

論 說 報 告

第 26 卷 第 12 號 昭和 15 年 12 月

乾燥砂層内垂直土壓に関する二、三の問題

(昭和 15 年 4 月 3 日 第 4 回工學會大會に於いて一部講演)

會 員 眞 井 耕 象*

概 要 本文は茲に土木學會誌第 24 卷第 5 號に發表せる『乾燥砂層に於ける垂直土壓』に引續き、其後種々の實驗法により砂層内部の垂直土壓を測定検討し、主として次の諸問題に就いて論述したものである。

1. 砂層の應力傳達に對する考察

a. 圓形載荷板下の砂層内壓力分布

b. 砂層内部のエネルギー蓄積

是等の實驗的考察により砂層内の應力傳達の狀態及び砂層内の初應力とも稱すべき現象を究明する一端としたものである。

2. 地下埋設構造物に作用する垂直土壓

地下に埋設される建造物に作用する垂直土壓は隧道の如く地下を掘鑿して構築される構造物に作用するものとは當然其の趣を異にして居る。仍て地下埋設の場合を考慮して實驗的に垂直土壓を測定研究したものである。

目 次

第一章 砂層の應力傳達に對する考察

1. 垂直土壓測定法

a. 緒言

b. 垂直土壓測定法(實驗第 1 法)

c. 無荷重の場合の垂直土壓

2. 圓形載荷板下の砂層内壓力分布

a. 砂層表面に於ける載荷重の砂層内傳達

b. 載荷重による砂層内壓力分布

3. 砂層内部のエネルギー蓄積(初應力)

a. 緒言

b. 載荷重取卸後の垂直土壓

c. 繰返載荷試験

d. 砂層搗固の影響

4. 載荷重を有する砂層の平衡土壓

5. 結 論 (1)

第二章 地下埋設構造物に作用する垂直土壓

1. 緒 言

2. 垂直土壓測定法

3. 實驗結果及び其の検討

4. 各種實驗法による測定値比較

5. 結 論 (2)

第一章 砂層の應力傳達に對する考察

1. 垂直土壓測定法

a. 緒 言

砂層内部に作用する垂直土壓を正確に測定することは極めて難事である。蓋し砂層内の土壓は極微の沈下變位によつても、變位量に應じて其の値を著しく變化するものであるのに對し、多くの壓力測定機構は大小の差はあれ、微少ながら兎も角幾許かの彈性的變位量によつて測定する様になつてゐるからである。従つて無變位壓力測定の方法に據らなければ其の絕對値を見出すことは出来ない譯である。又たとひ、理想的無變位壓力計があつても其の裝置を砂層内任意の點に用意することは總ては砂層の組織を亂すこととなり、砂粒相互の壓力傳達に異狀を來し、嚴密な意味に於いて實際の値を知ることは期待出来ないであらう。

然し一面より考ふれば、砂層表面が水平で無限に一樣に擴がつてゐる時は、砂層内部の任意の點に於ける砂層重量に基く垂直土壓は當然上部の砂柱重量そのもので、かゝる場合に於ける完全無變位の壓力計による測定値は此の値に一致したものでなければならぬ。砂層表面に無限廣さの等布荷重がある場合も同様である。然るに若し砂層内部に局部的變位が生じた時には、其の變位が如何に微少のものであつても、内部の均衡狀態は破れて局部的に

* 工學士 北海道帝國大學助教授

異常壓力を生ずることとなるのである。實際の地下構造物に作用する垂直土壓も結局局部的彈性變位に伴ふ壓力であるから従つて吾々は局部的變位と壓力の變化する關係を知ることが必要であつて、常に絶對無變位の壓力測定を要求するものとは限らない。

斯くの如く砂層内土壓力の絶對値を知ることは固より困難であり、又場合によつては必ずしも之を必要としないが、同一測定法に依つては一定微量の變位量に應じて大體一定の値が得られるから、變位量に對する相對的壓力量を比較檢照することは出来るのである。

著者は曩に第 1 報として諸種の實驗法を用ひて乾燥砂層底部の局部的沈下による垂直土壓量の變化を測定觀測し、其の測定値に就いて比較檢討し、主として隧道掘鑿中支保工上部に働らく土壓に就いて理論的に考察した。即ち乾燥砂層内部に於ける垂直土壓量は初め極く微量の沈下によつても其の値を著しく低下するが、間もなく平衡状態となり、最小土壓に達する。此の状態より後は底部の沈下が更に進み、之に伴つて砂層の崩壞範圍が擴大されても垂直土壓影響線は殆んど變化なく、常に一定の土壓量を示すに至るものである。此の値を茲には“平衡土壓”と稱することとする。従つて第 1 報に於いては支保工上部にかゝる土壓量として此の平衡土壓に就いて考察論述したのである。

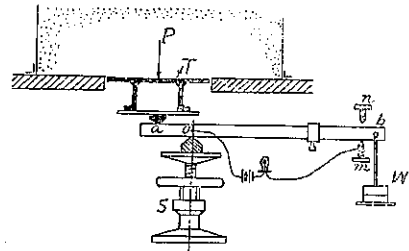
之に對して、本章に於いては測定中捕捉し得る最初の始動點即ち最大の土壓力に就いて比較攻究せんとするものである。此の値を平衡土壓に對して、“始動壓力”と稱することとする。

b. 垂直土壓測定法 (實驗第 1 法)

垂直土壓測定法として天秤法を採用する。之は第 1 報に於いて實驗第 1 法と稱したものである。裝置の要部を示せば 圖-1 の如し。10 kg 天秤の秤臺に砂槽底部の落戸 T を載せ、横桿の分銅掛金に近く、2 箇のネジ m, n を設けて桿を緊定する。

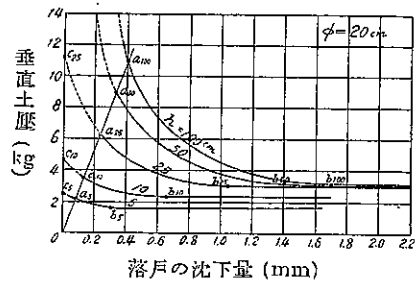
試料填充に先ち、桿を固定し、分銅 W は砂の壓力 P より充分大なるものを掛けて置く。試料填充後測定開始と共にネジ n を弛めて W の値を徐々に減ずれば遂に W は P と釣合つて桿は m 點を離れんとし其の瞬間電氣接點の切斷により豆電球が消滅して容易に始動點を知ることが出来る。

圖-1. 實驗第 1 法裝置要部



砂填充中本裝置の可動點は凡て緊定しあるも尙砂高を増すに従つて秤臺の彈性沈下を絶對には防止することは出来ない。従つて落戸は測定開始前試料填充により既に微量の沈下をなしてゐるから本測定法に於ける始動點は勿論無變位状態に於ける場合の垂直土壓を表はさず、稍低下した値を示すこととなる。圖-2 は落戸の徑 $\phi = 30$ cm の場合の沈下-土壓曲線で曲線上の各 a 點は種々の砂高に對する始動點を表はし、本實驗に於いて捕捉し得る最大壓力即ち茲に謂ふ始動壓力にして本章に於ける研究の對象とするものである。圖中の b 點は平衡土壓を、c 點は落戸上砂柱の實重量を示す。尙沈下-土壓曲線に就いての考證は第二章に於いてなすこととする。

圖-2. 沈下-土壓曲線



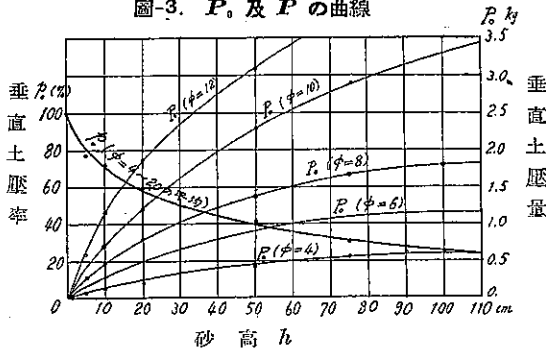
試料は洗濯乾燥せる川砂にして、輕盛の場合に於いて單位重量 $\omega = 1.376$ gr/cm³, 空隙比 47.3%, 内部摩擦角 $\phi = 34.3^\circ$, 粒度率 2.4S である。砂槽は徑 30 cm, 落戸の徑は 4~20 cm の 9 種である (詳細は土木學會誌第 24 卷第 5 號を参照せられたし)。

c. 無荷重の場合の垂直土壓

先づ砂層表面に載荷重なき場合を考へる。落戸の徑 4~20 cm に對して砂高を 5 cm より 100 cm まで變へて各落戸に働らく垂直土壓 P_0 を測定する。圖-3 は測定結果の一部で各落戸に於ける P_0 曲線を示す。測定値 P_0 と落戸上の砂柱重量 W との比 $p_0 (\%) = P_0/W$ を求むれば表-1 となり、圖-3 の p_0 曲線で表はされる。茲に注目すべきは p_0 の値は落戸の徑には殆んど關係なく、砂高に應じて略一定値を有することである。此の關係は 圖-4

に於いて落戸の沈下が進み、砂層内部にアーチ作用を起生して遂に平衡土圧に達すれば最早砂高に關係なく却つて落戸の徑によつて決定されるのと趣を異にする。即ち本装置による測定 of 始動點 a では砂層内に未だアーチ効果を誘致せず、従つて落戸上に一樣の垂直壓力が働らくことが察知せられるのである。又始動點に於ける變位量即ち砂層填充中の秤臺の變位量が互に相違するに係らず同一砂高の p_0 の値は略同一である。是等の事實より見れば p_0 の値は略一定値に近い値を示すものゝ如く考へられる

圖-3. P_s 及 P の曲線



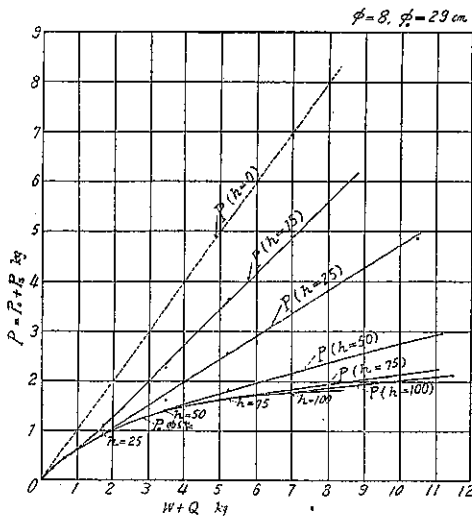
(尙是等の値は後述 圖-21~24 又は 圖-25 の變位量極めて小なる場合の値に相當する。)

2. 圓形載荷板下の砂層内壓力分布

a. 砂層表面に於ける載荷重の砂層内傳達

次に砂層表面に圓形載荷板を置いて其の上に荷重 Q を載せる。圖-5 は落戸徑 $\phi = 8$ cm, 載荷圓板徑 $\phi_0 = 29$ cm

圖-5. 載加重による垂直壓力 P の曲線

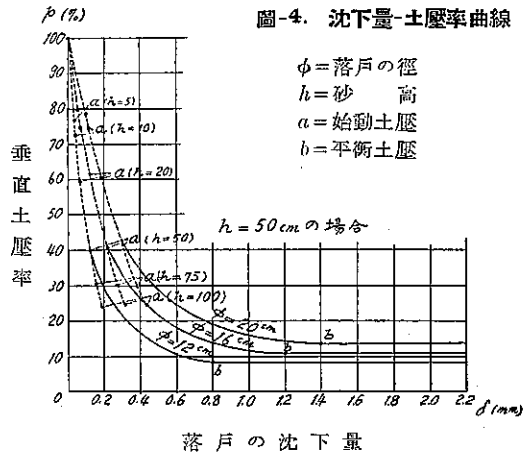


大する (圖-12 に依れば多少曲線となる)。即ち載荷重の傳達割合 $p_s(\%) = P_s/Q$ は載荷重量に關係なく砂高によつて略一定し、砂高の相違によつて著しく變つて來る。砂高 $h=0$ に於ける p_s の値を 100% とすれば $h=15, 25, 50, 75$ 及び 100 cm の場合 p_s の値は夫々 71, 43, 18, 8 及び 6% となる。圖-6 は h と p_s との關係を示す p_s -曲線である。無荷重の場合の垂直土壓 p_0 -曲線と比較すれば砂高を増すと共に p_s -曲線は急激に減少して

表-1. $P_0(\%)$ の値

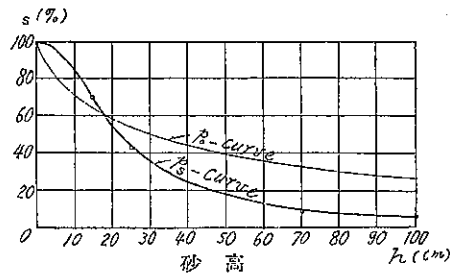
ϕ h	4 cm	8	12	16	20	平均
5 cm	78.9	74.4	75.4	79.7	78.7	77.4
10	72.1	67.2	73.5	75.1	74.8	72.5
20	53.1	62.6	60.1	62.0	61.5	59.9
50	44.3	42.6	40.5	40.3	41.6	41.8
75	29.1	29.8	31.2	30.8	29.6	30.1
100	23.9	26.0	23.3	24.8	25.0	24.6

圖-4. 沈下量-土壓率曲線



落戸の沈下量

圖-6. P_s -曲線



る。

1). 載荷重による砂層内壓力分布

砂層表面に載荷した重量が砂層内部に如何に分布傳達されるかを明かにすることは、砂層が其上に設けられた構造物を支持する力を決定する上に基本的要件となるものである。之に關しては Kögler u. Scheidig, Goldbeck 其の他によつて實測されてゐるが、尙前述した測定上の難點は脱却されてゐない。茲に實施した方法は充分の精度を以つて而かも比較的簡単な装置で砂層内の壓力分布状態を明かにすることが出来たのである。

砂層表面の載荷圓板上に荷重をかけ、砂槽底部の落戸は徑 4, 8, 12, 16 及び 20 cm の一連のものをを用ひ、順次に各落戸に付き垂直土壓 P を測定し、之を砂柱重量 W による壓力 P_0 と載荷重 Q による壓力 P_s とに分析し、夫々次位の落戸における値との差に付き單位面積上の強度比 $p_s = P_s/Q$ を算出したのである。従つて p_s の分布は夫々次位の落戸との徑の差によつて平均した値で表はされてゐる。

圖-7 は載荷板として徑 $\phi_0 = 10$ cm, 圖-8 は徑 $\phi_0 = 6$ cm の圓板を用ひた場合である。是等の壓力分布圖を見るに板の中央に近い直下では壓力分布は荷重強度の 100% 以上にも上つてゐて、此點 Kögler u. Scheidig の實驗の場合も之と略同様の結果を示してゐる。但し嚴密には各深さに於ける値は夫々の深さを有する砂層の底部に就いて壓力を測定せるもので、未だ砂層中間の任意深さに於いて壓力を測定したものでないから各深さに於ける眞の値とは若干の隔りがある譯である。

圖-7. 圓形載荷板 (徑 10 cm) 下の壓力分布

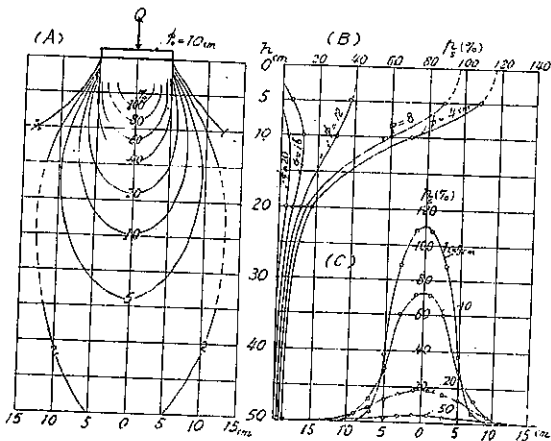


圖-8. 圓形載荷板 (徑 6 cm) 下の壓力分布

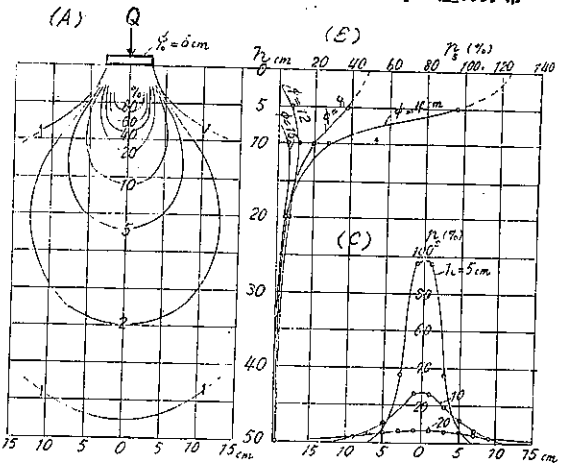
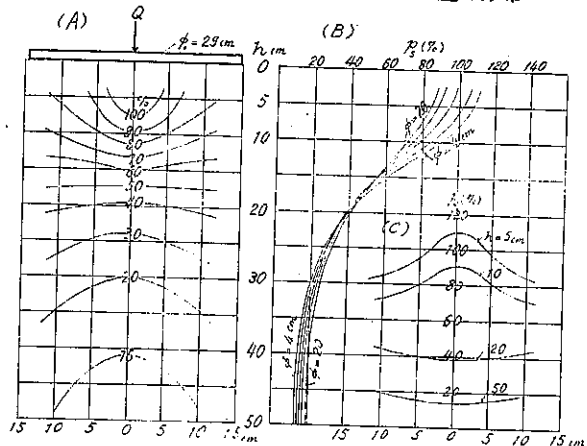


圖-7 及び 圖-8 を比較すれば載荷板が大なるほど壓力の傳播は著しく深部まで達し、大なる支持力あるを示す。又圖-7 は圖-8 に比して多少砂槽側壁が影響して等壓線が變形されてゐる様に觀察される。

圖-9 は砂槽内徑一杯の載荷板を用ひた場合で、横膨脹が許されなため、應力の側方傳播は阻止されて壓力分布は異状を呈し、上層に於いては載荷板中央部に最大壓力が表はれ、下層に行くに従つて壓力傳播は寧ろ周邊部に移行し、中央部分より却つて大なる壓力となる如き傾向を示してゐる。圖-9 の載荷試験には砂層表面の均らし方に細心の注意を要し、若し少しでも高くなつた所があれば此處に壓力が集中して不平均な載荷状態を呈することになり易い。

圖-9. 圓形載荷板 (徑 29 cm) 下の壓力分布



側壁の影響を考へれば 圖-9 を 圖-7 及び 圖-8 と一様に取扱ふことは固より出来ないが、圓形

載荷板の大小と壓力傳達の深度を知る一つの指針として是等三つの場合より圖-10の如き關係を知るのである。但し此の場合 P_s の値は載荷板中央線上に於けるものを取つてゐる。之に依れば壓力傳達は載荷圓板の徑が大なると共に著しく深部に達することが了解せられる。

3. 砂層内部のエネルギー蓄積(初應力)

a. 緒言

軽く填充した砂層を載荷壓縮すれば砂層面は幾分沈下するが載荷重量大なる割合に其の壓縮量は極めて僅少である。然し壓力は砂層内部の相當深部まで傳達されて砂粒は相互の位置を移動して緊密となり、砂層の組織は變化する。一旦載荷したる時は載荷重量を取卸しても砂層組織は全くは原の状態に復歸しないのみならず、内部に傳達された壓力は砂粒相互の摩擦に阻止されて砂層内部に其の儘エネルギーとして蓄積伏在せしめることになる。此の現象は砂が粉體にして彈性體及び粘性體と異なる所であつて、“砂の固化”とも稱せられてゐるものである。之は彈性體に於ける初應力に相當するものであるが砂に於いては此の現象極めて顯著である。

b. 載荷重取卸後の垂直土壓

今砂高 $h=25$ cm, 落戸の徑 $\phi=8$ cm の場合に就き、載荷板 $\phi_0=29$ cm に一旦重量をかけた後之を全部取卸して無荷重状態として落戸に及ぼす垂直土壓を測定するに、載荷せざる場合に比し著しく大なる壓力を得るのである。即ち一旦載荷したるものは、たとひ之を取卸したる後も尙砂層内部に大なる壓力をエネルギーとして蓄積することを示すのである。

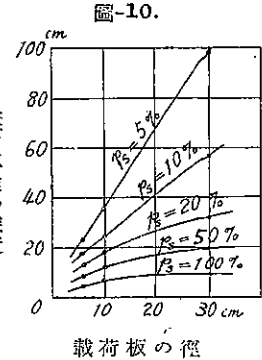


表-2.

($h=25$ cm, $\phi=8$ cm, $\phi_0=29$ cm, $W=1.73$ kg, $P_0=0.91$ kg)

$Q+W$	Q	Q/W	P_s+P_0	P_s	$P_s'+P_0$	$(P_s'+P_0)/W$	P_s'	P_s/Q	P_s'/Q	P_s'/P_s
kg	kg		kg	kg	kg	%	kg	%	%	%
24.3	0	0	0.91	0	-0.91	53	0			
50	1.83	1.05	1.56	0.65	1.11	64	0.24	35.5	10.9	30.7
75	3.61	2.08	2.58	1.67	1.31	76	0.40	46.2	11.1	23.9
100	5.39	3.11	3.48	2.57	1.55	90	0.64	47.7	11.9	24.9
150	8.97	5.18	4.88	3.97	1.86	108	0.95	44.3	10.6	24.9
200	12.47	7.21	6.16	5.25	2.16	125	1.25	42.1	10.0	23.8
250	16.07	9.32	7.61	6.70	2.41	139	1.50	41.7	9.3	22.4
								平均 42.9	平均 10.6	平均 25.1

表-2 は實驗結果を表示したものである。表中 W は落戸上の砂柱重量、 Q は同じく載荷重、 P_0 は W による垂直土壓、 P_s は Q による壓力、 P_s' は一旦 Q をかけてから全部取卸した後の蓄積壓力を表はす。載荷時間は平均 2 分、載荷重取卸直後測定したるものである。圖-11 は一旦載荷した荷重 Q とその載荷重を全部取卸したる後の落戸上の垂直壓力 ($P=P_0+P_s$) との關係を示すものである。 q 及び p' は夫々 Q 及び P' を砂柱重量の比で表はしてゐる。全然載荷せざる場合の砂層の垂直土壓 p_0 は圖-3 の p_0 -曲線より $h=25$ cm の場合に於いて 53% であるが、載荷重 Q を増すに従つて p_0+p_s' の値は漸次増大し遂には 100% を超え、砂柱の實重量よりも遙かに大なる壓力が測定され $q=9$ の時は $p=136\%$ にも達し $q=0$ の時の 2.57 倍に相當する。即ち一旦載荷した砂層は之を取卸した後外見上何等變化を認めない様でも内部の應力に大なる變化を起生してゐるのを知る。換言す

(1) かゝる場合の壓力測定には彈性變位量による壓力計の使用は適當でない。何となれば荷重を受けた砂層は荷重のため變形し、壓力に應じて壓力計は變位をなすが、荷重を取除いた後砂層の沈下は残存壓力量の如何に拘らず容易には原に復し難いから、かゝる状態に於ける壓力量を其の彈性變位を以て測定することは不合理となるからである。之に反して茲に採用せる實驗第 I 法では秤の釣合ひの方式に依るのであるから砂層の變位状態に關係なく、潜在的壓力をその處測定し得るものである。

れば砂層内部の壓力は過去の荷重經歷によつて大なる影響を受けることが認められる。茲に興味あることは表-2に示す如く、載荷重 Q と此の載荷重によりて誘致される壓力 P_s 、及び此の載荷重を取卸した後蓄積される壓力 P_s' との關係である。載荷重 Q の種々の値に對して P_s/Q 、 P_s'/Q 、及び P_s'/P_s を求むれば、平均値として夫々 42.9、10.6 及び 25.1% となる。是等の値は載荷重 Q の値には殆んど關係なく何れも略一定の値を持つてゐる。即ち砂高 25 cm 上の載荷板に重量をかければ、その重量の 42.9% の壓力を生じ、載荷重を取卸した後尙元の載荷重の 10.6% の壓力を砂層内にエネルギーとして蓄積し、載荷時の壓力の 24.8% に當る譯である。勿論此の數値は砂高、載荷條件等によつて異なることは考へられるが砂層内垂直土壓の複雑性を推察することが出来る。

圖-11. 一旦載荷した荷重を全部取卸した後の垂直壓力曲線

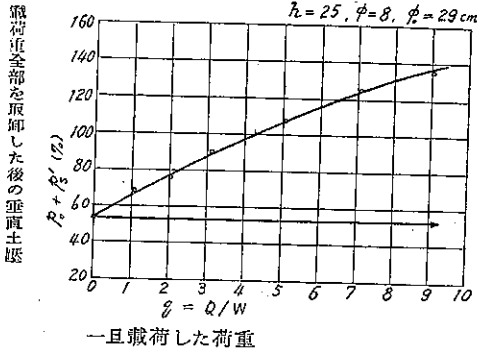


圖-12. 一旦載荷した荷重を次第部分的に取卸した後の残留壓力

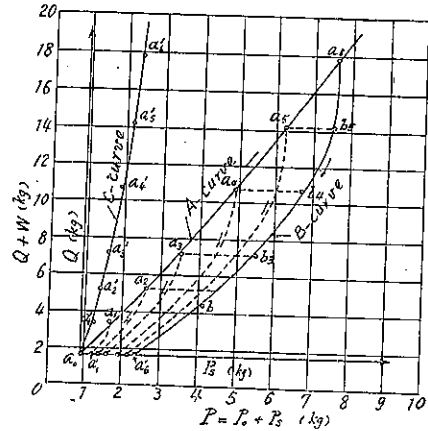


圖-12 は表-2 の場合と同様に砂高 $h=25$ cm, 落戸徑 $\phi=8$ cm, 載荷板 $\phi_0=29$ cm に就いて、一旦一定荷重を載荷した

る後其の一部の荷重を取卸す毎に落戸上の壓力を測定したものである。圖中 A-曲線は漸次大なる重量を載荷した場合の落戸上の垂直土壓を示し、B-曲線は一旦一定荷重を載荷したる後其一部の荷重を漸次取卸して遂に無荷重まで達せしめたる場合の落戸上の垂直土壓を示す。即ち A-曲線は大體直線に近く載荷重と共に増大するが、B-曲線は A-曲線より著しく遅れを示し、hysteresis を描き、決して終始點は合致しない。C-曲線は載荷重を全部取卸したる後の土壓を示す。

是等の結果より觀るに現在の載荷重が同じ Q_1 でも過去に於いて大なる荷重 Q_2 をかけた後之を Q_1 に減じたものは、初めより Q_1 をかけたものに比し、遙かに大なる壓力を示すのである。此の現象を理論的に考察するに下向の大なる荷重を受けた時は砂層内部は壓力が働らき砂粒は移動して相互に緊密となり、摩擦力によつて阻ばまれ或はアーチ作用を誘發し、砂層の深部には載荷重に對しては比較的輕小なる壓力が作用する。載荷重を取卸す時は砂粒相互の摩擦は前とは反對方向のアーチ効果を伴ひ、上方へ内部壓力の逃げることを一部阻止し、残留壓力は輕少とは謂へ無荷重の場合の壓力に比すれば尙大なる値のものが蓄積されるに至るものと推論されるのである。

c. 繰返載荷試験

前項 (b) の場合と同じ砂高、落戸及び載荷法によつて載荷重 $Q=3.6$ kg (總重量 50 kg) を 1 回乃至 5 回反覆載荷取卸をなし、其の都度落戸上の垂直土壓を測定したるに、載荷時の壓力は何れも平均 1.5 kg、取卸後の壓力は平均 1.2 kg にして反覆載荷の影響を全く認めない。即ち砂層内の應力と壓密度は載荷の大いさによつて決定され、重量が増大されない限り同一荷重を繰返載荷しても砂層内部の組織に變化が起らぬことは當然であると考へられる。

之に依つて觀るに過去の荷重經歷は繰返載荷の回数に關係なく、載荷重量而かも過去の最大載荷重量と現在の載荷重量とによつて決定されるものであることが解る。

以上の實驗に於いて載荷時間 2 分、荷重取卸直後に壓力測定をなした。尙念の爲取卸後經過時間によつて壓力が低下減退する如きことはないかに就き測定した。然し測定値に不同多く、平均値を見出すに困難であつたが結局

時間的影響は無きものゝ様である。

d. 砂層搗固の影響

軽く填充した砂層表面上の載荷板に重量をかける時は、砂層内に壓力を傳達し、荷重を取卸した後も大なるエネルギーを蓄積して垂直土壓を増大することを知つた。砂層表面に載荷する代りに砂層を搗固める場合にも同様に砂層内にエネルギーを蓄積せしむることが出来る。

搗棒はコンクリート試験用の径 16mm 重量 1kg の尖端を有する丸鋼である。砂高 $h=25$ cm, 之を 2 層に分けて各層毎に夫々 50, 100, 200, 300, 400, 500 回軽く搗固めをなして填充した。落戸径は 8cm である。其の結果は表-3, 圖-13 の如し。

圖-13. 搗固めによる垂直土壓の變化

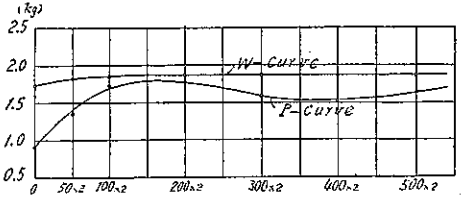


表-3. 搗固めの影響

搗固回数	N	0	50×2	100×2	200×2	300×2	400×2	500×2
重量	W (kg)	1.730	1.831	1.850	1.866	1.873	1.876	1.877
垂直壓力	P (kg)	0.91	1.37	1.73	1.78	1.59	1.53	1.64
重量の増率	(%)	0	5.8	6.9	7.7	8.3	8.4	8.5
垂直壓力の増率	(%)	0	51	90	96	75	67	80
P/W	(%)	52.7	74.9	93.6	95.5	85.0	81.0	87.5
P/W の増率	(%)	0	42.0	77.5	81.3	61.2	53.7	66.0

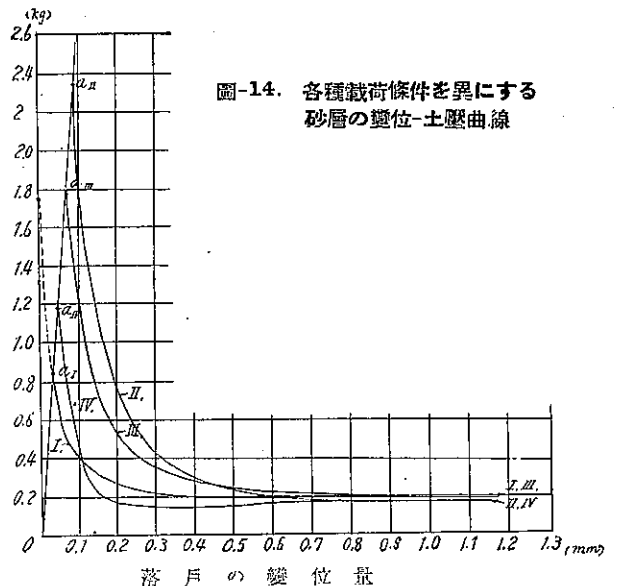
搗固めにより砂層は幾分密實となり、重量に於いて僅かに 8% を増大する。之に對し垂直壓力は砂柱の重量比で表はして、搗固めせざる場合に於ける $p_0=52.7\%$ のものが搗固回数 200×2 に於いて 95.5% となり、初めより 81% を増大してゐる。而して砂層の密度即ち重量は搗固回数 200×2 以上では殆んど一定の値を示して決して減退する様なことはない。之に反して垂直壓力は 300×2 回に於いては 200×2 回に於けるより却つて減少し 400×2 回に於いては更に減じ 500×2 回に到つて再び増大の傾向を示してゐる。即ち砂層の密度は搗固めによつて増大し、搗固めを繼續しても密度を低下する如きことはないが、之に對して垂直壓力は搗固めにより砂層内の砂粒の配列状態が恐らくエネルギー蓄積に好條件に達して最大となり、續いて搗固めを進む時は却つて砂層の内部組織を攪亂して蓄積されたエネルギーの一部を消失して垂直壓力を減じ、其の後更に搗固めを繼續すれば、再びエネルギー蓄積に好條件の砂粒配列に復して垂直壓力を増し、結局周期的に壓力を増減するに至るものと考察される。

4. 載荷重を有する砂層の平衡土壓

本章に於いては主として實驗測定中の始動壓力に就いて述べ、始動壓力は砂層表面の載荷條件を種々變へることによつて夫々其の特性を表はすことを知つたが、茲では始動壓力の代りに平衡壓力を取扱ひ、かゝる載荷條件の相違は平衡壓力に如何に影響するかを一應調査したのである。

圖-14 は實驗第一法により砂高 $h=25$ cm, 落戸径 $\phi=8$ cm の場合に就いて、砂層表面の載荷條件を種々に變へた場合の沈下量—壓力曲線であ

圖-14. 各種載荷條件を異にする砂層の變位—土壓曲線



る。圖中

- (I) は表面荷重のない場合
- (II) は載荷圓板徑 $\phi = 29 \text{ cm}$ に荷重 50.98 kg をかけた場合
- (III) は載荷圓板徑 $\phi = 10 \text{ cm}$ に荷重 21.04 kg をかけた場合
- (IV) は一旦(II)と同様の載荷重をかけた後載荷重全部を取卸した場合

の曲線を表はす。是等の各曲線によつて明かなる如く始動壓力は夫々の載荷條件によつて勿論相違するが、平衡壓力に於いては殆んど一致してゐる。即ち同一測定法によれば平衡壓力は載荷條件に何等關係ないことを示すものであつて、従つて又或る高さ以上は砂高にも關係なく、既に第 1 報に於いて報告した所により、單に落戸の徑によつてのみ變化し、且つ其値は略落戸の徑を徑とする半球體の土量の重量に等しく、此の關係は落戸が圓形及び方形の場合にも同様に成立つものである。

5. 結論 (1)

1. 砂層内の垂直土壓は載荷重に比例して増減し、兩者の比は砂高に依つて一定し、砂高を増すと共に著しく減少する。
2. 圓形載荷板下の砂層内壓力分布は板の中央に近い直下では壓力分布は荷重強度の 100% 以上に上つてゐる。
3. 横膨脹を阻止した場合の砂層内の壓力分布は深い方に行くに従つて寧ろ周邊部に大なる値を示してゐる。
4. 載荷板の徑が大になれば壓力の分布範圍は著しく擴大されて深い所まで達してゐる。
5. 砂層は一旦荷重をかけたものは之を取卸した後も砂層内に載荷時のエネルギーを一部蓄積して大なる垂直土壓を示す。
6. 此の砂層内に蓄積されるエネルギーは荷重に對し略一定の割合を示す。砂高 $h = 25 \text{ cm}$ 、落戸徑 $\phi = 8 \text{ cm}$ の場合は載荷重の 10.6% にして、載荷時に於ける載荷重による土壓の 25.1% が蓄積される。
7. 砂層内垂直壓力は荷重經歷に依つて相違し、過去の最大荷重と現在の荷重とによつて支配される。
8. 載荷を反覆繰返してもエネルギーの蓄積には影響しない。只載荷重の大きさによつて決まる。
9. 蓄積されたエネルギーは時の経過によつては其の値を變化しないものゝ如し。
10. 砂層を搗固めても内部にエネルギーを蓄積することになる。蓄積エネルギーは搗固回数によつて限度があり、夫以上の搗固めは搗固回数により其の限度内に於いて周期的に増減する様である。
11. 平衡土壓量は砂高及び載荷條件に關係なく、落戸の徑に應じて常に一定の値を與へる。

第二章 地下埋設構造物に作用する垂直土壓

1. 緒言

地下に埋設さるべき建造物に作用する垂直土壓と隧道の如く地下を掘鑿して構築するべき建造物に作用するものは當然違つた性質を有するものであらうと考へられる。

隧道掘鑿中、支保工上部に働らく垂直土壓は支保工頂部の沈下によつて地山が弛緩崩壊して作用するものである。乾燥砂層に依れば初め僅少の沈下により垂直土壓は著しく減じて間もなく平衡状態を呈して最小値に達し、其の後沈下が進んでも土壓影響線は一定不變であることを知つた。隧道支保工に及ぼす土壓は結局此の最小限界値即ち茲に謂ふ所の平衡壓力に落付くものとなしたのである。勿論實際の地山は乾燥砂層の如き粉體でもなく、且つ湧水が作用し複雑な現象を呈するから此の理論を實地に應用するには尙幾多の困難があるらう。

之に對して地下埋設管渠類に於いては、開鑿された溝底に管渠類を敷設して上部に盛土をなすものである。従つて土砂の高さを増し其の荷重が大となるに従つて、埋設管渠類は漸次彈性沈下をなし、之に應じて埋戻し土砂は沈下し落付きながら上方へ堆積されるのである。故にかゝる過程に於ける土砂の埋設管渠類に及ぼす垂直土壓は隧道構築の場合とは其の趣を異にするものであると考察されるのであつて、茲に地下埋設の場合を考慮して別種の垂直土壓測定法を採用した所以である。

2. 垂直土壓測定法 (實驗第 3 法)

砂層の垂直土壓測定法として第 1 報に於いて

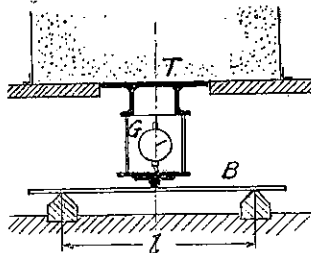
實驗第 1 法: 秤の釣合による測定法

實驗第 2 法: 中央支柱を用ふるビームの撓みに依る測定法を報告した。實驗第 1 法は本文 圖-1 に於いて示したものである。實驗第 2 法はビームの撓みを利用するもので、實驗第 1 法と同一意義を持たしめるため、特にビームの中点を其の下側より中央支柱によつて支へ、砂を一定高さまで填充する間はビームの撓みを抑止する装置としたのである。實驗第 3 法は單に實驗第 2 法に於けるビーム下の中央支柱を全然使用しない丈であつて、従つて本實驗装置に於いては砂を所要高さまで填充する間に、砂の壓力に應じてビームは自由に撓み、之に應じて砂層は沈下し、沈下しつゝ填充されるのであつて、斯くの如くして管渠類地下埋設の場合に該當すべき経過を取るのである。即ち本法は次の如く表はすことが出来る。

實驗第 3 法: ビームの自由撓みに依る測定法

圖-15 は本装置の要部を示す。測定用ビームは 2 種で、ビーム I は斷面幅 20mm×高 4mm、ビーム II は 15×2mm の鋼鐵で長さ 350mm である。徑間は 60~300mm を適用して、撓度を色々に變へた。尙徑間小な

圖-15. 實驗第 3 法装置要部



る場合は實驗臺の固有剛性の影響が大きくなるから嚴密なる修正を施したのである。

3 實驗結果及び其の検討

實驗第 3 法による測定結果を圖示すれば 圖-16~20 の如し。圖-16 は落

戸の徑 $\phi=20$ cm に就いて、ビーム I 及び II を用ひ其の徑間を種々に變へ、各徑間毎に漸次砂を填充しつゝ、

圖-16. 實驗第 3 法による砂の變位—壓力曲線 (1)
(測定原圖)

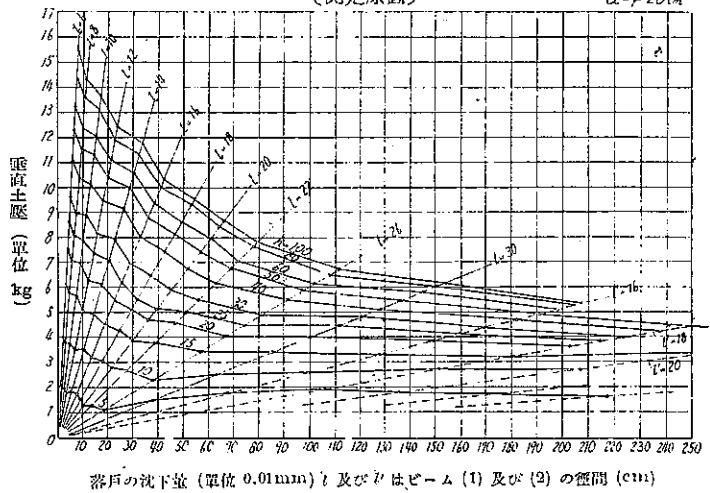


圖-17. 實驗第 3 法による砂の變位—壓力曲線 (2)
(圖-16 の修正圖)

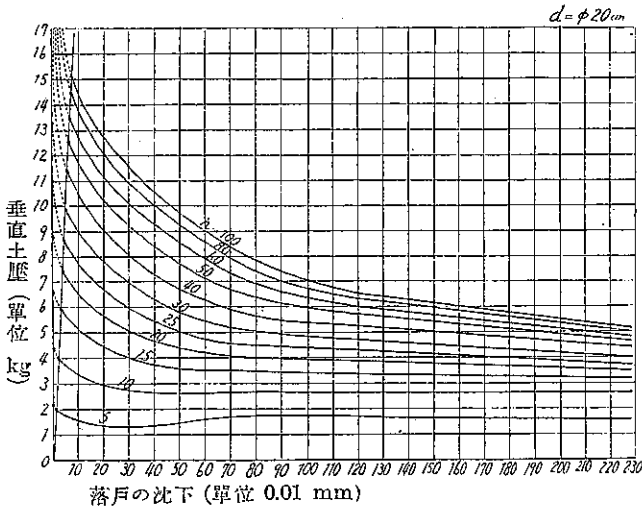


圖-18. 實驗第 3 法による砂の變位—壓力曲線 (3)

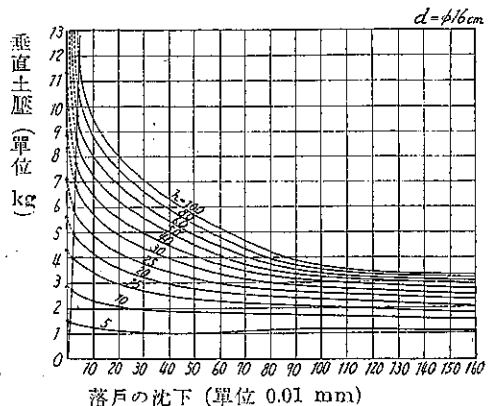


圖-19. 實驗第3法による砂の
變位—壓力曲線(4)

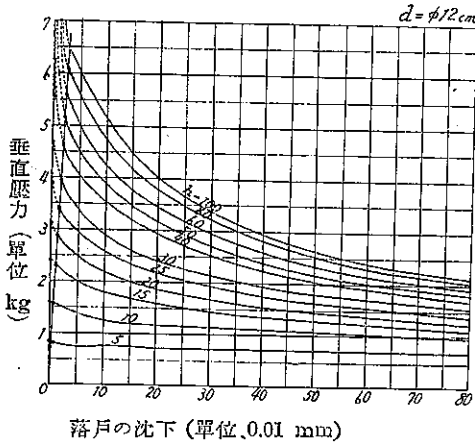
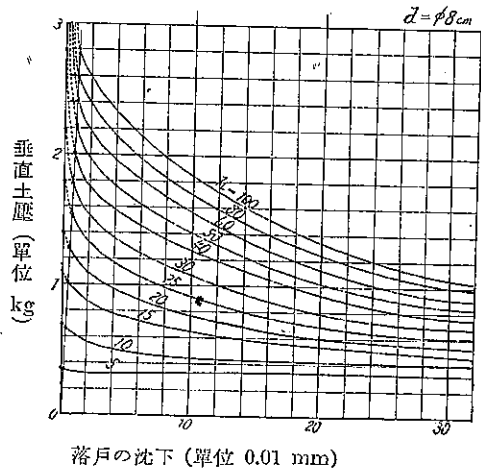


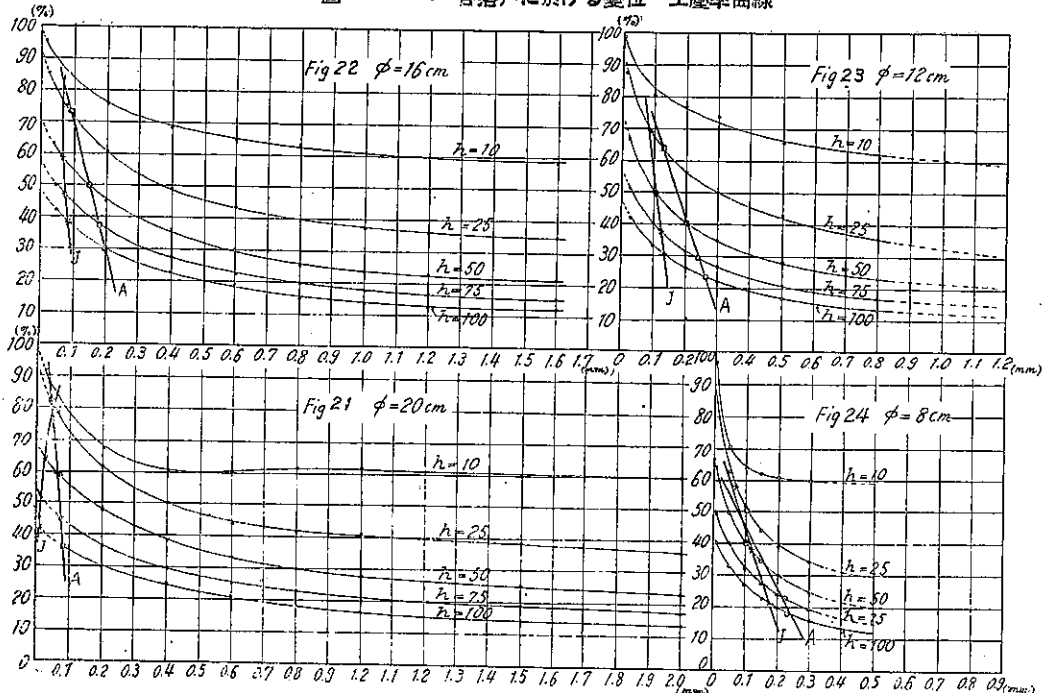
圖-20. 實驗第3法による砂の
變位—壓力曲線(5)



之に應じて増大するビームの撓みより垂直壓力を求め⁽²⁾、同一砂高の垂直土壓の値を結んだものである。圖-17は圖-16の原形圖を修正したもので落戸の沈下量と垂直土壓の變化の關係を表はす。圖中b點は砂柱の實重量を示す。圖-18~20は夫々落戸の徑 16, 12, 8 cm の場合である。

圖-17~20に據り、垂直土壓を砂柱の重量に對する比 μ (%) にて圖示すれば圖-21~24が得られる。又此の

圖-21~24. 各落戸に於ける變位—土壓率曲線



μ の値を落戸の徑に就いて比較すれば、圖-25, 26 の如くなる。是等を觀察するに、落戸の沈下小なる間は μ の値は落戸の徑に關係なく、砂高によつて略近似してゐる。然るに沈下が進むに従ひ、落戸の徑によつて相違を生じ一般に其の徑小なるものほど μ の値は小となる傾向を有す。是等の曲線に就いて其の始點及び曲線を延長して

⁽²⁾ 本法によつても明かなる如く、彈性變位を利用する機構の壓力計では變位量に依つて壓力を定むるのであるが、砂層に於いては變位そのものによつて壓力が變化するのであるから、單に一種の撓度を利用する壓力計の彈性變位によつては、任意變位量に對する砂層の垂直壓力を見出すことは不可能であり、若し異つた撓度の壓力計を用ふれば當然異つた値が出る譯である。茲に變位壓力計の難關がある。

圖-25. 變位-土壓率曲線

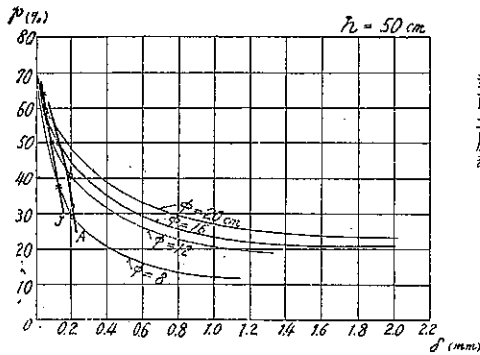
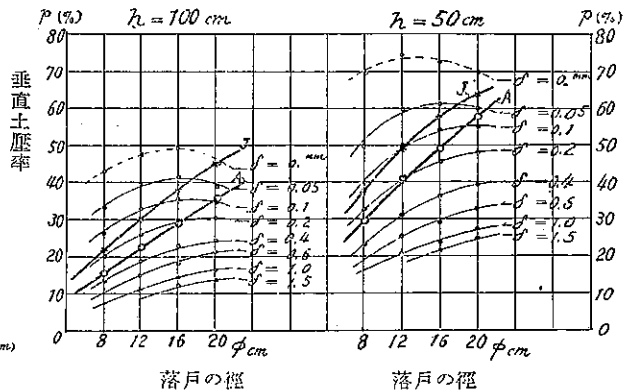


圖-26. 變位-土壓率曲線



沈下量 δ が略 0 の程度に於ける p の平均値を求めて圖示すれば 圖-27 の III₁, III₂ となる。

今地下埋設管渠類に加はる垂直土壓の算定公式として屢、應用せられる Janssen 氏及び Airy 氏の公式を引用して實測値と比較検討しやう。Janssen 氏は穀倉内に於ける粒體の水平及び垂直壓力を一種の液體壓力の平衡から算定し、Airy 氏は穀倉内の粒體を半液體と考へて一種の楔形の壓力から水平及び垂直壓力を誘導したものである。兩公式は次の如し。

Janssen 公式

$$p = \frac{\omega b}{2\mu k} \left(1 - e^{-\frac{2k\mu h}{b}} \right)$$

Airy 公式

$$p = \frac{\omega b}{2\mu k} \left(1 - \frac{\sqrt{1+\mu^2}}{\sqrt{\frac{4h}{b}\mu + 1 - \mu^2}} \right)$$

但し p = 單位垂直土壓, ω = 砂の單位重量, b = 埋設物の幅, $\mu = \tan \varphi$, φ = 砂の内部摩擦角, $k = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$, h = 砂高

今 $\omega = 1.376 \text{ gr/cm}^3$, $\varphi = 34^\circ$, $\mu = 0.675$, $k = 0.287$ とし $h = 25, 50, 75, 100 \text{ cm}$, $b = 8, 12, 16, 20 \text{ cm}$ の場合に就いて兩公式より $p(\%) = p/h\omega$ を求むれば 表-4 となる。是等の値を 圖-21~26 に於ける p 曲線上にプロット

表-4. 公式による $p(\%)$ の値

公 式	Janssen 公 式				Airy 公 式				
	h	25	50	75	100	25	50	75	100
$b = \phi$									
8		57.9	37.6	26.8	20.5	49.1	29.7	21.0	16.4
12		68.6	49.7	37.7	29.6	63.7	40.2	29.4	23.1
16		75.0	59.3	46.3	37.7	73.8	49.6	36.9	29.4
20		79.0	64.2	52.8	44.5	82.5	57.4	43.7	35.0

して實測値と比較することが出来る。圖中 J-線は Janssen 公式より得たる値を示し、A-線は Airy 公式より得たる値を表はす。之に據れば J 及び A-線は何れも落戸の沈下量 0.3 mm 以下の場合に相當するもので、更に之を仔細に觀察すれば、落戸の徑大なるものほど沈下量小なる場合に適合し、其中落戸徑 $\phi = 20 \text{ cm}$ に於ける J-線を除いて、J 及び A-線何れも砂高大なる時は沈下量稍大なる場合に、砂高小なるほど沈下量稍小なる場合に夫々相違することがわかる。

尙 圖-28, 29 は Janssen 及び Airy 公式に就いて $\varphi = 35 \sim 20^\circ$ $h/b = 1 \sim 20$ の場合に對する $p(\%)$ の變化を

圖-27. 各實驗法に於ける變動壓力 P-曲線

I-實驗第 1 法によるもの II-實驗第 2 法によるもの III-實驗第 3 法によるもの
III₁-始動壓力曲線 III₂-變位量 $\delta = 0$ の場合

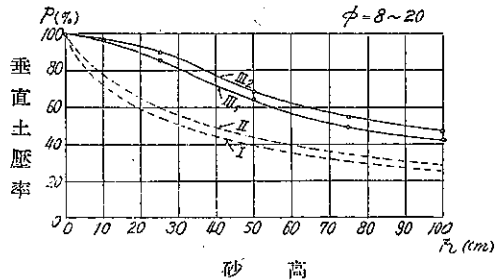


圖-28.

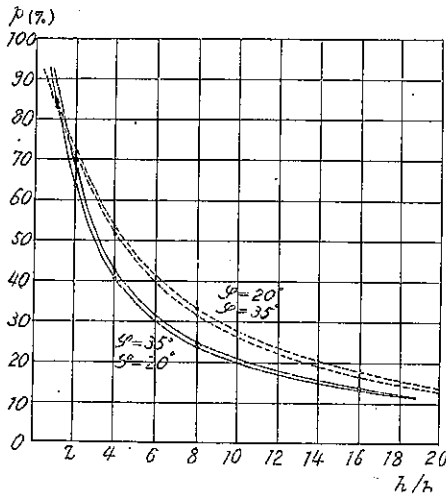
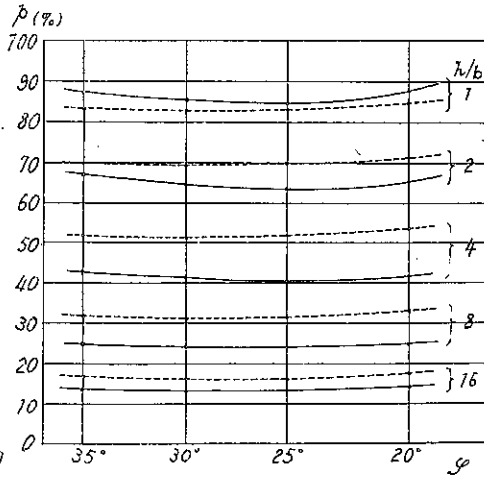


圖-29.



示す。之に依つて観れば、兩公式に於いては p の値は土砂の内部摩擦角 ϕ による影響は極めて少なく、砂高と埋設物の幅との比即ち h/b に依つて著しい變化を示してゐる。

4. 各種實驗法による測定値比較

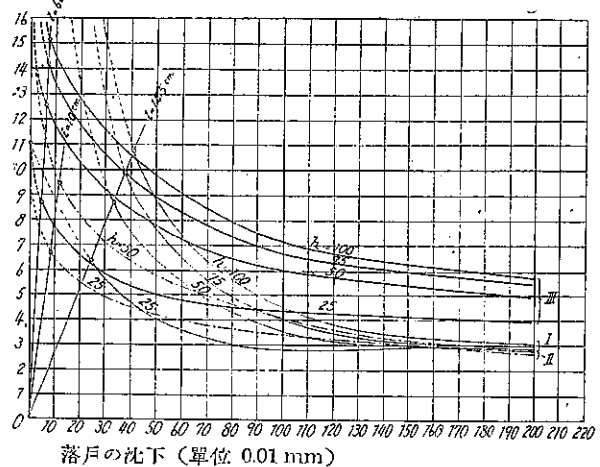
砂層の垂直土壓測定法として前記の實驗第1法、第2法及び第3法を綜合比較すれば 圖-30 の如し。圖は落戸の徑 $\phi=20$ cm, 砂高 $h=25\sim 100$ cm の場合

である。實驗第3法による土壓曲線はビーム I の徑間 $l=6$ cm の場合より始まる。實驗第1法に依る土壓曲線は秤臺の固有剛度が略ビームの徑間 $l=15.5$ cm に相當するを以て曲線の始動點は實驗第3法に於ける同一徑間の値とよく近似してゐる。實驗第2法に於ける土壓曲線の始點 a はビームの兩端支點の間に中央支柱を挿入せる關係上最小徑間としてビーム I の $l=10$ cm に當り、砂層填充の條件を異にするので勿論第3法の場合と適合しないことになる。而して實驗第1法と實驗第3法とは砂層填充後の測定操作が大體似通つて

垂直土壓 (單位 kg)

圖-30. 各測定法による測定結果の比較

落戸の徑 20 cm, I-實驗第1法 II-實驗第2法 III-實驗第3法



ゐるので、自然砂層内部の組織も漸次同一状態となる爲か、其の平衡土壓は略一致した値を示してゐる。之に反して實驗第3法は前二者と測定操作が相違する爲、落戸の沈下が進むに従つて土壓曲線は其の軌を異にし、他の場合より大なる値となつてゐる。表-5 は各測定法に於ける平衡土壓を比較せるものである。

表-5. 各種實驗法による平衡土壓比較

測定法	實驗第1法	實驗第2法		實驗第3法				
	h	25~100 cm	25	50	25	50	75	100
ϕ								
8 cm	平均	0.19 kg			$\delta=0.3$ mm 0.62	0.84	0.98	1.05
12		0.66			$\delta=0.8$ mm 1.4	1.8	2.0	2.1
16		1.50			$\delta=1.2$ mm 2.5	3.0	3.4	3.6
20		2.92	2.7	2.8	$\delta=2.0$ mm 4.0	5.0	5.5	5.8

5. 結 論 (2)

1. 垂直土壓が埋設管渠類に働らく場合を考慮した實驗法によつて乾燥砂層内の垂直壓力を求むれば、隧道に於ける如く土中に掘鑿して構築される建造物の場合に於けるよりも一般に大なる値を示してゐる。
2. 埋設管渠類に働らく垂直土壓算定の實用公式として屢々用ひられる Janssen 及び Airy 氏の公式は比較的實測値に適合し、落戸の沈下量 $\delta=0.3\text{mm}$ 以内の場合に相當してゐる。
3. 砂層内垂直土壓の沈下量に對する曲線は測定法の異なるによつて大なる變化を示す。而して砂層に同一組織を與へる如き測定法に於いては、平衡土壓は略同一値を取る。

附記：本實驗に關し、特に助言を賜りたる工學博士小野諒兄先生並に屢々實驗及び製圖に盡力された松田昌治君、高木精一君に對し深甚の感謝の意を表す。
