

論 說 報 告

第 27 卷 第 2 號 昭和 16 年 2 月

土の突固め試験及びこれに基く施工難易度の 判定並びに施工基準の設定に就て

(昭和 15 年 4 月 3 日第 4 回工學會大會講演會に於て)

會 員 星 埜 和*

要 旨 土を實驗室内に於て突固める時起る現象及び得られる土の試験體の工學的性質を明かにし、それに基づき土の施工難易の程度を判定する方法を述べ、又その土を用ひて土工工事を行ふ場合の施工基準を與へんとするものであつて、第 4 回工學會大會に於て土の突固めに關する實驗的研究なる題下に大要を發表した研究に其の後の結論を追補して纏めたものである。

目 次

- | | |
|------------------------|------------|
| 緒 言 | 3. 施工基準の設定 |
| 1. 突固め試験 | 結 言 |
| 2. 突固め難易度の比較による土質適性の判定 | |

緒 言

土の構築材料としての性質はその土を構成する箇々の土粒子の性状によつて支配されることは勿論であるが、又その間隙量及び含水量により著しく變化する。土の突固め操作はその密度を大ならしめ、換言すれば間隙量を減少せしめて土の力學的性質（壓縮強さ及び剪斷強さ）の改善、防水能力の向上を圖り、以て支持力或は安定度の増大又は防水層の形成を來さしめんとするものである。

然るに土の密度の増加即ち間隙量の減少の程度は突固めに使用せられる器具の性能、突固め回数によつて變るのみならず、土の性質及びその含水量によつて甚しく左右される。

構築材料としての土の性質は一般に密度の増加と共に向上するものと考へられるが、土の種類が異なればその性質向上の程度は必ずしも同じでなく複雑な變化を示すものと思はれる。従つて或種の土を突固めんとする場合にその土に如何なる含水量を與へれば最も容易に間隙を減少せしめ得るかを知らんと共に、間隙の減少に伴ひ土の工學的性質がどの程度に向上するかを研究しなければならぬ。かゝる方法によつて吾々は各種の土の突固めに對する難易の程度を定め、構築材料としての適性の大小を比較し、施工に際し適當なる規準を與へ得るものである。

従來土質の判定には所謂物理的基本性質を試験して居るが、これを上述の如き場合に適用し正當なる判定を下さんとすることは極めて難事であつて、深い經驗と充分なる熟練のみが之を良くするものであると考へられる。

若又物理的基本性質が土質の適性判定に役立ち得るものとするならば、突固め試験により得られる直接的な結果との間に存立する關係が明かにされねばならぬであらう。

著者はこゝに一定の容器中に盛られた土を突固め、土質及び含水量並びに突固め回数の影響等を實驗的に明かにし、次で得られた試験體に就きその工學的性質の變化を求め、之により突固め効果を判定し且施工基準を設定せんとする方法を述べて大方の批判を乞ふ次第である。

1. 突 固 め 試 験

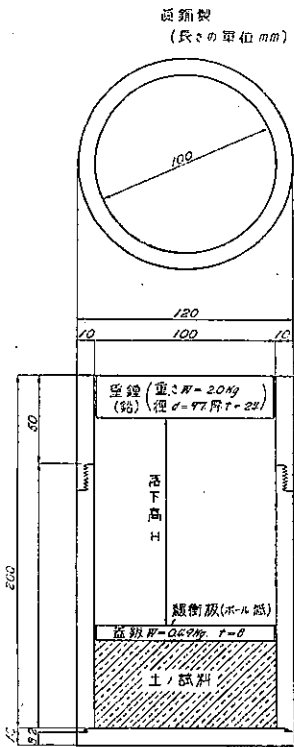
a. 實驗裝置及び方法

突固めに使用せる裝置は取外し得る底鍔を附した内徑 10 cm, 高さ 20 cm の真鍮製圓筒に土の試料を填充し、

* 内務技師 工學士 内務省土木試験所

約 10 cm の高さより重さ 2 kg の重錘を繰返し落下せしめて突固め得る如くしたもので、その構造の概略は圖-1

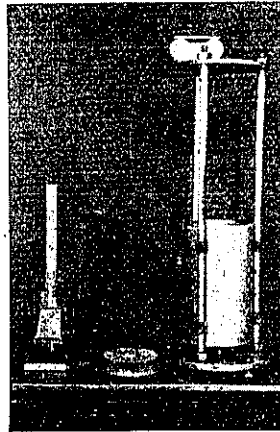
圖-1. 突固め装置の略圖



及び寫眞に示す。本装置は重錘落下高が試料の厚さによつて變化する、試料の厚さを均一に製作し得ない、突固め回数に應じて直ちに試料の厚さを讀取り得ない、個人的の偏差がある等の缺點があるが、一面構造が簡易であつて熟練により一様な突固めを行ふことも左程困難でないと言ふ點で勝れて居る。

實驗の方法は圓筒容器内に一定の含水率を與へた土 400~600 gr 程度を均等に填充し蓋板を以て覆ひ、緩衝用ボール紙を狭み、その上から重錘を落下せしめ、突固め回数を増しつゝ各回に於ける試料の厚を 0.1 mm 迄讀取り得る遊標を附した測定器にて測定する。突固めを終つた試料は容器より取出しその

寫眞 突固め装置



重量を秤量し次で爐中にて乾燥し、乾燥前の重量と乾燥後の重量より含水率 w を算出し、又その間隙率 p は試料の見掛比重 G' と土粒子の眞比重 G_s が分れば次式より計算される。

$$p = 100 - \frac{G'}{G_s} (100 - w) \dots \dots \dots (1)$$

試料の密度 d_s は

$$d_s = G_s \left(1 - \frac{p}{100} \right) \dots \dots \dots (2)$$

であるから、間隙率の増減に逆比例して増減する。以下凡て密度の増減の代りに間隙率の増減を以て論ずることとする。

同一種の土を用ひ、含水率を漸次變化せしめて上記の實驗を繰返し、突固め回数と間隙率との關係を求める、又數種の土を用ひて同様實驗を行ひ土質の相違を明かにする。

表-1. 試験に使用せる土の物理的性質

項目	試料記號	A_k	T_1	T_2	T_3	T_4	N_a	N_b	N_c	N_d	L_a	R_y
機械分析												
砂	1.17~0.60	0.1	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0.4	0.8
	0.60~0.30	1.0	1.9	0.7	1.7	0.7	0.1	0.1	0.4	0.8	0.5	1.9
	0.30~0.15	2.8	2.9	3.0	4.7	4.4	0.9	0.7	2.8	4.8	1.6	3.3
	0.15~0.075	8.1	6.8	14.4	14.2	14.3	4.4	3.1	6.9	6.6	6.8	4.9
計	12.0	11.6	18.1	20.6	19.4	5.4	3.9	10.2	12.2	9.3	10.9	
沈泥	0.075~0.005	51.1	37.8	58.1	51.0	53.5	43.3	38.5	55.9	39.0	55.3	36.9
粘土	0.005~0	36.9	50.6	23.8	28.4	27.1	51.3	57.6	33.9	48.8	35.4	52.2
眞比重		2.54	2.58	2.61	2.63	2.57	2.53	2.61	2.56	2.67	2.71	2.42
遠心力含水當量		27.9	31.4	36.1	35.9	37.1	38.6	38.3	30.5	18.8	16.1	65.4
收縮限界		30.3	19.4	36.2	32.3	37.6	32.8	15.7	31.5	13.6	17.3	65.3
收縮比		1.47	1.67	1.33	1.44	1.32	1.41	1.33	1.47	1.85	1.33	0.95
液性限界		42.9	66.3	76.7	71.3	80.4	75.8	83.9	60.2	49.7	41.3	94.2
塑性限界		28.5	30.3	33.3	31.6	32.8	28.2	29.3	24.8	13.7	16.5	60.3
塑性指數		14.4	36.0	43.4	39.7	47.6	42.6	54.6	35.4	36.0	24.8	33.9
産地		栃木縣	千葉縣	"	"	"	横須賀	"	"	佐世保	北支那	東京

次に突固めにより得られた試験體に就てその壓縮強さ、剪斷強さ及び透水性を測定して突固め効果の判定をなし、且數種の土に就ての比較を行つた。

實驗に用ひた土は 11 種で、その物理的性質は表-1 の通りであつて、何れも沈泥と粘土を多量に含有して居る。

b. 突固め試験結果

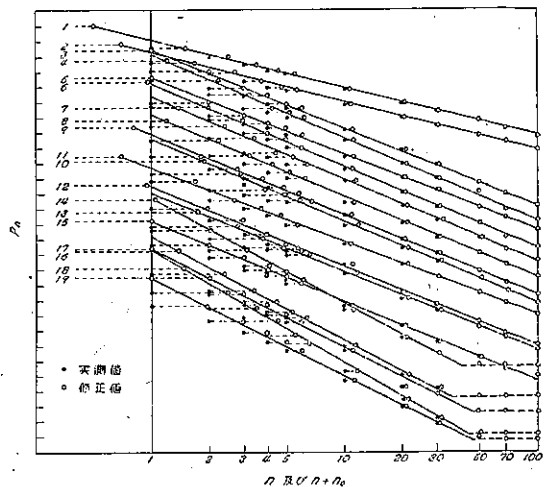
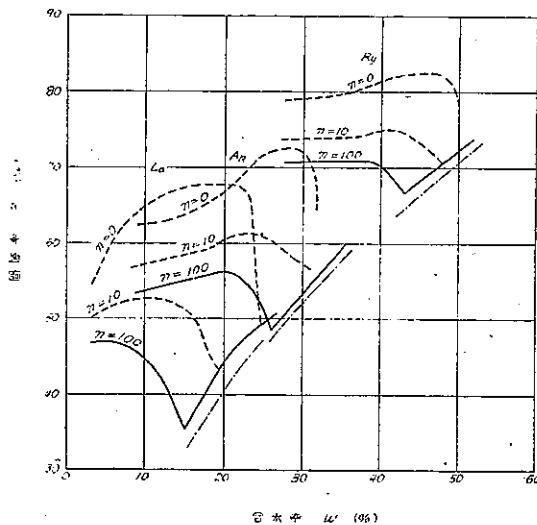
突固め試験の結果より、試料の含水率を横軸に、得らるる間隙率を縦軸に取り、各突固め回数に應じてプロットした點を結べば圖-2 に示すやうな曲線が得られる。

突固め回数 n と得られる間隙率 p_n との關係を夫々の含水率に就き半對數目盛方眼紙上にプロットすれば、土の種類如何を問はず又含水率の凡ての範圍に互つて略直線的な關係が認められる(圖-3.)、著者は之を次の實驗式で表はした。

$$p_n = p_0 - q \cdot \log(n + n_0) \dots\dots\dots(3)$$

圖-2. 各突固め回数に於ける含水率と間隙率との關係

圖-3. 突固め回数による間隙率の減少 (Δk)



式中、 p_0 、 q 、 n_0 は突固め装置及び方法が一定し、土の種類とその含水率が與へられれば決まる常數である、突固めを開始する前に試料が容器内で保つ間隙率は

$$p_{n=0} = p_0 - q \cdot \log n_0 \dots\dots\dots(4)$$

で與へられる。 n_0 は實驗の結果から見るに普通 2 以下の小さい數値を示し、 n が大きい時即ち突固め回數が増せば之を省略しても大差はない、従つて n が大なる時は近似的に

$$p_n = p_0 - q \cdot \log n \dots\dots\dots(5)$$

となる。之より突固めにより土の間隙率は突固め回數の對數に比例して減少すると言ふことが出来る。

q は間隙の減少する割合を示す係數であつて、著者は之を突固め係數と名付けた。

又

$$Q = - \frac{dp_n}{dn} = \frac{q}{2.3(n + n_0)} \dots\dots\dots(6)$$

與へられる Q を突固め率と名付ければ、之は各の突固め回數に對應した間隙率減少の割合を示し、 Q は近似的に n に逆比例し、突固めが進むにつれて間隙の減少は少なくなり、突固め難くなることを示す。

p_0 、 q 、 n_0 を一括して假に突固め常數と呼べば、之等突固め常數は土の種類及び含水率によつて變化し、實驗結果よりその關係を求めれば圖-4 に示す如くなる、何れの土に於ても乾燥状態より含水率が増加するに伴ひ、 p_0

も q も n_v も始めは緩慢に後には急激に増加し終に最大値に達して後は急激に低下し、 p_0 は一定値に、 q 及び n_v は零となり、其以上は含水率の増加と共に p_0 は増加するが、 q が零であるから突固めは全然進行しない。

これは含水量が増加したため、試料の間隙は略完全に水を以て飽和された状態となり、恰も液體に近い流動性を示し突固めを行ふも全然壓縮し得ないからである。かくの如く突固めが進行しなくなる現象は突固めの途上に於ても間隙が含水飽和の状態に到達すればやはり起るものであつて、それ以上の突固めは無益である。

今土粒子の間隙が水で完全に充滿され氣泡を含まない状態に在るものとした時、間隙率 p_0 と含水率 w との間には次の關係式が成立する。

$$P_0 = \frac{100 \cdot G_s \cdot w}{100 + (G_s - 1) w} \dots\dots\dots (7)$$

但し G_s : 土粒子の眞比重

この式から得られる曲線は飽和曲線(或は無氣泡曲線)と名付けられ、圖-2 に鎖線で示す、突固めはこの曲線に近付くと急に停止し、試料中になほ僅か乍ら略一定量の氣泡を残留して居ることが分る。

突固めを開始する以前に於ける間隙率 $p_{n=0}$ は (4) 式により與へられるが、之は試料の含水率が増加するにつれ漸次急激に増大して一旦最大に達して後は急激に減少し、なほ含水量が増せば略飽和したまゝの状態が増加する(圖-2)。

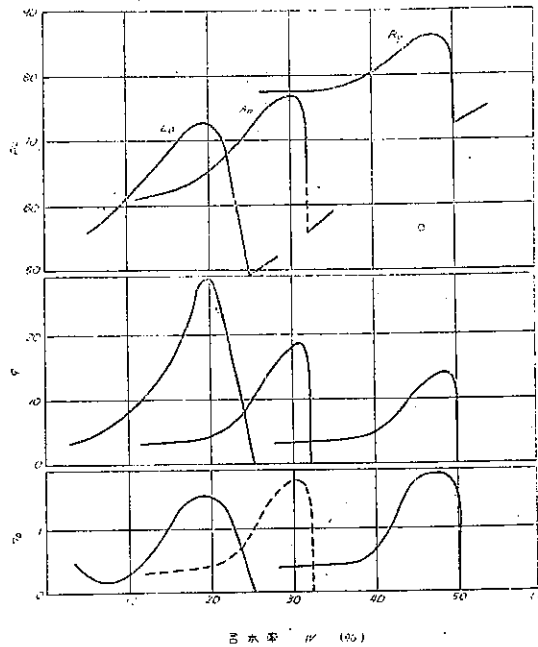
之は砂に於て認められる含水膨脹の現象が土に於ても全く同様に起ることを示し、土質により膨脹の程度を異にすることは圖-2 に依り明かで、恐らく土の粒子の大きさや形状、粒度及び表面の状態等により左右されるものと推定される。

次に突固め係数 q の含水率による變化を見るに(圖-4)、含水率の小なる時は値小さく、漸次増加して最大に達して後急激に低下することは p_0 の變化とよく近似してあるが、たゞ或値以下の含水率に於て q の變化は極めて緩慢で殆んど變化なく、その限界を超へて含水率が増すと q が急に増大する傾向が認められる、(L_a では餘り明かでないが)、これは土に含まれる水分が突固めに對し二の異なる作用を及ぼすものと想像される。即ち含水量小なる時水分は土粒子の表面を被覆して薄膜となり、その見掛けの容積を増大せしめるが、その性質は土粒子と堅く結合して固體に近く土粒子相互の移動に對する抵抗を餘り變化させない。然るに水量が或る限界を越えると水分の一部は土粒子から遊離し始め、土粒子相互の接觸點を潤し移動に對する抵抗を弱め、恰も潤滑油の如く作用するのではないかと考へられる。

従つて q の値、就中 q が急増し始める點に對應する含水率 w_c は土粒子の性状により支配されるものと推測される。

一般に含水率が w_c より小さい時は q は略一定で、 p_0 が含水率の増加と共に増加するから、得られる間隙率は含水率が w_c に近づく程大きくなり、又含水率が w_c より大きい時は q が急に増大するため得られる間隙率は減少するから突固めが進むと w_c に於て最大の間隙率を示すやうになる(圖-2 及び 圖-4 を比較参照)。なほ含水量が増せば突固め途上に於て飽和に達して突固めが進まなくなるから、得られる間隙率は再び大となる。即ち一定

圖-4. 突固め係数の含水率による變化



の突固め回数に對して得られる間隙率は含水率が増加するに伴ひ始めは増加して最大 (p_{max}) となり、次で低下を續け飽和點に達して最小 (p_{min}) となり以降は飽和曲線に沿ひ再び増加する、然して得られる試料は含水率が p_{min} に對應する含水率 w_n 以下では多くの氣泡を含んで不飽和であり、 w_n 以上では飽和状態に在るわけである。

或る突固め回数に於て試料の密度を最大從つて間隙率を最小にするためにはその突固め回数に應じた最も適當な含水率 w_b (最適含水率と呼ぶ) が存在し、又その最適含水率を與へた時得られる最小間隙率 p_{min} が決定される。この關係を實驗結果より求めたものを圖 5 に示した。各突固め回数に於ける p_{min} と w_n の値は土の種類により相違して居るが、何れも突固め回数の増加と共に減少して居る。この事實から廣く一般に適用される次の如き原則を確立することが出来る、即ち土の密度を大ならしむるため最も有效な突固めを行ふには突固めが修了した時丁度その間隙が略飽和に達するやうな水分 (最適含水率) を土に與へなければならぬ。

圖-5. 各突固め回数に於ける最適含水率及び最小間隙率

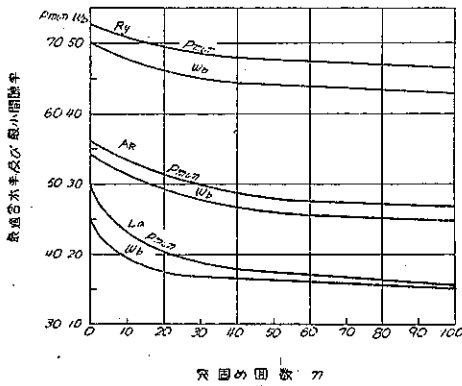


圖-6. 同一突固め回数 ($n=100$) に於ける含水率と間隙率の關係 (土質による相違)

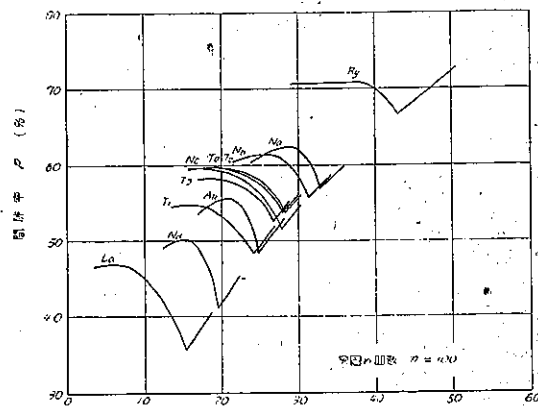
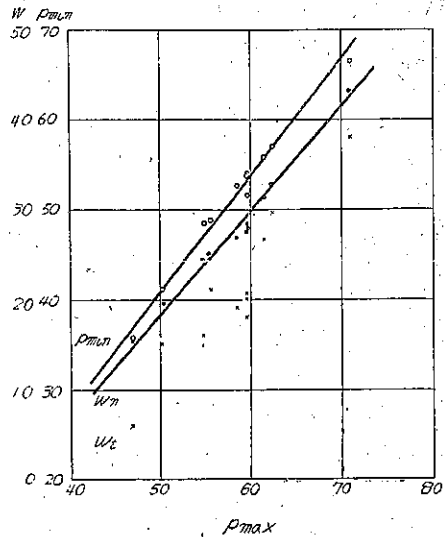


圖-6 は 11 種の土を夫々 100 回突固めた時得られる間隙率と含水率との關係を示す曲線であつて、土の突固めに対する性質を示してゐるものと考へられるので、この曲線から求められる最大間隙率 (p_{max})、最小間隙率 (p_{min}) 及び夫々に對應する含水率 w_b , w_n の値を以てその土の突固め特性と呼べば、表-2 及び圖-7 より明かなる如く、 p_{min} 及びそれに対応する含水率 w_n は p_{max} と略直線的關係を示し、 w_b のみやゝ異なる故、結局土の突固め特性は最大の間隙率 p_{max} 及びこれに対応する含水率 w_b によつて表はすことが可能となる。

圖-7. p_{max} と p_{min} , w_b , w_n との關係

表-2. p_{max} , w_b , p_{min} 及び w_n の値

試料	p_{max}	w_b	p_{min}	w_n
A_k	55.6	21.0	48.6	24.9
T_1	54.8	16.0	48.4	24.2
T_2	59.7	20.0	53.8	28.1
T_3	58.4	19.0	52.6	26.9
T_4	59.6	20.6	53.8	28.4
N_a	62.4	29.6	57.0	32.8
N_b	61.4	26.6	55.8	31.3
N_c	59.5	18.0	51.6	27.8
N_d	50.2	15.0	41.2	19.6
L_a	47.0	5.8	35.6	15.3
R_v	70.9	38.0	66.6	43.0



c. 突固め効果の判定

次に突固めが果して有効に遂行されたか否かは間隙率のみを以て判定する譯に行かない、何となれば同一種の土では間隙率の減少と共にその土の工學的性質(力學的並びに透水的)は改善されるものと考へられるけれども、異種の土では同一間隙率に於てその工學的性質が異なるのみならず、間隙率の増減に伴ふ工學的性質の變化も亦一様でないと考へられるからである。

よつて突固め効果の判定に必要と認められる力學的性質及び透水的性質に關する研究を行ふ必要がある。

イ) 力學的性質; 突固め回数一定 (n=100) として得らるゝ徑 10 cm, 厚約 4 cm の扁平な圓筒體より邊長各 4 cm の立方體を 2 箇づゝ切り取り、壓縮強さ及び上下壓を 3 段に變化せしめた時の剪斷強さを測定した、結果の一部は圖-8 及び圖-9 に示す通りである。結果から含水率の變化に伴ふ壓縮強さの變化及び剪斷試驗結果から

$$\tau = C + v \cdot \tan \varphi \dots\dots\dots(8)$$

こゝに v: 上下壓

なる關係を適用して、凝集力 c 及び内部摩擦係數 tan φ の變化を求めれば圖-10 (b) 及び (c) に概念的に示したやうな曲線が得られる。實測の結果から求めた曲線の例は圖-11 及び 圖-12 に示すやうなものである。之により一定の突固めを與へた時土の力學的性質は含水率の變化により類似の傾向を辿ることが知れる。即ち壓縮強さは含水率 w_n を境として飽和状態と飽和状態では全く方向を異にする 2 本の直線的變化を示し、最大値は最小間隙率に對應する含水率 w_n に於て得られて居る。然して 2 本の直線は含水率の少ない所と多い所では何れもやゝ曲つて來るやうである(圖-10 (b) の破線)、剪斷強さの方は凝集力 c も内部摩擦係數 tan φ も含水率の増加とともに減少し略逆 s 字形をなして居り、飽和と飽和の境目(w_n)に於て別に不連続は認められない、之は剪斷強さが主として含水率の影響を多く受け、間隙率の變化は餘り關係がないことを示すものである。tan φ の實測結果では含水率が w_n を過ぎてから急に上昇して居るものがあつて (A_k 及び L_a) (圖-12) 剪斷試驗中に試料の含水の一部が搾り出されるため試料の當初の含水率を基準として取ることに無理があるとも考へられるが、然しこの上昇が相當顯著に且或種の土に限り起つて居ることは注意に値する點と思考される。

飽和状態に在る土に水を加へて含水量を増加せしめればその力學的性質は漸次低下し飽和状態に於て最低となるものと認められ、その最低値はその間に間隙率が變化しないものと假定して圖-10 中に示す矢印のやうな經過を辿つて求められる。w_n に於ける壓縮強さ σ_{cm} 及び剪斷強さ c_n 及び tan φ_n の値は表-3 の如くである。

土の立方體を壓縮する時、破壊が一般に剪斷抵抗の最小な面に沿つて起る

圖-8. 壓縮試驗結果の一例

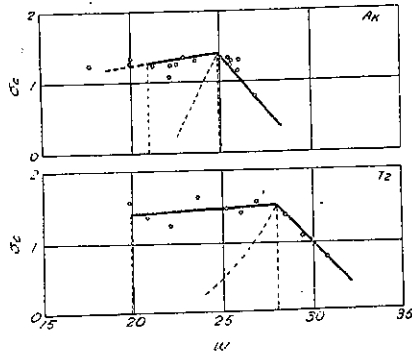


圖-9. 剪斷試驗結果の一例

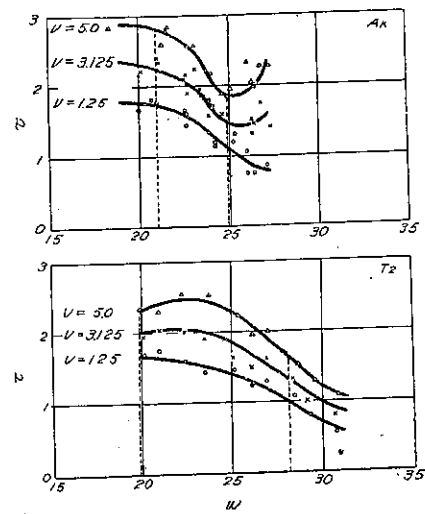
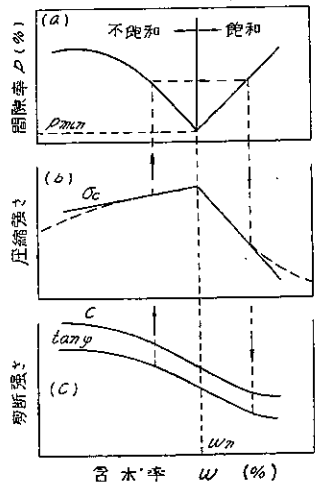


圖-10. 同一突固め回数に於ける力學的性質の變化



1) 但し飽和状態に於ては一定回数の突固めを行つても飽和に達して後の回数は無駄となつて居ることに注意を要する。

表-3. 最適含水率に於ける壓縮強さ及び剪断強さ

試料	壓縮強さ σ_{cn}	剪断強さ	
		c_n	$\tan \phi_n$
A_k	1.40	0.88	0.194
T_1	1.76	0.87	0.173
T_2	1.50	0.75	0.179
T_3	1.65	0.98	0.212
T_4	1.46	0.87	0.202
L_a	2.55	1.03	0.301
R_v	1.33	0.76	0.170

ものと考へ、理論上壓縮強さ σ_c と剪断強さ (c 及び $\tan \phi$) の間には次の如き関係が成立するものとされて居る。

$$\sigma_c = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \dots\dots\dots (9)$$

然るに本実験の結果は兩者全くその傾向を異にして居り、壓縮による破壊が理論の如き剪断によつて起るものとは認め難いやうである。之は又必ずしも理論の不備のみでなく、剪断強さや壓縮強さの測定法が適當でないためとも考へられ、今後研究を要すると思ふ。

土の突固めは土粒子相互の移動に對する抵抗に打勝つて行はれるものと考へれば、突固め係数 q と剪断強さとの間に或る關聯が存在するものと推定される。同一含水率に於ける q と c との關係を圖上にプロットして見ると、 c の増加に伴ひ q は略比例的に減少してゐることが認められる。

ロ) 透水性性質；次に築堤材料としての土の突固め効果を判定するため、土の透水性に關する試験を行つた、土の含水率や突固め回数を種々變化せしめて間隙率の異なる試験體を順次拾數個作り、之を直ちに透水試験機に水平に填充し、上方より下方に向つて透水せしめる。普通僅かの時間を經た後透水が始まり、透水量は時間の経過と共に漸減して數時間後には略一定となる。この時 t 時間中の透水量 Q を測定し、Darcy の法則を適用して透水度 k を次式より算出する

$$k = \frac{Q}{iFl} \text{ cm/sec} \dots\dots\dots (10)$$

- 但し
- Q : t 時間中の透水量 (cm^3)
 - i : 水頭勾配 ($= \frac{\text{水頭差}}{\text{試料厚}}$)
 - F : 透水斷面積 (cm^2)
 - t : 透水時間 (sec)

然し乍ら或種の土に於ては殆んど透水せざるにも拘らず數時間後突然試料の一部が破壊放流して終ひ (N_a)、又他種の土では水頭勾配が或限度以上となる時透水量は時間の経過と共に増大し一日或は二日後に最大となつて後漸く低下に向ふものもある (R_v)。かかる現象は透水試験中に試料が吸水膨脹する等の原因から間隙率に著しき變化を來すのではないかとの疑を懐かしめたので、一部の土に就き試験後の試料から含水率を測定し、之と試験前の

圖-11. 壓縮強さの變化 (土質による相違)

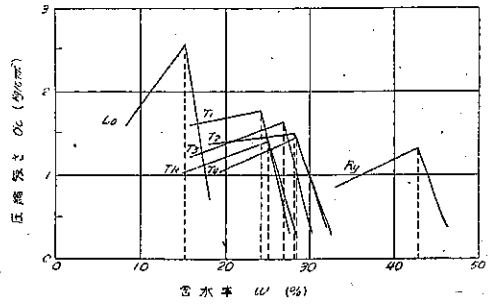


圖-12. 剪断強さの變化 (土質による相違)

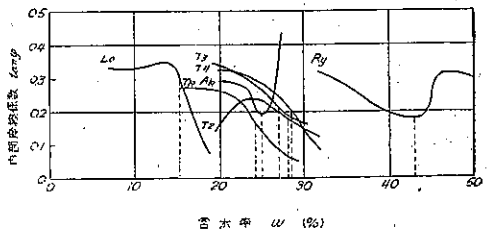
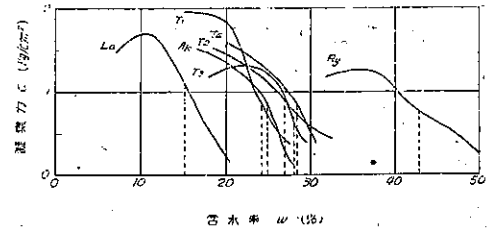
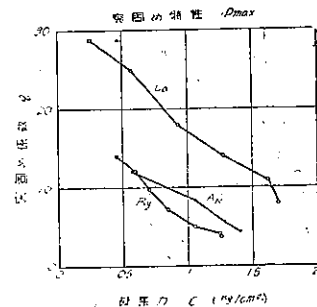


圖-13. 凝集力と突固め係数との關係



間隙率を飽和するに要する含水率とを比較した 處前者の方が大きく明かに間隙率の増大が認められたものもあつた (R_v)。然し乍ら一般には前者は後者より小さく著しき變化はないと考へて差支へないやうである。

實驗の結果から土の透水性は間隙率が或値以下に於ては零で、その限界を越すと その増大につれて増大することが認められるので、著者は多少の理論的考察³⁾の後次の關係式を導いた。

$$k = a(p - p_c)^2 \dots \dots \dots (11)$$

式中 p_c は透水の起る最小の間隙率を示し限界間隙率と名付け、 a は其の透水係数とも呼ぶべきもので間隙率の増加に伴ふ透水性の増加割合を示し、粘性係数の逆数を含むから温度の修正を必要とするが、 p_c, a 共に土に與へられた常數と考へられる。

實驗結果の一部は圖-14 に示したが、結果より得た p_c 及び a の値は表-4 の如くである。限界間隙率は何れの土に於ても突固め回数が 100 回の時の最小間隙率よりや

圖-14. 透水試驗結果の例

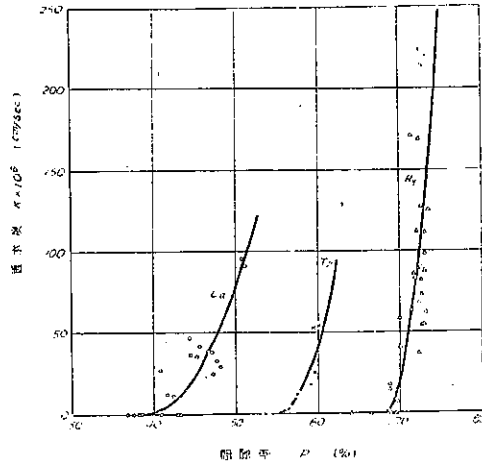


表-4. 透水常數の値

種 別	a	p
A_k	1.3×10^{-6}	49.7
T_1	1.2×10^{-6}	49.0
T_2	1.7 "	55.0
T_3	2.5 "	53.0
T_4	3.2 "	54.0
N_a	12.3 "	59.0
N_b	2.60 "	57.0
N_c	1.48 "	51.6
N_d	59.5 "	43.3
L_a	0.65 "	39.0
R_v	5.0 "	68.0

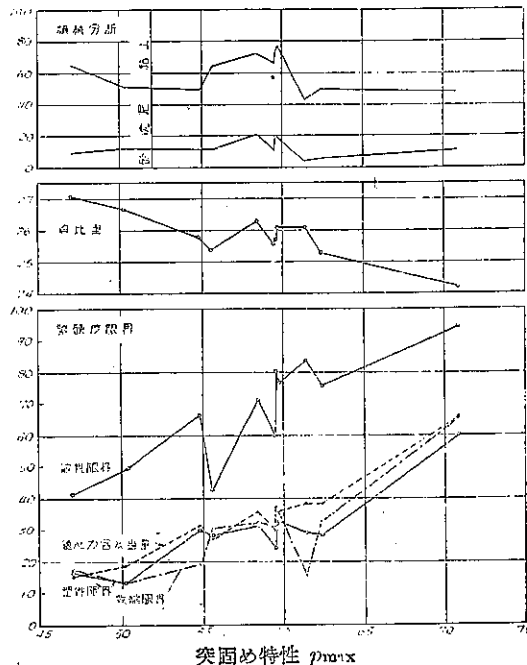
や大きく、從つて突固め 100 回以内に於て完全な不透水層が得られることが分る。又 p_c や a の値は水頭勾配の大小によつて殆んど變化しないやうに認められ、この點 Darcy の法則は充分信頼されるやうである。透水係數 a は二、三の例外を除けば $1 \sim 3 \times 10^{-6}$ 程度の値を有する。

d. 突固め特性と物理的性質

土の突固め經過は土の種類及びその含水率によつて異なり、之を一つの指數を以て代表させやうとすることは極めて困難であらうが、さきにも述べた如く同一回数突固めた時得られる間隙率の最大値 (p_{max}) とそれに對應する含水率 (w) を考へれば、これ等は突固め經過を示す含水率-間隙率曲線上の一點を與へるのみならず、最小間隙率 (p_{min}) とそれに對應する含水率 (w_m) が p_{max} と比例的關係に在るから、曲線上の他の一點をも與へ得て、土の突固め特性を或程度明かにし得るものと考へられる。

今假に土の突固め特性を代表する數値として突固め回

圖-15. 突固め特性と物理的性質との關係



(2) 土木試験所報告, 第 55 號, 59 頁-60 頁参照。

数を 100 とせる時の p_{max} を採り之と従來の物理的基本性質の間に如何なる關係が存するかを検討して見る。

圖-15 は p_{max} (表-2) を横軸に取り、機械分析、眞比重及び緊硬度限界 (表-1) を縦軸上に表して見たものであるが、兩者の關係は餘り明瞭に表はれて居ない。然し大體の傾向を述べれば、機械分析とは殆んど關聯がない、比重は p_{max} の大きいもの程小さくなる、緊硬度限界は p_{max} と共に増加するやうである。これ等の點に就ては今後には多數の實驗結果を得て統計的に觀察する必要がある。

e. 土の突固め特性と工學的性質

同様に p_{max} と土の突固め効果の判定に必要と認められる力學的性質及び透水性との關係は圖-16 (a) 及び (b) に示す如くなる。力學的性質は $n=100$ に於て最適含水率を與へて得られる最小間隙率を有する試験體の壓縮強さ (最大) 及び剪斷強さ (表-3) を以て代表せしめたが、大體に於て σ_{cm} も c_n も $\tan \phi_n$ も p_{max} が大きい程低下する傾向を示して居る。透水性の指數は限界間隙率 p_c と透水係數 a (表-4) であるが、圖-16 (b) に見る如く、 p_c は p_{max} と略直線的な關係に在ることが知られ、 a は例外 (N_a と N_b) を除けば、 p_{max} の増加と共に大となる傾向が認められる。突固め特性と透水性の間にかゝる密接な關聯が存在することは特に注目に値する。

圖-16. (a) 突固め特性と力學的性質との關係

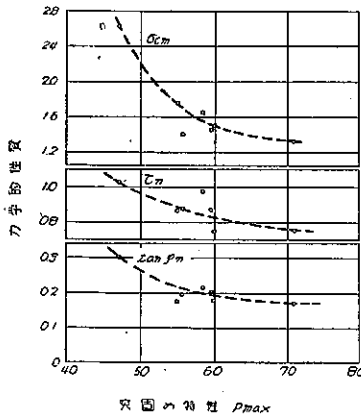
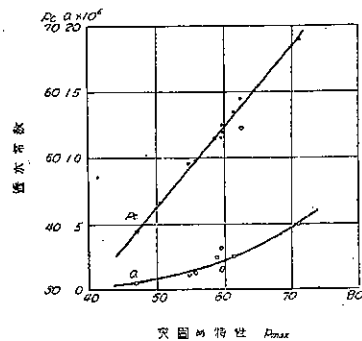


圖-16. (b) 突固め特性と透水的性質との關係



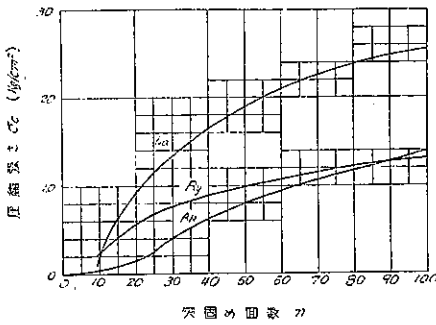
2. 突固め難易度の比較による土質適性の判定

構築材料としての土の適否を判定するためには經濟的且容易な施工によつて必要な工學的性質を發揮し得ると言ふ條件を満足するや否や知らねばならぬ。即ち土の工學的性質 (力學的或は透水的) は締固め、突固め或は振動等の方法により向上せしめ得るものであるが、同程度の強度或は防水性を發揮せしめるため、土に加ふべき仕事の量は土の種類により又エネルギーの形 (締固めか突固めか振動か等) により著しく異なる。従つて土質適性の判定はその土に最も適した形のエネルギーを用ひて一定の工學的性質を土に與へ得るに要するエネルギーの量を以て比較決定すべきこととなり、問題は極め複雑である。然し乍ら最も廣い範圍の土に適した施工方法は突固めエネルギーの利用に在るものと認められるから³⁾、突固めによつて土の施工難易度を判定すれば最も一般的であり、少くとも突固め工法による場合には充分な指針を與へるものと言はなければならぬ。

先に述べた突固め試験の結果を應用するならば、施工難易度の判定を試みる事が出来る。即ち突固めに要する仕事量を突固め回数によつて表示し、條件を同じくし且飽和状態に於ける最も不利な場合を考へるため、最適含水率を與へて突固めた時得られる試料の力學的並びに透水的性質を以て比較の基準とすれば良い。圖-17、圖-18 及び圖-19 は何れも突固め回数に對する最適含水率を與へて突固めた試料の工學的性質の變化の一例を示したも

3) K. Keil: Einsatz und Entwicklungsfragen der Verdichtungsgeräte in Erdbau. Der Strassenbau Nr. 2. 31 Jg. 15. Jan. 1940.

-17. 突固め回数と壓縮強さとの關係



のである。これ等の圖を用ひて施工難易度を判定すれば、壓縮強さに於て L_a 最も勝れ、 R_y , A_k は共に劣る。剪斷強さに於て L_a は突固め仕事の増加により c も $\tan \varphi$ も順調な上昇を示して良好であるが、 R_y , A_k は $\tan \varphi$ が突固め仕事の増加に逆行して低下する傾向を示し適當と認め難い。透水性に於ても L_a は一般に透水度低く良好な性状を示し、 k を零ならしむる突固め回数は L_a 29 回、 R_y 36 回、 A_k 50 回となり、 R_y , A_k の劣ることを示して居る。

こゝに例として擧げた 3 種の土の中 L_a は R_y , A_k に比して力

圖-18. 突固め回数と剪斷強さとの關係

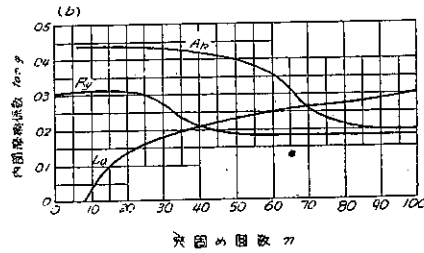
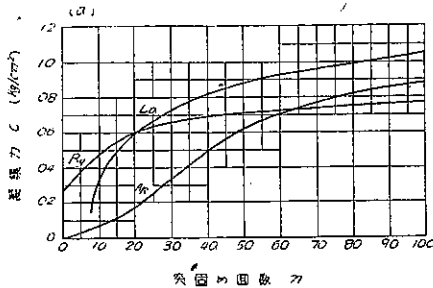


圖-19. 突固め回数と透水度との關係

學的性質に於ても透水性に於ても優れて居ると認められるが、或る性質には勝れ、他の性質に於ては劣るやうな土もあり得るわけであつて、之と構築すべき構造物の目的用途とを睨み合せて判定しなければならぬ、又必要に應じては 2 種以上の土を適當な割合に混合しその性質を改良して使用することも出来るわけである。要はその土の特徴を生かして適材を適所に使用すべきであつて、突固め試験の結果はかゝる土の適性検査の役割を果し得るものと信ずる。

3. 施工基準の設定

突固め試験結果より突固め難易度による土質適性の判定が行はれ、使用すべき土が決定されるならば、次で起る問題は施工基準の設定である。即ち土の含水量はどの程度を適當とし、又どの程度に密度を増大せしむれば充分安全なる土の構築物を築造し得るかと言ふ問題を解決せねばならぬ。この點に關しても亦土の突固め試験は一つの指示を與へ得る。但し吾々が築造せんとする土の構築物がどの程度の力學的或は透水的性質を要求するかと言ふ事は未だ充分明確でない。築堤の法面は土の剪斷強さが幾莫の時何割を以て安定するか、地盤の沈下は土の壓縮強さが幾莫の時許容すべき値内に止まり得るか、又築堤の透水度がどの程度に達するまではパイピングの現象が起り得ないかと言ふ様な點に於て廣汎な研究があるにも拘らず吾々は多くの疑問と少なからぬ不安にぶつかる。然も土の構築物の安全性を支配する因子は其等の外に色々あると考へられるから構築物の許容應力や許容透水度を確定することは不可能ではないにしても少くとも現在の所充分信頼し得る根柢が無いやうに思はれる。であるから暫定的に従來の餘り正確でない理論や簡単な計算や實際上の考慮などから其等の値を誘導し且はその誘導方法に相應した大きい安全率を見込んで置くのも已むを得ないであらう。かくしてともかくも求められた許容應力や許容透水度が決まるならば吾々は、突固め試験結果からそれ等の許容値を土に與へるため必要な突固めの程度即ち間隙率減少の限度を求めることが出来る。又その間隙率を與へるため施工の際土が含有すべき最適含水率を決定することが出来る。

一例として實際に起り得べき壓縮強さを 0.5 kg/cm^2 とし、安全率を 2 とすれば 1.0 kg/cm^2 の壓縮強さを必

要とすることとなる。 L_a を用ふるものとすれば圖-17より $n=23$ 、圖-5よりこの n に對應する間隙率 $p=39.8\%$ 、最適含水率 $w=17.3\%$ が得られる。 R_v や A_k を用ひる場合に就ても同様にして求められる。

表-5. 壓縮強さによる施工基準の設定例

種 別	L_a			A_k			R_v		
	壓縮強さ	n	所要間隙率 p	最適含水率 w	n	所要間隙率 p	最適含水率 w	n	所要間隙率 p
0.5	(13)	42.0	18.8	(35)	49.2	26.9	(17)	69.7	46.6
1.0	(21)	40.0	17.5	(64)	47.5	25.4	(50)	69.6	44.1
1.5	(35)	38.7	16.8	—	—	—	—	—	—

剪斷強さと透水性に關しても全く同様である。

かくして吾々は一定の標準に従つて選定した土に最適の含水率を與へ實際に用ひられる突固め器械を用ひて之を突固め所要間隙率にするため必要な回数を決定することが出来る。勿論現場に適用される基準に於ては實際上の考慮を加へ、含水率は最適含水率を上限とする或範圍を以て規定し、所要突固め回数はその含水率の範圍の下限に於ける最大値を採らねばならぬ。

結 言

以上述べた所を要約すれば次の如くである。

1. 容器に盛られた土を突固める時、その間隙率は突固め回数の對數に比例して減少する。
2. 然してその減少の割合は土質とその含水率によつて著しく變るが、何れの土に於ても乾燥状態より含水率が増加するに伴ひその割合(q の値)は次第に大きくなり遂に最大値に達して後急に減少する。
3. 土の含水率が大きなる場合には突固めの途中に於て土の間隙が飽和された状態に達し、それ以上突固めても間隙率は減少しない。
4. 容器に盛つて未だ突固めない土の保つ間隙率は含水率の増加と共に増大し一旦最大に達して急に小さくなり遂に飽和状態に達する(含水膨脹)。
5. 土の保有する水分には突固めに對して全然異なる作用を及ぼす2種の形態が存するもののやうである。
6. 夫々の突固め回数に對し得られる最大、最小の間隙率及びそれ等に對應する含水率を決定することが出来る。
7. 突固めを最も有效に行ふためには、突固めが終了した時その間隙が略飽和する如き水量(最適含水率)を土に與へなければならぬ。
8. 土の突固め特性を指示する數値として一定の突固め回数に於ける最大間隙率及びそれに對應する含水率を選ぶことが出来る。
9. 一定突固めを與へた時土の壓縮強さは含水率により飽和状態と不飽和状態とで全く異なる直線的變化を示し、最大値は兩状態の境界に於て得られる。
10. 剪斷強さの二要素凝集力及び内部摩擦係数は含水率の増加に伴ひ飽和、不飽和の兩状態を通じ連續した逆s字形をなして低下する。
11. 理論上から考へられる壓縮強さと剪斷強さとの關係は認められない。
12. 突固め係數と凝集力との間には或程度の關聯が認められる。
13. 土の透水性は間隙率によつて變化し、夫々の土に就て透水を零ならしむる限界間隙率と透水性の増加の度合を與へる眞の透水係數が決定される。
14. 土の突固め特性と物理的性質との間の關係は或程度の傾向が認められないこともないが、あまり明瞭でない。
15. 土の突固め特性と工學的性質との關係の中、力學的性質との關係は充分明瞭でない。透水性は一、二の例外はあるが極めて密接な關聯を示して居る。
16. 突固めに要する仕事量を突固め回数によつて表はし、最適含水率を與へて突固めた試料の工學的性質の變化によつて施工難易度の比較を行ふことが出来る。
17. 施工難易度を比較すれば、構築材料として適當な土を選定し或は適當な土の配合を決定することが出来る。
18. 構築物の所要工學的性質が決定され得るならば、突固め試験の結果よりそれに必要な間隙率減少の限度並びに施工の際土が含有すべき最適含水率を決定して、施工基準を與へることが出来る。