

## コンクリートの高品質化を目的とした材料・養生方法の現場適用と検証

藤倉 裕介

### 概 要

近年、特に公共工事ではコンクリート構造物の高品質化、長寿命化に関する提案型発注が増加している。また、性能照査型設計への移行、環境負荷低減の観点から、各種の混和材料を組み合わせるケースも増加している。このように使用材料の多様化が進む中、施工者は適切な材料選定を行うとともに、コンクリートの施工性、強度発現性および長期耐久性といった時間軸で要求される性能を満足することを計画段階で把握することが必要である。特にかぶりコンクリートの耐久性を向上させるためには、施工者は環境条件を配慮した最適な養生方法を選定する必要がある。

一方、コンクリートの諸性能を高めるには湿潤状態の養生期間をできるだけ長く保つことが良いとされるが、工期、経済性を考慮すると困難なケースも多い。また、湿潤養生を行うためには大規模な設備が必要とされることもある。本報では、できるだけコストを抑え高品質な施工を行うことを目的とした取り組みの一環として実施した事例として、耐震補強工事およびトンネル覆工の例について報告する。

### **Studies into use of SCMs and their effect on concrete curing and performance for the purpose of high-quality concrete structure**

#### **Abstract**

The ongoing progress of the shift to performance-oriented design has allowed more freedom of material selection and proportioning according to the performance requirements for structures. In addition, the use of industrial byproducts as supplementary cementing materials (SCMs) has been increasing as waste disposal and reduction of CO<sub>2</sub> emissions become more important. Amid such changes in the environment for cementitious materials, contractors are required to select appropriate materials, and understand their effect on the performance of the concrete over time, including placeability, strength development, and long-term durability.

To improve the performance of concrete, it is preferable to extend the curing period of the wet condition as much as possible. But there are a lot of difficult considerations, including terms and costs of the work. This report examines improvements in concrete performance and the rationalization of construction.

キーワード： 提案型発注 コンクリート温  
度 配合 養生

## §1. はじめに

近年、特に公共工事ではコンクリート構造物の高品質化、長寿命化に関しての提案型発注が増加している。また、性能照査型設計への移行、環境負荷低減の観点から、各種の混和材料を組み合わせる使用ケースも増加<sup>1)</sup>している。このように使用材料の多様化が進む中、施工者は適切な材料選定を行うとともに、コンクリートの施工性、強度発現性および長期耐久性といった時間軸で要求される性能を満足することを計画段階で把握することが必要である。特にかぶりコンクリートの耐久性を向上させるためには、施工者は環境条件を配慮した最適な養生方法を選定する必要もある。コンクリートの諸性能を高めるには湿潤状態の養生期間をできるだけ長く保つことが良いとされるが、実際の施工では不経済であり施工上困難であることから、土木学会のコンクリート標準示方書における標準的な材齢に準じて脱型がなされ、かぶりコンクリートが気中に曝される。また、工期短縮のために所定の強度が発現されていることを確認後、標準的な養生期間以前に脱型されるケースもある。

例えばトンネル覆工コンクリートの施工では、ほぼ材齢1日にて通例的に脱型が行われるが、冬場であっても坑内湿度が比較的一定で湿度が高いと考えられていたことから、脱型後の養生にあまり注意が払われていなかった経緯がある。しかし、トンネル坑内の作業環境改善のために換気設備が近年大型化していることにより、坑内の湿度は60~70%程度と以前よりも低下していることが報告されている<sup>2)</sup>。トンネル覆工コンクリートにおいても通常のコンクリートと同様に湿潤養生が必要と考えられ、また発注機関からの覆工コンクリートの高耐久化要求によりミスト養生やバルーン養生など脱型後の養生に注意が払われつつある。

本報告では、コンクリートの高品質化を目的とし、材料・養生方法について、現場において検討した事例について紹介するものである。

## §2. 養生条件がコンクリートの物性に及ぼす影響

セメントは水の存在下で水和する。早期に相対湿度の低い環境に曝されて乾燥状態になると、コンクリート内部の含水率の低下を招き未水和セメントのその後の反応過程が阻害され、特に表層のかぶり部分の緻密な組織形成に影響を及ぼす。このことはかぶりコンクリートの力学性能や耐久性に影響する。湿潤養生期間と圧縮強度の関係を図1に示す。湿潤養生した試験体を乾燥させると一時的に圧縮強度は増加するが、その後の乾燥に伴い強度は低下する。初期の湿潤養生期間が短いほど、長期材齢における圧縮強度

は小さいことが分かる。

一方、コンクリートの耐久性性能は劣化因子の移動特性に左右され、数nmから数十 $\mu\text{m}$ の範囲の毛細管空隙の特徴から説明されることが多い<sup>4)</sup>。そのため、養生条件がコンクリートの品質に及ぼす影響としては、毛細管空隙の特徴を評価可能な水銀圧入式ポロシメータを用いた実験結果が多く報告されている。例えば、乾燥条件下や一度乾燥を受けた後に再度水分供給を受ける場合といった環境作用下でのセメント硬化体の空隙構造の変化に関する実験的な研究がなされている<sup>5),6)</sup>。これらの研究では早期に乾燥された場合、湿潤な水和条件のケースと比較して水和の進行が阻害され粗大な空隙が残存する傾向が示されている。図2には水セメント比50%で練り混ぜたセメントペーストを用い、材齢1日、3日、7日、28日にて脱型を行い20 $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度60%の環境下で養生した際の材齢91日における空隙構造について著者が調べた結果を示す。材齢91日まで養生した場合でも乾燥開始材齢が早期であるほど粗大な空隙が残存していることが示されていることが分かる。このように、コンクリートの強度、耐久性を向上させるためには湿潤養生期間をできるだけ長くとする必要があることが分かる。

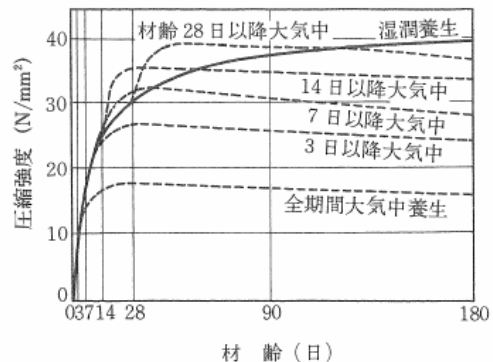


図1 湿潤養生期間と圧縮強度の関係<sup>3)</sup>

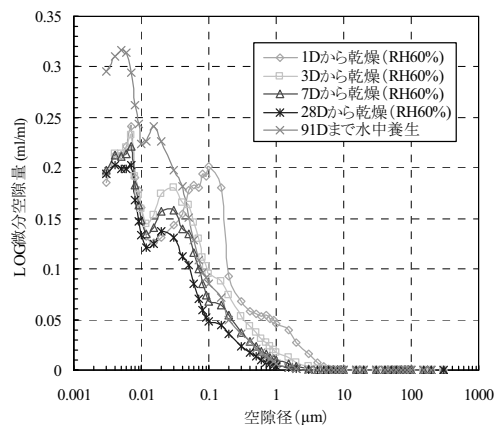


図2 乾燥開始材齢が異なる場合の材齢91日での空隙径とLOG微分空隙量の関係

一方、このように早期乾燥による空隙の粗大化についての実験結果が報告されているものの、乾燥過程における硬化体内部の含水状態やその際の水和反応の過程さらには空隙構造の形成過程に及ぼす影響についてのメカニズムについては十分に検討されていないのが現状である。そのため、著者らは配合設計段階で任意の使用材料の構成とその反応過程に基づき、硬化体の構成物質の観点から空隙構造を評価し、さらにはマクロな諸物性を実務的なレベルで評価可能な手法の構築を行っている<sup>7),8)</sup>。本報ではその詳細については省略するが、任意の温湿度下におけるセメント硬化体の形成過程を説明可能な手法が構築されることにより、コンクリート部材としてのマクロな物性予測、さらには環境条件を考慮した合理的な施工計画、養生計画の立案が可能となるものと考えている。

### §3. 材料・養生に関する提案、検証事例

前章にて示したように脱型時期を遅らせ、長期間湿潤養生を実施することが望ましいわけであるが、工期、経済性を考慮すると困難なケースも多い。また、湿潤養生を行うためには大規模な設備が必要とされることもある。本報では、脱型時期を変更することなく、型枠の保温性能や脱型後に安価なシート養生を行うことにより、コンクリートの初期性能の向上について提案し現場にて適用した事例と効果の検証結果について報告する。また、温度ひび割れや乾燥収縮によるひび割れといった不具合は使用材料の潜在的な特性に起因する部分が多い。そこで、コンクリートの配合についてもコストを抑えた高性能コンクリートを提案し適用した結果についても合わせて示す。

#### 3.1 RC 巻き立て耐震補強コンクリートの事例

既設橋脚の RC 巻き立て耐震補強工事の事例について紹介する。図 3 に一般構造、配筋図の一例を示すが、既設コンクリートと補強コンクリートの一体化の為にジベル筋が5本/m<sup>2</sup>配置され、壁厚 200 mm の中に主筋 D32、フープ筋 D22 の補強鉄筋が配置されている。1回のコンクリート打ち込み部位として、高さ 3.6m、厚さ 200 mm と薄い壁構造物を構築することとなる。施工に起因して生じるひび割れや不具合を未然に防ぎ、耐久性の高いコンクリート構造体を構築するため、材料および養生方法に関する施工上の対策を実施し、その効果の検証を行った。

まず、養生方法について示す。図 4 に養生フローを示し、図 5 に散水養生システムの概要を示す。特に本工事では冬場の施工であり、コンクリートの硬化、強度発現を促進するような対策を考慮した。手順としては、①初期強度の発現促

進のため、脱型前の散水(温水)による湿潤養生を実施、②ビニールシートを型枠に巻き付け、養生雰囲気温度や湿度を保持、③急激な乾燥や温度変化を防止するため、脱型作業はビニールシート内で実施、④乾燥収縮によるひび割れ発生を低減するため、脱型後には速やかに気泡シートを巻き付け、散水を材齢 28 日程度まで継続した。

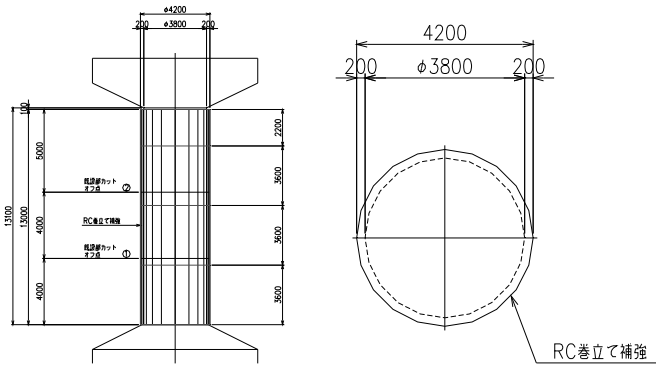


図 3 一般構造・配筋図(3P)

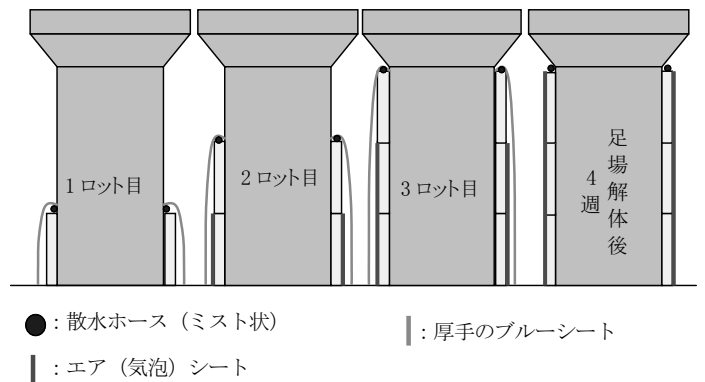


図 4 養生フロー

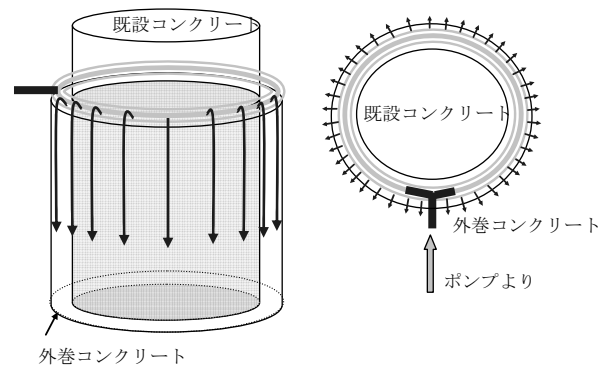


図 5 散水養生システム

次に、これら養生に関する対策の効果の検証を行う目的で打込み時から脱型までの間の温度・湿度計測を実施した結果について示す。温度・湿度計測は図6に示す位置で行い、散水・シート養生の有無で比較した。図7にコンクリート温度の計測結果を示し、図8には養生シート内・外の雰囲気温度および外気温の測定結果を示す。養生シートの設置によりコンクリート温度が高い分布を示していることが分かる。また、防音シート内においても外気温より温度変化が小さく高い温度を示しているが、養生シート内では更に高い温度を示す。このことから、養生シートの設置により雰囲気温度の変化、特に外気温の影響による温度低下を防ぐことができることが分かった。

また、図9には養生シート内外の相対湿度の測定結果を示す。散水により養生シート内部において高い湿度が保たれていることが分かる。脱型時および脱型後も同様の養生を継続して実施しており、高湿度な雰囲気が長期間保持されていることが分かる。これによりコンクリート表面が乾燥することなく水合が促進され、良好な強度発現、コンクリート表面の緻密化が促進され、耐久性の向上につながるものと考えている。

次に、乾燥収縮によるひび割れ対策および充填性の向上による施工の合理化、省力化を目的として配合面の検討を行った事例について示す。図10には乾燥収縮と温度応力を考慮したひび割れ解析の結果を示す。配合を表1に示す。標準配合ではひび割れ発生確率が高いため、膨張材の使用を検討した。施工の合理化、省力化を目的とした配合ではスランプフロー450mm程度のコンクリートを適用した。既存の高流動コンクリートの配合設計ではコスト高となるため、高スランプのプラント JIS 配合に高性能 AE 減水剤を追加添加することで流動性を高め、その一方で低下する材料分離抵抗性を不分離性混和剤(セルロース系増粘剤)の微量添加により向上させた。これにより従来の膨張コンクリートや高流動コンクリートよりもコストを抑えた配合を適用した。流動性を増加させた配合では施工性は非常に良好であり、型枠バイブレータの併用により充填性は良好であった。しかし、分離抵抗性を向上させるためにコンクリートの粘性を増加させており、写真1に示すようにエアあばたが若干残る結果がみられた。エアあばたの発生を低減するような施工上の対策が今後の課題である。

これらの提案配合では初期の材料コストが高くなるが、1基当りのコンクリート量が少ないため、施工の合理化、省力化及び良好な充填性による不具合低減、さらにはひび割れが生じた際の調査補修費用の削減によって、標準配合よりもトータルの施工費用としては安価となるものと考えている。

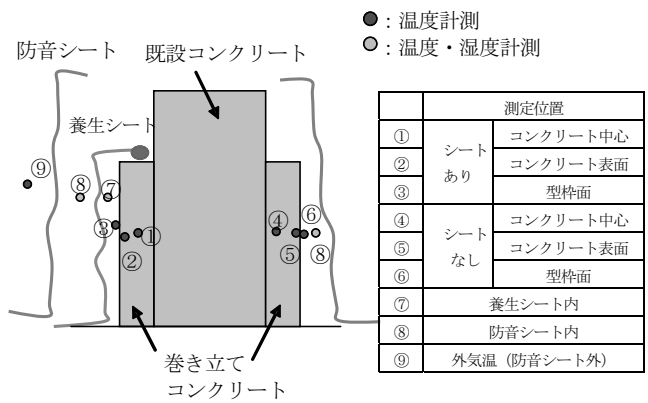


図6 温度計測の概念図

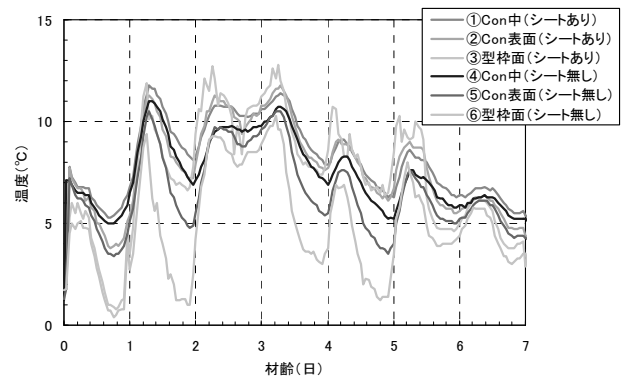


図7 養生シートの有無によるコンクリート温度の違い

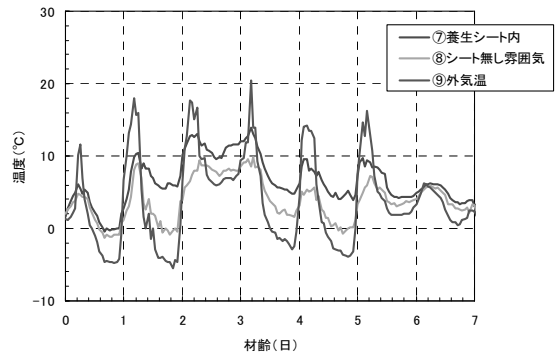


図8 養生シート内外の雰囲気温度および外気温の測定結果

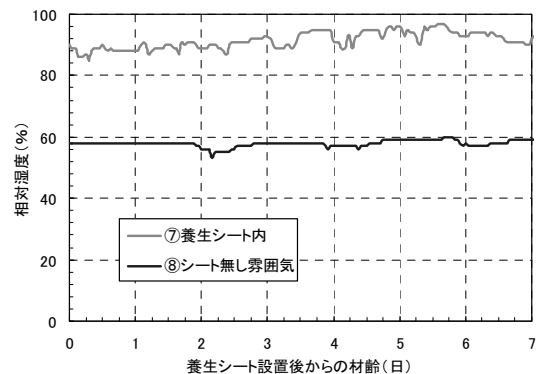


図9 養生シート内外の相対湿度

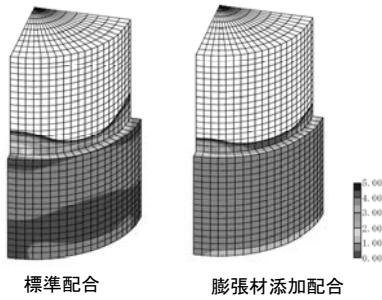


図 10 温度応力解析の結果

表 1 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	EX	S	G	混和剤	
								①	②
標準	50	45.7	169	338	—	836	1007	2.03	—
A	50	45.7	164	314	14	908	947	*1.98	—
B	50	45.9	175	335	15	999	806	*3.85	0.05

備考)  
 W:水、C:セメント(普通ポルトランドセメント)、S:細骨材、G:粗骨材  
 EX:膨張材、混和剤①:AE 減水剤、※高性能 AE 減水剤  
 混和剤②:不分離性混和剤

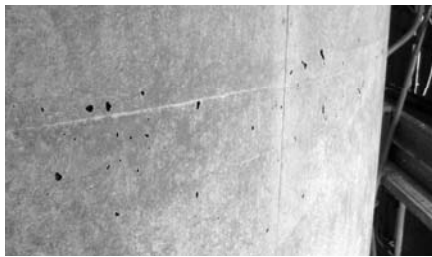


写真 1 コンクリート表面の仕上がり状況

### 3.2 トンネル覆工コンクリートにおける FRP 型枠の適用例

トンネル覆工コンクリートに FRP 製の型枠を使用した場合の効果について示す。覆工コンクリートでは鋼製の型枠を使用するのが通例であり、材齢 1 日程度で脱型されることから、初期養生が重要である。表 2 に鋼製型枠と FRP 型枠の物性を示す。FRP では比熱が大きく、保温効果を有することが分かる。そこで、保温効果を確認する目的で図 11 に示すようなモデルにて温度解析を行い、覆工コンクリートの温度分布について事前に検討した。解析条件としては、設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup> 程度の普通コンクリートを想定し、坑内温度およびコンクリートの打ち込み温度は 20℃とした。脱型材齢は 1 日とした。図 12 には FRP 型枠および鋼製型枠を使用したときの覆工コンクリート表面と内部の温度を示す。FRP 型枠を使用した場合では、型枠表面からの放熱が小さく、表面部温度が内部温度と同様に高い値を示していることがわかる。FRP 型枠を使用した場合では打ち込み時から約 15℃程度の温度上昇量を示し、鋼製型枠を使用した場合と比較して最大温度時において約 5℃の差が生じている。ま

表 2 FRP および鋼製型枠の物性

	FRP	鋼製
熱伝導率(W/m℃)	0.3	46.5
ポアソン比	0.4	0.3
熱膨張係数(μf/℃)	1.0	10
比熱(kJ/kg℃)	1.25	0.47
単位体積重量(kg/m <sup>3</sup> )	1800	7800
ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	25000	210000

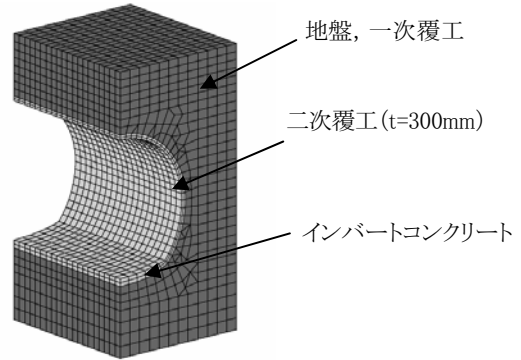


図 11 解析モデル

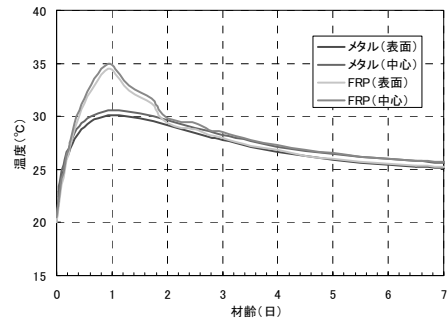


図 12 覆工表面および内部の材齢と温度の関係

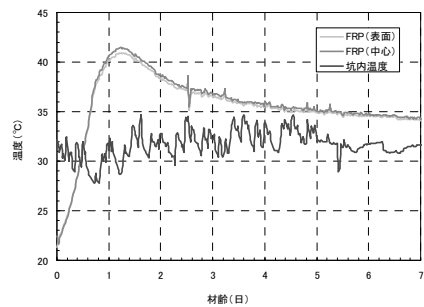


図 13 覆工コンクリートの温度(中間地点付近)

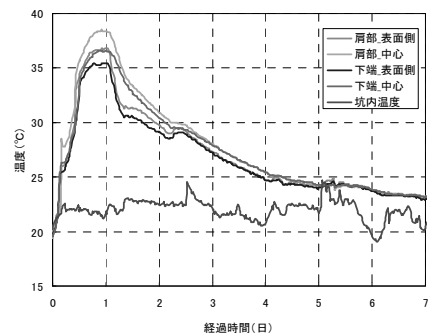


図 14 覆工コンクリートの温度(到達側付近)

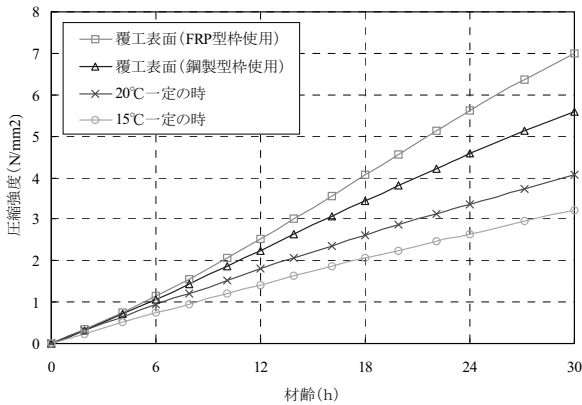


図 15 材齢と圧縮強度の関係

た、覆工コンクリートの厚さが 300mm であり覆工表面と中心の温度差は小さいことが分かる。

次に解析結果の検証を目的として、約 1000m の延長を有する道路トンネルの施工時においてコンクリート温度の計測を行った。図 13 には掘削中の 500m 付近での結果、図 14 にはトンネル貫通後の到達側付近での計測結果を示す。また、坑内温度もあわせて示す。貫通前のトンネル坑内温度は 30℃ 前後を示し比較的暖かいことが分かる。一方、貫通後は 20℃ 前後となり、坑内の温度が低下していることが分かる。いずれの計測結果においても事前に実施した解析と同様にコンクリート温度は 15℃～20℃ 程度の温度上昇がみられる。貫通後の到達口付近で計測を行った場合には貫通前と比較して坑内温度が低下するにも関わらず、コンクリート温度については貫通前に計測したケースと同様の温度上昇がみられ、FRP 型枠の保温効果が表れているものと考えられる。覆工コンクリートでは材齢 24 時間程度で脱型されるケースが多く、覆工コンクリートの高耐久化のためには材齢 1 日までの初期養生、特に十分な養生温度を確保することが重要となる。図 15 には図 14 に示す温度履歴を用い、積算温度の考え方により圧縮強度の発現状況を算定した結果を示す。比較として解析結果を用いて算定した鋼製型枠のケースも示す。保温効果のある FRP 型枠を使用することにより、貫通後など坑内環境の変化による影響を受けることなく、覆工コンクリートの十分な養生温度を確保することができ、安定した初期強度の確保が期待できるものと考えられる。

#### §4. まとめ

本報では、型枠の保温性能や脱型後の養生方法やコンクリートの配合上の工夫により、コンクリートの初期性能の向上を行いその効果についての検討について、耐震補強 RC

巻き立てコンクリートの事例およびトンネル覆工コンクリートに FRP 型枠を使用した事例について報告した。主にコンクリート温度の測定を行い保温効果としての養生の効果を検証した。

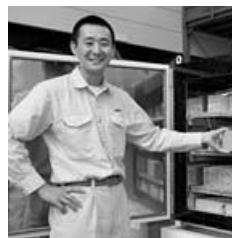
最後に現場での計測にご協力いただいた広島支店、九州支店の作業所の各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート技術シリーズ 74、混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333 委員会)報告書, 2007
- 2) 馬場弘二ほか:施工中のトンネル坑内環境と覆工コンクリートの湿度変化に関する研究、土木学会論文集 No.742/VI-60, pp.27-35, 2003
- 3) 社団法人コンクリート工学協会:コンクリート便覧(第二版)、1996
- 4) 佐伯竜彦ほか:コンクリートの中性化の機構解明と進行予測、土木学会論文集、No.414, pp.99-108, 1990
- 5) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇:乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率、細孔構造の不均一性、日本建築学会構造系論文集、第 509 号、1998
- 6) 伊代田岳史、魚本健人:若材齢における乾燥がセメント硬化体の内部組織構造に及ぼす影響、土木学会論文集、No.732 /V-59, pp.17-26, 2003
- 7) 藤倉裕介、大下英吉:セメント硬化体の相組成と構成相の粒度変化に着目したセメント硬化体の空隙構造モデル、土木学会論文集 E、Vol.66, No.1, 2010
- 8) 藤倉裕介、大下英吉:任意湿度下における内部含水状態を考慮したセメント硬化体の空隙構造形成モデル、コンクリート工学年次論文集、Vol.32, 2010

#### ひとこと

提案型発注をはじめ、コンクリート構造物の高耐久化に対するニーズは高い。しかし、過剰な提案や高コストな対策工が望まれているわけではない。今後もコンクリート配合や養生方法を工夫することにより、高品質化に努めるとともに、トータル施工コストの低減、施工の省力化について検討していきたいと考える。



藤倉 裕介