

フレキシブルマウンド (FLM) の港湾開口部への適用

田中正博*・源波修一郎**・奥津宣孝**
堀哲郎**・北直紀***

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膜構造の没水型構造物、フレキシブルマウンド（以下、FLM と称する）を提案した。そして、FLM による消波メカニズム、透過・反射特性および波力・膜張力特性について模型実験および理論解析により検討し、FLM が波浪制御構造物として有効であることを明らかにした（田中ら、1987, 1989, 1991; 大山ら、1988; 清川ら、1987）。また、FLM の設計および施工手順についても検討し、設計・施工マニュアルにまとめた（建設省土木研究所、1991）。さらに、このマニュアルの手順に従って実規模スケールの FLM の袋体および基礎架台を設計・製作し、FLM の消波特性、袋体の耐久性、基礎架台の安定性、FLM 周辺地盤の洗掘特性および岸沖方向の地形変化を模型実験により検討し、FLM が実用性の高い構造物であることを確認した（宇多ら、1991）。FLM は図-1 に示すように、基礎架台を介して海底の基礎杭に固定されている袋体に海水を充填してカマボコ状の形を形成する没水型構造物である。したがって、波浪条件に拘らず構造物を起立させておく従来の潜堤と同様な使用法のみならず、荒天時のみ起立させて使用する方法も可能である。後者の使用法として、1992年3月に長崎県に開設したハウステンボス（以下、HTB と称する）の港湾開口部に FLM が設置された。すなわち、常時は船舶の航行の支障とならないように袋体を倒

伏させておき、暴風時に給水して FLM 袋体を起立させ消波構造物として機能させるという新しい使用形態である。本論文は、今回 HTB に適用された FLM に関し、要求される機能、FLM の構造・設置条件および施工手順、模型実験による消波効果の確認、給排水システムの概要と袋体の内圧調整法・袋体の起立・倒伏の安定性について報告するものである。

2. FLM の機能と設置条件

(1) 構造物に要求される機能

HTB は、閉鎖海域の大村湾北部に位置し小型港湾シャトルハーバーを有している。周辺海域は、常時は概ね $H_{1/3} \leq 0.3 \text{ m}$ の静穏な海域であるが、暴風時（特に大型台風通過時）には $T_{1/3} = 3.5 \text{ sec}$, $H_{1/3} = 1.34 \text{ m}$ が想定され、開口幅が広いため南方向から来襲する波浪を開口部で消波し港内の船舶を守る必要がある。一方、常時シャトルハーバーには来園者を運ぶシャトルボートと観光用の帆船が頻繁に出入りするのでその航行を妨げない構造物形式でなければならない。また、HTB はオランダの街並みを再現したテーマパークで、港湾部は園の表玄関および代表的なアトラクションの一つであるので、園の景観・美観を損なわない構造物でなければならない。すなわち、FLM に要求される機能は、a) 暴風時に想定される波浪条件に対し、港口での透過率 $K_T \leq 0.5$ を確保する（L.W.L. 時： $h = 5.0 \text{ m}$, M.W.L. 時： $h = 5.5 \text{ m}$, H.W.L. 時： $h = 6.0 \text{ m}$ に対して、 $h = \text{水深}$ ）、b) 常時はボート、帆船の航行に支障を与えないよう水深 4.8 m （L.W.L. 時）以上を確保する、c) 美観、景観を損なわない構造物および稼働方式とすることである。

(2) FLM の構造・配置

FLM はシャトルハーバー開口部の全幅を1基でカバーする設置方法が消波性能上望ましいが、開口幅が約 70 m と広いので FLM 膜体および基礎架台に対する施工時のハンドリングを考慮し、2基を千鳥状に設置することにした。FLM は、本体をなす袋体と基礎架台、それを支持する基礎杭、袋体を起立・倒伏させるための給排水システム（給・排水管、内圧調整管、ポンプ・電磁

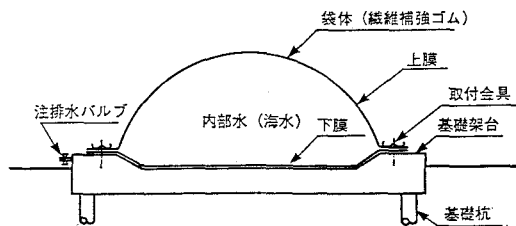


図-1 FLM の一般的な構造

* 正会員 清水建設(株) 技術研究所

** 正会員 清水建設(株) 海洋開発エンジニアリング部

*** 正会員 清水建設(株) 九州支店土木技術部

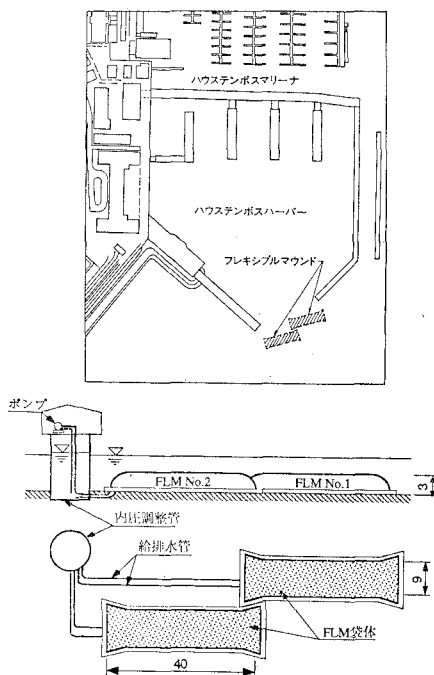


図-2 FLM の全体配置

弁等)で構成され、その配置は図-2に示すとおりである。袋体は、ナイロン繊維で補強された厚さ 16 mm の硬質ゴム (SBR-NR 系超耐磨耗ゴム、初期引張り強度 500 kgf/cm 以上)を用い、起立時の寸法は幅 9m、長さ 40m、高さ 3m である。ゴム膜は設計波浪条件 ($H_{max}=2.41$ m, $T_{1/3}=4.3$ sec) で想定される膜張力に対して、初期で 4.0 以上、耐用年数の 30 年後で 2.0 以上の安全率が確保できるように設計した。

本件では、設置海域の地盤が海底面より 12m まで超軟弱層 (N 値=0) で地盤からの反力が得られないので、下膜 (図-1 参照)を用いず、基礎架台を箱型の鋼殻構造とし、袋体の周辺部を基礎架台にボルトと座金を介して固定し水密の構造体とした。基礎架台、それを支持する杭基礎の構造は図-3に示すとおりである。常時は、袋体を海底面とほぼ同じレベルに倒伏させなければならないので、袋体が常に規則正しく基礎架台の鋼殻部に納まるように構造的な工夫を施した。すなわち、袋体両端部の余裕長は基礎架台端部の近傍をテーパ状の幅広にし両端で余裕長ゼロとなるよう吸収した。また、両端部以外の膜の余裕長は鋼殻断面の周辺長が膜長 (円弧部) よりも若干長くなるように半円筒の突起を 3 本取付け (図-3 の断面図参照)、袋体がほぼ一定の形状で鋼殻部に納まるように工夫した。適用に先立ち、これら工夫を施した 1/6 模型を用いて倒伏試験を行ない、袋体が無秩序な突起をつくることなく安定した形状で鋼殻内に納まることを確認した。実機の突起は最大で 20 cm 以内

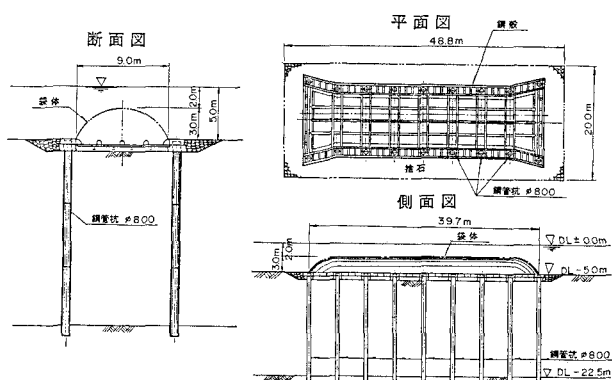


図-3 基礎架台および杭基礎の構造

であり、目標とする L.W.L. 時の水深 $h \geq 4.8$ m を確保できることを確認した。

なお、FLM は建設省の MMZ 計画策定の手引き(案) (1991) に準拠して設計したが、基礎架台 および 杭の設計では日本港湾協会の港湾の施設の技術上の基準・同解説 (1989) も併用した。

(3) 施工手順

本件で用いた施工手順は図-4に示すように、海上の基礎工事と、陸上の FLM 構造体の製作を並行して行ない、完成した FLM 構造体を現地に曳沈・航設した。1) 海上では沈設予定地の海底地盤に改良工事を施した後、所定の間隔で鋼管杭を打設し杭頭処理し、所定の深さに基礎架台を仮受けする台と架台との連結力を強化するスタッドジベルを取付けた。2) 一方、陸上ヤードでは鋼製基礎架台を製作し水張り試験を行なった後、工場で作成されたロール状の膜材を展張しボルトと座金で基礎架台に固定した。ボルトは所定の残留トルクが得られるまでトルク調整 (増し締め) を行なった後、袋体内

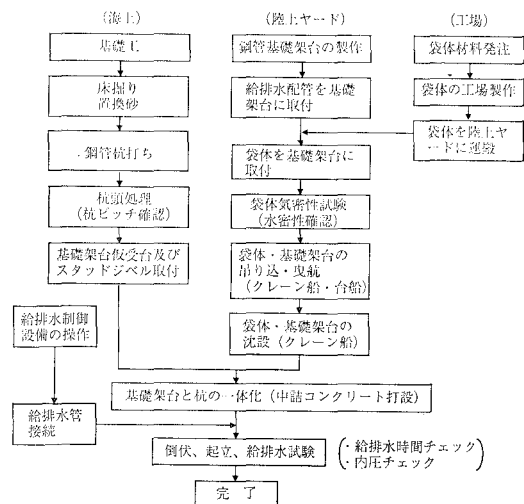


図-4 施工フロー

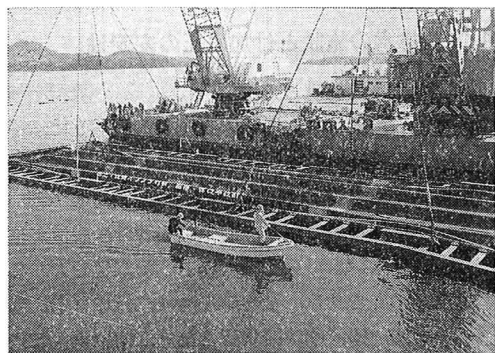


写真-1 FLM 構造体の沈設

に空気を注入し気密試験を行ない構造物の水密性を確認した。3) 袋体を倒伏し台船に載せて設置海域に曳航し、袋体を取り付けた基礎架台をクレーン船で吊り上げ、基礎杭に立てた4本のガイド管に添って所定の深さに沈設した(写真-1 参照)。中詰めコンクリートを打設し基礎架台と基礎杭を一体化した後、予め海底に配管してあった給排水管を基礎架台部に接続した。袋体の製作から給排水管取付けまでの施工期間は約9ヶ月である。また、FLM 構造体の沈設は海域が静穏であったこともあるが予想よりもはるかに順調に一基当り数時間で、しかも鉛直方向の据付誤差2cm以内で行なうことができた。

3. 平面配置と消波効果の確認

(1) 実験の目的と方法

まず2次元水路(長さ40m, 幅0.6m, 深さ1.3m)で約1/6の模型(繊維補強された厚さ1.5mmのゴム膜製で、幅1.6m, 高さ0.45m)を用いて、HTBにFLMを適用した場合に期待される消波効果を潮位変化に対する影響を含め検討した。次に、FLMの適正な配置を決めるため、1) 袋体端部の構造・形状(端部は滑らかに天端が低くなっている)および拘束力が消波性能に及ぼす影響、2) 千鳥配置時に十分な消波効果を得るために必要なFLM端部のラップ長を把握するため平面水槽を用いて模型実験を行なった。実験に用いた水槽は長さ54m, 幅10m, 模型は繊維補強された厚さ $t=1.5$ mmの軟質塩ビ膜製で、幅1.5m, 高さ0.47m, 長さ5m(縮尺1/6)である。その全体配置は図-5に示すとお

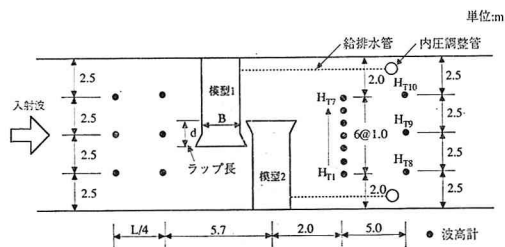


図-5 模型と波高計の配置 (平面実験)

表-1 波浪条件

Case No.	周期 T (cm)	波高 H (cm)	波の種類
R-1	1.225	15	規則波
	(3.0)	(90)	
R-2	1.429	22.3	
	(3.5)	(135)	
R-3	1.633	22.3	
	(4.0)	(135)	
R-4	1.837	22.3	
	(4.5)	(135)	
I-1	1.429	18	不規則波
	(3.5)	(108)	
I-2	1.633	17	
	(4.0)	(102)	

りで、2つの模型は固定架台に取付けられており、水槽の幅方向に0~90cmの範囲でそれぞれ移動することができる。袋体の内圧は、給排水管を介して連結されている内圧調整管の水位で調整した。実験は、水深を86cm(M. W. L.に対応)に固定し、千鳥配置された模型1と2のラップ長 d を0, 80, 160cmに変えて模型周辺の波高分布に及ぼす影響を検討した。入射波条件は、全ての周期に対し設計波高相当の22.3cm(現地換算で1.34m)を目標としたが、規則波の $T=1.23$ secと不規則波の全ケースで、造波が困難であったので、表-1に示すように定めた。ただし、表中カッコ内の値は現地換算した波浪の諸元である。波高の測定位置は図-5に示したとおりで、水槽側壁からの反射を含まない透過波高の分布を模型2の2m岸側の7点で、また側壁からの反射波を含む平均的な透過波高を7.5m岸側の3点でそれぞれ測定した。

(2) 消波特性

図-6は、2次元模型を用いて水深 h を75, 82, 90cm(それぞれL. W. L., M. W. L., H. W. L.に対応し、没水率 $R/h=0.40, 0.45, 0.50$)に変化させたときのFLMの消波特性を示したものである。ただし、付加水圧

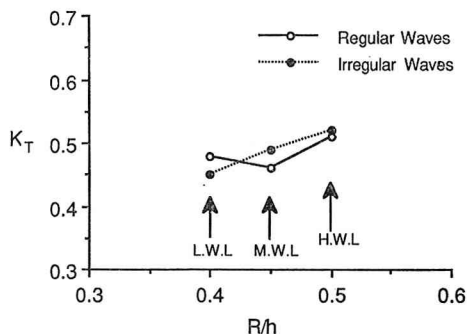


図-6 潮位変化と期待される消波効果

$p_0=4.0 \text{ gf/cm}^2$, 規則波は $T=1.43 \text{ sec}$, $H=20 \text{ cm}$, 不規則波は $T_{1/3}=1.43 \text{ sec}$, $H_{1/3}=12 \text{ cm}$ である. H.W.L. 時に透過率 K_T は若干 0.5 を越えているが, 実験で与えた波高が現地で想定される波高の換算値 $H_{1/3}=22 \text{ cm}$ よりも小さいことを考慮すると, いずれの潮位に対しても $K_T \leq 0.5$ を期待できる. なぜなら, 一般に潜堤では, 波高が大きくなり天端上水深と波高との比 R/H_I が小さくなるほど, 碎波による消波効果が大きく, すなわち K_T が小さくなる (例えば, 永井ら, 1977). FLM の場合, R/H_I が大きく非碎波の場合には袋体の運動に伴って発生する radiation wave と入射・散乱波との干渉作用によって消波するが, $R/H_I \leq 2.0$ の場合には FLM 上での碎波が消波に重要な役割を果たし, 通常の潜堤と同様に R/H_I が小さくなるほど K_T が小さくなる (宇多ら, 1991) からである.

図-7, 8 は, 波浪条 $R-2$, $I-1$ 件に対し, 千鳥配置した袋体のラップ長と幅との比 d/B を 0.0, 0.53, 1.07 に変えたときの透過波と入射波の波高比 H_T/H_I 分布をそれぞれ示したものである. ただし, 両図共に $h=86 \text{ cm}$, $B/h=1.74$, $R/h=0.45$, $p_0/\rho gh=0.05$ である. 相対ラップ長 $d/B=1.07$ のとき, FLM 近傍の H_T/H_I が若干小さくなる傾向が認められるが, d/B の違いによる透過波高分布への影響は小さい. ただし, 図には示さなかったが, 周期の短い波浪条件 $R-1$ の場合, $d/B=0.0$ のとき全般に H_T/H_I が大きくなった. したがって, 本件がシャトルハーバー港口部という重要な場所に設置されることも考慮し, 相対ラップ長 d/B を 0.7 とした. 千鳥配置の場合, 透過波高は FLM 背後で複雑な分布となるので 2次元実験の場合のように透過率を求めることは難しいが, 図-7, 8 より $d/B=0.7$ で千鳥配置すれば, FLM 背後での透過波高比は平均的に $H_T/H_I \leq 0.5$ を期待できる.

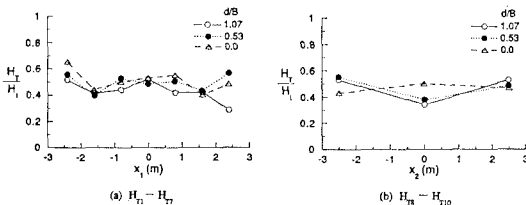


図-7 千鳥配置における透過波高比の分布 (規則波: R-2)

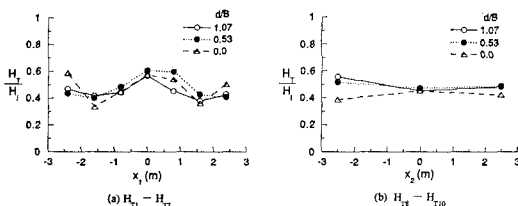


図-8 千鳥配置における透過波高比の分布 (不規則波: I-1)

4. 給排水の施設と付加水圧の安定性

(1) 給排水の施設と方法

本件に用いた給排水システムの概要は図-9に示すような構成で, 給排水共に自動運転により行うシステムとなっている. 給水時は, 電磁バルブ①, ③, ⑤が開, バルブ②, ④は閉状態となり, 内圧調整管外に設けた取水管から海水を給排水ポンプで汲み上げ給水管を介して袋体に給水し起立させる. また排水時は, バルブ①, ③は閉, バルブ②, ④, ⑤が開状態となり, 内圧調整管内の海水を取水管からポンプで汲み上げ調整管外に排出することにより袋体内の海水を排水し倒伏させる. 給水および排水量はポンプ近傍に取付けた電磁流量計で測定して積算され, 所定の流量に達すると電磁バルブ⑤が閉じ, 給排水ポンプが停止する. 給水完了時, 内圧調整管内の水位は潮位 $+17 \sim 39 \text{ cm}$ になり, FLM がすぐれた消波性能を発揮する付加水圧 (M.W.L. 時の水深 5.5 m の $5 \pm 2\%$ の水頭) に相当する. また, 排水完了時には調整管内の水位を潮位よりも低く ($DL-3.5 \text{ m}$) 保ち, 袋体が基礎架台の鋼殻部に確実に納まるようにした. 起立および倒伏に要する時間はそれぞれ約 3, 4 時間である.

本給排水システムが FLM の消波構造物としての稼働を大きく支配するので, その信頼性を高めるため, 給排水ポンプは 2 基の FLM に 1 台ずつ設け, 一方のポンプに不具合が生じた場合には残りの 1 台を 2 つの FLM の給排水に共用 (ただし, 手動操作) できるシステムとした. また, 給排水管およびバルブの不意の故障に対応するため, バルブの切り替えにより給水管および排水管は給水路と排水路のいずれにも使用できるシステム (手動操作) となっている. 図-9 に示した真空ポンプ (VP) は, 給排水開始時, ポンプケーシング内に呼び水を給水

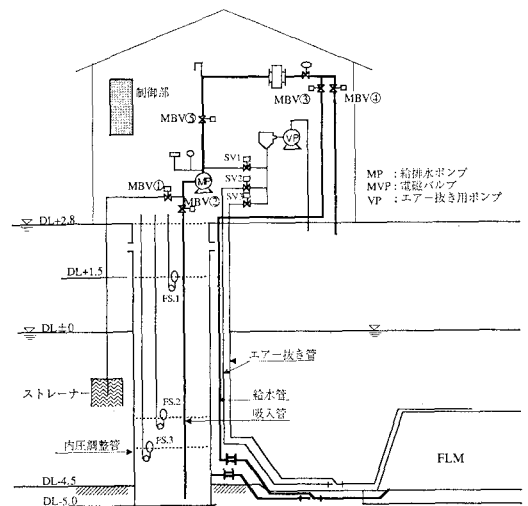


図-9 給排水システム

し、給水完了時、袋体への連行エアを抜くために使用する。

(2) 付加水圧の設定と安定性

付加水圧 p_0 は FLM の消波性能上最も重要なパラメータの一つであるので、起立時 p_0 を適正な範囲（水深の 2~10% の水頭）に確実に迅速に設定する必要がある。FLM を通常の波浪制御構造物として使用する場合は、設置後の静穏な時に設置水深との水頭差を見ながら所定の p_0 に設定すればよい。しかし、本件のように暴風の来襲時に FLM を起立させる場合、内圧設定時には波高がある程度大きい場合も想定される。この場合、袋体が運動し内圧調整管内の水位が変動するため、内圧調整管内の水位と潮位との差により付加水圧 p_0 を精度良く設定することは困難である。そこで本システムでは、所定の p_0 に対応する目標の総水量 Q_0 を予め求めておき、システム運転時の総水量 Q が目標値 Q_0 になったら給水または排水を完了する方法とした。この方法を用いる場合、 Q の再現性、潮位変化が設置時および設置後の p_0 に及ぼす影響を把握しておく必要がある。総水量 Q は目標値 Q_0 (約 900 m³) に対し 0.4% 程度の誤差で管理できることを確認した。

図-10 は、給水完了後約15時間の FLM (No. 1) 内圧調整管内の水位 h_I と潮位 h_T 、および水位差 Δh ($=h_I - h_T$; p_0 に相当) の変化の一例を示したものである。給水完了後の水位差 Δh は、潮位が上がると減少し、潮位が下がると上がると予想されたが、給水完了後 2~25 時間で 24 cm に落ち着き、その後は潮位変動に拘わらずほぼ一定である。これは、潮位変化に伴って生じる内圧調整管内の水位差 Δh の変動分が袋体の変形によって吸収されるためと考えられる。水位差 Δh すなわち付加水圧 p_0 は潮位変動に拘わらずほぼ一定に保たれており、1 m 程度の潮位変化の場合、付加水圧の設定においてその影響を考慮しなくてもよいことがわかる。

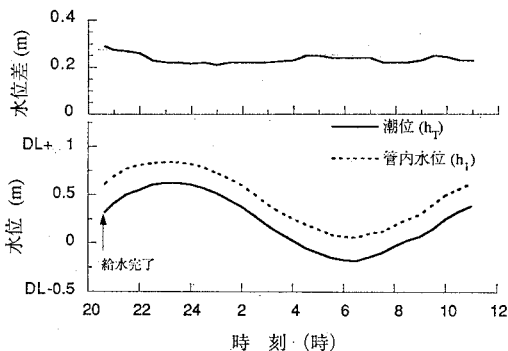


図-10 内圧調整管内外の水位変化

5. まとめ

膜構造の袋体に海水を充填して没水の構造体を形成し

波浪制御するフレキシブルマウンド (FLM) を提案し、その設計・施工法を検討してきた。この度、常時は障害物とならないように倒伏させておき、暴風時のみ起立させて消波する新しい利用形態の構造物として、長崎ハウステンボスの小港湾開口部に適用された。FLM は、暴風時に透過率 0.5 以下を、一方常時には船舶の航行に必要な水深を確保し、また園の景観・美観を損なわない構造・配置、稼働方式とした。FLM はハンドリング性を考慮し 2 基を若干ラップさせて千鳥状に配置したが、ラップ長が消波効果に及ぼす影響は小さい。FLM の起立・倒伏は、給排水システムにより自動運転で行なう。起立時の袋体の付加水圧は総給水量の管理で精度よく設定することができる。また、設置後の付加水圧は潮位変動に拘わらずほぼ一定に保たれ、設定時の潮位および設定後の潮位変動に対応した調整を必要としない。

今回の設置では、袋体、基礎架台および杭基礎に歪ゲージを取付けてあり、港外に 1 点、港内に 2 点波高計を設置する予定であるので (6~9 月)、荒天時のデータが得られたなら報告したいと考えている。

なお、FLM は建設省土木研究所と共同で研究開発した波浪制御構造物です。最後に、FLM の適用にあたり、長崎オランダ村と(株)日本設計から全体配置、景観設計に関し貴重な御意見と多大な御支援を、また長崎大学の富樫教授から水理特性の評価に関し貴重な御意見を賜りましたことをここに記して、こころから感謝致します。

参考文献

- 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理機能の検証, 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・宇多高明・村井禎美 (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 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 562-566.
- 清川哲志・三俣正和・田中正博・大山 巧 (1987): 可動板型 Radiation Wave Generator による波浪制御, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 472-476.
- 建設省土木研究所 (1991): MMZ 計画策定の手引き (案)
- 田中正博・三俣正和・大山 巧・清川哲志・宇多高明・村井禎美 (1987): フレキシブルマウンドによる透過・反射特性の実験的検討, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 492-496.
- 田中正博・大川 巧・清川哲志・宇多高明・小俣 篤 (1989): フレキシブルマウンドに作用する波力, 海岸工学論文集, Vol. 36, pp. 554-558.
- 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碎波力と膜張力, 第 46 回土木学会年次学術講演会概要集 II, pp. 918-919.
- 永井莊七郎・倉田克彦・長谷川 恵 (1900): 潜堤の消波効果に及ぼす天端の影響, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 303-307.
- 日本港湾協会 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説