

報告 ASRによるひび割れが生じた擁壁へのHPFRCC吹付けによる修景と5年間の観察

林 承燦*1・森井 直治*2・関田 徹志*3・六郷 恵哲*4

要旨: アルカリシリカ反応 (ASR) によるひび割れが生じた重力式コンクリート擁壁の修景を主目的として、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) の吹付けによる表面補修の試験施工を行った。施工後5年を経過した時点でも、ひび割れ幅はほぼ0.1mm以下に抑制されており、当初期待したHPFRCCの効果が確認された。本適用の範囲では、HPFRCCのひび割れ分散に対し、補強材の配置や基盤コンクリートのひび割れのシールの効果は明確とはならなかった。HPFRCC上へのアクリル系塗料の塗布には、短期的な美観改善効果しか認められなかった。

キーワード: HPFRCC, ひび割れ, アルカリシリカ反応, 擁壁, 吹付け

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 (HPFRCC)¹⁾ は、引張力下においてひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動を示す繊維補強モルタルであり、コンクリート構造物の表面補修や断面修復への利用が期待されている。アルカリシリカ反応 (ASR) によるひび割れが生じたコンクリート構造物の中には、修景を目的に表面補修を行えばよいものもあるが、この目的に適した補修材料ならびに補修方法は十分には確立していない。

アルカリシリカ反応によるひび割れが生じた重力式コンクリート擁壁に対して、補景を目的にHPFRCCの吹付けによる表面補修の試験施工を、2003年4月に行った。これは、実構造物へのHPFRCCの吹付け施工としては、最も古いものの一つである。その後、施工後1年目、3年目および5年目にひび割れ発生状況等の観察を行った。

ここでは、試験施工の内容ならびに施工後の擁壁表面の観察結果について報告するとともに、当初適用した技術の妥当性について検証する。

2. 構造物のひび割れ状況と補修工法

2.1 構造物のひび割れ状況

対象とした構造物は、岐阜県東部広域水道事務所 (岐阜県瑞浪市釜戸町) 内にあり、1970年頃 (昭和40年代後半) に施工された重力式コンクリート擁壁 (幅約18m×高さ約5m) である。この擁壁には、アルカリシリカ反応による亀甲状のひび割れが生じたため、1994年にひび割れ注入工法と表面被覆工法による補修が行われた。しかし、2002年に著者らが調査した時点では、写真-1

に示すように再び擁壁表面に亀甲状のひび割れが生じていた。

過去の調査データやひび割れ形状が亀甲状であったことから、コア試料を採取 (擁壁下端から約80cm、表面から約50cmの位置) し、コンクリートの残存膨張量をJCI-DD2法により確認した。残存膨張量は0.005~0.011%であったことから、対象とした擁壁のコンクリートの将来の膨張量は比較的小さいと判断した。

2.2 補修工法の選定

アルカリシリカ反応による残存膨張量が小さいことと、重力式擁壁という構造物の特殊性とを考慮すると、この構造物の安全性や使用性が今後著しく低下するとは考え難く、アースアンカーのような力学的な補強を行う必要は無いと考えた。しかし、ひび割れ発生により美観が著しく低下していることから、修景を主目的とした表面補修が必要であると判断した。

補修工法として、ひび割れ注入や樹脂系材料の表面被覆による補修も考えられたが、この構造物において過去



写真-1 施工前の擁壁

*1 (株) デーロス・ジャパン 企画開発部 工博 (正会員)

*2 (株) デーロス・ジャパン (正会員)

*3 鹿島建設 (株) 技術研究所 工博 (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)

表—1 施工条件

擁壁のブロック No.	吹付け材料	補強筋	シール材によるひび割れ部処理	塗料による表面被覆
1	材料 A ・分類：HPFRCC ・使用繊維：PVA+高強度 PE ・繊維混入率：1.5vol%	溶接鉄筋網	有	1液型のアクリル系塗料を擁壁下端より2mの範囲に塗布
2		エキスパンドメタル		
3		—		
4		—		
5	材料 B ・分類：HPFRCC ・使用繊維：高強度 PVA ・繊維混入率：2.1vol%	溶接鉄筋網	有	
6		エキスパンドメタル		
7		—		
8		—		
9	材料 C ・分類：補修用吹き付けモルタル	溶接鉄筋網		



図—1 擁壁の分割図（単位：m）

3. 施工概要

3.1 施工条件

施工条件を表—1 に、擁壁の分割図を図—1 に示す。吹付け材料 3 種類（A、B、C）、補強筋 2 種類（溶接鉄筋網、エキスパンドメタル）、ひび割れ部のシール材の有無を組み合わせた合計 9 条件で、9 ブロックを施工した。1 ブロックの寸法は、幅約 1.8m×高さ約 5m であった。シール材には、1 液型ポリウレタン系シール材を使用し、ひび割れ部を幅 30mm、厚さ 5mm 程度シールした。擁壁のひび割れ部をシール材で覆い HPFRCC と擁壁コンクリートとの付着のない領域を設けることにより、HPFRCC に生じるひび割れが細かく分散しやすくなることを期待した。施工 2 日後に、1 液型のアクリル系塗料を全ブロックの擁壁下端より 2m までの範囲に塗布した。HPFRCC はひび割れ幅が小さいため、HPFRCC 上の塗膜が破れにくく、ひび割れが見えにくくなることを期待した。

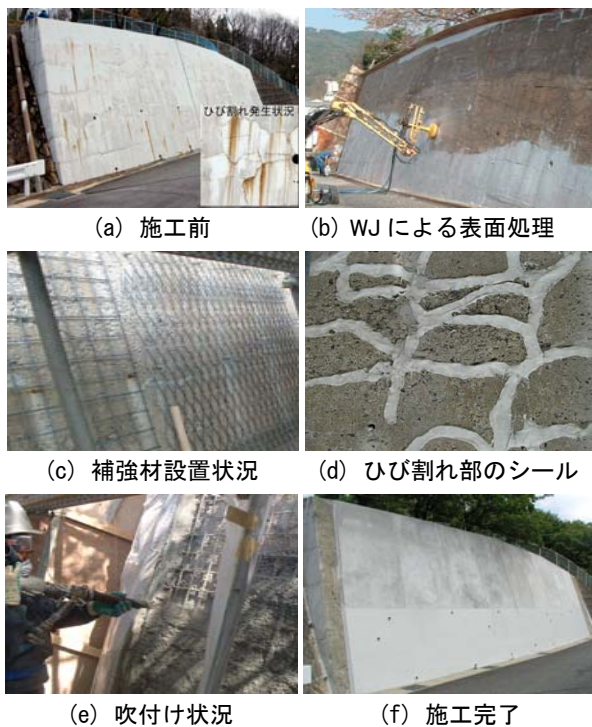
3.2 吹付け材料と補強筋

吹付け材料 A は、プレミックスポリマーモルタルに PVA 繊維（直径 0.026mm、長さ 6mm）および高強度 PE 繊維（直径 0.012mm、長さ 9mm）を体積比で 0.75% ずつ合計 1.5% 混入した HPFRCC 吹付けモルタル（水セメント比 46%）である。吹付け材料 B は、プレミックス材に高強度 PVA 繊維（直径 0.04mm、長さ 12mm）を体積比で 2.1% 混入した HPFRCC 吹付けモルタル（水結合材比 32%）である。吹付け厚さは、50～70mm 程度とした。

溶接鉄筋網には、鉄筋（SD295、D6）を 100mm ピッチで格子状に溶接したものを用いた。エキスパンドメタルには、メッシュ寸法が 75×203mm のもの（規格：XS-82）を用いた。補強筋は、擁壁面から 10mm 程度浮かせて配置した。補強筋を HPFRCC の中に配置することにより、HPFRCC のひび割れの局所化が生じにくく、ひび割れが細かく分散しやすくなることを期待した。

3.3 施工

施工の様子を写真—2 に示す。吹付け前には、ウォータージェット（WJ）により擁壁表面を数 mm の深さで



写真—2 施工の様子

にこれらの工法を適用した結果、再劣化が生じた経緯もあることから（写真—1）、ひび割れ部での変形能に優れた補修材による表面被覆が必要であると考えた。また、長期にわたる美観の観点から、セメント系材料での補修が望ましいと考えた。そこで、HPFRCC の吹付けによる表面被覆工法を試験的に採用した。

はつり処理した。その後、補強筋の設置およびひび割れ部のシーリング（ブロック No.4 と No.8）を行い、吹付けを行った。HPFRCC 吹付け材料 A では、ニューギャードミキサー（容量 320ℓ）を用いて練混ぜ、スネークポンプにより圧送し、吹付けを行った。HPFRCC 吹付け材料 B と補修用吹付け材料 C については、ホバートミキサー（容量 120ℓ）を用いて練混ぜ、スクイーズポンプにより圧送し、吹付けを行った。

4. 補修材の強度試験結果

この試験施工を行った当時には、HPFRCC の引張試験方法が確立しておらず、圧縮および曲げ強度試験のみを行った。表-2 に材齢 1 ヶ月における圧縮および曲げ強度試験結果を、図-2 に三等分点曲げ強度試験時に計測した曲げ供試体（寸法：100×100×400mm）の荷重-変位（たわみ）曲線を示す。HPFRCC 吹付け材料 A, B は、補修用吹付け材料 C に比べ、弾性係数が小さく曲げ強度が大きく、圧縮強度と曲げ強度の比 (f'_c/f_b) が小さかった。HPFRCC 吹付け材料のうち、材料 A に比べ材料 B の方が圧縮強度および静弾性係数がともに大きかった。三等分点曲げ強度試験時に計測した材料 A, B の曲げ荷重-変位曲線では、ひび割れ発生後に変位の増加に伴って荷重が増加し、いわゆるたわみ硬化特性が明確に認められた。曲げ強度試験におけるひび割れ発生荷重は、

表-2 材料の強度試験結果（材齢：1 ヶ月）

材料	圧縮強度 (f'_c) (MPa)	弾性係数 (E) (GPa)	曲げ強度 (f_b) (MPa)	f'_c/f_b
A	37.6	15.5	6.72	5.6
B	54.2	20.5	8.31	6.5
C	59.3	29.7	4.65	12.8

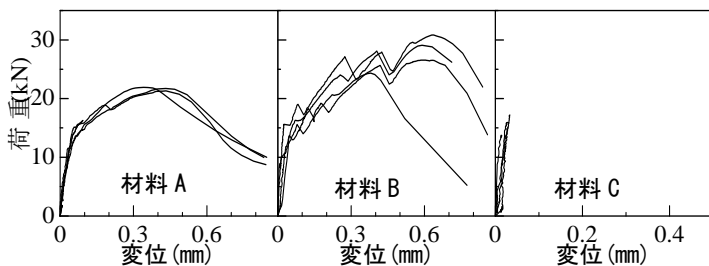


図-2 曲げ強度試験による荷重-変位曲線



写真-3 WJによる表面処理前・後の状況

材料 A, B とともに約 13kN とほぼ同程度であったが、曲げ最大荷重および最大荷重時の変位は、材料 A に比べ材料 B の方が大であった。

5. 施工後の擁壁面の経時変化

5.1 ひび割れ等の観察

(1) ひび割れ観察方法と塗膜

施工後、擁壁面の観察を定期的に行った。当初は目視およびクラックスケールによりひび割れ観察を行い、2 年目以降は顕微鏡を用いてひび割れ幅の測定も行った。

アクリル系塗装を塗布した下端より高さ 2m までの範囲では、施工後 2 年を経過した頃から塗膜に膨れ、剥離、ひび割れが増えはじめ、施工後 4 年目には、美観を損なうほど塗膜の剥離やひび割れが目立つ結果となった。また、塗膜の無い範囲においても、汚れによりひび割れが見えにくくなった。このため、塗膜部の美観を改善するとともにひび割れの計測を容易にする目的で、4 年を経過した時点で、塗膜を含め下端より 2.5m までの範囲を、ウォータージェット (WJ) により清掃した。写真-3 に WJ による表面処理前後の状況を示す。

(2) ひび割れ分布図

補修した擁壁表面上の高さ 2m の位置を基準として、上部 1m の範囲（表面被服無）と下部 1m の範囲（表面被服有）に観察されるひび割れを、チョークを用いてマーキングした後、デジタルカメラにより撮影し、画像解析によりひび割れ分布図を作成した。ひび割れ分布図は、施工後 1 年目、3 年目、5 年目に作成した。擁壁表面の状況および画像解析によるひび割れ分布図を、図-3 に示す。

(3) 施工後 1 年目まで

吹付け材料 C を用いたブロック No.9 では、施工後 1 ヶ月目から微細なひび割れが確認され、施工後 3 ヶ月目には縦方向に連続した長いひび割れ（長さ約 4.5m）が確認された。施工後 10 ヶ月目には、ブロック前面に亀甲状のひび割れが生じていた。HPFRCC 吹付け材料 A, B を用いた全てのブロックにおいて、施工後 10 ヶ月目には、幅 0.05mm 以下の微細ひび割れが確認された。

施工後 1 年目には、いずれの補修材料についても、全面に網目状の微細なひび割れが発生していた。材料 C に比べ材料 A, B の方が、ひび割れ発生間隔が狭く、ひび割れ本数が多かった。塗膜で覆われた部分については、材料 A, B にひび割れはほとんど観察されな

ったが、材料 C にはひび割れが観察された。これは、材料 C による補修部分には、塗膜では追従出来ない程度の大きなひび割れが発生したためと考えられる。補修材料の表面の汚れ状況については、材料 C に比べ材料 A、B の汚れが若干目立つ状況であったが、美観上の問題とされるほどではなかった。

(4) 施工後 3 年目

施工後 3 年目には、HPFRCC 吹付け材料 A で補修したブロック (No.1~No.4) と補修用吹付け材料 C で補修したブロック (No.9) において、施工後 1 年目に比べひび割れの数が多くなった。しかし、HPFRCC 吹付け材料 B で補修したブロック (No.5~No.8) の場合、施工後 1 年目に比べ施工後 3 年目におけるひび割れ数が少なくなった。これは、材料 B の場合、材料 A に比べ繊維混入率が多く、表面により多くの繊維が露出しており、大気中の粉塵や微生物などにより表面が汚れやすく、ひび割れの多くが隠されたためと考えられる。このことは、材料 B の表面の色が他の材料の表面の色よりも濃いことから推定できる (図-3 (b))。

施工後 3 年目には、塗膜で覆われた材料 A、B の部分にも、ひび割れが認められた。ひび割れは、材料 A より

も材料 B の表面の方が少なかった。

(5) 施工後 5 年目

施工後 4 年目には、前述のようにアクリル系塗膜部分の美観を改善するとともにひび割れ計測を容易にする目的で、塗膜を含め下端より 2.5m までの範囲をウォータージェット (WJ) により清掃した。

塗膜で覆われておらず、WJ により清掃を行わなかった範囲 (高さ 2~2.5m) の材料 A、B の表面では多数のひび割れが観察されたが、WJ による掃除を行っていない残りの範囲 (高さ 2.5~3m) では、ひび割れの多くは微生物や汚れにより塞がれ、肉眼による観察は困難であった。材料 C の表面では、WJ による掃除の有無に関係なく、ひび割れが容易に観察された。後述するように、いずれの補修材料においても、塗膜で覆われていた部分では、塗膜で覆われていない部分に比べ、ひび割れ発生間隔がやや広く、ひび割れの幅が少し大きい傾向にあった。

5.2 ひび割れ幅の経年変化

(1) ひび割れ幅の計測方法

施工後 2 年目以降では、マイクロスコープを用いて、表面のひび割れの幅の計測を行った。ひび割れ幅は、次

- ・高さ 2m の下部：塗膜材料塗布、緑ラインの上部：塗膜無
 - ・高さ 2.5m の下部：WJ による表面掃除 (施工後 4 年目)
 - ・ひび割れ調査範囲：高さ 2m を基準として、上下 1m の範囲
- 補修面のひび割れ、—— 補修前のひび割れ

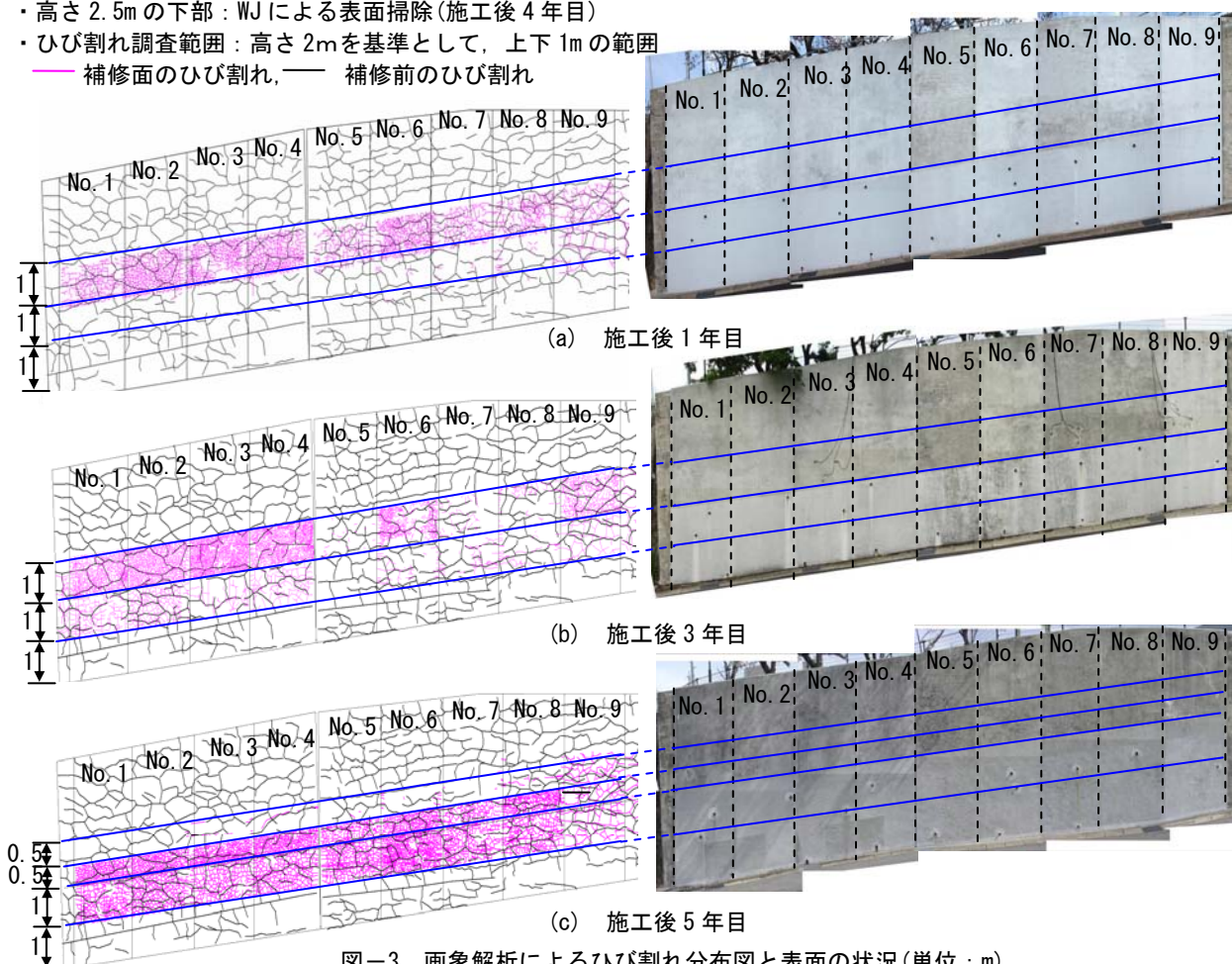


図-3 画像解析によるひび割れ分布図と表面の状況 (単位 : m)

の二つの方法により計測した。

計測方法 1：所定の高さにブロック左端より長さ 900mm の水平線を引き、その線上のすべてのひび割れの幅を計測。

計測方法 2：塗膜の無い高さ 2m から 2.5m まで、幅 1.8m の範囲から無作為にひび割れを 40 箇所抽出して、その位置でのひび割れ幅を計測。

施工後 2, 3, 5 年目におけるひび割れ幅の計測は、次のように行った。

- ① 施工後 2 年目：計測方法 1（高さ 2.05m）と計測方法 2
- ② 施工後 3 年目：計測方法 1（高さ 2.05m）
- ③ 施工後 5 年目：計測方法 1（高さ 1.95, 2.05 と 2.55m）

ひび割れ幅の測定結果を図-4 に示す。図中の横軸は、計測区間内のひび割れ計測箇所の数であり、ひび割れ幅が大きい順に並べられている。

(2) 計測方法の比較

施工後 2 年目に、計測方法 1, 2 により計測したひび割れ幅の結果を図-4 (a) に示す。いずれの計測方法によっても、HPFRCC 吹付け材料 A, B を用いたブロック (No.1 ~No.8) における最大ひび割れ幅は、0.1~

0.15mm 程度であり、幅 0.1mm 以下の微細なひび割れが大部分を占めた。補修用吹付け材料 C を用いたブロック

(No.9) では、計測方法 1 によれば HPFRCC を用いたブロックと同程度のひび割れ幅であったが、計測方法 2 によれば、最大ひび割れ幅が 0.3mm 程度で、4 割以上のひび割れが幅 0.1mm 以上であった。材料 C の場合、局部的にひび割れが大きいところがあり、計測方法の違いの影響がひび割れ幅の計測結果に表れたと考えられる。計測方法 2 は、大きなひび割れ幅を強調できるが、ひび割れ箇所の選定において計測者の恣意が入りやすいので、3 年目と 5 年目の計測では計測方法 1 を用いることとした。計測方法 2 については、対象領域を分割して各区画中の最大ひび割れ幅を計測し集計する等、計測者の恣意を小さくするための改善が今後望まれる。なお、補修用吹付け材料 C の表面には、背面からの漏水の痕跡のある貫通ひび割れと思われるものもあった。

(3) ひび割れ幅の推移

計測方法 1 により、高さ 2.05m の位置にブロック左端より長さ 900mm の水平線を引き、その線上で計測したひび割れの幅の推移を、図-4 (b) に示す。施工後 3 年目においては、HPFRCC 吹付け材料 B を用いたブロック (No.5~No.8) では、汚れによりひび割れ幅の計測が困難であったため、ひび割れ幅の計測は材料 A, C を用いたブロック (No.1~No.4, No.9) のみとした。施工後 4 年目にウオータージェット (WJ) により表面の汚れを除去したため、施工後 5 年目にはすべてのブロックでひび割れ幅を計測した。

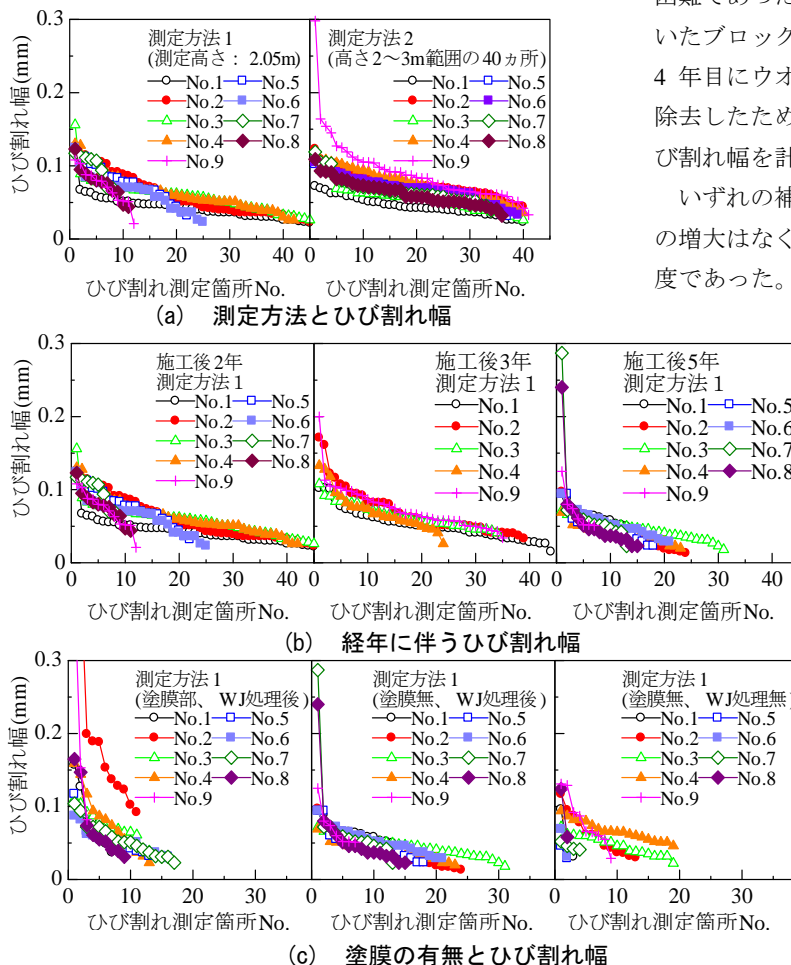
いずれの補修材料においても、経年に伴うひび割れ幅の増大はなく、ほとんどのひび割れは幅 0.02~0.1mm 程度であった。図-4 (b) では、吹付け材料 C のひび割れ幅が小さいが、これは、ひび割れ幅

測定範囲内に大きな局所化したひび割れが含まれていなかったためである。

(4) 塗膜とひび割れの経年変化

①塗膜で覆われていた部分で WJ による表面清掃が行われた部分（高さ 1.95m の線上）、②塗膜が無い部分で WJ による表面清掃が行われた部分（高さ 2.05m の線上）、③塗膜が無い部分で洗浄が行われていない部分（高さ 2.55m の線上）でひび割れ幅を測定した結果を図-4 (c) に示す。

前述のように、塗膜で覆われていない部分に比べ覆われていた部分のひび割れの幅が大きい傾向であった。塗膜で覆われておらず WJ による表面清掃も行われていない部分では、いずれの



(c) 塗膜の有無とひび割れ幅
図-4 ひび割れ幅の経年変化

補修材料においても、ひび割れ幅がほぼ 0.1mm 以下であった。これは、HPFRCC 吹付け材料 A, B の場合、ひび割れが微生物や汚れにより塞がれ、ひび割れ幅が小さく観察されたためと考えられる。吹付け材料 C においては、計測方法の影響により、ひび割れ幅測定範囲内に幅が大きいひび割れが含まれていなかったためであると考えられる。これらは、図-3 の塗膜で覆われておらず WJ による表面清掃も行われていない部分において、材料 A, B の場合には、肉眼で観察されるひび割れがほとんど無いが、材料 C には非常に多くのひび割れが観察されており、材料 C の場合、ひび割れ幅の計測結果が計測方法や計測範囲の影響を受けることが分かる。材料 C の場合には、もっと広域にわたってひび割れを観察するべきであったと考えられる。

5.3 補強材およびひび割れ処理部の影響

補修後 3 年目においては、補強材やひび割れ部の処理方法とひび割れ発生傾向について検討を行った。図-5 に HPFRCC 吹付け材料 A と補修用吹付け材料 C の施工後 3 年目のひび割れ分布図を示す。図中には、クラックスケールによりひび割れ幅 0.1mm 以上と判断された大きいひび割れのみを示した。

溶接鉄筋網を配置したブロック No.1 と No.9 からわかるように、補修用吹付け材料 C を用いた場合、補修前の擁壁コンクリートのひび割れの上に幅が 0.2mm 以上のひび割れが発生し、その間に 0.1~0.2mm のひび割れが発達していた。一方、HPFRCC 吹付け材料 A のひび割れの場合、補修前の擁壁コンクリートのひび割れとの関連性は認められないが、溶接鉄筋網とほぼ同じ間隔で縦と横方向に卓越したひび割れが発達していた。エキスパンドメタルを配置した場合、メッシュの形状と似た傾向のひび割れが発達していた。HPFRCC に生じるひび割れを細かく分散させる目的で補強材を配置したが、HPFRCC 層の引張変形量が小さいこともあり、その効果は明確とはならなかった。

ひび割れ部をシール材でシールしたブロック No.4 では、補強材が無いブロック No.3 に比べ、0.1mm 以上のひび割れ数が多い結果となった。この傾向は、塗膜で覆われていた部分においてより明確であった。HPFRCC のひび割れを細かく分散させる目的で、擁壁コンクリートのひび割れをあらかじめシール材で覆ったが、補強材の場合と同様に、HPFRCC 層の引張変形量が小さいこともありその効果は明確とはならなかった。

6. おわりに

アルカリシリカ反応によるひび割れが生じた重力式コンクリート擁壁の修景を目的に、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) の吹付けによる

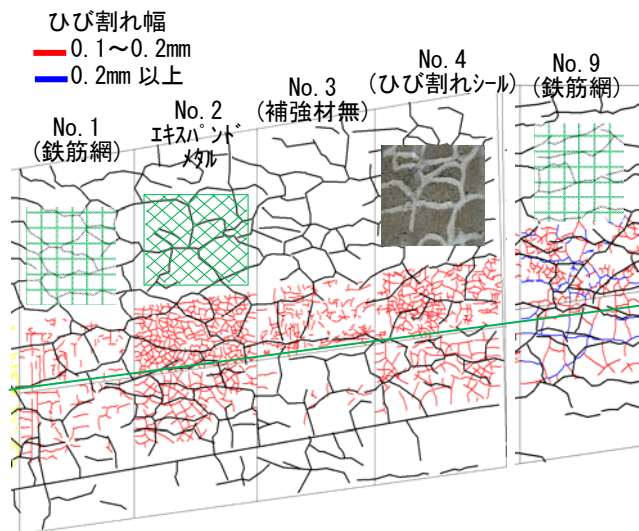


図-5 HPFRCC 補修材料 A と補修用モルタル C の施工後 3 年目のひび割れ分布図

表面補修を行い、5 年間にわたり表面の観察を行った。得られた主な結果は、次のとおりである。

- (1) 施工後 5 年を経過した時点でも、HPFRCC 吹付け材料 A, B を用いた箇所ではひび割れ幅はほぼ 0.1mm 以下に抑制されていたことから、HPFRCC を表面補修に用いることで、当初期待した景観性の改善効果が得られた。
- (2) 材料 A および B ともにひび割れが微細であったため、材料 B は施工後 3 年目に、材料 A は施工後 5 年目に、肉眼による観察が困難なほど、多くのひび割れは微生物や汚れにより閉塞していた。
- (3) HPFRCC のひび割れを細かく分散させることを目的に、HPFRCC 内に補強材を配置したり、基盤コンクリートのひび割れをシール材で覆い HPFRCC との付着を弱めたが、HPFRCC 層の引張変形量が小さいこともあり、それらの効果は明確には得られなかった。
- (4) HPFRCC のひび割れが微細であるため、表面をアクリル系塗料で塗布することにより、施工後 2 年目頃までは、表面にひび割れが現れなかったが、その後アクリル系塗料が劣化して剥離やひび割れが増え、施工後 4 年目には、美観を損なうほどになった。HPFRCC 上へのアクリル系塗料の塗布は、短期的な美観改善効果しか認められなかった。

この試験施工と 5 年間にわたる計測をご支援いただいた岐阜県東部広域水道事務所に対し、お礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木工学会：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, 2007