

平成25年度

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 —実環境下における敷設5年後の追跡調査—

寒地土木研究所 道東支所 ○渡辺 淳
寒地土木研究所 耐寒材料チーム 吉田 行
帯広開発建設部 帯広道路事務所 山本 佳宏

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、現地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型側溝製品の現場敷設5年経過時における追跡調査結果と、即時脱型方式で製造した皿型側溝製品の現場敷設4年経過時における追跡調査結果を報告する。

キーワード：長寿命化、ライフサイクルコスト、工場製品、改質セメント

1. はじめに

現在の厳しい財政状況の下、社会基盤整備は構造物の長期的な耐久性を確保することにより長寿命化を図りライフサイクルコストを縮減するなど、効率的に推進していくことを強く求められている。特に積雪寒冷地における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ことから、その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。

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環境下での耐久性等を検証するため、現場試験施工や現地暴露試験を実施し、継続的な調査を行っている。^{1), 2), 3)}

本文では、コンクリート工場製品への適用性を検討するため試作した皿型側溝製品（以後、開発品と記述）の現地敷設後4～5年経過時における物性及び耐久性についての評価結果を報告する。

2. 皿型側溝製品の概要

(1) 試験施工の概要

皿型側溝の現場試験施工は、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部の協力を得て、十勝管内の一般国道274号清水町日勝峠で実施した。この峠部における既設の皿

型側溝の一部は既報で述べたとおり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、試験施工箇所の選定にあたっては、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、6合目付近の直線部と9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流し込み方式により製造したベースセメントが異なる2種類である（以下、流し込み型と記述）。なお、現在一般的に用いられている即時脱型方式で製造された製品（以下、即脱型と記述）とも比較するため、図-1に示すとおり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、経年的な調査を考慮して1箇所につきそれぞれ4組分を敷設した。このうち、本調査では1箇所あたり1組ずつ回収した。なお、平成21年度および平成22年度にも1箇所あたり1組ずつ回収し、それぞれ1年経過時点、2年経過時点における耐久性等を評価している。^{2), 3)}

また、製造方法による違いを検証するため、平成21年度回収跡地に即脱型の改質セメントコンクリート製品（製品3、詳細は後述）を図-2に示すとおり1箇所あたり6個敷設した。平成22年度には1箇所あたり2個ずつ回収して1年経過時点における耐久性等を評価している。³⁾ 本調査では1箇所あたり2個ずつ回収した。

(2) 使用材料と配合

上述のとおり、試験施工では製造方法や結合材の種類が異なる製品を製造し敷設している。



写真-1 6合目付近の試験施工状況



写真-2 9合目付近の試験施工状況

製品1 (普通+スラグ)	一般品1 (即脱型)	製品2 (早強+スラグ)

図-1 皿型側溝の敷設状況 (1組分)

即脱型開発品敷設箇所 (H21回収跡地)			
H22 回収済	H25 回収	H25 回収	H22 回収済
製品3 (普通+スラグ: 即脱型)		一般品2 (即脱型)	

図-2 即脱型皿型側溝の敷設状況 (1箇所分)

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3.15g/cm ³ 普通ポルトランドセメント (NP) 3350 [※] 、密度3.16g/cm ³
混和材	高炉スラグ微粉末 (S6) 6100 [※] 、密度2.89g/cm ³
細骨材	流込み型: 人舞産陸砂 密度2.60g/cm ³ 、吸水率2.39% 即脱型: 白老産陸砂 密度2.66g/cm ³ 、吸水率1.30%
粗骨材	流込み型: 人舞産陸砂利 密度2.67g/cm ³ 、吸水率2.39% 即脱型: 敷生川産砕石 密度2.64g/cm ³ 、吸水率1.30%
高性能減水剤	流込み型: カルボキシル基含有ポリエーテル系 (工場製品用) 即脱型: メラミンスルホン酸塩系
A E 剤	流込み型: 天然樹脂酸系 即脱型: アルキルエーテル系

※比表面積 (cm²/g)

表-2 開発品の配合 (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 (%)	コンクリート単位量 (kg/m ³)					A E 剤添加量 (B×%)		
							W	B ^{※2}		S	G ^{※3}		S P	
								C	S6		(5-15)			(15-25)
流込み型 (早強+スラグ)	HP	60	35	4.5	0.65	41	167	477	671	990		3.10	0.02	
							191	286		643	347			
流込み型 (普通+スラグ)	NP	60	30	2.5	1.50	50	147	420	712	1052		2.74	0.02	
							168	252		684	368			
即脱型 (普通+スラグ)	NP	60	30	2.5	1.50	50	120	400	960	477	477	6.00	0.02	
							160	240						
即脱型 (一般品)	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 括弧書きは骨材寸法)

開発品の使用材料を表-1に示す。流込み型の結合材は、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 (製品1)。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、普通セメントと記述 (記号: NP)) とスラグを組み合わせた場合 (製品2) についても比較検討した。

配合を表-2に示す。配合決定にあたっては、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製造している。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 (一般品1) 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、混和材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塑剤が用いられている。

一方、平成21年度に新たに製造し敷設した即脱型の開発品は、結合材に普通セメントとスラグを用いている (製品3)。水結合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に協力を頂いた製品工場ですべて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、この工場ですべての製品として設定している貫入量7±3cmとし、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。

(3) 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ている。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⁴⁾、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）を協力的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た。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

(1) スケーリング調査

皿型側溝製品のスケーリングは、現地または回収後に写真撮影した製品の画像データから、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-3に示すように、皿型側溝の流水部分は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、本調査で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のみを調査対象面として計測し（図-3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、開発品の一部には写真-3に示すような除雪車によると考えられる擦り傷が付いたものや、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) 超音波伝播速度計測

超音波伝播速度計測は、超音波非破壊測定器を用い透過法で行った。計測は、図-4に示すように、回収した製品から採取したコア供試体（φ10cm×7cm）を直径方向に超音波伝播時間を測定、伝播距離はノギスで測定し、伝播距離/伝播時間から伝播速度を求めた。測点は製品の流水面（コア表面とした）から底面（コア裏面とした）に向かい1cmの位置からコア裏面方向に1cm間隔とした。

なお、超音波伝播速度に及ぼす供試体の水分量の影響を排除⁵⁾するため、コア供試体を1週間40°Cにて乾燥した後、超音波伝播速度を計測した。また、コア供試体採取

にあたっては、製品の配筋間隔が10cm以下（7~9cm）であったため、鉄筋位置が可能な限りコア断面の中心から外れ側面付近位置となるようコアを抜いた。

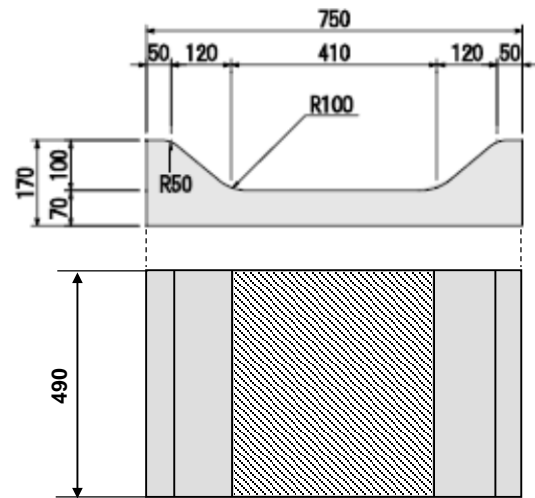


図-3 皿型側溝の概略

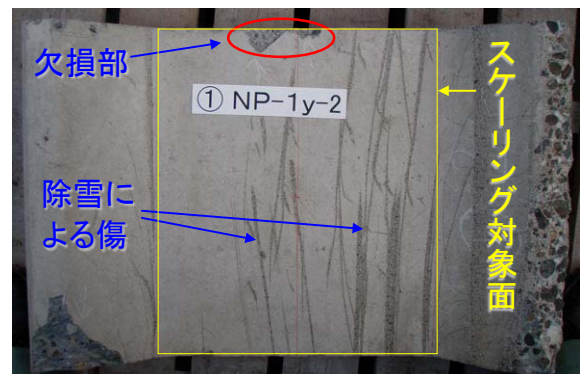


写真-3 開発品の損傷例
(9合目敷設「普通+スラグ」の開発品)

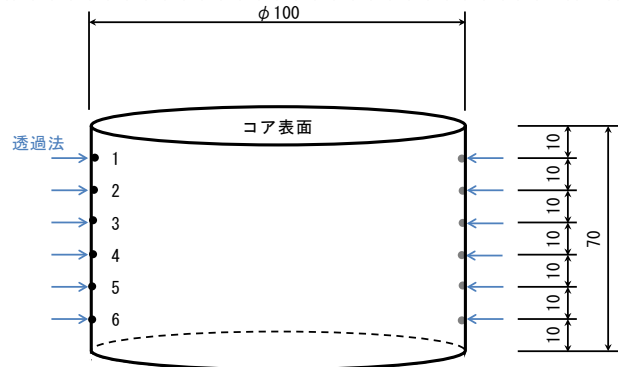


図-4 超音波伝播速度の計測

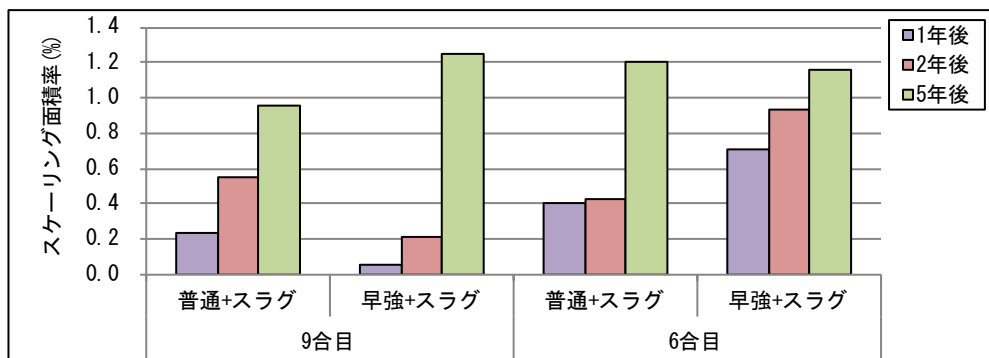


図-5 スケーリング面積率

(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調査を行った。塩分浸透量は、電子線マイクロアナライザー (EPMA) による面分析 (定量分析) により測定した。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、CaO=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 $17.5\text{mass}\% \leq \text{CaO} \leq 52.5\text{mass}\%$ 、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。

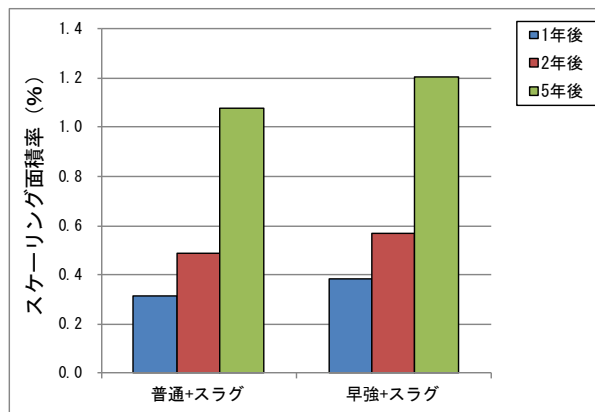
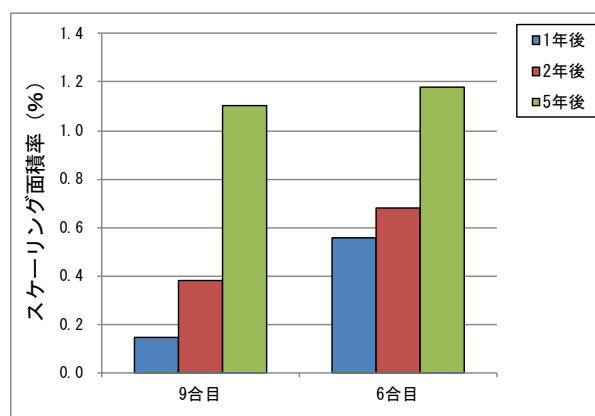


図-6 スケーリング面積率平均値
(筒所別・種類別)

4. 皿型側溝の経年調査結果

(1) スケーリング面積率

図-5に回収した流込み型開発品の5年経過後までのスケーリング面積率の経年変化を示す。箇所毎、種類毎にそれぞれ3個の平均値をスケーリング面積率として経年的に比較した。なお、即脱型は、前述したとおり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、表層のペースト被膜が剥離しても大きな剥離につながらず、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経年的に増加傾向

にあるものの、劣化が大きいものでも面積率は1.3%以下であり、表面上の劣化面積は小さかった。

図-6に箇所別、種類別でみたスケーリング面積率平均値を示す。箇所別で見ると2年後までは6合目に設置した方がスケーリング劣化が大きい傾向がみられたが5年後ではほぼ同程度となっている。種類別で見ると「早強+スラグ」の方が僅かに大きいのが経年劣化はほぼ同程度といえる。

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⁹⁾を示す。いずれの製品も3mm以下の剥離深さだったが、流込み型開発品では一部粗骨材の表面

表-3 ASTM試験におけるスケーリング程度の等級⁹⁾

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

が確認された。これは、流込み型の製造方法に起因するもので、製造時に製品の上面が型枠底面となることから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くなるためであり、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5年経過時点においても表面上の劣化は小さいと言える。

(2) 超音波伝播速度

図-7に超音波伝播速度計測結果を示す。敷設4~5年後の超音波伝播速度は、流込み型が概ね4.1km/s、即脱型が概ね4.3km/sであり、全体としては、箇所別、種類別ともに、表面からの距離ごとの伝播速度分布の変動は小さく、敷設1~2年後と比べても流水面（表面）からの劣化の傾向は無い。他方、6合目の製品1「普通+スラグ」や一般品2（即脱型）は、表面からの距離ごとに伝播速度が低下していた。裏面は製品製造時のコンクリート打設面であり、型枠面となる表面より相対的に品質が低下する部位である。このため、隣接する皿形側溝の目地等の隙間から裏面に水分等が侵入し、裏面から品質が低下した可能性がある。しかし、実際に回収した製品の裏面には、目視では大きな劣化が確認されていないため、現地に残存する製品について、継続的な調査が必要である。

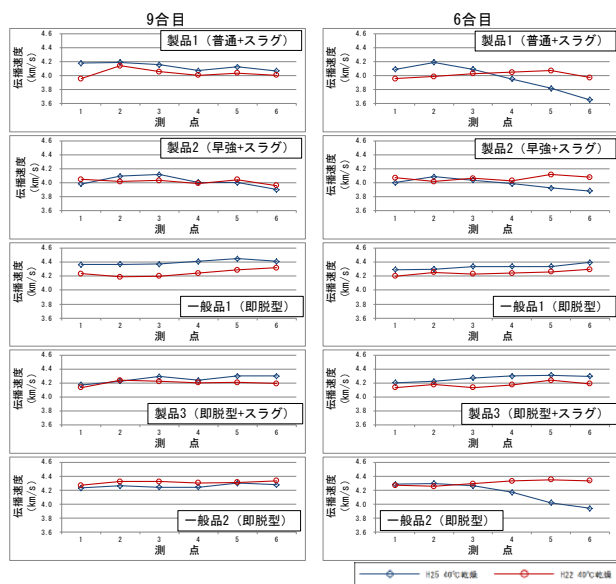


図-7 超音波伝播速度

(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に定量分析に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。

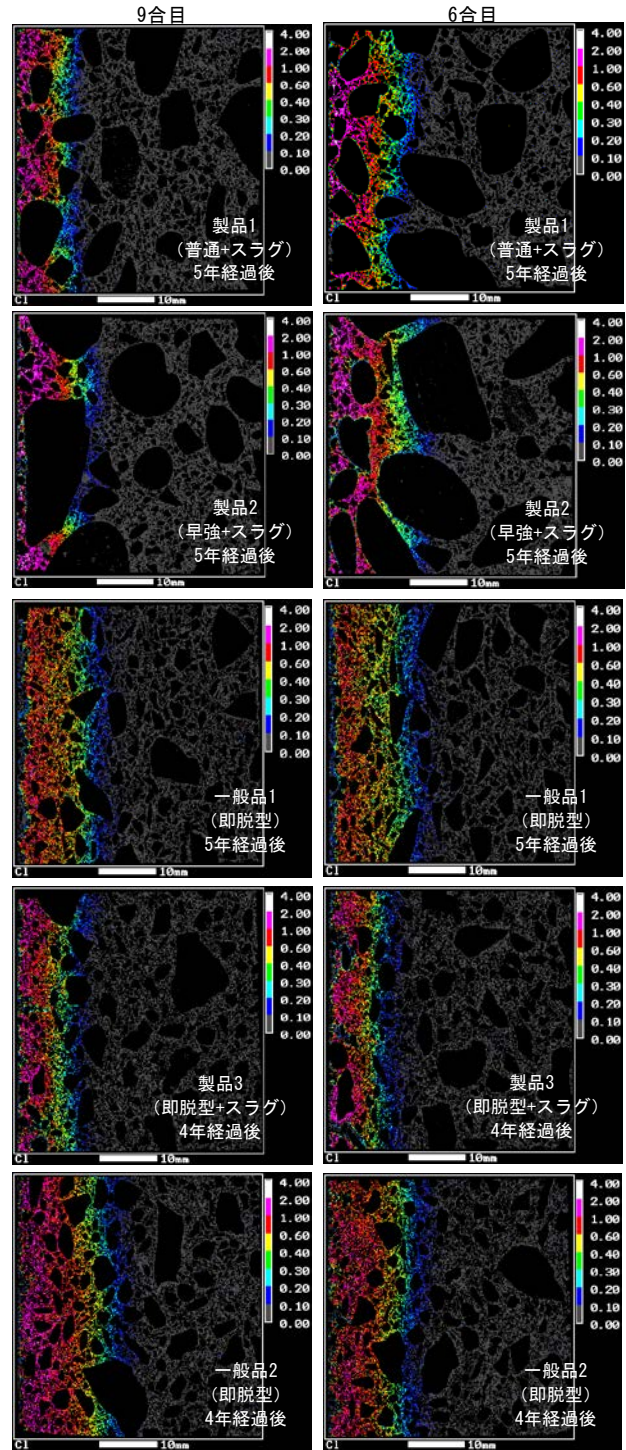


写真-4 塩化物イオンの浸透状況（EPMA面分析定量）

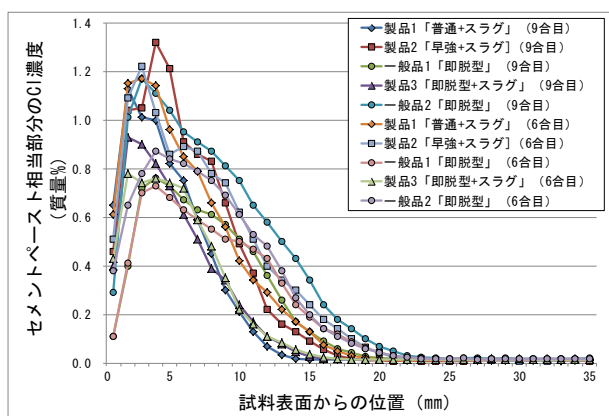


図-8 セメントペーストに相当する部分のCl濃度分布

敷設後5年経過した製品は、既報³⁾の2年経過時点と比べて、いずれも表面付近の塩分濃度および内部への塩分浸透量は増加していた。また、6合目の「早強+スラグ」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2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、6合目に敷設した製品の方が内部への塩分浸透量が若干大きい傾向がみられた。

一方、新たに敷設した即脱型のスラグ製品（製品3）は、塩分濃度、内部への塩分浸透量とも一般の即脱型よりも小さかった。なお、比較した一般品は平成20年度敷設の一般品とは製造工場および配合が異なるため、一般品2と表記している。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くなることが確認できた。

5. まとめ

本報告では、改質セメントコンクリートの実環境下における耐久性の検証を目的として、試験施工した皿型側溝製品の実環境下5年後の物性および耐久性について評価した。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 現場敷設5年経過時においても開発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) 超音波伝播速度は、全体として、流水面からの劣化の傾向は無いことを確認した。しかし、一部の製品では、裏面の超音波伝播速度が低下しており、裏面からの品質の低下が示唆されたことから、現地に残存する製品について、今後も継続的に調査する必要がある。
- (3) 現場敷設5年経過時においてもスラグ製品の方が一般の即脱型よりも塩化イオンの浸透抑制効果が高いことが示された。

以上により、5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。今後も、現地に残存する製品を継続的に調査し、長期的な耐久性等を検証していく予定である。

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-02、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) 吉田行、宮本修司、山本典隆：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、第 54 回（平成 22 年度）北海道開発技術研究発表会、ふ 3(道)、2011. 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（6000 cm^3/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、Vol143、No5、pp. 50-57、2001. 9
- 5) 林田宏、田口史雄、遠藤裕丈、草間祥吾：超音波伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究、寒地土木研究所月報、No. 656、pp. 10-15、2008. 1
- 6) ASTM C672/C672M-98、Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Structures Exposed to Deicing Chemicals