

東京ゲートブリッジの概要 — 景観性と構造的性 特に、塗装耐久性 —

(財)港湾空港建設技術サービスセンター横浜支部東京支所 ○保坂鐵矢
国土交通省関東地方整備局東京港湾事務所 池田忠睦

1. はじめに

国内最大コンテナ港である東京港の港湾物流機能の強化を図るため(図-1)に示す全長約 8 km の東京港臨海道海道路整備事業が計画され、すでに 1 期事業は 2002 年に、2 期事業 4.6km も 2012 年 2 月供用された。

本稿ではこの内、東京港第 3 航路を横断する橋梁部(東京ゲートブリッジ:延長約 2.9km:(図-1)参照)の海上部・主橋梁を例に、地域環境特性を考慮した景観性とライフサイクルコストの縮減に着目し採用した主たる新技術や塗装耐久性について概要を報告する。

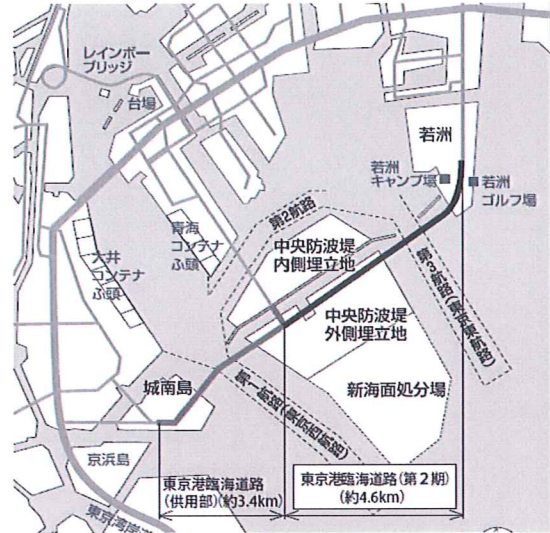


図-1 臨海道路計画・概念

2. 橋梁構造形式の検討

東京の海の玄関口に位置し、臨海副都心の高層ビル、付近の若洲海浜公園や整備中の海の森公園等の景観性、そして環境への調和とランドマーク性を有する近代的な構造形式の選定が求められた。構造選定は架設位置が羽田空港の空域制限(橋梁の高さ制限:構造高さ 98.1m 以下)と第 3 航路の航路制限(航路幅と航路高さの確保:幅 300m × 高さ 54.6m)等の条件下、吊橋や斜張橋、アーチ橋等を含め検討した結果、施工性、景観性、経済性、構造・耐震性等から 3 径間連続トラス・ボックス複合構造の長大トラスが採用された。(図-2)に架設位置の制約条件、図-3 に主橋梁構造概念、写-1 に完成状況を示す。ちなみに、世界最長支間のトラス橋は 1917 年に建設されたケベック橋(支間長 549m)で当該ゲートブリッジ(支間長 440m)は 9 番目である。しかし、上位長大橋はゲルバートラスで連続構造では世界最長となる。なお、当該橋梁は中央径間の一部が鋼床版箱桁という異種構造と一体になった混合構造である。

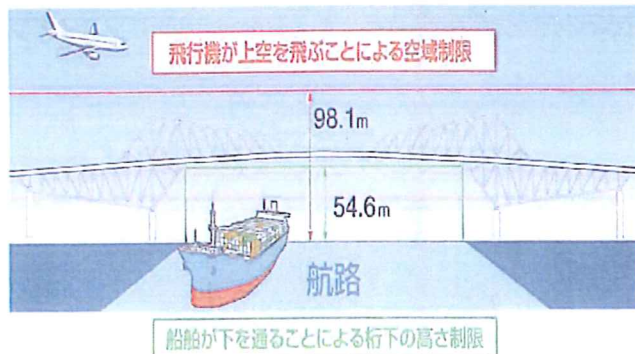


図-2 空域制限と航路空頭確保

上位長大橋はゲルバートラスで連続構造では世界最長となる。なお、当該橋梁は中央径間の一部が鋼床版箱桁という異種構造と一体になった混合構造である。

3. 景観性を配慮した構造概要

トラス橋梁は多数の細い部材で組立てられる合理的な構造物で、近代的構造と言いがたい。そこで環境に調和する近代的な軽快で開放的なイメージを表現する構造を演出するため、設立された技術検討委員会・景観検討分科会で検討された結果(図-3)、(写真-1)に示す景観性に配慮した斬新的構造が採用された。採用した構造はフォース橋に似ているという人や、ガントリークレーン、そして嘴の大きい鳥や恐竜(図-4)のイメージ参照)に例える人がいる。

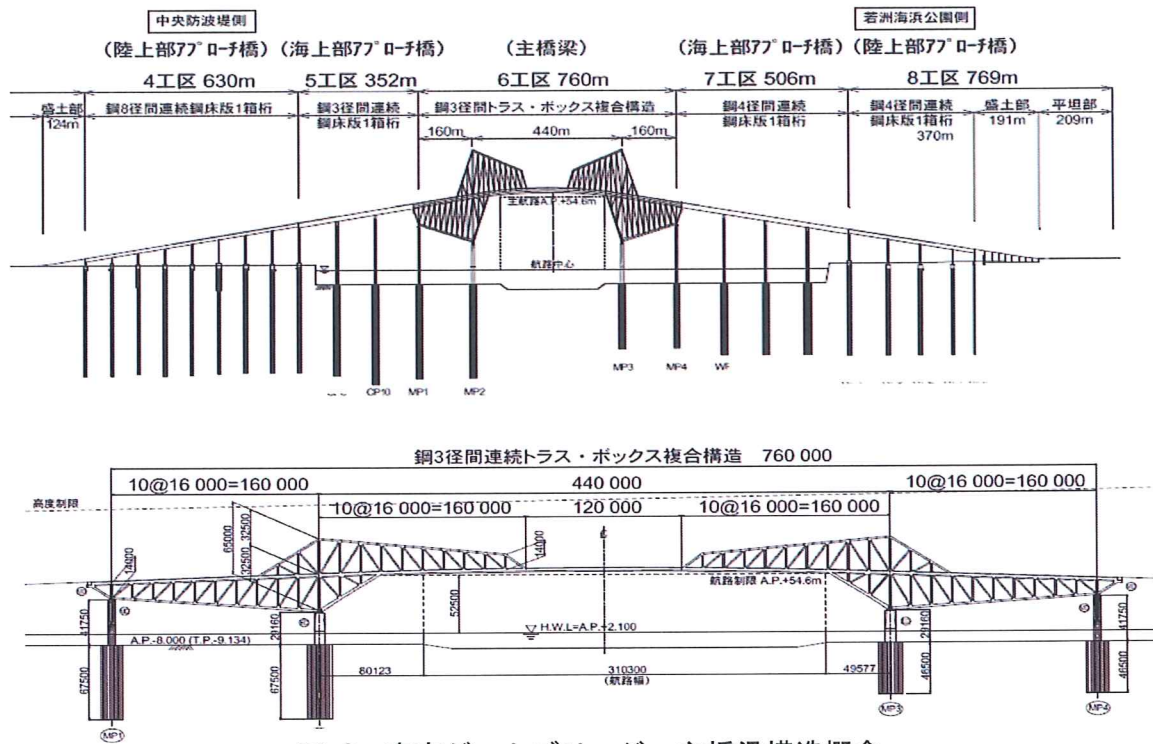


図-3 東京ゲートブリッジ・主橋梁構造概念



写真-1 東京ゲートブリッジ・全景

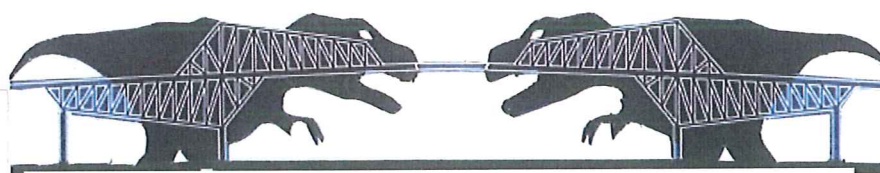


図-4 東京港に怪獣出現(抜粋:東京港湾事務所ホームページ)

3.1 混合構造による近代的なトラス構造の演出

「トラスボックス合成構造」と「鋼床版箱桁」との異種構造を一体とした「混合構造」の採用は経済性、構造的に加え、アプローチ橋桁との連続性を強調した主構の「直線性」の採用と上トラス部の「上ラテラル省略」等種々の構造的配慮等により、トラスという古典的な無骨な構造をスマートで景観性を有する近代的な橋梁への変身を演出された。ちなみに、平行弦でないトラス主構はほとんど曲弦が多く、国内では最大長の港大橋(図-5 参照)や本四架橋・番の洲・与島橋等、そして海外のフォース橋等も格点で折り曲げた曲弦トラスである。

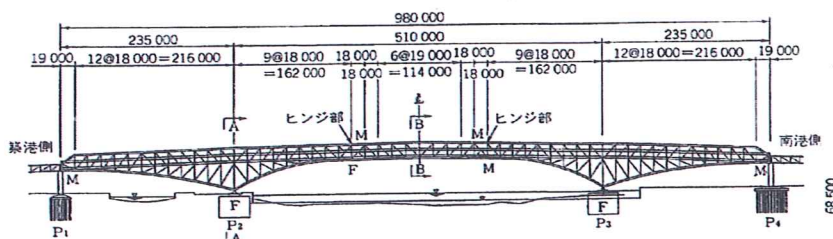


図-5 港大橋・全体概念

3.2 中央径間の上路桁とトラス部の上ラテラルの省略

経済性、構造的、維持管理の省力化、そして走行車ドライバーや遊歩者の橋梁上からの景観性等から上路橋タイプの有利性から、中央径間部は鋼床版箱桁を、中間支点部付近の負曲げ区間には上横構を省略したトラスを採用された。(写真-2)に示す上横構の省略は部材数や部材継手の軽減による経済性、景観性向上、加えて、塗装耐久性の向上は鋼桁の最大の弱点である補修塗装の省力化や活線上の危険作業の縮減等々に寄与する構造である。ちなみに、一般的に長大トラス橋には上横構やトラス支材が用いられ、走行自動車は“トンネルのまばたき区間”を走行するのと同じでドライバー等に圧迫感・閉塞感を与える構造となる。写-3 の港大橋の例をドライバーの視線からの状況を示す。



写真-2 上トラスの上横構省略：支材方式

3.3 その他、構造への配慮

“箱断面構造”、“コンパクト格点”、“全断面現場溶接”、“吊り金具の改良”等。景観への配慮として、古典的な無骨なトラス構造を如何に近代的な構造に変身させるか。構造はトラスと鋼床版箱桁の混合構造で、構造ディテールへの配慮とし

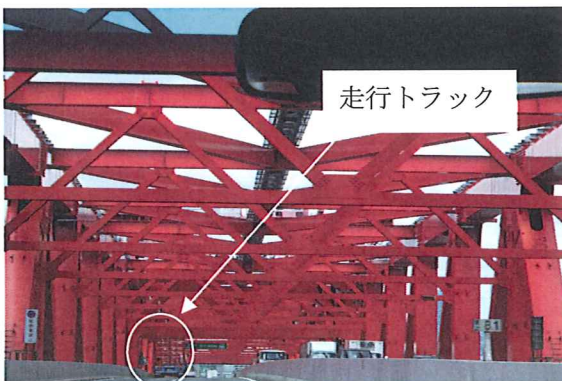


写真-3 運転席からの視界：港大橋の例

て、スマートで軽快性を表現する構造：「部材をすっきりした箱断面」で、「小さい格点構造：コンパクト格点」を、「合理的な現場継手：全断面現場溶接」を、そして、「部材外面に露出する維持管理用治具の改良：吊り金具」等が用いられている。概要は【4、5章参照】。

4. 新しい技術の概要

構造的、経済性、耐震性そして景観性や維持管理の低減等に寄与できるトラス橋を創造するため合理的な設計手法、高強度で製作施工性に優れた新しい材料、新しい構造やディテールが種々の高度な解析や実験・試験等により事前に検証され採用されている。

4.1 合理的な設計法：限界状態設計法の採用

国内の道路橋示方書の適用範囲は 200m 以下で、且つ設計法が許容応力度法であることから、当該橋梁の特性、長大橋で設計荷重に占める死荷重の割合が大きいこと、そして BHS 鋼のように高強度鋼材の適用等から、荷重特性や材料強度特性を合理的に評価する限界状態設計法の「荷重抵抗係数設計法：LRF D」を採用した。

限界状態設計法は材料強度と荷重の特性値ならびに荷重係数、構造解析係数、材料係数、部材係数、および構造物係数の安全係数により、各々の限界状態に対して設定される安全性照査を行うため、合理的な部材耐力評価が可能となる。当然、解析にマッチングした構造ディテールや製作性は三位一体の品質管理が前提である。

4.2 新しい高性能鋼材の採用：BHS 鋼材

橋梁用高性能鋼材 BHS 鋼材は高強度、高靱性で、優れた製作性能（溶接施工性、加工性）を有する鋼材で、これらの特性を適切な設計や製作に反映することにより高品質の製品が、経済性の向上が期待される。ゲートブリッジの主橋梁における BHS の全鋼重の占有率は約 50% で、約 12% のコスト効果が見られた。

① 強度を活用した効率的な部材断面の設計、鋼材重量の低減。

・ SM570 材相当の強度（降伏点：450 N/mm²）→BHS500（降伏点：500 N/mm²
（40mm < t ≤ 75mm））

② 溶接性向上：予熱の省略・低減、入熱量の緩和。組立溶接長の緩和等。

・ 熱加工制御（TMCP）技術により溶接時の入熱上限 10,000J/mm

・ PCM 値（≤0.2）で溶接性に優れ、組立溶接長は 50mm 以上（従来は 80mm）

③加工性向上：シャルピー吸収エネルギー（150 以上）が高く、冷間曲げ加工半径 ≥ 7t。

④板取の自由度向上：ミルシートで Cross 方向を保証。

⑤耐ラメラテア性向上：TMCP 化により S 量を抑え、Z35 レベルの耐ラメラ性能が確保。

4.3 新しいトラス・ボックス複合橋の採用

一般トラス桁はトラス格点をヒンジ、主構部材を軸力部材、床組みを格点横桁上に支承を介した構造が多い。当該橋梁は鋼床版床組をフルボックス断面とし弦材と直結一

体化する構造で、トラス格点が剛、弦材が曲げ部材になる一般に言う合成トラスである。従来トラスと比較すると主構間隔の縮小、支承の省略、そして、鋼床版床組みのフルボックス化によるねじり剛性の向上は上横構やトラス対傾構の一部の省略等が鋼重の軽減等による経済性、耐震性等の向上。そして、部材外面の凹

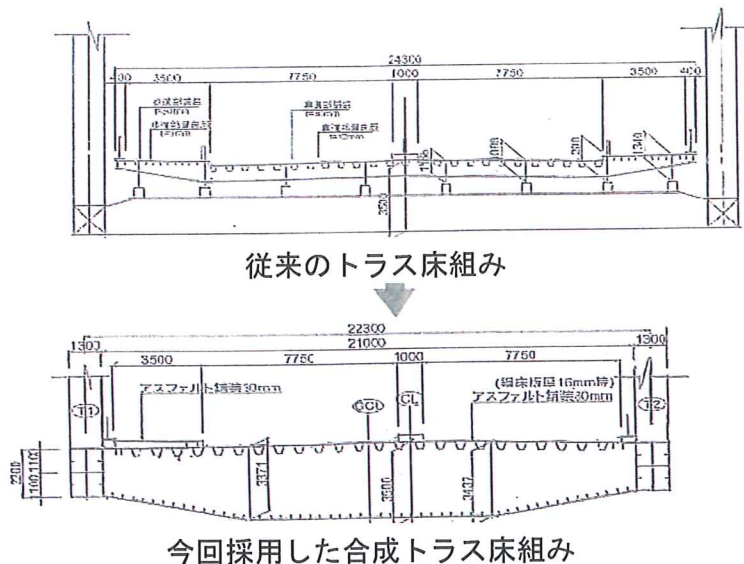


図-6 トラスの床組み構造概念

凸がなく塗装耐久性の向上に寄与できた。従来鋼床版床組との比較を（図-6）に示す。

4.4 新しいトラス格点：コンパクト格点

合成トラスの格点は従来のトラス格点と応力挙動が異なり一種のラーメン構造の隅角部である。このため、応力伝達機能を考慮した4面添接構造のコンパクトな格点構造を検討し国内で初めて採用された。コンパクト化や現場溶接継手の併用による経済性、景観性の向上に寄与できた。そして腐食の原因となる「水」の滞留を防ぐ対策として格点を密閉構造するなど構造的に防食設計を積極的に採用した。（図-7）にトラス格点構造概念を示す。【関連事項：5章参照】。

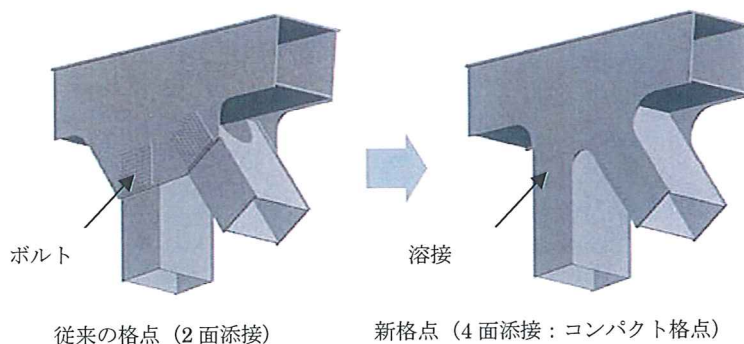


図-7 トラス格点の構造概念

4.5 全断面現場溶接：Z継手他

溶接継手は HTB 継手に比較して、円滑な応力伝達機能を有する継ぎ手構造で、鋼材量の低減等の経済性、景観性、塗装の耐久性の向上等に寄与できる。一方、現場溶接は拘束溶接であるため先行溶接による拘束を緩和し、且つフランジとウェブの溶接線をずらす Z 継手を採用。(図-8) に Z 継手構造の概念を示す。

4.6 新しい疲労耐久性を向上させた鋼床版 U リブ

最近、交通量の大きい鋼床版橋梁に多くの疲労損傷が生じている。本橋梁で用いた新しい鋼床版 U リブは、FEM 解析や模型試験体による疲労試験で局部応力や応力集中を緩和した耐疲労性向上を有する構造を開発、実用化した。構造概要を(図-9) に示す。

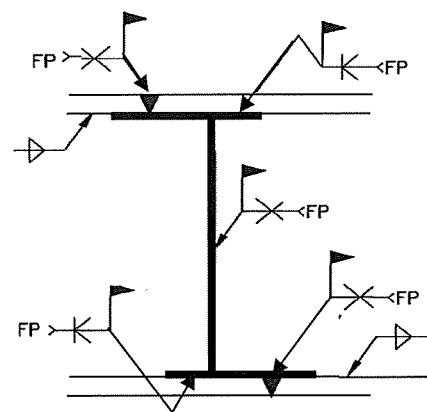


図-8 全断面現場溶接 Z 継手概念

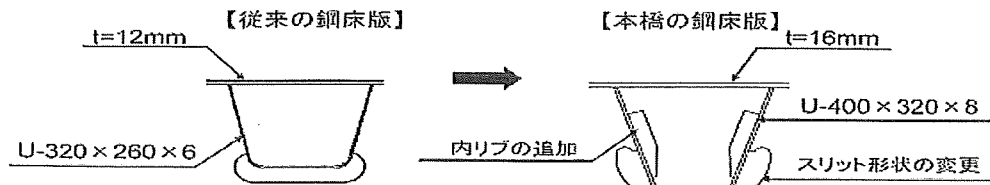


図-9 耐疲労性向上耐震性向上鋼床版 U リブ概念

5. 塗装耐久性向上のため対策

塗装耐久性向上は、本四架橋の大型海上橋梁等の実績から長期耐久性を有する塗装系が採用されたが、塗装材料が長期耐久性を有しても防食設計が適切にリンクしなければ材料特性が発揮できないのは自明の理で、塗装材料特性と塗装構造、塗装施工のマッチングが重要となる。

例えば、コバ面や HTB 添接部等の構造的弱点対策、現場塗装における品質管理や架設途上におけるタッチアップ処理等々の施工的弱点対応等々が、そして、供用後の補修塗装の設備等の配慮等、総合的に考慮することが重要である。

以下に、景観性を考慮しながらや長期耐久性確保のため対策の主たる例を示す。

5.1 構造的配慮

当概橋梁で採用した耐久性を配慮した構造、均一に雨水が流れる排水性の良い円滑な構造、例えば、「箱断面」で、「水切れの良い小さい格点構造」で、鋼材表面が滑らかな「溶接継手構造」を、そして、鋼部材外面から突出しない「省略吊り金具構造」、そして、弱点となるHTB継手部の塗装構造等を紹介する。

① “箱断面構造” と “トラス格点の密閉構造”。

鋼床版は一般に格点横桁と鋼床版縦リブから構成された開断面であるが、プルボックス化は弦材と一体構造とすることにより複雑な縦リブや横リブは箱内部に収まり雨水は箱外面を流化することから塗装耐久性向上に寄与できる(図-10)。

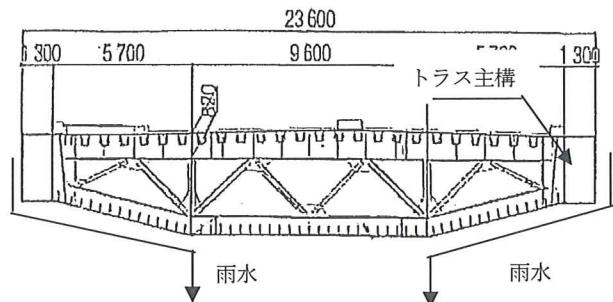


図-10 プルボックス鋼床版

トラス格点は腹材との交点の複雑な狭隘部で防錆上の最大の弱点であった。鉄道の例等を水切りプレートでトラスガセット格点部を密閉する構造を用いた。(写真-4)に格点密閉構造を示す。

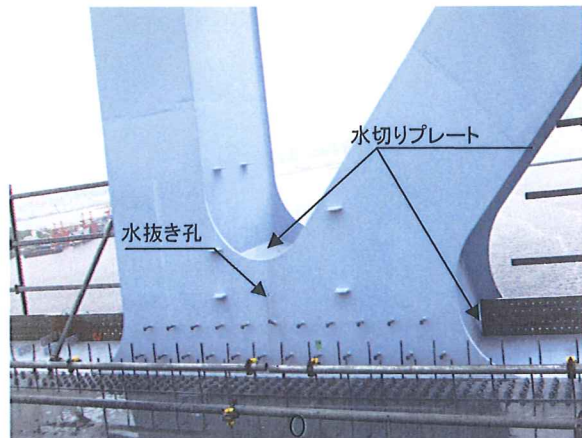


写真-4 トラス格点密閉構造

②現場継手部の溶接構造：“全断面現場溶接：Z継手”、そして“改良型吊り金具”。

施工性から現場継手はHTB継手が多いが、塗装桁の最大の弱点であるのは周知のとおりである。現場溶接は構造的、経済的、景観性にも優れ、加えて表面の滑らかさから塗装耐久性向上にも寄与する継手法である。海外ではHTB継手の肌すき目違いに対する精度確保からも溶接が多用されている現状から、どうして、何が原因で採用できないのであろうか……。なお、全断面現場溶接は安易に施工を行うと継手耐力を侵す恐れがあるので拘束溶接を緩和するZ継手等の全断面現場溶接を採用した。また維持管理上桁外面に多用している吊り金具は、二



写真-5 改良型吊り金具を配置した全断面現場溶接桁

次部材ということから製作精度からもなおざりになり疲労耐久性を侵す恐れも生じ、加えて塗装品質の低下も鋼材表面の凸凹が発錆原因になっている。これらの弱点をカバーする凸凹のない改良タイプを採用した。(写真-5) に突出した吊り金具がない状態を示す。

③ “上トラスの上横構の省略” と “対傾構の省略”

鋼床版プルボックス化に伴い、上トラスの上横構や対傾構の省略は部材数の縮減に伴う塗装面積の縮減による経済性のみならず、塗装施工性にも優れ耐久性向上に、そして、海上・主要航路上や道路上の塗装作業の省力化は安全性にも寄与できた。(写真-2) に上横構省略、(写真-6) に対傾構を縮減した構造を示す。



写真-6 対傾構の縮減とプルボックス鋼床版

④ HTB 継手部の塗装ディテールの改良：

・塗装構造ディテール：外面に露出する HTB 継手は、大ブロック架設継手部、トラス下横構、トラス対傾構部に用いている。前者は架設施工性から、後者 2 項は地組立て時の構造・組立施工性から、溶接構造を HTB 継手に変更された。継手部・母材小口部は上下添接板に挟まれているので大気に暴露されるので外面塗装系を適用している。

また、添接板の内側（摩擦接合面に相当する面）の母材ギャップ範囲も大気暴露状態となり、厚膜型無機ジンクリッチペイントの状態では、特に、海上橋梁では飛来塩分等による悪環境下となるため、外面塗装範囲とするか、シール充填等での密閉区間とした。

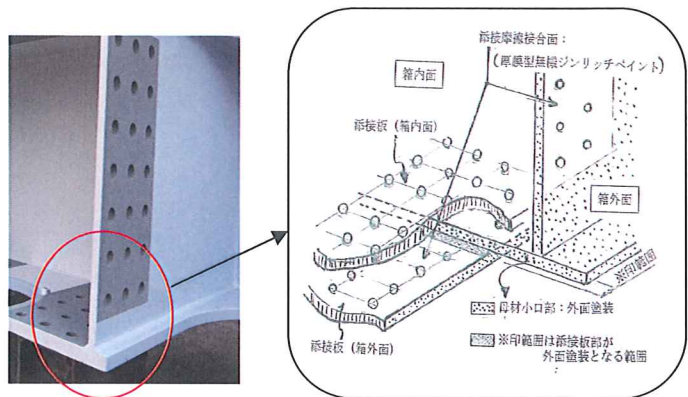


図-11 HTB 継手部の塗装範囲概念概略

塗装耐久性確保のためのディテール例を（図-11）に示す。

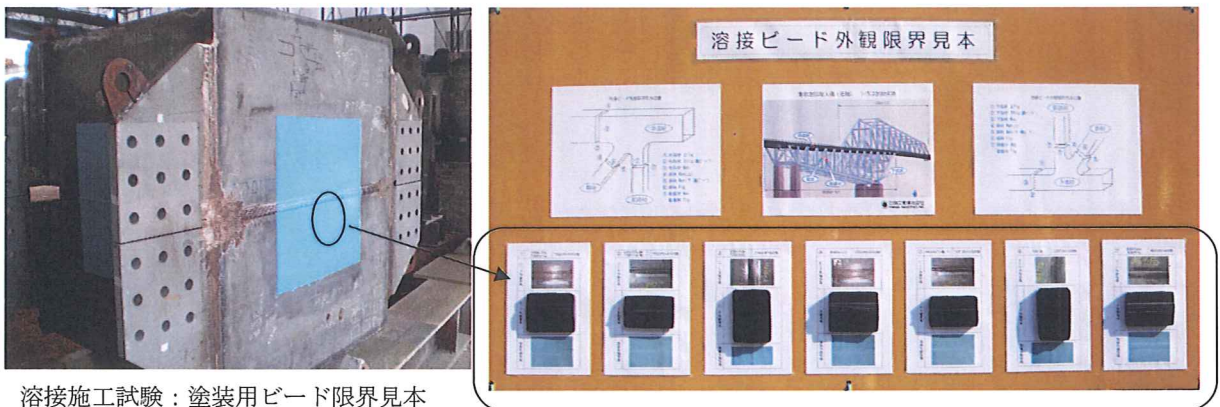
・ HTB の種類（防錆六角ボルトの採用）：

防食便覧 (H17.12) では防錆トルシアボルトの適用不可とは明示が無く、多く用いられているのが現状である。しかし、長期防錆塗装材料とのマッチングを考慮するとトル

シアボルトのピンテールの破断部は大きな弱点となることから、防錆六角ボルトを採用した。

⑤現場溶接部の溶接ビード表面の粗さと塗装ともマッチング

現場溶接は溶接姿勢が工場溶接より厳しいため溶接ビードが荒くなるため、現場溶接部の塗装耐久性は素地調整の信頼性がビードの粗さに影響する。このため、現場溶接施工試験の実物大模型試験体を用いて塗装確認試験を行い、ビード粗さによる鋼材表面の浄清度の確認を行うと共に、近・中距離における景観性的視点からの目視検査により、塗膜を塗布したビード表面外観形状の限界見本を作製し、現場溶接部の塗装品質確保の判定基準とした。当然のことながら限界見本は現場溶接のビード表面の粗さ検査基準としている。(写真-6) に実物大溶接施工試験体の溶接ビード表面観察と、溶接ビード外観限界見本を示す。



溶接施工試験：塗装用ビード限界見本

写真-6 溶接ビード外観限界見本

5.2 箱断面内部塗装の簡素化

本橋は付近にあるレインボーブリッジの箱桁内面の腐食環境を調査し、箱桁内部塗装系の簡素化を採用した。調査はACM (Atmospheric Corrossion Monitar) 型腐食センサーを使用した。調査対象箇所は外気が進入する桁端部マンホール近傍や腹板を貫通する配水管近傍を腐食環境の厳しい箇所として選定した。箱桁内面の腐食環境は「腐食の進行しない環境」であることを確認した。

調査結果から、箱内面は無塗装でも腐食が進行しないと判断できたことから、大気に暴露されない箱内面塗装は必要最小限塗装とした。つまり維持管理上必要な照明度が確保できる変性エポキシ樹脂塗料による塗装一層とした。

6. おわりに

東京ゲートブリッジは地域環境性から景観性を、そして構造的、経済性、維持管理を含めたライフサイクルコスト目標に、関係者の技術の結晶で完成しました。結果として合理的な構造は釣合いがとれた構造なるもので、本文をまとめるに当たり、設計・製作・架設、そして維持管理等の総合力が必要と改めて感じた幸いです。関係者の何らかの参考になれば幸いです。紙上を借りて感謝いたします。

なお、東京ゲートブリッジ建設に伴う主たる資料、文献を下記に列記しました。

参考文献：

- ①諸星一信・他、東京港臨海大橋（仮称）における技術開発とコスト縮減 第1回～第5回、橋梁と基礎 2008—7, 2008—9～ —12.
- ②土木施工 2012. Jan. VOL. 53 NO.1 特集・東京港臨海道路の全線開通（東京ゲートブリッジ）.
- ③国交省関東地方整備局東京港湾事務所、東京港臨海大橋（仮称）製作基準書（案）、H18年11月.
- ④国交省関東地方整備局東京港湾事務所、東京港臨海大橋（仮称）現場溶接管理要領（案）、H18年11月.
- ⑤道路協会、道路橋示方書・同解説、I 共通編、II 鋼橋編、平成14年3月.
- ⑥日本規格協会、橋梁用高降伏点鋼、JIS G 3140 : 2008、H20. 11. 20.
- ⑦道路協会、鋼道路橋塗装・防食便覧、平成17年12月.
- ⑧関西国際空港（株）、関西空港連絡橋工事誌、平成6年6月.
- ⑨網鉄道橋ディテール・解説（トラス編）H14. 3 鉄道公団