

D滑走路における小型船係留棧橋について
 ～厳しい波浪環境下に建設される羽田空港初の係留施設の設計と施工～

(株)大林組	中村 泰
鹿島建設(株)	藤代 勝
連絡誘導路工区	松元 和久
連絡誘導路工区	出口 大輔
JV 工務・企画Gr	上野 浩二

キーワード：UFC、揚圧力、工期短縮、プレキャスト、航泊禁止区域

1. はじめに

羽田空港における初めての係留施設は、「棧橋」と「渡り橋」で構成される全長 76.0m、幅員 5.5mの棧橋構造である。(写真 1-1)

この施設は、①D滑走路工事中は監督用交通船(対象船舶 最大総トン数(GT) 132t 級)の係留、②D滑走路供用開始後は、海上セキュリティ対策の警戒艇係留を目的として、図 1-1 に示す位置に建設された。

本報告は、当係留施設における構造形式の選定、UFC(超強度繊維補強コンクリート)による渡り橋の設計及び一部プレキャスト化を採用し工期短縮を実現した施工について報告するものである。



写真 1-1

2. 係留施設構造形式の選定

2-1 設計条件

本施設は、現空港島の南側外周護岸に位置し、消波工を有する既設護岸部に設置するため厳しい波浪条件に耐えうる性能が要求された。

その上で、渡り橋、棧橋の構造形式を最適化することが構造設計におけるポイントであった。

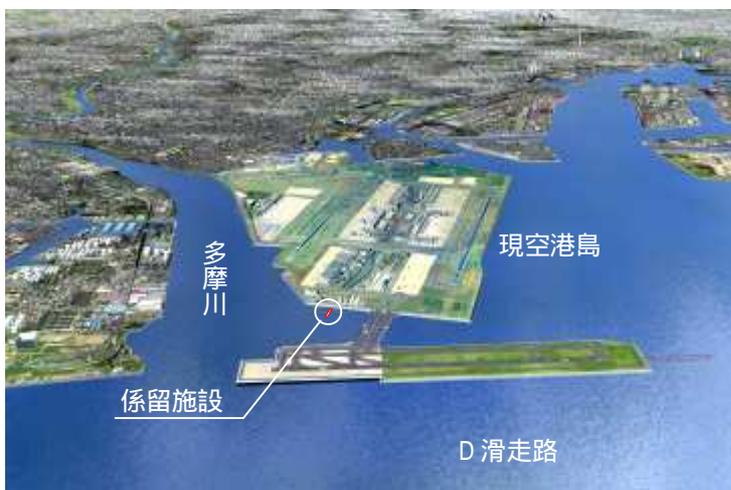


図 1-1 係留施設 位置図

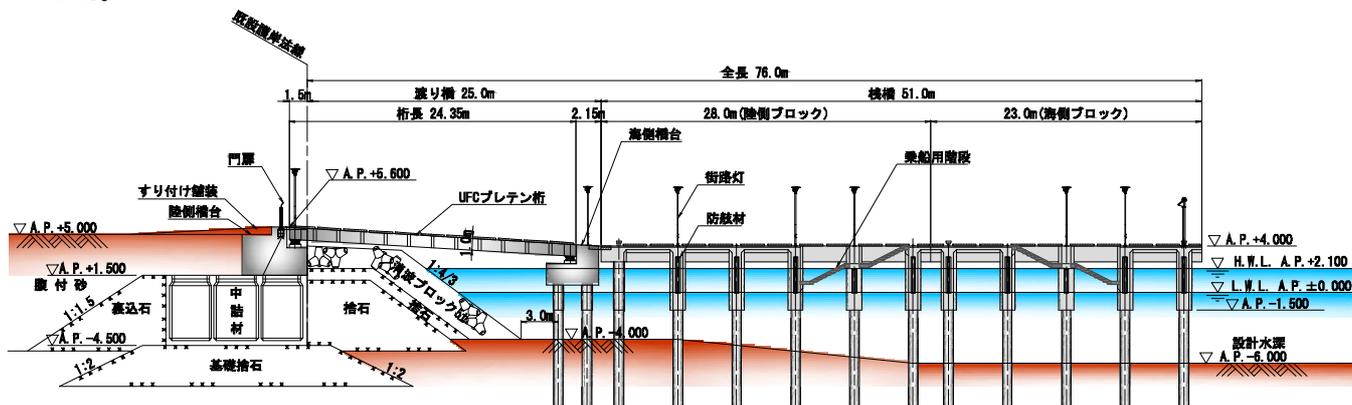


図 2-1 係留施設 設計断面図

〔主な設計条件〕

- ・ 波浪条件 : $H_{1/3} = 3.95\text{m}$ 、 $T_{1/3} = 8.1\text{sec}$ (再現期間 50 年)
- ・ 潮位 : 朔望平均満潮面 (H.W.L.) = A.P.+2.1m、朔望平均干潮面 (L.W.L.) = A.P. ± 0.0m
- ・ 栈橋天端高 : A.P.+4.0m
- ・ 設計水深 : 渡り橋 A.P.-4.0m 栈橋 A.P.-6.0m
- ・ 耐用年数 : 50 年
- ・ 利用条件 : 警戒艇利用時の乗降 ※ただし、車両の乗り入れ可能な構造

2-2 渡り橋構造形式の選定

本施設の設計では、既設護岸近傍にある渡り橋の構造形式の選定が大きな課題であった。

当初、暴風波浪時の波による揚圧力を受けない高さまで橋面を上げた「歩道橋形式」を検討したが、緊急時の車両乗り入れが可能な構造形式にする必要があることから採用を見合わせた。

既設護岸の越波量低減機能を現況と同様に確保するため、消波工の残置を前提とした構造形式にする必要があった。車両乗入れという利用条件に対し、桁高を大きく出来ないという制約があった。図 2-2 及び以下に、渡り橋の構造選定における課題を 3 点示す。

「桁高に制約を受ける」

「スパン長が長く、大きな揚圧力が作用する」

③「厳しい塩害環境にある」

渡り橋構造形式は、表 2-1 に示すように構造的・経済的検討から、「橋梁形式」を選定した。

渡り橋上部工の構造形式は、表 2-2 に示すように、本施設特有の設計的な課題から高強度かつ耐久性に優れた「UFC プレテン桁」を採用することで厳しい波浪環境下での耐久性を確保した。

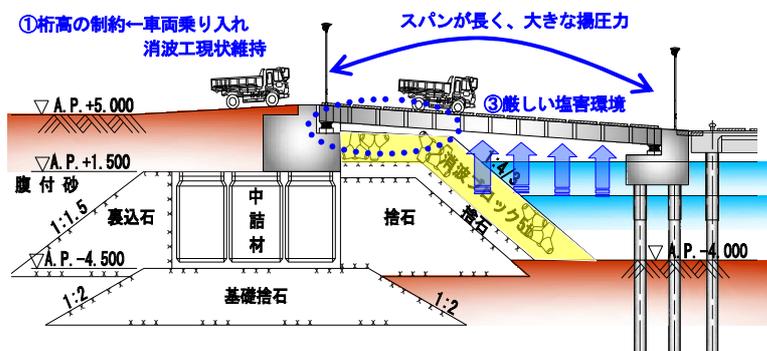


図 2-2 渡り橋の構造選定における課題

表 2-1 渡り橋の構造形式比較表

構造形式	案 : 橋梁形式 (実施)	案 : フラットスラブ形式	案 : 歩道橋形式
概念図			
車両乗り入れ	車両の乗り入れが可能	車両の乗り入れが可能	歩道橋形式のため、車両の通行は不可
施工性	被覆石と消波工の一部のみ撤去復旧が必要	被覆石、消波工、捨石の大規模な撤去復旧が必要	被覆石のみ撤去復旧が必要
越波対策	消波工は、現況復旧するため越波対策の必要なし	新設杭があることから、現況復旧が困難	消波工は現況のままであり、越波対策の必要なし
施工時安定	既設ケーソン護岸の安定検討の必要あり ただし、案②より影響は少ない	既設ケーソン護岸の安定検討の必要あり	既設ケーソン護岸の安定検討の必要なし
揚圧力対策	UFC・グレーチングの採による揚圧力対策を実施する	フラットスラブ全体で揚圧力に抵抗する	歩廊部を揚圧力が作用しない高さとする
経済性	1.00	1.20	-
総合評価		×	×

※経済性は、案①を1.00とした場合についての値

表 2-2 渡り橋上部工の構造形式比較表

主桁構造	案 : UFCプレテン桁 (実施)	案 : PCポステン桁	案 : 鋼版桁
概念図			
桁高	1.0 m	1.6 m	1.0 m
主要材料	コンクリート:UFC $c_k=180N/mm^2$	コンクリート:高強度コンクリート $c_k=60N/mm^2$	鋼材:SM570
既設護岸の維持	消波工と桁下空間の確保が可能	桁高が高くなり、消波工の撤去が必要となる	消波工と桁下空間の確保が可能
耐久性	プレテンション桁として工場製作するため、腐食性物質の侵入抵抗が極めて高いUFCを使用することで、100年以上の耐久性を確保。鉄筋配置不要。	ポストテンション桁として場所打ちコンクリートで製作。鉄筋はエポキシ樹脂鉄筋を用い、純かぶり70mmとすることで設計耐用期間50年に対する塩害抵抗性を確保。	重防食塗装系C-5(フッ素系樹脂)を適用。波や浮遊物が直接当たる海水面付近に設置する鋼桁であるため、適用可能な防食対策がない。
経済性	1.00	1.50(背後地の越波による被災を考慮せず)	1.65(架け替えを含む)
総合評価		×	×

※経済性は、案①を1.00とした場合についての値

2-3 棧橋構造形式の選定

棧橋の構造形式は、ジャケット式棧橋や鋼製棧橋および浮棧橋を比較したが、厳しい波浪条件と経済性・実績等を考慮し「鋼管杭 RC 梁スラブ形式」を選定した。

暴風波浪時の波による揚圧力対策として、受圧面積を大幅に低減させるため、床版および乗船用階段にはグレーチング構造（透過率 53%）を採用することとした。（写真 2-1、2-2）

また、本施設は厳しい塩害環境の下に設置されることから、各部材において耐久性の優れる防食仕様とした。主な部位における防食仕様を以下に示す。

床版グレーチング（溶融アルミニウムめっき：設定耐用年数 15 年）

乗船用階段 本体部（重防食 超厚膜型エポキシ樹脂塗装：設定耐用年数 40 年）

乗船用階段 グレーチング（FRP 製：設定耐用年数 20 年）



写真 2-1 床版グレーチング



写真 2-2 乗船用階段

3. UFC を用いた渡り橋上部工の設計と施工

3-1 概要および設計条件

渡り橋上部工は、工場製作した5本のプレテンション桁を組立てヤードにて地組し、横桁を場所打ちして一体化した。その後クレーン付台船にて海上輸送した後に一括架設を行ったもので側面図を図3-1に示す。構造形式は、UFCを用いたプレテンション桁構造とし、以下に挙げる設計条件を満足するものとした。

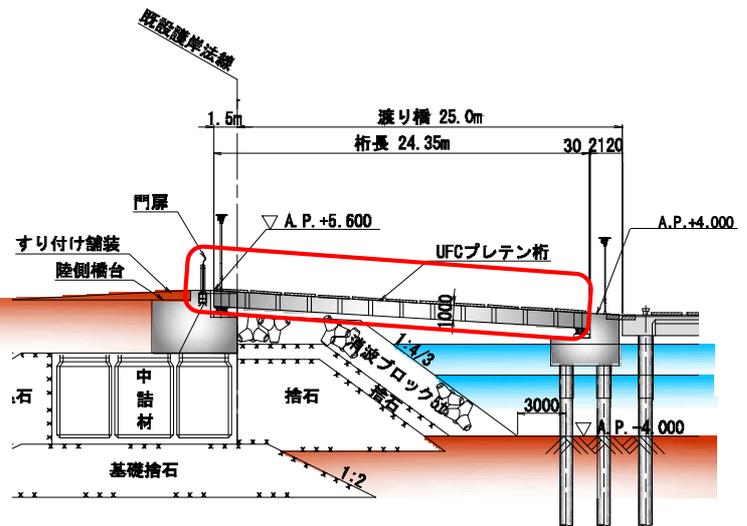


図3-1 渡り橋 側面図

- ①設計供用期間50年（防食含む）に鑑み、耐久性に優れる橋梁とする。
- ②暴風波浪時の揚圧力の作用を軽減するため、主桁をできるだけスリムにするるとともに、床版にグレーチングを用いて受圧面積を低減している。
- ③車両乗り入れ可能とするため、陸側橋面高さをA.P.+5.6mに抑え、縦断勾配を8%以下とする。
- ④桁高は消波ブロックとの離隔を確保するため1.0m以下に制限する。

構造設計に当たっては、「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」（2004年；土木学会）（以下、UFC指針）に準拠し、終局限界状態ならびに使用限界状態について照査を行った。

3-2 UFC の特徴

渡り橋上部工に用いたUFCは、圧縮強度が $180\text{N}/\text{mm}^2$ 以上と非常に高く、長さの異なる2種類の補強用鋼繊維によりひび割れの伸展や幅の拡大が抑制され、引張強度の特性値は $8.8\text{N}/\text{mm}^2$ と非常に高い強度を示す。写真3-1に補強用鋼繊維を、図3-2に直接引張試験による引張軟化曲線を示す。

UFCは化学的に緻密化された硬化体を形成することにより、塩分の浸透（塩素イオンの浸透深さ）は一般のコンクリート（ $W/C=45\%$ ）に比べ1/100程度と非常に高い耐久性を有している。これらの特長により、構造物の軽量化と長期間の耐久性を維持することのできる材料である。UFCはプレミックス結合材、細骨材、特殊鋼繊維、減水剤および水とで構成され、今回用いたUFCの場合、1次養生並びに同種材料と比べ低い温度及び短時間の2次養生（給熱養生：蒸気 85°C で20～24時間）でその性能を発揮する。



写真3-1 補強用鋼繊維

3-3 設計概要

主桁にUFCを用いることにより、高強度化によって主桁幅および桁高を最適化し揚圧力による作用を極力抑えるとともに、その材料性能によって高耐久性を確保し維持管理を容易にすることができ、前述「2-2 渡

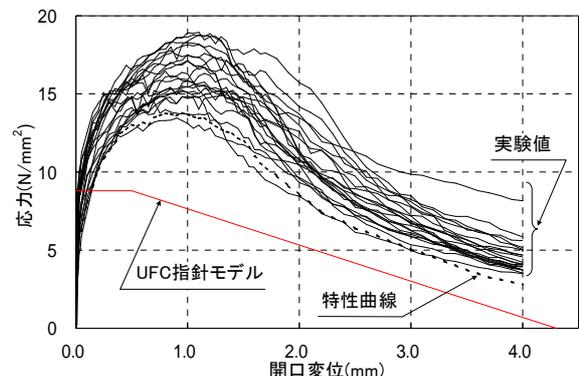


図3-2 引張軟化曲線の特性値（直接引張試験）

り橋構造形式の選定」で示した3つの課題を解決した。その他、設計における留意点を示す。

主桁：運搬時の長さ制限（25m以下）、重量の制限（30t以下）、養生中の収縮およびクリープを考慮した導
入力の設定

中間横桁（場所打ち）：必要かぶりの確保とPC鋼材および補強鉄筋の防食

端横桁（場所打ち）：PC鋼材および補強鉄筋の防食、支点は支承との取り合い

終局限界状態として、面内の照査では揚圧力作用時および上載荷重作用時を考え、面外の照査においては水平波力作用時および地震時作用力を考慮した。使用限界状態としては、曲げおよびせん断の照査のほか、「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編」を準用し、たわみの照査を行った。場所打ちコンクリートにて構築する中間横桁の検討では、揚圧力および上載荷重の偏載時を考慮した。端横桁の検討では、揚圧力による支点負反力発生時について安全性の検討を行った。

主桁の断面は、矩形の無垢断面とし、終局限界状態において引張抵抗材として必要なPC鋼材のうち、緊張制限（プレテンション固定緊張装置の容量）を越える本数については非緊張鋼材として配置し、使用限界状態において必要なプレストレス力はポストテンション鋼材にて補った。

PC鋼材の配置は、UFCが補強用繊維を含むため、打込みのし易さ、繊維の分散性に配慮する必要があった。また、PC鋼材とUFCの付着を確保するため、PC鋼材の「あき」および「かぶり」はPC鋼材の径以上および径の1.5倍以上を確保した。また、中間横桁の鉄筋最小かぶりは、塩害のもっとも厳しい区分の場所打ちプレストレストコンクリート構造として、70mm（エポキシ樹脂被覆鉄筋併用）とした。

3-4 桁の施工と架設

主桁の製作は、型枠の設置、PC鋼材の緊張、打込み、1次養生、プレストレスの導入、2次養生の手順で行った。打込みの際し、PC鋼材が高密度に配置されているため、主桁側面が上下方向となるように型枠を設置して打設することとし、事前に施工試験を行って品質を満足することを確認した。写真3-2にUFCの打込み状況を示す。UFCのフレッシュ性状は自己充填性を有する流動性の高い材料であるため、密実な打込みが可能であった。主桁の組立ては、工場より運搬されてきた桁を予め設置しておいた組立て架台上に位置および高さを調整しながら据え付けた。桁の据付が完了した後、上沓のセットおよび横桁の施工を行った。

渡り橋上部工の架設は、400t吊級固定式起重機船により行った。写真3-3および3-4に架設状況を示す。



写真 3-2 UFCの打込み状況



写真 3-3 渡り橋の浜出し状況(中袖製作ヤード)

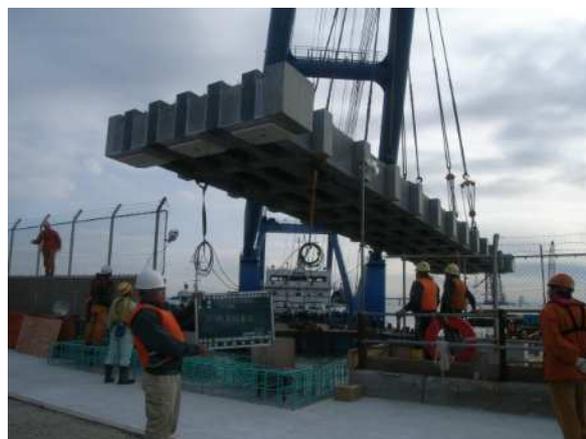


写真 3-4 渡り橋の架設状況(現地)

4. 係留施設の施工

4-1 部材のプレキャスト化

栈橋コンクリート（梁下）は図 4-1 に示すように底面が A.P. -1.5m であるため H.W.L. 時に最大 3.6m が海中部となる。また、施工区域沖合いに防波堤等の施設がないため、施工段階で波浪の影響を直接受ける。

本施設の栈橋コンクリート（梁下）を現場にて水中施工する場合、以下に示す課題が挙げられる。

コンクリート構築工期の短縮

浮力・波浪に対する型枠等の強度確保

水中コンクリートの出来形と品質の確保

以上の課題から、「海上作業の低減による工期の短縮」「コンクリートの品質の向上」を目的として、栈橋コンクリート（梁下）の杭頭部をプレキャスト化しクレーン付台船にてプレキャストブロックを設置する方法を採用した。

またプレキャストブロックは、D滑走路本体工事の工期優先のため、現地製作ヤードの確保が困難であることから工場製作とした。

施工に際しては、プレキャストブロック重量（18.7t）と作業半径（16m）より 200t 吊クレーン付台船を使用して設置した。（写真 4-1）

次に、杭頭部コンクリートのプレキャスト化による工期短縮の効果を図 4-2 に示す。

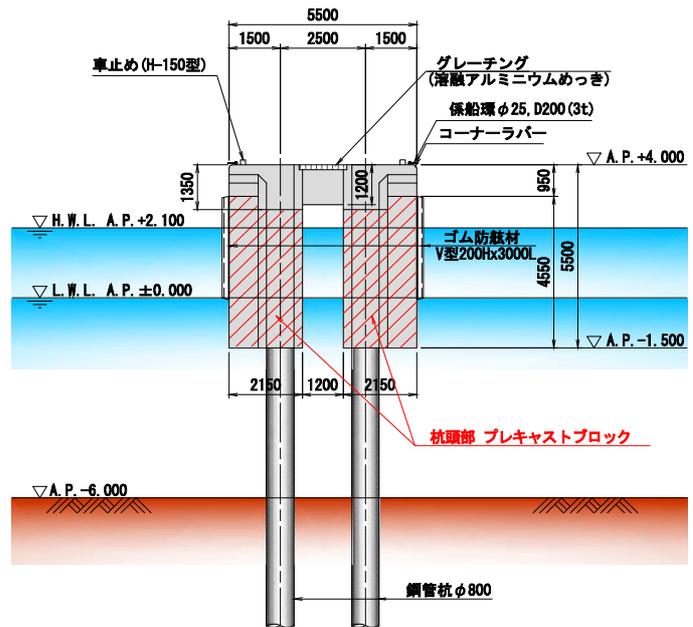


図 4-1 栈橋断面図



写真 4-1 クレーン付台船配置状況

条件	工事内容	経過日 数量	10	20	30	40	50	60	70
			水中 施工	型枠	626.6m ²				
	鉄筋	11.0t	65日						
	コンクリート	157.1m ³							
プレキャスト	製作	20個							
	据付	20箇所	15日	50日短縮					
	間詰モルタル	23.5m ³							

製作工程は工場製作として考慮しない

図 4-2 プレキャスト化による工期短縮の効果

杭頭部を水中施工する場合、全数を一括施工すると波浪による型枠の破損等のリスクがあるため、全体を4つに分割し、受ブラケット設置→型枠組立→鉄筋組立→コンクリート打設→養生→型枠解体の工程を繰り返すことから、構築工期全体で65日間必要となる。

これに対してプレキャストブロックを設置する場合は、図4-3の施工フローに示すように、プレキャストブロックの製作工程を施工工期から除外できるため、施工工程は受ブラケット・底型枠設置→プレキャストブロック浜出し→プレキャストブロック据付→間詰めコンクリート打設→養生となり、15日間で施工を完了することができる。よって、杭頭部のプレキャスト化により50日分の工期短縮の効果がある。(設置状況は写真4-2参照)

その他にも、梁・スラブ構築の支保工組立・解体作業を効率化するため、プレキャストブロックに梁・スラブ施工時の支保工取付用のインサートボルトを配置すること等により、更なる工期の短縮を図っている。

4-2 航泊禁止区域境での施工

本施設の施工区域は、D滑走路建設工事の航泊禁止区域の末端に位置しており(図4-4参照)、航泊禁止区域外に施工区域を確保できない。これにより、施工に際して、工事用船舶のアンカーの展開方法に制約を受ける。

特に、施工精度の求められる栈橋の鋼管杭打設においては、使用する起重機船を強固に固定する必要があるが、航泊禁止区域外に係留アンカーを継続打設することができないという課題があり、この条件をクリアする起重機船の選定が重要であった。

また本施設の施工では、工期短縮を目的として、工場で1本化した鋼管杭(800、全長:57.0m、重量:16.5t)を使用するため、起重機船の選定には、「必要十分な吊能力を有すること」という条件も付加される。

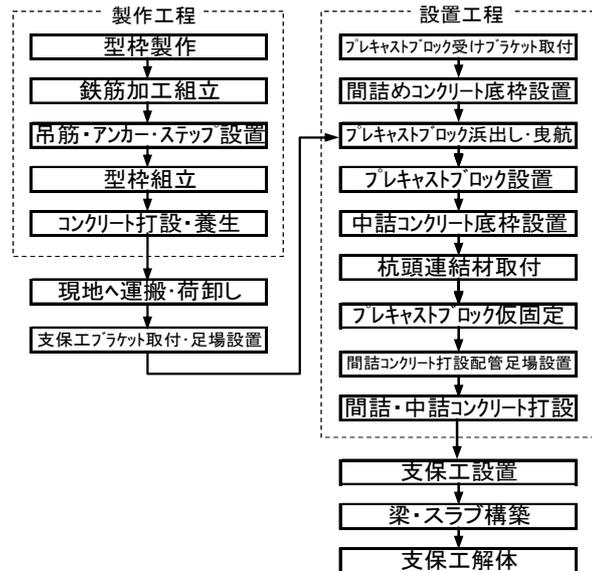


図4-3 プレキャストブロック施工フロー



写真4-2 プレキャストブロック設置状況

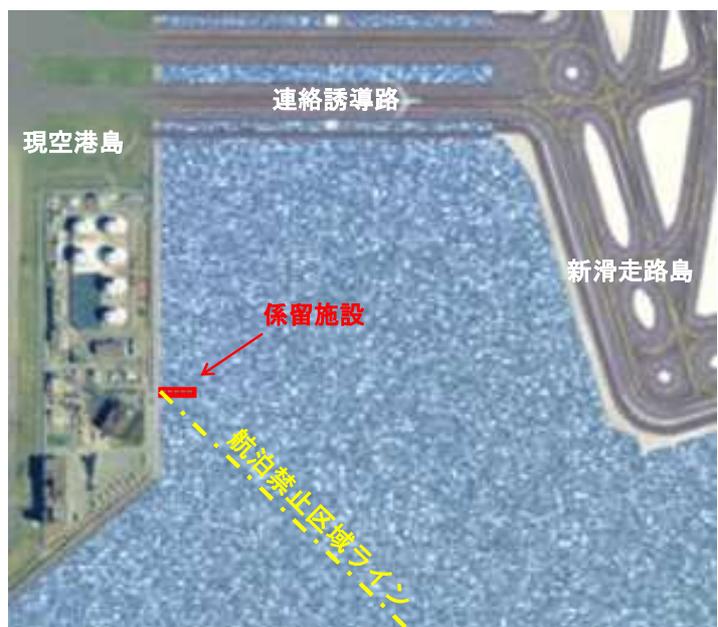


図4-4 係留施設施工区域図

以下に、起重機船の選定条件をまとめる。

- ①アンカー展開範囲が狭い場合でも船舶を強固に固定する手段を有すること
- ②建込み時、杭全長分の揚程を確保するブームを搭載していること

1次打設時（バイプロハンマ）の衝撃荷重を含めた吊能力を有すること

以上の条件を満足する船舶を検討した結果「450t 吊級ハーフセップ台船」を選定した。450t 吊級ハーフセップ台船による鋼管杭打設状況を写真 4-3 に示す。

この起重機船は、4 点スパットを搭載した台船に、450 t 吊クラスのクローラークレーンを上乗せさせた構成となっており、船舶の固定をスパットの打設によることで大幅なアンカーの広域展開が不要である。

また、上乗りのクローラークレーンはジブ長を最大 78m まで延長可能であることから、1 本化した鋼管杭でも十分に建込むことができる。吊能力においても安全率 1.66[最大荷重 47t、定格荷重 78t(作業半径:22m)]となり打設能力に問題はない。

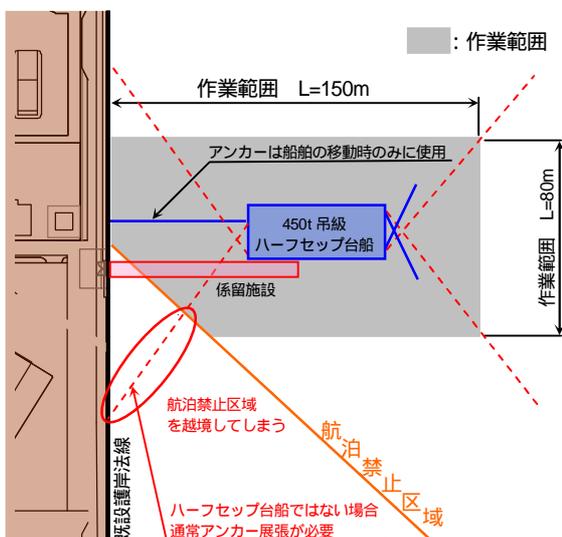


図 4-5 起重機船の係留検討概念図



写真 4-3 鋼管杭打設状況

5. おわりに

本施設は、平成 19 年 9 月に着工し、平成 20 年 5 月に無事工事を終え供用を開始している。
(現在、毎日監督用交通船が利用している)

今後、本報告が厳しい波浪環境下に建設される係留施設の設計・施工事例の参考になれば幸いである。

また設計と施工に際して、関係各位に多大なご指導・ご協力をいただき、末筆ではあるがここに感謝の意を表する。



写真 5-1 対象船舶「たかしま」係留状況