

		構造			様式		
		要素浮体支持型			ボンツーン型		
		小型円筒型	大型円筒型	フーティング型	一様断面型	底面凹型	
縦	横						
		$H = 10\text{ m}$ $D = 7\text{ m}$ $C = 5\text{ m}$ $P = 1.5\text{ m}$ $d = 6.5\text{ m}$	$H = 10\text{ m}$ $D = 10\text{ m}$ $C = 5\text{ m}$ $P = 1.5\text{ m}$ $d = 3.2\text{ m}$	$H = 10\text{ m}$ $D = 8\text{ m}$ $C = 5\text{ m}$ $d_s = 3.85\text{ m}$ $d = 6.5\text{ m}$ $P = 1.5\text{ m}$ $h = 5.2\text{ m}$	$H = 10\text{ m}$ $d = 3\text{ m}$ $f = 7\text{ m}$	$H = 10\text{ m}$ $f = 7\text{ m}$ $H = 4\text{ m}$ $C = 3\text{ m}$ $d = 3\text{ m}$	$H = 10\text{ m}$ $d = 3\text{ m}$ $H = 4\text{ m}$ $f = 7\text{ m}$ $C = 3\text{ m}$

図 5.3 構造様式の概要図

式が考えられるが、構造的に単純な構造としてボンツーン型が代表的な構造様式の一つであり、アクアポリスや石油掘削リグなどで、流体力学的に波浪による浮体の挙動が小さいとされている要素浮体支持型がもう一つの構造様式の代表であるといえる。

したがって、浮体式海上空港の構造様式としては、この2つを調査対象とした。

ボンツーン型は、構造様式が単純であるが、建造ユニットを洋上接合する場合に水中接合が必要となるので、水中接合を必要としない型式を加えて合計2型式とする。

要素浮体支持型は、要素浮体の形状及び水線面積を変えた3つの型式とする。それらの5型式を便宜上次のように名称をつけると共に、構造の概要図を図5.3に示す。

- 1) 要素浮体支持型 (小型円筒型)
- 2) " (大型円筒型)
- 3) " (フーティング型)
- 4) ボンツーン型 (一様断面型)
- 5) " (底面凹型)
- 6) マルチユニット型

なお、マルチユニット型としては、下部をボンツーン型または要素浮体支持型のいずれの場合でも可能であるが、本調査ではボンツーン型として取り扱うことにした。

5.2.3 構造様式の比較検討

5.2.2 において提示した6型式の構造様式について次に示す項目の特性につき比較検討を行なう。

(1) 各構造様式の特徴

各構造様式の特徴を比較する項目として、剛体運動、撓み、係留力、構造強度、重量、施工性、維持補修、環境保全及び美観性等について概略的な検討を加

えた。

その結果、要素浮体支持型とボンツーン型とを比較検討すると、要素浮体支持型は、ボンツーン型に比べて現地における工事が大幅に軽減され、工期が短くてよく、波浪による浮体の撓みや傾斜がボンツーン型よりも小さく、浮体の下面に作業船等が入るので補修、点検並びに要素浮体の交換がボンツーン型に比べて容易である。

一方、ボンツーン型は、現地工事における水中工作が必要であり、所要の喫水を確保するために大量のバラストを搭載する必要があり、波浪による浮体の撓みや傾斜が要素浮体支持型よりも大きい。また、外部から浮体の下面に作業船等が入ることが不可能なために補修点検が困難である。

したがって、浮体式海上空港の構造様式としては、要素浮体支持型を採用することとした。なお、要素浮体の形状については、円筒型とフーティング型とは概略的な検討から優劣を判定することが困難であるため、本調査においては小型円筒型及びフーティング型の2型式について調査検討を行うこととした。

5.3 材料の選定

浮体の構造様式として前節において要素浮体支持型を選定したが、ここでは、この構造様式に対して最適な材料の選定を試みるべく、種々検討を行なった。

5.3.1 材料の分類と特色

浮体構造用材料の選定にあたり、その第1段階の検討では、一般に使用可能な材料として金属材料の鋼材とアルミニウム及び非金属材料のコンクリート、FRP、フェロセメントとレジンコンクリートの6種類の構造用材料を選び、それぞれが有する物性を比較検討する。

(1) 材料の長所と短所

鋼材, アルミニウム, コンクリート (ボルトランドセメントコンクリート), FRP, フェロセメント及びレジンコンクリートの6種類について, 各種強度や弾性係数等の材料が有する物理・化学的特性, 耐食性, 水密性, 施工性, 使用実績及び価格等について既存資料に基づいて比較検討を行った。

その結果, 現時点においては一応鋼材またはコンクリートが使用材料として最も適していると判断された。

5.3.2 構造と材料の組合せ

これまで構造様式としてセミサブ型が, また, 構造用材料として鋼材及びコンクリートが選定されている。本節ではセミサブ型浮体を上部構造と要素浮体に大別し, それぞれに鋼材及びコンクリートを配した場合につき比較検討を行なう。比較検討の因子としては, 耐食性, 水密性等の材料そのものの特性は前項で既に触れているので, ここでは構造としての施工性, 工期, 維持補修, 改築, 廃棄等を取り上げて概略検討した結果を表5.2に一覧表で示す。

この表から, コンクリート製上部構造に鋼製要素浮体を組合せた第4案は, 結果的には両材料の不利な面

を結びつけた形となり, 現実性に欠けるため検討の対象から除外して良いものと考えられる。

コンクリートだけから成る第3案は, 維持補修の面だけを考えると, 最も有利と推察されるが, 施工性の面でコンクリート構造の現地接合を伴わざるを得ず, これは工期の制約上非常に大きな障害となり, その為本案の優位性は残る他の2つの案に比して著しく低下するものと判断される。以上の結果, 第1案及び第2案が検討対象となり, 上部構造はおのずから鋼製とし, 要素浮体は鋼製またはコンクリート製となる。

(1) 上部構造の構造方式

主滑走路を対象として, シングルデッキ及びダブルデッキ方式の上部構造の試設計を行ない, これをもとに鋼材, 現地接合に要する工数及び塗装の費用を概算する。簡単のため建造時の価格を上記3項目の合計で考え, かつ, ダブルデッキの建造時の価格を100とし, それぞれ指数表示にして表5.3に示す。

この表から, 経済性の見地からみると, 建造時の初期費用ではシングルデッキが有利であるが, その後の維持補修を考え, 更に耐用年数60年を考慮に入れて総合的に判断するとダブルデッキを採用する方が有利であるといえる。

表 5.2 鋼製とコンクリート製との組み合わせに対する比較

案	構 造		施 工 性	工 期	維 持・補 修	増 改 築	廃 却
	上部構造	要素浮体					
第1案	鋼製	鋼製	ユニットの組立てに既存設備を流用出来る。 ユニットの重量が軽く、ドック内での進水も容易。 現地接合が大気中の溶接となり比較的楽。	工期は最も短い。 工程管理が容易。	腐食に対する対策が必要(電気防食等) 塗装の定期的補修が必要であり、その面積が最も大きい。	水中、大気中を問わず比較的容易。	スクラップ化が可能。 再生、再利用も可能。
第2案	鋼製	コンクリート製	要素浮体組立時十分強固でかつ広いコンクリートヤード及び大容量の移送設備が必要。重量大の為ユニットのドック内での進水が難しい。(フローターを要する可能性あり)。現地接合は大気中溶接で容易。コンクリートの重量管理が必要。	工期は第1案よりやや長くなる。 ユニット組立時、上部構造/要素浮体夫々について綿密な工程管理が必要。	上部構造の塗装の定期的補修が必要。 要素浮体はメンテナンスフリーに近い。	上部構造は比較的容易。 要素浮体ごと取替えは可能なるも、一部改築等は難しい。	上部構造はスクラップ化可能。 要素浮体は海中に沈めざるを得ない。
第3案	コンクリート製	コンクリート製	強固で広大なコンクリートヤード及び大容量の移送設備が必要。(第2案より更に大規模) 現地接合が非常に困難。 綿密な重量管理が必要。	ユニットの組立て現地接合共非常に時間がかり、工期は最も長い。	メンテナンスフリーに近い。	極めて困難。	困難。 海中投棄のみ。
第4案	コンクリート製	鋼製	ほぼ第3案と同じ。	ほぼ第3案と同じ	上部構造はメンテナンスフリーに近い。 要素浮体の腐食に対する対策が必要。(電気防食等)	上部構造は極めて困難。 要素浮体は可能。	要素浮体はスクラップ可能。 上部構造は海中投棄。

表 5.3 デッキ構造方式の比較

項 目	デ ッ キ 構 造		備 考	
	ダ ブ ル	シ ン グ ル		
施 造 時 コ ス ト	鋼 材	78.3	70.6	材料及び加工費を含む
	現 地 接 合 工 数	4.1	3.3	
	塗 装 費 用	16.3	21.6	
	点 検・補 修 用 設 備	1.3	0	恒久的に組み込まれている設備のみ
	施 造 時 合 計	100	95.5	
ラ ン ニ ン グ コ ス ト	塗 装 の 補 修 費 (10年 間 当 たり)	1.4	4.2	ランニングコスト 塗装の補修費と取定

(2) 要素浮体の材料

要素浮体の材料としては、鋼製の方が幾分有利であるように思えるが、決定的な差には致らず、鋼製とコンクリート製との二者択一は現段階では難かしいと思われる。

5.4 構造解析

浮体式海上空港の構造様式及び構造用材料が選定されたので、ここでは、構造解析についてまず、局部強度上の見地から構造部材の基本的な諸寸法を設定し、つぎに、舗装寸法、施設重量及び全体重量を求め、最後に、構造強度面からの検討として、外力による浮体空港の撓み、応力の応答特性、固有振動及び災害モデルに対する損傷程度並びに建造ユニットの曳航時の強度などについて概略的な検討を行い、浮体式海上空港を構造面から安全性について大略的な確認を行った。

また、要素浮体をコンクリートで建造する場合の設計及び施工についても概略検討を行った。

5.4.1 構造部材寸法の設定

(1) 上部構造及び要素浮体

ここでは、局部強度上から必要最小限の値として浮体構造部材の基本的な諸寸法を設定し、その寸法を基に、曳航時を含む各種外力に対する全体構造強度を概略検討し、部材寸法を修正した。

浮体構造物の上面は、荷重の大きさに応じて以下の3区分に分けて、それぞれの区分で構造部材計算を行って部材寸法を求めた。

- a) 主滑走路部：航空機が離陸または着陸する時に衝撃荷重を受ける部分。
- b) 誘導路、施設帯部：航空機が遅い走行または停止する場所で航空機の自重を受ける部分。
- c) 緑地帯部：上記 a) 及び b) 以外の部分で、通常航空機及び車輛等が通行しない部分であるが、場所によってはサービス道路を設ける部分。

構造用部材としての外板及び小骨については、日本海事協会の「海洋構造物及び作業船等規則(案)」に準拠し、外板板厚及び小骨の断面係数を設定した。

また、大骨及び中骨は、梁による弾性計算結果及び日本海事協会鋼船規則に準拠して設定した。

以上の計算によって求めた部材寸法に基づいて基本構造図を作成した結果を図 5.4～図 5.8 に示す。構造部材の寸法及び重量は、一つの建造ユニットについて表 5.4 に示す。

なお、部材寸法と構造解析に用いた部材寸法は部分的に相違しているが、それは適用規則の変更及び構造解析結果による変更等によるものである。

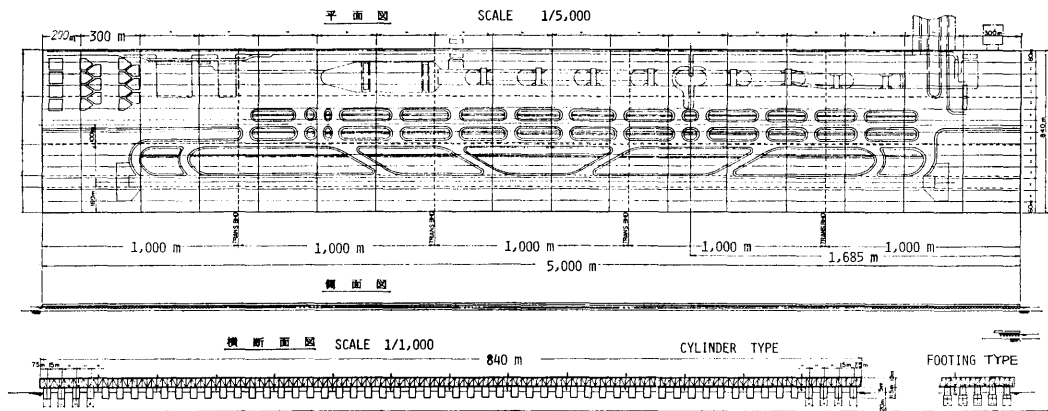


図 5.4 主滑走路用浮体の基本構造図

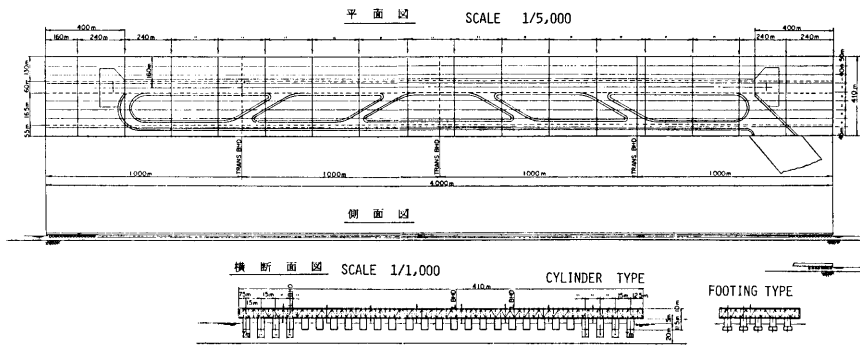


図 5.5 補助滑走路用浮体の基本構造図

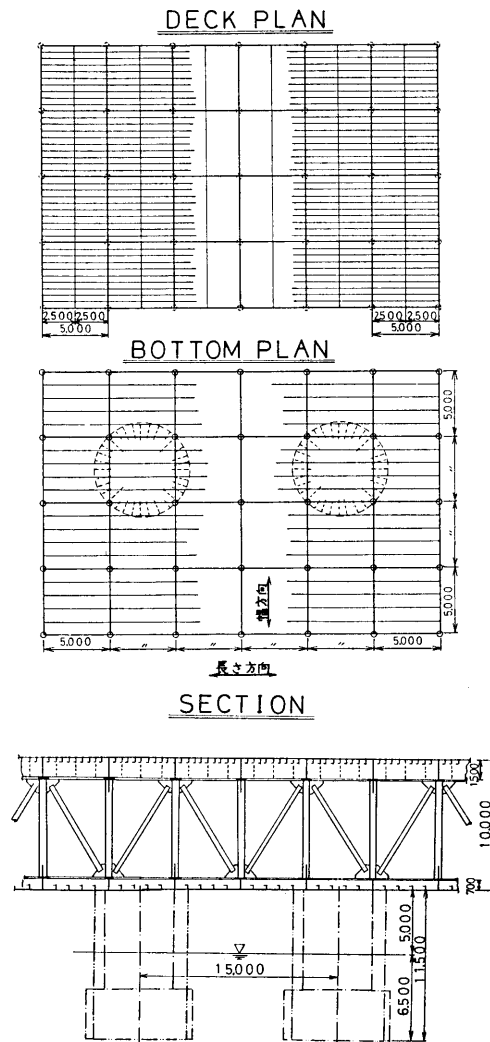


図 5.6 浮体の上部構造物の構造図

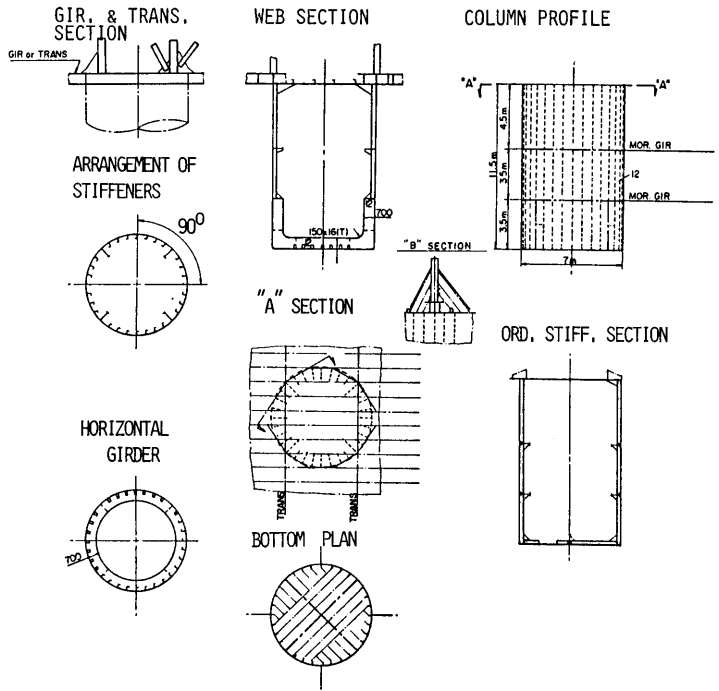


図 5.7 円筒型要素浮体の構造詳細図

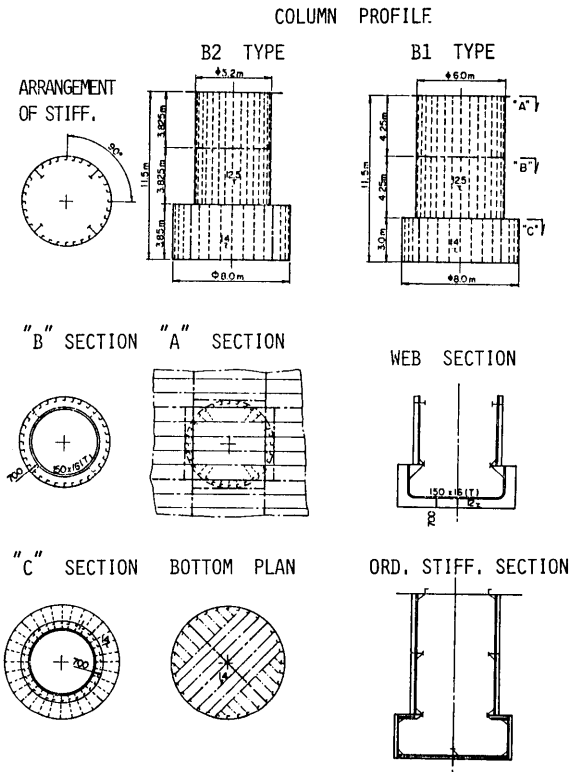


図 5.8 フーティング型要素浮体の構造詳細図

表 5.4 建造ユニットの鋼材重量表 (300 m×60 m)

部 材	主 滑 走 路 部		誘導路, 航空機スポット部		そ の 他 (緑 地 帯)		
	部 材 寸 法	重 量 (t)	部 材 寸 法	重 量 (t)	部 材 寸 法	重 量 (t)	
上 面	PLATE	22	3,109	20,5	2,896	18	2,554
	LONGITUDINAL	350 x 100 x 12/17	1,468	250 x 90 x 12/16	1,092	250 x 90 x 10/15	953
	INT. TRANSVERSE	WEB 1,000 x 12 F.PL. 200 x 16	430	WEB 800 x 12 F.PL. 200 x 16	362	WEB 800 x 12 F.PL. 180 x 12	332
	TRANSVERSE	WEB 1,500 x 12 F.PL. 200 x 16	599	WEB 1,200 x 12 F.PL. 200 x 22	531	WEB 1,200 x 12 F.PL. 200 x 12	475
	GIRDER	WEB 1,500 x 12 F.PL. 200 x 16	599	WEB 1,200 x 12 F.PL. 200 x 22	531	WEB 1,200 x 12 F.PL. 200 x 12	475
下 面	PLATE	11	1,554	主滑走路部と同じ	2,553	主滑走路部と同じ	2,553
	LONGITUDINAL	250 x 90 x 10/15	423				
	TRANSVERSE	WEB 700 x 12 F.PL. 150 x 12	288				
	GIRDER	WEB 700 x 12 F.PL. 150 x 12	288				
PILLAR (VERTICAL)	450φ t= 23.8	1,415	400φ t= 21.4	1,125	350φ t= 19	876	
PILLAR (DIAGONAL)	350φ t= 19	1,900	300φ t= 17.4	1,562	250φ t= 15.1	1,136	
要 素 浮 体	SIDE PLATE	12	1,906	主滑走路部と同じ	3,609	主滑走路部と同じ	3,609
	BOTTOM PLATE	12.5	302				
	VERT. STIFFENER	250 x 90 x 10/15	832				
	HOR. GIRDER	WEB 700 x 12 F.PL. 150 x 16	288				
	VERT. WEB	WEB 700 x 12 F.PL. 150 x 16	91				
	BTM. WEB	WEB 700 x 12 F.PL. 150 x 16	76				
	BTM. STIFFENER	250 x 90 x 10/15	114				
BRACKET		234		220		210	
合 計 重 量		15,916		14,481		13,163	
単 位 面 積 当 り 重 量		0.884 t/m ²		0.805 t/m ²		0.731 t/m ²	

なお、BHD & WALL PL 12.5、STIFF 250 x 90 x 10/15、単位面積当りの重量 0.149 t/m²。

(2) 舗装寸法

a) 舗装材料

通常の空港の舗装材料は、アスファルトコンクリートを表層とするアスファルト舗装、またはセメントコンクリートを表層とするコンクリート舗装である。

しかしながら、同一空港内においても区域によってアスファルトまたはコンクリート舗装を使い分けている空港がある。例えば、新東京国際空港においては、主滑走路部がアスファルト舗装で、ローディングエプロンがコンクリート舗装である。本調査に用いた浮体式海上空港においても通常の空港内舗装と同一にすることが望ましいが、本調査では舗装材料の検討を行わなかったため、舗装材料は全てセメントコンクリート舗装にすると仮定し、総舗装重量を推算する。

b) 舗装厚

主滑走路用浮体や補助滑走路用浮体及び航空機連絡橋の舗装厚は、表 5.5 に示すように設定した。

なお、滑走路及び誘導路の横断面勾配は最大勾配が航空法等で 1.5% と規定されており、最小勾配が設置

表 5.5 舗 装 厚

滑走路の中心線	500 mm
誘導路の中心線	400 mm
滑走路路及び誘導路側端部 (ショルダー部)	180 mm (滑走路) 165 mm (誘導路)
施設帯	100 mm
緑地帯	75 mm

基準で排水のために 1.0% と規定されている。そこで、本調査では、勾配は滑走路で 1.2%、誘導路で 1.3% とし、施設帯及び緑地帯においては、適当な個所に排水孔を設けて排水することとした。

c) 施設等の重量

主滑走路用浮体には、新交通システムを採用し、その時の施設構造物の配置例を図 5.9 に示す。そして、施設構造物、舗装及び最大駐機時の航空機等の重量を表 5.6 に示す。なお、幹線道路及び新交通システム用の周辺鋼壁等の重量は舗装重量に含ませた。

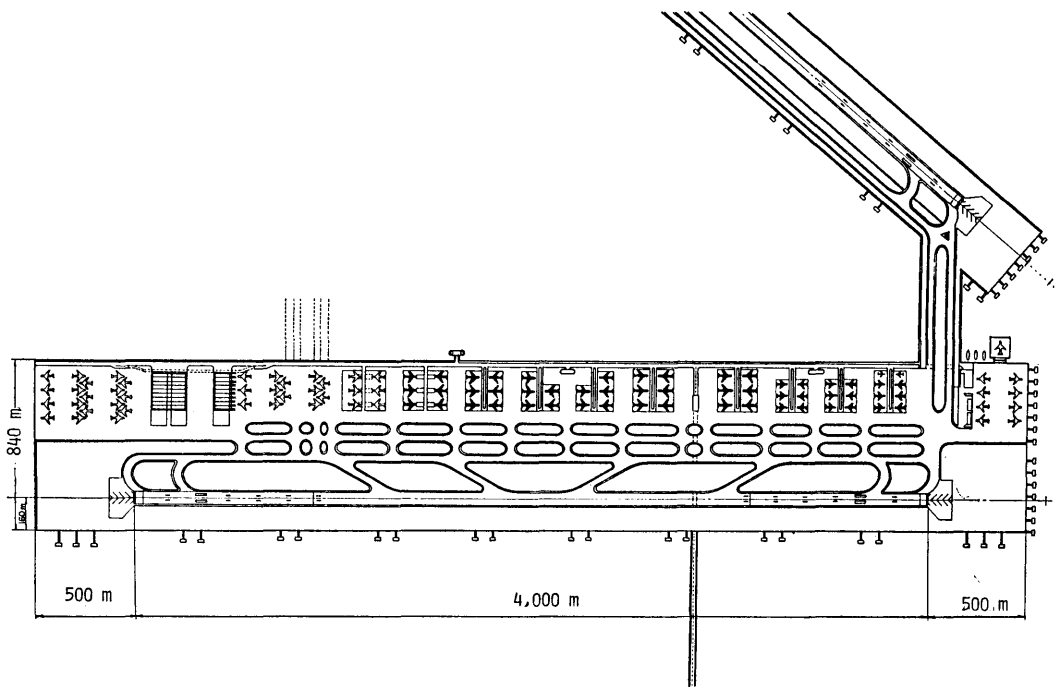


図 5.9 浮体式海上空港の施設構造物の配置例

d) 要素浮体の寸法

構造解析を行う際の要素浮体は、円筒型及びフーティング型である。なお、上部構造物上の重量分布は無視して要素浮体の寸法及び取り付け間隔を一定とした。なお、フーティング型要素浮体の寸法は、海上空港の設置海域において最も出現頻度が高い7秒の波で上下方向の波強制力が零になるように設定した。

e) 全体重量

本調査研究において想定した海上空港例の鋼材、溶接材、舗装及び施設構造物等の重量表を一括して表 5.7 に示す。なお、表中の溶接材重量は、一般船舶の実績から使用鋼材の正味重量の 1.5% とし、溶接材の使用総重量を正味重量の 3.0% とした。舗装重量は、滑走路、誘導路、施設帯及び緑地帯等の舗装用のものである。また、要素浮体の重量は、7.0 m ϕ の円筒型について算出した値である。

5.4.2 構造強度の検討

浮体式海上空港の構造強度に関する検討としては、主として上部構造体に関し、① 波浪による弾性撓み、② 温度差による弾性撓み、③ 駐機航空機の移動による弾性撓み、④ 航空機の離着陸時の弾性撓み等を既存理論にて検討し、種々の外力に対する上部構造体の

撓み量を推算した。

つぎに、それらの成果に基づいて通常時及び異常時に対する上部構造体の各部材に働く内力及び応力を推算して構造強度上の安全性を確認した。

その他、① 建造ユニット浮体の曳航時における構造強度、② 浮体式海上空港の上部構造体の固有振動周波数、③ 上部構造体に航空機の墜落による損傷及び④ 要素浮体のコンクリート製造法の検討等を行った。

(1) 波浪による弾性撓み応答

浮体式海上空港は、長大な浮遊式海洋構造物であるため、単に剛体として構造強度を検討したのでは不十分であり、上部構造体を弾性として取り扱い、波浪による上部構造体の弾性撓みを推算して構造強度上の安全性を検討する必要がある。

そこで、一般船舶の構造解析に通常適用している慣性力を無視した静的撓み解析手法及び現時点において一応解析手法が確立している動的影響を考慮した撓み応答計算とを適用して上部構造体の波浪による弾性撓み量を推算した。

a) 静的撓み応答

浮体式海上空港の構造モデルを幅 15 m のストリップ

表 5.6 主滑走路用浮体の施設構造物、舗装及び航空機の重量

	名 称	単 位 重 量	規 模	重 量	備 考
施設 構 造 物	新交通システムステーション	0.95 t/m ²	300m ² ×8, 15m ² ×3	2,660 t	
	ゲート建屋	7,400 t	8	59,200	
	トランジット通路	0.95 t/m ²	1,210m ² ×6	6,900	
	フェリー乗降ゲート	0.95 t/m ²	1,600 m ²	1,520	
	消火救難施設	0.785 t/m ²	2,000 m ²	2,350	
	貨物スポット施設	0.79 t/m ²	952m ² ×2	1,460	
	大型ラインメンテナンスハンガー	20,44 t		20,440	
	小型ラインメンテナンスハンガー	10,220 t		10,220	
	幹線道路	17.0 t/m	840 m	14,280	片幅 20mの複線
	新交通システム道路	10.0 t/m	4,500 m	45,000	幅 30m
	サービス道路	9.4 t/m	5,000 m	47,000	幅 30m
	合 計			211,030	
	舗 装	滑 走 路	0.68 t/m ²	240,000 m ²	163,200
誘 導 路		0.58 t/m ²	480,000 m ²	278,400	平均厚さ 275 mm
緑 地 帯		0.16 t/m ²	1,972,200 m ²	315,552	平均厚さ 75 mm
施 設 帯		0.21 t/m ²	1,507,800 m ²	316,638	平均厚さ 100 mm
合 計				1,073,790	
航 空 機	国際線旅客スポット	500 t	30 機	15,000	
	国内線スポット	350	20	7,000	
	貨物スポット	500	12	6,000	
	ナイスティエブロン	450	40	18,000	
	合 計		102	46,000	

表 5.7 浮体空港モデルの重量表

	主滑走路用浮体	補助滑走路用浮体	航空機連絡用浮体	合 計
鋼材重量	344.5 万トン	131.2 万トン	8.9 万トン	484.6 万トン
溶接材重量	5.2	2.1	0.1	7.4
舗装重量	107.4	50.9	3.7	162.0
施設構造物重量	21.1	7.5	0.5	29.1
合 計	478.2	191.7	13.2	683.1

プとして取り出し、これを上下撓み変形できるバネで支持する曲げせん断梁に置換する。

梁の剛性は、ダブルデッキのトラス構造体の幅 15 m 部分に等価な断面 2 次モーメント及びせん断面積の値を用いた。

バネ定数は、各要素浮体の取り付け個所において要

素浮体の喫水変化に対する浮力変動量に相当する値であり、一本当りの要素浮体のバネ定数は、円筒型浮体で 39.45 t/m、フーティング型浮体で 21.77 t/m である。

外力条件としては、表 2.15 に示す波浪条件及び図 3.45 に示す要素浮体に働く上下方向の波強制力である。

静的撓み応答は、まず、波浪を不規則波の周期と有義波高と同じ周期と波高をもつ長波頂規則波として縦波及び横波中における応答値を求め、この値を長波頂不規則波中における応答値であるとした。そして、短波頂不規則波中における応答値は、長波頂不規則波中の応答値に方向関数（単純化して $-20^{\circ} \sim 20^{\circ}$ の間だけを $4/3\pi$ の一定とし、それ以外を零とした矩形型である。）を乗じて $-\pi \sim \pi$ まで積分して求めた。なお、

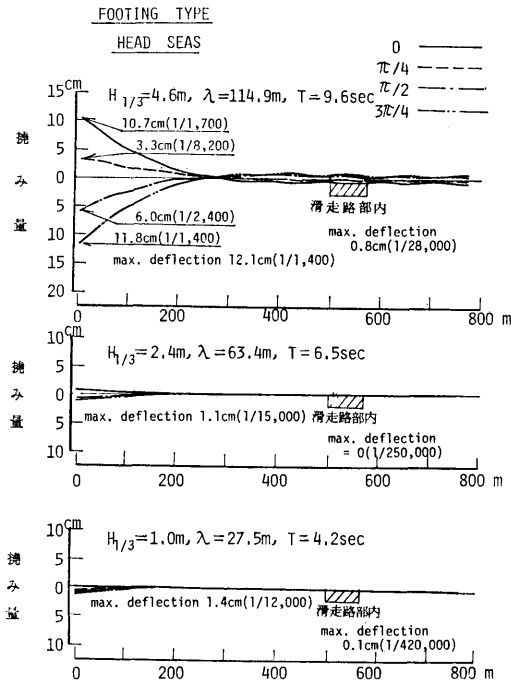


図 5.10 主滑走路用浮体の波浪による長さ方向の撓み

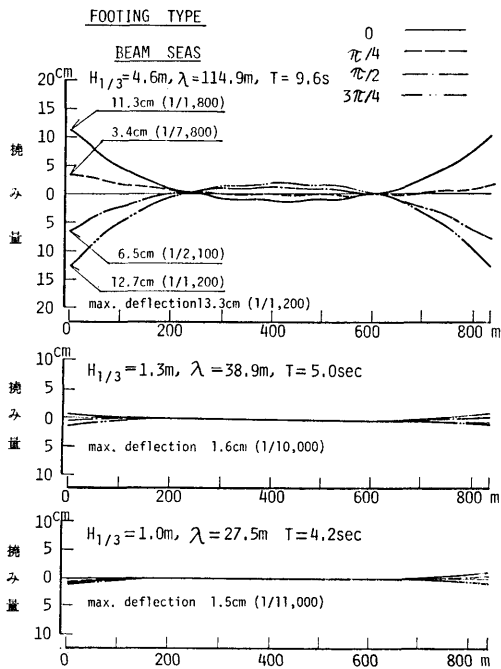


図 5.11 主滑走路用浮体の波浪による幅方向の撓み

1/1,000 最大期待値は、有義値の 2 倍であるとした。

上部構造体の静的弾性撓みの応答の推算結果例として、フーティング型要素浮体支持型について 100 年台風時、平均年間最大時及び累積度数率 95% 時の縦波及び横波中ものを図 5.10 及び図 5.11 に示す。なお、図には位相を $\pi/4$ づつずらせた時の応答値を示してある。また、図中には、() 内にその場所における勾配を示す。

b) 動的撓み応答

動的撓み応答の検討は、基本的には静的撓み応答と同様に 2 次元的に考え、一様な弾性基礎で支持された単純一様梁として梁の曲げ振動を次式の線形運動方程式で書き表わされることができるとする。

$$EI \frac{d^4 X}{dx^4} + \left(c - \omega^2 \frac{\gamma A}{g} + i\omega N \right) X = \bar{F}_A e^{-ikx}$$

ここで、 EI : 梁の曲げ剛性

c : バネ定数

$\frac{\gamma A}{g}$: 梁の単位長さ当りの質量

N : 単位長さ当りの減衰力の片振幅

\bar{F}_A : 波強制力の片振幅

X : 弾性応答

である。なお、弾性応答は、浮体の動揺（上下動と縦揺れ）と固有振動モード（上下動と縦揺れ）とが線形結合しているものと仮定する。

動的撓み応答計算は、付加質量係数、等価線形減衰力係数及び波強制力等を前述の設定値を用い、100 年台風時及び平均年間最大時の波浪条件について縦波中の浮体の波上側 3 点（端部、500 m 及び 1,000 m）における応答を推算した。推算結果例として円筒型及び

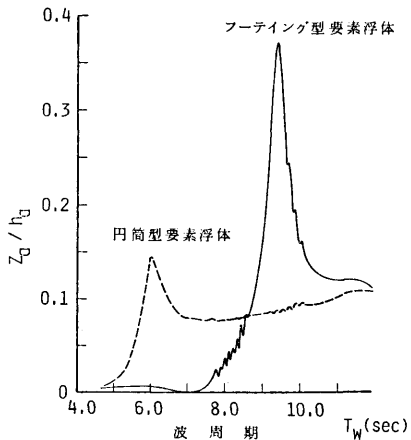


図 5.12 浮体端部における撓みの片振幅

表 5.8 静的・動的計算による浮体端部及びグライドバスとローライザー付近の最大撓み量

浮体	計算手法	縦波 ($\alpha=0^\circ$)			横波 ($\alpha=90^\circ$)			縦波 (グライドバス付近)			横波 (ローライザー付近)		
		N3	N5	A1	N3	N4	A1	N3	N5	A1	N3	N4	A1
フーティング	静的計算	0.3cm (1/3500)	4.6cm (1/320)	24.0cm (1/60)	0.4cm (1/5100)	1.0cm (1/1400)	26.0cm (1/50)	≒0 (1/120000)	0.1cm (1/6200)	1.0cm (1/220)	0.1cm (1/6600)	0.1cm (1/2700)	3.9cm (1/110)
	動的計算	—	7.1cm (10.4cm)*	12.0cm	—	—	—	—	0.3cm	0.4cm	—	—	—
円筒型	静的計算	1.4cm (1/1200)	1.1cm (1/1500)	12.0cm (1/140)	1.5cm (1/1100)	1.6cm (1/1000)	13.0cm (1/120)	0.1cm (1/42000)	≒0 (1/25000)	0.8cm (1/2800)	0.3cm (1/1900)	0.4cm (1/1700)	2.8cm (1/200)
	動的計算	—	0.3cm	33.0cm (51cm)*	—	—	—	—	0.1cm	2.3cm	—	—	—

(*) 内の数値は、図 5.1/2 の応答曲線の最大値に対するものを示す。

フーティング型要素浮体支持で 100 年台風時の浮体端部における撓み応答例を図 5.12 に示す。

また、両手法の推算結果から浮体端部、グライドバス及びローライザー付近における各海象条件ごとの 1/1,000 最大期待値の撓み量を求めた結果を表 5.8 に示す。なお、表中の () 内の値はその場所における勾配を示す。

この表から大略次の事項が推察できる。

i) 静的撓み応答と動的撓み応答では、動的撓み応答に端部で共振現象と思われる現象が現われて応答が高い値を示すが、それ以外の場所では静的と動的とで大略妥当な値を示している。

ii) 空港としての機能を発揮しなければならない、N5 及び N4 以下の波浪条件では、縦揺れ、横揺れ及び上下動等を考慮しても最大撓み量は、円筒型で 10 cm、フーティング型で 1.6 cm 程度である。また、100 年台風時の波浪条件では浮体端部より 200 m 内側にはいと撓みが極端に小さくなることが判明した。

iii) 100 年台風時の撓み量は、上部構造物の構造強度面からの安全性検討用の値として用いることとした。

なお、構造強度を検討する際に用いる値は、静的と動的応答値の単純平均値であるとした。

iv) 静的計算には、曲げ撓みとせん断撓みを考慮しているが、動的計算には、せん断撓みを無視している。

しかしながら、せん断撓みの影響を検討した結果、約 3% 以下であることを確認している。

(2) 温度差による弾性撓み応答

浮体式海上空港の上部構造物を単純な鋼構造物と仮定して鋼構造物の上面と下面との温度差による構造物の伸縮及び上下曲げ変形と水平曲げ変形等の概略検討を行った。

a) 温度条件

大阪地方における気温は理科年表から 5.2.1 の(3)

において設定した値を用いる。

まず、太陽が浮体上面に垂直に当たる場合の熱伝達は、太陽の熱量が浮体から外部へ風による強制対流や自然対流で逃げ、その残りが舗装を通して浮体構造物の内部に入る、そして、浮体構造物の内部で舗装部と鋼板部の熱伝達、空気の熱伝達、自然対流及び輻射等を考えた熱の移動から各部の温度を定常状態で推算し、その後、浮体構造物の下面から外部に自然対流で熱が移動して下部の温度が推算できるものとする。

この仮定に基づき、太陽の熱量を 560 kcal/m²h とし、舗装の熱吸収率を 0.88 と仮定して各部の温度を推算すると次のようになる。

- 浮体構造物の上面鋼板における温度 : 約 60°C
- ” 下面鋼板における温度 : 約 40°C
- 上下鋼板間の温度差 : 約 20°C
- 浮体構造物の内部における平均温度 : 約 50°C
- 浮体構造物の下面と海面との間の温度 : 約 25°C
- 浮体構造物の側壁間の温度差 : 約 25°C

b) 平均温度差による浮体構造物の伸縮量
伸縮量は、次式で推算する。

$$\delta = \alpha X \cdot \Delta T$$

ここで、 δ : 伸縮量

α : 鋼材の線膨張係数

X : 原点からの距離

ΔT : 平均温度からの温度差

である。この式に基づいて過去最大の温度差による浮体構造物の長さ及び幅方向の最大伸び及び縮み量を求

表 5.9 過去最大の温度差による浮体空港の最大伸縮量

浮体	最大伸び (cm)		最大縮み (cm)	
	長さ方向	幅方向	長さ方向	幅方向
主滑走路用浮体	203	34	-145	-24
補助滑走路用浮体	162	17	-116	-12

めた結果を表 5.9 に示す。

c) 温度差による上下曲げ変形

上下曲げ変形の推算は、波浪による静的弾性撓みの推算手法を用い、温度差に等価な曲げモーメントを梁の両端に加えて求めることとした。

そして、浮体構造物の長さ方向及び幅方向の温度差による上下方向の曲げ変形の推算結果を図 5.13 及び表 5.10 に示す。

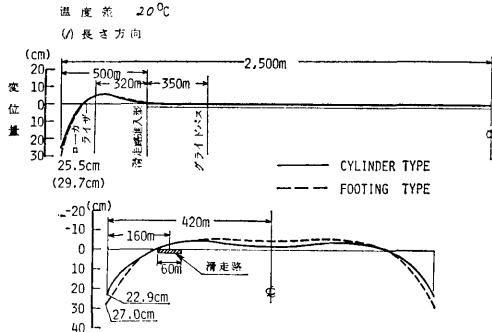


図 5.13 熱荷重による主滑走路用浮体の上下方向変形

表 5.10 温度差による端部の上下方向の最大変位置

浮体及び方向		浮上量 (cm)		沈下量 (cm)	
		円筒型要素浮体	フーティング型要素浮体	円筒型要素浮体	フーティング型要素浮体
主滑走路用浮体	長さ方向	5.1	5.7	25.5	29.7
	幅方向	4.5	5.5	22.9	27.0
補助滑走路用浮体	長さ方向	5.1	5.7	25.5	29.7
	幅方向	9.9	12.0	22.1	25.7

d) 温度差による水平曲げ変形

浮体構造物は、太陽を斜めから受けると太陽熱によって太陽が当たる側壁と陰になる側壁との間に温度差が生じて水平面内で変形する。

その水平曲げ変形の推算は、上下曲げ変形の推算と同様、温度差に等価な曲げモーメントが梁の両端に作用するものとして求めた。

そして、浮体構造物の温度差による水平面内の曲げ変形量を求めた結果、主滑走路用浮体では最大変形量が 3.0cm 程度、補助滑走路用浮体で 1.5cm 程度であることが判明した。

(3) 駐機航空機の移動による弾性撓み

浮体式海上空港の施設や舗装等の固定荷重に対する弾性撓みは、設計段階で充分考慮され得るものとした。したがって、旅客や貨物スポット及びナイトスティエ

ブロン等に駐機する航空機による上部構造物の弾性撓み量を概略検討する。

ここで検討する状態は、最も極端な場合として満載の 102 機の航空機が総て旅客や貨物スポット及びナイトスティエブロンに駐機したと仮定する。

撓み量の推算は、上部構造物に等価な 1 枚の鋼板へ要素浮体に相当するバネを各節点に配置し、その鋼板上に駐機航空機の荷重分布を加えて面外曲げ変形を求めた。その結果、撓み量が大きくなる場所は、駐機航空機が多くなるナイトスティエブロン付近と国内線旅客スポット付近(海側の左端、1,500 m 付近及び 4,000 m 付近)で円筒型要素浮体の場合に 27 cm 程度、フーティング型要素浮体の場合に 46 cm 程度になることが判明した。

(4) 航空機の離着陸時の弾性撓み

浮体式海上空港の上部構造物を弾性体とした場合、航空機が離陸または着陸する時の上面鋼板の弾性撓みを駐機航空機の移動による弾性撓みと同様な手法で概略検討すると共に、航空機が離着陸する時の走行状態における弾性応答をも概略検討した。

a) 離陸時の撓み

離陸時の最大撓み量は、滑走路部の舗装を余剰強度として航空機が満載状態の 500 t で滑走路上の節点に静的荷重で加わっていた状態から除去されたものとして概略推算する。その結果、静的荷重による最大変形量は、円筒型要素浮体の場合に 4.6 cm、フーティング型要素浮体の場合に 6.1 cm 程度であることが判明した。

b) 着陸時の撓み

着陸時は、静的荷重として取り扱っては不充分である。そこで 5.2.1 項の (2) において設定した航空機の重量及び衝撃係数を用い衝撃荷重を求め、その衝撃荷重の掛る状態を 3 角形のパルス状及びパルス状の荷重の後に航空機の重量が持続するとして上部構造物の最大撓み量を概略推算する。また、パルス状の荷重の

作用時間は0.4秒及び1.0秒とした。その結果、作用時間が0.4秒のパルス状の衝撃荷重で作用した後に航空機の重量が持続する場合、最も弾性撓み量が大きく、円筒型要素浮体で最大変形量が着陸して2.8秒後に5.4cm程度になることが判明した。

c) 離着陸及び走行状態における弾性撓み

実際の航空機が離着陸する際の資料を用い、ボーイング747について調査し、その結果に基づいて離着陸時の衝撃力及び揚力の増減、走行速度と機体や滑走路浮体の固有振動数との関係並びに滑走路面の凹凸と上

部構造物の剛性による周期性等に起因する上部構造物と航空機の振動等を考慮して航空機の離着陸時をシミュレーション計算し、上部構造物の滑走路面における弾性撓み量を概略推算した。その結果、機体の弾性変形量が大きくなり、舗装厚を考慮しなくとも上部構造物の接触点及びグライドバスの設置点における最大変位量は、-0.7cm及び0.3cm程度であることが判明した。

(5) 各種外力の重ね合せ時の最大撓み

以上が上部構造物を弾性体として取り扱った場合の

表 5.11 個々の外力の重ね合せによる浮体の撓み量

外力条件	円筒型要素浮体					フーティング型要素浮体				
	HEAD SEAS (N5)	BEAM SEAS (N4)		HEAD SEAS (N5)	BEAM SEA (N4)	HEAD SEA (N5)	BEAM SEAS (N4)		HEAD SEAS (N5)	BEAM SEAS (N4)
	浮体端部	浮体端部	浮体端部	付近の幅方向	付近の幅方向	浮体端部	浮体端部	付近の幅方向	付近の幅方向	付近の幅方向
波浪による弾性撓み応答	4.6cm (1/3200)	1.0cm (1/14000)	1.0cm (1/14000)	(1/62000)	(1/27000)	1.1cm (1/15000)	1.6cm (1/10000)	1.6cm (1/10000)	(1/250000)	(1/17000)
移動荷重による弾性撓み応答	27 cm (1/930)	27 cm (1/930)	27 cm (1/930)	≒0	≒0	46 cm (1/620)	46 cm (1/620)	46 cm (1/620)	≒0	≒0
温度差による弾性撓み応答	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0
航空機離着陸時の弾性撓み応答	≒0	≒0	1.8cm (1/6100)	(1/10000)	≒0	≒0	≒0	3.4cm (1/6500)	(1/7000)	(1/85000)
計	32 cm (1/720)	28 cm (1/870)	30 cm (1/760)	(1/8600)	(1/27000)	47 cm (1/600)	48 cm (1/580)	51 cm (1/540)	(1/6800)	(1/14000)

表 5.12 荷重条件の一覧表

(1) 単独荷重

荷重番号	荷重条件
①-1	波浪荷重（通常時、平均年間最大）
①-2	波浪荷重（異常時、100年台風時）
②	移動荷重（航空機駐機時）
③	熱荷重（温度差20）
④	航空機着陸衝撃荷重
⑤	施設構造物重量（ラインメンテナンスハンガーと旅客スポット）

(2) 組み合わせ荷重

荷重番号	単独荷重				
	①-1	①-2	②	③	④
①	○		○		
②	○		○	○	
③	○		○	○	
④	○			○	○
⑤	○			○	

表 5.13 各施設場所の許容応力値

場所	状態	許容応力値 (kg/mm ²)				備考
		通常状態	異常状態	通常状態	異常状態	
浮体上面 軸力に対応するもの	I	11.6	11.6	15.5	15.5	GIRDER OR TRANS. WEBの座屈で決まる。
	II	12.8	12.8	17.1	17.1	
	III	12.8	11.5*	17.1	15.3*	
浮体下面 軸力に対応するもの	I	5.5	1.5	7.4	2.0	Plateの座屈で決まる。
	II	5.5	1.5	7.4	2.0	
	III	5.5	1.5	7.4	2.0	
Vertical**Pillar 許容軸力/応力	I	439 t/ 13.6		586 t/ 18.1		Pillarの座屈荷重で決まる。
	II	262 t/ 13.0		349 t/ 17.4		
	III	208 t/ 12.7		278 t/ 16.9		
Diagonal**Pillar 許容軸力/応力	I	259 t/ 12.9		346 t/ 17.2		"
	II	141 t/ 11.8		188 t/ 15.7		
	III	82 t/ 10.1		110 t/ 13.4		
浮体上面 曲げ応力に対応するもの	I	14.4	14.4	19.2	19.2	0.6σ _y で決まる 0.8σ _y
	II	14.4	14.4	19.2	19.2	
	III	14.4	14.4	19.2	19.2	
浮体上面 GIRDER OR TRANS. WEBのせん断応力	I	7.2	7.2	9.6	9.6	0.6τ _{cr} で決まる 0.8τ _{cr}
	II	7.7	7.7	10.2	10.2	
	III	7.7	7.7	10.2	10.2	

I : 主滑走路
II : 副滑走路、施設帯
III : 緑地帯

** Pillarの座屈荷重は " Eulerの式 " Thomsonの式 " を用いて算出した。

波浪や温度、及び航空機の離着陸等による撓み量を概略推算した結果である。

そして、空港として稼働している気象・海象条件において各種外力が重ね合わさった場合の最大撓み量を概略検討した結果を表 5.11 に示す。なお、縦波中では平均年間最大時 (N5) の状態、横波中では横風最大時 (N4) の状態の外力であり、波浪による撓みと温度差による撓みは同時に起らないとした。また、外力の重ね合わせによる撓み量は、厳密な場所及び度合等を無視して各外力による最大値を単に加え合わせて求めた。

(6) 部材に働く内力及び応力

上部構造物の各部材の内力及び応力を求めて強度上の安全性を確認した。

a) 計算法

上部構造物の 15 m 幅の構造を取り出して 2 次元骨組構造にモデル化し、各種外力に対する撓み量を求めた結果を強制変位量として入力し、各構造部材に働く部材力及び応力を求め、日本海事協会の「海洋構造物及び作業船等規則(案)」で規定されている許容応力と比較して上部構造物の安全性を検討した。

b) 荷重条件

荷重条件としては、表 5.12 に示すように単独荷重と組み合わせ荷重とに分けて検討した。

c) 許容応力

上部構造物は、基本的には前述のように滑走路部、誘導路部、航空機スポット部及びその他の部分に大別

されて部材寸法が設定されている。それらの区分について日本海事協会の「海洋構造物及び作業船等規則(案)」に基づいて各部材の許容応力及び座屈応力を求めた結果を表 5.13 及び表 5.14 に示す。なお、Pillar の座屈荷重は Euler の式及び Thonson の式を用いて算出した。

d) 結果

まず、単独荷重が働いた場合に各個所の種々の構造部材に働く応力値の内最大応力値を示す部材に対する応力の推算値と許容応力値との比較を一括して表 5.15 に示す。表中の + は引張り応力で、- は圧縮応力である。

この表から、単独荷重状態では、要素浮体の形状、通常時と異常時との波浪条件等に関係なく、総ての部材に働く応力が許容応力以下であることがわかり、上部構造物は十分安全であるといえる。

つぎに、想定した組み合わせ荷重が働いた場合の部材に働く最大応力は、単独荷重の最大応力値を単純加算して推算値とした。そして、最大応力の推算値と許容応力値との比較を表 5.16 に示す。

この表から、各部の構造部材に働く応力値は許容応力値以下であり、組み合わせ荷重が作用しても上部構造物は十分安全性が確保されているといえる。

(7) 建造ユニットの曳航時における強度の検討

各地のドックで建造された建造ユニットは、設置海域まで曳航し、現地で接合して浮体式海上空港となる。

その場合、各建造所から設置場所までの曳航に関し

表 5.14 各部材の座屈応力値

部 材		座 屈 応 力 (kg/mm ²)					
		主 滑 走 路		誘導部・航空機・スポット部		そ の 他 (緑地帯)	
		圧縮座屈	せん断座屈	圧縮座屈	せん断座屈	圧縮座屈	せん断座屈
上	PLATE	(22.4) 23.9	—	(21.9) 23.9	—	(19.1) 23.6	—
	LONGITUDINAL	23.8	—	23.7	—	23.6	—
面	TRANS. OR GIRDER WEB	19.4	12.0	21.4	12.8	21.4	12.8
下	PLATE	(2.5) 9.2	—	主滑走路部と同じ。		主滑走路部と同じ。	
	LONGITUDINAL	22.2	—				
面	TRANS. OR GIRDER WEB	22.3	21.8				
PILLAR*		座屈荷重	座屈応力	座屈荷重	座屈応力	座屈荷重	座屈応力
VERTICAL PILLAR		732 t	22.6	436 t	21.7	347 t	21.1
DIAGONAL PILLAR		432 t	21.5	235 t	19.6	137 t	16.8

* Pillarの座屈荷重は“Eulerの式”Thonsonの式を用いた。()内の値はパネルの長辺に(浮体の幅方向)圧縮荷重が働いた場合である。

表 5.15 単独荷重条件下における応力の計算値と許容値との比較

応力単位: kg/mm^2

荷重番号	単独荷重条件	応力計算場所	円筒型要素 浮体										フーティング型要素 浮体										外力条件					
			浮体上面軸応力		浮体下面軸応力		Vertical Pillar 軸応力		Diagonal Pillar 軸応力		浮体上面 Girder 曲げ応力		浮体上面 Girder せん断応力		浮体上面軸応力		浮体下面軸応力		Vertical Pillar 軸応力		Diagonal Pillar 軸応力			浮体上面 Girder 曲げ応力		浮体上面 Girder せん断応力		
			計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値		計算値	許容値	計算値	許容値	
①	普通時	波	HEAD SEAS	II	±0.1	-12.8	±0.3	-5.5	±0.3	-13.0	±0.4	-11.8	--	--	--	0	-12.8	±0.1	-5.5	±0.1	-13.0	±0.1	-11.8	--	--	--	--	
				III	±0.1	"	"	"	±0.4	-12.7	±0.6	-10.1	--	--	--	0	"	"	"	"	-12.7	"	-10.1	--	--	--	--	
	浪	HEAD SEAS	II	0	"	±0.1	-1.5	±0.1	-13.0	±0.2	-11.8	--	--	--	0	"	±0.2	-1.5	±0.2	-13.0	±0.3	-11.8	--	--	--	--		
			III	0	-11.5	"	"	±0.1	-12.7	±0.3	-10.1	--	--	--	0	"	-11.5	"	"	-12.7	±0.5	-10.1	--	--	--	--		
②	移動荷重	NIGHT STAY	HEAD SEAS	II	±0.8	-17.1	±1.6	-7.4	±0.9	-17.4	±1.7	-15.7	--	--	--	±0.4	-17.1	±0.8	-7.4	±0.5	-17.4	±0.9	-15.7	--	--	--	--	
				III	±0.9	"	"	"	±1.1	-16.9	±2.6	-13.4	--	--	--	±0.5	"	"	"	±0.6	-16.9	±1.3	-13.4	--	--	--	--	
				BEAM SEAS	II	±1.0	"	±1.9	-2.0	±2.0	-17.4	±3.0	-15.7	--	--	--	"	"	±1.0	-2.0	±1.0	-17.4	±1.6	-15.7	--	--	--	--
					III	±1.1	-15.3	"	"	±2.4	-16.9	±4.5	-13.4	--	--	--	"	"	±0.6	-15.3	"	±1.2	-16.9	±2.3	-13.4	--	--	--
③	熱荷重	熱	浮体の長さ方向	II	-2.4	-12.8	2.4	±14.4	2.9	-13.0	-5.1	-11.8	--	--	--	-2.4	-12.8	2.4	±14.4	3.4	-13.0	-5.9	-11.8	--	--	--	--	
				III	"	"	"	"	3.6	-12.7	-7.7	-10.1	--	--	--	"	"	"	"	4.2	-12.7	-8.9	-10.1	--	--	--	--	
				浮体の幅方向	II	"	-12.8	"	"	1.6	-13.0	4.5	-11.8	--	--	--	"	"	"	"	1.9	-13.0	5.3	-11.8	--	--	--	--
					III	"	-11.5	"	"	2.0	-12.7	6.8	-10.1	--	--	--	"	"	-11.5	"	"	2.3	-12.7	8.0	-10.1	--	--	--
④	航空機着陸時	機	軸荷重	I	-1.0	-11.6	1.6	±14.4	-4.6	-13.6	-4.3	-12.9	6.1	±14.4	3.7	-7.2	-1.3	-11.6	2.1	±14.4	-6.1	-13.6	-6.2	-12.9	6.1	±14.4	3.7	-7.2
				III	0	-12.8	0	-1.5	-0.8	-13.0	-0.7	-11.8	--	--	--	0	-12.8	0	-1.5	-0.8	-13.0	-0.7	-12.8	--	--	--	--	
⑤	施設帯の軸荷重	旅客ゲート	施設帯	I	0	-12.8	0	-1.5	-1.4	-13.0	-1.1	-11.8	--	--	--	0	-12.8	0	-1.5	-1.4	-13.0	-1.1	-12.8	--	--	--	--	
				III	0	-12.8	0	-1.5	-1.4	-13.0	-1.1	-11.8	--	--	--	0	-12.8	0	-1.5	-1.4	-13.0	-1.1	-12.8	--	--	--	--	

なお、I: 主溝走路部、II: 誘導路部及び施設帯部、III: 緑地帯部である。

表 5.16 組み合わせ荷重条件下における応力の計算値と許容値との比較

荷重番号	要素 浮体	組み合わせ荷重条件	組 合 び 合 せ 荷 重 条 件 に 対 す る 応 力 (kg/mm^2)																	
			円筒型							フーティング型										
			浮体上面軸応力	浮体下面軸応力	Vert. Pillar 軸応力	Diagonal Pillar 軸応力	浮体上面軸応力	浮体下面軸応力	Vert. Pillar 軸応力	Diagonal Pillar 軸応力	浮体上面軸応力	浮体下面軸応力	Vert. Pillar 軸応力	Diagonal Pillar 軸応力						
②	BEAM SEAS	幅方向 ②移動	-2.9	-12.8	2.7	±14.4	-3.1	-13.0	-4.5	-11.8	-3.3	±12.8	2.9	±14.4	-6.2	-13.0	-7.4	-11.8		
③	HEAD SEAS	③長さ方向 ④熱	④熱	-3.4	-12.8	4.0	±14.4	-4.6	-13.0	4.8	-11.8	-3.7	±12.8	4.5	±14.4	-6.1	-13.0	-6.0	-11.8	
				④熱	-3.4	-12.8	4.0	±14.4	-4.6	-13.0	4.5	-11.8	-3.7	±12.8	4.5	±14.4	-6.1	-13.0	-5.7	-11.8
⑤	BEAM SEAS	⑤施設	熱	⑤施設	-1.4	-12.8	0.5	±14.4	-3.0	-13.0	-5.6	-11.8	-1.6	±12.8	0.6	±14.4	-3.3	-13.0	-6.4	-11.8
				⑤施設	±0.8	-17.1	±1.5	-2.0	-2.7	-17.4	-3.6	-15.7	±0.4	±17.1	±0.8	-2.0	-2.0	-17.4	-2.3	-15.7
⑥	HEAD SEAS	⑥施設	緑地帯	⑥施設	-2.5	-12.8	2.7	±14.4	4.0	-12.7	-8.3	-10.1	-2.4	-12.8	2.5	±14.4	4.3	-12.3	-9.0	-10.1
				⑥施設	-2.5	-12.8	2.7	±14.4	4.0	-12.7	-8.3	-10.1	-2.4	-12.8	2.5	±14.4	4.3	-12.3	-9.0	-10.1

てどの程度の家象まで建造ユニットを安全に曳航できるかを概略検討した。

まず、曳航時の縦強度に関しては、建造ユニットを長さ 300 m、幅 60 m とし、その幅 15 m 部分を取り出して両端自由な 1 本の梁と仮定して、波高及び波周期を順次変化させ、日本海事協会の海底資源掘削船規則の異常時の荷重に対する許容応力値を用いて曳航可能な許容最大波高を求めた。その概略推算の結果、一般に Hogging モーメントの方が Sagging モーメントよりもやや大きいことや許容最大波高はデッキ下面の圧縮応力によって決まることが判明した。そして、その許容最大波高は、最近 10 年間の太平洋沿岸の曳航海域全域における家象に対して 99.8% の確率で安全に曳航できることが判明した。

なお、横波を受けた場合の最大応力値は、許容応力値の 10% 程度であることも確認された。

つぎに、曳航時の局部強度に関して縦強度と同様な手法に基づいて各構造部材に働く応力を求めた。その概略推算した結果、縦波の場合には最大応力は下面ガーダーに生じ、その値は許容応力以内に収まるが、斜め 45° の波の場合には、下面ガーダーの応力値が許容応力を上まわることが判明した。したがって、曳航可能な確率は、縦強度より局部強度、特にデッキ下面のガーダーで決定され、曳航海域全域の家象条件では 99.7% となり、最も厳しい房総沖の冬期の家象条件で 99.1% の確率で安全に曳航できる。

以上、建造ユニットの曳航時における強度を概略検討した結果、台風及び大型低気圧が通過する場合を除けば構造強度的には充分安全が確保されていることが判明した。

(8) 浮体式海上空港の固有振動周波数

一般に、曲げ剛性をもつ弾性基礎上の棒の固有振動

数を推定する式にせん断撓みの影響を考慮して、弾性支持された一様平板に適用することによって、浮体式海上空港の固有振動周波数は、次式で推算することができる。

$$f = \frac{\phi}{2\pi} \sqrt{gEI/WL^3}$$

ここで、 $p = \pi^2(n^2 + \eta^2 S^2)$ と置いて

$$\phi^2 = \frac{p^2 + pkL^2B/k' \cdot GA + kL^4B/EI}{1 + (\alpha + \beta)p + k\beta L^2B/k' \cdot GA}$$

- L : 長さ
- B : 幅
- W : 全重量
- EI : 曲げ剛性

$k'GA$: 有効せん断剛性

$$\alpha = EI/k' \cdot GA \cdot L^2$$

$$\beta = k_r^2/L^2$$

$$\eta = L/B$$

k : 支持バネ定数

k_r : 回転半径

n : 長手方向の固有振動モードの節数

S : 幅方向の固有振動モードの節数

である。

上式を用いて主滑走路用浮体が円筒型及びフーティング型要素浮体で支持された場合の固有振動周波数を求めるために代入した数値を表 5.17 に、その結果を図 5.14 に示す。

表 5.17 主滑走路用浮体の固有振動周波数概算用数値

項目	要素浮体	
	円筒型	フーティング型
長さ (L)	5,000 m	
幅 (B)	840 m	
構造重量 (W)	3.16×10^9 kg	
付加重量係数	0.3	0.6
付加重量 (ΔW)	9.48×10^8 kg	1.90×10^9 kg
曲げ剛性 (EI)	1.80×10^{17} kg \cdot cm 2	kg \cdot cm 2
有効せん断剛性 (kGA)	2.48×10^{10} kg	
支持バネ定数 (k)	7.53×10^6 kg/cm 2	7.17×10^6 kg/cm 2

この図から、長手方向の固有振動周波数は、節数に関係なく、円筒型で 0.17 Hz、フーティング型で 0.20 Hz と推算された。その主たる要因は、長さが長大であるために節数が 10 程度までであれば節数による影響が無視できる程度になるためである。しかしながら、極端に節数を大きくすれば固有振動周波数は、当然の結果として変化することになる。

(9) 航空機の墜落による損傷

浮体式海上空港の上部構造物に航空機が墜落した場合、大略どの程度の損傷を受けるかを塑性崩壊エネルギー法を用いて概略検討を行った。

上部構造物は、簡素化して上面と下面の鋼板と pillar だけとし、その他の部材は余剰強度分であるとする。

航空機は、10 m の高さより 500 t の鉄の塊が自然落下するものと仮定し、その衝突エネルギーがそのまま破壊エネルギーになるものとする。

そして、破壊パターンは、長さ 60 m で幅 30 m と長さ 30 m で幅 15 m の 2 種類について検討する。

その結果、前者の場合に 2.5 m 程度、後者の場合に 4.0 m 程度陥没し、構造物の下面まで陥没量が達しないことが判明した。

(10) コンクリート要素浮体の検討

ここでは、円筒型要素浮体をコンクリート製で設計及び施工する手法を検討した。

a) 設計条件

i) 自然環境条件は、鋼製の要素浮体と同様に第 2 章において既に設定されている値を用いる。

ii) 荷重条件は、自然環境条件の中の波浪、風、潮流及び潮位等による荷重を考慮する。

iii) 許容応力

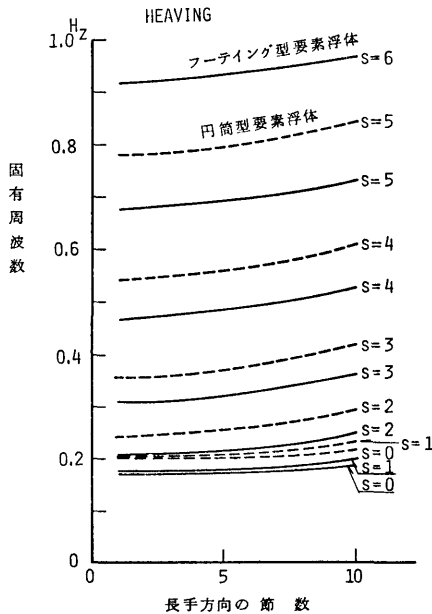


図 5.14 主滑走路用浮体の上下振動の固有周波数

使用する鉄筋及び PC 鋼材の許容応力は、日本海事協会の規則に準拠し、コンクリートについては、フルプレストレスを用いて異常時の許容引張力をひび割れ防止の意味から日本海事協会の規則に準拠して、圧縮が 200 kg/cm^2 、引張が 30 kg/cm^2 とする。

b) 設計

まず、要素浮体の乾舷は、鋼製要素浮体と同様に 5.0 m とし、要素浮体の高さは、要素浮体の自重及び要素浮体 1 個当りにかかる上部構造物の重量等を考慮し、要素浮体の直径を 7.3 m とした場合には 15.4 m 及び 14.0 m となり、進水時の喫水を 5.0 m として

要素浮体の直径を太くした場合には、要素浮体の高さが 10.6 m となる。

つぎに、要素浮体に作用する荷重としては、静水圧、波浪水圧、上下動による底板荷重及び波浪による曲げモーメント等を考慮した。そして、これらの荷重を組み合わせて引張応力が円筒の高さ方向及び円周方向に作用するとして、これに見合うプレストレス量を推算した。以上で試設計された 3 型式の要素浮体の比較表を表 5.18 に示す。

c) 施工法

施工法としては、一体として打設する手法とリング

表 5.18 コンクリート製要素浮体の試設計

	試 設 計 1	試 設 計 2	試 設 計 3
1) 形状			
内 径	6.9 m	6.9 m	9.75 m
外 径	7.3 m	7.3 m	10.25 m
2) 乾舷(完成時)	5.0 m	5.0 m	5.0 m
喫水(進水時)	8.7 m	7.2 m	5.0 m
3) 進水時のフローターの有無	必 要 155m 以上の体積を持つ フローター	必 要 93m 以上の体積を持つ フローター	不 要
4) 使用コンクリート	普通骨材コンクリート	軽量骨材コンクリート	軽量骨材コンクリート
5) 構 造	一体物	分割リング・組立会	分割リング・組立式
6) 重 量	約 200 t	約 160 t	約 220 t
7) 単 価 比	100	90	125
8) 特 徴	<ul style="list-style-type: none"> ○ 約 200 t の一体打ちコンクリート構造物のため、ドック内での打設が、200 t 以上の能力を持つフローティングクレーンを用意し、岸壁近くで打設・養生する。 ○ 進水時の喫水を得るために、フローターが必要。 ○ 下端部が球状となつているために大型の架台が、各ユニットに必要。 ○ 要素浮体の中心間隔が 1.5 m となつており、各要素浮体の取りはずし撤去が可能。 ○ 水深 20 m 程度の深さを有する場所が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 要素浮体が複数のリングに分割され、また軽量コンクリートを使用しているため、作業用クレーンは比較的小型で済む。 ○ 進水時の喫水を得るためにフローターが必要であるが、軽量化を計つているので、試設計 1 の約半分の体積のフローターで済む。 ○ 目立たせるための特別な架台は必要ない。 ○ 同 左 ○ 同 左 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 要素浮体が複数のリングに分割され、また、軽量コンクリートを使用して軽量化を計つているが、試設計 2 よりは重くなつている。 ○ フローターは不要。 ○ 同 左 ○ 要素浮体の外径が 10.5 m であるのに対し、各要素浮体の中心間隔が 1.5 m であるので、単体での撤去は困難。 ○ 比較的浅い水深でも適用可能。

に分割して打設して組み立てる手法とについて検討した。

i) 一体打設

建造ユニットを建造するヤード内にプレストレスコンクリート製要素浮体を打設するヤード（長さ 300 m、幅 50 m）を 300 t 吊起重機船が接舷可能な岸壁付近に設ける。そして、そのヤードにおいて同時に 52 個の要素浮体を製作し、起重機船で吊り上げて海上の仮置き場にストックする。

ii) リング分割

ドック近くの製作ヤードにおいて要素浮体をリングに分割して軽量骨材コンクリートで打設し、ドックヤードの側壁上で組み立ててドック内に搬入する。

以上が要素浮体をコンクリート製で製造する場合の検討結果である。また、ここで提示した 3 種類の喫水の要素浮体及び一体またはリング分割施工に関しては、総て適用可能であるために詳細検討は、実際の試設計段階で選定すべきであるといえる。

第6章 浮体式海上空港の係留装置に関する検討

浮体式海上空港の係留装置は、通常時においては浮体が空港としての機能を充分発揮できるように浮体を位置保持し、異常時においては、浮体を充分安全に係止できればよいといえる。

なお、係留装置に関する検討の主体は、港湾技術研究所であったが、浮体の挙動量を推定するためには、係留装置を含めた検討が必要となる。

したがって、ここでは、港湾技術研究所とは別途に行った係留装置の形式選定から装置の基本計画及び安全性等の総合検討に関して概要を紹介する。

6.1 係留装置の評価手法

6.1.1 評価手法の概要

係留装置の評価手法としては、以下に述べる手法を適用した。

まず、既存技術の範囲内で建造可能な方式を7方式設定し、これらの方式について同一な設計条件に基づいて概略設計を行う。

つぎに、構造強度、安全性、耐久性、施工性及び建造費等について比較検討して総合的に適合性の高い方式を選定し、それらの基本計画を行う。

最後に、選定された方式に対して、静的・動的強度、耐震性、浮体の挙動に基づく係留力と不均一係留力及び係留装置の安全性の検討を行うと同時に、船舶や航空機等の衝突等の災害モデルに対する安全性さらには、施工、維持補修、建造費及び維持補修費等を含めた経済性についての検討を行う。

以上が常用係留装置を選定評価する手順であるが、さらに係留装置の安全性を高めるために、バックアップ係留装置を装備する場合の選定評価する手順及び適合性の高い方式を見出し、概略設計と概略検討を行った。

6.1.2 選定・評価手法の流れ図

常用係留装置に関する選定・評価手法の流れ図を図6.1に、バックアップ係留装置に関しては図6.2に示す。

6.2 常用係留装置の検討

既存技術の範囲内で建造可能な係留方式としては、没水リンク方式、カンチレバー方式、スラスター方式、テンションレグ方式、ドルフィン索・鎖方式、シンカ

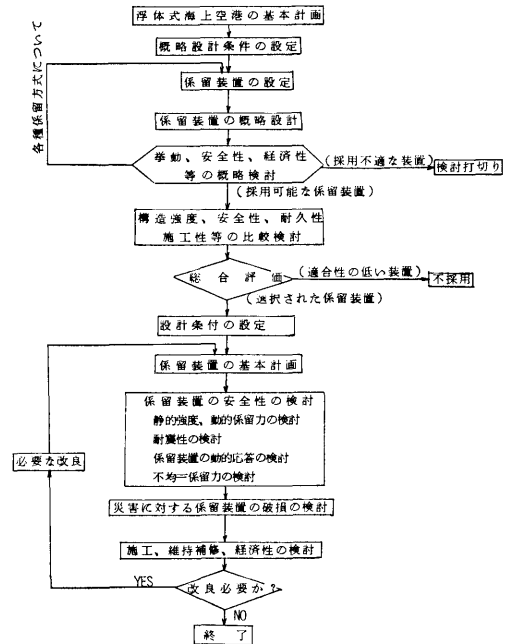


図 6.1 常用係留装置の評価手法の流れ図

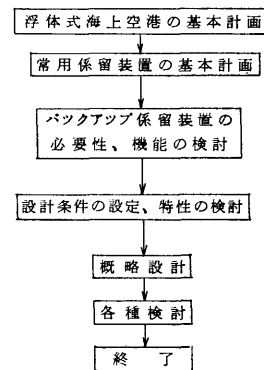


図 6.2 バックアップ係留装置の流れ図

一索・鎖方式及びドルフィンリンク方式の7方式が考えられる。これらの方式について係留特性、施工性、工期、経費、耐久性、保守、拘束度、本体の伸縮の影響、没水部の機能、緩衝機能、人為的外力の影響及び地震の影響等に対する定性的な検討を行った。その場合、要求性能及び外力条件は、主滑走路用浮体の許容移動量を、第1段階の目安として、異常時に長さ方向

が ±100 cm 以内、幅方向が ±50 cm 以内及び上下方向が ±40 cm 以内とし、通常時に幅方向が ±20 cm 以内とすること、また、浮体に働く定常外力を、異常時において長さ方向に 13,000 t、幅方向に 21,000 t 程度、通常時において長さ方向に 1,300 t、幅方向に 2,500 t 程度とすることと設定した。

以上に基づいて7方式の常用係留装置の概略設計を行い、初期検討を行った結果次のような結論に到達した。

i) 没水リンク方式

許容移動量を満足しないこと、機構の耐久性が問題となること及び海底の水深の一樣性と地盤沈下が問題となること等によって不適当と判断される。

ii) カンチレバー方式

杭本数が多く施工精度に問題があることや杭と浮体との摺動機構に問題があること等により安全性の面から実現が難かしいと判断される。

iii) スラスタ方式

運転及び保守にかかる経費が莫大になることやスラスタ制御用のソフトウェア開発に相当な時間と費用が必要となること等から不適当と判断される。

iv) テンションレグ方式

設置水深が浅く、干満差が大きいこと等によって係留ラインに張力調整装置が必要となると同時に実績が乏しいことなどを考慮して不適当と判断される。

v) ドルフィン索・鎖方式

一応係留装置として成立する可能性がある。

vi) シンカー索・鎖方式

一応係留装置として成立する可能性がある。

vii) ドルフィンリンク方式

一応係留装置として成立する可能性がある。

したがって、常用係留装置として可能性がある方式は、ドルフィン索・鎖方式、シンカー索・鎖方式及びドルフィンリンク方式の3種類であるといえる。

そこで、これらの3方式について構造強度、安全性、耐久性及びその他の項目で詳細な比較検討を行った。

その結果、空港として使用している状態において浮体の変位が最も小さく、100年台風時の係留力が過大にならず、地震時に浮体が大変位しても係留力が過大にならず、温度差による浮体の伸縮影響を受けない、及び価格が適当であること等の理由から、本調査研究においては、常用係留装置としてドルフィンリンク方式が最も適用性が高いという結論を得た。

(108)

6.3 常用係留装置の基本計画

6.3.1 設計条件

設計条件の内、設計水深、気象・海象条件、温度条件、浮体に働く外力の推算値及び耐用年数等は既に前章までにおいて設定した値を用いる。

(1) 土質条件

土質条件は、航空審議会の資料である「関西国際空港の規模及び位置」に示されている土質データを適用する。なお、同一場所において昭和53年度にボーリング調査が行なわれているが、上記資料と余り変わらないことを確認している。

(2) 地震条件

水平震度は、港湾施設の基準に基づき0.25を適用し、地震波については、表6.1の特性を適用する。

表 6.1 地震波の特性

	地 震 波	
	八 戸	板 島 橋
最大加速度	170gal	220gal
卓越周波数	0.9 Hz	3.6 Hz
主要動継続時間	40sec	10sec
最大変位	10.0cm	3.4cm

(3) 許容応力度

a) 構造用鋼材

構造用鋼材の許容応力度は、港湾施設の基準を適用して表6.2に示す値とする。なお、軸方向圧縮応力度については、座屈長による許容応力度の低減を日本道路協会の「道路橋示方書解説」に基づくこととする。

表 6.2 構造用鋼材の許容応力度

応力の種類	鋼種 SS41(kg/cm ²)
軸方向引張応力度(純断面積について)	1,400
軸方向圧縮応力度()	1,400
曲げ引張応力度()	1,400
曲げ圧縮応力度()	1,400
せん断応力度()	800
支圧応力度(鋼板と鋼板)	2,100

b) 鋼ぐい材

鋼ぐい材の許容応力度は、港湾施設の基準を適用して表6.3に示す値とする。

表 6.3 鋼ぐい材の許容応力度

応力度の種類	鋼 種	
	STK 41	SS41 (kg/cm ²)
軸方向引張応力度 (純断面積につき)	1,400	
軸方向圧縮応力度 (総断面積につき)	$\frac{l}{\delta} \leq 20$	1,400
	$20 < \frac{l}{\delta} < 93$	$1,400 - 8.4(\frac{l}{\delta} - 20)$
	$\frac{l}{\delta} \geq 93$	$12,000,000$ $6,700 + (\frac{l}{\delta})^2$
曲げ引張応力度 (純断面積につき)	1,400	
曲げ圧縮応力度 (純断面積につき)	1,400	
軸方向力及び曲げ モーメントを受ける 部材	(1) 軸方向力が引張の場合 $\sigma_t + \sigma_{st} \leq \sigma_{ta} \text{かつ} -\sigma_c + \sigma_{bc} \leq \sigma_{ba}$ (2) 軸方向力が圧縮の場合 $\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{ba}} \leq 1.0$	
せん断応力度	800	

表 6.4 荷重の組み合わせと許容応力度の割増し係数

荷重の種類	自然条件		備 考	
	100年台風時	地震時		
ドルフィン自身に作用する外力	自重	○	○	
	風荷重	v = 9.94m/s	○	10分間平均風速
		v = 50.0m/s	○	同 上
	波圧力	H = 1.0 m	○	
		H = 9.2 m	○	最大波高時
	潮流力	U = 0.8 kt	○	
U = 2.0 kt		○		
地震時の影響			○	
の浮体から の外力 係留力	地震時	○		
	100年台風時	○		
許容応力度の 割増し係数	ドルフィン	1.0	1.5	
	リンク	1.5	1.5	

(4) 荷重の組み合わせと許容応力度の割増し係数

荷重の組み合わせ及び許容応力度の割増し係数は、完成時において表 6.4 に示す値になるものとする。

(5) ぐいの許容支持力

ぐいの許容支持力は、港湾施設の基準に基づいて極

表 6.5 ぐいの許容支持力に対する安全率

自然条件	安 全 率	
	鉛直支持力	引抜き力
100年台風時	2.5以上	3.0以上
地震時	1.5以上	2.5以上

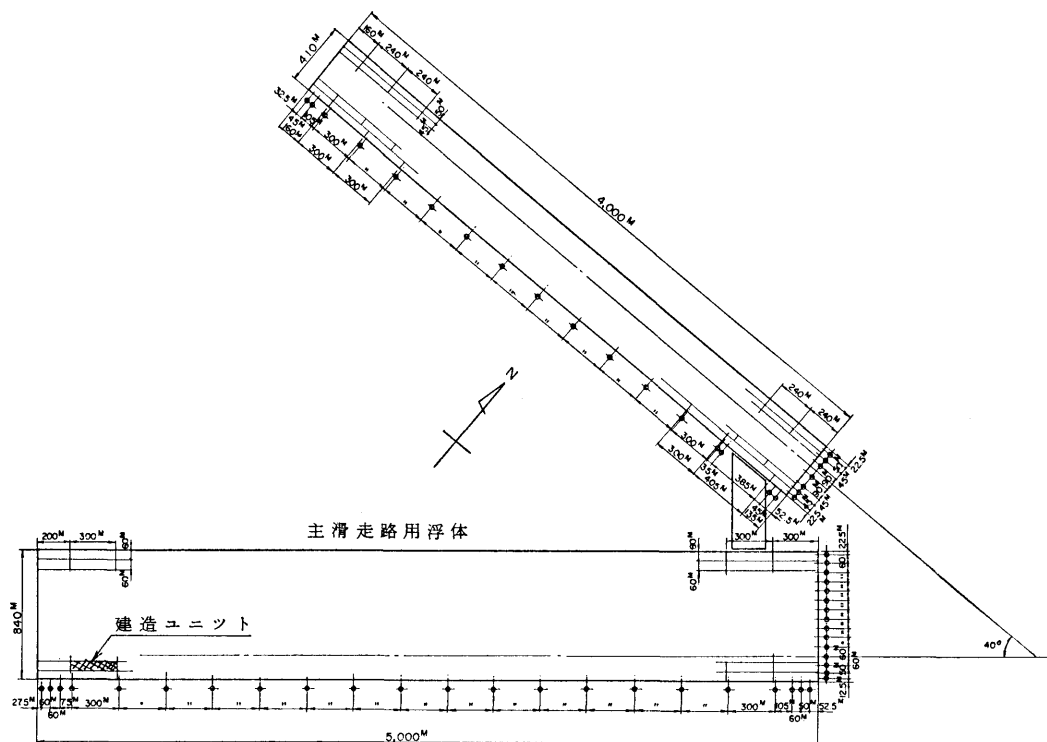


図 6.3 係留用ドルフィンの配置図

限支持力を表 6.5 に示す安全率で除した値を用いる。

6.3.2 ドルフィン計画

(1) ドルフィンの形式

常用係留装置用のドルフィンとしては、気象・海象条件、地盤条件及び地理的条件等を考慮すると斜ぐい式、直ぐい式、ジャケット式及び鋼かくコンクリート式の4種類の形式が考えられる。

この4種類のドルフィンについて一般図、強度、施工、維持及び経済性等を概略検討した結果を表 6.6 に示す。そして、概略検討した結果、4種類とも大差がないが、水平荷重に対する強度を高めることが出来る斜ぐい式とジャケット式を今回の調査研究では適合性が高いという結論を得た。そして、構造様式が簡単で経済的であると思われる斜ぐい式を一応詳細検討対象として選定した。

(2) ドルフィンの基数、力量及び配置

a) ドルフィンの基数

ドルフィンの基数を設定するに当たって、① ドルフィン1基当りの力量を可能な限り大きくしてドルフィンの基数を少なくする、② 係留側の各建造ユニットは少なくとも1基のドルフィンに係留する並びに③ 浮体の回頭による端部に掛る荷重の増加をなくすために端部ドルフィンの基数を増設する等を考慮した。

その結果、主滑走路用浮体のドルフィンの基数は、建造ユニットの数と端部に各2~3基の補強を加味し、長辺が22基、短辺が15基とする。また、補助滑走路用浮体のドルフィンの基数は、主滑走路用浮体と同様な手法で長辺17基、短辺7基とする。

b) ドルフィンの力量

まず、1基当りの係留力を推算すると、概略設計時に求めた、長さ方向が約1,530t、幅方向が約1,570tを用いる。つぎにゴムダンパーの上限の最大圧縮荷重の約2,800tを考慮する。そして、ドルフィン1基当りの力量は、3,000tであるとした。

表 6.6 ドルフィン型式の比較検討

	斜ぐい式	直ぐい式	ジャケット式	鋼かくコンクリート式
一般図				
強度	大きな水平荷重に対して十分な強度が得られる。変位量が小さい。	鋼管ぐいがすべて直ぐいのためくい本数が斜ぐい式より多い割には大きな水平荷重を受けられない。	大きな水平荷重に対して十分な強度が得られ、斜ぐい式より海底面上の構造が剛である。	本型式は鉛直荷重に対して有効であるが、水平荷重が大きい場合には適さない。
施工	直ぐい式よりくいの打設が難しいが可能である。水中作業が無く作業は容易である。	すべて直ぐいなのでくい打は容易である。水中作業が無く作業は容易である。	ジャケットをガイドとしてくい打が可能。作業は容易である。	水中作業があり他の工法より作業が難しい。
維持	干満帯、飛沫帯がくい部であるので防食防錆工が容易である。	干満帯、飛沫帯が直ぐいであるので防食防錆工は容易である。	干満帯、飛沫帯にジャケットの格点があると防食防錆工が難しい。	脚の外面積が少ないので防食防錆工は容易である。
経済性	四工法の中で最も経済的である	ジャケット式より高い。	斜ぐい式より若干高いと推定される。	四工法の中で最も高い。
総合評価	適している。	水平荷重が大きい係留ドルフィンには適当である。	適している。	水平荷重が大きいドルフィンには不適当である。

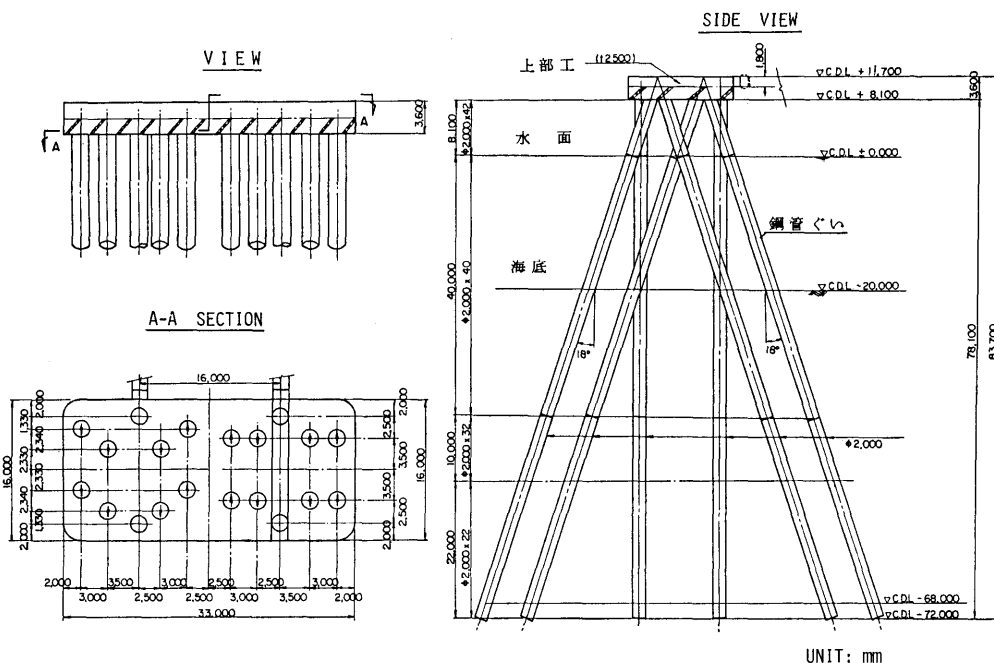


図 6.4 斜ぐい式ドルフィンの概要図

c) ドルフィンの配置

ドルフィンの配置は、温度変化による浮体の伸縮の影響を少なくするために浮体の長辺と短辺の夫々1辺のみで係留するL字型配置とする。

以上の結果に基づいてドルフィンを図 6.3 に示すように配置することとした。

(3) ドルフィンの構造

ドルフィンには、下部が大口径鋼管ぐいで上部工がコンクリートを充填した鋼板製とする。

a) 上部工

上部工には、浮体とドルフィンとを連結するリンクを2本取り付けることとする。そして、ぐいの引抜き抵抗及び耐震性等を考慮して長さ 16.0 m、幅 33.0 m、高さ 3.6 m で重量が約 2,500 t の上部工とした。

b) 斜ぐい

ぐいは、材質を STK 41 または SS 41 の 2,000 mmφ の大口径鋼管とする。そして、ドルフィンとしては、直ぐい 4 本、18° 傾斜の斜ぐいが 16 本、合計 20 本で構成することとした。

以上によって設計された力量 3,000 t の斜ぐい式ドルフィンの概要図を図 6.4 に示す。

6.3.3 ダンパーの計画

(1) 係留特性の検討

ドルフィンリンク方式には、ドルフィンとリンクともに剛性が大きいために浮体と連結させる際、緩衝装置を介することが必要である。

その緩衝装置の係留特性としては、線形型、ソフト型及びハード型とが一応考えられるが、浮体式海上空港の場合、空港として使用する通常時には浮体に働く外力に対する移動量を極力小さくするために強いバネ定数を有し、100 年台風などの異常時には、外力に対して浮体が大変位しても係留装置の破壊を防ぐために弱いバネ定数を有しているものが望ましい。

その結果、係留特性は、ソフト型が最も適しているといえる。

(2) 緩衝装置の形式

ソフト型の緩衝装置としては、ゴムダンパー方式、バネオイルダンパー方式及び油圧シリンダー方式の3方式が考えられるが、保守頻度が少なく、機構が簡単で信頼性が高く、施工性が容易であり、かつ価格が適正であることからゴムダンパー方式を選定した。

(3) ゴムダンパーの圧縮特性

ゴムダンパーとしては、一般にゴム防舷材として使用されているものが現時点において最も適用性が高いものである。一般のゴム防舷材の中で初期変位に対してバネ定数が大きく、大変位に対してバネ定数が小さ

い剛性漸減のソフト型の保留特性を有するものは、中空円筒型、円錐型、中空角型、中空台形型及び開脚型等がある。その中から、本調査研究においては、一応暫定的に中空円筒型を用いて以後の検討を進めることとした。

a) 圧縮特性の変動

ソフト型のゴム防舷材を圧縮だけのダンパーとして使用する場合、製造誤差、経年変化、周囲温度依存性、クリープ特性、周波数依存性及び繰り返し圧縮回数依存性等によって基本の圧縮特性が変動する。それらについて現時点において説明されている変動要因と変動範囲を100年台風時及び地震時とに区別して示すと表6.7のようになる。

この表から、100年台風時には静的基準圧縮特性を100%ととし、上限を111%、下限を75%とすればよく、地震時には上限を124%、下限を77%とすればよいことになる。

表 6.7 ゴムダンパーの圧縮特性の変動範囲

変動要因	変動範囲(%)	
	100年台風時	地震時
製作誤差	96 ~ 104	
経年変化	なし	
周囲温度依存性	95 ~ 110	95 ~ 123
周波数依存性	101 ~ 102	100 ~ 102
圧縮回数依存性	82 ~ 95	85 ~ 95
合計	75 ~ 111	77 ~ 124

b) 圧縮特性

ゴムダンパーは、常に圧縮のみに用いることとする。その圧縮特性を決定するには外力に対して基数及び圧縮特性を変化させて浮体の挙動シミュレーション計算を繰り返し行って最適な基数及び圧縮特性を選定することが望ましいが、本調査ではこれまでに概略設定された値を用いてドルフィン1基当りのゴムダンパーの圧縮特性を設定することとした。

i) 常用最大荷重

ゴムダンパーの最大圧縮荷重が2,800tであるので、この値を上限とし、下限を表6.7の値(75/124)から約1,700tとする。

ii) 常用最大変位

異常時における浮体の許容移動量を±1m以下にするには、ゴムダンパーの変位量も1m以下にする必要があるため常用最大変位は1.0m程度とする。

iii) 低荷重時の圧縮特性

(112)

横風最大時の圧縮荷重が200t程度で浮体の変位を10cm以下にする圧縮特性を有するものとする。

c) ゴムダンパーの選定

本調査研究用のゴムダンパーに用いる中空円筒型ゴム防舷材は、外径、内径、高さ、フランジ部の曲率及びゴム質等を変えることにより広範囲に圧縮特性を変化させることができる。

ここでは、1例として次のごとくゴムダンパーの主要目を設定する。

型式: 中空円筒型

主要寸法

高さ: 2.25 m

外径: 2.10 mφ

内径: 1.40 mφ

重量: 7.5 t

1 ロッド分の数: 片側4ケ, 両側8ケ

1 ドルフィン分の数: 16 ケ

以上において設定されたゴムダンパーの概要図を図6.5に、圧縮特性を図6.6に示す。

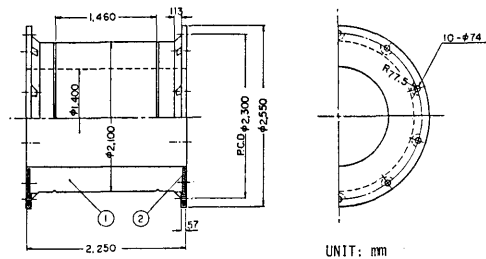


図 6.5 ゴムダンパーの概要図

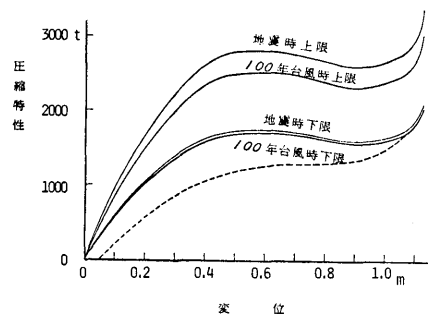


図 6.6 ゴムダンパーの圧縮特性

d) ゴムダンパー装置

ゴム防舷材は、1 ロッドにつき片側4ケで両側8ケが取り付けられており、図6.7に示すように浮体の変位に対して常に圧縮のみに使用される。

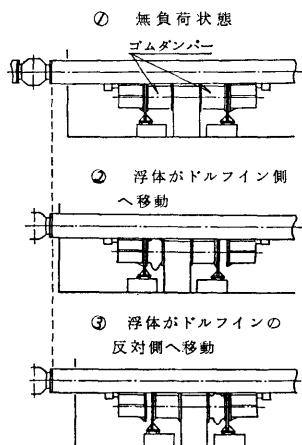


図 6.7 ゴムダンパーの作動図

6.3.4 リンク機構の計画

(1) リンク機構の基本構成

1基のドルフィンに2組のリンク機構を取り付ける。その1組のリンク機構は、①ドルフィン側、中間及び浮体側の3本のロッド、②ロッドを連結する2個のユニバーサルジョイント、③ゴムダンパー、④ダンパー押え、そして⑤浮体側のロッドのガイ

ドローラーから成り立っている。

(2) 主要寸法及び機能

a) 中間ロッドの長さは、上下及び水平方向の浮体とドルフィンとの相対変位が $\pm 3.5\text{m}$ でユニバーサルジョイントの作動角を 10° 以内とすることから 30m とした。

b) リンク機構の各部強度は、通常時 750t 、異常時 $1,500\text{t}$ の水平方向荷重が作用するものとして主要寸法を設定した。なお、異常時の強度計算においては水平方向荷重を許容応力度を 50% 割増した。

i) ロッドの断面

ロッドは一辺が 1.8m の正方形で 22mm 厚の鋼板製であり、これに座屈防止用の 19mm 厚で長さ 200mm の補強鋼板を各辺2板を外板内側に取り付ける。また、適当な間隔にダイアフラムを配置する。

ii) ユニバーサルジョイント

ユニバーサルジョイントは、フランジヨーク、カップリングヨーク及びカバーによって構成されている。

(イ) フランジヨークは、鋳鋼製であり、ロッドと 90° に交差する軸を有し、ベアリングを介してカップリングヨークに取り付ける。

(ロ) カップリングヨークは、ドーナツ状の鋳鋼

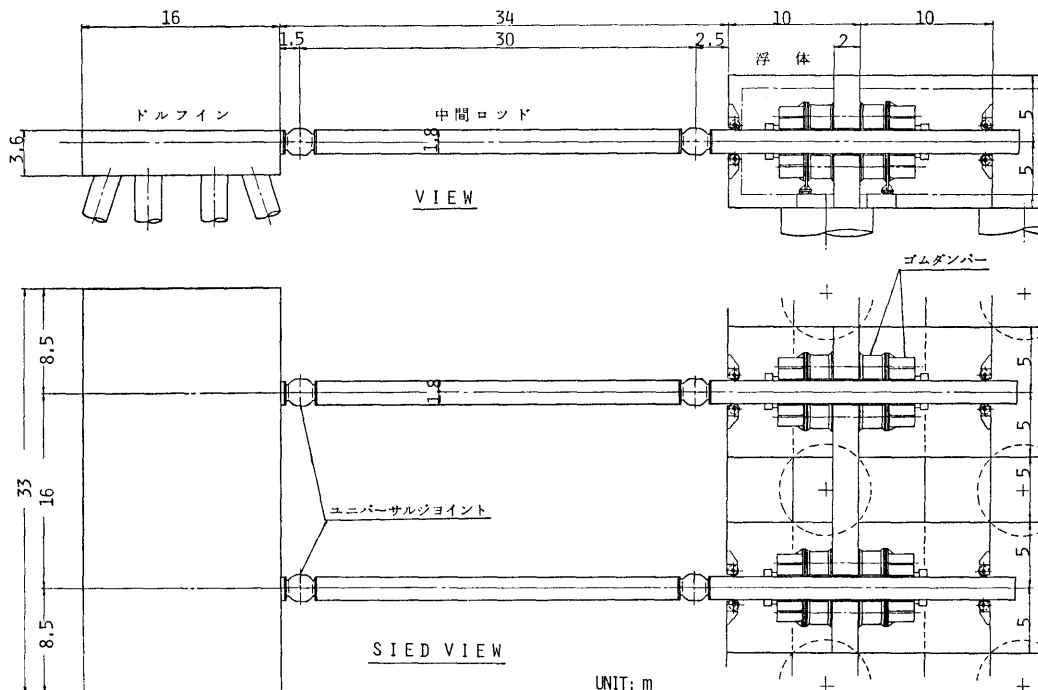


図 6.8 リンクの機構の概要図

製であり、ドーナツ状の円周の4個所に孔があって2つのフランジヨークの軸がはまるようになっている。この役目は、ロッドに作用する軸力をフランジヨークを介して他のロッドに伝えるものである。

(ハ) カバーは、2つ割球状の鋳鋼製であり、フランジヨークの球状部とカップリングヨークの側面との間に取り付け、カップリングヨークの側面にボルトで取り付けられており、フランジヨークの球状部でスライドする。

(3) ガイドローラー

ガイドローラーは、鋳鋼製であり、橋梁の沓に類似しているために強度計算は日本道路協会の「道路橋示方書・同解説」に準拠し、ガイドローラーの寸法は、直径 80 cm、幅 33 cm とした。

以上によって計画されたリンク機構の概要図を図 6.8 に示す。

6.4 常用係留装置の安全性の検討

6.3 節において基本計画された係留装置に関して種々の角度から安全性を概略検討した。

その検討内容は静的と動的とに区分して行った。

6.4.1 静的強度

常用係留装置の静的強度の検討項目としては次の事項である。

(1) ドルフィンの静的強度

ドルフィンの静的強度は、100 年台風時については、上部工自重、係留力、波力、潮流力及び風圧力の定常外力が作用した場合のくいの変位量、くいの最大断面力、最大応力度及びくいの限界支持力に対する安全率等を求め、ドルフィンが基本仕様を満していることを確認した。また、ドルフィンが弾性挙動して大変形後でも復原する最終耐力を推算した。

(2) リンク機構の静的強度

リンク機構の静的強度に関しては、通常時及び異常時の荷重条件に基づいてリンク機構の各部材に作用する軸力、反力及び曲げモーメントを求め、各部材の許容応力度以下であることを確認した。

(3) ユニバーサルジョイントの強度

ユニバーサルジョイントの強度に関しては、フランジヨーク及びカップリングヨークを3次元有限要素解析と1/4縮尺模型による静的引張破壊試験とを行い、弾性限界荷重及び破壊荷重共に充分設計荷重を満足していることを確認した。

(4) ゴムダンパーの強度

ゴムダンパーは、他のリンク機構の強度に対して充分大きい荷重まで破壊しないために過圧縮による破損は全く考えなくてよいといえる。

(5) 不均一係留力に対する検討

不均一係留力が生じる要因として100年台風時の均一定常外力によるもの、温度差による変形で生じるもの及び係留特性の不均一によるもの等を考えた。そして、これらの不均一が最も厳しい条件に対して各係留点における弾性変形量を推算し、係留装置には不均一係留力による影響が無視できる程度であることを確認した。

6.4.2 動的強度

常用係留装置の動的強度としては、係留装置に最も影響が大きいものとして次の事項について概略検討を行った。

(1) 耐震性の検討

常用係留装置が地震に対して基本的に安全な装置であることを次の事項について検討した。

a) 震度法による検討

港湾施設基準に準拠して地震時のドルフィンの動的強度を震動法で検討し、充分安全であることを確認した。

b) 設定地震波による検討

想定される地震として遠距離海洋型、中距離内陸型及び近距離型の規模を考え、それに基づいて既往の大型地震として1968年の十勝沖地震による八戸港及び1968年の豊後水道地震による板島橋における地震波の記録波形を用いて地盤、ドルフィン、浮体とドルフィン系及び浮体等の挙動を数値シミュレーションによって実時間の時系列で求めた。その結果、ドルフィンの上部工の挙動量が大きくなり、それに伴って浮体の前後動、左右動及び船首揺れが相当大きくなることが判明したが、係留装置に対しては安全であることを確認した。

c) 正弦波形の地震波による検討

浮体の挙動の固有周波数に近い周波数成分を大量に含む地震波を想定して正弦波形の地動に対する浮体の挙動量を検討した。その結果、浮体の固有周期に近い正弦波形の地震波では浮体端部の変位及びダンパーの変形量が大きくなるが、ゴムダンパーの変形量にして1.0 m以下に収まることが判明した。

以上の検討結果としてドルフィンリンク方式による常用係留装置は、地震に対して浮体の変位、ゴムダンパーの変形及びドルフィンの強度等基本的に安全が確

保できることを確認した。

(2) 浮体の挙動に基づく係留装置の動的強度

浮体の挙動が係留装置に及ぼす影響を検討するため、係留系を骨組モデルの線形バネと1質点系モデルの非線形バネに置換して種々の外力中における浮体の挙動に対する係留装置の動的特性を究明した。その結果、係留系の動的特性は静的問題として取り扱った特性と大差ないことが判明した。したがって、係留装置は浮体の挙動に対しても充分安全であることが確認された。

6.4.3 災害に対する係留装置の破損程度

係留装置の災害に対する破損程度を考える場合に、実際に生じ得る現象の内最も影響が大きい船舶または航空機の係留装置への直接衝突を検討した。

(1) 船舶の衝突

泉州沖を航行する船舶を航空審議会資料に基づいて検討した結果、内航最大級の船舶は長さ 93 m、幅 15.4 m、高さ 8 m、満載喫水 6.7 m で満載排水量が 6,000 MT である。この船舶が4ノットで漂流してドルフィンの上部工またはリンクに直接衝突するとして衝突エネルギーと破壊エネルギーとを求めて破損の程度を検討した。その結果、ドルフィンの上部工では1基、リンクでは2本程度の破壊で収まることが判明した。

(2) 航空機の衝突

現在の大型ジェット機の全備重量は約 350 トン程度であるが、航空機の大型化を考慮して全備重量 500 トンの航空機がステップ関数で近似した衝突荷重と時間関数との関係を用いてドルフィンの上部工に衝突した場合を検討した。その結果、ドルフィンは衝突開始後約 0.23 秒で杭の降伏点を越えて破壊し、まだ運動量が残るが、実際の衝突では機体が離散すると思われるのでドルフィンが一基のみの破壊と考えればよいと思われる。

6.5 バックアップ係留装置の検討

本調査研究において選定したドルフィンリンク方式の常用係留装置は、種々検討を行い基本的には充分安

全が確保されることが確認されたが、浮体式海上空港の公共性を加味し、より安全性を確実なものにするためにバックアップ係留装置を装備するならばという仮定に基づいてバックアップ係留装置の基礎的な検討と概略設計を行ったので、その概要だけを紹介する。

6.5.1 初期検討

バックアップ係留装置の初期検討は、図 6.2 に示した評価手法の流れ図に沿って行った。

まず、バックアップ係留装置は、常用係留装置が万一破損した場合のみの係留力を分担し、浮体の漂流を防ぐという機能を有するものであるとした。

その立場から常用係留装置を選定したと同様に、バックアップ係留装置として可能性の高いものを選定した。その結果、現時点においてはドルフィンリンク方式を常用係留装置とした場合には、バックアップ係留装置としてシンカー索・鎖方式が最も有力であることが判明した。

6.5.2 シンカー索・鎖方式の概略設計

概略設計されたバックアップ係留装置のシンカー索・鎖方式は、大略次の通りである。

(1) 係留ライン

1 条の係留ラインは、152 mmφ 3 種チェーンで全長 200 m とし、上端より 30 m の個所に 50 t の中間シンカーを取り付ける。

(2) 係留ラインの条数

係留ラインの破断強度を最大張力の 4 倍とし、係留ラインの条数を求めた。その結果、浮体の短辺方向が 136 条、長辺方向が 108 条となった。

(3) シンカーの重量

シンカーの重量は、水平方向荷重が約 340 t、鉛直方向荷重が約 50 t に耐えるものを用いる。

6.5.3 バックアップ係留装置の各種検討

選定されたシンカー索・鎖方式の係留装置について施工性、耐久性、復帰性、係留特性、維持補修及び経済性等について概略検討を行った。その結果、概略検討した項目中には余り問題がなく、大略満足するという結論に到達した。

第7章 浮体空港の挙動と係留力の予測

浮体式海上空港を論ずる場合、浮体の強度、挙動及び係留力が、与えられた外力条件下で、設定した許容範囲内になることが前提になる。その中でも挙動及び係留力は、空港機能としての特性、安全性などを検討する上で重要な要素であり、自由浮体の挙動を単純に推定するにとどまらず、係留系で拘束された状態で、動的相互影響を考慮した推算を行う必要がある。本章では前章までに調査検討した結果に基づき浮体の挙動と係留力の予測を行い、安全性及び機能上の評価を行なうための基礎資料を得ることとする。

7.1 挙動と係留力の予測の方法

係留された浮体の挙動と係留力の予測及びその評価を行なうには想定外力条件下で許容される挙動と係留力を設定し、許容値を満足するように浮体あるいは係留系を選定する必要があるが、その手順の概要を図7.1に示す。この図は浮体の設計を固定し、係留系の再検討を行なうための流れ図であるが、その前提は浮体の主要目を多少変更しても挙動特性等に大きな変化がないことである。予測の方法は次の前提に基づいている。なお、要素浮体は総てフーティング型である。

(1) 6自由度の運動の取り扱い

浮体の運動は一般に6自由度の運動として取り扱わ

れるが、全体浮体の形状、支持浮体の流体力学的特性及び係留系の機能等を勘案すると、上下方向の挙動モードである上下動、縦揺れ及び横揺れと、水平方向の挙動モードである前後動、左右動、船首揺れはそれぞれ別に取り扱うこととする。

そして、上下動、縦揺れ、横揺れについては既に述べたように、非線形減衰係数を等価線形化して取り扱うので、一般の船体運動の予測に使用している解析的方式を適用する。一方、水平方向の挙動については、係留系の変位に対する反力特性がその要求される機能上強い非線形性をもたせてあるので、上下方向挙動と同様な線形の取り扱いができない。したがって、運動方程式に外力の時系列を作用させて逐次積分し、応答の時系列を求めた結果を解析することにする。

(2) 浮体の剛性

巨大な浮体構造物では弾性変形が問題となる。全体浮体の挙動を論ずる場合には構造上の撓みや振動による変位が密接な関係を有するが、滑走路部分においては浮体の剛性を考慮することによる浮体の弾性撓みや変位は余り問題にならない程度であるので水平方向及び上下方向の挙動ともに浮体を剛体として取り扱うことにする。

(3) 不均一外力

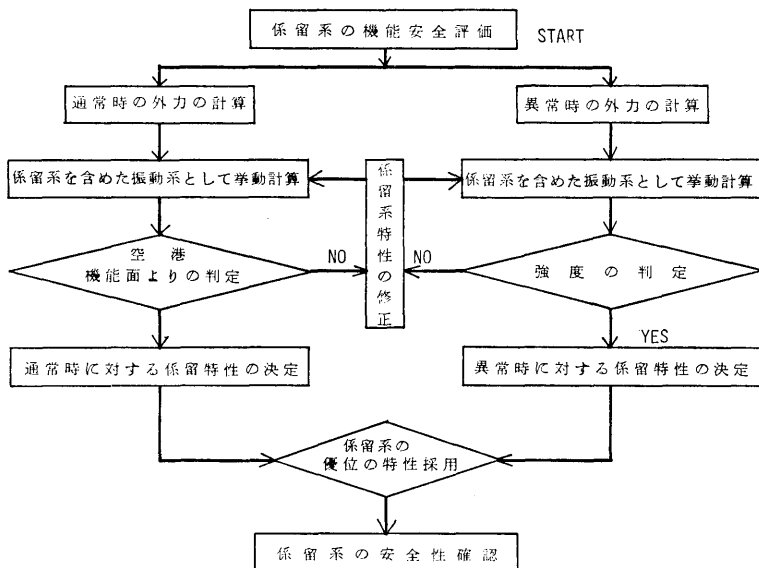


図 7.1 係留系の安全性検討用流れ図

不均一外力の基本的な考え方に関しては既に検討しているの、それに基づき具体的な検討を加えて予測値に反映させることにする。

(4) 不規則波

不規則波は、短波頂不規則波とし、既に設定された Bretschneider-光易のスペクトラムに適合させた I.S.S.C. 標準スペクトラムを適用し、方向関数も I.S.S.C. 標準の $D(\theta) = \frac{4}{3\pi} \left(\cos \frac{1}{2}\theta\right)^4$ を使用する。

7.7.1 上下方向成分力による挙動

上下方向成分力による挙動は主として支持浮体に作用する波強制力による上下動、縦揺れ及び横揺れの各モードである。潮流及び風による上下変位に対する2次の影響はここでは取り扱わないことにする。計算は一般に船体運動の予測計算に使用されている線形重ね合せの理論が適用できるものとし、前述の仮定に次の仮定を加える。

(1) 運動方程式及び座標系

既に示した(4.1)式の運動方程式と図4.1の座標系を用いる。ただし(4.1)式の連成項は無視することとした。

(2) 速度の2乗に比例する抵抗成分は加味しない。したがって、運動の応答関係はその同調点近傍では実

際より大きめの値を計算することになり、安全性評価の面から厳しい評価となるが、安全側に予測することになる。

以上の仮定に基づく上下変位の予測法の流れ図を図7.2に示す。

(3) 予測計算実施内容

その他計算実施にあたっては次の取り扱いをしている。

a) 既に述べた通り波強制力は波周波数と波の入射角度の変化に対して振動的に変化するので単位振幅規則波に対する浮体の運動応答関数 $(H(\omega, \chi))$ もまた同様な性質をもつことになる。そこで、運動応答関数を使用する計算では $H(\omega, \chi)$ について波強制力と同様に次式で平滑化する。

$$\bar{H}(\omega_n, \chi) = \left[\frac{1}{\Delta\omega} \int_{\omega_n - \Delta\omega/2}^{\omega_n + \Delta\omega/2} H^2(\omega, \chi) d\omega \right]^{1/2} \quad (7.1)$$

b) 運動の有義値及び最大期待値等

短波頂不規則波のスペクトラムを $S_z(\omega, \chi)$ とすると、短波頂不規則波中における浮体の運動の分散 σ^2 は次式で求められる。

$$\sigma^2 = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} \bar{H}^2(\omega, \chi) \cdot S_z(\omega, \chi) d\omega_n \cdot d\chi \quad (7.2)$$

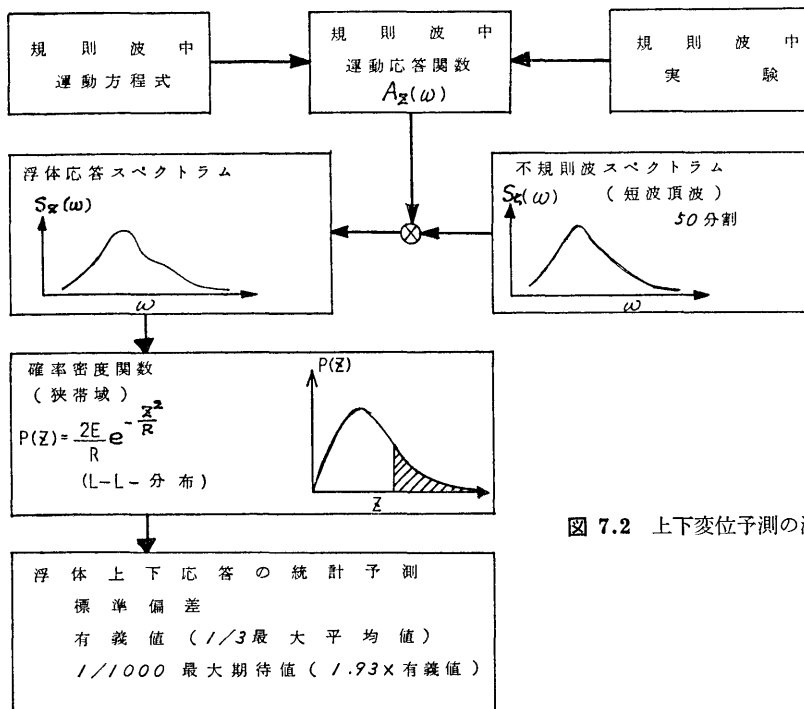


図 7.2 上下変位予測の流れ図

そして標準偏差 (σ) を用いて 1000 波のうちの最大期待値 (1/1000 最大期待値) は有義値の 1.93 倍で求められる。計算は $\omega=0.3\sim 1.7$ (rad/s) の範囲で 0.1 間隔とし、波との出会角については $1/16\cdot\pi$ 間隔として台形公式によって数値積分する方法をとった。この方法によると方向性の強い現象に対しては可成り高目の値が得られることになる。

7.1.2 水平方向成分による変位と係留力

水平変位に寄与する外力としては潮流抵抗、定常風抗力及び波漂流力の定常力の他に変動分として波浪と風によるものが加わる。波浪によるものは、上下変位の場合と同様に短波頂不規則波を、風の変動分に対しては Davenport の変動風のスペクトラムを使用する。係留力は変位に対する係留反力の非線形特性を復原力の項に入れ、ヒステリシスを運動速度に関する減衰力におきかえて取り入れる。挙動の計算法としては、定常力及び変動外力を合成して外力の時系列を作り、これを運動方程式に入力して逐次積分し、挙動の時系列解を求め、得られた時系列を解析して特性を求める。

なお、上下方向成分力による挙動において述べた仮定に次の仮定を加える。

(1) 運動方程式及び座標系

水平変位の運動方程式及び座標系は (4.1) 式と図 4.1 を用いる。ただし、(4.1) 式の連成項は無視することとした。

(2) 変動風のスペクトラムは Davenport の式を使用する。ただし、風の方向分布は 5° 以内であるから方向スペクトラムは考慮しない。

(3) 付加質量及び浮体による減衰力は代表周波数に対応するものを定め、定数として取り扱う。

(4) 予測計算実施内容

a) 波のスペクトラムの設定範囲は $\omega=0\sim 2.0\text{ sec}^{-1}$ とし、分割は $N_\omega=50$ とした。

b) 波との出会角は 45° 間隔とした。

c) 出力の時間刻みは $0.5\sim 1.0\text{ sec}$ とし、シミュレーション時間は $1,000\text{ sec}$ までとした。

d) 外力、変位及び係留力は各々の時系列より定常値及び変動値を求めるが、変動値は原則としてスペクトラム解析により有義値を求め、そして 1/1,000 最大期待値を求めた。ただし異常時 (A1) では非線形域に入るので、有義値は定常変位側の片振幅のみの極値の 1/3 最大平均値を用いた。1/1,000 最大期待値は変位については線形性が強いと見做し、1/1,000 最大期待値は有義値の 1.93 倍とし、係留力はこの変位の 1/

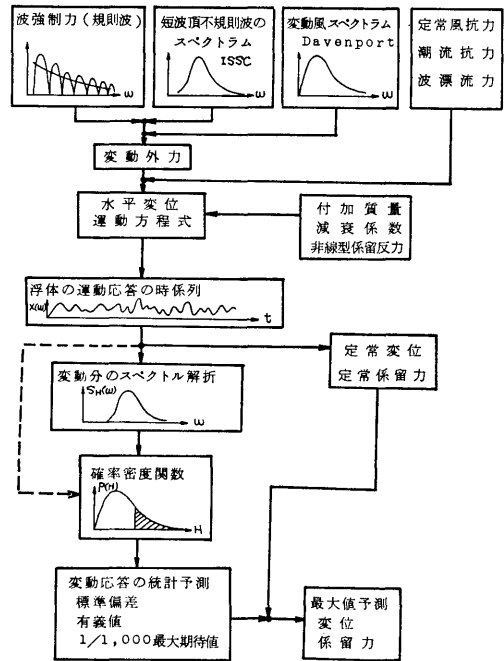


図 7.3 水平変位と係留力の予測の流れ図

1,000 最大期待値に対応するゴムダンパーの反力を特性曲線から読みとり、更にゴムダンパーの減衰力を変位に応じて加算したものとした。水平変位と係留力の予測法の手順を図 7.3 の流れ図で示す。

7.1.3 予測値の計算法

(1) 浮体の計算モデルと計算項目及び点数

浮体を係留するドルフィンには、計算の便宜上幾つかのドルフィンをもとめて近似的に配置し、実機を図 7.4 に示すようにモデル化した。なお、図中のドルフィン数として示した数値はドルフィンをもとめた数で

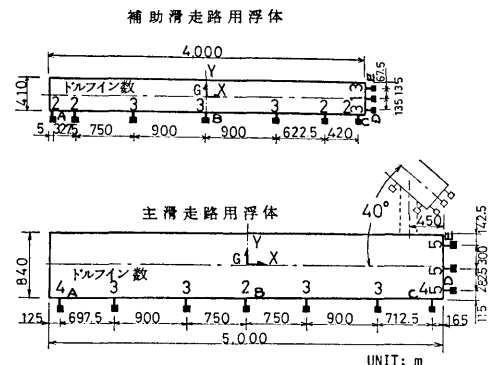


図 7.4 シミュレーションに用いた浮体及び係留系のモデル

表 7.1 数値シミュレーション計算を行った状態の総括表

状 態	風波の 方向	上 下 挙 動			水平挙動及び係留力			備 考
		解 算 計 算 適 用	風 波 の 真 方 位		シミュ レ ー シ ョ ン 計 算 適 用	風波の真方位		
			主 浮 体	補 助 浮 体		主 浮 体	補 助 浮 体	
N 1	0°	○	50°/230°	90°/270°	○	230°	270°	通 常 時
	45°	○	95°/275°	45°/315°	○	275°	315°	
	90°	○	140°/320°	0°/ 90°	○	320°	0°	
N 2	0°	○	50°/230°	90°/270°	○	230°	270°	通 常 時
	45°	○	95°/275°	45°/315°	○	275°	315°	
	90°	○	140°/320°	0°/ 90°	○	320°	0°	
N 3	0°	○	50°/230°	90°/270°	○	230°	270°	通 常 時
	45°	○	95°/275°	45°/315°	○	275°	315°	
	90°	○	140°/230°	0°/ 90°	○	320°	0°	
N 4	0°	○	50°/230°	90°/270°	—	—	—	横 風 最 大
	45°	○	95°/275°	45°/315°	補 主	—	315°	
	90°	○	140°/230°	0°/ 90°	主 補	320°	0°	
N 5	0°	○	50°/230°	90°/270°	○	230°	270°	平 均 年 間 最 大
	45°	○	90°/275°	45°/315°	○	275°	315°	
	90°	○	140°/230°	0°/ 90°	○	320°	0°	
A 1	0°	○	50°/230°	90°/270°	○	230°	270°	100 年 台 風 時
	45°	○	90°/275°	45°/315°	○	275°	315°	
	90°	○	140°/230°	0°/ 90°	○	320°	0°	
A 3	0°	—	—	—	主 補	230°	—	津 波 来 襲 時
	45°	—	—	—	主 補	—	315°	
	90°	—	—	—	—	—	—	
A 1 ₁	波真方位	—	—	—	○	240°	240°	台 風 シミュレーションの 風波の真方位で設定
	風真方位	—	—	—	○	180°	180°	
A 1 ₂	0°	—	—	—	主 主 主	230°	—	変 動 風 の 影 響 を 100 年 台 風 時 に 適 用
	45°	—	—	—	主 主 主	275°	—	
	90°	—	—	—	主 主 主	320°	—	

主または主浮体は主滑走路用浮体の略
補または補助浮体は補助滑走路用浮体の略

相 対 方 向 と 真 方 位 の 関 係

