

長大スパン（31.6m）ボックスカルバートの温度ひび割れ防止

北沢建設(株) ○犬飼一登
 長野県飯田建設事務所 宮下 寛
 北沢建設(株) 北沢資謹
 日本コンクリート技術(株) 篠田佳男

1. はじめに

函渠工の側壁部や擁壁のような下端が拘束される壁においては、断面を貫通する温度ひび割れが発生することが多い。このような温度ひび割れの抑制対策としては、低発熱セメントの使用、膨張材の添加、ひび割れ誘発目地の設置、リフトスケジュールの調整や養生方法の工夫などの多くの方法がある。これらの中で、汎用的に使用されるのはひび割れ誘発目地である。しかしながら、水理構造物のように機能面から誘発目地の設置が認められない場合もある。

本報告では、側壁部の壁厚が 90cm でスパン長が 31.6m の函渠工（以下、ボックスカルバートと称す。）の施工において、水和熱抑制型超遅延剤を用いたNDリターダー工法^[1]を適用したことにより温度ひび割れの発生の防止に成功した事例を紹介する。NDリターダーは水和熱抑制型超遅延剤であり、添加したコンクリートの凝結を遅延させる効果を有する。NDリターダー工法は、基礎部に接する壁体部の下端部分にNDリターダーを添加したコンクリートを打ち込んで凝結を遅延させる。このことにより、壁体部が基礎部から受ける拘束力を低減し、温度ひび割れの発生を抑制するひび割れ抑制工法である。

2. NDリターダー工法の温度ひび割れ抑制メカニズム

図-1に、NDリターダー工法による壁状構造物の温度ひび割れ抑制メカニズムを示す。ここでは、温度ひび割れの発生メカニズムおよび温度ひび割れ抑制対策のひとつであるND-WALL工法^[2]のメカニズムについてもあわせて示した。

フローの上段の図は、従来工法における外部拘束型の温度ひび割れの発生メカニズムである。この場合は図に示すような位置に温度ひび割れが発生する。そこで、ひび割れ抑制対策として、想定されるひび割れ間隔を考慮して誘発目地を設置する。このことにより、ひび割れを誘発目地部に誘導して誘発目地間におけるひび割れの発生を抑制する。

ND-WALL工法は、フロー図の中段に示すように、先行壁体部に収縮低減目地を設けて温度ひび割れの発生を抑制するものである。この工法は、先行壁体の収縮低減目地部に発生させたひび割れの開閉作用により壁体部が収縮変形しやすくすることを特徴としている。すなわち、壁体部に作用する外部拘束力を低減して温度ひび割れの抑制を図る。

NDリターダー工法は、フロー図の下段に示すように、壁体下部にNDリターダーを添加して凝結を遅延させる部位を設けることを特徴としている。このことにより、壁体部に初期材齢時において作用する外部拘束力がゼロに近い理想的な状態を実現する。

以上のように、ND-WALL工法は「構造的な特性を活かしたひび割れ対策」と見なせるのに対し、NDリターダー工法は「材料的な特性を活かしたひび割れ対策」と見なすことができる。

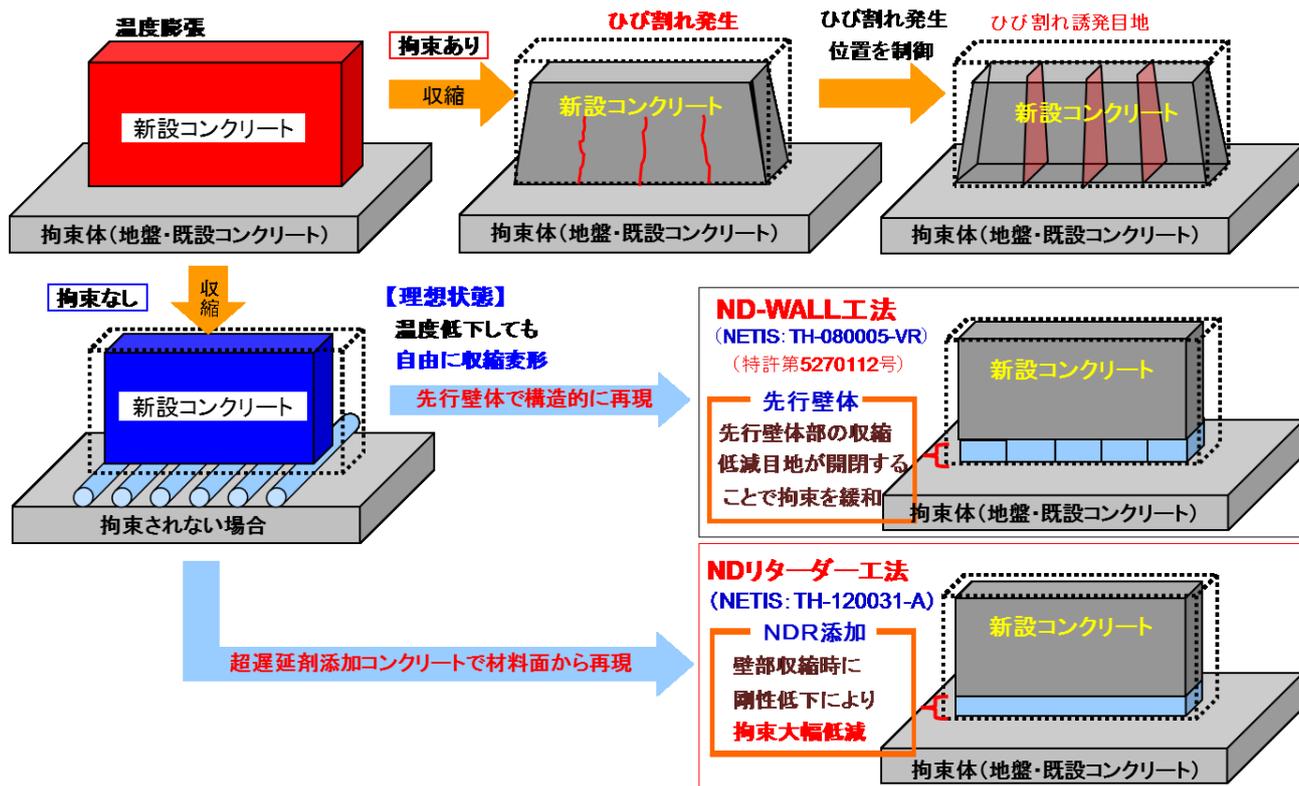


図-1 温度ひび割れの抑制メカニズム (ND-WALL工法とNDリターダー工法)

3. 構造物の概要

3.1 工事概要

表-1に本工事の工事概要を示す。ボックスカルバートは道路の下部を横断する水路として構築するものである。この方法は、道路の路面上に目地を設けないため車両走行性がよくなる利点がある。写真-1に上空から撮影した施工段階の現場の状況を示す。ここで、写真に示したスパン長31.6mの部位が今回NDリターダー工法を適用して構築したボックスカルバートの長い方の側壁部分である。また、写真-2に現在は水路として供用されている構造物の完成後の状況を示す。



写真-1 施工途中段階 (上空からの写真)



写真-2 完成写真

表-2 コンクリートの配合

コンクリートの種別	水セメント比 (%)	単用量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
普通 24-8-25BB	55.0	158	287	802	1099	3.06

4. 施工計画

4.1 NDリターダー工法適用の検討手順

NDリターダー工法の効果を確実に得るため、図-3のフローにしたがって事前検討を実施しNDリターダーの添加率を決定した。まず、対象部位をモデル化した温度応力解析を実施し、側壁部の温度応力を最小にする凝結遅延期間を設定した。次に、設定した凝結遅延期間を実施工で実現するためのNDリターダーの添加率を決定した。添加率の決定を効率的に行うため、モルタルを用いた簡易的な試験を実施し、NDリターダー添加率と凝結遅延期間の関係を把握した。試験内容は、NDリターダーを添加したモルタルの温度を測定し、発熱が開始した材齢を凝結遅延期間と判定するものである。そして、生コンクリート製造工場において試験練りを実施し、凝結遅延期間を確認した上で実施工におけるNDリターダーの添加率を決定した。以下で具体的な検討内容を示す。

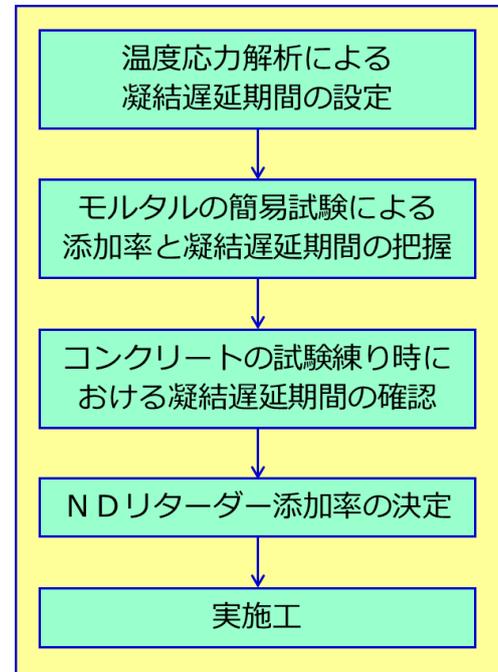


図-3 事前検討のフロー

4.2 温度応力解析による凝結遅延期間の設定

図-4に解析モデルを示す。左側は従来工法で施工する場合、右側はNDリターダー工法を適用した場合のモデルである。図-5は、凝結遅延期間を7日とした場合の温度応力の分布図を示したものである。図-5に示した通り、NDリターダー工法の適用により側壁部の最大応力は2.44N/mm²から1.28N/mm²まで48%低減される結果となった。また、図-6に温度応力の履歴図を示す。

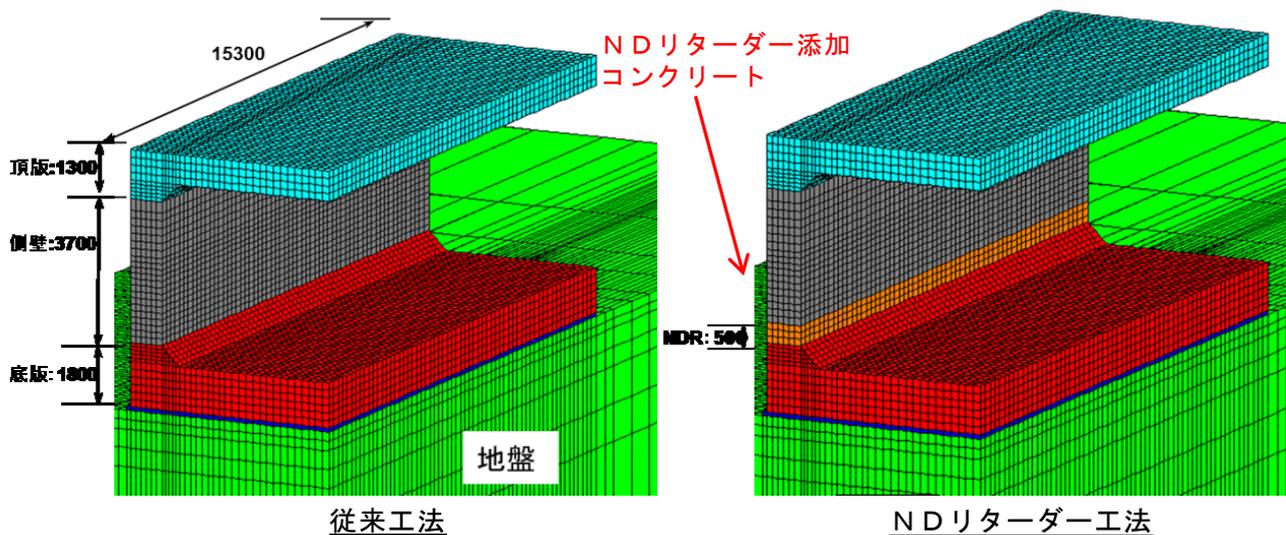


図-4 温度応力解析のモデル

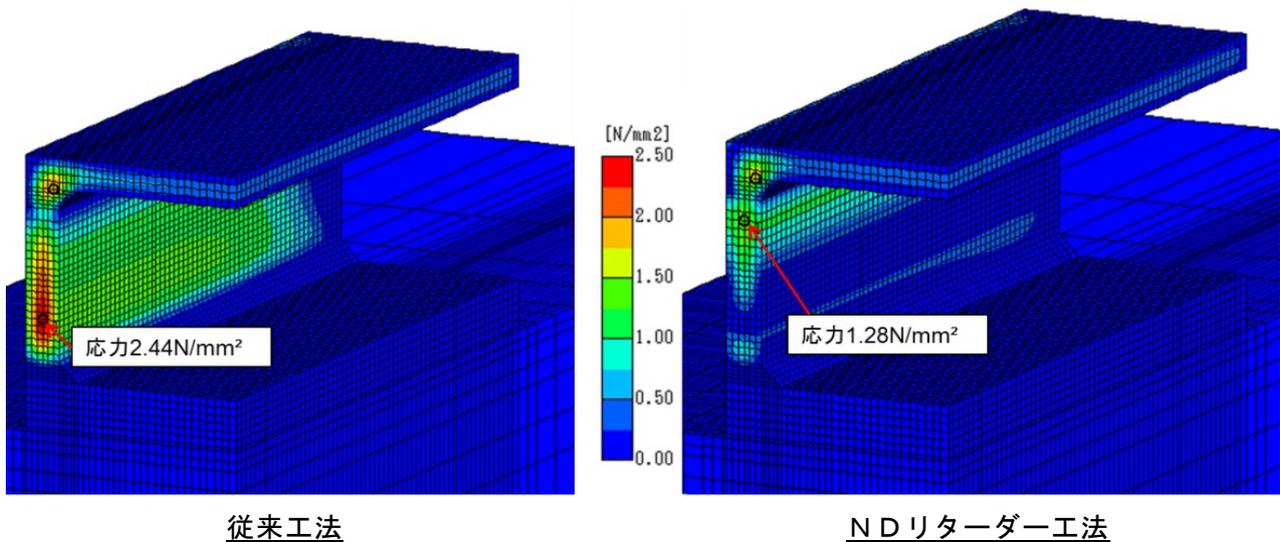


図-5 温度応力解析結果（温度応力の分布図）

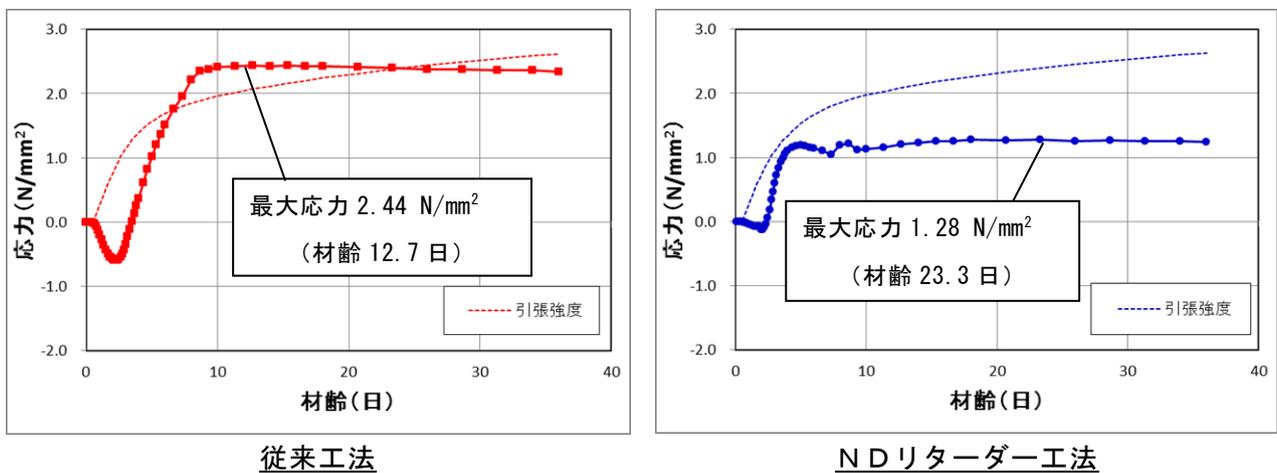


図-6 温度応力解析結果（温度応力履歴図）

(3) NDリターダーの添加率の決定

コンクリートの試験練りを行う前に、生コンクリート工場で使用しているセメントと細骨材を練り混ぜたモルタルによる簡易試験を実施した。ここで、NDリターダーの添加率は、単位セメント量 C （ $=287\text{kg}/\text{m}^3$ 、表-2の配合表参照）に対して0.5%（ C に対して0.5%の量を添加、以下同様）、0.7%の2水準とした。図-7に簡易試験の結果を示す。モルタルの発熱開始材齢から判断して、凝結遅延期間は0.5%、0.7%の添加率に対し、それぞれ2.2日、6.8日となった。

簡易試験の結果より、温度応力解析にもとづく凝結遅延期間7日の条件を満足するNDリターダーの添加率は0.7%程度であることを把握した。ただし、凝結遅延期間はコンクリート温度の影響を受け、温度が高くなると遅延期間は短くなる傾向がある。そこで、試験練りでは、養生温度を 20°C

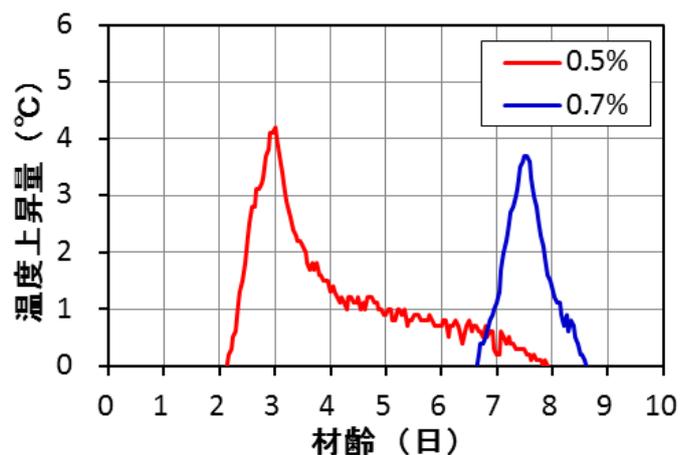


図-7 簡易試験の結果

とした条件のもとでNDリターダーの添加率を決定することとした。ここで、添加率は無添加の場合(0%)に加え、0.6C%、0.7C%、0.8C%の3水準とした。また、コンクリートの強度発現は、凝結遅延期間を考慮して14日、28日、91日の3材齢における圧縮強度試験により行った。

コンクリートの試験練り時におけるフレッシュ性状と圧縮強度試験結果を表-3の一覧表に示す。コンクリートは練り混ぜ時に混和剤の減水剤をNDリターダーに置き換える形としたが、スランプおよび空気量ともにベースコンクリートと同一となることを確認した。また、凝結遅延期間はNDリターダーの添加率が0.8C%の場合に5.5日であり、目標とする7日以内となった。NDリターダーを添加したコンクリートの圧縮強度は、材齢14日ですべて呼び強度の 24N/mm^2 を上回る結果となった。材齢28日ではNDリターダー添加コンクリートの圧縮強度が基本配合のコンクリート圧縮強度を上回った。さらに、長期材齢の91日では、NDリターダー添加コンクリートの強度がさらに増加することを確認した。

表-3 コンクリート試験練りの結果

No	試験内容	フレッシュコンクリート			遅延期間	圧縮強度 (N/mm^2)			
		スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)		材齢 7日	材齢 14日	材齢 28日	材齢 91日
1	基本配合 (無添加)	9.0	4.5	18.0	—	17.7	—	34.1	41.6
2	NDR 0.6C%添加	8.5	4.1	17.0	2日	—	29.0	37.9	45.4
3	NDR 0.7C%添加	7.0	4.5	17.0	3.5日	—	28.8	40.0	50.2
4	NDR 0.8C%添加	8.5	4.4	17.0	5.5日	—	27.9	36.3	45.2

NDR: NDリターダー、SL: スランプ、Air: 空気量、T: コンクリート温度

図-8は材齢とコンクリート圧縮強度の関係を示したものである。左側のグラフは材齢を線形目盛軸としたもので、材齢7日を一目盛としている。NDリターダーを添加したコンクリートは混入率に係わらず材齢14日で無添加(基本配合)とほぼ同等の強度となる。そして、材齢14日以降はすべての添加率のコンクリートが基本配合のコンクリート強度を上回る。図-8の右側のグラフは材齢を対数軸で示したものである。材齢の対数と圧縮強度の間にはほぼ線形的に関係が認められる。このことから、NDリターダーを添加したコンクリートの強度発現は無添加のコンクリートと同様に積算温度にもとづく有効材齢で評価できるものと考えられる。

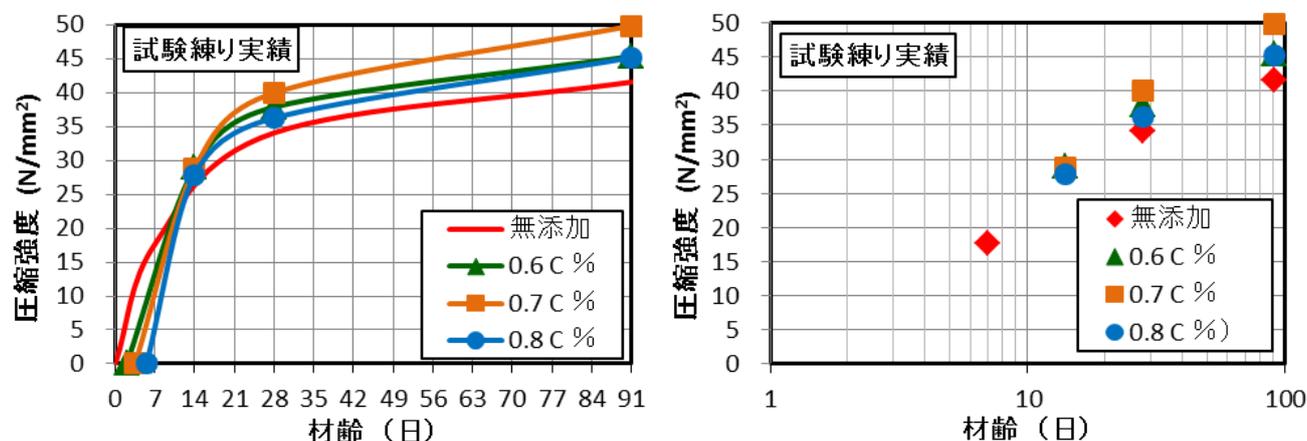


図-8 材齢とコンクリート圧縮強度の関係

4.3 コンクリートの打込み計画

試験練りの結果より、NDリターダーの添加率が0.8%のときの凝結遅延期間が5.5日と確認された。このことをもとに、NDリターダーの添加率は凝結遅延期間を目標とする7日に近づけるため0.05C%増量して0.85C%とした。なお、側壁部外側の型枠の脱型は、材齢14日でコンクリートの圧縮強度が呼び強度を満足することにもとづき、材齢14日の圧縮強度を確認した後に実施する計画とした。

5. ボックスカルバートの施工

ボックスカルバートの施工は、まず、底版コンクリートの施工を行った後、支保工を設置して頂版部下側の型枠を組立てた。次に、側壁および頂版の鉄筋の組立を行った。そして、最後に側壁、頂版の順にコンクリートを打ち込むこととした。なお、側壁と頂版のコンクリートの打込み間隔は4日間とした。写真-3に側壁のコンクリート打込み状況を示す。写真-4に型枠脱型後のボックスカルバート内部のコンクリートの仕上がり状態を示す。



写真-3 側壁のコンクリート打込み状況



写真-4 ボックスカルバートの内部

表-4に施工時に打ち込んだコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の圧縮強度試験結果を示す。ここで、No.1はNDリターダーを添加したコンクリートで、No.2、No.3、No.4はそれぞれ3箇所の壁体に打ち込んだ無添加コンクリートである。NDリターダーを添加したコンクリートの凝結遅延期間は温度応力解析時に想定した7日となった。コンクリートの打込み温度を見ると試験練り時の17.0℃より4℃低い13.0℃となっている。このことより、コンクリートの打込み温度の低下

表-4 コンクリートの試験結果

No.	内容	フレッシュコンクリート			遅延期間	圧縮強度 (N/mm ²)			
		スラップ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)		材齢 10日	材齢 14日	材齢 28日	材齢 91日
1	NDR 0.85C%添加	8.0	3.7	13.0	7日	14.8	23.8	36.7	44.8
2	24-8-25BB①	9.0	5.2	14.0	—	—	—	37.1	—
3	24-8-25BB②	8.0	4.6	15.0	—	—	—	35.0	—
4	24-8-25BB③	9.0	4.3	15.0	—	—	—	36.7	—

がNDリターダー添加量増量とともに凝結遅延期間の延伸（試験練り時の5.5日から7.0日）に寄与したものと考えられる。遅延期間コンクリートの圧縮強度は材齢28日でほぼ呼び強度（ $24\text{N}/\text{mm}^2$ ）と同じになった。また、材齢28日ではベースコンクリートとほぼ同等となる結果となった。

写真-5にボックスカルバート側壁部のスパン長31.6mの部位の外観を示す。側壁のスパン全長31.6mに対し、ひび割れの発生は確認されなかった。



写真-5 ボックスカルバートの外観

5. まとめ

今回施工したボックスカルバートは側壁のスパン長が最大で31.6mであり、高い確率で温度ひび割れが発生することが予測された。しかしながら、NDリターダー工法の適用により温度ひび割れの発生を防止することができた。このことは、今までは困難と考えられていた長スパンの壁状構造物においても、凝結遅延効果を有する材料を効果的に使用することにより温度ひび割れを抑制することが可能であることを示していると考えられる。

[参考文献]

- 1) 河野一徳, 篠田佳男, 西祐宣, 横山貢: 超遅延剤 (NDリターダー) を用いた温度ひび割れ抑制技術の開発と実用化, 第4回コンクリート技術大会 (長岡) 講演資料集, 2014. 9.
- 2) 野島省吾, 篠田佳男: 壁状構造物の温度ひび割れ低減工法の開発・実用化, コンクリート技術大会 (会津) 講演資料集, 2011. 10.