

FRP セントルの開発

瀬崎 満弘・源石 佳弘

本報告では覆工コンクリートの耐久性の向上に資するため、養生方法の改善を目的として、FRPを覆工コンクリートのセントルとして使用するための開発の経緯を述べるとともに、実際にFRP セントルを使用して打設した覆工コンクリートで測定されたコンクリートの内部温度結果を述べる。FRP セントルを使用して打設された覆工コンクリートの温度は、鋼製セントルを使用して打設されたコンクリートより、覆工コンクリートの平均温度が3～4℃高くなることが現場実験で確認され、FRP セントルの有用性が認められた。

キーワード：トンネル、覆工コンクリート、セントル、FRP、コンクリート温度

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性は、従来メンテナンスフリーで容易に確保できるものと考えられてきた。すべてのコンクリート構造物は、想定される耐用年数の期間中、その要求される強度と使用性を果たし続けることが当然のことながら求められている。そのためには、コンクリートは、暴露されることが予想される環境の下で、劣化の過程に耐えることができなければならない。しかし、種々の原因による早期劣化が顕在化して、大きな社会問題となってきた。

道路あるいは鉄道におけるトンネルの覆工コンクリートは、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工等の支保部材によって、地山が適切に補強されることによりトンネルの安定性が十分に保たれる場合は、力学的な負荷は期待しておらず、地下水等の漏水の少ない、水密性のよい構造物とし、安全で長期的な使用に耐えるものとするべきとしている。一方、地山の変形が収束しない状態で覆工コンクリートを施工する場合、覆工コンクリートを施工後、水圧あるいは上乗荷重等によって外力が作用する場合、あるいは支保部材が劣化した場合は、構造物としての安全率を増加させることが期待されている。しかしながら、歴史的には構造物としての品質確保については、一般的なコンクリート部材ほどの重要性を考慮されてはいなかった。

一方、覆工コンクリートの剥離・剥落の発生等を受け、剥離・剥落に対する安全性の向上が要求されるよ

うになってきている。そのためには、覆工コンクリートの耐久性を向上させる必要がある。加えて、近年の公共投資のコスト縮減を受け、社会資本の合理的な整備の観点からトンネルを含むコンクリート構造物のライフサイクルコストの低減、長寿命化が強く求められるようになり、構造物の重要な構成部材であるコンクリートの高品質化、高耐久性化が必要となってきている。そのために様々な面からのアプローチがなされており、覆工コンクリートに繊維補強コンクリートや膨張コンクリートを使用すること、あるいは施工面においては養生方法の改善や締固めの工夫といった取り組みがなされてきている。

覆工コンクリートの耐久性を考える場合は、必然的に覆工コンクリートに発生するひび割れへの対応を検討する必要がある。ひび割れの発生には種々の要因があるが、安全性の確保や長期の耐久性を向上させようとする場合には、覆工コンクリートの打設後の温度・乾燥収縮に伴って発生するひび割れに対する対策が必要となる。

以上の背景のもと、本報告では覆工コンクリートの耐久性の向上に資するため、養生方法の改善を目的として、FRP（強化プラスチック・Fiber reinforced plastics）を覆工コンクリートのセントルとして使用するための開発の経緯を述べるとともに、実際にFRP セントルを使用して打設した覆工コンクリートで測定されたコンクリートの内部温度結果を述べ、FRP セントルの有用性について論述する。

2. FRP セントルの開発経緯

1970年代より NATM 工法が導入されてから、セントルに使われる材料として鋼製の材料を使用することが業界では常識であった。

このような中、平成 11 年頃 FRP 製品をコンクリート打設用セントルの外枠に使用できないかとの話があり、検討をはじめた。FRP は、軽量で高強度の特徴があり、プレジャーボートや漁船のボディにも使われている材料である。FRP の特徴として、加えて耐候性、耐熱性、耐薬品性に優れており、また、断熱性があるという性質をもっている。

FRP の制作法は複数あるが、船体等の制作にはハンドレイアップ法が使われている。

当時トンネルの現場では、強度面、耐久性面を満たすことはもちろんのことであったが、鋼製のものと同等の価格設定が求められたため、様々な角度から検討した結果、引き抜き成形法での制作方法が選ばれた。FRP を大型のパネルにするために、工場内のレイアウト及び設備を全面的に見直す必要があったが、FRP 製造メーカーである日本ポリエステルの協力を得て、新設備を導入することができ、W900×L5,250 の大型 FRP パネルの制作が可能となった。

このような経過の後、平成 12 年に 3 箇所のトンネル現場にて試験的に導入してみたが、いずれもセントルの強度不足が原因の一つであったが、出来上がった覆工コンクリートの美観が悪く現場のニーズを満足できるものではなかった。また、打設されるコンクリートの流れによる耐摩耗性にも問題があることが判った。

このような複数の問題が同時に発生したため、FRP をセントルに使用することを断念せざるを得ない状況になった。しかしながらこのとき、FRP という新素材の可能性を信じ、現場が満足する製品にしたいという一心から、設計を一から見直すことにした。

まず、FRP のガラス繊維量を検討し直し、表面摩耗耐久剤の選定を考え直した。加えてセントルの構造設計、製造監理工程を徹底して見直すことにした。

まず、強度面においてはセントル側の基本構造を FRP に合わせ合体させ、また強度を従来品以上にレ

ベルアップする為に、取り付け金具の製品を開発した。

耐摩耗性については、樹脂組成内容の変更を何度か行って現在の組成内容となっている。

このあと、現場のニーズを満たすべく、現地でのきめ細かな手直しを繰り返していくうち、FRP セントルが完成したのである。写真—1 は、最新に納入したセントルの全体写真である。



写真—1 セントル全体写真

3. 実験の概要

(1) 覆工コンクリートの配合

実験を実施したトンネルは、延長 2,417 m の高速道路のトンネルであり、先行して施工を行った 1,347 m の工区を対象とした。非常駐車帯の拡幅部を除く区間で、FRP セントルを使用して、覆工コンクリートが打設された。1 スパンの打設延長は 10.5 m であった。非常駐車帯の拡幅部では、鋼製セントルを用いて覆工コンクリートを打設した。1 スパンの打設延長は 6.2 m で、5 スパン分 31.0 m で 1 つの非常駐車帯となっている。

覆工コンクリートの仕様、配合および使用材料を表—1 に示す。単位セメント量は 297 kg、水セメント比は 0.53 である。

(2) 覆工コンクリートの温度測定の方法

FRP セントルに打設された覆工コンクリート中の温度測定は、連続した 3 スパンで実施された。覆工コンクリートは、1 日おきに打設されており、測定され

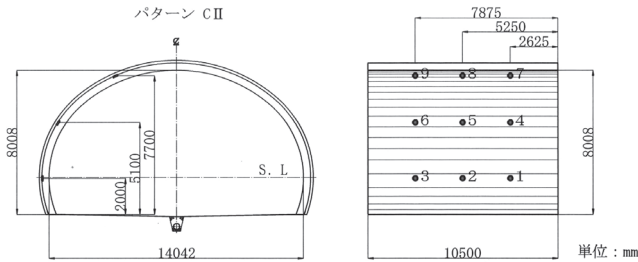
表—1 覆工コンクリートの仕様、配合および使用材料

仕様	呼び強度 24, 最大粗骨材粒径 20 mm, スランプ 18 cm, 空気量 4.5%,						
	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
配合	0.53	0.493	157	297	634	959	2.08

C: 普通ポルトランドセメント Ad: 高性能 AE 減水剤標準形 1 種

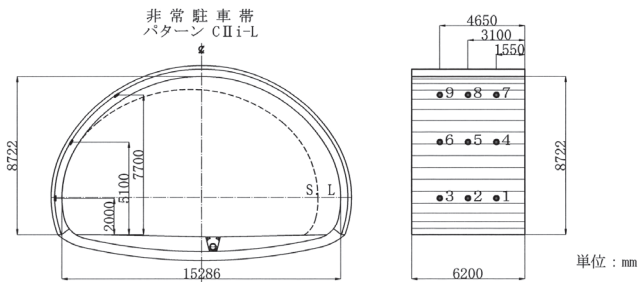
S: 大分県津久見市上青江, 宮崎県延岡市大武町, G: 大分県津久見市上青江

た第1スパンは2010年2月8日に、第2スパンは2月10日、最後のスパンは2月12日に打設され、各スパンにおいてコンクリート打設後ほぼ24時間以内で脱枠されている。図一1に、温度計を設置した位置の断面図と展開図を示しているが、1スパンにつき9点の測点を設け、熱電対式の温度計を用い30分間隔で約1ヶ月間、自動計測を行った。



図一1 温度計を設置した位置 (FRP セントル 左:断面図/右:展開図)

一方、非常駐車帯の拡幅部の覆工コンクリートは鋼製セントルを使って打設された。最初の拡幅部において、覆工コンクリートの温度を測定した。測定は1スパンだけで実施し、5スパン分の4つ目のスパンで実施した。覆工コンクリートの打設日は、2010年4月24日である。ここでも24時間後に脱型している。測定位置の断面図を図一2に示すが、FRP セントルを用いて打設した一般部と同じ高さに温度計を設置したが、展開図に示すように1スパンが6.2 mとなっている。

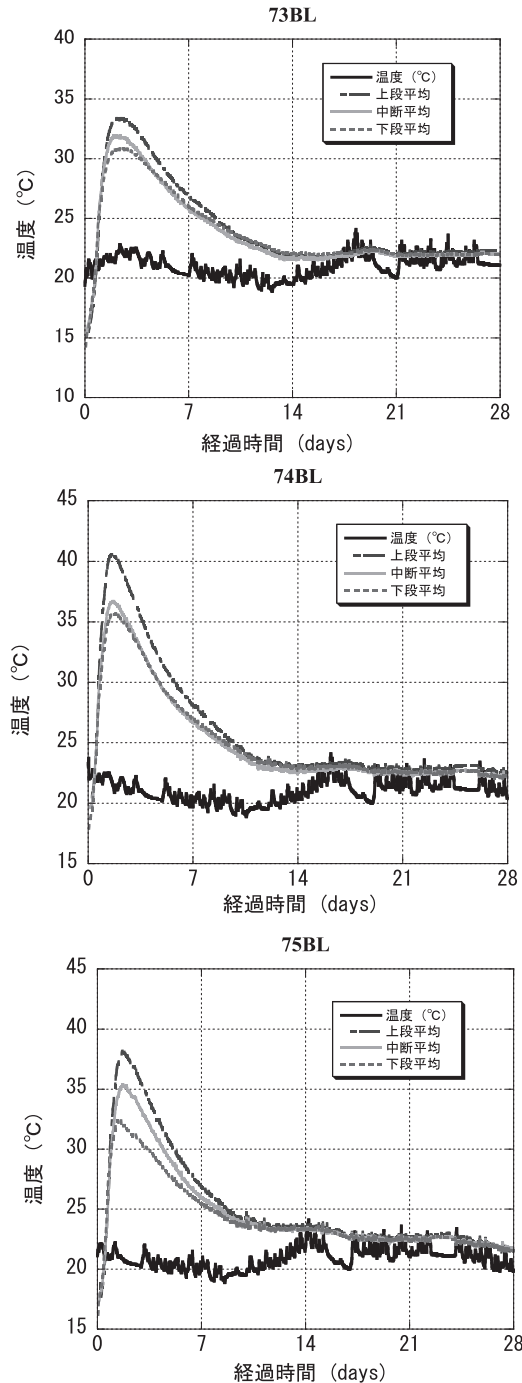


図一2 温度計を設置した位置 (鋼製セントル 左:断面図/右:展開図)

4. 実験結果

(1) 覆工コンクリートの温度

覆工コンクリートの打設は全て朝8時ごろにスタートし、下段の位置に設置された温度計には10時ごろに達し、中段の位置にある温度計には12時ごろ、上段の温度計には14時ごろに到達し、最終的に16時ごろに全ての打設が完了した。図一3に、下段の温度計にコンクリートが達した時刻を0とした場合の、観測された各点での覆工コンクリートの温度変化を経過



図一3 覆工コンクリート内の温度変化 (FRP セントル)

時間との関係で示している。覆工コンクリートの温度変化は、各段に設置した3測点の平均値を示している。

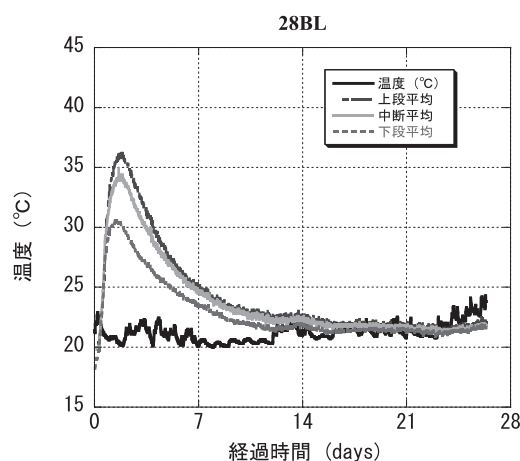
打設後の覆工コンクリートの温度は、約36時間から48時間経過後に最高温度に達する。最高温度に達する時刻も、温度計が設置された位置にコンクリートが達した時刻と同様に、まず、下段の位置にある覆工コンクリートが最高温度に達し、その後、約2時間遅れで中段にあるコンクリートが最高温度に達し、その後ほぼ2時間遅れで、上段の位置にある覆工コンクリートが最高温度に達する。最高温度に達した後は、徐々に温度が低下していき、最終的には約18日から

21日経過後に坑内温度と同じになる。その後は覆工コンクリートの温度は急激には変化しないので、ほぼ坑内温度の平均値と同じ値を示すことになる。

各段の位置にコンクリートが最初に到達したときの温度を初期温度とし、その後各点で計測されたコンクリートの温度が最高値に達した温度を最高温度、その差を温度上昇値として、各段にある3測点の平均値を求めたものを表一2に示している。2月8日に打設された73BL スパンでは、初期温度の平均値が14.8℃で、その後17.2℃上昇して最高温度が32.0℃に達している。2月10日に打設された74BL スパンでは、初期温度の平均値が73BL スパンに比較して4.6℃高い19.4℃で、その後18.4℃上昇して最高温度が37.8℃に達している。2月12日に打設された75BL スパンでは、初期温度の平均値が17.3℃で、その後18.0℃上昇して最高温度が35.3℃に達している。これら3スパンで計測された覆工コンクリートの温度の平均値が表一2の最下段に示されている。下段のコンクリートの初期値は、コンクリートが打設された時刻が午前10時ごろの早い時間帯であることに加えて、中段および上段の位置に打設される時刻が昼すぎにあり、周りに相当量のコンクリートが打設されていることにより、中段および上段のコンクリートの初期値よりも1℃ほど低くなる。そのことが各段のコンクリートの最高温度にも影響して、上段の位置での覆工コンクリートの最高温度は、下段のコンクリートの最高温度より3℃ほど高くなり、中段では下段のコンクリートの最高温度より約0.5℃高くなっている。

一方、非常駐車帯の拡幅部において、鋼製セントルを用いて打設された覆工コンクリート内で計測された温度変化を図一4に示す。一般部と同様に、覆工コンクリートの打設は朝8時ごろにスタートし、下段の

位置に設置された温度計には10時ごろに達し、中段の位置にある温度計には12時ごろ、上段の温度計には14時ごろに到達し、最終的に16時ごろに打設が完了している。下段の位置に設置された温度計にコンクリートが到達した時刻を0とし、左側に3日までの経時変化を右側に28日までの経時変化を示している。なお、コンクリートの打設は4月24日に実施されている。FRP セントルで打設された一般部と同様に、打設後約36時間経過した後に覆工コンクリート内の温度が最高値に達し、その後ゆっくりと低下していき、約14日経過した後に坑内温度と同じ温度に達している。その後は坑内温度の平均値と同じになるような変化を示している。



図一4 覆工コンクリート内の温度変化 (鋼製セントル)

表一2と同様に各測定点で計測された覆工コンクリートの初期温度、最高温度そして温度上昇値を表一3に示す。初期温度の平均値が19.4℃で、その後14.3℃上昇して最高温度が33.7℃に達している。コンクリートが打設されたのが4月の後半であったことにより、初期温度は19.4℃と高くなっているが、その後の温度上昇は前述のFRP セントルで打設された一般部の平均上昇値18.0℃より4.7℃低い14.3℃の値を示している。初期温度が高い割には最高温度が33.7℃と低く、このことが影響して図一3の温度変化と比較して割と早い14日経過後に、坑内温度が同じ温度に達している。

表一2 覆工コンクリートの初期温度と温度上昇値 (FRP セントル)

型枠	スパン	位置	初期温度 (°C)	最高温度 (°C)	温度上昇値 (°C)
FRP	73BL (2/8 打設)	上段	14.7	33.5	18.8
		中段	15.3	32.0	16.7
		下段	14.3	30.5	16.2
	74BL (2/10 打設)	上段	20.5	40.7	20.2
		中段	19.7	36.8	17.1
		下段	17.9	35.8	17.9
	75BL (2/12 打設)	上段	17.5	38.2	20.7
		中段	17.9	35.5	17.9
		下段	16.5	32.6	16.1
平均値	上段	17.6	37.5	19.9	
	中段	17.6	34.8	17.2	
	下段	16.2	33.0	16.8	

表一3 覆工コンクリートの初期温度と温度上昇値 (鋼製セントル)

型枠	スパン	位置	初期温度 (°C)	最高温度 (°C)	温度上昇値 (°C)
鋼製	28BL (4/24 打設)	上段	20.2	36.2	16.0
		中段	19.8	34.4	14.6
		下段	18.2	30.5	12.3

前述したようにFRPセントルを使用して打設された覆工コンクリートの温度は、鋼製セントルを使用して打設されたコンクリートより、温度が高くなることが現場実験で示された。コンクリートの強度は、材齢と温度の両方によって異なるため、強度は積算温度(Σ (時間の間隔)×温度)の関数であると言われている。28日までの材齢と0～20℃前後の養生温度では、コンクリートの強度は積算温度の対数との直線性が明瞭に示されている。つまり、20℃前後で養生されたコンクリートの強度は、積算温度が大きくなればなるほど、高い値を示すことになる。まだ貫通していない状態のトンネル坑内においては、坑内温度は図—3および図—4に示されるように20℃前後であり、またトンネル坑内は湿度も十分にあるので、材齢の初期段階でコンクリートの温度が高いことは積算温度が十分になることを意味している。長期的な強度も含めてコンクリートの強度が高くなり、ひいては耐久性の高いコンクリートが生産されることになる。

5. おわりに

覆工コンクリートを打設する際に、セントルとして熱伝導率の低いFRPを用いると、養生中にセントル表面から熱が伝達されにくくなるため、鋼製セントルを用いた場合に比べて覆工コンクリートの温度が3～5℃高くなることが実測値から明らかになった。この高くなった覆工コンクリートの温度は、脱型後もその差を保ったまま、ゆっくりと低下していくために、覆工コンクリートの品質にとって有利な条件となる。コ

ンクリートの強度は28日までの材齢と0～20℃前後の養生温度では、積算温度が大きくなればなるほど、高い値を示すことになる。つまり、トンネルの坑内のように坑内温度が20℃前後で一定であり、加えて十分な湿度がある場合は、FRPセントルを用いて打設された覆工コンクリートの強度は、鋼製セントルを用いて打設された覆工コンクリートの強度よりも高くなっている可能性が高い。覆工コンクリートのひび割れで問題となってくる引張強度も高くなっていることが考えられる。

一方、今までは述べてこなかったが、FRPセントルは水密性が相当に高く、打設されたコンクリートから水が溢水することがほとんどないために、脱枠時にはFRPセントルの表面に水がびっしりと付着しているため、標準養生状態にも近く、離型にも非常に有利となる。

JICMA

[筆者紹介]



瀬崎 満弘 (せざき みつひろ)
宮崎大学
工学部
准教授



源石 佳弘 (げんいし よしひろ)
株式会社エムケーエンジニアリング
代表取締役