

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料が有する ひび割れ分散性の漏水量低減効果

上野和広* 長東 勇** 石井将幸**

* 鳥取大学大学院連合農学研究科, 〒680-8553 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101

** 島根大学生物資源科学部, 〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060

要 旨

機能低下したコンクリート水路では、その機能の回復を図るために補修工法が適用され始めている。しかし、ひび割れ上に敷設された補修材料には、ひび割れ幅の変動に起因した割れが生じ、再び機能低下する可能性が高い。本研究では、そうした補修後における機能低下を防止するため、補修材料にひび割れが発生した場合においても要求性能を確保するための材料として複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）に着目した。HPFRCC およびモルタル供試体にひび割れを発生させ、透水試験を行った結果、ひび割れ分散性を有する HPFRCC からの漏水量はモルタルと比較して大きく低減することが明らかとなった。また、ひび割れ幅が小さい場合には漏水量が徐々に減少し、水密性が回復することが確認された。

キーワード：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料、ひび割れ分散性、Hagen-Poiseuille の法則、透水試験、自己修復性

1. はじめに

建設から相当な年月が経過したコンクリート水路では、ひび割れの発生による劣化因子の侵入促進および漏水の発生や、モルタル部分の先行した摩耗による粗度係数の悪化など機能低下が問題となっている。近年、こうした水路には表面被覆工法や断面修復工法といった補修工法が適用され始めており、低下した機能の回復および向上が図られている。コンクリート水路に対する補修工法には対象とする変状によって各種の性能が要求され、またそれは供用期間を通して発揮され続けることが求められる。しかし、長く薄いコンクリート版から構成されるコンクリート水路では、水路躯体に発生したひび割れの幅が温度変化に伴って多頻度で大きく変動することが確認されていることから（上野ら、2008）、その上部へ適用した補修材料にはひび割れが発生する可能性が高く、再び機能低下を生じることが懸念される。そのため、補修工法には上述した性能に加え、ひび割れ幅の変動に抵抗する性能（ひび割れ追従性）が要求される。既刊の設計施工指針案では、ひび割れ追従性を評価する指標の例として伸び能力および疲労特性が挙げられていることから（土木学会、2005）、ひび割れ幅の変動に追従し補修材料のひび割れの発生を防ぐには、高い伸び率を有する柔軟な材料が有効と考えられる。ところが、一般にそうした材料は摩耗作用に対する抵抗性が低い場合が多く、流水および混入土砂による摩耗作用を受けるコンクリート水路に適用可能な工法・材料の開発には至っていない。

そこで、補修材料にひび割れが発生した後においても補修材料に求められる性能を確保するための材料として複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（High Performance Fiber Reinforced Cement Composite: HPFRCC）に着目し、その有効性について検討した。HPFRCC とは、モルタル中に繊維を分散させることにより、高い靱性を付与したセメント系材料である。また、初期ひび割れが拡大し、そのまま破壊に至るような脆性的破壊を示す一般的なセメント系材料とは異なり、初期ひび割れ発生後も混入された繊維がひび割れを架橋して応力を伝達することから、引張変形の増加に伴ってひび割れ幅が拡大するのではなく、微細なひび割れが多数発生する（ひび割れ分散性）材料である（土木学会、2007）。

こうした特性を有する HPFRCC は、補修材料として適用された後にひび割れが発生しても、水密性および劣化進行の防止といった補修材料に求められる性能を維持できる可能性が高い。これは、Hagen-Poiseuille の法則に基づいたひび割れからの透水量はひび割れ幅の 3 乗に比例することから、ひび割れ幅を抑制することによる漏水量の低減効果は大きく、また、劣化因子の浸入抑制効果も期待できるからである。本研究では、割裂によってひび割れを発生させた HPFRCC 供試体の透水試験を行い、ひび割れ分散性による漏水量低減効果について検討した。

2. ひび割れ分散性による漏水量低減効果

粘性の小さい液体が 2 枚の板の間の狭い間隙を流れる

際、その流れは層流になる。そのため、ひび割れ内部における流れは Hagen-Poiseuille 流れになると考えられ、この流れにおける透水量は式(1)で与えられる (土木学会, 2002)。

$$Q_{cjd} = \frac{\gamma_w}{12a\mu_w} bw^3 \frac{h}{L} \quad (1)$$

ここに、 Q_{cjd} : ひび割れからの漏水量 (m^3/s)、 γ_w : 水の単位重量 (N/m^3)、 a : ひび割れの部材内部での曲がりやひび割れの表面粗さの影響を考慮する係数、 μ_w : 水の粘性係数 ($Pa \cdot s$)、 b : ひび割れの長さ (m)、 w : ひび割れ幅 (m)、 h : 水頭差 (m)、 L : 透水経路長 (m) である。

式(1)では、ひび割れからの漏水量がひび割れ幅の 3 乗に比例しており、ひび割れ幅を抑制することによる漏水量低減効果を理論的に示している。すなわち、HPFRCC はひび割れ分散性に伴うひび割れ幅抑制効果によって、ひび割れ発生後においても水密性等の性能が維持できる可能性が高いと考えられる。

3. 実験方法

HPFRCC の有するひび割れ分散性が、漏水量低減に及ぼす効果を透水試験により評価した。以下にその内容を示す。

3.1 供試体概要

HPFRCC は現場での施工性を向上させるため、吹付け施工システムが開発されており (閑田ら, 2001)、円滑な施工が可能となっている。そこで、本研究では現場での施工条件に合わせ、吹付けにより作製した HPFRCC を供試体として用いた。Table 1 に示す配合の HPFRCC を用い、 $\phi 100mm \times 30mm$ の円盤型供試体を湿式吹付け方式で厚み方向へ吹付けることにより作製した。使用した繊維は、有機系の高強度ビニロン繊維であり、繊維長 12mm、繊維径 0.04mm、引張強度 $1,600N/mm^2$ 、配合割合は体積率で 2.0% である。また、HPFRCC の漏水量低減効果を他のセメント系材料と比較するため、セメント、細骨材、水の重量比が 1:2.5:0.6 のモルタルで供試体を作製した。供試体形状は HPFRCC と同様である。なお、試験を実施した時の材齢は、いずれも 28 日以上である。

3.2 ひび割れの導入

本研究では、割裂により供試体にひび割れを導入した。載荷速度は、現有の耐圧試験機で設定可能な速度の中で最も緩やかな $0.06N/(mm^2 \cdot s)$ とした。

HPFRCC へのひび割れの導入は、供試体中央部に変位計 (感度: 約 $2,000 \times 10^{-6}/mm$ 、標点距離: 50mm) を設置し、その変位計が設定した目標変位量を示すまで割裂を継続することにより行った。しかし、除荷後の供試体において、ひび割れを架橋した繊維の弾性による変位の回復が生じ、割裂時に示した最大変位量が供試体に残留した変位量と等しくならないことが確認された。そこで、供試体にコンタクト・ミクロン・ストレインゲージ (精

Table 1 HPFRCC の配合
Mix proportion of HPFRCC

水結合材比 W/B(%)	砂結合材比 S/B(%)	単位水量 W(kg/m ³)	繊維体積率 Vf(%)
32.0	41.3	360.0	2.0

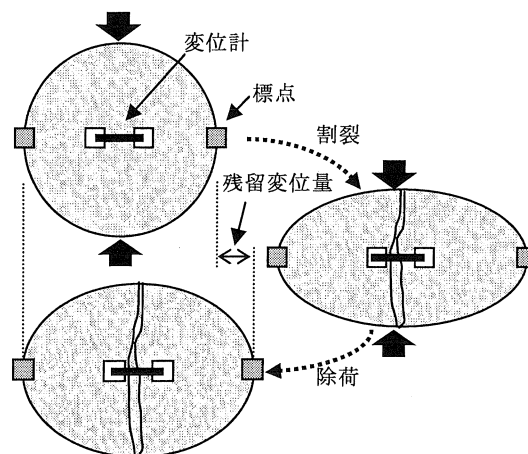


Fig.1 HPFRCC へのひび割れ導入方法
Method of causing crack in HPFRCC

度: 0.001mm) 用の標点を取り付け、割裂の前と後 (除荷後) の変位量を測定し、両者の変化量から供試体に残留した変位量 (以後、残留変位量と呼ぶ) を求めた (Fig.1)。設定した目標変位量は、0.1mm、0.2mm、0.4mm の 3 ケースであり、それぞれ 3 体の供試体を割裂し、ひび割れを導入した。

モルタル供試体については、割裂により二分した供試体間に厚さ 0.1mm のナフロンテープを所要の枚数挟むことによってひび割れ幅を調節した。

次に、ひび割れの測定方法について示す。供試体を割裂方向に 10 分割した際の分割線 (11 本) とひび割れが交差した点およびひび割れの先端において、ひび割れ幅および交差位置の座標 (供試体の中心を原点とする) を測定した (後掲の Fig.2 参照)。ただし、供試体の縁部 7mm の範囲は、透水試験を行う際に止水用のパッキンが接触するため、ひび割れの計測から除外した。以上のように測定した結果から、式(1)においてひび割れが関係する箇所値 bw^3 (以後、ひび割れ定数と呼ぶ) を式(2)により求めた。

$$bw^3 = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=2}^{11} \left\{ \left(\frac{w_{j-1} + w_j}{2} \right)^3 \times b_j \right\} \right] \quad (2)$$

$$b_j = \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2} \quad (3)$$

ここに、 n : 供試体の片面に発生したひび割れ本数、 j : 分割線の番号、 w_j : j 番目の分割線とひび割れの交差位置のひび割れ幅 (mm)、 b_j : $j-1$ 番目の分割線とひび割れの交差位置から j 番目の分割線とひび割れの交差位置までのひび割れ長さ (mm)、 x_j : j 番目の分割線とひび割れの交差位置の x 座標 (mm)、 y_j : j 番目の分割線とひび割れの交差位置の y 座標 (mm) である。

3.3 透水試験方法

本研究で採用した透水試験は、アウトプット法による定水位透水試験である。水頭差は一般的なコンクリート水路における水深を参考に 1.0m とした。漏水量は供試体からの流出水を電子はかり上へ設置した容器へ滴下させ、その重量から算出した。漏水量の測定は、試験の開始から 10 分後、30 分後、60 分後に行い、その後の測定頻度は 1 時間に 1 度とした。

4. 結果と考察

4.1 ひび割れ発生状況

割裂により導入したひび割れの発生状況の一例を Fig.2 に示す。Fig.2 を見ると、HPFRCC に多数のひび割れが発生していることから、割裂引張試験によって HPFRCC のひび割れ分散性を発揮させ、その評価を行うことが可能と考えられた。また、ひび割れの測定結果を Table 2 および Table 3 に示す。HPFRCC において最もひび割れ数が多かったのは H04-1 であり、その数は表面で 8 本、裏面で 14 本であった。一方、モルタルはひび割れ分散性を持たないことから脆性的な破壊を示し、ひび割れ数は全て 1 本である。

次に、HPFRCC における割裂時最大変位量と残留変位量を見ると、HPFRCC の残留変位量は全てにおいて割裂時最大変位量よりも小さく、ひび割れを架橋した繊維の弾性による変位量の回復を確認することができる。割裂時最大変位量が大きいほど変位量の回復度合は小さくなっており、これは変位量の増大に伴って繊維の滑りや伸び、あるいは破断が進行したためと考えられる。なお、H02-1 の残留変位量については、その値がマイナスを示し、測定ミスと考えられたため、考察から除外した。

ここで、各供試体に生じた変位量と平均ひび割れ幅 w

の関係を Fig.3 に示す。なお、HPFRCC において変位量に用いたのは残留変位量であり、モルタルでは平均ひび割れ幅である。Fig.3 を見ると、モルタルでは変位量の増加に伴いひび割れ幅が大きく拡大するのに対し、HPFRCC ではほとんど拡大せず、狭く抑えられることを確認できる。これは、HPFRCC がひび割れ分散性を発揮したためであり、変位量を増加させるエネルギーが新たな微細ひび割れの発生に使われた結果と考えられる。HPFRCC における平均ひび割れ幅は、最大でも 0.028mm であり、ひび割れ分散性によるひび割れ幅抑制効果は非常に大きい。一方、モルタルはひび割れ分散性を有さないため、変位量が増加するとひび割れ幅の拡大へと直結する。

さらに、変位量とひび割れ長さの関係は Fig.4 のよう

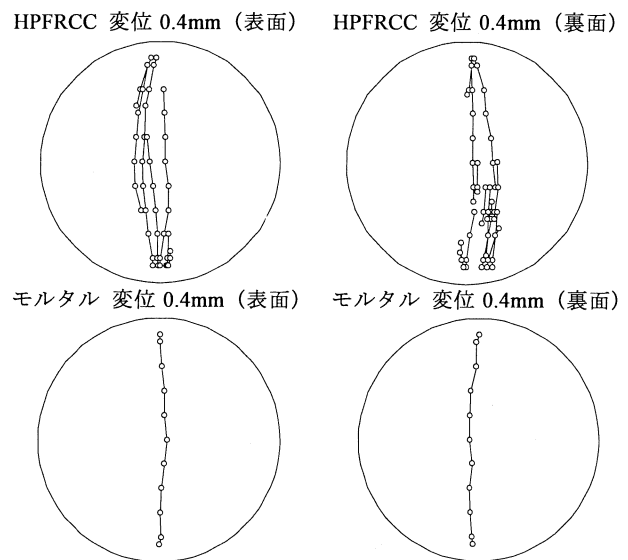


Fig.2 ひび割れ発生状況の一例
One example of cracked specimen

Table 2 HPFRCC のひび割れ発生状況
Measurement results of cracks in HPFRCC specimens

目標変位量	0.1mm	0.1mm	0.1mm	0.2mm	0.2mm	0.2mm	0.4mm	0.4mm	0.4mm
供試体名	H01-1	H01-2	H01-3	H02-1	H02-2	H02-3	H04-1	H04-2	H04-3
割裂時最大変位量(mm)	0.119	0.103	0.107	0.201	0.202	0.211	0.413	0.412	0.406
残留変位量(mm)	0.026	0.023	0.013	-	0.057	0.112	0.247	0.167	0.164
ひび割れ本数	表面	5	3	8	1	2	4	8	6
	裏面	3	3	1	1	3	4	14	5
最大ひび割れ幅(mm)	0.026	0.024	0.030	0.024	0.033	0.080	0.095	0.043	0.080
平均ひび割れ幅(mm)	0.010	0.007	0.005	0.017	0.020	0.028	0.025	0.021	0.024
ひび割れ長さ(mm)	表面	244.0	151.0	228.8	86.3	89.2	186.7	317.6	221.4
	裏面	114.8	106.2	87.0	86.5	139.8	168.0	307.8	162.0
	平均	179.4	128.6	157.9	86.4	114.5	177.4	312.7	191.7

Table 3 モルタルのひび割れ発生状況
Measurement results of cracks in mortar specimens

目標変位量	0.1mm	0.1mm	0.1mm	0.2mm	0.2mm	0.2mm	0.4mm	0.4mm	0.4mm
供試体名	M01-1	M01-2	M01-3	M02-1	M02-2	M02-3	M04-1	M04-2	M04-3
ひび割れ本数	表面	1	1	1	1	1	1	1	1
	裏面	1	1	1	1	1	1	1	1
最大ひび割れ幅(mm)	0.037	0.040	0.028	0.133	0.133	0.133	0.320	0.320	0.347
平均ひび割れ幅(mm)	0.021	0.021	0.021	0.080	0.082	0.083	0.172	0.174	0.178
ひび割れ長さ(mm)	表面	86.3	86.3	86.9	86.5	86.4	86.0	86.4	86.8
	裏面	86.2	87.2	88.0	86.4	87.0	86.8	86.5	86.3
	平均	86.3	86.7	87.5	86.5	86.7	86.4	86.5	86.4

になる。HPFRCCは多数の微細ひび割れが発生したため、ひび割れは全ての変位量においてモルタルよりも長い。したがって、式(1)におけるひび割れ長さ b の値が大きくなることから、この点に関しては、漏水量の増加方向へ影響することになる。しかし、先に示したひび割れ幅の抑制効果と併せて考えた場合、ひび割れ幅は3乗された値で漏水量に影響することから、結果的には漏水量は低減すると考えられる。

そこで、ひび割れからの漏水量に直接的に影響を与えるひび割れ定数 (bw^3) の値を算出し、HPFRCCとモルタルで比較した。表面と裏面のそれぞれについて求めて平均をとった値と各供試体における変位量との関係を Fig.5 に示す。HPFRCCとモルタルでひび割れ定数の値は大きく異なっており、その差は変位量の増加によって著しく拡大する。これは、ひび割れ定数とひび割れ長さが比例関係にあるのに対し、ひび割れ幅の場合はその3乗された値と比例関係にあるためである。すなわち、ひび割れが2本に分かれ、ひび割れ長さが2倍になった場合、ひび割れ幅は1/2の3乗となるため、ひび割れ定数の値は結果的に1/4になる。この低減効果は、ひび割れの発生数が多いほど大きい。変位量の値が同程度である H04-2,3 および M04-1,2,3 でひび割れ定数の値を比較したところ、HPFRCCの値はモルタルの約1/130となった。

4.2 透水試験結果

HPFRCCの透水試験結果を Fig.6 に、モルタルの透水試験結果を Fig.7 に示す。Fig.6 および Fig.7 を見ると、ひび割れ幅の測定結果から予測されたように、HPFRCCからの漏水量はモルタルと比較して非常に少なく、HPFRCCのひび割れ分散性による漏水量低減効果が確認された。各供試体における変位量と透水試験開始10分後の単位時間あたり漏水量(初期漏水量)の関係は Fig.8 に示すとおりであり、同程度の変位量であってもHPFRCCとモルタルでは漏水量が大きく異なっている。変位量の値がほぼ等しい H04-2,3 および M04-1,2,3 で比較すると、HPFRCCからの漏水量はモルタルの約1/46であり、HPFRCCの高い漏水量低減効果が明らかとなった。しかし、HPFRCCのひび割れ定数がモルタルの約1/130であったことを考慮すると、HPFRCCからの漏水量はひび割れ定数から予測するよりも多く生じたことになる。これは、HPFRCCが高靱性を有することから、ひび割れを導入する際の割裂時にモルタルより長く引張作用を受け、その結果、供試体の組織自体に緩みが生じ、ひび割れ以外からの漏水が生じたためと考えられる。また、HPFRCCに発生するひび割れが微細であるため、ひび割れ計測時に確認されなかったひび割れが存在し、そのひび割れからの漏水が生じたことも漏水量が増加した一因と考えられる。

ここで、Fig.6においてHPFRCCからの漏水量の経時変化を見ると、全てのグラフにおいて時間の経過に伴う漏水量の減少を確認することができる。しかし、同様の

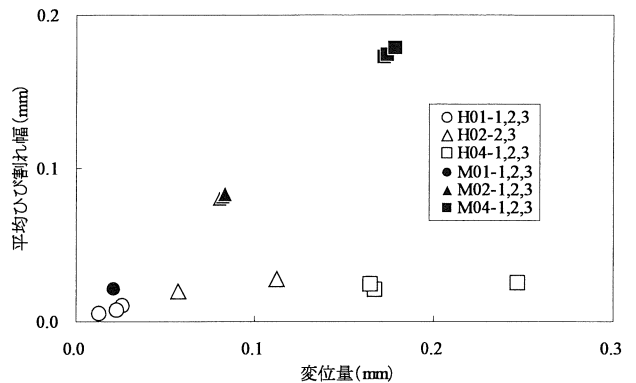


Fig.3 変位量とひび割れ幅の関係
Relationship between the displacement and the crack width

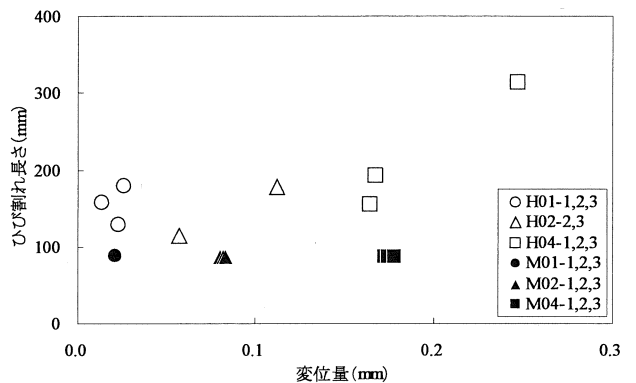


Fig.4 変位量とひび割れ長さの関係
Relationship between the displacement and the crack length

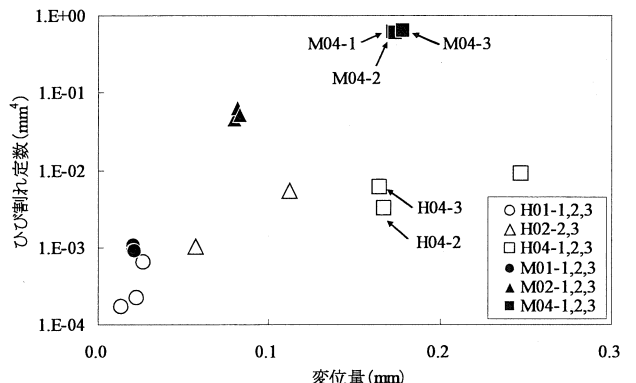


Fig.5 変位量とひび割れ定数の関係
Relationship between the displacement and the crack constant

傾向は Fig.7 における M01-1,2,3 のモルタル供試体にも見られ、HPFRCCに限られた現象では無い。したがって、この水密性の回復はセメント系材料に特有の自己修復性の発揮、あるいは割裂時に発生した微細な供試体片がひび割れに目詰まりを生じさせたフィルター効果によるものと考えられる。しかし、M02-1,2,3 および M04-1,2,3 ではそういった傾向を確認することはできず、試験開始時から終了時までほぼ一定の漏水量を示している。これより、自己修復性およびフィルター効果の発揮にはひび割れ幅の影響が示唆されたため、式(4)により水密性回復率 R を求め、ひび割れ幅との関係を確認した。

$$R = \frac{L_i - L_{24}}{L_i} \times 100 \tag{4}$$

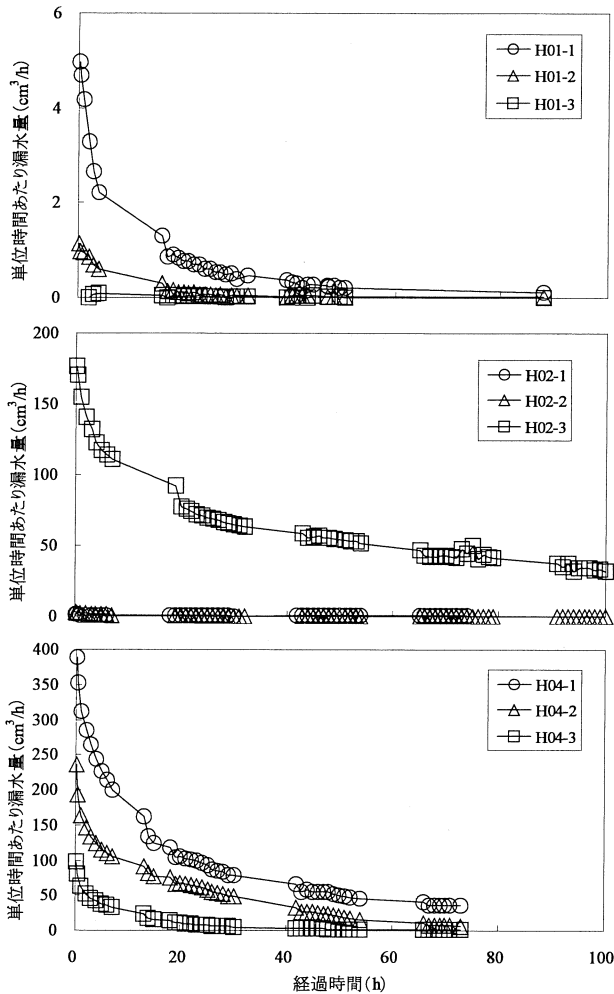


Fig.6 HPRCCの透水試験結果
Leakage from HPRCC specimens

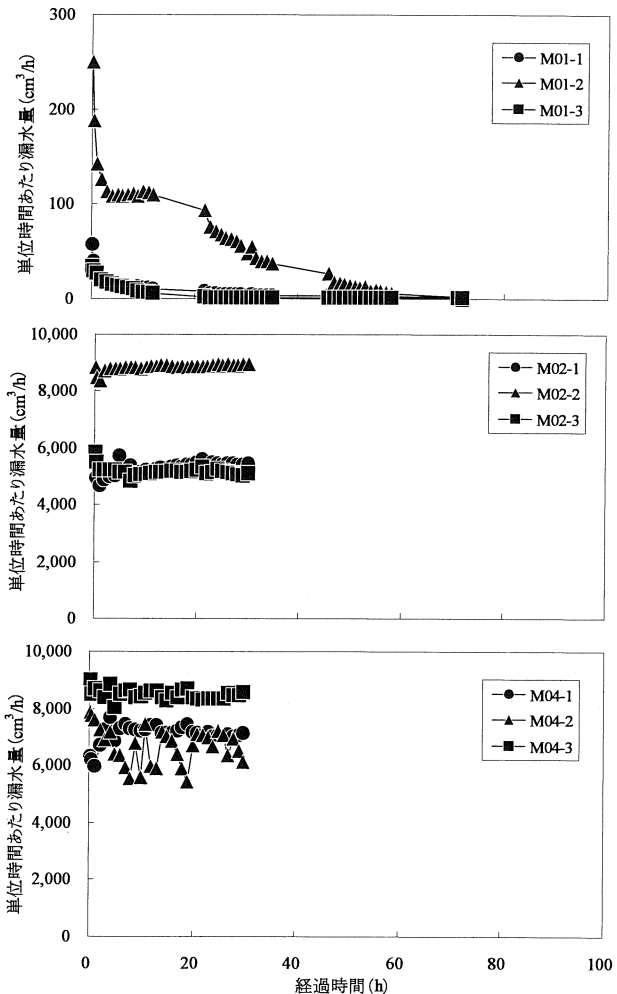


Fig.7 モルタルの透水試験結果
Leakage from mortar specimens

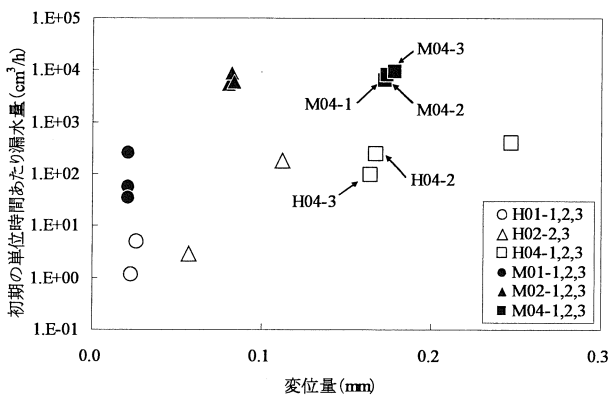


Fig.8 変位量と初期漏水量の関係
Relationship between the displacement and the initial leakage

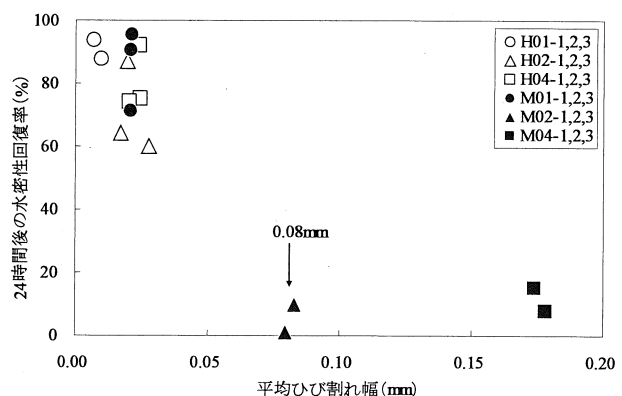


Fig.9 平均ひび割れ幅と水密性回復率の関係
Relationship between the crack width and the ratio of recovery

ここに、 R : 24 時間後における水密性回復率 (%), L_i : 初期漏水量 (cm^3/h), L_{24} : 試験開始 24 時間後の単位時間あたり漏水量 (cm^3/h) である。

水密性回復率と平均ひび割れ幅の関係を Fig.9 に示す。Fig.9 を見ると、ひび割れ幅が小さいほど水密性回復率が高いことを確認することができる。これは、ひび割れが発生して漏水が生じたとしても、そのひび割れ幅が小さい場合には低下した水密性を自ら回復することが可能であることを示している。すなわち、ひび割れ分散性を有

し、発生するひび割れ幅を小さく抑制することが可能な HPRCC は、ひび割れ発生後における水密性の回復についても優位性が高いことが明らかとなった。また、Fig.9 においてひび割れ幅が約 0.08mm 以上のデータを見ると、水密性回復率が非常に低くなっていることが確認できる。これより、ひび割れ幅が約 0.08mm 以上になると、水密性の回復はほとんど見込めないことが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、ひび割れが発生した後においても補修材料に求められる性能を確保するための材料として HPMFRCC に注目し、その有効性を透水試験により評価した。得られた知見を以下に示す。

1. HPMFRCC にひび割れが発生した際の残留変位量は、ひび割れを架橋した繊維の弾性により変位量が回復し、割裂時最大変位量よりも小さくなる。変位量の回復度は、割裂時最大変位量が大きいほど小さい。
2. HPMFRCC はひび割れ分散性を発揮するため、ひび割れの総延長はモルタルよりも長くなる。しかし、ひび割れ幅はモルタルと比較して非常に小さくなるために、HPMFRCC のひび割れ定数 (bw^3) はモルタルと比較して非常に小さくなる。
3. 微細なひび割れが多数発生する HPMFRCC は、ひび割れ分散性の発揮によって、ひび割れからの漏水量を大きく低減する。
4. ひび割れ幅が小さい場合、自己修復性あるいはフィルター効果によって水密性が回復することが確認された。また、水密性回復率はひび割れ幅が小さいほど高くなる傾向を示したため、微細なひび割れが発生する HPMFRCC のさらなる優位性が明らかとなった。
5. 本実験条件下における水密性の回復は、ひび割れ幅が 0.08mm を超えた場合ほとんど望めない。

謝辞：本研究の遂行にあたり、多大なるご協力を頂いた島根大学施設機能工学研究室専攻生の蜂谷稔治氏、荒木直子氏、陳星氏、原武氏に深く感謝を致します。また、論文を執筆するにあたり、様々な助言を頂いた鳥取大学の緒方英彦准教授に深謝の意を表します。

引用文献

- 土木学会 (2002) : 2002 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 32-33.
- 土木学会 (2005) : コンクリートライブラリー119 表面保護工法設計施工指針 (案), 24-25.
- 土木学会 (2007) : コンクリートライブラリー127 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), 1-4.
- 関田徹志, 斉藤 忠, 坂田 昇, 平石剛紀 (2001) : PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による吹付け補修材料の基礎特性, コンクリート工学年次論文集, 23-1, 475-480.
- 上野和広, 長東 勇, 野中資博, 石井将幸 (2008) : コンクリート水路のひび割れ補修材料に必要な伸び性能, 農土論集, 254, 59-66.

[2008. 12. 17. 受稿, 2009. 3. 5. 閲読了]

[この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 農業農村工学会論文集編集委員会にて)は, 2009年10月24日まで受付けます。]

Leakage Reduction Effect by Multiple Cracking Feature of High Performance Fiber Reinforced Cement Composite

UENO Kazuhiro*, NATSUKA Isamu** and ISHII Masayuki**

* *The United Graduate School of Agricultural Science, Tottori University,*
4-101 Koyama-Minami, Tottori, Tottori, 680-8553, JAPAN

** *Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University,*
1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane, 690-8504, JAPAN

Abstract

In a kind of concrete canal, repair materials are applied for recovery of the deteriorated functions. However, due to the re-cracking of the repair material caused by the fluctuations of the crack width, there is a great possibility that the functional deterioration reoccurs after the repair. In this research, High Performance Fiber Reinforced Cement Composite (HPMFRCC), which has multiple cracking feature, was evaluated as a repair material to prevent the functional deterioration after the repair. HPMFRCC and mortar specimens were cracked and examined by permeability test. As a result, it was clarified that the leakage from the HPMFRCC specimen was very little compared with the leakage from the mortar specimen. Moreover, it was confirmed that the leakage from the narrow cracks were gradually decreased.

Key words : *High Performance Fiber Reinforced Cement Composite, Multiple cracking feature, Hagen-Poiseuille law, Permeability test, Self healing*