

パイプ式透過堤の水利特性および曝気特性に関する研究

小田 一紀* ・ 天野 健次**・ 大東 秀光***
鈴木 隆****・ 田中 彬夫*****

1. まえがき

筆者らは、この数年来、図-1 に示すような狭窄部を有するパイプをその中心軸が波の進行方向に平行になるように組み込んだ透過堤の波に

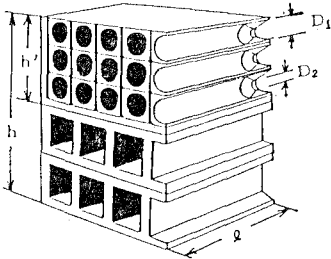


図-1 パイプ式透過堤の構造と諸元

対する水利特性を研究してきた。本透過堤はパイプ両端における圧力差によってパイプ内に往復水平流を発生させ、それが狭窄部、および端部を通るときに生じる渦乱によって波のエネルギーを逸散させて反射波と透過波を低減させようとするものである。

しかし、本透過堤はこのような消波機能だけでなく、堤体における流体運動の非線形性に基づく沖側から岸側への質量輸送を誘起し、あたかも波動ポンプのような機能をも有する。これに水面付近のパイプ端部で生ずる曝気現象が相まって、特に岸側(港内側)水域の溶存酸素を増大させる機能をも有する。本研究では、このパイプ式透過堤の基本的な水利特性および曝気特性を解明する。

2. 水利特性の理論解析

ここでは以下に示す2通りの解析方法を用いて、本堤体の水利特性を解析する。

(1) ポテンシャル接続法

堤体の沖側水域における反射波、岸側水域における透過波の振幅と位相差を未知数とする速度ポテンシャルをパイプ内流体の運動方程式および連続方程式と、堤体側面における境界条件を満たすように決定し、堤体の反射率、透過率を求める。この理論は既に小田ら(1988)が海洋開発シンポジウムで発表したものでここで記述すること

は省略する。

(2) 境界積分法

本堤体の水深方向における開口率が一定でない場合やマウンド上に設置されるような場合には、その境界条件が複雑になるので前述のポテンシャル接続法では解析が困難である。そこで、本研究では Macaskill (1979) によって提案された手法を拡張し、以下に示す境界積分法を用いる。

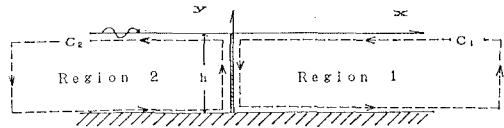


図-2 座標系と計算対象領域

いま、図-2 のような鉛直2次元の計算対象領域を考える。時間変動項を除いた速度ポテンシャルは次の支配方程式および境界条件を満足するものとする。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad ; \text{ in } \Omega \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\partial \phi / \partial y - \phi \nu = 0 \quad ; \text{ on } y = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\partial \phi / \partial y = 0 \quad ; \text{ on } y = -h \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\lim (\partial \phi / \partial |x| - i k \phi) = 0 \quad ; \text{ at } |x| \rightarrow \infty \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、ベルヌーイの定理より圧力は次の式で与えられる。

$$p/\rho = -\partial \phi / \partial t - g y \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 p : 水中圧力、 ρ : 水の密度、 $\sigma = 2\pi/T$ (T : 周期)、 $i = \sqrt{-1}$ 、 Ω : 流体領域、 $\nu = \sigma^2/g$ (g : 重力加速度)、 $k = 2\pi/L$ (L : 波長) であり $\nu = k \tanh kh$ を満足する実正根の波数である。また、上記の支配方程式と境界条件を満足するグリーン関数として John ら (1950) によって求められたものを用いる。

パイプ堤の外部領域における速度ポテンシャルはグリーン関数の公式を介し境界積分法による定式化を行うと、領域2および領域1に対して、それぞれ式(6)および式(7)のように表わされる。

$$\begin{aligned} \phi_2(\xi, \eta) = & \phi_I(\xi, \eta) \\ & + \int_{-h}^0 \left\{ \phi(0-, y) \frac{\partial G}{\partial x}(0-, y; \xi, \eta) \right. \\ & \left. + G(0-, y; \eta) \frac{\partial \phi}{\partial x}(0-, y) \right\} dy \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

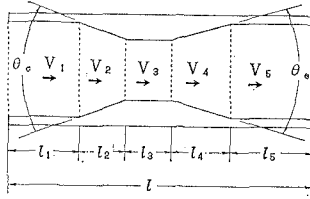
* 正会員 工博 大阪市立大学 工学部土木工学科
** 学生員 大阪市立大学大学院 工学研究科
*** 関西電力(株)
**** 京都大学大学院 工学研究科
***** (株)クボタ

$$\phi_1(\xi, \eta) = \int_{-h}^0 \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial x}(0+, y) G(0+, y; \xi, \eta) - \phi(0+, y) \frac{\partial G}{\partial x}(0+, y; \xi, \eta) \right\} dy \quad \cdots \cdots (7)$$

つぎに、パイプ部を出入りする流れを表す内部領域の速度ポテンシャルの解析解として、式(8)で表されるような角野(1986)が用いたスリット近傍での局所流の速度ポテンシャルを用いることにする。

$$\phi(\xi, \eta) = \{\xi \pm C(\eta)\} U(\eta) + C_0 \quad \cdots \cdots (8)$$

式(6)、式(7)および式(8)における (ξ, η) はそれぞれの領域内の任意点の座標であり、式(8)中の正負の記号は各々 ξ の符号に対応し、 $U(\eta)$ は一様流部の流速、 C_0 は任意定数である。 $C(\eta)$ は“blockage coefficient”である。上部パイプ部および下部ケーソン部(図一1に示す透過堤の下部を指す)に対する $C(\eta)$ は図一3に示すような狭窄部を有する管路における非定常流の運動方程式より、その中の非線形項をローレンツの等価仕事の原理を用いて線形化することによって式(9)のように導かれる。



図一3 管路断面形状

$$C(\eta) = \begin{cases} i \frac{k_{fp}}{\varepsilon_p^2} + \frac{l C_p}{\varepsilon_p} & ; \text{パイプ部} \\ i \frac{k_{fc}}{\varepsilon_c^2} + \frac{l}{\varepsilon_c} & ; \text{ケーソン部} \end{cases} \quad \cdots \cdots (9)$$

ここに、

$$C_p = \{l_1 + l_3 + (l_2 + l_4) \cdot (D_1/D_2) + l_3 \cdot (D_1/D_2)^2\} / l \quad \cdots \cdots (10)$$

$$k_{fp} = (1 - \gamma_R) f_F (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{1/2} \cdot (4/3\pi) \times \frac{3S_1 + 1/3 \cdot S_3}{(2kh' + S_2) \sinh kh} \quad \cdots \cdots (11)$$

$$k_{fc} = (1 - \gamma_R) f_c (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{1/2} \cdot (4/3\pi) \times \frac{3 \sinh k(h-h') + 1/3 \cdot \sinh 3k(h-h')}{(2k(h-h') + \sinh 2k(h-h')) \sinh kh} \quad \cdots \cdots (12)$$

$$S_1 = \sinh kh - \sinh k(h-h') \quad \cdots \cdots (13)$$

$$S_2 = \sinh 2kh - \sinh 2k(h-h') \quad \cdots \cdots (14)$$

$$S_3 = \sinh 3kh - \sinh 3k(h-h') \quad \cdots \cdots (15)$$

$$f_p = \left(f_e + f_0 + f_1 \frac{l_1 + l_3}{R_1} \right) + \left(f_2 \frac{l_3}{R_2} + f_4 \frac{l_4}{R_4} \right) \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \left(f_{s0} + f_3 \frac{l_3}{R_3} + f_{s2} \right) \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 \quad \cdots \cdots (16)$$

$$f_c = f_e + f_0 + \frac{l}{R_0} \quad \cdots \cdots (17)$$

$\varepsilon_p, \varepsilon_c$: パイプ部およびケーソン部前面の開口率、 l : 堤体幅、 α_1, α_2 : 入射波振幅の実部と虚部、 γ_R, γ_T : 複素反射率および透過率、 f_e, f_0 : 入口および出口の損失係

数、 f_{s0}, f_{s2} : 漸縮および漸拡部の損失係数、 $f_1 \sim f_4$: $l_1 \sim l_4$ 部の摩擦損失係数、 $R_1 \sim R_4$: $l_1 \sim l_4$ 部の径深、 R_0 : ケーソン部の径深、 f : 摩擦損失係数。

式(6)および式(7)から、 $\xi \rightarrow \pm 0$ として外部領域におけるパイプ堤近傍での速度ポテンシャルを導き、その差を求める。次に、式(8)より内部領域両端におけるポテンシャル差を求めて、前者と等置すると以下の積分方程式が得られる。

$$C(\eta) U(\eta) + \phi_I(0, \eta) = 2 \int_{-h}^0 G(0, y; 0, \eta) U(\eta) dy \quad \cdots \cdots (18)$$

反射率、透過率は式(6)、式(7)を各々 $x=0, \xi \rightarrow -\infty, x=0+, \xi \rightarrow +\infty$ とした極限形を考えることによって、次式のように導かれる。

$$\gamma_R = G_a' \int_{-h}^0 \{ k\phi(0-, y) + iU(y) \} \times \cosh k(y+h) dy \quad \cdots \cdots (19)$$

$$\gamma_T = G_a' \int_{-h}^0 \{ k\phi(0+, y) - iU(y) \} \times \cosh k(y+h) dy \quad \cdots \cdots (20)$$

ここに、

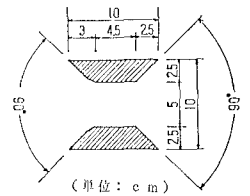
$$G_a' = G_a \cdot \cosh kh / \cosh k(\eta+h) \quad \cdots \cdots (21)$$

$$G_a = (\nu/k + 1) \times \frac{\exp(-kh) \sinh kh \cosh k(h+\eta)}{\nu h + \sinh^2 hk} \quad \cdots \cdots (22)$$

3. 理論解の検証

(1) ポテンシャル接続法による理論値と実験値の比較

実験は、長さ 50 m、幅 1.0 m、高さ 1.5 m の片面ガラス張り 2 次元造波水槽で行った。実験に用いた狭窄部の断面形状を図一4に示す。



図一4 狭窄部の断面形状

図一5(a)は狭窄部がない場合、同図(b)は狭窄部を設けた場合の反射率 K_R と透過率 K_T の理論値と実験値の比較の一例を示している。これらの図から、反射率、透過率ともに狭窄部が有る場合も無い場合も両者は良好な一致を示している。しかし、他の実験条件の場合を含めて、どちらかといえば反射率については理論値は実験値より若干大きめの値を与える。その差は狭窄部が有る場合の方が大きく、且つ波形勾配が大きくなるほど大きくなる傾向が認められた(小田ら, 1988)。実験においてパイプ開口部に対する平均水面の相対的な位置によって反射率が変化することが確認されており、このことから波の有限振幅性がこの不一致の原因の一つではないかと

考えられる。

(2) ポテンシャル接続法によるパラメトリック解析

図—6 および図—7 はそれぞれ反射率、透過率に及ぼす堤体幅の影響を調べた計算結果である。

図—6 から堤体幅の増大とともに反射率は増大し、透過率は減少するが、長周期側の波に対しては堤体幅の影響は小さくなる。また、図—7 から、前面開口径に対して狭窄部開口径を変化させることによる、反射率、透過率への影響は、短周期側で小さいが、長周期側ではかなり大きいことが見出せる。

(3) 境界積分法とポテンシャル接続法による計算結果の比較

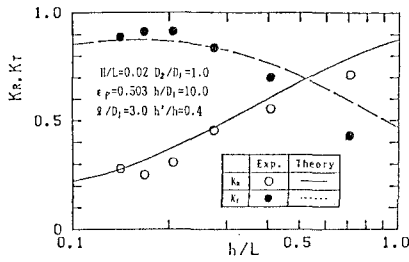
パイプ部に狭窄部が無い場合について境界積分法を用いて計算した反射率と透過率を、ポテンシャル接続法による解析解と比較したものが、図—8 (a), (b) である。同図 (a) は全断面がパイプ部で構成されている一様断面の場合を、また同図 (b) は下部がケーソン部で構成されている複合断面の場合を示している。同様に、図—9 (a), (b) はパイプに狭窄部がある場合の

比較を示している。これらの図によると、反射率、透過率ともに境界積分法による計算値の方が僅かに大きめの値を示しており、その差は狭窄部がない場合は極く小さいが、狭窄部がある場合は比較的大きいことがわかる。また、一様断面の場合より複合断面の場合の方がその差が大きいといえる。この原因については明確なことはわからないが、狭窄部がある場合の方が差が大きいことお

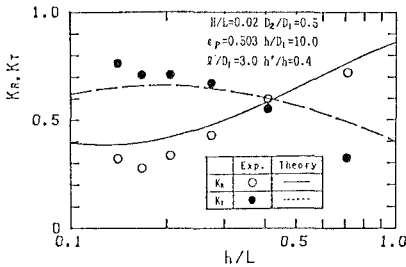
よび反射率、透過率ともに大き目の値を示していることから判断して、パイプ内での blockage coefficient $C(\eta)$ の誘導過程になんらかの問題があるのではないかと考えられる。

(4) 境界積分法による計算例

図—10 (a) ~ (c) に示すように、上部パイプ部断面の一部を上から順に不透透にした場合の3種類の断面形に対

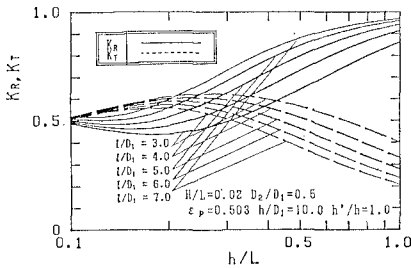


(a) 狭窄部が無い場合

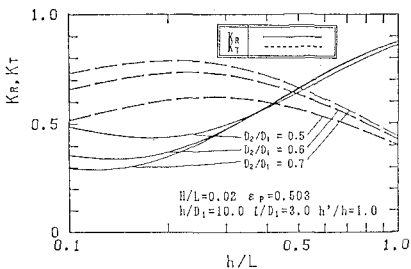


(b) 狭窄部が有る場合

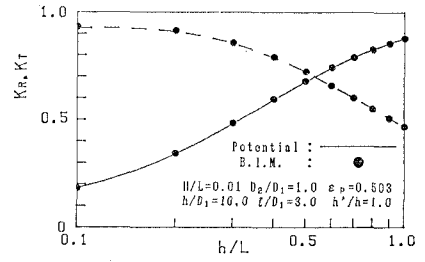
図—5 ポテンシャル接続法による理論値と実験値の比較 (複合断面)



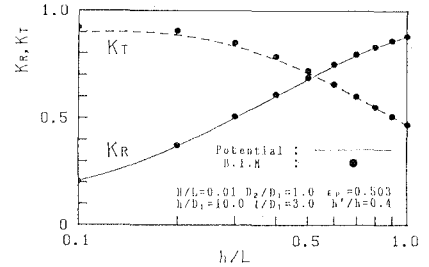
図—6 堤体幅の影響



図—7 狭窄部開口径の影響

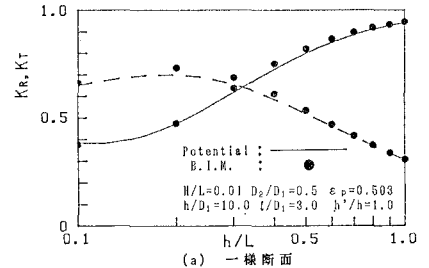


(a) 一様断面

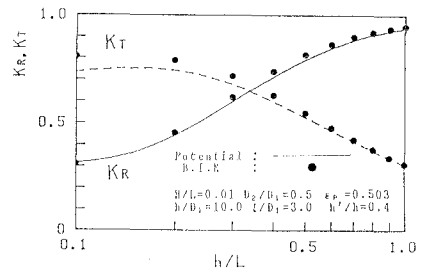


(b) 複合断面

図—8 理論値の比較 (狭窄部が無い場合)



(a) 一様断面

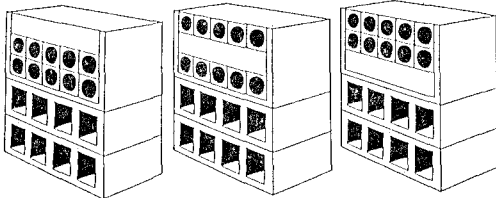


(b) 複合断面

図—9 理論値の比較 (狭窄部が有る場合)

して反射率, 透過率を境界積分法で求めてみる. この場合には, 積分方程式の誘導過程で, 不透過面上 (I') の境界条件を式 (23) のように設定する必要がある.

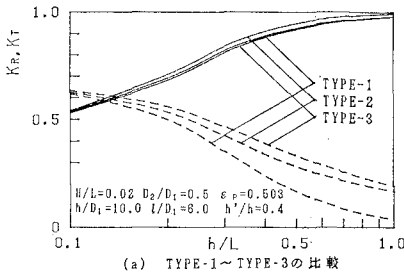
$$\partial\phi/\partial x=0 \quad ; \quad \text{on } I' \quad \dots\dots\dots (23)$$



(a) TYPE-1 (b) TYPE-2 (c) TYPE-3

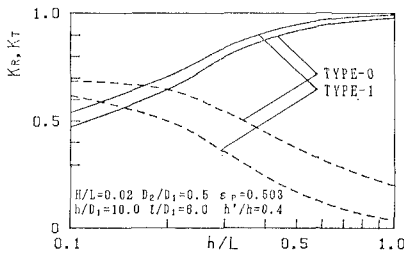
図-10 上部パイプ不透過部を有する堤体断面

計算結果を図-11 (a), (b) に示す. 同図 (a) によると, 不透過部を上下に移動させても反射率には大きな差は生じないが, 透過率に比較的大きな差が生じ, 短周期側になるほどその差は大きくなる. また, 不透過部が上にある程透過率は小さくなる傾向が見られる.



(a) TYPE-1~TYPE-3の比較

同図 (b) は最上段を不透過にした TYPE-1 と不透過部を設けない場合 (TYPE-0, 図-1参照) との比較を示す. この図から最上段を不透過にすると反射率をあまり変化させずに, 透過率をかなり低減できることがわかり, 実用上有用な知見が見出されたといえる.



(b) TYPE-0とTYPE-1の比較
図-11 上部パイプ部中の不透過部の位置の影響

4. 曝気特性

(1) 曝気実験

実験は, 長さ 20 m, 幅 0.5 m, 高さ 0.6 m の鋼製片面ガラス張り造波水槽で行った. 堤体模型は図-12 に示すように基礎マウンド (不透過) を含めて木材で製作し, 実験水槽のほぼ中央に設置した. 幾何学的縮尺は 1/25 とした. パイプ部の開口率は沖側側面で 50 %, 岸側側

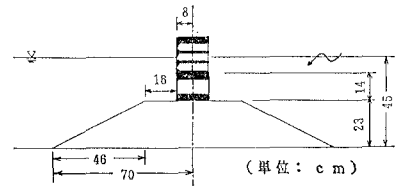


図-12 曝気実験の堤体模型

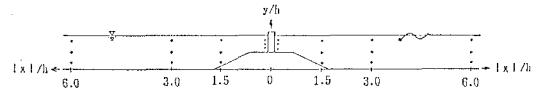


図-13 DO計の設置位置 (・測定点)

端狭窄部で 12.5 %, 下部ケーソン部で 40 % である.

溶存酸素濃度は DO 計 4 台を用いて測定した. その測定点は図-13 に示すように, 堤体中心から岸および沖方向にそれぞれ $1.5h$ (h : 水深), $3.0h$ および $6.0h$ における断面内の, 水深方向に水底から $0.2h$, $0.5h$ および $0.8h$ の位置で行った. 波条件は波形勾配をほぼ 0.02 で一定に保ち, 周期 T および波高 H の組み合わせを (0.82 sec, 2.1 cm), (1.02 sec, 3.1 cm) および (1.20 sec, 4.0 cm) とした.

波による溶存酸素の増加状態を調べるため, 実験開始前に亜硫酸ナトリウム (触媒は塩化コバルト) を用いて水中の溶存酸素濃度を 1~3 ppm まで下げた. その後, 規波則を連続 3 時間作用させ, 各測定点における溶存酸素濃度の時間的変化を DO 計を用いて 10 分間隔で測定した.

(2) 曝気特性の評価

細川 (1986) は, 水中への溶存酸素の回復現象を次式で定式化している.

$$\partial C/\partial t = k_2(C_s - C) \quad \dots\dots\dots (24)$$

初期濃度を C_0 として式 (24) を積分し, 無次元表示すると式 (25) が得られる.

$$k_2 T \cdot t/T = -\ln(1 - C^*) \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここに,

$$C^* = (C - C_0)/(C_s - C_0) \quad \dots\dots\dots (26)$$

式 (25) および式 (26) において, C^* : 無次元溶存酸素濃度, k_2 : 再曝気係数, C : 溶存酸素濃度, C_s : 飽和溶存酸素濃度, C_0 は初期溶存酸素濃度, t : 曝気時間である.

一般に, 曝気効果を評価する指標として曝気点における再曝気係数 k_2 が用いられるが, ここではこれを T で無次元化した $k_2 T$ を用いることにする.

(3) 溶存酸素の時間的変化

図-14 (a), (b) に $T=1.02$ sec, $H=3.1$ cm の時の $y/h=0.8$ における C^* の経時変化を示す. 同図 (a) は沖側水域, 同図 (b) は岸側水域における経時変化を示している.

これらの図によると, 沖側では堤体から離れるほど曝

気速度が小さくなるが、岸側では $|x|/h=3.0$ 付近までは、曝気速度にあまり差がなく、堤体からある程度離れた水域まで比較的速い速度で曝気が進む事がわかる。これは、前書きにも述べたよう

に、本堤体が沖側から岸側への質量輸送を誘発する機能を有しており、これによる移流拡散効果が大きいためであると考えられる。このような傾向は、他の波条件の場合も同様に認められた。

(4) 各測定点における k_2T の値

図一14(a), (b) に示すような各測定点における C^* の経時変化の実験曲線から最小自乗法によって k_2T の値を求めた一例を表一1に示す。表一1は $T=1.02$ sec の場合の結果である。この表から、(i) 岸側および沖側水域ともほぼ $|x|/h=3.0$ よりも堤体寄りでは k_2T の値は各測定断面とも水面から水底まで鉛直方向にはあまり大きな差は見られないが、 $|x|/h>3.0$ の領域では水底付近の方が大きめの値を示す傾向があり、特に岸側水域ではこの傾向は強い。(ii) 全般的に岸側水域の方が k_2T の値が大きい、などのことが見出せる。これらの傾向は他の場合も同様であった。

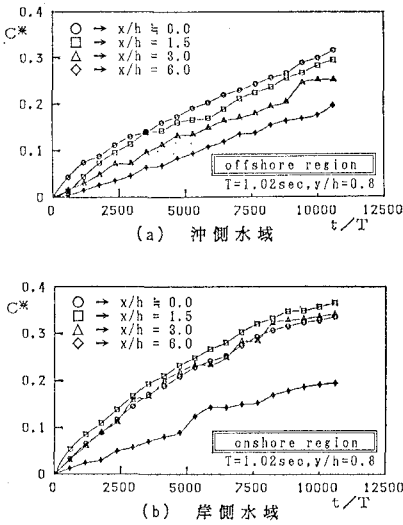
表一1 k_2T の値 ($k_2T \times 10^4$) ($T=1.02$ sec)

y/h	岸側水域					沖側水域			
	6.0	3.0	1.5	0.14		0.14	1.5	3.0	6.0
0.8	1.87	3.92	4.24	3.78	実	3.08	2.81	2.21	1.71
0.7	—	—	—	3.73		3.04	—	—	—
0.6	—	—	—	3.70	験	2.99	—	—	—
0.5	3.09	4.12	4.00	—		—	2.90	2.48	1.79
0.4	—	—	—	—	堤	—	—	—	—
0.3	—	—	—	—		—	—	—	—
0.2	3.28	4.00	4.00	—	体	—	2.75	2.26	1.80

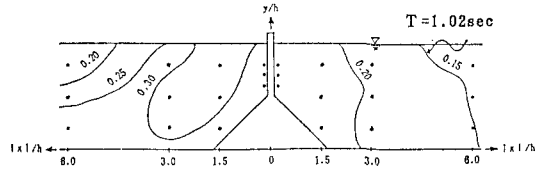
(5) 溶存酸素濃度の空間的分布

同一経過時間における溶存酸素濃度の空間的分布の一例を $T=1.02$ sec の場合の $t/T=7,500$ の時について示したものが図一15である。この図からも明らかなように、

沖側水域では僅かではあるが、水面付近より水底付近の方が溶存酸素濃度が高くなっているが、岸側水域ではこの傾向が一層顕著に現れている。これは、水面付近のパイプ端部から流出する噴流が下降成分を有しており、これによる移流拡散効果が大きいためであると考えられる。このように特に岸側水域の下層の溶存酸素を増大させることが、本透過堤の大きな特徴であると考えられる。



図一14 C^* の経時変化



図一15 C^* の空間的分布 ($t/T=7,500$)

5. 結 論

本研究によって以下の事が明らかになった。

- (1) ポテンシャル接続法による理論解析から得られた本堤体の反射率と透過率の理論値は、全般的に実験値との一致は良好であったが、どちらかといえば、反射率については実験値より若干大きめの値を与えた。その原因の一つとして波の有限振幅性が挙げられる。
- (2) 境界積分法を用いて計算した反射率、透過率の値は同一条件の下で求めたポテンシャル接続法による解析解より僅かに大きな値を与えた。この原因の究明は今後の課題である。
- (3) 境界積分法を用いてパイプ部の開口率が鉛直方向に一樣でない場合の水利特性を計算した結果、パイプ部の開口率を鉛直方向に変えることによって、反射率特性に大きな影響を与えることなく透過率特性を制御できることがわかった。
- (4) 本パイプ式透過堤は、水面付近から流出する噴流によって岸側、沖側水域とも溶存酸素濃度を増大させるが、特に岸側水域の下層部の溶存酸素を増大させる効果が高い。

参 考 文 献

- 小田一紀・長尾義三・大東秀光・田中彬夫 (1988): 狭窄部を有するパイプ式透過堤の水利特性に関する研究, 海洋開発シンポジウム, pp. 189~194.
 角野昇八・小田一紀・村本哲二・芳田利春 (1986): 複素係数の blockage coef. を導入した漸近展開接合法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 407~411.
 細川恭史 (1986): ガストレーサーを用いた流水の再曝気係数の測定, 港湾技研資料, No. 562, pp. 1~22.
 John, F. (1950): On the motion of floating bodies, II, Comm. on Pure and Applied Math., Vol. 3, No. 1, pp. 45~101.
 Macaskill, C. (1979): Reflexion of water waves by a permeable barrier, J. Field Mech., Vol. 95, Part 1, pp. 141~157.