

論文 断面修復材の靱性が補修部材のひび割れ分散性に及ぼす影響

国枝 稔^{*1}・宮田 良大^{*2}・鎌田 敏郎^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：劣化したコンクリート構造物にはひび割れが存在する場合があります，部材の変形もそのひび割れ部の開口に伴って大きくなる。断面修復材にとっては，ゼロスパンにおけるひび割れ追従性が要求されることになるものと考えられる。本研究では，高靱性セメント複合材料の1つである ECC の断面修復材としての適用性について検討するために，ゼロスパンにおけるひび割れ追従性の評価をモデル化した供試体を作製し，変形能，ひび割れ性状について検討した。断面修復材の引張試験から得られる靱性と補修部材のひび割れ分散性との関係について検討する際には，両者のひび割れ発生領域に着目する必要があることを指摘した。

キーワード：断面修復材，靱性，ECC，ひび割れ，ゼロスパン伸び，破壊の局所化

1. はじめに

劣化したコンクリート構造物に対する補修工法の1つに断面修復工法がある。断面修復材に要求される性能には，強度，寸法安定性，遮蔽性，耐久性および母材との一体性などが挙げられるが，近年特に重要視されるものに剥落に対する抵抗性が挙げられる。各種鋼繊維やビニロン繊維などの短繊維を混入することで靱性を向上させ，剥落防止性能を付与しているのが現状である。

下面増厚を対象とした力学性能について各種実験が実施されており¹⁾，ひずみ硬化型の繊維補強材料も開発され，断面修復材や下面増厚への適用の可能性について検討されている^{2), 3)}。しかし，断面修復材にどの程度の靱性が要求されているのかは明らかにはされていない。特に，ひび割れを有するコンクリート構造物では，部材の変形もそのひび割れ部の開口に伴って大きくなる。すなわち断面修復材にとっては，いわゆるゼロスパンにおけるひび割れ追従性が要求されることになるものと考えられる。断面修復工法により補修された鉄筋コンクリートはりを対象とした力学的な研究が行われているが⁴⁾，

母材コンクリートのひび割れに起因した断面修復材のゼロスパン伸びに着目した研究は少ないのが現状である。

本研究では，ゼロスパンにおけるひび割れ追従性の評価をモデル化した供試体を作製し，補修部材の変形能，ひび割れ性状について考察を行うことで，補修材料単体の試験から得られる靱性が補修部材のひび割れ分散性に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 母材コンクリートの作製

表 - 1 に，母材コンクリートの配合を示す。水セメント比は 63% とし，セメントには早強ポルトランドセメント（密度 3.12g/cm^3 ），細骨材には揖斐川産川砂（密度 2.59g/cm^3 ），粗骨材には最大寸法 15mm の揖斐川産玉砕石（密度 2.61g/cm^3 ）を用いた。容量 100 リットルの強制練パン型ミキサーに，セメント，骨材をすべて投入し空練りした後，水及び混和剤を投入し十分に練り混ぜ，所定の型枠に試料を打ち込んだ。

打設後 2 日にて脱型し，その後実験室内にて湿布養生を行った。材齢 37 日（補修供試体の載

*1 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 工博（正会員）

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

*3 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 工博（正会員）

*4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博（正会員）

表 - 1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	粗骨材最大 寸法(mm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	単体量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad.*
63	15	6.4	15	184	293	722	1035	11.7

*AE 剤

表 - 2 作製した供試体

ひび割れの有 無	表面処理方法	供試体 の本数
模擬ひび割れ 無し	ウォータージェット	2
	ワイヤブラシ	2
模擬ひび割れ 有り	ウォータージェット	2
	ワイヤブラシ	2
	付着損失領域有り	2

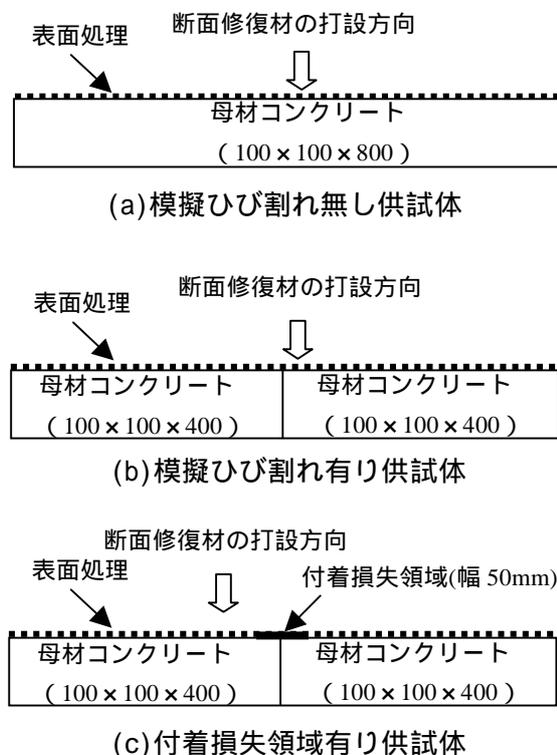
荷試験日)でのコンクリートの圧縮強度及び弾性係数はそれぞれ 33MPa, 25GPa であった。

2.2 補修供試体の形状及び表面処理方法

本実験で作製した供試体をまとめて表 - 2 に示す。母材コンクリートにひび割れが生じ、局所化した変形部周辺での断面修復材のひび割れ性状について確認するために、模擬ひび割れ無し供試体、及び模擬ひび割れ有り供試体の 2 種類の供試体形状を採用した。図 - 1 に示すように、模擬ひび割れ無し供試体は、高さ 100mm × 幅 100mm × 長さ 800mm とし、上面に厚さ 30mm の断面修復材を打設した。模擬ひび割れ有り供試体は、高さ 100mm × 幅 100mm × 長さ 400mm の供試体 2 つを隙間がないよう付き合わせ、上面に断面修復材を打設した。

断面修復材と母材コンクリートとの界面の表面処理方法は、脱型直後に行ったワイヤブラシによる表面処理及びコンクリートの材齢 15 日に実施したウォータージェットによる洗出し(粗骨材が露出する程度)の 2 種類とした。さらに、母材コンクリートと断面修復材の付着が補修部材のひび割れ性状に及ぼす影響について検討するため、模擬ひび割れを有する供試体を対象とし、ひび割れ部を挟む幅 50mm の表面にガムテープ(ひび割れの両側 25mm の領域)を貼付し、付着損失領域を設けた。

なお、いずれの供試体も断面修復材打設直前



(単位: mm)

図 - 1 補修供試体の作製方法

に打継ぎ面を湿潤状態にした。

2.3 使用した断面修復材

本実験では断面修復材として、Engineered Cementitious Composites (ECC)⁵⁾を用いた。ECC は高靱性セメント複合材料に属する材料の 1 つであり、ひずみ硬化挙動および複数ひび割れを生じる材料の一例として使用した。ECC の配合を表 - 3 に示す。水セメント比は 30%、短繊維には直径 12 μm、長さ 12mm のポリエチレン繊維を 1.5% 混入した。

2.4 断面修復材の引張試験

断面修復材(ECC)の靱性を評価するために、図 - 2 に示すダンベル型供試体による 1 軸引張試験を行った。

本実験では補修部材における断面修復材の厚さが約 30mm であることを勘案し、供試体中央

表 - 3 ECC の配合

セメント ^{*1}	水	細骨材 ^{*2}	高性能 AE 減水剤	増粘剤 ^{*3}	繊維 ^{*4}
1.0	0.30	0.31	0.030	0.00071	0.015

*1:早強ポルトランドセメント, *2: 7号珪砂, *3:メチルセルローズ系, *4:体積混入率

部の試験区間の断面は 30mm×30mm とした。
 また、試験区間内には、図 - 2 に示すように 4ヶ所に変位計取付け用コマを貼付し、検長 50mm のパイ型変位計 (感度 1/2000mm) を 3ヶ所に取り付け、引張応力 - ひずみ関係を計測した。なお、供試体の本数は 2 本とした。

2.5 補修供試体の載荷試験方法

図 - 3 に補修供試体の曲げ載荷試験概要を示す。補修はコンクリートの材齢 16 日にて実施した。補修した面が引張側となるように供試体を設置し、荷重と載荷点変位を計測した。模擬ひび割れ有り供試体については、ひび割れ部付近の局所的な変形量を計測するため、コンクリート上段、コンクリート下段、断面修復材上段及び断面修復材下段 (供試体下面) の計 4ヶ所にひび割れ部を挟むようにパイ型変位計 (検長 50mm, 精度 1/2000mm) を貼付し、各点での荷重 - 変位関係を計測した。模擬ひび割れ無し供試体についても、模擬ひび割れ有り供試体と同様、供試体中央部にパイ型変位計を配置した。補修供試体の載荷試験は、コンクリートの材齢が 37 日、断面修復材の材齢 21 日にて実施した。

3. 実験結果

3.1 断面修復材の靱性の評価

ダンベル型供試体を用いた引張試験の結果を図 - 4 に示す。なお、図中の検長 150mm の結果は、3ヶ所のパイ型変位計により得られた結果を加算し、検長 150mm としてひずみに換算した結果である。一方、検長 50mm の結果は、3ヶ所のうち終局変位が最大である部分の結果を、検長 50mm としてひずみに換算した結果である。引張試験の結果は検長に依存しており、検長が小さいほど終局ひずみが大きくなった。ダンベル型供試体に生じたひび割れ (試験終了後) を図 - 5 に示す。これによると、試験区間内 (断

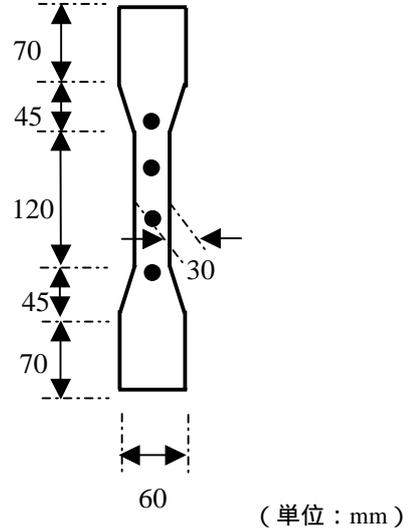


図 - 2 ダンベル型供試体 (黒丸はパイ型変位計用コマの取付け位置)

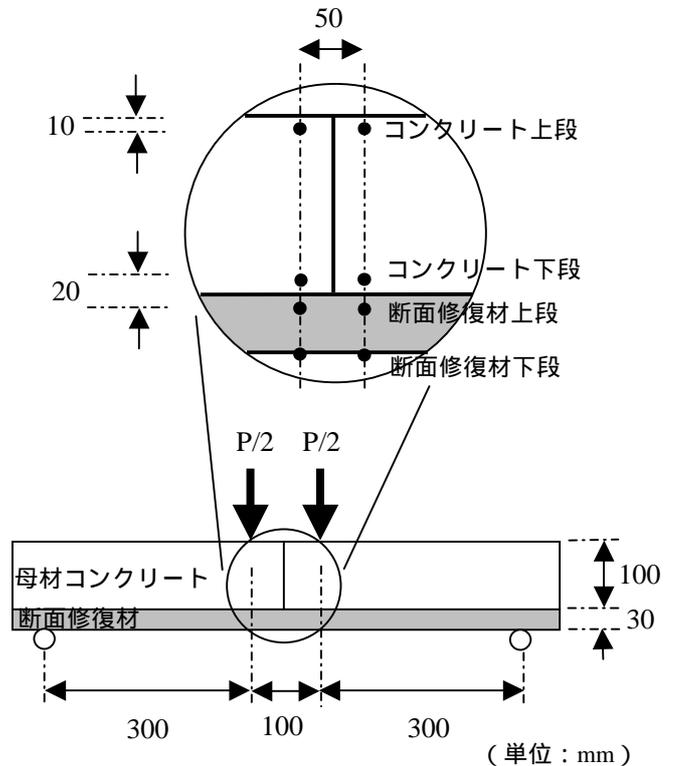


図 - 3 補修供試体 (黒丸はパイ型変位計用コマの取付け位置)

面が 30×30mm の区間) にひび割れ (およその間隔 15mm) が発生した後、さらに間隔の狭い

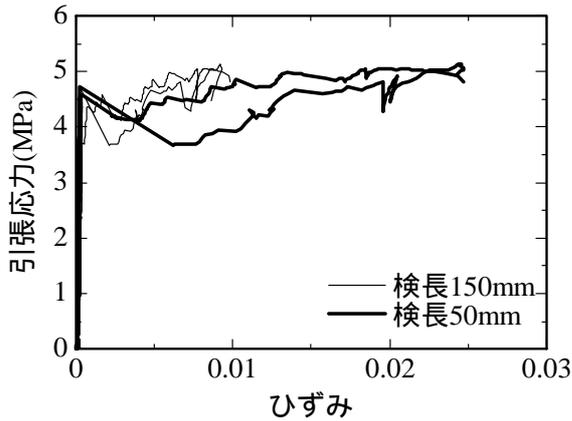


図 - 4 引張応力 - ひずみ曲線 (引張試験)

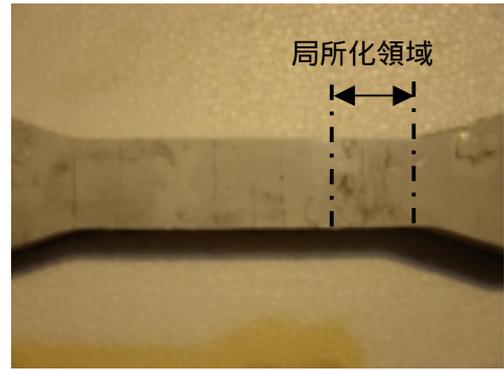


図 - 5 ダンベル型供試体に発生したひび割れの例

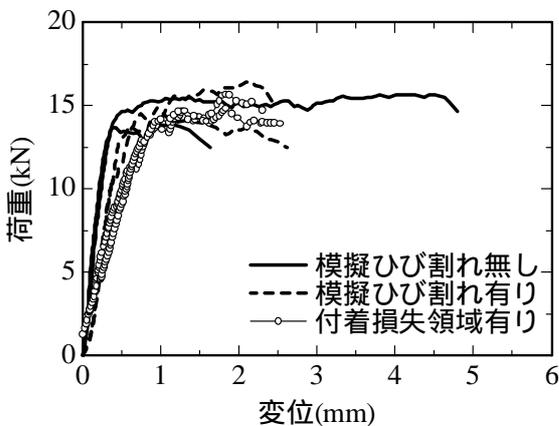


図 - 6 荷重 - 変位曲線 (ウォータージェット)

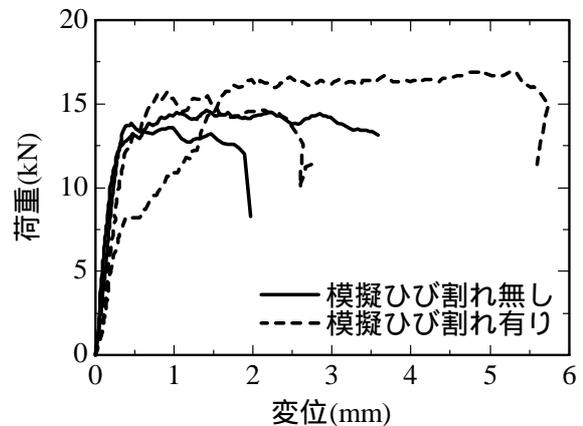


図 - 7 荷重 - 変位曲線 (ワイヤブラシ)

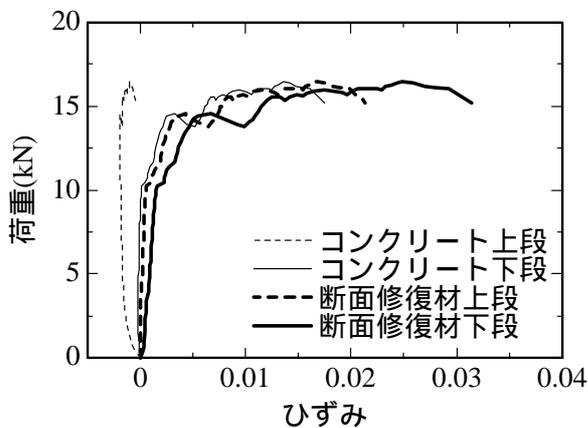


図 - 8 荷重 - ひずみ曲線 (模擬ひび割れ有り)

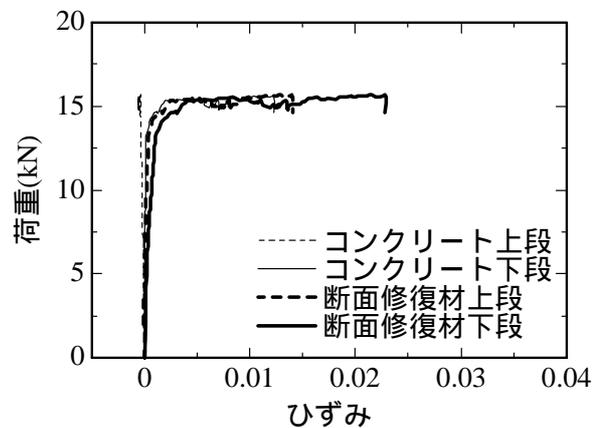


図 - 9 荷重 - ひずみ曲線 (模擬ひび割れ無し)

複数ひび割れを生じながら徐々にひび割れが集中していき、最終的には1本のひび割れが大きく開口した。すなわち、一般的なコンクリートほどではないが、破壊が局所化する傾向にあった。従って、複数ひび割れを生じる断面修復材の性能評価を行う場合、ひび割れの発生領域 (ここでは、供試体軸方向においてひび割れの発生している区間の長さ) を勘案し、適切に評価す

る必要がある。検長 50mm の結果に着目すると、約 4.5MPa にて初期ひび割れが発生し、その後複数ひび割れを生じながら、最大応力 5.2MPa、約 2.5% のひずみを生じた後破断した。

3.2 補修供試体の実験結果

(1) 荷重 - 変位曲線

補修供試体の曲げ載荷試験により得られた荷重 - 変位曲線を図 - 6, 7 に示す。ほとんどの供

試体において、約 2 - 3mm の変位を生じ破断しており、模擬ひび割れの有無が荷重 - 変位曲線に及ぼす影響については明確ではなかった。なお、変位が極端に大きくなっているものについては、母材コンクリート部にひび割れが 2 本以上生じたためである。わずかではあるが、ワイヤブラシによる処理面を有する供試体の方が、終局時の変位量が大きくなる傾向にあった。

また、本実験の範囲内では、付着損失領域が供試体の荷重 - 変位曲線の形状に及ぼす影響は小さかった。

(2) ひび割れ部での荷重 - ひずみ曲線

供試体中央部に配置したパイ型変位計により計測された結果を図 - 8, 9 に示す。計測されたすべての変位は、パイ型変位計の検長 50mm を用いてひずみに変換した。模擬ひび割れの有無に関わらず、コンクリート上段部は圧縮応力によりマイナス側(閉口)の変位が計測されたが、それ以外はすべてプラス側(開口)の変位が計測された。

模擬ひび割れ有り供試体では、初期剛性が若干低下する傾向にあった。また、断面修復材の下段にて計測されたひずみが最も大きく、約 3% 程度のひずみが計測された。

模擬ひび割れ無し供試体では、パイ型変位計の検長内にひび割れが発生しない場合があること、および複数のひび割れが母材コンクリート内に発生し、パイ型変位計にて計測している部分が終局状態とならない場合があり、計測されたひずみが模擬ひび割れ有り供試体のそれに比べて若干小さくなる傾向にあった。

付着損失領域を設けた供試体の荷重 - ひずみ曲線を図 - 10 に示す。断面修復材下段において約 5% のひずみを生じた後に破断した。このことは、母材コンクリート部に拘束されず変形に寄与できる領域(断面修復材)が大きかったことによるものと考えられる。

(3) ひび割れ性状

図 - 11, 12 に断面修復材に生じたひび割れの例を示す。模擬ひび割れの有無によらず、コン

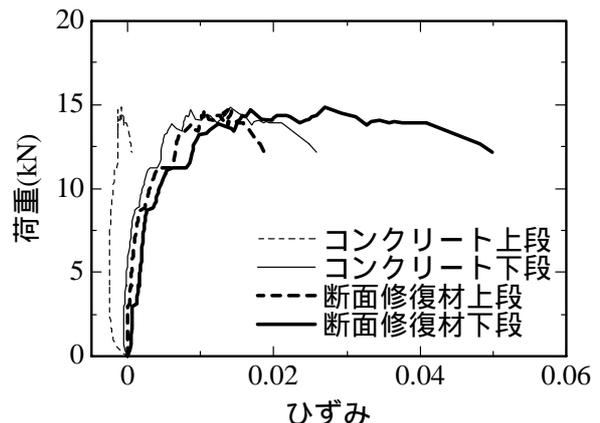


図 - 10 荷重 - ひずみ曲線 (付着損失領域有り)

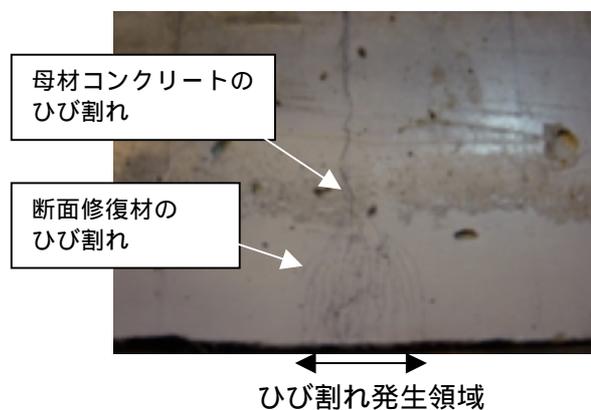


図 - 11 ひび割れ発生状況の例 (模擬ひび割れ無し)

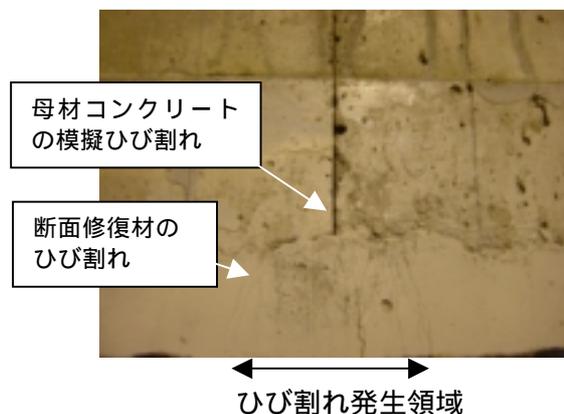


図 - 12 ひび割れ発生状況の例 (模擬ひび割れ有り, 付着損失領域有り)

クリート下段のひび割れ部を起点として供試体下面に向けて三角形に広がるひび割れが発生した。供試体下面におけるひび割れの発生領域(はり部材の軸方向においてひび割れの発生している区間の長さ)の大きさは約 30 - 50mm の間であった。このひび割れ発生領域の大きさは、

ダンベル型供試体の引張試験にて得られたひび割れ発生領域とほぼ同程度であった。よって、補修供試体における断面修復材の終局ひずみの大きさは、ダンベル型供試体を使用した引張試験結果のうち、検長 150mm ではなく検長 50mm の終局ひずみと同程度となったものと考えられる。すなわち補修供試体内においてひび割れの発生しうる領域の大きさに合わせた断面修復材の性能評価が必要であることが分かった。

付着損失領域を有する供試体では、断面修復材の下段のひび割れ発生領域が大きくなり、併せて断面修復材の上段でのひび割れの分布幅が若干大きくなった。

4. 結論

本実験にて得られた結論を以下に示す。

- (1) 断面修復材として使用した ECC の引張試験の結果によると、ひずみ硬化挙動を示しながらも試験区間内に一様にひび割れが生じず、引張応力 - ひずみ曲線の結果も検長に依存していることが明らかとなった。このような断面修復材の靱性の評価を行う場合には、ひび割れの発生領域を勘案し、適切に行う必要がある。
- (2) 模擬ひび割れの有無は荷重 - 変位曲線よりも、むしろパイ型変位計にて計測される荷重 - ひずみ曲線に影響を及ぼした。模擬ひび割れ有り供試体では、模擬ひび割れ部付近の断面修復材が破断するケースが多く、パイ型変位計にてその挙動が計測可能であった。
- (3) 付着損失領域の有無も、荷重 - 変位曲線の形状ではなく、パイ型変位計による荷重 - ひずみ関係に大きく影響を及ぼした。付着損失領域を設けた供試体では、母材コンクリート部に拘束されず、変形に寄与できる領域（断面修復材）が大きかったことによるものと考えられる。ひび割れ性状に関しては、断面修復材の下段のひび割れ発生領域が大きくなり、併せて断面修復材の上段

でのひび割れの分布幅が若干大きくなった。

- (4) 模擬ひび割れの有無によらず、コンクリート下段のひび割れ部を起点として供試体下面に向けて三角形に広がるひび割れが発生した。ひび割れ発生領域の大きさは、ダンベル型供試体の引張試験にて得られたひび割れ発生領域とほぼ同程度であった。パイ型変位計にて計測された終局ひずみは、引張試験結果の終局ひずみのうち、検長 150mm ではなく検長 50mm にて算定した結果と同程度となった。このことは、補修供試体内においてひび割れの発生しうる領域の大きさに合わせた断面修復材の性能評価が必要であることを示している。

参考文献

- 1) 松原功明, 横山和昭, 鹿野善則, 坂田昇: 下面増厚材料の力学特性および耐久性に関する基礎実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1419-1424, 2002
- 2) 閑田徹志, 斉藤忠, 坂田昇, 平石剛紀: PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による吹付け補修材の基礎的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.475-480, 2001
- 3) Lim, Y. M. and Li, V. C.: Durable repair of aged infrastructures using trapping mechanism of engineered cementitious composites, Journal of Cement and Concrete Composites, Elsevier, Vol. 19, No. 4, pp.373-385, 1997
- 4) たとえば佐藤貢一, 小玉克巳, 加納暢彦, 前田哲哉: 下面増厚した RC はりの補強筋剛性と破壊形態に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.563-568, 1998
- 5) Li, V. C.: From micromechanics to structural engineering - the design of cementitious composites for civil engineering applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 10, No. 2, pp.37-48, 1993