

ECC リンクスラブの曲げ挙動に関する解析的検討

An analytical study on the flexural behavior of ECC link slabs

北海道大学工学部
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科

学生員 〇加保 勇介
正会員 松本 高志
学生員 角間 恒
F 会員 林川 俊郎
正会員 何 興文

(Yusuke Kaho)
(Takashi Matsumoto)
(Ko Kakuma)
(Toshiro Hayashikawa)
(Xingwen He)

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites)の一種である ECC(Engineered Cementitious Composite)は、ひび割れ面での繊維による応力伝達と複数ひび割れの分散発生により、一軸直接引張試験下において擬似ひずみ硬化挙動を示し、高い変形性能およびエネルギー吸収性能を有する(図-1)。また、一軸直接引張試験下での平均ひび割れ幅が 0.2mm 以下となり、微細に留まることから、構造物の劣化を促進する物質の透過を抑制できる¹⁾。このことから、ECC は既設構造物の補修・補強に適用されることが期待されており、その一つに橋梁ジョイント部への ECC を用いたリンクスラブの配置がある。

橋梁ジョイント部は、単純支持桁間の桁間において伸縮を吸収するために設置されるが、交通荷重による損傷が激しい部分でもある。また、損傷すると融雪剤を含んだ水が路面から桁へと流れてしまい、鋼桁の腐食やコンクリート桁内部の鉄筋腐食につながることもなる。よって、その維持管理は重要であり、ジョイント部の更新も頻繁になされ、コスト的にも少なからぬ比率を占めるのが実状である。また、単純支持桁の既設橋梁は多数存在することからも、ジョイント部の対策は重要であり、その1つとしてスラブの連続化が行われている²⁾。

ECC リンクスラブは、これをジョイント部へ配置することでスラブの連続化を行い上記の問題を解決しようとするものである。ECC リンクスラブについて、実験による曲げ挙動の把握はされている³⁾。しかしながら、他の設計条件での曲げ挙動や、さらには疲労挙動について検討するには解析的な検討が有効であるが、解析的な静的曲げ挙動や疲労挙動の検討はなされていないのが実情である。そこで本研究ではまず、有限要素解析を用いて ECC リンクスラブの既往の実験の再現と曲げ挙動の解析的検討を行うことを目的とした。



図-1 ECC の応力-ひずみ関係模式図

2. 解析モデル

2.1 既往の実験概要

本研究では、Kim らが行った ECC リンクスラブの繰返し曲げ載荷実験³⁾をもとに ECC リンクスラブのモデル作成を行った。実験では支間長が 25m の単純支持桁間に ECC リンクスラブを配置する状況を想定して曲げモーメントが 0 となる点を支点、実構造上の支点を載荷点とすることで ECC リンクスラブを単純桁とみなし(図-2)、変位制御で繰返し載荷(step1~5)を行っている。

供試体に用いられた材料の特性を表 1 に示す、鉄筋比は支点位置の回転角が 0.0015rad の際に、鉄筋応力が降伏強度の 40%を超えないように設計されている。

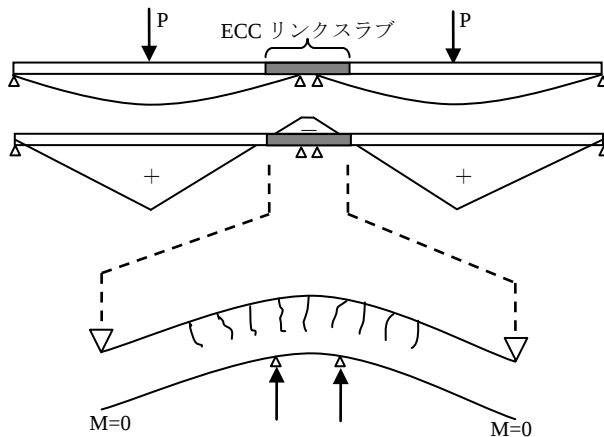


図-2 リンクスラブの境界条件

表 1 材料特性

ECC	ヤング率 (GPa)	20.0	
	ひび割れ強度 (MPa)	4.0	
	引張強度 (MPa)	6.0	
	圧縮強度 (MPa)	80.0	
	引張強度時ひずみ (%)	3.7	
	ポアソン比	0.23	
プレート ガーダー	規格	W14×82	
	ポアソン比	0.3	
鉄筋	使用鉄筋	D22	D19
	鉄筋比	0.014	0.001
	ヤング率 (GPa)	200	
	ポアソン比	0.3	

また、実験供試体を図-3 に示す。ECC リンクスラブ、プレートガーダー、鉄筋からなる構造で、ECC リンクスラブとプレートガーダーの境界面はジベルによる剛結部と非剛結部である付着切れ領域に分けられる。

2. 解析モデル

図-4 は有限要素モデルであり、対称性を考慮した1/2 の二次元モデルとした。リンクスラブは負曲げを受けるため、実験と解析では実構造とは上下を逆にして正曲げを加えた。ECC リンクスラブおよびプレートガーダーには4 節点アイソパラメトリック要素、鉄筋には2 節点梁要素を用いている。境界面の剛結部は節点を共有させ、付着切れ領域で摩擦係数は0.7 を用いた接触解析を行っている⁴⁾。表1 に示した材料特性を用いており、プレートガーダーのヤング率は実験供試体と単位幅当りの曲げ剛性が等価となるように決定した。また、鉄筋は弾性体としており、降伏と引き抜きは考慮していない。変位計測点は支間中央 ECC リンクスラブ部の引張縁(図-3 中 A)で、ひずみ計測点は支間中央 ECC リンクスラブ部の引張縁、鉄筋位置、圧縮縁の3 点である(図-3 中 A, B, C)。

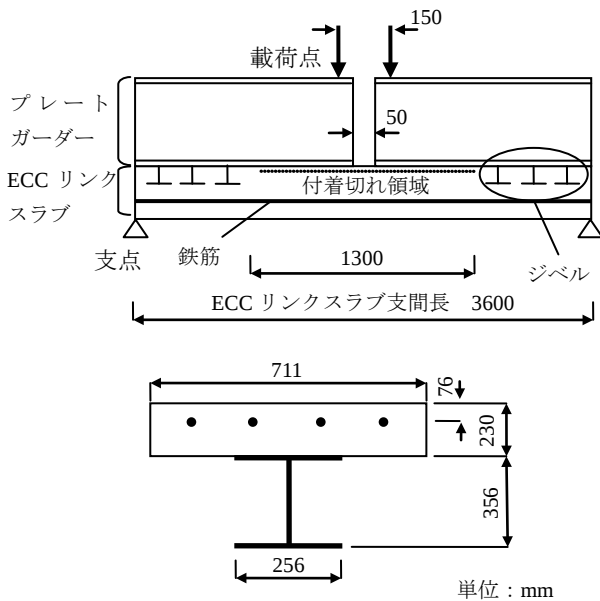


図-3 実験供試体

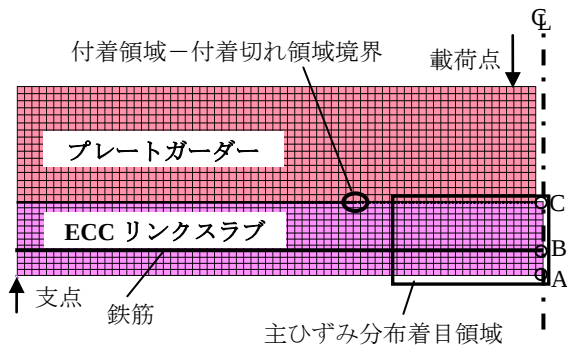


図-4 有限要素モデル

3. 静的曲げ解析

3.1 解析概要

非線形有限要素解析ソフト MSC.Marc を用いて図-4 の有限要素モデルの静的曲げ解析を行い、実験結果との比較による曲げ挙動の把握とモデルの妥当性の検証を行う。

付着切れ領域の効果を確認するために付着切れ領域なし、付着切れ領域が ECC リンクスラブ支間長の10%、30%、50%を作成し、さらには付着切れ領域30%でプレートガーダーと ECC リンクスラブの境界面にシートなどを挿入することを想定して摩擦係数を減らしたモデル、使用鉄筋を D19 としたモデルについても作成し、解析結果の比較検討を行った。荷重は上限140kN の単調載荷である。各解析モデルの呼称を表2 に示す。

3.2 解析結果の実験結果との比較

LS-db30 の解析結果と実験結果の比較を図-5 に示す。また、LS-db30 の応力集中箇所における荷重と応力の関係を図-6 に示す。

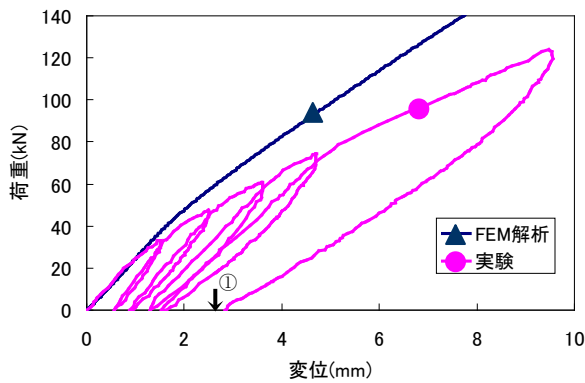
図-5(a)の荷重変位関係より、剛性が低下した50kN 付近までは実験結果をよく再現しているが、その後の剛性に差があることが確認できる。また、(b)の荷重ひずみ関係より、鉄筋位置では概ね再現できているが、引張縁では傾きは実験結果と同程度であるが、解析結果では30kN 付近で先に剛性が低下しており、圧縮縁では解析結果で実験結果よりも剛性が高くなっていることが確認できる。

図-6 より、まず20kN で支間中央引張縁がひび割れ応力に達しており、30kN で付着領域と付着切れ領域の境界の ECC がひび割れ応力に達している、さらに50kN で鉄筋位置がひび割れ応力に達していることが分かる。このことから実験結果の荷重変位関係の剛性が変化する点と引張縁の荷重ひずみ関係の曲線が折れる点ではそれぞれ、鉄筋位置の ECC、付着領域と付着切れ領域の境界の ECC がひび割れ強度に達したと考えられる。

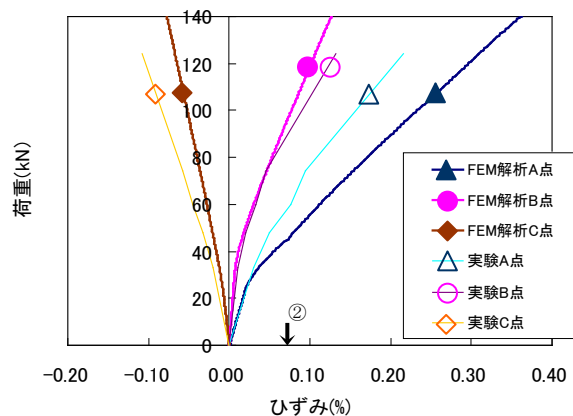
図-5(a)の解析結果と実験結果の剛性の差は、二次元解析では剛結部が奥行き方向の全断面で ECC リンクスラブが拘束されているのに対して、実験ではプレートガーダーの部分だけ拘束されており、その分剛性が高くなったと考えられる。また、図-5(b)で解析結果が実験結果より早期に付着領域と付着切れ領域の境界の ECC がひび割れ強度に達したのは、この箇所では応力集中が起きており、応力を過大評価しているためであると考えられる。

表2 解析モデル呼称

付着切れ領域 (mm)	鉄筋	摩擦係数	呼称
0	D22	0.7	LS-db0
360	D22	0.7	LS-db10
1300	D22	0.7	LS-db30
1300	D19	0.7	LS-db30r
1300	D22	0.2	LS-db30s
1800	D22	0.7	LS-db50



(a) 荷重変位関係



(b) 荷重ひずみ関係

図-5 LS-db30 の結果比較

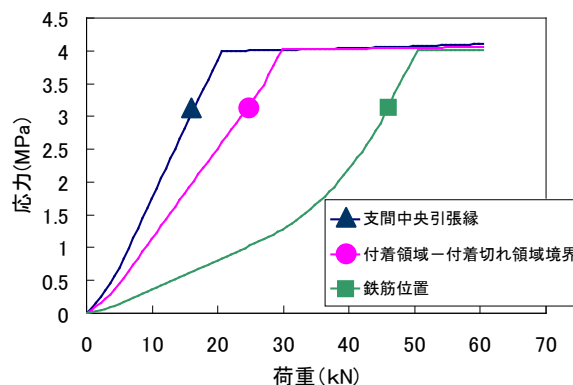


図-6 荷重ひび割れ応力関係

実験では支点位置の回転角が 0.0015rad となるときに鉄筋が降伏ひずみの 40%を超えないように設計されている。図-5(a)中の黒矢印①が支点位置の回転角が 0.0015rad となる変位で、解析結果ではそのときの荷重は 60kN であり、鉄筋降伏ひずみの 40%の位置である(b)中の黒矢印②には達していない。

解析では鉄筋の引き抜きは考慮していないが、荷重変位関係において 50kN 付近で剛性が低下する挙動は実験結果においても同様の挙動が見られることや、鉄筋位置の荷重ひずみ関係が実験結果をよく再現していることから鉄筋の引き抜きの影響は少ないことが推察される。

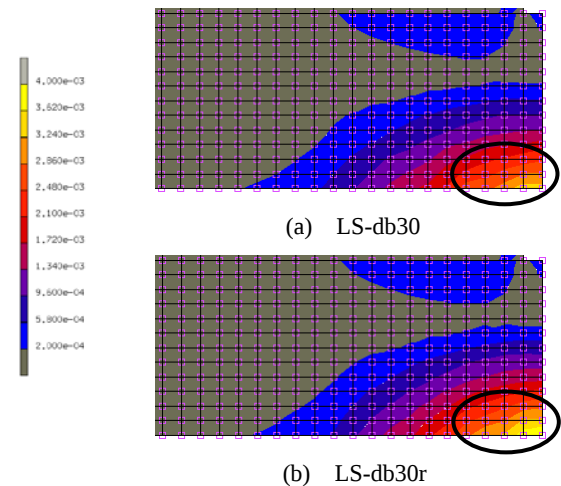


図-7 LS-db30 と LS-db30r の ECC リンクスラブにおける 140kN 時主ひずみ分布

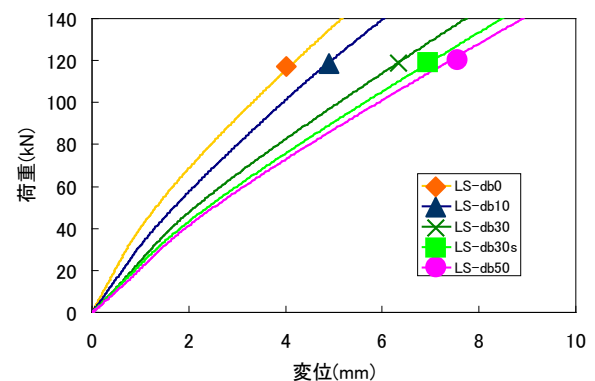


図-8 解析モデルごとの荷重変位関係

図-7 は実験結果と比較した鉄筋比 0.0014 のモデル (LS-db30)と、使用鉄筋を D19 として鉄筋比を 0.0010 としたモデル (LS-db30r)について、図-4 で示した部分の主ひずみ分布であり ECC のひび割れ領域を示している。両者を比較すると、ひび割れ領域に変化は無いが鉄筋比を小さくすることで ECC の負担する応力が大きくなり、ひずみの値が大きくなっていることが確認できる。実験においても、LS-db30r では支間中央引張縁のひび割れ本数が LS-db30 よりも多いことが確認されている。

3.3 付着切れ領域と摩擦係数による比較

解析モデルごとの荷重変位関係の比較を図-8 に示す。LS-db0, LS-db10, LS-db30, LS-db50 と付着切れ領域の増加に伴い 140kN 時の変位が、 5.2mm , 6.0mm , 7.7mm , 8.9mm と増加していくことが確認できる。これは付着切れ領域の増加によってプレートガーダーと ECC リンクスラブの合成効果が減少していくためである。

また、LS-db30s は LS-db30 と比較すると剛性が低下していることが確認できる。これは摩擦係数を減少させることによってプレートガーダーと ECC リンクスラブの合成効果が減少するためであると考えられる。

鉄筋位置の ECC がひび割れ強度に達する荷重はいずれの解析モデルにおいても 50kN 付近であり、その後の剛性の低下が確認できる。

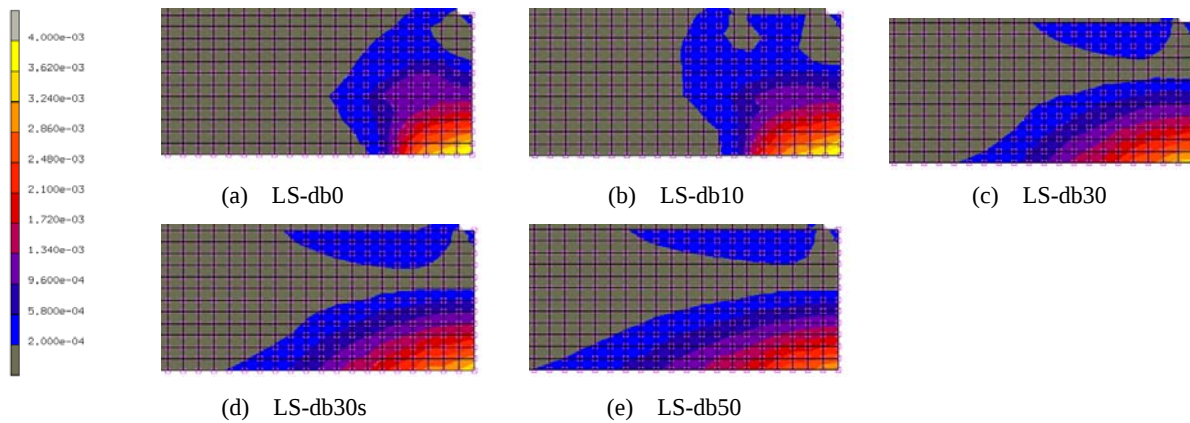


図-9 解析モデルごとの ECC リンクスラブにおける 140kN 時主ひずみ分布

図-9 は図-4 に示した領域の 140kN 時の主ひずみ分布で、ECC にひび割れが生じている領域を表している。これより、付着切れ領域の増加に伴ってひび割れ領域が高さ方向には進展しにくく水平方向に進展して行く傾向にあることが確認でき、これは、ECC リンクスラブがプレートガーダーによって拘束されていることが原因である。

LS-db30 と LS-db30s ではひび割れ領域も大きな変化は見られなく、140kN 時の支間中央引張縁のひずみも 0.362%と 0.371%でありほぼ同程度で、付着切れ領域へのシートの挿入などによる ECC リンクスラブの性能向上は見られなかった。

リンクスラブに ECC を用いた理由はひび割れの分散発生により、高いエネルギー吸収性能とひび割れ幅の抑制を期待するためである。付着切れ領域を短くすることでたわみは抑えられるが、ひび割れの局所化による早期破断、ひび割れ幅の増大による構造物に悪影響を及ぼす物質の透過など本来の ECC の役割が果たせなくなることが懸念される。また、付着切れ領域を長くすると、ひび割れ領域の分散効果は大きくなるが剛性が低下しすぎ、たわみが大きくなることが懸念される。

このことから、実験では ECC リンクスラブの設計は支点位置の回転角によって行われているが、付着切れ領域の長短によるひび割れ領域やひび割れ幅も設計で考慮する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、ECC リンクスラブの有限要素解析を行い、既往の実験結果との比較を示した。また、付着切れ領域、プレートガーダーと ECC リンクスラブの境界面の摩擦係数を変えた複数の解析モデルを比較し、付着切れ領域と摩擦による ECC リンクスラブの挙動の変化について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 有限要素解析の結果は、定性的な挙動の把握と鉄筋位置のモデル化の妥当性の確認は出来たが、定量的な実験結果の再現にはいたらなかった。
- 2) 付着切れ領域が長いと ECC リンクスラブの剛性は低く、ひび割れ領域は水平方向へ進展していくことが確認された。付着切れ領域が短いと ECC リンクスラブの剛性は高く、ひび割れ領域は高さ方向へ進展していき、局所化が起きることが確認された。
- 3) 付着切れ領域へのシートの挿入などによる摩擦係数低減ではひび割れ領域の分散などの有効的な効果は見られなかった。

今後は、付着領域と付着切れ領域の境界のモデル化の改善を行い、より良く実験結果を再現できるようにするとともに、疲労寿命について検討するために疲労解析を実施する予定である。

参考文献

- 1) 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), 土木学会, 2007.
- 2) 松本高志: 土木学会編 複合構造技術の最先端 4.7 橋梁ジョイント部への ECC リンクスラブの適用, pp92-95, 2007.
- 3) Kim, Y.Y., Fischer, G., and V.C. Li.: Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile ECC, ACI Structural Journal, Vol. 101, No. 6, pp792-801, Nov-Dec, 2004.
- 4) 猪股ら: 支圧力を受ける鋼・コンクリート接触面の静的・疲労付着性状, 第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.21-1~8, 2005.