

特集：道路橋に係わる技術開発及び評価の現状

道路橋部材の新技术評価

七澤利明* 玉越隆史** 小澤敦夫***

1. はじめに

近年、我が国では厳しい財政状況のもとライフサイクルコストの縮減が期待できる良質な社会資本を効率的・経済的に整備するための総合的な取り組みが進められている。例えば、工費、工期の縮減など様々なニーズに対応した新しい技術の導入を促進するため、技術提案型の契約方式の導入、新技术情報提供システムの整備といった制度・体制の充実が図られている。こうした新技术導入の際には、適用する技術が基準の求める性能を満足することを個別に検証する必要があるものの、新技术に対する検証方法は一般に確立されていない。このような基準適合性に関する適正評価の困難さが、新技术導入にあたっての実務上の課題となっている場合が多くあると考えられる。

本稿では新技术評価の例として、現行設計基準では容易に性能評価が行えない新しい床版構造について、当該橋の条件に即して個別に性能検証を行った事例を紹介する。

2. 対象橋梁と検証項目

対象は国道17号の亀泉高架橋における鋼コンクリート合成床版等の評価事例である。亀泉高架橋工事は、コスト縮減や事業実施期間の短縮、限られた用地内での迅速かつ安全な施工のため、新技术・新工法の積極的な活用を図ることを目的として、設計施工一括発注方式が適用された。採用された提案における諸元を以下に示す(図-1,2)。

- ・橋長 [支間長] ; 367.1m [26.9~49.5m]
- ・幅員 [車線数] ; 9.4m [2車線] (標準断面)
- ・上部工 ; 非合成連続少数鋼鈹桁 [3+5+2径間]
- ・床版 ; 鋼コンクリート合成床版 (図-3)
[支間長4.0~6.0m]
- ・下部工 ; RC橋台 [3基]、RC橋脚 [10基]
- ・基礎 ; 場所打ち杭 [φ 1200mm]

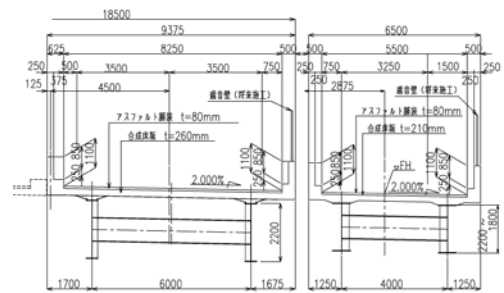


図-2 標準断面図

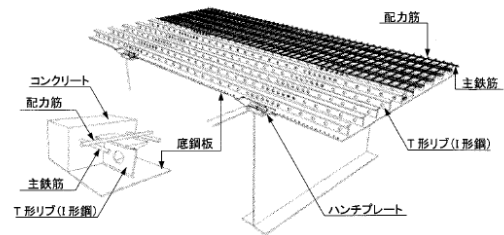


図-3 合成床版構造概念図

提案のうち、道路橋示方書に規定のない鋼コンクリート合成床版の設計基準、耐久性、維持管理、施工品質管理等については、特に性能評価に困難が予想された。このため技術検討委員会を設置して検討を行い、実施にあたっての付帯事項を課した上で提案を採用した。鋼コンクリート合成床版に係る付帯事項を表-1に示す。

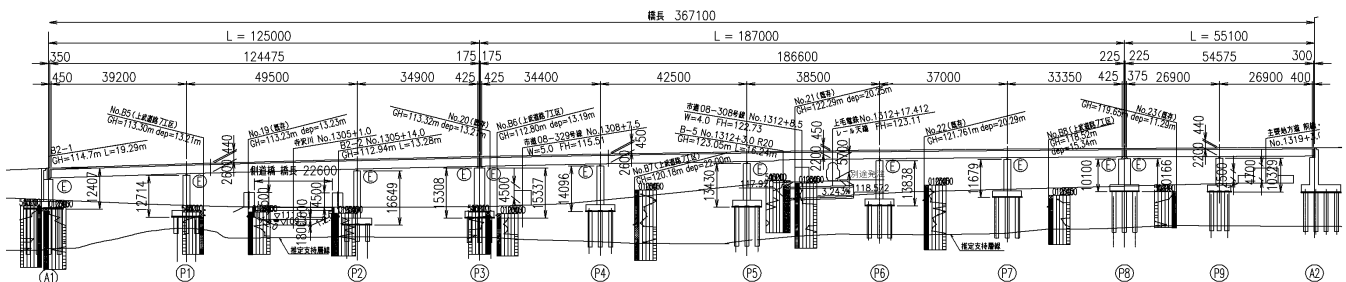


図-1 側面図

3. 検討・評価の概要

ここでは付帯事項に対する検討の概要について、鋼コンクリート合成床版に係る内容を中心に示す。

(1) 合成床版の設計基準（と検証方針）について

まず、提案した構造と道路橋示方書における関連規定との関係を整理し、検証が必要な事項の抽出を行った。

(1)合成床版の設計基準(と検証方針)について
・提示案の使用にあたっては、道路橋示方書による要求性能との関係を明確にし、それらを満足すること
(2)上部構造の耐久性について
・公募図書に示した工期内で実橋の諸条件を考慮し、特に、滞水状態における耐力について、実橋との相関が明確でかつ実橋に対する評価が定量的に行える手法(実験等による照査)によって検証すること
・鋼部材の設計応力と実応力の関係を明確にしたうえで、継手部の疲労耐久性などを照査するなど、「道路橋示方書Ⅱ鋼橋編」に従って疲労設計を行うこと。特に、実験を行う場合には、主桁および床組としての機能(作用力・合成)を考慮して評価し、版として照査すること
・底鋼板と主桁の接合部および底鋼板と底鋼板の接合部は、道路橋示方書に基づき主桁と同様な品質管理を行うとともに、実橋との相関関係が明確でかつ実橋に対する評価が定量的に行える手法(実験等による照査)により耐久性[疲労・腐食]および耐力を検証すること
(3)上部構造の耐震性について
・地震時の上部構造に対する要求性能を明確にし、それを満足することを定量的に照査すること。ただし、損傷を許容する場合には、地震後の性能と復旧方法を明確に提示すること
(4)維持管理について
・維持管理における床版の損傷等異常の検出方法および健全度の判定方法を明確に提示すること
・床版の補修に対して、床版の打ち換えを含め、その工法と補修時の交通機能の確保について、実橋の状況から実現可能な対策法を提示すること
(5)床版の品質管理について
・床版の施工品質に対する要求水準(例えば、コンクリートのひびわれ、充填性、鋼材の溶接品質など)を設計との関係から明確にし、それらを満足する施工が可能な方法および品質管理が満足されることを検証できる品質管理方法を提示すること
(6)上部工の出来高管理について
・施工中および完成系の部材および全体の精度管理基準値や応力状態の管理値とその考え方(品質が満足されることの検証)を示すこと

表-1 実施に際しての付帯条件

鋼コンクリート合成床版については、現在までに様々な構造形式のものが提案され、供試体を用いた輪荷重走行試験なども行われている。しかし、床版構造の損傷メカニズムや実橋と供試体の相対関係については明確でないものが多い。そのためこの検証では、設計や構造から予め起こりうる劣化・損傷のシナリオを抽出し、それらのシナリオのいずれを経ても確実に耐力性能が満足できると考えられる限界の状態を特定し、その状態になるまでの時間が設計供用期間を超えるであろうことを証明した。

同様に、道路橋示方書が求める性能について、条文とその根拠あるいはすでに確立している一般的なRC床版等では規定に従うことで具備される

性能水準を参考にして再整理した。本橋の条件における合成床版に対する要求性能と検証が必要となる根拠、それに照らした具体的な検証方針と手法を表-2に示す。表に示すように、検証のため引張応力作用下における輪荷重走行試験、FEM解析等を実施し、提案時点での構造細目の一部変更なども行うことで要求性能を全て満足することを確認した。

(2) 上部構造の耐久性について

本構造の損傷シナリオを検討した結果、床版コンクリートと鋼部材それぞれの疲労耐久性の照査により、床版構造の疲労耐久性を間接的に照査できることが考えられた。

床版コンクリートについては、床版内部に配置される補剛リブの直上等において、自動車荷重の移動により局所的に大きな応力が発生することが考えられた。このため、FEM解析により載荷位置を変えてコンクリート各部の応力状態を確認することとし、既往の研究や技術基準類との比較により耐久性は確保されるものと判断した。

コンクリート床版の疲労耐久性は床版上面の滞水により大きく損なわれることが知られている。本床版でも輪荷重走行試験の結果から滞水が生じた場合、長期の耐久性が確保されない可能性があると考えられたため、可能な限り床版への浸水を防止できるよう床版防水システムを決定した。また、供用後は直接床版コンクリートを目視できないことを考慮して、万一床版コンクリートの損傷が進展した場合にも、底鋼板パネルのみで最低限の耐力が確保でき供用安全性が確保できる構造とした。さらに、舗装の劣化や漏水の発生などにより床版コンクリートの異常が発見され、対策がとられるまでの間の安全性を考慮して、底鋼板の腐食の影響についても予め評価した。

鋼部材については疲労耐久性を確保するため、コンクリート部と同様に活荷重による応力振幅を一定レベル以下に抑えること(底鋼板の増厚)、過去に疲労損傷を受けた継手、構造を避けること(連続すみ肉溶接の変更)、疲労強度等級の前提となる継手の品質確保を図ることとした。鋼道路橋の疲労設計指針¹⁾に準じ、輪荷重走行試験との比較により妥当性を確認したFEMモデルにより応力的検証を行い、それぞれの継手について、結果的に疲労強度等級の打ち切り限界に対しても十分

な安全余裕が確保されることを確認した。

応力による疲労耐久性の照査が困難な底鋼板土の接合部はHTBによる摩擦接合、主桁との接合部は主桁上フランジ上に設置した頭付きスタッドによりコンクリートを介して接合する構造とし、道路橋示方書に従って計画、施工、品質管理を行うことで所要の耐荷力・耐久性を確保した。

(3) 上部構造の耐震性について

本橋は横桁が省略された少数主桁構造であり、横荷重に対して床版の抵抗が大きくなるため、地震時には床版が桁全体の立体的挙動と横荷重への抵抗機能を発揮することが求められる。レベル2地震時に対しても復旧性や供用性などの所要の耐震性能が確保されるための条件として、床版本体及び主桁との接合部が無損傷であることを要求性能として設定し、他の上部構造部材等とともに、動的解析を行い必要な耐震性能が確保されていることを検証した。

(4) 維持管理について

鋼コンクリート合成床版の維持管理方法について

では、底鋼板により床版コンクリートの状態が下面から直接視認できないという特徴を踏まえて、点検方法や損傷評価基準を設定する必要がある。

本橋では、本床版構造について実橋での劣化の実績がなかったため、輪荷重試験結果なども参考に生じうる損傷シナリオを全て抽出した。そして、いずれのシナリオを辿ったとしても、供用性が損なわれる段階に対して十分な時間的余裕をもって異常を検出でき、かつ補修補強等の対策が完全に供用停止することなくとり得ることを確認するとともに、そのための点検方法や健全性等の状態評価要領をとりまとめた。

具体的には、床版の変状は剛性の低下に伴ってたわみが増加し、舗装のひび割れとなって顕在化すると考えられること、浸水・滞水の影響により耐久性が低下する場合には、舗装のひび割れ等の異常や漏水を伴うと考えられることから、舗装路面の異常と床版下面からの漏水の有無を点検し、大がかりな補修を必要としない段階で損傷の進行を抑えることを床版維持管理の基本方針とした。

道路橋示方書の要求性能	亀泉高架橋の課題	対応策	検証の手法
《(A)立体的機能》 道示Ⅱ 7.1 10.6 橋の断面形の保持、剛性の確保、横荷重の支承への伝達が図れる構造とする。	主桁の削減と横桁の省略に対して橋の立体的機能が確保できること	・主桁・各点垂直補剛材、横桁で構成されるラーメン構造で剛度を照査 ・ねじれ抵抗機能の確保 ・横倒れ座屈の照査	・道路設計便覧 下路式プレートガーダーの剛度 ・中間横桁を6m以下の間隔で配置、主桁の偶力で抵抗 ・主桁間隔に対する主桁支間長の比を18以下確保
《(B)耐荷力性能》 道示Ⅱ 8.1.2(1) 直接支持する活荷重等の影響に対して安全なようにする。	鋼とコンクリートの合成構造であり、道示に準拠して設計する場合、平面保持、等方性など適用性を確認する必要があること	・平面保持、等方性、ヤング係数比の確認 ・曲げモーメントに対する照査 ・せん断力に対する照査 ・曲げ耐力力の照査 ・押抜きせん断耐力力の照査	・土研橋荷重走行試験の結果とFEM解析結果の対比 ・曲げ応力度：RC断面計算と同様 ・せん断応力度：FEM解析 ・曲げ耐力力：設計曲げモーメントに対する終局曲げモーメントの比率 ・押抜きせん断：大阪大学での実験の結果よりかぶり部分のコンクリートの押抜きせん断耐力力
《(C)供用性能》 道示Ⅱ 8.1.2(1)1 荷重に対して疲労耐久性を損なう有害な変形が生じないようにする。	活荷重による床版の変形によって支持桁の構成部材や床版と桁の接合構造に疲労損傷が生じないこと 主桁の削減と構造の省略の影響を確認する必要があること	・荷重伝達機能の確保 ・鉛直曲げ剛性の確保 ・活荷重たわみの照査	・孔あきジベル・鋼構造物設計指針 PARTB ・底鋼板継手部：道示Ⅱ 6.3 高力ボルトの継手 ・輸送時・架設時のFEM解析 ・床版と支持桁の接合部にハンチ設置 ・PC床版の曲げ剛度と対比 ・主桁を含むモデルによるFEM解析
《(D)疲労耐久性性能》 道示Ⅱ 8.1.2(1)2 自動車の繰返し通行に対して疲労耐久性が損なわれないようにする。	実績が浅く、損傷メカニズムが必ずしも明確でないため、輪荷重走行試験等による既往の床版との相対比較による検証が必要であること 連続桁であるため、中間支点上は主桁作用による負曲げの影響を考慮する必要があること	・床版としての疲労耐久性照査 ・主桁作用負曲げ部の疲労耐久性照査	・輪荷重走行試験による基準床版(RC)との比較 ・引張応力作用下における輪荷重走行試験
《(F)維持管理性能》 道示Ⅱ 1.5 点検および補修・復旧が容易である。	実験で評価できない部位、あるいは実績の規模に対して応力の検証による補足が必要であること 底鋼板継手部も一般部と同等の耐久性を確認する必要があること 実橋において疲労耐久性を確保するため、水の影響を排除する必要があること	・鋼材部応力範囲照査 ・コンクリート内部の応力状態照査 ・コンクリート部応力範囲照査 ・継手部の疲労耐久性照査 ・滞水状態における耐力力の照査 ・腐食状態における耐力力の照査	・「鋼道路橋の疲労設計指針」の手法準用 ・FEM解析 ・曲げ応力振幅を既往の床版のレベルと対比 ・輪荷重走行試験における継手部の目開き量 ・鋼板パネルのみモデルによるFEM解析 ・腐食時断面モデルによる安全率照査
《(E)疲労耐久性性能》 道示Ⅱ 5.2 鋼材、コンクリートに供用期間中に有害な錆、劣化が生じないようにする。	本橋に固有の課題は無いが、既往の床版と同様の対応策の必要があること	・床版防水システムの設置 ・防水材と舗装による床版防水機能・舗装の耐久性を向上させる排水機能 ・路面排水計画：計画降水量に対し、路肩の幅で通水し落下させる ・ひび割れ幅の抑制：引張側コンクリートのひび割れ、許容幅以下 ・鉄筋かぶりの確保、底鋼板の舗装	・床版防水システムの設置 ・滞水抑制システムの設置 ・コンクリート充填試験による施工方法の確認
《(G)荷重分配機能》 道示Ⅱ 8.1.2(2)1 床版に主桁間の荷重分配作用を考慮した設計を行う場合には、その影響を適切に評価し、それらに対して安全なようにする。	本橋の設計では床版に荷重分配機能を求めないため、本体構造(主桁、横桁)のみで荷重を分配させる必要があること	・舗装の異常、床版下面からの漏水を点検する。床版下側には、障害物が無く、高所作業車等により接近目視が可能である。 ・足場、型枠の設置が不要であるため安全・短工期に、交通規制を必要最小限に抑えて床版の補修・復旧が可能である。 ・設計手法の適用：鉛直荷重に対し、主桁と横桁で構成される骨組構造にて荷重分配する。 ・荷重分配可能な横桁構造：荷重分配に伴う曲げモーメント、せん断力を伝達出来る横桁構造とする。 ・支持桁の不等沈下による付加曲げモーメントの影響照査：必要床版の確保	・「鋼道路橋の疲労設計指針」の手法準用 ・FEM解析 ・曲げ応力振幅を既往の床版のレベルと対比 ・輪荷重走行試験における継手部の目開き量 ・鋼板パネルのみモデルによるFEM解析 ・腐食時断面モデルによる安全率照査
《(H)横荷重抵抗機能》 道示Ⅱ 8.1.2(2)2 地震の影響や風荷重等の横荷重に対して床版が抵抗する設計を行う場合には、その影響を適切に評価し、それらに対して安全なようにする。	本橋は非合成桁であるが、横桁を設けないため、横荷重に対して床版が抵抗するように設計する必要があること	・安全性の確保：床版本体の耐久性確保 ・断面形状の保持：主桁、各点垂直補剛材、横桁にてラーメン構造を形成 ・橋の剛性の確保：地震時面外曲げモーメントによる各部の応力照査の結果、許容応力度以下 ・荷重の伝達機能：地震時横荷重に対する有効範囲に頭付きスタッドを必要本数配置	・「鋼道路橋の疲労設計指針」の手法準用 ・FEM解析 ・曲げ応力振幅を既往の床版のレベルと対比 ・輪荷重走行試験における継手部の目開き量 ・鋼板パネルのみモデルによるFEM解析 ・腐食時断面モデルによる安全率照査

表-2 要求性能、課題、対応策と検証の手法

点検項目	損傷の種類	着目箇所	損傷の特徴
鋼材	腐食	底鋼板下面	集中的に錆が発生する状態
	亀裂	底鋼板	鋼材に生じる亀裂
	ゆるみ・脱落	床版パネル継手	ボルトのゆるみ、脱落
	破断	底鋼板	鋼材部が完全に破断しているか、破断しているときみせる程度に断裂している状態
	防食機能の劣化	鋼材外面	防食皮膜の劣化による変色、ひびわれ、ふくれ、はがれ等
コンクリート	ひびわれ	壁高欄側面、地覆	コンクリート部材の表面に発生
	剥離・鉄筋露出	壁高欄側面、地覆	コンクリート部材の表面に発生
	漏水・遊離石灰	継目、開口部	床版張出端部、パネル継手、排水柵付近、主桁溶接ハンチ部からの水や石灰分の滲出や漏出
	床版ひびわれ	舗装路面、パネル継手部	格子状ひびわれ、水平ひびわれまたは貫通ひびわれが発生
	うき	舗装路面	舗装の網目状ひび割れ、規則的な舗装のうき
その他	路面の凹凸	舗装路面	路面に生じる橋軸方向の凹凸や段差
	舗装の異常	舗装路面	舗装のうきやポットホール等の現出
共通	変色・劣化	壁高欄側面、地覆	コンクリートの変色
	漏水・滞水	伸縮装置、排水柵	排水機構によらない箇所からの漏出
	異常なたわみ	底鋼板	通常では発生することのないような異常なたわみが生じている状態
	変形・欠損	(不特定)	部材の局所的な変形あるいは一部を欠損
	土砂り	排水柵	土砂が埋まった状態

表-3 点検での着目箇所

判定方法	損傷の程度	床版の状態
超音波板厚測定	床鋼板の減厚<0.5mm以上1.0mm未満>	耐力確保
	床鋼板の減厚<1.0mm以上>	許容値超過(降伏以下)
たわみの計測	設計荷重によるたわみがL/2000以下	設計性能確保
	設計荷重によるたわみがL/2000~L/1000	床版の損傷懸念
	設計荷重によるたわみがL/1000以上	床版の損傷進展
たたき試験	ボルトのゆるみや脱落を生じている数が少ない(一群あたり本数の5%未満である)。	耐力・耐久性確保
	ボルトのゆるみや脱落が生じている数が多い(一群あたり本数の5%以上である)。	継手部の耐力低下
浸透深傷試験	底鋼板に塗膜われが確認できる。き裂を生じているが、線状でないか、線状であってもその長さが極めて短く、さらに数が少ない。	耐力・耐久性確保
	線状のき裂が生じている。または、直下にき裂が生じている疑いを否定できない塗膜われが生じている。	耐久性の低下

表-4 詳細調査における判定方法

橋梁定期点検要領(案)²⁾に示す標準的手法があてはまらない事項については個別に点検方法、損傷評価基準を定めた。その他、非破壊検査の適用方法も含めた点検方法、健全度の判定方法、詳細調査の方法、異常時点検の方法、補修工法および補修工事時の留意点について整理を行った。点検での着目箇所について表-3に、詳細調査における判定方法を表-4に示す。(2)に示したように、床版内のコンクリートが損傷しても鋼板パネルのみで一定の安全性を確保できるように設計することにより、地震等の異常時の直後には、底鋼板のき裂のみを点検で確認することで交通開放の判断が可能となる。

(5) 床版の品質管理について

鋼材の溶接品質、コンクリートのひび割れ対策およびコンクリートの充填性について、要求水準

と具体的な管理手法を定めるとともに、工場製作時における品質管理項目とコンクリートの現場施工時における品質管理項目を整理した。

特にコンクリートの充填性に関しては、床版完成後に所定の品質が得られていることを検証することが困難であることから、実構造に準じた試験体による充填性確認試験を実施するとともに、各段階で要領に従った適切な施工を行うプロセス管理によって、所定の品質を確保することとした。

(6) 上部工の出来高管理について

合成床版の工場製作および現場施工において、設計の前提となる出来高を測定し、所定の精度を満足することを確認することとした。工場製作における部材検査の抜き取り基準等を具体的に定めるとともに、現場施工時の管理基準等を定めた。

4. まとめ

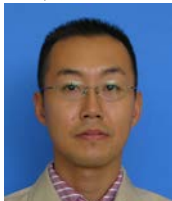
新技術評価の事例として、亀泉高架橋で検討された性能検証の主な内容を紹介した。同高架橋は、平成20年に国道17号上武道路延伸部として供用される予定である。

本事例のように、適用基準の前提となっている技術との違いがある場合には、それが例え部分的なものであっても、基準の準用や適用の可否、あるいは基準の要求への適合性を適正に評価するため、設計から施工、品質管理、維持管理手法まであらゆる段階における関連事項について網羅的かつ具体的な検証が必要となる。なお、検証の難易や必要な労力はまさに千差万別であり、一概には言えない。本報告が今後の適切な新技術評価の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針、2002
- 2) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領(案)、2004

七澤利明*



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室主任研究官
Toshiaki NANAZAWA

玉越隆史**



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室長
Takashi TAMAKOSHI

小澤敦夫***



国土交通省関東地方整備局高崎河川国道事務所前工務第一課長
Atsuo OZAWA