

強潮流下の海峡部に係留した台船からの 80m鋼桁吊上げ工事

ERECTION OF 80M LONG STEEL GIRDER FROM A BARGE MOORED IN HIGH TIDAL CURRENTS

阪東浩造¹・福下敏至²・岩村武史³・稲垣聡⁴

Kozo BANDO, Toshinori FUKUSHITA, Takeshi IWAMURA and Satoshi INAGAKI

¹正会員 Ph. D. 鹿島 海外事業本部 (〒163-1028 新宿区西新宿3-7-1新宿パークタワービル28F)

²正会員 鹿島 海外事業本部 (〒163-1028 新宿区西新宿3-7-1新宿パークタワービル28F)

³正会員 工修 鹿島 横浜支店 (〒231-0011 横浜市中区太田町4-51)

⁴正会員 工修 鹿島 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

After collapse of the KB Bridge in Palau in fall, 1996, a modern hybrid extra-dosed bridge with three spans was constructed with financial aid by the Government of Japan. The main span and side span are 247m long and 82m long, respectively. As one of the efforts to minimize the moment at the main towers caused by shorter side spans, a hybrid structure of concrete and steel girder is employed.

The steel girder was manufactured and assembled in Vietnam and China. The completed steel girder was transported by an 8000 ton barge and a 2700 horse power tugboat to Palau. The barge was towed by three local tugboats and moored at the construction site, where tidal current speed reaches at 4 knots. Since the hydraulic forces on the barge were expected to be large, measurement and prediction of sea surface elevation and tidal current were carefully made. Based on those results, the mooring system was designed, and the design and operational conditions were established.

Key Words : Steel girder, barge, mooring, tidal currents, tide, measurement, prediction, operational condition

1. はじめに

国際空港のあるパラオ最大のBabeldaob島と政治経済の中心地であるKoror島を結ぶKB橋が1996年9月崩壊した。パラオ政府からの要請を受け、日本の無償援助資金により、新KB橋が旧橋と同じ地点に建設されることになった。建設は1999年11月に開始され、2001年12月に終了した。

この工事では、橋梁中央部の鋼桁を一括架設する必要があった。現地調達可能な資機材がほとんどないこと、工期が短いこと、潮流が速いこと、作業参加メンバーが4カ国にわたることなどの現地での特殊な条件の下、この鋼桁架設作業を計画実施した。種々の工法を検討した結果、バージに鋼桁を積載し、橋梁鋼桁部直下に係留し、建設中の橋から吊上げることになった。

本橋が架設される海峡は、最大で約4ノットの潮流が流れているため、バージを安全に係留しウィンチ操作により正確な位置に固定することが特に重要

であった。このため、潮位・潮流速・風・波浪などの計測を実施し、自然条件の把握に努めると同時に、潮流速の予測と流体力の評価を行った。これらの検討結果は、係留システムの設計と設計条件・架設作業条件の決定に反映させた。

この論文では、このような架設作業のための準備検討と吊上げ作業について詳述する。

2. プロジェクト概要

(1) 現地の状況

本橋が跨ぐ海峡は幅が約200mと狭い。また、北東から南西に延びるパラオ諸島の東の海水と西の海水を交換する主要な水路となっている。このため、潮流速は速い時には4ノットに達する。このため、最深部水深は約35mで、陸上部から急斜面で最深部に達し、中央部は平坦である。一方、現場の南東部には水深が1m以下の浅瀬も存在する。

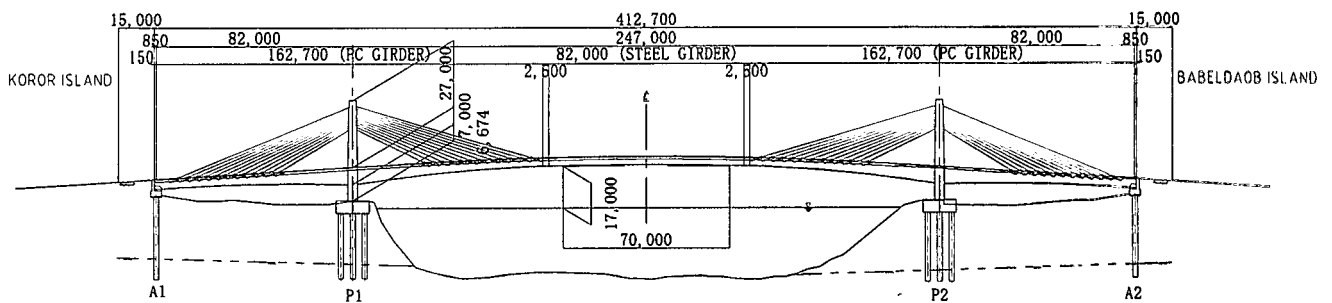


図-1 日本パラオ友好橋(New KB橋)

本橋建設地点の北西側約60mには、崩壊した旧橋を迂回するための架設浮橋が存在する。架設地点から浮橋までの距離が非常に短いことや、潮流が速い時にはタグボートの自由な操船が困難であること等から、バージやタグボートの操船・潮流が浮橋に向かっていている時の係留に関しても、十分な注意が必要であった。

(2) 橋梁概要

本橋は、主径間が海峡を跨ぐPC桁と鋼桁からなる3径間複合エクストラードス橋である。主径間長247mに対し側径間長82mと、一般的な3径間橋梁と比べて側径間の長さが短くなっている。このために生じる中間支点まわりの不均衡モーメントを最小化し、端支点の負反力を抑制するために、幾つかの設計面での工夫がなされている。その一つが、軽量の鋼桁を中央部に用いる選択である。図-1に、橋梁の構造を示している。この論文では、橋梁のBabeldaob島側をAirai側、Koror島側をKoror側と呼ぶ。

鋼桁は、長さ4mの接合ブロック2個と長さ77mの大ブロックで構成されている。接合ブロックは、PC桁と鋼桁を連結するためのブロックである。鋼桁部建設は、鋼桁製作・鋼桁輸送・鋼桁架設の順に行われた。鋼桁は小部材に分けてベトナムで製作され、中国で組立て・塗装後、8000トンバージに載せられパラオに運ばれた。その後、架設スケジュールに合わせバージを現地に曳航後、係留した。鋼桁は建設中の本橋から直接吊上げられるため、鋼桁位置直下に

バージを係留固定する必要があった。正確な位置に係留後、鋼桁の架設を実行した。

(3) 準備作業と架設作業

潮流に代表される自然条件を熟知し、精度のよい予測を実行し、設計と施工計画に反映させることは、この鋼桁架設を成功させるための必須条件であった。

係留作業準備のための計測は2月より開始し、データの蓄積と作用流体力予測法の確立と精度向上を図った。並行して、推定作用流体力を基に、係留システムの設計と作業手順を慎重に決定した。

3. 自然条件の調査

(1) 潮位

潮位変動を把握するために、表-1に説明するC計測を実施した。潮位予測としては、ハワイ大学で計算された6分間隔の予測値を用いることとした。この予測値は、約10km南西に位置するMalakal港を対象としたものであり、その精度を確認するためにC計測を実施した。計測は3ヶ月に亘って実施したが、全ての日で、計算値と計測値には良好な一致が得られ(図-4参照)、今後の検討に用いることができることが明らかとなった。

表-1 潮流・潮位の現地計測概要

	A計測	B計測	C計測
目的	<ul style="list-style-type: none"> 潮流の空間分布の調査 潮流の流向成分の調査 浮橋の影響の調査 潮流の時間変動の調査 潮流と水位の関係の調査 計測を参考に潮流予測モデルの構築 	<ul style="list-style-type: none"> 長期間の計測による潮流変化の把握 長期間の計測による潮流予測モデルの評価 	<ul style="list-style-type: none"> 長期間の潮位観測による潮位変動の把握 長期間の潮位観測による予測潮位の精度評価
方法	<ul style="list-style-type: none"> ADCPを搭載した船の海峡横断方向移動 ADCPを搭載した船の定点24時間連続計測 水位は目視により10分間隔で計測 	<ul style="list-style-type: none"> PC桁部先端から電磁流速計による計測 	<ul style="list-style-type: none"> 容量線式波高計による連続計測. 10分間隔の目視計測.
時期	<ul style="list-style-type: none"> 2001年2月20日-28日 	<ul style="list-style-type: none"> 2001年5月-7月(日中のみ) 	<ul style="list-style-type: none"> 2001年4月-7月(24時間)

(2) 潮流

潮流状況を把握するために、表-1に説明するA計測・B計測を実施した。

A計測の結果の一部として、定点での各水深での1日間の流速流向の時系列を図-2に、潮流速の時間変動を図-3に整理した。図-3には、計測値の他、後述する予測モデルによる計算値も同時にプロットしている。

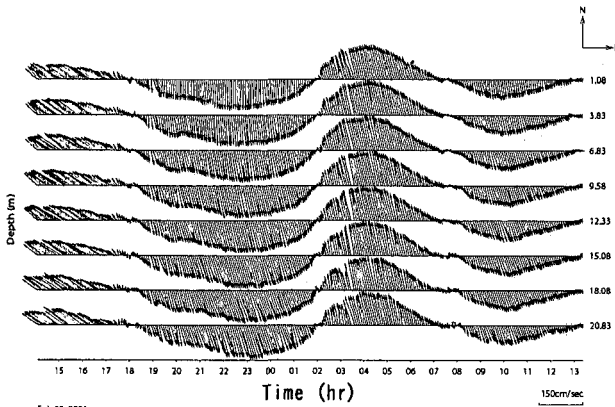


図-2 潮流流向流速の定点測定結果 (2月23-24日)

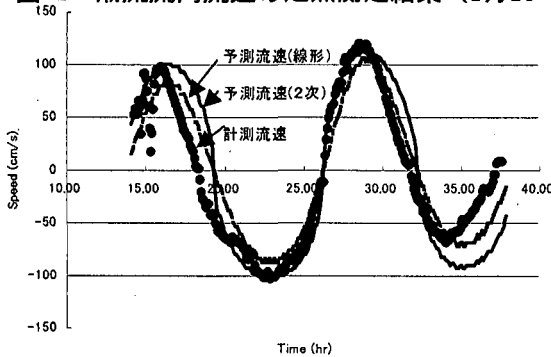


図-3 予測潮流と測定値の比較 (2月23-24日)

A計測の結果以下の事項が明らかとなった。

- ・ 潮流は、潮位に対応して変動している。
- ・ 潮流の方向は、ほぼ海峡に平行 (橋軸方向に直角) である。
- ・ 流速は、Airai側 (北東側) で若干速いが、実用上は、空間でほぼ一様であると言える。
- ・ パージが浸水する深さの範囲では、流速はほぼ一定であった。
- ・ 潮流の鉛直方向成分は無視できるほど小さい。
- ・ 最大流速は、満月一日前に測定された1.3m/sであった。

この計測結果は、現場海域では潮流が海峡方向に均一に流れていると仮定することが妥当であることを示唆している。そこで、幅の狭い矩形水路を潮流が往復すると仮定して、潮位変動から潮流速を計算する簡単なモデルを作成した。非線形の移流項とコリオリ力を無視すると、式(1)のような水面勾配と摩擦力 τ_b が釣り合う運動方程式が得られる。

$$g \partial \eta / \partial x = -\tau_b / \rho h \quad (1)$$

ここに η : 水位, ρ : 海水密度, h : 水深。更に、

潮汐は長波であることから、水面勾配の項は次のように時間微分で書き直すことが可能である。

$$g \partial \eta / \partial x = \left(g / \sqrt{gh} \right) \partial \eta / \partial t \quad (2)$$

また、式(3)のように水位摩擦項は流速の二乗に比例する形で書くと、式(1)は式(4)のようになる。

$$\tau_b = \rho C_f u^2 \quad (3)$$

$$\sqrt{g/h} \partial \eta / \partial t = -\left(C_f / h \right) u^2 \quad (4)$$

C_f : 海底摩擦係数。これを流速について解くと、

$$u = \pm A \sqrt{|\Delta \eta / \Delta t|} \quad (5)$$

が得られる。ここにAは定数で、A計測で計測された流速と水位から、最適値を推定して、以降の流速評価に用いた。

図-3には、予測値として式(5)の他に、この式を線形化した式による計算値も同時にプロットしている。両者を比べると、線形化した式を用いると測定値よりも小さく、式(5)によるものは大きくなる傾向がわかった。そこで、安全側として式(5)をそのまま用いることにした。図-3は、式(5)が精度のよい予測値を与えることを示しているが、調整定数Aを含むことや短期間での比較となっている。そこで、予測流速と長期にわたるB計測で得られた流速値を比較した。図-4には、潮位差が中程度の日と大きい日における両者の値をプロットしている。これらの図は、以下の事項を明らかにしている。

- ・ 潮位差が中程度以下の日は、一致度は良好。
- ・ 潮位差が大きい日には、上潮時の最大流速の予測値が実測値より30%程度小さくされており、1.5m/sを超える。また、流速が大きい時の実測値はより尖った形をしている。
- ・ 上潮時の最大値は、予測よりも早く生じる。
- ・ 潮位差が大きい日においても、下げ潮時の最大流速は予測値と実測値はよく一致している。

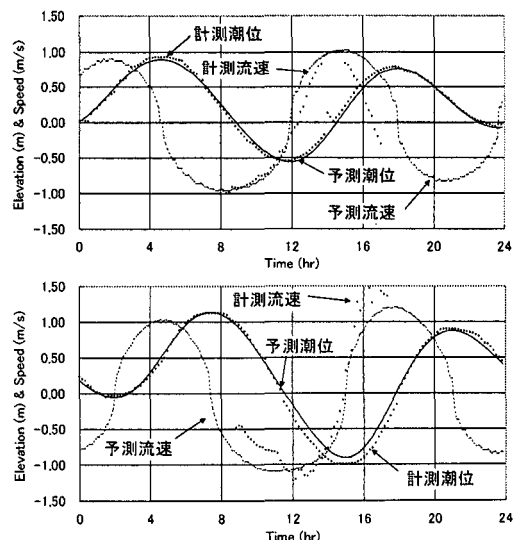


図-4 予測潮流と測定値の比較

後述するように、係留力検討から最大流速が1.2m/sを超える場合には、吊上げ作業を実施しない。このため、予測流速が必要なのは潮位差が中程度以下の日であり、式(4)のモデルは吊上げ作業条件設定等に必要な潮流速を予測できることがわかった。

(3) 波浪条件

パラオは珊瑚礁に囲まれた国であり、海岸で観測される波浪は非常に小さい。現場海域も珊瑚礁に防護された狭い水路であり、波は一般に非常に小さい。2001年5月から約2ヶ月間、目視により波浪観測を実施した。その結果、全観測日の45%では波が観測されず、95%では波高は20cm以下であった。観測期間中、うねりは観測されなかった。

(4) 風条件

パラオでは、低気圧が通過する時とスコールとともに強風が吹くことが多い。一般に、低気圧はパラオ付近で発生するため、低気圧による強風は稀であるが、強力な低気圧の場合には強風が数日続くことになる。スコールにともなう強風は、突然襲来し、短時間で静まるのが通常である。

2000年7月より、現場で斜材安定性確認のため風観測を実施している。代表的な計測例として、2001年4月の観測値データを参考にすると、75%が4m/s以下、95%が6m/s以下で、最大風速が約10m/sであった。

4. 係留計画

(1) 係留アンカー

バージには、双胴式の5機のウィンチが設置され、その操作可能最大張力は約10トンであった。そこで、アンカーの設計強度は約30トンとした。バージを安全に係留するためのアンカーとして、3種類計10個のアンカーを設置した。タイプA(図-5のNo.1,2)は、186トンのコンクリートブロックで、浮橋のアンカーとして用いられているもので、慎重に安全性の検討を行った後、併用することにした。タイプB(No.3,4,9,10)は、長さ12mの300mmH鋼を海底下約9mまで二本打設したものである。タイプC(No.5,6,7,8)は、RC構造の中に埋め込まれたH鋼を利用したボラードである。潮流の向きやバージの係留方向などを考慮して、各段階で有効なアンカーを選択しバージに係留した。なお、現場に進入するタグボートに曳航されたバージを減速するため、バージ係留時に浮橋方向に流体力が作用したときの抵抗として、3.5トンの錨を用いた。事前に実施したダイバーによる海底面調査では、海底面は平滑な岩で、錨は機能を発揮できないことが危惧されたが、実際の操船時には錨が働いたことが確認された。結合ブロック吊上げ時の係留と使用アンカーを図-5に示す。

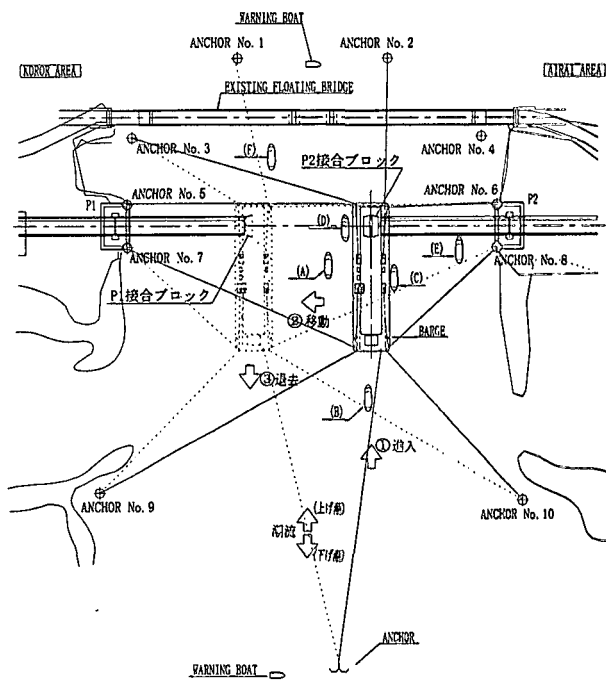


図-5 バージ係留及びアンカー位置

(2) 係留索

係留作業は潮止まりを中心に潮流のなるべく遅い時に実施する必要があるため、バージからの係留索を素早く各アンカーに取付けることが重要であった。タイプAのアンカーは海底35mの位置にあるため、このアンカーに取付けたワイヤーを浮橋上まで延長し仮留めして準備した。一方、タイプBのアンカーには2-3m程度のループ状のワイヤーをあらかじめ取付けた。後述する係留計算により、係留索として38mmのワイヤーやこれに等価なワイヤー及びロープを用いることにした。

(3) 係留計算

鋼桁を搭載したバージは、幅22.8m長さ90mドラフト1.5m(鋼桁積載時)で、ほぼ直方体浮体である。鋼桁を載せたバージに作用する流体力として、風・潮流・波による成分をそれぞれ計算し、合成した。風および潮流による抗力の計算には、通常の二次式を用い、抗力係数は安全側として1.6を採用した。風による流体力の計算では、バージの乾舷部と鋼桁部に作用する抗力を計算した。波による流体力は、係留されたバージの動揺解析を行い、慣性力を評価した⁽¹⁾。

計算では、バージの係留位置・係留方向・風向風速・潮流速を想定される範囲で変化させた。係留方向は、結合ブロック吊上げ時は橋軸直角で、大ブロック吊上げ時は橋軸平行である。なお、潮流は常に海峡に平行(橋軸に直角)に流れると仮定している。タイプCのアンカーからの係留索は荷重作用方向と大きな角度をなすため、補助的な役目と考え、計算では、考慮しなかった。

計算結果は、受圧面積が最も大きくなるバージが橋軸平行に係留された時、最大の係留索張力が作用

することを示した。また、橋軸直角方向に係留した場合でも、風がバージの長軸方向に直角に吹く場合には、係留索本数が少ないこともあり発生張力が大きくなることがわかった。これらの計算結果は、先に説明したアンカーや係留索の選定に反映させた。

ウィンチの操作可能最大張力は約10トンであったので、稼働条件として係留索張力が10トン以下とした。この条件と計算結果から、潮流速と風速をパラメータにした一覧表(表-2)を作成し、稼働可能日を決定した。なお、波浪は波高0.2m周期3秒とした。この表からは、例えば、潮流速が0.8m/s以下、風速が10m/s以下であれば作業可能であることがわかる。この制約条件は、上述の自然条件から、大潮時を除けば、実用性の高いものであることがわかった。作業当日早朝に、この表と観測される天候から作業実施可能かどうかを決定した。

表-2 種々の条件下での係留索張力 (ton)

wind speed (m/s)	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0
current speed (m/s)							
0.6	sea to bridge	4.3	5.3	6.7	8.5	10.7	13.3
	bridge to sea	3.5	4.3	5.5	7.0	8.8	10.9
0.8	sea to bridge	6.5	7.5	8.9	10.7	12.9	15.5
	bridge to sea	5.3	6.1	7.3	8.8	10.6	12.7
1.0	sea to bridge	9.0	10.0	11.3	13.1	15.2	17.7
	bridge to sea	7.5	8.4	9.5	11.0	12.8	14.9
1.2	sea to bridge	12.3	13.3	14.7	16.4	18.5	21.0
	bridge to sea	10.3	11.2	12.3	13.8	15.6	17.7
1.4	sea to bridge	16.2	17.2	18.6	20.3	22.4	24.9
	bridge to sea	13.6	14.5	15.6	17.1	18.9	21.0
1.6	sea to bridge	20.8	21.7	23.1	24.8	26.9	29.4
	bridge to sea	17.5	18.3	19.4	20.9	22.7	24.8

(4) タグボート

バージの曳航と、係留索のアンカーへの取付け及び解除のために、現地のタグボート6隻を利用した。現地で調達可能なタグボートには、馬力(300HP-850HP)・ワイヤー巻取り能力・操船性(twin screwを持つものが少ない)等に限界があったが、その中で、最適の配置を考慮した。

5. バージ係留作業

ここでは、鋼桁吊上げ作業の内、バージを鋼桁吊上げ可能な位置に係留するまでについて記述する。鋼桁の吊上げに関しては、他の文献を参照されたい(例えば大島ら⁽²⁾⁽³⁾)。

(1) 全体計画

バージはMalakal港到着後、港で艀装作業を行い、現場海域に曳航され、まず接合ブロックを吊上げる。その後、現場で接合ブロックの連結固定作業と大ブロック吊上げの準備作業のため、約1週間の待機期

間が必要で、バージの安全を考慮して、バージをMalakal港で待機させることにした。その後、再曳航し、大ブロックを吊上げた。吊上げ当日は、小潮であることが望ましいが、実際は、バージの到着日と架設作業条件を満たす潮流条件などを考慮し、吊上げ実行日を決定した。

接合ブロックの吊上げは、3日間で計画した。バージの港から現場への曳航には3-5時間かかることが予想されたため、現場の北東部約1kmの静穏な海域でバージを仮係留し、1日停泊することにした。翌日は潮汐の状況から日の出と同時に曳航作業を再開した。2個の接合ブロックの吊上げ作業は、作業の状況によっては1日で終了しないことが予想されるため、1日1個の吊上げを行うこととした。一方、撤収時は港への曳航が後工程となるため、係留解除後引き続きバージを港まで曳航することとした。

大ブロックの吊上げは、4日間で計画した。第一日目は、接合ブロックと同様に港から現場へのバージの曳航であるが、現場での係留システムが十分に機能することが判明したため、吊上げ現場に潮流方向に平行に係留して停泊することにした。第二日目は、作業工程と自然条件の不確定性を考慮して予備日とした。三日目は、バージの回転後、大ブロックを吊上げ、更に停泊位置に戻して停泊した。最後の四日目は、現場から港へのバージの曳航である。

また、この作業の参加者は、タグボート船長がパラオ人とインドネシア人・曳航時の地元アドバイザーがパラオ人・バージの位置決め指揮が日本人・ウィンチ操作が日本人・指示を受けて係留索のアンカー固定などの作業がフィリピン人と国際部隊であり、意思の疎通を確実にすることが不可欠であった。このため、異なる作業を行う全ての段階で作業内容を明示した図を作成し、参加者で徹底した。

(2) 接合ブロック及び大ブロック吊上げ

接合ブロック吊上げ時の現場海域での作業を潮位及び潮流速とともに図-6に、大ブロック吊上げ時の全体作業進行の詳細を表-3に整理した。これらの図表に示した実際の作業進行は、自然条件に恵まれたこともあり、ほぼ計画とおりであり、一部作業は計画よりも短時間で終了した(写真-1参照)。

潮流と風向風速の観測は、吊上げ作業時も実施した。位置固定と係留にとって重要な因子であるこれらの自然条件が予想の同じような大きさと同じような時間変動をしているかを確認するためである。この様子は、図-6に示しているが、作業期間中の潮流は、ほぼ予想通りであったことがわかる。

図-6によると、Airai側接合ブロックの吊上げ終了後、バージを停泊のために現場に係留した16:00頃、1.2m/s強の潮流が浮橋方向に流れている。この時バージはタイプBの二つのアンカーに係留されていた。この期間、タグボートの入れ替えのため一本の係留索を緩めたため、一時的に一本の係留索で保持されていたが、係留状態に異常はなく、今回の係

留方法でバージを安全に係留できることを確信した。

表-3 大ブロック吊上げ時の作業工程

日時	作業内容
7月15日	
05:55	錨引き揚げ
06:15	港から現場への曳航開始
06:45	港からの出口にある幅の狭い水路へ進入(速さ3ノット)
07:30	水路から出る
07:30	曳航ロープの延長作業(速さ4.2ノット)
08:20	現場海峡への入り口到着
08:55	一時待機海域付近でバージ反転作業・タグボートの編成換え作業
09:15	浮橋方向への潮流が速いため潮待ち停止
10:15	曳航再開
10:55	投錨
11:00	曳航完了し、係留索をアンカーに取付け開始
11:55	主係留索固定完了し、ウィンチにより前進。他の係留索の取付け作業開始。潮待ちが十分でなく、比較的潮流の速い中での作業となり苦労
12:30	係留索のアンカー換え、タグボートの位置換えなどを実施
12:40	潮流向が変わるのを待つ。解除した係留索が海底面の鉄筋等に絡み、その解放に30分要す。
15:00	作業再開
15:30	係留索取付け終了
7月17日	(7月16日は予備日)
06:05	バージの回転開始
07:15	バージ所定位置に停止
07:28	Airai側吊上げ準備完了
07:35	Koror側吊上げ準備完了
08:10	大ブロック吊上げ開始
10:45	係留索解除・バージ回転作業開始
11:05	バージ停泊位置に係留完了
7月18日	
06:15	係留索解除開始
07:20	バージの曳航開始(速さ5.4ノット)
08:00	海峡の外に出る(速さ4.5ノット)
09:00	港への水路に進入(速さ4.5ノット)
10:10	港到着

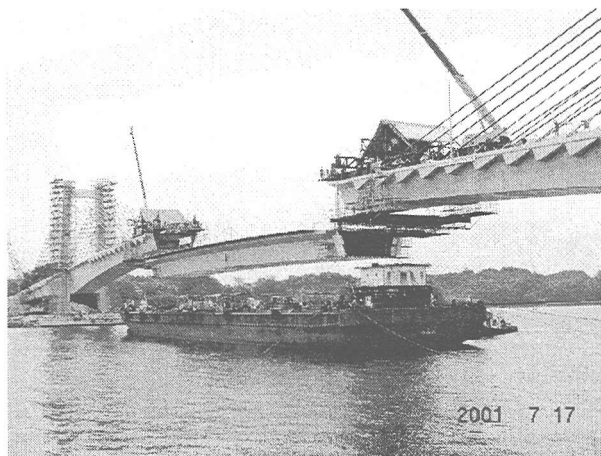


写真-1 大ブロック吊上げ

6. 結論

本橋梁建設工事での鋼桁吊上げは、幾つかの現地の特殊な条件の下に慎重に計画し、予定通り架設を終了することができた。準備段階では、自然条件と流体力の妥当な評価を重要視し、調査・解析・設計・施工手順を計画した。この調査から施工までの一連の作業で以下のことが明らかになった。

- ・調査には5ヶ月の長期を要したが、各段階での精度の高い推定やその妥当性の確認を実施することが可能になり、工事成功の大きな要因となった。
- ・予測潮位は、十分な精度で用いることができた。
- ・予測潮位を基に、簡略モデルにより潮流速を計算したが、実作業に用いることのできる程度の精度で予測可能であった。これは、海峡が水路に近い形状であったことも一因と考えられる。
- ・予想した流体力を基に、設定した稼働条件を満たすように吊上げ作業を計画し、無事完了した。
- ・抗力を計算する時に用いた抗力係数1.6は、過大であったと推定される。実作業では、更に精度のよい抗力係数の推定が、望まれる。
- ・吊上げ作業中も潮流速と風観測を継続し、用意した流体力表を参考にして安全性を確認した。
- ・多国籍で多くの人々が参加する作業であったが、各作業段階での確認作業を実行することで、意思の疎通が図れた。

謝辞：予測潮位データを快く提供して頂きました Department of Oceanography, University of Hawaii に、心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 今井, 利穂, 池谷, 秋山: 多点係留浮体の係留力解析, 鹿島建設技術研究所年報, 37, pp.157-164, 1989.
- 2) 大島, 鈴木, 柏村, 織田: パラオ共和国・日本パラオ友好橋の施工(上), 橋梁と基礎, 2001. 12
- 3) 大島, 鈴木, 柏村, 織田: パラオ共和国・日本パラオ友好橋の施工(下), 橋梁と基礎, 2002. 1

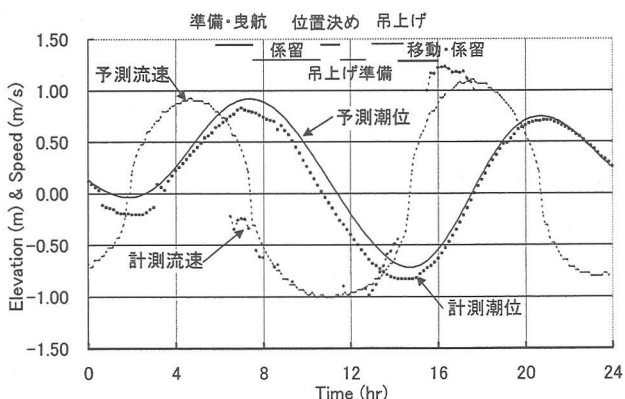


図-6 接合ブロック吊上げの手順と潮汐条件