

岸壁裏込めの間隙水による動水圧

正員 松尾 春雄*
准員 大原 資生**

要旨 さきに飽和砂の振動土圧及び水圧の実験結果を報告したが¹⁾、これは小型振動函によるものであつて、殊に水圧に関しては、奥行の影響が相当にあると推察されたので、引き続き大型振動函により同様の実験を行つたところ、振動函の大きさの影響が明らかに認められたので、こゝに新しい実験結果の内、水圧に関するものゝ結果を報告するとともに、それ等について検討した。

1. 実験装置及び測定方法

前報告と違つた点は、まず、今回使用した大型振動函の内法寸法が高、幅、奥行がそれぞれ $40 \times 90 \times 100$ cm で前報告のものの $40 \times 50 \times 50$ cm に比して幅と奥行が約 2 倍となつてゐる事である。

動水圧の測定方法は前回と同様であるが、前回は頁数の超過のため詳細を述べる事ができなかつたので、こゝに詳述する。

すなわち、図-1 に示すように圧力計の前面に径 1/32 英寸 (0.8 mm) の小孔を 1 mm 間隔に穿つた厚さ 2 mm の金網状の円形真鍮板を取り付け、土圧を分離して水圧のみを測定した。圧力計は径 3 cm の受圧膜面の歪を膜面に貼つた抵抗線歪計で測定する方式のもので、膜には 0.05 mm 厚の燐青銅膜を用いた。加圧の際の膜面の中心撓みは dial gauge で測定したところによると、 100 g/cm^2 で $5/100 \sim 1/10 \text{ mm}$ 程度であつた。なお、受圧膜面の所では金網状真鍮板の厚さは 1 mm、膜面と真鍮板の間の間隙は 1 mm である。

図-1 圧力計取付図

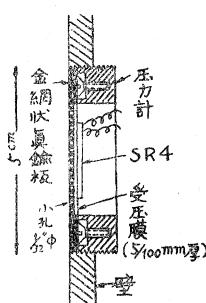


図-2

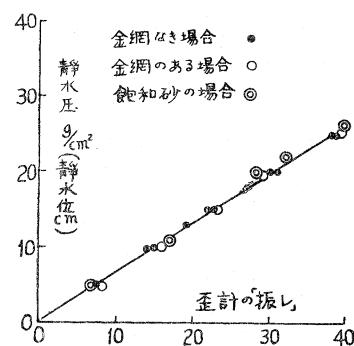
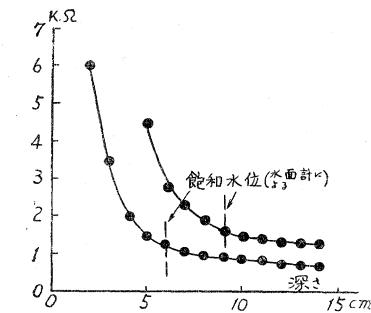


図-3 飽和水位と電気抵抗との関係

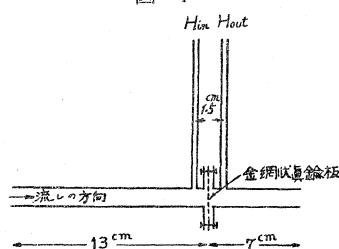


圧力計の補正曲線（圧力歪曲線）は振動函の側壁に圧力計を取り付け、函の中に水を満たし、その水位を変化させて求めた。その際、念のために金網状真鍮板を取はずした場合及び函の内部に飽和砂を満し、その飽和水位を種々に変化せしめて同様の測定を行つたが、三者の間の差位はほとんどなく、その結果の一つを 図-2 に示す。これは深さ 32.5 cm の所につけられた圧力計についてのものである。飽和砂の場合の飽和水位の決定は目盛を刻んだ 5 mm 径の二本の銅棒を約 20 cm 距て鉛直に砂中に斜めに差し入れて行つた。相互間の電気抵抗値の変化の状態は 図-3 の様になり、飽和水位は電気抵抗値の変化がほとんどなくなる直前附近であることがわかつたので、この方法によつた。また、径 2 cm の硝子 U 字管の一方に入砂を入れ、他方に水を入れて砂中の毛管現象による水分の上昇高をみてみたが、この砂では平均 3 cm 程度であつた。

次に金網状真鍮板の動水圧に対する影響をしらべるため図-4 のよう、それぞれの端にフランジをつけた内径 1 cm の 2 本の真鍮管をフランジ間に金網状真鍮板及びゴムパッキンを挟んで接合し、管に水を流した。

その際の金網の前後の水圧をそれぞれ硝子管に現われる水位により測定し、同時に管の出口にメスシリンダーを置いて単位時間の流量を測定

図-4



* 工博、九州大学教授、工学部土木教室

** 九州大学助手、工学部土木教室

した。金網前後の水位差 $H_{in} - H_{out}$ は金網による水頭損失と考えられるので、これと流量より計算した管内流速との関係を調べた。その結果 図-5を得た。これより金網による水頭損失は速度の自乗に比例して大となる傾向にあることがわかる。なお、金網を挟まず 2 本の真鍮管を接合した場合の $H_{in} - H_{out}$ は流速 200 cm/s で 0.7 mm であった。

この結果より圧力計に 50 g/cm² の動水圧が周期 0.3 秒の正弦的に加わった場合、膜面が一様に 5/100 mm 変位したと考えると圧力計前面の金網を通して出入する流量は単位面積当り 0.005 cm³、その速度は 0.1 cm/s となり金網のある事による水頭損失はほとんど問題にならない。

振動函中に飽和砂を満す方法は大略、前報告と同様であつて、水中に砂を落とさせたが、砂が相当大量となつたので充填には、このため特別に造つたバケットコンベアを使用した。これはバケット一個の容量 450 cc のもの 21 個を有し、一分間に 120 個反転するが、砂を補給する人力の限界のため有効な反転個数は毎分 60 個位になり、充填に要する時間は普通 15 分であつた。この時、荒砂と玉砂利の間隙比は 0.77 及び 0.73 であつた。なお、試料は前報告と同一であるので省略するが、平均粒径はそれぞれ 0.9 mm 及び 5.0 mm であつた。

また、振動台の加速度を決定するのに、今まで台の変位曲線より計算していたが、今度新たに抵抗線歪計型の加速度計を取付け、これによつた。検定の結果、両者の差異はほとんどなかつた。また、従来用いていた電磁オシロはプロマイド記録紙の現像に手間がかゝるから、これをペン書きオシロに改めた。この実験の振動周期は 0.3 秒前後であるので、ペンの慣性の影響はほとんど認められなかつた。

2. 実験結果

A. 砂表面まで水に飽和された場合

初期現象については前報告以上特別に述べることはない。土砂の“ゆり込み”が完了した後における間隙水による動水圧を前報告と同様の方法で実験を繰返えし、荒砂、玉砂利について図-6 の結果を得た。前回の小型振動函の結果をもあわせて示したが、いずれの震度でも前回の測定値より約 1.3 倍程度大なる値が得られた。

B. 砂層の途中まで水に飽和された場合

この場合、初期現象及び動水圧共に飽和水位以下のみ存在することがわかつた。

図-7 砂層の途中まで水に飽和された場合の初期現象

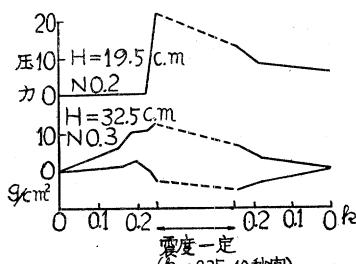


図-8 動水圧分布図

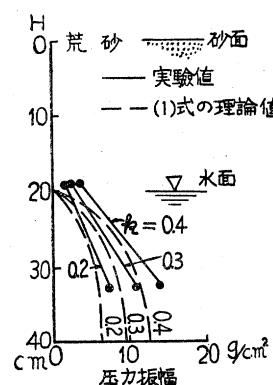


図-5 金網の水頭損失と流速との関係

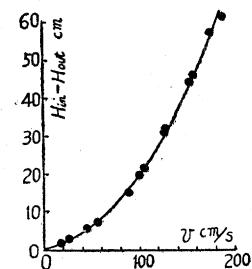


図-6 動水圧分布図(圧力振幅は全振幅)

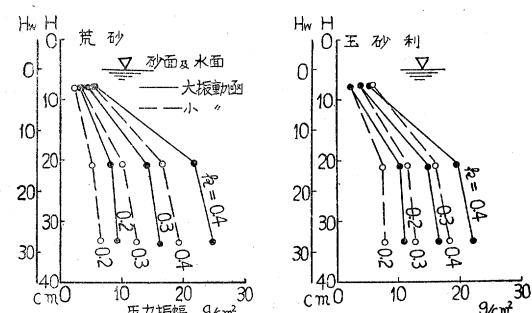


図-9 飽和水位と動水圧振幅との関係
(震度 0.4 の時)

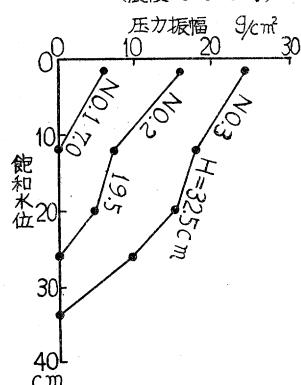


図-7 は試料に荒砂を用いて、砂表面下 20 cm に飽和水位がある場合の初期現象であり、図-8 はその“ゆり込み”後の動水圧の振幅及び後述(1)式による計算値である。

図-7においては砂表面からの深さ $H = 7.0 \text{ cm}$ の測点 No. 1 は動水圧、初期現象ともになかつたので、図には省略してある。 $H = 19.5 \text{ cm}$ の No. 2 も動水圧は殆ど認められず、単に初期現象による間隙水圧の上昇のみが

認められた。

図-9は同じく荒砂による結果であるが、振動函の底部のコックにより排水して行つた際に三つの異なる深さの圧力計の動水圧の振幅の変化を示したもの($k=0.4$)である。いずれも飽和水位がほどそれぞれの深さ以下になると動水圧がなくなる事が明らかである。

3. 結果と理論との比較

A. 奥行の影響

図-6で明らかなように今回は前報告より大なる実験値を得たが、これは振動函の大きさ、殊に奥行 l が前報告の場合の 50 cm に対して今回は 100 cm と 2 倍になつてることが一つの大きい原因と考えられる。函の幅の影響は水圧の場合ほとんどないと考えてよいと思う。

Werner, Sundquist²⁾によれば、貯水池等における動水圧は表面波の影響を無視すれば、次式で表わされる。

すなわち、鉛直壁面に働く動水圧 σ (半振幅) は、

$$\sigma = \frac{8h}{\pi^2} \alpha w \cos \frac{2\pi t}{T} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda(2n+1)^2} \frac{1 - \cosh \kappa l}{\sinh \kappa l} \sin \frac{\kappa}{\lambda} Z \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\lambda = \sqrt{1 - \left[\frac{4h}{2(n+1)T} \right]^2 \left(\frac{w}{gE} \right)}, \quad \kappa = \lambda(2n+1) \frac{\pi}{2h}$$

h : 全水深 E : 水の弾性率 w : 水の密度 T : 周期
 α : 震度 l : 奥行 Z : 測定点の水深

である。

(1) 式は $l=\infty$ の場合には Westergard の式と一致する。

本実験のような間隙水圧の場合に上式が適用できるか否かについては検討の余地があるが、間隙水に対しては表面波の生成はほとんど考えなくてよいと推察されるので、試みに上式を前報告の $l=50$ cm 及び今回の $l=100$ cm の両方について計算し、実験結果と比較する。

図-10(a), (b) はその結果であり、これでみると震度の小さい間は理論値と実験値とは割合に一致するが、震度の大きいところでは実験値の方が大となる。

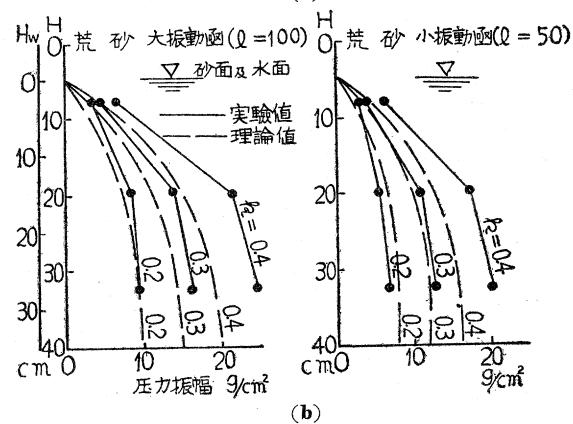
今、両者の比率を水深 H_W が 14.5 cm 及び 27.5 cm の点についてとり、震度との関係を見ると、図-11の通りで、荒砂は震度に比例して、その比率が大となるが、玉砂利ではその傾向は非常に小さい。また、図-11において、実験値と理論値との比率は $l=50$ cm の場合より $l=100$ cm の方が大きいのは、 $l=100$ cm の場合には砂がより動きやすいことを示していると考えられる。同様に $H_W=14.5$ cm より $H_W=27.5$ cm の方が小さいのは、深い所では砂の動きが少ないと想う。

奥行の違う二つの場合($l=50$ cm $l=100$ cm)についての $H_W=14.5$ cm 及び $H_W=27.5$ cm の値を比較してみると(図-11)、同じ水深どうしの違いが震度が大になると少くなり、殊に震度 $k=0.4$ においては $H_W=27.5$ cm の二つの値がほとんど一致していることは、この震度になると振動函の底で砂の滑りが生ずる結果、 $l=100$ cm と $l=50$ cm の二つの場合の底に近い部分の砂の動き量に差異がなくなるためと思われる。

B. 安蔵教授の理論

安蔵教授はこの問題について、水を非圧縮性とし、砂は動かず間隙水のみが砂を通つて運動すると仮定し、そ

図-10 動水圧分布の実験と理論の比較
(a)



(b)

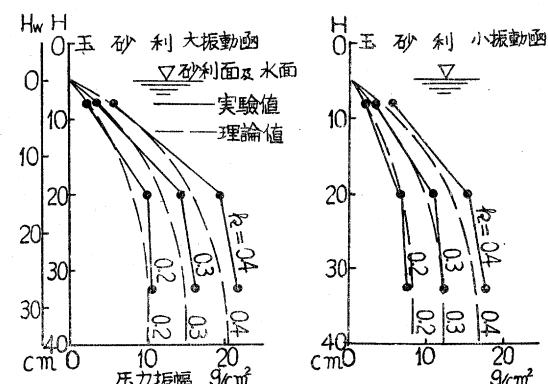
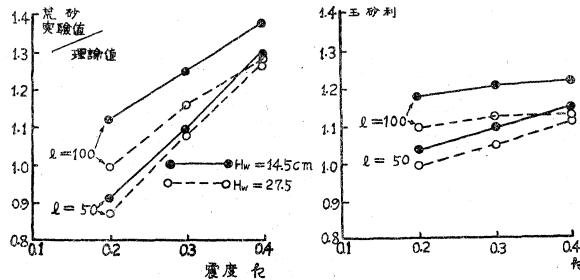


図-11 実験値/理論値と震度との関係



$$D_m = \frac{-2\kappa\alpha g^2 \sin 2C_m h}{h\lambda(\kappa^2\omega^2 + g^2)C_m(2C_m h + \sin 2C_m h)}$$

$$E_m = \frac{2\kappa^2\alpha\omega g \sin 2C_m h}{\lambda(\kappa^2\omega^2 + g^2)C_m(2C_m h + \sin 2C_m h)}$$

$$F_n = \frac{-\omega g \sum_{m=1}^{\infty} \frac{C_m(1-e^{-2C_m\pi})}{C_m^2+n^2} \left\{ \frac{\omega g}{\kappa} D_m + \left(\omega^2 - \frac{ng}{\lambda} \tanh nh \right) E_m \right\}}{\pi\kappa \left\{ \left(\omega^2 - \frac{ng}{\lambda} \tanh nh \right)^2 + \left(\frac{\omega g}{\kappa} \right)^2 \right\}}$$

$$G_n = \frac{-\omega g \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_m(1-e^{-2C_m\pi})}{C_m^2+n^2} \left\{ \frac{\omega g}{\kappa} E_m - \left(\omega^2 - \frac{ng}{\lambda} \tanh nh \right) D_m \right\}}{\pi\kappa \left\{ \left(\omega^2 - \frac{ng}{\lambda} \tanh nh \right)^2 + \left(\frac{\omega g}{\kappa} \right)^2 \right\}}$$

$$C_m \tan C_m h = \frac{\lambda\omega^2}{g}$$

κ : 裏込の透水係数, λ : 裏込の間隙率
 α : 震度, g : 重力加速度 h : 全水深
 y : 測点までの水深

である。

この計算は随分煩雑であるが、これをこの場合について数値計算してみると図-12の様になる。計算は $l=\infty$ の場合でありながら実験値より相当小さい値となる。

これは砂が動かず、水が摩擦抵抗をうけるという仮定が実際とちがうためであると思う。

4. 結語

以上は水に飽和した裏込めについて、その動水圧変化のみをとり出して測定し、在来の二つに理論式と比較、検討を試みたのであるが、水のみの場合の式と割合に近似した結果がえられた。また、安蔵教授の裏込土中の間隙水による動水圧の理論式の計算結果とは、圧力分布状態が著しく異なり、かつ比較的両者の値が近づいている深い場所でも、測定値は計算値よりも尙40%程度大となつてゐる。すなわち、この実験結果からは水のみの理論式を適用する方がよいと結論できる。

しかし、実際の岸壁の深い場所では砂の動きも少であると考えられるので、安蔵式もこの実験結果に表われている程の差は示さないよう推定される。

水のみの式による計算値も測定値よりも、深さと震度によって最大10~40%も大となつてゐる。

この原因の一つは(1)式で無視している表面波の影響のためであるが、おもなものは振動に伴う砂粒子の動きにより周期的な間隙水圧の変化が起り、これが前記水圧に影響を与えていたためと思う。換言すれば、振動土圧がこの水圧にも影響を与えているためと考えられる。

しかるに、振動土圧振幅は深さとともに減少する傾向にあるから、土圧が水圧に及ぼす影響も深さとともに少となり、実際の水圧分布は計算式に近くなるものと思う。

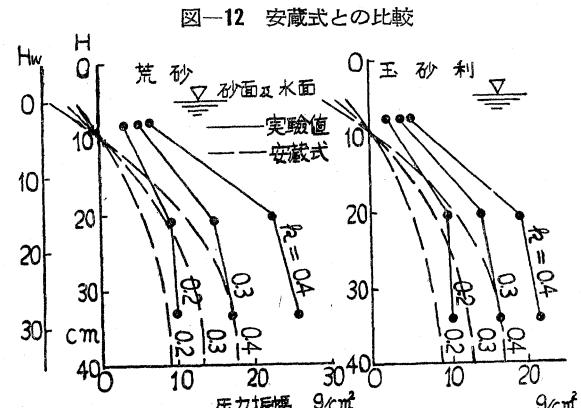
現在、これらについてはなお研究を進めているから次の機会に地震時土圧と総合して論ずるつもりである。

の際に Darcy の法則による摩擦抵抗を受けるとして、 $l=\infty$ の場合に対して次の理論解を導かれている³⁾。すなわち、動水圧 p は

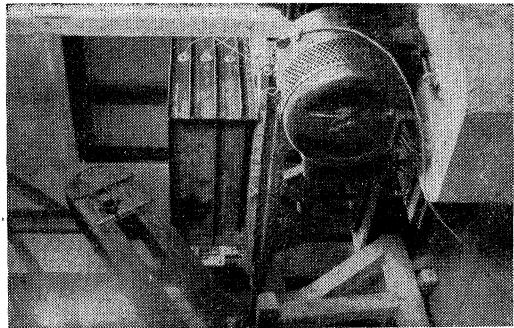
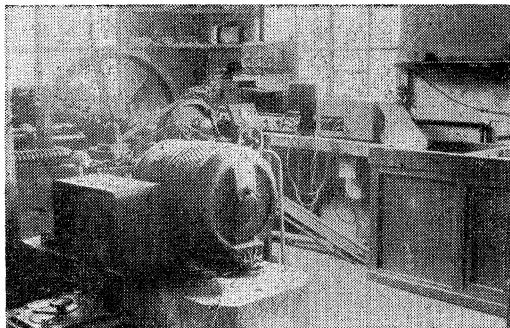
$$p = \rho \left(\lambda \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\lambda g}{\kappa} \phi - gy \right) \dots\dots (2)$$

$$\phi = \sum_{m=1}^{\infty} (D_m \sin \omega t + E_m \cos \omega t) \frac{\cos C_m(h+y)}{\cos C_m h}$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} (F_n \sin \omega t + G_n \cos \omega t) \frac{\cosh n(h+y)}{\cosh nh}$$



[付記] 本実験に用いた振動函の製作には運輸省第四港湾建設局博多港工事々務所の御援助をうけ、安蔵教授の式の数値計算は当時の土木科学生、前田進君の助力を得た。こゝに感謝の意を表する。



参考文献

- 1) 土木学会誌 40巻6号 p 11~15.
- 2) Werner, Sundquist; On hydrodynamic earthquake effect, Trans. of Geophysical Union, Oct. (1949).
- 3) 安蔵善之輔: 地震時岸壁の前面並びに背面に及ぼす水圧について, 第3回工学会大会講演集(昭11)
(昭. 31. 2. 22)