

도로성토사면의 안정성 분석시 원지반 투수성의 영향

Permeability Influence of Base Soil for Analysis of Road Landfill Stability

김영목¹⁾, Young-Muk Kim, 김충기²⁾, Chung-Ki Kim, 김만구³⁾, Man-Goo Kim, 김건해⁴⁾, Geon-Hae Kim

¹⁾ 한밭대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanbat National University

²⁾ 삼부토건 현장소장, Construction Manager, Sambu Construction

³⁾ 대전광역시 교통국 도시고속도로건설 담당관, Chief of Urban Highway Construction and Transportation, Daejeon Metropolitan City

⁴⁾ 한성엔지니어링 대표이사, President, Hansung Engineering Co.

SYNOPSIS : Stability of embankment is influenced on landfill condition, permeability, shear strength and soil engineering propensity and so on, and need examination in reply because is different according to change of soil property of foundation ground and permeability condition. Analyzed seepage behaviour by finite element method for embankment, and change permeability of base to analyze effect that permeability of ground water table formation before embankment and analyze seepage behaviour to typical embankment in this research.

In the case of permeability of foundation ground is 10 more than landfill permeability, rise of groundwater table was changed slightly. Pore water pressure was decreased slowly in landfill after rainfall. The effect of permeability of foundation ground was effected in change of pore water pressure.

For permeability of foundation ground is 10 more than landfill, stability of road landfill was small changed during rainfall. But in the case of permeability of base soil similar to landfill permeability, road landfill stability was large decreased during rainfall.

Key words : road landfill, stability, groundwater table, permeability, pore water pressure

1. 서 론

일반적으로 절토사면의 안정 검토 시 지하수위의 영향에 대해 고려해주고 있는 반면 성토사면의 경우는 지하수위의 영향을 무시하고 있다. 평지부 성토사면은 강우시 표면으로부터 침투가 시작되어 점차 성토 체체내로 확대되며, 지하수위는 체체가 완전히 포화될 때까지 체체 하단부에 존재하고 있다가 짧은 시간 내에 빠르게 상승한다. 또한 강우가 침투하여 체체 내로 거의 포화될 때까지 안전을 변화는 미미하지만 지하수위가 빠르게 상승하는 시점에서 사면은 불안정하게 된다.

본 연구는 성토하기 전 원지반의 투수성이 성토체의 안정성에 기여하는 바를 평가하기 위해 원지반의 투수성을 변화시켜 침투거동을 분석한 것이다. 이때 지하수위 형성에 끼치는 영향의 정도는 강우특성 뿐만 아니라 지질구조, 토질 및 지형조건 등에 따라 다를 수 있으나, 지하수위 변화에 가장 중요한 외부인자로서 강우를 고려하였다.

본 연구에서 지하수위의 위치는 원지반의 지표면에 위치하는 것으로 하였으며, 원지반과 성토체와의

지반이 같은 경우와 성토체 보다 투수성이 큰 경우인 경우에 해석하였다. 이때 불포화흐름을 고려한 침투거동은 수치해석법의 일종인 유한요소법을 적용하였으며, 침투거동시 안정해석은 한계평형법을 적용하였다. 한편, 이에 대한 사례로서 충남지역의 도로시공 현장을 대상으로 하여 침투거동 및 안정성을 분석하여 원지반의 투수성이 도로성토사면의 안정성에 끼치는 영향을 분석하였다.

2. 모델 및 해석조건

2.1 모델

2.1.1 단면조건

본 연구의 대상 모델은 충남지역의 도로현장의 사면으로서 높이 10m, 원지반 10m, 소단 1m, 그리고 사면 기울기가 1 : 1.8, 1 : 1.5로 구성되어 있다. 두개의 토층으로 이루어 졌으며 그림 1은 성토모델 대상의 횡단면도이다.

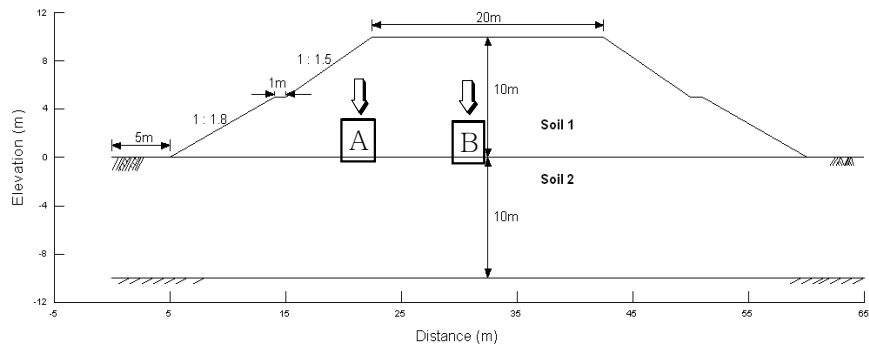


그림 1. 모델의 횡단면도

2.1.2 토질 및 해석 조건

해석단면의 성토재료는 전형적인 화강 풍화토로서 일반적인 토질특성은 표 1과 그림 2와 같다. 이 때 불포화흐름의 특성을 지배하는 간극수압에 대한 투수계수의 함수특성성은 본 토질과 유사한 특성을 가진 안성풍화토의 시험결과(류지협, 1997)를 활용하였으며, 실제 적용에 있어 검증된 Green and Corey의 방법으로 예측된 결과를 사용하였으며 그림 3과 같다.

성토체에 대한 초기 함수비는 성토조건을 고려하여 흙의 다짐시험규격(KS F2312)의 A다짐에 의한 최적함수비로 하였다. 지하수위의 위치는 지표면에 위치하는 것으로 하였으며, 원지반과 성토체와의 지반이 같은 경우와 성토체 보다 투수성이 큰 경우인 경우에 대해 해석하였다. 일반적으로 성토재료가 풍화토임을 감안하여 원지반이 풍화토인 경우에는 동일한 투수성으로 간주하였으며, 원지반이 사질토와 같이 성토체의 투수성보다 큰 경우에는 성토체보다 5배, 10배, 15배, 그리고 20배 큰 투수성 지반에 성토체가 위치하는 것으로 하였다.

표 1. 성토재료의 토질조건

전체단위중량 (t/m ³)	투수계수 (cm/sec)	강도정수		비 고
		c (t/m ²)	φ (°)	
1.963	4.47×10 ⁻⁴	1.0	31	풍화토

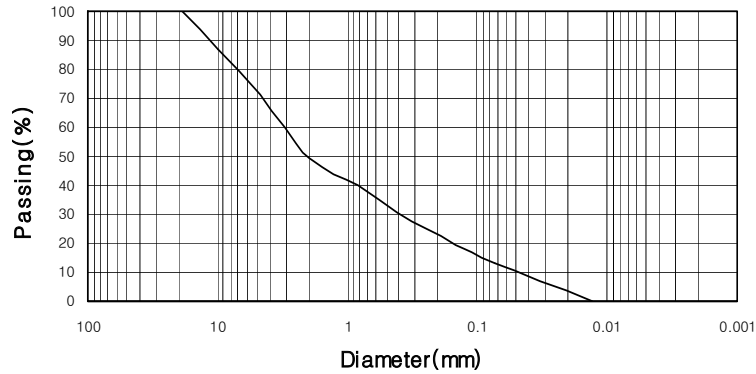


그림 2. 성토재료의 입도 분포 곡선

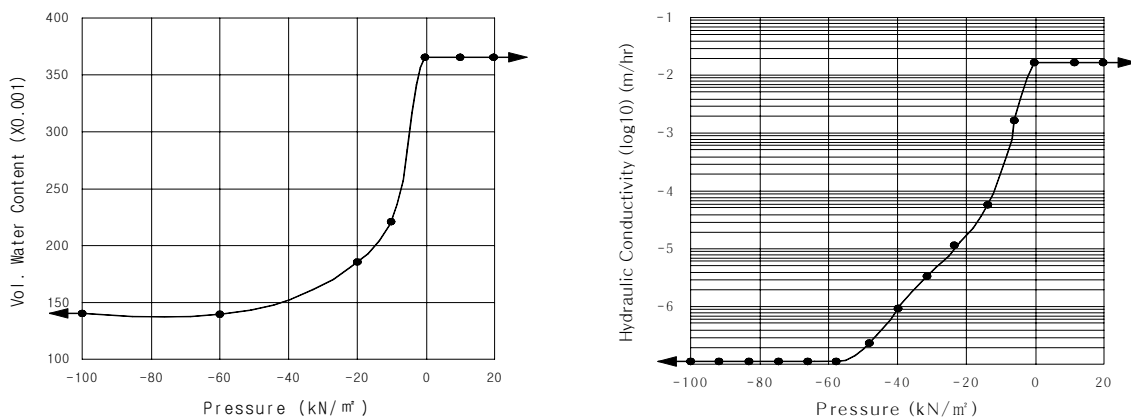


그림 3. 간극수압에 대한 함수특성 및 투수계수의 함수 곡선

강우는 시간당 10mm의 강우량으로 가정하였으며, 이것은 사면내에 강우가 침투하여 간극수압이 일정하게 될 때까지 지속되는 것으로 하였다. 강우종료 후 성토체내의 침투수에 대한 거동분석은 변화된 지하수위가 본래의 지하수위로 하강하는 과정까지 수행하였으며, 강우초기에서부터 전 과정에 대한 안정해석을 행하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 간극수압의 변화

3.1.1 강우 기간내 간극수압의 변화

그림 4와 그림 5는 강우개시 후 강우 기간내 성토체 내에서의 간극수압 변화를 나타낸 것이다. 여기서 5K ~ 20K는 원지반의 포화시 투수계수가 성토체의 포화시 투수계수 보다 5배 ~ 20배 크다는 것을 나타내고 있다. 그림 4와 그림 5에 의하면 원지반의 투수계수 크기에 따라 성토체내에서 간극수압의 변화가 다르게 나타나고 있다. A지점은 그림 1에서 표시되고 있는 바와 같이 성토체의 마루폭 왼쪽 아래 10m에 위치한 곳이며, B지점은 마루폭 가운데 원지반과의 경계면에 위치한 곳이다.

이것은 원지반의 투수조건이 성토체의 간극수압에 영향을 주고 있는 것으로 강우개시 후 약 6일 이후 간극수압의 변화가 두드러지게 나타나고 있으며 대략 10일 이후에는 일정하게 유지되고 있어 강우가 지

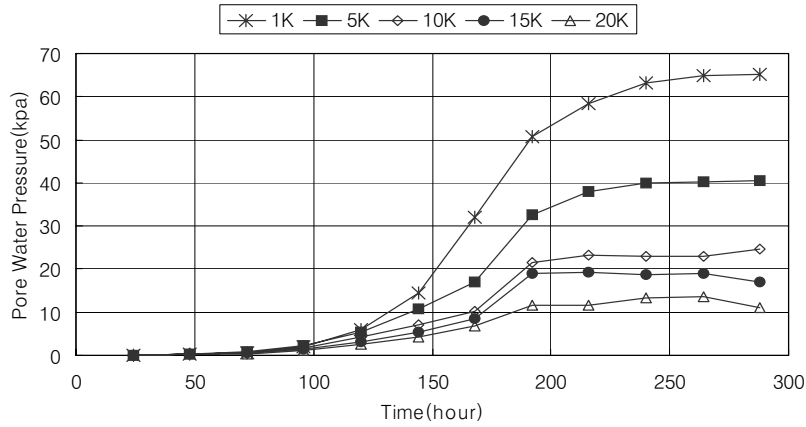


그림 4. 강우 기간내 A지점에서의 간극수압 변화

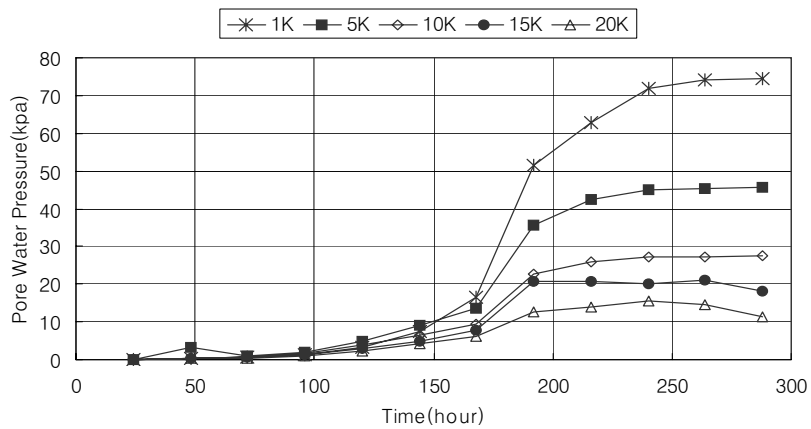


그림 5. 강우 기간내 B지점에서의 간극수압 변화

속적으로 계속되는 경우 일정시간이 흐르면 성토체 내로 지하수위가 형성될 수 있음을 예측할 수 있다. 특히 원지반의 투수계수가 성토체의 투수계수와 비슷한 경우 간극수압은 상대적으로 크게 나타나고 있다.

3.1.2 강우 종료 후 간극수압의 변화

그림 6과 그림 7은 강우 종료 후 간극수압의 변화를 나타낸 것으로 강우종료 후 원지반의 각각의 조건에 따라 일정하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉, 강우종료 후 성토체와 원지반의 투수계수가 동일한 경우의 변화와 원지반의 투수성이 성토체의 투수계수보다 큰 경우 간극수압의 변화는 유사하게 나타나고 있다.

이때 강우 종료 후에는 강우 기간동안 형성된 지하수위의 위치에서 하강함에 따라 원지반의 투수계수는 성토체의 간극수압의 변화 형태에는 큰 영향을 주고 있지 않고 있으나, 원지반의 투수계수가 성토체의 투수계수와 동일한 크기를 갖는 경우 오랜 시간에 걸쳐 제체내의 간극수압이 감소되고 있음을 알 수 있다.

3.2 사면의 안정성

3.2.1 강우 기간동안 성토사면의 안정성

그림 8은 강우가 지속되는 동안 지반조건에 따른 안전율의 변화를 나타내고 있다. 원지반의 투수계수

가 성토체보다 10배 이상 큰 경우 강우가 진행됨에 따라 표면으로 침투가 시작되어 점차 성토체내로 포화영역이 확대되어가는 과정에서 안전율의 변화는 미미하였지만, 원지반의 투수계수가 성토체의 투수계수와 유사한 경우에는 침윤전선의 확대에 따라 지하수위가 빠르게 상승하여 사면 안정성은 감소하였다.

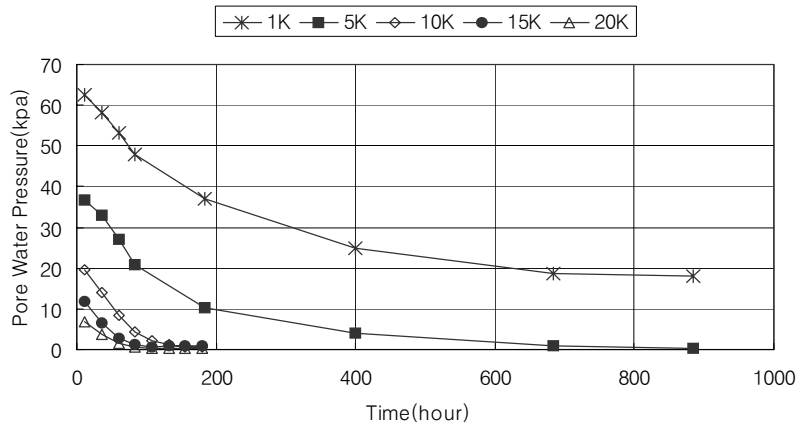


그림 6. 강우종료 후 A지점에서의 간극수압 변화

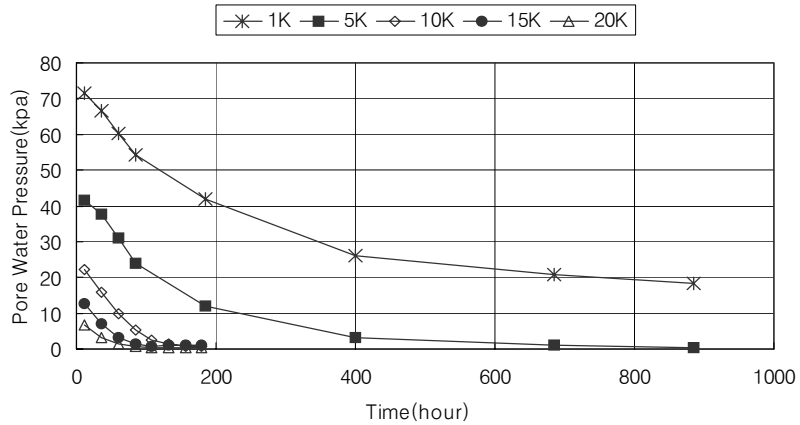


그림 7. 강우종료 후 B지점에서의 간극수압 변화

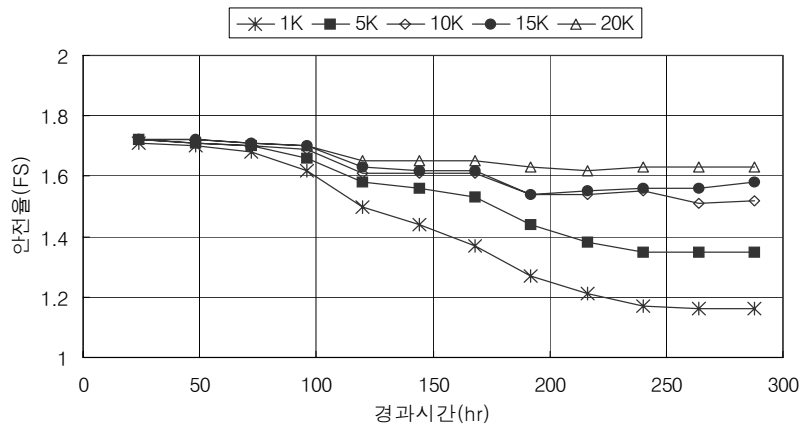


그림 8. 강우 기간내 성토사면의 안전율 변화

3.2.2 강우종료 후 성토사면의 안정성

그림 9는 강우종료 후 안전율의 변화를 나타낸 것으로 시간이 지남에 따라 서서히 안전율이 증가하고 있다. 이는 상승된 지하수위의 하강에 기인한 것으로 지하수위의 하강에 따라 성토체는 점차 정(+)의 간극수압에서 부(-)의 간극수압으로 변화됨에 따라 성토사면의 안전성이 회복되고 있다.

그림 9에 의하면 원지반의 투수성이 성토체의 투수성보다 10배 이상 큰 경우 안전율은 강우 종료 후 짧은 시간에 초기상태로 회복되었는데 이는 근본적으로 강우가 계속됨에도 불구하고 지하수위의 상승이 미미함에 따라 지하수위 하강 역시 쉽게 발생하기 때문으로 보인다.

3.3 적용사례 분석

원지반이 사질지반인 충남○○지역의 성토사례에 대해 성토체의 침투거동 및 안정성을 분석하였다. 성토단면의 조건은 그림 1과 같으며, 원지반은 가는모래(fine sand)와 굵은모래(coarse sand)로 구성된 사질지반이다. 가는모래 지반의 경우 투수계수는 $7.35 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로서 성토체의 투수성에 비해 약 16배 큰 값을 보이고 있으며, 굵은모래 지반은 $2.93 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로서 약 66배의 투수성을 보이고 있다. 이때 강우량은 모델해석과 같이 10mm/hr로 가정하였다.

3.3.1 간극수압 변화

그림 10은 강우 기간 동안 A지점에 대한 간극수압 변화를 나타낸 것이다. 그림 11에 의하면 원지반의 투수계수 크기에 따라 성토체내에서 간극수압의 변화가 다르게 나타나고 있다.

강우개시 후 6일 이후 간극수압의 변화가 두드러지게 나타나고 있으며 가는 모래지반인 경우 10일 이후에는 간극수압이 일정하게 유지되고 있고, 굵은 모래지반인 경우에도 10일 이후에는 약 $0.5t/m^2$ 의 적은 간극수압을 일정하게 유지하고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 강우 종료 후 A지점에 대한 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 원지반이 굵은모래로 되어 있는 경우 대략 강우 종료 후 200시간이 지나게 되면 상승된 간극수압은 거의 소산되었다. 한편, 가는 모래로 되어 있는 경우에도 투수성이 굵은모래로 되어 있는 경우에 비해 상대적으로 투수성이 작음에도 불구하고 대략 200시간이 경과하는 동안 간극수압은 거의 소산이 되는 것을 알 수 있다. 즉, 성토체의 투수성에 비해 가는모래의 경우에도 약 16배의 큰 투수성을 갖고 있어 실제 간극수압의 소산은 굵은모래지반과 강우 종료 후 거의 유사한 변화를 보이는 것으로 보인다.

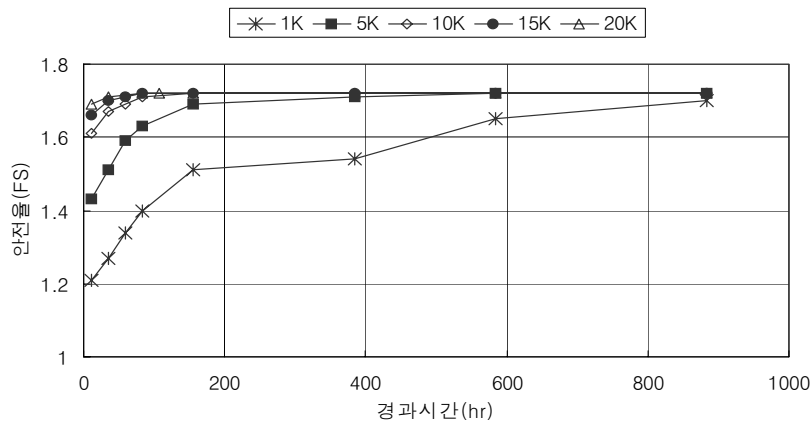


그림 9. 강우종료 후 성토사면의 안전율 변화

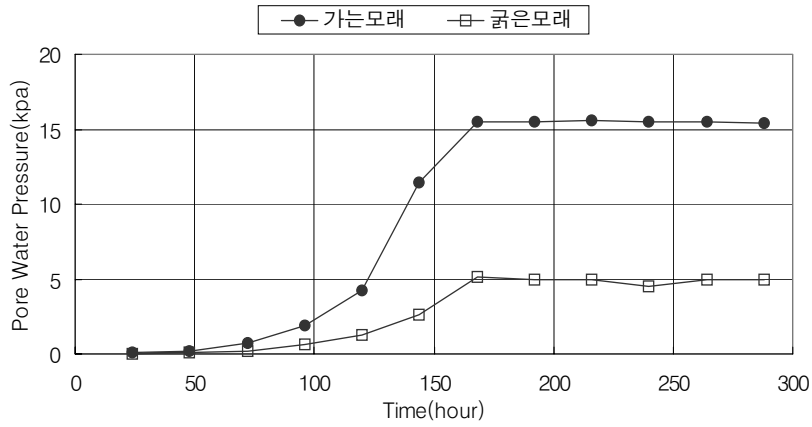


그림 10. 강우 기간동안 A지점에서의 간극수압 변화(적용사례)

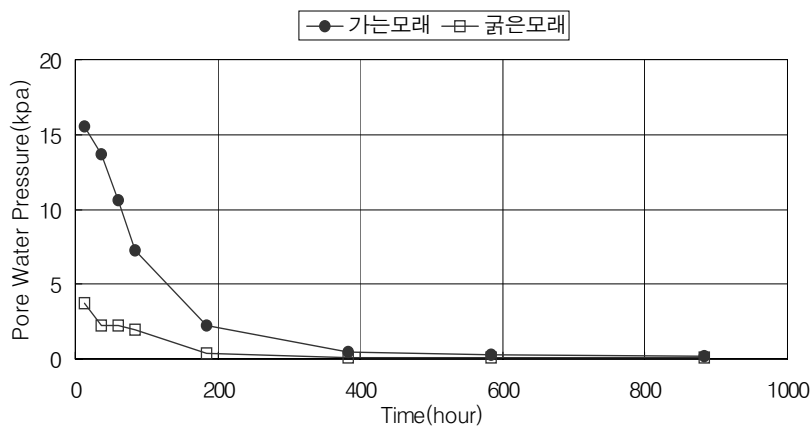


그림 11. 강우종료 후 A지점에서의 간극수압 변화(적용사례)

3.3.2 사면의 안정성

그림 12는 강우기간 동안 성토사면의 안정성을 평가한 것으로 원지반의 조건에 따른 안전율의 변화를 나타내고 있다. 원지반이 굵은 모래인 경우 성토체 보다 투수계수가 60배정도 큰 경우로서 강우가 진행됨에 따라 표면으로 침투가 시작되어 점차 성토체내로 포화영역이 확장되어가는 과정에서 안전율은 거

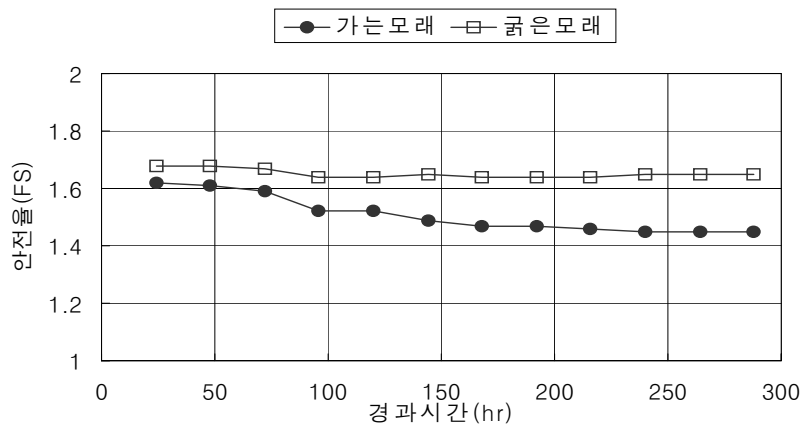


그림 12. 강우 기간내 안전율 변화

의 일정하였으나 원지반이 가는 모래인 경우 성토체 보다 투수성이 16배정도 큰 경우로서 강우가 진행됨에 따라 침윤전선의 확대에 따라 지하수위가 상승하여 성토사면의 안정성이 약간 감소하고 있다.

그러나 원지반이 가는모래의 경우에도 성토체의 투수성보다 훨씬 큰 사질지반으로 강우 기간동안 전반적인 안정성은 충분히 확보하고 있다.

4. 결 론

본 연구는 원지반의 조건에 따라 성토사면 내 지하수위의 형성과정 및 그 영향에 대해 분석하고 성토체의 안정성을 연구한 것이다. 원지반의 투수성이 성토체의 투수성과 유사한 경우에는 강우가 계속되는 동안 성토체에 체체 상부까지 지하수위가 형성되어 간극수압이 빠르게 상승하였다. 원지반의 투수성이 성토체의 투수성보다 10배 이상 큰 경우에는 성토체는 강우가 계속되어도 지하수위의 상승은 미미하였으며, 간극수압의 변화 역시 미미하였다.

강우종료 후 성토체내에서의 간극수압은 서서히 감소하였는데, 이때 간극수압의 감소속도에 대한 원지반의 투수성의 영향은 지반조건에 따라 크게 구별되지 않았다.

사면의 안정성은 원지반의 투수계수가 성토체보다 10배 이상 큰 경우 강우가 진행됨에 따라 안전율의 변화는 미미하였지만, 원지반의 투수계수가 성토체의 투수계수와 유사한 경우 지하수위가 빠르게 상승하여 사면 안정성은 크게 감소하였다. 한편 강우 종료 후 지하수위 하강에 따라 사면의 안정성은 서서히 증가하였다.

참 고 문 헌

1. 김영목, 최문희, 김만구, 박향근(2000), “강우시 도로 성토사면의 사면 불안정 해석 및 대책”, 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집(II), pp.163~166.
2. 김영목, 최문희, 박향근(2004), “호우시 도로성토사면의 사면불안정 분석”, 한국지반환경공학회 논문집, 제5권, 제3호, pp.41~50.
3. 류지협(1997), “불포화 화강풍화토의 투수 및 강도특성”, 동국대학교 대학원 공학박사 학위 논문.
4. 조성은, 이승래(2000), “강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석”, 한국지반공학회지, 제16권, 제1호, pp.51~64.
5. Kim, S. K., Hong, W. P., and Kim, Y. M.(1992), “Prediction of Rainfall Triggered Landslides in Korea”, Proc. 6th Int. Sym. on Landslides, Christchurch, New Zealand, 2 : pp.989~994.
6. Pradel, D., and Raad, G.(1993), “Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes”, Geotech. Eng., ASCE, Vol.119, No.2, pp.315~332.
7. Sakajo. S., and Kato. K.(1999), “Instability Analyses of Embankments on Tokaido-Shinkansen in Heavy Rainfalls”, Slope Stability Engineering, Yagi, Yamagami and Jiang. Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.527~532.