

## 강우 시 석회암 풍화토 사면의 안정해석에 관한 연구

김종렬<sup>1)</sup> · 강승구<sup>2)</sup> · 강희복<sup>\*3)</sup> · 박승균<sup>4)</sup> · 박철원<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>전남대학교 공과대학 토목공학과, <sup>2)</sup>다산이엔지, <sup>3)</sup>한영대학 토목환경과

<sup>4)</sup>남양건설(주), <sup>5)</sup>전남도청

### A Study on the Slope Analysis of Weathered Limestone Soils during Rainfalls

Jong-Ryeol Kim<sup>1)</sup> · Seung-Goo Kang<sup>2)</sup> · Hee-Bog Kang<sup>3)</sup> · Seung-Kyun Park<sup>4)</sup> · Chol-Won Park<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University, <sup>2)</sup>Dasan Engineering Co. Ltd.,

<sup>3)</sup>Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyeong College, <sup>4)</sup>Namyang Construction Co. Ltd.,

<sup>5)</sup>Jeollanam-do Provincial

본 연구는 전라남도 장성군 일대의 석회암지대에서 강우로 인해 파괴된 절개사면을 대상으로 시료를 채취하여 물리적·역학적 특성을 파악하고 강우로 인한 사면안정해석을 통해 사면구배의 변화에 따른 안전율의 변화를 규명하였다. 연구지역 석회암 풍화토는 석영, 정장석, 깃사이트, 침철석 등으로 구성되어 있고 비중은 2.73, 통일분류상 SC에 해당되며 모암에서 풍화가 진행되면서 칼슘성분이 현저하게 감소하였다. 투수계수는  $2.56 \times 10^{-4}$  cm/sec로서 실트 성 점토의 투수계수와 비슷한 값을 보였고 전단시험결과 불포화토에서 포화토로 변할수록 점착력은  $3.0$  t/m<sup>2</sup>에서  $0.72$  t/m<sup>2</sup>로 현저하게 줄어들며 내부마찰각  $\Phi$  값도 감소하는 경향을 보였다. 강우로 인한 사면안정해석 시 강우강도를 고려한 침투심도를 구하는 것이 합리적이며 사면안정해석결과 침투심도가 클수록 사면의 안전율은 낮아져서 불안정하게 되고 침윤선을 고려한 절토사면의 최소안전율 1.5와 비교 시 강우를 고려한 석회암 풍화토의 절토사면 구배는 1:1.2이상 되어야 안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 불포화토에서 포화토로 변할수록 점착력의 감소는 사면의 안전율감소에 많은 영향을 미침을 알 수 있었다.

**주요어:** 석회암 풍화토, 점착력, 내부마찰각, 침투심도

A set of soil samples were picked up from a failed slope formed by rainfall in limestone zone in Jangseong-gun, Jeonnam, Korea, to find out its physical and mechanical characteristics for this study, and variation of safety factor depending on slope inclination was defined by analysing slope stability affected by rainfall. Decomposed limestone soil in the research area is composed of quartz, orthoclase, gibbsite, goethite, etc., with specific gravity of 2.73, and this soil is included in SC by unified soil classification system. Calcium ingredient decreased remarkably during weathering at its mother rock. Coefficient of permeability is  $2.56 \times 10^{-4}$  cm/sec, similar to its value of silty clay. Cohesion decreases remarkably from  $3.0$  t/m<sup>2</sup> to  $0.72$  t/m<sup>2</sup>, and  $\Phi$  value of internal friction angle tends to decrease as it turns to be saturated soil from partial saturated soil in the shear test. To analyze slope stability affected by rainfall, it is reasonable to seek seepage depth with reference to rainfall intensity. In the slope stability analysis, when the seepage depth is the larger, its safety factor is the less, which

\* Corresponding author : kang4104@hanmail.net

makes the slope unstable. Comparing with minimum safety factor, 1.5 of cut slope in consideration of the seepage line, safety factor is found to be satisfactory only when inclination of cut slope of decomposed limestone soil is more than 1:1.2 slope at least considering rainfall. It is also found that decrease of cohesion has great effect on decline of safety factor of slope while partial saturated soil turns to be saturated soil

**Key words:** weathered limestone, cohesion, internal friction angle, seepage depth

## 서 론

석회암은 지구상에 분포하는 퇴적암중 20~25%를 차지하고 있을 정도로 그 양이 방대하고 화학적 침전으로 이루어진 것과 유기적으로 형성된 것이 있으며 생물의 생화학적 작용으로 만들어진 것이 많다. 우리나라 선캄브리아 이언의 석회석광상은 경기육괴와 소백육괴의 발달지역인 경기도, 충청남북도, 전라남북도 및 경상북도에 분포하는 결정 편암계에 협재되는 석회암으로 대부분 재결정작용을 받은 것이 특징이다. 선캄브리아 이언의 석회석광상은 대부분 변성 퇴적암류의 엽리방향과 평행하게 렌즈 상으로 배대되며, 그중 재결정작용이 현저하고 색상이 뛰어난 것은 대리석 석재로 이용되고 있다. 국내의 대표적인 광상으로는 전라남도 장성읍의 장성 시멘트광상과 경상북도 울진군의 평해 석회석광상 등이 있다. 이러한 석회암 지대는 시멘트의 주원료로 사용되는 석회암을 채취하기 위한 광산이 주를 이루고 있어 폐광 후의 사면의 안정에 대한 대책과 사면의 절취나 도로공사 시 출현하는 석회암 풍화토의 물리적·역학적 특성, 그리고 집중호우로 인해 얇은 사면파괴가 빈번하게 발생되고 있어 강우로 인한 사면의 안정성을 적절하게 평가하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다.

지금까지의 국내의 연구를 살펴보면 풍화토의 공학적 특성에 관한 연구는 주로 화강암 풍화토에 관해서(이영수, 1983; 박병기, 1998)진행되어 왔으며 셰일 및 이암의 풍화토에 관한 공학적 특성 연구는 주로 대구 및 경북지역에(이상복, 1994; 김영수 등, 1995; 김기영, 1995)국한되어 왔다. 또한 사면안정해석에 대한 연구로 안일환(2001)은 강우침투 시 얇은 파괴가 발생하는 토사 사면에 대한 안정해석에 관한 연구를 하였으며, 이선주(2001)는 강우 시 화강토와 표준사를 혼합한 복합토 사면의 침투거동에 관한 연구를, 김재홍 등(2002)은 강우 시 불포화 풍화토의 습윤에 의한 무한사면 해석에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 지금까지의 연구는 주로 화강 풍화토와 셰일 및 이암의 풍화토

그리고 안산암 풍화토에 집중되어 있으나 전남지방에 많은 분포를 보이고 있는 석회암 풍화토에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 전라남도 장성군 일대의 석회암지대에서 강우로 인해 파괴된 절개사면을 대상으로 교란 및 불교란 시료를 채취하여 물리적·역학적 특성을 규명하기 위한 여러 가지 시험을 실시하였다. 또한 강우로 인한 사면안정해석을 위해 투수계수를 고려한 침투심도와 강우강도를 고려한 침투심도를 구한 후 이를 토대로 유한요소해석 프로그램인 FLAC/SLOPE를 사용하여 침투심도 및 절토사면 구배를 변화시키면서 강우로 인한 석회암 풍화토 사면의 안전을 변화를 규명하고자 하였다.

## 침투심도이론

1993년 Pradel & Raad는 Green & Ampt(1911) 모델을 이용하여 강우강도, 지속시간 및 재현기간을 고려할 수 있는 사면의 안정성 평가기법을 제안하였다. Green-Ampt(1911)가 제안한 누가 침투량  $F$ 로부터 침투심도  $z_w$ 까지 지반을 포화시키기 위해 필요한 시간( $T_w$ )은 식 1로 나타내었다.

$$T_w = \frac{\Delta w}{K} \left[ z_w - \Psi \ln \left( \frac{\Psi + z_w}{\Psi} \right) \right] \quad (1)$$

여기서  $\Delta w$ : 토양부족수분

$K$ : 투수계수

$\Psi$ : 모관흡수력

$z_w$ : 침투심도

$T_w$ :  $z_w$  깊이까지 포화되기 위한 지속시간

여기서, 안전율이 1이 되는 임계 깊이  $z_w$ 까지 포화를 얻기 위해서는 강우강도는 지반의 침투율( $f$ )을 초과해야하며 침투깊이  $z_w$ 까지 포화되도록 충분히 지속되어야 한다. 따라서 침윤전선이 깊이  $z_w$ 까지 진행하여 포화되기 위해서는 강우강도의 지속시간

$T \geq T_w$ 이고, 강우강도  $I \geq f$  이어야 한다. 이 가정은  $z_w$  깊이까지의 포화되기 위한 최소한의 필요조건이다.

$$T_{min} = T_w, I_{min} = f \quad (2)$$

여기서,  $I$ : 강우강도

$f$ : 침투율

식 1과 침투율인  $f(t) = K \frac{(h_0 + z_w + \Psi)}{z_w}$  를 식 2에 대입하여 최소강우강도식을 정리하면 식 3과 같다.

$$I_{min} = f = \frac{\Delta w}{T_{min}} [z_w - \Psi \ln(\frac{\Psi + z_w}{\Psi})] (\frac{z_w + \Psi}{z_w}) \quad (3)$$

여기서,  $T_{min}$ :  $z_w$  깊이까지 포화되기 위한 최소지속시간

또한, 지반의 투수계수가 한계투수계수 ( $K_{lim}$ )보다 작으면 지반이 포화되지 않는다고 가정하였으며 한계투수계수 식은 4와 같다.

$$K_{lim} = I_{min} (\frac{z_w}{z_w + \Psi}) = \frac{\Delta w}{T_{min}} [z_w - \Psi \ln(\frac{\Psi + z_w}{\Psi})] \quad (4)$$

### 석회암 풍화토의 물리적·역학적 특성

#### 성분 및 물리적 특성

본 연구의 대상지반은 전남 장성군 일대의 석회암 지대로 강우 시 파괴된 절개지 사면에서 석회 풍화토를 채취하여 비중시험(KS F2308), 입도분석시험(KS F2302), 액성한계시험(KS F2303) 등 기본적인 물성시험을 실시하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 비중은 2.73이고 #200체 통과 량이 48.75%이며 통일분류법에 의해 SC로 분류 되었다.

석회암 모암 및 석회암 풍화토의 입자크기 및 광물 조성을 파악하기 위해 SEM분석 및 채취한 시료를 노

건조 시켜 #200체를 통과한 시료에 대해 X-Ray회절분석을 실시하였다. SEM분석결과 모암입자는 표면이 매끄러운 반면에 풍화토 입자에서는 표면이 거칠고 얇은 판상으로 흩어지는 현상을 보이고 입자들이 층상의 구조를 이루며(Fig.1) Table 2의 EDS분석에 의하면 모암에서는 칼슘성분이 22.05%이었으나 풍화가 진행됨에 따라 2.29%로 급격히 감소함을 알 수 있다. Fig. 2의 XRD 회절분석결과와 석회암 모암에서는 탄산염 광물인 방해석과 아라고나이트, 정장석, 카오리나이트, 석영이 발견되었으나 풍화토에서는 석영, 정장석, 김사이트, 침철석이 발견되었다. 또한, 양이온 교환시험(Cation Exchange Capacity)결과 CEC값은 18.94 (meq/100g)로써 팽압의 가능성은 없는 것으로 보이며 Table 3은 양이온 교환시험결과를 나타낸 것이다.



(a) Limestone



(b) Weathered limestone

Fig. 1. SEM images of limestone and weathered limestone(20KV, X40,000)

Table 1. Physical properties of weathered limestone

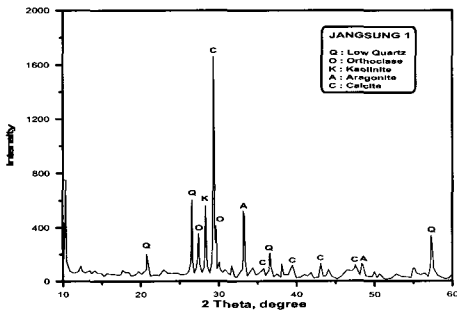
| Specimen            | Gs   | LL (%) | PL (%) | PI (%) | #200 (%) | Compaction         |        | USCS |
|---------------------|------|--------|--------|--------|----------|--------------------|--------|------|
|                     |      |        |        |        |          | $\gamma_d (t/m^3)$ | OMC(%) |      |
| Weathered limestone | 2.73 | 35.24  | 20.67  | 14.57  | 48.75    | 1.56               | 23     | SC   |

Table 2. Results of EDS

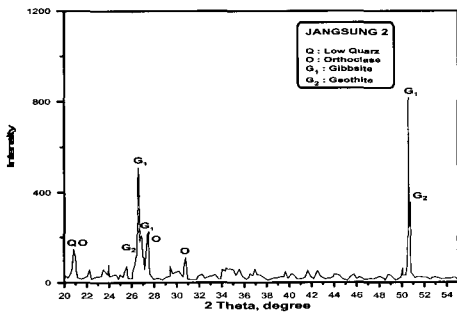
| Specimen            | O (%) | Ca (%) | Si (%) | Fe (%) | Al (%) | Mg (%) | K (%) | Mn (%) | sum(%) |
|---------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Limestone           | 40.02 | 22.05  | 21.79  | 8.38   | 4.85   | 1.54   | 1.37  | -      | 100    |
| Weathered limestone | 39.05 | 2.29   | 31.69  | 13.71  | 8.46   | 0.06   | 4.13  | 0.61   | 100    |

Table 3. Results of cation exchange capacities

| Specimen            | CEC( meq/100g) | Cation( meq/100g) |                |                  |
|---------------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
|                     |                | Ca <sup>2+</sup>  | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> |
| Weathered limestone | 18.94          | 14.78             | 0.57           | 4.92             |



(a) Limestone



(b) Weathered limestone

Fig. 2. Results of X-ray diffractions

투수특성

시료의 투수시험은 KS F 2322의 시험방법에 준하였으며 절개지의 경사면에서 전단 링(H: 2cm, ϕ : 6.2cm)으로 불교란 시료를 채취하여 건조단위중량(γ<sub>d</sub>)과 함

수비를 측정하였다. 시험결과 건조단위 중량(γ<sub>d</sub>)은 1.41 t/m<sup>3</sup> 이고 함수비는 26.91%로서 석회암 풍화토를 조제하여 다짐시험을 시행한 결과 다짐층수는 3층, 다짐횟수는 10회를 낙하 하였을 때 현장조건과 일치 하였으며 이의 조건으로 변수위 투수시험의 시료를 성형하였다. 변수위 투수시험결과 투수계수 k는 2.56×10<sup>-4</sup> cm/sec 로서 보통의 사질토보다 낮은 투수계수 값으로 실트 성 점토의 투수계수와 비슷한 값을 보였다.

전단특성

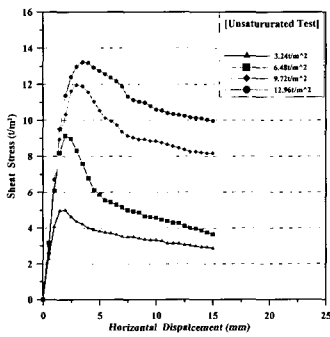
석회암 풍화토의 전단특성을 파악하기위해 건조단위 중량(1.41t/m<sup>3</sup>)하에서 직접전단시험(KS F2343-92)방법으로 불포화토와 포화토에 대해 직접전단시험을 실시하였다. 수직하중은 4단계 (3.24 t/m<sup>2</sup>, 6.48 t/m<sup>2</sup>, 9.72 t/m<sup>2</sup>, 12.96t/m<sup>2</sup>)로 나누어 재하 하였으며 전단강도-전단변위 그래프에서 Peak강도를 택하여 파괴포락선으로부터 전단정수를 결정하였으며 Table 4에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 불포화토에서 포화토로 변할수록 점착력 C 값은 3.0 t/m<sup>2</sup>에서 0.72 t/m<sup>2</sup>로 현저하게 줄어들었으며 내부마찰각 ϕ 값도 줄어드는 양상을 보였다. Fig. 3은 불포화 상태일 때 수평변위-전단응력(a), 수평변위-체적변화(b)와 전단응력-수직응력의 관계(c)를 도시한 것이며, Fig. 4는 포화상태 일 때의 결과를 보인 것이다. 수평변위와 전단강도의 관계를 보면, 전체적으로 건조단위중량이 증가할수록 조밀한 모래나 과 압밀 점토에서 볼 수 있는 파괴점이 뚜렷이 나타

났다. 또한, 수평변위와 체적변화의 관계를 보면 수직 응력 3.24, 6.48, 9.72  $t/m^2$  의 세 단계에서 불포화토는 대체적으로 압축(-) Dilatancy) 되었다가 팽창(+) Dilatancy)하는 경향을 보여주고 있으며 수직응력이 작을수록 팽창현상은 크게 나타남을 알 수 있다. 포화토의 경우 수직응력 3.24 $t/m^2$ 에서는 수평변위가 2.5mm까지 급격히 팽창(+)Dilatancy)되다가 이후에

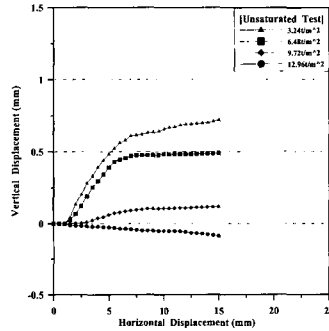
는 완만히 팽창하는 경향을 보이고 나머지 수직응력 6.48, 9.72, 12.96  $t/m^2$ 에서는 모두 압축(-)Dilatancy)하는 경향을 보이고 있다. 전단변형에 따른 체적변형의 결과에서 포화토는 수직하중 증가에 따라 건조측에서는 적은 팽창이 발생하고 습윤측으로 갈수록 큰 압축 현상이 발생함을 알 수 있다.

**Table 4.** Shear strength of saturated and unsaturated specimens

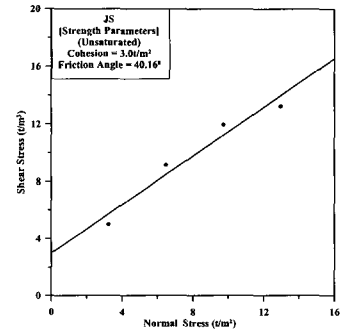
| Condition    | $G_s$ | $w$ (%) | $S$ (%) | $c$ ( $t/m^2$ ) | $\phi$ ( $^\circ$ ) | $\gamma_d$ ( $t/m^3$ ) |
|--------------|-------|---------|---------|-----------------|---------------------|------------------------|
| Unsaturation | 2.73  | 26.91   | 78.56   | 3.0             | 40.2                | 1.41                   |
| Saturation   | 2.73  | 40.14   | 96.36   | 0.72            | 27.7                | 1.41                   |



(a)  $\tau - Disp.$

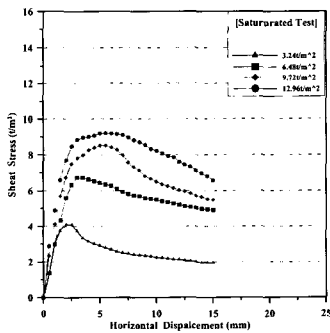


(b)  $\epsilon_v - Disp.$

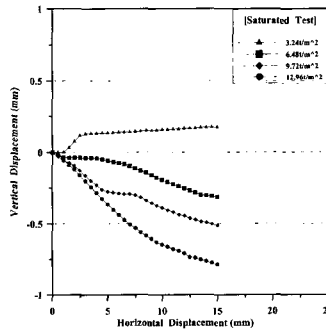


(c)  $\tau - \sigma$

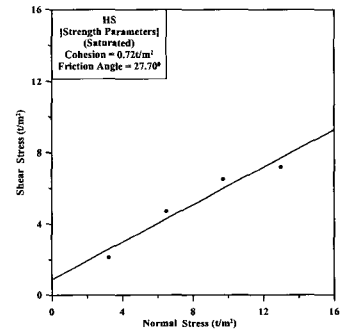
**Fig. 3.** Results of shear strength tests on unsaturated specimens



(a)  $\tau - Disp.$



(b)  $\epsilon_v - Disp.$



(c)  $\tau - \sigma$

**Fig. 4.** Results of shear strength tests on saturated specimens

### 사면안정해석

### 강우강도를 고려한 침투심도

#### 투수계수를 고려한 침투심도

투수계수를 고려한 침투심도는 식 1에 의해 구하였다.  $T_w$ 는 침투심도  $z_w$ 에 도달하는데 필요한 시간이며  $\Psi$ 는 모관흡수력으로 Brooks와 Corey(1964)가 제시한 반 경험식을 사용하여 구하였으며,  $\Delta w$ 는 토양부족수분으로 초기함수비( $w_i$ )와 포화함수비( $w_s$ )의 차이이다. 표 5는 투수계수를 고려한 침투심도 산정 시 적용한 제반 값들을 나타낸 것이며 투수계수와 지속시간을 고려한 침투심도는 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 침투심도는 시간에 비례하여 증가함을 알 수 있었다.

강우강도-지속시간을 고려한 침투심도 산정에 있어 사용한 확률 강우강도식은 식 5와 같으며 a, b, c, d, n의 계수 값과 결정계수는 건설교통부 연구보고서(2000) 중 장성에 근접해 있는 광주값을 사용하였다. Table 6은 각종 계수 값을 나타낸 것이며 확률강우강도식에 의해 구해진 강우강도를 식 3에 대입하여 지속시간에 따른 침투심도를 구하여 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 재현 기간은 일정한 기간 동안에 어느 크기의 호우가 발생할 횟수를 말하며 대체로 임의의 강우량이 1회 이상 같거나 초과되는데 소요되는 변수로 표시되며 본 연구에서는 재현기간을 2, 5, 10, 30, 50년으로 가정하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 재현기간이 길수록 침투심도는 커짐을 알 수 있고 시간에 따라 침투심도 또한 커짐을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6(재현

Table 5. Input parameters used in the seepage depth analysis

| Specimen            | $\Psi$ ( cm ) | $K$ ( cm/hr ) | $\Delta w$ |
|---------------------|---------------|---------------|------------|
| Weathered limestone | 45.63         | 0.92          | 0.13       |

Table 6. Rainfall intensity parameters(Ministry of Construction & Transportation, 2000)

| NO  | Region  | Time(min.) | Parameters |          |         |         |        | $R^2$   | $\Sigma(s^2)$ |        |
|-----|---------|------------|------------|----------|---------|---------|--------|---------|---------------|--------|
|     |         |            | a          | b        | c       | d       | n      |         |               |        |
| 156 | Gwangju | 60         | Short T.   | 185.4785 | 97.5953 | 0.5941  | 0.1531 | -0.1131 | 0.9997        | 81.364 |
|     |         | Long T.    | 354.2587   | 78.4099  | -0.6737 | -0.0313 | 0.3859 | 0.9992  | 78.981        |        |

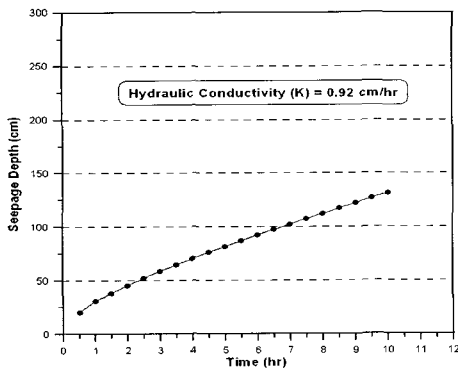


Fig. 5. Seepage depth versus time  
(  $K = 0.92\text{cm/hr}$  )

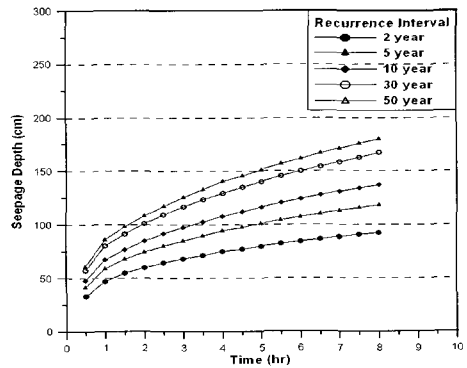


Fig. 6. Seepage depth versus time for different recurrence interval

기간 50년)의 일정한 심도에서 분석해 보면, 투수계수만 고려한 침투심도보다는 강우강도를 고려한 경우 빠른 침투가 일어나고 시간 또한 적게 걸린다. 일반적으로 얇은 사면의 파괴는 집중 강우 시 단시간에 일어나기 때문에 강우강도를 고려한 침투심도를 구하는 것이 합리적이라고 판단된다.

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

여기서,  $I$ : 확률강우강도  
 $T$ : 재현기간  
 $a, b, c, d, n$ : 지점별 계수 값

**침투심도에 따른 사면안정해석**

침투심도에 따른 사면안정해석은 강우강도를 고려한 침투심도가 타당하다고 판단되어 강우지속시간 2, 5, 10, 15, 20, 24시간마다의 침투심도 및 누적강우량을 산정하여 각 시간마다 사면의 구배를 1:0.6 ~ 1:1.5까지 변화시켜 가면서 안전율을 구하였다. Fig. 7은 대표적인 해석단면의 유한요소망을 나타낸 것이며 적용된 지반물성은 Table 7과 같다. 사면안정해석은 유한요소해석 프로그램인 FLAC/SLOPE를 사용하였으며 Fig. 8은 대표적인 단면(사면고가 5m, 사면구배 1:1.2)의 해석결과를 나타낸 것이다. 누적강우량은 2002년 8월 10일부터 20일까지 10일 동안 약 235.5mm이고 강우시간 10시간 일 때의 누적강우량이 247mm로서 두 경우 누적강우량이 비슷하기 때문에 재해발생위험강우량으로 가정하여 강우시간 10시간 일 때의 누적강우량을 적용하였다. Table 8은 해석에서 구한 안전율을 나타낸 것으로 강우시간이 길고 침투심도가 클수록 사면의 안전율은 적어 불안정하게 된다. 해석결과에서 나타난 안전율을 한국도로공사의 도로설계요령(1976), 일본도로공단 등이 제시한 침윤선을 고려한 절토사면 최

소안전율 1.5와 비교해보면 본 연구에서는 강우 시 석회암 풍화토의 절토사면 구배는 1:1.2 이상 되어야 안전율을 만족한 것으로 나타났으며 사면구배를 증가시킬수록 안전율은 증가한 것으로 나타났다. 안전율 감소원인은 전절의 전단강도 결과에서 나타난 바와 같이 강우직전에는 불포화상태(부의 간극수압 존재)로 존재하다가 강우가 지속되어 지반이 포화(정의 간극수압 전환)되면 내부마찰각보다 점착력이 크게 감소하

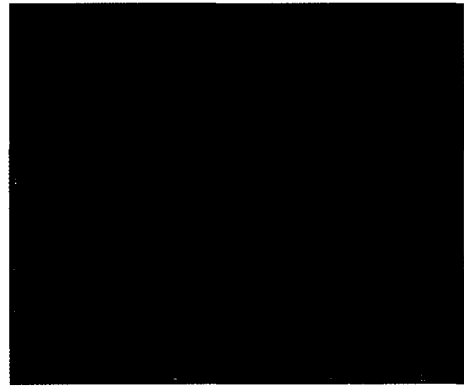


Fig. 7. Finite element mesh for slope stability analysis

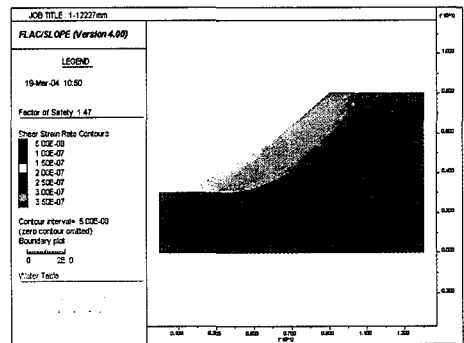


Fig. 8. Results of slope stability analysis (Slope 1:1.2, seepage depth: 227mm)

Table 7. Input parameters used in the slope stability analysis

| Condition    | $\gamma_t (t/m^3)$ | $\gamma_{sat} (t/m^3)$ | $c (t/m^2)$ | $\Phi (^\circ)$ |
|--------------|--------------------|------------------------|-------------|-----------------|
| Unsaturation | 1.78               | 1.98                   | 3.0         | 40.2            |
| Saturation   | 1.98               | 1.98                   | 0.72        | 27.7            |
| Interface    | 1.87               | 1.98                   | 1.82        | 33.9            |

Table 8. Summary of slope stability analysis

| $z_w$<br>(mm) | T<br>(hr) | I<br>(mm) | $F_s$ (Safety factor) |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-----------|-----------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               |           |           | 1:0.6                 | 1:0.8 | 1:1.0 | 1:1.2 | 1:1.3 | 1:1.4 | 1:1.5 |
| 108           | 2         | 100       | 1.44                  | 1.65  | 1.87  | 2.45  | 2.66  | 2.94  | 2.98  |
| 151           | 5         | 146       | 1.35                  | 1.48  | 1.65  | 1.89  | 2.16  | 2.34  | 2.49  |
| 195           | 10        | 247       | 1.19                  | 1.35  | 1.39  | 1.55  | 1.69  | 1.81  | 1.97  |
| 227           | 15        | 400       | 1.10                  | 1.25  | 1.34  | 1.51  | 1.62  | 1.73  | 1.83  |
| 252           | 20        | 579       | 1.04                  | 1.27  | 1.32  | 1.48  | 1.57  | 1.68  | 1.81  |
| 271           | 24        | 723       | 1.01                  | 1.18  | 1.25  | 1.38  | 1.51  | 1.65  | 1.74  |

기 때문이며 강우가 지속되어 파괴면에서 실제 수직 응력보다 큰 과잉간극수압이 발생(함수비 증가)하게 되면 전단강도는 Zero에 근접하여 일순간에 사면활동이 발생되는데 이는 오재화(2003)의 연구결과와 일치한다.

## 결론

전라남도 장성군 일대에 분포하는 석회암 풍화토의 물리적·역학적 특성에 대한 시험과 강우 시 침투심도를 고려한 사면안정해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 석회암 풍화토는 석영, 정장석, 깃사이트, 침철석 등으로 구성되어 있고 비중은 2.73, 통일분류상 SC에 해당되며 석회암 모암에서는 칼슘성분이 22.05%이었으나 풍화가 진행됨에 따라 2.29%로 급격히 감소함을 알 수 있었다.

2. 변수위 투수시험 결과 투수계수는  $2.56 \times 10^{-4}$  cm/sec 로서 보통의 사질토보다 낮은 투수계수 값으로 실트 성 점토의 투수계수와 비슷한 값을 보였으며 전단시험결과 포화토와 불포화토 모두 건조단위중량이 증가하면서 조밀한 모래나 과압밀 점토에서 볼 수 있는 뚜렷한 Peak점을 보였다. 체적변화의 관계를 보면 불포화토의 경우 전반적으로 압축되었다가 팽창하는 Dilatancy현상이 뚜렷하였으며 포화토의 경우 수직하중의 증가에 따라 건조측에서는 적은 팽창이 습윤측으로 갈수록 큰 압축현상이 발생하였다. 또한,

불포화토에서 포화토로 변할수록 점착력은  $3.0 t/m^2$ 에서  $0.72 t/m^2$ 로 현저하게 줄어들었으며 내부마찰각  $\phi$ 값도 감소하는 경향을 보였다

3. 침투심도 산정결과 투수계수만 고려한 침투심도 보다는 강우강도를 고려한 경우 빠른 침투가 단기간에 일어나며 일반적으로 얇은 사면 파괴의 경우 집중 강우 시 단시간에 일어나는 점으로 보아 강우강도를 고려한 침투심도를 구하는 것이 합리적이라고 판단된다. 침투심도에 따른 사면안정해석결과 강우시간이 길고 침투심도가 클수록 사면의 안전율은 적어 불안정하게 되며 침윤선을 고려한 절토사면의 최소안전율 1.5와 비교할 경우 강우를 고려한 석회암 풍화토의 절토사면 구배는 1:1.2이상 되어야 안전율을 만족한 것으로 나타났다. 또한 강우직전에는 불포화상태(부의 간극수압 존재)에서 강우가 지속되어 지반이 포화(정의 간극수압 전환)되면 내부마찰각보다 점착력이 크게 감소하는 것으로 보아 안전율에 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

## 참고 문헌

- 건설교통교부, 2000, 한국 확률강우량도 작성, 1999년도 수자원 관리기법 개발 연구조사 보고서, V. 1, pp 94~154.
- 김기영, 1995, 혈암풍화토의 전단특성에 관한 연구, 경북대학교 석사학위논문.
- 김영수, 이상복, 정성관, 1995, 퇴적암 풍화토의 공학적 특성-대구·경북지역을 중심으로, 한국지반공학회지. v.11(4), pp.63~74.



김재홍 외 3명, 2002, 강우 시 습윤에 의한 불포화 풍화토의 사면안정해석 연구, 한국지반공학회지, 제 18권, 제 2호, pp 123~136.

박병기, 1998, 한국화강토의 토목공학적 특성연구, 한국과학재단, pp.10~54.

안일환, 2001, 강우 침투 시 얽은 파괴가 발생하는 토사 사면에 대한 안정해석, 경기대학교 석사학위 논문.

이상복, 1994, 혈암풍화토의 공학적 특성 연구-대구 앞산 지역을 중심으로, 경북대학교 석사학위논문

이선주, 2001, 강우 시 사면의 침투거동에 관한 연구, 홍익대학교 석사학위논문.

이영수, 1983, 화강풍화토의 파쇄 및 다짐에너지가 투수성에 미치는 영향, 대한토목학회지, v.3(3), pp.107-116.

오재화, 이광찬, 2003, 실내시험에 의한 붕괴사면 경계면의 전단강도 특성, 대한토목학회지, v23(6), pp.373-381.

Brooks, R. H. and Corey, A. T.,1964, Hydraulic properties of porous media, Hydrology paper No.3, Civil Eng. Department, Colorado State University, Fort Collins.

Green, W. H., and Ampt, G. A.,1911, Studies of soil physics I. The flow of air and water through soils, J. Agr. Sci., 4, pp.1~24.

Pradel, D. and Raad, G. 1993, Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes, J. Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.119(2), pp.315 ~ 332.

투 고 일 2004년 11월 02일  
 심 사 일 2004년 11월 03일  
 심사완료일 2005년 1월 20일

김종렬  
 전남대학교 토목공학과 부교수  
 500-757, 광주광역시 북구 용봉동 300번지  
 Tel : 062-530-1654  
 Fax : 062-530-1651  
 E-mail : jrkim@chonnam.ac.kr

강승구  
 (주)다산이엔지  
 151-762, 서울특별시 관악구 봉천2동 1703-1번지  
 동아아파트내 다산빌딩(B상가)  
 Tel : 02-873-1705  
 Fax : 02-873-1708  
 E-mail : sg75@lycos.co.kr

강희복  
 한영대학 토목환경과  
 550-260, 여수시 여서동 산19번지  
 Tel : 061-650-4104  
 Fax : 061-650-4020  
 E-mail : kang4104@hanmail.net

박승균  
 남양건설(주) 상무이사  
 501-180, 광주광역시 동구 광산동 10-4 남양빌딩  
 Tel : 062-231-1070  
 Fax : 062-232-9962  
 E-mail : psk1412@namyang.co.kr

박철언  
 전라남도 도청 지역 계획과  
 501-702, 광주광역시 동구 광산동 13번지  
 Tel : 062-607-4807  
 Fax : 062-607-6178  
 E-mail : pcw1003@empal.com