

特別講演Ⅱ

ひび割れ幅が細かく引張力を分担できる繊維補強モルタルの構造利用

岐阜大学 教授 六郷恵哲

国土開発コンサルタント 技師長 藤元安宏

1. まえがき

「コンクリート工学」は「ひび割れ制御工学」と言えるくらい、コンクリート工学分野における技術の多くは、コンクリートのひび割れの制御を目的としている。RC 構造とすることでコンクリートのひび割れ幅をある程度制御し、PC 構造とすることでひび割れを発生させない構造物を造ることができる。施工や材料においても、コンクリートのひび割れの原因となる収縮を抑え、水和熱を抑えるための様々な対策が採られている。

コンクリートへの短繊維混入の目的は、従来は鋼繊維補強コンクリートにみられるように、引張強度を高めることが中心であった。最近では、ひび割れ幅の制御を目的としたものが注目されている。作用する引張力の増加に伴い、幅の小さなひび割れが次々に生じ、大きく引張変形する繊維補強モルタルが開発されている(図-1, 写真-1)。短繊維により、ひび割れ幅は0.1mm 前後、最大でも0.2mm 以下に制御されている。引張変形の増加に伴い、ひび割れ幅が増加するのではなく ひび割れ本数が増加するという点が、この材料の大きな特徴である。

この材料は、優れた引張性能を有することから HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites)、あるいは性能の中の引張ひずみ硬化特性を強調して SHCC (Strain Hardening Cement-based Composites) と海外では呼ばれることが多い。その中の代表的な材料が、Prof. Li によって開発された ECC (Engineered Cementitious Composites) である。

実構造物へのこの材料の適用が始まったことから、土木学会コンクリート委員会では、この材料を用いた構造物の設計施工指針(案)を作成中である。この設計施工指針(案)では、細かいひび割れが分散して生じることを強調して「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料」とこの材料を呼んでいる。

ここでは、土木学会の委員会における検討の成果¹⁾を踏まえながら、ひび割れ幅が細く 引張力を分担できるこの材料(HPFRCC と略す)を紹介することを目的として、この材料の特徴と性能、試験施工例、合成部材の性能と適用の可能性について述べる。

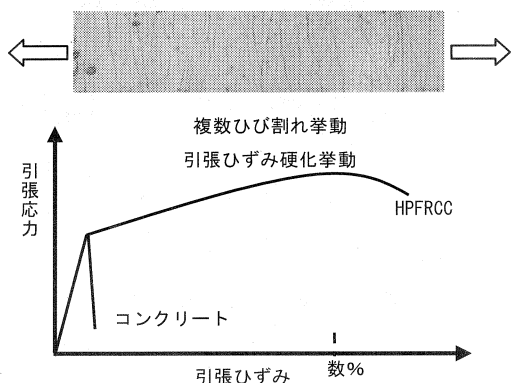


図-1 引張ひずみ硬化挙動と複数ひび割れ挙動

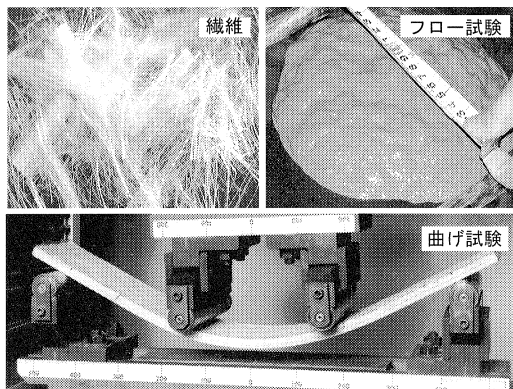


写真-1 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材(HPFRCC)

2. 材料の特徴と性能

2.1 使用材料と施工

HPFRCC は、セメント等の結合材、細骨材、短繊維、高性能 AE 減水剤、増粘剤、水等で構成される。引張力下での性能を高めるため、一般に粗骨材は含まれない。このため、硬化時に大きな収縮が起こりやすいので、適量の膨張材や収縮低減剤を用いる場合が多い。セメントの使用量が多く厚い部材では水和熱が大きくなりやすいので、セメントの一部をフライアッシュ等の粉体材料で置き換えるなどして、水和熱を抑える工夫がされる。短繊維は、ビニロン繊維やポリエチレン繊維であり、繊維の直径は 0.01~0.04mm 程度、長さは 10mm 前後のものが、体積で 1~2% 用いられる。繊維の分散性をよくするために適量の増粘剤が用いられる。通常は、打込みあるいは吹付けによって施工される。

2.2 力学性能とひび割れ性能

HPFRCC の圧縮強度は 30~60MPa 程度、引張強度は 5MPa 前後、曲げ強度は 5~10MPa 程度、ヤング係数は 15~20GPa 程度である。薄板状供試体の曲げ試験を行うと、写真-1 に示すように大変形するものもある。HPFRCC を通常のコンクリートに重ねて用いた場合、コンクリートに生じたひび割れは HPFRCC では細かく分散する (写真-2)。

一軸引張応力下において 初期ひび割れ後に引張応力も引張ひずみとともに増加する 擬似的な「引張ひずみ硬化挙動」の過程では、引張力に直角方向のひび割れが増える「複数ひび割れ挙動」が現れる (図-1)。複数のひび割れが高密度に形成されると、材料の引張変形の分布は一様化する。なお、最大荷重点後のひずみ軟化の過程では、特定のひび割れのみ 幅が拡大し、変形の局所化が起こる。

HPFRCC の引張性能を有効に活用するためには、引張応力ひずみ関係とひび割れ性状の評価方法を確立することが重要である。HPFRCC の引張試験では、両端を大きくし中央部を細くしたダンベル型の試験体が用いられる場合が多い。両端部の掴み方としては、空気圧等を用いて摩擦力で掴む方法や、両端部の肩の部分で掴む方法 (写真-3)²⁾ が用いられている。ひび割れ性状の評価では、引張応力と引張ひずみの関係と同時に、ひび割れ幅 (平均、最大) やひび割れ密度 (あるいは計測区間内の本数) を、载荷の初期から連続して評価するのがよい。

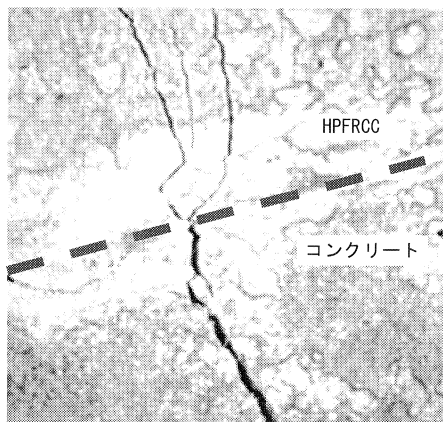


写真-2 HPFRCC で細かく分散するひび割れ

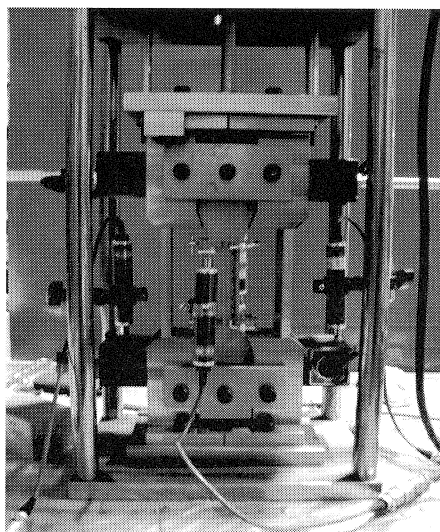


写真-3 ダンベル型供試体の簡便な引張試験装置

2.3 耐久性能

HPFRCC を用いると鉄筋コンクリート構造物の耐久性能の向上が期待できる。その理由としては、ひび割れが微細化してひび割れ部における物質透過性が抑制されることに加え、ひび割れが多数分散して生じるために、鉄筋の腐食形態がマイクロセル型となり 腐食速度が抑制されることが挙げられる³⁾。

通常のコンクリートでは、ひび割れ幅が 0.1mm 程度以下であれば、自己修復 (Self-healing) が期待できるといわれている。配合および材料にも依存するが、HPFRCC のひび割れ幅は 0.05～0.1mm 程度、最大でも 0.2mm より小さい。HPFRCC の高い靱性 (Ductility) は、高い耐久性 (Durability) をもたらす可能性を秘めている。

使用繊維、HPFRCC 材料、HPFRCC を鋼材と組合せた部材の各レベルにおける 各種の劣化や時間依存性の挙動について、微細なひび割れが生じた状態で用いられるという HPFRCC の特徴を踏まえて、精力的な検討が国内外で行われている。

2.4 利用のアイデア

コンクリートは種々の材料を組合せた複合材料である。HPFRCC についても、様々なものと組合せることにより、有用性が高まる。例えば、細かい気泡を体積の半分程度混入すれば軽量で変形性能に富む材料が得られる⁴⁾。鋼材ではなくネット状繊維と HPFRCC の組合せも、耐力と靱性の点で効果的である。表面含浸材である撥水材を表面に塗布すると、ひび割れ幅が細かい場合には止水効果が高まる⁵⁾。一般に、人が思い付かないような離れたものを組合せ、その結果の有用性が大きいほど、優れたアイデアとなる。新しいアイデアを実現させる場合には、短期的な性能だけでなく、長期にわたる性能とコストを抑えることへの配慮が特に重要である。

3. 試験施工例

3.1 試験施工の種類と分類

HPFRCC は、引張力下における複数の微細ひび割れの発生、大変形、高靱性といった特性を示すことから、防食材、止水材、鋼材被覆材、エネルギー吸収材、緩衝材等への利用が期待されている。他の国に比べ、わが国では実構造物への HPFRCC の試験的な適用が盛んである。具体的な適用例として次のようなものがある^{6), 7)}。

- ・水密性の向上を期待したコンクリートダム の表面補修 (2003 年 広島県)
- ・ひび割れが生じた擁壁の美観の向上を期待した表面補修 (2003 年 岐阜県)
- ・引張力を分担させ疲労耐久性の向上を期待した橋梁床版 (2004 年 北海道)
- ・腐食性物質の侵入を抑えることを期待した高架橋の表面被覆 (2005 年 静岡県)
- ・補強断面厚を抑えることを期待したトンネルの災害応急工事 (2005 年 新潟県)
- ・連続一体化を期待した RC 床版の連結スラブ (Link Slab, 2005 年 ミシガン州)
- ・地震作用時の制振を期待した建築物用ダンパー⁹⁾ (2005 年 東京都, 2006 年 神奈川県)
- ・漏水の低減を期待した農業用水路の表面補修 (2005 年 滋賀県 富山県, 2006 年 和歌山県)
- ・架設時の変形追従性能を期待した橋梁床版の敷きモルタル (2006 年 兵庫県)

橋梁床版や建築物用ダンパーは力学的性能を利用したものであり、表面補修はひび割れが細かく分散する性能を利用したものである。

現在のところ、HPFRCC の利用形態を 次のように大別できる。

① HPFRCC のみの部材 (HPFRCC)

HPFRCC のみの場合、韌性に富み欠落ちが生じ難いので 圧縮力を受けるブロック状部材や曲げモーメントを受ける板状部材としての利用は考えられる。しかし、引張力を受ける細長い棒状部材として、HPFRCC のみが用いられることはほとんど無いと考えられる。

② 補強筋を配置した HPFRCC 部材 (R/HPFRCC)

鉄筋を配置した場合、HPFRCC はひび割れ域を分散させることから、鉄筋の降伏域が広がり、鉄筋のエネルギー吸収量が増大する。補強筋としては、鉄筋やエキスパンドメタル、PC 鋼材の他、ネット状繊維や連続繊維補強材も有効である。補強筋には、荷重分担の機能のほか、HPFRCC のひび割れをさらに分散させる働きもある。試験施工例の中で、連結スラブや建築物用ダンパーは、鉄筋補強 HPFRCC である。

③ HPFRCC とコンクリートとを合成させた部材 (HPFRCC/C)

基盤となるコンクリートにひび割れが生じている場合には、施工された HPFRCC には、表面のひび割れ幅を小さくし、止水性や美観を向上させることが期待される。HPFRCC とコンクリートとの一体性を確保するため、コンクリート面の目粗しやアンカー筋の配置が必要である。具体例としては、水路や擁壁のコンクリート面の補修が挙げられる。HPFRCC の部分に補強筋を配置した利用も考えられる (R/HPFRCC/C)。

④ HPFRCC と鋼板 (あるいは鋼管) とを合成させた部材 (HPFRCC/S)

HPFRCC は引張変形能に優れ ひび割れ幅が小さいことから防食性に優れ、鋼板の被覆材に適している。HPFRCC により鋼板を被覆することで、部材の剛性と耐力が向上する。HPFRCC と鋼板との一体性を確保するため、十分なズレ止めを配置する必要がある。具体的には、橋梁の鋼床版と合成した例がある。

HPFRCC を使う場合の留意点として、次のようなものがある。

- ・ 施工にあたっては、繊維補強の連続性を確実に確保する。
- ・ 鋼板や鋼管といった面状の鋼材と HPFRCC とを合成して用いる場合には、両者が一体として挙動するよう十分なズレ止めを配置する。
- ・ 微細なひび割れが生じていることを前提にして、HPFRCC を用いた部材や構造物の全体の性能を確認する。
- ・ HPFRCC が水中に漬かった状態で大きな繰り返し作用を受けると、微細なひび割れ部に浸入した水が HPFRCC の劣化を促進する⁸⁾ので、このような状態にならないよう設計施工において配慮する。
- ・ 繊維が引張力を長期にわたって分担するので、使用する繊維の耐久性ならびに疲労や引張クリープに関する性能を確認する。

3.2 橋梁床版^{1), 9)}

HPFRCC は引張力を受け持つことができるため、鋼板と組み合わせて合成部材とすると、通常の鋼コンクリート部材に比べ、薄い断面寸法で大きな曲げ耐力が得られる。

2004 年に北海道で建設された美原大橋 (橋長 972m, 中央支間 340m) では、鋼床版上のアスファルトの 1/2 (厚さ 40mm) を HPFRCC に置き換えることにより 床版の耐力と剛性を高め発生応力を低下させて、鋼床版の補剛部の疲労耐久性を向上させた (写真-4)。示方書の改定に伴い 鋼床版補剛部の疲労耐久性を向上させる必要が生じたため、HPFRCC が採用された。

HPFRCC と鋼床版との付着を高めるために FRP 製プレートジベルが採用された。HPFRCC はレディーミクストコンクリート工場で練混ぜられ、通常のアジテータ車で現場まで運搬され、繊維の分散を確実にするため、現場で二次練りが行われた。1日に約 30m^3 の HPFRCC が打設され、練混ぜられた HPFRCC の総量は約 800m^3 であった。HPFRCC をレディーミクストコンクリート工場で製造し 大量に安定して供給することができた点で、画期的である。雨水の排水ができず HPFRCC が水中に漬かった状態で大きな走行荷重を受けるところでは、早期に変状が発生した。その原因と対策については、鋭意検討が進められている⁸⁾。

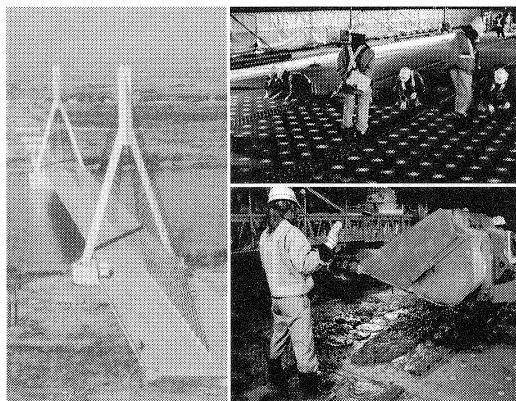


写真-4 鋼 HPFRCC 合成床版

3.3 RC 建築物用ダンパー¹⁰⁾

鉄筋補強 HPFRCC 部材は、正負交番载荷を受けた場合のエネルギー吸収能力が大きい。

図-2に示すように、2005 から 2006 年にかけて東京や横浜の RC 建築物に HPFRCC 部材がダンパーとして組み込まれ、建物全体の耐震性能の向上が図られた。HPFRCC 部材は、高層 RC 建築物のコア壁を繋ぐ連結梁として用いられた。

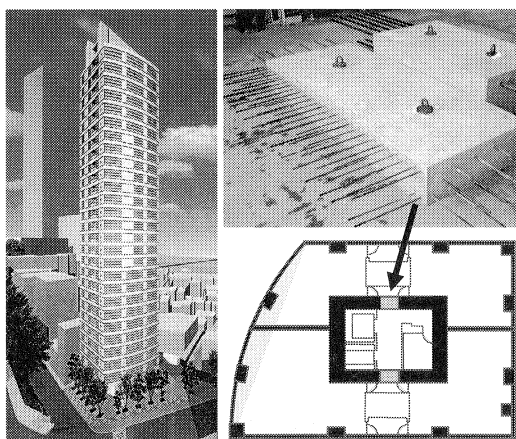


図-2 RC 建築物用ダンパー

3.4 農業用水路の表面補修¹⁾

農業用水路には、建設後数十年が経過して劣化が進んだものが多い。樹脂系ライニング材は紫外線劣化が生じやすく施工時の表面が湿潤であると剥離が生じやすいという問題があるため、セメント系ライニング材として HPFRCC が期待されている。

富山県の農業用水路（側壁約 1.1m、石積み側壁約 2.4m、底版約 2m）は、表面に粗骨材が現れ、底版の一部に断面欠損がみられ、石積み側壁の下部では一部の間詰めモルタルが失われていた。劣化部分を除去するための下地処理にはウォータージェット工法が用いられた。石積み側壁の凹凸部はモルタルで間詰めが行われた。HPFRCC の厚さは、側壁では 6mm、底版では 10mm とし、吹付けによる施工が 2005 年に行われた（写真-5）。

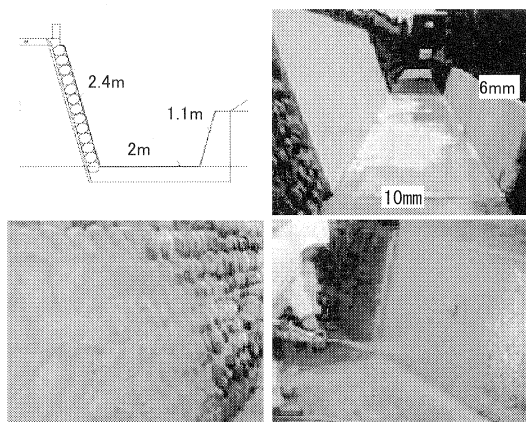


写真-5 農業用水路の表面補修

目地部や接合部からの漏水は多いが、コンクリート躯体が比較的堅牢な農業用水路については、造り替えに比べ、HPFRCC を用いた止水と表面補修が費用対効果の点で優れており、大きな市場に成長しつつある。

3.5 擁壁の表面補修¹⁾

HPFRCC は、生じるひび割れの幅が小さいので、ひび割れたコンクリート構造物の表面の修景に適している。

岐阜県にある重力式コンクリート擁壁(幅約 18m, 高さ約 5m)は、1970 年頃建設され、アルカリ骨材反応によるひび割れが生じたため、1994 年にひび割れへの樹脂注入と表面被覆が行なわれた。表面被覆がひび割れた状態となっていたため、2003 年に HPFRCC の吹付けによる表面補修が実施された。3 種類の補修材(2 種類の HPFRCC, 1 種類の補修モルタル)、3 種類の補強筋(溶接鉄筋網、エキスパンドメタル、無し)、2 種類のひび割れ部処理(付着の無い領域を増やすためのシールがある場合と無い場合)を組み合わせで合計 9 区画の施工が行われた(写真-6)。吹付け前に、ウォータージェットにより表面が数 mm はつり取られた。擁壁の下部 2m には、補修材の表面にアクリル系塗料が塗布された。コア採取したコンクリートの残存膨張量は 0.005 ～ 0.011 と少なかった。吹付け厚さは、50 ～ 70mm であった。

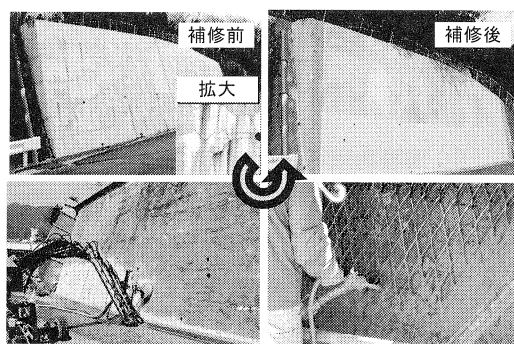


写真-6 擁壁の表面補修

HPFRCC による補修部分には、施工後 7 ヶ月まではひび割れが観察されず、ひび割れ幅は施工後 10 ヶ月では 0.05mm 以下、施工後 24 ヶ月で 0.12mm 以下であった。12 ヶ月のひび割れ発生状況を図-3に示す。微細なひび割れがほぼ同程度に網目状に生じていた。一方、通常の補修モルタルによる補修部分(図-3で右端のブロック No.9)には、施工後 1 ヶ月からひび割れが目視により

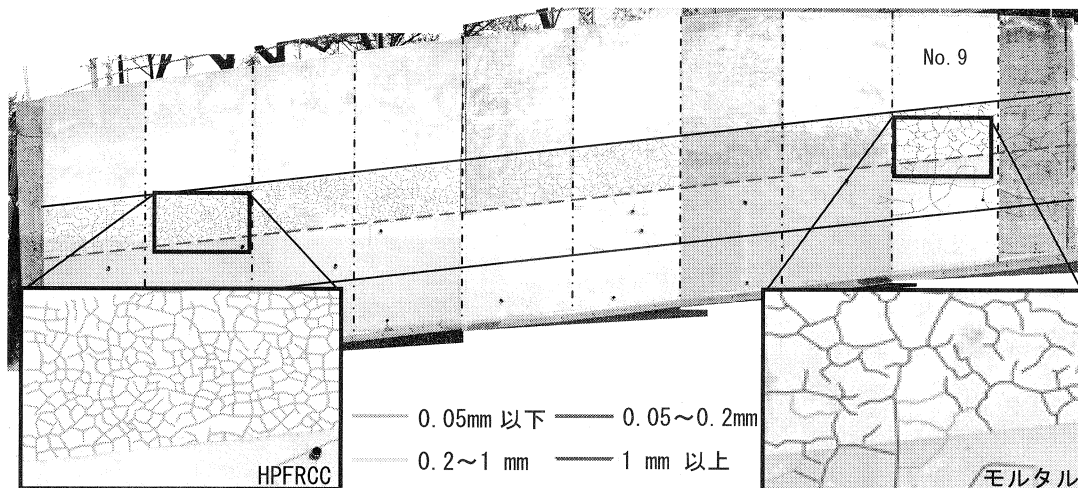


図-3 ひび割れの発生状況

観察され、ひび割れ幅は、施工後 3 ヶ月で約 0.03mm、10 ヶ月で約 0.2mm、24 ヶ月で約 0.3mm であった。38 ヶ月 (約 3 年) の時点でのひび割れ観察においも、HPFRCC のひび割れ幅は、0.1mm 程度以下で最大でも 0.2mm を超えないという状態で安定していた。通常の補修モルタルの表面に比べ、HPFRCC の表面は、表面の汚れにより、ひび割れが観察しにくくなっていた。

3.6 高架橋の表面被覆^{1), 11)}

HPFRCC はひび割れ幅が小さく、気体や液体が透過しにくいいため、コンクリート構造物の表面を HPFRCC で被覆することにより、コンクリート構造物の中性化を遅らせることが期待される。

長期的な耐久性が要求される鉄道高架橋では、中性化に対する予防保全を目的として、塗膜系ライニング材による表面保護工が施される場合があるが、列車走行によるひび割れの開閉のため、塗膜系ライニング材には早期にひび割れが発生しやすい。そこで、曲げひび割れが生じた高架橋のはり部材に対して、吹付けにより厚さ 10mm の HPFRCC が、表面保護工として 2005 年に試験施工された (写真-7)。HPFRCC と基盤コンクリートとの付着を確保するために、アンカーが用いられた。

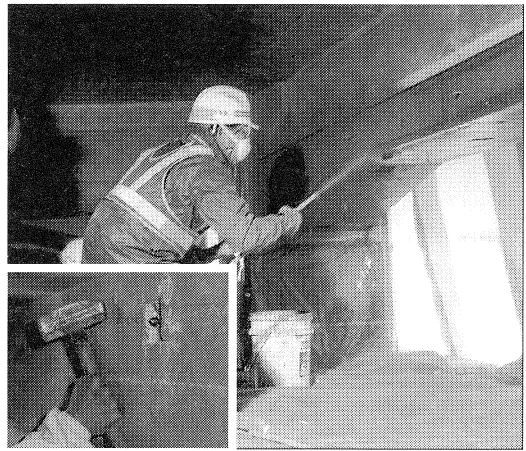


写真-7 鉄道高架橋の表面被覆

4. HPFRCC と鋼材との合成部材の性能と適用の可能性

4.1 HPFRCC で被覆した鋼管の曲げ性能¹²⁾

筆者らは、鋼管 (厚さ 5mm、内径 206mm、長さ 2500mm、一般構造用炭素鋼) の周囲を HPFRCC で被覆した供試体 (円形断面、正方形断面) と鋼管のみの供試体を作製し、曲げ載荷試験を行った (図-4)。被覆供試体では鋼管と HPFRCC とのずれ止めとして、スパイラル筋 (D10) を 50mm

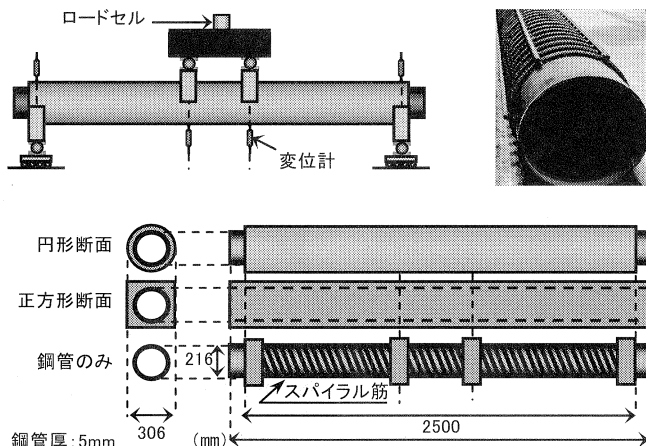
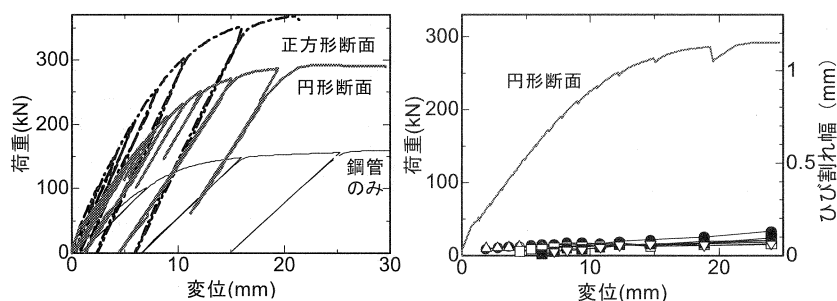


図-4 HPFRCC 被覆鋼管

間隔に溶接し、さらに軸方向筋 (D10) を 6 本溶接した。供試体の荷重－変位曲線と円形断面供試体の荷重－変位－ひび割れ幅の関係を図－5に示す。ひび割れ幅をマイクロ스코プにより観察した。これらの結果から分かるように、鋼管を HPFRCC で被覆することにより、初期剛性ならびに最大荷重が増大した。HPFRCC のひび割れ幅は最大荷重点付近でも 0.1mm 程度と小さかった。鋼管が降伏する程度まで载荷した後に徐荷しても、徐荷後の在留変位もひび割れ幅も小さかった。十分なずれ止め鉄筋を配置することにより、鋼管と HPFRCC は破壊の最終段階まで一体的な挙動を示した。

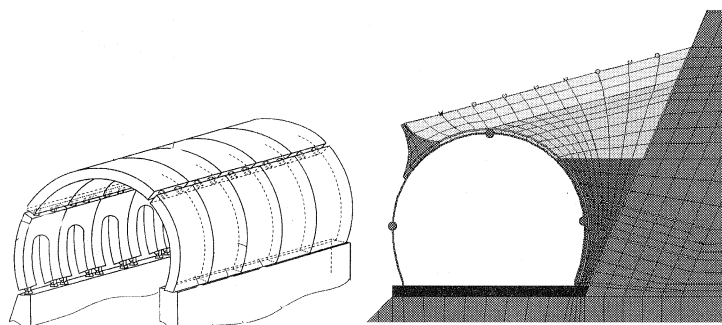


図－5 HPFRCC 被覆鋼管供試体の荷重－変位曲線、ひび割れ幅

4.2 合成部材の適用の可能性

3.2 節で述べた美原大橋は、鋼床版上に HPFRCC を打設し、FRP 製プレートジベルで両者の一体化を図った合成部材である。HPFRCC と鋼板との合成部材は、トンネル断面の補強部材や既設橋脚の補強部材への利用が考えられる。

HPFRCC で被覆した鋼管を棒部材、あるいは並べて面部材として利用した場合、大きな衝撃荷重や地震力を受けて鋼材が降伏する程度まで部材が変形しても、徐荷後は耐荷力を有しているだけでなく、ひび割れ幅も残留変位も小さく、補修をほとんど必要としない構造物となりうる可能性を有している。HPFRCC で被覆した鋼管は、橋脚、吊り床版構造部材、複合トラス構造部材等への適用も考えられる。さらに、図－6に示すように、合成部材を PC 鋼材で連結したロックシェッドも考えられる¹³⁾。



図－6 HPFRCC 被覆鋼管を用いたロックシェッド

5. あとがき

わが国では、HPFRCC の優れた力学的性能を利用して橋梁床版や建築物用ダンパーへ適用が行なわれ、ひび割れが細かく分散する性能を利用してコンクリートダム、水路、擁壁の表面補修が行なわれている。

今後、HPFRCC の止水性と力学特性を活用したトンネル覆工への適用、大変形しエネルギー吸収量大きいことを利用したロックシェッドへの適用、剛性増加を期待した橋梁部材への適用、目を減らしたあるいは無くした連続版や壁への適用、HPFRCC 表面へ撥水剤や塗料を塗布して止水性や耐久性を高めた適用等、さらなる適用の拡がり期待される。HPFRCC に気泡を積極的に混入したり、HPFRCC をネット状繊維で補強したり、HPFRCC で木材や H 型鋼を被覆したりと、様々なアイデアが考えられる。

一方、HPFRCC の利用を拡大するためには、次のような課題がある。

- ・引張試験方法を標準化し、引張性能ならびにひび割れ性能の評価方法を確立する。
- ・引張性能ならびにひび割れ性能の特徴を反映した設計方法を確立する。
- ・製造ならびに施工を平易にし、低コスト化をはかる。

HPFRCC は特殊な材料ではなく、従来からある繊維補強モルタルに比べ、ひび割れ幅を小さくし引張力を分担できるように靱性を改良したものである。この材料の特徴をうまく生かした利用が望まれる。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，コンクリート技術シリーズ 64，2005.7.
- 2) 森山守，林承燦，内田裕市，六郷恵哲：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の引張性能と試験装置，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.311-316，2006.
- 3) 平石陽一，本間貴光，箱山幸幸，宮里心一：高性能繊維補強セメント系複合材料の曲げひび割れ部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度，コンクリート工学論文集，Vol.16，No.3，pp.31-38，2005.9.
- 4) 山本基由，鎌田敏郎，国枝稔，六郷恵哲：複数ひび割れ型繊維補強軽量気泡モルタルの開発とその特性に及ぼす繊維種別と空気混入率の影響，コンクリート工学論文集，Vol.17，No.1，pp.103-111，2006.1.
- 5) 加藤久也，浅野幸男，山本基由，六郷恵哲：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.
- 6) 関田徹志，坂田昇，国枝稔，六郷恵哲：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）の研究の現状と構造利用の事例，コンクリート工学，Vol.44，No.3，pp.3-10，2006.3.
- 7) Minoru Kunieda and Keitetsu Rokugo: Recent Progress on HPFRCC in Japan - Required Performance and Applications -, Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, Vol.4, No.1, pp.19-33, 2006.2.
- 8) 三田村浩，福田一郎，加藤静雄，六郷恵哲：高靱性セメント複合材料で上面増厚した鋼床版の水中環境下の輪荷重走行試験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.2，pp.1555-1560，2006.

- 9) 三田村浩, 坂田昇, 赤代恵司, 須田久美子, 平石剛紀: 鋼床版への高靱性繊維補強セメント複合材料 ECC を用いた補強工法の適用—美原大橋における施工—, 橋梁と基礎, Vol.39, No.8, pp.88-91, 2005.8.
- 10) 丸田誠, 閑田徹志, 永井寛, 山本幸正: プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構, コンクリート工学, Vol. 43, No. 11, pp.18-26, pp.2005.11.
- 11) 須田久美子, 六郷恵哲: 鉄道高架橋の曲げひび割れ部中性化抑止対策工への吹付け ECC 工法の適用, コンクリート工学, Vol.41, No.5, pp.162-167, 2005.5.
- 12) 山下賢司, 藤元安宏, 林承燦, 六郷恵哲: 複数微細ひび割れ型コンクリートにより被覆した鋼管の曲げ破壊性状とひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.301-306, 2005.
- 13) 藤元安宏: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の合成構造への適用に関する研究, 博士学位論文, 岐阜大学, 2006.1.