

強潮流下の円柱基礎周辺に係留された作業船の現地動揺特性

岡田 凌太*・上田 忠夫*・中込 國喜**
今井 貫爾***・秋山 義信****

1. はじめに

本州四国連絡橋に代表される渡海橋の海中基礎の建設においては、基礎周辺に作業船に係留する場合がある。渡海橋基礎が建設される海峡部には強潮流が発生することもあり、基礎周辺は、上流側の堰上げ・下流側の後流等の存在により場が乱されるため、作業船に施工上不都合な動揺が生じる可能性がある。したがって、係留設計において基礎周辺の係留作業船の動揺を事前に把握することは重要である。

従来より、波による作業船の動揺の研究は、解析・実験の両面において各種実施されてきたが、基礎周辺に係留された作業船の潮流による動揺特性は、構造物＋流れ＋波の相互干渉の結果として起こる複雑な現象となるため、実務的な問題であるにもかかわらず、検討された例は少ない(岡野ら, 1989)。そこで、はじめに、室内実験により作業船の動揺特性の把握を実施した(坂本ら, 1991)。

本報では、室内水理実験の結果を踏まえ、明石海峡大橋2Pケーソンのコンクリート打設工事に使用中の2種類の船体規模が異なる作業台船について強潮流や強風・強波浪が作用した時の船体動揺および係留索張力について現地計測を行ったのでその結果について報告を行う。

2. 計測方法

(1) 計測概要

現地の状況を写真-1に示す。計測期間は、1989年12月13日～15日で、主に強潮流(大潮: 約 3.0 m/s)、強風および強波浪が作業船に作用した時の、船体の6成分動揺量・係留索の変動張力・外力(潮流・波・風)についてデータの取得を行った。主たる計測機器の配置を図-1に示す。

(2) 計測対象とした作業船

計測対象作業船は、舞子(兵庫県神戸市)沖、南方約

1.0 km の位置にある明石海峡大橋2Pケーソン(円柱基礎)周辺に係留された、デッキバージタイプのコンクリートプラント台船(以下、CP 台船、24000 t 積級台船)と資材台船(12000 t 積級台船)である。両船の主要な浮体および係留索諸元を表-1に示す。作業船の係留配置を図-2に示す。両台船とも8本の鋼製チェーンで係留されており、船体の向きは主潮流方向である。なお、両台船とも淡路島側に張られた索⑥ならびに索⑦は動揺低減のために、CP 台船は 70 t、資材台船は 40 t の中間シンカーが付いている。

(3) 船体動揺量計測

船体の6成分の動揺量の計測には、今井ら(1988)により示された、非接触計測が可能なステレオビデオトラッカーを使用した。本計測機は、写真測量・画像処理の技術を利用するもので、船体に取り付けた3点以上のマーカの3次元変位を2つのビデオ画像より求め、船体重心回りの動揺量6成分を求めるものである。マーカは図-3に示すものを使用し、写真-2、写真-3に各々の台船におけるマーカの設置状況を示す。ビデオカメラは円柱基礎上に設置し計測を行った。なお、マーカとカメラの概略の離れ距離は、CP 台船が 100 m、資材台船が 50 m である。

(4) 係留索の変動張力計測

両台船の係留は8本の係留索で行われている。係留索の変動張力の計測は、CP 台船3本(索⑤, ⑥, ⑧)、資材台船2本(索⑤, ⑧)について実施した。計測は甲板



写真-1 現地状況

* 本州四国連絡橋公団垂水工事事務所
** 正会員 明石海峡大橋2P下部工JV
*** 正会員 PhD. 鹿島建設株式会社技術研究所
**** 正会員 工修 鹿島建設株式会社技術研究所

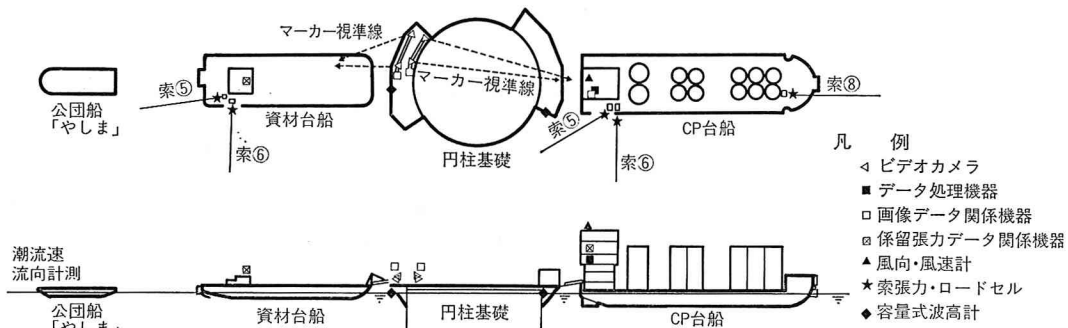


図-1 計測機器配置

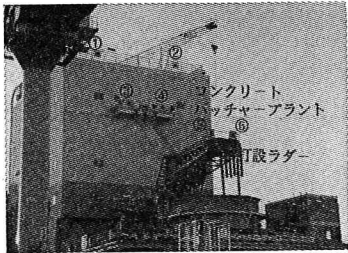


写真-2 CP 台船マーカー設置状況

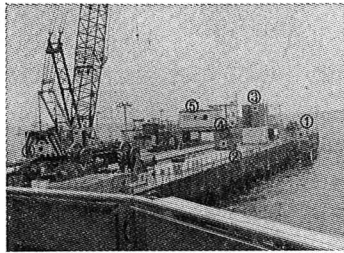


写真-3 資材台船 マーカー設置状況

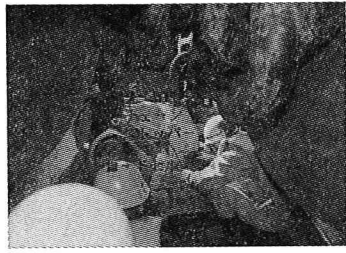


写真-4 ロードセル設置状況

表-1 浮体と係留索諸元

諸 元		CP 台船	資材台船
船 殻 船体形状	長さ (m)	138	103
	幅 (m)	36	30
	高さ (m)	9	7
重量 (t)		30.155	12,000
吃水 (m)		7.3	2.8
重心高さ (m)		17.1	7.8
メタセンター 高 さ	roll 方向 (m)	1.4	20.4
	pitch 方向 (m)	204.0	306.3
慣 性 モーメント	roll 方向 (t・m ²)	3.6×10 ⁶	1.0×10 ⁶
	pitch 方向 (t・m ²)	3.5×10 ⁷	1.1×10 ⁷
	yaw 方向 (t・m ²)	3.6×10 ⁷	1.1×10 ⁷
係 留 索 諸 元	係留本数	8 本	8 本
	種別	φ100チェーン	φ70チェーン
	単位長さ当たり水中重量 (kg/m)	190.2	93.2
	シンカー設置水深 (m)	-56~-42m	-56~-41m
	中間シンカー付き係留索	索⑥, ⑦(70t)	索⑥, ⑦(40t)
備 考	設計初期導入張力 (t)	100t	70t
	シンカー側100m 部分の係留索は, 上記種別と異なる索が使用されており複合索となっている。主に, CP 台船は φ100, 資材台船は φ78 のワイヤーを使用。		

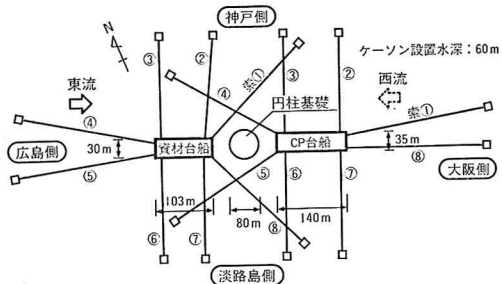


図-2 係留配置

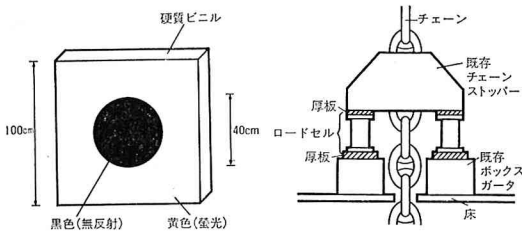


図-3 マーカー形状

図-4 係留索張力測定方法

して実施した。ロードセルの設置状況を写真-4に示す。

(5) 外力計測

潮流向・潮流速は工事海域の警戒船にドップラー流速計を設置し計測を行った。風向・風速はCP台船上に搭載された30mの高さがあるコンクリートバッチャープラントの屋上にプロペラ式風向・風速計を設置することに

上に設置されたチェーンストッパーを利用し、図-4に示すように4個のロードセル(定格容量200t)を設置

より計測を行った。波高は、円柱基礎周辺の2箇所に容量式波高計を設置し計測を行った。

3. 計測結果および考察

計測結果の例として、26ケースの計測データの中で代表的な外力作用状態で、特徴がある現象が得られた下記に示す2種類の場合の結果を中心に以降で説明を行う。

ケースa：円柱基礎の下流側に係留された状態で強潮流

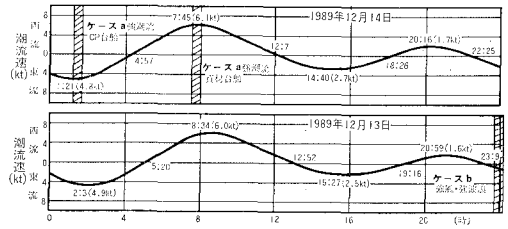
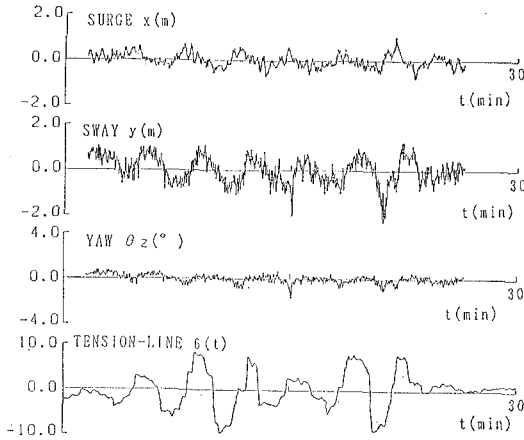


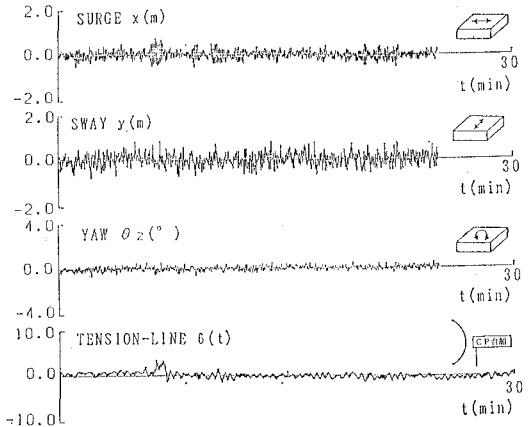
図-5 予測潮流と計測ケース

表-2 外力計測結果

ケース	名称	測定日時	潮流		風			波			備考
			方向	流速 kt.	方向	平均風速 m/s	瞬間最大 風速 m/s	方向	有義波高 m	有義周期 s	
a	強潮流	12/13, 00:55~01:05	東流	4.9	西風	2.0	3.2	西波	0.2	3.4	CP台船下流側
		12/13, 07:30~08:00	西流	6.1	西風	1.9	3.0	西波	0.2	6.5	資材台船下流側
b	強風+強波浪	12/14, 23:40~00:10	東流	0.8	西風	11.2	16.0	西波	1.7	4.5	

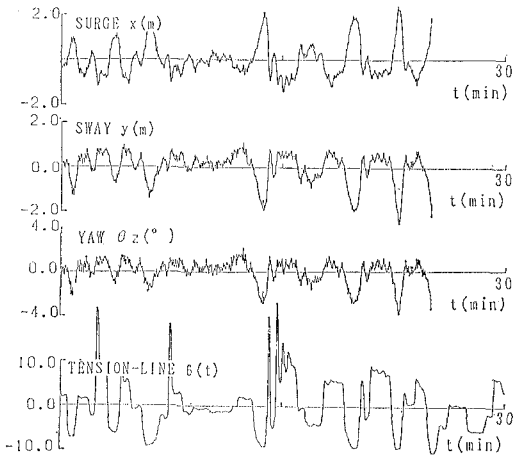


ケース a 強潮流・下流側設置

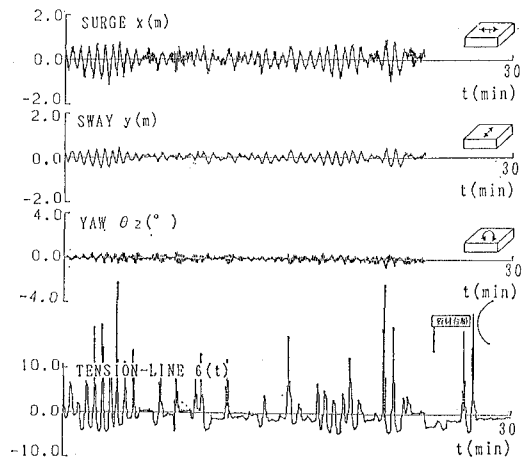


ケース b 強風・強波浪

図-6 CP台船の動揺量・係留索張力時系列



ケース a 強潮流・下流側設置



ケース b 強風・強波浪

図-7 資材台船の動揺量・係留索張力時系列

が作用した場合 (CP 台船の場合: 東流, 資材台船の場合: 西流)。

ケース b: 強風・強波浪が作用した場合。

図-5 に計測期間中における予測潮流と上記計測ケースとの関係を示す。計測継続時間は30分, サンプルング周波数は 5Hz である。

(1) 外力計測結果

表-2 に外力の計測結果について示す。潮流の計測で得られた結果と予測潮流との差はほとんどなかった。なお, 強風・強波浪時の計測における風の平均風速は 15 m/s, 最大瞬間風速は 18 m/s の西風であった。

(2) 時系列波形結果

図-6, 図-7 に CP 台船ならびに資材台船の6成分の動揺量の中で卓越する平面方向成分動揺量 (surge, sway, yaw) ならびに顕著な変動が見られた索⑥の係留索に発生する張力の時系列波形について示す。なお, 特に CP 台船の動揺時系列波形に見られる細かい振動は, これは, ビデオ画像のチラツキならびにカメラ自身の振動によるものである。

潮流作用時の結果では, 両台船とも最大動揺量ならびに最大変動索張力の発生は, 円柱基礎の下流側に係留された状態で最大の潮流が作用した場合であった (ケース a)。図より, 資材台船のケース a の最大動揺量発生時における sway は, 正方向変位が負方向変位に対し, 拘束されている (波形が 1.0m でロック状態)。また, sway の拘束が生じている部分では, 急激な変動索張力の増加ならびに波形が不連続な波形となっている。これは, 索⑥の係留索がダンパー効果を期待して中間シンカ

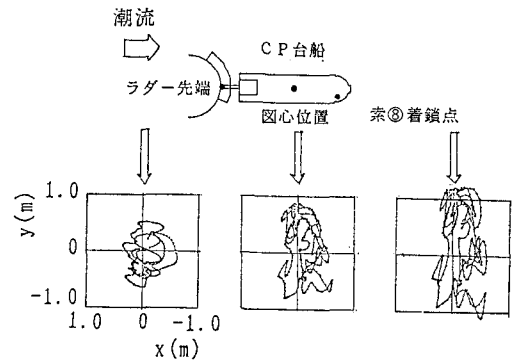


図-8 CP 台船代表点平面軌跡 (強潮流時)

一を付けたものであり, 係留着鎖点変位・張力の関係が不連続となっていること, ならびに, 中間シンカーが浮上する前の状態であるために他の索に比べ有効な索長が短く, 変位に対し敏感となっているためである。

強風・強波浪作用時の結果 (ケース b) では, CP 台船は資材台船に比べ顕著な動揺ならびに変動索張力の増加は見られなかった。これは, CP 台船は資材台船に比べ, 船体長さ/波長比が大きく動揺が生じにくいこと, ならびに, 強風・強波浪が西側からの作用であったために円柱基礎が防波堤の役目をしたためと考える。これに対し, 風および波の影響を直接受ける資材台船では船体固有周期に近い30秒程度で動揺ならびに変動索張力が大きな変動を示す。

(3) 平面方向動揺パターン

CP 台船の動揺が最大であったケース a の時に, 船体上の3点 (ラダー先端, 甲板図心, 索⑥着鎖点) の平面軌跡を 図-8 に示す。sway 成分が surge 成分よりも大きい。また, 円柱基礎側の観測点より離れるにしたがい sway 成分の増加が見られる。これは, 船体が円柱基礎側に近い点で yaw の回転中心を持って動揺したためである。

(4) 動揺周期特性

CP 台船ならびに資材台船の sway 方向動揺成分と係留索⑥の変動索張力のパワースペクトルを 図-9 および 図-10 に示す。図より, 動揺が大きい下流側に設置された状態で強潮流が作用する場合の動揺卓越周期は両台船において約 150 秒前後となる。これは, 円柱基礎周辺の剥離渦

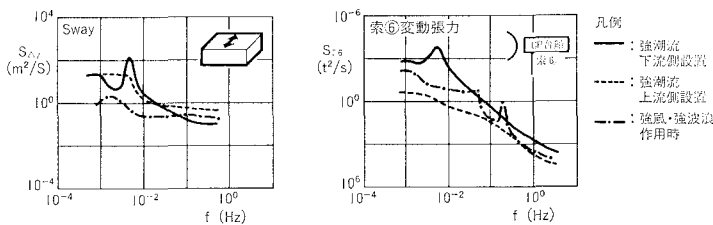


図-9 SWAY・索(6)張力のパワースペクトル (CP 台船)

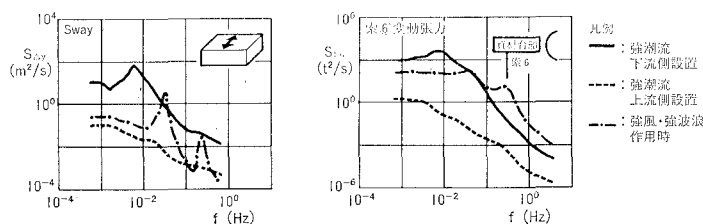
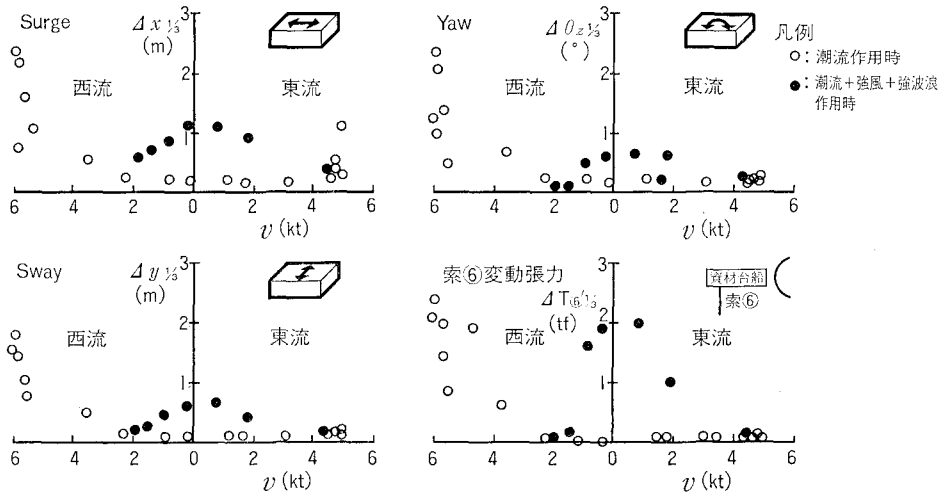


図-10 SWAY・索(6)張力のパワースペクトル (資材台船)



図一11 潮流速と1/3有義応答値 (CP 台船)

の発生周期133秒とほぼ一致する。

$$\frac{\text{円柱基礎の径 } 80 \text{ m}}{\text{ストローハル数 } 0.2 \times \text{潮流速度 } 3.0 \text{ m/s}} = 133 \text{ 秒}$$

また、資材台船において強風・強波浪が作用する場合には、船体の固有周期(約30秒)と波の周期(5秒)の双峰のピークを有するスペクトルとなる。

(5) 潮流速と有義応答値

資材台船の潮流速の変化に伴う平面方向の動揺量ならびに変動索張力について 図一11に示す。横軸は潮流速、縦軸は1/3有義応答値である。図中、黒塗でプロットした点は風および波の影響が大きいものを示す。資材台船は CP 台船に比べ動揺量が大きく、円柱基礎に対し下流側にある場合に動揺量が潮流速度に伴い増加する。また、資材台船に対する波による影響は潮流速が小さい時に顕著になる。

なお、CP 台船の動揺量は潮流速の増大ならびに潮流の向きにかかわらず surge, sway の並進方向変位で 1.0 m 以下, yaw の回転成分で 1.0° 以下であった。

4. おわりに

今回の現地計測を通して以下の事項が明らかになった
① CP 台船と資材台船では、船体規模の大きな CP 台船の方が動揺量が小さい。これは、主にチェーン径の大きな係留索で初期張力 100t と強緊張状態で係留しているためと考える。

② 両台船とも船体の動揺量は, surge, sway, yaw の平面方向成分が卓越する。また、変動張力も水路側に張

られた sway を拘束する索が顕著な変動を示す。

③ 最大の動揺量ならびに変動索張力は両台船とも円柱基礎に対し下流側に設置され、最大の潮流が作用した時に発生する。また、変動の卓越周期は円柱基礎から発生する剥離渦の発生周期と一致する。

④ 円柱基礎の下流側に設置された資材台船は、潮流速の増大に伴い動揺量が非線形的に増加する傾向にある。

⑤ 強風・強波浪の場合、資材台船が顕著な動揺を示しその動揺周期は船体の固有周期と波の周期が卓越する。

⑥ 潮流と風・波では潮流による動揺の方が顕著である

今回の現地計測で、円柱基礎周辺の係留作業船の潮流による動揺は主に円柱基礎から生じる剥離渦が船体に交番力として作用することにより生じることを確認した。また、作業船規模・作用潮流速・波の動揺に対する影響について定性的な把握を行った。

今後は、円柱基礎の剥離渦により生じる船体に作用する流体力ならびに船体動揺評価のための解析方法の開発が必要であると考えられる。

参考文献

- 今井貫爾・池谷 毅 (1988): 浮体動揺計測システム—非接触計測システムと現地計測システム—, 鹿島建設技術研究所年報, 計第36号, pp.197-202.
- 岡野 哲・山根 彰・久宝啓作・平野廣和 (1989): 超大型円柱基礎に係留された作業台船の動揺特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.744-748.
- 坂本光重・佐々木雅敏・北口雅章・今井貫爾: 強潮流下における大規模橋梁基礎の施工時の水理的諸問題に関する研究, 土木学会論文集 (投稿中).