

盛土斜面の崩壊에 관한 實驗的 研究

Experimental Study on the Slope Failure of Embankment

姜 义 默* · 李 達 遠** · 池 仁 澤** · 趙 在 弘**
Kang, Yea Mook · Lee, Dal Won · Chee, In Taek · Cho, Jae Hong

Summary

The laboratory model test was carried out to investigate the behavior of pore water pressure, the critical amount of rainfall for slope failure, the pattern of failure, and the variation of seepage line at the slope with the uniform material of embankment by changing the slope angles and rainfall intensities.

The results were summarized as follows :

1. At the beginning stage of rainfall, the negative pore pressure appeared at the surface of slope and the positive pore pressure at the deep parts. But, the negative one turned into the positive one as the rainfall continued and this rapidly increased about 50 to 100 minutes before the slope failure.
2. The heavier the rainfall intensity, the shorter the time, and the milder the slope, the longer the time took to reach the failure of slope.
3. As the angle of the slope became milder, the critical amount of rainfall for slope failure became greater.
4. Maximum pore water pressure was 10 to 40g/cm² at the toe of slope and 50 to 90g/cm² at the deep parts.
5. In the respect of the pattern of slope failure, surface failure of slope occurred locally at the toe of slope at the A-soil and failure of slope by surface flow occurred gradually at the top part of slope at the B-soil.
6. As the rainfall continued and the saturation zone in the embankment was formed, the seepage line went rapidly up and also the time to reach the total collapse of slope took longer at the B-soil.

* 忠南大學校 農科大學

** 忠南大學校 大學院

키워드 : 斜面崩壊, 安定解析, 空隙水壓, 浸潤線

7. As the position of the seepage line went up and the strength parameter accordingly down, the safety factor was 2.108 at the A-soil and 2.150 at the B-soil when the slope occurred toe failure. Minimum safety factor was rapidly down to 0.831 at the A-soil and to 0.936 at the B-soil when the slope collapsed totally at the top part of slope.

I. 緒 論

盛土斜面에 관한 理論的인 安定解析은 여러 가지 方法이 研究되어 使用하고 있으나 어느 方法이 實際에 接近할 수 있는지는 優劣을 가리기가 어려운 實情이다.^{2, 4, 5, 6, 8, 12, 13, 23)}

오히려 斜面安定解析을 할 때 實驗에서 구하는 強度定數가 어떤 것이 適合한지를 選定하여 入力資料로 定하는 것이 더욱 더 重要時되어야 할 것이다. 適合한 強度定數를 選定하기 위해서는 理論的인 分析方法과 더불어 實際模型實驗을 통하여 檢證하는 研究가 先行되어야 할 것이다.

盛土斜面은 透水성과 強度定數가 一定하지 않기 때문에 豪雨³⁶⁾가 發生했을 경우 複雜한 舉動을 나타내고 있으며 또 崩壞의 形態도 여러 가지로 나타난다. 地盤條件이 流動化하기 쉬운 모래이거나, 傾斜진 基礎위에 軟弱한 層이 存在할 경우 또는 地下水水位가 높은 細砂地盤에서는 盛土의 安定性에 대하여 신중히 檢討해야 한다. 특히 斜面崩壞의 大部分은 降雨에 의한 表面水나 浸透水에 의해서 發生되고 있다. 盛土의 不均一性外에 降雨量이나 降雨強度 等에 의해서 降雨時 盛土斜面의 浸透現象은 複雜하게 나타나고 있다. 지금까지 降雨에 의한 斜面崩壞의 研究는 많은 學者들에 의하여 理論的인 分析^{11, 15, 37, 42)} 및 模型實驗 等^{9, 24, 45)}를 통해서 研究되어 왔으나 아직도 未解決된 問題點이 많이 남아 있다.

盛土斜面의 破壞에 대한 模型實驗은 여러 學者들에 의하여 研究되어 왔는데, 그 중에서 久樂 等²⁰⁾은 雨水의 浸透를 考慮한 경우의 盛土斜面에 대하여 安定解析方法을 提案하고, 模型實

驗을 통하여 雨水浸透實驗 結果와 比較하여 그 의 適合性을 檢討했다. 村田 等²⁶⁾은 斜面安定에 관한 地下水의 影響과 空隙水壓의 分布를 模型實驗을 통하여 實驗한 結果와 比較 分析하였다. 또 岡田 等³⁰⁾은 不透水성의 地盤위에 築造된 盛土斜面에 대하여 遮水성의 被覆材料를 使用하여 降雨에 의한 盛土斜面의 崩壞實驗을 하였다.

최근에는 原地盤條件과 同一한 條件下에서 斜面被壞에 관한 模型實驗을 實施하고 있는데 均一한 盛土斷面에 대하여 遠心模型實驗機를 利用하여 降雨에 의한 斜面崩壞 實驗을 實施하고, 斜面內의 空隙水壓의 分布를 利用하여 斜面의 安定檢討를 研究하고 있다.^{16, 19, 45)}

集中豪雨에 의한 斜面崩壞는 人命被害는 물론 막대한 經濟的 損失을 입히기 때문에 斜面崩壞 發生時期的 推定이 중요한 研究課題가 되고 있다. 斜面崩壞 發生時期的 推定은 變形速度의 變化에 의한 方法³²⁾과 地表面 傾斜의 變動,²⁵⁾ 微騒音의 測定⁴⁰⁾ 및 降雨에 의한 危險降雨量을 設定하는 方法⁴³⁾ 등이 있다.

이와 같은 崩壞發生時期的 推定에 관하여는 여러 學者들에 의해서 研究가 進行되어 왔으나, 아직도 많은 問題點이 대두되고 있다. 특히 降雨에 의한 砂質土 斜面의 小規模 表層崩壞의 發生時期 推定에 대해서는 아직도 확고한 方法이 確立되어 있지 않고 있다.

斜面崩壞의 發生時기에 관하여 아직까지도 확고한 推定方法이 確立되어 있지 않은 이유중의 하나는 崩壞構造가 多樣해서 그 支配要因을 명확하게 설명할 수 없기 때문이다.⁴³⁾

그러나 斜面崩壞에 관한 많은 研究로부터,

崩壞의 主原因은 降雨浸透에 따르는 空隙水壓의 增加때문이라는 것이 명확하게 설명되어지고 있다.^{16, 19, 20)} 崩壞의 主要因이 斜面內空隙水壓의 增加로 인하여 發生되기 때문에 空隙水壓의 變化에 基礎를 두고 斜面崩壞 發生時期를 推定할 需要가 있다고 생각된다.

따라서 本 研究에서는 土質이 均一한 盛土斜面에 대해서 斜面傾斜角, 降雨強度 등을 變化시키면서 降雨持續時間에 따른 空隙水壓의 變化, 盛土內의 自由水面의 變化 등이 斜面崩壞에 미치는 影響을 室內 模型實驗을 통하여 考察하였다.

II. 材料 및 試驗方法

1. 使用材料

本 研究에 使用된 試料는 大田直轄市 儒城區 弓洞에서 採取한 모래(sand)와 大田直轄市 西區 屯山洞에서 採取한 흙(loam)의 두 種類의 試料를 使用하였고, 그의 粒度分布와 物理的性質은 Fig. 1 및 Table-1과 같다.

透水試驗은 두 種類의 試料를 最適含水比로 調節하여 最大乾燥密度의 95%로 다져서 하였고, 粘着力과 內部摩擦角을 구하기 위한 三軸 壓縮試驗도 透水試驗과 同一한 條件으로 不飽和時와 飽和時에 대하여 非排水試驗(UU)을 實施하였다.

Table-1. Properties of soil tested

Properties	unit	Materials	
		A-soil (Sand)	B-soil (Loam)
Specific gravity		2.62	2.68
Atterberg LL	%	-	33.4
Limit PI	%	NP	11.7
Optimum Moisture Content(Womc)	%	13.2	15.80
Max. Dry Density ($\gamma_{d,max}$)	g/cm ³	1.803	1.740
Passing by #200 sieve	%	17	45
Coeff. of Permeability(k)	cm/sec	3.31×10^{-5}	5.09×10^{-7}
Triaxial C	kg/cm ²	0.25	0.50
compression C(sat.)	kg/cm ²	0.01	0.01
ϕ	degree	9°27'	0
ϕ (sat.)	degree	0	0
Soil classification		SM	SC

2. 試驗裝置

가. 斜面模型裝置

降雨時 斜面內의 浸透現象을 觀察하기 위하여 Fig. 2와 같이 아크릴판(두께: 15mm)과 앵글로 模型裝置를 製作하였다.

模型裝置의 크기는 길이 174cm, 높이 72cm, 폭 39cm로 하였고, 이 안에 흙을 다져서 盛土斜면을 만들었다. 그리고 空隙水壓과 浸潤線은

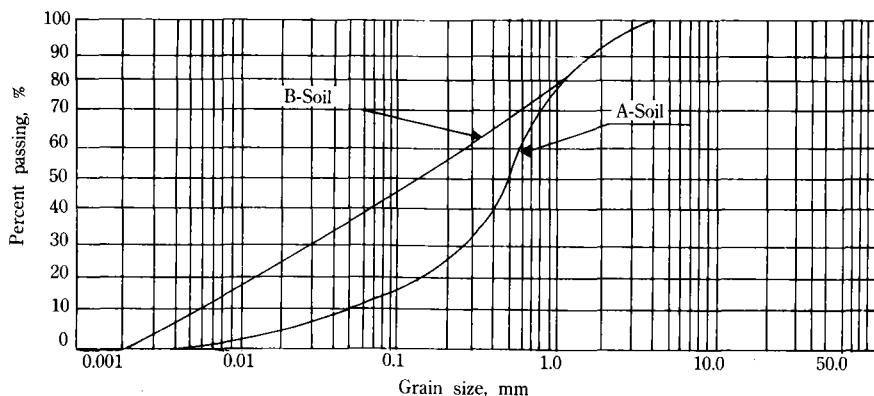


Fig. 1. Grain size distribution curves

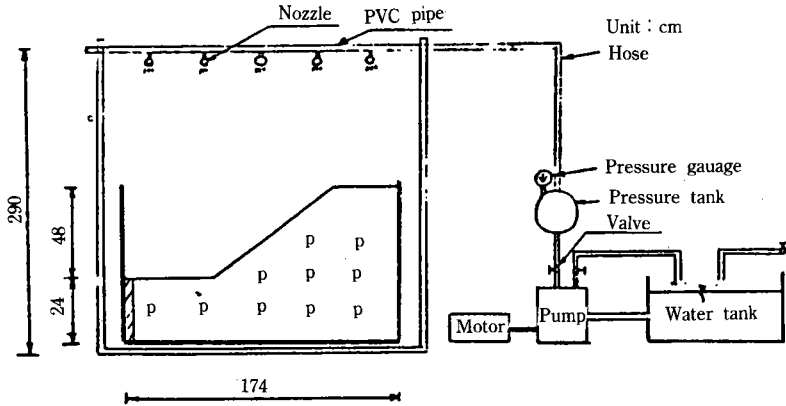


Fig. 2. Test model apparatus

Fig. 2와 같이 測定用 밸브를 설치하여 測定하였다.

나. 降雨裝置

降雨裝置는 斜面模型內에 여러가지 降雨強度를 再現할 수 있도록 製作하였고, 降雨強度는 流量供給裝置를 이용하여 壓力 게이지의 눈금으로 調節하였다. 調節된 降雨強度는 降雨量測定裝置를 使用하여 다시 信賴性을 檢定하였다. 요구되는 降雨強度는 PVC 파이프(直徑 15mm)를 통해서 노즐에 到達되고 이 노즐(直徑 0.5 mm)을 통하여 斜面 模型에 均等하게 分散되도록 하였다. 또 降雨裝置는 斜面模型의 바로 위에서 降雨가 均等하게 分布되도록 높이를 조절하여 使用하였다.

다. 空隙水壓測定裝置

1) 測定方法

本 實驗에 使用된 空隙水壓計는 原理나 기구가 간단하고 耐久性과 安定性이 뛰어나며 精度도 일반적으로 良好한 水銀 마노미터식을 利用하여 空隙水壓를 測定하였다(Fig. 3).

降雨로 인하여 地盤浸透가 發生할 때 正 및 負의 空隙水壓의 變化를 알기 위하여 텐시오미터를 使用하였고 텐시오미터는 地盤에 埋設하였을 때 氣泡가 남지 않도록 세라믹 필터(Seramic filter)로 製作하였다.

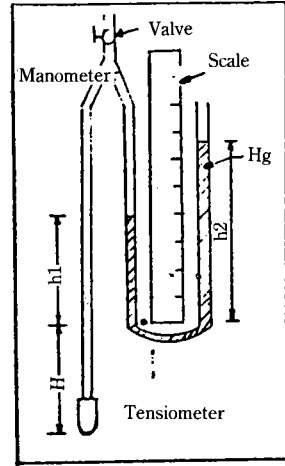


Fig. 3. Pore pressure apparatus

2) 實驗方法

模型實驗에 使用된 試料는 最大乾燥密度의 95%에 對應하는 含水比 範圍로 調節하여 密度가 一定하게 維持되도록 두께 5cm로 動的다짐을 하여 實驗地盤을 築造하였다. 그리고 表面流出에 의한 浸蝕 洗堀이 일어나지 않도록 降雨強度를 조절하여 實驗하였다.

降雨強度는 每年 6월부터 9月사이에 集中降雨의 形態로 發生되어 自然災害를 誘發시키므로 降雨強度는 이 期間에 全國에서 發生된 산사태의 資料를 基礎로 하여 35mm/hr, 45mm/hr,

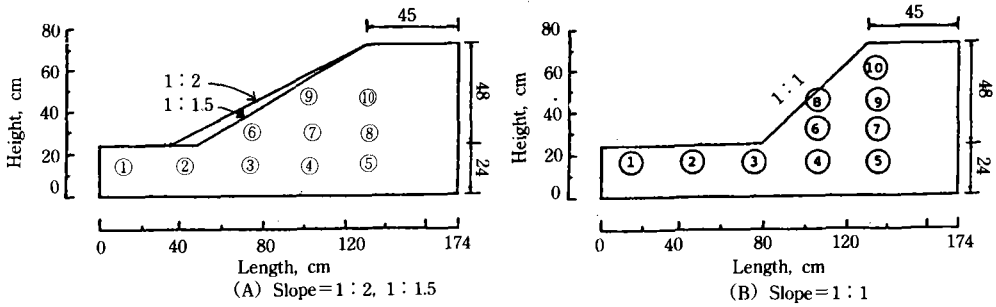


Fig. 4. Dimensions of slope model and locations of pore pressure meter

55mm/hr의 3種類로 設定하였다.

그리고 降雨強度는 다음과 같은 식을 利用하여 구했다.

$$I_R = \frac{10Q}{At}$$

Q = 測定용기의 體積(ml)
 A = 測定용기의 面積(cm^2)
 t = 時間(hours)
 I_R = 降雨強度(mm/hr)

適用된 降雨強度가 盛土 模型全體에 均一하게 分散되어야 하는데, 이와 같은 均等分布는 流量供給裝置의 壓力과 노즐의 크기에 따라 變하게 된다. 이때 分布의 量은 다음과 같은 식(Christiansen's coefficient)³⁾을 利用하여 구했고, 이 식으로 구한 均等分布는 약 80% 정도로 良好하게 斜面全體에 均一하게 分散되었다.

$$C_u = 100 \times \left(1 - \frac{\sum |x|}{m \cdot n}\right)$$

m = 平均觀測깊이
 n = 觀測回數
 x = 平均-各各의 觀測깊이

盛土斜面 模型은 築造가 可能하도록 斜面의 傾斜를 1:1, 1:1.5, 1:2의 3단계로 變化시켰으며, 斜面 높이는 48cm, 斜面폭은 39cm로 一定하게 維持하도록 하여 盛土斜面을 築造하였다. 實驗計劃을 要約하면 Fig. 4 및 Table-2와 같다.

斜面內的 空隙水壓의 變化를 測定하기 위해서 10개의 텐시오미터를 埋設하고 水銀 마노미터에

Table-2. Parameters and angles of inclination of model slopes

Soil type	A-soil(sand)	B-soil(loam)
Rainfall intensity (mm/hr)	35 ± 2, 45 ± 2, 55 ± 2	35 ± 2, 45 ± 2, 55 ± 2
Slope	1:1, 1:1.5, 1:2	1:1, 1:1.5, 1:2
Water content(%)	13 ± 2	16 ± 2
Unit Weight, γ_t (g/cm^3)	1.792	1.735

연결하여 觀測했다. 텐시오미터의 設置는 가로 30cm, 높이는 15cm 간격으로 埋設했다. 텐시오미터는 호스를 水銀 마노미터에 連結하여 空隙水壓을 測定했고, 計測時間은 30分單位로 하였다.

III. 結果 및 考察

1. 經過時間에 따른 空隙水壓의 變化와 崩壞時期의 推定

室內模型實驗의 結果 正의 空隙水壓의 增加現象으로 인하여 崩壞 發生時期를 推定할 수 있었으며, 空隙水壓의 上昇이 確認되고부터 崩壞가 發生되기까지의 時間은 比較的 짧게 나타났다. 降雨時의 斜面 崩壞時期의 推定方法은 종래 經驗的으로 提案되어 있는 危險降雨量(한계우량)⁴³⁾에 의하여 推定되어 왔지만, 危險降雨量에 의하여 推定하는 것보다는 降雨持續時

間, 降雨強度, 降雨量 등이 주로 空隙水壓에 影響을 끼치기 때문에 從來의 方法에다 空隙水壓을 測定해서 安定解析에 이용하는 것이 信賴性을 높이는 方法이라고 생각된다. 그에 따른 斜面崩壞 發生時期의 推定可能性을 檢討하기 위하여 斜面內 空隙水壓의 時間的 變化를 觀測한 結果 Fig. 5~10과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 空隙水壓은 崩壞直前に 比較的 顯著한 增加現象을 보이고 있다. 降雨強度와 斜面傾斜에 따라서 차이는 있으나 崩壞가 發生하기 50~100分前부터 空隙水壓이 增加現象을 보이기 시작한다.

그림에서 보는 바와 같이 空隙水壓의 變化를 全體的으로 보면, 降雨開始 初期에는 斜面內의 흙이 不飽和狀態로 되어 있기 때문에 表層附近의 測點에서는 負의 空隙水壓에서 시작되고, 深層部에서는 正의 空隙水壓에서 시작하여, 斜面內로 降雨가 浸透함에 따라 飽和狀態가 되어다 같이 空隙水壓이 增加하면서 破壞가 일어난다 그 以後는 漸次로 減少하는 傾向을 나타내었다.

이와 같은 結果로부터 降雨浸透에 따른 空隙水壓의 變化를 測定함으로써 表層崩壞의 發生

時期를 大略 推定할 수 있었고, 盛土材料에 따라서 傾向의 差異는 있으나 一般的으로 深層部보다는 表層部에서 經過時間에 따르는 空隙水壓의 增加幅이 크게 나타났다.

가. A 試料(sand)

Fig. 5~7은 斜面傾斜가 1 : 2이고, 降雨強度가 $35 \pm 2\text{mm/hr}$, $45 \pm 2\text{mm/hr}$, $55 \pm 2\text{mm/hr}$ 일 때 盛土斜面內의 降雨持續時間에 따른 空隙水壓의 變化를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 降雨開始 初期에는 大部分의 位置에서 負 또는 작은 空隙水壓을 나타내고 있으나, 降雨가 持續됨에 따라 正의 空隙水壓으로 增加되고 있다. 降雨가 持續됨에 따라 斜面表層部에서는 空隙水壓의 增加現象이 急激하게 나타났고 深層部에서는 增加現象이 緩慢하게 나타났다.

그리고 空隙水壓이 最大値에 도달하는 時間도 深層部보다는 表層部에서 짧게 나타났다. 空隙水壓이 最大値에 到達하여 斜面崩壞가 시작되는 時間은 降雨強度가 $35 \pm 2\text{mm/hr}$ 일 때는 270分, $45 \pm 2\text{mm/hr}$ 일 때는 170分, $55 \pm 2\text{mm/hr}$ 일 때는 150分으로 나타났다. 또, 降雨強度를 45 ± 2

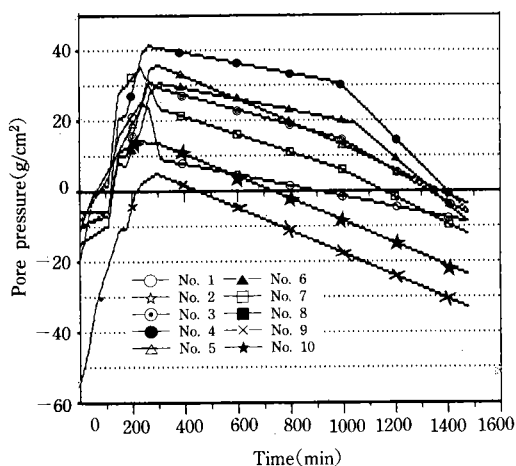


Fig. 5. Pore pressure distribution with time (A-soil, S=1 : 2, $I_R=35 \pm 2\text{mm/hr}$)

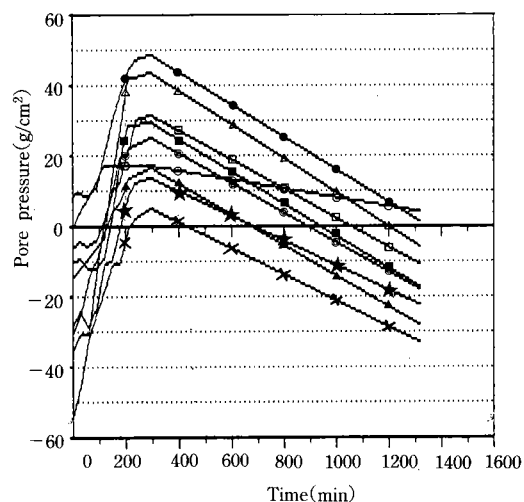


Fig. 6. Pore pressure distribution with time (A-soil, S=1 : 2, $I_R=45 \pm 2\text{mm/hr}$)

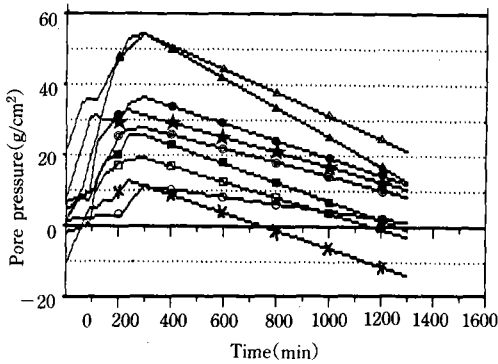


Fig. 7. Pore pressure distribution with time (A-soil, S=1:2, $I_R=55 \pm 2$ mm/hr)

mm/hr로 固定시키고 斜面傾斜를 1:1, 1:1.5, 1:2일 때의 降雨持續時間에 따른 空隙水壓의 分布를 測定한 結果, 類似한 現象을 나타냈고, 降雨開始로부터 崩壞할 때까지의 時間은 경사가 완만할수록 길게 나타나서 120分, 150分, 170分으로 되었다.

失田 等⁴³⁾도 人工降雨에 의한 砂質土斜面的 空隙水壓을 室內實驗과 現場實驗에 의하여 觀測한 結果, 空隙水壓의 變化는 無降雨時에는 斜面內의 吸引力(suction)이 커져서 負의 空隙水壓을 나타내지만, 降雨가 持續되면 斜面內의 飽和領域이 形成되어 正의 空隙水壓으로 增加한다고 하였다. 또 空隙水壓은 斜面崩壞가 發生하기 20~30分前부터 急激하게 上昇하기 때문에 突發적으로 일어나는 斜面崩壞의 發生時刻를 豫測할 수 있다고 하였다.

나. B 試料(loam)

Fig. 8~10은 降雨強度가 35 ± 2 mm/hr이고 斜面傾斜가 1:1, 1:1.5, 1:2일 때 經過時間에 따른 空隙水壓 分布를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 斜面傾斜가 1:1일 때 降雨持續時間과 空隙水壓과의 關係를 나타낸 것으로 降雨時間이 持續됨에 따라 負의 空隙水壓에서 正의 空隙水壓으로 上昇됨을 알 수 있고, 空隙水壓이 最大値에 도달되어 斜面이 崩壞될 때까지의 時間은 180分으로 나타났다.

Fig. 9는 斜面傾斜가 1:1.5일 때를 나타낸 것으로 斜面傾斜 1:1과 마찬가지로 降雨가 持續됨에 따라 空隙水壓이 上昇되며, 崩壞까지의 時間은 250分으로 나타났다. 그리고 降雨가 斜面內로 浸透됨에 따라 不透水層에 도달되면 深層部의 空隙水壓 上昇幅은 더욱 현저하게 나타났다.

Fig. 10은 斜面傾斜가 1:2일 때를 나타낸 것으로 降雨가 持續됨에 따라 初期에 空隙水壓이 上昇되어 崩壞가 終了될 때까지 거의 一定한 값을 나타내고, 崩壞가 發生할 때까지의 時間은 300分으로 나타나서 斜面傾斜가 緩慢할수록 崩壞할 때까지의 時間은 크게 나타남을 알 수 있다.

深度別로 空隙水壓의 分布를 보면 埋設깊이가 깊어질수록 空隙水壓도 큰 값을 나타냈고, 盛土斜面肩部分은 낮은 空隙水壓을 나타내고 있다. Fig. 10에서 ④地點의 공극수압이 가장 큰 것은 초기 공극 수압이 월등히 크게 나타났는데 원인이 있는 것으로 생각된다.

흙질흙인 B試料에서는 사면경사가 완만할수록 破壞가 일어날 때까지의 시간은 길게 나타났다. Fig. 8에서는 空隙水壓이 最大가 되기 전에 파괴되었고 Fig. 9에서는 空隙水壓이 最大일 때

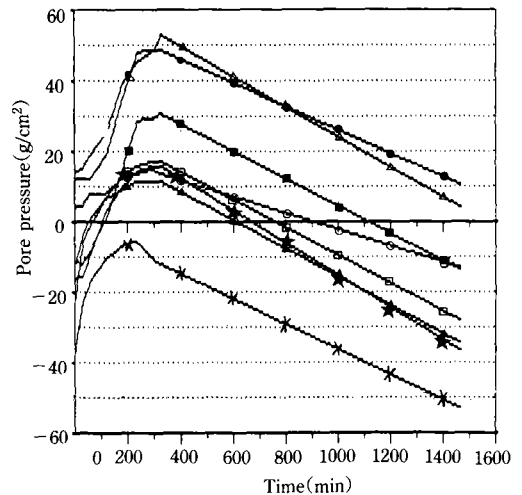


Fig. 8. Pore pressure distribution with time (B-soil, S=1:1, $I_R=35 \pm 2$ mm/hr)

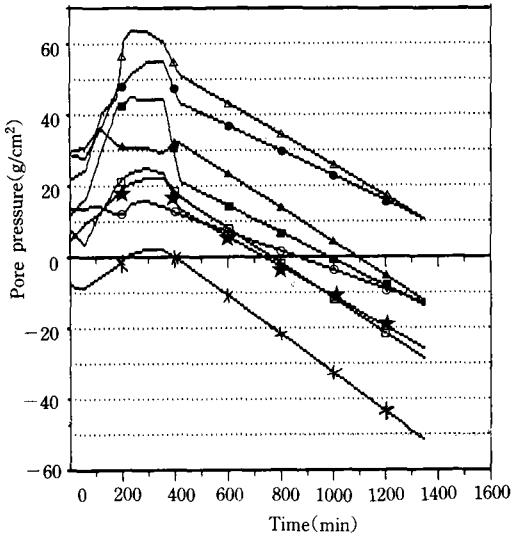


Fig. 9. Pore pressure distribution with time (B-soil, S=1 : 1.5, $I_R=35\pm 2$ mm/hr)

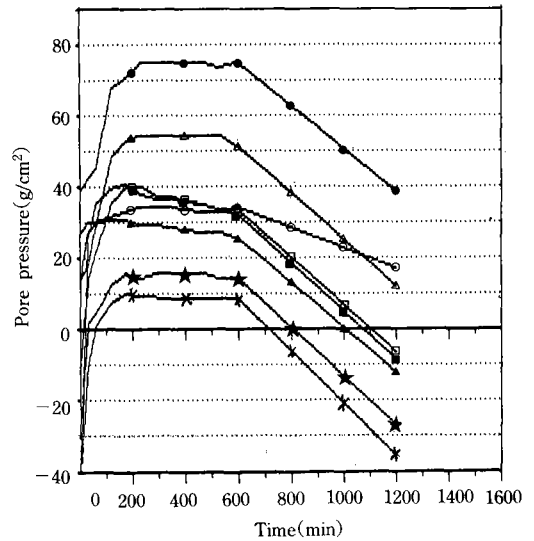


Fig. 10. Pore pressure distribution with time (B-soil, S=1 : 2, $I_R=35\pm 2$ mm/hr)

破壞되었고 Fig. 10은 最大가 된 後에 破壞되었다. 即 降雨開始로부터 破壞될때까지의 時間은 斜面傾斜가 緩慢할수록 길게 나타났다.

또 斜面傾斜가 1 : 1.5이고 降雨強度가 35 ± 2 mm, 45 ± 2 mm, 55 ± 2 mm일때의 降雨持續時間에 따른 空隙水壓의 分布를 測定한 結果, 類似한 結果를 나타냈고 降雨開始로부터 崩壞할때까지의 時間은 250分, 240分, 220分으로 降雨強度가 클수록 崩壞할때까지의 時間은 짧게 나타났다.

神品 等¹⁹⁾도 降雨時 斜面內에 空隙水壓의 舉動을 알기 위하여 斜面에 對한 模型實驗을 實施하였다. 降雨強度가 28mm/hr이고 斜面傾斜角이 45° 일때 空隙水壓의 舉動을 觀測한 結果, 降雨開始後 時間이 經過함에 따라 空隙水壓은 서서히 上昇한다고 하였다. 斜面崩壞直前에 특히 斜面肩部分에서 急激하게 減少하였고, 表層部보다는 深層部에서 더 큰 空隙水壓을 나타낸다고 하였다. 그리고 斜面傾斜角이 45° 이고, 降雨強度가 14mm/hr로 작을때의 空隙水壓은 降雨초기에는 變化를 나타내지 않았으나 崩壞直前에 急激하게 增加했고, 崩壞도 斜面先部分에서 局部的으로 發生된다고 하였다.

2. 危險降雨量의 測定

모래(A 試料)斜面에서 傾斜崩壞가 發生될때까지의 時間과 總降雨量과의 關係를 나타내면 Fig. 11과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 모래斜面에서는 降雨強度가 클수록 崩壞가 發生할때까지의 時間은 짧게 나타났고, 斜面傾斜가 緩慢할수록 崩壞될때까지의 總降雨量은 急激하게 增加함을 나타내고 있다. 모래로 築造된 盛土斜面에서의 崩壞는 깊이가 대략 1m以下인 表層에서 崩壞된다는 點을 考慮하면⁴³⁾ 降雨強度별로 崩壞發生時間이 다르고, 崩壞가 發生할때까지의 危險降雨量은 다르게 나타나지만 1 : 1 斜面에서는 50~100mm, 1 : 1.5 斜面에서는 80~140mm, 1 : 2 斜面에서는 130~160mm로 나타났다.

Fig. 12는 롬(B 試料)斜面에서 崩壞가 發生했을때 斜面 傾斜別로 總降雨量을 나타낸 것이다. 斜面傾斜가 緩慢할수록 崩壞가 發生할때까지의 總降雨量은 크게 나타나고, 降雨強度의 增加에 따라서 崩壞가 發生할때까지의 時間은 모래斜面과는 다르게 全斜面에서 180~300分은

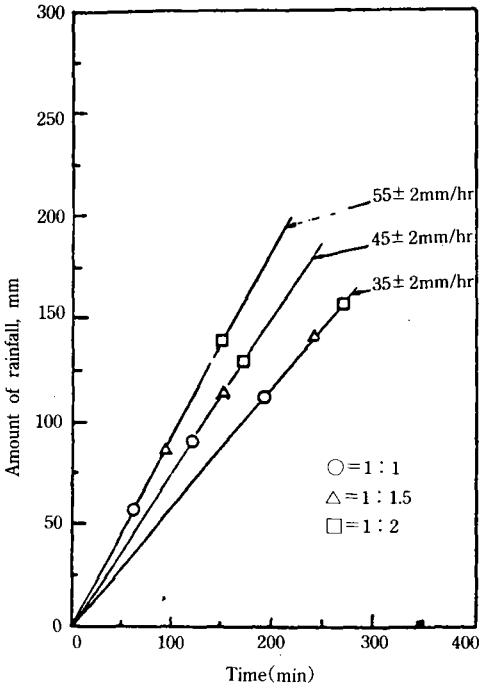


Fig. 11. Relationship between time and amount of rainfall(A-Soil)

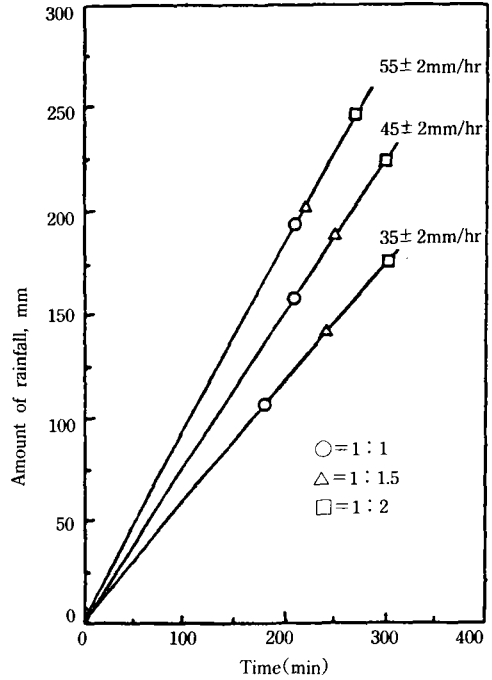


Fig. 12. Relationship between time and amount of rainfall(B-Soil)

로 範圍가 좁게 나타났다. 그리고 崩壊가 發生할때까지의 危險降雨量은 1:1 斜面에서는 100~200mm, 1:1.5 斜面에서는 140~200mm, 1:2 斜面에서는 170~250mm로 모래 斜面에서보다 더 크게 나타났다. 또 흙질층 斜面에서는 透水係數가 작아서 浸透量이 降雨強度에 민감하게 影響되지 않으므로 강우강도별로 위험 강우량이 큰 차이를 나타내지 않은 것으로 생각 된다.

失田 等⁴³⁾은 無降雨日數와 崩壊가 發生할때까지의 總降雨量을 斜面높이별로 觀測한 結果, 斜面높이가 1.0m이고 無降雨일수가 0~15일이 있을때 降雨가 시작되어 斜面崩壊가 發生될때의 危險降雨量은 100~300mm로 나타났고, 危險降雨量은 初期空隙水壓과 事前降雨量이 重要한 파라미터가 된다고 하였다.

斜面崩壊의 主要原因이 降雨浸透에 따른 空隙水壓의 增加에 起因된다는 것은 많은 研究結果

로부터 立證되었지만,^{19,22,27,29)} 崩壊할때 發生되는 空隙水壓의 크기와 總降雨量의 推定은 아직까지 確固한 方法이 確立되어 있지 않다.

따라서 總降雨量에 對應하는 空隙水壓을 미리 구해 둔다면, 現在 觀測되고 있는 空隙水壓이 어느정도까지 上昇하면 崩壊의 危險性이 있는 가를 推定할 수 있다.

Fig. 13은 모래(A 試料)斜面에서 降雨強度가 45±2mm일때 總降雨量과 空隙水壓과의 關係를 斜面傾斜別로 나타낸 것이다. 空隙水壓은 空隙水壓計의 埋設位置에 따라 다르게 나타났지만, 斜面 崩壊의 危險性이 가장 높은 斜面先 附近(埋設位置:6번)을 보면, 降雨가 持續됨에 따라 負의 空隙水壓에서 正의 空隙水壓으로 서서히 增加되며, 總降雨量이 180mm부터는 거의 一定한 現象을 나타내고 있다. 그리고 空隙水壓의 최대치는 10~20g/cm²로 작은 값을 나타냈다. 또 上部位置(埋設位置:9번)에서는 降雨量의

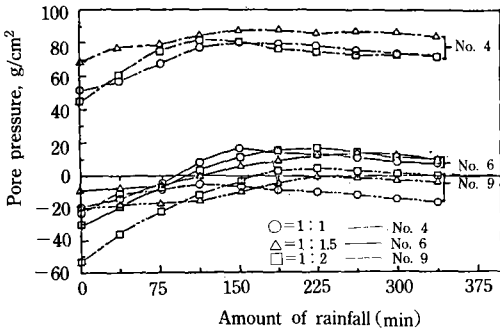


Fig. 13. Relationship between pore pressure and amount of rainfall(A-Soil, $I_R=45 \pm 2\text{mm/hr}$)

增加에 따라 약간씩 空隙水壓은 增加하지만 거의 負의 空隙水壓狀態를 유지하고 있다.

深層部の 位置(埋設位置: 4번)에서는 모든 斜面에서 空隙水壓은 $50\sim 90\text{g/cm}^2$ 로 크게 나타났고 空隙水壓이 최대치에 到達되었을때 總降雨量은 약 150mm로 나타났다.

斜面崩壞가 發生되었을때의 總降雨量을 全體的으로 보면 90mm부터 120mm 사이에서 發生되었고, 空隙水壓이 최대치에 到達되기 50分~100分전부터 서서히 斜面先附近부터 崩壞가 시작되었음을 알 수 있었다.

Fig. 14는 흙질흙(B 試料)斜面에서 降雨強度가 $45 \pm 2\text{mm/hr}$ 일때 總降雨量과 空隙水壓과의 關係를 斜面傾斜別로 나타낸 것이다. 空隙水壓은 空隙水壓計의 埋設位置에 따라 다르게 나타났지만, 斜面崩壞의 危險性이 가장 높은 斜面先附近(埋設位置: 6번)을 보면 降雨가 持續됨에 따라 負의 空隙水壓에서 正의 空隙水壓으로 서서히 上昇하며, 總降雨量이 225mm부터는 거의 一定한 狀態를 유지하고 있다. 그리고 이때의 空隙水壓의 최대치는 $10\sim 40\text{g/cm}^2$ 으로 나타냈다. 深層部の 位置(埋設位置: 4번)에서는 空隙水壓이 $60\sim 90\text{g/cm}^2$ 의 範圍로 크게 나타났고, 空隙水壓이 최대치에 到達되는데 總降雨量은 모든 斜面에서 225mm로 一定하게 나타났다.

降雨量과 空隙水壓과의 全體的인 關係를 보면, 空隙水壓이 최대치에 到達되어 斜面이 崩

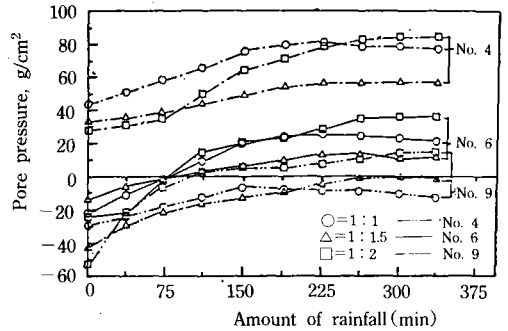


Fig. 14. Relationship between pore pressure and amount of rainfall(B-Soil, $I_R=45 \pm 2\text{mm/hr}$)

壞되는 時期의 總降雨量은 150mm~225mm로 나타났다. 그리고 空隙水壓은 表層部에서는 變動幅이 크면서도 작은 값을 나타내고 있지만, 深層部에서는 변동폭이 작으면서 空隙水壓은 큰 값을 나타냈다.

風間 等¹⁸⁾은 累積雨量을 考慮하여 砂質土斜面의 安定解析을 實施하고 崩壞가 發生한 地域의 降雨데이터를 基礎로 平均降雨強度와 崩壞時間과의 關係를 分析한 結果, 降雨強度의 增加에 따라 斜面은 急激하게 崩壞하였고, 斜面崩壞는 거의 20時間以內에서 發生된다고 하였다. 鹿子木 等¹⁶⁾은 降雨時 盛土斜面의 安定性을 遠心力載荷裝置를 利用하여 室內實驗을 實施한 結果, 斜面先部分의 空隙水壓은 降雨開始後 빠르게 增加하고, 深層部에서는 雨水浸透에 의하여 空氣가 斜面內로 浸透되어 空隙水壓이 늦게 上昇하며 斜面肩部分에서는 崩壞時에 急激하게 空隙水壓이 上昇한다고 하였다.

이와같은 結果로부터 斜面崩壞가 發生될때의 時間과 總降雨量과의 關係를 全體的으로 보면 降雨強度가 클수록 崩壞가 發生할때까지의 時間은 짧게 나타났고, 斜面傾斜가 緩慢할수록 崩壞될때까지의 總降雨量은 急激하게 增加함을 나타내고 있다. 또 斜面崩壞가 發生되었을때의 空隙水壓은 最大値에 到達되기 50分~100分前부터 서서히 斜面先 附近부터 崩壞가 시작되었음을 알 수 있었다.

3. 斜面 崩壞의 形狀

降雨가 持續됨에 따라 斜面의 粘着力과 内部 摩擦角이 低下되어 崩壞가 發生하는데 이 때 降雨浸透에 따른 斜面의 安全率은 空隙水壓, 自重, 強度定數 등의 變化를 알 수 있다면 安定解析에 의하여 구할 수가 있고 破壞位置도 決定할 수 있다.^{10, 17, 37)}

安定解析에 사용한 斜面은 模型實驗에 사용된 斜面과 同一한 縮尺에서 2種類의 試料에 대하여 모두 1:1, 1:1.5, 1:2의 傾斜에 대해서 簡易 Janbu方法으로 安全率을 구하였다. 空隙水壓의 變化는 模型實驗에서 구한 값을 사용했고, 強度定數는 三軸壓縮試驗에서 구한 값을 사용했다. 安定解析 프로그램은 空隙水壓의 變化를 考慮할 수 있는 프로그램인 STABL5에 의하여 安全率을 구했다.

가. A 試料(sand)의 破壞特性

斜面崩壞는 初期에는 斜面先 附近에서 局部的인 破壞가 發生하기 시작하였으며 降雨가 계속됨에 따라 斜面肩部分으로 進行되었다. 降雨가 계속됨에 따라 斜面内로 浸透된 降雨가 飽和領域을 形成하여 限界狀態에 到達되면 흙의 粘着力과 内部摩擦角이 減少하면서 斜面先부터 서서히 崩壞가 시작된다. 崩壞가 斜面肩으로 進行될수록 破壞깊이도 깊어지고 臨界圓을 形成하게 된다. 斜面傾斜가 급할수록 臨界圓은 圓弧形態로 나타나고 崩壞에 이르는 時間도 짧게 나타났다. 이와같이 모래斜面에서 斜面肩부터 一時에 崩壞가 發生되지 않고 斜面先附近부터 局部的인 崩壞가 發生되는 것은 降雨에 의하여 不飽和 領域이 서서히 飽和領域으로 上昇되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 15는 斜面의 空隙水壓과 浸潤線을 考慮하고 三軸壓縮試驗에 의하여 구한 強度定數를 이용해서 實驗値와 理論値와의 臨界圓 位置를 나타낸 것이다. 實驗値에서의 臨界圓의 位置는 斜面先부터 斜面肩까지 盛土表面을 따라 一定하게 나타난 反面, 理論値에서는 斜面深層部가

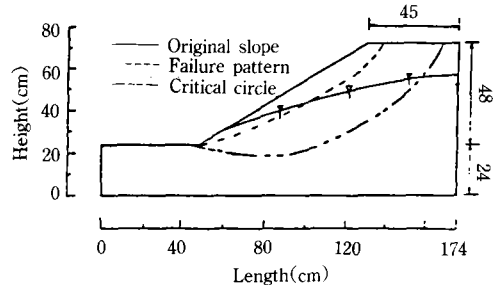


Fig. 15. Failure pattern(A-Soil, S=1:1.5, $I_R=55 \pm 2\text{mm/hr}$)

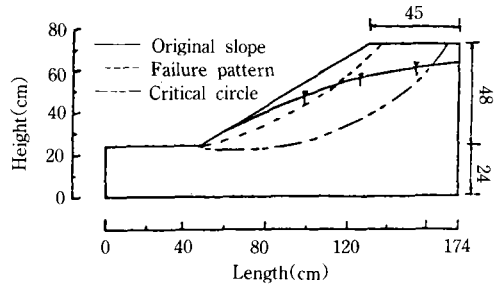


Fig. 16. Failure pattern(B-Soil, S=1:1.5, $I_R=55 \pm 2\text{mm/hr}$)

지 깊게 나타났다. 最小安全率이 1.0以下가 되는 臨界圓의 位置가 實驗値와 일치하지 않는 것은 理論値에서는 崩壞가 一時에 일어나는 것으로 考慮했으나 實際는 斜面先부터 漸次로 崩壞가 進行되었기 때문으로 생각된다.

丸山 等²²⁾은 地下水水位上昇에 따른 斜面崩壞 形狀을 室内實驗에 의하여 觀測한 結果, 斜面의 높이가 클수록 活動破壞面은 깊고 크게 滑動한 다고 하였고, 斜面의 破壞發生 여부는 地下水 水位의 變化와 密接한 關聯이 있다고 하였다.

吉武 等⁴⁵⁾은 降雨時 花崗土斜面의 崩壞實驗을 實施하고, 空隙比가 작을 때는 滑動面은 상당히 작으면서 崩壞形狀도 明確하게 나타나지 않고, 斜面肩에서 斜面 中腹까지 直線的으로 나타난 다고 하였다. 그러나 空隙比가 큰 경우에는 崩壞까지의 時間도 짧고 滑動面도 깊게 나타난 다고 하였고, 破壞形狀도 斜面先부터 斜面肩까지 圓弧形態로 나타나며, 臨界圓은 實驗値의 破壞線보다 더 깊은 位置에서 나타난다고 하였

다.

나. B 試料(loam)의 破壞特性

崩壞形態는 透水係數가 상당히 작기 때문에 傾斜面을 따라 表面流出이 發生되어 隄리(gully)의 形態를 이루면서 斜面先에서부터 斜面肩部分으로 서서히 進行하는 表層滑動의 形態를 나타내고 있고, 全體斜面이 飽和되어 崩壞에 이르는 時間은 상당히 길게 觀測되었다.

또 다짐時의 含水比의 차이는 斜面崩壞에 커다란 影響을 미치는데 初期 含水比가 작은 경우는 斜面肩부터 圓弧上의 表層崩壞가 發生되고, 崩壞까지의 時間도 짧은 반면, 初期含水比가 많은 경우에는 斜面先부터 崩壞가 시작되어 斜面肩으로 進行된다.^{34, 44)}

Fig. 16은 斜面의 空隙水壓과 浸潤線을 考慮하고 三軸壓縮試驗에 의해서 구한 強度定數를 이용해서 實驗値와 理論値와의 臨界圓 位置를 나타낸 것이다. 斜面肩까지 崩壞되었을때 臨界圓의 位置는 모래斜面과 유사하게 斜面先부터 斜面肩까지 盛土表面을 따라 一定하게 나타난 反面, 理論値에서는 斜面深層部까지 깊게 나타났다.

神品 等¹⁹⁾은 斜面의 崩壞形狀을 斜面傾斜角과 降雨強度別로 考察해 본 結果, 飽和領域이 上昇할때는 斜面先部分부터 崩壞가 發生하고, 斜面의 傾斜角이 크고 浸潤線이 下降할 때에는 大部分 斜面肩部分부터 崩壞가 發生한다고 하였다.

이와같은 結果로부터 모래斜面에서는 斜面先附近부터 局部的인 崩壞가 發生되었고, 흙 斜面에서는 表面流出이 發生되어 隄리(gully)의 形態를 이루면서 斜面線에서부터 斜面肩部分으로 서서히 進行하는 表層滑動의 形態를 나타냈다. 또 浸潤線의 位置, 強度定數, 空隙水壓의 變化 등을 考慮한 安定解析을 하여 安全率을 구할 수 있었고, 臨界圓의 位置와 滑動形狀을 어느정도 豫測할 수 있었다.

4. 斜面內의 浸潤線變化

飽和 및 不飽和土內의 非定常浸透流의 解析에 있어서는 降雨條件, 盛土의 土質, 不均一性, 形狀 및 地下水의 狀態 等의 原因이 不飽和領域을 包含한 盛土內의 非定常浸透流에 複雜한 影響을 미치기 때문에 그들의 條件을 全部 滿足하는 浸透解析을 하는 것은 困難하다.^{1, 14, 28)} 특히, 實際의 盛土에 適用할 土質定數를 決定하는 것이 더욱 重要한 課題이므로 여기서는 雨水의 浸透에 의한 盛土內의 浸潤線의 變化를 考察하였다.

浸潤線의 變化는 斜面崩壞와 密接한 關聯이 있기 때문에 그 變化의 豫測이 斜面의 安定性 評價에 重要한 要素가 된다.

斜面內의 浸潤線의 舉動을 觀測하기 위하여 模型水槽 側面에 가로, 세로 9cm 間隔으로 파이프(직경: 5mm)로 設置하였다.

Fig. 17과 18은 모래斜面과 흙斜面의 浸潤線의 變化를 時間별로 觀測한 것이다. 降雨가 계속됨에 따라 盛土表面에서 서서히 地盤內로 浸透하여 浸潤線을 形成하고 있다. 降雨가 계속됨에 따라 斜面全體로 浸透해서 飽和領域이 形成되면 浸潤線의 위치가 急激하게 上昇함을 알 수 있고, 盛土斜面이 崩壞되는 時間도 짧게 나타났다.

모래斜面의 경우를 보면 降雨開始 1時間정도 부터 浸潤線의 位置가 나타나면서 斜面先 部分부터 崩壞가 시작되었고, 그 以後부터는 浸潤線의 急激한 上昇과 함께 漸次로 進行되어 斜面肩附近까지 崩壞되는데 걸리는 時間은 80分 정도로 짧게 나타났다. 흙斜面에서는 盛土材料가 透水性이 작기 때문에 浸潤線은 降雨開始後 3時間정도부터 나타나기 시작하였고 崩壞되는데 걸리는 時間은 60分 정도로 짧게 나타났다. 두 試料 모두 降雨에 의하여 일단 飽和領域이 形成되어 浸潤線이 나타나면 그 以後부터는 浸潤線의 位置가 急激하게 上昇하고 짧은 時間에 崩壞됨을 알 수 있었다.

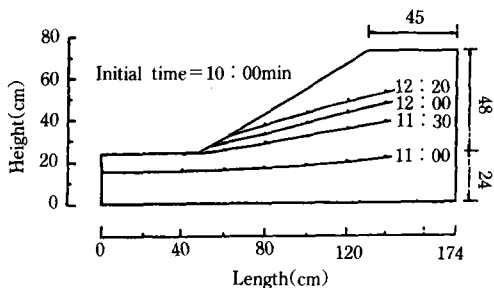


Fig. 17. Variations of seepage line for the rainfall time (A-Soil, $S=1:1.5$, $I_R=55 \pm 2\text{mm/hr}$)

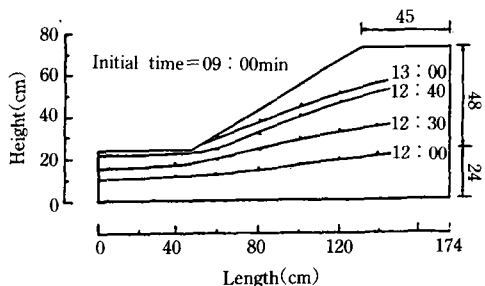


Fig. 18. Variations of seepage line for the rainfall time (B-Soil, $S=1:1.5$, $I_R=55 \pm 2\text{mm/hr}$)

村田等²⁶⁾은 室内模型實驗을 통하여 地下水의 浸透에 의하여 斜面崩壞實驗을 實施한 結果, 斜面傾斜角과 浸透水壓이 崩壞發生의 重要한 因子가 된다고 하고, 斜面傾斜角이 30° 인 경우를 보면 地下水面이 地表面附近까지 上昇할때가 가장 危險한 狀態로 되고, 이러한 地下水面의 觀測은 斜面崩壞의 推定에 重要한 手段이 된다고 하였다.

吉武等⁴⁵⁾은 降雨에 의한 盛土內의 浸潤線의 變化는 盛土表面부터 서서히 進行되며 斜面崩壞는 斜面全體에 물이 浸透하기 前에 發生되었고, 崩壞形狀은 거의 浸潤線과 平行하게 일어난다고 하였다.

三木等²⁴⁾은 大型模型堤防에 人工降雨實驗을 實施하고 浸透流解析에 의하여 時間에 따라서 浸潤線의 變化를 考察한 結果, 降雨開始後 20~25時間 정도에서 堤防內의 傾斜面에서 浸潤線이

나타나기 시작하고 그 後부터는 急速하게 堤體中央部로 水位가 上昇해 간다고 하였다. 또 堤體內의 浸透豫測은 다짐에 의한 成層構造의 形成, 初期飽和度의 分布, 浸透係數의 異方性 등이 浸潤線에 큰 影響을 미친다고 하였다.

Fig. 19는 모래斜面和 흙질흙의 斜面에서 斜面先崩壞가 시작한 後의 降雨持續時間에 따른 安全率의 變化를 Janbu의 簡便法을 이용하여 斜面安定解析을 한 것이다.

浸潤線은 模型實驗에서 觀測된 높이를 解析에 이용하여 그의 影響을 考慮했고, 強度定數는 斜面先部分이 崩壞가 시작될때와 破壞時 그리고 破壞後의 c, ϕ 값을 三軸壓縮試驗(UU試驗)에 의해서 구하여 入力常數로 使用하였다.

Fig. 19에서 보는 바와 같이 斜面先部分에서 滑動이 시작할 때의 安全率은 모래斜面에서는 2.108로, 흙질흙의 斜面에서는 2.150으로 나타났으나 崩壞가 斜面肩까지 到達하였을때 安全率의 값은 急激하게 減少하여 모래斜面의 경우

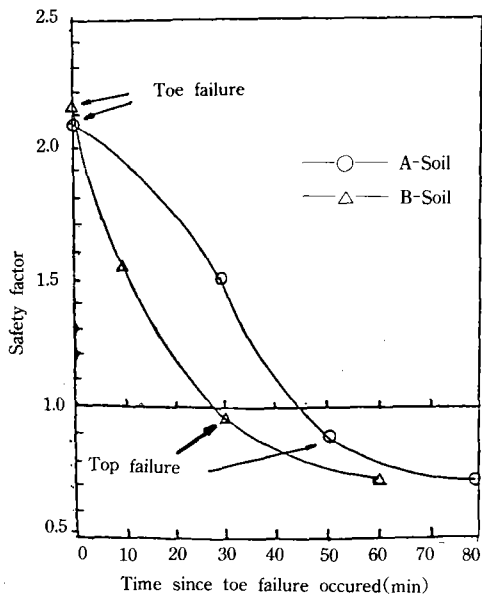


Fig. 19. Variations of safety factor for the time since toe failure occurred ($S=1:1.5$, $I_R=55 \pm 2\text{mm/hr}$)

에는 0.831로 나타났고, 흙질흙 斜面的 경우는 0.936으로 나타났다.

丸山 等²²⁾은 模型에서 觀測된 地下水위의 位置를 斜面安定解析에 導入하여 安全率을 구한 結果 滑動이 發生했을때의 安全率의 값은 0.6~0.7정도로 一定하게 나타났다고 하였고, 安全率의 減少는 浸透流解析에 의한 것보다는 實驗에서 觀測된 地下水위를 이용하여 구한 것이 더 현저하게 나타났다고 하였다. 神品 等¹⁹⁾도 降雨時 浸潤線의 變化와 強度定數를 이용하여 時間經過에 따른 安全率의 變化를 나타냈는데, 時間이 經過할수록 安全率은 急激하게 減少하며, 降雨強度가 작을수록 安全率이 1.0以下로 減少하여 斜面이 崩壞되는데 時間은 더 길게 걸린다고 하였다. 沖村 等³¹⁾은 自然斜面을 對象으로 降雨持續時間의 經過에 따라 非矩形 3次元 安定解析을 한 結果, 安全率이 1.0以下로 減少하는데 걸리는 時間은 降雨開始後 5時間 정도가 된다고 하였고, 宇野 等^{38,39)}은 降雨·洪水時 河川堤防의 安全率을 檢討하기 위하여 降雨強度와 外水位를 變化시켜 解析한 結果, 安全率은 累積降雨量보다는 降雨強度(降雨變化量)의 影響이 더 크고, 飽和透水係數와 降雨形態에 따라 時間變化에 따른 安全率도 다르게 나타난다고 하였다.

久樂 等²⁰⁾은 雨水의 浸透에 따른 盛土의 安定性을 檢討하기 위하여 實物크기의 實驗을 實施하고 降雨가 계속됨에 따라 盛土內의 自由水面은 斜面先部分부터 나타나기 시작하여 斜面崩壞가 시작할때는 盛土中央部는 낮고 斜面先附近은 높은 形態의 自由水面이 形成된다고 하였다. 또 降雨量과 盛土의 安全率을 解析한 結果, 降雨量이 200mm정도에서 安全率은 急激하게 減少하고, 安全率이 1.0以下로 減少할때 總降雨量은 250~300mm로 나타난다고 하였다.

失田 等⁴³⁾도 表層崩壞를 對象으로 實施한 安定解析에서는 粘着力의 影響이 가장 크다고 하였고, 急傾斜의 自然斜面이 崩壞하지 않는

것은 粘着力의 影響때문이라고 하였다.

이와 같은 研究 結果로부터 斜面模型實驗에서 觀測된 浸潤線의 變化와 強度定數를 安定解析에 適用하여 降雨持續時間에 따른 安全率의 減少를 豫測할 수 있었다.

그러나 浸潤時 盛土 斜面的 崩壞에 대한 安定性을 時間적으로 正確하게 豫測하기 위해서는 보다 適切한 強度定數를 구하는 것이 重要한 問題가 된다고 생각된다.

IV. 結 論

土質이 均一한 盛土斜面에 대해서 斜面傾斜角, 降雨強度 등을 變化시키면서 降雨持續時間에 따른 空隙水壓의 變化, 危險降雨量, 崩壞形狀, 自由水面의 變化 등에 關한 室內模型實驗을 實施하여 斜面崩壞에 미치는 影響을 考察한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 空隙水壓은 降雨開始初期에는 表層部에서는 負의 空隙水壓으로 나타났고, 深層部에서는 正의 空隙水壓으로 나타났으나, 降雨가 持續됨에 따라서 모두 正의 空隙水壓으로 增加하였으며, 崩壞가 發生하기 50~100分前부터 急激한 增加現象을 나타냈다.

2. 降雨強度가 增加함에 따라서 斜面崩壞가 일어날때까지의 時間은 減少하고 또 斜面의 傾斜가 緩慢할수록 崩壞가 일어날때까지의 時間은 增加하였다.

3. 崩壞가 發生하는 危險降雨量은 斜面의 傾斜角이 緩慢할수록 큰 값을 나타냈다.

4. 空隙水壓의 最大값은 斜面先附近에서는 10~40g/cm²으로 작게 나타났고, 深層部에서는 50~90g/cm²으로 크게 나타났다.

5. 斜面의 崩壞形狀은 A試料에서는 斜面先附近부터 局部的인 表層崩壞가 發生하였고, B試料에서는 表面流出에 의한 崩壞가 發生하여 斜面肩部分으로 서서히 進行되는 現象을 나타냈다. 그리고 降雨가 시작해서 崩壞가 發生할

때까지의 時間도 A 試料보다는 B 試料에서 더 길게 나타났다.

6. 降雨가 持續됨에 따라 飽和領域이 形成되면 浸潤線의 높이는 急激하게 上昇하였고, 斜面肩을 包含해서 斜面全體가 완전히 崩壞될때까지의 時間은 B 試料에서 길게 나타났다.

7. 安全率은 浸潤線의 位置가 上昇함에 따라 強度定數의 低下로 斜面先附近의 局部的인 崩壞가 發生할때 A 試料에서는 2.108, B 試料에서는 2.150으로 나타났다. 또 斜面肩部分의 崩壞가 일어날때의 最小安全率은 A 試料에서는 0.831, B 試料에서는 0.936으로 急激하게 減少하였다.

이 論文은 1992년도 教育部支援 韓國學術振興財團의 자유공모(地方大學育成)과제 學術研究 造成費에 의하여 研究되었음.

參 考 文 獻

1. 荒川辰雄, 小池十一, 竹村次期, 1987, 降雨による石炭盛土의 崩壞實驗, 第22回 土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1499~1500.
2. Anderson, M. G., and K. S. Richards, 1987, Slope stability, John Wiley and Sons.
3. Armfield Ltd, 1989, Engineering teaching and research equipment, rainfall simulator, pp. 1~29.
4. Baligh, M. M., and A. S. Azzouz, 1977, End effects on stability of cohesive slopes, Journal of the Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 101, No. GT11, pp. 1105~1117.
5. Bishop, A. W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique Vol. 5, pp. 7~17.
6. Brunsdon, D. and D. B. Prior, 1984, Slope instability, John Wiley and Sons.
7. Cakmak, A. S., 1987, Soil structure interaction, Develop. in Geotech. Eng. No. 43, Elsevier.
8. Chen, R. H., 1981, Three-Dimensional slope stability analysis, Purdue University.
9. Chowdhury, R. N., 1978, Slope Analysis, Develop. in Geotech. Eng. No. 22, Elsevier.
10. 宣保清一, 1987, 地すべり斜面의 安定性評價に用いる強度定數의 考え方, 土と基礎, Vol. 35, No. 11, pp. 27~32.
11. Hirschfeld, R. C., 1973, Embankment Dam Engineering, Cassagrande Volume, John Wiley and Sons.
12. Hovland, H. J., 1977, Three-Dimensional slope stability analysis method, Journal of the Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 103, No. GT9, pp. 971~986.
13. Huang, Y. H., 1983, Stability analysis of earth slopes, Van Nostrand Reinhold Comp.
14. 福佳隆一, 木村薰, 1961, 施工時盛土地盤의 強さに關する考察(その1), 土と基礎, Vol. 11, No. 2.
15. 今泉繁良, 山口柏樹, 大橋健二, 1988, 一般分割法による斜面의 安定解析, 土と基礎, Vol. 36, No. 5, pp. 55~60.
16. 鹿子木 清, 1987, 盛土의 降雨時安定性に關する研究, 第22回土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1501~1502.
17. 川上浩, 1987, 自然斜面의 安定性を評價する上での2, 3の問題, 土と基礎, Vol. 35, No. 11, pp. 3~8.
18. 風間秀彦, 滝尺太朗, 市川武志, 1987, 斜面崩壞に對する累積雨量算定について(その2), 第22回土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1493~1494.
19. 神品英夫, 末政直晃, 竹村次朗, 1990, 降雨による斜面崩壞に關する研究, 第25回 土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1611~1612.
20. 久樂勝行, 石塚廣史, 1982, 雨水의 浸透と盛土의 安定性, 土と基礎, Vol. 30, No. 9, pp.

- 37~43.
21. 久樂勝行, 松本徳久, 1988, 設計における有効應力の用いられ方, 土と基礎, Vol. 36, No. 6, pp. 59~64.
 22. 丸山正, 木材孟, 廣岡明彦, 森有一朗, 1992, 地下水位上昇による斜面崩壊に関する基礎的研究, 第27回土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1869~1872.
 23. Meyerhof, G. G., 1970, Safety factor in soil mechanics, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 349~354.
 24. 三木博史, 山田哲也, 佐藤正博, 持丸章治, 1992, 大型模型堤防を用いた降雨實驗に関する2, 3の考察, 第27回土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1949~1950.
 25. 森野亮廣, 1975, 斜面崩壊檢知に関する實驗, 鐵道技術研究所速報, No. 75~104.
 26. 村田重之, 雫木武, 平田登基男, 1988, 降雨時斜面崩壊へ及ぼす浸透地下水の影響, 土と基礎, Vol. 36, No. 4, pp. 45~50.
 27. 中道育夫, 1987, 崩壊と地すべりに對する解析手法の適用, 土と基礎, Vol. 35, No. 11, pp. 51~56.
 28. 日本土質工學會, 1989, 斜面安定解析入門.
 29. 日本土質安定材料委員會編, 1990, 斜面安定工法, 昌宇出版.
 30. 岡田勝也, 野口達雄, 1990, 盛土斜面被覆效果に関する盛土降雨模型實驗, 第25回土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1613~1615.
 31. 沖村, 鈴木洋平, 森本功彦, 1992, 集水性を考慮した非矩形三次元多平面安定解析による崩壊源規模の推定, 第27回土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1895~1896.
 32. 齊藤由孝, 1970, 斜面崩壊發生時期の豫知に關する研究, 鐵道技術研究所報告, No. 706.
 33. Sarma, S. K., 1973, Stability analysis of embankment and slopes, Geotechnique, Vol. 23, pp. 423~433.
 34. 玉田, 1987, 地すべり面における c , ϕ の考え方, 土と基礎, Vol. 35, No. 11, pp. 9~14.
 35. 田中茂, 1988, 豪雨時山腹斜面安定解析上の問題點, 土と基礎, Vol. 36, No. 5.
 36. 谷口榮一, 久保田哲也, 1985, 長野縣西部地震による松越地區の斜面崩壊, 土と基礎, Vol. 33, No. 11, pp. 59~65.
 37. Uchida, I. and T. Hiruta, 1977, Failure of embankment slope of silty sand Masa, Proc. of the 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 2, pp. 161~164.
 38. 宇野尚雄, 宮下高昭, 1981, 浸透による不飽和土の強度低下について, 土と基礎, Vol. 129, No. 6, pp. 41~47.
 39. 宇野尚雄, 彬井俊夫, 1991, 降雨洪水をうける堤防の安全率變化と外力評價, 第26回土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1733~1734.
 40. 渡正亮, 板恒治, 1975, 微小音による岩盤地すべりの豫知手法の豫備實驗, 土木技術資料, No. 17-2.
 41. 八木則男, 楊明溪, 1988, 斜面安定と有効應力, 土と基礎, Vol. 36, No. 6, pp. 31~35.
 42. 山田嘉昭, 良村秀人, 吉永 寛, 1980, 有限要素法による 應力解析とそのマイクロコンピュータ化, 生産研究, Vol. 32(3), pp. 98~105.
 43. 矢田部龍一, 八木則男, 楊 明溪, 1986, 降雨による砂質土斜面の崩壊發生時期の豫知法に對する檢討, 土木學會論文集, Vol. 376, No. 3, pp. 297~305.
 44. 吉田喜忠, 石原研面, 松井保, 1987, 浸透による土の強度變化と斜面の安定性, 第22回土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1503~1504.
 45. 吉武茂樹, 鬼塚克忠, 1992, 降雨によるまさ土斜面崩壊に關する研究, 第27回土質工學研究發表會, Vol. 2, No. 2, pp. 1873~1874.