報告 DFRCC と鋼による複合プレートの曲げ性能

岡崎 一寬^{*1}·大高 範寬^{*2}

要旨: 立坑やトンネルに使用される鋼製のライナープレートに対して, DFRCC による曲げ性能の向上を試みた。ライナープレートによる土留め部材には, H 型鋼などの補強材が用いられることが多く, これらの省略や簡素化を目的として DFRCC による補強を検討した。曲げ載荷実験の結果, UFC を用いた場合では無補強に対して 1.8 倍, HPFRCC では 1.3 倍の耐力の向上が確認された。また,実験結果に対して汎用の静弾性有限要素法解析により検証を行った。

キーワード: DFRCC, HPFRCC, UFC, ライナープレート, 複合構造

1. はじめに

ライナープレートは、図-1に示すように、薄い鋼板 を波付け加工し、4 辺にフランジを取り付けたもので、 波付けにより高い強度を持ち、軽量で取り扱いが容易で あることから、立坑や集水井などの土留め部材として広 く使用されている。ライナープレートによる土留めは、 土圧など外力の作用条件により、図-2に示すように、 必要に応じてH型鋼による補強リングを円周状に構築す るが、この補強材の省略や簡素化を目的として、高靭性 繊維補強セメント複合材料 DFRCC (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite)¹⁾で補強したハイブリ ッド板の開発検討を実施したので報告する。





2. 実験概要

2.1 ハイブリッド板の形状・寸法

ハイブリッド板はライナープレートの4辺フランジで 囲まれた部分に DFRCC を流し込んで製作した。また, ライナープレートと DFRCC の付着を確保するため,図 -3に示すように D10 (SD295A) のL字鉄筋を設置した。 なお, ライナープレートの材質は SS330 である。





2.2 試験に用いた DFRCC

ある程度の変形性能を有するライナープレートを補強 するに当たり、今回検討した DFRCC には、強度レベル や応力-ひずみ曲線が異なるものを用いることとし、複 数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composite)¹⁾1 種類、超高強度繊維補強コンクリート UFC (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete)²⁾1種類、および比較の ための自己充てんコンクリート Self-Compacting Concrete (SCC)を含めた合計3種類とした。これら DFRCC の種類および物性一覧を表-1に、配合を表-2および表-3に示す。曲げ強度は100×100×400mm の角柱供試体にて3等分点載荷を実施しており、最大荷 重から曲げ強度を算出した。なお、UFC については蒸気 養生を実施しており、最高温度85℃で20h以上保持した。

DFRCC	圧縮強度	曲げ強度	继 继 循 粨	差止	
の種類	(MPa)	(MPa)	和以下田个里头只	食生	
HPFRCC	42.9	10.1	PVA	気中	
UFC	202.2	29.3	鋼	蒸気	
(SCC)	60.4	5.6	_	気中	

表 - 1 検討した DFRCC の種類および物性

表-2 HPFRCC の配合

W/(C+FA) W		S/(C+FA)	繊維		
(%)	(kg/m^3)	(%)	(vol%)		
42.2	350	70	2.0		

W:水,C:普通ポルトランドセメント,FA:フライア ッシュ,S:細骨材

表-3 UFC の配合

W	P S		繊維	
(kg/m^3)	(kg/m ³)	(kg/m^3)	(vol%)	
205	1287	905	1.75	
1 - (

W:水, P:結合材, S:細骨材

2.3 曲げ試験体の種類

曲げ載荷実験を実施した試験体の一覧を表-4に示 す。ライナープレートと DFRCC 相互の応力伝達を図る L字鉄筋は、ライナー長手方向に対して、300mm および 600mm 間隔で設置した 2 種類について検討し、600mm については千鳥配置とした。また、DFRCC はオムニミ キサー、SCC は強制 2 軸ミキサーにより製造した。とこ ろで、SCC を使用した試験体では、養生中にひび割れ幅 で最大 0.25mm 程度、主として薄肉部分に沿ったひび割 れが発生した。しかし、曲げ性能には影響を及ぼさない と判断し、載荷実験を実施したが、美観上の問題を残し た。一方、残りの DFRCC 試験体には収縮低減剤が添加 されていることから、ひび割れは確認されなかった。

試験体	DFRCC の種類	L 字鉄筋 間隔	備考
No.1	—	—	ライナープレート単体
No.2	(SCC)	300mm	
No.3	HPFRCC	300mm	
No.4	HPFRCC	600mm	
No.5	UFC	300mm	

表-4 曲げ試験体の種類

2.4 曲げ載荷実験の方法

曲げ載荷実験は、**写真-1**に示すように試験体を単純 支持し、載荷スパンを 1.4m とする中央1 点帯状曲げ載 荷とした。載荷は 1,000kN 油圧ジャッキを使用し,ハイ ブリッド板の載荷部および支点部は,モルタルで平滑に し,緩衝材を挟んで載荷を実施した。また,載荷荷重は 最大荷重まで単調載荷とし,緩やかに荷重を増加させた。

3. 実験結果

3.1 曲げ載荷実験

載荷実験で得られた各試験体の載荷荷重と載荷スパン 中央部の鉛直変位の関係を図-4に示す。載荷実験では 変位計を実験途中で取り外しているため,鉛直変位で 40mm 程度までのデータしか取得できていないが,最大 荷重までの鉛直変位の履歴は概ね測定できたと判断した。

実験の結果, DFRCC の補強により, ライナープレー トの曲げ耐力の向上が確認できた。ハイブリッド板の破 壊は, 載荷スパン中央部のライナープレートL 字鉄筋取 付用開口部の割れ,側面フランジ部ボルト孔付近の割れ, 同フランジ部の外側への変形といった,載荷スパン中央 部のライナープレートに発生する引張応力の増大による もの,載荷治具直下のコンクリート部の圧壊などが確認 された。

ここで、各試験体間の詳細な比較を行うため、各試験 体の最大荷重、最大荷重時の変位、破壊形態を表-5に 示す。表中の曲げ耐力を表す最大荷重は、基準となる試 験体 No.1 に対して、UFC を使用した No.5 が 1.86 倍で



写真-1 曲げ載荷実験状況(試験体 No.1)



試験体番号 の種類	DEPCC 是十带	是十齿舌	. 最大荷重 + 時変位 (mm)	破壊形態			
	DFRCC の種類	取八何里 (kN)		L字鉄筋取付用 開口部割れ	ボルト孔部 割れ	フランジ部 変形	コンクリート 圧壊
No.1		28.3 (1.00)	38	_	絞り	僅か	—
No.2	(SCC)	39 (1.37)	40	0	絞り	0	0
No.3	HPFRCC	38 (1.34)	38	0	0	0	見られず
No.4	HPFRCC	38.1 (1.35)	43	0	0	0	見られず
No.5	UFC	52.5 (1.86)	22	見られず	絞り	0	見られず

表-5 各試験体の最大荷重,変位,破壊形態 表中〇印は顕著な破壊形態が見られた

最大となり, SCC を使用した No.2 で 1.37 倍, HPFRCC を使用した No.3, No.4 では 1.35 倍程度となった。SCC は圧縮強度 60.4MPa, 静弾性係数 35,000MPa, 一方, HPFRCC は圧縮強度 42.9MPa, 静弾性係数 17,000MPa で あり,曲げ剛性では HPFRCC は SCC の 50%程度である のに関わらず,最大荷重がほぼ同等であったことから, HPFRCC の積極的な引張力の負担が推察された。

また、L 字鉄筋の配置間隔を検討した試験体 No.3 と No.4 においては、両者が荷重変位関係および最大荷重な どで、ほぼ同等な結果となったことから、本実験の範囲 内では、L 字鉄筋の配置量がライナープレートと DFRCC 相互の応力伝達を図るに十分な量が配置されていたと判 断できる。さらに、同試験体間では、L 字鉄筋の取付用 としてライナープレートに開口部を設けたが、その箇所 における割れが破壊形態として確認されており、それが 曲げ耐力に悪影響を与えた可能性も否めないが、開口箇 所数の異なる試験体 No.3 (載荷スパン中央部に3箇所) と No.4 (同位置に2箇所)の結果を踏まえると、その影 響は軽微とも考えられる。しかし、載荷スパン中央部の 断面欠損が曲げ耐力に影響しないとは考えにくいため、 L 字鉄筋の設置には、溶接など別な手法を検討すること が望ましい。 さらに、試験体の中で唯一、載荷治具直下のコンクリ ートの圧壊が確認された SCC を使用した試験体 No.2 で は、試験体の載荷スパン中央断面の圧縮側コンクリート が、圧縮ひずみに追随できずに破壊したと考えられるが、 同時に引張力を負担するライナープレート側でも、顕著 な破壊形態が見られた。このため、SCC の圧縮強度が本 実験で用いたコンクリートより低い場合には、コンクリ ートの圧壊が先行することが考えられ、曲げ耐力が向上 しない可能性がある。



写真-3 L字鉄筋取付用開口部の割れ



写真-2 試験体の破壊状況(No.3)



写真-4 側面フランジ部ボルト孔付近の割れ

4. 静弾性有限要素法解析による検証

4.1 解析モデル

曲げ載荷実験で耐力を確認したハイブリッド板は、板 厚2.7mmのライナープレートとDFRCCによる複合部材 であることから、解析モデルはライナープレートをシェ ル要素、DFRCCを6面体ソリッド(一部5面体)とし た1/4モデルとし、静弾性有限要素法解析による検証を 試みた。また、解析に入力した構成材料の材料定数は表 ー6に示す通りであり、載荷荷重は実験で得られた各試 験体の最大荷重を等分布荷重で解析モデルに作用させた。



表-6 構成材料の材料定数

試験体	構成材料	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	板厚
No.1 \sim	ライナー	200.000	0.2	2.7
No.5	プレート	200,000	0.5	2./mm
No.2	SCC	35,000	0.1667	
No.3, 4	HPFRCC	17,000	0.1667	
No.5	UFC	46,000	0.1667	_

4.2 解析結果

解析で得られた主応力の最大値をコンター図として図 -6~図-11に示す。図-6は基準となるライナープ レート単体の試験体 No.1の引張側を表しており,載荷ス パン中央のライナープレートの側面フランジ下縁や波形 の谷部で450MPa 程度の引張応力が発生している。本解 析が線形解析であることから,ライナープレートの引張 強度である330~430MPa と解析結果との単純な比較は できないものの,上述の主応力が非線形領域であること, 最大値の発生部位などは載荷実験とも整合する。また, HPFRCCを使用した試験体 No.3,4や UFCを使用した No.5の解析結果を図-7および図-8に示すが,DFRCC による補強効果がライナープレートの波形の谷部に顕著



図-6 最大主応力のコンター図(No.1 引張側)



図-7 最大主応力のコンター図(No.3, 4 引張側)



図-8 最大主応力のコンター図(No.5 引張側)

であることから、その部分の引張応力は低減した。一方、 側面フランジ下縁では450MPa 程度の引張応力が発生し ており、フランジ下縁が先行して破壊に至る傾向が見ら れる。このことは、実験でフランジの外側への変形が、 試験体 No.1 で僅かであったことに対して、DFRCC 試験 体では顕著に見られたことを説明できる。なお、側面フ ランジは波形部分と同一の鋼板をプレス加工して製造さ れるため、フランジの補強を考えた場合、フランジのみ の板厚を増加することは困難である。このため、何らか 別の方法でフランジの補強が必要となる可能性がある。

また,SCC を使用した試験体 No.2 の結果を図-9に 示すが,引張応力の最大値を示す位置は,DFRCC 試験 体と同様にフランジ下縁に見られるが,応力で 350MPa 程度しか発生しておらず,他の試験体に比べて低い値と なっている。



図-9 最大主応力のコンター図(No.2 引張側)



図-10 最大主応力のコンター図(No.2)



図-11 最大主応力のコンター図(No.3, 4)

さらに、試験体 No.2 および No.3、4 の載荷スパン中央 断面における主応力のコンター図について、図-10お よび図-11に示す。図-10では、SCC が引張強度を ほとんど期待できない材料であるのに関わらず、ライナ ープレートの波形の谷部付近において、僅かな範囲では あるが最大で150MPa、その他大半の要素では0~50MPa 程度の引張応力が発生する解析結果となっている。しか し、この引張応力の大半は、ライナープレートで負担す ることになるため、ライナープレートにおける主応力の 最大値は図-9で見られた350MPaではなく、さらに増 大し、結果的には、他の試験体の解析結果である最大値 450MPa 程度に近づくものと推察される。

同様に、図-11に示した HPFRCC を用いた試験体 No.3,4でも,No.2と同程度の引張応力が発生している。 DFRCC はマルチプルクラックが発生することにより, ある程度の引張応力の伝達が期待できる材料であるが, 応力レベルから見て,引張応力の一部はライナープレー トで負担されると考えられる。このため、ライナープレ ートの引張応力の最大値は,補強効果の顕著な波形の谷 部で増大し,図-7で示した載荷スパン中央におけるラ イナープレートの波形谷部の主応力は,側面フランジ下 縁で見られた最大値 450MPa に近づくものと推察される。

最後に,SCC による試験体 No.2 が載荷治具直下で圧 壊したことについて考察する。試験体 No.2 における,載 荷スパン中央断面の主応力図を図-10に示しているが, HPFRCC による試験体である図-11とも主応力分布が 近似したものとなっており,特に No.2 で過大な圧縮応力 の発生は確認できない。しかし,波形の山部付近では, セメント系材料の厚みが 10mm と薄く,粗骨材を含んだ SCC ではそのような位置で不均一な材料となっている 可能性も否めないことや,DFRCC のように補強用の繊 維を使用していないことから,発生応力レベルはほぼ同 等であっても,早期に圧壊に至ったものと考えられる。

以上より,本検討の範囲内において,ハイブリッド板 の発生応力や最大荷重について,汎用の静弾性有限要素 解析により,試験体間の相対的な比較ができる可能性が ある。

5. まとめ

本報告では、ライナープレートと DFRCC によるハイ ブリッド板の開発検討の概要を報告した。検討の結果、 得られた結論を以下に述べる。

- (1) DFRCC で補強したライナープレートは,補強しな い場合に比較して曲げ耐力が向上した。特に圧縮強 度 200MPa クラスの UFC を使用した場合には 1.8 倍 の向上効果が確認された。
- (2) HPFRCC を使用した場合には 1.3 倍の曲げ耐力の向 上が確認された。HPFRCC の強度レベルは検討した 材料中で最も低く,弾性係数も同様であるが,積極 的な引張応力を負担することで曲げ耐力向上に寄 与したと考えられる。
- (3) 圧縮強度 60MPa クラスの SCC で補強した場合も 1.4 倍の向上効果が確認されたが,養生中に発生したひ び割れについては美観上の問題がある。
- (4) 各種の DFRCC で補強したライナープレートの発生 応力や最大荷重について,汎用の静弾性有限要素法 解析で試験体間の相対的な比較ができる可能性が ある。
- (5)本報告で検討したように、ライナープレートの圧縮 域を DFRCC のような材料で補強する場合は、側面 フランジが先行して引張強度に達するため、フラン ジの補強が必要となる可能性がある。

謝辞

本報告で取り上げたハイブリッド板の開発に当たり, 当時,日鐵住金建材株式会社に在職された射場氏に御協 力頂いたことに深謝致します。

参考文献

- 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, No.127, 2007.3
- 土木学会:超高強度繊維補強コンクリートの設計・ 施工指針(案),コンクリートライブラリー,No.113, 2004.9