

사면안정해석을 위한 설계강우 산정과 적용방안 Design Rainfall for Slope Stability Analysis and Its Application

김경석¹⁾, Kyung-Suk Kim, 장현익²⁾, Hyun-Ick Jang, 정충기³⁾, Choong Ki Chung

1) 한국도로공사 전임연구원, 공학석사, Researcher, Korea Expressway Corporation.

2) 한국도로공사 책임연구원, 공학박사, Chief Researcher, Korea Expressway Corporation.

3) 서울대학교 건설환경공학부, 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng. Seoul Nat. Univ.

SYNOPSIS : Recently, slope stability analysis in current design criteria is criticized for its unrealistic assumption of groundwater table and slope stability analysis incorporating seepage analysis considering rainfall is gaining a recognition as an alternative. However, a reasonable method for determining the rainfall used in the seepage analysis has not yet been established. Rainfall input for seepage analysis is a time series of rainfall and is similar to the hyetograph which is usually obtained from hydrology. In this paper a method to obtain the hyetograph from the intensity-duration-frequency is proposed. The resulting hyetograph can be used in the in the slope design stage. Also some considerations for practical application of slope stability analysis considering the rainfall is included.

Key words : slope stability analysis, seepage analysis, hyetograph, intensity-duration-frequency curve

1. 서 론

사면안정해석에서 지하수는 해석결과에 매우 큰 영향을 주지만 설계에서는 사면이 지표면까지 지하수로 포화되거나 또는 표면에서 일정심도까지 포화된 상태로 가정하여 해석하고 있어 비현실적이라는 문제가 지속적으로 제기되고 있다(이승래 등, 2008). 강우에 의해 지중에 발생하는 간극수압을 실험적 또는 실제 측정된 사례나 해석사례에 의하면 종래의 설계에서 가정하는 사면의 완전포화와 정수위 조건은 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 이러한 문제제기에 타당성을 더해주고 있다(김상규 외, 1991; 이인모 외, 2003; 김경석 외, 2006). 최근 강우시 사면파괴원인과 메커니즘을 규명하고자 하는 연구가 국내 외적으로 많이 수행되었고 강우를 고려한 침투해석과 안정해석을 수행함으로써 강우 시 발생하는 지하수위를 합리적으로 고려하여 안정해석을 하고자 하는 시도가 있어 왔으며, 현재는 이러한 해석을 쉽게 수행할 수 있는 틀이 개발되어 합리적인 결과를 도출 할 수 있는 단계에 와 있다.

하지만 강우를 고려한 사면안정해석이 종래의 지하수위 가정을 통한 해석보다는 합리적인 방법으로 간주되지만 이 방법이 실용적으로 적용되기 위해서는 해석에 적용하는 강우를 어떻게 적용해야 하는지에 대한 합당한 방법론이 필요하다. 이는 해석에 적용하는 강우조건에 따라 지하수의 형성이 달라질 수 있으며 안정해석 결과의 차이로 이어질 있기 때문이다. 기존 연구에서는 강우시 파괴사례의 원인을 규명하기 위해 실측 강우를 이용하여 해석하는 경우가 있지만 설계단계에서 강우시의 사면안정해석을 위해서는 적용하는 강우를 구하는 방법에 대한 구체적인 기준이 필요하다고 볼 수 있다.

이와 같은 배경에서 본 논문에서는 국내 강우 특성과 사면파괴를 유발하는 강우기준을 고찰하고 강우를 고려한 사면안정해석에서 사용할 수 있는 입력강우를 구하는 방법을 제시하고자 하였다. 또한 강우를 고려한 사면안정해석의 적용방안을 포괄적으로 고찰하여 보았다.

2. 강우를 고려한 사면안정해석방법

설계 강우를 결정하기 위해서는 이를 이용하는 사면안정 해석방법에 대한 이해가 필요하다. 강우를 고려한 사면안정해석방법은 침투해석과 안정해석의 고려방법에 따라 다양한 방법들이 이용되고 있는데, 수리지질역학적 연동해석(coupled hydro-geomechanical analysis)을 수행하여 강우침투현상과 응력 및 변위분포를 동시에 해석하는 방법에서부터(김준모, 2002; Cho, 2001; Cai, 1998) 1차원 침투와 무한사면해석을 이용하여 수학적으로 해석할 수 있는 방법도 있다(Iverson, 2000; 조성은, 2000). 가장 보편적으로 사용되는 방법은 2차원 침투해석을 통해 지중의 간극수압분포를 구하고 이를 종래의 한계평형기법에 기반한 사면안정해석방법을 이용하는 것이다(Fredlund and Rahadjo, 1993; 유충식, 2005). 이 논문에서는 침투해석결과를 이용하여 한계평형해석을 수행하는 방법을 대상으로 하였으며 해석방법에 대해서 다음 절에 간략히 정리하였다.

2.1 해석방법 고찰

침투해석과 사면안정해석은 별도의 단계로 이루어진다. 침투해석은 지반의 포화상태 또는 불포화상태를 고려하여 해석대상 영역의 간극수압분포(pore water pressure distribution)를 계산하는 과정이며 불포화상태를 고려할 경우에는 불포화 상태를 나타내는 함수특성, 투수계수를 정의하기 위한 매개변수를 추가로 필요하다.

침투해석을 위한 지배방정식은 식(1)과 같이 포화 및 불포화영역내의 물의 흐름(Darcy법칙)과 연속방정식으로부터 유도한 식을 이용하게 되며(Richards, 1993) 유한요소해석이나 유한차분해석을 통해서 간극수압분포를 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(\psi) \frac{\partial h_w}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \left(1 + \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) \right\} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, ψ 는 간극수압(양의 간극수압과 음의 간극수압-모관흡수력-을 포함, kPa), h_w 는 압력수두(= ψ/γ_w), θ 는 체적함수비(= V_w/V , 단위체적내 물의 부피비), $K(\psi)$ 는 포화, 불포화 상태에서의 투수계수.

해석을 위해서는 대상지반의 포화상태 체적함수비(θ_s), 투수계수(K_s)뿐만 아니라 불포화상태에서의 체적함수비(θ)-간극수압(ψ)관계의 변화량($\partial\theta/\partial\psi$)과 투수계수함수($K(\psi)$)가 필요한데, 체적함수비-간극수압관계는 흙-수분특성곡선(SWCC, soil water characteristic curve)이라고 부르는 관계식의 매개변수를 시험적으로 구하여 결정하며 van Genuchten(1980), Fredlund & Xing(1994) 등이 제안한 대표적인 관계식을 이용할 수 있다. 불포화 투수계수는 시험이 매우 까다롭고 장시간이 소요되므로 이론적으로 유도된 적분방정식과 함수특성곡선을 이용하여 구하게 된다. 식(2)와 식(3)은 van Genuchten(1980)이 제안한 함수특성곡선과 불포화투수계수식을 나타낸 것이며 시험 결과를 이 식으로 회귀 분석하여 매개변수 α , n , m 를 구하여 결정한다.

$$\text{함수특성곡선: } \theta(\psi) = \theta_n + (\theta_s - \theta_n) \left\{ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right\}^m \quad (2)$$

$$\text{불포화투수계수 } K(\psi) = K_s \cdot \frac{[1 - (\alpha\psi)^{n-1} \{1 + (\alpha\psi)^n\}^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}} \quad (3)$$

사면안정해석은 침투해석으로부터 계산한 간극수압분포를 종래의 한계평형해석기법에 포함시켜 수행하며 불포화 영역에서의 전단강도 증가량을 고려하기 위하여 식(4)와 같이 Fredlund(1977)가 정의한 전단강도를 이용한다. 하지만 보수적인 안정해석결과를 위해서 불포화상태의 전단강도 증가량을 고려하

지 않기도 한다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi_b' \quad (4)$$

여기서, c' 는 유효점착력, ϕ' :유효내부마찰각, $(\sigma - u_a)$: 순연직응력 (net normal stress), $(u_a - u_w)$: 흡인력 (matric suction), ϕ_b' : 흡인력에 의한 마찰각을 나타낸다.

사면에서와 같이 대기과 접한 경우에 공기압(u_a)은 0으로 간주할 수 있으며, 지반이 포화상태($u_a=0$, $u_w \geq 0$, $\phi' = \phi_b'$)인 경우에 Terzaghi의 유효응력($\sigma - u_w$)으로 정의되는 전단강도식과 동일해진다.

불포화 영역에서의 함수특성과 투수특성 그리고 전단강도는 일반적으로 비선형적인 관계를 나타내며 이를 수작업으로 단순하게 해석하기는 거의 불가능하므로 대부분 컴퓨터로 전산화된 방법을 사용하게 되는데 Geo-Slope International사에서 개발된 상용프로그램인 SEEP/w와 Slope/W를 이용하고 있다.

2.2 해석조건과 강우 침투현상의 이해

강우를 고려한 침투해석은 기본적으로 부정류해석(transient analysis)이며 해석대상 영역내의 초기조건과 경계조건을 설정하고 시간에 따른 해석을 수행하여 시간에 따른 영역내 간극수압분포 변화를 구하게 된다.

초기조건은 해석의 시작단계에서 해석영역 내에 존재하는 초기 간극수압분포를 설정하는 것인데 실제 사면내에 존재하는 간극수압분포를 해석에 이용하기에는 현실적으로 한계가 있으며, 실용적으로는 초기 간극수압 분포를 가정하거나 또는 영역경계 및 영역내에서의 특정 지점에서 간극수압분포 또는 지하수위를 측정(또는 가정한 값)하고 정상상태해석을 수행해서 구하여 초기조건으로 이용하게 된다. 특정 지점의 간극수압 분포는 현장에서 측정한 함수비와 시험적으로 구한 함수특성곡선에서 구할 수 있다.

해석단계에서 강우는 사면표면에 경계조건으로 설정하게 되는데 강우의 침투현상을 해석에 올바르게 적용하기 위해서는 경계조건의 설정방법을 이해할 필요가 있다. 강우는 시간에 따른 강우량을 사면표면에서 단위시간당 유량(unit flux, m/sec)으로 가하게 되는데, 사면내로 침투되는 시간당 강우는 흙의 침투능(infiltration capacity)보다 클 수가 없다. 흙의 침투능은 사면표면에서의 강우의 침투량으로서 식(5)와 같이 불포화투수계수와 동수경사를 고려한 Darcy flux로 나타낼 수 있다.

$$\text{Infiltration rate} = K(\psi) \frac{\partial H}{\partial z} = K(\psi) \left\{ \frac{\partial(z + h_w)}{\partial z} \right\} = K(\psi) \left\{ 1 + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right\} \quad (5)$$

초기에 흙은 불포화상태로 존재하며 지표면 근처에서는 증발에 의해 더 큰 불포화상태가 유지되는 것으로 간주할 수 있다. 만약 지하수위면 위에서 지표면까지 선형적으로 (-)간극수압이 분포하고 있다면 심도에 따른 전응력의 차이는 0으로서 평형상태에 있지만 강우로 인하여 지표면이 포화되기 시작하면 지표면과 바로 아래의 흙 사이에는 큰 전수두의 차이가 발생하며 식(5)에서 동수경사(hydraulic gradient, $\partial H/\partial z$)값이 증가하므로 초기에는 비교적 큰 침투가 발생하지만 시간이 경과하여 표면이 포화되고 습윤대가 진행되어 지반이 포화되면 심도에 따른 흡인력의 차이($\partial \psi/\partial z$)가 0이 되어 위치수두에 의해서만 침투가 발생하게 되며 침투능은 포화투수계수(K_s)와 같게 된다. 투수계수 측면에서 보면 건조한 상태에서는 불포화투수계수가 작으므로 침투량이 작지만 점차 포화가 되기 시작하면 투수계수는 포화투수계수와 동일하게 되어 침투량이 증가하게 된다. 즉, 강우에 의한 침투량은 동수경사와 투수계수의 곱으로 표현되며 초기에는 침투량이 크지만 침투가 진행되면서 점차적으로 감소하고 포화가 되면 포화투수계수와 같아지게 된다.

해석에서는 경계조건으로 강우강도를 flux로 설정하지만 표면이 포화된 이후에도 침투능보다 큰 강우가 지반내로 침투되지 않도록 하는 조건을 필요하며 표면이 포화에 도달한 이후에는 강우 경계조건이 압력수두가 0인 상태로 변화되어 침투가 더 이상 발생하지 않게 된다. 또한 해석 중 사면내로 침투된

강우가 침투수로 변화되어 사면경계 외부로 흘러나오게 되는 위치에서도 강우의 침투가 이루어지지 않으며 경계조건이 압력수두 = 0인 상태로 변화되어 더 이상의 강우침투가 발생하지 않게 된다. 그림 1에는 강우침투해석 시 설정하는 경계조건의 적용 예를 나타내었다.

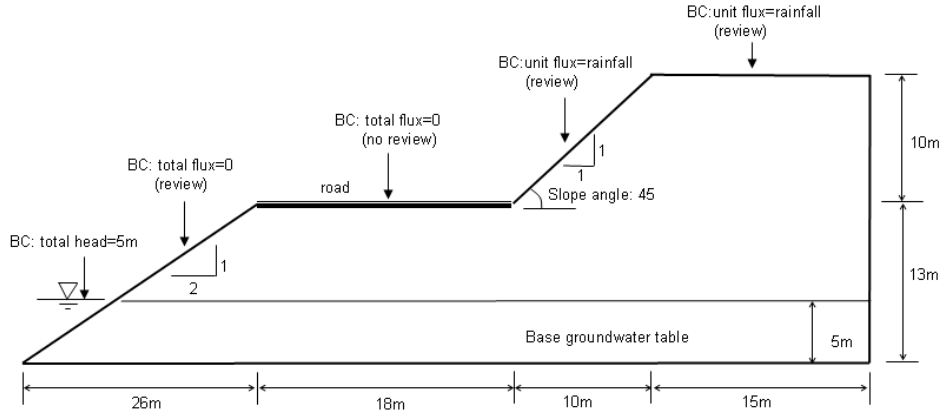


그림 1. 사면 침투해석에서의 경계 조건 적용 예

2.3 기존 해석방법과의 차이

강우를 고려한 사면안정해석방법과 종래의 사면안정해석방법을 비교해 볼 때 가장 큰 차이점은 지하수위를 결정하는데 있어 가정을 할 것인가 아니면 실제 조건을 고려한 해석을 통해 구할 것인가의 차이로 대별할 수 있다.

지반의 불포화 상태의 고려, 강우에 따른 고려, 부정류해석이 수행해야 한다는 점에 있어서 강우를 고려한 사면안정해석이 종래 방법에 비해 복잡하다고 생각될 수 있지만 매년 강우에 의한 사면파괴가 빈번하게 발생하고 있고 이러한 문제에 대한 현실적인 해석방법을 제시한다는 점에 있어서 강우를 고려한 사면안정해석방법의 활용은 보다 적극적으로 검토되어야 할 것으로 보인다. 표 2에는 현재의 사면안정해석방법과 강우를 고려한 사면안정해석방법의 차이를 보다 쉽게 이해할 수 있도록 각 해석방법의 수행과정과 필요한 입력변수들을 나타내었다.

표 1. 사면안정해석방법의 차이점 비교

구분	현재의 사면안정해석	강우를 고려한 사면안정해석
시험 및 입력정수 산정	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현장시료채취(현장상대밀도) ○ 강도정수 산정시험 <ul style="list-style-type: none"> - 직접전단, 삼축시험 등 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현장시료채취(현장상대밀도, 현장함수비) ○ 강도정수 산정시험 <ul style="list-style-type: none"> - 직접전단, 삼축시험 등 - 불포화 강도정수산정시험 ○ 함수특성 및 투수특성시험 <ul style="list-style-type: none"> - 포화투수계수(K_s), 포화체적함수비(θ_s) - 불포화 함수특성곡선($\theta - \psi$) - 불포화 투수계수곡선($K - \psi$)
지하수위결정	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지하수위 가정 <ul style="list-style-type: none"> - 지표면 또는 지표면 하 2-3m 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 강우를 고려한 침투해석에서 지하수위 결정 <ul style="list-style-type: none"> - 초기 간극수압분포 결정 - 강우조건 설정 (강우의 시간분포) - 부정류 해석을 통한 시간단계별 간극수압분포
사면안정해석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 한계평형해석 <ul style="list-style-type: none"> - 파괴면 및 안전을 산정 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 한계평형해석 <ul style="list-style-type: none"> - 침투해석에서 구한 간극수압분포 이용 - 불포화 전단강도 정수 사용 - 주요 시간단계별 파괴면 및 안전을 산정

3. 설계 강우 산정방법과 적용방안

3.1 사면안정해석을 위한 설계 강우 산정방법

사면안정해석에 적용하는 강우 입력값은 강우량과 시간과의 관계곡선으로서 강우의 시간적 분포를 나타내는 우량주상도(rainfall hyetograph)를 이용할 수 있다. 우량주상도는 수문학 분야에서 많이 연구되어 왔으며 실제 강우의 시간분포형태를 가정하여 분석하는 방법들, 경험공식을 이용하는 방법 그리고 강우강도-지속시간-빈도곡선을 이용하는 방법 등이 있다(선우중호, 1993; 서진호 외, 1995; 건설교통부, 1999).

실측값이 없는 상태에서 우량주상도를 구하기 위해서는 해당지역에 대한 과거의 경험적인 공식이나 통계적인 방법으로 구한 확률강우곡선(강우강도-지속시간-빈도곡선, IDF곡선)을 이용할 수 있는데 여기에서는 확률강우곡선으로부터 우량주상도를 구하는 방법을 소개한다.

건설교통부(2000)에서는 1998년까지의 우리나라 전국 강우자료를 통계적으로 분석하여 확률강우곡선과 확률강우량을 제시하고 있으므로 이러한 방법을 적용하는데 있어 자료 확보의 어려움은 없을 것으로 보인다. 또한 확률강우곡선을 확률강우량을 선형화기법을 이용하여 단기, 장기간으로 구분하여 구할 수 있는 공식을 식(5)과 제안하고 있으므로 수치적인 값을 산정할 수도 있다.

$$I(T,t) = \frac{a + b \ln \frac{T}{t^n}}{c + d \ln \frac{\sqrt{T}}{t} + \sqrt{t}} \quad (5)$$

여기서, I 는 강우강도(mm/h), T 는 재현주기(년), t 는 강우지속시간(분) 그리고 a, b, c, d, n 은 지역별로 결정되는 상수이다. 매개변수 a, b, c, d, n 은 건설교통부(2000)의 연구보고서 또는 건설교통부(2003)의 배수시설 설계 및 유지관리지침에 지역별 값이 제시되어 있다. 확률강우곡선으로부터 우량주상도를 구하는 방법은 다음과 같다.

- (1) 대상 지역을 대표하는 확률강우곡선을 구하고 목표하는 설계 재현 강우 빈도를 결정한다.
- (2) 시간간격을 결정하고 강우강도-지속시간 곡선으로부터 지속시간별 강우강도를 구한다.
- (3) 지속시간별 강우량과 시간대별 강우증가량을 계산한다.
- (4) 지속시간별 강우증가량을 도시한다.
- (5) 강우증가량 값 중 최대값을 가운데에 위치시키고 양쪽에 순차적으로 번갈아 가며 위치시켜 전체 분포를 구한다.

이해를 돕기 위해 식(5)를 이용하여 강원도 원주지역의 50년 재현주기를 갖는 강우에 해당하는 우량주상도를 구하는 예를 다음과 같이 제시하였다.

- (1) 강원도 원주지역에 해당하는 확률강우곡선을 구한다. 확률강우곡선은 기존 연구보고서나 지침(건설교통부, 2000; 건설교통부, 2003)을 참조하거나 식(5)를 이용하여 구할 수 있다. 여기에서는 식(5)를 이용하였으며 사용한 매개변수는 $a=368.0955$, $b=126.2754$, $c=1.0182$, $d=0.1342$, $n=0.2777$ 이고 산정된 강우강도-지속시간-재현빈도 관계를 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.
- (2) 그림 2의 곡선으로부터 목표재현기간을 50년으로 설정하고 이 재현기간에 해당하는 곡선으로부터 시간간격 1시간(60분)마다 해당되는 강우강도를 구하여 표 2과 같이 구한다.
- (3) 지속시간과 강우증가량의 관계를 그림 3a와 같이 구한다.
- (4) 이를 다시 최대강우강도가 가운데에 위치하도록 그림 3b와 같이 재정리하면 시간에 따른 강우분포를 구할 수 있다.

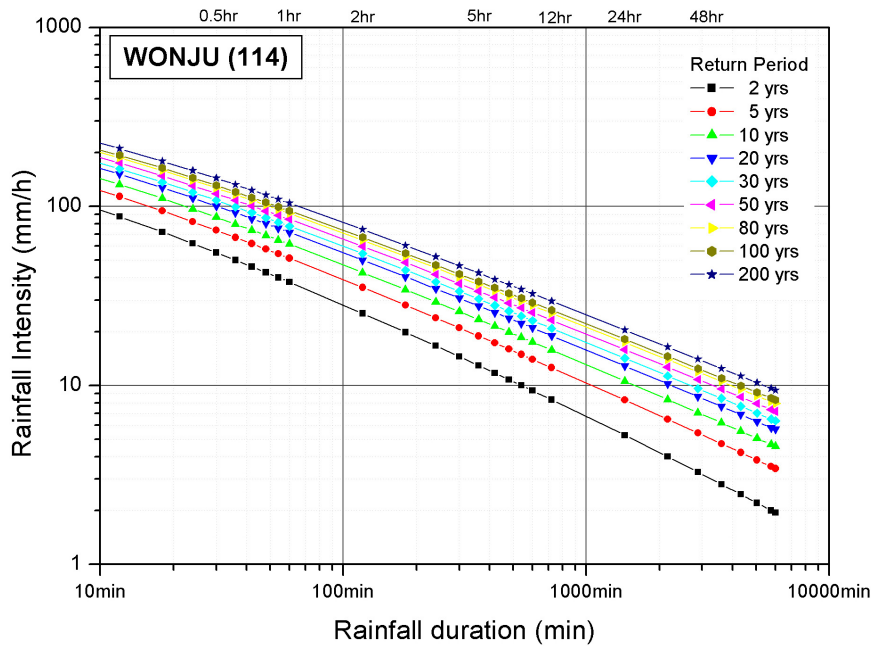
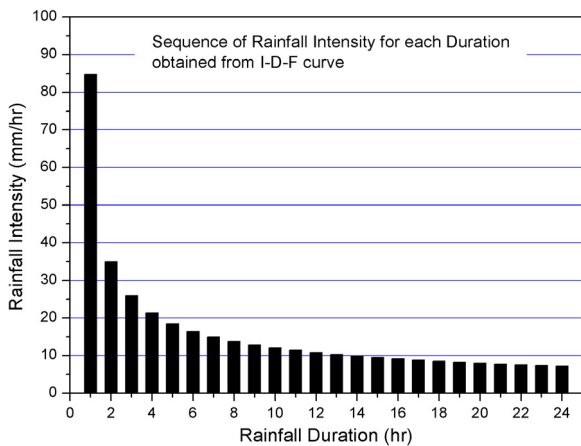


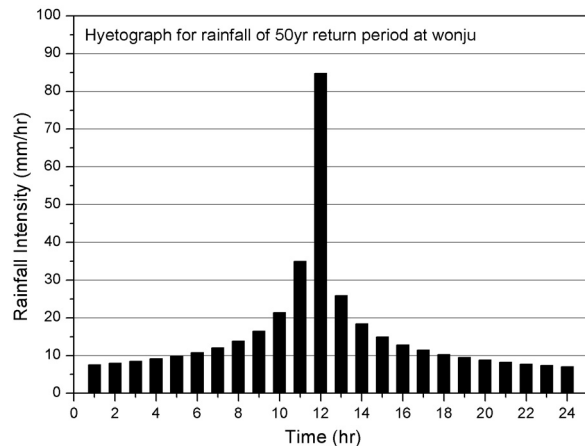
그림 2. 강우강도-지속시간-재현주기 곡선 (원주, 114)

표 2. 우량주상도 계산결과

지속시간(hr)	강우강도(mm/hr)	강우량(mm)	강우증가량(mm)
1	84.75	84.76	84.75
2	59.88	119.77	35.01
3	48.57	145.71	25.94
4	41.77	167.09	21.38
...
23		278.24	7.41
24	15.87	380.89	7.22



(a) 강우강도와 지속시간 계산값



(b) 우량주상도

그림 3. 우량주상도의 합성 결과

그림 3b의 우량주상도는 원주지역의 강우강도-지속시간-재현주기 곡선의 재현주기 50년에 해당하는 강우의 시간적 분포를 나타내는 것으로서 과거 해당 지역에서 발생한 강우통계자료에서 확률적으로 산정한 값을 염두에 두어야 한다.

그림 3은 24시간에 해당하는 우량주상도를 1시간 시간간격으로 제시하고 있지만 시간간격과 지속시간을 변화시켜 계산할 수도 있다. 시간간격과 지속시간에 대한 사항은 강우를 고려한 사면안정해석 기준에서 제시되어야 할 부분이다.

3.2 사면파괴 유발강우와 지반조건

강우를 고려한 사면안정해석방법이 기존의 연구자들에 의해 합리적인 방법으로 자리매김을 해가고 있는데 강우 침투해석 시 앞 절에서 제시된 방법으로 구한 우량주상도를 이용한 경우 지반 내에 형성되는 지하수위가 실제 현상을 어느 정도 모사할 수 있는지를 가늠하는 것도 중요하다.

김경석 등(2006)은 동일한 지형조건과 강우조건에서 투수특성이 다른 세 가지 지반조건에 대하여 강우강도-지속시간-재현빈도곡선으로부터 구한 강우량을 이용하여 침투해석을 수행하였으며 점토와 같이 투수계수가 작은 지반은 강우가 지속되는 시간 내에 포화되기가 어렵고, 모래·자갈과 같이 투수계수가 큰 지반은 실제 강우강도 하에서 침투속도보다 배수속도가 커 포화가 되지 않는 반면 실트·모래질 지반 조건은 국내의 강우조건(강우강도, 지속시간)에서 부분적으로 포화될 가능성이 가장 높은 것으로 제시하고 있다. 실제 강우시 파괴가 발생한 국내 사면의 지반조건이 실트질모래(SM)로 분류되는 화강 풍화토가 상당부분 차지하고 화강풍화토의 투수계수가 10^{-5} cm/sec~ 10^{-3} cm/sec (=0.36mm/h~36mm/h)범위로서 파괴당시의 강우강도에 쉽게 반응할 수 있는 범위임을 감안할 때 침투해석에 의한 지하수위 산정결과가 실용적으로 사용될 수 있음을 나타낸다.

이러한 결과는 지반의 투수특성과 국내 강우조건을 비교함으로써 지하수의 형성으로 인한 파괴가능성이 높은 상태를 판단할 수 있는 가능성도 제시한다. 국내에서 사면 파괴를 유발하는 강우기준에 대한 연구들(홍원표, 1990; 이영남, 1991; 김경석, 2008)에 의하면 사면파괴 또는 산사태는 지질, 지반특성과 강우특성에 의해 유발되며 유발강우 기준은 연구자별, 지역별 차이는 있지만 대략 시간강우가 10mm/h~30mm/h이상이고 100~150mm의 24시간 누적강우가 발생하면 파괴가 유발될 수 있는 것으로 제시하고 있다. 파괴가 발생한 사면의 투수특성은 제시되어 있지 않지만 이러한 강우에 쉽게 반응하는 지반조건에서 파괴가 우세하게 발생할 것이라는 것을 가늠할 수 있으며 앞의 화강풍화토와 같은 투수특성을 가진 지반조건이라고 상정하면 그림 4와 같이 파괴가능성이 높은 투수범위와 강우범위를 개념적으로 도시할 수 있다. 이러한 개념은 구체적인 사례를 통해 추가로 검증되어야 하겠지만 향후 강우를 고려한 사면안정해석대상 지반조건을 가늠하는데 이용할 수 있을 것이다.

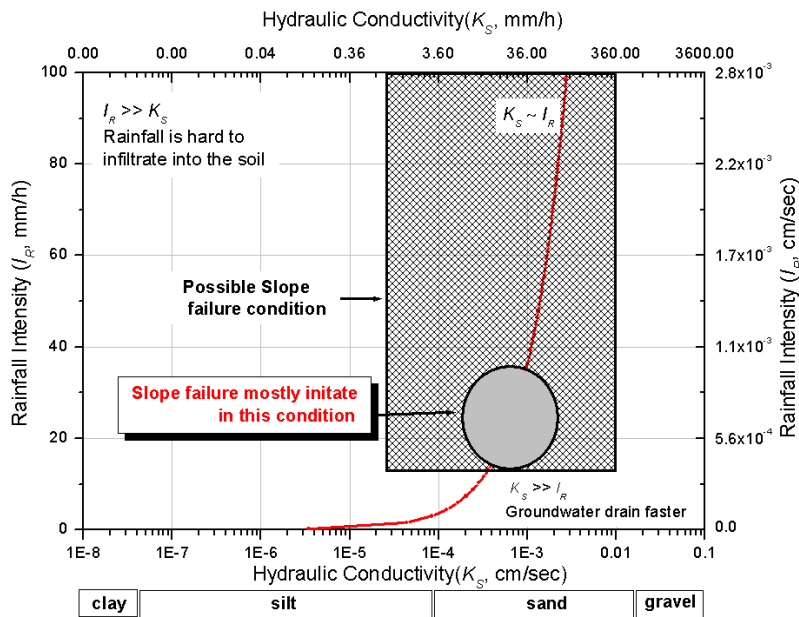


그림 4. 사면파괴를 유발하는 지반조건 강우조건 개념도

3.3 설계 기준을 위한 제안

건설교통부(2006)에서 제정한 비탈면 설계기준에서는 우기조건에서 강우 침투를 고려한 해석을 실시할 수 있도록 규정하고 있으나 이 논문에서 문제 제기한 바와 같이 구체적인 강우기준은 제시되어 있지 않다. 또한 강우침투를 고려한 해석 방법론과 적용대상지반 조건과 해석을 위해 필요한 입력값을 구하는 조사나 시험방법에 대한 사항들도 설계기준에서 언급되어 있지 않다. 이 절에서는 강우를 고려한 사면안정해석을 수행할 경우 설계기준에서 고려되어야 하는 사항들에 대해서 고찰해 보았다.

강우는 자연현상으로서 재현주기별로 강우특성(강우강도, 지속시간, 강우의 시간적 분포형태)이 다르며 이로 인해 발생하는 사면 파괴의 규모, 횡수 및 사면파괴가 발생하는 지반조건에 차이가 있다. 사면 설계에 적용하는 설계강우는 어떠한 재현주기를 갖는 강우에 대해서 사면이 안정성을 유지하도록 설정할 것인가가 매우 중요하다. 배수시설설계나 수공구조물과 같이 강우특성을 고려하는 구조물의 설계기준에서는 구조물 중요도에 따라 설계 재현주기가 차등적으로 제시되어 있는데(건설교통부, 2003), 사면의 경우도 이와 마찬가지로 사면 규모나 중요도, 파괴발생시의 위험정도에 따라 설계 강우의 재현주기를 설정하는 것이 필요하다. 이러한 재현주기는 과거 사면파괴를 유발하는 강우특성에 대한 조사, 사면 파괴에 의해 발생하는 인명, 재산, 시설물에 발생할 수 있는 위험정도 그리고 사회적으로 사면파괴방지를 위한 요구정도를 반영하여 결정된다. 하지만 아직 강우에 의한 다양한 사면파괴 현상에 대한 자료, 엄밀한 조사를 통한 원인 규명 사례, 피해위험도 분석자료가 부족한 상황이므로 구체적인 기준을 설정하는 것은 앞으로도 지속적인 관심을 통해 결정해 나가야 할 것으로 보인다.

강우침투를 고려한 사면안정해석을 적용하는 대상 지반조건에 대해서도 규정할 필요가 있다. 강우시 사면의 안정성이 저하되는 것은 주지의 사실이지만 현재의 강우침투해석은 균질한 침투 특성을 갖는 지반조건에서 적용하도록 되어 있으므로 흙사면 조건에서만 적용하는 것이 바람직하며, 흙의 종류 중에서도 투수계수가 비교적 높은 실트질, 모래질이 많은 지반조건이 가장 적합할 것으로 판단된다. 불연속면의 영향이 큰 암반사면의 경우는 해석을 통한 결과가 실제 현상을 제대로 반영하지 못하므로 적용하기에는 적합하지 않다. 풍화가 진행되어 절리와 파쇄대가 많은 사면의 경우에도 적용이 가능하지만 투수특성을 구하기 어려운 점이 있으므로 실제 적용과 결과의 이용에는 주의가 필요할 것이다.

이러한 사항과 더불어 해석에 필요한 입력값을 구하는 시험방법에 대한 규정도 필요할 것이다. 이미 2장과 표 1에서 강우를 고려한 사면안정해석에서 필요한 입력정수 값들을 나타내었듯이 침투해석을 위해서 불포화 및 포화상태를 나타내는 지반의 함수특성과 투수특성 값이 필요하고 안정해석에 있어서 불포화상태의 전단강도를 나타내는 매개변수가 필요하다. 아직 국내에서는 이러한 불포화상태의 지반특성값들에 대한 시험이 보편적이라고 보기는 어렵지만 앞으로 강우를 고려한 해석방법의 활용의 증가와 더불어 대안으로 적용할 수 있는 방법들에 대해서도 검증을 통해 활용할 수 있는 방법들을 모색할 필요도 있을 것으로 보인다.

4. 결론

이 논문에서는 설계단계에서 강우를 고려한 안정해석을 수행할 경우 필요한 강우를 합리적으로 고려하는 방법으로서 수문학에서 사용하는 우량주상도를 강우강도-지속시간-재현빈도 곡선으로부터 구하는 방법을 제시하였고 앞으로 강우를 고려한 해석방법이 실무적으로 적용되기 위해 필요한 사항들에 대해서 고찰하였다. 안정해석방법으로는 강우침투해석결과로부터 사면내 간극수압 분포를 찾고 이를 종래의 한계평형해석을 통해 사면의 안정성을 분석하는 방법이며 입력강우는 시간에 따른 강우강도의 분포형태로 주어지는 경우를 대상으로 하였다. 강우강도-지속시간-재현빈도 곡선으로부터 합성되는 우량주상도는 실제 국내 강우특성을 통계적으로 처리한 결과로부터 도출되므로 현실적인 값을 제시할 것으로 판단된다.

강우를 고려한 안정해석방법에 대해서 많은 연구가 이루어지지만 아직 국내의 설계기준에서는 이러한 방법론의 적용에 대해서는 미비한 점이 많이 있으며 특히 설계에서 사용할 강우의 재현기간과 같은 강

우 적용기준, 해석의 방법론, 적용대상지반의 기준은 앞으로 지속적인 자료축적과 사례분석을 통해 구체화시켜야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2000) **1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서**, 제1권, 제2권
2. 건설교통부 (2003) **도로배수시설 설계 및 유지관리 지침**
3. 건설교통부 (2006) **건설공사 비탈면 설계기준**
4. 김경석 (2008) 토석류 발생지형과 유발강우 특성 분석, **대한토목학회지**, 제28권, 5C호 (계제예정)
5. 김경석, 정충기 (2006) 수치해석을 이용한 강우시 사면에 발생하는 지하수위에 대한 고찰, **2006 대한 토목학회 학술대회 논문집**, pp.227-230
6. 김상규, 김영목 (1991) 강우로 인한 사면 불안정, **한국토질공학회지**, 제7권 제1호, pp.53-64
7. 김준모 (2002) 사면 내의 지하수 유동과 사면의 안정성에 대한 강수 영향의 완전 연동된 수리지질역학적 수치 해석, **한국지반공학회 논문집**, 제18권 제6호, pp.5-16
8. 서진호, 이상배, 조홍제, 민병형 (1995) “설계강우의 시간적 분포모형 적용성 연구”, **한국수자원학회 논문집**, 제28권, 제5호, pp.205-217
9. 선우중호 (1993) **수문학**, 동명사, 서울
10. 유충식, 전한용, 정혜영, 정혁상 (2005) 집중강우시 발생한 블록식 보강토 옹벽의 붕괴사례, **한국지반 공학회논문집**, 제21권, 제4호, pp.135-143
11. 이승래, 김윤기 (2008) “강우침투를 고려한 사면 안정성 평가기법”, **한국지반공학회 2008 사면안정학술발표회 논문집**, pp.46-57
12. 이영남 (1991) 지반공학과 자연재해(II)-산사태, **대한토질공학회지**, 7권 1호, pp.105-113
13. 이인모, 조우성, 김영옥, 성상규 (2003) 풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구, **한국지반공학회논문집**, 제19권, 제1호, pp.41-49.
14. 조성은, 이승래 (2000) 강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가, **한국지반공학회논문집**, 제16권, 제5호, pp.107-116
15. 홍원표, 김윤일, 김상규, 한중근, 김마리아 (1990) 강우로 기인되는 우리나라 산면활동의 예측, **대한토질공학회지**, 6권 2호, pp.159-167
16. Cai, F., Ugai, K., Wakai, K., Li, Q. (1998) Effects of horizontal drains on slope stability under rainfall by three-dimensional finite element analysis, **Computers and Geotechnics**, Vol.23, No.4, pp.255-275
17. Cho, S.E., Lee, S.R. (2001) Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration, **Computers and Geotechnics**, Vol.28, No.3, pp.185-208
18. Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R.; Widger, R. A., 1978, Shear Strength of Unsaturated Soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v 15, n 3, pp.313-321
19. Fredlund, D.G and Xing, A, 1994, Equations for the Soil-Water Characteristic Curve, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol.31, No. pp.521-532
20. Fredlund, D.G and Rahardjo, H, (1993), **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**, John Wiley & Sons Inc, NY, NY
21. Iverson, R.M (2000) Landslide triggering by rain infiltration, **Water Resources Research**, Vol.36, No.7, pp.1897-1910
22. Richards, L.A. (1931) Capillary conduction of liquids in porous mediums, **Physics**, Vol.1, pp.318-333
23. van Genuchten, M.Th. (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Vol.44, No.5, pp.892-898