

二柱式橋梁下部工が沈設時に受ける潮流力に関する水理実験

The Experimental Study of the Tidal Current Force on Twin-Tower Pier

織田幸伸*・東江隆夫*・池尻一仁**・尾高義夫***
Yukinobu Oda, Takao Toue, Kazuyoshi Ikejiri and Yoshio Odaka

Abstract

To reduce construction costs of a pier of bridge over a strait, a new type of pier, called Twin-Tower, is proposed. The shape of Twin-Tower is not axisymmetric, thus the lift force and moment around the vertical axis by tidal current should be considered.

In this study hydraulic model tests are carried out to verify the drag force, lift force and the moment coefficient of Twin-Tower. The results show that the drag force is smaller than the rectangular cylinder, and the lift force and the moment is so small that the special method in setting Twin-Tower is not necessary.

keywords: Tidal Current Force, Bridge over the Strait, Twin-Tower Pier, Mooring

1. はじめに

支間距離世界一となる明石海峡大橋が今年開通し、さらに現在幾つかの渡海橋が計画されている。これらの渡海橋建設では、技術的な問題はもちろんであるが、ローコスト化が大きな課題となる。明石海峡大橋で主塔基礎に採用された円筒型設置ケーソン式下部工では、設置水深が深くなるとともに直径が大きくなり、建設費が増大する。そこで本研究では、数量の小さな下部工の形状として二柱式の橋梁下部工を取り上げる。

図-1に示す二柱式橋梁下部工は、矩形断面のフーチングと、主塔を支える二本の柱からなる下部工である。柱の形状は、ケーソンの沈設時の安定性を確保するため、上部幅よりも下部幅の広い台形とした。この二柱式下部工は、全体容積が小さいため建設コストが削減できるだけでなく、慣性力が低減できるため耐震的にも有効である。しかし、円筒型下部工と違い形状が複雑なため、流れ方向の潮流力の他に、流れと直角方向、鉛直軸に対して回転方向に潮流力が発生する。また、回転対称でないため、橋軸に対して高精度で設置することが要求される。この様な潮流力を評価する方法は、これまでのところ確立されたものがない。そのため、沈設時の潮流力を精度良く評価した上で係留設計を行う必要がある。本研究は、二柱式の橋梁下部工の沈設時に働く潮流力を実験によって求め、必要な係留力を求めることを目的とする。

2. 実験方法

二柱式橋梁下部工に働く潮流力を求めるため、想定実機に対して1/100縮尺の模型実験を行った。二柱式下部工として、図-1に示す形状の模型を用いた。また比較対象のため、円筒型下部工、角柱型下部工についても実験した。円筒型下部工は、底盤の直径73.2cmで断面一定の円筒型、角柱型下部工は、底盤が65cm×70cmの角柱である。ただし、二柱式については角

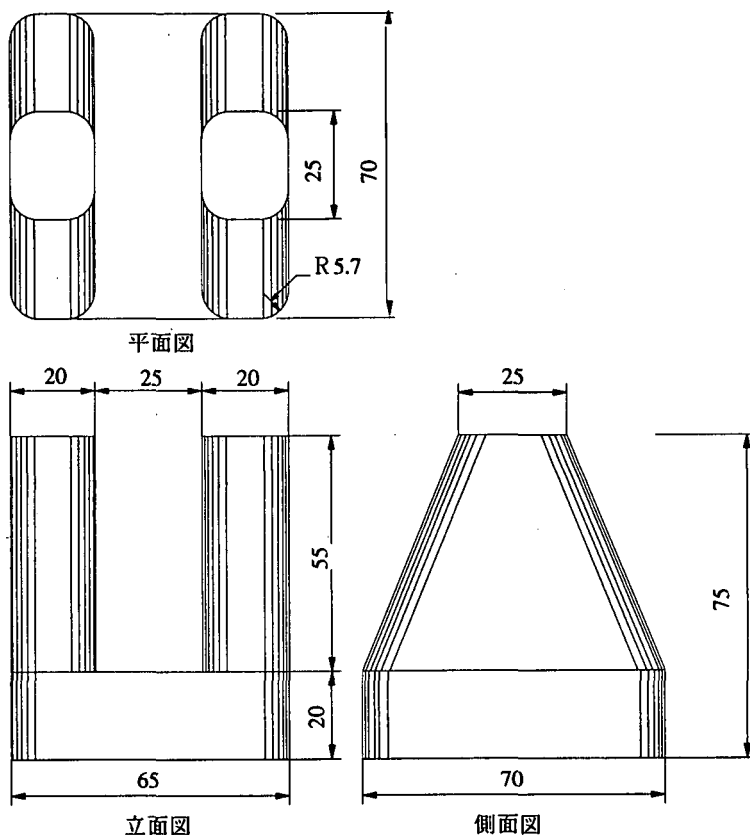


図-1 二柱式下部工模型 (unit:cm)

* 正会員 大成建設株式会社技術研究所海洋水理研究室

** 正会員 大成建設株式会社土木設計第二部海洋設計室

*** 正会員 大成建設株式会社土木プロジェクト部

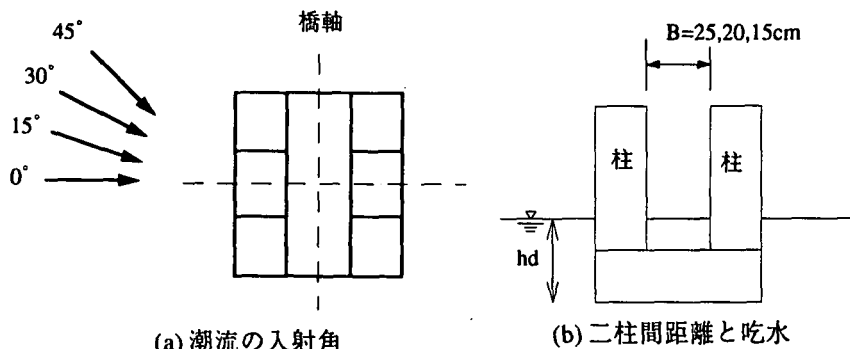


図-2 実験パラメタ

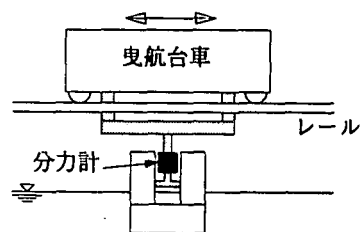


図-3 実験方法

部の隅落としをし、丸めてあるが、角柱型については丸めていない。実験は平面水槽を用い、水深は70cmで一定とした。パラメタとして、二柱間距離Bを3種類、吃水hdを4種類、潮流の入射角 θ を4種類について実験し、潮流の流速を変化させて潮流力を計測した。各パラメタの値を図-2及び表-1に示す。

実験は、流れを起こす代わりに、曳航台車に下部工模型を分力計を介して設置し、一定速度で台車を走行させることにより、潮流力を計測した。計測は、曳航台車を往復させることにより2回計測した(図-3参照)。

表-1 実験条件

模型形状	二柱間隔B (cm)	入射角 θ (°)	吃水hd (cm)	流速u (cm/s)
二柱式	(二柱式のみ)	0	15	15
円筒型	25	15	20	20
角柱型	20	30	25	25
	15	45	50	30

3. 実験結果と考察

3.1 各潮流力及び潮流力係数の定義

潮流力としてここでは、抗力 F_D 、揚力 F_L 、z軸回りのモーメント M_z の3つの力を対象とする。抗力は流れと同じ方向に働く力である。揚力は、一般には鉛直上向きの力を意味するが、ここでは流れに対して水平直角方向に働く力とする。各力の定義を図-4に示す。

また、潮流力係数として、抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 及びモーメント係数 C_M を以下によって定義する。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_x u |u| \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A_y u |u| \quad (2)$$

$$M_z = \frac{1}{2} \rho C_M A_x L_y u^2 \quad (3)$$

ここで、 A_x 、 A_y はそれぞれ、 $y'-z'$ 平面、 $z'-x'$ 平面への投影面積であり、 L_y は A_y の水平長さの最大値、 u は流速(ここでは、台車の移動速度の正負を逆にしたもの)である。

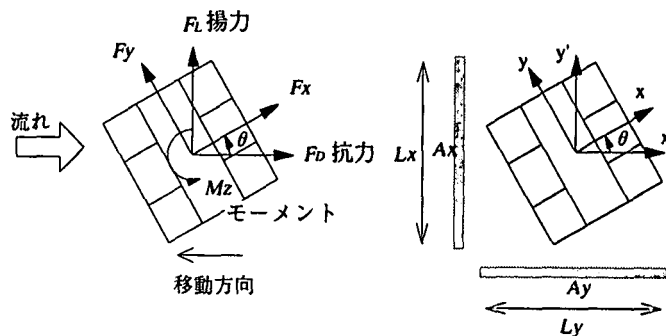


図-4 潮流力の定義

3.2 解析方法

本実験では、流れを起こすのではなく、曳航台車を走行させることによって潮流力を計測した。したがって、力の計測結果には、始めと終りに加速域と減速域が生じる。潮流力を求める際には、この加速、減速域を除いた出来るだけ長い時間の計測結果の平均値を用いた。その時の流速は、曳航台車に設置した電磁流速計によって計測し、潮流力を計測した時間と同じ時間帯の流速計測結果の平均値を用いた。

3.3 Re数と潮流力

図-5は、各形状毎にRe数と抗力との関係を示した例である。円柱の場合、一般に抗力係数はRe数によって変化し、Re数が 10^5 から 10^6 になる間で減少する。実験結果はこの傾向を示しており、 $10^5 \sim 10^6$ の間で右下がりとなっている。これに対し、角柱型に働く抗力は、Re数によって変化せず、実験結果もほぼ一定値を示している。二柱式の実験結果を見ると、角柱型と同様に抗力はRe数によらずほぼ一定の値となっている。したがって二柱式の場合も、Re数の抗力に及ぼす影響は小さいことが分かる。ここでは、抗力係数についてのみ示したが、揚力係数、モーメント係数についても同様にRe数の影響は小さい。以下では、角柱型と二柱式について各流速毎に求めた潮流力係数の平均値を、その形状の潮流力係数として検討する。

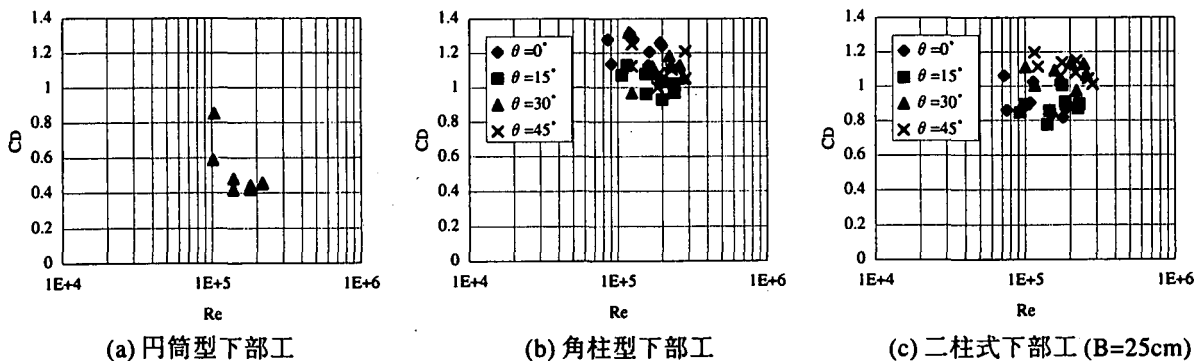


図-5 Re数と抗力係数

3.4 抗力係数

図-6,7は、入射角 θ と抗力係数の関係を吃水 hd 毎に、角柱型と二柱式について示したものである。抗力係数は、吃水が大きくなるとともに大きくなっている。角柱型の場合、無限長の角柱型の抗力係数は断面を正方形とすると $\theta=0$ に対して2.0である。実験結果は、これよりも小さく $hd=15\text{cm}$ ではこれの0.4倍、 $hd=50\text{cm}$ でも0.7倍程度である。これは、構造物の3次元効果によるものであり、水が横だけでなく底側にも逃げていくために抗力が小さくなっている。

吃水が20cm以下の場合、二柱式の柱部がまだ沈んでいない状態であるため、角柱型と状況は同じであり、 B の影響もない。しかし吃水20cm以下で二柱式と角柱型を比較すると、角柱型の $C_D=0.8$ 程度に対して、二柱式は $C_D=0.6\sim 0.8$ と若干小さい。これは、二柱式は角部を丸めてあるためである。

吃水20cm以上で、 $\theta=30, 45^\circ$ では、二柱式と角柱型は同程度の値になっている。一方、 $\theta=0, 15^\circ$ では二柱式の方が小さい。 θ が大きい場合には2本の柱の両方に流れが直接あたるが、 θ が小さいと、流れに対して片方の柱がもう一方の柱の後ろに隠れる形になる。従って θ が小さい場合には柱が2本あることの影響が小さく、角部を丸めてある影響が大きくなって角柱型よりも小さな抗力係数となっていると考えられる。

抗力係数で比較すると、二柱式は角柱型よりも若干小さい程度である。投影面積は二柱式の方が角柱型よりも小さいため、抗力の絶対値で比較すると、二柱式は角柱型よりも小さくなる。

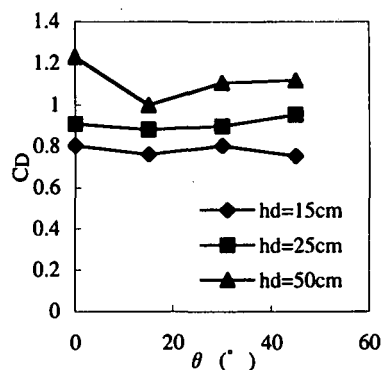


図-6 角柱型の抗力係数

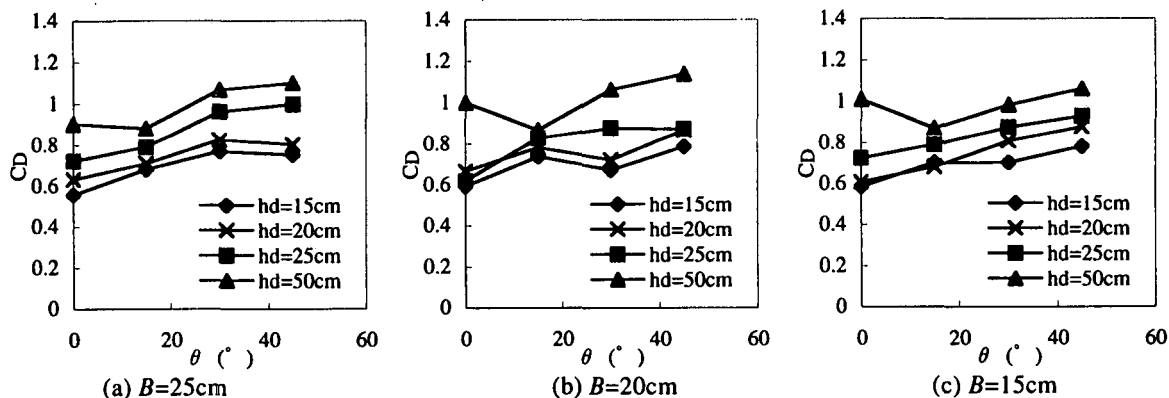


図-7 二柱式下部工の抗力係数

3.5 揚力係数

今回対象とした角柱型は、断面の縦横比が70:65と正方形に近いので、揚力はほとんど働かない。同様に、二柱式についても、吃水が20cm以下の場合には揚力はほとんど働かない。

図-8は、吃水が25cmと50cmの場合について揚力係数を示したものである。 $hd=50\text{cm}$ の結果を見ると、 $\theta=0$ では揚力は働かないが、 $\theta \neq 0$ となると揚力が発生する。これは、2本の柱部の厚さが薄いので、それぞれが平板に斜めに流れが作用するのと同じ効果を及ぼし、流れに対して直角方向に大きな力が働いているためである。揚力係数は θ に対してあまり変化せず、約0.3で一定値となっている。ただし、 $\theta < 45^\circ$ では投影面積は θ とともに大きくなるので、 θ の大きい方が揚力の絶対値は大きい。

揚力係数と抗力係数を比較すると、揚力係数は抗力係数の最大でも 1/3 程度である。ここでは係数で比較しているが、実際に働く潮流力で比較しても、揚力は抗力の 1/3 程度であった。

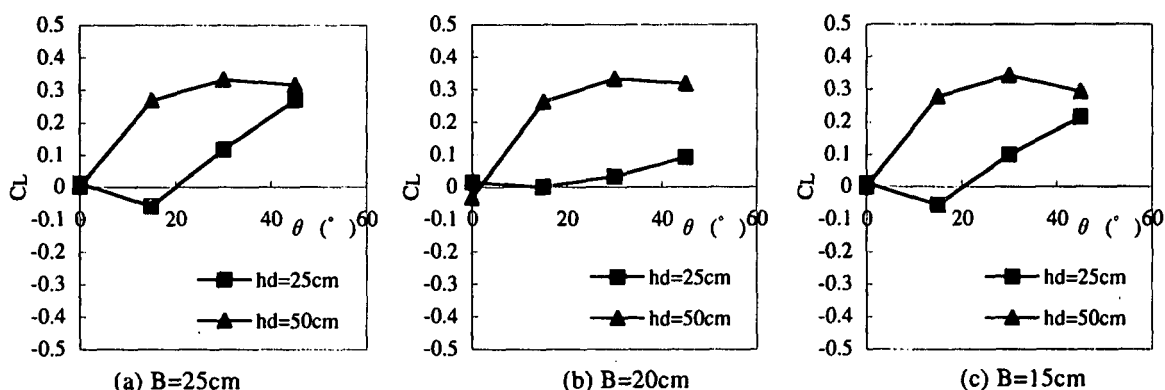


図-8 二柱式下部工の揚力係数

3.6 モーメント係数

図-9は、図-8と同様に吃水 25, 50cm の場合について、モーメント係数を示したものである。揚力と同様に、角柱型に働くモーメントは小さく、また、 $hd < 20\text{cm}$ のときの二柱式に働くモーメントも小さい。

θ とモーメント係数の関係は、図-8 の揚力係数とよく似た特性を示している。ただし、 $hd=25\text{cm}$ で $\theta = 15^\circ$ の時は、揚力係数は小さかったが、モーメント係数は $\theta \neq 0$ では比較的大きい値となる。

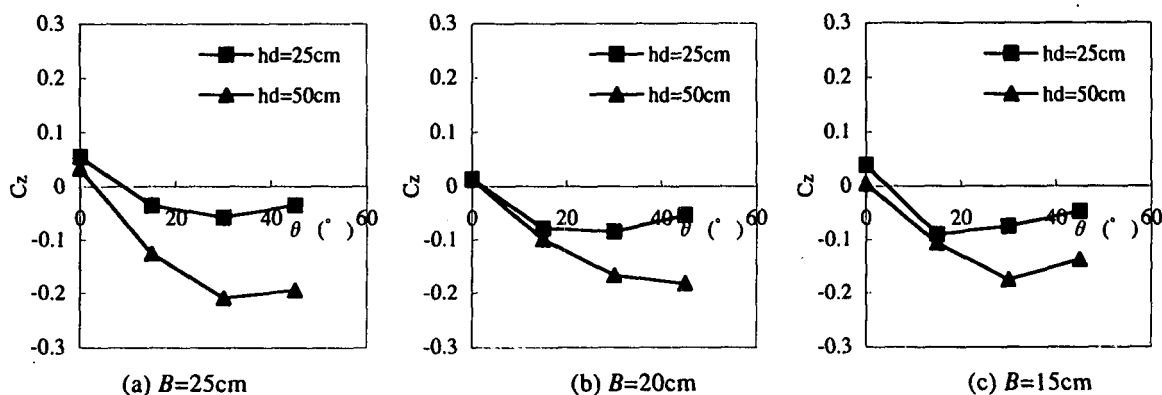


図-9 二柱式下部工のモーメント係数

3.7 二柱間距離 B の影響

二柱式下部工の二柱間距離 B と各潮流力係数との関係を $hd=50\text{cm}$ の場合について図-10に示す。揚力、モーメントについては $\theta = 0$ の場合はほとんど力が働かないため省略してある。

抗力係数、揚力係数に関しては、 B に対してほとんど変化せず、 B の影響は小さいことが分かる。モーメント係数に関しては、 B の増加とともに絶対値が大きくなり ($C_L < 0$ なので、図では右下がり) になっている。モーメントは、構造物表面の圧力に中心軸からの距離を乗じて求められるため、 B が大きいほどこの距離が大きくなり、モーメントが大きくなっていると考えられる。

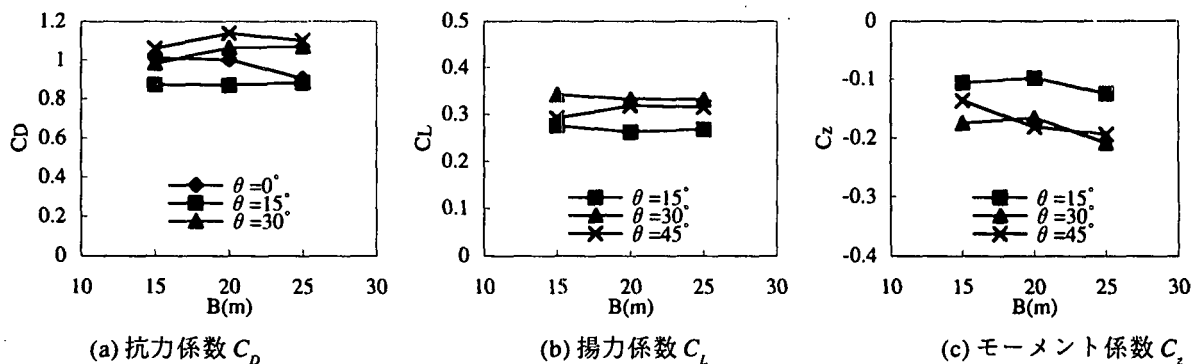


図-10 二柱間距離 B の影響 ($hd=50\text{cm}$)

3.8 各形状による抗力係数の比較

図-11は、各形状の抗力係数を比較したものであり、図-12はそれに $1/2 \rho$ と投影面積を乗じて、実際の抗力を比較したものである。ただし、図-12は模型縮尺 $1/100$ として現地換算した値である。角柱型と二柱式は θ が小さいときには抗力係数は二柱式の方が小さく、 θ が 30° から 45° の範囲では、角柱型と二柱式ではほとんど同じであった。また、実際に働く抗力で比較しても、二柱式の方が角柱型よりも若干小さい。

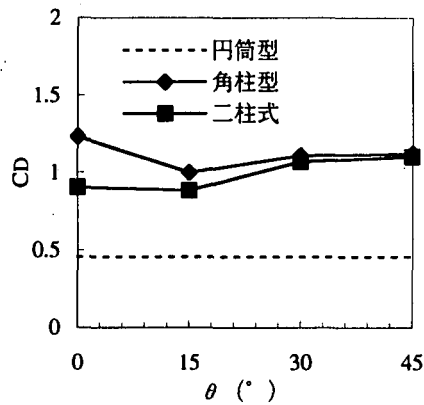


図-11 抗力係数の形状比較

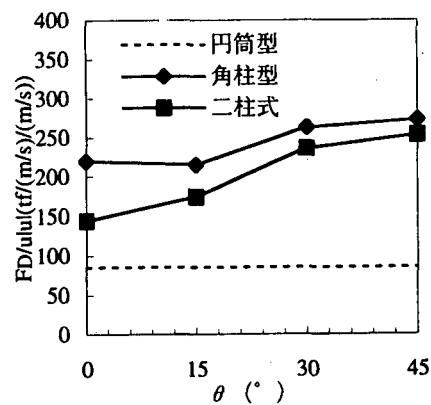


図-12 抗力の形状比較

4. 係留索に働く張力

以上の実験結果を基に、実際に係留する場合に係留索に働く張力を試算した。潮流や係留索の条件は、明石海峡大橋の主塔基礎ケーソン沈設工事（高塚ら，1990）を参考に設定した。計算は実機スケールで行っている。計算条件を表-2に示す。なお、係留索は明石海峡大橋で用いた $\phi 120\text{mm}$ （許容張力 400tf ，破断強度 1000tf ，安全率 2.5 ）のワイヤーロープとした。ここで流速 1.5m/s はおおよそ明石海峡での小潮時の日最大流速に相当する。下部工の形状は図-1を 100 倍したものとした。

係留索の配置は、図-13とし、全ての係留索で下部工と海底面の係留点間の水平距離を 300m とした。係留索の長さは一定とし、無荷重状態で初期張力 100tf となる長さとした。実際には係留索の長さを調整することによりケーソンを定位置に保持するが、ここでは潮流力作用後の、定位置からの変位が計算される。下部工に働く潮流力は、実験結果を基に表-3とした。

計算結果を表-4に示す。ライン1～8は図-13の係留索①～⑧を示す。張力 t は、ケーソン側の係留点で係留索に働く張力を表しており、 t_x, t_y, t_z はその x, y, z 軸方向の分力である。また索長は、係留索の伸びを考慮した初期張力 100tf での係留索の必要長さである。表-4によれば、各係留索に働く張力は許容張力 400tf よりも小さいことが分

表-2 係留索張力の計算条件

水深	70m
二柱間距離	25m
吃水	50m
入射角	30°
流速	1.5m/s

表-3 作用させた潮流力

抗力	720tf
揚力	230tf
モーメント	$-75\text{tf}\cdot\text{m}$

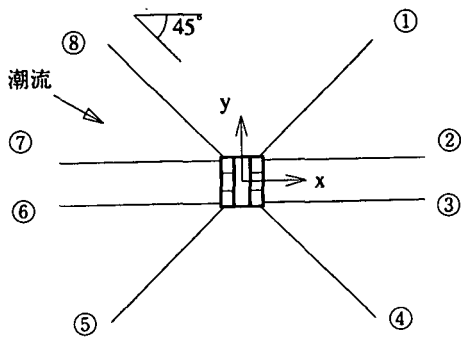


図-13 係留索配置

表-4 定常力下の平衡状態における係留索張力

	t (tf)	t_x (tf)	t_y (tf)	t_z (tf)	索長 (m)
ライン1	71.9	48.8	49.5	-18.4	302.1
ライン2	40.4	38.0	0.2	-13.6	302.2
ライン3	57.5	55.1	0.2	-16.3	302.2
ライン4	47.9	32.2	-32.2	-14.8	302.1
ライン5	129.6	-90.1	-89.6	-25.2	302.1
ライン6	221.8	-218.9	0.2	-35.7	302.2
ライン7	384.9	-381.0	0.3	-54.3	302.2
ライン8	343.3	-241.1	239.4	-49.6	302.1

表-5 重心位置の変位

	x (m)	y (m)	θz ($^\circ$)
変位	1.42	-0.72	0.81

かる。ここでは、係留索に働く張力の概略を把握するために図-13に示した係留配置によって計算したが、係留索の本数や配置を適当に変えることにより、この張力をより小さくすることが可能である。

5. おわりに

本研究では、渡海橋下部工の形式として二柱式下部工を取り上げ、これに働く潮流力を実験によって求めた。また、実際に係留計算を行い、潮流に対する係留索の安全性を確認した。その結果、二柱式下部工に働く抗力は、角柱型の下部工よりも小さく、また揚力、モーメントについても大きな問題ではないことが分かった。二柱式下部工は他の形式の下部工に比較して体積が小さいため、経済性に優れた下部工形状であり、また慣性力も低減されるため耐震性にも優れた形状であると言える。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 二柱式下部工に働く抗力の抗力係数は、角柱型の抗力係数とほぼ同じであり、投影面積が小さい分、抗力は二柱式の方が小さい。
- 2) 二柱式下部工に働く揚力係数は、最大で抗力係数の1/3程度である。
- 3) 実験結果を基に係留計算を行った結果、1本当たりの張力は400tf以下であり、明石海峡大橋の沈設工事と同様な係留設備で十分係留可能である。

参考文献

高塚政修・佐々木雅敏・北口雅章 (1990): 明石海峡大橋 2P・3P 鋼ケーソン設置, 本四技報, No.53, pp.47-53.