

# 地震時土圧の一つの求め方

大原資生\*・松田 博\*\*

## One Determination of the Seismic Earth Pressure

Sukeo O-HARA and Hiroshi MATSUDA

### Abstract

A seismic earth pressure has been computed by Mononobe and Okabe's Formula. But, in this formula, cohesion is omitted.

It is necessary to clarify an effect of cohesion on a seismic earth pressure, in order to establish the calculation of a seismic earth pressure of cohesive back fill.

In this experiments, relations between an earth pressure and movable wall displacement are obtained at seismic coeff.  $k_h=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ .

Sands used in this experiment are dry Toyoura sand and Toyoura sand mixed with glycerin (cohesive sand).

These results show a hysteresis loops.

We considered that seismic earth pressure is the resultant earth pressure and proposed one calculation of seismic resultant earth thrust acted on a wall, by a comparison of dynamic hysteresis loops with static those.

This calculation is attributed to the correspondence of the calculated displacement of sand layer with the displacement of movable wall.

According to this method, we calculate a displacement of sand layer by a shear vibration theory, first and we can obtain a seismic resultant earth thrust, using Fig. 9.

### 1. 緒 言

擁壁に作用する地震時土圧に対する粘着力の影響は明らかでない。

1924年に、物部・岡部氏が提案され、現在も地震時土圧の計算に用いられているが、この式には粘着力が考慮されていないことは衆知のことである。そのために、最近粘着力を考慮した計算式が発表されているが、実験的検証がまだできていない。

地震時土圧の実験的検証については、粘着力のない乾燥砂の場合についても長い年月を要し、まだそのすべてが明らかでないことから、粘着力の影響の解明にも、今後の多くの実験結果の蓄積が必要と考えられる。

地震時土圧の実験には、通常、振動台の上に砂槽がのせられ、その中に砂をつめて所定の振動を与えた際

の振動方向に直角な側壁に作用する土圧を測定するという方法がとられる。その際の土圧測定は土圧計によって土圧分布を求める方法と、ロードセルを用いて壁全体に加わる土圧合力を求める方法がある。

本実験では、乾燥砂にグリセリンを混合して、僅かの粘着力のある砂を作って、これを砂槽の中につめ、地震時土圧の測定を行った。

側壁は、その下端がヒンジとなっていて僅かに回転する。所定の加速度の振動中にこの側壁の上支点を2.0 mm だけ外側および内側にくり返し変位させ、そのときの土圧変化を測定した。

この実験の目的は、地震時土圧と裏込め土のひずみレベルの関係を明らかにすることにある。そこで、実験結果の整理には、壁の変位と作用する土圧との関係を履歴曲線として示した。この曲線から地震時土圧が主動状態となるに必要な壁変位（裏込め土のひずみ）と壁変位による土圧の変化が求められる。

また、土圧合力の測定値の考察から、地震時土圧係数、壁面摩擦角、土圧合力の作用高についての特性を

\* 土木工学科

\*\* 建設工学科

求めた。

本論文では、それらの結果についてのべる。

## 2. 試料および実験装置

試料としては、豊浦標準砂の気乾状態のもの（これを以後乾燥砂という）とそれにグリセリンを質量比10：1の割合で混合したもの（これを以後グリセリン砂という）とを用いた。

グリセリンを混合して用いたのは、後述するように砂槽の深さが 50 cm であるので、粘着力があまり大きい試料は用いることができないことから、僅かの粘着力を持った試料を作るために、グリセリンを混合したものである。なお、実験では粘着力のある場合の結果と比較する必要があるため、実験には乾燥砂も用いて、粘着力のない場合の実験を行った。

豊浦砂の物理定数は表-1に、粒度曲線は図-1に示す。また、強度定数は表-2のとおりである。

グリセリン砂の粘着力は 1.18 kPa であった。

実験に用いられた砂槽は軽金属製で、図-2に示すように深さ、幅、長さがそれぞれ 50 cm×50 cm×98 cm で振動方向に直角な側壁は両方とも下端をヒンジとした可動壁となっている。

その一方の壁は下端のヒンジが水平および鉛直方向

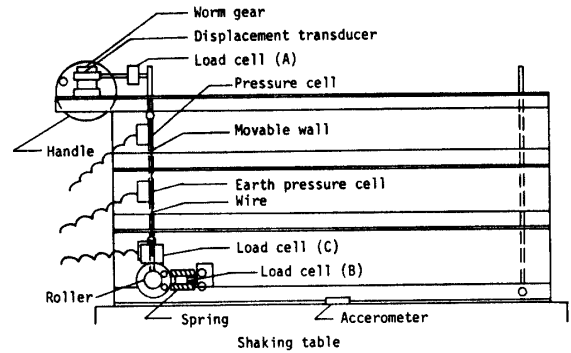


Fig. 2 Sand Box

ともロードセルで支えられ、上端の支点も水平方向はロードセルで支えられており、壁に作用する土圧合力の水平成分、鉛直成分が測定できるようになっている。

また、この壁には、砂表面から 10 cm, 25 cm, 40 cm の位置に土圧計（受圧面径5.0 cm）が取付けられており、土圧分布も測定できる。

壁はハンドルを回転することによって、上の支点を、ゆっくりと水平方向に動かすことができる。

これらのロードセル、土圧計の出力は、振動台の加速度、壁の変位を測る変位計の出力と一緒にペンソロに記録される。

Table. 1 Physical properties

Specific gravity	$G_s$	2.640
Uniformity coefficient	$U_c$	1.58
Average grain diameter	$D_{50}$	0.205 mm
Maximum grain diameter	$D_{max}$	0.840 mm

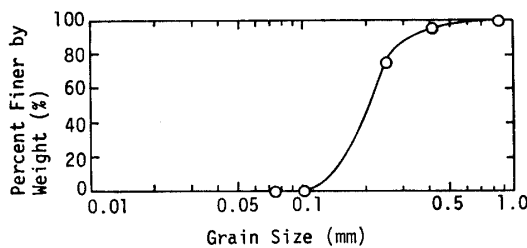


Fig. 1 Grain size distribution

Table. 2 Strength constants

	sand	sand mixed with glycerin
cohesion (kPa)	0	1.18
angle of internal friction (°)	37.4	31.0

## 3. 実験方法

砂槽の中に砂をできるだけ密度が均等になるようにつめる。その方法は次のようである。

グリセリン砂は、砂槽の中に6層に分けて入れ、タンパー（面積 14 cm×20 cm）を用い、試料上面を軽く押え、密度が均一になるようにして詰めた。詰められた砂の単位重量の平均は 14.3 kN/m<sup>3</sup> で、この値は3層の試料をつめる際に塩化ビニール容器を3個置いて砂をつめ、あとでとり出して測定したものである。

乾燥砂は、ホッパーの中に入れ釣り上げ、ホースを通して砂槽の中に静かに流し込んで詰めた。詰められた砂の単位重量の平均は 13.4 kN/m<sup>3</sup> で、測定方法はグリセリン砂の場合と同ようであり、深さ 10 cm, 25 cm, 40 cm の位置での測定値である。

実験はまず、振動台を駆動し、振動数を 3Hz で一定に保ち、水平震度  $k_h=0.1$  の加速度を与えた。そして、試料上面から 6.6 cm の位置（支点の位置）での可動壁の水平変位が 2 mm となるまで可動壁を静かに、0.01 mm/s の速度で外側に倒す。次に、可動壁を

同じ速度で、内側への変位が 4 mm (中立位置からの変位は 2 mm となる) となるまで内側に倒す。最後に、さらに同じ速度で 2 mm 外側に動かして、中立位置に戻す。

ここで、振動台を一旦止めて、振動によって生じた試料の沈下量を測定し、得られた体積変化より、密度の変化を求めた。また、試料の沈下にもなる裏込め土の高さの減少の測定値に及ぼす影響を少なくするために、沈下量を補う分だけ砂を補充して詰め、試料の高さを元にもどした。

このようにして、震度 0.2, 0.3, 0.4 の同ような実験を行った。

実験終了後、試料を静かにとり出し、土圧計、換力計のゼロ点測定を行った。

なお、振動台の加速度、各深さの土圧、可動壁の変

位量、各ロードセルの出力は、前述のようにペンオシログラフに記録された。

また、可動壁の変位方法は、動的試験と同じようにして、静的試験が行われた。

#### 4. 実験結果および考察

図-3 は、グリセリン砂の実験記録の一例で、震度  $k_h=0.2$  のものである。

一番上の記録波形は、振動台の加速度である。

Horizontal force (I), (II), (III) は、図-1 に示す可動壁を水平方向に支えるロードセル(A)と(B)の左右の 2 個によって測定された壁に作用する土圧合力の水平成分である。

Vertical force (I), (II) は、ロードセル(C)の左右 2 個によって測定された壁に作用する土圧合力の垂直成

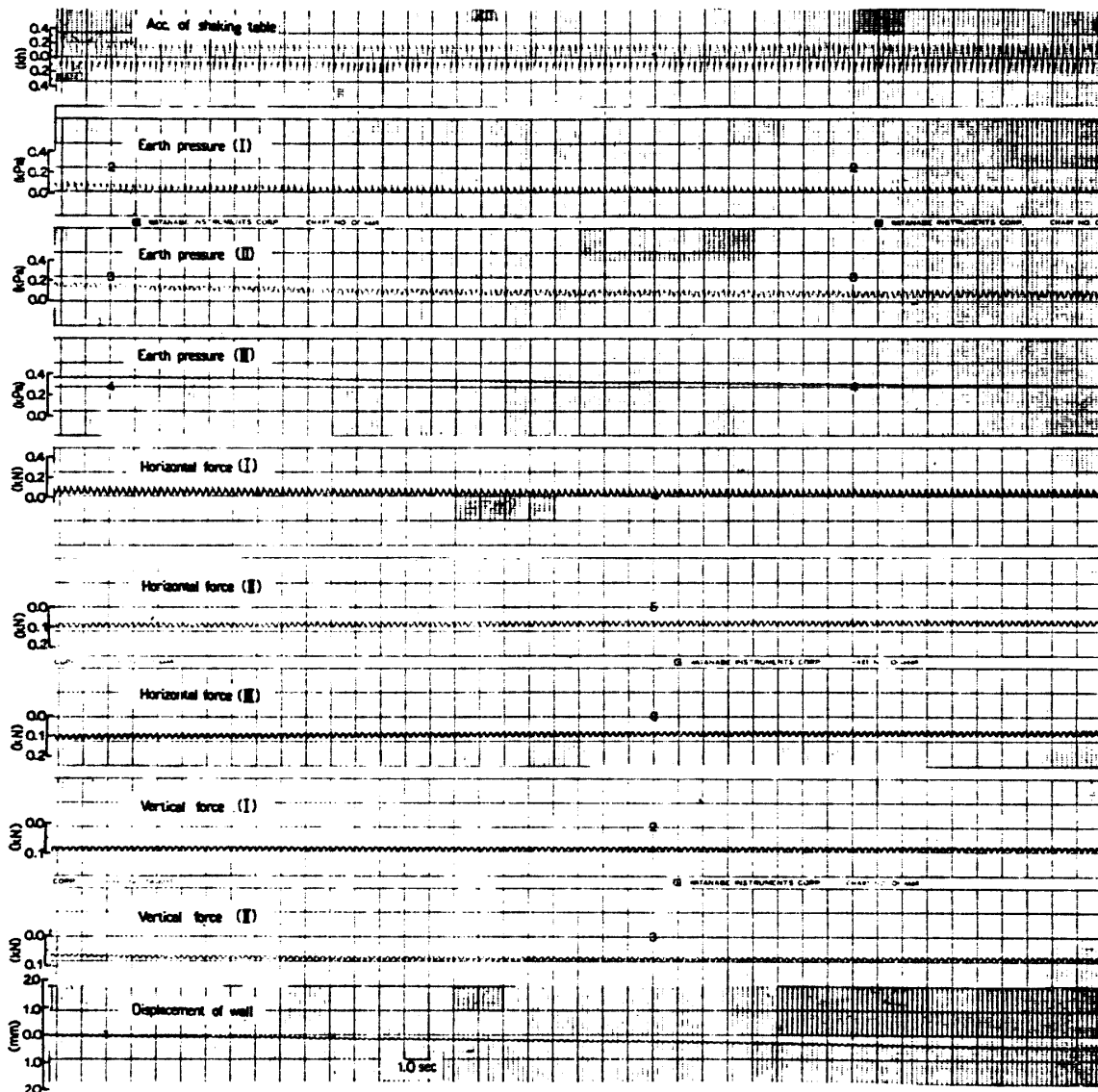


Fig. 3 Typical Pen-Oscillograph records (Glycerin sand)

分である。

Earth pressure (I), (II), (III) はそれぞれ深さ10 cm, 25 cm, 40 cm の深さの土圧強度である。一番下の記録波形は可動壁の水平変位である。

図-4は乾燥砂, グリセリン砂の静的土圧合力, 図-5は動的土圧合力と壁変位の関係を示したものである。壁変位は主働側および受働側に, 最大 2.0 mm

とした。

なお, 土圧合力は, 水平成分と垂直成分の合ベクトルとなっている。

図-4(a)より, 乾燥砂では, 壁変位のサイクルを増すごとに, 主働土圧はやや小さくなり, 受働側(壁が受働側に2.0 mm 変位したときの土圧をいう)土圧は大きくなっていることがわかる。

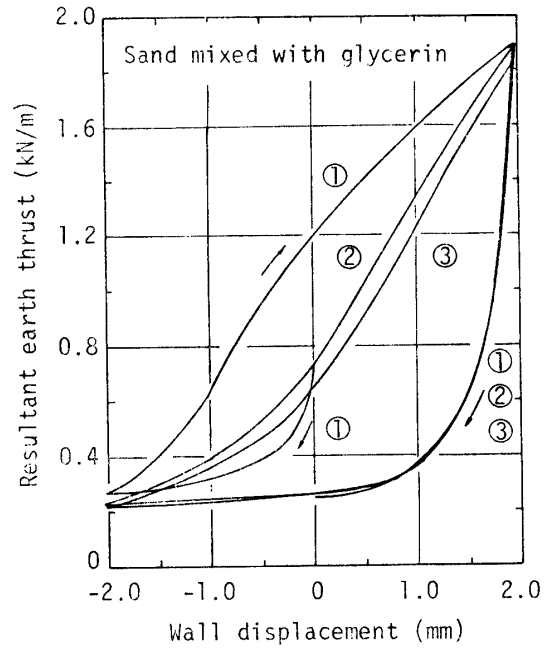
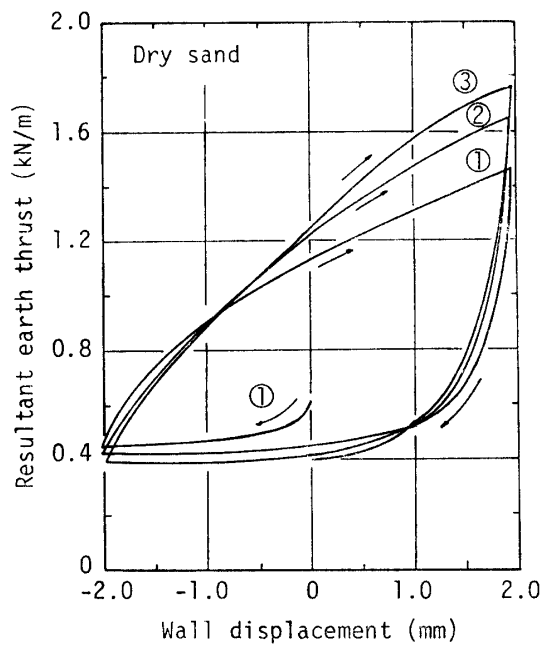


Fig. 4 Static resultant earth thrust

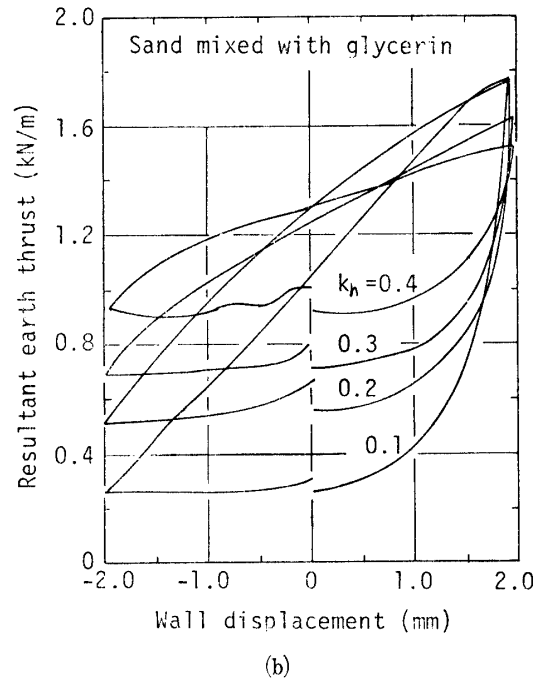
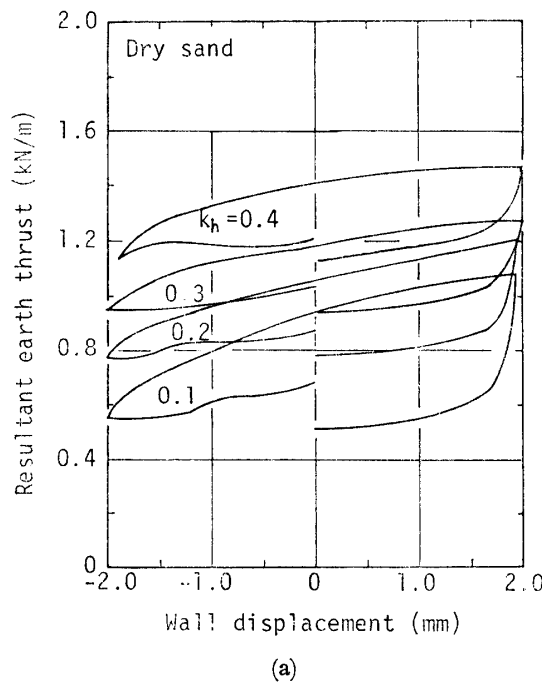


Fig. 5 Seismic resultant earth thrust

主働土圧が小さくなり、受働側土圧が大きくなるのは、可動壁の変位サイクルによって壁近傍の砂が次第に締められて、その単位重量が大きくなるためであると考えられる。

図-4 (b)をみると、グリセリン砂では、壁を外側に倒すとき、第2、第3サイクルにおいて土圧合力がほとんど同じ値となっている。

しかし、壁を内側に倒すときには、土圧合力の増加の様子に差がある。これは、可動壁を外側に倒すときに、砂が壁の方向に移動し砂表面にキレットが入ることから、砂層中にすべり面が発生すると考えられるが、このことが原因と推測される。

図-4より、主働土圧合力は乾燥砂の方が、グリセリン砂より大きくなり、受働状態では、その逆となっており、粘着力の影響が表れている。

図-5より、乾燥砂では、震度が大きくなると土圧合力は全体的に大きくなる。しかし、グリセリン砂では震度が大きくなると主働土圧は大きくなるが、受働側の土圧は小さくなっている。図-5の(a)、(b)を比較すると、震度が大きくなると、土圧合力と壁変位の関係のループの示す値や曲線の傾きなどが、次第に等しくなることがわかる。

このことは、グリセリン砂でも、震度が大きくなると、振動によって砂粒子がバラバラになり、粘着力の影響が小さくなることを示していると考えられる。しかしこのことは、粘着性のある砂質土について言えることであろう。

動的土圧合力が静的土圧合力より大きくなるのは、振動によって砂層に慣性力が作用しているからであるが、この慣性力によって生じるべき砂層の変位が壁によって拘束されることで動土圧が生じると考えることができる。

すなわち、動土圧は一種の抵抗土圧であると考えられる。

そこで図-5で得られる動土圧の主働値に等しい抵抗土圧を生じるに必要な壁変位を図-4から求める。このようにして求めた壁変位と砂層にせん断振動が生じたときの変位振幅との対応をみることによって、地震時土圧の特性を導くことができる。

図-6がその一例である。実験値としては、グリセリン砂と乾燥砂の値を示した。これらの値は、上述のようにして図-4から求めた値が砂表面より6.6 cm 上での値であることから、砂表面の値に修正して示してある。

計算値は、砂層の等価せん断弾性係数 ( $G_{eq}$ ) を454.5 kPa とした時のせん断振動時の砂表面の変位振幅である。

等価せん断弾性係数の値は実験式(1)式から求めた。

$$G_{eq} = \frac{c}{\gamma^n} \sigma_v^m \quad (1)$$

ここで、 $c, m, n$ : 定数、 $\gamma$ : せん断ひずみ(%),  $\sigma_v$ : 鉛直有効圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) で、豊浦砂では  $c=0.952, m=0.484, n=0.619$  である。

ここでは、 $\gamma=0.005\%$ ,  $\sigma_v=0.03 \text{ kg}/\text{cm}^2$  として、 $G_{eq}$  を求めている。

このような砂層に対して  $G_{eq}$  の値が適切であるかどうかの問題であるが、実験値と計算値はほぼ近い値となっている。

このことから、図-4に示すような静的土圧合力と壁変位との関係がわかっているときに、地震時の裏込め表面の最大変位を応答スペクトル法などを用いて求めれば、動的土圧合力を推測することが可能となる。その方法については後述するが、その際に、一緒に求める必要となる壁面摩擦角および作用高さについての

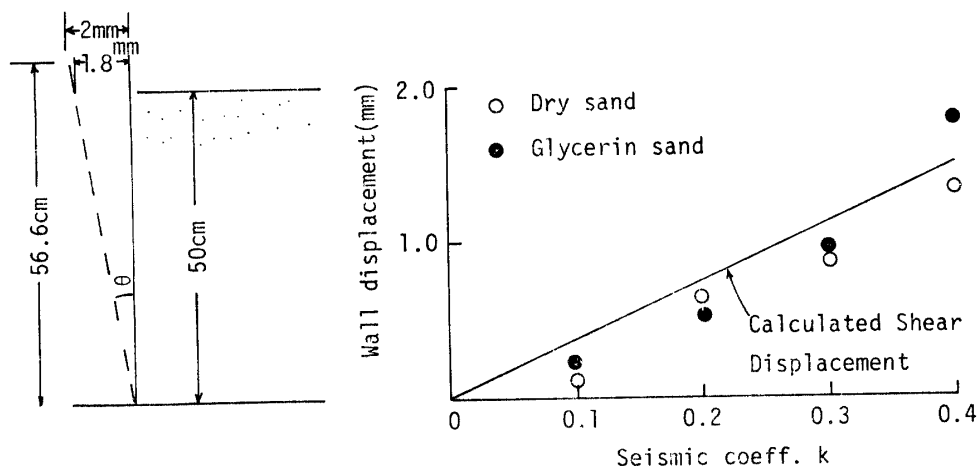


Fig. 6 Comparison of the wall displacement

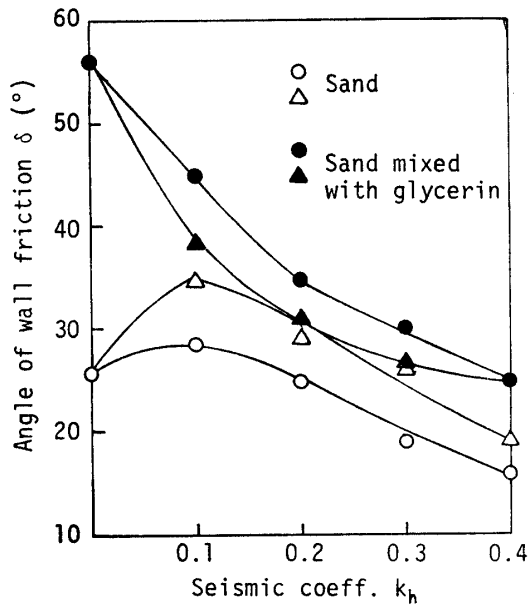


Fig. 7 Angle of wall friction

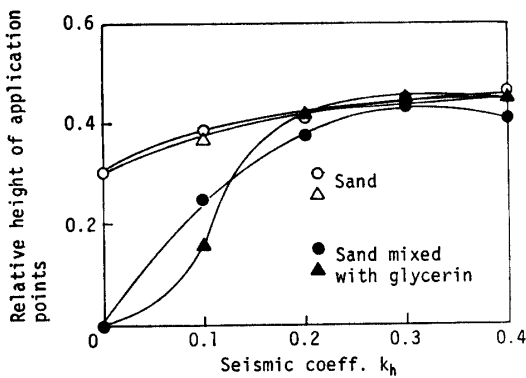


Fig. 8 Height of application points

実験結果をのべる。

図-7は地震時主働土圧の壁面摩擦角  $\delta$  を示す。グリセリン砂の場合の値には粘着力の影響が入っているので、実験値をこのままとることはできない。壁面摩擦角としては、むしろ乾燥砂の場合の値をとるのが望ましいと考えられる。

図-8は地震時主働土圧合力の作用高の実験値を示す。この場合もグリセリン砂の値には粘着力の影響が入っているので、乾燥砂の場合の値を考えるのが望ましい。

作用高が震度が大きくなるにもなって高くなるのは、震度が大きくなると、慣性力による土圧が深さの浅い所でやや大きくなるためであろう。

### 5. 地震時主働土圧の予測

以上の実験結果を用いての地震時主働土圧合力を予

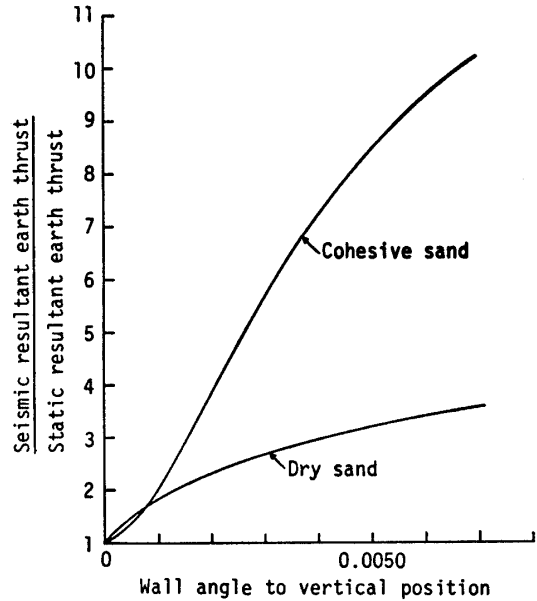


Fig. 9 Resultant earth thrust ratio

測するため、次のような方法を考えた。

前述のように、図-6に示す結果が得られたことから、図-4の最初のサイクルの曲線①を壁変位と主働土圧合力に対する静土圧合力の比（以後土圧合力比という）の関係にまとめてみた。その結果が図-9である。横軸は壁変位を壁の傾角  $\theta$  (ラジアン) で示してある。地震動によって生じる裏込め表面の最大変位振幅を壁高が除した値を図-9の横軸上にとり、その値に相当する縦軸の土圧合力比を知れば、地震時主働土圧合力が主働土圧合力の何倍となるかがわかる。

また、図-7および図-8から壁面摩擦角と、作用高を知ることができることになる。

次に例によって説明する。

静岡地震（1935年）で被害をうけた清水港丙号岸壁を例にとってみよう。地震動としてはエルセントロ波形を用い、その最大加速度は245ガルとする。

裏込め砂層の横波の伝播速度は、過去の著者の測定例を参考にして 110 m/s、単位重量は 1.56 t/m<sup>3</sup> とした。

丙号岸壁の高さは10.8mである。なお、問題を簡単にするため、残留水は考えない。

減衰定数は10%とする。

裏込め砂層がせん断振動を生じると考え、New mark の複合応答スペクトル図を用いて裏込め表面の最大振幅を求める。

$$v_s = 11000 \text{ cm/s}, H = 1080 \text{ cm}, h = 0.1,$$

$$\gamma_t = 1.56 \text{ t/m}^3$$

$$\text{固有周期: } T_j = \frac{4H}{(2j-1)v_s} = \frac{0.3927}{(2j-1)}$$

$$\begin{aligned} \text{固有円振動数: } n_j &= \frac{\pi \times 11000}{2160} (2j-1) \\ &= 15.99(2j-1) \end{aligned}$$

$j$	$\mu_j$	$T_j$ (s)	$n_j$	$S_0$ (in/s)	$S_0$ cm/s※	$S_0$ cm/s※※
1	1.274	0.3927	15.99	5.3	13.46	16.42
2	0.424	0.1309	47.97	1.7	4.32	5.27
3	0.255	0.0785	79.95	1.0	2.54	3.10

※  $k_h=0.2g$  の値, ※※  $k_h=0.25g$  の値

表面の最大振幅は

$$\begin{aligned} (y_{\max})_H &= \sqrt{(1.274 \times 16.42/15.99)^2 + (0.424 \times 5.27/47.97)^2} \\ &\quad + (0.255 \times 3.10/79.95)^2 \doteq 1.30 \text{ cm} \end{aligned}$$

故に壁の傾角としては  $\theta = 1.30/1080 \doteq 0.0012$  をとる。

図-9より、裏込めを砂質土として土圧合力比を求めれば2.0を得る。すなわち、地震時主働土圧合力は、静的主働土圧合力の2倍ということになる。

物部・岡部の式では震度0.25での地震時主働土圧は常時主働土圧合力の1.76倍となっている。

また、図-7、図-8から壁面摩擦角は $25^\circ$ 、作用高さは $0.42H$ となる。

## 6. ま と め

擁壁、とくに岸壁に作用する地震時土圧については、従来から物部・岡部の式によって計算されているが、この式には粘着力の影響が加味されていない。土圧に対する粘着力の影響は、両者の次元のちがいが一次比例の形として処理できないので、粘着力を加味した地震時土圧の計算は単純でない。

その点を簡易にすることを目的とし、地震時土圧が抵抗土圧の一種であるとの考えに立って、次のような計算法を提案したものである。すなわち、擁壁がない半無限に広がった土層と考えたときの裏込め層に生じるせん断変位が擁壁によって押し戻された結果、その際に生じた土圧が地震時土圧であると考えた。

押し戻し変位量とそのために増大した土圧合力の関係を実験的に求めた。一方、裏込め層のせん断変位は応答スペクトル法で求めて、地震時主働土圧合力が静的主働土圧合力の何倍となるかを定める方法を提案した。

実験には、本学学生米原 勝君、長田公仁君の助力を得た。ここに謝意を表する。

(昭和59年3月28日受理)