

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

福田 一郎<sup>\*1</sup>・三田村 浩<sup>\*2</sup>・今野 久志<sup>\*3</sup>・松井 繁之<sup>\*4</sup>

**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、高靱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<sup>1)</sup>。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<sup>2,3)</sup>。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、

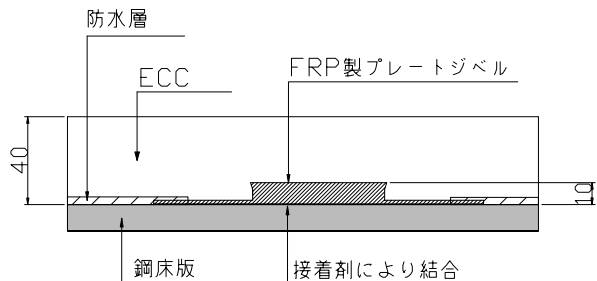


図-1 補強工法の概要図

\*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）

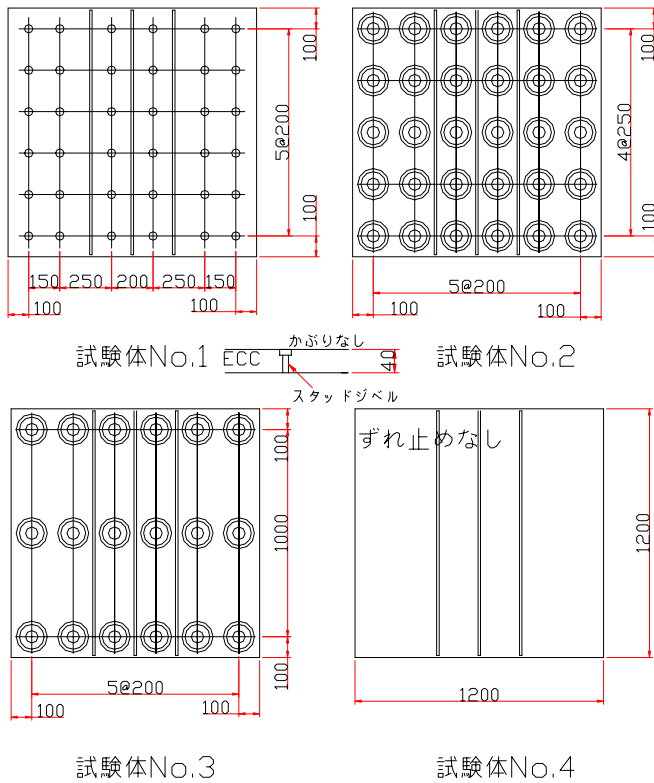


図-2 試験体の形状・寸法

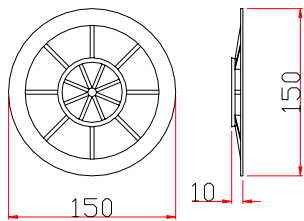


図-4 FRP ジベルの形状・寸法

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、支間中央にウェ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-3および表-2にECCの一軸引張試験における応力-ひずみ曲線の測定例および材料試験結果

表-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	FRPジベル	30
No. 3		18
No. 4	ジベルなし	—

表-2 ECCの材料試験結果

項目	試験体No.			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>1)</sup>	40.4	42.2	48.6	38.5
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) <sup>1)</sup>	17	17	18	17
引張降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>2)</sup>	4.0	4.1	4.4	4.0
引張終局ひずみ (%) <sup>2)</sup>	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 <sup>2</sup> )	280
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	441
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) *	212

\*) ひずみゲージを貼付して求めた見掛けの値

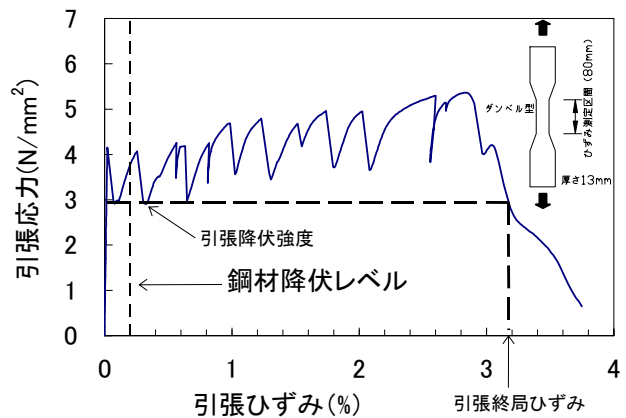


図-3 ECCの応力-ひずみ曲線の測定例

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-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φ9mm、長さ40mmの頭つきで、材質はアルミキルド鋼とした。防水層はポリウレタ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、荷重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. 荷重試験

### 3.1 荷重方法

図-5に荷重概要・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、主桁ウェブ上を輪荷重が跨いで走行する場合を想定した荷重方法とした。両端部は、テフロン支承により水平移動・回転を自由、中央はウェ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に荷重点下の荷重-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、ウェ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ため、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でウェ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荷重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、

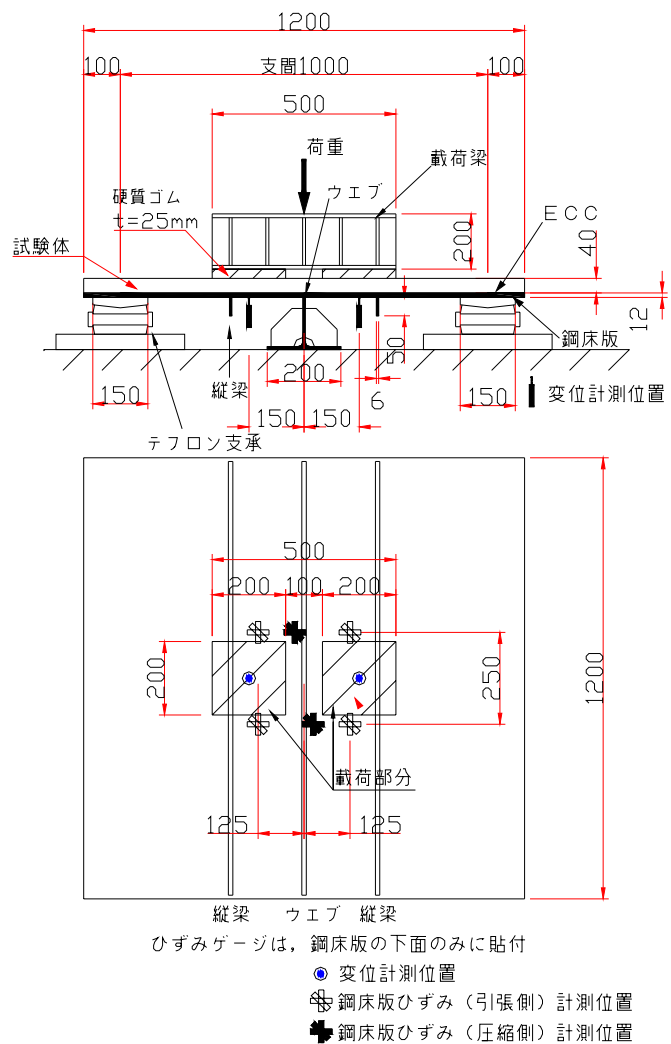
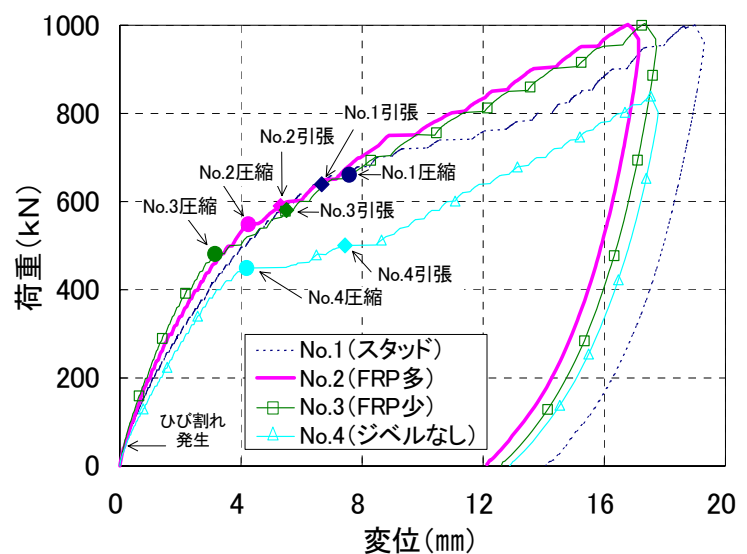
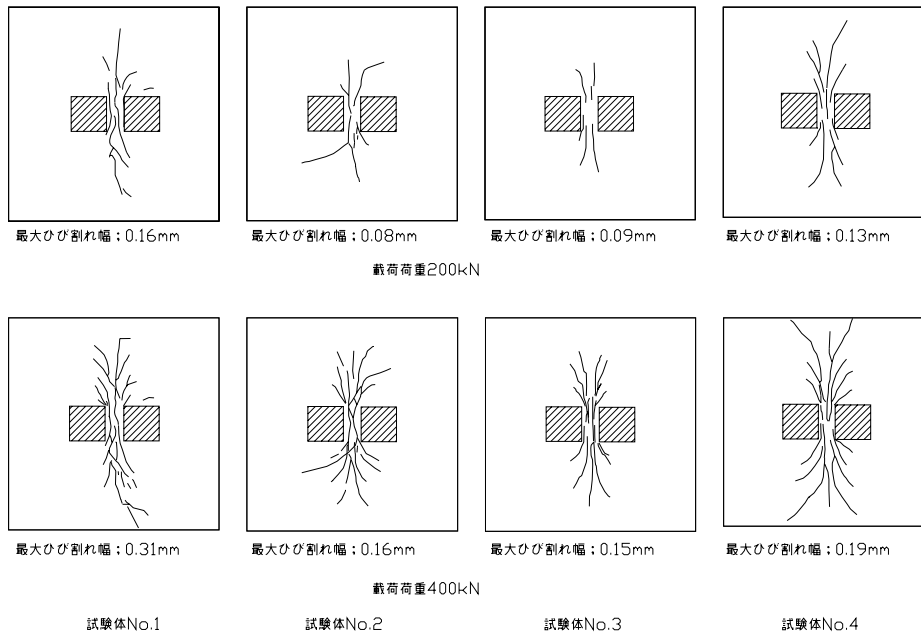


図-5 荷重概要・計測位置図



凡例の説明 No. ; 試験体 No.  
 圧縮 ; 鋼床版圧縮降伏, 引張 ; 鋼床版引張降伏

図-6 荷重-荷重下変位関係



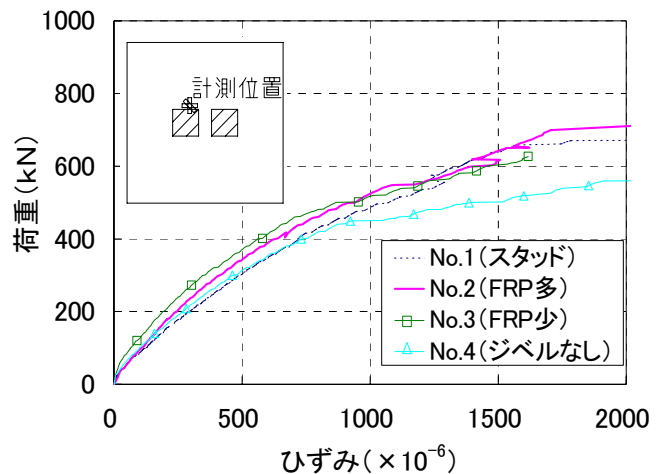
図一 九 ひび割れ図

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。

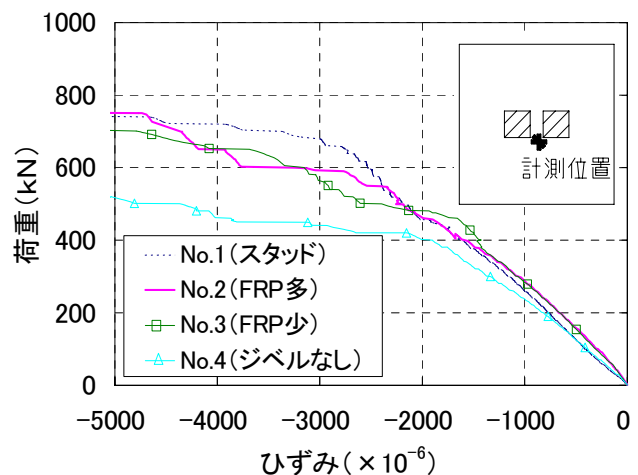
FRP ジベルの試験体 No. 2, 3 の変位は、載荷初期から実験終了まで、ジベルなしおよびスタッドジベルの試験体よりも小さかった。FRP ジベルの数量の違いで比較すると、載荷初期は、数量が少ない試験体 No. 3 の変位が小さいが、荷重 500kN からは、数量が多い試験体 No. 2 の変位が小さくなった。

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。

図一 九 に、200kN および 400kN でのひび割れ図を示す。写真一 一 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 で載荷点近傍のウェ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ェ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。



図一 七 荷重－鋼床版主引張ひずみ関係



図一 八 荷重－鋼床版主圧縮ひずみ関係

#### 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り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りひずみは、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<sup>4)</sup>。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ェブ上でもひび割れ

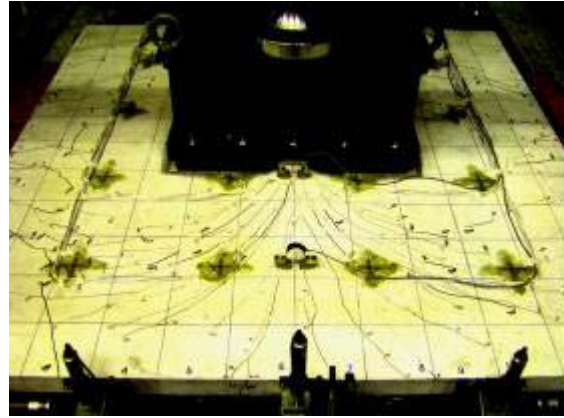


写真-1 最終状況の一例（試験体 No. 3）

表-4 剛性の比較

No.	100kN		200kN		400kN	
	剛性 <sup>*1)</sup>	比率 <sup>*2)</sup>	剛性 <sup>*1)</sup>	比率 <sup>*2)</sup>	剛性 <sup>*1)</sup>	比率 <sup>*2)</sup>
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 主引張りひずみの比較

No.	荷重	200kN		400kN	
		ひずみ <sup>*1)</sup>	比率 <sup>*2)</sup>	ひずみ <sup>*1)</sup>	比率 <sup>*2)</sup>
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 ( $\times 10^{-6}$ )

\*2；試験体 No. 4 に対する比率

表-6 主圧縮ひずみの比較

No.	荷重	200kN		400kN	
		ひずみ <sup>*1)</sup>	比率 <sup>*2)</sup>	ひずみ <sup>*1)</sup>	比率 <sup>*2)</sup>
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 ( $\times 10^{-6}$ )

\*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、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、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。

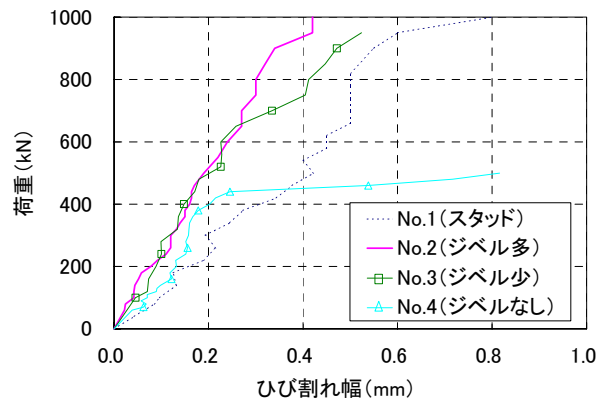


図-10 荷重-ECC の最大ひび割れ幅の関係

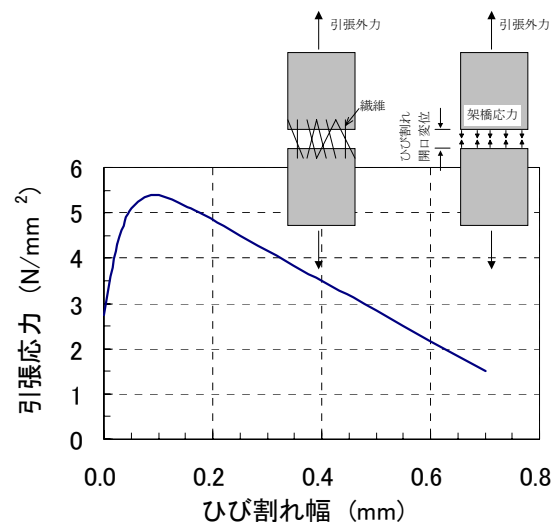


図-11 ECC の引張応力-ひび割れ幅の関係<sup>4)</sup>

## 参考文献

- 1) 鋼床版の疲労委員会：鋼床版の疲労，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：高靱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：高靱性 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
- 4) 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