

論 說 報 告

第 22 卷 第 6,7 號 昭和 11 年 7 月

乾燥砂並に濕潤砂の土質力学的研究

會 員 工 学 博 士 小 野 諒 兄*

會 員 工 学 士 眞 井 耕 象**

Soil Mechanics Research on Dry and Wet Sand

By Ryôkei Ono, Dr. Eng., Member.

Kôzô Manai, C. E., Member.

要 旨

本文は土壤内部の機構を知る目的を以て、剪断試験により乾燥砂並に濕潤砂の内部摩擦角及び凝集力を測定して其の特異性を検討し、併せて砂質土壤の構成成因をなす諸種の環境条件による影響を考察したものである。

目 次

	頁
緒 論	1
第 1 章 試料及試験装置	2
第 2 章 乾燥砂の剪断試験	3
第 1 節 空隙比と内部摩擦角	4
第 2 節 填充法の影響	6
第 3 節 粒径及粒粗率の影響	6
第 3 章 濕潤砂の剪断試験	6
第 1 節 含水量の影響	8
1. 凝集力, 2. 内部摩擦角, 3. 含水膨脹率	
第 2 節 土壤の構成条件による影響	12
1. 搗固め効果, 2. 加圧効果, 3. 時間効果, 4. 吸水効果, 5. 脱水効果, 6. 結果	
結 論	15

緒 論

土壤の安定を決定するに就ては今の處内部摩擦角と凝集力に立脚するより外はない。之等は剪断抵抗の測定によりて與へられるが、其の真相に就ては多種多様にして之を實地建造物に適用する上に於て困難なるのみならず全く相違する場合に陥る事が尠くない。既に發表せられたる實驗報告に徴すも組成密度含水量を等しくする一見同質の土壤と思はれる材料にありても全く意外の隔りを示すことが尠くない。之畢竟するに如上の因子の外に其地質的成因並に過程其の他の複雑なる環境条件に支配される結果に外ならない。

地下建造物に於て殊に地下鉄道の如き構造物其の物にありては精密に計算せらるゝも、之に働く外力に對しては往々相違せる假定の下に置かるゝことが多い、従つて巨費を投じて出來上りたる建造物も強度の上より極めて不確實たるを免れない。著者は土壤内部の機構より内部摩擦角及凝集力の本体を明かにして稍確實にして實際に適

* 北海道帝國大学教授

** 同上 助教授

合せる構造物たらしむる目的の下に 實驗に着手したるものにして、本文は 其の第一次結果の發表である。本稿に於て取扱へる範圍は

- 第 1, 乾燥砂に就て粒大及び粒粗率別に,種々異なる搗固め法により内部の組織を変へて剪断抵抗を測定し,
- 第 2, 濕潤砂に就きて含水比を変へ含水膨脹を觀測し種々異なる組織に於て剪断抵抗を測定し,更に普通土壌構成の成因たる受圧影響,受圧時間及吸水脱水による影響に就いて検討したものである。

前記試驗は地下鉄道敷設箇所の地下數米突に於ける調査を目的とせしものなれば従つて試驗荷重も其の範圍に止めたのである。

第 1 章 試料及試験装置

試験に用ひられた砂は川砂(豐平川産)で,粒大により No. 8~16(8 番篩通り 16 番篩止り), No. 16~30, No. 30~50, No. 50~100 及 No. 100 通りの 5 種に篩分け之を A1~A5 となし,必要に応じて是等を任意一定比に配合し之を B1~B9 とした。各篩分砂及配合砂の比重,空隙比,含水比及吸水比を示せば表-1~2 の如し。但し含水比は試験室内に放置せる場合の値にして天候により多少の変移がある。又吸水比は96時間水中に浸漬した場合の値を表はす。図-1 は篩分砂の比重,含水比及吸水比曲線を示し 図-2 は配合砂の篩分析曲線を示す。

配合砂中 B2 は自然配合のもの, B4 は最大密度を得る様に配合したもの(但し後になつて之より更に密度大なる配合砂 B6 及 B7 を得た)である。B1~B5 は同一間隔の

図-1. 篩分砂の比重,吸水比及含水比曲線

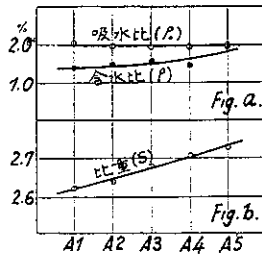
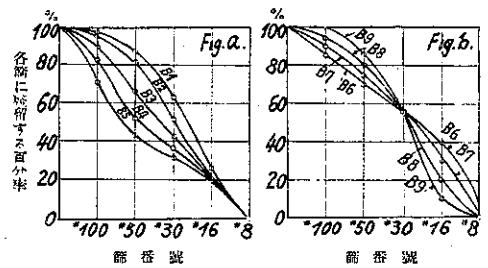


図-2. 各種配合砂の篩分析曲線



配合したものの(但し後になつて之より更に密度大なる配合砂 B6 及 B7 を得た)である。B1~B5 は同一間隔の

表-1. 篩分砂の比重及吸水比

種別	比重	平均室内含水比	吸水比
番号	(S)	(p)	(ρ _a)
A1	2.62	1.37	2.02
A2	2.64	1.46	1.96
A3	2.68	1.55	1.94
A4	2.71	1.45	1.94
A5	2.73	1.99	2.04

異なる粒粗率を有し, B6~B9 は同一粒粗率を有せしめ且つ何れも是等の配合比を其の篩分析曲線が自然配合砂(B2)の曲線に成可く順応せしめる様にした。尚濕

表-2. 配合砂の組成

番号	組成					粒粗率	比重	含水比
	A1	A2	A3	A4	A5			
B1	26.0	37.0	26.0	9.0	2.0	2.76	2.65	1.47
B2	19.0	31.8	31.0	15.0	3.2	2.48	2.66	1.49
B3	20.0	23.0	23.0	24.0	10.0	2.19	2.67	1.51
B4	20.6	16.5	14.9	31.4	16.6	1.93	2.68	1.54
B5	18.0	14.0	11.0	29.0	28.0	1.65	2.69	1.60
B6	40.0	15.0	15.0	15.0	15.0	2.50	2.66	1.52
B7	30.0	25.0	20.0	15.0	10.0	2.50	2.66	1.50
B8	20.0	35.0	25.0	15.0	5.0	2.50	2.66	1.49
B9	10.0	45.0	30.0	15.0	0	2.50	2.66	1.48

潤砂の試験には特に粘土分の影響から極力回避するため 試験毎に充分洗滌乾燥せしめ一旦篩分けてから所定の割合に配合する様にした。

試験装置は一面剪断法を用ひ剪断機上下の箱の大いさは 20×15cm 高さ各 10cm である。

図-3 は剪断試験装置を图示す。従つて剪断面積は 300 cm^2 、垂直圧力 N は $P+S$ (但し P は加載荷重、 S は砂の自重) で $P=0, 2.7$ 及び 5.7 kg の三つの場合を採る。此の垂直圧力は低圧に失する憾はあるが、凝集力比較的軽微な本試料に對しては如上の圧力圏内に於ても尙よく剪断抵抗を内部摩擦力と凝集力とに分析することを得るのみならず、却て高圧を用ふる時は特に弛く詰めた試料の試験に對しては其の内部組織に変化を與へて本來の数値測定を不可能ならしめるのである。

上下箱の重ね目は 1 mm 程度の薄い挟み板を使用して僅かに間隙を與へ且つ砂粒子の侵入及遊離水の漏出を防止するため上箱の内側下端に極めて薄いゴム板を貼り其の下端を僅かに下箱の内側に垂下せしめる様にした。

剪断荷重は水の重量を利用し滑車を経て上箱に連続的に且つ徐々に水平力を與へ其の水平移動量は Ames' dial gauge に表示せしめた。滑車の抵抗係数 μ は次の如くである。

$\mu=0.115$, 従つて 図-3 より

$$F = \frac{W}{1+\mu} = 0.897 W$$

含水量特に大なる (過飽和状態) の濕潤砂の試験には剪断機重ね目の水密を完全ならしむるため砲金製鑄物を用ひ、 1 cm の摺合せとしたが、重ね目の抵抗力が比較的大且つ相當廣範圍に変化する缺點あり。之がため剪断抵抗小なる場合の本試験には影響する所大きく測定に却つて困難した。

尙ほ輕詰の濕潤砂の剪断試験には特に注意を要するが、之に就ては第 3 章に詳述する。

第 2 章 乾燥砂の剪断試験

乾燥砂の剪断試験に就ては從來屢行はれて居る。茲には主として乾燥砂の剪断抵抗に關する要素として

1. 砂の密度と内部摩擦角との關係
2. 填充法と内部摩擦角との關係
3. 粒大及粒粗率と内部摩擦角との關係

等を検討したものである。

試料は 3 回に分けて填充し各層毎に所定の搗固めをなした。即ち搗固めには 3 様の方法を適用し、I 法は搗棒として径 32 mm 重量 $1 \text{ kg}(+0.07)$ の平端面を有する丸鉄管を、II 法は径 16 mm 重量 $1 \text{ kg}(-0.03)$ の尖端を有する丸鋼 (内務省土木試験所規定のもの) を使用し、III 法は I 法と同一の搗棒に砂面上の敷板を併用し (図-4) 何れも搗棒を砂面上 $2\sim 3 \text{ cm}$ の高さより自重で落下せしめ打撃力を略同一にした。是等の中 I 法は砂中の穿入度淺く、II 法は穿入度深く、各々砂の内部組織を成るべく變じつゝ漸次密度を高上せしめ、III 法は搗棒と敷板との衝撃により震動を與へて砂を揺り込む様に作用せしめ内部組織を成るべく擾亂せずして漸次密度を大ならしむる様にした。

搗固めは總べて 3 層にわけて填充し、各層を 5 回宛搗固めのもの、20 回宛搗固めのもの、50 回宛搗固めのもの及 100 回宛搗固めのものゝ 4 種となし、III 法の場合は搗固効果が著しいので更に各層を 2 回宛搗固めのものを追加して試験に供した。剪断試験は各場合に就き數回行ひ平均値に對して内部摩擦角 (θ) 及び空隙比 (v) を算

図-3. 剪断試験装置

G は Ames' dial gauge, F は滑車荷重,
P は加載荷重, S は砂の自重,
 $P+S=N$ (垂直圧力)

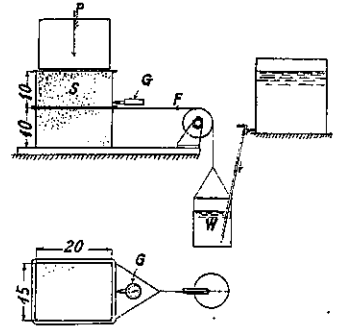


図-4. 3種の搗固法

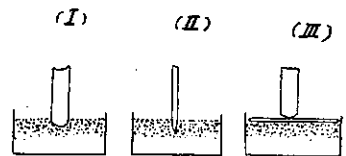


図-5(a). 搗固法 (I) に依る各種砂の $v-\theta$ (空隙比率-内部摩擦角) 曲線

図中 A は 篩分砂, B は配合砂

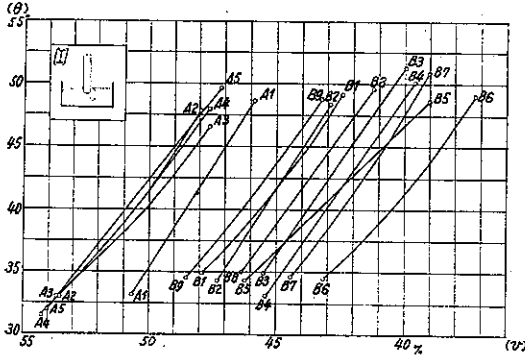
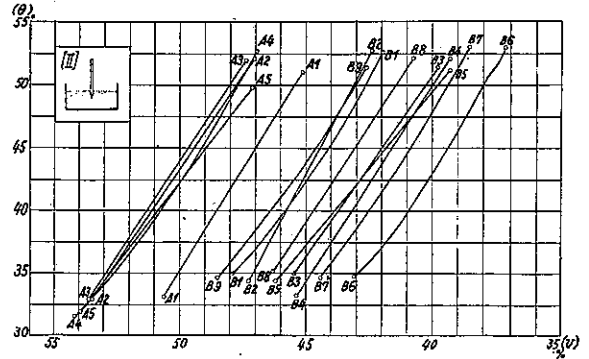


図-5(b). 搗固法 (II) に依る各種砂の $v-\theta$ 曲線

図中 A は 篩分砂, B は配合砂



定した。実験の結果を图示すれば 図-5(a), 5(b) 及 5(c) の如し, 図に就て考察するに

第 1 節 空隙比と内部摩擦角

各試料に對し一般通則として空隙比の減少 (即ち密度の増大) と共に内部摩擦角の値は略抛物線的に増大する。其の増大する割合は搗固法 II に依る場合最も大で, I の場合之に亞ぎ III の場合は著しく小である。即ち同一砂に於ても填充法により内部組織を異にする同一空隙比に對して内部摩擦角は等しくない。従つて單に砂の空隙比のみを以て其の内部摩擦角の値を判定することは困難である。

図-5(c). 搗固法 (III) に依る各種砂の $v-\theta$ 曲線

図中 A は 篩分砂, B は配合砂

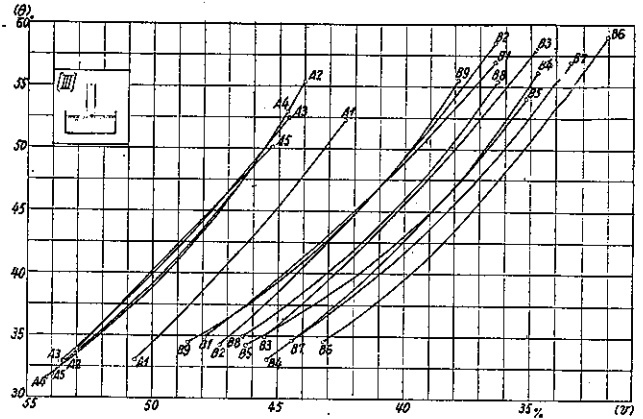


図-6. 各種砂の $v-\theta$ 曲線 (各曲線の始點に集めたる場合)

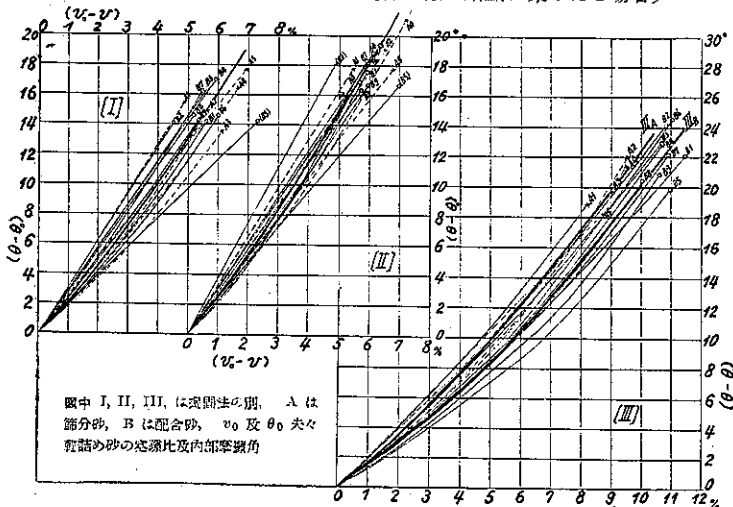
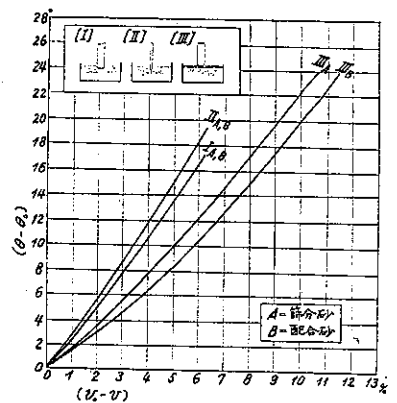


図-7. 乾燥砂の平均 $v-\theta$ 曲線

図中 v_0 及 θ_0 は夫々標記の砂の空隙比及内部摩擦角



而して茲に着目せらるゝことは何れの試料にありても I, II 及 III の各填充法を通じ各填充法毎に其の $\theta \sim v$ 曲線は單に其の始點を異にするのみで一様に略平行してゐることである。

換言すれば同一填充法に於ては空隙比の減少率に對する内部摩擦角の増大率は試料の如何に拘らず常に略一定してゐるのである。圖-6 及 7 は各試料の試験値に關係なく、各 $\theta \sim v$ 曲線の始點を同一原點に移して各曲線の相對的変移状態を示したものである。

是等の關係を數式に纏むれば

$$\theta = \theta_0 + a(v_0 - v)^b$$

となり拋物曲線で表はされる。¹⁾

茲に a, b は定數で平均値として右表の値が得られる。

又式中の θ_0 及 v_0 は最も軽く詰めた場合の内
部摩擦角及空隙比の値で $\theta \sim v$ 曲線の始點に該
當する。

v_0 の値は砂粒が揃つてゐるとき大となり其の粒の大きさには餘り關係
しない。之に對して荒目のもの多く之に細目のものを配合した場合に小
さい値を取る。篩分砂で平均 53.2%, 配合砂で平均 46.1% である。然
るに θ_0 の値は必ずしも v_0 の値に影響せられず大体相似の値を有し、篩
分砂で平均 32.5, 配合砂で平均 34.6 である。表-3 及び 圖-8 は v_0
及 θ_0 の値を示す。

搗固法	a	b
I 法	2.29	1.11
II 法	2.06	1.14
III 法	1.07	1.27

圖-8. θ_0 及 v_0 曲線
(φ_0 は安息角)

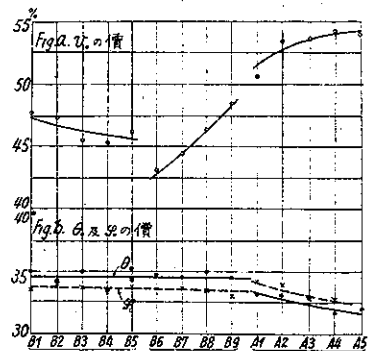


表-3 各種乾燥砂 (輕詰めの場合の θ_0, φ_0 及 v_0 の値)

No.	内部摩擦角 θ_0	安息角 φ_0			空隙比 v_0	No.	内部摩擦角 θ_0	安息角 φ_0			空隙比 v_0
		最小	最大	平均				最小	最大	平均	
A1	33.1	32.6	36.0	34.3	50.6	B1	34.9	31.6	35.5	33.6	47.8
A2	32.9	32.3	35.5	33.9	53.6	B2	34.3	32.1	35.8	34.0	47.3
A3	32.9	31.5	34.3	32.9	53.6	B3	34.9	32.1	35.2	33.7	45.5
A4	31.5	31.5	33.9	32.7	54.2	B4	33.4	32.3	34.6	33.5	45.4
A5	31.9				53.9	B5	34.3	31.1	36.5	33.8	46.2
平均 A	32.5			33.5	53.2	B6	34.6	32.6	36.7	34.7	48.1
						B7	34.6	31.3	35.8	33.6	44.4
						B8	35.0	31.9	35.1	33.5	46.3
						B9	34.5	31.7	34.2	33.0	48.5
						平均 B	34.6			33.7	46.1

尙ほ同一砂に就き、上方より軽く撤出したる場合と下方より靜かに切崩したる場合の自然傾斜面より安息角 φ_0 を

¹⁾ 之に關しては九大彙報第 7 卷 5 號所載中村氏の報告あり。同報告によれば乾燥砂の内部摩擦角は空隙比と共に直線的に変化してゐる。但し此の場合密度の変化が如何なる方法によるものかは明示されてゐない。本試験の結果は大體直線に近い拋物線形で搗固め方法によりて其の形を異にするのである。

測定したが、剪断試験により内部摩擦角として測定したものと大体一致した値を示す。表-3 に示すものである。

第 2 節 填充法の影響

搗固法は内部摩擦角及密度に對して大なる影響を有つてゐる。而して搗固効果は III 法による場合最も顯著に表はれ II 法, I 法之に亞ぐ。即ち震動を與へつゝ揺込み様に填充すれば砂は最も緊り易く従つて密度及内部摩擦角を最大にすることが出来る。

今各層毎の搗固回数 n に對する各試料の空隙比の減率即ち密度の増率 ($dv = \frac{v-v_0}{v} \%$) 及内部摩擦角の増率 ($d\theta = \frac{\theta-\theta_0}{\theta_0} \%$) の關係を图示すれば 図-9 の如くなり次式を以て表はされる。

$$dv = a + b \log n \quad \text{密度増率曲線式}$$

$$d\theta = a' + b' \log n \quad \text{内部摩擦角増率曲線式}$$

定數 a, b の平均値を決定すれば次の如し。

係 数		IA	IIA	IIIA	IB	IIB	IIIB
dv	a	18.4	6.3	2.93	2.03	1.26	5.79
	b	12.5	22.9	7.04	4.89	5.76	8.97
$d\theta$	a'	14.5	11.5	12.2	(IA)	(IIA)	13.4
	b'	16.7	23.1	25.2			26.1

$n \sim dv$ 曲線及 $n \sim d\theta$ 曲線は何れも對數曲線で表はされるが兩者を比較すれば n の同値に對して $d\theta$ は dv の約 3~4 倍に達する。

尙ほ图中曲線 IIA 及 IIB 上の A 點は内務省土木試験所規定の空隙測定法による値を示す。

第 3 節 粒径及粒粗率の影響

斯の如く砂の密度は内部摩擦角を決定する絶對的のものでない。其處に搗固め如何なる方法に據りたるか、換言すれば内部機構に就て知らなければならない。同一搗固法の場合、密度の増率に對して内部摩擦角の増率が略一定である。而して斯る現象は大体砂の粒大及粒粗率とは無關係で此の關係は 図-5 及 図-6 からも看取される。

第 3 章 濕潤砂の剪断試験

乾燥砂に水を混和すれば種々の新たなる物理的現象を生ずる。其中最も顯著なるものは含水膨脹と凝集力とである。之は何れも水の表面張力に基因するもので砂粒が小となるほど其の作用は大となる。

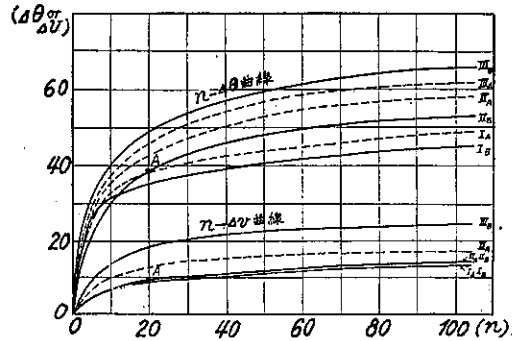
此の水分子引力による凝集力は通常「見掛けの凝集力」と稱せられるもので土質微粒子相互の分子引力に基く「眞の凝集力」と區別されてゐる。一般の土壤が示す凝集力は兩者の綜合作用によつて種々の條件により複雑且廣範圍に変化する。

茲には粘土粒子に比しては粒径比較的大なる砂粒子を試料として出来る丈粘土分を排除しつゝ、其の濕潤状態によつて起生する凝集力即ち見掛けの凝集力を測定したものである。

試料は一定水量を細滴化して加へ均質に切返へしたる後剪断試験に供した。試料填充には成可く弛くした場合と充分緊密にした場合とを採る。前者の場合には輕詰めしたる試料に一旦最大垂直圧力 ($N = P + S = 5.7 \text{ kg} + S$) を加

図-9. $n \sim d\theta$ 曲線及 $n \sim dv$ 曲線

图中 n は搗固回数、 $d\theta$ 及 dv は夫々内部摩擦角及密度の増率 I, II, III は夫々搗固法の別、A は篩分砂、B は配合砂



重したるものであり、後者の場合は試料を2回に分ちて填充し末端径28mmの搦棒を以つて50回づゝ強く搦固めたものである。

濕潤砂を輕詰めした場合の剪断試験は乾燥砂の場合と趣を異にし、特に次の點に留意しなければならぬ。

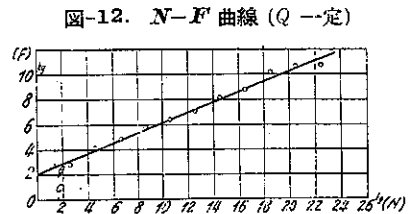
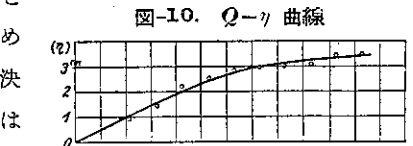
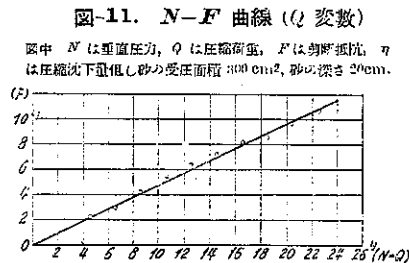
第一に切返へされた濕潤砂を輕詰めしたものは充分膨みを生じ極めて壓縮し易く、従つて剪断試験において垂直圧力 N を加ふれば試料を壓縮して其の内部組織を一変せしむることになる。一方加重壓縮されたものは荷重を取去つた後も加重中の組織を維持するから輕詰め試料の剪断試験には常に最大垂直圧力を一旦加重して一定組織にしたるものに就て垂直圧力 N の値を變じつゝ剪断試験を行ふと同時に最大垂直圧力の値も成る可く低小なるものを採用すべきである。

第二に留意すべき點は輕詰め試料は壓縮容易なるため剪断試験の際剪断力の傳播が均等でなく、後方より局部的に壓縮されつゝ剪断される如き経過をとり、剪断面全体が同時に且つ一様に作用することが困難である。従つて剪断抵抗の値は搦固状態の場合の如き明瞭を欠く場合が多い。尙ほ此の缺點を補ふ目的から剪断容器の上箱の下方に縱横の仕切りを取付けて剪断力の傳達を均齊ならしむる様に試みたが、左程の効果を認めざるのみならず、却つて垂直圧力の傳播に支障となるので此の方法は採用しないことにした。

次に試料 B2, $\rho=8\%$ を輕詰めしたものに就て壓縮荷重 Q (試料を壓縮するため剪断試験前に加载せらるゝ重量)と垂直圧力 N (剪断試験中に加载せらるゝ重量)とを區別して試験した結果を記述しやう。圖-11は壓縮荷重 Q を種々に變へつゝ Q を以て垂直圧力 N として剪断試験をなす時の $N-F$ 曲線(F は剪断抵抗)である。圖によれば垂直圧力 N (即ち此の場合壓縮荷重 Q)に對して剪断抵抗 F は直線的に変化するが、此の場合試料は常に其の組織を變化せしめられてゐて、任意圧力をうけた状態に於ける砂の凝集力 c の値を求むることは出来ない。尙 圖-10は試料の壓縮沈下量を η として $Q-\eta$ 曲線を示す。

圖-11に對して圖-12は壓縮荷重 Q を一定(20kg+砂の自重 S)とし、従つて試料の組織を常に一定にしたるものに就き $N-F$ 曲線を求めたものである。之に依れば與へられたる Q に對して c 及び θ の値が決定され且つ實驗範圍内では垂直圧力 N の値に關せず c 及び θ の値は略一定なることが認められる。

次に壓縮荷重 Q の種々の値に對して如上の方法に倣つて c 及び θ を求めれば圖-13の如し。 c の値を查證するため $Q=S$, $S+5$ kg及 $S+20$ kgの場合に



における輕詰め濕潤砂の最大直立高 h (cm)を實驗的に求めれば(圖-14), 夫々6, 11及び20cmを得。

然るに土壤斜面の安定條件を其の凝集力及内部摩擦角より求めれば

$$c_0 = \frac{1 - \cos(\varphi - \theta)}{4 \cos \theta} w l$$

の關係が得られる。但し c_0 =最大凝集力, φ =斜面の傾斜角, l =斜面の長さ, w =土壤の單位容積重量。従つて直

立面に対しては上式に $\varphi=90^\circ$, $l=h$ と置けば

$$c_0 = \frac{1 - \sin \theta}{4 \cos \theta} w h$$

となる。今 $\theta=20^\circ$, $w=0.0011 \text{ kg/cm}^3$ とすれば

$$c_0 = 0.00019h$$

を得。之に先に実験より求めた直立高 h の値を代入して c_0 を算出すれば、夫々 0.0011, 0.0021, 0.0038 kg/cm^2 となる。此の値を剪断試験より得たる 図-13 に示す c の値に比すれば稍々近似し幾分小さい。図に於ける (I)

図-13. 軽詰濕潤砂の加圧効果

四中 (I) は剪断試験による値, (II) は直立高による値。
 Q は圧縮荷重

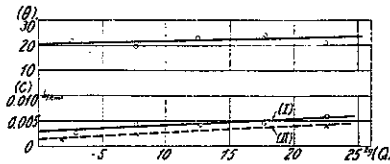
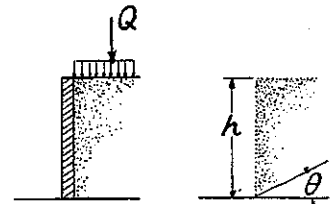


図-14.



は剪断試験による値, (II) は直立高さより求めた c の値である。(II) の値が (I) の値より小であるのは h の測定困難なるに依るものと考えられる。

斯くして本剪断試験には前記 3 様の垂直圧力 ($N=P+S$; $P=0, 2.7, 5.7 \text{ kg}$) を用ひ、其の剪断抵抗より内部摩擦角及凝集力を決定し同時に重量より含水膨脹率及空隙比を算出した。

尚ほ含水膨脹率及空隙比の算式は次の如く誘導される。剪断機上下箱の容積を V_0 とし、之に填充したる乾燥砂及濕潤砂の重量を W_0 及 W とする。今乾燥砂 W_0 に水量 $\omega = W_0 \rho$ (ρ は含水比²⁾) を混和した場合の膨脹せる總容積を V とすれば

$$\frac{V}{W_0 + \omega} = \frac{V_0}{W} \quad \text{故に} \quad V = \frac{W_0(1 + \rho)}{W} V_0$$

$$\text{従つて含水膨脹率 } m(\%) = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100 = \left[\frac{W_0(1 + \rho)}{W} - 1 \right] \times 100$$

砂の比重を S とすれば

$$\text{空隙比 } v(\%) = \left[1 - \frac{W}{S(1 + \rho)V_0} \right] \times 100$$

試験後は時々試料につき其の粘土量及粒度を検定したが粘土量は 0.7~0.5% 以下で、粒度の変化も 1% 以下である。

第 1 節 含水量の影響 (濕潤砂の凝集力, 内部摩擦角及び含水膨脹率)

剪断試験は初め A1, A3 及 A4 の 3 種の篩分砂に就き、次に B2 (自然配合砂) 及び B4 (最密配合砂) の 2 種に就て行つた。実験結果を綜合すれば凝集力 ($c \text{ kg/cm}^2$), 内部摩擦角 (θ) 及び含水膨脹率 ($m\%$) は表-4 及び 図-15~16 の如し。

(1) 凝集力

凝集力は濕潤砂を搗固めた場合に大きいが其の値は本実験の範囲内に於ては最大値でも一般土壤が有つ夫れに比して極めて微小なる量に過ぎない。然し各砂粒大毎に含水比 ρ に応じて大体一定の相似曲線を描いて増減する。

²⁾ 茲に示す含水比 ρ は実験室内に放置せる乾燥砂に対する重量比で表はした見掛上の含水比であつて従つて含水膨脹及空隙比も見掛上の値である。眞の値は ρ の代りに $\rho' = \rho + 1.5\%$ とすれば可い。但し 1.5% は室内含水比で表-2 中に示されるものである。

表-4. 濕潤砂の剪断試験 (I は輕詰めの場合, II は搗固めの場合)

試料 No.	單位容積重量 w % g/cm ³		空隙比 V _v %		含水膨脹率 m %		内部摩擦角 θ 度		凝集力 C %		試料 No.	單位容積重量 w % g/cm ³		空隙比 V _v %		含水膨脹率 m %		内部摩擦角 θ 度		凝集力 C %	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II		I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
a. 篩分砂 *3~*6 (A1)											c. 篩分砂 *50~*100										
1	0.001319	0.001424	48.7	43.3	0	0	33.1	48.6	0	0	0	0.001240	0.001424	52.2	47.4	0	0	31.5	46.0	0	0
2	0.001284	0.001499	52.0	43.9	4.7	0.3	31.0	46.2	0.0021	0.0018	2	0.001210	0.001409	56.0	47.5	4.1	0.3	27.7	44.0	0.0028	0.0015
4	0.001170	0.001510	56.0	44.3	16.4	1.6	—	42.5	—	0.0029	4	0.001029	0.001423	61.3	49.5	18.4	4.1	—	44.5	—	0.0020
6	0.001166	0.001530	58.0	45.0	19.0	2.0	23.7	44.1	0.0034	0.0045	6	0.000994	0.001419	65.3	52.5	32.2	6.4	22.0	43.4	0.0039	0.0020
8	0.001142	0.001508	57.7	46.7	24.7	6.5	—	45.2	—	0.0051	8	0.000877	0.001430	70.0	50.0	52.7	6.0	—	46.2	—	0.0113
10	0.001164	0.001537	57.7	46.6	24.5	6.4	22.6	45.0	0.0033	0.0030	10	0.000860	0.001450	70.9	51.3	57.1	0.1	22.3	42.9	0.0044	0.0140
12	0.001184	0.001553	57.6	47.0	24.4	6.8	—	43.9	—	0.0037	12	0.000810	0.001404	71.2	51.1	59.0	2.3	—	42.5	—	0.0167
14	0.001214	0.001577	57.5	47.4	23.0	7.2	23.1	45.2	0.0033	0.0031	14	0.000804	0.001539	71.4	52.0	60.0	5.2	20.4	42.3	0.0052	0.0164
16	0.001245	0.001605	59.1	46.1	22.7	2.2	—	41.8	—	0.0051	16	0.000790	0.001578	71.4	47.7	59.0	4.4	—	44.5	—	0.0163
18	0.001302	0.001656	57.0	47.3	—	—	23.5	—	0.0030	—	18	0.000795	0.001577	71.4	50.6	59.7	6.5	20.4	45.6	0.0064	0.0151
20	0.001333	0.001677	57.5	46.0	13.0	6.1	—	44.7	—	0.0029	20	0.000735	0.001602	71.3	50.6	59.2	2.2	—	45.0	—	0.0160
25	0.001415	—	56.8	—	16.5	—	—	—	—	—	22	0.000747	0.001627	71.4	50.7	59.2	7.1	18.7	46.0	0.0065	0.0151
b. 篩分砂 *30~*50 (A3)											d. 炭素配合砂 (B4)										
0	0.001252	0.001421	53.3	47.0	0	0	32.9	47.7	0	0	24	0.000992	0.001620	70.5	49.6	52.2	4.7	—	46.4	—	0.0160
2	0.001217	0.001433	55.5	47.5	4.9	1.2	22.5	43.7	0.0023	0.0018	26	0.000923	0.001722	70.0	49.5	52.0	4.2	18.2	44.2	0.0062	0.0077
4	0.001106	0.001402	60.3	49.4	17.0	5.0	—	43.1	—	0.0036	28	0.000970	0.001753	69.4	49.3	47.2	4.0	—	43.9	—	0.0070
6	0.000979	0.001399	65.6	50.8	33.6	7.6	26.3	42.2	0.0031	0.0031	30	0.001115	0.001911	68.3	47.2	44.6	2.2	20.6	43.1	0.0071	0.0151
8	0.000923	0.001445	67.0	50.0	45.0	6.5	—	47.9	—	0.0127	32	0.001142	—	67.6	—	42.9	—	—	—	—	—
10	0.000919	0.001462	68.0	50.3	50.1	6.8	23.7	41.3	0.0043	0.0127	34	0.001243	—	66.0	—	33.7	—	—	—	—	—
12	0.000923	0.001461	67.2	51.3	51.5	8.9	—	43.1	—	0.0095	36	0.001322	—	67.3	—	33.0	—	—	—	—	—
14	0.000932	0.001494	67.4	51.3	53.2	8.9	24.0	42.0	0.0037	0.0101	e. 自然配合砂 (豊平川産) (B2)										
16	0.000953	0.001526	67.3	51.0	52.2	7.9	—	42.7	—	0.0036	0	0.001420	0.001651	45.1	38.4	0	0	33.0	42.6	0	0
18	0.000956	0.001547	67.8	51.1	54.5	8.4	22.8	42.4	0.0042	0.0101	4	0.001031	0.001572	61.0	42.8	41.9	7.7	21.1	41.4	0.0053	0.0083
20	0.000924	0.001592	67.3	50.5	52.7	7.1	—	44.7	—	0.0069	8	0.001007	0.001634	65.2	43.5	52.0	7.1	21.1	43.7	0.0071	0.0167
22	0.001006	0.001574	67.3	51.3	52.3	9.0	23.5	43.7	0.0047	0.0101	12	0.001009	0.001679	66.3	44.0	64.4	10.1	22.5	44.3	0.0082	0.0077
24	0.001049	0.001653	63.6	50.6	49.1	7.6	21.4	39.3	0.0046	0.0123	16	0.001053	0.001704	64.1	47.6	60.0	7.4	16.6	43.1	0.0084	0.0124
26	0.001114	0.001677	62.4	50.2	43.2	2.6	—	39.3	—	0.0148	20	0.001153	0.001843	64.1	47.6	58.2	7.5	17.7	43.6	0.0085	0.0077
30	0.001159	0.001753	64.9	49.7	40.3	6.2	20.3	42.0	0.0041	0.0041	22	0.001223	0.001907	62.5	41.7	47.7	3.6	17.7	42.0	0.0086	0.0124
35	0.001341	—	62.9	—	26.1	—	—	—	—	—	24	0.001330	—	59.7	—	37.2	—	12.6	—	0.0083	—

X P = 10.27 · 配合・ホ

例へば 図-15 A3 の凝集力曲線に就て観れば、初め ρ を増すと共に c を増し、 $\rho=9\%$ に於て最大値 (之を初めの最大凝集力と假稱す) 0.013 kg/cm^2 に達し、夫より稍減退しつつも略同一の値を維持し、 $\rho=26\%$ 附近に至り一旦再び増大する傾向を示した後急速に低下する。³⁾ 如上の状態は配合砂の場合にも略同様の現象が看取される。尙初めの最大凝集力は 図-15 (c) に示す含水膨脹率曲線図に對比すれば膨脹率の大なるときに起り、最大に達したるときは既に幾分減退する如く見ゆる。

之を粒大別に初めの最大凝集力に就て比較すれば 図-17 に示す如く粒徑大なるものは含水量小なる時に起り、其の値は小であるが、粒徑小なるものほど含水量大なる時に起り、其の値も小である。即ち 図-17 (b) に示す如く各粒徑が示す初めの最大凝集力と其の場合の含水比とは略平行して粒徑小なるに従ひ増大してゐることが推定される。

³⁾ 此の際試料は既に搗固状態に於て飽和状態にあり、之以上の含水量を有する状態の實驗に對しては實驗不能に陥る。何となればかゝる含水量の試料を搗固すれば水を分離するに至り、結局は含水量を低下したる状態となるからである。

図-15. 篩分砂 (A1, A3 及 A4) の凝集力 (c), 内部摩擦角 (θ), 及含水膨脹率 (m) 曲線

图中 (I) は輕詰めの場合, (II) は搦固めの場合

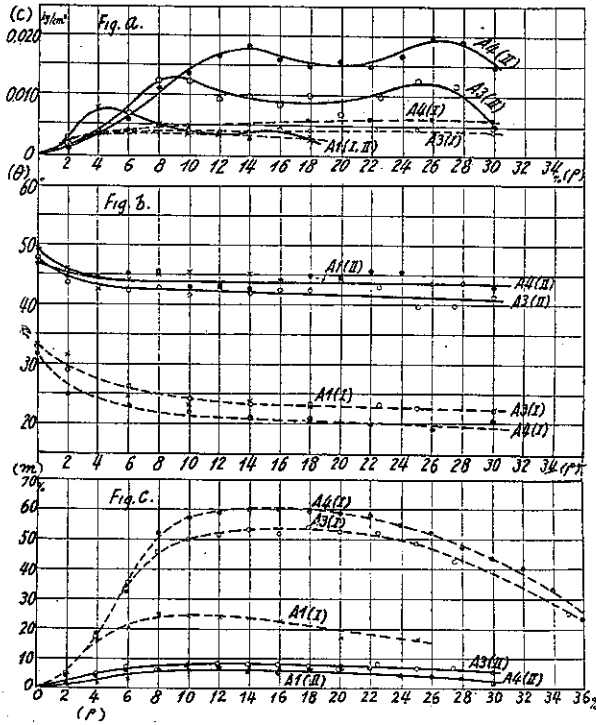


図-16. 配合砂 (B2 及 B4) の凝集力 (c), 内部摩擦角 (θ), 及含水膨脹率 (m) 曲線

图中 (I) は輕詰めの場合, (II) は搦固めの場合

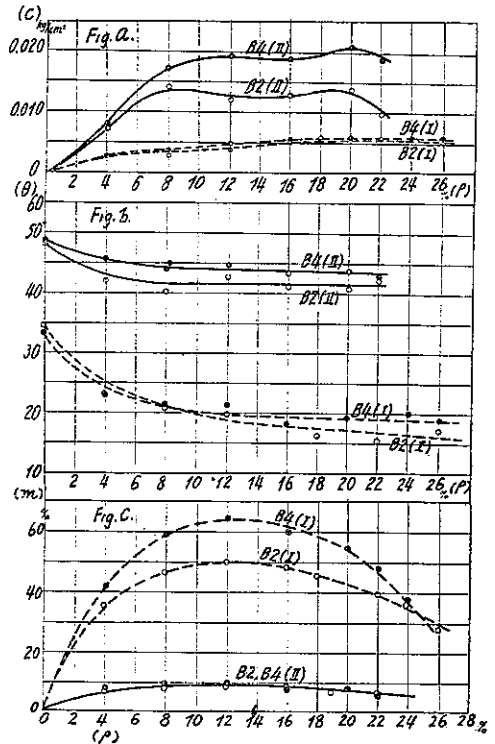


図-17 (a). 砂粒と凝集力との關係

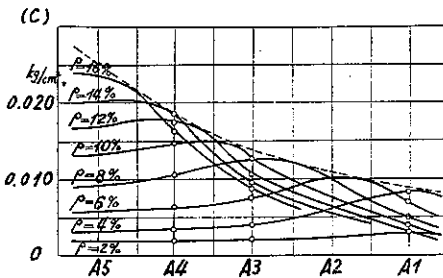
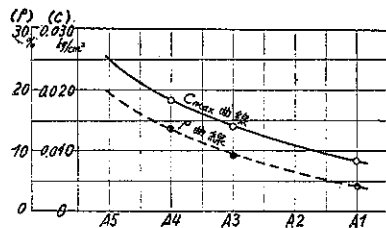


図-17 (b). 砂粒大と初めの最大凝集力及 其の場合の含水比との關係



配合砂に於ては最密配合砂は自然配合砂に比して其の密度大且つ細目のものを多量に含有するを以て凝集力大なるは當然である。大体含水量 $\rho=10\sim 20\%$ の時平均凝集力 $c=0.019 \text{ kg/cm}^2$ である。

輕詰めの場合の凝集力は搦固めの場合に比して低小である。其の値は試験時の加圧状態によつて異なるべきは勿論であるが、本実験における圧縮程度では各試料共含水量の変化に對し影響される所極めて少なく、且つ大体相似の値を示し $0.008\sim 0.006 \text{ kg/cm}^2$ 程度である。図-15 (a) 及 図-16 (a) に點線にて示すものである。

(2) 内部摩擦角

内部摩擦角 θ と含水比 ρ との關係に關しては一般に θ は ρ の増加すると共に略對數曲線的に減少する。今乾燥時の内部摩擦角 θ_0 を原點とし θ と ρ との關係を圖示すれば 図-18 の如くなり、

$$\theta = \theta_0 - a - b \log \rho$$

で表はされる。係数 a, b を定むれば

係数	I _A	I _B	II _A	II _B
a	3.17	5.92	1.20	"
b	4.50	8.91	2.93	"

但し I は軽詰の場合、II は搦固めの場合を示す。

ρ の増加に對する θ の減少する割合は篩分砂及配合砂とも搦固状態に於ては略一致軽詰の状態に於ては比較的大なる減少率を示す。即ち搦固めの場合では $\rho = 10 \sim 30\%$ に於て乾燥時の θ_0 より $5^\circ \sim 7^\circ$ を減ずるに對し、軽詰めの場合では $\rho = 10, 20$ 及 30% に於て篩分砂で夫々 $9.5^\circ, 11^\circ$ 及 12° 、配合砂で夫々 $14^\circ, 16^\circ$ 及 17.5° を減ずる。含水量 30% は一般に水に飽和せる状態である。

(3) 含水膨脹率

含水膨脹率に就いて觀察すれば大体凝集力曲線に相似の傾向を有して、初め ρ と共に増大し飽和點に近づくに従つて著しく低下する。但し凝集力の場合には搦固め状態の時であるに對し此の場合は軽詰め状態の時である。此の現象は勿論粒径及粒粗率小なるほど顯著である。

各試料に對する最大含水膨脹率及其場合の含水比を示せば 圖-19 の如し。弛く詰めた場合には含水膨脹率 m は 60% にも達するものもあるが、之に比して充分搦固めた場合は

圖-20. 篩分砂の單位容積重量 (w kg/cm³) 及空隙率 (v %) 曲線

圖中 (I) は軽詰めの場合、(II) は搦固めの場合

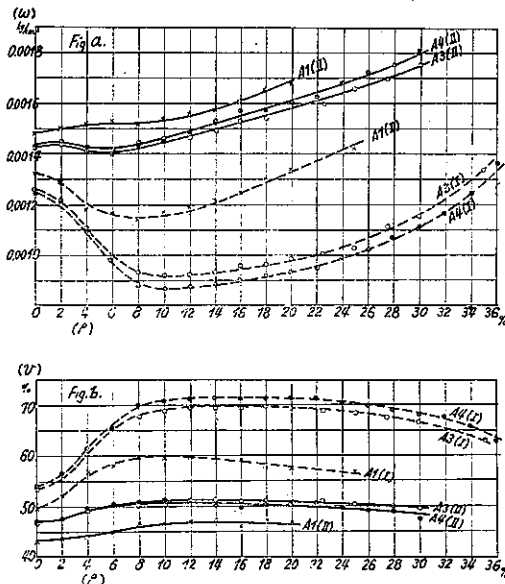


圖-18. 濕潤砂の平均 $\rho - \theta$ (含水比 - 内部摩擦角) 曲線

圖中 A は篩分砂, B は配合砂, I は軽詰の場合, II は搦固の場合, θ_0 は乾燥時内部摩擦角

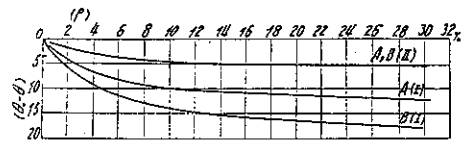


圖-19. 各種砂の最大含水膨脹率 (m) と其の場合の含水比 (ρ) との関係

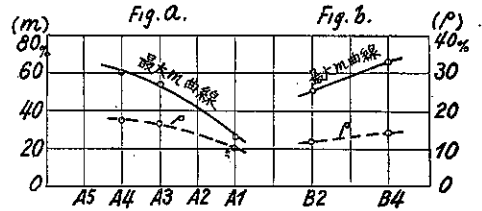
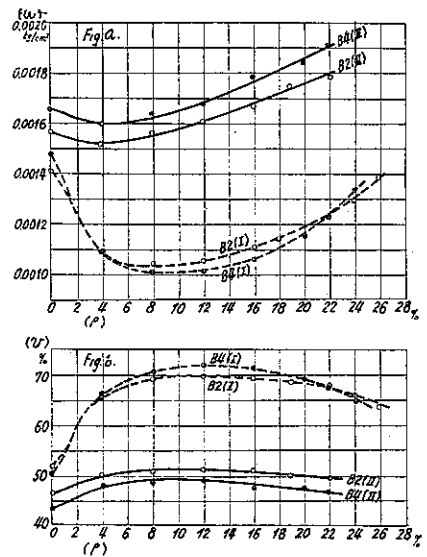


圖-21. 配合砂の單位容積重量 (w) 及空隙率 (v %) 曲線

圖中 (I) は軽詰めの場合、(II) は搦固めの場合



殆んど 10% を超ゆることはない。尤も如上の含水膨脹の現象は砂に單に注水したのみでは殆んど起生せず、加水した砂をよく切返へしたる場合に初めて見らるゝものである。

尙参考として前頁に示す 図-20 及 図-21 は含水比に對する單位容積重量及空隙比曲線を表はす。

第 2 節 土壤の構成條件による影響

曩に述べたる如く試験中の粘土分は出来る丈之を取除いて其の影響を受けしめない様に努めたが、尙試料を水と混和切返へして搗固めつゝ填充する間には粘土分を生成し其の量は 0.5~0.7% 程度に達した。かゝる試料に就て得たる凝集力の値を之と略同程度の粘土分を含有する自然の採集したる砂質土壤の値と對比すれば 表-5 に示す如く著しく大なる差が認められる。表-5 は鉄道省にて採集試験したものである。之畢竟するに自然土壤が他の諸種の環境條件に支配されることを示すものである。砂は又乾燥時に於ても加圧のため固化する傾向を有し圧力を取去つた後も相當長く此の性質を維持することが實驗されてゐる。⁴⁾ 併し地下鉄道の如き地中淺き部分に於ける砂

表-5.

No.	砂						淤泥	No. 100 以下の %	粒粗率	粘土 %	空隙比 v %	含水量 %	c kg/cm ²	θ	
	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200									
T ₁	78	3.60	11.60	47.30	17.60	17.8	1.00	0.70	19.5	1.61	0.40	36.8	7.10	0.078	34.6
T ₂	88	10.80	17.84	52.20	6.60	7.50	1.50	2.00	11.0	2.07	1.56	38.4	16.68	0.140	40.5
T ₃	93	0.44	3.45	35.83	20.09	36.32	2.01	1.17	39.5	1.04	0.69	—	17.20	0.060	26.1
B2		19.0	31.8	31.0	15.0	3.2			3.2	2.48	0.5~0.7	51~52	8~18	0.013	41.5
B4		12.6	16.5	14.9	31.4	16.6			16.6	1.93	〃	48~49	10~20	0.019	43.5

(註) T は鉄道省土質調査委員會第二輯所載實驗値。B は本實驗におけるもの。

質土壤が果して同一條件に支配せらるゝだらうか?、此の間の事情を検討するため試料填充法又は裝備中の條件として

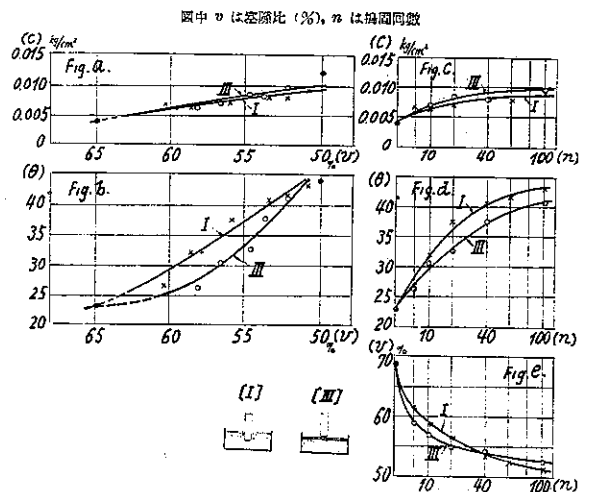
1. 填充法の影響 (搗固效果)
2. 加圧の影響 (加圧效果)
3. 加圧時間の影響 (時間效果)
4. 吸水の影響 (吸水效果)
5. 脱水の影響 (脱水效果)

に就て夫々實驗的考證を行つた。

(1) 搗固め效果 (試料 A3, ρ=10%)

試料填充法には乾燥砂の實驗に於ける I 法と III 法とを適用し、II 法は其の搗固效果が極めて少ないので除外した。實驗結果は 図-22 に示すが如し。圖-22 (a) (b) に依れば一般に密度を大にするに従つて凝集力及内部摩擦角を増大する。而して其の増率は凝集力に於ては密度を増すと共に

圖-22. 搗固め效果 (試料 A3, ρ=10%)



⁴⁾ 鉄道省土質調査委員會報告第三輯 p. 31.

低下し、内部摩擦角は却つて大となる。搗固め法に就て III 法を I 法に比較するに、III 法に依る衝撃効果は乾燥砂に於ては顯著に發揮されたが濕潤砂に於ては殆んど認められない。凝集力は大体一致した値を示すが内部摩擦角は却つて I 法より減少して、乾燥砂の場合と反對の現象を表はしてゐる。図-22 (c)(d) 及 (e) は搗固め回数 n と凝集力 c 、内部摩擦角 θ 及空隙比 v との關係を示す。

(2) 加圧効果 (試料 B2. $\rho=8\%$)

試料填充後荷重²⁾ $P=0\sim 340$ kg ($0\sim 1.13$ kg/cm²)、土の高さに換算して $0\sim 7.2$ m までの圧力をかけ、加圧時間を 24 時間とし試験直前に荷重を卸して剪断機にかけた。實驗結果より θ 及 c を算出して図示すれば 図-23 の如くなり、之に依つて觀れば加圧を増すに従つて極く僅か乍ら c を増し θ を減ずる傾向があるが、本實驗に於ける如き輕少なる加圧範圍に於ては著しい変化を認めない。

以上は試料を搗固めて填充したものに加圧した結果であるが輕詰めの場合に對する加圧効果は前掲 図-13 に示す所である。此の場合には壓縮重量のため試料は少からず壓縮されてゐるが c 及 θ の増大は比較的輕少である。

(3) 時間効果 (試料 B2. $\rho=8\%$)

是迄述べた結果は、前記加圧効果の場合の外は凡て試料填充と剪断試験との間に時間的間隔を置いてゐない。依つて此の時間の影響を見るために試料搗固填充後 $0\sim 360$ 時間 (15 日間) を経過せしめ、其の間一定の荷重 ($P=30$ kg) をかけ水分の散逸を防止する様にした。實驗結果は 図-24 に示す如く、與へられたる範圍の時間に於ては其の效果は全く認められない。其の效果を知るには長時日を必要とする。

(4) 吸水効果 (試料 B2.)

茲にも述べたる如く乾燥砂に加水して之を切返すときは著しく容積膨脹するが、若し加水したまゝ切返へさなければ容積変化を起さず。従つてかゝる状態の濕潤砂は切返したるものに比すれば空隙著しく小で毛管作用が大なることが推察される。依つて乾燥試料に吸水装置を施して内部組織を亂さないで吸水せしめたる状態に於て剪断試験を施行した。

吸水装置 (圖-25) は各一端を水に浸漬したる數本の吸水線 (ガーゼを細長く巻きたるもの) の他端を外部より剪断容器上箱の中間の砂中に導入したものである。水は吸水線によつて吸上げられ 1 時間を要せずして容器中の砂全部に限なく行渡る。下箱の底部に水抜孔を設け、之より漏水し始むるに至れば吸水を打ち切り數時間を静置して充分水を切る。然る時は種々の搗固め状態の乾燥砂に對して砂中の含水量は $18\sim 20\%$ (平均 19%) の範圍内にあり、而かも容積従つて空隙に何等変化を認めない。之を切返へし濕潤砂の搗固めたるものゝ密度に比すれば遙かに大である。一旦切返へしたる濕潤砂は之を如何様に搗固め且つ荷重を懸けても吸水砂の密度に及ぼすことは極めて

5) 乾燥標準砂に對する實驗 (鉄道省土質調査委員會報告第三輯 p. 27 所載) によれば高圧 (36 kg/cm² に及ぶ) を受けたる乾燥砂は凝集力を發生し、圧力増大と共に凝集力を増大する。

圖-23. 加圧効果

試料 B2, $\rho=8\%$, 裝固時間 24 時間

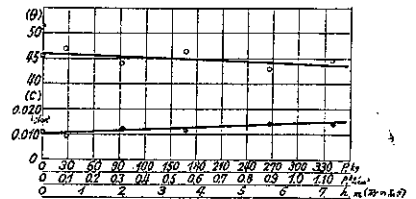


圖-24. 時間効果

試料 B2, $\rho=8\%$, 裝固中の加重 $p=0.1$ kg/cm² ($P=30$ kg)

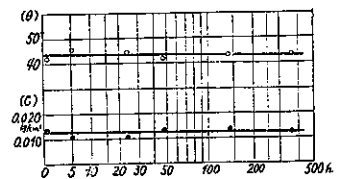
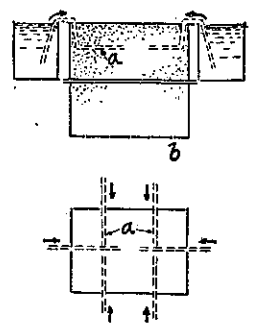


圖-25. 吸水装置

a 吸水線, b 水抜孔



至難である。只上記の吸水装置では含水量任意にして且つ均質なる状態の試料を得ることは困難である。

斯の如くして豫め乾燥砂を種々に搗固めて空隙を變へたるものに對し、吸水せしめてから剪断試験を行へば其の剪断抵抗は著しく大で、大なる凝集力を誘致する。図-26 は乾燥砂に自然吸水せしめたるもの(図中の I)の吸水効果を示し、併せて切返へし濕潤砂(含水量相等しきもの、即ち $\rho=19\%$ 、図中の II)と比較したものである。之に據れば I は II に比して密度大であるから c 及 θ の値も亦大である。吸水砂に於ける c 及 θ の値は密度を増すと從つて増大するが其の増率は θ では密度と共に著しく高上するが、 c では却つて低下する。尙此場合の θ の値を乾燥時の θ の値に比較すれば相當低下してゐるが前記剪断抵抗の著しく増加するは新たに凝集力を發生したるに因る。図の點線は乾燥砂の内部摩擦角曲線を示す。尙 図-26 中 (b) 點が (a) 點より密度小なるに拘はらず内部摩擦角大なるは搗固めにより内部組織に変化を來たしたるに因るものと思惟される。

斯して乾燥状態の砂は吸水により、比較的大なる凝集力を發揮することが確證される。

(5) 脱水効果 (試料 B2)

濕潤砂を填充後乾燥器に入れて 200°C 以下の温度で充分に乾燥せしむれば⁶⁾塊状に結合する。之を室溫に戻してから剪断機にかけると比較的强大なる剪断抵抗が發生する。此の場合の内部摩擦角は乾燥砂の値を保有するものと假定して凝集力を算出すれば濕潤砂の際に有する凝集力に比し約 5 倍に達する値を示す。種々の含水比の場合につき實驗結果は 図-27 に示すが如く最大凝集力曲線は含水比 8% 附近より増大し飽和點に至りて稍減退する。

次に豫め試料中に吸水装置(圖-25 に做ひ)を施し、脱水乾燥後再び徐々に吸水せしめたるものに就て試験すれば凝集力は消失減退して略元の値に戻る。

此の現象を考察するに僅少なながらも試料中に存在する粘土分は水と合して糊状体となり乾燥されて固結作用を

發揮するものと認められる。混和水量過小なる間は粘土分の糊状化充分ならず、從つて固結作用も小なるわけである。尤も此の種の凝集力は頗る不安定のもので之に僅かの衝撃を與ふれば塊状は忽ち破壊されて粒状となる。圖中凝集力の一定しないのは實驗操作中不知不識の間に與へられたる衝撃の影響による結果である。

斯の如く凝集力に及ぼす脱水効果は頗る大きく、此の結果は自然土壌が有する値にも接近する程度である。

(6) 結果

以上土壌の構成条件の影響として各項に於て實驗したる結果より判断すれば試料 B2 及 B4 の凝集力の値は吸

圖-26. 吸水効果 (試料 B2)

圖中 I は搗固め乾燥砂に吸水せしめた場合 ($\rho=19\%$)、II は切返へし濕潤砂 ($\rho=19\%$) を搗固めた場合、D は乾燥砂の θ 曲線、(a) は乾燥砂乾詰めの場合、(b) は切返へしたる濕潤砂を搗固めた場合、(c) は乾詰めの場合を示す

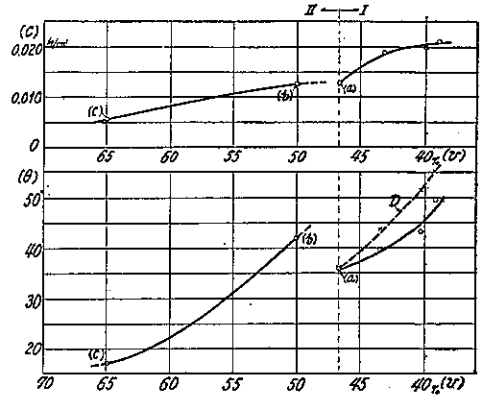
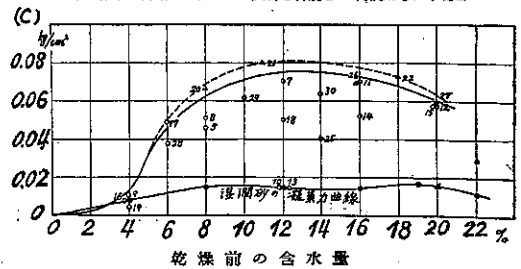


圖-27. 脱水効果

圖中の數字は實驗番號、△ は試料を引續き 2 回使用したる場合



6) 試料の乾燥を促進する爲試料に小なる蒸發孔 5 個を穿ち右図(平面図)の如く配置した。

水其の他の諸効果と相俟つて容易に夫々 0.025 及 0.035 kg/cm^2 以上に達せしめ得ることが推定される。それでも之を表-5 に示さるゝ自然土壤の凝集力に比すれば尙低小である。然し同表に就て其の内容を仔細に吟味すれば、天然土壤は本實驗試料に比して、 T_2 では粘土量多く、 T_1 及 T_3 では粒粗率小さく細粒に富んでゐる。且つ其の密度は極めて大である。是等の條件は何れも凝集力を大ならしむる要素である。従つて天然土壤 T の凝集力が大であるのは當然である。又 θ の値を比較する時天然土壤の方が小さいことは注目すべき事である。蓋し剪断試験の條件如何によつては同一剪断抵抗に對し θ を大にすれば c を減ずることにもなるからである。是等の事情を參酌すれば本實驗に於ける濕潤砂の凝集力は天然土壤の示す値に益々接近することになる。

結 論

本實驗の範圍に於て得たる結果を要約すれば次の結論に到達する。

A. 乾燥砂

- (1) 搦固められない状態の乾燥砂の内部摩擦角は其の空隙比の如何によりて大なる相違はない。従つて大体砂の粒大及粒粗率と無關係である。
- (2) 前記の空隙を有する砂を搦固めて密度を増すときは内部摩擦角は漸次増大する。而して同一搦固め法に従へば砂の組成如何を問はず空隙比に對する内部摩擦角の変化は略同一拋物線的である。
- (3) 搦固め方法を変へて内部の機構を異にするときは異なる拋物線を描く。

B. 濕潤砂

- (1) 乾燥砂に水を加へて混和する時は容積を増加し内部摩擦角を減じ凝集力を起生する。之を搦固むる時は凝集力及び内部摩擦角を高上せしむる。
- (2) 凝集力は含水量に応じて増し、或點に至り最大となり、夫より稍減退しつゝ略同一値を保ち、飽和點に達する頃に再び増大の傾向を示し後急速に低下する。
- (3) 上記凝集力の最大値は砂の粒徑大なるものは含水量の小なる時に起り、其の値は小なるも粒徑小なる程含水量の増したる時に起り其の値も大である。配合砂に於いても細目のものを混合する時は含水量を増したる時に起り其の値も大である。
- (4) 含水膨脹率は僅小の含水量に對して最大となり水量を増すに従つて減退する。而して(3)に示す凝集力の關係の如く粒徑が小なる程膨脹率は大である。
- (5) 凝集力の最大値は含水膨脹率の大なる時に起り、最大膨脹の時は既に幾分減少する。
- (6) 内部摩擦角は水量の増加に伴ひて略對數曲線的に減小する。而して輕詰めの場合は搦固めの場合に比し其の減少著し。

C. 土壤構成條件の影響

- (1) 濕潤砂を搦固めて漸次密度を高上せしむるに従つて凝集力は略直線的に増加し、搦固法の影響は少ない。之に對し内部摩擦角の変化は乾燥砂と同様に曲線的で且つ搦固法によつて相違する。
- (2) 濕潤砂に圧力を加へても之を取り去るとき其の圧力大ならざれば内部摩擦角及凝集力に及ぼす変化は輕微である。
- (3) 濕潤砂に圧力を加へて或時間經過後之を検するも剪断抵抗に何等変化を認めない。
- (4) 乾燥砂に水を徐々に吸収せしむるも容積を増加せず、内部摩擦角は減ずるが相當大なる凝集力を起生する。

之を切返へしたる濕潤砂に比すれば密度が著しく大であるから従つて凝集力及内部摩擦角も大である。乾燥當時の密度が大であるほど吸水後の砂の凝集力及内部摩擦角は大となる。

- (5) 濕潤砂を乾燥脱水する時は著しく剪断抵抗を増大し、大なる一時的の凝集力を表はす。再び吸水せしむれば元の抵抗に復歸する。