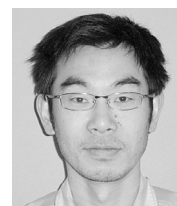


橋梁「技術トピックス編」*



藤田 敏明**

Bridge(Technical Topics)*

by FUJITA Toshiaki**

キーワード 東京ゲートブリッジ, 合理化, トラス, 鋼床版, LRFD, SBHS

1. はじめに

近年、国の財政事情は厳しく、公共事業に対してコスト縮減が求められている。これを受け、鋼橋分野では、新たな構造の採用、新技術の活用などさまざまな取り組みが行われている。鋼とコンクリートの特徴を融合させた合成構造や複合構造の採用、部材を厚板化・大型化することによって材片数や溶接延長、塗装面積を減少させた少数I桁橋、細幅箱桁橋、合理化鋼床版の採用などである。これら合理化橋梁の実績は年々増加しており、平成21年の完工重量では、国内鋼橋の受注量約29万トンのうち42%に達している¹⁾。

一方、既設橋梁においては、高度経済成長期に建設された多くの橋梁が老齢化しており、疲労、腐食などの損傷劣化に対して安全性の確保、長寿命化の対策が図られている。

社会インフラに対して、経済性、安全性、耐久性が求められるなか、新たな設計手法の導入、新しい構造と施工技術の採用、高性能鋼材の利用など、更なる開発が望まれている。本稿は、これら新技術が積極的に導入された東京ゲートブリッジ（以降、本橋）の設計・製作技術の一部について、文献などを参考に紹介する。

2. 新たに導入された技術

東京ゲートブリッジは、東京港第3航路を横断する長さ約2.9km、主橋梁部760mのトラス・ボックス複合橋で、2012年に供用が開始され、東京港の新たなシンボルとなっ

ている。本橋の基本理念には、「東京港の玄関にふさわしい個性ある橋」「経済性の高い橋」の創出などが掲げられ、これまでのトラス橋のイメージを一新した構造となっている。また、これらを具体化するための新たな設計手法や橋梁向けに開発された高性能鋼材（Steels for Bridge High-performance Structure 以降、SBHS）の採用によって、建設費および維持管理費のトータルコスト縮減が図られた革新的な橋梁となっている²⁾（図-1）。

2.1 新たな設計手法の導入（LRFD 設計法）

本橋のトラス主構の設計には、限界状態設計法の一つとされる荷重抵抗係数設計法（LRFD; Load and Resistance Factor Design 以降、LRFD）が用いられた。LRFDは、荷重側および抵抗側の不確実性のある要因に対して、個別に安全率が設定できるよう意図された設計手法である。さまざまな荷重作用に対して安全率が一律となる許容応力度設計法に比べて合理的に経済設計できる手法とされる。特に、本橋のような死荷重比率の高いトラス主構の設計では、効果が顕著に得られ、このLRFDの導入によってトラス主構の断面構成が最適化された結果、約13%のコスト縮減が可能となったと報告されている³⁾。

現行の道路橋示方書³⁾（以降、道示）では、許容応力度設計法が用いられているが、要求品質の確保と合理的な設計を可能とする設計体系の構築に向け、信頼性の考え方を取り入れたこの新たな設計手法が着目されている。諸外国、他分野において、許容応力度設計法から限界状態設計法への移行が進むなか、次期道示の改訂に向けた検討も進んでいる⁴⁾。

2.2 新しい構造の採用

(1) 鋼床版合成トラス構造

本橋では、鋼床版の床組とトラス主構を一体化した大断面フルボックス箱桁形式が採用されている⁵⁾。従来のトラス橋は床組とトラス主構が別構造で、床組は支承を介してトラス主構に設置されるが、この一体化は鋼上部工の断面全体のねじり剛性を高め、横桁、横構、対傾構などの部材

*原稿受付 平成25年1月7日

**正 員 川田工業㈱ Member, Kawada Industries, Inc.



図1 東京ゲートブリッジ

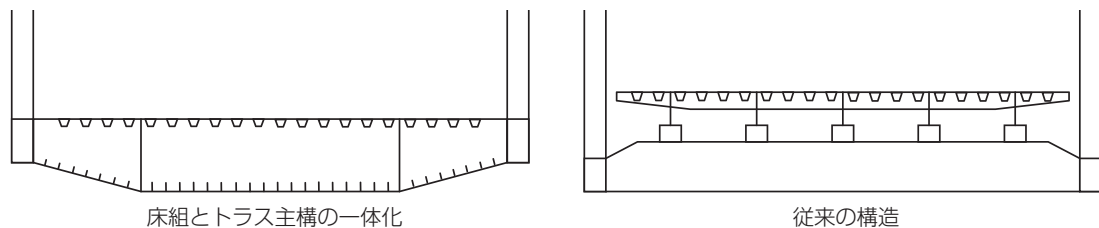


図2 鋼床版の床組み構造

省略を可能としている。図-2に床組み構造の形式比較を示す。部材数の削減と鋼重軽減、支承の省略と外面塗装面積の軽減などによる維持管理の向上も含めて、経済性に優れた構造となっている。

(2) コンパクト格点

トラス格点部には、構造の合理化と景観性の向上、製作施工性を考慮した新たな格点構造が採用されている。一般に、トラス格点部は2面添接構造が用いられ、ガセット板厚や断面構成が過大となる場合があるが、本橋では、鉛直材や斜材を4面添接構造とすることによって、部材板厚の低減と格点部のコンパクト化が図られている²⁾。図-3に形式比較を示す。この4面添接構造の適用に際しては、格点内部の部材配置やフィレット部の形状についてFEM解析による応力性状の確認が行われ、部材構成の最適化が図られている。またコンパクト化に伴う部材配置の密さ、輻輳化に対して、製作方法や施工順序などの妥当性の確認が実物大の供試体を用いて行われている。

(3) 鋼床版構造

重車両交通の多い橋梁において鋼床版に疲労損傷の事例が報告されている⁵⁾。本橋は、東京港の主要なコンテナターミナルに通ずる道路であり、重車両の混入率は、一般道よりも高いと見込まれている。このため、エフェクティブノッチストレス手法を含むFEM解析や疲労試験を通じて、疲労耐久性に優れた鋼床版構造の検討が行われた。デッキプレートとトラフリブの縦方向溶接部に生じる疲労

亀裂の抑制では、デッキプレート板厚を12mmから16mmに、トラフリブ板厚を6mmから8mmへと厚板化、トラフリブ幅は310mmから400mmに大型化することによって、従来と変わらないコストで高い疲労強度を有する新たな構造を実現している⁶⁾。

また、トラフリブと横リブ交差部のスリット回し溶接部に生じる疲労亀裂に対しては、この回し溶接部の疲労耐久性をさらに高める構造として、従来よりもスリット形状を大きく切り欠き、その一方でトラフリブの内部にリブを取り付けた新たな構造が採用されている^{7,8)}。この剛性バランスの最適化は、スリット回し溶接部に生じる応力を分散させ、疲労亀裂の発起点となる溶接止端部の応力集中の低減を可能としている。

図-4に本橋にて採用された鋼床版構造を示す。この新しい構造は、従来構造よりも僅かに製作コスト増となる面もあるが、応力低減効果が確認されており、長寿命化によってライフサイクルコストの低減が見込める構造となっている²⁾。

2.3 高性能鋼材の利用

(1) SBHS 鋼材

本橋の主橋梁部には、橋梁用に開発された高性能鋼材⁹⁾のSBHS500が約1万トン(主橋梁部の鋼重50%に相当)使用されている。この高性能鋼材は、その後、JIS G 3140「橋梁用高降伏点鋼板」として2008年11月に規格化された。現在、JIS G 3140¹⁰⁾は2011年11月に改訂が行われ、鋼橋にて汎

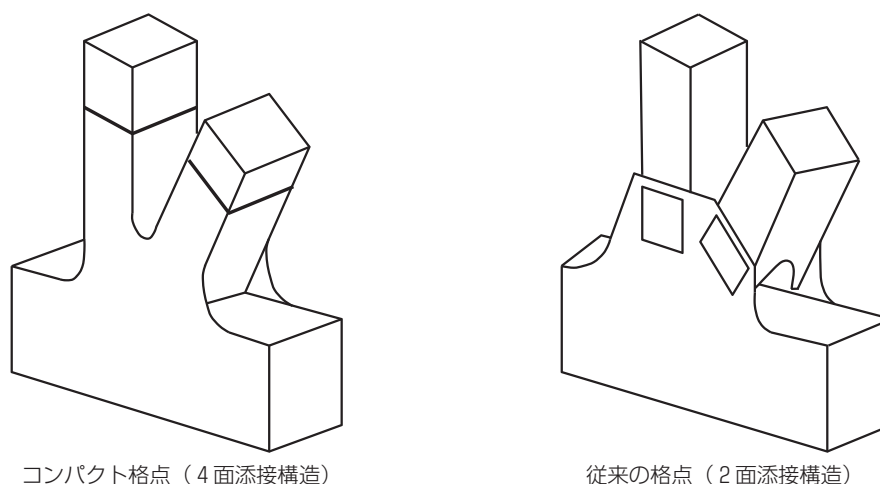


図3 トラス格点部の構造

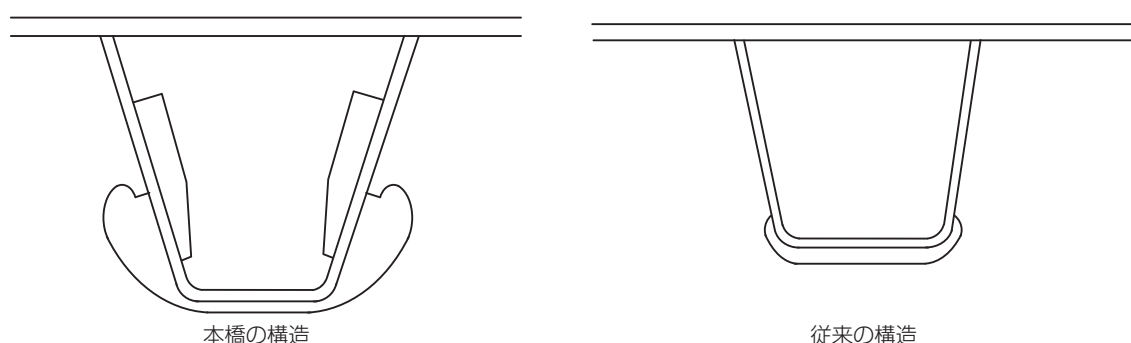


図4 鋼床版の構造

用的に用いられる50キロ鋼に相当する降伏強度 400 N/mm^2 のSBHS400, SBHS400Wが追加された。これにより、降伏強度保証は $400, 500, 700 \text{ N/mm}^2$ の3グレード、耐候性仕様を加えた計6種となっている。

橋梁で使用される鋼種は、予熱低減鋼、大入熱対策鋼、耐ラメラテア鋼、降伏点一定鋼などの特性を含めると、現在、約30種にも及んでいる。SBHSはこれら特性をフルスペックとすることで鋼種の大幅な集約を実現している。

(2) 機械的特性

鋼橋の軽量化では、高強度化（高降伏強度）が1つの方法となる。しかし、繰り返し荷重に起因する疲労強度上の制約や構造形式ごとの特性によって、高強度化には上限があるとされる。一般的なI桁橋や箱桁橋の場合、その効果が得られるのは、降伏強度 500 N/mm^2 程度までとされ、鋼上部工の死荷重が経済性に大きな影響を及ぼす吊橋、斜張橋などは 700 N/mm^2 とされる^{9, 10)}。SBHSは、これら鋼橋の構造要求に応じた高降伏強度の特性が付加されている。

鋼材のシャルピー吸収エネルギーは、高強度鋼材の脆性破壊に対する安全性、曲げ加工性への配慮から、圧延直角方向にて 100 J と高い靱性値が保証されている。

(3) 溶接性

溶接性は、継ぎ手品質の確保、製作効率の観点から重要である。SBHSは、高度な熱加工制御（TMCP）と合金元素の適正添加によって、従来鋼よりも低炭素、低合金にて高強度化と高靱化が図られ、冷間割れ指標の1つである溶接

割れ感受性組成 (P_{CM}) が低く規定されている。道示では、この P_{CM} が予熱温度の指標に採用されており、この値が 0.22 以下の場合には、ガスシールドアーク溶接、サブマージアーク溶接、極低水素系の被覆アーク溶接では、鋼材板厚に関わらず（ただし 100 mm 以下）予熱を不要とすることも可能となる。本橋では、最大板厚 50 mm のSBHS500 (P_{CM} は 0.20 以下) に予熱省略が行われた。予熱の省略は、狭隘環境での作業負担の軽減や出来形精度に関わる部材取付け調整を容易にするなど、製作性の向上に大きく貢献している。

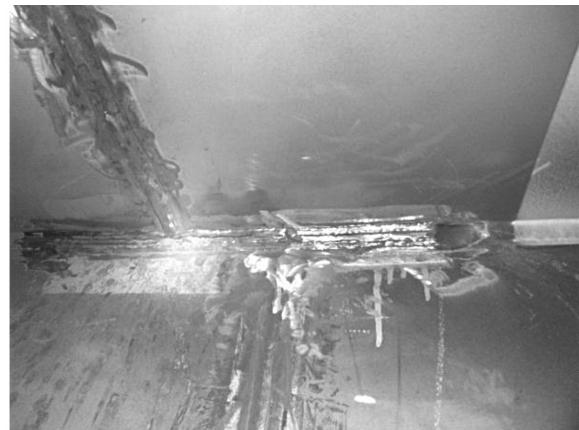
SBHSは、低炭素化による島状マルテンサイトの抑制、析出物や酸化物などの微細分散による細粒高靱化技術の導入などを通じ、大入熱溶接への対策が講じられている。道示では、継ぎ手の機械性能を確保するため、溶接入熱量に制限が設けられ、SM520やSM570、耐候性鋼は入熱量 7 kJ/mm 以下、SM490などは入熱量 10 kJ/mm 以下となっている。この入熱量を超えた施工を行う場合には、溶接施工試験による事前確認が求められることになる。SBHS500は、従来鋼のSM570に相当する鋼種でありながらSM490と同等の扱いが可能で、入熱量を 10 kJ/mm としても問題ないとされる¹²⁻¹⁴⁾。本橋の溶接施工では、トラス部材の出来形精度への配慮などから、実績のある従来施工とその精度管理が行われたが、SBHSは溶接パス数を低減した効率的な施工も選択可能と考えられることから、今後は製作性の向上が期待されている。



図5 現場溶接の状況



開先状況



溶接外観

図6 現場溶接継ぎ手の例

現行の道示では、SBHS に関して詳細な記述は認められないが、この鋼材の特性を活用した製作技術の開発とともに鋼橋製作において広く普及すると予想される。溶接性や大入熱性に優れた鋼材は、これまでも利用されていたが、鋼橋用に開発された SBHS の鋼橋製作への利用は合理的な選択と考えられる。

(4) 加工性

SBHS の化学成分は、耐ラメラテア特性に影響を及ぼす硫黄量が従来鋼の 6 分の 1 程度の 0.006% 以下と極めて低く JIS に規定されており、十分な絞り性能 (JIS G 3199 Z35 相当) を有している。歪時効硬化の要因となる窒素量も 0.006% 以下と低く抑制され、曲げ加工後にも所定の靱性が得られるよう鋼材の初期シャルピー吸収エネルギー値は高く規定されている。

合理化橋梁は、大型化、厚板化となることが多く、溶接継ぎ手は従来よりも厳しい拘束状態となる。特に、本橋のようなトラス構造では、板厚方向に力を伝える継ぎ手が多く存在し、ラメラテア特性に対して十分な検討が必要となる。SBHS が有する特性は、このような溶接継ぎ手に対して、容易に健全性を高めることができ、本橋の設計・施工

においても有益となっている。

2.4 施工技術

(1) トラス全断面の現場溶接

トラス主構の現場接合には、これまで高力ボルトが用いられてきた。本橋では、SBHS の高い溶接性や鋼材特性を担保に大規模トラス橋では初めてとなる全断面現場溶接が採用されている。現場溶接の状況を図-5 に示す。現場溶接継ぎ手は、完全溶け込み溶接のノンスカラップ構造で、主構のフランジとウェブの溶接線を 100mm ずらした Z 継ぎ手¹⁵⁾が採用されている。ノンスカラップ構造は、景観性の向上の他、スカラップによる構造的な不連続の排除、部材内面の密閉化による内面塗装の簡略化を可能としている。

一方、フランジあるいはウェブ溶接線の交差部の施工は難しく、高度な技量を必要とする。ノンスカラップ部の溶接では、溶接の始末端部が溶接継ぎ手部に留まることから、その溶接施工に際しては十分な配慮が必要となる。交差部やノンスカラップ部を健全な品質とするためにも、開先形状や溶接材料の適切な選定、溶接方法とその施工手順、プロセス管理などの検討が重要となる。本橋のスカラ

ップ部の開先形状は、溶接トーチが適切な角度で操作でき、溶接部の視認性が十分得られる形状を選定、開先両端には船底形の整形を施すなどの対策が行われた。実施工では、溶接積層中の運棒操作や溶接始末端処理の徹底などが行われている。図-6に現場溶接継ぎ手の例を示す。

(2) 鋼床版の現場溶接

本橋の鋼床版は、疲労耐久性を高めた構造として、従来よりもデッキプレートは増厚され16mmとなっている。この部位の現場溶接は一般に、サブマージアーク溶接による片面裏波施工が用いられ、板厚12mm程度を1パス溶接で行う高能率な施工が行われてきた。しかし、この増厚したデッキプレートへの1パス施工は、これまで以上に大入熱の溶接となることから、健全な裏波ビードの確保、継ぎ手性能の確保について十分な検討が必要となる。本橋の現場施工では、多パス溶接による従来施工が用いられたが、デッキプレートの増厚は疲労耐久性の観点から一般化しつつあり、高能率な施工を可能とする現場溶接技術の開発が望まれている。

3. さいごに

今回紹介した東京ゲートブリッジは、我が国の橋梁技術のレベルアップや国際競争力の向上に向けた取り組みとして、新しい技術の積極導入が行われている。

技術基準の国際的な整合性、品質の確保と合理的な設計を可能とする限界状態設計法の先駆的な導入はその一環であり、道示の次期改訂ではこの新しい設計手法の導入が検討されている。また、本橋にて積極活用された橋梁用の高性能鋼材SBHSは、橋梁で用いられる鋼材としては約40年ぶりにJIS規格化に至っている。

これら新しい技術を本格的に導入することによって、さ

らに鋼橋の建設費および維持管理費の縮減を実現し、経済性、安全性、耐久性に優れる鋼橋の創出が期待される。

参考文献

- 1) 合理化橋梁実績 社団法人 日本橋梁建設協会 平成23年10月。
- 2) 諸星一信, 森永真朗, 千葉照男, 三木千壽ほか: 東京湾臨海大橋(仮称)における技術開発とコスト縮減 第1回~第3回, 橋梁と基礎 2008.8~2008.10.
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 丸善 2002.
- 4) 玉越隆史, 松井謙二: 道路橋設計基準の国際的動向と部分係数設計体系への移行, 土木施工 Vol.53, No.7, 2012. 6.
- 5) 土木学会: 鋼床版の疲労, 鋼構造シリーズ19, 2010.
- 6) 菅沼久忠, 三木千壽: 鋼床版のデッキプレートとトラフリップ間の縦方向溶接部の疲労に対する EFFECTIVE NOTCH STRESS による評価, 土木学会論文集 A Vol.63 No.1, 35-42, 2007. 1.
- 7) 宮田正史, 千葉照男, 菅沼久忠: 鋼床版交差部スリットに発生する応力の内リブによる低減効果, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007.
- 8) 古土井健, 菅沼久忠, 千葉照男, 三木千壽: 高耐久性鋼床版構造の検討, 土木学会第61回年次学術講演会, 2006.
- 9) 三木千壽, 市川篤司, 楠隆, 川端文丸: 橋梁用高性能鋼材(BHS500, BHS700W)の提案, 土木学会論文集 No.738/I-64, 1-10, 2003. 7.
- 10) 日本規格協会: 橋梁用高降伏点鋼板 JIS G3140, 2011. 11.
- 11) 小西拓洋, 高橋和也, 三木千壽: 高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性, 土木学会論文集 No.654/I-52, 91-103, 2000. 7.
- 12) 安藤ほか: BHS500 鋼の製作性評価試験と溶接継手特性(第1報), 土木学会第61回年次学術講演会, 2006.
- 13) 田中ほか: BHS500 鋼の製作性評価試験と溶接継手特性(第2報), 土木学会第61回年次学術講演会, 2006.
- 14) 岡野ほか: BHS500 鋼の製作性評価試験と溶接継手特性(第3報), 土木学会第61回年次学術講演会, 2006.
- 15) 保坂鐵矢, 杉本一郎: 鋼鉄道におけるスカラップを設けない全断面現場溶接(1), 土木学会第54回年次学術講演会, 1999.