

# 地表面載荷重によつて岸壁に作用する横方向 土圧の分布について

正 員 市 原 松 平\*

## ON THE DISTRIBUTION OF LATERAL EARTH PRESSURE ON A QUAY WALL DUE TO SURCHARGE

(JSCE May 1955)

Matsuhei Ichihara, C.E. Member

**Synopsis** Measurements of earth pressures are, generally speaking, influenced by a number of unfamiliar, uncontrollable factors and the results are often misleading. Our results obtained during these five years may be said to give clear images of lateral pressure increments due to surcharges under various conditions, and they are found to be very near to the distribution computed by the method of image applied to Fröhlich's formulas.

**要旨** 壁の背面に作用する横方向土圧が地表面載荷重によつて、どのように増加するかを代表的な種々の状態において測定し、その測定結果とFröhlichの式に鏡像の原理を応用してえた計算値とを比較したものである。照査の結果この両者は比較的によく一致した。

### 1. 緒言

岸壁背後の水平な裏込土砂上に載荷した場合に、荷重によつて土砂が壁面に押しつけられて、壁に作用する横方向の土圧を増加させる。この増加した土圧を増加土圧と称する。

従来、この種の問題は地表面無限の広さに載荷した等分布荷重を土の重量に換算して求める方法や、Culmannの図解法による方法があつたが、最近 Gerber や Spangler によつて実験され、増加土圧分布は従来の方法によつていないということがわかつた。しかしながら、それらは単に実験結果を総合するだけで十分な一般性がなかつた。著者は、この点に関して種々なる実験を行い、あらゆる場合に対する一般解法をえたので、それと実験結果とを、比較したものをここに示す。

この種の測定値は日本においてはもちろん、外国においてもきわめて少ない。これは土圧測定自体が困難であるということにもとづくものである。数少ない土圧測定はむしろわれわれをミスリードするおそれさえあるが、著者数年間の土圧測定は、統一的概観を与えてくれる。その実験内容を要約すると次のようになる。

1) 固定壁と考えられる砂深 80 cm の砂槽で室内実験を行い、裏込砂は同一の砂を用いて、その処理法をかえることにより、同一荷重に対しては裏込の硬さを変え、さらに荷重の種類、載荷面積、荷重強度、載荷距離を変えて、それらの場合の増加土圧を求め、特に

裏込土砂の硬さの異なる場合には Fröhlich の集中係数  $\nu$  の値を変化させなければならないこと、及びこれらの  $\nu$  の値は鉛直増加土圧の場合と一致することを確かめた。

2) 壁高 2.7 m 程度の大型岸壁実験を行い、岸壁並びに載荷重の scale が大きい場合、壁が載荷によつて移動可能の場合、裏込材料が室内実験と異なる場合、並びに連続載荷をした場合等の増加土圧分布を観察した。

以上の実験によると、横方向増加土圧の測定値は、Fröhlich の式に鏡像の原理を応用して計算したものとよく合うといふことができる。

### 2. 室内実験装置、その他

i) 砂槽、裏込砂の処理 装置は前報<sup>1)</sup>の実験に用いた軟鋼製砂槽(内法長さ 170×巾 72×高さ 80 cm)、土圧計、ランプ台、スケール台よりなり、土圧計は写真-1 に示すように砂槽の一方の rigid な側壁の中央鉛直線上に光挺子式土圧計<sup>2)</sup>を 5 個、受圧板を平滑な砂槽内面につらいちに取付けた。土圧計の検定は機械的荷重並びに水圧で行つた。実験前後の検定値の変化は 2% 以下で現在に至るまできわめて安定している。受圧板の最大変位量は、水圧が作用する submerged sand の最下部土圧計で 1/100 mm に達した。

使用した裏込砂は豊浦標準砂で、これを dry loose, submerged, drained の各状態で実験した。dry loose sand の填充は水平填充法と斜面填充法とを用いた。後者は安息角で静かに砂を落して填充する方法である。submerged の状態とは最初に loose dry sand に注水し、排水、注水をくりかえし、砂表面の高さが、排水、注水によつて大きな変化のない状態に注水して、水が砂表面と一致した状態をいう。排水終了は砂槽の 2ヶ所に取付けた stand level の水位の 0 をもつてし

\* 運輸技術研究所港湾施設部

写真-1 砂槽, 土圧計



た。裏込砂の深さは特別の場合を除き 75 cm とした。

ii) 載荷重 載荷重としては水平な裏込上にアルミニウム鋳物の厚い載荷板を置き, その上に次第に重錘を加えてゆき, 最大荷重が  $q=100\sim 200\text{ g/cm}^2$  になるまで載荷した。載荷板の大きさは  $15\times 15\text{ cm}^2$ ,  $15\times 20\text{ cm}^2$ ,  $15\times 30\text{ cm}^2$  の 3 種類で, また裏込砂が dry loose sand の場合のみ, 水平な裏込砂表面上に底のない木枠を置き, これに dry loose sand を静かに水平に  $q=20\text{ g/cm}^2$  だけ載荷した。載荷重の長さ  $L$  を一定の 63 cm にして, 巾  $B$  を 15 cm から 73 cm まで変化させた。これを前記荷重に対して, 砂荷重と称することにす。

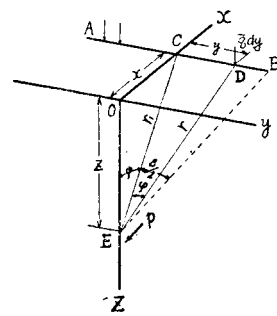
iii) 測定の方法 裏込土砂のみによる土圧 (以下これを裏込土圧と称す) を読み, 次に載荷し, そのときの土圧を読み, 両者の差をもつて, 載荷による増加土圧となした。dry loose sand に一度載荷すれば, その後除荷しても, 土圧はもはや載荷前に復元しないので (図-8), 載荷することに裏込砂を置きかえた。submerged sand の場合は, 除荷後に裏込を一度排水しそれから再び注水すると載荷による履歴はほとんどなくなり, drained sand の場合は, 除荷後に注水して裏込を一たん submerged の状態にした後に排水して履歴を取り除き載荷前の土圧をほとんど一定にした。

3. 基礎式の積分

図-1 において  $yz$  面を鉛直壁の背面とし,  $AB$  を水平な裏込土砂上に壁に平行に置いた長さ  $L$  なる線荷重とする。  $AB$  を垂直に 2 等分する鉛直面と壁の背面との交線は,  $AB$  によって生ずる最大の横方向増加

土圧分布を与える。いまこの交線を  $z$  軸に, 裏込土砂天端との交点を原点として, 図のごとく座標軸を定め

図-1 壁に平行な線荷重による横方向増加土圧



線荷重  $AB$  によって,  $z$  軸上の任意の一点  $E$  に生ずる横方向増加土圧を  $p$ , 平均荷重を  $\bar{q}$ ,  $K_I = p/\bar{q}$  とすれば,  $p$  は Fröhlich の式に鏡像の原理を適用して  $p=2\sigma_x$ , 線荷重が等分布をなすときは  $\sigma_x$  は前報<sup>1)</sup> の式 (3) で与えられ,  $K_I$  は容

易に求められる。

線荷重強度が  $3/2\{1-(2y/L)^2\}\bar{q}$  で与えられる放物線分布をなすときは,

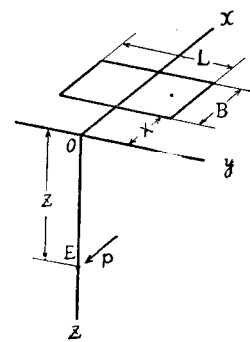
$$K_I = \frac{3}{2} \bar{f}_1 \frac{z^{\nu-2} x^2}{r_1^{\nu+1}} - \bar{f}_2 \frac{1}{L^2} \frac{z^{\nu-2} x^2}{r_1^{\nu-1}} \dots\dots\dots (1)$$

$\nu$  は集中係数,  $\tau_1, \beta, \bar{f}_1, \bar{f}_2$  は前報<sup>1)</sup> で示した。無限に長い等分布線荷重では,  $\beta = \pi$  とおくことにより,  $\bar{f}_1$  は表-1 の値をとる。

表-1 無限に長い等分布線荷重の  $\bar{f}_1$

$\nu$	3	4	5	6	7
$\bar{f}_1$	$4/\pi$	$3/2$	$16/3\pi$	$15/8$	$32/5\pi$

図-2 壁に平行な矩形載荷重  $B\times L$  が壁に平行に, 壁から距離  $X$  だけ離して  $x$  軸に対称に置かれた場合に,  $z$  軸上の一点  $E$  に生ずる横方向増加土圧



次に図-2のごとく, 矩形載荷重  $B\times L$  が壁に平行に, 壁から距離  $X$  だけ離して  $x$  軸に対称に置かれた場合に,  $z$  軸上の一点  $E$  に生ずる横方向増加土圧係数を  $K$  とすれば,  $K$  は鉛直増加土圧の場合と同じようにして求めることができる。等分布底面反力の場合は

$$K = \sum_{x=X}^{x=X+B} \bar{f}_1 \times \frac{z^{\nu-2} x^2}{r_1^{\nu+1}} \Delta x \dots\dots\dots (2)$$

$\Delta x$  は分割した帯状荷重の巾。

長さ  $L$  が岸壁方向に無限に長い巾  $B$  をもつた載荷重では  $\bar{f}_1$  は  $x, z$  の値にかかわらず, 表-1 に示す一定値をとるから式 (2) は積分の形であらわすことができ, かつ積分可能である。  $B = \infty, L = \infty$ , すなわち壁の背後に無限遠に載荷された等分布載荷重では, 計

算の結果、 $K=1/(\nu-2)$ となり、壁の全高にわたつて、増加土圧値は一定で $\nu$ の値によつてのみ決定される。

しかるに鏡像の原理の適用に際して、鉛直な壁の背面は不動で摩擦がないと仮定した。従つて、この場合  $K$  は earth pressure at rest  $K_0$  となり、 $K=K_0=1/(\nu-2)$  となる<sup>3)</sup>。

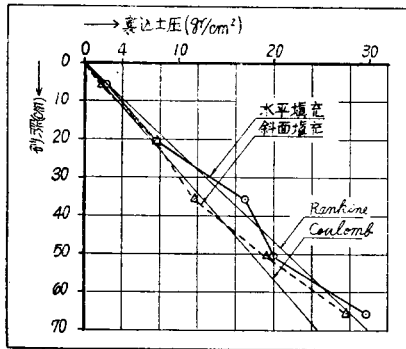
図-2 で底面反力が、矩形板の両辺に平行な断面において、いずれも放物線分布をなす場合は

$$K = \sum_{x=X}^{x=X+B} \left\{ \frac{3}{2} \bar{f}_1 \frac{z^\nu - 2x^2}{r_1 \nu + 1} - \bar{f}_2 \frac{1}{L^2} \frac{z^\nu - 2x^2}{r_1 \nu - 1} \right\} \times \left\{ \frac{3}{2} - \frac{6}{B^2} \left( x - X - \frac{B}{2} \right)^2 \right\} dx \dots (3)$$

4. 測定結果並びに考察

i) Dry loose sand による裏込土圧 裏込土圧測定のうち dry loose sand による値を図-3に示した。これは水平填充 14 回、斜面填充 33 回の平均値を示したものであるが、水圧的に分布し、その大きさは実測した安息角  $\varphi=32^\circ$ 、 $\rho=1.4 \text{ g/cm}^3$ 、壁摩擦角  $\delta=20^\circ$  (仮定) による Rankine の土圧係数  $K_A=0.307$ ,

図-3 dry loose sand の裏込土圧



Coulomb の土圧係数  $K_A=0.255$  の中間程度の値である。水平填充の方が値がいくぶん大きい。

ii) 砂荷重による増加土圧 長さ  $L=63 \text{ cm}$ 、巾  $B$  の異なる載荷重を距離  $X=2 \text{ cm}$  に置いた場合の増加土圧分布 (2~3 回の平均値、図-4) から次のことがわかる。

- 1) 同じ距離で、載荷重の巾を大きくすると、下方の増加土圧が大きくなる。
- 2) 従つて、近距離で、巾と長さが壁高に対してかなり大きい荷重を載荷すれば、増加土圧分布形状だけは、従来の設計に用いてきた等分布に近い。
- 3) 測定値が不規則な分布をしているのは、載荷重に用いた砂の填充に当つて、loose な裏込砂が一様にしまらなかつたことによる。

いま各位置における増加土圧分布図から、壁高  $H=$

図-4 長さ  $L=63 \text{ cm}$  の砂荷重を壁より距離  $2 \text{ cm}$  に置いたときの横方向増加土圧分布 ( $q=20 \text{ g/cm}^2$ )

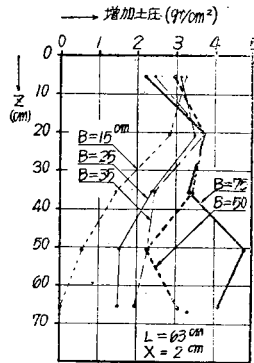
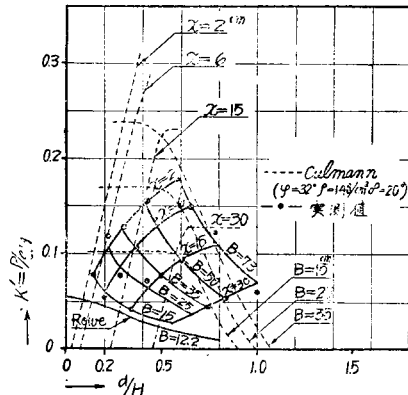


図-5  $L=63 \text{ cm}$  の砂荷重を各距離に置いた場合の  $K'$  の測定値と Culmann の解との比較



高  $H$  に対して二次元荷重とみなしうるとして、Culmann の図解法で土圧合力を求め、 $K'$  を図-5に点線で示したが、これは測定値よりもこの場合大きい。しかるに後述するように、壁が安定しているかぎり、載荷による土圧増加量はかなり大きくなる。従つてこれは、増加土圧が裏込土砂並びに荷重状態によつて広範囲に変化することを示すものである。

また図-5に Rowe<sup>4)</sup> の実験の測定値をえがいてみると、これは筆者の測定値の極端な場合に相当し、よくあてはまっているといえる。

この場合、Fröhlich の式を適用すると、増加土圧分布は  $\nu=6$  の等分布底面反力式 (2) の場合と一致する。一例を図-6に示した。また Rowe の実用式による値を示したが、これは筆者の測定値に比してかなり大きめである。

iii) 載荷板荷重による増加土圧 dry loose sand 上に  $B \times L=15 \times 20 \text{ cm}^2$ 、 $q=100 \text{ g/cm}^2$  が図-7に、

65.5 cm (最下端 土圧計の深さ) に作用する土圧合力  $P(\text{g/cm})$  を求め、載荷重の中心と壁との距離を  $d$  とし、平均増加土圧係数  $K' = P/qH$  を各分布図から求め、これを  $d/H$  に対して図示すると図-5 がえられる。図-5 によると、 $L$  が一定な場合は、 $K'$  は  $B$  と  $X$  によつて変化する状態がわかる。いま巾  $B=35 \text{ cm}$  以下のものは壁

図-6 砂荷重による横方向増加土圧測定値

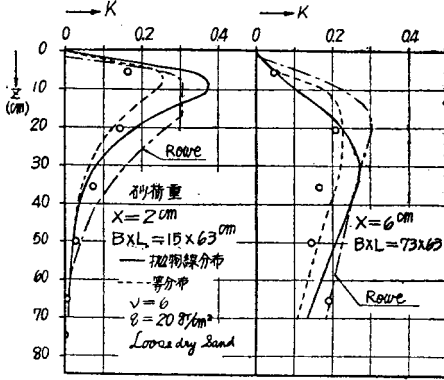


図-7 dry loose sand の測定値

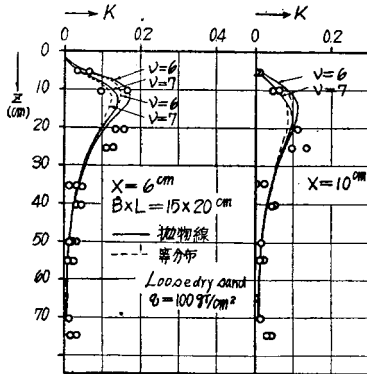


図-8 載荷による増加土圧の分布と除荷した場合の増加量との関係

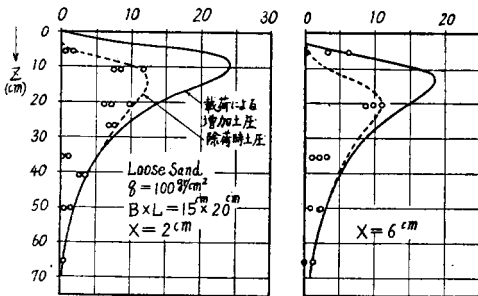


図-9 submerged sand の測定値

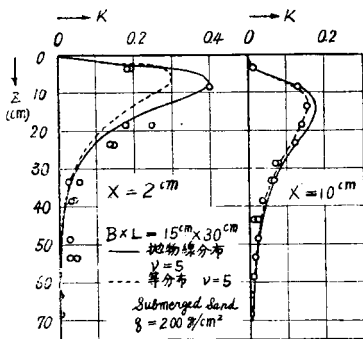
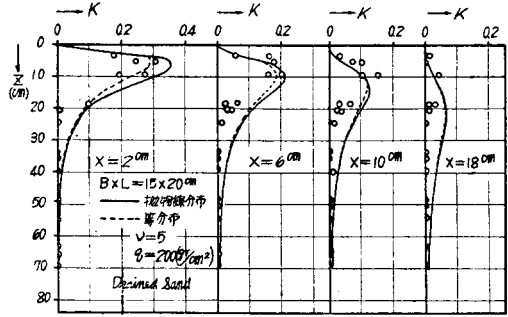


図-10 drained sand の測定値



submerged sand 上に  $B \times L = 15 \times 30 \text{ cm}^2$ ,  $q = 200 \text{ g/cm}^2$  が図-9 に, drained sand 上に  $B \times L = 15 \times 20 \text{ cm}^2$  が図-10 にそれぞれ, 非常に数多い測定値の代表的一例として示した。

dry loose sand では鉛直測定でえた  $\nu(6-7)$  を用い, submerged 並びに drained sand では同様にして求めた  $\nu=5$  を用い, 底面反力は放物線分布として式(3)で計算すれば, 比較的良好一致しているといえる。いずれもこれらの底面反力分布並びに  $\nu$  の値は鉛直増加土圧の測定と一致しているといえることは特筆すべきことである。前報<sup>1)</sup>で底面反力分布並びに  $\nu$  の値は  $q/q_b$  によるとのべたが, 壁に作用する横方向増加土圧の分布形状を支配する極大値の位置と大きさは計算によれば, 載荷板の底面反力分布と  $\nu$  の値によって決定し, 近距離では底面反力が強く影響し, 遠距離ではその影響はほとんどなく,  $\nu$  の値のみによって支配されるが, 上記の測定値は大体この計算曲線に従っている。

なお, loose sand に載荷後, 除荷すると土圧は載荷前の値に戻らないで, かなり増加したまま残る。その測定値の一例は図-8 に示した。

5. 大型岸壁実験

酒田港, 宇部港において, それぞれ壁高 2.75 m, 2.4 m の岸壁で土圧実験を行った<sup>5)6)7)</sup>。裏込土砂は酒田では砂質土, 宇部ではコンクリート用の砂を, 土圧計は両港ともゴールドベック改良型(港施1型)<sup>2)</sup>を用い, 載荷重は酒田では底巾 1 m 角のコンクリートブロック, 宇部では各種大きさのコンクリート板に重材料を載荷し, 2~4 t/m<sup>2</sup> の荷重強度にした。

室内実験と比較して次の顕著な差が認められた。

- (1) 載荷によつて, 壁体上部の土圧が増加し, 壁体下部の土圧がいくぶん減少した。
  - (2) 載荷後に除荷すると, 土圧が残留した。
- (1) は壁の移動にもとづくものであるが, 残留土圧は壁が移動しない場合でも, 載荷によつて壁の背面に

押し出された砂の摩擦力的のために、除荷後も壁面に対して力を保持することによって生ずる。これらの残留土圧は、はじめて近距離に載荷して壁の上部に大きな増加土圧を生じた場合に大きく、載荷、除荷の連続によって、裏込砂が締め固まつて、より弾性を呈してくるに従つて減少した。残留土圧合力の最大は、最大増加土圧合力の 60% 程度であつた。stockholm<sup>9)</sup> の実験では 60~70% でわれわれの測定値に接近していた。残留土圧は約 16 時間経過後に測定したら減少していることが認められた。その理由は判明しないが、これは土圧の一性質として特筆すべきことである。

以上の事実にもかかわらず、次のことがいえる。

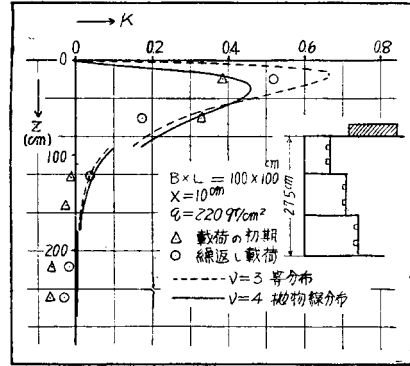
(1) 裏込土砂填充時に変位した程度の壁の変位が載荷によつて起つたが、増加土圧分布形状は実用上室内実験と同じで図-6~10 に示すような分布をした。この関係は、Gerber の実験<sup>9)10)</sup>、Spangler の実験<sup>11)</sup> が砂槽と擁壁との相異、並びに裏込土砂の相異にもかかわらず、ほとんど同じような分布形状を示したのに似ている。

(2) 壁の安定度、壁が乗っている地盤の状態などが酒田と宇部ではいくぶん異なるにもかかわらず、両者の増加土圧分布には大差がなかつた。

以上の関係は、載荷によるわずかな壁の移動よりも裏込土砂と載荷重との関係が、増加土圧分布に対して、より大きな影響を有することを示している。

図-11 に酒田港 ( $q = 220 \text{ g/cm}^2$ ) の測定値の一例を示した。裏込土砂は締め固まつた状態で○印は当日の朝測定した載荷前の裏込土圧を基準土圧にとり、それよりの増加量、△印は載荷、除荷の実験中各載荷直前よりの載荷による土圧増加量で、両者の差は残留土圧にもとづくものである。式 (3)、 $\nu = 4$  がこの場合よく一致する。図-12 に一定荷重でくりかえし載荷した場合の増加量の変化を示した。一定荷重でくりかえし載荷をすると、裏込土砂は次第に硬さを増し、壁もその

図-12 酒田港、第 1 岸壁の壁より 10 cm の位置でくりかえし載荷した場合の土圧増加量の比較



荷重に対しては次第に安定を増し、 $\nu = 3$  の等分布載荷式 (2) に接近する。荷重強度、載荷面積による変化は図-13 に示した。これは宇部港で、Vibrator で裏込土砂を突き固めて、きわめて硬くなつた土砂上で、比較したものであるが、荷重強度を一定にして載荷面積を増大させると、放物線分布荷重の  $\nu = 4$  から等分布荷重の  $\nu = 3$  程度に変化し、また載荷面積を  $50 \times 100 \text{ cm}^2$  のままで荷重強度を  $2 \text{ t/m}^2$  より  $4 \text{ t/m}^2$  に増大させると、同じ放物線分布荷重において  $\nu = 4$  としたときよりも、 $\nu = 5$  のときの方がよく合つた。これらの関係は、主として荷重と裏込土砂との関係、 $q/q_0$  によつて増加土圧分布が明らかに変化することを示すものである。

Spangler の線荷重の実験式<sup>11)</sup> によつて面荷重を計算して筆者の測定値と比較したものを 図-11 に示し

図-13 宇部港における載荷板の大きさ並びに荷重強度による土圧増加量の比較

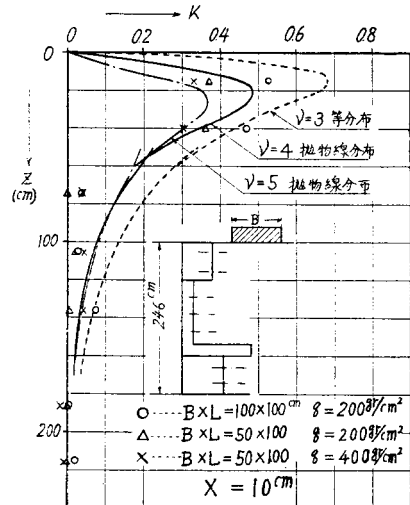
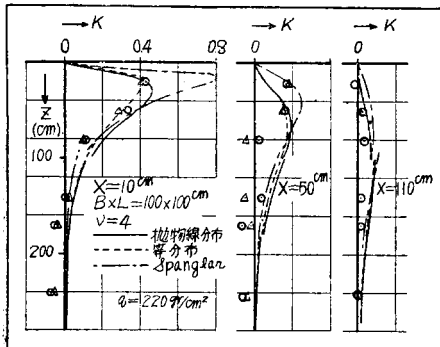


図-11 酒田港、第 2 岸壁の増加土圧測定値と Spangler の値との比較



た。Spangler によると近距離載荷の場合、壁の上部でかなりに過大になる。従つて彼の実験式は  $\nu=3$  程度ならばいくぶん合うが、それ以外には妥当ではない。同様にして Rowe の実用式<sup>1)</sup>は  $\nu=6\sim 7$  程度にのみ適用できる。

## 6. 結 語

(1) 裏込砂の処理によつて  $\nu$  がどのように変化するか、 $\nu$  の大きさの順に列記すれば、loose sand では  $\nu=6$  ないし 7, submerged sand, drained sand では  $\nu=5$ , 酒田港, 宇部港の実験では  $\nu$  は 5 から 3 まで変化した。これは前報<sup>1)</sup>の鉛直増加土圧の場合の  $\nu$  の値と同じであつた。なお一定荷重では裏込砂が硬い方が  $\nu$  が小である。従つてまた一定荷重で載荷, 除荷をくりかえすと  $\nu$  は減少して  $\nu=3$  に到達する。

(2) 載荷して除荷すると残留土圧が存在した。この残留土圧は時間の経過とともに減少した。

(3) 壁の移動ということが問題になるが、現場実験の移動しうる壁でも、載荷によつて移動しうる程度ならば、増加土圧分布の形状並びに大きさは、室内実験の固定壁の場合と実用上同じである。壁を移動するときは土圧合力の減少をきたすが<sup>12)</sup>、これは壁自体を積極的に移動させた場合の土圧変化であつて、載荷によつて、裏込土砂が壁を押し出した場合には、土圧減少量はそれほど顕著ではない。

(4) 岸壁並びに載荷重の大型と小型とでなら区別を考へる必要はない。 $q/q_0$  が一定な場合、載荷重と壁の背面の幾何学的関係が同じであれば、増加土圧係数  $K$  の値は同じである。

(5) 一定な裏込土砂上で、載荷面積、荷重強度を変化させた場合には、増加土圧分布の形状並びに大き

さが変化する。この場合には  $\nu$  の値を増減させて増加土圧分布をあらわすことができる (図-13)。

最後に筆者はこの研究に、終始御指導を頂いた近藤正夫、村山朔郎両博士に対して、ここに記して厚く感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 市原松平：剛性載荷板荷重による砂層中の鉛直増加土圧の分布について、土木学会誌40巻4号
- 2) 近藤・長谷川・市原：土圧計3種，運研報告書3巻4号，昭和28年4月，pp 17
- 3) 最上武雄：土の力学，昭和23年，pp 141
- 4) P.W. Rowe：The Distribution of Lateral Earth Pressure on a Stiff Wall due to Surcharge, Civil Engineering and Public Works Review, Sep. 1950, pp 590, Oct. 1950, pp 654
- 5) 市原松平：酒田港物揚場模型実験報告書，第一港湾建設局，昭和28年
- 6) 市原松平：宇部港9m岸壁模型実験報告書，第四港湾建設局，昭和28年
- 7) 市原松平：酒田港における地表面載荷重による土圧の測定，第8回年次学術講演会概要，昭和27年，pp 42
- 8) H. Jansson, A. Wickert and A. Rinkert：Earth Pressure against Retaining Walls, Proc. 2nd I.C.S.M., Vol. II
- 9) D.H. Lee：Sheet Piling, Cofferdams and Caissons, 1945, pp 68
- 10) K. Terzaghi：Anchored Bulkheads, Proc. of A.S.C.E., Sep. 1953, pp 7~14
- 11) M.G. Spangler：Lateral Pressures on Retaining Walls caused by Superimposed Loads, Highway Research Board, part II, 1938, pp 57
- 12) K. Terzaghi, Large Retaining Wall Tests Eng. News Record, Vol 112, 1934 pp 136~140 (昭 29.9.17)

# 開水路の垂直流速曲線における平均流速の位置の分布性について

正員 春日屋 伸昌\*

## THE DISTRIBUTION OF THE THREAD OF MEAN VELOCITY ON THE VERTICAL VELOCITY CURVE IN AN OPEN CHANNEL

(JSCE May 1955)

Nobumasa Kasugaya, C.E. Member

**Synopsis** The author describes the relations among the thread of mean velocity, the thread of maximum velocity and the ratio of surface velocity to mean velocity on the vertical velocity curve in an open channel, and with 679 data observed by U.S. Geological Survey he argues about the ranges of them, the distribution of the thread of mean velocity and the probabilities for the threads of mean and maximum velocity occurring in several intervals.

\* 中央大学助教授，工学部土木工学教室

要旨 開水路の垂直流速曲線における平均流速の位