論文 FRP ジベルを配置した鋼床版の高靭性セメント複合材料による上面 増厚効果

福田 一郎^{*1}·三田村 浩^{*2}·今野 久志^{*3}·松井 繁之^{*4}

要旨: 鋼床版の疲労耐久性向上を目的に, ずれ止めとして FRP 製のプレート型ジベルを用い て, 高靭性セメント複合材料(ECC)で補強する合成構造を考案した。実物大の部分供試体 を用いて局所的なせん断力を作用させた要素試験を実施したところ, 従来のスタッドジベル を用いた場合と同等以上の合成効果が得られることを確認した。

キーワード:合成構造,高靱性セメント材料,鋼床版,上面増厚,ずれ止め

1. はじめに

鋼床版において、輪荷重走行による疲労損傷 が多く報告されている¹⁾。対策として、デッキプ レートの剛性を確保し、鋼床版の発生ひずみを 低減させることが有効であり、コンクリートを オーバーレイして合成床版とすることが考えら れる。しかし、建築限界や自重増の制限から薄 層になるため、負の曲げモーメントおよび局所 的な引張力に対する補強鉄筋の設置が困難であ り、引張抵抗性に優れた増厚材料が要求される。

そこで、高靱性セメント複合材料(以下, ECC) を、鋼床版の上面増厚材料に適用することを検 討した。ECCは、ひび割れ発生後もモルタルマト リックス中の繊維の架橋効果により、引張力を 負担するセメント系材料で、準自己充填型のECC が実用化のレベルに達している^{2.3)}。鋼材の降伏 ひずみの10倍程度の引張ひずみが作用した場合 でも引張力を保持できる材料である。そのため、 鋼床版に局所的な引張ひずみが作用しても、ECC は上面増厚材料として補強効果を期待できる。

ECC と鋼床版のずれ止めとしては, 薄層でも設置が可能なプレート型ジベルの適用を検討した。 プレートの材質は, 耐久性を考慮して FRP とした。図-1に, 今回考案した補強工法(以下, 本工法)の概要図を示す。プレート近傍の ECC にひび割れが発生した場合でも, ECC がひび割れ を抑制するため, ECC と鋼床版間でせん断伝達さ れ,合成効果が期待できる。

本研究では、実物大の部分試験体を用いて、 ECC と鋼床版の接合部が局所的に厳しい応力状 態となる条件での要素試験を行い、本工法によ る合成効果を検討した。

2. 試験体

2.1 試験体諸元

実験配列および試験体の形状・寸法をそれぞ れ表-1および図-2に示す。実験配列は, FRP 製のプレート型ジベル(以下, FRP ジベル)をず れ止めとした試験体を2体,比較用として,ス タッドジベルをずれ止めとした試験体を1体,



図-1 補強工法の概要図

*1 鹿島技術研究所 材料・LCE グループ (正会員)
*2 独立行政法人 北海道開発土木研究所 構造部 主任研究員 (正会員)
*3 独立行政法人 北海道開発土木研究所 構造部 主任研究員 工博 (正会員)
*4 大阪大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

- 1693 -



図-2 試験体の形状・寸法



図-4 FRP ジベルの形状・寸法

ジベルなしの試験体を1体の合計4体である。 試験体の形状は、一辺が 1,200mm の正方形で、 支間は1,000mm, 支間中央にウエブおよび縦梁を 配置し、鋼板の厚さは12mmとした。オーバーレ イする ECC の厚さは 40mm とし、鋼床版の防水層 の膜厚は 2mm とした。FRP ジベルと鋼床版の接合 には、接着樹脂を用いた。

2.2 使用材料

ECC を構成する主要材料は、セメント、フライ アッシュ,水,珪砂,短繊維である。短繊維に は繊維径 0.04mm, 長さ 12mm のビニロン繊維を用 いており、混入量は体積比で 2.1%である。図ー 3および表ー2に ECC の一軸引張試験における 応力ーひずみ曲線の測定例および材料試験結果

表一1 実験配列

試験体No.	ジベル種類	ジベル数量
No. 1	スタッドジベル	36
No. 2	FPDSでは	30
No. 3	rkr 23 ()D	18
No. 4	ジベルなし	-

表-2 ECC の材料試験結果

武験体No. 項目	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
圧縮強度(N/mm ²) ¹⁾	40. 4	42.2	48.6	38. 5
ヤング係数(kN/mm ²) ¹⁾	17	17	18	17
引張降伏強度(N/mm ²) ²⁾	4.0	4.1	4.4	4.0
引張終局ひずみ(%)2)	1.5	1.4	0.9	1.6

1)は圧縮強度試験 3本の平均値 2) は一軸引張試験 5本の平均値

表-3 鋼床版の機械的性質

項目	試験値
降伏強度 (N/mm ²)	280
引張強度 (N/mm ²)	441
ヤング係数 (kN/mm²)*	212

*) ひずみゲージを貼付して求めた見掛けの値

7 6 引張応力(N/mm²) 5 4 3 引張聽伏強度 2 鋼材降伏レベル 1 0 0 1 2 3 4 引張終局ひずみ 引張ひずみ(%) 図-3 ECC の応カーひずみ曲線の測定例

をそれぞれ示す。ECC の引張性能が載荷試験の結 果に大きく影響するが、材料試験値は、そのば らつきを考慮するとほぼ同等であり, ECC の引張 性能に試験体間で有意な差はなかったと考えら れる。図ー4に FRP ジベルの形状寸法を示す。 FRP ジベルの突起部分には、ECC が充填するよう に中空部を設けた。FRP ジベルの材質は繊維強化

ナイロンとした。スタッドジベルはφ 9mm,長さ40mmの頭つきで,材質はア ルミキルド鋼とした。防水層はポリウ レア系の吹付け硬化型の樹脂を,接着 剤はアクリル系の樹脂を用いた。表-3に鋼床版の機械的性質を示す。

2.3 試験体製作方法

試験体は, 鋼床版のブラスト処理, FRP ジベルの接着, 防水層の吹付け, ECC の打設, の順序で製作し, 載荷試 験開始まで現場封緘養生とした。スタ ッドジベルの施工は, 防水層の吹付け 前に行った。

3. 載荷試験

3.1 載荷方法

図-5に載荷概要・計測位置図を示 す。ECC と鋼床版の界面に作用するせ ん断応力が最も大きくなる状態として, 主桁ウエブ上を輪荷重が跨いで走行す る場合を想定した載荷方法とした。両 端部は,テフロン支承により水平移 動・回転を自由,中央はウエブの下フ ランジを高力ボルトにより固定した。

3.2 試験結果

図-6~図-8に載荷点下の荷重-変位関係,荷重-鋼床版ひずみ関係(主 引張および主圧縮)を示す。なお,鋼 床版には、ウエブおよび縦梁の溶接に よる熱影響があり,試験体間で降伏ひ ずみが異なっていた。試験体 No.1 では スタッド溶接を行っているので,他の 試験体に比べ熱影響が大きかった。

図-6~8より,ジベルのない試験 体 No.4 では,荷重 450kN でウエブ近傍 の鋼床版の圧縮降伏後,荷重がほとん ど増加せずに変位のみが増加した。変 位の増加に伴い,ECC と鋼床版との界 面が載荷位置周囲から広い範囲で剥離 した。変位が8mm程度以降になると,







荷重が再度ほぼ線形に増加したが,この時点 では ECC と鋼床版が分離し,鋼床版のみで抵 抗していたと考えられる。

FRP ジベルの試験体 No. 2, 3 の変位は, 載 荷初期から実験終了まで, ジベルなしおよび スタッドジベルの試験体よりも小さかった。 FRP ジベルの数量の違いで比較すると, 載荷 初期は, 数量が少ない試験体 No. 3 の変位が 小さいが, 荷重 500kN からは, 数量が多い試 験体 No. 2 の変位が小さくなった。

スタッドジベルの試験体 No.1 では、荷重 660kN で鋼床版の圧縮降伏後、荷重がほとん ど増加せずに変位のみが増加する段階 (700kN 近傍)があり、この際に ECC と鋼床 版との付着力が広い範囲でなくなり、スタッ ドジベルにせん断力が移行したと考えられ る。

図-9に、200kN および 400kN でのひび割 れ図を示す。写真-1に最終状況の例として 試験体 No.3 を示す。いずれの試験体も、荷 重 20~60kN で載荷点近傍のウエブ上に曲げ ひび割れが発生した。ひび割れは、荷重の増 加に伴ってウエブに沿って発達した後、載荷 部分を中心に無数の同心円状に発達した。



図-8 荷重ー鋼床版主圧縮ひずみ関係

- 1696 -

4. 考察

表-4に,設計荷重100kNの1,2,4倍で の各試験体の剛性(荷重-変位関係の割線勾 配)を示す。FRPジベルの試験体の剛性は, スタッドジベルの試験体よりも大きい。FRP ジベルとスタッドジベルの試験体で剛性が 異なるのは,両者のせん断力に対する抵抗方 法の違いによるものと考えられる。すなわち, スタッドジベルでは,スタッドの曲げ変形で せん断力に抵抗するのに対し,FRPジベルで は,プレートおよびプレート内部に充填され た ECC のせん断変形によりせん断力に抵抗す るものと考えられる。

FRP ジベルの数量の違いで比較すると,数 量の少ない試験体 No.3の初期剛性が大きい。 載荷初期においては ECC と鋼床版のずれが比 較的小さいため,FRP ジベルが負担するせん 断力は,FRP ジベルの数量の違いで有意な差 がないと考えられる。これに対し,載荷初期 は ECC と防水層界面での付着力があるため, 付着面積の差が剛性に影響したものと考え られる。

表-5および表-6に、荷重 200kN および 400kN における鋼床版の主引張ひずみおよび 主圧縮ひずみを示す。FRP ジベルの試験体の 主引張ひずみは、いずれもジベルなしの試験 体より小さく、鋼床版に発生する引張応力を 低減させることがわかる。FRP ジベルの数量 の違いで比較すると、FRP ジベルの数量の少 ない試験体 No.3 のほうが小さいが、これは 初期剛性と同様の理由であると考えられる。 主圧縮ひずみは、試験体 No.1~3のいずれも、 ジベルなしの試験体より小さかった。

図-10 および図-11 に,荷重-ECC の最大 ひび割れ幅の関係および本実験に用いた ECC のひび割れ幅とひび割れ面における架橋応 力の関係を示す⁴⁾。いずれの試験体も,荷重 400kN までの最大ひび割れ幅が 0.3mm 以下だ った。無筋コンクリートであるにもかかわら ず,局所応力が大きいウエブ上でもひび割れ



写真-1 最終状況の一例(試験体 No.3)

表一4 剛性の比較

荷重	100kN		200kN		400kN	
No.	剛性*1)	比率*2)	剛性*1)	比率*2)	剛性*1)	比率*2)
1	168	94	162	108	127	101
2	238	134	195	130	151	120
3	256	144	211	141	178	141
4	178	100	150	100	126	100

*1;単位(kN/mm)

*2;試験体 No.4 に対する比率

表-5 主引張ひずみの比較

荷重	200kN		400kN		
No.	ひずみ*1)	比率 ^{*2)}	ひずみ*1)	比率 ^{*2)}	
1	263	104	681	99	
2	244	97	616	90	
3	209	83	570	83	
4	252	100	684	100	

*1; 図-5中の引張側4点の平均(×10⁻⁶)

*2;試験体 No.4 に対する比率

表-6 主圧縮ひずみの比較

荷重	200kN		400kN		
No.	ひずみ*1)	比率* ²⁾	ひずみ*1)	比率*2)	
1	-760	93	-1, 592	85	
2	-679	83	-1, 525	81	
3	-641	78	-1, 461	78	
4	-820	100	-1, 873	100	

*1; 図-5中の圧縮側2点の平均(×10⁻⁶)

*2;試験体 No.4 に対する比率

が無数に分散しており(写真-1), ECC のひび 割れ抑制効果が認められた。これは,図-11 に 示すように ECC のひび割れ面で,引張応力が伝 達されているためと考えられる。FRP ジベルの試 験体 No. 2,3 は,スタッドジベルの試験体 No. 1 よりもひび割れ幅が小さかった。スタッドジベ ルの試験体でひび割れ幅が大きいのは,スタッ ドジベル近傍の局所応力が大きいためと考えら れる。ひび割れ幅の観点からは,ジベル近傍の 局所応力が緩和される FRP ジベルの方が有利で あると考えられる。

以上より、本工法は従来のスタッドジベルを 用いた場合と同等以上のせん断伝達特性を有し ていると考えられる。面外せん断力によって局 所的な変形が生じても、鋼床版との合成効果が 期待できる。輪荷重の走行位置に非常に厳しい 局所応力が作用しても、ECC のひび割れ分散効果 が期待できることから、ひび割れ幅を抑制し、 鋼床版の耐久性が向上するものと思われる。

5. まとめ

鋼床版の疲労耐久性向上を目的に、上面増厚 材料として ECC を適用し、ずれ止めに FRP ジベ ルを用いる合成構造の性能を検討した結果、以 下の知見を得た。

- (1) 面外せん断力によって局所的な変形が生じ ても,従来のスタッドジベルと同等以上の合 成効果が期待できる。
- (2) 鋼床版に発生するひずみを低減することが 可能であり, 鋼床版の疲労耐久性が向上する 可能性が高い。
- (3) 局所的な引張力が作用した場合でも,ひび割 れが分散し,ひび割れ幅を抑制する。

本工法の今後の課題としては,輪荷重走行試験による疲労特性の把握のほか,FRP ジベルのせん断耐力および剥離力に対する抵抗性の把握などが挙げられる。



図-11 ECC の引張応カーひび割れ幅の関係⁴⁾

参考文献

- 39 (第床版の疲労委員会: 39 (第床版の疲労、土木学 会論文報告集, Vol.410, I-12, pp.25-36, 1989.10
- 2) 閑田徹志,永井覚,丸田誠:高靭性繊維補強 セメント複合材料の施工性および耐久性に 関する実験的検討,コンクリート工学年次論 文集, Vol.25, No.1, pp.1859-1864, 2003.6
- 3)須田久美子,閑田徹志,一宮利通,坂田昇, 金氏眞:高靭性 FRC ハーフプレキャスト合成 床版の輪荷重疲労特性,コンクリート構造物 の補修,補強アップグレードシンポジウム論 文報告集, Vol. 1, pp. 261-268, 2001
- Li, V. C. et al: Tensile Strain-Hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite, ACI materials Journal, Vol.98, No.6, pp.483-492, 2001