

水和熱抑制型超遅延剤による温度ひび割れ抑制技術

北沢建設株式会社 ○小沢雅樹
 長野県飯田建設事務所 竹内 剣
 日本コンクリート技術株式会社 篠田佳男
 日本コンクリート技術株式会社 河野一徳

1. はじめに

土木学会のコンクリート標準示方書・施工編^[1]（以下、標準示方書と略す。）には、マスコンクリートとして取り扱うべき部材の形状寸法として、「下端が拘束された壁では厚さが 50cm 以上を目安としてよい」と記述している。例えば壁高欄のように壁厚が 50cm 以下のコンクリート構造物の場合は、ひび割れの発生原因は乾燥収縮が主体的であると考えられてきた。そのため、壁高欄のひび割れ抑制対策は、膨張材を添加したコンクリートを使用することが一般的となっている。

今回ひび割れ抑制対策の対象としたボックスカルバートならびにU型擁壁の側壁部は壁厚が 30 と 35cm である。このため、標準示方書に示された考え方にしたがえば、側壁部はマスコンクリートとして取り扱うべき部材にはあたらない。ただし、側壁部は壁厚が小さいものの、水和熱により 10℃以上の温度上昇が生じる。また、断面積が小さいため縦方向に配置された主鉄筋が断面欠損部を形成し、応力集中によりひび割れを誘発する可能性がある。これらのことより、壁厚が 50cm 以下の構造物であっても温度応力に起因するひび割れの抑制対策を検討する必要があると考えられる。

本報告では、側壁部の壁厚が 30cm のボックスカルバート構造物に、ひび割れ抑制対策工法としてNDリターダー工法^[2, 3]を適用することによりひび割れの発生を防止できた事例を紹介する。NDリターダーは水和熱抑制型超遅延剤であり、コンクリートの凝結を遅延させる効果を有する。

2. NDリターダー工法について

2.1 温度ひび割れの抑制メカニズム

図-1はNDリターダー工法による壁状構造物のひび割れ抑制メカニズムを示したものである。

通常の施工では、図の上段に示したように、温度低下時に壁体部の収縮変形が底版に拘束されることでひび割れが発生する。これに対し、下段の図に示すように、NDリターダー工法では、壁体の下部に打ち込んだNDリターダーを添加したコンクリート部分の凝結を遅延させることで、底版からの拘束力を低減して温度ひび割れの発生を抑制する。

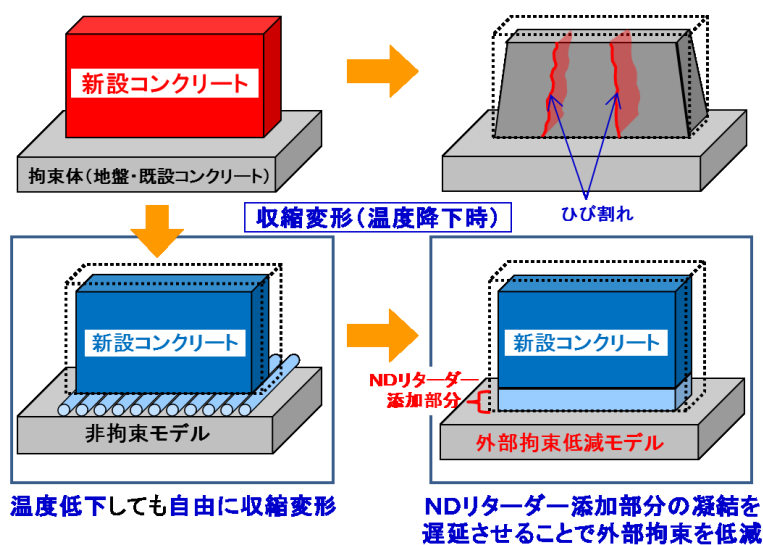


図-1 NDリターダー工法のひび割れ抑制メカニズム

2.2 凝結遅延がコンクリートの強度発現に及ぼす影響

NDリターダーにより凝結を遅延させたコンクリートの強度発現について、表-1に示した2現場における施工事例にもとづき説明する。これら2つの現場における対象構造物はいずれもボックスカルバートである。以下、施工事例のNo.1を「新潟実績」、同じくNo.2を「長野実績」として説明する。なお、表-2に各施工事例におけるコンクリートの配合を示す。いずれの現場もコンクリートの呼び強度は 24N/mm^2 で、セメントの種類は高炉セメントB種であった。

表-1 NDリターダー工法の適用工事（主な実績）

No	発注者	工事名	施工場所
1	国交省 北陸地整 長岡国道事務所	国道17号八色原道路その5工事	新潟県
2	長野県 飯田建設事務所	平成26年度社会資本整備総合交付金(道路)工事	長野県

表-2 コンクリートの配合

No	コンクリートの種別	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m^3)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
1	普通 24-12-40BB	50.6	143	283	759	1150	2.83
2	普通 24-8-25BB	55.0	158	287	802	1099	3.06

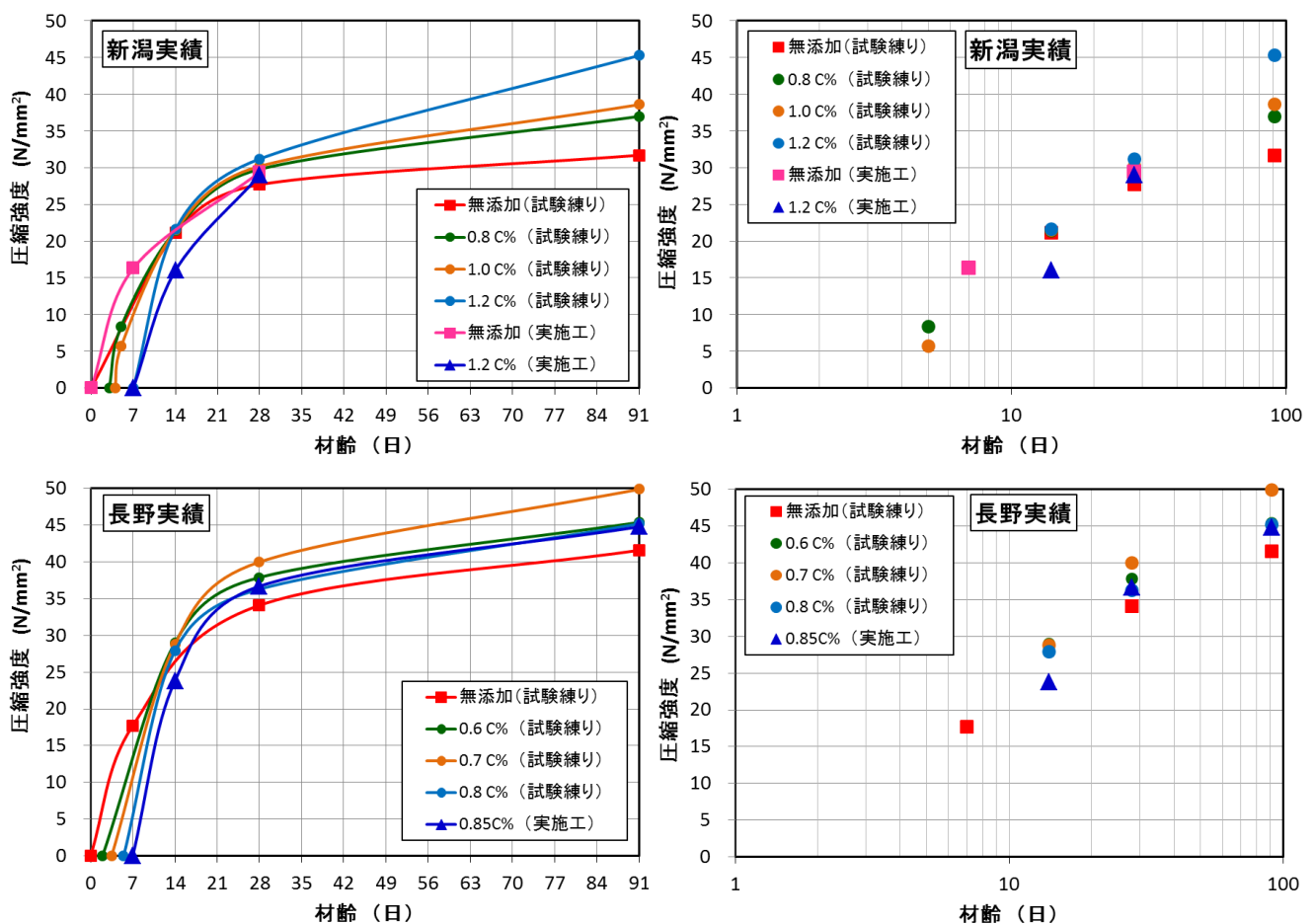


図-2 NDリターダー添加コンクリートの強度発現

図-2は新潟実績、長野実績の双方について、コンクリートの材齢と強度の関係を示したものである。ここで、右側の図は材齢軸を対数とした片対数表示の関係を示した図である。なお、これらの実績の中には、実施工の結果の他に、試験練り時に実施したNDリターダーの添加率をパラメトリックに変化させた場合の結果も示した。

新潟実績、長野実績ともに凝結遅延期間は実施工における7日が最大となった。図-2より、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28日においてすべてNDリターダーを添加しないベースコンクリートの圧縮強度を上回ったことがわかる。また、材齢28日以降においては、新潟実績、長野実績のいずれの場合もNDリターダーを添加したコンクリートの強度の伸びがベースコンクリートより大きくなる傾向も見られる。以上より、NDリターダー添加コンクリートは、①7日程度凝結が遅延しても材齢28日における圧縮強度はベースコンクリートを上回ること、②長期材齢においてはさらに強度の伸びが大きくなることわかる。片対数で表示した材齢とコンクリート強度の関係は、コンクリートの強度発現が材齢の対数で評価できることを示している。

3. NDリターダー工法を適用した構造物の概要

3.1 工事概要

本工事は県道の地下横断歩道用の函渠工（以下、ボックスカルバートと称す）およびそれに付帯するU型擁壁をボックスカルバートの両端部に構築するものである。表-3に工事概要を示す。

表-3 工事概要

工事名	平成26年度 社会資本整備総合交付金（住宅）工事
発注者	長野県 飯田建設事務所 整備課
工事場所	（主）飯島飯田線 飯田市 切石～北方1工区
工期	平成27年2月10日～平成27年11月30日
工事数量 （函渠工、擁壁）	地下横断歩道（現場打ちボックスカルバート 3000mm×3000mm, L=32.9m U型擁壁 L=31.4m） $\Sigma V=311.72\text{m}^3$

3.2 対象構造物

地下横断歩道工の施工平面図、側面図をそれぞれ図-3、図-4に示す。また、U型擁壁とボックスカルバートの断面図を図-7に示す。ボックスカルバートは3ブロックより構成され、各ブロックの長さは10.0m（ただし、中央ブロックは9.9m）である。また、U型擁壁箇所の歩道部分は12%の急勾配となっている。なお、ボックスカルバートおよびU型擁壁の側壁部の壁厚はそれぞれ30cm、35cmである。NDリターダーを添加したコンクリートは、図-5の施工断面図に示すように側壁部の下端から30cmの部分とした。コンクリートの配合を表-4に示す。コンクリートは呼び強度24N/mm²、スランプ8cm、水セメント比が54.5%でセメントの種類は高炉セメントB種である。

表-4 コンクリートの配合

コンクリートの種別	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
普通 24-8-25BB	54.5%	152	279	789	1130	2.79

ボックスカルバート側壁部に縦方向に配筋された主筋は、外側がD22（公称径 22.2mm）、内側がD13（同 12.7mm）である。したがって、側壁部断面の主筋位置は $22.2+12.7=34.9\text{mm}$ の部分が断面欠損する形となっており、断面欠損率は 11.6% （ $=34.9/300$ ）と10%を超える値となっている。

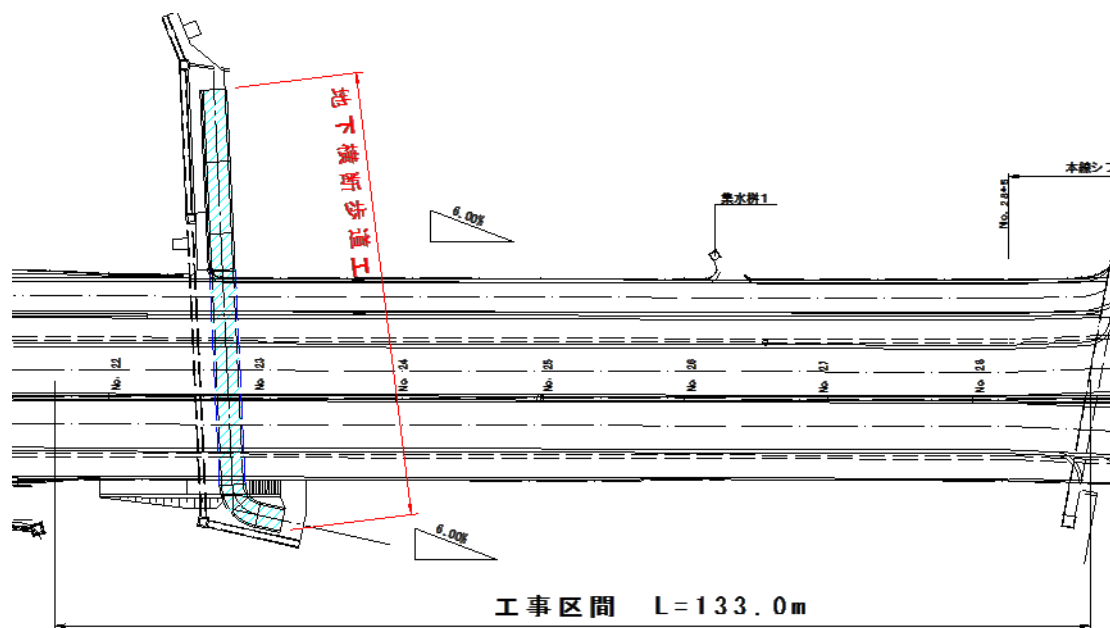


図-3 施工平面図

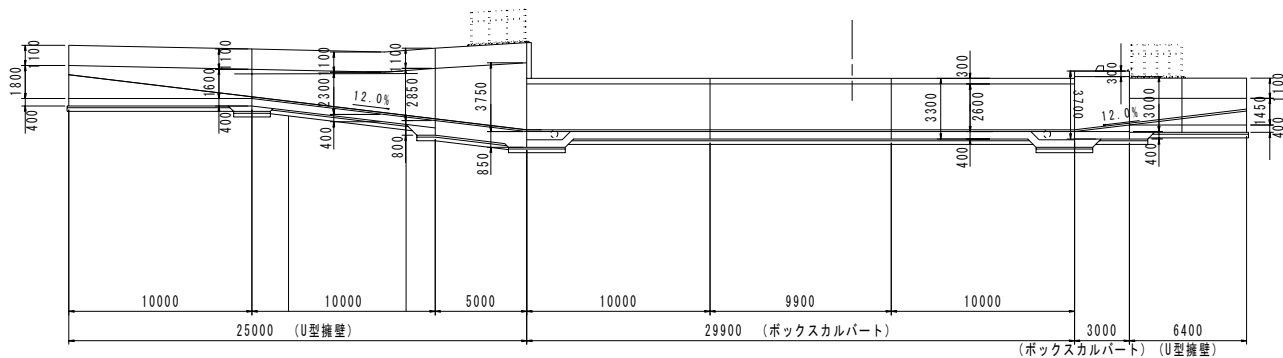


図-4 施工側面図

ボックスカルバート

U型擁壁

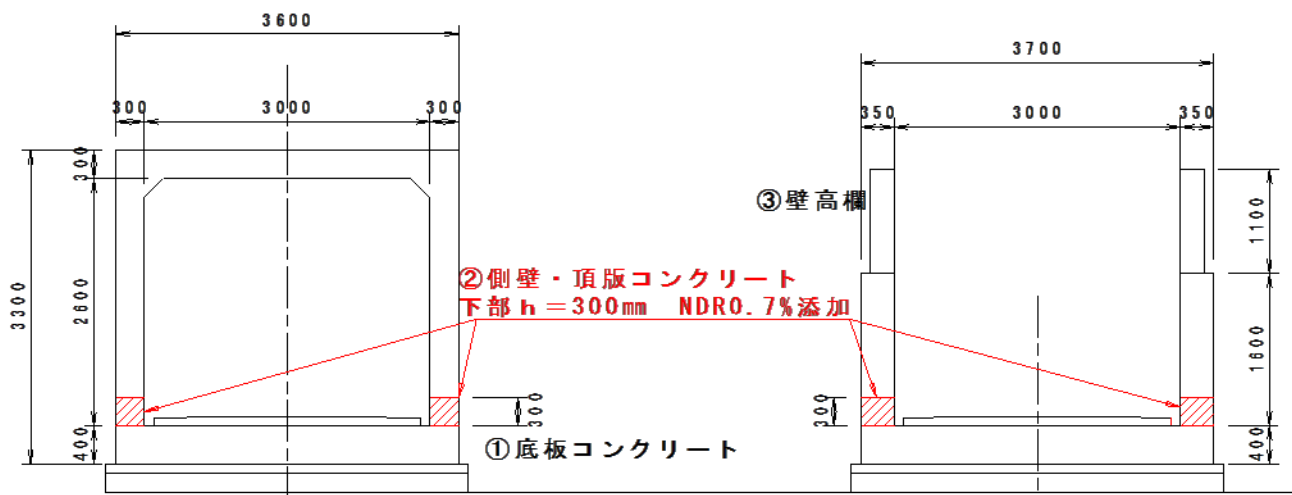


図-5 U型擁壁およびボックスカルバートの施工断面図

4. 施工計画

4.1 事前検討によるNDリターダー添加率の決定

(1) 温度応力解析にもとづく凝結遅延期間の設定

NDリターダー工法の適用にあたっては、事前検討^[4]により目標とする凝結遅延期間とNDリターダーの添加率を決定した。まず、第1ステップとして、ボックスカルバートおよびU型擁壁を対象とした温度応力解析を実施し、温度応力の低減に最適となる凝結遅延時間を設定した。図-6にボックスカルバートの解析モデルを示す。ここで、要素分割図の橙色の要素がNDリターダーを添加したコンクリートの部位（側壁の下端30cm）である。解析は凝結遅延期間をパラメーターとして実施した。すなわち、解析ケースは、基本（凝結遅延無し）、遅延期間をそれぞれ3日、4日、5日とした計4ケースとした。図-7に温度解析の結果を示す。打込み温度27.8℃に対し最高温度は38.1℃（材齢1日）となり約10℃の温度上昇が生じる。また、図-8に温度応力の履歴図を示す。凝結遅延期間を3日とした場合は、温度応力は基本ケースの1.12N/mm²から0.48N/mm²まで約40%低減する。このことにより、最小ひび割れ指数は1.46から3.83まで改善される。以上の結果にもとづき、凝結遅延期間の目標値は施工時の気温変動の影響を考慮して1日増やした4日に設定した。

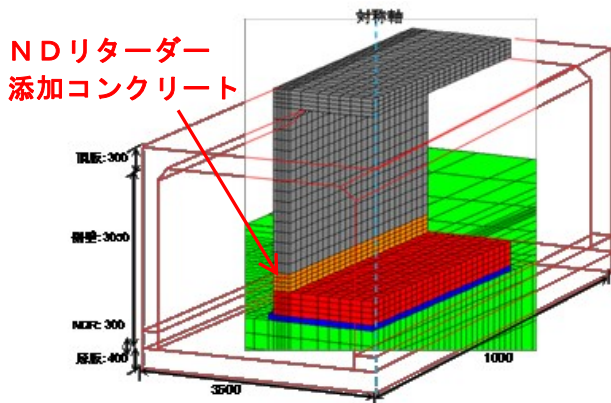


図-6 解析モデル（1/4 対称モデル）

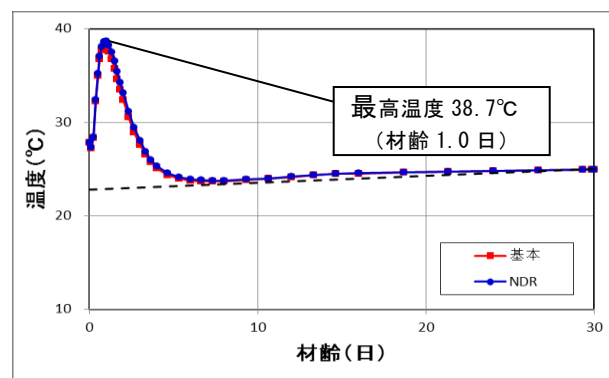


図-7 温度履歴

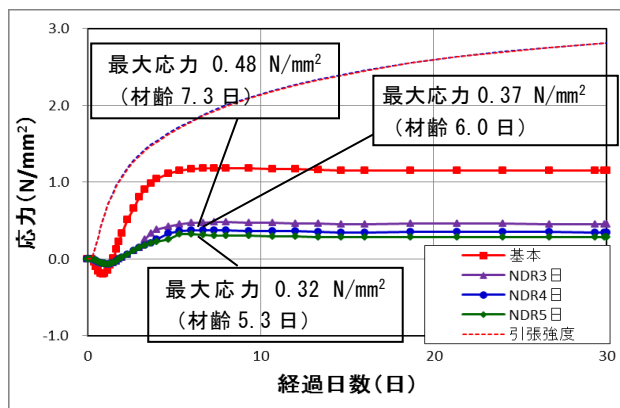


図-8 温度応力の履歴

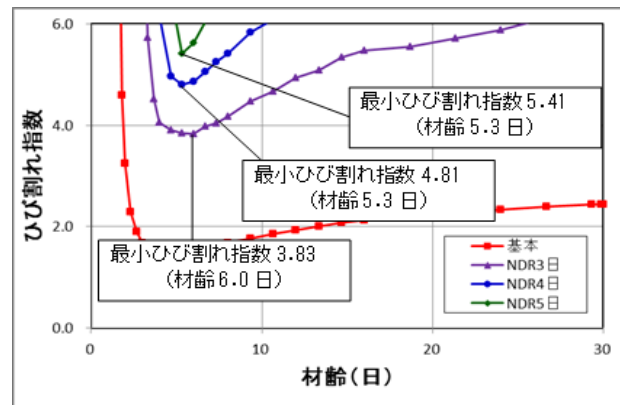


図-9 ひび割れ指数の履歴

(2) NDリターダー添加率の決定

NDリターダーの添加率は、モルタルを用いた簡易試験により決定した。ここで、NDリターダーの添加率は、単位セメント量C (=279kg/m³) に対して0.5C% (Cの0.5%、以下同様)、0.6C%、0.7C%、0.8C%の4水準とした。図-10にモルタルの温度上昇量の測定結果を示す。モルタルの温度が上昇した時間を凝結開始時間と考え、添加率0.5C%の場合は2.7日、同

0.6C%では5.0日、同0.7C%では7.0日、同0.8C%では11.5日が各添加率に対する凝結開始時間となる。なお、簡易試験時における雰囲気温度は16~20℃であった。解析により設定した目標遅延期間の4日は、雰囲気温度23.6~31.2℃の条件にもとづく。雰囲気温度が高い場合は凝結開始が早まることから、NDリターダーの添加率は単位セメント量の0.7%に設定した。

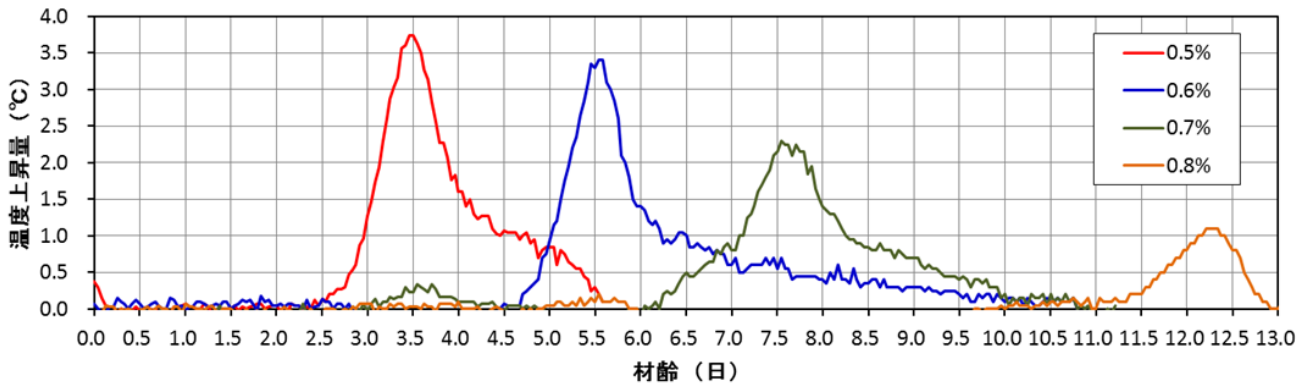


図-10 簡易試験結果（モルタルの温度上昇量の測定結果）

4.2 施工計画

本工事において工夫を要した点は、U型擁壁の12%の急勾配箇所におけるNDリターダー添加コンクリートの打込み方法であった。ボックスカルバートの側壁部に対しては、体底面がレベル(水平)の構造のため、頂版のハンチからNDリターダー添加コンクリート面までの高さを測定できる。すなわち、検尺棒を用いて打設高さを逐次確認しながら施工を行えば、NDリターダー添加コンクリートの打設高さが300mmとなるように管理できる。しかしながら、U型擁壁においては、体底面より12%の勾配があるため検尺作業を行うことができない。そこで、現場では勾配区間におけるNDリターダー添加コンクリートの打設にあたっては、下面より高さ300mmまでの部分の型枠面に透水シートを貼付し、端部を型枠外側に折り返して露出させて排水を確認することとした。このことにより、側壁面型枠において標準面と透水シート型枠間にわずかな隙間が存在することとなる。コンクリートの打込み中は、型枠側面に薄型の防護メガネを着用した作業員を1名配置した。そして、防護メガネを通して型枠内部を目視で観察し、NDリターダーコンクリートの打ち止め高さの確認を行った。透水シートからのブリーディング水の排出状況については次節の施工状況の項で示す。

5. 施工状況

写真-1にボックスカルバートの側壁部へのコンクリートの打設状況を示す。また、写真-2に透水シートからブリーディング水が排出されている状況を示す。

写真-3にU型擁壁の完成写真を示す。本写真は、外側から見たU型擁壁の外観を示す。写真中に赤で囲みを入れた部分が12%の急勾配区間にNDリターダー添加コンクリートを打ち込んだ部位である。なお、ボックスカルバートならびにU型擁壁のいずれの部位においてもひび割れの発生は認められなかった。このことから、NDリターダー工法の適用がひび割れ抑制効果を発揮したと判断される。



写真-1 コンクリート打設状況

表-5にコンクリート打込み時に実施したフレッシュコンクリートの試験結果および硬化コンクリートの圧縮強度試験結果を示す。なお、NDRリターダーを添加したコンクリート（以下、NDRコンクリート）の凝結遅延期間は設定どおり4日間となった。また、NDRコンクリートの材齢28日における圧縮強度は、ボックスカルバートが 29.6N/mm^2 、U型擁壁が 33.8N/mm^2 となり、いずれも呼び強度の 24N/mm^2 を十分に上回る結果となった。なお、ボックスカルバートのNDRコンクリートの28日強度は、U型擁壁とは逆にベースコンクリートより 5N/mm^2 程度低い強度となった。この要因としては、NDRコンクリートがスランプで2cm、空気量で1.5%、いずれもベースコンクリートより大きかったことに起因すると考えられる。



写真-2 透水シートからの排水状況

表-5 コンクリートの試験結果

打設箇所	コンクリート種別	フレッシュコンクリート			圧縮強度 (N/mm^2)		
		スランプ	空気量	温度	材齢7日	材齢14日	材齢28日
ボックスカルバート (側壁・頂版)	NDR	10.5cm	5.5%	20.0°C	—	20.5	29.6
	ベース	8.5cm	4.0%	21.0°C	17.4	—	34.5
U型擁壁 (側壁)	NDR	10.5cm	5.5%	21.0°C	—	25.6	33.8
	ベース	10.5cm	5.7%	21.0°C	18.5	—	30.4

※NDRはNDリターダーを0.7%添加したコンクリート



写真-3 完成したU型擁壁の外観（外側）

6. 再解析による温度応力の推定

ボックスカルバートの施工時にコンクリートの温度測定を行った。そして、施工後に実測温度を用いた温度応力解析（再解析）を実施して施工時における温度応力を推定した。温度の測定結果より、コンクリートの打込み温度は 22.4℃、最高温度は 33.3℃であった。すなわち、コンクリートの温度上昇量は 10.9℃であった。

図-11の温度履歴図に緑で示した曲線は実測温度の履歴、赤で示した曲線は再解析に用いた温度履歴をそれぞれ示す。このように実測値と解析値がほぼ一致することを確認した上で、温度応力の再解析を実施した。図-13は再解析にもとづく温度応力の推定結果を示したものである。図-12より、NDリターダー工法を適用したことにより、温度応力は、基本ケースの 1.17N/mm² から NDリターダー工法の 0.42N/mm² までのおよそ 1/3 に低減したものと推定される。このことは、NDリターダー工法の適用により、温度応力を大幅に低減させることが可能なことを示している。

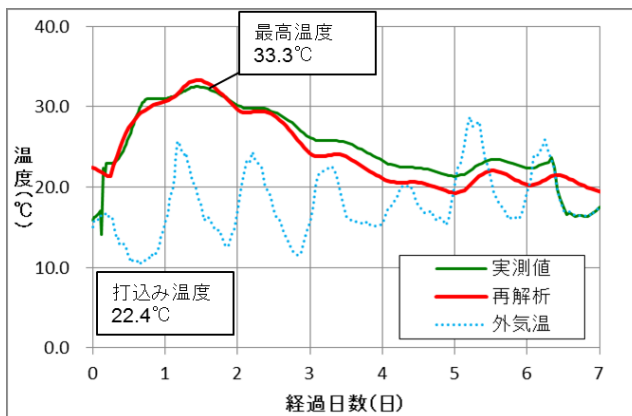


図-11 温度履歴（実測と再解析の比較）

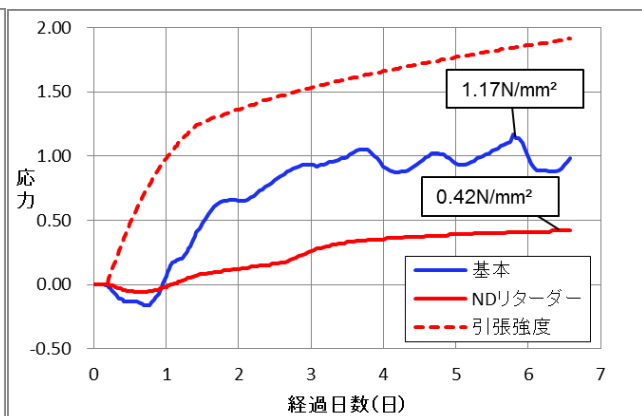


図-12 温度応力履歴（再解析）

6. まとめ

NDリターダー工法の適用により、本工事で施工したボックスカルバートとU型擁壁における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、薄肉断面構造物のひび割れ抑制対策においてもNDリターダー工法が有効なひび割れ抑制対策工法になることを示している。また、本工事においては、温度応力解析、簡易試験および試験練りのプロセスを経てNDリターダーの添加率を決定したが、その妥当性も確認された。以上より、本施工の結果は、壁厚 50cm 以下の薄肉部材である橋梁上部工の壁高欄のひび割れ抑制対策においても、NDリターダー工法が有効な対策として適用できることを示していると考えられる。

[参考文献]

- 1) 土木学会編：[2012年制定]コンクリート標準示方書・施工編
- 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.
- 3) 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.
- 4) 犬飼一登，宮下覚，北沢資謹，篠田佳男：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，第5回コンクリート技術大会（盛岡）講演資料集，2015.10.