

論文 超高強度ひずみ硬化型モルタルの引張疲労耐久性

江口 輝行^{*1}・国枝 稔^{*2}・中村 光^{*3}・長瀧 宏弥^{*4}

要旨: 本研究では、高強度ポリエチレン繊維を用いた繊維補強ひずみ硬化型モルタル (UHP-SHCC) を補修・補強材料として適用する際に懸念される引張疲労耐久性の評価を行った。特に、ひび割れが発生し繊維の架橋効果により引張荷重に抵抗している状態にある UHP-SHCC, 及び UHP-SHCC とコンクリートとの接合部の引張疲労耐久性について、一軸引張疲労試験により実験的に検討した。その結果、UHP-SHCC の疲労破壊は繊維の引抜けが卓越した破壊モードにより生じること、コンクリートとの接合部の引張疲労耐久性は十分に確保されており、コンクリートの性能に依存することが明らかとなった。

キーワード: 超高強度ひずみ硬化型モルタル, 引張疲労耐久性, 接合部, 繊維架橋力

1. はじめに

老朽化によって耐荷力や変形性能が低下したコンクリート構造物が増加している。これらの構造物は、補修や補強を施すことで、低下した性能を回復させ、長期にわたり供用することが可能となる。

超高強度ひずみ硬化型モルタル¹⁾ (Ultra High Performance-Strain Hardening Cementitious Composites, 以下 UHP-SHCC) は、高強度ポリエチレン繊維を高強度モルタルに混入することにより、圧縮強度 100MPa 以上、引張強度 8~10MPa 以上、引張強度時ひずみ 2%以上という、従来のひずみ硬化型セメント系複合材料 (Strain Hardening Cementitious Composites, SHCC) を上回る力学的性能も実現できる材料である。さらに、透気係数が既存のモルタルの 1/100 程度以下、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が 0.04~0.05cm²/year であり、各種物質の移動に対する抵抗性が高い材料²⁾であることから、コンクリート構造物の補修・補強材料としてその性能を発揮することが期待できる。

本研究では、UHP-SHCC を床版の上面増厚補修に用いる際に懸念される疲労耐久性を検証することを目的とし、ひび割れを有する UHP-SHCC の引張疲労破壊試験及び母材コンクリートと UHP-SHCC の接合部の引張疲労試験を実施し、それぞれの疲労耐久性について実験的に検討した。

前者については、UHP-SHCC により上面増厚された床版の負曲げ部において、ひび割れの発生した状態で繰り返し荷重を受ける場合を想定している。そこで、ひび割れを導入した UHP-SHCC に一軸方向の繰返し引張荷重を作用させ、引張強度の 90%、60%の大きさの応力比において疲労試験を実施し、UHP-SHCC が疲労破壊に至る

までの載荷回数と応力比との関係、及び破壊面の性状について検討した。また、既往の研究では湿潤状態のコンクリートの疲労耐久性が乾燥したコンクリートと比較して低下するという報告²⁾がなされており、本研究でもこの点について検討を行うために水中での疲労試験も実施した。

後者については、母材と補修・補強材料として用いられる UHP-SHCC とコンクリートとの接合部の疲労耐久性に関する基礎的なデータを得ることを目的としている。そこで、普通コンクリートと UHP-SHCC の接合部を有する供試体に、一軸の繰返し引張荷重を作用させ、付着強度の 90%、70%、50%の大きさの応力比について疲労試験を実施し、接合部が破壊に至るまでの載荷回数と応力比との関係及び、破壊面の性状について検討した。また、この場合にも前者と同様に水中での疲労試験を実施し、疲労耐久性と水分の関係についても検討した。

2. ひび割れを有する UHP-SHCC の引張疲労耐久性

2.1 使用材料

本研究で用いた UHP-SHCC の示方配合を表-1に示す。本研究では水結合材比を 0.22 とし、引張性能に影響を与える繊維 (長さ 60mm, 直径 12 μ m, 引張強度 2700MPa) の混入率に対して 1.25%と 1.5%の 2 ケースを設定した。

表-1に示した配合の UHP-SHCC で、ダンベル供試体 (試験部断面: 13mm \times 30mm) を作製し一軸引張試験を実施した。その際の応力-ひずみ関係を図-1に示す。図-1より、いずれの繊維混入率の場合も試験結果のばらつきが大きい。UHP-SHCC が初期ひび割れの発生後も複数ひび割れを生じながら応力とひずみを増進させる性質を有していることがわかる。

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 学生 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博士 (工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士 (工) (正会員)

*4 名古屋大学 全学技術センター工学系技術支援室環境安全技術系

表-1 UHP-SHCC の示方配合

水結合 材比	細骨材 結合材比	繊維 混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)							
			水	低熱セメント	シリカフューム	珪砂 7 号	膨張材	混和剤*1	抑泡剤	繊維
0.22	0.1	1.25	277	1106	199	397	20	13.20	0.03	12.10
0.22	0.1	1.50	346	1320	237	158	20	15.80	0.06	14.60

*1：高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）

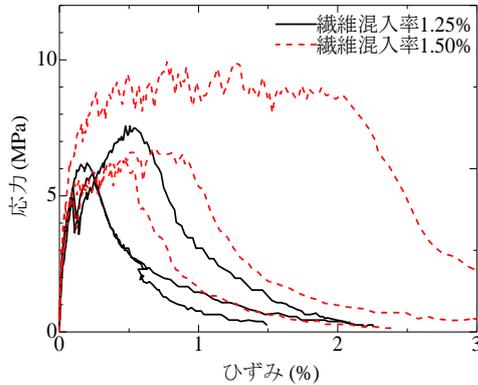


図-1 ダンベル供試体引張試験時の応力-ひずみ関係

2.2 供試体形状

供試体は図-2のように、100mm×100mm×100mmの角柱中央部にコンクリートカッターで入れた切欠きを有する形状（試験部の断面：20mm×70mm）とした。

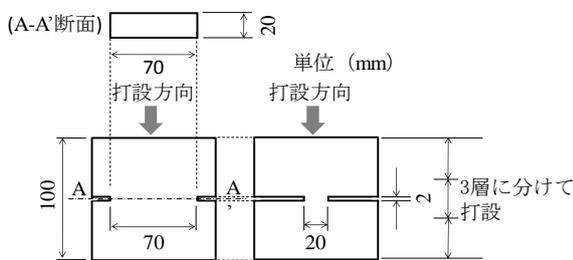


図-2 疲労試験用供試体形状

2.3 荷荷方法

試験状況を写真-1に示す。まず静的な引張試験を実施し、リガメント部（切欠きを除く試験部）の引張強度を求めた。切欠きに設置したクリップゲージにより計測した切欠き開口変位とリガメント部応力の関係を図-3、図-4および図-5に示す。図-4は図-3の微小変位部分を拡大したものである。いずれの材料においても、開口変位 0.01mm 程度で、リガメント部を貫通する一つのひび割れ面が発生していることが予想される引張応力のピークがある。しかし、一つ目のピーク以降の挙動は繊維混入率によって異なり、繊維混入率 1.25%の供試体については、初期ひび割れ発生後の応力の増加が見られず、いわゆる軟化挙動を呈した。このため、繊維混入率 1.25%の供試体については、初期勾配が変化するときの

応力をひび割れ発生応力、ピーク時の応力をリガメント部の引張強度として考える。一方、繊維混入率 1.5%の供試体では、二つのピークが見られる。一つ目のピークはリガメント部を貫通するマクロなひび割れの発生であり、二つ目のピークはひび割れ断面での繊維架橋力による抵抗に相当していると推察される。静的試験の結果では繊維混入率 1.25%の方が 1.5%よりも静的引張強度が大きくなっている。これは、ひび割れ面に占めるモルタルの割合が大きい分 1.25%の方が高いひび割れ発生強度を有し、かつ、複数ひび割れの発生が許容されない供試体形状のために、1.5%におけるひずみ硬化による強度増加が得られにくかったためである。静的試験の結果をもとに、疲労試験時にリガメント部に作用させる応力およびそれに対応する荷重を表-2 および表-3 のように設定した。繊維混入率 1.25%の供試体については、ひび割れ発生後に軟化挙動を呈することから、ひび割れ発生強度（引張強度の 60%程度）に相当する引張荷重を上限とした場合と、引張強度の 90%に相当する応力を上限とした場合の 2 ケースについて疲労試験を行った。繊維混入率 1.5%の供試体については、リガメント部の引張強度（図-5 の二つ目のピーク）の 90%、70%、50%に相当する引張荷重を上限とした場合について水中と気中の環境条件の下、計 6 ケースについて疲労試験を行った。図-6 に示すような三角波で荷重を制御した片振りの引張疲労試験を行い、破壊に至るまでの載荷回数を計測し、上限荷重を破壊面積で除して実際の応力比を算定した。

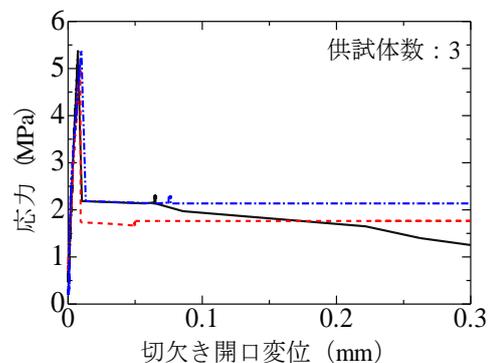


図-3 応力と切欠き開口変位の関係 (V_f=1.25%)

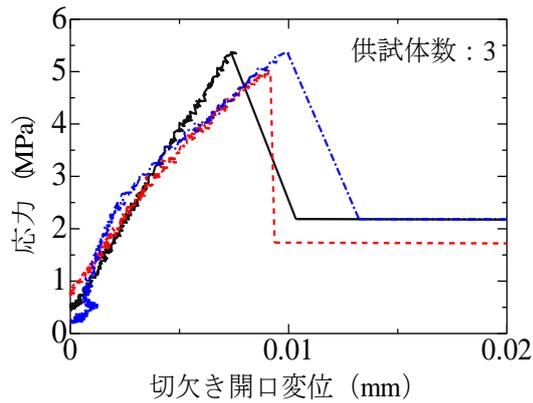


図-4 応力と切欠き開口変位の関係拡大図 (V_f=1.25%)

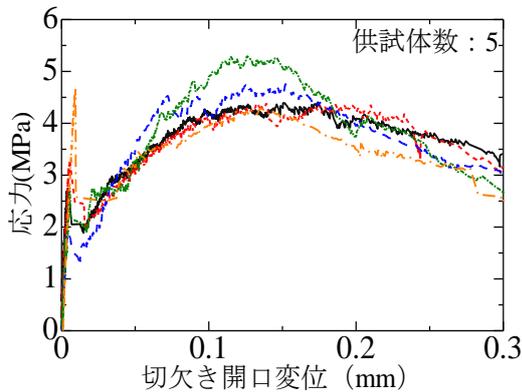


図-5 応力と切欠き開口変位の関係 (V_f=1.5%)

表-2 試験時の上限応力と対応する荷重 (V_f=1.25%)

見掛けの応力比	上限応力 (MPa)	換算荷重 (kN)
0.6 (ひび割れ発生強度)	3.6	5.0
0.9	5.0	7.0
1.0 (静的引張強度)	5.3	7.4

表-3 試験時の上限応力と対応する荷重 (V_f=1.5%)

見掛けの応力比	上限応力 (MPa)	換算荷重 (kN)
0.5	2.1	3.0
0.7	3.0	4.2
0.9	3.9	5.4
1.0 (静的引張強度)	4.28	6.0

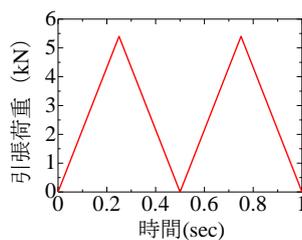


図-6 载荷波形

(V_f=1.5%, 応力比 0.9 の例)

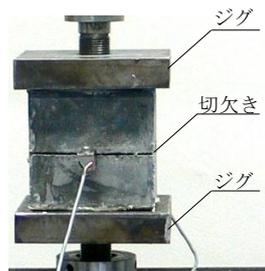


写真-1 载荷状況

2.4 UHP-SHCC が破壊に至るまでの繰返し回数と作用応力の関係

図-7 に繊維混入率 1.25% の場合のひび割れを有する UHP-SHCC が、疲労破壊に至るまでの繰返し回数とリガメント部に作用する引張応力の関係を示す。

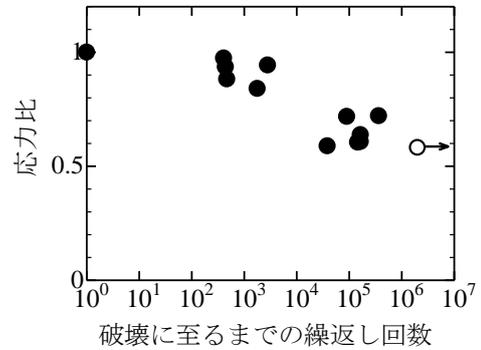


図-7 疲労破壊までの繰返し回数と応力比の関係 (V_f=1.25%)

図-8 に繊維混入率 1.5% の場合のひび割れを有する UHP-SHCC が、疲労破壊に至るまでの繰返し回数とリガメント部に作用する引張応力の関係を示す。

繊維量の違いによらず、リガメント部に作用する応力が小さくなるほど、破壊までの繰返し回数が増加する傾向にあることが分かる。これは普通コンクリートや既往の繊維補強セメント系材料についての曲げ応力下での疲労試験結果^{3), 4)}と類似している。また、水中試験と気中試験の結果には明確な差は確認できない。

なお、低応力比においては疲労破壊するまでの回数に大きなばらつきがみられる。本実験では、ひび割れを分散させない状態での疲労耐久性を検討するために、ひび割れの発生領域を限定するような供試体形状を採用している。そのため、リガメント部断面での材料特性 (繊維の本数を含む) によって引張強度や引張疲労に対する耐久性が決まるために、疲労試験の結果にばらつきが生じていると推察される。

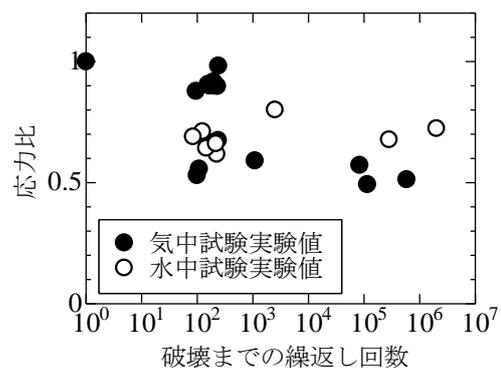


図-8 疲労破壊までの繰返し回数と応力比の関係 (V_f=1.5%)

2.5 破断面の状況

写真-2 に静的载荷並びに各応力比における破断面の繊維の状態をマイクロスコープにより撮影した写真（撮影倍率 100 倍）を示す。この写真からも全体的な傾向としては繊維の引き抜けが卓越している破壊モードであることが確認された。しかし、詳細に観察してみると、応力比 0.9 程度の疲労破壊によって引抜けた繊維の表面と静的引張破壊によって引抜けた繊維の表面には微小なモルタルが付着している状況を確認できるが、応力比 0.6 程度で疲労破壊させた供試体の破断面の繊維にはモルタルの付着は確認できなかった。このことから、高応力下での疲労破壊は繊維周辺のモルタルの破壊を伴う繊維の引き抜け挙動となる点で静的载荷の破壊モードと類似している。一方、低応力下での疲労破壊では、繊維とモルタルの界面の化学的付着が劣化しモルタルの破壊を伴わずに、繊維がそのまま引き抜かれる破壊モードとなっていると推察できる。この点については、今後

も詳細に検討する必要がある。

3. コンクリートと UHP-SHCC の接合部の引張疲労耐久性

3.1 使用材料

本実験で用いた UHP-SHCC の示方配合は、2 章の実験で用いた繊維混入率 1.25% のものと同様、表-1 に示す通りである。また、母材コンクリートは表-4 に示した示方配合で作製した。材齢 28 日の圧縮強度は 20MPa であった。なお、付着試験は材齢 34 日で実施し、疲労試験は材齢 35 日以降に実施した。

表-4 母材コンクリートの示方配合

水セメント 比	単体量(kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤*1
57.0%	176	312	860	882	1.5

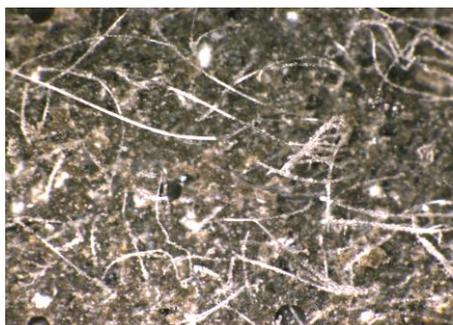
*1 AE 減水剤



(a) $V_f=1.25\%$, 応力比 0.6



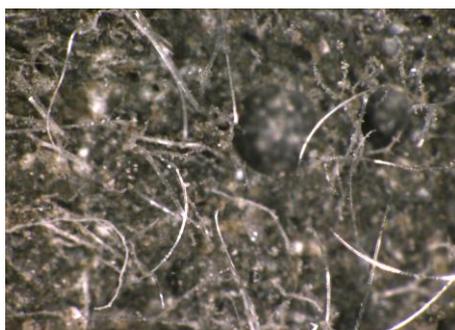
(d) $V_f=1.5\%$, 応力比 0.5



(b) $V_f=1.5\%$, 応力比 0.9



(e) $V_f=1.5\%$, 応力比 0.9



(c) $V_f=1.25\%$, 静的载荷



(f) $V_f=1.5\%$, 静的载荷

写真-2 破断面の繊維の状態

ダンベル供試体（試験部断面：13mm×30mm）の一軸引張試験より得られた応力-ひずみ関係を図-9に示す。図-9より、ばらつきは大きいですが、UHP-SHCCが初期ひび割れの発生後も複数ひび割れを生じながら応力とひずみを増進させる性質を有していることがわかる。

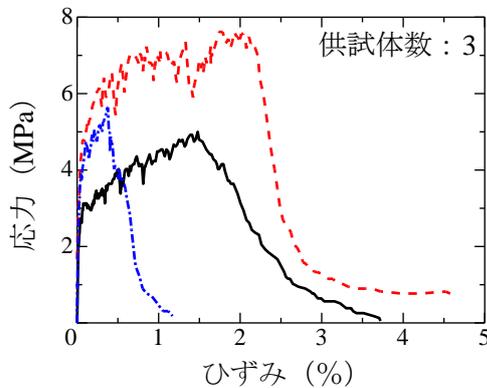


図-9 ダンベル供試体引張試験時の応力-ひずみ関係

3.2 供試体形状

供試体の形状は図-10に示すように、100mm×100mm×100mmのコンクリートに、同じく100mm×100mm×100mmのUHP-SHCCを打ち継いだ。普通コンクリートの打設後に表面に遅延剤を散布し、打設の翌日に表面の骨材を深さ5mm程度まで洗い出す処理を施したうえでUHP-SHCCを打ち継いだ。洗い出し後のコンクリートの表面性状を写真-3に示す。



写真-3 洗い出し後に露出した粗骨材

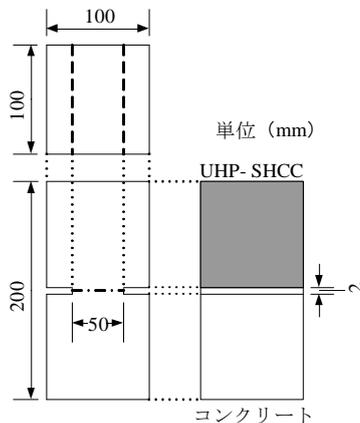


図-10 供試体形状

3.3 荷重方法

疲労試験の状況を写真-4に示す。まず、静的な引張試験を実施し（5体の試験体を使用）、コンクリートとUHP-SHCCの付着強度を確認した。疲労試験は、得られた付着強度（平均値1.75MPa）に対して、90%、70%、50%となるような3種類の応力比について行った。疲労試験時の応力と対応する荷重の関係を表-5に示す。UHP-SHCCの引張疲労試験と同様、図-6に示すような三角波で荷重を制御した片振りの引張疲労試験を行い、破壊に至るまでの載荷回数を計測した。



写真-4 荷重状況（水中試験）

表-5 試験時の上限応力と対応する荷重

見かけの応力比	応力 (MPa)	換算荷重 (kN)
0.5	0.88	4.4
0.7	1.23	6.15
0.9	1.58	7.9
1.0 (静的付着強度)	1.75	8.75

3.4 疲労破壊するまでの繰返し回数と応力比の関係

図-11にコンクリートとUHP-SHCCの接合部が疲労破壊するまでの繰返し回数とリガメント部の応力比の関係を示す。

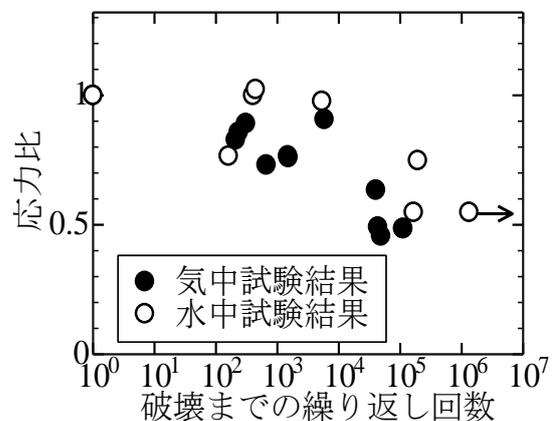
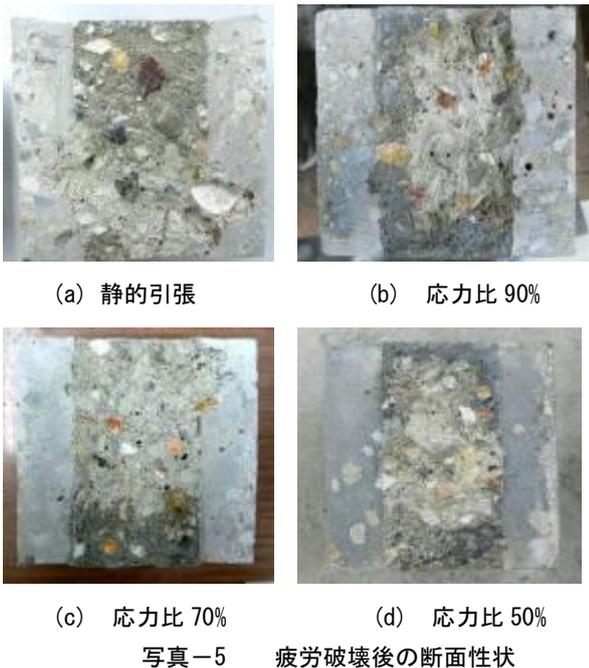


図-11 破壊までの繰返し回数と応力比の関係

気中試験・水中試験ともに、破壊に至るまでの繰り返し回数は応力比 0.9 程度で 300 回～5000 回、応力比 0.5 程度で 40000 回～1000000 回付近に分布し、前章の試験結果と同様に、断面に作用する応力が小さくなることにしたがって、破壊に至るまでの繰り返し回数が増加することが確認された。しかし、気中・水中両環境条件下における試験結果に大きな差は認められなかった。

3.5 破断面の状況

写真-5 に静的試験および各応力比における疲労試験体の破断面の状態を示す。載荷時の条件の違いによる破断面の性状の違いは確認できなかった。わずかに UHP-SHCC のモルタルとみられる薄層がコンクリート側に付着しているものがあつたが、全体的にみてコンクリート側のモルタルや骨材が破壊する傾向にあつた。この結果より、UHP-SHCC とコンクリートの接合部は十分に付着しており、本研究で使用したコンクリートの強度レベルにおいては、疲労破壊性状は母材コンクリートの性能に依存するといえる。



4. まとめ

本研究では、ひび割れを有する UHP-SHCC の引張疲労耐久性、および疲労破壊性状を実験的に確認し、以下の知見を得た。

(1)ひび割れを有する UHP-SHCC の疲労試験では、応力比が小さくなるに従い、破壊までの繰り返し回数が増加

することが確認された。

(2)高応力下（応力比で 0.9 程度）での疲労破壊は静的載荷の破壊モードと類似した、繊維周辺のモルタルの破壊を伴う繊維の引抜き挙動となる。一方、低応力下での疲労破壊では、引抜き後の繊維にモルタルの付着はほとんど認められず、繊維とモルタルの化学的付着が劣化する破壊モードとなっていると推察される。

さらに、コンクリートと UHP-SHCC の接合面を対象とした引張疲労耐久性を確認したところ、以下の知見を得た。

(3)破壊モードは全ての条件においてコンクリート側での破壊となり、UHP-SHCC とコンクリートの付着は十分であつた。すなわち、接合面の静的付着および付着疲労強度は、コンクリートの静的引張強度および引張疲労強度を上回っていると推察される。

(4)気中、水中環境条件下における、UHP-SHCC と普通コンクリートの接合面の疲労耐久性は同程度のものであると考えられる。

謝辞

本研究の成果は、新道路技術会議道路政策の質の向上に資する技術研究開発「緻密でよく曲がるセメント系材料を用いた補修・補強工法の開発（代表：中村光）」によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国枝 稔, Ahmed Kamal, 中村 光, Eugen Brühwiler : 超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.315-320, 2007
- 2) 志水 康祐, 国枝 稔, 中村 光, 玉越 隆史 : 超高強度ひずみ硬化型モルタルの物質移動抵抗性の評価, 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 9 巻, pp253-260, 2009
- 3) 金子 林爾, 大岸 佐吉 : 気乾および湿潤コンクリートの直接・割裂各引張疲労特性に関する研究, 二本建築学会構造系論文集, 第 149 号, pp.31-38, 1991
- 4) Matsumoto,T. and Suthiwarapirak,P. and Kanda,T. : Mechanism of Multiple Cracking and Fracture of DFRCCs under Fatigue Flexure, Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites(DFRCC) – Application and Evaluation -,pp259-268,2002