浮体工法による海上空港

近 藤 弘 雄*
Hiroo KONDO

1. ま え が き

今世紀の人類の偉業に航空機の発明と実用化がある。航空機の利用者は将来ますます増大することが予想される。

このための空港の設置は、利用者の便利のためには都市の近くが望ましいが、騒音被害が大きいので、人口ちゅう密地に設けることはできない。幸い、臨海都市では、空港の位置を沿岸から離れた海上に選定することによって、利用者の利便と騒音公害の問題を解決することができる。

わが国では、海上空港として大村湾の長崎空港がすでに利用されており、ついで大阪湾に関西国際空港が計画されている。海外においても英・米などで多くの海上空港の構想が発表されている。

海上空港の建設工法には干拓、埋立、さん橋、浮体あるいはそれらの組合せなどがあり、地理的条件、工法の発達によって大きく影響される環境問題、及び建設費などが主として勘案されて選択されるが、なかんずく、建設費は水深と海底土質によって大幅に左右される⁽¹⁾ (図1)。

ここでは、比較的水深の大きいところで有利とされる浮体工法について述べる。

2. 各種の浮体空港の提案

近年、英・米およびわが国で各種の浮体空港の提案が行われている⁽²⁾⁽³⁾。それらの配置、構造様式、係留方式について大別すると図2のとおりとなるが、このうちの主なものを次に紹介する。

2.1 イギリスの提案 浮消波堤の中に Pontoon を浮かべたもので、Pontoon は深さ1~2mの中空平底コンクリート箱である。これは、浮体の周囲を防波堤で囲む形式であるが、浮消波堤は

長周期の波(うねり)を消すことは困難であり、Pontoon は波による影響を受けやすい(図2-C1, M1)。

最近、北海に離着陸の滑走距離の小さい STOL 機用の空港を設置する計画が発表された。これは、水中の横長浮体によって着陸帯を空中に支えるローハル形のセミサブ方式(Semi-Submergible)を用いて、波浪による動揺の少ないものとしている。また、係留方式は海底に固定せず、Thruster によって定位置を保ち、風向に合わせて旋回させるとしている⁽⁴⁾ (図2-C2)。

2.2 アメリカの提案 1972年、Goodyear Aerospace 社は拡張しうる浮基地として、六角形の甲板とそれを支える長い脚柱をユニットとしてつぎつぎと継ぎ合わせたものを提案し、外洋における航空機の基地として適すると発表している⁽⁵⁾ (図2-C3)。

NASA (アメリカ航空宇宙局) は、今後の航空機の発達指向は超音速機(SST)と垂直離着陸機(VTOL)であるとし、SST の空港を、沿岸から40~50 km 離れた海上に設け、原子力により発生した水素を SST の燃料とする設備を併設したものを提案した⁽⁶⁾。工法は環礁のある場所が適するとして特に指定はないが、浮体工法によらなければ

図1 埋立工法と浮体工法のコスト比較

* 正員、石川島播磨重工業会社 (〒100 東京都千代田区大手町1-1-3, 東京貿易会館)。

空港の配置	<p>L1 着陸帯</p> <p>施設帯(ターミナル)</p> <p>沿岸</p> <p>着陸帯, ターミナルを含む全施設を海上に設ける施設集中方式。</p>	<p>L2 着陸帯</p> <p>乗降施設</p> <p>ターミナル</p> <p>着陸帯と航空機への乗降施設を海上に, ターミナルは沿岸に設ける施設分離方式。</p>	<p>L3 着陸帯旋回形</p> <p>施設帯(ターミナル)</p> <p>着陸帯は海上に, 施設は中間埋立島に設ける。着陸帯は風向によって旋回させる。</p>	<p>L4 着陸帯</p> <p>フェリー</p> <p>ターミナル</p> <p>着陸帯は海上に, ターミナルは沿岸に設け, その間をフェリーで結ぶ。航空機はフェリー上で整備される。</p>
浮体の構造様式	<p>C1</p> <p>単純箱形のPontoonを海上に浮かべる方式。</p>	<p>C2</p> <p>水中のPontoonから多数の柱で本体を空中に支える。滑走路の短いものに適用される。</p>	<p>C3</p> <p>長大なフロートによって本体を空中に支える。深海うねりのあるところに適用される。</p>	<p>C4</p> <p>数多くの小フロートによって本体を空中に支える。浅海に適用される。</p>
係留方式	<p>M1</p> <p>空港の周囲を防波堤又は消波堤で囲ったもの。係留はごく簡単なものでよい。</p>	<p>M2</p> <p>干満差が少なく, 海底土質がよい場合は, 周囲をアンカー索鎖で固定できる。風波による移動が若干ある。</p>	<p>M3</p> <p>水深が大, 海底土質がよい場合, 浮体は干満によって上下しない。</p>	<p>M4</p> <p>海底土質が軟らかい浅海の場合, 風波による移動はほとんどない。</p>

図 2 各種の浮体海上空港

ばならないものが多い。

2.3 わが国の提案 昭和49年, 航空審議会の関西国際空港部会は, 新たに建設する関西国際空港の設置位置は, 泉州の沿岸から5km離れた沖合が適当な旨答申した。この地点は, 水深約20m, 暴風時波高4.2mで, うねりの影響はほとんどない。海底土質は粘性土層と砂質土層の互層で, 深く, 極めて軟弱であることから, 従来一般に行われた埋立法のほかに各種の工法についての検討が行われた。浮体工法については, 日本空港コンサルタンツを中心として海上空港研究会がもたれ, 二, 三の試案が発表された⁽⁷⁾ (図2-L3, L4)。

図2-L4は, 海上に設けられた着陸帯と沿岸の

ターミナルの間を, 航空機を乗せて運ぶフェリーを用いて連絡するもので, 乗客はターミナルで接岸したフェリーに乗り込み, 航行中に航空機へ移る。フェリーが着陸帯に接岸すると直ちに航空機は着陸帯に移り離陸する。着陸時はちょうど出発時の逆の順序となる。通常エプロンで行われる航空機の整備作業はフェリー甲板上で行われる。

日本造船工業会においても, 昭和49年に浮体工法による海上空港研究会をもち, 昭和52年, 「浮体工法による関西国際空港の概案」を発表した⁽⁸⁾ (図2-L2, C4, M4)。

運輸省は, 52, 53年度にわたって浮体工法に関する調査費を出し, 日本造船工業会の案をもとに船舶, 港湾両技術研究所に, 「関西国際空港計画

にかかわる浮体工法評価のための基礎調査」を委託した。船舶技術研究所に委託された調査の一部はさらに日本造船研究協会に再委託されたが、日本造船工業会は、日本造船研究協会のメンバーとしてこの政府調査を分担するとともに、54年度においても引き続き独自に補足調査を継続している。

3. 浮体方式による関西国際空港の概要

浮体方式による海上空港の代表例として、日本造船工業会提案の関西国際空港計画と、それをもとに行った政府調査のうち同会が分担した調査結果の概要を紹介すると共に、これに関与した筆者としての解説を加える。

3.1 全体配置 (図3) 航空審議会の答申にそって、4000 m 主滑走路をもつ着陸帯④と、3200 m 補助滑走路をもつ着陸帯⑤が沿岸から約5 km の海上に配置されている。施設帯は、沖側の③と沿岸側の①とに分離して配置されている。

3.2 浮体の構造 断面図 (図4) に示すように水面から5 m 上に深さ10 m の鋼製箱があり、その下面に直径7 m×長さ11.5 m の円筒が15 m 間隔に並んでいる。円筒のきつ(吃)水は6.5 m で、この排水量で鋼製箱および円筒の自重を支持させている。

この円筒形の支持浮体による方式はセミサブ方

式の一つであり、波による動揺が少ないのが特色である。すなわち支持浮体の水線面積は、本体が全面水没している Pontoon 方式に比べ約17%であり、それだけ水面の変動による力は小さい。しかし、その反面、航空機などの変動荷重の支持力は小さい。これら波浪および航空機の荷重を広い範囲に分散させるため、上記の浮体の深さを10 m とし、十分の剛性をもたせたものである。

3.3 係留装置 着陸帯④⑤、施設帯③、航空機橋⑥の係留方式は図2-M4のドルフィン-リンク方式を用いている(図4)。すなわち直径2 m の鋼管くい20本を海底の軟弱地層約50 m を貫通して砂れき層まで打ち込み、その頭部を固結して一組とし、その固結部分から2本のリンクを出して浮体を係留する。リンクの両端には上下左右に動けるヒンジが設けられ、浮体とはゴムダンパを介して連結されている。このドルフィン-リンクは着陸帯④の浮体の長短辺二辺にL形に配置されており、他の二辺は自由で、増設などは容易である。着陸帯⑤に対しても同様である。

この方式によれば、係留されている浮体の潮の干満による上下動を妨げず、風・波浪・潮流などによる水平方向の動揺を極めて少なくすることができる。また、温度による浮体の伸縮も自由で、拘束されることがない。

特に、リンクと浮体との連結部に設けられたダンパは、図5に示すゴム製の防舷材を組み合わせたもので図6のような特性をもっている。このため、各係留装置における浮体とドルフィン間の距離の誤差からくる不均一な負担力などは緩和されて均等化される。また、地震時海底からの振動を吸収するので浮体本体およびドルフィン-リンクともに損傷を受けない。

3.4 調査の進め方 設置候補地である大阪湾

図3 関西国際空港配置

図4 浮体断面及び係留要領

の気象・海象などの既存資料および最近の観測結果などから環境外力条件の設定値を求めた。

浮体に働く風・波・潮流力などの外力はまず既存の方法によって推定し、風洞・水槽などによる模型実験によってその推定法を検証し、次に係留系を含めた挙動、係留力の応答特性を推定し、大形模型実験によってその適用性を確認した。

これらの調査と並行して、構造や係留装置の様式・材料・強度などの検討を行い、浮体空港の諸要目を設定した。浮体空港の安全性を評価するための資料として、空港使用状態の通常時ならびに100年台風時、津波時、地震時など、あらゆる環境条件下における浮体空港の挙動と係留力とについてその値を算出した。

最後にこれらの調査結果を用い、空港の機能および安全性を総合的に検討し、旋行法、工期ならびに維持補修までを含めて経済性の検討を行った。

3.5 設計条件 まず気象・海象条件については、大阪湾の付近には過去多くの実績記録があるため、これらをもとに耐用年数60年に対し再現期間を100年とし、確率的に設計条件を設定した。暴風時設計基本風速は50 m/sとし、この風速をもとに候補地に対し最も不利な位置を台風が通過した場合の波高を算出した(図7)。また、その結果を過去の大阪湾内の波高実績と対比する

図5 ゴムダンパの形状

図6 ゴムダンパの圧縮荷重-たわみ特性 (ドルフィン1基当たり)

ことも行った。

同様に地震、津波、潮位などの値を設定し、さらに船舶や航空機の衝突などを想定して、空港に作用する外力条件を設定した。

航空機の荷重は、将来の大形化に対処し得るよう、最大荷重を500 tと想定した。ちなみに、現在最大の旅客機B-747は360 tである。

3.6 浮体の挙動 浮体を空中に支えている支持浮体は、図4のような直径7 mの単純な円筒形のほかに、上部を直径5.2 m、下部を直径8 mとしたフーティング形についても検討を行った。フーティング形は水線面積が小さいので、航空機荷重に対しては敏感に反応するが、波の運動に対しては安定している。

表1はフーティング形の支持浮体をもった場合の主着陸帯④と施設帯⑤の挙動である。

3.7 構造関係 浮体の構造様式、材料などについては種々の角度から検討が行われた。特に構成材料については、浮体本体は各種候補材料のうち空港使用中における増設、模様替え、修理、さらには撤去などの容易な鋼製がまさとし、支持浮体は、コンクリートおよび鋼製について製造、価格、防食などの面から検討した結果わずかに鋼製がまさとした。

前記の荷重による浮体の最大応力および空港機能に最も影響の大きい計器着陸用誘導装置の取り付け部分のたわみは、表2、3に示すとおりいずれも小さな値で、構造的に十分安全であることはもちろん、機能をも満足させるものである。

3.8 係留関係 各種係留方式を検討の結果、この候補地の地質条件からドルフィン-リンク方

数字は $H^{1/3}$ m, 矢印は主波向, ※印は設置点

図7 モデル台風による大阪湾の波 (進路②, 風速40 m/s, 台風中心0 h)

式が最も優れ、ドルフィンには組くい、ジャケット方式があるが、そのいずれでもよいとした。

ドルフィンは、主滑走路浮体では縦22基、横15基が片側直角に配置されていて、安全率およびたわみは表4に示すとおりである。

また、この係留装置については、地震時、船舶衝突時、さらに、何らかの理由によるドルフィンあるいはリンクなどの一部、例えば端部二組が破損した場合の挙動などについても検討して十分安全なことを検証した。

3・9 防食関係 空港の寿命を60年と想定して、その間のメンテナンスも考慮し、表5のような塗装および電気防食を行うこととした。

3・10 建造および建設費 全国の造船所や鉄工所でパーツあるいはパネルをつくり、東京から九州にわたる造船所の25ドックを用い、幅60m

×長さ300mおよび幅45m×長さ240mのユニットをつくり、現地へえい航、あらかじめ先行施行された係留装置の縦横の角の部分からスタートし、つぎつぎとユニットを並べ溶接で一体に接合する。この際、Pontoon方式とちがいセミサブ方

表4 ドルフィンの静的強度検討

項 目		リンク方向	
く い 頭 変 位		18 mm	
く い 反 力 及 び 安 全 率	押 込 み 力	1 141 t	3.4>2.5*
	引 抜 き 力	824 t	3.0=3.0*
く い 応 力 度 $\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}}\right)$		$\frac{502}{1199} + \frac{230}{1400} = 0.58 < 1.0$	
極 限 支 持 力		4 471 t	
最 大 引 抜 き 力		1 944 t	

(注) く い 反 力 には く い 自 重 含 ま ず。* 印 は、海 洋 構 造 物 設 計 基 準 の 所 要 安 全 率 を 示 す。

表5 防食対策一覧表

防食対象箇所		浮	体	ドルフィン
空	外	デッキ上	舗装(一次防せい塗り)	無機ジंक塗料 (90 μm)
		側 部	無機ジंक塗料 (90 μm)	エポキシ塗料 (120 μm)
			エポキシ塗料 (120 μm)	ビニール塗料 (120 μm)
	中	底 部	無機ジंक塗料 (90 μm)	無機ジंक塗料 (90 μm)
			コールタールエポキシ 塗料 (400 μm)	コールタールエ ポキシ塗料 (400 μm)
部	内	上部および側部	無機ジंक塗料 (90 μm)	無 防 食
		底 部	コールタールエポキシ 塗料 (250 μm)	
飛	ま っ 帯 び 帯 お よ ぶ 干 満	合成樹脂塗料 (3 mm)		い ず れ か モルタル (50 mm)の外側 をFRP (5 mm) で被覆
		合成樹脂(充てん材 入り) (4 mm)		
		レジンモルタル (5 mm)		
没	水 部	無機ジंक塗料		電気防食 (外部 電源方式)
		コールタールエポキシ塗 料		
		電気防食(外部電源方式)		
土 中 部		—		電気防食 (外部 電源方式)

表1 風・波・潮流に対する浮体の反応

		自然条件				浮体の動き (滑走路部分) において		
		風 m/s	波高 m	周期 s	潮流 kt	上下 cm	水平 cm	
							前後	左右
空 港 使 用 時	カバレッジ 95%	10	1	4.2	0.8	0	±2.2	±0.7
	年間最大	25	2.4	6.5	0.8	±2.5	±4.4	±4.4
異 常 時	100年確率 台風時	50	4.6	9.6	2.3	±5.5	±21	±19
	地震時	10	1	4.2	0.8	0	±2.2	±7.8
	津波来襲時	10	1	4.2	1.9	102	±9.9	±0.2

表2 各種荷重による応力の最大値
〔(－)は圧縮応力〕

	移動荷重	熱荷重	波浪荷重 (100年 台風時)	衝撃荷重 (航空機 着陸時)	組合せ 最大
最大応力 kg/mm ²	-4.2	-7.7	4.5	6.1	-8.3

表3 外力による浮体のたわみ傾斜

位 置		グライドパス 付近 (縦方向最大)	ローカライザ 付近 (横方向最大)
外 力	動 的	波浪(年間最大時)	1/13 300
	航 空 機 離 着 陸	1/7 000	1/85 000
静 的	上 下 の 温 度 差	0	<1/1 000
	夜 間 駐 機	0	≒0
合 計 (動 的)		1/7 000	1/11 500

表 6 概略見積結果

浮体区分 区 分	寸 法 m	浮 体		係 留 装 置*	
		物 量(万 t)	金 額(億円)	基 数 (基)	金 額(億円)
主滑走路用浮体	5 000×510	210	5 050		
施 設 帯	5 000×330	135	3 270	37	650
横風用滑走路浮体	4 000×410	131	3 250	24	420
航 空 機 橋	500×210	9	210	4	70
合 計			11 780		1 140

(注) 総 計 1兆2920億円。* 斜めくい式ドルフィンによった場合を示す。

式では浮体本体が空中に支えられているので水中溶接はない。

建設費の概略見積結果は表6のとおりである。

3・11 空港機能 調査の対象とされたこの案は施設分離方式であるが、沿岸部のターミナルを沖合の施設と一体とする集中方式とすることは、何ら差し支えない。施設集中方式のほうが浮体本体の中空箱内部の利用度が高まり、上部の施設と内部の施設を互いに呼応させ有機的に運営することができる。例えば、格納庫下は部品庫、貨物用ローディングスポットの下はカーゴターミナル、エプロン下は第1層は航空機整備車両用、第2層は駐車場用などに充当できるなどである。

浮体方式は、着陸帯、施設帯などが各ユニットとして自由に配置組合せが可能であり、また、施設の増設、模様替えなどによる空港使用の妨げも少ない。管制関係の電波誘導装置、通信設備などすべて浮体の上部に設けられ、陸上空港の場合と全く同様である。

4. む す び

浮体工法による海上空港は、前述のように優れたものとされながら、世界においてまだ実現されたものがない。沿岸を埋め立てたものや、内陸郊外に設けたものに比べて建設費がかさむことに主原因があるためであろう。

浮体工法による海上空港の建設は、海象条件と工法およびその関連産業の発達のいかに大きく左右される。現在までに提案されたものは外洋に設ける場合が多く、その工法も必ずしも適切なものと思えない。

大阪湾に設けようとする関西国際空港は、水深、土質、海象条件は埋立には極めて不利であるが、浮体工法には得難い好条件のところである。

さらに、この巨大な建造物も、世界の50%を超える建造能力をもつわが国の造船業にとっては、たかだか1年間に扱う新造船作業量に匹敵するものであり、短期間の建造も無理ではない。海洋の利用については、各国においてようやく活発な開発が進められてきたが、最も戒めるべきことは、陸上や沿岸開発で行ったような自然破壊的行為を海洋開発に繰返さないことではなかろうか。

従来、海洋は、それ自体が広大なことから沿岸水域においても国土としての観念に乏しいのが一般であったが、沿岸水域における炭素循環・浄化作用などエコシステムのもととして、また、雨、雪、水産、水運の恩恵、景観、心情などから、海洋民族の生命そのものともいうべきものであり、国土を構成する主要素、国土そのものとみて、自然を壊すことなくたいせつに利用することは、海洋国家としてのわが国の責務であり、また、われわれが次代に残すべきよき遺産ではなかろうか。

このように海洋利用をみると、環境を傷つけず、不要となれば容易に撤去し得る特長をもつ浮体工法による海上空港の建設の意義がおのずから明らかになると思われる。

(原稿受付 昭和54年11月2日)

文 献

- (1) Weidlinger, P., 海洋機器開発, 3-10 (1971).
- (2) 長崎, 施行技術, 10-12 (昭 52), 4.
- (3) 造船技術, 11-5 (通 126) (昭 53-5), 76.
- (4) OCEAN INDUSTRY, 14-7 (1979-8), 61.
- (5) Final Technical Report—Expandable Floating Base, (1972-11), Goodyear Aerospace Co.
- (6) 日本航空宇宙工業国際情報, 別冊, No. 14 (昭 53-3), 5.
- (7) AIRPORT REVIEW, 20 (1975).
- (8) AIRPORT REVIEW, 24 (1978).