

報告

既設合成桁の床版取替えにおける設計・施工上の課題について

大垣賀津雄*

*工博, ものづくり大学 教授, 技能工芸学部 建設学科 (〒381-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)

わが国では、1960～1970 年代に経済成長時代を迎え、数多くの合成桁橋が建設されている。ここでは、各種資料に示されている合成桁設計方法を再度整理して概説し、連続合成桁の設計・施工方法に多くの種類があり、施工上の特色があることを示している。また、近年大規模更新工事として、鉄筋コンクリート床版の取替えが計画されており、これらの合成桁も例外ではない。したがって、連続合成桁の床版取替えにおける検討項目とその手順について示している。さらに、床版取替え後の主桁設計・施工をどのようにするかについて、課題の整理を行った。最後に、近年取り組まれている合成桁の設計・施工における合理化への試みや、新しい性能照査型設計法について紹介するものである。

キーワード：合成桁, 連続合成桁, 大規模更新, RC 床版, 床版取替え

1. はじめに

1960 年代から 1980 年頃までにかけて、わが国では数多くの合成桁橋が建設されている。合成桁の設計方法は正曲げモーメント範囲でほとんど違いがなく、床版と鋼桁が一体となって抵抗するものとする。しかしながら、連続合成桁の中間支点付近における負曲げモーメント範囲は、ずれ止め配置、ずれ止め形状、および施工方法等で区別して、種々の設計方法が用いられてきている。1960 年代に、橋博士は連続合成桁の設計・施工方法について、各種実験や施工事例等の知見をまとめている¹⁾。これらの連続合成桁の歴史については、五十畑博士らがその構造、施工法、実績、および基準の変遷について整理している²⁾。さらに、中井博士らは合成桁の各種設計法、欧米の設計基準、終局耐荷力の計算法等を示している³⁾。近年、長井博士が合成桁の設計法、終局強度照査方法、および維持管理設計法という観点で、欧米諸国で新たに適用されている考え方をまとめている⁴⁾。ここでは、これらの資料に示されている合成桁設計・施工方法を再度整理して、概説するものである。

また、近年大規模更新工事として、鉄筋コンクリート（以下、RC と呼ぶ）床版の取替えが計画されており、これらの合成桁も例外ではない。既設合成桁の RC 床版施工時には、例えば、一時的に上横構を配置して架設時の鋼桁安定性を確保しているものや、床版の軸方向にプレストレスを導入しているもの等があり、これらの RC 床版取替え中や取替え後にどのような設計・施工を行うかが重要な課題である。本文はこれらの課題を整理して、

解決に必要な検討事項をまとめて示したものである。

2. 既往の合成桁設計・施工方法

2.1 合成桁の長所と短所

1960 年代から、RC 床版と鋼桁が適切にずれ止めと連結され、両者が一体となって働く合成桁が標準的な構造形式として考えられるほどに普及した。単純桁として用いられる合成桁は一般に 40m 程度までが建設されているが、連続化することにより支間長は 50m 程度までが対象となり、1980 年頃まで数多くの連続合成桁が建設され、その経済性は認められてきたといえる。高度経済成長時代には高架橋を始めとして橋梁の建設が数多く計画されている時代であり、構造形式決定において経済性が最も重要な因子であると考えられた時代である。

連続合成桁の長所と短所は表-1 に示す通りである¹⁾。同表に示す通り長所のみならず短所も存在する。同表から、合成桁は設計・施工が複雑で高品質の RC 床版が要求されるものの、経済的な効果は捨て難いことから採用

表-1 連続合成桁の長所と短所

長所	(a) 経済性が高い。
	(b) 構造高さを低減可能
	(c) 長大支間への適用可能
	(d) 耐荷力が増大する。
短所	(a) 設計・施工が複雑となる。
	(b) 高品質の RC 床版が必要
	(c) 床版損傷で機能不全になる。
	(d) 床版取替えが複雑となる。

されてきている。

また、鋼桁支間部全体を支保した状態で、RC 床版を施工する死活荷重合成桁は、1970 年代初めにほとんど施工されなくなっており、合成桁といえば単純活荷重合成桁ないしは、連続合成桁が主流となった。

2.2 連続合成桁の種類と変遷

橋博士らは 1950 年代後半～1970 年代初頭まで、連続合成桁の設計・施工法について一連の研究を行っている。1950 年代後半にドイツで多く建設されていたプレストレスする連続合成桁の事例紹介を行い、その後模型実験を実施している⁹⁾⁶⁾。また、その際のクリープや乾燥収縮の実用的な計算方法について、ドイツの事例等を紹介している⁷⁾。

1960 年代初期には、中間支点部床版コンクリートに生じる引張応力の低減を目的に、逆に合成度を低下させた不完全合成構造として、中間支点部付近の剛なずれ止めを柔なずれ止めに変えた弾性合成桁や、一部の区間のずれ止めを省略して非合成とする断続合成桁、あるいは部分合成桁の実験的な研究や計算手法の紹介を行っている⁸⁾¹⁰⁾。さらに、1960 年代後半には、剛なずれ止めを全橋に渡って配置する完全合成桁で、プレストレスしない連続合成桁の実験を行っている¹¹⁾。プレストレスを導入する工法よりも煩雑さがなくなり、工期短縮と設計の合理化に繋がることを最終的に示している。

わが国の連続合成桁の変遷は、上述の橋博士らの一連の研究から、10 数年の間に種々の過程を経て、プレストレスする連続合成桁から、1970 年代には中間支点部のずれ止めを十分に配置したプレストレスしない連続合成桁が主流となり、その設計・施工法が移行して定着したといえる。

改めて連続合成桁の考え方と施工方法を表-2 にまとめて示す^{1)3),12)}。連続合成桁には、プレストレスする合成桁、プレストレスしない合成桁、部分合成桁、断続合成桁、弾性合成桁等がある。いずれの連続合成桁も正曲げモーメント領域では合成断面として外力に抵抗するよ

うに設計することは同じであるが、表-2、図-1 に示す通り、中間支点付近の負曲げモーメント領域の構造もしくは施工方法を変えることによって、その設計的な考え方を区別している^{1)3),12)}。

しかしながら、1980 年代には RC 床版の劣化損傷事例が顕在化したことを受けて、RC 床版の取替えを念頭に入れるため非合成桁が主流となってきている。以下に、各種連続合成桁の設計・施工法を解説する。

(1) プレストレスする連続合成桁

中間支点付近の床版にプレストレスを導入し、桁全領域を完全合成桁として扱う設計方法である。プレストレ

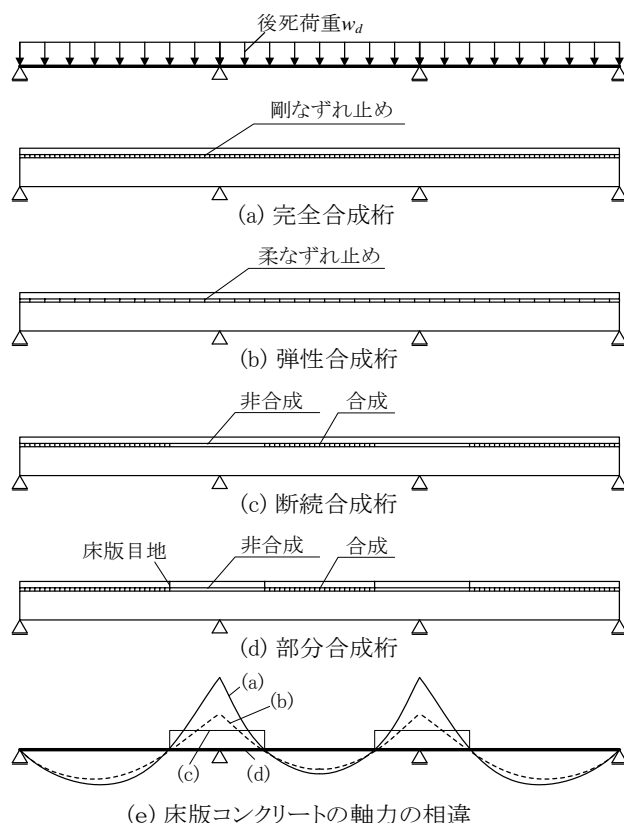


図-1 各種連続合成桁の構造と床版軸力の相違

表-2 連続合成桁の考え方と施工方法

分類		中間支点付近の考え方	施工方法
完全合成桁	プレストレスする連続合成桁	鋼桁と RC 床版が合成一体化して、中間支点部床版にもプレストレスにより、ひび割れを許容しない。	(1)支間部の先行荷重による工法 (2)ジャッキアップダウンによる工法 (3)PC 鋼線による部分的な縦締め工法
	プレストレスしない連続合成桁	負曲げ領域は鋼桁+鉄筋で抵抗し、鉄筋量でひび割れ幅を制御する設計法。	中間支点付近も RC 床版と鋼桁が十分合成する程度のずれ止めを配置
不完全合成桁	弾性合成桁	負曲げモーメント領域のみ不完全合成として設計する。	全長にわたり柔なずれ止めを設け、中間支点部床版の連続性は確保する。
	断続合成桁	正曲げ領域を完全合成桁で、負曲げ領域の一部を非合成として設計する。	正曲げ領域を剛なずれ止めで、負曲げ領域を柔なずれ止めで結合する。
部分合成桁		死荷重の正曲げ領域を合成とし、負曲げ領域を非合成として設計する。	正曲げ領域を剛なずれ止めで、負曲げ領域を柔なずれ止めで結合し、その境界で床版に目地を設ける。

ス導入の施工方法は図-2 に示す通り、以下の3種類がある。これらの方法により、床版に作用する引張応力でひび割れが生じないように照査している。

- (a) 同図(a)は、支間中央部の RC 床版を施工した後、その床版部分に水や砂を用いて先行荷重を載荷しておき、中間支点部床版を施工後に先行荷重を除荷してプレストレスを導入する方法である。
- (b) 同図(b)は中間支点をジャッキアップした状態で、その部分の床版コンクリートを打設した後にジャッキダウンする方法である。(a),(b)の方法はクリープや乾燥収縮でプレストレスが経時的に減少していくことが指摘されている。
- (c) 同図(c)は船形突起を付けて、シーす管に縦締め PC 鋼材を通し、プレストレスを導入する方法である。プレストレス導入に際して、鋼桁と床版が合成された後にプレストレスする場合、合成前にプレストレスする方法がある。後者の場合、床版施工後に合成させることが困難であるため、前者が一般的であるが、床版への導入軸力は鋼桁による拘束を適切に評価する必要がある。

(2) プレストレスしない連続合成桁

一方、連続合成桁の中間支点部床版のコンクリート引張力について、ドイツの影響を受けていた初期は、プレストレスの導入によって許容応力内に抑える方法がとられた。しかし、次第に北米、英国で採用されていたプレストレスしない工法へと移行した。これは RC 梁の設計方法と同様に引張領域のコンクリートを無視する考えであり、負曲げモーメント領域でコンクリート床版の

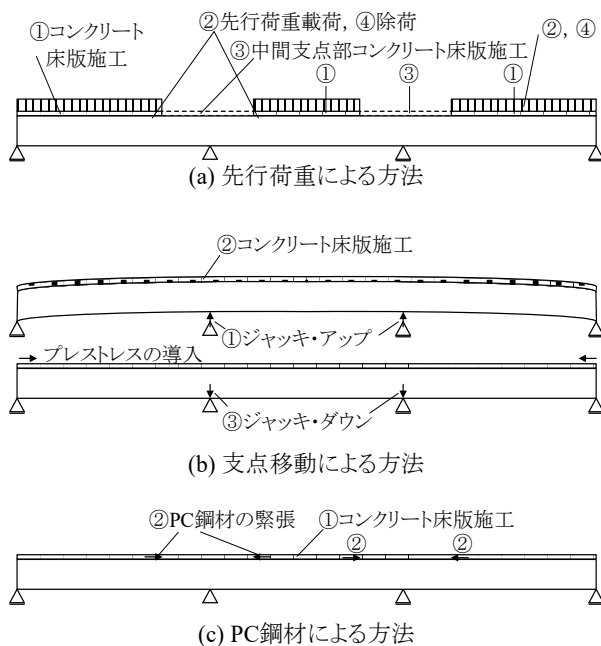


図-2 プレストレスする連続合成桁の工法

ひび割れを許容し、コンクリートを無視して床版の中にある鉄筋と鋼桁からなる断面で抵抗すると考える設計方法である。橋博士らは、断続合成桁、部分合成桁等が実用上定着した形式とならなかったことを指摘し、プレストレスしない連続合成桁の設計法を、わが国でも取り入れることを提案し、これを「プレストレスしない連続合成桁」と称した。

(3) 弾性合成桁

負曲げモーメント領域にバネ定数を考慮した柔なずれ止めを用いる不完全合成桁の設計方法である。床版を連続させるが中間支点部付近は床版と鋼桁がずれるため、不完全合成桁と考えるものである。正曲げモーメント区間も不完全合成とするケースもあり、考え方が煩雑である。また計算と実態が一致しない等の問題点が指摘されている。

(4) 断続合成桁

負曲げモーメント領域の床版も連続させて、ずれ止めをスラブランプに変えて非合成桁として扱う設計方法である。部分合成桁と混同される場合がある。

(5) 部分合成桁

負曲げモーメント領域の考え方は非合成桁として扱う断続合成桁と同じ考えの設計方法であるが、負曲げモーメント領域の床版は切断目地を設けて、床版を連続させない構造である。

(6) 連続合成桁の施工実績

上述の(3)～(5)は正曲げモーメント領域だけに合成作用を考慮する設計方法であり、これらの施工実績は少ない。(1)のプレストレスする連続合成桁と(2)のプレストレスしない連続合成桁の施工実績は(3)～(5)に比べて多い。しかしながら、(1)ではジャッキアップダウンの施工性やケーブルプレストレスによる維持管理性等が課題であり、(2)ではひび割れを許容することに対する理解度の不足等があると考えられる。さらに、RC 床版の劣化が顕在化した1980年以降は、将来のRC床版の取替えを考慮して非合成桁設計するケースが増えており、施工実績は減少している。

その後、1990年代より、ドイツやフランスでは複合・合成構造が構造物の合理化、標準化の観点で有力な構造形式であることが示され、わが国でも連続合成桁の合理性が調査レポートに示されている¹³⁾¹⁴⁾。1990年代後半から、場所打ちPC床版を用いた2主桁橋等の合理化橋梁の建設が行われるようになり、耐久性の高い厚板の横締めPC床版が採用されたことにより、床版の取替えを前提としない、(2)のプレストレスしない連続合成桁の建設が見受けられるようになってきた¹⁵⁾。横締めPCで場所打ち床版であるため、橋軸方向の配力鉄筋を連続的に配置することができるので、ひび割れ制御を考慮した設計が可能となる¹⁶⁾。

2.3 切断合成桁の施工

上記以外に、連続合成桁に区分できない切断合成桁という構造形式がある。図-3に示す通り、RC床版施工後に中間支点部において鋼桁を切断して単純桁化し、全体を支保工で支持することなく死活荷重合成桁を建設できる工法である^{17),18)}。切断後に支点付近で受け持っていた死荷重曲げモーメントが支間部の合成断面に再配分されるためである。床版はそのまま連続化させているので、その部分の床版がひび割れて損傷を受けること等から、数10年経過して鋼桁を連続化しているものもある。床版打替えに際して鋼桁の補強設計や床版撤去時に横倒れ座屈防止用の仮設構構が必要となる等、設計計算や対処法が非常に複雑である。

3. 床版取替えにおける検討項目と課題

3.1 検討手順

床版取替え工事実施の判断基準や、床版の余寿命診断と延命化工事の考え方についても課題として挙げられているが、ここでは床版取替えを前提とした検討手順について述べる。連続合成桁の床版を取替えて更新する工事は、通常の非合成桁に比べて以下の検討項目を実施したうえで、詳細設計や施工計画を行う必要がある。具体的には、連続合成桁のRC床版を取替える際の検討手順は図-4に示す通りである。同図に示す通り、詳細設計

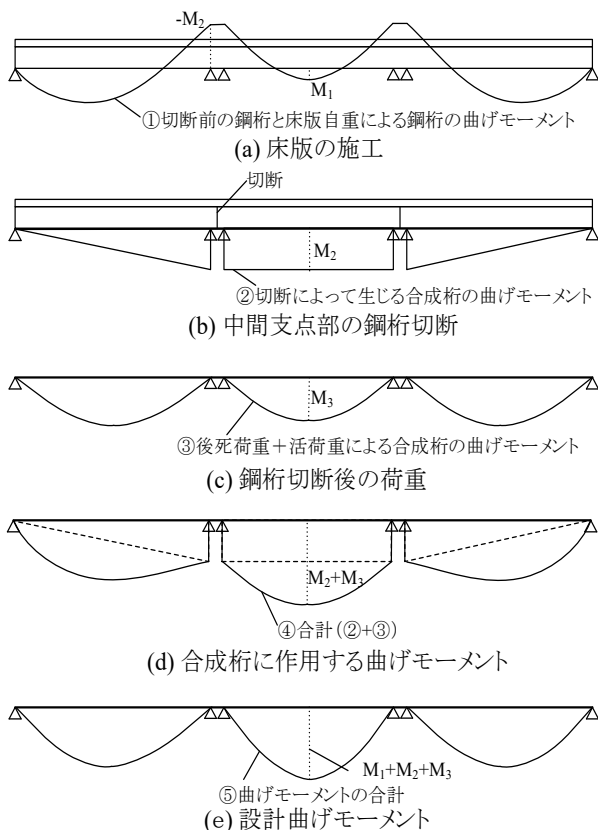


図-3 切断合成桁の曲げモーメント

までの事前検討が多く、それぞれの検討には多くの課題が含まれており、エンジニアリングを含めた工事費が高くなることとなる。(1)~(6)の検討項目を実施して、解決しない場合は課題となった項目にフィードバックして、場合によっては施工制約条件の見直し等を行い、施工計画まで終える必要がある。

以下では、交通規制、施工ヤード等の条件、交通開放のタイミング等の施工制約条件調査を示す。また、既設RC床版の解体方法、分割と解体順序、解体時の鋼桁安定性確保等の床版解体方法検討内容を紹介する。さらに、取替える新設床版の種類、設計、重量、分割方法等の新設床版基本設計段階での検討内容を述べる。

3.2 施工制約条件調査

既設合成桁の床版取替え工事では、時間的・空間的な制約が多い。施工時の制約条件を表-3に示す。これらの施工空間、施工時間、障害物、および施工環境保全等の制約を事前に調査する必要がある。

既存交通への影響をミニマムにするため、車線規制で夜間施工等の制約を受ける場合が多い。車線規制を行いながら、部分的に床版を撤去する等の厳しい条件がある場合は、施工難易度が高い。特に夜間等の規制時間が限られている場合はさらに施工が困難となる。

車線規制で片側交通開放しながらの施工になると、床

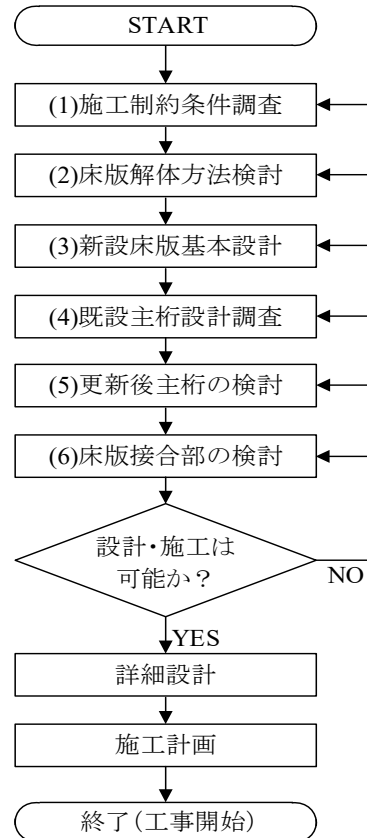


図-4 床版取替え検討手順

版の幅員方向に縦継手を設けなければならないこと等、新設床版の選定条件を左右することとなる。また、車線規制しながら縦継手のある新設床版を部分的に取替える工法は複雑となり、その継手構造、継手位置の検討、床版の欠損を受ける合成桁の照査や対策が必要となる。

さらに、連続合成桁における床版解体や新設床版の設置においては、床版の分割位置と順序が重要となる。連続合成桁の場合は支間部から床版打設しているケースが多く、床版に作用している応力やプレストレスについて、既設橋の設計・施工の状況を調査したうえで完成後どのようにするのかの検討が必要となり、片側からの順次施工できない等の検討結果になる場合が多い。

3.3 床版解体方法検討

床版解体方法は、表-4 に示す検討項目を満足させる必要がある。既設合成桁は密にスタッドが配置されているため、床版解体には通常のプレーカによるはつり作業では時間がかかり、騒音も大きくなる。また、合成桁は頭付きスタッド等のずれ止めが多いので、床版を解体する際にこの接合部分を分離することに対策が必要となる。さらに、新設橋梁と異なり、既設橋の床版更新では、振動、騒音、粉塵、および有害物質の発生等周辺環境へ

表-3 床版取替え工事の制約

項目	内容
施工空間の制約	車線規制や桁下空間交差条件による施工ヤードの制約
施工時間の制約	夜間施工（昼間交通解放）等の時間的な制約
障害物による制約	送電線、電気、ガス、および水道管等の添加物
施工環境保全の制約	振動、騒音、粉塵、および有害物質等の発生

の影響ミニマムが求められるので、これらについて配慮した工法が求められている。近年、これらの課題を解決するため、ワイヤーソーによる RC 床版撤去工法が開発されている¹⁹⁾。

既設合成桁の床版施工時に仮横構等を設置して、鋼桁の横倒れ座屈を防止していた橋梁も多く、同様に床版解体時にこのような仮設備が必要となる。床版の解体や新設床版の設置においては、鋼桁の上に床版取替え用仮設クレーンを設置する場合と、桁下のヤードにクレーンを設置する場合、あるいは専用の解体、運搬、設置機材にて施工することも考えられる。この条件次第で鋼桁に与える影響が異なるので、それぞれの方法に応じた載荷状態で、鋼桁に与える影響を検討して、その安定性を照査する必要がある。

3.4 新設床版基本設計

既設床版を撤去後に新設床版を設置することとなる。その床版構造形式は種々考えられが、表-5 に示す通り、

表-4 床版解体における検討項目

項目	内容
床版解体分割の検討	床版を解体するときの分割方法、解体手順を検討する。
床版切断方法の検討	床版の切断、はつり等の工法を比較検討する。
ずれ止め分離方法の検討	床版と鋼桁を合成している頭付きスタッド等のずれ止めの分離方法を検討する。
環境保全対策の検討	騒音、振動、粉塵、および有害物質の発生等周辺環境への対策を検討する。
撤去工法と設備の検討	クレーンや運搬設備等機材を検討し、その設置位置の構造を検討する。
鋼桁安定性の検討	鋼桁の安定性の検討を行い、鋼桁の補強や仮設上横構等の計画を行う。

表-5 既設合成桁における取替え新設床版の設計・施工上の特徴

床版構造形式	長所	短所
RC 床版	既設合成桁と同様に設計検討ができる。	活荷重の作用が大きくなっているため、既設橋より床版が厚くなり、鋼桁補強や鋼桁安定性の確保が課題。
プレキャスト PC 床版	既設床版と同程度の厚さで設計可能、工期が短縮できる。	床版相互間、鋼桁と床版間の接合方法検討が必要、幅員方向分割施工は困難、中間支点部の鉄筋の連続化不能。
ハーフプレキャスト PC 床版	既設床版と同程度の厚さで設計可能、中間支点部の鉄筋の連続化が可能。	工期が長くなる。プレストレス導入まで床版に工事用車両の載荷ができない等施工性が悪い。
合成床版	合成床版設置により架設時の鋼桁安定性が確保できる。床版施工前に重機を設置できるものもある。ずれ止め配置が容易。	鉄筋配置して床版打設を行うため、工期が長くなる。既設橋床版より、鋼材が多く重くなる。
取替え鋼床版	軽量化が可能であり、鋼桁補強にも繋がる。鋼桁の補強を最小限に留めることが可能。	取替え鋼床版の疲労耐久性の検討。冬場の凍結対策等の検討が必要。

注 1) グレーチング床版の特徴は、合成床版とほとんど同じである。

2) 上記床版において、超高強度繊維入りコンクリート (UFC) を用いた場合は、性能向上が期待できる。

それぞれには長所・短所等の特徴があり、そのため状況に応じた検討課題がある。

取替え新設床版は工期短縮を前提とするので、場所打ち RC 床版は考え難い。したがって、プレキャスト PC 床版（以下、PCa 床版と呼ぶ）、合成床版、鋼床版等が候補として挙げられる。1960 年～1970 年代に建設された連続合成桁は、一般的に TL-20 等の活荷重で設計されているため、現在主要橋梁に用いられている B 活荷重より小さな作用しか見込んでいない。したがって、B 活荷重で設計する場合、既設 RC 床版よりも、取替え床版は重くなる。そのため、活荷重のみならず、前死荷重が大きくなるので、鋼桁を補強する必要が生じる。

PC 床版や合成床版の軽量化には、高強度コンクリートの採用、軽量骨材の適用等が有効になる。また PCa 床版の場合、横締めをプレテンとして縦締めを現場施工することにより、軽量化と床版相互間の継ぎ手の問題が解消される。連続合成桁において、中間支点部をプレストレスする場合に、近年、外ケーブルによる方法も検討されている。

4. 床版取替え後の主桁設計・施工上の検討項目と課題

図-4 の検討項目(4)以降の検討項目と課題について、以下に述べる。まず、既設連続合成桁の設計方法を調査して、その主桁応力状態を把握する。また、更新後も連続合成桁として設計するのか、あるいは非合成桁として設計するのか、鋼桁の補強方法も含めて更新後主桁の検討を行う必要がある。さらに、更新後の主桁設計方法にもよるが、鋼桁と床版のずれ止めの形式と配置等の床版接合部の検討項目と課題について説明する。

4.1 既設主桁設計調査

既設合成桁の床版取替えにおいては、対象橋梁の設計方法や施工方法について、表-6 に示す項目を確認する必要がある。各種合成桁の設計法を踏まえ、対象橋梁の構造、断面形状、必要に応じて合成前後の曲げやせん断に対する耐荷力を調査する。これらの調査内容は建設当時のしゅん功図書のみならず、補修・補強工事の記録を

調査し、現地の状況を確認して判断する必要がある。現状を示す正確な図面が存在しない場合もある。

既設の連続合成桁橋では、クリープや乾燥収縮の影響でプレストレスが抜けている等の状況変化も検討する必要がある。床版支間が大きい等の理由から縦桁増設等の補修・補強を行っている場合や、B 活荷重対応で鋼桁を補強している場合があるので注意が必要である。

4.2 更新後主桁の検討

これまで合成桁で設計されていたものを非合成桁化するのか、従来通り合成桁として設計するのかを検討する（表-7 参照）。また連続合成桁で設計・施工されていた橋梁を、同じく連続合成桁として設計する場合、どのような設計法を選択するかが重要となる。現在、連続合成 2 主桁橋等で採用されている設計は、プレストレスしない連続合成桁であり、中間支点部床版のずれ止めを密に配置して、鉄筋を連続させて密に配置することにより、ひび割れ制御を行うものである。一方、PCa 床版は軸方向鉄筋を連続配置することは困難である。したがって、

表-6 既設連続合成桁の主桁設計・施工法の調査

項目	内容
建設時の設計方法	連続合成桁の主桁設計方法は、表-2 に示した種類があり、調査する必要がある。
建設時の施工方法	表-2 に示した分類の連続合成桁の施工法を調査する。また、使用鋼材の材質を調査する。
建設時の仮設材	床版施工時に用いていたベントや仮設の上横構等を調査する。
建設後の応力変化	RC 床版のクリープや乾燥収縮により、鋼桁に作用する応力の経時変化状況を調査する。
ずれ止め設計法	表-2 に示した連続合成桁の考え方に応じて、ずれ止め形状と配置が異なるので調査する。
鋼桁添接部の設計	鋼桁の添接計算はどのような応力状態を前提に設計されているか調査する必要がある。
縦桁増設補強方法	床版支間が大きいものも多く、縦桁を増設している場合が多いので、その内容を調査する。
鋼桁補強	荷重強度に B 活荷重が導入された時に、鋼桁を補強している場合があるので調査する。

表-7 床版取替え後の鋼桁設計

既設橋	更新後	施工方法と留意点
非合成桁	非合成桁	床版が重くならない限り、部分補強等で設計可能である。
	合成桁	B 活荷重等作用アップに対応できるように、この機会に設計見直しを図る場合、少しの桁補強で設計可能である。連続桁の場合は中間支点部の照査も重要となる。
合成桁	非合成桁	床版を軽量化しても、設計・施工は容易ではない。鋼桁の曲げ耐荷力向上のための大幅な補強が必要となる。鋼桁補強後に床版を取替えれば、施工時の座屈の問題は解消される可能性がある。
	合成桁	鋼桁の補強は必要であるが設計可能と思われる。床版取替え時に横倒れや曲げ座屈の可能性あり。施工時に支保工が必要な場合もあるので、設計・施工が煩雑となる。

注) 床版取替え施工時および完成供用時の桁耐荷力照査法や、性能照査型設計への見直しが必要となる。

PCa 床版を用いる場合は、PC 鋼線縦締めによるプレストレス導入工法、逐次ジャッキアップダウンによるプレストレス導入工法等で、プレストレスする連続合成桁とすることを検討している²⁰⁾²¹⁾。しかしながら、中間支点部床版にプレストレスを導入するよりも、ひび割れ幅制御する工法が合理的であるとの観点から¹⁶⁾、PCa 床版においてもループ鉄筋等で配力鉄筋の連続性効果が見受けられるとの観点で、ひび割れ幅制御する工法の研究も行われている²²⁾。

大規模更新における床版取替えは、これを機に活荷重も新設橋の設計で用いている B 活荷重等の作用に見直しして、更新後の主桁設計を行う必要がある。しかしながら、連続合成桁設計されていた鋼桁の耐荷力は低く、B 活荷重に対応させると後死荷重や活荷重が大きくなるため、主桁の強度不足になると考えられる。鋼桁に載荷できる床版死荷重や施工時荷重の限度が非合成桁より少なく、鋼桁を補強するかもしくはベントで一時的に支持する等の対策が必要となる。また、性能照査型設計に移行する中で、このような合成桁の照査方法をどうするのか等の課題があり、近年、合成桁の耐荷力について種々の研究がなされている²³⁾²⁶⁾。

床版取替え後の主桁設計における留意点を表-8 に示す。合成桁の場合、上フランジ断面が小さく鋼桁の中立軸も下フランジ側にある場合が多い。RC 床版の取替え工事の際に、鋼桁の上に重機を仮設することや新設床版を設置することに対して、鋼桁の曲げ座屈と横倒れの連成座屈について照査が必要である。すなわち、鋼桁が曲げ座屈や横倒れ座屈を起こして不安定になる可能性があり、建設時に付けていた仮設横構を設置する等の対策

表-8 床版取替え後の主桁設計における留意点

項目	留意点
中間支点部の主桁の設計	中間支点部床版にプレストレスを導入するか、新設床版の形式を加味して、この部分の設計法の検討が重要となる。
鋼桁の安定性確保	RC 床版解体や新設床版設置の際に、鋼桁の曲げ座屈と横倒れの連成座屈についての照査し、必要な鋼桁補強を行う。
床版取替え時の仮設機材検討	床版取替え時に場合によってはベントや仮設の上横構等を設置する必要あり、これが補強後の主桁の設計条件となる。
既設橋の補強状況に応じた主桁設計	既設橋の縦桁増設、上面増厚、外ケーブル補強、桁連結等の補強対策を調査し、床版取替え後の主桁設計条件を検討する。
鋼桁点検と疲労設計の実施	疲労き裂がないか十分な点検を行い、鋼材の溶接性能確認や補強後の鋼桁疲労設計を実施する。
添接部の照査と補強設計	鋼桁の添接部の強度が不足している場合があり、これらの補強設計を行う。

が必要となる。

架設時の主桁の照査では、必要に応じて詳細な解析手法（3次元有限変位 FEA 等）を用いる。格子解析による主桁応力が制限値を超過した場合には、特に3次元 FEA 等による詳細な照査を行い、場合によっては、CFRP シートや当て板による鋼桁の補強を実施する必要がある。

既設合成桁等では供用後比較的早期から床版の劣化が顕在化しており、縦桁増設、上面増厚、外ケーブル補強、桁連結等の補修・補強対策を行っている場合がある。また、既設連続合成桁でプレストレス導入を行っている場合は、中間支点部付近の床版を有効にしているため、床版更新後にプレストレスしない連続合成桁に変更した場合に、鋼桁の断面剛性が不足しているケースが想定されるので注意する必要がある。

また、道路橋の既設合成桁は疲労設計を実施していないケースがほとんどである。合成桁の場合、中立軸が床版直下等の上フランジ側に位置しており、下横構面外ガセットまわし溶接部の応力頻度が大きくなる等が考えられるので、近接目視点検により疲労き裂がないか十分な点検が必要となる。さらに、床版更新後の鋼桁は、疲労設計を実施して、これらの箇所によっては補強等の対策を行う必要がある。

今後の大規模更新における床版取替え工事にあたっては、これらの構造的な特徴を理解したうえで、鋼桁の補強設計や仮設材等の施工計画を行うことが重要である。また、将来の維持管理方法を考慮した構造に見直すことも考える必要がある。

4.3 床版接合部の検討

完成後も合成桁として設計する場合、PCa 床版で箱抜き部におけるグループスタッドが少なくなれば、合成度合いに課題が残る場合がある。特に、中間支点部や桁端部では、水平せん断力が大きくなるのでずれ止めが多く必要となり、支間長が長くなるほど配置が困難となる。箱抜き部でグループスタッドを合理的に配置すれば、鋼桁と PCa 床版の合成度が確保できることが実験で検討されている²⁷⁾。

PCa 床版では適用が困難であるが、頭付きスタッド以外のずれ止めとして、H 鋼ジベル、柔ジベル、および孔あき鋼板ジベル等があり、鉄道橋の連続合成桁等で研究や実橋適用が行われている²⁸⁾。合成床版やハーフプレキャスト床版であれば、ずれ止め形状や配置に自由度があり、対象構造として検討可能となる。

PCa 床版では床版相互間の接合部も課題となり、配力鉄筋が連続する程度の接合部強度を確保すべきである。これらの合理化検討については、次章で述べている。一方、合成床版やハーフプレキャスト床版であれば、配力鉄筋や床版の連続性も確保できるものの、鉄筋の配筋やコンクリート打設を行う必要があるため、工期が長くなり部分的な交通開放も困難である。

5. 合成桁の合理化への試み

5.1 床版相互接合部

PCa 床版相互間に従来のループ継手を設けた場合、床版の厚さが最低でも 24cm 程度必要となり、床版自重の低減が困難となる。そこで、近年、PCa 床版相互間の継手の合理化構造の研究や実橋適用がなされてきている。このような継手形式の代表例は、ナット付き鉄筋継手²⁹⁾、コッター式継手³⁰⁾、定着体付き鉄筋継手³¹⁾、高い引張性能を有する超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC と呼ぶ）を用いた鉄筋重ね継手³²⁾等がある。しかしながら、今後の課題は、このような継手の要求性能の明確化であろう。継手の荷重耐久性（輪荷重載荷試験）の評価方法、すなわち、性能評価試験における荷重、回数、負曲げの試験や水張り試験の方法等をどのように設定するかルールが明確になっていないのが実情である。

5.2 軽量骨材の採用

合成桁に軽量骨材を適用する試みは、1960 年代半ばから行われている³³⁾³⁴⁾。近年、取替える新設床版軽量化の要請に応えるため、人口軽量骨材を用いた軽量コンクリートの研究が行われている。鉄道橋の連続合成桁において、中間支点部床版に鋼繊維入り軽量コンクリートを適用した事例がある³⁵⁾。その他の研究事例としては、速硬性混和材と収縮低減材を組み合わせて配合した軽量コンクリートの研究³⁶⁾、石炭灰（フライアッシュ）系人工軽量骨材（吸水率が普通骨材と同程度で低く、凍結融解

抵抗性とポンプ圧送性が改善された高性能軽量コンクリート）の研究³⁷⁾が行われている。

5.3 取替え新設床版の耐久性向上

取替え新設床版の耐久性向上対策を表-9 にまとめて示す。鋼桁と PCa 床版の隙間に充填するモルタルは流動性が高く高強度無収縮グラウト材を適用している。PCa 床版相互間の間詰部やずれ止め設置用箱抜き部（頭付きスタッド用孔）のコンクリートには高強度で収縮低減タイプのコンクリートを適用する。また床版相互間の間詰部は水の侵入対策に防錆処理鉄筋を使用し、防水工は高機能床版防水を施す等、高耐久な PCa 床版を施工すべきである。これらの施工時間を含めた要求性能を明確にして、適用する必要がある。

近年、塩害対策地域や凍結防止剤を散布する高速道路の PCa 床版において、高炉スラグ微粉末を混入して高耐久性や表面の緻密化を図った事例があるが、床版の塩害に対する耐久性照査方法をどのようにするのか、混和材（高炉スラグ微粉末・フライアッシュ）の効果は、設計上どう考慮するか等が課題である。

また、高性能床版防水は遮塩性を性能として求めるが、本当に床版表面への塩分の供給がないのか等、状況に応じて検討を実施する必要がある。PC 鋼材の代わりにアラミド繊維補強プラスチック (AFRP) 緊張材を適用した事例もある³⁸⁾。また、UFC は高強度と高耐久性のある材料であり、羽田空港 D 滑走路では UFC プレキャスト PC 床版を適用している³⁸⁾。

表-9 取替え新設床版の耐久性向上対策

項目	内容と課題
高強度無収縮グラウト材の適用	鋼桁と PCa 床版の隙間に充填するモルタルの硬化時間と要求性能の明確化。
高強度収縮低減コンクリートの適用	PCa 床版相互間の間詰部やずれ止め設置用箱抜き部に施工するコンクリートの硬化時間と要求性能の明確化。
防錆処理鉄筋の適用	床版相互間間詰部の水の侵入対策に防錆処理鉄筋が有効であるが、その仕様や要求性能の明確化。
高機能床版防水工の適用	高機能床版防水工の施工条件と要求性能の明確化。
高炉スラグ微粉末混入による塩害対策	塩害対策地域や凍結防止剤を散布する道路橋に有効であるが、その耐久性照査方法が確立されていない。
AFRP 緊張材の適用	中間支点部床版のプレストレス導入における腐食しない AFRP 緊張材の施工条件と要求性能の明確化。
超高強度繊維補強コンクリート UFC の適用	プレキャスト床版に UFC を用いる場合、継手が弱点となる。その継手構造と要求性能の明確化。

5.4 合成桁の新しい設計法

合成桁の正曲げモーメントを受ける支間中央部では、圧縮側にコンクリート床版があるため、図-5 に示す通り鋼桁は降伏を超えて全塑性状態が終局強度とほぼ同じとなるコンパクトな断面であると考えられる³⁴⁾。一方で、中間支点部付近は床版が接合されていない下フランジ側が圧縮となるので、初期降伏程度で曲げ耐荷力に至るノンコンパクトな断面として有していることが多いと考えられる²⁴⁾。

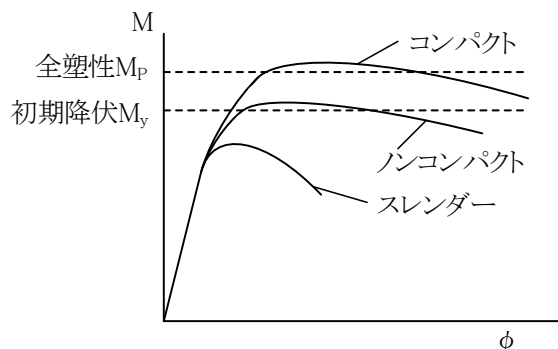


図-5 合成桁の断面区分

これまで、道路橋で用いられてきた鋼桁は後座屈強度に期待して安全率 1.7 を確保しており、フランジや腹板の幅厚比、ならびに垂直補剛材や水平補剛材の配置と剛度を決めている。このようなみなし規定を採用していたため、既設鋼桁の終局限界強度が不明確である。特に連続合成桁の正曲げモーメントを受ける支間中央部において、床版を取替える際の鋼桁は曲げ座屈が生じやすく、横倒れ座屈との連成の影響を受けることも考えられ、床版がない状態ではスレンダーな断面である場合が多い。近年、これらの鋼桁の限界強度の算出方法も弾塑性有限変位解析の発達とともに定式化され、まとめられてきている³⁹⁾⁴¹⁾。

本文で対象としている既設連続合成桁においては、新設床版に取替後の主桁の設計法にもよるが、B 活荷重を対象として終局限界状態に対する安全性を照査する手法を考えることとなる。この場合の鋼桁の補強は、従来の当て板による工法か、もしくは炭素繊維シートによる補強工法が考えられる⁴²⁾⁴⁴⁾。後者の工法は、近年、研究されているものであり、炭素繊維シートの貼付け量で、終局強度をコントロールできるような補強方法であり、各断面位置で細かく対応できる点に合理性がある。また、断面の腹板に貼り付けることで、後座屈強度に期待しない領域まで曲げ強度やせん断強度を向上させることができる。さらに、現場では鋼桁に削孔を行うことや、溶接により熱を加えることが無いので、老朽化した既設鋼桁の延命化には適切な工法であると考えられる。

5. まとめ

本文は、既往の合成桁設計法と施工法について、合成桁の長所と短所、および連続合成桁の種類と変遷という観点で、改めてまとめて紹介した。また、切断合成桁の施工法や考え方についても記載している。次に、近年道路橋の大規模更新時代を迎え、連続合成桁の床版取替えにおける検討項目とその手順について示し、施工制約条件調査、床版解体方法検討、および新設床版基本設計等の課題を記載した。さらに、床版取替え後の主桁設計・施工をどのようにするかについて、既設主桁設計調査、更新後主桁の検討、および床版接合部の検討等について課題を整理した。

最後に、近年取り組まれている合成桁の設計・施工における合理化への試みとして、床版相互接合部の改良、軽量骨材の採用、取替え新設床版の耐久性向上対策、および合成桁の性能照査型設計法について記載している。

本文は、連続合成桁を対象に大規模更新工事（床版取替え）における設計・施工上の課題や、最近の取組みを幅広くまとめたものであり、重要な課題の詳細や検討内容等の情報が不足していると考えられる。これらについては、今後の課題として他の機会に調査レポートをまとめていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 橋善雄：連続合成桁，理工図書株式会社，1966.1
- 2) 五十畑弘，綿引透，榛澤芳雄：道路橋鋼合成桁の歴史的調査，土木史研究，第 17 号，pp.245-256，1997.6
- 3) 中井博，北田俊行：鋼橋設計の基礎，共立出版，1992.5
- 4) 長井正嗣：合成桁と設計法，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.74，No.5，pp.11-12，2018.5
- 5) 橋善雄，近藤和夫：連続合成桁の実例とその模型試験について，土木学会誌，第 43 卷 12 号，pp.37-42，1958.12
- 6) 橋善雄，近藤和夫，伊藤敏一：鋼索を用いたプレストレスト合成桁の実験的研究，橋梁・構造工学研究発表会，Vol.8，pp.41-52，1961
- 7) 橋善雄：連続合成桁橋の収縮とクリープについて，土木学会誌，45 卷 1 号，pp.5-12，1960.1
- 8) 橋善雄，近藤和夫：連続桁橋中間支点上の合成構造についての研究，橋梁・構造工学研究発表会，Vol.9，pp.85-94，1962
- 9) 橋善雄，足立義雄：不完全合成桁について，土木学会論文集，112 号，pp.11-19，1964.12
- 10) 橋善雄，田井戸米好，岩永安正，久保田隆三郎：部分合成桁の実験的研究，土木学会年次学術講演会講演会，Vol.20，pp.84-1-84-2，1965
- 11) 橋善雄，向山寿孝，湊勝比古：プレストレスしない連続合成桁の静的実験，土木学会誌，53 卷 10 号，pp.55-61，1968.10
- 12) 川田忠樹監修：複合構造橋梁，技報堂出版，1994.9
- 13) 鋼橋技術研究会：合理化・省力化研究部会報告書，1996.3
- 14) 関西道路研究会 道路橋調査研究委員会 合成桁小委員会：連続合成桁橋の復活に向けて，1998.3
- 15) 大垣賀津雄，八部順一，中菌明広，中村元，長井正嗣：PC 床版連続合成 2 主桁橋の合理的設計・施工法，土木学会論文集，No.679，VI-51，pp.65-80，2001.6
- 16) K. Roik, G Hanswille, 伊藤敏一，平城弘一：合成桁におけるひび割れ幅の制限，橋梁と基礎，pp.33-40，1993.2
- 17) 笹戸松二，加藤信夫，長谷川：切断合成ゲタ 姥久保高架橋(下)，橋梁と基礎，pp.10-20，1967.6
- 18) 藤田真実，宮本雅章，福田暁，引地健彦，小寺一志：切断合成桁橋の損傷と補強対策—中央自動車道相模湖高架橋—，橋梁と基礎，pp.15-20，2003.11
- 19) 西垣登，橋本達也，宮崎勇治，倉持守，村井向一：合成桁におけるコンクリート床版解体新工法の開発，宮地技報，No.31，pp.10-13，2018.5
- 20) 中井博編：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工，森北出版，1988.5
- 21) 中井博編：鋼・合成橋梁の進歩を支える諸技術，山海堂，1999.5
- 22) 大城壮司，上條崇，奥井義昭，長井正嗣：プレキャスト床版連続合成桁の曲げひび割れ幅に関する実験，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1027-1040，2010.3
- 23) 野阪克義，植村文孝，伊藤満：モーメント再分配を考慮した連続合成桁の非弾性設計に関する一考察，構造工学論文

- 集, Vol.53A, pp.218-226, 2007.3
- 24) 長井正嗣, 稲葉尚文, 奥井義昭, 宮下剛, 平山繁幸, 細見直史: 合成 I 桁の正, 負曲げ及び相関強度評価に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.115-123, 2009.3
- 25) 奥井義昭, Bandula Heva, T.M., 小室雅人, 山口栄輝, 長井正嗣: 連続合成桁の負曲げ領域における横倒れ座屈設計法, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.58-67, 2008.9
- 26) 小林駿祐, 山口隆司, 光川直宏, 松本崇志, 小倉司: 既設合成桁の合理的な床版取替えにおける効果的な主桁補強方法に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.71, I-542, 2016.9
- 27) 久保宣人, 栗田章光: グループスタッドの連続合成桁への適用, 土木学会論文集, No.780, I-70, pp.133-143, 2005.6
- 28) 保坂鐵矢, 平城弘一, 松室哲彦, 小枝芳樹, 橘吉宏, 渡辺滉: 鉄道用連続合成桁橋に適用されるずれ止めのせん断特性に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.53, I-542, 1998.9
- 29) 山岸俊一, 北川学, 真田修, 倉田朋和, 黒木武: 東名高速道路 用宗高架橋(下り線)の床版取替え工事 ~施工について~, 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.72, VI-642, 2017.9
- 30) 渡邊輝康, 浅見恭輔: コッター式継手を有する橋梁用床版(コッター床版)の性能確認試験(その 1), 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.72, V-301, 2017.9
- 31) 北慎一郎, 中山逸人, 櫻井信彰, 前川宏一, 丸野幹人, 佐竹紳也, 大井川幸彦, 谷口晋二郎: 半連続プレキャスト床版における梁モデルを用いた継手構造の耐力評価検討, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.49-56, 2017.4
- 32) 佐々木一成, 大場誠道, 岩城孝之, 富永高行, 野村敏雄: UFC を用いた重ね継手構造を有する床版の曲げ性能に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.72, I-158, 2017.9
- 33) 橘善雄, 千葉静男, 田井戸米好, 長崎光男: 軽量コンクリートを用いた合成桁の実験, 土木学会誌, 51 巻 11 号, pp.43-50, 1966.11
- 34) 千葉静雄, 橘善雄, 中井博, 矢幡健: 軽量コンクリート合成げた橋の現場実験, 土木学会誌, 52 巻 9 号, pp.34-42, 1967.9
- 35) 杉本一朗, 山田高裕, 保坂鐵矢, 中野幹一郎, 藤木英一: 連続合成桁の中間支座位床版に用いる鋼繊維軽量コンクリートのフレッシュ性状-阿佐線-物部川橋梁-, 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.54, 第 1 部 A, pp.696-697, 1999.9
- 36) 浜中昭徳, 長塩靖祐, 中島裕: 速硬性混和材および軽量骨材を用いたコンクリートの(br)基礎性状, 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.65, 第 5 部, pp.1419-1420, 2010.9
- 37) 桜田道博, 渡辺浩良, 大浦隆, 鈴木基行: 石炭灰系高性能軽量骨材を使用した PC 床版の輪荷重走行試験, 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.57, 第 5 部, pp.839-840, 2002.9
- 38) 松井繁之編著: 道路橋床版の長寿命化技術, 森北出版, 2016.9
- 39) 西村宣男, 玉田和也, 小野潔: 招待論文 鋼桁橋を対象とした強度設計の性能規定化, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.87-96, 2007.3
- 40) 日本鋼構造協会, 鋼橋の合理化構造・設計法研究委員会, 合理化構造・設計法研究部会: 鋼橋の強度設計の合理化, JSSC テクニカルレポート, No.98, 2013.3
- 41) 日本鋼構造協会, 鋼橋の合理化構造・耐久性向上研究委員会, 合理化・構造設計法部会: 鋼橋の性能評価と強度設計の合理化, JSSC テクニカルレポート No.105, 2015.11
- 42) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.541-553, 2014.3
- 43) 服部雅史, 広瀬剛, 大垣賀津雄, 宮下剛, 奥山雄介, 小林朗, 秀熊佑哉: 炭素繊維シートで補強した 2 軸対称プレートガーダーの曲げ耐荷力実験, 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.72, I-242, 2017.9
- 44) 原田拓也, 広瀬剛, 大垣賀津雄, 菊地新平, 宮下剛, 奥山雄介, 小林朗, 秀熊佑哉: 炭素繊維シートで補強した 1 軸対称プレートガーダーの曲げ耐荷力実験, 土木学会年次学術講演会講演会, Vol.73, I-547, 2018.8

(2018 年 7 月 20 日受付)