

ケーソン式防波堤の底面に作用する地震時動水圧について

濱田純次*・菅野高弘**・森田年一***・宮田正史****

1. 緒 言

構造物の振動に起因する動水圧に関する検討は, Westergaard (1933) のダムの壁体に作用する動水圧の検討にはじまり, 清川(1984)の水の圧縮性の検討, 中村(1993)の撓み性構造物に作用する動水圧等々, 様々な検討がなされてきている。ケーソン式防波堤に関しても上部ら(1989)は, マウンドの有無, マウンド高さ, マウンド幅をパラメタにし, 実験的に検討しており, 泉宮ら(1995)は, 鉛直動の影響を計算より評価している。ケーソン式防波堤の耐震設計においては, 現設計法では, 水平地震動のみ考慮し, ケーソン前背面に作用する動水圧は考慮されているもののケーソン鉛直振動やケーソン底面に作用する動水圧は考慮されていない。マウンド上のケーソンは, 水平地震動しか受けなくても, ロッキングやそれに伴った上下動が生じる。それにより, ケーソン底面に作用する動水圧はケーソンの上下動, ケーソンの水平動, 地盤の上下動, あるいはマウンドのせん断変形など様々な要因が含まれた水圧変動が生じるであろう。

本研究では, こういった研究背景を踏まえ, 設計では考慮されていないケーソン底面に作用する動水圧を水中振動実験により検討した。ケーソン底面に作用する動水圧に関しては, ケーソンの転倒検討の際に影響し, その動水圧は有意な値であろうか, 転倒する方向に作用しているのであろうか, またどういったメカニズムで動水圧が発生しているのかを検討した。

2. 水中振動実験

本実験は, ケーソン式防波堤の水平及び上下動の水中加振実験を行った。

2.1 実験模型・実験条件

模型振動実験には, 港湾技研所有の大型水中振動台を用い, 高さ 17.0 m のケーソン式防波堤を 1/22 縮尺した模型を用いた。図-1 に実験断面図と計器の取り付け位置を示す。ケーソン前背面に 4 つずつ動水圧計が埋め込

まれており, マウンド内にはケーソン下に間隙水圧計が多数配置してある。また, 加速度計もケーソンの上下及びマウンド内に配置してある。実験に用いたケーソンはロッキング及び滑動が生じやすいように重量を軽く製作した(単位体積重量 1.55 tf/m³ (15.2 kN/m³))。マウンドは砕石 4 号を用いた。

実験条件は, 表-1 に示すように入力加速度レベルと加振振動数を変えて行った。なるべくマウンドが変形しないようマウンド変形が小さいと予測されるケースより順にレベルを上げて行った。地震波加振では, 時間軸を Fr 相似に合わせた。なお, 本論文では, 主に水平正弦波加振結果を用いて実験データを整理している。

3. 実験結果

以下に得られた結果の一部を示す。

3.1 加速度波形

図-2 に正弦波加振時の加速度波形を示す。マウンド内加速度 (AH 10), ケーソン下加速度 (AH 2) と入力加

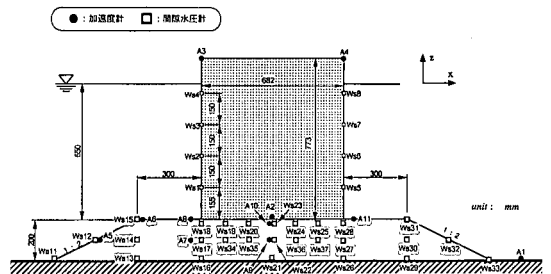


図-1 実験断面図と計測位置

表-1 実験ケース

加振方向	加速度レベル (m/s ²)	加振振動数 (Hz)
水平-方向	0.2, 0.3, 0.4, 0.5 1.0, 2.0, 4.0, 6.0	正弦波 1, 10, 20, 30, 50
	1.0, 6.0	地震波 神戸波, 八戸波, 大船渡波
鉛直-方向	0.2, 0.3, 0.4, 0.5 1.0, 2.0, 4.0, 6.0	正弦波 1, 10, 20, 30, 50
	1.0, 2.0, 4.0, 6.0	正弦波 (10 Hz)
水平+鉛直	1.0, 6.0	地震波 (神戸波)

* 正会員 工修 (株)竹中工務店技術研究所 生産研究開発部
 ** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部構造振動研究室
 *** 正会員 運輸省港湾技術研究所 構造部構造振動研究室
 **** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 構造部構造振動研究室

速度 (AH1) より、マウンド内で滑り (せん断変形) が生じており、更にケーソン底面での滑動も見られる。ケーソン上部はロッキングにより増幅している。また、ここでは示していないが、高振動数加振では完全にケーソン上下で逆位相になっており、ロッキング運動が卓越していた。ケーソン底面の鉛直加速度波形 (AV 2) は、鉛直入力 (AV 1) がないものの 1.0 m/s^2 以上の加速度が入力振動数の倍振動数で生じていた。

3.2 動水圧

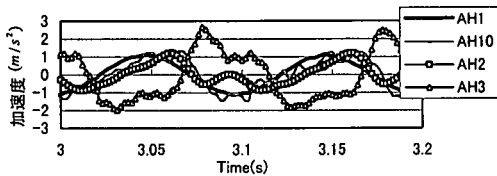
図-2 に対応する動水圧を図-3 に示す。マウンドがない場合はケーソン前背面で逆位相になっていたが、マウンドを有する場合、その影響により対称形にはなっていない。この理由は、5章にて詳しく述べる。図-4 は鉛直方向加振時のものであり、単純に重力加速度の変動分の静水圧変化(式1)として算定すると、 $\alpha = 0.98 \text{ m/s}^2$ として $Ws1$ 地点で 0.005 kgf/cm^2 (0.49 kPa) となり、大方の一致を示している。

$$p(z, t) = -\rho \alpha z \dots\dots\dots (1)$$

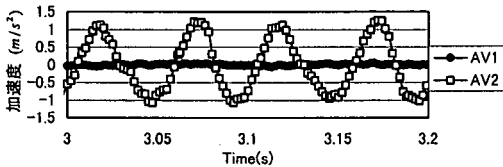
ここで p : 動水圧, ρ : 水の密度, α : 上下動の加速度, $-z$: 水深である。

3.3 過剰間隙水圧 (ケーソン底面での動水圧)

ケーソン底面に作用する動水圧を図-5 に示す。水平動によりケーソン底面での入力振動数の倍振動数成分が見られる。また、加速度レベルの小さな時 (0.2 m/s^2) は、ケーソン底面中央部では倍振動しているものの、底面端



a) 水平加速度波形



b) 鉛直加速度波形

図-2 加速度波形 (1.0 m/s^2 , 10 Hz , 水平加振)

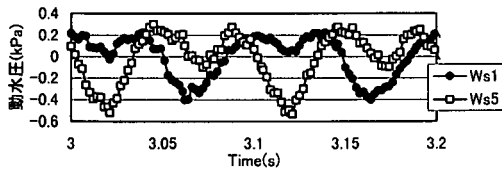


図-3 動水圧波形 (1.0 m/s^2 , 10 Hz , 水平加振)

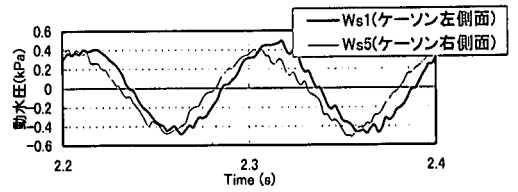


図-4 動水圧波形 (1.0 m/s^2 , 10 Hz , 鉛直加振)

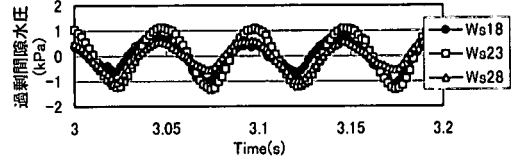


図-5 間隙水圧波形 (1.0 m/s^2 , 10 Hz , 水平加振)

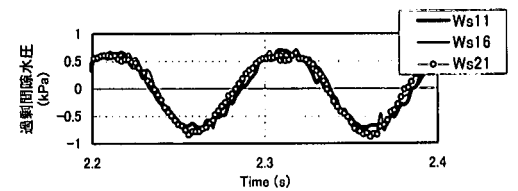


図-6 間隙水圧波形 (1.0 m/s^2 , 10 Hz , 鉛直加振)

部では、入力振動数で振動していた。これらの原因については6章で考察する。鉛直動によるそれは図-6 に示すようにマウンド内外で位相差もなく同様の波形となっており、式 (1) で推測可能である。

4. Laplace 式による動水圧

ポテンシャル理論を用いケーソン底面の動水圧を計算し、ケーソン幅やマウンド厚さの影響を検討した。ここでは、基本的な検討のためマウンドの透水性は十分にあるものとし、マウンド自身のモデル化は行っていない。

計算は、領域分割法 (井島ら, 1972) を用いて波動場の支配方程式である Laplace 方程式を境界値問題として解いた。図-7 に示すケーソン幅 B 、水深 h を変化させ、ケーソン底面の動水圧に与える影響を調べた。

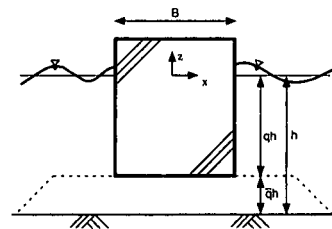


図-7 モデル図

4.1 ケーソン幅の影響

図-8にケーソンが鉛直振動した時のケーソン幅とケーソン底面中央での動水圧の関係を示す。その結果、ケーソン幅の増加に従い動水圧は著しく増加している。本実験では水深が0.85 mであるが、水深を変化させた動水圧も同図に示す。ケーソン底面と海底面の距離(qh)を一定に保っている限り、あまり水深の影響は受けていない。また、ケーソン幅を大きくしていくと $\rho B^2/8qh$ に漸近する。すなわち、ケーソン幅の2乗に比例する。

4.2 マウンド厚さの影響

図-9にケーソンが鉛直振動した時のケーソン下のマウンド厚さとケーソン底面中央での動水圧の関係を示す。ケーソン底面と海底面との間の距離が小さくなるに従って動水圧は大きくなる。本実験では、図中のケーソン底面と海底面の距離が0.2 mの所に相当し、動水圧に対して敏感な所であり、注意が必要である。

図-10にケーソン水平振動時、鉛直振動時のケーソンに作用する動水圧分布を示す。ケーソンの諸元は図-7と同様である。また、図に示した数値は、動水圧をケーソン加速度値で除した値である。a)の水平加振時には

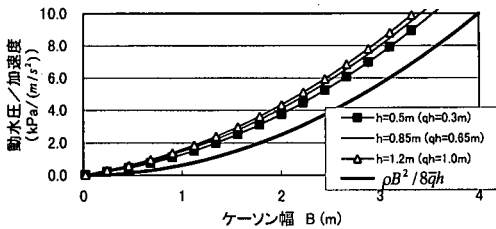


図-8 ケーソン幅の影響 (ケーソン鉛直振動)

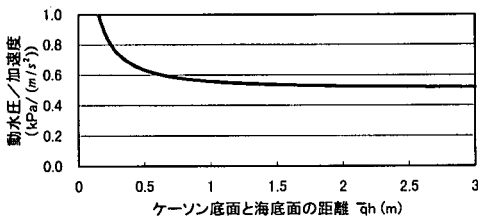
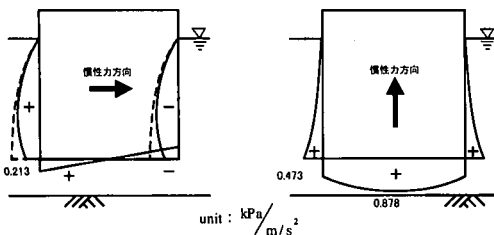


図-9 マウンド厚さの影響 (ケーソン鉛直振動)



a) 水平振動時 b) 鉛直振動時

図-10 ケーソン水平・鉛直振動時の動水圧分布

ウンドの透水性がない場合に相当する水深0.65 m時の動水圧を点線で重ねて示す。マウンドの透水性が大きいとした場合は、ケーソン側面下部で動水圧がかなり低下している。

ケーソン幅が大きい場合やマウンド厚が薄い場合、ケーソンの鉛直振動による動水圧は大きくなるが、その時のケーソンは、ロッキングしにくく、それによる鉛直動も生じにくくならう。しかし、鉛直動は、水平動の倍振動数で振動しており、鉛直変位が水平変位の1/4位であろうと同位の加速度が生じていることになり、注意が必要である。

5. ケーソン前背面動水圧

前章のポテンシャルによる計算結果(図-10)を用いて、実験での加速度値(AV2)とケーソン前背面動水圧値(Ws1, Ws5)を関連づける。

図-3でケーソン側面下方での動水圧の時系列波形を示したが、対称形の動水圧は得られなかった。この原因としてマウンドの影響が考えられる。しかし、マウンドの透水性は動水圧値には影響を及ぼすものの、それによって前背面での対称形が失われることはない。

図-11, 12にケーソン前後の動水圧の差の平均((Ws1-Ws5)/2)、和の平均((Ws1+Ws5)/2)を示す。和平均は、入力振動の倍振動数で振動しており、差平均は、入力振動数で振動している。和平均は、ケーソンの鉛直動により発生した動水圧であり、差平均は、ケーソンの水平動により発生したものである。ケーソンの水平加速度と差平均の関係を図-13に、鉛直加速度と和平均の関係を図-14に示す。また、点線は、図-10に示した理論値である。マウンドの透水性をモデル化していない

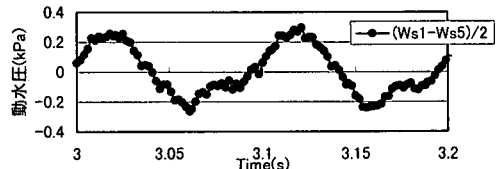


図-11 ケーソン前背面での動水圧の差平均 (1.0 m/s², 10 Hz, 水平加振)

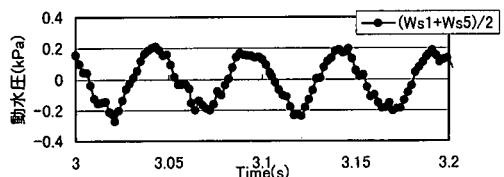


図-12 ケーソン前背面での動水圧の和平均 (1.0 m/s², 10 Hz, 水平加振)

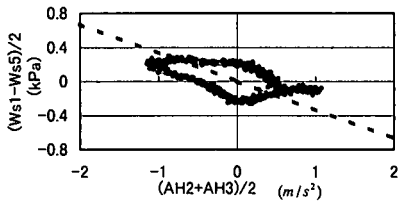


図-13 ケーソン前背面での動水圧の差平均とケーソン水平加速度の関係 (1.0 m/s², 10 Hz, 水平加振)

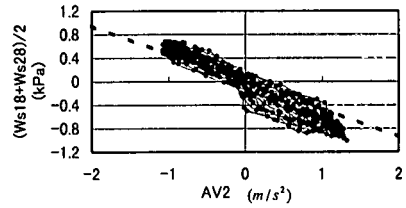


図-16 ケーソン底面端部での動水圧の和平均とケーソン鉛直加速度の関係 (1.0 m/s², 10 Hz, 水平加振)

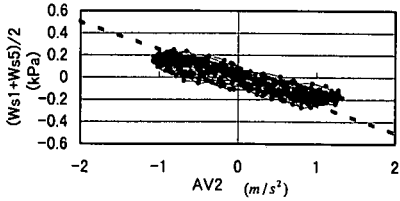


図-14 ケーソン前背面での動水圧の和平均とケーソン鉛直加速度の関係 (1.0 m/s², 10 Hz, 水平加振)

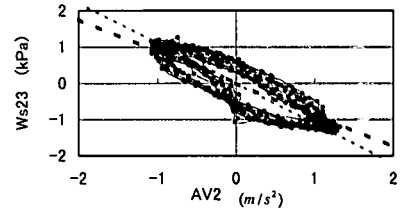


図-17 ケーソン底面中央部での動水圧とケーソン鉛直加速度の関係 (1.0 m/s², 10 Hz, 水平加振)

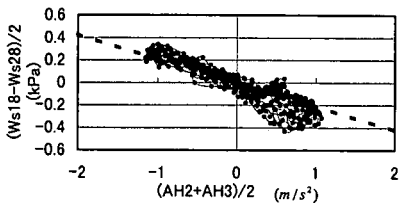


図-15 ケーソン底面端部での動水圧の差平均とケーソン水平加速度の関係 (1.0 m/s², 10 Hz, 水平加振)

ものの、概ね一致している。ケーソン前背面の動水圧はケーソン上下動による水圧の影響を大きく受けていることがわかる。しかし、ケーソンの水平加速度とケーソン前背面の動水圧は少し位相がずれている。これは、影響が小さいものとして無視したロッキングによる動水圧の影響かと思われる。

6. マウンド内の過剰間隙水圧 (ケーソン底面動水圧)

3.3でも一部示したが、ケーソン底面のマウンド内の過剰間隙水圧は、入力波の倍振動数で振動していた(1.0 m/s²水平加振, 図-5)。5章と同様、実験での加速度値と過剰間隙水圧値を関連づける。

ケーソン底面前後の過剰間隙水圧の和平均((Ws18 + Ws23)/2)は、ケーソン側面動水圧同様、入力振動の倍振動数で振動しており、差平均((Ws18 - Ws23)/2)は、入力振動数で振動していた。ケーソンの水平加速度と差平均の関係を図-15に、鉛直加速度と和平均の関係を図-16に示す。また、点線は、図-10に示した理論値である。ケーソンの底面の端部間隙水圧はケーソンの上下動のみ

でなく、水平動による影響も大きく受けていることがわかる。入力レベルの小さな場合(0.2 m/s²)は、ケーソンの鉛直振動が小さく、ケーソン底面端部の間隙水圧は水平動による間隙水圧が鉛直動によるそれより大きかったため、端部では入力振動数で振動していた。

また、図-17にケーソン底面中央部での動水圧とケーソン鉛直加速度の関係を示す。底面中央部も同様、理論値と大方の一致を示している。傾きの大きな点線は、一連の実験を通じてケーソンが沈下したためケーソンと海底面の距離が0.13 m (7 cm 沈下)として計算した理論値である。

以上より、ケーソン自身の鉛直動による動水圧は反力として作用しておらず、付加質量として作用していた。マウンドをモデル化していない計算とも大方一致していることより、有効応力低下による過剰間隙水圧の上昇成分は殆ど無かったと言える。

7. ケーソン水平加速度と鉛直加速度

6章で示した通り、動水圧はケーソンの慣性力方向に作用しているが、ケーソンの転倒を検討する際、動水圧は有利なように働かず不利なように働くかは、別の検討が必要となる。それは、ケーソンのロッキングの支点がどこにあるか、また、ケーソン水平加速度と鉛直加速度がいかなる位相関係にあるかによる。図-18に、入力加速度0.2, 1.0, 2.0 m/s² (10 Hz) 時の水平加速度成分と鉛直加速度成分の関係を示す。右に小さく示した図は、ケーソンの慣性力方向を示している。0.2 m/s²時は、ケーソンの下端部を支点とし、水平方向に変位したとき、上方に浮き上がっているが、2.0 m/s²時は、マウンドにめり

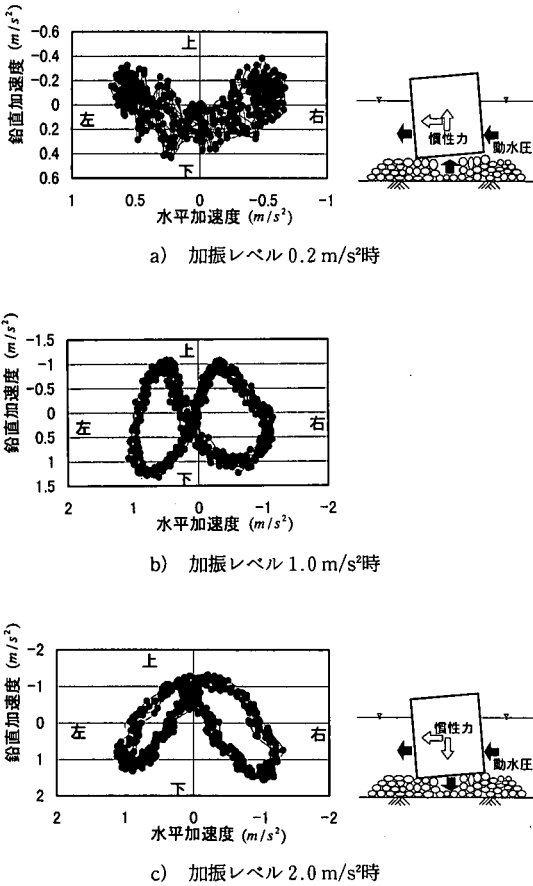


図-18 ケーソン水平加速度と鉛直加速度の関係(水平加振)

込んでおり、水平方向に変位したとき、下方に沈んでいる。1.0 m/s²時は、位相が90度ずれた結果となった。加速度レベルが小さな時は、端部圧も小さくマウンドが変形していないため前肢を支点にケーソンが持ち上がろうと回転するが、加速度レベルの大きな時は、前肢が沈んでしまい、回転の支点が後方にずれたため水平加速度と鉛直加速度の位相に違いが生じたと考えられる。

8. 結 論

ケーソン防波堤の底面に作用する動水圧を水中振動実

験により検討し、以下の結論を得た。

(1) 鉛直地震動による動水圧は重力加速度の変動分の静水圧変化に相当した。これはマウンド内外ともに成立した。

(2) 水平加振によるケーソン前背面に作用する動水圧は、マウンドの透水性により、マウンド天端面を海底とした動水圧より水平振動成分に関しては小さくなるものの、ロッキングにより発生するケーソン鉛直振動により倍振動数の動水圧が発生し、これが足し合わされた動水圧が生じた。

(3) ケーソン底面に作用する動水圧は、ロッキング運動によりケーソンが上下に入力波の倍振動数で振動することによって発生した。ロッキングの支点によってはケーソンを転倒させる方向に作用している場合も見られた。また、底面に作用する動水圧は側面のそれよりも大きかった。地盤の鉛直動がある場合は、これに地盤の鉛直動により発生した動水圧が加わり、ケーソン底面端部では、更にケーソンの水平動による動水圧の影響が大きくなり、これらが重なった形で水圧変動が生じた。

今回の実験では、マウンドの透水性が大きかったため以上の結論を得たが、透水性が小さな場合はマウンドのせん断変形の影響を受けたり、この限りではない。今後、実際のマウンドの透水性等を考慮し、実験・解析を進める予定である。

参 考 文 献

井島武士ら (1972. 6): 有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形, 土木学会論文報告集, 第202号.
 泉宮尊司, 田辺 剛 (1995): 鉛直加速度を考慮した地震時動水圧の評価, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 821-825.
 上部達生ら (1989): 混成式防波堤に作用する動水圧の模型振動実験, 港湾技研資料 No. 641.
 清川哲志 (1984): 流体の圧縮性を考慮した軸対象構造物の付加質量解析, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 471-475.
 中村孝明 (1993): 海洋構造物の地震時流体力によるねじり振動特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 866-870.
 Westergaard, H. M. (1933): Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE98, pp. 418-434.