

모래층에서의 水流의 特性에 關한 實驗的 研究

Experimental Study on the Characteristics of Water Flow Through Sand Layer

南 宮 達* · 金 哲 基*
Tal Nam Kung · Choul Kee Kim

Summary

The object of this experiment is to find out some flow characteristics of water through sand layer, to prevent moving sands in the filters of the fill Dam, infiltration gallery, well and Deversion Weir.

This experiment was accomplished with different particle Sizes of Six Samples and different hydraulic gradient.

The results obtained are Summarized as follows.

1. The critical hydraulic gradients for laminar flow was found to be between 1 and 2 when the sand used had the effective diameter, D_{10} of between 0.18cm and 0.45 cm.
2. The critical hydraulic gradients for different particle sizes of sands were varied considerably.
3. There was a negative correlation between critical hydraulic gradient and critical Velocity, and between effective particle diameter D_{10} and critical hydraulic gradient respectively.
4. In spite of relatively small variation of void ratio of sands used, the values of the coefficient of permeability varied considerably. There was a negative correlation between coefficient of permeability and void ratio.

緒 論

모든 물의 흐름은 土質과 密接한 關係를 가지고 있으며 특히 필댐 土砂地盤上的 取入堰 集水暗渠 및 地下水井 等 水利構造物 設計에 있어서 留意하여야 할 한가지 重要的 일은 quick sand 現象에 依

한 内部土砂의 流動과 貫孔作用을 未然에 防止할 수 있는 方法을 講究하는데 問題가 있다. 이러한 問題를 解決하기 爲하여 오늘날까지 많은 學者들에 依하여 多方面의 研究가 進行되고 있다. 필타를 必要로 하는 構造物에는 필타 設置의 法則에 準하여 필타를 設置하고 있으며 防潮堤 및 取入堰의 밑목 決定에 있어서는 合理的인 Creep 比를 定하여 水流에 依한 土砂의 貫孔作用을 防止하도록 努力하고

* 忠北大學 農工學科

있으나 필타 内部 또는 基礎地盤의 土砂中을 물이 흐를 때 모래 粒子的의 移動性과 關聯된 層流와 亂流 現象의 發生에 對한 水理學의 特性을 考慮한 일은 別로 없다.

따라서 本研究에서는 粒度가 다른 모래로 組成된 6種類의 試料에 對하여 透水試驗을 實施하므로써 물의 흐름에 影響을 주는 모래의 粒度 組成과 空隙 透水係數, 動水勾配 等과 流速과의 相關關係를 考察하므로써 主로 모래層에서의 모래 粒子的의 流動이 생기지 않는 層流領域에 關한 水理의 特性을 究明 하고자 한다. 이에 몇가지 結果를 얻었기에 이에 報告한다.

I. 研究史

모래層의 물의 흐름의 特性을 考慮하여 構造物의 安定을 圖謀하는 것은 大端히 重要한 問題이다.

記錄에 依하면 人類는 土砂中의 물을 利用하기 爲하여 우물을 팠다는 事例가 있다^{1), 2)}

그러나 土砂中을 흐르는 물 即, 地下水 理論이 體系를 이룬 것은 Tolman³⁾ meinzner⁴⁾等에 依하여 研究된 以後라 한다. 1956年 Darcy는 흡속을 흐르는 地下水의 흐름에서 Darcy의 法則을 提案하였다.

흡속을 흐르는 물 即 地下水는 土質과 密接한 關係를 가지고 있으며 Lee⁵⁾는 필댐에 對한 安全性, 不透水性 施工의 難易 물에 對한 不溶性 等を 考慮한 選擇基準을 求하였다. 우리나라 農水產部에서 드 필타材料의 粒徑과 透水係數에 對해서 提示하였다⁶⁾.

松尾는 地中膜을 利用한 地下水의 積極的인 開發에 必要한 土質改良 即 射出水에 依한 흙의 透水性 改良에 關해서 數年間 研究를 繼續하고 있다^{13), 15)}.

우리나라에서도 필댐이나 排水도랑에서 필타材로서의 모래에 對한 基準이 提示되어 있다²⁰⁾. 土砂의 移動可能性이 있는 곳에서 이것을 防止하기 爲하여 透水性 필타層의 材料는 다음과 같은 粒度를 選擇한 다는 基準이 提示되어 있다. $\frac{D_{15}F}{D_{10}B} = 12 \sim 40$ $\frac{D_{60}F}{D_{50}B} = 12 \sim 58$ ²¹⁾ 특히 1922年에 Torzaghi가 研究를 始作하여 Gasacvande Burtram을 거쳐 美國 開拓局 육군 토목부에서 이어가는 동안에 다소의 意見을 달 리하고 있지만 어느點에서는 意見의 一致를 보고 있다고 한다²²⁾.

흙의 다짐은 물의 透水性과 關係를 갖고 있으며 透水性을 制限하기 爲하여 18世紀末에 地中海地方

에서 動物을 利用하여 흙을 다진 記錄이 있다²³⁾.

그러나 흙의 透水性에 對한 體系的인 研究는 Drcctor²⁴⁾가 다짐 試驗方法을 研究하기 始作한 後라 하겠다.

久保는 여러가지 堤防에 對한 試料를 採取하여 透水試驗을 하고 最少 空隙化와 透水係數에 對하여 研究한 바 있다.

松尾¹³⁾는 粘土 모래의 中間粒度 分布를 갖는 흙으로 透水性에 關한 試驗의 考察을 하였으며 特別히 透水係數와 空隙化 흙의 粒徑 및 細粒土의 含有量과 의 關係에 對하여 檢討하였으며 透水性이 낮은 흙에 對하여 碎石을 混合하여 透水性을 改善하는 試驗을 하였다.

松尾¹⁶⁾는 動水勾配와 流速과의 關係를 試驗한 結果 動水勾配의 變化는 流速에 크게 影響을 주지 않는다고 報告하였다.

1856年에 Darcy²⁵⁾는 모래의 濾過層을 通過하는 흐름을 實驗해서 濾過層의 길이 L , 斷面積을 S 라 하고 兩端의 壓力을 P_1, P_2 라 하면 單位時間內에 濾過層을 通過하는 流量 Q 는 $Q = \text{const} \frac{S(P_1 - P_2)}{L}$ 平均流速 V 는 Q/S 라고 提示하였다.

1839年 Hazen²⁶⁾은 圓管內의 흐름의 壓力差를 測定했으며 흐름에는 2種類의 狀態가 存在하는 것에 着眼하였다고 그論文에 提示하였다. 其後 1843年에 Stokes²⁷⁾도 같은 것을 發表하였다고 한다. 2種類의 흐름狀態란 層流와 亂流를 意味하는 것이고 이를 明確히 한 것은 Reynolds라고 한다.

M. Anandarishnan and G.E. Varandara Julu¹는 地에 對한 一定한 水頭에서의 透水試驗을 하여 모래層을 通하는 물의 亂流 方程式을 提案하였으며 $D_{10} > 0.03\text{cm}$ 에서 Reynolds數는 1보다 작다고 言及하였다.

Hazen²⁸⁾은 $K = 41de^2(0.7 + 0.03t)$ 의 透水係數 公式를 發表하였다. 地下水의 定流 不定流의 基本方程式에 對한 研究 Deputit의 堤體에 對한 浸潤線의 研究 暗渠의 밀과 不透水層間의 關係式을 Forchheimer가 研究發表하는 등 많은 研究가 되어 왔으나 自然的인 條件 實驗裝置 土層의 組成 等에 依하여 差異가 있으므로 研究의 餘地가 있음은 勿論 未研究 部分도 아직 많은 것으로 생각한다.

II. 材料 및 試驗方法

1. 使用材料

이 試驗에 使用한 모래의 試料는 無心川 上流에

서 採取하여 4番체를 通過하고 200番체에 남은 試料을 다시 分析하여 그림1 및 表1과 같이 粒度 分布가 다른 6種類의 試料을 人爲的으로 配合 混合 하여 使用하였다.

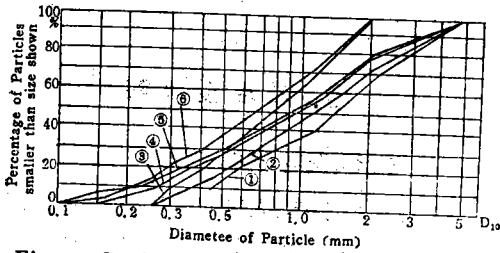


Fig. 1. Grainsize Abbumulatierr Curves.

2. 實驗裝置와 實驗方法

實驗裝置는 그림2에 表示한것과 같이 試料을 넣 는 圓筒은 두께 5mm의 鐵製로 만들었고 通水管은 $\phi=20\text{mm}$ 의 Plastic製를 使用하였으며 圓筒에는 透 水試驗에 있어서 水頭差 h 를 測定하기 爲하여 $\phi= 10\text{mm}$ 인 2개의 피에조 메타를 附着시켰다.

通水管 上端의 Tank와 透水圓筒 上端은 물을 越 流시킬 수 있는 幅 2cm의 notch를 부쳐 試驗時 定 水位를 維持하도록 만들었다. 試料을 透水圓筒內에 넣을때 다짐에 使用한 램마의 重量은 2,495kg이고 램마의 落下高는 30.5cm이다.

試料은 圓內筒에 두께 10cm씩 3層으로 나누어 넣

Table-1. Composition of the Samples of sand particles and their physical properties.

sample Number	1	2	3	4	5	6
sieve number	No. 4~ No. 40	No. 4~ No. 60	No. 10~ No. 60	No. 4~ No. 140	No. 4~ No. 200	No. 10~ No. 200
physical properties						
No. 4	0% (100)	0% (100)	%	0% (100)	0% (100)	%
No. 10	31.2 (68.8)	26.4 (73.6)	0 (100)	23.8 (76.2)	23.6 (76.4)	0 (100)
No. 16	24.9 (43.9)	21.0 (52.6)	28.6 (71.4)	18.9 (57.3)	18.9 (57.5)	24.7 (75.3)
No. 30	29.4 (14.5)	24.8 (27.8)	33.7 (37.7)	22.4 (34.9)	22.2 (35.3)	29.1 (46.2)
No. 40	14.5 (0)	12.2 (15.6)	16.5 (21.2)	11.0 (23.9)	11.3 (24.0)	14.3 (31.9)
No. 50		9.2 (6.4)	12.5 (8.7)	8.3 (15.6)	7.6 (16.4)	10.8 (21.1)
No. 60		6.37 (0.03)	8.68 (0.02)	5.8 (9.8)	5.7 (10.7)	7.5 (13.6)
No. 100				7.3 (2.5)	7.3 (3.4)	9.5 (4.1)
No. 140				2.45 (0.05)	2.4 (1.0)	3.2 (0.9)
No. 170					0.5 (0.5)	0.7 (0.2)
No. 200					0.1 (0.4)	0.16 (0.04)
specific gravity	2,631	2,631	2,621	2,616	2,674	2,673
Void Ratio	0.402	0.403	0.408	0.432	0.467	0.469
D ₁₀	0.42	0.35	0.30	0.27	0.22	0.18

고 各層 마다 람마로써 10회씩 다졌으며 다짐에너지는 0.9kg cm/cm²으로 하였다. 透水試驗의 操作은 上端의 Tank의 位置를 낮은 位置에서 점차로 높여 가며 實驗하고 다시 Tank의 位置를 높은 位置에서 낮은 位置로 하여 이에 따라 變化하는 水頭差 *h*를 測定하는 同時에 mass cylinder를 使用하여 流量 *Q*를 測定하였으며 이때 流量의 測定時間은 Stop watch를 使用하여 30秒, 60秒 2회로 나누어 그때 마다 水溫을 測定하였다.

이와같은 操作을 三反復하였고 透水係數 *K*와 實際의 流速 *V*는 Darcy의 法則(2-1)과 (2-2)式에 依하여 計算하였다.

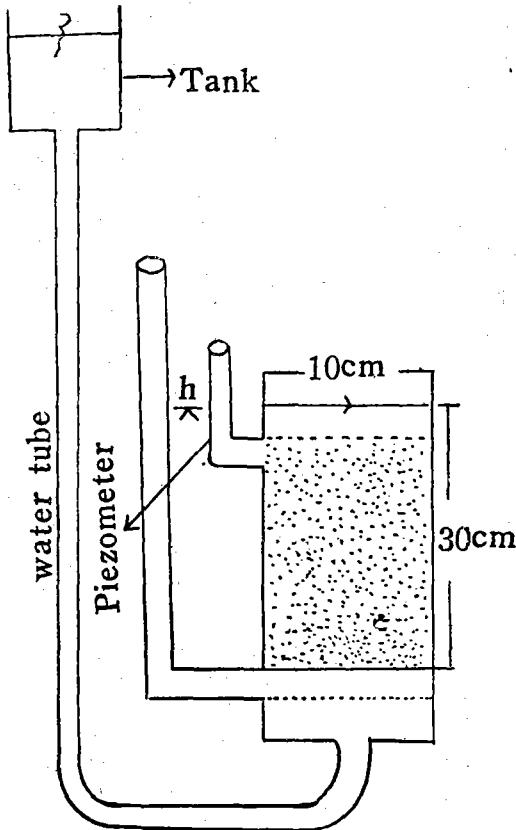


Fig. 2. measuring A pparatus of hydraulic conductivity.

$$Q = KAi = KA \frac{dh}{dL} \dots (2-1)$$

A = 流量 (cm³/min or cm³/sec)

i = 動水勾配

dh = 流速의 두점에서의 水頭差

dL = *dh*에 對한 流線長

K = 透水 係數 (cm/min or cm/)

A = 筒內의 試料斷面積 (cm²)

$$V = \frac{Q}{A_v} = Ki \frac{A}{A_v} = \frac{Ki}{n} \dots (2-2)$$

V = 實際의 流速 (cm/min, cm/sec)

A_v = 間隔의 斷面積 (cm²)

n = 間隔率

III. 結果 및 考察

1. 動水勾配와 流速

各試料에 따른 動水勾配 *i*와 流速 *v*와의 關係는 兩對數 그래프 用紙를 使用하여 表示한바 그 結果는 그림 3과 같다. 供試한 6種類의 試料에 對한 水理學的 條件은 (Fig. 3參照) 표 2와 같다.

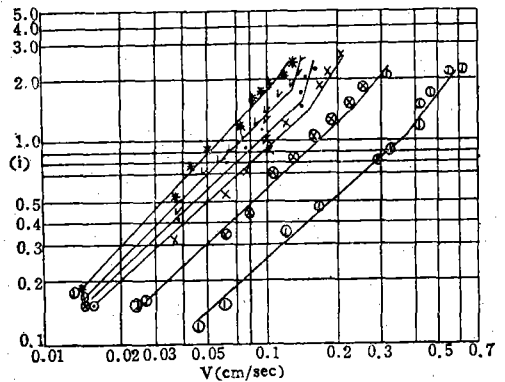


Fig. 3. Relationship between hydraulic gradient (i) and flow velocity (v)

그림 3에서 보는바 같이 折點을 이룬 上部와 下部의 勾配는 各各 다르며 上部에서는 下部보다 勾配가 急한 것으로 되어있다. 따라서 動水勾配가 어느 限界點을 지나면 動水勾配의 增加에 比해 流速의 增加率이 減少될을 나타내는 傾向이 있다. 一般의으로 이點의 附近을 遷移領域이라 부르고 그 上部 領域은 亂流領域이 될것이고 그 下部領域은 層流領域이 될 것이다.

한편 粒徑이 큰 試料에서는 작은 粒徑의 試料보다 같은 動水勾配에서 動水勾配의 增加에 比해 流速의 增加率이 커진다는 것을 나타냈다.

여기에서 直線의 勾配가 變化하는 點의 動水勾配를 限界動水勾配 *i_c*로 부르기로 한다. 各試料에서 *i_c*의 값은 표 2 및 그림 3에서와 같이 1-2의 範圍에 存在하며 粒徑이 큰 試料일수록 작아지는 傾向을 보였는데 이 값은 松尾가 行한 碎石層에서의 限界

Table-2. The hydraulic conditions of the samples

Sample Number	1 No. 4~ No.40	2 No. 4~ No.60	3 No.10~ No.60	4 No. 4~ No. 140	5 No. 4~ No.200	6 No.10~ No.200
Hydraulic Condition						
Coefficient of Permeability	0.049	0.032	0.029	0.024	0.019	0.017
Critical Velocity	cm/sec 0.41	0.19	0.14	0.13	0.12	0.11
Critical hydraulic gradient	1.09	1.27	1.38	1.52	1.61	1.78
Effective Diameter	mm 0.42	0.35	0.30	0.27	0.22	0.18

動水勾配의 값 보다 큰값으로 粒度가 큰 試料 일수록 限界動水勾配의 값이 작아짐은 松尾의 試驗結果와 比較하여 보더라도 잘 說明될 수 있는 事實로 생각한다.

2. 限界 動水勾配와 有效粒徑

그림 4는 限界動水勾配 i_c 와 모래의 有效粒徑 D_{10} 과의 關係를 表示한 것이다. 그림에서 i_c 와 D_{10} 은 負의 相關關係를 나타내고 있으며 따라서 粒徑이 크면 粒徑이 작은 경우에 比하여 작은 動水勾配에서 水流은 亂流領域으로 變하였다.

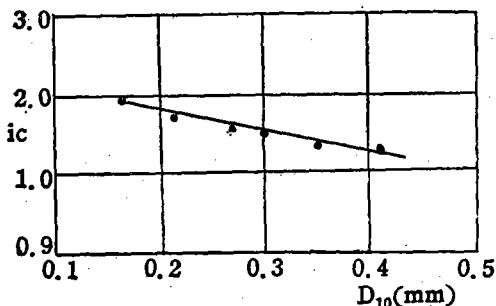


Fig. 4. Relationship between critical hydraulic(i_c) and effective Diameter of sand particles(D_{10})

3. 限界動水勾配와 限界流速

그림 5는 限界動水勾配 i_c 와 限界流速 V_c 의 關係를 表示한 것이다. 限界動水勾配와 限界流速은 負의 相關關係를 나타내고 있다. 이와같은 事實은 松尾⁹⁾가 碎石에서 實驗한 事實과 비슷한 傾向을 나타냈다.

4. 透水係數와 有效粒徑

本實驗에서 透水係數 K 와 有效粒徑 D_{10} 의 關係를 나타내면 그림 6과 같다. 여기에서 透水係數 K 와 有效粒徑 D_{10} 과는 正의 相關關係를 나타내어 有效

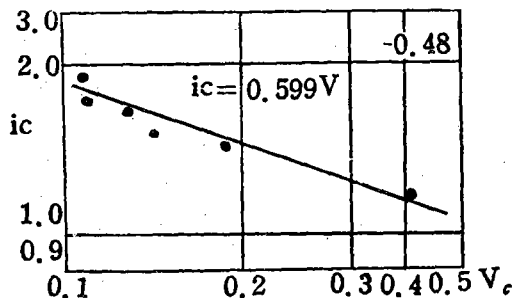


Fig. 5. Relationship between critical hydraulic gradient(i_c) and critical velocity(V_c)

粒徑의 增大에 따라 透水係數가 增大함을 나타냈는데 이와같은 事實은 Hazen¹⁰⁾이 論한바 透水係數는 有效粒徑의 自乘에 比例한다고 한 事實과 大體로 비슷한 傾向을 나타낸 것으로 생각할 수 있다.

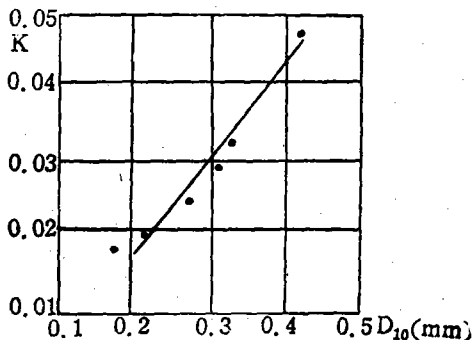


Fig. 6. Relationship between coefficient (K) and effective diameter of sand particles(D_{10})

5. 透係數와 間隙比

本實驗에 使用한 試料에 對한 透水係數 K 와 間隙比의 關係를 表示하면 그림 7과 같다.

그림 7에서 보는 바와 같이 透水係數 K 와 間隙

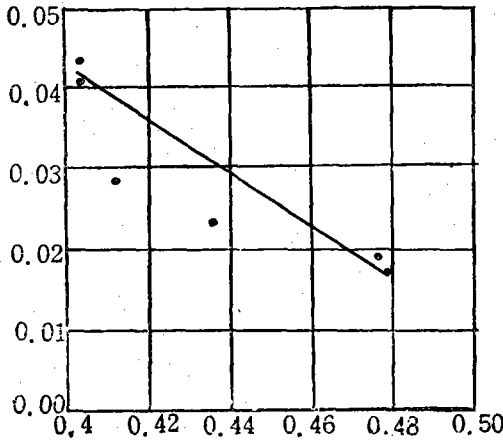


Fig. 7. Relationship between coefficient of permeability(K) and void Ratio(E)

比 c 는 大體로 負의 相關關係가 있으며 間隙比의 變化가 적은데 비해 透水係數의 값의 變化는 크다. 이와같은 事實은 從來 研究된 均一粒徑의 모래에 對한 透水係數의 값이 e^2 에 比例한다는 事實^{20), 21)}과는 相反된 關係를 나타내고 있는 것이지만 이는 筆者가 供試한 試料은 均一粒徑이 아닌 粒度 曲線이 相異한 모래를 使用한데 原因이 있는 것으로서 一般의으로 粒度가 가는 흙일수록 하나의 間隙의 크기는 작으나 全體間隙比는 커진다고 알려진 事實에 비추어 볼 때 間隙比가 클수록 透水係數가 작아지는 結果를 나타낸 것은 大體로 合理的인 것으로 생각할 수 있다.

IV. 結 論

모래속을 물이 흐를때 流速이 어느 限界值를 넘으면 quicksand 現象에 의한 모래의 流動이 일어난다는 경우가 있다.

필댐 集水暗渠 및 地下水井에 필타를 設置하면 이는 그 充分한 機能을 發揮하여야 할것이고 滲透性地盤에 取入堰을 設置하면 水流에 의한 貫孔作用이 일어나지 않도록 하는 것이 우리의 要望하는 바이다.

이 試驗은 모래層의 透水層을 通하여 물이 흐를 때 微細粒子의 移動이 일어나지 않는 層流 領域의 限界를 알아보기 爲한 것으로써 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 모래層 속을 물이 흐를 때 動水勾配와 流速의 變化에 依하여 생기는 層流의 限界點은 動水勾配 1-2의 範圍에 있음을 나타냈다.
2. 限界動水勾配 ic 와 有効粒徑 D_{10} 과의 關係에서 粒徑이 크면 粒徑이 작은 경우에 比하여 작은 限界動水勾配를 이루는 傾向을 보이므로 같은 動水勾配에서는 粒度가 큰 필타 또는 地盤일수록 모래의 流動可能性이 큰것으로 推定된다.
3. 限界流速은 粒度가 클수록 커졌으며 같은 流速에서 粒度가 큰 필타 또는 地盤일수록 모래의 流動에는 安定性이 크다고 할 수 있다.

V. 摘 要

本研究의 目的은 필댐 集水暗渠 및 地下水井에 設置되는 필타 또는 取入堰의 滲透性 地盤에서의 土砂流動 防止를 爲하여 모래속을 通하는 水流의 特性을 究明하고자 한 것이다.

그래서 本實驗에서 粒度配合이 다른 6種類의 試料에 對하여 動水勾配를 달리 하면서 透水試驗裝置에 依한 透水試驗을 實施하였는데 이에 依하여 얻은 試驗結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 모래의 有効粒徑 D_{10} 0.18cm에서 0.45cm의 사이에서 層流의 限界點이 動水勾配 1~2의 範圍에 있음을 나타냈다.
2. 모래를 通하여 물이 흐를때 限界動水勾配는 粒徑의 크기에 依하여 層流 限界點이 다르게 나타났다.
3. 限界動水勾配와 限界流速 또는 有効粒徑 D_{10} 과 限界動水勾配는 負의 相關關係가 있음을 나타냈다.
4. 透水係數의 값은 間隙比의 變化가 적은데 비하여 그 變化幅이 컸으며 間隙比와는 대체로 負의 相關關係를 나타냈다.

引 用 文 獻

1. Anandarkishnan, M. and G. E. Varandara Julu(1963) ASCE. Journal of the Soil mechanics and Foundation Division, proceedings 3631 PP. 1~15.
2. Baker. M. N. and R.E. Horton(1936) historical development of ideas regarding the crigin of Spring and ground water Trans, Amer. Geophysical union, Vol 17. PP. 395~400.

3. 崔榮博 柳漢烈 鄭俊錫(1971) 水理學 光林社. P. 395~400.
4. David Keith Todd(1959) PH.D. ground water Hydrology PP. 44~45.
5. Hazen. A. (1911) Discussion of Dams on Sand Foundation Trans. A.S.C.E. Vol 73. PP. 199~203.
6. Hazen A. (1893) Some physical properties of Sands gravels with Special reference to this use in filtration, 24th Ann Rep. mass stated Health, Boston. PP. 541~556.
7. 原藤次郎 本間仁, (1957) 應用水理學 上九善 PP. 32~33.
8. 姜父默, 朴春洙, (1973) 土質力學 PP. 48~49.
9. 金始原, 金哲基, 羅壽錫, 南宮達, 閔丙燮, 黃垠(1973) 農業水利構造學 PP. 78~79.
10. 久野悟即(1962) 土の締め, 技報堂 P. 3.
11. 久保田敬(1955) 河川堤防は どの程度に 締固められて, いるか 土と 基礎 Vol. 3. No. 11. PP 22~29.
12. Lee. C. H. (1936) Selection of matterials for polled Fill Earth Dams. proc. of A. S. C. E Vol 62. PP. 1026~1042.
13. 松尾新一郎 河野伊一郎(1968) 地下水 規制のための 地中グムの 構想 土木學會誌 第53卷 3號 PP. 9~13.
14. 松尾新一郎 木暮敬仁, (1969) 土の 透水性に 關する 一考察, 土と基礎, Vol 17, No. 5. PP. 23~29.
15. 松尾新一郎 木暮敬仁(1968) 射出水による 土質改良に 關する 基礎約 研究, 土と基礎, Vol 16. No. 7. PP. 29~35.
16. 松尾新一郎 木暮敬仁(1970) 石の 透水性に 關する 實驗 土と基礎 Vol 18. No. 2 PP. 5~8.
17. mimzer. D. E.(1934) The history and development of groundwater hydrology. Jour. Washington Acad. Sci. Vol 24. PP. 6~32.
18. Myens. J. (1961) Coefficient of permeability of soils. proceeding of the 5th international Conference on Soil mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1. PP. 381~385.
19. 閔丙燮 李漢永 金東萬 安秉基(1969) 地下水開發 P. 381~885.
20. 農林部(1968) 土地改良事業設計基準 P. 115.
21. 内田茂男(1957) 流體力學 山海堂, PP. 63~65.
22. 岡本哲史著(1968) 應用流體力學 PP. 263~264.
23. Proctor RR. (1933) Fundamental Principles of soil compaction, Engineering News Record, Vol 111. Nos 9, 10, 12 and 13.
24. Slichter. C.S. (1899) theoretical investigation of the mortion of the groundwater. U.S. Geological Survey 19th Ann. Rep. Pt. 2, Washinton. D. C. PP. 259~384,
25. Slichter. Cos(1902) the mortions of under groundwater, U.S. geological survey water supply paper 67. Washington, D.C. C.P. 106.
26. 土質工學會(1965) 土質工學 핸드ブック PP. 75~83.
27. Taylor D.V.(1948) Pundamentals of soil mechanics. John and Sons. PP. 112~123.
28. Tolman C.F. (1937) Groundwater, Mcgraw Hill Newyork P. 593.