

平良港におけるフローティングドックの係留避泊

Mooring of Floating Dock under Hostile Weather Conditions at the Port of Hirara

上田 茂*、樋口豊志**、板生考司*

Shigeru Ueda, Toyoshi Higuchi and Takashi Itao

Caissons for outer breakwater of the port of Hirara are being fabricated by use of floating docks(hereafter FD). FDs used to refuge to Okinawa island or Ishigaki island when a typhoon seemed to attack the Miyako island, and the fabrication work ought to be interrupted and postponed for one or two weeks for every typhoon. If it is possible to moor FDs during typhoons are influencing the Miyako island, the days of interruption must be shorten. Then, the examination was made on the safety of mooring of a FD during typhoon with numerical simulation method then 4,800 ton FD has been moored safely during typhoon since 1989. In 1990, it was planned to replace the 4,800 ton FD by 6,000 ton FD, therefore the examination was made on the safety of mooring of 6,000 ton FD with the same manner. Then the 6,000 ton FD has been moored since June, 1990. Several typhoons attacked the Miyako island in 1990, however, the FD was moored safely. Motions of the FD were measured during typhoons.

This paper describes the procedure and the results of the examination on the safety of mooring of 6,000 ton FD and the results of the observation.

Keyword: Floating Dock(FD), Mooring of FD, Motions of FD,
Field Observation, Refuge of FD.

1. はじめに

沖縄県宮古島は台風の経路に当たり、その気象海象条件は著しく厳しい。このため、沖縄総合事務局平良港工事事務所においては、台風時の船舶の避難泊地を整備する目的で沖防波堤の建設を進めている。防波堤はコンクリートケーソン式であるが、大型であるためフローティングドック（以下FD）を用いて製作されている。このケーソン製作用FDとして平成元年度は4,800トンFDが用いられたが¹⁾、平成2年度は6,000トンFDを用いることとなった。

本地域は台風の経路にあたるため、ケーソンの製作時期においても台風の襲来が十分予想される。従来は台風の影響が予測されたときにはケーソン製作工事を中断しFDを沖縄本島や石垣島などへ避難させていたが、このため1週間～2週間もの工事中断を余儀なくされていた。そこで、台風時のFDの係留の安全性について数値シミュレーションによって検討をし、1989年より4,800トンFDの台風時の係留船舶を実施している。1990年においては6,000トンFDを使用することとなったので、同様の検討を行い係留の安全性を確認し係留避泊を実施した。1990年には多くの台風が宮古島に来襲したが、このときのFDの動揺を実測した。本文においてはこれらの結果について述べる。

2. 検討条件

2.1 一般条件

- 1) 係留位置；平良港第1ふ頭（-5.5m）前面（図-1参照）
- 2) 使用フローティングドック；FD-ST6000
- 3) 製作ケーソン；2,120トンケーソン2函同時製作
- 4) 海底土質；土質調査資料による
第1ふ頭-5.5m泊地：N=0～10 砂質土
第2ふ頭-7.5m泊地：N=0～5 シルト混じり砂礫（サンゴ礫）
- 5) 定係期間；平成2年度より3～6年程度を予定

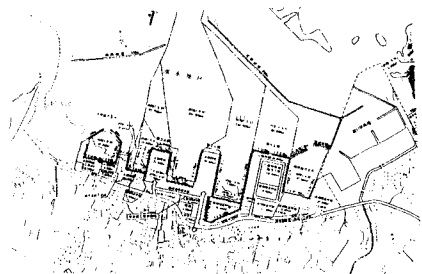


図-1 平良港平面図

* 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部（〒239 横須賀市長瀬3-1-1）

** 運輸省第一港湾建設局新潟港工事事務所（前運輸省港湾技術研究所構造部）

2. 2 自然条件

宮古島気象台および沖縄総合事務局の観測記録を参考にして以下のように設定された。

1) 風

風速 平均風速 40m/s、50m/s

ただし、風速50m/sのときの波浪条件およびFDの状態は40m/sの計算結果から特定する。

風向 0°、30°、90°、150°、180°、210°、330° (7方向)

2) 波浪

港内波高；港内波高計算結果に基づいて避難泊地における入射波高は表-1のように設定されている。ここに、入射波高とは係船岸による反射波を無視した進行波の波高である。動揺計算においては係船岸による反射波が考慮されている。

2. 3 FDの諸元

6,000トンFDの形状一般図を図-2に、また、FDの諸元を表-2に示す。

表-1 避難泊地における入射波高

DWT	波向	波高	
		14s	5s
6000t	0°	0.66m	2.70m

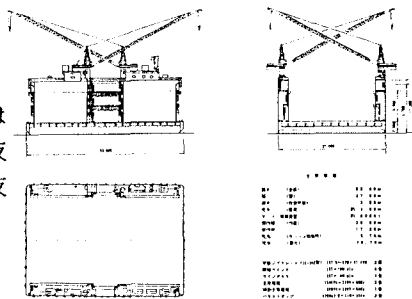


図-2 6,000トンFD形状一般図

3. 6,000トンFDの係留計算

3. 1 計算の方法および手順

動揺計算は港湾技術研究所で開発した係留浮体の動揺計算プログラムを用いて港湾技術研究所のACOS1000で実施した。不規則波はブレットシュナイダー・光易型スペクトル、また、変動風はダーベンポートのスペクトルを用いて発生させた。変動風のカスト率は約1.3である。

係留浮体に作用する波力および造波抵抗力は、井島の三次元領域分割法によって求めた。ただし、検討の対象になるFDは、喫水が小さく d/L （喫水/長さ）、および d/B （喫水/幅）が0.1以下であるので、粘性抵抗が大きいと考えられるので、港湾技術研究所における実験および計算²⁾に基づいて、上記の計算で造波抵抗力から求められる付加質量および減衰係数を表-3に示す。

図-3は6,000トンFDの14本係留の係留図である。係留索はナイロンロープφ100mmで長さは78.8m~150.6mである。

数値シミュレーションにおいては、逐次積分によって係岸船舶の動揺と係留索の張力ならびに防舷材の反力を求めるが、逐次積分のタイムステップは0.25s、積分の回数は6,000ステップとした。つまり、実時間にして1,500s (25min) に相当する計算を行った。ただし、計算結果の整理に当たっては、逐次積分の最初の900ステップの計算結果は棄却し、残りの5,100ステップの計算結果について統計的に処理している。

3. 2 計算ケースおよび条件

表-4は計算ケースを示したものである。風速40m/sにおいては、ケーソン製作時および完成時について風向を変えて合計24ケースの計算を行っている。表中のバラスト注水時は、軽荷時においてとくに周期14sの場合に動揺が大きくなるので、軽荷時にバラスト水を注水した場合を意味する。さらに上記計算で危険と思われる条件について、風速を50m/sとして7ケースの計算を行った。

6,000トンFDの係留計算は、ナイロンロープ14本係留（柔らかい特性）について行った。現有装備ではワイヤロープを用いているが、伸びが小さいので張力が過大になり切断の恐れがあるので、台風時の避泊係留には適当ではない。そこで、ナイロンロープを用いた係留系について計算を行った。なお、4,800トンFDに対する台

表-2 観測時の条件および6,000トンFDの諸元

	完成時	軽荷時	バラスト注水時
全 長	53.00m		
幅	37.00m		
深さ(ボンテン)	3.80m		
深さ(全深)	17.20m		
吃 水	3.10m	1.00m	3.10m
重心(海底面から)	11.20m	11.10m	4.90m
計画載荷重量	4,300トン		
最大積載重量	6,000トン		
排 水 量	6,180トン	1,940トン	6,180トン
K G	8.80m	6.60m	4.50m
風圧レーバー長	-1.70m	1.50m	4.50m

表-3 付加質量および減衰係数の修正係数

		6,000トン		
		満載	軽荷	バラスト
質量	サージウェイ	1.5	3.0	1.5
減衰	サージロビッチ	1.5	3.0	1.5

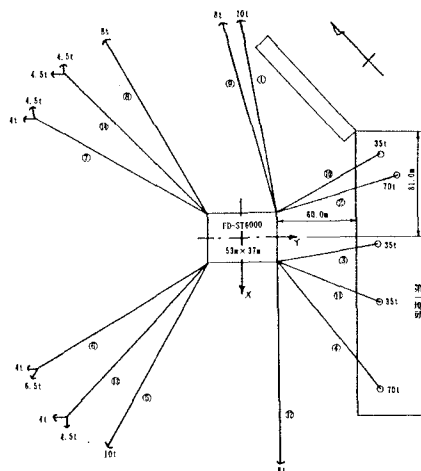


図-3 6,000トンFD係留図

風時係留船舶の検討の結果から、ナイロン索が弛緩している状態であると考えられるので、図-4に示す変位復元力特性を用いて非線形な特性に対する計算を行っている。

3.3 計算結果

1) 風荷重および波力

図-5は、6,000トンFDに対する風と波の作用方向と6,000トンFDの係留状態を示したものである。FDは係船岸前面に係留されるが、計算においては単軸をX軸、また、長軸をY軸とする。

2) 規則波中の6,000トンFDの動揺量

不規則波中の動揺計算を行うに先立って、規則波中の無係留のFDの動揺量を計算した。波向が0°であるので6,000トンFDのサージの動揺振幅が大きい。たとえば、ケーソン完成時には周期14sでは2.31m、周期5sでは0.24mである。軽荷時には周期14sでは2.38m、周期5sでは0.21mである。また、バラスト注水時には周期14sでは2.41m、周期5sでは0.23mである。

3) 不規則波中の6,000トンFD

の動揺計算(風速40m/s時)

先の計算ケースに従って、風速40m/sで不規則波中の動揺計算を行った。ここでは、6,000トンFDの動揺量と係留索の張力とを取りまとめて示す。

表-5、6は、表-4に示したケーソン完成時の風速40m/s、波周期T=14sおよびT=5sの計算のうち、6,000トンFDに係留する各係留索が最大張力を示すときの風向と張力とを取りまとめたものである。表には最大張力を許容張力で除した安全率を記入している。

これらから判断すると、6,000トンFDは、係留避泊案(ナイロンロープ14本係留：柔らかい特性)では安全に係留できるといえる。ただし、最大動揺量はおよそ30m程度になる。

表-4 6,000トンFD動揺計算ケース表

風向	0°	30°	90°	150°	180°	210°	330°
ケーソン完成時	T=14s	○	○	○	○	○	○
風速40m/s	T=5s	○	○	○	○	○	○
バラスト注水時	T=14s	○	○	○	○	-	-
風速40m/s	T=5s	○	○	○	○	-	-
ケーソン完成時	T=14s	○	○	○	○	○	○
風速50m/s							

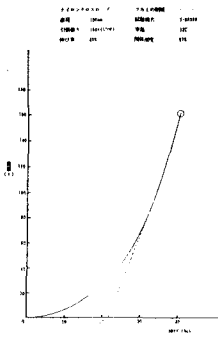


図-4 係留索の変位復元力特性

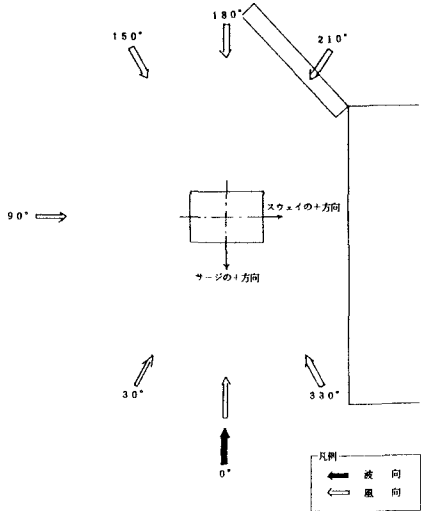


図-5 6,000トンFDに作用する風と波の作用方向

表-5 係留索の安全性の判定

6,000トン(14本係留) ケーソン完成時 T=14s 0.11k V=40m/s 波向=0°

ライン No.	風向 (deg)	最大張力 (tf)	最大変位量 (m)	判定			備考
				安全率	判定	7/8- ブロー 力	
1	180	14.71	29.51	9.8	○	○	
2	210	15.29	19.40	9.5	○	○	
3	210	8.63	12.16	16.7	○	○	
4	0	20.80	28.46	8.9	○	○	
5	30	24.00	35.84	6.0	○	○	
6	30	14.35	29.18	10.0	○	○	
7	150	12.28	21.28	11.7	○	○	
8	180	22.37	24.98	5.4	○	○	
9	150	14.19	21.01	10.1	○	○	
10	210	28.08	22.29	5.1	○	○	
11	330	29.38	21.67	4.9	○	○	
12	0	19.13	32.83	7.5	○	○	
13	30	19.81	33.53	7.2	○	○	
14	150	17.65	31.83	8.2	○	○	

係留索	ナイロンロープ	切断強度(t)	許容張力(t)	ラインNo.	備考
ロープ	φ100	144	72	1~14	
ブロー	35.1	—	35	3,10,11	
ブタ	70.1	—	70	2,4	
ブタ	8.1	—	40	8,9,12	
ブタ	8.51	—	42.5	7,13	
ブタ	9.1	—	45	14	
ブタ	10.1	—	50	15	
ブタ	10.51	—	52.5	6	

表-6 係留索の安全性の判定

6,000トン(14本係留) ケーソン完成時 T=5s 2.70k V=40m/s 波向=0°

ライン No.	風向 (deg)	最大張力 (tf)	最大変位量 (m)	判定			備考
				安全率	判定	7/8- ブロー 力	
1	180	14.31	21.14	10.1	○	○	
2	210	14.59	19.04	9.9	○	○	
3	210	7.88	11.58	18.5	○	○	
4	0	19.24	27.62	7.5	○	○	
5	30	22.73	35.17	6.3	○	○	
6	30	13.69	26.57	10.5	○	○	
7	150	11.99	26.32	12.1	○	○	
8	180	21.67	24.56	6.6	○	○	
9	150	12.75	26.63	10.5	○	○	
10	210	26.88	21.86	5.4	○	○	
11	330	27.35	21.06	5.1	○	○	
12	0	17.88	31.97	8.1	○	○	
13	30	18.91	32.68	7.6	○	○	
14	150	17.15	31.48	8.4	○	○	

係留索	ナイロンロープ	切断強度(t)	許容張力(t)	ラインNo.	備考
ロープ	φ100	144	72	1~14	
ブロー	35.1	—	35	3,10,11	
ブタ	70.1	—	70	2,4	
ブタ	8.1	—	40	8,9,12	
ブタ	8.51	—	42.5	7,13	
ブタ	9.1	—	45	14	
ブタ	10.1	—	50	15	
ブタ	10.51	—	52.5	6	

4) 不規則波中の6,000トンFDの動揺計算(風速50m/s時)

風速40m/sの検討の結果から風速50m/sの検討は、ケーソン完成時、風向7種類で行った。風速50m/sでは、波向と風向が同じ方向である0°のときにサージの変位が約40mとなり、動揺量が大きい。表-7に係留索の安全性の判定表を示す。ロープ張力はどの条件でも安全率が高い。ただし、風向210°と330°のときには、No.10とNo.11のロープに陸上ブロックの滑動または転倒の抵抗力を上回る張力が作用する。

4. 台風時のFDの動揺観測結果と係留計算

4.1 概要

上記の検討の結果、6,000トンFDの係留避泊の安全性が確認されたので、平成2年7月から実施した。このようなFDの台風時の避泊係留はあまり例がないので、台風時に6,000トンFDの動揺観測を行い計算値と比較し、後日の検討の資料とすることとした。観測は沖縄総合事務局平良港工事事務所が実施した。

平成2年は大型台風の発生が多く、宮古島に來襲するものは9個あまりを数えた。そのうち8月18日(台風12号)、8月29日(台風15号)、9月26日(台風20号)、10月5日(台風21号)の4回の観測を行った。

4.2 観測方法

1) X軸の動揺の観測

- ①FD船首に中央を0として50cm間隔でマーキングをおとす。
- ②第1ふ頭の道路上に基準となる点を決める
- ③セキスタントにより基準点からX軸に直角にポールをたてる。
- ④基準点にトランシットを据え、ポールの見通し上のマーキングを測定する。
- ⑤測定は15秒毎に20分間行う。

2) Y軸の動揺の観測

- ①FD左舷ウイングに50cmごとにマーキングする。
- ②荷川取漁協2階に設けられた観測点にトランシットを据え、マーキングの読みを測定する。
- ③測定はX軸と同様に15秒毎に20分間行う。

3) その他

- ①風向・風速及び波高観測は、平良港工事事務所設置の計器によるものとする。
- ②現地の波高は目視観測とする。

4.3 観測結果

写真-1は観測時の状況を撮影したものである。また、図-6および図-7は、トランシットで観測した結果を図示したものである。表-8は観測時の風速、波高およびFDの諸元である。表-9は観測時の最大最小変位量である。それぞれ、先に示した観測方法で1日2回観測した結果である。8月18日の観測では、FDはX軸方向に約3.3m、またY軸方向に約1.8m、8月29日の観測では、X軸方向に約1.9m、Y軸方向に約1.5mドリフトしている。つづいて9月26日の観測においては、X軸方向に約8.6mY軸方向に約3.5m、10月5日の観測では、X軸方向に約6.4m、Y軸方向に約3.5mそれぞれドリフトしている。8月に行われた2回の観測値が、9月以降の2回の観測値に比べて小さくなっている。前者の場合、計測開始時点でのトラ

表-7 係留索の安全性の判定

6,000トン(14本係留)		ケーソン完成時		T=14s 0.66m V=10m/s 波向=0°		判定		備考
ラインNo.	風向(deg)	最大張力(tf)	最大変位量(m)	ロープ安全率	陸上ブロック転倒力	ロープ判定	陸上ブロック判定	
1	150	22.13	35.17	6.3	○	○	○	
2	210	24.49	23.28	5.9	○	○	○	
3	210	16.19	16.18	8.5	○	○	○	
4	330	31.07	32.99	4.6	○	○	○	
5	30	38.21	42.55	3.6	○	○	○	
6	30	23.63	35.64	6.1	○	○	○	
7	150	20.46	32.74	7.0	○	○	○	
8	150	35.68	41.47	4.0	○	○	○	
9	150	22.88	35.25	6.3	○	○	○	
10	210	46.14	26.51	3.1	○	×	○	
11	330	52.11	26.46	2.8	○	×	○	
12	0	28.35	38.15	5.1	○	○	○	
13	30	32.31	40.02	4.5	○	○	○	
14	150	29.09	38.55	5.0	○	○	○	

		切断強度(t)	許容耐力(t)	ラインNo.	備考
係留索	ナイロンロープ	144	7.2	1~14	
	φ100	—	3.5	3,10,11	
	35t	—	—	—	
	ブク	70t	7.0	2,4	
	ア	8t	4.0	8,9,12	
	ン	8.5t	4.25	7,13	
船力	1	9t	4.5	14	
	2	10t	5.0	1,5	
	3	10.5t	5.25	6	

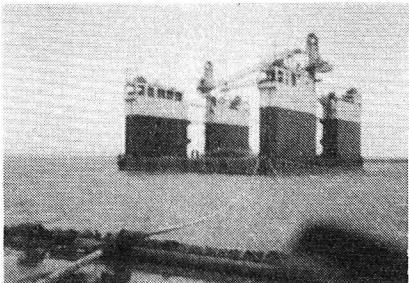


写真-1 FD-ST6,000 観測時

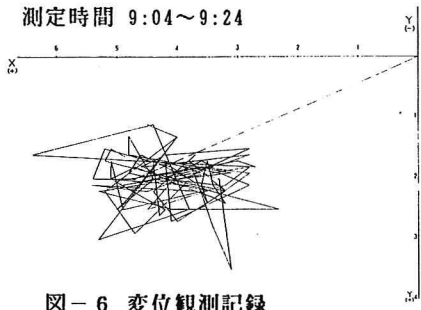


図-6 変位観測記録



図-7 変位観測記録

ンシットの最初のよみをゼロ点としている。それに対して後者の場合は、計測の前日に係留避泊対策を終了した時点（ロープを張り終えた時点）でのトランシットのよみをゼロ点としている。そのため、このような差が生じたものと考えられる。つまり、8月に行なわれた2回の計測では、ロープが伸びたのでFDがドリフトしてから点をゼロ点としているため、結果的には初期張力が作用している条件に近いといえることができる。

表－8 観測時の風速、波高
およびFDの諸元

	8月18日	8月29日	9月26日	10月5日	
風速(平均風速)	11.0m/s	11.9m/s	11.1m/s	17.0m/s	
風 向	200°	200°	160°	110°	
波 高	0.30m	0.50m	0.50m	0.50m	
周 期	3.5s	5.4s	4.4s	6.2s	
波 向	0°	0°	0°	0°	
吃 水	2.49m	2.72m	3.32m	1.00m	
重心(海底面計)	9.90m	10.45m	11.20m	11.10m	
排 水 量	4964t	5422t	6180t	1940t	
K G	6.89m	7.67m	8.80m	6.60m	
風圧レバー長	3.40m	2.76m	~1.70m	1.50m	
風圧力面積	X Y	993.13㎡ 357.37㎡	970.94㎡ 378.85㎡	950.90㎡ 430.08㎡	900.00㎡ 270.00㎡

表－9 観測時の最大最小変位量

日付	風向 deg	風速 m/s	波向 deg	周期 s	波高 m	X変位（m）		Y変位（m）	
						MAX	MIN	MAX	MIN
08/18	200	11.0	0	3.5	0.30	0.3	-2.2	1.8	-0.6
						2.1	-2.4	1.2	-1.4
08/29	200	11.3	0	5.4	0.50	1.6	-1.2	1.5	-1.1
						1.9	-1.1	0.9	-0.7
09/26	160	13.1	0	4.4	0.50	6.7	2.4	0.3	-2.6
						8.5	1.9	0.7	-3.5
10/05	110	17.0	0	6.2	0.50	6.4	2.8	3.5	1.1
						6.2	2.1	2.4	0.3

表－10 計算結果

日付	風向 deg	風速 m/s	波向 deg	周期 s	波高 m	サージ(m)		スウェイ(m)	
						MAX	MIN	MAX	MIN
8/18	200	11.0	0	3.5	0.30	6.7	3.9	-1.0	-1.6
8/29	200	11.3	0	5.4	0.50	7.5	4.3	-1.9	-2.8
9/26	160	13.1	0	4.4	0.50	9.4	4.6	0.8	0.5
10/05	110	17.0	0	6.2	0.50	7.2	5.8	2.6	1.9

4. 4 観測時の条件に対する動揺計算

1) 計算条件、風圧力および波力

4つの台風における観測時の条件に対して、6,000トンFDの動揺計算を行った。

2) 係留索の特性を非線形（柔らかな特性）としたとき

新しい繊維索を使用する場合、または、係留時にやや弛緩状態で係留するときには、図－4に示す曲線のような変位復元力特性を示す。しかし、長期にわたって使用し、かつ、30～40%のひずみを与えられたナイロンロープなどの繊維索や、または、それらの係留索にこれに相当する十分な初期張力を掛けた場合には、係留索の変位復元特性は図の直線のようにになると考えられる。観測時においては係留索が新しく、また、十分な初期張力を掛けることができたとは思えないという現場の報告があるので、観測時における係留索の変位復元力特性は図－4の曲線のものであり、かつ、初期張力ほとんど作用していないものとする。

動揺量を観測値と計算値の比較すると8月18日、8月29日の2回の観測値が計算値に比較して小さい。これは、前の項で示したように、ゼロ点のとりかたの差によるものであると考えられる。そこで9月26日、10月5日の動揺量の観測値に着目してみる。観測値はX軸、Y軸の二次元のため、ねじれや回転による動揺は考慮されていないが、計算値とはほぼ似かよった値を示しており、計算により動揺量の把握ができていといえる。

5. 検討結果のまとめ

以上のように6,000トンFDの避泊係留の検討を行い、係留計画を提示し実行した。また、平成2年8月～10月にかけて来襲した台風のうち4回について強風下における6,000トンFDの動揺観測を行い、また、この条件に対する動揺計算を実施し、それらの結果を比較検討した。その結果以下のことが言える。

- ① 6,000トンFDは、ナイロンロープ14本係留を行えば風速40m/s程度の条件までは安全に係留できるものと考えられる。
- ② 係留索の変位復元力特性を新しいナイロンロープのものとし、初期張力を0tfとして得た結果と現地観測結果とを比較して検討したところ、現地観測値とよく合った。
- ④ 風速40m/sにおいては、係留索の初期張力が0tfのとき、FDの動揺量はサージで最大30m前後になることがわかった。
- ⑤ FDの避泊係留において動揺量をこれより小さくするとすれば、各係留索に初期張力を与えることが望ましい。適切な初期張力の値は今後検討しなければならないが、実際にはFDにおいては係留初期張力を適切に与えることは困難であることを考えれば、非線形な係留索の変位復元力特性を考慮して行った動揺計算から得られた動揺量を考えておかねばならない。

6. あとがき

本調査における避泊係留時のFDの動揺計算は、沖縄総合事務局平良港工事事務所の依頼で港湾技術研究所構

造部海洋構造研究室が実施したものである。また台風時の動揺観測は沖縄総合事務局平良港工事事務所が実施したものである。調査は係留計画、動揺計算、現地観測からなるが、本報告を取りまとめるに当たって、沖縄総合事務局平良港工事事務所から、係留時の自然条件等に関する資料および現地観測結果を提供戴いた。また、佐伯建設工業（株）からFDの諸元等に関する資料ならびに現地観測における協力を戴いた。ここに記して心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 善見政和、山口良永、上田茂：平成元年度全国港湾技術報告会、大型フローティングドック（FD）の台風避泊対策、1989.12
- 2) 上田茂：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究、港湾技研資料、No.504, 1984.
- 3) 上田茂、白石悟：大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究（第2版）、港湾技術研究所報告、第19巻第3号、1980.9