降雨를 考慮한 盛土斜面의 安定解析

Stability Analysis of Embankment Slopes in Consideration of Rainfall

이 달 원[1)]
Lee, Dal - Won

Abstract

This study was carried out to compare and analyze the results of the laboratory model test and the finite element method at the slope with the uniform material of embankment when it rained.

The results of this study were summarized as follows:

1. At the beginning stage of rainfall, the pore pressure appeared the negative pore pressure at the surface of the 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. In the respect of the pattern of slope failure, surface failure of slope occurred locally at the toe of slope at the sand slope and failure of slope by surface flow occurred gradually at the top part of slope at the sandy loam slope.

3. As the rainfall continued, Minimum safety factor was 2.11 at the sand slope and 2.15 at the sandy loam slope when the slope occurred toe failure. Minimum safety factor went rapidly down to 0.83 at the sand slope and to 0.94 at the sandy loam slope when the slope collapsed totally at the top part of slope.

4. At the beginning stage of rainfall, the distribution of the maximum shear stress-strain appeared greatly at the base of the slope. But, it was decreased gradually and concentrated in the part of the toe of slope when the slope occurred toe failure. And, the total displacement of the slope was concentrated in the domain of displacement at the part of the toe of slope and in the range of 0.42 vertical height in the cause of the volume variation based upon the shear strain.

5. The position of potential slip circle appeared the pattern of the toe failure at the

1) 한국토지개발공사 토지연구원

limit equribrium method and the toe of slope and the part of the slope surface at the finite element method. And, the results ones those appeared similarly to the laboratory model test.

요 지

降雨時 均一한 盛土斜面에 대하여 室內模型實驗의 結果와 有限要素法에 의한 解析結果를 比較分析하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

1. 空隙水壓은 降雨開始初期에는 表層部에서는 負의 空隙水壓으로, 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. 斜面의 崩壞形狀은 모래 斜面에서는 斜面先 附近부터 局部的인 表層崩壞가 發生하였고, 砂質흙 斜面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.

3. 降雨가 持續됨에 따라 局部的인 崩壞가 發生할때의 安全率은 모래 斜面에서는 2.11, 砂質흙 斜面에서는 2.15로 나타났고, 斜面이 完全히 崩壞되었을때 모래 斜面에서는 0.83, 砂質흙 斜面에서는 0.94로 急激하게 減少하였다.

4. 降雨開始前의 最大剪斷應力-變形의 分布는 底部地盤에서 크게 分布되었으나, 斜面先 崩壞가 발생되었을때는 점차적으로 減少하여 斜面先 部分에 集中되는 現象을 나타냈으며, 斜面의 全體變位는 剪斷變形에 따른 體積變化의 原因으로 斜面先 部分과 全體斜面 높이의 0.42Hv의 範圍에서 集中的인 變位領域을 나타냈다.

5. 臨界圓의 位置는 極限平衡法에서는 斜面先 崩壞形態으로 나타났고, 有限要素法에 의한 局部安全率의 範圍는 斜面先과 斜面 部分에 分布되어 있어 模型實驗 結果와 類似하게 나타났다.

1. 緖 論

最近 새로운 建設裝備의 開發로 國土開發事業은 勿論, 모든 建設事業의 規模가 大型化되어 切土와 盛土斜面도 巨大해짐에 따라 이들에 대한 安定檢討가 重要한 硏究課題로 대두되고 있다.

盛土斜面은 人工的인 構造物로서 盛土材料에 强度의 不均一性, 盛土內의 不規則性등으로 因하여 安定解析을 할 때 많은 問題點이 대두되고 있다.

이와같이 盛土斜面에 관한 理論的인 安定解析은 여러가지 方法이 硏究되어 使用되고 있으나, 어느것이 實際에 接近할 수 있는지는 優劣을 가리기가 어려운 實情이다. 오히려 斜面安定解析을 할때 適合한 强度定數를 選定하기 위해서 理論的 分析方法과 더불어 實際模型實驗을 實施하여 檢證하는 硏究가 先行되어야 할 것이다.

盛土의 不規則性外에 降雨量이나 降雨强度, 降雨持續時間等에 의해서 降雨時 盛土斜面의 浸透現象은 複雜하게 나타나고 있다.[4,5,6,9]

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. 그러나, 斜面崩壞에 관한 많은 硏究로부터,[1,2,3,8] 崩壞의 主要因이 斜面內 空隙水壓의 增加로 인하여 發生되는 것으로 糾明되었기 때문에

2. 材料 및 方法

2.1 試驗裝置

2.1.1 斜面模型裝置

降雨時 斜面內의 浸透現象을 糾明하기 위하여 아크릴판(두께 : 15mm)과 앵글로 製作된 模型은 그림 1과 같다.

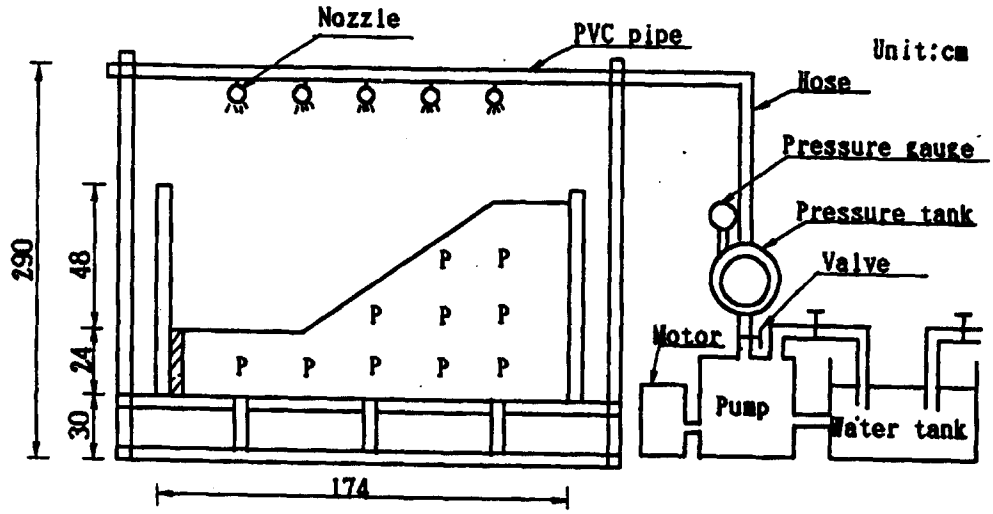


Fig. 1 Test model apparatus

2.1.2 降雨裝置

降雨强度는 斜面模型內에 여러 가지 降雨强度를 再現할수 있도록 製作하였고, 降雨强度는 流量供給裝置를 이용하여 壓力 게이지의 눈금으로 調節하였다.

2.1.3 空隙水壓測定裝置

降雨로 인하여 地盤浸透가 發生할때 正 및 負의 空隙水壓의 變化를 알기 위하여 텐시오미터을 사용하였고 텐시오미터는 地盤에 埋設하였을때 氣泡가 남지 않도록 세라믹휠터(seramic filter)로 製作하였다.

2.1.4 浸潤線 測定裝置

降雨의 浸透에 의한 盛土斜面內의 浸潤線의 擧動을 觀測하기 위하여 模型水槽의 側面에 橫과 縱을 9cm 間隔으로 비닐 호오스(直徑 : 5mm)를 設置하여 30分 單位로 測定하였다.

2.2 使用材料

使用된 試料는 모래(Sand)와 砂質롬(Sandy loam)의 두 種類이고, 그의 粒度分布와 物理的性質은 그림 2 및 表 1과 같다.

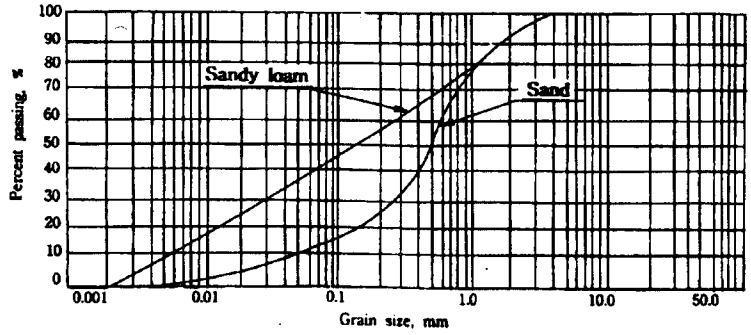


Fig. 2 Grain size distribution curves

Table 1. Properties of soil tested.

Properties	Symbol	Unit	Materials	
			Sand	Sandy Loam
Specific gravity	Gs		2.62	2.68
Atterberg Limit	LL	%	-	33.4
	PL	%	-	21.7
	PI	%	NP	11.7
Optimum moisture content	ω_{omc}	%	13.20	15.80
Max.dry density	γ_{dmax}	g/cm^3	1.805	1.740
Passing by #200 sieve		%	17.0	45.0
Coeff.of permeability	k	cm/sec	3.31×10^{-5}	5.09×10^{-7}
Triaxial compression	c	Kg/cm^2	0.25	0.50
	c(sat.)	Kg/cm^2	0.03	0.04
	ϕ	degree	9 ° 27	0 °
	ϕ(sat.)	degree	2 °	0 °
U.S.C.S			SW	SM
U.S.D.A			Sand	Sandy loam

2.3 試驗方法

模型實驗에 사용된 모래와 砂質흙을 密度가 一定하게 維持되도록 두께 5cm로 動的다짐을 하여 그림 3과 같이 斜面의 傾斜를 1:1, 1:1.5, 1:2의 3단계로 變化시켰으며, 斜面의 높이는 48cm, 幅은 39cm로 一定하게 維持하도록 하여 盛土斜面을 築造하였다.

그리고 適用된 降雨强度가 盛土 模型全體에 均一하게 分散되어야 하는데, 이때 分布의 量은 다음과 같은 식(Christiansen's coefficient) [10]을 利用하여 구했고, 이 식으로 구한 均等分布는 約 80%程度로 良好하게 斜面全體에 均一하게 分散되었다. 그리고 降雨時 盛土斜面의 實驗計劃을 要約하면 表 2와 같다.

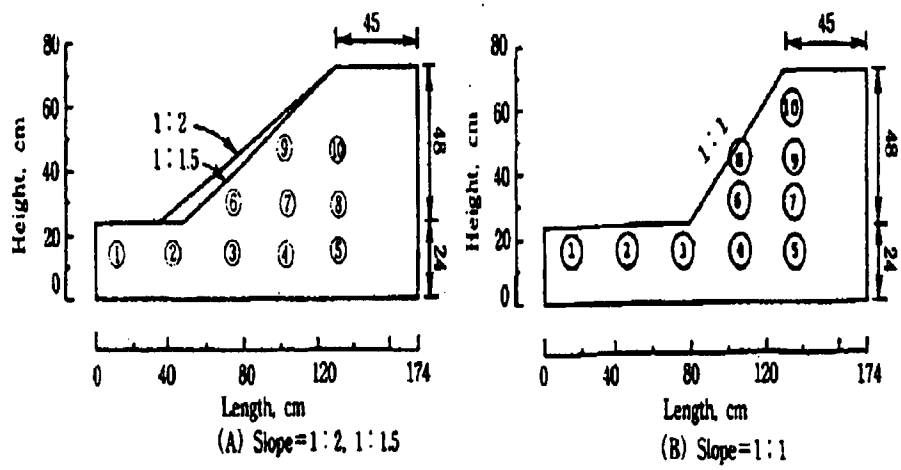


Fig. 3 Dimensions of slope model and locations of pore pressure meter

降雨開始後부터 斜面의 崩壞가 發生할때까지의 空隙水壓의 分析方法은 降雨强度와 斜面傾斜別로 그림 3과 같이 盛土斜面內에 10개의 空隙水壓을 橫과 縱으로 各各 15cm 間隔으로 설치하여 30분 單位로 測定하였고, 浸潤線은 模型水槽의 側面에 橫과 縱으로 各各 9cm 間隔으로 47개를 설치하여, 降雨持續時間에 따른 空隙水壓의 變化, 崩壞時間, 危險降雨量, 浸潤線의 變化, 安全率의 變化特性등을 分析하였다.

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

Soil Type	Sand	Sandy loam
Rainfall Intensity, I_R(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, ω(%)	13±2	16±2
Wet unit weight, γ_t(g/cm^3)	1.792	1.735

3. 結果 및 考察

3.1 模型實驗에 의한 安定解析

3.1.1 降雨持續時間에 따른 空隙水壓의 變化와 崩壞時期의 推定

降雨時의 斜面 崩壞時期의 推定方法은 從來에는 經驗的으로 提案되어 있는 危險降雨量(=限界雨量)[7]에 의하여 推定되어 왔으나, 危險降雨量에 의하여 推定하는 것보다는 降雨持續時間, 降雨强度, 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는 그림 4~5와 같다.

그림 4의 (a), (b), (c)는 모래 斜面의 傾斜가 1:2이고, 降雨强度가 35±2mm/hr, 45±2mm/hr, 55±2mm/hr일때 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. 空隙水壓이 上昇하여 斜面先 附近에서 滑動이 시작될때의 時間은 降雨强度가 35±2mm/hr일때는 270分, 45±2mm/hr일때는 170分, 55±2mm/hr 일때는 150分으로 測定되어 降雨强度가 클수록 짧게 나타났다.

또, 降雨强度를 45±2mm/hr로 固定시키고, 斜面傾斜가 1:1, 1:1.5, 1:2일때의 降雨持續時間에 따른 空隙水壓의 分布를 測定한 結果, 그림 4의 경우와 類似한 現象을 나타냈고, 降雨開始부터 斜面先 附近에서 滑動이 시작될때까지의 時間은 各各 120分, 150分, 170分으로 測定되어 傾斜가 緩慢할수록 길게 나타났다.

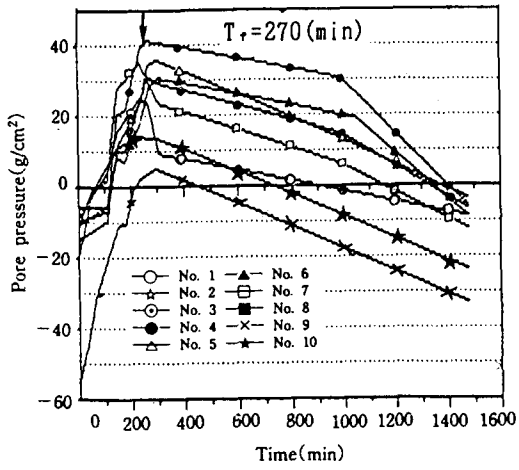
그림 5의 (a), (b), (c)는 砂質흙 斜面에서 降雨强度가 35±2mm/hr이고 斜面傾斜가 1:1, 1:1.5, 1:2일때 降雨持續時間에 따른 空隙水壓 分布를 나타낸 것이다.

降雨가 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 上昇하여 斜面先 附近에서 滑動이 시작될때의 時間은 斜面 傾斜에 따라서 각각 180分, 250分, 300分으로 測定되었고, 斜面傾斜가 緩慢할수록 崩壞할때까지의 時間은 길게 나타나서 모래 斜面의 경우와 비슷한 傾向을 보였다. 그리고 深度別로 空隙水壓의 分布를 보면, 埋設깊이가 깊어질수록 空隙水壓도 큰 값을 나타내고 있다. 斜面傾斜가 1:2의 경우, 埋設위치 ④번 地點의 空隙水壓이 가장 큰 것은 初期 空隙水壓이 월등히 크게 나타난데 原因이 있는 것으로 생각된다.

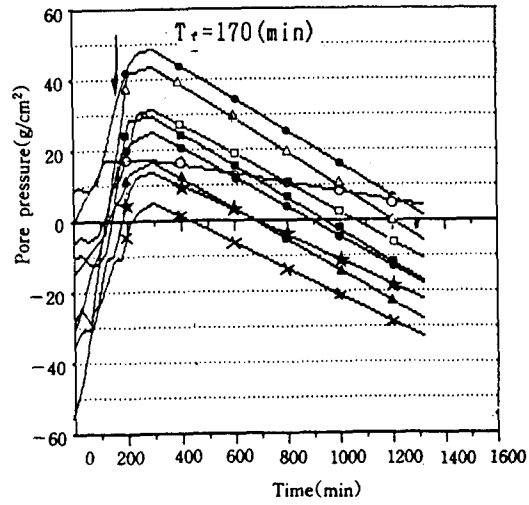
그리고 斜面傾斜가 1:1.5이고, 降雨强度가 35±2mm/hr, 45±2mm/hr, 55±2mm/hr일때의 降雨持續時間에 따른 空隙水壓의 分布를 測定한 결과, 類似한 結果를 나타냈고, 降雨開始로부터 崩壞가 發生할때까지의 時間은 250분, 240분, 220분으로 測定되어 降雨强度가 클 수록 崩壞할때까지의 시간은 짧게 나타났다.

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, 深層部에서는 正의 空隙水壓에서 시작되고, 斜面內로 降雨가 浸透함에 따라 飽和狀態가 되어 다 같이 空隙水壓이 增加하면서 破壞가 發生되고 그 以後는 漸次로 減少하는 傾向을 나타내었다.

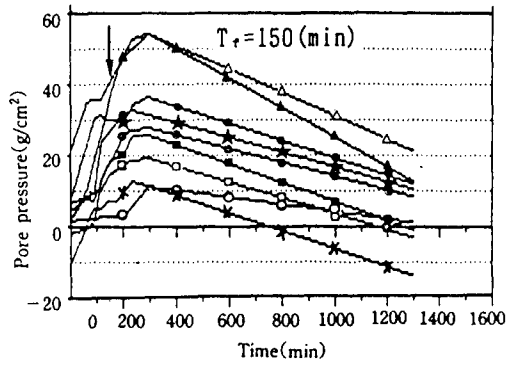
이와같은 結果로부터 降雨浸透에 따른 空隙水壓의 變化를 測定함으로써 表層崩壞의 發生時期를 推定할 수 있었고, 空隙水壓은 崩壞直前에 比較的 顯著한 增加現象을 보이고 있고, 降雨强度와 斜面傾斜에 따라서 차이는 있으나 崩壞가 發生하기 50-100分前부터 空隙水壓이 增加하기 시작하였다.



(a) I_R=35±2mm/hr

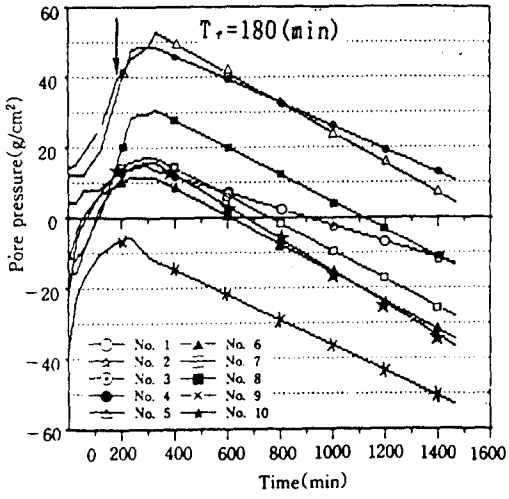


(b) I_R=45±2mm/hr)

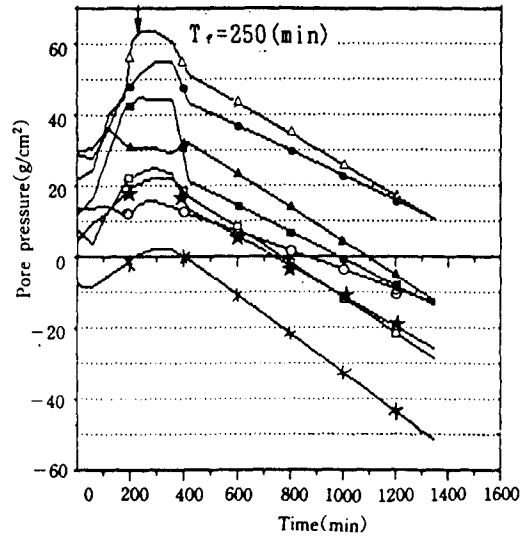


(c) I_R=55±2mm/hr

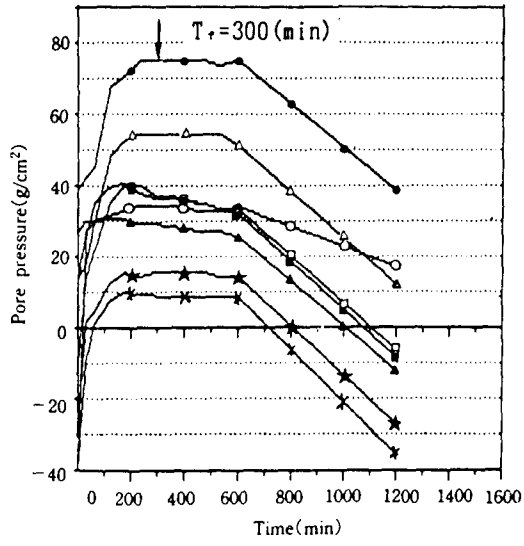
Fig. 4 Pore pressure distribution with time (Sand, S=1:2)



(a) S=1:1



(b) S=1:1.5



(c) S=1:2

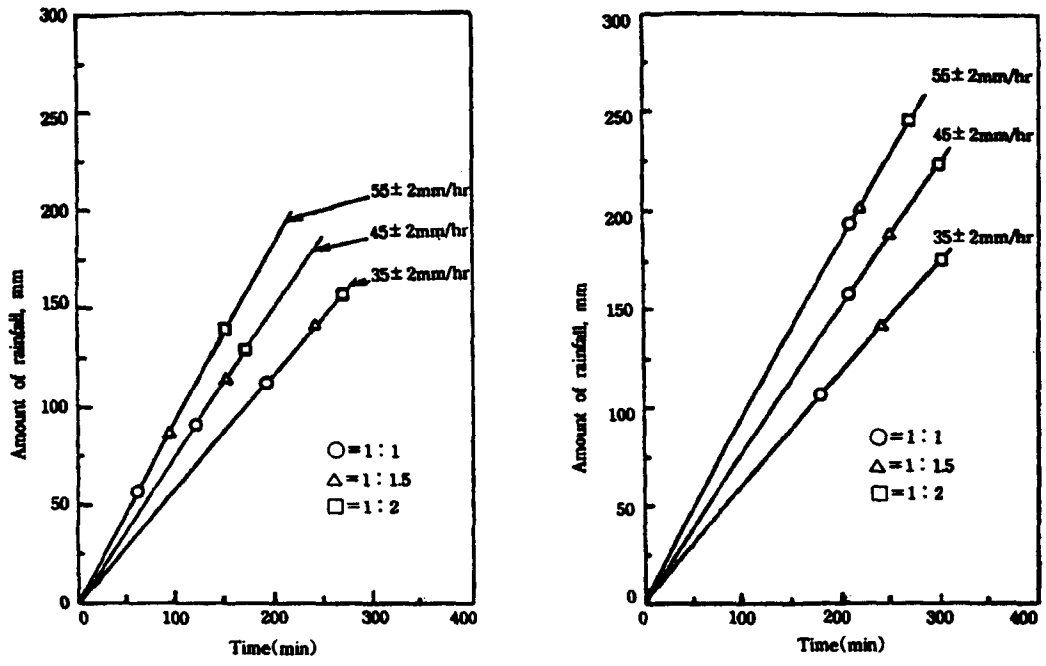
Fig. 5 Pore pressure distribution with time (Sandy loam, I_R=35±2mm/hr)

3.1.2 斜面崩壞時 危險降雨量의 推定

그림 6은 모래 斜面과 砂質름 斜面에서 斜面崩壞가 發生될때까지의 時間과 總降雨量과의 關係를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 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하면[7] 降雨强度別로 崩壞發生時間이 다르고, 崩壞가 發生할때까지의 危險降雨量은 다르게 나타나서 1:1斜面에서는 50-100mm, 1:1.5斜面에서는 80-140mm, 1:2斜面에서는 130-160mm로 斜面傾斜가 緩慢할수록 危險降雨量은 더 크게 나타났다.

砂質름 斜面에서 降雨强度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으로 範圍가 좁게 나타났고, 崩壞가 發生할때까지의 危險降雨量은 1:1斜面에서는 100-200mm, 1:1.5斜面에서는 140-200 mm, 1:2斜面에서는 170-250mm로 모래 斜面에서 보다 더 크게 나타났다. 이와같은 現象은 砂質름 斜面에서는 모래 斜面보다 透水係數가 작아서 浸透速度가 늦어졌기 때문이라고 생각된다.



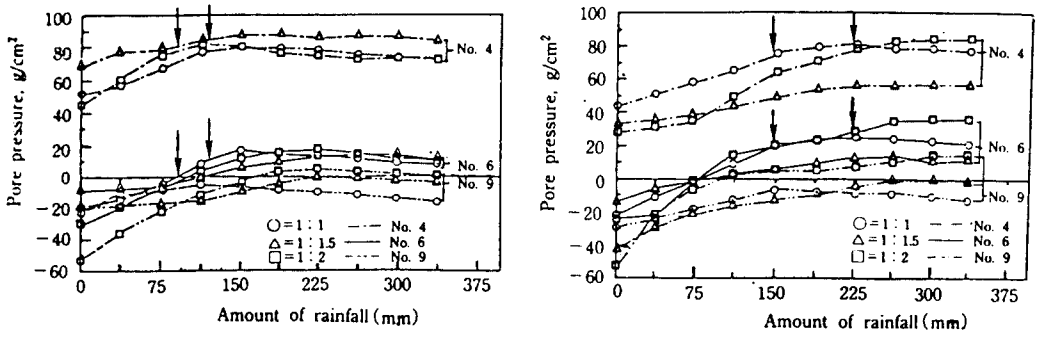
(a) Sand (b) Sandy loam

Fig. 6 Relationship between time and amount of rainfall

그림 7은 모래와 砂質름으로 築造된 斜面에서 降雨强度가 45±2mm일때, 斜面傾斜別, 空隙水壓計의 設置位置別에 따른 總降雨量과 空隙水壓과의 關係를 나타낸 것이다.

空隙水壓은 空隙水壓計의 埋設位置에 따라 다르게 나타났으나, 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 增加되며, 總降雨量은 모래 斜面에서는 180mm, 砂質롬 斜面에서는 225mm부터 거의 一定한 現象을 나타내고 있다. 그리고 空隙水壓의 최대치는 10-40g/cm^{2}로 작은 값을 나타냈다.



(a) Sand (b) Sandy loam

Fig. 7 Relationship between pore pressure and amount of rainfall. (I_R=45±2mm/hr)

上部位置(埋設位置: ⑨번)에서는 降雨量의 增加에 따라 약간씩 空隙水壓은 增加했으나, 거의 負의 空隙水壓狀態를 유지하고 있고, 深層部의 位置(埋設位置: ④번)에서는 모든 斜面에서 空隙水壓의 最大値는 50-90g/cm^{2}로 크게 나타났다.

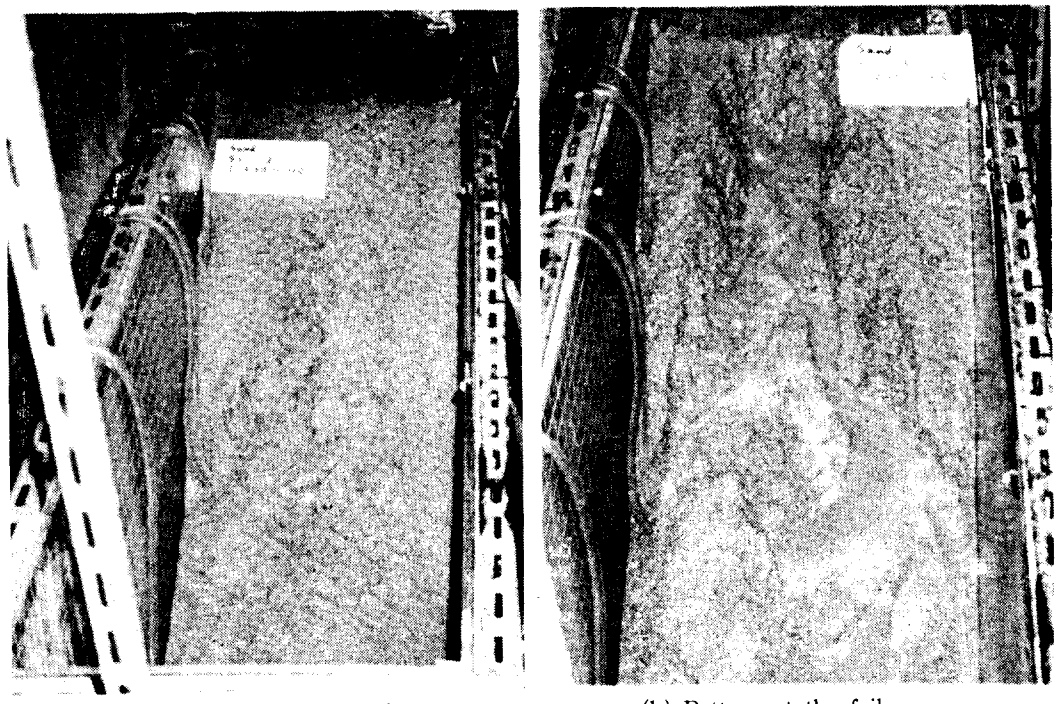
斜面崩壞가 發生되었을때의 總降雨量을 全體的으로 보면 모래 斜面에서는 90mm-120 mm, 砂質롬 斜面에서는 150mm-225mm에서 發生되었고, 空隙水壓은 表層部에서는 變動幅이 크면서도 작은 값을 나타내고 있으나, 深層部에서는 변동폭이 작으면서 空隙水壓은 큰 값을 나타냈다.

3.1.3 斜面 崩壞의 形狀

斜面의 崩壞現象은 水位의 急降下에 의해서 순식간에 崩壞되는 것과 飽和領域의 上昇에 따라 斜面先 附近에서 局部的으로 崩壞되는 것으로 나타낼 수 있는데, 이와같은 現象을 究明하기 위하여 모래 斜面과 砂質롬 斜面에 대하여 降雨持續時間에 따른 崩壞 形狀을 考察하였다.

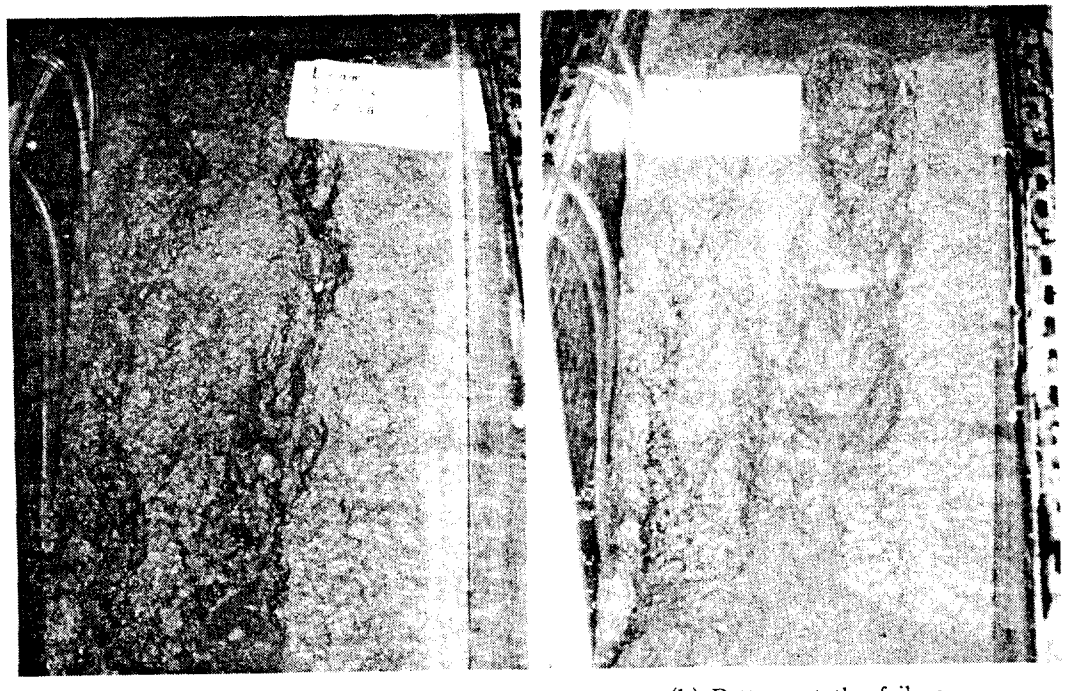
사진 1은 모래 斜面과 砂質롬 斜面에 대하여 降雨强度가 55±2mm/hr이고,斜面傾斜가 1:1.5일때의 降雨持續時間에 따른 崩壞現象을 撮影한것이다.

寫眞에서 보는 바와같이 모래 斜面의 경우는, 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되는 것을 알 수 있다. 降雨가 계속됨에 따라 斜面內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 內部摩擦角이 減少하면서 斜面先부터 서서히 崩壞가 시작되고, 崩壞가 斜面肩으로 進行될수록 破壞깊이도 깊어지고 臨界圓을 形成하게 되며, 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.



(a) Pattern at the beginning (b) Pattern at the failure

(A) Sand



(a) Pattern at the beginning (b) Pattern at the failure

(B) Sandy loam

Photo. 1 Failure pattern at the beginning and the failure (S=1:1.5, I_R=55±2mm/hr)

이와같이 모래斜面에서 斜面肩부터 一時的인 崩壞가 發生되지 않고, 斜面先附近부터 局部的인 崩壞가 發生되는 現象은 降雨에 의한 浸透水가 斜面先으로부터 斜面肩으로 서서히 飽和되는 過程 때문이라고 생각된다.

砂質름 斜面의 崩壞形態는 透水係數가 상당히 작기 때문에, 斜面의 表面을 따라 表面流出이 發生되어 걸리(gully)의 形態를 이루면서 斜面先에서부터 斜面肩部分으로 서서히 進行하는 表面滑動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.

이와같은 結果로부터 모래斜面에서는 斜面先附近부터 局部的인 崩壞가 發生되었고, 砂質름 斜面에서는 表面流出이 發生되어 걸리(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 나타냈다.

3.1.4 安全率의 變化

그림 8은 斜面傾斜가 1:1.5이고, 降雨强度가 55±2mm/hr일때 모래 斜面과 砂質름 斜面에서 降雨持續時間에 따라 安全率의 變化를 Janbu의 簡便法을 이용하여 斜面安定解析을 한 것이다.

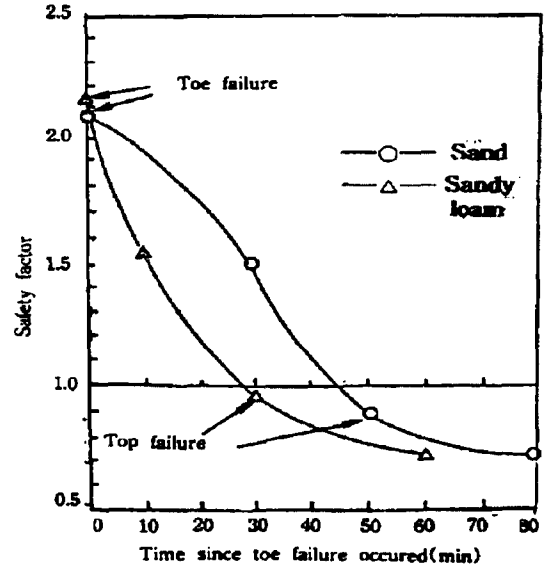


Fig. 8. Variations of safety factor for the time since toe failure occured.
(S=1:1.5, I_R=55±2mm/hr)

그림에서 보는 바와 같이 斜面先部分에서 滑動이 시작할때의 安全率은, 모래 斜面에서는 2.11, 砂質름 斜面에서는 2.15로 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 경우는 0.83, 砂質름 斜面의 경우는 0.94로 나타났다.

그리고 斜面先 部分의 崩壞가 시작되고부터 安全率의 값이 1.0以下로 되어 斜面肩까지 完全히 崩壞될때까지의 時間은, 모래 斜面에서는 50分으로 나타났고, 砂質름 斜面에서는

30分으로 나타났다.

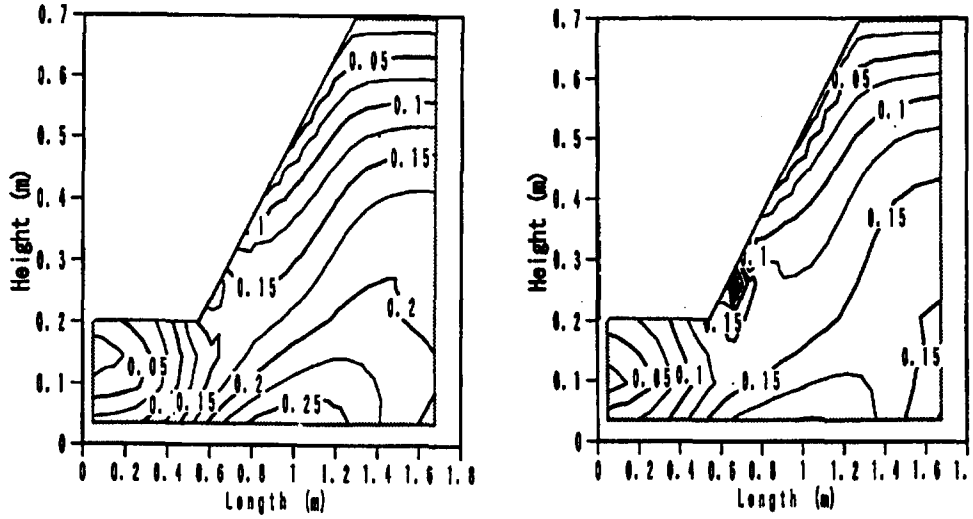
이와같은 硏究結果로부터 斜面模型實驗에서 觀測된 浸潤線의 變化와 强度定數를 安定解析에 適用하여 降雨持續時間에 따른 安全率의 減少를 豫測할 수 있었다. 그러나, 浸潤時 斜面崩壞에 대한 安定性을 時間的으로 正確하게 豫測하기 위해서는 보다 適切한 强度定數를 구하는 것이 重要한 問題가 된다고 생각된다.

3.2 有限要素法에 의한 安定解析

降雨時 盛土斜面에서 발생되는 應力-變形特性을 解析하기 위해서 이용된 有限要素法의 Mesh는 실내모형실험에서 사용된 단면과 동일하게 하여흙댐, 록필댐 및 堤防등의 斜面安定解析時에 많이 이용되는 平面變形分析를 媒介로 해서 節点數는 200개, 要素數는 175개의 四邊形 要素로 分割하였다. 그리고, 흙의 非線形과 應力-變形에 依存되는 應力履歷 및 體積變形特性은 Duncan등에 의해서 개발된 雙曲線 모델을[11] 사용하였다.

3.2.1 最大剪斷應力의 分布

그림 9의 (a), (b)는 斜面傾斜가 1:1.5, 降雨强度가 55±2mm/hr일때 모래 斜面에서 降雨開始前(盛土直後)과 斜面先崩壞가 발생되었을때의 最大剪斷應力의 分布狀況을 等値線으로 나타낸 것이다.



(a) Before rainfall (b) Toe failure

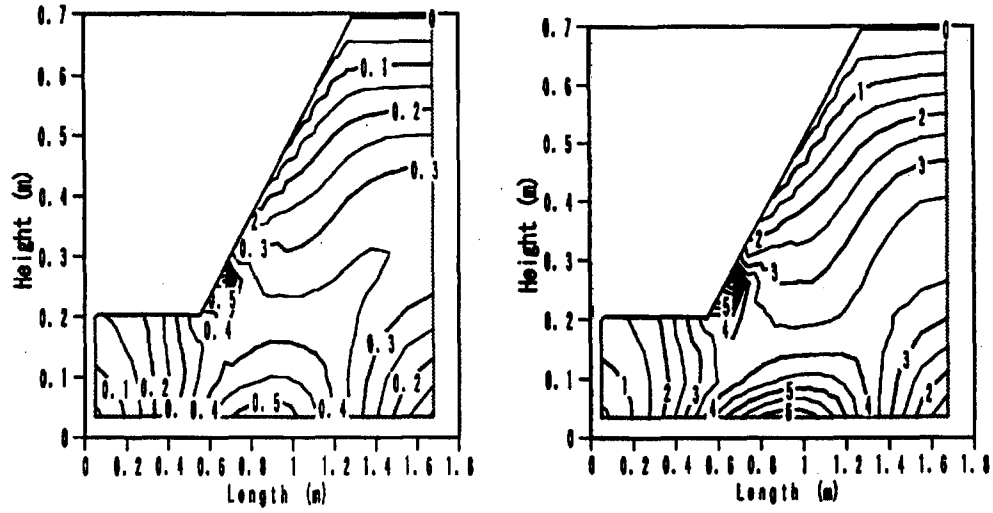
Fig. 9 Contour of maximum shear stress in the embankment with different condition. (Sand, S=1:1.5, I_R=55±2mm/hr)

降雨開始前의 剪斷應力은 斜面先 附近과, 底部地盤의 0.57Hd(Horizontal distance)의 部分에서 0.2-0.25의 값으로 나타났으며, 等値線의 形狀은 斜面의 基礎部分에서 中心線(Center line)쪽으로 길게 分布되고 있음을 알 수 있다. 斜面先 崩壞時의 剪斷應力分布를

보면, 降雨開始前에는 斜面의 基礎附近에 0.2-0.25로 分布되었던 剪斷應力값이 점차로 減少하며, 斜面先 部分에 집중되는 形態를 나타냈다.

3.2.2 最大剪斷變形의 分布

그림 10의 (a), (b)는 斜面傾斜 1:1.5, 降雨强度가 55±2mm/hr일때 모래 斜面에서 降雨開始前(盛土直後)과, 降雨가 지속됨에 따라 斜面先 崩壞가 발생하였을때의 最大剪斷變形의 分布狀況을 等値線으로 나타낸 것이다.



(a) Before rainfall (b) Toe failure

Fig. 10 Contour of maximum shear strain in the embankment with different condition. (Sand, S=1:1.5, I_R=55±2mm/hr)

降雨開始前의 剪斷變形의 分布는 斜面先 附近과 底部地盤에서 0.5%로 작게 나타났으나, 斜面先崩壞가 발생되었을때 最大剪斷變形은 斜面先 附近에서 5%이상으로 增加하였다.

斜面의 破壞剪斷變形을 3%로 간주한다면, 最大剪斷變形이 破壞剪斷變形의 3%를 초과하는 部分은, 斜面先에서 斜面中心線(Center line)쪽으로 연결되어 있고, 5%를 초과하는 部分은 斜面先 部分과 底部地盤의 中央部에 分布하고 있다.

이와같은 結果로부터 斜面의 最大剪斷變形은 斜面先 附近에 집중되어 있음을 알 수 있고, 降雨가 持續됨에 따라 斜面先 附近에서 발달된 最大剪斷變形은 결국 斜面의 局部的인 破壞를 일으키는 原因이 된다고 생각된다.

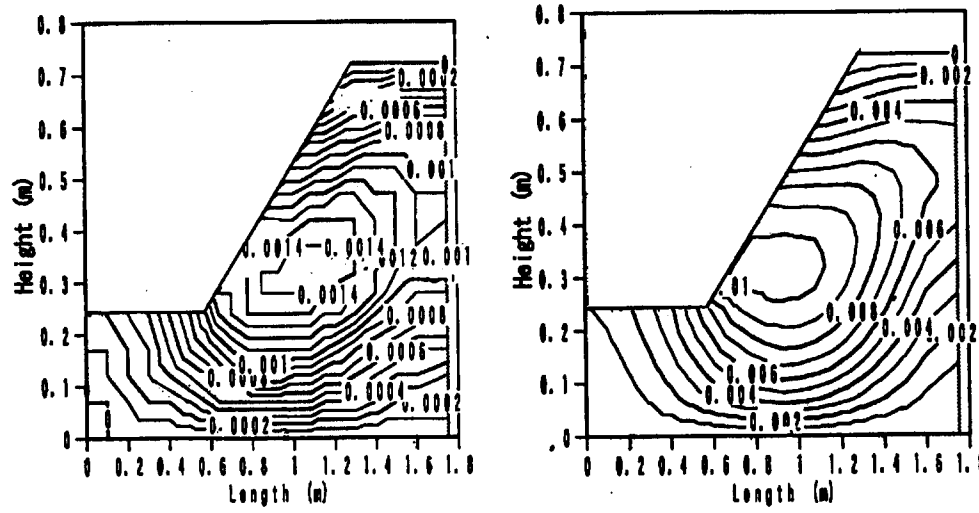
3.2.3 全體變位의 分布

그림 11의 (a), (b)는 斜面傾斜 1:1.5, 降雨强度가 55±2mm/hr일때 모래 斜面에서 降雨開始前과 斜面先 崩壞가 發生되었을때 全體變位의 分布狀況을 等値線으로 표시한 것이다.

降雨開始前의 全體變位는 斜面先 部分에서 1.4mm정도로 작은 값을 나타냈고, 斜面先 部分과 全體斜面 높이의 0.42Hv(Height of vertical)에서 變位領域이 집중적으로 分布되어 있

음을 알 수 있다.

斜面先 崩壞가 발생하였을때 變位는 降雨開始前의 位置와 거의 동일한 位置인 0.42Hv에서 10mm로 큰 變位를 나타내면서 變位領域이 점차로 斜面先 部分으로 이동되는 分布形態를 나타냈다. 이와 같이 全體變位는 剪斷變形에 따른 體積變化의 原因으로 斜面의 變位量도 局部的인 차가 생기고, 斜面先部分과 全體斜面 높이의 0.42Hv의 範圍에서 집중적인 變位領域을 나타냄을 알 수 있었다.



(a) Before rainfall (b) Toe failure

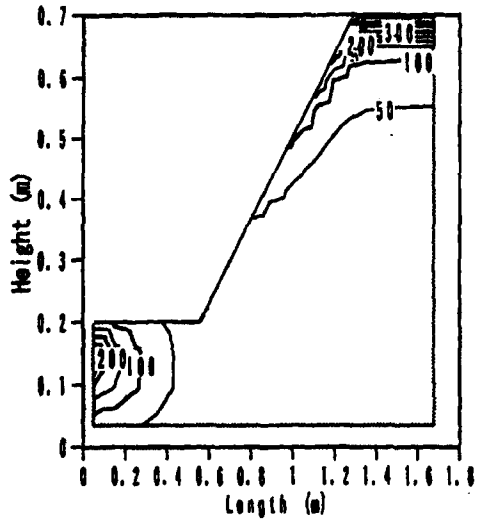
Fig. 11 Contour of total displacement in the embankment with different condition. (Sand, S=1:1.5, I_R=55±2mm/hr)

3.2.4 局部安全率의 分布

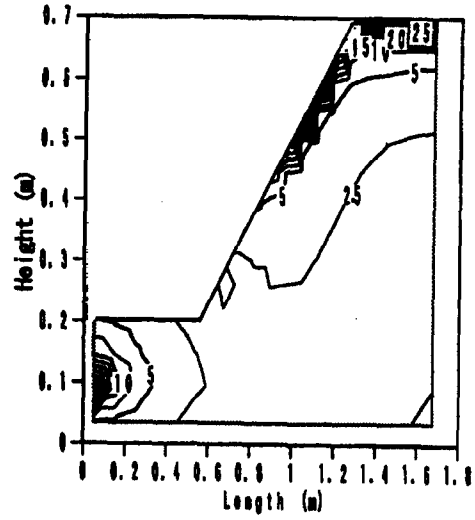
그림 12는 斜面傾斜가 1:1.5, 降雨强度가 55±2mm/hr일때 모래 斜面에서 降雨開始前과 斜面先 및 斜面肩崩壞가 발생하였을때 局部安全率의 分布形態를 等値線으로 나타낸 것이다.

降雨開始前의 局部安全率은 斜面上部와 斜面 左側部分에서 큰 安全率을 나타내고 있으나, 斜面先崩壞가 발생하였을때의 局部安全率은 2.5로 크게 減少하면서 斜面先 部分에 집중적으로 分布되어 있다.

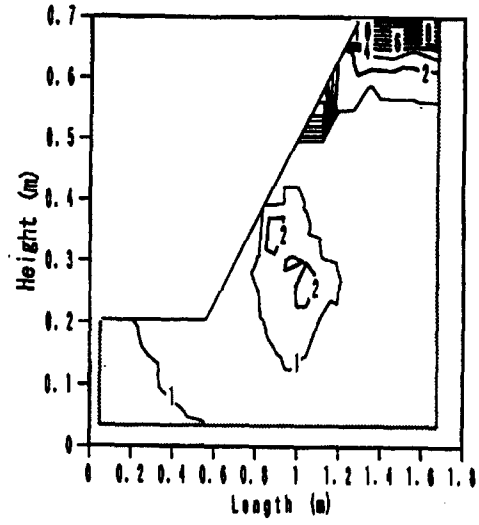
斜面肩 崩壞가 발생되었을때, 局部安全率, F_{SL}=1이 되는 部分은 斜面先部分 뿐만 아니라, 斜面의 上部쪽인 斜面肩 部分까지 넓게 分布되어 全體斜面이 이미 崩壞되었음을 나타내주고 있다.



(a) Before rainfall



(b) Toe failure



(c) Top failure

Fig. 12 Contour of local safety factor in the embankment with different condition. (Sand, S=1:1.5, I_R=55±2mm/hr)

그림 13은 模型實驗 結果와 簡易Janbu方法에 의한 臨界圓(Critical slip surface) 및 有限要素法에 의한 局部安全率를 重合시켜 본 것이다.

斜面肩 破壞가 발생하였을때 極限平衡法에 의한 臨界圓은, 斜面先에서 安全率이 0.94로 圓弧形態로 나타났고, 有限要素法에 의해 局部安全率이 1.0이하가 되는 범위는 斜面先 部分과 傾斜面에서 斜面上部 部分으로 分布되어 있어 模型實驗結果와 一致하고 있음을 보여주고 있다.

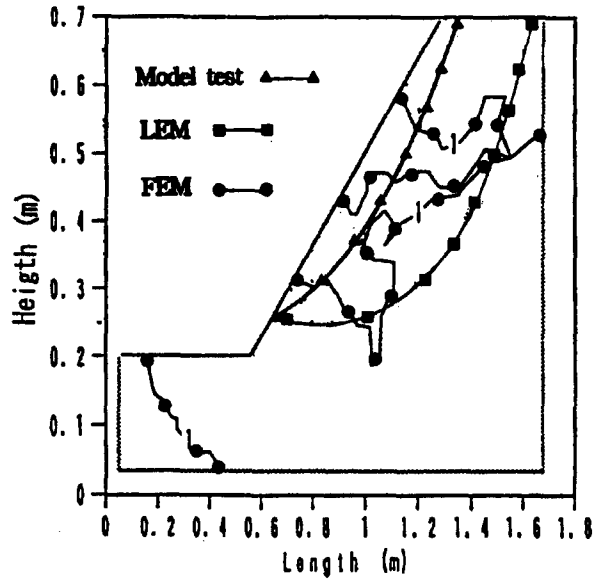


Fig. 13 Distribution of critical circle with LEM, FEM, and model test..
(S=1:1.5, I_R=55±2mm/hr)

4. 結 論

降雨時 均一한 盛土斜面에 대하여 室內模型實驗의 結果와 有限要素法에 의한 解析結果를 比較分析하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

1. 空隙水壓은 降雨開始初期에는 表層部에서는 負의 空隙水壓으로, 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. 斜面의 崩壞形狀은 모래 斜面에서는 斜面先 附近부터 局部的인 表層崩壞가 發生하였고, 砂質롬 斜面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.

3. 降雨가 持續됨에 따라 局部的인 崩壞가 發生할때의 安全率은 모래 斜面에서는 2.11, 砂質롬 斜面에서는 2.15로 나타났고, 斜面이 完全히 崩壞되었을때 모래 斜面에서는 0.83, 砂

質름 斜面에서는 0.94로 急激하게 減少하였다.

4. 降雨開始前의 最大剪斷應力-變形의 分布는 底部地盤에서 크게 分布되었으나, 斜面先 崩壞가 발생되었을때는 점차적으로 減少하여 斜面先 部分에 集中되는 現象을 나타냈으며, 斜面의 全體變位는 剪斷變形에 따른 體積變化의 原因으로 斜面先 部分과 全體斜面 높이의 0.42Hv의 範圍에서 集中的인 變位領域을 나타냈다.

5. 臨界圓의 位置는 極限平衡法에서는 斜面先 崩壞形態으로 나타났고, 有限要素法에 의한 局部安全率의 範圍는 斜面先과 斜面 部分에 分布되어 있어 模型實驗 結果와 類似하게 나타났다.

參 考 文 獻

1. 石田毅, 渡邊啓行, 伊藤洋, 北原義浩, 松本正毅(1981), "模型斜面の靜的破壞實驗の數値解析", 電力中央研究所報告, No.380057.
2. 近藤政司(1973), "盛土により生ずる地すべり面での間隙水壓の强度と斜面の安定解析の檢討", 土木技術資料, Vol.15, No.8, pp.20-25.
3. 神品英夫, 末政直晃, 竹村次朗, 木村孟(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.
4. 久樂勝行, 石塚廣史(1982), "雨水の浸透と盛土の安定性", 土と基礎, Vol.30, No.9, pp.37-43.
5. 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關する2,3の考察", 第27回土質工學研究發表會, Vol.2, No.2, pp. 1949-1950.
6. 鹿子木淸(1987), "盛土の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.
7. 失田部龍一, 八木則男, 楊明溪(1986), "降雨による砂質土斜面の崩壞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.
8. 吉武茂樹, 鬼塚克忠(1992), "降雨によるまさ土斜面崩壞に關する研究", 第27回土質工學研究發表會, Vol.2, No.2, pp.1873-1874.
9. Anderson, M. G. and Richards, K. S.(1987), "Slope stability", John Wiley and Sons
10. Armfield Ltd.,(1989), "Engineering teaching and reserch equipment", Rainfall simulator, pp.1-29.
11. Duncan, J. M., Seed, R. B., Wong, K. S. and Ozawa, Y.(1984), "A Computer program for finite element analysis of dams", Geotechnical Engineering Research Report No.SU/GT/84-03, Dept. of Civil Engineering Stanford University.