

論文 PC 箱桁下床版におけるカーボンロッドメッシュ筋のひび割れ抑制効果に対する検討

松浦 葵^{*1}・富山 潤^{*2}・風間 洋^{*3}・砂川 勇二^{*4}

要旨：支間 50m を超える橋梁型式として PC 箱桁橋の実績が多くなっている。沖縄県でも、宮古島と伊良部島を結ぶ約 4km に亘る離島架橋に PC 箱桁が採用されている。しかし、県内の同型式の PC 箱桁橋下床版にひび割れの発生が確認されていることから、同橋では PC 箱桁下床版のかぶり部分にカーボンロッドメッシュ筋 (CFCC 筋) を埋設し、ひび割れ抑制対策を講じており、現在ひび割れは生じていない。本研究では CFCC 筋のひび割れ抑制効果を検証するために、CFCC 筋を配筋した床版の曲げ載荷試験を行った。さらに、実験より得られた知見に基づき非線形有限要素解析を行い、両結果を併せて CFCC 筋のひび割れ抑制効果を検証した。

キーワード：PC 箱桁、カーボンロッドメッシュ筋、ひび割れ抑制効果、非線形有限要素解析

1. はじめに

支間 50m を超える上部工橋梁形式として PC 箱桁橋の実績が多くなっている。しかし、沖縄県では下床版下面および桁端部に構造特性に起因したと考えられるひび割れが確認されており、1990 年代に架設された下床版中央付近に PC 鋼線定着部のある箱桁では、(a) 下床版中央橋軸方向のひび割れ、(b) 下床版斜め方向のひび割れ (ハの字ひび割れ)、(c) 桁端部定着側面のひび割れが確認されている。また、2000 年代に架設された下床版端部に PC 鋼線定着部がある箱桁でも下床版中央橋軸方向のひび割れが確認されている¹⁾。

沖縄県の宮古島と伊良部島を結ぶ約 4km に亘る離島架橋では、中央航路部以外に PC 箱桁が採用されており、(a) および (b) のひび割れ抑制としてカーボンロッドメッシュ筋 (CFCC 筋) を一部箱桁の下床版かぶり部分に配筋し、ひび割れ抑制対策を行っている。この結果、現時点ではすべての PC 箱桁においてひび割れは生じていない。しかし、これが CFCC 筋のひび割れ抑制効果であるということは確認されていない。

そこで本研究では、CFCC 筋のひび割れ抑制効果を検証するために、CFCC 筋を配筋した PC 箱桁下床版を模擬した試験体を製作し、曲げ載荷試験を行った。さらに実験から得られた知見に基づき、曲げ載荷試験の非線形有限要素解析を行い、両結果を併せて CFCC 筋のひび割れ抑制効果に対する検証を行った。

2. PC 箱桁下床版の模擬試験体の曲げ載荷試験

2.1 プレストレス導入時の PC 箱桁のひずみ状態

ここでは、PC 箱桁下床版に埋設した CFCC 筋のひ

び割れ抑制効果を確認するために曲げ載荷試験を実施する事になった経緯を述べる。

平成 22 年度に沖縄県宮古土木事務所と財団法人沖縄県建設技術センターは、実橋梁において PC 箱桁セグメント (以下、セグメントと称す) 架設時からプレストレス導入時を含む架設後までの 120 日間に生じる下床版下面のひずみの挙動を計測している²⁾。その結果、外ケーブル緊張時に図-1 に示す様な下床版ウェブ近傍で架設中最大の引張りひずみが横断方向に発生することを確認した。また、その時の下床版下面の橋軸直交方向には、中央部に圧縮ひずみ、ウェブ近傍の両端部には引張りひずみが生じることを確認した。このことから、下床版には 3 次曲線的な曲げが生じていることが予想された。この結果を考慮し、CFCC 筋のひび割れ抑制効果を確認するため、単純な荷重条件ではあるが、曲げ載荷試験を実施することにした。

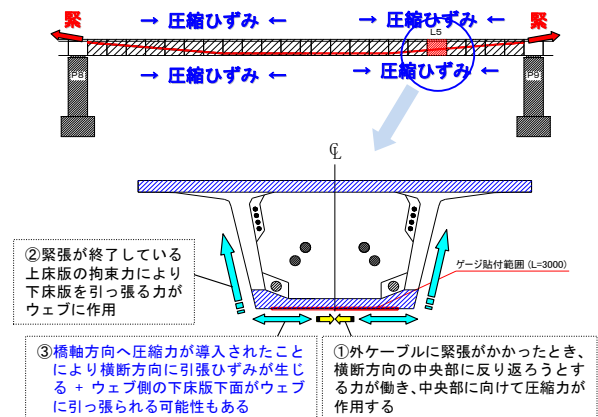


図-1 外ケーブル緊張時のひずみ発生模式図

*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (学生会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 アール・アンド・エー 代表 (正会員)

*4 沖縄県土木建築部道路管理課

2.2 試験方法

(1) 試験体の概要³⁾

曲げ載荷試験は、図-2 に示す下床版の模擬試験体を製作し、2 点載荷で行った。模擬試験体は、CFCC 筋の効果を確認するために CFCC 筋無しを 2 本(試験体名:N-1, N-2)と、CFCC 筋有りを 2 本(試験体名:A-1, A-2)作製した。図-3 に試験体の概要図を示す。試験体の寸法は幅 1,100mm、高さ 220mm、長さ 5,000mm である。なお、試験体の幅、高さはともにセグメントと同じ寸法であるが、長さは、曲げ載荷試験を実施するために、セグメントの実寸法 3,000mm より 2,000mm 長く設定している。また、鉄筋(SD345)および CFCC 筋(ϕ 5mm)は、セグメント下床版と同じものを用い、ピッチ(軸方向:75mm、軸直角方向:150mm)、かぶり(30mm)も同様に配筋した。なお、CFCC 筋の表面形状は、素線にポリエステル繊維が巻き付けられ、細かい凹凸被覆を形成している。実験では、床版の中央下面のたわみを変位計により測定した。また、鉄筋(SD345)および CFCC 筋に直接ひずみゲージを設置して各々のひずみも測定した。ひずみ等の検証については、第 3 章において数値解析との比較の際に必要な項目についてのみ説明し、詳細な説明は本論文では割愛する。

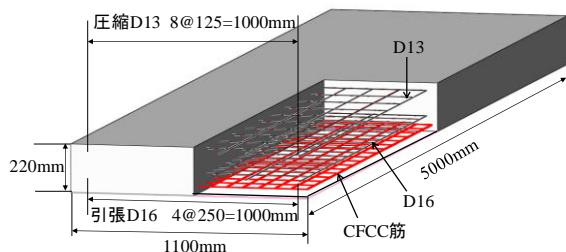


図-2 模擬試験体 (CFCC 筋あり)

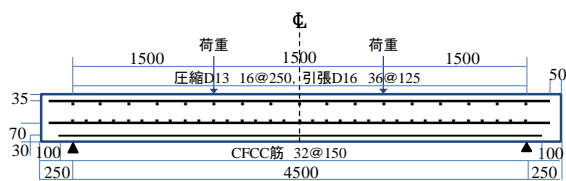


図-3 曲げ載荷試験の概要図

(2) 材料特性

表-1 に曲げ載荷試験に用いたコンクリート、鉄筋(SD345)および CFCC 筋の材料特性を示す。なお、コンクリートの材料特性は、JIS A 1132 に準じて試験体を作製後、強度試験(JIS A 1108)および静弾性係数試験(JIS A 1149)を行った結果である。

第 3 章で示す数値解析的検証に用いる材料特性は、表-1 に示した材料特性を用いている。

表-1 材料特性

	コンクリート	SD345	CFCC 筋
E(kN/mm ²)	44.5	200	167
ν	0.2	0.3	—
f'_c (N/mm ²)	77.4	—	—
f_t (N/mm ²)	2.75	431	2500
f_y (N/mm ²)	—	345	—

E:弾性係数, ν :ポアソン比, f'_c :圧縮強度, f_t :引張強度, f_y :降伏強度, コンクリートの設計基準強度は 50N/mm²

2.3 曲げ載荷試験結果および考察

図-4 に荷重-たわみ曲線を示す。また、表-2 は目視によりひび割れ発生を確認した時の荷重である。

N-1 と A-2 の値が高めになっているが、図-4 から実際の値は 35kN 程度であることが読み取れ、目視確認を見誤った可能性がある。以上より、両ケースはひび割れ発生まで同等の挙動を示しているが、ひび割れ発生後の挙動は、CFCC 筋有りの曲げ剛性が無しに比べて高く、CFCC 筋の効果を確認することができる³⁾。

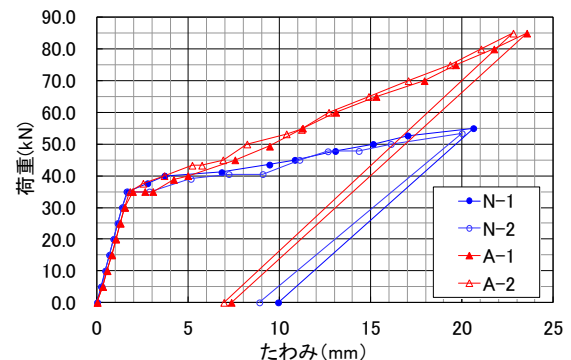


図-4 荷重-たわみ曲線

表-2 ひび割れ発生荷重

	N-1	N-2	A-1	A-2
ひび割れ発生荷重(kN)	37.6	35.0	35.0	37.6

2.4 実験のまとめ

ここでは、実験結果の概要を示す。表-3 には、CFCC 筋有り無しとの全体的な比較結果を示している。これらの中から、本論文では以下の 3 点について、次章に示す数値解析の結果と併せて評価する。

- ひび割れ発生荷重は両ケースとも同様な値であり、ひび割れ発生までは CFCC 筋のひび割れ抑制効果は小さい。
- ひび割れ発生後は、CFCC 筋有りの曲げ剛性が無しに比較して高く、CFCC 筋の効果が認められた。
- 床版下面に生じたひび割れ本数は、CFCC 筋有りの方が無しに比較し多いが、ひび割れ幅は CFCC 筋有りの方が無しより小さい。

表-3 曲げ載荷試験の結果概要

項目	CFCC無し	判定 ^{※1}	CFCC有り
ひび割れ発生荷重 (kN)	35.0 - 37.6	≒	35.0 - 37.6
鉄筋降伏荷重 (kN)	52.7 - 53.4	<	85.0
ひび割れ発生時	ひび割れ本数 (本) ^{※3}	2	2
	最大ひび割れ幅 (mm) ^{※2}	0.15 - 0.20	0.05 - 0.10
N供試体鉄筋降伏時	ひび割れ本数 (本) ^{※3}	7	9
	最大ひび割れ幅 (mm) ^{※3}	0.45	0.15
A供試体鉄筋降伏時	ひび割れ本数 (本) ^{※3}	除荷済み	15
	最大ひび割れ幅 (mm) ^{※3}	除荷済み	0.20
たわみ	ひび割れ発生時 (mm) ^{※2}	2.79 - 2.89	2.44 - 2.51
	降伏時 (mm) ^{※2}	20.08 - 20.43	22.30 - 23.30
コンクリートひずみ	異常値になる直前 (μ) ^{※2※4}	70 - 75	66 - 71
	換算応力 (N/mm ²) ^{※2}	3.25 - 3.48	3.06 - 3.29
	そのときの荷重 (kN) ^{※2}	30.0 - 35.0	30.0 - 35.0
鉄筋ひずみ ()内はCFCCひずみ	N供試体の鉄筋降伏荷重時 (μ) ^{※2}	1706 - 1765	808 - 902 (1192 - 1206)
	換算応力 (N/mm ²) ^{※2}	341 - 353	162 - 180 (199 - 201)
	そのときの荷重 (kN) ^{※2}	52.7 - 53.4	53.2 - 55.0
	A供試体の鉄筋降伏荷重時 (μ) ^{※2}	除荷済み	1533 - 1903 (1942 - 2588)
	換算応力 (N/mm ²) ^{※2}	除荷済み	307 - 381 (324 - 432)
	そのときの荷重 (kN) ^{※3}	除荷済み	85.0
応力比(CFCC/鉄筋)	ひび割れ発生前 ^{※2}		1.42 - 1.43
	ひび割れ発生後 ^{※2}		1.11 - 1.18

※1 各要因をCFCCの有り・無しと比較したとき、両者のうち優れている方に> (大なり)、差が認められない場合は≒で表記した。
 ※2 ○○ - ○○と数値を記載している場合、N1平均値-N2平均値、またはA1平均値-A2平均値を示す。
 ※3 1セル内に1個の数値を記載している場合、N1とN2またはA1とA2の数値が同じであったことを示す。
 ※4 ひび割れ発生によってコンクリートひずみがそれまでと明らかに異なる挙動を示した値を異常値と表記した。

3. 非線形有限要素解析

3.1 構成モデル

本研究では、構造解析ソフト midas-FEA⁴⁾を用いて非線形有限要素解析を行った。以下に本解析で使用した材料の構成モデルを示す。解析に必要な材料特性は表-1 に示した値を用いた。

(1) 圧縮モデル

コンクリートの圧縮モデルには図-5 に示す放物線モデルを用いた。ここで、 f_c はコンクリートの圧縮強度[N/mm²], G_{fc} はコンクリートの圧縮破壊エネルギー[N/mm], h は要素のひび割れ幅[mm]である。

(2) 引張軟化モデル

引張軟化モデルは、図-6 に示される Hordijk モデルを使用した。ここで、 f_t はコンクリートの引張強度[N/mm²], G_{ft} はコンクリートの引張破壊エネルギー[N/mm], d_{max} は粗骨材の最大寸法[mm]である。

(3) 鉄筋およびCFCC筋の弾塑性モデル

鉄筋およびCFCC筋の構成モデルには、完全弾塑性モデルを採用した。

3.2 解析モデルおよび解析条件

解析モデルを図-7 に示す。解析領域は対称性を利用し、床版の1/2モデルを用いた。コンクリートは六面体要素、鉄筋は埋め込み型鉄筋要素、CFCC筋にはトラス要素を採用した。コンクリートのひび割れモデルは回転ひび割れモデルを用いた。載荷方法は強制変位を与え、各ステップ0.01mmとした。なお、非線形の収斂計算にはニュートンラプソン法を用いている。

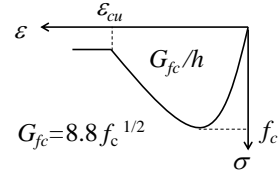


図-5 圧縮応力下の応力-ひずみ関係

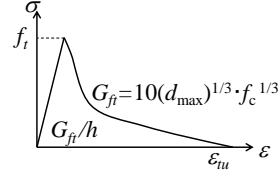


図-6 引張応力下の応力-ひずみ関係

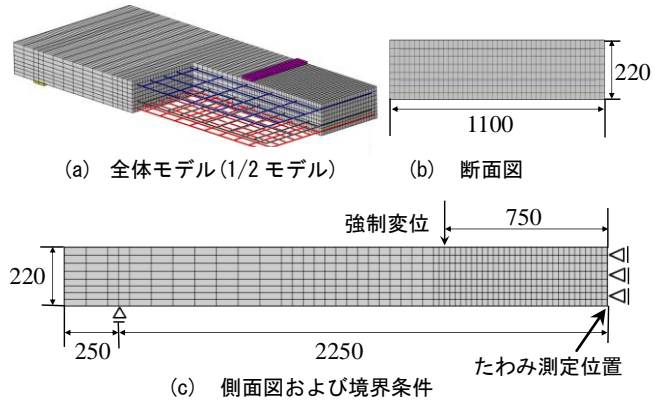


図-7 解析モデル(単位:mm)

3.3 解析結果および考察

(1) 荷重-たわみ関係

図-8 および図-9 に実験および数値解析より得られたCFCC筋無しと有りの荷重-たわみ関係をそれぞれ示す。なお、図中の番号(1,2,3,4)は、後ほど検討する際に用いる数値解析結果の荷重レベルを表している。

数値解析の結果は、弾性域で実験とわずかに異なっている。しかし、これは養生条件や寸法効果などにより、材料試験に用いた円柱試験体と模擬試験体の強度が異なっていたためだと考えられ、コンクリートのばらつき等も考慮すると弾性域は実験をほぼ再現していると考えられる。また、解析ではひび割れが生じた解析ステップ時の荷重をひび割れ発生荷重とし、図中に示している。これらの結果より、ひび割れ発生荷重は、両結果とも同程度の値であり、解析結果からもひび割れ発生荷重に対するCFCC筋の効果は確認できない。

次に、実験ではひび割れ発生荷重以降に曲げ剛性が急激に変化しているのに対し、数値解析によるひび割れ発生以降の挙動はひび割れ発生後もCFCC筋無しで46.4kN、CFCC筋有りでは47.6kN(図中荷重レベル1)までほぼ線形性状を保っている。これは数値解析にお

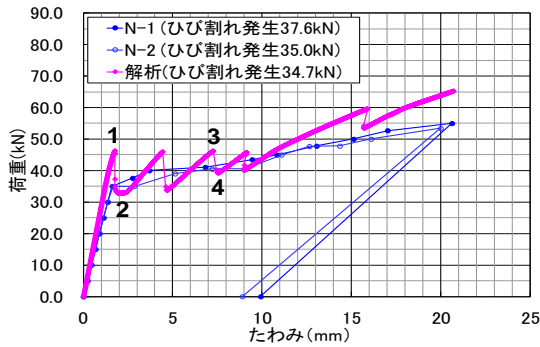


図-8 荷重－たわみ曲線(CFCC 筋無し)

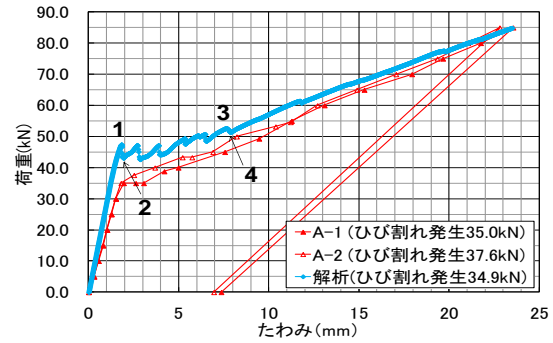


図-9 荷重－たわみ曲線(CFCC 筋有り)

いて鉄筋とコンクリートの付着を完全付着と仮定していることが原因の一つであると考えられる⁵⁾。

数値解析における荷重レベル1以降は、荷重が階段状に上下動しながら増加傾向を示しており、実験結果と異なる挙動を示している。これは、ひび割れ発生時に一時的に載荷荷重が解放されて低く出たものと考えられる。このことは、実際の載荷試験においても認められた現象であるが、実験ではデータ記録システム上の問題から再現できなかった。よって、本解析結果は実験の全体的な挙動を概ね再現していると考えられる。なお、この階段状の荷重の増加挙動については、次のひび割れ進展と併せて考察する。

(2) ひび割れ進展状況

ここでは、階段状に上下動しながら増加傾向を示した荷重－たわみ関係についてひび割れ進展状況と併せて考察する。

解析結果では両ケースとも荷重レベル1以降、階段状に上下動しながら荷重が増加している。ただし、荷重低下の割合は、CFCC 筋有りに比べて無しの場合が大きい。この結果も CFCC 筋によりひび割れ発生に伴う応力解放が抑制されたためだと考えられる。この現象について以下に詳細な検証を示す。

図-10 に CFCC 筋無し、図-11 に CFCC 筋有りのひび割れ進展図を示す。なお、図中(a)(b)のひび割れ進展図の荷重レベル1,2,3,4 は、図-8, 9 の荷重－たわみ曲線の番号1,2,3,4に対応したひび割れ図を示し、ひび割れの色はひび割れ間の伝達応力(σ_t)の値を示している。これらの図を見ても、荷重－たわみ曲線が上下動する上極点(荷重レベル1,3)でひび割れが載荷区間に分散し、下極点(荷重レベル2,4)では一部のひび割れのみが進展し、局所化されていることが分かる。

最終的なひび割れ状況は、図-10, 図-11(c)(d)に示すように CFCC 筋有りは、無しに比べて局所化されたひび割れが多く生じていることが実験および解析ともに確認できる。さらに、実験結果から CFCC 筋有りの場合は CFCC 筋無しに比較してひび割れ幅が小さいこ

とが確認されており(表-3)、これらの結果から、曲げ載荷試験時の床版下面のひび割れ発生状況は、CFCC 筋によるコンクリート応力の分散効果が示唆される。この分散効果について以下に考察する。

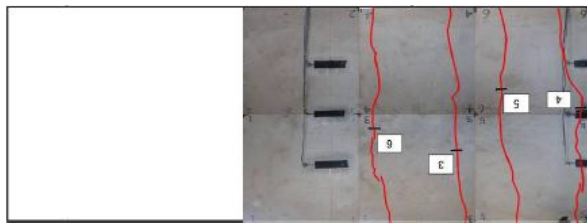
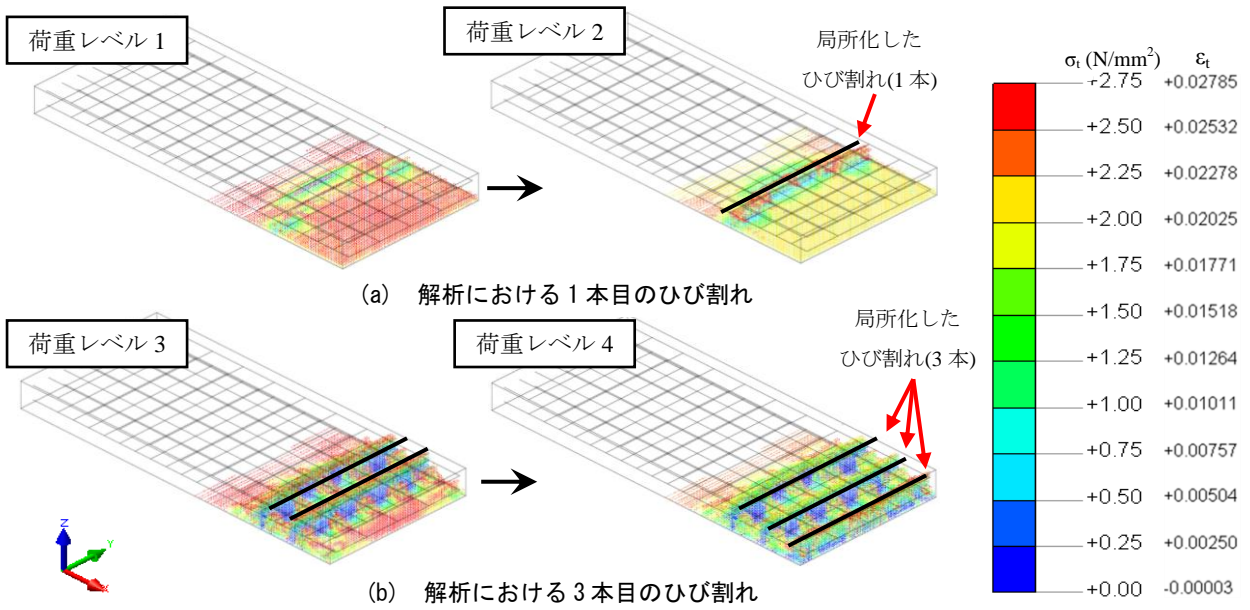
図-12 に図-8, 9 中の荷重レベル1における主鉄筋の断面力分布を示す。これらの図は図-10 および図-11にあるように微細ひび割れが床版下面に多数発生した後、ひび割れが局所化する際に引張側の主鉄筋が受け持つ力を表している。これらの図より、CFCC 筋無しでは、局所的に大きな断面力が生じている箇所があるのに対し、CFCC 筋有りでは断面力が平滑的に分散し、値も小さいことが分かる。このことから CFCC 筋を格子状に配筋することによりコンクリートの応力が分散され、ひび割れ発生が広く分布したと考察できる。なお、ひび割れ幅についても実験と同様、CFCC 筋有りが無しに比べ小さいことを床版全体の変形より確認している。

(3) 鉄筋の荷重－ひずみ関係

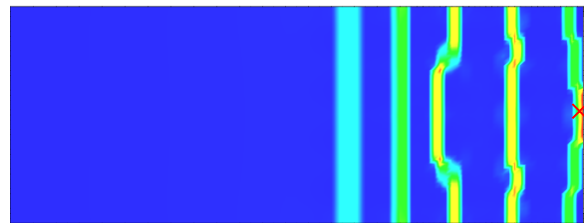
ここでは、CFCC 筋無しと有りのひび割れ発生位置における主鉄筋の荷重－ひずみ関係について考察する。図-13 に図-10, 図-11(d)の×印を示したひび割れ発生位置における主鉄筋の荷重－ひずみ関係を示す。また、図中の N-1, N-2, A-1, A-2 は実験における床版中央の断面中心位置における主鉄筋の実測ひずみに基づく荷重－ひずみ関係である。

この図より、実験では鉄筋ひずみが 600μ 程度までは CFCC 筋無し、有りともにほぼ同じ挙動を示しているが、その後は CFCC 筋有りの場合で床版の曲げ剛性が高くなっており、CFCC 筋の主鉄筋への補助効果が確認できる。一方解析では、弾性領域において実験結果とほぼ同じ挙動を示しているが、ひび割れ発生以降、実験結果と異なる挙動を示している。これは解析において鉄筋とコンクリートを完全付着と仮定していることが一因と考えられ、今後検討が必要である。

解析結果において、両者を比較すると、CFCC 筋無しでは鉄筋ひずみが約 50μ から約 700μ に急激に増加

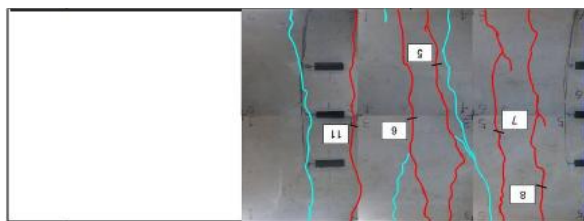
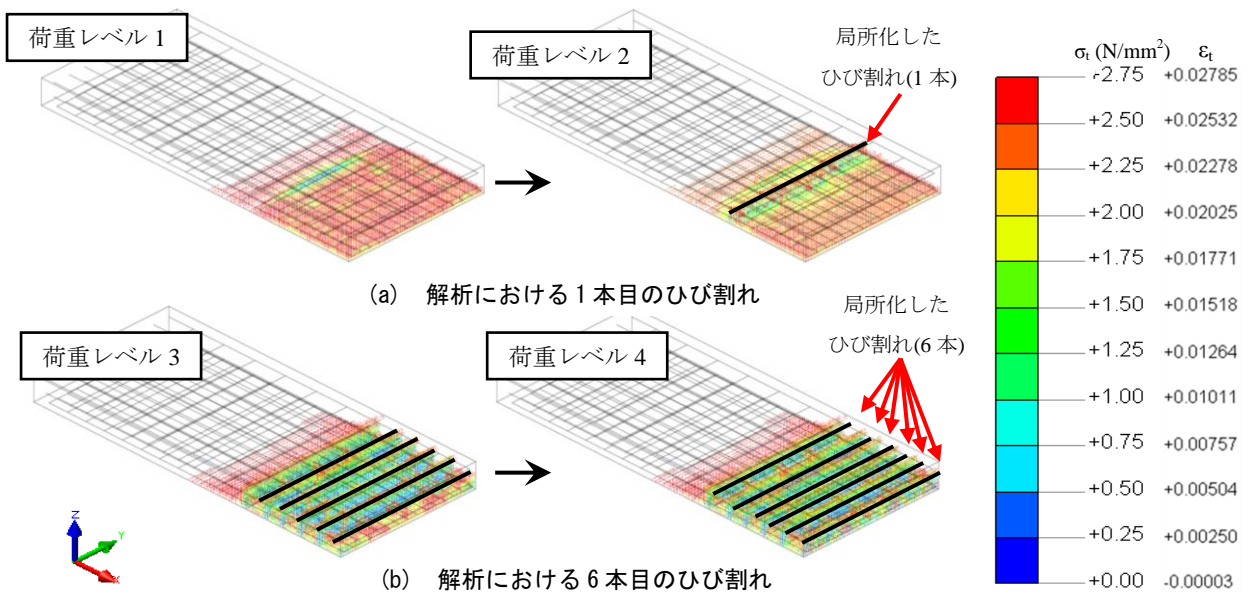


(c) 実験ひび割れ (CFCC 筋無し : 最終)

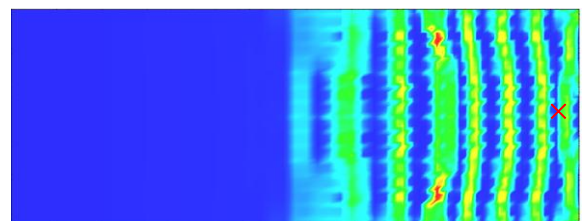


(d) 解析ひび割れ (CFCC 筋無し : 最終)

図-10 CFCC 筋無しのひび割れ比較 (解析 : 最大主ひずみ (ϵ_1) 図)



(c) 実験ひび割れ (CFCC 筋有り : 最終)



(d) 解析ひび割れ (CFCC 筋有り : 最終)

図-11 CFCC 筋有りのひび割れ比較 (解析 : 最大主ひずみ (ϵ_1) 図)

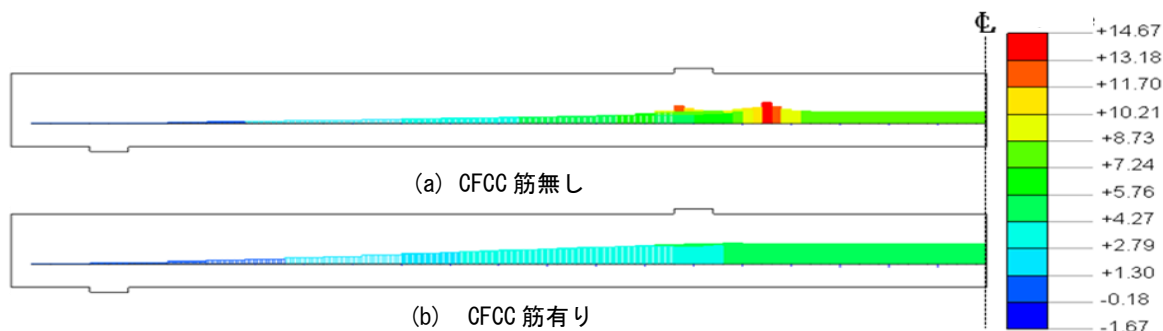


図-12 荷重レベル1における主鉄筋の断面力分布(N/mm²)

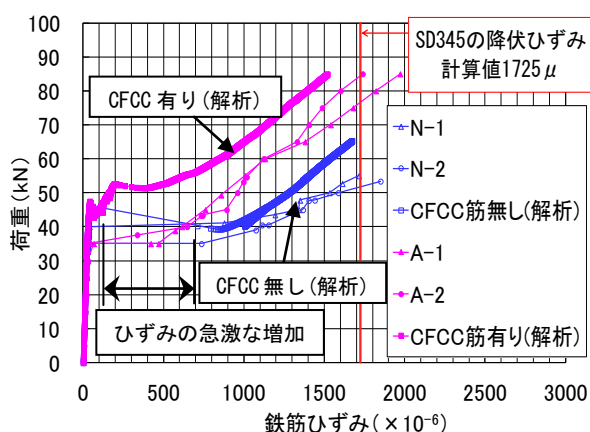


図-13 鉄筋の荷重-ひずみ関係

しているのに対して、CFCC筋有りではCFCC筋の効果によりひずみの急激な増加が抑制されていることが分かる。この現象は、実験結果においても確認できる。

4. まとめ

本研究は、PC箱桁下床版のひび割れ抑制に使用されたCFCC筋のひび割れ抑制効果について、曲げ載荷試験および数値解析的アプローチより検証した。得られた知見と今後の課題を以下に示す。

- (1) 曲げ載荷試験および非線形有限要素法の結果より、ひび割れ発生荷重に対するCFCC筋のひび割れ抑制効果は小さいことを確認した。
- (2) ひび割れ発生以降の挙動をみるとCFCC筋無しに比較し、有りの曲げ剛性が高く、CFCC筋の効果を実験および数値解析により確認できた。
- (3) 床板下面のひび割れ発生本数は、CFCC筋有りが無しに比較して多いが、ひび割れ幅はCFCC筋有りの方が小さい。これは、CFCC筋をかぶりコンクリートに格子状に配筋することで、応力が分散された効果であることが数値解析結果より明らかとなった。
- (4) CFCC筋無しでは、ひび割れ発生直後に主鉄筋のひずみが急激に増加しているのに対し、CFCC筋

有りではひずみの増加が抑えられていたことから、CFCC筋の主鉄筋への補助効果が確認できた。

- (5) 塩害対策でかぶり厚が7cm以上にもなるPC箱桁の場合、かぶりコンクリートが無筋に近い構造体となり、ひび割れが生じやすくなっていると考えられる。今回の結果より、CFCC筋をかぶりコンクリートに配筋することは、コンクリートに生じる応力が分散され、ひび割れを抑制できる可能性があると考えられる。このことについては、今後、鉄筋のすべりモデルを考慮するなど、解析方法を高度化し、さらにPC箱桁の解析モデルを用い、実荷重環境に近い荷重条件のもとCFCC筋のひび割れ抑制効果の検証に取り組む予定である。

謝辞：本研究は、(独)土木研究所、沖縄県および(財)沖縄県建設技術センターの三者の協力協定に基づく「沖縄県離島架橋100年耐久性検証プロジェクト」の一環として実施した。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 平安山良和：プレストレストコンクリート箱桁のひび割れ制御および塩分浸透制御に関する研究，九州大学博士論文，2011.5
- 2) 沖縄県宮古土木事務所，財団法人沖縄県建設技術センター：下床版ひずみ測定の結果報告書「伊良部大橋第5期コンクリート耐久性検討業務委託報告書」，2010.3
- 3) 沖縄県宮古土木事務所，財団法人沖縄県建設技術センター：下床版モデル載荷試験の結果報告書「伊良部大橋第7期コンクリート耐久性検討業務委託報告書」，2012.3
- 4) midas-FEA Analysis Manual (理論マニュアル)
- 5) コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究会委員会：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用，コンクリート工学協会，pp.181-182，2003.8