

簡易設置型防波堤 (Shore-RIB) による透過率及び作用張力に関する研究

細井 寛昭*・小林 信久**・Jeffrey A. Melby***

本研究では、浅海域において簡易に設置・撤去できることを目的として考案された新型の波浪制御構造物を対象に、その設計で重要な透過率や膜張力の算定手法を提案し、実験値との比較によりその精度を検証するとともに、この構造物の実用性の検討を行った。本計算手法は、透過率を若干過小評価するものの実験結果の特性を良好に再現すること、構造物の被覆膜に作用する最大張力を精度よく算定可能であることが明らかとなった。また、静水状態における初期張力や構造物内部の筒の岸沖方向振動の拘束程度により、被覆膜に作用する変動張力が影響を受けることが明らかとなった。

1. 目的

阪神淡路大震災では、陸路の被災や渋滞などから海からのアクセスが非常に有効であった。近年、東海地震や南海・東南海地震に対する関心が強まるにつれ、地震発生時など緊急時に孤立した沿岸地区に海からのアクセスを確保するために急速施工が可能な波浪制御構造物を開発する意義は大きい。Melby・Resio (2002) は、浅海域において簡易に設置・撤去でき、しかも施工にかかる諸費用及び設置時間の削減を目的として、簡易設置型防波堤 Shore-RIB (Nearshore Rapidly Installed Breakwater) を提案した。Shore-RIB は図-1 に示すように円筒を緊張ケーブルで支持された膜で覆った構造である。膜を使った防波堤としては、大山ら (1988) は可撓性の膜を用いたフレキシブルマウンドの波浪制御効果を実験及び数値計算からその高い波浪制御機能を示しており、実用化されている。Shore-RIB の波浪制御機能は必ずしもフレキシブルマウンドと同じではなく、通常の低天端型防波堤の性質も併せ持つが Melby・Resio (2002) の実験によれば必要とされる波浪制御機能は有していると判断できる。

本研究では、この Shore-RIB を、今後波浪制御構造物として実用化するために重要な透過率と膜やアンカークーブルに作用する張力の大きさや変動特性を水理模型実験に基づいて初期張力や波浪条件と関連づけながら考究する。さらに構造物の耐久性をも念頭におきながら波浪制御面で有効な Shore-RIB の形状について検討する。そして、設計に必要な透過率や張力の予測手法を提案し、Shore-RIB の実用化の検討を行う。

2. 水理模型実験

本研究では Melby・Resio (2002) によって行われた水理実験結果を解析する。実験は全長 45 m, 幅 0.9 m の二次元造波水槽で行われた。水槽には、造波板から岸に向

かって勾配 1/18 及び 1/82 の水底面が設置され、後者の斜面上に Shore-RIB 模型が設置された。水槽は奥行き方向に幅 0.6 m と 0.3 m の二つに区切られ、0.6 m の水路に模型を設置し、もう一方は波を透過させた。構造物の前後に水位計を設置し、これらの水位から入射波、反射波及び透過波の水位変動を求めた。また、模型を設置していない水路で測定した入射波の水位変動を後述する数値計算の沖側境界条件の入力値として与えた。

実験では、入射波の有義波高 $H_{m0}' = 7.7 \text{ cm} \sim 13.5 \text{ cm}$, ピーク周期 $T_p' = 1.2 \text{ s} \sim 2.7 \text{ s}$ の不規則波を入射させた。入射波の条件や構造物の形状を変化させて全 62 ケースの実験を行い、各ケースで水位変動とケーブルに作用する張力をサンプリングタイム 0.02 s で造波開始から 590 秒間計測した。なお、解析では、造波開始時の 30 秒間を除去した 560 秒間のデータを用いた。

(1) 構造物モデル Shore-RIB の概要

構造物モデルは図-1 のように、実験水槽の底面に打ち付けられたアルミ板上に奥行き方向に設置したポリ塩化ビニル製の筒を繊維膜で覆い、その膜の岸側端部をアルミ板に固定し、沖側端部をケーブルによって引張る形で内部の筒を挟み込んだものである。実験では、ケーブルを奥行き方向の両端に取り付け、さらに張力の時間変動を測定するための計測器を 2 本のケーブルに取り付けてある。

実験では、内部の筒の本数を 1 本と 2 本の 2 種類変化させ (図-1 は筒 2 本のケース)、ケーブルの初期張力も変化させた。また、筒の岸沖方向への移動を制御するための留め木の有無も変化させた。筒 1 本で留め木無しを

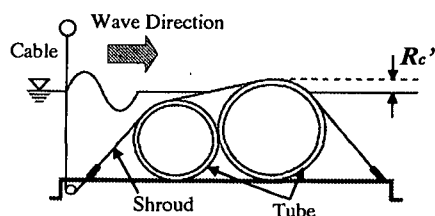


図-1 実験構造物模型 (筒 2 本型モデル)

* 正会員 工修 (株)建設技術研究所
* Ph.D. デラウェア大学教授
* Ph.D. U.S.Army Corps of Engineers

表-1 選定6ケースの諸条件及び波力の測定結果

Test	d_p' (cm)	R_c' (cm)	T_p' (s)	H_{m0}' (cm)	T_p' (N/m)	T_{max}' (N/m)
1.3	29.4	2.9	1.7	11.6	0.0	413.6
2.2	29.4	2.9	1.7	12.3	124.1	289.3
3.5	24.6	2.9	2.0	9.6	127.2	162.0
3.17	30.2	-2.7	2.2	12.0	132.1	169.7
3.22	30.2	-2.7	2.2	12.0	34.3	168.0
3.32	19.8	7.7	2.1	9.6	131.5	165.9

Plan 1 (全12ケース), 留め木有りを Plan 2 (全6ケース), 簡2本で留め木有りを Plan 3 (全44ケース) として, これらテスト番号の最初の数字で示している。(表-1 参照)

3. 数値計算モデル

(1) 波浪場の計算

支配方程式として Kobayashi・Wurjanto (1989) が提案した非線形長波方程式を基礎式とする波浪解析モデルを構造物天端が水面上に現れても計算可能となるよう改良した。流体を支配する式は, 連続式及び運動量式を無次元化した以下の式 (1), (2) である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}(ht) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + \frac{1}{2}h^2) = -\theta h - f|u|u \quad (2)$$

ここでは, それぞれの変数 (プライム付き) は以下のように無次元化されている。

$$t = t'/T_p'; x = x'/[T_p'(gH_{m0}')^{1/2}] \quad (3)$$

$$u = u'/(gH_{m0}')^{1/2}; h = h'/H_{m0}'; \theta = \sigma \tan \theta' \quad (4)$$

$$f = f'/2; \sigma = T_p'(g/H_{m0}')^{1/2} \quad (5)$$

t' は時間, x' は水平座標, h' は自由水面以下の全水深, u' は鉛直方向に平均した水平流速, θ' は水底勾配角度, f' は構造物にかかるせん断力に関する摩擦係数 (本研究では $f'=0$ として計算した) を表す。

実験で行った全62ケースのうち, 代表として6ケースを数値計算の対象とした。表-1 は計算対象ケースを示したもので, d_p' は静水面下の膜沖側水深, R_c' は静水面から構造物の頂点までの距離で, 天端が水面上の時が正の値をとる。 T_p' と T_{max}' はそれぞれ初期張力と最大張力で, 測定値を構造物の幅 (奥行き方向) で割った単位幅あたりの張力である。

計算の沖側境界条件として, 実験で計測した Shore-RIB 沖側先端部の水位変動を与えた。数値計算上では, 無次元全水深 h が負の値をとるとゼロにし, h が分母にくる場合は最小値を 0.001 に設定して計算を行った。計算は実験の計測時間にあわせて 560 秒間実施した (無次元計算時間間隔 $\Delta t'/T_p'$ は約 1/3000)。この数値計算より, 構造物前後の平均水位や透過率を求め, 実験値との

比較を行った。

(2) 波力の計算

被覆膜の沖側端の引張ケーブルに作用する変動張力を予測するために被覆膜に作用する波力を算定する必要がある。本研究では, 波動圧を用いた簡単な波力算定法により Shore-RIB にかかる全波力の水平成分及び鉛直成分の算定を行った。以下にその詳細を記す。

図-2 のように微小な直角三角形の斜面にかかる長波圧力 P_w' は以下のように表せる。

$$P_w' \cong \rho g \eta' \quad (6)$$

ここに, ρ , g と η' はそれぞれ水の密度, 重力加速度及び静水面からの自由表面の高さを表す。したがって図-2 の三角形の斜面に作用する波力の水平・鉛直成分 $\Delta F_h'$ 及び $\Delta F_v'$ は以下のようになる。

$$\Delta F_h' = P_w' \sin \theta' [(\Delta x')^2 + (\Delta z')^2]^{1/2} \quad (7)$$

$$\Delta F_v' = P_w' \cos \theta' [(\Delta x')^2 + (\Delta z')^2]^{1/2} \quad (8)$$

上式を書き直すと以下のようになる。

$$\Delta F_h' = P_w' \tan \theta' \Delta x' \quad (9)$$

$$\Delta F_v' = P_w' \Delta x' \quad (10)$$

式 (9) と式 (10) に式 (6) を代入してそれぞれ膜の上側に沿って積分すると,

$$F_h' = \rho g \int_0^{x_e'} \eta' \tan \theta' dx' \quad (11)$$

$$F_v' = \rho g \int_0^{x_e'} \eta' dx' \quad (12)$$

と表せる。さらに両辺を無次元化すると以下を得る。

$$F_h = \frac{F_h'}{\rho g H_{m0}'^2} = \int_0^{x_e} \theta \eta dx \quad (13)$$

$$F_v = \frac{F_v'}{\rho g H_{m0}'^2 \sigma} = \int_0^{x_e} \eta dx \quad (14)$$

以上より, $F_h(t)$, $F_v(t)$ は $\eta(t, x)$ を $0 \leq x \leq x_e$ の区間 ($x=0$ が沖側境界, $x=x_e$ が岸側境界を表す) で積分した形となり, t の関数として求められることになる。

4. 数値計算結果

(1) 構造物前後の平均水位差

図-3 に, 計算領域の岸沖境界の平均水位差の計算結果と天端高及び有義波高の比 $R_c = R_c'/H_{m0}'$ との関係を示す。Kobayashi ら (1989) は, 潜堤 ($R_c < 0$) を挟んだ

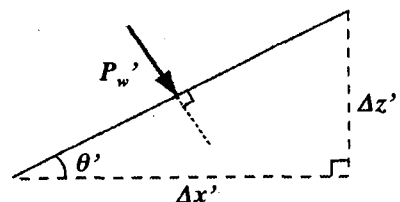


図-2 微小直角三角形の概略図

岸沖境界の平均水位差について検討しているが、非没水型構造物 ($R_c > 0$) についての明確な指標は与えられていない。図-3の結果より、 R_c が正負にかかわらず減少するほど平均水位差が大きくなっているのがわかる。すなわち、無次元天端高が下がるほど構造物上で碎波することによって生じる wave setup と wave setdown の現象が顕著に現れていることを示している。

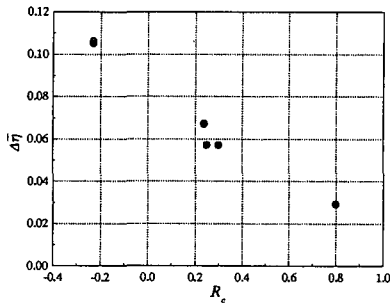


図-3 平均水位差と無次元天端高 R_c の関係

(2) 透過率の計算・実験結果

図-4に、透過率の実験値と計算値の無次元天端高 R_c にとともなう変動特性を示す。図中の実線は D'Angremond ら (1996) による捨石マウンドの実験から得られた透過率の経験式を表し、鎖線は Melby ら (2002) の実験から得られた Plan 3 に対する経験式である。

$$K_t = 0.53 - 0.28R_c \quad (\text{Plan 3}) \quad \cdots \cdots (15)$$

図より、実験結果及び計算結果ともに透過率は無次元天端高 R_c が増大するにしたがって線形的に減少していることがわかる。本実験結果は捨石マウンドの透過率よりも若干大きい、これは、被覆膜の表面が滑らかで摩擦が少ないこと、また、構造に柔軟性があるため筒の岸沖方向の振動により造波が起こったためであると考えられる。計算値が透過率を若干過小評価しているが、これは、本数値計算モデルでは構造物を剛体不動と仮定したことによると考えられる。

5. 作用張力の予測

(1) 計算波力値を用いた張力予測手法

式 (13), (14) による計算波力の水平・鉛直成分の時間平均値、最大値と最小値と R_c の関係を図-5に示す。このうち、水平・鉛直成分の最大値はともに R_c と以下の線形関係にあることが判明した。

$$(F_h)_{\max} = 3.0 + 0.5R_c \quad \cdots \cdots (16)$$

$$(\sigma F_v)_{\max} = 5.5 + 1.3R_c \quad \cdots \cdots (17)$$

図-6に水理模型実験によって測定された無次元張力 $T(t) = T(t) / (\rho g H_{mo}^2)$ の時間変動を示す。図から明らかに、張力の変動は不規則性が非常に強く、明確な

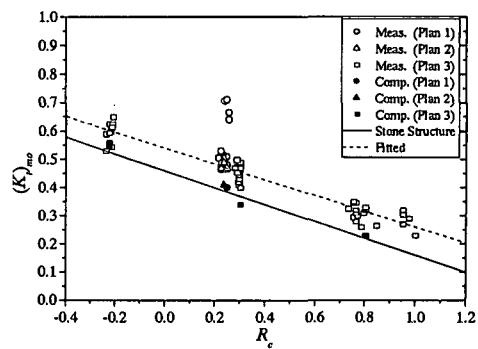


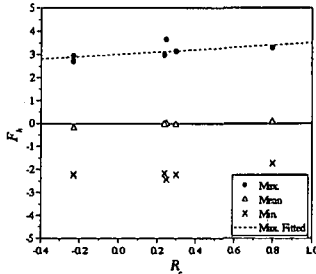
図-4 実験値及び計算値の透過率

周期性は認められない。しかし、張力 $T(t)$ は、どの時間でも初期張力を下回ることではないことを確認した。そこで、作用張力を初期張力と波によるゼロ以上の変動張力にわけて考える。

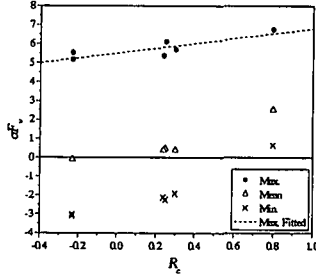
$$T(t) = T_s + T_w(t) \quad \cdots \cdots (18)$$

測定した膜の沖側での張力を予測するためには、計算波力値と張力を関係づける必要がある。

構造物内部の筒は入射波によって岸沖方向の水平方向に振動し(留め木の有無により大きさに差はあるが)、それによって被覆膜が動揺し、膜を支えるケーブルに余分な張力が作用することが考えられる。一方、この筒は常に海底面に接しているため、鉛直方向の振動はない。そ



(a) 水平成分



(b) 鉛直成分

図-5 計算波力値(水平・鉛直成分)の最大、最小及び平均値

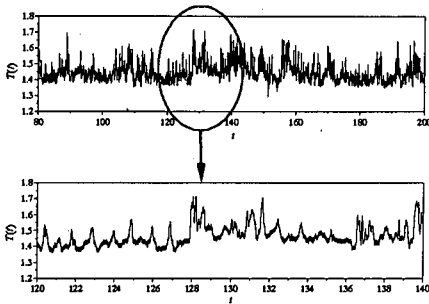


図-6 測定された張力の時間変動 (Test 3.5)

れゆえに波力の鉛直成分は筒や海底に作用力が伝達しても膜自体の動きは小さく、そのためケーブルにかかる張力にはほとんど影響しないと考えることができる。そこで本研究では、水平方向の波力成分が張力変動に大きく影響を及ぼしていると考えられることから、以下のように波力の水平成分を用いて張力の予測を行うこととした。

入射波によって構造物は力を受けるが、その力に対抗するために、筒に波力に対する反作用の力 F_b (図-7 参照) と沖側の膜に変動張力 $T_w(t)$ が作用する。水平方向の力の釣り合いより $T_w(t)$ を以下のように仮定した。

$$T_w(t)\cos\theta' = F_h(t) - F_b(t) \quad \text{for } F_h > 0 \quad \cdots (19a)$$

$$T_w(t) = 0 \quad \text{for } F_h \leq 0 \quad \cdots (19b)$$

ここで、 θ' は膜沖側斜面と水底面となす角度で、Plan 1 と 2 では 43.5° で Plan 3 では 47.1° である。

筒の反作用力の時間変動 $F_b(t)$ を予測するのは困難であるため、ここでは、 $F_b(t)$ の代わりに減衰係数 r ($0 < r < 1$) を用いることで式 (19a) の右辺を以下のように近似する。

$$T_w(t) = \frac{r}{\cos\theta'} F_h(t) \quad \text{for } F_h > 0 \quad \cdots (20)$$

式 (20) から両辺の最大値をとると、式 (18) の最大値をとった $(T_w)_{\max} = T_{\max} - T_s$ の関係式及び、波力の計算結果から得られた式 (16) を代入することができ、その結果、以下のような関係式が得られる。

$$r = \frac{(T_{\max} - T_s)\cos\theta'}{3.0 + 0.5R_c} \quad \cdots (21)$$

減衰係数 r を理論的に求めることは困難なので、実験

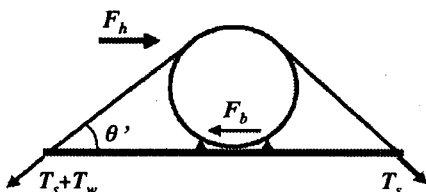


図-7 Shore-RIB (筒1本型、留め木有り) に作用する力

結果より評価することとする。全 62 ケースに対して、 $T_{\max}$ 、 T_s 、及び R_c の実験結果を式 (21) に代入して r の値を求めた。図-8 は、 r と初期張力 T_s の関係を示したもので、構造物の形状 (Plan) ごとに分けてある。図より、減衰係数 r と初期張力 T_s の間には、ほぼ線形な以下の関係がある。

$$r_i = a_i - b_i T_s \quad \text{for Plan } i \quad \cdots (22)$$

ここでは、 $a_1 = 0.7$ 、 $a_2 = 0.5$ 、 $a_3 = 0.18$ 、 $b_1 = 0.35$ 、 $b_2 = 0.32$ 、 $b_3 = 0.075$ である。最大作用張力 $T_{\max}$ は以下のよう、準経験的に与えられる。

$$(T_{\max})_{\text{predicted}} = T_s + \frac{r(T_s)}{\cos\theta'} (3.0 + 0.5R_c) \quad \cdots (23)$$

図-9 は式 (23) で求めた全 62 ケースの最大張力の計算値を実験値と比較した結果を示したものである。本研究で提案した算定手法はどの構造形式 (Plan) に対しても張力の最大値を精度よく予測できる。

(2) 張力予測手法による結果

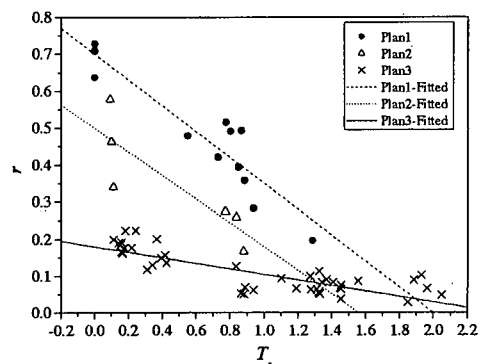
ところで、 $r(T_s)$ 及び T_s は時間 t と独立であり、式 (18) と (20) より t に依存する変動張力の算定式が求まる。

$$T(t) = T_s + \frac{r(T_s)}{\cos\theta'} F_h(t) \quad \text{for } F_h > 0 \quad \cdots (24)$$

$$T(t) = T_s \quad \text{for } F_h \leq 0 \quad \cdots (25)$$

図-6 に例示したように、不規則性の強い張力の時間変動の正確な予測は不可能であるが、最大張力から初期張力の間の変動張力の振動の度合はほとんどのケースにおいて良好に再現されていることがわかった。被覆膜の設計において、この変動張力振動を減少させることは安全性の面から重要であると考えられる。

図-10 は、張力変動の標準偏差と初期張力 T_s の関係を実験値と計算値と比較した結果である。図より、 T_s が増大すると標準偏差は減少することがわかる。これは、初期張力が増大することにより、減衰係数 r は小さくなり、変動張力の振幅が小さくなるためである。換言すれ

図-8 全 62 ケースの減衰係数 r と初期張力の関係

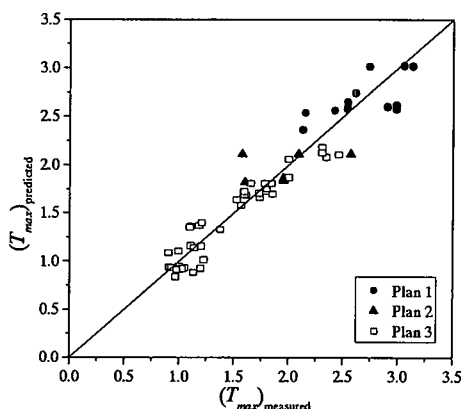


図-9 最大張力の予測値と実験値の相関図

ば、初期張力を大きくすると、被覆膜の岸沖方向の緊張が強くなり、これによって水平波力の被覆膜への伝達が減少し、ケーブルを支えるアンカー部への過剰な負担が減ることになる。このような初期張力の増減による影響の違いは、図-8に示したように、筒1本型の構造物の方が2本型よりも顕著に現れていることから確認できる。逆に、筒2本型の構造物は初期張力がそれほど大きくなくても変動張力を抑えることができる。

6. 結 論

本研究で得られた主要な結果を要約すると以下の通りである。

- 1) 砕波が原因となる wave setup-setdown による構造物前後の平均水位差は、天端高が静水面上から下に減少すると線形的に増大する。
- 2) 透過率は天端高が増大するにしたがって線形的に減少する。本計算手法は実験値を若干過小評価するが、透過率の傾向を良好に再現しうる。
- 3) 長波理論による圧力から予測された最大張力は実験値と非常に良好に一致する。さらに、変動張力の標準偏差も十分に評価できる。

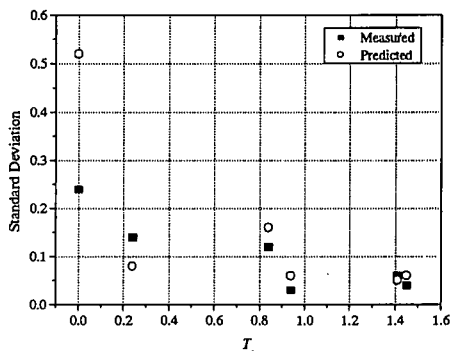


図-10 実験値及び計算値の変動張力の標準偏差

- 4) 筒2本型モデルは1本型と比較して、小さい初期張力でも変動張力がそれほど大きくならないため、耐久性に優れている可能性が高い。

謝辞：本研究は、U. S. Army Corps of Engineers 海岸水理研究所との契約 No. DACA 42-02-P-0041 の研究と関連してデータを提供して頂きました。また、本研究を遂行するにあたって、名古屋大学大学院の岩田好一朗教授、水谷法美教授には貴重なご助言を頂きました。ここに謝意を申し上げます。

参 考 文 献

- 大山 巧・田中正博・清川哲志・宇多高明・村井祐美 (1988): フレキシブルマウンドの反射・透過特性の解析, 第35回海防論文集, pp. 562-566.
- D'Angremond, K., Van der Meer, J. W., De Jong, R. J. (1996): Wave transmission at low-crested structures, Proc. 25th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 2418-2427.
- Kobayashi, N., and Wurjanto, A. (1989): Wave transmission over submerged breakwaters, J. Waterway, Port, Coast., and Oc. Engrg., Vol. 115, No. 5, pp. 662-680.
- Melby, J. A., and Resio, D. T. (2002): A nearshore rapidly-installed breakwater, Proc. 28th Conf. Coastal Eng., ASCE pp. 1887-1899.