

報告 トンネル監視員通路縦壁補修（埋設型枠工法）の実物大試験体によるモルタル充填性に関する実験的検討

山内 健利*1・大田 一成*2・石田 征男*3・安藤 哲二*4

要旨：中国地方の高速道路におけるトンネル監視員通路縦壁は冬季に散布される凍結防止剤による塩害で劣化損傷し、早期の補修が望まれている。補修工法採用にあたっては、耐久性はもちろん通行車両に与える影響を最小限とした施工方法が要求され、その1工法として埋設型枠（超高強度繊維補強コンクリート）工法が検討されている。本報告は、この埋設型枠と既設縦壁との隙間に充填されるモルタルの充填性と付着性能について実物大試験体による実験を行い、本工法の施工性および有効性を確認したものである。

キーワード：監視員通路縦壁、埋設型枠、超高強度繊維補強コンクリート、実物大試験体、モルタル充填性

1. はじめに

高速道路のトンネル監視員通路は、トンネル内の保守点検作業の安全性確保を目的とした管理用通路として設置されたもので、その構造は「車両が接触しても安全な高さおよび強度と、電らん管・水道管等の埋設物を収納できる空間を確保するもの」と規定されている。¹⁾

図-1 にトンネル監視員通路の標準的な構造を示す。このトンネル監視員通路は、鉄筋コンクリート製縦壁（以下、縦壁）背面に埋設物を収納し、中詰め砂により充填されているが供用開始から20年以上経過し、写真-1 に示すように表面タイルの脱落等、劣化・損傷が激しく補修工事の必要性が高まっている。

これらの劣化要因として冬季に散布される凍結防止剤が挙げられるが、中国地方の高速道路に散布される凍結防止剤の総量は約17,000 t/年（最大値は約50t/km）との報告²⁾があり、最近の調査・報告によるとこの縦壁の劣化要因の主たるものは走行車両の水しぶき（凍結防止剤を多量に含む）による塩害であり、縦壁には鉄筋の腐食発生限界濃度 1.75kg/m^3 （普通ポルトランドセメント $\text{W/C}=0.55$ ）を大きく超える 6.70kg/m^3 （平均値）～ 12.9kg/m^3 （最大値）の多量の塩化物が浸透し、その範囲はトンネル全長に及ぶとの報告がある。³⁾

2. 縦壁補修（埋設型枠）工法

2.1 補修工法の要求性能

縦壁の補修工事を考えた場合、高い耐久性（耐塩害性）の確保、縦壁内部の管路や砂の移設撤去を伴わない施工方法および通行車両に与える影響を最小限とする必要がある。表-1 に、補修工事にあたっての要求性能を示す。

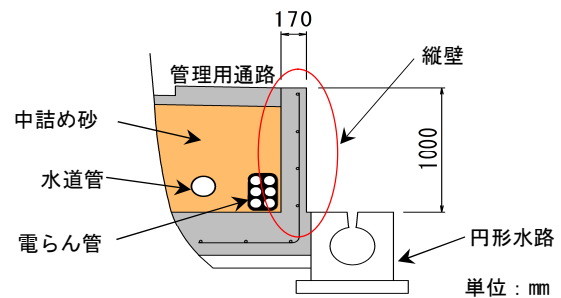


図-1 監視員通路（縦壁）の標準断面



写真-1 監視員通路縦壁の劣化・損傷状況

表-1 縦壁補修時の要求性能

項 目		要 求 性 能
耐塩害性	浸透防止	外部からの劣化因子（塩化物）の浸透防止（遮断）または低減
	腐食防止	内部鉄筋の腐食防止または低減
構造性能	基本構造	施工時に中詰め砂や埋設管等の移設を伴わないこと、縦壁前面の内装余裕幅（30mm）内に納まるもの
	耐荷性能	施工時（規制解放時）、荷重（中詰め砂による土圧、車両の衝突荷重）に耐えられるもの
施 工 性	規制条件	夜間（または昼間）のみの交通規制（走行車線規制）で施工できること
	支保条件	支保工は、通行車両の妨げとならない最少のものとし、衝突時に車両損傷を最小限とするもの
維持管理性	—	供用期間中、定期点検のみで大規模な補修工事を必要としないもの

*1 西日本高速道路エンジニアリング中国（株） 土木事業本部 道路技術部 上級主幹 （正会員）

*2 西日本高速道路エンジニアリング中国（株） 土木事業本部 道路技術部 道路技術第二課 課長 （正会員）

*3 太平洋セメント（株） 中央研究所 第2研究部 CSチーム 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*4 太平洋マテリアル（株） 営業本部 機能性材料営業部 グラウトグループ グループリーダー

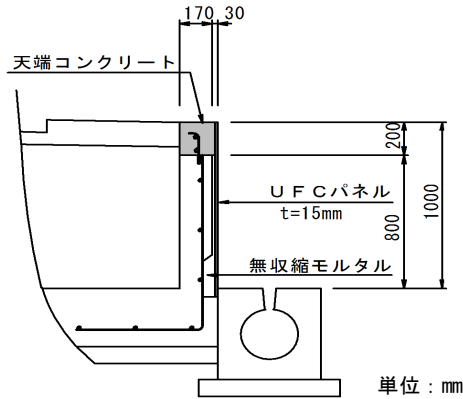
2.2 補修工法の選定

縦壁の補修工法選定は、表－1 の要求性能に着目し選定を行ったが、高い耐久性と施工性が要求されていることから本報告では埋設型枠工法を提案している。

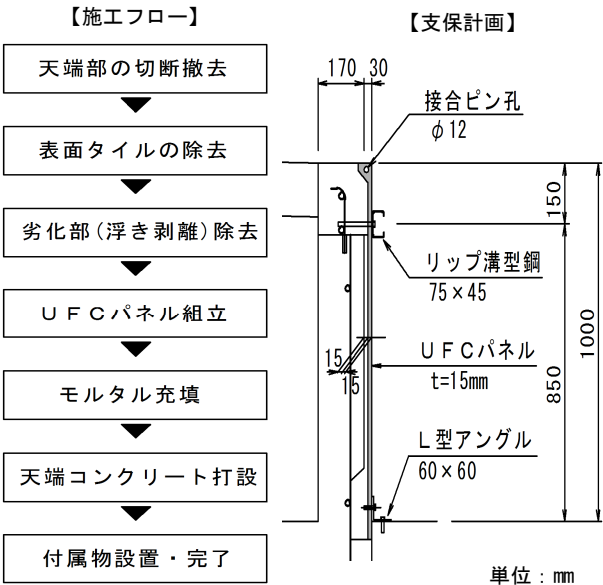
この埋設型枠工法は、縦壁前面の内装余裕幅 30mm 内に表－2 に示す超高強度繊維補強コンクリート⁴⁾板（以下、U F C パネル：t=15mm）を設置し、縦壁との隙間（最小 15mm）に表－3 に示す無収縮モルタルを充填し一体化するものである。この工法は、U F C パネルを使用することにより外部からの劣化因子の浸透量を大幅に低減、さらに軽量で施工性も良く、要求性能である耐塩害性、施工性、維持管理性に優れるものである。

（図－2、図－3 参照）

また、構造的には、劣化部の除去範囲をかぶり部分（50mm）に限定することで施工時にも土圧や衝突荷重に耐えられる構造としている。なお、縦壁天端や背面からの劣化因子の浸入も想定されるため内部鉄筋の腐食対策として無収縮モルタルに防錆剤（多価ニトロエステル塩）を添加することにより防錆効果を付与している。



図－2 埋設型枠工法の標準断面図



図－3 埋設型枠工法の施工要領図

表－2 U F C パネルの材料特性

項 目	特性値ほか
補強繊維混入率 (vol. %)	鋼繊維 2 (2 以上)
圧縮強度 (N/mm ²)	180 (150 以上)
引張強度 (N/mm ²)	8.8 (5 以上)
ひび割れ強度 (N/mm ²)	8.0 (4 以上)
弾性係数 (kN/mm ²)	50
付着層	凸タイプ t=5mm
単位重量 (kg/m ³)	2,550

※ () 内は規格値⁴⁾を示す

表－3 無収縮モルタルの材料特性

項 目	特性値ほか
圧縮強度 (N/mm ²)	3 日 42.4 (25 以上)
	28 日 65.4 (45 以上)
膨張収縮率 (%) 材齢 7 日	+0.24 (収縮を示さない)
ブリーディング率 (%)	0.0 (2.0 以下)
流動性 (J ₁₄ 漏斗 : 秒)	8±2
弾性係数 (kN/mm ²)	29.5
付着強度 (N/mm ²)	4.3 (1.5 以上)
単位重量 (kg/m ³)	2,300

※ () 内は規格値⁶⁾を示す

2.3 埋設型枠工法の検討課題

今回提案した埋設型枠工法は、新設構造物に多数実績がある埋設型枠と異なり、狭隘な空間（縦壁と U F C パネルの隙間、最小 15mm）に高さ 800mm まで無収縮モルタルを充填し一体化する。また、U F C パネルの固定はモルタル充填時の側圧に対処するため通常 3 段固定が必要であるが、劣化因子浸入口（支保用ボルト孔）を最小限とするとともに施工の省力化を目的に図－3 に示すように、上下 2 段固定（リップ溝型鋼＋L 型アングル）の簡易な支保材を採用している。

このため、検討課題として

- 課題(a)狭い隙間（最小 15mm）にモルタル充填可能か
 - 課題(b)U F C パネルに作用する側圧はどの程度か
 - 課題(c)モルタルは空隙等なく充填できるか
 - 課題(d)モルタルの付着性状は規格値を満足するか
- の確認・検証が必要であったため、本報告では課題(a)および (b)を確認する「事前確認試験」と課題(c)および (d)を確認する「実物大試験」を実施し、埋設型枠工法の施工性および有効性を確認・検証することとした。

3. 事前確認試験

3.1 事前確認試験概要

実物大試験実施前に、モルタル充填方法の確認や支保工計画に必要な課題(a)および課題(b)について図－4 および写真－2 に示す事前確認試験（最小隙間 10mm に設定）

を実施した。また、モルタル充填は先端扁平加工した充填器具(写真-3 参照)を使用し、U F C パネル No.1(1200×1000mm)、No.2 ～No.4 (750×1000mm、パネル 3 枚 1 セット) の順で行うとともに、モルタル充填時間および側圧によるパネルひずみ(縦ひずみ 11 点、横ひずみ 1 点)を測定した。

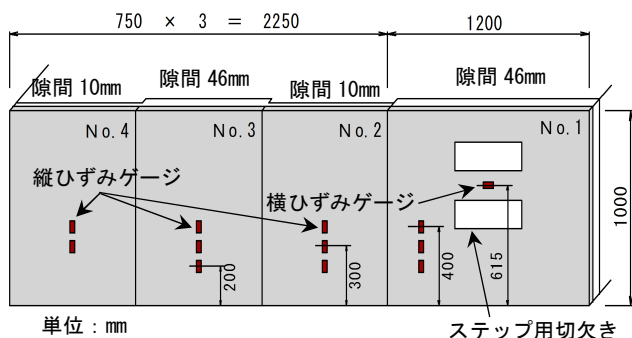


図-4 事前確認試験体



写真-2 事前確認試験状況



写真-3 モルタル充填器具

3.2 U F C パネルに作用する側圧測定

モルタル充填時の側圧の大小はモルタル充填速度や支保材の固定間隔(850mm)に影響を受けるため、モルタル充填速度およびU F C パネル (t=15mm) 表面のひずみを測定し、充填方法や支保材間隔の検討資料とした。

モルタルの充填は、モルタル供給量を一定とし連続して行った。モルタルの充填速度は、充填完了高さで充填に要した時間より計算し、パネル No.1 は 3.00m/h、パネル No.2 ～No.4 は 1.38m/h と推定した。この速度の差は、充填量(区間幅)の相違により生じたものである。

充填速度が速く、ひずみが最も大きい結果となったパネル No.1 のひずみを図-5 に、パネル No.1 の応力度(ひずみ換算値と計算値)を図-6 および表-4 に示す。なお、応力度のひずみ換算値はU F C パネルの下端より 400mm の位置のひずみと弾性係数より算出した。

次に、パネルに作用する側圧の計算式は、式(1)に示す土木学会式⁷⁾を使用し、応力度は支保材により上下2段に固定された梁構造(図-3 参照)と考え算出した。

$$P_w = W_c H \quad (1)$$

ここに、 P_w : 液圧 (kN/m²)、 W_c : モルタル単位重量 (23.0kN/m³)、 H : 充填高さ (m) とした。

なお、支保材の上段はリップ溝型鋼による固定で可動状態に近く、下段はL型アングル固定による固定状態に近い状態と考えられるが正確な固定状態が不明なため、上段を可動、下段を固定(回転可)とする単純梁と上下段とも固定とする両端固定梁の2形式について応力度を算出し比較した。

図-5 より、パネル No.1 の横ひずみは縦ひずみの 1/2 ～1/3 程度であり縦ひずみが支配的と考えられる。さらに縦ひずみの高さの違いによる差は小さいことが明らかとなった。また、計測されたひずみより換算したU F C パネル応力度(下端より 400mm 位置)は、図-6 および表-4 に示すように充填高さ 500mm 以下において両端固定梁で算出した計算値にほぼ一致していると考えられる。

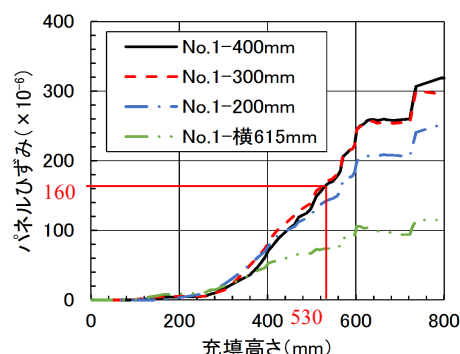


図-5 パネル No.1 高さ別のひずみ

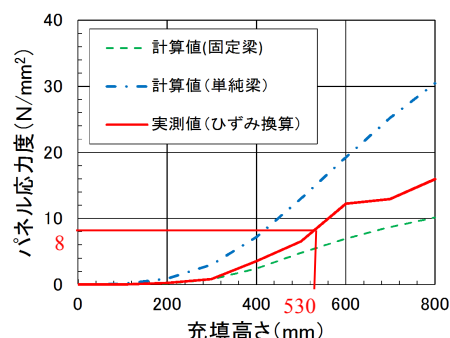


図-6 パネル応力度(計算値と実測値)

表-4 U F C パネル応力度比較 (パネル No.1 下端より 400mm 位置)

充填高さ (mm)		100	200	300	400	500	600	700	800	備考
計算値	側圧 (kN/m ²)	2.3	4.6	6.9	9.2	11.5	13.8	16.1	18.4	
	応力度 (N/mm ²)	0.11	0.91	3.04	7.22	13.04	19.24	25.26	30.46	単純梁
	応力度 (N/mm ²)	0.02	0.15	0.78	2.43	4.80	6.94	8.72	10.15	両端固定梁
実測値	ひずみ (×10 ⁻⁶)	0	5	17	71	131	245	259	319	
	応力度 (N/mm ²)	0	0.25	0.85	3.55	6.55	12.25	12.95	15.95	弾性係数 50kN/mm ²

3.3 モルタル充填方法と支保工

モルタルの充填性については、計画では最小隙間 15mm であるが、今回は施工誤差等を考慮しあえて最小隙間 10mm にて試験を実施した。その結果、先端を扁平加工した充填器具により閉塞等も発生せず、十分充填可能であることが目視確認できた。

パネル表面の応力度は、図－5 および図－6 よりパネル No.1 において充填高 530mm 付近（ひずみ 160×10^{-6} ）でパネルひび割れ強度の 8.0N/mm^2 に到達したものと考えられた。さらに 800mm まで充填完了後、目視ではひび割れは確認できなかったものの、表面に水を噴霧することで微細なひび割れを確認した。

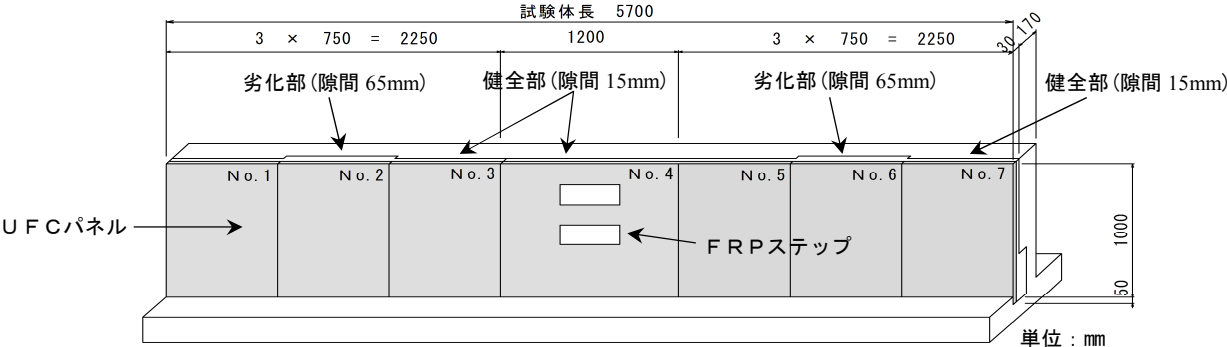
以上の結果より、上下 2 段を固定した支保工計画ではモルタルを 800mm 一層で充填するとパネルにひび割れが生じる可能性が高いため、モルタルの充填方法は 2 層（1 層目 400mm まで、翌日 2 層目 800mm まで）に分けて充填することとした。なお、充填高さ 400mm のパネル応力度は表－4 より実測値 3.55N/mm^2 、計算値 2.43N/mm^2 （固定梁）～ 7.22N/mm^2 （単純梁）であり、ひび割れ強度に対して十分余裕のある値となっている。

4. 実物大試験と試験内容

4.1 実物大試験概要

試験体は、課題(c)および課題(d)について現地の監視員通路縦壁を模擬して実物大とし、試験体の中央部 1.20m（パネル No.4）に足掛け用のステップ部（FRP ステップ）を再現するとともに、モルタル充填隙間を健全部（パネル No.1, 3, 4, 5, 7）15mm, 劣化部（パネル No2, 6）65mm として実施した。

（表－5、図－7、写真－4～写真－6 参照）



図－7 実物大試験体



写真－4 実物大試験体



写真－5 UFC パネル



写真－6 UFC パネル組立完了

4.2 モルタルの充填性確認

モルタルの充填性確認は、ここでは近接目視による確認が可能な透明型枠、ファイバースコープおよび切断面観察を行った。

透明型枠による観察は、試験体の両端部にアクリル板を取り付け、写真－7 に示すように U F C パネル下端部の隙間、健全部 15mm ～劣化部 65mm に至るまでモルタル材の漏出や気泡の発生もなく均等に充填されたことを確認した。また、最も狭い隙間の健全部（パネル No.1, 3, 4, 7）15mm において写真－8 に示すようにファイバースコープカメラにより充填状況を確認した。

次に、写真－10～写真－12 に示すようにモルタル硬化後に試験体をワイヤーソーにて 4 分割に切断し、切断面を目視で確認した。切断面の観察により試験体とパネルの隙間 15mm～65mm まで、いずれの箇所においても表面気泡、豆板および付着切れと思われるような箇所は確認されなかった。これらの結果より、モルタルの充填は最も狭い隙間である健全部 15mm においても十分充填できることが確認できた。

表－5 実物大試験内容・数量

項 目		内容・数量
試験体製作（設計基準強度 24N/mm^2 ）		$170\times 1000\times 5700$
U F C パネル ($t=15\text{mm}$)	標準部	$750\times 1050-6$ 枚
	ステップ部	$1200\times 1050-1$ 枚
モルタル 充填確認	透明型枠	端部（アクリル板）
	ファイバースコープ	1 式(CCD カメラ)
	切断面観察	1 式（4 分割）
付着強度試験	上記の試験体	$\phi 50\text{mm}\times 10$ 本
	室内試験体 $\square 300\text{mm}$	$\square 40\text{mm}\times 4$ 本



写真-7 透明型枠による充填確認

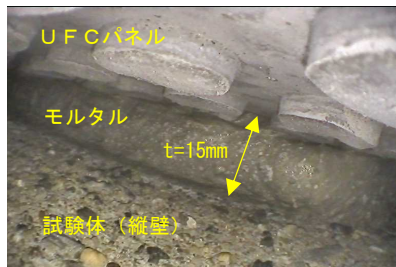


写真-8 ファイバースコープによる充填確認



写真-9 実物大試験体完成



写真-10 ワイヤソーによる切断



写真-11 試験体切断面
(健全部隙間 15mm)



写真-12 試験体切断面
(ステップ背面付近)

4.3 モルタルの付着性能試験

本試験は、設置したUFCパネルと縦壁の隙間に充填したモルタルの付着性能を確認するために実施した。試験体（母材）に使用しているコンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 とUFCパネルやモルタルと比べ低強度のためすべて母材破断となりUFCパネルとモルタルの付着強度を正しく評価できないことが予想されたため、併せて室内試験も実施し、UFCパネルとモルタルの付着強度を確認した。

試験は、構造物施工管理要領⁹⁾に規定される「試験法432」に準拠して、建研式引張試験器を用いて行った。試験体による試験要領は、モルタル厚さ15mmでは深さ35mmまで、モルタル厚さ65mmでは深さ85mmまで、 $\phi 50\text{mm}$ の切込みを入れ、破断までの荷重を測定した。試験体による付着強度試験結果を、表-6および写真-13に示す。

また、室内試験体（ $300\times 300\text{mm}$ ）に実物大試験体による試験と同一の方法で $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ の切込みを入れ、破断までの荷重を測定した。室内試験体による付着強度試験結果を表-7および写真-14に示す。モルタルの圧縮強度試験結果は、いずれも材齢5日および7日で $59.9\sim 64.0\text{N/mm}^2$ であった。

表-6 試験体による付着強度試験結果(モルタル厚さ15mm)

位置	直径 (mm)	断面積 (mm^2)	最大荷重 (kN)	付着強度 (N/mm^2)	破断状況
健全部	49.6	1932	4.12	2.13	母材破断
	49.7	1940	3.08	1.59	母材破断
	49.6	1932	2.07	1.07	母材破断
	49.7	1940	3.52	1.81	母材破断
	49.7	1940	2.92	1.51	母材破断
平均値				1.62	材齢9日

表-7 室内試験体による付着強度試験結果(モルタル厚さ15mm)

N.O.	形状 (mm)	断面積 (mm^2)	最大荷重 (kN)	付着強度 (N/mm^2)	破断状況
1	$\square 40$	1600	6.36	3.98	ハネ破断
2	$\square 40$	1600	5.28	3.30	モルタル破断
3	$\square 40$	1600	6.15	3.84	ハネ界面
4	$\square 40$	1600	5.40	3.38	ハネ破断
平均値				3.62	材齢7日

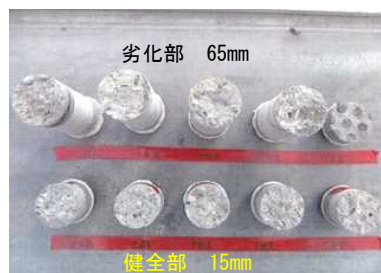


写真-13 付着試験後の破断面

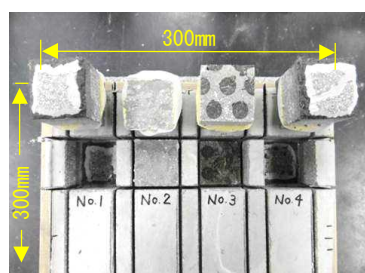


写真-14 室内付着試験の破断面



写真-15 UFCパネル付着層

本試験に使用したU F Cパネル付着層には、写真－15に示すような凸タイプ（ $\phi 9\text{mm}$ ， $t=5\text{mm}$ ）を採用しているが、これは既往の研究によると凸タイプ、凹タイプ、骨材散布タイプ等において無機系グラウト材との付着性状は正打ち逆打ちいずれの場合においても凸タイプ（ $\phi 9\text{mm}$ ， $t=5\text{mm}$ ）が安定した性状（付着強度 $2.4\sim 3.3\text{N/mm}^2$ ）を示すことが確認されている。^{5),8)}

試験体による付着強度試験結果は表－6に示す通り、健全部のモルタル厚さ 15mm で平均値 1.62N/mm^2 の結果がえられたものの、その値は規格値の 1.5N/mm^2 をわずかに超過しただけで施工時の練混ぜや充填作業の不確実性を考慮すると必ずしも十分とは言えない。しかし、破断面が全て母材であるコンクリート断面であることから本試験結果は全てコンクリート自体の引張強度と考えられる。このことより、充填モルタルの付着強度は明確な数値が示せないものの、本試験結果以上であると考えられる。

次に試験体による付着強度試験と並行して実施した室内試験結果は表－7に示す通り、モルタル厚さ 15mm で各試験結果ともに 3.0N/mm^2 以上確保できており、規格値の 1.5N/mm^2 を十分満足できる事が確認できた。

4.4 付属物の耐久性について

トンネル監視員通路に求められる管理用通路としての要求性能は「保守点検作業の安全性確保」であり、そのため縦壁の高耐久性化はもとより設置される付属物についても高い耐久性が求められている。

従来の監視員通路ではステップ部を現場にて縦壁に箱抜きし製作している。このため、ステップ部の鉄筋はかぶり不足となるとともに劣化因子（水、凍結防止剤）の堆積箇所となっている。また、ハンドレールは従来から溶融亜鉛メッキ加工した鋼管が使用されており、概ね10～15年で交換が必要と考えられている。

今回の実物大試験では、これらのことを念頭に付属物に高耐久なFRP製のステップおよびハンドレールを採用し、製作・取付けを行った。その結果、FRPステップ背面の狭隘な空間にも確実にモルタル充填ができること、FRPハンドレールの取付けにも問題がないことを確認した。

5. まとめ

本試験は、埋設型枠工法の特徴や施工性を把握し現地施工に反映させることを目的とし、特にモルタルの充填性や付着性能などに着目し実物大試験体および埋設型枠（U F Cパネル）を使用して検討課題に対して確認・検証を行った。以下にその結果を述べる。

- (1) モルタルの充填方法は、モルタルを2層に分けて充填することで、U F Cパネルにひび割れを発生させることなく施工できることを確認した。
- (2) モルタルの充填性については、ファイバースコープや透明型枠によるリアルタイムな確認を実施し、いずれも良好な結果であった。
- (3) 目視困難な箇所については、試験体完成後、切断し断面の目視確認を行いこれも良好な結果であった。
- (4) モルタルの付着性状については、規格値を十分満足するものであった。

今後は、現地施工に向け更なる施工性の向上や現場におけるモルタル充填確認方法などの品質管理手法を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 西日本高速道路(株)：設計要領第Ⅲ集，トンネル建設編，2016.8
- 2) 日本道路公団中国支社：中国支社管内平成15年度雪氷対策報告書作成業務雪氷報告書，2004.11
- 3) 山内健利，大田一成，瀬戸口雄二，神木克典：トンネル監視員通路の塩害劣化の現状と評価，土木学会全国大会第73回年次学術講演会論文集，pp.1243-1244，2018.8
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2014.8
- 5) (一財)土木研究センター：建設技術審査証明報告書 建技審証第0124号「ダクトフォーム」，2017.3
- 6) 西日本高速道路(株)：構造物施工管理要領，2017.7
- 7) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2018.3
- 8) 小幡浩之，西澤辰男，佐々木巖，國府勝郎：超高強度繊維補強コンクリートと無機系グラウト材の付着性能，土木学会全国大会 第61回年次学術講演会論文集，pp.233-234，2006.9