

改良セメントの コンクリート工場製品への適用性 —改良セメントを用いた皿形側溝の試験施工—

寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○吉田 行
寒地土木研究所 道東支所 川村 浩二
帯広開発建設部 帯広道路事務所 三井 修

積雪寒冷地のコンクリート構造物は、厳しい気象環境や使用環境により凍害や塩害等を複合的に受ける。このため、LCC縮減の観点からもコンクリートの高耐久化が求められており、これまでに、セメントの改質や混和材使用の有効性が確認されている。本研究では、このような改良セメントコンクリートの実用化の一つとして、工場製品への適用性の検討を目的に皿形側溝を製造し、その室内試験および日勝峠での試験施工概要について述べるものである。

キーワード：長寿命化、複合劣化、工場製品、改良セメント

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地のコンクリート構造物は、厳しい気象環境や使用環境により凍害や塩害を複合的に受けるため、その耐久性を長期的に確保することは、ライフサイクルコスト縮減の観点からも非常に重要であり、その対策が求められている。

コンクリートの耐久性を向上させる基本事項としては水セメント比の低減があり、土木学会のコンクリート標準示方書施工編等でも、高い耐久性が要求される環境下での水セメント比の最大値が規定されている。他方、セメントや混和材などの結合材は、コンクリートの性能を決定する上で最も重要な材料であり、耐寒材料チームでは、結合材を改質することによるコンクリート自体の耐久性向上について研究を進めてきた。これまでの研究により、ビーライト系セメントの高微粉末化や混和材の適切な組合せなどにより、同一水セメント比でも、普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種を用いた従来の一般的なコンクリートより耐久性の高いコンクリートの製造が可能であることを明らかにしている^{1), 2)}。また、このようなコンクリートの工場製品への適用性を評価するために、蒸気養生の影響について検討した結果、蒸気養生した場合でも高い耐久性の確保が可能であることを明らかにしている³⁾。

これらの研究成果を踏まえ、本研究では、具体的なコンクリート製品への適用性検討のため、皿形側溝の作製を行った。本文では、その適用性に関する室内試験結果とともに、実際に凍害などによる皿形側溝の著しい劣化が見られていた、国道274号の日勝峠で実施した試験施

工の概要について述べる。

2. 室内試験の概要

本研究では、作製した皿形側溝の初期性能を把握することを目的に、物性試験として強度試験、静弾性係数測定を、耐久性試験として塩分浸透試験、凍結融解試験、スケーリング試験を実施しており、以下に詳細を述べる。

(1) 使用材料

表-1に使用材料を示す。結合材には、これまでの試験結果で高い耐久性が確認されており、型枠転用や製品の早期出荷の観点から工場製品での使用が多い早強ポルトランドセメント（以下早強セメントと略記）とJIS規格値を満足する比表面積6000cm²/gクラスの高炉スラグ微粉末（以下スラグと略記）を用いた。また、汎用性と経済性を考慮し、普通ポルトランドセメント（普通セメント）とスラグを組み合わせた場合についても比較検討した。高性能減水剤は、カルボキシル基含有ポリエーテル系のコンクリート製品用を、併せて空気量を調節するた

表-1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント(HP) 4770 [*] 、密度 3.15 g/cm ³
	普通ポルトランドセメント(NP) 3350 [*] 、密度 3.16 g/cm ³
混和材	高炉スラグ微粉末(S6) 6100 [*] 、密度 2.89 g/cm ³
細骨材	十勝産陸砂 密度 2.60g/cm ³ 、吸水率 2.39%
粗骨材	清水町人舞産陸砂利 密度 2.67g/cm ³ 、吸水率 1.39%
高性能減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系(工場製品用)
A E 剤	天然樹脂酸系

※比表面積 (cm²/g)

表-2 配合

配合名	セメントの種類	混和材の種類	混和材置換率 (%)	W/B (%)	空気量 (%)	SP添加率 (B*%)	s/a (%)	コンクリート単用量 (kg/m ³)							
								W	B		S	G		SP	AE剤
									C	S6		15-5	25-15		
NP-S6(60)	NP	S6	60	35	4.5	0.65	41	147	421	712	1052		2.74	5A	
HP-S6(60)	HP							169	252		684	368			
即脱型	NP	-	-	30.6	2.5	0.25	42.8	110	360	1107	885		0.90	-	

SP:高性能減水剤

め天然樹脂酸系のAE剤を用いた。

コンクリートの配合を表-2に示す。配合決定に当たっては、過去の試験結果のうち特にスケーリング等の耐久性を考慮し、スラグ置換率はセメント内割で60%、水結合材比は35%とした。また、比表面積6000クラスのスラグの使用によりフレッシュコンクリートの粘性が高まることから、皿形側溝の製造は、高性能減水剤の添加でスランプフローを調整した中流動のコンクリートを型枠に流込むことにより作製することとし（以下流込み型と略記）、目標スランプフローおよび空気量は、45±5cmおよび4.5±1%とした。なお、最近では、水セメント比35%以下の硬練りコンクリートを強力な振動と圧縮力を加えて成形し、成形終了後に即時脱型する製法によるコンクリート製品（以下、即脱型と略記）が主流となっている。このため、本研究でも即脱型との性能を比較することとした。表-2には即脱型の配合も併記されている。比較検討した即脱型は、水セメント比30.6%の普通セメントを用いたコンクリートで、混和剤には、ノニオン系界面活性剤のコンクリートブロック用可逆剤が用いられている。

(2) コンクリートの製造と供試体の養生方法

流込み型の製品および室内試験用供試体の作製は、実際のコンクリート製品工場の設備を用いて行った。流込み型製品は蒸気養生を行い、その方法は比表面積6000クラスのスラグを用いた既往の研究⁹⁾を参考に、①供試体作製後前置きを3時間行い、②昇温速度を10°C/hrとし、20°Cから55°Cまで温度を上げ、③55°Cを6時間保持し、④その後、自然冷却により20°Cまで下げた。蒸気養生後は、製品については試験施工日まで工場の敷地内にある屋外ヤードに静置した。また、同時に作製した室内試験用供試体も同様に蒸気養生を行い、その後は温度20°C、湿度60%程度の室内で気中養生を行った。

即脱型の製品は、通常の市販品と同様、表-2に示した低水セメント比の硬練りコンクリート（ゼロスランプ）を強力な振動と圧縮力を加えて成形し作製した。製造の過程では、まず、型枠面（実際の製品の上面）に水セメント比20%のモルタル（セメントと砂の割合≒1:3）が15~20mm打ち込まれ、その上に硬練りのコンクリートが数回に分けて打ち込まれるとともにその都度振動締めが行われる。脱型後は、1日工場内に静置し、その後は屋外ヤードに静置した。なお、即脱型の室内試験用供

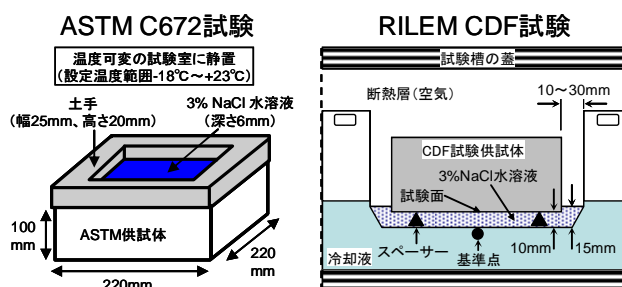


図-1 スケーリング試験の概要

試体は、製品工場で作製された各種製品から、目的に応じた供試体をコア採取あるいは切り出しにより作製した。

(3) 室内試験項目

強度試験として、圧縮強度試験および引張強度試験を、それぞれJIS A 1108およびJIS A 1113に準拠して、材齢3、7、14、28および91日の5材齢で実施し、併せてコンプレッソメータによる静弾性係数測定も行った。

耐久性試験として、塩分浸透抵抗性と凍結融解抵抗性に関する試験を行った。

塩分浸透抵抗性は、JSCE-G571-2003の電気泳動によるコンクリート中の実効拡散係数試験方法（案）に準拠して塩化物イオンの実効拡散係数を求め評価した。供試体は、材齢28日までそれぞれの方法で養生を行い、その後φ10×20cmの円柱供試体の中央部を、厚さ5cmの円盤状になるように切断したものを用いた。

凍結融解抵抗性は、水中凍結融解試験と、一面凍結融解試験によるスケーリング試験により評価した。水中凍結融解試験は、JIS A 1148のA法に準拠して材齢28日より試験を開始し、凍結融解サイクルの進行に伴う相対動弾性係数と質量変化により評価を行った。なお本研究では、試験水に真水と3%NaCl水溶液を用いた2水準とした。

スケーリング試験はASTM C672並びにRILEM CDF法に準拠した試験をそれぞれ行い評価した（図-1）。

ASTM法では、220×220×100mmの角柱供試体に-18°Cを16時間、23°Cを8時間の1日1サイクルで凍結融解作用を与えた。蒸気養生供試体は蒸気養生後、試験開始の材齢28日まで温度20°C、相対湿度60%の環境下で気中養生を、標準養生供試体は材齢7日まで20°C環境下で湿布養生を行い、その後材齢28日まで温度20°C、相対湿度60%の環境下で気中養生を行い試験に供した。試験面は実際の製品の暴露面を考慮して型枠底面（220×220mm）とし、試

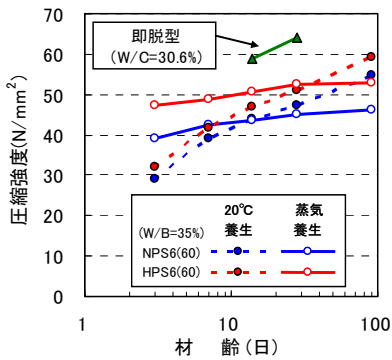


図-2 圧縮強度と材齢の関係

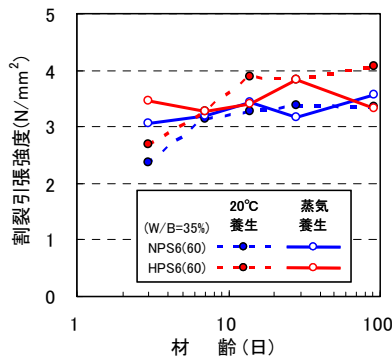


図-3 割裂引張強度と材齢の関係

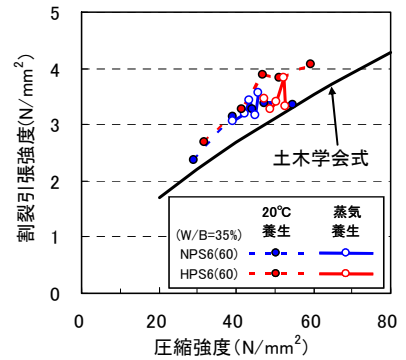


図-4 引張強度と圧縮強度の関係

験面には土手を設けて試験溶液を湛水し凍結融解作用を与えた。なお、試験溶液には、塩害との複合劣化を想定して、3%NaCl水溶液を使用した。

CDF試験では、+20℃から-20℃まで10K/hの定速で4時間冷却し、-20℃を3時間保持後、同じ定速で20℃まで4時間加熱した後、+20℃を1時間保持する、12時間1サイクルで凍結融解作用を与えた。供試体は、100×100×400mmの角柱供試体を半分に切断して100×100×200mmとしたものを用い、試験面はASTM法と同様に型枠底面とした。供試体の養生は、蒸気養生した供試体は蒸気養生後材齢21日まで温度20℃、相対湿度60%の環境下で空中養生を、標準養生供試体は材齢7日まで20℃水中養生後、材齢21日までは温度20℃、相対湿度60%の環境下で空中養生した後、それぞれの供試体側面をシールし、20℃で試験面より7日間下面給水させた後、試験を開始した。試験水にはASTM法と同様、3%NaCl水溶液を用いた。

3. 室内試験結果

(1) 圧縮強度と材齢の関係

図-2に圧縮強度と材齢の関係を示す。なお、図には20℃水中で標準養生を行った結果も併記している。

配合の違いで比較すると、いずれの材齢においても、ベースセメントを早強セメントとしたHPS6(60)の方がベースセメントを普通セメントとしたNPS6(60)よりも強度は高く、材齢が経過してもその差は殆ど変わらなかった。養生の違いで比較すると、蒸気養生を行った場合、標準養生よりも材齢初期の強度発現が大きく、材齢3日ですべての配合も40N/mm²程度以上となったが、長期的な強度の増進は殆どみられず、HPS6(60)では材齢28日以降、NPS6(60)では材齢14日以降、水中養生と強度が逆転した。また、配合の違いによる強度の差は、蒸気養生の方が標準養生よりも大きかった。これは、蒸気養生では、養生温度が高温であるため、比表面積が大きい早強セメントの反応がより活性化したためと考えられる。

一方、即脱型は材齢14、28日の結果であるが、いずれの材齢も流込み型のものより強度は高く、60N/mm²程度

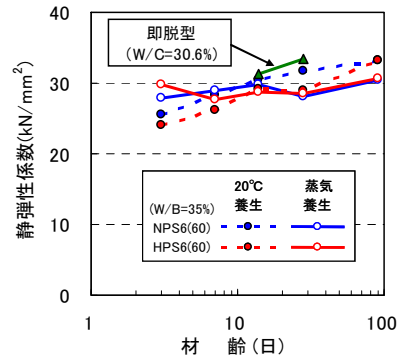


図-5 静弾性係数と材齢の関係

以上であった。これは、水セメント比が30.6%と低いことと、締め固め方法が影響していると思われる。

以上から、蒸気養生した供試体の圧縮強度はいずれの配合も40N/mm²程度以上と高いことが確認された。

(2) 引張強度と圧縮強度の関係

図-3に引張強度と材齢の関係を示す。全体的な傾向としては圧縮強度と同様であるが、圧縮強度と比べて配合や養生による強度の差は小さく、蒸気養生では3~4N/mm²程度となり、一般的に引張強度は圧縮強度の1/10~1/13程度であることを考慮すると、妥当な範囲と思われる。図-4に引張強度と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度と引張強度には良い相関がみられ、いずれも土木学会コンクリート標準示方書設計編に示されている圧縮強度と引張強度の関係式より算出される値を上回っており、土木学会式により安全側で評価することが可能である。

(3) 静弾性係数と圧縮強度の関係

図-5に静弾性係数と材齢の関係を示す。引張強度と同様、静弾性係数は配合および養生条件による差が殆どみられず、蒸気養生したものは30kN/mm²程度と材齢の進行による増加は殆どみられなかった。また、即脱型の方が静弾性係数は若干大きかった。図-6に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図には土木学会標準示方書設計編に示されている静弾性係数と圧縮強度の関係とその値の90%値(土木学会×0.9と表記)および80%値(土木学会×0.8と表記)を併記している。

いずれの供試体も圧縮強度に対する静弾性係数が小さく、土木学会値を下回った。これらの供試体は、結合材の種類だけでなく、水結合材比や供試体の作製方法が異なるため、その要因については明らかとなっていないが、安全側の設計を行うには、NPS6(60)および即脱型では土木学会値の90%値を、HPS6(60)では土木学会値の80%値を適用する必要があると思われる。

(4) 塩分浸透抵抗性

図-7に各コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数を示す。

HPS6(60)とNPS6(60)の実効拡散係数は、蒸気養生した供試体の方が標準養生のものよりも小さく、特にHPS6(60)の拡散係数は小さかった。なお、塩分浸透試験の試験開始材齢28日における圧縮強度は、図-2に示したように水中養生と蒸気養生でほぼ同程度であったが、本試験結果を考慮すると、材齢28日においては蒸気養生の方がコンクリートの組織構造が緻密化していることが考えられる。

一方、普通セメントを用いた即脱型は、これらのコンクリートよりも水セメント比が小さいものの、実効拡散係数は大きかった。このことから、高炉スラグ微粉末の使用により、塩化物イオンの浸透抵抗性が極めて向上することがわかる。また、即脱型では製品の表層と内部について試験を実施したが、表層の方が拡散係数は小さい結果となった。これは、即脱型製品の作製方法が影響していると考えられる。すなわち、2.(2)で述べたように、即脱型の製品の表層(製品の上面)は、内部のコンクリートよりも水セメント比が小さいモルタル層(厚さ15~20mm)となっており、これにより表層部の実効拡散係数が小さくなったものと考えられる。

(5) 凍結融解抵抗性(水中凍結融解試験)

図-8に水中凍結融解試験結果を示す。

真水による凍結融解試験では、蒸気養生した供試体の質量変化率、相対動弾性係数ともに最初のサイクルで増加し、その後は殆ど劣化がみられなかった。また、標準養生した供試体も、初期値のままほぼ横ばいとなり殆ど劣化がみられなかった。蒸気養生した供試体において最初のサイクルで値が増加したのは、蒸気養生後は相対湿度60%の環境下に静置していたため、試験開始とともに吸水したことによる影響と考えられ、相対動弾性係数が増加したのは吸水により養生が促進されたことが考えられる。

これに対して、即脱型も質量が最初のサイクルで増加したが、相対動弾性係数は殆ど変化せず横ばいとなった。初期サイクルでの質量の増加は、蒸気養生供試体と同様、試験開始とともに吸水したためである。しかし、最終的に相対動弾性係数の急激な低下がみられた。これは、試験を実施した3個の供試体のうちの一つに大きな空隙が

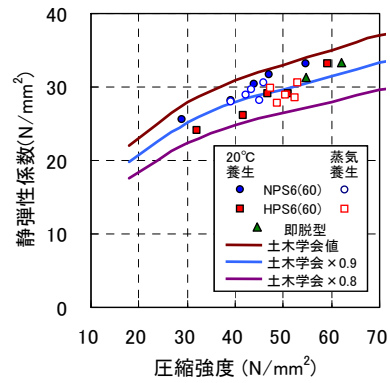


図-6 静弾性係数と圧縮強度の関係

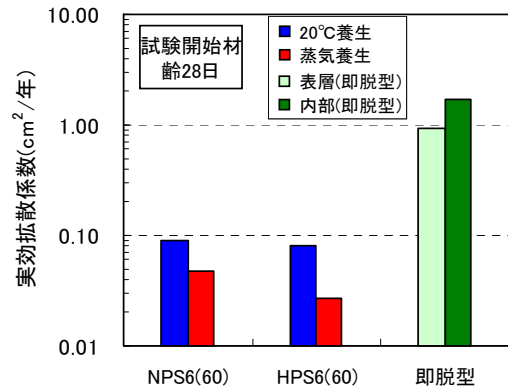


図-7 塩化物イオンの実効拡散係数

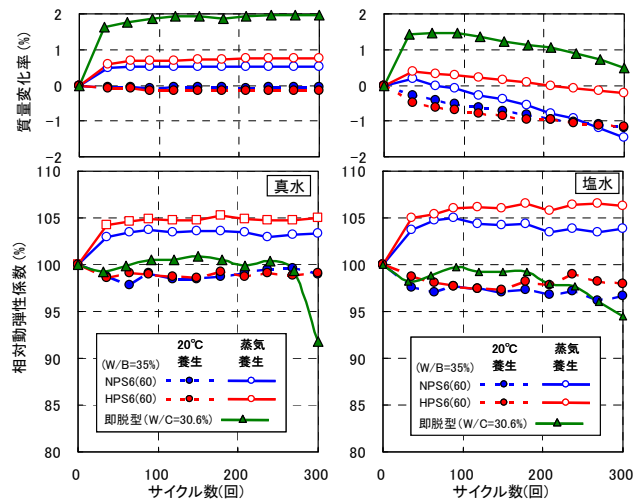


図-8 水中凍結融解試験結果

みられ、この部分の劣化が大きくなったためである。前述したように、即脱型の供試体は実際の製品より切り出しを行っており、表面上みられなかった締固め不良に起因して生じた空隙が製品内部にあったためと考えられる。

一方、塩水による凍結融解試験でもほぼ同様の傾向がみられ、質量の減少が真水の場合よりも多少増大するものの、最終的な相対動弾性係数はいずれの供試体もほぼ95%以上であり、極めて高い凍結融解抵抗性が示された。

(6) スケーリング抵抗性

図-9にASTM法によるスケーリング量と凍結融解サイク

ルの関係を示す。

いずれもスケーリングは軽微ではあるものの、養生方法および結合材の種類により若干の差がみられ、ベースセメントに普通セメントを用いたNPS6(60)の方が早強セメントを用いたHPS6(60)よりも、また標準養生した供試体の方が蒸気養生したものよりもいずれもスケーリング量は少なかった。一方、即脱型は50サイクルまでの結果ではあるが、スケーリングは殆ど発生していなかった。即脱型でスケーリングが極めて抑制された要因として、3.(4)節で述べたように、その作製方法が影響していると考えられ、試験面となる供試体上面は、水セメント比が極めて小さいモルタル層となっており、これがスケーリング抵抗性を向上させた要因と考えられる。いずれにしても、さらに長期的なスケーリング量の把握が必要である。図-10にASTM法によるスケーリング深さを示す。ここで、スケーリング深さとは、目視により劣化の大きい箇所を5点選定し、各測定箇所測定したスケーリング深さのうちの最大値である。スケーリング深さは、スケーリング量とほぼ同様な傾向がみられた。

図-11にCDF試験によるスケーリング量と凍結融解サイクル数の関係を示す。

CDF試験によるスケーリング量は、図-9に示したASTM法による試験結果と同様に、養生方法や結合材の種類により差がみられ、結合材の種類では蒸気養生と標準養生した場合で異なり明確な傾向がみられなかった。一方、養生の違いでは、蒸気養生した供試体の方が標準養生したものよりもスケーリングは少なく、ASTM法による試験

結果と逆の傾向を示した。また、即脱型はASTM法と同様、殆どスケーリングはみられなかった。なお、CDF試験によるスケーリング限界量は凍結融解28サイクルで1500g/m²とされており⁵⁾、いずれの供試体もスケーリング量は極めて小さい結果であった。

他方、今回の試験では、上述したようにASTM法とCDF試験で異なる傾向が確認された。これらの試験法は凍結融解条件が異なるだけでなく、水の供給方法が大きく異なり、ASTM法では供試体上面に湛水させ上面より凍結融解が作用するのに対し、CDF試験では試験面を下に向け毛管現象により吸水させ凍結融解が作用する(図-1参照)。試験結果の違いは、これらの試験条件の影響を受けているものと考えられるが、そのメカニズムについては今後詳細に検討する必要がある。なお、今回試験対象とした皿形側溝製品を考慮した場合、供給される水は製品の上面に作用することになることから、ASTM法の試験水供給条件の方が実環境に近い条件と考えられ、蒸気養生した供試体のスケーリング量が若干増加する傾向にあるものの、その量は微少であり、スケーリング抵抗性はいずれも高いと判断できる。

4. 皿形側溝の現地試験施工概要

(1) 試験施工箇所の現状と試験施工箇所の選定

皿形側溝の試験施工は、北海道開発局帯広開発建設部帯広道路事務所管内の国道274号日勝峠で実施した。写真-1に示すように、試験施工を実施した箇所における

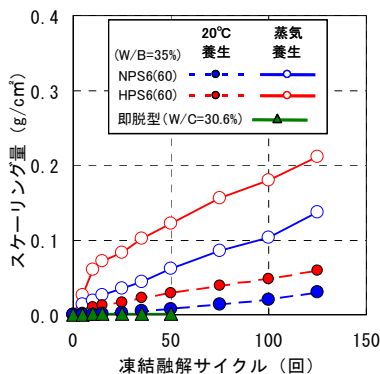


図-9 スケーリング量 (ASTM法)

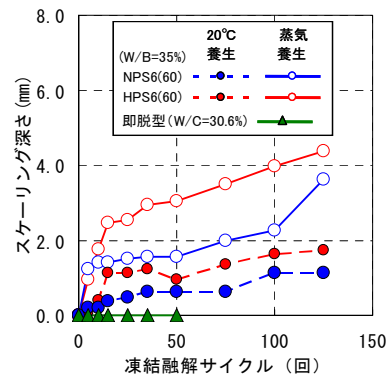


図-10 スケーリング深さ (ASTM法)

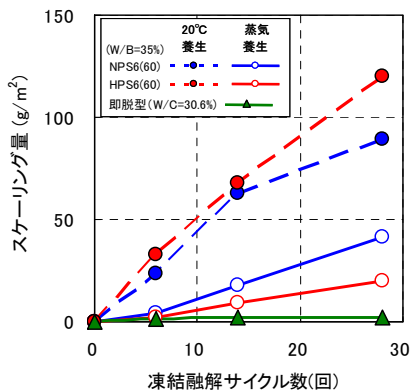


図-11 スケーリング量 (CDF試験)



写真-1 既設皿形側溝の劣化状況



写真-2 6合目付近における試験施工状況



写真-3 7合目付近における試験施工状況

既設の皿形側溝は、コンクリート部分が土砂化するほど著しい劣化により崩壊しており、内部の鉄筋が剥き出しとなり完全に錆びている状況が確認された。これらの劣化は、凍結融解と塩化物系凍結防止剤の複合作用によるものと考えられる。なお、劣化が著しい皿形側溝の供用年数は明らかではないが、現地製品を目視で調査した限りでは、流し込みにより製造された製品であると考えられる。なお、現地では維持工事が順次行われており、即脱型の製品に置き換えられている。即脱型の製品は、最大7~8年程度経過しているものがあるが、それらの製品は現在のところ劣化がみられていなかった。

この様な状況をふまえ、試験施工箇所を選定にあたっては、凍結防止剤の散布が多くなる5合目より上を条件として設定し、実際には6合目付近の直線部と、7合目付近のトンネル手前の2箇所を選定した。各地点における試験施工状況を写真-2および写真-3に示す。

(2) 試験調査計画の概要

図-12に試験施工の概略を示す。図のように、即脱型を挟むように、普通セメントとスラグによる製品1と早強セメントとスラグによる製品2をそれぞれ3個1組として設置し、経年的な調査を考慮して、1箇所に付き4組分の施工を行った。現在のところ、調査年は1、2、3、および5年後を予定している。また、経年調査は、現地より製品を回収し、目視による劣化の状況、強度、塩分の浸透深さ、コンクリートの細孔組織等について各種試験を実施し評価を行う予定である。

5. まとめ

本文では、改良セメントコンクリートの工場製品への適用性検討を目的に皿形側溝を製造し、室内試験を実施するとともに、日勝峠で行った試験施工の概要について述べた。

室内試験による初期性能としては、強度および耐久性ともに高い水準が確保されていることが確認されたことから、改良セメントのコンクリート製品への適用性が示



図-12 試験施工の概略

された。また、即脱型も強度および耐久性が高水準であることが確認されたが、低水セメント比のモルタル部分とコンクリート部分で品質が異なっており、特に実環境下では、製品同士の継目から皿形側溝の裏面に水が供給され、裏面のコンクリートの劣化が著しい事例も多くみられたことから、製品製造の際にはコンクリート部分の締固めに十分配慮する必要があると思われる。

今後は試験施工した製品について経年的な調査を継続し、実環境下における性能の検証を行う。

謝辞：本試験における皿形側溝製品の作製や試験用供試体の作製に当たり、田村コンクリート株式会社と株式会社ソックの協力を、また、試験施工時には、清水開発工業株式会社の協力をいただきました。ここに記して深謝いたします。なお、本研究成果の一部は、北海道大学と日鐵セメント株式会社との共同研究成果である。

参考文献

- 1) 吉田行、田口史雄、嶋田久俊：改良セメントによる高耐久コンクリートの適用性について、第50回(平成18年度)北海道開発局技術研究発表会、コ-8、2007.2。
- 2) 吉田行、田口史雄、嶋田久俊：早強ポルトランドセメントと各種混和材を用いたコンクリートの物性と耐久性、寒地土木研究所月報 No.659、pp2-8、2008.4。
- 3) 吉田行、田口史雄、名和豊春、渡辺宏：蒸気養生した各種混和材を用いたコンクリートの諸特性、プレキャストコンクリート製品の課題と展望に関するシンポジウム、JCI-C74、pp.81-86、2008.2
- 4) 酒井秀昭、横山博司、高野茂晴、前田悦孝：高炉スラグ微粉末(6000cm²/g)を用いた鋼橋のPCプレキャスト床版の検討、プレレストコンクリート、Vol.43、No.5、pp50-57、2001.9。
- 5) Jochen Stark, Bernd Wichit (訳：太田利隆、下林清一、佐伯昇)：コンクリートの耐久性第2版、社団法人セメント協会、pp.200-202、2003.8。