

表面含浸材による 開削トンネルコンクリートの予防保全

Preventive maintenance for open-cut tunnel concrete by the surface impregnation method

木村定雄¹・乾川尚隆²・宇野洋志城³

Sadao Kimura and Naotaka Inuikawa and Yoshiki Uno

¹ 正会員 金沢工業大学 環境土木工学科 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

E-mail: s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

² 学生会員 金沢工業大学大学院 環境土木工学専攻 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

³ 正会員 佐藤工業 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10)

E-mail: uno@satokogyo.co.jp

A surface impregnation method is used as one of the prevention maintenance. A main ingredient of surface impregnation materials with an experimental is silicate and silane. An experimental to evaluate their performance applying to tunnel lining concrete was performed. As a result of experimental, silicate of a small particle size restrain water absorption and carbonation and a chloride ions.

Key Words : preventive maintenance, surface impregnation material, open-cut tunnel, tunnel lining

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の公共構造物は一般に耐用年数が50年に設定されている¹⁾。一方、地下構造物は一度構築するとそれを再構築することが困難である特徴を有するため、種々の観点から耐用年数を長く設定する必要があると考えられる²⁾。このため、地下構造物は地上構造物に比べて予防保全などの延命化技術が重要な課題となる。また、予防保全は構造物の延命化のみならず、同時期に建設された構造物の老朽化の進行速度を変え、補修や補強の時期の平準化を図る技術としても有効である。

予防保全の方法の一つとして表面保護工法がある。表面保護工法は表面被覆工法、表面含浸工法および断面修復工法に大別される。最近では、表面保護工法の中でも安価で施工が容易に行える表面含浸工法

が注目されている。

そこで、著者らは主に地下構造物を念頭におき、表面含浸工法の有効性を検討してきている^{3),4),5)}。一般に、開削トンネルに用いられる躯体コンクリートの水セメント比は55%である。したがって、良好な材料が選定され、適切な施工がなされれば、その性能も長期にわたって確保されるものと考えられる。しかしながら、施工時の環境条件や施工条件等による打継目部の不具合やコールドジョイントの発生、あるいは供用時の地盤条件やトンネル内の使用環境によるコンクリートの早期劣化が報告されている^{6),7)}。

本文は開削トンネルを主な対象として、その予防保全に用いる表面含浸材の施工性および表面保護効果を確認することを目的として実施した試験に基づき、表面含浸材の有効性について述べたものである。

2. 表面含浸材の試験概要

2.1 表面含浸材の特徴

コンクリートの表面含浸材は、コンクリート表層部に含浸し、表層部を改質することで、炭酸ガスや塩化物イオンなどの劣化因子の侵入を抑制するとともに、防水性やはっ水性などを付与する材料である。

本研究では一般的に用いられている表面含浸材の特性を把握するため、けい酸塩系①、けい酸塩・シラン系、超微粒子けい酸塩系、けい酸塩系①+けい酸塩系②およびその他+シラン系の5種類の表面含浸材を試験の対象とした。表1に表面含浸材の主成分と設計塗布量を示す。

2.2 試験体の作製方法および各種試験の概要

表面含浸材の施工性および表面保護効果に関する各種の性能を確認するための試験はJSCE-K571-2004(以下、試験方法(案)と呼ぶ)⁸⁾に準拠した。

使用材料の物性およびモルタルの配合を表2および表3に示す。試験体の水セメント比(W/C)は試験方法(案)で基準としている50%、躯体コンクリートの配合で多用される55%および過去の地下構造物に適用された可能性があるもののうち、最もW/Cの大きい65%の3種類とした。なお、砂セメント比は3とした。

表面含浸材の塗布方法には、吹付け、刷毛やローラーによる方法などがある。本試験では各種の表面含浸材の性能を比較する上で、塗布方法や設計塗布量のばらつきを少なくするために、刷毛を用いて塗布した。表4、表5および写真1に表面含浸材の塗布工程および塗布状況を示す。塗布工程は実作業の工程を参考にして定めたものであり、塗布量は1回あたり100g/m²(1工程で2回塗布、または4回塗布)とした。表面含浸材の塗布時の環境条件となる気温や湿度を一定にするのが望ましいが、本試験では実際の施工環境を想定して室内の自然環境(室温：14～19℃、相対湿度：44～54%)とし、塗布時の試験体表面の水分率を測定することで作業環境を評価した。

表1 表面含浸材の主成分と設計塗布量

記号	表面含浸材の種類	主成分	設計塗布量(g/m ²)
I	けい酸塩系①	リチウムシリケート、けい酸ナトリウム、水	400
II	けい酸塩・シラン系	リチウムシリケート、メチルトリメトキシシラン、けい酸ナトリウム、水	400
III	超微粒子けい酸塩系	コロイド状けい酸ナトリウム溶液	400
IV	けい酸塩系①	リチウムシリケート、けい酸ナトリウム、水	200
	けい酸塩系②	TMAH、けい酸化合物、水	200
V	その他	TMAH、ブチルセロソルブ、IPA(イソプロピルアルコール)、エトキシシランオリゴマー、オルガノシラン、ブチルセロソルブ	400
	シラン系		100

表2 使用材料および物性値

セメント	普通ポルトランドセメント	密度	3.16g/cm ³
		表乾密度	2.57g/cm ³
		乾燥密度	2.51g/cm ³
		吸水率	2.50%
細骨材	石川県手取川産川砂	粗粒率	2.85

表3 試験体の示方配合

水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C	単位量(kg/m ³)		
		W	C	S
50	3	252	504	1512
55		276	502	1507
65		305	469	1406

表4 塗布工程(Ⅰ～Ⅳの場合)

1工程 (1日目)	塗布	■ 1分で100g/m ² 使用
	含浸1	■ 光沢が消えるまで静置
	塗布	■ 1分で100g/m ² 使用
	含浸2	■ 光沢が消えるまで静置
2工程 (2日目)	気中養生	■ 24時間気中養生
	塗布	■ 1分で100g/m ² 使用
	含浸3	■ 光沢が消えるまで静置
	塗布	■ 1分で100g/m ² 使用
	含浸4	■ 光沢が消えるまで静置
	気中養生	■ 24時間気中養生

表5 塗布工程(Vの場合)

1工程 (1日目)	塗布	■ 1分で100g/m ² 使用
	含浸1	■ 光沢が消えるまで静置
	塗布	■ 1分で100g/m ² 使用
	含浸2	■ 光沢が消えるまで静置
	気中養生	■ 3時間気中養生
	塗布	■ 1分で100g/m ² 使用
	含浸3	■ 光沢が消えるまで静置
	塗布	■ 1分で100g/m ² 使用
2工程 (2日目)	含浸4	■ 光沢が消えるまで静置
	気中養生	■ 24時間気中養生
	塗布	■ 1分で100g/m ² 使用
	含浸5	■ 光沢が消えるまで静置
	気中養生	■ 24時間気中養生



写真1 塗布状況

表 6 試験の確認項目および目的

試験名	確認項目	目的
施工性確認試験	表面水分率	塗布前のコンクリート表面の水分量の把握
	含浸深さ	各材料の浸透性の把握
	含浸時間	各材料の浸透時間の把握
性能評価試験	透水量 (透水抑制率)	外部からの水分に対する防水性の把握
	吸水量 (吸水抑制率)	
	中性化深さ (中性化抑制率)	中性化(CO ₂ 濃度:5%)に対する抵抗性の把握
	塩化物イオン浸透深さ (塩化物イオン浸透抑制率)	塩分浸透(塩分濃度3%)に対する抵抗性の把握

表面含浸材の試験は、施工性を確認するための試験と表面含浸材の性能を評価するための試験に大別して実施した。表 6 はそれらの試験で確認する項目と目的とを示したものである。

3. 施工性確認試験および性能評価試験の結果

3.1 施工性確認試験の結果

(1) 表面水分率

試験体表面の水分率は表面含浸材の塗布性状に影響を与える。そこでまず、6 日間の水中養生終了後の気中養生中(室温:20±3℃, 相対湿度:60±5%)に、試験体の表面水分率の変化を測定し、水分の逸散の基本性状を確認した。図 1 はその結果である。この結果から気中養生を開始してから約 14 日目で表面水分率がほぼ一定となり、その値は約 6.0~7.0%である。一方、試験体に各種の表面含浸材を塗布する直前(28 日目)の平均表面水分率を図 2 に示す。図中の平均値は 54 点(18 体×各 3 点)の測定値を平均したものである。試験体の平均表面水分率は 5.0~7.0%の範囲となっており、塗布工程の違い、W/C の大きさの差異および 2 工程目の表面含浸材の種類の違いによる影響は小さい。図中の破線は表面水分率のばらつきの範囲を示したものである。これを見ると 1 工程目(1 回目の塗布直前)で 3.6~6.8%, 2 工程目(3 回目の塗布直前)で 3.5~7.1%であり、工程の違いによる差は小さい。

(2) 含浸深さ

表面含浸材の浸透性を確認するために含浸深さを

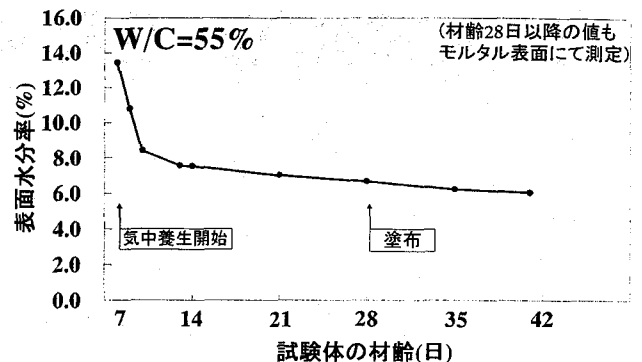


図 1 モルタルの表面水分率の変化

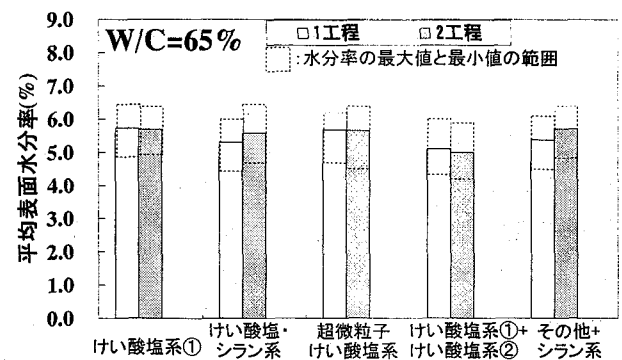
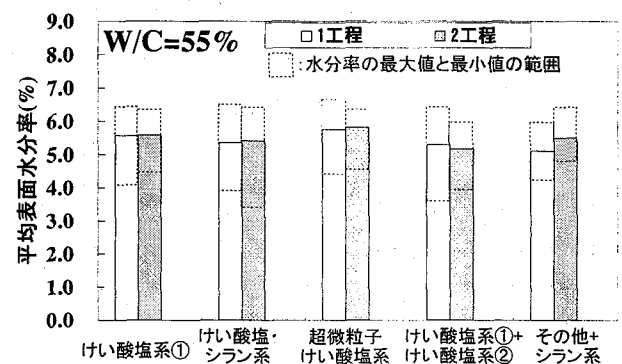
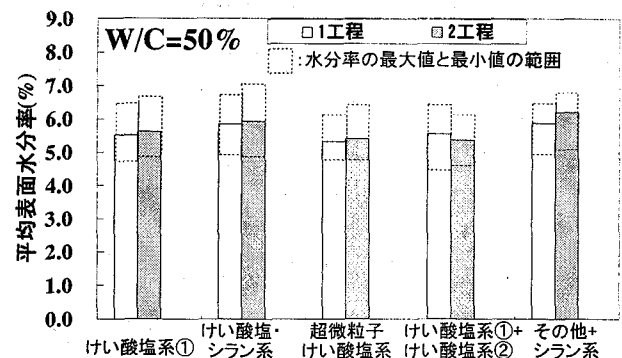


図 2 塗布前の表面水分率

測定した。シリラン系以外の含浸材は水溶性の無色透明であることから、すべての含浸材にフルオレセインナトリウムを質量比で 0.5% 混入し、試験体が着色した部分を統一して含浸深さとした。写真 2 は含浸状況を示したものである。写真 2 中の白線は含浸深

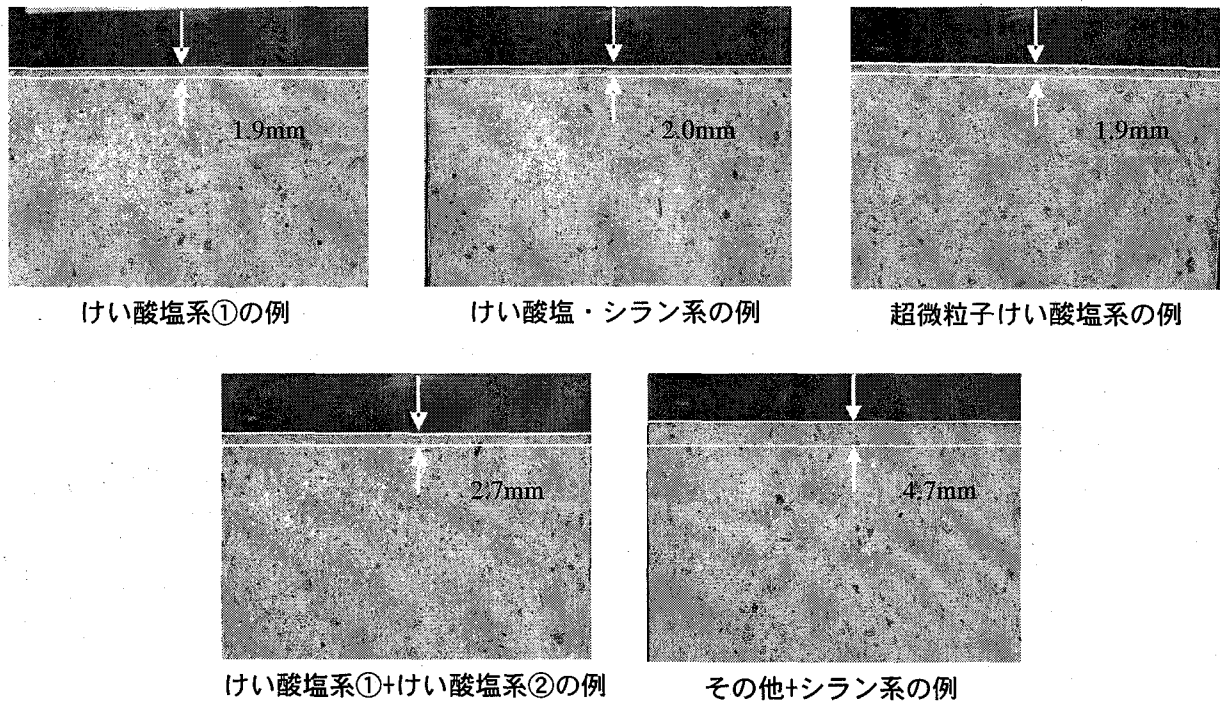


写真2 表面含浸材の含浸状況

さを示しており、すべての含浸材が試験体中にほぼ均一に浸透していることがわかる。図3は含浸深さを示したものである。その他+シラン系の含浸材が最も大きく3.0~4.0mmであり、それ以外の含浸材は1.0~3.0mmである。これはその他+シラン系含浸材の設計塗布量が他の含浸材のそれに比べて多いことが影響していると考えられる。一方、すべての含浸材でW/Cが大きくなると含浸深さが大きくなる傾向が認められる。これはW/Cが大きくなるとモルタル中の細孔が多くなるためと考えられる。

(3) 含浸時間

表面含浸材の施工速度を決定する要因として含浸時間を測定した。含浸時間は表面含浸材を塗布してから目視により試験体の表面から光沢が消えるまでの時間とした。図4はその結果である。すべての含浸材において、平均含浸時間は含浸深さに関係なく、含浸工程の影響を受ける。すなわち、1工程中の1回目より2回目の方が、2工程中の3回目より4回目の方が含浸時間が大きくなる。これは含浸材が表層部の細孔に浸透して細孔を充てんすることで、表層の組織を緻密化するためと考えられる。また、すべての含浸材においてW/Cが大きくなると、ある程度

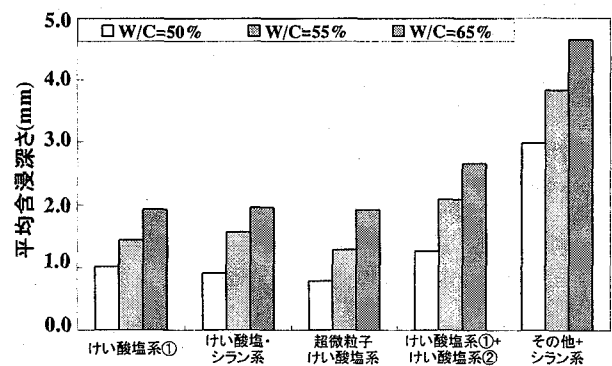


図3 含浸深さ

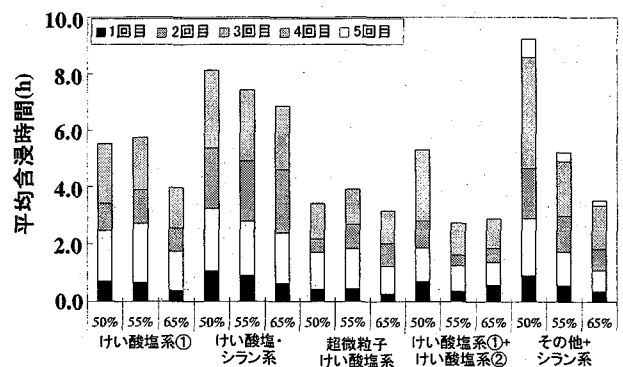


図4 含浸時間

のばらつきはあるものの、含浸時間は短くなる傾向がある。一方、シラン系の含浸材は細孔充てんとともに、表層には水効果も付与するため、一度塗布すると、それ以降の重ね塗りの際には、含浸時間が増大する結果となっている。

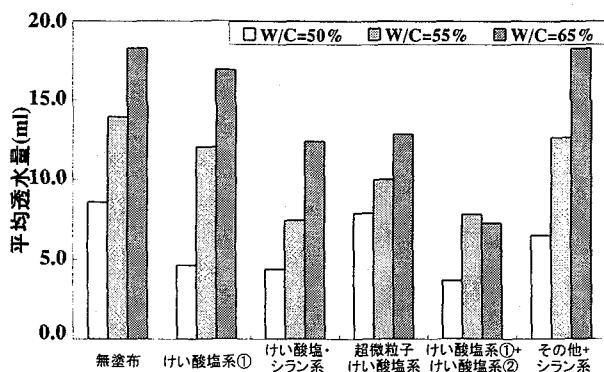


図5 透水量

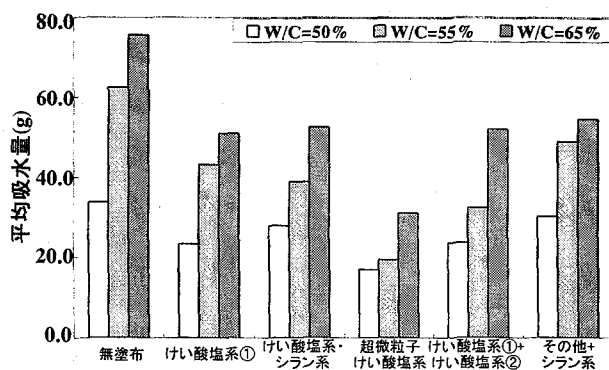


図6 吸水量

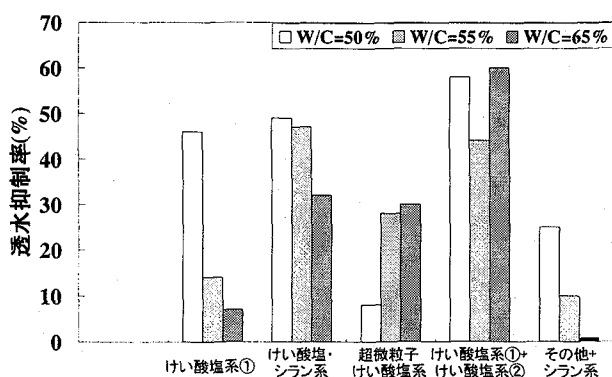


図7 透水抑制率

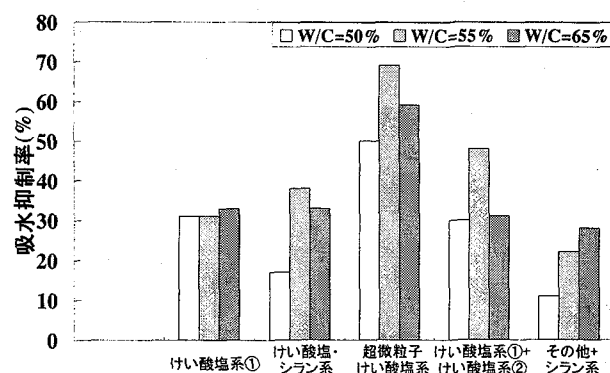


図8 吸水抑制率

他方、超微粒子けい酸塩系は含浸時間が他の含浸材に比べて短くなっている。これは他の含浸材の粒径が $5\mu\text{m}$ であるのに対して、超微粒子けい酸塩系の粒径は 7nm と小さいためと考えられる。

3.2 性能評価試験の結果

(1) 透水量および吸水量

表面含浸材の防水性を確認するために、透水量および吸水量を測定する試験を行った。透水量および吸水量の試験結果を図5および図6に示す。図中の平均値は1ケースあたり3体の測定値を平均したものである。すべての含浸材においてW/Cが大きくなると透水量および吸水量が大きくなる傾向がある。一方、表面含浸材の防水性を評価するために透水抑制率(無塗布の透水量-塗布後の透水量/無塗布の透水量)および吸水抑制率(無塗布の吸水量-塗布後の吸水量/無塗布の吸水量)を求めた。図7および図8は、それらの結果である。表面含浸材の種類に応じて透水抑制率および吸水抑制率が異なっている。透水抑制率をみると、けい酸塩系①+けい酸塩系②が最も

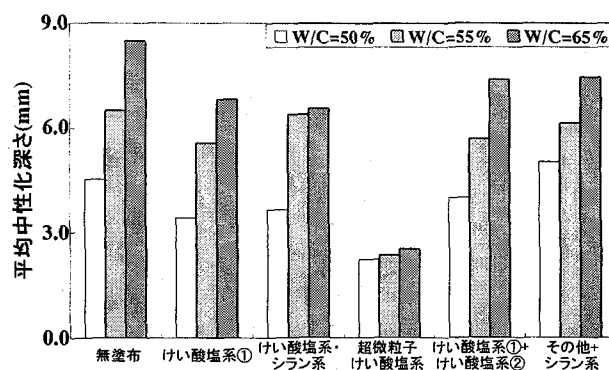


図9 中性化深さ

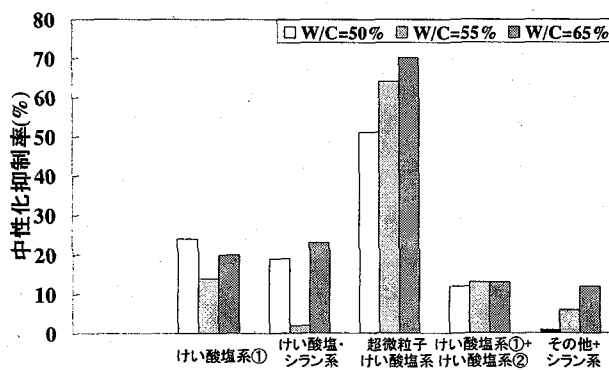


図10 中性化抑制率

抑制率が大きく、吸水抑制率をみると、超微粒子けい酸塩系が最も抑制率が大きくなっている。

また、図3に示した含浸深さの結果とあわせ考えると、透水性や吸水性に対して含浸深さが直接的に関係しないことがわかる。

(2) 中性化深さ

中性化試験は、CO₂が5±0.2%、温度が20±2℃、相対湿度が60±5%および促進材齢28日間として行った。図9は1ケースあたり18点(6点×3体)の測定値を平均した中性化深さである。すべての含浸材においてW/Cが大きくなると中性化深さが大きくなる傾向がある。表面含浸材の中性化に対する抵抗性を評価するために、中性化抑制率(無塗布の中性化深さ-塗布後の中性化深さ/無塗布の中性化深さ)を求めた。図10はその結果である。とくに超微粒子けい酸塩系が約50～70%の中性化抑制効果が確かめられた。これは、超微粒子けい酸塩系は主成分の粒径が他の含浸材に比べて小さいため、表層部が緻密化し、気相の侵入を抑制したためと考えられる。

(3) 塩化物イオン浸透深さ

塩化物イオン浸透試験は、塩分濃度が3±0.3%で促進材齢が63日間として行った。図11は1ケースあたり18点(6点×3体)の測定値を平均した塩化物イオン浸透深さである。すべての含浸材においてW/Cが大きくなると塩化物イオン浸透深さが大きくなる傾向がある。表面含浸材の塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価するために、塩化物イオン浸透抑制率(無塗布の塩化物イオン浸透深さ-塗布後の塩化物イオン浸透深さ/無塗布の塩化物イオン浸透深さ)を求めた。図12はその結果である。これを見ると、超微粒子けい酸塩系の塩化物イオン浸透抑制率がとくに大きい。これは中性化抑制率と同様に超微粒子けい酸塩系の含浸効果により液相の侵入を抑制したためと考えられる。一方、前述の超微粒子けい酸塩系の透水抑制率をみると、高い抑制率を示していない。これは試験を実施した材齢が21日目と若いため、けい酸の硬化が未成熟であったこと等の影響が考えられる。

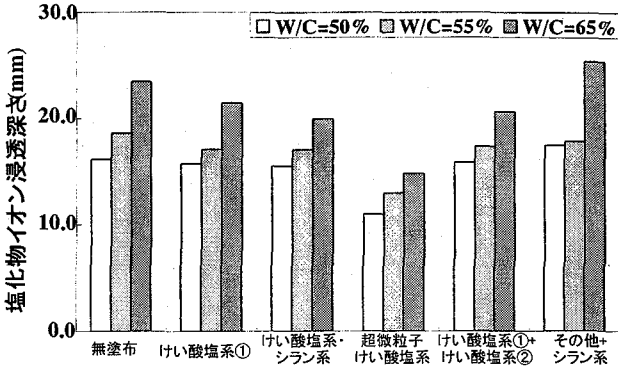


図11 塩化物イオン浸透深さ

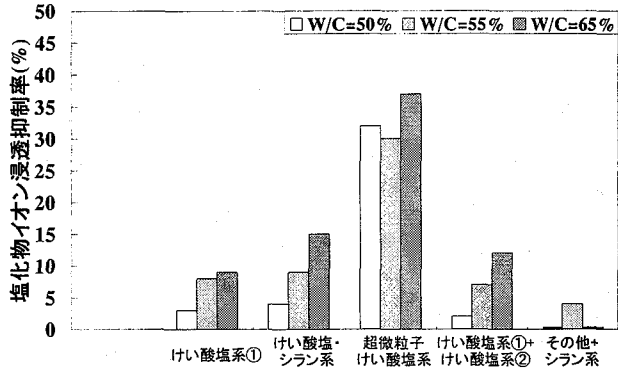


図12 塩化物イオン浸透抑制率

表7 評価項目とその評価基準

評価項目	評価基準		
	A	B	C
透水抑制率	80%以上	80～60%	60%以下
吸水抑制率	80%以上	80～60%	60%以下
中性化抑制率	30%以上	30～10%	10%以下
塩化物イオン浸透抑制率	80%以上	80～60%	60%以下

表8 各種含浸材の一般的な性能

評価項目	シラン系	けい酸塩系	
		けい酸リチウム系	けい酸ナトリウム系
透水抑制率	A	C	C
吸水抑制率	A	C	C
中性化抑制率	C	B	B
塩化物イオン浸透抑制率	A	C	C

表9 表面含浸材の性能評価

評価項目	けい酸塩系①			けい酸塩系・シラン系			超微粒子けい酸塩系			けい酸塩系①+けい酸塩系②			その他・シラン系		
	W/C			W/C			W/C			W/C			W/C		
	50	55	65	50	55	65	50	55	65	50	55	65	50	55	65
透水抑制率	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C
吸水抑制率	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C
中性化抑制率	B	B	B	B	C	B	A	A	A	B	B	B	C	C	B
塩化物イオン浸透抑制率	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C

(4) 表面含浸材の性能評価

表面含浸材の一般的な性能は試験方法(案)に示されている。表7は評価項目とその評価基準を示したものである。表8は各種含浸材の一般的な性能を示したものである。本研究で実施した表面含浸材の試験結果を表7の評価基準によって評価した。表9はその結果を示したものである。これをみると、けい酸塩系の含浸材は一般的なけい酸塩系の性能と同程度である。一方、本研究で用いたシラン系の含浸材は、けい酸塩系と複合したものであるが、一般的な性能よりも劣っている。これは含浸材を複合することで総合的な効果が得られない可能性があるとともに、設計塗布量の違いや塗布方法の違いなどの影響によるものと推察される。

4. まとめ

開削トンネルの躯体コンクリートを主な対象とした予防保全の一つである表面含浸材の特性を試験により把握した。試験から得られた主な知見を示すと以下のとおりである。

(1) 施工性に関する知見

- ① 含浸深さは表面含浸材の種類、設計塗布量およびW/Cの大きさによる影響が大きい。
- ② 含浸時間は表面含浸材の種類やW/Cの大きさによる影響が大きい。とくに、シラン系は細孔充填とともに、表層には水効果を付与するため、一度塗布すると重ね塗りする際に含浸時間が増大する。

(2) 性能に関する知見

- ① 含浸後の透水性や吸水性は含浸深さに直接的に関係しない。
- ② 超微粒子けい酸塩系の含浸材は吸水抑制率、中性化抑制率および塩化物イオン浸透抑制率が大きい。

本研究により表面含浸材の基本的な性能が評価できたと考える。今後は、この試験結果が予防保全対策として実施する際の効果の定量化、すなわち延命年数などを定量的に評価する手法を検討する予定で

ある。

参考文献

- 1)減価償却資産の耐用年数等に関する省令、財務省令、第57号、2005.5.
- 2)安田享：トンネルの維持補修，建設マネジメント勉強会，「建設マネジメントを考える」，サマースクール2001，2001.7
- 3)玉井攻太，宇野洋志城，木村定雄：けい酸質系およびシラン系表面含浸材の基本性能の確認実験，土木学会中部支部研究発表会，pp.537-538，2006.3.
- 4)乾川尚隆，宇野洋志城，木村定雄：けい酸質系およびシラン系表面改質材の塗布環境と施工性に關する検討，土木学会中部支部研究発表会，pp. 553-554，2006.3.
- 5)宇野洋志城，玉井攻太，木村定雄：コンクリート表面含浸材の基本性能の評価，土木学会第61回年次学術講演会，V-002，2006.9.
- 6)例えば，松下博通，手塚誠，豊田昭夫：海水の浸食による鉄筋の腐食(関門トンネル車道床版の調査)，コンクリート工学年次論文集，Vol.2，pp.17-20，1980.
- 7)例えば，JTA 保守管理員会：トンネルの保守・維持管理(5)東京における地下鉄トンネルの場合，トンネルと地下，Vol.25，No.5，pp.73-78，1994.5.
- 8)土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー119，2005.4.