

平成18年度（財）港湾空港建設技術サービス センター研究開発助成報告書

助成番号：平成18年10月30日付 第06—1号

研究開発項目：（ ）公共工事コスト削減対策に関するもの

震災復旧時のコスト削減を可能とする セメント系補強材の開発

平成20年4月30日

名古屋大学

国枝 稔

目次

1. 研究開発の目的	1
2. 材料の基本性能の確認	4
2.1 超高強度ひずみ硬化型モルタル（UHP-SHCC）の開発	4
2.2 UHP-SHCC の寸法安定性	5
3. 劣化の程度と補強効果の確認（母材コンクリートとの一体性）	8
3.1 引張側の補強効果の確認	8
3.2 圧縮側の補強効果の確認	12
4. 吹付け施工を想定した施工性能の確認	17
5. 部材設計方法の提案	19
6. コスト比較	26
7. 結論	27

1. 研究開発の目的

港湾構造物をはじめとする社会基盤を適切に維持し，安全で快適な生活を確保することが重要である．とりわけ，将来起こりうる大規模地震に対してその被害の軽減，および被災後の早期機能復旧が重要である．例えば，コンクリート構造物のはり部材や柱部材が地震力により損傷した場合，部材の健全性を診断し，適切な工法により補強する必要がある．実際には，鋼板，シートや鉄筋コンクリート（RC）による巻立てなどが行われるが，以下のような点がコスト増加を招いている．

- ・ 損傷の程度や損傷した部材寸法にあわせた補強部材設計
- ・ 作業足場，支保工，補強筋の配筋，ひび割れ注入，鋼板と既設部材との空隙の充填など，数多くの施工プロセス
- ・ 緊急時のための資材のストックや作業者の確保

本研究開発は，超高強度かつ超高靱性な短繊維補強セメント系複合材料を開発し，地震被災後のコンクリート構造物の機能を早期復旧するために，吹付け工法によって補強するための工法の開発に関する基礎的研究である．補強用鉄筋の配筋，型枠工，架設などの省略により，早期の機能復旧が可能となり，かつ工法そのもののコストダウンも可能とする．さらに，材料使用量の面からのコスト削減も目指している．

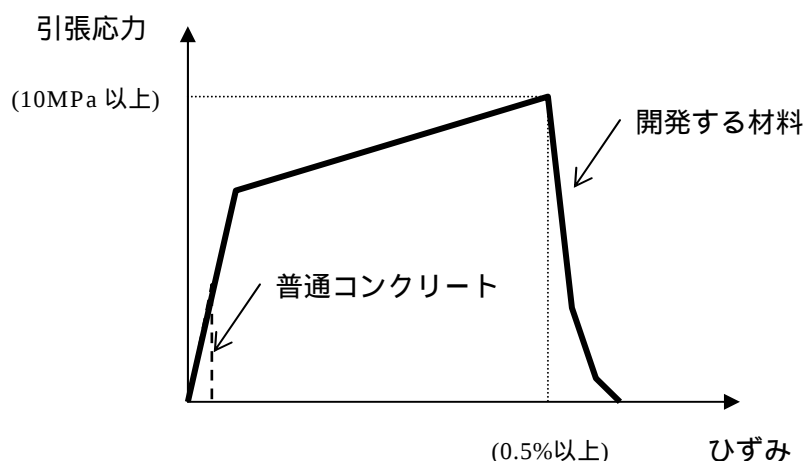


図 - 1.1 普通コンクリートおよび開発する材料の引張応力 - ひずみ曲線のイメージ

図 - 1.1 に示すように，当該材料の目標性能は，引張強度 10MPa，引張強度時ひずみを 0.5% に設定している．例えば，断面 150mm × 200mm の鉄筋コンクリートはり（鉄筋を 1% 配置）の一軸引張試験を想定した結果（解析による）を図 - 1.2 に示す．これと同程度の力学性能を有する断面を，開発予定の材料（引張強度 10MPa，引張強度時ひずみ 0.5%）で置換する場合，部材厚が 90mm に低減できる（図 - 1.2 参照）．緊急時のための材料ストックや，運搬などの難しさから，できる限り少量の材料を利用し，効果的な補強が行われることが震災復旧時には重要な要素となるが，本研究開発によってこれらの達成が十分に期待できる．

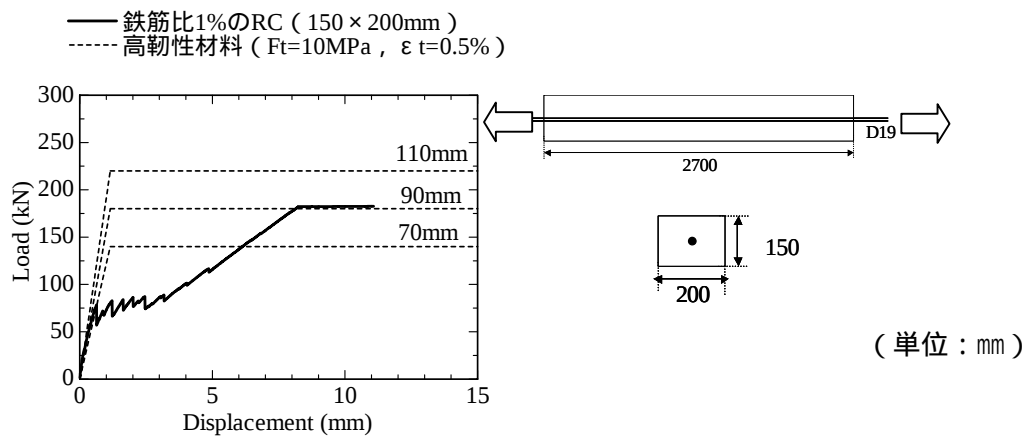


図 - 1.2 高靱性材料と既存 RC の引張性能の比較と対象部材

今回開発されるセメント系材料により，図 - 1.2 に示すように，地震力によりコンクリートのかぶり剥落し，内部のコンクリートがブロック状に破砕される程度の損傷部材への適用が期待される．



図 - 1.3 損傷した RC 部材の例(土木学会(第1次)・地盤工学会合同調査団 調査速報(Ver. 1.0, 2005年1月11日)より)

本研究開発は，超高強度ひずみ硬化型モルタル（以下，UHP-SHCC とよぶ：Ultra High Performance-Strain Hardening Cementitious Composites）を用いて，損傷した鉄筋コンクリート部材（以下，RC 部材とよぶ）を早期復旧する工法の可能性について検討したものである．特に，以下の項目について検討を行った．

- (1) 材料の基本性能の確認（力学性能，寸法安定性）
- (2) 劣化の程度と補強効果の確認（母材コンクリートとの一体性）

- (3) 吹き付け施工を想定した施工性能の確認
- (4) 部材設計方法の提案
- (5) コスト比較

2. 材料の基本性能の確認

ここでは，本研究開発の核となる超高強度ひずみ硬化型モルタル（UHP-SHCC）の材料開発および性能確認を行った．前半では，各種配合試験の結果，得られた超高強度ひずみ硬化型モルタルの力学性状（引張性能）について，後半には，硬化時に生じる収縮挙動（寸法安定性）について，実験的に検討した結果を紹介する．

2.1 超高強度ひずみ硬化型モルタル（UHP-SHCC）の開発

(1) 実験概要

表 - 2.1 に当該材料の配合を示す．W/B を 22%の一定とし，セメント質量の 15%をシリカフュームで置換した．繊維には高強度ポリエチレン（長さ 6mm，直径 12 ミクロン）を使用し，体積混入率を 0.5%，1.0%，1.5%と変化させた．

練混ぜは容量 50L のパン型ミキサにより，セメント，シリカフューム，細骨材を 1 分間空練りし，水，混和剤等を投入して更に練混ぜた後，繊維を投入して 2 分間練混ぜた．

表 - 2.1 超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の示方配合

繊維量 (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水	セメント	シリカフューム	細骨材	化学混和剤	消泡剤	繊維
0.5	22	347	1343	237	185	31.6	6.95	4.9
1.0					171			9.7
1.5					158			14.6

(2) 実験結果

図 - 2.1 に，ダンベル型供試体（試験区間の厚さ 13mm，幅 30mm）を用いた一軸引張試験により得られた応力 - ひずみ曲線を示す．繊維混入量の違いにより材料特性をコントロールでき，1.5%の混入量で，最大で引張強度約 11MPa，引張ひずみ約 3%の特性が得られている．よって，積極的に補強効果を得るためには，1.5%程度の混入量が必要であることが分かる．

図 - 2.2 に同試験にて得られた供試体のひび割れ図を示す．これによると，繊維混入量が多くなるほど，ひび割れ本数が多くなっていることが分かる．なお，いずれも極めて微細なひび割れに留まっていることも確認された．

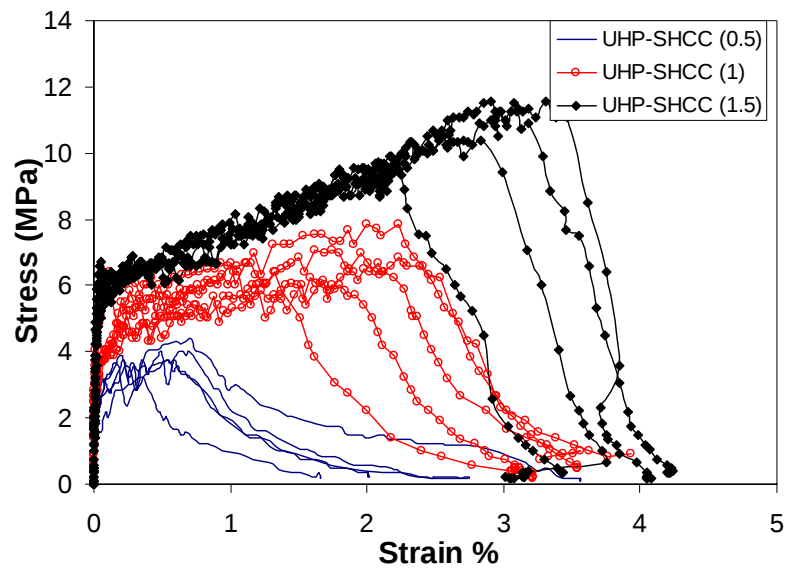


図 - 2.1 開発された超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の応力 - ひずみ曲線

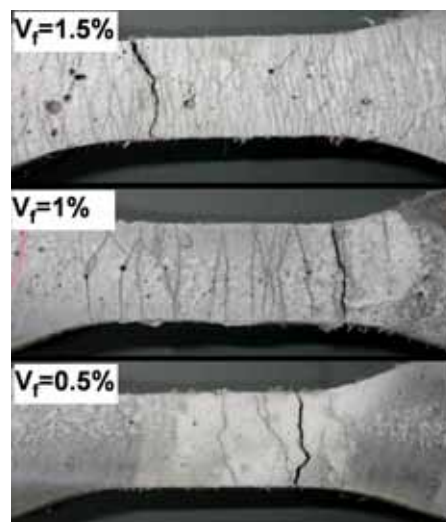


図 - 2.2 ひび割れ性状

(3) まとめ

低水セメント比でかつ PE 繊維を用いた繊維補強材料を開発し、繊維 1.5%の混入量で、最大で引張強度約 11MPa ,引張ひずみ約 3%を示し、また複数の微細ひび割れを生じる UHP-SHCC の開発が可能であった。

2.2 UHP-SHCC の寸法安定性

(1) 実験概要

実験に用いた UHP-SHCC の配合は、前節で使用した表 - 2.1 と同様とした。収縮ひずみ測定には $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用い、各水準につき 2 本ずつの供試体を作製した。

供試体は打設後 24 時間で脱型を行い，水中養生を行った．水結合材比が小さく，シリカフュームなどの粉体量が多い材料では自己収縮と乾燥収縮が混在することが知られているが，ここでは乾燥収縮を取り除くことを目的に，水中養生を実施した．供試体には収縮ひずみ測定のためエポキシ樹脂により真鍮プラグを取付けた．真鍮プラグは打設面とその裏面を除く 2 面にそれぞれ 1 対取付けた．プラグ貼付位置を図 - 2.3 に示す．ひずみ検長区間は 250mm とし，コンタクトゲージ(フーゲンベルガー製)により 1/1000mm まで計測した．

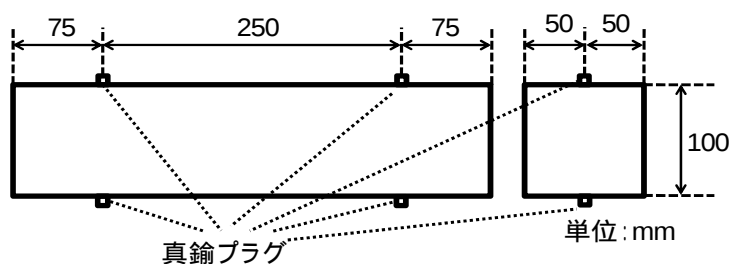


図 - 2.3 プラグ貼付位置

(2) 実験結果

各供試体の収縮ひずみの経時変化を図 - 2.4 に示す．なお，類似の配合で繊維を混入していない配合 (0%) のデータも併せて示す．いずれの配合も水中養生のため，材料が水分を吸収して初期に膨張し，その後収縮が始まるが，繊維混入率 0.0% と 0.5% では収縮ひずみの違いはあまり見られない．一方，繊維混入率 1.0%，1.5% の場合は，0.0%，0.5% に比べ収縮ひずみが材齢 28 日においていずれも 100 μ ほど低減していることが分かる．これは繊維の拘束力による収縮低減効果と推察される．PE 繊維の混入は超高強度モルタルの収縮を抑制する効果を持つことが分かった．しかし，ある一定量以上の繊維 (本研究では 1.0%) をモルタルに混入しないとその効果は得られないと推察される．

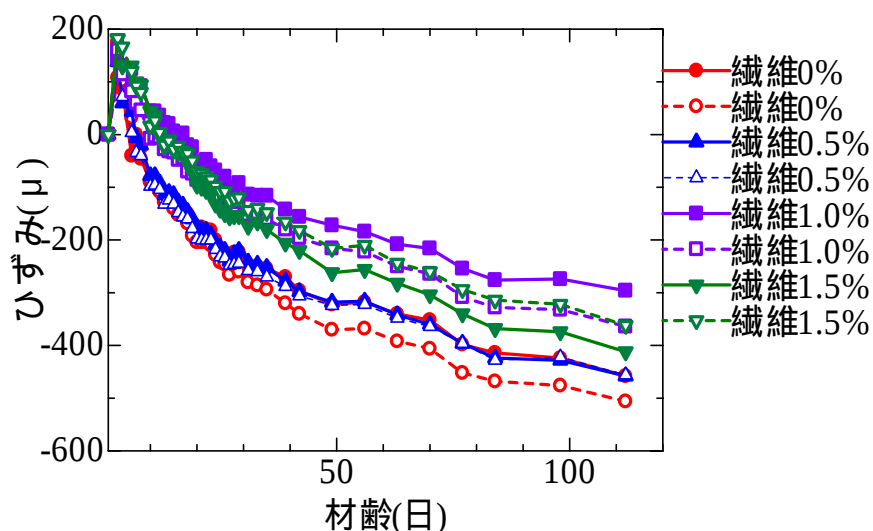


図 - 2.4 モルタルの収縮に及ぼす繊維混入率の影響

(3) まとめ

ここでは、開発された UHP-SHCC の寸法安定性を確認したところ、水中養生であるが $300 \sim 400 \times 10^{-6}$ 程度の収縮量であった。なお、PE 繊維の混入は超高強度モルタルの収縮を抑制する効果を持つことが分かった。

3. 劣化の程度と補強効果の確認（母材コンクリートとの一体性）

ここでは損傷した RC 部材を模擬した供試体を用いて，UHP-SHCC を用いて補強し，その補強効果の確認を行った．なお，曲げを受ける RC 部材を対象とし，図 - 3.1 に示すような(1)引張側のひび割れを導入したもの，(2)圧縮側のコンクリートが圧縮破壊したもの，の2種類の損傷を対象とした．

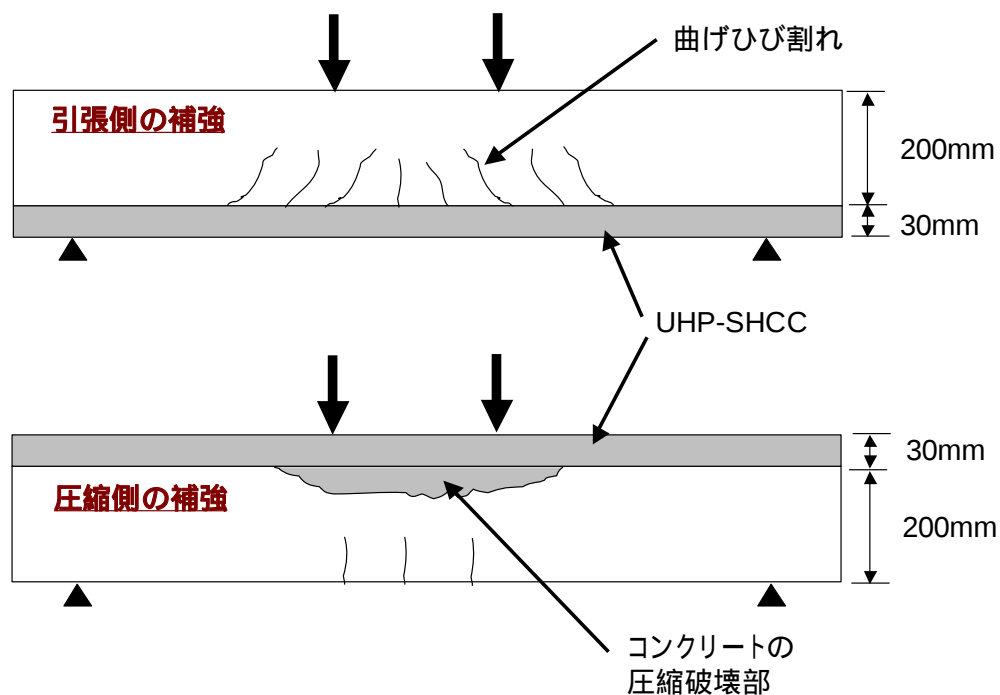


図 - 3.1 検討した補強のイメージ図（上図：引張側の補強，下図：圧縮側の補強）

3.1 引張側の補強効果の確認

(1) 実験概要

表 - 3.1 に母材となる RC はりに使用したコンクリートの配合を示す．水セメント比は 56.4%とした．

表 - 3.1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤*
56.4	49.6%	15	176	312	860	882	1.5

*AE 減水剤

RC はりの寸法は，図 - 3.2 に示すように幅 150mm，高さ 200mm，長さ 1800mm とし，主筋には D10（SD295A， $f_y=362\text{N/mm}^2$ ）を 2 本配置した．また，せん断スパンには，D6（SD295）を 90mm ピッチで配置した．なお，供試体は 2 本作製した．

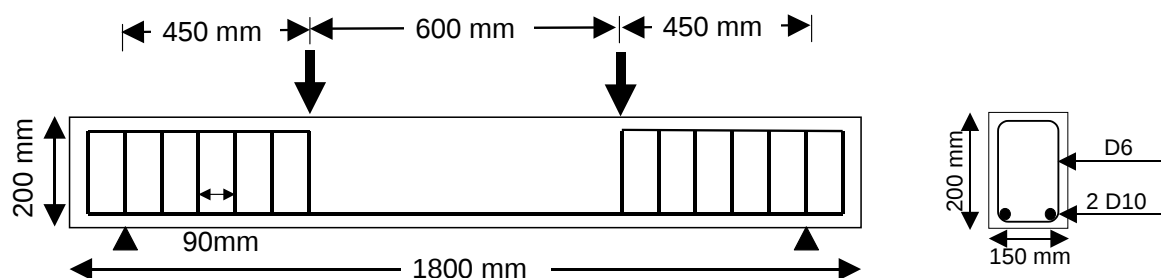


図 - 3.2 供試体形状および寸法

コンクリートの打設後，翌日に脱型し，その後 13 日間 20 の恒温室内にて湿布養生を行った．なお，UHP-SHCC にて補強される面（図 - 3.2 では下面）には，あらかじめ凝結遅延剤を型枠に塗布しておき，脱型時に洗い出すことで凹凸を付けた．

図 - 3.3 に，本実験のフローを示す．コンクリートの材齢 14 日にて，初期損傷（曲げひび割れの導入）を与えるための曲げ載荷試験（初期載荷とよぶ）を行い，その後，UHP-SHCC を供試体下面に打設後，再度 30 日間恒温室内にて湿布養生を行い，総材齢 44 日にて，初期載荷と同様の曲げ載荷試験（2 次載荷）を補強供試体に対して行った．なお，材齢 14 日（初期載荷時）でのコンクリートの圧縮強度は 23.7MPa，材齢 44 日（2 次載荷時）でのコンクリートの圧縮強度は 30.1MPa であった．

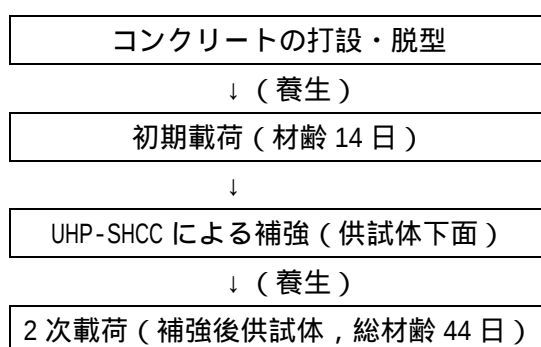


図 - 3.3 実験のフロー

曲げ試験は，図 - 3.2 および 3.4 に示すように載荷スパン 1500mm，モーメントスパン 600mm の 2 点載荷とし，ロードセル（容量 300kN）にて荷重を，高感度変位計（ストローク 50mm，感度 1/200mm）にて載荷点変位をそれぞれ計測した．



図 - 3.4 載荷試験状況（補強後供試体）

(2) 実験結果

図 - 3.5 に、初期載荷において得られた荷重 - 載荷点変位関係を示す。いずれの供試体も、約 20kN 付近で初期ひび割れが発生し、その後複数のひび割れが生じることで剛性が低下した。さらに 40kN 付近にて鉄筋が降伏したため、補強をするために除荷を行った。図 - 3.6 に、除荷重終了時のひび割れ発生状況の例を示す。モーメントスパン内（幅 600mm）におよそ 7 本程度のひび割れが生じていた。また、各ひび割れの幅は、0.1mm 程度以下であった。

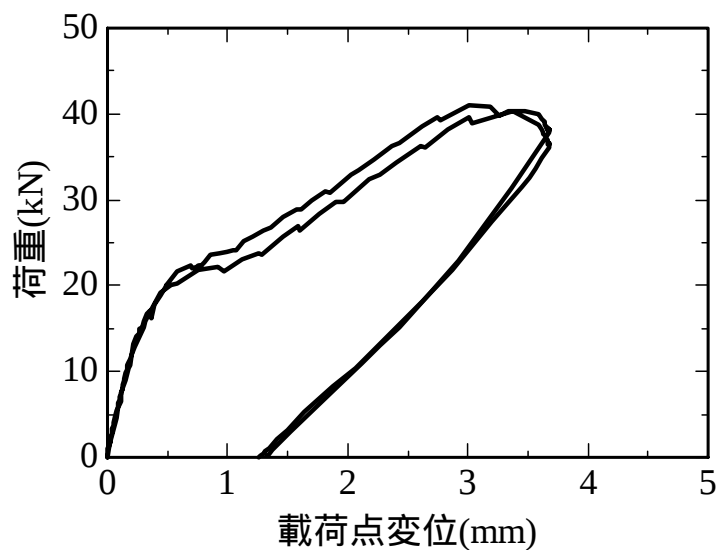


図 - 3.5 初期載荷時の荷重 - 載荷点変位関係

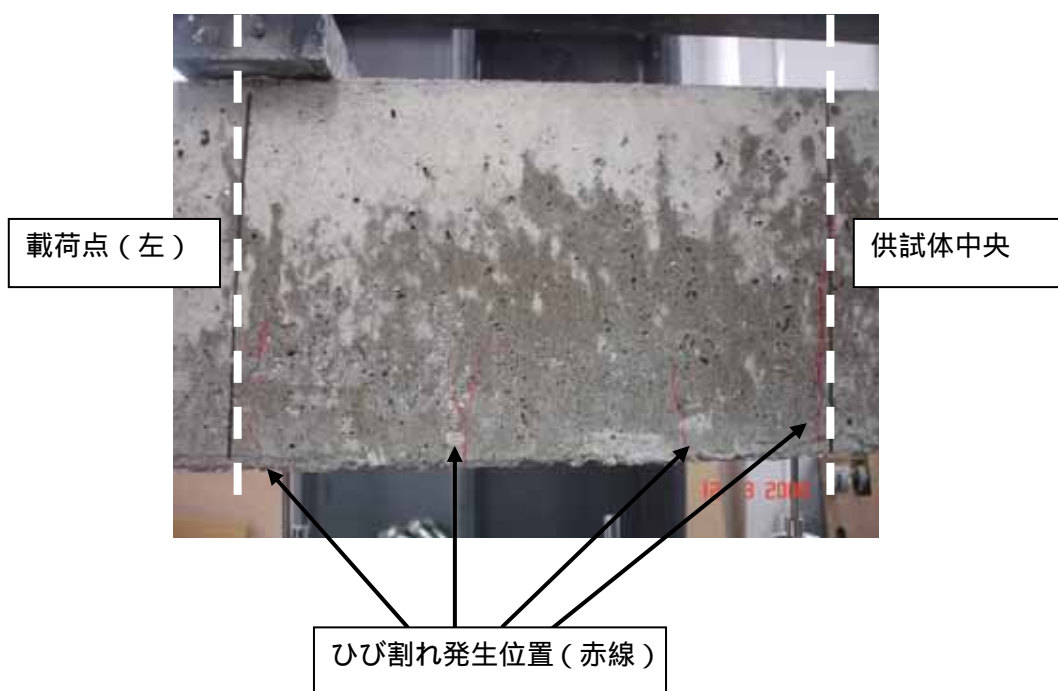


図 - 3.6 初期載荷終了時のひび割れ性状の例

初期載荷後に UHP-SHCC にて補強を行い、総材齢 44 日にて 2 次載荷を行った際の荷重 - 載荷点変位関係を図 - 3.7 に示す。なお、載荷は載荷点変位が 20mm になった時点で終了した。2 次載荷時には、ひび割れ発生後の剛性が高く、また鉄筋降伏時の荷重が初期載荷時のそれらに比べて大きくなっていることが分かる。これは、UHP-SHCC が引張力を負担していることに起因していると考えられる。ただし、2 次載荷時の荷重 - 載荷点変位関係では、ばらつきがやや大きく、材料の性能改善などが今後の課題であるといえる。

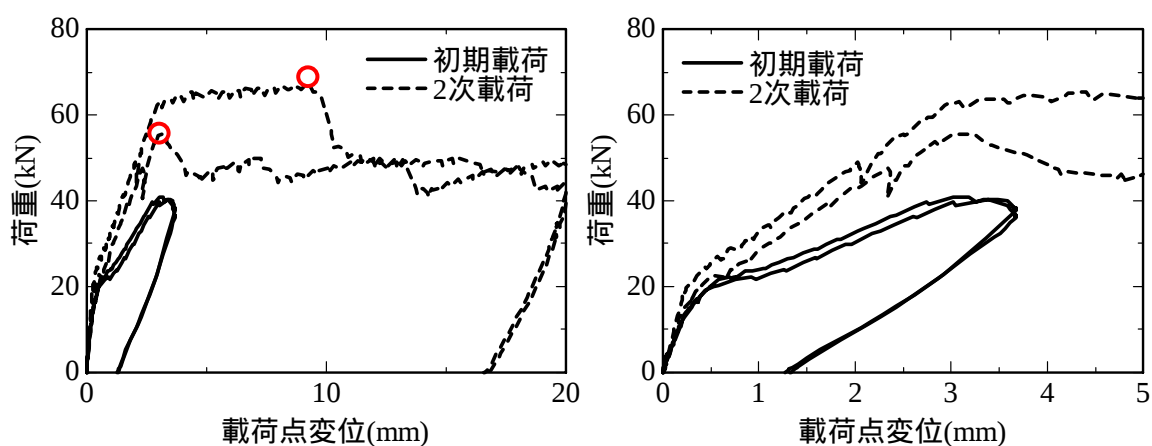


図 - 3.7 2 次載荷時の荷重 - 載荷点変位関係（左図：全体，右図：変位 5mm までを拡大）

図 - 3.8 に、2 次載荷時のひび割れ性状の例を示す。初期載荷時に導入されたひび割れ部の下縁部の UHP-SHCC に複数の微細なひび割れが生じていることが分かる。また、図 - 3.7

上図の赤丸部分では、UHP-SHCC 内の微細なひび割れのうち一本が大きく開口し、破壊が局所化した。なお、UHP-SHCC 層と既設コンクリートとの剥離などは一切認められなかった。

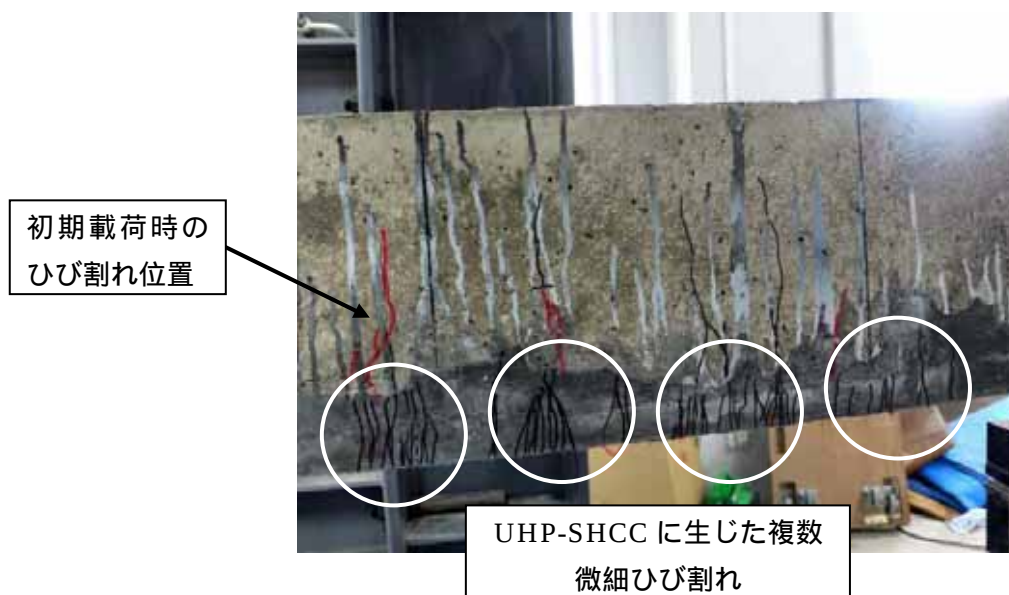


図 - 3.8 2 次載荷時のひび割れ性状の例

(3) まとめ

ここでは、引張側を UHP-SHCC で補強した際の補強効果を確認する実験を行った。これによれば、ばらつきはやや大きいものの、ひび割れ発生後の部材の剛性を向上させ、また耐力も向上させる効果が確認された。また、UHP-SHCC と既設コンクリートとの剥離などは一切見られず、終局時まで一体性が確保されていた。

3.2 圧縮側の補強効果の確認

(1) 実験概要

前節にて使用したコンクリートを用いて、前節と同一の形状、寸法の供試体を作製した。ただし、圧縮破壊時のたわみを小さくすることを目的に、図 - 3.9 に示すように、主筋量およびせん断補強筋量を多くした。前節と同様の載荷フローにより、初期載荷および 2 次載荷をそれぞれ実施した。なお、載荷試験実施時期は図 - 3.10 に示す。

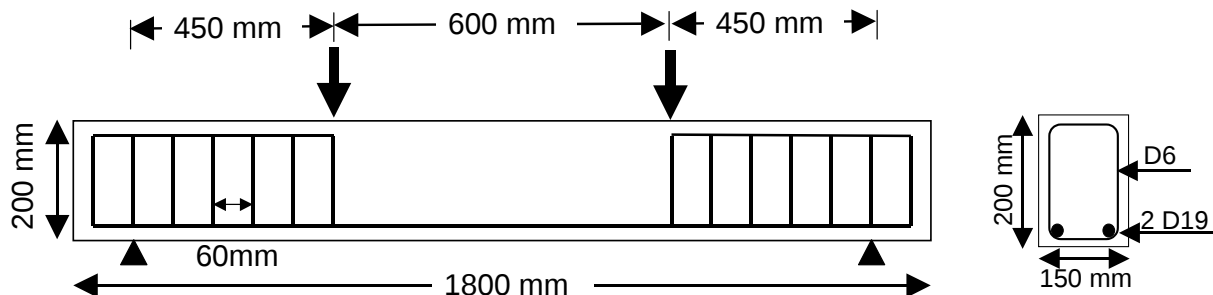


図 - 3.9 供試体形状および寸法

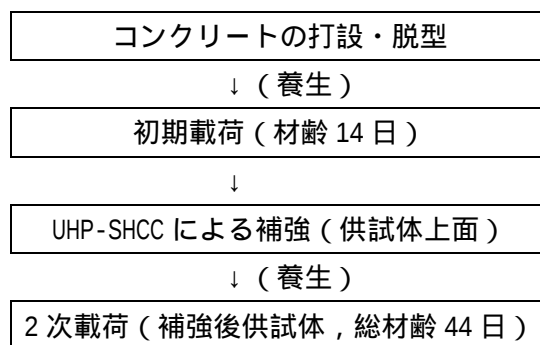


図 - 3.10 実験のフロー

(2) 実験結果

図 - 3.11 に初期載荷時に得られた荷重 - 載荷点変位関係を示す。これによると、約 150kN 付近で鉄筋が降伏し、載荷点変位約 10mm 近傍で RC はり上縁のコンクリートが圧縮破壊した。初期載荷終了後の圧縮破壊の様子および、圧縮破壊したコンクリートの小片をすべて取り除いた後の様子を図 - 3.12 に示す。はりの上縁から最大で約 5cm 程度のコンクリートが取り除かれ、かつ下縁には曲げひび割れも存在した。

コンクリートの小片を完全に取り除いた後、再び型枠をセットし、圧縮破壊部を含む RC はり上縁を 30mm 補強した。圧縮破壊部のみを部分的に補強した場合、補強材料のみが剥離することが予備試験にて確認されたため、本工法での懸念事項である補強材との一体性という観点から、図 - 3.13 に示すように、30mm の増厚を同時に行う方法を採用した。

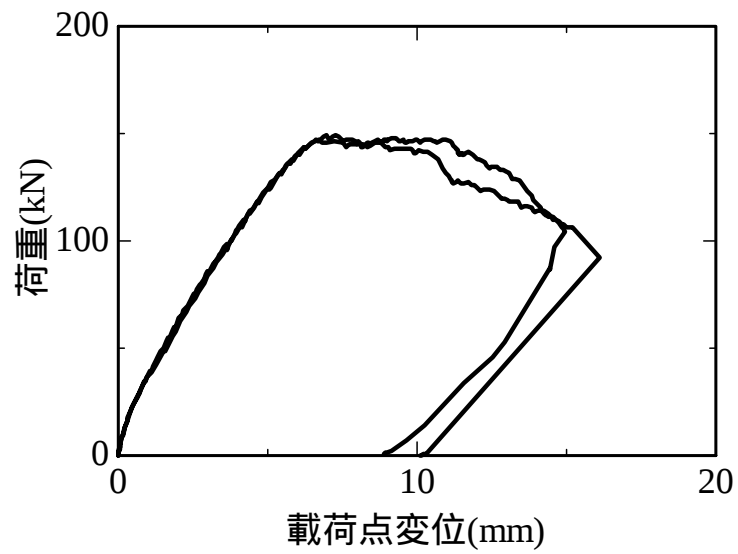


図 - 3.11 初期載荷時の荷重 - 載荷点変位関係



図 - 3.12 圧縮破壊部分（左図：載荷終了時，右図：コンクリート小片を除去）



図 - 3.13 補修後の状態

図 - 3.14 に 2 次載荷により得られた荷重 - 載荷点変位関係を示す．なお，初期載荷時の荷重 - 載荷点変位も併せてしめす．これによると，はり高さが大きくなったことによる影響とみられる初期剛性の増加および最大荷重の増加がみられた．なお，初期載荷時には，載荷点変位 10mm の時点で圧縮破壊したが，UHP-SHCC で補強した後は，小さいもので 20mm，大きいもので 40mm まで変形し，部材の靱性が大幅に向上していることがわかる．また，最終的にはせん断スパンに斜め引張りひ割れが生じることで部材の破壊が決定されたが，それまでは圧縮補修部の剥離などは一切認められなかった．特に，圧縮縁の UHP-SHCC に貼付したひずみゲージ(検長 30mm)により計測されたひずみによると(図 - 3.15 参照)，UHP-SHCC のひずみは 3500 μ 程度以下であり，圧縮破壊時のひずみである 5000 μ には到達していない．

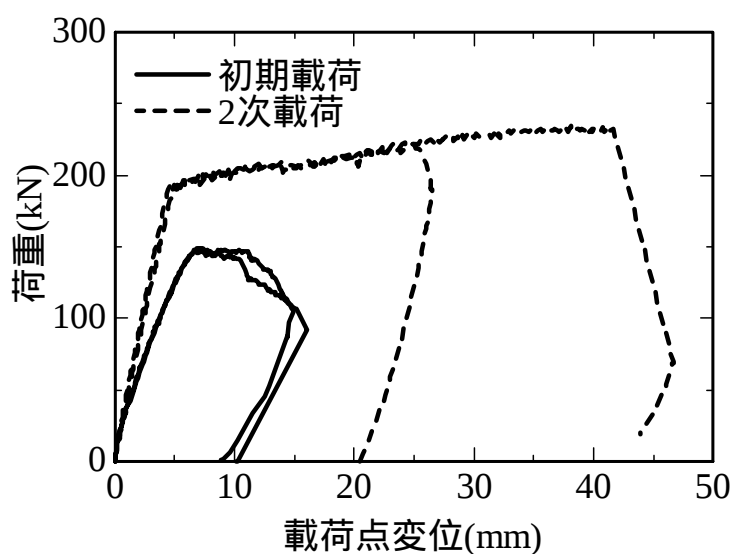


図 - 3.14 2 次載荷時の荷重 - 載荷点変位関係

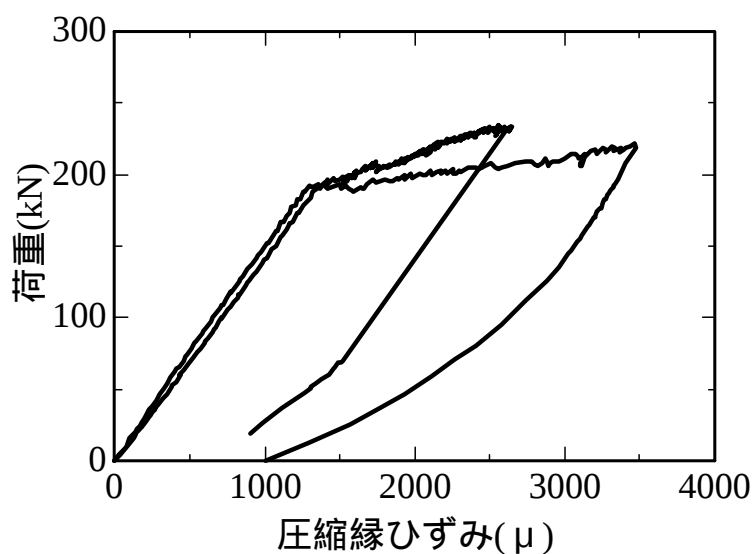


図 - 3.15 圧縮縁ひずみ (UHP-SHCC)

(3) まとめ

以上より，圧縮部のコンクリートが破壊した RC 部材を UHP-SHCC にて補強することで，特に靱性の改善が可能であることが明らかとなった．また，本実験の範囲内では，既設コンクリートと UHP-SHCC の一体性が確保されていることが明らかとなった．

4. 吹付け施工を想定した施工性能の確認

UHP-SHCC を吹付け施工用に改善するため、まず吹き付け試験施工を実施した。これによると、図 - 4.1, 4.2, 4.3 に示すように、パン型ミキサおよびポンプを用いて、練混ぜおよび吹き付けが可能であることを確認した。さらに、吹き付け後にコテ仕上げを行った状況を図 - 4.4 に示す。これにより、凹凸の少ない仕上げも可能であることが確認された。



図 - 4.1 吹付けの設備（ミキサ，ポンプなど）



図 - 4.2 練混ぜ状況



図 - 4.3 吹付け状況



図 - 4.4 仕上げ後の状況

5. 部材設計方法の提案

ここでは、部材の補強を行う際の設計方法を提案するにあたり、引張補強を対象として種々の補強厚さの供試体を作製し、検討を行った。

(1) 実験概要

2章で用いたコンクリートおよび UHP-SHCC により、図 - 5.1 に示す複合部材（補強された RC 部材）を作製した。表 - 5.1 に本実験で検討したパラメータをまとめて示す。はり高さ 200mm、幅 150mm の RC はりを基準に、UHP-SHCC を 30mm、50mm、70mm と変化させた複合部材を作製した。また、比較のために、70mm のコンクリートおよびその内部に鉄筋を配置した RC 層を付与した複合部材も作製した。

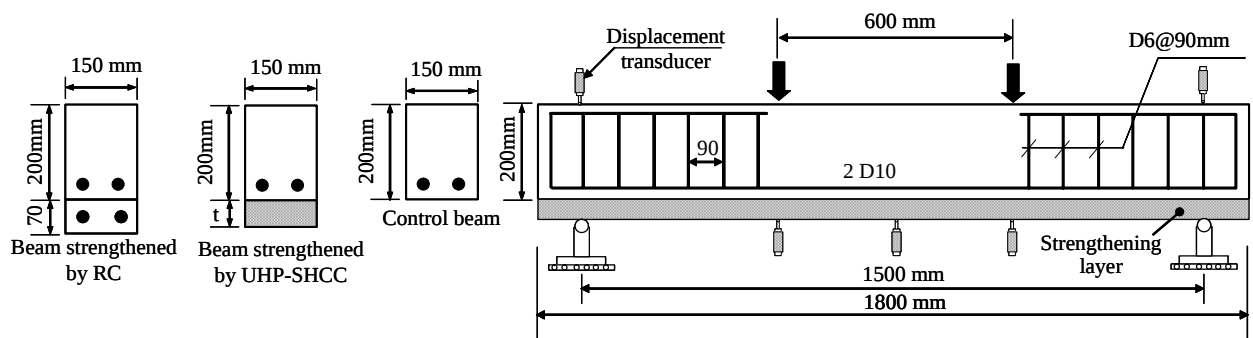


図 - 5.1 供試体形状および寸法

表 - 5.1 実験のパラメータ

補強材の種類	補強厚 (mm)	鉄筋比 (鉄筋量)	供試体本数
なし (基準供試体)	-	-	2
UHP-SHCC	30		
	50		
	70		
鉄筋 (RC 層)	70 (コンクリート厚)	1.36% (2 D10)	
		2.04% (3 D10)	
		3.62% (3 D13)	

コンクリートの打設後、翌日に脱型し、その後 28 日間 20℃ の恒温室内にて湿布養生を行った。なお、UHP-SHCC にて補強される面（図 - 5.1 では下面）には、あらかじめ凝結遅延剤を型枠に塗布しておき、脱型時に洗い出すことで凹凸を付けた。

図 - 5.2 に、本実験のフローを示す。コンクリートの材齢 28 日にて、UHP-SHCC および RC

層を供試体下面に打設後，再度 28 日間恒温室内にて湿布養生を行い，総材齢 56 日にて，曲げ載荷試験を補強供試体に対して行った．なお，材齢 28 日（補強材打設時）でのコンクリートの圧縮強度は 22.7MPa，材齢 56 日（2 次載荷時）でのコンクリートの圧縮強度は 24.0MPa であった．

曲げ試験は，図 - 5.1 に示すように載荷スパン 1500mm，モーメントスパン 600mm の 2 点載荷とし，ロードセル（容量 300kN）にて荷重を，高感度変位計（ストローク 50mm，感度 1/200mm）にて載荷点変位および中央変位をそれぞれ計測した．

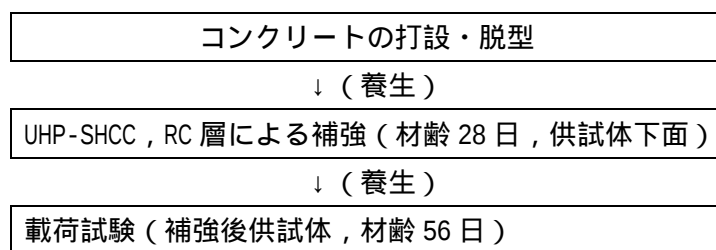


図 - 5.2 実験のフロー

(2) 実験結果

図 - 5.3 に，実験により得られたモーメント - 曲率関係を示す．なお，左図は UHP-SHCC により補強された供試体の結果，右図は RC 層により補強された結果をそれぞれ示す．また，初期ひび割れ発生モーメント，鉄筋降伏モーメント，最大モーメント，最大モーメント時の曲率，を表 - 5.2 にまとめて示す．各供試体の UHP-SHCC による補強の場合，補強厚が大きくなるほど，最大モーメントが大きくなっており，補強効果が高くなっていることが確認された．なお，最大荷重時までは，UHP-SHCC 内には微細なひび割れが複数生じていたが（図 - 5.4 参照），最大荷重に到達すると，そのうちの 1 本が大きく開口し，荷重が低下した．

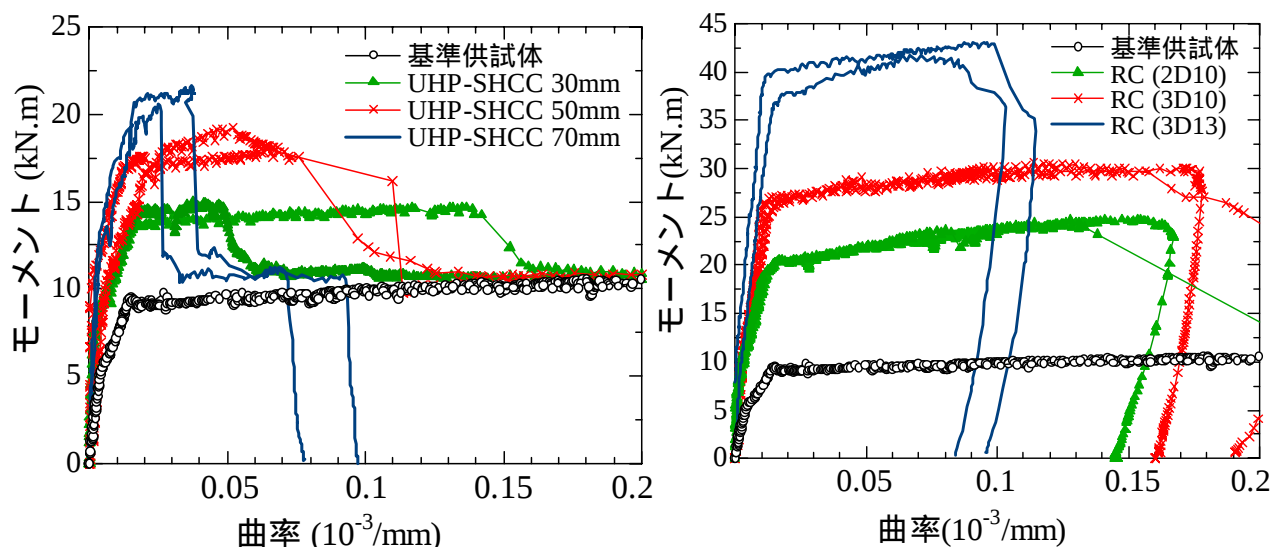


図 - 5.3 モーメント曲率関係（左図：UHP-SHCC による補強，右図：RC 層による補強）

ただし，荷重が低下後は，基準 RC の降伏モーメントと同程度のモーメントで変形し，図 - 5.5 に示すような，水平方向のひび割れが大きく拡大し終局に至った．なお，最大荷重時の曲率（変形）は，補強厚が大きくなるほど小さくなる傾向にあった．一方，RC 層による補強の場合，鉄筋量が多くなるほど最大荷重が大きくなっていることが確認できる．ただし，補強層のひび割れの本数は，SHCC で補強した場合に比べて少なく，逆にひび割れ 1 本あたりの幅は大きい．さらに，RC 層による補強の場合，いずれの場合も上縁のコンクリートが圧縮破壊して耐力が低下した．

表 - 5.2 実験結果一覧

供試体の種類	初期ひび割れ発生モーメント (kN.m)	鉄筋降伏モーメント (kN.m)	最大モーメント (kN.m)	最大モーメント時の曲率 ($10^{-3}/\text{mm}$)
基準供試体	5.5	9.2	11	0.33
UHP-SHCC30mm	9.0	14	15	0.08
UHP-SHCC50mm	11	17	19	0.06
UHP-SHCC70mm	11	20	21	0.03
RC1.36% (2 D10)	6.3	20	25	0.14
RC2.04% (3 D10)	8.7	26	30	0.12
RC3.62% (3 D13)	8.9	38	42	0.08

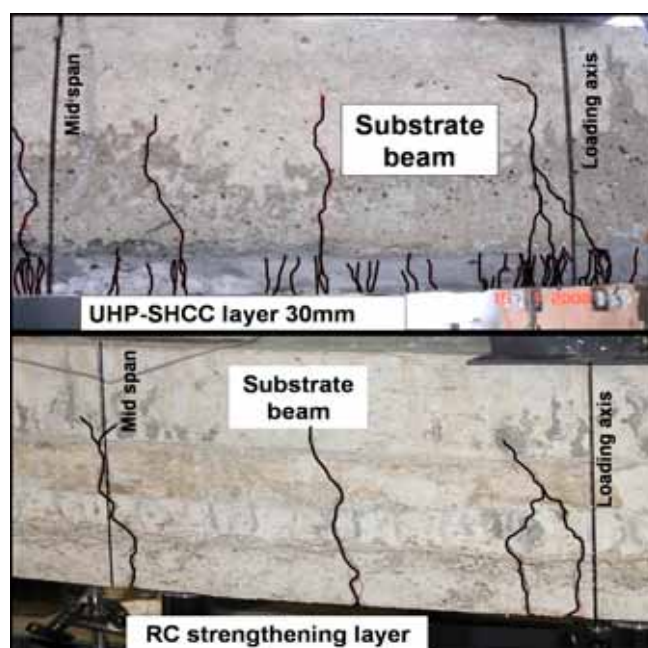


図 - 5.4 モーメントスパン内のひび割れ性状（上図：UHP-SHCC 厚 30mm，下図：RC 層）

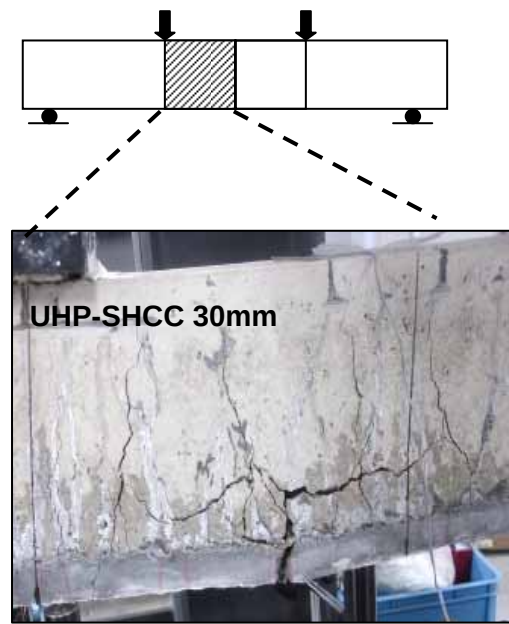


図 - 5.5 終局の破壊形式（UHP-SHCC の場合）

(3) 解析による予測

使用した材料をそれぞれモデル化して断面解析を行った。UHP-SHCC の引張特性は、実験で得られた図 - 5.6 に示す引張応力 - ひずみ関係の平均値（赤の破線）を用いた。圧縮は弾性体と仮定した。コンクリートの圧縮特性は、実験で得られた圧縮強度（24MPa）をもとに、図 - 5.7 に示す曲線を仮定した。なお、コンクリートの引張特性は考慮しないこととした。鉄筋の引張応力 - ひずみ関係は、図 - 5.8 に示すようにバイリニアとし、降伏後は初期剛性の1%でひずみ硬化すると仮定した。

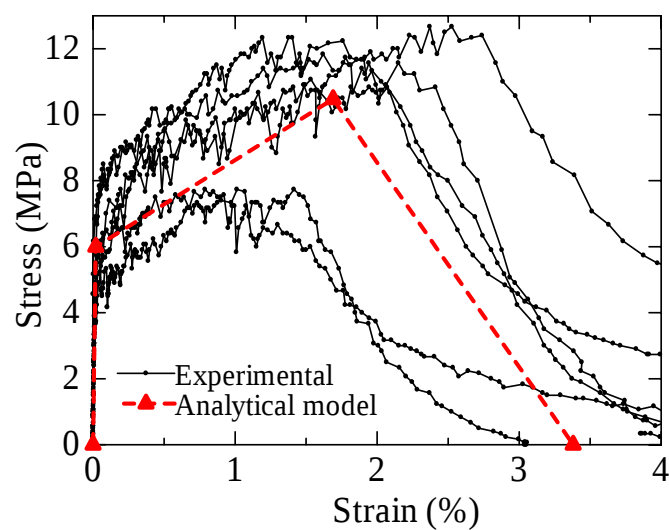


図 - 5.6 UHP-SHCC の引張応力 - ひずみ関係

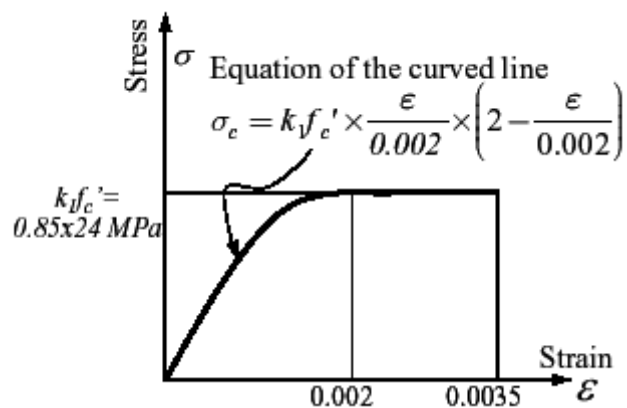


図 - 5.7 コンクリートの圧縮応力 - ひずみ関係

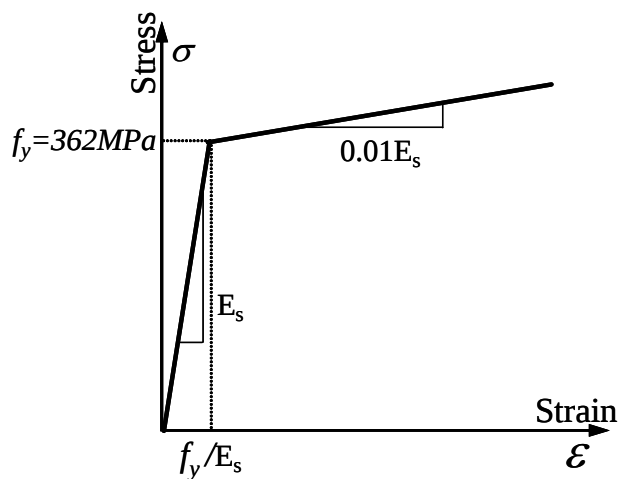


図 - 5.8 鉄筋の引張応力 - ひずみ関係

図 - 5.9 に、解析により得られたモーメント - 曲率関係を、実験結果とともに示す。実験値にばらつきがみられるものの、70mm を除けばおよその応答が推定できているといえる。なお、70mm の実験では、2 本の供試体ともに、せん断スパン内のひび割れが大きく開口しており、本解析で用いた曲げ破壊のみを対象とした手法の適用外であったといえる。

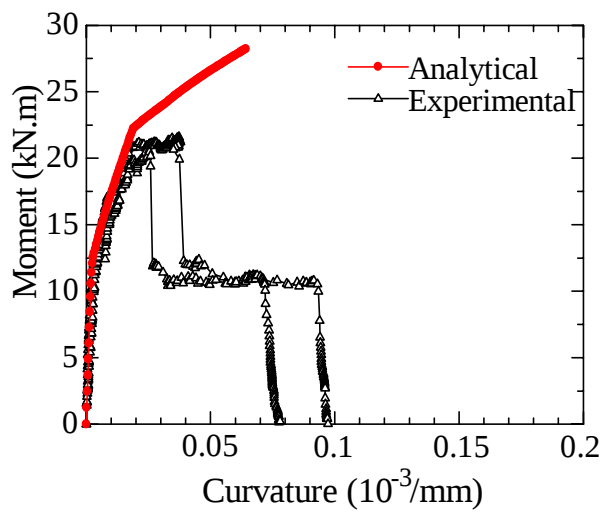
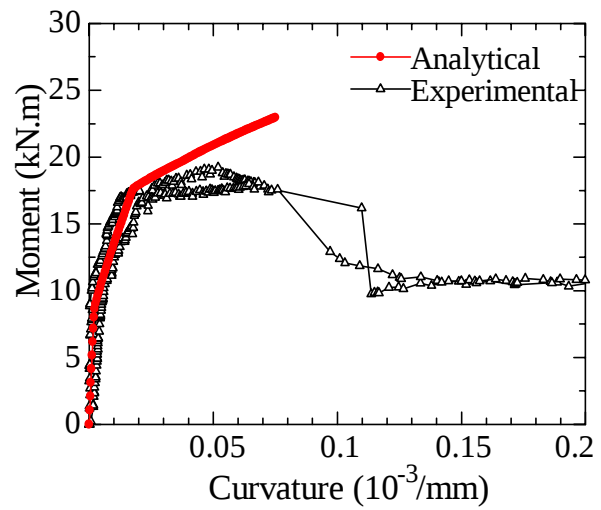
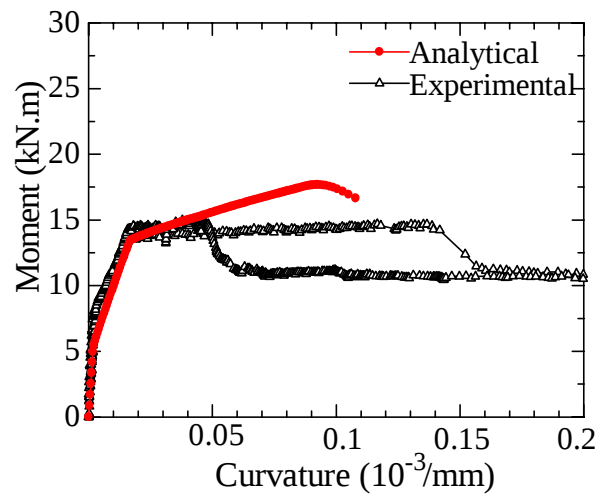


図 - 5.9 解析により得られたモーメント - 曲率関係(上から UHP-SHCC 厚 30mm ,50mm ,70mm)

(4) 補強厚と補強効果の関係

前節までの検討により，UHP-SHCC を用いることにより，たとえば最大モーメントが大きくなるなどの効果が確認できたが，実際に補強設計を行うにあたり，どの程度を目標に補強厚を決定するかなどが明確になっていないのが現状である．

図 - 5.10 に，UHP-SHCC および RC 層によって補強された部材の最大モーメントの変化を示す．本研究の範囲内では，UHP-SHCC を用いた補強が，RC 層の鉄筋比で 0.5～1.0%程度に相当することが確認できる．このような関係を用いることで，RC 層による補強（RC 巻き立てなど）と UHP-SHCC を用いた補強の効果が確認でき，かつ UHP-SHCC の補強厚を決定する際に有用な情報となることが分かる．

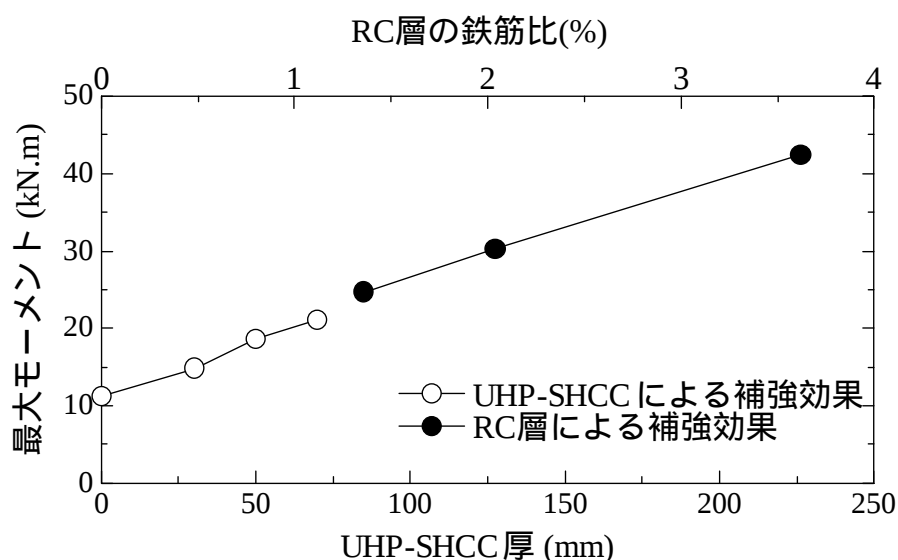


図 - 5.10 UHP-SHCC と RC 層による補強効果の関係図

(5) まとめ

本章では，引張補強と対象に，UHP-SHCC および RC 層を用いて補強した部材の曲げ試験をとおして，それぞれに補強効果があることを確認した．また，UHP-SHCC により補強した部材の挙動を断面解析により推定したところ，補強厚 70mm を除けば，およその挙動が推定できることを明らかにした．最後に，UHP-SHCC による補強効果と RC 層による補強効果をそれぞれ比較したところ，本研究の範囲内では UHP-SHCC による補強は鉄筋比 0.5～1.0%程度に相当し，UHP-SHCC の補強厚を決定する際の情報の 1 つとして利用することができることを明らかにした．

6. コスト比較

RC 橋脚の鋼板巻立てによる耐震補強を想定し，コスト比較を行った（表 - 6.1）．なお，ここでの耐震補強は，被災構造物の早期復旧を目的としたものではなく，通常の施工条件，材料・作業工の調達条件の下で算定した．橋脚の形状は，柱断面が $3\text{m} \times 3\text{m}$ ，高さがフーチング天端から梁付け根までが 11m 程度の橋脚とし，いくつかの形状の異なる橋脚の平均的な金額を算定した．また，高靱性材料の補強厚の算定方法については，現段階では確立されていないため，RC 巻立てを 30cm で行うところ，図 - 1.2 の結果を参考に約 60% に低減した 20cm と仮定した．高靱性材料は，類似の材料の価格（ $10\text{万円}/\text{m}^3$ ）を参考にし，最大吹付け厚さの観点から，4 層に分けて施工すると仮定した．高靱性材料を用いた場合の仮設工は，橋脚上部施工時の足場および飛散防止対策等を含むと考え，鋼板巻立ての場合の 5 割増しとした．結果として，材料費については，鋼板巻立ての場合と同程度以下に抑えることができ，吹付け時の飛散防止対策などを考慮しても，従来型の鋼板巻立て工法と同程度のコストとなる可能性がある．

さらに，今回対象としている被災構造物の早期復旧であれば，鋼板部材を製作する時間に比べて，高靱性材料吹付け工法の場合の施工期間が大幅に短縮できる可能性もあり，本工法の優位性が示された．

表 - 6.1 コスト比較の例

工種 / 種別 / 細別			鋼板巻立て	UHP-SHCC
工場製作	材料費		1,000,000	0
	製作費		2,810,000	0
コンクリート橋 脚補強工	鋼板取付工		7,250,000	0
	高靱性材料吹付け工	高靱性材料（30m³）	0	3,000,000
		吹付け工（132m²×4層）	0	3,000,000
現場塗装工			460,000	0
雑工			250,000	250,000
仮設工			1,960,000	3,000,000
直接工事費計			13,730,000	9,250,000

7. 結論

本研究開発は、超高強度かつ超高靱性な短繊維補強セメント系複合材料を開発し、地震被災後のコンクリート構造物の機能を早期復旧するために、吹付け工法によって補強するための工法の開発に関する基礎的検討を行ったものである。以下に、得られた結論を以下に示す。

- (1) 低水セメント比でかつ PE 繊維を用いた繊維補強材料を開発したところ、繊維 1.5%の混入量で、最大で引張強度約 11MPa、引張ひずみ約 3%を示し、また複数の微細ひび割れを生じる UHP-SHCC の開発が可能であった。
- (2) 開発された UHP-SHCC の寸法安定性を確認したところ、水中養生であるが $300 \sim 400 \times 10^{-6}$ 程度の収縮量であった。なお、PE 繊維の混入は超高強度モルタルの収縮を抑制する効果を持つことが分かった。
- (3) 引張側を UHP-SHCC で補強した際の補強効果を確認する実験を行った。これによれば、ばらつきはやや大きいものの、ひび割れ発生後の部材の剛性を向上させ、また耐力も向上させる効果が確認された。また、UHP-SHCC と既設コンクリートとの剥離などは一切見られず、終局時まで一体性が確保されていた。
- (4) 圧縮部のコンクリートが破壊した RC 部材を UHP-SHCC にて補強することで、特に靱性の改善が可能であることが明らかとなった。また、本実験の範囲内では、既設コンクリートと UHP-SHCC の一体性が確保されていることが明らかとなった。
- (5) UHP-SHCC を吹付け施工用に改善するため、まず吹き付け試験施工を実施した。これによると、従来からの設備を用いて、練混ぜおよび吹き付けが可能であることを確認した。さらに、凹凸の少ない仕上げも可能であることが確認された。
- (6) 引張補強を対象として解析等による挙動予測を行ったところ、70mm の厚さの場合の除けば、およその挙動が再現できることが明らかとなった。また、UHP-SHCC を用いた補強が、RC 層の鉄筋比で 0.5～1.0%程度に相当することが確認された。
- (7) UHP-SHCC による吹き付けおよび鋼板巻き立てを対象としコスト試算を行ったところ、材料費については、鋼板巻き立ての場合と同程度以下に抑えることができ、吹付け時の飛散防止対策などを考慮しても、従来型の鋼板巻き立て工法と同程度のコストとなる可能性がある。さらに、鋼板部材を製作する時間に比べて、高靱性材料吹付け工法の場合の施工期間が大幅に短縮できる可能性もあることが分かった。