

改質セメントを用いた皿形側溝製品の 現地耐久性追跡試験について

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 宮本 修司
帯広開発建設部 帯広道路事務所 山本 典隆

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、比表面積6000cm²/gの高炉スラグ微粉末を用いた皿形側溝製品を製造し、現場試験施工を実施して耐久性等の検証を行っている。本文では、流し込み方式で製造した皿形側溝製品の現場敷設2年経過時における追跡調査結果と、即時脱枠方式で新たに製造した皿形側溝製品の現場敷設1年経過時の物性と耐久性に関する試験結果を報告する。

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

厳しい財政状況下での社会基盤整備では、長期定期的な耐久性を確保して構造物の長寿命化を図るなど、効率的に推進することが強く求められている。特に、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、耐久性を長期に亘り確保するための対策が重要となっている。

このため、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。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を図るため、現場試験施工や現地暴露試験などにより実環境下における耐久性の検証を行っている^{1), 2)}。

本報告では、コンクリート工場製品への適用性の検討として、試作した皿形側溝製品（以後、開発品と記述）の現地試験施工後1～2年経過時点における、物性および耐久性について評価を行った。

2. 皿形側溝製品の概要

(1) 試験施工の概要

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¹⁾、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いるものが多数見られていた。このため、実際に試験施工を行う箇所を選

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。

当初敷設した開発品はベースセメントが異なる2種類であり、流し込み方式により製造したものである（以下、流し込み型と記述）。なお、現地での敷設は、現在一般的に用いられている即時脱型する製法による製品（以下、即脱型と記述）とも比較するため、図-1に示すように即脱型を挟むように開発品（製品1と製品2、詳細は後述）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。このうち、本調査では、1カ所あたり1組ずつ回収した。

昨年度は、これらのうち1組ずつを現地より回収し、1年経過時点の耐久性等を評価した。なお、回収跡地には、製造方法の違いを検証するため、即脱型の改質セメントコンクリート製品を新たに作製し（詳細は後述）、1カ所あたり6個ずつ現地に敷設した。なお、本調査では1カ所あたり2個ずつ回収した。

(2) 使用材料と配合

上述したように、試験施工では結合材の種類や製造方法の異なる製品を作製し敷設している。

流し込み型開発品の使用材料を表-1に示す。結合材は、これまでの室内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、早強セメントと記述（記号：HP））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、スラグと記述（記号：S6））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



写真-1 6合目付近における試験施工状況



写真-2 7合目付近における試験施工状況



図-1 皿形側溝の敷設状況 (1組分)

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 流込み型製品の配合 (即脱型一般品を併記)

配合名	セメント種類	スラグ置換率 (%)	W/B (%)	空気量 (%)	SP※ ¹ 添加量 (B×%)	s/a (%)	コンクリート単位数 (kg/m ³)					AE剤添加量 (B×%)		
							W	B※ ²		S	C※ ³		SP	
								C	S6		(5-15)			(15-25)
普通+スラグ	NP	60	35	4.5	0.65	41	147	420	712	1052	2.74	0.02		
早強+スラグ	HP				0.65		168	252	684	368			990	
即脱型(一般)	NP	-	30.6	2.5	0.25	43	110	360	1107	885	0.90	-		

(※1 SP:高性能減水剤、※2 B:結合材、※3 G:括弧書きは骨材寸法)

表-3 即脱型開発品の配合

配合名	セメント種類	スラグ置換率 (%)	W/B (%)	空気量 (%)	SP※ ¹ 添加量 (B×%)	s/a (%)	コンクリート単位数 (kg/m ³)					AE剤添加量 (B×%)		
							W	B※ ²		S	C※ ³		SP	
								C	S6		(2.5-5)			(5-20)
即脱型(スラグ)	NP	60	30	2.5	1.50	50	120	400	960	477	477	6.00	0.02	
								160	240					

(※1 SP:高性能減水剤、※2 B:結合材、※3 G:括弧書きは骨材寸法)

と記述(記号:NP)とスラグを組み合わせた場合についても比較検討した。

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。流込み型は、施工性を考慮し、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した。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、比較検討した一般製品の即脱型は、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製品で、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。

一方、昨年度新たに作製し敷設した開発品は即脱型で製造し、結合材は、普通セメント(比表面積3360cm²/g、密度3.16g/cm³)とスラグ(比表面積6140cm²/g、密度2.89g/cm³)を用いた。細骨材は、白老産陸砂(密度2.66g/cm³、吸水率1.30%、粗粒率2.54)を、粗骨材は、

敷生川産碎石(密度2.64g/cm³、吸水率1.30%、G_{max}=20mm)を用いた。混和剤は、製品用の高性能減水剤(メラミンスルホン酸塩系)とAE剤(アルキルエーテル系)を用いた。

配合を表-3に示す。水結合材比は、一般的な即脱型製品を考慮して30%とした。コンシステンシーの管理は、製造の協力を頂いた製品工場で独自に採用しているテーブル型の振動機による貫入式試験方法により行い、目標コンシステンシーは、この工場で縁石製品の一般管理値として設定している貫入量7cm±3cmとし、目標空気量は一般型の即脱製品と同様に2.5±1.0%とした。スラグ置換率は流込み型と同様、セメント内割で60%とした。

(2) コンクリート製品の製造と養生方法

開発品の製造は、何れも実際のコンクリート製品工場の設備で行った。流込み型の養生は蒸気養生とし、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を参考に³⁾、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、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。なお、比較検討した一般の即脱型製品は、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日工場内に静置され、その後は屋外ヤードに静置されていた。また、即脱型のスラグ製品は、上記とは異なる工場で製造しているが、基本的な製造過程は一般の即脱型と同様である。

3. 調査・試験概要

皿形側溝の物性および耐久性の調査は、現地におけるスケーリング調査のほか、製品を現地より回収し、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、製品を現地で写真撮影し、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。また、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

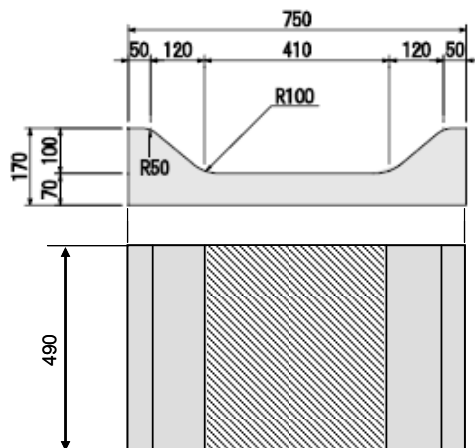


図-2 皿形側溝の概略

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： 1×10^{-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、Ca=48.0mass%、

SiO₂=50.9mass%)

プローブ径：25μm、ピクセルサイズ：50×50μm

Clの濃度分布は、試料表面側から内部方向について、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、反射電子の強度の他に $17.5\text{mass}\% \leq \text{Ca} \leq 52.5\text{mass}\%$ 、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CaCO₃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、

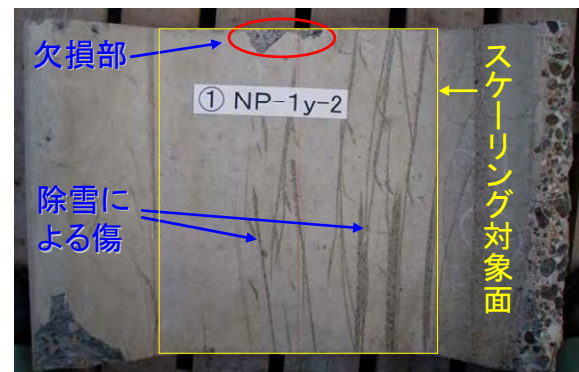


写真-3 製品の損傷例
(7合目敷設「普通+スラグ」の製品)

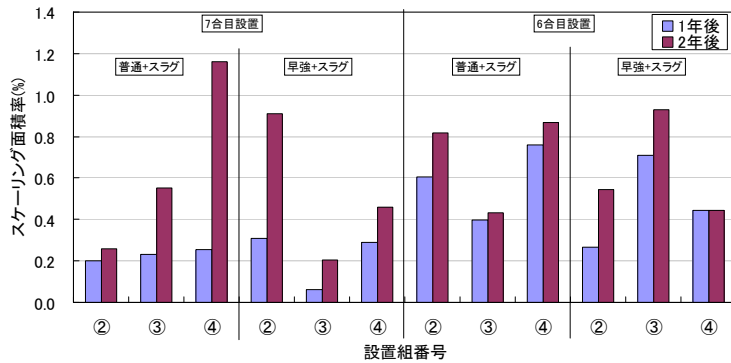


図-3 スケーリング面積率

結合水量の測定を行った。また、コンクリートの中酸化状況を把握するために、CaCO₃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°C/minで熱質量分析(TG-DTA)を行った。結合水量は20°Cと800°Cの質量減量より、CaCO₃量は650~800°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75μm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. 皿形側溝の経年調査結果

(1) スケーリング面積率

図-3に2年経過した流込み型製品のスケーリング面積率を示す。横軸の設置組番号とは、3個1組として製品を設置した際に付与した組番号を示しており、①は1年目で回収しているため、ここでは現地に残存している②~④各組のスケーリング面積率を測定し、3個の平均値により経年的に比較した。なお、即脱型の一般品は、前述したように、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ためここでは省略した。

全体として、スケーリング面積率は2年目で増加傾向にあるものの、劣化が大きいものでも面積率としては1.2%以下であり、表面上の劣化面積は小さかった。また、平均的には6合目に設置したものの方がスケーリング劣化は大きい傾向がみられたが、経年的には7合目に設置したものの方が増加する傾向もみられた。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であり、目視によりその影響を取り除いてはいるものの、表面上見えていないひび割れ等が生

表-4 ASTM試験におけるスケーリング程度の等級⁴⁾

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	粗骨材が全面露出する程の激しい剥離

じ、スケーリングが増加した可能性も考えられる。

表-4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⁴⁾を示す。いずれの製品も3mm以下のはく離深さだったが、流込み型製品では一部粗骨材の表面が確認された。これは、流込み型の場合、製造時に製品の上面にあたる型枠底面に粗骨材が集中しやすく、僅かなスケーリングでも骨材が露出する可能性が高いためであり、スケーリングの程度としては1点と評価するのが妥当であり、敷設2年経過時点でも表面上の劣化は小さいと言える。なお、即脱型の一般品の表層は、敷設1年経過時点での報告²⁾と同様、敷設直後に比べざらついており、全面的に薄い剥離が確認されたものの、1年経過時点と比べるとほとんど変状はみられなかった。

一方、昨年度敷設した即脱型スラグ製品は、6合目に敷設したもののうちの一つに面積率0.06%程度の僅かなスケーリングが確認されたが、その他については変状は確認されなかった。

(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。

7合目に敷設した流込み型製品および一般の即脱型製品は、いずれも経年的に曲げ破壊荷重が増加していたが、2年経過時点の荷重はいずれも同程度だった。他方、6合目に敷設した製品は、1年経過時点では7合目のものよりも破壊荷重は大きかったものの、2年経過時点では荷重の増加は見られなかった。しかし、「早強+スラグ」を除くと1年経過時とほぼ同程度であり、表面上の劣化は微小であること、および曲げ試験は1体でしか行っていないことを考慮すると個体差の影響の可能性もある。

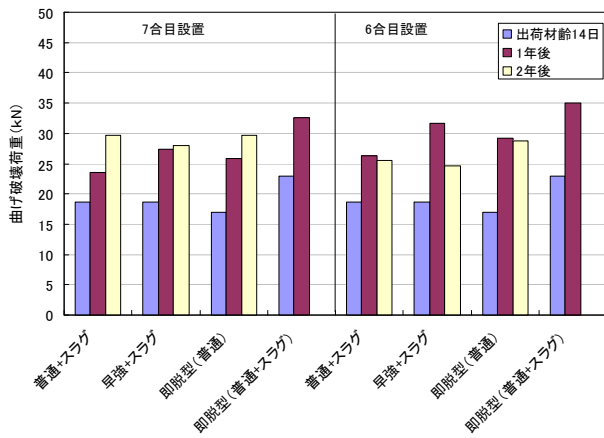


図-4 皿形側溝の曲げ試験結果

一方、昨年度敷設した即脱型の開発品（普通+スラグ）は1年経過後の曲げ破壊荷重が増加しており、他の製品と同様の傾向であった。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したものと考えられる。

なお、この現場における仕様では、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-4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、図-5に定量分析より算出したセメントペーストに相当する部分のCl濃度分布を示す。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。

敷設後2年経過した製品は、既報²⁾の1年経過時点と比べて、いずれも表層付近の塩分濃度は増加していた。また、「早強+スラグ（7合目）」を除くと、スラグを用いた製品は表面上の塩分濃度は高いものの、内部への塩分浸透量は一般の即脱型より少なく、この傾向は1年経過時点と同様であった。他方、敷設箇所の違いで比べると、1年経過時点では7合目に敷設したもののほうが、いずれの製品も塩分濃度および内部への浸透深さが若干大きくなる傾向が見られたが、2年経過時点は逆の傾向を示しているものもあり、この差は製品毎の個体差の可能性もある。なお、2年経過時点における「早強+スラグ（7合目）」については、特に内部への塩分浸透深さが大きくなった、7合目に敷設したスラグ製品は、前述のように除雪による傷などが見られていたため、この影響を受けた可能性が考えられる。

一方、新たに敷設した即脱型のスラグ製品は、表層の塩分量は一般型の即脱型製品と同程度だったものの、内部への浸透深さは一般型製品よりも小さく、流込み型製

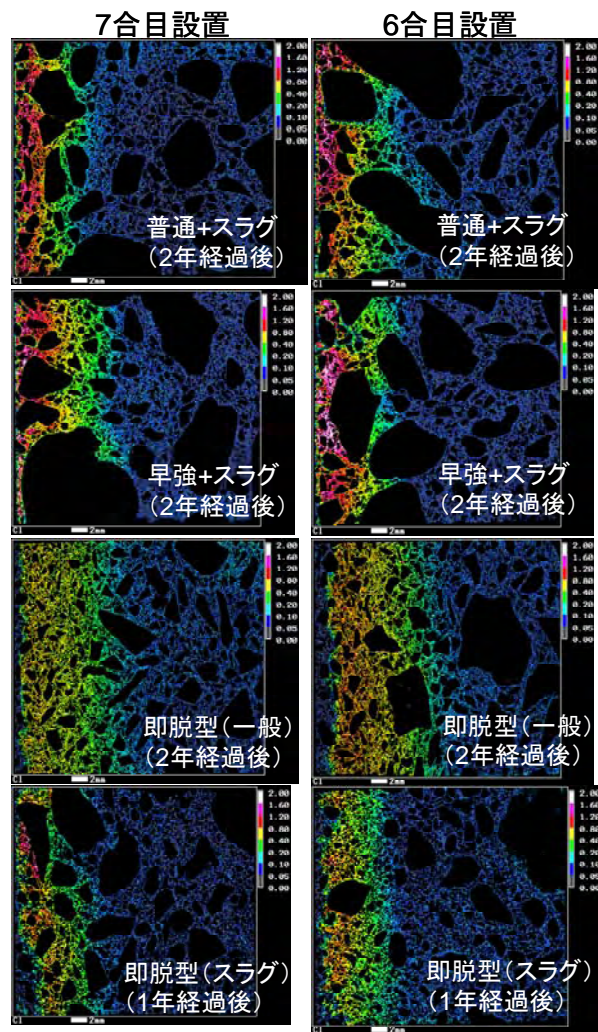


写真-4 塩化物イオンの浸透状況（EPMA 面分析定量）

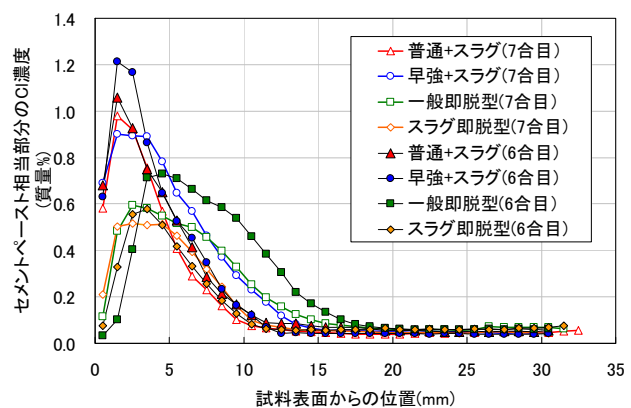


図-5 セメントペーストに相当する部分のCl濃度分布

品と同等の浸透曲線を示した。このことから、製造方法が異なる場合でも、スラグを用いた場合には、塩分浸透の抑制効果が高まることが確認できた。

なお、いずれの製品においても、ごく表層部の塩分量が内部よりも少ない傾向がみられるが、これは既報²⁾でも述べたように、中性化の影響を受けているものと考えられる。

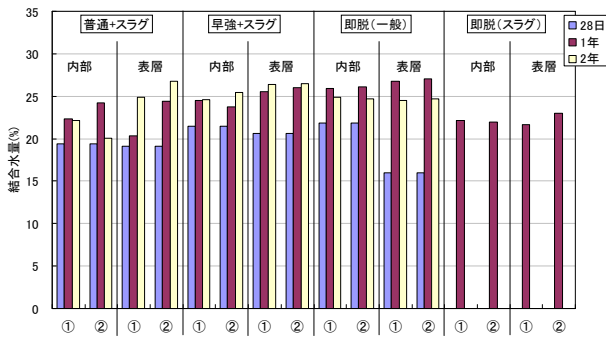


図-6 示差熱分析による結合水量

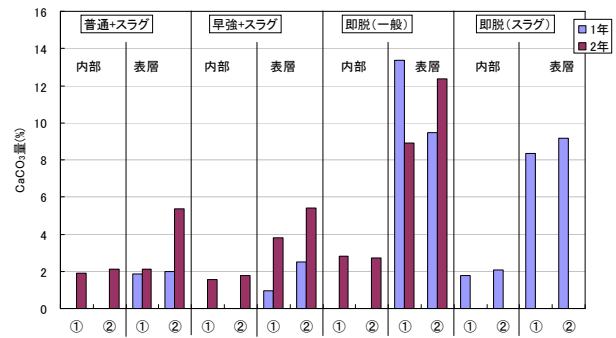


図-7 示差熱分析によるCaCO₃量

(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軸ラベルにある数字は設置箇所を示しており、①は7合目、②は6合目を意味する。また、内部とはそれぞれの箇所に敷設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5mmより採取した試料を意味する。また、凡例の28日とは、製品と同様に蒸気養生した供試体を、温度20℃、相対湿度60%の室内に材齢28日まで静置後に測定したものであり、敷設当初の値と同等のものである。

結合水量は、流込み型のスラグ製品は、概ね経年的に微増する傾向がみられ、水和が進行していることが確認できる。なお、一般の即脱型製品は、2年経過時の結合水量がいずれも減少傾向にあるが、これは製品が炭酸化したことが影響していると考えられる。

一方、新たに作製した即脱型スラグ製品の、1年経過時における結合水量は、結合材の種類が同じ流込み型の「普通+スラグ」の1年経過時とほぼ同程度であった。

図-7に示差熱分析によるCaCO₃量の測定結果を示す。年数の経過に伴い、CaCO₃量は増加するとともに、1年経過時には確認されなかった製品内部からもCaCO₃が確認され、中性化が進行していることが確認された。しかし、流込み型のスラグ製品は、一般の即脱型よりもCaCO₃量は少なく、中性化の抵抗性も高いことが確認できる。

一方、新たに作製した即脱型スラグ製品をみると、一般品の即脱型の2年経過時とほぼ同程度であり、中性化の進行が比較的早いことが確認された。この傾向は、図-5で、即脱型のスラグ製品と一般品におけるごく表層部の塩分量の低下状況がほぼ同程度だったこととも対応している。このため、現時点では即脱型スラグ製品の塩分浸透深さは一般品よりも小さかったものの、今後増加する可能性があることから、調査を継続すると共に、コンクリートの細孔構造を含めた詳細な検討が必要である。

5. まとめ

本報告では、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) 現場敷設2年経過時点の製品のスケーリング劣化は、微少であることが確認された。
- (2) スラグ製品の曲げ強さは経年的に増大しており、水和が進行していることが確認された。
- (3) 2年経過時点においても、流込み型のスラグ製品の方が一般の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。
- (4) 昨年度新たに敷設した即脱型のスラグ製品は、強度および塩分浸透抵抗性は良好だったが、中性化の進行が比較的早く、細孔構造を含めた詳細な検討が必要である。

以上より、2年経過時においてもスラグ製品の耐久性が高いことが確認された。しかし、即脱型のスラグ製品は、中性化の進行が比較的早い傾向も確認されたことから、今後も経年的な調査を継続し、性能の更なる検証を行っていく。

謝辞：製品の製造にあたり、株式会社上田商会の協力を、また、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いた。ここに記して深謝する。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、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）北海道開発技術研究発表会、コ402、2009.2。
- 2) 吉田行、村中智幸、若林将裕：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—、第53回（平成21年度）北海道開発技術研究発表会、コ13(道)、2010.2。
- 3) 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、プレストレストコンクリート、Vol.43, No.5, pp.50-57, 2001.9。
- 4) ASTM C672/C672M-98、Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Structures Exposed to Deicing Chemicals