

論文 ひずみ硬化型高靱性セメント複合材料で作製した部材の引張性能

林 承燦^{*1}・閑田 徹志^{*2}・水野 勇^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：ひずみ硬化型の高靱性セメント複合材料である ECC により作製した要素部材の直接引張試験を行い、引張性能について考察した。ECC のみの条件と ECC の中に溶接鉄筋網またはエキスパンドメタルを補強筋として配置した条件で部材を作製した。ECC はひび割れ後も引張力を負担できることから、部材としての引張耐荷力は補強筋と ECC の双方の耐荷力を重ね合わせたものとなった。引張変形能が小さい ECC に補強筋を組み合わせた場合、補強筋がひび割れの分散を促すことから、部材としての引張変形能が大きくなった。

キーワード：高靱性セメント複合材料，繊維補強コンクリート，ECC，ひび割れ，引張試験

1. はじめに

ひずみ硬化型の高靱性セメント複合材料である ECC(Engineered Cementitious Composites)¹⁾は、通常のコンクリートと異なり、引張力を受けても脆性的に破壊せず、細かい多数のひび割れを伴いながら大きく変形する点に特徴がある。ECC は、綿状(直径 0.01~0.04mm,長さ 5~15mm 程度)の短繊維(ポリエチレン繊維や PVA 繊維(通称ビニロン))を体積で 1~2%含有しており、打込みや吹付けにより施工される。日本コンクリート工学協会には、高靱性セメント複合材料に関する研究委員会があり、高靱性セメント複合材料の性能評価と性能に基づく構造利用について検討が行われている²⁾。

筆者らは、アルカリ骨材反応によるひび割れが生じた重力式コンクリート擁壁(幅約 18m×高さ約 5m)を対象として、修景を目的に ECC の吹付け(厚さ 50~70mm 程度)により表面補修を実施した³⁾。

本論文では、上記の試験施工の際に作製した要素部材を対象に、直接引張試験を行い、引張性能について考察した。作製条件は、ECC のみの条件と ECC の中に溶接鉄筋網またはエキスパンドメタルを補強筋として配置した条件とした。

2. 実験概要

2.1 吹付け材料と補強筋

表 - 1 に吹付け材料を示す。吹付け材料 A は、プレミックスポリマーモルタルに PVA 繊維(直径:0.026mm,長さ:6mm)および高強度ポリエチレン繊維(直径:0.012mm,長さ:9mm)を等容積で、合計 1.5 vol%混入した ECC 吹付けモルタルである。吹付け材料 B は、プレミックス材に高強度 PVA 繊維(直径:0.04mm,長さ:12mm)を 2.1 vol%混入した ECC 吹付けモルタルである。吹付け材料 C は、通常のセメント系の補修用吹付けモルタルである。

図 - 1 に示すように、補強筋には溶接鉄筋網またはエキスパンドメタルを用いた。溶接鉄筋網には、鉄筋(D6, SD295)を 100mm ピッチで格子状に溶接したものをを用いた。エキスパンドメタルには、吹付けモルタルの充填性を考慮して、メッシュ寸法が 75×203mm のもの(規格:XS-82)を用いた。また、部材に占める鋼材の体積比は、溶接鉄筋網の場合は 0.82 vol%(引張方向の鉄筋比は 0.41%)、エキスパンドメタルの場合は 0.80 vol%(異方性があり、引張方向が卓越)であった。

*1 デーロス(株) 工博 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 工博 (正会員)

*3 篠田製作所(株) 橋梁部橋梁設計課

*4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

表 - 1 吹付け材料

	材料 A	材料 B	材料 C
分類	ECC 吹付けモルタル	ECC 吹付けモルタル	補修用吹付けモルタル
使用繊維	PVA 繊維+高強度ポリフェン繊維	高強度 PVA 繊維	
繊維混入率	1.5vol%	2.1vol%	
モルタルの形能	プレミックスポリマーモルタル(W/B=18%)	プレミックスモルタル(W/B=32%)	プレミックスモルタル(W/B=32%)

2.2 練混ぜと吹付け装置

ECC吹付けモルタルAでは、ニューギヤードミキサー（容量320）を用いて練混ぜ、スネークポンプにより圧送し、吹付けを行った。ECC吹付けモルタルBと補修用吹付けモルタルCでは、ホバートミキサー（容量120）とスクイズポンプを用いた。

2.3 部材概要

表 - 2 に示す 3 種類の吹付け材料ならびに補強筋の 3 条件（補強筋無し、溶接鉄筋網、エキスパンドメタル）を組み合わせた合計 9 種類の部材を、2 体ずつ、合計 18 体作製した。部材の寸法は、厚さ 75 × 幅 200 × 長さ 1800mm とした。

図 - 1 と図 - 2 に示すように、部材の中央部を引張試験区間とし、両側の区間には溶接鉄筋網またはエキスパンドメタルを上下から挟む形で 2 本の鉄筋（D16）を溶接し、さらにこれらの鉄筋に加力用のネジ節鉄筋（D25）を溶接した。

吹付け材料が補強筋や溶接した鉄筋の下にも十分に充填されるよう入念に施工した。部材作製後、材齢 1 ヶ月までは湿布養生を行い、その後は屋外に置いた。各条件 2 体の部材のうち、1 体を材齢 1 ヶ月で、残りを材齢 3 ヶ月で試験した。

また、圧縮試験用の円柱供試体（100 × 200mm）と、曲げ試験用の角柱供試体（100 × 100 × 400mm）を引張試験用供試体と同じ吹付け方法により作製した。

2.4 引張載荷試験

部材の引張載荷試験の様子を図 - 3 に示す。部材両端のネジ節鉄筋にカプラーを用いてネジ節鉄筋（D25）を継ぎ足した。剛な床に固定した鋼製の反力板とセンターホール型油圧ジャッキを用いて、部材に引張荷重を加えた。荷重は、ロードセルによ

表 - 2 引張試験用部材

吹付け材	補強筋	試験時の材齢
材料 A	溶接鉄筋網 エキスパンドメタル	1 & 3 ヶ月
材料 B		
材料 C		

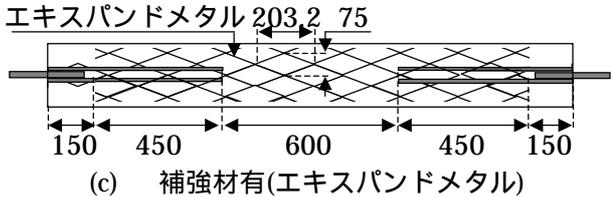
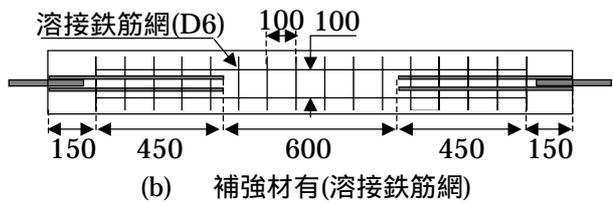
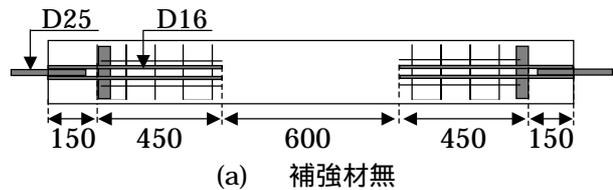


図 - 1 型枠内の補強筋の配置状況

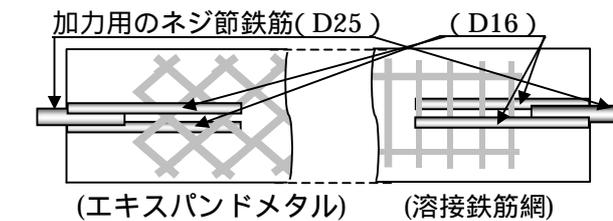


図 - 2 引張加力用のネジ節鉄筋の概要図

り検出した。部材の中央部 500mm の区間の全体変形（平均ひずみ）とひずみ分布とを、部材の両側面に設置した高感度変位計 2 個（精度:1/500mm、検長 500mm）と部材上面に設置したパイ型変位計 10 個（精度:1/2000mm、検長 50mm）を用いてそれぞれ計測した。部材表面におけるひび割れ発生状況は目視によっても観察した。目視による最大ひび割れ幅が 2mm に達する時点が荷重が明確に低下す

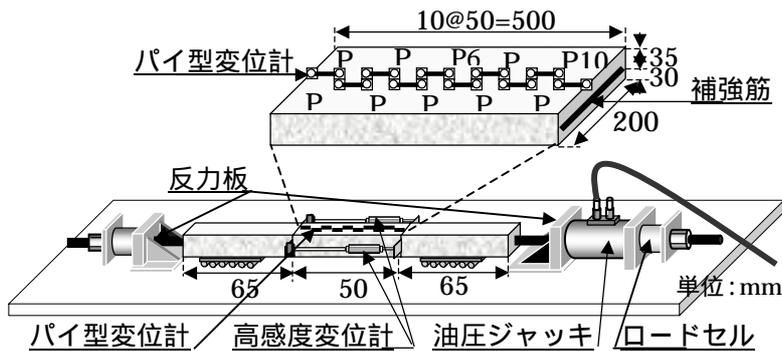


図 - 3 部材の引張载荷試験の様子

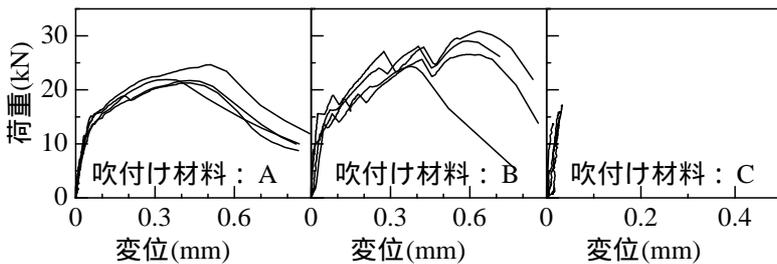


図 - 4 曲げ強度試験による荷重 変位曲線

表 - 3 材料の強度試験結果 (材齢: 1 ヶ月)

吹付け材料	圧縮強度 (f_c) (MPa)	弾性係数 (E) (GPa)	曲げ強度 (f_b) (MPa)	f_c/f_b
A	37.6	15.5	6.72	5.6
B	54.2	20.5	8.31	6.5
C	59.3	29.7	4.65	12.8

る時点まで、引張変形を漸増させながら、繰返し载荷を行った。

3. 結果および考察

3.1 吹付け材料の圧縮および曲げ試験結果

表 - 3 に材齢 1 ヶ月における圧縮および曲げ強度試験結果を、図 - 4 に三等分点曲げ試験により計測した曲げ供試体の荷重 - たわみ関係を示す。ECC 吹付けモルタル A, B は、補修用吹付けモルタル C に比べ、弾性係数が小さく、圧縮強度と曲げ強度の比 (f_c / f_b) が小さかった。ECC 吹付けモルタルのうち、ECC 吹付けモルタル A に比べ B の方が圧縮強度および静弾性係数がともに大きかった。三等分点曲げ载荷試験で計測した ECC 吹付けモルタルの曲げ荷重 - たわみ関係には、ひび割れ発生後にたわみの増加に伴って荷重が増加し、ひずみ硬化特性が明確に認められた。曲げ試験において、ひび割れ発生荷重は、約 13kN と ECC 吹付けモルタル A, B とともにほぼ同じであったが、曲げ最大荷

重および最大荷重点のたわみは、A に比べ B の方が大であった。

3.2 部材の引張载荷試験の結果

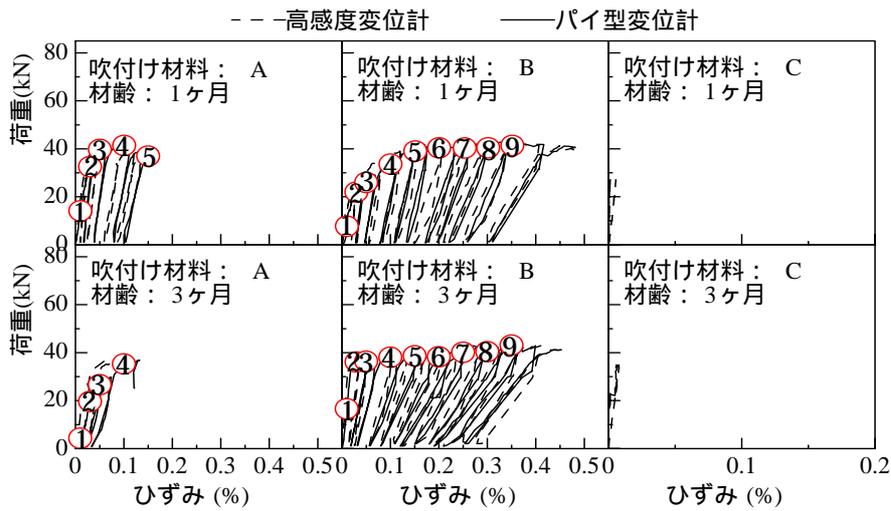
補強筋が無い部材、溶接鉄筋網を用いた部材、エキスパンドメタルを用いた部材の引張载荷試験結果をそれぞれ図 - 5~7 に示す。材齢 1 ヶ月と 3 ヶ月で実施した試験の結果を併記する。図中で(a)は引張荷重と平均ひずみの関係、(b)はひずみの分布、(c)は部材表面のひび割れの様子を示す。図 - 6(a)には、クラックスケールにより確認した最大ひび割れ幅と平均ひずみとの関係も示す。図 - 6(a)の吹付け材料 B の材齢 1 ヶ月における引張試験のみの場合、一定のひずみ間隔ごとに載

荷を止め、ひび割れの観察は行ったが、試験操作の誤りにより荷重を除去することなく引張試験を行った。

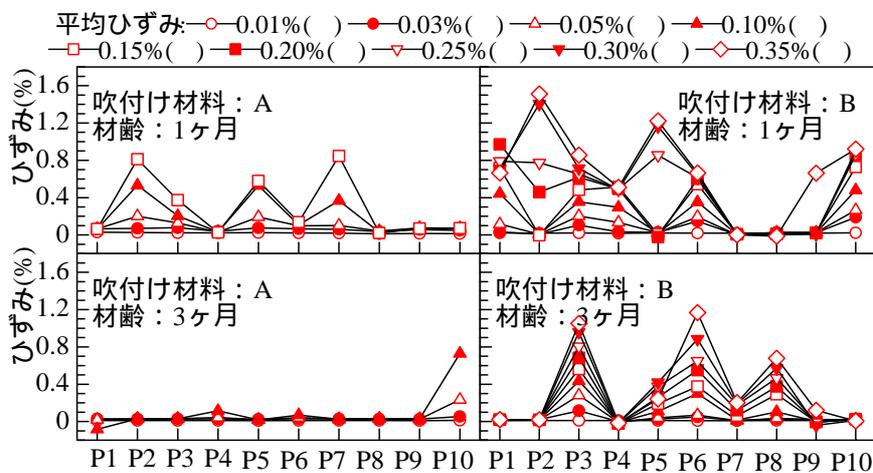
(1) 繰返し荷重 - ひずみ関係

図 - 5~7 の(a)に示す引張荷重 - ひずみ関係のうち、破線は高感度変位計 2 個により部材の両側面 (検長 500mm) で計測した平均ひずみであり、実線は部材上面のパイ型変位計 10 個の平均ひずみである。2 種類の方法により計測した荷重 - ひずみ関係は、若干の差異はあるものの、ほぼ同じ形状であった。

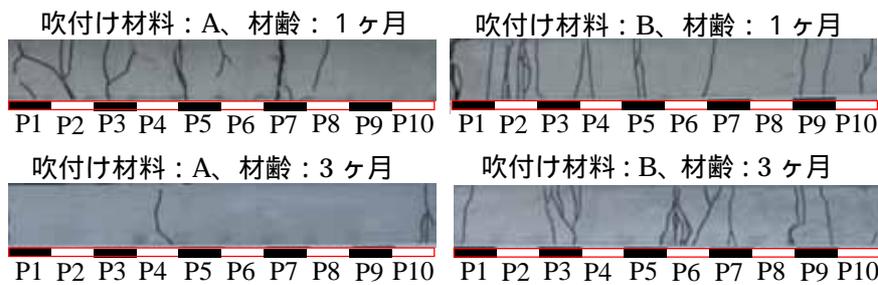
いずれの補強筋の条件のもとでも、補修用吹付けモルタル C に比べ、ECC 吹付けモルタル A, B の最大荷重および最大荷重点におけるひずみが大きくなった。補修用モルタル C の場合、ひび割れが発生すると同時に鋼材が降伏しひび割れ幅が急激に拡大した。補強筋量が少ないため、ひび割れ発生前にモルタルが受持っていた引張力をひび割れ後に補強筋が肩代わりできなかったものと考えられる。一方、ECC 吹付けモルタル A, B の場合、いずれの部材においてもひびわれ発生後に荷重が増加するひずみ硬化特性が見られた。すなわち、ECC はひび割れ後も引張力を負担できることから、部材としての引張耐力は補強筋と ECC の双方の



(a) 荷重 - 平均ひずみ関係



(b) 各箇所のパイ型変位計によるひずみ分布



(c) パイ型変位計の定着位置とひび割れ発生状況

図 - 5 荷重 - ひずみ関係、ひずみ分布およびひび割れ発生状況
(補強筋：無)

耐荷力を重ね合わせたものとなった。

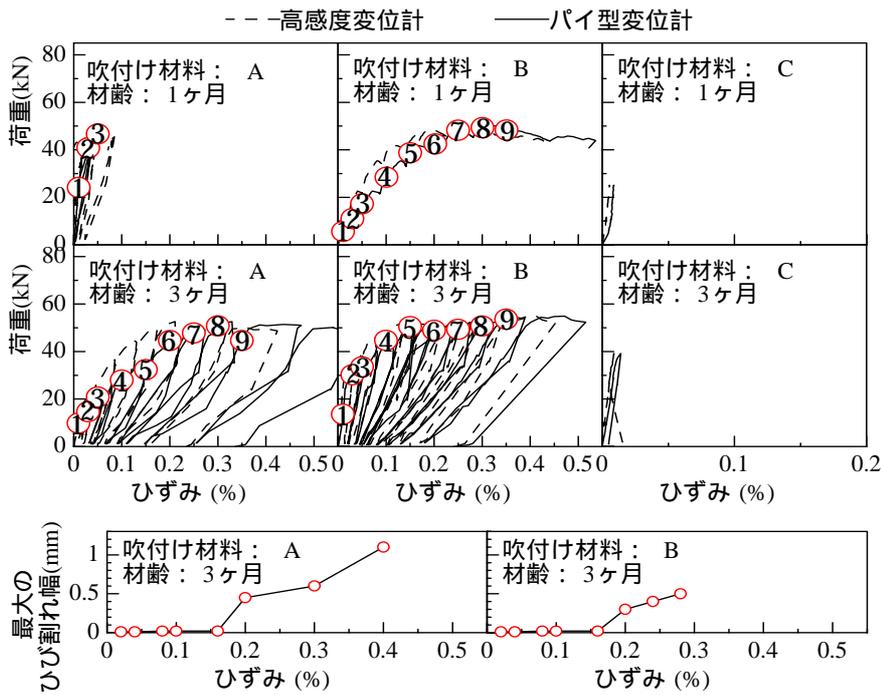
ECC 吹付けモルタル A, B の場合、最大荷重は、補強筋の無い部材、溶接鉄筋網を配置した部材、エキスパンドメタルを配置した部材の順に大きくなった。これは、先述のように、ECC と補強筋の耐荷力の重ね合わせができることと、溶接鉄筋網に比べエキスパンドメタルの部材の引張方向に占める鋼材の体積比が多いことによるものと考えら

れる。また、補強筋を同じとした場合、ECC 吹付けモルタル A と B の違いによる部材の最大荷重に差はほとんど認められなかった。一方、最大荷重点の平均ひずみは、ECC 吹付けモルタル B では補強筋の有無にかかわらず 0.3% 程度であったが、ECC 吹付けモルタル A では、補強筋が無い部材に比べ、補強筋を配置することで大きくなる傾向となった。これは、補強筋がひび割れを拘束し、ひび割れの分散を促したためと考えられる。

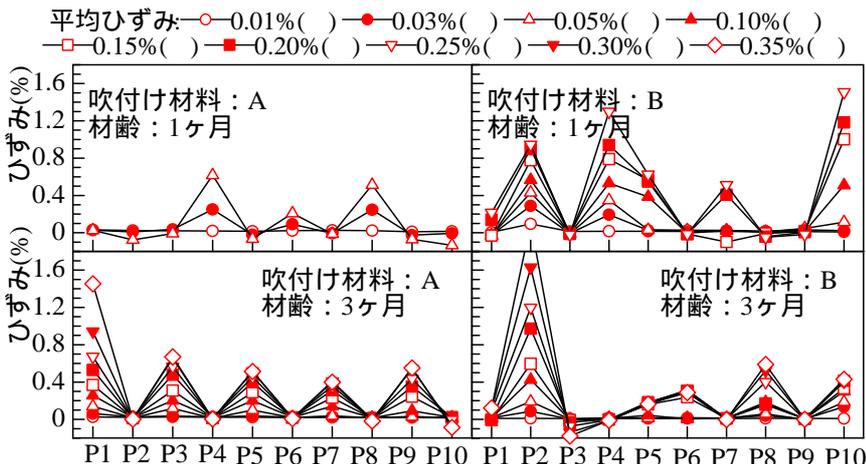
材齢 1 ヶ月と 3 ヶ月における試験結果を比較すると、いずれの材料もモルタルの強度増加のため、最大荷重が大きくなる傾向を示した。ECC 吹付けモルタル B の 2 体の部材では荷重 - ひずみ関係の形状は似ていたが、ECC 吹付けモルタル A では B に比べ 2 体の部材の形状の差が大きかった。

(2) ひずみ分布およびひび割れ発生状況

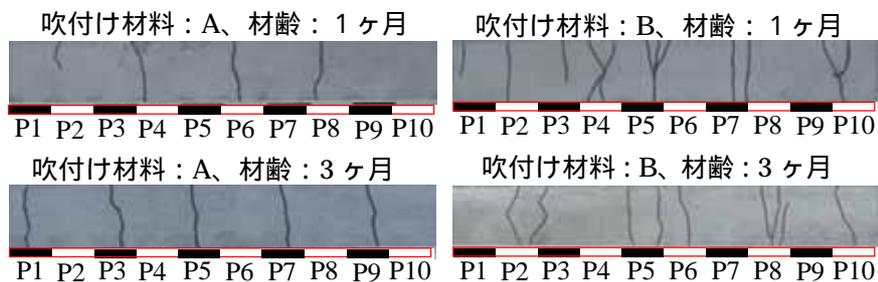
図 - 5~7 の(b)に示すひずみ分布は、図の(a)の荷重 - ひずみ曲線上の ~ の時点において、10 箇所のパイ型変位計により計測したものである。図の(c)に示すひび割れ発生状況は、引張試験終了後に、幅約 0.01mm 以上のひび割れをトレースし、パイ型変位計の位置と関連させて示した。なお、補修用モルタル C のひずみ分布とひび割れ発生状況は省略した。



(a) 荷重 - 平均ひずみ関係及び最大ひび割れ幅 - 平均ひずみ関係



(b) 各箇所のパイ型変位計によるひずみ分布



(c) パイ型変位計の定着位置とひび割れ発生状況

図 - 6 荷重 - ひずみ関係、ひずみ分布およびひび割れ発生状況 (補強筋：溶接鉄筋網)

いずれの補強条件の場合にも、ECC 吹付けモルタル A に比べ B の方が、広範囲にわたってひずみが分布し、多くのひび割れが観察された。A および B とも、材齢 1 ヶ月に比べ材齢 3 ヶ月におけるひ

ずみ分布およびひび割れ分散性の程度が若干劣る結果となった。パイ型変位計を連続して設置することにより、ECC のひずみ分布の推移をモニターすることができた。

ECC 吹付け材料 A および B ともに、補強筋がエキスパンドメタルの場合、補強筋の無い部材と似たひずみ分布やひび割れ分散性となった。一方、溶接鉄筋網で補強した部材では、溶接鉄筋網のピッチ (100mm) とほぼ同じ間隔にひずみが生じる傾向にあった。この傾向は、B に比べ A でより顕著であった。これは、溶接鉄筋網の場合、部材軸に直角な方向 (引張力に直角な方向) に配置された鉄筋がひび割れを誘発したものと考えられる。なお、吹付け材料 A の場合 (図 - 6(c))、ひび割れ発生位置が材齢 1 ヶ月と 3 ヶ月で異なるが、これは補強筋の位置のずれやパイ型変位計の貼り付け位置の違いによる影響であると考えられる。

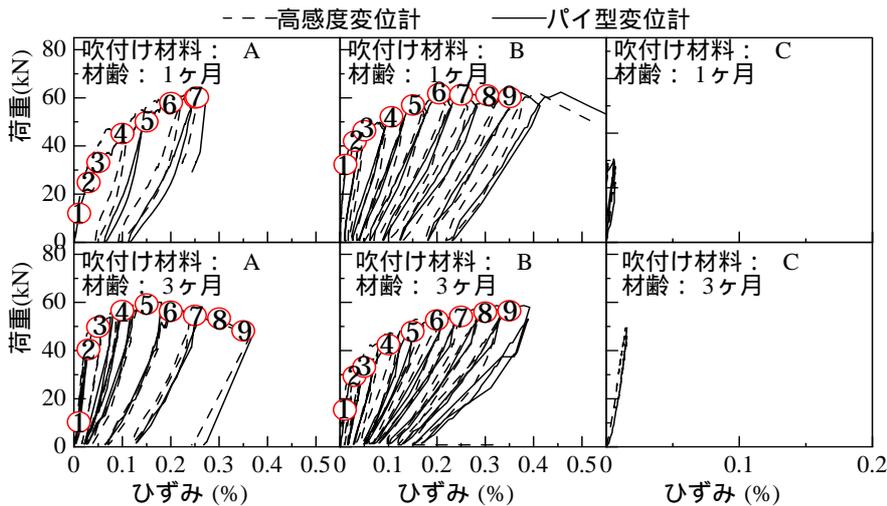
4. まとめ

(1) ECC 吹付けモルタル A, B には、曲げならびに引張荷重下で顕著なひずみ硬化特性が認められた。

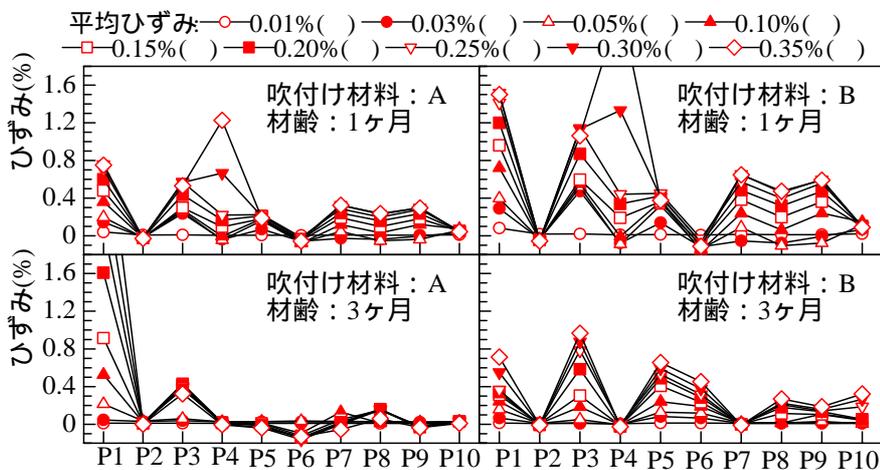
(2) ECC はひび割れ後も引張力を負担できることから、補

強筋量が小さくても部材としての引張耐荷力は補強筋と ECC の双方の耐荷力を重ね合わせたものとなった。

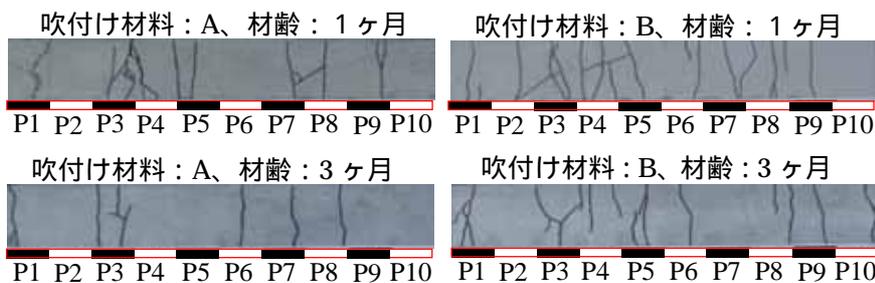
(3) 引張変形能が小さい ECC 吹付けモルタル A に



(a) 荷重 - 平均ひずみ関係



(b) 各箇所のパイ型変位計によるひずみ分布



(c) パイ型変位計の定着位置とひび割れ発生状況

図 - 7 荷重 - ひずみ関係、ひずみ分布およびひび割れ発生状況
(補強筋：エキスパンドメタル)

補強筋を組み合わせた場合には、補強筋がひび割れを拘束しひび割れの分散を促すことから、部材としての引張変形能が大きくなった。

(4) ECC 吹付けモルタル A に比べ B の方が、ひずみとひび割れがより広範囲に分散した。パイ型変位計を連続して設置する方法は、ECC のひずみ分布の推移をモニターするうえで有効であった。

(5) 溶接鉄筋網で補強した部材では、A および B とともに、溶接鉄筋網のピッチ(100mm)とほぼ同じ間隔にひび割れが生じる傾向が認められた。これは、引張力に直角方向に配置された鉄筋がひび割れを誘発したためと考えられる。

本論文は、JCI 主催のシンポジウムに発表した論文(査読なし)³⁾のうち、引張試験と曲げ試験に関する部分を取りまとめたものである。

参考文献

1) 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, No.471/I-24, pp.1-12, 1993

2) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う、高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書、2002.1

3) 六郷恵哲，閑田徹志，林承燦 他：ECC による重力式コンクリート擁壁表面補修の試験施工と要素部材の引張性能評価，高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，pp. 133-140，2003