

# 論文 高靱性繊維補強セメント複合材料 (DFRCC) による栈橋梁部への増厚曲げ補強効果に関する基礎的研究

小笠原 哲也\*1・猪木 勇至\*2・角掛 久雄\*3・大内 一\*4

**要旨:** 高靱性繊維補強セメント複合材料(DFRCC)は、引張応力を負担でき、かつ遮塩性が高い材料であり、栈橋の補修、改修工事に伴う耐震補強用材料として適用できる可能性がある。そこで、ディープビームに分類される標準的な栈橋の梁を対象とし、1/5の梁供試体に対して、DFRCCの曲げ補強効果を検討した。補修・補強法としては、下面増厚、塩害補修、コの字型巻立て、下面増厚にFRPグリッド併用の4種を用意し、増厚量も実験変数とした。一連の実験を実施した後、断面分割法を使用した最大荷重の算定値と実験値を比較し、実験値を評価した。

**キーワード:** 栈橋, 高靱性繊維補強セメント複合材料, 曲げ補強

## 1. はじめに

主要な港湾施設のひとつである栈橋は、港湾内の耐震施設として防災拠点になることもある重要な施設である。その栈橋の設計基準である「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>1)</sup>が、2007年に改訂されたことにより地震荷重の算定方法が変わり、旧基準<sup>2)</sup>より設計地震力が大きくなる場合がある。一方で、海面付近に位置する栈橋の上部工では塩害による劣化が生じやすい上に、現在膨大な量の港湾施設が高齢化しており、補修を行って延命化する必要性が増している。他に増深化等による栈橋の補強や改修を行う事例も増えている。

これらの補修・改修工事に伴って、新基準に則り耐震性能を確保するよう耐震補強を行う機会が増大すると考えられ、上部梁部材では必要強度を確保するために、曲げ補強が重要となる。

このような背景のもと、高靱性繊維補強セメント複合材料(以下 DFRCC)を補修・補強用材料として適用できる可能性がある。DFRCCは短繊維の架橋効果により微細な複数ひび割れに分散する特性から遮塩性に優れ、かつ引張力負担を期待できる材料である。また DFRCCに包含され、疑似ひずみ硬化も有する複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)と比較して、安価である。一方で、これらの材料で補強した場合の効果については未だ研究事例は少ない。

そこで栈橋の梁を対象とし、DFRCCにより増厚曲げ補強した実験を行い、曲げ補強効果を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 モデル供試体と実験変数

本研究では、旧基準でつくられた栈橋に対して補修・補強を行うことを想定し、旧基準に準拠した「港湾構造物設計事例集」<sup>3)</sup>における直杭式横栈橋をモデル栈橋とした。この栈橋は一般的な梁スラブ構造である。梁は杭間スパン長 5.4m、梁高 2.1m、幅 1m の寸法を有する。これは概ね栈橋の標準的な構造であり、せん断スパン比(せん断スパン長/有効高さ)は 1.43 である。

図-1に示すように、この梁の縮尺 1/5 モデルを供試体と設定した。供試体一覧を表-1に示す。補強すなわ

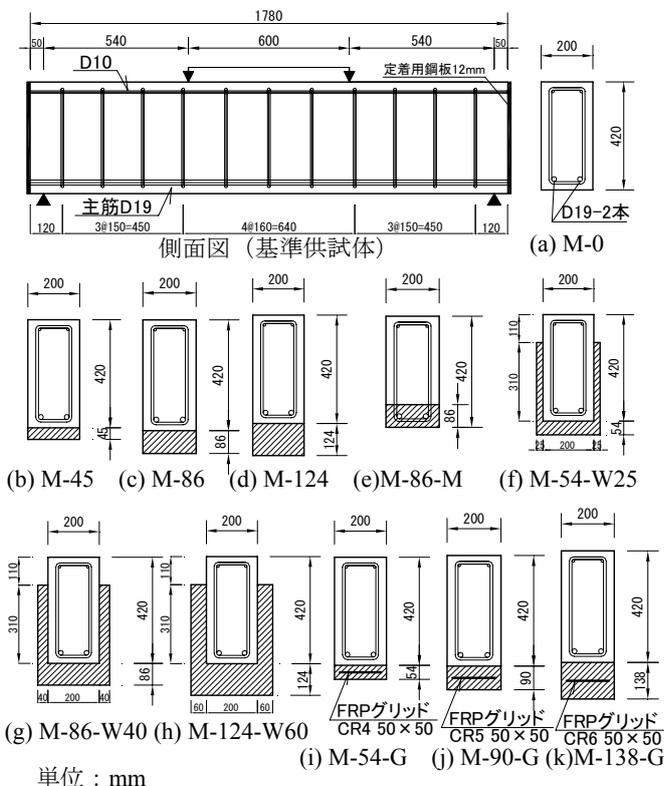


図-1 供試体

\*1 五洋建設(株) 技術研究所 課長 (正会員)  
 \*2 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 (正会員)  
 \*3 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻助教 博(工) (正会員)  
 \*4 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻教授 博(工) (正会員)

表-1 供試体一覧表

種類	供試体名	材齢 (日)	DFRCC 下面厚 (mm)	DFRCC ウェブ補強厚 (mm)	グリッド仕様	想定曲げ補強効果 (%)
無補強	M-0	—	0	—	—	—
下面増厚	M-45	16	45	—	—	10
	M-86	21	86	—	—	20
	M-124	23	124	—	—	30
塩害補修	M-86-M	24	86 (置換補修)	—	—	—
コの字型巻立て	M-54-W25	13	54	25	—	27
	M-86-W40	20	86	40	—	47
	M-124-W60	22	124	60	—	76
FRP グリッド補強	M-54-G	34	54	—	CR4 <sup>*)</sup>	27
	M-90-G	36	90	—	CR5 <sup>*)</sup>	47
	M-138-G	37	138	—	CR6 <sup>*)</sup>	76

\*)グリッド仕様については、表-9 に詳述

ち DFRCC の形状として、①下面増厚、②コの字型巻立て、③下面増厚した DFRCC 内に FRP グリッドを配置したものを(以下 FRP グリッド補強と称す)の 3 種類を用意した。梁の曲げ補強として、最も一般的と考えられる下面増厚を第 1 のシリーズとし、DFRCC の補強厚を 3 種類とし、表-1 のようにした。補強厚は、既往文献<sup>4)</sup>の簡易的な補強耐力算定式より仮定した曲げ強度から、無補強供試体に対しておよそ 10%、20%、および 30%程度の曲げ補強効果を期待した補強厚とした。供試体名称は、M-XX とし、XX にそれぞれの補強厚を示した。

一般的な下面増厚に対してウェブ側面も補強したコの字型巻立て補強を第 2 のシリーズとした。ウェブ側面を補強することにより、下面増厚した DFRCC と一体となって機能して局所破壊を抑制し、下面 DFRCC の引張靱性をより発揮させることを期待したものである。ウェブの補強高さについては、栈橋梁の上部側面にはスラブがあることから梁側面のすべてを補強することはできないため、実構造物のハンチ下に該当する高さ(梁高 420mm のうち 310mm)までとした。梁下面の増厚厚さは下面増厚供試体と同程度とし、ウェブ厚については下面増厚厚さの 1/2 程度として、供試体名称 M-XX に添えた WXX の XX に補強厚を示した。表-1 に示す想定曲げ補強効果とは、下面増厚の供試体と同様に簡易的な補強耐力算定式より算定したものである。

また、FRP グリッド補強とは、下面増厚した DFRCC の局所破壊を抑制し、引張靱性をより発揮させることを期待して、DFRCC 内に FRP グリッドを配置して補強したものであり第 3 のシリーズとした。下面増厚の厚さを他供試体と同程度とし、簡易的な補強耐力算定式より得られる想定曲げ補強効果をコの字型巻立てと合わせる様に FRP グリッドを選定した。なお、想定曲げ補強効果算定時の FRP グリッドの引張強度は、DFRCC が局所破壊するひずみを 10000 $\mu$  と仮定してグリッドの弾性係数から 1000N/mm<sup>2</sup>とした。DFRCC 内にグリッドを配置し

た供試体の名称は、名称の末尾に G を添付した。

他に塩害等により母材コンクリートをはつり、DFRCC による補修を行う場合を想定して、供試体を作製した。供試体名称を M-86-M とした。

2.2 材料

無補強、下面増厚および塩害補修の 5 供試体について先行して供試体を作製し載荷実験を行い、その後同仕様の材料によりコの字型巻立ておよび FRP グリッド補強の 6 供試体を作製して載荷実験を行った。2 段階で実験を行っているため、後述の表-3、表-4、表-8 では材料試験結果を 2 種類示す。両者の結果に大きな差はない。

(1) コンクリート

旧基準での設計基準強度は、24N/mm<sup>2</sup>であることから、載荷実験時の梁供試体強度が 24N/mm<sup>2</sup>程度となるように呼び強度を 18N/mm<sup>2</sup>とした。縮小モデルを想定したため粗骨材最大寸法は 15mm とした。コンクリートの配合を表-2 に示し、材料試験結果を表-3 に示す。

(2) 鉄筋

図-1 に示すように主筋には、鉄筋 SD345 の D19 を 2 本使用し、圧縮鉄筋およびせん断補強筋には、それぞれ鉄筋 SD345 の D10 と D13 を使用した。表-4 に鉄筋の材料試験結果を示す。

(3) DFRCC

DFRCC の使用材料、PVA 繊維の材料特性、および DFRCC の配合は既往文献<sup>5)</sup>を参考に設定した。DFRCC の材料試験結果を表-5~表-8 に示す。

表-2 コンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	早強セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
15	12	64	4.5	50.1	182	284	876	910	0.71

表-3 コンクリートの材料試験結果

スランプ (cm)	空気量 (%)	材齢 (日)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
13.5	5.3	27	—	27.3	25.0	0.18
		41	2.30	—	—	—
		70	2.68	28.8	26.3	0.20
11.5	4.7	29	2.39	26.9	26.4	0.20
		36	2.73	28.0	27.5	0.21
		62	2.34	32.2	26.1	0.20

上段：無補強、下面増厚、塩害 下段：コの字、FRP グリッド

表-4 鉄筋の材料試験結果

鉄筋仕様	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ ( $\mu$ )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D10	363	187	1941	579
D13	369	191	1932	537
D19	377	194	1943	564
D10	355	196	1811	527
D13	383	199	1925	603
D19	385	202	1906	571

上段：無補強、下面増厚、塩害 下段：コの字、FRP グリッド

表-5 DFRCC 使用材料

材料種類	名称	記号
セメント	早強ポルトランドセメント	C
混和材	フライアッシュⅡ種	FA
細骨材	珪砂7号	S
短繊維	ポリビニルアルコール繊維	PVA
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系	SP
増粘剤	セルロース系	VA

表-6 PVA 繊維の材料特性

繊維名称	直径 (μm)	長さ (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸度 (%)	弾性係数 (GPa)
PVA	40	12	1.3	1600	6	40

表-7 DFRCC 配合

水結合材比 W/(C+FA) (%)	繊維混入率 (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			水 W	早強セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	繊維 PVA	高性能 AE 減水剤 SP	増粘剤 VA
45	2	50	458	815	204	407	26	10	0.4

表-8 DFRCC 材料試験結果

スランブフロー(mm)	空気量(%)	材齢(日)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
684	0.8	8	—	43.4	17.0	0.26
		15	2.43	—	—	—
		49	—	55.7	17.7	0.24
		54	2.91	—	—	—
665	0.6	9	2.50	—	—	—
		10	—	41.3	14.6	0.22
		17	—	48.2	15.9	0.23
		43	2.71	—	—	—
		44	—	56.5	16.9	0.23

上段：無補強，下面増厚，塩害 下段：コの字，FRP グリッド

表-9 FRP グリッドの材料試験結果

FRP グリッド仕様	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
CR4	6.6	1596	102.3
CR5	13.2	1598	101.4
CR6	17.5	1769	104.2

#### (4) FRP グリッド

FRP グリッドには、高強度炭素繊維に該当する CR4, CR5 および CR6 を使い、格子間隔を 50mm×50mm とした。FRP グリッド 4 本を軸方向に配置することになる(図-2 の B-B 平面図参照)。端部定着を設けず、梁軸直角方向に配置されるグリッドを定着として機能させた。表-9 に FRP グリッドの材料試験結果を示す。

#### 2.3 供試体作製方法

##### (1) 供試体作製手順

供試体作製手順として、まず母材コンクリートを打設し打継目処理を行った後、DFRCC の型枠を組み立て、オムニキサで練り混ぜた DFRCC を下面増厚側を頂面として打設した。締固めには内部振動機と型枠パイプレータを併用した。コンクリートおよび DFRCC 打設後、それぞれ 3 日間供試体をビニール等により覆い、封かん養生とし、その後は気中養生とした。FRP グリッドは、母材コンクリート打設後アンカーボルトにより下面増厚の中央高さに固定してから DFRCC を打設した。

##### (2) 打継目処理方法

実構造物では、既設コンクリートのはつりや表面処理

により表面に凹凸をつけた後、DFRCC を打設して一体性を確保すると想定され、本研究では DFRCC が接する箇所の打継目処理を行った。型枠に接する側面では、凝結遅延性の樹脂を塗布したシートを型枠内面に貼り付けた。上面ではコンクリート打設後、凝結遅延性の打継目処理剤を散布した。打設 2 日後に脱型し、高压水 (圧力約 3N/mm<sup>2</sup>) により上面、側面の打継目を洗い出し、粗骨材を露出させた。打継目処理の一例を写真-1 に示す。



写真-1 打継目処理の一例

#### 2.4 荷重方法および計測方法

両端を単純支持した 4 点荷重により実験を行った (図-1 参照)。1000kN 級アムスラー型万能試験機を用い、供試体の降伏までは荷重制御により荷重し、降伏後は変位制御により荷重した。計測は、試験機荷重 1 点、変位計片側 5 点×2、主鉄筋ひずみゲージ片側 3 点×2、スパン中央 DFRCC の引張縁に π 型変位計 3 点の計 20 点で行った。FRP グリッドを配置した供試体では、グリッドの格子中央の位置においてグリッド軸方向にひずみゲージ 6 点を設置して計測した。図-2 に計測概要図を示す。

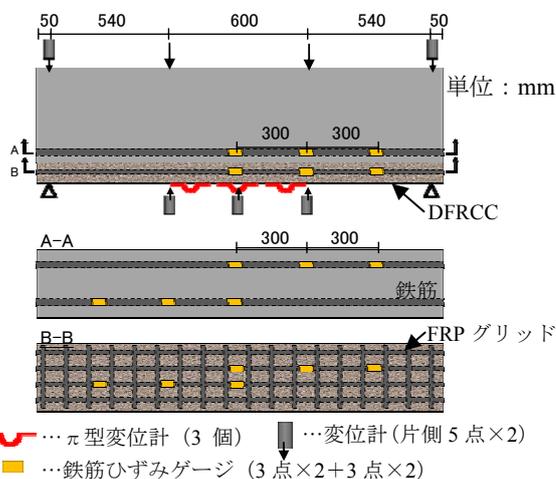


図-2 計測概要図 (FRP グリッド供試体)

#### 3. 実験結果

##### 3.1 破壊性状

荷重終了時の破壊性状を写真-2 に示す。なお、ここでは無補強の M-0、下面増厚から M-86、塩害補修の M-86-M、コの字型巻立てから M-86-W40 および FRP グリッド補強から M-90-G の 5 体を例示している。

すべての供試体において、曲げひび割れのみならず、斜めひび割れが発生したものの、純曲げ区間付近に数本のひび割れが発生し、FRP グリッド補強以外では、供試

体上縁に生じた圧縮破壊により最終的に曲げ破壊に至った。FRP グリッド補強では、FRP グリッドの破断により破壊に至った。各供試体の下縁部において、DFRCC による複数微細ひび割れを確認できた。特に FRP グリッド補強では、写真-3(b)の M-138-G に示すように他供試体と比較して複数微細ひび割れが数多く見られた。

また M-86-M においては、M-0 とほぼ同様の破壊性状を示したが、下面増厚では、M-86 の写真に示すように変形が進むにつれ、純曲げ区間の中央下面部でひび割れが局所化した。その後、コンクリートと DFRCC の打継面の上側でせん断ひび割れとは逆行する形で斜めひび割れが生じ、界面付近の破壊に至った。本来 DFRCC はひび割れが分散するが、曲げの引張側補強の場合、DFRCC の下縁部と上縁部で引張応力が異なり不均一であることや、下縁部ではひび割れが開口しやすいことから、早期にひび割れの局所化が生じたと考えられる。

### 3.2 下面増厚補強における荷重-変位関係

図-3 に下面増厚における荷重と梁中央変位の関係を示す。図より M-86-M を除く下面増厚では、補強厚が大きくなるにつれ、無補強の M-0 に比して、一次剛性と二次剛性の変化点（○印付近）および最大荷重が大きくなった。最大荷重後は荷重が低下し、無補強である M-0 の挙動に漸近し、変位 7mm 程度以降は供試体による差異はほとんど見られなかった。写真-2(b)の M-86 の破壊性状で示したように、純曲げ区間に生じた曲げひび割れが局所化することにより荷重低下が生じた。その後は DFRCC の補強効果がほとんどないため、差異があまり生じなかったと考えられる。

ただし、塩害補修を模した M-86-M では図-1 に示すように他の供試体と異なり DFRCC が引張鉄筋と一体となっているために、部材降伏後も緩やかに荷重増加し、緩やかに荷重低下するといった DFRCC による影響が若干確認できた。なお、本論文での最大荷重とは、DFRCC が局所破壊する前の最大荷重と定義する。

### 3.3 コの字型巻立て補強における荷重-変位関係

図-4 にコの字型巻立てにおける荷重と梁中央変位との関係を示す。図よりコの字型巻立て補強においても、補強厚が大きくなるにつれ、一次剛性と二次剛性の変化点が大きく、最大荷重も大きくなる傾向が前項 3.2 と同様に認められた。また最大荷重後は下面増厚と同様に荷重が低下した。このことよりウェブ側面を補強することによって当初期待した DFRCC のひび割れ局所化抑制効果は十分発揮できなかった。荷重低下後は供試体による荷重の差異が少なくなるが、無補強である M-0 よりやや耐力が大きい状態で推移した。これは、ウェブ側面に巻き立てた DFRCC により曲げ補強効果が得られているためと考えられる。

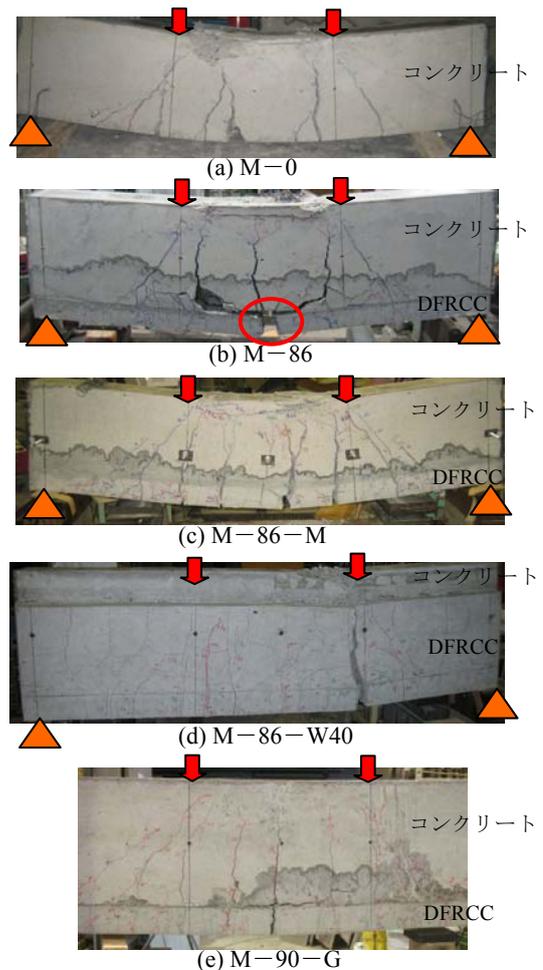


写真-2 破壊性状の一例

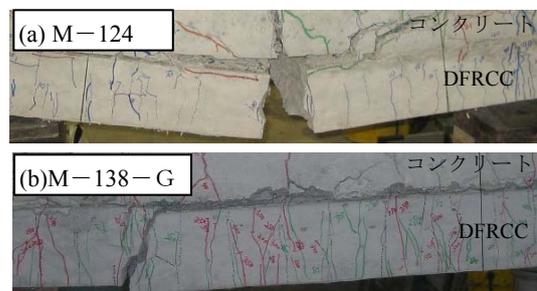


写真-3 複数微細ひび割れ性状の一例

### 3.4 FRP グリッド補強における荷重-変位関係

図-5 に FRP グリッド補強における荷重と梁中央変位との関係を示す。図中の×は FRP グリッド破断時を示す。M-54-G から M-90-G、次に M-138-G となるにつれて、下面増厚厚さおよび FRP グリッド断面積がともに大きくなるが、図よりそれらの補強量が大きくなるにつれ、部材降伏荷重および最大荷重が大きくなるのがわかる。下面増厚やコの字型巻立てと比較して、荷重の低下が生じておらず、部材降伏後も緩やかに荷重が増加した。FRP グリッドによって DFRCC の局所破壊が抑制されたことによる差異と考えられる。なお FRP グリッドで補強した 3 供試体とも FRP グリッドが破断すると急激に荷重低下して脆性的に破壊した。

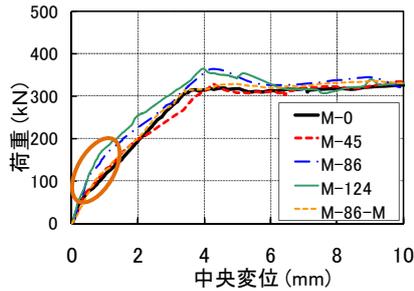


図-3 荷重-変位関係(下面増厚)

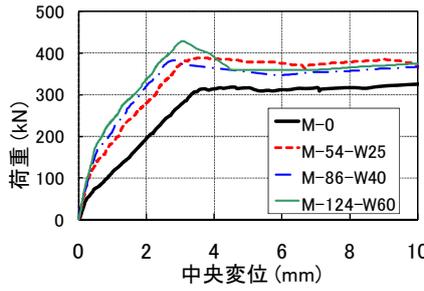


図-4 荷重-変位関係(コの字型巻立て)

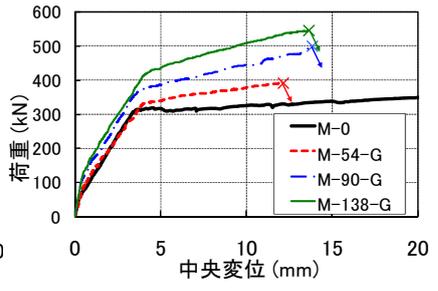


図-5 荷重-変位関係(FRPグリッド補強)

### 3.5 DFRCC 下縁部のひび割れ幅測定結果

コの字型巻立ておよび FRP グリッド補強において  $\pi$  型変位計にて測定した DFRCC 下縁のひび割れ幅と荷重の関係を図-6 に示す。コの字型巻立ての M-54-W25 では、ある荷重でひび割れ幅が急激に大きくなっており、局所破壊が生じたものと考えられる。一方、FRP グリッド補強の場合、3 供試体ともにひび割れ幅の増大傾向が緩やかであり、FRP グリッドを併用することで DFRCC のひび割れ局所化を抑制する効果があると考えられる。

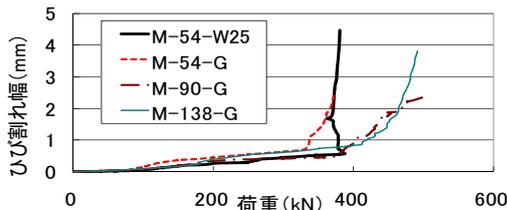


図-6 DFRCC 下縁ひび割れ幅-荷重関係

## 4. 曲げ耐力の算定値と実験値の比較による評価

### 4.1 概要

曲げ耐力の算定は、断面分割法によって行った。算定時の各材料定数は表-3, 4, 8, 9 の材料試験の値を用い、コンクリートの応力ひずみ関係は、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に準拠し、鉄筋は完全弾塑性のバイリニアモデルとした。FRP グリッドは、弾性体として線形モデルとした。DFRCC については次項 4.2 で詳述する。

### 4.2 DFRCC 引張特性のモデル化

DFRCC の引張特性は、一軸引張試験より得られた応力-ひずみ関係に基づいてモデル化した。一軸引張試験結果のバラツキを平均化するため、本論文と同一配合にて作製した既往文献<sup>5),7),8)</sup>の一軸引張試験結果を含めて試験結果数を 12 個とした。各試験結果の引張降伏強度、引張降伏ひずみ、局所破壊により DFRCC が応力低下し始めるひずみ、および終局引張ひずみをそれぞれ求めたあと、平均して標準の引張特性をモデル化したものが図-7 のモデル 1 である。

一方で、参考文献<sup>9)</sup>では、DFRCC の材料試験結果を直接モデル化したもの(モデル 1) 以外に、終局引張ひずみをモデル 1 の 1/2 にしたもの、および応力度をモデル 1 の 1/2 にしたものを使用して曲げ耐力算定をしている。

その結果によると応力度を 1/2 にしたモデルの適合性がよいと報告があり、引張特性評価には検討の余地がある。

そこで本研究では、12 個の試験結果のなかで最小終局ひずみが、モデル 1 の終局ひずみの約 1/3 であったため、応力低下し始めるひずみと終局ひずみをモデル 1 の 1/3 としたものをモデル 2、モデル 1 の応力度を 1/2 にしたものをモデル 3 として耐力評価を行った。DFRCC のモデル曲線を図-7 に示す。

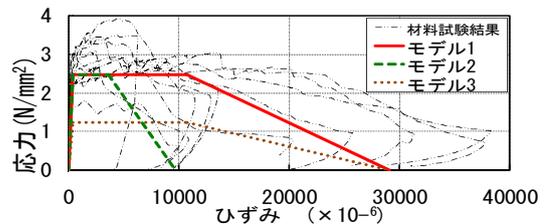


図-7 DFRCC の引張特性モデル曲線

## 4.3 曲げ耐力の算定値と実験値の比較

### (1) 荷重-変位関係の比較

実験で得られた荷重-変位関係と、断面分割法で得られた M- $\phi$  関係を荷重-変位関係に変換して比較する。代表的なものとして M-86, M-86-W40 および M-90-G を図-8 に例示する。剛性の相違はあるが、いずれの供試体においても耐力の指標となり得る部材降伏荷重に関してはモデル 1 および 2 の算定値と実験値が概ね一致した。下面増厚の M-86 およびコの字型巻立ての M-86-W40 の実験値は、最大荷重到達後、低下しており、材料試験結果よりも早期に DFRCC が局所破壊するモデル 2 による算定結果と概ね一致した。破壊性状や荷重-変位曲線においても、下面増厚およびコの字型巻立てにおいて、DFRCC が早めに局所破壊した兆候を示しており、本算定結果によっても裏付けられた。

一方で、FRP グリッド補強の M-90-G の実験値は、部材降伏後も緩やかに荷重増加しており、材料試験結果を直接モデル化したモデル 1 による算定値と概ね一致した。写真-3(b) に示すように、FRP グリッド補強と DFRCC 補強を併用すると、他と比較して複数微細ひび割れが多く生じており、FRP グリッドと併用することにより DFRCC の早い局所破壊を抑制し、DFRCC は一軸引張試験と同等の性能を発揮したのと考えられる。

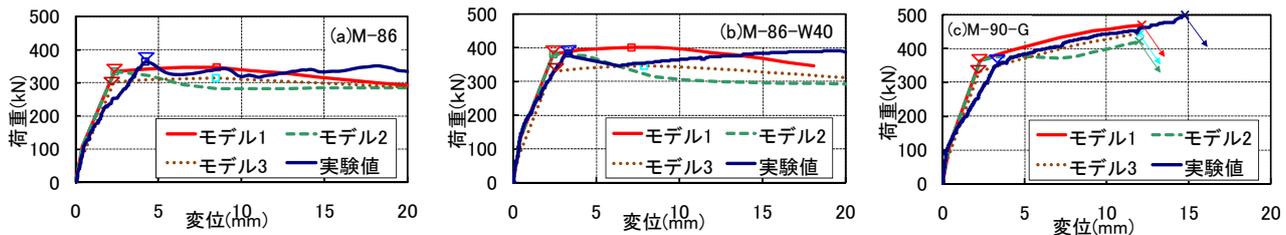


図-8 曲げ耐力の算定値と実験値の比較一例

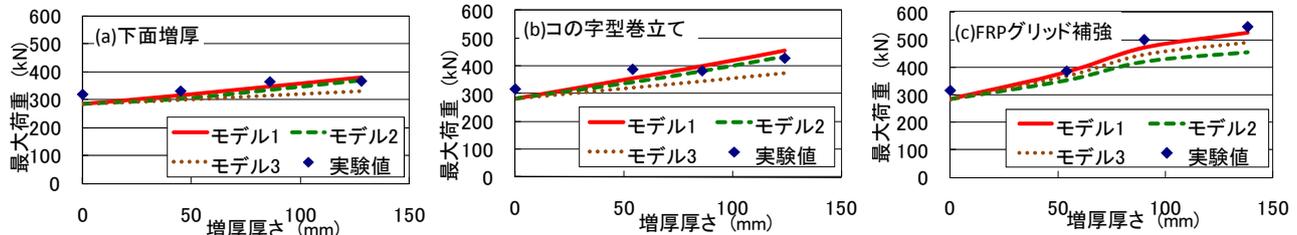


図-9 最大荷重算定値と実験値の比較

## (2) 最大荷重の算定値と実験値の比較

断面分割法による最大荷重の算定値と実験値を比較したものを図-9に示す。下面増厚およびコの字型巻立てにおける最大荷重の実験値は、モデル2による各算定値とほぼ一致しており、DFRCCの一軸引張試験結果に対して終局ひずみを低減してモデル化した引張特性により最大荷重を算定することで、概ね実験結果を評価できると言える。FRPグリッド補強の実験値は、モデル1による各算定値を上回っており、DFRCCの一軸引張試験結果を忠実にモデル化した引張特性により最大荷重を算定することで、概ね安全側に実験結果を表現できると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、栈橋梁部材を対象としてDFRCCによる増厚の曲げ補強効果を検証した。加えてDFRCCの応力-ひずみ関係から断面分割法により曲げ載荷時の最大荷重を算定し、計算値と実験値との比較および補強効果を検討した。得られた結果を以下に要約する。

- (1)DFRCCを下面増厚およびコの字型巻立てで補強した場合、無補強に対して補強効果が得られたが、DFRCCの早期の局所破壊により想定した補強効果を得られなかった。
- (2)FRPグリッドとDFRCCを併用して補強することにより、DFRCCの早期局所破壊を抑制し、ほぼ想定した補強効果を得ることができた。
- (3)DFRCCの一軸引張試験結果から引張特性を設定するときに、下面増厚およびコの字型巻立ての場合、終局ひずみを1/3に低減したモデルにて最大荷重を算定することで、またFRPグリッド補強の場合は、DFRCCの一軸引張試験結果を忠実にモデル化して最大荷重を算定することで、両者とも概ね安全側に実験結果を表現できることが認められた。

本研究のとりまとめ、および実験の遂行にあたっては、金春日君（現大阪市立大学大学院）、藤倉輝季君（現大阪市立大）に多大なるご協力をいただいた。紙面を借りて、ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，2007.7
- 2) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，1999.4
- 3) （財）沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集，1999.4
- 4) 土木学会：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），コンクリートライブラリー127，2007.3
- 5) 谷口 勝基，斎藤 尚，角掛 久雄，大内 一：高靱性モルタルのせん断補強への適用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No3，pp.1471-1476，2008.7
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2007.12
- 7) 猪木 勇至，金 春日，小笠原 哲也，角掛 久雄，大内 一：DFRCCによる梁の曲げ補強実験，土木学会第65回年次学術講演会，V-533，pp.1065-1066，2010.9
- 8) 小笠原 哲也，金 春日，角掛 久雄，大内 一：高靱性繊維補強セメント複合材料（DFRCC）による栈橋梁部へのせん断補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No2，pp.1381-1386，2008.7
- 9) （社）日本コンクリート工学協会：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pp.56-59，2002.1