

飽和砂の振動圧力について

EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMIC PRESSURE
OF WATER SATURATED SAND

大原 資生*

By Sukeo Ohara

要 旨 前論文¹⁾において岸壁裏込の間げき水による動水圧の理論解およびその実験結果を報告した。

岸壁の耐震設計において、この種の動水圧の有無は非常に問題である。現在、飽和砂の振動圧力を考える場合、飽和砂の振動圧力をそのものとして考えるのが妥当であるという説があるが、著者は従来から振動土圧とこの動水圧の和の振動圧力を考えるのが妥当であり、考えやすいと思っている。今度このことを実験によって調べてみた。また、著者が考えている「間げき水による動水圧」を真に動水圧と考えてよいものかどうかという点を明らかにするために、埋込み水圧計を用いて砂箱内の、この動水圧の二次元的、すなわち深さおよび長さ方向の分布状況を測定した。これらをまとめて報告する。

1. 緒 言

前論文¹⁾でも述べたように、地震時に岸壁に作用する振動圧力として、裏込間げき水による動水圧を考える必要があるかどうかということは耐震設計を行なう場合、非常に重要である。著者はこの動水圧の理論解を求め、これが裏込土の透水係数、水深、振動周期によって、その値および分布状態が異なり、強制振動と動水圧との間に位相差が生ずることなどを計算値によって示した。

その結果の一部を具体的に述べれば $\rho_w \lambda g \omega H^2 / \kappa k (\rho_w$: 間げき水の密度, λ : 裏込の間げき率, H : 水深, κ : 間げき水の体積弾性率, k : 裏込土の透水係数, ω : 強制振動角速度, g : 重力加速度) の値が 1.0 以下ではこの動水圧の最大値は Westergaard の値にほぼ等しいこととなり、強制振動との位相差もほとんどない。

これは、例えば裏込水深が 10 m の岸壁を考えた場合、裏込土の透水係数が 10~1 cm/s で、強制振動周期すなわち地震周期が 0.2~2.0 秒の範囲にある場合に相当する。

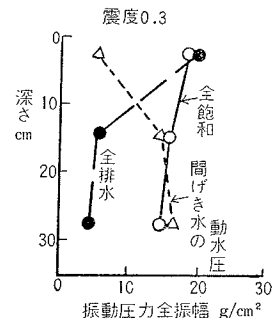
また、この計算によれば裏込水深を 7 m、裏込土の透水係数および間げき率が 10^{-2} cm/s, 0.5 で地震周期を 2.0 秒とすると Westergaard 値の約 70% の動水圧値 (幅 1 m あたり 33.3 t) が作用することとなる。

以上の理論解は振動台上の振動砂箱内に飽和砂を入れての室内実験によってほぼ完全に確かめられたと考えら

れる結果を得たのであるが、前論文の末尾でも述べたように、飽和砂の振動圧力が振動土圧に、この間げき水による動水圧の和に等しいかどうか、すなわち、飽和砂の振動圧力を求める場合に振動土圧と間げき水による動水圧とを別個に求めてそれを加え合わせてもよいかどうかということが具体的な問題としての疑問点があった。

それは実験によって測定された飽和砂の振動圧力全振幅とこの間げき水による動水圧の全振幅とを比較すると、その大きさの関係は前者の全振幅は後者のそれに振動土圧の全振幅を加えた値よりかなり小さい値となる点である。その間の状況を示すために掲げたのが図-1 である。

図-1 振動圧力全振幅分布



これは前論文にも掲げたものであるが、この全飽和の場合の全振幅と全排水の場合の全振幅との差が間げき水による動水圧の全振幅より小さいという結果を示す。

この結果より飽和砂の振動圧力は飽和砂独自のものと考えべきであって、振動土圧と間げき水による動水圧との和に等しいものではないとの見解も生れる。しかし、飽和玉砂利について行なった実験で、土圧計前面にスクリーンを付けて間げき水による動水圧だけを測定した場合は前論文にも示したように常に Westergaard の値にほぼ等しい全振幅が得られるにもかかわらず、土圧計前面のスクリーンをはずしての測定値は玉砂利が締まってくると間げき水による動水圧の全振幅より小さい場合が生じるとの経験から前記の事からについて著者はつぎのように考察した。

すなわち、土圧計の構造が受圧面変位型であるので受圧面に砂と水とが接している場合は水圧が減少しても砂が受圧面を押したままの状態が残るので、受圧面は水圧減少に追従して変位することができないことが原因であると考えた。ゆえに砂と水の性質から考えて、飽和砂の実験では受圧面は圧力増加時には動水圧と振動土圧それぞれの増加分の和に追従して変位し、圧力減少時にはほ

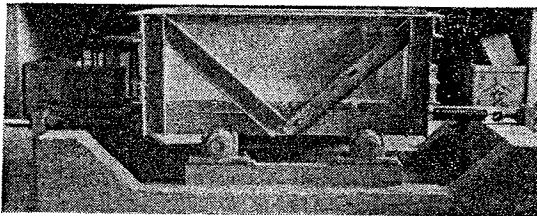
* 正員 工博 山口大学教授 工学部土木工学教室

ば振動土圧減少分だけに追従して変位するものと考えることができる。このように飽和砂の振動圧力の正側振幅と負側振幅は異質のものであるから飽和砂の振動圧力については、それぞれの圧力を全振幅で比較した結果からそれぞれの圧力の間の関係を明らかにすることはできないと思う。それで、今回、再び飽和砂の実験を行ない、その結果を整理するにあたっては正側振幅* すなわち正圧* だけをとって見た。また、間げき水による動水圧が著者が理論解を求める場合に仮定しているように、振動によって砂の間げきを間げき水が流動するために生ずる動水圧であるかどうかということ、すなわち、著者が間げき水による動水圧と考えている水圧は真の動水圧であるかどうかをみるために動水圧の砂箱の長さ方向の分布状態を埋込水圧計によって測定し理論と比較した。以上の結果について述べる。

2. 実験装置および方法

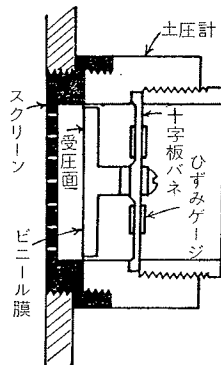
これについては前報告^{1),2)}で述べたこととほぼ同様であるので特に述べることはないが、振動台は山口大学において新たに製作したもので写真-1の構造のものである。原理的に前回に使用した九州大学のものとほぼ同一であり、ローラーの上に乗った台がバネによって振動するようになっている。振動箱の大きさが前回のものは深さ、幅、長さがそれぞれ 40×90×100 cm であったのに比して、今回は 30×60×100 cm となっている。

写真-1 振動台



この振動箱の振動方向に直角な壁面の一つに深さが、それぞれ 5 cm, 15 cm, 25 cm の位置に圧力計が壁面と受圧面がツラーとなるようにし 図-2 壁面圧力計(スクリーンをつけた場合)

圧力計の構造および動水圧のみを測定する際に圧力計受圧面の前に取り付けられたスクリーンなどは前回のものと全く同一である(図-2 参照)。また、埋込水圧計の構造は 図-3 に示すように外側をスクリーンでおおわれた圧力計でこれは内、外ともにブリキ缶を利用し、内缶の内側に抵抗線ひずみゲージを接着して作ったものである。



* 静圧を規準としての増加側の振幅をいう。

振動箱の中に入れる飽和砂の作り方は前報告²⁾でも述べたように、箱の中に水を満たしたのち、その水中に砂を投入して作った。

そのようにして作った飽和砂の間げき比は測定の結果 0.83 程度であった。また、粒度分析およびそのほかの土質試験の結果はつぎのとおりである。

図-3 埋込水圧計の構造

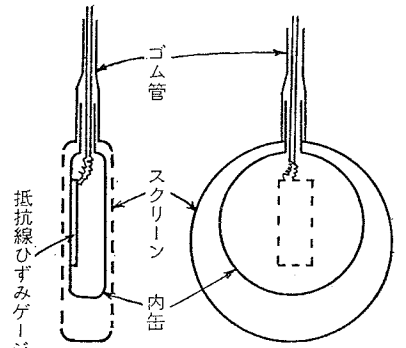
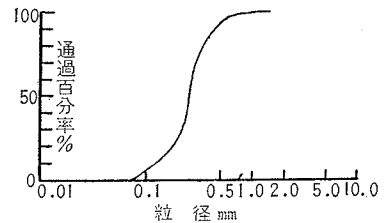


図-4 粒度曲線



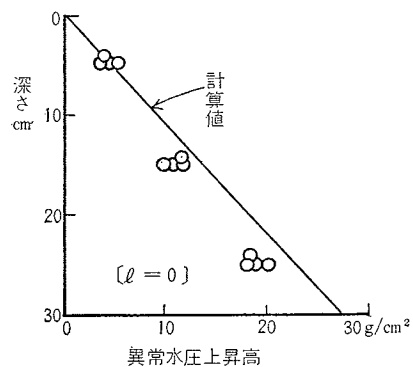
真比重 2.62, 内部まさつ角 41°20', 透水係数 0.19 cm/s

実験の方法としては振動台の震度を次第に増大して最大震度を 0.5 程度まで大きくし、その状態を 10 秒間継続したのち、震度を次第に減少して台を静止する。このような過程を 3 回くり返して一連の実験を終る。

3. 実験結果

砂づめ後、初回の振動の過程においては、以前より述べているように砂の沈定にともなって流動化の現象が生じ、このとき、一時的な過剰間げき水圧が発生し、これが壁面にも作用する。われわれはこれを初期異常水圧上昇といっているが、この最大水圧上昇高の鉛直分布を実験結果から求めたのが 図-5 である。この場合の記録は

図-5 初期異常水圧分布



前報告の図-2に示してあるように、この異常水圧上昇に周期的な振動圧力の振幅が重なっているの、異常水圧上昇高を求めるとはつぎのように考えた。すなわち、この現象時には砂は流動化しているの、その振動圧力の中心はその全振幅の1/2点にあると考えられるの、異常水圧上昇高は振動前の零線（静水圧）よりこの点までの高さとして求めたものである。

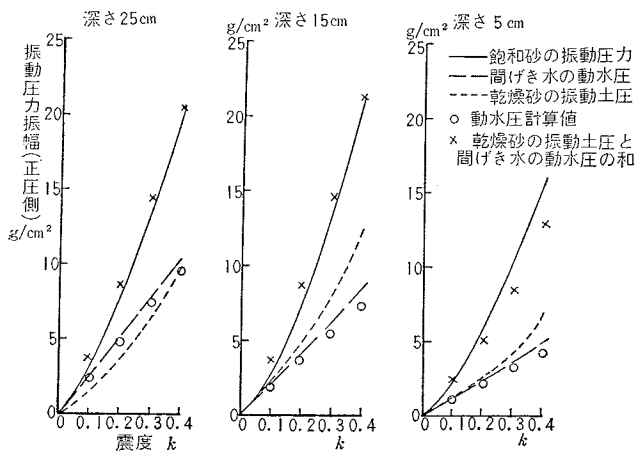
つぎに初回の振動において砂が十分に沈定したのち、すなわち、第2回および3回目の振動の際の測定値を整理したのが図-6の実線および破線で、実線は飽和砂の振動圧力であり、破線は土圧計の前面にスクリーンを取り付けて水圧だけが測定できるようにした、いわゆる間げき水による動水圧である。

緒言においても述べたように、本実験の目的は飽和砂の振動圧力と振動土圧との関係を知ることにあるの、今回の実験結果は正圧によって整理したので図-6の縦軸は正圧振幅である。初回の振動によって砂が十分に沈定していれば、第2、第3回の振動中の振動中心（静土圧値）変化はほとんどないので、正圧振幅だけをとりだすことができる。

図-6の点線は飽和砂の実験と併行して行なった乾燥砂の実験結果である。乾燥砂の場合も初回の振動ではゆり込み土圧の発生があるので、第2、第3回の振動時の測定結果から正圧振幅をとりだした。また、乾燥砂を箱の中につめたときの間げき比も0.83程度で飽和砂の場合と全く変わらなかった。

図-6のそれぞれの実験値曲線はそれぞれの場合についての10~20回程度の反復実験結果の平均値曲線である。経験したところでは、いずれの場合でも震度の小さいところほど実験値のばらつきが少なく、それぞれの場合を比較すれば乾燥砂の実験値が最もばらつきが少なく、飽和砂の振動圧力の実験値が最もばらつきが大きく極端な場合を除いては震度0.3で $\pm 1.3 \text{ g/cm}^2$ 程度のばらつきがあった。

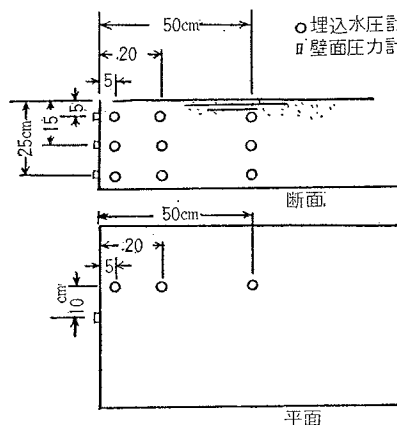
図-6 振動圧力振幅と震度との関係



つぎに間げき水による動水圧の箱の長さ方向の分布の測定結果であるが、前述のように、これは著者が間げき水による動水圧と呼んでいる動水圧が真の動水圧、すなわち著者が理論解において仮定したように振動によって間げき水が間げきの中を流動するために生ずる動水圧であるか、どうかという点を確かめるために行なった実験で埋込水圧計を砂層内に埋め込んでその点の動水圧を調べた。

埋込み深さは壁面圧力計の取付深さと同じに5、15、25 cmとし、それぞれの深さについて壁面からの距離を5、20、50 cmとし、それらの点に埋込まれた水圧計と壁面の圧力計（スクリーンをつけてある）とによって、同一深さで計4か所の動水圧を同時に測定した（図-7参照）。なお、使用した埋込水圧計の数は3個である。

図-7 圧力計および埋込水圧計設置位置



また、図-7でわかるように、埋込水圧計を埋込むときの平面的位置はそれらが壁面圧力計の前面位置にこないように10 cmだけ横にずらして埋込んだ。これは壁面圧力計の前に埋込水圧計を埋込むと壁面圧力計の測定値にその影響があらわれたからである。

なお、埋込み水圧計相互の影響や、埋め込み場合の受圧面の方向（振動方向に直角か、または平行かというようなこと）の測定値への影響は認められなかったの、埋め込みの都合上3個の埋込水圧計は同一線に、受圧面は振動方向に平行に埋め込んだ。

この実験の際にも砂づめ後、第1回目の振動時には砂の沈定にともなう初期異常水圧上昇がすべての水圧計に認められたことはもちろんである。

そのようにして得られた動水圧記録の一例を示すと図-8のようで、これは深さ15 cmの線上の測定結果で第3回目の振動によるものである。

これよりわかるように壁面からの距離が大となるにしたがって波の形がくずれ距離が50 cm, すなわち箱の長さ 1/2 の点ではあたかも周期が 1/2 になったと見なせるような波が記録されていることは非常に興味深い。

これについては考察の項でくわしく述べるが、種々考察の結果、壁面よりはなれた位置では振動によって砂層にせん断変形が生じ、これにともなって生じる dilatancy が原因であることがわかった。

4. 実験結果の考察

以上述べた実験結果の考察について順に述べる。

まず、砂づめ後初回の振動時に生ずる初期異常水圧上昇について考察してみる。

図-5 は壁面圧力計での測定結果より得られたものであるが、埋込水圧計によって測定された異常水圧上昇高を同じ方法で求めたのが図-9 である。これら相互を比較してわかることは、この異常水圧上昇高は壁面からの距離に無関係で同一深さではほぼ一定値となることがわかる。

この異常水圧上昇の生ずる原因は振動によって砂が沈定する際に過剰間げき水圧が発生するためである。すなわち振動による砂の流動化が原因であると思われる(著者らが異常水圧上昇の原因についてこのような結論を得た経過については前報告³⁾にくわしく述べてあるので、ここでは省略する)。この考えにより異常水圧上昇高を理論的に求めると、いま、飽和砂の水中見かけ密度を r_a (浮力を差し引いた値)、内部まさつ角を ϕ とすると、飽和砂面からの深さ h の点の砂層のせん断強度は一般に(粘着力はないものとする)

$\tau = (r_a h - u) \tan \phi$ ただし u : 過剰間げき水圧
で示される。砂が沈定するときに一時的に流動状態になるのであるから $\tau = 0$ とすると $r_a h = u$ を得る。

図-8 間げき動水圧の記録

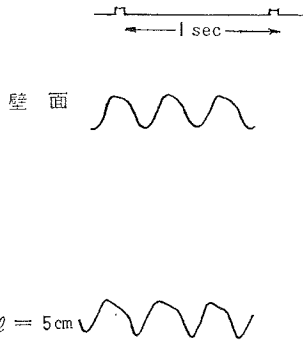
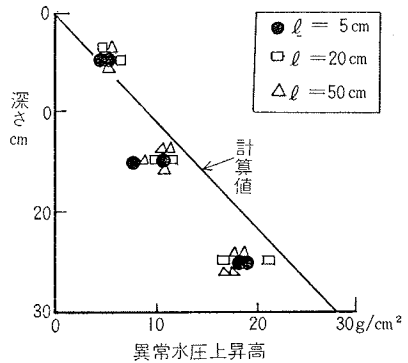


図-9 初期異常水圧分布



本実験に用いる砂層の間げき比および砂粒子の比重は 0.83, 2.62 であるから $r_a = 0.884 \text{ g/cm}^3$ となる。ゆえに砂層全体が完全に流動化するならば、この異常水圧上昇高は $0.884 h \text{ g/cm}^2$ となると推定できる。図-5, 9 の実線がこの計算値で実験値にほぼ近い値となっている。

以上により、著者が以前より述べているように、この異常水圧上昇は振動によってゆるい砂の構造がくずれ砂が流動沈定するときに発生する過剰間げき水圧と断定することができると思う。

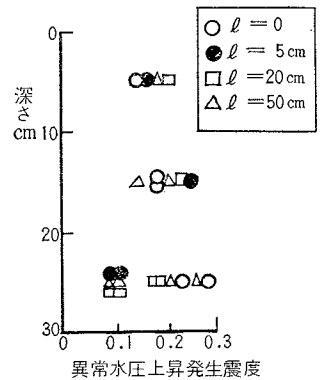
また、その異常水圧の発生する震度は今度の実験でも 0.2 前後となり、砂面からの深さおよび壁面からの距離によって変化するというような点は認められなかった(図-10)。

つぎに間げき水による動水圧についてであるが、前報告で述べた理論解によれば本実験の場合においても $\rho_w \lambda g \omega H^2 / \kappa k$ の値は 4.5×10^{-4} となり、実験値は Westergaard の値に一致するのが当然との結果を得る。

ゆえに図-6 に○印で Westergaard の値を記入したが、間げき水による動水圧の実験値(破線)と比較した結果、実験値はいくぶん大であるが、両者は近似した値となっていることがわかる。これは前回の実験の場合と同様な結果である。

つぎに今回の実験の目的の一つである飽和砂の振動圧力と振動土圧および間げき水による動水圧との関係を実験結果より調べる。図-6 で示した破線(間げき水による動水圧)と点線(乾燥砂の振動圧力)との値の和は図-6 の×印で示してあるが、これは実線(飽和砂の振動圧力)の値にほぼ近似したものとなることがわかる。

図-10 初期異常水圧発生震度



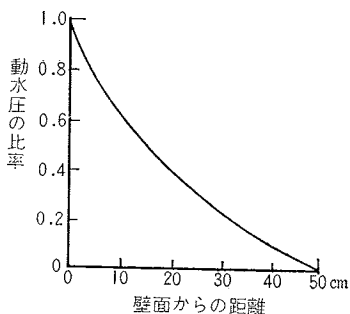
この結果、飽和砂の振動圧力は振動土圧と間げき水による動水圧の和に等しいとの結論が得られるものと思う。

最後に埋込水圧計の実験結果について述べる。

前述のようにこの実験は著者が間げき水による動水圧と考

図-11 動水圧の水平方向分布 (理論)

えている水圧が真の動水圧であるか、どうかをみるために行なったもので、動水圧であるならば、その値の箱の長さ方向の変化状態は動水圧の理論解より図-11のよ

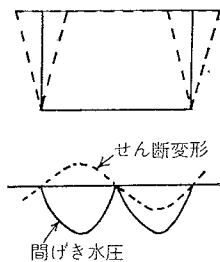


うに壁面で最大、箱の長さの 1/2 点で 0 となるべきである。

しかるに、この実験で得られた記録は図-8 のようである。このような波の山の部分がくずれるというような波形は砂づめ後第一回目の振動で異常水圧上昇が生ずるまではほとんど認められず、砂の沈定が進むにしたがって、すなわち初期異常水圧が減少したのちに顕著にあら

われてくること、および砂粒子間の相対変位の比較的に小さい壁面付近では認められず、相対変位が大きい箱の長さの 1/2 点付近で顕著であることから考えて、この原因は dilatancy にあると考えた。すなわち、沈定後のかなり締まった状態の砂層に振動によってせん断力が作用すると、せん断変形にともなって砂層の間げきが膨張する。そのとき、一時的に負の間げき圧が生ずることとなる。せん断変形が右方向に生ずるとき、左方向に生ずるとき、いずれのときも間げきは膨張するので、図-12 に示すように 1 周期に 2 回負の間げき圧が生ずることとなる。

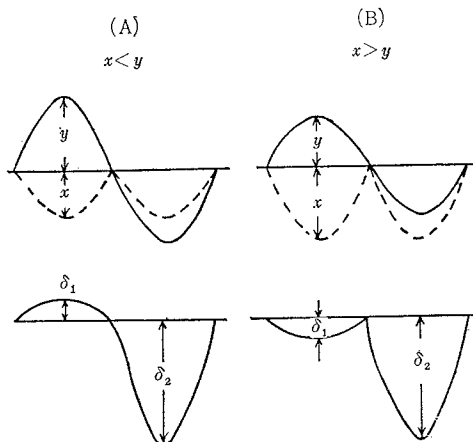
図-12 せん断変形と間げき圧の関係



結局、埋込水圧計の測定値は動水圧にこの負の間げき圧がふくまれた振動水圧であると考えられる。動水圧振幅と間げき水圧振幅の大小の関係で図-13 に示す 2 つの波形が考えられる。(A) は動水圧振幅が間げき水圧振幅より大きい場合であり、(B) はその逆の場合である。

図-8 において壁面からの距離 $l=5$ cm の点の記録が (A) の場合に相当し、 $l=20$ cm の点の記録が (B) の場合に相当すると考えることができる。すなわち、砂層のせん断変形は壁面付近で微小、箱の長さの 1/2 点で最大となると推定されるので、この間げき水圧振幅も壁面

図-13 間げき水圧と間げき水圧の合成



で 0、箱の長さの 1/2 点で最大となり、一方、動水圧振幅は壁面で最大、1/2 点で 0 となるので、壁面に比較的に近い場所では (A) の場合の波形が得られ、1/2 点に近くなるにしたがって (B) の場合の波形が得られるようになる」と解釈することができる。

特に 1/2 点での波形については、この点では動水圧振幅は 0 で間げき水圧のみがあらわれていると見ることができる。

いま、この間げき水圧振幅を x 、動水圧振幅を y とすると図-13 に示すように

(A) の場合では $\delta_2 = y + x$ 、 $\delta_1 = y - x$ であるので、

$$y = \frac{1}{2}(\delta_2 + \delta_1)$$

$$x = \frac{1}{2}(\delta_2 - \delta_1)$$

また、(B) の場合では $\delta_2 = x + y$ 、 $\delta_1 = x - y$ であるので、

$$x = \frac{1}{2}(\delta_2 + \delta_1)$$

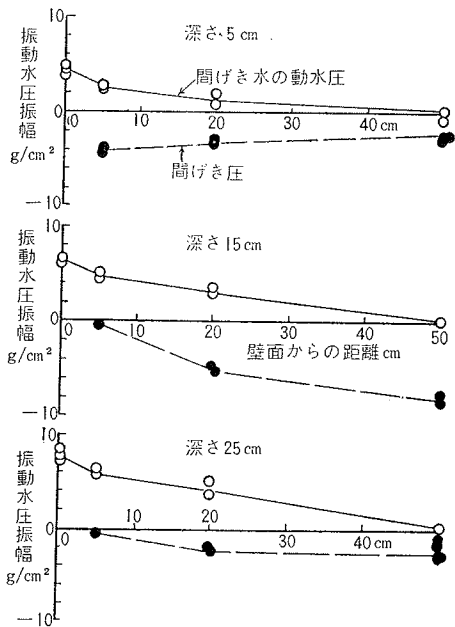
$$y = \frac{1}{2}(\delta_2 - \delta_1)$$

ゆえに、それぞれの場合の δ_1 、 δ_2 が測定できれば x と y とをそれぞれ求め得る。 δ_1 、 δ_2 を測定するには振動中心(静圧)が必要であるが、砂づめ後第 2 回以後の振動による記録では振動中の静圧の移動はあまりなく、振動中心はほぼ確定することができる。また、動水圧と間げき水圧との位相差があるときは上記の方法によって x 、 y を求めることができないが、図-8 からわかるように、この点についてあまり問題にしなくてもよいように思われる。

以上により動水圧振幅と間げき水圧振幅とを求め、その長さ方向の分布を示したのが図-14 である。これは震度 0.3 の場合の値である。実線は動水圧値であり、破線は負の間げき水圧値である。

図-11 と図-14 の実線との対応により著者が間げき

図-14 間げき動水圧と間げき水圧の分布



水による動水圧と考える水圧は真に動水圧と考えてよいと思われる。また、振動箱内の砂を弾性体と仮定して振動によって生ずるせん断ひずみを著者の理論⁴⁾によって計算した結果は図-15のようになる。この場合、砂の弾性率は図示のように深さの関数としている。図-15と図-14の破線とを比較すると両者の分布はほぼ近似的なものであることがわかる。

ただ、深さ 5 cm の点では例外となっているのは震度が 0.3 程度となると表面波のため表面付近の砂の運動が激しいための影響ではないかと考えられる。

5. 結 語

以上、実際岸壁の耐震設計を行なうにあたって飽和砂

の振動圧力を計算するのに振動土圧と間げき水による動水圧を別個に計算してその和を求めればよいか、どうかということ、著者が間げき水による動水圧と呼んでいる振動水圧が真の動水圧であるか、どうかということとを明らかにすることを目的として再び飽和砂についての実験を行なった結果および考察について述べた。その結果、つぎの結論を得た。

(1) 振動初期に生ずる異常水圧上昇は砂の沈定にもなって生ずる間げき水圧で、その上昇高は $r_a h$ にほぼ等しい。ただし、 r_a は砂の水中見かけ密度、 h は深さである。

(2) 飽和砂の振動圧力は振動土圧に間げき水による動水圧を加えたものに等しい。

(3) 著者が間げき水による動水圧と考えている振動水圧は、その長さ方向の分布から判断して、真の動水圧であると考えられる。

(4) 振動中、飽和砂層内には周期的な dilatancy による負の間げき水圧の発生が見られる。

(4) の負の間げき水圧の岸壁の耐震性におよぼす影響については現在では全く明らかでない。ただ、考えられることは本実験のような固定壁では壁面にはこの間げき水圧の影響はみられないが、可動壁においてはこの影響があるのではないと思われる。

これについては現在、可動壁についての実験を行なっているので、そのうちに実験してみる予定である。

終りに本研究に対して常にご指導、ご批判いただいている、九大名誉教授 松尾春雄先生(現 大分工業高専校長)に厚く感謝の意を表す。また、本実験を行なうにあたっては当時、本学学生 大場常男君(現在、大阪市交通局勤務)の助力をいただいたことを付記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 岸壁裏込めの間隙水による動水圧について, 土木学会論文集 第 87 号, 昭.37.11.
- 2) 岸壁裏込めの間隙水による動水圧, 土木学会論文集 第 38 号, 昭.31.10.
- 3) 水に飽和された土の振動圧力, 土木学会誌 第 40 卷 6 号, 昭.30.6.
- 4) 重力式岸壁の耐震性についての一考察, 土木学会論文集 第 70 号, 昭 35.9.

(原稿受付: 1963.5.23)

図-15 せん断ひずみの水平方向分布(理論)

