高靭性セメント複合材料で上面増厚した合成鋼床版の疲労耐久性に関する研究

Research on the fatigue durability of composite steel bridge deck with Engineered Cementitious Composite top surface

的場栄孝*，大田展裕**，三田村浩***，今野久志****，松井繁之*****

Hidetaka MATOBA, Nobuhiro OTA, Hiroshi MITAMURA, Hisashi KONNO, Shigeyuki MATSUI

* (株)宮地鐵工所 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通3番地)

** 前田建設工業(株) (〒519-3200 三重県北牟婁郡紀北町 紀伊長島町 508-9)

*** (独)北海道開発土木研究所 構造研究室 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

**** 工博 (独)北海道開発土木研究所 構造研究室 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

*****工博 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Recently in Japan, fatigue-cracking damage in orthotropic steel decks is frequently reported. Fatigue damage had occurred by stress concentration around the welding part between steel elements. The reason is considered to be the remarkable increase of traffic volume and existence of overloaded vehicles. As a permanent measures of reducing fatigue damages of new making steel decks, it is proposed that a layer of fiber reinforced concrete on the steel deck surface is put to change the whole system into a composite deck.

Generally, SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) is often used for the concrete on the steel deck surface. In addition, the studs are often used to transmit the shear force between the steel and concrete. For many reason, new type of composite steel deck that use ECC (Engineered Cementitious Composite) as additional concrete on the deck surface and plate made of FRP as shear connector was developed

To verify the idea was good or not, fatigue test using a using wheel running machine was carried out. It is established by proof that this composite deck has enough fatigue durability. With the use of specimen after fatigue test using a using wheel running machine, the element examination of plate shear connector carried out to verify the residual load bearing ability.

Keyword: orthotropic steel deck,composite steel deck,wheel-running machine,FRP plate ,ECC

1.はじめに

美原大橋(北海道・石狩川)は，全長972mの3径間連続斜張橋（1面吊り）および3径間連続鋼床版箱桁で構成される橋梁である．主橋梁部の支間割は154m+340m+150m，主塔の高さは80mの規模を誇る．本橋は，H5年度の道示に基づき詳細設計が行われたが，現道示の設計仕様と差異がある．その差異により，鋼床版のデッキプレートは，現道示が規定する剛性を十分確保していないことが認められた．

ところで，鋼床版の疲労損傷事例が近年多数報告されており，問題視されている[1),2),3)]．損傷事例の1つにデッキプレートと縦リブの隅肉溶接部に発生する疲労き裂がある．この疲労き裂はデッキプレートの剛性不足に起因するものと指摘されている[4)]．

デッキプレートには，車輪の形状や走行位置により，設計時に考慮されなかった局部的な板曲げが発生する．その局部的な板曲げにより，高い応力集中がデッキプレートと縦リブの溶接部近傍に生じ，この応力集中により疲労き裂が発生するものと考えられる．

現道示の設計仕様の差異ならびに近年における鋼床版の疲労問題，これらを踏まえ本橋の鋼床版に疲労予防対策を講じた．対策手法としてデッキプレートの増厚，横リブ間隔の縮小化，リブ補強，合成鋼床版化等が提案され，比較・検討した．

鋼床版は薄い鋼板をリブで補剛した構造形式であり複雑な直交異方性板であり，補修・補強が容易に出来ない．また，鋼床版は主に長大橋に適用され，構造体内には莫大な面積の鋼床版が存在する．もし疲労損傷に対する補修および補強を部材要素ごとに行うならば，膨大な費用と労力が必要となる．ゆえに，疲労予防対策として最も経済的で施行性が良いと考えられる合成鋼床版化を対策手法として採用した．

合成鋼床版化とは，鋼板の上面にジベルを配置し，その後，繊維補強コンクリートを打設して鋼床版を合成構造化する補強方法である．合成構造化することで，溶接部近傍および各部材に発生する応力は低減し，大幅に疲労耐久性が向上することが期待される．

上面に増厚するコンクリートには繊維補強モルタル(以下ECC)を使用しているが，一般的に，増厚コンクリートには鋼繊維補強コンクリート(以下SFRC)が用いられる[5)6)]．しかし，北海道では冬期に凍結防止剤が散布されるため，SFRCを使用するとSFRC内の鋼繊維が腐食する可能性がある．そこで，腐食をしないビニロン繊維を繊維補強材とするECCが用いられた[7)8)9)]．

H15年度に鋼床版の疲労対策が検討された際は，美原大橋は既に施工段階にあり，斜張橋部は既に架設が完了していた(H17年度供用開始)．鋼床版と増厚コンクリートを合成する部材に，スタッドが一般的に用いられるが，スタッドと鋼床版の接合の際に発生する溶接熱により，床版内面の塗装が焼失してしまう可能性がある．さらに，ECCは微細なひび割れ

が多数発生するため，ひび割れから雨水が浸入し，スタッドやデッキプレートの腐食につながることも懸念される．そこで，今回は防水層の設置が可能でかつ接着剤で鋼床版に接合できるFRP製のプレート型ジベルが開発された[10]．

本研究では，輪荷重走行試験機[11]を用いた疲労試験を実施し，本合成鋼床版の疲労耐久性および合成効果について検討した．また，合成鋼床版の解析モデルを作成し，輪荷重の走行による剛性の低下および実験値の補完をした．さらに鋼床版モデルを作成し，合成効果による各部発生応力の低減について検討した．

前述したように，本合成鋼床版には，新たなジベルとして開発されたFRP製のプレート型のジベルが用いられている．プレートジベルの疲労耐久性は明らかとなっておらず，輪荷重走行試験後にジベルの基本性能確認試験(引抜き試験・せん断試験)を実施し，その破壊性状および残存耐荷力を検討した．

2.疲労試験概要

2.1ECCの概要

ECCはモルタル内にビニロン繊維を混入した複合材料である．ひび割れ発生後もモルタル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ある．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．ECCの曲げ試験状況の一例を**写真1**に，ECCのひび割れ発生メカニズムを**図1**に示す．

ECCの使用材料ならびに材料試験結果を**表1, 表2**に示す．なお，材料試験結果は鹿島技術研究所で実施されたものによる[10]．引張試験結果はダンベル型供試体を用いた1軸引張試験(**図2**)より得られた．1軸引張試験の応力－ひずみ曲線の測定例を**図3**に示す．なお，ECCは引張応力下において，鋼材のような応力－ひずみ関係を示すので，図中に併記したとおり，引張り強度，引張り終局ひずみを定義する．引張強度は引張応力度の最大値であり，引張終局ひずみは，規格引張降伏強度を確保できる最大のひずみとして求めている．

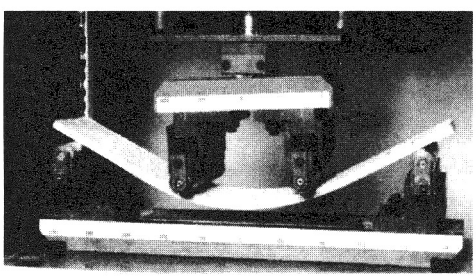


写真1　ECC曲げ試験状況の一例

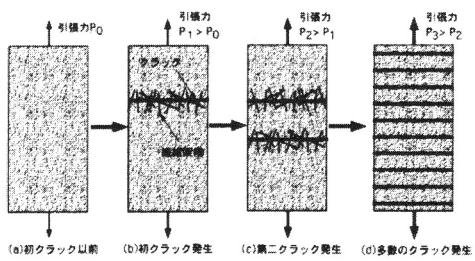


図1　ECCひび割れ発生メカニズム

表1　使用材料

施工方法	流し込み
主要材料	セメント フライアッシュ 水 硅砂 短繊維
短繊維仕様	繊維径0.04mm 長さ12mm ビニロン繊維 混入量：体積比2.1%

表2　材料試験結果

圧縮強度 (N/mm^2)	45.9
ヤング係数 (kN/mm^3)	18.9
引張強度 (N/mm^4)	3
引張終局ひずみ (%)	3.3

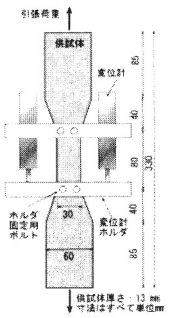


図2　引張試験結果

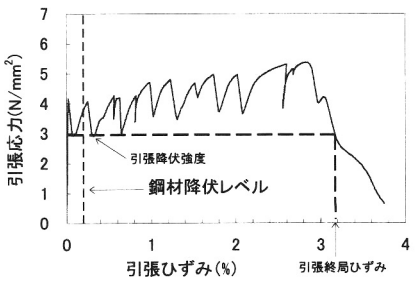


図3　応力－ひずみ曲線

2.2プレートジベルの概要

鋼床版とコンクリートの連結には，FRP製のプレート型のジベル(**図4，写真2　以下プレートジベル**)を使用した．プレートジベル中心部の円筒部の上部は，外向きにテーパー加工されている．このテーパーが引抜き力に抵抗する構造となる．中空部にECCを充填させ，円筒の外側にウィングを設けることで，せん断力に抵抗している．PLジベルの力学的性質は，引張強度80N/mm^{2}以上，静弾性係数2kN/mm2，ポアソン比0.35である．

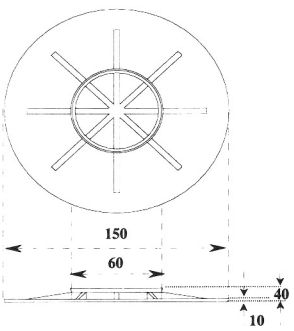


図4　プレートジベル詳細図

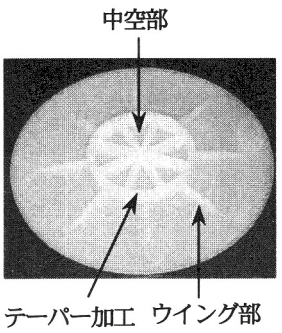


写真2　FRPプレートジベル

2.3試験体

試験体の断面図を**図5**に示す．3本の主桁が配置されており，主桁間隔は1480mmとなる．各主桁間にトラフリブが2本，計4本の縦リブが配置されている．さらに，横桁が両端部に配置されている．デッキプレート厚は12mm，その上面に層厚40mmのECCが打設されている．平面寸法は2960mm(橋軸直角長)×3500mm(橋軸長)である．

2.4試験機

車両の繰り返し走行が床版へ与える疲労損傷を再現する疲労試験機である輪荷重走行試験機を用いた[11)12)]．

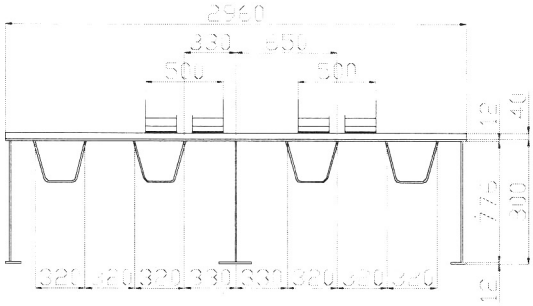


図5　試験体断面図

2.5 走行位置

鋼床版は輪形状および走行位置によっては，デッキプレートに局部的な板曲げが発生する．そこで，従来使用しているシングルタイヤを模擬した軌道装置ではなく，ダブルタイヤの輪形状を模擬した載荷装置を用い，走行コースはダブルタイヤが縦リブのウェブを跨ぐような位置とした(**図6**).

C 走行コースは 2 種類選定した．中央主桁近傍の縦リブを跨ぐ走行位置 (床版中央から橋軸直角方向に-330mm 離れた位置) をコース①，中央主桁から若干離れた(床版中央から橋軸直角方向に 650mm 離れた位置)離れた位置をコース②とする．

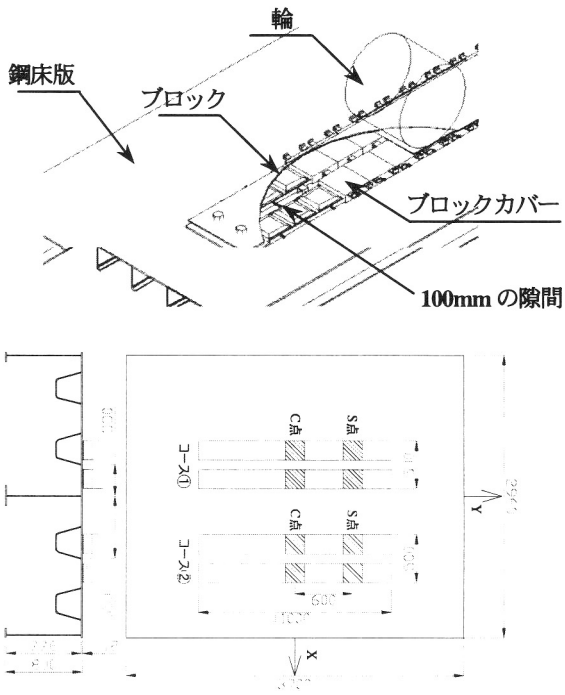


図6　軌道装置および輪荷重走行位置

2.6 載荷プログラム

載荷プログラムを**図 7** に示す．既往の研究で鋼床版の疲労照査荷重としてダブルタイヤ 1 組あたりの輪荷重を 50kN としており，このモデル荷重を採用した [13]．衝撃を考慮に入れた 70kN を基本荷重とし，基本荷重の 2 割増，4 割増の 84kN，98kN で各コースを 10 万往復ずつ走行させることで，試験体の挙動を確認することにした．また，本橋の年交通量の推計と耐用年数 100 年とした際の輪荷重の載荷回数を推定した．その結果，各コース 30 万往復，計 60 万往復回走行させることとした．

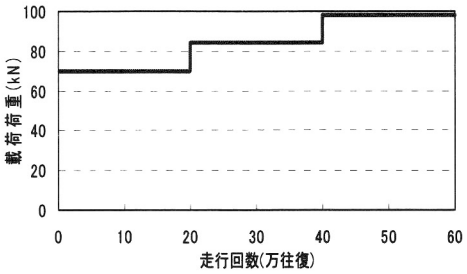


図7　載荷プログラム

3.FEM 解析

鋼床版ならびに合成鋼床版の 2 種類のモデルを作成し 3 次元 FEM 解析を行った．　要素分割図の概略を**図 8** に示す．鋼部材は 4 節点肉厚シェル要素を($Es=200000N/mm^2$　$\nu=0.30$)，コンクリート部のモデル化には 8 節点ソリッド要素($E=17000N/mm^2$　$\nu=0.2$)を用いた．載荷面積は 200mm×200mm×2(ダブルタイヤ)とし，載荷荷重は輪荷重の走行位置に 98kN(設置面圧 $1.225N/mm^2$)を直接等分布載荷する．支持条件は主桁下面 4 隅で変位のみ拘束した．デッキプレートと ECC はプレートジベルにより一体化しているものとし，ジベルのモデル化は特に考慮せず，シェル要素とソリッド要素の節点は共有し剛結している．鋼の最小メッシュサイズはデッキプレートと縦リブの交差部周辺であり 5mm としている．

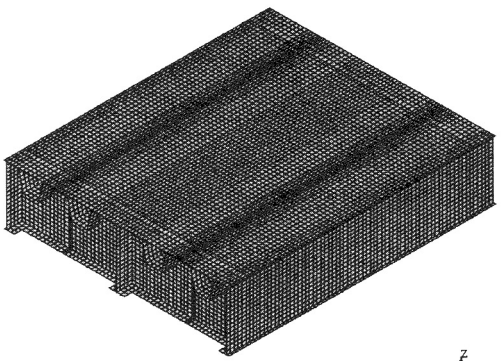


図8　解析モデル

4 基本性能確認試験概要

4.1 試験体

輪荷重走行試験後の試験体を用いて基本性能確認試験を実施した．プレートジベルおよびジベル周辺部の ECC を残し，その他の ECC 部を除去し試験体を作製した(**写真 3，図 9**)．試験体寸法は，縦 190mm×横 190mm×高さ 40mm となる．プレートジベルは，橋軸方向に 320～330mm 間隔，橋軸直角方向に500mm間隔で配置され．計56個のプレートジベルがECC内に埋設されている(**図 10**)．引き抜き試験，せん断試験に半数の 28 個ずつ当てる．

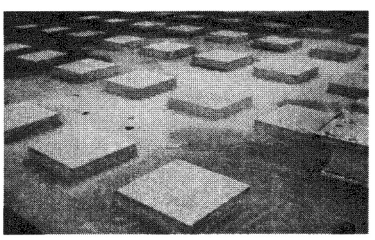


写真 3 試験体作製状況

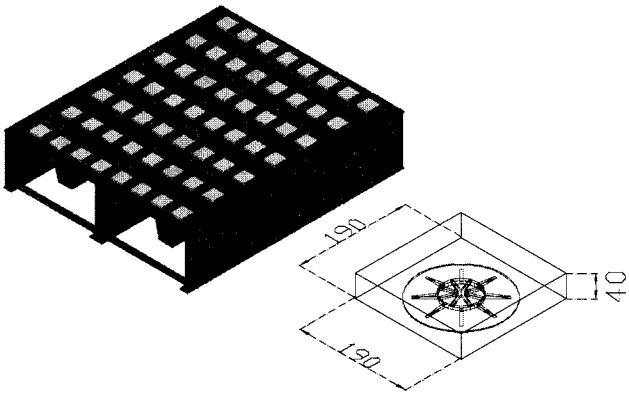


図9　引抜きおよびせん断試験体

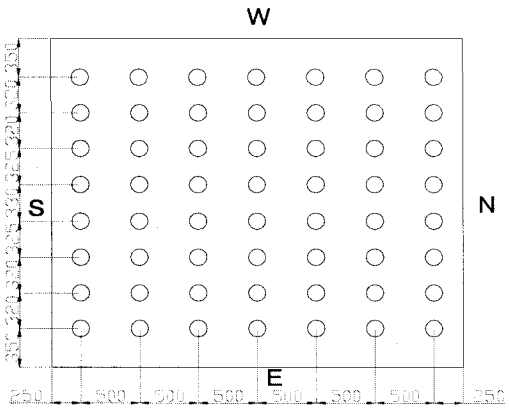


図10　プレートジベルの埋設位置

4.2 試験機

4.2.1 引抜き試験機(図 11)

試験体上面に接着剤にて引張治具(こがめ)を接着し，それに被せたフレーム（おやがめ）を反力装置として油圧ジャッキによって鉛直方向に引抜き力を与える独自に開発した実験装置で行う．試験体上面 4 隅の変位を測定した．

4.2.2 せん断試験機(図 12)

引抜き試験後に残った試験体間には十分な空間が形成され，その部分に油圧ジャッキを水平に挿入しせん断力を与えることができる．ただし，高さ 4cm の本試験体に対して油圧ジャッキの直径が大きいため，試験体にモーメントが作用し浮き上がる可能性があり，その回転防止をしながら純せん断を与える装置を作成した．また，ジャッキ反力を取るため，反力カバー装置を被せ，それを高力ボルトにて固定した．試験中は載荷荷重と供試体背後におけるずれ変位を測定した．

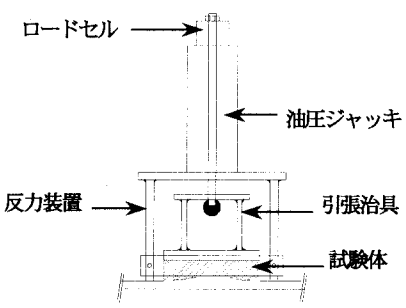


図 11 引抜き試験装置

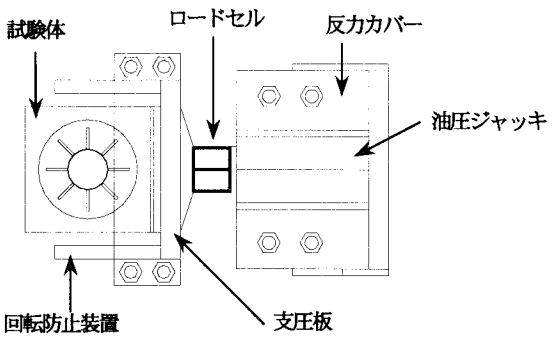


図 12 せん断試験装置

5.疲労試験結果および考察

輪荷重走行試験は，予定どおり往復走行回数 60 万回載荷した．上面のECCには多数の微細なひび割れが発生していたが，たわみ値安定しており，軌道直下の ECC が破壊に至ることはなかった．

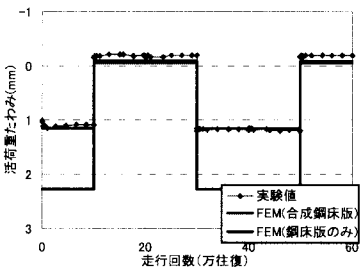
また，測定毎に溶接部近傍を目視で観察したが，疲労き裂は確認されなかった．測定値は全て 98kN に線形換算し，非線形性は無視している．なお，たわみ分布，ひずみ分布ともに橋軸方向中央における橋軸直角方向の分布である．

5.1 活荷重たわみの経時変化(98kN 換算)

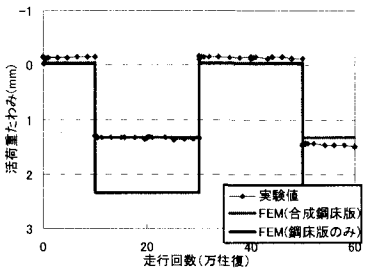
コース①におけるC点載荷位置直下(橋軸方向床版中央断面)の活荷重たわみの経時変化，コース②におけるC点載荷位置直下(橋軸方向床版中央断面)の活荷重たわみの経時変化を**図13**に示す．載荷位置直下のたわみ値はデッキプレートのたわみ値となる．なお，各図ともにたわみ値が急変しているが，これは走行位置を10万，30万，50万で変更したことによる．

載荷直後から1000往復までの間にたわみ値がやや増加している.しかしながら，1000往復以降たわみ値の挙動は安定し，試験終了時まで変化はみられなかった．また，合成鋼床版のFEM値とほぼ同様の値を示し，FEM値とよくあっている．鋼床版のFEM値と比較すると，たわみ値が合成化により大きく低減されているとわかる．

輪荷重が走行するにつれてECCに多数の微細なひび割れが発生した．この微細なひび割れは中央主桁上面や，載荷位置周辺のトラフリブのウェブ上周辺に発生した．ひび割れは走行開始直後に急激に発生したが，この影響による床版剛性の低下により，載荷直後から1000往復までの間にたわみ値がやや増加したと考えられる．それ以降，多少のひび割れ増はみられたが，たわみ値は増加しなかった．ひび割れ幅は微細であり，ECC内の繊維が十分に作用しているためと考えられる．



1)コース①　C 点載荷



2)コース② C点載荷

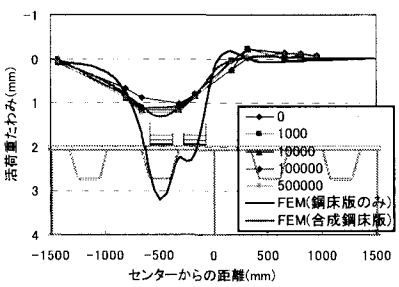
図13 活荷重たわみの経時変化

5.2たわみ分布(98kN換算)

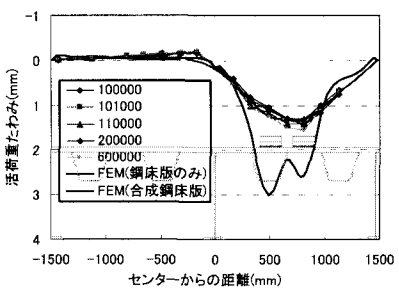
各走行コースにおける活荷重たわみの橋軸直角方向分布を**図14**に示す．鋼床版は，輪荷重の直下で局部的な板曲げを生じているが，合成鋼床版は緩やかなたわみ分布となっている．

新型のジベルやECCを使用しているが，本合成鋼床版は十分な合成効果を発揮しているといえる．また，走行回数が増加してもたわみ分布の変化はみられなかった．合成効果は床版の各箇所で走行終了時まで保持されていたといえる．

主桁付近には負曲げの作用により，特にひび割れが発生しており，ひび割れ幅も大きかった．上面のアスファルト舗装へも悪影響を及ぼす可能性が懸念され，舗装のひび割れやECC内部への雨水の進入を注意する必要がある．



1)コース① C点載荷



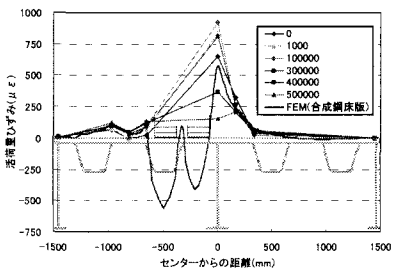
2)コース② C点載荷

図14 活荷重たわみ分布

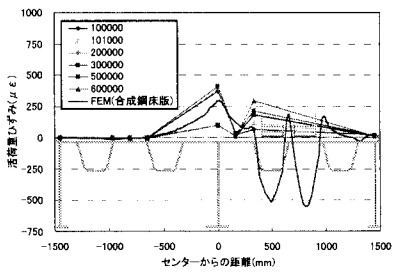
5.3ECC上面ひずみ分布(98kN換算)

ECC上面における橋軸直角方向ひずみの橋軸直角方向分布状況を**図15**に示す．コース①の場合，走行開始直後は，FEM解析値とほぼ同様のひずみ分布を示しているが，往復走行回数10万回以降，中央主桁近傍の実験値は解析値と比べて大きな値となっている．輪荷重の走行によって中央主桁上面には多数のひび割れが発生しており，この領域におけるECCの剛性が低下したためと考えられる．

コース②の場合，コース①と同様に床版中央において大きな引張りひずみが発生しているが，走行開始時においても実験値と解析値は異なっている．コース②の走行開始時は，コース①において既に10万往復走行しており，試験体は疲労損傷を受けている状態である．そのため，既に主桁付近のECCの剛性が低下しており，実験値と解析値が異なっていると推測出来る．ところで，コース②を走行するにつれて，中央主桁近傍におけるトラフリブのウェブ直上のひずみ値が増加している．走行開始時は実験値と解析値はほぼ同様の値を示していたが，コース②を走行することで，新たにその周辺部のECCの剛性が低下したと考えられる．主桁上および主桁近傍のトラフリブのウェブ上においてECCの剛性が低下しやすいといえる．今回行ったFEM解析は，ECCにひび割れは発生しておらず健全な状態であり，デッキプレートとECCは完全剛結されている．今後，ECCの剛性低下の再現するとともにデッキプレートの合成条件を変化させ，実験を行った合成鋼床版がどのような状態であったのかを検証する必要がある．



1)コース① C点載荷

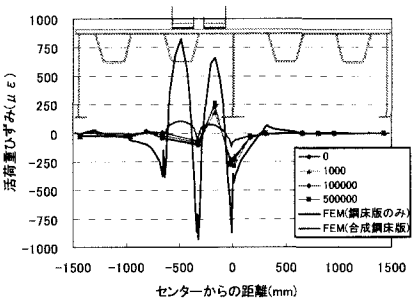


2)コース② C点載荷

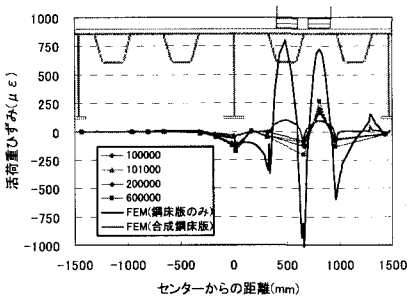
図15 ECCひずみ分布

5.4デッキプレート下面ひずみ分布(98kN換算)

各コースにおけるデッキプレートの橋軸直角方向ひずみの橋軸直角方向分布状況を**図16**に示す．鋼床版モデルの解析値は溶接部近傍で大きな応力が発生しているが，合成化によりその応力が大きく低減されていることが分かる．合成効果により荷重分配性が増し，デッキプレートの局部変形が抑制されたためである．また，ECCのひずみが増加しているが，デッキプレート下面のひずみは増加しておらず，ECCにひび割れが生じた後，よく繊維が働いていると考えられる．



1)コース①



2)コース②

図16　デッキプレート下面ひずみ分布

5.5合成効果による溶接部近傍の発生応力範囲の低減(98kN換算)

デッキプレートの剛性不足により，縦リブとデッキプレートの隅肉溶接部からの疲労損傷が懸念される．

このき裂は縦リブとデッキプレートの溶接部近傍に働く橋軸直角方向応力が支配的となる．そこで，溶接部近傍に**図16**に示すようひずみゲージを貼り付け輪荷重の走行にともなう応力変動に着目した．その橋軸直角方向の応力変動(98kN 換算，コース②)の一例を図 **17** に示す．鋼床版も合成鋼床版ともに正負の交番応力が作用しているが，両者の応力範囲を比較すると鋼床版で 170Mpa，合成鋼床版で 65Mpa あり合成化することで発生応力範囲は約40%に低減した．

鋼道路橋の疲労設計指針 [14]によると鋼の疲労設計曲線の傾きは3である．これらを踏まえると疲労耐久性は17倍近く向上したといえる．

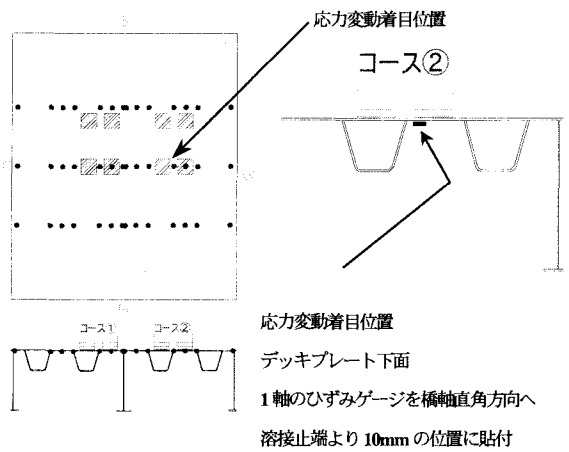


図16　ひずみゲージ貼付位置および応力変動着目位置

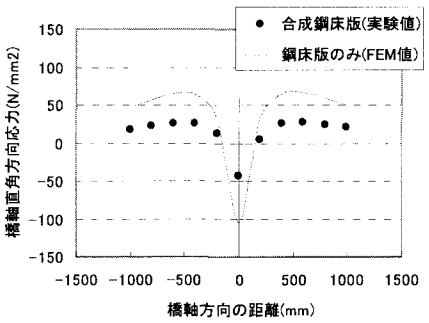


図17　着目位置の応力変動

5.6ひびわれ計測結果

試験終了時における ECC 上面のひび割れ発生状況を**図 18** に示す．ECC 上面に多数のひび割れが確認された．特に床版中央主桁直上と輪荷重走行試験機の走行位置周辺では，走行開始直後から無数の微細な格子状のひび割れが確認された．しかし，剥離，割れなどの損傷は認められなかった．ほとんどのひび割れはひび割れ幅 0.01mm 程度であり貫通していなかった．ただし，これだけの微細なひび割れに雨水が浸入した場合，モルタル間のすり合わせにより，砂利化に似た現象が生じ，ECC の遊離石灰が生ずると予想される [15]．

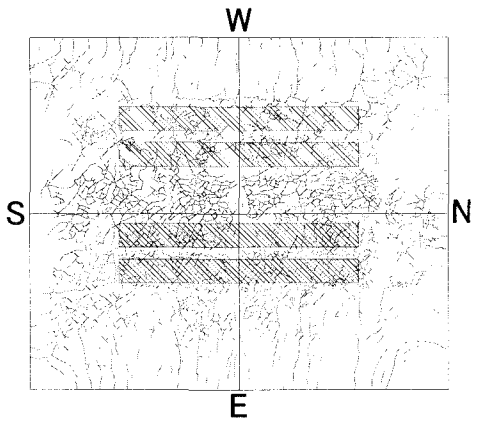


図18　ECC 床版上面ひび割れ発生状況

6.基本性能確認試験結果

6.1 引抜き試験

6.1.1 破壊形式

全ての試験結果において，引抜き力による破壊は ECC とプレートジベル間で生じた．プレートジベルが鋼床版のデッキプレートから引き剥がされることはなかった．接着剤の接着力はかなり強固であると考えられる．2 種類の典型的な破壊状況を**図 19** に示す．プレートジベルの中空部には三角形状の 8 つの穴が存在する．タイプ 1 の破壊状況では，プレートジベル中空部に充填された ECC がその穴に全て残っていた．一方で，タイプ 2 の破壊状況では，穴に ECC が全て残ることはなく，幾つかは引抜いた ECC 側に残っていた．また，ECC が防水層に強固に付着しているものもあった．

8 つの穴に残った ECC のブロック数と耐荷力との関係にはっきりとした相関は得られなかった．しかし，防水層に ECC が強固に付着しているものは耐荷力が大きく，引抜き耐荷力は防水層と ECC の付着強度に大きく依存すると考えられる．

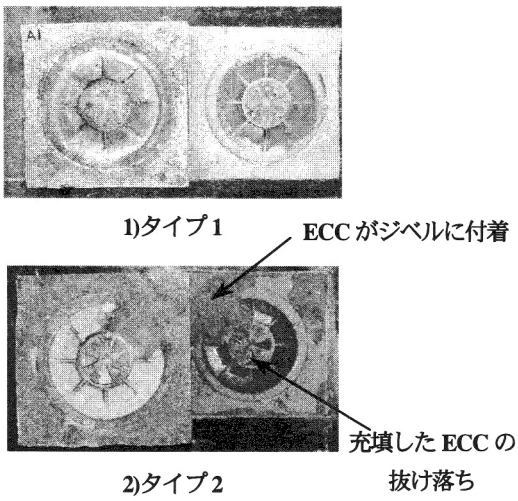


図19　引抜き試験の破壊性状

6.1.2 引抜き耐荷力分布

引張耐力分布を図20に示す．北海道開発土木研究所で行ったFEM解析によると，ダブルタイヤ1組あたりを70kNとして，床版中央に載荷した場合，プレートジベルに作用する最大引抜き力は0.45kNと報告されている[8]．最低耐荷力は5.88kNであり，全てのジベルが十分な耐荷力を有していると考えられる．

さらに，北海道開発土木研究所でジベルの静的引抜き試験が行われており，耐荷力は7.65kNであった[8]．今回行った27体の平均耐荷力は12.75kNであり，最低耐荷力は5.88kNであった．

実験方法の違いはあるものの，疲労試験をした床版内のジベルは大きな疲労の影響は受けておらず，十分な耐久性を有すると考えられる．輪荷重の走行位置において顕著な低下はみられず，走行位置との相関は見られなかった．なお，床版端部周辺で耐荷力が小さいという傾向がみられる．これは鋼床版製作時に発生した溶接によるデッキプレートの残留変形に起因していると推定できる．

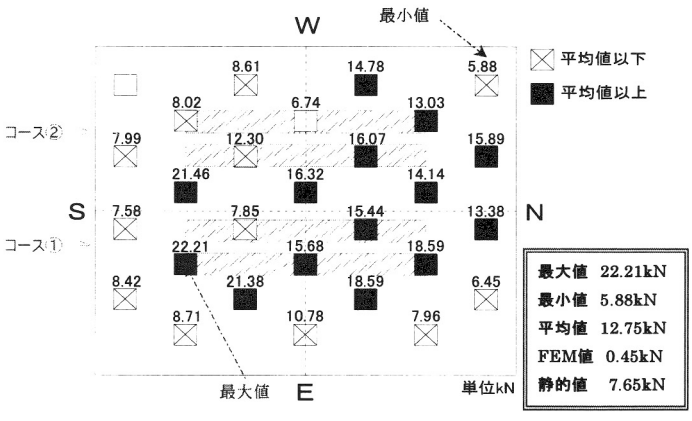


図20　引抜き耐荷力分布

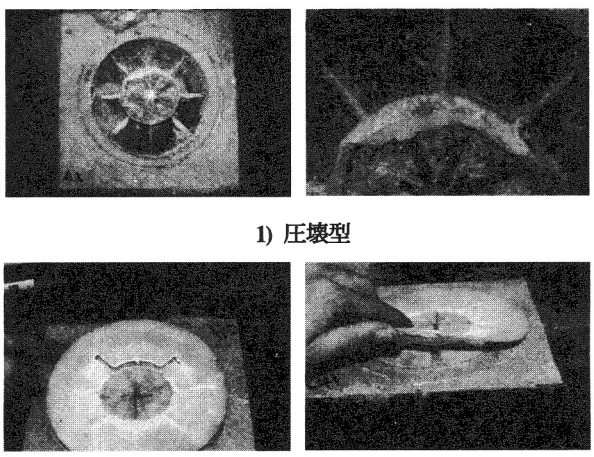
6.2 せん断試験

6.2.1 破壊形式

引抜き試験結果と同様に，せん断力による破壊形式はECCとプレートジベル間で生じた．プレートジベルが鋼床版のデッキプレートから引き剥がされることはなかった．

破壊形式は，“圧壊型”および“破れ型”の2種類に大別することができる(図21)．“圧壊型”とはECCがジベルに乗り上げてジベルが圧壊する形式である．全ての試験体において，荷重を作用させた側から見て手前側のFRPおよびECCの両者が圧壊に至った．“破れ型”は，FRPとECCのせん断抵抗が高いため，ジベルが水平方向に押し出されてジベル自体が破れる形式である．荷重を作用させた側から見て手前側4分の1周が破れた．

プレートジベルが破れ，試験体が斜め上方に向かって変位していく時点で試験は終了した．特に，破壊形式と耐荷力について相関は得られなかった．なお，図21-2)における破れ型の図は，デッキプレートとプレートジベルが剥離したようにみえる．これは，ECCとプレートジベルを分離することができず，プレートジベルの破壊形状を観察するために，人為的にジベルをデッキプレートから引き剥がしたことによる．



1) 圧壊型

2) 破れ型

図21　せん断試験の破壊性状

6.2.2 せん断耐荷力分布

せん断耐荷力分布を図22に示す．引抜き試験と同様，北海道開発土木研究所で行ったFEM解析によると，プレートジベルに作用する最大せん断力は20.73kNと報告されている[8]．最低耐荷力は21.83kNであり，平均耐荷力は44.96kNであった．全てのジベルが十分な耐荷力を有していると考えられる．

さらに，ジベルの静的せん断試験が摂南大学で行われ，せん断耐荷力は48～71kNとなった[16) 17)]．これと比較すると若干耐荷力は劣るが，ほぼ近い耐荷力となっている．このことからほとんど疲労の影響はないと考えられる．また，輪荷重の走行位置において顕著な低下はみられなかった．走行位置との相関は見られなかった．なお，床版端部周辺で耐荷力が小さいという傾向がみられる．これは引き抜き試験同様のデッキプレートの溶接変形に起因していると推定できる．

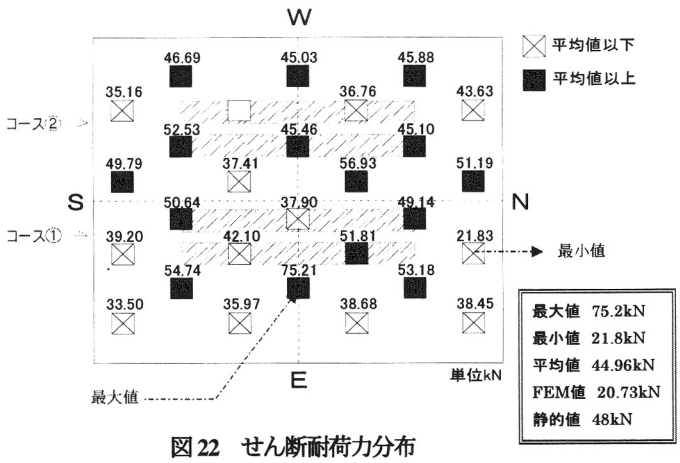


図22　せん断耐荷力分布

6.3 プレートジベルとデッキプレートの付着の確認

全てのプレートジベルは輪荷重走行試験後もデッキプレートに完全に付着していることを確認した．**図23** に示すように，良好に接着しているとプレートジベルは透明で下の接着剤の色が分かる．一方，プレートジベルをデッキプレートから完全に剥離させるとプレートジベルは空気が入り，浮白色に変化する．全てのプレートジベルが透明であり良好に接着しているといえる．

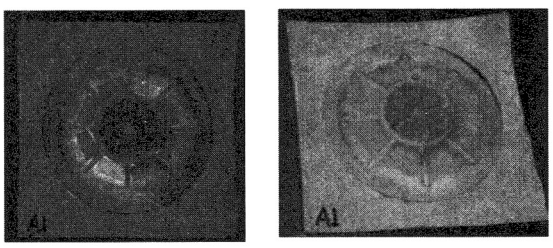


図23　デッキプレートとジベルの付着

7 まとめ

1) 走行終了時は ECC 全体にわたり多数のひび割れが発生していた．しかし，剥離，割れなどの有害な損傷は認められず，たわみ値も安定しており，本合成鋼床版は十分な疲労耐久性を有していると判断できる．
2) FEM 解析で鋼床版モデルを作製し比較することで，合成効果による局部変形ならびに溶接部近傍応力の低減効果を確認した．
3) 輪荷重走行試験後にプレートジベルの基本性能確認試験を実施し，ジベルが十分な残存耐力を有していることを明らかとした．また，走行位置によるジベルの劣化を比較したところ，走行位置による違いは特に認められなかった．
4) プレートジベルと ECC の引抜きおよびせん断力による破壊性状を明らかとした．ECC とプレートジベルせん断および引抜き耐力だけでなく，プレートジベルとデッキプレート間の付着力も十分であったことを明らかとした．

参考文献

1) Y.Hirabayashi，F.Machida，T.Shimozato：Fatigue Damage of Orthotropic Steel Deck used Trough Rib in Steel Bridges,5th J-G Bridge Symposium
2) 南荘淳，吉原聡，時譲太，石井博典，坂野昌弘：鋼床版箱桁橋全体を対象とした応力性状の把握と疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.49A，2003-3
3) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002 年 3 月
4) 三木千尋，菅沼久忠，冨澤雅幸，町田文孝：鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集 No780／I-70，57-69，2005．1
5) 真木久幸：凍結抑制型合成鋼床版の疲労耐久性に関する研究　大阪大学修士論文
6) 的場栄孝：道路橋鋼床版の疲労耐久性向上に関する研究 大阪大学修士論文
7) 閑田徹志：高靭性繊維補強セメント複合材料の設計技術の現状，コンクリート工学　Vol.38，No.6，2000.6
8) 北海道開発土木研究所　美原大橋橋面舗装検討業務報告書
9) 三田村 浩, 坂田 昇; “高靭性繊維補強セメント複合材料 ECC を用いた鋼床版補強工法に関する研究”, 土木学会論文集 F , Vol. 62, No. 1, pp.128-143, (2006)
10) 福田一郎，三田村浩，今野久志，松井繁之：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1693-1698，2004.
11) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学学位論文，pp.154～156,1985.
12) 松井繁之：橋梁の寿命予測 - 道路橋 RC 床版の疲労寿命予測 -，安全工学，Vol.30,No.6,pp.432～440,1991
13) 岩崎雅紀：橋梁鋼床版の疲労耐久性の評価・向上手法による研究 大阪大学学位論文 H9.1
14) 日本鋼構造協会(JSSC)編『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』
15) 松井繁之：橋梁の寿命予測 - 道路橋 RC 床版の疲労寿命予測，安全工学，Vol.30,No.6,pp.432～440,1991
16) 湯室貴章，平城弘一，FRP ジベルのせん断伝達耐荷性能に関する基礎的検討　2005 年全国大会
17) 的場栄孝，松井繁之，輪荷重走行試験後のプレートジベルの残存耐力に関する基礎的検討実験　2005 年全国大会