

羽田空港D滑走路のジャケット工法の技術 ～世界初のジャケット式空港～

Jacket technology of D-runway of Tokyo International Airport
～ The World's first airport that consists of Jacket type pier ～

風野 裕明* 羽田空港再拡張プロジェクト班 シニアマネジャー
Hiroaki Kazeno

関口 太郎 羽田空港再拡張プロジェクト班 シニアマネジャー
Taro Sekiguchi

阪上 精希 羽田空港再拡張プロジェクト班 シニアマネジャー
Seiki Sakaue

片山 能輔 海洋・エネルギー事業部 鋼構造設計技術部
シニアマネジャー
Yoshisuke Katayama

藤川 敬人 海洋・エネルギー事業部 営業・企画部
シニアマネジャー
Norihito Fujikawa

佐藤 弘隆 技術開発研究所 防錆・防食技術室 シニアマネジャー
Hiroataka Satou

抄録

羽田空港の海上沖合いに4本目の滑走路であるD滑走路の建設が進められている。D滑走路は埋立部と栈橋部からなり、栈橋部に適用されているジャケット構造の製作、設計、防食には当社の技術が多数用いられている。ここでその概要を紹介する。

Abstract

The 4th runway (D-runway) of Tokyo International Airport, located offshore of Haneda, is now under construction.

D-runway consists of reclaimed area and jacket type pier area. The jacket type pier includes the many advanced technologies of Nippon Steel Engineering with respect to fabrication, structural design and anticorrosion. This paper describes the essences of the technologies.

1. 緒言

羽田空港D滑走路の新滑走路島の多摩川側約1,100mは、多摩川河口域に建設されることにより通水性の確保が求められ、杭本数の削減やプレファブ化による工程短縮、近接する羽田空港の運用条件への対応等の理由により、ジャケット式栈橋構造を採用している。ジャケット構造はこれまでに海洋エネルギー施設や港湾施設での適用実績はあるものの、広大な空港基盤施設としての適用は、世界で初めての試みとなる。本稿では、空港基盤施設としてのジャケット構造の設計、製作、防食上の技術について述べる。

部の大部分が多摩川河口域内にあり、河川への影響について配慮が必要である。設計供用期間は100年間、航空機荷重としては最大でA380の最大離陸重量400t、供用中の全走行回数は最大1150万回である。

採用した栈橋構造は、コンクリート床版を支持する鋼桁上部構造、鋼管トラス下部構造及び基礎杭から成るジャケット構造であり(図2)、コンクリート床版は滑走路・誘導路部にPCa床版、着陸帯部にUFC床版を配置している。

2. ジャケット構造の概要と計画・実施上の留意点

2-1. 基本条件

新滑走路島栈橋部は、D滑走路の多摩川側に位置し、図1に示すように幅約520m、長さ約1,100m、栈橋面積は約52万㎡と前例のない広大な構造である。栈橋

2-2. 計画・実施上の留意点

新滑走路島栈橋ジャケットの計画・実施にあたり、特に留意した点を以下に示す。

(1) 多摩川河口域に設置される栈橋部は、河川管理上支障のない構造とし、通水性を確保した構造とする必要がある。

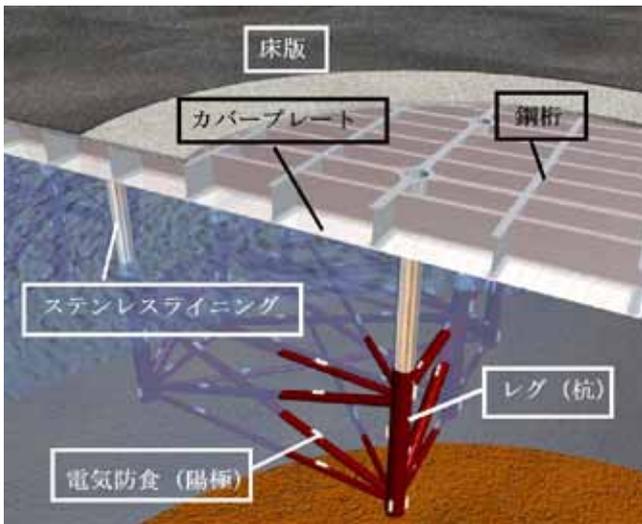


図2 ジャケット構造

Fig.2 The jacket type pier

- (2) 設計に考慮する最大の航空機荷重は A380 (最大離陸重量 400t) であり、一般の道路橋の活荷重と比べて輪荷重の設地面積が約 2m² と小さく、集中荷重的に作用することや走行回数が最大 1150 万回と多いといった特徴があり、走行時たわみを抑制し、100 年間の疲労耐久性を確保可能な上部桁構造が必要である。
- (3) 滑走路基盤面としては栈橋部全体を連続構造とする必要があるが、連続一体化に伴って大規模な不静定構造物となり、温度変化により構造物に発生する応力の適切な評価と構造上の対応が必要となる。
- (4) 新滑走路島の設計条件として、補正最大基盤加速

度 439gal のレベル 1 地震動と 486gal のレベル 2 地震動が設定されている。これらの設計地震動に対して、所要の耐震性能 (構造部材強度及び変形性能) を確保することが必要である。

- (5) 栈橋部全体でジャケット 198 基、鋼材約 26 万トンにも及ぶため、短工期での大量な製作および出荷を安定して行う製作施工方法の確立が必須である。
- (6) 栈橋部は厳しい腐食環境となる海上部に建設され、供用期間も 100 年間と超長期のため、適切な防食方法および維持管理により維持管理費を抑え、ライフサイクルコストを低減することが重要である。

2-3. 構造計画

上記設計上の留意点を踏まえ、ジャケット構造の基本構造は以下の通りとした (図 3、表 1)。

(1) 上部桁構造

上部鋼桁構造は杭 (レグ) を結ぶように格子状に配置し、桁間隔は床版の支持スパンから、3,750mm × 7,850mm とした。桁高は作用荷重に応じて 2,500mm と 2,000mm の組合せとし、疲労耐久性の確保および製作性、維持管理性を考慮して I 断面とした。鋼桁の腐食対策には、桁下面にカバープレートを設置し、内部空間を湿度管理することで腐食環境を改善し、維持管理費の低減を図った。

(2) 下部ジャケット構造

河川機能確保のため、ジャケットの補剛材 (ブレー

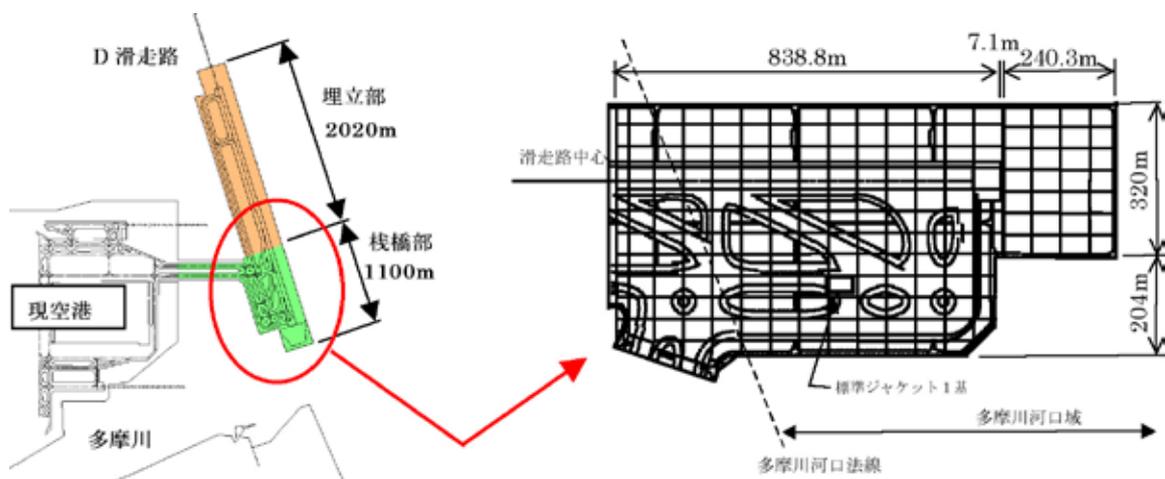


図1 D滑走路配置・栈橋部平面図

Fig.1 The plan of D-runway and jacket type pier area

ス)はAP. -4.5m以下に配置し、水面付近はブレース補強のないラーメン構造とした。トラス構造を天端まで配置して剛性を高める一般的なジャケット構造とは異なるが、後述するように、温度応力や地震応答の軽減、厳しい腐食環境である干満・飛沫帯の防食面積の低減にも効果があり、有効な部材配置である。

表 1 ジャケット構造の主要諸元

Table1 Spec of the jackets

	標準仕様	主要数量
ジャケット	45m × 63m × 32mH	198 基
鋼桁	BH2500 BH2000 BH700	約16万トン
下部ジャケット	レグ φ1600~φ1960 ブレース φ700~φ1422.4	約9万トン
基礎杭	φ1600 φ1422.4 × 85~90m φ1320.8	1,165 本 約9万トン

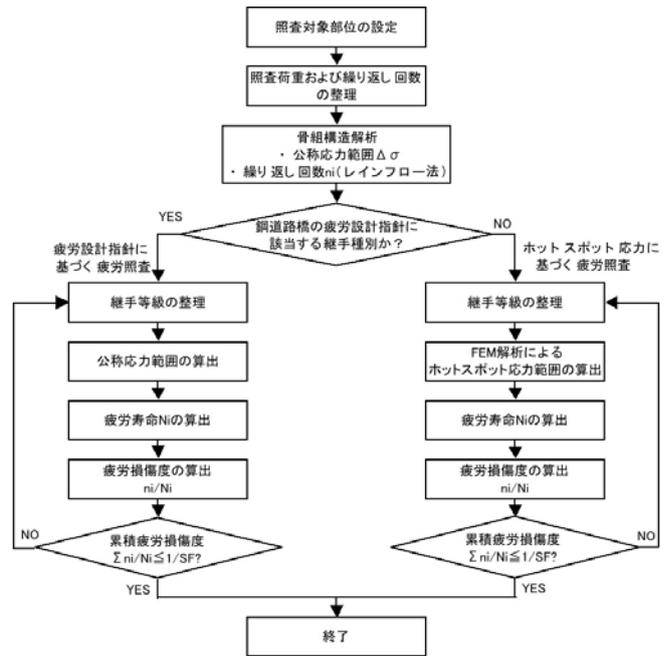


図 4 上部桁の疲労設計フロー

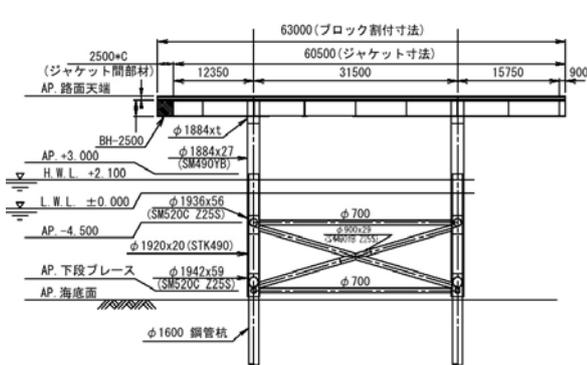
Fig.4 Fatigue design flow

3. 設計技術

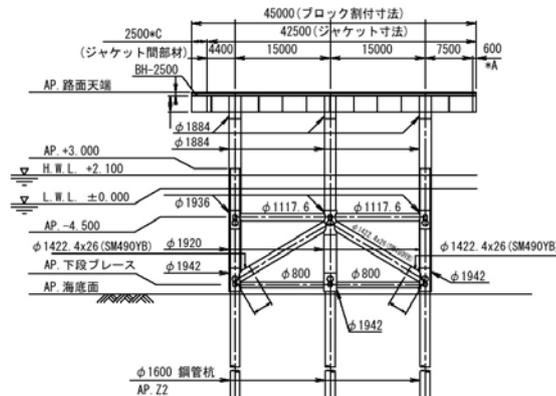
3-1. 疲労耐久性の確保

疲労設計は図 4 に示すフローにしたがって実施した。上部桁は原則として、「鋼道路橋の疲労設計指針」(社)日本道路協会)に基づく疲労照査手法に従い、ジャケット・杭・地盤ばねを一体でモデル化した 3次元骨組み解析モデルにより算出した公称応力に

基づいて照査を実施したが、実施にあたっては、「鋼道路橋の疲労設計指針」が前提としている自動車荷重と、本件で想定する航空機荷重との影響の違いをふまえ、主応力方向の影響を考慮して継ぎ手等級を選定した。公称応力による評価が困難な継ぎ手であるレグ頭部や桁交差部などの評価については、ホットスポット応力を FEM 解析により算出し、疲労耐久性を評価した(図 5)。FEM 解析のモデル化及びホットスポット応力の算出方法は、国内では統一された方法がないため、



滑走路方向断面



滑走路直角方向断面

図 3 ジャケット構造図

Fig.3 The jacket structure

FEM 解析モデル作成手法や評価方法がもっとも妥当であると考えられる国際溶接協会 (IIW-International Institute of Welding) の「Designer's Guide」の手法を用いた。また、下部ジャケットの鋼管格点部についても、「ジャケット工法技術マニュアル」((財) 沿岸開発技術研究センター) にしたがって航空機荷重および波浪荷重によるホットスポット応力を算出し、疲労照査を実施した。これらの手法を導入することで、航空機という特殊荷重条件に対する 100 年間の長期耐久性を確保した構造設計が可能となった。

設計に当たっては、「実寸大模型による溶接施工性の検証も実施し、製作に際して、設計上の要求品質を確保できることも確認した。

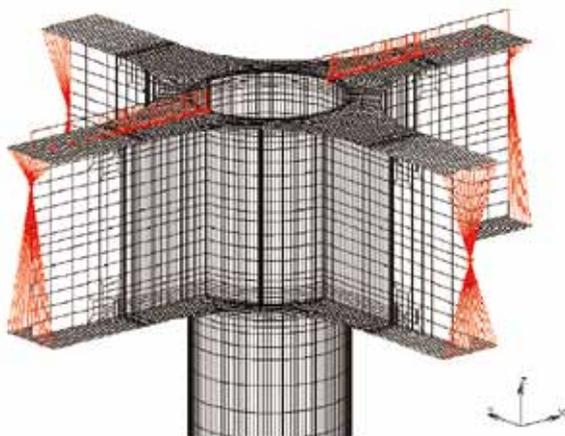


図5 レグ頭部のFEMモデル
Fig.5 FEM analysis model(top of the leg)

生じないように配慮した。

栈橋本体ブロックの大きさは 840m × 520m であり、基準温度 (20°C) に対して +20°C、-30°C の温度変化を考慮して設計を行った。-30°C の温度変化による栈橋ブロック端部での変形量はおよそ片側 150mm である。一方、下部ジャケットの拘束が全くないと仮定した場合の変形量は、鋼部材の線膨張係数 1.2×10^{-5} から 151mm と計算される。両者の差は小さく、下部ジャケットの拘束効果は比較的小さいと言える。これは、(1) 表層地盤が軟弱であること、(2) ジャケットがラーメン構造となっていることから、栈橋の横方向の剛性が小さいことによる。これにより下部工への大きな温度応力を回避している。

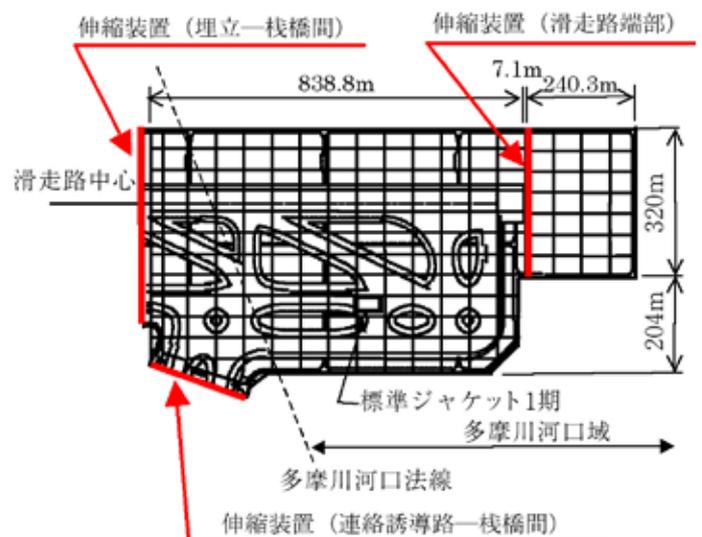


図6 伸縮装置の配置
Fig.6 Layout of expansion device

3-2. 温度変化の影響に対する設計

栈橋部は 1100m × 524m の大平面構造物であり、温度変化により上部構造が平面方向 2 方向に十数 cm 伸縮するため、構造形式や形状が大きく異なる箇所境界では大きな温度応力が発生する。したがって、図 6 に示すように、埋立-栈橋間、栈橋-連絡誘導路間及び滑走路端部の栈橋本体ブロックと滑走路端安全区域間には伸縮継手を配置して温度変化による過度な応力が

3-3. 耐震性能の確保

設計対象地震動に対する照査方針を表 2 に示す。レベル 1 地震動に対しては、「軽微な被害程度」という要求性能に対する性能保障として、航空機が直接走行する上部構造は弾性範囲内とし、下部構造や杭については塑性化を許容するが、発生ひずみは局部座屈ひずみ以下となるようにした。栈橋の応答塑性率は要求水準にしたがって、港湾構造物の重要度 A 級に相当する

1.3以下とした。レベル2地震動に対しては、「栈橋が崩壊しない」という要求性能に対して、上部構造部材の塑性化を許容し、応答塑性率2.5以下となることを照査した。また、部材の局部座屈が発生しないことを確認した。

耐震設計は図7に示すフローにしたがって実施した。上記のように、各部材の塑性化を積極的に許容したことで、詳細な動的解析を繰り返し実施することで各部材サイズの選定を実施する必要があった。そこで、ジャケット構造などの骨組構造物専用を開発され、材料や地盤の非線形や動的影響も考慮できる解析プログラム「CAP」を国内では他社に先駆けて導入し、これ

表2 耐震照査方針

Table2 Antiseismic check policy

設計対象地震波		レベル1地震動	レベル2地震動	備考
耐震性能		構造物としては軽微な被害程度とし、強度、安定性を確保	構造物としては著しい被害を受けるが、崩壊しない	
部材強度ひずみ	上部桁	降伏強度以下	終局耐力以下	動的解析により照査
	ジャケット部材	部材耐力以下	局部座屈を生じない	
	杭	局部座屈を生じない	局部座屈を生じない	
基礎の安定性	杭支持力	許容支持力以下	極限支持力以下	
栈橋変形性能	許容塑性率	1.3以下	2.5以下	プッシュ・オーバー解析による照査

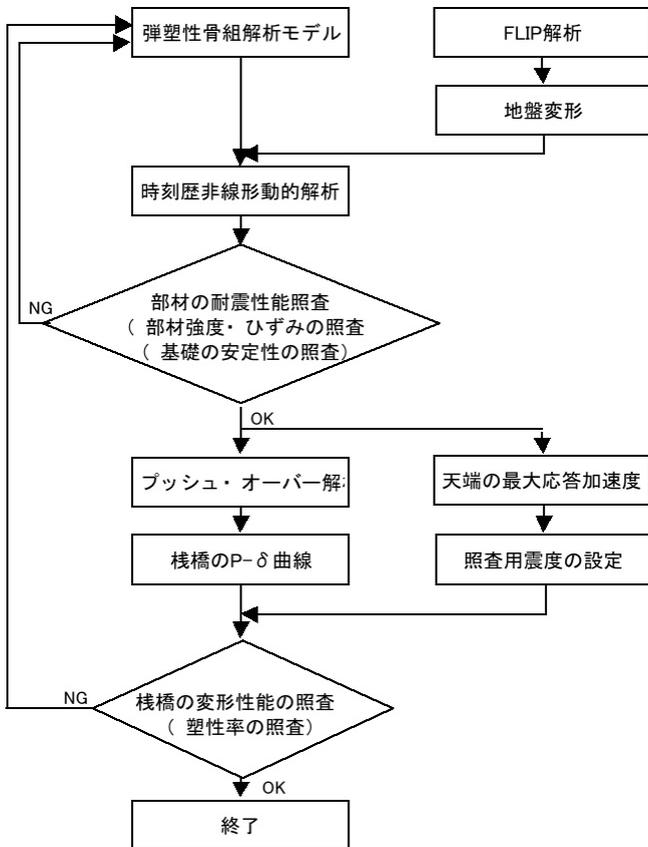


図7 耐震設計フロー

Fig.7 Seismic design flow

により多数の動的解析を効率的に実施した。

解析にあたっては対象に応じてジャケット3～14基をモデル化した詳細モデルを用いた(図8)。

動的解析では、FLIP解析により得られた地盤の応答変位波形を地盤バネを介して入力し、構造部材の強度等について照査を行った。

プッシュ・オーバー解析では、解析モデル天端に水平荷重を漸増荷重させて荷重-変位曲線(P-δ曲線)を求めた。栈橋の降伏点は荷重-変位曲線上の過半数の杭が全塑性モーメントに達した点から定義し、動的解析によって得られた栈橋天端の最大応答加速度を震度換算した照査用震度との比から応答塑性率を算出し、栈橋の変形性能を照査した。

代表的な箇所として、滑走路部での結果を表3に示す。

栈橋の固有周期は約1.8秒であり、ジャケットの部材配置および軟弱地盤の影響により、比較的長周期である。

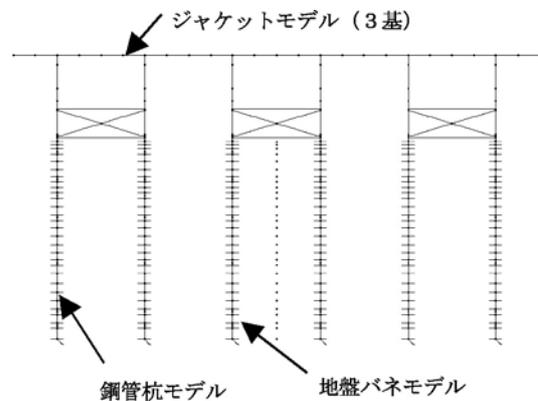


図8 耐震解析モデル

Fig.8 Seismic analysis model

表3 耐震設計結果

Table3 Result of seismic design

	八戸波 439gal		シナリオ波	
	滑走路平行方向	滑走路垂直方向	滑走路平行方向	滑走路垂直方向
固有周期	1.84秒	1.81秒	1.84秒	1.81秒
動的解析	最大天端変位	60.2cm	59.6cm	69.9cm
	最大応答加速度	245gal	245gal	267gal
プッシュ・オーバー解析	応答塑性率	1.18<1.3	1.20<1.3	1.29<2.5
			1.31<2.5	

3-4. 埋立-栈橋接続部の地盤の側方変形に対する検討

埋立と栈橋との接続部では、埋立地盤の施工中・供用中の圧密沈下による地盤の側方変形（水平変位）が0.3～0.5m程度生じる。そのため、接続部護岸前面のジャケット・杭も地盤変位の影響を受ける。このような地盤変形に対する解析については、前述のCAPを用いて、地盤変位を強制変位として地盤バネを介して構造モデルに作用させる応答変位法を用いた（図9）。これにより、地盤変形によるジャケット・杭への影響を精度よく評価することができた。

地盤の水平変位は、その8～9割程度が施工中に発生することから、施工期間中の地盤変形の影響を極力低減するため接続部前面の18列ジャケットとその隣接ジャケットの上部桁の連結時期を極力遅らせる施工法を採用した。

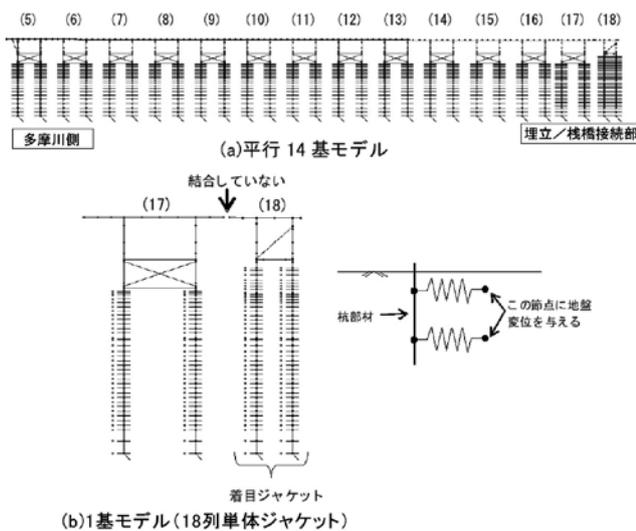


図9 埋立栈橋接続部ジャケット解析モデル
Fig.9 Analysis model of joint part of reclamation and pier

4. 製作技術

本件でのジャケット製作工事の特徴として、198基の栈橋ジャケット（うち約半数が当社製作）を約2年間で、羽田現地での施工工程に合わせ、製作工程を調整し、オンタイムでジャケットを供給していく必要がある（月産約8基強の定常生産が必須）ことが挙げられ、国内にとどまらず世界的にも、史上最大規模の、鋼構造製作プロジェクトと言える。また、全体製作作業量の8割が、上部ジャケットのH桁格子構造（上部桁）

の製作に集中するが、上部桁の溶接継手は、100年間の超長期の疲労耐久性確保のため、従来と比べて非常に厳しい溶接品質が要求され、アンダーカットや内部傷の許容値や超音波探傷時の検出レベルは、従来の一一般的な構造物でのレベルの2倍程度厳しいものが要求された。このため、ジャケット製作に当たっては、工程や品質を安定させつつ、これまでにない大量製作・出荷を行う必要があった。

4-1. 上部桁の製作

上部ジャケットの製作に当たっては、生産性向上と溶接を初めとする品質安定化を図るため、以下に示す取り組みを実施した。

- (1) 上部桁のフランジとウェブの溶接（首溶接）は、航空機の繰返し走行に対する疲労耐久性確保のため、完全溶け込み溶接が多用されている。この首溶接の生産性向上と品質の安定化のため、大電流タンデムSAW溶接法を導入し、ガウジングが不要なノンガウジング工法を確立した（図10）。導入に際しては、板厚変化部でも連続溶接を可能とするため、自動センシング機構を追加した。
- (2) 膨大なT継手の非破壊検査量への対応として、国内の鋼構造工事では初めて、超音波自動探傷装置（AUT）の本格的な大規模適用を実現し、検査効率の向上を図った。適用に当たり、AUTの性能確認試験を実施し、厳しい要求品質に対しても十分な探傷性能を有していることを確認した。
- (3) レグTOP等の重要部位では、国内鋼構造工事では初めて、疲労耐久性向上のため超音波打撃処理法（UIT）による溶接止端処理を実施している。UIT

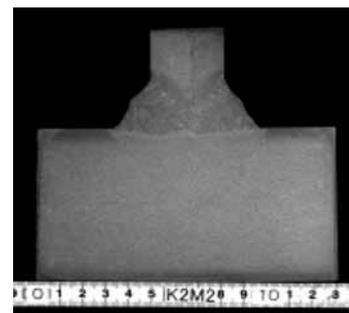


図10 大電流タンデムSAW溶接によるノンガウジング工法マクロ断面
Fig.10 The macro-section of the non-gouging method by high current SAW-welding

の本格的な導入に際して、機器の耐久性向上を図るとともに、UITの品質管理要領を確立し、品質の安定化を図った。

4-2. 下部ジャケット製作と上下部ジャケットの一体化

下部ジャケットの立体鋼管トラスの製作及び上下ジャケット一体化作業は、ヤード屋外作業の比率が高く、また、下部ジャケットの平面トラス組み立て、立体トラス組み立て、上下ジャケット一体化など各作業工程ごとの作業内容や作業環境が大きく変わるといふ特徴がある。製作に当たっては、作業効率向上を図るため、以下に示す取り組みを実施した。

- (1) 工場内作業となる鋼管端部のTKY切断は、君津製鉄所構内に最精鋭NC自動切断機を導入して実施することで、また、鋼管長尺作業は、君津鋼管工場の超高速長尺溶接ラインに委託することで、下部ジャケット製作ヤード（富津工場）における工場内作業を省略した。
- (2) 下部ジャケットの平面組み立て、立体組み立て及び上下ジャケット一体化などの生産工程毎の作業場所を固定ベッド化し、製作途中の半製品の構造を、ユニットドーリーにより、各作業場所間を移動させる連続ライン生産システムを確立した（図11）。海洋構造物のヤード生産において、上記のようなライン生産システムを導入したのは、国内では初めてである。
- (3) 高所作業を最小化するため上部ジャケットを一括搭載とした。一括搭載を行う場合、一般的には大型起重機船を用いるが、起重機船の備船可否による工程リスクを回避するため、海外での海洋プラットフォームデッキ搭載システムを参考に、新設の搭載架構+ウインチによる搭載システムを採用した。

4-3. 上部ジャケットの出荷・輸送・搬入（水切り）

上部ジャケット製作工場（若松工場）から下部ジャケット製作及び上下ジャケット一体化を行う富津工場までの上部ジャケットの出荷及び輸送効率を上げるために、上部ジャケットを2段積み重ねて出荷・輸送を実施した。また、起重機船を使用した場合の備船可否

リスク回避や出荷コスト削減のため、新設した段積み架構や一体化搭載架構利用による積み重ね・おろし及び、搬送用ユニットドーリーによる出荷・積み下ろしを実現した。



図11 ドーリーによる運搬

Fig.11 Transport by the dolly

5. 防食技術

5-1. 防食工法の選定

栈橋部は約52万㎡と広大な面積を占め、床版により全体を覆われており、飛来して部材に付着した塩分（海塩粒子が降雨によって洗浄されずに堆積するため、厳しい腐食環境が形成される。また、海上部であることから補修や塗装の塗り替えが容易ではない。加えて供用期間100年間という構造物としては異例の超長期の耐用が要求された。これらのことから、鋼材の防食工法は、供用中の維持管理を極力省力化でき、ライフサイクルコストが最小となるような仕様を選定した（図12）。

部位		腐食環境	防食工法
上部構造	桁内空間	内部空間	D-4 塗装+湿度管理
	桁下	海上大気部 (軒下部)	カバープレート(チタン)
レグ		海上大気部 (軒下部) 干満・飛沫帯	耐海水性ステンレス鋼ライニング
レグ・ブレース		海中部	電気防食(流電陽極方式)
鋼管杭		海中部 土中部	

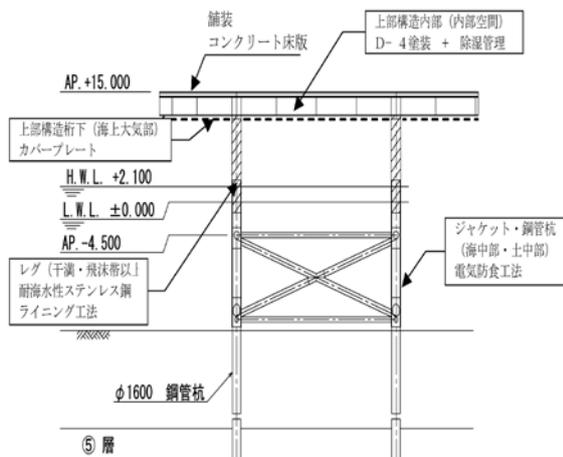


図 12 ジャケット各部の防食仕様

Fig.12 Specifications of anticorrosion

5-2. 上部鋼桁部の防食

上部鋼桁部の防食は、塗装のみによる防食が一般的であるが、15～30年程度で塗り替えが必要となる。しかし、全延長約200kmに及ぶ鋼桁を海上で塗り替えることは困難である。本構造では、鋼桁塗装の劣化を抑制するために、カバープレートで鋼桁全体を覆い、厳しい腐食環境を改善し、更に、除湿システムを導入して、外気の侵入と気温の変化によって生じる結露を防止している。

内部空間の鋼桁塗装は橋梁での実績の多い箱桁内面用変性エポキシ樹脂塗装(D-4 塗装)を適用した。

カバープレートの材料については、当初は鋼板に塗装を施した構造が計画されていたが、カバープレート自体の塗装の塗り替えが必要になってしまうという課題もあった。そこで、鋼橋のライフサイクルコストを最小化するため、当社で開発したチタンカバープレートを本栈橋に適用した。

チタンカバープレートは、図13に示すように外面に優れた耐食性を有するチタンを配置し、内面側の鋼板との間に軽量のポリソシアヌレート(PSI)の芯材を挟んだ構造で、鋼桁の腐食環境を改善する防食機能と維持管理時の足場機能及びカバープレート自体の100年間の耐久性の確保という要求される性能のすべてを実現できる構造である。

除湿システムは、カバープレート内部空間に除湿機と循環ファン、送気ダクトを設置し、内部空間の相対湿度を50%以下となるように乾燥空気を送気し、内部の湿度をコントロールし、塗装の劣化原因となる結露の発生を抑制することができる。このよう湿度制御による腐食抑制手法は、土木構造物においても国内外で事例はあるが、52万㎡に及ぶ広大な空間に適用することは初めての試みである。

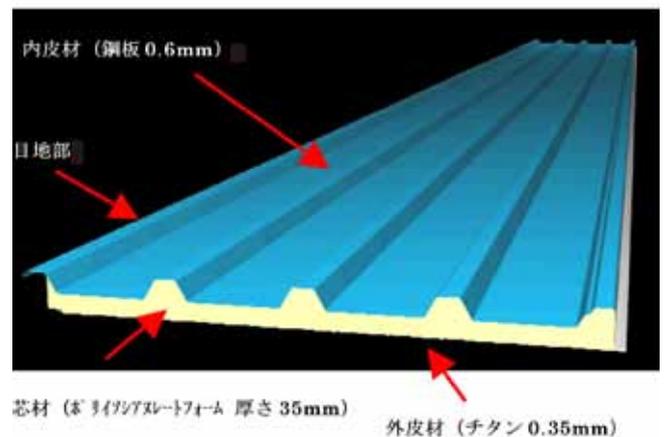


図 13 チタンカバープレートの構造

Fig.13 The titanium cover plate

5-3. 海上大気部～干満・飛沫帯の防食 (レグの防食)

干満・飛沫帯や桁下の大気部は補修等が困難であることから、他の防食被覆に比較して特に耐衝撃性、耐摩耗性に優れ、長期耐久性の確認された耐海水性ステンレス鋼による金属被覆を基本とした。

使用するステンレス鋼はSUS312Lであり、一般のステンレス鋼(SUS304系、SUS316L系)に対して、主にクロムやモリブデンを高めて耐孔食性や耐隙間腐食性

を向上させた、いわゆるスーパーステンレス鋼である。

本体構造の鋼材へのステンレス鋼の溶接方法については、ステンレス鋼の薄肉化、溶接の高速化・自動化およびステンレス鋼同士の重なり部の隙間構造の防止による耐久性向上が可能な、インダイレクト・シーム溶接とプラズマ溶接を組み合わせた複合溶接法を開発・適用した。インダイレクト・シーム溶接+プラズマ溶接を、1ランで達成する施工技術は、当社の差別化技術である。これにより、従来では、ステンレス鋼厚1.2mmが限界で、溶接工の技能に依存していた方法から、厚さ0.4mmのステンレス鋼への高速安定施工を実現した。(図14)

参考文献

- 1) 鋼道路橋の疲労設計指針 平成14年3月
(社)日本道路協会
- 2) 道路橋示方書・同解説 平成14年3月
(社)日本道路協会
- 3) ジャケット工法技術マニュアル 平成12年1月
(財)沿岸開発技術研究センター
- 4) Structural HOT-SPOT stress approach to fatigue analysis of welded components-designer's guide-. INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING



図14 ステンレスライニング部 (レグ部)

Fig.14 Stainless steel lining

5-4. 海中部・土中部の防食

海中部のジャケットおよび土中部の鋼管杭は、港湾施設に実績が豊富で信頼性が高い流電陽極方式の電気防食工法(陽極は3.5A型、設計寿命は35年)を採用した。

6. 結言

当社の、これまでの長年にわたるジャケット工法に関わる経験を土台に、新たな技術を加えて、本件ジャケットは成立した。今後も更なる技術向上に努めていきたい。