

論文 無機質セメント結晶増殖材による打継目の水密性の向上に関する基礎的検討

三留 啓奨^{*1}・細田 暁^{*2}・大西 聡^{*3}・木村 哲^{*4}

要旨：水平打継目の打継面処理方法や、セメント結晶増殖材の打継面への塗布が打継目の物質移動抵抗性に及ぼす影響を解明するために大型供試体を作製し、供試体表面と切断面において表面吸水試験により吸水抵抗性を評価した。供試体の切断面においてはセメント結晶増殖材による吸水抵抗性の向上が見られた。また、結晶増殖材が打継目の水密性に与える影響を解明するために、打継目に対する水圧作用下での水密性試験を実施し、液体タイプのセメント結晶増殖材により水密性が向上する結果が得られた。

キーワード：打継目、無機質セメント結晶増殖材、界面処理、表面吸水試験、水密性

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

コンクリート構造物における打継目や、補修する際の母材コンクリートと補修材の界面等が、物質移動抵抗性が低いために弱点となりやすいことが指摘されている。これらの界面における物質移動抵抗性が著しく低いと、環境作用の激しい条件では内部の鋼材腐食につながる懸念があり、補修材の浮きやはく離につながる事も多い。また、水圧を受ける地下構造物等においては、界面からの漏水が発生する場合がある。

コンクリート構造物中の界面が弱点とならないようにするため、無機質セメント結晶増殖材を界面に直接塗布することで界面の物質移動抵抗性を向上させる試みがあるが、その効果については定量的な検討が充分になされていない状況にある。なお、本研究で使用する無機質セメント結晶増殖材は、コンクリート空隙内で未水和セメントと間隙水との反応を促進する触媒の作用をして、結晶を増殖させることでコンクリートを緻密にする、とされるものである。

本研究では、界面の処理方法やセメント結晶増殖材の塗布がコンクリート打継目の吸水抵抗性に及ぼす影響を表面吸水試験によって検討する実験を行う。また、高い水圧が作用する条件で、セメント結晶増殖材の塗布の有無が打継目の水密性に及ぼす影響を検討する実験も行う。

1.2 無機質セメント結晶増殖材

本実験で用いたセメント結晶増殖材は主に二種類あり、CaO、MgO、SiO₂、Na₂O、K₂O等のセメント成分とシリカサンドに触媒性化合物を添加した粉体タイプのものと、上記からシリカサンドを除いて溶媒に溶かした

液体タイプのものがある。このようなセメント結晶増殖材を塗布することで、コンクリート空隙内で未水和セメントと間隙水との反応を促進する触媒の作用により、結晶を増殖させてコンクリートを緻密にするとされる。今回の実験においては、液体、粉体の2つのタイプを用いて実験を行った。

2. 表面吸水試験による吸水抵抗性の評価実験

2.1 実験概要

この実験では実構造物の打継目を模擬するために、比較的大型の50×60×180cmの打継目を有する供試体を屋外において作製し、打継面を凹凸にする箇所のみ液体タイプの遅延剤を散布し、12時間後に高压洗浄機によってレイタンスを除去した。凹凸にしない箇所には遅延剤を散布しなかった。材齢4日に打継面にセメント結晶増殖材の塗布を行った。なお、セメント結晶増殖材を塗布した後は気乾養生とした。一層目打込みの7日後に二層目を打ちこみ、材齢が経過してから供試体の表面から表面吸水試験を実施した。また、材齢が約1年となった段階で供試体を切断し、切断面に対しても表面吸水試験を実施した。

2.2 供試体の作製方法と切断方法

打継目を有する50×60×180cmの供試体を二つ作製した。どちらの供試体もまず一層目の高さ30cmを打ち込んだ。打継面に対して、図-1に示すようにレイタンス除去をして骨材の露出を行う方法で処理する箇所と、遅延剤等の処理を何も実施しない箇所を設けた。レイタンス除去による打継ぎ処理を行う箇所は図-2、3に示す「凹凸」の箇所にもみ30cmおきに設け、遅延剤を散布した12時間後に高压洗浄機を用いてレイタンス除去を

*1 (株)安藤・間 関東支店 原電東海出張所 工事2課 修士(工学)(正会員)

*2 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 教授 博士(工学)(正会員)

*3 (株)KSJ ザイペックス事業 担当部長

*4 (株)日本ザイペックス 専務取締役技術部長 博士(工学)

表-1 セメント結晶増殖材の塗布方法

界面セメント結晶増殖材の種類	界面への塗布方法
液体タイプセメント結晶増殖材	1m ² 当たり 0.2kg の液体タイプセメント結晶増殖材を、0.1kg/m ² ずつに分けて2回塗布する。
粉体タイプセメント結晶増殖材	粉体と水を質量比 1：2 で混合したものを、刷毛を用いて、1m ² 当たり 1.2kg になるように塗布を行う。

表-2 打継界面処理条件の一覧

遅延剤の使用・不使用	界面セメント結晶増殖材の塗布方法
遅延剤を用いた凹凸処理	液体タイプのセメント結晶増殖材塗布
	無塗布
	粉体タイプのセメント結晶増殖材塗布・かぶり 1cm
	粉体タイプのセメント結晶増殖材塗布・かぶり 5cm
遅延剤を用いずに気乾養生(平滑)	液体タイプセメント結晶増殖材塗布
	無塗布
	粉体タイプのセメント結晶増殖材塗布・かぶり 1cm
	粉体タイプのセメント結晶増殖材塗布・かぶり 5cm

表-3 コンクリートの配合と使用材料

G _{max} (mm)	W/C(%)	s/a(%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	S1	S2	S3	G	Ad
20	53.0	47.6	175	331	424	170	254	960	2.979
普通セメント セメント密度：3.16g/cm ³									
S1：砕砂 東京都八王子産 F.M. 2.95・表乾密度 2.63 g/cm ³									
S2：山砂 千葉県富津市産 F.M. 1.60・表乾密度 2.60 g/cm ³									
S3：砕砂(石灰) 埼玉県秩父郡横瀬町 F.M. 2.90・表乾密度 2.69 g/cm ³									
G：碎石(成木) 東京都青梅市 実積率 59.5%・表乾密度 2.71 g/cm ³									



図-1 レイタンス除去を行った面と平滑な打継面

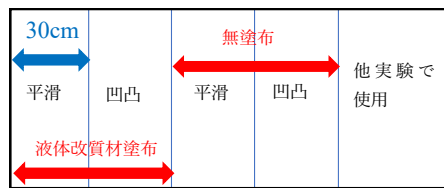


図-2 供試体1の界面処理条件

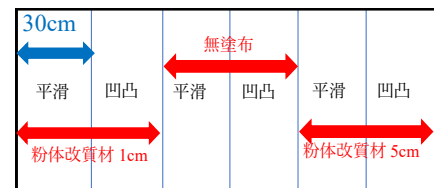


図-3 供試体2の界面処理条件

行った。打継目の吸水抵抗性に対する無機質セメント結晶増殖材の影響を調べるため、一層目のコンクリートが材齢4日において、一つ目の供試体においては液体タイプのセメント結晶増殖材を、もう一つの供試体は粉体タイプ(モルタル)の結晶増殖材を、表-1に示すメーカーの指定する方法で塗布した。ここで、液体タイプを用いたものを供試体1、粉体タイプを用いたものを供試体2とする。図-2および図-3に、二種類の供試体の打継面の打継処理条件を示す。粉体タイプのセメント結晶増殖材については、供試体表面からセメント結晶増殖材を

塗布する領域までのかぶりが供試体表面からの吸水抵抗性に与える影響を観察するため、塗布時に型枠側面までのかぶりを1cmと5cmとしたケースを設定した(図-4, 5)。二層目のコンクリート打設は、一層目の材齢7日に行った。表-2に打継面の処理条件の一覧を示す。二層目の材齢180日で供試体表面からの表面吸水試験を、各打継条件ごとに供試体の北側・南側でそれぞれ2点ずつの計4点で行った。その後、材齢約1年で供試体内部の観察のために切断を行い、切断から10日後に切断面3か所に対して表面吸水試験を行った。

供試体の切断は大型のダイヤモンドカッターを用いて一方方向から一度に切断した。供試体の切断時に複数回刃を入れると、計測を行う断面の形状が凹凸になってしまい表面吸水試験のカップが適切に設置できなくなることがあったためである。供試体の切断は、面処理条件の境界から5cm離れた場所で行った。また、表-3に今回の実験で用いたコンクリートの配合を示す。

2.3 表面吸水試験

表面吸水試験を用いると、コンクリート表面からの吸水抵抗性を定量的に評価できる²⁾。表面吸水試験では複数の評価指標が提案されており、10分時点での吸水速度 $p_{600}(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ を用いると、計測中の10分間はシリンダー内に水が残っている事が前提となる。打継目においては吸水速度が速く10分以内にシリンダー内の水が無くなってしまふことが多かったため、計測時間が10分未満でも吸水抵抗性を評価できる吸水係数 $CSWA(\text{ml}/\text{m}^2/\sqrt{\text{s}})$ を用いることにした。吸水係数は、計測時間の平方根と吸水量の間の比例関係を示す直線の傾きであり、この値が大きいほど吸水抵抗性に劣ることを意味する。既往の研究により、吸水係数と他の研究で用いられている10分時点での吸水速度(p_{600})の間に高い相関が示されることが報告されている²⁾。

吸水抵抗性を評価する場合の3段階のグレーディング評価として、 p_{600} を用いる場合に、 p_{600} が $0.25(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ 以下のときに「良」、 0.25 より大きく 0.5 以下のときに「一般」、 0.5 より大きいときに「劣」と評価する方法が提案されている²⁾。既往の研究によると、 p_{600} の $0.25(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ に相当する $CSWA$ が $10(\text{ml}/\text{m}^2/\sqrt{\text{s}})$ 程度、 p_{600} の $0.5(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ に相当する $CSWA$ が $20(\text{ml}/\text{m}^2/\sqrt{\text{s}})$ 程度であるとされている。

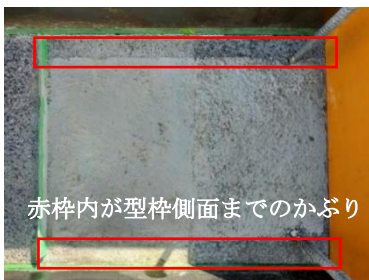


図-4 粉体タイプのかぶり厚さ5cmの塗布状況



図-5 粉体タイプのかぶり厚さ1cmの塗布状況

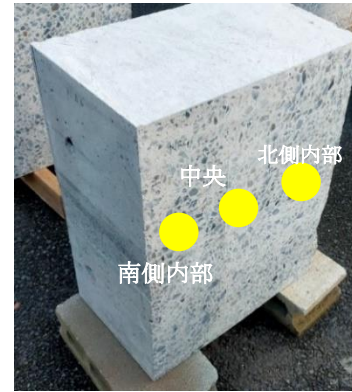


図-6 切断供試体と表面吸水試験の測定箇所

2.4 実験結果と考察

材齢半年程度における供試体の表面からの表面吸水試験の結果を以下の図-7および図-8に示した。

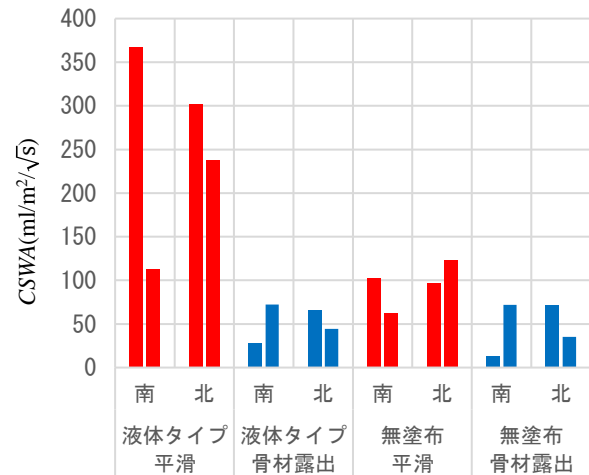


図-7 供試体1の切断前の表面吸水試験結果

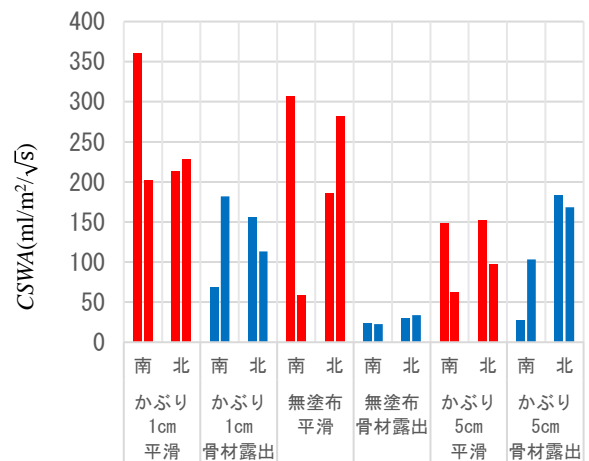


図-8 供試体2の切断前の表面吸水試験結果



図-9 供試体 2 の端部での打継目に沿った開口
(写真は供試体の長手方向から撮影)

図-7 に見られるように、供試体 1 においては、界面処理で骨材を露出させた箇所の表面からの吸水抵抗性が高く、その場合に液体タイプのセメント結晶増殖材による吸水抵抗性の向上の効果はほとんど見られなかった。

また、CSWA が 10~20(ml/m²/√s)程度で一般的なコンクリートの吸水抵抗性と同等であることから、平滑面では吸水抵抗性が劣り、特に液体タイプのセメント結晶増殖材を塗布した供試体の端部の箇所において、吸水抵抗性が著しく劣る結果となった。これは、図-9 に示したように、材齢半年程度の計測時に、供試体 1 と 2 の端部付近で打継目に沿った開口が確認され、この影響によると思われる。供試体が大型であったため、コンクリートの乾燥により打継目より上のコンクリートの端部付近が上側に反る変形を示し、打継目が開いたと考えられる。

図-8 に見られるように、供試体 2 においても、供試体端部で吸水抵抗性が著しく低下する傾向が見られた。供試体中央付近の骨材露出をさせた無塗布の箇所が最も高い吸水抵抗性を示した。供試体 1 と同様に、供試体端部付近の打継目が開く現象の影響により、粉体タイプのセメント結晶増殖材の吸水抵抗性の効果を適切に評価することが困難な結果となった。

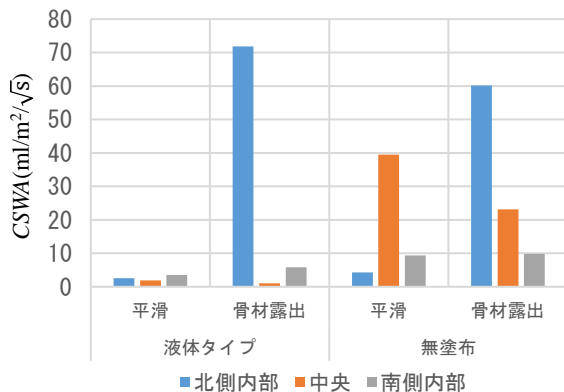


図-10 供試体 1 の切断面での表面吸水試験の結果

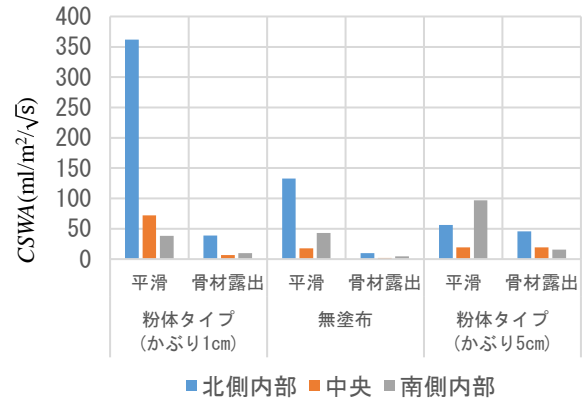


図-11 供試体 2 の切断面での表面吸水試験の結果

図-10 および図-11 に、材齢 1 年程度での切断面における表面吸水試験の結果を示した。

図-10 に見られるように、切断面においては、骨材露出の北側内部を除いて、液体タイプのセメント結晶増殖材を塗布した箇所では極めて高い吸水抵抗性を示した。打継目を含む箇所での吸水抵抗性が、一般的なコンクリートの吸水抵抗性よりも高い値を示した。骨材露出の北側内部が著しく低い吸水抵抗性を示した理由は不明であるが、供試体作製時の施工の影響と思われる。今後のデータの蓄積が期待される。

図-11 からは、骨材露出の箇所が平滑な箇所よりも高い吸水抵抗性を示し、改めて打継面の適切に骨材を露出させる処理の有効性が認められた。粉体タイプのセメント結晶増殖材が吸水抵抗性を向上させる効果は切断面においても見られなかった。

以上より、液体タイプのセメント結晶増殖材を打継面に塗布することにより、切断面から行った表面吸水試験により、打継目の吸水抵抗性を大きく向上させる可能性が認められた。

3. 水圧作用下での水密性に関する実験

3.1 実験概要

この実験では、発泡スチロール製の円柱を中央に配置して、図-12 に示すような打継目を有する中空の供試体を作製し、中空部分から水圧を作用させ、打継目の水密性を調べる。打継目に液体タイプと粉体タイプのセメント結晶増殖材を塗布し、水密性に及ぼす影響を調べる。

3.2 供試体の作製方法

高い水圧を作用させた状態で打継目の水密性を調べるため、打継目と直径 8cm の中空部を有する一辺 30cm の立方体の供試体を作製した。型枠底部から 15cm の高さに発泡スチロール製の円柱の軸を固定し、高さ 15cm でコンクリートを打ち込んだ。打込み後に仕上げ面に遅

延剤を散布し、12 時間後に高圧洗浄機によるレイタンス除去を行って骨材を露出した。一層目の材齢が 5 日の時点で、セメント結晶増殖材を界面に塗布し、材齢 7 日に二層目の打込みを行った。本実験で用いた供試体の外観を図-12 に示す。水密性の試験は二層目のコンクリートが材齢 60 日の時点で実施した。水密性の試験は、穴の空いた二枚のステンレス板で供試体を上下から挟み、棒ネジで固定して、注水穴から水を注入し、手動の水圧ポンプによって加圧する装置を用いた³⁾。図-13 に試験装置の外観を示した。この実験で用いたコンクリートの配合を表-4 に示す。

表-4 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	A _d
20	48	45	175	364	789	982	0
普通セメント			セメント密度: 3.16g/cm ³				
S:大井川水系陸砂			F.M.2.65・表乾密度 2.59 g/cm ³				
G:東京都青梅市			実積率 61.9%・表乾密度 2.66g/cm ³				



図-12 水密性を調べる供試体の外観



図-13 水圧をかけて水密性を調べる装置の外観

3.3 水密性試験の手順

図-13 に示す試験装置の鋼板上部の注水穴から注水を行い、水圧を 0.5MPa, 1MPa, 1.5MPa と増加させ、各水圧をかけた状態で 30 分間保持した。液体タイプセメント結晶増殖材を塗布した供試体においては、1.5MPa

で 30 分の水圧をかけても漏水が見られなかったため、その時点で実験を中止した。漏水が見られた場合は、そのときの水圧と時刻を記録し、漏水箇所当てた紙が吸収した水の質量を計測し、打継目の長さ当たりの漏水量 (ml/cm/s) を求めた。

3.4 実験結果と考察

図-14 と図-15 に実験結果を示す。

図-14 に見られるように、液体タイプのセメント結晶増殖材を塗布したものは、1.5MPa の水圧を 30 分かけても漏水が発生せず、最も高い打継目の水密性を示した。図-14 中の黄色と緑の○印は、漏水が発生した時点を示す。無塗布のものは、水圧を 1.0MPa に上げて 5 分程度した段階で漏水が発生した。粉体タイプのセメント結晶増殖材を塗布したものは、水圧を 0.5MPa に上げる段階で水密性を失い、約 0.25MPa で漏水が発生するという結果となった。粉体タイプのセメント結晶増殖材をモルタル状にして界面に塗布する方法は、本研究の検討範囲では、セメント結晶増殖材自体が弱点となり、水密性を損ねる結果となった。

図-15 に、漏水量の計測結果を示す。粉体タイプのセメント結晶増殖材を塗布した供試体では大量の漏水が発生して試験が中止され、計測が不可能であった。液体タイプのセメント結晶増殖材を用いた場合は、漏水が全く生じず、高い水密性が確認された。無塗布の場合は、水圧 1.0MPa で 0.3ml/cm/s 程度の漏水が確認され、1.5MPa に水圧を上げることで漏水量が 2 倍程度に増加した。

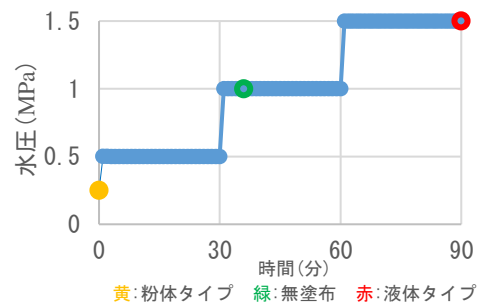


図-14 水密性試験の経時変化と漏水発生状況

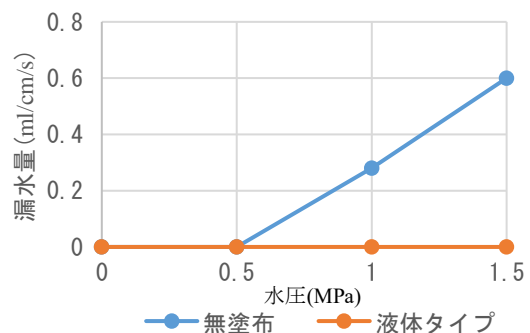


図-15 漏水量の計測結果

4. まとめ

本研究では、水平打継目の打継面の処理方法や、セメント結晶増殖材の打継面への塗布が打継目の吸水抵抗性に及ぼす影響を解明するために大型供試体を作製し、供試体表面と切断面において表面吸水試験により吸水抵抗性を評価した。また、セメント結晶増殖材が打継目の水密性に与える影響を解明するために、打継目に対する水圧作用下での水密性試験を実施した。本研究での結果から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 大型の供試体の水平打継目に対して供試体表面からの表面吸水試験では、供試体の乾燥により供試体端部で打継目が開く現象により、打継目の吸水抵抗性を適切に評価することが困難であった。
- (2) 大型供試体を切断して、切断面に対して行った表面吸水試験により、液体タイプのセメント結晶増殖材を打継面に塗布することにより、打継目の吸水抵抗性を大きく向上させる可能性が認められた。
- (3) 高い水圧をかけた状態での打継目の水密性試験から、液体タイプのセメント結晶増殖材を打継面に塗布することにより、本研究の検討範囲では漏水が発生せず、高い水密性が得られた。

打継目の水密性の評価については、供試体の寸法形状や作製方法、試験方法の影響を大きく受けられる。界面の処理方法や各種のセメント結晶増殖材が実構造物の打継目での物質移動抵抗性や水密性に及ぼす影響については、今後も検討を深める必要がある。

参考文献

- 1) 上田 洋, 鈴木 浩明: コンクリート表層ならびにコンクリートと補修材との界面における水分移動, 鉄道総研報告, RTRI REPORT, Vol.29, No.4, pp.5-10, 2015.4
- 2) 細田 暁: 表面吸水試験の適切な計測方法の確立と品質評価の活用法, 日本非破壊検査協会 第7回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム 論文集, pp.129-136, 2022.8
- 3) 手塚 基広, 逸見 義男, 松井 勇, 守屋 哲夫: 高水圧下におけるコンクリートの打継ぎ部及びひび割れ部の水密性試験の提案, 日本建築学会技術報告集, 第13巻26号, pp.411-414, 2007.12