

報告 過酷な積雪寒冷地におけるRC床版の品質確保と高耐久化に対する取組

音道 薫*1・阿波 稔*2・迫井 裕樹*3・船水 武*4

要旨：近年、東北地方の鉄筋コンクリート床版（RC床版）において表層コンクリートが土砂化する劣化が散見されるようになった。この現象は交通量の少ない路線でも発生しており、自然環境条件による凍害や凍結抑制剤散布による塩害、アルカリシリカ反応（ASR）が起点となっていることが分かってきた。本報告では、道路橋RC床版の劣化抵抗性向上を目的とし多重防護の考え方を取り入れ、コンクリートの緻密性向上および空気量の確保、また防錆仕様の鉄筋を採用し、さらに施工の基本事項の遵守と丁寧な施工を徹底することにより品質確保と耐久性向上を図った取組みとその検証について報告する。

キーワード：RC床版、凍害、ASR、多重防護、施工状況把握チェックシート

1. はじめに

国道103号青ぶな山バイパスは、青森県十和田市青樺山～十和田市子ノ口までの安全で円滑な交通の確保とともに、奥入瀬渓流の自然環境保護と散策時の安全性・快適性の向上を目的とした、延長5.2kmの道路である。この、青ぶな山バイパス起点側に位置する（仮称）青ぶな山1号橋のRC床版を2018年5月～11月に施工した。表-1に橋梁諸元を記す。

主に鋼道路橋に採用される鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）は、車両の走行によって生じる活荷重の繰返しによって疲労損傷し、やがて床版の打換えに至るライフサイクルを設定して設計されている。

しかし、近年、東北地方のRC床版において表層コンクリートが土砂化（あるいは砂利化）する劣化現象が散見されるようになってきた¹⁾。この土砂化は、交通量のあまり多くない東北地方においては、RC床版が置かれている供用環境が大きく起因しており自然環境条件による凍害や凍結抑制剤散布による塩分供給によって塩害、アルカリシリカ反応（以下、ASR）が起点となっていることが近年の研究で分かってきた。

この劣化現象について、子田ら²⁾はRC床版の凍害は供用年数だけではなく、冬期平均気温と凍結抑制剤散布量という劣化要因が重なったときに劣化が顕在化することを報告している。

これらの知見を踏まえ、本橋梁のRC床版の高耐久化を念頭におき、東北地方特有の劣化現象である凍害や塩害およびASR、これが起点となり発生する土砂化に対して、凍結抑制剤散布下におけるRC床版の耐久性確保の手引き³⁾および東北地方における凍害対策に関する参考

資料（案）³⁾（以下、参考資料）を運用し多重防護の考え方（図-1）で劣化抵抗性向上を図ることを目的とした。具体的には、耐凍害対策として微細な気泡であるエントレインドエア（気泡径25～250μm）の確保、またコンクリートの緻密性確保のため水結合材比（以下、W/B）の低減、塩分環境下でのASR抑制のため高炉セメントB種を採用した。さらに、ひび割れを抑制するために膨張材を使用し、鉄筋の腐食抑制のために防錆仕様の鉄筋を採用することとした。また、これらの性能の確認や施工性を把握するために試し練りや試験施工を行い、施工の基本事項の遵守のために施工状況把握チェックシート「試案」（以下、チェックシート）を検討・作成し適用した。

これらの取組について、各段階で各種試験を行い検証しながら本施工を実施し、本施工完了後には表層透気試験⁴⁾、⁵⁾と表面吸水試験⁴⁾、⁵⁾を用いて表層品質を評価し劣化抵抗性向上を明らかにすることを目的とした。

表-1 橋梁諸元

路線名	一般国道103号（青ぶな山BP）
道路基準	第3種 第3級
設計速度	V=50km/h
橋長	BL=34.500m（CL上）
斜角	$\theta = 70^{\circ} 00' 00''$ （弦方向に対し）
平面線形	R=100～A=70
縦断勾配	i=3.930%
横断勾配	i=4.000%（片勾配）～拌み勾配変化区間
活荷重	B活荷重
雪荷重	$W_s=1.0\text{KN/m}^2$
上部工形式	鋼単純I桁橋（多主桁）

*1 上北建設(株) 土木部主幹（正会員）

*2 八戸工業大学 工学部土木建築工学科 教授 博（工）（正会員）

*3 八戸工業大学 工学部土木建築工学科 准教授 博（工）（正会員）

*4 国土交通省東北地方整備局 青森河川国道事務所 建設監督官

表-2 コンクリートの配合表

セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水結合材比 (%)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	膨張材 F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
普通ポルトランドセメント (N)	25	12	50	6.0	43.3	170	320	20	740	1102	3.06
	25	12	45	6.0	41.3	170	358	20	694	1119	3.78
	25	12	40	6.0	38.2	170	405	20	627	1151	4.25
	25	12	35	6.0	34.4	170	466	20	547	1187	7.78
フライアッシュセメント B種 (FB)	25	12	50	6.0	42.9	168	316	20	730	1102	3.02
	25	12	45	6.0	41.0	168	353	20	684	1119	3.73
	25	12	40	6.0	37.7	168	400	20	614	1151	4.20
	25	12	35	6.0	33.7	168	460	20	531	1187	7.20
高炉セメント B種 (BB)	25	12	50	6.0	42.9	170	320	20	730	1102	3.06
	25	12	45	6.0	40.9	170	358	20	681	1119	3.78
	25	12	40	6.0	37.7	170	405	20	614	1151	4.25
	25	12	35	6.0	33.7	170	466	20	531	1187	7.29

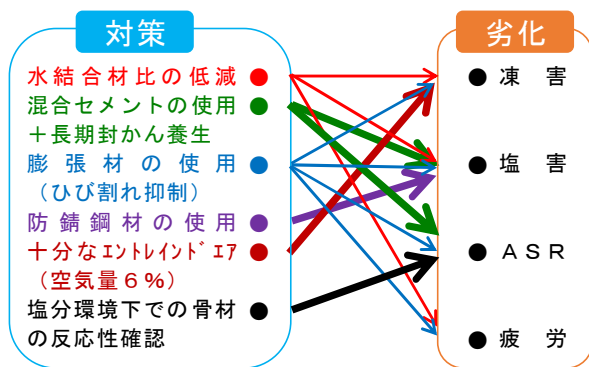


図-1 RC床版の多重防護の考え方

2. 室内試験練り

2.1 配合条件

本研究で検討した配合表を表-2に示す。配合計画に当たって、国土交通省東北地方整備局が非合成桁床版の標準仕様基準⁶⁾に定めている普通ポルトランドセメントを含めフライアッシュセメントB種および高炉セメントB種の3種類のセメントを用いてW/B=50, 45, 40, 35%, 目標空気量6.0%, スランブ12cm, 膨張材はセメントの内割りで20kg/m³とした組み合わせで計12配合にて検討した。

2.2 室内試験

(1) 室内試験項目について

室内試験では、フレッシュコンクリートの空気量測定試験、スランブ試験、圧縮強度試験、スケーリング試験、ASR試験、乾燥収縮試験、気泡組織の測定、コンクリートの自己収縮応力試験を行った。

この2章では、東北地方特有の劣化現象に関係の深いスケーリング試験、ASR試験についてのみ記述する。

(2) スケーリング試験 (JSCE-K572)

参考資料³⁾では、エントレインドエアが(気泡径25~250μm)必要量確保されれば凍害抑制に顕著な効果が

あるとされている。また、スケーリング量を少なくするには、硬化コンクリートの500μm以下の空気量を3.0~3.5%程度確保し、気泡間隔係数を250μm以下にしなければならないとしている。さらに、今回適用する実構造物は参考資料において、最も凍害が厳しいとされる種別Sに該当する。また、種別Sの地域では50サイクルにおけるスケーリング量についてスケーリング抵抗性が期待できる0.3kg/m²程度以下にすることが推奨されている。そのため、今回の研究では目標空気量6.0%とした場合、各種セメントおよびW/Bにおいてスケーリング抵抗性を検証した。

なお、種別Sとは、冬期間(12月, 1月, 2月)の日平均気温が-3℃未満の地域でかつ、凍結抑制剤の散布量が20t/km以上の区間をいう。

今回、適用したスケーリング試験はJSCE-K572(6.10)に準拠して行ったため、60サイクルまで実施している。なお、試験水はNaCl3%水溶液を用いた。図-2にスケーリング試験の結果を示す。

図-2の試験結果から、高炉セメントB種のW/B=50%のみがスケーリング量0.3kg/m²程度以下をクリアできなかった。しかし、それ以外の配合については、セメントの種類に関わらずスケーリング抵抗性を期待できる0.3kg/m²程度以下を満足する結果となった。

(3) ASR試験 (SSWコンクリートバー法)

本研究で使用した骨材は、ASR試験の化学法にて「無害」と判定されたものである。しかし、近年無害と判定された骨材であっても、塩分が供給された場合に膨張反応を起こす可能性があることが最近の研究^{1), 7)}で明らかにされている。そのため、本対象構造物には多量の凍結抑制剤が散布されることが分かっているためSSWコンクリートバー法¹⁾により膨張反応を示すか検証した。

このSSWコンクリートバー法は、真水を20%NaCl水溶液に置き換え、供試体3本の平均膨張ひずみが6ヶ月

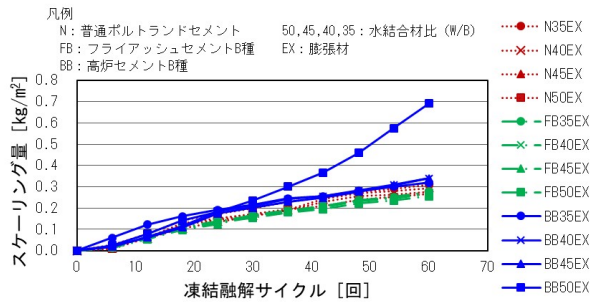


図-2 スケーリング試験結果

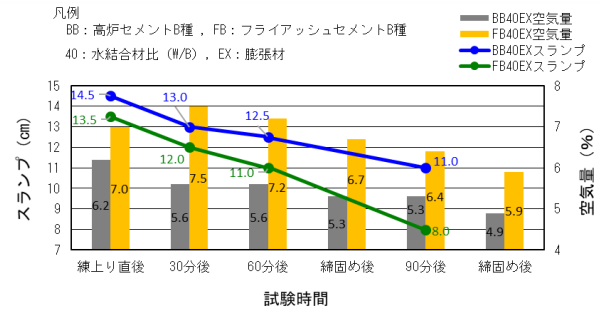


図-4 フレッシュコンクリートの性状試験

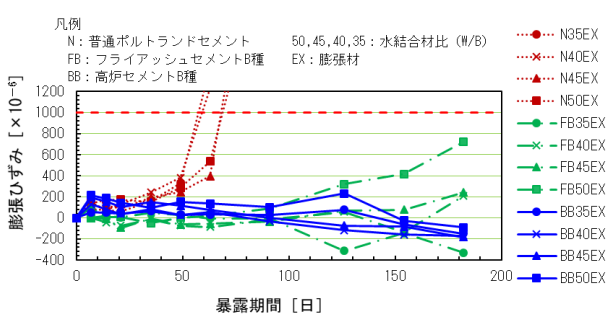


図-3 ASR 試験 (SSW コンクリートバー法)



写真-1 模擬床版コンクリート打込み状況

後に 1,000 μ 以上の場合「反応性あり」と判断する。試験結果を、図-3 に示す。

図-3 の試験結果から、普通ポルトランドセメントのみ W/B に関わらず試験開始後、60 日付近において膨張ひずみ 1,000 μ を超えており反応性ありの結果となった。この試験結果から、「無害」と判定された骨材であっても塩分が供給されると普通ポルトランドセメントでは膨張反応がでることが分かった。また、フライアッシュセメント B 種と高炉セメント B 種は水密性が高く、ASR を抑制することが検証された。

3. 実機試験練り

3.1 実機試験練りの配合選定

2 章 2 節の試験結果より、実機試験練りでは ASR を抑制し水密性の高いフライアッシュセメント B 種と高炉セメント B 種を採用した。また、乾燥収縮試験の結果から W/B は低い程、収縮量が小さくなることとコンクリートの緻密性を確保するため W/B=40% とした。なお、W/B=35% においても良好な試験結果を得られているが実際の施工性を配慮し、粘性が強く仕上げ作業には不向きであるため除外した。

3.2 実機試験の概要・試験結果

室内試験練りと実機試験練りとは、ミキサの練混ぜエネルギーの違いにより、フレッシュコンクリートの性状が必ずしも同様にならない場合があるため、実機試験にて性状を確認する。実機試験は、室内試験で実施した確認事項を実機により再現可能であることを確認する。

特に、トラックアジテータでの運搬中のスランプと空気量については、本施工と同様に 4 m^3 を積載運搬し経時変化の測定やパイプレータによる締固め後に空気量を計測し空気の保持性を確認する。これらの性状確認により試験施工および本施工に使用する配合を決定する。

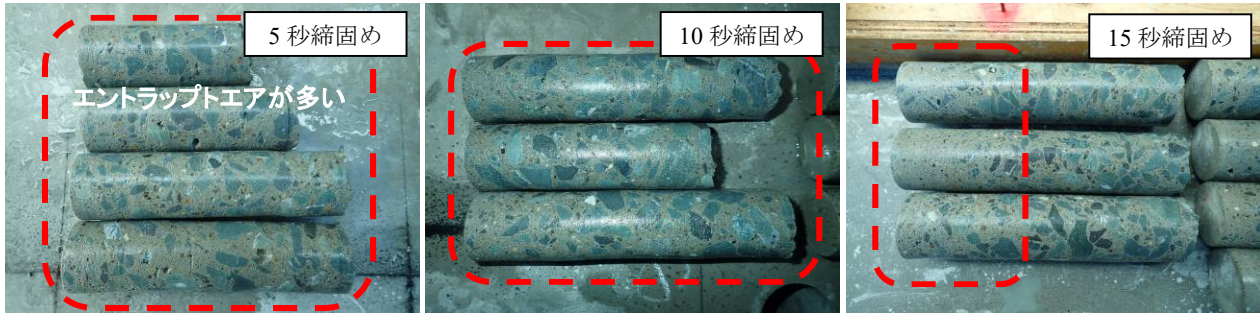
性状試験についてはスランプと空気量を、練上がり直後、30 分経過後、60 分経過後、90 分経過後に測定を行った。さらに、60 分経過後と 90 分経過後に締固めを行い、その後に空気量を測定し保持性能を確認した。性状試験結果については図-4 に示す。

試験結果から、空気量についてはフライアッシュセメント B 種および高炉セメント B 種とも 90 分経過後において下限規格値の 5% 以上であり問題はなかった。しかし、スランプについてフライアッシュセメント B 種では 90 分経過後に 8.0cm まで低下し、こわばりの速さも感じられた。本施工の時期が、7 月下旬であり暑中コンクリートの対応が必要となることに配慮し使用する配合は高炉セメント B 種の W/B=40% に決定した。

4. 試験施工

4.1 試験施工の概要・目的

床版は面施工のため、1 つのトラブルが品質低下に大きな影響を与える。本施工で、そのような不具合を発生させないために施工計画書の立案に不可欠な項目を本施工前に確認し、良かった点、改善点などを議論し最適な状態で本施工を迎えられるようにすることが試験施工の目的である。



① 材料分離は認められない ② 材料分離は認められない ③ 粗骨材の沈下が確認される

写真-2 締固め時間別のコア供試体

4.2 試験施工での確認項目

模擬床版は幅 5.5m×延長 10.5m に対し、実際の床版は標準幅 14m×延長 34.5m である。模擬床版は実際の施工現場に製作したため、本施工と同じ環境条件である。

なお、確認項目としてフレッシュコンクリートのスランプ・空気量、本施工を想定し施工性や人員・設備の過不足、締固め時間と空気量および気泡間隔係数の関係、決定した配合で施工が可能か、コンクリートポンプ車の圧送能力、最適締固め時間の決定、左官仕上げのタイミングを N 式貫入試験値と相関させる、湿潤養生マットの適用性、コンクリート温度履歴、ひずみ測定による膨張材の効果およびひび割れリスクの確認などが挙げられる。また、試験施工では本施工において施工の基本事項が遵守されるようにチェックシートを導入し、練習も兼ねて実施する。打込み状況を写真-1 に示す。

4.3 確認項目に対するの改善点

コンクリートのスランプと空気量は規格値内で連続的に安定供給された。また、施工設備面では特に不足などはなかったが、実際の床版面積と施工時期（7 月下旬・暑中対策）を考えた場合、仕上げバイブレータや左官工を増員しなければ仕上げ作業に遅れがでて品質を低下させる恐れがあると考えられた。その他、模擬床版に屋根を掛けて施工をしたことにより、施工面に直射日光が当たらずコンクリートの凝結を遅らせ仕上げ作業が容易に行うことができたという効果も得られた。そのため、これらの改善点や良かった点を本施工に反映させ、仕上げバイブレータの人員と左官工を増員し床版施工面に日陰を設けるために遮光ネットを設置することとした。

4.4 仕上げバイブレータの振動締固め時間

仕上げバイブレータの振動締固め時間を決定するために、試験施工では模擬床版を延長方向に 3 分割し 5、10、15 秒と締固め時間を変えて施工した。その模擬床版の硬化コンクリートからコア供試体（写真-2）を打込み面から下面に向かって採取した。採取したコア供試体は模擬床版厚さと同じ 20cm でその中央をスライスして気泡組織を調べた。気泡組織の測定は ASTM C457 のリニア

表-3 締固め時間別の硬化コンクリートの気泡組織

項目	気泡径	圧送後	5 秒締固め	10 秒締固め	15 秒締固め
気泡数 [個]	全気泡数	533	486	376	392
	0~500 μ m	517	463	343	358
空気量 [%]	全気泡数	6.6	6.7	6.3	6.9
	0~500 μ m	5.3	5.1	4.4	4.7
気泡間隔 係数 [μ m]	全気泡数	139	153	193	194
	0~500 μ m	128	139	174	172

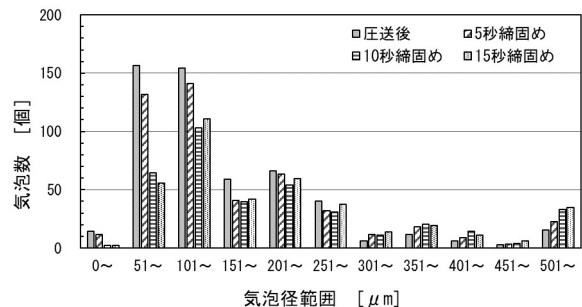


図-5 気泡径

トラバース法に準拠して測定した。結果を、表-3、図-5 に示す。

採取したコア供試体の側面を目視確認した時に、5 秒の締固め時間ではエントラップトエアが多数存在しており締固め不足であることが容易に確認できた。また、15 秒では上層部の骨材が沈下しており過振動による骨材分離が確認された。なお、10 秒のコアでは、これらの現象は確認されず最適な締固め時間に近いことが確認された。

次に、締固め時間別の硬化コンクリートの気泡組織の結果、表-3（トラバース長 1m 当たりの気泡数を表示）から、硬化コンクリートの空気量はいずれの締固め時間においても 4% 以上確保され、気泡間隔係数も 250 μ m 以下であり耐凍害に有効な気泡組織を有している。しかし、10 秒と 15 秒の気泡間隔係数が約 170 μ m に対し、5 秒では約 140 μ m である。この結果から、当配合のコンクリー

トが十分に締固められた場合、気泡間隔係数が 170 μm 付近に安定すると考えられる。さらに、10 秒の時点で気泡間隔係数は約 170 μm になっているため、その以前に約 170 μm に落ち着く時間帯があると言える。あくまでも今回の実験の範囲では、より微細な気泡は締固め時間が短い方が多く残存しており、締固め時間が長くなるほど 500 μm 以上の気泡が増える傾向にあることが分かる。これは、床版部材が 20cm と薄いことと、スランプ 12cm で軟練りであるため締固め時間が長くなると微細な気泡も抜けやすく、かつバイブレータの振動により空気を巻き込むと考えられる。以上の結果から、確実な締固めと微細な気泡をしっかり残存させるためには、最適な振動締固め時間は 8 秒付近～10 秒の間にあると考えられる。

この結果を踏まえ、本施工では施工誤差（慎重な作業によるバイブレータのかけ過ぎ）も考慮して振動締固め時間を 8 秒に決定した。

5. RC 床版の本施工

5.1 本施工での取組

これまで行ってきた、室内試験練り、実機試験練り、試験施工の結果を踏まえて本施工では確実に品質確保や、施工の基本事項が遵守されるようにチェックシートを活用しながら、細心の注意を払い丁寧な施工を心がけ耐久性向上を図った。

具体的な取組として、エポキシ樹脂鉄筋の採用とコンクリート内部に入る金物全てエポキシ樹脂被覆し防錆対策を行った。型枠目地には、ノロ漏れを防ぐためにシーリングを行い、作業足場になる敷板裏面にはクッション材を当て（写真－3）エポキシ樹脂鉄筋の被覆に傷が付かないように配慮した。さらに、打込み時は作業従事者全員に役割を標示した安全ベストの着用や暑中コンクリート対策として打込みの進捗に合わせて遮光ネットで日除けを設置した。仕上げバイブレータの挿入位置につい

ては、所定のピッチを守るようにマーキングロープにて管理し、振動締固め時間は打設副指揮者がストップウォッチにて測定し、笛で合図を出し徹底した管理を行った（写真－4）。養生については、打込み完了から 30 日間湿潤養生を行いコンクリートの緻密性向上を図った。



写真－3 敷板裏面にクッション材設置



写真－4 床版コンクリート打込み状況

表－4 表層透気試験・表面吸水試験の結果

測定位置	表面含水率 [%]				表層透気試験結果			表面吸水試験結果			
					表層透気係数 [$\times 10^{-16} \text{m}^2/\text{s}$]	影響深さ [mm]	透気性 評価	10分時点での表面 吸水速度 [$\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$]		判定	
	①	②	③	平均							
A1側・右 (打ち始め)	4.3	4.5	4.6	4.5	0.0420	14	良	n. d. (0.0)	0.0156	良	
	4.5	4.3	4.8	4.5				0.0390			0.0255
	4.7	4.5	4.7	4.6				0.0240			0.0057
橋長中心 中央部	5.3	5.2	5.0	5.2	0.0350	13	良	0.0060	0.0091	良	
	5.3	4.9	5.1	5.1				0.0230			0.0129
	5.2	4.9	5.2	5.1				0.0510			0.0083
A2側・左 (打ち終わり)	4.9	5.0	4.7	4.9	0.0085	6	優	0.0008	0.0147	良	
	4.8	5.0	4.8	4.9				0.0017			0.0137
	4.8	4.6	4.9	4.8				0.0021			0.0296

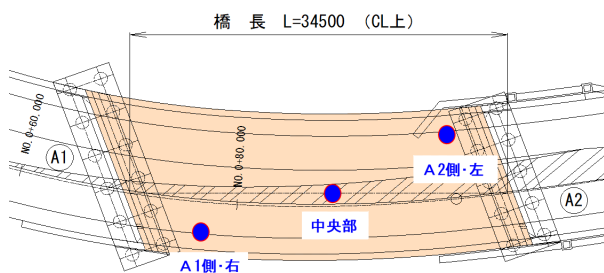


図-6 表層透気試験・表面吸水試験測定位置図

5.2 非破壊試験による表層コンクリートの評価

表層透気試験^{4), 5)}および表面吸水試験^{4), 5)}の結果を表-4に示す。また、測定位置図については図-6に示す。これらの結果より、施工の基本事項を遵守するためにチェックシートを活用し各試験段階を踏まえ丁寧な施工を指導し実践することにより、極めて良質な品質を確保できることが分かった。また、セメントについてもASR抑制効果や水密性の高い高炉セメントを採用しW/Bを下げ、長期湿潤養生を行うことにより緻密なコンクリートを構築できることが証明された。

6. まとめ

本報告では、東北地方特有のコンクリートの劣化現象の対策として多重防護の考えを取り入れ、チェックシートの活用や長期湿潤養生を実践した取組みについて紹介した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 耐凍害対策としてフレッシュコンクリートの目標空気量を6.0%とし、W/B=45%以下とすることによって、塩分環境下においても高いスケリング抵抗性が確保できることが分かった。また、フレッシュコンクリートで空気量6%を確保すれば、硬化コンクリートでも耐凍害に有効な3%以上の空気量が確保されることが分かった。なお、スランプ12cmを使用し床版のように薄い部材での最適な振動締固め時間は8付近～10秒程度であることが明らかとなった。
- (2) ASR試験の化学法で「無害」と判定された骨材であっても、塩分が供給されると普通ポルトランドセメントでは膨張反応を示す骨材がある。また、同じ骨材でも混合セメントを使用すると膨張反応を抑制できることが明らかとなった。
- (3) 試験施工により、チェックシートを用いて施工の基本事項を遵守する経験を植え付けることにより本

施工ではさらに徹底され丁寧な施工となることが実証された。これは、施工段階における改善点がより明確になり品質確保のためのPDCAサイクルがしっかり循環したことを意味しており、試験施工とチェックシートの活用は有効な手段といえる。

- (4) 表層透気試験と表面吸水試験の結果から、空気量をJIS規格より多くした場合であってもW/Bを低減し、チェックシートを用いて施工の基本事項の遵守と長期湿潤養生を実施すれば非常に緻密性の高いコンクリートを構築できることが明らかとなった。

謝辞：本研究の遂行に当たり、日本大学工学部 佐藤和徳教授、横浜国立大学 細田暁教授より各種試験および施工に対する指導・助言を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) SIP インフラ 維持管理・更新・マネジメント技術：平成28年10月 凍結抑制剤散布下におけるRC床版の耐久性確保の手引き（案），pp.1-103，2016.10
- 2) 子田康弘，坂井拓矢，岩城一郎：東北地方における橋梁点検データを利用した道路橋の劣化要因分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1447-1452，2012.7
- 3) 国土交通省 東北地方整備局：平成29年3月 東北地方における凍害対策に関する参考資料（案），pp.1-32，2017.3
- 4) 阿波稔，迫井祐樹，金濱巨晃，音道薫：函渠工・橋梁下部工におけるコンクリート構造物の品質確保の取組とその検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1611-1616，2016.7
- 5) 細田暁，小松怜史，中川恵理，佐藤和徳：コンクリート構造物の品質向上の取組みと非破壊試験による効果の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1273-1278，2015.7
- 6) 東北地方整備局制定：平成29年4月 共通仕様書（参考資料）平成29年度以降，pp.613-615，2017.4
- 7) 松元淳一，武若耕司，山口明伸，梅木真理：塩害とASRの複合劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.639-644，2008.7