

PC 斜張橋(呼子大橋)の斜材ケーブルの制振対策

原 寛明¹・田中 宏二¹

¹九州地方整備局 佐賀国道事務所 道路保全課 (〒849-0924 佐賀県佐賀市新中町 5-10)

直轄診断, 修繕代行業を実施した呼子大橋について, 風による斜材ケーブルなどの主構造の挙動等を把握し, 本橋の耐久性向上を目的とした斜材ケーブル振動抑制の効果的かつ効率的な対策選定の検討を実施した。

Key Words: PC斜張橋, ウェイクギャロッピング, 制振対策

1. はじめに

呼子大橋は, 佐賀県西北部の玄海灘に面した東松浦半島の呼子町殿ノ浦と離島加部島を結ぶ延長 728m の海上橋梁 (図-1, 写真-1) で, そのうち加部島側 494m が PC3 径間連続斜張橋となっている。平成元年 4 月に供用を開始, 現在まで 31 年経過している。



写真-1 呼子大橋



図-1 呼子大橋 位置図

これまで, 唐津市において定期的な点検や修繕を行ってきたが, 斜張橋の斜材ケーブルの振動抑制対策として実施した制振ワイヤに破断が生じ (写真-2), 取替えを実施してきた経緯があった。



写真-2 制振ワイヤ破断状況

平成 27 年度に唐津市の要請により九州地方整備局, 国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人土木研究所の職員で構成する「道路メンテナンス技術集団」を派遣し, 「直轄診断」を実施した。

「直轄診断」の結果, 主桁内部に多数のひびわれの発生や強風時においてケーブル振動の発生が明らかとなり, 今後, 斜材ケーブルの振動抑制対策の見直しや強化も視野に入れ, 対策検討を速やかに行うことが極めて重要であると, 国から唐津市に報告した。「直轄診断」の報告を受けた唐津市の要請により, 翌平成 28 年度から権限代行による修繕代行業に着手することとなった。

また, 呼子大橋の損傷原因の究明と効果的かつ効果的な修繕対策を策定するため, 有識者及び専門技術者で構成した「呼子大橋修繕対策検討会」(座長 日野 伸一)を設置し, 検討を行った。

本稿では, 呼子大橋の風環境および斜材ケーブルの振

動特性について、詳細な調査を実施し、風による斜材ケーブルなどの主構造の挙動、既に生じているコンクリート部材のひび割れなどの損傷への影響を把握し、振動抑制と本橋の耐久性向上に対する効果的かつ効率的な対策選定の検討結果について紹介する。

2. 斜材ケーブルの振動抑制

橋梁諸元を表-1、上部工断面図を図-2、に示す。

表-1 呼子大橋 橋梁諸元

項目	諸元	
路線名	市道呼子大橋線	
橋梁名	呼子大橋	
道路規格	第3種 第4級 (橋格:2等級)	
設計荷重	TL-14	
架設年次	1989年(28年経過)	
適用示方書	昭和53年道路橋示方書	
橋長	L=727.85m	A1~P5 取付橋部 L=233.60m
		P5~A2 主橋部 L=494.25m
全幅員	W=10.90m	有効幅員 W=7.5m
		(車道W=5.5m、歩道W=2.0m)
上部工形式	A1~P3 PC3径間連続ラーメン箱桁橋	
	P3~P5 PC2径間連続ラーメン箱桁橋	
	P5~A2 PC3径間連続斜張橋	
	(サスペンデット・マルチケーブル方式)	
下部工形式	逆T式橋台2基(A1、A2)、壁式橋脚5基(P1~P5)、主塔2基(P6、P7)	
基礎形式	直接基礎(全基)	

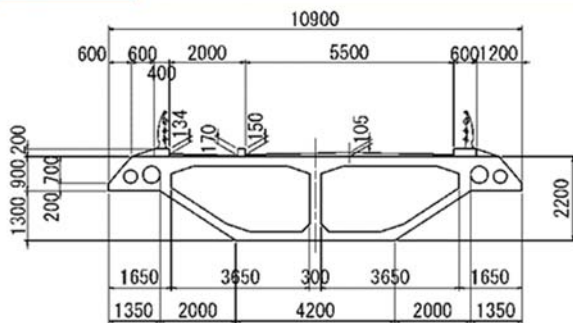


図-2 上部工断面図(斜張橋部)

(1) 斜材ケーブルの振動抑制の目的

風による斜材ケーブルの振動に対して各種制振対策を行っても、振動を完全に抑制することはできないため、斜材ケーブル振動時の振幅に起因する『①制振ワイヤの破断、②主桁内部のひびわれ増加、③斜材ケーブル定着部の疲労』に対する低減を図る目的で制振対策を講じる必要がある。

①制振ワイヤの破断

制振ワイヤの疲労による破断や連結部での制振ワイヤとクランプの摩擦によって生じる破断を低減するため、振動発現時の振幅の低減を図る。

②主桁内部のひびわれ増加

主桁内部のひびわれ増加の要因の一つとして想定されている斜材ケーブル振動時の振幅に対し、主桁への影響を低減するため、振幅が大きい振動が発生することによ

って生じる斜材ケーブルの軸力変動の低減を図る。

③斜材ケーブル定着部の疲労

斜材ケーブル振動時の振幅によって生じる定着部への大きな曲げ応力が繰り返し作用しないようにするため、振動発現時の振幅の低減を図る。

(2) 想定される斜材ケーブルの振動現象

斜材ケーブルの風による振動現象には、ケーブル背後に形成される渦によって発生する渦励振やウェイクギャロッピング、風と雨の相互作用によって生じるレインバイブレーションなどがある。

ウェイクギャロッピングは、並列配置のケーブル中心間隔が $1.5D \sim 6D$ 程度 (D :ケーブル直径)の場合に顕著に発生する^りと言われており、呼子大橋は、ケーブル中心間隔が $2D$ 程度(中央径間:ケーブル間隔 $S=1.85D, 1.92D$)であり、サブスパンで発生している振動現象はウェイクギャロッピングの可能性が考えられる。

(3) 制振対策

既設制振ワイヤが設置された現況よりも斜材ケーブル振動時の振幅の低減を目的とし、斜材ケーブルの各種制振対策のうち、空気力学的対策である「束ねケーブル」、構造力学的対策である「制振ワイヤ」を段階的に施工して、制振効果が得られる効果的かつ効率的な対策の組み合わせを策定することとした。

a) 束ねケーブル

束ねケーブルにより並列ケーブルの中心間隔を狭めることでウェイクギャロッピングの発生を抑制し、斜材ケーブル振動時の振幅の低減を図れるか確認することとした。

ケーブル中心間隔は、 $1.2D \sim 1.3D$ とした場合にウェイクギャロッピングの振動抑制に対して有効であったという研究報告をもとに、呼子大橋のケーブル中心間隔は $1.25D$ とした。(図-3、写真-3)

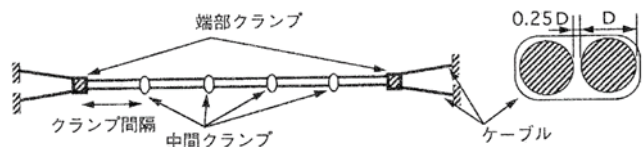


図-3 束ねケーブル概要図

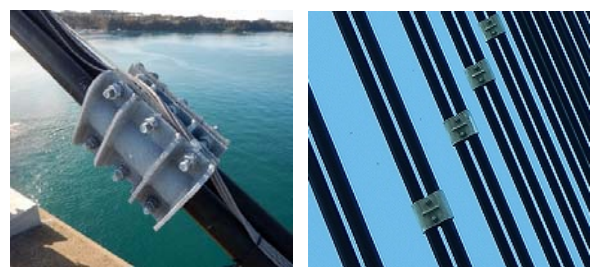


写真-3 端部クランプ(左)と中間クランプ(右)

b) 制振ワイヤ

制振ワイヤは、斜材ケーブル同士をワイヤで連結し、ケーブル振動時の振幅の低減を図ることを目的とした対策である。新設制振ワイヤは、既設制振ワイヤと同じ位置・列数で設置し、振動発現時の振幅の低減が図れるか確認することとした。

今回実施する制振対策によって、振幅の低減が図れたとしても、斜材ケーブルの風による振動を完全に抑制することはできないため、斜材ケーブル間にユニバーサルジョイントを用いて、ワイヤとクランプを固定し、平行連結方式の制振ワイヤに改良した。(写真-4)



写真-4 平行連結方式の制振ワイヤ

3. 計測結果

観測ケーブルは、中央径間の P6 主塔西側に面する斜材ケーブルの中から、以下の4項目を整理して、振動が発生しやすい斜材ケーブル(サブスパン)を選定することとした。

- ①斜材ケーブルの構造特性
- ②風の特性
- ③制振ワイヤの破断・交換履歴
- ④目視によるケーブル振動観察

観測ケーブルは、S-18のL3区間とS-26のL3区間を選定した。観測ケーブル位置図を図-4に示す。

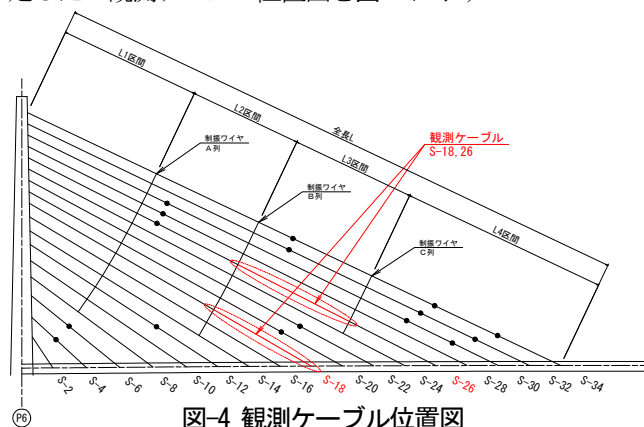


図-4 観測ケーブル位置図

観測ステップは、「束ねケーブル」、「制振ワイヤ」による制振効果を確認するための観測ステップを以下に示すステップで実施した。

ステップ0(現況)では、各種制振対策の効果を比較・検証するための初期値として、既設制振ワイヤが設置された状態で、斜材ケーブルの振動が発生する風の条

件や振動数(振動モード)、振幅を確認することとした。ステップ①では、「束ねケーブル」、ステップ②では、「束ねケーブル」+「制振ワイヤ」を段階的に施工し、ステップ0(現況)と比較して、振動発現時の振幅の低減が図れるかを確認することとした。

(1) ステップ0(現況)の計測結果

目視観察によると、S-18は平均風速7m/s程度以上、S-26は平均風速5m/s程度以上から斜材ケーブルの振幅を確認することができ、風速の増加とともに発現振幅も増加することが確認された。サブスパン振動は、1次モード(5Hz)が卓越する振幅が大きい振動であり、目視によると平均風速5m/s程度以上から並列ケーブルが逆位相で振動する現象が確認された。

(2) ステップ①(束ねケーブル)の計測結果

中間クランプの設置間隔を決定するため、表-2に示すようにサブスパンに対して中間クランプの設置個数を変化させた3ケース(図-5)で計測を行い、斜材ケーブル振動の抑制効果を確認することとした。

表-2 中間クランプ設置間隔ケース

観測ケース	中間クランプ設置個数	分割数	設置間隔	
			S-18	S-26
ステップ①-1	1個	2	11.0m程度	14.0m程度
ステップ①-2	2個	3	8.0m程度	9.5m程度
ステップ①-3	3個	4	6.0m程度	7.5m程度

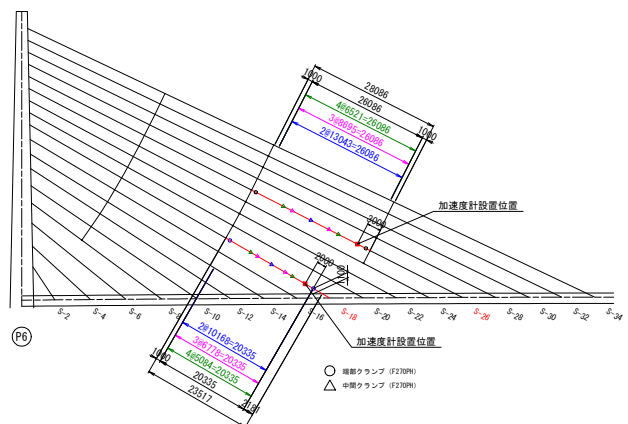


図-5 中間クランプ配置図

サブスパンに対して、束ねケーブル(端部クランプと中間クランプ1個)を設置した結果、平均風速15m/s程度の風が吹く条件においても、並列ケーブルの一体化によって、目視で確認できるような振幅が大きい振動は発生しなくなった。なお、目視観察の結果、中間クランプの設置個数の違いによる変化は見受けられなかった。

束ねケーブル設置後のケーブル振動時の振動数を表-3に示す。ケーブル振動時の振動数は、束ねケーブルの設置前後で殆ど変化は見られず、束ねケーブル設置後も制振ワイヤのクランプを節としたサブスパン振動が発生していることが確認された。

表-3 振動数 (S-26) (Hz)

振動モード	ステップ0 (現況)	ステップ①-1 中間クランプ1個 (2分割)	ステップ①-2 中間クランプ2個 (3分割)	ステップ①-3 中間クランプ3個 (4分割)
1次	5	5	5	4
2次	9	10	10	9
3次	14	15	15	13
4次	19	19	19	18

ケーブル振動時の振幅変位を表-4 (風向:北東 (NE)) に示す。ステップ0 (現況) では、目視により確認できる振幅が大きい1次モードが卓越する逆位相のサブスパン振動が発生していた。

サブスパンに束ねケーブルを設置した3ケースの観測では、いずれも1次モードが卓越する逆位相のサブスパン振動は発生しなくなった。2次~4次モードが卓越するサブスパン振動が発生することで、ステップ0 (現況) と比較して振幅変位が低減していると想定される。

中間クランプの設置個数の違いによるケーブル振動時の振幅変位については、観測期間中に観測された平均風速 11m/s までの結果から、設置個数を増やすことで振幅変位が僅かに低減することが確認されたが、中間クランプを1個設置した場合と大差がないことが確認された。

以上のことから、並列ケーブルのウェイクギャロッピングに対する制振対策として、束ねケーブルに効果があることが確認された。

また、中間クランプの設置間隔については、サブスパンに対して中間クランプを1個設置 (14m 程度の間隔で設置) した結果、並列ケーブルの間隔保持と一体化によって逆位相のサブスパン振動は発生しなくなり、中間クランプの設置個数の違いによる振幅変位にも大差が見られなかったため、中間クランプはステップ①-1 に該当する 14m 程度以下の間隔で設置することとした。

(3) ステップ② (束ねケーブル+制振ワイヤ) の計測結果

ステップ②の束ねケーブルと制振ワイヤを組み合わせた観測では、現況と同じ位置・列数で制振ワイヤを新たに設置することで、ケーブル振動時の振幅の低減が図れるか確認することとした。

目視観察の結果、S-26 のステップ0 (現況) とステップ② (束ねケーブル+制振ワイヤ) の目視観察の結果をもとに、目視で振幅が確認できる振動の発生頻度を風速ごとに整理した結果を表-5 に示す。

表-5 目視で振幅が確認できる振動の発生頻度 (S-26, 風向:北東)

平均風速	ステップ0 (現況)	ステップ② (束ねケーブル+制振ワイヤ)
5~7m/s	10%程度	0% (100%減)
7~9m/s	30%程度	0% (100%減)
9~11m/s	40%程度	0% (100%減)
11~13m/s	40%程度	2%程度 (90%減)
13~15m/s	60%程度	10%程度 (80%減)
15m/s以上	80%程度	-

ステップ0 (現況) では、平均風速 5m/s 程度以上から目視で確認できる振幅が大きい振動が発生し、風速の増加とともに発生頻度も高くなる。しかし、ステップ② (束ねケーブル+制振ワイヤ) では、目視で振幅が確認できるような振動は発生しておらず、発生頻度が 80% 程度以上低減 (観測期間中に観測された平均風速 15m/s までの風) することが確認された。

4. まとめ

観測期間中に観測された平均風速 15m/s までの風に対して、以下のことが確認できた。

斜材ケーブルの振動時の振幅に起因する『①制振ワイヤの破断, ②主桁内部のひびわれ増加, ③斜材ケーブル定着部の疲労』の課題を既設制振ワイヤが設置された現況よりも低減するため、制振対策を段階的に計測した結果、振動発現時の振幅の低減が図れる効率的かつ効果的な対策は、束ねケーブルと制振ワイヤを組合せた対策であることが確認された。

謝辞

呼子大橋修繕対策検討会における闊達な議論を頂き、対策工の修繕代行事業を実施することができた。

検討会に参画いただき、貴重なご助言を賜った日野伸一座長 (九州大学名誉教授), 松田一俊教授 (九州工業大学) および国土技術政策総合研究所, 国立研究法人士木研究所の皆様へ謝意を表します。

参考文献

- 1) 斜張橋並行ケーブルのウェイクギャロッピング制振対策検討マニュアル (案), 土木研究所 共同研究報告書 第134号, 平成7年9月
- 2) 久保喜延, 斜張橋用複数本ケーブルの耐風挙動, 第13回 風工学シンポジウム, 1994

表-4 振幅変位 (S-26) (cm/Hz)

振動モード	ステップ0 (現況)					ステップ① (束ねケーブル)												
						ステップ①-1 中間クランプ1個 (2分割)				ステップ①-2 中間クランプ2個 (3分割)				ステップ①-3 中間クランプ3個 (4分割)				
	平均風速 5~7m/s	平均風速 7~9m/s	平均風速 9~11m/s	平均風速 11~13m/s	平均風速 13~15m/s	平均風速 5~7m/s	平均風速 7~9m/s	平均風速 9~11m/s	平均風速 11~13m/s	平均風速 13~15m/s	平均風速 5~7m/s	平均風速 7~9m/s	平均風速 9~11m/s	平均風速 11~13m/s	平均風速 5~7m/s	平均風速 7~9m/s	平均風速 9~11m/s	平均風速 11~13m/s
1次	16	23	35	30	36	0	1	2	10	3	0	1	2	-	0	0	1	-
2次	1	2	7	6	3	0	0	2	1	1	0	0	1	-	0	0	0	-
3次	2	2	1	4	5	0	0	1	1	1	0	0	1	-	0	0	0	-
4次	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	-	0	0	0	-

：ステップ①-1では平均風速15m/sまでの風は観測されたが、ステップ①-2、①-3では平均風速11m/s以上の風は観測されなかった。