

D滑走路 栈橋部ジャケット構造の設計 ～大平面ジャケット式栈橋空港～

J V 工務・設計監理 Gr 関口太郎

新日鉄エンジニアリング 風野裕明、片山能輔

キーワード：大平面栈橋、ジャケット、温度影響、疲労設計、耐震設計、防食

1. まえがき

D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初めての試みとなる。本稿では、空港基盤施設としての設計上の留意点を整理し、設計上の対応について述べる。

2. ジャケット構造の概要と設計上の留意点

2-1 基本条件

栈橋部はD滑走路の多摩川側に位置し、幅約520m、長さ約1,100m、面積は約52万m²である。栈橋部の大部分が多摩川河口域内にあり、杭配置等に制約がある。建設地点の水深は沖合側がAP. -19m程度と最も深く、現空港側に向かって緩やかに浅くなり、連絡誘導路の取付部付近でAP. -14mである。地盤は表層20m程度が軟弱粘性土層となっており、杭基礎の支持層はAP. -80m付近に分布している。

採用した栈橋構造は、鋼桁上部構造及び鋼管トラス下部構造、基礎杭から成るジャケット構造で床版を支持する形式である。鋼桁天端高はAP. +11mから+14mであり、D滑走路路面の縦横断勾配に応じた勾配を設けている。

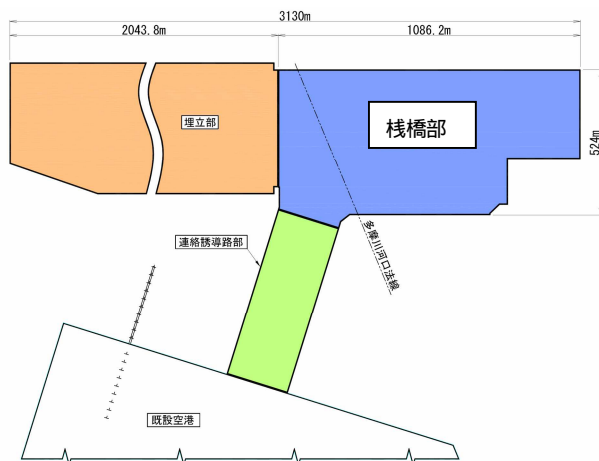


図2-1 D滑走路栈橋部

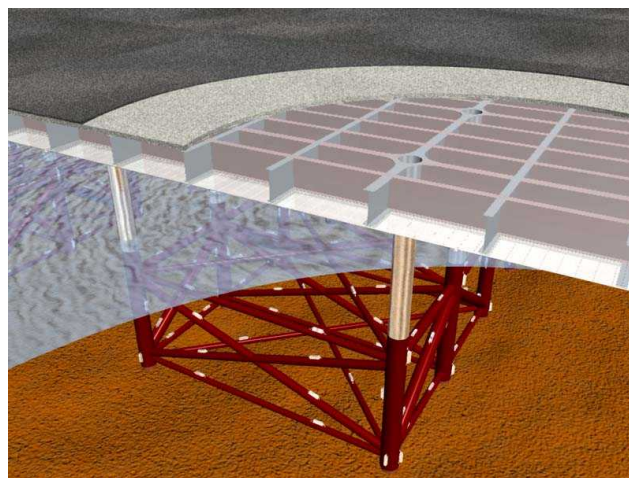


図2-2 ジャケット構造

2-2 設計上の留意点

D滑走路栈橋部の設計にあたり、特に留意すべき点を以下に示す。

多摩川の通水性を確保する下部構造の配置計画

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、「河川管理施設等構造令第8章橋の規定」に準拠する必要がある。

航空機の繰返し走行に対する変形抑制、疲労耐久性の確保

設計に考慮する最大の航空機荷重はA380-800(最大離陸重量400t)であり、一般の道路橋と比べて死荷重に対する活荷重比率が大きいため、走行時のたわみを抑制し、100年間の疲労耐久性を確

保可能な上部桁構造が求められる。

広大な栈橋構造に作用する温度変化影響の適切な考慮

栈橋部は構造の連続性重視の観点等から、全域を上下部一体構造として計画する。このため、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。

軟弱地盤上に建設される栈橋構造の耐震性確保

D滑走路の設計条件として、補正最大基盤加速度 439gal のレベル1地震動(八戸波、大船渡波)と、同 487gal のレベル2地震動(八戸波、大船渡波、シナリオ波)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。

100年間の設計供用期間を前提とした維持管理性

栈橋部は厳しい腐食環境となる海上部に建設されるため、適切な腐食対策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。

現空港の運用条件への構造上の配慮

栈橋部はA滑走路およびC滑走路の進入表面直下に位置するため、特に高度制限が厳しく、構造計画においても可能な限りの配慮が必要である。

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。

杭配置

多摩川の河川機能確保に基づく制約から、河口域内の杭は格子状に配置することとし、滑走路方向の杭間隔は、平均径間長の規定から許容される最小間隔である 31.5m とした。また、滑走路直角方向の杭間隔は、構造の合理性から 15m とした。杭本数は栈橋部全域で 1,165 本であり、杭径は所要の支持力を確保するため、1600 を中心とした。

杭は直杭とし、先行打設した杭に工場製作したジャケット構造をかぶせるように据え付ける施工法を前提とした。一般的なジャケット構造では、ジャケット据付後にジャケット上から杭を建て込み、打設するが、高度制限を受ける本建設地点においては、杭の先行打設方式が有利である。

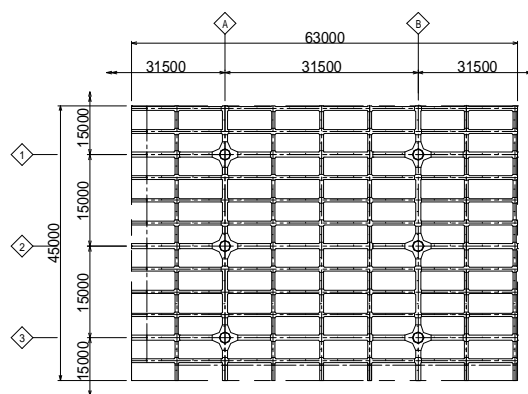


図 3-1 ジャケット構造の平面図

表 3-1 ジャケット構造の主要緒元

	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 1600 ~ 1960 ブレース 700 ~ 1422.4	約9万トン
基礎杭	1600 } 1422.5 } × 85 ~ 90m 1320.8 }	1,165本 約9万トン

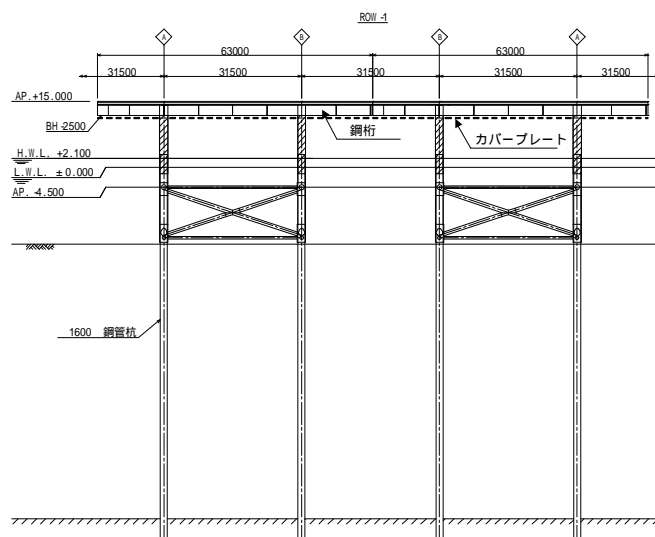


図 3-2 ジャケットの標準構造図(滑走路方向断面)

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 × 7,875mm 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 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。

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。

ジャケットの施工単位

できるだけ大ブロック化して据付回数の低減を図る一方で、利用可能な作業船や輸送台船の制約から、工場で製作されるジャケット 1 基の標準的な大きさを 63m × 45m（レグ 6 本配置）とした。栈橋部のジャケットは全 198 基であり、ジャケット 1 基分の最大吊り重量は約 1,650 トン（付属設備含む）である。据え付られたジャケットは、鋼桁同士を現地で結合することにより一体化される。

4. 常時の設計

4-1 航空機荷重に対する設計

航空機荷重には要求水準書にしたがって衝撃係数（滑走路部 0.4、誘導路部 0.3）を考慮した。部材断面力およびたわみ量の算出には、鋼桁およびジャケット鋼管部材を梁要素に置き換えた立体骨組モデルを使用した。PCa 床版部の滑走路方向桁は床版と鋼桁の合成桁として梁部材の剛性を評価し、その他の桁は非合成桁としてモデル化した。

航空機によるたわみ量は、滑走路部で 6mm（支持スパン比 1/2,500）、誘導路部で 6mm（同 1/2,500）と小さく、要求水準書に示された許容値を満足している。

4-2 疲労設計

疲労設計は図 4-2 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したがったが、公称応力による評価が困難な継手であるレグ頭部については、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。FEM 解析のモデル化およびホットスポット応力の算出方法は、要求水準書にしたがい、「Designer's Guide」（IIW-International Institute of Welding）の手法に準じた。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。なお、要求水準書にしたがい、水中部には疲労損傷度安全係数 3 を考慮した。

結果的に、大部分の部材が許容応力度および耐震性能確保の観点で断面が決定され、疲労照査により断面変更が必要となる部位はごく限定的であった。

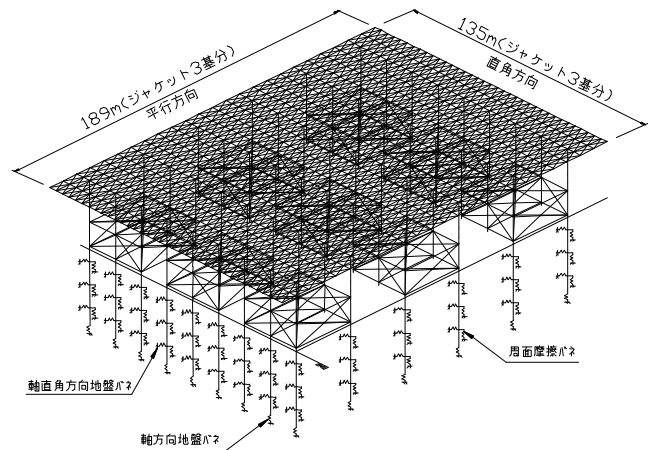


図 4-1 ジャケット構造の解析モデル図（常時）

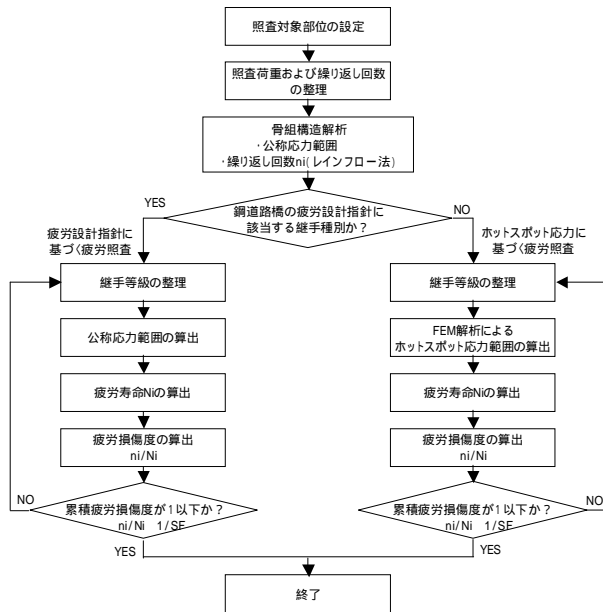


図 4-2 上部桁の疲労設計フロー

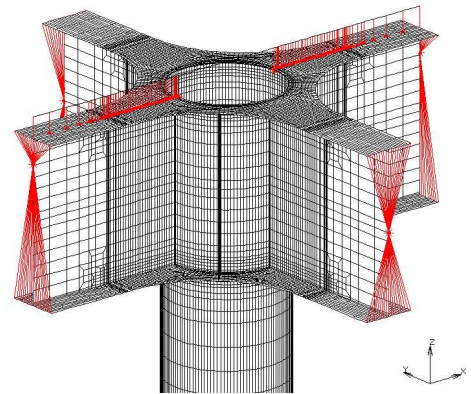


図 4-3 レグ頭部の FEM 解析モデル

4.3 温度変化の影響に対する設計

栈橋部は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に伸縮するが、下部ジャケットと剛結されているため変形が拘束され、不静定力が発生する。特に滑走路端安全区域部分は、温度変化による変形方向が栈橋本体ブロックと異なるため、その境界部に大きな温度応力が発生する。したがって、図 4-4 に示すように、この境界部には伸縮継手を配置して栈橋部を大きく二分し、各々のブロックが独立して変形できるように配慮した。

栈橋本体ブロックの大きさは 840m×520m であり、基準温度 (20) に対して +20 、 -30 の温度変化を考慮して設計を行った。-30 の温度変化による栈橋本体ブロック端部での変形量はおよそ片側 156mm である。一方、下部ジャケットの拘束が全くない場合の変形量は、鋼部材の線膨張係数 1.2×10^{-5} から以下のように計算される。

$$= \alpha \times T \times L = 1.2 \times 10^{-5} \times 30 \times 470.7 \times 1,000 = 169\text{mm}$$

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、表層地盤が軟弱であること、ジャケットがラーメン構造となっていることから、栈橋の平面方向の剛性が小さいことによる。これにより桁に生じる大きな温度応力を回避しているが、一方で上部構造の変形量が比較的大きいため、隣接する構造物との境界に配置した伸縮装置で対応できるようにしている。

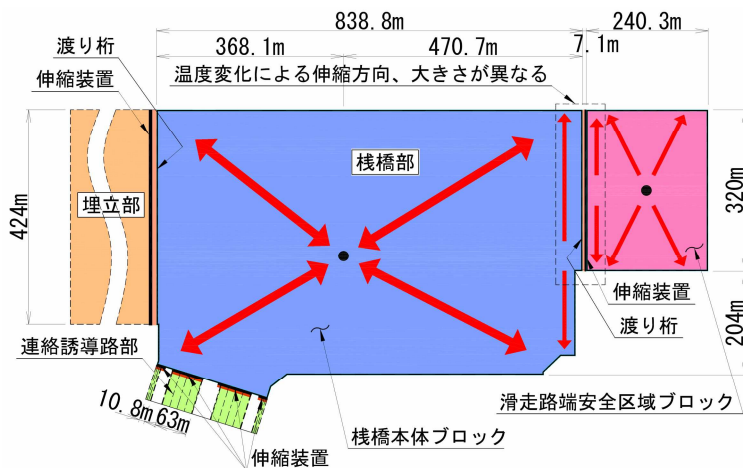


図 4-4 伸縮装置の配置

5. 地震時の設計

5-1 設計対象地震動と照査方針

設計対象地震動に対する照査方針を表5-1に示す。レベル1地震動に対しては、軽微な被害程度とし、航空機が直接走行する上部構造は弾性範囲内とした。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、栈橋が崩壊しないものとし、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。

表5-1 耐震照査方針

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・オーバー解析により照査

5-2 設計フローおよび解析手法

耐震設計は図5-1に示すフローにしたがって実施した。構造解析モデルには構造部材および地盤バネの非線形性を考慮した。使用した解析プログラムは「CAP」である。

動的解析では、別途実施した地盤応答解析（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载荷させて荷重変位曲線（P-曲線）を求めた。栈橋の降伏変位 y は、荷重変位曲線上で過半数の杭が全塑性モーメントに達した時点の栈橋天端変位として定義した。応答変位 a は、動的解析で得られた栈橋天端での最大応答加速度を震度換算した照査用震度とP-曲線から算出し、 a と y との比から応答塑性率を求め、栈橋の変形性能を照査した。

5-3 耐震照査結果

代表的な箇所として、滑走路部での結果を表5-2に示す。

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

レベル1地震動は八戸波がクリティカルであり、杭の海底面付近に塑性化が発生する。下部ジャケット部材の多くがこの地震動による部材強度の照査で決定されている。

レベル2地震動はシナリオ地震が最も厳しいが、部材の局部座屈および応答塑性率には余裕があり、この地震動で決定される部材は、埋立/栈橋接続部前面の杭など、ごく一部である。

表5-2 耐震照査結果（滑走路部）

		八戸波439gal		シナリオ波	
		滑走路平行方向	滑走路直角方向	滑走路平行方向	滑走路直角方向
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	49.9cm	69.9cm
	最大応答加速度	245gal	245gal	256gal	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

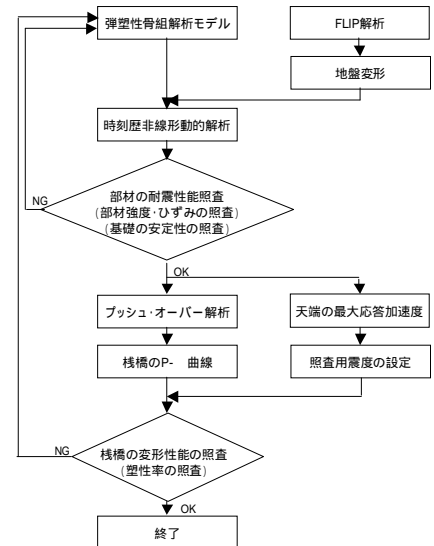


図5-1 耐震設計フロー

6. 杭の支持力

6-1 支持地盤の特徴

棧橋建設地点は、表層 20m 程度に厚い軟弱粘性土層（層）が堆積し、AP. -60m 付近までは粘性土層（層）である。この下に砂質土と粘性土の互層（層）が存在し、杭基礎の支持層となりうる S 層は AP. -80m 付近に存在する。S 層は N 値 50 以上の連続した砂質土であり、一部、砂礫層を介する。

6-2 設計支持力の設定

杭径が 1600 と大口径であるため、先端支持力の推定には十分な注意が必要である。

羽田空港の近傍で建設中である東京港臨海道路では、1500 の鋼管杭について鉛直載荷試験を実施しており、先端閉塞率を表 6-1 の通り設定している。杭径がほぼ同じで、類似の支持層と考えられることから、東京港臨海道路の載荷試験データを参考に、支持層に杭径の 3 倍の深さ根入れし、先端閉塞率を 50% と設定して支持力の照査を実施した。

なお、今後、現地で鉛直載荷試験を実施し、設計で想定した支持力の妥当性を確認することとしている。

表 6-1 東京港臨海道路での試験結果と棧橋部で採用した先端閉塞率

	臨海道路の載荷試験結果		D滑走路島棧橋部 (設計値)
	試験杭	試験杭	
杭径(mm)	1500	1500	1320.8 ~ 1600
支持層の種類	礫層	砂層	砂層・礫層
支持層への根入長	3D(4.5m)	3D(4.5m)	3D(4 ~ 4.8m)
先端閉塞率(%)	74	53	50

出典:「東京港臨海道路 大口径鋼管杭の載荷試験」基礎工2004.10

7. ジャケットと杭の接合部の設計

ジャケットと杭の接合部は一般に、溶接接合あるいはグラウト接合が用いられる。本棧橋では、杭頭が AP.+3m とジャケット天端よりも低いことを考慮して、グラウト接合を採用した。グラウト接合はジャケットレグと杭との隙間にセメントミルクあるいはモルタルを充填し、一体化する接合方法で、ずれ力が高めるために、ジャケットレグと杭のグラウト接合面にずれ止め（シアキー）を配置する。許容ずれ力は「ジャケット工法技術マニュアル」にしたがって設計し、シアキー設置範囲は杭に伝達する軸力に対応して約 5m (AP. -6m ~ -11m) とした。また、グラウト接合部は航空機荷重等の繰り返し作用を受けるため、疲労耐久性の照査を実施し、安全性を確認した。

標高 AP.	層名	土質	標高 AP.(m)	層厚 (m)	t (kN/m ²)	cu (kN/m ²)	N値	
-17.5	-H	覆土	-20.0	2.5	16.0	0.39	'h	-
-20.0	-C-1	粘性土	-30.0	10.0	13.5	0.39	'h	-
-30.0	-C-2	粘性土	-36.0	6.0	15.0	0.39	'h	-
-36.0	-C	粘性土	-60.0	24.0	18.0	0.50	'h	-
-60.0	-S	砂質土	-78.0	18.0	18.0	-	50	45
-78.0	-C-1	粘性土	-83.0	5.0	18.0	0.50	'h	-
-83.0	-S	砂質土	-100.0	20.0	20.0	-	50	45

図 6-1 D滑走路棧橋部の地盤（滑走路部）

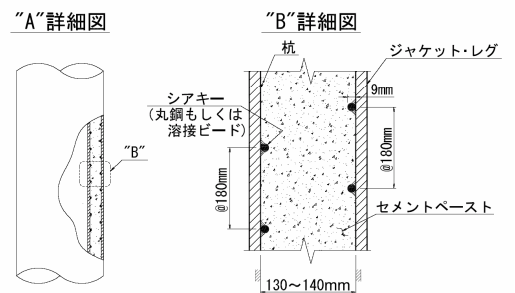
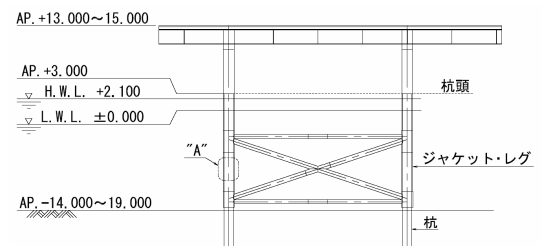


図 7-1 グラウト接合部

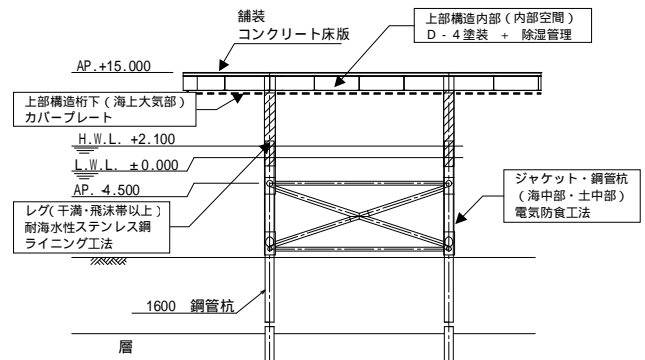
8. 防食設計

8-1 防食工法の選定

栈橋部は広大な床版により覆われており、飛来して付着した塩分（海塩粒子）が降雨によって洗浄されない厳しい腐食環境である。また、海上部であることから補修が容易ではない。これらのことから、鋼材の防食工法は長期耐久性を確保可能な仕様を優先的に選定した。

表 8-1 D滑走路栈橋ジャケットの適用防食工法

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)	耐海水性ステンレス鋼ライニング 干満・飛沫帯	耐海水性ステンレス鋼ライニング
	干満・飛沫帯		
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		



8-2 耐海水性ステンレス鋼ライニング

耐海水性ステンレス鋼ライニングは、構造用鋼材の表面を海洋環境での耐食性に優れた耐海水性ステンレス鋼で覆うライニング防食工法であり、他の防食被覆に比較して特に耐衝撃性、耐摩耗性に優れている。従来の重防食に比べて超長期の耐久性が期待できることから、近年、港湾施設での適用事例も増えてきている。

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の含有率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。

一般部の適用板厚は 0.4mm であり、一般の TIG 溶接では施工が困難であるため、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溶接法により施工する。

栈橋部への適用にあたっては、万が一の際の補修が確実に実施可能であることが求められるため、溶接補修試験を実施して確認を行った。

8-3 カバープレート

カバープレートは、広大な防食面積を有する上部鋼桁の腐食環境を改善する防食機能と、維持管理のための足場機能を併せ持ち、上部桁を覆うように鋼桁の下面と外周部側面に配置される。カバープレートの構造は、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ポリイソシアヌレート製の芯材を挟み込んだチタンパネルを採用した。チタンパネルはファスナーと呼ばれる軽量形鋼によって、鋼桁に吊り下げられる。チタンパネルは幅 1m、長さ 11m で製造され、パネル間は目地構造となっている。



図 8-1 耐海水性ステンレス鋼ライニング補修試験状況

栈橋部への適用にあたっては、適用事例の調査、パネルの曲げ強度試験、金具の耐力確認試験、目地部の確認試験、風洞試験による風荷重の評価、実物大のモックアップ試験による施工性確認など各種の検討を行い、所要の機能が確保されることを確認した。

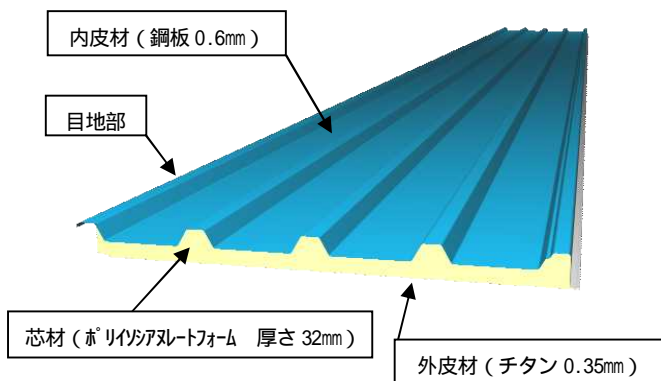


図 8-2 チタンパネルの構造



図 8-3 カバープレート モックアップ試験状況

8.4 桁内湿度管理

カバープレートによって覆われた桁内空間は腐食環境が大幅に改善されるが、外気の侵入と気温の変化により生じる結露によって、桁内塗装の劣化が予想される。結露の防止のために、除湿機と循環ファン、送気ダクト等からなる除湿システムを利用し、桁内空気の相対湿度を 50%以下にコントロールする防食工法を採用した。除湿システムの 1 区画は橋梁での事例を参考に決定し、栈橋部に 49 基(除湿能力 600m³/h)を配置した。

除湿システムの仕様決定にあたっては、建設地点の気象データを参照し、相対湿度 50%以下が確保できるよう、空調シミュレーション等による検討を実施した。また、送気ダクトを栈橋部全域に配置し、除湿機から排出される乾燥空気を強制送気することで、内部空間が均一な湿度となるように工夫している。

8.5 電気防食

海中部および土中部は、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を採用した。初期防食電流密度は、建設海域における水質調査結果等から、上層部 (AP. 2.0m 以上) を 130mA/m² とし、それ以下の海中部を 100mA/m² と設定した。

陽極の設計寿命は 35 年であり、栈橋部全体で 3.5A 型をおよそ 16,000 個設置する予定である。

9. あとがき

本文では、羽田空港 D 滑走路における栈橋ジャケット構造について、設計の留意点と設計概要について述べた。かつて例のない大規模な栈橋構造物であり、設計で想定した挙動と実構造物の差異等を確認するために、現地において、詳細土質調査や杭の載荷試験、ジャケットの振動特性の計測や施工時地震計測が予定されている。今後得られるこれらのデータを適切に設計にフィードバックし、施工に取り込むことにより、安全で機能性の高い基盤施設の建設に取り組む所存である。

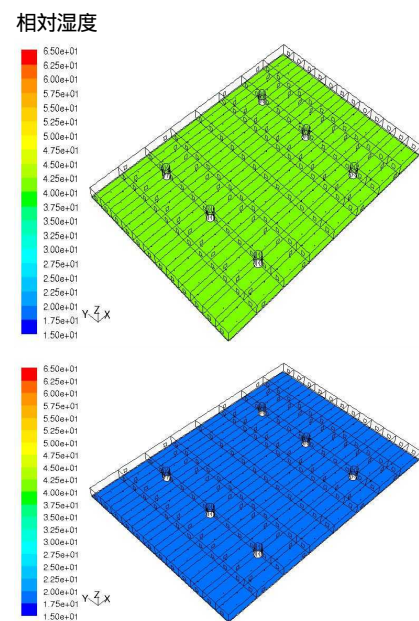


図 8-4 3次元空調シミュレーション例
(上段：初期状態、下段：48 時間後)