

営業線直下でのR&C工法を用いた アンダーパス工事

吉弘英光¹・大菅健¹・中村祐¹・北原進一²・平岡憲二³・辻健一⁴

¹正会員 鹿島建設株式会社 九州支店 (〒812-8513 福岡市博多区博多駅前三丁目12-10)

²鹿島建設株式会社 九州支店 (〒812-8513 福岡市博多区博多駅前三丁目12-10)

³株式会社間組 九州支店 (〒812-8562 福岡市博多区下呉服町1-1)

⁴正会員 株式会社松本組 (〒812-0054 福岡市東区馬出一丁目1-19)

国道 202 号線福岡外環状道路と西鉄天神大牟田線との立体交差工事で、R&C工法を用いて、軌道直下の土被り約 1.0mの位置に幅 35m高さ 8.9mのボックスカルバートを構築する工事である。

施工場所は、福岡市郊外の住宅密集地で、騒音・振動に敏感な環境下であり、13.5m上空には都市高速が供用されている。

本稿では、営業線の安全運行確保を大前提に、近隣住民の要望にも配慮し、工期短縮や施工環境の改善を図りつつ、無事故無災害で竣工した国内最大級のR&C工法の施工実績を報告する。

キーワード：地下道路トンネル、営業線立体交差、非開削工法、R&C工法、騒音・振動対策

1. はじめに

慢性的な交通混雑が社会的問題となっている福岡市南西部地域では、国道 202 号福岡外環状道路（幅員 40m、総延長 16.2km）の開通による渋滞緩和が期待されている¹⁾。

当工事は、福岡市の主要鉄道である西鉄天神大牟田線（輸送人員数：26.1 万人/日、運行本数：470 本/日²⁾）における井尻～雑餉隈間の営業線直下に、R&C工法では国内最大級の断面となる幅 35m×高さ 8.9mのボックスカルバートをけん引式で軌道直下に構築する国道工事である（**図-1**）。

今回、約 1.0mの低土被り条件下において、営業線直下を列車の安全運行を確保しながら、函内掘削以外の軌道直下の作業は夜間に行ったが、住宅密集地での施工のため、騒音・振動対策が要求された。



図-1 完成イメージ

2. 工事概要

(1)全体工事概要

工事名：福岡外環状道路と天神大牟田線（井尻 5 号踏切付近）との立体交差工事

事業者：国土交通省

発注者：西日本鉄道株式会社

施工者：鹿島・間・松本共同企業体

工事場所：福岡市南区井尻三丁目～四丁目地内

工期：平成 17 年 5 月 20 日～平成 22 年 3 月 31 日

工事内容：

ボックスカルバート工 L=18.7m

R&C工法（けん引式）：内空容積 3206m³

箱型ルーフ工：15.5m×54 本

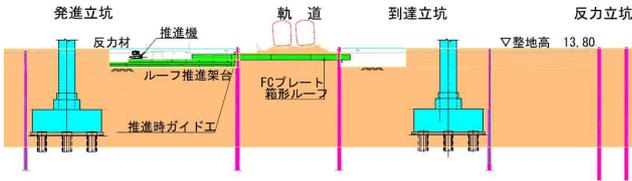
表-1 主要工種数量

主要工種	内容	全体数量	単位	
薬液注入(軌道直下斜施工)	注入量	2,151.8	m ³	
柱列式連続地中壁(SMW工法)	施工面積	9,252.2	m ²	
底板改良工(Superjet-Midi工法)	本数	103.0	本	
土工(山留めオープンカット工法)	掘削量	20,061.1	m ³	
構造物構築(RCボックスカルバート)	コンクリート量	1,938.0	m ³	
R&C工法	箱型ルーフ推進工	総延長(54本分)	834.8	m
	水平ボーリング	総延長	859.0	m
	ガイド導坑(矢板工法)	施工延長(4坑分)	61.8	m
	R&Cけん引・掘削	延長	15.5	m
		内空断面	207.4	m ²

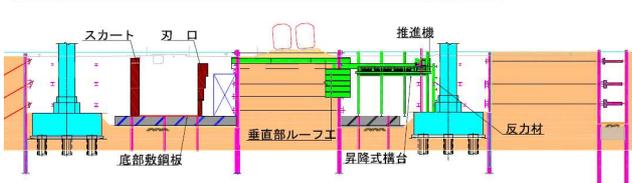
(2) 施工手順

R & C工法とは、Roof と Culbert の頭文字を取ったネーミングで、角型のパイプルーフをカルバート（以下 函体）で順次押し出し、置換する工法であり、当工事でのR & C工法の手順は以下のとおりである（図-2）。

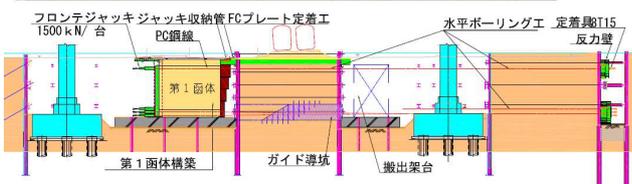
① 軌道下地盤改良→SMW土留め→一次掘削→水平ルーフ工



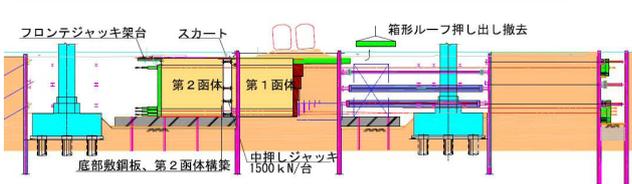
② 立坑築造→垂直ルーフ工→刃口・スカート組立→底部敷銅板工



③ 水平ボーリング工→ガイド導坑工→第1函体構築→けん引設備設置工



④ 第1函体けん引・掘削→底部敷銅板→第2函体構築→けん引設備設置工



⑤ 第1,2函体けん引・掘削工→中押し設備撤去→函体接合工→けん引設備撤去

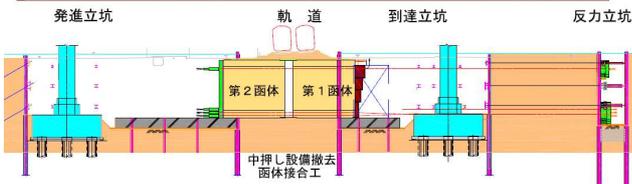


図-2 R & C 施工順序図

3. 施工条件と課題

(1) 直上営業線条件

当該箇所はカント量 121mm，平面曲線 R=603m，縦断緩和曲線区間であり，直上に電車線用の電架柱も配置されている。また，直近に踏切道があり，軌

道整備上，不動点としての制約も受ける。当営業線は，福岡市近郊の主要交通であり，営業線安全運行の確保が最優先課題となる。

(2) R & C工

これまでに実績のない掘削大断面 8.9m×35mでの高精度での施工を行う必要がある。そのため，本工事の施工条件に合致した施工計画立案と掘進管理及び線形管理の手法を確立しなければならない。

(3) 低土被り

工事場所の地層は，主に砂質土で，地下水位は地表面より約 2mの深さであり，水平部パイプルーフが掘進する地山は無水砂層となる。さらに，地表面から水平部パイプルーフの土被りは 0.8~1.3m と非常に小さいことから，地表面に影響を与えやすい地盤条件下でパイプルーフ工を施工するにあたり，慎重な施工管理が要求される。

(4) 周辺環境への配慮

施工場所は市街地人口集中地区（D I D）で，かつ環境に非常に敏感な地区であることから，夜間作業時のみならず昼間作業における騒音や振動の発生を最小限に抑えなければならない。

(5) 作業時間制約と全体工程短縮

当現場の作業時間は，昼間作業については地元協定で 8：00~17：00，夜間作業については営業線運行上 0：30~4：00 までとなっており，時間当たりの施工効率の向上が必要不可欠である。また，事業としての全体工程短縮を事業者から強く要望されており，隣接工区への引渡しを早期に実施する必要があった。

4. 土質条件

当該場所の R & C 工に関連する地質は，沖積砂層 (as)・洪積粘土層 (dHc)・洪積砂層 (dHs) から構成される。as 層は GL-7m 前後まで分布し，粒径は不均一で，φ2~4mm の角礫を少量混入し，ところどころレンズ状に粘性土を含む。dHc 層は連続性が乏しく含水量は小さく硬い。dHs 層は粗砂を主体とし，φ2~15mm 程度の花崗岩礫を混入しており，比較的透水係数が高い ($k=1.0 \times 10^{-2} \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$) 地層である（図-3）。

なお，箱型ルーフ施工深度下端より函体施工に関

わる深度までは地盤改良を実施済みである。

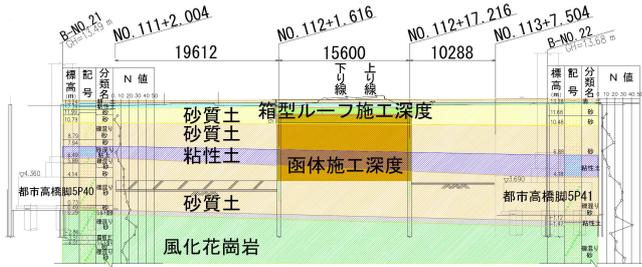


図-3 地層断面図

5. 箱型ルーフ工の施工計画と施工実績

(1) 水平パイプルーフ工

箱型水平ルーフ工は、 $\square 800 \times 800 \text{mm}$ 断面の箱型のパイプルーフの上端を函体上端と一致させた位置に施工するもので、当初契約では施工精度が高い人力施工だった。しかしながら、水平ルーフ 42 本を人力夜間施工とした場合、約 6 ヶ月もの工期が必要であった。そこで、オーガーシャフト中心をレーザー光での常時計測により人力施工と同等の精度が期待できる TH パイプルーフ工法による機械施工で全体工期短縮を図った。

まず 1 台の TH 掘進機により水平部パイプルーフの中央スパン (No. 21, 図-4) を基準管として $\phi 812.8 \text{mm}$ の円形鋼管で施工した後、箱型ルーフへの置換工を行い、その後、No. 22 を施工した後、2 台の掘進機を用いて、隣接するスパンを順次掘進することにより、水平部 (No. 1~42) を完成させ、立坑築造完了後に垂直部パイプルーフを施工する計画とした。

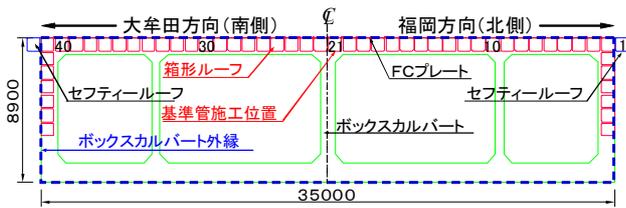


図-4 ボックスカルバート施工断面

実際には、基準管の精度は高かった (水平 3mm, 垂直 1mm) もの、土質が当初予定と異なり、粘性土であったため、置換工やその後の箱型ルーフ工では掘削土の取込み不足による先行隆起が見られ、加えて予想外の騒音も発生した。そこで、以下の対策を実施し、改善を図った。

a) 先行隆起対策

① 刃口形状変更

刃口の施工断面上部およびジョイント部にオーバーカット部を設け、既設ルーフ管のジョイント内部やフリクションカットプレート (以下 FCプレート) 前面にある取込み困難な部分の土砂を角型断面内に取込みやすい刃口形状とした (図-5 上図)。

② 掘削部先行攪乱

オーガーをルーフ管より約 750mm 前方に伸ばせるオーガー割付とし、推進に先立ち先行攪乱を実施することで地山を乱して、直上の隆起を抑制しながら必要排土量を確保できる構造とした (図-5 下図)。

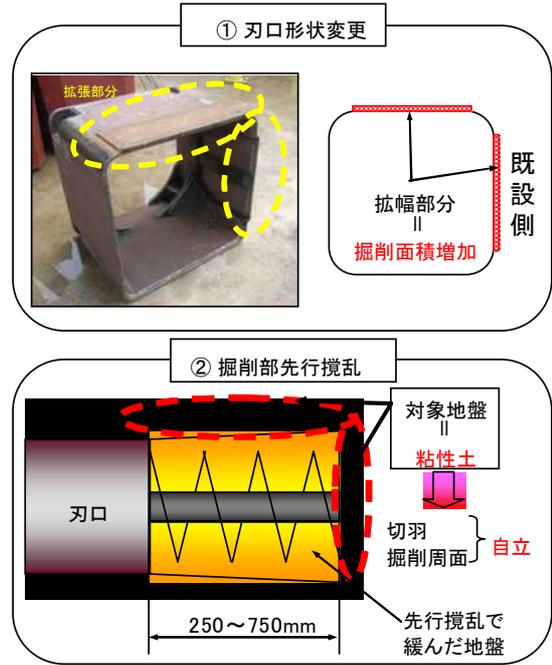


図-5 先行隆起防止対策

b) 騒音対策

騒音・振動を低減するため、止むを得ない夜間作業以外の作業は、すべて昼間作業で行うものとした上で、更なる環境負荷低減として、以下の内容を実施した。

① オーガープラグゾーンの設置

ルーフ管内に土砂が充填されているほうが、オーガーとルーフ管の鋼材同士の干渉音を低減できるため、オーガーにプラグゾーンを設け、排土量を調整した (図-6)。

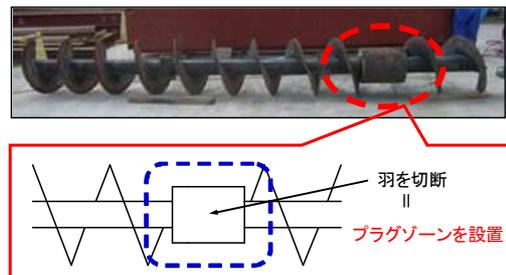


図-6 騒音対策①



写真-1 騒音対策②



写真-2 騒音対策③

②ルーフ管内オーガー受台の取付け

オーガーの片持ち構造部が長くなりオーガー先端とルーフ管との干渉が発生するのを防止するため、ルーフ管内に受台として円形鋼管を4分割したものを溶接し、オーガーの片持ち距離を短くし、干渉を低減した。また、オーガー羽根端部は、曲線になるようにガス溶断で切欠き、受台に滑らかに掛かるようにした(写真-1)。

③オーガージョイントの溶接一体化

オーガージョイント部の遊びにより、オーガーがルーフ管と干渉するのを防止するため、ジョイント部を溶接補強し、一体化した(写真-2)。

④推進機・油圧ユニット個別防音、簡易防音ハウス

種々の対策を講じて、騒音を完全になくすことは不可能なことから、推進機の減速機およびモータ部を吸音アルミ板で囲い、全体を簡易防音ハウスで囲うとともに、油圧ユニットを簡易防音パネルと防音シートで二重に囲って、騒音の拡散を抑制した(写真-3)。

なお、簡易防音ハウスはクレーンで設置できる構造とし、作業効率向上を図った(写真-4)。



写真-3 騒音対策④ 個別防音

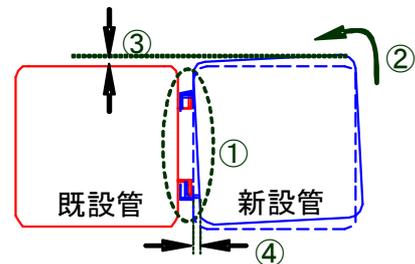


写真-4 騒音対策④ 簡易防音ハウス

6. 函体けん引・掘削工の施工計画と施工実績

(1) 水平ルーフ施工誤差による沈下の抑制対策

前述の水平ルーフ施工では、営業線への影響回避を最大課題として管理したため、箱型ルーフのローリング(図-7)を制御できず、ルーフ管が目標の施工精度を確保できなかった(写真-5)。そこで、ルーフ管の施工誤差を函体上端より上に集中させることで、函体への置換時の隆起を完全回避し、空隙充填による沈下対策を講じて軌道への影響を低減する方法を採用した。



- ①アングル継手部の余裕代による誤差
- ↓
- ②オーガーに起因するルーフ管の回転
- ↓
- ③, ④鉛直・水平方向への施工誤差

図-7 ローリング概念図



写真-5 水平ルーフ誤差状況

空隙充填対策として、数多く実績を有する沈下抑止特殊充填材³⁾を硬化速度抑制型に改良（以下 ボイドキーパーS）し、空隙充填材兼用の滑材としてR&C工法では初めて適用した。ボイドキーパーSは、珪酸塩鉱物を主成分とし、材料の安定性を図るためのポリマーとせん断抵抗力の向上を目的として繊維（太さ 2 デニール、長さ 2~6mm）を混合した材料である。

a) 実証実験の概要と結果

第一函体けん引から第一・第二函体けん引まで約 4 ヶ月間けん引期間が開くため、けん引時の共動きが無いように長期間のコンクリート付着力抑制について検証する必要がある。また、注入箇所選定のために注入時の拡散についても確認する必要がある。

① 付着状況の確認

コンクリート表面では付着力の増大が予想されたため、防水材（2 例）と鉄板とを比較し、ボイドキーパーSが鉄板であるFCプレートに付着することを確認した。その結果、防水材Aをコンクリート面に塗布することにより、ボイドキーパーSが確実にFCプレートに付着し、けん引時の共動きが無いことを確認した（図-8、写真-6）。

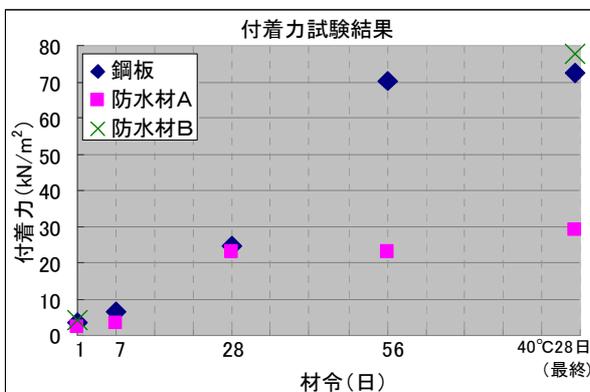


図-8 ボイドキーパーSの付着力試験結果



写真-6 ボイドキーパーSの付着状況
(左:鋼板, 右:防水材A)

② 注入拡散状況の確認

注入口位置@877mm で配置し、注入により確実な充填効果が期待できるか否かの実証実験を行い、等圧で均等に注入されており、実施工上も問題ないという実験結果を得た（写真-7）。



写真-7 ボイドキーパーS充填実験状況

b) 函体付着低減材と注入機構

上記実証実験の結果を元に、函体に防水材A（GR-A工法）を塗布し、付着力低減と防水性向上を両立した。また、注入機構は1インチの注入口34孔を箱型ルーフジャッキ収納管の土留めプレート間（@877mm）に配置（写真-8 赤丸部分）し、ルーフ管推進後、直ちに注入を開始し、函体けん引前に、上部の空隙を充填する計画とした。



写真-8 防水材塗布状況

c) 軌道への影響

軌道の沈下計測結果は7章にて示すが、無対策の場合に想定された100mm以上の沈下量に対して20mm程度の沈下に抑えることができ、ボイドキーパーSの地山保持効果を確認することができた。

(2) 掘削効率向上策

a) 自動昇降ステージの開発・採用

一般的なR&C工法の刃口は、簡易棚により各作業室の足場が構成されており、作業室間の移動にははしごや階段が必要である。また、函内掘削後には、開口をまたいで不安定な姿勢で仮土留めを設置する必要があった。そこで、当現場では自動昇降拡幅ステージを開発（図-9、写真-9）し、作業効率向上と安全性向上とを両立した。

自動昇降拡幅ステージの機能を以下に示す。

①ペンダントスイッチによる電動稼動

ペンダントスイッチとすることで、搭乗人員不在時にもステージ昇降を地上から行えるため、バックホウでの下部掘削時に上空にスペースを確保できる。

②刃口斜柱に沿う昇降によるステージ前方開口軽減

刃口斜柱に沿ってステージを昇降させて、ステージ端部と切羽面との開口が最小となる構造にした。

③前後スライド機能による切羽開口閉塞

切羽掘削時に、常に切羽面とステージ端部との距離を一定に保ち、掘削した分が開口になるのを防止でき、安定した作業姿勢を確保できる。

④左右伸縮機能による刃口柱間開口閉塞

ステージを前進した後、左右に拡幅することによって、切羽面側での横方向の作業室間の移動が容易になり、作業効率が向上するとともに、安全性も向上する。また、刃口の投影部分で死角となる部分も、ステージ足場上から安全に作業できる。

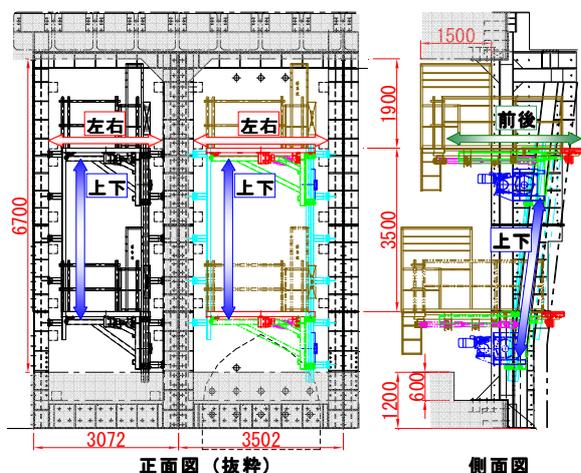


図-9 自動昇降拡幅ステージ



写真-9 自動昇降拡幅ステージ

b) 掘削土揚重設備の検討

函内掘削で発生した残土は深度約10mの発進立坑に移動し、揚重する必要があった。レール式の土運搬鋼車を利用して残土積込み・揚重を効率化し、一日あたりの施工量確保を図った。

c) 軽量仮土留め材の採用

一般的なR&C工法では、仮土留めには、木製の矢板や角材が用いられており、当現場では当初20kg/枚の木製矢板を使用する設計となっていた。そこで、軽量（重量10kg/枚）でコンパクトなアルミ製矢板をはじめとするアルミ製仮設材を用いて、作業効率向上と安全性向上を図った。

(3) 作業環境改善策

坑内環境で重要な換気と騒音、作業スペース確保について、以下の対策を実施した。

a) 電動機械の採用

電動バックホウ（写真-10）や電動コンプレッサの採用により、排ガス発生を回避し、原動機騒音も低減した。これにより、快適な作業環境となり、また、合図や声も良好に聞こえ、安全性の向上にもつながった。



写真-10 電動バックホウ使用状況

b) 油圧ユニット架台の新設

通常、函体後方や函体内に配置する油圧ユニットを、フロンテジャッキ架台に併設した油圧ユニット架台(写真-11)に配置して、坑内スペースを確保した。



写真-11 油圧ユニット架台

(4) 函体けん引制御

函体けん引制御は函体姿勢制御とFCプレート制御の2つに大別できる。

今回は、1台のパーソナルコンピュータで双方の制御を同時に行えるシステムとした(図-10)。

今回使用したジャッキの数量および仕様を表-2に示す。

表-2 使用油圧ジャッキ

ジャッキ種別	仕様	全体数量	自動制御	単位
フロンテジャッキ	1,500kN	53	18	本
FC制御ジャッキ	1,500kN	20	20	本
ルーフジャッキ	1,500kN	104	0	本
フェースジャッキ	300kN	152	0	本
中押しジャッキ	1,500kN	53	0	本
振動低減補助ジャッキ	1,500kN	14	0	本

a) 函体姿勢自動制御

当現場では国内最大級の断面でのR&C工法となるため、同工法としては国内初の函体姿勢自動制御システムを採用した。函体の移動量をワイヤーストローク計で計測し、左右の移動量を近似させるようにコンピュータ油圧制御することで情報化施工を行った(図-10 下側)。

b) FCプレート自動制御

一般的には函体の移動による上部地山への摩擦力の伝達をFCプレートで遮断し、FCプレート自体の変位を制御して地山変位を抑制する。当現場ではFCプレートの変位を、変位計でリアルタイム計測した値を電気信号化し、コンピュータで解析、油圧バルブを調整するというFC自動制御システムを用

いてFCプレートの自動制御を行った(図-10 上側)。

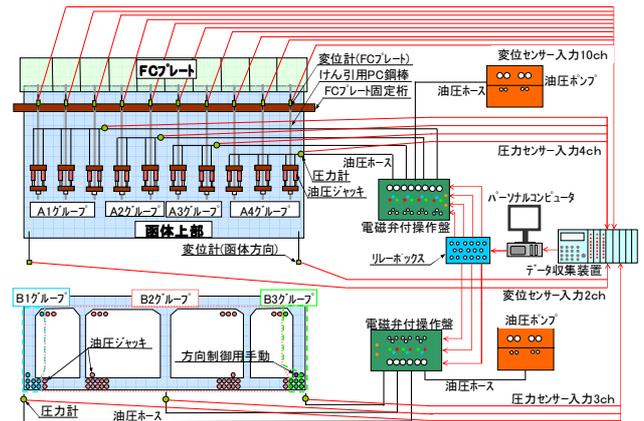


図-10 自動制御システム図

(5) けん引時騒音振動対策

函体けん引では、函体の静止摩擦力が動摩擦力になる瞬間にPC鋼線の弾性伸びが急激に戻るため、函体が断続的な被けん引挙動を示す。

この断続的な挙動を連続した挙動に変えることで騒音低減を図った。具体的な対応策を以下に示す。

a) 油圧ダンパーとしてのルーフジャッキ利用

函体けん引に従ってルーフジャッキの油圧をリリースすることで、ルーフジャッキを油圧ショックダンパーとして機能させ、断続的な挙動を連続的な挙動にした(図-11)。

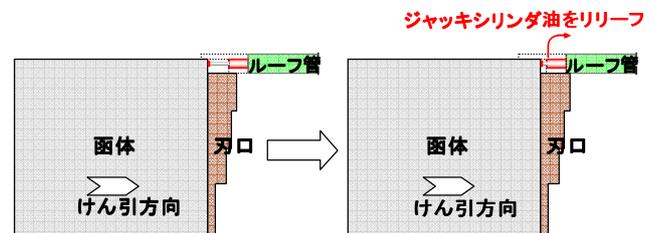


図-11 けん引時振動対策

b) 函体底面への滑剤注入

立坑発進架台と函体底面との摩擦が騒音の一要因と判断し、グラウト孔を利用して、一般の液体性滑材のように流れ出ることなく、それでいて流動性もあるエコメールを滑材として注入して、摩擦低減を図った。同材料は、シールドテールシーラーでの実績があり、非油性のため環境負荷も低減できた。

c) 振動低減補助ジャッキの使用

函体をけん引形式で移動させる場合、PC鋼線の伸びは必ず発生する。そこで、補助推進ジャッキを配置して、静止摩擦と動摩擦との差分をけん引力に負担させないけん引配分方式とし、円滑なけん引を実施した。

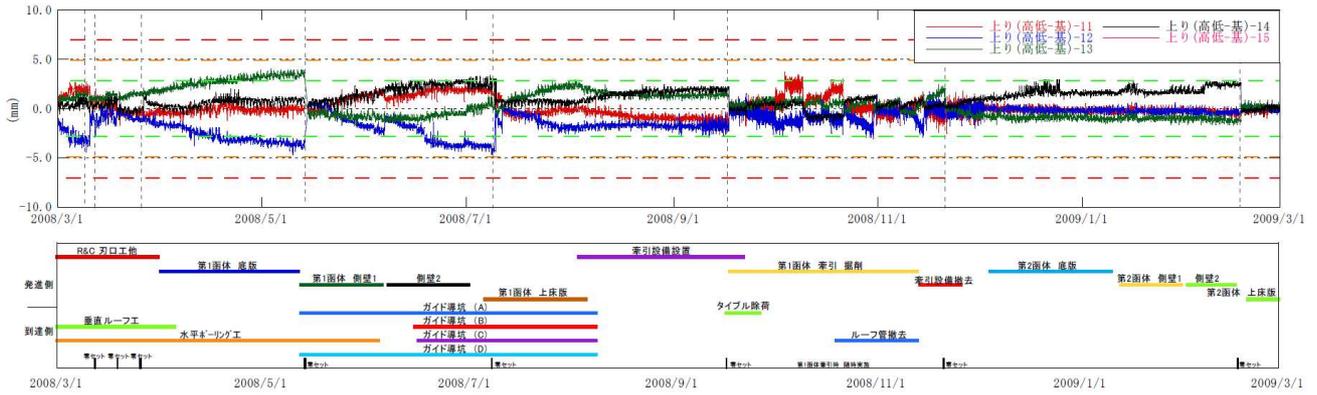


図-12 軌道自動計測結果

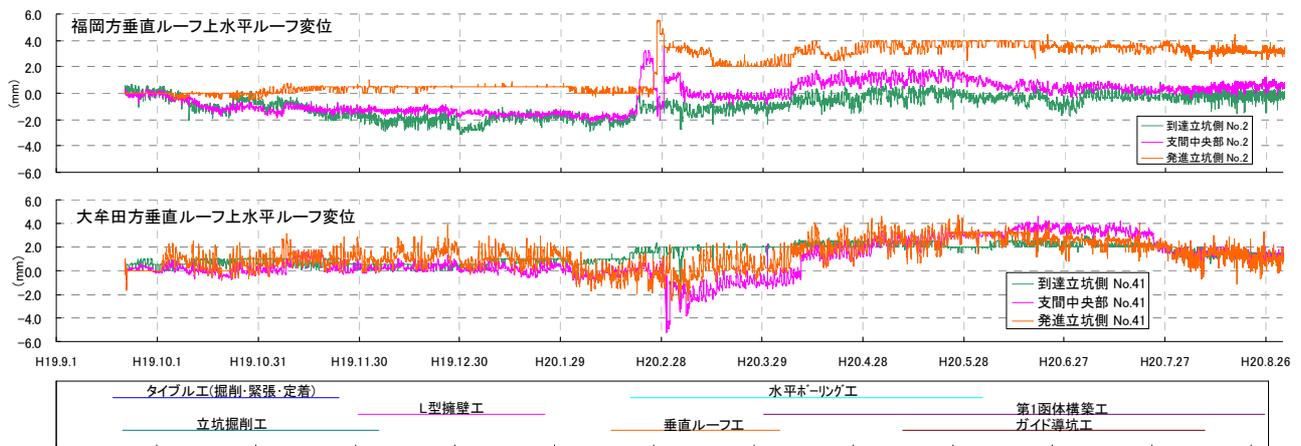


図-13 垂直ルーフ施工時水平ルーフ沈下計測結果

7. 計測工

(1) 軌道計測

当該営業線は、縦横断に曲線を有し、カントもある複雑な線形となっており、加えて架線柱配置条件から定まる電車線の懸架位置による軌道変位制約もある。この軌道計測を手動計測とトータルステーションによる自動計測の双方で管理することで、営業線安全運行を実現した。

自動計測の結果を図-12に示す。

(2) 水平ルーフ沈下計測

水平ルーフ施工完了後から函体けん引開始まで約1年の長期間となるため、その間のルーフ沈下を把握(図-13)し、情報化施工を実施することで、函体けん引時の軌道影響回避を図った。加えて、既設水平ルーフの挙動把握により垂直ルーフの情報化施工による昼間施工を実現し、工程短縮にも寄与した。

8. おわりに

当工事では、低土被り大断面のR&C工法施工における上部への影響回避のための空隙充填材や函体姿勢制御・FCプレート自動制御システム、さらには作業効率向上と安全性向上の両立を実現した自動昇降拡幅ステージの開発を行った。

今後、ボトルネック解消を目的として、市街地で増加傾向にある立体交差工事では、直上への影響を低減しながら施工可能な非開削工法の採用頻度の増加やその大型化が予想される。

本稿が同種工事の施工計画や施工管理において参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省福岡国道事務所：事業案内パンフレット
- 2) 西日本鉄道株式会社：西日本鉄道株式会社ホームページ
- 3) 栗林正明, 瀬戸清, 田中啓之, 吉迫和生：沈下抑止特殊充填材のパイプルーフ推進工法用滑材への適用実績, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007.9