

港湾開口部に適用したフレキシブルマウンド (FLM) の消波効果と安定性

田中正博*・源波修一郎**・堀 哲郎**・佐藤 博***

1. 緒 言

著者らは、波浪や漂砂の制御機能のみならず、美観・景観を損なわず、また人々が構造物の近傍海域でも安全に利用できるフレキシブルマウンド(以下、FLMと略称する)と称する膜構造の消波堤を考案した。これまでの一連の模型実験および理論解析により、FLMによる消波メカニズムおよび消波特性について明らかにすると共に、FLMが実用的な波浪制御構造物であることを確認した(Tanaka et al., 1992; 大山ら, 1988; 宇多ら, 1991)。その実用性に加え、景観上および静穏時のすぐれた機能が評価され、FLMは長崎県のハウステンボスと称するテーマ・パーク(1992年開園、以下、HTBと略称する)の港湾開口部に非常時用の消波堤として適用された(田中ら, 1992)。これは、静穏時には船舶の航行の支障とならないようにFLM袋体を海底に倒伏させておき、暴風時に袋体を起立させ消波構造物として機能させる新しい使用方法である。設置後のFLMの消波効果と構造物の安定性を確認するため、1992年と1993年の台風時期を中心にそれぞれ4ヶ月間、港内外の波浪とFLMの各部材に作用する応力について現地観測を実施した。1993年8月に来襲した台風7号は設計の波浪条件と同等以上の波浪もたらし、現地観測の目的が達せられた。

本論文は、台風7号による港内外の波浪観測結果、FLMの各部材に作用する応力およびFLMの安定性について報告するものである。

2. 現地観測の方法

港の開口部に設置したFLMの配置は図-1に、また、その構造・寸法は図-2にそれぞれ示すとおりである。FLMによる消波効果を確認するため、港外に1基(波高計1)、港内に2基(波高計2, 3)を設置した。波高計1および2は、自記録機能を有する超音波式波高計(型式URM-1:協和商工製)で、内蔵電池で作動する。2つの超音波式波高計は予め海底に設けた取付け架台に、受

感部がほぼ海底面(L.W.L.で5mの水深)と一致するように取付けた。また、波高計3は容量式波高計で、図-1に示した南防波堤の先端から約5mの港内側に取付けた。波高計3の観測データは後述するひずみと共に南防波堤の先端の灯台小屋内に設置したデータ記録装置に1時間毎に10分間収録した。

一方、袋体、鋼殻構造の基礎架台および杭基礎に作用する応力を把握するため、図-3に示すように、それぞれ、4, 3, 18点のひずみゲージを取付けた。ひずみはいずれも、静穏時にFLM袋体を起立させバランスを取

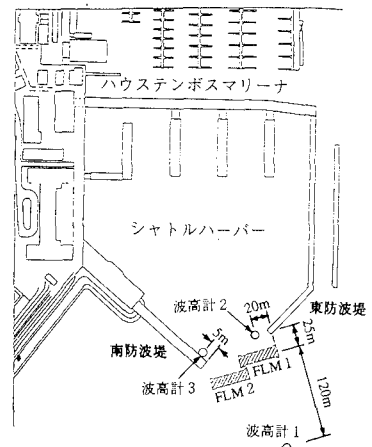


図-1 FLMの配置と波高計の位置

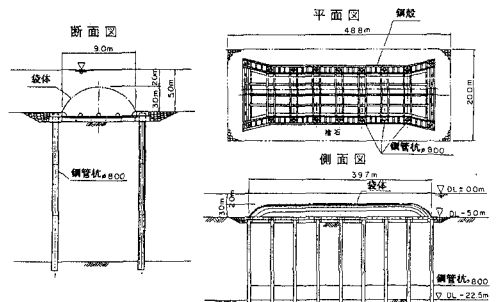


図-2 FLMの構造と寸法

* 正会員 工博 清水建設(株)技術研究所
 ** 正会員 清水建設(株)海洋開発ENG.部
 *** 正会員 清水建設(株)大阪支店土木技術部

りゼロ点とした。

観測は、1992年と1993年の台風の来襲が予想される6月から10月にかけての約4か月間実施した。ただし、超音波式波高計は電池の寿命とデータのメモリ容量の制約上、設置から約2か月後に電池の交換とメモリからのデータの掃き出しを行なった。観測の頻度と時間は、波浪とひずみ共に毎正時の前10分間(例えば、1時の観測は0時50分~1時)とした。

3. 消波効果の確認

(1) 台風7号の風向・風速

1993年の観測期間中、長崎地方には3つの台風が来襲し、HTBの西側を通過した台風7号が南風により港湾に大きな波浪をもたらした。台風7号による8月10日の3時から10時までの10分毎の最大風速および平均の風向と風速を図-4に示す。ただし、これらの結果は、HTB内のシンボルタワーに設置した風速計(地上100m)で観測されたものである。HTBの港の開口部はSSEに面しているの、港内に厳しい波浪をもたらすのは、SE~S方向からの強い風である。SE~S方向からの風は4時半から8時であり、この間、風速は4時半から急激に増加し5時に最大となり、その後次第に低下している。したがって、5時から8時までの風が港の波浪に厳しい条件となる。

(2) 欠測波浪データの補足

観測データの解析は、台風7号がHTBに接近した8月10日の3時から10時までの7時間(8回分の観測)を対象とした。超音波式波高計で観測したデータのうち、急激に風速の増大する5時から7時の3回のデータはノイズが極めて多く利用不能であった。記録波形から判断して、碎波の発生により水中に多くの気泡が巻き込まれ、不正確なデータになったと思われる。そこで、これら3時間の港外波浪データについては、Bretschneiderの方法(例えば、水理公式集, 1985a)により推算した。

図-4に示した地上100mの風速 U_{100} から求めた地上10mでの8月10日3時から10時までの1時間毎の風向・風速 U_{10} および各時刻の風向に対応した開口部の前面海域のフェッチを表-1に示す。風速は次式で換算した(例えば、港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1979)。

$$U_{10} = U_{100} \left(\frac{10}{100} \right)^n \dots\dots\dots (1)$$

ただし、HTBの地上近傍2箇所での実測値より、 $n=2/13$ とした。表より、4時から8時の平均風速は14~26m/sであり、毎時の風向に対応するフェッチに対し風波が完全に発達するために必要な吹送時間 t は表-1の右端欄に示すように0.5~1.3時間である(SMB法: 例え

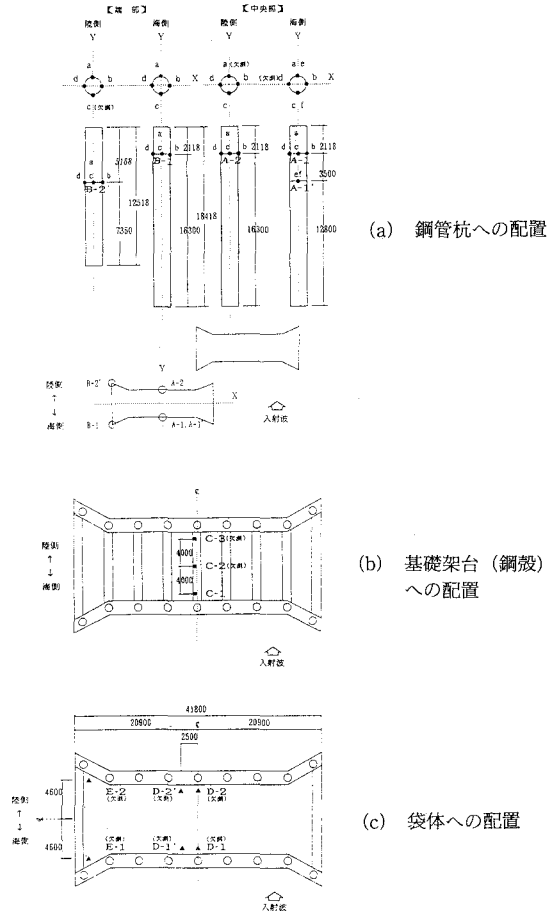


図-3 ひずみゲージの取付け位置

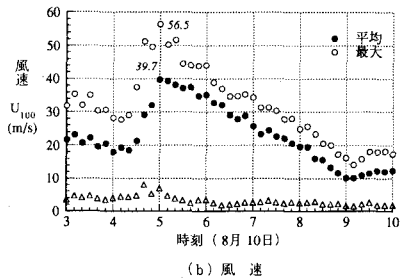
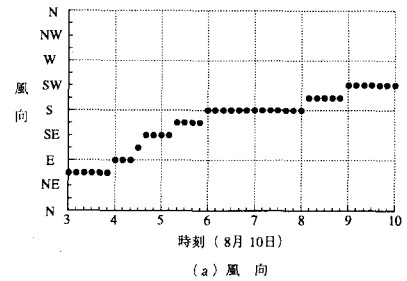


図-4 台風7号(1993年)の風向と風速

ば、水理公式集, 1985 b). Bretschneiderの方法は、定常風域内の風波の推算であるが、台風7号の場合、4時から5時を除けば1時間毎の風向と風速はほぼ一様であるので、Bretschneiderの方法により風波を推算することができる。

8月10日4時から9時までの1時間毎の港外の有義波高 $H_{1/3}$ の計算値と、4時、8時および9時における実測値を表-2にまとめて示す。4時、8時および9時における有義波高の計算値は実測値の1.16~1.26倍となっているので、計算値を1.26で除した値を5時から7時の港外の有義波高とした(表-2の右端欄参照)。補正後の推算値は、6時に最大となり1.57mである。これは設計条件 $H_{1/3}=1.34$ mを越える波高である。

ハウステンボスの港湾施設の管理担当者と観光船の乗組員、および清水建設の工事担当者により、8月10日6時前後に波高が最も大きくなり、目視で1.5m程度であったことが確認されており、上記推算値は妥当な結果と考えられる。なお、有義周期はBretschneiderの提案している上記の推算で得られた波高を相当深水波高 H_0 と見なし、SMB法の風波予知曲線(例えば、水理公式集, 1985b)を用いて、 H_0 、 U_{10} およびフェッチ F に対応する周期を求めた。

表-1 台風7号の風向・風速と対応するフェッチ・吹送時間

時刻(時)	風向	風速 U_{10} (m/s)	フェッチ $F \times 10^3$ (m)	吹送時間 t (h)
3	ENE	14.4	1.0	<0.5
4	ENE	14.5	0.9	<0.5
5	ESE	18.7	3.1	0.5~0.75
6	SSE	25.9	8.0	1.1
7	S	20.6	8.0	1.1~1.2
8	S	15.5	8.0	1.3
9	SSW	10.1	7.0	1.3~1.4
10	SW	8.1	1.0	<0.5

表-2 港外波浪の観測値と推算値(台風7号)

時刻(時)	観測値		推算値		補正值
	周期 $T_{1/3}$ (s)	波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)	波高 $H_{1/3}$ (m)	
3	1.98	0.48	—	—	0.48
4	1.87	0.47	2.1	0.59	0.47
5	—	—	3.6	1.50	1.20
6	—	—	4.0	1.96	1.57
7	—	—	4.3	1.63	1.30
8	3.81	0.85	3.0	0.99	0.85
9	3.20	0.42	2.4	0.52	0.42

(3) 波浪データの解析と消波効果

超音波波高計による観測では、5時~7時以外の波浪データにおいても、明らかにノイズと思われるデータが存在したが、すべて除去もしくは補完した。5時~7時の3時間の港内波浪は、容量式波高計(図-1の波高計3)で測定したデータを用いた。なお、SSE方向よりも南側から入射する6時以後の波浪に対し、容量式波高計は南防波堤に遮られる位置になるので、回折に対する補正、および港内の超音波波高計の8時の観測値と比較することにより補正した。

8月10日4時の港の内外の波高記録例を図-5(a), (b)に、また、波のパワースペクトルの比較を図-6にそれぞれ示す。図-5から、港内の波高が港外の波高に比べて明らかに小さくなっていることがわかる。また、図-6から、港内の波浪のパワースペクトルは港外のそれに比べて、周波数0.3 Hz(周期3.3 s)の近傍で著しく低下しており、HTBに設置したFLMの消波対象波浪の条件2.5~4.5 sに対応していることがわかる。

図-7(a), (b)は、超音波式波高計および容量式波高計で観測された港内と港外の有義周期 $T_{1/3}$ および有義波

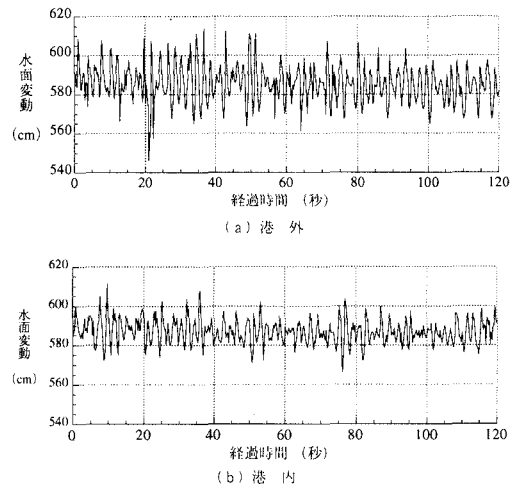


図-5 港の内外の波高記録(8月10日4時のデータ)

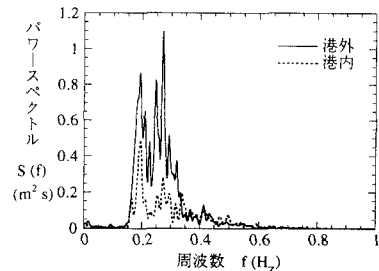


図-6 港の内外の波のパワースペクトル(8月10日4時)

高 $H_{1/3}$ を比較したものである。ただし、FLM は 8 月 9 日の 22 時に起立を完了し、8 月 10 日の 9 時 10 分頃より袋体から排水を始めたので、図中の 9 時までは FLM の起立時の、また、10 時以降は非起立時のデータである。風速が急激に増加し(図-4 参照)、かつ風向がフェッチの長い SE~SSE に変わる 4 時から 6 時にかけて、有義周期も急激に長くなっている。推算データを含む 5 時から 7 時までを除くと、港内で観測された有義周期は港外の結果と同等または若干短くなっている。これは FLM 上で碎波し、高い周波数の波が発生したためと考えられる。

港外の波高は 4 時から 6 時にかけて著しく増加し $H_{1/3}=1.57\text{ m}$ に達しており、その後は 9 時までほぼ一様に減少している。図-4 からわかるように、3 時から 4 時までと 7 時から 8 時までの平均風速はほぼ等しいが、これらの風速によって発生した 4 時と 8 時の波高はそれぞれ 46 cm, 85 cm であり、後者は前者の 2 倍近い波高となっている。これは、表-1 に示したように、3 時から 4 時の風向 ENE に対するフェッチ F が 1 km であるのに対し、7 時から 8 時の場合、風向 S に対し $F=8\text{ km}$ と長いためである。港内波高も 4 時から 6 時にかけて増加し $H_{1/3}=0.7\text{ m}$ になっている。

FLM 起立時の港内の波高は、8 月 10 日の 8 時と 9 時を除き港外の波高の約 1/2 となっており、FLM は期待どおりの消波効果を発揮している。特に、5 時から 7 時の港外波浪は、50 年確率の設計波浪として与えられた $T_{1/3}=3.0\sim 4.3\text{ s}$, $H_{1/3}=1.34\text{ m}$ を越える規模の $T_{1/3}=3.6\sim 4.3\text{ s}$, $H_{1/3}=1.2\sim 1.57\text{ m}$ であったが、港内波高は

港外波高の 0.5 以下になっており、FLM が非常時用の消波堤として十分に機能を発揮することが確認された。

8 時と 9 時における港内波高は港外波高の約 0.6 倍で消波効果が若干低下している。これは、波が FLM に対し斜めに入射(ビデオ映像から、8 時で $30\sim 45^\circ$ と推定された)することによる消波効果の低下(田中, 1994)、また、波が SW~W 方向から入射する場合、南防波堤と No.2 の FLM との間隙から波が進入する等の理由によるものと考えられる。

なお、HTB の港湾施設の管理担当者と観光船の乗組員および現地の工事担当者によって、波浪条件の最も厳しい 8 月 10 日の 6 時から 7 時における港内の波高が港外の波高の 1/2 程度に低下し、FLM により十分な消波効果が得られていることが目視でも確認された。

4. 構造物に作用する応力特性と FLM の安定性

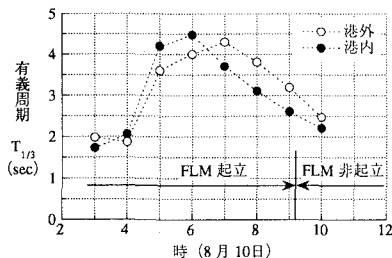
図-3(a)~(c) に示したように取付けたひずみゲージのうち、93 年 8 月の台風 7 号の来襲時までに、袋体に取り付けた 6 箇所全て、基礎架台の 3 箇所のうち C-2, C-3 の 2 箇所、杭基礎 18 箇所のうち A-1-d, A-2-a および B-2-c が絶縁不良のため計測不能となった。

(1) 杭および基礎架台のひずみ特性

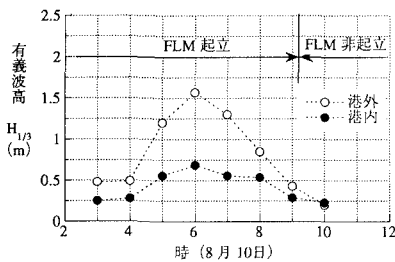
図-8 は、FLM 中央部の鋼管杭で、港外側 A-1 と港内側 A-2 に生じる軸ひずみの時間変化を示したものである。ただし、図の横軸は計測を開始した 8 月 10 日 7 時 50 分からの経過時間 (s) である。

軸ひずみの変動は、全体に港内側 (A-2) の方が港外側 (A-1) よりも大きく、また、圧縮 (一侧) の方が引張 (另一側) よりも大きくなっており、杭に作用する鉛直力は下向き (押し込み) が卓越している。これは、波力実験の結果 (宇多ら, 1991) と符合しており、実験結果に基づいて設計した波力と設計法の妥当性が確認された。

図-9 は、杭 A-1 と基礎架台 C-1 (図-3 参照) の X 軸回りの曲げひずみの経時変化を示したものである。杭のひずみの変動の方が基礎架台のそれよりも大きい。両者の位相は一致しており杭と基礎架台が一体で応答していることがわかる。設計では、杭と基礎架台を剛接合のラーメン構造として解析し構造断面を決定したが、その



(a) 港内と港外の有義周期の変化



(b) 港内と港外の有義波高の変化

図-7 港の内外の周期と波高の比較

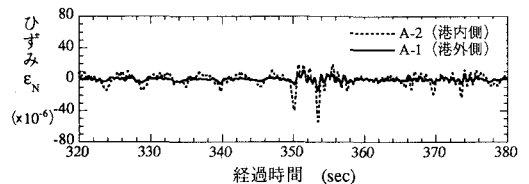


図-8 杭の軸ひずみ (8月10日8時)

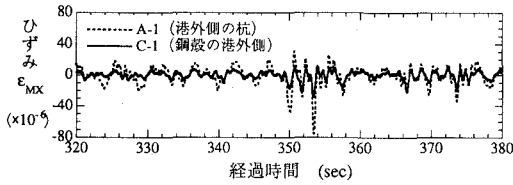


図-9 杭と鋼殻のX軸回りの曲げひずみ (8月10日8時)

表-3 杭に生じる合成力, 押込力・引抜力の比較

部材	項目	観測値	設計値(1)	設計値(2)	許容値
鋼管杭 (A-1)	合成応力度 σ (kgf/cm ²)	350	747	834	1900
	押込力 R_c (tf)	20	32	43	180
	引抜力 R_t (tf)	16	1	-	29
鋼管杭 (A-2)	合成応力度 σ (kgf/cm ²)	628	1190	1190	1900
	押込力 R_c (tf)	81	40	51	180
	引抜力 R_t (tf)	29	27	16	29

注) 設計値(1): 波力によって杭に生じる力(動的な成分)
 設計値(2): 設計値(1)に自重, 付加水圧による力を加えた力

妥当性が検証された。

(2) 観測結果と設計値との照合

設計時の構造解析は, $H_{max}=2.41$ m で $T=3.5, 4.0, 4.3$ s の波浪条件の鉛直波力を上向きおよび下向きに作用させ, 各部材に生じる最大の軸力と曲げモーメントを求めた。鋼管杭に働く合成応力 σ , 押込力 R_c および引抜力 R_t は次式で評価できる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_N + \sigma_{MX} \\ R_c, R_t &= A \cdot \sigma_N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに, σ_N : 軸応力度, σ_{MX} : X軸回りの曲げ応力度, A : 鋼管杭の断面積である。杭に作用する合成応力, 押込力と引抜力の観測値と設計値の比較, および許容値を表-3に示す。ただし, 観測値は8月10日8時に観測された最大波高 $H_{max}=1.28$ m に対する応力を設計最大波高 2.41 m に対する値に換算したものである。また, 表中の設計値(1)は波力によって生じる動的な力, 設計値(2)は設計値(1)に袋体の付加水圧(静水圧)および自重等によって生じる静的な力を加えた合力である。

港外側の杭の引抜力と港内側の杭の押込力で, 観測値は設計値を上回っているが, その他の観測値は設計値を下回るか, 同等である。なお, 観測値が設計値よりも大きくなっている港外側の杭の引抜力と港内側の杭の押込力についても, 許容値内に納まっており, 安全性は確保されている。さらに, 表中の設計値(2)からわかるように, 自重および付加水圧は鉛直下向きに作用するので,

全引抜力は波力によって生じる引抜力よりも小さくなり, 安全上の問題はない。

5. 結 語

長崎ハウステンボスの港湾の開口部に非常時用の消波堤として設置したフレキシブルマウンド (FLM) の消波効果と構造物の安定性を確認するため現地観測を実施した。得られた主な結果は以下に示すとおりである。

- 1) 1993年の台風7号は強い風を伴い, 8月10日5時から7時の港外波浪は, 設計条件 ($T_{1/3}=3.0\sim 4.3$ s, $H_{1/3}=1.34$ m) を越える規模の $T_{1/3}=3.6\sim 4.3$ s, $H_{1/3}=1.2\sim 1.57$ m であった (推算値および目視観測値)。
- 2) 波高の増加した8月10日の4時から8時において, 港内波高は港外波高の概ね1/2になっており, FLMが期待どおりの消波効果を発揮することが確認された。
- 3) 観測された軸力および曲げモーメントから換算した合成応力, 押込力および引抜力は設計値よりも大きいものも一部あったが, 全て許容値を下回っており, 安全性が確認された。

最後に, FLMの現地観測の実施にあたっては, 長崎オランダ村(株)ハウステンボスの施設管理本部の皆様にご支援と資料の提供を賜りました。ここに, 記して感謝申し上げます。

参 考 文 献

Tanaka M., T. Ohyama, T. Kiyokawa, T. Uda and A. Omata (1992): Characteristic of wave dissipation by flexible sub-merged breakwater and utility of the device, Proc. of the 23 rd ICCE, Chap. 123, pp. 1613-1624.

宇多高明・小俣 篤・田中正博・大山巧他 (1991): 実規模模型実験によるフレキシブルマウンドの水利機能の検証, 建設省土木研究所共同研究報告書第56号, pp. 71-84.

大山 巧・田中正博・清川哲志 (1988): フレキシブルマウンドによる反射・透過特性の理論的検討, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 562-566.

田中正博・源波修一郎・奥津宣孝・堀 哲郎・北 直記 (1992): フレキシブルマウンド (FLM) の港湾開口部への適用, 海岸工学論文集 Vol. 39, pp. 551-555.

田中正博・堀 哲郎・吉田 功・宇多高明・小俣 篤 (1991): フレキシブルマウンドに作用する砕波力と膜張力, 第46回土木学会年次学術講演会梗概集 II, pp. 918-919.

田中正博 (1994): パッシブ型海域制御構造物の開発と適用, 大阪大学学位論文, pp. 166-174.

港湾の施設の技術上の基準・同解説(1979): 日本港湾協会, p. 2-22.

水理公式集 (1985a): 土木学会, pp. 491-492.

水理公式集 (1985b): 土木学会, p. 487.