

曲げ・せん断補強に関する研究

構造およびコンクリート分野

金 春日

Abstract

高靱性繊維補強セメント複合材料(DFRCC)は、引張応力が負担でき、かつ遮塩性が高い材料であり、栈橋の補修、補強工事に伴う耐震補強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梁を対象とし、DFRCCにより曲げおよびせん断補強を行って載荷試験を行い、補強効果を検討した。曲げ補強の結果として、下面増厚とコの字巻立て補強供試体ではDFRCCに局所破壊が起り、想定した補強効果は得ることが出来なかった。FRPグリッド補強供試体では、FRPグリッドとDFRCCを併用することにより、DFRCCの局所化を抑制し、ほぼ想定した補強効果を得ることが出来た。せん断補強の結果として、ディープビームに適用するせん断耐力式と、DFRCC部のせん断負担分を組み合わせることにより、実験結果を安全側に評価できる。

1. はじめに

栈橋は港湾の主要施設で、船舶の着岸するために作られた係留施設である。この港湾施設の設計基準である「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾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、旧基準より設計地震力大きくなる場合がある。一方で、海面付近に位置する栈橋は塩害を受けやすく、特に高度経済成長期以降に整備された港湾施設は高齢化しており、補修を行って延命化する必要がある。さらに、栈橋上のクレーン能力増強により、栈橋などに作用する荷重が増加して補強を必要とする場合もある。

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(DFRCC)を栈橋の補修・補強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ひび割れが分散する「マルチプルクラック特性」を持っていて遮塩性に優れており、かつ引張応力が負担できる材料である。

そこで、DFRCCの補修・補強への適用を前提に、栈橋の梁部を対象に曲げ・せん断補強実験を行なって、その補強効果を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体および試験パラメータ

本研究では、「港湾構造物設計事例集」²⁾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り、梁は杭間スパン長 5.4m、梁高 2.1m、幅 1m の構造である。

本研究で用いた供試体はモデル栈橋の 1/5 縮尺モデルと設定した。図-1、図-2 に曲げ供試体およびせん

断供試体をそれぞれ示し、供試体一覧表を表-1、表-2 に示す。

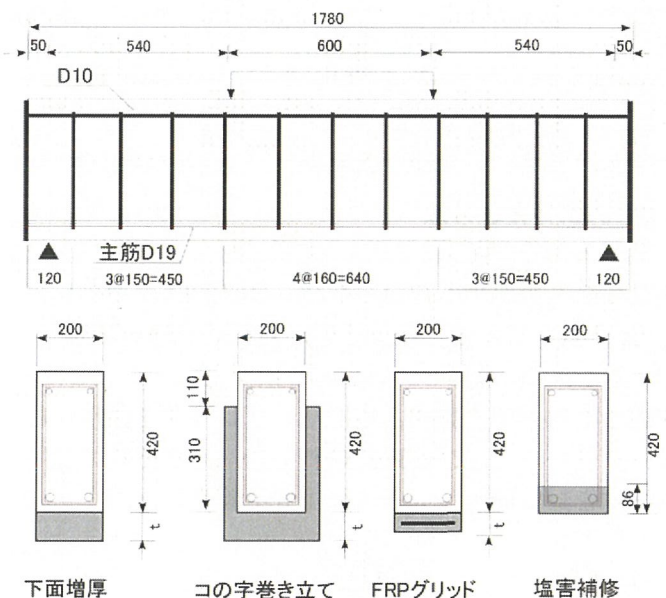


図-1 曲げ供試体

表-1 曲げ供試体一覧

種類	供試体名	材齢(日)	DFRCC 下面増厚 (mm)	DFRCCウェブ 補強厚 (mm)	DFRCCウェブ 補強高さ (mm)	グリッド 仕様	想定曲げ補 強効果 (%)
無補強	M-0	-	0	-	-	-	-
下面増 補強	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)	-	-	-	17
コの字巻 立て 補強	M-54-W25	13	54	25	310	-	27
	M-86-W40	20	86	40	310	-	47
	M-124-W60	22	124	60	310	-	76
	M-86-W40-L	23	86	40	155	-	38
	M-86-W40-EX	29	86	40	310	-	47
FRPグリッド 補強	M-54-G	34	54	-	-	CR4	27
	M-90-G	36	90	-	-	CR5	47
	M-138-G	37	138	-	-	CR6	76

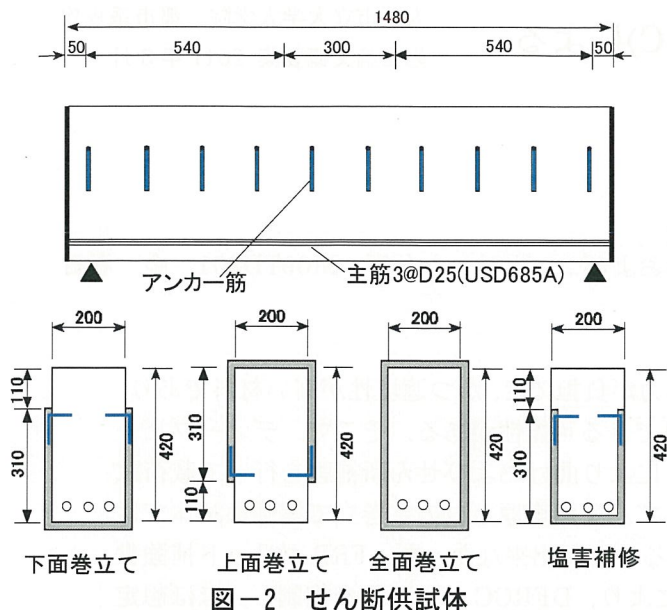


図-2 せん断供試体

表-2 せん断供試体一覧表

種類	供試体名	材齢 (日)	巻立て厚 t (mm)	想定せん断 補強効果 (%)
無補強	S-0	29	0	0
下面コの字 巻立て	S-20	30	20	22
	S-40	33	40	44
	S-60	40	60	66
上面コの字 巻立て	S-20-R	35	20	20
	S-60-R	41	60	62
全面巻立て	S-20-F	39	20	20
	S-60-F	41	60	62
塩害補修	S-20-M	34	20 (塩害補修)	22

2.2 供試体作製方法

供試体の作製手順として、まず母材コンクリートを打設し打ち継ぎ処理を行なった後、DFRCCの型枠を組立て、オムニミキサで練り混ぜたDFRCCモルタルを、図-3に示すようにDFRCC部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日間供試体を封緘養生し、その後は気中養生した。

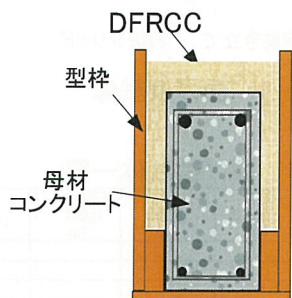


図-3 DFRCCの打設状況

2.3 荷重方法および計測方法

1000kN級アムスラー型万能試験機を用い、両端を単純支持した4点荷重により実験を行なった。図-4および図-5に計測概要図を示す。

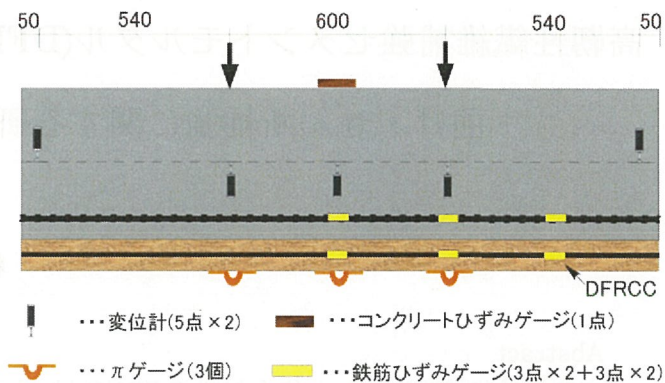


図-4 曲げ供試体計測概要図

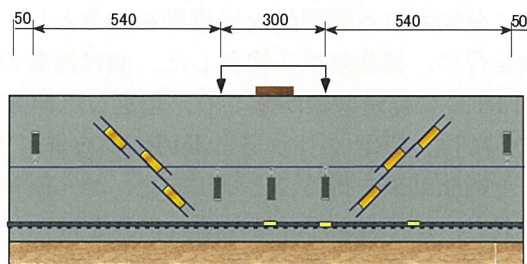


図-5 せん断供試体計測概要図

3 実験結果

3.1 曲げ補強

3.1.1 破壊性状

図-6に各供試体のひび割れ図を示す。すべての

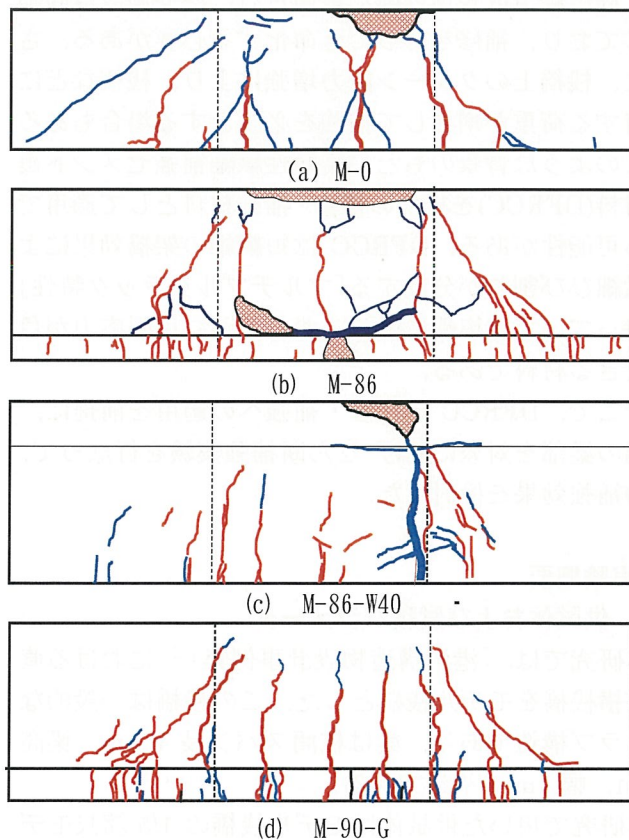


図-6 ひび割れ図

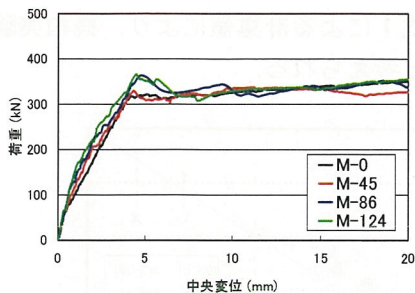


図-7 荷重-変位関係(下面増厚)

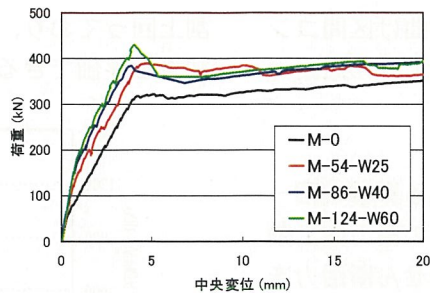


図-8 荷重-変位関係(コの字巻立て)

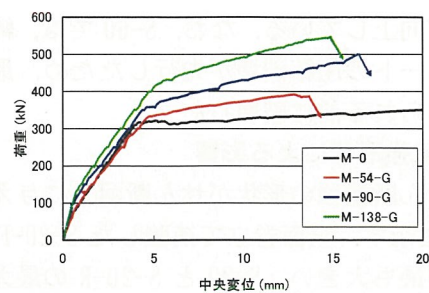


図-9 荷重-変位関係(FRPグリッド補強)

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。下面増厚およびコの字巻立て補強では、純曲げ区間付近に数本のひび割れが発生してその中の一本が局所化し、最終的には供試体の上縁に生じた圧縮破壊により破壊に至った。FRPグリッド補強では、純曲げ区間に生じたひび割れが局所化せず、FRPグリッドの破断により破壊に至った。FRPグリッド補強では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。

3.1.2 荷重-変位関係

図-7、図-8および図-9に各供試体の荷重と中央変位の関係を示す。図より、補強厚が大きくなるにつれ、一次剛性、二次剛性および最大荷重が大きくなった。下面増厚とコの字巻立て補強では、DFRCC部の局所破壊により最大荷重後は荷重が低下した。FRPグリッド補強では、部材降伏後も荷重の低下が生じておらず、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。

3.1.3 曲げ耐力算定値と実験値の比較

曲げ耐力の算定は、断面分割法によって行なった。算定の各材料定数は材料試験の値を用いた。

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。本論文と同一配合にて作られた既往文献³⁾の一軸引張試験結果を含めて12個の試験体の材料試験を平均して標準の引張特性をモデル化したものが図-10のモデル1である。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なった。

断面分割法による算定値と実験値の荷重-変位関係の比較を図-11に示す。下面増厚およびコの字巻立ての実験値は、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。FRPグリッド補強の実験値は、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。

3.2 せん断補強

3.2.1 荷重-変位関係

(1) 補強厚による影響

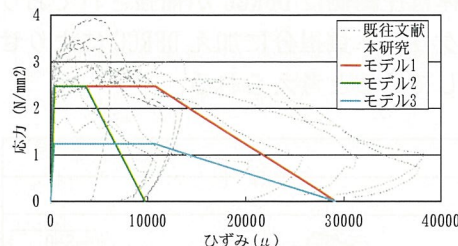


図-10 DFRCCの引張特性モデル曲線

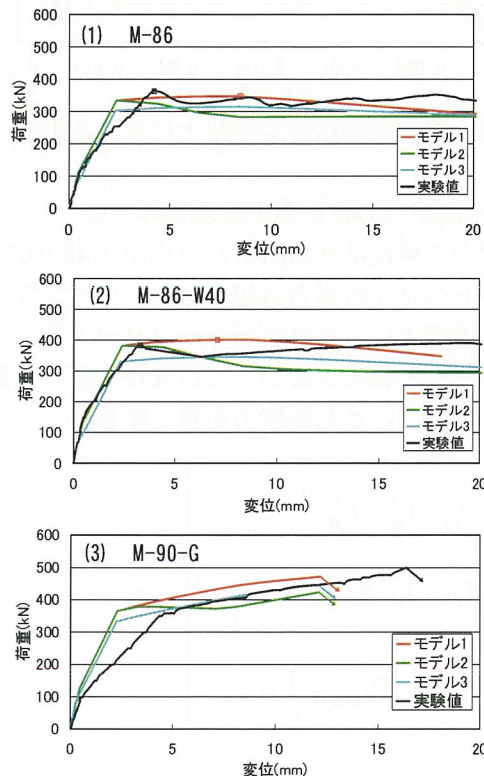


図-11 曲げ耐力の算定値と実験値の一例

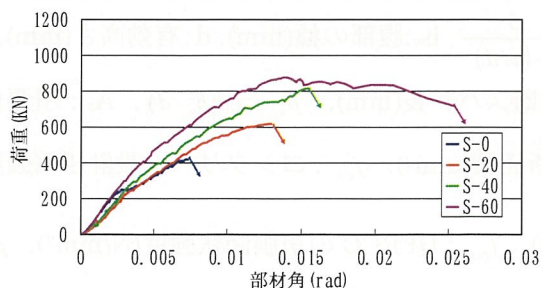


図-12 補強厚がせん断耐力に与える影響

補強厚がせん断耐力に与える影響を図-12に示す。S-20、S-40では無補強に対してほぼ比例的にせん断耐

力が向上している。なお、S-60 では、純曲げ区間コンクリートの圧縮破壊が先行したため、最大せん断耐力が得られる前に破壊した。

(2) 補強形状による影響

せん断補強の形状がせん断耐力に与える影響を図-13 に示す。全面巻立て補強した S-20-F の耐力向上効果が最も大きい。S-20 と S-20-R の最大せん断耐力を比較すると、S-20-R の方が大きく、剛性も高い。上面巻立て供試体は圧縮側に DFRCC が補強されており、圧縮縁のコンクリート負担分に加え DFRCC によりせん断耐力が向上していると考えられる。

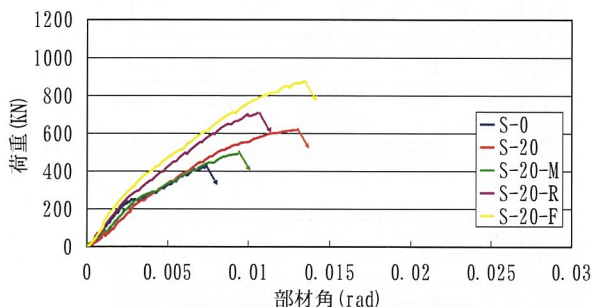


図-13 補強形状がせん断耐力に与える影響

3.2.2 せん断耐力の算定値と実験値の比較

せん断耐力の算定はせん断スパン比が 1.43 のため、コンクリートのせん断耐力負担分についてはコンクリート標準示方書⁴⁾に示されるディープビーム算定式を使用し、DFRCC 負担分については既往文献⁵⁾を参考にして式 1 のようにせん断耐力を算定する。

$$\left. \begin{aligned} V_{yd} &= V_{cd}^{(7)} + V_{fd}^{(5)} \\ V_{cd} &= \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d \\ V_{fd} &= \left(\frac{f_{yd}}{\tan \beta_u} \right) \cdot 2t \cdot z \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 $f_{dd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}}$ 、 $\beta_d = \sqrt[4]{1000/d}$ 、 $\beta_p = \frac{1 + \sqrt{100p_v}}{2}$

、 $\beta_a = \frac{5}{1 + (a/d)^2}$ 、 b_w : 腹部の幅(mm)、 d : 有効高さ(mm)、

a : せん断スパン長(mm)、 $p_v = A_s / (b_w \cdot d)$ 、 A_s : 引張側鋼材の断面積(mm²)、 f'_{cd} : コンクリート設計圧縮強度

(N/mm²)、 f_{yd} : DFRCC の引張降伏強度(N/mm²)、 β_u

: 軸方向とひび割れがなす角度、 t : DFRCC の補強厚(mm)

図-14 にせん断耐力の計算値と実験値の比較を示す。図に示すように、計算耐力より実験耐力が 1~3

割上回っており、式 1 による計算値により、概ね実験結果を評価できると考えられる。

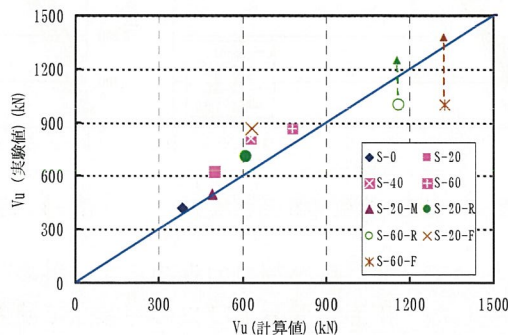


図-14 せん断耐力の計算値と実験値の比較

4 まとめ

本研究では、港湾構造物の栈橋を対象に、曲げおよびせん断補強効果を評価することを目的に、載荷実験を行なった。以下に得られた結果をまとめる。

4.1 曲げ載荷試験

1. DFRCC を下面増厚およびコの字型巻立て補強した場合、DFRCC の早期の局所破壊により、想定した補強効果を得ることができなかつた。また、終局ひずみを 1/3 に低減させて最大荷重を算定することで、概ね実験結果を評価できた。

2. FRP グリッドと DFRCC を併用して補強した場合、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。DFRCC の一軸試験結果をそのままモデル化して最大荷重を算定することで、実験結果を安全側に表現できた。

4.2 せん断載荷試験

せん断耐力については、既存部はディープビームとしてのせん断耐力、DFRCC 部はトラス効果としてのせん断負担を累加することにより、実験結果を安全側に評価できる。

参考文献

- 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
- (財) 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集、1999.4
- 谷口勝基、斉藤尚、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, No.3, pp.1471-1476, 2008.7
- 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]、2007.12
- 土木学会：複合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

討 議 等

◆ 討議[木内 龍彦]

① DFRCC の物性は普通のコンクリートと比較してどう違う？

◆回答：図 1 と図 2 に本研究で用いたコンクリートおよび DFRCC の材料特性を示す。図示により、同じ材齢の DFRCC とコンクリートを比較すると、引張強度および圧縮強度は DFRCC のほうがコンクリートより若干大きく、弾性係数は DFRCC のほうがコンクリートより若干小さい値を示している。

② 下面コの字巻立て、上面コの字巻き立て、全面巻き立てはどのような位置付けになる？

◆回答：本研究の対象構造物である栈橋の梁部の上部側面にはスラブがあり、梁断面の周囲すべてを補強

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)まで補強することとした。上面コの字巻き立て補強は栈橋が地震力の繰返し力を受けるのを想定した逆載荷供試体である。全面巻き立て供試体については、近年行なわれた DFRCC の研究では全部巻立てによる研究が多いため、比較用として作られた。

◆ 討議[吉中 進]

FRP グリッドは脆性的に破壊する材料であるが、なぜ使用したのか？

◆回答：FRP グリッドを DFRCC 内に配置したのは DFRCC の早期局所化を抑制させるためである。FRP グリッドの破断ひずみは 16000 μ であり、DFRCC の局所開始ひずみは 10000 μ 前後であるため、DFRCC がその靱性を十分発揮してから FRP グリッドが破綻すると想定して FRP グリッドを使用することにした。

スランプ (cm)	空気量 (%)	材齢 (日)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	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

図 1 コンクリートの材料特性

スランプ (cm)	空気量 (%)	材齢 (日)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	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	2.5	-	-	-
		10	-	41.3	14.6	0.22
		17	-	48.2	15.9	0.23
		43	2.71	-	-	-
		44	-	56.5	16.9	0.23

図 2 DFRCC の材料特性