

16. 橋梁床版

とりまとめ：阿部 忠（日本大学）

論文題目：“シームレスジョイント付き RC 床版の輪荷重走行疲労実験”

著者：関口幹夫，橋原正周，堀川都志雄
掲載：Vol.56A, pp.1206-1216, 2010 年 3 月

◆討議 [阿部忠（日本大学）]

①疲労耐久性の算出で α_k に 365 が乗じられているが α_k の係数は、表のどの値に相当するのか。

②式(1)中の逆数 $m=4$ はかなり厳しい条件ではないでしょうか。

◆回答：①表-11 の中に α_k の計算に必要なデータ（軸重測定車線の大型車交通量/日）を省略していましたので、表-11 の訂正版を回答します。なお、いずれの交通量も文献 6) の調査データです。

表-11 100kN 換算輪数による各地点の疲労耐久性
(改訂版)

観測地点	環八通り 砦	環七通り 小茂根	町田街道 町田	新大橋通り 築地	永代通り 永代	五日市街道 秋川
舗装設計交通区分	N7 (D交通)	N7 (D交通)	N6 (C交通)	N6 (C交通)	N5 (B交通)	N4 (A交通)
一日一方向大型車交通量	9,861	6,899	1,361	4,501	5,368	683
軸重測定車線大型車交通量/日	5,507	1,642	3,163	5,068	1,361	683
100kN換算輪数/車線/年	69,016	40,001	21,693	8,973	3,739	6,103
100kN換算輪数/一方向/年	123,632	54,453	21,693	12,769	12,223	6,103
シームレスジョイント設置部床版厚別疲労耐久性年数	80mm	0.1	0.3	0.7	1.3	2.5
	100mm	0.8	1.9	4.8	8.5	17.1
	120mm	1~2	2~4	5~10	8~16	18~36

②式(1)中の逆数 $m=4$ は RC 床版で一般的に採用されている松井式(文献 4)の $m=12.76$ に比較して厳しいと考えられますが、本文でも記述したとおり、実橋（高井戸陸橋の切出し床版での残存疲労耐久性の検討で得られた推定値(文献 5)の $m=3.53 \div 4$ を採用しました。この $m=4$ はゴムジョイント付き RC 床版に関する既報(文献 2)での評価結果が概ね実態と整合していると判断できましたので、道路管理者の安全性を重視する立場からの相対評価では、妥当な推定範囲と考えられます。なお、 m の根拠付けについては、十分とは言えませんのでさらにデータの蓄積が必要と考えております。

論文題目：“アルミニウム床版の移動トラックタイヤ載荷試験による疲労耐久性評価”

著者：大倉一郎，長尾隆史，萩澤亘保
掲載：Vol.56A, pp.1217-1226, 2010 年 3 月

◆討議 [川井豊（日本エンジニアリング(株)）]

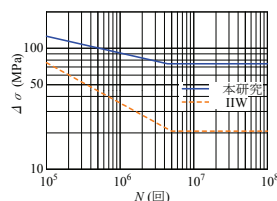
①床版の主桁の連結方法は実験のモデルと同じでしょうか。もしそうであれば、床版に主桁作用が生じるが、設計上はどうしているのでしょうか。

②図-18 の S-N 曲線と IIW の fatigue design code ...* の設計 S-N 曲線と比較されているでしょうか。

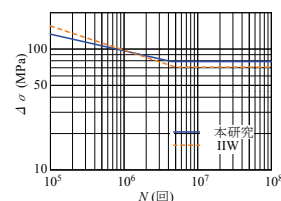
③アルミニウム床版の版剛性は RC 鋼床版と比較してどの程度となるのでしょうか。走行車両のバネ系との共振による衝撃係数の増大の可能性は(固有振動数)検討されていますか。

◆回答：①床版と主桁の連結方法には、実橋においても実験と同じ方法を用いるため、床版と主桁が合成作用を示します。合成作用を有することで、温度変化によりアルミニウム床版と鋼桁に応力が生じます。アルミニウム床版-鋼桁橋の設計では、アルミニウム床版-鋼桁橋が崩壊するとき、アルミニウム床版と鋼桁は非合成となるとし、死荷重、活荷重、衝撃荷重などの主荷重に対して、アルミニウム床版と鋼桁は非合成として設計されます。実働荷重に対しては、合成作用を考慮して、温度変化によって生じる応力と主荷重による応力を足し合わせた応力に対して照査します。

②本文図-18 には、母材に対する設計 S-N 曲線と摩擦撓拌接合部に対する設計 S-N 曲線がありますが、後者に対しては海外の規格にはありません。仮に、IIW の溶接部の設計 S-N 曲線と比較すると、図 A に示すように、本研究の摩擦撓拌接合部に対する設計 S-N 曲線は IIW の溶接部のそれよりも高い位置にきます。母材に対する設計 S-N 曲線は応力比によって変わりますが、本文中に示す応力比 $R=0$ 付近では、図 B に示すように両者は同等となります。IIW のアルミニウム合金に対する設計 S-N 曲線は、5000 系と 6000 系の区別がなく、腐食の影響が考慮されていません。本研究の設計 S-N 曲線は 6000 系合金に対して、腐食の影響を考慮したものであるため、両者を比較することはあまり意味がないと考えられます。



図A 本研究の摩擦撓拌接合部に対する設計 S-N 曲線と IIW の溶接部に対する設計 S-N 曲線の比較 ($R=0.1$)



図B 母材に対する本研究の設計 S-N 曲線と IIW の設計 S-N 曲線の比較 ($R=0$)

③動的な影響については検討していないが、衝撃係数 0.4 を考慮しています。さらに次の文献に示すように、アルミニウム床版にはたわみ規定を設けています。

大倉一郎，原田祐樹，萩澤亘保，長尾隆史：道路橋用アルミニウム床版の適用支間長，ALST 研究レポート，No.9，2009。
http://alst.jp/pdf/ALST_report9.pdf.

論文題目：“積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について”

著者：三田村浩，佐藤京，西弘明，渡辺忠朋

掲載：Vol.56A, pp.1239-1248, 2010 年 3 月

◆討議 [関口幹夫 (東京都土木技術支援・人材育成センター)]

図-10 の説明でハンモック状に剥離した原因の一つに、丸鋼と異形鉄筋での差異が影響している可能性についてコメント願いたい。

◆回答：図-10 に示した、実験終了後のシートの剥離状況であるが、コンクリートの押抜きせん断面を起点にして、コンクリートとシートが接着されたままの状態で、ハンモック状に剥離した状態を示している。このとき、床版の配筋が、丸鋼と異形鉄筋の違いにより差異が発生する可能性として、走行方向のひび割れ間隔の違いによる影響が考えられる。一般に、ひび割れの連続性は異形鉄筋に比べて丸鋼を用いた場合に、梁状化の幅が大きくなることから、梁状化間での付着作用（コンクリートとシートの接着）の低下が丸鋼の方が小さくなる。これにより、丸鋼鉄筋を用いた側の接着状態が健全であり、コンクリートとシート間の剥離が生じにくい状態にあったと考えられる。一方、走行直角方向は、下面側かぶりコンクリートまでは剪断ひび割れが移行、その後下面側の丸鋼主鉄筋の付着破壊に沿って端部近くで破壊しており、この結果よりハンモック状の剥離形態が形成されたものと推定される。なお、本件については今後も検討課題とする。

論文題目：“実橋における鋼床版 SFRC 舗装によるひずみ低減効果”

著者：児玉孝喜，一瀬八洋，加形護，大田孝二，新延泰生

掲載：Vol.56A, pp.1249-1258, 2010 年 3 月

◆討議 [坂野昌弘 (関西大学)]

①図-13 で、SFRC の補強効果を示されており、デッキ貫通き裂に対する効果は A1, F1 で評価されていますが、ビード貫通き裂に対する効果はどのゲージで評価されているのでしょうか。②また、ダブルタイヤの載荷位置は、デッキとウリブの溶接線を跨ぐパターンだけでよいのでしょうか。

◆回答：①既往の研究により、デッキプレートとウリブとの溶接部に生じるデッキ貫通き裂とビード貫通き裂は、輪荷重によってデッキプレートが局部変形し、溶接部に大きな応力が生じることが原因とされています。本報においては、溶接部の応力を直接計測するのではなく、溶接止端から 5mm 離れた位置 (図-1 参照) の応力を、アスファルト舗装時と SFRC 舗装時とを比

較することで、溶接部の応力が低減することを実橋でのひずみ計測で確認しました。また、局部変形の低減については FEM 解析を用いて、たわみと曲率半径が低減されたことを確認したものです。従いまして、ビード貫通き裂に対する効果も、デッキ貫通き裂と同様に A1, F1 のゲージで評価できると考えております (今回計測したゲージ位置では、デッキ貫通とビード貫通で応力の違いほとんどないものと考えられ、重要なのは局部変形を抑えることと考えています)。

補足ですが、今回は活荷重に着目しておりますが、溶接部は複雑な応力状態となっており、活荷重のほか、溶接による残留応力や溶接サイズが、デッキ貫通き裂とビード貫通き裂の発生に起因しているものと推測されます。実橋の損傷を調査した一例では、溶込み量が多い場合はデッキ貫通き裂が生じやすく、溶接サイズが小さい場合はビード貫通き裂が生じやすい傾向です。また、ビード貫通き裂からデッキ貫通き裂に進展する場合もあります。そのため、複雑な応力に着目するのではなく、単純に局部変形の低減が、疲労損傷き裂 (デッキ貫通とビード貫通の両方) に寄与するものとして本報をまとめております。いままで、SFRC による補強効果が大いことと、SFRC はすでに疲労き裂が生じた橋梁の補強を対象としていることから、溶接部の応力の方向やき裂がどちらに生じるかに着目するのではなく、内在したき裂 (デッキ貫通とビード貫通の両方) の進展を抑制する効果があるかなどを、輪荷重走行試験にて確認しております。これについては、別途論文を発表しておりますのでご覧いただけたら幸いです。

②ダブルタイヤの載荷位置は、事前の FEM 解析による検討ならびに既往の研究を参考にして、アスファルト舗装時に局部変形が大きくなる位置のデッキプレートとウリブの溶接線を跨ぐパターンとしました。また、前輪については、溶接線の片側載荷となるうえ、図-2 に示すように a～f の溶接線、6 ラインについて計測を行っております。従いまして、デッキとウリブの溶接線を跨ぐ 1 パターンだけでなく、12 パターン (前輪、後輪×6 ライン) の計測を行っているため、問題ないと考えております。

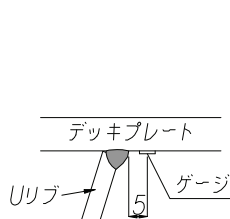


図-1 応力測定位置

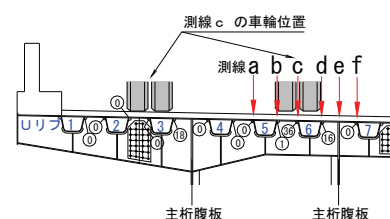


図-2 トラック載荷の測線位置

論文題目：“輪荷重走行疲労実験における RC 床版 SFRC 上面増厚補強法の耐疲労性”

著者：高野真希子，阿部忠，木田哲量，児玉孝喜，小森篤也

掲載：Vol.56A, pp.1259-1269, 2010 年 3 月

◆討議 [関口幹夫 (東京都土木技術支援・人材育成センター)]

古市亨 ((株)維持管理工房), 三田村浩 ((独)土木研究所 寒冷地土木研究所)]

①二次補強の判断として、床版のたわみ $L/400 \sim 350$ を提案していますが、下面のひび割れ状態(密度)はどのレベルに相当しているのか。

②施工において CFRP の配置時期はいつなのか、また、その際その箇所が弱点にならないのか。

③10mm の位置に CFRP を配置する時に粗骨材(15mm)はじやまにならないのか。

④SFRC 上面増厚の施工目地からの水の影響について実験ならびに考察はしているのでしょうか。

◆回答：①今回の実験では、荷重と等価走行回数の関係から、従来型の SFRC 上面増厚の場合はたわみが床版支間 L の $1/400$ 付近から急激に増加し、また、接着材の塗布と接着材と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚の場合は、床版支間 L が $1/350$ 付近から急激に増加しています。したがって、本研究ではたわみについてのみ考察をしました。今後、ひび割れ密度との関連性について検討したいと考えております。

②CFRP 格子筋は配置は接着材を塗布した後に増厚界面から 15mm の位置に設置しております。本文では 10mm と記載しましたが誤記ですので、ここで訂正させていただきます。上面増厚マニュアルでは鉄筋の配置もございしますが、鉄筋を配置した場合の上面増厚は通常増厚の 2 倍となります。しかし、CFRP は 3mm 程度の厚さであることから、従来型の増厚で十分効果を発揮します。したがって、弱点となることはありません。

③②で回答しました通り界面から 15mm の位置に CFRP を配置しております。粗骨材の寸法は 5mm~12mm を使用していますので、施工上大きな問題はないものと考えます。なお、骨材の配置については供試体を切断し、確認しております。

④今回の実験では、基礎的な実験として乾燥状態での実験検証を行っております。しかしながら、水を張った場合の目地部への影響、耐久性の低下の有無などは今後研究を行っていく予定です。

訂正：P.1260 右下 1 行目

10mm を 15mm とします。

論文題目：“輪荷重走行疲労実験における RC 床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法”

著者：阿部忠，木田哲量，高野真希子，小森篤也，児玉孝喜
掲載：Vol.56A, pp.1270-1281, 2010 年 3 月

◆討議 [関口幹夫 (東京都土木技術支援・人材育成センター), 大西弘志 (大阪大学)]

①提案式を用いて、他の実験結果での検討は行っていますか。

②コンクリート材料の低減係数 D_c を 0.7 としているが、湿潤環

境下での疲労を考えるともっと小さな値で良いのではないのか。
③上面増厚補強を対象と考えるのであれば、既存床版と増厚層の付着の低下(経済的な影響として)を 1 つのパラメータとして導入する必要はないのか。

◆回答：①本実験に関する提案式については、輪荷重設置面の寸法を考慮してモデル化した供試体を用いての疲労実験から評価したものです。今後はコンクリートの圧縮強度、床版厚などパラメータを増やして多角的に検証する予定です。

②湿潤環境下でのコンクリートの低下は、本報告では既往の研究成果を参考に低減係数 D_c を 0.7 として適用しました。今後は、湿潤環境を考慮した疲労実験を行い、低減係数などの検討も行う予定です。

③上面増厚補強では、既存床版部と増厚層との界面の付着が切れることで、予想よりも早い段階で損傷していることが報告されています。したがって、付着界面の定着は RC 床版の疲労耐久性に大きな影響を及ぼすものと考えられますので、界面付着の影響を考慮した研究解析は今後必要なものと考えています。

論文題目：“ECC による鋼床版上面増厚補強の合成効果に関する解析的検討”

著者：角間恒，松本高志，林川俊郎，何興文

掲載：Vol.56A, pp.1282-1291, 2010 年 3 月

◆討議 [大西弘志 (大阪大学), 三田村浩 ((独)土木研究所 寒冷地土木研究所)]

①疲労解析時に主桁が存在する効果を鉛直変位拘束で与えているが、解析結果に与える影響はどのくらいあるのか。

②解析時荷重の 350kN や 450kN は何を考慮しているか。荷重が大きいのと考えますが…。

◆回答：①弾性支持部のばね剛性を変数としたパラメータ解析により実験結果の再現性のある程度確保してはいるが、詳しい比較・考察は行っていない。したがって、拘束条件に起因する“どの程度”といった定量的な変化を評価するのは現段階では難しい。しかしながら、主桁位置の鉛直変位を拘束することで、その直上の ECC 上面には局所引張力が作用しやすい状態となり、ECC の疲労劣化が促進される方向に評価されていることから、たわみやデッキプレートひずみ等の増加割合という点においては、過大に算出されているものと予想される。

②本研究では、200 万回の繰返し载荷中に生じる ECC の変化に着目して载荷荷重を決定している。具体的には、(1)150kN は 200 万回载荷後であっても ECC が十分に引張力を伝達できる状態、(2)300kN は 200 万回载荷中にひずみ軟化域に達する状態、(3)450kN は初期载荷時に既に引張強度に達している状態、を想定しそれぞれのケースにおける合成効果の変化を検討した。

論文題目：“支持辺の任意領域で部分固定される多層版の数値解析”

著者：横山広，浦脩造，関口幹夫，堀川都志雄
掲載：Vol.56A，pp.1292-1299，2010 年 3 月

◆討議 [三田村浩（(独)土木研究所 寒冷地土木研究所），古市亨（(株)維持管理工房）]

①三層構造のそれぞれの接触界面の(接着強度等)強度特性を変位させた場合，本解析では，適用可能か。

②鉛直 2 方向の多層版の解析が行われていますが x, y 方向の異方性への対応は可能でしょうか。

◆回答：①解析上，接触界面の応力伝達を調整することは可能です。ただし，値の評価が困難になる可能性があります。選点法を組み合わせることで任意領域のはく離を表現することも可能です。

②対応可能です。その際，版の各方向の断面剛性を計算の中で考慮して異方性を反映させることになります。一般的な床版の維持管理では，床版が劣化しても版として挙動している範囲内で補強等対策が行われています。よって，断面剛性で評価する手法で問題ないと考えています。

論文題目：“走行振動応力履歴 RC 床版の塩害・凍害作用による劣化状態と耐荷力低下に関する研究”

著者：木田哲量，阿部忠，水口和彦，大塚裕太，小川洋二
掲載：Vol.56A，pp.1300-1311，2010 年 3 月

◆討議 [大西弘志（大阪大学）]

今回の床版の性能低下は床版内のコンクリートに塩害・凍害によるひび割れが発生したことにより与えられたものと考えてよいか。

◆回答：塩害および塩害・凍害床版は走行振動荷重において弾性域の範囲まで荷重を載荷し，その後塩害作用を与えております。したがって，下面にはひび割れが発生するものの，上面までひび割れは目視では確認できませんでした。しかし，塩害作用として塩化カルシウム混入した塩水を 1 年 10 ヶ月散布した後は，目視で確認できるひび割れが発生しており，鉄筋の腐食診断では，圧縮・引張鉄筋の一部に発錆が確認できる状態となっております。また，塩害と凍害の複合劣化を与えた床版においては，塩害作用による劣化に加え，ひび割れに塩水が浸透し，凍結することでひび割れが拡大されるとともに，床版上面におけるスケールリングが著しいものとなっております。したがって，塩害・凍害作用は RC 床版の性能低下に影響を及ぼしているものと考えられます。なお，今後はコンクリートの圧縮強度

の違いによる影響についても診断する必要があると考えます。

論文題目：“鋼・コンクリート合成床版における接着接合継手の疲労耐久性評価”

著者：吉田賢二，松井繁之，街道浩
掲載：Vol.56A，pp.1343-1355，2010 年 3 月

◆討議 [櫻井伸彰（新日鉄エンジニアリング(株)）]

接着剤の経年劣化に対してどう考えていますか。

◆回答：経年変化による劣化には，水（酸・アルカリ，塩分を含む），紫外線，橋面荷重等の持続荷重，活荷重による繰り返し荷重による影響等が考えられます。接着部は床版下面の底鋼板上面と添接板との接触面にあり，紫外線による影響はほとんどないものと考えます。荷重による影響は輪荷重走行試験により疲労耐久性が高いことを確認しています。しかし，接着部の界面に水分等が浸入するという問題について，数十年という長期にわたってのデータはありません。そのため，必要接着強度を設定する際に，FRP 構造設計便覧（(社)強化プラスチック協会）により安全率 3.0 を確保することにしています。

今後の検討課題となりますが，接着部の機能低下あるいは機能しない場合の対策として，継手部にプレキャスト PC 床版と同様に，ループ継手を設ける等の方法を考えています。底鋼板の応力伝達機能を確保し，継目部の段差防止を目的としています。本論文にある土木研究所の輪荷重走行試験では実施していませんが，先行して実施した大阪大学での輪荷重走行試験ではループ継手を併用した試験体を採用しています。現場施工性等の課題があり，今後の研究課題と考えています。

論文題目：“U リブ内面モルタル充填による既設鋼床版の疲労耐久性向上検討”

著者：田畑昌子，青木康素，服部雅史，大西弘志，松井繁之
掲載：Vol.56A，pp.1356-1369，2010 年 3 月

◆討議 [坂野昌弘（関西大学）]

①図-15 で仮定しているルート部の形状とデッキき裂の発生進展方向は，実橋で確認されたものとは，だいぶ異なっているようですが，確認されていますか？また，この参照応力で実橋のき裂の発生進展が説明できますか。

②図-3 の補強方法では，デッキと U リブ間のビードが破断した場合には充填されたモルタルは何の役にも立たず，むしろ重しとなって U リブごとぶら下がりスタッドボルトで支えることになると思いますが，それで，ビード貫通き裂に対する補強になるのでしょうか。

③7.まとめの(6)で「FEM 解析の結果・・・応力低減は保持できることを確認した」と述べていますが、解析結果が正しいことは検証されているのか。「確認」ではなく「推定」ではないですか。

◆回答：①解析モデルのルート部の形状は、阪神高速道路の損傷事例でのサンプリングコアに基づき、溶け込み量などを反映してモデル化しています。ただし、実橋のルート部（溶接部）の微視的な表面の凹凸などは考慮していません。また、本検討では、溶接ルート部近傍の評価応力として、1mm法を用いています。ここでは、き裂発生起点から仮想のき裂進展方向に対し1mmの深さでのき裂進展方向に対して直角な応力成分を求めています。実橋におけるき裂の発生及び進展方向を捉えた事例（き裂部を含んだサンプリングコア）は少なく、今後の調査の進展が期待されますが、本検討では、既往のサンプリングコアのデッキプレート貫通型き裂の初期の進展方向（1mmの箇所を含む）と近似する仮想き裂進展方向を考慮した解析モデルを用いて、1mm法での応力参照位置を決定しています。

②本文を引用して説明させていただきます。静的載荷試験の結果より、デッキプレートとUリブ溶接部近傍のUリブウェブ側（測定点 I3-2, I4-2）の橋軸直角方向応力影響線（図-19）と、着目

した1mm法での溶接部のビード側ルート部近傍応力の橋軸直角方向応力影響線（図-21）とは、同様の形状を呈しており、ビード貫通型き裂の発生起点であるルート部近傍の疲労評価応力として、デッキプレートとUリブ溶接部近傍のUリブウェブ側の応力を用いることが可能と考えています。また、実験及び解析結果により、これら2つの応力に関して、補強前後の応力ピーク値が大きく低減することを確認しています。さらに、前述の質問回答と同様に、実橋におけるき裂の発生及び進展方向を捉えた事例でのビード貫通型き裂の初期の進展方向（1mmの箇所を含む）と近似する仮想き裂進展方向を考慮した解析モデルを用いて、1mm法での応力参照位置を決定しています。以上より、下面補強は、Uリブとデッキプレートの溶接部近傍の局部応力を大きく低減でき、ビード貫通き裂に対する補強になると考えています。

③本検討で用いた解析モデルは、実験供試体の付着切れを検証したものではありませんが、補強効果への影響検討では、輪荷重走行試験後のデッキプレート上面からの打音検査により確認した付着切れ箇所を「広範囲に様な深さの隙間」として仮定し、ルート部近傍応力を評価したものであり、付着切れモデルでも、高い補強効果を有していることを確認しています。