : 初期値



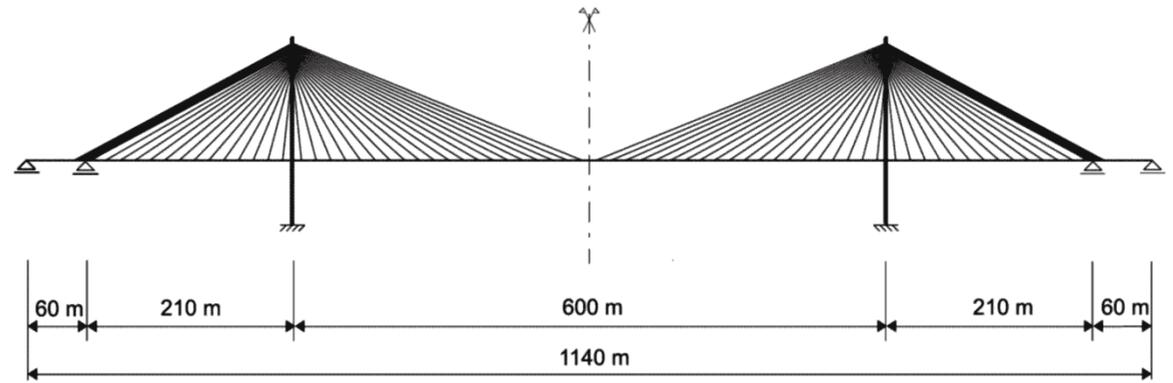
ケーブル破断に関する照査式と動的増幅率 (DAF)

Design guideline	Load combinations	DAF
PTI (2012)	1.1Dc + 1.35Dw + 0.75(LL+IM) + 1.1{cable loss dynamic forces}	Static analysis : DAF = 2.0
	Dc : Dead Load (components and attachment) Dw : Dead Load (wearing surface and utility) LL : Live Load IM : Dynamic Load Allowance	Dynamic analysis (Nonlinear) : DAF ≥ 1.5
SETRA (2002)	0.75TS + 0.4UDL	Instant rupture : DAF = 2.0
	TS : Tandem System UDL : Uniformly Distributed Load	Progressive rupture : 1.5 ≤ DAF ≤ 2.0

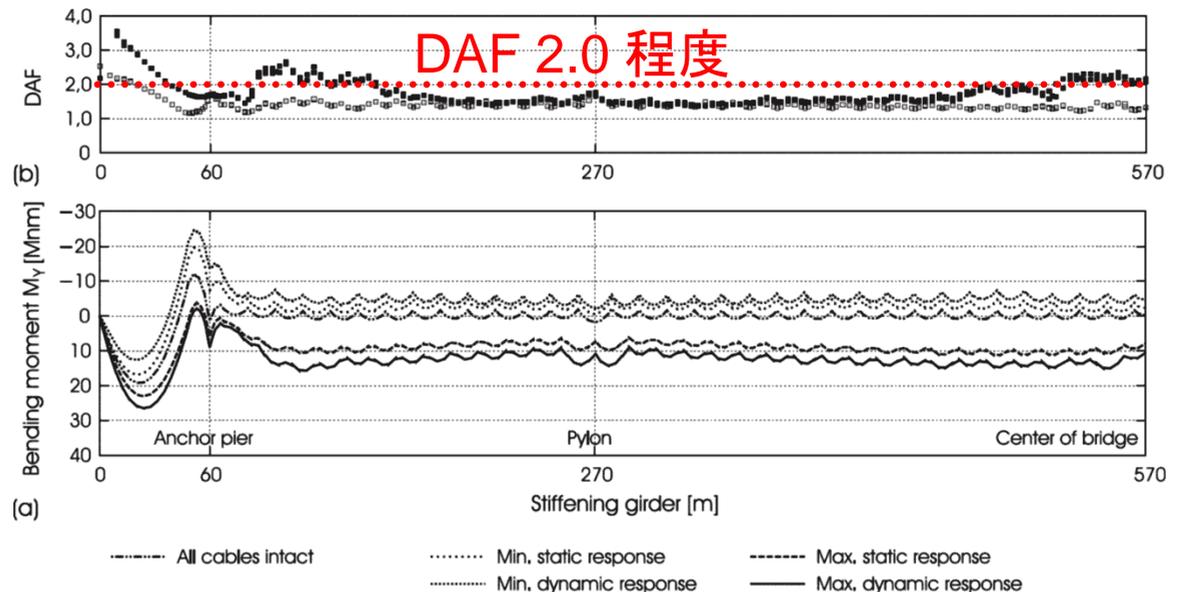
動的応答を考慮したケーブル破断時の挙動

動的増幅率の検討事例

- 主径間長600mのマルチケーブル斜張橋を対象
- 静的な断面力の小さい部材（設計に支配的でない）の動的増幅率DAFが大きくなる傾向がある
- 設計に支配的となる断面力の動的増幅率DAFは概ね2.0程度



検討対象橋梁

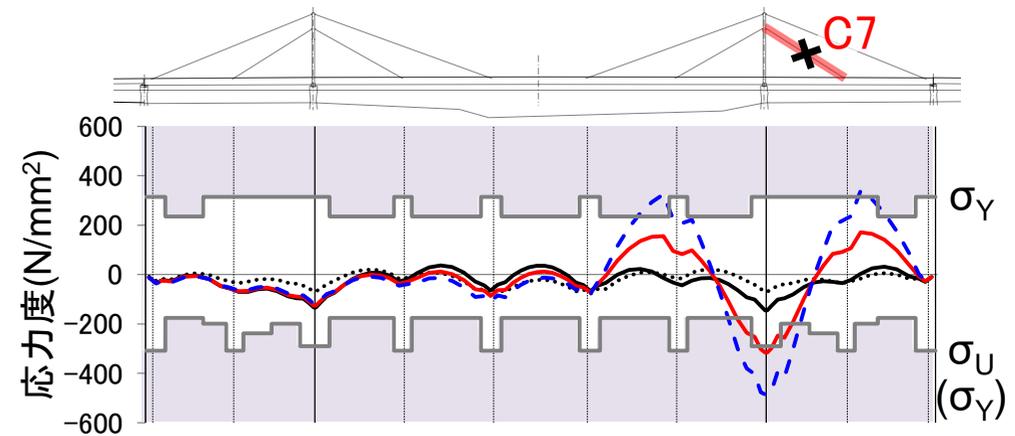
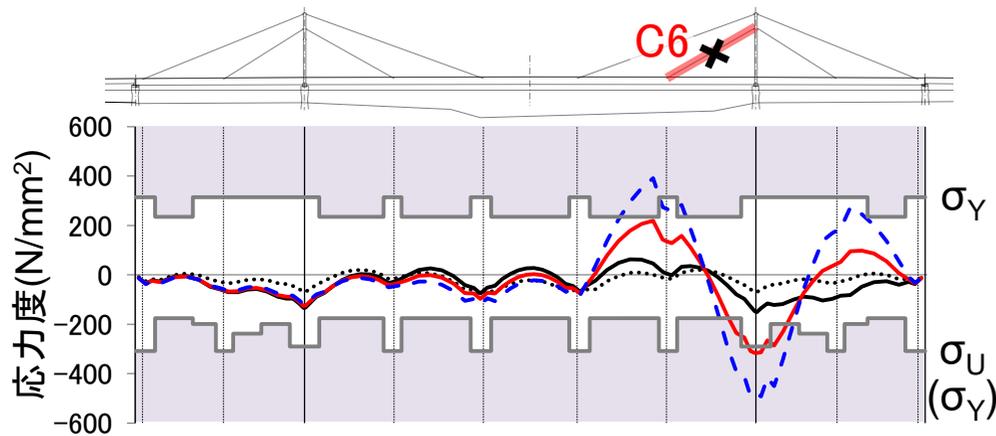
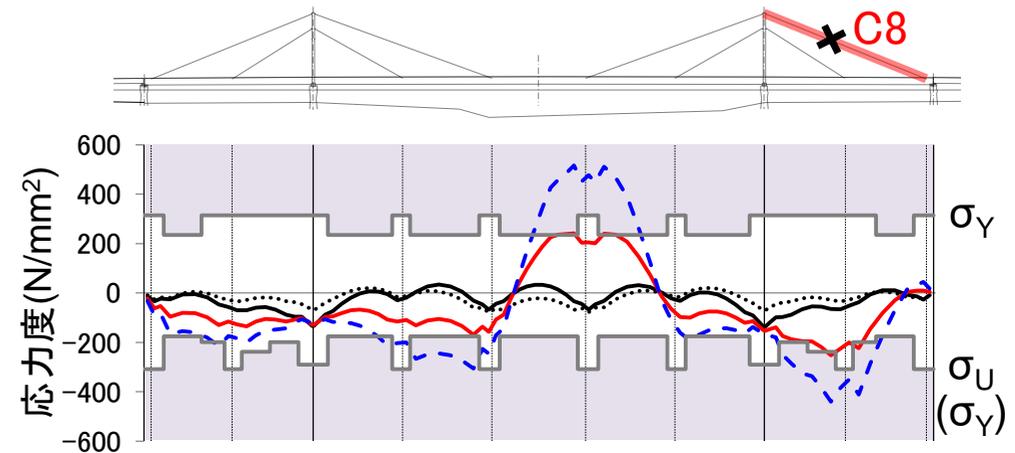
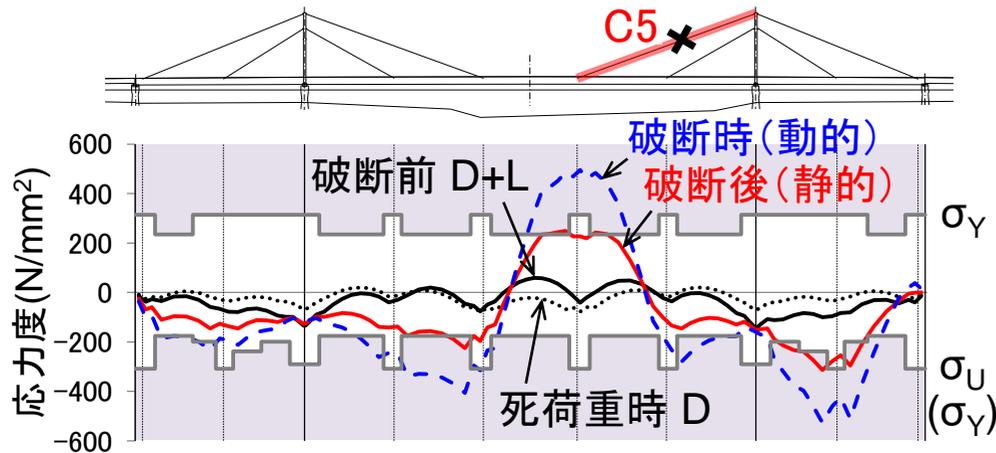


主桁の曲げモーメントに関する動的増幅率

動的応答を考慮したケーブル破断時の挙動

小段数ケーブル斜張橋(豊里大橋)に対する動的増幅率を考慮した検討

➤ 動的増幅率2.0を考慮して、主桁下フランジの応力度を整理



➔ 動的な影響を考慮すると降伏点(座屈耐力)を大きく超える可能性が高い

① ケーブル断面欠損による影響検討

- 豊里大橋を対象とした解析により、ケーブルの断面欠損の影響を調査し、斜張橋の挙動を定量的に評価した
- 断面欠損により**ケーブル鋼線が降伏するまで**(腐食率70%程度まで)は、斜張橋の各部材に与える影響は**限定的**である
- ケーブルが降伏するまでは変形量が小さく、モニタリング等による**変状の予知は難しい**
- **ケーブル破断の寸前**になると、小段数ケーブル斜張橋では、**主桁の一部が降伏**するなど、**広範囲の部材が損傷**する事態になると予想される
- 一方、**マルチケーブル斜張橋**では、ケーブル1本の破断が他部材に与える**影響は小さい**
- 耐荷力の観点から見ても、小段数ケーブル斜張橋とマルチケーブル斜張橋では、ケーブル1本の破断による影響に大きな差がある
- 以上より、**小段数ケーブル斜張橋**では、**ケーブル1本の破断が橋に致命的な影響**を与える可能性があり、これを踏まえた維持管理が必要となる。

② 斜張橋ケーブル鋼線の破断の原因

- 疲労の可能性は低く、**応力腐食割れ等の環境脆化**の可能性がある
- 応力腐食割れを生じると、**急激に破断に至る**ことが危惧される

③ ケーブル破断時の安全性

- ケーブルが突然に破断した場合、小段数ケーブル斜張橋では、動的な作用を考慮すると**構造物に深刻な影響を与える**可能性がある
- **マルチケーブル斜張橋**では、ケーブルが数本破断した程度では、**深刻な状態にはならない**と考えられる

④ 本検討結果を踏まえた維持管理に対する提案

- ケーブル破断による影響が深刻となり得る**小段数ケーブル斜張橋**では、突然にケーブル破断に至る可能性のある「**応力腐食割れ**」を避けることが重要と考えられる
- 現時点で、応力腐食割れの発生条件は明確でないが、**雨水の侵入を防ぎ、長期に渡り滞水する状況を避ける**ことが特に重要になってくると思われる

4. 維持管理手法に関する現状調査とあり方

1. 維持管理に関する技術調査

- (1)点検手法(要領、アプローチ手法)
- (2)損傷事例・補修事例
- (3)製品調査

2. 維持管理手法の検討と提案

- (1)重点点検箇所(ケーブル種別毎)
- (2)調査・点検手法(非破壊検査手法・張力測定)
- (3)補修対策(張替え判断、補修事例)

3. まとめ

1. 維持管理に関する技術調査

【①点検手法(点検要領)】

(道路会社 A)

判定基準

		点検頻度	1回/年
		点検手段	足場又は点検車
		点検内容	目視、たたき、触手、簡単な計器
		点検項目	
定期点検	概略点検	主ケーブル	ケーブル本体被覆 被覆の異常、傷みの有無 水ダレ、鳥ツ害の有無
		ケーブルカバー 防水カバー	カバーの異常、傷みの有無 ゴミ、鳥ツ害の有無 塗膜の異常の有無
		制振装置	ボルトの緩み、塔側減衰ゴムの不具合、ダンパー油漏れ

		点検頻度	供用開始後 1,3,5 年目とその後 5 年毎に一回
		点検手段	足場等
		点検内容	計器による高度な測定
定期点検	詳細点検	点検項目	温度測定 縦断線形の測定 主塔の倒れ量の測定 ケーブル張力の測定 ケーブル制振装置の点検 ケーブルソケットの抜け出し量

(政令指定市 A)

判定基準

		点検頻度	1回/5年
		点検手段	足場又は 点検車
詳細点検 詳細調査	点検内容	詳細点検	近接目視によって定期的に状態を詳細に点検し、損傷の有無を確認する点検。
		詳細調査	重要な損傷に対してより詳細な情報を収集するために実施する調査
		点検箇所 (ケーブル関係)	
	詳細調査 (ケーブル)	腐食調査	目視、非破壊検査、開放調査(錆・腐食)等
		張力調査	張力変化

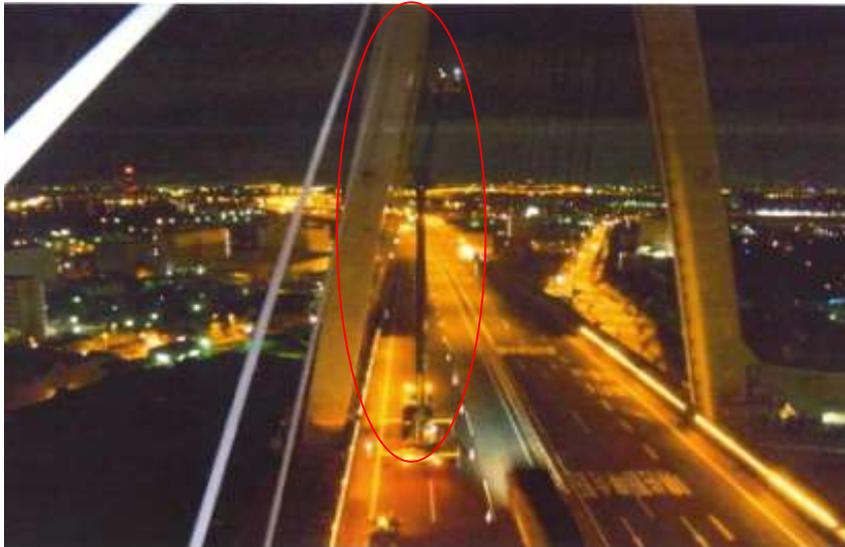
損傷区分	評価基準
A	・変状なし
B	・点錆がある。
C	・表面錆のある素線が全体の30%未満
D	・表面錆のある素線が全体の30%以上
E	・破断している素線がある。 ・断面欠損量が素線断面積の5%以上

1. 維持管理に関する技術調査

【①点検手法(アプローチ)】

(高所作業車)

H=40m程度までは高所作業車によるアプローチが一般的である。損傷の記録や損傷した箇所の応急補修も可能である。



(特殊高所技術、ロープアクセス)

高所作業車、点検ロボット等によりアプローチが不可能な場所に適している。



1. 維持管理に関する技術調査

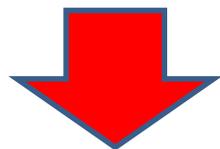
(ロボットによる点検)

課題とは？

高所作業車 ⇒規制作業(お客様サービス低下、安全確保) ⇒×

特殊高所技術(ロープアクセス)

⇒安全確保のための規制、固定点設置準備等 ⇒×



課題解決の為

ロボットを開発

1) ケーブル点検ロボット

⇒ 阪神高速技術(株)保有

2) 自走式斜材点検装置

⇒ 中日本高速道路(株)保有

3) コロコロチェッカー

⇒ 西松建設(株)保有

1. 維持管理に関する技術調査

(開発・使用されたロボット事例)

名称	自走式斜材点検装置	ケーブル点検ロボット	コロコロチェッカー
制作者	中日本高速道路(株)	阪神高速技術(株)	西松建設(株)
計測項目	外観画像、過流探傷	外観画像	外観画像
写真			
諸元等	<p>調査可能斜材直径:100~200mm 調査可能斜材角度:65度以下 調査可能斜材長:200m以下 隣接斜材上下距離:173mm 装置外観寸法:0.7×0.6×1.2m 点検装置本体重量:26.0kg 制御箱重量:22.0kg 過流探傷センサ部重量:7.2kg 走行速度:7.0~10.0m/分 ビデオ画素数:200万画素 電源:リチウムイオン電池24V</p>	<p>本体寸法:555×650×650mm 装置重量:59.0kg 走行速度:0.1,0.3,0.5m/s 対応ケーブル径:160,180,200mm 対応ケーブル傾斜角:20~50度 操作方式:無線操作 撮影カメラ性能:検査用カメラ6機(フルハイビジョン) 回転防止:姿勢回復機能搭載 自動走行、自動記録・保存 夜間調査:可能(エッジライト型LED)</p>	<p>本体寸法(重量):500×500×500mm(30kg) 走行方式:モータ駆動による自走式(バッテリー搭載) 走行速度:5mm/min(傾斜角40°時) 斜材保護管対応角度:最大傾斜角65度 斜材保護管対応径:直径90~230mm 撮影カメラ性能:フルハイビジョン 連続運転時間:2時間以上 自動走行 夜間調査:可能(エッジライト型LED)</p>
その他		ケーブル損傷自動検知機能	ケーブル損傷自動検知機能
引用先	コンクリート工学 Vol 55.No.8 2017.8		構造物ジャーナル

1. 維持管理に関する技術調査

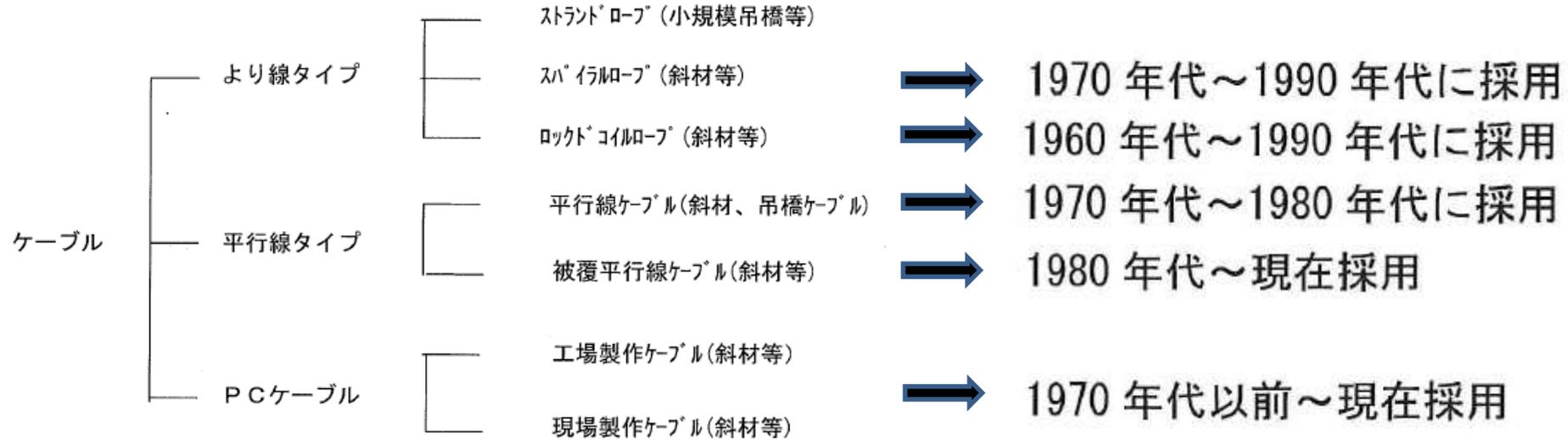
【②損傷事例・補修事例】

ケーブル破断、錆(ケーブル本体、定着部)、グラウト注入孔割れ(脱落)
PE管(割れ・傷)、ゴムカバー・チューブ損傷、コーキング劣化等

橋名	橋梁形式	損傷原因	損傷内容	補修内容
浜田マリノ大橋	斜張橋	クレーン船が衝突	被覆(2本)が損傷(L=0.9m)	PE管で補修
名港西大橋	〃	落雷	被覆が損傷	〃
南本牧大橋	〃	トラクタ接触	被覆が損傷	PE管等で補修
六甲大橋	〃	振動、劣化等	連結部等から油漏れ(ペトロラム)	防食テープ巻等
Rion-Anterion 橋	〃	落雷	最上段ケーブルが破断	張替え
Fred Hartman Br	〃	レインバウブレーション	定着カバーが損傷	カバーの再溶接とダンパー設置
Binh 橋	〃	船舶3隻衝突	PE被覆破損(その後、錆等発生)	張替え
雪沢大橋	エクストラードスト橋	融雪材を含んだ雨水	ケーブル1本破断	張替え

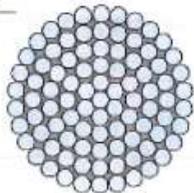
1. 維持管理手法の調査

【③製品調査】



スパイラルロープ

構成
 1×19
 1×37
 1×61
 1×91
 1×127
 1×169
 1×217

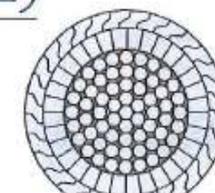


1×91

- 特徴**
- 同一素線を各層毎にかぶせていく
 - ストラットロープの1ストランドがロープとなったもの
 - 曲げ剛性が高い
 - 平行線ケーブルを除くと同一ロープ径で最も高強度
 - 1×37まではシングルロック加工が可能
 - 弾性係数: 16,000kgf/mm²以上
- 主用途**
- 吊橋メインケーブル ●斜張橋斜材ケーブル
 - ニールセン橋斜材ケーブル

ロックドコイルロープ

構成
 C形
 D形
 E形
 F形

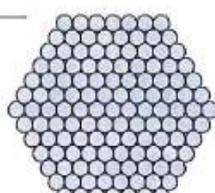


C形

- 特徴**
- 外層に異形線(T線、Z線)を使用
 - 曲げ剛性が高い
 - ロープ単体の耐腐食性に優れている
 - 素線充填率が高い
 - 端末加工はソケット加工に限定される
 - 弾性係数: 16,000kgf/mm²以上
- 主用途**
- 吊橋メインケーブル ●斜張橋斜材ケーブル
 - ニールセン橋斜材ケーブル

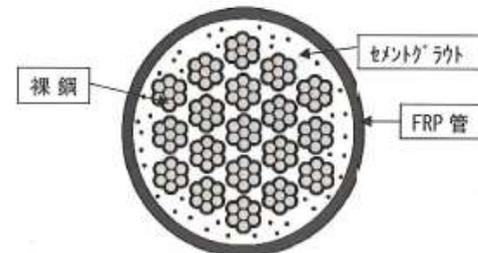
PWS

構成
 PWS-19
 PWS-37
 PWS-61
 PWS-91
 PWS-127



PWS-127

- 特徴**
- 素線をより合わせず平行に束ねる
 - 素線強度を100%生かせる
 - 六角形を基本とした断面形状
 - 現場にてケーブルをさらに束ね合わせる
 - 巻き取り時、形崩れを起こすことがある
 - 弾性係数: 20,000kgf/mm²以上
- 主用途**
- 長大吊橋メインケーブル



2. 維持管理手法の検討と提案

(1) 重点点検箇所

【スパイラルロープの場合】

- ① 亜鉛めっきの白錆化やめっき消耗による錆汁の発生などを入念に点検する。
- ② 塗装や被覆が為されている場合は、塗膜・被覆の劣化や損傷の確認は重要である。
- ③ 錆・腐食がある場合は、「全磁束法」等による非破壊検査の実施が有効である。

【ロックコイルロープの場合】

- ① 最外層のT線・Z線による水密性が高い。亜鉛めっきの白錆化やめっき消耗による錆汁の発生などを入念に点検する。
- ② 塗装や防食テープ巻きがされている場合は、塗装やテープの劣化、損傷を入念に点検する
- ③ 保護管で被覆されている場合は、保護管の損傷や必要に応じて被覆内の鋼線の状態を確認するのも重要である。
- ④ 鋼線に錆・腐食が発生している場合は、「全磁束法」等による非破壊検査の実施が有効である。
- ⑤ 桁側定着部ソケット前面における漏水や錆汁の流出の確認は特に重要である。

2. 維持管理手法の検討と提案

【PWSの場合】

- ①亜鉛めっき鋼線とFRP管との2重防食が為されている。
- ②FRP管の損傷や必要に応じて鋼線の状態を確認する。非破壊検査も重要。
- ③塔側はサドル構造部の鋼線の発錆・腐食状況の確認、桁側定着部はソケット前面あるいは周囲の漏水や発錆の確認する。

【NEW-PWS、SPWC-FR、CM(ロングラウト)の場合】

- ①ソケット付けされていることから、ソケット前面間のPE被覆の変状を確認する。
- ②桁側定着部ソケット前面における漏水や錆汁の流出の確認する。
- ③PE管の損傷の有無、振動対策のためのディンプルや平行突起、Uストラップ等の変状を確認する。
- ④ケーブル内部の変状を確認する場合は、「全磁束法」や「渦流探傷法」等による非破壊検査の実施が有効である。

2. 維持管理手法の検討と提案

【NEW-PWS、SPWC-FR、CM(グラウト)の場合】

- ①ソケット付けされていることから、ソケット前面間のPE被覆の変状を確認する。
- ②現場施工のグラウト用孔からの錆汁流出、ブーツ等の水密性の確認する。
- ③桁側定着部ソケット前面における漏水や錆汁の流出を確認する。
- ④ケーブル内部の変状を確認する場合は、「全磁束法」や「渦流探傷法」等による非破壊検査の実施が有効である。

【PC鋼より線の場合】

- ①外套管の損傷や桁側・塔側のブーツ部等の変状を確認する。
- ②近年、3重防食ケーブルも採用されている。しかし、現場収束タイプのケーブルでは外套管が不連続となる塔側・桁側のブーツ付近からの雨水の浸入とそれに伴う損傷の確認が特に重要である。
- ③セミプレファブケーブルの場合、防食の不連続部でかつ現場施工部からの塩分の混じった水分の浸入が鋼線の腐食や破断を招いている。こういう不連続部でかつ現場施工部は特に入念に点検する必要がある。

(2)調査・点検手法

【①張力測定】

1)張力測定の目的

定期的に張力測定をすることで橋梁全体系あるいは部材毎の何らかの変状(基礎・主塔・主桁・ケーブル)をキャッチ出来る可能性がある。

2)張力測定方法

- ・対象となるケーブルに加速度センサーを設置する。
- ・人力による強制加振もしくは自然風や大型車両等による常時微動により直接ケーブルの振動特性(固有振動数)を計測する。
- ・この固有振動数とケーブル張力との関係は弦理論で算定できるため、固有振動数を測定し張力を算出する。

2. 維持管理手法の検討と提案

3) 評価方法

○ 振動法によるケーブル張力の实用算定式

計測された振動波形から固有値解析を行い、1次又は2次モードの振動周波数を算定する。算定された振動周波数を、例えば、以下の式に代入し張力を求める。

表-2 振動法によるケーブル張力算定式

Γ	張力算定式
2次モード推奨 (サグの大きい場合) $\Gamma < 3$	逆対称1次振動により張力計測を行う。 $T = \frac{w}{g} (f_2 D)^2 \left\{ 1.02 - 6.26 \frac{C}{f_2} \right\} \quad (\varepsilon \geq 10)$
1次モード推奨 (サグの小さい場合) $\Gamma \geq 3$	対称1次振動により張力計測を行う。 $T = \frac{4w}{g} (f_1 D)^2 \left\{ 0.857 - 10.89 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (3 \leq \varepsilon \leq 17)$ $T = \frac{4w}{g} (f_1 D)^2 \left\{ 1 - 2.2 \frac{C}{f_1} - 2 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (17 \leq \varepsilon)$ ただし、 $\varepsilon > 100$ の場合、 $T = \frac{4w}{g} (f_1 D)^2$ による可

f_1, f_2 : 計測した1次, 2次の固有振動数

$$C = \sqrt{\frac{Eg}{wl^3}}, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{T}{EI}} \cdot l$$

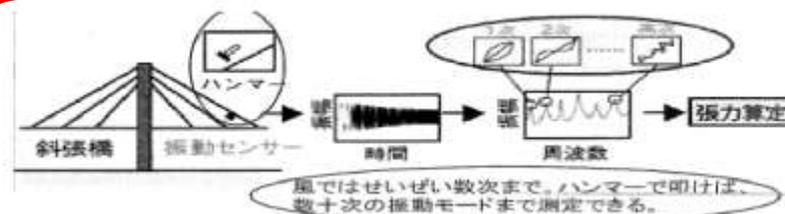
$$\Gamma = \sqrt{\frac{wl}{128 EA (\delta)^3 \cos^2 \theta} \left(\frac{0.31 \varepsilon + 0.5}{0.31 \varepsilon - 0.5} \right)}$$

新家・広中・頭井・西村: 振動法によるケーブル張力の实用算定式、土木学会論文報告集第284号、1980年2月、pp.25-32

2. 維持管理手法の検討と提案

○新たな手法

- ・実用算定式では、低次(1次もしくは2次)の固有振動数を使用し、ケーブルの曲げ剛性(EI)を事前測定する、必要がある。
- ・低次の固有振動数は主塔や主桁のノイズにより波形ピークが潰れることがあること、ケーブルの曲げ剛性(EI)が張力(T)に依存すること、が課題となる。
- ・現在、「曲げ剛性の事前測定」を省略し、曲げ剛性の分からない既設橋梁にも適用可能な測定器が開発され、低次モードから高次モードまでの固有振動数を用いてケーブル張力とケーブルの曲げ剛性を同時に算出できる手法が確立され利用が進んでいる。



$$f_i^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} i^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} i^2$$

f_i : モード次数*i*に対応する固有振動数
 ρ : 密度
 A : 断面積
 L : 長さ
 EI : 曲げ剛性
 T : 張力

※係数同定により曲げ剛性「EI」「T」を同時に決定可能。

2. 維持管理手法の検討と提案

【②健全度評価手法】(全磁束法)

- 1) 斜張橋のケーブルは、鋼線の集合体であり「**強磁性体**」である。近年、各種のケーブルが採用されているが被覆層が鋼材等の磁性体でなければ測定は可能である。
- 2) スパイラルロープ及びロックドコイルロープは防食テープや塗装、NEW-PWS及びSPWC-FR,CM等の工場収束型ケーブルはPE被覆、現場収束型はFRP管やPE管が外套管として使用されており測定が可能である。

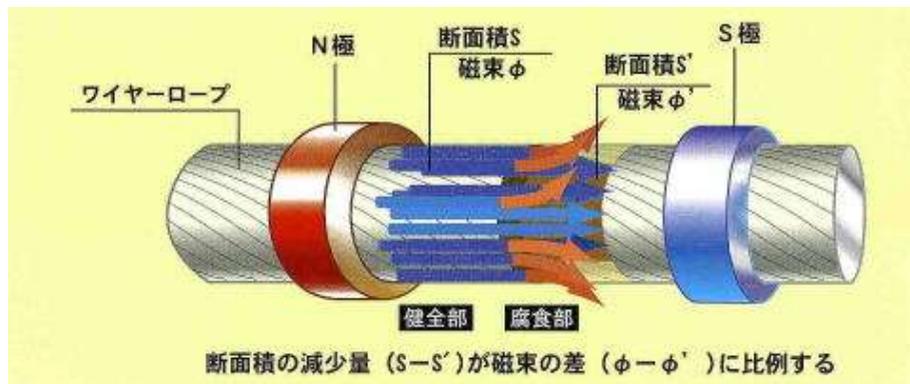
3) 検査実績

- ・ロックドコイルロープ(永歳橋、でんでん大橋)
- ・PWS(大和橋)
- ・NEW-PWS(インチョン大橋)
- ・SPWC-FR(ルーリング橋、新湊大橋、天保山大橋、川崎橋)
- ・SEEE(F500PH)(雪沢大橋)
- ・フレシネHシステム(ツインハーブ橋)

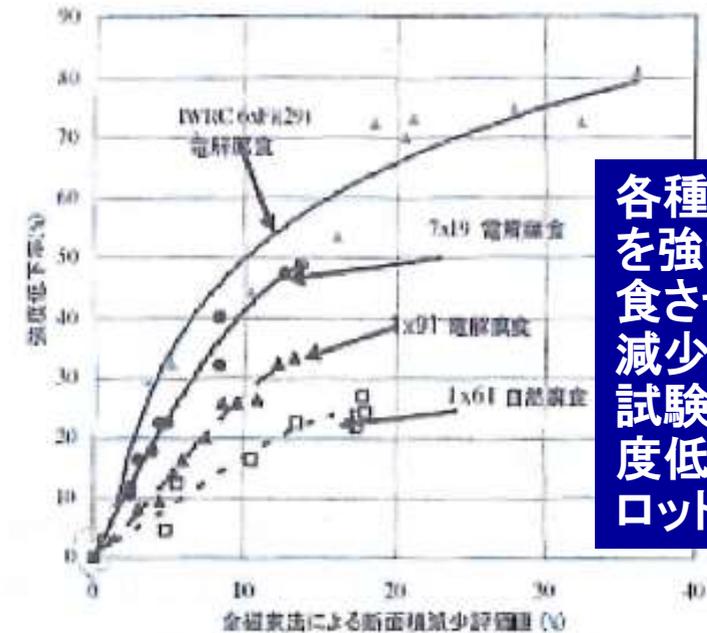


2. 維持管理手法の検討と提案

全磁束法の理論

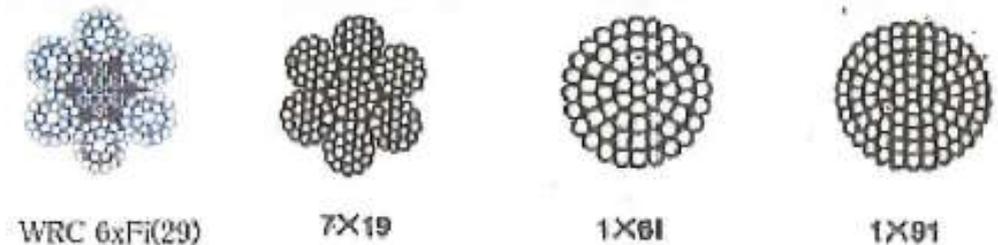


- ・ケーブルを磁化する。
- ・磁束密度と断面積が比例
- ・磁束密度の変化がケーブル断面積の変化
- ・磁束密度の変化 = 断面減少率
- ・右の図にプロット
- ・強度低下率の算出



各種のロープを強制的に腐食させ、断面減少率と引張試験による強度低下率をプロット

図8: 断面積減少と強度低下率の関係

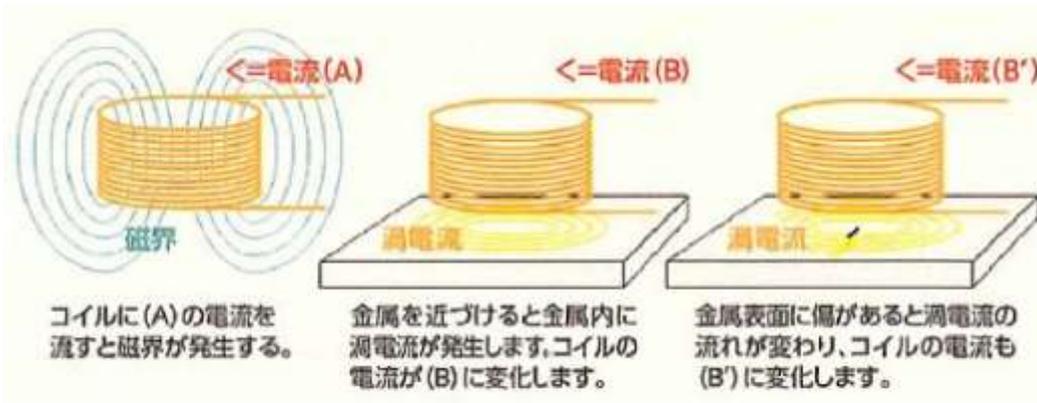


断面減少率と強度低下率

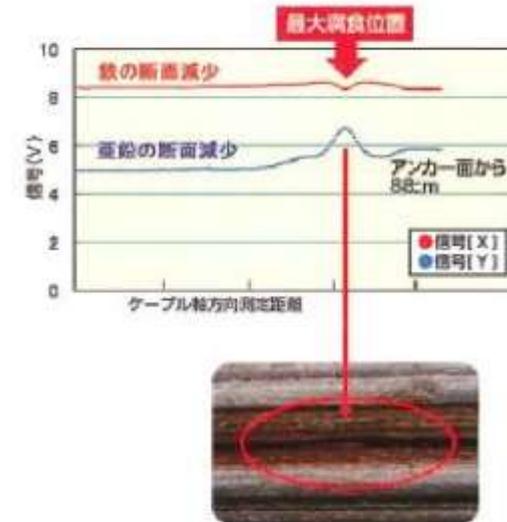
2. 維持管理手法の検討と提案

【②健全度評価手法】(過流探傷法)

- 1) 斜張橋のケーブルは鋼線の集合体であり「強磁性体」である。近年、各種のケーブルが採用されているが被覆層が鋼材等の磁性体でなければ測定は可能である。
- 2) スパイラルロープ及びロックコイルロープは防食テープや塗装、NEW-PWS及びSPWC-FR, CM等の工場収束型ケーブルはPE被覆、現場収束型はFRP管やPE管が外套管として使用されており測定が可能である。



渦流探傷法測定理論



(3)補修対策

【①張替え判断や仮設ケーブル】

1) 錆、腐食等の状態(深さ、範囲、分布)を調査

FRP管やPE管等の被覆を撤去して錆・腐食の状況を調査する。

2) 劣化度評価

- ・「全磁束法」や「渦流探傷法」でケーブルの健全性を評価する。
- ・表面・内面の損傷評価では一般的に「全磁束法」が採用されている。
- ・全磁束法によりケーブルの腐食等による耐力低下を定量的に評価する。
- ・表面傷・腐食等による疲労強度の低下や耐力低下を総合的に評価する。

3) 張力測定

ケーブルの腐食による断面欠損、剛性低下により張力の再配分が発生している可能性がある。このため、張力測定も重要となる。

2. 維持管理手法の検討と提案

4) 構造検討の実施

- ・1)～3)までを実施後、ケーブル剛性(EA)を評価した解析モデルにより全体解析を実施する。また、張替え時のケーブル撤去の可能性も検討しておく必要がある。
- ・マルチケーブルの斜張橋では張替えを考慮して何本かは抜ける設計にしている事例が多い。少数ケーブルでは仮設ケーブルに頼るしかない場合がある。

5) 評価の実施

- ・ケーブルの劣化が他のケーブル、主塔、主桁へ与える影響について再評価を行う。主塔、主桁に補修・補強が必要で、かつケーブルにもより以上の防食が必要であれば「張替え」というのも判断の一つとなる。
- ・鋼斜張橋では、ケーブルの安全率(設計荷重作用時)は2.5。
鋼斜張橋のケーブルの安全率は少なくとも2.0はキープしておきたい。

2. 維持管理手法の検討と提案

【仮設ケーブル】

前記、1)～5)を検討し張替え判断が出された場合、仮設ケーブルの採用となる。

1) 仮設ケーブルの検討

- ・マルチケーブル斜張橋では、上段ケーブルの1～2本が欠損しても設計上はOKとなっているケースが多い。これは、将来のケーブル張替えを想定しているからである。
- ・これは、張替え用の代替ケーブルの施工が大掛かりであること、主桁を借受せずにケーブルの張替えを可能にするためである。
- ・しかし、少数ケーブル斜張橋(例えば、豊里大橋)では、仮設ケーブルの設置や主桁の仮支持等の構造検討が必要となる。

2) 検討重要点

特に重要となるのが死荷重(ケーブル、主桁、主塔、舗装等の橋面工)の変化(拡幅、設備追加)や活荷重の変化である。既存の主塔、主桁、ケーブルの許容値の範囲で可能な設計・施工法を検討する必要がある。

2. 維持管理手法の検討と提案

【②補修工法】(被覆等の補修)

1) 防食テープによる補修

●ニトハルマック

- ・特殊配合乾性油を主成分としたコンパウンドをプラスチック系不織布に含浸させたもので、酸化重合により表面に皮膜を形成し、優れた防食性と耐候性を有する。
- ・柔軟性に富んでおり貼って撫で付けるだけでどんな形状にもピッタリ密着する。
- ・補助材料である下塗り材、充填材、上塗り材との併用が一層防食効果を高める。

●ペトロラタムテープ

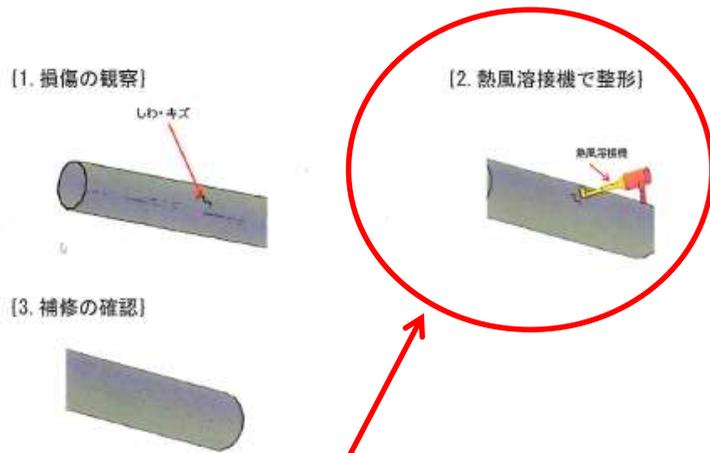
- ・このペトロラタム(不活性石油系ワックス)を主成分とするコンパウンドを不織布に含浸させてテープ状にしたものである。
- ・柔軟性に富んでおり貼って撫で付けるだけでどんな形状にもピッタリ密着する。
補助材はニトハルマックと同様である。

3. 維持管理手法の検討と提案

【補修工法】(PE管の小さな傷の補修)

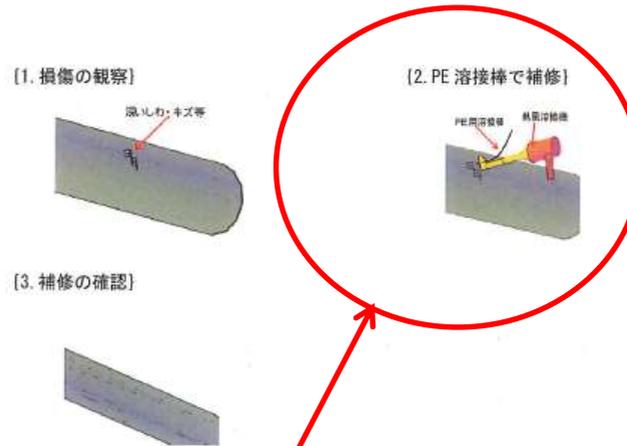
小さな損傷についてはPE管の熱風溶接で対応する。

表面のしわ、傷がある場合(軽度)



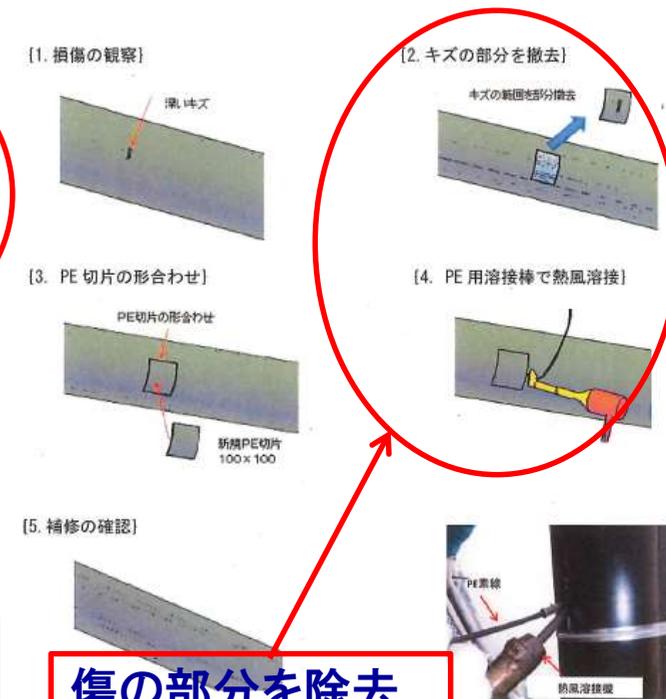
熱風溶接機で表面を整形

深いしわ、傷がある場合(中度)



PE溶接棒を溶かし熱風溶接機で傷を補修

深い傷がある場合(重度)



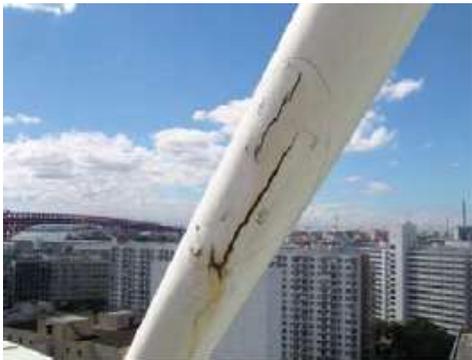
傷の部分を除去し、新設PEシートをPE溶接棒と熱風溶接機で融着

3. 維持管理手法の検討と提案

【補修工法】(PE管の大きな損傷の補修)

・B橋(SPWCゲラウトタイプ)

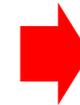
- ①PE管損傷部切除⇒②素線の防食(防錆材塗布等)⇒③ポリブタジエンゴム注入
⇒④熱収縮チューブ巻付け⇒⑤自己融着テープ巻き⇒⑥SUSカバー巻き⇒⑦水切取付



PE管の損傷(錆汁発生)



ポリブタジエンゴム注入



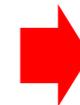
熱収縮チューブ巻付け



自己融着テープ巻き



SUSカバー巻き



水切取付

3. 維持管理手法の検討と提案

・D橋(SPWCハンゲラウトタイプ)

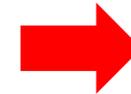
- ①PE管損傷部切除⇒②鋼線の乾燥⇒③新設PE管熱風溶接⇒④熱収縮チューブ巻付け
⇒⑤水切取付⇒⑥ケーブル内部を乾燥



PE管損傷部の切除



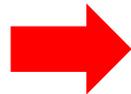
鋼線の乾燥



新設PE管の熱風溶接



熱収縮チューブ巻付け



水切取付



ケーブル内部の乾燥

3. 維持管理手法の検討と提案

【補修工法】(FRP管の小さな損傷の補修)

- ①包帯上のガラス繊維マットで損傷部を螺旋状に巻き付ける。
- ②樹脂をガラス繊維マットに含浸させて固定。
- ③ガラス繊維マット表面を塗装。

【補修工法】(FRP管の大きな損傷の補修)

- ①損傷部分を切断・除去する。
- ②半割管で損傷部分を被覆する。
- ③ガラス繊維マットで半割管を補強する。
- ④半割管内部に接着剤を注入する。
- ⑤ガラス繊維マット表面を塗装する。



①損傷部に上記のガラステープを螺旋状に巻き付け、ローラーにて樹脂を含浸させます。
※樹脂は熱硬化性ビニルエステル樹脂を使用します。
※気温が10℃以下の場合にはドライヤー等で熱風を当てて硬化促進します。

②樹脂硬化後、サンドペーパーにて表面を滑らかにします。

③表面をシンナー等の溶剤を使用して清掃します。

3. 維持管理手法の検討と提案

【補修工法】（ケーブル本体の補修）

- ①ケーブル素線は腐食に伴う断面欠損が生じると著しく耐力が低下するとともに、特に疲労や延性に影響が生じることとなる。
- ②ケーブル耐久性については、（疲労強度に大きな影響を及ぼす）素線の表面傷と腐食が重要となる。
- ③ケーブル本体の補修は、大きく張替えと補修の手法が考えられるが、ここでは張替えについて概説する。

【ケーブル張替え】

- ①マルチケーブル斜張橋の場合、ケーブル表面・内面の錆、腐食の発生、あるいは素線の破断に至った場合、計算上安全が確保されればケーブル張替えという判断がある。
- ②しかし、少数ケーブルの場合、解放されたケーブルが担っている主桁自重を一時的に支持する等、の検討が必要である。
- ③いずれにしても多大なコストが発生する。予防保全的管理が特に重要である。

3. まとめ

(1) 調査・点検の重要性

- ① ケーブルは、主塔・主桁との協働作用により外力に抵抗する非常に重要な部材。
- ② ケーブル材料や防錆・防食法がどうなって、何をどう点検すれば良いか、事前に調査・整理して管理に望むことが特に重要。
- ③ 点検要領等の整備、判定基準、補修マニュアル等の整備が重要。
- ④ ケーブル種類により、防食のレベル(仕様等)は様々。損傷の事例集作成も有効。
- ⑤ 点検は、近接目視による被覆材や保護管の点検だけでは無い。
- ⑥ 錆汁等の前兆や予兆の把握、保護管の変形や損傷等の早期発見が重要。

(2) 補修の重要性

- ① 損傷の早期発見、早期補修はコストが高いケーブルの長寿命化に特に重要。
- ② 損傷程度に応じた補修マニュアルの整備が重要。

(3) 健全性評価の重要性

- ① 腐食損傷に関する定性的・定量的な評価が重要。
- ② 非破壊検査(全磁束法・渦流探傷法)や張力測定等。

(4) 最後に

本報告書が斜張橋ケーブルの維持管理の手本になれば幸いである。