

論文 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料で表面被覆した RC はりの鉄筋腐食に対する補強効果

森本拓也*1・国枝稔*2・河村圭亮*3・中村光*4

要旨: 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料(UHP-SHCC)を RC 構造物の表面被覆材として利用することで、防食効果が得られると期待される。また、内部の鉄筋が腐食した場合でも、UHP-SHCC が腐食膨張圧による軸方向ひび割れ幅を低減することが可能となる。本研究では、UHP-SHCC で表面被覆した RC はりを電食させ、ひび割れ発生状況を確認するとともに、曲げ試験を行い、表面被覆を行わなかったはりと比較することで、補強効果を確認した。その結果、UHP-SHCC の被覆により、腐食によるひび割れが抑制、あるいはひび割れ幅が低減されること、曲げ試験において初期ひび割れ発生荷重、最大荷重などの向上が確認された。

キーワード: 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料, UHP-SHCC, 腐食, 電食, 表面被覆

1. はじめに

超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料(Ultra High Performance - Strain Hardening Cementitious Composites, UHP-SHCC)は、低水セメント比のセメント系材料をポリエチレン短繊維で補強した複合材料であり、引張応力下において複数ひび割れを生じる特性を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性を大幅に向上させた材料である¹⁾。この材料の適用例の一つに補修材としての利用が挙げられ、Ahmedら²⁾は引張面側をUHP-SHCCで補強したRCはりの曲げ載荷試験を行い、初期剛性、耐荷力の向上を確認している。一方、この材料は透気係数が既往の普通コンクリートの1/100 程度以下と極めて緻密であることから、高い物質移動抵抗性が期待でき、RC構造物の表面被覆材として利用することで、防食効果も得られるものと考えられる。また、被覆後にRC構造物内部の鉄筋が腐食したとしても、高い引張強度を持つUHP-SHCCが、(1)腐食膨張圧による表面ひび割れの発生を抑制、あるいはひび割れ幅を低減、(2)かぶりコンクリートの剥落の防止、および (3)部材の耐力向上の3つの効果が期待できる。

そこで本研究では、鉄筋の膨張圧により表面に生じる軸方向ひび割れに対する UHP-SHCC の補強効果の確認を行うため、腐食率と UHP-SHCC の補修厚をパラメータとし、UHP-SHCC で表面被覆した RC はりの鉄筋を電食により腐食させ、ひび割れ性状の観察を行った。また、それらの供試体で曲げ載荷試験を行い、UHP-SHCC による補強効果の確認を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本研究で使用した母材用の普通コンクリートの配合および、補修材用の UHP-SHCC の配合を表-1 (a), (b) に示す。普通コンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³)、細骨材は豊田産山砂(表乾密度 2.55g/cm³, 最大寸法 5mm)、粗骨材は豊田産山砂利(表乾密度 2.60 g/cm³, 最大寸法 25mm)、混和剤は AE 減水剤(ナフタリン系)である。一方 UHP-SHCC で使用したセメントは低熱ポルトランドセメント(密度 3.14g/cm³)であり、セメント質量の 15%をシリカフェーム(密度 2.2g/cm³)で置換した。また、UHP-SHCC の細骨材は 7 号硅砂(密度 2.68g/cm³)を、繊維は長さ 6mm の超高強度ポリエチレン繊維(直径0.012mm, 密度0.97g/cm³, 弾性係数 88GPa, 引張破断強度 2700MPa)を、混和剤は高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)と消泡剤を使用し、材料の収縮によるひび割れの発生を抑制する目的で膨張材(エトリングライト・石灰複合系)を用いた。鉄筋は D13 鉄筋(SD345, 降伏強度 $f_y=384\text{MPa}$)を使用した。

2. 2 供試体概要

供試体の寸法および、UHP-SHCC による表面被覆方法を図-1 に示す。上面以外の合計 5 つの面を UHP-SHCC で 10mm もしくは 30mm 被覆した。母材コンクリートは打設後室温 20℃の恒温室内で湿布養生し、材齢 35 日で圧縮面を上に向けた母材の周りに型枠を組み、そこへ UHP-SHCC を流し込み表面被覆を行った。ただし、実際には吹付けコンクリートなどで施工することが想定される。その際、母材コンクリートと UHP-SHCC との界面となるコンクリート表面は型枠面とし、目粗し等の界面

*1 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (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(工学) (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 (正会員)

*4 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(工学) (正会員)

表-1 使用した材料の配合

(a) 母材コンクリートの配合

最大骨材寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	単体量(kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
25mm	10.5	5.5	0.565	0.445	160	284	801	1017	2.84

(b) UHP-SHCC の配合

水結合材比 W/B	砂結合材比 S/B	単体量(kg/m ³)							
		水	セメント	細骨材	シリカフェューム	高性能AE減水剤	消泡剤	膨張材	繊維
0.22	0.1	335	1200	153	305	15.2	0.06	20	14.6

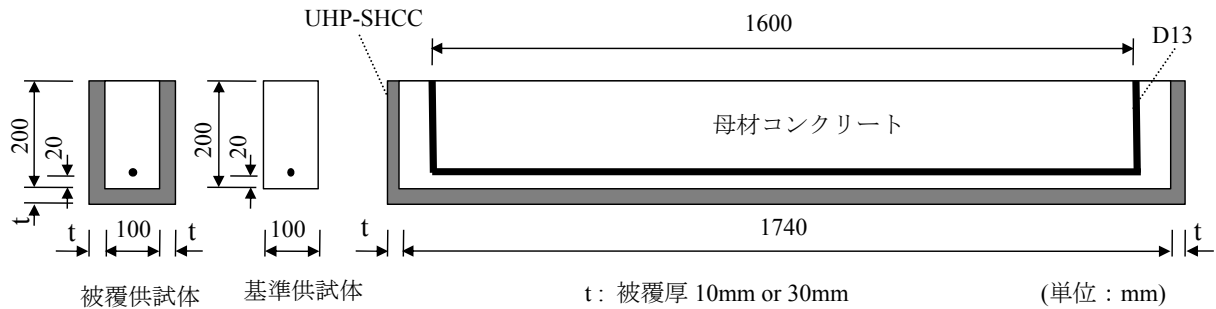


図-1 供試体概要

表-2 供試体一覧

供試体名	被覆厚 t(mm)	目標 腐食率(%)	通电時間 (日)	腐食率(%)
0mm-0%	0	0	0	0
0mm-10%		10	16	7.0
0mm-30%		30	48	18.6
10mm-0%	10	0	0	0
10mm-10%		10	16	6.2
10mm-30%		30	18~25	8.3
30mm-0%	30	0	0	0
30mm-10%		10	10~17	2.0
30mm-30%		30	42	16.8

表-3 使用した材料の強度試験結果

	母材コンクリート		UHP-SHCC	
	通电前	はり載荷時	通电前	はり載荷時
圧縮強度(MPa)	18.5	24.2	75.1	117
弾性係数(GPa)	22.4	24.0	—	31.8
引張強度(MPa)	1.78	2.61	7.56	7.41

処理は行わなかった。

表面被覆後再び室温 20°C の恒温室内で湿布養生し、母材コンクリートの材齢が 127 日、被覆材の UHP-SHCC の材齢が 92 日の時点から、定電流電源装置により 0.9mA/cm² の電流を流し電食させた。電食実験装置の概要を図-2 に示す。電解液には 3%塩化ナトリウム水溶液を用い、鉄筋側をアノード極、銅板側をカソード極となるように接続した。各供試体の被覆厚、目標とする腐食率および通电時間を表-2 に示す。なお、目標腐食率および通电時間との関係は、田森ら³⁾の実験結果をもとに算定した。ただし、補修厚 10mm 目標腐食率 30%(10mm-30%)、補修厚 30mm 目標腐食率 10%(30mm-10%)の供試体は、試験途中で通电していないことが判明したため、通电保証時間はそれぞれ 18 日および 10 日とした。

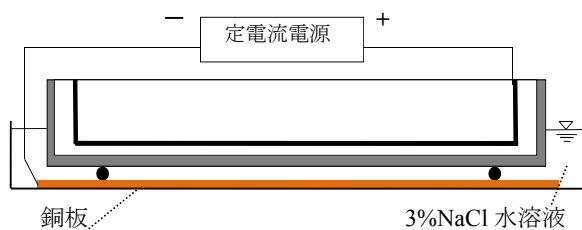


図-2 通电方法

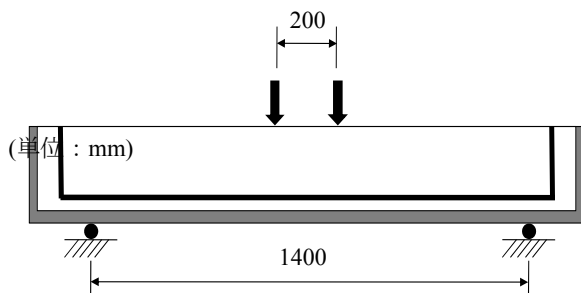


図-3 載荷方法

電食後、図-3 に示すように載荷スパン 1400mm、モーメントスパン 200mm の 2 点載荷を行い、載荷点の変位と荷重を測定した。

載荷試験終了後、コンクリート中から鉄筋をはつり出し、10%クエン酸アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬して錆を溶解させた後、質量減少率を求めた。この質量減少率を腐食率とし、表-2 に示す。

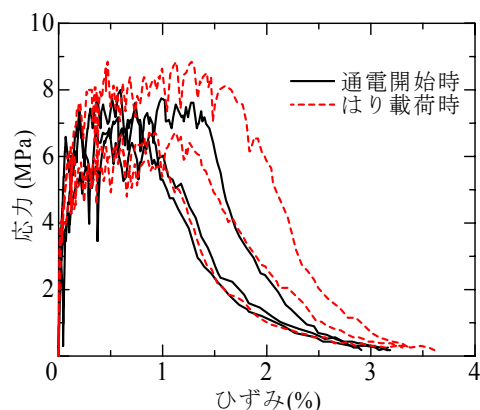


図-4 使用した UHP-SHCC の引張試験結果

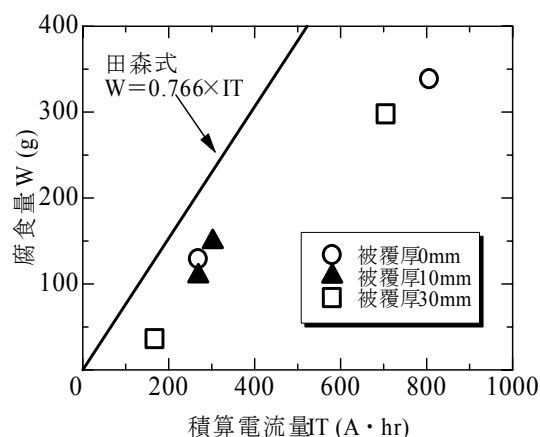


図-5 腐食量と積算電流量の関係



写真-1 供試体底面のひび割れからの腐食生成物の流出 (0mm-10%)

2. 3 使用した材料の強度試験

本研究で使用した母材コンクリートおよび UHP-SHCC の通電開始前(母材コンクリート:材齢 28 日, UHP-SHCC : 材齢 92 日)とはり載荷時 (母材コンクリート:材齢 188 日, UHP-SHCC : 材齢 153 日) の圧縮強度, 弾性係数, 引張強度を表-3 に示す。引張強度は, 母材コンクリートについては円柱試験体の割裂試験から, UHP-SHCC については試験区間内の断面が 13mm × 30mm のダンベル型試験体の一軸引張試験により求めた。UHP-SHCC の引張試験により得られた応力ひずみ関係を図-4 に示す。

母材コンクリートは圧縮, 引張両方において, UHP-SHCC は圧縮において材齢の増加に伴う強度の増加が確認された。

3. 各供試体の腐食率と通電直後のひび割れ性状

今回の実験で得られた腐食量と積算電流量の関係を図-5 に示す。図中には参考までに田森らによる腐食量と積算電流量の関係式を実線で示した。今回の実験では UHP-SHCC で表面被覆を行うことで, 表面被覆しなかった供試体との腐食量-積算電流量関係に大きな違いは見られなかった。UHP-SHCC の物質移動に対する抵抗性は高く, 防食効果が高いことが期待できるが, 今回は電食実験であること, および上面が開放されている供試体であることから, 酸素が十分に供給され腐食量に違いは見られなかったものと考えられる。

図-6 に通電終了後の各供試体の側面および底面のひび割れの様子を示す。

図-6(b), (c)に示すように UHP-SHCC で補修を行っていない基準供試体 0mm-10%, 0mm-30%には底面に軸方向に連続する一本のひび割れが観察され, そこから写真-1 に示すような腐食生成物の流出が見られた。図-7 に供試体 0mm-10%, 0mm-30%の底面の各測定位置でのひび割れ幅を示す。

UHP-SHCC で被覆した供試体 10mm-10%, 10mm-30%, 30mm-30%の底面には微細な複数ひび割れが生じたが, いずれのひび割れ幅も 0.05mm 程度以下であり, 腐食生成物の流出も比較的少なかった。ほぼ同じ腐食率である供試体 0mm-10%と 10mm-10%を比較しても UHP-SHCC で被覆した 10mm-10%のほうが流出している腐食生成物の量が少なかった。供試体 30mm-10%は腐食率が小さいこともあり, 底面に目視で確認できるひび割れはなく, 腐食生成物の流出もほとんどなかった。

また, 基準供試体 0mm-10%, 0mm-30%の側面にはひび割れが見られなかったが, 供試体 10mm-30%, 30mm-30%には側面に複数ひび割れが見られた。載荷後供試体断面を観察したところ, 図-8 に示すように, 基準供試体ではいずれの腐食率でも鉄筋に沿ったひび割れが底面に生じたのに対し, 供試体底面, および側面に斜め方向に交わるひび割れが見られた。これは UHP-SHCC の拘束によるものと考えられる。しかし, 今

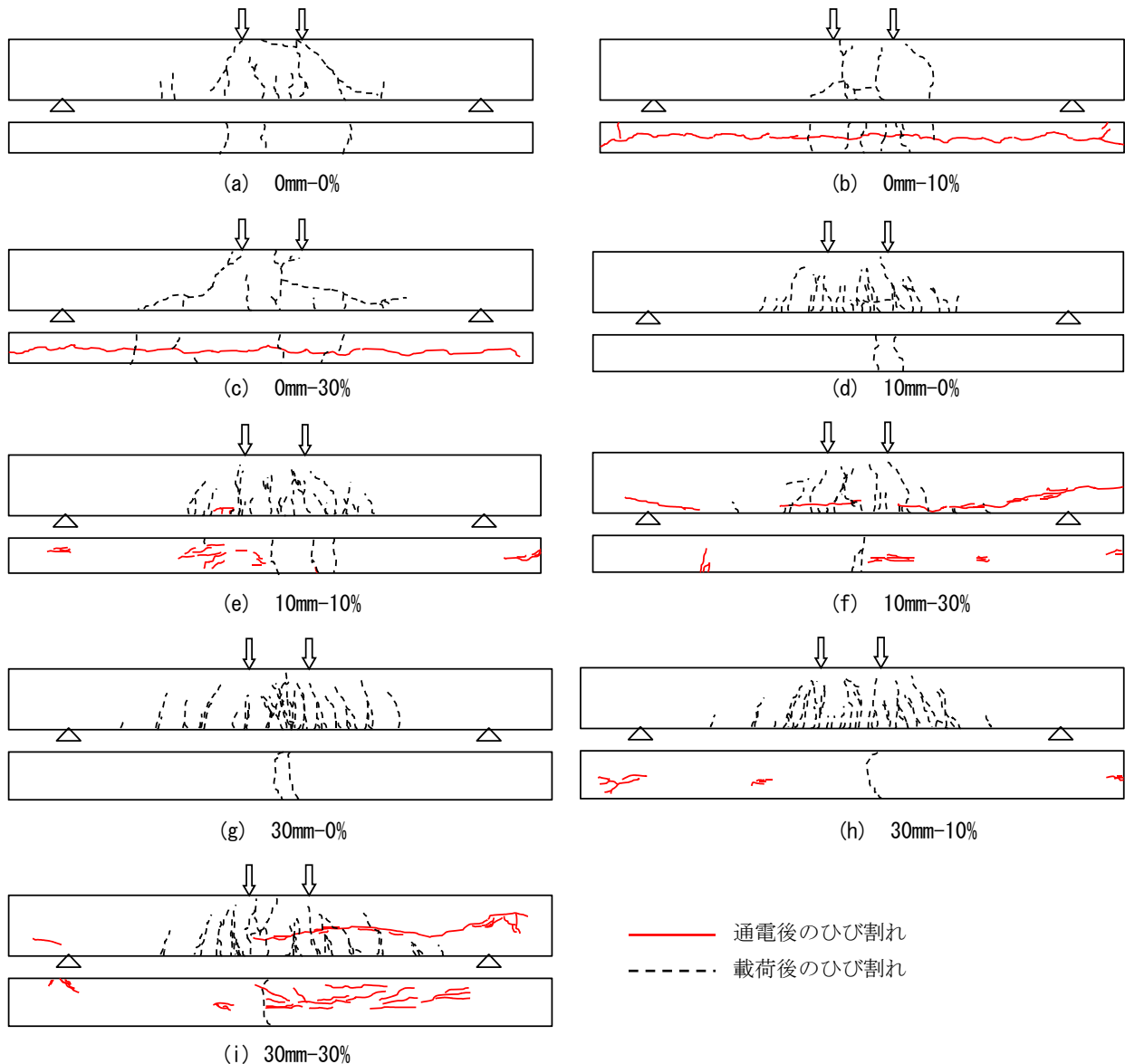


図-6 各供試体側面および底面のひび割れの様子

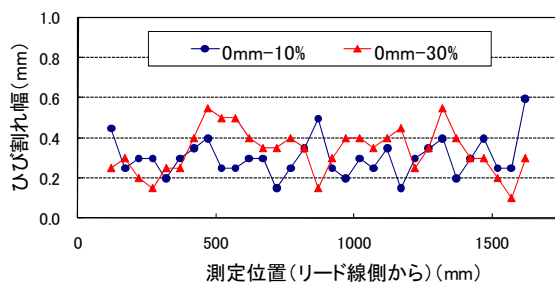


図-7 基準供試体通电後の底面のひび割れ幅

回の実験結果だけではそのことが断言できないため、今後腐食ひび割れの発生メカニズムについて詳細な検討を行う予定である。

4. 载荷試験結果

4.1 基準供試体の载荷試験結果

UHP-SHCC で表面被覆していないはり(基準供試体)の

载荷試験により得られた荷重-変位曲線を図-9 に示す。

電食させていない供試体 0mm-0%は変位約 20mm 付近でコンクリートが圧壊し、その直後に斜め引張破壊が起きた。表面被覆を行わず、通电した供試体 0mm-10%、0mm-30%は腐食による鉄筋断面積の減少から、降伏荷重が低下し、モーメントスパン内において腐食した鉄筋が破断することにより破壊に至った。

4.2 UHP-SHCC で表面被覆した供試体の载荷試験結果

UHP-SHCC で表面被覆したはりの载荷試験により得られた荷重-変位曲線を図-10 に示す。なお、変位 40mm 付近でいずれの载荷も終了した。10mm の表面被覆を行った供試体は通电の有無に関わらず同じような荷重-変位関係を示した。10mm-0%、10mm-10%、10mm-30% は表面被覆を行わなかった供試体に比べ、断面積が増加したこと、ならびに UHP-SHCC が複数の微細ひび割れを生じながら最初引張応力を負担することから、最大荷重

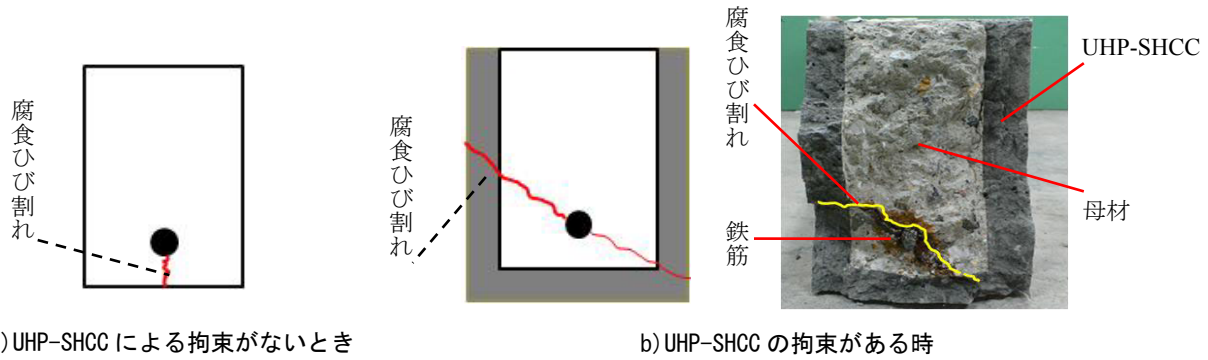


図-8 表面被覆の有無によるひび割れの入り方の違い

が増加した。載荷点変位が約 4mm に達した時にモーメントスパン内のひび割れが局所化し始め、その後変位 20mm 付近で母材コンクリートが圧壊するものの、周りを UHP-SHCC が拘束しているため荷重を保持し続ける。その後も UHP-SHCC が圧縮応力を受け持ち、また、せん断に対しても抵抗するため、0mm-0%でみられたような斜め引張破壊を防ぎ、変位が 40mm を超え荷重を終了するまで荷重を保持し続けた。30mm の表面被覆を行った供試体では、30mm-0%の初期剛性は 30mm-10%のそれ

よりも小さいことから、30mm-0%は載荷前にひび割れ等の初期欠陥を有していたものと考えられる。30mm-10%の最大荷重が 30mm-0%よりも大きいのもそのためと考えられる。しかし、表面被覆を行わなかった供試体に比べ、最大荷重が増加した点、載荷点変位が約 4mm 以上に達した時にモーメントスパン内のひび割れが局所化し始め、その後母材コンクリートの圧壊後も UHP-SHCC が圧縮応力を受け持ち、また、せん断に対しても抵抗するため、変位が 40mm を超え荷重を終了するまで荷重を

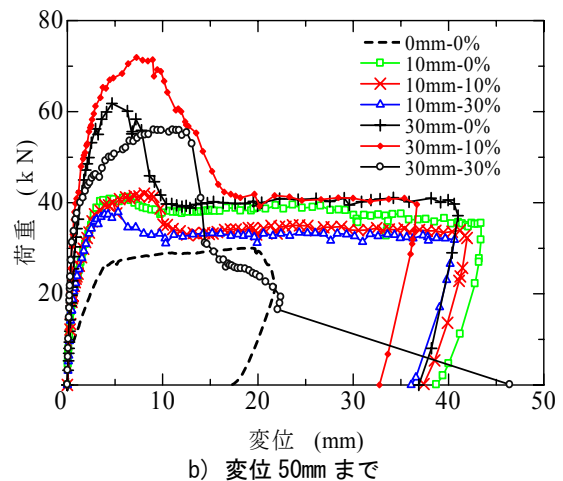
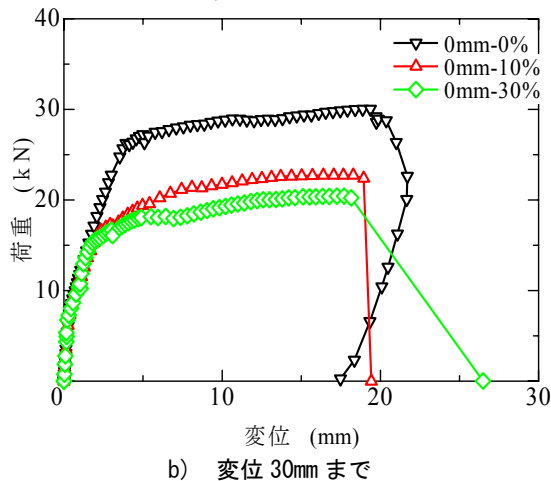
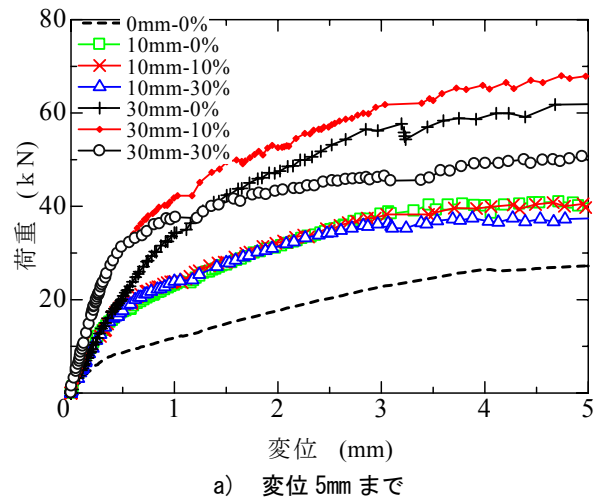
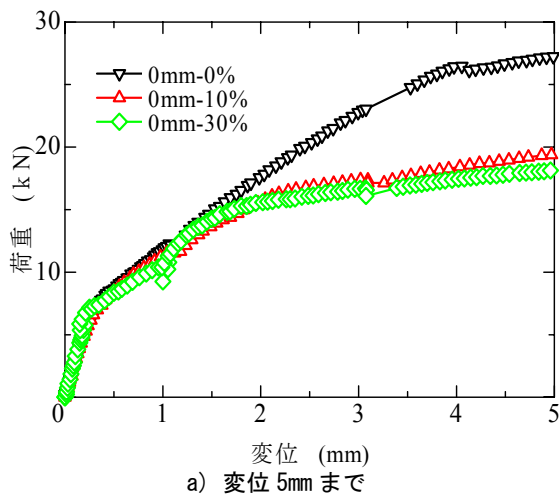


図-9 UHP-SHCC 無被覆はりの荷重-変位関係

図-10 UHP-SHCC 被覆はりの荷重-変位関係

表-4 UHP-SHCC 被覆はりの初期ひび割れ発生荷重, 最大荷重, 最大荷重時の変位

供試体名	0mm-0%	10mm-0%	10mm-10%	10mm-30%	30mm-0%	30mm-10%	30mm-30%
初期ひび割れ発生荷重(kN)	7.7	14.3	13.8	15.0	30.3	27.3	28.3
最大荷重(kN)	30.0	41.2	42.0	38.0	61.9	72.0	56.1
最大荷重時の変位(mm)	19.5	6.4	8.1	5.3	5.0	8.1	11.9

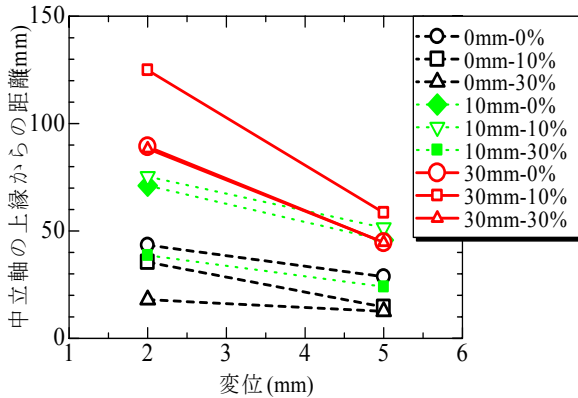


図-11 変位 2mm および 5mm 時の中立軸の位置

保持し続けた点から、30mm-0%と 30mm-10%は、同じような破壊挙動であると推察される。そのメカニズムも 10mm の表面被覆を行ったものと同様であると考えられる。一方、30mm-30%は 16.8%と腐食率が高いために、降伏荷重が低く、0mm-10%、0mm-30%と同様にモーメントスパン内の鉄筋の破断により破壊に至った。腐食率が高く、鉄筋破断に依存した破壊となったため、このような変形性能の低下が見られたものと考えられる。

表-4に UHP-SHCC で表面被覆したはりの初期ひび割れ発生荷重と、最大荷重, 最大荷重時の変位を示す。表面被覆していない基準供試体 0mm-0%と比較すると、初期ひび割れ発生荷重, 最大荷重ともに増加がみられた。また、先述したように UHP-SHCC が曲げだけでなく、圧縮力の分担, およびせん断に対しても抵抗することから、UHP-SHCC の表面被覆により、変形性能の大幅な向上効果が得られた。

図-11 に、はり上面中央のコンクリート表面に軸方向に取り付けたひずみゲージと、側面下縁の中央に軸方向に取り付けたπ型変位計(検長 100mm)で測定したひずみより求めた変位 2mm, 5mm 時の中立軸の位置を示す。変位 5mm は基準供試体 0mm-0%が降伏し、UHP-SHCC で表面被覆を行った供試体の多数が最大荷重を示す変位である。変位が大きくなるにつれて中立軸位置がはり

上縁に近づくが、被覆厚が小さいほど、腐食率が高いほど、中立軸がはり上縁に近くなっていることが分かる。これにより、はりの耐力の向上が得られたと考えられる。

5. 結論

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) UHP-SHCC を RC はりの表面被覆材として用いることで、表面被覆後に RC 構造物内部の鉄筋が腐食したとしても、鉄筋の膨張圧により生じる軸方向ひび割れの発生を抑制、あるいはひび割れ幅を低減する効果が認められた。ただし腐食ひび割れの発生メカニズムにも違いが見られたため、今後詳細な検討を行う予定である。
- (2) RC はりの UHP-SHCC の被覆により、曲げ試験において、初期ひび割れ発生荷重, 最大荷重, 変形性能の向上がみられた。

謝辞

本研究の一部は科学技術費補助金(若手研究(B)19760302)により行った。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集, Vol.29, No1, pp.315-320, 2007
- 2) Ahmed KAMAL, Minoru KUNIEDA, Naoshi UEDA and Hikaru NAKAMURA : ASSESSMENT OF STRENGTHENING EFFECT ON RC BEAMS WITH UHP-SHCC, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No3, pp.1483-1488, 2008
- 3) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典 : 鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol10, No2, pp.505-510, 1988