小 特 集

超大型鋼構造物特集<その1>
橋梁

東京湾横断道路*

吉 田 修**, 成 田 和 由***

Trans-Tokyo Bay Highway*

by Osamu Yoshida**, Kazuyoshi Narita***

キーワード: 鋼製水中橋脚, エレクトロガスアーク溶接, チタン, チタンクラッド鋼板, TIG 溶接

1. は じ め に

東京都市圏への産業・人口の過度集中傾向を緩和し快適な生活と業務の効率化をはかるため, 都市機能の再配置と多核都市化が進められている現在, 京浜地域と開発余力の大きい房総地域とを結ぶ東京湾横断道路は, その一翼を担うものとして大きな期待を集めている。調査開始以来 20 年余り, 幾多の紆余曲折を経て民間活力を活用した新方式で事業化されることになった東京湾横断道路は, 東京圏の核都市の一つである神奈川県川崎市と, 東京湾の対岸にあって豊かな自然空間をもつ千葉県木更津市とを結ぶ延長約 15.1 km の自動車専用道路であり, 1987 年 7 月に事業許可を受けた。

また, この道路は東京湾に沿って, 横須賀市から富津市を結ぶ約 160 km の東京湾岸道路と東京湾の人口部にあたる浦賀水道をまたいで横須賀市と富津とを結ぶ湾口部横断道路構想を加えて, 東京湾環状道路を構成するもので, 東京外郭環状道路などを経由して全国の高速道路網につながる東京圏の大動脈である。

道路延長 15.1 km はトンネル, 橋梁および川崎・木更津の二つの人工島で構成される。東京湾横断道路の計画諸元を表 1 に, 位置を図 1 に, 全体一般図を図 2 に示す。

ここでは, 東京湾横断道路のうち橋梁部を対象に, その概要と鋼製橋脚の溶接施工について紹介したい。

*原稿受付 平成 3 年 9 月 18 日

** 東京湾横断道路㈱ Trans-Tokyo Bay Highway Corp.

*** 東京湾横断道路㈱ Trans-Tokyo Bay Highway Corp.

表 1 東京湾横断道路の計画諸元

(1) 有料道路名	東京湾横断道路
(2) 路線名	一般国道 409 号
(3) 工事区間	川崎市川崎区浮島町地先から木更津市中島まで
(4) 延長	15.1 キロメートル
(5) 車線数	4 車線 (将来構想 6 車線)
(6) 設計速度	80km/h
(7) 推定交通量	供用時 約 33,000 台/日 20 年後 約 64,000 台/日
(8) 工事期間	昭和 62 年 7 月から平成 8 年 3 月まで

図 1 東京湾横断道路の位置

2. 橋梁の概要^{1,2)}

東京湾横断道路の橋梁部は図 3 に示すとおり, 木更津人工島から着岸点までの約 4.4 km の海上に位置しており, $A_1 \sim P_{13}$ の沖合い部橋梁と $P_{13} \sim A_2$ の浅瀬部橋梁に大別される。図 4, 図 5 に橋梁の標準断面を示す。

図 2 東京湾横断道路全体一般図

図 3 橋梁部一般図

図 4 沖合部橋梁標準断面図

橋梁上部工の構成形式は鋼床版箱桁橋としており、最大桁高は約 10.5 m である。総幅員は 29.9 m であり上下線各々 3 車線を計画しているが、当面 4 車線の工事を

図 5 浅瀬部橋梁標準断面図

い、将来、交通量の増加により拡幅が必要となった場合には各 1 車線分の鋼床版を両側張出し架設して完成させる。P₅～P₉の航路部では最大 240 m スパンとなっており、浅瀬部では 80 m スパンが連続している。また、走行性の向上と耐震性の向上を図るため上部工は多径間連続化の方針で計画し、沖合い部においては鋼製ヒンジ支承を用いた橋長 1630 m の 10 径間連続橋、浅瀬部においてはゴム沓を用いた多径間連続橋を採用した。

沖合い部橋脚 (P₁～P₁₂) は水深約 15～25 m の比較的地盤の悪い地点に設置され、波浪や地震による水平力および上部工鉛直反力も大きくなる。したがって、構造規

模も大きくなり施工も極めて難しい条件であった。下部工構造形式の選定に際しては4種類の形式を比較検討し、工費、工期、施工性のいずれにおいても最も優れた鋼製水中橋脚を採用した。

鋼製水中橋脚は、あらかじめ工場製作したフーチングと脚柱が一体となった鋼製橋脚を、フローティングクレーンにより、現地にあらかじめ打設した鋼管杭上に設置し、水中不分離性コンクリートをフーチング内に打設して杭とフーチングを結合する基礎である。

浅瀬部橋脚 ($P_{13} \sim P_{42}$) は水深 1~6 m に設置される。下部工構造形式選定に際しては4種類の形式を比較検討し、工費が安価で工期が比較的短いコンクリート橋脚(鋼管矢板井筒基礎)を採用した。

3. 景観の検討¹⁾

東京湾横断道路は、首都東京の海、空の玄関口に位置し、ビジネス、観光、リクリエーション等で往来する人々の目にふれるとともに、公共性、恒久性の面から 21 世紀に向けての貴重な文化的資産として期待されている。また、本道路は東京湾のほぼ中央にあり、海を主体とした自然環境の中に建設されることから、これらとの調和を図った構造物が望まれた。

以上のような背景を受け、学識経験者および関係機関よりなる景観検討委員会を設け、本道路の景観のあるべき姿、各構造物の基本コンセプト等について検討を進めてきた。

本道路の基本的な役割り、社会的な位置づけを踏まえ、

Harmony: 新首都圏・自然との調和を図る景観

Symbol: 新首都圏のシンボルとなる景観

Quality: 貴重な資産として質の高い景観

の三つの基本コンセプトを選定した。これらを各構造物の景観設計に反映すべく、検討を重ねた結果を以下に述べる。

橋梁全体形態の検討では、縦断線形、支間割り、桁高変化はなめらかで連続性をもたせる形態とした。

橋脚形状の検討では、多くの案をパースで表現し、うち上部工の形状と最もマッチする、曲線を取り入れた優美な Y 型形状を採用した。

色彩の検討では、カラーシミュレーションを行い高明度、低彩度への絞り込みを行った後、現地海洋上での色彩検討も実施した。橋脚については、浅瀬部コンクリート製橋脚との色の連続性を考慮し、かつ橋脚が桁をしかり支える感じとなる「オイスターグレイ (マンセル 5Y7/1 LTG)」を選定した。また、上部工については、橋梁の曲線が美しく見えるよう、黄色味を帯びた明るい

図6 沖合部橋梁完成予想図

図7 浅瀬部橋梁完成予想図

色の「アイボリーホワイト (マンセル 5Y9/0.7 W)」を予定している。

橋梁部の完成予想図を図6、図7に示す。

4. 鋼製水中橋脚の構造

工事が最も進捗している P₁ 鋼製水中橋脚を取り上げ、その構造を以下に解説する。鋼製橋脚の全体像を表現するため、鳥かん図を図8に示す。

鋼製橋脚は多くの実績があるものの、東京湾横断道路の橋脚で採用した形式が、脚柱とフーチングの鋼製一体構造であること、景観を考慮した Y 型橋脚であること等による生ずる独自の構造上の特徴を有するため、以下にその特徴を述べる。

- (1) 脚柱を Y 型とし、TP+6.0 m 以上で円曲線を設ける。
- (2) 脚柱上方は四角形の二角を隅切りした六角形断面を採用する。
- (3) 二つの脚柱間につなぎ材を設け、応力部材として扱う。つなぎ材幅は脚柱幅の 1/2 とし、つなぎ材天端は脚柱天端より 3~6 m 程度下げる。
- (4) 脚柱断面は外板となるフランジ、ウェブのほか、中段より下方はボックス内に隔壁板を設けて構成

図8 P₇橋脚鳥かん図

する。

- (5) フランジ、ウェブは縦リブで補剛し、縦リブは応力部材として扱う。
- (6) フランジ、ウェブおよび隔壁板をダイヤフラムで補剛する。
- (7) フーチングは大梁、小梁からなる格子構造とする。
- (8) 脚柱基部のフランジ、ウェブはフーチング大梁に一致させ、隔壁板はフーチング大梁または小梁に一致させる。
- (9) フーチング外側板は板厚 6 mm の鋼板で囲う。ただし、フーチング上下面は橋脚設置および水中コンクリート打設のため開口構造とする。
- (10) フーチングの継手は全て溶接継手とする。
- (11) 脚柱のうち外板となるフランジ、ウェブの継手は溶接継手とし、ボックス内の部材となる隔壁板、縦リブどうしの継手は高力ボルト継手とする。
- (12) 飛沫・干満帯となる TP+3.0 m～TP-2.0 m の範囲は防食性を重視して、チタンクラッド鋼板を脚柱に溶接する方法を採用する。

5. 脚柱の施工

P₇橋脚の製作は2社が担当し、1社が脚柱を、1社がフーチングを分担した。脚柱、フーチングを別々の工場にて並行して製作し、最後に二つのブロックを一体化した。

P₇橋脚・脚柱の構造と溶接方法を図9に示す。脚柱の

図9 溶接方法概要図

圖 10 開先形狀

図 11 P₇橋脚全景

また、脚柱は9ブロックに分けて製作したものを、地組立時に横に寝かせ各ブロックをヤードにて溶接した。完成したP₇橋脚を図11に示す。

6. チタンクラッド鋼板の溶接³⁾

鋼製水中橋脚の飛沫・干満帯の防食法は、犠牲鋼板($t=25\text{ mm}$) + 超厚膜型エポキシライニング ($t=2.3\text{ mm}$) の仕様と、チタンクラッド鋼板による方法とを比較し、結局チタンクラッド鋼板を採用した。その理由は、メンテナンスフリーであり優れた長期防食性を示すこと、脚柱本体よりの突出量が 5 mm で表面が滑らかで景観に優れること、大気中加熱・圧延法による銅ろう接型の低コストチタンクラッド鋼板が開発されたこと等である。しかし、海洋土木構造物で本格的に採用された実績がないこと、チタンの溶接に特殊技術を要すること等課題もあった。

東京湾横断道路(株)では、各種実験を実施しその結果を基に、1990年「水中基礎飛沫・干満帯部チタンクラッド鋼ライニング施工基準(案)」を制定し、材料、溶接施工等について基準を設定し、施工に対して万全を機した。

ここでは上記基準(案)に基づき施工したP₇橋脚について以下に報告する。

6.1 チタクラッド鋼板の溶接方法

チタンと鋼を直接溶接すると極めて脆い金属間化合物を生成するため、鋼間のような溶接接合方法は適用できない。したがって、鋼とチタンの接合には、その両者と完全固溶し金属間化合物を形成しない中間金属をインサート材として挿入して接合するか、銀ろう等によるろ

う付け法で接合せざるを得ない。

鋼構造にチタンクラッド構造物を接合する場合、合せ材のチタンと構造部体の鋼が直接溶融しないように、合せ材のチタン層を切削除去し溶接した。突合せ溶接部は、同様に合せ材のチタン層を切削除去し、下側母材鋼部はレ型開先として実施した。

溶接方法は、スパッター発生によるチタンの耐食性劣化防止および溶接ヒュームによるチタン面への影響を考慮してTIG溶接とした。

この開先に切出したチタンクラッド鋼の溶接では、まずチタン層を除去した部分までの鋼と構造部材とをTIG溶接する。そして、チタンの除去部分を十分清掃した後、その上から当て板として 2 mm 厚のチタン板を隅肉溶接し完全に覆った。以上の溶接方法を図12に示す。

チタンクラッド鋼を被覆する橋脚飛沫・未満部の端部は、鋼構造体と溶接したチタンクラッド鋼の母材鋼部と当て板(チタン)との間は、隙間が生じた状態になる。このままでは、その隙間に雨水や飛散してきた海水が進入して防食材のチタン内側から腐食を進行させることになり防食材としてなら機能しなくなる。これを回避するためには、溶融して隙間を埋める必要があり、異材接合を行わざるを得ない。このような異材接合部分をできるだけ少くするために、図12に示したように飛沫・干満部の上・下端部に帯状のチタンクラッド鋼板を巻き付けるように配置し、クラッド鋼スペーサを用いて施工した。この部分の溶接方法を図13に示す。

また、実際の橋脚ではやせ馬が発生する。施工に先立ち橋脚モデルの試作検討により施工性を確認した。やせ馬部分にチタンクラッド鋼板を張合せた結果、やせ馬に沿った状態で支障なく張合せることが可能であった。実際の施工でも全く問題なかった。

さらに、橋脚コーナー部の施工法を2種類の加工法で検討した。前者は、当て板方式と称し、突合せ部分がコーナーの一部となり、当て板のチタン板が曲げ加工されているだけであるため、平面部でのチタンクラッド鋼板の接合法と全く同様に施工できた。後者は、曲げ加工方式と称し、チタンクラッド鋼板をプレスにて曲げ加工し張合せる方法である。表曲げは、チタンが伸び変形し鋼が圧縮変形することを考慮して、 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 程度に加熱し 15° の曲げ加工を行った。その結果、割れなどの不具合が発生せず良好な曲げ加工が可能であった。ただし橋脚本体のコーナー部はグラインダー等により、密着性を考慮して 15° の加工を行う必要がある。

以上の結果、橋脚コーナー部の加工は、いずれの方法でも施工可能であったが、飛沫・干満帯上下端の異材継

図 12 溶接方法 (A 部, B 部)

図 13 溶接方法 (C 部)

手を含めて継手部を減少できることから、曲げ加工方式を採用して施工した。

6.2 溶接部の検査

チタンクラッド鋼の厚さ方向の硬度に及ぼす当て板溶接における入熱量の影響を検討した。入熱量が大きいと、チタンと母材の接合面近傍 (表層から約 1 mm 付近) の硬度が高くなることが認められた。これは、当て板溶接の際溶接入熱が多くなると、合せ材のチタンとその下層にある銅の一部が溶融し脆い金属間化合物を生成するためである。このような脆弱層を作らないためには、できるだけ低入熱すなわち 160 A, 13 V, 28 cm/min (入熱 4.5 KJ/cm) 以下で溶接することが好ましい。

表 2 チタン溶接判定基準

チタン溶接部の 変色の程度	溶接部の性質	チタンの溶接技術 判定における合格
銅色	コンタミネーションのない健全な溶接部である。	合格
金色又は茶色	ほとんどコンタミネーションのない溶接部である。	
紫又は青	溶接部表面の延性に少し影響する。しかし溶接部全体としては、その性質にほとんど影響がないとみてよい。	不合格
青白又は灰色	かなりのコンタミネーションがある。溶接部の溶接部では延性がかなり低下する。	
白又は黄白	溶接部はぜい弱となる。	

チタンは大気中の酸素や窒素、炭素、水素などとの化学的親和力が極めて強いので、溶接前の前処理として表面の汚れや酸化物、水分の除去などが必要である。この前処理が不完全の場合、溶接部にブローホールが発生したり、酸化物、窒化物などのコンタミネーションが生じやすい。

また、チタンは高温状態 (300°C 以上) で大気と接触すると、酸素を吸収したり、容易に反応して酸化物、窒化物および水素化合物を形成するために、溶接部が硬化して延性の低下をまねき、著しい場合には割れを生ずる。

したがって、チタン部分の溶接に当っては、純アルゴンガス (JIS K1105 1 級) を用いてガスシールドすることが不可欠である。ガスシールドの良否は、表 2 に示した日本溶接協会の WES7102 [イナートガスアーク溶接作業標準 (チタン及びチタン合金)] などの判断基準を基に、溶接部の変色の程度により判定しなければならない。

チタンクラッド鋼の溶接部の試験検査も、日本溶接協会の WES7202 [チタンクラッド鋼のイナートガスアーク溶接およびチタンライニング作業標準] あるいは、HPIS E1986 [チタンクラッド鋼加工基準] のように規格化されたものがあるので、それに準じて実施しなければならない。チタンクラッド鋼の母材側を溶接する際には、その熱影響によってクラッド界面に剝離を生ずる危険がある。したがって、溶接前に目視検査および浸透探傷試験により、剝離の起因となりやすい割れ、ピッド等の有害な欠陥がないことを確認しておく必要がある。

また隅肉溶接でも、同様に欠陥のないことを確認しておく必要がある。

6.3 電気防食

チタンは海水中、大気中はもちろん海洋生物付着下での隙間腐食に対して優れた耐食性がある。

しかしながら、一方では炭素鋼とチタンのように異なる金属が海水中に共存する場合には、異種金属接触腐食が発生し、炭素鋼部分が腐食する懸念があり、この防止策がポイントとなった。飛沫帯、干満帯、海水中の腐食環境を模擬した室内試験によって異種金属接触腐食現象を調査した結果、鋼製橋脚の防食に用いられる電気防食を若干補強することによって、チタンと炭素鋼の間に生ずる異種金属接触腐食を防止する効果があることが確認さ

れた。

7. おわりに

東京湾横断道路は、日本道路公団、地方公共団体および民間の三者から出資を受けた東京湾横断道路㈱が建設、管理を行い、日本道路公団が道路を所有し対外調整を行う民活新方式で事業化している。

1991年9月現在、橋梁部は鋼製水中橋脚12基中6基と、コンクリート製橋脚30基中11基が発注済である。

残りの下部工と上部工の全量は今後発注が予定されている状況にあり、完成にむけ着実に工事は進捗している。

本稿をまとめるにあたり、資料を提供していただいた(株)宮地鉄工所・小坪毅氏、新日本製鉄㈱・高橋康雄氏に深甚の謝意を表したい。

参考文献

- 1) 篠原ほか：東京湾横断道路建設事業の概要、橋梁と基礎、90-8, p87-90
- 2) 香川ほか：多径間連続橋梁の計画と下部工の設計(上)、橋梁と基礎、91-1, p15-22
- 3) 香川ほか：鋼製橋脚飛沫干満部防食用チタンクラッド鋼板の基本特性と溶接加工法について、土木学会論文集 NO. 435/VI-15

書 評

書 名：高信頼度マイクロソルダリング技術

著 者：竹本 正, 佐藤了平

出版社：工業調査会, 1991年

価 格：6,650円

電子機器の小形・軽量化を推進してきたのは、狭い空間に多くの電子部品を超高集積化する高密度実装技術である。そして、その中心となっているのは実は古来から利用されているはんだ付技法である。しかし、接合部が微細、微小になった上、一層の信頼度が要求されるために今まで無視できたようなことまできちんと把握して対応せねばならず、改めてマイクロソルダリング技術として体系的に理解することが必要になってきた。

本書ははんだ接続の信頼性を定量設計するために纏められたもので、はんだ接続の基礎となる物理・化学を明らかにし、今までに得られている定量的な式を示すことにより設計を支援できることを狙いとしている。

構成内容は全10章、391頁からなっており、まず第1章では、「何故信頼性が重要か」として本書の対象とするところを解説している。次いで前半部は、はんだ接続の基礎を材料からプロセスに互つての体系的な解説と定量的データを呈示しており、第2章「はんだ合金」、第3章「はんだ合金の変形」、第4章「はんだ合金と母材の関係」、第5章「フラックスおよび基板の洗浄」、第6章「溶剤ペースト」からなっている。

後半部は、はんだ接続の信頼性の解説と定量的データを呈示した、第7章「信頼性の考え方」、第8章「マイクロはんだ接続の機械的信頼性」、第9章「金属間化合物の成長と継手の信頼性」、第10章「電気・化学的信頼性」からなっている。

全体を通して、基礎から応用、解説から実用データまで広範囲に記述されている。最近の電子機器の生産技術の重要な柱として、体系化されつつある高密度実装技術の専門技術者の入門書、電子機器設計技術者の参考書あるいは工学部学生の教科書などへの活用に適している。

(M. O)