

흙댐의 다짐密度가 安定度에 미치는 影響에 관한 研究

A Study on the Effect of the Compaction Density on the Stability of Earth Dam

尹 忠 燮* · 金 始 源**
Yoon, Chong Sup · Kim, Shi Won

Summary

This study was carried out for the stability analysis of earth dam by the variation of compaction density.

The test samples were taken from five kinds of soil used for banking material and the degree of compaction for this samples were chosen 100, 95, 90, 85, and 80 percent.

The stability problems were analysed by the settlement and camber(extra banking) of dam, strength parameter and dam slope, and coefficient of permeability and seepage flow through dam body.

The results of the stability analysis of earth dam are as follows.

1. The more the fine particle increases and lower the compaction degree becomes, the lower the preconsolidation load becomes but the compression index becomes higher.

2. Sixty to eighty percent of settlement of dam occurs during the construction period and the settlement ratio after completion of dam is inversly proportional to the degree of compaction.

3. The camber of dam has heigher value in condition that it has more fine particle(N) and heigher dam height(H) with the relation of $H = e^{(aN-bH-c)}$.

4. The cohesion(C) decreases in proportion to compaction degree(D) and fine particle(N) with the relation of $C = aD + bN - c$, but the internal friction angle is almost constant regardless of change of degree of compaction.

5. In fine soil, strength parameter from triaxial compression test is smaller than that from direct shear test but, they are almost same in coarse soil regardless of the test method.

6. The safety factor of the dam slope generally decreases in proportion to cohesion and degree of compaction but, in case of coarse soil, it is less related to the degree of compaction and is mainly affected by internal friction angle.

7. Soil permeability(K) decreases by the increases of the degree of compaction and fine particle

* 慶尙大學校 農科大學

** 建國大學校 農科大學

with relation of $\kappa = e^{(a-bD-cN)}$

8. The more compaction thickness is, the less vertical permeability (K_v) is but the more horizontal permeability (K_H) is, and ratio of K_v versus K_H is largest in range from 85 to 90 percent of degree of compaction.

9. With the compaction more than 85 percent and coefficient of permeability less than $\alpha \times 10^{-3}$ cm/sec, the earth dam is generally safe from the piping action.

I. 緒 論

水資源開發을 위한 댐을 비롯하여 防潮堤, 水路堤防 및 河川堤防등과 같은 構造物은 大部分이 土工構造物로서 이들 構造物은 築造할 때에는 力學的으로 安定性이 있고 工事費가 적게드는 經濟的인 構造物이 되도록 技術的인 設計와 施工이 이루어져야 한다. 卽 흙으로 築造되는 堤體는 堤體內의 浸透流에 의한 崩壞에 安全하고 堤體의 漏水量이 許容值以內이어야 하며 堤體의 斜面은 安定條件에 만족해야 할뿐만 아니라 壓密沈下로 인한 被害도 없어야 한다.

土工構造物의 斜面傾斜는 最小의 許容安全率 이 되도록 土質試驗으로 부터 粘着力과 内部磨擦角을 구해서 斜面의 安定性을 檢討해야 하며 堤體의 壓密沈下量은 흙의 壓密試驗結果와 施工速度의 假定值를 가지고 施工後의 壓密沈下量을 구해서 이를 余盛土로 補充해 주어야 한다.

또 물과 接하고 있는 土工構造物은 堤體를 통한 浸透流에 對해서 安全해야 하며 이를 위해서는 堤體의 浸潤線과 浸透流量을 正確히 구하고 파이핑에 대한 安定性도 檢討해야 한다. 浸透流에 影響을 주는 가장 重要한 要素는 透水係數로서 特히 水平透水係數와 垂直透水係數는 흙의 種類와 다짐의 程度(다짐率) 및 다짐 두께에 따라 큰 차이를 나타내고 있어 이를 正確하게 구하는 것은 댐의 浸透流解析에 대단히 重要한 일이다.

그러므로 本 研究에서는 흙댐材料로 많이 사용되는 5種類의 盛土材料에 대하여 다짐率을 100%에서 80%까지 5段階로 變化시켜 다지고 堤 安定度分析에 必要한 諸般試驗을 實施해서 흙의 粒度와 다짐率變化에 따른 工學的 性質의 相關

性和 흙댐의 斜面傾斜, 壓密沈下 및 浸透流에 對한 安定性등에 대하여 究明하였다.

II. 研究史

흙댐과 같은 土工構造物을 築造하는데 良質의 材料를 使用하는 문제는 오래前부터 研究의 대상이 되어 왔으며 美國開拓局을 위시해서 많은 곳에서 盛土에 대한 많은 研究가 이루어져 흙의 種類別 工學的인 特性과 構造物 種類에 따른 使用順位等を 定해서 실제구조물설계에 적용하고 있다.^{14), 167, 18), 26), 27), 36), 37)}

그러므로 現在 우리나라에서 築造되고 있는 흙댐의 部位別 盛土材料를 보면 中心코어部位에는 細粒土(CL, ML, SC)가, 그리고 一般盛土部位에는 粗粒土(SC, SM, GM, GW)가 많이 使用되고 있다.^{21), 39)}

이러한 盛土材料를 다지기 위한 다짐의 理論이 定立된것은 1933年 Proctor가 다짐의 方法을 發表한 後부터였으며 그 뒤로 많은 사람들이 다짐에 대한 研究를 하였다.^{15), 19), 35), 39)}

Barden¹⁰⁾을 위시하여 많은 사람들이 흙의 密度와 含水比와의 關係를 研究하였으며^{15), 19)} Rao¹⁶⁾는 흙의 consistency와 다짐密度와의 關係를, 그리고 鬼塚²⁸⁾는 다진 흙의 異方性에 대해서 연구하였다.

이러한 다짐의 試驗結果를 실제 施工에 適用하기 위하여 美國開拓局³⁶⁾을 비롯하여 Kotzias²⁰⁾ 등은 現場試驗을 실시해서 盛土의 다짐두께와 다짐裝備別 다짐回數等を 研究하여 設計와 施工에 適用토록 하였으며^{21), 25), 39)} 우리나라에서도 尹³⁹⁾ 등이 이에 대한 研究結果를 發表하였다.

試驗室과 現場의 다짐試驗結果로부터 다짐率

을定해서使用하고있으며 Sherard³²⁾, 는댐의다짐을最高90~95%以上다져야한다고강조하고많은경우에15m이상인댐의코어는98%이상, 15m이하에서는95%이상, 다지도록規定하고있다.^{36), 39)}

그리고우리나라河川堤防의盛土에서는最小의다짐율이80%로規定되어있어¹⁷⁾ 土工構造物의種類와規模에따라다짐의定도가多樣함을알수있다.

댐을岩盤위에築造할지라도盛土材料, 다짐程度, 댐높이, 工事期間等에따라서壓密沈下が달리發生하므로댐築造時에는工事完了後의예상되는沈下量만큼余盛土를해주어야한다.¹⁴⁾ 이러한댐施工後의壓密沈下量(余盛土)은工事中的壓密量보다적은것이많은研究에서 밝혀졌으며^{18), 22), 29), 36)} 이余盛土量은盛土高, 施工速度와관련된空隙水壓의消散에의한有効應力等을利用하여계산하는경우가 많다.^{13), 14), 16), 27), 38)} 그리고이러한余盛土의높이는댐높이의약1.6~2.1%가大部分임을알수있다.^{13), 18), 22)}

댐의높이가定해지면댐의規模(體積)는댐斜面的安定度分析으로決定되며이를위해서는盛土材料의粘着力과内部摩擦角과같은強度定數가가장重要한要素이므로이에대한研究가 많이 이루어지고 있다.^{9), 23), 35), 36)}

이들強度定數를구하기위하여1969년에Rowe³⁰⁾는飽和된모래에대하여三軸壓縮試驗과直接剪斷試驗을실시하여그結果가비슷하다고하였고Chen⁹⁾은1983년에發表한그의論文에서지진시내부마찰각은변하지않아도접착력은많이변한다고하였으며鬼塚²⁸⁾는다진흙의수직강도와水平強度에異方性이있다고하였다. 이러한흙의強度定數는댐斜面安定에크게영향을주므로이에대한연구가Baker等많은사람들에의해서이루어졌다.^{3), 8)}

그리고Bishop¹⁵⁾이1960년에空隙水壓에대한發表를한것을위시해서이分野에대한많은研究가이루어졌으며⁷⁾ Eisenstein등은댐을施工할때흙의含水狀態와施工速度등과관련하여空隙水壓의發生과消散에대해서發表하였다.¹³⁾

²⁵⁾ 이러한공극수압의計算値는現場實測値와큰차이가있을수있으며이는安定度計算時入力資料에많은영향을주게된다.¹²⁾

댐의安定度分析方法是대단히복잡하며1960년에Taylor가圓弧法으로댐의安定度を分析한뒤로Janbu, spencer등많은사람들이이에대한연구를하였으며이中에서Bishop의修正方法이많이使用되고있다.

댐體의透水係數도重要한要素가되며특히垂直透水係數와水平透水係數와의關係는重要하며이들의값은흙의種類(粒度狀態)와다짐方法에따라달라진다. 그리고透水係數는흙의密度및다짐율과깊은관계가있어다짐율이조금만작아져도투수계수는크게增加됨을많은研究에서알게되었다.^{13), 24), 37), 39)}

또室內에서구한수직투수계수와현장에서측정한투수계수와는큰차이가있으며Chen⁹⁾의연구에서는현장투수계수가시험실값보다10배정도크고黑田²²⁾의研究에서는약6배나컸다. 이와같이透水係數가크면댐體를 통한漏水量도크게되므로漏水量이許容値以內가되도록해야하며, 댐이浸透流에의한파이핑현상도없어야한다.

現在파이핑에대한檢討는空隙比와比重을使用한限界動水傾斜方法과Justin의限界流速을利用한方法等이가장많이이용되고있으며^{10), 13), 16), 26), 27), 32), 34)} 日本電力土木技術協會에서는흙의透水係數를利用하여파이핑에대한安全度を檢討한例도있다.¹⁴⁾

이와같이흙댐의安定도에대한研究는댐設計에많은發展을가져왔으나댐의築造材料와施工方法이多樣하므로이러한모든條件에알맞는댐設計를하기는어려운일이며따라서댐安定도에대한綜合的인研究는아직도未洽한狀態이다.

Ⅲ. 安定度檢討의 理論的 背景

1. 흙댐의 壓密沈下量과 余盛土

흙댐의余盛土는總沈下量에서工事中的沈

下量을 뺀 값으로 工事中の 壓密沈下量은 工事中空隙水壓의 消散, 即 工事完工後의 殘留空隙水壓과 깊은 關係가 있으며 이는 흙의 粒度와 含水比, 施工期間, 施工速度等에 따라 달라진다.

盛土의 空隙水壓은 透水性이 큰 一般盛土에서는 問題가 없으며 主로 細粒의 粘質土에서 發生하므로 中心코어部位에서는 殘留空隙水壓으로 인한 壓密沈下에 대하여 余盛土를 해주어야 한다.

余盛土의 높이는 式(1) 및 (2)와 같은 經驗式을 利用하여 求할수도 있으나 보다 正確한 方法은 壓密試驗結果에 근거를 둔 (3), (4)式에 의하여 推定하는 것보다 正確하다.^{13), 14), 16), 27)}

$$\Delta H = 0.001 H^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta H = K \cdot H^{\frac{5}{2}} + 10^{-5} \dots\dots\dots (2)$$

여기서

H: 댐높이(m)
K: 定數로서 0.1~0.7

$$\Delta H_1 = \left(\frac{W \cdot H_b^2}{2E} + \frac{W \cdot H_u \cdot H_b}{E} \right) A \dots\dots (3)$$

$$\Delta H = \frac{1}{2E} W \cdot H_b^2 \cdot A \dots\dots\dots (4)$$

但 $E = \frac{P_m}{S}$,

$$A = 1 - \Delta A = 1 - \frac{S_1}{S}$$

여기서

ΔH_1 : 任意點에 있어서의 沈下量 (m)
 ΔH : 댐 마루부($H_u=0$)의 沈下量 (m)
 W: 盛土材料의 密度 (t/m^3)
 H_u : 任意點에서보다 上부분의 盛土高 (m)
 H_b : 任意點에서보다 下부분의 盛土高 (m)
 E: 壓密試驗에서 求한 荷重—沈下曲線에서 求하는 沈下係數
 A: 空隙水壓의 消散과 關係되는 壓密沈下率

P_m : 作用荷重 (t/m^3)

S: 全 沈下量 (m)

S_1 : 先行荷重(P_e)에 대한 沈下量 (m)

式(4)에서 A는 空隙水壓의 消散率과 關係되는 壓密沈下率으로 이를 計算하는데 必要한 空隙水壓消散率(ΔA)은 工事完了時의 殘留空隙水壓과 總空隙水壓의 比로 求하는것이 合理的이다. 그러나 실제로 댐 盛土 施工時의 施工速度와 工事期間을 正確하게 推定하기는 어려우며 댐의 作用荷重이 그 部位의 先行荷重보다 작으면 壓密이 안일어난다고 보아 式(3), (4)에서와 같이 先行荷重을 利用하여 計算하는 경우가 많다.¹³⁾
14), 16), 27)

2. 댐의 斜面安定度 分析

댐 斜面에 대한 安定은 築造時와 滿水時 및 水位 急降下時에 대하여 實施하며 이를 위해서 댐體를 통한 浸潤線을 구해야 한다.

浸潤線은 模型試驗으로 正確히 구할수 있으나 Casagrande의 實驗公式으로 구한것이 模型試驗結果와 큰 차이가 없어 이를 利用하는것이 一般的이다.^{16), 21), 27)}

댐體 斜面의 滑動面에 대한 安全率은 一般的으로 分割法을 使用하여 (5)式과 같이 分析하고 있으며 地震의 影響이 적고 낮은 댐의 경우에는 式(6)과 같이 地震力을 고려하지 않은 式으로 計算한다.

$$F_s = \frac{\Sigma \{ C_i + (N - U - Ne) \tan \phi \}}{\Sigma (T + T_e)} \dots\dots (5)$$

$$F_s = \frac{\Sigma (\bar{C} \Delta \chi \cos \theta + \bar{N} \tan \bar{\phi})}{\Sigma W \sin \theta} \dots\dots (6)$$

여기서

N: 滑動面의 垂直力 (ton) $N = W \cos \theta$
 T: 滑動面의 接線力 (ton) $T = W \sin \theta$
 N_e : 地震에 의한 垂直力(ton) $N_e = KW \sin \theta$
 T_e : 地震에 의한 接線力 (ton) $T_e = KW \cos \theta$
 K: 地震係數

- W : 微小要素의 重量 (ton)
- $\Delta\chi$: 微小要素의 幅(m)
- \bar{C} : 有效應力에 대한 粘着力 (t/m²)
- $\bar{\phi}$: 有效應力에 대한 内部摩擦角
- \bar{N} : 滑動面의 有効垂直力 (ton) $N=N-u$
- u : 滑動面에 作用하는 空隙水壓(ton)
- θ : 滑動面이 水平線과 이루는 角

- i_c : 限界動水傾斜
 - G_s : 흙의 比重
 - e : 흙의 空隙比
- 또 日本電力土木技術協會에서는 透水係數를 利用하여 限界動水傾斜를 구하고 있다.¹⁴⁾
(2) Sichart 式

$$i_c = \frac{1}{1.5\sqrt{k}} \dots\dots\dots (9)$$

3. 浸透流에 대한 安定度 檢討

堤防이나 흙댐을 통과하는 浸透流量은 許容 限界値以下이어야 하며 이 浸透流로 因하여 堤體의 파이現現象이 생기지 않아야 한다.

浸透流量을 구하는 方法에는 差分式이나 有限要素法을 쓰는 數學的 方法과 試行作圖法이나 近似式解法과 같은 近似解法, 그리고 各種模型 實驗에 의한 實驗的 方法이 있으나 堤防이나 흙댐을 設計할때에는 近似解法이 가장 많이 쓰인다.

近似式解法에는 Casagrande의 方法이 一般的으로 使用되며 이 때에는 正常透水時의 自由水面即 浸潤線을 구한 다음 流線網을 利用하여 다음 式으로 流量을 구한다.

$$Q = k \cdot H \cdot \frac{N_f}{N_p} \cdot W \dots\dots\dots (7)$$

여기서

- Q : 浸透流量 (m³/sec)
- K : 透水係數 (m/sec)
- H : 全水頭 (m)
- N_f : 流線網의 流線의 分轄數
- N_p : 流線網의 等水頭線의 分轄數
- W : 流路의 幅(m)

파이핑에 대한 安定性 檢討는 限界動水傾斜의 方程式을 많이 使用하며 限界流速 方程式으로 檢討하기도 한다.^{10), 14), 16), 18), 27), 34)}

(1) 限界動水傾斜의 方程式

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} \gamma_w = i_c \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w$$

여기서

- $\frac{\partial \sigma}{\partial z}$: 포텐셜의 傾斜度
- γ_w : 물의 單位體積重量 (g/cm³)

(3) 中部電力式

$$i_c = \left(\frac{1.67 \times 10^{-2}}{k} \right)^{0.623} \dots\dots\dots (10)$$

式 (9)와 (10)을 利用함에 있어 댐의 경우에는 水平透水係數를 使用하는것이 바람직하며 (10) 式에 의한 限界傾斜가 (9)式보다 작으므로 파이핑 檢討에는 (10)式을 利用하는것이 安定性이 크다.

IV. 材料 및 試驗方法

1. 實驗材料

本 試驗에 使用한 흙 材料는 댐이나 堤防築造에 많이 使用되는 無機質 盛土材料로서 4번체 (4.76mm)를 전부 통과하고 細粒材(74 μ 以下)의 含有量이 80.56%, 66.18%, 50.56%인 3個의 細粒土와 細粒材가 35.44%, 20.82% 混合된 2個의 粗粒土로서 이들 材料의 物理的 試驗結果와 標準 다짐試驗結果는 Table-1과 같다.

그리고 壓密試驗, 剪斷試驗 및 透水試驗을 위해서 各 試料를 다짐시험에서 구한 最適含水狀態로 맞춘다음에 最大乾燥密度를 基準으로하여 100%, 95%, 90%, 85%, 및 80%의 5種類로 다짐하여 所要의 試驗을 하였다.

2. 壓密試驗 및 壓密沈下量 計算

壓密試驗은 標準壓密試驗機를 使用하였으며 \sqrt{t} 壓法을 適用하여 壓縮量을 測定하였다.

壓密試驗結果로부터 各荷重에 대한 空隙比(e)를 구하고 90%壓密에 要하는 時間(t_{90}), 壓密係數(C_v), 先行荷重(P_c), 壓縮指數(C_c) 및 一次

Table-1. Soil properties.

Sample Properties	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
Specific gravity	2.60	2.61	2.63	2.67	2.70
Sand (>74 μ)(%)	19.44	33.82	49.44	64.56	79.18
Silt & clay (<74 μ)(%)	80.56	66.18	50.56	35.44	20.82
Silt (5 μ ~ 74 μ)(%)	50.56	42.18	34.56	25.44	14.82
Clay (<5 μ)(%)	30.30	24.00	16.00	10.00	6.00
Liquid limit (%)	37.1	32.2	26.9	21.2	17.5
Plastic limit (%)	24.4	22.1	17.8	14.6	N.P
Plastic index (%)	12.7	10.1	9.1	6.6	N.P
Classification	CL	CL	CL	SC-SM	SM
Max. dry density (gr/cm ³)	1.695	1.767	1.834	1.913	1.988
Opt. moisture content (%)	20.5	18.5	16.3	14.2	12.6
Max. wet density (gr/cm ³)	2.042	2.094	2.133	2.185	2.238

壓密比(r_p)를 구하였으며 有效應力에 대한 壓密度曲線으로 부터 沈下量係數(E)를 求하였다.

壓密試驗結果와 式 (3)을 利用하여 댐의 壓密沈下量을 구하였으며 이때 空隙水壓의 消散率은 先行荷重에 대한 沈下量과 總 荷重에 대한 沈下量의 比率로 計算하였다.

댐 높이가 10m, 20m, 30m, 40m, 50m인 경우의 總 沈下量과 댐높이에 대한 沈下量과 沈下率을 구하고 工事完了後의 沈下量과 沈下率을 구하였으며 이를 基準으로해서 余盛土量(높이)을 구하였다.

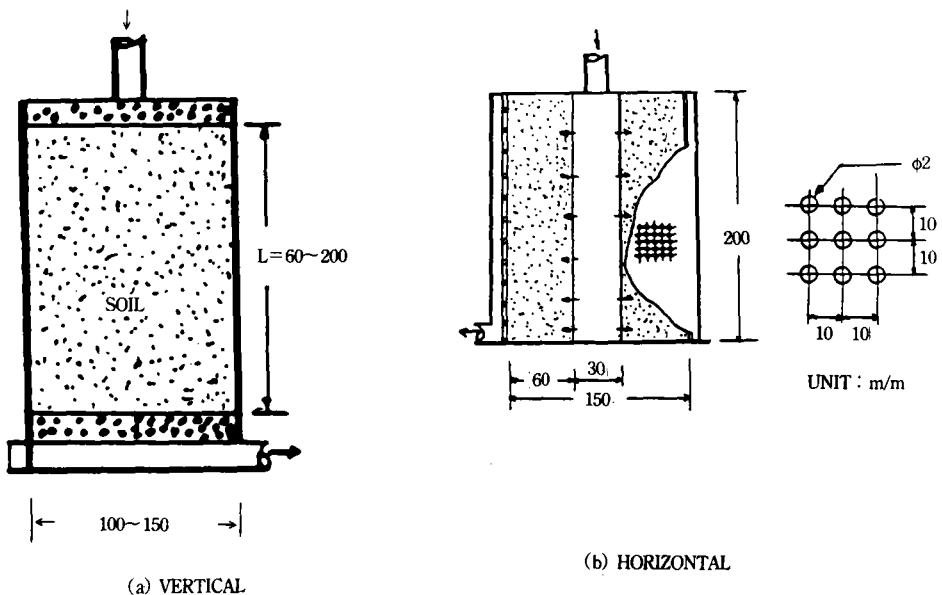


Fig. 1. Permeability testing mold.

3. 剪斷試驗 및 斜面安定率計算

剪斷試驗은 標準試驗機를 使用하여 三軸壓縮試驗과 直接剪斷試驗을 하였으며 濕潤狀態와 飽和狀態下에서 非壓密非排水 試驗으로 하였다.

그리고 剪斷試驗으로부터 구한 強度定數를 利用하여 댐 높이 10m, 20m 및 30m에 대하여 斜面安定度를 Computer를 利用하여 檢討하였다.

4. 透水試驗 및 파이핑計算

透水試驗은 Fig. 1과 같은 透水試驗모드를 使用하였으며 다짐두께는 6cm, 10cm, 20cm의 3種類로 하였으며 透水試驗모드내에다 각 두께별로 必要한 試料의 全量을 넣고 다짐으로서 可及의 現場狀態와 같은 條件을 만들고져 하였다.

그리고 댐體를 통과하는 浸透流에 대한 파이핑 검토는 限界動水傾斜의 式 (8)과 透水係數를 利用하는 式 (10)을 使用하여 실시하였다. 이때 斷面은 最小의 安全率(SF=1.2)을 갖는 斷面으로 하였으며 安全率이 작아서 斜面傾斜가 완만하게 되는 경우에는 最大로 1:3.0까지의 傾斜를 갖는 斷面으로 가정하였다.

V. 結果 및 考察

1. 壓密沈下特性

가. 흙의 粒度 및 다짐率과 壓密時間

흙이 90%壓密되는데 要하는 時間(t_{90})의 Table-2(荷重段階別 壓密時間의 平均值)와 같이 21.9~31.9sec로서 荷重初期에 大部分의 壓密이 일어난다. 일반적으로 細粒材가 많을수록, 그리

Table-2. Consoilation time (t_{90}).

(unit : sec)

Sample	D (%)					Mean
	100	95	90	85	80	
S-1	31.9	29.8	25.5	24.8	23.1	27.0
S-2	27.1	25.4	24.8	24.3	23.2	25.0
S-3	25.4	23.6	22.7	21.6	21.6	23.0
S-4	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6
S-5	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6

고 다짐율이 클수록 沈下時間이 다소 길어지나 細粒材가 50%미만인 細粒土에서는 다짐率에 관계없이 荷重을 加함과 同時에 壓密이 일어난을 알 수 있다.

나. 先行荷重과 壓縮指數

어떤 盛土層의 先行荷重이 그 土層에 作用하는 흙의 荷重보다 크면 그 土層은 壓密이 안일어난다고 볼수 있으므로 先行荷重의 크기는 壓密 沈下와 큰 관계가 있다.

Table-3은 試料別 다짐율 변화에 따른 先行荷重을 表示한것으로서 鬼塚²⁸⁾의 研究結果와 같이 細粒材가 많고 다짐율이 작을수록 先行荷重도 작아진다.

細粒材의 量과 다짐狀態를 알면 式 (11)을 利用하여 先行荷重(P_c)을 推定할수 있다.

$$P_c = (11.2D - 4.9N) \times 10^{-2} - 4.665(\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots (11)$$

여기서

D : 다짐율(%)

N : 細粒材의 含有量(%)

Table-3. Pre-Consolidation Load(P_c).

(unit : kg/cm²)

Sample	D (%)				
	100	95	90	85	80
S-1	1.97	1.78	1.47	1.34	1.23
S-2	2.61	2.30	2.10	2.03	1.58
S-3	4.10	3.25	2.68	2.45	1.89
S-4	5.65	3.81	3.33	2.75	2.40
S-5	7.40	5.14	3.87	3.27	2.85

Table-4. Compression index(C_c).

Sample	D (%)				
	100	95	90	85	80
S-1	0.063	0.087	0.103	0.142	0.169
S-2	0.036	0.076	0.099	0.124	0.158
S-3	0.033	0.056	0.080	0.111	0.134
S-4	0.017	0.033	0.049	0.069	0.079
S-5	0.013	0.023	0.040	0.050	0.066

그리고 先行荷重보다 큰 荷重이 作用할때 壓密沈下量計算에 必要한 壓縮指數(Cc)는 Table-4와 같으며 100%다짐경우에 비해서 90% 다짐시에는 압축지수가 2~3배 커짐을 알 수 있다.

$$C_c = (1.33N - 4.44D) \times 10^{-6} + 0.41 \dots (12)$$

壓縮指數는 式(12)와 같이 細粒材가 많을수록 그리고 다짐율이 작을수록 커지며 이러한 관계는 鬼塚²⁸의 연구에서도 발표되었다.

다. 댐의 壓密沈下量과 沈下率

댐 높이가 10m, 20m, 30m, 40m, 50m인 경우의 壓密沈下量은 細粒材가 많고 다짐율이 작으며 또 댐이 높을수록 커진다.

Fig. 2는 댐 높이가 10m인 경우, 總 沈下率(實線)과 工事完了後의 沈下率(點線)을 나타낸 것으로 細粒材가 적고 다짐을 잘하면 工事完了後의 沈下量은 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 댐이 높고 細粒材인 경우에는 工事完了後의 沈下量은 總沈下量의 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}$ 이 됨을 알 수 있었

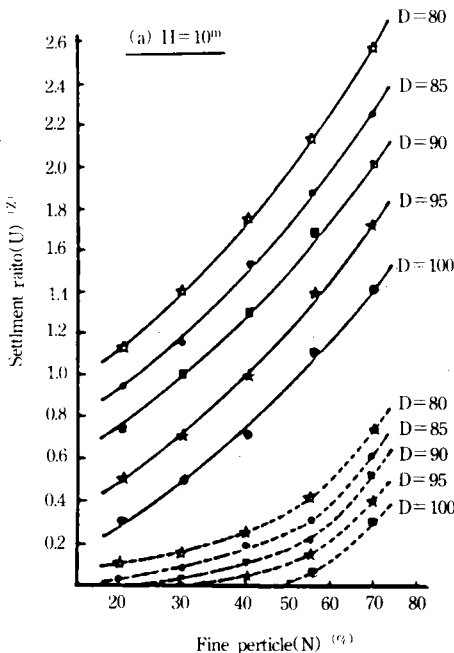


Fig. 2. Relationship between fine particle and settlement ratio.

다.

美國 開拓局의 보고서에 의하면 施工後의 壓密沈下量은 工事中的 沈下量보다 적으며 Rao²⁹는 施工後의 沈下量은 工事中的 沈下量의 40% 정도라고 發表한것과 本 試驗結果와는 大差가 없음을 알 수 있다.

라. 댐의 余盛土

댐의 余盛土는 댐 工事完了後의 沈下量만큼 盛土를 더해주는 것으로서 이는 盛土材料中の 細粒材의 含有量, 다짐을 및 댐 높이 등에 따라서 달라진다.

Fig. 3은 다짐율이 90%와 95%인 경우의 盛土의 細粒材의 含有量과 댐 높이에 대하여 余盛土의 높이를 나타낸것으로서 (13)式을 利用하여 余盛土의 높이를 구할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta H_{90} &= e^{(-1.931 + 0.033N + 7.63H \times 10^{-4})} \\ \Delta H_{95} &= e^{(-2.578 + 0.039N + 7.52H \times 10^{-4})} \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

여기서

- ΔH_{90} : 90% 다짐시의 余盛土의 높이(cm)
- ΔH_{95} : 95% 다짐시의 余盛土의 높이(cm)
- N : 細粒材의 含有量(%)
- H : 댐의 높이(cm)

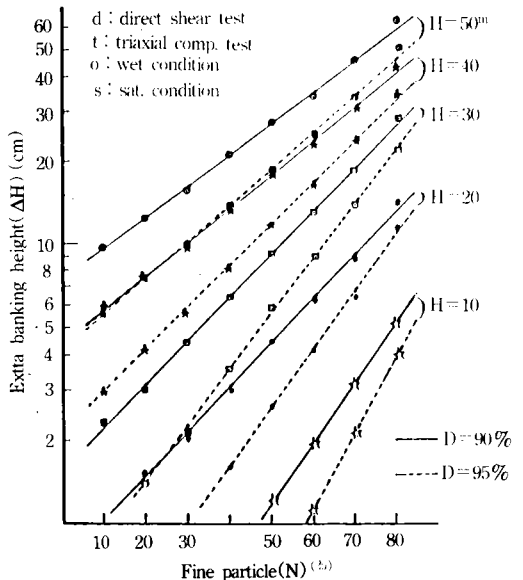


Fig. 3. Extra banking height with fine particle and dam height.

Fig. 3 및 (13)式으로 구한 余盛土의 높이는 最適含水比 狀態의 密度를 基準으로 한것으로서 鬼塚²⁸⁾의 發表과 같이 壓密沈下는 最適含水比 狀態때 最小가 되며 日本 大姆會 및 建設省에서 發表한 22個 姆의 余盛土의 平均値가 姆높이의 1.6~1.7%인것을 고려할때 姆 設計時에는 本 研究結果의 1.5~2.0倍를 取하는것이 바람직하다.

2. 剪斷特性

가. 흙의 粒度 및 다짐率과 粘着力

非飽和 및 飽和狀態에서 三軸壓縮試驗과 直接剪斷試驗으로부터 求한 粘着力中에서 盛土材料의 細粒材의 含有量 및 다짐율과 粘着力의 關係를 圖示하면 Fig. 4와 같으며 粘着力은 細粒材가 많고 다짐율이 클수록 (14) 式과 같이 比例的으로 커짐을 알수 있다.

$$\left. \begin{aligned} C_{o-t} &= 0.18D + 0.0049N - 1.594 \\ C_{s-t} &= 0.33D + 0.017N - 3.222 \\ C_{o-d} &= 0.031D + 0.11N - 2.808 \\ C_{s-d} &= 0.016D + 0.0082N - 1.576 \end{aligned} \right\} \dots\dots (14)$$

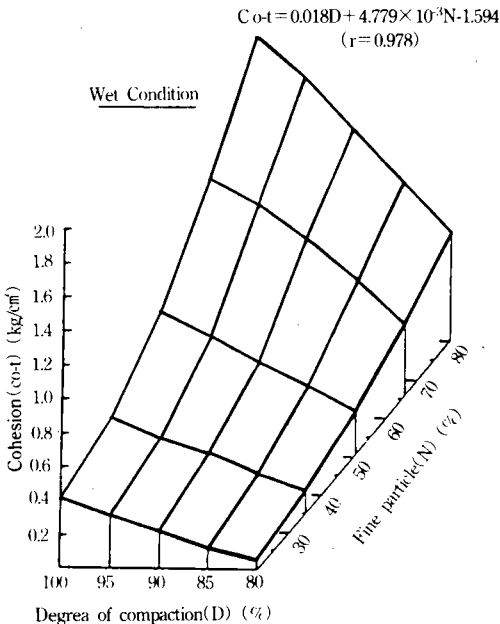


Fig. 4. Cohesion by triaxial compression test.

여기서

C_{o-t} : 三軸壓縮試驗의 非飽和狀態의 粘着力 (kg/cm²)

C_{s-t} : 三軸壓縮試驗의 飽和狀態의 粘着力(kg/cm²)

C_{o-d} : 直接剪斷試驗의 非飽和狀態의 粘着力 (kg/cm²)

C_{s-d} : 直接剪斷試驗의 飽和狀態의 粘着力(kg/cm²)

D : 다짐율 (%)

N : 細粒材의 含有量(%)

그리고 非飽和時의 粘着力의 값은 細粒의 粘質土에서는 三軸壓縮試驗結果가 直接剪斷試驗 値보다 크게 나타나고 粗粒土에서는 반대로 직접剪斷시험치가 약간크게 나타났다.

다짐율과 粘着力의 관계에서는 점착력(C)은 다짐율(D)이 작아질수록 $C=a \times bD$ 의 直線의인 關係로 작아지며 이러한 현상은 細粒材가 많을 수록 현저하여 細粒土일수록 다짐의 영향이 큼을 알수 있다.

이러한 結果는 同一한 흙에서는 다짐이 잘될 수록 粘着力이 커진다고 발표한 金¹⁹⁾의 研究와 그 外的 많은 研究에서도 밝혀진바 있다.^{23), 33), 35)}

나. 흙의 粒度 및 다짐率과 内部摩擦角

흙의 粒度와 内部 摩擦角의 關係를 보면 粗粒土에서는 細粒材量에 反比例하여 작아지나 細粒土에서는 細粒材量이 50%미만인 경우에는 細粒材가 많을수록 내부마찰각이 작아지나 50%以上에서는 반대로 내부마찰각이 커졌다.

Rouse³¹⁾는 그의 研究에서 粗粒土에서는, 내부 마찰각은 粘土含有量(K)과 反比例해서 $\phi = 38.3 - 0.4K$ 의 關係로 增減되며 粘土含有量이 50%以上되면 内部摩擦角이 오히려 커진다고 發表한 것과 本 試驗結果와는 같은 現象을 나타내고 있다.

그리고 흙이 飽和時의 内部摩擦角은 粗粒土에서는 非飽和時의 内部摩擦角과 거의 同一하나 細粒土에서는 다소 작아진다. 이는 金¹⁹⁾等의 研究에서도 밝혀진바 있다.

Fig. 5는 다짐율 變化에 의한 内部摩擦角의 變化狀態를 나타낸것이다.

Fig. 5에서 보면 同一한 흙에서는 다짐율이 작아져도 내부마찰각은 뚜렷하게 변하지 않으며 흙의 種類(粒度)에 따라서만 내부마찰각의 차이가 있음을 알수 있다. 이러한 현상은 金¹⁹⁾의 研究나 地震으로 흙의 密度가 變할때 粘着力은 變해도 내부마찰각은 변하지 않는다고 發表한 chen⁹⁾의 研究結果와도 一致되는 現象이다.

그리고 内部摩擦角이 다짐율에 관계가 별로 없는 현상은 三軸壓縮試驗이나 直接剪斷試驗, 그리고 飽和時나 非飽和時에도 거의 비슷하다.

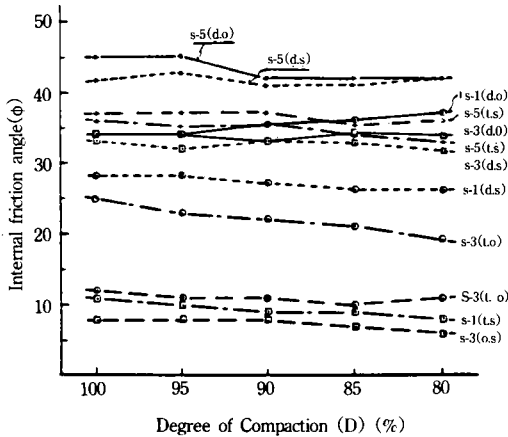


Fig. 5. Relationship between degree of compaction and friction angle.

Table-5. Comparison of triaxial test and direct shear test.

T. M	Cohesion		Friction angle	
	$\frac{C_{0-t}}{C_{0-d}}$	$\frac{C_{s-t}}{C_{s-d}}$	$\frac{\phi_{0-t}}{\phi_{s-d}}$	$\frac{\phi_{s-t}}{\phi_{s-d}}$
S-1	1.34	0.60	0.63	0.35
S-2	1.31	0.77	0.32	0.28
S-3	1.09	0.83	0.32	0.22
S-4	1.02	0.80	0.37	0.34
S-5	1.00	0.92	0.80	0.87

C_0 : cohesion of wet condition.

C_s : cohesion of sat. condition.

ϕ_0 : friction angle of wet condition.

ϕ_s : friction angle of sat. condition.

t : triaxial comp. test.

d : direct shear test.

다. 三軸壓縮試驗과 直接剪斷試驗結果의 比較

Table-5는 三軸壓縮試驗과 直接剪斷試驗으로부터 求한 粘着力과 内部摩擦角의 값을 비교한 것으로 粘着力은 非飽和時에는 三軸壓縮試驗值가 다소 크거나 같았으나 飽和時에는 반대로 直接剪斷試驗值가 컸으며 그 차이는 細粒土에서는 크게 나타나고 粗粒土에서는 큰 차이가 없다. 그러나 内部摩擦角은 飽和時나 非飽和時 모두 直接剪斷試驗結果가 컸으며 이러한 현상은 細粒土에서 현저하고 粗粒土는 그 값이 거의 비슷하다. 이는 Rowe³⁰⁾의 研究에서 포화된 모래의 내부마찰각은 삼축압축시험과 직접전단시험결과가 거의 비슷하다고 發表한것과 같은 현상이다.

그러므로 土工構造物 設計에 必要한 強度定數를 求할때에는 粗粒土는 直接剪斷試驗도 可能하지만 (약 80%) 細粒土는 三軸壓縮試驗으로 強度定數를 求하는것이 바람직하다.

라. 댐의 斜面傾斜과 安全率

댐의 높이를 10m, 20m, 30m로 하고 다짐율이 95%, 90%, 85%인 경우 5種類의 試料로 築造된 댐 斷面(内外側 各 3個 斷面)에 대하여 (6)式을 적용하여 Computer로서 270個의 斷面(3H×5D×5S×6S)에 대하여 最小의 安全率을 구하였다.

Fig. 6은 粘質土(S-1)와 砂質土(S-5)로 築造된 댐의 内側傾斜의 安全率을 나타낸것으로 粘質土로 築造된 낮은 댐은 斜面傾斜가 완만해지면 安全率이 급격하게 커지므로 점착력이 큰 성토 재료로 축조된 낮은 댐은 댐傾斜를 急하게하여 斷面을 작게 할수 있다.

그러나 댐 높이가 20m以上되면 安全率이 傾斜度에 比例하여 완만하게 커지며 砂質土(S-5)의 경우는 傾斜度를 작게할 경우 낮은 댐에서는 안전율이 점질토(S-1)보다 떨어지나 높은 댐에서는 오히려 커진다. 그러므로 낮은 댐에서는 粘質土가 有利하고 높은 댐에서는 粗粒土로 築造함이 經濟的임을 알수 있다.

그리고 다짐율이 安全度에 미치는 영향을 보면 細粒土로 축조된 낮은 댐일수록 다짐의 效果가 크며 粗粒土에서는 댐이 높으면 다짐의 效果가

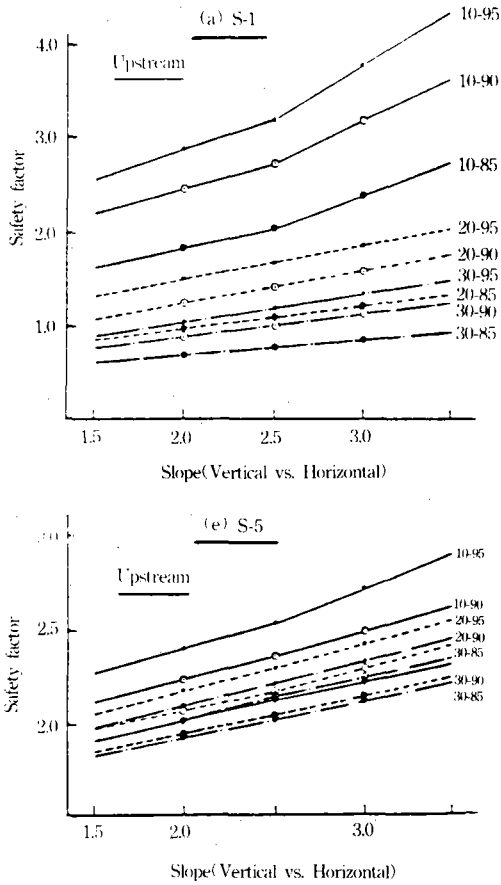


Fig. 6. Relationship between slope and safety factor.

점질토보다 적음을 알 수 있다.

3. 浸透流特性

가. 흙의 粒度 및 다짐率과 透水係數

흙의 透水係數는 흙의 種類(粒度)와 다짐方法에 따라서 달라지며 이 두 條件이 같아해도 水平透水係數와 垂直透水係數의 값은 달라진다.

흙의 細粒材의 含有量이 적을수록, 그리고 다짐이 不良할수록 透水係數는 커지며 다짐두께가 두꺼울수록 水平透水係數의 增加率이 컸다.

Fig. 7은 다짐두께 20cm인 경우 세립재의 含量 및 다짐율과 垂直透水係數의 關係를 3次元으로 표시한 것이다.

다짐두께를 6cm, 10cm, 20cm로 할때 垂直透水係數는 다짐두께가 두꺼울수록 작으나 水平

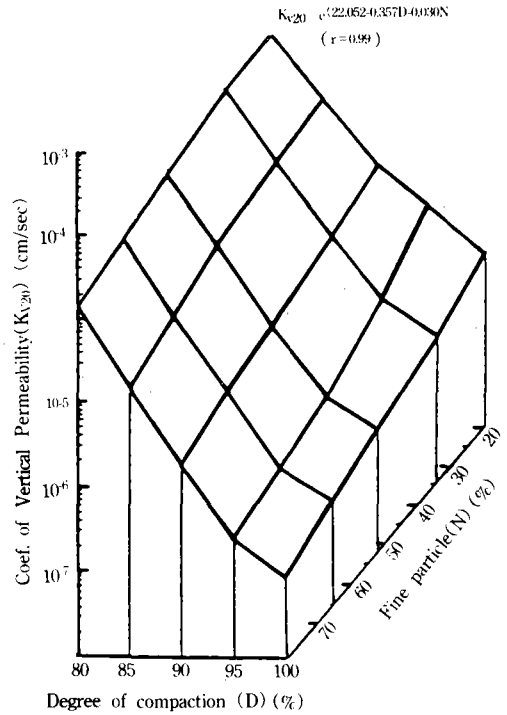


Fig. 7. Coef. of vertical permeability.

透水係數는 반대의 현상을 나타내 試驗室에서 求하는 垂直透水係數와 現場의 실질적인 水平透水係數와는 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

그리고 垂直 및 水平透水係數는 다같이 細粒材가 많을수록 半對數紙에서 거의 直線的으로 작아져 細粒材 含有量(N)과 透水係數(K)와는 $K=e^{a+bN}$ 의 關係가 成立함을 알 수 있다. 이러한 現象은 姜¹⁵⁾을 비롯해서 여러사람들의 研究結果와 一致되는 現象이다. 또한 透水係數는 다짐率 減少時에도 細粒材減少時와 비슷하게 크게 增加된다.

細粒材含有量과 다짐率로부터 다짐두께 20cm 때의 透水係數를 求하는 式은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} k_{v20} &= e^{(22.052 - 0.357D - 0.030N)} \\ k_{H20} &= e^{(26.456 - 0.382D - 0.028N)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

여기서

K_{v20} : 다짐두께 20cm 때의 垂直透水係數(cm/sec)

k_{H20} : 다짐두께 20cm 때의 水平透水係數(cm/sec)

sec)

D : 다짐율 (%)

N : 細粒材의 含有量 (%)

나. 다짐率과 透水係數

흙의 透水係數는 다짐에 크게 影響을 받아 다짐密度가 몇%만 감소해도 투수계수는 數 10배 增加되며^{13), 37)} 1979년에 松層는 다짐回數를 2배로 한 結果 透水係數는 1/8로 減少되었다고 하였다.²⁴⁾

이와 같이 흙을 다지는일은 흙의 粒度狀態와 더불어 透水係數에 影響을 가장 많이주는 要素이다. Table-6은 다짐두께 20cm인 경우 다짐율이 減少됨으로서 透水係數가 增加하는 倍率을 나타낸것으로 100%다짐時의 透水係數를 基準으로 한것이다. Table-6에서 보면 다짐이 不良할 경우의 透水係數의 增加率은 細粒土(S-1)가 粗粒土(S-5)보다 크고 水平透水係數가 垂直透水係數보다 큼을 알수 있다. 이러한 현상은 다짐율 90%와 85%때 더욱 커서 실제로 透水係數를 비교해보면 水平透水係數가 垂直透水係數보다 12~28배나 크게 나타났다.

그러나 95%다짐에서는 水平透水係數가 약 8~13배 크며 이는 댐 工事에서 測定한 現場透水係數(主로 K_H)가 室内에서 測定한 透水係數(K_V)보다 8~10倍以上 크다고 한것과 같은 결과이다.^{25), 32), 36)}

Table-6. Increasing rate of permeability.

(T=20^om)

S	D(%) K	D(%)				
		100	95	90	85	80
S-1	K_{V20}	1	2.9	21	180	1687
	K_{H20}	1	3.4	56	462	2316
S-2	K_{V20}	1	2.5	20	176	1470
	K_{H20}	1	2.9	54	461	2028
S-3	K_{V20}	1	2.7	18	192	1244
	K_{H20}	1	2.9	43	388	1641
S-4	K_{V20}	1	3.4	17	171	960
	K_{H20}	1	3.4	41	241	1216
S-5	K_{V20}	1	4.0	15	85	503
	K_{H20}	1	4.4	35	137	612

다. 파이핑에 대한 安定性

斜面安定度分析結果 最小의 安全率(SF=1.2)을 갖는 斷面의 最大動水傾斜($i_b = \frac{H}{L}$)는 0.18~0.45이다. 그러므로 piping作用에 抵抗하는 限界傾斜는 動水傾斜보다 커야 한다.

댐 施工時의 最大空隙比(20cm두께로 다짐시 下層空隙比)와 最大透水係數(20cm두께의 水平透水係數)를 使用하여 piping에 저항하는 限界傾斜를 (8) 式과 (10) 式을 利用하여 求하면 Table 7과 같다.

Table-7. Resistance value to piping

S	D(%)	ic			$i_c = \left(\frac{1.67 \times 10^{-4}}{K}\right)^{0.623}$		
		95	90	85	95	90	85
S-1		0.79	0.74	0.71	216.88	37.87	10.21
S-2		0.82	0.77	0.73	176.88	28.61	7.56
S-3		0.85	0.80	0.76	137.26	25.21	6.43
S-4		0.95	0.86	0.81	82.55	17.75	5.84
S-5		0.97	0.91	0.87	46.73	12.83	5.51

Table-7에서 보면 모든 條件에서 piping作用에 抵抗하는 限界傾斜(i_c)는 動水傾斜(i_b)보다 훨씬 크며 위의 두 條件은 最惡의 경우에 대한 것이므로 안전율은 더욱 크다.

試驗結果 堤防盛土를 85%以上 다지고 透水係數가 1×10^{-3} cm/sec以下이면 파이핑에 대한 안전율은 크다고 생각되며 따라서 現在施工되고 있는 흙댐의 다짐율이 95%以上이고 止水部位의 透水係數가 대단히 작으므로 piping에 대한 염려는 없을 것이다.

VI. 結 論

本 研究에서는 흙댐의 安定度檢討와 實驗을 위해서 5種類의 盛土材料를 選定하여 다짐率을 100%에서 80%까지 5段階로 變化시키면서 所要의 土質試驗을 實施하고 試驗結果로부터 壓密沈下, 斜面安定 및 浸透流에 대한 安定度를 檢討하였으며 그 主要 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 盛土材料의 先行荷重은 細粒材가 많고 다

짐울이 작을수록 減少하며 壓縮指數는 반대로 큰 값을 나타냈다.

2. 댐의 總沈下量의 60~80%는 施工中에 沈下되며 施工中の 沈下率은 다짐률이 작아짐에 따라 比例하여 直線的으로 增加하였다.

3. 댐의 余盛土(ΔH)는 細粒材(N)가 많고 댐높이(H)가 높을수록 $\Delta H = e^{(aN+bH^c)}$ 의 관계로 높아진다.

4. 盛土材料의 粘着力(C)은 다짐률(D)과 細粒材含有量(N)에 比例하여 $C = aD + bN - c$ 의 關係로 增加하고 内部摩擦角은 다짐률變化에는 關係없이 거의 一定하다.

5. 細粒土에서는 三軸壓縮強度가 直接剪斷強度보다 작으나 粗粒土에서는 뚜렷한 差異가 나타나지 않았다.

6. 댐 斜面의 安全率은 大體로 粘着力과 다짐률에 比例하고 粗粒土에서는 다짐률과는 관계가 적고 主로 内部摩擦角에 영향을 받는다.

7. 盛土의 透水係數(K)는 다짐률과 細粒材含有量에 反比例하여 $K = e^{(a-bD-cN)}$ 의 관계로 나타낼수 있다.

8. 盛土의 다짐두께가 두꺼울수록 垂直透水係數(K_v)는 작아지고 水平透水係數(k_H)는 반대로 커지며 $\frac{K_H}{K_v}$ 의 比率은 다짐율 85~90%에서 가장 큰 값을 나타냈다.

9. 다짐률이 85%以上이고 透水係數가 1×10^{-3} cm/sec 以下인 堤防은 대체로 파이핑作用에 安全하다고 생각된다.

參 考 文 獻

1. Agarwal, K. B. and R. N. Sachan, 1968, Correlation of Shear Strength Parameters of Soils Compacted at O. M. C, with Their Plasticity Characteristics, Symp. on Earth and Earth Rock Fill Dams (India), Vol. 1, pp. 85-93.
2. Anagnosti, P., 1981, Design Parameters for Fills, 7th. E. C. S. M. F. E(London), Vol. 5, pp. 159-169.
3. Baker, R. and M. Garber, 1977, On Slip Surface and Slops Stability Analysis, J. Soils and

- Foundations. Japanese Society of Soil Mechanics and Found. Eng., Vol. 17, No. 1.
4. Barden, Laing, 1968, The Effect of Stress Path on the Compression of Compacted Clay Fill, Symposium on Earth and Earth Rock Fill Dams(India), Vol. 1, pp. 49-57.
5. Barden, L., 1974, Consolidation of Clays Compacted 'Dry' and 'Wet' of Optimum Water Content, J. Geotechnique, The Institution of Civil Engineers(London), Vol. 24, No. 4
6. Bishop, A. W. and G. E. Blight, 1963, Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils, J. Geotechnique, The Institution of Civil Engineers (London), Vol. 13, No. 3.
7. Bishop, A. W. and N. Morgenstern, 1960, Stability Coefficients for Earth Slopes, J. Geotechnique, The Institution of Civil Engineers(London), Vol. 10, No. 4.
8. Chen, R. H. and J. L. Chameau, 1982, Three-Dimensional Slope Stability Analysis, 4th. Inter. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics(Canada), Vo., 2, pp. 671-678
9. Chen, W. F. and T. Sawada, 1983, Earthquake Included Slope Failure in Nonhomogeneous Anisotropic Soils, J. Soils and foundations, Japanese Society of Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 23, No. 2.
10. 大韓土木學會, 1983, 토목공학 핸드북, pp. 22-51~22-60.
11. Goel, M. C. and N. C. Das, 1981, Construction Pore Pressures-Case Study of Ramganga Dam-, 10th. I. C. S. M. F. E. (Stockholm), Vol. 3, pp. 417-420.
12. 長谷川高士, 菊澤正裕, 1982, 파일그람의動的學動に及ぼす貯水の影響, 日本農業土木學會論文集, 第 87號.
13. Japanes National Comittee on Large Dams,

- 1976, Design Criteria for Dams, pp. 85-98, 114-117.
14. 電力土木技術協會, 1981, 最新フィルダムの工學, pp. 45~48, 100~119, 131-133.
15. 姜又默, 1970, 흙의 다짐에 관한 연구(흙의 다짐이 一軸壓縮強度 및 透水係數에 미치는 影響), 韓國農工學會誌, 第12卷, 3號.
16. 建設部, 1982, 河川施設基準(댐편), pp. 237~242.
17. _____, 1987, 河川工事標準示方書, pp. 46~49, 76~81.
18. 建設省 河川局(日本), 多目的 ダムの建設, 第3卷, 全國建設研修セメタ, pp. 207~255.
19. 金周範, 尹忠變, 1975, 흙의 工學的 性質에 관한 研究, 韓國農工學會誌, 第17卷, 3號.
20. Kotzias, P. C. and A. G. Stamatopoulos, 1975, Statistical Quality Control at Kastraki Earth Dam, J. Geotechnical Engineering, A. S. C. E., Vol. 101, No. GT. 9.
21. 權式男, 姜又默, 1983, 堤體의 浸透流解釋에 관한 比較研究, 韓國農工學會誌, 第25卷, 1號.
22. 黑田充, 1984, 高見ダムの設計と施工, 大ダム. 日本 大ダム會議, 第27卷, 11號.
23. Matsuo, M. and K. Kuroda, 1974, Probabilistic Approach to Design of Embankments, J. Soils and Foundations, Japanese Society of soil Mech. and Found. Eng., Vol. 14, No. 2.
24. 松尾新一郎, 福本武明, 1979, まさ土の締固め密度と透水性に及ぼす 粒子破碎の 影響, 土質工學會論文集 Vol. 19, No. 2.
25. Murthi, P. L. N., J. M. Tiwari and P. C. Tiwari, 1968, Pore-Pressures in Earth Dams during Construction, Symposium on Earth and Earth Rock Fill Dam(India), Vol. 1, pp. 256-263.
26. 農業土木學會(日本), 1979 農業土木ハンドブック, 九善株式會社, pp. 13 : 38~13 : 40.
27. 農水産部, 1982. 農地改良事業企劃設計基準(댐편), pp. 258~359.
28. 鬼塚克充, 林重德, 吉武歳樹, 大石英隆, 1979, 締固めた土の壓縮及び強度 異方性について, 土質工學會 4 No. 4.
29. Rao, D. J. and K. K. Rao, 1968, Movement in some Earth Dams during and after Constuction, Symposium on Earth and Earth Rock Fill Dams(India), Vol. 1, pp. 145-150.
30. Rowe, P. W., 1969, The Relation between the Shear Strength of Sands in Triaxial compression, Plane Strain and Direct Shear, J. Geotechnique, The Institution of Civil Engineers (London), Vol. 19, No. 1.
31. Rouse, W. C., 1975, Engineering Properties and Slope form in Granular, J. Engineering Geology(The Netherland), Vol. 9, pp. 221-235.
32. Sherard, J. L., R. J. Woodward, S. F. Gizienski and W. A. clevenger, 1963, Earth and Earth-Rock Dams, John Wiley and Sons, New York, pp. 127-129, 271-286, 723-353, 585-613.
33. 土質工學會事業 普及委員會, 1976, N値およびCと ϕ の考え方, 日本土質工學會 pp. 66-70.
34. 土質工學會(日本), 1982, 土質工學ハンドブック, pp. 78~98, 1210~1224.
35. 鳥山晃司, 1978. 締固の粘性土のセソ斷特性の水浸による變化, 日本農業土木學會 論文集, 第77號.
36. U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1973, Design of Small Dams(2nd), A Water Resources Technical Publication, pp. 136-139, 264-270, 641-644.
37. U. S. Department of Interior Bureau of Reclamation, 1974, Earth Manual (2nd), A Water Resources Technical Publication, PP. 18-22, 43-64, 253-260, 419-432.
38. 尹忠變, 尹在模, 1973, 흙댐設計에 있어 電子計算機의 利用, 韓國農工學會誌, 第15卷, 4號.
39. _____, 金周範. 1979. Fill Dam의 機械輻壓效果에 관한 研究. 韓國農工學會誌, 第21卷.