

高靱性繊維補強セメント複合材料の利用拡大

Development on Engineered Cementitious Composite

坂田 昇・須田 久美子 閑田 徹志
福田 一郎 平石 剛紀 巴 史郎

要 約

高靱性セメント系複合材料 (Engineered Cementitious Composite, 以下, ECC) は, その優れた性能が注目され, 補修・補強分野を中心に実施工へ適用されつつある¹⁾。実施工への展開にあたり, これまでの実験データをもとに統計処理を行い, ECCの品質管理手法の確立を図った。つぎに, 世界初となるECCの場所打ちコンクリートの実現に向けて, レディミクストコンクリート工場での製造方法を検討した。その結果, 練混ぜ時間や材料投入順序などの最適な組合せを選定することで, 工場においても試験室のECCと同等のフレッシュ性状及び硬化性状が得られることを見出した。また, ECCは, 打継ぎ部の曲げ特性やひび割れ部の凍結融解抵抗性においても優れた性能を有することを実験的に明らかにした。さらに, ECCを用いた鋼床版の画期的な補強方法を考案し, 実物大の試験体を用いた載荷実験により補強効果を確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 品質管理手法
- III. 実機製造方法
- IV. 性能確認
- V. まとめ
- VI. おわりに

I. はじめに

高靱性セメント系複合材料 (以下, ECC) は, セメント, 水, 砂などの通常のモルタル材料に, 高強度の有機繊維を混合したセメント系材料であり, ひび割れ発生後も繊維が引張力を負担し, 数パーセント程度の引張ひずみが作用しても引張力を保持できる。従来のセメント系材料にない優れた性能から, ECCは様々な用途への展開が期待されているが, これまでは研究室レベルでの実験的検討がほとんどであった。

近年, 筆者らはECCの適用拡大に向けての一策として, 汎用的な機械で施工が可能なECCの吹付け施工システムを開発した²⁾。これを契機に吹付け施工を中心にECCの実施工への適用が増加している。ECCを実施工へ適用するには, 適用したECCが所定の引張性能を有している必要がある。すなわち, ECCの品質管理としては引張性能試験が重要になる。そこで, これまでに実施した試験データをもとに統計的な処理を行い, ECCの品質管理手法を検討した。

一方, 流し込みタイプのECCは, 建築の耐震デバイスや道路橋床版の埋設型枠など, 主にプレキャスト部材での研究が進んでおり, プレキャスト工場での製造技術が確立しているが³⁾, これまでに場所打ちコンクリートとしての製造技術は確立されていない。そこで,

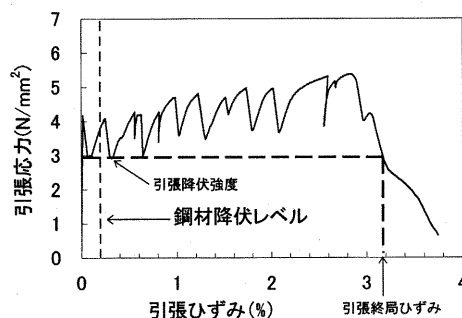


Fig.1 ECCの引張応力-ひずみ関係の一例
(Example of Relationship of Stress and Strain)

世界初となるレディミクストコンクリート工場 (以下, レミコン工場) でのECCの製造を目標として, 各種の試験及び検討を行った。

また, ECCの実施工への適用に伴い, 試験室では想定していなかった打重ね及び打継ぎ目, ひび割れが発生した状態での凍結融解抵抗性について検討した。さらに, ECCを用いた鋼床版の画期的な補強工法を考案し, その補強効果を確認することを目的に実物大の載荷試験を行った。

本報告では, ECCの引張性能に関する品質管理手法, レミコン工場の大型強制二軸ミキサーによるECCの製造方法, ECCの各種の性能確認試験結果について報告する。

II. 品質管理手法

1. 引張性能の管理方法

一軸引張試験におけるECCの引張応力-ひずみ関係の一例をFig.1に示す。通常のセメント系材料とは異なり, 初期ひび割れ発生以降も引張ひずみの増加に伴い応力が徐々に増加する擬似ひずみ硬化特性を示す。ここで, ECCの品質管理値として引張降伏強度

キーワード: ECC, 品質管理, 合成構造, 鋼床版, 曲げ, 打継ぎ, 凍結融解, ひび割れ

及び引張終局ひずみをFig.1に示すとおり定義する。つまり、引張降伏強度は金属材料の降伏点に相当する値として定義し、引張終局ひずみは引張降伏強度を確保できる最大のひずみとして定義する。このようにしてECCの引張側の応力-ひずみ曲線を完全弾塑性モデルとして定義することで、ECCの引張特性を設計に利用することが可能になることがわかっている⁴⁾。

ECCの引張特性を考慮して適用する場合は、通常のコンクリートで行われる圧縮強度の管理のほかに、引張性能を管理する必要がある。すなわち、適用レベルに応じた所定の引張降伏強度及び引張終局ひずみが保証されることを品質管理試験により確認する必要がある。ECCの引張試験としては、実用的で実績が豊富な方法としてダンベル型の一軸引張試験(測定区間長80mm, 幅30mm, 厚さ13mm)を実施する。Fig.2にダンベル型引張試験方法の概要を示す。試験時の載荷速度は0.5mm/分とし、供試体両側に取り付けた2本の変位計の平均で引張ひずみを評価する。なお、1ケースの試験体数は5体として試験を行い、二次曲げの影響を排除する目的で、一方のひずみ計の変位が他方の2倍以上となったデータは、不良データとして採用しない。ここで、流し込み施工において繊維の三次元的配向の影響がある場合は、ダンベル型引張試験ではECCの引張性能を過大評価する可能性があるため、所定の係数をダンベル型引張試験結果に乗じる。この係数は、部材の厚さ及び施工方法によって異なると考えられるため、今後のデータの蓄積が必要である。吹付け施工の場合は、繊維が二次元配向となるので、ダンベル型引張試験の結果をそのまま用いる。

室内試験におけるダンベル型引張試験による吹付けECCの引張降伏強度及び引張終局ひずみの測定例をTable 1に示す。ECCの品質管理試験では、5%危険率の下側信頼区間の値が設計値を下回らないことを確認する。

2. ECCの品質管理の適用例

ECCの品質管理の例として、広島県三高ダムの既設堤体の吹付け補修工事に用いたECCの品質管理結果を示す¹⁾。ECCの品質管理基準値は、室内試験結果を参考に、引張降伏強度を3.0N/mm²、引張終局ひずみは変動係数が大きいことから0.5%とした。

品質管理試験結果としてFig.3及びFig.4に引張降伏強度及び引張終局ひずみの施工日ごとの試験結果を示す。実施工におけるECCの引張試験結果は、引張降伏強度、引張終局ひずみのいずれも試験室に比べて小さい結果であった。これは、温度や圧送距離などの施工条件や供試体の養生条件の違いなどによるものと考えられる。したがって、今後、現場施工におけるECCの品質管理の基準値については、さらに実施工における試験データを蓄積し、検討していく必要があると考えられる。

III. 実機製造方法

1. 開発の経緯

モルタルマトリックス(以下、マトリックス)中に多量の繊維を含むECCは、マトリックス中に繊維を均一に分散させるため、従来、油圧式の特殊なミキサー(オムニミキサー)を用いて製造する必要があった。しかし、オムニミキサーはレミコン工場では特殊な設備であるため、一般的な強制二軸練りミキサーによるECCの製造技術の確立が求められた。レミコン工場でのECCの製造技術確立に向けて検討した項目について、改良点を中心に以下に示す。

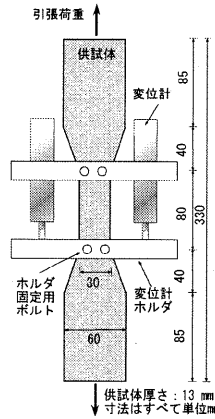


Fig.2 一軸引張試験

(Uniaxial Tensioning Test)

Table 1 ダンベル型引張試験結果の測定例 (n=84)

(Example of Uniaxial Tensioning Test)

試験項目	平均値	標準偏差	変動係数
引張降伏強度	3.8N/mm ²	0.4N/mm ²	10.5%
引張終局ひずみ	3.0%	1.1%	37.8%

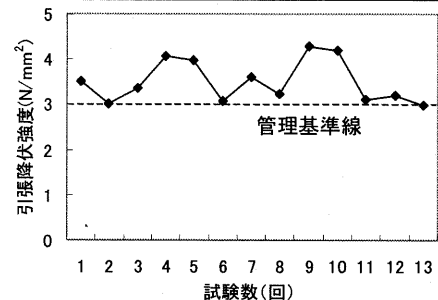


Fig.3 引張降伏強度試験結果

(Results of Tensile Yield Strength)

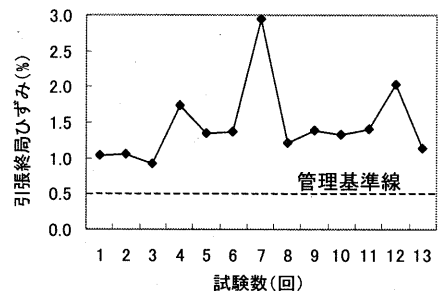


Fig.4 引張終局ひずみ試験結果

(Results of Tensile Strain)



Photo 2 実機製造によるECCのフレッシュ性状

(Fresh Properties of ECC)

2. 練混ぜ方法に関する検討

強制二軸練りミキサーによる、練混ぜ時間、材料投入順序及びコンクリート配合などを水準とした練混ぜ方法に関する検討を行い、それらの最適な組合せを選定することで、強制二軸練りミキサーでのECCの製造を可能とした。

しかしながら、ECCの製造を連続で実施した場合などに、ミキサーの羽のシリンダー部分に付着したマトリックスがダマとなって散在した。そこで、構造物における材料の均一性を確実に図るための方法として、レミコン工場の強制二軸練りミキサーで練混ぜたECCを、現場に設置した容量500リットル以下の強制二軸練りミキサーで再度練混ぜすることを検討した。この結果、数十秒の再練混ぜによって、一次練りで散在したダマが分散して材料の均一性が確保できることを確認した。

3. 運搬方法に関する検討

ECCの現場までの搬送手段は、一般的なコンクリートと同様にアジテータトラックとなるが、通常のアジテートを実施した場合には、フレッシュ性状の経時変化が大きくなる傾向を示した。そこで、運搬時にアジテートなしとしたところ、フレッシュ性状の経時変化は小さく、一般的なコンクリートと同等の打設許容時間が確保できることを確認した。

以上の検討結果から、レミコン工場の強制二軸練りミキサーを用いたECCの製造技術が確立できた。今後も、検討を継続してより汎用的な製造方法の確立を目指す予定である。

IV. 性能確認

1. ひび割れ部の凍結融解抵抗性及び凍結融解後の曲げ特性

ECCはひび割れを許容する材料であることから、ひび割れ部でのECCの凍結融解抵抗性及び、凍結融解作用後の曲げ特性を確認するための実験的検討を行った。

試験体は10cm×10cm×40cmの角柱供試体とし、凍結融解サイクル開始前に曲げ試験を行い、初期載荷終了点としてひび割れ発生荷重の1.5倍の荷重まで載荷した。Fig.5に曲げ試験の荷重－変位関係の代表例を示す。ひび割れを発生させた後、「コンクリートの凍結融解試験方法(JSCE-G501)」に準拠した試験を実施し、30サイクルごとに、相対動弾性係数及び質量変化率を測定し、同一配合で凍結融解前に曲げ試験を行わなかった試験体（以下、ひび割れなしの試験体）との比較をした。また、同サイクルで顕微鏡を用いて、ひび割れ幅の測定及び試験体表面のスケーリング状況の観察を行った。さらに、凍結融解300サイクル終了後に曲げ試験を行い、同一配合の凍結融解作用を受けていない試験体と比較した。

Fig.6～Fig.8に、ひび割れありの試験体における最大ひび割れ幅の変化、凍結融解試験における相対動弾性係数の比較及び質量変化率の比較を示す。なお、ひび割れありの試験体は0サイクルの質量を乾燥状態で測定し、30サイクル以降を湿潤状態で測定したために、30サイクルで質量が大きく増加した。そこで、質量変化率は、30サイクルの質量とした。

Fig.6から、初期載荷で発生した最大ひび割れ幅は、すべての試験体で0.04mm以下であり、試験開始から終了まで、ひび割れの進展及びひび割れ幅の顕著な増加は認められなかった。ひび割れ中に侵入した水分は凍結時に膨張圧を生じ、ひび割れを拡大及び進展させ

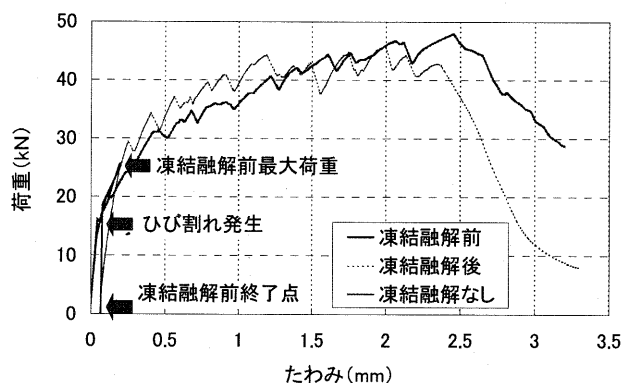


Fig.5 荷重－変位関係

(Relationship of Load and Displacement)

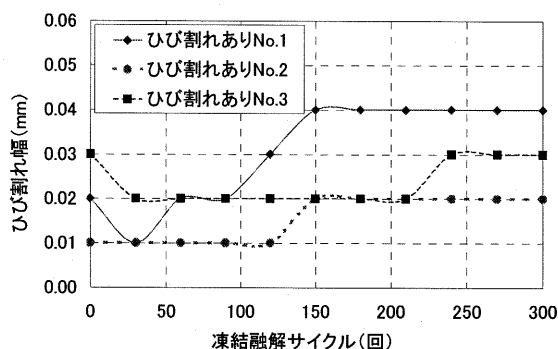


Fig.6 ひび割れ幅の変化

(Change of Crack width)

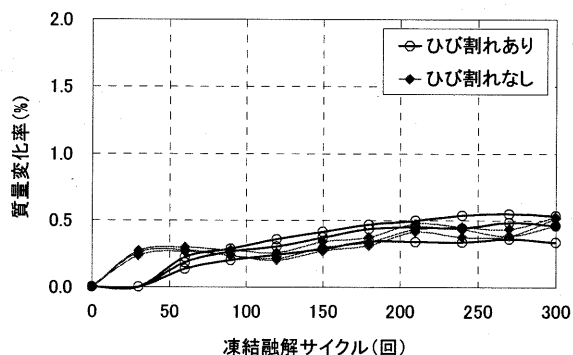


Fig.7 質量変化率の変化

(Change of Ratio of Mass Change)

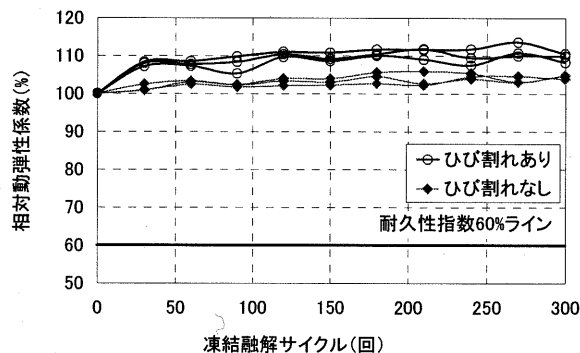


Fig.8 相対動弾性係数の変化

(Change of relative dynamic modulus of elasticity)

と考えられたが、試験結果からはそのような現象は観察されなかった。これは、上記の膨張圧に対してひび割れを架橋する繊維が、十分な剛性を持って抵抗したことを示していると考えられる。

Fig. 7 から、相対動弾性係数はほとんど変化がなかった。表面に微細なひび割れが生じた状態で凍結融解が生じて、内部のひび割れは進行せず、健全な状態を保つと考えられる。これは、ひび割れ部分以外での劣化が生じなかったとともに、ひび割れ部でも水の膨張圧を、繊維の架橋によって拘束し、ひび割れの進行を抑制したためであると考えられる。

Fig. 8 から、質量変化率は緩やかに増加した。ひび割れなしの試験体も質量変化率が増加していることから、サイクル数の増加とともに E C C 表面に微細なひび割れが発生して水を吸収したためであると考えられる。

Fig. 9 は曲げ試験後のひび割れ状況であり、Fig. 5 から凍結融解後の荷重-変位関係は凍結融解作用を受けていない試験体とほぼ同様であった。Fig. 9 より凍結融解前のひび割れが進展して破壊に至るのではなく、数本のひび割れが新たに発生しており、繊維の架橋効果が認められた。したがって、凍結融解作用では繊維や繊維とマトリックス界面の性能に損傷は生じないと考えられる。これらのことから、E C C はひび割れ部においても高い凍結融解抵抗性を有しており、また、本実験の範囲では凍結融解作用が E C C の引張降伏強度や引張終局ひずみに及ぼす影響は小さく、曲げ特性を確保できると考えられる。

2. 打重ね部及び打継ぎ部の曲げ特性

E C C は繊維の架橋効果により引張力を負担する材料であるが、比較的大規模な部材に適用する際には、施工中断による打重ね及び施工継目による打継ぎなど、繊維が不連続な箇所が発生する可能性がある。そこで、打重ね時間間隔及び打継ぎ処理方法が、E C C の曲げ特性におよぼす影響を把握することを目的として、曲げ試験による実験的検討を行なった。

Fig. 10 に試験体の形状・載荷位置を示す。打重ね及び打継ぎ（以下、打継ぎに統一）の角度を 30 度とし、旧ブロック打設の際に新ブロック側に型枠を設置して角度を設定した。施工中に打設間隔が伸びた場合などを想定した試験体では、旧ブロック打設後の打継ぎ時間の間隔を 2、4 時間とし、いずれも打継ぎ処理や再振動を行わなかった。これに対し、施工継目を想定して打継ぎ間隔を材齢 1 週とした試験体では、旧ブロック打設の 2 時間後に打継ぎに設置した型枠を脱型して、2 種類の方法で打継ぎ面に微細な凹凸処理をした後、新ブロック打設まで湿潤養生とした。曲げ試験は 3 等分点載荷とし、同一配合の試験体との比較を行った。

Fig. 11 及び Fig. 12 に荷重-試験体中央変位の関係及びひび割れ状況を、Table 2 に実験結果一覧示す。Fig. 11 より、すべての試験体で、ひび割れ発生後も破壊に至らず変位の増加に伴い荷重が増加した。最大荷重後も脆性的な破壊は生じず、変位が増加しながら荷重が緩やかに低下した。Table 2 より、ひび割れ発生荷重は、打継ぎの有無にかかわらずほぼ同等であった。打継ぎのある試験体では、打継ぎ端部に最初のひび割れが発生したが、最初のひび割れが打継ぎに沿って破壊に至るのではなく、複数のひび割れが生じて破壊に至っており、E C C のひび割れ分散効果が認められた。これは、打継ぎに作用するせん断力及び剥離力に対して、新旧マトリックス及

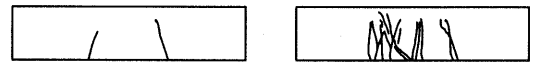


Fig.9 曲げ試験後のひび割れ状況
(State of Cracking)

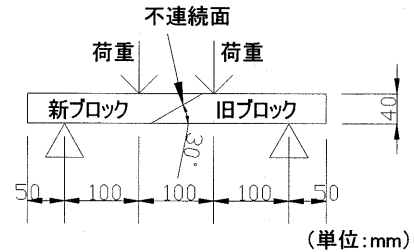


Fig.10 試験体形状・載荷位置
(Test Specimen)

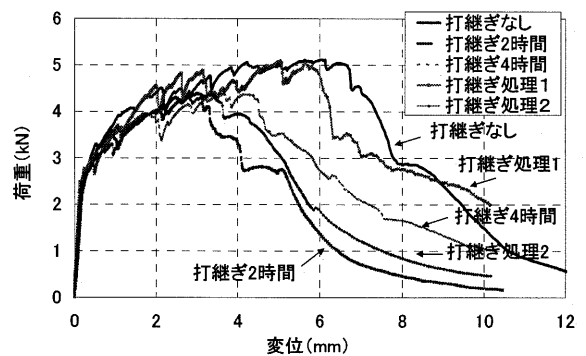


Fig.11 荷重-変位関係
(Relationship Between Load and Displacement)

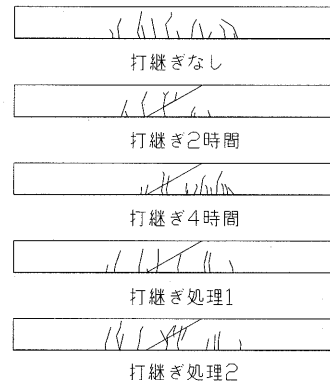


Fig.12 ひび割れ状況
(State of Cracking)

Table 2 曲げ試験結果一覧
(Results of Bending Test)

打継ぎ面の状態	ひび割れ発生時の荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時のたわみ (mm)
打継ぎなし	2.3	5.7	5.2
打継ぎ間隔2時間	2.1	4.3	2.9
打継ぎ間隔4時間	2.5	4.3	3.9
打継ぎ処理1	1.9	4.9	3.6
打継ぎ処理2	2.1	4.5	3.0

試験値は 3 本の平均値

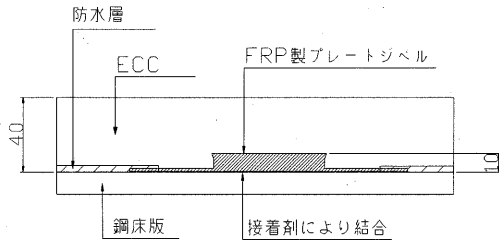


Fig.13 補強工法の概要図
(Outline of Reinforcement Method)

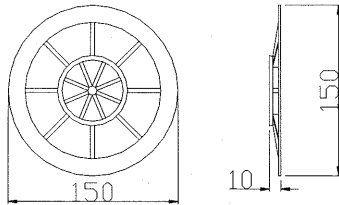


Fig.14 プレートジベルの形状・寸法
(Plate Dowel)

び繊維とマトリックスの付着力により抵抗したためと考えられる。

打継ぎがある試験体の最大荷重及び最大荷重時の変位は、打継ぎなしの試験体に比べて小さくなった。最大荷重時の変位は、ECCの引張終局ひずみと相関が大きく、打継ぎ部における見掛けの引張終局ひずみが、打継ぎなしに比べて小さくなると考えられる。

打継ぎ時間間隔2時間と4時間では有意な差がなかった。ECCの凝結時間が通常のコンクリートよりも長いために、本実験の範囲では有意な差がなかったものと考えられる。

以上より、打継ぎ部の角度を30度以下とし、打継ぎ面に微細な凹凸処理を施して湿潤状態を保つことで、概ねECCの曲げ特性を確保できるものと考えられる。

3. 新しい鋼床版補強工法

(1) 背景

近年、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。対策として、コンクリート上面増厚工法が有効であるが、建築限界や自重の制約から薄層になる。そのため、負の曲げモーメントや局所的な引張力に対する補強鉄筋の配置が困難であり、引張抵抗性に優れた増厚材料が要求される。

これに対し、北海道開発土木研究所との共同研究によりECCを用いた画期的な鋼床版の補強工法を考案した。Fig.13に今回考案した補強工法（以下、本工法）の概要図を示す。ECCが引張力を負担するため、補強鉄筋を配置しなくても補強効果が期待できる。ECCと鋼床版のずれ止めには、薄層でも設置可能なプレート型ジベル（以下、プレートジベル）を適用した。Fig.14にプレートジベルの形状・寸法を示す。塩害等に対する鋼床版の長期耐久性を確保するために、鋼床版には防水層による被覆を施し、プレートジベルの材質はFRPとした。ここでは、実物大の部分試験体を用いた要素試験により、本工法の合成効果について検討した。

(2) 実験概要

試験体の形状・寸法をFig.15に示す。上面増厚するECCの厚さは、構造物での自重及び建築限界を考慮して比較的薄層の40mmとし、防水層の膜厚は2mmとした。プレートジベルと鋼床版は樹脂による

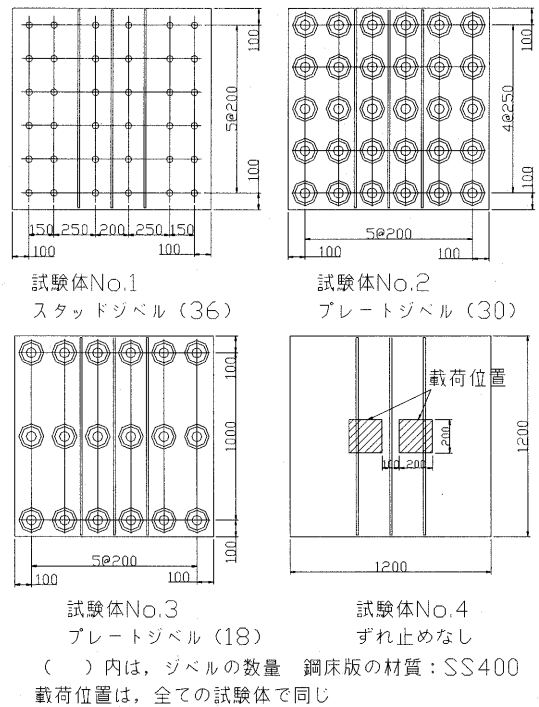


Fig.15 試験体の形状・寸法
(Test Specimens)

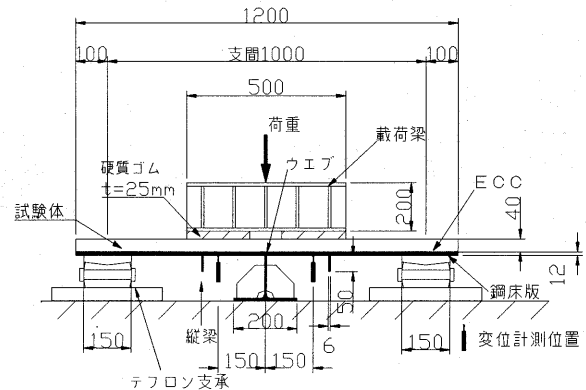
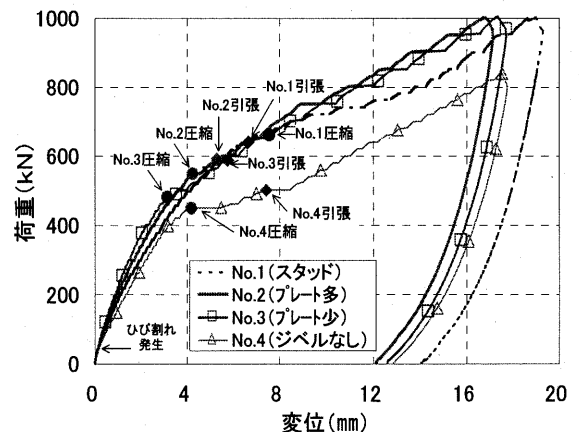


Fig.16 載荷概要図
(Outline of Test)



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

Fig.17 荷重-載荷点下変位の関係
(Relationship Between Load and Displacement)

接着接合とした。防水層はポリウレタ系の吹付け硬化型樹脂を、接着剤はアクリル系樹脂を用いた。試験体は、鋼床版のブラスト処理、プレートジベルの接着、防水層の吹付け、ECCの打設、の順序で製作し、所定の湿潤養生後に載荷試験開始まで現場封緘養生とした。

Fig. 16に載荷概要を示す。ECCと鋼床版の界面に作用する局所応力が最も大きくなる状態として、主桁ウェブ上に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。

(3) 実験結果

Fig. 17に載荷点下の荷重－変位関係を示す。なお、鋼床版には、ウェブ及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。

Fig. 17より、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、荷重の増加に伴い、ひび割れがウェブに沿って発達した後、鋼床版の圧縮降伏及び引張降伏が生じた。その後も荷重は増加し、ひび割れは載荷部分を中心に無数の同心円状に発達した。

Fig. 17より、プレートジベルの試験体の剛性（荷重－変位関係の割線勾配）はジベルなし及びスタッドジベルの試験体よりも大きく、従来のスタッドジベルと同等以上の合成効果が認められた。本実験の範囲では、プレートジベルの数量の違いによる有意な差は認められなかった。スタッドジベルは、スタッドの曲げ変形でせん断力に抵抗するが、プレートジベルでは、プレートと周囲の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。

Fig. 18に荷重－ECCの最大ひび割れ幅の関係を示す。いずれも、荷重400kNまでの最大ひび割れ幅が0.3mm以下であり、Photo 3のようにウェブ上の厳しい局所応力が作用する箇所においてもひび割れが分散していることから、ECCのひび割れ抑制効果が認められた。また、プレートジベルの試験体は、スタッドジベルの試験体よりもひび割れ幅が小さかった。これは、プレートジベルを用いることで、ジベル近傍の局所応力が緩和されたためと考えられる。

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。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。

V. まとめ

ECCの実施工への適用拡大に伴い、ECCの品質管理手法、レディミクストコンクリート工場でのECC製造方法、打継ぎ部や凍結融解作用後の曲げ特性、新しく考案した画期的な鋼床版の補強工法の補強効果について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ECCの品質管理として引張性能が重要であり、引張降伏強度及び引張終局ひずみを管理することで、設計値を設定できる。吹付けECCの施工において引張降伏強度 3.0N/mm^2 、引張終局ひずみ0.5%の管理限界を設定したところ、十分に満足できることが確認できた。
- 練混ぜ時間、材料投入順序及びコンクリート配合の最適な組合せを選定することで、レディミクストコンクリート工場でのECCの製造が可能となる。

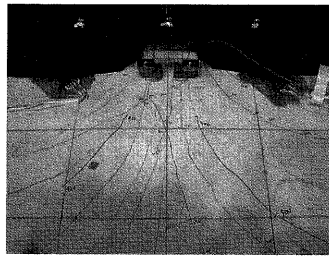


Photo 3 ウェブ直上のひび割れ状況 (State of Cracking)

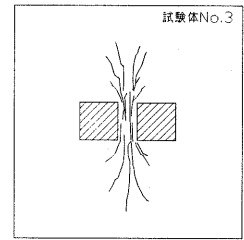


Fig. 18 ひび割れ状況(荷重400kN) (State of Cracking)

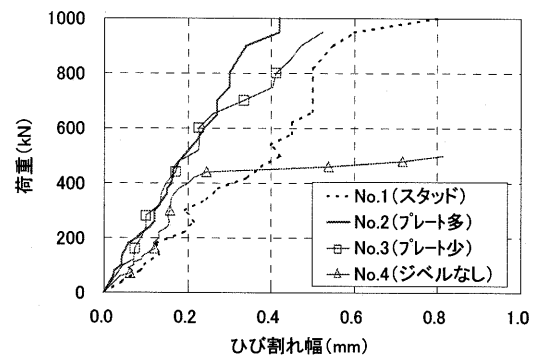


Fig. 19 荷重－最大ひび割れ幅の関係 (Relationship Between Load and Cracking)

のECCの製造が可能となる。

- 表面に微細なひび割れが発生した状態で凍結融解が作用しても、ECCの相対動弾性係数はほとんど変化せず、凍結融解300サイクル後も、ECCの曲げ特性が確保できる。
- 打継ぎ部においては、打継ぎ面の角度を30度以下とし、打継ぎ面に微細な凹凸処理をして湿潤状態に保つことで、ECCの曲げ特性を概ね確保できる。
- プレートジベルをずれ止めとして、ECCを鋼床版の上面増厚材料として適用した場合、ECCが引張力を負担することにより、鋼床版との合成効果が期待でき、ECCのひび割れ抑制効果により、疲労耐久性が向上すると考えられる。

VI. おわりに

本開発により、ECCの品質管理手法、レディミクストコンクリート工場での製造技術が確立できた。今後も基礎データの蓄積を図りつつ、さらなるECCの実施工への展開を図りたい。

参考文献

- 児島ほか；高靱性セメント複合材料を用いた吹付け補修工法の適用，コンクリート工学，Vol. 42，No. 5，(2004. 5)，pp. 135-139.
- 坂田ほか；高靱性セメント複合材料の吹付け施工システムの開発，鹿島技術研究所年報，Vol. 50，(2002. 9)，pp. 187-190.
- 関田ほか；高靱性繊維補強セメント複合材料の施工性及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報告集，Vol. 25，No. 1，(2003)，pp. 1859-1864.
- 福田ほか；高靱性セメント複合材料の引張性能を考慮した曲げ部材の設計法，高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，2003. 12，pp. 169-174.