

論文 海藻ゲル物質を用いた HPFRCC 微細ひび割れ部の止水性の改善

高橋 祐二^{*1}・浅野 幸男^{*2}・小林 孝一^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: ワカメや昆布などの海藻を主原料とするアルギン酸ナトリウム溶液をひび割れ部に含浸させて、補修後に発生するひび割れ部の止水性を改善することを目的とした研究を行った。HPFRCC を補修材料として捉え、コンクリート表面に HPFRCC 他 2 種類の材料をそれぞれ 10mm の厚さで積層し、両引き載荷によってひび割れを導入した供試体を用いて実験を行った。ひび割れ箇所の止水性の評価は透水試験によって行った。ひび割れ幅が 0.1mm より小さい場合には、アルギン酸ナトリウムによる生成ゲルと水和生成物による自己閉塞性が相乗して、止水性の改善に可能性が高い結果が得られた。

キーワード: HPFRCC, ひび割れ, 止水性, 海藻ゲル, アルギン酸ナトリウム

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）は、その優れた材料性質や設計・施工指針¹⁾等の整備が相まって、今後、新設・既設コンクリート構造物への利用が拡大していくものと考えられる。HPFRCCの材料性質の一つとして、引張応力が増加しても局所的な大きなひび割れとならずに、微細なひび割れが複数発生してひび割れ本数が増加するという特徴が挙げられる。

水密性が特に要求される水理構造物、地下構造物、貯水槽およびトンネルなどでは、HPFRCCのひび割れが微細であるという特徴は、漏水対策の面からも極めて優位である。しかしながら、劣化したコンクリート構造物へ断面修復材としてHPFRCCを適用する場合には、断面厚が薄い状態での使用が考えられるため、利用用途によっては防水面での要求性能を満たさない場合も考えられる。筆者らは、このような場合を想定して撥水材による効果を報告した²⁾。

本研究は、微細ひび割れ部へのゲル状物質の充填による止水効果と、充填物の誘引によるひび割れの自己閉塞の促進をも考えたものである。実験に用いたアルギン酸ナトリウムは、カルシウムとの反応によって不溶性のアルギン酸カルシウムゲルを生成する³⁾。アルギン酸ナトリウムは、アイスクリームの安定剤やゼリーの素材など

として多用されており、一方、生成物であるアルギン酸カルシウムも食品添加物として認められているもので、身近な例としては人工イクラの表面部がアルギン酸カルシウムである。このアルギン酸カルシウム自体が、ワカメや昆布の主要成分である。

実験からは、ひび割れ幅が 0.1mm 以下の場合では、補修材料の種類に関わらず、透水試験時の水供給とその後の乾燥過程における、比較的短時間の間に止水性が大幅に改善することが確認されたので、以下にその概要を報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体

(1) 材料および配合

補修材側の材料は、HPFRCC、ポリマーセメントモルタル（以下 PCM）および普通モルタル（以下 NM）の 3 種類、母材側のコンクリート（以下 NC）は一般に常用されている W/C55%のもの 1 種類とした。

これらの配合を表-1 に示す。PCM は市販の断面修復材用で、エマルジョンと粉体品とのプレミックスタイプを用いた。セメントは HPFRCC, NM および NC 共に早強ポルトランドセメント, NM および NC の骨材は川砂, 砂利 (Gmax15mm) を用いた。

HPFRCC には $\phi 0.012 \times 12\text{mm}$ の高強度ポリエチレン織

表-1 各種材料の配合表

材料	繊維	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)								
			W	C	7号珪砂	S	G	Ad ₁	Ad ₂	MC	F
NC	-	55	175	318	-	826	937	0.795	-	-	-
NM	-	55	273	496	-	1289	-	1.240	-	-	-
HPFRCC	PE	30	380	1264	395	-	-	-	37.92	0.9	14.6
PCM	粉体20kg、エマルジョン3.2kgの割合										

※ Ad₁はAE減水剤, Ad₂は高性能AE減水剤であり水に含まれる。MCは増粘材, Fは繊維量を示す。

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)
 *2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)
 *3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 博(工) (正会員)
 *4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)



(a) HPFRCC



(b) PCM

写真-1 透水試験用の供試体



写真-2 振動式粘度計

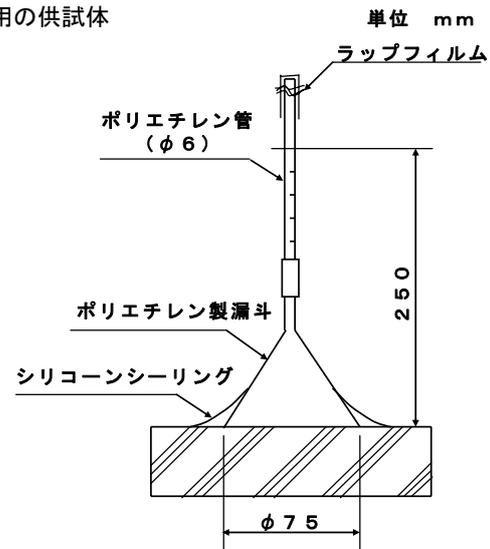


図-1 透水試験装置

維を体積比で1.5%混入した。

(2) 供試体の作製

鉄筋D10を長さ方向に2本配筋した母材側コンクリートを幅100mm、厚さ40mm、長さ1200mmの寸法で先に打設し、翌日に3種類の補修材を10mm打ち継いで全厚が50mmとなるようにして供試体を作製した。

打設後の養生を経た後に両引き載荷によりひび割れの導入を行い、切り出しを行う直前にマイクروسコープを用いてひび割れ幅の測定を行った。

ひび割れ部を含む箇所が写真-1に示す100mm×100mm×50mm程度の大きさとなるように、透水試験用の供試体を切り出して、試験に供した。

2.2 アルギン酸ナトリウム

アルギン酸ナトリウムは、粉末状の試薬を実験に用いた。1.0%の高濃度溶液を予め調製して、この溶液を適宜希釈して所定濃度の溶液を作製し、実験に用いた。

2.3 試験および評価方法

(1) アルギン酸ナトリウム溶液の濃度の選定

実験に使用するアルギン酸ナトリウム溶液の濃度の選定を目的として、粘度と濃度の違いによる微細ひび割れへの浸透性を調べた。

粘度はアルギン酸ナトリウム溶液の濃度水準を0～1.0%の範囲とした6水準を対象として、写真-2に示す

振動式の粘度計を用いて測定した。粘度は液温の影響を受けるため、測定前日から20℃の恒温室に材料や試験装置を搬入して試験を行った。

微細ひび割れへの浸透性試験は、透水試験用に切り出した供試体の内の1個(HPFRCC)を用いて行った。試験は、ひび割れ幅が大きい母材側コンクリートの表面に図-1に示す透水試験装置を取り付け、水頭250mmから10分間で下がる液量を測定して評価した。この場合のアルギン酸ナトリウムの溶液は、濃度水準を0～0.30%の範囲とした10水準について行った。

(2) 止水性の評価

図-1に示すようなJIS A 6909「建築用仕上塗材」の中の、透水試験法Bに規定する装置を補修材料側に取り付けて、ひび割れ部の止水性の評価を行った。

アルギン酸ナトリウム溶液で処理する前と処理後について、透水試験を実施した。処理後については性能を総合的に評価するために、乾湿を繰り返して評価することとした。乾湿の繰り返しは4回(一部の供試体では3回)を行い、その都度透水試験を行って止水性の定量的な評価を行った。この評価と並行して母材側コンクリート

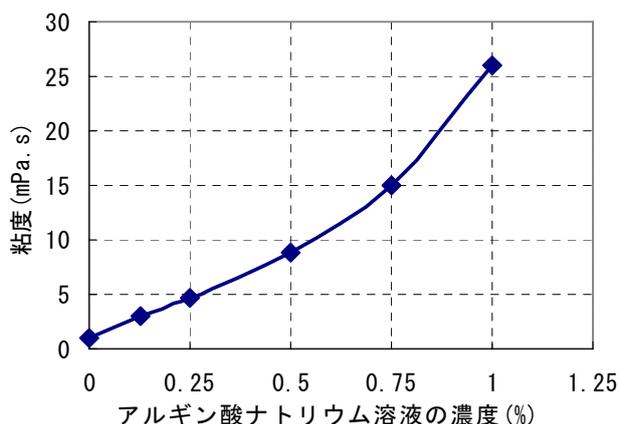


図-2 溶液濃度と粘度

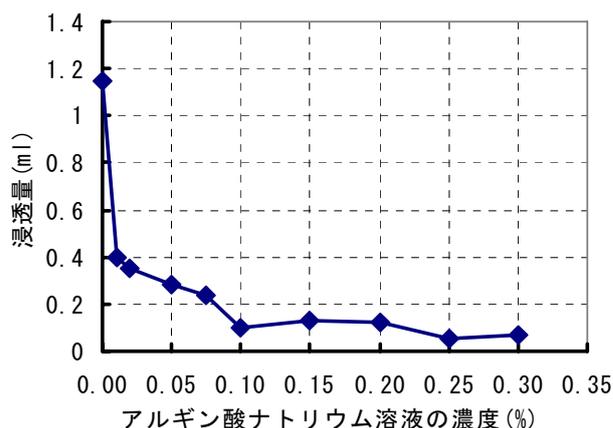


図-3 溶液濃度と浸透量

のひび割れ部の観察を目視やマイクロスコープを用いて行った。

乾湿条件は、1 回目はアルギン酸ナトリウム溶液と接触した供試体表面を刷毛を用いて水洗いした後、約 40℃の温風で 1 日、その後、装置を取り付けてから室温で 2 日の計 3 日を乾燥期間とした。2 回目および 3 回目の乾燥条件も 1 回目と同じで、4 回目の乾燥は室温で延べ 7 日間とした。

透水試験は水頭 250mm から 200mm まで低下する所要時間を測定して止水性を評価することとした。

アルギン酸ナトリウム溶液を透水試験装置の水頭 250mm まで充填して、約 12 時間放置し、ひび割れ部分へ同溶液を含浸させた。

3. 実験結果および考察

3.1 アルギン酸ナトリウム溶液の粘度と浸透性

アルギン酸ナトリウム溶液の濃度と粘度との関係を図-2、濃度と微細ひび割れ部への浸透量との関係を図-3に示す。

粘度は濃度が高くなるのに伴って、指数関数的に加速して大きくなる傾向を示した。この場合の水の粘度は 0.92mPa·S で、溶液濃度が 0.125 % の場合は 2.92 mPa·S、0.25 % の場合は 4.62 mPa·S となった。

溶液濃度と微細ひび割れ部への浸透量の関係の試験には、表-2に示す HPCRCC の No.3 の供試体(HPCRCC-3)を用いた。補修材側の最大ひび割れ幅は 0.040mm、ひび割れ本数は 9 本、母材側の最大ひび割れ幅は 0.589mm のもので、ひび割れ幅が大きな側から溶液を通すことによって、微細ひび割れ部への溶液濃度と浸透性の関係を調べた。図-3 から明らかなように、溶液濃度が高くなるほどアルギン酸ナトリウムの溶液は浸透しにくくなり、溶液濃度が 0.10 % 以上となると微細ひび割れ部への浸透が難しくなることが分かった。しかし、実験は溶液濃度が薄い方から濃い方に順に行ったものの、一つの供試体



写真-3 生成ゲル

で行っているため、当該水準濃度よりも前のものによる残留の影響も考えられた。

以降の実験に用いるアルギン酸ナトリウム溶液の濃度の選定は、微細なひび割れ部へ浸透可能な濃度であること、浸透後の溶液がひび割れ内部で保持されやすい濃度であること、アルギン酸カルシウムゲルの生成量が多くなる濃度であることを、条件として行うこととした。このうち、アルギン酸カルシウムゲルの生成量に関する実験を別に行ったが、カルシウム量を一定としてアルギン酸ナトリウムの溶液濃度を変化させた場合には、この実験の範囲では、濃度が高くなるほどアルギン酸カルシウムゲルの生成量が多くなる結果が得られた。

このようなことから、以降の実験に用いるアルギン酸ナトリウム溶液の濃度は、微細なひび割れの数量が多い HPCRCC は 0.10 %、その他のものには 0.25 % のものを用いることとした。HPCRCC は、ひび割れ自体が微細であることに加えて、繊維がひび割れ破面間を架橋して現れるため、浸透後のアルギン酸ナトリウム溶液や反応後の生成ゲルの保持性能に優れていると思われる。一方、繊維の混入が微量である PCM や無混入の NM は、ひび割れ内部におけるアルギン酸ナトリウム溶液の保持性に期待がもてないことから、HPCRCC と比較して高濃度のアルギン酸ナトリウム溶液を用いることとした。

表-2 ひび割れの発生状況

箇所	供試体番号	HPFRCC				PCM			NM			
		1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
補修材側	本数(本)	17	8	9	7	1	2	1	2	1	3	1
	最小値(mm)	0.001	0.007	0.007	0.010	0.073	0.062	0.187	0.021	0.413	0.006	0.130
	最大値(mm)	0.046	0.032	0.040	0.027	0.073	0.062	0.187	0.045	0.413	0.288	0.130
	合計値(mm)	0.255	0.159	0.153	0.121	0.072	0.072	0.072	0.066	0.066	0.294	0.294
母材側	本数(本)	1	1	1	3	2	1	1	1	1	2	2
	最小値(mm)	0.054	0.054	0.054	0.054	0.130	0.140	0.224	0.070	0.050	0.209	0.352
	最大値(mm)	0.568	0.501	0.589	0.655	0.130	0.140	0.224	0.070	0.050	0.209	0.352
	合計値(mm)	0.889	0.889	0.889	0.889	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.215	0.389
透水速度 ($\times 10^{-3}$ ml/s)		2.70	0.55	1.19	3.69	69	52	1562	13	10	1041	231

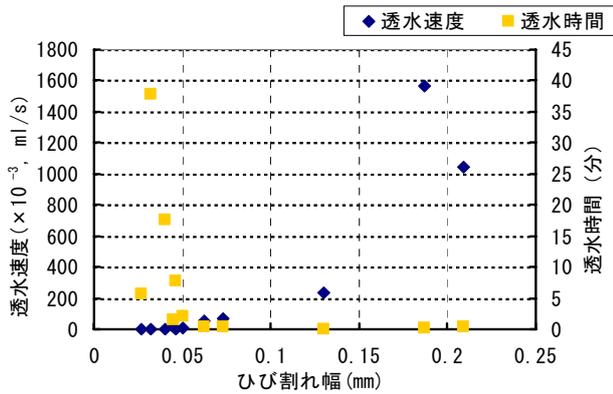


図-4 アルギン処理前のひび割れ幅と透水速度

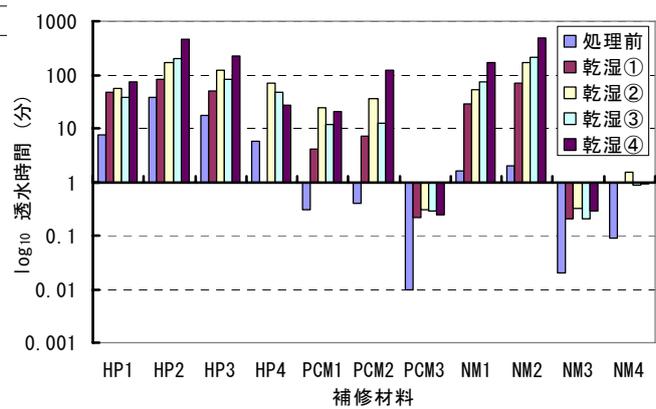


図-5 アルギン処理後の透水性

表-3 アルギン処理前後の透水時間差

	HP1	HP2	HP3	HP4	PCM1	PCM2	PCM3	NM1	NM2	NM3	NM4
最大ひび割れ幅(mm)	0.046	0.032	0.04	0.027	0.073	0.062	0.187	0.045	0.050	0.209	0.130
透水時間差(分)	65.5	430.1	205.7	21.9	20.6	122.7	0.23	167.3	485.2	0.27	0.81
透水時間比	9.5	12.4	12.8	4.9	69.7	307.8	17.8	105.6	487.2	14.5	10

写真-3にアルギン酸ナトリウムとHPFRCC中のカルシウムイオンとの反応によって生成したゲルを示す。この場合のゲルはHPFRCCの供試体を50mm角に切り出し、0.10%のアルギン酸ナトリウム溶液に3時間浸漬した後の生成物である。

3.2 ひび割れの発生状況とアルギン処理前の透水性

(1) ひび割れの発生状況

表-2に供試体のひび割れ本数とひび割れ幅を示す。ひび割れの発生状況を補修材別にみると、HPFRCC供試体の場合、補修材側のひび割れ本数は7本~17本、最大ひび割れ幅は0.027mm~0.046mmとなっており、母材側の最大ひび割れ幅が0.501mm~0.655mmと大きいにも関わらず、HPFRCCの特徴が良く現れた状況となった。一方、PCM供試体の場合、補修材側のひび割れ本数は1本~2本、最大ひび割れ幅は0.062mm~0.187mmで、母材側の最大ひび割れ幅は0.130mm~0.224mmとなった。PCM-3のひび割れ幅は補修材側で0.187mm、母材側では0.224mmとなっており、供試体の高さ方向によるひび割

れ幅が近似した結果となった。NM供試体の場合、補修材側のひび割れ本数は1本~3本、最大ひび割れ幅は0.045mm~0.413mmとばらついて現れ、母材側の最大ひび割れ幅は0.050mm~0.352mmとなった。NM-2は補修材側のひび割れ幅は0.413mm、母材側のひび割れ幅は0.050mmとなり、上下で逆転して現れた。

(2) アルギン処理前の透水性

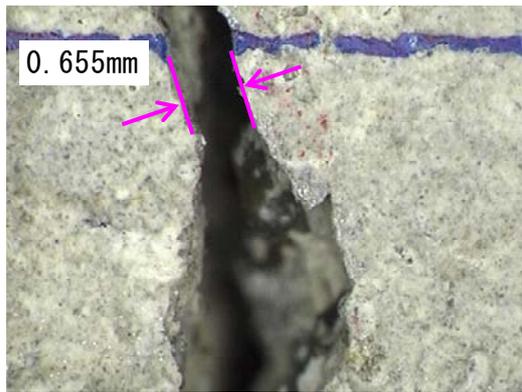
図-4にアルギン酸ナトリウム溶液で処理する前の、最大ひび割れ幅と透水速度の関係を示す。

図中のひび割れ幅は、補修材側と母材側のそれぞれの最大ひび割れ幅のうちの小さい方の値である。

透水速度はひび割れ幅が大きくなるに従って速くなり、ひび割れ幅が0.1mm以上となると加速度的に大きくなる傾向を示した。一般にひび割れ部からの漏水量は、ひび割れ幅の3乗に比例するようであるが、本実験でもこれとほぼ近似した結果となった。

3.3 アルギン処理後の透水性

図-5にアルギン酸ナトリウム溶液で処理後の、乾湿

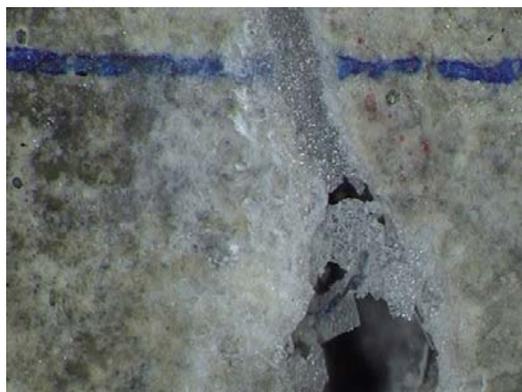


1) HPFRCC-4



2) NM-4

(a) 透水試験前



1) HPFRCC-4



2) NM-4

(b) 透水試験後

写真-4 透水試験前後のひび割れ部の状況

回数と透水時間の関係を、表-3 に各供試体の最大ひび割れ幅とアルギン処理前後の透水時間差を示す。

材料間での比較では、HPFRCC が母材側のひび割れが 0.501mm~0.655mm と大きいにも関わらず、アルギン処理前でも高い止水性能を示した。アルギン処理後では、4 例中の 3 例が乾湿の繰り返しとともに止水性能が向上する傾向を示した。アルギン処理前後の透水時間差は 22 分~430 分であった。

図-5 から、アルギン処理前の透水時間（水頭 250mm から 200mm まで下がる所要時間）が 1 分以下のものは、PCM-1, PCM-2, PCM-3, NM-3 および NM-4 の 5 例が該当し、このうちの PCM-3, NM-3, NM-4 についてはアルギン処理後についても透水時間が 1 分を上回ることはなかった。一方、残りの 2 例についてはいずれもアルギン処理後に止水性能が向上して、処理前後の透水時間の差は 21 分~123 分、比では 70 倍~約 308 倍となった。NM-1, NM-2 もアルギン処理後の数値が大きく現れ、NM-2 はアルギン処理前後の透水時間の比は約 500 倍近くとなって現れた。

図-6 に最大ひび割れ幅とアルギン処理前後の透水時間の差を示す。最大ひび割れ幅が、概ね 0.1mm 以下とな

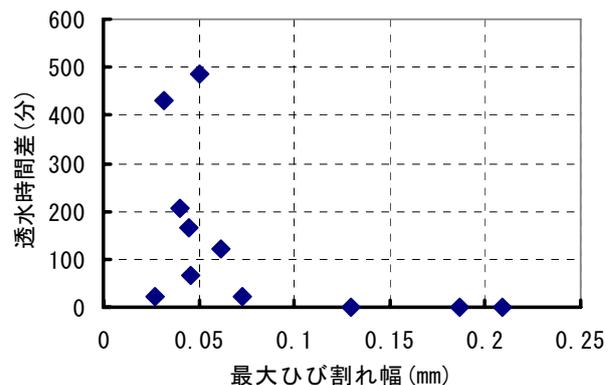


図-6 ひび割れ幅とアルギン処理前後の透水時間差

ると処理後の改質効果が高く現れた。

写真-4 に透水試験開始前と全試験終了後の母材側コンクリートのひび割れ部の状況を示す。

写真はマイクロスコープの画像で、左側は HPFRCC-4、右側は NM-4 で、前者の補修材側の最大ひび割れ幅は 0.027mm、母材側の最大ひび割れ幅は 0.655mm、後者の補修材側の最大ひび割れ幅は 0.130mm、母材側の最大ひび割れ幅は 0.352mm である。写真に示した HPFRCC-4 は HPFRCC の 4 例中で最も改質効果が少なかったもので

ある。

試験終了後のひび割れ部分は、いずれの場合もひび割れの輪郭線に沿って析出物の固着が認められ、HPFRCC-4では、ひび割れ開口部の一部表面を析出物で塞いでいるのが観察されたが、表面部分のみが薄皮状となって覆っているだけで、内部は空洞の状態であった。

透水試験は、透水速度が遅いものは試験前日から装置内に水を入れて貯水し、速いものは試験直前に装置内への注水を数回繰り返して、ひび割れ内部へ水をいきわたらせてから実施した。これは乾燥後のゲルの膨潤作用の促進や、透水試験のばらつきを要因のひとつとして、ひび割れ断面内の気泡によるものを考えたことによる。

供試体の透水性能によって異なるものの、アルギン処理前の透水試験から試験終了時まで、延べ日数として約10日間、供試体になんらかの水供給を行ってきたことになる。析出物はセメントに由来するカルシウムが、水分の供給に伴って水酸化カルシウムの状態で析出したものと推察された。

HPFRCC-4の乾湿繰り返し過程における透水所要時間が約50分の時の、母材側のひび割れ箇所の漏水状況は、数分間で1滴の水がしたたる程度であった。一方、NM-4の透水時間は約40秒で流下水には至らないものの速いピッチで落ちた。このことから、補修材側のひび割れ幅を小さくして、母材側への水の供給速度を遅くすることは、補修材の裏面に生じたひび割れの自己閉塞性を助長するものと考えられた。アルギン酸ナトリウムには水の供給速度を遅らせる効果が期待できた。また、HPFRCCは、それ自体のひび割れが微細であることに加えて、ひび割れが生じた後には、多量の繊維がひび割れ断面内の壁間を通じて現れることから、ひび割れ断面内の通水を妨げることによる透水抑止性能と、その後の自己閉塞性能に期待が高いと考えられた。

アルギン酸処理による止水性の改善効果は、NM-2が量、率ともに最も高く現れたが、補修材側の最大ひび割れ幅が0.413mmで、漏水側となる母材側の最大ひび割れ幅が0.05mmと極端にせまくなっていることから、補修材と母材の境界域で滞留が生じて、ゲルも保持しやすく、また、水酸化カルシウムの析出も助長されたと思われる。

以上をまとめると、アルギン酸処理によるひび割れ部の止水性の検討を行ったが、全体の改質効果を透水量で見た場合には、ひび割れ幅が0.10mm以下の場合に効果

が高く現れ、透水比からはひび割れ幅が0.05mm～0.10mmまでの領域に効果が高いことが認められた。

4. あとがき

海藻ゲル物質によるひび割れ部の止水性の改善を、厚さ40mmのコンクリートに、HPFRCC、断面修復用のポリマーセメントモルタル、W/C55%の普通モルタルを各々10mm積層して一体化した後に、ひび割れを導入して透水試験によりその効果を確認した。結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 海藻ゲル物質による止水性の改善効果は、ひび割れ幅が0.10mm以下の場合には高く現れたが、ひび割れ幅が0.10mmを越えた場合には、ほとんど効果が無いことが確認された。
- (2) ひび割れ部分への水の供給速度が遅くなるほど、水酸化カルシウムと思われる析出物が速い段階で生成され、ひび割れ断面内における固着が促進されて、止水性が改善される可能性が高いと考えられた。アルギン酸ナトリウムには水の供給速度を遅らせる効果が期待できた。
- (3) 補修を想定した実験の範囲内の厚さにおける2層構造の漏水性は、ひび割れ幅の小さい方の影響を受けた。従って、漏水対策の面からもHPFRCCによる積層は優位かと思われた。

謝辞；本研究にあたり、岐阜県産業技術センターの大野仁志氏から貴重な助言を頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー127：土木学会、2007.3.
- 2) 加藤久也ほか：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の水密性能と撥水材の効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.28, No.1, pp.341-346, 2006
- 3) 相田奨ほか：安定剤とその利用技術、衛生技術会、pp.84-91, 1981.3