

# 改質セメントを用いた皿形側溝製品の物性および耐久性評価

## —実環境下における敷設1年後の追跡調査—

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 村中 智幸  
帯広開発建設部 帯広道路事務所 若林 将裕

積雪寒冷地におけるコンクリート工場製品の耐久性向上を目的として、昨年度、比表面積 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いた改質セメントコンクリートの工場製品への適用性を検討するため、改質セメントを用いた皿形側溝製品を製造し現場試験施工を実施した。本研究では、敷設1年後の皿形側溝製品について調査を実施し、その物性および耐久性を検証した。その結果、敷設後1年経過時の製品は、強度および耐久性ともに十分満足していることが明らかとなった。

キーワード：長寿命化、複合劣化、工場製品、改質セメント

### 1. はじめに

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削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。耐寒材料チームではその対策の一つとして、セメントの微粉末化や混和材の積極的な利用など、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手法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<sup>1), 2)</sup>。

これらの研究結果を踏まえ、現段階では改質セメントを用いたコンクリートの実用化に関する検討として、現場試験施工や現地暴露試験等を実施し、実環境下における耐久性の検証を行っている。昨年度は、実用化の一端としてコンクリート工場製品への適用性について検討を行い、皿形側溝製品を試作して現地試験施工を行うとともに、室内試験による物性および耐久性を評価した。その結果、室内試験により、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<sup>3)</sup>。本文では、現地施工後1年目の皿形側溝製品を回収し、その物性および耐久性について評価した結果について報告する。

### 2. 皿形側溝試験施工の概要

#### (1) 皿形側溝製品の概要

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 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 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（以下、普通セメントと略記）とスラグを組み合わせただけの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

表-1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント(HP) 4770 <sup>*</sup> 、密度 3.15 g/cm <sup>3</sup> 普通ポルトランドセメント(NP) 3350 <sup>*</sup> 、密度 3.16 g/cm <sup>3</sup>
混和材	高炉スラグ微粉末(S6) 6100 <sup>*</sup> 、密度 2.89 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	十勝産陸砂 密度 2.60g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 2.39%
粗骨材	清水町人舞産陸砂利 密度 2.67g/cm <sup>3</sup> 、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(cm<sup>2</sup>/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 (%)	コンクリート単体量 (kg/m <sup>3</sup> )							
								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	
								169	252		684	368			
HP-S6(60)	HP							167	477	671	990		3.10	5A	
								191	286		643	347			
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

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し込むことにより作製することとした（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している。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) コンクリート製品の製造と養生方法

流込み型の製品の製造は、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<sup>9)</sup>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℃/hrとし、20℃から55℃まで温度を上げ、③55℃を6時間保持し、④その後、自然冷却により20℃まで下げた。蒸気養生後は、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。

即脱型の製品は市販品であり、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製造されたものである。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されていた。

### (3) 試験施工箇所

皿形側溝の試験施工は、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部の協力を得て、十勝管内の国道の峠部で実施した。この峠における既設の皿形側溝の一部は、既報で述べた通り<sup>3)</sup>、凍結融解と塩化物系凍結防止剤の複合作用と考えられる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た。

このため、実際に試験施工を行う箇所の選定にあつ

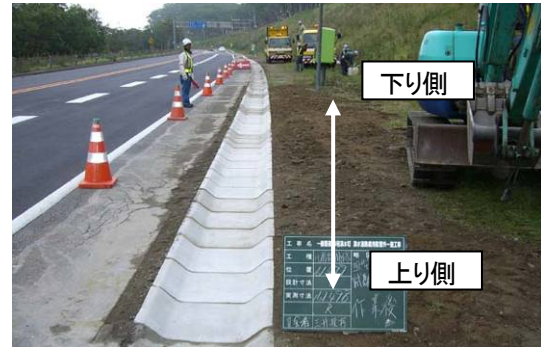


写真-1 6合目付近における試験施工状況



写真-2 皿形側溝の試験施工状況  
(7合目付近)



図-1 皿形側溝の敷設状況

ては、凍結防止剤の散布が多くなる5合目より上側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-1および写真-2に示す。また、図-1に製品の敷設状況を示す。実環境下での耐久性調査にあたっては、前述したように現在一般的に用いられている即脱型製品とも比較するため、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箇所に付きそれぞれ4組分の施工を行った。

### 3. 調査・試験概要

皿形側溝の物性および耐久性の調査は、敷設後1年経過時点で現地より製品を3個ずつ回収し、スケーリング調査のほか、製品自体の曲げ試験や塩分浸透状況等について試験を実施した。各調査・試験方法を以下に示す。

#### (1) スケーリング調査

皿形側溝製品のスケーリングは、回収した製品を写真撮影し、パーソナルコンピュータに取り込んだ画像データからスケーリング劣化した部分の面積を測定し評価した。なお、**図-2**に示すように皿形側溝の流水部分はR加工部を含んでおり曲線部の面積測定は困難であることから、本調査においては製品中央の平坦部が最も雨水や融雪水の影響を受ける部分と考え、R加工部を除く平坦部を調査対象面として面積を計測し（**図-2**の斜線部）、対象面積あたりのスケーリング劣化面積をスケーリング面積率として表した。なお、回収した製品の一部には**写真-3**に示すように、除雪車によると考えられる擦り傷がついたものや、回収作業時に製品端部が一部欠損した部分があったため、劣化面積を測定する際には目視による判断ではあるがその影響を除いて計測した。

#### (2) 曲げ試験

製品自体の曲げ試験は、JIS A 5363プレキャストコンクリート製品一性能試験方法通則に準拠して行った。なお、他の試験の関係から曲げ試験はそれぞれ1試験体のみで行った。

#### (3) 塩分浸透量調査

塩化物系凍結防止剤の影響を調査するため、コンクリート内部への塩分浸透量を測定した。測定は、電子線マイクロアナライザー（EPMA）による面分析（定量分析）により行った。面分析は、研磨した試料の分析面に導電性を持たせるために金を蒸着し実施した。面分析条件を以下に示す。

加速電圧：15kV、試料電流： $1 \times 10^{-7}$ A、  
測定時間：40msec/ピクセル、  
分光結晶：LDE5H (C)、PET (Ca、Cl)、TAP (Si)  
標準試料：Cl (Halite、Cl=60.7mass%)、  
Ca、Si (Wollastonite、CaO=48.0mass%、  
SiO<sub>2</sub>=50.9mass%)

プローブ径：25 $\mu$ m、ピクセルサイズ：50 $\times$ 50 $\mu$ m

Clの濃度分布は、試料表面側から内部方向の向きについて、Cl元素としての質量% (mass%) で表記した。なお、コンクリート内部への劣化因子の侵入はセメントペースト部を介して起こるため、面分析結果の画像は、セメントペーストに相当する部分のみを表示する条件で作成した。セメントペーストに相当する部分の表示は、反

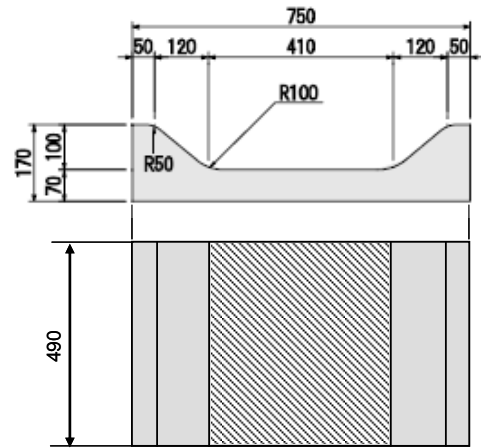


図-2 皿形側溝の概略

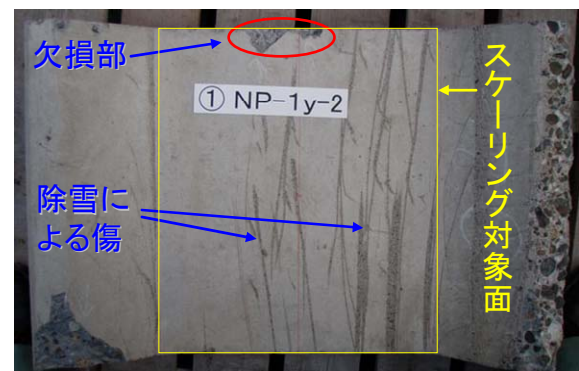


写真-3 製品の損傷例

(7 合目敷設「普通+スラグ」の製品番号 2)

射電子の強度の他に $17.5\text{mass}\% \leq \text{CaO} \leq 52.5\text{mass}\%$ 、および $5.0\text{mass}\% \leq \text{SiO}_2 \leq 30.0\text{mass}\%$ の条件に当てはまるピクセルのみを選択することにより行った。

#### (4) 結合水量およびCaCO<sub>3</sub>量測定

敷設後のコンクリートの水和状況を把握するために、結合水量の測定を行った。また、コンクリートの中性化状況を把握するために、CaCO<sub>3</sub>量の測定を行った。測定は何れも熱分析装置を用い、昇温速度10 $^{\circ}$ C/minで熱質量分析(TG-DTA)を行った。結合水量は20 $^{\circ}$ Cと800 $^{\circ}$ Cの質量減量より、CaCO<sub>3</sub>量は650 $\sim$ 800 $^{\circ}$ C付近の質量減量よりそれぞれ求めた。測定試料は、まず粗砕したコンクリートを鉄乳鉢中で粉砕しながら粗骨材を取り除き、残った試料をさらにアセトン中で軽く粉砕して75 $\mu$ m以下の粉末を採取した。試料は、この粉末を窒素ガス雰囲気中で一定質量となるまで乾燥させたものを用いた。それぞれの測定量は、試料質量から骨材質量を除いた硬化セメントペースト質量当たりの割合で表記した。骨材質量は、採取した試料から得た不溶解残分質量率(セメント協会法F-18に準拠)により補正した。

#### 4. 調査・試験結果および考察

##### (1) スケーリング面積率

図-3に各皿形側溝製品のスケーリング面積率を示す。なお、前述したように調査対象面にスケーリング以外の損傷が見られた製品は、いずれも7合目に設置した製品のうち、「普通+スラグ」の製品番号2、3と「早強+スラグ」の製品番号1、2、3（全て）であり、6合目敷設製品と即脱型製品には無かった。

図から、いずれの設置箇所においても「早強+スラグ」製品のスケーリング面積率が比較的大きく、「普通+スラグ」製品についてもスケーリングが確認された。他方、写真-4に即脱型の表面状況の敷設直後と1年経過後を比較した一例を示したが、即脱型製品の表層は敷設直後に比べ1年後の方がざらつき感が増しており全面的に薄い剥離が確認された。しかし、特殊な製造法により表層がモルタル層に覆われているため、表層のペースト皮膜が剥離しても大きな離れにつながらず、スケーリング面積率としての評価は出来なかった。なお、これら製品のスケーリング劣化の傾向は、既報の室内スケーリング試験結果と同様である<sup>3)</sup>。

表-3にASTM C672試験における目視によるスケーリング程度の評価等級<sup>5)</sup>を示す。これにより評価した場合、

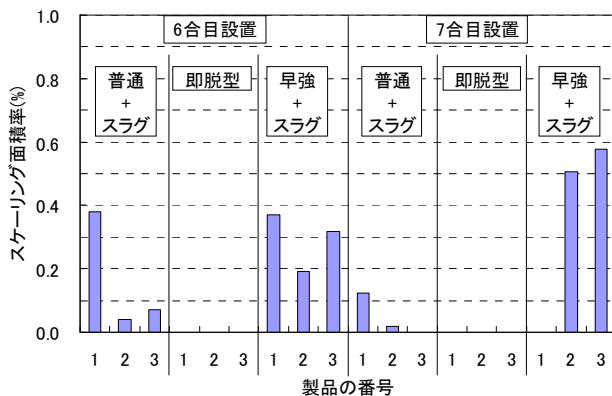


図-3 スケーリング面積率

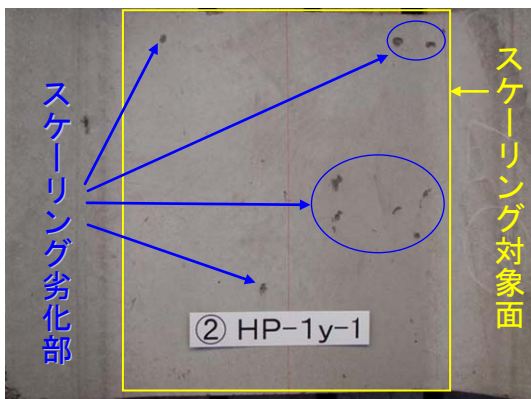


写真-5 スケーリング劣化部  
(6合目敷設「普通+スラグ」の製品番号1)

いずれの製品も3mm以下のはく離深さであり、スラグを用いた製品では一部粗骨材の表面が確認されているものの、スケーリング以外の損傷が見られなかった製品でスケーリング面積率が最大となった「普通+スラグ」の製品番号1の実際の状況(写真-5)を見ても、現時点での劣化は極めて小さいことが確認でき、スケーリング面積率の絶対値も極小であることから、敷設1年後における表面上の劣化は問題ないと言える。

##### (2) 皿形側溝の曲げ破壊荷重

図-4に皿形側溝の曲げ試験結果を示す。なお、図には製品の出荷材齢14日における曲げ破壊荷重も示している。

実環境下に1年曝された製品はいずれも曲げ破壊荷重が増加しており、特に「早強+スラグ」の増加が大きく、以下即脱型、「普通+スラグ」の順となり、出荷材齢時の曲げ破壊荷重にはほとんど差がなかったものの、現場敷設1年後には配合により差がみられた。また、6合目に敷設した製品法が7合目に敷設したものよりも破壊荷重は大きかった。敷設後の製品の破壊荷重の増加は、実環境下において雨水などによりコンクリートの水和が進行



写真-4 即脱型の表面状況の経年比較

表-3 ASTM試験におけるスケーリング程度の等級<sup>5)</sup>

点	試験面の劣化状況
0	剥離なし
1	粗骨材の露出なし、深さ3mm以下の剥離
2	評価1と評価3の中間程度の劣化性能
3	粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	評価3と評価5の中間程度の劣化性能
5	粗骨材が前面露出する程の激しい剥離

したことによると考えられる。また、6合目の方が破壊荷重が大きかったことについては、標高差に伴う温度の影響等が考えられる。なお、北海道開発局の仕様では、皿形側溝製品の曲げ破壊荷重の規定値は9.3 kNであり、いずれも十分に満足していた。

### (3) 塩化物イオンの浸透状況

写真-6にEPMA面分析（定量分析）によるコンクリートの塩化物イオンの浸透状況を示す。写真の左側が試料の表面、すなわち皿形側溝の上面に相当する。なお、写真の凡例の色分布は塩化物イオンの濃度分布を示しており、濃度が濃いほど白色や赤色など暖色系の色で示され、濃度が低いほど黒色や青色の寒色系の色となる。

分析した試料における骨材の分布状況の影響もあり一概には言えないが、全体としては設置箇所による違いは殆ど見られず、製品により塩化物イオンの浸透状況は異なった。「早強+スラグ」製品は、極表面部で比較的低い濃度を示したが、その内側から表層2mm程度を中心に高い濃度を示し、以降、試料表面から10mm程度まで内部方向に向かって段階的に濃度が低下する傾向がみられた。「普通+スラグ」製品は、概ね「早強+スラグ」と同様の傾向であったが、試料内部への塩化物イオン浸透深さが13mm程度と「早強+スラグ」製品よりも若干大きくなる傾向が見られた。一方、即脱型の場合、試料表面部の濃度が低い領域が深さ2.5~3.0mm程度まであり、その内部側では表層5mm程度を中心に高い濃度を示し、以降、試料表面から20mm程度まで内部方向に向かって段階的に濃度が低下する傾向が見られた。このように、スラグを用いた製品では、表層部の塩化物イオン濃度が高かったが、塩化物イオンの浸透深さは比較的小さいのに対し、即脱型製品は比較的内部まで塩化物イオンが浸透していた。

図-5にセメントペーストに相当する部分のCl濃度分布を算出した結果を示す。上述したように、いずれも極表面部の塩化物イオン濃度は内部よりも低下しているが、これは表層部のコンクリートの中性化により内部に塩分が移動したものと考えられる<sup>9)</sup>。また、スラグを用いた製品は即脱型製品よりも明らかに塩分浸透抑制効果が高いことがわかる。なお、塩化物イオン濃度は若干ではあるが7合目に敷設した製品の方が高い傾向がみられる。これは7合目はトンネル手前に敷設されており、トンネル内の融雪水が直接的に流入することや、路側の堆雪幅が6合目よりも狭いことなどから凍結防止剤を含む雪が集中し、塩化物イオンが蓄積された可能性が考えられる。

### (4) 熱分析結果

図-6に示差熱分析による結合水量を示す。X軸ラベルにある内部とはそれぞれの箇所に敷設し1年経過した製品の内部より採取した試料を意味し、表層とはその表層部より採取した試料を意味する。また、参考とは過年度実施した室内試験時の試料から得られたデータを意味し、

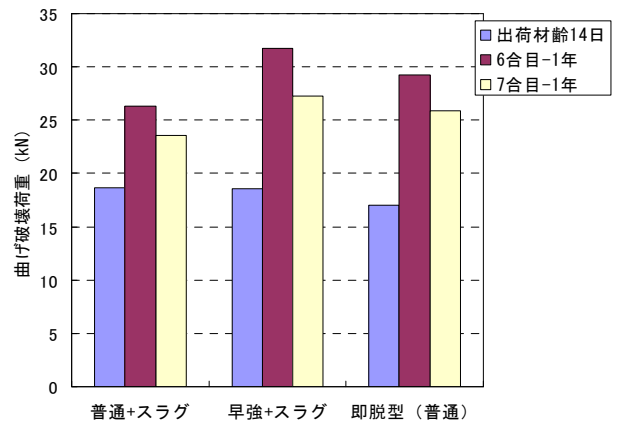


図-4 皿形側溝の曲げ試験結果

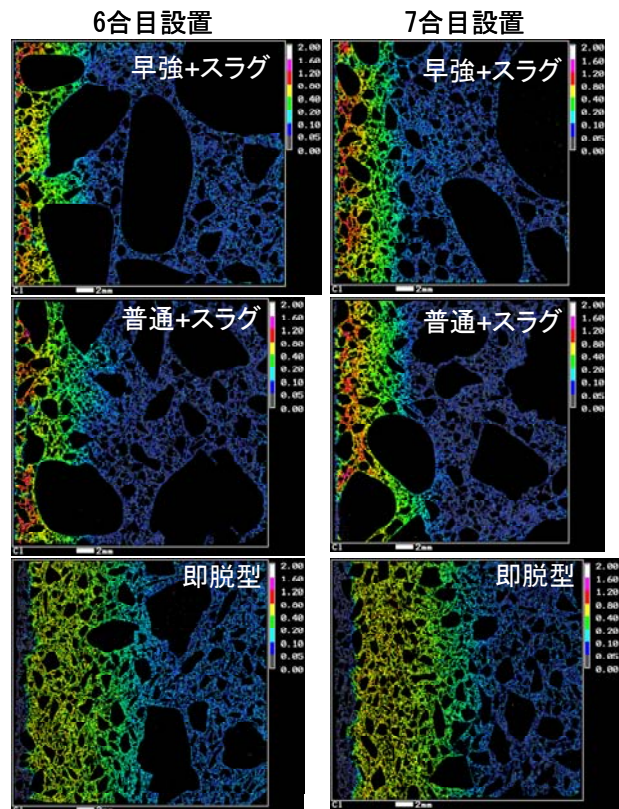


写真-6 塩化物イオンの浸透状況（EPMA 面分析定量）

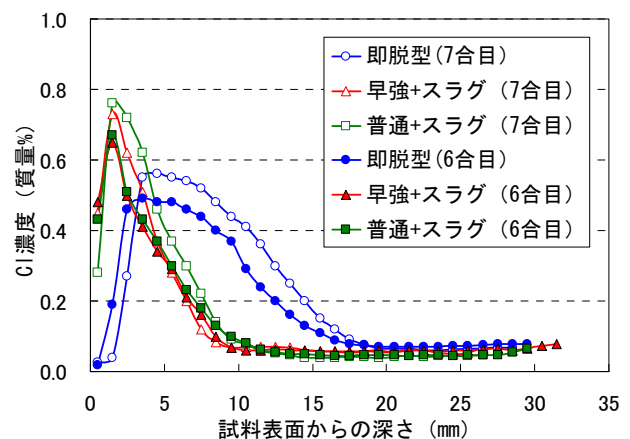


図-5 セメントペーストに相当する部分のCl濃度分布

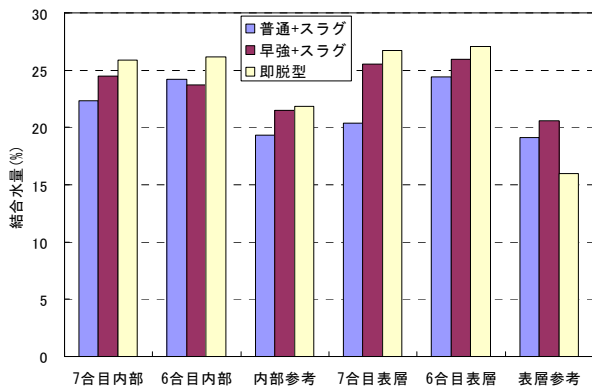


図-6 示差熱分析による結合水量

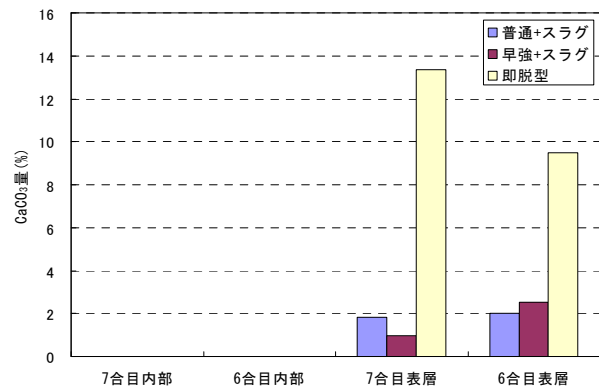


図-7 示差熱分析によるCaCO<sub>3</sub>量

この試料の養生条件は製品と同様に蒸気養生した後、温度20℃、相対湿度60%の室内に材齢28日まで静置し材齢28日で測定したものである。従って、この値は実環境下に敷設した当初の製品の値と考えると差し支えないと考えられる。

結合水量は、敷設当初と同等と考えられる「参考」の値よりも1年後の方が増加していた。これは、1年後の方が水和が進行していることを意味しており、敷設1年後の方が製品の強度が増加していたことを裏付けるものである。また、1年経過後の結合水量は、概ね「普通+スラグ」よりも「早強+スラグ」や即脱型の方が増加していることに加え、7合目に敷設したものよりも6合目に敷設したものの方が結合水量は増加しており、これらの傾向は1年後に製品により強度差が見られたことや6合目の方が強度が大きかったこととも一致していた。

図-7に示差熱分析によるCaCO<sub>3</sub>量の測定結果を示す。これらは敷設1年経過後の製品の試験値であるが、製品内部の試料からはCaCO<sub>3</sub>が検出されていないのに対し、表層部の試料からはいずれもCaCO<sub>3</sub>が検出された。このことから、製品の表層は何れも中性化していることが明らかとなり、塩化物イオンの浸透分析において、表層部の中性化の影響により内部に塩分が移動したとする仮説を裏付けるものである。さらに即脱型のCaCO<sub>3</sub>量はスラグを用いた製品よりも多く、即脱型の方が表層部の塩化物イオン濃度がより内部に移動していた結果をよく説明する。

以上から、1年後の製品の強度が増加していることや、表層部の中性化が塩化物イオンの浸透に影響を及ぼしていることが、熱分析試験の結果から検証された。

## 5. まとめ

本文では、改質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として、実環境下に試験施工した皿形側溝製品の施工後1年目の物性および耐久性について検

証した。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) 現地敷設1年後の製品のスケリング劣化は極わずかであり、現時点では全く問題ないと判断できる。
- (2) 製品の曲げ強さは1年経過後増大しており、水和が進行していることが確認された。また、強度の増加の程度は、製品の配合や敷設箇所により異なる傾向が見られた。
- (3) スラグを用いた製品の方が即脱型よりも塩化物イオンの浸透および中性化の抑制効果が高く、耐久性が高いことが示された。

以上より、敷設後一年目の評価としては、強度および耐久性ともに十分満足していることが明らかとなった。今後も経年的な調査を継続し、実環境下における性能の更なる検証を行う。

**謝辞：**製品の回収にあたり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、pp.2-8、2008.4.
- 3) 吉田行、川村浩二、三井修：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試験施工—、第52回（平成20年度）北海道開発局技術研究発表会、コ-02、2009.2.
- 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（6000cm<sup>2</sup>/g）を用いた鋼橋のPCプレキャスト床版の検討、プレストレストコンクリート、Vol.43、No.5、pp.50-57、2001.9.
- 5) ASTM C672/C672M-98、Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Structures Exposed to Deicing Chemicals
- 6) 小林一輔：図解コンクリート構造物の診断—電子の目で内部を見る—、オーム社、pp.30-33、2006.7.