

# 강우를 고려한 사면의 안정해석

임 해 식<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 대한주택공사 부장

## 개 요(SYNOPSIS)

강수시의 사면안정 검토를 하는데 있어서 필수적인 것은 실제 조건에 가장 가까운 조건으로 상정하여 안정 해석을 실시하는 것이다. 강수 조건을 고려한 사면 안정해석 방법은 크게 세가지로 구분할 수 있다. 첫째, 강우 영향을 지하수위로 고려하는 방법, 둘째, 강우에 의한 습윤대를 산정하여 습윤 지반에 간극수압비( $\gamma_u=U/\gamma \cdot z$ )를 고려하는 방법, 셋째, 불포화지반에서의 강우 침투해석을 실시하여 각 위치에서 지반의 간극 수압을 고려하는 방법이다. 실제 거동을 가장 잘 반영할 수 있는 것은 세 번째 방법이다. 그러나 실무에서는 아직까지 실제 거동과도 부합하지 않는 첫 번째 방법이 가장 흔히 사용되는 현실이다. 이럴 경우 실제 거동과 얼마나 차이를 나타내는지를 살펴 보아, 향후 어떤 해석 기법들을 적용해 가는 것이 합리적이고 타당한지의 방향을 설정하는데 도움이 되고자 한다.

## 1. 강수의 이동과 지반내 물흐름

강수는 (그림 1)에서와 같은 순환 시스템으로 이동한다. 공학적으로 주 관심이 되는 경우는 주로 인공적으로 조성되는 사면이며, 이 사면들은 대개 불포화대에 위치하게 된다. 따라서 강수의 불포화대에서의 거동이 사면 안정 검토에서 중요한 요인이다.

일반적으로 불포화대의 경우도 지반 조건에 따라 다르기는 하지만 일정량의 수분을 함유하고 있다. 이 상태에서 지표면에 강수가 내리면 조건에 따라 일정량은 지반으로 침투되고 나머지는 유출된다. 사면의 안정에 주요한 양은 바로 이때 지반으로 침투되는 수량이며 이 수량이

땅속에서 거동하는 특성에 따라 사면의 안정성이 크게 좌우된다.

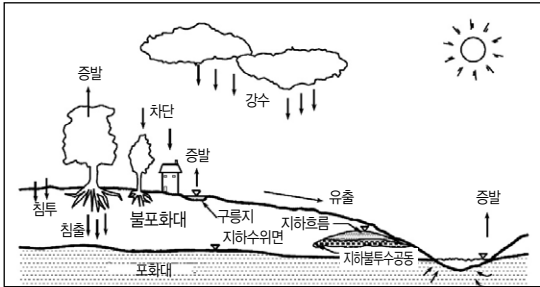


그림 1. 강수의 순환

따라서 강수에 따른 사면의 안정성을 정확히 알기 위하여는 불포화 지반에서의 강수 거동을 파악해야 한다.

## 2. 불포화토의 기본 특성

일반적인 토질역학 기초 단계에서 다루는 지반중의 물의 거동은 포화상태의 거동을 의미한다. 이는 주로 Darcy의 법칙에 기본을 두고 체제에서의 물의 흐름을 다루는데 주로 사용된다. 이 경우 수면 아래에서의 지반중 물은 주로 정(+)수압으로 작용하는 경우가 대부분이며 토질 기술자들에게 친숙하다. 반면 불포화토에서의 물의 거동은 이보다 더 복잡하다.

### 2.1 불포화토의 기본 이론

실질적으로 지하수위면 위 지표면 사이의 흙은 완전포화 또는 완전건조가 아닌 불포화 상태로 존재하게 된다. 이경우의 흙의 특성은 흡입(suction)력의 큰 영향을 받게 된다.

흙 중에서 물은 온도와 압력에 따라 고체(Solid), 액체(Liquid), 기체(Vapor)상태로 존재하게 된다. 불포화토에

서는 흡증의 공기(air)와 물(water), 흡입자(Solid)의 상호 작용에 의해 흡입(suction)력이 작용하게 된다. 이를 고려하여 불포화토의 유효응력을 규정하는 여러가지 식이 있으나 그 중 가장 명료한 Bishop(1959)의 제안식을 나타내 보면 다음과 같다.

$$\sigma' = (\sigma - U_a) + X(U_a - U_w)$$

$\sigma'$  : 유효응력

$\sigma$  : 전응력

$U_w$  : 간극 수압

$U_a$  : 간극 공기압

X : 포화도에 관계된 계수

여기서  $(U_a - U_w)$ 항이 흡입(suction)력을 나타내는 항이다. 불포화 대에서 이 흡입(suction)력의 크기나 분포에 따라 지반의 강도 특성은 물론 지표면에 내리는 강수의 침투 거동도 달라지게 된다.

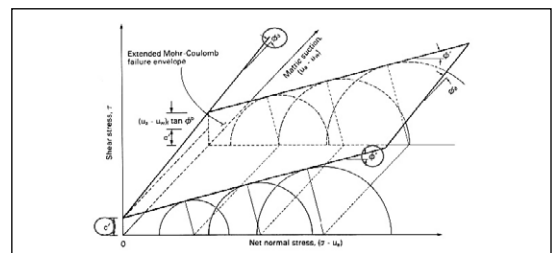


그림 2. 불포화토에대한 Mohr-Coulomb 파괴포락선의 확장 (Fredlund and Rahardjo)

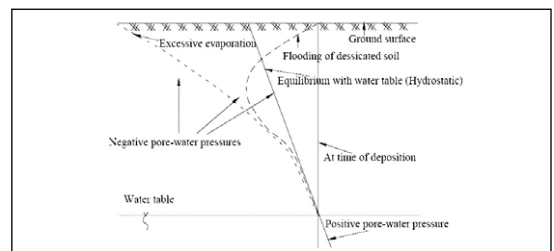


그림 3. 지반내 Matricion 분포 형태 (Fredlund and Rahardjo)

# 기술기사

## 2.2 흡입(suction)력에 영향을 미치는 인자

기본적으로 흡입(suction)력 다시말해 간극수압은 다음 식으로 정의되는 체적함수비(volumetric water content)와 관계가 있다.

$$\sigma' = V_w / V$$

$\sigma'$  : 체적함수비(volumetric water content)

$V_w$  : 간극수체적

$V$  : 전체체적

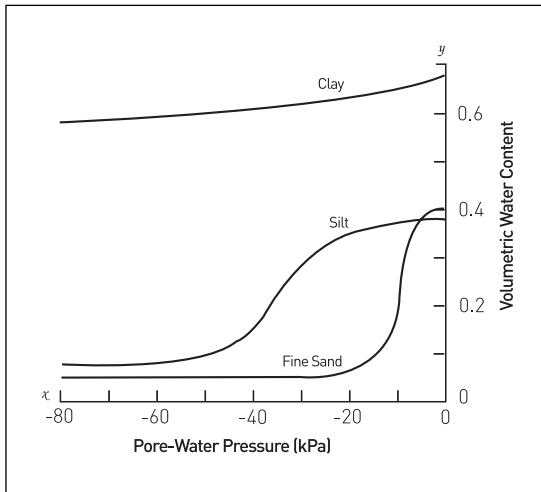


그림 4. 체적함수비와 간극수압 측정예

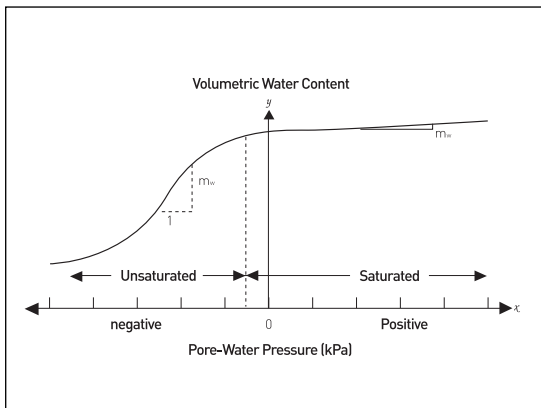


그림 5. 체적함수비와 간극수압 관계

## 2.3 수리특성곡선

### (Hydraulic conductivity function)

흡속에서 물이 얼마나 잘 흐를 수 있는냐는 수리특성곡선(Hydraulic conductivity function) 이나 투수계수(permeability)로 나타내 진다. 일반적으로 투수계수(permeability)는 토질기술자 들에게 친숙한 용어이며, 주로 포화 상태에서의 흡 중 물의 흐름성을 나타내는 용어로 주로 사용되어진다. 즉, 투수계수는 완전 포화된 흡 중 에서의 물의 흐름값으로 일반적으로는 정류 상태의 동일 흡에서 같은 값을 가진다.

그러나 불포화토의 경우 함수비 상태에 따라 물의 투수성이 크게 달라지게 된다.

결론적으로, 수리특성곡선(Hydraulic conductivity function)은 흡의 체적함수비(volumetric water content)와 관련이 있고 따라서 흡의 간극수압과 연관이 있다.

즉, 불포화 상태 지반에서의 물의 거동을 알기 위하여는 수리특성곡선(Hydraulic conductivity function)을 알아야 하고 이는 흡의 함수특성과 연관이 있으므로 이 개념을 간편히 적용하기위해 흡-함수비 특성에서 수리 특성곡선을 예측하는 방법이 쓰이고 있다.

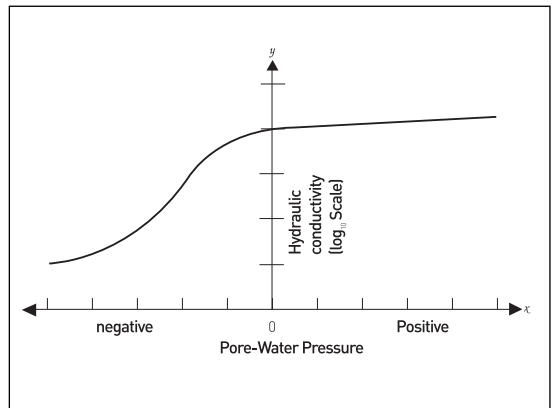


그림 6. 수리 특성곡선과 간극수압의 관계

### 3. 사면안정 해석시 강수 조건을 고려하는 방법

사면안정 해석시 강수에 의한 영향을 고려하는 방법은 (그림 7)에서와 같이 크게 3가지이다. 가장 널리 사용되는 방법은 수위면을 사면 지표면에 위치시켜 사면내 지반 전체에 그 수두만큼의 정수압이 작용하는 것으로 산정하는 방법이다.

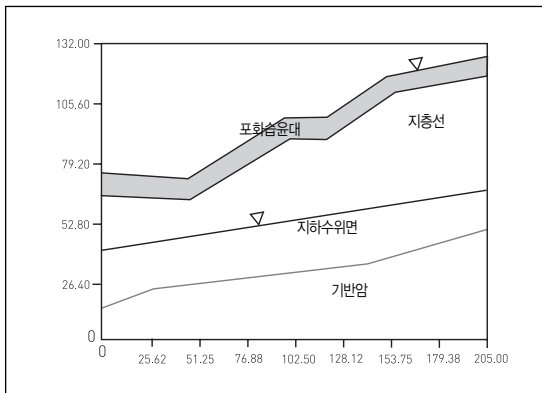


그림 7. 강우를 고려하는 방법

이 방법은 지하수위가 지표면과 근접한 경우가 아니면 일반 토층에서 거의 발생할 여지가 없는 조건을 묘사하는 것으로 실제 거동과 크게 다른 결과를 나타내게 된다.

또다른 방법은 강수가 지표면 으로부터 침투되어 습윤대가 아래로 하강 하는 거동을 고려하여 지반의 포화도와 공극비 침투 투수계수등을 이용하여 포화 습윤대의 두께를 산정하고 그 습윤대에 간극수압비( $u=U/\gamma \cdot z$ )를 적용시켜 사면 안정해석을 실시하는 방법이다. 이 방법은 강수의 지표면으로 부터의 침투 거동을 산정하기는 하였으나 불포화대 에서의 거동을 정확히 묘사하지는 못하며 특히 습윤대 에서는 동일한 간극수압비를 적용하여야 하고 어느 정도 수준으로 적용할 것인지에 대하여는 경험적인

인자에 의존할 수밖에 없다.

따라서 강수 거동을 제대로 반영하기 위하여는 강수에 의한 불포화토 지반에서의 침투 거동을 먼저 해석하고 그로부터 얻어진 지반내의 간극수압을 적용하여 사면안정 해석을 수행하는것이 가장 합리적인 방법이다.

### 4. 강우를 고려한 사면안정 해석에

강우시의 사면안정 해석 방법에 따른 차이를 알아보기 위하여 (그림 8)같은 형상의 단일 지층 사면의 침투 해석을 실시한 후 이를 기존의 안정해석 법과 비교해 보기로 하였다. 해석 프로그램은 Geo-slope 사의 사면해석과 침투해석용 프로그램을 사용하였으며 굴착 사면 경사는 1:1.25 이고 초기의 지하수위는 파란색 점선으로 표시 되어 있다. 강우의 침투는 사면 상부와 하부 그리고 법면부에서 동시에 발생하는 것으로 고려하였으며 그 양은 일반 실트질 토사 범위의 30mm/hr 값을 적용 하였다.

불포화 지반에서의 침투 거동에 가장 중요한 수리 특성 곡선과 함수특성은 (그림 9), (그림10)에 나타난 바와 같이 여러 시험 결과를 토대로 제시된 일반 실트질 토사의 값을 적용하였다.

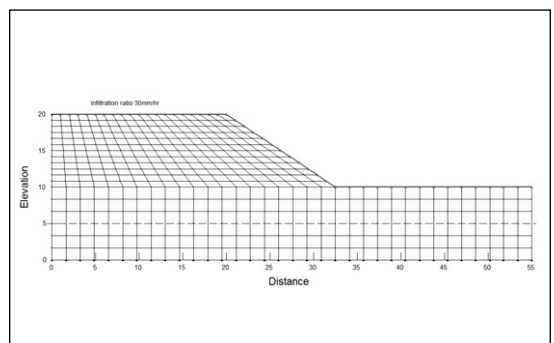


그림 8. 안정해석 해석 단면 개요

# 기술기서

## 4.1 불포화토의 침투 해석 결과

상기와 같은 조건에서 강우가 왔을 경우의 침투해석을 실시하였다. 이 중 강우가 1일, 4일, 8일동안 지속되는 경우 지반내의 수압 및 지하 수위 특성을 (그림 11) ~ (그림 14)에 나타내었다.

이 침투 해석 결과를 토대로 지반내 압력을 고려하여 사면 안정 검토를 실시하였다.

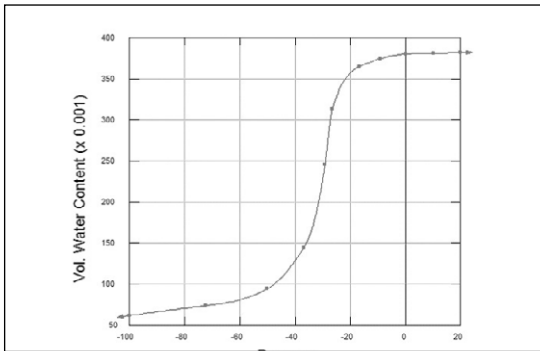


그림 9. 함수 특성

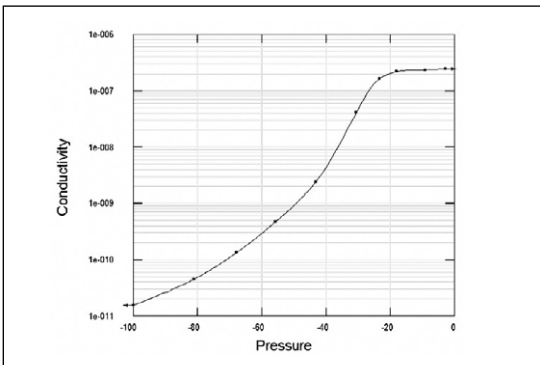


그림 10. 수리 특성

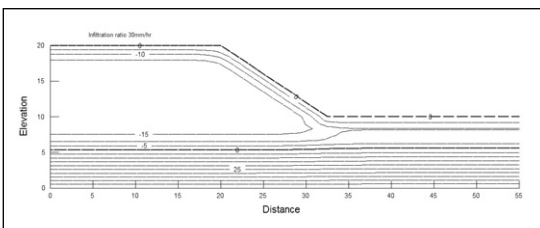


그림 11. 1일 강우 지속시의 압력분포

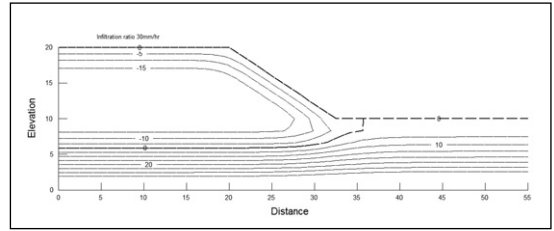


그림 12. 2일 강우 지속시의 압력분포

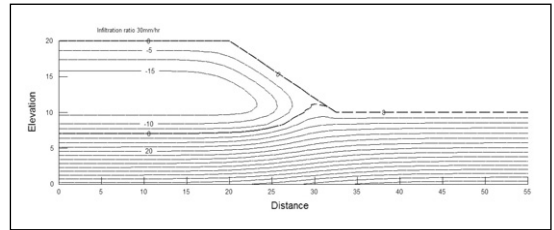


그림 13. 4일 강우 지속시의 압력분포

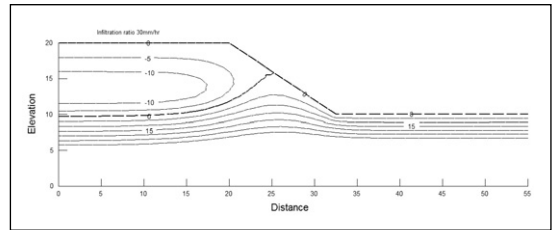


그림 14. 8일 강우 지속시의 압력분포

## 4.2 침투해석 결과에 의거한 사면안정 해석

불포화 지반의 침투해석 결과를 토대로 지반내 압력분포를 반영하여 사면안정 검토를 수행 하였다. 사면 안정 검토시 적용된 지반의 물성치는 흙의 단위무게  $18 \text{ kN/m}^3$ , 내부마찰각  $25^\circ$ , 점착력  $10 \text{ kN/m}^2$  이며, 불포화토에 의한 강도정수 변화는 고려하지 않았다. 또한 침투해석결과에 의한 안정검토와 간극 수압비( $u$ )에 의한 해석 결과와 비교하기 위하여 지반 전체에 간극 수압비를 일률적으로 적용한 해석도 실시하였다. 해석 결과는 (그림 15) ~ (그림 21)에 나타 내었다.

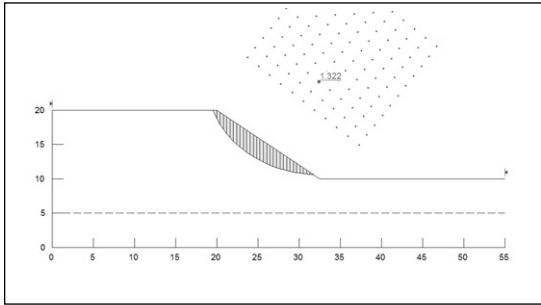


그림 15. 정상시

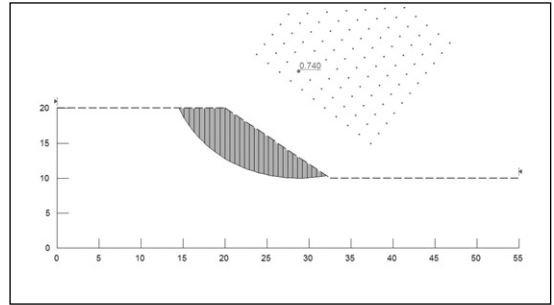


그림 19. 지표면에 수위 설정시

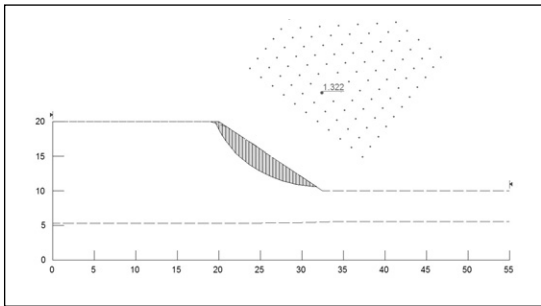


그림 16. 1일 강우 지속시

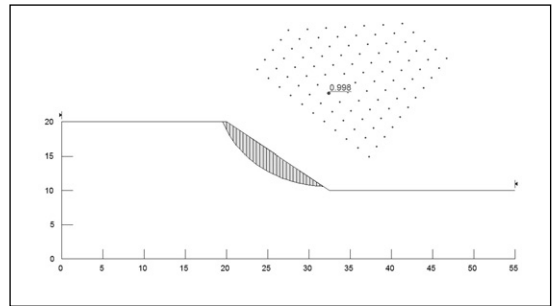


그림 20.  $\gamma_u = 0.3$  적용시

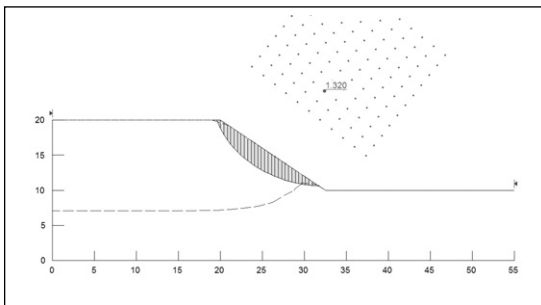


그림 17. 4일 강우 지속시

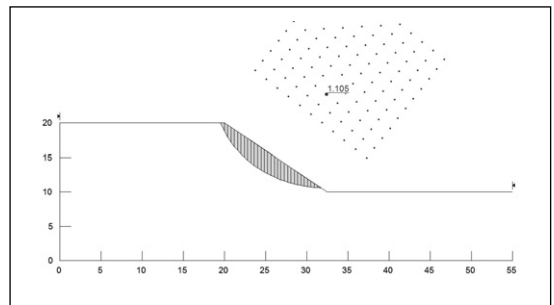


그림 21.  $\gamma_u = 0.2$  적용시

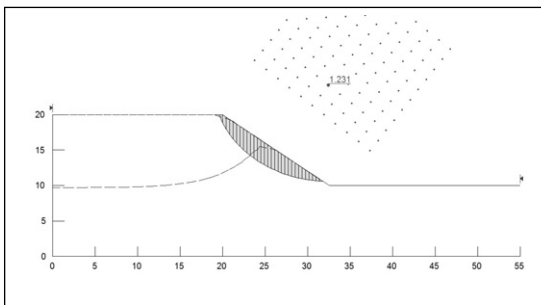


그림 18. 8일 강우 지속시

## 5. 결과 분석 및 고찰

불포화 지반의 침투해석을 통한 사면의 강수에 대한 안정성 검토 결과를 고찰해보면 다음과 같은 중요한 내용을 파악할 수 있다.

## 기술기사

(1) 흔히 사면안정 검토시 강수 조건으로 산정하는 지표면에 수위를 위치시키는 방법은 실제 강수의 침투 거동과는 크게 상이할 뿐 아니라 해석 결과도 다른 방법과 크게 차이가 난다.

검토 예에서는 이 경우 SF = 0.74로 8일동안 지속되는 강우를 산정하여 불포화 침투해석 결과를 토대로 강수 조건을 고려한 해석결과 SF=1.23과 큰 차이를 나타 내었다.

이 차이는 불포화 지반의 침투 거동 해석을 위해 추정하여 적용하게되는 값들의 차이에 의한 해석 결과 차이를 크게 초과하는 범위에 있다.

(2) 침투해석 결과의 지반내 압력 분포와 사면안정 해석 결과를 살펴보면 강수에 의해 지반내에 간극수압이 변화 하여도 이 값이 사면 안전율에 미치는 영향은 그리 크지않다. 사면 안전율에 영향을 미치는 시점

은 이 압력들이 정수두화(수위화) 되는 시점부터 안전율에 크게 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

(3) 포화 습윤대에 간극수압비( $\gamma_u$ )를 적용 하는 방법은 해당 습윤대에 적용하는 간극수압비( $\gamma_u$ )를 어떻게 선정하느냐가 해석 결과를 좌우하게 된다.

이러한 여러 가지 검토 결과를 살펴볼 때 사면 안정에서 강수의 고려는 불포화 지반의 침투해석을 실시한후 안정 해석을 실시하는것이 가장 바람직하고 합리적인 방법임을 알 수 있다. 예전의 경우 불포화토의 침투해석을 위한 도구(Tool)가 여의치 않아 강우시나 평시의 안전율을 다르게 적용하는 기준들이 정착하게 된점은 이해가 되기도 하지만 현재에는 이를 구현할 수 있는 다양한 도구(Tool)들이 있음에도 불구하고 기존의 방법에 안주하는 것은 바람직한 방향이라고 보기 어렵다.

**[참고문헌]**

- (1) D. G. Fredlund and H. Rahardjo, "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Sons, INC., 1995.
- (2) Federal Highway Administration, "Advanced Course on Soil Slope Stability", 1993.
- (3) Southwest Florida Water Management District, "FIPR Hydrologic Model Users Manual and Technical Documentation", 1997.
- (4) A.G. Li, Z.Q. Yue, L.G. Tham, C.F. Lee, and K.T. Law, "Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope", 2005.
- (5) Geo-Slope International Ltd., "SEEP/W User's Guide".
- (6) Geo-Slope International Ltd., "SLOPE/W User's Guide".