

ケーソン護岸連結目地内における流体共振スペクトルの理論解析

金沢大学大学院

○藤井 誠

金沢大学工学部 正会員 斎藤武久 フェロー 石田 啓

はじめに ケーソン護岸連結目地は、そのスケールが構造の代表長さに比べて極めて小さいため、従来、目地内での流体挙動が技術的に論じられることは少なかった。しかし、悲しくも痛ましい事故となった平成 13 年の大蔵海岸陥没事故¹⁾を教訓に、目地など、間隙内における流体挙動の正確な把握の必要性が指摘されている。これに関連して、著者ら²⁾は、ケーソン護岸連結目地内での流体挙動特性を実験的に考究し、目地内での流体共振の発生を報告している。具体的には、写真-1 に例示するような目地内での流体共振の発生を確認し、その発生条件を無次元波数 kL (k : 入射波の波数, L : 目地長さ)と波高増幅率との関係から図-2 のような流体共振スペクトルとして整理している。さらに、漸近接合法を用いた理論解析により、流体共振の発生条件の漸近解が $kL=(n+1/2)\pi$ ($n=0,1,\dots$)となることを示している。ただし、この漸近解は、目地幅 $2a$ をゼロへ漸近させた場合の解であり、流体共振の発生条件に関して、およそ目安となるに留まっている。また、理論解析では、線形ポテンシャル理論に基づき、エネルギー減衰効果を見逃しているため、目地内の波高増幅率を正確に評価することはできなかった。そこで本研究では、上述の理論解析法を発展させ、目地幅などの幾何形状特性を考慮した流体共振の発生条件および目地内でのエネルギー減衰効果を考慮した流体共振スペクトルを理論的に誘導し、実験結果との比較から、理論解析法の妥当性を検討する。

2. 理論解析方法 図-3 に示すように、ケーソン護岸へ入射波が直角入射する場合を対象として、解析領域を(I)外部領域、(II)目地端部領域、(III)目地内部領域に分割し、それぞれの領域で線形ポテンシャル理論に基づき速度ポテンシャルを次式のように定義する。

$$\text{領域(I)} \quad \phi_{(I)} = 2\bar{A} \cos kx + Q_R \sum_{m=-\infty}^{+\infty} H_0^{(1)}(kr_{Rm}), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad i = \sqrt{-1}, \quad \bar{A} = -igA/\omega \quad \dots (1)$$

$$\text{領域(II)} \quad \phi_{(II)} = \text{Re}W(\tau) = \text{Re}(M \ln \tau + C), \quad \hat{z} = \frac{2a}{\pi} \left[-i(\tau^2 - 1)^{1/2} + \ln(\tau / ((\tau^2 - 1)^{1/2} + i)) \right], \quad \hat{z} = x + iy \quad \dots (2)$$

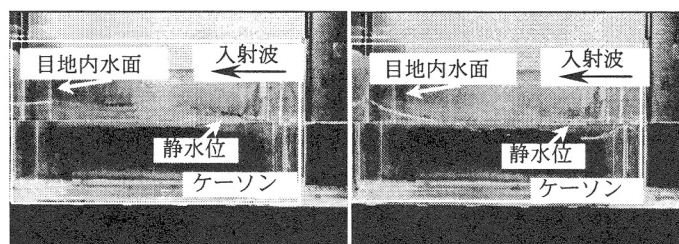
$$\text{領域(III)} \quad \phi_g = E \left(e^{-ik(x+L)} + K_R e^{ik(x+L)} \right) \quad \dots (3)$$

ここに、 A は入射波振幅、 g は重力加速度、 ω は角振動数、 $H_0^{(1)}(kr)$ は第 1 種 0 次ハンケル関数 ($H_0^{(1)} = J_0 + iN_0$)、 Q は湧き出し強さを表す。なお、外部領域では、目地による影響を連続壁面上の点湧き出しにより表現し、目地端部領域では、写像変換を利用した。さらに、目地内部領域では、目地奥で不透過の条件を与え、得られた式の反射波の項に反射率 K_R を用いて、目地内でのエネルギー減衰効果を取り込むこととした。式(1)～(3)において未知数は、 Q, M, C, E となるが、隣り合う領域への漸近速度ポテンシャルを誘導・接合し、項別に等値することにより未知数 E は K_R を含んだ次式のように定まる。

$$E = \frac{2\bar{A}}{(1 + kaR_R)e^{-ikL} + (1 - kaR_R)K_R e^{ikL}} \quad \dots (4)$$

$$R = \left(1 + \frac{2i}{\pi} \ln \frac{2\gamma ka}{e\pi} + 2 \sum_{m=1}^{+\infty} H_0^{(1)}(kmd) \right)$$

ここに、 γ はオイラー一定数を表し、 $d=B+2a$ である。式(4)を式(3)に代入し、水面での力学的境界条件により、目地内の水面変動 η は次式のように記述できる。



$kL=1.45$ (一次モード)

$kL=4.46$ (二次モード)

写真-1 目地内での水面変動 ($2a/L=0.026$)

$$\eta = \frac{2A(e^{-ik(x+L)} + K_R e^{ik(x+L)})}{S + iT + U + iV} \quad \cdot \cdot (5)$$

$$S = (1 + kaR_a) \cos kL + kaR_b \sin kL$$

$$T = kaR_b \cos kL - (1 + kaR_a) \sin kL$$

$$U = K_R \{ (1 - kaR_a) \cos kL + kaR_b \sin kL \}$$

$$V = K_R \{ -kaR_b \cos kL + (1 - kaR_a) \sin kL \}$$

$$R_R = R_a + iR_b, \quad R_a = 1 + 2 \sum_{m=1}^{+\infty} J_0(kmd),$$

$$R_b = \frac{2}{\pi} \ln \frac{2\gamma ka}{\pi e} + 2 \sum_{m=1}^{+\infty} N_0(kmd)$$

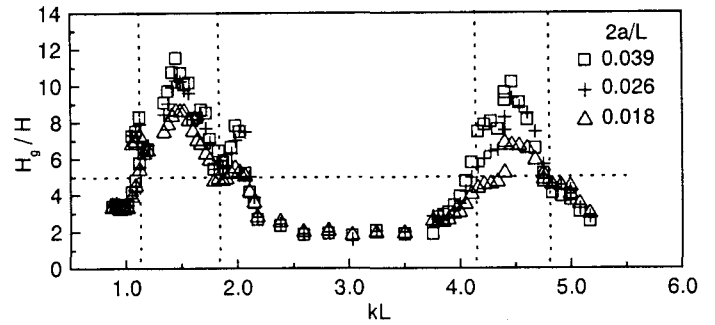


図 - 2 流体共振の発生範囲

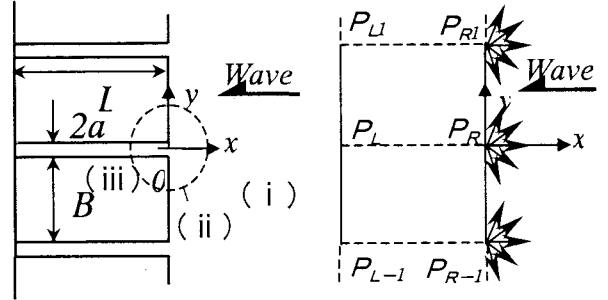


図 - 3 座標系 (右図は外部領域の場合)

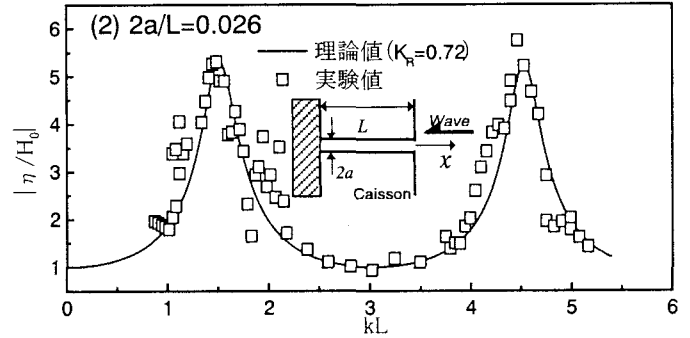
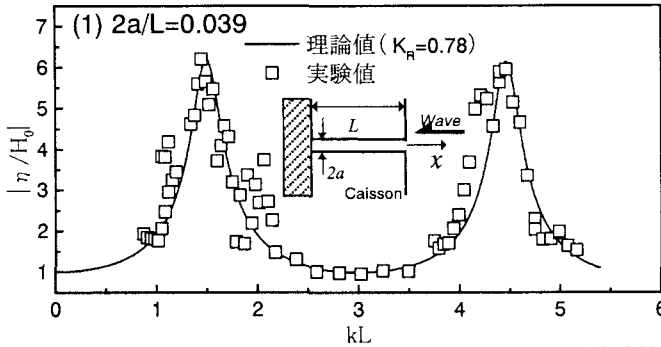


図 - 4 理論解析結果と実験結果との比較

さらに、式(6)を変形し、その絶対値を取ることによって、目地奥 ($x = -L$) での流体共振スペクトルが次式として誘導される。

$$|\eta/H|_{x \rightarrow -L} = (1 + K_R) / \sqrt{(S + U)^2 + (T + V)^2}, \quad H = 2A \quad \cdot \cdot (6)$$

3. 解析結果および考察 式(6)を用いた流体共振スペクトルの結果を図-4に例示する。図より、実験で水面変位が最大となった $kL = 1.45$ と $4.46(2a/L=0.039)$ および $kL = 1.49$ と $4.46(2a/L=0.026)$ 付近において、理論解析による流体共振スペクトルは極値を示し、最も顕著な流体共振発生時の無次元波数は実験結果と極めてよく一致することが分かる。なお、この無次元波数の理論値は、 $K_R=1.0$ としてエネルギーの減衰効果を考慮しない場合の流体共振スペクトルから得られた無次元波数の理論値とほぼ同じ値となっていた。このことは、目地内でのエネルギー減衰効果が最も流体共振の顕著となる無次元波数、つまり流体共振の発生条件に与える影響は小さいことを示すものである。さらに、最も顕著な流体共振発生時における水面変位の実験値は、理論解析により $2a/L=0.039$ の場合 $K_R=0.78$, $2a/L=0.026$ の場合 $K_R=0.72$ で非常に良く再現できていることが分かる。

4. まとめ 本研究では、ケーソン護岸連結目地内での流体共振特性を理論的に考究し、目地内における流体共振スペクトルを理論的に誘導した。実験結果との比較により、本研究で新たに誘導した流体共振スペクトルを用いて、目地内水面変位が最大となる場合の無次元波数を特定できること、さらに、流体共振時における目地内水位を適確に表現し得ることがわかった。現在、形状比の変化に伴う K_R の変化に関して検討中である。

参考文献

- 1) 大蔵海岸陥没事故調査小委員会：平成13年度 大蔵海岸陥没事故調査小委員会 最終報告書 2002.
- 2) 斎藤武久・稲田春野・Miao, G.P.・石田 啓：ケーソン護岸連結目地内での流体共振特性とその発生条件, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.716-720, 2004.