

築堤用흙의 含水比 變化에 依한 다짐率 및 透水係數 變化에 關한 研究

A study of compaction ratio and permeability of
soil with different water content

尹 忠 燮*
Choong Sup Yoon

Summary

Compaction of soil is very important for construction of soil structures such as highway fills, embankment of reservoir and seadike. With increasing compaction effort, the strength of soil, interior friction and Cohesion increases greatly while the reduction of permeability is evident.

Factors which may influence compaction effort are moisture content, grain size, grain distribution and other physical properties as well as the variable method of compaction. The moisture content among these parameter is the most important thing.

For making the maximum density to a given soil, the comparable optimum water content is required. If there is a slight change in water content when compared with optimum water content, the compaction ratio will decrease and the corresponding mechanical properties will change evidently.

The results in this study of soil compaction with different water content are summarized as follows.

- 1) The maximum dry density increased and corresponding optimum moisture content decreased with increasing of coarse grain size and the compaction curve is steeper than increasing of fine grain size.
- 2) The maximum dry density is decreased with

increasing of the optimum water content and a relationship both parameter becomes $r_{dmax} = 2.232 - 0.02785W_o$. But this relationship will be change to $r_d = ae^{-bw}$ when comparable water content changes.

- 3) In case of most soils, a dry condition is better than wet condition to give a compactive effort, but the latter condition is only preferable when the liquid limit of soil exceeds 50 percent.
- 4) The compaction ratio of cohesive soil is greater than cohesionless soil even the amount of coarse grain sizes are same.
- 5) The relationship between the maximum dry density and porosity is as $r_{dmax} = 2,186 - 0.872e$, but it changes to $r_d = ae^{be}$ when water content vary from optimum water content.
- 6) The void ratio is increased with increasing of optimum water content as $n = 15.85 + 1.075w$, but there relation becomes $n = ae^{bw}$ if there is a variation in water content.
- 7) The increment of permeability is high when the soil is a high plasticity or coarse.
- 8) The coefficient of permeability of soil compacted in wet condition is lower than the soil compacted in dry condition.
- 9) Cohesive soil has higher permeability than cohesionless soil even the amount of coarse particles are same.
- 10) In general, the soil which has high optimum water content has lower coefficient of permeability than low optimum water content.

*農業振興公社 農工試驗所

11) The coefficient of permeability has a certain relations with density, gradation and void ratio and it increase with increasing of saturation degree.

I. 緒 論

土木工에서 EARTH DAM 이나 防潮堤 河川堤防 및 道路等 剪斷強度 및 透水性이 重要視되는 構造物에서 흙은 가장 重要한 築堤材料로서 使用되고 있다.

이러한 材料의 力學的 性質은 基本 性質인 物理的 性質과 더불어 大端히 重要한 것으로 同一種類의 흙이라도 여러가지 物理的인 相異한 狀態에 따라서 그의 力學的 性質은 變하게 된다. 흙의 力學的 性質은 變化에 가장 큰 要因이 되는 것은 흙 粒子 사이에 含有되어 있는 水分(含水比)과 이 흙이 가지는 密度(單位容積重量)의 變化인 것이다.

흙을 다져서 密度를 增加시키면 土粒子의 空隙이 적어지며 흙의 摩擦力과 粘着力이 增加하고 물에 대한 感受性이 적어지며 따라서 土質構造物의 壓縮性의 減少, 剪斷強度의 增加, 容積變化의 減少, 透水性의 減少 및 凍害의 防止等 많은 利點을 增加시킬 수 있는 것이다. 그러므로 흙을 所要의 密度로서 다진다는 것은 現在까지도 또 앞으로도 가장 重要한 土質改良의 한 方法으로 생각된다.

흙의 다짐의 效果는 흙의 狀態, 種類 및 다짐의 方法에 따라서 달라지나 같은 흙이라도 그 含水狀態에 따라서 달라진다. 다짐의 方法이 一定할 때 各 흙은 어느 一定한 含水狀態(最適含水比)下에서 最大密度를 갖으며 이는 다짐의 效果를 判定하는 基本이 되는 것이다.

흙의 다짐의 程度는 構造物의 使用目的에 따라서 달라지며 室內試驗에서 標準다짐試驗方法으로서 求한 最適含水比(W_o)와 最大乾燥密度(d_7)를 基準으로 하여 다짐의 限界基準을 定하게 된다. 다짐의 限界基準은 構造物에 따라서 달라지며 美國開拓局에서 使用하고 있는 Small Dam 에 대한 限界規定을 보면 Dam 높이 50 ft 以下에서는 $W_o-2\%$ 내지 $W_o+2\%$ 를, 그리고 50 ft 以上에서는 W_o 내지 $W_o+2\%$ 의 限界含水比를 使用하고 있고 다짐率限界는 4番체(4.76mm) 通過率이 75% 以上되는 흙에 對하여 50 ft 以下에서 95%, 50 ft 以上에서 98%로 規定하고 있다. (41)

現在 우리나라에서도 이와같은 規定을 使用하고 있다. (27)

本 試驗에서는 몇개의 흙 試料에 對하여 最適含

水比를 基準으로 하여 $W_o-4\%$, $W_o-2\%$ 의 乾燥狀態와 最適含水狀態(W_o), 그리고 $W_o+2\%$, $W_o+4\%$ 의 濕潤狀態等 各種 含水狀態에서 標準다짐方法으로 다졌을 때의 다짐率과 透水係數의 變化를 研究하여 構造物 築造 및 安定度 檢討의 도움을 얻고자 하는 것이다.

II. 研究史

흙을 다짐에 있어 含水量을 調節하여 흙의 強度를 增大하고 構造物의 安定을 圖謀하는 것은 대단히 重要한 것이다. 有力한 記錄에 依하면 19世紀 以前까지는 다짐의 效果를 增大하기 爲하여 人爲적으로 흙을 적시거나 말리면서 다졌다는 事例은 없다. (28)

그러나 人類가 實際의 工事に 흙의 다짐을 適用한 것은 世紀末期에 유럽 地中海 地方에서 Earth Dam 施工時 흙을 다짐 目的으로 소나 山羊을 動員한 記錄이 있다. (44)(47) 흙쌓기에서 다짐의 重要性은 처음 英國에서 證明되었으며 1820년까지는 소나 山羊이 이 目的에 使用되었고 19世紀 中葉까지 콘크리트와 金屬으로 만든 무겁고 平滑한 Roller 가 유럽에서 使用되었으며 美國에서도 紹介되었다. (28) 이러한 흙의 다짐을 위해서 1905年 캘리포니아에서 처음으로 sheepsfoot roller 가 發達되었다.

1907년에는 steel sheepsfoot roller 가 Drum Dam 을 築造時 使用되었고 이런 roller 는 1930~1950年 사이 까지도 利用되었다. (22)

흙의 다짐에 대한 가장 近代의인 方法은 1930年初期의 California Highway Department 에서 發達되었고 그뒤 土工과 堤塘工事を 위한 흙의 다짐에 對한 基礎的인 原理가 1933년에 Proctor 에 依해서 더욱 發達되었다. (1)(8)(17)(18)(26) Proctor 가 考案한 標準다짐 方法은 直徑이 4 inch 높이 5 inch 의 Mold 에 打擊面의 直徑이 2 inch 인 5.5 Pound 의 rammer 로 12 inch 높이에서 3층의 흙을 各 25회씩 다지게 되어있다.

1925年 以來 土質力學的 知識이 갑자기 普及됨으로서 築堤材料에 對한 研究가 始作되어 (28) 世界 第二次 大戰前에 英國이나 和蘭에서는 堤塘築造時 다짐을 實施하였으며 (29) 1937年 以來 實際의으로 다짐의 方法이 土木工事に 應用된 以來 美國 A.A.S.H.O. (American Association of State Highway Officials)에서는 1938년에 도로 다짐에 對한 標準法을 設定하였다. (4)

1940年 初期에 高造道路의 發展과 더불어 여러가지 安全施工法에 對한 研究가 發達되어 美國 오하이오州 道路局에서는(1946年) 道路盛土時 盛土高

10ft를 基準으로 그 以上과 以下 두가지 경우에 對하여 盛土材料 最大乾燥密度(標準다짐時)에 對한 다짐率을 發表하였다.⁽¹⁰⁾ 그리고 같은 해에 Porter는 含水量이 큰 高塑性 土質에 對한 研究試驗에서 高塑性의 土質은 높은 空隙壓을 받고 있기 때문에 慢속한 軋壓을 하기 어려우며 이를 위해서는 施工時 土層을 얇게 깔고 軋壓해야 한다고 했다.⁽¹¹⁾

그런데 McDowell(1946)은 完全한 道路施工을 위해서는 Modified AASHO 다짐方法을 써야 한다고 했다. 이것은 mold의 지름이 6inch, 높이 5inch이며 5層의 흙을 各層마다 18 inch의 높이에서 10 Pound의 Rammer로 55回 다지도록 되어있다.⁽¹²⁾

G.P. Tschebotarioff(1951)는 그의 다짐에 對한 研究에서 含水量 變化에 依한 密度變化 關係를 發表하였다.⁽¹³⁾ 試驗室 Compaction에서 興味있고 重要한 發展은 1952年 McRae와 Rutledge에 依해서 이루어졌는데 이는 Kneading의 壓力과 時間을 增加하므로써 最大密度는 增加하고 最適 含水量比는 減少된다고 했다.⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾

美國 匪拓局에서는 1953년에 現場에서 盛土施工의 含水量과 다짐率을 調節하는 方法을 發表한 뒤로 1960年 美國 工兵團에서도 흙의 含水量과 密度에 對한 關係와 다짐率에 對한것을 發表했다.⁽¹⁷⁾

그 뒤 Modified Proctor Test 方法에 이어서 Johnson과 Sallberg(1962)는 Kneading Compactors를 開發하여 使用하였다.⁽¹⁸⁾ 그리고 같은해에 시라커스 大學校에서는 캠브릿지 空軍 研究所의 支援를 얻어서 美 空軍 飛行場 建設을 위한 다짐研究試驗을 實施했는데 이것은 盛土材料의 含水量比를 變更하면서 다졌을때에 深度別로 Cone Penetration Test를 實施한 것이다.⁽¹⁹⁾

우리나라에서는 1964년에 KSF 2312로서 흙의 다짐에 關한 規定이 만들어졌고 土聯農業土木 研究所에서는 貯水池와 防潮堤 築造時의 現場施工管理를 위한 다짐의 規定을 만들어서 實際工事に 使用하고 있다.⁽²⁰⁾

한편 軋壓土의 透水係數에 對한 研究는 Tayler(1948)가 Darcy 法則에 根據를 둔 變水位 方法에 依해서 土壤속의 透水係數를 求하는 法을 發表한 뒤로 始作하여 飽和된 粘土에 對한 透水試驗이 A. S. Michaels(1954), W. E. Schmid(1957), S. Hamsbo(1960), H. W. Olsen(1962) 및 J. K. Mitchell(1965) 등에 依해서 많이 發展되었다.⁽²¹⁾ T. W. Lambe(1954)는 定水位法을 應用하여 軋壓粘土에서의 透水係數를 求하는 法을 開發하였다.

그리고 Bjerrium과 Hunder(1957)는 三軸試驗

Cell을 使用하여 軋壓粘土의 透水試驗을 實施하였다. 이때 같은 狀態의 試料라도 飽和度가 높으면 透水係數도 높았다.⁽²²⁾⁽²³⁾

그 뒤 캘리포니아 大學校에서는 土質構造物의 密度 다짐方法, 試驗方法, 飽和度等을 考慮한 透水試驗을 實施하였다.⁽²⁴⁾

久野(1962)는 軋壓土에 對한 試驗結果에서 透水係數와 最適含水量과의 關係는 $k=ae^{bW}$ 라고 發表했다. J. L. Sherard(1963)는 다짐 및 透水試驗에 對한 研究를 하여 垂直透水係數와 水平透水係數의 關係를 發表했고⁽²⁵⁾ E. L. Matyas(1967)는 軋壓土에서 空氣와 물의 透水係數에 對한 研究를 하고 같은 含水量 및 密度의 흙이라도 透水係數는 飽和度에 따라서 달라진다고 했다.⁽²⁶⁾

河上(1969)은 含水量 變化에 따른 密度變化와 透水係數의 變化에 對한 試驗 結果에서 最少의 透水係數는 最適 含水量比보다 약간 많은 濕潤狀態에서 생기며 乾燥密度가 몇% 減少하므로써 透水係數는 數十倍나 增加된다고 했다.⁽²⁷⁾ 그리고 姜(1970)은 흙의 다짐에 對한 研究에서 흙의 다짐이 透水係數에 미치는 影響에 對해서 發表한바 있다. 그의 研究에서 透水係數는 土粒子의(粒子) 큰 關係가 있다고 했다.⁽²⁸⁾

Ⅲ. 試驗材料 및 方法

1. 使用材料

本 研究試驗에 使用한 試料는 統一 흙分類方法에 依한 類에서 SM, SC, CH 및 MH群에 屬하는 試料各 1個와 CL₁ 및 ML群에 屬하는 試料 4개 및 3개를 取하여 都合 11個를 그림 1과 같이 擇하였으며 모든 試料는 4番체(4.76mm)를 通過시킨 것으로 粒度分析 試驗結果는 그림 2와 같다.

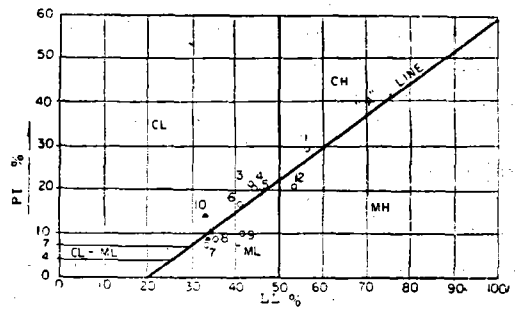
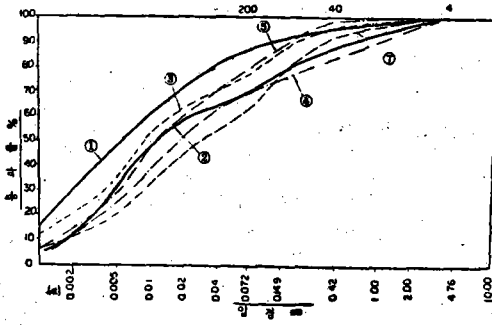
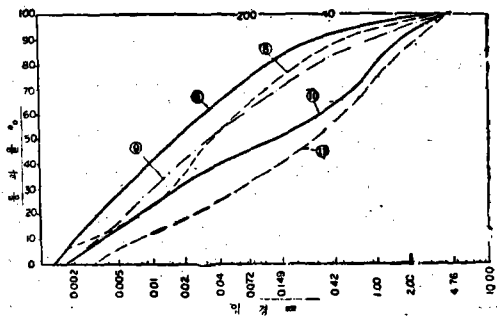


그림 1. 塑性圖



(a)



(b)

그림 2. 粒度曲線

表-1

흙의 물리성 性質表

試料名		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
試驗區分	比 重	2.68	2.68	2.65	2.65	2.66	2.65	2.72	2.68	2.67	2.65	2.68
粒度分析 (%)	No. 4체	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	No. 40체	95.24	87.74	95.74	83.00	98.00	92.00	91.76	88.00	83.28	61.94	56.86
	No. 200체	87.16	69.74	77.32	70.46	79.00	74.50	63.76	65.50	61.94	45.60	32.32
	0.005 mm	49.00	31.00	36.00	27.30	29.50	28.00	21.00	17.00	18.00	15.60	5.00
	均 等 係 數	15.85	11.80	21.60	18.80	13.58	15.00	20.66	38.40	20.66	113.4	100.00
塑性試驗 (%)	液性限界	56.50	53.80	43.00		45.20	40.90	33.17	34.80	41.00	32.50	33.20
	塑性限界	28.25	33.10	21.74	22.86	25.70	23.32	26.03	26.90	30.98	19.50	24.94
	塑性指數	28.25	20.70	21.26	20.44	19.50	17.58	7.07	7.90	10.02	14.00	8.26
分 類		CH	MH	CL	CL	CL	CL	ML	ML	ML	SC	SM

表-2

다짐試驗結果表

試料名		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
試驗區分	條 件												
	건 조 밀 도	Wo - 4	1,412	1,449	1,623	1,605	1,506	1,545	1,617	1,653	1,553	1,760	1,692
		Wo - 2	1,514	1,510	1,648	1,636	1,545	1,580	1,651	1,685	1,585	1,821	1,760
	Wo	1,575	1,561	1,681	1,665	1,575	1,607	1,670	1,712	1,610	1,858	1,824	
	Wo + 2	1,526	1,526	1,641	1,620	1,545	1,570	1,615	1,653	1,563	1,783	1,731	
Wo + 4	1,540	1,459	1,591	1,580	1,495	1,535	1,552	1,612	1,513	1,695	1,640		
다짐합수비 %	Wo - 4	20.00	19.85	15.60	16.40	19.30	17.00	16.80	14.80	18.40	9.00	11.11	
	Wo - 2	22.00	21.85	17.60	18.40	21.30	19.00	18.80	16.80	20.40	11.00	13.11	
	Wo	24.00	23.85	19.60	20.40	23.30	21.00	20.80	18.80	22.40	13.00	15.11	
	Wo + 2	26.00	25.85	21.60	22.40	25.30	23.00	22.80	20.80	24.40	15.00	17.11	
	Wo + 4	28.00	27.85	23.60	24.40	27.30	25.00	24.80	22.80	26.40	17.00	19.11	

2. 試驗方法 및 結果

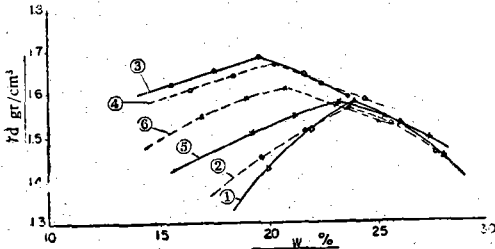
가. 分類를 위한 試驗

上記試料에 對하여 實施한 比重, 粒度分析 및 亞 다벨그限界試驗結果를 基礎로하여 統一系分類法에 依해서 分類했으며⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾ 各試料에 對한 物理性試驗結果는 表1과 같다.

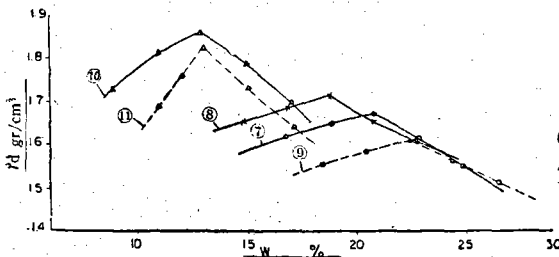
나. 다짐試驗

다짐試驗 方法은 KSF 1312의 A-1 方法으로 Proctor의 標準다짐試驗方法^(28, 29)과 같으며 mold의 內容積은 944 cc, Lammer의 重量 2.5 kg 落下高 30 cm로 하며 3層 25회씩 다짐으로서 다짐 Energy는 5.96 cm-kg/cm³로 하였다.

上記 標準다짐試驗器具로 求한 最大乾燥密度(γ_d)와 最適含水比(W_o)를 基準해서 $W_o-4\%$, $W_o-2\%$, $W_o\pm 0\%$, $W_o+2\%$ 및 $W_o+4\%$ 의 다섯가지 경우에 各試料-다짐試驗 結果는 表 2 및 그림 4와 같다.



(a)



(b)

그림 3. 乾密度 曲線

다. 透水試驗

다짐試驗에서 各試料의 最適含水比(W_o)와 最大乾燥密度(γ_d)를 求한다음 앞에서 表示한 5個條件의 含水量과 密度로 만들어서 定水位 透水試驗法과 定水位 透水試料法으로 各試料의 透水係數를 求하였다.

1) 定水位透水試驗

透水係數는 다음 公式에 依해서 求한 다음 K_{15} 로 換算(溫度補正)하였다.

$$K_t = \frac{Q}{AT} \cdot \frac{L}{h} \dots\dots\dots(1)$$

$$K_{15} = \frac{\mu_t}{\mu_{15}} K_{15} \dots\dots\dots(2)$$

- 여기서 K_t ; 水溫 $t^\circ\text{C}$ 일때 透水係數(cm/sec)
- A ; 試料의 流線의 直角인 斷面積(cm^2)
- L ; 試料의 길이(cm)
- h ; 水位差(cm)
- T ; 透水量 測定時間(sec)
- Q ; 時間 T內의 透水量(cm^3)
- K_{15} ; 水溫 15°C 일때 透水係數(cm/sec)
- μ_t ; 水溫 $t^\circ\text{C}$ 때의 粘性係數(gr-sec/cm^2)
- μ_{15} ; 水溫 15°C 때의 粘性係數(gr-sec/cm^2)

本 試驗에서 標準다짐 試驗의 mold를 使用하여 $A=80.86 \text{ cm}^2$, $L=8 \text{ cm}$ 그리고 $h=280 \text{ cm}$ 로 하였다.

2) 變水位 透水試驗

먼저 K_t 를 다음公式에 依해서 求한다음 K_{15} 로 換算(溫度補正)하였다.

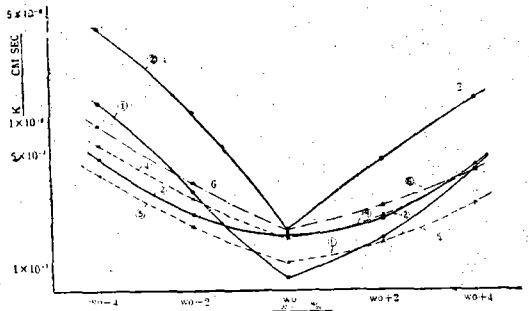
$$K_t = 2.3 \frac{L, a}{A(T_2 - T_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \dots\dots\dots(3)$$

- 여기서 K_t ; 水溫 $t^\circ\text{C}$ 때 透水係數(cm/sec)
- A ; 試料의 斷面積(cm^2)
- L ; 試料의 길이(cm)
- a ; Stand Pipe의 斷面積(cm^2)
- h_1 ; 時間 T_1 때의 Stand Pipe內의 水位 (cm)
- h_2 ; 時間 T_2 때의 Stand Pipe內의 水位 (cm)

$T_2 - T_1$; 透水量을 測定한 時間(sec)

本 試驗은 直徑 5 cm의 容器를 使用하여 $A=19.64 \text{ cm}^2$, $L=8 \text{ cm}$, $h_1=60 \text{ cm}$, $h_2=25\sim 30 \text{ cm}$ 로 實施하였다.

위의 두 方法으로서 求한 透水試驗 結果는 表 3 및 그림 4와 같다.



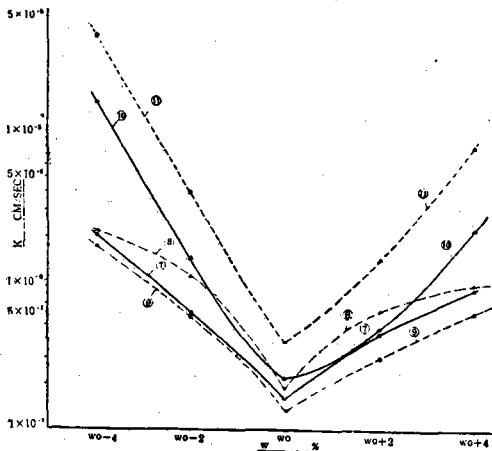
(a)

그림 4. 透水係數 曲線

表-3

透水試驗結果表 (cm/sec)

시료명 조건	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wo-4	1.30×10 ⁻⁶	4.05×10 ⁻⁶	5.31×10 ⁻⁶	6.78×10 ⁻⁶	4.21×10 ⁻⁶	9.15×10 ⁻⁶	2.08×10 ⁻⁶	2.18×10 ⁻⁶	1.71×10 ⁻⁶	1.55×10 ⁻⁶	4.36×10 ⁻⁶
Wo-2	3.18×10 ⁻⁷	1.11×10 ⁻⁶	2.45×10 ⁻⁶	3.06×10 ⁻⁶	1.94×10 ⁻⁶	3.75×10 ⁻⁶	2.91×10 ⁻⁶	1.08×10 ⁻⁶	5.70×10 ⁻⁶	1.37×10 ⁻⁶	3.88×10 ⁻⁶
Wo	8.28×10 ⁻⁸	1.80×10 ⁻⁶	1.65×10 ⁻⁶	1.65×10 ⁻⁶	1.10×10 ⁻⁶	1.82×10 ⁻⁶	1.60×10 ⁻⁶	1.88×10 ⁻⁶	1.34×10 ⁻⁶	2.17×10 ⁻⁶	3.84×10 ⁻⁶
Wo+2	1.58×10 ⁻⁷	5.28×10 ⁻⁶	2.16×10 ⁻⁶	2.29×10 ⁻⁶	1.50×10 ⁻⁶	2.61×10 ⁻⁶	4.29×10 ⁻⁶	6.19×10 ⁻⁶	2.92×10 ⁻⁶	4.40×10 ⁻⁶	1.34×10 ⁻⁶
Wo+4	4.47×10 ⁻⁷	1.35×10 ⁻⁶	4.81×10 ⁻⁶	4.46×10 ⁻⁶	2.73×10 ⁻⁶	4.48×10 ⁻⁶	8.27×10 ⁻⁶	9.07×10 ⁻⁶	5.91×10 ⁻⁶	2.04×10 ⁻⁶	7.46×10 ⁻⁶



(b)
그림 4. 透水係數 曲線

IV. 試驗結果 및 考察

1. 乾燥密度와 含水比와의 關係

本 試驗에서 使用한 11개의 試料는 200番체 通過量이 最高 87%인 高塑性의 細粒粘土質에서 부터 200番체 通過量이 32% 까지의 粗粒 실트質 모래의 흙 等이다. 乾燥密度-含水比 曲線을 考察할때 (그림 4 參照) 粗粒土의 含有量이 많으면 乾燥密度는 큰 값을 나타내고 最適含水比는 작은 값을 나타내며 曲線은 急하게 된다. 反對로 細粒土 含有量이 많으면 乾燥密度는 작은 값을 나타내고 最適含水比는 큰 값을 나타내며 曲線은 緩하게 되는데 이러한 現象은 Burmister⁽¹⁾, 河上⁽¹²⁾ 및 久野⁽¹⁷⁾의 標準다짐試驗의 結果와 姜⁽¹⁴⁾의 다짐에 關한 研究 結果와 一致한다. 그리고 같은 粒度分布의 試料일지라도 粘性土(塑性圖에서 "A" Line 上部)는 乾燥密度 曲線

이 非粘性土(塑性圖에서 "A" Line 下部)에 比해서 緩한데 이는 Sherard⁽¹³⁾의 研究에서처럼 흙의 다짐은 흙의 粒度와 塑性에 큰 關係가 있음을 보여준다.

最適含水比를 基準으로 해서 濕潤時에 比하여 乾燥時의 曲線이 緩慢한 것은 sheepsfoot roller의 現場다짐試驗⁽¹⁶⁾에서 다짐에너지가 標準보다 比較的 커질때 最適含水比보다 多少 乾燥時에 最大密度를 나타내는 境遇와 比할 수 있으며 다짐의 效果는 乾燥時가 濕潤時보다 좋음을 나타낸다.

2. 200번체 通過量과 最大乾燥密度와의 關係

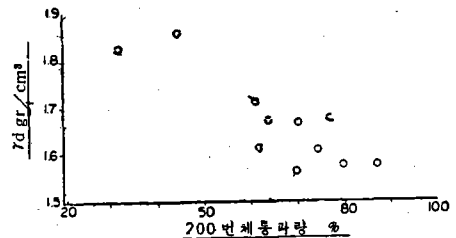


그림 5. 200번체 通過量과 最大密度와의 關係

그림 5에서 보는 바와 같이 200번체 通過量이 많으면 最大乾燥密度는 大體로 작아지며 直接的인 關係를 가진다.

3. 均等係數와 最大密度와의 關係

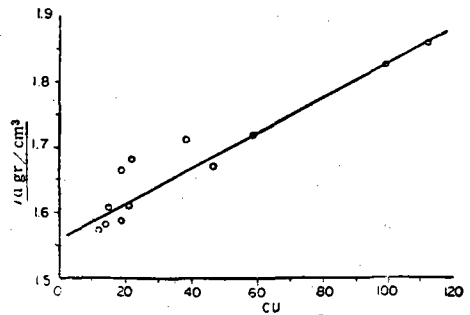


그림 6. Cu 와 γd max 와의 關係

表 1과 2로서 求한 均等係數(C_u)의 最大乾燥密度의 關係에서 均等係數가 增加하면 最大乾燥密度도 增加하며 直線的인 關係를 나타내고 있으므로 그 關係式을 求해보면 $\gamma_d = 1.56 + 0.00267 C_u$ 가 된다. 이 關係에서 앞에서 論한 200번제 通過量이 많고 塑性度가 높은 것은 같은 均等係數의 흙이라도 最大乾燥密度는 적었음을 알 수 있다. 姜⁽¹¹⁾의 다짐에 關한 研究結果에서 보면 γ_d 와 C_u 와의 關係式은 $\gamma_d = 1.660 + 0.1386 \log_{10} C_u$ 로서 本人의 試驗式보다 큰 값을 나타내고 있으나 이것은 다짐의 Energy가 크므로써 因한 結果라 하겠고 均等係數의 增加時 密度의 增加現象은 本人의 試驗結果와 一致하였다.

4. 最大乾燥密度와 最適含水比와의 關係

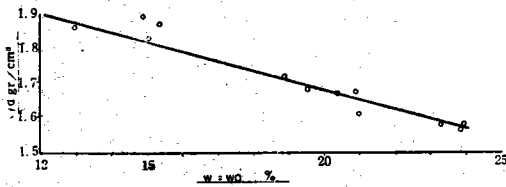


그림 7. W_o 와 γ_{dmax} 의 關係

最大乾燥密度와 最適含水比와의 關係에서 姜⁽¹¹⁾은 그의 研究에서 最適含水比가 增加하면 最大乾燥密度는 減少하며 $\gamma_d = 2.3948 - 0.037 W_o$ 인 直線的關係를 나타낸다고 하였다. 本 試驗結果에서는 $\gamma_d = 2.232 - 0.0278 W$ 로 姜⁽¹¹⁾의 結果와 비슷하게 直線變化를 나타내고 있다.

5. 含水比 變化와 密度變化의 關係

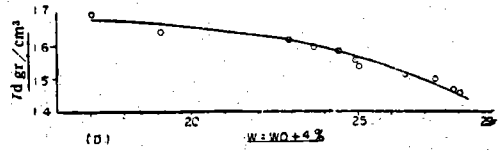
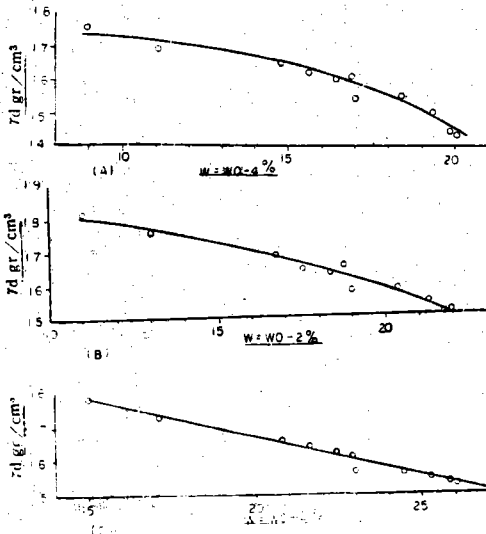


그림 8. W 와 γ_d 와의 關係

위의 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 含水比가 變함으로써 含水比-다짐率 關係는 直線에서 曲線으로 變하여 $\gamma_d = a - bw$ 에서 $\gamma_d = ae^{-bw}$ 의 關係式을 가지게 된다. 그러므로 各 條件變化(含水比 變化)에 따른 含水比-乾燥密度 關係式을 求해 보면 表 4와 같다.

表-4 乾燥密度-含水比 關係式

條 件	關 係 式
$W_o - 4\%$	$\gamma_d = 2.05 e^{-0.0176 w}$
$W_o - 2$	$\gamma_d = 2.10 e^{-0.0127 w}$
W_o	$\gamma_d = 2.232 - 0.02785 w$
$W_o + 2$	$\gamma_d = 2.125 - 0.0228 w$
$W_o + 4$	$\gamma_d = 2.09 e^{-0.0114 w}$

6. 含水比 變化에 의한 다짐率

各 試料의 最大密度를 基準으로 하여(다짐率 100%) 含水比變化에 따른 다짐率의 關係는 表 4 및 그림 9와 같다.

$$D = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}} \times 100 \dots \dots \dots (4)$$

여기서 D; 다짐率 %

γ_d ; 任意的 含水比 때의 乾燥密度(gr/cm^3)

$\gamma_{d \max}$; 最適含水比 때의 最大乾燥密度(gr/cm^3)

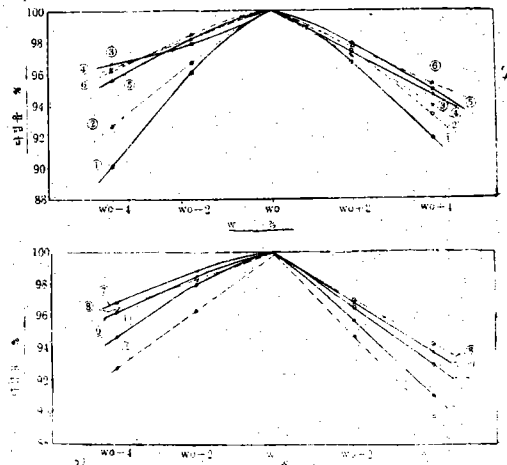


그림 9. 含水比 變化와 다짐率과의 關係

表-5

含水比變化에 의한 다짐率 (%)

조 건	시료명	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Wo - 4		90.25	92.70	96.60	96.40	95.70	96.30	96.80	96.50	96.40	94.70
Wo - 2		96.10	96.60	97.90	98.20	98.20	98.50	99.80	98.30	98.40	98.00	96.30
Wo		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Wo + 2		96.80	97.50	97.60	97.30	98.00	97.70	96.60	97.00	97.10	95.90	94.9
Wo + 4		92.00	93.30	94.70	94.90	95.00	95.30	93.00	94.40	93.90	91.20	89.9

上記 結果에서 試料 1과 2를 除外하고는 最適含水比보다 乾燥狀態가 濕潤狀態보다 다짐率이 良好함을 알 수 있는데 이는 考察 1에서 乾燥密度와 含水比關係에서 論한 바와 같다. Design of Small Dam⁽⁴⁾에서는 土堰堤의 높이 15 m 以上에서 最低

다짐率을 98%로 規定하였으며 우리나라에서도⁽⁵⁾ 이와같은 規定을 擇하고 있는데 本 試驗結果에서 98% 다짐率에 對한 各 試料의 限界 含水比를 土質 群別로 보면 表 6과 같다.

表-6

含水比 限界(다짐率 98%시)

토 차 분류	시 료 명	합 수 비 한 계 %	
		건 조 상 태	습 윤 상 태
CH	1	Wo - 1.2	Wo + 1.35
MH	2	Wo - 1.28	Wo + 1.68
CL	3, 4, 5, 6	Wo - 2 ~ Wo - 2.4	Wo + 1.5 ~ Wo + 2.0
ML	7, 8, 9	Wo - 2.0 ~ Wo - 2.8	Wo + 1.04 Wo + 1.28
SC	10	Wo - 2.0	Wo + 1.04
SM	11	Wo - 1.04	Wo + 0.72

上記 表에서 보면 細粒의 高塑性材料(CH, MH)와 粗粒의 低塑性材料(SC, SM)는 限界含水比 範圍가 좁으며 中位의 低塑性 材料(CL, ML)는 그 範圍가 넓고 그중에서도 粘性土(CH, CL, SC)가 非粘性土보다 넓어서 CL가 가장 큰 範圍를 나타내고 있다.

7. 다짐에 있어 含水比와 液性限界와의 關係

各 試料에서 乾燥狀態일 때와 濕潤狀態일 때의 다짐率의 差와 液性限界의 關係를 보면 表 7 및 그림 10과 같다.

表-7

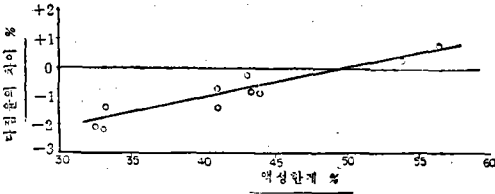
液性 限界 와 다 짐 率

시 료 명	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
액 성 한 계 %	56.50	53.80	43.30	43.30	45.20	40.90	33.10	34.80	41.00	32.50	33.20
다짐率 4% W의 변화시	+1.75	+0.6	-1.9	-1.5	-0.7	-1.0	-3.8	-2.1	-2.5	-3.5	-2.9
差(%) 2% W의 변화시	+0.4	+0.2	-0.3	-0.9	-0.2	-0.8	-2.2	-1.9	-1.4	-3.1	-1.4

上記 表에서 試料 1의 Wo-4%때 다짐率 D는 -90.25%이며 Wo+4%때 D는 +92%이다. 그러

므로 다짐率差 = -90.25% + 92.00% = +1.75%인 것이다.

A. (-2%시의 다짐율)-(+2%시의 다짐율)



B. (-4%시의 다짐율)-(+4%시의 다짐율)

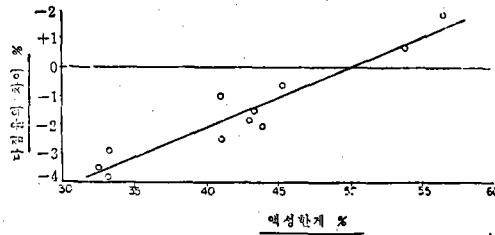


그림 10. 액성限界와 다짐率

Burmister⁽¹⁾는 다짐의 效果를 增加시키기 爲해서 는 다소 乾燥狀態가 좋으며 高塑性 材料의 다짐을 增加시키기 爲해서 軋壓土層의 厚度를 얇게해야 한 다고 했다. sheepsfoot roller의 現場다짐試驗⁽⁶⁾ 結果는 現場含水比가 最適含水比보다 多少 적을 때 最大密度를 나타냈다. (但 다짐에너지가 標準보다 클 때)

그러나 200번에 通過率이 96% 以上の 細粒高塑性 材料에 對한 tire roller의 軋壓試驗結果⁽⁷⁾에서는 最適含水比보다 0.5~1.6% 많을 때(但, 다짐에너지가 標準보다 클 때) 最大密度를 나타냈다. 위의 Burmister⁽¹⁾의 試驗이나 sheepsfoot roller의 試驗結果⁽⁶⁾에서처럼 本 試驗結果에서도 低塑性 材料일수록 乾燥狀態가 濕潤狀態에 比하여 다짐率이 良好하다. 그러나 液性限界가 50% 以上인 高塑性 材料에서는 濕潤狀態가 다짐의 效果를 더할 수 없는 것은 tire roller의 軋壓試驗結果⁽⁷⁾와 같았다.

8. 空隙比(e)와 乾燥密度와의 關係

各 試料의 物理性試驗과 다짐試驗으로부터 求한 比重과 乾燥密度로서 다음과 같이 空隙比를 求하였다.

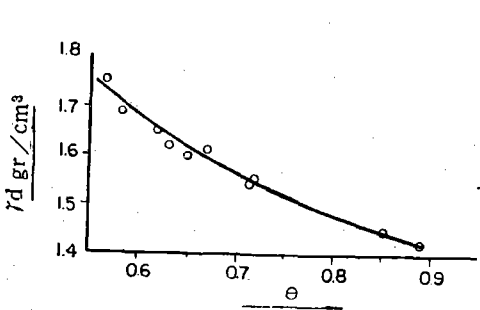
$$e = \frac{Gs \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \dots \dots \dots (5)$$

- 여기서 e ; 空隙比
- Gs ; 흙의 比重
- γ_w ; 물의 密度(gr/cm³)
- γ_d ; 흙의 乾燥密度(gr/cm³)

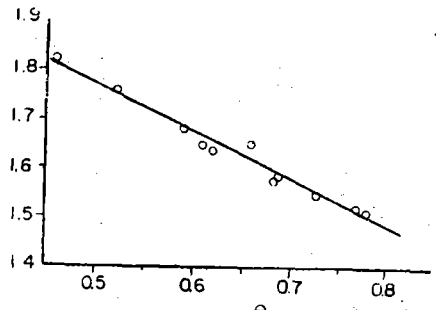
各 試料의 含水比 變化에 따른 空隙比의 값은 表 8과 같으며 空隙比와 乾燥密度와의 關係는 그림 11과 같다.

表-8 空隙比 變化

조건	시료명	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wo - 4%		0, 885	0, 851	0, 631	0, 651	0, 768	0, 716	0, 670	0, 621	0, 720	0, 566	0, 584
Wo - 2		0, 770	0, 776	0, 608	0, 620	0, 725	0, 682	0, 658	0, 591	0, 687	0, 457	0, 523
Wo		0, 703	0, 717	0, 575	0, 591	0, 689	0, 647	0, 630	0, 567	0, 660	0, 429	0, 469
Wo + 2		0, 757	0, 757	0, 611	0, 636	0, 721	0, 687	0, 685	0, 613	0, 710	0, 488	0, 550
Wo + 4		0, 852	0, 837	0, 662	0, 677	0, 783	0, 727	0, 752	0, 663	0, 764	0, 566	0, 630

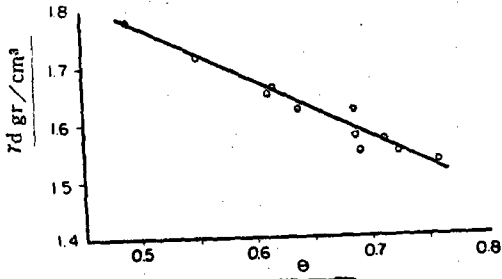


(a) Wo-4%

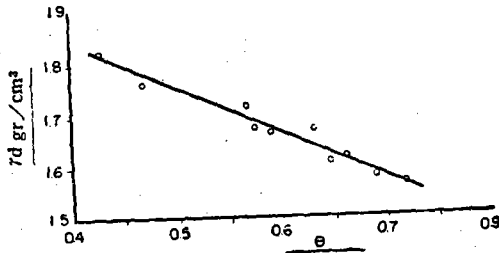


(b) Wo-2%

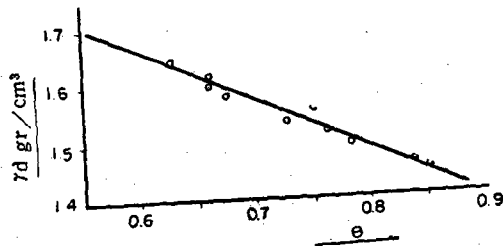
그림 11. e와 γ_d 와의 關係



(c) W_0



(d) W_0+2



(e) W_0+4

그림 11. e와 7d와의 관계

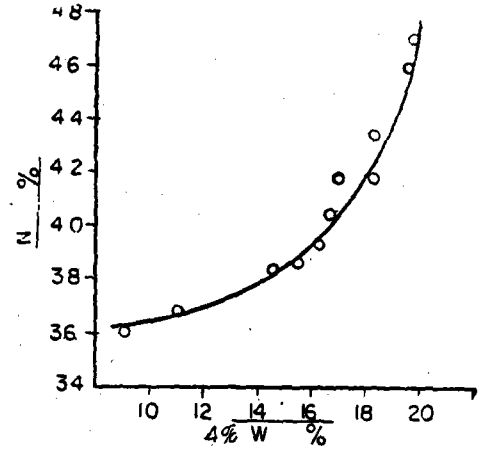
앞에 結果에서 알 수 있는 것은 空隙比의 增加로써 乾燥密度는 減少하며 그 關係는 最適含水比며 $7d = a - be$ 의 直線變化로서 表示되나 含水比의 變化가 크므로서 $7d = ae^{-be}$ 의 關係가 있다. (이 式에서 ae 의 e 는 自然對數의 e 이며 be 의 e 는 空隙比이다) 그래서 各 條件에 對한 空隙比와 最大乾燥密度와의 關係式은 表 9와 같다.

表-9 空隙比와 乾燥密度의 關係式

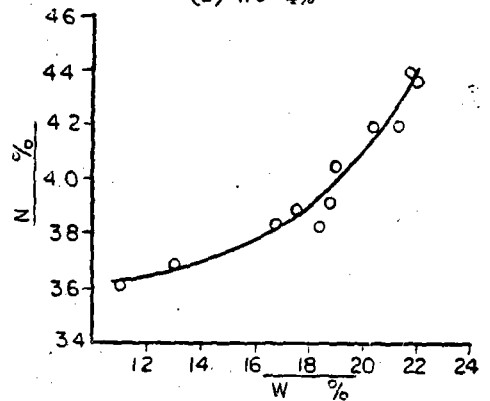
條 件	關 係 式
$W_0 - 4\%$	$7d = 2.25e - 0.524e$
$W_0 - 2$	$7d = 2.253 - 0.916e$
W_0	$7d = 2.186 - 0.872e$
$W_0 + 2$	$7d = 2.239 - 0.953e$
$W_0 - 4$	$7d = 2.168 - 0.849e$

9. 含水比와 空隙率의 關係

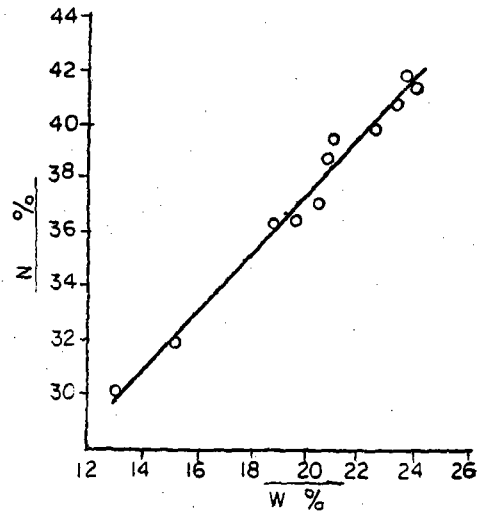
空隙率 n 은 公式(5)로 부터 다음과 같이 求하



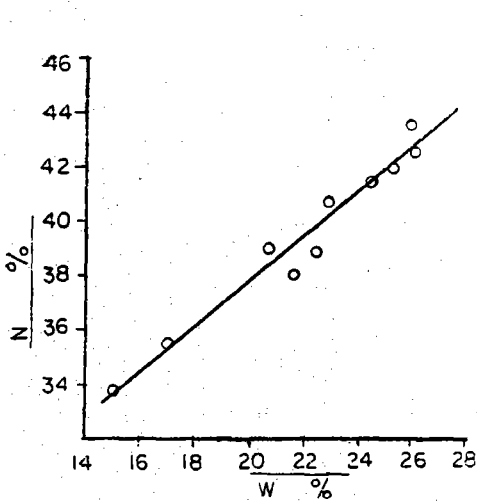
(a) $W_0-4\%$



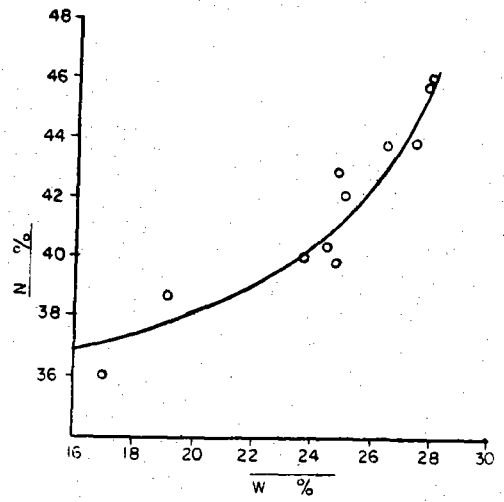
(b) $W_0-2\%$



(c) W_0



(d) $W_0 + 2\%$



(e) $W_0 + A - 8$

그림 12. w와 n와의 관계

였다.

$$n = \frac{e}{1+e} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 n; 空隙率(%)

e; 空隙比

含水比變化에 따른 各試料의 空隙率은 表 10과 같으며 含水比와 그의 關係는 그림 12와 같다.

表-10

空隙率變化(%)

시료명	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
조건											
$W_0 - 4\%$	47.00	46.00	38.70	39.40	43.60	41.80	40.50	38.30	41.85	36.15	36.85
$W_0 - 2$	43.50	44.10	37.60	38.30	42.10	40.60	39.20	37.15	40.70	31.40	34.30
W_0	41.30	41.80	36.50	37.15	40.80	39.40	38.70	36.25	39.75	30.00	31.90
$W_0 + 2$	43.10	43.10	38.10	38.90	41.80	40.80	40.68	38.00	41.50	32.80	35.50
$W_0 + 4$	46.00	45.70	39.96	40.40	43.90	42.15	42.85	39.85	43.80	36.15	38.70

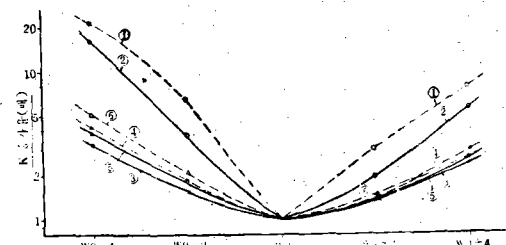
위의 結果로 부터 含水比變化에 따른 含水比와 空隙比와의 關係式을 綜合하면 表 11과 같다.

表 11. 함수비와 공극율의 관계식

조건	관계식
$W_0 - 4\%$	$n = 28e - 0.0222w$
$W_0 - 2$	$n = 28.9e - 0.0179w$
W_0	$n = 15.85 + 1.075w$
$W_0 + 2$	$n = 21.4 + 0.827w$
$W_0 + 4$	$n = 26.3e - 0.0177w$

10. 含水比變化에 의한 透水係數의 變化率

各試料의 最適含水比를 基準으로 해서 含水比가 變化時의 透水係數의 增加率을 求해보면 表 12 및 그림 13과 같다.

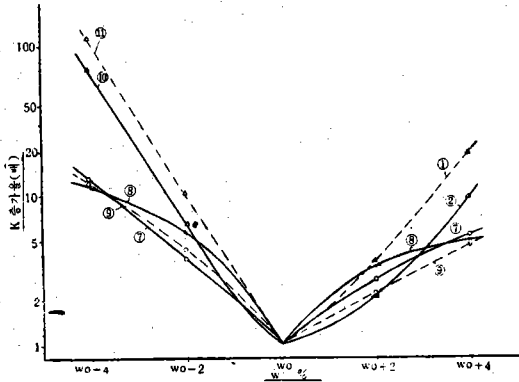


(a)

시료명	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
조건											
Wo - 4%	15.7	22.5	3.22	4.10	3.83	5.05	13.00	11.58	12.74	71.30	116.50
Wo - 2	3.60	6.18	1.50	1.82	1.77	2.07	3.70	5.74	4.25	6.21	10.10
Wo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Wo + 2	1.90	2.88	1.31	1.39	1.36	1.44	2.68	3.29	2.18	2.03	3.49
Wo + 4	5.40	7.50	2.31	2.80	2.48	2.46	5.24	4.82	4.41	9.40	19.45

11. 200番체 通過量과 透水係數

最大密度時 200番체 通過量과 透水係數의 關係는 그림 14와 같다.



(b)

그림 13. W변화에 의한 K증가율

久野⁽¹⁷⁾의 試驗에 依하면 最適含水比를 基準으로 해서 乾燥時의 透水係數가 濕潤時보다 越等하게 컸고 이런 結果는 Mitchell과 Hooper⁽¹⁹⁾의 碾壓된 砂質粘土의 透水試驗에서도 같은 狀態의 變化를 나타냈다. 即 +2% 濕潤時에는 3배가 增加되었으나 -2% 乾燥時에는 100배나 增加되었다.

그림 16에서 볼때 久野⁽¹⁷⁾나 Mitchell⁽¹⁹⁾의 試驗 結果와 같이 最適含水比보다 濕潤狀態가 乾燥狀態보다 透水係數의 增加率이 적으며 高塑性 細粒土(CH, MH)를 除外하고는 粗粒土일수록 透水係數의 增加率이 크며 같은 粒狀의 흙이라도 非粘性土가 粘性土보다 透水係數의 增加率이 크다.

이것은 Greager⁽²⁰⁾의 研究에서처럼 土質內의 물의 흐름은 土粒子의 自乘의 比例하며 塑性에 關係가 있기 때문이라 하겠다. 그런데 高塑性의 細粒土(CH, MH)가 透水係數의 變化가 큰것은 高塑性 粘土는 含水比가 적을때 덩어리가 되기 쉽고 이것이 붕괴되기 곤란하며, 含水比가 많을때는 덩어리가 수膜으로 덮이고 空隙는 전부 물로 充滿되며 각 흙덩어리는 粗粒土의 土質과 같은 狀態로되며 透水係數 增加現象이 크게 이루어기 때문이라고 하겠다.

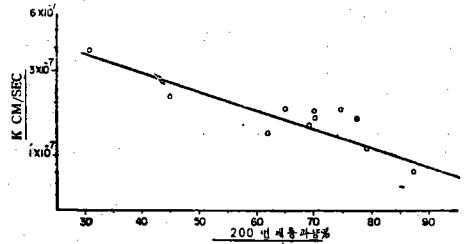


그림 14. 200번체 통과 량 K

위에서 볼때 200番체 通過量이 많으면 透水係數가 增加하며 透水係數 K와 200番체 通過量 P와는 $k=ae^{-bP}$ 의 關係가 있다.

이는 Greager⁽²⁰⁾의 研究나 Earth Manual⁽²⁰⁾에서처럼 粗粒子의 增加에 따라서 透水係數도 增加하기 때문이다.

12. 最適含水量과 透水係數의 關係

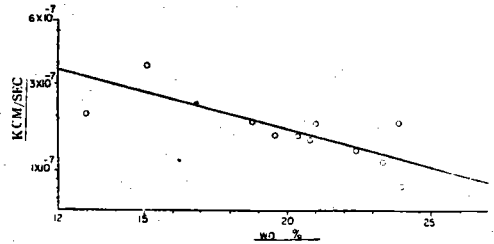


그림 15. Wo와 K와의 관계

上記 結果에서 볼때 最適含水量이 減少하므로서 透水係數의 값이 커지는 것은, 흙의 粒子의 크기가 增加하므로서 일어나는 現象이라고 하겠다.

久野⁽¹⁷⁾는 最適含水量 Wo와 透水係數 K와는 $K=ae^{-bWo}$ 의 關係가 있다고 한것과 같이 本 研究 試驗에서도 같은 結果를 나타내어 $K=1.1 \times 10^{-6}e^{-0.0053Wo}$ 의 關係式이 成立됨을 알수 있다.

13. 乾燥密度와 透水係數와의 關係

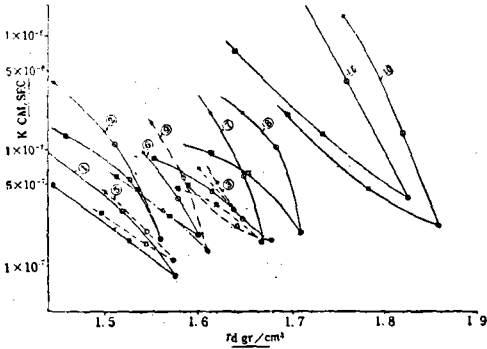
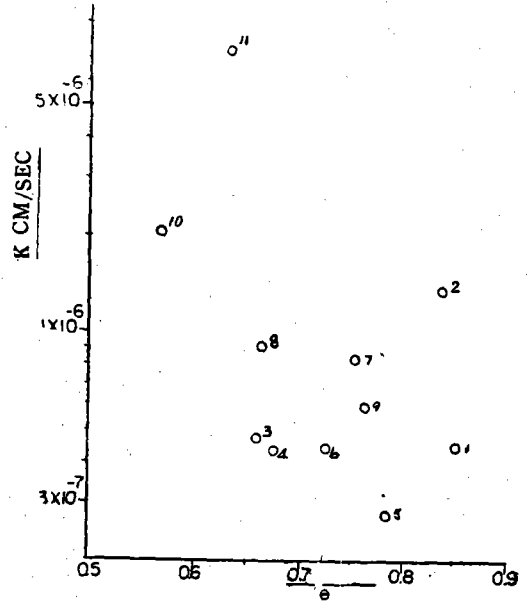
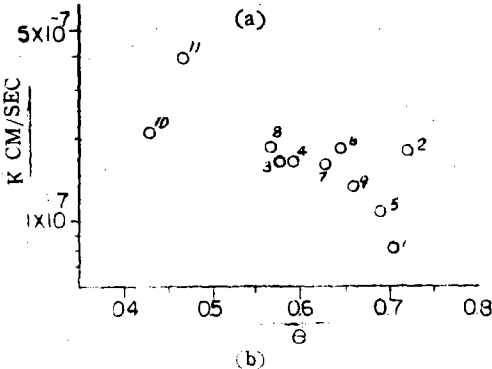
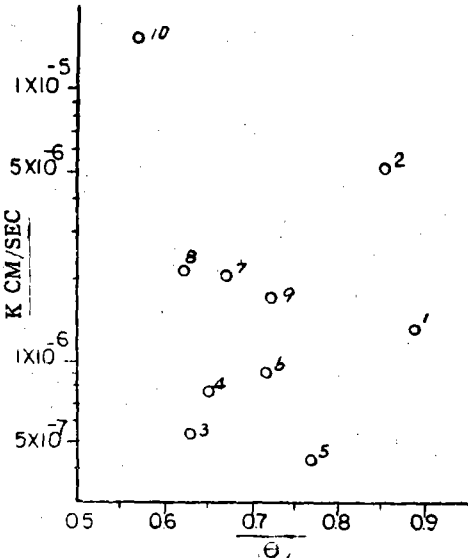


그림 16. γ_d 와 K 의 관계

最適含水狀態에는 大體로 密度에 比例해서 透水係數가 增加한다. 그리고 高塑性의 試料1과 2를 除外하고는 各 試料別로 含水比變化로 密度가 減少되고 透水係數는 增加되는 現象은 密度가 큰 試料일 수록 크다. 試料1과 2의 增加範圍가 큰것은 高塑性 材料로서 粒子의 分離가 쉽게 일어나지 않아서 큰 空隙이 생기므로 因한 것이라 하겠다.

14. 空隙比와 透水係數의 關係



(c)

그림 17. e와 K와의 關係

最大乾燥密度時 空隙(e)의 增加로서 透水係數는 減少하여 $k=ae^{-be}$ (여기서 $-be$ 의 e는 空隙比인)의 關係가 있으나 含水比 變化로서 空隙이 增加될때 空隙과 透水係數는 一定한 關係를 찾아볼수 없다.

그러나 이 때는 空隙比에 關係없이 粗粒材 및 非 塑性 材料가 透水係數의 增加現象이 棼을 보여 주 었다.

V. 結 論

盛土用 흙의 含水比變化에 依한 다짐 率과 透水 係數變化에 對하여 本 試驗에서 얻은 結果를 要約 하면 다음과 같다.

1. 一般的으로 粗粒子의 흙일수록 最大乾燥密度는 크고 最適含水比는 작으며 乾燥密度曲線의 傾斜는 急하며 細粒土일수록 最大乾燥密度는 작고 乾燥 密度曲線은 緩하다.

2. 最適含水比가 增加하면 最大乾燥密度는 減少 하여 $\gamma_{dmax}=2,232-0.0245 W_o$ 의 直線의인 關係가 있으나 含水比의 變化가 생기므로서 $\gamma_d=ae^{-be}$ 의 關係式으로 變한다.

3. 最適含水比를 基準으로해서 乾燥狀態의 다짐 率이 濕潤狀態보다 좋으나 液性限界가 50以上の 高 塑性土에서는 濕潤狀態가 좋다.

4. 粗粒子의 量이 같은 흙이라도 粘性土일수록 含 水比 變化로 因한 다짐率의 減少現象이 작다.

5. 空隙比와 最大乾燥密度와의 關係는 γ_{dmax}

=2, 186-0.872 e의 직선의 관계가 있으나 수비비 변화가 크면 $\tau d = ae^{-b\sigma}$ 의 관계로 된다.

6. 수비비 증가로서 공률률도 증가하며最適含水時에는 $n = 15.85 + 1,075 W$ 의 관계가 있으나 수비비의 변화가 크면 $n = ae^{bW}$ 로 된다.

7. 高塑性材料和粗粒材일수록 수비비 변화時透水係數의 증가率이 크다.

8. 最適含水비를基準으로 濕潤狀態가 乾燥狀態보다透水係數가 적다.

9. 粗粒子の量이 같은 흙이라도 塑性이 큰 흙은透水係數가 적다.

10. 一般적으로 最適含水비가 큰 흙일수록透水係數가 적다.

11. 透水係數는 密度, 粒度, 公률률에 關係가 있고 飽和度가 클수록透水係數도 크다.

VI. 摘 要

水水資源開發을爲한 Earth Dam이나 道路와 같은 흙을 主로하는 많은 構造物築造에 있어서 그 構造物性質에 따라서 흙의 種類가 決定되며 때로는 흙의 性質에 따라서 構造物의 設計가 달라진다. 特히 貯水를 目的으로 하는 堤塘築造에서 中心粘土材料의 選定은 完全한 構造物을爲해서 또 工事費 切減을爲해서 大端히 重要한 問題라 하겠다. 이를 위해서 여러 種類의 흙이 使用되고 있고 이들 흙의 諸般 力學的 性質이 이미 實施된 많은 試驗結果로서 實際 設計에, 또 構造物 安全度 檢討에 應用되고 있으나 이들 結果는 그 흙의 最適含水비 最大密度에 對한 것으로 實際 施工過程에서 볼때 最適含水狀態下에서 施工하기는 어려운 것으로 이런 境遇에 흙의 力學的 性質에 對한 資料가 없어 設計 및 安全度 檢討에 支障이 많은바 이를 위해서 本 試驗을 實施하였다.

1. 試驗에 使用한 試料는 實際 貯水池 築堤材料로서 使用하고 있는 材料를 現場에서 採取하였다.

2. 本 試驗은 農業振興公社 農工試驗所에서 實施하였다.

3. 本 試驗 結果로서 다음과 같은 點을 實際業務에 應用할 수 있다.

가. 現場含水비를 알므로서 工事材料로서의 適否 判斷을 내릴 수 있다.

나. 含水비가 變化時 다짐率과 透水係數를 알 수 있으므로 實際設計 및 施工管理에 適用할 수 있다.

다. 施工된 構造物의 다짐率을 알므로서 이에 適合한 安全度 檢討를 할 수 있다.

라. 道路와 같은 높은 支耐力를 要하는 構造物을爲해서는 最適含水비 내지 乾燥狀態가 좋고 貯水池와 같은 止水를 要하는 構造物에서는 最適含水비 내지 濕潤狀態로 施工함이 좋다. 그러나 高塑性 흙에서는 支耐力 및 止水를 위해서 共히 後者の 境遇가 좋다.

以上的 研究結果가 完璧하다고는 할수 없으나 本 試驗 結果로서 수비비 變化에 對한 諸般 力學的 性質의 變化狀態를 求하기에 最善을 하였으므로 이 分野의 研究者나 設計者 또는 施工者와 같은 實務者에게 多少의 도움이 된다면 큰榮光으로 생각 하겠다.

引用 文 獻

1. Burmister. D.M, 1964; "Environmental Factors in Soil Compaction", A.S.T.M. Special Technical Publication No 337, A.S.T.M.
2. Dept. of the Air Force and the Army. U.S.A., 1954; "Control of Soil in Military Construction", P. 150-161
3. "Compaction of Soil", 1964, A.S.T.M. Special Tech. Pub. No 377; p. 80-101,
4. "Design of Small Dams"; 1960, U.S. Government Printing Office, Washington
5. "Design Manual"; 1961; NavDocks DM-T Dept. of the navy, Bureau of Yards and Docks Washington 25. D.C. p. 7-9-1 7-9-11.
6. "Effect of Size of feet on Sheepsfoot Roller"; 1954. Waterway Experiment Station Vicksburg Mississippi, Tech. Memorandum No 3-271
7. "Effect on Soil Compaction of Tire Pressure", 1956; Waterway Experiment Station, Vicksburg, Mississippi. Tech Memorandum No 3-271
8. Goodman. L.J. and A.R. Aidum, 1965, "Sol-Surface Compaction with A Foam-Type Explosive" Journal of the Soil mech. and Foundation Division, ASCE. Vol 91 No SM 1
9. Greager. W.P, J.D. Justin and J. Hinds, 1944 "Engineering for Dams" p 305-316
10. Hilf. J.W, 1966; "A Rapid Method of construction control for Embankments of cohesive Soil" A water resources Tech. Pub. Bureau of Reclamation U.S.A.
11. Hydro-Electric Power Commission, 1968 "Lower Notch Generating station Technical Specification" Ontario, Canada
12. 진병익, 1965 "土質力學"

- 치정문화사 p 204~210
13. 河上房義, 1939 “新編土質力學” 森北出版株式會社 p 210~223
 14. 강예목, 趙成燮, 金成完, 1969 “흙다짐에 관한 연구 1” 농공학회지 Vol 11 No. 4,
 15. 강예목, 1970 “흙다짐에 관한 研究 II” 농공학회지 Vol 12 No. 1
 16. ———, 1970, “흙다짐에 관한 研究 IV” 농공학회지 Vol 12 No. 3
 17. 久野悟郎, 1962, 土の締固め 技報堂全書 57, 技報堂, p. 1~3, 44~100
 18. Matyas. E.L., 1967, “Air and water permeability of compacted soils” A.S.T.M. spec. Pub. No 417 A.S.T.M. U.S.A.
 19. Mitchell. J.K. and D.R. Hooper, 1965, “Permeability of compacted clay” Journal of the Soil mech. and Foundation Div. A.S.C.E. Vol 91, No SM 4
 20. 농림부. 1968, “토지개량사업 설계기준(유틸면 편)” p. 117
 21. Lee. K. L and S.C. Haley, 1968 “Strength of Compacted clay at High Pressure” Journal, A.S.C.E. Vol 94 No SM6
 22. Shevard J.L, R.J. Wood ward, S.F. Gizienski and W.A. Clevenger, 1963, “Earth and Earth-Rock Dams” John Wiley and Sons, Inc. p 201-207, 563-577
 23. Schwab. G.O, R.K. Frevert, T.W. Edmins, and K.K. Barnes, 1966, “Soil and water conservation Engineering(Second Edition)”. John Wiley and Sons, Inc. p 119-121, 296-325
 24. Taylor. D.W. 1948, “Fundamentals of Soil Mechanics John Wiley and Sons, Inc. p 97-123
 25. Terzaghi. K. 1943 “Theoretical Soil Mechanics John Wiley and Sons, Inc. p 301-304
 26. Terzaghi. K and R.B. Peck 1968, “Soil Mechanics in Engineering Practice” p 440-451 John Wiley and Sons, Inc. p 36-63, 440-459
 27. 토련, 농업토목연구소, 1964, “工堰堤 盛土 施工管理試驗” 기술자서 32호
 28. Tschebotarioff. G.P, 1951, “Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures” Mc Graw-Hill, New York. p 311-320
 29. Turnbull. W.J. J.R. Compton and R.G. Ahlvin, 1966, “Quality Control of Compacted Earth” Work” Jour. A.S.C.E. Vol 92 No SM 1
 30. U.S. Dept. of the Interior, 1968. “Earth Manual, Bureau Reclamation, Denver, Colorado p. 34-44, 60-65, 192-202, 237-254.