

論 說 報 告

第 24 卷 第 5 號 昭和 13 年 5 月

乾 燥 砂 層 に 於 ける 垂 直 土 圧

會 員 工 学 博 士 小 野 諒 兄*

會 員 眞 井 耕 象**

要 旨 本文は乾燥砂層を對象として、種々の實驗法を用ひて砂層の局部的沈下による垂直土圧の変化を測定觀察し、之を理論的に考察し、主として隧道上部の土圧の性質と其の算定法を究むるを目的としたものである。

第 1 章 緒 論	第 2 章 實驗第 1 法
第 3 章 大装置による實驗	第 4 章 實驗第 2 法
第 5 章 二元的に取扱へる實驗	第 6 章 理論的考察—從來の學說
第 7 章 實驗より考察せる著者説	第 8 章 結 論

第 1 章 緒 論

隧道其の他の地下建造物を設計するに當つて外力の一つとして垂直土圧は最も普遍的に取扱はるべき要素なるに拘らず、之に關する從來の土圧論と實際工事の經驗との間には大なる矛盾があつて其の適切な數値を求むることは極めて困難である。垂直土圧の算定法としては種々の方法が案出されてゐるが尙實際と好く適合するものは尠ない。之は在來の理論を以つては未だ解決し得ざる幾多不明の問題が存在することを示すものである。

從來一般には隧道上部に加はる地圧に對しては其の施工中地山を弛緩せしめて一部崩壊する土の自重により大なる地圧を發生するものと考へ、從つて掘鑿中に支保工にかゝる地圧は支保工頂部の沈下状態を觀察して土圧の性質を推定してゐる。然るに土砂内部機構の極めて僅少なる變動も応力分布に大なる変化を興へ從つて支保工にかゝる垂直圧力にも大なる影響を及ぼすことになる。斯くの如く土砂内部の変位と応力との間には複雑なる關係が存在することが認められる。本文は乾燥砂を試料として砂層底部の局部的沈下により之に及ぼす垂直圧力の変化を測定し砂層内の平衡状態より土圧影響線を實驗的に究明せんとしたものである。

本實驗の結果より推定すれば隧道掘鑿の場合に於て隧道頂部の土圧は初め僅少なる沈下により其の値を著しく低減して平衡状態に達する。然るに一旦平衡状態に到れば其の後頂部の沈下が進行して地山の崩壊範圍が漸次擴大されても平衡曲線は常に一定で殆んど変化しないことが認められる。又地山の高さにも殆んど關係がないと云ふ結果に到達したのである。勿論本實驗は粘着力なき單なる乾燥砂を試料としたものであるから自然土壤とは其の趣を異にするも其の一斑を窺知することが出来ると思ふ。

第 2 章 實驗第 1 法 (秤の釣合による測定法)

1. 試 料

實驗に使用せる試料は乾燥川砂にして、輕盛りの場合に於て單位重量 1.4 gr/cm^3 、空隙比 47.3%，内部摩擦角 34.9° 粒度率 2.48 で其の組成次の如し。

* 北海道帝國大学教授

** 北海道帝國大学助教授、工学士

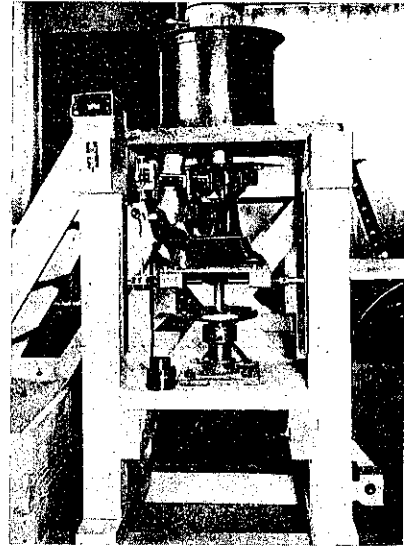
篩 番 號	8~16	16~30	30~50	50~100	100~
百 分 率	19.0	31.8	31.0	15.0	3.2

2. 實驗裝置

砂の垂直圧力は其の測定條件によつて著しく影響される。従つて圧力測定の方法に就いては慎重に考慮を要す。本實驗に於ては以下述ぶる如き種々の方法を採用して比較検討した。

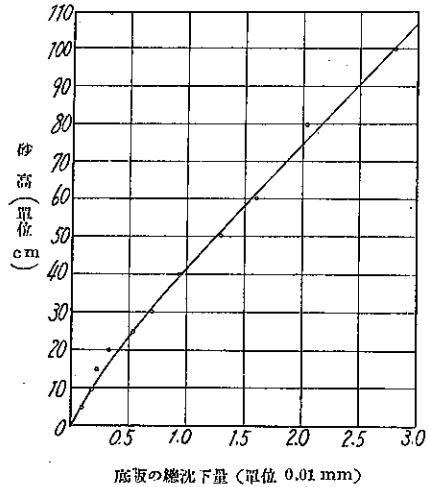
實驗臺は 圖-1 の如く堅固なる構造の架構を用ひその上部に砂槽の底版を固定す。底版は殊に剛性大なる鑄鉄版である。加重による底版及架構の總沈下量⁽¹⁾は砂高 100 cm にして約 0.03 mm である。此の値は極めて微少であるが實驗上決して無視することの出来ない値で常に測定値に付き修正を要するのである。砂槽は径 30 cm 高 25 cm の円筒を積重ねて高さ 2 m まで適用することが出来る。砂槽側壁の影響を除去する爲には径大なる円筒を要すれども實驗によれば径の大きさ及内壁面の粗度によりて大なる相違を認めないのである⁽²⁾。砂槽底版には落戸を設け、落戸の径は 4~20 cm の 9 種である。落戸の周邊は摺合はせをよくし砂微粒子の侵入を防止し且つ摩擦抵抗を可及的に與へない様にしてゐる。此の實驗裝置は實驗第 2 にも適用したものである。

圖-1. 實驗臺及秤の釣合による測定裝置



- (1) 底版上の載荷重と之によつて底版及架構が沈下する總量との關係は 圖-2 の如し
- (2) 砂槽側壁が垂直圧力に及ぼす影響を吟味するに砂槽内径 D と砂槽側壁内面の粗度を種々に變へて其の變化を測定すれば表-1. の如くなる。但し此の際落戸の径は 8 cm, 砂高 25 cm の場合で實驗第 1 法に依る値 (圖-6 中の a 點) を比較したものである。

圖-2. 砂槽底版の沈下量
(實驗臺の沈下を含む)



- 1. 側壁内径 $D=10, 20, 30$ cm の場合
- 2. 側壁内面粗度
 - a. 平滑なる場合
 - b. 粗雜なる場合、内面に砂粒を粘着せるもの

表-1.

D (cm)	a (内面平滑なる場合)		b (内面粗雜なる場合)	
	値	平均	値	平均
10	560	600	520	530
	650		660	
	590		490	
20	750 640	780	980 820	820
	940 860		700 800	
	710			
30	570 780	830		
	880 800			

之に依れば垂直圧力は砂槽内径に多少の影響を受け D が小なるに従ひ圧力も幾分減じてゐる。之に對して砂槽内面の粗度には殆んど關係が無い様である。

3. 実験第 1 法 (秤の釣合による測定法)

本法は秤を用ひて其の釣合により落戸に加はる垂直圧力を測定する方法である。其の実験装置の要部は 図-1 及 3 の如く、落戸 T は 10kg 天秤の秤臺の上に載せ砂槽内に徐々に砂を填充し所定の高さに達すれば測定を開始するものである。秤の桿は 0 點を支點とし倍率 (ob:oa) は 5 である。B 點に近く支へネジ m 及押へネジ n の 2 箇のネジを設け桿の固定及微動をなさしむる。測定操作の大要次の如し。

初め分銅 W は砂の圧力 P より充分大なるものを掛け m にて支持し、試料填充中は n を緊めて桿を固定する。測定開始と共に n を僅かに弛めて間隙を與へ W の値を徐々に減ずれば遂に P に釣合つて桿は m 點を離れんとするに至る。その瞬間は此の點に装置せる電気回路の切断により電燈が消滅するから容易に之を知ることが出来る。次に m を上げて桿に接觸せしむれば回路は通じて電燈は點し n を弛めて僅かに桿より離す。之を反覆継続すれば a 點即ち落戸 T は漸次沈下して其の変位量を 1mm の 1/100 程度迄讀取ることが出来る。測定の進行と共に桿は水平より幾分傾斜する状態となるが秤の感度に及ぼす影響は無視出来る量である。かくして落戸の沈下は約 2mm まで達せしめ得るが、之以上の沈下に對しては可動支臺 S の把手を回轉して 5cm に達する垂直変位を適用する事が出来る。

然るに茲に留意すべき事は砂を所定の高さ迄漸次填充する間は本装置の總ての可動點は固定しあるも尙僅少の弾性沈下を絶対に防止することは出来ない。特に a 及 o 點は蝶番にして knife edge の構造をなす故最も弱い處である。従つて斯の如き不完全固定状態に於ては砂を漸次填充して所定の高さに達する迄に之に応じて a 點従つて落戸は極めて微少なながら沈下する状態を免れない。此の値も決して等閑に附することの出来ない影響を持つてゐる。此の關係を次の実験第 2 法 (ビームの撓みによる測定法) に就いて吟味すれば荷重が 10kg 以内ならばビーム (I) に於ける径間 $l=15.5$ cm の場合に相當する撓みを成すものである。(1)

4. 実験結果

図-6 及 7 は実験第 1 法に依る測定値から落戸の沈下量に對して垂直土圧が変化する状態を图示せるものである。但し落戸径は 20~12 cm の 5 種、砂高は 100~25cm の場合である。各線図の始點 (図中の a 點) が沈下量より離れてゐる所以は前述の如く測定の

(1) 図-4 は荷重と秤臺の弾性沈下量との關係を示し、図-5 は秤臺の刚性 (撓み) をビーム (I) の荷重による撓みと比較したものである。

図-3. 秤の釣合による測定装置

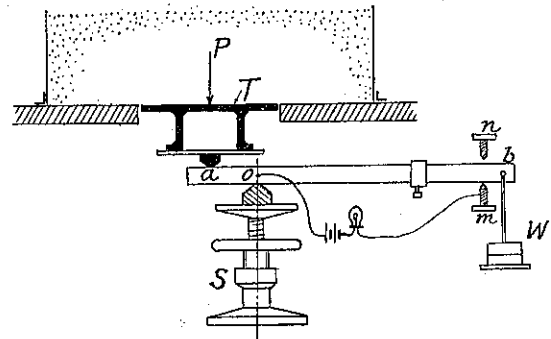


図-4. 秤臺の弾性沈下量

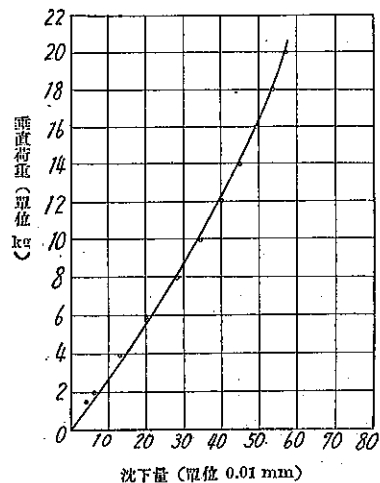


図-5. 秤臺の弾性をビーム (I) に比較せるもの

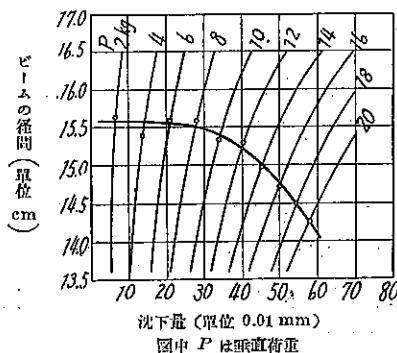
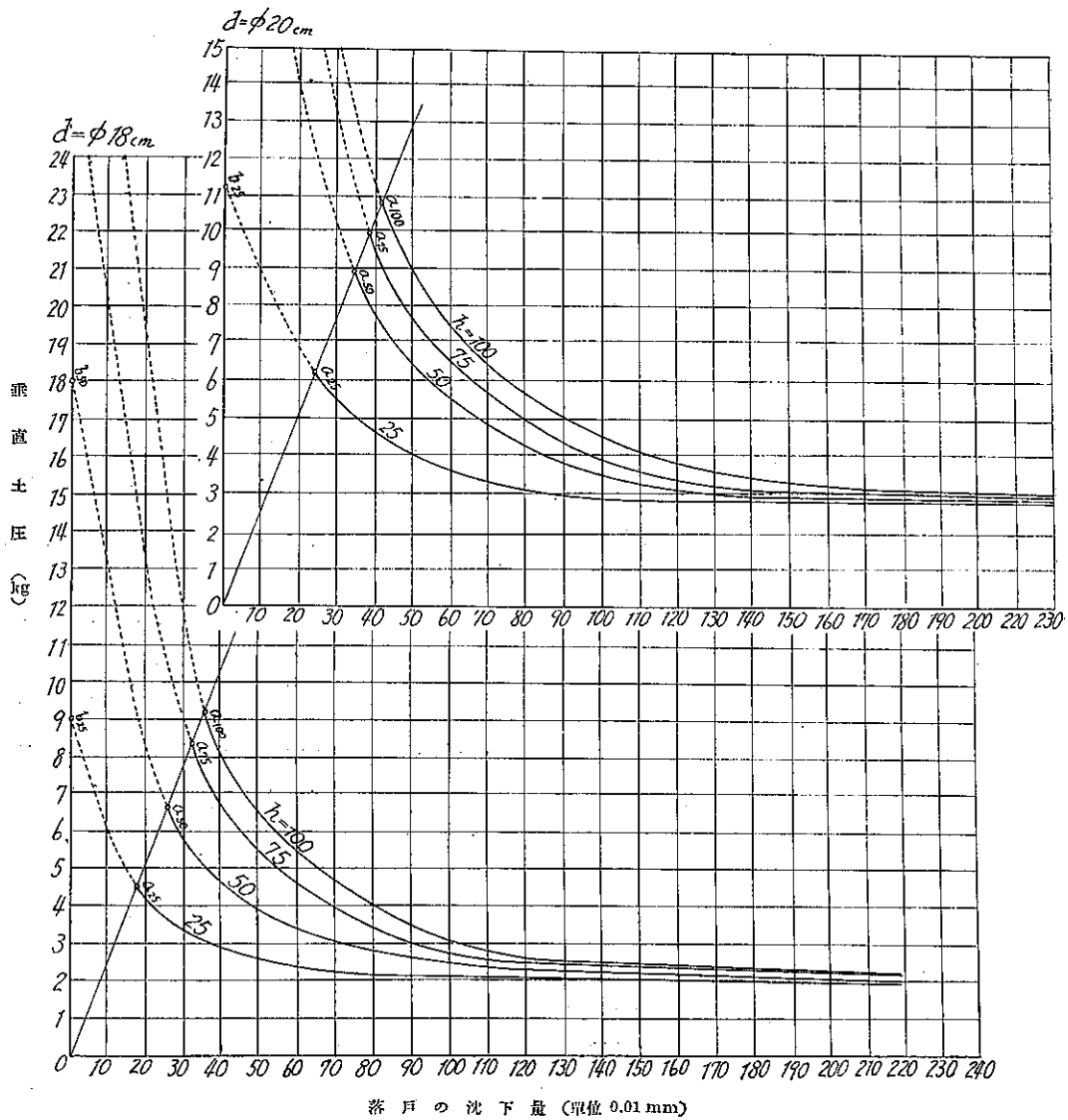


図-6. 実験第1法による砂の変位圧力曲線(I)

d : 落戸の径, h : 砂の高 (cm), a 點は測定始動圧力, b 點は無変化の場合の圧力

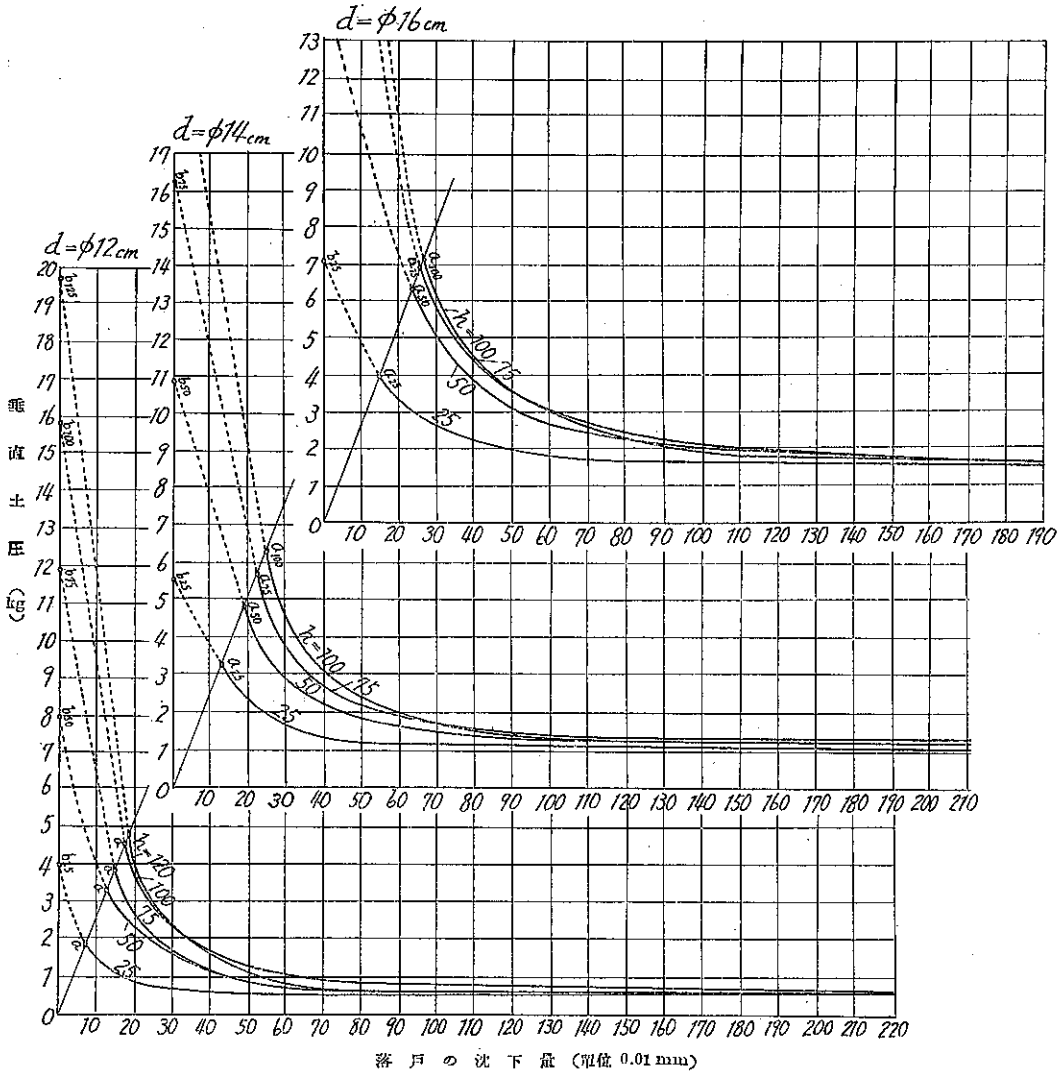


初め実験装置を全部緊定するも尙所定の高さに砂を損充する間に漸次弾性変位をなして落戸の沈下を招來するに外ならない。是等の図によれば垂直土圧量は落戸の沈下に對し初め極めて急激に低減し、僅々 0.5~1.5 mm 程度の沈下により殆んど最小土圧量に達し、其の後の沈下に對しては変化極めて渺く殆んど一定値を示す。

茲に注目すべきは同一の落戸に對しては砂高に殆んど關係なく何れの場合も垂直土圧の最小限界値は略同一値を探ることである。而かも斯くの如くして得たる垂直土圧の限界値より落戸に及ぼす砂層の土圧影響線を考察するに、今此の影響線を Ellipsoid と假定して影響線の高さ h と落戸の径 r との關係を、夫々直径を異にする數種の落戸の場合に就いて求むるに 表-2. の如くなる。

図-7. 實驗第1法による砂の変位圧力曲線(II)

d : 落戸の径, h : 砂の高 (cm), a 點は測定始動圧力, b 點は無変化の場合の圧力



此の結果より觀れば落戸の半径 r が 3 cm 以下の小なる場合を除き $r=4\sim 10$ cm に至る 7 種の實驗に於いて h/r の値は極めて良く一致し殆んど一定値を示すことを知る。即ち Ellipsoid の場合には $h/r=1.01$ となり略 Spheroid として作用するものである。之に依つて觀れば砂層は落戸の大いさ及砂層の高さに殆んど關係なく落戸の沈下により常に一定の平衡面を形づくり此の平衡面以下の土量が落戸に最小垂直土圧として作用するものなることを知るのである。換言すれば落戸の沈下により砂層は常に崩壊しながらも土圧影響面は沈下量に關係なく常に一定の形状を持続するものであることが認められる。

勿論敘上の關係は砂高が落戸の半径以上なる時に成立つもので 図-8. は砂層が 20 cm より小なる場合を示す。又此の最小土圧量に達するに要すべき落戸の沈下量は落戸の径が大なるほど大となり又砂高が大となるほど大と

表-2.

落戸 2r	P_0 (gr)	h (cm)	h/r
4	16	1.28	0.64
6	60	2.24	0.75
8	190	4.05	1.01
10	360	4.91	0.98
12	661 (700)	6.26	1.04
14	1,098 (1,300)	7.62	1.09
16	1,497 (1,800)	7.96	0.99
18	2,023 (2,500)	8.54	0.95
20	2,917 (3,200)	9.96	1.00

Ellipsoid 容積 $V=2.094 hr^2$

重量 $W=wV$

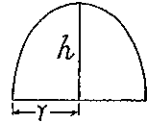
$=2.930 hr^2$

$=P_0$

$\therefore h = P_0 / (2.930 r^2)$

P_0 : 限界土圧量

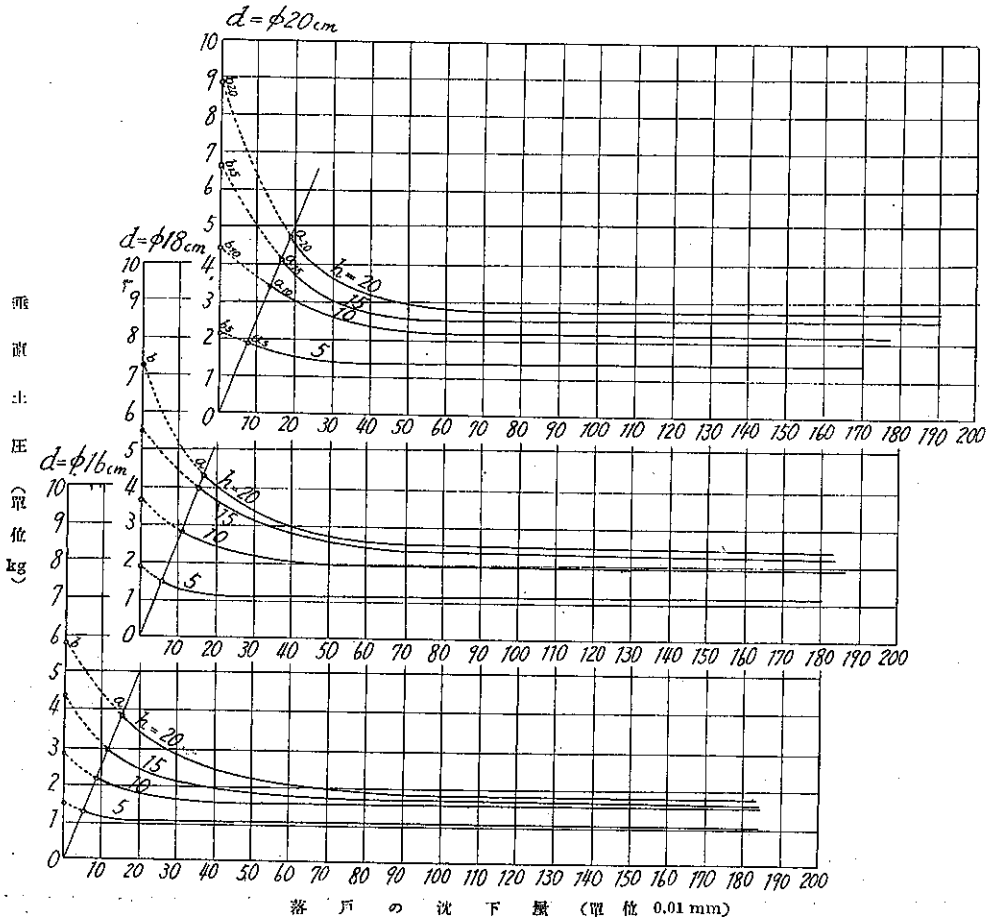
w: 砂の単位重量 = 1.4 gr/cm³



括弧内の値は 図-11 における平均値

図-8. 實驗第1法による砂の変位圧力曲線(III)

d: 落戸の径, h: 砂の高さ (cm), a 點は測定始動圧力, b 點は無変化の場合の圧力



なる傾向を示してゐる(図-14 参照)。最小限界値に達したる後更に落戸の沈下量を増す時は之に応じて垂直土圧は僅少なから漸次増大する。然し落戸の沈下に応じて落戸の孔内に這入つて来る砂の重量(図-9 に示す B の部分)を之より控除すれば実験範囲内の沈下に對しては殆んど土圧量に増減なく砂層の土圧影響面は一定なることを知る。図-10 及 11 は此の關係を示す。

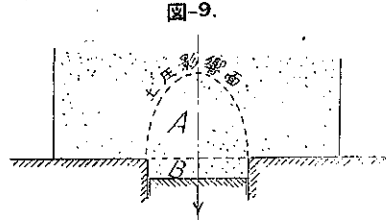
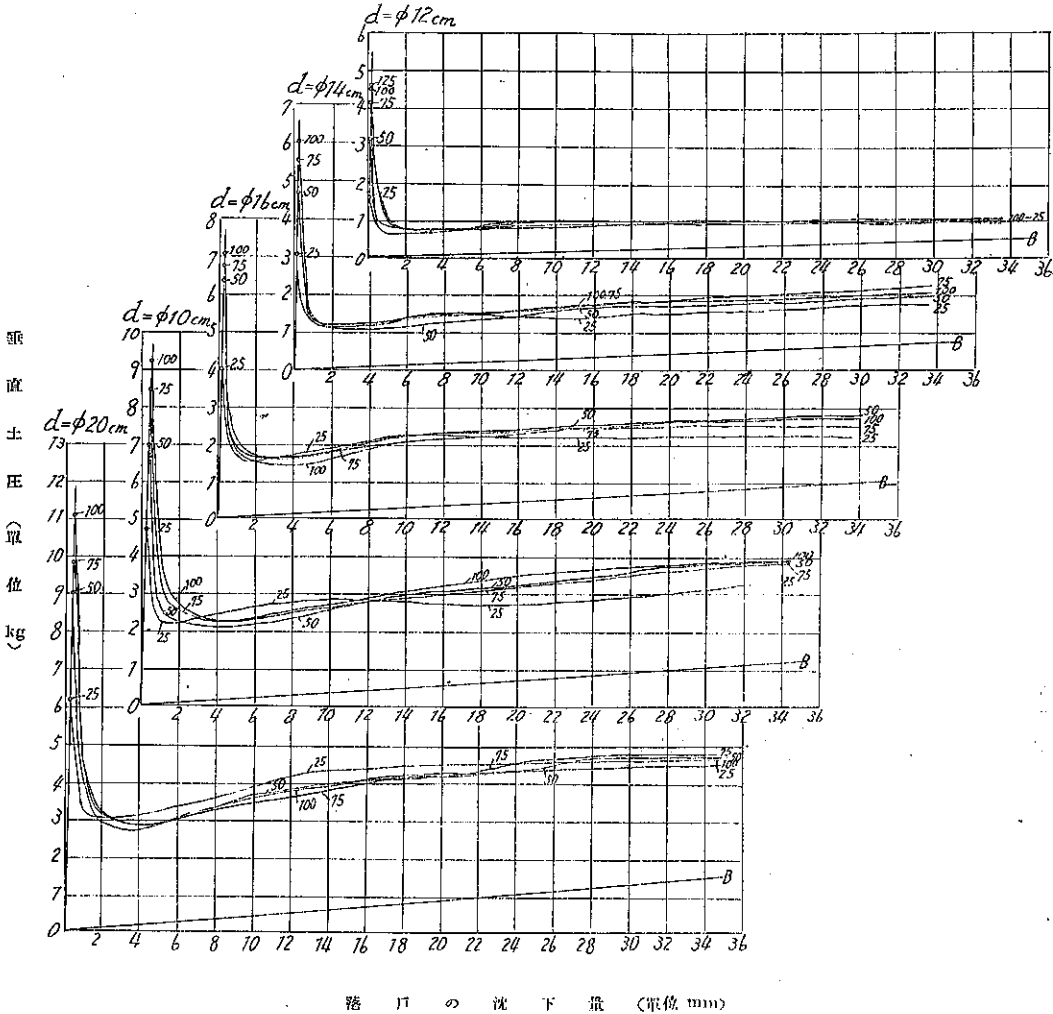


図-10. 實驗第 1 法による砂の沈下圧力曲線(IV)

图中 B 線は落戸の孔内に侵入する砂の重量



第 3 章 大装置による實驗

前述の實驗の結果落戸の径 20 cm 迄に於ては垂直土圧の最小限界値は殆んど砂の高さに關係なく落戸の径に応じて一定となり、土圧影響面は落戸を底とする略半球面を成すことが認められる。然しかゝる關係は落戸の径が

図-11. 実験第1法による砂の沈下圧力曲線(V)

① は總土圧量 ② は落戸孔内の砂重量を差引ける場合

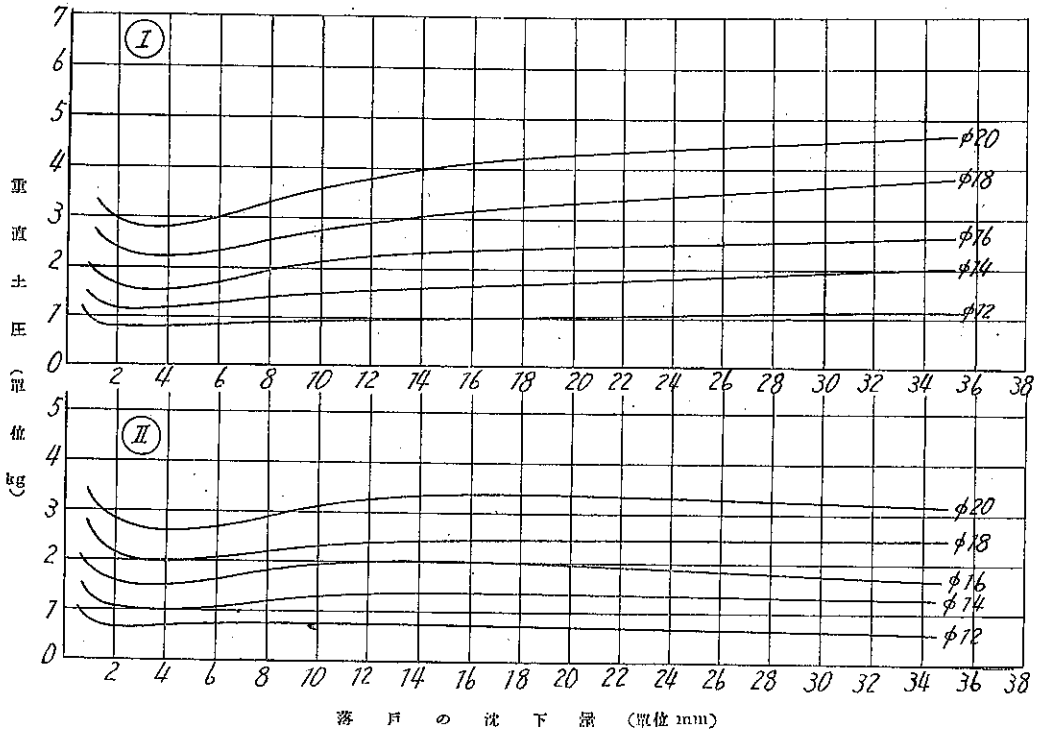
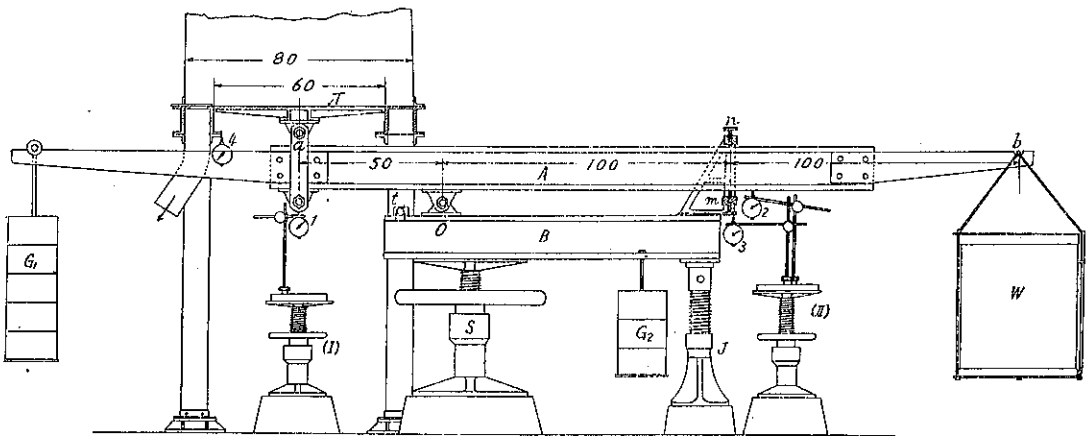


図-12. 大 實 験 装 置 (I) 單位 cm



更に大となる場合に於ても依然同一状態を持續するや否や此の點を究明するため徑 60 cm 及 45 cm の落戸を有する大装置を設け実験第 1 法に準じて實驗に供したのである。其の裝置は 圖-12 及 圖-13 に示すが如く其の倍率は $ob : oa = 200 \text{ cm} : 50 \text{ cm} = 4 : 1$ である。本裝置に依る實驗法の要領並に經過は次の如し。

(a) ビーム A の一端 a に落戸 T を載せ、他端 b に於ける水槽の water gauge が零の時、落戸の面が砂槽底

版と同一面となり、且つ同時にビーム A が水平の位置に於て左右相釣合ふ様に對重 G_1 を調整する。

(b) 斯くしてビーム A が左右無荷重で釣合状態になれば上下のネジ m 及 n を緊定し、水槽に水を充たす。尚水槽に水を注入又は排出する時 m 點從つて a 點が変位しない様にビーム B に豫め重量 G_2 を懸けジャッキ J を充分に利かせる。 a 點又は m 點の変位は dialgauge (1) 及 (3) にて讀む。質績によれば荷重用水の注入及排出のため m 點の変位從つてビーム B の移動は極めて僅少にてビーム A に影響する處は殆んどなきを認む。

(c) 砂槽内に徐々に砂を入れ砂高 10 cm 毎に表面を均らしつゝ落戸 (a 點) の沈下及架橋の沈下を夫々 dialgauge (1) 及 (4) にて讀む。

(d) 所定の高さまで砂の填充を完了すれば押えネジ n を僅かづゝ弛め測定を開始する。先づ水を徐々に排出せしめ、dialgauge (1) 又は (2) が始動して一定距離動いた時水槽のcockを閉め water gauge を讀み取り、dialgauge の動きが停止する時其の示度を讀む。此の時左右の荷重は略釣合へるものと見做す (實際は b 點の荷重が幾分大なる状態にある)。

(e) 前法を繰返して落戸の沈下と共に垂直土圧量の変化を測定するのである。測定の進行と共に dialgauge (1) 又は (2) の動きは漸次活潑となり遂に水槽のcockを閉めたる後も更に進行して押えネジ n に迄達する。此の際には a 點の荷重即ち砂層の圧力は b 點の荷重より寧ろ稍超過してゐることを示す。斯る状態に於ては垂直土圧は略最小限界値を示し、更に落戸を沈下せしむるも垂直土圧は殆んど変化せず。

(f) 斯る状態に達すれば支へネジ m を緊めて一旦水を注入したる後押へネジ n を弛め、水を徐々に排出してビーム A が左右相釣合ふに至らしめて水槽の water gauge を讀む。

(g) 同様の方法は可動支臺 S 及ジャッキ J を相互適宜に下げて漸次落戸を沈下せしめ、之に對する垂直土圧を測定することが出来る。

實驗の結果より落戸の沈下量 δ に對する垂直土圧 P の変化を示す図表を作れば前記 圖-6 又は 圖-7 と殆ど同様のものが得られる。但し本實驗裝置に於ては其の始動點に稍明瞭を缺く缺點がある。

表-3 は垂直土圧の最小限界値 P_0 及其の時の落戸の沈下量 δ_0 を示すものである。

前同と同様に土圧影響面を ellipsoid と假定して測定土圧量 P_0 より其の高さ h 及之と落戸の半径 r との比 h/r を算出すれば 表-4 となり h/r

圖-13. 大實驗裝置 (2)

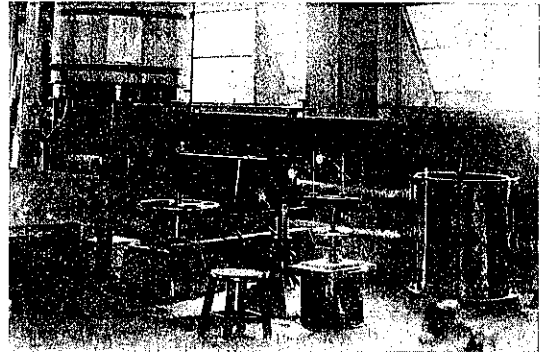


表-3.

砂 高 t (cm)	落戸径 60 cm		45 cm	
	δ_0 (mm)	P_0 (kg)	δ_0 (mm)	P_0 (kg)
50	3.5	78.0	4.4	33.5
	6.2	74.0	3.7	29.2
	5.8	78.0	4.2	34.3
	5.6	78.7		
	4.0	76.4		
	7.1	75.6		
	4.6	79.5		
	4.8	73.7		
	(平均)5.2	76.8	4.1	32.3
75	6.2	66.7		
	5.0	68.7		
	5.1	69.5		
	(平均)5.4	68.5		
100	6.0	66.7	4.0	27.7
	8.4	64.8	6.1	29.2
	8.0	67.9	4.0	35.1
	4.0	67.9	4.5	31.2
	(平均)6.6	66.8	4.7	30.8

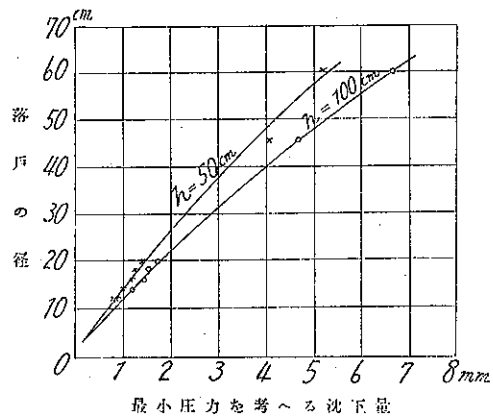
表-4.

砂高 h (cm)	落戸径 60 cm			45 cm		
	P_0 (kg)	h (cm)	h/r	P_0 (kg)	h (cm)	h/r
50	76.8	29.1	0.97	32.3	21.8	0.97
75	68.3	25.9	0.86			
100	66.8	25.3	0.84	30.8	20.8	0.92

表-5.

落戸径 cm	最小圧力を與へる沈下量 (mm)	
	砂高 50 cm	100 cm
12	0.8	0.9
14	1.0	1.2
16	1.2	1.4
18	1.3	1.5
20	1.4	1.7
45	4.1	4.7
60	5.2	6.6

図-14. 落戸の径と最小土圧を
與へる沈下量との關係



の値は落戸の径の小なる場合と略同様の結果が得られたのである。然し仔細に觀察すれば落戸の径が大なるに従ひ又同一落戸に於ては砂高が大なるに従ひ土圧影響面の高さは却つて幾分小さくなる傾向があることが認められる。尙落戸の垂直土圧を最小限界値に達せしむべき落戸の沈下量 δ_0 はその径が大なるほど大となる事は 表-5 及 図-14 にて推測される。

第 4 章 實驗第 2 法 (ビームの撓みによる測定法)

1. 實驗法

實驗第 2 法はビームの撓みを利用して垂直土圧量を

図-15. ビームの撓みによる測定装置 (1)

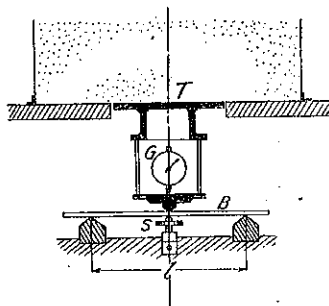
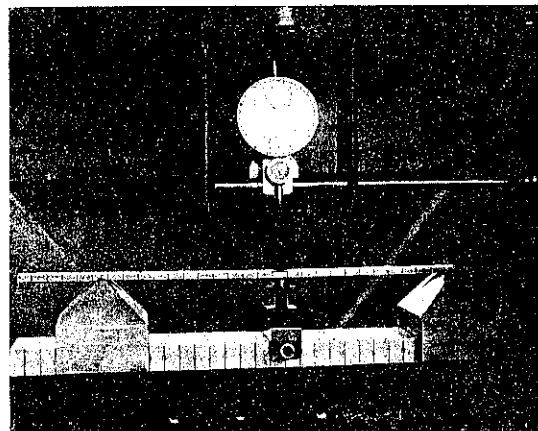


図-16. ビームの撓みによる測定装置 (2)



測定せんとするもので本實驗装置の要部は 図-15 及 16 の如し。落戸 T は其の中央部の一點が測定用 simple

beam B の中央に載り此の點の撓みを dialgauge G を以て測定するのである。而して此の撓みより計算にて垂直圧力を求める代りに、各實驗裝置をなす毎に先づ試驗荷重をかけて之に對するビームの撓みを測定し之を基準として其の儘の状態にて砂を填充し其の圧力によるビームの撓みを測定して砂の垂直圧力を求めるものである。従つて各實驗裝置間の不同不備は凡て消去される譯である。

而して砂を一定の高さに填充する間はビームの撓みを抑止するためにビームの中點を其の下側より中央支柱(S)によつて支へ、砂の填充を終れば中央支柱を一時に取除いてビームの撓みを測定するのである。此の中央支柱はネジの回転によつて降下移動をなさしめるものであるが、斯くの如くビームに中央支柱を施しても砂を填充する間尙輕微ながら或程度の彈性沈下は免れない。

實驗に使用したる測定用ビームは2種でビーム(I)は断面幅 20 mm、高 4 mm、ビーム(II)は幅 15 mm、高 2 mm、何れも鋼鉄製で長さ 350 mm、径間 60~300 mm を採用してゐる。

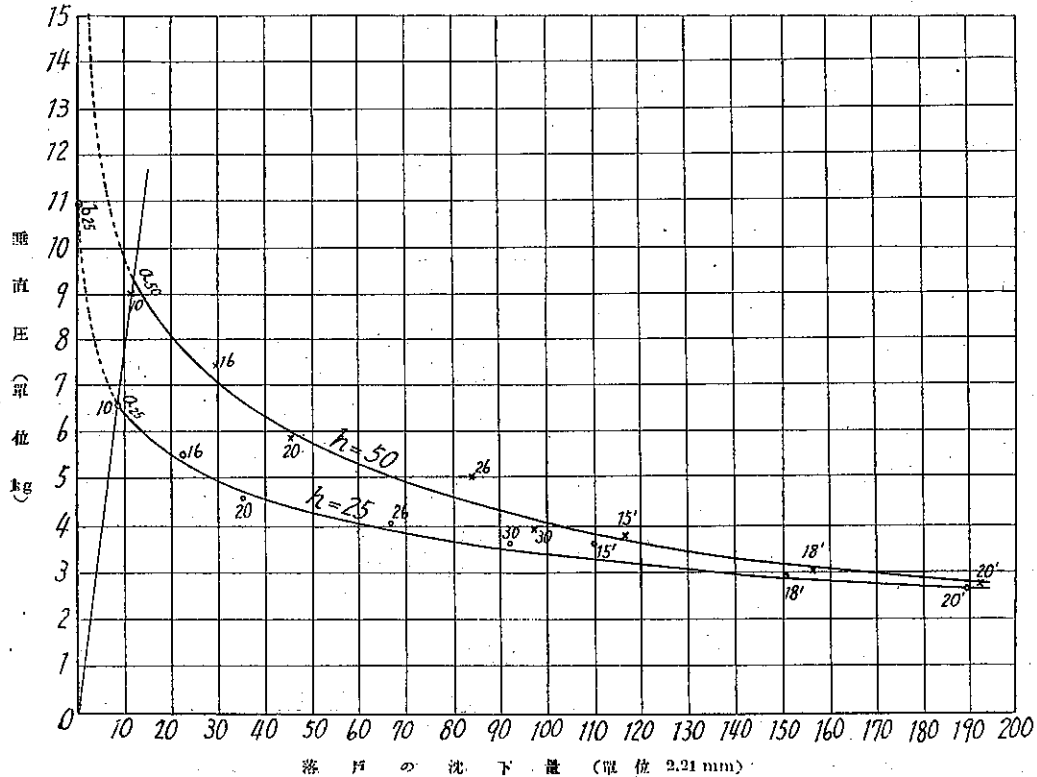
2. 實驗結果

圖-17 は落戸径 20 cm、砂高 25 及 50 cm の場合に就て中央支柱を有するビームの撓みによる測定結果を示すものである。中央支柱を取外すには殆んど一瞬時に行ふ場合と比較的緩漫に行ふ方法とがあつて各異つた結果を與へる。然し著しく急速ならざる限り其の速さには殆んど影響なく略同一値を與へる。

圖-17 を實驗第 1 法「料による測定法」に比較すれば各實驗裝置の固有剛性を異にするのみで途中の測定方

圖-17. 實驗第 2 法による砂の変位圧力曲線

但し落戸径 $d = \phi 20$ cm の場合、図中の數字はビーム (1) の径間 (cm)、
數字に (') を附せるものはビーム (2) の径間 (cm) を示す



法が同一操作なるを以て求める曲線は初めは夫々相違するも後には殆んど相一致した最小土圧量と與へることが認められる。兩者に於ける落戸の沈下速度には互に相違があつても測定値に及ぼす影響が少いから結局兩者の最小限界値は略同一となるのである。

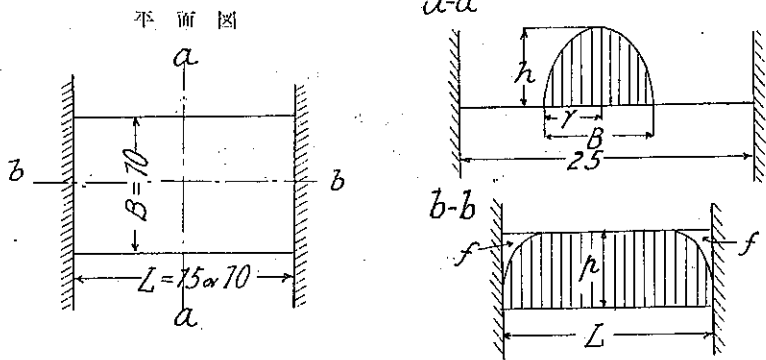
尙本實驗装置に於て、中央支柱を用ひずビームの自由撓みによつて垂直土圧を測定することが出来る。然し此の場合砂を所要の高さまで填充する間にビームは漸次撓み之に應じて沈下するを以て、斯くの如くして得らるべき一定高さの砂層の垂直土圧は本實驗における測定法と其の意味を異にする。かゝる状態は地下埋設管渠類に作用する土圧に相當し、之に就ては別に稿を更めて論述する事にする。

第 5 章 二元的に取扱へる實驗

以上の實驗に在りては總て円形落戸を採用したので垂直土圧の作用する範圍は三元として取扱はれてゐるが茲には円板の代りに矩形板を落戸として二元的に取扱ひ特に隧道の場合に就き考察したるものである。

落戸は 2 種を以て 1 組と成す。落戸 (I) は 15×10 cm, 落戸 (II) は 10×10 cm である。即ち兩者の奥行は夫々 15 cm 及 10 cm で相異なるが其の前後の仕切壁は同一である。今 圖-18 に就て落戸の長さに關係なく砂高が等しければ落戸の單位長に働らく土圧 p 及前後側壁面の摩擦抵抗 F が相等しとすれば次表の如し。

圖-18. 矩形落戸に依る測定断面圖



然る時は

$$Q_1 = P_1 - F \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_2 = P_2 - F \dots \dots \dots (2)$$

$$(1)-(2), Q_1 - Q_2 = P_1 - P_2 = f(L_1 - L_2) = 5p$$

$$\therefore p = \frac{Q_1 - Q_2}{L_1 - L_2} = \frac{1}{5}(Q_1 - Q_2)$$

又は (1)+(2)

落 戸	I	II
寸 法	$L_1 \times B = 15 \times 10 \text{ cm}$	$L_2 \times B = 10 \times 10 \text{ cm}$
單位垂直圧	p	(I) に同じ
全 圧 力	$P_1 = pL_1$	$P_2 = pL_2$
前後側面抵抗	$F = 2f$	(I) に同じ
測 定 値	Q_1	Q_2

$$F = \frac{1}{2} \{ (P_1 + P_2) - (Q_1 + Q_2) \} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{L_1 + L_2}{L_1 - L_2} (Q_1 - Q_2) - (Q_1 + Q_2) \right\}$$

$$= 2Q_1 - 3Q_2$$

垂直土圧の影響線を ellipse と假定し、其の高を h とすれば

$$p = \frac{\pi}{2} h b w \quad \therefore \quad h = \frac{2p}{\pi b w} = \frac{p}{11} = \frac{Q_1 - Q_2}{55}$$

本装置を用ひて實驗第 1 法を適用すれば 表-6 の結果が得られる。

表-6.

砂 高 (cm)	$Q_1(\text{gr})$	$Q_2(\text{gr})$	$p(\text{gr})$	$F(\text{gr})$	$h(\text{cm})$	h/b	
25	始動圧力	2.643	1.663	196	297	17.82	3.56
	最小限界値	1.080	793	57	-219 ⁽¹⁾	5.22	1.04
50	始動圧力	3.875	2.136	348	1.342	31.53	6.31
	最小限界値	1.074	795	56	-227 ⁽¹⁾	5.07	1.01

最小限界値は砂高 25 cm 及 50 cm に對し夫々 $h/b=1.04$ 及 1.01 となり三元に取換へる場合と全く同一結果である事が認められる。

第 6 章 理論的考察—從來の學說

隧道の貫く地山が軟弱なる土質より成り掘鑿によつて地山が弛緩する場合隧道上部に來る地圧に關しては從來多くの學者によつて論ぜられて居る。今其の中の二三の學說に就き概説すれば次の如し。

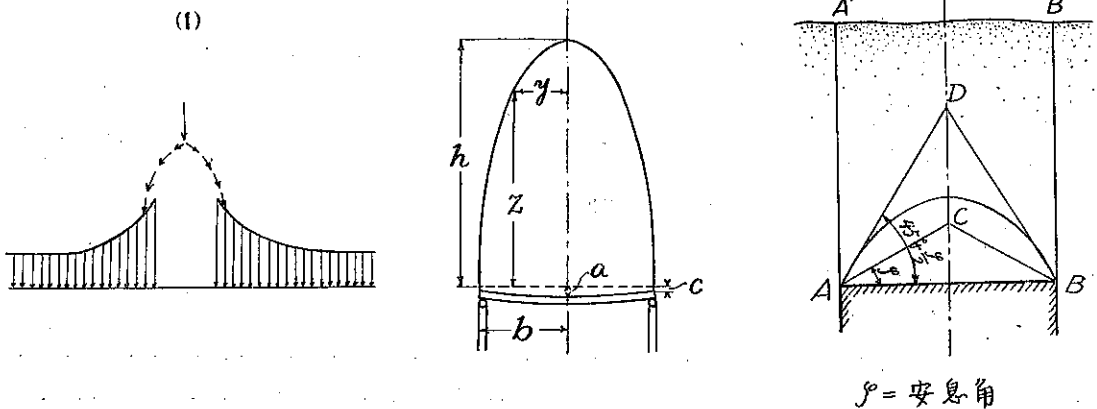
1. アーチ説

隧道が貫通する地山が土質の場合に在りては導坑掘鑿前には略一樣なる垂直土圧が存在するが之を掘鑿したる爲に上方の地山が弛緩し、弛緩せる土砂の自重が漸次支保工の上に加はることになる。然るに弛緩したる地山の上方は土質内部のアーチ作用に依つて隧道の左右の地山に傳へられて支保工にはアーチ以下の土の重量が懸るも

圖-19.

(2)

(3)



のである (圖-19 (1))。此の説は Willmann, Ritter, Engesser 氏等によつて提唱せられてゐるものである。Willmann 氏は隧道天井の沈下に応じて上部の土は弛緩するとなし、其の大きさを次の parabola の式にて表はしてゐる。圖-19 (2) に於て

$$z = \frac{100}{p} \left(a - \frac{a-c}{b^2} y^2 \right), \quad h = \frac{100 a}{p}$$

茲に p : 弛緩膨脹率 (%), a 及 c : 支保工の中央及兩端の沈下量

(1) 前記の假定に従つて前後仕切壁面の抵抗を算出すれば Q の最小限界値に對して其の値は負となることを示してゐる。

此の式に依れば沈下量の増加するに従ひ土圧影響線の高さ h は大となり、地圧を増大することを示す。

尙 Meem 氏⁽¹⁾ に依れば 図 19 (3) に於て隧道の天井 AB にかかる压力は恐らく AC 線と AD 線との間にアーチが出来てアーチ以下の土の重量が直接压力として作用するもので、AD 線の外は二次的に水の作用をうけて土質が変化しない限り AB には作用しないと説明してゐる。

2. 摩摺説

Birbaumer 氏等の説く所で隧道上部の土圧は上部の土砂が隧道頂部の沈下によつて將に移動せんとして其の際垂直面に摩擦抵抗を受け、夫れ丈隧道上部の土柱全重量が減ぜられて作用するものとして居る。即ち 図-20 に於ける EF 面の垂直土圧は EF GH の土柱の重量より兩側 EG 及 FH 面の摩擦抵抗を控除し其の平均値が隧道上部の地圧として働くとしてゐる。

Janssen 及 Airy 氏も周辺の摩擦抵抗を考へた平衡條件より垂直压力の算定式を誘導してゐる。但し是は一般に埋設管渠類の場合に適用され隧道の場合には応用されてゐない。

Terzaghi 氏は「砂のアーチ効果」⁽²⁾ と題して次の如き解説をなしてゐる。砂層が一部沈下するときは沈下した部分に沿ふて剪断応力を生じ、其の爲垂直压力を減少せしめ、沈下に關係のない層に夫等の垂直压力を傳達するとなし、之をアーチ効果と謂つて居る。図-21 は方形落

戸 aa_1 に就て、落戸の沈下が極く僅小なる間は砂柱 aa_1bb_1 の下方部分は垂直方向に伸び水平方向に縮まり其の結果として隣接砂粒は横に移動し、傾斜面 ac, a_1c_1 内に剪断応力を生じ砂の重量を夫れ以外の部分に傳へる。更に沈下が進めば砂の内部組織は崩れて過大の移動のため最小抵抗面は垂直面 ad, a_1d_1 に変移するとなしてゐる。

円形落戸の場合には尙此の外砂の ring effect を考へなければならぬ。砂層内の局部沈下がない時は水平直压力は如何なる方向にも一樣であるが落戸が沈下して砂が円筒狀に移動弛緩すれば砂粒は求心的に移動して順次切線の方に压力を生じ恰も中空円筒が外力の爲に圧されたる如き応力分布を示す。此の ring effect に依つて垂直压力は更に影響されることになる。

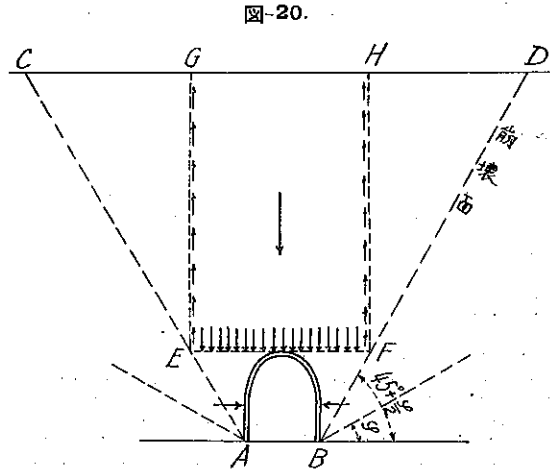


図-20.

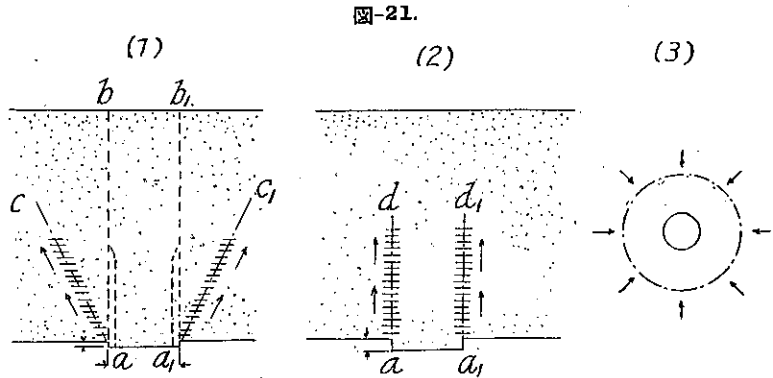


図-21.

(1) Transaction of A. S. C. E 1908, p. 12

(2) Terzaghi, E. N. R. May 4. 1936

第7章 実験より考察せる著者説

砂層の局部的沈下による垂直土圧の変化を究せんとするに當り砂層内部の砂粒子の移動状況を探知するは極めて重要な問題である。之がため砂層を白と黒との水平互層に充填し落戸の沈下による縞模様を觀察したのである。此の縞模様を用ふる方法は既に應用されてゐるが茲には此の方法によりて特に落戸の沈下量と砂層内部の崩壊領域が擴大する關係を定量的に調査し、之によつて砂の崩壊量と垂直圧力の変化との關係を究明せんとしたのである。

落戸の沈下が漸次進行するに従ひ砂層の崩壊する状態を各段階毎に寫眞に撮影して其の間の変化を觀察すれば、

圖-22. 落戸の沈下 ($\delta=1.0$ cm) に依る 砂層の移動

落戸幅 10 cm, 砂高 50 cm, 幅 60 cm

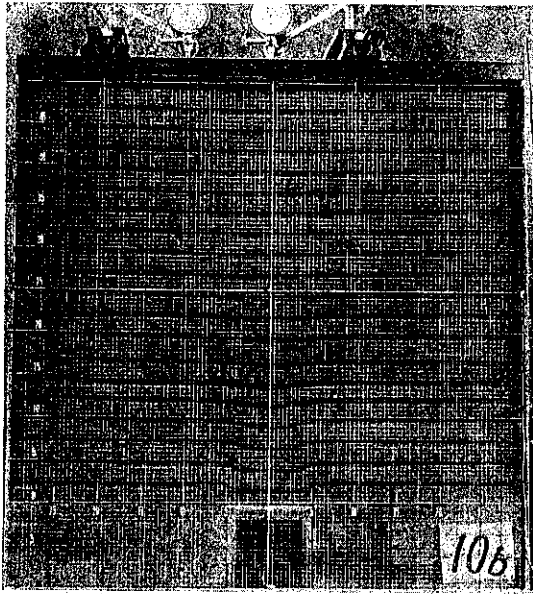
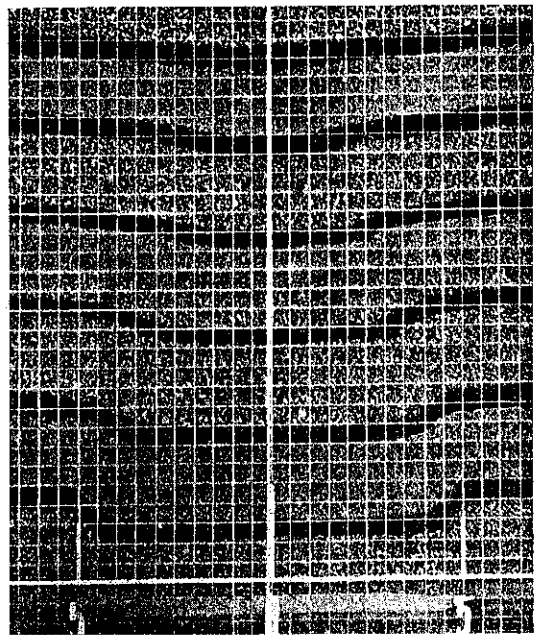


圖-23. 圖-22 の要部擴大圖



崩壊面は上方に向ひ加速度的に擴大進展するを知る。圖-22 は其の一例を示し、圖-23 は其の要部を擴大せるもの、又圖-24 及 25 は落戸沈下量 1.0 及 2.5 cm の場合の崩壊面の進行状態を示す。茲に特に注意すべきは如上の砂層の崩壊面とは別に落戸の極めて微小なる沈下も直ちに落戸上部の全砂層を通して砂層表面に傳播せられ表面砂粒子の移動を示すことである。之は砂層表面に dialgange を裝置するとき仔細に此の状態を知ることが出来る。圖-26 は砂層厚さ 50 cm の場合に砂層底部の落戸の沈下量と砂層表面の沈下量とを比較せるものである。砂層の移動により砂粒子の運動を觀察する時は殆んど垂直方向に降下し、僅かに中心部に向つて水平移動して居ることが認められる (圖-27)。従つて砂層崩壊面は幾分左右に擴大し、砂粒大となるほど此の傾向は大となる。圖-28 は此の關係を示す。

斯くして落戸の極めて僅かな沈下にも落戸上部の砂層全体が容易に垂直移動することが認められるのである。此の現象よりする時は前記摩擦説の如く隧道頂部の圧力は上部土柱の重量より兩側の摩擦を控除したるものゝ如く思はれる。然るに之を計算より誘導する時は實驗値に比して可成懸絶せる値を得るのである。圖-29 に於て

$$\text{土柱の重量} \quad W = wr \pi h$$

図-24. 落戸の沈下 ($\delta=1.0$ cm) に依る砂層の崩壊

a は崩壊面, 数字は落戸の沈下量 (cm) を示す

$\delta = 1.0$ cm

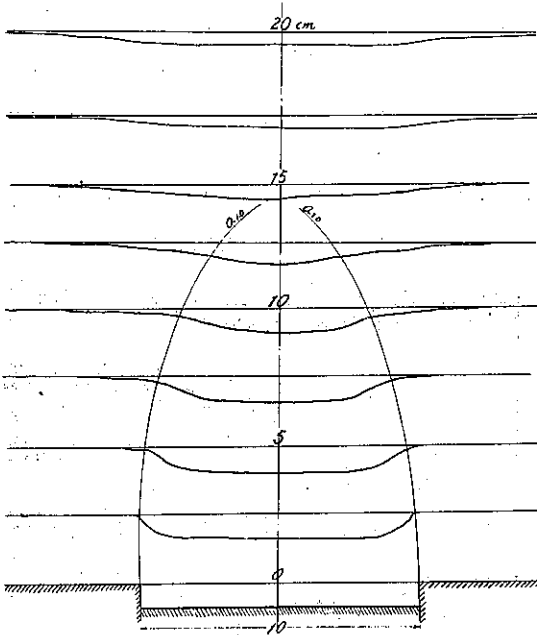


図-25. 落戸の沈下 ($\delta=2.5$ cm) に依る砂層の崩壊

a, b, c は崩壊面, 数字は落戸の沈下量 (cm) を示す

$\delta = 2.5$ cm

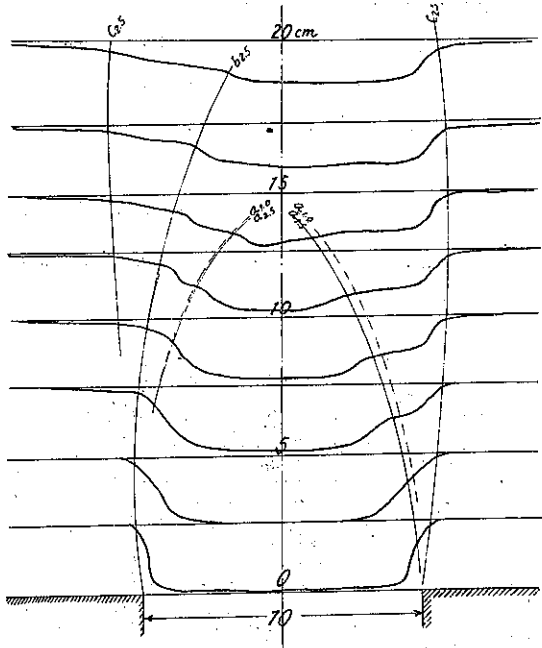


図-26. 落戸の沈下量と砂層表面の沈下量比較

但し砂高 50 cm, 落戸の幅 10 cm, 図中の数字は落戸の沈下量 (cm) を示す

落戸中心よりの距離 (cm)

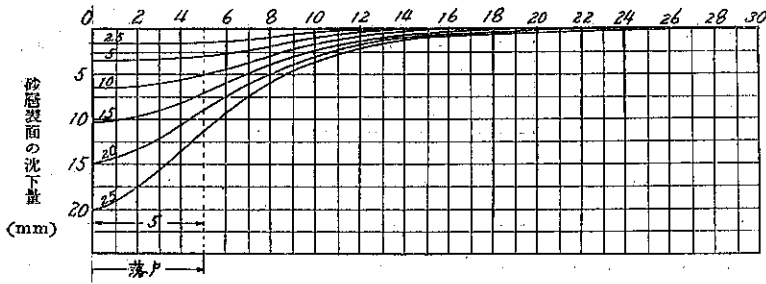


図-28. 崩壊面進展の状況

a 細目砂, b 中目砂, c 荒目砂の場合, 数字は崩壊の順序を示す

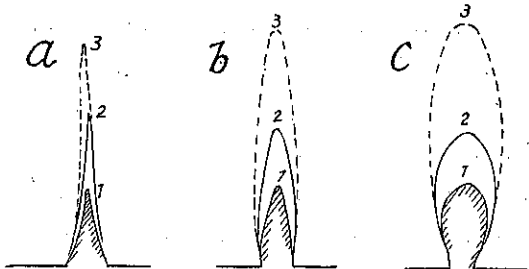
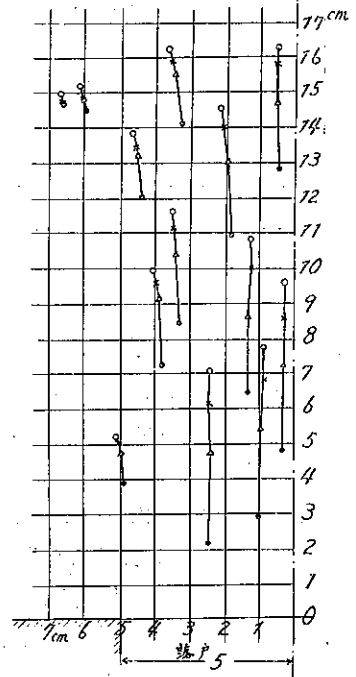


図-27. 砂粒子の移動

但し落戸 10 cm, 砂高 50 cm, 砂幅 60 cm の場合図中 \times , \circ , \triangle 及 \bullet は落戸の沈下 0, 1.0, 2.5, 5.0 cm の場合の同一砂粒子の位置を示す



土柱周囲の摩擦抵抗

$$F = \mu E = \tan \varphi \times \frac{1}{2} w h^2 \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \times 2\pi r$$

$$= w \pi r \tan \varphi \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} h^2$$

故に円形落戸（半径 r ）上の垂直土圧 P は

$$P = W - F = w \pi r^2 h - w \pi r \tan \varphi \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} h^2$$

$$= w \pi r h \left(r - \tan \varphi \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} h \right) = w \pi r h (r - \mu K h)$$

但し $\mu K = \tan \varphi \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$ 上式において P の値は $r/h \leq \mu K$ とな

れば負数となる如き結果に陥り無条件には採用出来ないのである。今 h に就て P の最大値を求むれば

$$\frac{dP}{dh} = w \pi r (r - 2\mu K h) = 0$$

$$r - 2\mu K h_0 = 0, \quad r = 2\mu K h_0, \quad h_0 = \frac{r}{2\mu K}$$

故に $P_{\max} = \frac{w \pi r^2}{4\mu K}$

之に依れば垂直土圧は砂高 h と共にその値を増大するも $h_0 = r/2\mu K$ を限界として h が之より大となれば却つて其の値を減じ遂には負数となる。寧ろ之に對しては垂直圧力は砂高 $h_0 = r/2\mu K$ にて最大値に達し、以後は砂高を増しても此の値は一定であると考へるのが妥當であらう。此の考方によつて砂層の内部摩擦角 $\varphi = 34^\circ$ 及 20° （弛緩せる場合の値）として數値を求むれば表-7を得。

表-7.

落戸径 2r	$\varphi = 34^\circ$				h_0 cm	$\varphi = 20^\circ$				h_0	實測値 (比較)			
	$h = 25$	50	75	100		25	50	75	100		25	50	75	100
4	46	46	46	46	5.3	50	50	50	50	5.6	16			
6	156	156	156	156	7.9	167	167	167	167	8.4	60			
8	370	370	370	370	10.5	396	396	396	396	11.2	190			
10	722	722	722	722	13.1	772	772	772	772	14.1	360			
12	1 249	1 249	1 249	1 249	15.7	1 340	1 340	1 340	1 340	16.9	661			
14	1 982	1 982	1 982	1 982	18.3	2 120	2 120	2 120	2 120	19.7	1 098			
16	2 960	2 960	2 960	2 960	21.0	3 160	3 160	3 160	3 160	22.5	1 497			
18	4 230	4 230	4 230	4 230	23.3	4 500	4 510	4 510	4 510	25.6	2 023			
20	5 740	5 780	5 780	5 780	26.2	6 110	6 180	6 180	6 180	28.1	2 917			
45	43 740	64 200	65 800	56 800	59.0	44 800	67 440	70 400	70 400	63.2	—	32 300	—	30 800
60	83 300	135 000	155 000	156 000	78.5	84 400	139 200	164 800	167 000	84.3	—	76 800	68 300	66 800

叙上の計算値を實驗値に比すれば何れの場合も殆んど 2 倍に近い値を示す。故に實際は摩擦説と異なりたる状態にあることが窺はれるのである。

然らば次に攻究せられるのはアーチ説である。Willmann 氏の説に従へば隧道上部の土砂はアーチを形成して

アーチより上部の圧力は隧道兩側に傳へられ、アーチ以下の崩壊せる土砂の全重量が隧道地圧として作用するものとしてゐる。然るに實驗の結果によれば落戸の沈下と共に砂層の崩壊面は上方に加速度的に進展し直ちに表面を遡大するを以て落戸上の土圧も當然之に応じて増大すべきであるに拘らず、實測土圧の値は初め落戸の僅かの沈下に對して最小限界値に達し其の後は落戸の沈下、從つて砂層崩壊範圍の擴大に無關係に略一定の値を持続することを示し、凝集力なき砂層である限り Willmann 氏の説と全く相矛盾せる結果となるのである。

著者は此のアーチ作用に基く抵抗線を砂層内の平衡條件より誘導せらるべき土圧曲線 (Geostatic curve) に該當するとなし、其の曲線内部の土砂重量が隧道上部の垂直土圧として作用すると推定したのである。而かも實驗より沈下移動せる部分の砂層は弛緩状態を呈し内部摩擦角を著しく低減してゐることを認め、其の値を検討して之を土圧計算式に導入したのである。

先づ砂層の弛緩により誘致せられる内部摩擦角の低減に就き考察せんに、落戸の沈下と共に落戸上部の砂粒は直ちに垂直移動をなすも其の移動量は落戸の沈下量に伴はず側方砂粒子の摩擦抵抗に阻まれて漸次遅れる結果移動部分の砂層は元の状態より弛緩して著しく空隙量を増したる状態になつてゐることが測定されるのである。

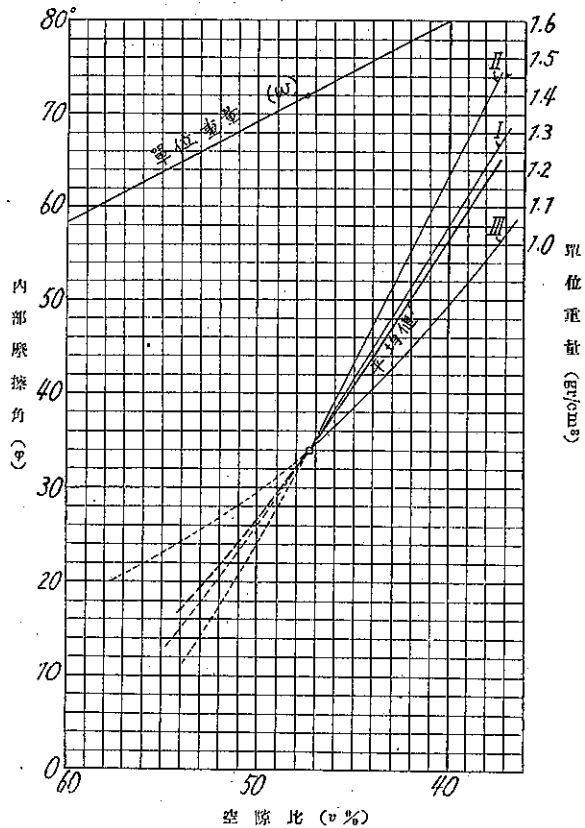
次に斯くの如き弛緩状態にある砂層の空隙量より内部摩擦角の値を求めんに、砂層の空隙量と内部摩擦角との關係に於て、砂層の密度の増加に對して内部摩擦角の増加する状態に就ては既に本誌第 22 卷 6,7 號に於て論ぜし處なるも、之と反對に密度を低減して充分弛緩状態にある砂層の内部摩擦角を測定することは至難なる問題である。然れども密度の低減によつて漸次内部摩擦角を減少することは推定し

得らるゝ所にして、若し砂の内部摩擦角が密度の増加と共に増加すると略同様に密度の減少と共に減少するものと考えれば、斯くの如き弛緩状態にある砂層の内部摩擦角の値を求むることが出来る。圖-30 は前掲報告に於て密度を高上せしむる場合の密度と内部摩擦角との關係を示す図表にして、図中の

- (I) は先端丸味を有する太棒にて搦固めたる場合
- (II) は先端尖鋭なる細棒にて搦固めたる場合
- (III) は砂表面に敷板を置いて (I) の太棒にて振動を與へつゝ搦固むる場合

を示し、此の 3 曲線の平均値を求め之を延長して密度を低減する場合に適用せんとするものである。図中の太き實線は測定平均値にして點線は推定値である。推定線において空隙比 $v=53\%$ に對し内部摩擦角 $\varphi=20^\circ$ 迄位は略大過ぎぬと考へられるも此より先きは暫く不明として置く。斯くして實測寫眞に就て砂層を小部分に區分し

圖-30. 空隙比 ($v\%$) と内部摩擦角 (φ) 及單位重量 ($w \text{ gr/cm}^3$) との關係圖



各に就て空隙比⁽¹⁾を求め図-30より内部摩擦角 φ の値を導出したのである。之を図示すれば図-31~32の如くなる。図中の陰影を施せる部分は $\varphi=20^\circ$ 又は夫以下に弛緩せる範囲を示すものである。之に依れば落戸の比較的僅かな沈下に對しても砂層崩壊線(図-24~25参照)に沿ふて著しく弛緩せる部分を生じ、落戸の沈下と共に比較的徐々に擴大する状況を判然と知ることが出来る。即ち實驗に使用せる砂の内部摩擦角は輕盛りの無変位状態に於て $\varphi=34^\circ$ より、落戸の沈下に因る弛緩状態に於て 20° 又は夫以下にも低下することを窺知るのである。但し以上の結果は硝子面を通して硝子面と接觸する砂粒子の変化を觀測した値で、従つて砂粒子は硝子面との摩擦のため下降運動を抑制されてゐるが、之に對し砂層内部の砂粒子はかゝる摩擦なく、それ丈砂層の弛緩作用を促

図-31. 落戸の沈下 ($\delta=1.0$ cm) に依る砂層の弛緩

數字は内部摩擦角の値、(20)は $\varphi=20^\circ$ 又は夫以下の値、陰影を施せる部分は $\varphi=20^\circ$ 又は夫以下に弛緩せる部分を示す

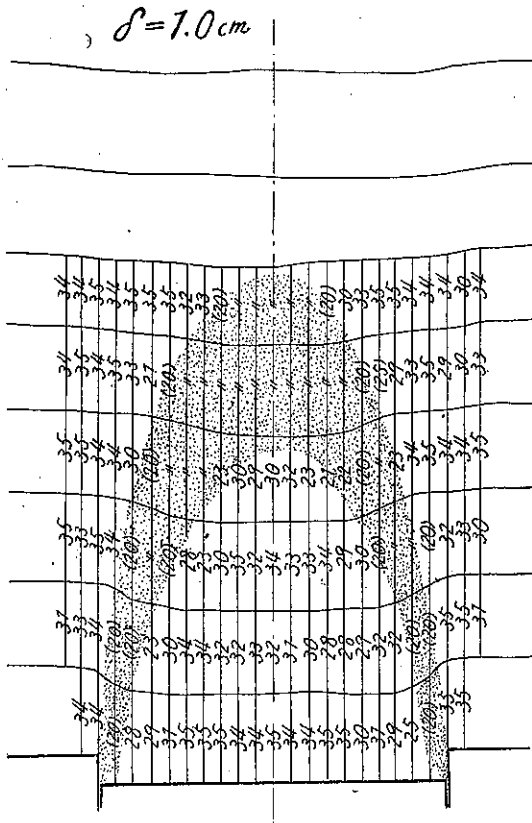
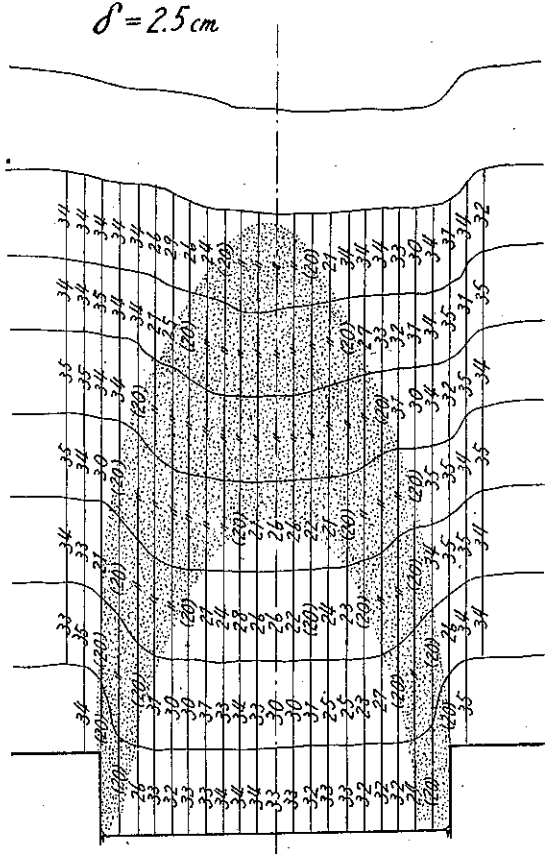


図-32. 落戸の沈下 ($\delta=2.5$ cm) に依る砂層の弛緩

數字は内部摩擦角の値、(20)は $\varphi=20^\circ$ 又は夫以下の値、陰影を施せる部分は $\varphi=20^\circ$ 又は夫以下に弛緩せる部分を示す



(1) 各区分の幅を $B (=0.5$ cm) 高さをも H とし、其の変位量を b, h とすれば空隙比 v_0 は次の如く変化す。

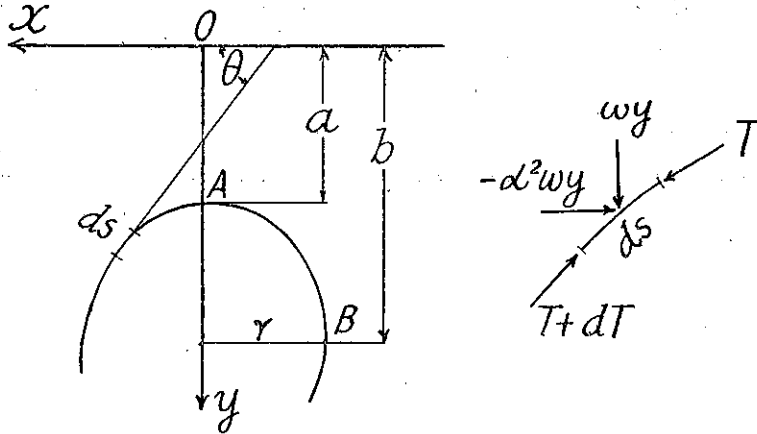
$$v = \frac{HBv_0 + \{(H+h)(B-b) - HB\}}{HB} = \frac{Hv_0 + h}{H}$$

但し b の値は沈下の中央部分ほど極めて小さい。従つて水平移動の大きい部分には其の誤差幾分大となる。然し H の変化は水平移動を無視して測定したから幾分小さくなり、上式の無視項の誤差を緩和することになる。

し、図中の陰影の高さは低下して、漸次円形に近接するものと認められるのである。

今砂層内の平衡条件より理論的に土圧曲線を求めれば 図-33 に於て

図-33.



$$\begin{cases} p_x = -\alpha^2 wy \frac{dy}{ds} = -\alpha^2 wy \sin \theta \text{ 但し } \alpha^2 = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \\ p_y = wy \frac{dx}{ds} = wy \cos \theta \end{cases}$$

之を ds 間の平衡条件

$$\begin{cases} R_x = -T \frac{dx}{ds} + \left\{ T \frac{dx}{ds} + d \left(T \frac{dx}{ds} \right) \right\} + p_x ds = 0 \\ R_y = -T \frac{dy}{ds} + \left\{ T \frac{dy}{ds} + d \left(T \frac{dy}{ds} \right) \right\} + p_y ds = 0 \end{cases}$$

に入れ、次の境界条件 $y=b$ の時 $dx/ds=0$ ⁽¹⁾、 $y=a$ の時 $dy/dx=0$ より x に就て解けば

$$x = \alpha \int_0^y \frac{(b^2 - y^2) dy}{\sqrt{(b^2 - a^2)^2 - (b^2 - y^2)^2}}$$

を得。次に此の曲線に就て曲率半径 ρ を求むるに $\frac{dy}{dx} = \frac{\sqrt{(b^2 - a^2)^2 - (b^2 - y^2)^2}}{\alpha(b^2 - y^2)}$ 、 $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(b^2 - a^2)^2 \cdot 2y}{\alpha^2(b^2 - y^2)^2}$ より

$$\rho = \frac{\left\{ 1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2y}{dx^2}} = \frac{\left\{ (b^2 - a^2)^2 - (b^2 - y^2)^2 (1 - \alpha^2) \right\}^{\frac{3}{2}}}{2\alpha y (b^2 - a^2)^2}$$

となる。此の式から A 点 ($y=a$) 及 B 点 ($y=b$) に於ける ρ の値を求むれば

$$f_a = \frac{\alpha^2(b^2 - a^2)}{2\alpha}, \quad f_b = \frac{b^2 - a^2}{2\alpha b}$$

となる。AB 間の曲線は略楕円に近似せるものである。今 図-34 に於て (1) を土圧曲線、(2) を楕円とすれば、楕円の A 点及 B 点に於ける曲率半径は夫々

⁽¹⁾ 落戸を垂直方向に沈下せしむる時、砂粒も垂直に移動して平衡状態となるを以て B 点に於ける土圧曲線の方向は垂直であるとする。

$$\rho a' = \frac{r^2}{h}, \quad \rho b' = \frac{h^2}{r}$$

である。Rankineの方法に倣つて若し此の2曲線に於て $\rho a/\rho b = \rho a'/\rho b'$ なる関係があるとすれば

$$\frac{\rho a}{\rho b} = \frac{\alpha^2(b^2 - a^2)}{2a} \times \frac{2\alpha b}{b^2 - a^2} = \frac{\alpha^3 b}{a}$$

$$\frac{\rho a'}{\rho b'} = \frac{r^2}{h} \times \frac{r}{h^2} = \frac{r^3}{h^3}$$

$$\therefore \frac{\alpha^3 b}{a} = \frac{r^3}{h^3} = \frac{r^3}{(b-a)^3}$$

$$r = \alpha(b-a) \sqrt[3]{\frac{b}{a}} = \alpha h \sqrt[3]{\frac{t}{t-h}}, \quad h^3 + \left(\frac{r}{\alpha}\right)^3 \frac{1}{t} h - \left(\frac{r}{\alpha}\right)^3 = 0$$

$$\therefore h = \frac{r}{\alpha} \left\{ \sqrt[3]{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{1}{3t} \frac{r}{\alpha}\right)^3}} + \sqrt[3]{\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{1}{3t} \frac{r}{\alpha}\right)^3}} \right\} = \frac{r}{\alpha} \lambda$$

之より土圧曲線を略楕円と考へて垂直土圧を求むれば

$$P_1 = \frac{1}{2} w \pi r h = \frac{w \pi r^2}{2\alpha} \lambda, \quad P_2 = \frac{2}{3} w \pi r^2 h = \frac{2 w \pi r^3}{3\alpha} \lambda$$

を得る。但し P_1 は隧道単位長の土圧量、 P_2 は半径 r の円板上の土圧量を示す。若し砂層の深さ t が r に比

図-34.

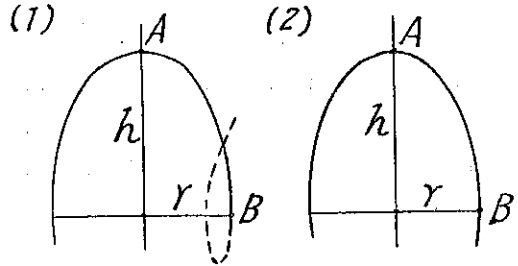
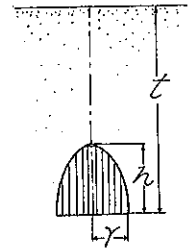
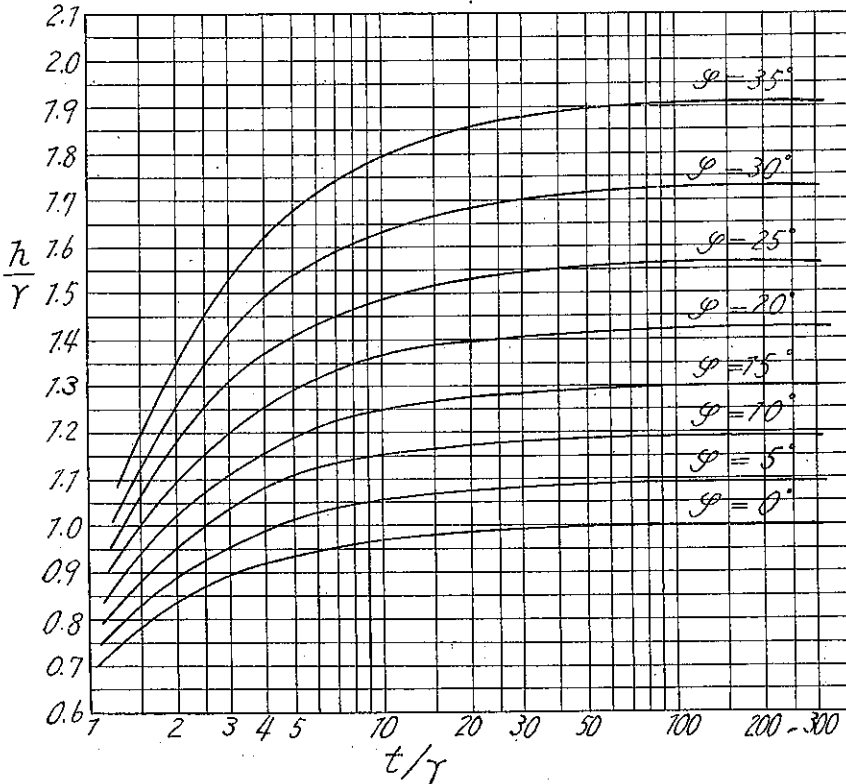


図-35. 土圧影響線を求める図表 ($h/r \sim t/r$ 曲線)



- r: 落戸半径
- t: 砂高
- h: 土圧影響線
- φ: 砂の内部摩擦角

して極めて大となる時は、 $\lambda=1$ となり、 $h=r/\alpha$ となる。従つて

$$P_1 = \frac{w\pi r^2}{2\alpha}, \quad P_2 = \frac{2w\pi r^2}{3\alpha}$$

となり垂直土圧は砂層の深さに關係なく一定値を取ることとなる。今砂高 t 及落戸の半径 r に種々の値を入れて土圧影響線の高 h を求め、 (t/r) と (h/r) との關係を図示すれば 図-35 の如くなる。同図は内部摩擦角 $\varphi=0^\circ\sim 35^\circ$ 間の種々の場合に對する値を表はす。此の關係を用ひて $\varphi=20^\circ$ の場合に就て落戸に及ぼす垂直土圧を算出すれば 表-8 の如くなる。本表の計算に於て砂の單位重量 w の價は元の 1.4 gr/cm^3 を用ひた。實際はアーチ以

表-8.

落戸径 $2r$	計算値 ($\varphi=20^\circ$)				實測値 (比較)			
	$h=25$	50	75	100	25	50	75	100
4	32	34	34	34	16			
6	106	111	112	113	60			
8	155	163	166	168	190			
10	495	498	509	515	360			
12	783	850	874	888	661			
14	1 193	1 329	1 359	1 399	1 098			
16	1 734	1 960	2 030	2 073	1 497			
18	2 400	2 758	2 874	2 922	2 023			
20	3 207	3 720	3 900	3 991	2 917			
45	—	35 450	39 220	41 800	—	32 300	—	30 800
60	—	73 870	86 500	93 100	—	76 800	68 300	66 800

下の弛緩せる状態より考へて w の値は之より 10% 程度減少してゐる。従つて本表に於ける土圧は尙ほ之より 10% 程度を減じたる値となり、計算値と實測値は略一致した結果となるのである。

然し、砂高が大となるに従つて同一内部摩擦角の値を適用すれば計算値は實測値より漸次稍大となる。之に就ては次の如く解釋することが出来る。落戸の沈下によつて上層部分ほど移動沈下する面積を擴大するに對し下層部分は局部的沈下なるを以て前述の如く側方の摩擦抵抗を受けて沈下を阻ばれる傾向あり。砂高大なるに従ひ水平圧力を増大し、側方の抵抗態大となり砂高の弛緩作用を一層激成するに至り、其の結果は弛緩部分の内部摩擦角の値を或程度まで更に低減せしむることが推察される。従つて砂高大なるに従ひ内部摩擦角の値小なるものを用ひて計算すれば土圧量は殆ど増加せず實驗値に近似することになるのである。

又 図-6 及 7 に就て見るに落戸の沈下量僅々 $1\sim 1.5 \text{ mm}$ にして垂直土圧は最小限界値に達して居る。是は 図-31 に依つて明かなる如く僅少なる落戸の沈下により砂層内一部は既に其の内部摩擦角を 20° 以下にも低減せしめる程度に弛緩することによつて見ても著者の算式適用の妥當性を認むるものである。

(1) 此の場合砂層の弛緩により砂の單位重量 w は減少するを以て次式に示す値を探るべきである。

$$w = \frac{1-v}{1-v_0} w_0 = 2.66(1-v)$$

但し v は土圧影響線以下の砂の平均空隙比、 w は其の時の單位重量、 v_0 及 w_0 は元の状態の値で夫々 47.3%、 1.4 gr/cm^3 である (圖-30 参照)。

第 8 章 結 論

乾燥砂に關する叙上の實驗並に理論的考察の結果より綜合するに、隧道掘鑿に際し隧道頂部の垂直圧力は頂部の僅少なる沈下により其の値を著しく低減して平衡状態となり、一旦平衡状態に達すれば、頂部の沈下が増大し之に伴つて地山の崩壊範圍が漸次擴大するも土圧影響線は殆んど一定で変化がない。之は隧道上部の砂層が一定形状のアーチを形成し、アーチ以下の砂の重量が地圧として隧道に作用するものと推定されるのである。著者は此のアーチを砂層の平衡條件より誘導さるべき土圧曲線と爲し、更に其の際アーチ附近の砂層は元の状態より著しく弛緩し従つて内部摩擦角の値を減少してゐる事實を觀測し、其の結果計算値と實測値とを比較的よく一致せしむることを得、土圧影響線は略円形に近きことを知り得たのである。本實驗に於ては主として三元的に取扱はれたが、隧道の場合の如く之を二元的に取扱ふ時も亦同一結果に到達したのである。

尤も此の結果を實際隧道工事の設計に適用する場合に於て、兩端の支柱が充分堅固でない時支保工頂部の垂直土圧算定に其の徑間を如何に定むべきかは今後に残された問題である。著者は砂層の垂直土圧をアーチ説を以て論じたるも従來のアーチ説の謂ふ所と異なり、砂層の崩壊範圍の變化は土圧量には直接關係なきことを明かにし、弛緩層内に土圧曲線を求めたもので、前記 Meem 氏の推定せるアーチの形状 (圖-19 (3)) に近きものである。

終りに本實驗に盡力せられたる松田昌治君、島田義章君及田中健彦君の 3 君の勞を感謝す。