

関門トンネルにおける長期耐久性向上を目指した コンクリート床版のリフレッシュ工事

Concrete slab replacement aimed at long term durability in KANMON Tunnel

稲森宏育*, 小林康範**, 棟安貴治***, 東 輝彦****, 澤田直行*****

Hiroiku Inamori, Yasunori Kobayashi, Takaharu Muneyasu, Teruhiko Higashi, Naoyuki Sawada

*大成建設(株)九州支店,土木部室長 (〒810-8511 福岡市中央区大手門 1 丁目)

**西日本高速道路(株)九州支社,宮崎工事事務所工事長 (〒810-0001 福岡市中央区天神 1 丁目)

***西日本高速道路(株)九州支社建設事業部,構造技術課主任 (〒810-0001 福岡市中央区天神 1 丁目)

****大成建設(株)東京支店,土木部所長 (〒163-6008 東京都新宿区西新宿 6 丁目)

*****大成建設(株)九州支店,土木部課長 (〒810-8511 福岡市中央区大手門 1 丁目)

KANMON Tunnel of Route No. 2 National Road is a very long undersea road tunnel with total length of 3,461 m, crossing under the KANMON Strait connecting Honshu with Kyushu acting as an important transportation hub. In this construction work, approximately 780 m of undersea concrete slab was drastically replaced. In just a short period of total 7 months, the existing concrete slab was removed and replaced, then finished with pavement. In this paper, the FRP composite slab and use of Ordinary Portland Cement with 50% replacement of blast furnace slag are introduced.

Key Words: Concrete slab replacement, FRP composite slab, Blast furnace slag

キーワード: コンクリート床版取り替え, FRP 合成床版, 高炉スラグ微粉末

1. はじめに

国道2号線関門トンネルは、本州（山口県下関市）と九州（福岡県北九州市）に挟まれた関門海峡直下の延長3,461mの長大海底道路トンネルである。本州と九州を結ぶ大動脈として、現在約35,000台/日の交通量が有り、昭和33年3月に開通してから供用後53年が経過している。コンクリート床版は海水による塩害、交通量の増大や車両の大型化、また経年変化に伴う劣化が進んでいる。これまで約10年毎に床版補修工事(海底部)がなされてきた。今回工事は、海底部約780mのコンクリート床版を抜本的

に取り替えるものであり、平成21年および22年のそれぞれ3.5ヶ月、計7ヶ月という短い工期で床版を撤去し打ち替え、舗装を行う(図-2)。床版の劣化状況および施工条件を踏まえ、打ち替えられる床版に求められる項目は①塩害に対する耐久性に優れる、②疲労に対する耐久性に優れる、③狭隘な施工箇所で急速施工が可能な構造である、が上げられた。今回採用された「FRP合成床版」および「高炉スラグ微粉末にて50%置換したコンクリート」の使用を中心に紹介を行う。

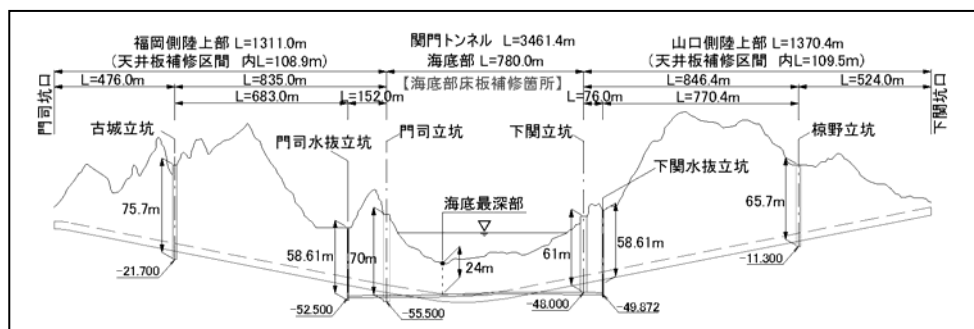


図-1 関門トンネル縦断面図

2. 床版の耐久性を向上させるための材料の選定

2.1 コンクリート

高炉スラグ微粉末は、製鉄所の高炉より副生される高炉水砕スラグを微粉碎した水硬性の混和材である。JIS A 6206 では、高炉スラグ微粉末は、比表面積により高炉スラグ微粉末 4000、高炉スラグ微粉末 6000、高炉スラグ微粉末 8000 の 3 種類を規格化している。本工事では詳細設計での温度応力解析により高炉スラグ微粉末 4000 を採用した。1m³ 当り粉体量を、高炉スラグ微粉末に 50% 以上置換した普通ポルトランドセメントは、置換していないものよりもコンクリートの細孔組織が緻密化し、塩化物イオンの浸透を防ぐことができ RC 床版の耐久性を向上することができる。一方で、同セメントの使用は、自己収縮量が大きいため、橋梁上部工等のひび割れ幅を制御する必要がある構造物では適切に設計することが肝要である。この他、高炉スラグ微粉末を使用したセメントは、アルカリ骨材反応 (ASR) の抑制や環境負荷の低減が期待できる材料である。

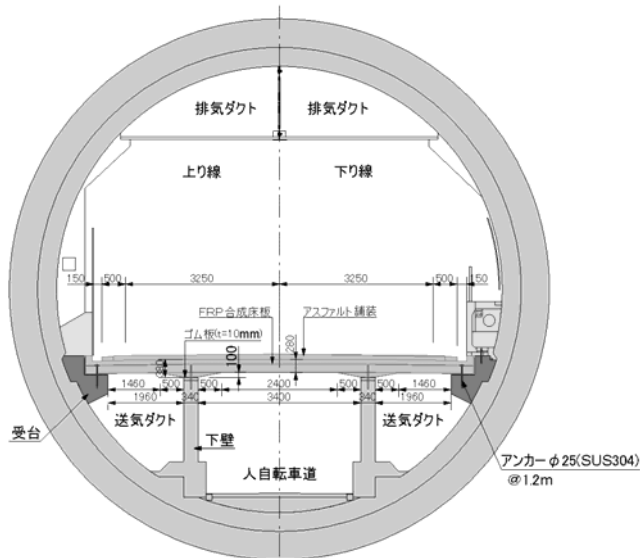


図-2 関門トンネル断面図 (補修箇所)

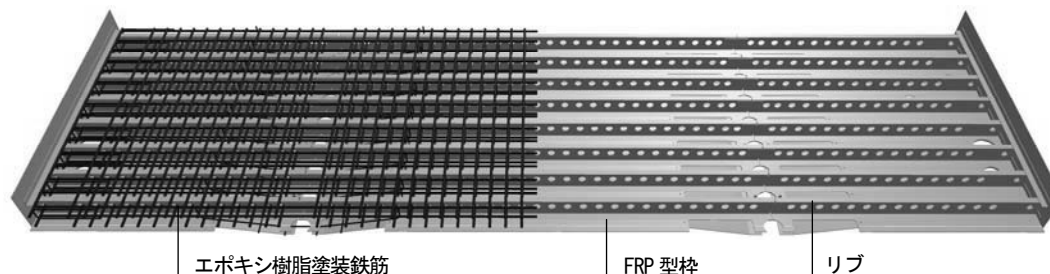


図-3 FRP 合成床版

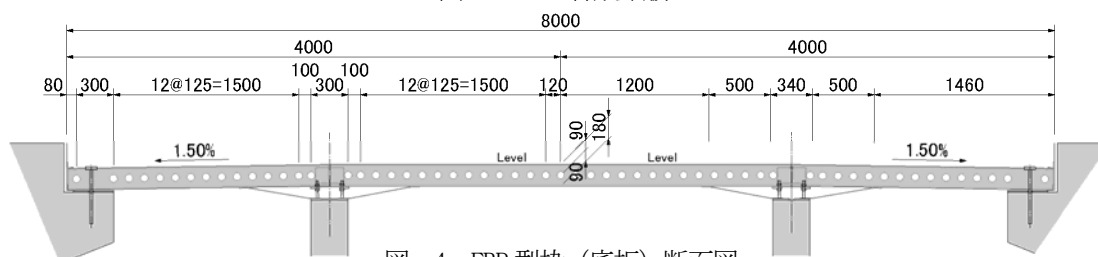


図-4 FRP 型枠 (底板) 断面図

2.2 鉄筋

床版の耐用年数 100 年程度を確保するため、鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋 (SD345) を採用し、鉄筋のかぶりを 70mm とした。許容応力度については、床版の長期耐久性を確保すること、ならびにエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用しており付着性能が一般の鉄筋よりも低下することを考慮し、道路橋示方書より 20MPa の余裕をみて、120MPa に設定した。

2.3 FRP 型枠

FRP 合成床版は、FRP 合成床版研究会により、設計・施工マニュアル (案) (以下、マニュアル (案))¹⁾ が平成 21 年 6 月に整備された。

同床版は、コンクリート床版の長期耐久性を期待できることから、高い耐久性が必要となる沿岸部の橋梁や維持管理に非常に手間がかかる跨道橋・跨線橋に適用されている。図-3 に、FRP 型枠の形状およびフォトモンタージュを示す。

FRP 型枠は以下の特徴を有する。

- ・ 繊維補強プラスチック (FRP) が床版底面を覆うため、床版下面からの塩化物イオンの侵入を防ぎ、また人自転車道天井となる床版の剥落を防止できる。
- ・ 底版とリブから構成されており、リブおよび底版上に接着した 3 号けい砂により、コンクリートと一体化される。
- ・ 所要の耐荷性能および耐疲労性が輪荷重走行試験等の実験において確認されている
- ・ リブの補剛効果により床版支保工を必要としない。また軽量であるため、本工事のように閉所で、使用する重機等に制約のある場所での急速施工する必要がある場合において有利な工法である。
- ・ 防災 3 級以上 (JIS A 1322) の難燃性で延焼し、燃焼時にも有毒ガスが発生しない。

3. 高炉スラグ微粉末に対する検討

3.1 概要

詳細設計にあたり、まず予備実験として高炉スラグ微粉末の自己収縮の影響を確認した結果、床版コンクリートに引張応力度が残留することが判明した。そのため、この引張応力度に対して補強鉄筋を追加することとした。一方、セメントの自己収縮量は粉末度の影響を受け、粉末度が大きいほど自己収縮量が大きくなる傾向にあり、使用する粉末度により補強鉄筋量が異なる。本件では、高炉スラグ微粉末として粉末度 6000 と粉末度 4000 について経済性および耐久性を比較し、粉末度 4000 を選定した。本設計では、自己収縮の影響を抑え合理的な床版とするために、3 段階の検討を実施した。図-5 に検討の流れを示す。

3.2 コンクリートについて

(1) コンクリートの配合

表-1 に、本工事で実施した試験練りにより定めた配合結果を示す。コンクリートは、収縮を軽減するため、膨張材を 20kg/m³ 混入した。

(2) コンクリートの自己収縮量

図-6 に、試験練りコンクリートの膨張材による膨張ひずみと自己収縮ひずみの伸縮履歴を示す。膨張後から有効材令 28 日までの収縮量は、次の通りである。

粉末度 6000 の収縮量：170μ

粉末度 4000 の収縮量：110μ

コンクリートの膨張・収縮特性について、試験結果をもとに次のように考えた。コンクリートのひずみは、有効材令 2～3 日で最大となり、有効材令 7 日まで急激に収縮量が増加する。その後、収縮量は漸減し約 1 ヶ月で収束している。

3.3 耐用年数について

普通ポルトランドセメント、高炉微粉末 4000 および 6000 を使用したセメントの耐用年数について、以下に整理する。検討条件は、次の通りである。

- ・鉄筋のかぶり：70mm
- ・鉄筋の仕様：エポキシ樹脂塗装鉄筋
- ・コンクリート表面の塩化物イオン濃度：13kg/m³

エポキシ樹脂塗装鉄筋を配置したコンクリート構造物の耐久年数²⁾と、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの拡散係数³⁾から得られた各セメント使用時の耐用年数を表-2 に示す。耐用年数が普通ポルトランドセメント：67 年、高炉スラグ微粉末 4000：85 年、高炉スラグ微粉末 6000：90 年であった。高炉スラグ微粉末 4000 と 6000 の間で顕著な差は見られなかった。

3.4 高炉スラグ微粉末に関するまとめ

粉末度 4000 と粉末度 6000 を比較すると、前者の工費が若干安くなるのに対して、耐用年数は 5 年短くなった。また、粉末度 6000 の自己収縮量は、粉末度 4000 よりも

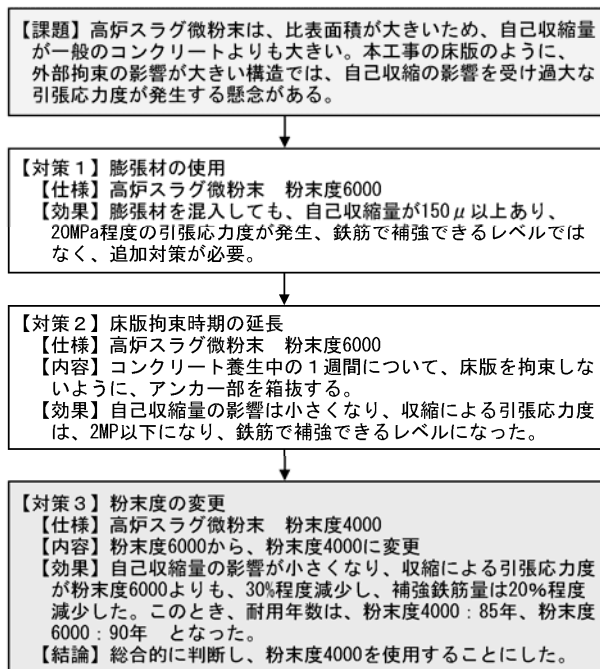


図-5 高炉スラグ微粉末 選定の流れ

表-1 コンクリートの配合（試験練りの結果）

配合 No.	スラグ 比表面積 [cm ² /g]	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水 W (1.00)	セメント 普通 (3.16)	高炉スラグ 微粉末	膨張材 EX (3.15)	細骨材 石灰砂 (2.66)	粗骨材 2005 (2.71)
I	6000	47.0	50.1	155	155	155	20	923	935
II	4000	47.9	49.8	158	155	155	20	912	935

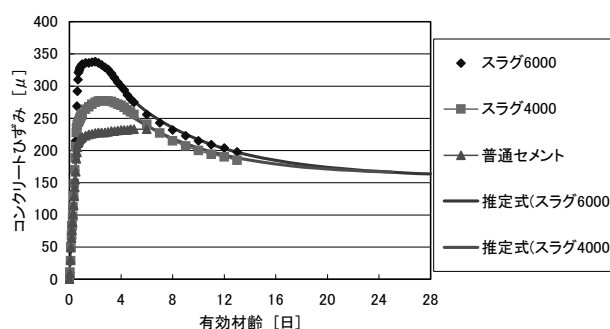


図-6 コンクリートの伸縮特性

表-2 各セメント使用時の耐用年数の算定

項目	単位	N	4000	6000	
水セメント比	W/C	0.479	0.479	0.479	
コンクリートの塩分拡散係数	Dp	cm ² /年	1.132	0.499	0.499
Dpの精度に対する安全係数	γ _p		1.2	1.2	1.2
拡散係数の特性値	D _k	cm ² /年	1.359	0.599	0.507
腐食限界濃度	C _{lim}	kg/m ³	1.2	1.2	1.2
表面塩化物イオン濃度	C _o	kg/m ³	13	13	13
構造物係数	γ _i		1	1	1
塩化物イオン濃度のばらつき	γ _{cl}		1.3	1.3	1.3
コンクリートの材料係数	γ _c		1.3	1.3	1.3
かぶり	c		70	70	70
設計拡散係数	D _d	cm ² /年	1.766	0.779	0.659
エポキシ樹脂塗装の厚さ	c _{ep}		0.22	0.22	0.22
エポキシ樹脂塗装の見かけの拡散係数の特性値	D _{epd}	cm ² /年	0.000002	0.000002	0.000002
鋼材位置での塩化物イオン濃度	C _d	kg/m ³	1.218	1.210	1.208
耐用年数	t	年	67	85	90
耐用年数の比率(4000を基準)	比率		0.79	1.00	1.06

ここに、N:普通ポルトランドセメント、4000：高炉スラグ微粉末 4000 を混入したポルトランドセメント、

6000：高炉スラグ微粉末 6000 を混入したポルトランドセメント

大きいことから、ひび割れが発生するリスクが高くなり、床版コンクリートの耐久性に影響を与えることが懸念された。

以上を踏まえて、本工事の床版コンクリートは、検討の結果、高炉スラグ微粉末 4000 を採用した。

4. 支承およびアンカーに対する設計

4.1 概要

図-7, 8 に基本設計における支承部詳細図を示す。基本設計の支承部は、床版と下壁・外壁のコンクリートが直接接触する構造となっている。そのため、車両走行時の床版の変形によるコンクリート接触部の局部応力と、支承部の目開きによるアンカーバーの腐食が懸念された。

詳細設計では、FEM 解析を実施し支承構造を見直すとともに、アンカーバーの防錆について再検討し、耐久性、経済性、施工性を総合的に判断し、ステンレス SUS304(JIS G 4322)を採用することとした。

4.2 支承近傍の応力照査

(1) 引張応力度の制限値

下壁の天端部 支承工 A (図-7) は、ポリマーセメント打設による無筋状態になることから、引張応力度を疲労強度以下に抑制することとした。

下壁部の設計基準強度を 30N/mm^2 とする。引張の疲労強度は、2007 年制定 コンクリート標準示方書 (設計編: 本編)「5.2.2 疲労強度」より、次式により算出した。

$$f_{rd} = k_{1f} \cdot f_d (1 - \sigma_p / f_d) (1 - \log N / K)$$

ここに、

k_{1f} : 引張の場合 = 1.0

f_d : 設計引張強度

$$f_d = f_{tk} / \gamma_c = 0.23 \cdot f'_{ck}^{2/3} / 1.3 = 1.71 \text{ MPa}$$

σ_p : 永久荷重による応力度 = 0.0 MPa

N : 繰返し回数

関門トンネル 車道床版改良設計 設計報告書より、通行台数は、2342 台/時間、耐用期間 100 年とする

$$\begin{aligned} \therefore N &= 2342 \text{ 台/時間} \times 2 \text{ 輪} \times 24 \text{ 時間} \times 365 \text{ 日} \times 100 \text{ 年} \\ &= 4,103,184,000 \text{ 回} \end{aligned}$$

$$K: K=17$$

$$\begin{aligned} \therefore f_{rd} &= 1.0 \times 1.71 \times (1 - 0 / 1.71) \times \\ &\quad (1 - \log(4,103,184,000 / 17)) = 0.74 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(2) 支承近傍の発生応力

図-9 に、支承近傍に発生する軸直角方向直応力分布を示す。下壁上には、床版と下壁のコンクリートが直接接触することにより支圧力が生じ、その直行方向には

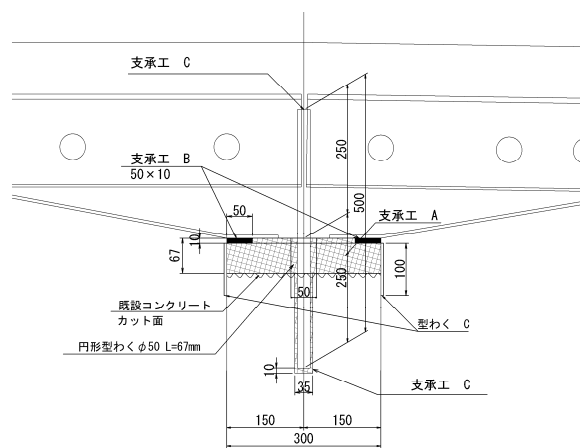


図-7 下壁上の支承構造

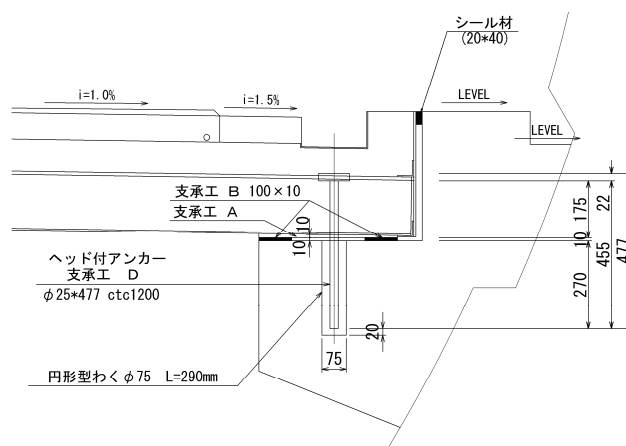


図-8 受台上の支承構造

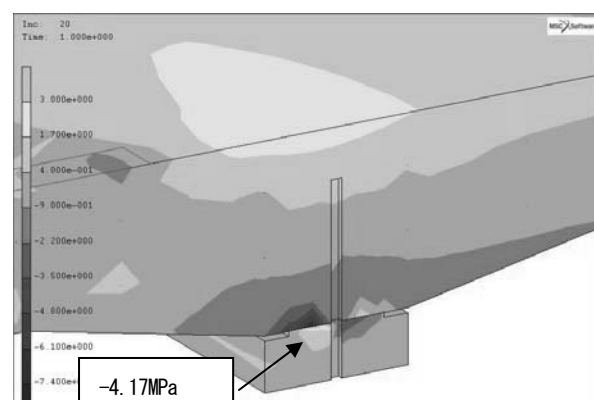


図-9 支承近傍の軸直角方向直応力分布 (原案)

割裂引張応力が生じる。本件では、割裂引張応力度が、 $4.17 \times 1.2 = 5.00 \text{ MPa} > f_{rd} = 0.74 \text{ MPa}$ NG より、引張応力度の制限値を上回ることが確認された。そのため、支承部の構造を見直すこととした。

4.3 支承構造の変更と照査結果

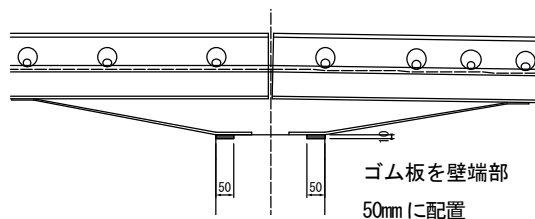
本件では、割裂引張応力度、すなわち支圧力を低減するために、床版と下壁の間にゴム板を設置することとした。図-10 に原案 (基本設計) と改善案 (詳細設計) を

示す。図-11 に、改善案の軸直角方向の引張応力度を示す。緩衝ゴムを下壁上全面に設置することにより、下記のとおり下壁に発生する応力度は制限値を満足することが確認された。

$$0.46 \times 1.2 = 0.55 \text{ MPa} < f_{rd} = 0.74 \text{ MPa} \text{ OK}$$

なお、緩衝ゴムは、死荷重や活荷重の反力を下壁・外壁へ伝達する機能も必要であることから、その仕様は道路支承便覧：日本道路協会を参照し、合成繊維で補強したゴム板を使用することとした。

原案（基本設計）



改善案（詳細設計）

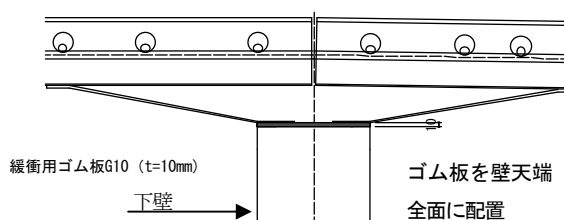


図-10 支承構造の変更

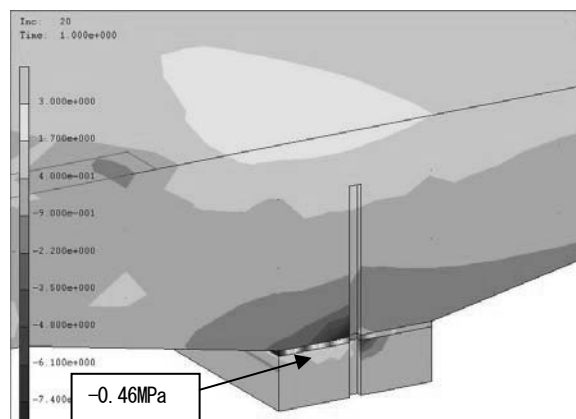


図-11 支承近傍の軸直角方向直応力分布



写真-1 ウォールソー切断状況

5. 施工

5.1 構造物(床版)取り壊しの施工

既設床版の撤去方法は、工程短縮を目指して大型ブロックでの切り出す方法とした。施工手順を以下に示す。

- ① 下壁と床版部をウォールソーにて切断（写真-1）
- ② 撤去可能な大きさで床版をフラットソーにて切断
- ③ 専用の床版撤去台車にて吊上げ回転、トレーラーにて搬出（写真-2, 3）
- ④ 端部を人力はつりにて撤去

床版の撤去サイズは大型トレーラーにて搬出可能な大きさとし、床版を横断方向に 2.4m ピッチに切断した。撤去床版の重量は 17 t /枚と大重量となったが、専用の床版撤去台車により昼夜で平均 12 枚（28.8m）をスムーズかつ安全な撤去を実現した。

5.2 FRP 型枠の架設

FRP 床版はリブに鉄筋貫通穴を設置し下筋橋軸鉄筋を通して配置する。側型枠が予め設置されており、FRP 床版架設後に下筋を組むことが困難になる。このため、以下の手順にて施工を実施した。



写真-2 専用の床版撤去台車



写真-3 床版撤去状況

- ①FRP 型枠搬入後、現場坑口付近のヤードにて FRP 型枠に下筋を設置
- ②トラックにて坑内に移動
運搬台車に FRP 型枠を吊り込み・架設場所へ移動
(写真-5)
- ③テレスコクレーンにて架設 (写真-6)
- ④床版上筋を現地にて組立 (写真-7)

5.3 床版コンクリートの施工

床版コンクリートは、海底部 $L=780\text{m}$ を 8BL に分け、平成 21 年と 22 年にそれぞれ 4BL ずつ施工を行った。工程短縮のため、床版躯体工と FRP 型枠架設を同時施工で行った。コンクリート打設は、ポンプ車を床版打ち換え区間以外に設置してコンクリートを圧送する工法を採用したため、配管長が最大 300m の長距離打設となった。打設に先立ち、長距離配管を想定した圧送実験を実施し、配管内圧力および時間当たりの実圧送可能量を計測し、配合設計で問題の無いことを確認した。実打設においても長距離の配管打設を問題なく実施することが出来た。

床版の長期耐久性確保の観点から養生に対しては十分な配慮を持って施工を実施した。打設直後の乾燥クラック発生防止として被膜養生剤を天端均し時に 2 度に分け規定量散布した。湿潤養生は、保水性能に優れた養生マットを使用して行った。また、トンネル内は平均気温 20°C でほとんど変化せず、日照も無いため、養生条件としては良好と言えるが、トンネル内は常時換気を行っているため、特に下関・門司の両立坑部 (図-1) 付近はトンネル内の換気のため風が常時吹いている状況であった。このため、コンクリートを打設した近傍部においては風の対流が無いよう送気・排気の調整を行った。また、普通コンクリート使用の場合、通常は 7 日間の湿潤養生を必要とするが、今回工事は高炉スラグ微粉末含有のコンクリートを使用しており、初期の自己収縮量低減を目指し、極力長い期間養生を実施した。次工程の施工のためダンプトラック、クレーン車を新設床版上に上げて施工を行う橋面使用をコンクリートの必要強度発現から養生 11 日後と設定した。橋面使用を工程の許す限り極力遅くし、養生を 15~25 日間に延長して実施した。

謝辞

日本の大動脈を 9 月から 12 月にかけて 3.5 ヶ月間を 2 ヶ年に亘り通行止めを行い、施工を実施した。無事完工できましたことは、関係内外の方々の多大なご支援を頂いた賜物であり、ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松井繁之, 久保圭吾, 大西弘志他: FRP 合成床版設計・施工マニュアル (案) (FRP 合成床版研究会, 2009.)
- 2) 武若耕司他: コンクリートライブラリー 112 エポキシ樹脂塗装



写真-4 床版撤去完了



写真-5 FRP 型枠運搬状況



写真-6 FRP 型枠設置状況



写真-7 床版鉄筋組立完了

鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針 改訂版 (土木学会 コンクリート小委員会, 1986.)

- 3) 近田孝夫, 檀康弘他: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐海水性 (コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 14, 1992.)