

メガフロート実証実験用浮体の係留設計

Design of mooring facilities for Mega-float demonstration experiments

関田 欣治*・大久保 寛**・池上 国広***・佐藤 千昭****

Kinji Sekita, Hiroshi Okubo, Kunihiro Ikegami, Chiaki Sato

The demonstration experiments on Mega-float off Oppama at Yokosuka has been completed in winter of 1998. There two kinds of mooring devices on mooring dolphins were adopted. Basically a rigid type mooring device is considered so that the Mega-float responds small against the wave and wind. However the sufficient breakwaters were not provided for creating a calm sea, the slack mooring system combined with a rubber damper and two lines of rubber mold chains was mainly used., while the rigid type device was used during two weeks in calm season. The paper describes the design for these mooring facilities, such as design loads, motion response along with results measured and the enhancements carried out.

Key words: large floating structure, mooring facilities, field experiments

1. はじめに

横須賀市追浜沖で実施されてきたメガフロート実証実験 (Ohkawa1996) は 1998 年 3 月に完了する運びになったが、本実証実験用浮体はドルフィン上に設けた 2 種類の装置により係留された。

一つはゴム防舷材とゴムモールドチェーンを組み合わせた緩係留方式である。これは 5000m 規模の浮体を想定すると実証実験は約 1/15 縮尺模型実験といえ、実機級の波高を考えると実験海域の海象が厳しすぎることになること、および既設の東防波堤を利用するため防波堤の一部に沈下や欠損があり、さらに浮体配置上、端部側に開口部が存在し防波堤で完全に囲いこめなかったことから採用された。大半の期間は上記係留装置で実証実験は行われたが、比較的静穏な海象状態が予測される期間メガフロート係留装置として有力な変位拘束型のものも用いられた。これら二つの係留装置

は 300m 長の浮体に対するものであったが、防波堤の欠損部の取り扱い等今後のメガフロートの係留の安全性の考え方に多くの示唆すべき点があるので長周期変動荷重や波浪に対する応答解析、実施した設計、および一部拘束係留に関する現地での結果やうねり対策を述べるものである。

2. 自然環境条件

係留設計で考慮した自然環境は潮位 H.W.L.(1.9m)と L.W.L.(0.0m)とし、全方向から流速 1 m/s の流れ、同じく全方向から風速 25m/s の風、さらに波浪である。波浪は実測された風速データに基づき設定された設計風速 (20 年再現風速) より予測された東側防波堤周囲の異常時波浪 (沖合波) を用いて、図-1 に示す東岸岸壁と東防波堤で囲まれた浮体の設置される港内の波高を

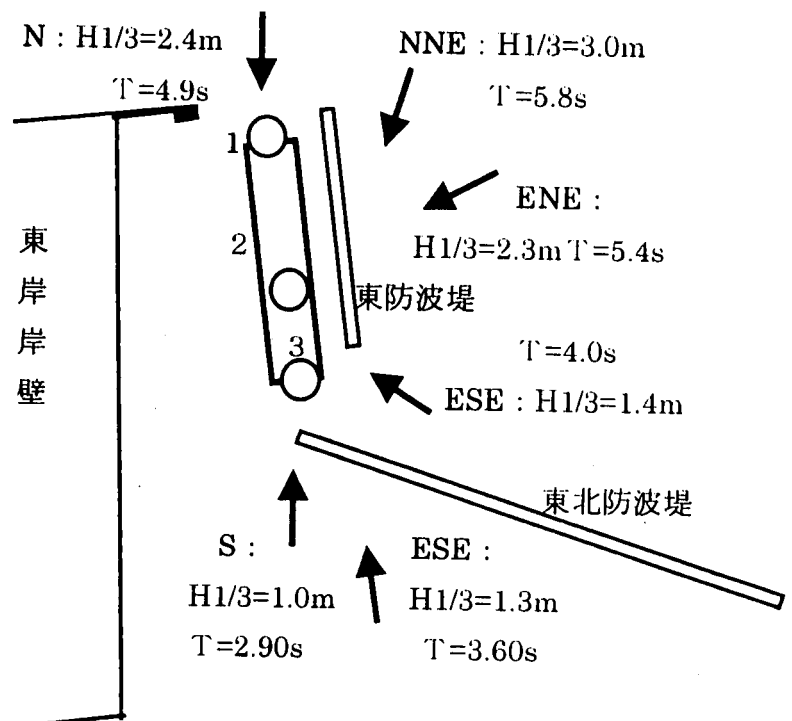


図-1 実験海域の沖合い波高 (20 年再現波)

* 正会員 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科

** 正会員 新日本製鉄(株) 鉄構海洋事業部 建設・技術部

*** 三菱重工業(株) 技術本部 長崎研究所

**** メガフロート技術研究組合 第一研究部

越波や回折、反射を考慮してを推算した。図中の波高は再現期間20年に相当する主な方向の沖合波である。また、港内の水深は3.3から9.0mである。港内波高は図-1に示す浮体設置点の北側(No1)、中央(No2)二地点で東防波堤の天端高を考慮して越波伝達波を推算し、南側(No3)地点は若干減衰した沖合波そのものとしている(表-1参照)。

また、N方向波は北側の開口部から浸入する沖合波が浅水変形したものであり、浮体にとってはNNWからの波浪が浮体の0°方向に相当するが、ここではN方向の波浪が0°方向から作用するとして以下検討する。また越波算定にあたって防波堤高、水深、波高等の関係で与えられる波高伝達率(Goda1969)を用いて推算した。東防波堤マウンドの高さは追浜造船所防波堤損傷状況調査表から決定し、水深は防波堤前面水深8.5mに、潮位を加えた。

3 係留設計

3. 1 係留装置の配置と選定

係留施設は施工性、工期等の理由で杭式のドルフィン構造とし、その配置に関しては造船所港内であり船舶の航行を少しでも阻害しないよう、また、海象特に横波(270°)に対しゴムモールドチェーンが常に張る側になるよう配置した(図-2)。すなわち、横方向係留は東防波堤側に平行に3基ドルフィンを設置し、縦方向係留は浮体ユニットの設置工事を考慮し、南側に1基設置した。なお1年目は浮体4ユニットで構成される部分模型浮体(200m長40m幅)を南側のB,C,Dドルフィンの3基で係留した。

3. 2 浮体主要目

浮体は1年目の200m長、幅40mの部分模型浮体と2年目以降の完成時全体模型浮体とがあるがここでは全体浮体の主要目を以下示す。

寸法： $L \times B \times D \times d = 300\text{m} \times 60\text{m} \times 2\text{m} \times 0.5\text{m}$ 重心： $KG = 1.0\text{m}$ 、
排水量： $W = W_{0LB} = 9225\text{tf}$ 水線面積： $A = 18000\text{m}^2$ 浮心： $KB = 0.25\text{m}$
横バネ定数： $BM_T = 600\text{m}$ ($GM_T = 599\text{m}$) 縦バネ定数： $BM_L = 15000\text{m}$ ($GM_L = 14999\text{m}$)
復原力： $(\text{heave}) k_{33} = 18450\text{tf/m}$, $(\text{roll}) k_{44} = 5.53 \times 10^6\text{tf} \cdot \text{m/rad}$, $(\text{pitch}) k_{55} = 1.38 \times 10^6\text{tf} \cdot \text{m/rad}$
回転半径： $k_{xx} = 17.4\text{m}$, $k_{yy} = 87.0\text{m}$, $k_{zz} = 88.7\text{m}$

3. 3 係留ドルフィン

係留ドルフィンは図-3にあるように天端高5.5m、重量880または730t重の上部コンクリートを頭部とし、外径1400mm板厚25～16mmの鋼杭(材質SKK490及び400)4本から成る直組杭ドルフィン形式である。浮体と上部コンクリート間には係留力のうちの圧縮に抵抗するゴム防舷材を1基、引張りに抵抗するゴムモールドチェーンを2条取りつけた。一方、変位拘束型係留はゴムモールドチェーンを緩めて上部コンクリート側面にある係留ポストと浮体間を係留フレームで接続するものである。防食

表-1 東防波堤で囲まれた地点の設計波高 (H.W.L1.9m)

波向	No 1 H1/3	No 2 H1/3	No 3 H1/3	平均 H1/3	周期 T1/3
270° (ENE)	1.4m	1.1m	1.9m	1.4m	5.8s
315° (NNE)	1.35m	1.0m	1.95m	1.3m	5.9s
0° (NNW)	1.6m	1.1m	1.4m	1.5m	4.9s

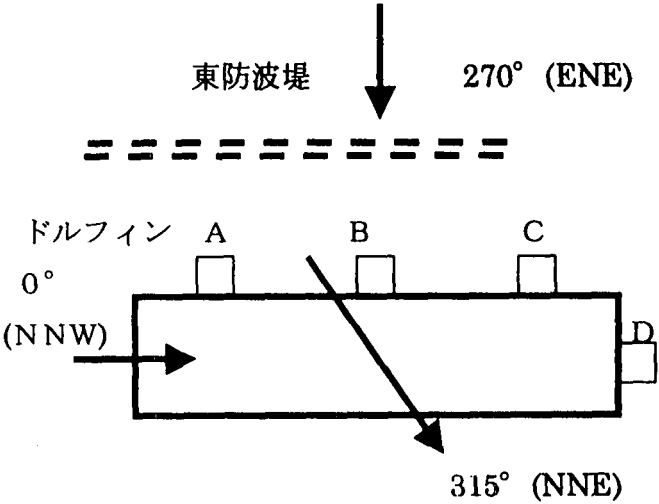


図-2 係留ドルフィンの配置

表-2 組み杭式ドルフィンの特性

ドルフィン	水深 (m)	ばね定数 (tf/m)	許容/破壊 水平荷重 (tf)
A	-9.0	1625	230 /367
B	-7.0	3058	196 /361
C	-5.0	2648	323 /426
D	-3.0	2692	248 /362

は杭にエポキシ塗料(300 μ)が施された。

ボーリングによって得られた地層は、様でなく、表層がN値 5 程度の粘性土または 10 程度の砂質土からなり、海底から 5～9m に岩盤が存在する。

検討荷重としては浮体接岸時荷重、けん引時荷重、合田式による波力、自重、浮力、係留力とし、地盤抵抗をバイリニアールばねとして構造解析を行い、部材断面を設定した。杭は支持層へ 1.5m 以上根入れされ、支持力は安全率を異常時（押込み 1.5、引抜き 2.5）とし算定し、部材の許容応力度を接岸、けん引時は 1.5 倍割増した。

解析の結果得られた微小変形時のばね特性、杭の引抜き、もしくは応力が許容内になる限界の許容荷重、および、それぞれが杭の極限引抜き支持力、もしくは引張強さになる破壊荷重を表-4 に示す。

3. 4 ゴムモールドチェーン

ドルフィンに作用する引張荷重を分担するため、直径 68mm、破断荷重 (BL) 357tf チェーンを 2 条使用時に安全率 (SF) 3 になるよう許容引張力(T_a)119tf/条と定め、さらに衝撃力を抑制するためゴムモールドチェーンを使用した。図-4 は長さ 10m のゴムモールドチェーンの張力(T)—伸び (δ) 特性であり、実際の数値シミュレーションにはさらに自重影響と初期張力を考慮するため、H.W.L、L.W.L それぞれに対しこの非線型 $T-\delta$ 特性を軸剛性とするカテナリー解析を行い、得られた $T-\delta$ 特性を用いた。

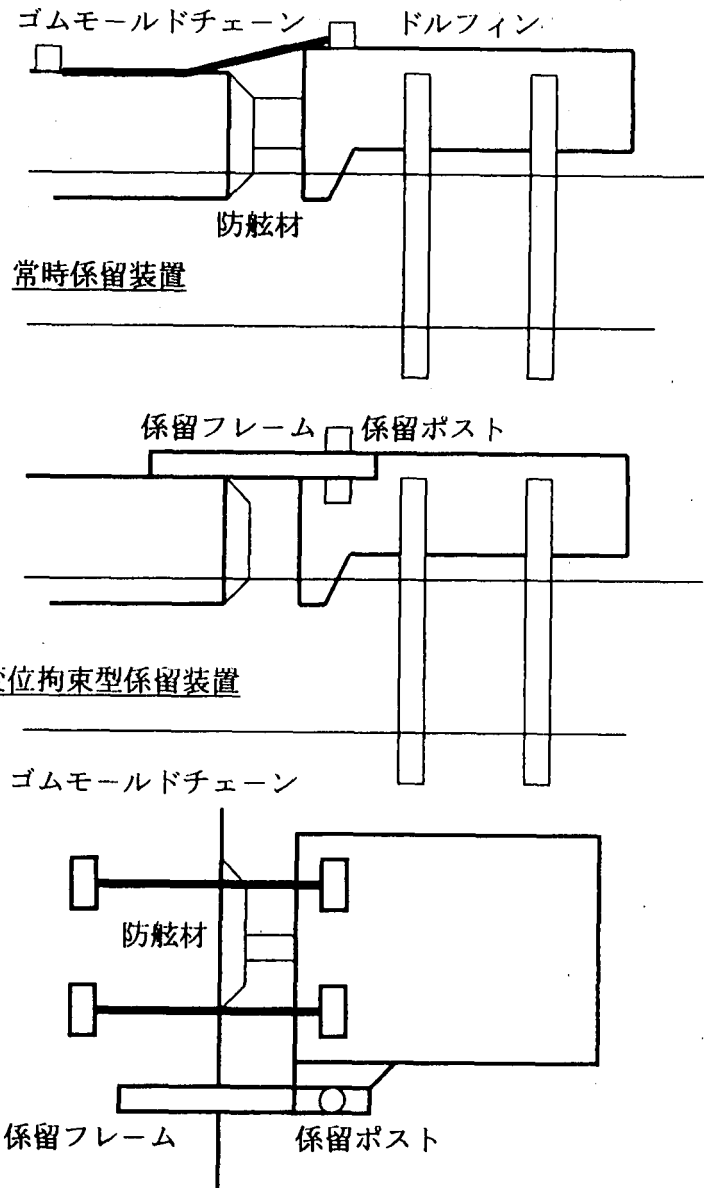


図-3 二種類の係留ドルフィン

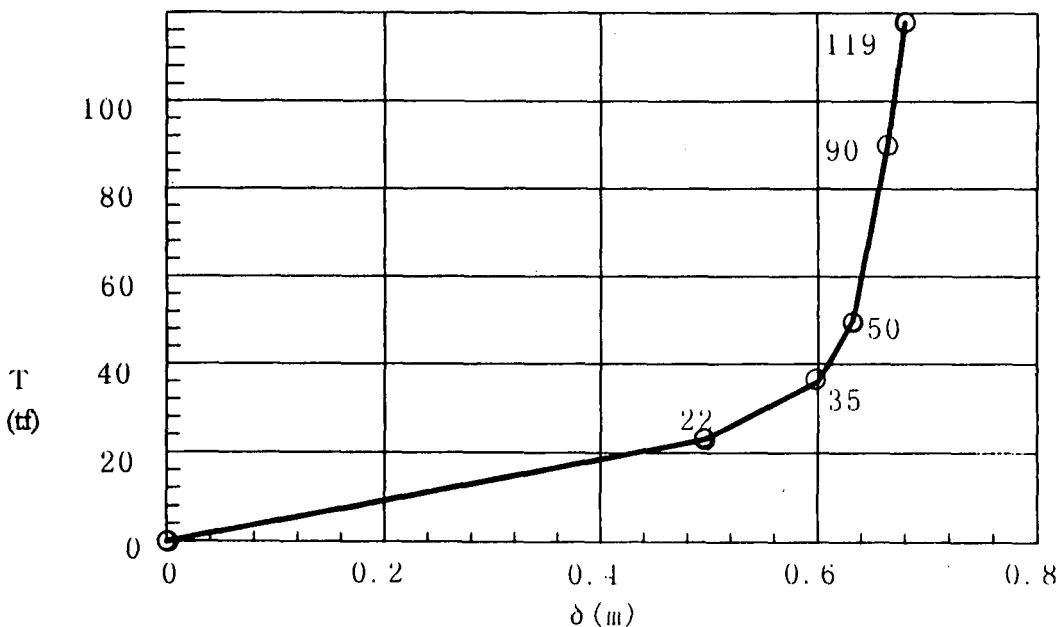


図-4 ゴムモールドチェーン (10m 長) の $T-\delta$ 特性

3. 5 定反力型ゴム防舷材

定反力型ゴム防舷材は大変位時における係留力を比較的小さく押さえることができるので、150tf 反力/サイズ 1600(RH)を使用した。この防舷材の復元特性は立ち上がりの約 10%歪みの間はばね定数がほぼ 625tf/m と線形的に反力が増加し、20%～52.5%までは概ね一定の反力 140tf を保持し、55%歪みで 151tf、60%で 250tf と急激に反力が増加する特性となる。

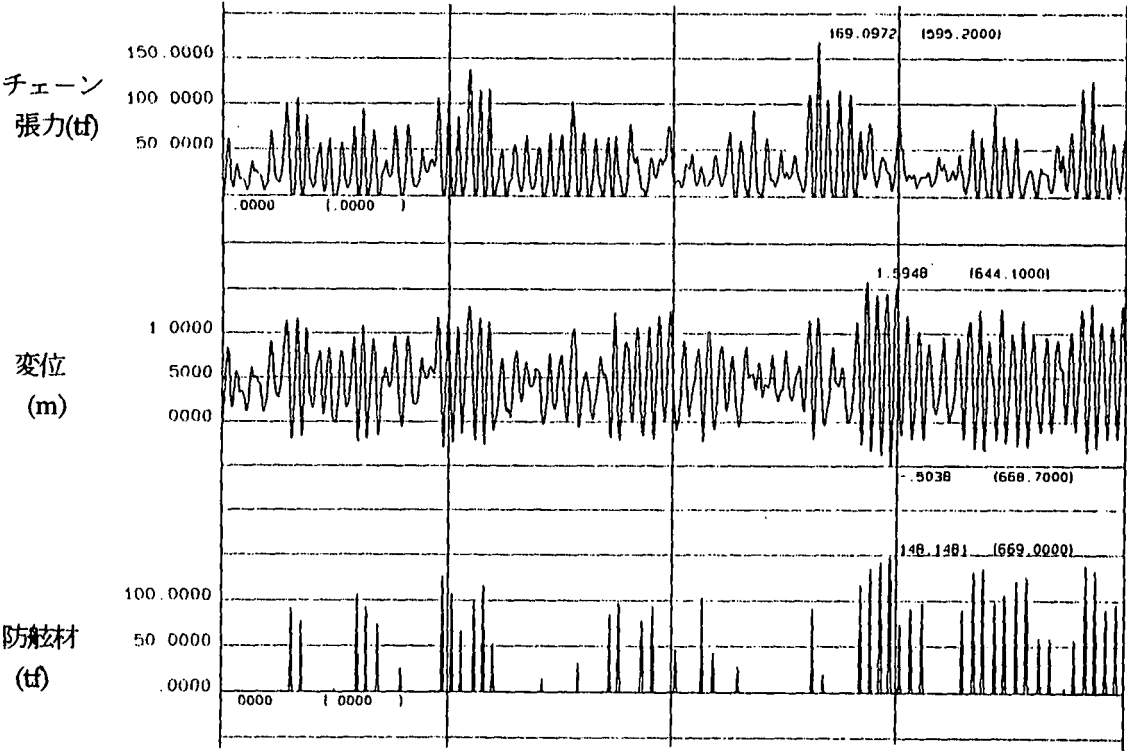
4. 数値シミュレーション

4. 1 荷重

主要な外力となる波浪及び、風と流れとの荷重の組合せについては表－3に示すように係留系に厳しい条件とし、これらの荷重に対して浮体の運動に関する時間領域の数値シミュレーションを実施した。定常力は流れ、風、定常漂流力をまた、変動荷重としては波浪強制力、変動波漂流力を考慮した。最大の荷重となる波漂流力については領域分割法で求めた 0 秒から 100 秒の周期に対する波漂流力係数から Hsu の方法(Hsu1970)により時刻歴荷重を作成した。また、前述の表－1 に示した東防波堤からの越波や開口部分からの通過波による浮体 No1、No2、No3 地点での波高が異なるため、横波 (270°) でも浮体に yaw モーメントが発生する。波浪強制力は波高分布、漂流力は波高の 2 乗分布を考慮して yaw モーメントを算定した。表－3 に得られた定常力及び、変動力の最大、最小値を示す。

表－3 全体浮体に作用する荷重

ケース	条 件	定 常 力			最大・最小変動力		
		$F_x(t_i)$	$F_y(t_i)$	$M_o(t_i)$	$F_x(t_i)$	$F_y(t_i)$	$M_o(t_i)$
270 ° (ENE)	H1/3=1.0m (5.8S) v=25m/s(270°) Vc=1m/s(270°)	0.	62.7	335.4	0.	327.1～ -337.1	2783.7～ -2832.9
315° (NNE)	H1/3=1.3m (5.9S) V=25m/s(270°) Vc=1m/s(270°)	4.3	66.6	0.2	32.9 ～ -29.6	169～ -129.6	2920 ～ -2936
0 ° (NNW)	H1/3=1.7m (4.9S) v=25m/s(0°) Vc=1m/s(0°)	18.4ti	0.	0.	106.0 ～ -107.4	0.	0.



図－5 横波中における C ドルフィン位置の変位・係留力応答

4. 2 解析法

時刻歴シミュレーションでは剛体浮体6自由度の運動方程式に係留点におけるドルフィンのばね特性とゴム防舷材およびゴムモールドチェーンの荷重・変形特性とを合成した復原力を、それぞれ押し側、引き側に加え、浮体の運動、ドルフィンの変形及び係留反力を求めた。解析時間は900秒とし、この間の応答結果の平均値及び分散値より、極大値の発生をレーリ分布に従うと仮定し最大値(1/1000期待値)を推定した。なお、減衰は造波減衰のみとした。

図-5は横波中(波高1.4m、周期5.8s)における解析した時刻歴応答の一例であり、上からCドルフィン位置の変位、防舷材及びチェーンの係留力であり、sway固有周期に相当する約12秒の周期で振動している。ゴム防舷材には150tf程度の圧縮力が、ゴムモールチェーンには180tf程度の引張力が発生している。

4. 3 限界波高

上に述べたように、20年確率波に対しては1600RHのゴム防舷材では歪みが大きすぎ、大型の使用も考えられたが、経済性等を鑑み海象が限界を超えることが予測される場合実証浮体を避泊させることを前提に、風や潮流の条件は20年確率のままで、波高は再現期間の短いものを限界条件とすることにした。

限界条件は前述のドルフィンの許容水平荷重、ゴム防舷材の限界歪とゴムモールドチェーン許容引張力(119tf*2条)のいずれかが許容値を超える条件とした。防舷材の歪はもっと小さく押さえるたかったが、実験期間が短いこと、また、実際には常に歪を監視できるので60%とし、何かあれば運用上対応することにした。

表-4 係留限界波高(網掛けは最大のもの)

H1/3 (波向)	ドルフィンA		ドルフィンB		ドルフィンC		ドルフィンD	
	反力 (tf)	張力 (tf) ／歪 (%)	反力 (tf)	張力 (tf) ／歪 (%)	反力 (tf)	張力 (tf) ／歪 (%)	反力 (tf)	張力 (tf) ／歪 (%)
1.4m(0°)*	0	0	0	0	0	0	160	58/50
1.2m(315°)	213	145/50	170	100/45	241	126/42	200	54/54
1.2m(270°)	154	86/37	142	72/29	315	200/60	0	0

(注*: 上から15年、10年、3年再現確率に相当する)

5. 変位拘束型係留

変位拘束型係留装置(メガフロート技術組合、平成10年)は係留ドルフィンA,C及びD上に設けられ、変位を抑えようとする剛係留方式のものである。これは、前掲の図-3に示した様にドルフィン上に別途設けられた係留ポストを浮体側と海側からローラーで挟むようにして浮体を係留するものである。全体が係留フレーム構造となり接続部には緩衝材を設ける。浮体の変位を抑制したい場合、本装置における上下動揺を解放するためのローラーの代わりに、2つのゴム防舷材が大型ポストを若干クリアランスをもって挟む類似のガイドフレームゴムフェンダー方式が有望とされており、これを想定したものである。

実験は1998年1月の2週間にわたって行われ、拘束ばね定数が325と650tf/mの2つと、ポストとローラー間にクリアランスを設けるか否かを条件に係留力や水平動揺を測定した。

この期間の波浪は有義波高が45から15cm、有義周期も4から2.5秒であった。最大の反力は4.2節で述べたように通常時の緩係留の場合と同様Cドルフィンで発生し、最大32tfであった。一方、AドルフィンはCドルフィンに比べ概ね70%程度以下の反力であった。また、北風をともに受けるDドルフィンでは最大で19.9tfであり、Aドルフィン程度であった。なお、最大値は4.2節と同様30分間のデータを統計解析し予測したもので、得られた分散値の約8倍相当である。

運動についてはswayの最大は30mm、yawは1分であった。全期間のswayの波浪応答(有義値(mm)/有義波高(m))を図-6に示すが、両ばね定数の場合もゼロクロス周期に対して線形的に増加しており、当然のことであるが硬いばねの場合の方がsway応答は小さい。なお、swayの固有周期は硬いばね、柔らかいばねそれぞれで5.5秒、7.6秒であり、yawの固有周期もそれぞれ4.7秒、6.7秒であり、硬いばねの場合波浪と同調する可能性が高い。したがって、一番長かった有義波周期3.9秒であった海象に対する応答解析を行った結果、実測、解析とも若干同調の影響がみられ、防波堤内の波浪条件、特に波向がこの種の解析を行う精度としては十分でないので正確に言い難いが、ほぼ斜波であったので波向60°とする解析結果と比べると比較的合う。クリアランスの影響については20cmと小さいこと、加えて波高も小さいためか顕著に見られなかった。実験期間の海象ではロードセルの反力には衝撃的なものは認められず、ほぼ波浪周期で応答し、係留装置として特に問題はなかった。

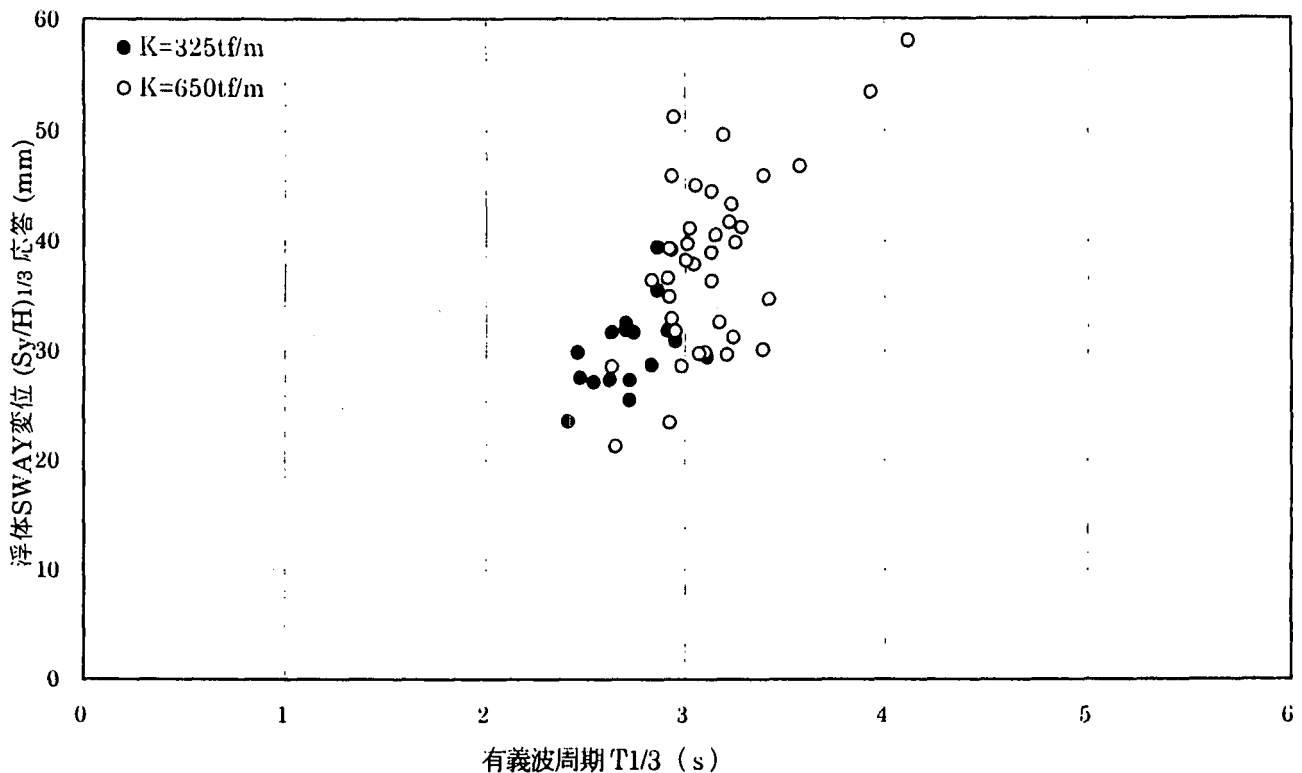


図-6 sway の波浪応答 (有義値/有義波高)

6. 現地での対策

実際の設計と実証実験の期間に発生した現象との乖離はいくつか報告 (メガフロート技術組合、平成 10 年) されており、詳細については今後発表されるものであろう。概略述べると、潮流は設計条件より 60% 程度と小さく、逆に風は 25m/s に対し平均風速 30.9m/s を記録したこと、沖合波、港内波とも同程度の風波であったものの、南からのうねりで有義波高約 50cm が観測された。これは低気圧や台風の通過により生じたうねりが外洋から東京湾内に侵入したもようであり、周期は 10~15 秒であった。そのためゴム防舷材には係留系固有周期との同調により、最大 175tf に達する反力が生じた。これは特に高潮位でゴムモールドチェーンの係留特性が緩くなり、固有周期が長くなったためであったので 2 条のゴムモールドチェーンの中間部を別のチェーンで絞り引き寄せ、係留ばね特性を硬めに変更し対応した。その結果、うねりに対し係留力が低下する事を確認できた。

なお限界波高を設定したが、全期間にわたり、避泊を促すような係留限界には至らなかった。

7. まとめ

実証実験のための係留装置に関する設計は今後のメガフロートの係留安全性評価の検討に生かせると思われるので、設計の考え方、長周期変動荷重や波浪に対する応答解析、実施した設計等を概略述べた。

また主として用いた緩係留方式はもちろんのこと、拘束型係留方式も予定通り機能した。緩係留方式ではうねりに対し当初の予想と異なった点もあったので、現地で対応した結果を報告し、加えて、拘束型係留方式では一部現地での計測結果が概ね解析結果と一致することを示した。

係留についてはここで述べた他、地震計測および耐震検討もなされており、現在、計測されたデータとの照合により係留設計技術に関する厳密な評価が精力的になされている。この段階でも、全体としては設計の考え方に大きな変更もなく、大規模浮体の係留のため十分安全で妥当なものであると検証されたものとする。

最後に、ここで報告した内容はメガフロート技術組合の研究の一環として行われたものであり、多くの関係者の協力でなされたものであり、このことを感謝し付け加えておきたい。

参考文献

- 1) Ohkawa, Y. : Concept and Outline of Mega-float, Inter. Workshop on VLFS, Hayama, Japan 1996
- 2) Goda, Y. : Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Rept.PHRI, Vol.8, No.3, 1969
- 3) F.A.Hsu and K.A.Blenkarn: Analysis of peak mooring forces by slow vessel drift oscillation in random seas, Paper OTC1159, 1970
- 4) メガフロート技術組合 : 「係留全体システム解析計算報告書」、平成 10 年
- 5) メガフロート技術組合 : 「大型浮体モデル実験報告書」、平成 10 年