

# Beaker方法에 의한 堤心土의 機械的分析

—器興貯水池堤心材의 實驗報告—

鄭 昌 柱

## 1. 緒 言

古典 土質力學에 있어서는 흙을 彈性體로 보고 또한 固體에 있어서의 힘의 平衡과 摩擦의 法則을 適用하여 解明하여 왔지만 近來에는 土性論의 立場에 立脚하여 이것을 解明하려고 하고 있다. 이 結果 先進諸國에서는 土性を 調査하기 爲한 各種의 實驗施設이 必要하게 되고 設計施工에 앞서 慎重한 檢討를 行하고 있다.

現今 我國에서 築造되고 있는 거의 全部의 灌溉用 貯水池가 흙을 材料로 한 堰堤임에도 不拘하고 이 用材로써의 흙을 아무런 科學的인 檢討도 없이 舊態依然한 設計 施工 方法을 踏襲하고 있는 것은 하루 빨리 止揚되어야 할 時急한 問題이다. 最近 我國에서도 이 分野에 研究熱이 旺盛하고, 關係機關에 實驗用 機具가 整備 乃至 計劃中에 있음은 기쁜 現象이 아닐수 없다.

筆者는 基本的 土性中의 重要한 一部인 粒度의 機械的 分析을 試圖하여 本學 農工學科生이 器興貯水池를 見學하는 機會에 採取한 堤心材를 試料로 하여 Beaker方法에 依하여 實驗을 遂行하였다. 現在 外國에서 行하여지고 있는 分析 方法은 Hychrometer methos(比重計方法)에 依한 것이며 이것이 標準化되어있다. 이 Hychrometer에 依한 原理에 Stokes의 法則에 依據한 것임으로 此 Beaker方法과 大同小異한 것이다. 이 Beaker方法은 近百回의 沈降作用을 해야 하기때문에 長期의 實驗時間을 要하는 缺點이 있으나 機具나 技巧이 簡單한 利點이 있다고 할 것이다.

이 粒度分析만으로 土壤의 物理的 性質의 全部를 把握할수는 없지만 이 土壤粒度가 根本的인 性質이되므로 土工의 모-든 實驗에 앞서 實行해야할 重要한 實驗인 것이다.

## 2. 實驗用機具

- a. Beaker(Volume 100cc)
- b. 恒溫電氣乾燥爐(Electric Drying Oven)
- c. 碯子製 Syphon

d. 攪拌器(Electric Shaker)

e. Balance(感度 0.01 gr)

f. 篩(Sieve), (No. 20, 40, 60, 140, 200)

g. 水槽(Water Tank)

h. Le Chatelier 比重瓶

## 3. 分析方法的 原理

本裝置에 依한 分析原理는 흙의 粒徑이 微細하기 때문에 Sieve에 依한 分析이 不可能한 微小粒子를 그의 水中에서의 沈降速度가 粒徑에 따라 相異함을 利用해서 一定한 時間에 一定한 距離를 降下하는 Limiting Diameter보다 微細한 흙을 識別해내는데있다. 卽 Stokes氏는 無限히 넓은 液體內部를 단하나의 土粒이 沈降할때의 終局速度(Terminal velocity)를 다음 式으로 表示하였다.

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2$$

여기서 V; Terminal velocity

$\gamma_s$ ; 土粒子의 單位重量

$\gamma_w$ ; 물의 粘性係數인

D; Limiting Diameter

이 Stokes氏의 式에서 一定한 粒徑(本實驗에서 는 0.02, 0.01, 0.005)이 沈降하는 速度를 計算하고 이에 依하여 11cm까지 標識한 Beaker에서 8cm降下하는 時間을 計算하여 沈降이 始作한後 이 時間이 經過한뒤 Syphon에 依하여 3cm 以上の 懸濁液을 他容器에 옮긴다. 이와같은 操作을 數十回되풀이하여 各己 分離된 懸濁液을 臨界 溫度(Critical Temperature)  $-100^{\circ} \sim 110^{\circ}$  까지 Drying Oven에서 乾燥시켜 各其重量을 알면 足하다.

여기서 問題되는것은 Stokes法則인데 原來 이 公式은 모든 粒子의 比重을 同等視했고 또한 無限히 넓은 液體속에 單하나의 土粒이 降下하며 또 粒子를 球로 假定한데 反하여 實際로는 以上 어느 境邊에도 一致할수 없는것이다. 그러나 數

十回の 沈降作業을 反復함으로써 實驗誤差를 縮少시킬수있으며 工學用 Data로서 支障없는 값을 求할수 있는것이다.

4. 沈降速度 및 沈降時間의 計算

Limiting Diameter는  $D_1=0.005$  mm,  $D_2=0.01$  mm,  $D_3=0.02$  mm로 했으며, 粘性係數 (Coefficient of viscosity)는 16.0c의 값을 取하여

$\mu = 0.01116 \frac{\text{dyne sec}}{\text{cm}^2} = \frac{0.01116}{980.7} \cdot \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2}$ , 물의 比重은 0.999, 土粒子의 比重은 2.45(다음 土粒子 比重測定實驗值 参照)로 하여 Stokes氏式에 代入한 結果 Terminal velocity와 沈降時間은 表 [I]과 같다.

表 [I] 沈降速度時間計算表

Limiting Diameter	$(\gamma_s - \gamma_w)D^2$	$18\mu$	V	$T = \frac{8}{V}$
$D_1=0.005$	0.0000003627	0.0002048	0.00177	$T_1=4519$ 秒=75分15秒
$D_2=0.01$	0.000000451	0.0002048	0.002202	$T_2=3636$ 秒=66分
$D_3=0.02$	0.000005804	0.0002048	0.0233	$T_3=283$ 秒=4分43秒

5. 實驗課程 및 結果

本實驗은 日本土質委員會의 實驗規定에 立脚해서 遂行하였다.

a. 土粒子 比重測定實驗

Le Chatelier比重瓶을 使用해서 眞比重을 測定한 結果는 表 [II]와 같다.

表 [II] 比重測定值

	Ws(gr)	$V_s = V_0 - V_1$	$G_s = \frac{W_s}{V_s}$
1	50	20.40	2.45
2	50	20.30	2.46
3	50	20.50	2.44

※  $G_s$ 의 값은 平均值로서 2.45를 取했음

b. 土粒의 機械的 分析實驗

먼저 Drying oven에서 臨界溫度에서 重量의 變化가 없게 乾燥한 試料 50gr씩을 取하여 標識이 되어있는 3個의 Beaker內 火中에 넣은後 1時間 以上 끓인뒤에 室溫으로 冷却시켜 Beaker의 밑에서 3cm 以上의 上澄液을 各各 別個로 옮기고 3cm 以下에 남은것에 土粒의 分離를 目的으로 水槽에 準備한 0.5% Ammonia水의 分散劑를 높이 11cm까지 加해서 3分 以上 攪拌器로서 攪亂하여 16°C로 水溫을 維持시키면서 所要時間 靜置했다가 硝子製 Syphon에 依해 3cm 以上의 上澄液을 排除하였다. 이와같은 操作을  $D_1=0.005$ 에 對하여 40回,  $D_2=0.01$ 에 對하여 25回,  $D_3=0.02$ 에 對하여 20回 反復했으며 이것을 乾燥시킨 結果는 表 [III]와 같으며 이 實驗에서 生진

實驗誤差 2.5 gr은 各限界粒徑에 比例配分하여 各限界粒徑에 對한 3個의 實驗值를 平均한것을 表示한것이다.

表 [III] 器與貯水池堤心土機械分析結果

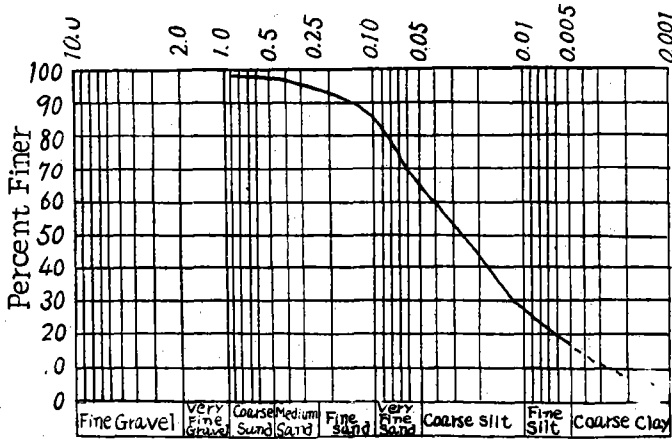
Sieve No.	Diameter	Retained weight	Passed weight	Percentage by weight
20	0.840	0.90	49.10	98.2%
40	0.420	1.23	47.87	95.7
60	0.250	1.55	46.32	92.6
140	0.105	2.35	43.97	87.9
200	0.074	6.20	37.77	75.5
	0.02	14.06	23.71	47.4
	0.01	9.11	14.60	29.2
	0.005	6.00	8.60	17.2

6. 實驗結果의 檢討

圖 [I]은 實驗에서 얻은 結果를 粒徑加積曲線 (Size accumulation Curve)에 表示한것이다.

機械的 分析의 가장 便利한 表示方法이 이 法이며 이 曲線의 性質은 粒徑이 均等할수록 急傾斜이다. 또한 이 曲線은 그의 獨特한 形狀으로 곧 그 품의 特徵을 나타낼수가 있다. 왜 냐하면 普通 ㅍ라밀狀 表示法에서는 粒徑의 單位를 取하는 方法에 따라서 그 形狀이 달라질수 있으나 加積曲線이 1個 품의 機械的 分析結果는 恒常 어느 境遇에도 獨特한 形狀을 나타내기 때문이다. 이 機械的 分析에 對한 加積曲線의 特性을, 數字基準으로 表示하는 是는 Allen Hazen의 方法

圖 (I) 기흥저수지 제심토 기계적 분석 가적곡선



을 使用한다. 有效粒徑( Effective Size)  $D_{10}$ 이 나 均等係數(Uniformity Coefficient)  $D_{60}/D_{10}$ 이 바 로 이것이며, Hazen은 처음에 이 有效粒徑으로 透水係數를 推定하는데 使用했으나 微粒子에 關 한 知識이 增加해감에 따라서 이와같은 土壤의 性質이 主로  $D_{20}$ 에 依存함으로 차라리  $D_{20}$ 과  $D_{70}$  을 이 加積曲線의 代表的인 量으로써 選擇함이 좋을것이라는것이 明白하여졌다. 그러나 一般으 로  $D_{10}$ 과  $D_{10}$ 을 使用하고있다. 이와같이 曲線의 代表的인 粒徑으로서 構造物 設計의 基準 或은 理想的인 配合狀態의 透水係數를 論及할수있다.

大體로 器興貯水池 堤心土의 機械的 分析에 依한 加積曲線은 粗粒砂에서 粘土에 이르는 曲線이 理想標準曲線에 近似함으로 理想的인 混合 狀態의 흙이라 할수있다. 最小의 限界粒徑의 通 過率이 17%나 되기 때문에 이 曲線의 趨勢에 依하여  $D_{10}$ 을 찾으면  $D_{10}=0.003\text{mm}$ 이며,  $D_{60}=0.04\text{mm}$ 이므로 均等係數  $D_{60}/D_{10} \approx 13$ 이 된다. 即 이 土壤은 有效徑  $0.006\text{mm}$ , 均等係數 6.7에 相當한다. 우리가 工事場 近處에서 求得할수 있 는 材料가 過度한 透水性의 것이 아니고 安定이 될수있는 것이라면 設計施工方法에 差異를 갖어 오는 限이 있더라도 어느材料가 훌륭히 採用 될 수있다는것은 널리 알려진 事實이다. 여기에서 安定에 關한 問題는 個別的實驗에 依한 綜合的 檢討으로써만 可能하기 때문에 言及할수 없으나 다음과같이 透水性은 推理해 볼수있다. 이 推算 에 있어의 Hazen의 式은 이試料가 粘質土이기 때문에 適合하지 못하며 表 [IV]에 依據코져한

表 [IV] 名粒徑에 依한 透水係數의 概略值\*

20% Size	$k \times 10^4$ (cm/sec)	$k \times 14^4$ (ft/min)	k(ft/year)	Soil Classification (U.S. Bureau)
0.005	0.030	0.059	3.10	Coarse Clay
0.01	0.105	0.206	10.84	Fine silt
0.02	0.400	0.787	41.40	Coarse silt
0.03	0.850	1.675	88.20	
0.04	1.750	3.450	181.50	
0.05	2.800	5.515	290.00	Very fine sand
0.06	4.60	9.060	477.0	
0.07	6.50	12.80	673.0	
0.08	9.00	17.75	935.0	
0.09	14.00	27.60	1,450.0	
0.10	17.50	34.50	1,815.5	Fine sand
0.12	26.00	51.30	2,698.0	
0.14	38.00	75.00	3,940.0	
0.16	51.00	100.00	5,256.0	
0.18	68.50	135.00	7,100.0	Medium sand
0.20	89.00	175.00	9,200.0	
0.25	140.00	276.00	14,500.0	
0.30	220.00	434.00	15,780.0	
0.35	320.00	630.00	33,150.0	
0.40	450.00	886.00	46,600.0	Coarse sand
0.45	580.00	1,142.00	60,000.0	
0.50	750.00	1,480.00	77,800.0	
0.60	1,100.00	2,160.00	113,500.0	Fine gravel
0.70	1,600.00	3,160.00	116,200.0	
0.80	2,150.00	4,240.00	223,200.0	
0.90	2,800.00	5,520.00	290,300.0	
1.00	3,600.00	7,100.00	373,500.0	Coarse gravel
2.00	18,000.00	35,400.00	1,860,000.0	

\* 이 表는 Justin, Hinds, Creage 共著 Engineering For Dam, Volume III 649 page에서 傳載한것임.

다. 이 表 [IV]는 美國의 Zanesville, Fort peak, Quabbin 등의 Dam에서 Clay로부터 sand에 이르는 여러土壤에 對해서 數百回의 透水試驗을 通하여 얻은 平均狀態의 透水係數를 表示한것이다.

圖 [I]의 粒徑加積曲線에서 20% 粒徑은 0.006 mm이며 이것에 相當하는 透水係數値는 表 [IV]에서 0.005와 0.01mm의 값을 按分하여  $k =$

$0.0000045 = 4.5 \times 10^{-6}$  cm/sec로 된다. 이와 같이 推定하여 얻은 概略值를 이 堤心材의 透水係數値에 相當한 것이라 한다면 이 材料의 透過性, 非透過性을 다음表 [V]에서 言及할수있으며 또한 非透過性이어야 할 堤心材의 適合性을 말할 수 있다.

表 [V] 투수 계수 및 그 응용 (cm/per/sec)

	10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	1.0	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>
Drainage property	Good Drainage						poor Drainage		practically Impervious			
Application in Earth Dam and Dikes	pervious section of Dams and Dikes						Impervious Section of Earth Dams & Dikes					
Types of Soil	Clean Gravel	Clean sands Clean Sand and Gravel Mixtures				Very Fine Sands; Organic & Inorganic Silts, Mixtures of sand, silt and clay glacial till, stratified clay Deposites, etc.			Impervious Soils e.g. Homogeneous clays below zone of weathering			
							"Impervious soil" Which are Modified by the Effects of vegetation and weathering.					

이 表는 Engineering for Dams volume III 646頁에서 傳載하였음

以上에서 推理한 透水係數  $k = 4.5 \times 10^{-6}$  cm/sec는 이表 [V]에서 大體로 "poor Drainage"에 屬하며 Dam의 非滲透性斷面 即 堤心土로서 使用可能한 材料임을 알수있다. 그러나 一般으로 同一한 加積曲線이라 하여도 透水는 그 粒子의 模樣에 따라서 대단한 差異가 있고, 또 直接의 透水試驗이 信賴性과 經濟上의 利點이 있기 때문에 間接的인 透水推定 即 이 機械的 分析을 基準으로 土壤의 透水係數를 計算하지는 않는다. 오로지 直接的인 透水試驗이 이루어지지 않았을 때 概略值를 얻을수 있을따름이다.

다음으로 이 加積曲線과 內部摩擦角(Angle of Internal friction)과의 關係를 이룩하는것도 아직 成功하지 못하고있다. 即 砂質土의 內部摩擦角은 粒徑 뿐만아니라 粒子의 模樣 그表面의 粗度(Roughness)에 關係하기 때문에 同一한 加積曲線을 갖인 壓縮된 두 土壤의 內部摩擦도 差異가 있을수있다는것이다. 또한 Silt나 clay와 같은 微細土와 內部摩擦과를 連關하려고하는 企圖도 아직 成功的인 結果를 얻지 못하고있다.

以上과같이 機械的 分析으로 다른 物理的 性質

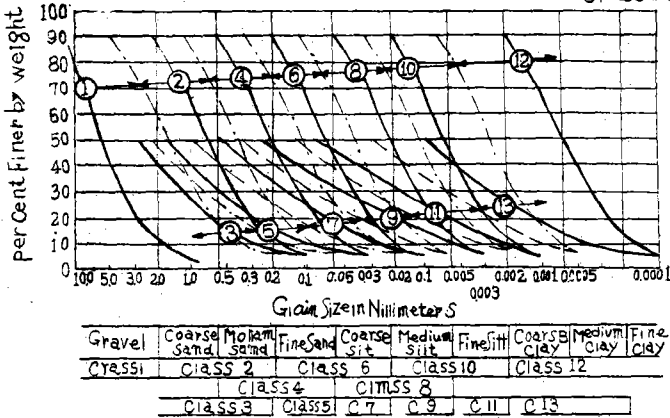
과 連關하여 생각해볼려고 하는것도 重要하지만 이 機械的 分析의 本來의 目的이 土壤의 物理的 性質의 理解에 寄具되는 것이므로 土壤을 性質이 相異한 數個의 集團으로 分類해서 어느 特定한 土壤이 어느 集團에 屬하는가 하는것을 把握하여 그 土壤의 性質을 理解할려고하는 이른바 土壤分類를 遂行하는데 이 機械的 分析이 基本的 役割을 하는것이다.

앞에서도 言及하였으나 土壤의 物理的 基本性質이 粒徑以外의 諸性質에 依存하는가답에 이러한 個別的性質을 基礎로하여 綜合的으로 表示되는 分類法이 理想的이라 할수있고 "物理的性質에 의한 分類"가 바로이것이다. 本實驗은 機械的 分析에 局限되어 있음으로 粒徑에 의한 分類로써 끝이고져한다. 이 普通의 方法이 美國 農務省 土壤局分類(Bureau of soils U. S Department of Agriculture Classification), M. I. T 分類(Massachusetts Institute of Technology classification) 等等이며 上記한 두方法이 널리 使用되는것이다. 圖 [II]는 土質工學者 W. I. Kenerson, 地質學者 Frank E. Fahlquist 兩氏가 만드려서 New Engl-

dand의 20個以上の Dam敷地에 使用한 “Modified Kendorco Classification”이다. 이것에 依하여 土壤은 13個의 集團으로 分類되고 이 그림에서

表示한 數中에서 偶數는 比較的 均等한 材料를 表示하는데 使用되고 奇數는 相當한 粒徑의 變化가 있는 材料를 表示하는데 使用된다.

Ⅱ Modified Kendorco classification, limit of Soil Classes\*



이 分類의 가장 큰 利點은 어느程度 熟達하게 되면 一連의 標準試料와 어느土壤과를 對照해서 그土壤이 屬할 範圍를 肉眼으로 分別할수있음에 있다고한다. 이 分類의 各番號에 該當하는 土壤은 다음과같다.

- ① Relatively Clean gravel
- ② Uniform Coarse to medium sand
- ③ Variable gravel and coarse to medium sand
- ④ Uniform medium to fine sand
- ⑤ Variable medium to fine sand
- ⑥ Uniform fine sand to coarse silt
- ⑦ Variable fine sand to coarse silt
- ⑧ Uniform coarse to medium silt
- ⑨ Variable coarse to medium silt
- ⑩ Uniform medium to fine silt
- ⑪ Variable medium to fin silt
- ⑫ Uniform clay
- ⑬ Variable clay

以上과 같은 分類 外에以 U.S. Public Road Administration의 三角圖表에 依한 分類, 路床土의 分類, A. Casagrande에 依한 飛行場흙의 分類

法等이 있으나 Earth Dam의 心壁에 關해서는 “Kendorco Classification”과같은 加積曲線의 形式에 依한 分類가 좋을것이라고 말하여지고있다.

器興貯水池堤心土는 美國 Bureau of Soils 分類表에 依하면 Sand 35%, silt 48%, Clay 17%의 混合土이며 modified Kendorce의 加積曲線에 依한 分類表에 依하면 ③의 Uniform coarse to medium silt의 範圍內에 있으나 加積曲線의 下半部는 ⑩의 Variable medium to fine silt에 近似하다.

### 7. 結 言

以上 器興貯水池堤心土를 試料로 하여 Beaker方法에 依한 機械的分析과 이에 關한 加積曲線에 對해서 若干의 說明을 加하였다. 原來 이 實驗은 大學院의 授業過程에서 이루어진것이므로 未熟한 點이 不尠할것으로 느껴지나 採取한 試料가 工事中인 現場의 Sample이므로 放置하기에는 多小貴重한 感이 있어서 整理하여 發表하는것이다.

(서울大學院農工學敎室)