

강우로 인한 사면활동의 안정성 평가

Evaluation on the Landslide Stability Triggered by Rainfall

사봉 명*
Sagong, Myung

ABSTRACT

Rainfall induced landslides are disasters causing sever damage on the human life and the infrastructures. In this paper, a simplified procedure to evaluate the slope stability problems induced by rainfall by modifying the Iverson's pressure head dispersion model. The proposed approach extends the applicability of the Iverson's model in to the cases of higher rainfall intensity than the permeability of the soil by incorporating the existence of overland flow. In addition, the Manning equation is applied to calculated the depth of overland flow. From the calculated depth of overland flow, shear stress acting on the surface is included for the driving component triggering the landslides. From the analysis of a case study, the long term rainfall alters the stability of slope.

1. 서 론

국내에서 강우로 인한 사면의 활동은 여름철 태풍과 함께 동반하는 국지성 호우로 인하여 발생하는 경우가 많다. 강우로 인한 사면활동의 특징은 건조된 사면에서 관측되는 점진적인 활동양상 보다는 상대적으로 빠른 활동속도와 넓은 활동거리를 보이고 있다. 이러한 특성으로 인하여 강우로 인한 사면의 활동은 인명 및 주변구조물에 상당한 영향을 미치고 있다. 특히 2002년과 2003년에 발생한 태풍 루사와 메미로 인한 장마기간의 누적강우량은 평년에 비해 1~2배 증가하는 양상을 보였으며 특히 사면의 활동으로 인한 인명의 피해의 비율 또한 낮지 않으며 증가하는 추세다(박 등, 2004).

사면의 안정성에 대한 인자중 강우와 관련된 인자는 사면활동에 큰 영향을 미치는데 특히 강우인자중 누적강우량과 시간당 강우강도는 흙사면의 안정성에 큰 영향을 끼친다. 강우가 침투되기 이전 상태에서 사면 내 흙은 불포화상태이므로 흙의 간극수압분포(흡입력)를 나타낼 것이나, 강우가 시작되면서 침투가 발생하며 이에 따라 체적함수량과 간극수압은 증가하는 방향으로 진행된다. 이때 강우강도가 침투율보다 큰 경우 일부 강우는 표면 유출수가 되어 지표면을 따라 흐를 것이며, 일부는 지중으로 침투할 것이다. 이러한 침투과정으로 인하여 지반의 전단강도는 결국 감소하게 되며, 사면내 흙의 공학적 특성과 강우패턴에 따라 천층의 토석류의 흐름에서부터 심층의 고전적인 사면활동 양상까지 서로 다른 활동패턴이 발생할 수 있다. 따라서 강우로 인한 사면의 거동은 사면의 제원과 공학적 특성 그리고 수문학적 특성에 의존한다. 결국 사면의 안정성 평가시 이상의 요소에 대한 고려가 필요하다. 본 논문에서는 사면의 제원과 수문학적인 모델 그리고 토양침식을 고려한 사면의 안정성 평가 기법을 제시하고자 한다.

* 한국철도기술연구원 국토토목연구본부 비회원

2. 기존모델에 대한 고찰

경사지에서 강우로 인한 침투모델에 대해서는 토양학과 표면 수리학 분야 등에서 여러 기법이 제안되었으나(Green과 Ampt, 1911, Mein과 Larson, 1973), 본 논문에서는 지반 공학적인 관점에서 제시된 Iverson(2000)과 Cho와 Lee(2003) 모델을 중심으로 논의하고자 한다. 이 두 모델은 다른 접근방법을 보이고 있는데 사면의 심도별 압력수두를 제공하는 Iverson의 모델과 침투로 인한 포화침도를 제공하는 Cho와 Lee의 모델을 비교·고찰하고자 한다.

2.1 Iverson 모델

Iverson 모델은 부정류 불포화 상태에서 다공성 매질내 흐름을 위한 Richard 공식을 이용하여 깊이별 간극수압의 분포를 나타낸다. Iverson 모델은 Richard 공식을 정리하여 간극수압의 확산을 시간과 깊이에 따른 함수로 표현하였다. Iverson이 제안하는 간극수두(수압)의 계산은 아래와 같이 강우지속시간 이전과 이후로 구분할 수 있다.

$$-\frac{\psi}{Z}(Z, t \leq T) = \beta(1 - \frac{d}{Z}) + \frac{I_Z}{K_Z}[R(t^*)] \quad (1)$$

$$-\frac{\psi}{Z}(Z, t > T) = \beta(1 - \frac{d}{Z}) + \frac{I_Z}{K_Z}[R(t^*) - R(t^* - T^*)] \quad (2)$$

여기서 ψ 는 간극수두, Z 연직방향 심도, T 강우지속시간, $\beta = Z \cos \alpha^2$, a 사면의 경사각, a 사면의 표면에서 지하수위 심도, 강우강도와 연직방향 투수계수의 비이며, t^*

T^* , $R(t^*)$ 는 아래와 같이 나타내었다.

$$t^* = \frac{t}{\frac{Z^2}{4 D_0^* \cos^2 \alpha}} \quad (3)$$

$$T^* = \frac{T}{\frac{Z^2}{4 D_0^* \cos^2 \alpha}} \quad (4)$$

$$R(t^*) = \sqrt{t^*/\pi} \exp(-1/t^*) - \operatorname{erfc}(1/\sqrt{t^*}) \quad (5)$$

$$D_0^* = 4 D_0 \cos^2 \alpha \quad (6)$$

식 (3)과 (4)는 정규화된 시간을 나타내며 식 (5)는 정규화된 시간에 의존적인 수두응답함수이다. 결국 식 (1)과 (2)를 통하여 사면내 압력수두의 계산이 가능한데, 이때 요구되는

변수로서는 수두응답함수 $R(t^*)$, 초기압력수두분포, 정규화된 강우강도 $\frac{I_Z}{K_Z}$, 그리고

정규화된 강우지속시간 T^* 이 필요하다.

그림 1은 심도 6m의 사면에서 지하수위고가 사면의 표면으로부터 2m 아래에 위치한 점토성 사면에 강우강도(I)가 0.0036m/h인 경우 압력수두의 시간과 깊이에 따른 변화를 보이고 있다. 사면내 흙의 투수계수(K)는 0.0036m/h이며 확산계수(D_0)는 0.0036²/h, 점

착력 4kN, 내부마찰각 20°, 그리고 포화단위중량은 22kN/m³을 적용하였다. 이상의 값들을 아래의 공식에 적용하여 각 깊이별 안전율을 계산할 수 있으며 그림으로 나타내면 그림 2와 같다.

$$FS = F_f + F_w + F_c \quad (7)$$

$$F_f = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \quad F_w = \frac{-\Psi(Z, t) \gamma_w \tan \phi}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad F_c = \frac{c}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha}$$

식 (7)은 압력수두 값을 직접 안전율 계산에 대입하므로 무한사면 조건에서 사면의 길이 방향으로의 흐름을 가정하지 않아 완전히 포화된 경우에 비해 보다 실질적인 안전율 값을 제공한다.

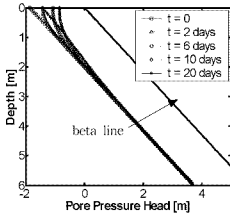


그림 1. 깊이에 따른 압력수두 분포

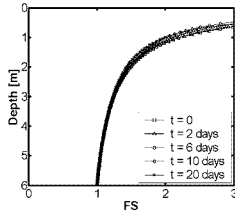


그림 2. 깊이에 따른 안전율의 변화

그림 1은 깊이에 따른 압력분포를 보이고 있는데 강우강도가 흙의 투수계수보다 할 경우나 강우가 오래 지속될 경우 저류가 발생하며 이로 인하여 과도한 압력수두의 분포를 나타낼 때가 있다. 이러한 경우에는 압력수두의 분포는 그림 1의 beta line 이상의 값을 보일 수 없으므로 beta line을 최대 상한값으로 한다.

2.2 Cho와 Lee 모델

Cho와 Lee(2002)는 Green-Ampt의 일차원 침투이론과 Mein과 Larson(1973)의 모델을 이용하여 강우로 인한 침윤선단부의 깊이를 도출하였다. 도출한 침윤선단부 깊이까지는 완전히 포화가 발생한 것으로 가정하였다. Cho와 Lee(2003)의 모델은 도출된 침윤선단부 깊이가 사면의 제원 및 흙의 공학적 특성값을 식(8)에 대입하여 안전율을 산정하는 방법을 취하고 있다.

$$F_s = \frac{c + (\gamma_f Z \cos^2 \alpha - u_w) \tan \phi}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (8)$$

Cho와 Lee(2002)의 모델은 손쉽게 포화선단부의 계산과 강우를 고려한 사면의 안정성 평가를 수행 할 수 있다. 그러나 포화선단부의 후면을 완전히 포화된 상태로 가정하여 정수역학조건으로 가정함으로써 보수적인 결과를 낳을 수도 있다. 포화선단부의 후면은 인

장-포화상태를 유지하고 있어 그림 1과 같이 흙의 압력수두를 유지하는 경우도 있다.

3. 유출수와 침투를 고려한 사면해석

본 연구에서는 확산모델을 사용한 Iverson(2000)의 모델은 이용하여 강우강도가 사면의 투수계수보다 큰 조건에 대해서도 적용이 가능하도록 수정하고자 한다. 강우강도가 흙의 침투율보다 큰 경우에는 어느 정도 수심을 가진 표면유출수가 발생하게 된다. 따라서 사면의 표면에서는 유출수의 심도에 해당하는 만큼의 수두가 작용하게 된다. 또한 표면유출수의 발생으로 인하여 사면의 표면에서는 흐름방향으로의 전단응력이 발생할 것이다. 이러한 점들을 반영하기 위하여 우선 강우강도, 사면의 재원 및 흙의 특성을 고려하여 표면 유출수의 심도를 계산하면 다음과 같다.

본 제안에서는 흙의 침투율이 누적침투량에 따라 변화하므로 침투율의 최소값인 포화투수계수를 적용하고자 한다. 포화투수계수의 적용은 표면유출수의 심도를 실제보다 높게 평가하여 결과적으로 보수적인 안전율을 도출한다. 강우강도가 포화투수계수보다 큰 경우 사면의 표면을 흐르는 단위 폭당 유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$q = (I - f) \times \cos \alpha \times t \quad (9)$$

여기서, t 는 강우지속시간을 나타내며, $(I - f)$ 는 연직방향으로의 유량을 나타내므로 경사를 고려하기 위하여 $\cos \alpha$ 를 곱하였다. 또한 연속방정식을 적용하면

$$q = a \times v = h_w \times v \quad (10)$$

여기서 a 는 통수단면적, v 는 표면유출수의 유속 그리고 h_w 는 표면유출수의 심도를 의미한다. 단위폭에 대한 유량을 계산할 경우 a 는 표면유출수의 심도(h_w)로 바꿀 수 있다. 또한 일정한 표면의 조도를 가지는 도관에서의 흐름에 대한 유속은 Manning 공식을 적용할 수 있다.

$$v = \frac{h_w^{0.67} (\sin \alpha)^{0.5}}{n} \quad (11)$$

여기서 n 은 조도계수이다. 식(11)을 식 (10)에 대입하면

$$q = \frac{h_w^{1.67} (\sin \alpha)^{0.5}}{n} \quad (12)$$

위의 식을 h_w 항으로 정리를 하면

$$h_w = \left[\frac{qn}{\sin \alpha^{0.5}} \right]^{0.6} = \left[\frac{(I - K_{sat})n \times \cos \alpha \times t}{\sin \alpha^{0.5}} \right]^{0.6} \quad (13)$$

로 표현할 수 있다. 침투율은 앞서 언급한바와 같이 포화투수계수로 대체하였다.

이때 표면유출수로 인하여 사면의 표면에 작용하는 전단응력은

$$\tau = \gamma_w \times h_w \times \sin \alpha \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (13)을 식 (14)에 대입하면

$$\tau = \gamma_w \times \left[(I - K_{sat})n \times \cos \alpha \times t \right]^{0.6} \times (\sin \alpha)^{0.7} \quad (15)$$

로 나타낼 수 있으며 무한사면조건에서 증력에 저항하는 전단장도는

$$\tau_R = c + \sigma \tan \phi = c + (\sigma - u) \tan \phi = c + (\gamma_s Z \cos \alpha^2 - \Psi(Z, t) \gamma_w) \tan \phi \quad (16)$$

이에 반해 표면유출수와 증력으로 인한 전단응력은

$$\tau_D = (\gamma_s Z + \gamma_w h_w) \cos \alpha \sin \alpha + \gamma_w [(I - K_{sp}) n \times \cos \alpha^2]^{0.6} \times (\sin \alpha)^{0.7} \quad (17)$$

따라서 안전율은 식 (16)과 식 (17)을 사용하여 아래와 같이 구할 수 있다

$$FS = \frac{c + ((\gamma_s Z + \gamma_w h_w) \cos \alpha^2 - \Psi(Z, t) \gamma_w) \tan \phi}{\gamma_s Z \cos \alpha \sin \alpha + \gamma_w [(I - K_{sp}) n \times \cos \alpha^2]^{0.6} \times (\sin \alpha)^{0.7}} \quad (18)$$

4. 적용예제

본 절에서는 3절에서 제안한 방법을 적용한 예제를 통하여 본 연구에서 제안하는 방법을 검증하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 방법이 저류가 발생하는 조건인 강우강도가 포화투수계수보다 큰 경우에 해당하므로 이에 상응하는 조건에 대하여 논의하고자 한다.

가급적 그림 1에서 적용한 조건과 유사하게 적용하여 사면의 경사 15° 심도 6m의 사면에서 지하수위고가 사면의 표면으로부터 2m 아래에 위치한 점토성 사면을 대상으로 하며, 사면내 흙의 포화투수계수는 0.00018m/h, 평균투수계수는 0.00036m/h, 확산계수 0.0036m²/h, 점착력 2kN, 내부마찰각 20°, 포화단위중량 22kN/m³, 그리고 Manning 조도 계수 0.025를 적용하였다. 이러한 조건에서 이때 강우강도 0.0036m/h로 2, 6, 10, 20일간 비가 내릴 경우에 대하여 사면내 압력수두와 안전율은 그림 3, 4와 같다.

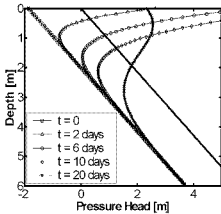


그림 3 압력수두의 분포

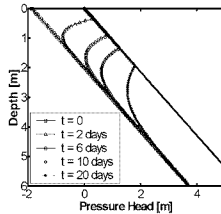
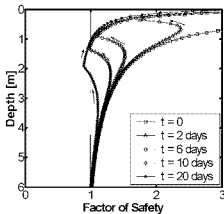


그림 4 beta line을 고려한 압력수두의 분포

그림 3은 상기 언급된 조건을 Iverson의 모델에 대입하여 구해진 수두의 결과이다. 이 결과는 강우강도와 포화투수계수의 비는 10인 조건에서 도출된 것으로서 Iverson이 제안하는 값의 범위를 넘어선다. 따라서 시간이 증가함에 따라 압력수두는 물리적으로 가능한 값을 나타내는 beta line을 넘어선다. 여기서 beta line은 사면내 흙이 완전히 포화되어 사면내 흐름이 발생하는 조건을 의미하는 것으로서 beta line은 $(h_w + Z) \times \cos \alpha^2$ 의 식으로 나타낼 수 있다. 그림 4는 beta line을 고려한 압력수두의 분포를 나타내는 것으로서 beta



도 누적강우량으로 인하여 다른 값의 안전율을 보인다.

line 이상의 압력수두 값은 각 깊이에서의 beta line의 값으로 가정하였다.

이상의 방법으로 구해진 압력수두를 식 (18)에 적용하여 구한 깊이에 따른 안전율은 다음과 같다. 초기 상태에서는 전 깊이에 대해서 안전율이 1보다 큰 상태이었으나 강우가 20일 이상 지속됨에 따라 안전율이 1 보다 작은 경우가 나타난다. 그림 4에서 나타낸 바와 같이 사면의 표면근처에서 압력수두가 동일할

5. 결론

본 논문에서는 Iverson의 압력수두 확산모델과 저류가 발생할 시 표면침식을 고려한 강우로 인한 사면의 안정성 평가 기법을 제시하였다. 사면의 안정성 평가에 있어 강우강도가 높은 포화투수계수보다 큰 경우와 작은 경우를 구분하여 적은 경우에는 Iverson(2000)이 제안하는 모델을 사용할 수 있으며 강우강도가 포화투수계수보다 클 경우에는 본 연구에서 제안하는 방법을 적용할 수 있을 것이다. 강우강도가 포화투수계수 보다 클 경우에는 사면의 표면에 저류가 발생할 것이며 이 저류의 깊이는 시간이 지남에 따라 증가할 것이다. 따라서 본 논문에서는 Manning의 공식을 적용하여 표면유출수의 심도를 계산하였으며 표면유출수의 발생으로 인한 사면의 표면에 발생하는 전단응력을 안정성 평가 절차에 포함하였다.

6. 참고문헌

1. 박덕근, 김태훈, 오정립(2004), "사면재해로 인한 인명피해현황 및 관리방안," 한국지반공학회 2004년 사면안정 학술발표회, pp. 89-100.
2. S. E. Cho and S. R. Lee(2002), "Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics," J. Geotech. Geoenv. Eng. Vol. 128. NO. 9, pp.756-763
3. W. H. Green and G. A. Ampt(1911), "Studies of soil Physics I. The flow of air and water through soil," J. Agric. Sci. Vol. 4. pp.1-24.
4. R. M. Iverson(2000), "Landslide triggering by rain infiltration," Water Res. Res. Vol.36. No.17. pp.1897-1910
5. R. G. Mein and C. L. Larson(1973), "Modeling infiltration during a steady rain," Water Resour. Res. Vol.9 No. 2, pp.384-394