

II-184

三次元性を考慮した水膜振動特性

(株)栗本鉄工所

正員 中島 康夫

建設省土木研究所

正員 角 哲也

1. はじめに

本報文は、水膜振動現象に関して越流幅の効果が考慮できる三次元模型を使用して、振動周波数および音圧レベルを調査したものである。目的は、水膜背後の空洞における三次元的な気柱振動や空洞振動が水膜振動に影響を与えているのか、またスポイラによる対策が低周波空気振動の音圧レベルにどのような効果を及ぼすのかを明らかにすることである。振動特性は、越流幅、落下高、放流量および水膜の両端の境界条件に依存し、越流ゲートにおいて、越流幅を考慮した水膜振動発生領域を特定するための資料が得られた。

2. 実験条件

実験装置を図1に示す。ゲートに相当する部分は刃形ゼッキを水平面に対して 40° の起立角で固定した。実験ケースを表1に示す。音圧レベルは最大越流幅に相当する水膜から6m下流の地点において、0~50Hzで一様特性である低周波音レベル計で測定し、また、振動周波数は超音波距離センサの測定値と合わせて周波数分析を行った。

3. 実験結果

(1) 振動周波数 特定の越流水深において卓越した周波数の水膜振動が発生し、また、その前後の越流水深においても、やや異なる準卓越周波数が存在する。振動周波数は越流水膜の両端が開放状態でも密閉状態でも、ほぼ一定であり、さらに、越流水深や越流幅にも依存していないことから、水膜振動は二次元性を保っていると考えられる。

越流水膜が両端開放状態の卓越周波数を図2に示す。仮に、ゲート部に自励振動が発生しているとすれば、 $fr \cdot t_0 = n + \beta/2$ となるが、今回の実験では、落下高が2.5mのとき卓越周波数は $n=15, 16$ となり、従来に比べてかなり高次の振動となっている。ここで fr は周波数、 t_0 は落下時間である。

次に、卓越周波数と準卓越周波数が発生する各越流幅における越流水深の領域を図3に示す。ここで準卓越周波数の領域は、時々卓越した周波数を発生するが大部分は落下音のみによる卓越のない周波数であり、有害な空気振動とはならない領域と考えてよい。図3によれば越流幅に従って振動領域が広がっており、径間が長くなると放流量が増加して水膜が厚くなっても振動が停止しない可能性がある。

(2) 音圧レベル 放流量に対する音圧レベルの変化を図4および図5に示す。水膜振動が発生している場合の音圧レベルはある特定の越流水深において最大となる傾向を示し、

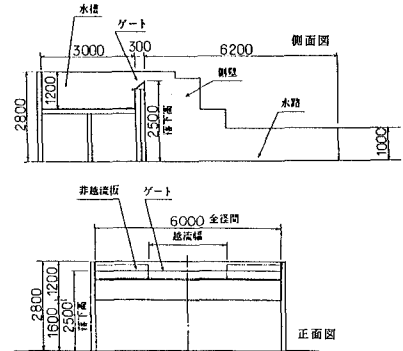


図1 実験装置

放流量 Q (L/s)	落下高 H (m)	ゲート起立角 α (°)	全越流水深 h (cm)
1.0	2.5	40	1.0
1.5	2.5	40	1.5
2.0	2.5	40	2.0
2.5	2.5	40	2.5
3.0	2.5	40	3.0
3.5	2.5	40	3.5
4.0	2.5	40	4.0
4.5	2.5	40	4.5
5.0	2.5	40	5.0
5.5	2.5	40	5.5
6.0	2.5	40	6.0
6.5	2.5	40	6.5
7.0	2.5	40	7.0
7.5	2.5	40	7.5
8.0	2.5	40	8.0
8.5	2.5	40	8.5
9.0	2.5	40	9.0
9.5	2.5	40	9.5
10.0	2.5	40	10.0
10.5	2.5	40	10.5
11.0	2.5	40	11.0
11.5	2.5	40	11.5
12.0	2.5	40	12.0
12.5	2.5	40	12.5
13.0	2.5	40	13.0
13.5	2.5	40	13.5
14.0	2.5	40	14.0
14.5	2.5	40	14.5
15.0	2.5	40	15.0
15.5	2.5	40	15.5
16.0	2.5	40	16.0
16.5	2.5	40	16.5
17.0	2.5	40	17.0
17.5	2.5	40	17.5
18.0	2.5	40	18.0
18.5	2.5	40	18.5
19.0	2.5	40	19.0
19.5	2.5	40	19.5
20.0	2.5	40	20.0
20.5	2.5	40	20.5
21.0	2.5	40	21.0
21.5	2.5	40	21.5
22.0	2.5	40	22.0
22.5	2.5	40	22.5
23.0	2.5	40	23.0
23.5	2.5	40	23.5
24.0	2.5	40	24.0
24.5	2.5	40	24.5
25.0	2.5	40	25.0
25.5	2.5	40	25.5
26.0	2.5	40	26.0
26.5	2.5	40	26.5
27.0	2.5	40	27.0
27.5	2.5	40	27.5
28.0	2.5	40	28.0
28.5	2.5	40	28.5
29.0	2.5	40	29.0
29.5	2.5	40	29.5
30.0	2.5	40	30.0
30.5	2.5	40	30.5
31.0	2.5	40	31.0
31.5	2.5	40	31.5
32.0	2.5	40	32.0
32.5	2.5	40	32.5
33.0	2.5	40	33.0
33.5	2.5	40	33.5
34.0	2.5	40	34.0
34.5	2.5	40	34.5
35.0	2.5	40	35.0
35.5	2.5	40	35.5
36.0	2.5	40	36.0
36.5	2.5	40	36.5
37.0	2.5	40	37.0
37.5	2.5	40	37.5
38.0	2.5	40	38.0
38.5	2.5	40	38.5
39.0	2.5	40	39.0
39.5	2.5	40	39.5
40.0	2.5	40	40.0
40.5	2.5	40	40.5
41.0	2.5	40	41.0
41.5	2.5	40	41.5
42.0	2.5	40	42.0
42.5	2.5	40	42.5
43.0	2.5	40	43.0
43.5	2.5	40	43.5
44.0	2.5	40	44.0
44.5	2.5	40	44.5
45.0	2.5	40	45.0
45.5	2.5	40	45.5
46.0	2.5	40	46.0
46.5	2.5	40	46.5
47.0	2.5	40	47.0
47.5	2.5	40	47.5
48.0	2.5	40	48.0
48.5	2.5	40	48.5
49.0	2.5	40	49.0
49.5	2.5	40	49.5
50.0	2.5	40	50.0
50.5	2.5	40	50.5
51.0	2.5	40	51.0
51.5	2.5	40	51.5
52.0	2.5	40	52.0
52.5	2.5	40	52.5
53.0	2.5	40	53.0
53.5	2.5	40	53.5
54.0	2.5	40	54.0
54.5	2.5	40	54.5
55.0	2.5	40	55.0
55.5	2.5	40	55.5
56.0	2.5	40	56.0
56.5	2.5	40	56.5
57.0	2.5	40	57.0
57.5	2.5	40	57.5
58.0	2.5	40	58.0
58.5	2.5	40	58.5
59.0	2.5	40	59.0
59.5	2.5	40	59.5
60.0	2.5	40	60.0
60.5	2.5	40	60.5
61.0	2.5	40	61.0
61.5	2.5	40	61.5
62.0	2.5	40	62.0
62.5	2.5	40	62.5
63.0	2.5	40	63.0
63.5	2.5	40	63.5
64.0	2.5	40	64.0
64.5	2.5	40	64.5
65.0	2.5	40	65.0
65.5	2.5	40	65.5
66.0	2.5	40	66.0
66.5	2.5	40	66.5
67.0	2.5	40	67.0
67.5	2.5	40	67.5
68.0	2.5	40	68.0
68.5	2.5	40	68.5
69.0	2.5	40	69.0
69.5	2.5	40	69.5
70.0	2.5	40	70.0
70.5	2.5	40	70.5
71.0	2.5	40	71.0
71.5	2.5	40	71.5
72.0	2.5	40	72.0
72.5	2.5	40	72.5
73.0	2.5	40	73.0
73.5	2.5	40	73.5
74.0	2.5	40	74.0
74.5	2.5	40	74.5
75.0	2.5	40	75.0
75.5	2.5	40	75.5
76.0	2.5	40	76.0
76.5	2.5	40	76.5
77.0	2.5	40	77.0
77.5	2.5	40	77.5
78.0	2.5	40	78.0
78.5	2.5	40	78.5
79.0	2.5	40	79.0
79.5	2.5	40	79.5
80.0	2.5	40	80.0
80.5	2.5	40	80.5
81.0	2.5	40	81.0
81.5	2.5	40	81.5
82.0	2.5	40	82.0
82.5	2.5	40	82.5
83.0	2.5	40	83.0
83.5	2.5	40	83.5
84.0	2.5	40	84.0
84.5	2.5	40	84.5
85.0	2.5	40	85.0
85.5	2.5	40	85.5
86.0	2.5	40	86.0
86.5	2.5	40	86.5
87.0	2.5	40	87.0
87.5	2.5	40	87.5
88.0	2.5	40	88.0
88.5	2.5	40	88.5
89.0	2.5	40	89.0
89.5	2.5	40	89.5
90.0	2.5	40	90.0
90.5	2.5	40	90.5
91.0	2.5	40	91.0
91.5	2.5	40	91.5
92.0	2.5	40	92.0
92.5	2.5	40	92.5
93.0	2.5	40	93.0
93.5	2.5	40	93.5
94.0	2.5	40	94.0
94.5	2.5	40	94.5
95.0	2.5	40	95.0
95.5	2.5	40	95.5
96.0	2.5	40	96.0
96.5	2.5	40	96.5
97.0	2.5	40	97.0
97.5	2.5	40	97.5
98.0	2.5	40	98.0
98.5	2.5	40	98.5
99.0	2.5	40	99.0
99.5	2.5	40	99.5
100.0	2.5	40	100.0
100.5	2.5	40	100.5
101.0	2.5	40	101.0
101.5	2.5	40	101.5
102.0	2.5	40	102.0
102.5	2.5	40	102.5
103.0	2.5	40	103.0
103.5	2.5	40	103.5
104.0	2.5	40	104.0
104.5	2.5	40	104.5
105.0	2.5	40	105.0
105.5	2.5	40	105.5
106.0	2.5	40	106.0
106.5	2.5	40	106.5
107.0	2.5	40	107.0
107.5	2.5	40	107.5
108.0	2.5	40	108.0
108.5	2.5	40	108.5
109.0	2.5	40	109.0
109.5	2.5	40	109.5
110.0	2.5	40	110.0
110.5	2.5	40	110.5
111.0	2.5	40	111.0
111.5	2.5	40	111.5
112.0	2.5	40	112.0
112.5	2.5	40	112.5
113.0	2.5	40	113.0
113.5	2.5	40	113.5
114.0	2.5	40	114.0
114.5	2.5	40	114.5
115.0	2.5	40	115.0
115.5	2.5	40	115.5
116.0	2.5	40	116.0
116.5	2.5	40	116.5
117.0	2.5	40	117.0
117.5	2.5	40	117.5
118.0	2.5	40	118.0
118.5	2.5	40	118.5
119.0	2.5	40	119.0
119.5	2.5	40	119.5
120.0	2.5	40	120.0
120.5	2.5	40	120.5
121.0	2.5	40	121.0
121.5	2.5	40	121.5
122.0	2.5	40	122.0
122.5	2.5	40	122.5
123.0	2.5	40	123.0
123.5	2.5	40	123.5
124.0	2.5	40	124.0
124.5	2.5	40	124.5
125.0	2.5	40	125.0
125.5	2.5	40	125.5
126.0	2.5	40	126.0
126.5	2.5	40	126.5
127.0	2.5	40	127.0
127.5	2.5	40	127.5
128.0	2.5	40	128.0
128.5	2.5	40	128.5
129.0	2.5	40	129.0
129.5	2.5	40	129.5
130.0	2.5	40	130.0
130.5	2.5	40	130.5
131.0	2.5	40	131.0
131.5	2.5	40	131.5
132.0	2.5	40	132.0
132.5	2.5	40	132.5
133.0	2.5	40	133.0
133.5	2.5	40	133.5
134.0	2.5	40	134.0
134.5	2.5	40	134.5
135.0	2.5	40	135.0
135.5	2.5	40	135.5
136.0	2.5	40	136.0
136.5	2.5	40	136.5
137.0	2.5	40	137.0
137.5	2.5	40	137.5
138.0	2.5	40	138.0

これは越流水が薄膜状態では表面張力が水膜振動を抑える方向に作用し、逆に厚膜状態では水膜の質量が増加して慣性力が大きくなるために振動振幅が拡大しないためと推測される。ここで、放流量を横軸としたのは越流水深ではゲート形状による流量係数の相違により、落下水膜の流速や厚さが同一とはならないためである。

図4は、水膜両端の境界条件の影響を整理したものであり、同一越流幅でも、両端が壁から離れば最大音圧が4dB低下している。また、越流水膜の片端が側壁に接して流下する $B=3.0\text{m}$ の場合、実在する水膜は半分であるが $B=5.5\text{m}$ （両端解放）の音圧レベルとはほぼ同様である。これは、側壁が反射面となり壁の反対側に音響影像が形成されるためと考えられる。従って、実機において越流水膜の両側を堰柱から離すことは音圧の低下に効果がある。

次に、図5に越流幅の影響を示す。越流幅が変わっても似たような音圧レベルの変化を示すが、最大音圧を与える放流量と、その時の音圧レベルが異なる。最大音圧を与える放流量が異なるのは、越流幅を変化させる非越流板により水膜両端に縮流が生じ水膜厚が幅方向に一様でないためとも考えられるが、水膜振動の三次元性による可能性もある。

一方、越流幅による音圧レベルの相違は、水流のエネルギーに比例する $\Delta L_p = 10\log(B_2/B_1)$ dBでは説明されず、放流量および落下高の効果を含めて、水膜振動発生時の補正が必要と考えられる。

スポイラにより越流水膜を分断すると音圧レベルが低下した。これは、水膜背後の空洞の圧力変動が解放されること

と、水膜の分断により複数音源の干渉が起こること、水膜の分断された通気部からの音は水膜から直接に届く音とは位相がずれていることなどによると考えられる。また、越流水膜の分断数が多いほど音圧レベルを低下させることができ、水膜振動が発生する越流水深の領域を小さくする効果があった。

最後に、水膜振動による音圧レベルの距離減衰は、越流幅に相当する線音源の場合に相当し次のようになる。すなわち、 $r < B/n$ のとき、 $\Delta L_p = 10\log(r_2/r_1)$ dB、 $r \geq B/n$ のとき、 $\Delta L_p = 20\log(r_2/r_1)$ dBである。

4. おわりに

本実験では越流幅の効果に関して調査したが、水膜振動は周波数に関して二次元性を保っている。しかしながら、音圧レベルが最大となる放流量やその音圧レベルは二次元モデルだけでは説明されない結果となった。越流水膜を分断すると、水膜振動を停止させることは必ずしもできないが音圧レベルを低下させることは可能であり、従来の対策の有効性が確認された。また水膜振動が発生する各越流幅における越流水深の領域が特定され、長径間ほど振動発生放流量が大きくなる可能性が示された。また、音圧レベルの予測においては、水流のエネルギーに比例する落下音圧と、非線形な水膜振動音圧の分離が必要であり、落下高の効果を含めて各要素の定式化が必要と考えられる。

（参考文献） 1) 角・大久保、フラップゲート越流水膜の振動特性、土木学会第43回年講、1988年

2) 萩原、フラップゲートおよびナップの自励振動、土木学会論文集、第357号/II-3、1985年

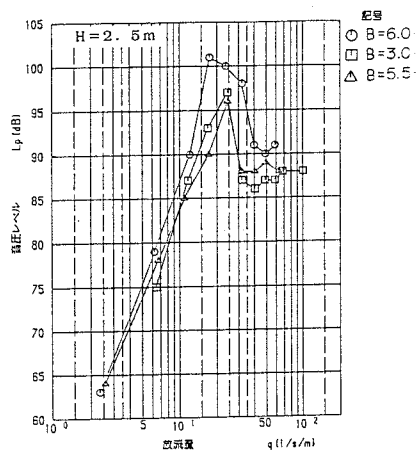


図4 放流量－音圧レベル（その1）

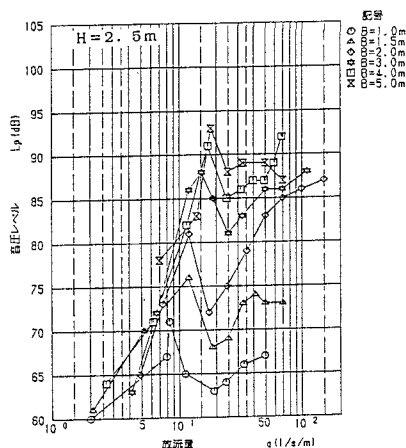


図5 放流量－音圧レベル（その2）