

論文・報告

沖縄都市モノレール鋼製橋脚のフィレット部に設置されたカバープレート撤去の最適化

～疲労き裂と応力集中に配慮したカバープレートの撤去手法～

Optimization of removal of cover plate installed on fillet part of Okinawa Monorail bridge steel piers.

和田 浩介 *1
WADA Kosuke

長坂 康史 *2
NAGASAKA Yasushi

辻 巧 *3
TSUJI Takumi

吉田 純 *4
YOSHIDA Jun

垣花 寿 *5
KAKINOHARA Hisashi

山岸 俊一 *6
YAMAGISHI Toshikazu

沖縄都市モノレールの鋼製橋脚では隅角フィレット部に景観上への配慮からカバープレート（以降、カバーPL）が取り付けられている。近年、経年劣化の影響から一部の橋脚のカバーPLとフィレットの溶接部に疲労き裂の発生が確認され、安全性の確保のためすべてのカバーPLを撤去する運びとなった。このうち、川田工業が13橋脚、川田建設は4橋脚のカバーPL撤去工事（計3工事）を受注し、橋脚の補修を実施した。施工にあたり、カバーPL撤去作業の安全性向上と鋼製橋脚本体の品質確保を目的とした川田独自のカバーPL撤去手法を考案し、モノレールの安全運行を妨げること無く、線路直下における橋脚横梁の挙動について常時観察を行いながら、カバーPLの撤去作業を完了させた。本報告では、川田グループ内の連携により行われた3工事に関する施工機器の改良・開発と現場での施工状況について報告するものである。

キーワード：モノレール鋼製橋脚、隅角フィレット部、カバープレート、疲労亀裂、カバープレートの撤去方法

1. はじめに

沖縄都市モノレール線は、沖縄県那覇市的那覇空港駅と浦添市のかど浦西駅を結ぶモノレール路線であり、「ゆいレール」との愛称で親しまれる県内で唯一の鉄道路線である。2003年（平成15年）8月に那覇空港―首里間（12.9km）が開業、2019年（令和元年）10月には首里―てこだ浦西間（4.1km）が延伸されている。

平成27年11月に沖縄県が実施した定期点検により、一部の鋼製橋脚に図1に示されるような鋼材のき裂が検出された¹⁾。これは、隅角フィレット部へ景観上の配慮により設置されたカバーPLの溶接部から生じたき裂であり、モノレール走行の安全性を確保するため、有識者で構成された「沖縄都市モノレール鋼製橋脚補修検討委員会²⁾」にて、すべてのカバーPLを撤去する運びとなった。対象となる橋脚は供用から17年が経過した先行開業区間（那覇空港―首里間）に点在する逆L型、T型の46橋脚（内閣府沖縄総合事務局13基、沖縄県29基、那覇市4基）であり、安全性と耐久性の観点から撤去手法の検討が進められた。

この委員会では先行してカバーPLの撤去作業が行われた比較的き裂の大きな3橋脚での技術的知見を踏まえ、

「き裂発生原因究明」、「補修方法の検討」、「鋼製橋脚点検時の留意点」に対する議論と検討が行われた。結果としてカバーPL撤去マニュアルに集約され、カバーPL撤去時の留意事項、施工中の安全管理、疲労耐久性に配慮した仕上げ形状など、具体的な事項が明記されている。

川田グループでは当該工事の受注に際し、更なる安全性の向上と応力レベルの高い隅角近傍作業による品質確保を目的に川田独自のカバーPL撤去手法を考案した。本報告では、このカバーPL撤去マニュアルを遵守しつつ、撤去作業の安全性と品質に配慮した施工機器の改良・開発により考案した施工法を紹介し、実際の施工状況について報告する。

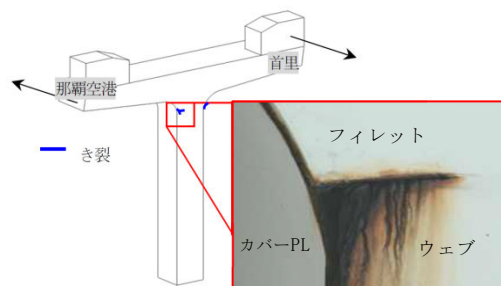


図1 橋脚に生じた疲労き裂の例²⁾

*1 川田工業㈱橋梁事業部四国工場橋梁技術課 課長

*2 川田工業㈱橋梁事業部保全推進室 担当部長

*3 川田工業㈱橋梁事業部保全推進室 室長

*4 川田建設㈱九州支店工務部 上席工事長

*5 川田建設㈱九州支店技術部 次長

*6 川田建設㈱工務本部工務部 担当部長

2. 工事概要

沖縄都市モノレールの先行開業区間（那覇空港～首里駅）におけるインフラ部は、内閣府沖縄総合事務局・沖縄県・那覇市の3管理者で管理されている。このうち、川田工業は内閣府沖縄総合事務局管轄の12橋脚、沖縄県管轄の1橋脚、川田建設は沖縄県管轄の4橋脚の計3工事17橋脚のカバーPL撤去工を受注した。本工事は、橋梁保全工事一式としてカバーPLの撤去工に加え、現場塗装工、仮設工、安全対策工を含む。以下に3工事の工事概要を示す。また、図2にモノレール路線上の橋脚位置を、写真1に代表的な橋脚の写真を示す。

【工事①：川田工業施工】

- ・発注者：内閣府沖縄総合事務局 南部国道事務所
- ・工事名：平成30年度モノレール鋼製橋脚CP撤去工事
- ・工事場所：沖縄県那覇市安次嶺～久茂地地内
- ・工期：平成30年5月1日～平成31年2月28日
- ・工事対象：橋脚No, タイプ

P198～P202, P209, P217, P245, P260（逆L型7脚, T型2脚）, P89, P92（逆L型1脚, T型1脚）
P19（逆L型1脚）

【工事②：川田工業施工】

- ・発注者：沖縄県 南部土木事務所
- ・工事名：沖縄都市モノレール補修工事（H30-3）
- ・工事場所：那覇市古島地内
- ・工期：平成30年3月20日～令和元年6月28日
- ・工事対象：橋脚No, タイプ

P491（T型1脚）

【工事③：川田建設施工】

- ・発注者：沖縄県 南部土木事務所
- ・工事名：沖縄都市モノレール補修工事（R1-1）
- ・工事場所：那覇市安次嶺～安里地内
- ・工期：令和元年9月30日～令和2年3月12日
- ・工事対象：橋脚No, タイプ

P21橋脚（逆L型1脚）

P96橋脚, P130橋脚, P366橋脚（T型3脚）

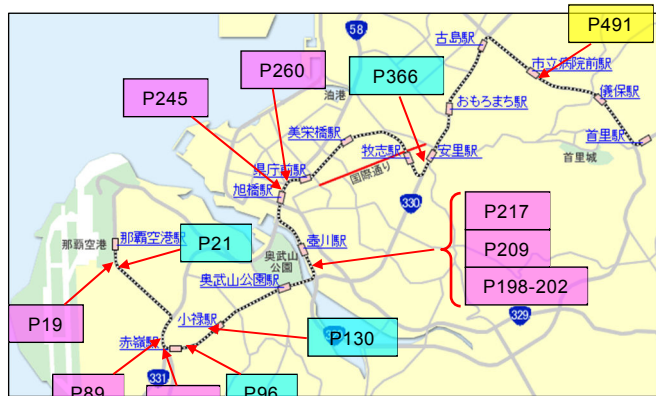


図2 モノレール路線上の工事対象橋脚位置図³⁾
（工事①：赤，工事②：黄，工事③：青）



写真1 橋脚外観例（左：逆L型，右：T

3. 新たなカバーPL撤去方法の検討

図3にカバーPLの概要図と外観例を示す。発注図書には撤去中の橋脚本体への影響から「ガスバーナーによる切断は行ってはならない」との記載があり、撤去マニュアルにディスクグラインダやレシプロソーなどのハンドツールの使用が推奨されている。また、マニュアルにはカバーPLの撤去フローとして、基本とする開口サイズや作業手順も示されており、我々はこれらの基本手法に対して、撤去時の更なる安全性と切除時の品質確保のために機器の改良と実大試験体等を用いた改良手法について検討を行うこととした。写真2に検討中の様子を示す。

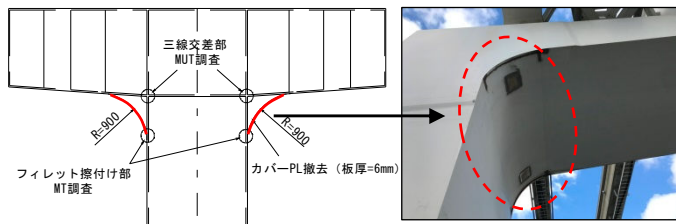


図3 カバーPL概要図と外観例



写真2 カバーPL撤去方法の施工試験風景

(1) 撤去時の問題点と改良ポイント

カバーPL撤去時に各種ハンドツールを用いて施工する場合、「切断姿勢が上向きとなる」ことや「柱および梁との擦付け部において母材との離隔が小さい」ことから、長時間の連続切断に対する作業者の安全性やフリーハンドでの切断による品質確保が懸念された。最も重要なポイントは母材へ損傷を与えずにカバーPLのみを効果的に取り出すことであり、作業姿勢や切削方法、作業手順を検討課題とした。表1にカバーPL撤去時の問題点と対策案について示す。

表 1 カバーPL 撤去作業の問題点と対策案

No	問題点	対策案
1	人力で不安定な姿勢となりやすい	ハンドツールに応じた専用レール設備の追加検討
2	母材へ傷が入りやすい	損傷防止治具の考案
3	グラインダによる作業が多い	撤去手順の見直し

(2) 撤去用設備の改良

カバーPL 撤去マニュアルに推奨されているハンドツールは表 2 に示すように 5 種類の機器が用途別に提示されている。このうち、主体的に利用する孔明け機、チップソー、ディスクグラインダの 3 機種に着目し、改良を行うこととした。

表 2 撤去用ハンドツールと用途 (撤去マニュアルより)

機器名称	用途
孔明け機	切削前のガイド孔
チップソー	CP の切断 (水平方向に優位)
レスプロソー	CP の切断 (鉛直方向に優位)
ディスクグラインダ	CP の切断 (どの方向にも対応可)
棒グラインダ	研磨仕上げ (微小な範囲の研磨)

CP : カバーPL の意

改良① : チップソー用のガイドレールと振れ防止

チップソーは、カバーPL の曲線部に沿った切断や直線部の切断に用いるが、鉛直方向の切断では上向き姿勢となるため作業者への負担が増す。作業者の負担軽減による施工中の安全性向上を目的として、新たに安定した切断設備の構築を実施した。具体的な方法として、写真 3 に示す曲線部や直線部に沿った専用のガイドレールを設置し、チップソーを固定する可動式の取付け架台を考案した。チップソーをレールに沿ってスライドさせることで安定した切断ラインが形成される。ガイドレールは撤去されるカバーPL 面に M6 ネジスタッドで固定する方式のため、母材等を傷付けることはない。

検証には写真に示す通り実物大試験体を用い、ガイドレールとチップソーの位置関係を微調整しながら安全で品質向上に繋がる切断設備を確立させた。



写真 3 カバーPL 曲線部の切断状況

図 4 はチップソーの刃の切込み深さを微調整できる機能を追加したものである。各橋脚でのカバーPL の曲線形状は微妙に異なり、カバーPL とガイドレールの距離も必然的に 1~2 ミリ程度の変化が生じるため、切込み深さの微調整が必要となる。よって、柱・梁の母材との擦付け近傍まで、カバーPL の確実な切削が可能となる機能を備えた。

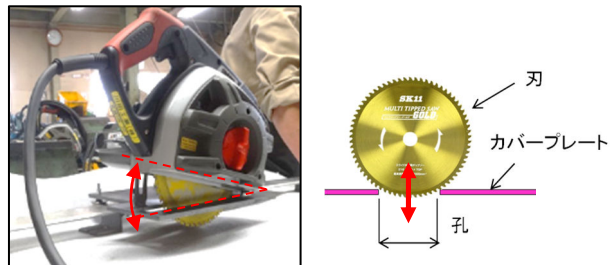


図 4 チップソー刃の切込み高さ微調整治具

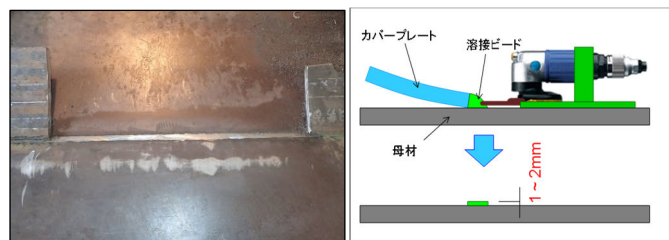
改良② : ディスクグラインダ用の平行切断治具

カバーPL と本体の溶接部近傍での切断は慎重な施工を要する。特に柱・梁部の母材との平行溶接部では、溶接ビードの擦付け仕上げが施されている場合もあり、溶接ビードと母材の境界を判断することは難しい。この切断にチップソーを用いた場合、カバーPL 貫通時に母材を傷付ける恐れがあり、切断ラインの位置決めが難しいため、狭隘な部分での仕上げ作業に有効となるディスクグラインダを用いた切断方法を検討することとした。図 5 にディスクグラインダへ装着した平行切断治具と作業状況を示す。回転砥石と母材に一定の間隔を保持させグラインダ本体を平行に保てる当て治具を考案し、ディスクグラインダの回転砥石を本体部材と平行に挿入させることで、溶接ビードを 2 mm 残して削りながら PL の撤去を可能とした。また、切削中の反力でのグラインダの跳ね上りを防止する補助治具も備え、実物大試験体にて安定した切断が可能となる治具の検証を実施した。



グラインダに装着した治具

跳ね上り防止補助治具



切断後の状況写真

切断イメージ

図 5 グラインダを用いた平行切断治具

改良③：孔明け深さまな管理器具

カバーPLの撤去における孔明け機の主役は、PL撤去に必要なガイド孔を設ける加工であり、切断前に設けるガイド孔は母材との離隔があるため、母材への傷の心配はない。しかし、我々は最終的にコーナー部に残ったPLを孔明け機を用いて連続孔明けで切断する方法を採用したため、母材との離隔が非常に小さく、ドリル歯の突抜けによる母材損傷が懸念された。図6に示すようにドリル歯先端にカバーPLの板厚に応じた孔明け深さが固定できるストッパーを設け、突き抜け防止対策を講じた。検証は実物大試験体により検証を行い、母材を傷付けることなくコーナー部のPL撤去が可能であることを確認した。

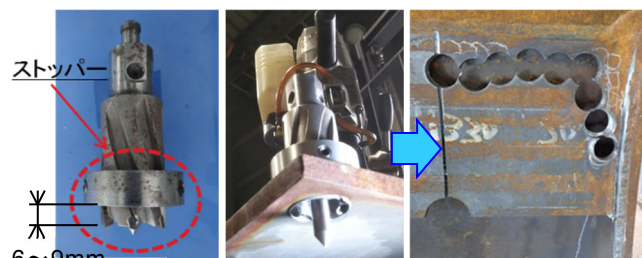


図6 追加したストッパーとコーナー部孔明け状況

考案したハンドツールについては、実際に現場施工に従事する作業者に模擬試験を体験させ、繊細な技能の習得を実施した。また、客先立会のもと実物大試験体を用いた実際の作業による施工試験を実施し、本取組みにより母材を傷つけずに安全性が向上し、品質確保につながる各改良の創意工夫が認められ、施工計画書に反映することができた。なお、この改良により切削効率の向上にも繋がっている。

4. 実工事における検証

図7にカバーPL撤去マニュアルによる撤去工事全体のフローを示す。図中の着色した範囲は、本工事の業務内容を示している。

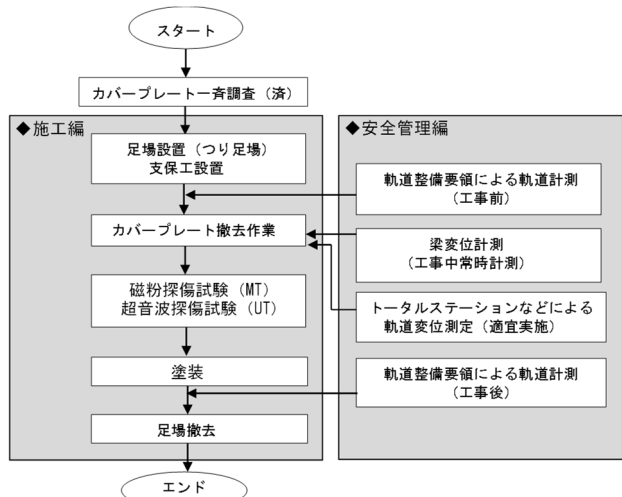


図7 カバーPL撤去マニュアルによる施工フロー図

本工事は、モノレール供用中の工事でありカバーPLの撤去前後の出来形管理として梁のたわみ計測、軌道計測等を実施した。また、品質管理としてはカバーPL撤去後のフィレット溶接部の磁粉探傷試験（以降MT）、調査業務として柱・梁本体の十字継手部、3線交差部の超音波探傷試験（以降UT）を実施した。

(1) カバーPL撤去手順の改良

カバーPL撤去工については、考案したハンドツールと実物大試験体により撤去マニュアルに示された基本手順の部分改良を行った。図8に基本手順と実工事で採用した改良手順を示す。以降に各ステップでの施工状況を述べる。

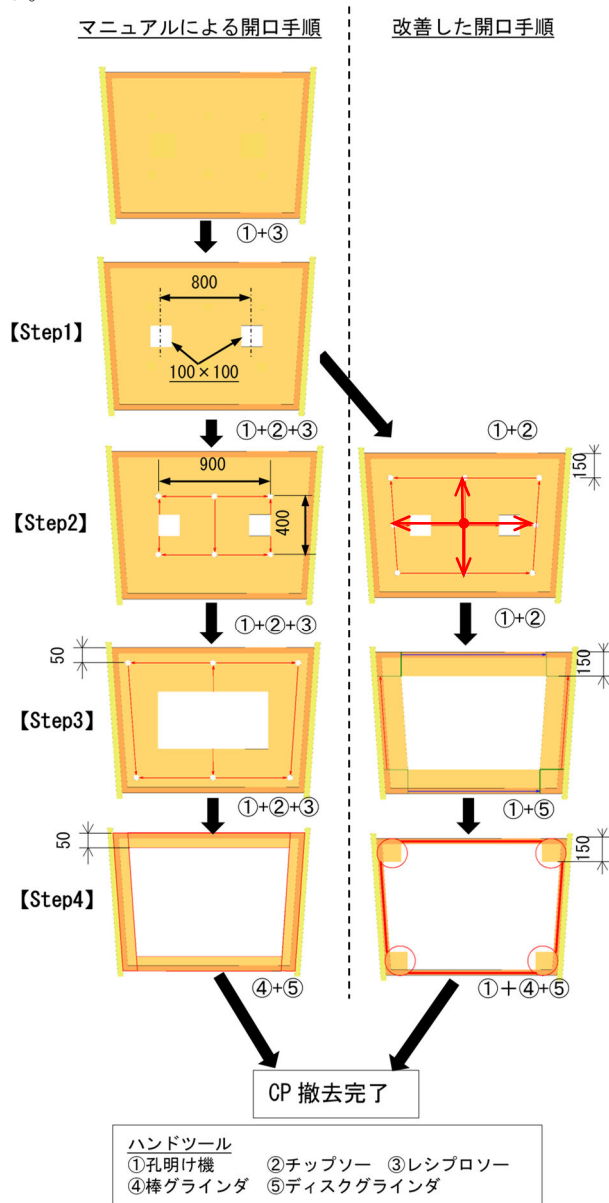


図8 カバーPL撤去フロー

① Step2の改良

点検孔の開口後、マニュアルに示されたStep2の開口は切断時における隅角部応力の急変に配慮して比較的小

さな 400×900 mm サイズに設定されていた。これに対し、矢印で示した中心から外側へ向けた切断を先行し、ガイドレールを用いたチップソーでの切断工法を用いることで安定した切断が可能となるため、一回り大きな開口サイズでの切断を実施した。

② Step3 の改良

マニュアルの開口手順 Step3 では、フィレット部や柱・梁部の境界付近における切断時に、母材を傷付けないよう境界ラインから 50 mm の離隔を設けて切断ラインを決定していた。しかし、鉛直方向切断ではガイドレールを用いたチップソーの機器改良（改良①）により、フィレット溶接部近傍での切断が可能となった。また、母材との平行切断でもディスクグラインダを用いた平行切断改良治具（改良②）により母材近傍での切断が可能となり、いずれも母材から 2 mm 程度の位置まで離隔を縮小できた。しかし、実施工での平行切断はグラインダの回転砥石の消耗が激しく、グラインダの連続使用が困難であることも判明したため、代替ツールとして近年、吊り金具の撤去にて使用頻度が高いピースカッターの採用を提案した。図 9 にピースカッターを利用した平行切断の撤去状況を示す。使用に際してはこれまでと同様に、安全性と品質性に対する検証を行い、切断作業における更なる効率化が図れることとなった。

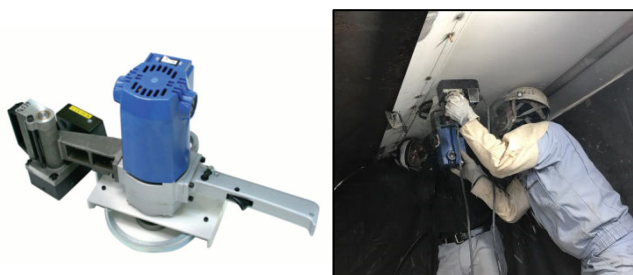


図 9 ピースカッターによるカバーPL 撤去状況

③ Step4 の改良

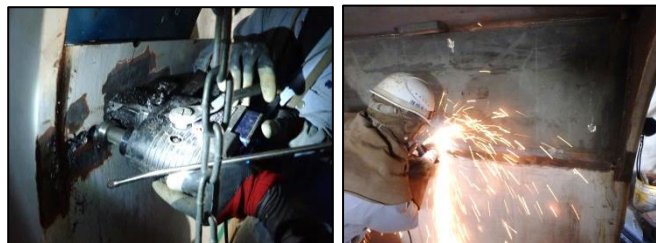
マニュアルの開口手順 Step4 では四隅に残置されたカバーPL に対し、ドリルストッパーを用いた孔明け深さ管理治具（改良③）により切断を施すこととした。連続孔明け作業では母材を傷つけることなく、溶接部のわずかな部材の残置により、ディスクグラインダでの仕上げ作業の最小化が可能となった。

写真 4 に各 Step での代表的な作業状況を示す。橋脚のカバーPL 厚は 6 mm と 9 mm が存在し、溶接サイズの違いが加工効率に影響した。前述するピースカッターの導入は、本工事においても大きく効率を落とすことなく良好な品質の作業を可能とした。また、平行切断部では、カバーPL の溶接余盛りが擦付け仕上げされている場合もあり、超音波探傷検査にて溶接範囲を確認しながら切り込み量を判断するなど慎重な対応を実施した。



Step2:チップソー曲線部切削

Step3: グラインダ切削



Step4: 角部アトラ削孔

Step4: グラインダ仕上げ

写真 4 カバーPL 撤去工事状況

(2) カバーPL 撤去後の非破壊検査

母材面まで溶接ビードを仕上げた後に実施した磁粉探傷検査では、本体部にわずかな指示模様を確認した。しかし、これらは部材の溶接中に生じたものと考えられ、超音波探傷検査（斜角探傷）により深さ方向に顕著なき裂の進展等も見受けられなかったことから、ディスクグラインダによる補修作業を実施した。写真 5 に磁粉探傷検査の状況を示す。なお、カバーPL 撤去後に実施した橋脚本体の 3 線交差部、十字継手部に対する非破壊検査については、今後の経過観察に対するバックデータの収集を目的とした検査を実施している。

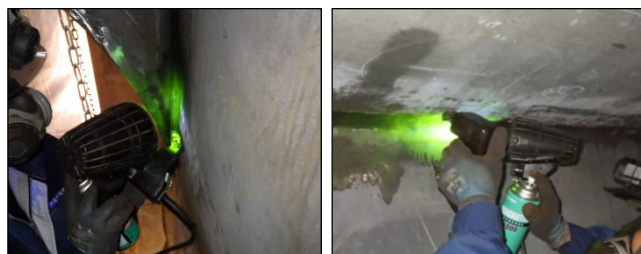


写真 5 カバーPL 撤去後の MT 検査

5. カバーPL 撤去に関わる安全管理

カバーPL 撤去マニュアルではカバーPL 撤去作業中の梁たわみや変位挙動を監視し、通常と異なる変位が検出された場合は工事の中断やモノレールの徐行要請、運航停止の判断が必要となる。本工事では表 3 に示すような各管理レベルでの対応方法をもとに、橋脚毎の活荷重たわみを計測し、部材の安全管理を実施した。また、カバーPL 撤去前後での軌道桁の高低差、位置関係の計測も実施している。

梁たわみ量の計測は図 10 に示すように橋脚部にレーザー距離計を用いて連続計測を行った。計測器の選定にはモノレール荷重による最大のたわみ値を抽出できるように 5~10 Hz の計測が可能となるシステムを採用した。

表 3 各管理レベルに対する対応

管理レベル	管理値	管理限界(閾値)	対応	備考
I-A	営業車通過なしでのカバープレート撤去時のたわみ	計算上の活荷重たわみδから営業車通行時たわみδ'の差を超過した場合	作業中断 + 変状確認、原因究明	死荷重再配分と残留応力の開放によるたわみ
I-B	営業車通行時のたわみ	計算上の活荷重たわみδを超過した場合	作業中断 + 変状確認、原因究明	
II	営業車通行時のたわみ	計算上の死荷重+活荷重による発生応力度が橋梁の許容応力度に達したときに相当するたわみ	徐行要請	許容応力度のたわみ
III	営業車通行時のたわみ	計算上の死荷重+活荷重時による発生応力度が橋梁の降伏点に達したときに相当するたわみ	営業車通行禁止	降伏点でのたわみ

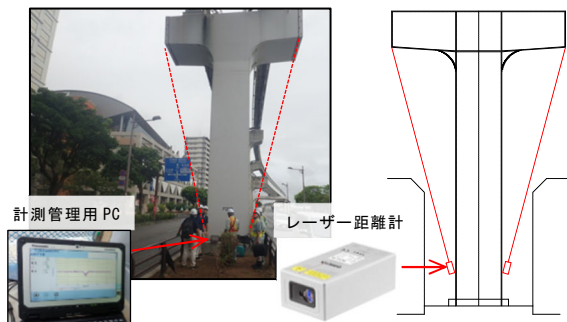


図 10 たわみ計測状況

(1) 撤去中の梁のたわみ計測

図 11 に P198 橋脚の計測結果を抜粋して示す。モノレール通過時のたわみ量は閾値である I-B (12 mm) 以下を示している。また、他のすべての橋脚についても I-B 値を超える値は確認されず、モノレールの運行に支障を来すことはなかった。

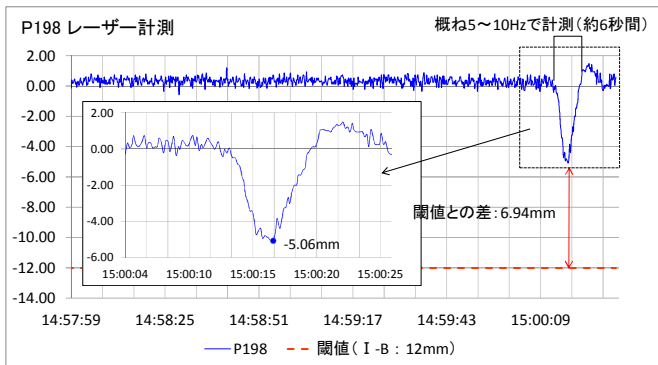


図 11 たわみ計測結果 (P198 橋脚の例)

(2) 軌道計測

軌道計測は作業着手前と施工完了後に軌電停止の時間帯で実施し、軌道桁の走行面における高低差、案内面における路線直角方向のずれ、軌道上桁ジョイント部の遊間を測定した。また、日常の管理として、初日の作業前と日々の作業終了後にトータルステーションにより軌道桁の上下変位を確認し、施工前後でのカバーPL 撤去による軌道桁への影響がないことを検証した。表 4 に一例として、P198 橋脚下り線におけるカバーPL 撤去前後の軌道計測 (走行面：天端、案内面：側面) と桁遊間の計測結果を示す。また、写真 6 に計測中の状況を抜粋して示す。

6. 工事全体で配慮した点

各工事共通の課題として、部材撤去時の機材等騒音の影響が無いことを確認する必要があった。初期の騒音測定において 90 デシベルを超過したことを受け、吊り足場の風防設備内側に防音シートを増設させ、終始周辺環境にも配慮した。また、供用中に梁のたわみが異常値となる場合に備え緊急時支保工も準備していたが、梁たわみの異常値は検出されず、使用していない。

表 4 P198 橋脚の軌道計測結果

P198上り線計測結果		通り(終点側)		遊間	
規定値	走行面 9mm以内	案内面 11mm以内	①	PC桁-PC桁:5~55mm	
			②	PC桁-鋼桁:5~210mm	
計測値	施工前	±0mm	-5mm	95mm	
	施工後	±0mm	-4mm	96mm	
	差	±0mm	+1mm	+1mm	



夜間軌道桁計測

トータルステーション変位計測

写真 6 軌道計測状況

7. まとめ

本工事は、「沖縄都市モノレール鋼製橋脚カバープレート撤去マニュアル」に対し、受注者側独自の創意工夫により安全で品質の向上が図れる方法を提案・実施した。本報告では KTI 川田グループ 2 社による継続した施工であるが、実工事に従事した共通の地元業者 ((株)仲本工業) との技能共有に努めた結果、より安全で品質の向上に繋がる施工を行うことができた。また、施工中には、県や市、本土から多数の見学者があり「母材を傷めない提案技術」としてアピールに努めた結果、高い評価を頂くことができた。

本工事の施工にあたりご対応頂いた沖縄総合事務局および沖縄県南部土木事務所のご担当者様、工事施工中の状況確認と対応に関する詳細なご指導を頂きました琉球大学・下里教授をはじめ、本工事に従事頂きました関係者の方々へ本紙面を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安全報告書 2017：沖縄都市モノレール株式会社
- 2) 金城、池田：モノレール鋼製橋脚のカバープレート撤去事例について、土木学会西部支部沖縄会、第 7 回技術研究発表会、Session4 補修・防食関連 pp.100-103
- 3) 沖縄ガイド「グルポン」よりモノレール路線地図引用