

13. 合成・複合構造

とりまとめ：大山 理 (大阪工業大学)

論文題目：“鋼・コンクリート接触面の腐食の発生・進展に関する実験的研究”

著者：中島章典・倉持弥奈・出川佑莉・磯 光夫

掲載：Vol.58A, pp.889-896, 2012年3月

◆討議 [鈴木森晶 (愛知工業大学)]

常時水に浸かっているような状況も生ずると思いますが、その場合はどのような結果となるのでしょうか？

◆回答：シリーズ1の実験では、実験室乾燥状態、屋外暴露状態、定期湿潤状態の3つの環境に試験体を設置して実験していますが、常時水に浸かるような環境では実験していません。したがって、明確なことはお答えできませんが、一般に、常時水に浸かっている状態よりも乾湿の繰り返しを受ける状態の方が腐食環境としては厳しいと言われてしますので、常時水に浸かっている状態での腐食の程度は本実験での屋外暴露状態よりはひどくならないと予想しています。

◆討議 [斉藤雅充 (鉄道総合技術研究所)]

隙間の腐食においては界面付近に滞水しているかどうか重要であると感じておりますが、本実験においては、滞水しているような状況は見られましたでしょうか(また、そもそも滞水が重要なのかどうかについてもご意見をお聞かせいただければ幸いです)？

◆回答：本研究では、屋外暴露状態においても試験体を立てて設置していましたので、接触面は常時滞水していません。また、鋼とコンクリートの接触面の滞水の問題は、私見ですが、界面に存在する水が強アルカリであれば鋼板は腐食しないと考えられますし、逆に、アルカリ性でなく溶存酸素を多く含む水が存在すれば接触面の鋼板は腐食することになると思われます。

◆討議 [有住康則 (琉球大学)]

鋼材の腐食では飛来塩分等も重要な腐食因子ですが、本研究では、パラメーターとして入れていません。考慮する必要はありますか？

◆回答：ご指摘のように飛来塩分の影響も重要だと思いますが、今回の実験では、通常環境で鋼とコンクリートの接触面が腐食するのか、また、その腐食が生じる場合の発生、進展の過程を考察することを目的としています。飛来塩分の影響については今後の課題と考えています。

◆討議 [谷口 望 (鉄道総合技術研究所)]

- ① 鋼とコンクリートの隙間を測定していますが、供試体製作後すぐの測定でしょうか？それとも、さびが生じた後でしょうか？
- ② さびが生じると隙間が広がるように印象を持っていますが、さびが生じる前後で隙間は変化していないのでしょうか？

◆回答：

- ① 鋼とコンクリートの接触面の隙間の計測はさびが生じた後です。端面端部に入りませんでした。
- ② 接触面にさびが生じることによって隙間が広がるような現象が生じているだろうと予想しています。実際に本研究のシリーズ2の鋼とコンクリートの接触面の付着が良好な場合では、腐食領域が広い屋外暴露状態の方が中性化範囲も広いことを述べています。ただし、暴露期間が2年経過した後においても、0.03mmの隙間ゲージが接触面端部に入りませんでした。

論文題目：“鋼箱桁橋とRC柱の結合部に用いるアンカービーム定着構造に関する実験的研究”

著者：斉藤雅充・南 邦明・横山秀喜・林川俊郎・八巻康博・水野 浩

掲載：Vol.58A, pp.897-907, 2012年3月

◆討議 [中島章典 (宇都宮大学)]

モデル1の荷重変形関係において最大荷重後の劣化が大きいのはなぜでしょうか？

◆回答：モデル1は、アンカービームが長く、貫通鉄筋も設けているタイプであり、モデル2、3と比較して拘束が高いモデルであると考えられます。このため、高い応答が得られたと考えられます。

一方、モデル1ではアンカービーム先端部で柱を塑性化させ、損傷範囲を限定させることに成功していますが、当初考えていた塑性ヒンジ形成範囲より小さな範囲で塑性化しており、これが最大荷重後に他のモデルより荷重の減少が大きかった原因と考えられます。

論文題目：“鋼・コンクリート合成床版に適用する高耐久性スタッドの開発”

著者：吉田賢二・稲本晃士・松井繁之・東山浩士・街道 浩

掲載：Vol.58A, pp.908-916, 2012年3月

◆討議 [中島章典 (宇都宮大学)]

フェルールの形状を改良してスタッドの疲労耐久性が増加した場合、結果的にスタッドの本数を減らすということを目指しているのでしょうか？また、コストの関係はどうなっているのでしょうか？

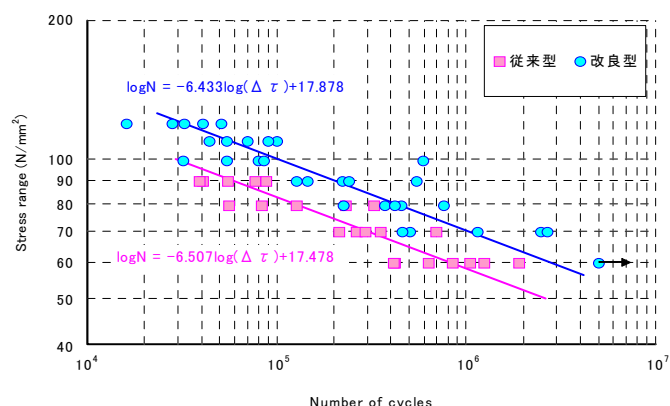
◆回答：現状ではスタッド本数を減らすのではなく、スタッドの疲労耐久性の向上により合成床版の疲労耐久性を向上させることを目的としております。コスト的には、アップすることが予想されますが、スタッド溶接後に鋼板に付着する溶接バリの除去作業が省略されるなどの施工面のメリットがあるため、今後検証したいと思います。

◆討議 [池田 学 (鉄道総合技術研究所)]

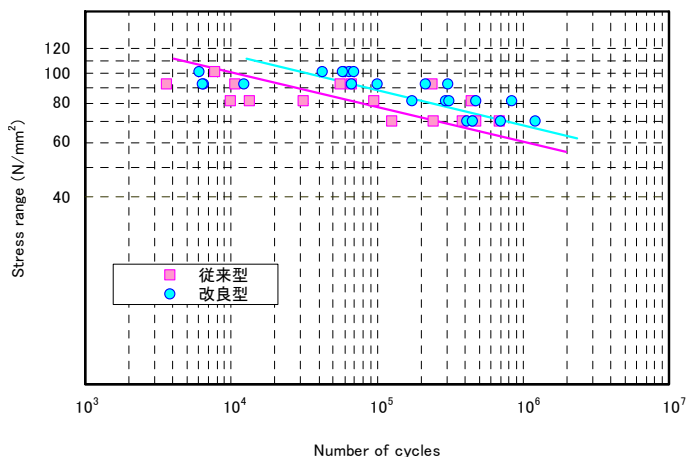
合成床板のスタッドの疲労を考える際には底鋼版の板厚の影響があると思います。今回の試験では板厚が厚い鋼版が用いられていますが、板厚が小さい場合の疲労強度は今回の結果と変わるのではないのでしょうか(一般に、合成床板の底鋼版の底鋼版は薄い鋼版が用いられていますので)?

◆回答：せん断曲げ疲労試験ではスタッド溶接される鋼版の板厚が22mmであるため、合成床版に適用する板厚と差異があり、試験結果が変わるのではというご指摘ですが、回転せん断疲労試験で使用した板厚は、合成床版に適用する底鋼版と同じ9mmであり、スタッド溶接部の疲労寿命はせん断曲げ疲労試験と同様に3倍程度向上していることを確認しております。

せん断曲げ疲労試験結果



回転せん断疲労試験結果



論文題目：“鋼橋の複合構造化に使用する速硬軽量コンクリートの硬化時におけるひび割れ挙動に関する検討”

著者：谷口 望・吉田直人・杉野雄亮・佐竹紳也・大久保 藤和・小出宜央・大垣賀津雄
掲載：Vol.58A, pp.917-924, 2012年3月

◆討議 [鈴木森晶 (愛知工業大学)]

- ① コンクリートのひび割れは、内部に、どの程度進展していたのでしょうか?
- ② ゴムラテックスのせん断強度はどの程度でしょうか?

◆回答：

- ① コンクリートのひび割れは、試験体上部から10cm程度の深さまで進展していました。貫通ひび割れではないことを確認しております。
- ② ゴムラテックスモルタルと鋼板の付着せん断強度は、4 N/mm²程度です。

◆討議 [中島章典 (宇都宮大学)]

ゴムラテックスと鋼材の付着の劣化は生じないものなのでしょうか?

◆回答：本材料の付着力低下は、材料劣化により生じると考えています。鉄道総研で実施した複合サイクル促進試験では、2000時間まで確認していますが、その時に材料劣化、付着力低下は確認されていません。なお、鉄道総研の実施している複合サイクル促進試験は、鉄道総研独自の手法によるもので、鉄桁の塗膜としては約10年分に相当すると想定しています。また、他の文献1によりますと、中性化速度係数、塩化物イオン浸透深さの試験で、SFRCよりも小さな値の結果となっていますので、一般のコンクリートよりも材料劣化は生じにくいと考えています。

文献1：杉野ほか：床版補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性に関する評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，2012.7

論文題目：“Numerical Study on Hybrid Structures Renovated from the Old Railway Steel Bridges”

著者：Weiwei Lin・Teruhiko Yoda・Nozomu Taniguchi and Norio Koide

掲載：Vol.58A, pp.925-934, 2012年3月

◆討議 [中島章典 (宇都宮大学)]

- ① In Fig.16, in case of only steel girder test, why is only so small the load is applied to the specimen?
- ② Existing bridge usually has the railway, then how does the concrete placed on the bridge?

◆回答：

- ① Loading test was performed on the old railway bridge before and after strengthening to confirm the effects of the present strengthening method. Therefore, in the loading test before strengthening (only steel girder test), relatively small load was applied to the specimen in order to avoid any yield or damage of the old steel girder.
- ② Concrete casting approach was also considered in the present strengthening method. GFRP plates are placed on the bottom flange of the old steel girder, and the concrete are designed to be poured from the space between the sleepers of the old railway bridge (Generally speaking, there is some space between the sleepers, which is enough for concrete casting).

◆討議 [三ッ木幸子 (石川工業高等専門学校)]

- ① 図16の計算と実験の値を比較すると、終局状態に近いところで計算値が若干高めの値になっています。この部分の取り扱いについてコメント下さい。
- ② 図7に示されているGFRP部材(凹型)の成形方法を教えてください。

- ③ 横桁が合成効果(拘束効果)に寄与していると考えられますが、横桁の高さと横桁とGFRP下床版の間の距離(クリアランス)を教えてください。縦桁のフランジ幅は図3に示されていますが、桁高(orウェブ高)を教えてください。
- ④ 図7のモデル化において、実験でGFRP間の接着がはがれたのでモデル化において最初から分離していたとあります。はがれた時にあるいは、はがれて最大耐力が達したと考えられますが、最大荷重時のその他の部分の変状を教えてください(コンクリート桁などの変状)。

◆回答：

- ① 本桁のフランジカバープレートは断続すみ肉溶接で取り付いており、終局時にはこの部分で溶接の剥離が生じ、重ね梁のような挙動となっていることが推測できます。FEMではこの部分のモデル化は行っていないため、終局時に計算値が高めの値になったと考えられます。
- ② 凹型の形鋼を作成し、これにガラス繊維をはり、プラスチック樹脂を含浸させてGFRPを作成しております。
- ③ 横桁とGFRPは数センチのクリアランスのみとなりました。なお本桁はリベット構造であり、現地組み立て精度があまり高くないため、横桁の主桁取り付け高さは一定ではありません。なお、横桁(C形鋼)の高さは200mm、縦桁(I形鋼)のウェブ高は260mmとなっています。
- ④ GFRPは接着剤により結合されているだけのため、かなり早い段階からこの部分で分離する傾向が見られたと推測しています。したがって、GFRPは桁の最大耐力に達する前に分離していたと考えられます。本桁の最大耐力は、GFRP、コンクリートの合成効果がなくなった後に縦桁鋼フランジの座屈挙動によって生じています。

論文題目：“高力ボルト摩擦接合されたGFRP部材の摩擦挙動および最大強度に関する力学的考察”

著者：橋本国太郎・杉浦邦征

掲載：Vol.58A, pp.935-945, 2012年3月

◆討議 [三ッ木幸子 (石川工業高等専門学校)]

- ① 表2のFiber Content Rate(%)について確認させて下さい。0.49は49, 0.45は45と考えてよろしいでしょうか？
- ② 表5のすべり実験のまとめで、3.2(1)を読むとTensile Strengthは最大荷重であるということがわかりますが、本文の939頁左上から4行目で「その平均値」と書いてあります。ボルト継手の限界状態を述べるとき、Stengthという表現よりmax loadなどloadという言葉を用いた方が誤解を招きにくいと考えますが。
- ③ まとめの2), 3)は、GGおよびGS共通とも考えられますが、本文中ではGSに対する解析のようでもあります。大まかにみて、すべり荷重と比較して最大荷重の差は少ないように見えます。対象を明確にして、結論を書いて頂けるとわかりやすいと思います。

◆回答：

- ① ご指摘の通りです。
- ② ご指摘の通りで、以後用語の使い分けに関して気を付けます。
- ③ まとめ2), 3)の結果はあくまでF-GSのFEM解析結果から得られたものです。F-GGではすべり係数が異なるため、結果は共通のものとして扱えないと考えられます。ご指摘の通り、実験ではF-GSとF-GGの最大荷重の差はあまりない結果となっております。これは、同じFRP材料を用いており、最大荷重は、そのFRP材で決まっているためと考えられます。

◆討議 [依田照彦(早稲田大学)]

導入軸力の大きさとその根拠を教えてください。

◆回答：軸力は、M20高力ボルトを使用しているため、鋼構造の摩擦接合継手と同様の考えで、181kNを目標に導入しております。

◆討議 [山口隆司 (大阪市立大学)]

鋼構造における摩擦接合のすべり係数と比べて、今回の実験結果のばらつきを教えてください

◆回答：鋼構造における摩擦接合と比べて大きいと思われます。今回の実験では、ステンレス同士の供試体では、すべり係数の標準偏差が0.005に対して、FRP同士で0.047、ステンレスとFRPの供試体で、0.017とばらつきが大きくなっております。

論文題目：“VaRTM成形による箱形断面CFRP梁の曲げ挙動に関する実験的研究”

著者：櫻庭浩樹・松本高志・堀本 歴・林川俊郎

掲載：Vol.58A, pp.946-958, 2012年3月

◆討議 [中島章典 (宇都宮大学)]

- ① 破壊モードに及ぼす補鋼材の影響が大きいように思いますが、いかがでしょうか？
- ② 破壊規準値の算出に用いている式は？

◆回答：

- ① 補剛材の有無は破壊モードに影響を及ぼすと考えられます。補剛材を用いない場合は、載荷点付近の上フランジとウェブの境界部(隅角部)において早期損傷が生じることを既往の研究 [櫻庭浩樹, 松本高志, 林川俊郎: 積層構成が異なる箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.73-87, 2012] で確認しております。この早期損傷は、載荷点付近の積層板面外方向せん断応力が主因となり、その面外方向せん断応力が CFRP 積層板の面外方向せん断強度に達することで生じると考えられる結果(上記論文の5章)が得られております。このような早期損傷は、梁部材として CFRP 積層板を用いる際に避けるべき損傷であることから、本研究においては支点と載荷点部に補剛材を設置し、その早期損傷の発生を防いでおります。

② 積層複合材料の応力の相互作用を考慮できる材料破壊規準である Tsai-Wu の破壊規準を用いております。応力の相互作用を考慮できる規準の中では、破壊規準に用いるパラメータを材料試験結果から比較的容易に決定できる規準であることから、積層複合材料の破壊規準としてよく用いられております。ただし、この破壊規準は、本来積層板の個々の層である単層板に適用される規準であります。本文中 3.2 節で述べているように、本研究では積層板を厚さ方向に均一な 1 枚の板と見なしてこの破壊規準を適用しております。

◆討議 [三ッ木幸子 (石川工業高等専門学校)]

- ① 載荷点での破壊で最大荷重に至ることは本来の実験計画では避けたかったと考えられる。そのため、これまでに支点部を補強するなどの工夫をされてきたと考えるが、荷重載荷点での応力集中を回避するため、載荷点(載荷治具と FRP の間)に、ゴム板を入れることは考えなかったか？
- ② 写真 3 の a)~c) では、破壊線に沿った盛り上がりが観察されています。これは、剥離が起きて、内側にもはらみ出す現象が予想されるが、この状況について教えて下さい。FRP の圧縮領域では、剥離に伴う局部座屈が予想されます。例えば、本文 951 頁右下から 2 行目で、剛性への寄与ということが書かれていますが、初期の断面の他に、剥離の影響を考慮して検討する必要があると思いますが、どのように考えられていますか？

◆回答：

- ① 本研究で用いている供試体の断面形状では、載荷点上フランジが終局に至る部位であると考えられる結果(本文中 5.4 節)が得られており、載荷点上フランジでの破壊は予想しておりました。ただし、本来であれば載荷点での破壊は避けるべき破壊であり、その位置での破壊を避けるためには、異なる断面形状を有する供試体を用いた検討が必要であると考えております。また、CFRP 供試体表面には凹凸があり、供試体と載荷治具との間に隙間が生じたため、石膏を用いてその隙間を埋めております。石膏を用いることがその隙間を埋めるために適切であると考えたため、ゴム板に関しては検討しておりませんでした。さらに、荷重載荷点での応力集中による影響は少なかったと考えております。本研究では、材料試験から得られた材料強度に基づいて梁の耐荷力を算定しており、梁理論に基づいた梁軸方向直応力と面内せん断応力の組合せが材料破壊規準(Tsai-Wu の破壊規準)を満たすことで梁は終局に至る、と考えることで実験の梁の耐荷力に比較的近い耐荷力算定値が得られております(本文中 5.4 節)。すなわち、応力集中の影響を考慮しない耐荷力の算定方法で、梁の耐荷力に比較的近い耐荷力算定値が得られていることから、応力集中の影響は少なかったと推察しております。

② ご指摘されたような圧縮領域の剥離に伴う断面欠損による局部座屈を検討するためには、曲げスパン内の圧縮領域の積層板任意位置において剥離の判定を行い、その判定に基づいて積層板の剛性を低減させていく必要があると考えられます。しかしながら、剥離に伴う局部座屈の検討は、本研究の着目範囲を超えており、そのような検討は行っておりませんでした。なお、本文中 5.4 節(1)項と(2)項に示している材料破壊規準に基づいた耐荷力算定結果と曲げスパン内における上フランジの局部座屈応力の算定結果では、載荷点上フランジが材料破壊を考えた場合の終局部位となり、かつその材料破壊は曲げスパン内における上フランジの局部座屈に対して先行する、と考えられる結果が得られております。したがって、載荷点上フランジの材料破壊が起点となって、本文中 5.3 節(2)項で述べている理由から、写真 3 のような破壊形態になったと考えております。本文 951 頁右下から 2 行目にある「剛性への寄与」に関する記述は、対角方向に単層板を有する供試体(Q1)の材料試験から得られた弾性係数が、積層理論に基づいて算出された弾性係数に対して小さい値を示す原因について考察したものであります。したがって、ご指摘された記述は、圧縮領域の剥離に伴う断面欠損による積層板の剛性低下に関するものではありません。