



た。

本事業の場合、適用した手法は、大きく3つの解析ステップに分類される。第1ステップでは、既往の気象擾乱（台風等）を選定し、海上風推算モデルにより気象擾乱時の沿岸や内湾の海上風場を推算する。第2ステップでは、海上風場を入力条件として、波浪推算モデル（WAM）により内湾・沿岸域の波浪場を計算領域のズームングにより、図-2.2に示す建設地点周辺の沖波浪諸元を算定した後に、極値統計処理を行い、2年、10年、100年確率期待値に相当する確率波高を設定する。第3ステップでは、確率沖波（波高、周期、周波数スペクトル、方向分布関数）を入力条件として、波の反射及び回折効果が考慮できるエネルギー平衡方程式を用いて設計条件の提示地点における波浪条件（波高、周期、波向、方向スペクトル）を設定する。

### 2.3 波浪条件の設定

本節では、今回の波浪条件の設定に使用した気象擾乱の内容（第1ステップ）、WAMによる波浪推算結果と実測値（東京灯標）との比較による検証結果（第2ステップ）、WAMによる波浪推算結果を用いた確率沖波の設定方法（第2ステップ）、エネルギー平衡方程式による波浪推算結果の概要（第3ステップ）を示し、最後に設計代表点における波浪条件の提示結果について示す。

#### （1）計算に用いた気象擾乱

計算対象とする気象擾乱として、東京灯標の観測期間（1969～2002年）から、1/10最大波高が2.3m以上の事例（47事例）を抽出した。それ以前の期間（1950～1968年）では、羽田付近に高波高をもたらしたと推定される経路（直撃コース、当該地域の北を通るコース）をとった台風を抽出し、その中から東京（大手町）の風の観測値の上位6位を選択し、合わせて53事例を選定した。

#### （2）WAMによる波浪推算結果と実測値（東京灯標）との比較による検証

WAMによる波浪推算結果の妥当性を確認するため、東京灯標の実測データと波浪推算結果のうち、最大波高についての比較を行った。全推算データ（毎時）と実測値との相関を図-2.3(a)に、推算値と実測値それぞれの一気象擾乱中の最大波高の相関を図-2.3(b)に示す。これらの図から、推算値と実測値については、特に波高が大きい場合に相関が高くなる傾向にあり、最大波高についてWAMによる推算結果の妥当性が確認された。なお、実際に推算結果を使用する際には、東京灯標におけるピークデータでの回帰係数0.97で補正を行うこととした。



図-2.1 波浪推算フロー

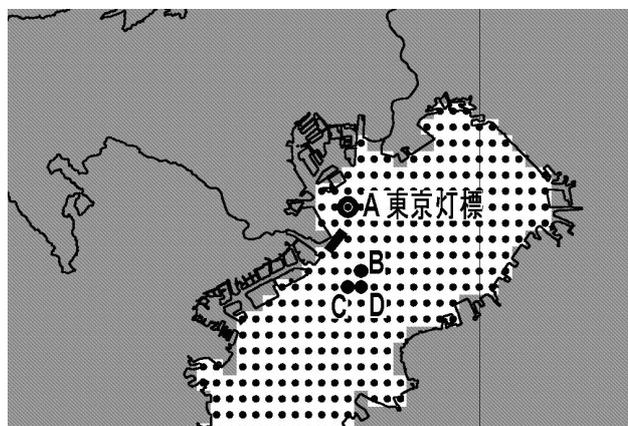


図-2.2 計算結果出力ポイント（WAM）

### (3) WAMによる波浪推算結果を用いた確率波高の設定

WAM の計算結果については、エネルギー平衡方程式による波浪変形計算における入力条件(確率沖波)として使用されるため、エネルギー平衡方程式による解析領域の境界位置における波向別の確率沖波が必要である。

WAMにより53個の気象擾乱毎に波浪推算を行い、図2.2に示した出力地点A,B,C,D毎に沖波波高の極値統計を実施した。D滑走路に最も近接するポイントBの整理結果を表-2.1に示す。同表に示すように、当該海域において高波浪をもたらす波向きはS方向である。そこで後述するエネルギー平衡方程式による波浪変形計算結果については、波向きSを例示する。

### (4) スペクトルの検討

東京灯標の観測データから得られたスペクトル形状から、当該海域におけるスペクトルの標準型への適合性を検討した。当該海域は、内湾の湾奥に位置し吹走距離が短いことから、標準型は有限吹走距離で観測された風波の標準スペクトルであるJONSWAPを採用した。JONSWAPスペクトルの形状はピーク強調係数により特徴づけられるため、ここでは、当該海域に適合したピーク強調係数を算出し、算出された $\gamma=6.0$ を用いて修正JONSWAP型スペクトル(図中:赤線)を求めた事例を図2.4に示す。このスペクトルをエネルギー平衡方程式への入力条件とした。

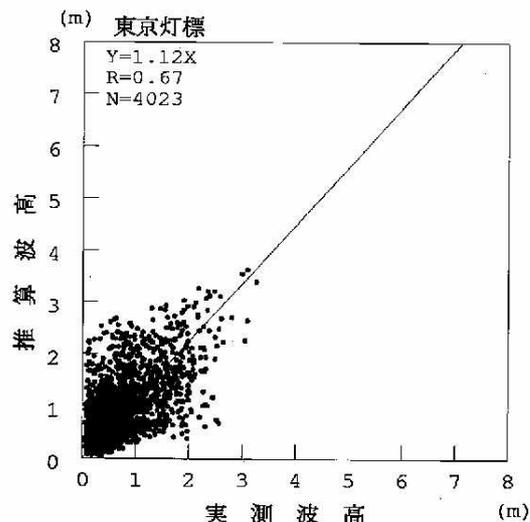


図-2.3(a) 実測値と推算値の散布図(全推算データ(毎時))

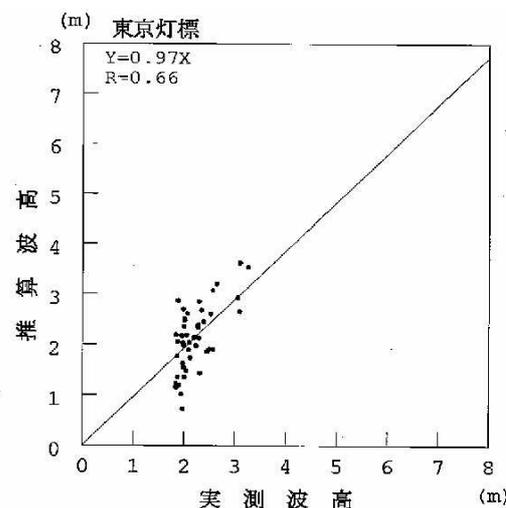


図-2.3(b)

実測値と推算値の散布図(ピーク時)

表-2.1 ポイントBにおける確率波高

年		E	ESE	SE	SSE	S	SSW
2	波高(m)	1.11	1.13	0.86	1.14	2.07	1.99
	周期(S)	4.22	4.25	3.72	4.27	5.76	5.65
10	波高(m)	1.80	2.09	1.71	1.89	2.97	2.55
	周期(S)	5.37	5.79	5.24	5.50	6.90	6.39
100	波高(m)	3.16	3.26	2.77	2.51	4.17	3.16
	周期(S)	7.12	7.23	6.66	6.35	8.17	7.12
200	波高(m)	3.73	3.57	2.98	2.62	4.58	3.32
	周期(S)	7.73	7.56	6.91	6.48	8.57	7.29

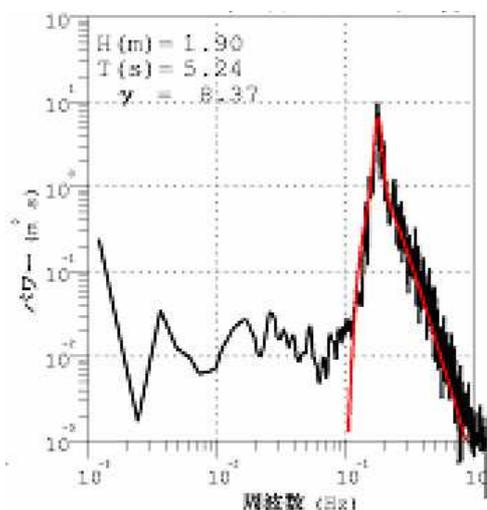


図-2.4 スペクトル図

### (5) 出力地点の波浪条件の計算手法

WAM により算出した確率波（波高、周期、周波数スペクトル、方向分布関数）を入力波としてエネルギー平衡方程式により出力地点の波浪条件を算出する。図 - 2.5. に波浪条件の出力地点を示す。図に示すように波浪条件は、護岸等の施工時の安定計算において波浪諸元を通過波として設定する必要があることからD滑走路島がない状態で算定した。なお、海底地形については、本検討を実施した時点における地形であり、入札公告時に提示したものと異なる。

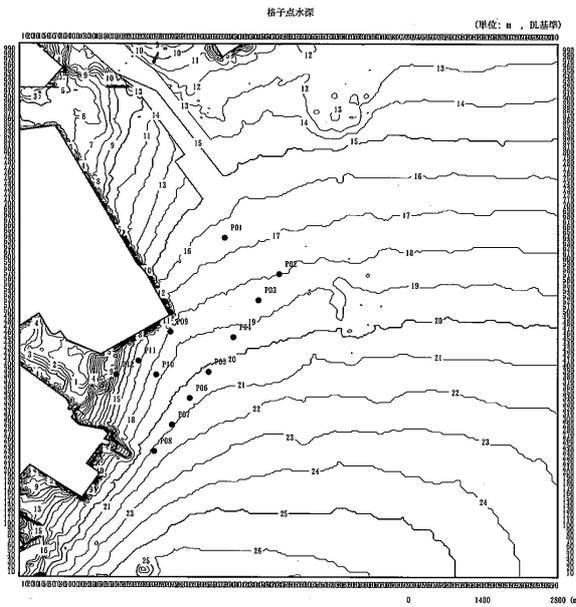


図 - 2.5 波浪条件出力地点

### 2.4 波浪条件設定結果

代表地点5（滑走路中心部）の風波の波浪変形計算結果を表 - 2.2 に示す。また暴風時（100年確率）におけるS方向の風波の波高比分布及び卓越波向き分布をそれぞれ図 - 2.6, 図 - 2.7 に示す。D滑走路島建設予定海域においてS方向からの卓越波向きが殆ど回折せず直進することから、波エネルギーの減衰もなく波高比が低減しないことが確認できる。地点5における波浪変形計算後の周波数スペクトル及び方向スペクトルを図 - 2.8, 2.9 に示す。周波数スペクトルは波浪変形後にもエネルギー減衰が見られず、先に示した波高比分布と同様に殆ど減衰していないことが確認できる。なお、図 - 2.9 に示す方向分布において2つの山が見えるのは、主波向きS方向と同時に既設空港側からの反射波の影響によるものである。

表 - 2.2 風波の設計条件

分類		設計条件
波高・波浪	供用時	代表波 $H_{1/3}=1.97\text{m}$ 、 $T_{1/3}=5.9\text{s}$ 、 卓越波向=180°
	施工時	代表波 $H_{1/3}=2.78\text{m}$ 、 $T_{1/3}=6.9\text{s}$ 、 卓越波向=180°
	暴風時	代表波 $H_{1/3}=4.15\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8.3\text{s}$ 、 卓越波向=180°
波向		東京湾の地形を含め提示条件に基づき、提案する工法や構造形状、寸法等により、もっとも危険となる方向を選定すること。

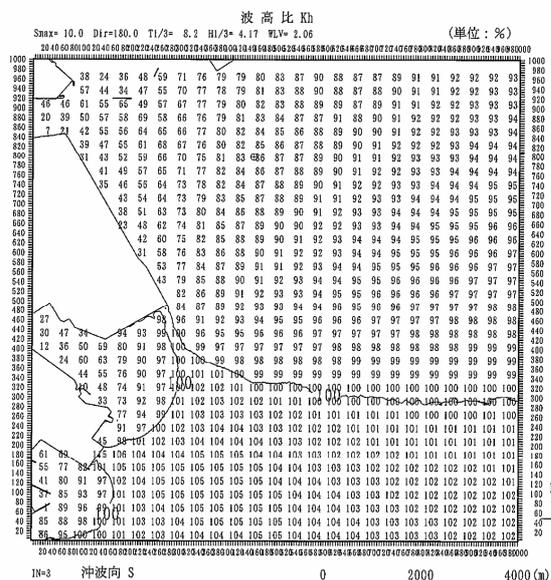


図 - 2.6 波高比分布図 (S方向)

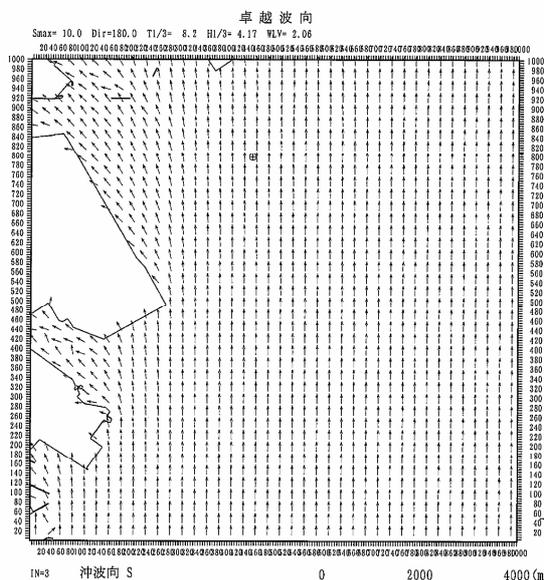


図 - 2.7 卓越波向分布図 (S方向)

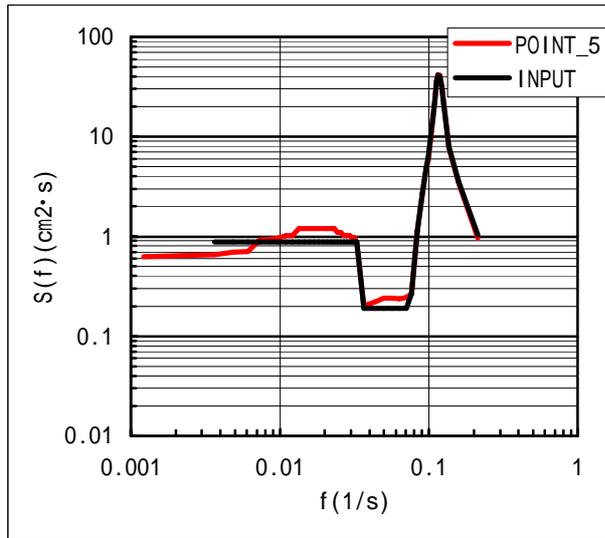


図 - 2 . 8 周波数スペクトル(沖波向S、地点5)

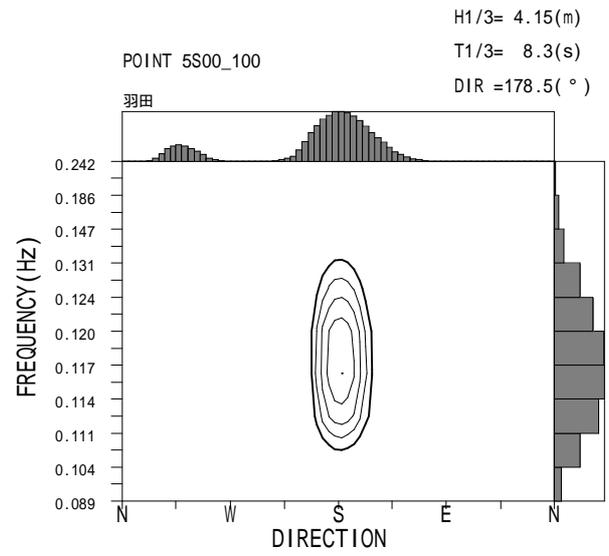


図 - 2 . 9 方向スペクトル(沖波向S、地点5)

### 3 . 滑走路の平坦性

本章では、航空機の安全な走行を確保するために設定した滑走路の平坦性に係るしきい値（滑走路のたわみ量、段差量）の設定方法・内容について述べる。

#### (1) 検討方法

航空機の操縦性及び乗り心地のしきい値を設定する検討フローを図 - 3 . 1 に示す。本検討では、図 - 3 . 1 に示すように、航空機が任意形状の滑走路を走行した際の鉛直応答加速度を再現可能である解析プログラム<sup>3) 4) 5)</sup>を利用し、解析から得られた航空機の鉛直応答加速度をアライのフライトシミュレータで再現し（写真 - 3 . 1 参照。）被験者となったパイロットにアンケート調査を行って操縦性のしきい値を設定した。しきい値の設定に際しては、他機関の基準及び類似構造空港の実績も参考としている。以下にその概要を示す。

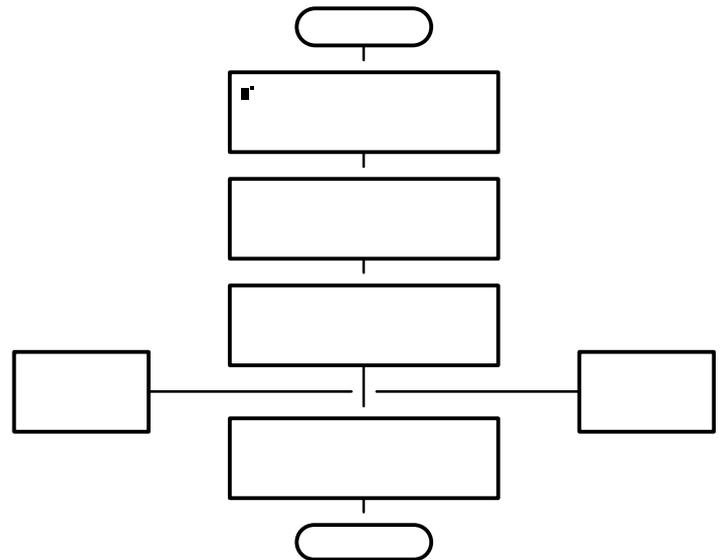


図 - 3 . 1 全体の検討フロー

#### 1) プログラムアプスによるシミュレーション

「たわみ」、「段差」による航空機の鉛直加速度をプログラムアプスを使ったシミュレーション計算で求めた。

#### 2) フライトシミュレータによる操縦性の事前検証

プログラムアプスによる計算値（航空機の鉛直加速度）が実際の運航時の操縦性を再現していることを検証するために、まず、C滑走路の路面形状をアプスに取り込み、航空機の鉛直加速度を計算した。次に、計算した鉛直加速度をフライトシミュレータに入力し、パイロットにフライトシミュレータを体験してもらい、C滑走路走行時とフライトシミュレータ再現時における操縦性の評価の比較を行った。なお、アプス計算値は、実際の航空機に搭載されている飛行データ記録装置による計測値（C滑走路における鉛直加速度）に比べて約2倍の値となっていることが確認されたことから、たわみに関する模擬飛行の場合には、フライトシミュレータに入力するデータはアプス計算値に0.5の補正係数を乗じた数値を使用することとした。段差については補正係数を求める実際の計測値（鉛直加速度）がないことからアプス計算値をそのまま使用した。

C滑走路の模擬飛行の結果、フライトシミュレータによる操縦性の評価は、パイロットが実際にC滑走路を離着陸している際に感じている操縦性よりも、やや厳しい評価（安全側の評価）であったが、概ね実際の航空機の操縦性を評価していることが確認された。



写真 - 3 . 1

フライトシミュレータによる操縦性及び乗り心地再現

#### (2) 滑走路平坦性に係るしきい値（たわみ量、段差）の設定

滑走路の平坦性に係るしきい値（たわみ量、段差）を設定するために、異なる大きさのたわみ量や段差等に対する模擬飛行を以下に示す機種を対象に実施した。シミュレータ調査は、民間エアラインのパイロットを中心に各機種毎に6名、8名を対象として実施した。以下に、しきい値（たわみ量、段差）の設定方法を示す。

・対象機種： DC 9-81 型機、B747-400 型機

・シミュレータ調査参加者

DC 9-81 : 民間エアライン機長 6名

B747-400 : 民間エアライン機長 6名、 航空局 運航審査官 2名

### 滑走路のたわみに関するしきい値

たわみ量は、図-3.2に示すとおり、航空機の走行時に発生する支間長(L)の中央部におけるたわみ量( )で定義される量である。アプラスによる解析では、路面形状をサインカーブとして与えている。栈橋部の支間長を想定し、15m及び30mについて検討を実施した。フライトシミュレータの結果は、パイロットから表-3.1に示す操縦性に関する評価区分を提出してもらうことにより評価した。

図3.3に、支間長15mの離陸・着陸時における大型機B747と小型機DC9のパイロットによる評価指数の平均値と規定値(たわみ/支間長L)の関係を示す。図3.3において、操縦性を対象とし、「問題なし」と「やや困難」の中間値である3.5を評価指数の合格ラインとしてたわみの許容値(最大限許容される値)を求めると、離陸時の条件により、 $=L/1000$ がたわみの許容値であることが分かる。同様な方法により設定した、滑走路のたわみに関する許容値(許容たわみ量/支間長L)を表3.2に示す。

図-3.4に現役航空会社のパイロットによるフライトシミュレータの結果をもとにした滑走路たわみのしきい値を他基準と比較して示す。ここに、60m支間におけるフライトシミュレータは実施してはいないが、他の基準を勘案して、60m以上の支間のたわみは3.0cm以下とした。



図-3.2 たわみのイメージ

表-3.1 操縦性の4段階評価

4段階評価		評価点
A	問題なし	4
B	やや困難	3
C	困難	2
D	著しく困難	1

表-3.2 滑走路の規定値  
(許容たわみ量/支間長L)

検討ケース	両機種	DC9	B747
15m 離陸	1/1000	1/1000	1/900
15m 着陸	1/500	1/500	1/500
30m 離陸	1/1850	1/1800	1/2000
30m 着陸	1/1550	1/1500	1/1650

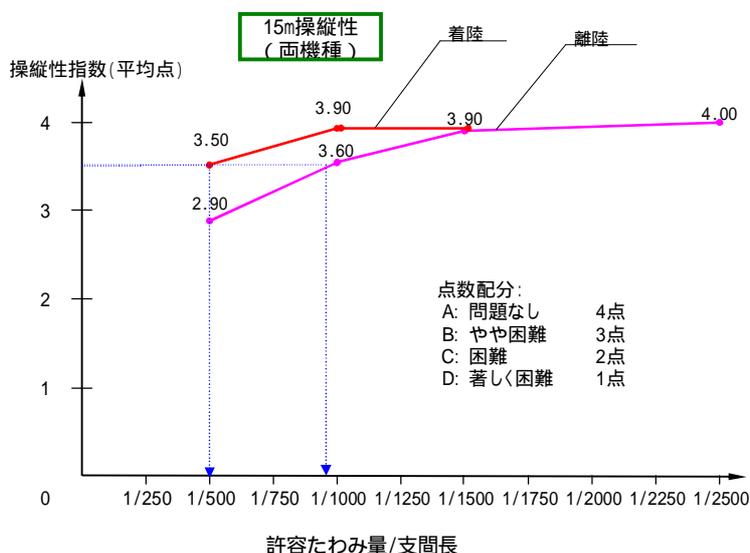


図 3.3 支間長15m離着陸時シミュレータ評価(両機種)

#### 離陸時

	A	B	C	D	合計	平均
1/500	1	5	2	0	23	2.90
1/1000	9	5	0	0	51	3.60
1/1500	12	2	0	0	54	3.90
1/2500	6	0	0	0	24	4.00

#### 着陸時

	A	B	C	D	合計	平均
1/500	7	7	0	0	49	3.50
1/1000	13	1	0	0	55	3.90
1/1500	13	1	0	0	55	3.90

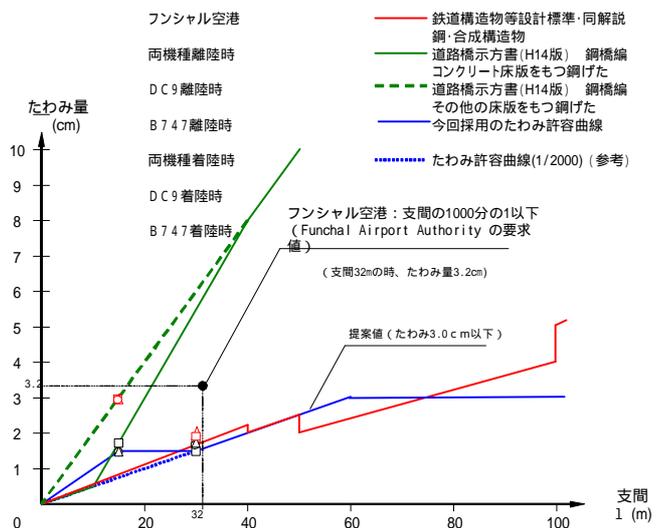


図 - 3 . 4 滑走路たわみしきい値と他類似基準との比較

滑走路の段差に関するしきい値

許容段差は、図 - 3 . 5 に示すとおり、滑走路における直壁状態の段差量で定義される量である。検討ケースは、段差量 1、2、4 cm の 3 種類とした。図 - 3 . 6 にたわみと同様の方法で計算した段差のシミュレータ評価を示す。

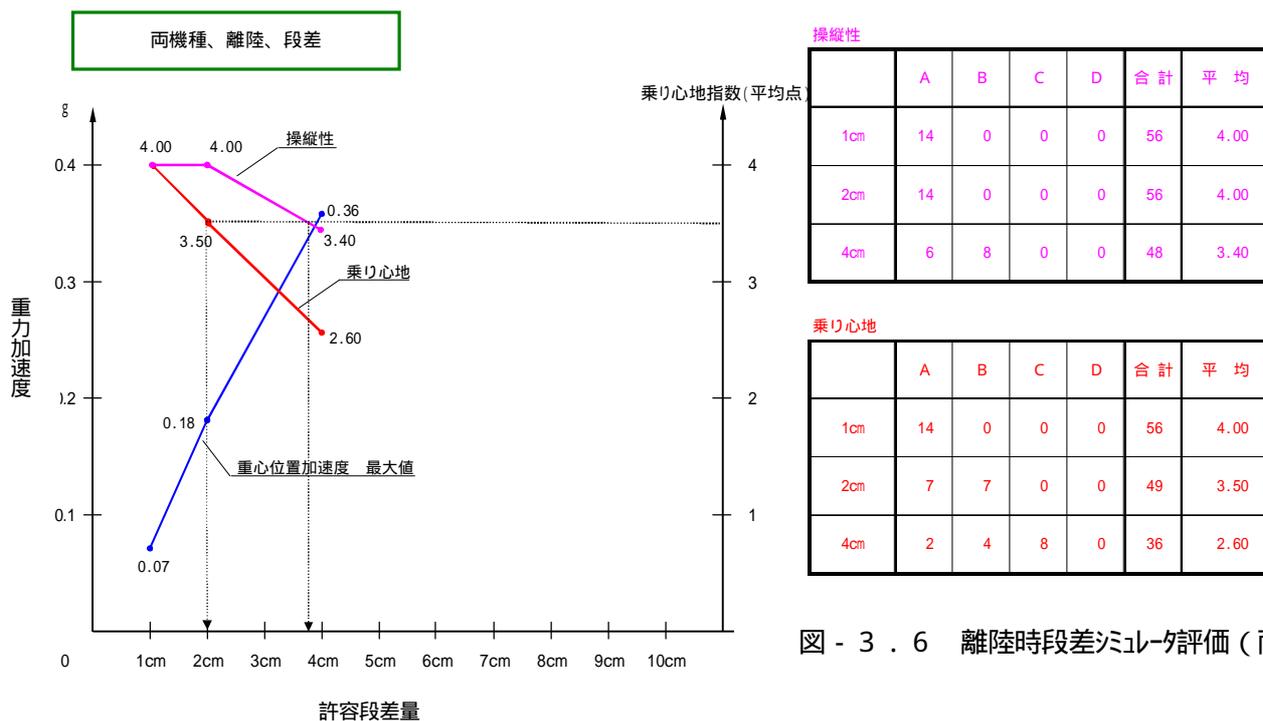
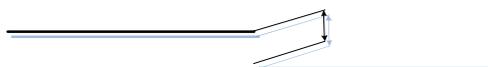


図 - 3 . 6 離陸時段差シミュレータ評価 (両機種)

表 - 3 . 3 に整理した許容段差量（最大限許容される段差量）の一覧を示す。この結果より、操縦性の観点から滑走路上で許容される最大段差量は、概ね 3.0 cm 以下となる。

**（４）まとめ（たわみ、段差のしきい値）**

滑走路の段差フライトシミュレータ実験アンケートから得られた許容段差量 3.0cm と類似基準との比較を表 - 3 . 4 に示す。他類似基準には、空港舗装補修要領(案)（平成 11 年 4 月運輸省航空局）のように厳しいしきい値が定められているものもあるが、今回はフンシヤル空港の伸縮装置（ローリングリーフ式継手）周辺における実績（2.0 cm の段差は走行性に影響が出ていないことをヒアリングで確認）を参考として、伸縮装置の場合には 2.0 cm を許容段差量とした。

表 - 3 . 4 段差しきい値の比較

滑走路の段差位置	フライトシミュレータ実験	空港舗装補修要領(案)	フンシヤル空港の実績
伸縮装置部	3.0 cm	-	2.0 cm
舗装部	-	1.0 cm	-

今回の設計条件として採用した、たわみ及び段差のしきい値を表 - 3 . 5（左欄）に示す。

表 - 3 . 5 設計条件としてのしきい値

提案事項	類似基準類(参考値)		既往事例
	鉄道構造物等設計標準 (新幹線)	道路橋示方書(鋼桁)	
滑走路たわみしきい値			ホルトガルフンシヤル空港
支間長 L (m) 15.0m 許容たわみ量 =L/1000	0 < L 40m =L/1800	L 10m =L/2000	=L/1000
15.0m < L 30.0m 許容たわみ量 =1.5cm	40m < L 50m =L/2000	10m < L 40m =L/20000L	
30.0m < L 60.0m 許容たわみ量 =L/2000	50m < L < 100m =L/2500	40m < L =L/500	
60.0m < L 許容たわみ量 =3.0cm	100m L =L/2000		
段差しきい値	空港舗装補修要領(案)		
滑走路 2.0cm 以下	1.0 cm		2.0cm 以下

## 4. 鋼構造物の疲労設計

鋼構造部材の疲労設計については、「工法評価選定会議」で選定された栈橋構造、埋立・栈橋組合せ構造、浮体構造の3工法について適用することを前提に、どの工法においても共通した検討方法となるように設定している。

本章では、栈橋構造の各溶接継手部の疲労検討における支配荷重である航空機荷重を対象とした疲労設計の基本的な考え方について、要求水準書に規定した内容を紹介する。

### 4.1 疲労設計の基本的考え方

#### (1) 適用基準

鋼構造物の疲労設計は、板構造については「鋼道路橋の疲労設計指針(H14.3, (財)日本道路協会)」、管構造については「ジャケット工法技術マニュアル(H12.1, (財)沿岸開発技術研究センター)」によることを基本としている。栈橋構造の場合、上部桁等の鋼道路橋に類似する箇所については、「鋼道路橋の疲労設計指針」の適用を、下部構造(鋼管トラス構造)については、「ジャケット工法技術マニュアル」の適用を要求している。また、継手形状等の構造詳細についても、上記の指針及びマニュアルを基本としている。

#### (2) 対象期間・対象荷重

疲労照査の対象荷重について、施工中も含め100年間の供用期間中に作用する全ての繰返し作用荷重を要求している。栈橋構造では、下表(表-4.1)に示す荷重を考慮した疲労照査を標準として規定している。

表-4.1 疲労照査における対象荷重

施工中	供用時
・製作時(工場組立, 運搬) ・曳航時(ジャケット構造曳航時) ・施工時(風荷重, 波浪)など	・活荷重(航空機荷重, 自動車荷重) ・風荷重 ・波浪荷重など

### 4.2 疲労照査方法

疲労照査の基本的な手順は以下に示すとおりである。本節では、下記及びについて、基本的な考え方を示す。

荷重条件(繰返し回数も含む)の設定

各対象荷重別に継手部で発生する応力振幅の算定

累積疲労損傷度の算定

疲労損傷度の照査

#### (1) 応力振幅及び累積疲労損傷度の算定( , )

4.1に示したとおり、栈橋構造の疲労設計は板構造と管構造に分類して適用基準等を使い分けて分類しているため、継手部で発生する応力振幅の算定は、板構造と管構造にわけられる。

##### 1) 栈橋構造の上部桁等の板構造 (「鋼道路橋の疲労設計指針(H14.3, (財)日本道路協会)」)

板構造については、「鋼道路橋の疲労設計指針」において等級分類された構造詳細を有する継手で、公称応力による疲労検討が適切と判断される場合は、同指針に基づき疲労照査を実施することとしている。但し、以下に示す場合は、局所応力解析(ホットスポット解析)を実施し、溶接継手部周辺における発生応力を適切に算定し、疲労照査を実施することとしている。なお、ホットスポット解析の内容については、4.4で述べる。

- ・「鋼道路橋の疲労設計指針」において等級分類された構造詳細に該当しない継手を使用する場合には、ホットスポット解析を行い、継手の疲労検討を行う。
- ・「鋼道路橋の疲労設計指針」で等級分類された継手であっても、主応力の方向、あるいは主応力の大き

さと方向が変化する場合には、ホットスポット解析を行い、継手の疲労検討を行う。

各荷重作用に対する疲労損傷度については、「鋼道路橋の疲労設計指針」において等級分類された構造詳細に該当する継手を用い、公称応力による取り扱いが可能な場合には、疲労設計曲線（S-N線図）は、「鋼道路橋の疲労設計指針」に規定されている曲線を用いて算出する（図-4.1）また、ホットスポット解析により発生応力を算定した場合は、「鋼道路橋の疲労設計指針」の疲労設計曲線（S-N曲線）におけるD等級（仕上げ）E等級（非仕上げ）を適用するものとした。累積疲労損傷度については、各荷重毎に算定された疲労損傷度をマイナー則に従い加算して算定する（下式参照）。

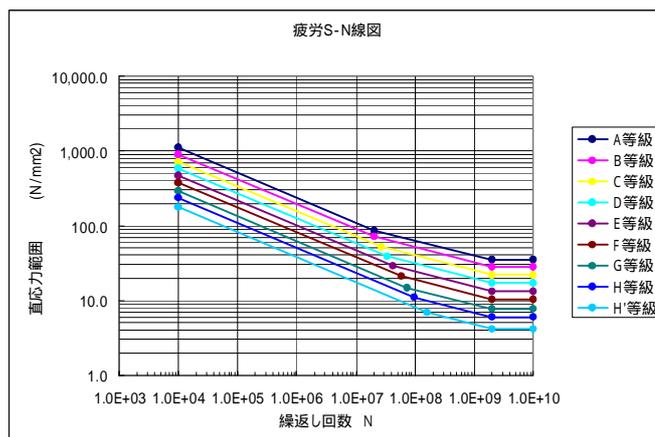


図-4.1 疲労設計曲線（S-N図）  
（「鋼道路橋の疲労設計指針」より）

$$D = (n_i / N_i)$$

D : 累積疲労損傷度（1となったときに疲労破壊が生じる。）

$n_i$  : 応力範囲頻度分布のうち、ある応力範囲レベルを  $\sigma_i$  としたときの頻度

$N_i$  :  $\sigma_i$  のみが繰返し作用したときの疲労寿命

$n_i / N_i$  :  $\sigma_i$  が  $n_i$  回繰返されたときの疲労損傷度

## 2) 管構造「ジャケット工法技術マニュアル（H12.1, (財)沿岸開発技術研究センター）」

管構造については、「ジャケット工法技術マニュアル」に基づき疲労照査を実施することとしている。同マニュアルでは、断面急変部である鋼管格点部において応力集中が発生することから、鋼管格点部の溶接部におけるホットスポット応力に対する疲労設計曲線を用いて疲労設計を行うこととしている。

鋼管格点部のホットスポット応力（局所的な応力集中）については、支管の公称応力（骨組み解析によって得られる部材断面力と部材断面係数から算出される部材応力）に応力集中係数を乗じることにより求めることが出来る（図-4.2及び下式参照）。応力集中係数は、米国保健省健康安全局 HSE (Health and Safety Executive, UK) の第4版基準に基づき、各鋼管点部の形状及び荷重状態毎の係数が提示されているものを用いる。

$$H = H(\max) - H(\min)$$

$$H = (SCF) \cdot N$$

ここに、

H : ホットスポット応力の変動幅 (N/mm<sup>2</sup>)

H : ホットスポット応力 (N/mm<sup>2</sup>)

N : 支管の公称応力 (N/mm<sup>2</sup>)

(SCF) : 応力集中係数

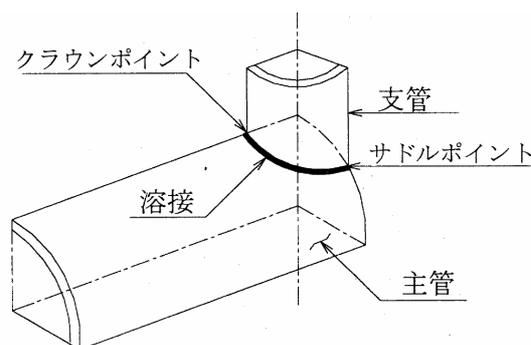


図-4.2 鋼管格点部概念図  
（「ジャケット工法技術マニュアル」より）

鋼管格点部の疲労設計に用いる疲労設計曲線は、HSEに規定される曲線を適用する。設計曲線は、腐食環境（大気中／海水中）及び電気防食の有無により異なる曲線を与えている（図-4.3）。累積疲労損傷度については、板構造と同様の方法で算定する。

## （2）疲労損傷度の照査（ ）

疲労損傷度の照査は、下式に示す疲労損傷度安全係数により安全性の照査を実施する。

$$= 1/D$$

：累積疲労損傷度安全係数

D 　：累積疲労損傷度

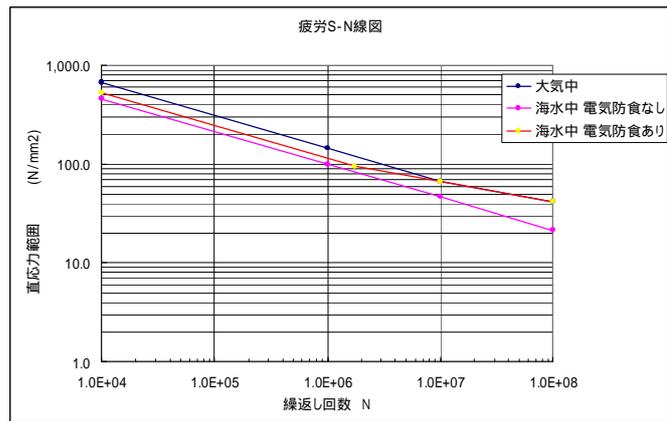


図 - 4 . 3 疲労設計曲線（S - N 図）  
（「ジャケット工法技術マニュアル」より）

許容される累積疲労損傷度安全係数は、海洋構造物の諸基準を参考に、表 - 4 . 2 及び図 - 4 . 4 のとおり定めている。基本的な考え方は、下記に示すとおりある。

いかなる箇所であっても、1以上の安全率を有すること。

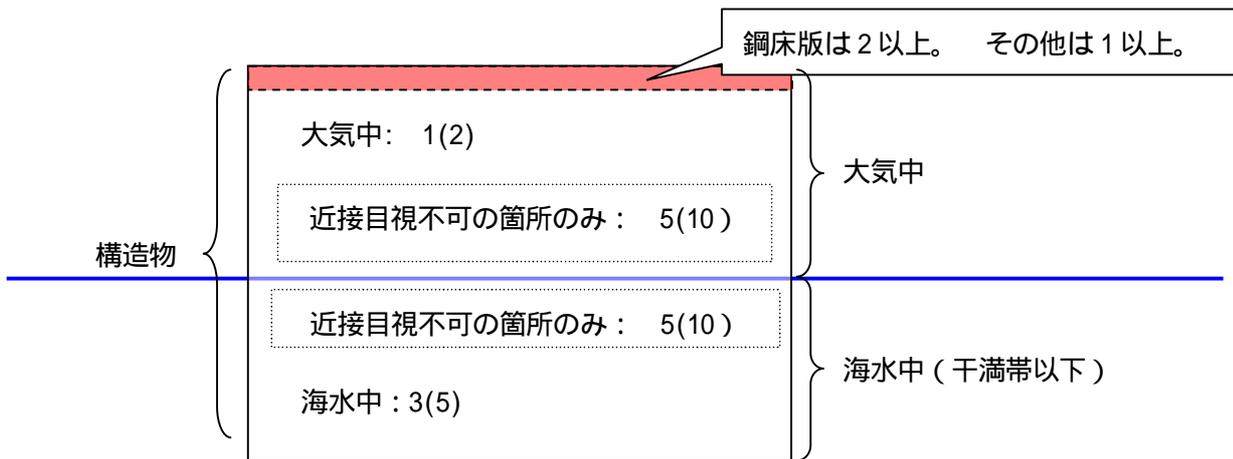
近接目視不可（維持管理不可）の箇所については、環境条件（大気中／海水中）に関わらず設計供用期間中の点検等を一切行うことができないことを考慮して、安全率5以上を基本としている。さらに、構造上クリティカルとなる部分については、さらなる安全性を考慮して、安全率10以上を基本としている。

大気中については、近接目視可（維持管理可）が可能な箇所であれば、構造上クリティカルとなる部分で2以上、クリティカルとならない部分で1以上の安全率とする。ただし、航空機が直接作用する鋼床版については、2以上の安全率とする。

海水中（干満帯以下）については、近接目視可（維持管理可）が可能な箇所であれば、構造上クリティカルとなる部分で5以上、クリティカルとならない部分で3以上の安全率とする。

表 - 4 . 2 累積損傷度安全係数

要求内容	照査方法												
疲労損傷度安全係数は、各対象部位の維持管理の難易度及び全体構造に及ぼす影響を勘案の上適切に設定すること。また、設定根拠を証明すること。	<p>疲労損傷度安全係数は、以下の値を原則とする。なお、構造上クリティカルか否かについては構造解析にて、近接目視が可能か否かについては実績または実証実験により示す必要がある。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>構造上 クリティカルでない</th> <th>クリティカル</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>大気中</td> <td>1.0</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>海水中</td> <td>3.0</td> <td>5.0</td> </tr> <tr> <td>近接目視不可 維持管理不可</td> <td>5.0</td> <td>10.0</td> </tr> </tbody> </table> <p>航空機荷重が直接作用する鋼床版の安全係数は対象部位にかかわらず2以上とする。航空機荷重が直接作用しない鋼部材の安全係数は対象部位にかかわらず1以上とする。</p>		構造上 クリティカルでない	クリティカル	大気中	1.0	2.0	海水中	3.0	5.0	近接目視不可 維持管理不可	5.0	10.0
	構造上 クリティカルでない	クリティカル											
大気中	1.0	2.0											
海水中	3.0	5.0											
近接目視不可 維持管理不可	5.0	10.0											



( ): 構造上クリティカルと定義される箇所

図 - 4 . 4 部位別の疲労損傷度安全係数

なお、近接目視可（維持管理可）とは、人が、手の届く至近距離において目視と計測器による検査が、容易、安全かつ確実にできる場合を想定しており、片面からの視認および計測器を用いた検査でよいが、維持管理計画に位置づけられた方法・頻度で確実に実行できることが求められる。

また、構造上クリティカルとは、構造的に重要な箇所であり、当該箇所の損傷が急速に拡大して構造安定性を急速に失わせる場合（リダンダンシーがない）で、損傷の拡大にともない“許容できない結果”（例えば、人命の喪失、重大な環境汚染、沈没、漂流、他構造物等への衝突など）が想定される場合を想定している。設計者は、構造上クリティカルである箇所を特定するとともに、構造上クリティカルではない箇所については、当該箇所での損傷が急速に拡大しないことを示す必要がある。

### 4.3 製作仕様（主に溶接継手の部分）

鋼構造物の疲労損傷は、主に溶接継手部分で発生することから、溶接継手部の製作仕様は疲労設計とリンクして一体として適用すべきである。その観点から、今回工事における製作仕様について、板構造については「鋼道路橋の疲労設計指針」、「道路橋示方書 鋼橋編」によることを基本とし、管構造については「ジャケット工法技術マニュアル」、「道路橋示方書 下部構造編」によることを基本としている。

### 4.4 ホットスポット応力の算定方法について

ホットスポット応力を求めるためのFEM解析については、具体的な解析方法の詳細が記載されているIIW(国際溶接協会)による「Fatigue Design of Welded Joints and Components (溶接構造の疲労設計)」及びIIWデザイナーズガイド(Prof. E. Niemi: Structural Hot Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components - Designer's Guide -)に準じて行うことを基本としている。以下、上記文献の概要を紹介する。

ホットスポットとは、溶接継手中で疲労き裂が最も発生しやすいと予想される位置であり、「溶接構造の疲労設計」によると「構造応力の変動と溶接形状あるいは切欠きの相乗効果により生じる疲労き裂の発生位置」と定義されている。ホットスポット応力は、ホットスポットの表面における構造応力の値（形状応力とも言う）として定義されている。

溶接継手の近傍では、図-4.5に示すとおり板厚方向の応力分布は切欠きの近傍で非線形となる。図-4.6に構造不連続を有する構造詳細の例を構造的な形状応力の分布とともに示す。構造的形状応力は、溶接形状自身による応力集中を除くすべての構造詳細による応力上昇効果を考慮したものである。このため、溶接止端のような局部的切欠きによる非線形ピーク応力はホットスポット応力からは除くことになるが、溶接止端形状のばらつき等の影響は、実験から設定される疲労設計曲線(S-N曲線)に既に含まれているため、適切な疲労照査が可能となる。

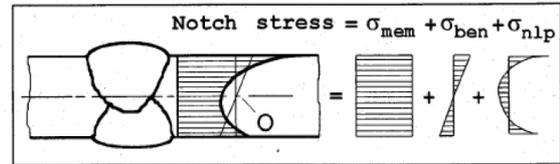


Fig.(2.2)-1 非線形応力分布の各応力成分への分解

切欠き応力 $\sigma_n$ の応力成分は[2]：

- $\sigma_{mem}$  膜応力
- $\sigma_{ben}$  板曲げ応力
- $\sigma_{nlp}$  非線形ピーク応力

図-4.5 非線形応力分布の各応力成分への分解  
(「溶接構造の疲労設計」(社団法人 溶接学会)より)

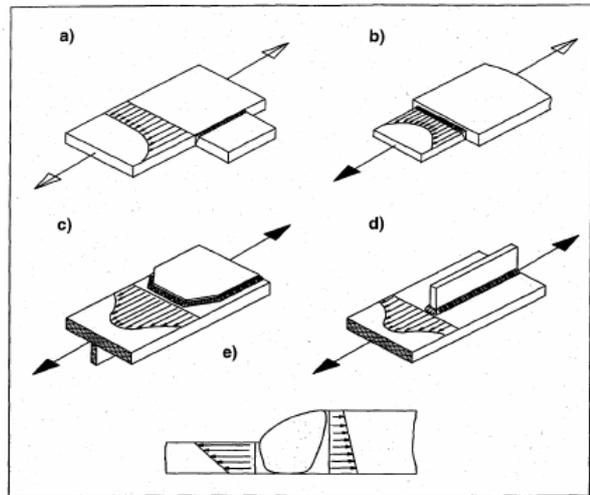


Fig.(2.2)-6 構造詳細と形状応力

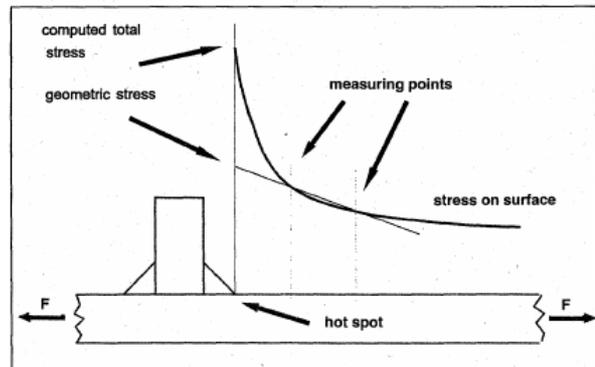


Fig.(2.2)-7 形状応力の定義

図-4.6 ホットスポット応力の定義  
(「溶接構造の疲労設計」(社団法人 溶接学会)より)

以上のことから、ホットスポット応力は、溶接止端から所定の位置離れた応力から外挿して算定することが基本とされている。外挿する応力測定位置は、

a) 応力が主として膜応力の場合：

2枚の計測点（ゲージ）で線形外挿

b) 板曲げ応力が生じる場合：

3枚の計測点（ゲージ）で2次式により外挿と規定されている（図-4.7）。

なお、溶接止端部におけるホットスポット応力の算定については、有限要素（FEM）解析により求めることになる。上記文献に詳細手引きが示されており、各種の解析上の留意点（要素種類、要素分割、応力の計算点など）が記載されている。

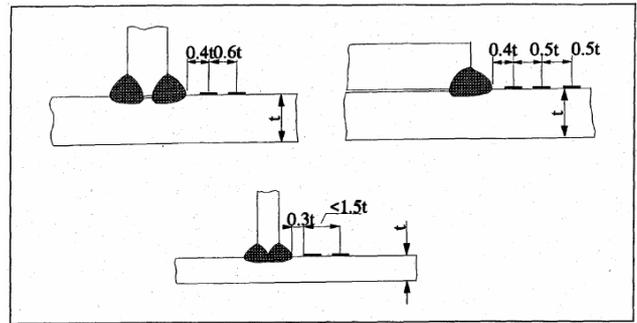


Fig.(2.2)-10 板構造におけるゲージ位置

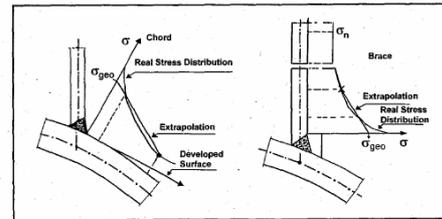


Fig.(2.2)-11 管構造におけるひずみゲージ位置

図-4.7 ホットスポット応力の外挿方法  
（「溶接構造の疲労設計」(社団法人 溶接学会)より）

## 5. 鋼部材の防食

### 5.1 防食の基本的考え方

D滑走路は、海上部という厳しい腐食環境下に位置することから、鋼部材の防食には特に留意する必要があるため、腐食環境区分を表-5.1のように定め、それぞれの環境に適用する防食を確実なものとするために防食工法に一定の制限を加えることとした。

### 5.2 海上部の防食工法

海上部大気中の防食工法は、道路橋におけるこれまでの実績及び知見を参考として、道路橋塗装便覧に準拠するものとし、厳しい環境に適用すると規定されているC塗装系を原則として用いるものとした。

なお、期待耐用年数については15年を標準としたが、これは駿河湾における海上暴露試験<sup>1)</sup>においてC-4塗装に相当する塗装系では、維持・補修等を実施しない状態において15年経過後も有意な損傷は見られないとの報告によるものである。他の文献<sup>2)3)</sup>では、期待耐用年数を30年としているものもあるが、入札公告の段階では、防食対象とする構造形式及び維持管理の内容が全く不明であったため、期待耐用年数15年は維持管理が全くなされない状況における下限値として設定した。

維持管理段階においては、塗装の劣化状況に応じた期待耐用年数の見直しが必要となる。

### 5.3 飛沫帯・干満帯の防食工法

飛沫帯・干満帯は、最も厳しい腐食環境であり補修が困難であると同時に、船舶や浮遊物の衝突による防食工の損傷も想定されることから、耐久性及び

表 5.1 鋼構造物の適用防食工法

腐食環境区分	要求水準書における記載の抜粋	腐食速度
海上部	C-3又はC-4塗装を原則。	0.0 mm/年
飛沫・干満帯	チタン又は耐海水性ステンレスライニングを原則。やむを得ない場合は、超厚膜形エポキシ樹脂塗装。	0.0 mm/年
海中部	電気防食のみ又は塗装との併用。	0.2 mm/年(電気防食の場合は0.02 mm/年)
内部空間	塗装のみ又は除湿装置との併用。	0.0 mm/年
土中部		0.03 mm/年

耐衝撃性のある工法を求めた。このため、港湾鋼構造物等の防食工法として実績のある金属ライニング工法を原則とすることとした。

なお、金属ライニングの適用が困難な箇所には、超厚膜型エポキシ樹脂塗装を原則としているが、港湾構造物防食・補修マニュアル(改訂版)に記載されているポリウレタン樹脂系、アクリル樹脂系のものもエポキシ樹脂系と同等とみなしてよいものとした。これら有機ライニングの場合には、耐用年数が金属ライニングに比べて劣る為、供用期間中に補修が必要となり、超厚膜型エポキシライニングの期待耐用年数を30年以下とした。これは類似例<sup>4)</sup><sup>5)</sup><sup>6)</sup>の耐用年数を参考として設定したものである。

#### 5.4 海中部の防食工法

海中部の防食は電気防食のみ又は塗装との併用を原則としているが、塗装との併用の場合は、塗装の塗替えが困難であることから塗装の期待耐用年数を10年とし、それ以降は電気防食のみによる防食扱いとした。

これは、複合電気防食の実績が乏しいこと、塗装の欠陥(ピンホールやスクラッチ等)を完全に回避することは不可能であること、電気防食環境下では塗膜下の鋼索地が強アルカリを呈するなど、塗膜の防錆性能を定量的に把握することは困難であることによる。

なお、要求水準書においては、塗装と併用する場合の防食電位を $-800 \sim -1000\text{mV}(\text{vs. Ag/AgCl})$ としているが、過剰な電流による塗装の劣化を防ぐために複数の文献<sup>7)</sup><sup>8)</sup>をもとに総合的に判断したものである。

#### 5.5 内部空間の防食工法

密閉された空間の防食工法については、塗装のみ又は塗装と除湿装置との併用を原則としているが、塗装のみの場合はC塗装系を原則とし、内部空間で環境が緩和されることから類似例<sup>4)</sup>を参考として25年の期待耐用年数とした。

塗装と除湿装置を併用する場合には、事例<sup>9)</sup>によれば、除湿防食の内面は、無機ジンクリッチプライマーか又は無塗装の例があるが、仮置き及び施工箇所が海上であり、工場を含めて施工中は長期間にわたり腐食環境の厳しい外気にさらされ、初期段階では腐食しやすい環境と考えられる為、道路橋で通常使用されている内部空間用のD塗装系を原則とした。

塗装と除湿装置を併用した場合の期待耐用年数は、除湿装置が相対湿度を常時50%以下に保つことを前提として100年間としている。

#### 5.6 土中部の防食工法

土中部の防食は、従来の方と同様に腐食代で対応することとした。要求水準書においては、港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版)に準拠して $0.03\text{mm/年}$ としている。

### 6. おわりに

羽田空港再拡張事業は、国民の期待が非常に高い事業であることから、本事業を一日も早く完成させ、我が国の経済や国際競争力の向上に寄与できるよう、関係者とともに努力していきたいと考えている。

なお、本報告で紹介した要求水準書の作成及び設計条件の設定等に係る技術的検討事項については、国土技術政策総合研究所、港湾空港技術研究所の多大な支援・協力を頂いた。未筆ではあるが、ここに深謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 宮田正史, 上原正光, 野口孝俊, 福本裕哉, 志茂 香, 竹内 泰弘:「D滑走路の設計の基本的考え方(その1)」, 東京国際空港D滑走路建設工事技術報告会(第1回)技術報文集, pp.1-22, 2006.9
- 2) WAM: 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井俊彦(1999): 第3世代波浪推算法(WAM)の推算精度に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第38巻, 第4号, pp.3-47.
- 3) Yoshitaka Hachiya, Jianjun Yin, Osamu Takahashi, Kenji Himeno: Aircraft Response Based Airport Pavement Roughness Evaluation, 土木学会論文集, No. 634/V-45, pp.403-411, 1999.11
- 4) 遠藤 桂, 姫野賢治, 川村 彰, 八谷好高, 松井邦人: 滑走路の乗り心地に着目した路面プロファイル解析, 土木学会舗装工学論文集, 第7巻, pp.13/1-8, 2002.12
- 5) 坪川将丈, 八谷好高, 董 勤喜, 姫野賢治, 川村 彰: 航空機の応答を考慮した空港舗装の平坦性評価に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第9巻, pp.1-8, 2004.12  
(防食部分)
- 1) 駿河湾における海上暴露試験(建設省土木研究所(財)土木研究センター: 海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書 第255号 平成12年12月)
- 2) 鋼橋のライフサイクルコスト(社)日本橋梁建設協会
- 3) (社)日本鋼構造協会 鋼橋塗装小委員会
- 4) 東京湾横断道路 鋼構造物の防食指針(案)平成元年7月 東京湾横断道路株式会社
- 5) 海洋構造物防食指針・同解説(飛沫帯干満帯編: 建設省土木研究所)
- 6) 大井埠頭新5バースのジャケット栈橋施工・維持管理検討調査
- 7) 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻) 平成11年4月 社団法人 日本港湾協会
- 8) 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版) 平成9年4月 沿岸開発技術センター
- 9) 金子正猪、溝上義昭、内藤真 乾燥空気による箱桁内防食(新尾道大橋) 橋梁と基礎 99-5