

繊維補強モルタルによる港湾構造物を対象とした曲げ補強効果に関する研究

Study on Flexural Strengthening Effect on RC Beams for Port Structure by Fiber Reinforced Cementitious Composite

構造及びコンクリート工学分野 畝 宏樹

Abstract

DFRCC による港湾構造物への適用を目的とし、本研究室では検討を行ってきた。曲げ補強では DFRCC と他の部材を併用することで材料特性が発揮されるといった結果が示されている。しかし、DFRCC と組むに適した補強材を解明するには至っておらず、更に DFRCC の引張構成則が確立されておらず曲げ補強効果を評価できていない。従って、本研究では DFRCC と他の補強材を併用した曲げ補強実験、および材料実験を行い、DFRCC の曲げ特性の評価を行った。

We have been studying in order to apply to the Coastal structure DFRCC in this laboratory. Results effect of DFRCC that is exerted by combining the other reinforcement is shown in flexural strengthening. However, it is not reached to clarify the reinforcement suitable for partnering with DFRCC, Furthermore, tension constitutive law model is not clear, it is not possible to assess the flexural strengthening effect. Therefore, by performing a material experiment and the experiment flexural strengthening test combined DFRCC and other reinforcement, We have evaluated the flexural property of DFRCC.

1. はじめに

港湾施設的设计基準である「港湾の施設の技能上の基準・同解説(日本港湾協会)」¹⁾の改訂により既設栈橋では要求される耐震性能を満足できない為補強の必要があることに加え、海面付近に位置する栈橋は塩害劣化が生じやすく、補修による延命化が迫られている。しかし、既存の補強方法では耐久性や上部工重量の増大といった問題が示唆されている。こうした背景のもと、本研究室では、ポリビニルアルコール(PVA)を混入することで、ひび割れ分散性、引張靱性を有する新材料、高靱性繊維補強セメント(以下 DFRCC²⁾)に着目し、栈橋上部工の巻き立て補強を対象に検討を行ってきた。

既往研究成果³⁾として、引張靱性に長けた配合の決定(表-1.1 及び表-1.2 参照)、加えてせん断補強に関しては補強効果の有用性を確認し、耐力算定式を提案することで概ね評価することができている。しかし、下面増厚補強を主とする曲げ補強⁴⁾に関しては、DFRCC 単体補強では期待される補強効果を得ることはできていない。一方で DFRCC と FRP グリッドを併用した際には、DFRCC の材料特性が顕著に発揮されることで高い

補強効果を得ることができるといった結果が示されている。しかし、DFRCC と組むに適した補強材を明らかにすることはできておらず、加えて DFRCC を曲げ補強材として用いた際の引張構成則が確立されていないことから、曲げ補強効果を評価するには至っていない。

以上より、本研究では DFRCC とその他補強材を組み合わせた増厚曲げ補強実験、および有限要素解析を行い、補強材の違いによる補強効果の検討を行う。また一軸引張試験、及び曲げ引張試験の逆解析を行うことで、最も適切な構成則モデル提案を行った。

表-1.1 DFRCC 配合表

水結合材比		繊維混入率	細骨材率
W/(C+FA)(%)		V _f (%)	S/C(%)
45		2	50
単位量(kg/m ³)			
水W	早強セメントC	フライアッシュFA	細骨材S
458	815	204	407
繊維PVA	高性能AE減水剤	増粘剤VA	消泡剤EB
26	10	0.4	0.82

表-1.2 PVA 繊維の物性

種類	径(μm)	長さ(mm)	密度(g/cm ³)
		40	12
PVA	引張強度(Mpa)	弾性係数(Mpa)	破断伸度(%)
	1600	40	6

2. 一軸引張試験

2.1 供試体概要

供試体は、一般的に引張試験に使用されるダンベル型平板(鹿島式)を基準とし、**図-2.1**に示される指針²⁾にて提案されている検長区間幅 b_F が 30mm のものに加え、 b_F を 60mm とした異なる 2 種類の形状を用いる。

載荷条件としては上部をピン支持、下部を固定支持し変位制御により行い、計測項目は荷重および、検長区間の変位とした。

2.2 供試体パラメータ

実験パラメータは供試体厚とし、指針²⁾で提案されている板厚 13mm を基準に 13mm, 26mm, 52mm の 3 種類とした。試験体数は、 b_F -60 については各 6 体、 b_F -30 については 13mm 及び 52mm は 16 体、26mm は 15 体である。

2.3 実験結果

各パラメータでの引張強度の平均値を**図-2.2**、全供試体の供試体厚と引張強度の関係を**図-2.3**に示す。各パラメータの平均値より、寸法による強度の違いは供試体厚 13mm で顕著に見られ、26mm 以上の厚さでは大きく違いはない。またいずれの寸法も 26mm から強度が一定の値に漸近していく傾向が見られる。従って、寸法や幅に寄らず安定した引張強度を得るには指針推奨値、もしくは繊維長の 2 倍程度の厚さを保障することが望ましいと考えられる。

引張応力-引張ひずみ関係に関しては、各パラメータでの傾向が見られなかった点、パラメータ間での相関性が見られなかった点から結果の一例のみ**図-2.4**に示す。既往研究⁴⁾と比較すると、全供試体に共通し DFRCC に期待される強度維持および軟化特性は得られず、最大強度付近で破断するといった脆性的挙動を示した。

3. 曲げ引張試験

3.1 供試体概要

供試体は**図-3.1**に示す断面 100mm*100mm、長さ 400mm のものを用いる。供試体制作において先ずコンクリート部の打設を行い、その後打継目の目荒らしを行った後に DFRCC 部の打設を行った。

載荷方法は 4 点載荷、計測項目は荷重および**図-3.1**に示す a, b の平均ひずみを π ゲージにより計測した。

3.2 実験パラメータ

実験パラメータは**図-3.1**に示す DFRCC 部の曲げ引

張領域における厚さ t とし、繊維指針における一軸引張試験体の推奨板厚 13mm を基準とし、F13(13mm), F26(26mm), F39(39mm)の 3 つのパラメータを設定し、実験体数は各 5 体とした。

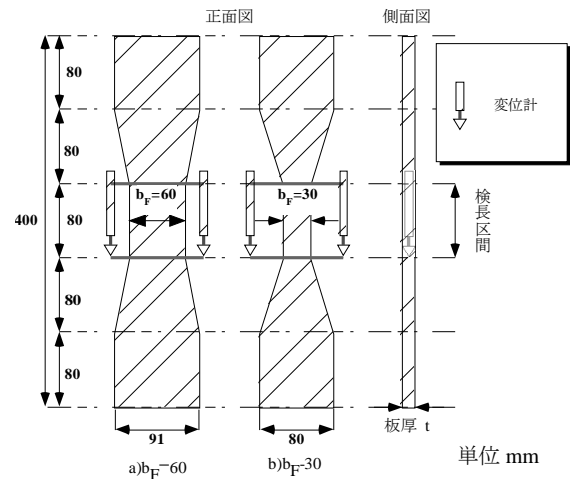


図-2.1 供試体及び計測項目

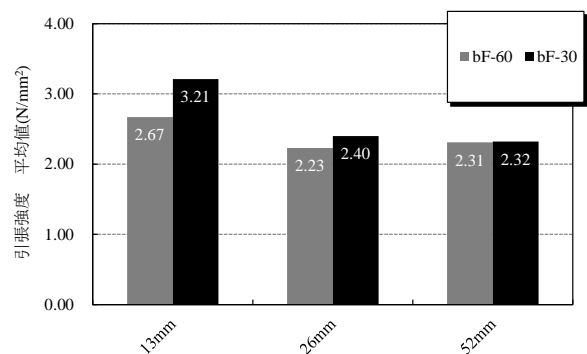


図-2.2 引張強度平均値

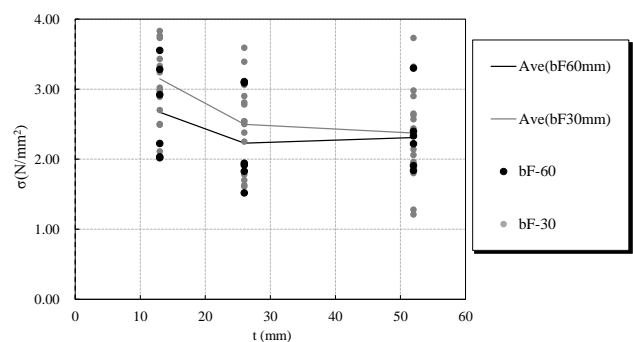


図-2.3 供試体厚-引張強度関係

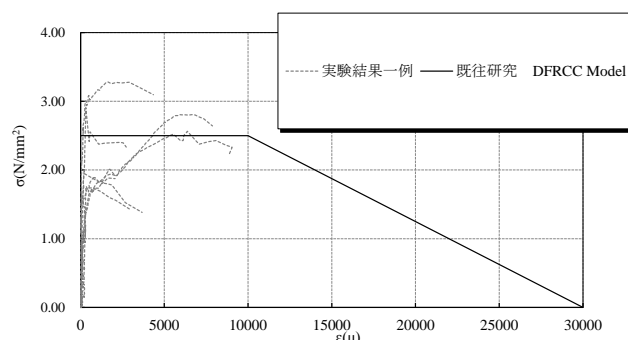


図-2.4 応力-ひずみ関係(一例)

3.3 逆解析概要

逆解析は断面分割法を用いて行い、DFRCCの引張構成則を操作し、実験でのM- ϕ 関係を再現することで曲げ引張時における構成則の検討を行った。

用いたDFRCCの引張構成則は一軸引張試験結果をモデル化したもの(軟化域なし)、既往研究⁴⁾を参考にしたモデル、既往研究⁴⁾のひずみを低減したモデルの3パターンを設定した(図-3.2)。引張強度については実験値と整合性のとれる値を任意に仮定し、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⁵⁾に準拠するものとした。

3.4 実験及び逆解析結果

図-3.3に設定した引張強度と曲げ引張試験値より算定した引張強度および一軸引張強度を比較したものを示す。設定した引張強度と一軸引張強度を比較した際に、いずれのパラメータにおいても設定値が一軸引張強度を大きく上回っており、一軸引張強度を用いた際にはやや過小評価になると言える。また算定した曲げ引張強度と設定値を比較すると、厚さが増すことで曲げ引張強度がやや過大評価となっており、厚さを考慮した強度算定式の提案が必要であると言える。

図-3.4に実験より得られた各パラメータのM- ϕ 関係及び逆解析結果を示す。なお π ゲージ設置部にひび割れが進展し、計測が途中で終了したものについてはデータより除外している。いずれのパラメータも既往研究のモデルをそのまま適用することで、実験挙動を概ね再現できており、このことからDFRCCは曲げ引張時において期待されるひずみ保持、及び軟化特性を發揮していると言える。

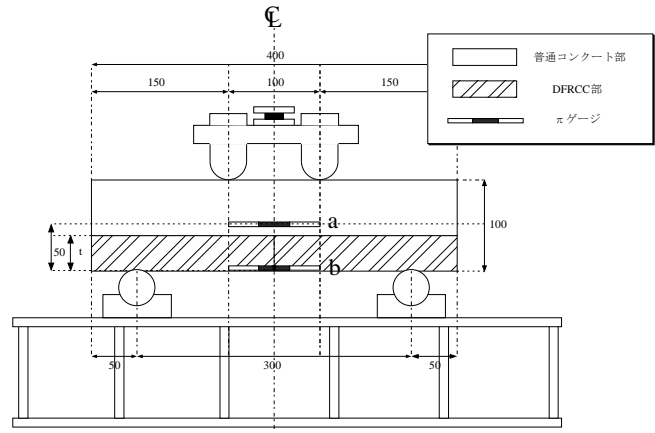


図-3.1 供試体概要図

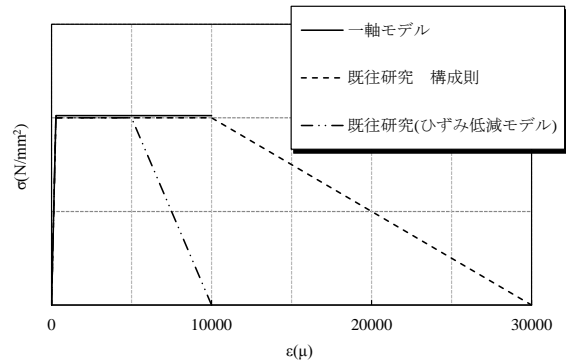


図-3.2 引張構成則モデル

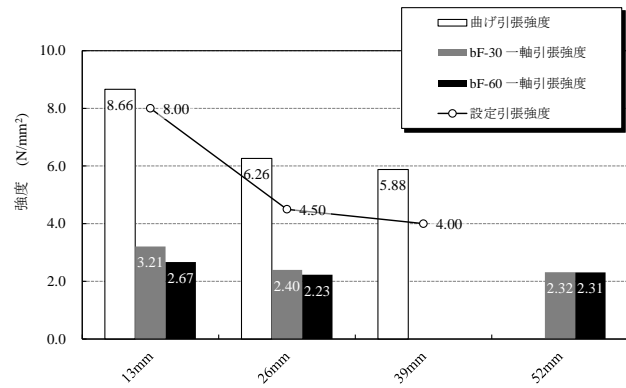


図-3.3 設定引張強度

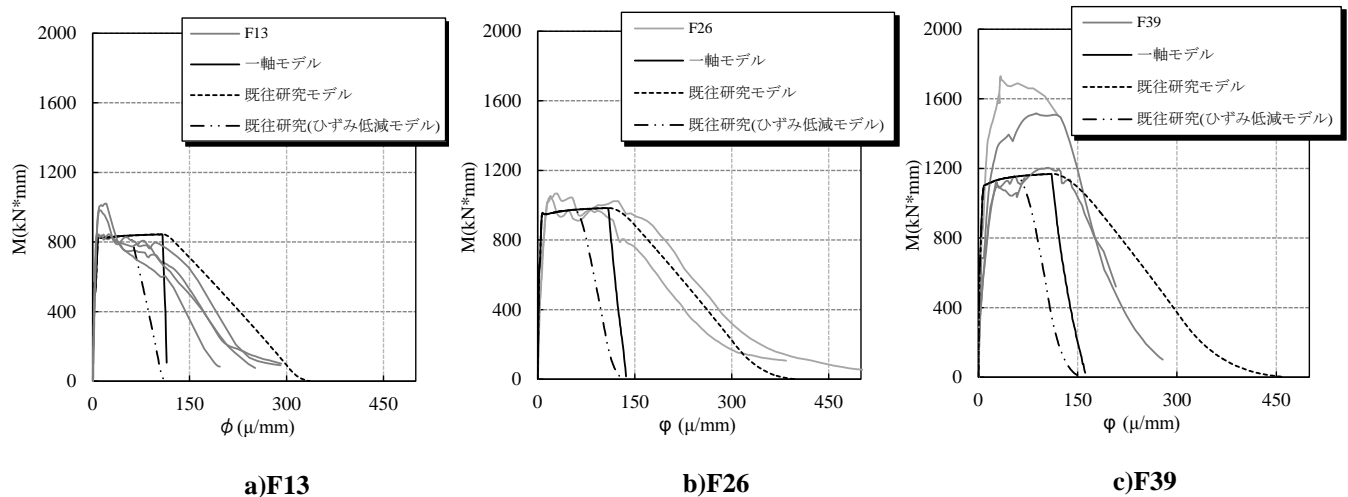


図-3.4 逆解析結果

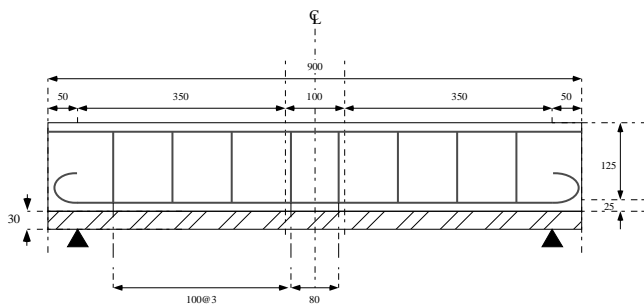


図-4.1 供試体側面図(DFRCC30mm 増厚時)

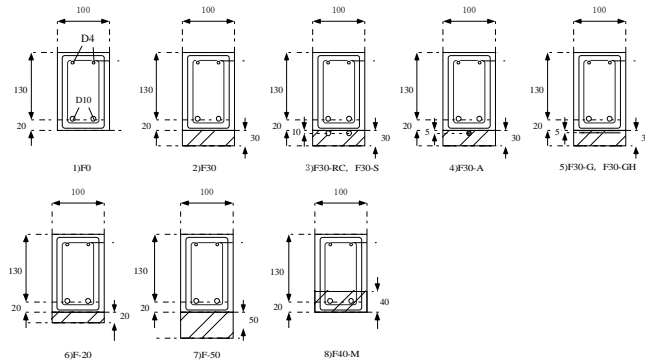


図-4.2 供試体断面図

表-4.1 供試体断面図

種類	供試体名称	DFRCC補強厚(mm)	補強材	補強材 弾性係数(kN/mm ²)	補強材断面積(mm ²)	補強材伸び剛性(kN)	補強材 純引張耐力(kN)
無補強	F0	-	-	-	-	-	-
	下面増厚	F20	20	-	-	-	-
		F30	30	-	-	-	-
		F50	50	-	-	-	-
下面増厚+補強材	F30-RC	30	鉄筋	200	71.3mm ² *2本=142.7mm ²	28520	49.2
	F30-S		ステンレス	200	71.3mm ² *2本=142.7mm ²	-	-
	F30-G		カーボングリッド	100	13.2mm ² *2本=26.4mm ²	2640	37.0
	F30-GH		高弾性グリッド	200	13.2mm ² *2本=26.4mm ²	5280	31.6
	F30-A		アラミドロッド	53	48.8mm ² *1本=41.3mm ²	2586	81.0
置換補修	F40-M	40	-	-	-	-	-

4. 増厚曲げ実験

4.1 供試体概要及び実験パラメータ

本実験では純曲げスパン 100mm を有する全長 900mm、梁高 150mm、幅 100mm、せん断スパン比 2.80 とした RC コンクリート部に DFRCC を 30mm 増厚したもの(図-4.1 参照)を基準とし、表-4.1 および図 4.2 に示す DFRCC 部に設置する補強材をパラメータとして、4 点荷重により実験を行う。また DFRCC の増厚量に対し検討を行う為に、増厚量を 20mm、50mm としたものをパラメータに追加し、更に補修材として用いた際の効果に対し検討を行う為に、無補強の下縁 40mm を DFRCC で置換補修したものをパラメータに追加した。

補強材については鉄筋補強をベースに各補強材の純引張耐力を可能な範囲で統一した上で塩害対策を想定し、耐腐食性に優れたものを選定した。ステンレスは図-4.3 に示す様に、鉄筋と同じ材料特性を持つが、降伏以降の二次剛性を持つのが大きな特徴であり、グリッド、高弾性グリッドおよびアラミドロッドについては弾性体のまま破断ひずみに至る部材である。

4.2 ひび割れ性状

図-4.4 に置換補修および DFRCC 単体補強における主鉄筋降伏時のひび割れ性状を、無補強のものと併せて示す。なお、ひび割れ性状の比較範囲は純曲げスパン 100mm とそれより左右 50mm の計 200mm である。無補強に比して良好なひび割れ分散が確認できる。こ

れは DFRCC と主鉄筋が一体なることで、DFRCC の複数微細ひび割れ効果が発揮された為と考えられる。

一方で、DFRCC 単体補強のものについては、置換補修と比して、ひび割れ分散がやや少なく、また増厚量

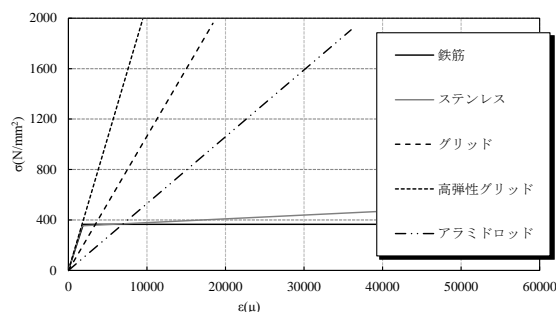


図-4.3 応力-ひずみ関係(材料規格値)

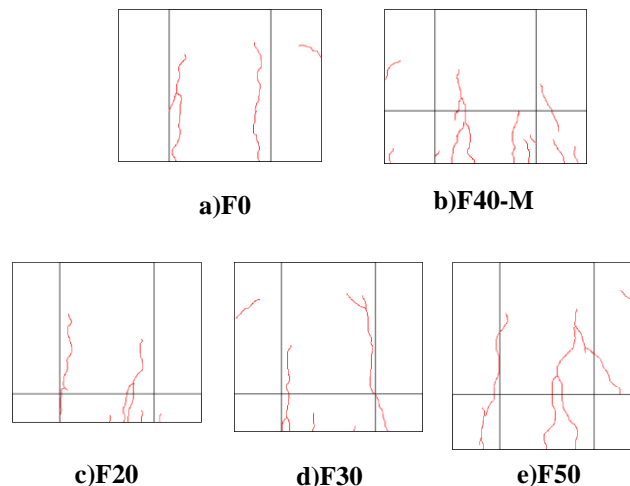


図-4.4 置換補修及び DFRCC 単体補強
(主鉄筋降伏時)

との相関性も見られない。従って、DFRCC 単体補強時においては、DFRCC に期待されるひび割れ分散性能は十分に発揮されないと言える。

図-4.5 に DFRCC と補強材を併用した供試体のひび割れ性状を示す。F30-RC と F30-S を比較した際に、F30-S では良好なひび割れ分散が確認できる。これは、鉄筋が降伏強度以降は変形抵抗を持たないのに対して、ステンレスは降伏強度以降の二次剛性を持つことで、DFRCC のひび割れ局所化を抑制した為ではないかと推察される。また F30-G, F30-GH 及び F30-A を比較した際には、F30-GH において良好なひび割れ分散が確認できる。これより、DFRCC のひび割れ分散効果を発揮する為には併用する補強材としては、鉄筋と同程度の剛性を持つものが望ましいと考えられる。

5. 有限要素解析 (FEM 解析)

5.1 解析モデル

解析モデルについては、平面応力要素により部材軸方向全域を対象とし、その概要を図-5.1 に示す。なお、DFRCC 部とコアコンクリートの間は既往研究⁴⁾を参考とした付着要素としている。

5.2 材料特性

各材料定数については、材料試験結果より決定する。コンクリートの構成則は、圧縮側については上昇域を修正 Ahmad モデル、圧縮強度以降をフラットモデルとし、引張側については上昇域を線形弾性、下降域を出雲モデルとしている。鉄筋の構成則については、完全弾塑性のバイリニアモデル、ステンレスについては増分型バイリニアモデル(二次剛性 3.00kN/mm^2)としている。グリッド、高弾性グリッドおよびアラミドロッドについては弾性-破断モデルとしている。

DFRCC の引張構成則については、引張強度は一軸引張試験より決定し、応力-ひずみ関係については逆解析より仮定した図-5.2 示すモデルとした。

5.3 DFRCC 単体補強及び置換補修 解析結果

図-5.3 に DFRCC 単体補強および置換補修における荷重-梁中央変位関係の解析結果を示す。なお、凡例中の Con とは DFRCC 部を普通コンクリートに置きかえて解析したものであり、DFRCC 終局とは FEM 解析において、ひび割れが局所化した要素が終局ひずみに到達した点を示す。図-5.3 より、いずれのパラメータにおいても耐力及び挙動は概ね一致しており、実験結果

を解析的に表現できると共に、逆解析より仮定した構成則を用いて十分に評価ができると言える。

解析結果から、主鉄筋降伏以降に圧壊(圧縮縁ひずみ 3500μ 到達)より先行して DFRCC が終局ひずみに到達していることから DFRCC 単体補強及び置換補修においては、使用時のひび割れ分散を期待する補強材としての提案が考えられる。

5.4 DFRCC と補強材を併用した供試体 解析結果

図-5.4 に DFRCC と補強材を併用した供試体における解析結果を示す。DFRCC 単体補強と同様に耐力および挙動は概ね表現できており、逆解析より仮定した構成則は十分に適用できると言える。

また、いずれのパラメータにおいても DFRCC の終局より圧壊が先行しており、F30-GH についてはグリッド破断時においても DFRCC は終局ひずみに至って

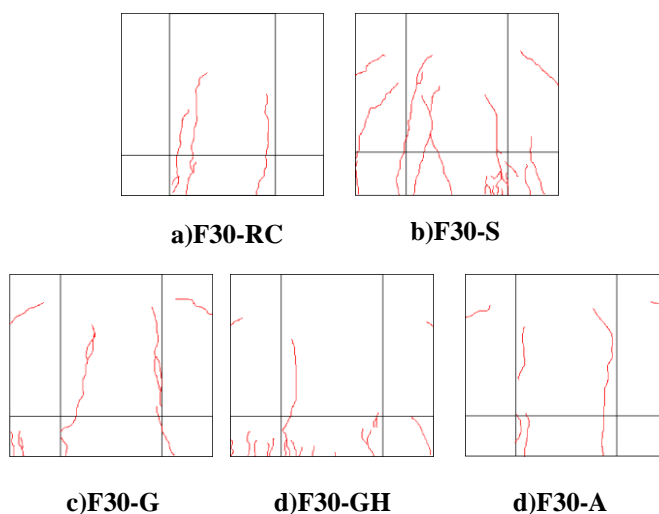


図-4.5 DFRCC と補強材を併用した供試体ひび割れ性状(主鉄筋降伏時)

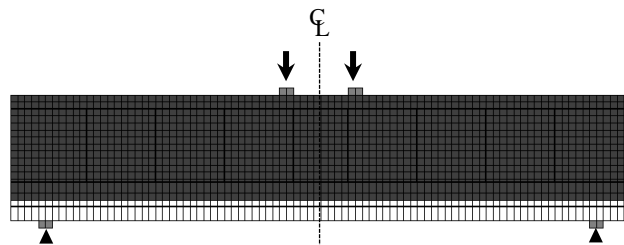


図-5.1 FEM 解析モデル

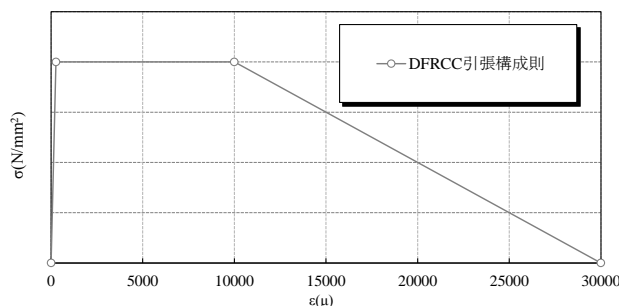


図-5.2 DFRCC 引張構成則

いない。このことから、DFRCC と補強材を併用することで、終局時における強度設計に適用可能であると言える。圧壊時の荷重を比較すると、F30-RC、F30-S 及び F30-GH が比較的大きく、このことから耐力面での増分を期待する際には、鉄筋と同程度の剛性を持つ補強材と併用することが望ましいと言える。しかし、その際に F30-RC では、圧壊後わずかな変形量で DFRCC が終局に至っている。施工時における繊維の配向性の乱れ等を考慮して安全側に評価するならば、比較的余裕のあるステンレスや高弾性グリッドが望ましいと言え、ステンレス及び高弾性グリッドについてはひび割れ分散性能も確認されており、DFRCC と組み合わせるのにふさわしい補強材であると言える。

大幅な耐力増分を期待しない場合であれば、グリッドやアラミドにおいても適用は可能であるが、本実験では十分なひび割れ分散を得ることができていない。従って補強材量をパラメータとした追加検討を行い、ひび割れ分散性が補強材の弾性係数、伸び剛性のいずれの要因で決定されるか検討する必要がある。

6. 結論

- 1)一軸引張試験において、安定した強度値を得るには指針推奨厚、もしくは繊維長の2倍程度の厚さが望ましいと考えられる。
- 2)逆解析においては、既往研究の引張構成則を適用することで実験挙動を概ね評価することができた。
- 3)下面増厚実験では、いずれのパラメータも FEM 解析により概ね実験挙動を評価することができ、DFRCC の補強効果およびひび割れ性状の面からステンレスと高弾性グリッドが組むにふさわしいと考えられる。

参考文献

- 1)国土交通省港湾監修：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)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
- 3)大内一，小笠原哲也，角掛久雄，：DFRCC による U 字巻き立てによるせん断補強，土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp251-270, 2012
- 4)小笠原哲也：高靱性繊維補強セメント複合材料による港湾栈橋の補修・補強法に関する研究，後期博士論文，2011.1
- 5)社団法人:2010 年制定コンクリート標準示方書[基準編]，2010

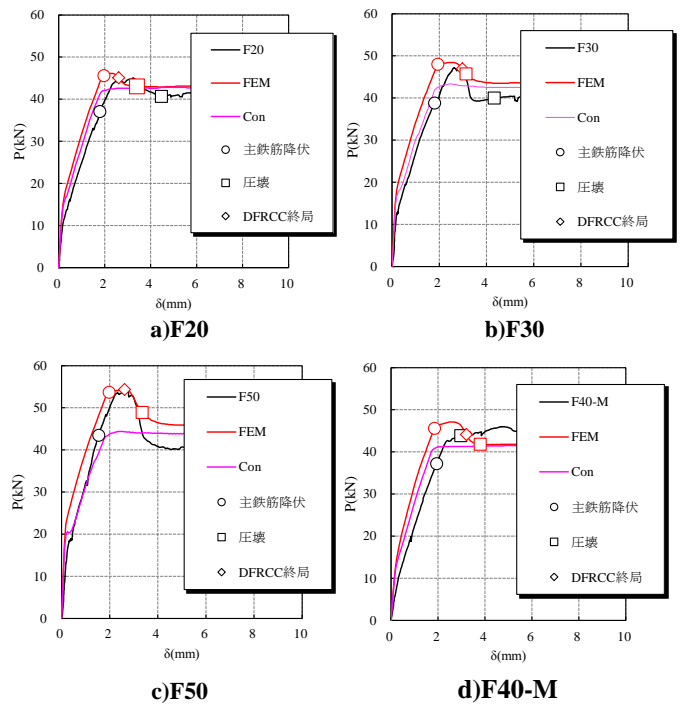


図-5.3 DFRCC 単体補強及び置換補修 解析結果

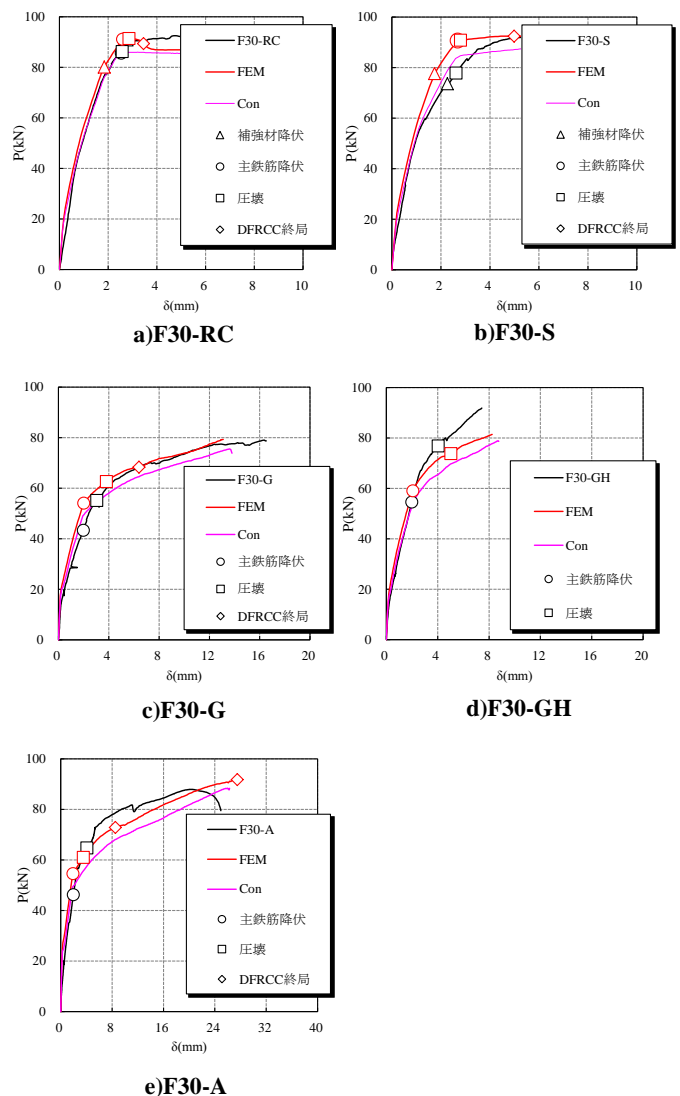


図-5.4 DFRCC と補強材を併用した供試体 解析結果

1. 補強に用いたグリッド, 高弾性グリッドの材質を教えてください(吉中先生)

補強に用いたグリッド及び高弾性グリッドはいずれも, 炭素繊維, ガラス繊維などの高性能連続繊維を, 耐腐食性に優れたビニルエステル樹脂に含浸, 硬化させ, 格子状に一体成形した, FRP(繊維強化プラスチック)製の格子筋となっています。

2. 補強材の定着方法を教えてください, また定着部からの劣化については問題ないのでしょうか(吉中先生)

補強材端部にナットをはめ込み, 隙間にエポキシ系樹脂を充填させることで補強材の定着を図っています。今回の実験は耐力比較を主として行っており, 塩害暴露試験などの耐久性に対する検討は行っていない為に, 定着部の劣化については言及することはできません。

3. 参考文献が少ないようですが, 他の既往研究からヒントを得ることはできないのでしょうか(松村先生)

まず一軸引張試験については, 文献[1]により図.1に示す供試体寸法, 実験手法が提案されており, 数種類のDFRCCについての検討も行われています。また, DFRCCに関する多くの研究で文献[1]を参考にした一軸引張試験が実施されています。しかし, 文献[1]において, 供試体の寸法や繊維長に対する供試体断面の寸法比等が変化することで, 実験結果に影響が生じることが認められながらも, その影響を検討した研究は少ないのが現状です。従って一軸引張試験結果を定量的に評価する為のデータの蓄積は進展していません。そこで, 本研究では文献[1]で提案されている供試体厚や寸法比以外での実験結果の検討を行うことを目的として, 一軸引張試験を実施しました。

一軸引張試験で期待される応力-ひずみ関係が得られていないにも関わらず, 実験手法を改善せず曲げ引張試験による逆解析を行った理由としては, 図

1に示す様に実験手法の改善には特殊な装置や器具を必要とする為に, 現段階で更なる一軸引張試験の言及を行うことは環境的, 時間的に困難であった為です。また構成則を提案する手法としては, 曲げ試験体に切欠部を設け, 破壊エネルギーより算定する手法が代表的であります。今回は厚さによる影響を確認することが大前提であった為に, DFRCC部の厚さをパラメータとし曲げ引張試験を行い, 逆解析により引張構成則の言及を行いました。

DFRCCと補強材を組み合わせた実験については文献[2], 文献[3]及び文献[4]等によりDFRCCを下面増厚に用いた際の効果の検証や, ファイバー法, 簡易モデルによる評価手法の提案などが為されています。しかし, これらの研究を初めとしたDFRCCの下面増厚の研究については, DFRCCと鉄筋を組み合わせたものがほとんどであり, その他の補強材と組み合わせた際の知見は不足しています。従って本研究では, DFRCCと補強材を組み合わせた実験を行い, 検討を行いました。

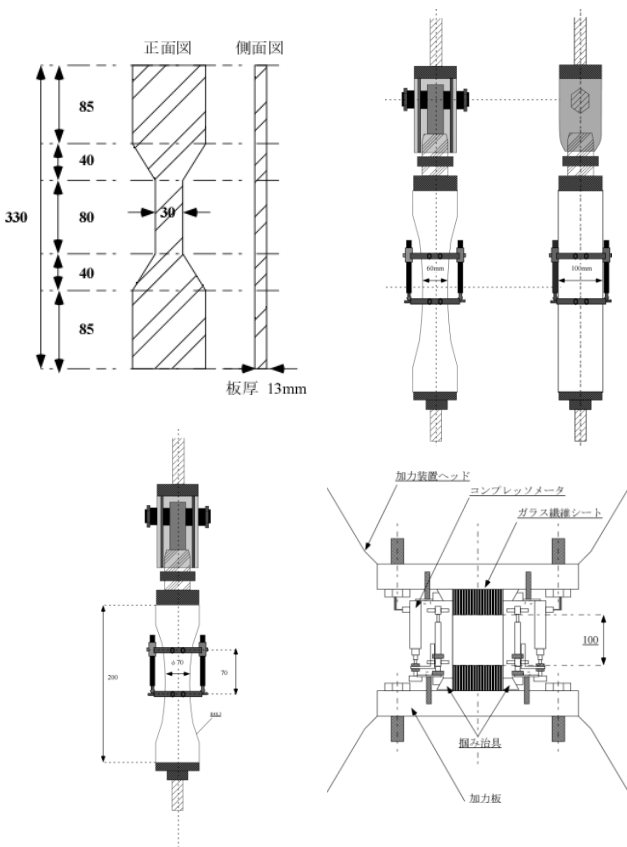


図.1 一軸引張試験 実験方法

4. 陸上構造物と港構造物で考慮する点がどう変わるのでしょうか(松村先生)

本研究の対象は港湾構造物の一つである栈橋です。栈橋については海面付近に位置することから、陸上構造物と比較してより塩害に対する耐久性が必要とされます。しかし既存の工法では以下の問題点が挙げられます。

- RC 増厚：かぶり確保による上部工の自重増大
- 鋼板接着工法：施工性に欠ける
- 炭素繊維シート：接着剤の耐久性の問題により海面付近では境界面での剥離が生じやすい

そこで、本研究室ではこれらの課題を解決し得る新材料として、優れた遮煙性を有する DFRCC の補修補強材としての提案を行う為の検討を実施してきました。

5. 繊維の混入率が異なると、物性はどうか(松村先生)

一般的には、繊維混入率を大きくすることで強度は大きくなるものの、多量の繊維を混入することで流動性が失われることから、施工性に影響が生じ、靱性能が乏しくなるとされています。ただし、繊維の種類や用いるモルタルによって適切な調配合は異なる為、適切な混入率についてはその都度検討が必要です。本研究に用いた DFRCC については、文献[5]により強度面、靱性面に対する検討を行った結果 2%が最も適切な混入率であるとされています。

6. 逆解析において M- ϕ 関係だけで整合性の確認をしてもよいのでしょうか(山口先生)

図.2に示す実験より得られた曲げ強度と純曲げ区間の下縁ひずみより、ひずみ値に関しては概ね逆解析より仮定した構成則モデルとの整合性が確認できます。断面分割法では、ある曲率時において、平面保持の仮定より各層のひずみが決定され、軸力、モーメントが算出されることを考えれば、引張縁のひずみ値が一致した上で M- ϕ 関係が一致すれば、実験との整合性は評価できると言えます。

参考文献

文献[1] 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Ⅱ，2004.5

文献[2] 六郷恵哲，福山洋，松尾庄二，金久保利之，鎌田敏郎，松本高志，閑田徹志，国枝稔：委員会報告 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の活動と成果の概要，コンクリート工学年次論文集，Vol26，No1，2004

文献[3] RC 構造物のポリマーセメントモルタル吹き付け補修，補強工法協会：ポリマーセメントモルタル吹き付け工法によるコンクリート構造物の補修補強設計・施工マニュアル(案)，2009.9

文献[4] 閑田徹志，斉藤忠，坂田昇，平石剛紀：PVA 繊維を用いた高靱性 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，Vol23，No1，pp.475-480，2001.7

文献[5]尾上和彦：短繊維モルタルのフレッシュ性状と引張性状，大阪市立大学卒業論文，2007.2

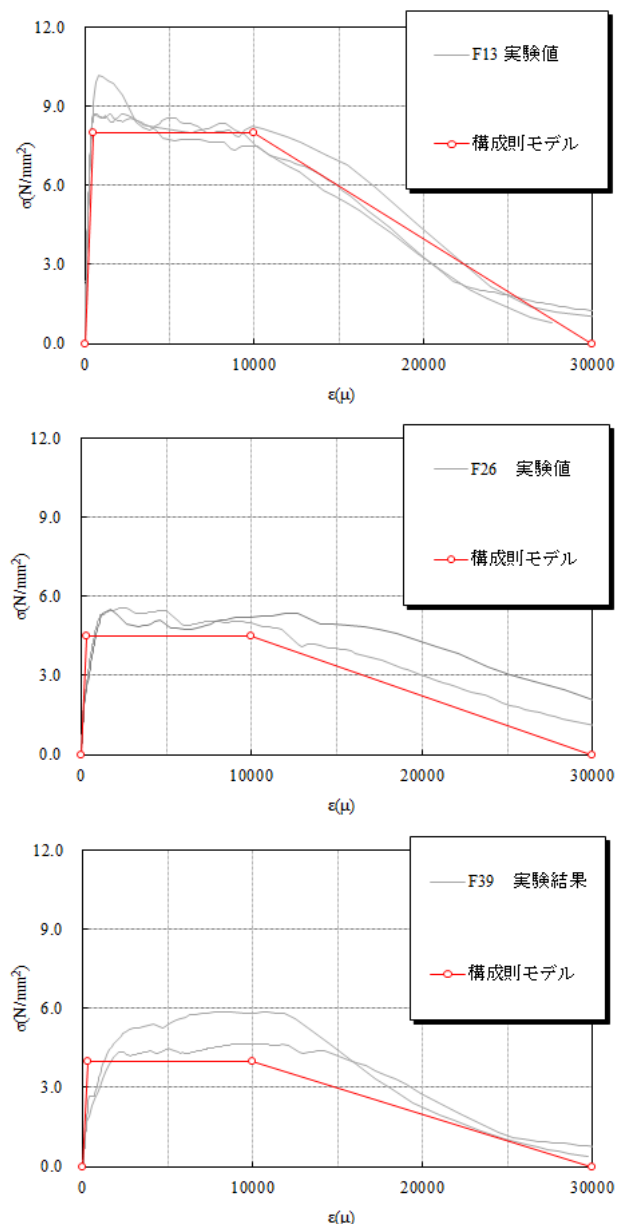


図.2 曲げ強度-下縁ひずみ関係と構成則モデルの比較