浮体式洋上アクセス施設の計画（第2報）

—設計事例と設計手順—

正員 二見 吉雄* 正員 鈴木 英之**
正員 飯島 一博***

Study of Floating Ocean Access Facility (2nd Report)
- Design Example and Procedure -

by Yoshio Futami, *Member* Hideyuki Suzuki, *Member*
Kazuhiro Iijima, *Member*

Summary

In first report, two of the authors presented a new concept of floating access facility, “a both-end supported lower-hull semi-submersible type facility”, and discussed its applicability. For such new-type floating structure, the design procedure has not been established. In this report, both-end supported semi-submersible facility is designed for example. Further, dynamic response analysis in waves was carried out, and structural characteristics of response are discussed. Design flow, design ground in determination of principal dimensions obtained in the process of study is summarized and proposed.

1. 緒 言

筆者らは、第1報において洋上施設におけるアクセス設備の概念と適用性について検討し、セミサブ型両端支承方式の有用性について述べた。

本報告では、このようなセミサブ型両端支承方式の構造の具体例として、空港における浮体式連絡誘導路の設計・計画について述べ、波浪中弾性応答解析を実施し、その特徴を示す。

さらに、浮力を用いたセミサブ型両端支承方式の構造は、新しい概念で設計するものであり、このような構造について、どのような観点から設計に取り組むかアプローチの方法について具体的に整理されたものはなく、本報告では、洋上アクセス施設に求められる性能を整理し、設計の流れと主要寸法の設計根拠を考察し、提案した。

2. 本体構造の基本概念

洋上アクセス施設は、大きな区分をおこなうと、埋め立て、栈橋、橋梁、軟着底の工法が考えられるが、第1報で述べたようにセミサブ型両端支承方式は、Fig.1 に示すように、水中部構造および基部支持構造から構成され、浮力を利用した方式である。

本方式は、地盤沈下に対する追従性を向上させ、既存施設への悪影響をなくすために海水の浮力を利用して支持反力を低減させることをねらいとしている。

また、本方式の基本コンセプトは、上部および水中部構造から構成され、水中部桁構造により十分な浮力を確保し、両端にバラストを集中的に配置することにより、設置据え付けするものであり、設置時にあらかじめ、初期ホギングモーメントを生じさせ、航空機・その他車両の荷重に対しても有利な構造とするものである。以下に、関西空港（以下関空と呼ぶ）のⅠ／Ⅱ期埋め立て空港島を結ぶ長さ200mの連絡誘導路を一例として洋上アクセス設備の計画例について述べる。構造は、平面形状が長さ200m、幅150mの上部構造と5列の水中桁およびそれらを結合する直径3mのコラムにより構成される。

ここで、当該海域の潮位については、Table 1 のように設定する。

* 三井海洋開発（株）石油開発事業部技術部

** 東京大学大学院工学系研究科海洋技術環境学専攻

*** 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

原稿受理 平成21年4月16日

設置時の荷重イメージ

Fig.1 Concept of Both End Supported Semi-Submersible

Fig.2 Transverse Section (60m Breadth)

Table 1 Tide Level

HHWL (既往最高潮位) :	D L + 3. 2 0 m
HWL (朔望平均満潮位) :	D L + 1. 6 0 m
LWL (朔望平均干潮位) :	D L + 0. 1 0 m
L L WL (大阪湾最低潮位) :	D L - 0. 4 1 m

2.1 構造の設計

構造は、水中桁、上部桁の両構造をコラム、ブレースで結合することにより強度を確保するが、特に上部桁は満潮時の水面とのクリアランスを得るために極力、深さを浅くして下部水中桁との全体構造で強度を持たせる設計とした。適用規則は、NK 鋼船規則 P 編「海洋構造物および作業船等」を適用した。構造の概略について、中央断面図を Fig.2 に示す。上部桁の位置は DL+6.0m である。

下部の水中桁構造は、Ⅰ期埋め立て部とⅡ期埋め立て部を結ぶ橋軸縦方向の強度を持たせ、箱型構造として曲げ、軸力に対し強い構造となっており、しかも保守点検のための交通の容易な構造となっている。

2.2 荷重バランス

鋼材重量および、舗装重量を支えるために水中桁の大きさを決定し、HHWL においても浮上しないように設置するための両端部に搭載するバラスト水の重量を求めた数値を、Fig.3 に示す。

中央部の浮力が大きく、初期ホギングモーメントを生じさせている。従って、設計時、建造時における重量管理の必要がある。

潮位		単位:トン				
		HHWL DL+3. 2m	HWL DL+1. 6m	LWL DL+0. 1m	LWL DL+0. 1m	LLWL DL-0. 41m
荷重	死荷重					
	浮体構造重量	△ 20,250	△ 20,250	△ 20,250	△ 20,250	△ 20,250
	舗装重量	△ 11,000	△ 11,000	△ 11,000	△ 11,000	△ 11,000
	バラスト重量	△ 9,000	△ 9,000	△ 9,000	△ 9,000	△ 9,000
	(小計)	△ 40,250	△ 40,250	△ 40,250	△ 40,250	△ 40,250
	航空機0	0	0	0	△ 1,360	△ 1,360
活荷重	舗装重量	0	0	0	△ 1,800	△ 1,800
	(小計)	0	0	0	△ 3,160	△ 3,160
合計		△ 40,250	△ 40,250	△ 40,250	△ 43,410	△ 43,410
支持力	浮力	39,890	38,610	37,410	37,410	37,000
	護岸反力	360	1,640	2,840	6,000	6,410

Fig.3 Balance of Load

3. 構造解析結果

3.1 静的解析結果

荷重条件については、Table 2 に示すように、HHWL、HWL、LWL において航空機荷重 680 トンを 1 機または 2 機、あるいは車両荷重を加えた最も厳しいと考えられる 7 ケースについて実施した。

たわみの評価に際してはその基準は、「空港土木施設設計基準」^{1)、2)} により、傾斜 1.5% (0.86°) および地上 3 m の高さから 300m 見通せる視程の条件 (0.57°)、許容応力は、道路橋示方書³⁾ により、14kgf/mm² とした。強度解析結果は応力、傾斜角ともに最大で、応力 10kgf/mm²、傾斜角 0.20° で規定値の範囲に収まっている。たわみおよび端部の最大傾斜角度の計算値を Table に示す。

Table 2 Loading condition and Calculated deflection

	潮位	活荷重
LC 1	HHWL (既往最高潮位)	なし
LC 2	HWL (朔望平均満潮位)	なし
LC 3	LWL (朔望平均干潮位)	なし
LC 4	LWL (朔望平均干潮位)	航空機、車両 3160ton
LC 5	LWL (大阪湾最低潮位)	航空機、車両 3160ton
LC 6	LWL (大阪湾最低潮位)	航空機、車両 2480ton
LC 7	LWL (大阪湾最低潮位)	航空機、車両 2480ton

	最大変位(mm)	最大傾斜角度 (degree)
許容値	—	0.86* (0.57**)
LC 1	245.8	0.20
LC 2	210.2	0.17
LC 3	176.9	0.14
LC 4	106.8	0.09
LC 5	99.8	0.08
LC 6	88.5	0.08
LC 7	88.9	0.08

(注) * : 傾斜 1.5% (空港土木施設設計基準：誘導路の最大縦断勾配に関する規定)

** : 地上 3m 高さから 300m 先が見通せる角度 (空港土木施設設計基準：視距離に関する規定)

3.2 波浪中弾性応答解析

前節までに、浮体式セミサブ型ローワーハルの特徴を生かした洋上アクセス施設の適用性について述べ、コンセプトを明らかにした上で、関空のⅠ期／Ⅱ期の埋め立て島を結ぶことを想定した北側連絡誘導路を例に試設計をおこなった。洋上における浮体構造の設計には、主要寸法を決定するためには、重量推定、必要な浮力の確保が重要であり、そして基本構造の設計により鋼材重量と舗装重量を用いて静的な強度検討をおこなう必要がある。さらに、その上で、前述のように、設置海域などの個々のプロジェクト固有の条件をもとに、波浪中の弾性応答解析を行ない、動的な応答を把握することが重要である。

本章では、前章までに述べた関空連絡誘導路を対象として、東京大学で開発された超大型半潜水式波浪中構造応答解析プログラム「VODAC」(Very Large Floating Structure Oriented Dynamic Analysis Code)⁴⁾を用いて波浪中弾性応答解析を実施した結果を示し、その特徴について考察する。

(1) 解析モデルおよび解析条件

解析対象の関空連絡誘導路の計画設置区域は、Fig.4 に示す。海域の波浪条件は、Table 3 に示す。波向きについては、橋軸方向を $\chi = 0^\circ$ とすることを示した。

解析は、橋軸方向の左側からの波を波向きゼロとして $0 \sim 180^\circ$ まで 15° 毎に行ない、応答関数を求めた。なお、

本解析では護岸の影響は考慮していない。

Table 3 Design Wave condition

波方向	H1/3(m)	T1/3(sec)
NE	1.6	6.2
ENE	1.7	5.8

Fig.4 Location of Investigated Airplane Passage

(免震支承)

免震支承は高減衰積層ゴムとし、バネ定数は、水平方向 2.82(tf/cm)、鉛直方向 1737.0(tf/cm)と設定した。

(モデル化)

鋼材重量および舗装重量は、それぞれの上部桁に 14.5(t/m)、11.0(t/m)を分布させた。支承は橋軸の一方に配置され、水平方向バネ支持として取り扱った。橋軸直角方向は運動を拘束した。また、鉛直方向は支承のバネ定数が大きいため単純支持とした。構造は縦桁、横桁、水中桁およびコラムを曲げおよびねじり剛性を持つ Beam 要素でモデル化した。支持条件および座標系を Fig.5 に示す。

Fig.5 Structural Model

(2) 弾性応答解析結果

解析結果のうち、浮体中心点の Sway、Heave、の応答関数を Fig.6、Fig.7 に示す。また浮体中心近傍の長手方向 Girder の Bending Stress の応答関数を Fig.8 に示す。上下方向加速度の応答関数を Fig.9 に示す。図中にて波向きは0度、45度、90度について示す。ただし、波向きは免震支承の配置された図中左側からの橋軸方向からを0°とし、橋軸直角方向からを90°としている。

また、応答の全体像を見るために、方向波中の応答関数を Fig.10 に示す。Heave の例をはじめとして、変形は全体的に波向きが90°の場合の応答が卓越している。

Fig.6 Response amplitude (Sway)

Fig.7 Response amplitude (Heave)

Fig.8 Response amplitude (Bending Stress)

Fig.9 Response amplitude (Vertical Acceleration)

Fig.10 Response amplitude in directional waves (Heave)

(3) 弾性応答解析結果の評価と考察

前節で求められた、波浪中の応答関数を用いて、(1)項に述べた設置海域の海象条件における応答の有義値を計算した。計算においては、応答の極大値の確率分布が Rayleigh 分布に従うとして有義値を計算した。

ここで、波スペクトルは、

$$[f(\omega)]^2 / H^2 \omega_1 = 0.11(\omega / \omega_1)^{-5} \exp[-0.44(\omega / \omega_1)^{-4}]$$

(1)

$$\omega_1 = 2\pi / T, H = \text{有義波高}, T = \text{平均波周期}$$

応答の標準偏差 R は、

$$R^2 = \int [f(\omega)]^2 [A(\omega)]^2 d\omega$$

$$R^2 = \int [f(\omega)]^2 [A(\omega)]^2 d\omega \quad (2)$$

$A(\omega)$ = 応答関数

応答の有義値は

$$(1/3) \text{ 有義値} = 2.00 \times R \quad (3)$$

で与えられる。

潮位変動および活荷重に対する静的構造応答とあわせて Table 4 に応答の有義値をまとめて示す。本章で示した波浪中弾性応答解析の結果から以下のことが分かる。

①波浪中の応答値はたわみ、応力ともに波向き 90° （橋軸直角方向の波）の場合の応答が卓越している。

②応答のピークはたとえば、Fig.6 の S w a y の応答関数では、 $\omega = 0.775, 1.00, 1.175, 1.40(\text{rad/s})$ の近傍に存在する。このときの波長はそれぞれ 102.4m、61.5m、44.6m、31.4m であり、水中桁の間隔に対し 3.5 倍、2.0 倍、1.5 倍、1.0 倍となっており水中桁の間隔が影響する。波粒子加速度は波強制力の大きさの指標であり、各桁に加わる波粒子加速度を位相を考慮して和をとった値を Fig.11 に示す。

ここで、5 列の 30m 間隔に配置された各水中桁に加わる波粒子加速度の振幅は、

$$A = a\omega^2 e^{i(kx - \omega t)} \quad (4)$$

ただし、 $k = \omega^2 / g$ ， $x = 30n$ ($n=0,1,2,3,4$)

位相を考慮して波粒子加速度の和をとると、

$$B = a\omega^2 \sum_{n=0}^4 e^{i(k30n - \omega t)} \quad (5)$$

(5) 式において、波粒子加速度の和は水中桁の間隔 30m の含まれる周期的な関数であり、 $\omega = 0.8, 1.0, 1.2, 1.4(\text{rad/s})$ の近傍で波粒子加速度の和の値が大きくなっている。

Table 4 Results of Dynamic Response Analysis

	潮位変動および 活荷重	波浪中弾性応答 (有義値)	合計
上下変位 (m)	0.245	0.051	0.296
端部傾斜角度 (drgree)	0.20	0.014	0.214
加速度(m/sec ²)	-	0.075 (7.5gal)	-
応力(kg/mm ²)	10.0	0.60 (軸応力) 0.59 (曲げ応力)	11.19

Fig.11 Sum of particle accelerations at floaters considering phase difference as an index of total force phase angle

③波浪中弾性応答の有義値は、Table 4 に示すように、上下変位については潮位変動および活荷重によるものの約 20% である。

④端部傾斜角度については、弾性応答による傾斜は小さく、合計値は、視程による許容値 0.57° に収まっている。

⑤加速度の有義値は、有義値は 7.5 gal であった。

⑥ガーダーの応力は、軸応力、曲げ応力ともに $0.60 (\text{kgf/mm}^2)$ 程度で非常に小さな値であった。

以上の結果から、実際の運用上においては上下加速度に配慮が必要となるものの、変位、傾斜角度、応力の観点から両端を支承で支持されたセミサブ型ローワーハル方式の誘導路は強度上大きな問題はないと判断される。

4. セミサブ型両端支承方式の構造設計法

洋上アクセス施設は、大型浮体構造に要求される一般的な性能に加え、アクセス特有の性能が要求される。本章では、前章までの検討の過程を通じて得られた知見をもとに、洋上アクセス施設の構造設計について、その基本計画、設計の流れについて述べる。

4.1 洋上アクセス施設に求められる性能

浮体構造の設計については、多くの検討がなされている。とくに、超大型浮体を海洋空間利用のための基盤施設として使用する場合に求められる諸性能として、1) 安全性、2) 機能性、3) 耐久性、4) 経済性などが挙げられる。⁵⁾ 本論文で取り上げる洋上アクセス施設においても大型浮体構造と同様な性能が要求される。また、車両走行による振動については、継ぎ手や突起・段差を車両が通過することによるが、全体構造については、海水による減衰が期待できると、起振力が大きくないことにより、大きな問題にならないと考えられる。

4.2 主要寸法の決定

(1) 設計の流れ

洋上アクセス施設の主要寸法の決定は、設置海域を含む設置計画と次項で述べる設計根拠により主要寸法を決める。その場合、本体構造の重量を精度よく計算し、必要浮力と必要最小限のバラスト量を求め、荷重バランスを設定することが重要である。そして安全性、機能性を確保できるように静的、動的な強度解析を行なうことにより確認をおこなう。具体的には、本方式の設計の流れを Fig.12 にまとめて示す。設計

手順の流れとしては、以下のような手順を追っておこなう。

- ① 設置計画に基づき、浮体の平面形状を計画し、その後、設置海域・水深の制約の中で縦断面の幾何学的形状を検討する。ここで、重量と浮力とバラスト重量を決定することが最初に必要な。したがって、まず、コラムの配置を仮に設定し、設計甲板荷重を支える上部桁の設計を行ない重量を推定する。ここで板、骨などの部材寸法は、既存の基準・指針を準用して定める。
- ② 次に全体深さに代表される剛性と、コラム径とコラム数に代表される浮力バネの適正な組み合わせを強度、機能を満足するように設定する。
- ③ ここで Fig.12 の中で示した合理化のブロックに示す検討を行い、重量の削減を図る。詳細は次項にて述べる。
- ④ HHWL（既往最高潮位）においても浮上しないように設置時のバラスト重量を決定する。
- ⑤ 立体構造モデルにより静的なたわみ、応力計算により安全性、機能性を確認する。端部傾斜角度、視距離などの条件が満足されない場合は、水中桁の大きさ（深さに制約がある場合は幅）すなわち浮力を微調整して初期ホギングモーメントの値を調整する。
- ⑥ つづいて波浪中弾性応答解析により、過大な動的応答が生じないことを確かめる。共振により、過大な応答が生ずる場合は初期寸法配置に戻り、流体力を受ける水中桁の配置などを見直す。
- ⑦ 構造の基本図が得られた後、耐久性・経済性を満足できるよう、保守点検要領の作成およびコスト算出を行なう。
- ⑧ 具体的な建造・設置工程、必要に応じて再浮上・再設置工程も検討する。
- ⑨ 必要に応じて構造の見直しを行ない、必要であれば強度検討により構造補強を検討する。
- ⑩ 以上の流れによる検討で安全性・機能性・耐久性・経済性が当初の計画に沿うものであることを確認し主要構造計画が終了する。

図中に示す構造合理化のブロックは、本構造方式の特徴である設計パラメータと設計自由度の多様性の中で合理化を図ることを示す。合理化手順については後述する。

（2） 主要寸法の設計根拠

セミサブ型両端支承方式は、長さ（L）、幅（B）はともにアクセス機能の要求から決められるものであり、深さについては、設置計画海域の水深および強度を考慮して決められる。はじめに重要なのは、重量と浮力とバラスト重量を決定することである。強度については、水中桁構造の設計とあわ

せて考慮する。以下に前節までの検討の過程で得られた知見をもとに主要寸法の設計根拠を考察し整理した。

- ① 水深の制限のもとで全体深さを設定する必要がある。
- ② ここで水中桁の深さ方向の位置は、水深および水面から露出しないことを条件とする。
- ③ コラム本数は上部桁のスパンを決めるので、浮力を確保するための水中桁を含めた鋼材重量への影響度が大きいので上部桁の重量を考慮しつつ決める。そして上部桁の設計を行なう必要がある。
- ④ 水中桁の端部傾斜角、護岸部の桁かかり長は護岸形状を考慮して決定するが、クリティカルではない。
- ⑤ 次にアスファルト重量、コラム、水中桁を支える浮力が得られるような水中桁の大きさを決める必要がある。
- ⑥ コラム直径は強度、保守点検時の通行性を考慮して決定する必要がある。
- ⑦ バラスト水の重量は、護岸への荷重を少なくするために必要最小限の重量とする必要がある。

本方式は、新しい概念で設計するものであり、前述した設計を踏まえて主要寸法の決定根拠を整理した。具体的な設計パラメータの項目については、Fig.13 に主要寸法のコストへの影響度に関する設計根拠を示す。この中で◎印で示した項目（全体深さ、コラム数）は、製造コストに影響度の大きい項目である。

（3） 合理化の手順

前述のように、セミサブ型ローハル構造の場合、設計パラメータの自由度が多く、合理化によるコスト削減が可能な余地があると考えられる。合理化にあたっては、各主要寸法の決定根拠にもとづきその制限を考慮し、剛性を確保しつつ、構造重量の軽減を図り、浮力、バラスト重量を再設定する。合理化にあたっては、構造重量に大きな影響を及ぼすコラム本数、全体深さをパラメータとして軽量化を図る。構造の合理化の手順を Fig.14 に示す。具体的には、上部桁の必要強度から桁深さを決定し、水中桁の深さ方向の位置を設定して全体深さを決める。その上で、概算重量を求め必要な浮力を計算して水中桁の大きさを決定する。コラム直径、本数を考慮して重量軽減を図り、板厚、骨寸法の確認をしたうえで全体剛性が応力・たわみなどの許容値を満足することを確認する。そしてバラスト水重量を設定して Fig.12 の流れに戻る。

Fig. 12 Design procedure of Both End Supported Semi-Submersible

両端支承構造の設計のポイント

設計寸法	決定根拠	コストへの影響度
長さ	水中桁の位置および水中桁の長さにより決定する。(b+f) ただし、重量の最適化を図る。	●
水中桁の位置	設置時にLWLの水位にて水中桁が波道にても 空中に出ない事を条件とし、さらに干満等の腐食を考え LWLより1m下とし、最低 7m とする。 (50年後の地盤高さが9.0m、LWL0.1mであり、 8.0-0.1+1.0=8.9m から7mとする。)	○
上部桁深さ (コラム数、コラムスパン)	コラムスパン30mとすると、深さ2.5m程度必要。 コラムスパンを覚えて最適化を図る。	●
水中桁の端部 傾斜角	全体構造を一体案として機能させるため、構造の 連続性と艀岸との干渉を避けることを考慮して 30°～60°程度とする。	×
艀岸部の桁かかり長	定常の大きさおよび地盤沈下による艀岸の水平 変位より9mとする。	×
浮力の決定	死荷重と重量と浮力がバランスするよう最小限の浮力 確保をする様に決める。	○
水中桁の長さ	浮力確保と全体剛性確保を考慮して決める。	○
コラム直径	強度、保守・点検時の通行性も考慮し、最小化する。	○
バラスト重量	HHWL時に浮き上がらず、通行性が確保できることを前提 にバラスト量を極力小さくする。 (浮上を許容する場合、係留チェーンおよびメンテ作業必要。 ただし、浮力を必要最小限にとどめ、最小のバラスト とする。)	○

Fig. 13 Design basis of Both End Supported Semi-submersible

Fig. 14 Procedure of Rationalization

4.3 本体構造の合理化例

ここでは、関空の連絡誘導路を例に、鋼材重量の低減を図った例について述べる。誘導路は、長さ 200m、幅 150 mの構造が、2 基設置するものとして、当初、Fig.12 の設計検討フローに従い設計を行なった。そして構造重量は幅 1 50mあたり 20,500 トンと推定された。構造の合理化による鋼材重量の低減について以下に述べる。ここでは、Fig.14 に述べた合理化の手順により、初期設計／全体配置の見直しを行い、必要な全体剛性を求めた後、コラム本数・全体深さの検討を行なった。

舗装重量、活荷重に対する上部構造の必要断面係数と、全体の剛性を考慮して合理化する。なお、前提条件として、連絡誘導路としての機能を満足させるため、応力・たわみが許容値を満足することをチェックしつつ合理化した。

コラム本数、全体深さなどをパラメータとしてその影響をしらべ、合理化をおこなった。具体的には、上部桁が 2 重構造、オープン構造の 2 種類についてそれぞれ、水中桁位置 5 ケース、コラム数 5 ケースの合計 50 ケースについて重量を算出し、それぞれのパラメータが重量に及ぼす影響を求めた。上部桁をオープン構造として、それぞれのパラメータを変えた重量検討の結果を Fig.15 に示す。

なお、ここで水中桁位置が 6m の場合鋼材重量が大きいのは、全体深さが減少することにより、剛性が不足し上部桁および水中桁の寸法を増やす必要が生じ、鋼材重量の増大に伴って浮力増加のためにさらに水中桁の大きさも増加したためである。

Fig. 15 に示す結果から、以下のことが言える。

a) 水中桁の位置は、7m の場合が構造重量が軽い。

b) 水中桁が空中に露出しないためには、水中桁の位置は、7mが必要である。

c) コラム数は多いほうが軽い、9本とすると、コラムスパンが小さくなり、上部桁の有効幅が小さくなるため逆に重くなり、8本が最も軽い。

鋼材重量の軽減の内訳を以下に述べる。

①計画変更により、連絡路の長さを200mから194.5mに調整し、さらにGSE通路部の上部桁深さを2.5mから1.5mに変更し、水中桁の縮小を行なった結果、約4,400トン軽減した。

②上部桁が2重構造であること条件をはずすことにより（オープン構造にする）、約1,400トン軽減した。

③さらに、コラム本数を5本から8本に増やすことにより、上部桁のスパンが小さくなり、重量が1,300トン減少した。以上の結果、構造重量は、当初の150m幅あたり、20,250トンから13,046トンに減少した。Fig.16に鋼材重量の合理化の結果を鋼アーチ橋と比較して示す。上部桁の軽量化に伴い、浮力を得るための水中桁の縮小が可能となり、浮体構造のメリットが現れていると考える。

④その場合の必要最小限の浮力とバラスト量を求め、結果として重量、バラスト量、付加水質量を低減して、地震時の支承反力を減少できる。

⑤HHWLにおいて浮上しないための必要最小限の浮力としたため、バラスト量が9,000トンから1,770トンに減少した。

さらに、水中桁の縮小により、付加水質量が減少し、地震時の慣性力の減少が期待できる。以上をまとめると、Table 5 のようになる。

Fig.15 Relation between Steel Weight and Number of Column / Location of Under water Box Girder

Fig.16 Structural Steel Weight

(日本橋梁建設協会「デザインデータブック」より)

Table 5 Results of Rationalization

	当初設計	合理化後
本体重量 (トン)	20,250	13,046
バラスト重量 (トン)	9,000	1,770
付加水重量 (トン)	31,660	23,347

ここに述べた合理化検討の経緯を振り返り、得られた知見をまとめると下記のように述べる事が出来る。

- 上部桁構造はそのスパンを短くすることにより、全体剛性を満足させる範囲で軽量化が可能である。
- 水中桁の水面下の位置の合理化により、鋼材重量は低減が可能である。
- 上部桁を軽量化させることにより、水中桁の浮力を減少させることができるので水中桁の縮小を図ることが可能となり、全体の鋼材重量の低減が可能である。
- 水中桁の縮小された寸法決定、およびバラスト水量の減少により、地震力の低減も期待できる。

5. 結論

本報告においては、空港における浮体式連絡誘導路の設計・計画について、関西空港（以下関空と呼ぶ）のⅠ／Ⅱ期埋め立て空港島を結ぶ長さ200mの連絡誘導路を対象に洋上アクセス設備の計画例について述べた。そして種々の

設計上の検討を行ない、セミサブ型ローワーハル構造の場合、設計パラメータの自由度が大きく、さらに浮力を利用していることから、軽量化によるコスト削減が可能な余地があることを述べた。

そして、以下の成果が得られた。

- ①初期設計により構造重量と、設置時に必要なバラスト重量を求めて初期ホギングモーメントを生じさせるために荷重バランスを設定した。そして設計時・建造時における重量管理が重要であることを示した。
- ②波浪中弾性応答解析の結果から、関空連絡誘導路を浮体式の浮体式セミサブ型ローワーハル方式で計画した場合、波浪中の応答値は水中桁の間隔が影響すると考えられる。
また、空港における浮体式連絡誘導路の設計・計画について、洋上アクセス施設に求められる性能を整理し、前章までの検討の過程で得られた知見をもとに設計の流れと主要寸法の設計根拠を考察しまとめた。そして構造の合理化についてその方法と具体例について記述し、以下の成果が得られた。
- ③初期設計からの構造重量低減の検討を行ない、そこで得られた知見を取り入れて設計検討フロー、主要寸法の設計根拠、合理化手順としてまとめた。
- ④浮力を利用するセミサブ型ローワーハル構造の特徴として、コラム本数、水中桁の位置（喫水）と形状を合理化することにより、大幅な構造重量低減が可能であり、特に上部桁を軽量化することにより、水中桁の縮小を図ることが可能であり、全体の鋼材重量の低減が可能であることを示した。

なお、本報告では地震応答には触れないが、本構造方式は浮体であることにより免震性が期待できること、浮力を利用することにより設置反力が小さいこと、免震支承で支持することにより通常のアクセス施設より地震に対して有利であると考えられる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、貴重な資料を提供いただいた（財）日本船舶技術研究協会の加戸正治氏（元住友重機械工業㈱）、浮体橋について助言をいただいた増井直樹氏（大林組）にこの場を借りて御礼を申し上げます。なお、本論文で引用した関空連絡誘導路の検討結果は筆者らがメガフロート技術研究組合において実施したものを一部引用させていただいた。ここに関係者各位に御礼を申し上げます。

参 考 文 献

1. 国土交通省航空局監修：空港土木施設設計基準、平成 17 年 4 月
2. 土木学会：浮体橋の設計指針、平成 18 年 3 月
3. 道路橋示方書・同解説：日本道路協会、平成 14 年 3 月
4. 飯島一博・吉田宏一郎・鈴木英之：超大型半潜水式浮体の波浪中構造応答解析、日本造船学会論文集、第 181 号、平成 9 年 5 月、PP. 281－288
5. 日本造船学会海洋工学委員会構造部会編：「超大型浮体構造物の構造設計」成山堂書店、平成 16 年 11 月