論文 ひずみ硬化型高靭性セメント複合材料で鋼材を被覆した部材の力学 挙動

森川 秀人*1·国枝 稔*2·藤元 安宏*3·六郷 恵哲*4

要旨:引張力下でひずみ硬化挙動を示す ECC(高靱性セメント複合材料の一つ)で鋼管を被 覆したはり供試体の曲げ載荷試験を行った。その結果,鋼管の被覆材に ECC を用いた部材 では, ECC は引張力を安定して分担するとともに鋼材の破壊域の局所化を遅らせることが 明らかとなった。鋼管にリブ加工を行うことにより,ECC との付着が改善され,曲げ耐力と ひび割れ分散性が向上した。膨張材を適量混入することにより,ECC の収縮を補償すること ができた。

キーワード: ECC, 鋼管, 引張ひずみ硬化, マルチプルクラック, 付着, 膨張材

1. はじめに

高靭性セメント複合材料(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites: DFRCC)の 1 つである Engineered Cementitious Composites (ECC)^{1), 2)}は、引張力下および曲げモーメン ト作用下において、複数の微細ひび割れ(マル チプルクラック)が発生し、繊維の架橋作用に よりひび割れ発生後もひずみの増加に伴い引張 応力が増加するひずみ硬化特性を示す材料であ る。ECCは、防食材、止水材、エネルギー吸収 材および補修・補強材料など様々な適用の可能 性を有している^{3), 4)}。多方面で利用するために は、用途に応じた性能評価手法を確立する必要 がある。

ECC は、従来のコンクリートが有する引張応 力下での脆性的な性質を克服していることより、 構造物の構造性能の向上に大きく寄与すること が期待されており、引張部材としての利用⁵⁾も 有効と考えられている。

本研究では、構造物の要素部材として、ECC で鋼管を被覆したはり供試体を作製し、曲げ載 荷試験を行い、その力学挙動の評価を行った。 また,ECCの収縮を抑制するため,膨張材の 混入についても検討を行った。

2. 膨張材混入量の検討

2.1 実験概要

本研究で使用する ECC は単位セメント量が 多いため、体積変化が拘束される部材や、鋼材 との複合部材など拘束力が大きな部材として用 いた場合、乾燥収縮および自己収縮によるひび 割れや温度ひび割れが発生しやすい。そこで、 ECC のひび割れを抑制するために最適な膨張 材混入量を決めることを目的とし、以下の手順 で検討を行った。

- ECC(詳細は 3.1 で述べる)へのカルシウ ムサルホアルミネート系膨張材(密度:2.94 g/cm³)の混入量は、セメント量に対して内 割りで 0%, 2%, 4.7%, 7%および 9.5% とし,標準曲げ供試体(100×100×400mm) を各一体作製する。
- (2) 図-1 に示すように、各供試体の上面と側面の各2箇所にフーゲンベルガーひずみ測定器用の標点(プラグ)を取付ける(上面)

*1	岐阜大学大学院	工学研究科土木工学専攻	(正会員)
*2	岐阜大学助手 🗌	L学部社会基盤工学科 工博	(正会員)
*3	(株) ピーエス	三菱 技術開発部 (正会員)	
*4	岐阜大学教授 🗌	L学部社会基盤工学科 工博	(正会員)



はエポキシ樹脂で接着,側面はネジ止め)。

- (3) ECC 打設後 8 時間より, フーゲンベルガ - 測定器を用い供試体のひずみを測定す る (室内:温度20℃)。
- (4) (3)の結果より最適な膨張材混入量を決 定する。

2.2 結果

ひずみ-経過時間関係を図-2 に示す。これ より, 膨張材をセメントの内割で0%, 2%, 4.7% 混入した場合では,収縮量の低減はほとんど見 られなかった。しかしながら、膨張材を 7%混 入した場合(通常のコンクリートの場合と同程 度の割合), ECC の収縮量は大幅に低減され残 留ひずみはほぼゼロとなった。膨張材を 9.5%

混入した場合には、500×10⁻⁶程度の 膨張ひずみが残った。以上より、本 研究の範囲内では、収縮を補償する ために最適な膨張材混入量はセメン ト量の内割りで 7%程度であるとい える。

曲げ載荷試験の概要 3.

なし(上面)

なし (側面)

(側面)

(上面)

(側面)

2% (上面)

7% (上面)

7%(側面)

- 9.5% (側面)

9.5% (上面)

2%

4.7%

4.7%

3.1 使用材料

本試験で使用した材料の配合を表-1に示す。 早強ポルトランドセメント (密度: 3.12g/cm³) とポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用し た。ECC においては,水セメント比 W/C を 30% とし,細骨材に7号珪砂(密度:2.6 g/cm³)を,

> 繊維には、繊維長 12mm、 繊維径 12 µ m, のポリエ チレン (PE) 繊維(断面 形状:円形,密度:0.95 g/cm³, 引張強度: 2.6GPa, 引張弾性係数 73GPa) を 使用した。PE 繊維の繊維 混入率は体積比で 1.5% とした。繊維の分散を促 すため増粘剤(ヒドロキ シプロピルセルロース) を使用した。膨張材入り

ECC では、2 章の結果より、膨張材をセメント 量の内割りで7%混入した。

モルタルおよび鋼繊維補強モルタル (SFRM) では W/C を 50%とし、細骨材には川砂(密度: 2.59g/cm³)を使用した。SFRM には、繊維長 30mm, 換算直径 ϕ 0.6mm の両端フック型の鋼



(a) リブ加工有り

写真-1 鋼管の表面



種類	セメント*1	水	細骨材*2	混和剤 1 ^{*3}	混和剤 2 ^{*4}	膨張材*5	繊維の体積 混入率 ^{*6}
モルタル	1	0.5	3	0.017	-	-	-
SFRM	1	0.5	3	0.017	-	-	1%
ECC	1	0.3	0.31	0.03	0.00071	-	1.5%
膨張 ECC	1	0.3	0.31	0.03	0.00071	0.07	1.5%

表-1 配合(繊維混入率を除きセメント量に対する比率)

*1: 早強ポルトランドセメント

*2: ECC には7号珪砂, モルタルと SFRM には川砂

*3: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

*4: メチルセルロース系増粘剤

*5: カルシウムサルホアミネート系膨張材, セメントの内割りで調合

*6: ECC にはポリエチレン繊維, SFRM には両端フック型鋼繊維

表-2 供試体の種類と実験結果

一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	か 再 ナナ	リブ	世动体教	初期ひび割れ	最大荷重
一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	似復初		一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	発生荷重(kN)	(kN)
モルタルリブ無し	モルタル	無	1	14.7	61.5
SFRM リブ 無し	SFRM	無	1	15.6	64.4
ECC リブ有り	ECC	有	1	29.4	100.2
ECC リブ無し	ECC	無	1	20.6	86.2
膨張 ECC リブ有り	膨張 ECC	有	1	30.4	99.2
膨張 ECC リブ無し	膨張 ECC	無	1	18.6	80.6

繊維(断面形状:伸線でありほぼ円形,密度: 7.85 g/cm³,引張強度:1GPa以上)を体積比で 1%混入した。

3.2 供試体概要

ECC 被覆鋼管供試体を図-3 に示す。鋼管に は写真-1 に示すような付着改善のためのリブ (連続ビート肉盛り溶接,リブピッチ 40mm, リブ高さ 3.0mm)を有するものと無いものを使 用した。鋼管は一般構造用鋼管 STK41(外径 φ 101.6mm,長さ 2000mm,肉厚 3.1mm,単位重 量 7.76kg/m)を使用した。供試体の種類は表-2 に示すように 6 種類とした。

ECC の練り混ぜにはホバート型ミキサ(容量:101)を用いた。ECC の練り混ぜ方法としては,始めに結合材,珪砂および増粘剤を2分間空練りし,その後,水,高性能 AE 減水剤お

よび繊維を投入し6分間練り混ぜた。練り混ぜ 後,型枠に流し込み,突き棒でよく突き,大き な気泡が入らないようにバイブレータで振動を 与えた。ECCの空気量は12.8%であった。

モルタルおよび SFRM には強制練パン型ミキ サ(容量:1001)を用いた。モルタルの練り混 ぜ方法は,始め結合材および細骨材を2分間空 練りし,その後,水と高性能 AE 減水剤を投入 し5分間練り混ぜた。SFRM の練り混ぜ方法は モルタル作製後,繊維を投入し2分間練り混ぜ た。

材齢1日で脱型を行い,載荷試験直前まで実 験室内(温度:20-25℃程度)で湿布養生を行っ た。試験材齢は23日とした。各被覆材の強度試 験結果を表-3に示す。

3.3 載荷試験方法



まきり事務	圧縮強度	曲げ強度	弾性係数
1411/11/11/11/11	(MPa)	(MPa)	(GPa)
モルタル	47.3	5.6	24.7
SFRM	32.9	4.8	19.8
ECC	64.2	11.4	21.7
膨張 ECC	63.7	11.4	21.0

表-3 強度試験結果

図-3 に示すように、載荷スパンを 1200mm とし3 等分点曲げ載荷を行い、荷重と載荷点変 位を計測した。ひび割れの発生状況の観察を行 った。載荷試験は供試体上縁で圧縮破壊が確認 されるまで行った。

4. 曲げ載荷試験の結果と考察

4.1 被覆材種類の違いによる影響

鋼管にリブが無い各供試体の荷重-変位関係 を図-4に示す。

(1) 初期ひび割れ発生時における挙動

表-2 に示すように、モルタルを被覆材に用 いたモルタルリブ無し供試体、SFRM を被覆材 に用いた SFRM リブ無し供試体および ECC を 被覆材に用いた ECC リブ無し供試体の初期ひ び割れ発生荷重は、それぞれ 14.7kN、15.6kN お よび 20.6kN であった。

各供試体における最大荷重の 1/3 程度時のひ び割れ状況を写真-2(写真では細かいひび割れ をマジックペンで明示している) に示す。ECC



リブ無し供試体の発生ひび割れは,SFRM リブ 無し供試体およびモルタルリブ無し供試体に比 べ、本数が少なく、微細であった。

(2) 終局時における挙動

図-4に示す通り, ECC リブ無し供試体はモ ルタルリブ無し供試体や SFRM リブ無し供試体 に比べ,曲げ耐力(最大荷重)は3割程度大き く,最大荷重時の変位は倍以上となった。この ことから,ECC は引張力を安定して分担すると ともに,鋼材の破壊域の局所化を SFRM やモル タルの場合と比較して遅らせることがわかる。

各供試体の終局時でのひび割れ発生状況を写 真-3 に示す。モルタルリブ無し供試体および SFRM リブ無し供試体の場合,荷重の増加に伴 い,初期ひび割れがそのまま進展し,ひび割れ 開口量が増大していった。さらに載荷を継続す ると,両供試体共に供試体上面に割裂ひび割れ が発生した。一方,ECC リブ無し供試体では, 初期ひび割れ発生後,繊維の架橋効果によりひ び割れ先端部に枝分かれ状に微細なひび割れが 多数発生した。さらに,載荷を継続すると,供 試体上面に圧壊を生じた。

4.2 リブの有無の影響

リブの有無の影響の検討は, ECC を被覆材に 用いた場合のみ行った。荷重一変位関係を図-5 に示す。表-2に示すように, ECC リブ有り供 試体では ECC リブ無し供試体に比べ, 初期ひび 割れ発生荷重は 5 割程度大きく, 最大荷重は 2 割程度大きくなった。これは, ECC リブ有り供



SFRM リブ無し供試体 (最大荷重の1/3 程度時) モルタルリブ無し供試体 (最大荷重の1/3 程度時) 写真-2 最大荷重の1/3 程度時のひび割れ発生状況



ECC リブ有り供試体(終局時)



ECC リブ無し供試体(終局時)



SFRM リブ無し供試体(終局時)

モルタルリブ無し供試体(終局時)

写真-3 終局時のひび割れ発生状況

試体では,鋼管と ECC の付着が向上し,両者の 一体性が増し ECC の負担する引張力が増加し たためと考えられる。逆に, ECC リブ無し供試 体では,鋼管と ECC との付着が弱く,すべりが 生じ, ECC の負担する引張力が小さくなったと 考えられる。

両供試体の最大荷重の 1/3 程度時および終局 時でのひび割れ発生状況を写真-2 および写真 -3 に示す。写真-2 に示すように,最大荷重の 1/3 程度時のひび割れ発生状況では, ECC リブ 有り供試体は ECC リブ無し供試体に比べ,ひび 割れの進展が遅くなっており,ひび割れ幅も小 さいことが確認できた。終局時でのひび割れ発 生状況においても,ECC リブ有り供試体では, 微細ひび割れ(マルチプルクラック)が供試体 全域に分散して発生したのに対し,ECC リブ無 し供試体では,微細なひび割れが多数発生した ものの,供試体全域には分散しなかった。先述 したように,ECC リブ有り供試体では,鋼管と ECC の一体性が増加し,供試体の曲げモーメン ト区間全域に多数のひび割れが発生したと考え られる。



写真-4 初期ひび割れ(軸方向) 4.3 膨張材の有無の影響

膨張材を混入していない供試体においては, 養生中に微細なひび割れ(幅は 0.04mm 以下) が,写真-4 に示す通り軸方向に発生した(マ ジックペンで明示)。しかし,膨張材を混入した 供試体では,確認されなかった。

図-5 に示す荷重-変位関係より,膨張材入 り供試体では,膨張材が入っていない場合に比 べ,終局時における圧壊がわずかに早まったほ かは,荷重-変位関係に大きな違いは認められ なかった。初期ひび割れ発生状況においても表 -2 からわかるように,明確な差は見られなか った。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 鋼管の被覆材に ECC を用いた部材では, 被覆材にモルタルや鋼繊維補強モルタル を用いた部材に比べ,曲げ耐力は3割程度 増加し,最大荷重時の変位も倍以上大きく なった。このことから ECC は,引張力を 安定して分担するとともに鋼材の破壊域 の局所化を遅らせることがわかる。
- (2) 鋼管にリブを加工することにより,部材の 曲げ耐力はさらに2割程度増加し,終局時 におけるひび割れ分散性も良くなり,鋼管 と ECC との一体化のための付着を確保で きた。
- (3) 鋼管に ECC を被覆した部材の使用時およ び終局時に生じる曲げひび割れは、モルタ ルや鋼繊維補強モルタルを被覆した部材 に比べ、ひび割れ幅は小さく、ひび割れ本

数は多くなった。

- (4) 鋼管に ECC を被覆すると、鋼管の拘束に より ECC には収縮ひび割れが生じたが、 ひび割れ幅は微細(0.04mm 以下)であり、 複合部材全体の力学挙動には影響を及ぼ さなかった。
- (5) 膨張材を適量(本研究の条件では、単位セメント量の7%(通常のコンクリートの場合と同程度))混入することで、ECCの収縮は低減された。膨張材を混入した ECCで鋼管を被覆した場合には、拘束に伴う収縮ひび割れは生じなかった。

参考文献

- 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
- 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
- 3) 日本コンクリート工学協会:高靭性セメン ト複合材料を知る・作る・使う、高靭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
- Li, V. C. : Reflections on the Reserch and Development of Engineered Cementitious Composites (ECC), Proceedings of the JCI International Workshop on DFRCC, pp.1-22, 2002
- Rokugo. K, Kunieda. M, Kamada. T, Fujimoto. Y, Furukawa. K : Structural Applications of Strain Hardening Type DFRCC as Tension Carrying Material, Proceedings of the JCI International Workshop on DFRCC, pp.249-258, 2002