

凍害対策種別 S に対応したトンネル坑口部覆工配合の検討と施工

Examination and construction on the mixing of lining concrete for tunnel entrance corresponding to type S of freezing damage countermeasures

高橋 慧* 跡部 芳昭**
 Kei Takahashi Yoshiaki Atobe
 椎名 貴快*** 小山田 哲也****
 Takayoshi Shiina Tetsuya Oyamada

要 約

復興支援道路の事業路線に含まれる川井第1・第2トンネルの工事では、凍害区分3（種別S）の寒冷環境に対応した覆工コンクリートの施工が求められた。特に坑口から約100 mまでの区間では、凍結抑制剤の付着あるいは浸透による塩害と凍害の複合劣化で生じるスケーリングへの対策が必要となった。そこで、岩手大学と共同で室内・実機での配合選定試験を実施し、所要のスケーリング抵抗性を有する3配合を見出した。その後、実打設を伴う現場施工試験を実施し、施工性や品質などを確認した上で、坑口部配合を30-18-20BB（水結合材比46%，細骨材率50%，空気量7%）に決定した。本稿では、配合選定試験の概要と結果、および現場での施工試験について報告した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 配合選定試験
- § 4. 現場施工試験
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災により、東北地方の道路整備の重要性が再認識され、三陸沿岸道路（三陸縦貫自動車道、三陸北縦貫道路、八戸・久慈自動車道）が「復興道路」、宮古盛岡横断道路（宮古～盛岡）、東北横断自動車道釜石秋田線（釜石～花巻）、東北中央自動車道（相馬～福島）が「復興支援道路」として事業化された（図-1）。復興支援道路の一路線である宮古盛岡横断道路は全長100 kmに及ぶ地域高規格道路であり、この内、宮古箱石道路（宮古～箱石）（図-2）は宮古市藤原から箱石間の約33 kmの区間を国が岩手県から権限代行で整備した区間である。在来の国道106号



図-1 復興支援道路概要図¹⁾

の線形不良区間を回避して走行性が向上するとともに、盛岡市と宮古市間の走行所要時間の短縮によるアクセス性向上および救急医療施設への速達性向上などの効果が期待されている。

本工事は、宮古箱石道路の内、岩手県宮古市川井地内において、宮古側から全長1,764 mの川井第1トンネル

* 北日本（支）川井トンネル（工）
 ** 北日本（支）川井トンネル（工）（現：西日本（支））
 *** 技術研究所土木技術グループ
 **** 岩手大学

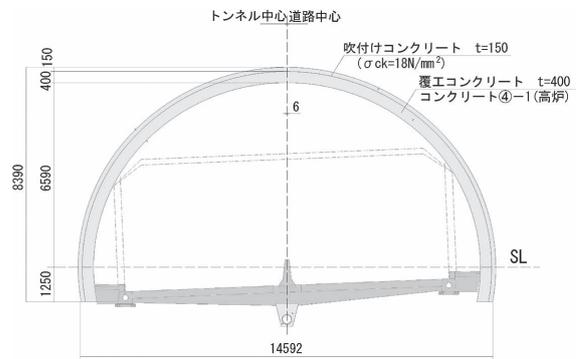


図一 宮古箱石道路 川井第1・第2トンネル位置図

(仮称)と全長1,782 mの川井第2トンネル(仮称)の連続する2本のトンネルを同時期に施工した(写真一)。現場のある地域は岩手県宮古市西部の山間部に位置し、積雪・寒冷環境による凍害の発生危険度が高いため、凍害区分3(種別S)に指定されている。発注者からは、坑口から約100 mまでの区間(以下、坑口部)の覆工コンクリートに対して、特段の耐凍害性の考慮が求められた。一般に、凍害とはコンクリート中の水分の凍結または凍結融解の繰り返しによって生じる劣化現象であり、その損傷はスケーリング、ポップアウト、ひび割れおよび崩壊の4つに大別できるとされる。この内、スケーリングはコンクリート表面がフレーク状に剥離する現象であり、凍結抑制剤の散布量が多い岩手県内陸の道路構造物で多くみられる。本工事では、スケーリング抵抗性の高いコンクリートを覆工坑口部に適用するため、岩手大学(小山田准教授)と共同で室内・実機による配合選定試験を実施した。本稿では、配合選定試験の概要と結果および現場でのコンクリート品質向上の取り組みについて報告する。



写真一 川井第2トンネルの坑口²⁾



図一 3 トンネル CI, CII 断面図(標準部)

§2. 工事概要

2-1 トンネル概要

- 工事名：国道106号川井地区トンネル工事
- 発注者：国土交通省 東北地方整備局
- 施工者：西松建設株式会社
- 工事場所：岩手県宮古市川井地内
- 工期：平成29年11月15日～令和3年3月5日
- 工事内容：川井第1トンネル L=1,764 m
- 川井第2トンネル L=1,782 m
- 上川井橋上部工(PC単純プレテンション桁橋) L=18 m
- 上川井接続道路改良工 130,000 m³
- 掘削断面積 140 m² (非常駐車帯)
- 掘削断面積 102 m² (標準部) (図一3)
- 内空断面積 88 m²

2-2 地形・地質、環境条件

本トンネルの坑口は崖錐堆積物と岩屑流堆積物に覆われており、深部の地質は北部北上帯の砂岩、粘板岩、砂岩泥岩互層、チャートで、弾性波速度は4.0～5.0 km/sを示す。現場は気象環境が厳しい山間地域に位置しており、国土交通省東北地方整備局の管理路線の中でも、凍害区分3、種別S(特に厳しい凍害環境)³⁾に指定されるエリアである。つまり、凍害の発生危険度が高く、凍結抑制剤の散布量が20 t/km以上と最も多い地域に該当する。このためコンクリート工事では凍害対策を講じることが必須とされており、特に凍害損傷の中でもスケーリングは、凍結抑制剤中に含まれる塩分の作用で劣化の促進が起こるとされるため、学識経験者の技術支援を受けながら配合上の対策を検討することになった。

§3. 配合選定試験

3-1 試験概要

(1) 使用材料および基本配合

表一1に使用材料、表一2にコンクリート基本配合を示す。セメントには高炉セメント B 種を使用し、膨張材は生コン工場の標準品 EA の他、成分や使用量の異なる 3 製品 (EB, EC, ED) を含む全 4 製品をセメント内割りで各々用いた配合で比較した。骨材および化学混和剤は生コン工場で日常的に使用されている製品で、スランプと空気量は混和剤で調整を行った。

スケーリング抵抗性を有するコンクリート配合の選定にあたり、コンクリートの基本配合は生コン工場出荷実績のある耐凍害用配合 24-18-20BB (水結合材比 50.0%, 膨張材 (EA) 20 kg/m³, 細骨材率 54.0%, 空気量 7.0%) をベースに、スランプは荷卸し想定で 18±2.5 cm を目標とした。本配合は、通常の覆工コンクリート配合に比べて、単位粉体量が多く、細骨材率も 54.0% とかなり高い理由として、骨材に碎石・砕砂を用いている影響が大きい。なお、一般に AE 剤で導入した微細な空気泡は耐凍害性の改善に寄与するが、連行される空気量が多すぎると凍結融解抵抗性の低下や圧縮強度の低下が顕著になるため、配合試験の過程で空気量が過大とならないように留意した。

(2) 製造手順

室内試験では、20℃環境下において、50 L の二軸強制練りミキサを使用し、粉体 (セメント、膨張材) と細骨材を空練り 10 秒した後、水と化学混和剤を加えて 15 秒練り混ぜ、ミキサ内の掻き落としをしてから粗骨材を投入して 45 秒練って排出した。目標空気量が通常の 4.5% よりも多いため、フレッシュ性状の確認は、巻き込みによる空気量が落ち着くのを待って、排出後 10 分静置してから実施した。

実機では、震災復興工事のために造られた現地生コン工場の製造設備を使用し、膨張材は通常、専用サイロから供給しているが、今回の試験では複数の膨張材を用いるため、手投入を基本とした。

(3) 試験項目

表一3にフレッシュおよび硬化コンクリートでの試験項目を示す。スケーリング試験は、内径 153 mm × 高さ 120 mm の塩化ビニルパイプに厚さ 20 mm の底板を配置した型枠を用いて、型枠上端までコンクリートを打ち込んで製作し (写真一2)、水中養生後、底板を外した底面を試験面として ASTM C672 に準じて評価した。試験開始は材齢 28 日とし、3% 塩化ナトリウム水溶液を塩化ビニルパイプ内に高さ 10 mm まで貯留して行った。凍結融解のサイクルは、-20℃の冷凍庫内に 12 時間存置して凍結させ、その後、12 時間 20℃の室内で融解させる計 24 時間を 1 サイクルとし、50 サイクルまで凍結融解を繰り返す方法である。スケーリング量の測定は 5 サイクル

表一1 使用材料

材料名	記号	仕様
水	W	回収水 (スラッジ水)
セメント	C	高炉セメント B 種, 密度 3.04 g/cm ³
膨張材	EA	石灰系 (膨張材 20 型), 密度 3.16 g/cm ³
	EB	石灰系 (膨張材 30 型), 密度 3.16 g/cm ³
	EC	石灰エトリンガイト系 (膨張材 20 型) 密度 2.98 g/cm ³
	ED	石灰エトリンガイト系 (膨張材 30 型) 密度 2.95 g/cm ³
細骨材	S	砕砂, 北海道白老産, 表乾密度 2.66 g/cm ³ FM2.87, 吸水率 1.88%
粗骨材	G	碎石, 盛岡市黒川産, 表乾密度 2.94 g/cm ³ 実積率 58.0%, 吸水率 0.46%
AE 減水剤	Ad	高機能タイプ 標準形 I 種 リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
AE 剤	AE	AE 剤 (I 種) 高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体

表一2 基本配合

W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	B		S	G
				C	EA		
50.0	54.0	7.0	165	310	20	942	888

表一3 試験項目

フレッシュ	スランプ (JIS A 1101)
	空気量 (JIS A 1128)
	コンクリート温度 (JIS A 1156)
硬化体	圧縮強度 (JIS A 1108)
	スケーリング量 (ASTM C672)
	気泡分布 (ASTM C457)
	表層品質 (透気試験, 表面吸水試験)



写真一2 スケーリング試験用供試体の採取状況

ごとに実施し、試験面に剥離片の浮きがないようにブラシで掻いて採取した後、5 B のろ紙で溶液と分離し、105℃の乾燥炉で定量となるまで乾燥させて質量を測定した。試験は 1 ケース 3 体の平均とし、目標スケーリング量は 50 サイクルで 0.5 kg/m² 以下とした。

3-2 試験結果

(1) コンクリート中の空気量変化とスケーリング

実機試験(写真-3)での工場出荷以降におけるフレッシュコンクリート中の空気量の変化を図-4に示す。コンクリート配合は、膨張材の使用有無および膨張材4種類(EA, EB, EC, ED)を用いた5配合で、空気量の測定は4段階(工場出荷時, 現着荷卸し時, ポンプ圧送後, 圧送して締固め後)で実施した。生コン工場からの運搬時間は約30分で、現場到着後に荷卸しし、ブーム式ポンプ車(26mM型4段屈折式)でコンクリートを圧送して模擬型枠内に打ち込み、内部振動機で締固めを行った。模擬型枠の寸法は縦500mm×横500mm×高さ1,000mmで、1層500mm高の2層打ちとし、締固めは高周波パイプレータ(φ50mm)で10秒とした(写真-4, 5)。

空気量測定の結果、各施工過程での空気量の変化は、膨張材の使用有無や膨張材の種類で大きな差はなかった。



写真-3 実機試験



写真-4 ポンプ車による圧送打ち込み状況



写真-5 圧送後の締固め状況

運搬による空気量の減少量は1%前後であったが、ポンプ圧送によって3~4%程度の大減少が確認された。一方で、圧送後に行った締固めによる変化はほとんどなかった。既往文献によると、本試験と同様に、振動締固め前にポンプ圧送した場合、圧送による空気量の減少は大きいですが、振動締固めによる空気量の減少は小さいとされる。これは圧送によって気泡径が粗大なエントラップトエアが多く消失したことで、振動締固めによる空気量の変化が小さくなったため⁴⁾と報告されている。また適度な振動締固めは、エントラップトエアを消失させるのに有効で、AE剤で連行させた微細なエントレインドエアに大きな変化はなく⁵⁾、特に150μm以下の気泡は振動締固めによって抜けにくい性質がある⁶⁾とされる。つまり、本試験では出荷・荷卸し時には巻き込みによる空気が多く存在し、AE剤で連行した微細な空気は結果として4~5%程度であったことが推定される。

図-5に室内および実機試験でのフレッシュコンクリートと硬化コンクリート中の空気量の関係を示す。なお実機データは各施工過程で採取した試料での結果である。フレッシュと硬化体の空気量には相関性が見られ、フレッシュ時に連行した空気は硬化後に大きく減少し、2.5~3.5%ほどしか残っていなかった。この原因として、凝結過程での気泡消失やブリーディングの影響などが考えら

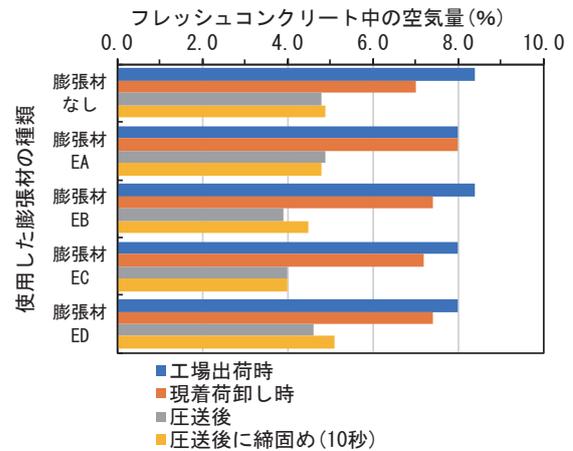


図-4 施工過程でのフレッシュ空気量の変化 (実機)

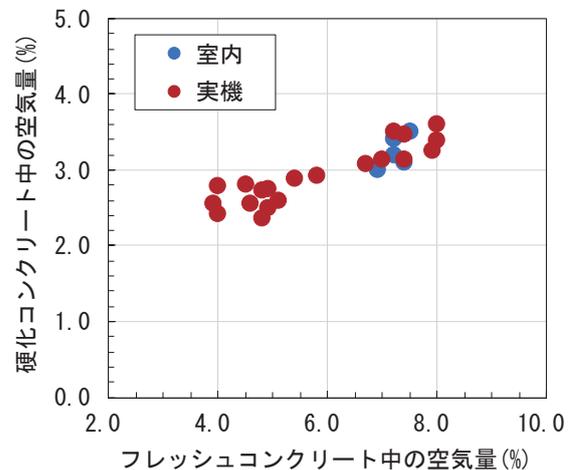


図-5 フレッシュと硬化体中の空気量の関係

れ、特にブリーディングが多いほどコンクリート中の空気が破泡や合泡を生じ、空気量の減少や気泡の粗大化が起きるとされる^{7,8)}。本工事では骨材に碎石・砕砂を用いており、ブリーディングによる影響は少なからずあったと推定される。

図-6に硬化コンクリート中の空気量とスケーリング量の関係を示す。スケーリング量は全ての配合で目標値を超える結果となったが、硬化体中の空気量とスケーリング量には線形相関性があり、外挿で4.0%程度の空気量が必要であることがわかった。また、硬化コンクリート中に残る空気の質、つまり気泡径に着目して、気泡間隔係数とスケーリング量の関係を整理した結果(図-7)、気泡間隔係数が小さいほどスケーリング量は小さく、耐凍害性の目安とされる250 μm 以下で、気泡間隔係数自体は十分に小さい値であった。しかしながら、スケーリング量は目標の0.5 kg/m^2 以下を超える結果であった。そこで気泡径の内、特に直径150 μm 以下の空気量とスケーリング量の関係を整理した所(図-8)、両者の間には関連性が認められ、当該空気量が大きいほどスケーリング抵抗性が向上し、外挿で1.4%程度が必要となった。

以上より、スケーリング抵抗性を確保するため、硬化コンクリート中に4.0%程度の空気量を残し、さらにこの内、直径150 μm 以下の微細な空気を1.4%程度連行させるように配合修正を行うことが良いと考えた。なお、本試験でベース配合とした生コン工場の耐凍害用配合であるが、配合設計当時のスケーリング試験ではスケーリング量が0.5 kg/m^2 以下であったことから、当時と今回で試験条件に何らかの違いがなかったか確認した。その結果、細骨材に含まれる微粒分量が当時に比べて大きく減少しており、ブリーディング量の増加による空気保持性の低下による影響があったと推測された。

(2) 配合修正

硬化コンクリート中に必要に空気量を確保するため、モルタルの粘性に着目し、水結合材比50%固定で細骨材率の値を変動させ、スケーリング量への影響を確認した。ちなみに、同じ宮古盛岡横断道路の路線にある凍害区分3の新区界トンネルでは、細骨材率を適切に設定することでスケーリング抵抗性を改善できたとの報告⁹⁾がある。本試験での細骨材率は、現行の54%のほか、56%、52%、50%の4水準とした。図-9に細骨材率と硬化コンクリート中の空気量およびスケーリング量の関係を示す。なお、本試験に用いた細骨材中の微粒分量が前回試験時よりも2%近く少ないことが試験後の調査でわかった。細骨材率56%では、空気の連行性よりもブリーディングの増加による空気の損失や気泡の粗大化による影響が卓越して、硬化体中の空気量が少なくなったと考える。それ以外では、細骨材率が大きいほど硬化体中の空気量は増える傾向を示したが、残念ながらスケーリング量も増加する結果となった。なお、細骨材率54%の時の硬化体中の空気量は、前回試験3.2%に対して、今回の試験では

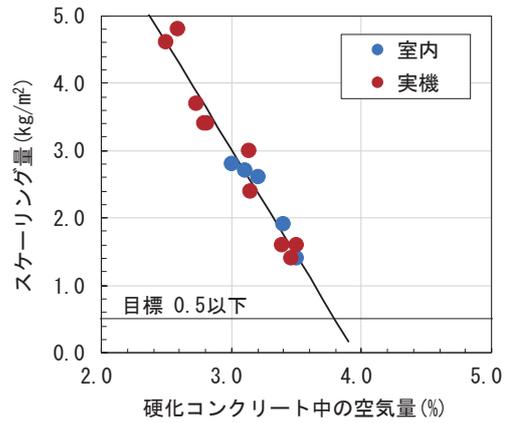


図-6 硬化体中の空気量とスケーリング量の関係

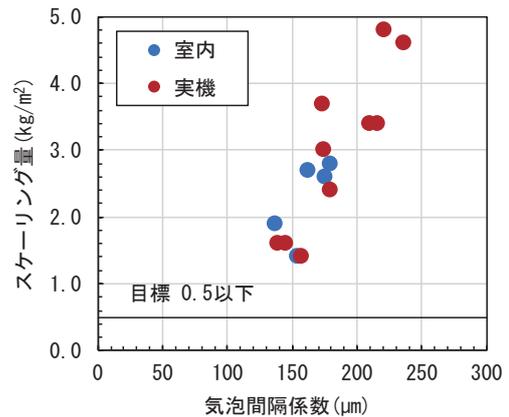


図-7 気泡間隔係数とスケーリング量の関係

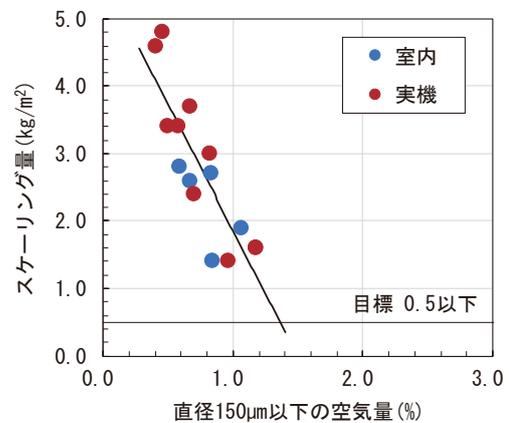


図-8 直径150 μm 以下の空気量とスケーリング量の関係

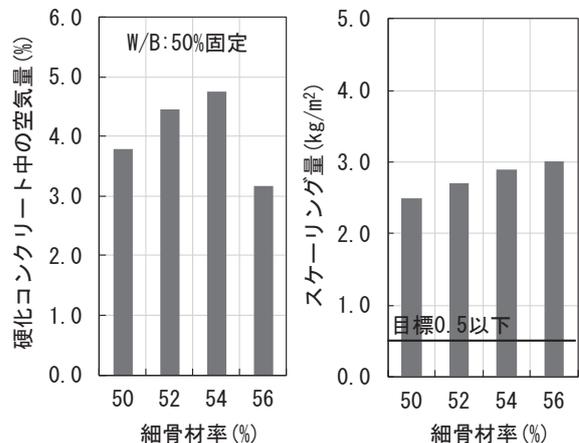


図-9 細骨材率と硬化体中の空気量、スケーリング量

4.7%で増えていた。これは、混練時における空気の連行性が高くなったことなどが要因と考えられる。

スケーリングは、**図-10**のスケーリング劣化とその損傷程度概念図¹⁰⁾より、劣化のごく初期は表面ペースト分の損失のみだが、その後、骨材の剥離が起ると表面の損傷は加速的に進行する(**写真-6**)。このため、ペーストの強度が十分でなく、細骨材率が高すぎると、見掛け上、試験のサイクルを重ねるほど損傷の進行が早くなり、スケーリング量も大きくなる。特に空気量が多い配合では、ペースト強度の低下が懸念された。そこで、粉体量を増やしてモルタルの粘性を高め、細骨材率を下げることにした。これにより水結合材比が小さくなることでペーストを強化でき、かつ細骨材の微粒分量の変動による影響を抑えられ、ブリーディングの発生量も抑制できる効果を期待した。

検討配合は、**表-4**の水結合材比46%、43%、41%の3水準とした。**図-11**に気泡径分布データを当初配合(水結合材比50%)と比較して示す。粉体量を増やして水結合材比を小さくし、細骨材率も小さくしたことで、当初配合に比べて、直径200 μm を超える空気が減り、一方で直径100 μm 以下の耐凍害性に有効とされる微細な空気が増えた。また**表-5**と**写真-7**に、硬化コンクリート中の空気量とスケーリング試験の結果を示す。硬化体中の空気量は3配合とも目標とした4.0%を超え、この内、直径150 μm 以下の空気量は水結合材比41.0%配合で目標をわずかに下回ったものの、概ね期待した数値を得られた。スケーリング量は3配合とも目標0.5 kg/m^2 以下を満足した。また直径150 μm 以下の空気量とスケーリング量の関係(**図-12**)を見ると、前記の室内・実機試験データとも相関が見られ、同一材料であれば、配合によらず、直径150 μm 以下の空気量1.4%程度をスケーリング抵抗性確保の目安にできる可能性がわかった。次に、3配合について実施工での確認試験を実施した。

表-4 修正配合案

W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)		
			W	B	
				C	EA
50.0(当初)	54.0	7.0	165	310	20
46.0	50.0	7.0	162	332	20
43.0	49.0			357	
41.0	47.0			375	

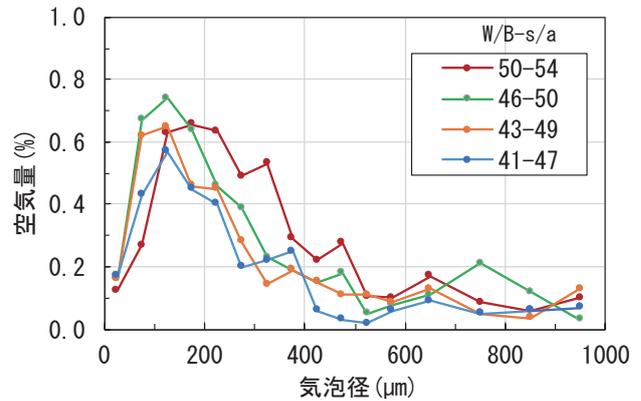


図-11 気泡径分布

表-5 硬化体中の空気量とスケーリング量

W/B (%)	s/a (%)	硬化体中の空気量			スケーリング量 (kg/m ²)
		総量 (%) (目標 4.0)	ϕ 150 μm 以下 (%) (目標 1.4)	気泡間隔係数 (μm)	
46.0	50.0	5.29	1.61	198	0.31
43.0	49.0	4.66	1.45	211	0.36
41.0	47.0	4.22	1.16	233	0.10



写真-7 スケーリング試験面 (50 サイクル)

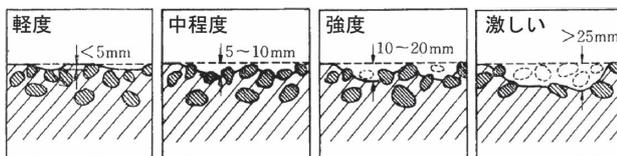


図-10 スケーリングによる劣化と損傷程度¹⁰⁾



写真-6 スケーリング試験面の損傷例

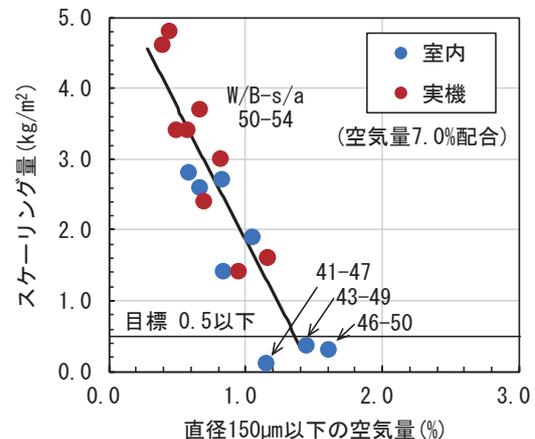


図-12 直径150 μm 以下の空気量とスケーリング量の関係

§4. 現場施工試験

配合選定試験で得られた3配合について、現場にて確認試験を実施した。打込み方法は通常の施工サイクルと同じで、アジテータ車4m³積みで工場出荷後、運搬時間はおよそ30分で、1配合につき1ブロック(10.5m)を順次施工した(写真-8)。フレッシュ性状は、工場出荷時、現着荷卸し時、ポンプ筒先(最下段打設窓のサクシオンホースより)、締固め後(内部振動機による)の各施工過程で試料を採取して確認した(写真-9)。また現着荷卸し時および締固め終了時に採取した試験体でスケーリング試験を行った。

スケーリング量は荷卸し時および締固め後ともに3配合とも50サイクルで0.5kg/m²以下であった。なお、硬化体中の空気量は、室内試験に比べて1~3%ほど増える傾向にあった。室内試験に比べてバッチ数量が多いことやアジテータ車での運搬もあることから単純な比較は難しいが、現場施工を通じて多くの空気が硬化体中に残る結果となった。また施工後、コンクリート表層の水分率が5.5%以下に達してから、SL下の箇所では非破壊による表層品質試験(表層透気試験、表面吸水試験)を実施して品質データを取得した。表-6に覆工コンクリートの表層品質試験結果を示す。表中には、同時期に施工した標準配合区間(呼び強度24)での測定結果も比較で示した。測定の結果、表層透気係数kTおよび表面吸水速度P600の値は、3配合とも標準配合と同等以上の品質を有していることが分かった。

以上より、現場施工試験の結果、3配合とも通常と同じように施工できたが、特にワーカビリティやセメント量過多による温度ひび割れ発生リスクなどを考慮して、水結合材比が46%の配合を坑口部配合として選定した。

§5. まとめ

川井第1および第2トンネル工事では、坑口から100m区間の覆工に、凍害区分3(種別S)に対応した高耐久コンクリートの適用が求められた。そこで、岩手大学と共同で室内・実機での配合試験を事前に行い、所要のスケーリング抵抗性を有した水結合材比の異なる3配合を選定した。そして実際の覆工に3配合を打ち込む現場施工試験を実施し、施工性や品質などを確認した上で、本施工に用いる坑口部配合を30-18-20BB(水結合材比46%、細骨材率50%、空気量7.0%)に決定した。以後、本施工も無事に完了することができた(写真-10)。

謝辞。覆工コンクリートの配合検討において、小山田准教授とともにご指導を頂いた岩手大学の羽原俊祐教授をはじめ、研究室の学生の皆様には心より感謝申し上げます。また室内・実機試験、現場施工試験にご協力を頂いたボゾリスソリューションズ(株)、太平洋マテリアル



写真-8 覆工コンクリートの施工状況



筒先での採取 締固め後の採取

写真-9 コンクリート試料の採取状況

表-6 表層品質試験結果

トンネル名	川井第1		川井第2			
	坑口用配合	標準配合	坑口用配合	標準配合	標準配合	
呼び強度	30	24	33	36	24	
空気量 (%)	7.0	4.5	7.0		4.5	
水結合材比 (%)	46.0	53.0	43.0	41.0	53.0	
細骨材率 (%)	50.0	53.5	49.0	47.0	53.5	
試験材齢 (日)	85	87	84	81	86	
表面水分率 (%)	4.9	4.7	4.2	4.3	4.3	
表層品質	表層透気係数 kT (×10 ⁻¹⁶ m ²)	0.459	0.870	0.446	0.580	0.820
	グレード判定*	一般	一般	一般	一般	一般
	表面吸水速度 P600(ml/m ² /s)	0.296	0.472	0.360	0.415	0.473
	グレード判定**	一般	一般	一般	一般	一般

* 優 (0.001~0.01), 良 (0.01~0.1), 一般 (0.1~1), 劣 (1~10), 極劣 (10~100)

** 良 (0.0~0.25), 一般 (0.25~0.50), 劣 (0.50~)



写真-10 覆工坑口部 (川井第2トンネル)

(株)、デンカ(株)、(株)セイアの関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局：復興道路・復興支援道路情報サイト, <https://www.thr.mlit.go.jp/road/fukkou/>
- 2) 国土交通省東北地方整備局：宮古箱石通信 No. 84, 2021. 3. 15
- 3) 国土交通省東北地方整備局：東北地方における凍害対策に関する参考資料(案) 2019年改訂版, 平成31年3月
- 4) 赤石広秋, 小山田哲也, 佐久間啓吾, 林大介, 松本修治：トンネル覆工コンクリートの耐凍害性を確保できる配合および施工方法に関する検討, 土木学会第71回年次学術講演会, VI-437, pp. 873-874, 2016
- 5) 小山田哲也, 平戸謙好, 山本英和：コンクリートのスケーリング劣化に及ぼす施工による空気量の変化の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, pp. 803-808, 2019
- 6) 片平博, 古賀裕久：空気量・振動締固め時間および細骨材の品質がスケーリング抵抗性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 771-776, 2018
- 7) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学：コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 35-47, 2012. 1
- 8) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学：中庸熟フライアッシュセメントを用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量の変化および耐凍害性への影響, コンクリート工学論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 47-57, 2011. 9
- 9) 高橋慧, 小山田哲也, 羽原俊祐, 樊小義：スケーリング抵抗性を考慮したトンネル覆工コンクリートの配合に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol. 70, pp. 378-383, 2016
- 10) 洪悦郎：コンクリートの凍害, コンクリート工学, Vol. 13, No. 3, 1975