

自立型無線センサーLIRISを用いた ローゼ桁の吊材取替工事の張力モニタリング

Tension Monitoring of the Replacement Work of Lohse Girder's Suspension Members Using LIRIS, an Autonomous Wireless Sensor System



永谷 秀樹*¹
Hideki NAGATANI

要 旨

OSMOS (Optical Strand Monitoring System) において、自立型無線センサーシステムであるLIRISは、別途の電源確保が不要で設置が非常に容易であり、光ファイバーを用いたモニタリングシステムとして多くの優位性を有している。ここでは、ローゼ桁の腐食損傷した吊材取替工事の張力管理のための施工時モニタリングへのLIRISの適用事例に対して、モニタリング内容および確認された有効性について報告を行う。

キーワード：OSMOS, LIRIS, モニタリング, ローゼ桁, 腐食損傷, 吊材取替, 張力管理

1. はじめに

構造物のモニタリングシステムOSMOSにおいて、自立型無線センサーシステムのLIRISは、内蔵のバッテリーで稼働するため、別途での電源の確保が不要で設置が非常に容易で、従来の有線式センサーシステムに比較して計測周波数は若干劣るがコスト的にも優れている。

また、モニタリングデータの共有システムSafeWorksを用いて、インターネット経由で、何時でも、何処でも、PC及びスマートフォンから容易にモニタリングデータの確認、情報共有が可能であり、モニタリングシステム全体として優れた利便性を有している。

既に、LIRISの傾斜計を用いた安全管理のための施工時モニタリングとして、ベントの傾斜に対するモニタリングについては施工実績も増え、前号にてその内容について概要を報告している¹⁾。

ここでは、LIRISの光ファイバーを用いた変位計のローゼ桁の腐食損傷した吊材の取替工事における張力管理への適用について報告を行い、施工時間等に制限がある腐食部材の部材取替工事の施工時における品質管理等に対する自立型無線センサーLIRISの有効性について報告を行う。

2. 吊材取替工事の概要

(1) 橋梁と損傷の概要

対象橋梁は、石垣島にある人工島（南ぬ浜町）と石垣市街地を結ぶ道路橋で、平成3年に供用を開始した下路式のローゼ桁橋である（図-1参照）。

厳しい腐食環境のため、吊材上下端の添接部近傍において、全18本の吊材の中で3本の腐食損傷が著しく、断面欠損等による疲労亀裂がウェブに発生・進展している。そのため、緊急対策として補強材を設置していたが、今回、部材の取替を実施することとなった。



図-1 橋梁全景

*¹ 技術本部技術開発部技術開発グループリーダー

(2) 工事概要

本工事は、吊材取替工事を(株)新友建設が施工し、吊材取替時の張力管理を(株)ホープ設計が実施しており、張力計測に関する協力を弊社が行っている。

本橋は、大型クルーズ船のフェリーバースのある南ぬ浜町と市街地を結ぶ唯一の橋梁であるため、取替工事はクルーズ船の就航に配慮した上で、夜間作業にて実施している。

取替工事は、①既設吊材撤去、②新設吊材設置について各々1夜間で実施している。以下に部材撤去・設置の手順を示す。

①既設吊材撤去

STEP1：既設部材1本につき4本の仮設吊材（PC鋼棒）を設置する。

STEP2：センターホールジャッキを用いて仮設吊材のPC鋼棒に所定の緊張力を導入し、既設吊材の分担軸力を仮設吊材に移行させる（図-2参照）。

STEP3：既設吊材を切断・撤去する（図-3参照）。

②新設吊材設置

STEP1：仮設吊材のPC鋼棒に新設吊材に導入する軸力と同等の緊張力を導入する。

STEP2：新設吊材を設置する（図-4参照）。

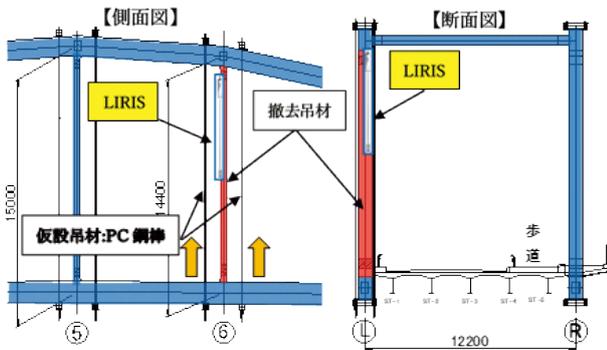


図-2 既設吊材撤去（STEP2：仮設吊材への軸力移行）

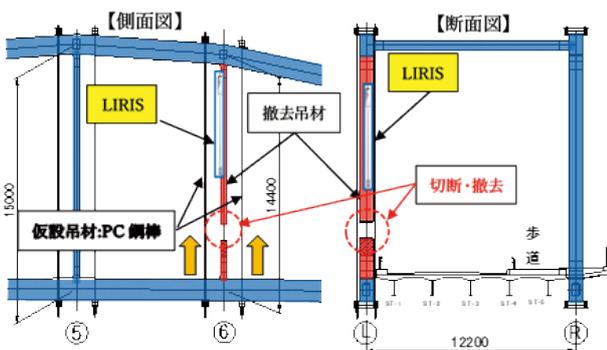


図-3 既設吊材撤去（STEP3：既設吊材撤去）

STEP3：仮設吊材のPC鋼棒の緊張力を解放し、新設吊材に軸力を移行する。

STEP4：仮設吊材を撤去する。

(3) 張力管理（LIRISによるひずみ計測）

下記の目的から吊材に導入される張力の管理を行う。そのため、張力（ひずみ）の計測にLIRISの変位計を用いる。

- ・既設吊材の撤去時に、その軸力を極力ゼロに近づけることで切断時の軸力解放による衝撃を低減し、施工時の安全性を確保する。
- ・既設吊材において現在の状態で負担している軸力と同等の軸力を新設吊材に導入するため、その軸力を定量的に確認する。

2. モニタリングシステムOSMOSとLIRISの概要

OSMOSは、図-6のシステム概要に示すように、計測を実施する有線・無線センサーシステムと情報共有・分析を行うSafeWorksの2つの技術から構成されている。ここで、情報共有システムであるSafeWorksは、計測データをインターネット経由でパソコンおよびスマートフォンにて、何時でも何処でも確認でき、工事関係者で計測データの共有が可能なシステムである。

(1) 光ファイバーを用いた変位計の計測原理

変位計は、ストランド状にした光ファイバーにおいて赤外線が光ファイバーの曲がり部において漏洩し、通過する赤外線の強度が変化する「マイクロベンディングの原理」を利用して、2点間の相対変位を高精度に静的・動的に安定した状態で測定する（図-5参照）。

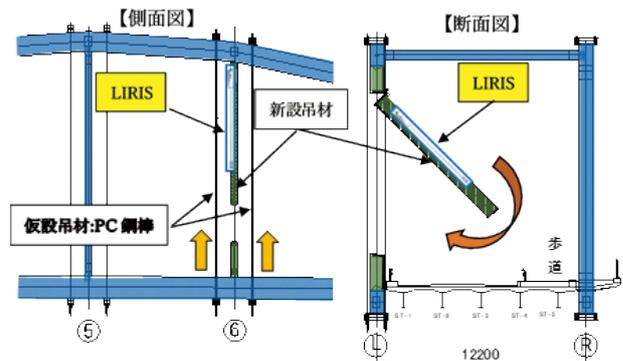


図-4 新設吊材設置（STEP2：新設吊材設置）

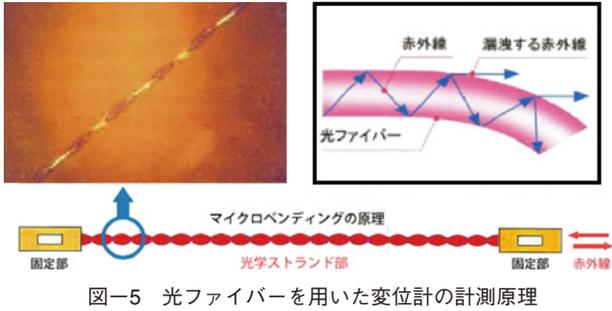


図-5 光ファイバーを用いた変位計の計測原理

(2) 自立型無線センサーシステム：LIRIS【変位計＋SMSモジュール】

このセンサーシステムは図-7に示すように以下の特徴を有している。

- ①電源が不要でセンサーの設置が簡単で早い
- ②SMSモジュールを使用することにより、
 - ・携帯回線によりデータを遠隔で自動取得可能
 - ・閾値を超えた場合に警報メールを発信可能
- ③モデムを用い短距離無線通信により、リアルタイムでのデータを収集可能

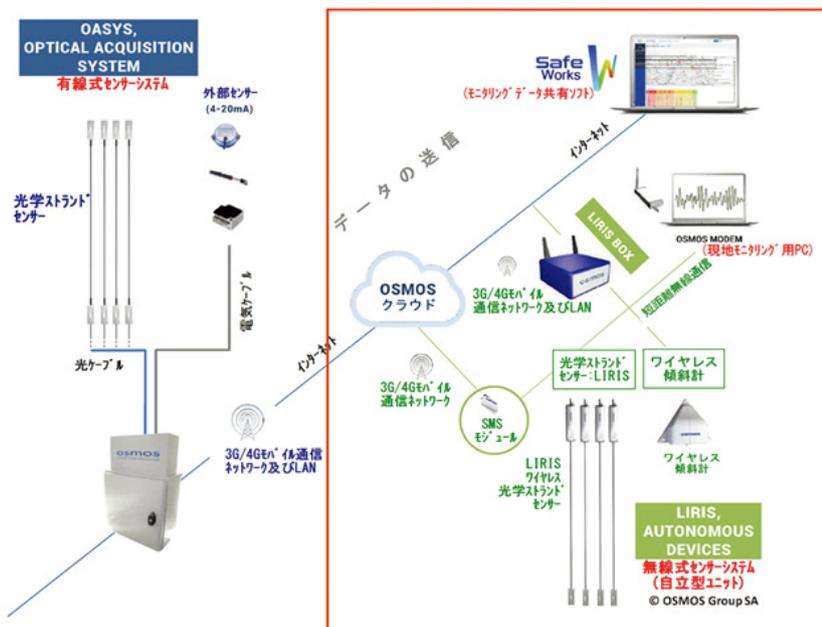


図-6 モニタリングシステム【OSMOS】の概要

図-8に変位計の外形と性能を示す。周波数50Hzで計測するため、0.02秒間隔で常時モニタリングを実施する。データの記録は、1時間間隔でセンサー本体に実施されるが、SMSモジュールを設置することにより計測データを自動的にOSMOSクラウドに毎時送信するため、SafeWorksを用い1時間間隔での計測値を遠隔で確認できる。



図-7 無線式センサーシステム：LIRISの概要と特徴



LIRIS 光学ストランド	
長さ	2mもしくは1m
計測範囲	2m センサの場合 4m、1m センサの場合 2m
分解能	フィルターなしの場合 20μm (低電力) フィルター使用の場合 最大 10μm
計測周波数	50 Hz
使用温度範囲	-10℃から 40℃
EMC、ストランド部分	電磁ノイズの影響を受けない
エンドボックス	サイズ 100 x 40 x 15 mm 素材 アルミニウム
ミニステーション	
ミニステーションボックス	サイズ 230x40x60mm 重さ 600g
ECM	欧州適合基準申請中
無線リンク	921MHz (R207-17LY21 JAPAN)
送信電力	3.0mW アンテナ出力
受信感度	100dBm
電源	ミニステーションボックスに内蔵されたバッテリーによる
バッテリー寿命	最長 1 年(使用環境により異なります)
動的データ保存容量	50kHz で 15 分間または 5 秒間の事象を 250 件
静的データ保存容量	1 時間に 1 回の記録で 6 か月まで
トリガーモード	動的モード



無線モデム	
電源	USB 使用
通信ポート	USB 2.0
アンテナ接続	Mini SMA タイプ
送信電力	3.0mW
受信感度	100dBm

図-8 変位計の外形と性能

3. 張力モニタリング

(1) 自立型無線センサーLIRIS適用のメリット

今回の張力管理にける張力（ひずみ）計測に関して、以下に示す長所からLIRISを適用している。

①腐食により不陸がある既設部材の平均的なひずみを計測可能

長尺センサー（1m）であるため、腐食の不陸による局部ひずみの影響を受けず軸力部材の平均的なひずみを計測可能である。

②センサーの設置と計測が簡単で早い

電源・配線が不要のため、12センサーを2人で2日で現場設置、設置後直ぐにモニタリング開始可能である。

③無線センサーのため、架設前の新設吊材に事前設置し、架設時に保管場所からそのまま移動可能

新設吊材への事前のセンサー設置による工程短縮が可能である。

表-1 計測に関する全体工程

	1月											2月															
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
機材設置準備																											
既設VL5.6へのLIRIS設置																											
既設VR6へのLIRIS設置																											
新設VL5.VL6.VR6へのLIRIS設置																											
事前計測(振動モニタリング 他)																											
既設VL6撤去時張力管理計測																											
新設VL6施工時張力管理計測																											
経時モニタリング(安全管理)																											
既設VL5撤去時張力管理計測																											
新設VL5施工時張力管理計測																											
経時モニタリング(安全管理)																											
既設VR6撤去時張力管理計測																											
新設VR6施工時張力管理計測																											
片付け																											

表-2 既設吊材撤去の施工と計測のタイムスケジュール

No.	施 工		計 測	1月20日(既設吊材VL6撤去)																							
	項 目	計測関連事項		20	21	22	23	0	1	2	3	4	5														
1	準備工																										
2	交通規制(片側通行止)																										
3	高所作業車・クレーン搬入																										
4	チェーンブロック機材設置																										
5	仮設吊材張力(10%張力)解放																										
⑥			①全吊材初期ひずみ計測																								
7	仮設吊材軸力導入(3段階)	各STEPで20秒間程度の軸力維持	②撤去吊材VL6のひずみ計測																								
⑧		仮設吊材軸力を維持	③撤去吊材VL6以外の吊材ひずみ計測																								
⑨		仮設吊材軸力を維持、軸力調整	撤去吊材の想定ひずみと測結果の比較																								
10	添接部ボルト軸力解放(下側)																										
⑪			④撤去吊材ひずみ計測 20秒間																								
12	既設吊材中段ガス切断 ①上段側切断	仮設吊材軸力維持																									
⑬			④全吊材のひずみ計測																								
⑭			既設吊材のひずみ量の確認																								
⑮		仮設軸力調整 (既設吊材ひずみが②の場合)	撤去部材のセンサー撤去																								
16	既設吊材中段ガス切断 ②下段側切断																										
17	既設中断吊材撤去																										
18	既設上段吊材撤去																										
19	既設下段吊材撤去																										
20	片付け																										
22	交通規制解除																										

表-3 新設吊材設置の施工と計測のタイムスケジュール

No.	施 工	計 測	1月30日(新設吊材VL6撤去)												
			20	21	22	23	0	1	2	3	4	5			
1	準備工														
2	交通規制(全面通行止)														
3	高所作業車・クレーン搬入														
4	チェーンブロック機材設置														
5	新設下段吊材架設														
6	新設上段吊材架設														
7	カウンターウェイト撤去														
8	新設中段吊材架設														
9	添接部ボルト孔明け														
10	ボルト締付け(全本数、一次締め)														
⑪		①全吊材初期ひずみ計測													
12	仮設吊材軸力解放														
⑬		②全吊材ひずみ計測													
⑭		新設吊材の想定ひずみと計測結果の比較(軸力調整検討)													
15	ボルト締付け(本締め)														
16	片付け、交通規制解除	仮設吊材軸力を維持													

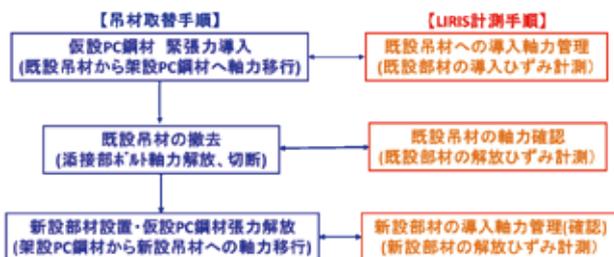


図-9 吊材取替と計測の手順

表-4 取替吊材の想定ひずみ一覧

	VL5	VL6	VR6
死荷重的計設計軸力(kN)	641.9	645.0	760.4
部材寸法	□350×778×10	□350×778×10	□350×778×10
材質	SM411AP	SM411AP	SM411AP
規定解放力(kN)	650	650	760
断面積(mm ²)	22,560	22,560	22,560
ヤング係数(N/mm ²)	2.0×10 ⁸	2.0×10 ⁸	2.0×10 ⁸
想定ひずみ(μ)	144.1	144.1	168.4
部材寸法	H798×350×22×12	H798×350×22×12	H798×350×22×12
材質	SM490Y	SM490Y	SM490Y
規定解放力(kN)	690	690	760
断面積(mm ²)	22,448	22,448	22,448
ヤング係数(N/mm ²)	2.0×10 ⁸	2.0×10 ⁸	2.0×10 ⁸
想定ひずみ(μ)	132.9	132.9	156.4

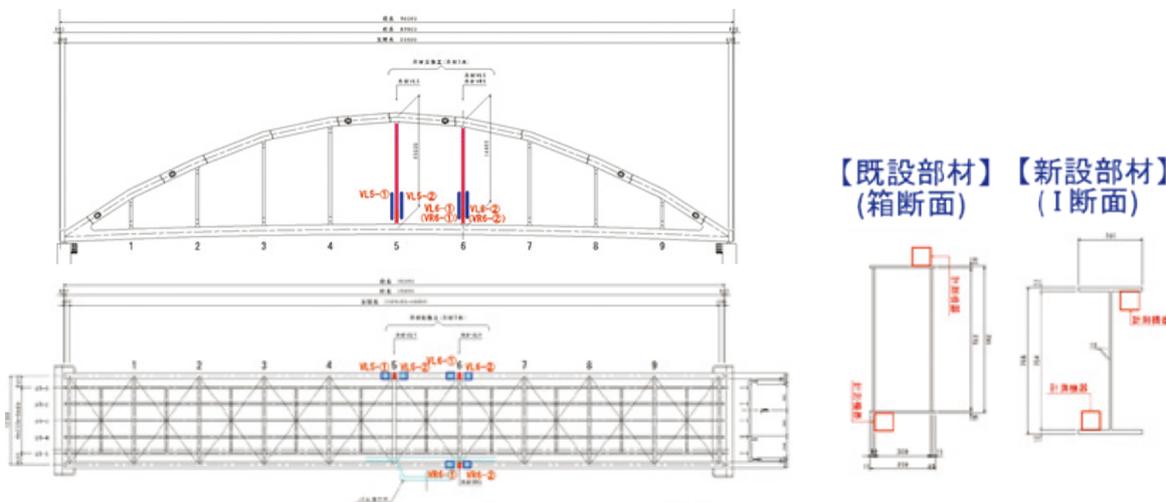


図-10 センサー配置図

(2) 計測手順

前述の既設吊材撤去・新設吊材設置手順および張力管理の目的から、吊材取替手順に対応するLIRISによる計測手順を図-9に示す。

既設吊材撤去では、仮設吊材への既設吊材の表-4に示す想定した軸力の移行の確認をひずみ計測により行う。

新設吊材設置では、仮設吊材撤去による新設吊材への表-4に想定した軸力の導入をひずみ計測により確認する。

(3) 計測工程

VL5,6及びVR6の3本の吊材取替におけるセンサー設置から張力管理計測までの全体工程を表-1に示す。また、既設吊材撤去および新設吊材設置に関するタイムスケジュールを表-2, 3に示す。このタイムスケジュールに示すように、部材の現場施工と計測が連携しており、円滑な計測と計測結果の評価が工程遵守の前提となっている。



図-11 高所作業車によるセンサー設置



図-14 架設前の新設吊材へのセンサー設置状況

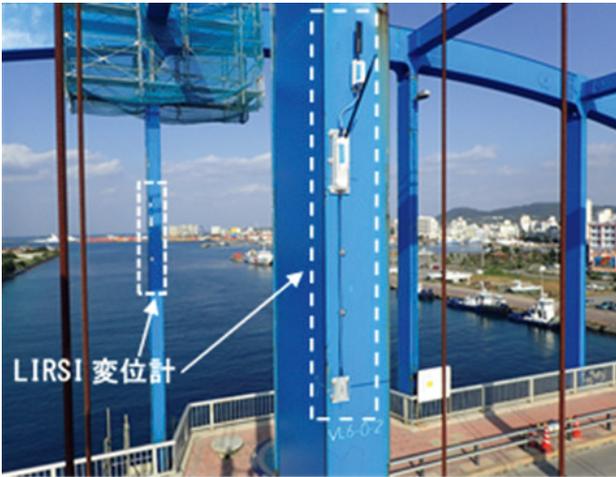


図-12 既設吊材へのセンサー設置状



図-15 センサー設置状態での新設吊材の架設



図-13 センサーが設置された既設吊材の腐状況

(4) センサー配置および設置状況

変位計は、取替えを行う3本の吊材に対して、既設・新設の吊材毎に2箇所設置することにより、合計12箇所設置している。吊材の断面における配置は、想定外の曲げ応力等の計測への影響を相殺するため、断面の各中心軸に対して対称に配置している（図-10参照）。

センサーの設置は図-11に示すように高所作業車を用いて実施しており、既設吊材へのセンサー設置状況を図-12に示す。また、センサーが設置された既設吊材は図-13に示すように腐食による断面の凹凸等があり、均等な断面形状と考えることが困難で発生ひずみも部分的に不均等なものになると想定される。新設吊材の架設前のセンサーの設置状況を図-14に示す。この状態からトラックにより架設現場まで輸送を行い、センサーを設置した状態で架設を行っている（図-15参照）。

また、新設吊材への取替完了後、1か月間程度遠隔モニタリングを実施し、変状がないことを確認している。その際に、万が一にも吊材に許容応力度の70%を超えるような急激な応力（ひずみ）変動が生じた場合には警報メールが発信されるように、変位の変動に関する動的な閾値を設定している。

3) 張力管理へのLIRIS適用の有効性に関する評価

a) 張力管理について

この既設吊材から新設吊材へ取替における吊材の軸力について、ホープ設計の張力管理報告²⁾における移行結果を表-5に示す。既設吊材の車道側VL5,6は計測結果から分担軸力にバラつきが生じていたが、新設吊材において両者はほぼ同様の軸力となっており、両者の合計は取替前後で4%程度の誤差内に留まっている、また、歩道側VR6については取替前後の軸力は単独で3%程度の誤差に留まる。

よって、良好な精度で既設吊材から新設吊材への軸力移行が実施されており、張力管理の精度確保にLIRISによるモニタリングが有効に機能したものと考ええる。

b) 施工性について

既設・新設吊材の取替は1夜間の非常に限られた時間内で実施されたが、現地でもデムを用いた無線でのデータ収集は全計測期間において問題なく実施できた。さらに、新設吊材には事前に変位計を設置し、保管場所から架設現場までの輸送および架設の間において施工性を妨げることなく計測ができており、自立型無線センサーとしての施工時モニタリングへの高い適用性が確認できた。

c) 耐候性について

張力管理の計測期間中には雨・風の強い荒天の日もあったが、安定したモニタリングが実施できており、吊材交換後3か月程度の期間の経時モニタリングに関しても安定してデータ収集できており、耐候性についても問題が無いことが確認できた。

4. おわりに

自立型無線センサーであるLIRISのローゼ桁の吊材取替工事への適用は初めてであり、工程的にも予備日は殆どない状態で実施された。しかし、工程の遅延もなくセンサー設置から計測完了まで円滑なモニタリングが実施できたことは、LIRISの設置の容易性、無線センサーであることの有効性が高かったものと考ええる。

今後も、LIRISの自立型無線センサーとしての長所を活用した施工時および維持管理に関するモニタリングについて検討を進めたいと考えている。

最後になりましたが、計測においてご指導・ご協力を頂いた(株)ホープ設計の親泊様、宇地原様、高本様、さらに、石垣市役所建設部港湾課施設整備係の池城様をはじめとする関係者の皆様には心より感謝の意を表します。また、現場での計測作業にご協力頂いた(株)新友建設の兼松様、センサーの設置と技術指導でご協力を頂いた日揮(株)の門様、阿南様にも御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 永谷秀樹：OSMOSを用いた施工時モニタリング，宮地技報No.32,pp.7-11,2019.
- 2) 高本寛之：ローゼ橋の吊材取替工事における張力管理手法，けんこん第14号，pp.90-93，(社)沖縄県測量建設コンサルタンツ協会，令和2年3月.
- 3) 永谷秀樹：光学ストランドセンサーを用いた構造モニタリング，宮地技報No.25,pp.82-88,2010.
- 4) 岩下宏，山下久生，能登宥愿：OSMOSシステムによる実橋モニタリング報告，宮地技報No.20, pp.90-99, 2005.

2020.6.3 受付

表-5 張力管理による吊材分担軸力移行結果

	吊材設計軸力 (kN)	① 既設吊材分担軸力 (kN)	② 新設吊材移行軸力 (kN)	移行比率 ②/①(%)
VL6	645	627	513	81.9
VL5	642	420	575	136.9
車道側合計	1287	1047	1088	103.9
VR6	750	695	714	102.7
歩道側合計	750	695	714	102.7