

有孔物体の付加質量

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	井上, 悟 佐藤, 修
巻/号	52巻2号
掲載ページ	p. 223-230
発行年月	1986年2月

有孔物体の付加質量^{*1,*2}

井上 悟, 佐藤 修

(1985年7月11日受理)

Added Masses of Porous Objects

Satoru Inoue^{*3} and Osamu Sato^{*3}

It is important to determine the added mass of objects in order to estimate the hydrodynamic force on floating fisheries banks. The following is a report on experimental results obtained for the added masses of porous objects. The apparatus used in this experiment is essentially a torsion pendulum. The values of added masses are calculated from the difference between the periods of this pendulum in water and in air. Objects used in this experiment were porous circular pipes, a porous hollow sphere, and a porous hollow double circular cone. Holes varying in radius (r) were drilled into circular pipes of various diameters (D) with varying distances (a) between the holes. Holes were also drilled into a hollow sphere and a circular cone. Radiuses of the holes were gradually decreased in size near the tops of both the sphere and the cone.

We were able to determine the added masses of these porous objects. Using porosity and a parameter: $\sqrt{a \cdot r / D}$, we were also able to estimate the added masses of other porous objects of arbitrary shapes.

浮魚礁として波浪中に強制係留された浮体の運動を解析するためには、係留される種々の物体の付加質量を明らかにすることが必要である。¹⁾ 実際の浮魚礁の形としてはいろいろなものが使用されているが、その基本形は筒形が多く、また通水性を持っていることが特徴である。したがって前報²⁾では、有限長の円柱体および円筒体の付加質量を求めたが、本論ではより実際の浮魚礁に近付いた形のものとして有孔物体の付加質量を求めた。

実験方法

実験の装置および方法は前報²⁾と同じく、ひずみゲージを用いた改良型のトーションペンドラム法で行った。Fig. 1 に示すようなトーションペンドラムを、その腕に測定物体をつけた場合とつけない場合とで、各々水中および空中で振動させ、そのときの振動周期の差から付加質量を計算した。測定に用いた有孔物体は、Fig. 2 に示すような、直径 $D=11.4, 8.9, 7.6, 6.0$ cm で、長さ l と直径 D とが等しい塩化ビニールおよび鉄パイプに、いろいろな大きさ、間隔で孔をあけた有孔円筒体、 $D=12$ cm のプラスチック球殻と同様にして孔をあけた有孔球殻、それに $D=6$ cm, $l=20$ cm で肉厚 $d=0.6$ mm の

ブリキ板で作った複円錐殻に孔をあけた有孔複円錐殻である。本論で使用した有孔物体の諸元は後述のように決めたが、Table 1 に測定した模型物体の諸元を示す。なお Fig. 2 は、孔を最も大きくしたときの状態を示している。またこれらの物体の運動方向は、各物体の軸方向と軸に垂直な方向の二つが考えられる。軸方向を傾角 0° とし、軸に垂直な方向を傾角 90° とし、測定は両者について行った。

なお有孔物体を水中に入れるときに気泡が付着して、水中振動周期に大きく影響することが考えられたので、本実験では先の細い真ちゅうパイプの先端に開けた小さな孔から水を噴出させることによって、気泡を完全に除去してから実験を行った。

有孔物体の諸元 (1) 有孔円筒体の場合 実際に設置される浮魚礁の共通形状として、また前報でその付加質量を明らかにした円筒体からの発展性も考慮して、有孔物体としてまず有孔円筒体を考えた。

有孔円筒体においては、その目合形状ともいうべき孔の開け方が問題となる。ただ本研究では、目合形状は一応二義的と考え、まずどれだけの通水性があるかを考慮し、模型製作の簡便さもあって、塩ビパイプあるいは鉄

*1 浮魚礁の係留に関する基礎的研究—III

*2 本報の要旨は昭和 60 年度日本水産学会春季大会において発表した。また本報は北海道大学審査学位論文 (1984) の一部である。

*3 北海道大学水産学部漁具設計学講座 (Laboratory of Fishing Gear Engineering, Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate 041, Japan).

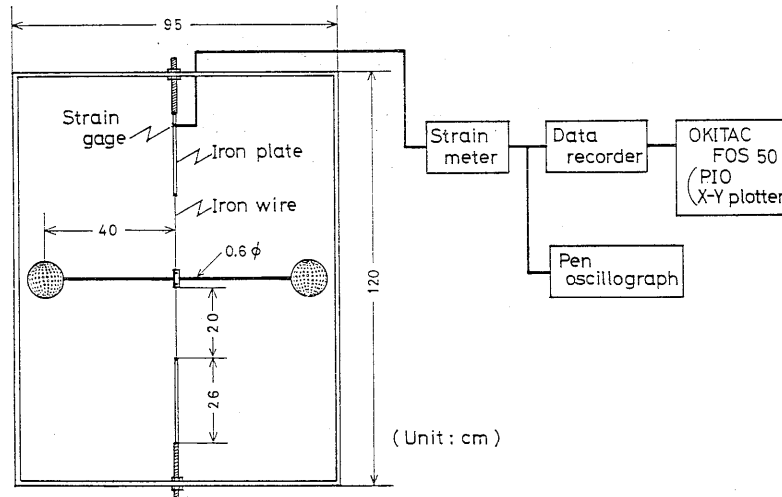


Fig. 1. Apparatus for the determination of added masses which consists essentially of a simple torsion pendulum.

Table 1. Details of porous objects

Model	D (cm)	a_c (mm)	r_c (mm)	$\sqrt{a_c \cdot r_c / D}$	σ	K_{90}	K_0	V (cm ³)	Wa (gw)	l (cm)	d (mm)	d/D ($\times 10^{-2}$)
1-1-1	11.4	9.44	4.08	0.054	0.414	0.050	0.120	1170.7	152.99	11.4	7.0	6.14
1-2-1	11.4	12.71	3.03	0.054	0.820	0.225	0.055	1165.6	302.55	11.4	7.0	6.14
1-3-1	11.4	15.90	3.75	0.067	0.825	0.232	0.052	1159.5	302.82	11.4	7.0	6.14
1-3-2	11.4	15.90	5.16	0.079	0.669	0.163	0.063	1159.5	245.68	11.4	7.0	6.14
2-1-1	8.9	9.42	2.50	0.054	0.779	0.180	0.065	549.9	144.58	8.8	5.8	6.51
2-1-2	8.9	9.42	3.86	0.067	0.474	0.110	0.123	549.9	87.92	8.8	5.8	6.51
2-2-1	8.9	12.69	2.86	0.067	0.839	0.288	0.053	551.8	155.74	8.8	5.8	6.51
2-2-2	8.9	12.69	3.94	0.079	0.697	0.141	0.071	551.8	129.30	8.8	5.8	6.51
2-2-3	8.9	12.69	5.01	0.089	0.509	0.147	0.083	551.8	94.47	8.8	5.8	6.51
2-2-4	8.9	12.69	5.61	0.094	0.385	0.081	0.087	551.8	71.44	8.8	5.8	6.51
2-3-1	8.9	15.15	5.55	0.103	0.578	0.170	0.075	552.4	106.72	8.8	5.8	6.51
3-1-1	7.6	8.79	2.00	0.055	0.837	0.306	0.049	343.8	92.65	7.6	4.8	6.31
3-1-2	7.6	8.79	3.16	0.069	0.623	0.085	0.080	343.8	69.01	7.6	4.8	6.31
3-1-3	7.6	8.79	3.73	0.075	0.477	0.068	0.089	343.8	52.88	7.6	4.8	6.31
3-1-4	7.6	8.79	3.95	0.079	0.414	0.024	0.103	343.8	45.89	7.6	4.8	6.31
3-2-1	7.6	12.59	2.89	0.079	0.834	0.245	0.049	341.5	91.63	7.5	4.8	6.31
3-2-2	7.6	12.59	4.32	0.097	0.630	0.160	0.067	341.5	69.21	7.5	4.8	6.31
3-2-3	7.6	12.59	4.90	0.103	0.533	0.170	0.076	341.5	58.57	7.5	4.8	6.31
3-2-4	7.6	12.59	5.18	0.106	0.477	0.065	0.081	341.5	52.45	7.5	4.8	6.31
3-3-1	7.6	15.53	3.94	0.103	0.797	0.335	0.049	339.3	87.26	7.5	4.8	6.31
3-3-2	7.6	15.53	5.33	0.119	0.629	0.190	0.062	339.3	69.85	7.5	4.8	6.31
3-3-3	7.6	15.53	6.33	0.130	0.477	0.092	0.068	339.3	52.29	7.5	4.8	6.31
3-4-1	7.6	12.59	2.86	0.079	0.838	0.175	0.002	343.8	222.72	7.6	2.0	2.63
3-4-2	7.6	12.59	4.34	0.097	0.626	0.150	0.008	343.8	166.35	7.6	2.0	2.63
3-4-3	7.6	12.59	4.87	0.103	0.530	0.140	0.015	343.8	140.75	7.6	2.0	2.63
3-4-4	7.6	12.59	5.14	0.106	0.477	0.091	0.018	343.8	126.76	7.6	2.0	2.63
4-1-1	6.0	8.75	3.44	0.091	0.514	0.090	0.112	170.2	33.42	6.0	4.6	7.64
4-2-1	6.0	12.25	3.12	0.103	0.795	0.270	0.059	169.3	51.49	6.0	4.6	7.64
12-2-1	11.9	12.73	6.0~	0.052	0.823	0.209	—	904.7	92.35	11.8	2.5	20.8
12-2-2	11.9	12.73	7.5~	0.058	0.724	0.092	—	904.7	81.44	11.8	2.5	20.8
12-2-3	11.9	12.73	9.0~	0.064	0.619	0.061	—	904.7	69.84	11.8	2.5	20.8
5-2-1	10.0	12.73	6.0~	0.066	0.868	—	—	523.6	158.80	20.0	0.6	1.20
5-2-2	10.0	12.73	7.5~	0.074	0.776	0.177	0.048	523.6	143.74	20.0	0.6	1.20
5-2-3	10.0	12.73	9.0~	0.081	0.664	0.091	0.036	523.6	124.74	20.0	0.6	1.20
5-2-4	10.0	12.73	—	—	1.000	0.664	0.360	523.6	561.05	20.0	0.6	1.20

Model 1-x-x~4-x-x: porous pipe; Model 12-x-x: porous hollow sphere; Model 5-x-x: porous circular cone, D =diameter, a_c =corresponding distance of holes, r_c =corresponding radius of holes, σ =solidity of the surface area of porous objects, K_{90} or K_0 =added mass coefficient of objects moving perpendicularly or parallel to longitudinal axis, V =virtual volume, Wa =weight in air, l =length of pipe and cone, d =thickness of pipe, sphere, and cone.

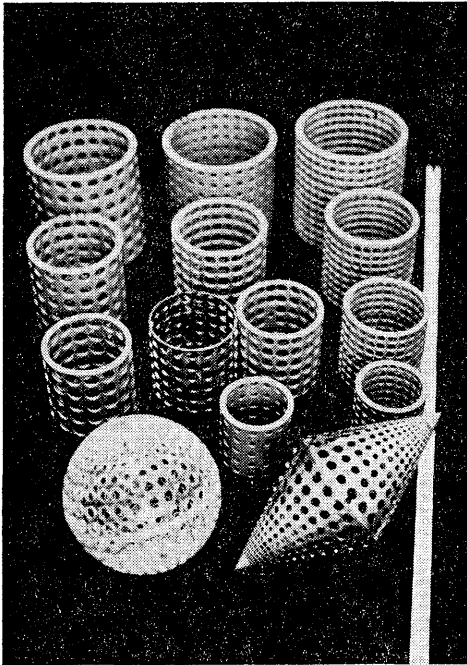


Fig. 2. Porous objects (porous circular pipes, a porous hollow sphere, and a porous double circular cone.)

パイプに電動ドリルで円形の孔を開けることにした。なお格子状の円筒体の場合でも、生物付着によりその目合形状は正方形から円形に変わっていくことを考えると、本研究のように円形の孔を開けることもそれなりに妥当なものといえる。

通水性の表し方は、穿孔前の円筒体表面積 S に対して、穿孔後の実質表面積 S' がどれだけ割合になっているかを表す、(1) 式に示すような実質面積率 σ を使うことにした。

$$\sigma = S'/S \quad (1)$$

また、Fig. 3 で示す有孔円筒体において、円筒の外径を D 、肉厚を d 、長さを l 、孔半径を r 、孔間隔（孔中心間距離）を a とし、円筒の大きさの代表値に外径 D をとると、無次元量として σ のほかに d/D 、 r/D 、 a/D 、 l/D が考えられる。また a と r は σ に大きく関係している。例えば a が 2 倍になると S' は 1/4 倍になるし、一方 r が 2 倍になると S' は 4 倍になる。すなわち σ が同じであっても孔の開き方が異なってくる。もちろんこの場合、 a 、 r の大きさは D に対する相対的なものになっている。したがって本論では孔の開け方を示すパラメーターとして $\sqrt{a \cdot r}/D$ なる無次元量を考えることにした。これは、上記の無次元量でみれば、 a/D と r/D とを組み合わせたものとも考えられる。同一の σ の場合でも、小さな孔がたくさん開いている場合には $\sqrt{a \cdot r}/D$

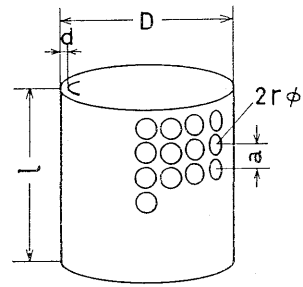


Fig. 3. Definition sketch for a porous pipe which is made holes in its wall.

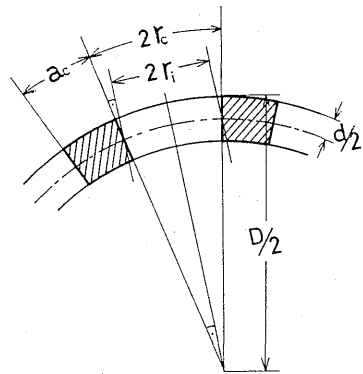


Fig. 4. Transverse section of a porous pipe.

は小さくなり、逆に大きな孔が少しだけ開いている場合には $\sqrt{a \cdot r}/D$ は大きくなる。

なお通水性という概念には、この σ と $\sqrt{a \cdot r}/D$ の両方が含まれてくるものと考えられる。したがって本研究では、通水性を表すものとしてこの両者を用い、円筒体の形状を表す無次元量として、上記の d/D 、 l/D を用いた。

次に、 σ 、 $\sqrt{a \cdot r}/D$ を実際に求める方法について述べる。本実験では孔の配置は基盤の目状とした。すると無限長の円筒体の場合、円筒外面における実質面積率 σ は、次式で求められる。

$$\sigma = (a^2 - \pi \cdot r^2)/a^2 = 1 - \pi \cdot (r/a)^2 \quad (2)$$

しかし有限長の場合、特に l を D によって限定した場合には、円筒体両端での孔間隔は必ずしも $a/2$ にならず、また端の影響も入ってくるので σ を単純に (2) 式で表すことはできない。またこの場合、円筒の肉厚も考慮されないことになる。そこでもし円錐台状の孔を開ければ、肉厚 d に関わらず実質面積率 σ は一定になり、体積率あるいは重量率と同じになる。本実験では穿孔後と穿孔前の重量比率から σ を求めた。

ただ本実験では、円錐台状の孔の代わりに直円柱状の孔を開けたので次のように考えた。いま円筒外面にお

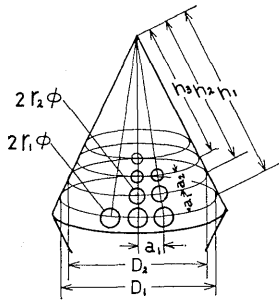


Fig. 5. Definition sketch for a porous double circular cone.

る半径が r_c の円錐台の孔の体積と、円筒外面から $d/2$ 内側に入った位置での半径が r_1 の直円柱の孔の体積とを同じと考える。すると円筒体の水平断面の一部を示す Fig. 4 において、この r_1 は次のようにして求めることになる。

円筒外面から $d/2$ 内側に入った位置での穿孔前の円筒表面積を S_0 、半径が r_1 (ドリルの直径が $2r_1$) の孔を $m \times n$ 個開けたときの孔の総面積を S_1 とすると、次のような関係式が得られる。

$$S_0 = \pi \cdot (D-d) \cdot l \quad (3)$$

$$S_1 = (m \times n) \cdot \pi \cdot r_1^2 \quad (4)$$

$$\sigma = 1 - S_1/S_0 \quad (5)$$

(4), (5) 式より次式が得られる。

$$r_1 = \sqrt{(1-\sigma) \cdot S_0 / (m \cdot n \cdot \pi)} \quad (6)$$

また同じく Fig. 4 において、外周相当孔半径 r_c は次式で求められる。

$$r_c = r_1 \cdot \{1 + d/(D-d)\} \quad (7)$$

いま有孔円筒体を無限長とすると、外周相当孔間隔 a_c は (2) 式により次式で与えられる。

$$a_c = r_c \cdot \sqrt{\pi / (1-\sigma)} \quad (8)$$

結局 (7), (8) 式より、 $\sqrt{a_c \cdot r_c} / D$ を算出し、これを一つの無次元パラメーターとして、いろいろな孔を開けた場合の比較の指標とした。今後本実験では、特にことわらない限り $\sqrt{a \cdot r} / D$ はこの $\sqrt{a_c \cdot r_c} / D$ をさすことにする。

なお有孔円筒体において l/D がいろいろ変わった場合には、前報²⁾ の円筒体の結果を参考にすることにして、本研究での有孔円筒体は $l/D=1$ の場合のみを取り扱った。

(2) 有孔複円錐殻および有孔球殻の場合 有孔円筒体から変形したものとして、有孔複円錐殻と有孔球殻を考え、有孔円筒体と比較することにした。

いま Fig. 5 に示す有孔複円錐殻において、円錐殻の直断面円直径を D 、母線長を h 、孔の半径を r 、孔の間隔

を a とすると、各孔の位置の母線長比は、同じく各孔の位置での直径比に等しい。また、各孔の間隔比、半径比を直径比と同じくすると、孔の開け方の重要なパラメーターと考えた $\sqrt{a \cdot r} / D$ を、各孔の位置にかかわらず一定値にそろえることができる。これによって有孔円筒体における同値の $\sqrt{a \cdot r} / D$ と比較することが可能となる。

有孔球殻の孔の開け方も同様にして、 $\sqrt{a \cdot r} / D$ を一定値にそろえた。なおこれらの孔の開け方は、例えば網地の場合、両頂点側を絞りこんでいった場合に似ているといえよう。

結果および考察

有孔円筒体について測定した結果を、前報の球体や円柱体および円筒体の結果と同様に、付加質量係数 K を縦軸に、周期パラメーター R_p を横軸にとって描いたのが Fig. 6 および Fig. 7 である。Fig. 6 は円筒体の軸と垂直方向に振動させた場合の付加質量係数 K_{90} 、Fig. 7 は円筒体の軸方向に振動させた場合の付加質量係数 K_0 である。

図から明らかなように、各測定点は前報²⁾ と同様に直線で結ぶことができる。したがって、各円筒体ごとに回帰直線を描き、 $R_p=0$ での K の値を各々の有孔円筒体の付加質量係数とした。なお有孔球殻、有孔複円錐殻の場合も全く同様な結果であった。このようにして付加質量係数を求め整理した結果を Table 1 に示す。

Fig. 8 は有孔円筒体について、 K_{90} と実質面積率 σ との関係を $\sqrt{a \cdot r} / D$ をパラメーターにして表したものである。同様に K_0 と σ との関係を Fig. 9 に示した。Fig. 8 において、 K_{90} の値は全体的に σ に対して指数関数的に増加している。なお $\sigma=0$ の場合は $K_{90}=0$ となり、 $\sigma=1.0$ の場合は円筒体における K_{90} の値となる。また K_{90} はパラメーターである $\sqrt{a \cdot r} / D$ によって多少ばらつきはあるが、 $\sqrt{a \cdot r} / D$ が小さい場合と $\sqrt{a \cdot r} / D$ が大きい場合とで差違がみられるようである。同図では $\sqrt{a \cdot r} / D$ の値が 0.07 付近を通るものと、0.1 付近を通るものとの二つに分けて、各々近似曲線を描いた。前者の場合は同じ実質面積率 σ においても小さな孔が数多く開いている場合を指し、後者の場合は大きな孔が少し開いている場合を指す。この両者を比べた場合、同じ σ でも小さな孔を数多く開けた方が K_{90} は小さいことがいえる。また本実験範囲内では、有孔円筒体の K_{90} に対する d/D の影響はほとんどないようである。

Fig. 9 次において、 K_0 の値は K_{90} の値に比べると絶対値が小さいので浮体の運動を解析する場合にはそれほど問題としなくてよい。ただ次のような特徴が見ら

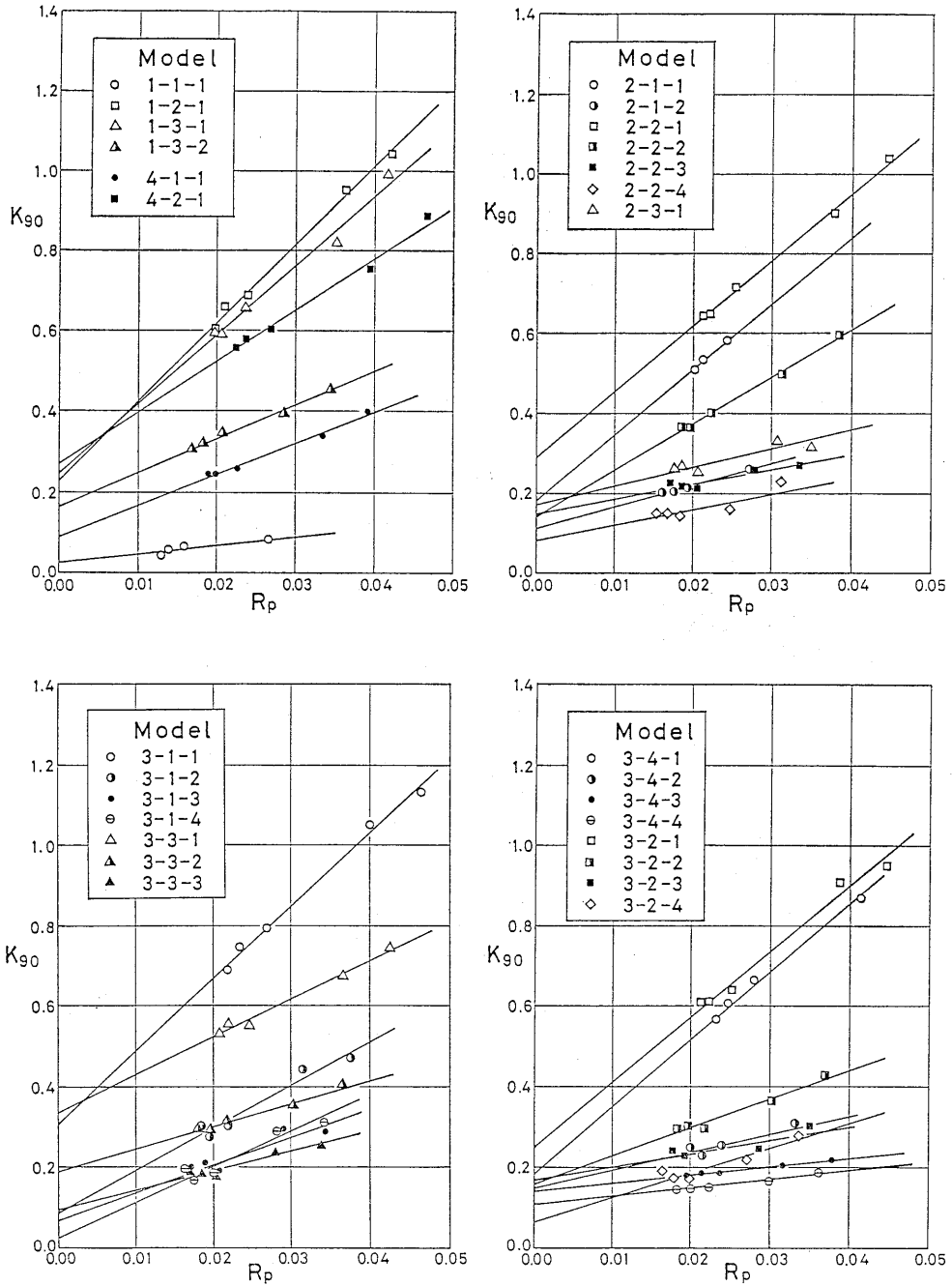


Fig. 6. Relation between K_{90} and R_p of various types of porous circular pipes.

K_{90} =added mass coefficient of pipes moving perpendicular to longitudinal axis in water, R_p = corresponding Reynolds number.

れる。すなわち K_0 は σ 以外に d/D に大きく影響を受けている。同図において $d/D=0.026$ は鉄製の円筒の場合であって、 d/D がこれより大きい塩ビ製の円筒の場合と大きく違っている。前報²⁾ の円筒体の付加質量の測定結果では $d/D=0.02\sim 0.1$ において K_{90} はほぼ一

定であったが、 K_0 は d/D の値によって大きく変化していた。同様な傾向が有孔円筒体の K_0 にも現れたものと考えられる。また同時に d/D が大、すなわち肉厚が厚ければ孔の部分の付加質量も多くなり K_0 が大きくなるのは当然のことである。なお同図では d/D を大・中・

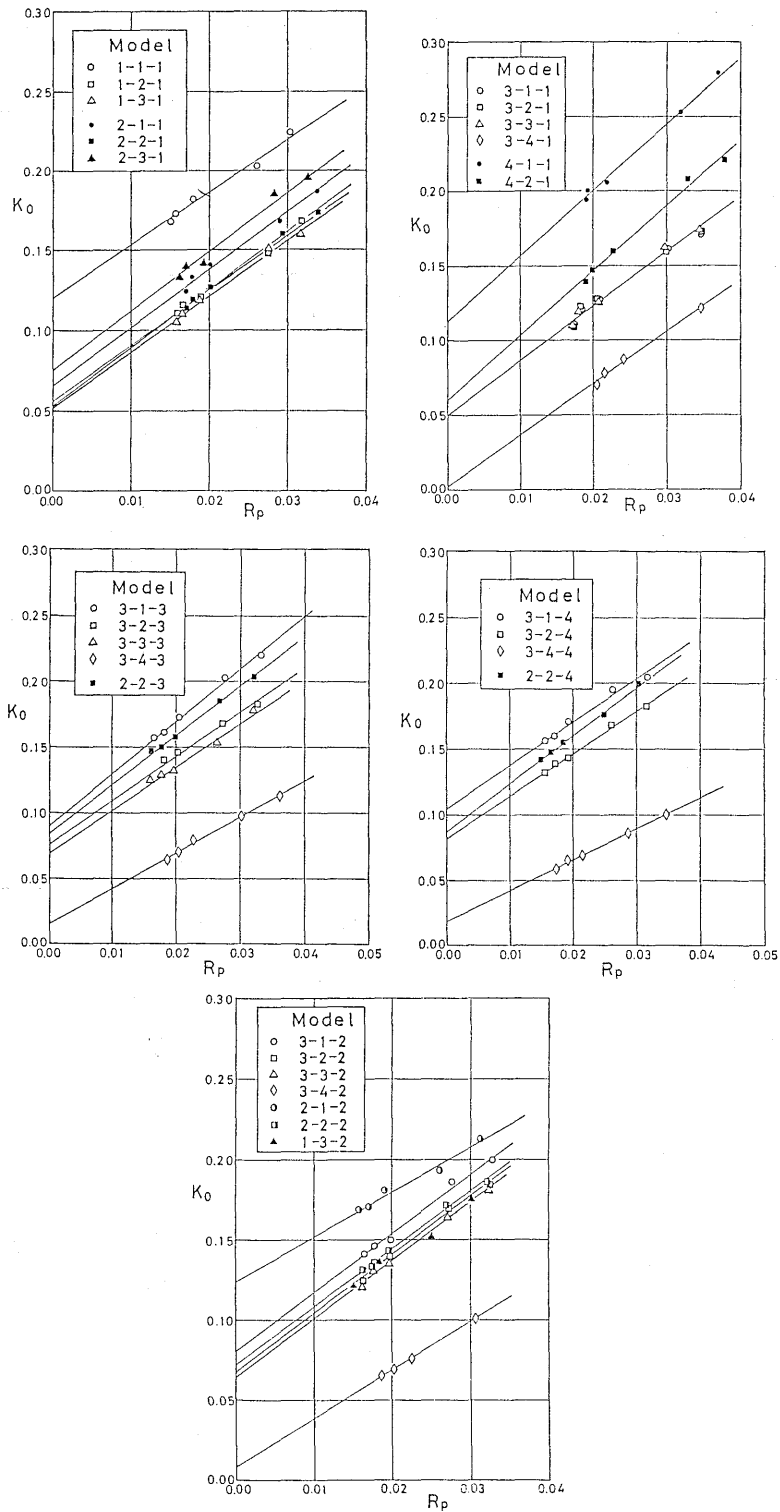


Fig. 7. Relation between K_0 and R_p of various types of porous circular pipes.
 K_0 =added mass coefficient of pipes moving parallel to longitudinal axis in water, R_p =corresponding Reynolds number.

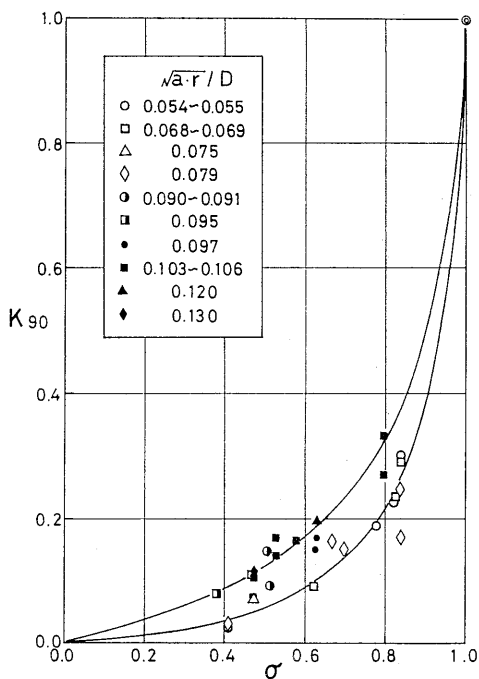


Fig. 8. Variation of K_{90} with solidity (σ) of porous circular pipes. $\sigma = S'/S$, where S is the total area included the area of holes, and where S' is the actual area eliminated the area of holes. At the same value of σ , small value of $\sqrt{a \cdot r}/D$ indicates that the circular pipe has many small holes, and large value of $\sqrt{a \cdot r}/D$ indicates that the circular pipe has a few large holes. Upper line indicates $\sqrt{a \cdot r}/D \approx 0.1$, lower line indicates $\sqrt{a \cdot r}/D \approx 0.07$.

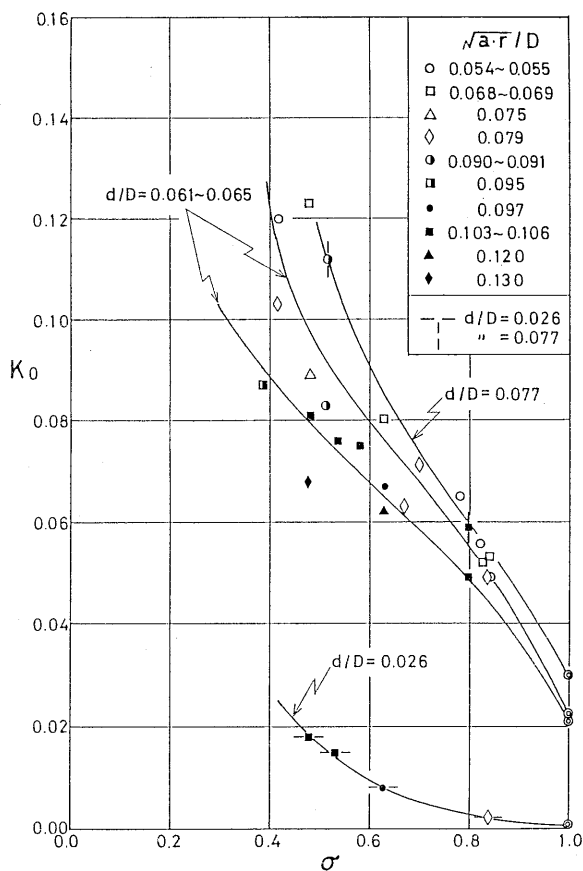


Fig. 9. Variation of K_0 with solidity (σ) of porous circular pipes. Other explanations are same as those of Fig. 8.

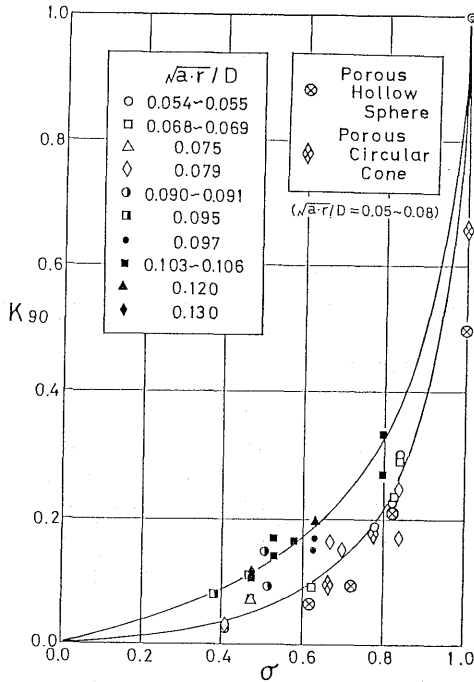


Fig. 10. Variation of K_{90} with solidity (σ) of porous circular pipes, porous hollow spheres, and porous circular cones.

小の三つの領域に分けて実験点を整理し近似曲線をひいた。ただ $d/D=0.061\sim 0.065$ の場合は、実験点が多かったことにもよるが、 K_0 の値にばらつきが見られる。このばらつきは K_{90} の場合と同様に $\sqrt{a \cdot r}/D$ に関係しているものと考えられる。したがって同図でも $\sqrt{a \cdot r}/D$ が 0.07 付近を通るものと、0.10 付近を通るものと二つに分けて二本の近似曲線を描いた。なおいずれの場合も、 $\sigma=1.0$ では円筒体の場合の K_0 の値をとることは K_{90} と同様である。

有孔円筒体と有孔球殻・有孔複円錐殻との関係 本実験では有孔物体としてまず有孔円筒体を考え、それと比較の意味で他の基本的な形状物体として有孔球殻、有孔

複円錐殻をとりあげた。この有孔球殻、有孔複円錐殻の K_{90} と σ との関係、有孔円筒体の K_{90} と σ との関係図 Fig. 8 上に重ねたのが Fig. 10 である。有孔球殻は \otimes 、有孔複円錐殻は \diamond の記号を用いた。また $\sigma=1.0$ の値は、各々中空でなくて中身がある球体および複円錐体についての値である。

Table 1 にも示したごとく、有孔球殻と有孔複円錐殻の $\sqrt{a \cdot r}/D$ の値は 0.05~0.08 であり、Fig. 8 において有孔円筒体の $\sqrt{a \cdot r}/D$ の値を大・小二つに分けたうちの小さい方に属している。また両者の K_{90} の値も、有孔円筒体の $\sqrt{a \cdot r}/D=0.05\sim 0.08$ の K_{90} の値とほとんど同じかやや小さめになっている。 $\sigma=1$ のときの K_{90} の値を比較してみると、有孔球殻、有孔複円錐殻の値が有孔円筒体の値より小さいことを考えると、有孔球殻も有孔複円錐殻も有孔円筒体の結果とうまく対応しているといえる。すなわち有孔球殻および有孔複円錐殻の測定値は、 $\sigma=1$ での各々の測定点から、有孔円筒体の $\sqrt{a \cdot r}/D=0.07$ でひいた曲線にそわせて描ける曲線上にうまくのっている。

本実験での有孔物体は、 d/D の値が 0.012~0.076 といわゆる殻状のものだけを取り扱ったが、上記のことより任意の形状を有する殻状の有孔物体の K_{90} は、その有孔物体の実質面積率 σ と $\sqrt{a \cdot r}/D$ の値を知れば、Fig. 8 あるいは Fig. 10 を利用することによって推測できる。

前報および本論では種々な物体の付加質量を求めた。先に示したり強制係留された球体での運動解析の理論が、これらの物体にも適用できるかどうかを検討するために、次にはこれらの物体を強制係留した実験を行う所存である。

文 献

- 1) 井上 悟, 佐藤 修: 日水誌, 51, 1769-1776 (1985).
- 2) 井上 悟, 佐藤 修: 日水誌, 51, 1997-2006 (1985).