

急潮流下における長大吊橋の補剛桁 直下吊り工法の研究

平山純一¹・坂本光重²・中尾俊哉³・古賀 昇⁴

¹正会員 工博 本州四国連絡橋公団第三建設局建設部長 (〒722 尾道市東御所町1-20)

²正会員 工博 本州四国連絡橋公団第三建設局建設部機械課長

³正会員 本州四国連絡橋公団第三建設局今治工事事務所技術課長 (〒794 今治市天保山町2-5-1)

⁴本州四国連絡橋公団第三建設局今治工事事務所機械電気課長

吊橋の直下吊り架設工法は、桁ブロックを積載した運搬船を架設位置直下に進入させ、主ケーブル上に設置したリフティングビームで吊り上げる工法であり、張出し工法に比べて経済性・工期・安全性に優れている。しかし、この工法は桁ブロックとリフティングビームの台付け時に運搬船を静止させる必要があり、急潮流下では運搬船の繫留が必要になる。一方、吊橋は急潮流で、しかも海上交通の要衝の地に架設されることが多く、航行船舶への影響を最小限にすることが求められるため、運搬船の繫留は困難になる。

このため、台船の四隅に推進器を装備し、この推進力を自動的に制御することにより定点を保持する運搬船を開発して急潮流下でも繫留索を用いない直下吊り工法の実現に明るい見通しを得た。

Key Words : dynamic positioning system, quick joint, PID control

1. はじめに

我が国の海峡部における吊橋の架設は、本四架橋に見られるように、主塔位置で荷上げした部材を、先端の架設位置まで橋上を運搬して組み立てる張出し工法が多く採用されているが、諸外国では桁ブロックを架設位置の直下に運搬して、主ケーブル上のリフティングビームで吊り上げる直下吊り工法が一般的である。直下吊り工法は、桁の形状に制限が無い・大ブロック化が可能である・高所作業が少ない等の特徴があり、経済性・工期・安全性に優れた工法にも関わらず、我が国で施工例が少ない。これは海面の使用に制限が伴うこと、海象条件が厳しいことなどによる。

我が国の海峡部は通常、海上交通の要衝の地であり、しかも好漁場であることが多く、多数の船舶が輻輳する。

直下吊り工法では桁ブロックの運搬船が数時間航路内に停船するため航行船舶の支障になる。加えて潮流速が大きい場合は繫留索による繫留が必要になるが、この繫留索の長さは水深の4~7倍必要なため、支障を与える範囲は数100mにおよび、事実上航路閉鎖が必要となり現実的には不可能である。したがって我が国における直

下吊り架設の施工例は、平戸大橋・伯方大島大橋・白鳥大橋等、航行船舶が少なく潮流速が小さい海峡に限られている。

本研究の目的は、国際航路である来島海峡に架設する来島大橋の直下吊り架設にあり、実現するには作業時間の短縮と海面使用範囲を縮小して航行船舶に与える影響を少なくすることが要諦になる。本研究はこのような観点にたち、運搬船の四隅に推進器を装備し、この推進器の推進力と方向を最適に制御することにより3knの潮流下でも船体の位置を±2.5m以内に保持する自動定点保持システムと、船体が±2.5m程度移動しても円滑な台付け作業が可能なクイックジョイントを開発したものである。

この装置を用いた、来島海峡における実大規模の実験によると運搬船の進入から退避までに要する時間は16~17分程度である。また、海面の使用範囲も桁ブロック長+5mの41m程度である。来島海峡の航行船舶は1日当たり1000隻を超えるが、作業時間の短縮と作業範囲の縮小により、1回の架設作業で支障を受ける船舶数は2隻程度となり、本工法の実現に明るい見通しを得た。

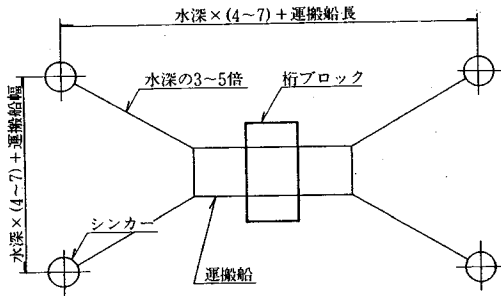


図-1 運搬船の繋留要領

曳船(←方向の移動) 曳船(→方向の移動)

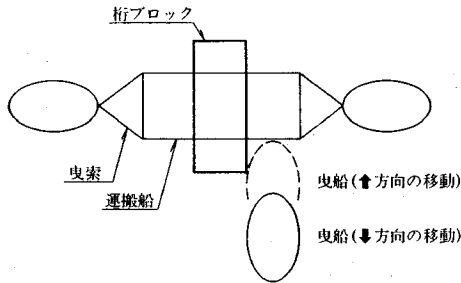


図-2 曳船の連携による定点保持要領

2. 既往の工法の問題点

(1) 運搬船の定点保持

浮体である運搬船の定点保持には、図-1に示すように、海底に設置したシンカーと運搬船を繋留索で結ぶ方法と、図-2に示す複数の曳船の連携による方法がある。

運搬船を繋留する方法は、潮流に関わらず確実に定点に固定できる利点はあるが、繋留索の長さは水深の3~5倍必要であり、海面の使用範囲が広くなり事実上航路閉鎖の状態になる。また、繋留作業と、繋留解除作業は潮止りとなるため、海面使用時間は6時間を超えることになり、航行船舶の多い来島海峡では採用できない。

複数の曳船の連携による方法は、位置の測量→複数の曳船の曳航力と方向の決定→曳船への指示→操船を繰り返すことになるが、全て人間が行っており1サイクルに数分要するため、潮流速が速くなるにしたがって保持精度が低下する。このため、既往の施工は潮流速が無視し得る程度の海峡に限られており、潮流速の速い来島海峡では採用できない。

また、両方法を組み合わせた1本の繋留索と曳船の連携による方法もあるが、この場合でも海面の使用時間は3時間程度要しており来島海峡では採用できない。

すなわち、来島大橋を直下吊り工法で架設するには、繋留索や曳船の連携によらない定点保持方法の開発が必要になる。

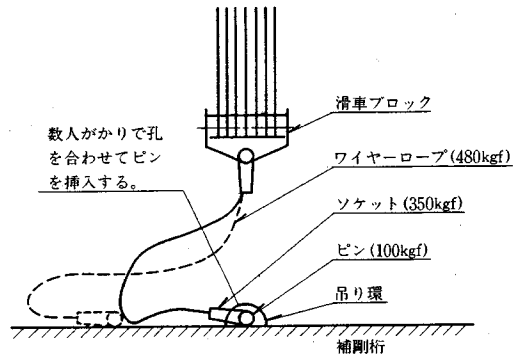


図-3 ソケットとピンによる台付け要領

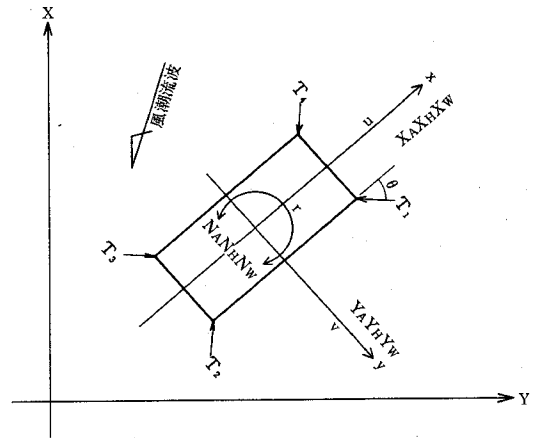


図-4 船体運動の座標系と記号

(2) 連結(台付け)装置

直下吊り架設のもう1つの課題に、運搬船に積載した桁ブロックと、リフティングビームから降下した吊りフックの連結(台付け)がある。通常の連結作業は図-3に示すように、桁ブロックの吊り環と、吊りフックに取り付けたワイヤーロープのソケットの孔を合わせてピンを挿入する方法が一般的である。この方法は特別な設備を必要としない利点はあるが、人力作業のため、ソケットやピンの重量が大きくなると取り扱いが困難になるとともに、運搬船が動揺すると孔ずれが生じて再修正が必要になり連結時間が長くなる。したがって、平面移動と動揺が生じても短時間で確実に連結できる装置が必要になる。

3. 自動定点保持システム

(1) 基本構想

海上に浮遊する船体の平面運動は、前後・左右・回頭の3自由度の運動であり、船体を受ける外力と与えた推力によって決まる。ここで、図-4に示すように、(X・Y)を空間固定の座標系、(x・y)を船体固定の座標系とすれば式(1)で表すことができる¹⁾。

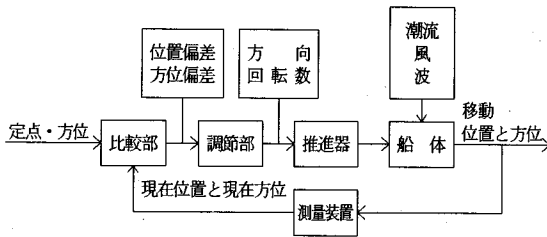


図-5 制御ブロックダイアグラム

前後運動

$$(M+m_x)du/dt=(M+m_y)\cdot v\cdot r+X_H+\sum T_i\cdot\cos\theta_i+X_A+X_W$$

左右運動

$$(M+m_y)dv/dt=-(M+m_x)\cdot u\cdot r+Y_H+\sum T_i\cdot\sin\theta_i+Y_A+Y_W$$

回頭運動

$$(I+I_{zz})dr/dt=N_H+\sum(x_i\cdot T_i\cdot\sin\theta_i-y_i\cdot T_i\cdot\cos\theta_i)+N_A+N_W \quad (1)$$

- ここに、 M, I : 船体の質量および慣性モーメント
- m_x, m_y, I_{zz} : 付加質量および付加慣性モーメント
- u, v, r : 前後・左右・回頭方向の速度
- $T_i \cdot \theta_i$: 各推進器の推進力と旋回角度
- x_i, y_i : 回頭中心を基準とする各推進器の座標
- X_H, Y_H, N_H : 前後・左右・回頭方向の潮流力
- X_A, Y_A, N_A : 前後・左右・回頭方向の風圧力
- X_W, Y_W, N_W : 前後・左右・回頭方向の波漂流力

したがって、目標位置(定点)と現在位置の偏差を求め、定点へ移動させる推進力を推進器に与えることにより船体の位置を定点に保持することができる。この制御動作は短時間に行なうことが肝要であり、図-5に示すように、測量→偏差の算出→推進力の算出→推進器への指令は全て電算機で行なうフィードバック制御ループを構成する。推進器は船体の四隅に各1台設け、電算機の指令により直接、回転数と旋回角を変えて推進力を制御する機構として応答時間の短縮を図る。これにより、このループの制御サイクルタイムは0.5~1秒となる。

(2)推進力の算定

定点と現在位置の偏差は平面位置($X \cdot Y$)と方位(ψ)の3成分に分けられるため、偏差の修正も3成分に分けて修正することになる。修正動作は迅速かつ正確であることが第1の要件であり、迅速に修正するには推進力を大きくする必要があるが、推進力を大きくすると定点のオーバーシュート(行き過ぎ)が生ずる。また、単に偏差量のみで管理するとオフセット(残留偏差)が生ずる。したがって、ここでは式(2)に示すように、偏差に比例して推進力を決定する比例成分・偏差の修正量に応じて推進力を決定する積分成分・修正速度に応じて推進力を決定する微分成分の3要素で推進力を決定するPID制御を採用する。

$$\begin{aligned} T_x &= K_{PX}(X^0 - X) + K_{IX} \int (X^0 - X) dt + K_{DX} \cdot u \\ T_y &= K_{PY}(Y^0 - Y) + K_{IY} \int (Y^0 - Y) dy + K_{DY} \cdot v \\ T_N &= K_{PN}(\psi^0 - \psi) + K_{IN} \int (\psi^0 - \psi) dt + K_{DN} \cdot r \end{aligned} \quad (2)$$

- ここに、 T_x, T_y, T_N : 前後・左右・回頭方向の推進力
- $K_{P(X,Y,R)}$: 前後・左右・回頭方向の比例ゲイン
- $K_{I(X,Y,R)}$: 前後・左右・回頭方向の積分ゲイン
- $K_{D(X,Y,R)}$: 前後・左右・回頭方向の微分ゲイン
- X^0, Y^0, ψ^0 : 目標位置と目標方位
- X, Y, ψ : 現在位置と現在方位
- u, v, r : 前後・左右・回頭方向の速度

(3)推進力の配分

前述の式(2)で運搬船全体に付与すべき、前後方向・左右方向の推進力と回頭モーメントは求まるが、推進器は船体の四隅に各1台装備されているため式(3)により4台の推進器に配分しなければならない。

$$\begin{aligned} T_x &= T_{x1} + T_{x2} + T_{x3} + T_{x4} \\ T_y &= T_{y1} + T_{y2} + T_{y3} + T_{y4} \\ T_N &= x_1 \cdot T_{y1} + x_2 \cdot T_{y2} + x_3 \cdot T_{y3} + x_4 \cdot T_{y4} + y_1 \cdot T_{x1} \\ &\quad + y_2 \cdot T_{x2} + y_3 \cdot T_{x3} + y_4 \cdot T_{x4} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 T_{x1}, T_{y1} : 各推進器の前後・左右方向の推進力
 x_i, y_i : 回頭中心を基準とする各推進器の座標
また、各推進器の推進力は式(4)に示すように、推進器の最大推進力と最小推進力の範囲でなければならない。

$$\begin{aligned} T_{x1}^2 + T_{y1}^2 &< T_{MAX1}^2 \\ T_{x1}^2 + T_{y1}^2 &> T_{MIN1}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

- ここに、 $T_{(x1,y1)}$: 各推進器の前後・左右方向の推進力
- T_{MAX1} : 各推進器の最大推進力
- T_{MIN1} : 各推進器の最小推進力

式(2), (3), (4)により各推進器に付与する推進力は求まるが、推進器は4台あるため配分のケースは無数に存在する。したがって、求めた推進力の配分ケースの中の最適値を決めなければならない。この最適配分方法としては式(5)に示す推進力の総和を最小にする方法と、式(6)に示す旋回角を最小にする2方法が考えられる。

$$\begin{aligned} J_T &= T_{x1}^2 + T_{x2}^2 + T_{x3}^2 + T_{x4}^2 + T_{y1}^2 + T_{y2}^2 \\ &\quad + T_{y3}^2 + T_{y4}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 J_T : 推進力を最小にする評価関数

$$\begin{aligned} J_\theta &= (\tan^{-1} T_{y1}/T_{x1} - \theta^{\circ}_1) + (\tan^{-1} T_{y2}/T_{x2} - \theta^{\circ}_2) \\ &\quad + (\tan^{-1} T_{y3}/T_{x3} - \theta^{\circ}_3) + (\tan^{-1} T_{y4}/T_{x4} - \theta^{\circ}_4) \end{aligned} \quad (6)$$

- ここに、 J_θ : 旋回角の操作量を最小にする評価関数
- θ°_i : 各推進器の操作前の旋回角度

機関と推進器の特性は、5.(2)で延べるように、旋回角の変化速度より回転数の変化速度が速い。したがって式(5)は推進器の回転数が最小のため、燃料消費量が少ない利点があるが、旋回角の操作量が大きいため、応答時間が長くなる難点がある。式(6)は旋回角が少ないため、

応答時間が短くなる利点があるが、燃料消費量が多い難点がある。今回は、定点保持時間は短いため燃料費は嵩まないことと、急潮流下の定点保持であるため、応答時間の短縮を優先して式(6)を採用する。

なお、式(2)で求めた推進力は定点からの偏差の修正に必要な力であり、実際には潮流力・風圧・波圧等の外力が作用している場合には推進力に過不足が生ずるためこれを補償しなければならない。このため、与えている推進力と発生している加速度より船体に作用している外力を常時把握して式(2)で求めた値に加減算する補償機能を設ける。

(4)推進器への指令

以上の計算で求めた推進器ごとの推進力と方向を推進器に指令することになる。このうち、推進器の方向(旋回角)は、推進力のx方向とy方向の比で決まり式(7)で求めることができる。推進器の推進力は、回転数・推進力減少率・海水の密度・プロペラの直径・推進力係数で決まり、これらの諸係数は型式ごとに模型実験で求められており式(8)に示すように、回転数で指令することになる²⁾。

$$\theta_i = \tan^{-1}(T_{xi}/T_{yi}) \quad (7)$$

ここに、 θ_i : 各推進器の旋回角指令値

$$n_i = \{(T_{xi}^2 + T_{yi}^2)^{1/2} / (1 - t_i) \cdot \rho_H \cdot D_i^4 \cdot K_{Ti}\}^{1/2} \quad (8)$$

ここに、 n_i : 各推進器の回転数指令値

t_i : 各推進器の推進力減少率

ρ_H : 海水の密度

D_i : 各推進器のプロペラの直径

K_{Ti} : 各推進器の推進力係数

4. 測量装置

(1)測量方法

この定点保持システムの制御は、現在位置と目標位置の偏差を基準にしているため測量の精度が重要になる。

特に、運搬船は時々刻々移動するため、精度に加えて即時性と連続性が重要になる。測量方法としては、運搬船の2点を計測する方法と、運搬船の1点と方位を計測する方法がある。方位の計測にはジャイロコンパスを使用するのが一般的であるが、位置の計測には光波・電磁波・GPS等の多くの方法がある。

ここで、考えられる測量方法と機能を整理すると表-1に示すようになり、電磁波測量とGPSディファレンシャル測量および画像処理測量は誤差が大きくて採用できない。GPSキネマティックオンザフライ測量は即時性に劣るとともに橋体による電波の遮断が考えられるために連続性に難があり、光波による2辺測量が適するこ

表-1 測量方法と機能

| 区分 | 方式 | 平面精度 (cm) | 方位精度 (度) | 計測時間 (秒) | 連続性 | 評価 |
|------|-------------|-----------|----------|----------|------|------------|
| 光波 | 1辺1角測量 | ±50 | ±0.2 | 1 | 優れる | 精度が劣る |
| | 2辺測量 | ±20 | ±0.2 | 1 | 優れる | 総合的に優れる |
| 電磁波 | 2辺測量 | ±100 | ±0.2 | 1 | 優れる | 精度が劣る |
| GPS | キネマティック測量 | ±10 | ±0.2 | 3 | 橋体遮断 | 即時性と連続性が劣る |
| | ディファレンシャル測量 | ±100 | ±0.2 | 1 | 橋体遮断 | 精度と連続性が劣る |
| 画像処理 | カラートラッキング測量 | ±200 | ±1.5 | 1 | 優れる | 精度が劣る |

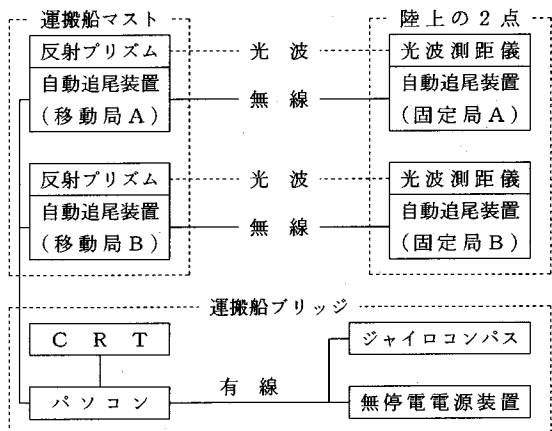


図-6 測量装置の構成

とになる。なお、測量方式はシステムの簡易性より運搬船の方位と1点の測量とし2点測量は比較の対象外とした。

(2)装置構成

測量装置は2組の光波測距儀とジャイロコンパスで構成する。光波測量においては光波測距儀と反射プリズムを正対させて光軸を一致させなければならない。通常の測量では被測量物は静止しているが、今回の運搬船は移動するため移動に合わせて水平面と鉛直面の調節が必要になる。このため、到達した光の強さを検知して常に最大の強さになるように角度を調整する自動追尾装置を装備する。この追尾速度は、運搬船の移動速度と動揺速度より、固定局は6度/秒、移動局は12度/秒とした。

これに加えて、測量データの送受信装置、受信したデータを演算するパソコン、演算結果を表示するCRT等が必要であり、これらを図-6に示すように構成する。

なお、測量は独自に設けた座標系に目標位置と固定局の設置位置を入力し、運搬船までの2距離を測量して、目標位置と運搬船の現在位置の差(偏差)を把握する。

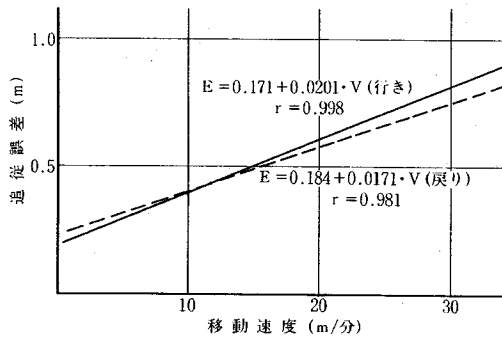


図-7 移動速度と追従誤差の関係

(3) 測定の精度と時間

測量機器は製作工場基準間距離を計測して精度を確認するが、これは機器単独の精度である。また、今回は自動追尾装置・送受信装置・演算処理ソフトを組み込んでいるため、運搬船への搭載に先立ち、構成システム全体の確認が必要になる。このため、造船所岸壁の走行クレーンに移動局を搭載し、500~900m離れた対岸の固定局より視準しながらクレーンを走行させて全体の機能と精度を確認した。測量精度は別の測量装置（光波測距儀）で同時に測量した値と比較して確認した。

最初にクレーンを静止させて静的精度を確認したところ、5回の測量の平均値の双方の位置の誤差は20mm以下、方位の誤差は0.05度以下であり良好な精度を示した。次いで、走行路にメジャーを布設し、クレーンを10・20・30m/分の速度で走行させながら、表示される測量値とメジャーの読み値を同時に比較して追従精度を確認した。この結果は図-7に示すように、移動速度が10m/分増加するにしたがって、双方の差が17~20cm増加する有意な相関が見受けられたが、この原因は測量の時間遅れによるものである。この装置では、図-8に示すように、測量は0.3秒ピッチで行なうが、測量→データの送受信→演算処理に略1秒の時間を要しているため、10m/分当り17~20cm増加したものである。 $(10^{m/分} / 60^{秒/分} \approx 17^{m/秒})$ また、この回帰式によると移動速度が0においても17~18cmの誤差が生じている原因は静的誤差と、メジャーの読取りのタイミングの差が加算されているためである。（表示値は1秒前の位置）

実施工における定点保持時の運搬船の移動速度は1~3m/分程度であり、この誤差を推定すると略20cmになる。予定している定点保持精度は±2.5mであり、実用上は十分な精度である。また、測量値は途切れることなく1秒間に2~4回確実にアウトプットされていることから、追従装置は良好な追従性能を有していることが解る。

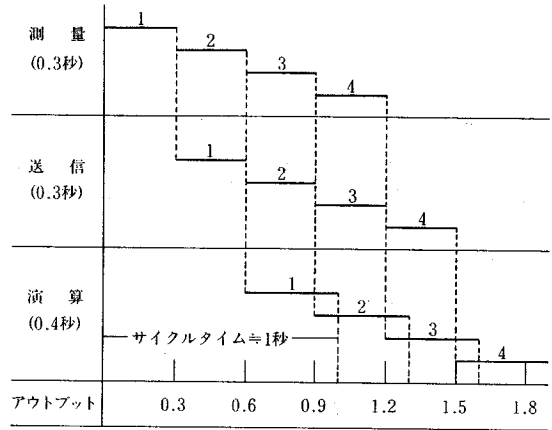


図-8 測量のサイクルタイム

5. 運搬船

(1) 基本構造

運搬船は補剛桁ブロックを積載して架設位置の直下に進入し、桁ブロックが所定の位置に吊り上がるまで四隅に装備した推進器と主機関により定点を保持するものであり、桁ブロック・主機関・ブリッジ等を搭載するに十分な平面積と積載能力（重量）が必要になる。桁ブロックの平面積は36m×32m、主機関の平面積は6m×2m、ブリッジは6m×8m程度である。また、艀装品を含めた総積載重量は略600tである。使用期間が短い（略1年）ことより、現有する台船の使用が最適であり、これらの積載物を配置すると2000t級の台船となり、これに全ての装置を艀装すると図-9に示すようになる。

(2) 主機関と推進器

主機関の必要出力と推進器の必要推進力は、航行性能と定点保持性能によって決まる。ここで、航行性能を風速15m/秒・波高1mのもとで7kn以上、定点保持性能を潮流速度3kn・風速10m/秒・波高0.5mのもとで±2.5mとして算出すると、主機関の出力は650PS、推進器の推進力は6tfになる。この程度の主機関と推進器は市販されており、適応機種を選定すると表-2に示すようになる。定点保持における制御応答時間を短縮するには、回転数（推進力）の上昇速度と旋回速度（推進力の方向）が速いことが重要になる。

この点に着目すると、表-2に示すように、回転数の上昇が7秒に対し、旋回角の変化には10秒要する（いずれも最大変更値）ことから、先に述べた推進力の配分方式は旋回角最小方式が優れることが解る。

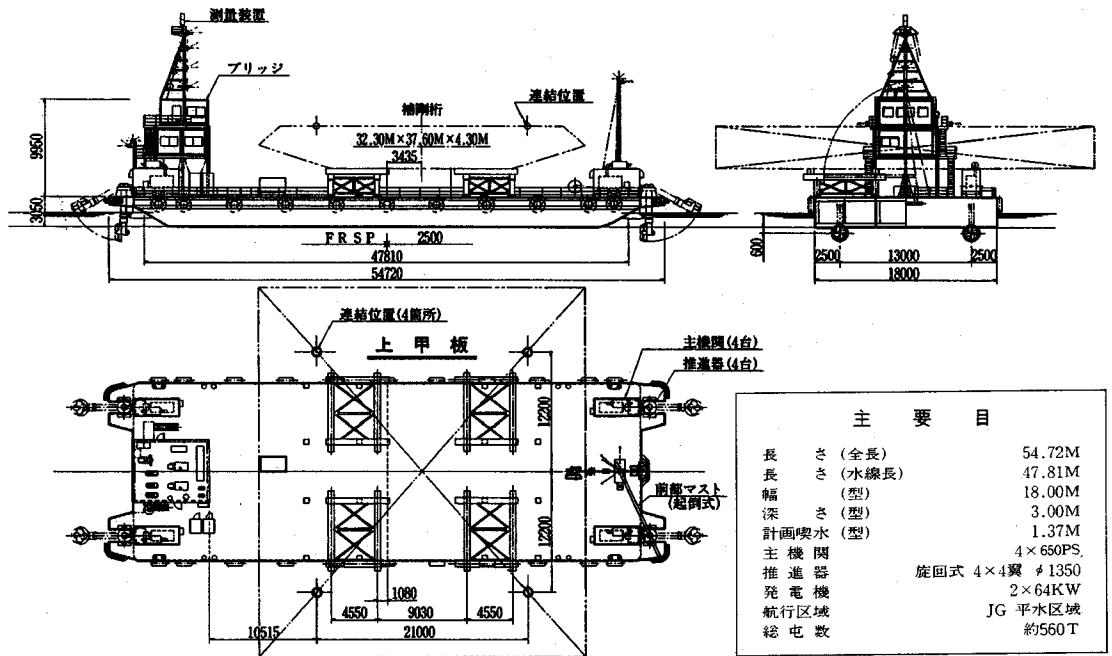


図-9 運搬船一般図

表-2 主機関と推進器の主要仕様

| 主要目 | | 仕様 |
|-----|------------|------------------|
| 主機関 | 形式 | 立型4サイクルディーゼル機関 |
| | 連続最大出力 | 650PS/1450rpm |
| | 回転数上昇速度 | 7秒/(650→1450rpm) |
| 推進器 | 形式 | 立型4翼全旋回型推進器 |
| | プロペラ径×ピッチ比 | 1350mm×0.8657 |
| | 推進力 | 6.4tf/474rpm |
| | 旋回速度 | 10秒/180度 |

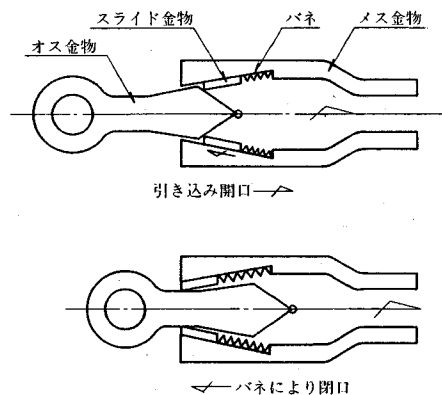


図-10 Q/Jの接続原理

6. クイックジョイント

(1) 連結原理

運搬船の定点保持精度は±2.5mであり、この範囲で平面移動を繰り返すとともに、付近を航行する船舶の航走波により上下動が生ずる。このため図-1に述べたソケットとピンによる台付けは困難であり、動揺下でも確実に台付けできる連結装置が必要になる。この連結装置のヒントに明石海峡大橋のケーソン繫留に使用したクイック

クジョイント（以下Q/Jという）がある。この装置は図-10に示すように、オス金物およびスライド金物とバネを収納したメス金物で構成され、オス金物をメス金物内に引き込むことにより連結を完了する機構となっている。オス金物に作用する荷重はスライド金物を介して支圧としてメス金物に伝達され、メス金物ではフープテンションとして受ける単純な構造である。また、オス金物はウインチで引き込むため重量の制限は無いためこれを応用する。

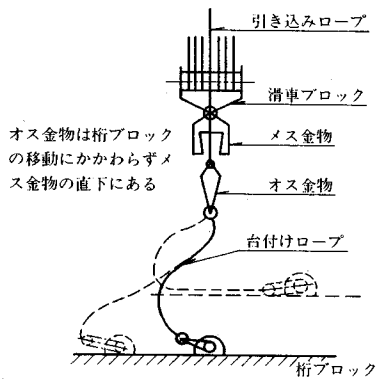


図-11 Q/Jの連結要領

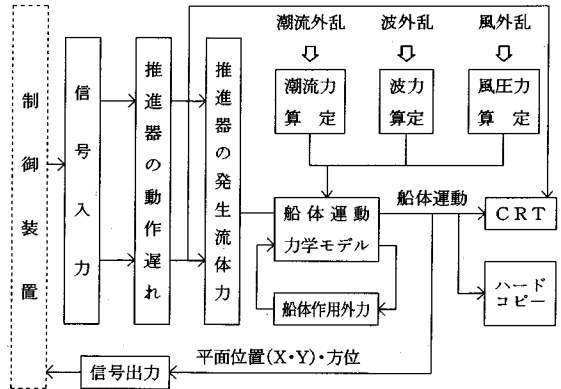


図-12 シミュレータの構成

表-3 外力と変動条件

(2)連結要領

この装置を使用する場合の問題点は動揺の吸収方法であるが、図-11に示すように、オス金物と桁ブロックの吊り環の間に台付けロープを設けることにより解決できる。すなわち、吊り環・台付けロープ・オス金物を桁ブロック側に、メス金物は滑車ブロック側に取り付け、メス金物側から引き込みロープを延ばしてオス金物に結び、引き込みロープを引き込むことにより連結でき、連結仮定における動揺は台付けロープの余裕長により吸収できる。

7. シミュレーション

(1)シミュレータの構成

定点保持システムは式(2)に示すように、偏差の大きさ・偏差の修正量・移動速度の3成分にそれぞれの制御ゲインを乗じて推進力を制御する。したがって、目標位置に誘導中の船体の挙動は、制御ゲインの値によって異なるため最適値を求めなければならない。この値は、最終的には現場海域実験で求めるものの、現場海域では実験条件や時間が制限されるため、系統的な実験は困難になる。また、現場海域に出港するまでにプログラムのデバッグが必要になる。このため、図-12に示すシミュレータを構築して、プログラムのデバッグと制御ゲインの最適化を進める。

シミュレータの基本は式(1)に示す船体運動の力学モデルであり、外力と推進力を与えれば船体の挙動が求まる。推進力は式(2)~(8)により与えることができる。船体に作用する外力は、潮流力・風圧力・波漂流力であり、潮流速・風速・波高と受圧面積および抗力係数で求まる。これらは作用方向によって異なるため、ここでは模型実験によって求めた。一例として潮流力を述べるが式(9)に示すように、作用する角度ごとに流体力微係数として無次元化して整理している。

| ケース | 変動外乱 | 潮流 | | 風 | | 波 | |
|-----|-----------|----|----|----|----|----|----|
| | | 流速 | 方向 | 風速 | 方向 | 波高 | 方向 |
| 1 | 潮流方向 0→35 | 3 | - | 10 | 35 | .5 | 35 |
| 2 | 35→0 | 3 | - | 10 | 35 | .5 | 35 |
| 3 | 潮流速 0→3 | - | 35 | 10 | 35 | .5 | 35 |
| 4 | 3→0 | - | 35 | 10 | 35 | .5 | 35 |
| 5 | 波方向 0→35 | 3 | 35 | 10 | 35 | .5 | - |
| 6 | 35→0 | 3 | 35 | 10 | 35 | .5 | - |
| 7 | 波高 0→0.5 | 3 | 35 | 10 | 35 | - | 35 |
| 8 | 0.5→0 | 3 | 35 | 10 | 35 | - | 35 |
| 9 | 風向 0→35 | 3 | 35 | 10 | - | .5 | 35 |
| 10 | 35→0 | 3 | 35 | 10 | - | .5 | 35 |
| 11 | 風速 0→10 | 3 | 35 | - | 35 | .5 | 35 |
| 12 | 10→0 | 3 | 35 | - | 35 | .5 | 35 |

注:方向は船首方向を0°とする。潮流速の単位はkn, 風速はm/秒, 波高はmとする。

$$\begin{aligned}
 X''_H &= 2 \cdot X_H / (\rho_H \cdot L \cdot D \cdot u^2) \\
 Y''_H &= 2 \cdot Y_H / (\rho_H \cdot L \cdot D \cdot u^2) \\
 N''_H &= 2 \cdot N_H / (\rho_H \cdot L \cdot D \cdot u^2)
 \end{aligned} \tag{9}$$

ここに、 X''_H, Y''_H, N''_H : 前後・左右・回頭方向の流体力微係数
 X_H, Y_H, N_H : 前後・左右・回頭方向の潮流力
 ρ_H : 海水の密度
 L : 船体の長さ
 D : 船体の吃水
 u : 前後方向速度

定点保持性能は、作用する外力の大きさと方向とともに変化速度により異なる。大きさと方向は現場海域の計測で求まるが、変化速度は大幅に異なり特定することが困難なためここでは、表-3に示すようにステップ変化(変化速度=∞)とした。

(2)制御ゲインと応答性

推進力は、比例・積分・微分の各成分の大きさによ

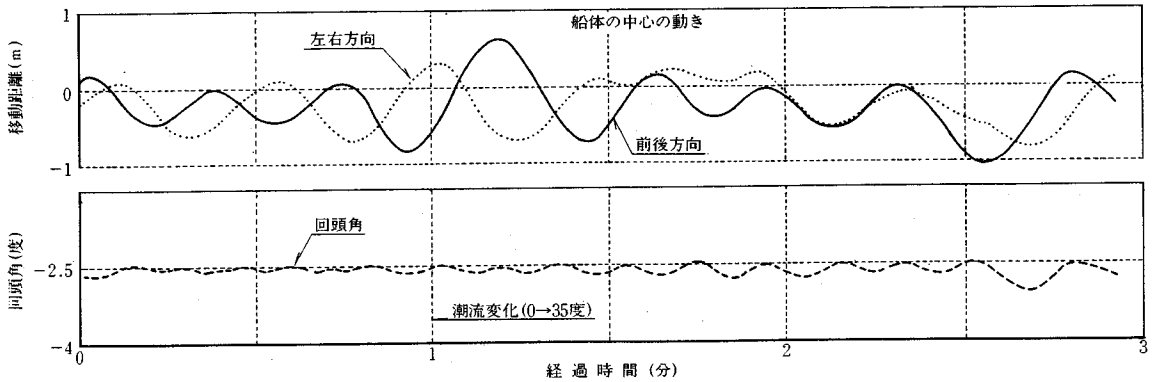


図-14 潮流方向変化時の船体の移動距離の時系列

て異なるためこの成分を決定する各ゲインの最適値を求めなければならない。また、このゲインは式(2)に示すように、前後・左右・回頭の運動成分ごとに求めることになる。良好な制御応答性(定点保持性能)とは、収斂時間が、短いとともに収斂範囲が狭いことである。

ここで、一例として回頭角について、制御ゲインの大きさと制御応答性の関係を図-13に示す。図-13は外力条件を固定して(全ての外力が一樣に作用する)、 -20 度の位置より目標の 0 度へ収斂する場合の航跡と制御ゲイン(ここでは比例ゲインと微分ゲイン)の関係を求めたものである。比例ゲインを大きくすると移動速度が速くなり、行き過ぎ量が増加して収斂までの時間が長くなっている。また、微分ゲインを大きくするにしたがって、オーバーシュート量は小さくなるが、目標点付近で速度が低下するため、収斂時間が長くなる傾向がうかがえる。このように、各ゲインは相互に関連するため一義的に決め得るものではなく、トライアンドエラーが必要になる。例えば各ゲインを3ケースで実施すると1つの運動成分で27ケースになり、前後・左右・回頭の成分では81ケースになるため、シミュレータによる検証が有効になる。

(3)最適制御ゲインにおける応答性

このようにして求めた最適制御ゲインの値を表-4に示す。この制御ゲインにおける船体の応答性は表-3に基づいて12ケース求めているがここではケース1の潮流方向が正面方向から右側35度に急変した場合の挙動に代表して述べる。

図-14は、船体中心の前後・左右の移動量と回頭角変化の時系列を示したものである。船体は略30秒のサイクルで移動を繰り返しながら1mの範囲に収斂しているが、1分経過後に潮流方向が変化して前方に移動するものの、この移動量に対応して修正する推進力が作用するため、船体は元の位置に戻されて略2分後には再び収斂している。その後若干の移動量の増加がみられるが、この後再び収斂しており、この原因は不明である。

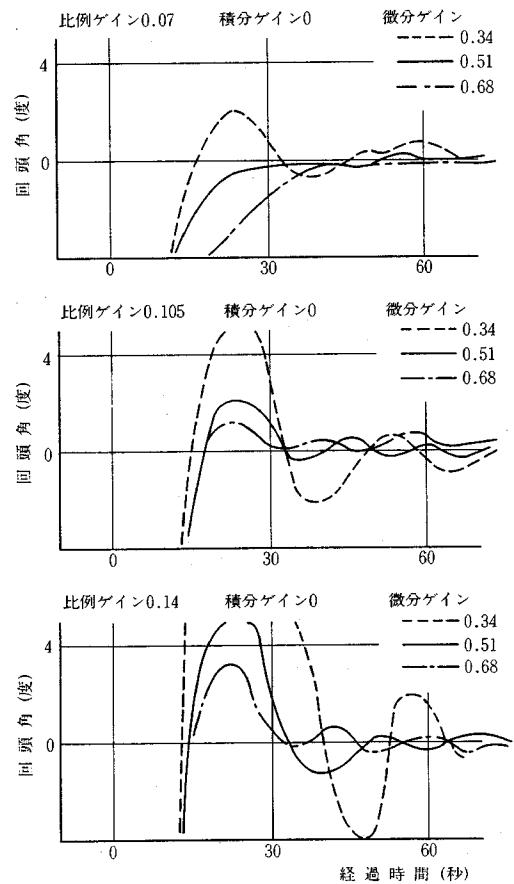


図-13 制御ゲインと船体の挙動の関係

表-4 シミュレーションの最適制御ゲイン

| 区分 | 比例ゲイン | 積分ゲイン | 微分ゲイン |
|----|-------|-------|-------|
| 前後 | 0.23 | 0.005 | 1.32 |
| 左右 | 0.19 | 0.005 | 1.40 |
| 回頭 | 0.14 | 0 | 0.68 |

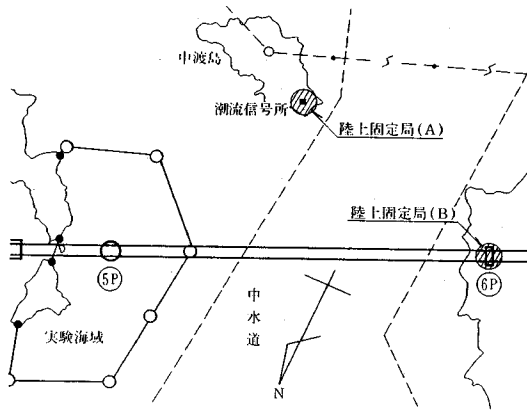


図-15 実験海域

8. 現場海域実験

(I) 実験内容

本工法の要諦は、急潮流下で繫留索を用いることなく運搬船の移動量を±2.5mの範囲内に保持できる定点保持システムと、運搬船が移動しても台付け可能なQ/Jにある。

シミュレーションにより定点保持性能の実現の見出しは得られたが、外力の作用条件が実海域と異なっている。

また、新しい工法には欠陥が内在しがちでありこれを洗い出さなければならない。さらに、採用するには多くの関係者の認知が必要である。これらを満足するため、定点保持システムを装備した運搬船とQ/Jを使用した実施工と同等の模擬施工を実海域で実施する。なお、桁ブロックとリフティングビームは現存しないため、桁ブロックは500t級の台船と敷き鉄板で、リフティングビームは600t吊りの起重機船で代替する。運搬船は今回新しく建造したものであり、乗組員の操船習熟が必要になる。また、定点保持性能は制御ゲインによって異なるため、現場海域の外力条件における最適化が必要であり、実験は次の手順で実施する。

- ① 現場海域に近接した潮流速の遅い燧灘で、前進・後進・横行・回頭・制動を繰り返し操船に習熟するとともに、基礎性能を把握する。
- ② 次に、潮流速の速い現場海域（5P）で同様の操船を繰り返し、潮流下の操船に習熟する。
- ③ 燧灘において、定点保持システムのプログラムの検証と制御ゲインの最適化を進める。
- ④ 5P海域において、模擬施工が必要になる、通常操船⇔定点保持操船の切り替え操作に習熟する。
- ⑤ Q/Jを装備した起重機船を5P海域に繫留し、これをリフティングビームに見立て、この直下に進入して定点を保持しながら桁ブロックの代替の台船を吊り上げる模擬施工を行なう。

表-5 現場海域実験の最適制御ゲイン

| 区分 | 比例ゲイン | 積分ゲイン | 微分ゲイン |
|----|-------|-------|-------|
| 前後 | 0.06 | 0.005 | 1.5 |
| 左右 | 0.08 | 0.005 | 1.4 |
| 回頭 | 0.04 | 0 | 0.457 |

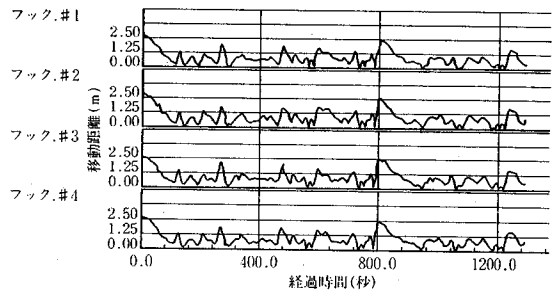


図-16 自動定点保持におけるフックポイントの移動距離の時系列

(2) 実験海域

実験海域は、気象海象条件が実施工に近似していること、実験の制限が少ないことより5P海域とする。この海域は図-15に示すように、来島海峡で最も潮流速が速い中水道に近接しているとともに、実施工と同様に付近の6Pと潮流信号所に測量用の固定局を設置することができる。

(3) 基礎性能の把握

基礎的な操船性能である、航行速度・制動距離・回頭半径は次のとおりであり、通常の船舶に比べて格段に優れる。

- ① 航行速度は8kn以上である。
- ② 制動距離はほぼ船長の1.5倍程度である。
- ③ 回頭半径は0（その場回頭）～無限大まで任意に選定できる。

(4) 制御ゲインの最適化

現場海域で最適化した制御ゲインの値は表-5に示すように、シミュレーションの値に比べて、特に比例ゲインが低くなっているが、これは外力の変化条件の差と、位置の把握時間の差（シミュレーションでは0、現場海域では1秒）によるものと思われる。

最適制御ゲインにおける自動定点保持状況を図-16に示す。図-16は潮流速2kn・風速5m/秒・波高0.3mのもとで、定点保持中の桁ブロックの4点のフックポイントの移動量の時系列を示したものであり、定点保持開始1分後より±2.5m以内に収斂している。

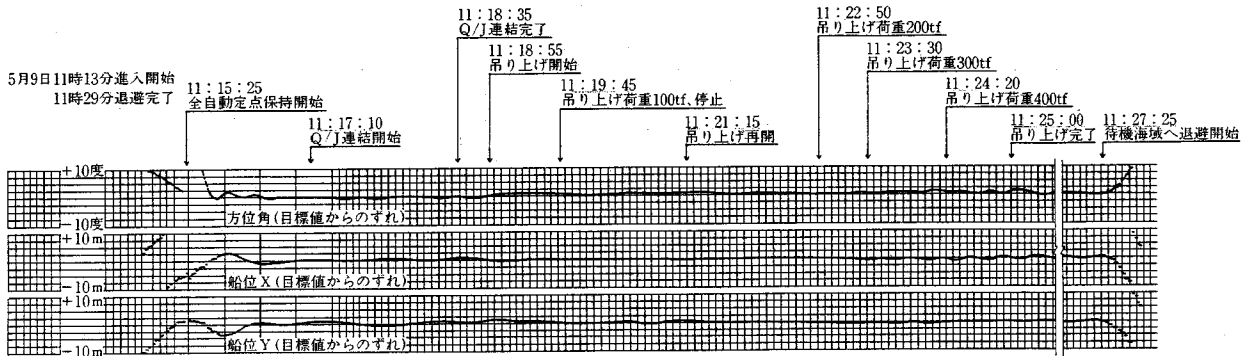


図-17 模擬施工時の運搬船の移動距離の時系列

(5) 模擬施工

次いで、5 P 海域に繫留した600 t 吊りの起重機船の直下に進入し、定点保持した後にクイックジョイントを連結して桁ブロックの代替の台船を吊り上げる模擬施工を3回実施した。最初は、吊り上げ中の吃水の変化や見かけの質量の変化による運搬船の挙動の変化が心配され、この計測に時間を要したため、進入開始から吊り上げ後の退避までの作業時間は50分であった。

この実験によると、運搬船は吊り上げ中でも極めて安定しており特異な現象は生じなかったため引き続いて作業時間の短縮を目標に2回実施したところ16~17分に短縮した。この作業手順と運搬船の移動量の経時変化は図-17に示すように、2分間で定点に収斂し、クイックジョイントの連結は1分で完了している。また吊り上げ中、運搬船は安定して定点を保持し、16分間で作業を完了している。なお、この16分間の潮流速は3 kn、風速は5 m/秒、波高は0.5m程度であり、ほぼ実施工と同等の条件であった。

9. 結 論

本研究は工学的判断により施工設備を立案し、最終的には実施工と同規模の模擬施工により、急潮流下における繫留索を使用しない直下吊り工法を実証したものであり、本研究で得られた知見をまとめるとつぎようになる。

- ① 船体の四隅に主機関と推進器を装備し、目標位置

と現在位置の偏差を計測して、この偏差を修正する自動定点保持システムによれば、3 knの潮流下でも船体の位置を±2.5mの範囲に保持することができる。

- ② クイックジョイントは±2.5mの平面移動と、0.5 m程度の上下動のもとでも1分程度で確実に連結できる。
- ③ 自動定点保持システムとクイックジョイントによれば、定点への進入→吊り上げ→定点からの退避を16~17分で完了することができ、従来3時間程度要していた海面使用時間を大幅に短縮することができる。

これにより、急潮流下で航行船舶の多い航路上に架設される吊橋の直下吊り工法の実現の見通しを得た。従来は、このような条件下における架設工法は張り出し架設に限られており、まさに、ブレイクスルーと言える。

本研究は時間と条件の制限を受ける現場海域実験を主体にしたため、最適値・極限值の見極めが不足しているがこれらは、実施工を通じて解明する所存である。

参考文献

- 1) 元良誠三：船体運動力学，共立出版，p.11，1967年5月。
- 2) 西島清一郎：船用機械工学，海文堂，p.39，1962年8月。

(1995.9.4受付)

PERPENDICULAR CONSTRUCTION OF BRIDGE GIRDER FOR LONG SPAN SUSPENSION BRIDGE UNDER A RAPID STREAM

Junichi HIRAYAMA, Mitsuige SAKAMOTO, Tosiya NAKAO and Noboru KOGA

This paper deals with a study of propulsion positioning system of bridge girder carrier barge under a rapid stream, by automatically controlling position/propulsion of four thrusters equipped at each corner of a barge. Bridge girder perpendicular construction, in which unit girder block is lifted from a carrier barge and directly constructed by means of lifting beams located at main cables, is a superb method in terms of cost, time and safety. Applying this method at a site of heavy sea traffic under a rapid stream, the precise positioning of carrier barge without anchor cables, which disturb sea traffic, is indispensable.