

割石マウンドおよびケーソンから成る大水深防波堤 に作用する動水圧に関する模型振動実験

運輸省港湾技術研究所	正会員	上部達生
国土庁	〃	守屋正平
飛島建設(株)	〃	岡本 浩
運輸省港湾技術研究所		工藤勝己

1. まえがき

過去に幾度となく津波による大被害が発生しているリアス式海岸の地域では、津波防護を主要な目的として、湾口に津波防波堤が建設されている。リアス式海岸は周辺に山が迫って湾内の水深は急激に深くなっており、津波防波堤は大水深構造物となっている。この大水深防波堤は津波防護が主要な目的であるから、その耐震性の検討が重要な課題である。この耐震性の検討では大水深構造物に作用する地震力の他に、大水深域で非常に大きくなる動水圧が重要な課題である。本報告で対象としている構造物は割石マウンドとコンクリートケーソンからなる混成式防波堤である。この混成式防波堤の割石マウンド斜面とコンクリートケーソンの鉛直壁に作用する動水圧について模型振動実験および数値計算により検討した。

2. 模型振動実験の概要

本報告の実験は、水圧計の検定のための振動実験、混成式防波堤の剛体模型に作用する動水圧に関する実験、割石マウンド斜面に作用する動水圧に関する実験の3種類である。水圧計の検定のための振動実験は計測値に含まれる水圧計の受圧面に作用する慣性力を補正するための実験である。一連の実験を通じて使用した振動台は、運輸省港湾技術研究所所有の粘性土層振動試験装置である。振動台の駆動方式は動電駆動方式である。振動台上に設置する長さ3m×幅3m×深さ1.2mの振動箱の中央を壁で仕切り、その片方に模型を製作し、注水して各種実験を行った。振動台への入力波形としては全実験を通じて正弦波を用いた。その正弦波の振動数は5Hzで、波数は3波である。一つの模型に対して、加速度振幅を変化させて数回加振した。この入力正弦波の振動台上での加速度記録の一例を図-1に示す。計測システムは加速度計および水圧計、増幅器、それに記録器としての電磁オシログラフとデジタルデータレコーダーからなる。

3. 混成式防波堤の剛体模型に作用する動水圧に関する振動実験

(1) 実験内容

マウンドの高さおよび勾配、マウンド天端幅、ケーソンの高さ等を変えて、種々の形式の混成式防波堤の模型について振動実験を実施するのは非常に多くの労力を必要とする。そこで、もっとも重要と考えられるマウンド天端幅だけについて検討することとし、マウンド天端幅を段階的に変化させた混成式防波堤の剛体模型について振動実験を実施した。この振動実験結果と、動水圧の算定方法と比較検討し、これを踏まえて数値計算により、種々の形状の混成式防波堤に作用する動水圧を検討することとした。

模型はアクリル板を用いて製作した。図-2に示すように、マウンド模型を振動台に固定し、その上にケーソン模型を設置した。このケーソンは取り外しが可能で、図に示すように天端幅を0、10、20、30、40、50cmの6通りに変化させた。マウンドの高さは50cmであり、水深は1mである。水圧計はその受圧面が、ケーソン鉛直壁面あるいは斜面と同一面上になるように設置した。6通りの天端幅の模型に対して入力最大加速度を約50、100、150、200、250Galの5通りとした計30ケースの実験を実施した。

(2) 実験結果

実験結果と、境界要素法による数値計算結果、簡易公式(Westergaard¹⁾の近似式とZanger²⁾式)の値の比較

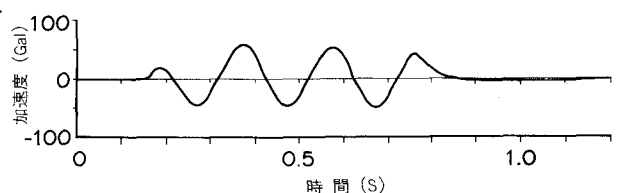


図-1 入力加速度の時刻歴

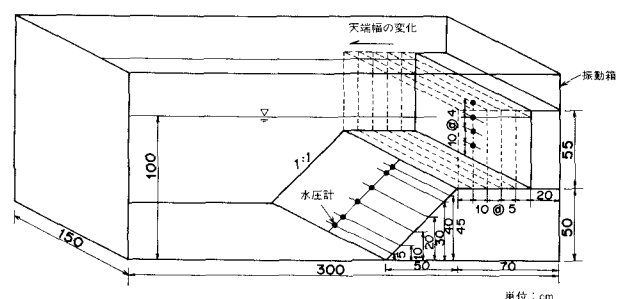


図-2 混成式防波堤の剛体模型

の1例を図-3を示す。図-3は、天端幅 $B=30\text{cm}$ 、入力加速度が約 100Gal のケースである。図中、実線は境界要素法による動水圧の算定結果であり、点線はWestergaardの簡易公式による算定結果である。黒丸は測定結果を示す。計算に用いた入力最大加速度は、実験時に振動台上で記録された値を用いた。ケーソン部の点線は、Westergaardの近似式において、水深 $h=50\text{cm}$ としたものであり、斜面部の点線はZanger式において、水深 $h=100\text{cm}$ としたものである。図-3によれば、境界要素法による動水圧の算定結果は実験結果とよく一致している。

図-4は天端幅 $B=30\text{cm}$ のときに、振動台上での加速度がそれぞれ約50、100、150、200、250 Galのときの実験結果と境界要素法による計算結果を比較して示したものである。実験値がやや、小さくなる傾向があるが両者はよく一致している。

図-5は入力加速度が振動台上で約 150Gal のときに天端幅 $B=0, 30, 50\text{cm}$ にたいして実験結果と境界要素法による計算結果との比較を行ったものである。両者はよく一致している。天端幅の変化により、ケーソンの鉛直壁およびマウンド斜面に作用する動水圧がどのように変化するかは次の数値計算において詳細に述べる。

(3) ケーソンおよびマウンドの形状が混成式防波堤に作用する動水圧に与える影響

1) 計算内容

前述の実験結果との比較より、境界要素法による動水圧の算定値は十分な精度を有することがわかったので、境界要素法による算定方法を用いてマウンドおよびケーソンの形状の変化が、混成式防波堤に作用する動水圧に与える影響を検討した。混成式防波堤の耐震設計では主にケーソンの鉛直壁に作用する動水圧が検討されており、その算定にはWestergaardの近似式が用いられる。そこで、ここでのケーソンおよびマウンドの形状が混成式防波堤に作用する動水圧に与える影響についての検討は、ケーソンおよびマウンドの形状を変化させた場合の境界要素法による計算結果が、対応する形状について求められる簡易公式（Westergaardの近似式、Zanger式）で与えられる計算値と比較することにより実施することにした。また、天端幅がどの程度の長さであれば、剛な鉛直壁に対するWestergaardの厳密解より求められる動水圧の値と混成式防波堤のケーソンの鉛直壁に作用する動水圧がほぼ等しくなるかと言う点も興味ある問題であるので、この点についての検討も行う。

混成式防波堤の形状は、図-6に定義するマウンド天端幅 B 、マウンド高さ dm 、マウンドの勾配、水深 h によって決定されるものとして、以下の検討でのパラメーターを B/h 、 dm/h およびマウンドの勾配の3つに設定した。パラメーターの値は、既設の防波堤の形状の調査を行い、次のように設定した³⁾。

- ① マウンドの勾配：1:4/3、1:1.5、1:2.0、1:2.5、1:3.0の5通り
 - ② マウンド天端幅と設計水深の比 B/h ：0.25、0.5、0.75、1.0の4通り
 - ③ マウンド高さおよび水深の比 dm/h ：0.2、0.4、0.6の3通り
- 以上の60ケースについて境界要素法による計算を実施した。

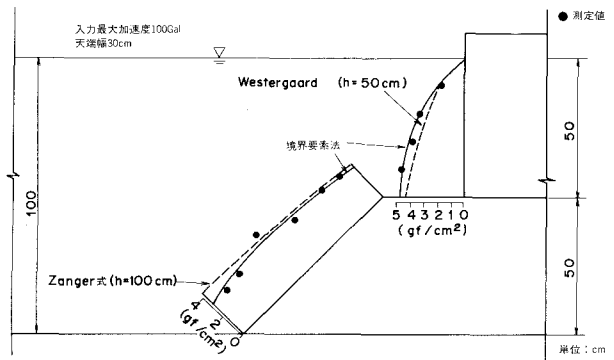


図-3 実験結果と、簡易公式および境界要素法による計算結果の比較

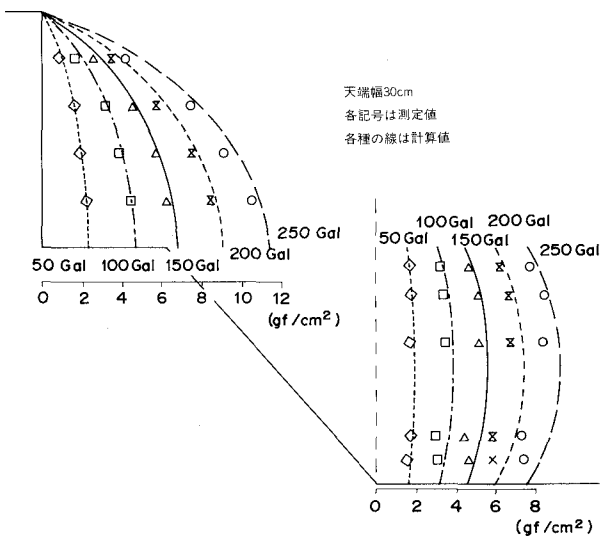


図-4 各入力加速度における境界要素法の計算結果と実験結果の比較

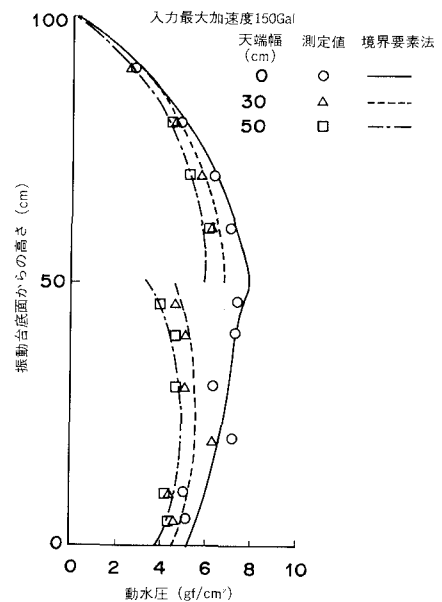


図-5 各天端幅における境界要素法の計算結果と実験結果の比較

2) 計算結果

a) ケーソン鉛直壁に作用する動水圧

まず、ケーソンの鉛直壁に作用する動水圧の計算結果について示す。境界要素法によるケーソンの鉛直壁に作用する動水圧の算定結果とWestergaardの近似式による比較はケーソンの鉛直壁に働く動水圧の合力に基づいて行った。計算結果の一例を図-7に示す。境界要素法によって算定した動水圧の合力とWestergaardの近似式による動水圧の合力との比を、3通りのマウンド高さ和水深の比 dm/h について、天端幅比 B/h に対して示してある。計算結果は以下のとおりである。

図-7に示すように、マウンド天端幅と水深の比 B/h が大きくなるにしたがって、動水圧が小さくなる。 $B/h = 0.25$ のときには、マウンドの勾配や、マウンド高さ和水深の比にかかわらず、数値計算による動水圧の合力はWestergaardの近似式による動水圧の合力を上回っている。その差の最大は約10%である。また、 $B/h = 0.5$ のときには、マウンド高さ和水深の比 $dm/h = 0.4$ の場合のみ、マウンドの勾配が $1:4/3 \sim 1:2.0$ の範囲において、数値計算による動水圧合力はWestergaardの近似式による合力を上回っている。その他の場合には、数値計算による動水圧の合力はWestergaardの近似式による動水圧の合力を下回っているが、その差は最大で約8%程度である。

図-8は、マウンド高さ和水深の比 dm/h が 0.4 のときに、マウンドの勾配が変わることによってケーソン部に働く動水圧の合力の比が変化する様子を示したものである。これによれば勾配が緩やかになればなるほど動水圧は減少することがわかる。

一方、天端幅がどの程度の長さになれば、ケーソンの鉛直壁に作用する動水圧が剛な鉛直壁に対するWestergaardの厳密解より与えられる動水圧とほぼ等しくなるかという点についても検討した。図-9には、マウンド天

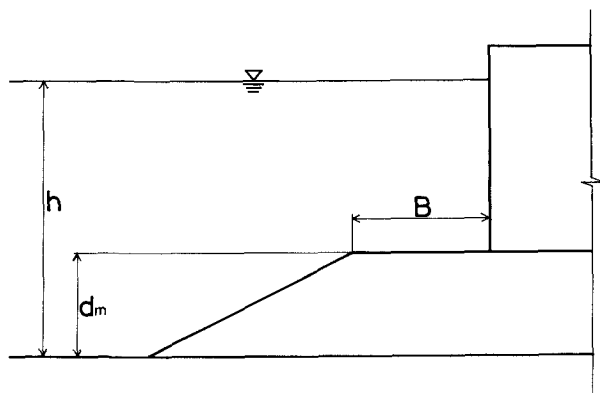


図-6 混成式防波堤の形状の定義

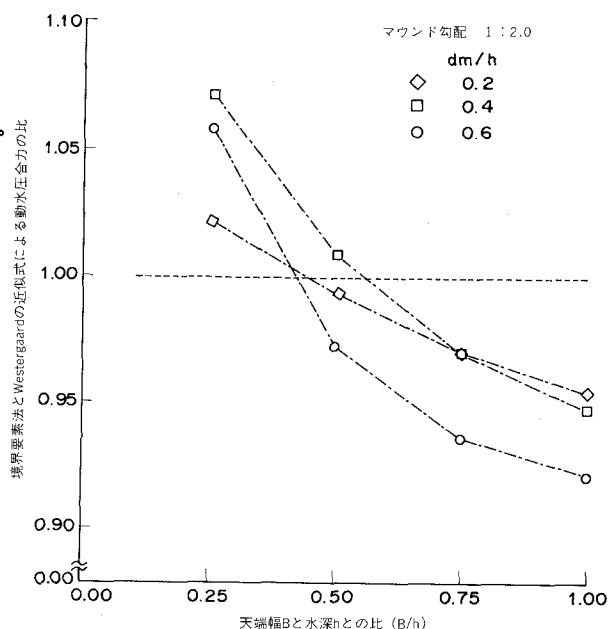


図-7 境界要素法とWestergaardの近似式との動水圧合力の比較(勾配 $1:2.0$)

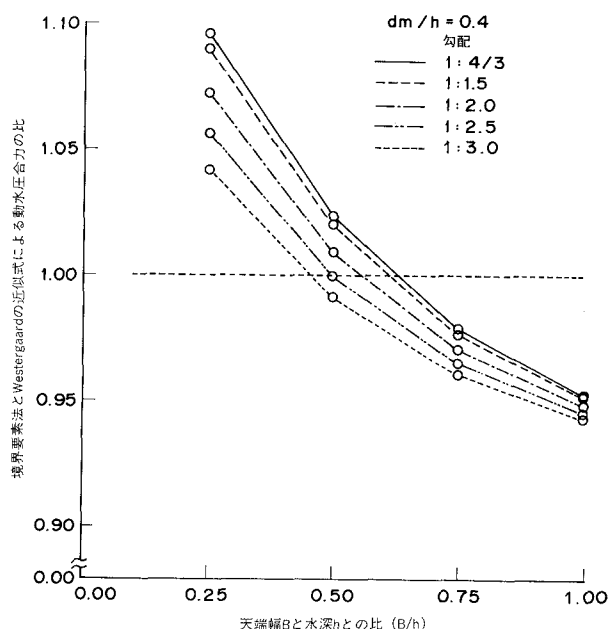


図-8 境界要素法とWestergaardの近似式による動水圧合力の比較(勾配を変えた場合)

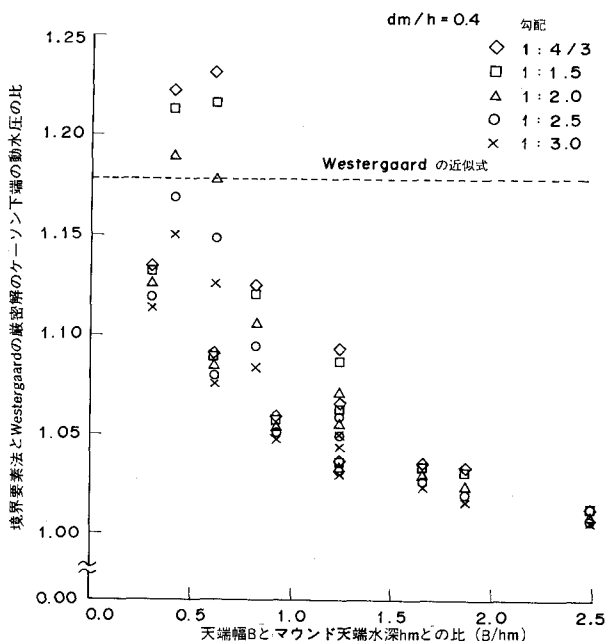


図-9 境界要素法とWestergaardの厳密解のケーソン下端の動水圧の比較

端幅 B とマウンド天端水深 h_m との比 B/h_m に対して、ケーソン下端の位置の動水圧の境界要素法による算定値とWestergaardの厳密解より求めた値の比を示した。図中、点線はWestergaardの近似式より求めた値とWestergaardの厳密解より求めた値の比である。マウンド天端幅 B とマウンド天端水深 h_m の比 B/h_m が小さいときには境界要素法による算定値とWestergaardの厳密解より求めた値の比はばらつきが大きく、Westergaardの厳密解との差は20%を越えるものもある。しかし、 B/h_m が大きくなるとばらつきが小さくなりWestergaardの厳密解に近づく。 $B/h_m > 1.5$ でWestergaardの厳密解との差は4%以下になる。 $B/h_m = 2.5$ ではWestergaardの厳密解との差は1%程度以下となり、境界要素法による算定値とWestergaardの厳密解より求めた値の間にはほとんど差がないことが分かる。

b) マウンド斜面に作用する動水圧

まず、境界要素法によるマウンド斜面に作用する動水圧の計算結果とZanger式のそれを斜面に作用する動水圧合力で比較した。ここで求めたZanger式の動水圧合力は斜面が水面まで続くとした時のマウンド高さまでの斜面に作用する動水圧合力とした。図-10は、境界要素法によって算定した動水圧合力と、Zanger式による動水圧合力との比を、3通りのマウンド高さと水深の比 d_m/h について、天端幅比 B/h に対して示したもので、マウンド勾配が1:2.0の場合である。

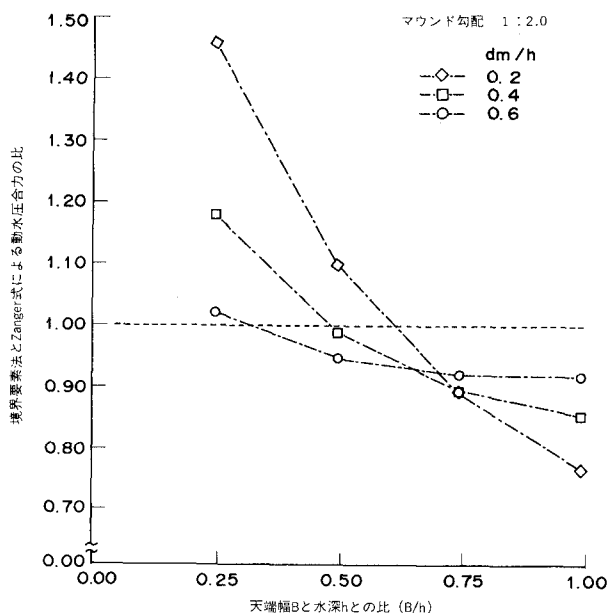


図-10 境界要素法とZanger式との動水圧合力の比較 (マウンド勾配 1:2.0)

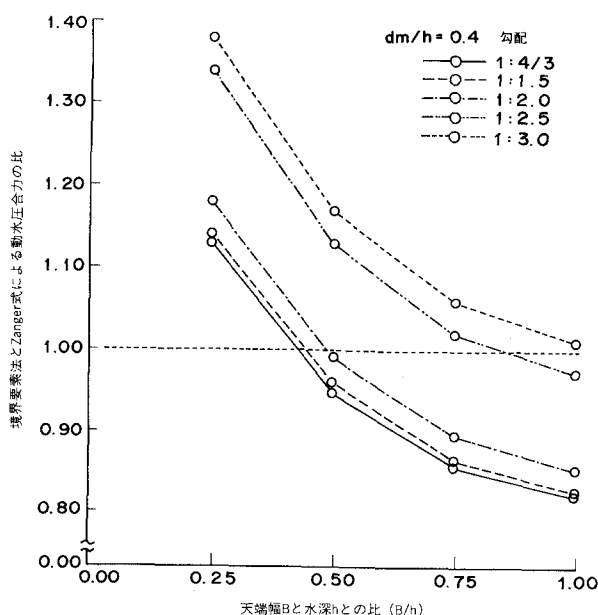


図-11 境界要素法とZanger式との動水圧合力の比較 (勾配を変えた場合)

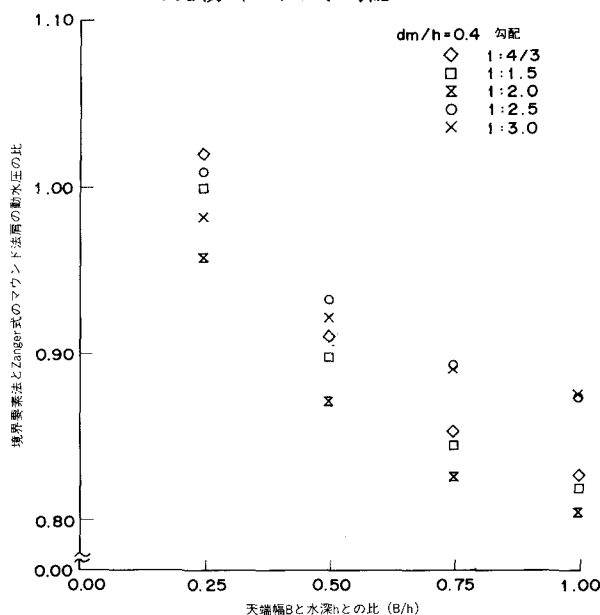


図-12(a) 境界要素法とZanger式とのマウンド法肩の動水圧の比較

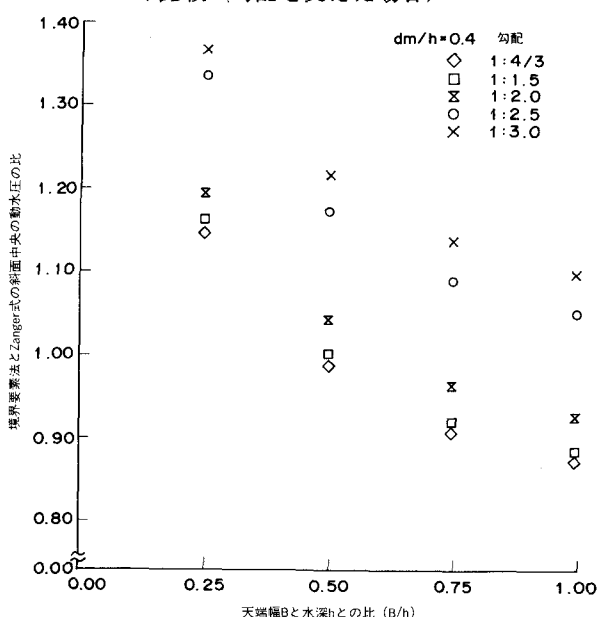


図-12(b) 境界要素法とZanger式との斜面中央高さの動水圧の比較

計算結果によれば、天端幅が短いと、混成式防波堤の場合は斜面の途中に鉛直な壁があるということになるので、斜面が水面まで続くとしたZanger 式の動水圧合力は境界要素法による計算結果より小さくなる。天端幅が長くなると、混成式防波堤の場合は斜面が途中でなくなるとい事になるので、斜面が水面まで続くとしたZanger 式の動水圧合力は境界要素法による計算結果より大きくなる。この時、 dm/h が小さい

ほど、鉛直壁が高くなるので、Zanger 式より求めた動水圧合力と境界要素法による計算結果の差は大きくなる。図-11は dm/h が0.4の場合に、勾配が変化した時の境界要素法による計算結果とZanger 式より求めた動水圧合力の比を比較したものである。図に示すように、勾配が緩い方が、鉛直壁の影響を強く受けて、Zanger 式より求めた動水圧合力は境界要素法による計算結果より大きくなるのがわかる。

図-12はマウンド法肩、マウンド中央の高さの位置の動水圧を、境界要素法による計算結果とZanger 式より求めた値の比で、 B/h に対して示したものである。マウンド法肩の動水圧はマウンド天端幅が大きくなるにつれて、Zanger式より求めた動水圧は境界要素法による計算結果より大きい値を示す。一方、マウンド中央の高さの位置の動水圧は、天端幅がかなり長くなないと、Zanger式より求めた動水圧は境界要素法による計算結果より小さい値を示す。

4. 割石マウンド斜面に作用する動水圧に関する振動実験

(1) 実験内容

割石マウンドのように透水性の凹凸のある斜面に作用する動水圧を検討するために砕石で高さ50cmのマウンド模型を製作した。勾配 1:1.2の斜面と1:1.5斜面の2種類の三角形のマウンド模型を製作した。図-13に勾配が1:1.2 の場合の模型を示す。用いた砕石材料は道路用砂石である1号砕石、4号砕石、6号砕石と、防波堤の模型振動実験⁴⁾でマウンド材料に用いた下田砕石である。これらの砕石の物理試験結果を表-1、粒径分布を図-14に示す。表-2に実験条件一覧表を示す。2種類のマウンド模型のそれぞれについて、上記の砕石から選んだ3種類の砕石材料を用いた。各実験条件のそれぞれについて、入力最大加速度を約50、75、100Galとして加振した。

(2) 実験結果

図-15、16は動水圧の測定値の深さ方向の分布を示す。図-15の斜面勾配は1:1.2、図-16のそれは1:1.5である。入力最大加速度が約75Gal、100Gal の場合の結果について示した。図には水一構造物連成系の有限要素法の地震応答計算プログラムBEAD

—III⁴⁾の計算結果を点線で、Zanger式の値を実線で示した。両者の計算結果は深い位置以外で良く一致している。なお、入力最大加速度が約75Gal の場合と、約100Gal場合の計算結果から与えられる図-15、

表-1 用いた材料の物理試験結果

項 目	1号砕石	4号砕石	6号砕石	下田砕石
比 重 G_s	2.68	2.626	2.617	2.621
吸 水 量 (%)	2.88	2.12	2.46	2.26
60% 粒径 D_{60} (mm)	56.	27.0	9.0	14.0
有効粒径 D_{10} (mm)	37.5	21.0	5.0	6.3
均 等 係 数 U_c	1.5	1.3	1.8	2.2
最大間隙比 e_{max}	0.885	—	0.990	0.821
最小間隙比 e_{min}	0.423	—	0.620	0.480

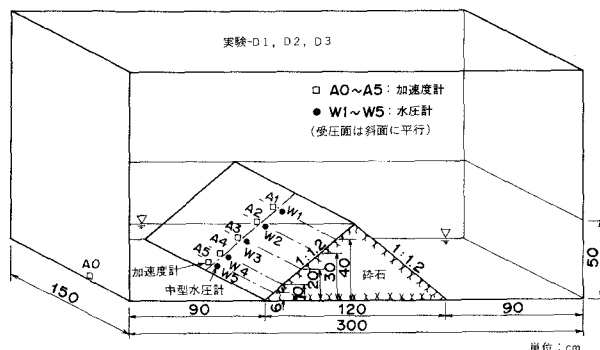


図-13 砕石マウンド模型 (勾配 1:1.2)

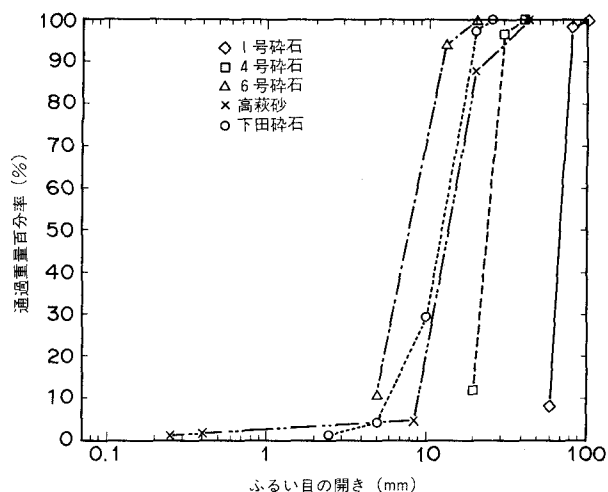


図-14 実験に使用した材料の粒径加積曲線

表-2 実験条件一覧表

実験番号	D1	D2	D3	DD1	DD2	DD3
斜面勾配	1:1.2	1:1.2	1:1.2	1:1.5	1:1.5	1:1.5
砕石名	1号砕石	4号砕石	6号砕石	1号砕石	6号砕石	下田砕石
乾燥単位体積重量 (tf/m ³)	1.425	1.402	1.287	1.542	1.384	1.564
飽和単位体積重量 (tf/m ³)	1.893	1.867	1.795	1.967	1.855	1.967
間 隙 比	0.881	0.873	1.033	0.738	0.891	0.676

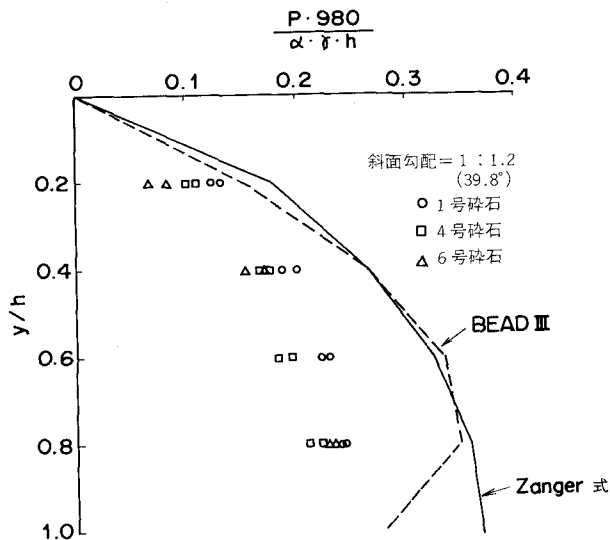


図-15 砕石斜面に作用する動水圧
(勾配 1:1.2)

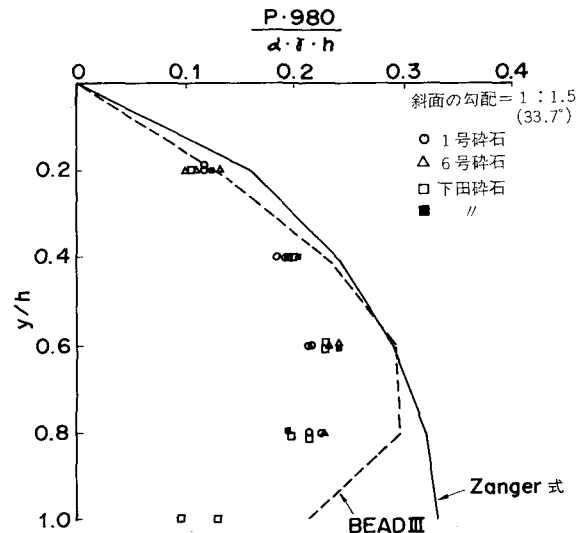


図-16 砕石斜面に作用する動水圧
(勾配 1:1.5)

図-16の横軸の値はほとんど差がなかった。測定値の深さ方向の分布形状は、計算結果とほぼ一致しているが、その値は測定値の方が小さい。これは、砕石マウンド斜面が凹凸のある透水性の斜面であるためと考えられる。図-15の斜面勾配が1:1.2の場合で、測定値は計算結果の0.6~0.7、斜面勾配が1:1.5の場合でそれは0.7~0.85であった。

5. 結論

混成式防波堤のマウンド斜面とコンクリートケーソンの鉛直壁に作用する動水圧を、模型振動実験と数値解析手法により検討した。得られた結論は以下の通りであった。

1. アクリル板で製作した混成式防波堤の剛体模型に作用する動水圧に関する振動実験結果と、境界要素法による動水圧の数値計算結果はよく一致した。
2. マウンド天端幅 B と水深 h の比 B/h が0.25のときは、マウンドの勾配や、マウンド高さ dm と水深 h の比 dm/h に関らず、境界要素法による動水圧合力の計算値はWestergaardの近似式による動水圧合力より大きく、最大で約1.1倍であった。 $B/h=0.5$ のときには、 $dm/h=0.4$ の場合のみ、マウンド勾配が1:4/3~1:2.0の範囲において、境界要素法による動水圧合力の計算値はWestergaardの近似式のそれを上回っている。その他のときには、数値計算による動水圧の合力はWestergaardの近似式のそれより小さい値を示した。
3. マウンド天端幅 B とマウンド天端水深 hm の比 B/hm が1.5より大きくなれば、境界要素法による数値計算で得られた混成式防波堤のケーソンの鉛直壁に作用する動水圧と、剛な鉛直壁に対するWestergaardの厳密解より与えられた動水圧の差は4%以下となることが判明した。
4. 砕石マウンド斜面に作用する動水圧の測定値はZanger式より小さく、その比は斜面勾配が1:1.2で約0.6~0.7、斜面勾配が1:1.5で約0.7~0.85であった。

参考文献

- 1) Westergaard, H.M.: Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE 98, 1933, pp.418-434
- 2) Zanger, C.N.: Hydrodynamic Pressures on Dams due to Horizontal Earthquakes, Proc. Exper. Stress Analysis, Vol.10, No.2, 1953
- 3) 片岡真二、斉田和成: 防波堤構造集覧、港湾技研資料、No.556、1986年6月
- 4) 上部達生、守屋正平: 砂地盤上の大水深混成式防波堤の大型模型振動実験と地震応答解析、港湾技研資料、No.589、1987年6月