

論文 シラン系含浸材浸透深さの基礎的研究

金平 修祐*1・水谷 真也*2・藤原 健太*3

要旨: 新たに開発した削孔装置を使うことで、モルタル供試体の表面から特定深さの削孔粉末の採取が容易になった。その後削孔粉末を使い炭素分析を行ない、シラン系含浸材塗布したものは全炭素量が増加することを確認した。モルタル供試体で割裂面、切断面、削孔穴により浸透深さを測定し、割裂面は平均値に対し8~12(%)、切断面は8~13(%)であった。削孔穴は17~11(%)であり、他とほぼ同様の結果であった。削孔粉末に含まれる全炭素量に着目した炭素分析は、シラン系含浸材の浸透深さを求める方法として有用と推察した。

キーワード: シラン系含浸材, 浸透深さ, 削孔粉末, 炭素分析装置

1. はじめに

コンクリートに関する企業や学会、公的機関では、従来のスクラップ&ビルドの流れから、既存構造物の補修・補強や長寿命化に向けた対策が行われている。コンクリート橋梁の補修では、表面含浸材（シラン系やケイ酸塩系等）で施工が目立つようになっている。しかしその技術は歴史が浅いため発展途上の段階にある。

今回、その中でも耐塩害性や耐凍害性および防錆性の特徴を持つシラン系を調査対象とし、表面含浸材の浸透深さを算出する方法を検討した。シラン系含浸材は、これまで公開されている論文から、橋梁等においてスケールリング等の凍害抑制や塩化物イオンの浸透抑制に効果があること^{1),2),3)}、その浸透深さは、水セメント比や普通ポルトランドセメントや高炉セメントなどのセメントの種類による違いがあることが報告されている^{4),5)}。その上、運用する機関により浸透深さが異なっており⁶⁾ 研究の余地が多い。シラン系含浸材を塗布したコンクリート供試体に対し、JIS A 1148 の水中凍結融解試験を行なった場合、水圧で圧入された水分凍結時の膨張圧で無処理のものより著しく剥落するとの指摘もある^{7),8)}。農林水産省サイドでは農業用水路の通水断面ではシラン系含浸材の使用は避けるとの方向性が示されている⁹⁾。しかし、基幹的な水路では維持管理のため冬期間も通水する場所もあるが、通常通水はかんがい期間に限定されている。冬期間中大半の水路は、ゲート等で仕切られ通水断面乾燥状態にある。水路内で水の供給が遮断され、室内試験で発生した凍結融解による膨張作用は起こらない可能性がある。

そのため現地水路の暴露試験による通水断面での検証が必要であると思っている。その上、施工管理におい

て浸透深さは定められず、塗布量が塗布面積に対し設計量以上であることが施工基準となっている。シラン系含浸材は、浸透深さが深いものほど中性化抑制効果があり¹⁰⁾、撥水性が期待できると報告¹¹⁾もあることから施工管理上浸透深さは重要な指標である。現場ではコンクリートを研った後に水を噴霧し、撥水層を確認後に、ノギスで測定して浸透深さを確認する方法が取られている。そのためコンクリート水路側面が乾燥状態の場合、水が短時間で蒸発することから、確認作業が困難になる。測定者の目視による測定のため浸透深さに違いが生じる可能性もある。そこで、より深い解析には定量的な数値が必要だと考えた。また、紫外線を受け表面から撥水性が失われるため、劣化予測を行うためには、表面から mm 単位で劣化をとらえる方法が不可欠である。

シラン系含浸材については、その成分は炭素とケイ素で、両者間で炭素の割合が多く、コンクリート中に含浸させた場合に全炭素濃度が高くなることを実験で確認した論文がある¹²⁾。それを参考に全炭素量に着目し、室内試験にてシラン系含浸材を塗布したモルタル供試体と無対策の供試体から削孔粉末を採取することを考えた。しかし正確に一定深さの粉を採取することが困難であり、削孔装置の開発が必要であった。試行錯誤の結果、開発した削孔装置で得られた削孔粉末を炭素分析^{13),14),15),16),17),18)}装置にかけ、浸透深さを求める手法を考え出した。その結果と考察および現状の課題、方向性を述べる。

2. 試験概要

2.1 供試体の全炭素量確認試験

試験で使用する供試体は、コンクリート供試体の場合粗骨材の影響が予想されるため、比較的構造が単純なモ

*1 岩手県土地改良事業団体連合会 博士（食産業学）（正会員）

*2 大同塗料株式会社 技術部（正会員）

*3 大同塗料株式会社 技術部（非会員）

ルタル供試体とした。上辺 65mm, 下辺 60mm 高さ 95mm の大きさで、4 個の供試体を準備した。供試体の配合は、表-1 示すとおりである。型枠に入れたモルタルは 2 層詰めとし、1 層につき 4 回突き固めを実施した。試験実施のため、シラン系含浸材塗布した供試体の準備作業を行った。試験準備として、供試体作製後 28 日間の気中養生し、供試体 4 方向側面にシラン系含浸材を塗布した。製品や標準塗布量による違いを捉えるため、図-1 に示すように 3 個の供試体に対し S1, S2, S3 のシラン系含浸材を塗布した。残り 1 個の供試体は無対策のものである。それは無対策の供試体とシラン系含浸材塗布した供試体と比較し全炭素量の差を算出するのを目的とした。試験で使用したシラン系含浸材は表-2 のとおりである。

図-2 に試験方法を表示する。電動ドリルと炭素分析装置の組合わせで実施した。分析装置は削孔粉末を装置中の燃焼炉で燃焼させ発生したガスに、赤外線放射し吸収された波長を特定後、ガス成分と濃度を測り、光源

表-1 モルタル配合

セメント C(kg)	細骨 材 S(kg)	水 W(kg)	備 考
0.96	2.45	0.48	1バッチ(4 供試体)量. 細骨 材 (岩手県盛岡市黒川産)

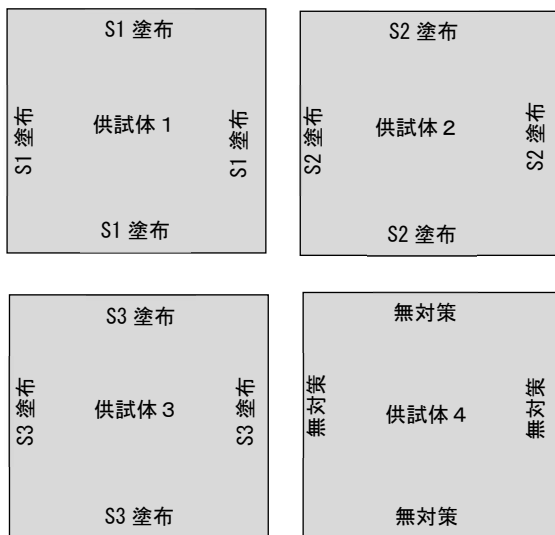
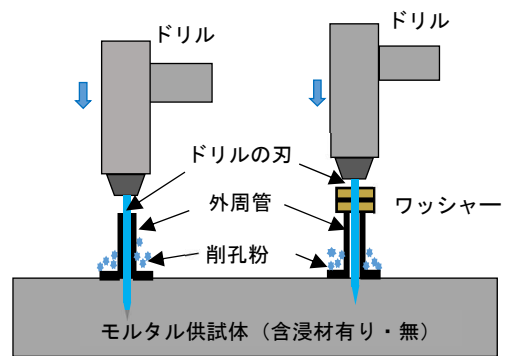


図-1 供試体の塗布位置 (上からの状況)

表-2 シラン系含浸材の特性、塗布量

モルタル供試体名.	S1	S2	S3
塗布量 (g/m ²)	200	350	230
シラン成分量	90%以上	90%以上	80%以上
防錆剤(有 or 無)	無	無	有



炭素分析装置

図-2 試験方法概略図



写真-1 削孔装置

から放射される全波長をそのまま用いる方式のものである。しかし試験にて削孔粉末を採取する場合、供試体からドリル削孔はできても、特定の削孔深さまでの削孔は困難であった。試行錯誤を繰り返し写真-1 に示すドリル削孔器具を用いることで解決した。電動ドリルの刃(φ10mm)の外側には、外周管としてドリルの刃より 8mm 短いステンレスパイプ(内径φ11mm)を配置した。そのためドリルが特定の削孔深さに到達するとストッパーとして働き削孔が停止する。その上ドリルの刃より 8mm 短い外周管に対し、単体あるいは複数の厚さ 2mm および 3mm のワッシャーを挟むことで外周管とドリルの刃の差を mm 単位で設定できるようになり、容易かつ安定した削孔深さ調整を行うことが可能となった。

次に供試体における削孔位置および深さについて説明する。シラン系含浸材を塗布した S1 供試体, S2 供試

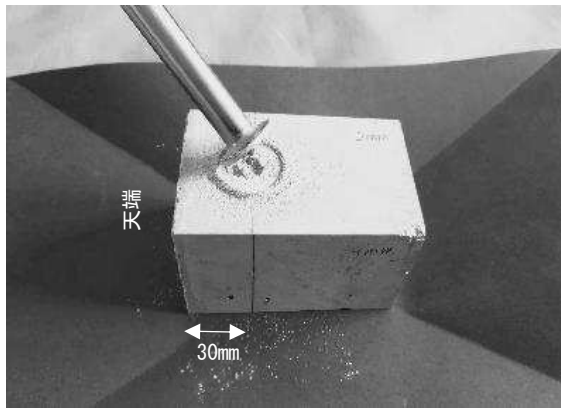


写真-2 供試体削孔状況

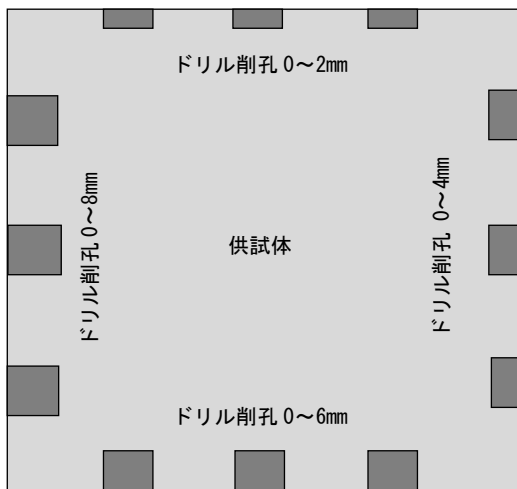


図-3 供試体ドリル削孔位置

体, S3 供試体および無対策供試体の各 4 側面に対しドリル削孔を行った。その削孔位置は写真-2 に示すように供試体天端から 30mm の線上とし, 0~2mm, 0~4mm, 0~6mm, 0~8mm と 4 ケースの粉末を採取した (図-3)。それぞれのケースでは, 削孔粉末には散らばりがあると考え, 3 箇所削孔粉末を混ぜ平準化させたものを試験装置にかけることにした。なお 0~2mm は表面からの削孔深さを表し, 他ケースも同様である。

調査において無対策供試体の削孔粉末は, すべてモルタル由来の全炭素量で無機系炭素量となると考えた。またシラン系含浸材を塗布した供試体の全炭素量は, モルタル由来の無機系炭素とシラン系含浸材由来の有機系炭素となるとした。そのことを踏まえ調査では, 無対策供試体とシラン系含浸材塗布供試体の削孔粉末を採取し, 炭素分析よりの全炭素量を対比させた。それによりシラン系含浸材塗布した供試体は, 有機系炭素量が付加され全炭素が増加すると考え, 浸透深さを算出する方法を考案した。

2.2 供試体の断面による撥水試験

試験において供試体に塗布したシラン系含浸材は, 浸透深さまで撥水性を帯びると考え, 結果の検証

を行うことにした。シラン系含浸材においては, コンクリート標準示方書 [規準編] の含浸深さ試験 (JSCE-K571-2013) により, 上水道水の 1 分間浸漬後に, 水の撥水の深さを 0.1mm 単位で測定することが示されている。その方法に沿いノギスを使って供試体天端から 20mm 付近の切断片を更に垂直方向に割った割裂面の浸透深さを測定した (写真-3, 写真-4)。しかし供試体を構成する細骨材は大きさや質量に散らばりが生じているため, 沈降速度の違いで品質に差が生じる可能性がある。そのため供試体の採取位置による値の散らばりは避けられないと判断した。また散らばり具合をより詳しく確認するため,

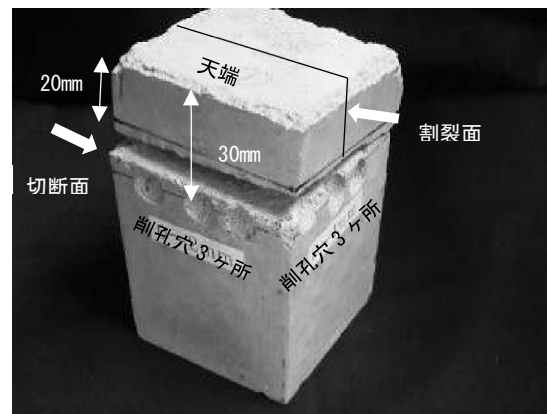


写真-3 供試体の撥水性試験

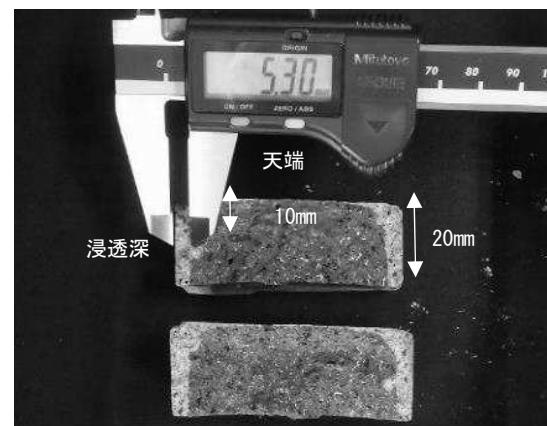


写真-4 割裂面による浸透深さ測定状況

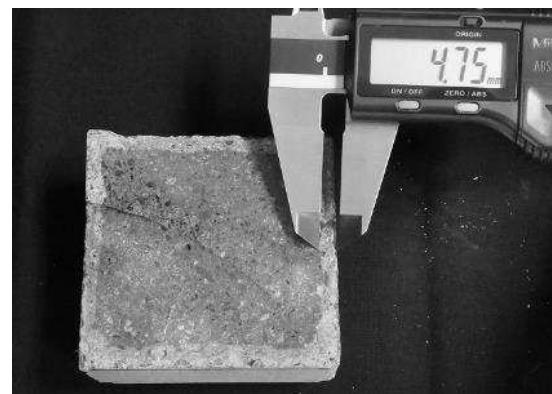


写真-5 切断面による浸透深さ測定状況

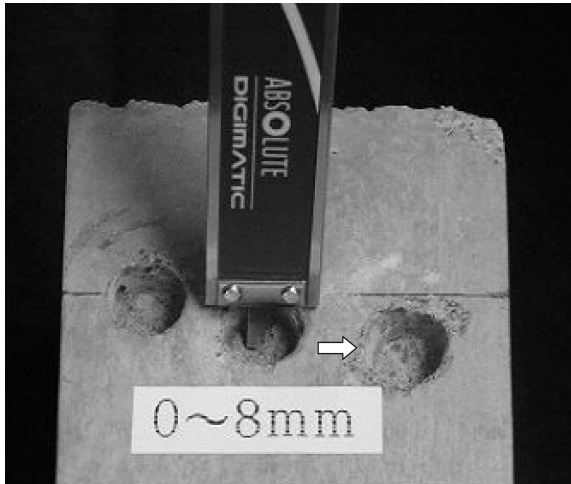


写真-6 削孔穴による浸透深さの測定状況

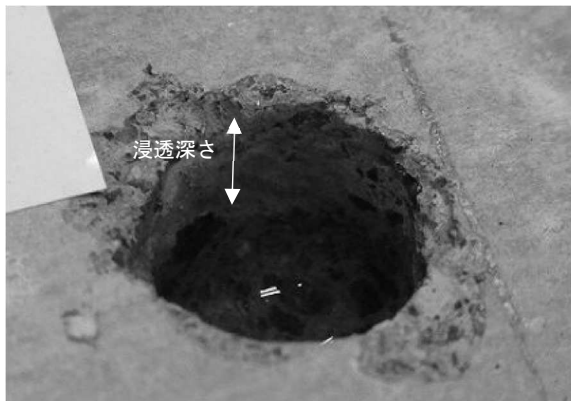


写真-7 削孔穴による浸透深さ測定状況（拡大）

供試体を使用して別角度の位置で測定することを検討した。その結果写真-5に示すように、供試体の天端から20mm 付近の切断した断面も撥水性の有無から浸透深さを求めることとした。

2.3 供試体削孔後の穴による撥水試験

破断面および切断面の浸透深さの結果と比較するため、削孔後の穴によりシラン系含浸材の浸透深さを検討した。削孔後の穴に水を滴らし、シラン系含浸材の浸透深さを求める方法とした。その浸透深さの判断基準として、撥水性が発現せず、部材に水の浸透により黒ずんだ色に変化した部分は含浸材が浸透していない。また撥水性があり、部材への水の浸透が抑制され明るい色のままの部分が浸透していると定めた。削孔後の穴に暫く水を溜めた後、スポイトで吸い取り、供試体の色の变化する境界の距離を測った。なお写真-6はノギスで黒ずんだ色が継続されている境界までの距離を測っている状況を示し、写真-7は削孔穴を拡大したものを示している。

3. 試験結果および考察

3.1 供試体の全炭素量確認試験

削孔装置により0~2mm, 0~4mm, 0~6mm, 0~8mmの特定区間の削孔粉末から炭素分析装置で算出した全炭素量を表-3に示す。その中でBLは無対策の供試体の値を表している。それにより得られた値からグラフ化したものを図-4に表示する。

その結果すべての供試体で全炭素量は0~2mmが最も多く、深いほど低下する傾向が見られた。無対策の全炭素量は、混和剤等を使用していないモルタル配合で、無機系炭素量である。そのため中性化による炭素量増加が考えられた。シラン系含浸材各種の全炭素量は無対策のものよりも増加しており、それは大半がシラン系含浸材由来の有機系炭素量によるものと推察した。

次に、シラン系含浸材の増加分を明らかにするため、S1, S2, S3全炭素量から無対策の全炭素量の差を求めグラフ化したものを図-5に示す。いずれも特定区間の削孔粉末から全炭素量が確認でき、シラン系含浸材の塗布による全炭素量の増加は明らかであった。シラン系含浸材は表層から含浸していく性質がある。そのため上層は全炭素量が多く、下層は濃度が低下すると考えて

表-3 削孔範囲の全炭素量

削孔範囲 mm	全炭素量 (%)			
	BL	S1	S2	S3
0~2	2.10	2.69	2.97	2.72
0~4	1.45	1.93	1.90	1.85
0~6	1.14	1.52	1.69	1.63
0~8	1.00	1.40	1.74	1.50

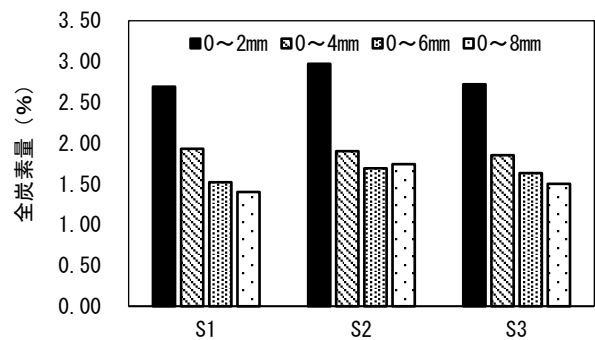


図-4 表面から特定区間の炭素量

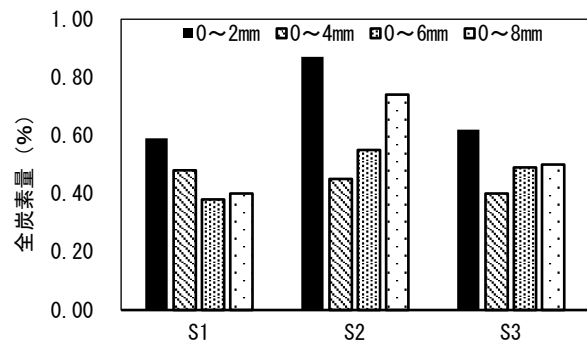


図-5 シラン塗布供試体の全炭素量の増加量

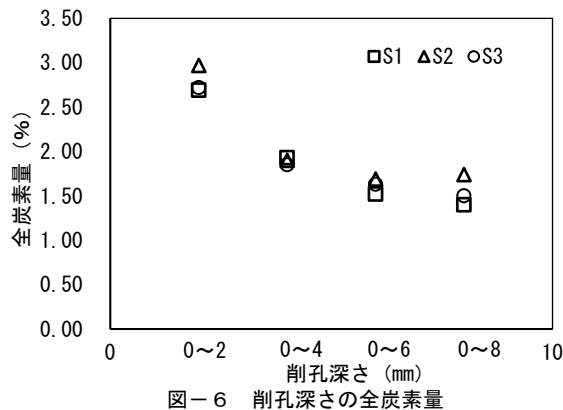


図-6 削孔深さの全炭素量

いたが、0~8mmの全炭素量は多く想定を超える結果となった。原因として、浸透深さが均一でないこと、次に密閉可能なビニル製の袋で削孔粉末を保管したが空気が残り、中性化が進行した可能性、さらに密閉容器に粉末を保管したが空気に晒された環境であったことが考えられた。

また全炭素量と浸透深さを明確にするため、削孔深さと全炭素量の関係を記したものを図-6に示す。削孔深さは、深部ほど全炭素量は減少することが確認できた。それは直線的に減少せず、深部ほど全炭素量の減少が縮小する傾向が見られた。これにより、炭素分析は有用な分析方法となることが見込まれた。しかし浸透深さを全炭素量で定量化するためには、検証が不可欠である。EPMAによる面分析等の追加調査の必要性があると推察した。

その上試験で改良すべき点が明らかになった。実施した試験では、シラン系含浸材を供試体の4側面に塗布後に0~2mm, 0~4mm, 0~6mm, 0~8mmの削孔粉末を採取し、4側面の値から得られた全炭素量を算出している。そのため材料による散らばりが発生することになる。削孔粉末の採取方法などで炭素量分析の精度向上が必要と考えた。

さらに、削孔粉末の採取区間の検討も必要である。本手法では削孔区間は、表面から削孔深さ区間の全炭素量を算出している。しかし、同一の削孔穴で、0~2mm, 2~4mm, 4~6mm, 6~8mmの粉末を採取する方法も考えられる。削孔区間が細分化され浸透深さが明確になると推察した。

3.2 供試体の断面による撥水試験

供試体割裂面および切断面の浸透深さを測定した。その結果を表-4、表-5に示す。両者とも4点の平均値を表し、その範囲をカッコ内に記している。S1およびS2とも割裂面の方が大きく、S3では割裂面と切断面では同一となった。割裂面では平均値に対し-8~12(%)。切断面では平均値に対し-8~13(%)で、ほぼ同様と判断した。なお表には標本数が少ないことから参考として標準偏差を載せている。

表-4 供試体割裂面の浸透深さ

	割裂面(mm)	範囲(mm)	(参考)標準偏差
S1	5.1	4.85~5.30	0.175
S2	7.2	7.01~7.50	0.196
S3	4.8	4.09~5.37	0.476

表-5 供試体切断面の浸透深さ

	切断面(mm)	範囲(mm)	(参考)標準偏差
S1	4.6	4.21~5.20	0.383
S2	6.5	5.61~7.35	0.729
S3	4.8	4.28~5.04	0.310

表-6 供試体削孔穴による浸透深さ

	削孔穴(mm)	範囲(mm)	(参考)標準偏差
S1	4.6	4.30~5.09	0.332
S2	6.9	6.47~7.20	0.315
S3	4.8	4.00~5.54	0.437

3.3 供試体削孔穴による撥水試験

供試体の削孔穴による浸透深さの測定結果を表-6に示す。割裂面と切断面の浸透深さを比較すると、削孔穴による値は切断面のものに近く、削孔穴は供試体天端から30mm離れた線上の値で、切断面は供試体天端から20mm離れた線上の値であった。それに対し割裂面は切断面を分割した断面の中心の値で、供試体天端から10mm離れた線上の値となっていた。削孔穴の浸透深さが切断面の値に近い理由として、割裂面より近距離にあったことが考えられた。しかし試験において削孔穴を用いて浸透深さを測定することに懸念もあった。シラン系含浸材を塗布した供試体に対しグラインダーの刃の熱で撥水性が消失したことを記した論文¹⁹⁾を見つけたためである。そのため浸透深さが特定不能の可能性があったが、削孔粉末から浸透深さを求めることができた。

また施工管理において、北海道内ではコンクリート構造物の凍害や塩害を防ぐ目的でシラン系含浸材が使われている。寒地土木研究所の研究成果から、独自に施工時に使用する製品の浸透深さをW/C=55(%)時のコンクリートで規格値を6mm以上と定めている。使用される製品は規格値をクリアする必要がある。提案した手法は、現地構造物から採取した削孔粉末の炭素分析により、定量的な浸透深さの推定が可能となると考えている。また、浸透深さはドリル削孔(φ10mm)の点情報になるが、ハンディーで移動が容易であり、多数の点情報より平面的な推定が可能となると推察している。

4. まとめ

本研究では、シラン系含浸材の浸透深さを求めるため、モルタル供試体の削孔粉末を用いて炭素分析を実施した。

本研究での成果は以下のとおりである。

- (1) 新たに開発した削孔装置により、供試体表面から特定深さ区間の削孔作業が容易となった。
- (2) 炭素分析装置により、無対策とシラン系含浸材塗布供試体の削孔粉末から全炭素量を求めた。比較によりシラン系含浸材塗布したものは、全炭素量が増加することが確認できた。
- (3) シラン系含浸材塗布供試体を使い、割裂面、切断面、削孔穴により浸透深さを測定した。割裂面では平均値に対し8～12(%)、切断面では8～13(%)で、切削穴は17～11(%)であった。
- (4) 全炭素量による炭素分析は、シラン系含浸材の浸透深さを求める方法として有用と見込まれた。

5. おわりに

浸透深さを求めるにあたり、シラン系含浸材を塗布した供試体単体から有機系炭素量を算出する方法を模索している。炭素分析装置の燃焼炉の温度設定が鍵と考えている。予備試験段階で、炭素分析において有機系炭素量は無機系炭素量燃焼炉温度より低い温度で確認されている。設定温度による有機系炭素量の散らばりがあり精度面で改善が課題と考えている。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、岩手県工業技術センターの小野元氏により炭素分析時に燃焼炉の温度設定などの多大な助言や提案もしてもらった。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 林大介, 坂田昇, 松田芳範, 遠藤裕丈: シラン・シロキサン系表面含浸材の開発, コンクリート工学, Vol.57, No.10, pp777-784, 2019
- 2) 遠藤裕丈: シラン系表面含浸材について—寒冷地での適用の留意点—, ベース設計資料土木編, pp64-68, 2017
- 3) 水谷真也, 仲本善彦, 河西悠介: シラン系表面含浸材の繰り返し塗布によるコンクリートの凍・塩害抑制効果の持続性について, 土木学会第70回年次学術講演会, pp1167-1168, 2015
- 4) 遠藤裕丈, 島多昭典, 林大介, 室野井敏之: シラン系表面含浸材の浸透性の効率的な管理方法に関する基礎的研究, 土木学会第70回年次学術講演会, pp1151-1152, 2017

- 5) 遠藤裕丈, 田口史雄: シラン系表面含浸材の含浸性状とコンクリートの品質との関係, 土木学会北海道支部論文集, Vol.63, F-2, 2006
- 6) 遠藤裕丈: コンクリート構造物における表面被覆材の適用手法, 土研 新技術ショーケース 2020 in 福岡, pp1-22, 2020
- 7) 住学: コンクリート表面含浸材(シラン系)に関する現状調査, 鴻池組技術研究報告, pp41-46, 2015
- 8) 遠藤裕丈, 田口史雄, 宮本修司, 村中智幸, 後藤浩之, 林大介, 坂田昇, 名和豊春: シラン系表面含浸材による寒地コンクリート構造物の耐久性向上効果, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.1, pp69-88, 2011
- 9) 農業土木事業協会: 表面含浸工法の現状と課題, JAGE E, Vol.95, pp43-45, 2018
- 10) 安部弘康: シラン系コンクリート表面含浸材の性能比較課題, 安藤ハザマ研究年報, Vol.2, pp1-6, 2014
- 11) 佐々木崇人, 松田芳範: 長期暴露試験による含浸材の耐久性評価, コンクリート工学, Vol.54, No.9, pp942-947, 2016
- 12) 田中博一, 滝本和志, 栗田守朗: 表面含浸材によるコンクリートの透水抑制効果に関する研究, 清水建設研究報告, pp1-8, 2007
- 13) 鞍掛幸広, 肥後裕一: 加熱制御を用いた高周波炉燃焼—赤外線吸収法による鋼中微量炭素の定量, 日新製鋼技報, Vol.83, pp8-12, 2002
- 14) 伊藤匡正: 形態別炭素の分別定量法, SCASNEWS 2002-II, pp18-20, 2002
- 15) 駒谷慎太郎: 固体中炭素・硫黄分析装置 EMIA-V シリーズ, HORIBA TECHNICAL REPORTS, pp49-53, 2000
- 16) 伴弘一: 燃焼-赤外線吸収法による炭素・硫黄の微量分析, まてりあ, Vol.33 (4), pp391-393, 1994
- 17) 嶋貫孝, 稲本勇: フェロシリコン中の炭素及び硫黄定量方法の検討, 分析化学, Vol.37, ppT148-T151, 1988
- 18) 井上貴仁, 平野彰弘: 新型炭素・硫黄分析装置 EMIA-ProExpert の開発, JETI=ジェティ Japan energy & technology intelligence エネルギー・化学・プラントの総合技術誌, pp1-17, 2020
- 19) 安中新太郎, 菊田悦二, 遠藤裕丈: 非破壊によるシラン系表面含浸材の浸透深さ管理方法の確立, 寒地土木研究所, pp1-17, 2020