

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

日本コンクリート技術(株) ○河野一徳
 日本コンクリート技術(株) 篠田佳男
 (株)フローリック 西 祐宣
 井口建設工業(株) 横山 貢

1. はじめに

擁壁や函渠工の側壁部などの壁状のマスコンクリート構造物を対象とした温度ひび割れ抑制対策において、従来から一般的に用いられてきた方法は、被拘束体となる壁体部にひび割れ誘発目地を設置する方法である。この方法は、ひび割れ誘発目地を適切な間隔で設置することを前提条件とすれば、誘発目地部以外でのひび割れ発生の抑制を可能とする確実性の高い方法である。しかしながら、函渠工や橋台においてとくに顕著なように、近年は、それらのコンクリート構造物も大断面化する傾向にある。さらに、2012年制定の土木学会編「コンクリート標準示方書・設計編」（以下、標準示方書と略）^[1]では、誘発目地部の断面欠損率について、2007年度版までの「30%～50%程度」から「50%程度とするのがよい」という形に表現が改められた。このことは、ひび割れ誘発目地の設置における手間を増やすとともに、材料コストの上昇要因となり得ることも否めない。

上記のようなひび割れ誘発目地に関わる背景もふまえて、筆者らは、壁状構造物の温度ひび割れ抑制対策技術として、壁体部と底版などの拘束体の間に先行壁体分を設けて、壁体部に作用する外部拘束に起因する温度応力の低減を図る「ND-WALL 工法」を開発した。同工法は2008年に開発・実用化してから6年を経て、全国で45ヶ所以上の施工現場において採用されるに至っている。

さらに、筆者らは、コンクリートに超遅延剤（製品名：NDリターダー）を添加して凝結を遅延させることにより、被拘束体における温度応力を低減させる方法に着目し、検討を進めてきた。このような方法は過去にもいくつか提案^{[2],[3]}されており、実験による効果が確認されているものの、実用化には至っていないのが現状である。その理由のひとつは、工程に直接影響を及ぼすことになるコンクリートの凝結を遅延させる期間のコントロールが難しいことが挙げられる。さらに、超遅延剤を添加したコンクリートの表面部分には美観上の問題が生じるため、外観が通常のコンクリート同じになるように改善できない限り、構造物への適用が難しい点も挙げられる。筆者らは、前者については事前に試験練りを実施することで、また、後者については透水性型枠シートを使用することで上述した課題の解決に取り組んでいる。ここでは、函渠工を対象として超遅延剤による温度ひび割れ抑制対策を適用することにより、ひび割れ抑制効果ならびに外観の仕上がりの改善が得られた施工事例について、施工前に実施した事前検討の内容と施工状況を報告する。

2. NDリターダーによる温度ひび割れの抑制メカニズム

図-1に、NDリターダー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、参考のためND-WALL工法のメカニズムも併せて示した。フローの一番上の図は、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、ひび割れ誘発目地を設置することで温度ひび割れの発生を抑制する。また、フローの真ん中の図は、ND-WALL工法による温度ひ

び割れの抑制メカニズムを示したものである。ここでは、先行壁体部の収縮低減目地に発生したひび割れの開閉作用により、先行壁体部を設けない場合に比べて壁体部が収縮変形しやすくなるようにし、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。フローの一番下の図は、「NDリターダー工法」による温度ひび割れの抑制メカニズムを示したものである。この方法では、壁体下部に超遅延剤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とにより、上部に打ち込む壁体部分のコンクリートを無拘束に近いほぼ自由に収縮変形できる状態にすることがポイントとなる。すなわち、温度降下に起因して生じる壁体部の収縮変形に対して、底版から作用する外部拘束力の低減を図ることがNDリターダー工法の特徴である。

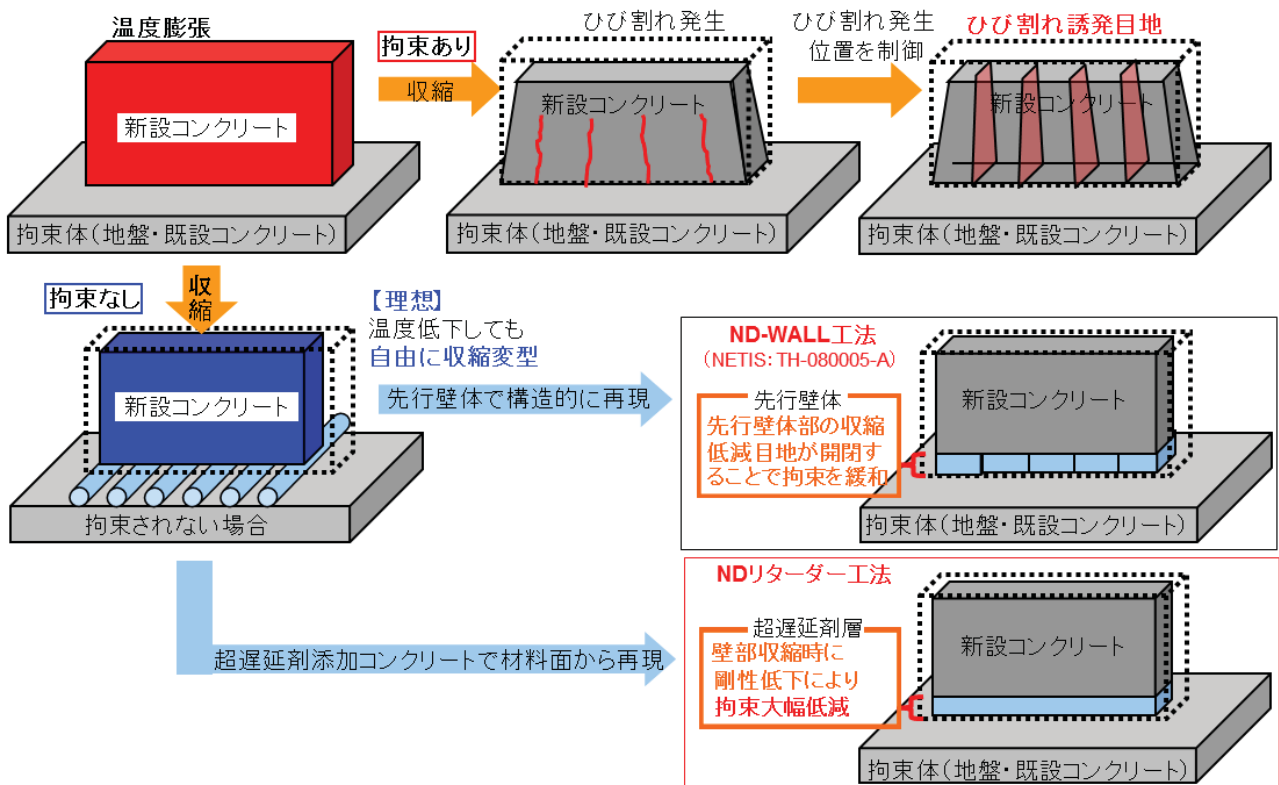


図-1 温度ひび割れの抑制メカニズムの比較

3. 超遅延剤を添加したコンクリートの物性

(1) 概要

超遅延剤の使用にあたっては、前に述べたとおり、凝結遅延期間の適切なコントロールとコンクリートの外観（仕上がり）の改善が課題となっている。しかしながら、超遅延剤の実施工への適用にあたってまず重要なことは、硬化したコンクリートの強度が設計基準強度を満足すること、ならびに超遅延剤の使用により外部拘束力が低減されることを確認することである。以上の観点から、超遅延剤を添加したコンクリートの強度発現の確認を目的とした室内試験、外部拘束の低減効果の確認および透水性型枠シートによるコンクリート外観の改善効果の確認を目的とした模型試験を実施した。ここではそれらの試験により得られた超遅延剤添加コンクリートの基本物性について示す。

(2) 強度発現特性

野島ら^[4]は、高炉セメントB種のセメントを使用したコンクリートを対象として、超遅延剤の混入率をパラメータとした圧縮強度試験を実施し、図-1の材齢と圧縮強度の関係を得た。ここで、

超遅延剤の混入率は無添加、単位セメント量の0.8%、同1.0%、同1.3%、同1.5%の5水準とした。図-2より、超遅延剤の添加量が増加するにしたがって凝結の開始材齢が遅れるものの、凝結遅延期間に関わらず、材齢28日における圧縮強度は、無添加の場合の圧縮強度とほぼ同じ値を示すことがわかる。さらに、材齢91日で比較した場合は、超遅延剤を添加したすべてのコンクリートの圧縮強度が無添加の場合の圧縮強度を上回る結果となった。このことは、超遅延剤の添加率が1.5%程度以下の範囲では、超遅延剤の添加

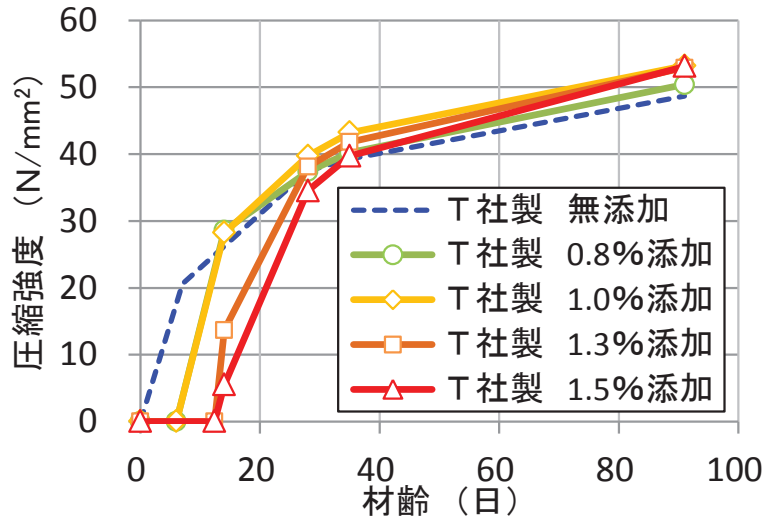


図-2 強度試験結果

率に関わらず、材齢28日以降の圧縮強度が無添加の場合の圧縮強度を上回ることを示唆している。

(3) 外部拘束度の低減効果

超遅延剤添加コンクリートの外部拘束低減効果を確認することを目的として、図-3に示すような模型試験体を用いた試験を実施した。ここで、「標準試験体」は通常の壁体コンクリートを模擬した試験体、「NDリターダー試験体」は壁体下部に超遅延剤(NDリターダー)を添加したコンクリートを打ち込んだ試験体である。試験方法は、標準試験体とNDリターダー試験体のそれぞれの壁体部(後者は無添加コンクリート打ち込み部)における温度応力を比較することにより、後者における外部拘束力の低減を確認した。なお、試験においては、壁体がマスコンクリートに近い温度上昇となるように、初期材齢時において写真-1に示すように壁体部を断熱材(スタイロフォーム)とシートで覆って保温養生した。図-4に、標準試験体とNDリターダー試験体のそれぞれに対して埋込型ひずみ計により測定した温度変化とひずみ変化の関係を示す。NDリターダー試験体(赤い点で測定結果をプロット)においては、温度変化とひずみ変化の関係を示す勾配が黒の直線で示した線膨張係数の勾配とほぼ等しくなり、壁体部には外部拘束力が殆ど作用していないことが確認された。これに対し、標準試験体では、温度変化とひずみ変化の関係を示す勾配が線膨張係数の65.6%の値(=7.13/10.87)となった。このことは、超遅延剤を添加したコンクリート部分の凝結遅延により、NDリターダー試験体の壁体部に作用する外部拘束力が大幅に低減されることを示している。

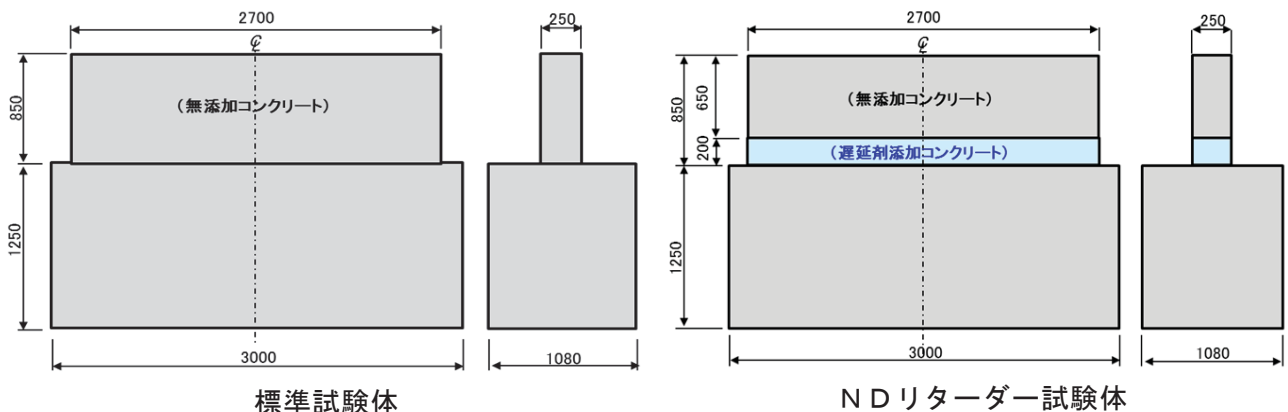


図-3 超遅延剤の外拘束低減効果確認試験に用いた供試体



写真-1 供試体の保温養生の実施状況

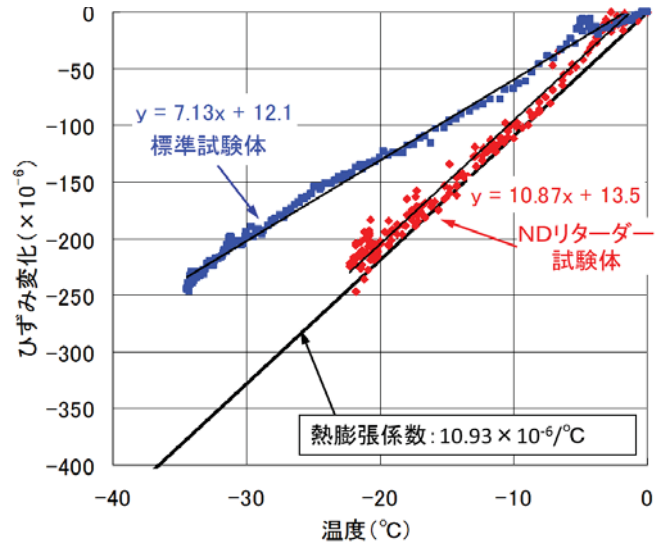


図-4 超遅延剤の外部拘束低減効果

(4) 透水性型枠シートによるコンクリート外観の改善

超遅延剤による温度ひび割れ抑制技術が実用化に至らなかった理由のひとつとして、コンクリートの外観に美観上の改善点があったことは、前にも述べたとおりである。筆者らは、超遅延剤を添加したコンクリートのブリーディングが大きいことに着目し、型枠の表面に透水性型枠シートを添付して、超遅延剤添加コンクリートにおける余剰水を除去することを考えた。図-6は透水性型枠シート(商品名:アバノン)のコンクリート外観の改善効果を確認することを目的として作製した供試体の形状寸法を示したものである。ここでは、4面あるコンクリート供試体の側面のうち、2面はアバノンを表面に貼付した型枠面とし、残り2面は通常の合板型枠面とした。写真-2は上記2者におけるコンクリートの外観を比較したものである。写真からも明らかなように、通常の合板型枠面における外観はまだら模様となっているのに対し、アバノンを使用した型枠面は通常のコンクリートとほぼ同じ外観となった。この結果をもとに、実施工においては、超遅延剤を添加したコンクリートを打ち込む部位の型枠に透水性型枠シートを標準で貼付することとした。

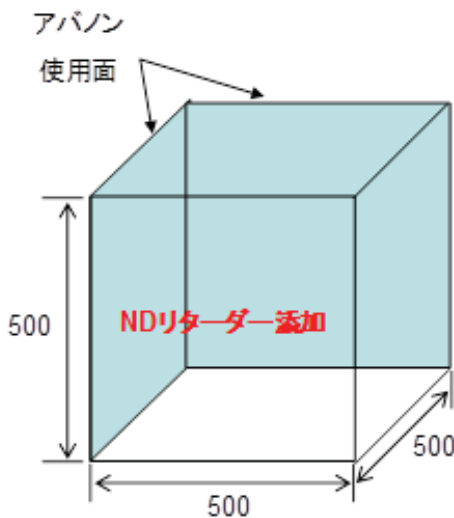


図-5 透水性型枠シートの外観改善効果確認試験に用いた供試体



写真-2 コンクリート表面の外観の比較

4. 函渠工の施工へのNDリターダー工法の適用

(1) 施工方法の概要

超遅延剤（NDリターダー）を添加したコンクリートの強度発現特性、温度応力の低減効果、さらには透水性型枠シートの使用が外観の改善効果を有することの3点が確認できたことにより、NDリターダー工法の実施工への適用における課題は解決されたものと判断した。このことにもとづき、国土交通省北陸地方整備局長岡工事事務所発注の「国道17号八色原道路その5工事」において、函渠工の施工にNDリターダー工法を適用し、温度ひび割れの発生を抑制することとした。

図-6に函渠工断面の形状寸法を示す。函渠工は底版、側壁および頂版の厚さがいずれも70cmであり、長手方向のスパン長は13.5mである。函渠工の施工は、まず、底版(①)のコンクリートを打ち込んだ後、側壁および頂版(②)の鉄筋、型枠および支保工を組み立ててそれらの部位にコンクリートを打ち込む手順で行った。側壁および頂版のコンクリート打込みにおいては、まず側壁下端から高さ40cmまでの部分にNDリターダーを添加したコンクリートを打ち込んだ後、そのまま継続して上部の側壁と頂版に通常のコンクリート（NDリターダー無添加）を打ち込んだ。すなわち、NDリターダー添加コンクリートを側壁下部に打ち込むことと、NDリターダー添加コンクリートの打ち込み部位の型枠面に透水性型枠シートを貼付することを除けば、通常の函渠工と同じ方法で施工できることがNDリターダー工法の特徴のひとつとして挙げられる。

ただし、NDリターダー工法の適用にあたっては、図-7の手順図に示すように、事前に、(1)温度応力解析による遅延期間の設定、(2)コンクリートの試験練りにもとづくNDリターダーの添加量の決定を行う必要がある。ここでは、施工状況の説明を行う前に事前検討の内容について示す。

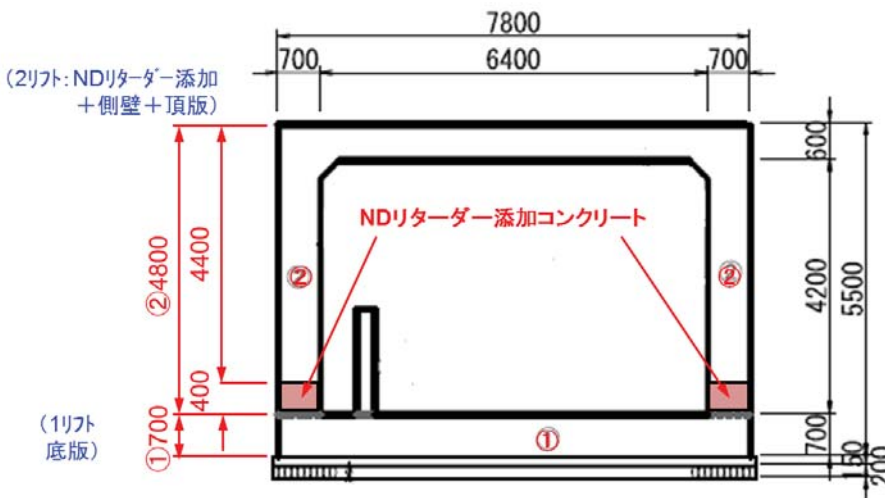


図-6 函渠工の形状寸法および施工方法

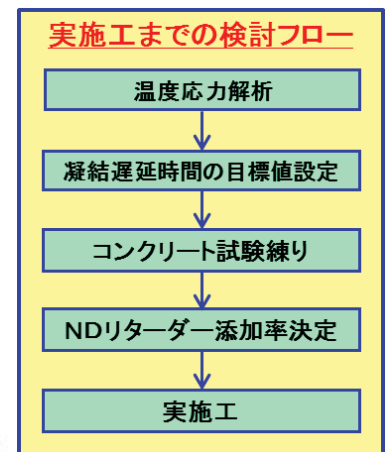


図-7 事前検討の手順

(2) 温度応力解析による凝結遅延期間の検討

NDリターダー工法の適用にあたって、事前に温度応力解析を実施して温度ひび割れの発生抑制を可能とする凝結遅延期間を設定した。図-8に温度応力解析の結果として、従来施工（凝結遅延なし）、NDリターダー工法で凝結遅延期間3日（NDR3日）および同凝結遅延期間4日（NDR4日）のそれぞれの場合における側壁部の温度応力履歴とひび割れ指数の履歴を示す。最大応力は、従来工法の場合と比較して、遅延期間3日の場合は26.4%、遅延期間4日の場合は44.8%、それぞれ低減される。また、最小ひび割れ指数は、従来施工の1.25（材齢7.3日、ひび割れ発生確率23.5%）に対して、遅延期間3日の場合は1.77（材齢8日、ひび割れ発生確率5.9%）、遅延期間4日の場合

は 2.40 (材齢 9.3 日、ひび割れ発生確率 1.6%) となる。この結果をもとに、目標とする凝結遅延期間をひび割れ発生確率が 6%以下に低減される 3 日に設定した。

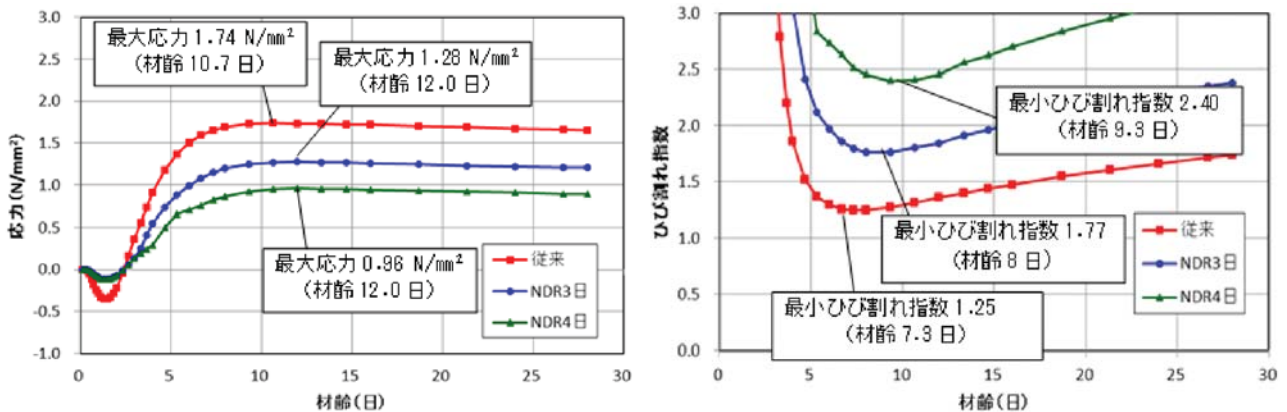


図-8 温度応力解析の結果 (温度応力およびひび割れ指数の履歴)

(3) 試験練りによる超遅延剤添加コンクリートの品質の確認

実施工の前に、超遅延剤の添加量を決定することを目的として試験練りを実施し、超遅延剤添加コンクリートの品質の確認を行った。表-1にコンクリートの基本配合を示す。コンクリートは呼び強度 24N/mm²、スランプ 12cm、粗骨材の最大寸法 40mm、水セメント比 50.6%で、セメントの種類は高炉セメントB種である。

表-1 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 24-12-40BB	50.6	143	283	759	1150	2.83

試験練りにおける超遅延剤 (NDリターダー : NDR) の添加量の設定は、基本配合をベースコンクリートとして、単位セメント量 (C=283kg/m³) に対して、0% (No.1)、C×0.8% (No.2)、C×1.0% (No.3)、C×1.2% (No.4) の4水準とした。ここで、No.1は表-1に示すように混和剤としてAE減水剤を使用している。これに対し、No.2からNo.4まではAE剤を同一量使用しているが、減水剤を全量NDリターダーに置き換えた。

表-2にコンクリートの試験練りの結果として、フレッシュコンクリートの品質(スランプ、空気量、温度)と硬化コンクリートの圧縮強度試験結果(材齢5日、14日、28日、91日)を示す。なお、圧縮強度試験用の供試体は、養生水槽上部の14~16℃の環境下に存置したため、外気温15℃の温度条件で養生したものとみなすことができる。

フレッシュコンクリートの試験結果をみると、No.1からNo.4までほぼ同一の品質を示していることがわかる。圧縮強度試験結果をみると、材齢5日ではNo.2(0.8C%添加)が8.39N/mm²、No.3(1.0C%添加)が5.7N/mm²、No.4(1.2C%添加)が未硬化であった。これらの結果から、No.2は材齢2~3日で、No.3は3~4日でそれぞれ硬化が開始したと推定される。また、材齢14日ではNo.1からNo.4のすべてのコンクリートの圧縮強度が21.1~21.6N/mm²とほぼ同一の値を示した。さらに、材齢28日における圧縮強度は、すべて27.7~31.2N/mm²と呼び強度24N/mm²を上回るとともに、NDRの添加量が多いほど強度が大きくなる傾向を示す結果と

なった。材齢 91 日の場合は上記の傾向がより顕著となり、とくに 1.2C%添加の No.4 においては No.1 の 1.4 倍の強度を示すに至っている。図-9 に材齢と圧縮強度試験の関係を示す。左側のグラフは材齢と圧縮強度の関係を直接示したものであり、右側のグラフは材齢を積算温度 M の対数で表示したものである。右側のグラフからも、1.2C%添加の場合の強度発現速度が大きいことがわかる。以上の結果より、超遅延剤を添加したコンクリートは要求品質(圧縮強度)を満足し、とくに長期強度は超遅延剤を添加した場合の方が大きくなることが確認された。

表-2 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			圧縮強度 (N/mm ²)			
		スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	材齢 5 日	材齢 14 日	材齢 28 日	材齢 91 日
1	ベースコンクリート	12.5	5.2	15.0	—	21.1	27.7	31.7
2	NDR を 0.8C% 添加	14.0	5.1	13.0	8.39	21.4	29.8	37.0
3	NDR を 1.0C% 添加	12.0	5.3	13.0	5.7	21.5	30.2	38.6
4	NDR を 1.2C% 添加	13.0	5.2	12.0	—	21.6	31.2	45.3

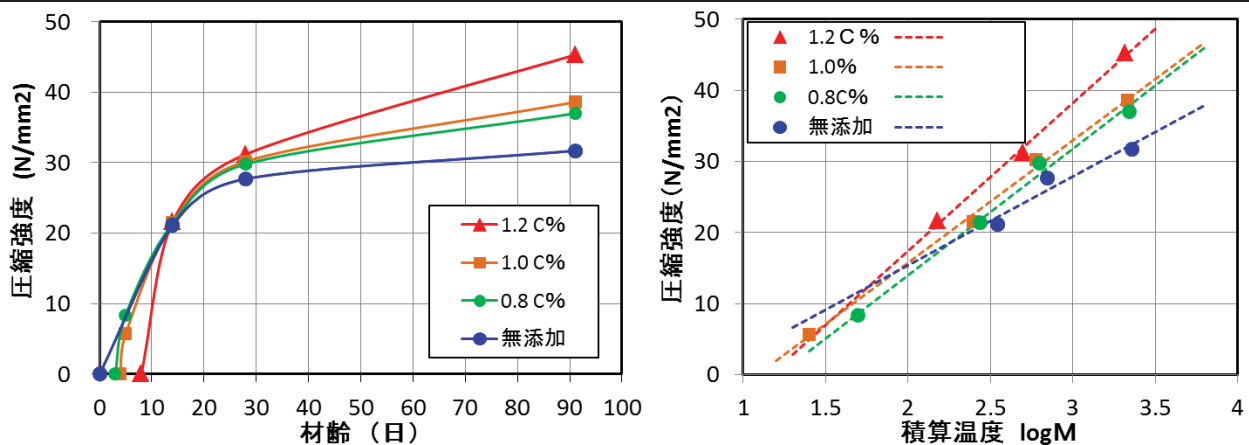


図-9 超遅延剤を添加したコンクリートの材齢と圧縮強度の関係

(4) 施工条件を反映した超遅延剤の添加率の決定

先に示したように、圧縮強度試験用の供試体は 15°C の温度条件で養生したものと見なせる。コンクリートの強度発現は養生温度に支配されるため、暑中コンクリートは初期強度が高く、また寒中コンクリートは初期強度が小さい。超遅延剤添加コンクリートの凝結遅延期間の検討についても、これらのことを反映させる必要がある。コンクリートの打込みは、当初の 3 月下旬の予定から 4 月上旬へと約 1 週間遅れとなった。この時期の外気温は平均が 10°C 程度であるが、超遅延剤添加コンクリート上部の側壁はマスコンクリートであり、温度が材齢 5 日まで 20°C 程度以上と高くなる。したがって、超遅延剤添加コンクリートの養生温度はその影響を受ける。試験練りで超遅延剤を 1.0C% 添加したコンクリートの凝結遅延期間が材齢 3~4 日であり、上部コンクリートの温度上昇の影響を受けると凝結遅延期間が材齢 3 日以内になる可能性が考えられる。以上の点を考慮して、本構造物の施工における超遅延剤の添加率は 1.2C% とした。なお、型枠脱型時期は、超遅延剤を 1.2C% 添加したコンクリートの圧縮強度が材齢 14 日においてベースコンクリートと同等となることが確認できたことにもとづき、材齢 14 日とした。

5. 函渠工の施工状況

函渠工の施工状況を写真-3および写真-4、函渠工の完成状況を写真-5にそれぞれ示す。写真-3は、型枠組立時における透水性型枠シートの設置状況を示す。また、写真-4は、コンクリートを打ち込んでいる状況を示す。型枠脱型後に外観調査を行った結果、側壁部におけるひび割れの発生は認められず、NDリターダー工法の温度ひび割れ抑制効果が確認された。また、写真-5の外観を観る限り、透水性型枠シートの接地面におけるコンクリートの外観の仕上がりも良好であり、透水性型枠シートの有効性が確認された。なお、超遅延剤添加部のコンクリートの凝結遅延期間は材齢7日頃と推定され、このことが温度応力をさらに低減する要因となったことも考えられる。



写真-3 透水性型枠シート



写真-4 コンクリート打込み



写真-5 完成した函渠工の外観

5. まとめ

本報告は、超遅延剤を使用した温度ひび割れ抑制技術である「NDリターダー工法」について、その開発の経緯と実用化について示したものである。函渠工工事への適用にあたり、超遅延剤による凝結遅延期間の決定プロセスに則って超遅延剤の添加量を決定し、実施工において温度ひび割れ抑制対策の有効性が確認されたことで、本工法の適用事例も増えていくことが期待される。筆者らは、今後、函渠工以外に橋台や道路橋の壁高欄などへも本工法の適用範囲を広げていく所存である。

[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・設計編
- 2) 例えば竹下治之：超遅延剤を添加したコンクリートの基礎的特性に関する研究，土木学会論文集第378号/V-6，1987年2月
- 3) 佃有射，三橋博三，浅井功：遅延剤内包マイクロカプセルを用いた温度応力低減工法に関する実験的検討，土木学会第65回年次講演会，pp.1311-1312，2010
- 4) 野島省吾，篠田佳男，熊本光弘，藤原浩巳：超遅延剤を用いた高炉セメントB種使用コンクリートの基礎性状，土木学会大67回年次講演会，pp.921-922，2012