

バサルト繊維補強材を軸方向筋に用いた コンクリートはり部材の性能に関する一考察

小林 巧・佐藤純弥・内田雅一・石田雅博

1. はじめに

海岸部や積雪寒冷地において、飛来塩分や凍結防止剤散布による塩害が発生しており、鋼材腐食被害が生じている。そのような背景から、腐食しない高耐久材料である繊維強化プラスチック（以下「FRP」という。）が、コンクリート中の普通鉄筋の代替材料として注目されている。

図-1に普通鉄筋、炭素繊維補強材¹⁾（以下「CFRP補強筋」という。）、アラミド繊維補強材¹⁾（以下「AFRP補強筋」という。）、およびバサルト繊維補強材（以下「BFRP補強筋」という。）の構成則例を示す。バサルトは自然由来の玄武岩のことで、これを熔融解して紡いだ繊維がBFRPであり、弾性係数は小さいが、FRPの中では安価（CFRPの1/5程度）である特徴を有する。

鉄筋の代替材料としてFRPを使用する目的は、塩害耐久性能を向上させることである。一方、橋梁には耐久性能の他にも、耐荷性能とその他使用目的との適合性を達成する為に必要な性能（以下「その他性能」という。）が要求されている。表-1に橋の性能²⁾を示す。設計では高耐久補強筋の使用により(塩害)耐久性能を向上させつつ、耐荷性能とその他性能を満たす手段を示す必要がある。

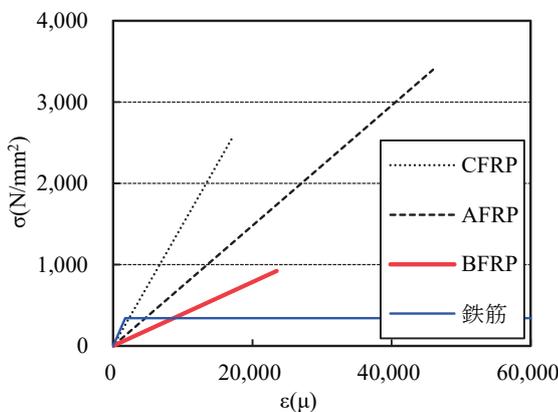


図-1 普通鉄筋およびFRPの構成則例

表-1 橋の性能²⁾

性能	性能の例
耐荷性能	荷重を支持する能力 構造物の安全性
耐久性能	経年劣化により耐荷性能に影響を及ぼさない能力
その他性能	通行快適性（不快感・不安感を生じさせないたわみ等）、フェールセーフ

そこで、本研究ではBFRPのように特に弾性係数が小さい材料を軸方向筋に用いたRCはり部材の曲げ性能を載荷試験により確認するとともに、上部構造の一部材としての性能の一部を達成するための手段について検討した例を報告する。

2. 道路橋への新材料適用に向けた検討

2.1 新材料の適用について

道路橋は、従来材料（コンクリートや鋼材）だけでなく、BFRP補強筋等の新材料も含め、様々な材料を組み合わせた結果として、橋全体としての要求性能を満たせばよいという設計体系（性能規定化）であるが、道路橋上部構造に新材料を適用するには、耐荷性能の照査を行い、規定される荷重組合せに対して部材の限界状態1及び限界状態3を超えないように設計するとともに、耐久性能の照査を行い設計耐久期間に対して、材料の経年的な劣化が耐荷性能に影響を及ぼさないことを確認し、加えて、通行快適性等その他性能として、たわみ照査用の活荷重に対して、一定のたわみの範囲になるかどうかを照査する必要がある。

また、大前提として、新材料を用いる場合には、JISやそれに相当する品質確保が必須である。これは材料物性のばらつきを基に、その信頼性を評価し安全率（部分係数）を設定するためである。品質が一定でない材料は道路橋に使用し得ない。

材料の品質が確保された前提で、部材単位もしくは、上部構造全体として要求性能を満たすこと

表-2 FRP補強筋を上部構造に適用する場合に検討が必要な主な課題の例

性能	検討課題例
性能確保の前提	<ul style="list-style-type: none"> ・JISへの適合もしくはそれと同等の品質確保 ・材料剛性や熱膨張係数が異なることも加味した、付着性能の確保及びその達成手段 ・曲げ加工や継手等の施工方法、曲げ加工部強度の確保や定着方法 等
耐荷性能	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ直上での部分的な圧壊や、せん断破壊後の急激な耐力低下・立体機能喪失などの、脆性的な破壊挙動の制御 ・FRP補強筋を破断させない適用範囲や条件 ・せん断やねじり補強方法、もしくはせん断補強筋としての性能確保手段 ・部材挙動に応じた荷重支持性能の変曲点（限界状態）の設定 ・部分係数設定のための、材料特性や部材特性のばらつき把握、再現性の確認 ・上部構造としての鉛直・橋軸・橋軸直角方向剛性、ねじり剛性、立体機能の確保 等
耐久性	<ul style="list-style-type: none"> ・疲労耐久性、耐火特性、耐アルカリ性等の設計耐久期間（基本的に100年）における性能の確保及びその達成手段 ・FRP補強筋の拘束効果を考慮したクリープ係数の設定 等
その他性能	<ul style="list-style-type: none"> ・橋の通行快適性に関わる活荷重時の変形量の低減及びその達成手段 等

を確認する方法や確認項目の例は、「道路橋の新技术評価手法に関する研究—新技术評価のガイドライン（案）—」³⁾や、「コンクリート道路橋設計便覧」⁴⁾に記載がある。

設計便覧⁴⁾に適合性を判断するためのステップとして、次の内容が記載されている。

- (1) 材料としての評価（機械的性質や応力ひずみ曲線の再現性、時間依存性挙動等）
- (2) 部材としての評価（部材耐荷機構の明確化、その再現性、限界状態の設定、耐久性）
- (3) 特定の部材としての評価（柱や床版等、特定の使い方をする際に追加で要求される性能）
- (4) 部材の使い方の評価（長期使用や多様な外力及び環境条件下における適用方法）

2.2 FRP補強筋を用いる場合の課題と解決手段例

2.1では、新材料を道路橋に適用する際に必ず達成すべき項目を述べた。それに基づきFRP補強筋を適用しようとした場合に考えられる主な

課題例を表-2に示す。

これら課題解決のために構成部材の性能を実験的に確認（輪荷重走行試験による疲労耐久性の確認等）するのも手段の一つである。また、要求性能を実験的に確認する手段以外にも、例えば材料特性が部材性能に与える影響が明らかな範囲で限界状態を設定する等の手段もある。要求性能の達成手段は一つだけではなく、その一例として、たわみの照査（通行快適性等その他性能）を満足し得ないほど材料剛性が低いBFRP補強筋を用いる場合を想定し、塩害耐久性能を向上させつつ、たわみを低減させる方法を模索した。

3. BFRPはりの曲げ載荷試験

3.1 実験対象及び載荷試験方法

表-3に物性値一覧、図-2にBFRPの断面模式図と写真、図-3に載荷試験体概略を示す。なお、表-1に示すBFRP補強筋の物性は規格として定められたものではなく、試作品の物性値であり、引張試験を基に算出した。試験体は軸方向筋にBFRP補強筋を用いたはり（CASE-1、以下「BFRPはり」という。）と普通鉄筋を用いたはり（CASE-2、以下「普通鉄筋はり」という。）である。スターラップは全てSD345-D10である。また、終局耐力はBFRPはりが368 kN、普通鉄筋はりが330 kNである。

使用したBFRPは熱可塑性樹脂（ポリプロピレン）であり、図-2のように芯材の周囲に材料保護と耐アルカリ性の観点からコーティング層を設けている。設計時は芯材の断面積を有効断面とした。

以上の試験体に対し、曲げ載荷試験を行った。

3.2 載荷試験結果

図-4に載荷試験により得た荷重—変位関係を示す。図-4より、ひび割れ発生までは両ケースとも部材剛性が同じであるが、その後の挙動は大きく異なる。BFRPはりは圧壊まで弾性的な挙動を示す。普通鉄筋はりが降伏に至るまでの荷重時では、BFRPはりの変位が非常に大きい。

図-5にひび割れ図を示す。これによるとBFRPはりは普通鉄筋はりとは比べ初期ひび割れ発生後に急激にコンクリート上縁近くまで進展し、その後、進展したひび割れ直上で圧壊している。

図-6に荷重と平均付着応力度の関係を示す。平均付着応力度⁵⁾は式（1）で計算した。

表-3 物性値一覧

CASE	コンクリート		軸方向補強筋			
	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	材料種別	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
1	45.3	31.8	BFRP補強筋	—	923	39.3
2	45.1	32.3	SD345-D19	405	551	200 ²⁾

$$\tau = \frac{A\sigma_s}{\psi l} \quad \dots (1)$$

ここで、 τ は平均付着応力度、 A は鋼材断面積、 σ_s は2点間の応力差（2点間のひずみ差にヤング係数を乗じて求めた。） ψ は補強筋の周長、 l は2点間の距離である。2点間は曲げスパンにおけるひずみゲージ間を意味する。BFRP補強筋はコーティング層を除く有効断面積と、それから逆算したみかけの補強筋径と周長を用いて平均付着応力度を求めた。そのため、平均付着応力度の絶対値には物理意味はないが、相対的な付着応力度の大小は滑り挙動の指標として扱える。図中において付着応力度が減少した位置、すなわち、滑りが生じたと解釈できる位置を初期滑りとした。それによると、図-6のBFRPはりは明確に初期滑りが生じており、ひび割れが生じた後に付着が切れ、滑り挙動を示したことがわかる。一方、異形処理がされた普通鉄筋はりでは、初期滑り後に付着応力度が小さくならず、ほぼ一定値を示す。これは初期滑り後に、節とコンクリートの噛み合わせにより、付着が保持されていることを示している。

3.3 BFRPはりの課題とその解決手段の例

曲げ荷重試験結果より、BFRP補強筋を用いたRCはりの課題は、(1)たわみやひび割れ幅が大きくなる、(2)局所的な圧壊が生じ、脆性的な破壊が起こる、(3)異形処理節が無く、滑り挙動が発生する点であると考えられる。

これら課題の内、本報文では設計上の工夫で、通行快適性等その他性能確保のために、たわみを抑制する方法の一例を示す。プレストレス導入もたわみ抑制に対する解決手段の一つであるが、本報文ではRCを対象とする。

たわみやひび割れ幅が大きいこと、中立軸位置が上縁側にあることは全て引張側鋼材の剛性が小さく、それが受け持つ応力が小さいことが原因であるので、引張側に剛性が大きい鋼材（以下「変形抑制筋」という。）を導入することで、たわみ

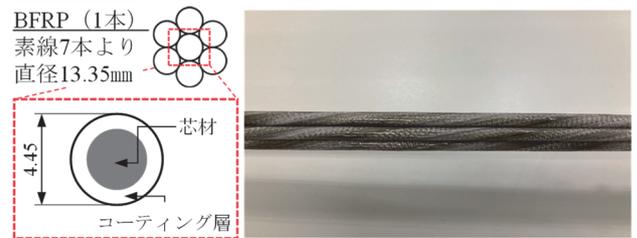


図-2 BFRPの断面模式図と写真

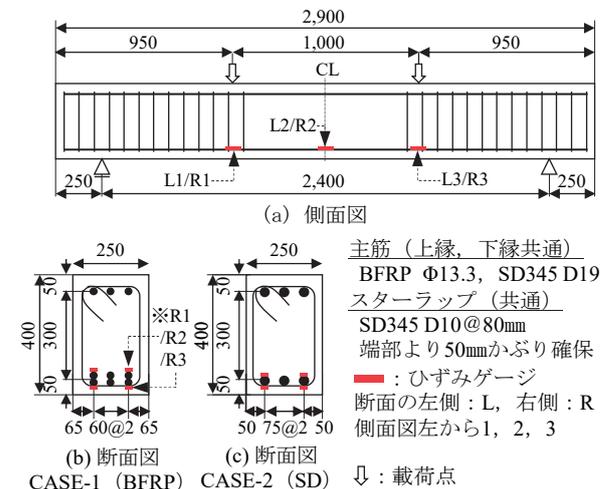


図-3 荷重試験体概略

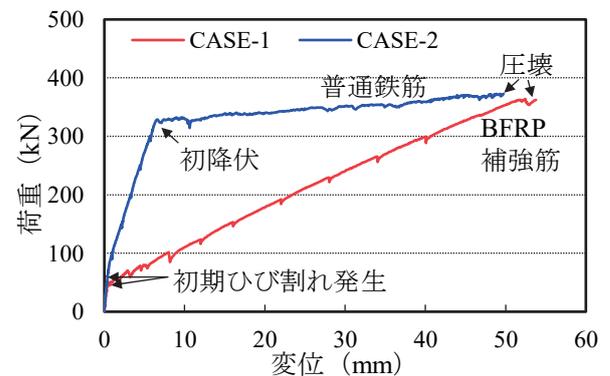
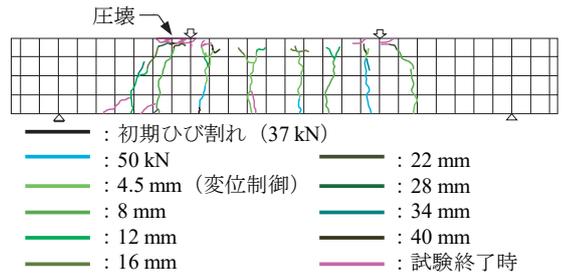


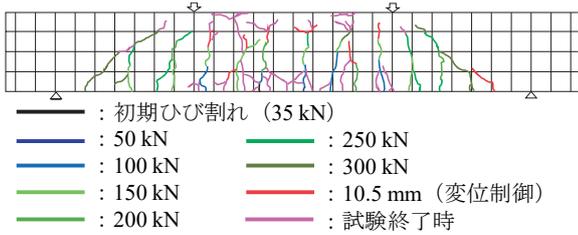
図-4 荷重-変位関係

低減、ひび割れ幅抑制、中立軸を下げる効果が期待できることは自明である。しかし、たわみをどの程度抑制できるかを検討した例は少ないので、変形抑制筋の効果を解析的に検証した。

なお、たわみ確保のために変形抑制筋（鉄筋）

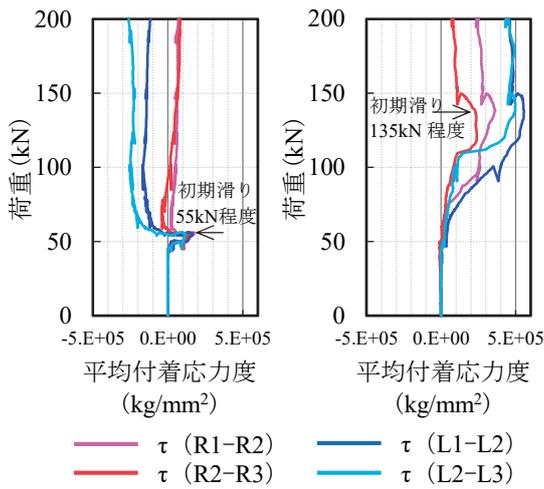


(a) CASE-1 (BFRP)



(b) CASE-2 (普通鉄筋)

図-5 ひび割れ状況



(a) CASE-1(BFRP) (b) CASE-2(普通鉄筋)

図-6 荷重と平均付着応力度の関係

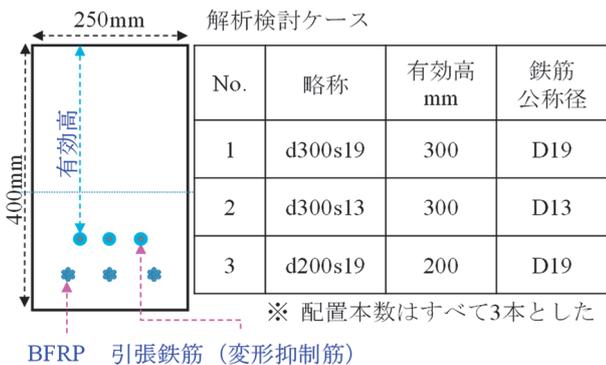


図-7 検討ケース

を追加することにより、その変形抑制筋が塩害を受けて腐食しては意味が無いので、十分にかぶりを確保した断面の内側に変形抑制筋を配置し、腐食しないようにした。

4. 変形抑制に関する解析的検討

4.1 解析方法および解析モデル

解析検討ケースを図-7に示す。ファイバー解析パラメータは有効高および鉄筋径とし、略称は、 d が有効高、 s は鉄筋の公称径であり、たとえば、 $d200s19$ は有効高が200 mm、鉄筋がD19の解析ケースである。鉄筋径は部材最小寸法の1/10から1/15の範囲内⁴⁾とするため、D19 ($d300s19$)と、BFRPと同径のD13 ($d300s13$)の2種類とした。有効高は部材中心、上端から300 mmの2種類とした。

解析モデルの外形状およびBFRPの配筋は静的載荷試験体(図-3)と同じである。鉄筋およびBFRP補強筋は埋め込み要素として取り扱った。表-2の実験値と文献²⁾の設計用構成則を用いた。

4.2 変形抑制の目安となる荷重について

解析結果の解釈の前に、変形抑制の目安について述べる。部材として剛性の高い従来のコンクリート構造では、たわみが問題となることが無かったため、その照査を行っていない。しかし、たわみがどこまで許容できるかは、要求性能として鋼橋でもコンクリート橋でも同じであるため、鋼橋の活荷重たわみの制限値⁶⁾を準用して検討することとした。それによると鋼橋では荷重係数を乗じない活荷重時のたわみで照査を行っている⁶⁾。

しかし、活荷重ははり部材の矩形断面では計算できず、上部構造断面が決定されなければ算出できない。そこで、比較対象としてRCはりの場合に想定される割り戻した活荷重相当の荷重時を、たわみ照査用の活荷重と仮定し検討した。

図-8に本報文におけるたわみ比較点を示す。比較点は、普通鉄筋はりの限界状態1(降伏)と限界状態3(圧壊)に達する荷重を作用と抵抗の部分係数²⁾で割り戻し、たわみ比較荷重AとBを求めた。長期的な影響要因(クリープ、乾燥収縮)等の影響は無視した。これら作用と抵抗の部分係数の組み合わせ(限界状態1:約1.72、限界状態3:約2.03)が安全率に相当する。表-4に部分係数とたわみ荷重を示す。CASE-2(普通鉄筋)の

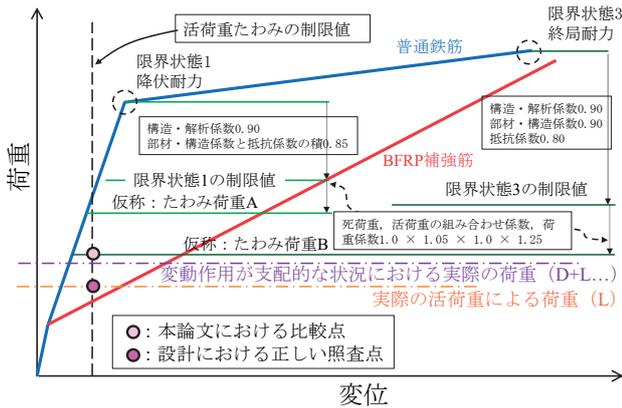


図-8 本報文中におけるたわみの比較点

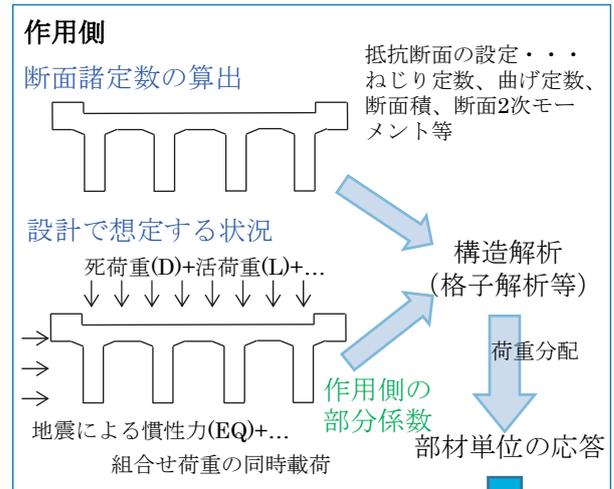
表-4 部分係数とたわみ荷重

CASE-2(普通鉄筋)		限界状態1	限界状態3	
実験値(kN)		326	372	
抵抗側部分係数	調査・解析係数	0.90	0.90	
	部材・構造係数		0.90	
	抵抗係数	0.85	0.80	
作用側部分係数	死荷重	荷重組合せ係数	1.00	
		荷重係数	1.05	
	活荷重	荷重組合せ係数	1.00	
		荷重係数	1.25	
	安全率		1.72	2.03
	たわみ比較荷重		190 (=326/1.72)	183 (=372/2.03)

荷重をそれで除すると、たわみ比較荷重Aは、約190 kN (= 326 kN / 1.72)、たわみ比較荷重Bは183 kN (=372 kN / 2.02) となる。本報文中では、183 kN時におけるたわみを確認する。

厳密には活荷重による荷重 (L) と異なり、死荷重を始め活荷重以外の荷重の累加 (D+L...)、上部構造の荷重分配効果、限界状態の制限値照査時の余耐力等が異なる。それらは橋が置かれた状況や断面で変化するため考慮できないが、設計上の工夫で変形抑制が可能かどうかを検証する目的であるので、荷重が大きく、たわみが大きい安全側の照査点での比較により、その傾向を推し量ることは可能である。

誤解が無いように、図-9に上部構造のはり部材



性能の階層化 → 部材単位で照査 VS

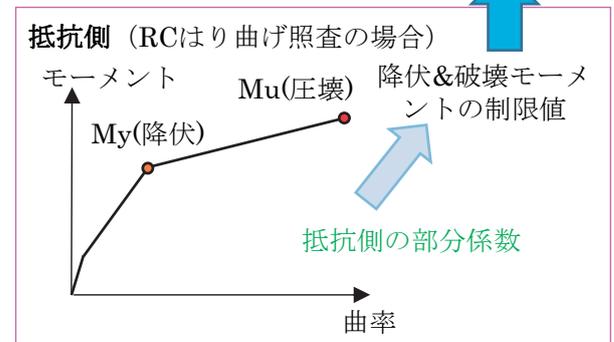


図-9 上部構造のはり部材における通常の耐荷性能 (曲げ) の照査

における通常の耐荷性能 (曲げ) の照査を示す。通常の照査では性能の階層化 (橋の性能を上部構造・上下部接続部・下部構造の性能照査でみなしてよく、上部構造の性能を構成部材の性能照査でみなしてよい) により、本来は作用側として上部構造断面に対して部分係数を乗じた荷重を載荷し、荷重分配による部材単位の応答が求まり、それと抵抗側の限界状態の特性値を部分係数で割った制限値との照査が行われる。今回の割り戻しは、格子解析上、ある位置において荷重とモーメントが比例すること、活荷重等の局所載荷されない荷重を前提としている。

4.3 解析結果

図-10に荷重-変位関係および解析結果を示す。図中の破線がたわみの制限値であり、L/600⁶⁾ (Lは支間長: 2,400 mm) で求められる。また、緑線がたわみ比較荷重B (183kN) である。実験値と解析値がほぼ整合しており、解析モデルの妥当

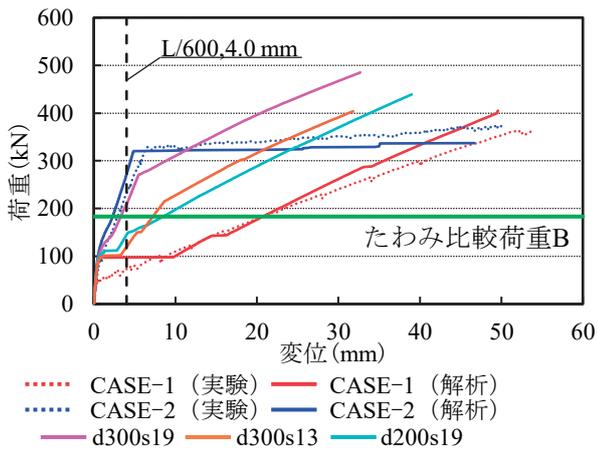


図-10 荷重－変位関係および解析結果

性が確認された。ただし、BFRPはりは付着滑りにより解析と実験の部材剛性がわずかに異なる。

図-10より、d300s19はBFRPはりに比べて変形が抑制できている。d300s19とd300s13を比較すると、鉄筋径の大きいd300s19の方が、変形抑制効果大きい。以上より、適切に変形抑制筋を配置することで、通行快適性等の性能を満足するたわみ量に抑えられる可能性があることが示された。

5. まとめ

道路橋は、従来材料(コンクリートや鋼材)だけでなく、BFRP補強筋等の新材料も含め、様々な材料を組み合わせた結果として、橋全体としての要求性能を満たせばよいという設計体系(性能規定化)であり、設計では高耐久補強筋の使用により(塩害)耐久性能を向上させつつ、耐荷性能とその他性能も満たす必要がある。

本検討では、腐食せず耐久性に非常に優れるが、

材料剛性が低く、たわみの照査を満足しにくい特徴を有するBFRP補強筋を用いたはり部材に対して、塩害耐久性を向上させつつ、たわみを低減させる方法を検討した。その結果、十分にかぶりを確保し、耐久性能を低下させないようにした上で変形抑制筋(鉄筋)を追加することで、活荷重相当の荷重下で、たわみを十分低減できる可能性があることがわかった。

謝 辞

本研究は文部科学省・科学技術振興機構による「革新材料による次世代インフラシステムの構築～安心・安全で地球と共存できる数世紀社会の実現～」の一環でJST・COI・JPMJCE1315の支援を受け実施したものです。記して謝意を示します。

参考文献

- (公社)プレストレストコンクリート工学会：繊維強化ポリマー (FRP) のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針、p.258、p.299、2020
- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、p.45、p.124、2017
- 国土技術政策総合研究所：道路橋の技術評価手法に関する研究－新技術評価のガイドライン(案)－、国総研資料、第609号、2010
- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅱ鋼橋・鋼部材編、pp.40～41、2017
- 西山啓伸、秋元泰輔：太径異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートばりの曲げせん断実験、コンクリート・ジャーナル、Vol.7、No.4、pp.10～20、1969
- (公社)日本道路協会：コンクリート道路橋設計便覧、pp.41～43、p.84、2020

小林 巧



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員
KOBAYASHI Takumi

佐藤純弥



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員
SATO Junya

内田雅一



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
UCHIDA Masakazu

石田雅博



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員
ISHIDA Masahiro