

ドラム遠心実験における波浪特性の観察

東洋建設	正会員	○宮本 順司	大阪大学	正会員	荒木 進歩
神戸大学	正会員	澤田 豊	東洋建設	正会員	小竹 康夫
大阪大学		牛山 弘己	神戸大学	学生会員	田中 佑弥

1. はじめに

別報¹⁾ではドラム型遠心力载荷装置を用いた、消波ブロック被覆堤の砂地盤の吸出しに関する水理模型実験を報告している。遠心力場の波浪実験では、円筒水路を回転させることにより水路全体に遠心力を作用させる。遠心力場の波浪実験の最大の特徴は、遠心力により通常重力(1g)のN倍の加速度(Ng)を円筒水路内に作用させて、模型に実物スケールの波圧、間隙水圧、地盤内応力を再現できることである。遠心力場における重力波の伝播特性は、関口²⁾により理論的に検討されている。この中で、円筒水路を回転させることによって生じるコリオリ効果が具体的に示されている。本報では、別報¹⁾の水理模型実験のために遠心力場の水路で行った波浪検定に関して示す。

2. コリオリ効果を考慮した入・反射の分離推定法

(1) コリオリ効果：円筒水路(半径R)が一定の角速度 Ω のもとで、鉛直軸周りに回転しているとする(図-1)。水路内で造られた水面波の円周方向への伝播問題を考える。この時、波の分散関係にコリオリ効果が及ぶため、それを考慮すると、容器回転の方向(正の方向)に波が伝播する場合と、負方向に波が伝播する場合とでは分散関係式は以下になる²⁾。

正方向に伝播する波： $\omega = \Omega[(A^2 + k \cdot A)^{0.5} + A] \dots (1)$

負方向に伝播する波： $\omega = \Omega[(A^2 + k \cdot A)^{0.5} - A] \dots (2)$

ここで、 ω ：波の角周波数、 k ：波数(=2 π a/L、L：波長、a：ドラム回転中心から静止水面までの距離)、b：ドラム回転中心から底面までの距離、A：a,b,kの関数で定義されるパラメータ。波の伝播速度は $c = a\omega/k$ で求められるが、上式(1)(2)で求まるkが異なるため、正方向と負方向で伝播速度が異なる。計算例を図-2(a)に示す。正方向に伝播する波の方が負方向に伝播する波より速いことがわかる。図中の赤線はコリオリ効果を受けていない場合の微小振幅波理論から求めた伝播速度であり、正方向と負方向の伝播速度の中間になる。円筒半径を大きくしa/d(d：水深)の値を大きくすると、コリオリ効果の影響が小さくなり赤線に近づく。コリオリ効果は波によってもたらされる変動水圧の大きさにも影響を及ぼす(図-2(b))。正方向に伝播する波の変動水圧は負方向に伝播するものよりも大きいことがわかる。

(2) 入・反射の分離推定法：通常重力場の波浪実験における入・反射波の分離推定法は合田ら³⁾によって示されている。ここで入射波と反射波の伝播速度は等しい前提で導かれているが、上述のように回転容器内ではそれらが異なる。本研究では、入射波と反射波の伝播速度を区別して式(3)の分離法を新たに導いた。

キーワード 遠心模型実験, 波浪, コリオリ効果

連絡先 〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1 東洋建設(株)鳴尾研究所 TEL0798-43-5903

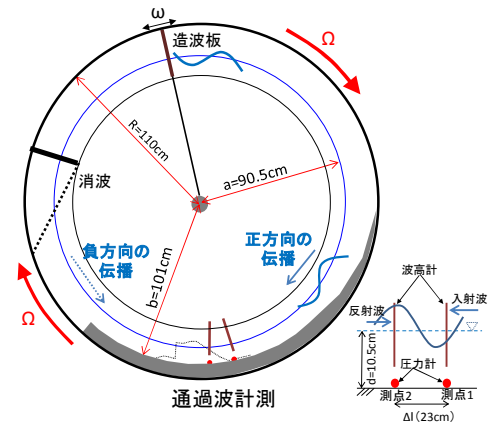


図-1 回転する円筒容器内の水面波の伝播と波浪計測

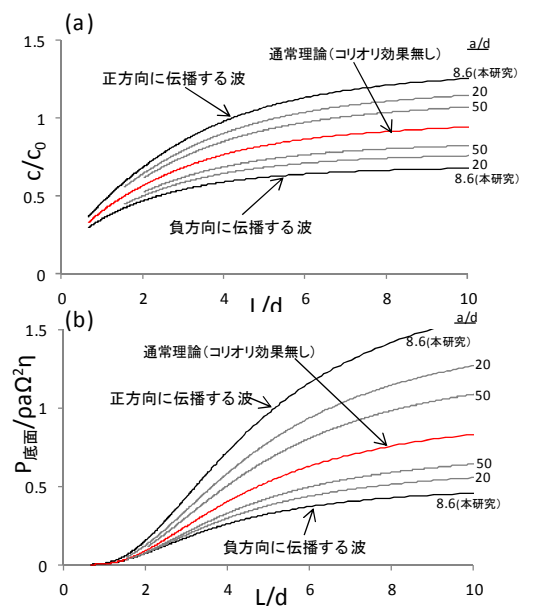


図-2 コリオリ効果の計算例：(a)無次元化した伝播速度と波長/水深比の関係、(b)無次元化した変動水圧と波長/水深比の関係(ただし、 $c_0=(a\Omega^2 d)^{0.5}$ 、d：水深、 η ：水面変動、 $a\Omega^2$ ：遠心加速度)

$$a_i = \frac{\{(CX_i + DY_i)^2 + (CY_i - DX_i)^2\}^{0.5}}{(C^2 + D^2)} \quad (i=L, R; \quad L: \text{入射波の時}, R: \text{反射波の時}) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} X_L &= A_2 - A_1 \cos(k_R \Delta l) - B_1 \sin(k_R \Delta l) & X_R &= A_2 - A_1 \cos(k_L \Delta l) + B_1 \sin(k_L \Delta l) & C &= \cos(k_L \Delta l) - \cos(k_R \Delta l) \\ Y_L &= B_2 + A_1 \sin(k_R \Delta l) - B_1 \cos(k_R \Delta l) & Y_R &= B_2 - A_1 \sin(k_L \Delta l) - B_1 \cos(k_L \Delta l) & D &= \sin(k_L \Delta l) + \sin(k_R \Delta l) \end{aligned} \right\}$$

ここで、 a_L , a_R : 入・反射波の振幅, k_L , k_R : 入・反射波の波数, Δl : 波の測定 2 地点の間隔, A_1 , B_1 , A_2 , B_2 : 2 測点のそれぞれの測定波形の $\cos$ 成分, $\sin$ 成分の振幅である。

3. 遠心力場の波浪検定

造波板の変位を制御する入力電圧を変化させて 6 つの波浪実験を行った。実験は全て、別報 1) に示す大規模実験の 1/38 模型水路で遠心力場 38g において行った。図-2 に示すようにコリオリ効果により正方向と負方向に伝播する波とで伝播速度が異なるため、厳密には伝播方向の正負に応じて使い分けるべきであるが、正負 2 方向の平均という意味で、コリオリ効果を受けていない分散関係を援用して波の周期を決定した。

$$\omega^2 = a \Omega^2 \cdot k \cdot \tanh(kd) = Ng \cdot k \cdot \tanh(kd) \cdots (4)$$

ここで、 $N=38$ であり、 k は実物の 38 倍とできるので、模型と実物とで $\omega_m = \omega_p \times 38$ の関係が成り立つ。大規模実験の波の周期が 7 秒なので、本研究の遠心模型実験の周期は 0.18 秒 ($=7/38$) とした。

2 つの測点 ($\Delta l=23\text{cm}$) で水位および底面圧力の変動を測定した (図-1 参照)。測定結果の 1 例を図-3 に示す。これらの観測波形から上式 (1) ~ (3) を用いて、水位変動と底面圧力変動それぞれについて入・反射波の振幅を求めた。得られた入射波の振幅を、実物波高に換算して、造波板制御の入力電圧ごとに図-4 にプロットした。ここで、波による底面変動圧力の計測値から得られた入射波の圧力振幅 P_i を、実物波高 H に換算するために、通常重力場の式 (5) を用いている。

ここは、底面水圧 P_i をもたらしうる実海域の波高を想定する目的であるためコリオリ効果を考慮しない。

$$P_i = \rho g \cdot (H/2) / \cosh(kd) \cdots (5)$$

図-4 で計測波高の値 (青○) と底面圧力から想定される波高 (赤●) との間に差が生じていることが重要であり、これはコリオリ効果によってもたらされている。すなわち、コリオリ効果が大きい場合は、実物の波高/波圧関係 (式 (5)) と遠心模型におけるその関係との差が大きくなる。従って、遠心力場の模型実験で底面圧力変動に関わる問題 (地盤やマウンド内の間隙水圧変動や地表面波圧に着目する問題) を取り扱う場合は、実験の入力波を波高縮尺で決定するのではなく底面圧力から得られる波高から決定する必要がある。実際、別報 1) の遠心模型実験の入力波の設定値は、大規模実験の波高 (実測) と底面圧力から換算した波高が整合するように決定している (図-4 参照)。

最後に、本研究は「水理模型実験における地盤材料の取り扱い方法に関する研究小委員会」の研究の一環として行われたことを付記する。

参考文献: 1) 荒木ら, 遠心模型実験による消波ブロック被覆堤マウンド下部地盤の吸出し現象の再現, 第 71 回年次後援会 (投稿中), 2) 関口秀雄, 遠心力場における水面波の造波とその適用, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 205-210, 1990. 3) 合田ら, 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 1976.

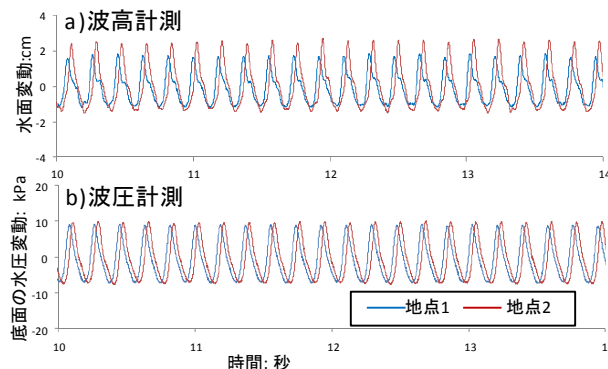


図-3 遠心力場38gの回転容器内を伝播する波高と波圧の計測結果(入力電圧5Vの場合)

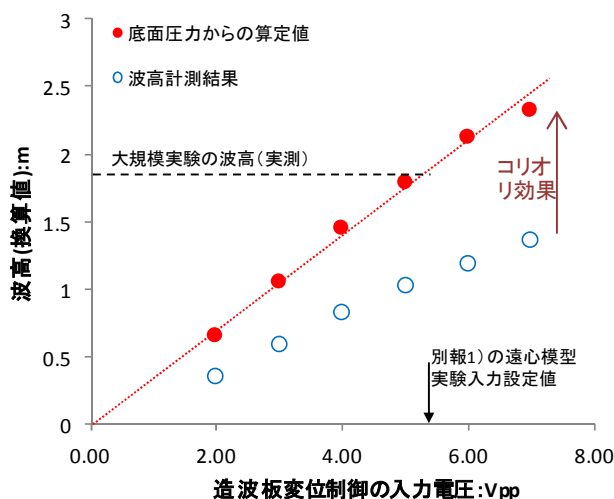


図-4 入射波の波高の比較: 波高計測結果と波圧計測結果から微小振幅波理論を用いて求めた波高