

論文 ブリーディングに起因した鉄筋周辺の空隙に対する保護層形成に関する検討

本田 和也*1・国枝 稔*2

要旨: 鉄筋コンクリートは、ブリーディング水の影響によって鉄筋周囲に通水性を有する空隙が生じた場合、空隙を介して塩化物イオンや水が鉄筋周囲に広がり、早期に鉄筋が腐食する傾向にある。そこで、本研究では通水性を有する空隙がある鉄筋の周囲に保護層を形成することを目的に、けい酸塩系表面含浸材を集中的に充填させる方法を検討した。その効果を検討するために、鉄筋周囲の通水性の評価、および表層透気係数の測定による鉄筋周囲のセメント硬化体の緻密さとして空隙量の評価を行った。その結果、けい酸塩系表面含浸材を鉄筋周囲の空隙に充填させることで、通水性を抑制し、表層透気係数を小さくさせることができた。

キーワード: ブリーディング, けい酸塩系表面含浸材, 通水試験, 表層透気係数

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋は、コンクリート表面やひび割れ部から侵入した塩化物イオンや水などの劣化因子が鉄筋に到達することによって腐食が進行する。ブリーディングが大きいコンクリートにて施工した場合、水平に配置された鉄筋の周辺には空隙やセメント硬化体との界面に境界相、または鉄筋周囲に緻密さが低下した領域が生じ、これらが鉄筋腐食に影響を与えるとされている^{1,2)}。

筆者らはこれまでに、ブリーディングの影響を受けて、鉄筋周囲に空隙がある試験体、または緻密さが低下したセメント硬化体の領域を有する試験体を作製し、鉄筋軸方向の通水性を評価し、さらにこれらの試験体を塩水浸漬させ、鉄筋腐食との関係を確認した。その結果、鉄筋軸方向の通水性が大きい試験体は、その他の試験体に比べ、塩水浸漬中に大きく自然電位が卑側に変化し、腐食しやすくなることを確認した³⁾。これらの結果から、ブリーディングの影響を受けた水平鉄筋は、鉄筋軸方向の通水性が大きく、鉄筋まで到達した劣化因子が、鉄筋全体に広がるため腐食が進行しやすくなると推察した。そのため、上記の通水性を有する空隙がある鉄筋コンクリートに対して、通水を抑制する保護層を形成することで、鉄筋腐食が抑制されることが推察される。

そこで本研究では、通水性を有する空隙がある鉄筋コンクリートを対象とした保護層を形成する方法の検討を行い、その保護層の効果を評価した。保護層を形成する材料としては、表面保護工法で使用されるけい酸塩系表面含浸材を使用材料として選定した。けい酸塩系表面含浸材の主成分はけい酸塩であり、材料自体の乾燥により固化が進行し、その固化物によってコンクリート中の空隙を充填する固化型と、コンクリート中の水酸化カルシ

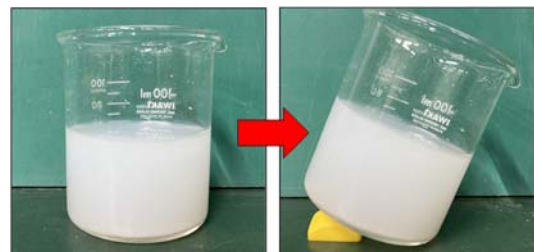


写真-1 けい酸塩系表面含浸材の硬化状況

ウムとの反応により C-S-H ゲルを生成してコンクリート中の空隙を充填する反応型がある⁴⁾。けい酸塩系表面含浸材は、通常はコンクリートの表面に塗布することで、コンクリートを緻密化させ、劣化因子の侵入を抑制する材料である。このけい酸塩系表面含浸材の特徴として、ひび割れ注入材に使用されるポリマーセメントスラリーや樹脂系の材料に比べて粘性が低いことがあげられる。そのため、鉄筋周囲の空隙に対して、水と同様に浸透し充填されると考えられる。また、鉄筋周囲には骨材の遷移帯と同様に、水酸化カルシウムが多く含まれている⁵⁾。そのため、反応型のけい酸塩系表面含浸材を使用することで、けい酸塩系表面含浸材に水酸化カルシウムを添加した写真-1 のように、鉄筋周囲にて硬化し、通水性を抑制できると考えられる。

本研究では、けい酸塩系表面含浸材の保護層形成の効果を確認するため、実験1では大きさや形状の異なる鉄筋を用いた試験体を作製し、けい酸塩系表面含浸材を鉄筋軸方向に浸透させた後に通水試験を行い、通水性を評価した。また、実験2では鉄筋のかぶり面からの表層透気係数を測定した。田籠らは、ブリーディングの影響で粗骨材界面に空隙が存在する試験体に対して透気試験を行い、透気量と空隙量の関係性を確認した⁶⁾。その方法

*1 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所 工修 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 博士(工学) (正会員)

を参考に、鉄筋周囲の空隙の量を評価するため、試験体の打設底面からの表層透気係数の測定を行った。なお、今回の実験では、鉄筋コンクリート構造部材における床や梁の下端鉄筋を想定とした試験体で実験を行った。

2. 実験1 (通水試験による空隙の評価)

2.1 試験体

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント (密度:3.15g/cm³, 比表面積:3260cm²/g) を使用した。細骨材は掛川産山砂 (表乾密度:2.56g/cm³, 吸水率:1.82%, F.M.2.62), 粗骨材は桜川産砕石 (表乾密度:2.60g/cm³, 実積率:59.9) を使用した。また AE 減水剤はリグニンスルホン酸系を使用し、ブリーディング率の調整を行うため増粘剤と消泡剤を使用した。増粘剤はセルロース系を使用し、消泡剤はポリアルキレングリコール誘導体を主成分としたものを使用した。鉄筋について、実験1では異形鉄筋として D10, D19, D32 と、丸鋼として φ10mm, φ19mm, φ32mm の合計6種類を使用した。保護層形成に使用したけい酸塩系表面含浸材は、水酸化カルシウムと反応する反応型のタイプを使用した。

(2) 配合

実験1ではモルタルを用いて試験体を作製した。モルタルの配合は水セメント比55%とし、セメントと細骨材の質量比を1:2、空気量は3.0%とした。また、ブリーディング率は5.0%±0.2%となるように増粘剤と消泡剤にて調整した。消泡剤は増粘剤使用による練り混ぜ時の空気量増加を抑制するために使用した。このブリーディング率の値は事前の試験練り時に、JCI-S-015-2018の小型容器によるコンクリートのブリーディング試験方法を参考に測定した。なお、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2022 の水密コンクリートではブリーディング量が0.3cm³/cm²以下と規定されており、本実験のモルタルはブリーディング量が約0.45cm³/cm²であるため、比較的ブリーディングの影響を大きく受けた条件である。

(3) 試験体作製方法

モルタルはホバート型ミキサーを用いて、JIS R 5201 付属書 C に準拠して練り混ぜた。実験1に使用した試験体を図-1 に示す。試験体の中央部に打設下面からのかぶりの厚さを40mm, 60mmの2水準設け、それぞれの位置に鉄筋を設置した。

打設は練混ぜが完了したブリーディング率5.0%のモルタルを2層にて打ち込みを行った。打設後は静置し、打設1日後に十分に硬化していることを確認した上で、脱型を行った。そして、材齢14日まで温度20±2℃、湿度60±5%RHの環境にて養生し、材齢14日の時点で鉄

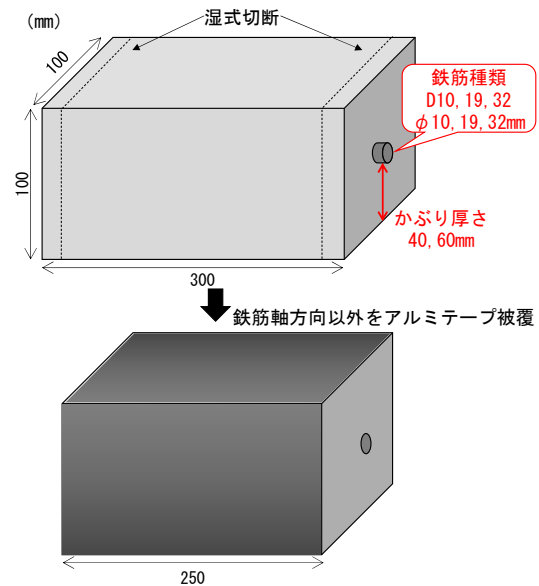


図-1 実験1の試験体の概要

材齢0日	材齢1日	材齢14日	材齢21日	材齢28日	材齢35日
打設	脱型	湿式切断 ↓ アルミテープ貼付	通水試験(1) 水道水1回目	通水試験(2) けい酸塩系表面含浸材 ↓ 試験後貫通面テープ貼付	通水試験(3) 水道水2回目 ↓ 止水性の確認

図-2 実験フロー (実験1)

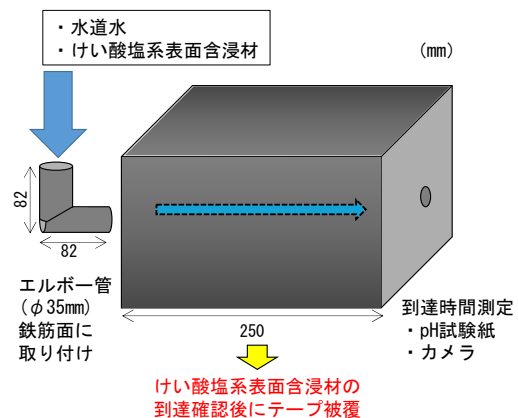


図-3 通水試験方法 (実験1)

筋軸方向の両端から25mmの位置を湿式切断した。その後、鉄筋の軸方向以外の4面をアルミテープにて被覆したものを通水試験に用いた。

2.2 試験方法

図-2に実験1のフローを示す。また、実験1の通水試験方法を図-3に示す。湿式切断した面の鉄筋の部分に、φ35mmのエルボー管を取り付け、その後に水道水、けい酸塩系表面含浸材を流し込み、鉄筋周囲の空隙を移動経路として反対面まで到達する時間を測定した。到達時間は反対面の鉄筋部にpH試験紙を取り付け、ビデオ

カメラにて撮影し、pH 試験紙が着色したタイミングを到達した時間とした。

材齢 14 日に湿式切断し、アルミテープを貼り付けた後、材齢 21 日に通水試験(1)として水道水をエルボー管から流し込み、到達時間の測定を実施した。その後、試験体を温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%RH$ の環境にて乾燥させ、材齢 28 日に通水試験(2)としてけい酸塩系表面含浸材をエルボー管から流し込み、到達時間の測定を実施した。けい酸塩系表面含浸材の到達を確認した後は、けい酸塩系表面含浸材を鉄筋周囲にて硬化させるため、樹脂テープを貼り付けて材齢 35 日まで静置した。そして材齢 35 日に、樹脂テープを剥がして、エルボー管から水道水を再び流し込み、通水試験の確認を行った。

2.3 実験 1 の結果

実験 1 の通水試験結果について、かぶり 40mm の結果を表-1 に、かぶり 60mm の結果を表-2 に示す。まず 1 回目の水道水の結果について、かぶり 40mm では、鉄筋径の違い、または異形と丸鋼の形状の違いによらず、全ての試験体が 16 秒以内に水道水の到達が確認された。また、かぶり 60mm においても、鉄筋径の違い、または異形と丸鋼の形状の違いによらず、全ての試験体が 8 秒以内に水道水の到達が確認された。このことから、ブリーディング水の影響により生じる鉄筋の下部に通水性を有する空隙は、鉄筋コンクリート中の鉄筋の大きさや形状によらず、同様に生じるものであると考えられる。また、かぶりを比較すると、かぶりが大きい 60mm の方が、全体的に到達時間が早いことから、打設底面からのかぶりが大きい方がより通水性の高い空隙が生じるものと推察される。これは、かぶりが大きい鉄筋の方が、上昇して鉄筋周囲に滞留するブリーディング水の量が多くなるためと考えられる。

けい酸塩系表面含浸材の結果については、水道水に比べると、到達するまでの時間が長くなる傾向であったが、いずれの条件においても、全て到達が確認された。けい酸塩系表面含浸材は、水溶液の状態では $\text{Si}(\text{OH})_n$ の連続する鎖状分子がアルカリ金属原子を取り囲む構造をもつポリシリケートとして存在しており、このポリシリケートの径は、 $1 \sim 10\text{nm}$ と毛細管空隙等に比べても非常に小さい大きさである⁴⁾。そのため、ブリーディングにより生じる鉄筋周囲の空隙に対しても十分に充填しているものと考えられる。

そして、けい酸塩系表面含浸材を硬化させた後に実施した 2 回目の水道水の通水試験では全ての条件においても、通水試験開始から 24 時間までに水道水の到達が確認されなかった。試験後の試験体を解体した後の状況を写真-2 に示す。写真に示すとおり、鉄筋下部に白い硬化体が充填されていることが確認でき、この硬化体が保

表-1 かぶり 40mm 通水試験結果 (実験 1)

かぶり (mm)	鉄筋	到達時間 (sec)		
		水道水1回目	けい酸塩系表面含浸材	水道水2回目
40	D10	11.8	64	到達無し
	φ10mm	5.5	41	
	D19	8.7	46	
	φ19mm	7.0	57	
	D32	12.8	96	
	φ32mm	15.1	141	

表-2 かぶり 60mm 通水試験結果 (実験 1)

かぶり (mm)	鉄筋	到達時間 (sec)		
		水道水1回目	けい酸塩系表面含浸材	水道水2回目
60	D10	5.1	30	到達無し
	φ10mm	5.2	39	
	D19	5.4	31	
	φ19mm	5.3	38	
	D32	7.8	56	
	φ32mm	6.1	43	



写真-2 含浸材注入後の試験体の解体状況

表-3 コンクリート配合 (実験 2)

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
55.0	40.0	4.5	180	327	687	1047

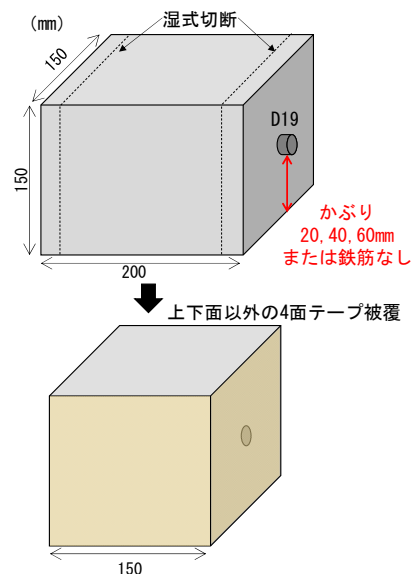


図-4 実験 2 の試験体の概要

護層として通水性を低減させていると推察される。

3. 実験 2 (表層透気係数による空隙の評価)

3.1 試験体

(1) 使用材料

使用材料は実験 1 と同様の材料を使用した。鉄筋について、実験 2 では異形鉄筋の D19 のみ使用した。

(2) 配合

実験 2 では表層透気係数による評価を行うため、コンクリートを用いて試験体を作製した。コンクリートの配合を表-3 に示す。また、使用したコンクリートのブリーディング率は 3 水準設け、0%、 $2.0 \pm 0.2\%$ 、 $3.0 \pm 0.2\%$ となるように増粘剤と消泡剤にて調整した。このブリーディング率の値は、事前の試験練り時に、JIS A 1123 のコンクリートのブリーディング試験方法にて確認した。本実験のコンクリートはブリーディング量が約 $0.10 \sim 0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ あり、JASS5 の水密コンクリートの規定値である $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下と比較した結果、標準的なブリーディングの影響を受けた条件であると考えられる。

(3) 試験体作製方法

コンクリートは強制二軸ミキサを用いて、セメント、細骨材、粗骨材、増粘剤を 15 秒間練り混ぜた後に、水と混和剤を投入して 60 秒間練り混ぜて排出した。実験 2 に使用した試験体を図-4 に示す。試験体の中央部に打設下面からのかぶりを 20mm、40mm、60mm の 3 水準設け、それぞれの位置に異形鉄筋 D19 を設置した。また、比較対象として、鉄筋を設置していない試験体も併せて作製した。

打設はブリーディング率 0%、2.0%、3.0% の 3 水準のコンクリートを 2 層にて打ち込みを行った。材齢 28 日後に脱型し、両端から 25mm の位置を湿式切断した。

3.2 試験方法

図-5 に実験 2 のフローを示す。試験体は温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\% \text{ RH}$ の環境にて保管した。材齢 28 日に湿式切断した翌日、図-6 に示すとおり、 $\phi 25 \text{ mm}$ で長さ 500mm のアクリルパイプを鉄筋周囲に垂直に取り付けて、水道水を流し込み、反対面まで到達する時間を pH 試験紙とビデオカメラにて測定した。

表層透気係数は、ダブルチャンバー方式のトレント法にて測定を行った。なお、表層透気係数は測定面のコンクリートの含水率の影響を取り除くため、測定する前に測定面の表面含水率をコンクリート水分計にて測定し、 $4.5 \sim 4.9\%$ の範囲内であることを確認した。また、表層透気係数を測定する際は、測定面とその反対面以外を樹脂テープにて被覆して測定を実施した。

表層透気係数の測定は 3 回実施し、表層透気係数測定 (1) は材齢 63 日に、図-7 に示すとおりブリーディング率

材齢0日	材齢28日	材齢63日	材齢70日	材齢84日
打設	脱型 湿式切断 ↓ 翌日、通水試験	表層透気係数 測定① ↓ かぶり厚さ20mmに 表面部を切断	表層透気係数 測定② ↓ 低圧注入による けい酸塩系表面 含浸材の注入	表層透気係数 測定③

図-5 実験フロー (実験 2)

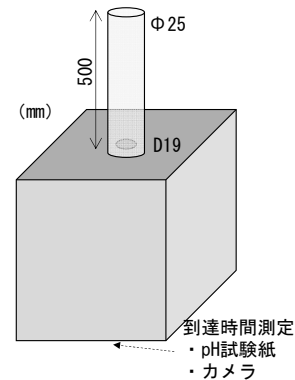


図-6 通水試験方法 (実験 2)

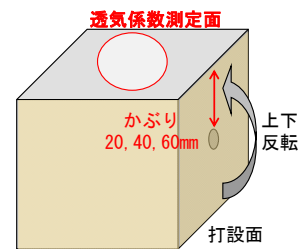


図-7 表層透気係数測定 (1) の試験体

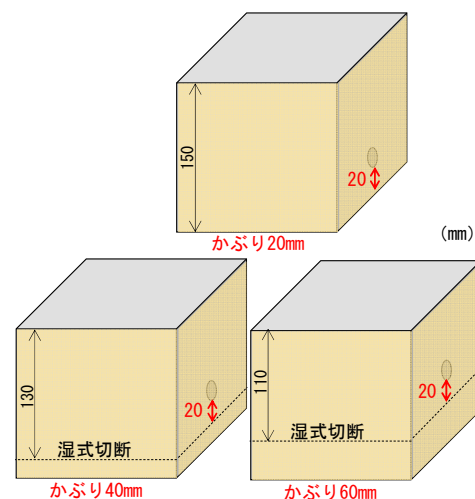


図-8 表層透気係数測定 (2) の試験体

が 0%、2.0%、3.0%、かぶりが 20mm、40mm、60mm、および鉄筋無しの条件にて、打設底面から測定を実施した。

表層透気係数測定 (1) の後に、測定面から鉄筋までの距離を統一させるために、図-8 に示すとおり、かぶりが

40mm と 60mm の試験体をそれぞれ打設底面から 20mm と 40mm の位置で湿式切断し、いずれの試験体も測定面から鉄筋までの距離が 20mm になるようにした。そして、材齢 70 日にて、表層透気係数測定(2)として、底面および切断面の表層透気係数の測定を実施した。

表層透気係数測定(2)の後に、鉄筋面の樹脂テープを取り外し、図-9 に示すとおり、ひび割れ補修工法で使用する低压注入器具をエポキシ樹脂にて鉄筋切断面に取り付けた。エポキシ樹脂硬化後に低压注入器具を用いて、けい酸塩系表面含浸材の注入を行い、反対面からのけい酸塩系表面含浸材の到達を確認した後に、鉄筋周囲にてけい酸塩系表面含浸材を硬化させるため、樹脂テープを貼り付けて材齢 84 日まで静置した。そして、材齢 84 日にてけい酸塩系表面含浸材を注入した後の表層透気係数測定(3)を実施した。なお、鉄筋無しの試験体とブリーディング率 0% の試験体は、けい酸塩系表面含浸材の注入を実施しなかった。

3.3 実験 2 の結果

実験 2 の通水試験の結果を表-4 に示す。ブリーディング率 0% の試験体では、いずれのかぶりにおいても、水道水の到達が確認されなかった。これは、ブリーディング率が 0% と非常に小さい場合は、鉄筋周囲に通水性を有する空隙が生じないためと考えられる。ブリーディング率 2%、3% の試験体については、かぶり 40mm、60mm では約 20 分程度、かぶり 20mm では約 120 分程度の到達時間となった。これは、実験 1 の結果と同様にかぶりが大きい方が鉄筋周囲に通水性を有する空隙が大きくなるためであると考えられる。

これらの試験体を用いた表層透気係数の測定結果について、表層透気係数測定(1)の結果を図-10 に示す。鉄筋無しの試験体は、ブリーディング率が大きくなるに伴い、少しずつ表層透気係数が大きくなる結果となった。これは、ブリーディングの影響により、コンクリート中の粗骨材の周囲の遷移帯のようなポーラスな硬化体が生じているためと考えられる。通水性のあるかぶり 40mm、60mm の試験体は、鉄筋無しの試験体と大きな差は確認されず、かぶり 20mm は比較的大きな表層透気係数が確認された。このことから、表層透気係数を測定する打設底面とコンクリート内部の鉄筋までの距離が大きいと、表層透気係数の測定結果に対して、鉄筋周囲に通水性を有する空隙の存在の影響が小さくなると考えられる。

それらの結果を踏まえた、表層透気係数を測定する打設底面とコンクリート内部の鉄筋までの距離を 20mm に合わせた表層透気係数測定(2)の結果を図-11 に示す。通水性の大きかったブリーディング率 2%、3% のかぶり 40mm、60mm の試験体の表層透気係数の値が、鉄筋無しの試験体に比べて非常に大きくなる結果となった。そこ

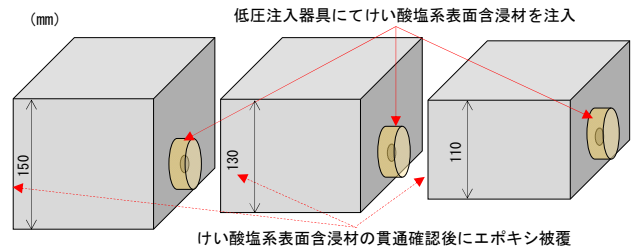


図-9 表層透気係数測定(3)の試験体

表-4 通水試験結果(実験 2)

水道水の到達時間 (min)	かぶり (mm)			
	20	40	60	
ブリーディング率	0%	到達無し		
	2%	124	21	24
	3%	119	19	11

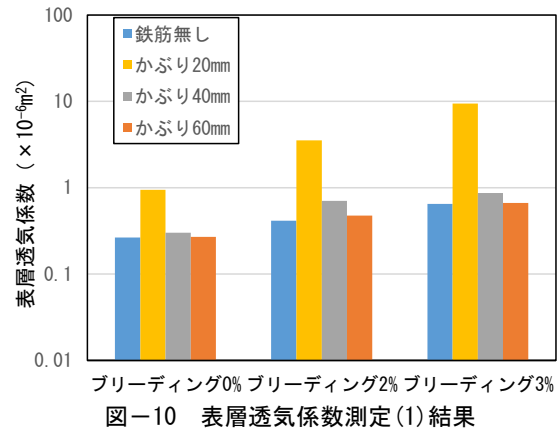


図-10 表層透気係数測定(1)結果

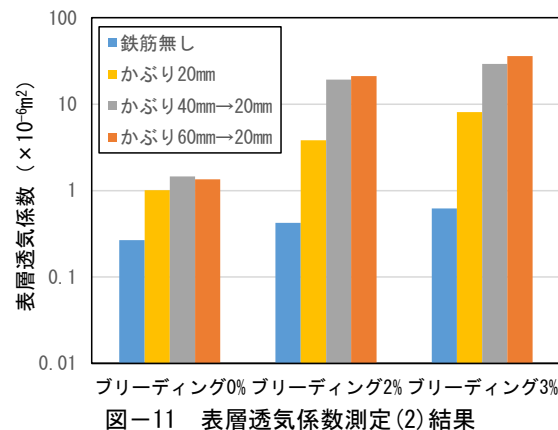


図-11 表層透気係数測定(2)結果

表-5 表層透気係数係数比

表層透気係数比 $\alpha = k_r / k_p$	ブリーディング率	かぶり (mm)		
		20	40	60
	0%	3.8	5.5	5.1
	2%	9.1	45.6	50.3
	3%	13.1	47.2	58.5

でブリーディング水の影響により鉄筋周囲に生じる空隙量を評価するため、鉄筋無しの試験体の表層透気係数 k_p と鉄筋ありの試験体の表層透気係数 k_r の比を、表層透気係数比 α として、式(1)にて算出した。

$$\text{表層透気係数比 } \alpha = \frac{\text{鉄筋あり表層透気係数 } k_r (\times 10^{-6} \text{m}^2)}{\text{鉄筋無し表層透気係数 } k_p (\times 10^{-6} \text{m}^2)} \quad (1)$$

算出した結果を表-5 に示す。その結果、通水性が大きいブリーディング率 2%、3%のかぶり 40mm、60mm の試験体は、表層透気係数比 α の値が 40 以上と大きく、このことから、表層透気係数の測定により鉄筋周囲の通水性のある空隙の存在を評価することができることが確認された。また、ブリーディング率 0%においても、ブリーディング率 2%、3%に比べれば小さいものの、表層透気係数が少し大きくなることが確認された。

次にけい酸塩系表面含浸材を低圧注入器具にて注入したブリーディング率 2%、3%の鉄筋ありの試験体の表層透気係数の測定結果、ならびに式(1)に算出した表層透気係数比 α の値について、注入前後の結果を図-12 に示す。注入前の結果に比べて表層透気係数の値が大きく低減し、鉄筋無しの試験体と同程度の値になっていることが確認された。また α の値も 1.0 に近づいており、鉄筋無しの試験体と同程度の表層透気係数になっていることが確認された。これは、けい酸塩系表面含浸材を注入することによって、写真-2 に示すように通水性を有する空隙を硬化体が充填され、さらに鉄筋周囲の硬化体組織が緻密化されて、保護層が形成されたためであると推察される。

これらの結果から、ブリーディング水の影響を受けて、鉄筋周囲に通水性を有する空隙が生じた鉄筋コンクリートに対して、けい酸塩系表面含浸材を鉄筋周囲に集中的に注入することで、鉄筋周囲でけい酸塩系表面含浸材がゲル化して硬化することで通水性を低下させ、さらに表層透気係数の測定から鉄筋周囲の硬化体を緻密化していることを確認することができた。今後は鉄筋コンクリートの切断面ではなく、実構想物を想定した注入方法を検討し、その効果を検証していく必要がある。

4. 総括

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)各種条件下において、ブリーディングの影響を受けた試験体は鉄筋軸方向において通水性があることを確認した。
- (2)ブリーディング水の影響を受けて、鉄筋周囲に通水性を有する空隙が生じた鉄筋コンクリートに対して、けい酸塩系表面含浸材を鉄筋周囲に注入することで、通水性を低減させることができることを確認した。

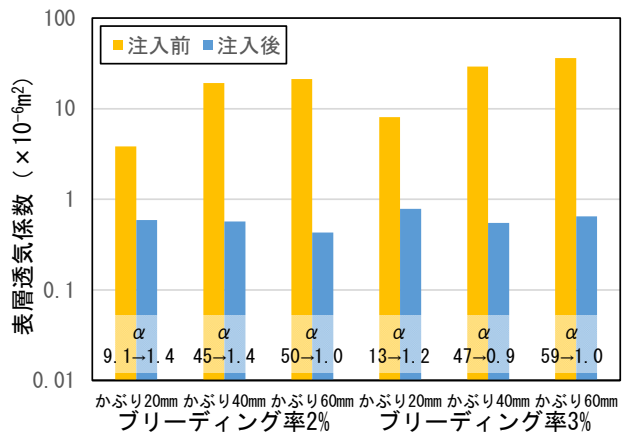


図-12 表層透気係数測定 (3) および表層透気係数比の結果

- (3)けい酸塩系表面含浸材を鉄筋周囲に注入した鉄筋コンクリートの表層透気係数を測定することで、ブリーディング水の影響で生じた鉄筋周囲の通水性を有する空隙が、けい酸塩系表面含浸材にて充填されることを確認した。

参考文献

- 1) 浮島文香, 大即信明, 西田孝弘, 宋暘: RC 部材中の塩化物イオンと水平鉄筋周りの境界相がコンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 6 巻, pp.299-304, 2006.10
- 2) 濱田秀則, 佐川康貴, 森川亮太, 高橋勝也: 鉄筋周囲に発生する空隙と鉄筋腐食の関係に関する実験的考察, セメント・コンクリート論文集, 第 63 巻, 1 号, pp.428-434, 2009
- 3) 本田和也, 国枝稔: 鉄筋周囲のセメント硬化体の空隙状況と鉄筋腐食の関係に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.460-465, 2022
- 4) 土木学会: けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案), コンクリートライブラリー137, 2012
- 5) 本田和也, 国枝稔: 電気泳動試験による模擬鉄筋周囲のセメント硬化体の緻密さの評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.550-555, 2021
- 6) 田籠滉貴, 中西縁, 伊代田岳史: ブリーディングによる骨材界面空隙の生成が物質透過性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.111-116, 2018