

실내모형실험을 통한 강우시 사면내 간극수압의 변화 탐구 Investigation of Pore Water Pressure Variation in Slope during Rainfall from Laboratory Model Tests

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 유한규²⁾, Han-Kyu Yoo, 강인규³⁾, In-Kyu Kang,
이혁진⁴⁾, Hyuk-Jin Lee

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept' of Civil Engineering, Hong-Ik Univ.

²⁾ 한양대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil & Environmental. Eng., Han-Yang Univ.

³⁾ (주)브니엘컨설턴트 책임, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

⁴⁾ 홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

SYNOPSIS : Landslides generally occur due to influences of the internal and external factors. Internal factors include ground characteristics, terrain and so on. External factors can also be divided into natural factors such as rainfall, ground water, earthquake and so on, and artificial factors resulting from cutting and embankments. Among these factors, rainfall becomes the most important external factors by means of which landslides occur in Korea. To appropriately deal with the effects of pore water pressures due to rainfall, the method using the pore water pressure ratio(r_u) is generally applied in slope stability analysis or the design of slope reinforcements. Since the value of r_u is in general not constant over the whole cross section, in most slope stability analyses the average values are used with little loss in accuracy. However, determination of the average values of r_u to applied in the design is difficult problem. Therefore, in this study, the average values of r_u according to the intensity of rainfall and slope inclination is suggested based on results of the small scaled model tests using the artificial rainfall apparatus. It is found from the model tests that the average values of r_u is about 0.07~0.18(in case of the intensity of rainfall is 50mm/hr.), about 0.10~0.28(in case of the intensity of rainfall is 100mm/hr.), and about 0.10~0.33(in case of the intensity of rainfall is 150mm/hr.).

Key words : Pore water pressure ratio, Artificial rainfall apparatus, Laboratory model tests

1. 서론

산사태는 토질 및 지형 등에 의한 내적요인과 외적요인으로 강우, 지하수, 지진 등의 자연적 요인 및 절·성토 등의 인위적 요인에 의해 발생된다. 우리나라의 경우에는 매년 7~9월 태풍 및 집중호우가 발생하는 시기에 산사태가 집중적으로 발생되고 있는 실정으로 강우가 산사태 발생의 가장 중요한 외적요인이다. 강우시 사면은 지반이 포화되면서 활동토피의 자중이 증가하고 강우의 침투로 인한 간극수압의 상승으로 지반내의 전단강도가 감소하여 사면의 전체 안정성이 저하된다. 따라서 강우시 사면안정해석 및 사면보강설계를 위해서는 간극수압의 증가에 의한 영향을 고려하여야 하며, 일반적으로 간극수압비(r_u)를 이용한 방법을 사용하고 있다. 그러나 강우시 사면내의 간극수압은 임의의 지점에 대해서 동일한 값을 갖지 않으므로 사면안정해석시 간극수압비는 가상 파괴면 내에 해당하는 간극수압비의 평균값을

사용하여야 하기 때문에 평균 간극수압비의 결정이 중요한 문제이다.

따라서 본 연구에서는 강우시 사면안정해석 및 사면보강설계에 있어서 평균 간극수압비의 결정을 위한 기초자료의 제공을 위해 폭 20cm, 높이 30cm, 길이 1m 크기의 토조를 제작하여 강우강도(50, 100, 150mm/hr.)의 변화와 사면경사(1:1.0, 1:1.2, 1:1.5, 1:1.8, 1:2.0)에 따른 사면내의 침투 거동 및 간극수압의 변화를 실험적으로 분석하여 실무차원에서 적용 가능한 평균 간극수압비를 제시하고자 한다.

2. 강우시 사면내의 변화

2.1 간극수압의 변화

강우시 사면내의 간극수압은 그림 1과 같이 강우초기에는 지표부근이 충분히 포화되지 않아 부(-)의 간극수압을 보이다가 강우가 지속되면서 습윤대(wetting band)가 점차 확산되어 지표부근에서는 양(+)의 간극수압을 나타내고 지하수위 부근은 모세관 효과(capillary effect)에 의해 부(-)의 간극수압을 나타낸다. 또한 강우가 지속됨에 따라 습윤대가 점차 깊어지면서 지하수위 상승이 발생한다.

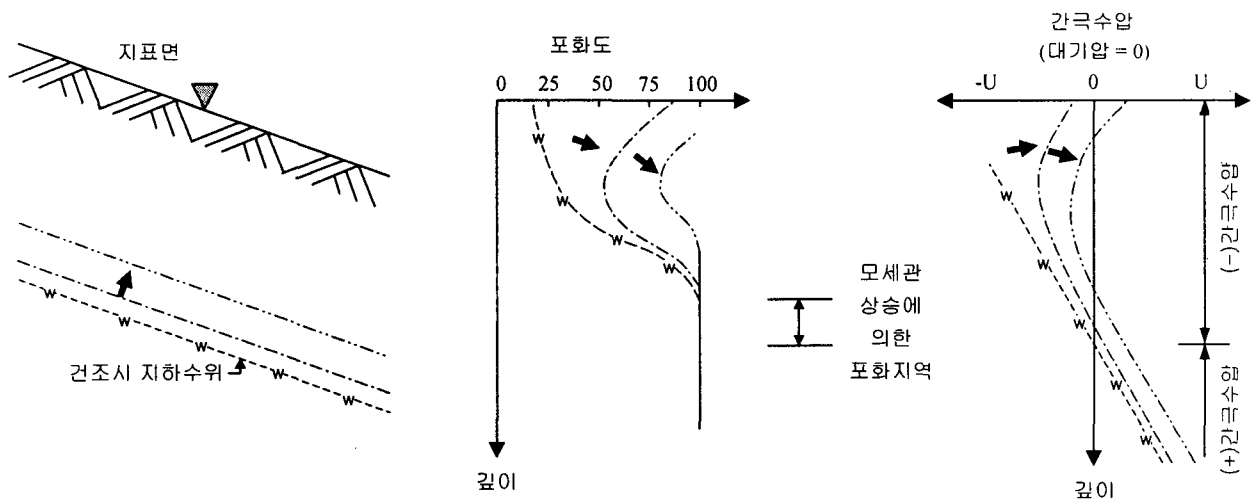


그림 1. 강우시 사면내의 간극수압(GEO, 2000)

사면안정해석시 강우로 인한 간극수압의 영향은 간극수압비를 이용하여 간편하게 고려할 수 있으며, 간극수압비(r_u)는 식(1)과 같이 사면내 임의의 깊이(z)에서 발생하는 간극수압(u)에 대한 전응력의 비로 정의된다.

$$r_u = \frac{u}{\gamma_t \cdot z} \quad (1)$$

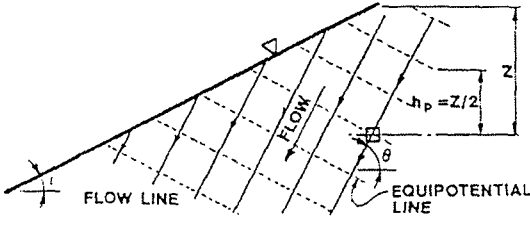
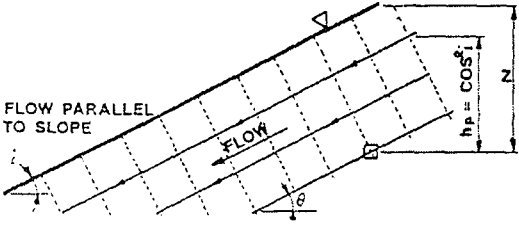
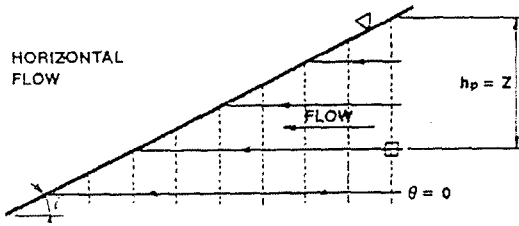
여기서, u : 사면내 임의의 깊이에서 발생하는 간극수압, γ_t : 토체의 습윤단위중량
 z : 지표에서 사면내 임의의 위치까지의 깊이

Lambe와 Silva-Tulla(1992)에 의하면 간극수압비의 크기는 유선이 직선일 경우 식(2)과 같이 계산할 수 있으며, 강우시 사면내의 침투양상에 따라 표 1과 같이 결정할 수 있다. 일반적으로 간극수압비는 0 (최소)~0.5(최대)의 범위의 값을 가지며 평균적으로 0.25를 사용한다(Turner, A. K. and Schuster R. L., 1996).

$$r_u = \frac{u}{z \cdot \gamma_t} = \frac{h_p \cdot \gamma_w}{z \cdot \gamma_t} = \frac{\gamma_w \cos i \cdot \cos \theta}{\gamma_t \cos(i - \theta)} \quad (2)$$

여기서, i : 사면경사, θ : 유선의 경사각

표 1. 침투양상에 따른 침투수의 판단기준(Lambe & Silva-Tulla, 1992)

침투 양상	간극수압비 (r_u)
	$v_t \cong 2v_w$ 일 경우 $r_u = \frac{h_p \cdot v_w}{Z \cdot v_t}$ $\cong \frac{(Z/2) \cdot v_w}{Z \cdot (2v_w)} = 0.25$
	$v_t \cong 2v_w, i=26.5^\circ$ 일 경우 $r_u = \frac{v_w \cos i \cdot \cos \theta}{v_t \cos(i-\theta)}$ $= \frac{\cos^2 i}{2} = \frac{\cos^2 26.5}{2}$ $= 0.40$
	$v_t \cong 2v_w, \theta=0^\circ$ 일 경우 $r_u = \frac{v_w \cos i \cdot \cos \theta}{v_t \cos(i-\theta)}$ $= 0.50$

2.2 습윤대(wetting band)의 두께

강우가 지속됨에 따라 사면내 토층은 깊이에 따라 포화도 분포양상이 그림 2와 같은 경향을 나타낸다. 강우로 인해 지표부근은 완전히 포화되어 포화도가 1.0에 접근하나 중력의 영향으로 깊이가 깊어짐에 따라 점차 감소하다가 일정깊이 이상에서는 일정한 포화도를 나타내며 습윤대(wetting band)를 형성한다. 강우가 지속되거나 중단될 경우에도 습윤대의 두께는 중력의 영향으로 점차 증가하다가 지하수위를 만나거나 투수계수가 낮은 지층에 도달하면 양의 간극수압을 나타내면서 지하수위를 상승시킨다. 또한 Lumb(1975)은 이와 같은 습윤대의 두께를 결정할 수 있는 간편식을 식(3)과 같이 제안한 바 있다.

$$h = \frac{k \cdot t}{n \cdot (S_f - S_0)} \quad (3)$$

여기서, h : 습윤대의 두께, n : 간극률
 S_0 : 강우전의 포화도, S_f : 강우후의 포화도
 k : 토층의 투수계수, t : 강우지속시간

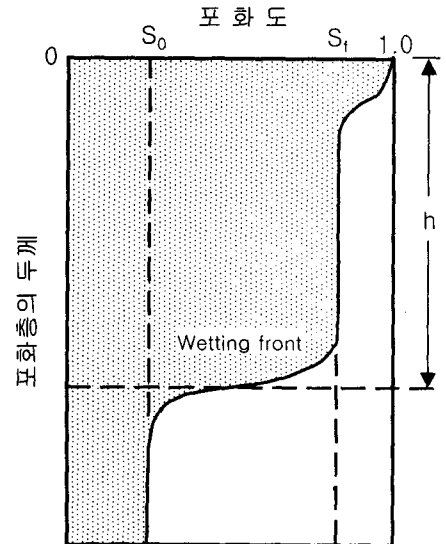


그림 2. 강우시 습윤대의 형성 (Lumb, 1975)

2.3 지하수위의 변화

강우시 사면내의 저류로 인한 지하수 상승은 식(4)과 같은 물수지방정식(Hydrologic Budget Equation)으로부터 예측할 수 있으며, 이를 도시화하면 그림 3과 같다.

$$\Delta H = P - E - Q_1 - Q_2 \pm S_t \quad (4)$$

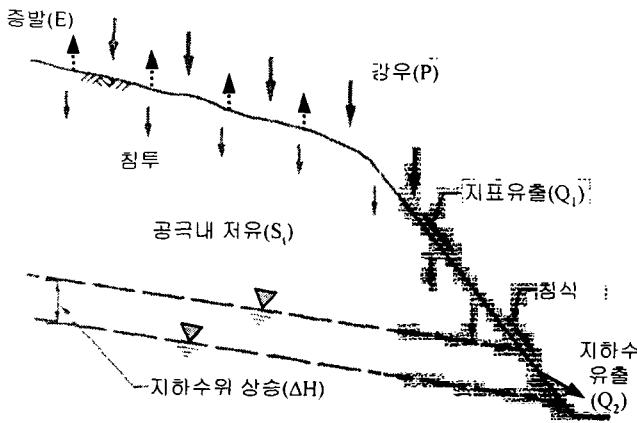


그림 3. 강우시 사면내의 변화

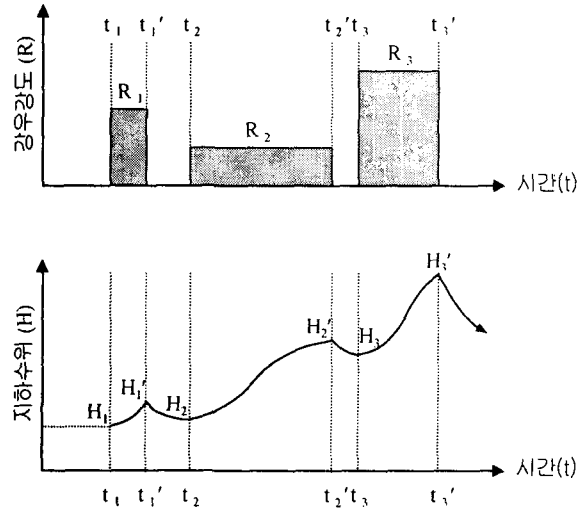


그림 4. 강우시 사면내의 지하수위 변화

또한 강우시 사면내의 지하수위 변화는 강우에 의한 지하수위변동 지연시간을 무시하면 그림 4와 같이 단순화하여 생각할 수 있으며, 강우중 및 강우후에 예상되는 지하수위의 변화량은 식(5)과 같이 간략하게 정리할 수 있다. 강우중의 지하수위는 실내모형실험결과 강우지속시간에 반비례하여 증가하는 경향을 나타내어 식(5)과 같이 단순화시킬 수 있다. 또한 Shin-Enokida(榎田)(1988)에 의하면 강우후의 지하수위는 관측정으로부터 관찰한 결과, 지하수위고(H)에 비례하여 지하수위가 감소하는 경향을 나타내므로 식(5)과 같이 단순화시킬 수 있다(申潤植, 1989).

$$\begin{aligned} \text{(강우중)} \quad & \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\rho_1}{t} \\ \text{(강우후)} \quad & -\frac{dH}{dt} = \rho_2 H \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ρ_1, ρ_2 는 비례상수로 지반의 투수계수(k), 강우강도(R), 사면경사(I)에 대한 함수로서 관측정 및 실내 또는 현장실험결과를 바탕으로 결정할 수 있으며, 식(5)으로부터 강우중 및 강우후의 지하수위는 식(6)과 같이 간략히 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{(강우중)} \quad & H = \rho_1 \ln(t-t_n) + H_n \quad (t_n < t \leq t_n') \\ \text{(강우후)} \quad & H = H_n' \cdot \exp(-\rho_2 t) \quad (t_n' < t \leq t_{n+1}) \end{aligned} \quad (6)$$

3. 실내모형실험

3.1 개요

실내모형 실험장치는 사진 1과 같이 저수조, 강우장치, 모형토조(폭×높이×길이=20cm×30cm×1m)

및 간극수압 측정장치로 등으로 구성되어 있으며, 우리나라의 7~9월중에 집중되는 강우를 재현하기 위하여 홍콩의 경우(GEO, 2000)를 참조하여 50~150mm/hr. 범위 내에서 강우강도를 결정하였다. 또한 사면경사는 국내 자연사면 및 성토사면의 전형적인 경사도인 1:1.0, 1:1.2, 1:1.5, 1:1.8 및 1:2.0으로 각각 변화시켜 실험을 수행하였으며, 발생하는 간극수압의 크기를 측정하기 위해 모형사면의 바닥에서 사면의 길이방향으로 111mm 씩 간격을 두어 총 8개의 tip을 일정한 간격으로 설치하였으며, 간극수압 측정위치에서의 토피고는 20cm로 하였다.

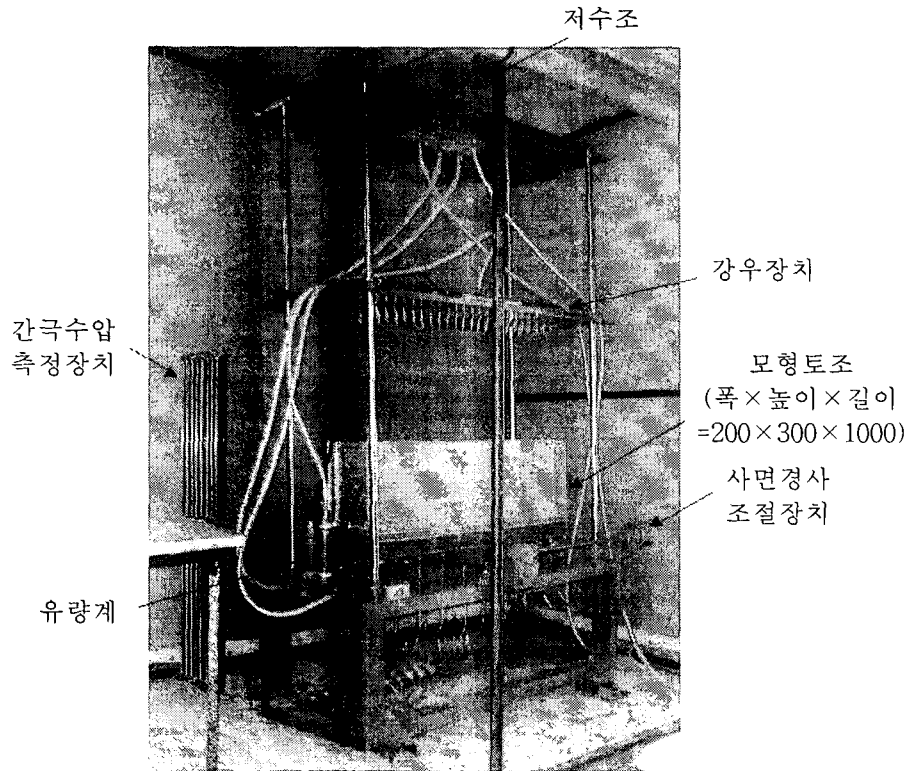


사진 1. 실내모형 실험장치

모형사면조성을 위한 토질재료는 실험상의 편의성과 국내 자연사면 및 성토사면의 토질특성을 반영할 수 있도록 화강풍화토와 주문진표준사를 1:1로 혼합한 복합토를 사용하였으며, 각 토질별 기본 불성치는 표 1과 같다.

표 1. 실내모형실험에 사용된 각 토질별 특성치

시 료	비 중	건조단위중량 (tf/m^3)	습윤단위중량 (tf/m^3)	공극률	투수계수 (cm/sec)
화강풍화토+표준사 (혼합비 1 : 1)	2.642	1.66	1.80	0.372	5.32×10^{-4}

3.2 실험결과

3.2.1 습윤대의 두께

제작된 모형사면에 대한 습윤대의 두께는 강우로 인한 표면에서의 토사유실이 발생하지 않은 상태에서 관찰하였다. 습윤대는 사면의 경사방향과 평행하게 진행됨을 알 수 있었으며, 모형사면(사면경사 1:2.0, 강우강도 50mm/hr.인 경우)에 대한 강우지속시간에 따른 사면내의 포화층 평균두께에 대한 실측

치와 식(3)에 의한 계산치와의 비교는 그림 5와 같다. 여기서, 습윤대의 두께 계산시 사용한 지반물성치는 표 1과 같으며, 강우 전·후에 대한 포화도의 차($S_f - S_0$)는 0.2~0.4로 하였다.

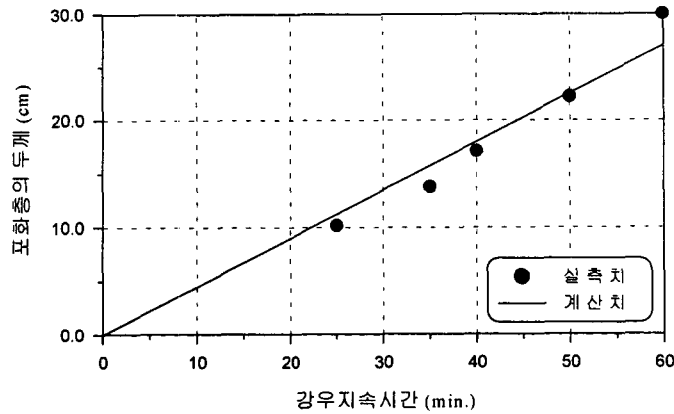
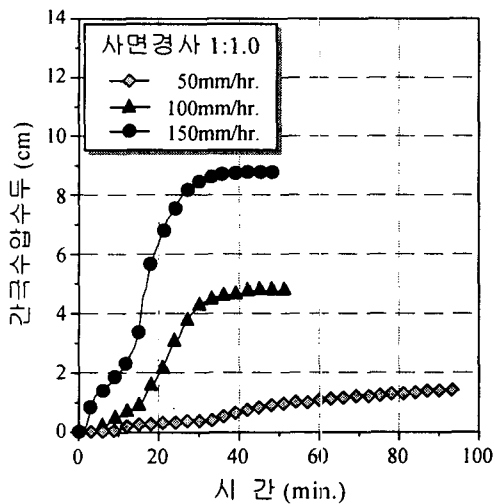


그림 5. 강우지속시간에 따른 침윤선의 진행

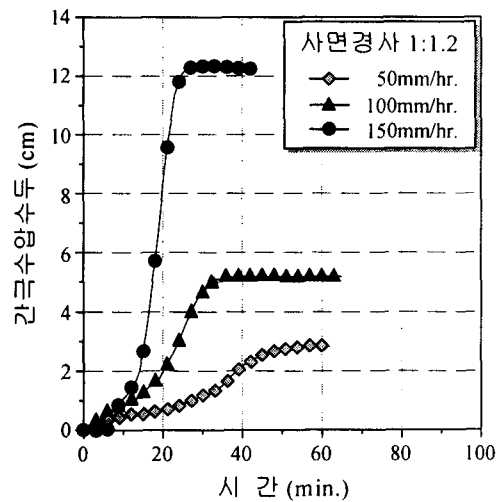
3.2.2 간극수압의 변화

본 실험에서 간극수압수두는 사면내에 설치된 tip으로부터 측정된 결과, 총 8개의 tip 중에서 사면 최하단 부분에 위치한 2개의 tip에서만 간극수압의 변화가 측정되었으며, 나머지 6개의 tip에서는 간극수압의 변화가 나타나지 않았다. 이는 모형사면의 경사로 인해 사면 최하단부에 위치한 2개의 tip내에서 자유수면대가 형성되기 때문인 것으로 나타났으며, 측정된 2개의 tip 중 최하단부에 설치된 tip은 배수공에 인접되어 있어 배수공으로 간극수가 빠르게 유출되면서 최소의 간극수압을 나타내었고 최하단부 바로 위쪽의 tip에서는 강우로 인해 형성된 자유수면대가 일정하게 유지되면서 최대의 간극수압을 나타냈다.

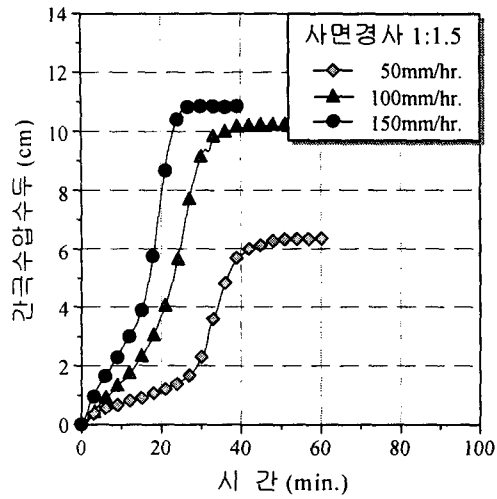
인공강우장치에 의한 강우강도 50~150mm/hr.에 대하여 사면경사 1:1.0~1:2.0인 경우에 사면내에서 측정된 2개의 tip 중 최대의 간극수압을 보이는 최하단부 바로 위쪽의 tip에서 측정된 간극수압수두를 정리하면 그림 6과 같다. 강우강도와 사면경사의 변화에 따른 간극수압의 변화양상은 그림 6에서 알 수 있듯이 강우강도가 커질수록 최대의 간극수압을 나타내는 사면경사가 점차 커지는 경향을 나타냈다.



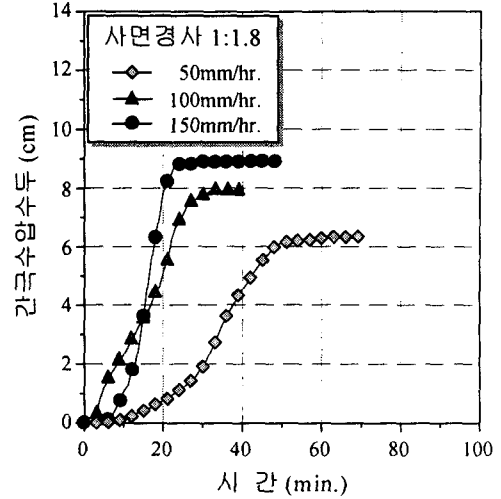
(a) 사면경사 1:1.0인 경우



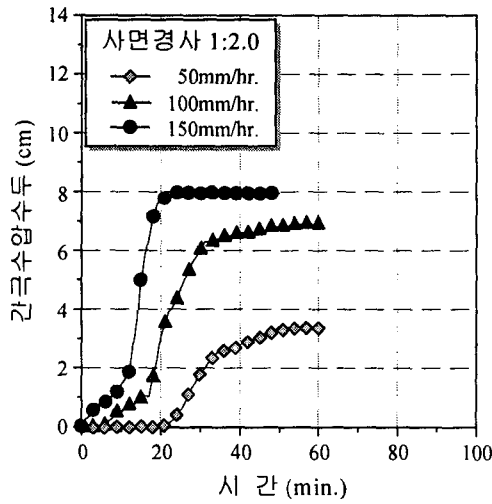
(b) 사면경사 1:1.2인 경우



(c) 사면경사 1:1.5인 경우



(d) 사면경사 1:1.8인 경우



(e) 사면경사 1:2.0인 경우

그림 6. 강우강도와 사면경사의 변화에 따른 간극수압수두의 변화

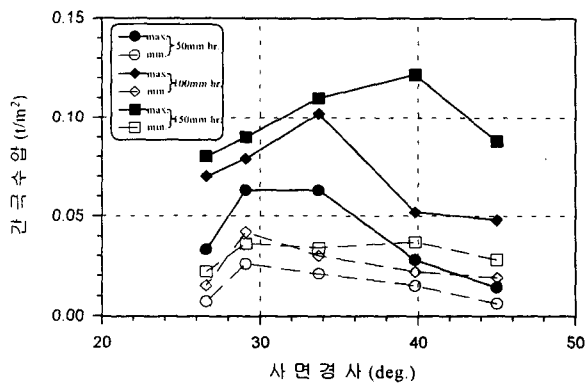


그림 7. 사면경사에 따른 간극수압의 변화

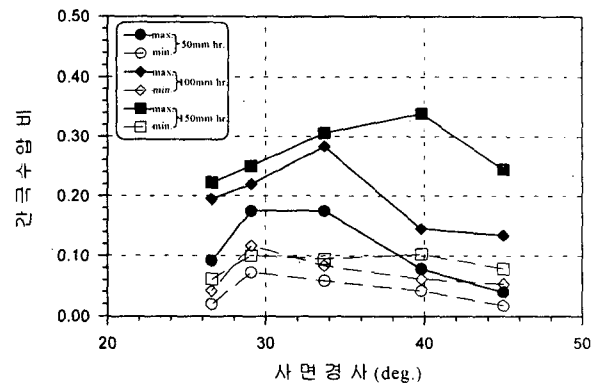


그림 8. 사면경사에 따른 간극수압비의 변화

또한 그림 6의 결과를 간극수압 및 간극수압비로 나타내면 그림 7 및 8과 같다. 여기서, 간극수압비의 계산시 토체의 습윤단위중량은 $1.8t/m^3$, 토피고는 0.2m를 적용하였으며, 강우강도에 따른 간극수압비의 크기를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

- 강우강도가 50mm/hr. 인 경우 : 측정된 간극수압비는 0.07~0.18
- 강우강도가 100mm/hr. 인 경우 : 측정된 간극수압비는 0.10~0.28
- 강우강도가 150mm/hr. 인 경우 : 측정된 간극수압비는 0.10~0.33

4. 요약 및 제언

- (1) 본 연구에서는 강우시 사면안정해석 및 사면보강설계에 있어서 평균 간극수압비의 결정을 위한 기초자료의 제공을 위해 폭 20cm, 높이 30cm, 길이 1m 크기의 토조를 제작하여 강우강도(50, 100, 150mm/hr.)의 변화와 사면경사(1:1.0, 1:1.2, 1:1.5, 1:1.8, 1:2.0)에 따른 사면내의 침투 거동 및 간극수압의 변화를 실험적으로 분석하여 실무차원에서 적용 가능한 평균 간극수압비를 제시하였다.
- (2) 집중호우 등 강우시 사면내부로의 침투거동을 살펴보기 위해 사면모형을 제작하여 실내실험을 실시하였으며, 본 실험에서는 강우강도 및 사면경사 등을 변화시켜 사면내 간극수압을 측정하여 분석하였다. 분석결과, 1) 강우강도가 50mm/hr.인 경우, 측정된 간극수압비는 0.07~0.18이며, 2) 강우강도가 100mm/hr.인 경우, 측정된 간극수압비는 0.10~0.28이고, 또한 3) 강우강도가 150mm/hr.인 경우, 측정된 간극수압비는 0.10~0.33으로 나타났다.
- (3) 향후 연구과제로 집중호우 등 강우시, 강우강도에 따라 임의의 시간 및 사면내부 임의의 지점에서의 지하수위 변화 예측모델에 관한 연구가 수행될 예정이다.

참고문헌

1. 김영목(1989), "강우시 무한사면의 침투거동", 박사학위논문. 동국대학교.
2. 행정자치부 국립방재연구소(2000), "사면붕괴 방지대책 제도화를 위한 기본방안 연구", pp. 67-92.
3. 中潤植(1989), *地滑り. I.學 -理論と實踐*, 山海堂, pp. 320-355.
4. Geotechnical Engineering Office(2000), *Geotechnical Manual for Slopes*, Civil Engineering Development Department, Hong Kong, 4th Ed., pp. 233-234.
5. Lambe, T. W. and Silva-Tulla(1992), "Stability Analysis of an Earth Slope", Proceedings of Stability and Performance of Slopes and Embankments-II, ASCE Specialty Conference, University of California, Berkeley, CA, pp. 27-67.
6. Lumb, P.(1975), "Slope Failure in Hong Kong", Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society of London, Vol. 8, 31-65.
7. Sangrey, D. A. and Harrop-Williams, K. O.(1984), "Predicting Ground-Water Response to Precipitation", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 110, No. 7, pp. 957-975.
8. Turner, A. K. and Schuster R. L.(1996), *Landslides Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report 247, National Academy Press, p. 521.