

強潮流下に係留された作業船に作用する潮流力

高城 信彦* 秋山 義信** 八重田 義博***
 今藤 久夫**** 加藤 浩司*****

1. はじめに

本州四国連絡橋に代表される渡海橋の橋梁基礎の建設では陸上からのアクセスが困難なために、各種の作業船が用いられる。一般に渡海橋基礎が建設される海峡部では強潮流の発生に伴い、作業船には潮流力が作用し、係留設計における支配外力となることが多い。

現在、来島大橋の基礎建設が進められている来島海峡でも最大 4 m/s の強潮流が発生するとともに、島や海底面の影響のために複雑な流況となる。また、厳しい自然環境と合わせ、作業船の係留では、航路隣接に伴う工事海域の制約により、非対称な係留配置で船体を潮流に対し迎え角をつけた状態で位置保持しなければならない等の施工面からの制約がある。

従来より、船体に作用する潮流力は風洞実験の柱体に作用する流体力の結果を準用して用いることが多い。しかし、実際には、自由水面の影響・吃水影響・船体形状の影響等により、風洞実験の結果と異なるため、水理実験や相似則の影響が無い現地計測での把握が必要である。

そこで、当海域の条件の厳しさ及び特殊性を踏まえ、今後当海域で使用される作業船の安全かつ合理的な係留設計の基礎データの集積を目的とし、周辺海域の流況および船体に作用する潮流力の現地計測を実施した。合わせて、潮流力評価のために実施した係留索張力計測に対し、方法の妥当性を把握するための室内実験を実施した。

2. 計測方法

(1) 現地計測方法

a) 計測概要 計測は、来島海峡中水道（愛媛県今治市）で建設が進められている、本州四国連絡橋来島大橋 5 P（本州側から数えて 5 番目の橋脚基礎）建設工事海域で実施した。主たる潮流の流れは南北方向である（以下、南向きの流れを南流、北向き流れを北流と呼ぶ）。計

測は、大潮時 2 日間（最大約 3.5 m/s 作用、1992 年 7 月 1 日～2 日）に渡って実施し、船体位置を変化させて、潮流力の計測を行った。計測時の現地状況を写真-1 に示す。

対象作業船は、5 P ケーソン沈設海底面の掘削に入域しているグラブ船（関門号、関門港湾建設）とした。係留配置を図-1 に、グラブ船の浮体及び係留索諸元を表-1 に示す。島が隣接し、シンカー設置位置が島側で最浅 +2 m、航路側で最深 -80 m と大きく異なることが特徴として挙げられる。

計測項目は、潮流速 V_0 ・流向 θ_0 、風速 V_w ・風向 θ_w 、船体位置 (x, y, θ_s) 、吃水 d 、 i 番目の係留索の張力 T_i 及び船体甲板から海面に向かう位置での平面角度 θ_{Hi} ・鉛直角度 θ_{Vi} である。潮流力 F は各係留索の張力をベクトル和を行い間接的に評価した。潮流速・流向は船首・

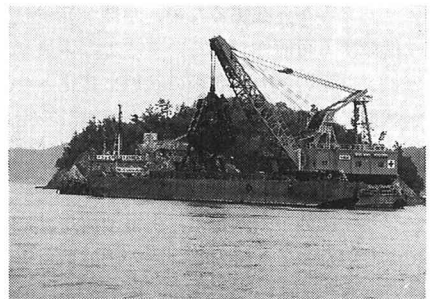


写真-1 現地状況

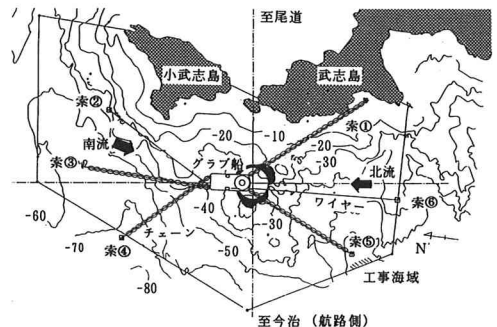


図-1 係留配置

* 正会員 本州四国連絡橋公団今治工事事務所
 ** 正会員 工修 鹿島技術研究所
 *** 正会員 工修 鹿島・大成・三井造船来島大橋 5 PJV
 **** 正会員 鹿島・大成・三井造船来島大橋 5 PJV
 ***** 鹿島・大成・三井造船来島大橋 5 PJV

表一 浮体諸元と係留索諸元

浮体諸元			係留索諸元			
長さ	L	(m)	68.0	索 No.	索種	水中
幅	B	(m)	28.0			破断
深さ	H	(m)	5.0			単位
吃水	d	(m)	2.6			重量
重心	KG	(m)	3.3			kg/m (t)
横メタセンター高	(m)	20.4	①③④⑤	φ73チェーン	117	407
縦メタセンター高	(m)	139.5	②⑥	φ85ワイヤー	32	474

船尾に取り付けた電磁式流速計を（船体影響の低減のため設置水深は船体底より3m深い場所とした）、風速・風向はプロペラ式の計測機器を、船体位置は六分儀を、吃水及び係留索の船体着鎖点位置における平面・鉛直角度は、定規及び分度器を使用して計測を行った。

計測は、ケース当たりのデータ取得継続時間10分で、北流時（7/1, 13:30~16:30, 2.7m/s）13ケース、南流時（7/2, 18:20~24:00, 3.7m/s）33ケース、計46ケースの取得を行った。

ｂ）係留索張力測定方法 チェーンの張力の測定は、図一2及び写真一2に示す様に甲板上で係留索の途中で張力を仮受けするために挿入された引張型荷重計（ロードセル）、もしくは、作業船の索巻上装置に取付けられた施工時の張力管理用の圧縮型荷重計を用いた。なお、圧縮型荷重計の出力は、索巻き上げ装置に至るまでの間にフェアリーダ等が存在するため、摩擦が発生し真の張力に比べ低減する可能性がある。そこで、索長を変化させることにより索の張力を各種の状態に変化させ、この各種緊張状態にある係留索を、引張型荷重計を用いて仮受けを行うことにより、圧縮型荷重計の出力特性の把握（検定）を事前に行った。

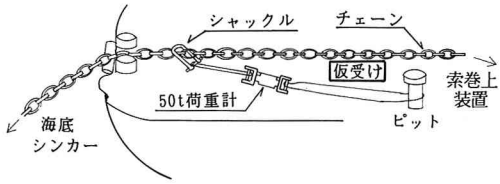
また、ワイヤーの張力測定は、引張型荷重計による仮受けができないために、張力管理用の圧縮型荷重計を使用した。ただし、チェーンの場合と同様に、圧縮型荷重計の出力が低減する可能性があるために、図一3および写真一3に示す様に、チェーンブロックを用いて既知の強制引張力を与え、圧縮型荷重計の増分量との比較により圧縮型荷重計の出力特性の把握を行った。

ｃ）潮流力・抗力係数計算方法 係留索の張力をベクトル合成することにより潮流分力の評価を行った。

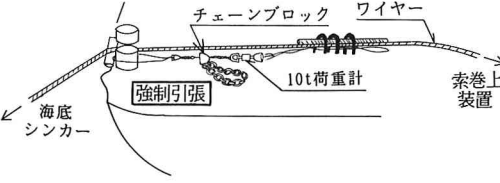
$$F_x = \sum_{i=1}^6 T_i \cdot \cos \theta_{Vi} \cdot \cos \theta_{Hi}$$

$$F_y = \sum_{i=1}^6 T_i \cdot \cos \theta_{Vi} \cdot \sin \theta_{Hi}$$

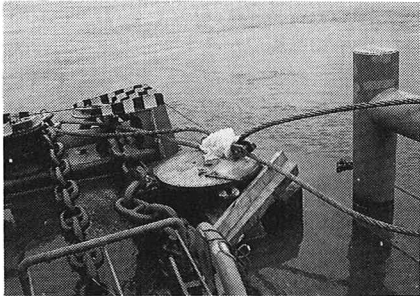
ここに、 F_x , F_y はそれぞれ x 軸（南北）、 y 軸（東西）方向の潮流力分力である。また、潮流力 F 、抗力係数 C_D は次式で評価を行った。



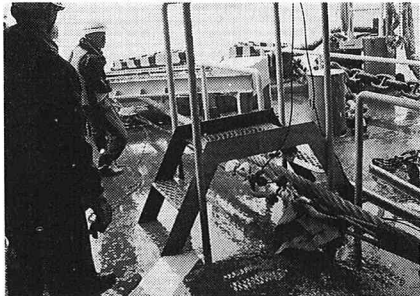
図一2 仮受け法による張力計測及び検定（チェーン）



図一3 強制引張法による張力検定（ワイヤー）



写真一2 仮受け法による張力計測及び検定（チェーン）



写真一3 強制引張法による張力検定（ワイヤー）

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$
$$C_D = 2 \cdot F \cdot g / (\gamma \cdot A \cdot V^2)$$
$$A = \{B \cdot \cos \theta_0 + |L \cdot \sin \theta_0|\} \cdot d$$

ここに、 g は重力加速度、 γ は海水の単位体積当り重量、 A は投影面積、 L , B は船体長さ、幅である。

（2）室内実験方法

現地計測の係留索張力計測はフェアリーダ（係留索が船体から海へ向う横置き円筒タイプのローラー）の船側で実施した。この場合、フェアリーダの摩擦接触および

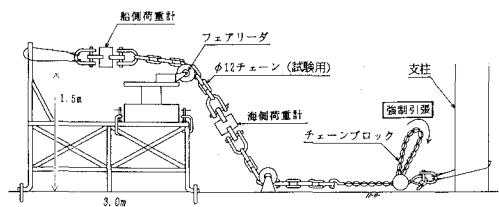


図-4 摩擦影響把握のための室内強制引張試験方法

チェーンの幾何形状から生じる引っかかり等により、フェアリーダ前後で張力が異なる可能性がある。そこで、上記張力変化の定性的な把握を目的として、室内模型実験（縮尺1/6.8）を実施した。試験は、チェーンブロックを用いて除々に張力を加える試験（以下、強制引張試験、図-4参照）と、ある張力で緊張状態にある係留索に対し足で規則正しく踏みつけを行うことにより動的に振動を与える試験（以下、強制振動試験）の2種類を実施した。

3. 計測結果および考察

(1) 現地計測結果

a) 索張力測定方法検定 検定結果の一例として、船首左舷チェーン（索①）と船尾ワイヤー（索⑥）の結果を図-5に示す。横軸は引張型荷重計で計測を行った真の張力で、縦軸は作業船の索巻き上げ装置に取り付けられた圧縮型荷重計の張力である。プロット点は計測値、点線は最小自乗解である。なお、ワイヤーの場合は、仮受けではなく強制引張によって検定を実施しているため、図にプロットしてある計測結果は離散的となる。これは、強制引張による検定は約5tの引張力しか与えられないために、事前に索長の伸縮により各種の張力とした状態を真（初期）に対し強制引張試験を行ったためである。

図より、計測結果のパラツキは若干多いものの、概ね直線傾向を示す。なお、索巻き上げ装置の圧縮型荷重計を張力データとして使用する場合は、ここで得られた結果を較正值として考え、変換を行い以降の処理を行った。

b) 潮流速 図-6に潮流速の計測結果を示す。プロットは船首・船尾における計測結果で、実線が予測潮流である。図より、計測結果及び予測潮流は良好な一致を示す。しかし、南流時に比べ北流時に、船首側流速が船尾側よりも小さくなる傾向となる。これは、船首の計測位置が船尾より作業船の半幅（14m）だけ航路側であるために、後に示す北流時の流速分布影響を受けたためと考える。

船尾側での潮流速の乱れの計測結果を図-7に示す。横軸は10分間の平均流速、縦軸は流速のrms値（乱れの大きさ）である。南流時に比べ北流時に乱れが大きい。

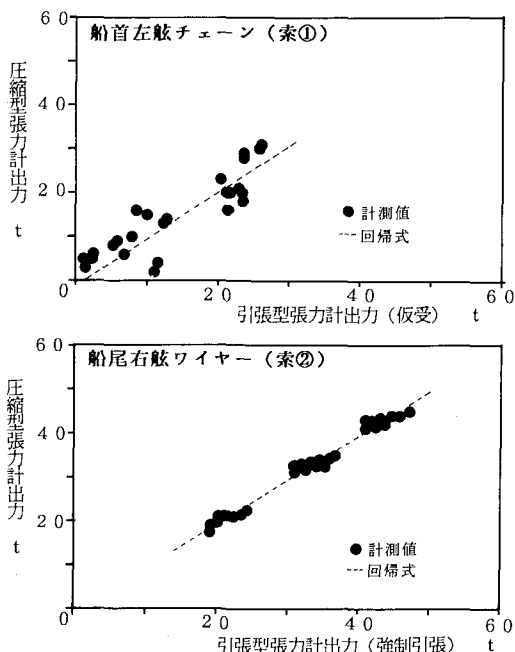


図-5 係留索張力検定結果

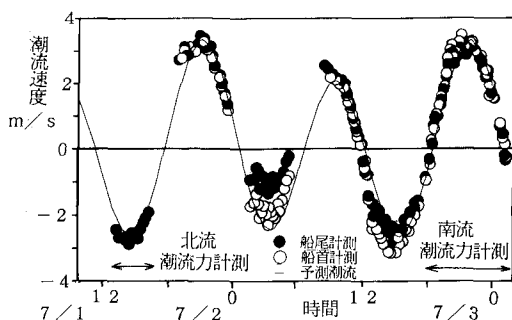


図-6 予測潮流速と実測潮流速

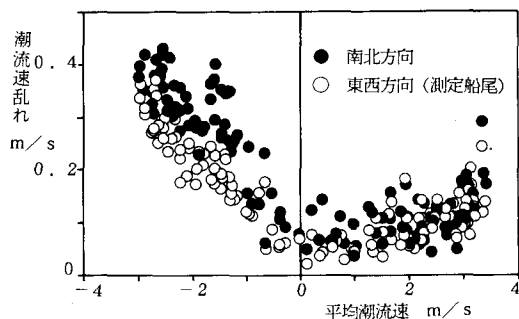


図-7 潮流速の乱れ

船体を移動させることにより計測を行った潮流速の平面分布を図-8に示す。計測は、南流・北流とも比較的潮流速が大きい2m/s以上の時に実施した。計測場所を黒

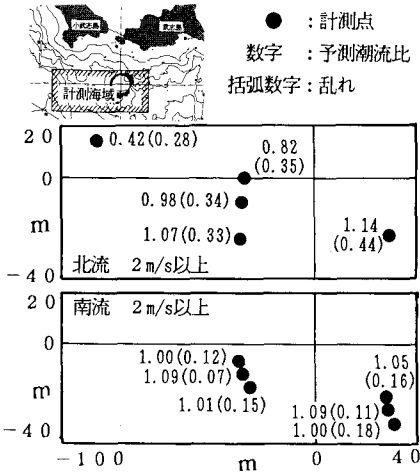


図-8 潮流速の平面分布

丸で示し、横の数値は予測潮流に対する計測された平均流速の比で、括弧内の数値は乱れの大きさを示す。北流時に島側で遅く航路側で速い流速分布（勾配：流向直角方向距離1 m 当り約0.06 m/s）が生じ、乱れが大きくなる。

計測海域が、南流では海峡に入った直後の位置であるのに対し、北流では十分流下した後の位置関係となる。また、海峡を台形断面水路と考えた場合、計測海域は斜面部分（海底勾配は2/11と急勾配）となる。以上から、北流では台形断面水路の地形影響が十分発達し航路側（西側）で速く、島側（東側）で遅い、顕著な流速分布が生じたものとする。

c) 潮流力と抗力係数 北流及び南流作用時の、潮流速・船首及び船尾側の初期計測値からの索張力差・潮流力・抗力係数の時間的変化を図-9に示す。

潮流力の結果より、南流時には流向と潮流力の作用方向はほぼ一致するが、北流時には北向と西向（航路側）分力がほぼ同等となり、潮流力の作用向は45°航路側にずれる。また船首側索張力差の結果から、北流時には船首左側のチェーンの張力変動が顕著となり航路側への力が大きい。これは、北流時の流速分布の影響で船体に循環が生じ、流向直角方向に力が生じたためと考える。

なお、抗力係数は一定値とはならず、潮流速が小さい時に大きな値を示す。これは、フェアリーグ部での摩擦やチェーンの引っかかり等により張力が分担され、見かけ上、甲板上で計測を行った張力が低減しなかったためと考える。また、潮位変動（最小：-2 m、最大：+2 m）に対する係留着鎖点位置の鉛直変位に伴う張力変化も一つの要因と考える。

潮流力の乱れ（rms 値）について図-10に示す。潮流速の乱れと同様に北流時に乱れが大きくなる。潮流力の

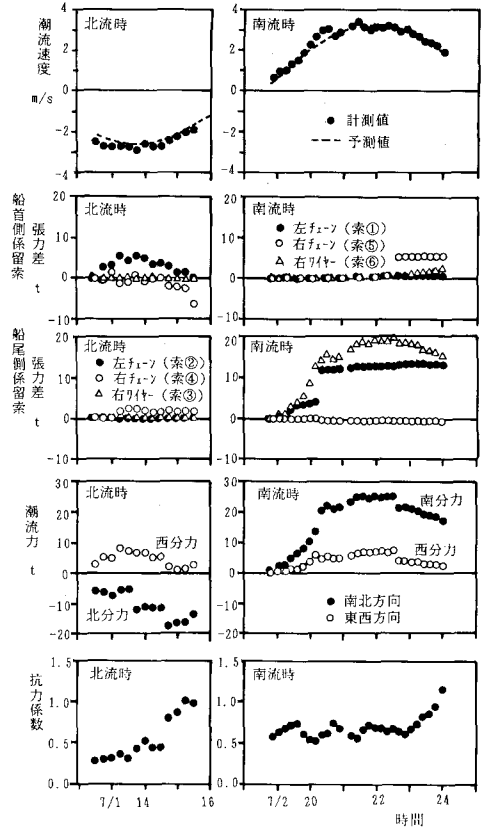


図-9 係留索張力・潮流力・抗力係数計測結果

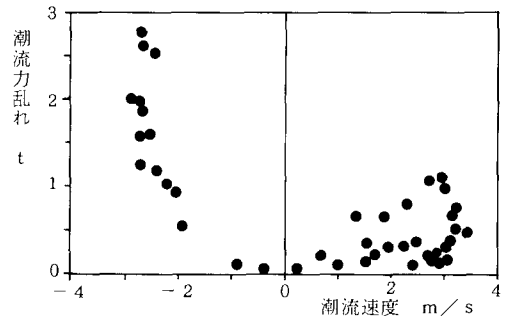


図-10 潮流力の乱れ

変動周期（10 分間のデータに対し zero-up-cross 法で定義した周期の平均値）の結果を図-11に示す。北流時に潮流力の変動周期も大きくなる。

(2) 室内実験結果

図-12は強制引張試験の結果の一例で、横軸は時間、縦軸はフェアリーグの船側・海側の前後での張力である。なお、図の結果はフェアリーグの回転を拘束した時の結果である。図より、張力増加時において、海側張力に比べ船側張力は3回の試験の平均で約33%小さくな

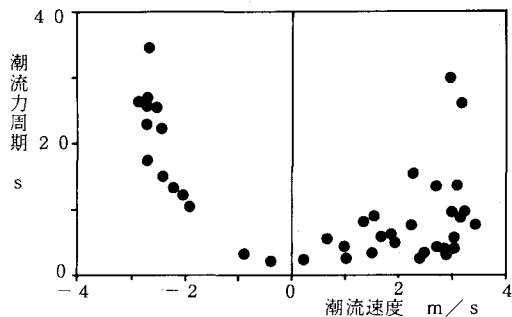


図-11 潮流力の変動振動周期

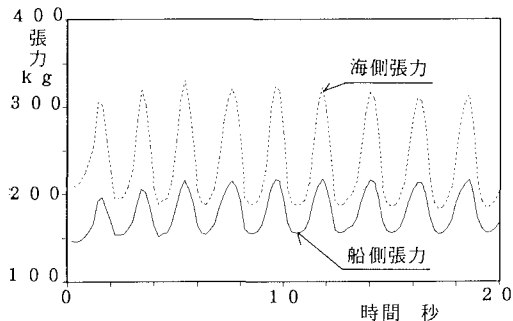


図-13 強制振動試験結果

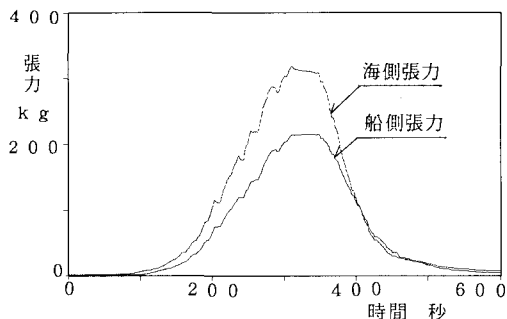


図-12 強制引張試験結果

る。一方、張力減少時には、良好な一致を示す結果となる。しかし、この現象は摩擦による張力分担がどこで滑るかに依存する不確定な現象である。

上記の意味あいでは、厳密ではないが、船側で計測した張力が33%低減するという結果を元に、抗力係数を再評価すると、ほぼ、南流時に0.7~0.9、北流時に0.5~0.8の範囲となる。鴻上ら(1978)や造船研究協会(1982)の、船形が近い水理模型実験による抗力係数の結果では、それぞれ、0.64、0.93であり、今回の計測結果は概ね妥当な結果であると考えられる。

図-13に強制振動試験の結果の一例を示す。図より船側張力の変動両振幅は海側に比べ、約半分の張力変動となる。

以上の強制引張及び振動試験の結果から、係留索張力

の測定ではフェアリーダーより海側の部分で計測を行うことが望ましいことがわかる。

4. おわりに

今回の検討を通じて以下の事項が明らかになった。

- ① 現地では、北流時に流速分布が発生し、潮流力の作用向きが航路側(西側)に偏る。
- ② 室内実験より、フェアリーダ摩擦影響のために、甲板上で計測を行った張力は約30%程度小さくなる。
- ③ 今回の結果の範囲内に限られるものの、船体に作用する潮流力の抗力係数は、約0.5~0.9程度である。

現地では、円形植木鉢型ケーソンが設置され、その周辺に作業船が係留される。今後は、基礎周辺に係留された作業船の潮流力の評価手法の確立も必要になるものと考えられる。

最後に、現地計測に多大なる尽力を頂いた関門港湾建設及び中央工測の小栗氏に、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 鴻上雄三・永田 慧・山下 茂・志岐 明・中込國喜(1978): 浮遊構造物の曳航と係留に関する研究(その1)一箱型作業船に作用する潮流力に関する水理実験一、鹿島建設技術研究所年報、第26号、pp. 15-19。
- 社団法人日本造船研究協会(1982): 箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムに関する研究報告書(第179研究部会)、研究資料 No. 346、pp. 53-54。