

論文 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

六郷恵哲^{*1}, 閑田徹志^{*2}, 森井直治^{*3}, 岩田敏彦^{*4}, 滝憲司^{*5}, 藤元安宏^{*6},
長瀬豊三^{*7}, 高木薫^{*8}, 国枝稔^{*1}, 林承燦^{*1}

要旨：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を対象として、修景を目的に ECC の吹付けにより表面を補修した。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施工した。ECC の表面は平滑な仕上がりとなり、施工後 3 ヶ月の時点では目視によるひび割れは確認されていない。施工したものとほぼ同じ条件で部材を作製し、引張載荷試験を行なった。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ることにより、部材としての引張変形能が大きくなった。

キーワード：ECC, 吹付け, 補修, 引張試験, ひび割れ, 引張変形能, エキスパンドメタル

1. はじめに

高靱性セメント複合材料の一つである ECC (Engineered Cementitious Composites)^{1,2)}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 10~40 μm , 長さ 5~15mm 程度)の短繊維(ポリエチレン繊維や PVA 繊維(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³⁾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。

岐阜社会基盤研究所(岐阜大学の社会基盤工学科と岐阜県建設研究所センターが中心となって活動)の中に「擁壁表面補修への ECC 適用検討会」(著者以外のメンバー: 坂田昇・平石剛紀(鹿島建設(株)), 水野勇(篠田製作所(株)), 栗本和明・星

野美奈子(中日本建設コンサルタント(株)))を組織し、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を対象として、修景を目的に ECC の吹付けにより表面補修を実施した。

ここでは、この試験施工の考え方、実施状況、施工後の性状等とともに、現場で作製した要素部材の直接引張試験の結果を述べ、引張性能について考察した。

2. ECC による重力式コンクリート擁壁表面補修の試験施工

2.1 対象構造物の概要及び試験施工の考え方

対象となる構造物は、岐阜県東濃用水道事務所内にあり、昭和 40 年代の終わりに施工された重力式コンクリート擁壁(幅約 18m×高さ約 5m)である。この擁壁は、平成 6 年に行われた耐震診断・劣化診断において、アルカリ骨材反応による亀甲状のひび割れが生じていることが確認され、ひび割れ注入工法と表面被覆工法による補修が施された。し

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

*2 鹿島建設(株) (正会員)

*3 デーロス(株) (正会員)

*4 中日本建設コンサルタント(株) (正会員) *5 ニューテック(株) (正会員)

*6 ピーエス三菱(株) (正会員)

*7 篠田製作所(株) (正会員)

*8 OM プランテック(株) (正会員)

表－1 試験施工の条件

吹付け材料	擁壁のブロック No.	補強筋	ひび割れ部の シール材
材料 A ・分類：ECC 吹付けモルタル ・使用繊維：PVA 繊維+高強度ポリエチレン繊維 ・繊維混入率：1.5vol% ・材料形能：プレミックスポリマーモルタル	1	溶接鉄筋網	—
	2	エキスパンドメタル	—
	3	—	—
	4	—	有
材料 B ・分類：ECC 吹付けモルタル ・使用繊維：高強度 PVA 繊維 ・繊維混入率：2.1vol% ・材料形能：プレミックス材	5	溶接鉄筋網	—
	6	エキスパンドメタル	—
	7	—	—
	8	—	有
材料 C ・分類：補修用吹付けモルタル	9	溶接鉄筋網	—

かし、平成14年の調査時には、再び擁壁表面にひび割れが生じていた。この擁壁は、コンクリートの残存膨張量が小さく(JCI-DD2法による促進膨張試験で、全膨張量は0.005～0.011%)、施設全体の安全上に果たす役割が比較的小さいことから、アースアンカー等を用いた力学的な補強は行わず、表面ひび割れの再発を防ぐことのみを目的として、ひび割れ部における引張変形能の大きなECCを用いて表面被覆を行った。

2.2 ECCによる試験施工の実施

(1) 施工概要

本試験施工では、表－1に示すように、吹付け材料3種類、補強筋2種類、ひび割れ部のシール材の有無を組み合わせた合計9条件で、9ブロックを施工した。1ブロックの寸法は、幅約1.8m×高さ約5mであった。吹付け前に、ウォータージェット法により擁壁表面を数mmの深さではつり処理した。ブロックNo.4とNo.8では、ECCとひび割れ近傍のコンクリートとの付着を弱めてECCの引張性能が十分に発揮されるよう、1液型ポリウレタン系シール材を用いてひび割れ部をシール(幅30mm、厚さ5mm程度)した。施工2日後には、全ブロックにおいて擁壁下端より2mの範囲に1液型のアクリル系塗料を塗布した。

(2) 吹付け材料と補強筋

表－1に示すように、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（ビニロン）および高強度ポリエチレン繊維を 1.5 vol%混入した ECC 吹付けモルタルである。吹付け材料 B⁴⁾は、プレミックス材に高強度 PVA 繊維を 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。

補強筋を用いるブロックでは、溶接鉄筋網またはエキスパンドメタルを、擁壁面から 10mm 程度浮かせて配置した。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。

(3) 練混ぜと吹付け

ECC吹付けモルタルAでは、ニューギヤードミキサー（容量：0.32 m³）を用いて練混ぜ、スクイズ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：0.12 m³）とスネーク式ポンプを用いた。吹付け厚さは50～70mm程度とした。ECCの吹付け施工の様子を写真－1に示す。

2.3 施工後の様子

写真－2に示すように、3種類の吹付け材料とも、平滑な仕上げ面となった。補修用吹付けモルタルCを用いたブロックNo.9では、施工1ヶ月後には微



写真-1 吹付け施工の様子



写真-2 施工後の様子(壁の両端は未補修)

細なひび割れが目視により確認され、施工3ヶ月後には縦方向にひび割れ(幅約0.03mm、長さ約4.5m)が確認された。一方、施工3ヶ月後においても、ECC吹付けモルタルA、Bを用いたブロックでは、ひび割れは観察されていない。

3. 要素部材の直接引張試験による性能評価

3.1 実験概要

(1) 引張試験用部材

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個ずつ試験施工の際に作製した。部材の寸法は、厚さ75×幅200×長さ1800mmとした。

部材の補強筋には、試験施工と同様に、溶接鉄筋網(鉄筋：D6(SD295)、ピッチ：100mm 格子状)またはエキスパンドメタル(メッシュ寸法：75×203mm、規格：XS-82)を用いた。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% (一方向の鉄筋比は0.41%)、エキスパンドメタルの

表-2 引張試験用部材

吹付け材料	補強筋
材料 A	—
材料 B	溶接鉄筋網
材料 C	エキスパンドメタル

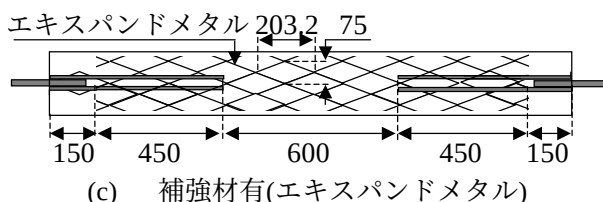
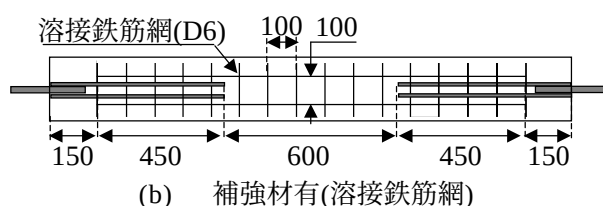
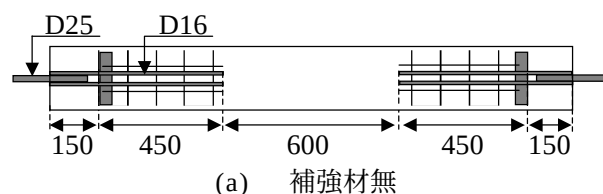


図-1 型枠内の補強筋の配置状況

場合は0.80 vol%である。図-1 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個の部材のうち、1個を材齢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(φ100×200mm)と、曲げ試験用の角柱供試体(100×100×400mm)を作製した。

(2) 部材の引張載荷試験

部材の引張載荷試験の様子を図-2 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、

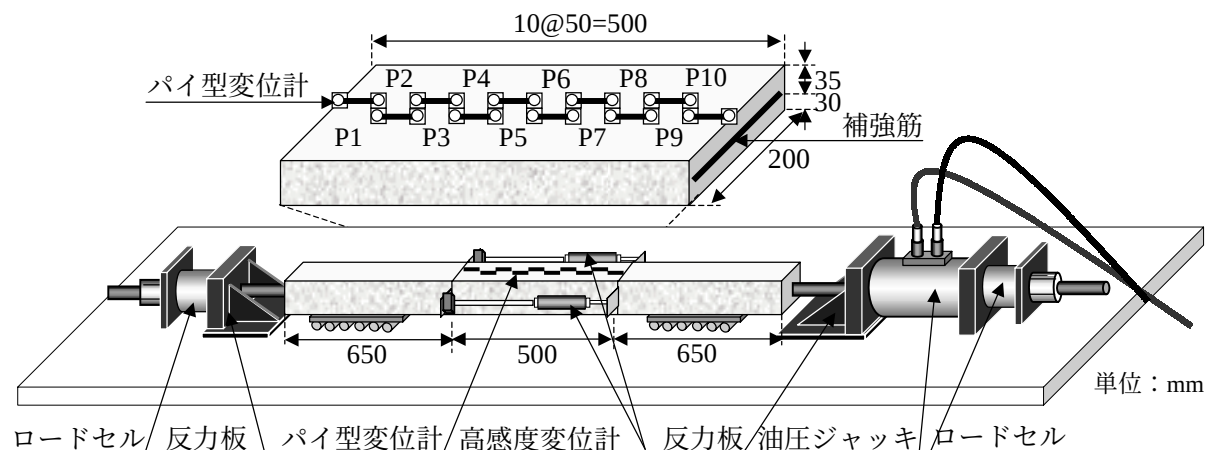


図-2 部材の引張载荷試験の様子

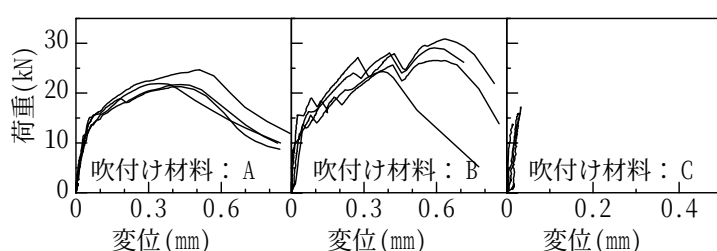


図-3 曲げ強度試験による荷重－変位曲線

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

部材に引張荷重を加えた。荷重は、ロードセルにより検出した。部材の中央部 500mm の区間の全体変形（平均ひずみ）と変形分布（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。目視によるひび割れ幅が 2mm に達する時点か荷重が明確に低下する時点まで、引張変形を漸増させながら、繰返し载荷を行った。

3.2 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-3 に三等分点曲げ強度試験により計測した荷重－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

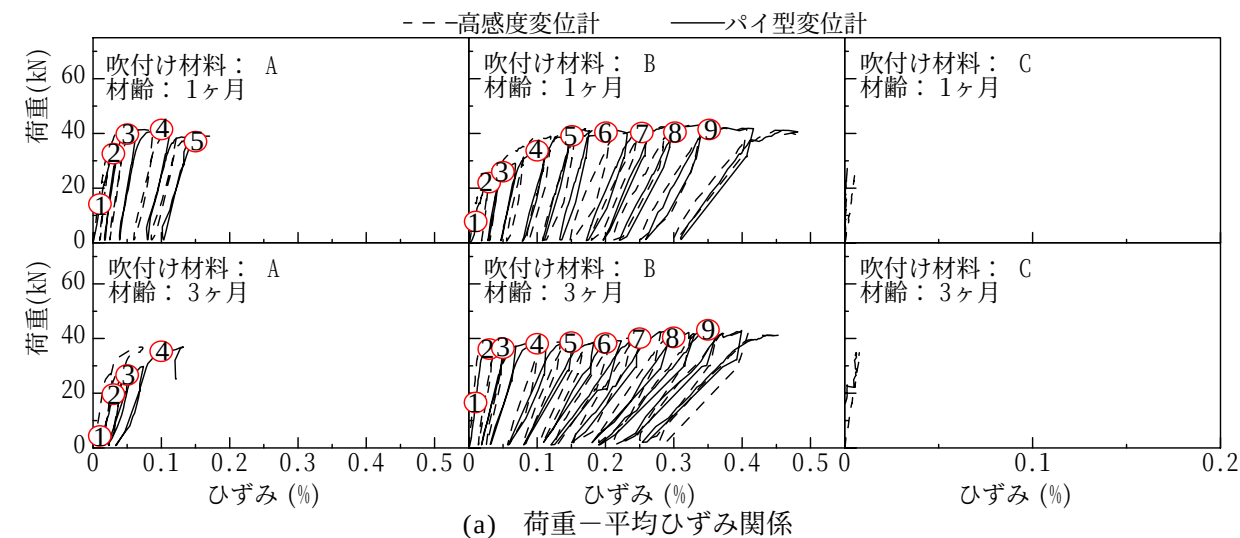
ルタルの曲げ荷重－たわみ関係には，ひび割れ発生後にたわみの増加に伴って荷重が増加し，ひずみ硬化特性が明確に認められた。曲げ試験において，ひび割れ発生荷重は，約 13kN と ECC 吹付けモルタル A，B とともにほぼ同じであったが，曲げ最大荷重および最大荷重点のたわみは，A に比べ B の方が大であった。

3.3 部材の引張载荷試験の結果

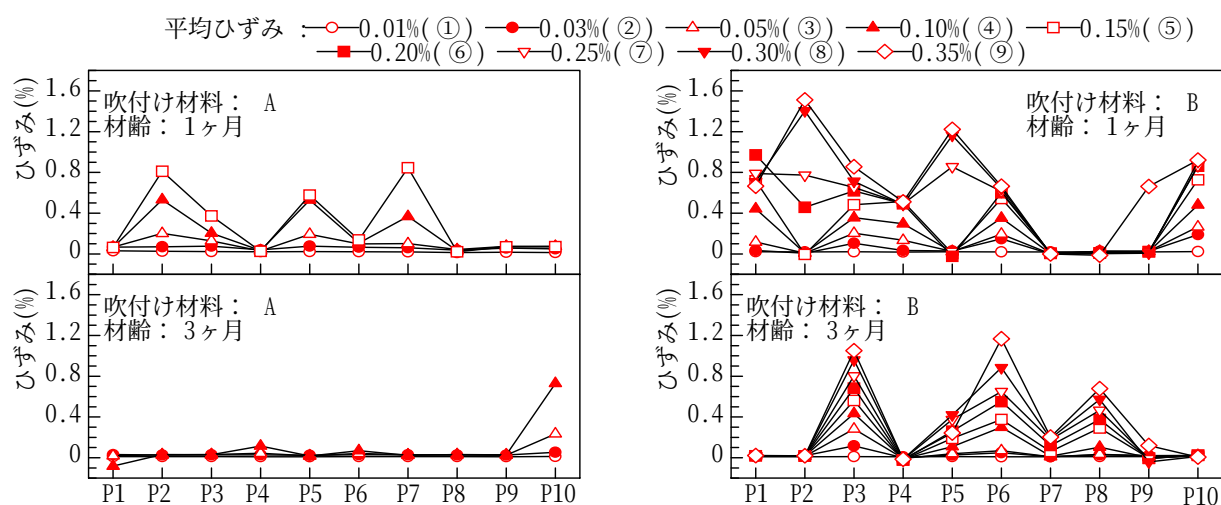
補強筋が無い部材，溶接鉄筋網を用いた部材，エキスパンドメタルを用いた部材の引張载荷試験結果をそれぞれ図-4～6 に示す。材齢 1 ヶ月と 3 ヶ月で実施した試験の結果を併記する。図中で(a)は引張荷重と平均ひずみの関係，(b)はひずみの分布，(c)は部材表面のひび割れの様子を示す。図-5(a)には，目視により確認した最大ひび割れ幅と平均ひずみとの関係も示す。

(1) 荷重－ひずみ関係

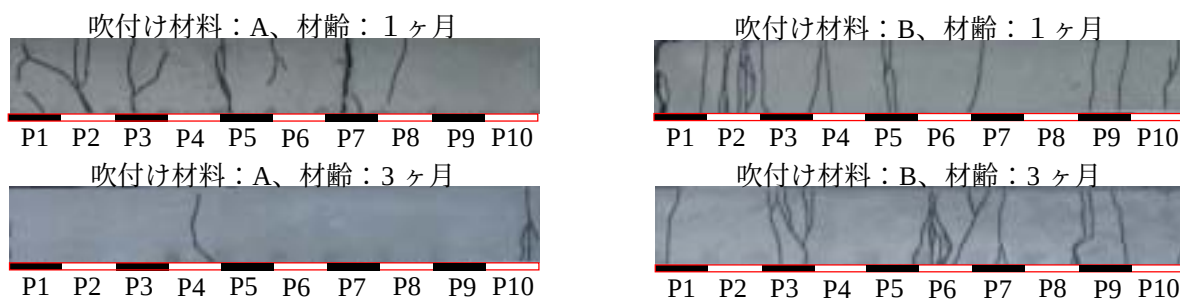
図-4～6 の(a)に示す引張荷重－ひずみ関係のうち，破線は高感度変位計 2 個により供試体の両側面（検長 500mm）で計測した平均ひずみであり，実線は供試体上面のパイ型変位計 10 個の平均ひ



(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



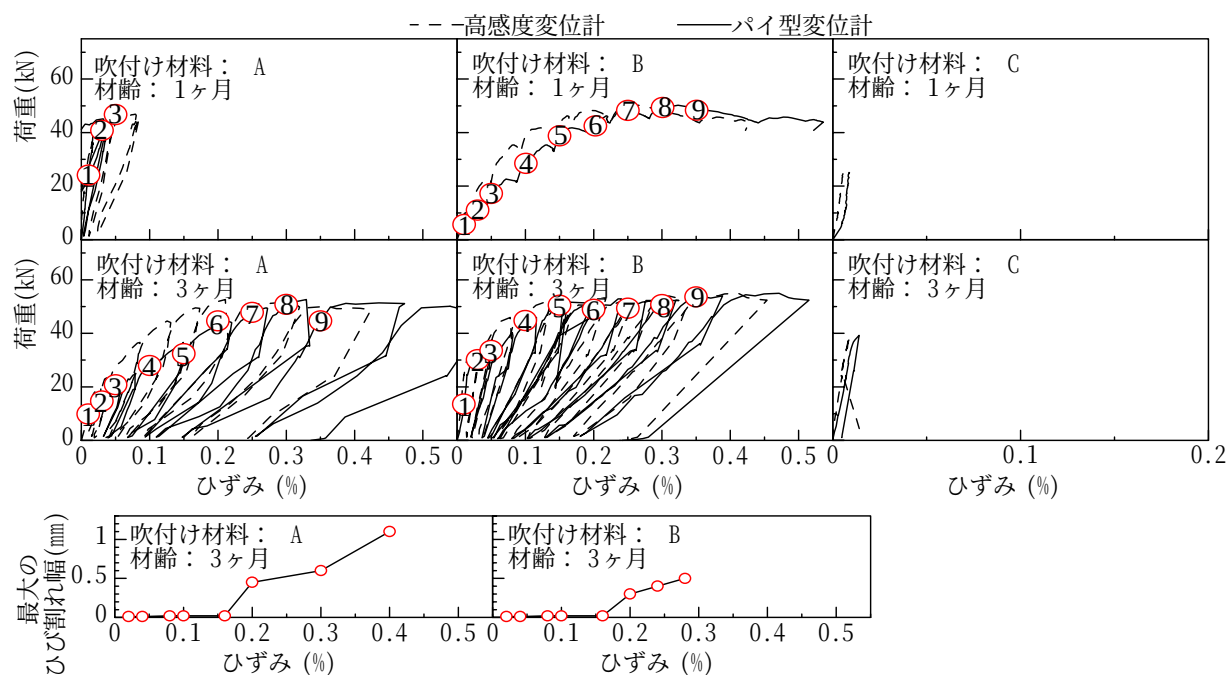
(c) パイ型変位計の定着位置とひび割れ発生状況

図－4 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：無し)

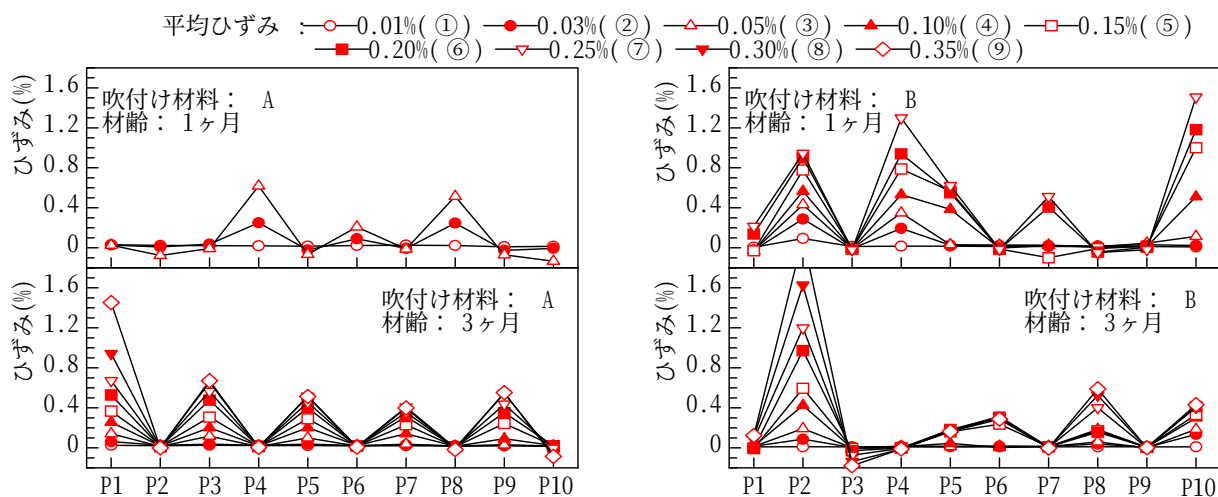
ずみである。2 種類の方法により計測した荷重－ひずみ関係は、若干の差異はあるものの、ほぼ同じ形状であった。

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

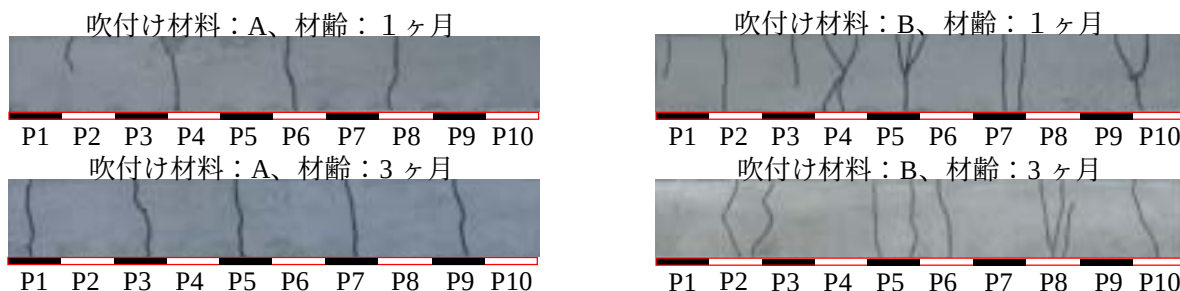
発生前にモルタルが受持っていた引張力をひび割れ後に補強筋が肩代わりできなかったものと考えられる。一方, ECC 吹付けモルタル A, B の場合, いずれの部材においてもひびわれ発生後に荷重が増加するひずみ硬化特性が見られた。すなわち, ECC はひび割れ後も引張力を負担できることから, 部材としての引張耐荷力は補強筋と ECC の双方の耐荷力を重ね合わせたものとなった。ECC 吹付けモルタル A, B を用いた部材の最大荷重に差



(a) 荷重—平均ひずみ関係ならびに最大ひび割れ幅—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

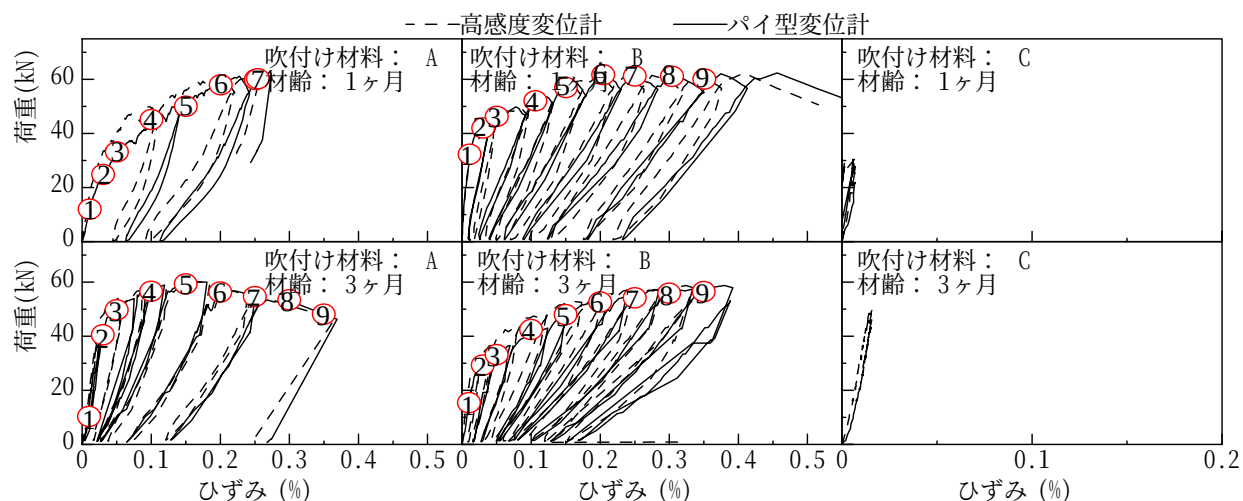
図—5 荷重—ひずみ関係、ひずみ分布およびひび割れ発生状況(補強筋：溶接鉄筋網)

はほとんど認められなかったが、最大荷重点におけるひずみはAに比べBの方が大きくなった。

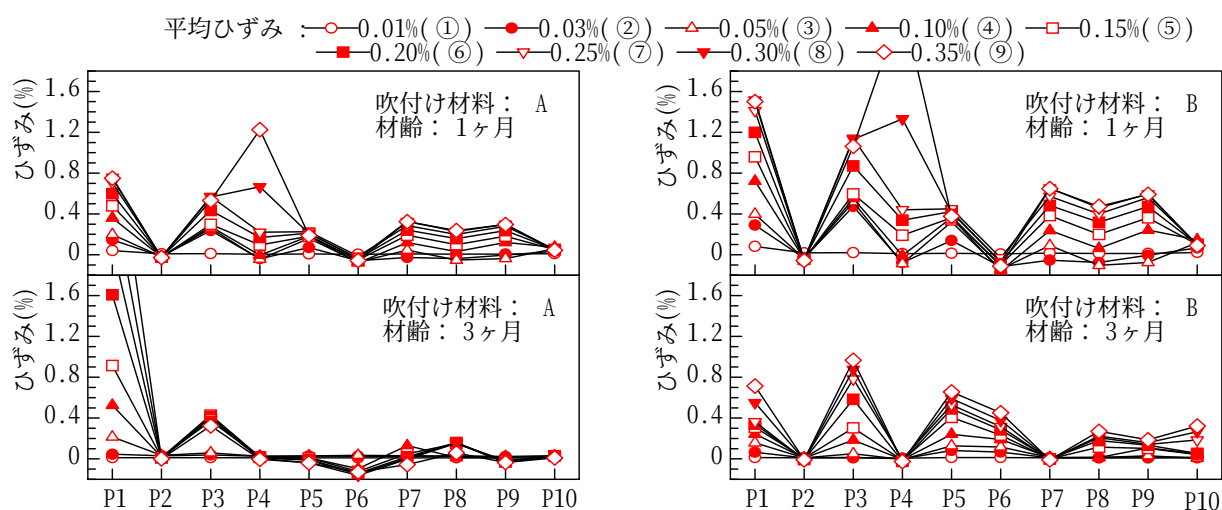
ECC吹付けモルタルA,Bの場合、最大荷重は、補強筋の無い部材、溶接鉄筋網を配置した部材、エキスパンドメタルを配置した部材の順に大きく

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、エキスパンドメタルに異方性があり部材軸方向の耐荷力が大きいことによると考えられる。

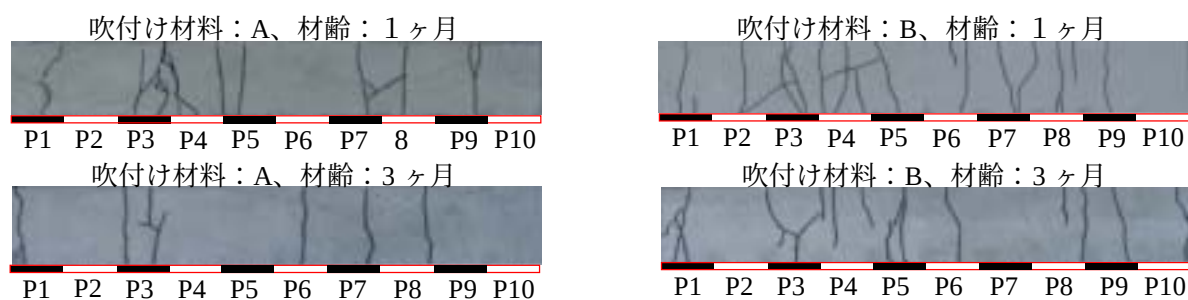
最大荷重点の平均ひずみは、ECC吹付けモルタ



(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－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：エキスパンドメタル)

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な傾向となった。すなわち、ECC 吹付けモルタル A のように引張変形能が小さい ECC に補強筋を組み合わせることにより、部材としての引張変形能が大きくなった。

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 個の部材では荷重－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 個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－4～6 の(b)に示すひずみ分布は、図の(a)の荷重－ひずみ曲線上の①～⑨の時点において、10 個

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 のひずみ分布とびひび割れ発生状況は省略した。

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低い結果となった。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。

補強筋がエキスパンドメタルの場合には、A および B ともに、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が、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ためと考えられる。

4. まとめ

- (1) 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を対象として、修景を目的に ECC の吹付けにより表面の補修を実施した。ECC の表面は良好な仕上がりとなり、施工後 3 ヶ月の時点では目視によるひび割れは確認されていない。補修用モルタルには施工後 1 ヶ月以内に微細なひび割れが目視により確認された。
- (2) 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。最大荷重点における変形（あるいはひずみ）は、A に比べ B の方が大であった。
- (3) 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。

- (4) 引張変形能が小さい ECC 吹付けモルタル A に補強筋を組み合わせるにより、部材としての引張変形能が大きくなった。
- (5) 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。
- (6) 溶接鉄筋網で補強した部材では、A および B 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。

謝辞

ECC の試験施工に擁壁を使わせていただくとともに、ご協力いただいた岐阜県東濃用水道事務所に対し、お礼申し上げる次第である。

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) Li, V.C.: Reflections on the Research and Development of Engineered Cementitious Composites (ECC), Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) – Application and Evaluation -, JCI, 2002.10
- 3) 日本コンクリート工学協会：高韌性セメント複合材料を知る・作る・使う，高韌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
- 4) 関田徹志，斉藤忠，坂田昇，平石剛紀：PVA 繊維を用いた高韌性 FRC による吹き付け補修材料の基礎的特性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 1, pp. 480-485, 2001