

화강풍화토 지반의 불포화 특성을 고려한 최적화기법에 의한 사면안정해석 방법

Slope Stability Analysis by Optimization Technique Considering Unsaturated Characteristics of Weathered Granite Soil

이 승 래*¹ Lee, Seung-Rae 이 성 진*² Lee, Sung-Jin
변 위 용*³ Byeon, Wi-Yong 장 범 수*⁴ Jang, Bhum-Soo

Abstract

Since most of soil slopes are in an unsaturated state, it is necessary to consider the unsaturated characteristics of soil slopes, in order to obtain more reasonable results. Therefore in this study we supplemented a slope stability analysis program to consider them, based on the concept of limit equilibrium. We also applied an optimization technique to search for a failure surface. Besides, we carried out experiments to obtain the unsaturated soil properties required in the analysis with weathered granite soils. We formulated a nonlinear apparent cohesion relationship with the matric suction to be able to apply the unsaturated shear strength characteristics to the stability analysis. In addition, we intended to obtain more accurate soil water characteristic curves(SWCC) by measuring the change in volume of the specimen in the SWCC tests. As a result, we could appropriately assess the change of the safety factor according to the rainfall intensity and duration, by considering the variation of suction, permeability, and shear strength caused by the infiltration of rainfall into slopes.

요 지

대부분의 토사사면은 불포화 상태로서, 이 경우 기존의 모관흡수력을 무시한 해석에 비해 보다 합리적인 결과를 얻을 수 있도록 대상 사면지반의 불포화 특성을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 지반의 불포화 특성을 고려할 수 있도록 한계평형법에 의한 사면안정해석 프로그램을 보완하여 작성하였으며 임계단면 탐색을 위하여 최적화 기법을 적용하였다. 그리고 이와 같은 해석을 위한 불포화 설계변수를 얻기 위해 국내의 대표적 지반 재료인 화강 풍화토에 대해 실험을 수행하였다. 실험자료 분석결과 불포화 강도특성을 안정해석에 적용하기 위해 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력 변화를 비선형성을 고려하여 수식화하였다. 또한 부피변화를 측정함으로써 함수특성곡선을 보다 정확하게 얻고자 하였다. 본 연구 결과를 통해 강우에 의한 침투로 야기되는 사면내부의 모관흡수력의 변화와 그에 따른 투수특성 및 강도특성변화를 고려함으로써 강우강도와 지속시간에 따른 안전율 변화를 보다 적절히 판단할 수 있었다.

Keywords : Limit equilibrium, Optimization technique, Shear strength, Slope stability, Soil water characteristic curve, Unsaturated soil

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., KAIST)
*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., KAIST)
*3 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., KAIST)
*4 정회원, 시설안전기술공단 기술개발지원실 차장 (Member, Vice Chief. KISTEC)

1. 서론

사면의 안정성 해석을 위한 두 요소(최소안전율과 임계단면)를 결정하기 위하여 가장 보편적으로 적용되는 한계평형법은 주어진 사면에 대하여 주어진 하나의 가상활동면에 대한 안전율을 구하게 된다. 이때 사용되는 방법들은 기존의 많은 연구를 통해 제안되어 왔으며 가상활동면의 형상과 주어진 대상 사면지반 특성 및 적용성에 따라 적절히 사용될 수 있다. 그리고 이와 같이 적절히 선택된 방법은 가상된 활동면에 대한 안전율을 비교적 잘 산정하는 것으로 알려져 있다. 그러나 주어진 대상 사면에 대한 안정성을 평가하기 위해서는 최소의 안전율을 갖는 임계단면을 적절하게 선택할 수 있어야 한다. 또한 불포화 사면지반에 대하여 사면안정해석을 수행하고자 할 때에는 기존의 포화토에 대하여 개발된 해석방법을 그대로 적용하기에는 한계가 있다.

대부분의 잔류토 사면은 일반적으로 지하수면 위에 존재하게 되며 자연상태에서 불포화상태로 음의 간극수압을 갖게 된다. 이러한 음의 간극수압은 모관흡수력(matric suction)이라 하며 잔류토 사면의 안정성에 유리한 방향으로 작용한다. 최근 들어 많은 연구자들이 이러한 불포화사면의 안정성을 보다 합리적으로 판단하고 해석하기 위해 불포화상태를 고려한 연구의 필요성을 제기하여 왔다. 이를 위해서는 모관흡수력에 대한 전단강도의 증진효과를 정량화하고 이를 안정해석에 적용하는 것이 요구되고 있는 실정이다.

Fredlund 등(1978)은 확장된 Mohr-Coulomb 파괴면을 정의하여 식 (1)과 같이 모관흡수력에 대한 강도의 증가량을 선형적으로 고려하여 새로운 강도정수 겉보기 마찰각(ϕ^b)으로 표현하였다.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (1)$$

그러나 이후 연구에서 ϕ^b 에 의해 선형적으로 고려하던 겉보기 점착력 부분이 낮은 모관흡수력 범위에서는 ϕ' 와 같은 값으로 선형증가를 보였으나 모관흡수력이 증가하면서 점차 비선형성이 나타나는 것이 확인되었다.

본 논문에서는 국내 화강풍화토에 대한 불포화 특성을 고려한 강도 실험과 함수특성 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 이용하여 비선형성을 고려한 겉보기 점착력 수식화방법과 모관흡수력 변화에 따른 강도변화를 적절히 고려할 수 있는 한계평형법을 이용한 사면안정

해석 방법을 제안하였다. 이때 유한요소해석에 의한 불포화지반 내 침투해석 결과를 이용할 수 있도록 함으로써 강우로 인한 사면의 안정성 판단 시 좀 더 합리적인 해석 결과를 얻고자 하였다. 그리고 주어진 대상사면에 대한 최소안전율을 주는 원호 및 비원호 형상을 갖는 가상 임계활동면을 보다 효율적으로 결정할 수 있도록 최적화 기법을 적용하였다.

2. 모관흡수력 변화에 따른 전단강도 변화 고려방법

2.1 가상활동면상 임의 점에서의 모관흡수력 산정방법

불포화 사면 지반의 경우에는 사면의 안정성이 그 지반 내에 유발된 음의 간극수압에 의해 상당한 영향을 받는다. 이러한 음의 간극수압은 강우강도 및 지속시간 뿐 아니라 선행강우 효과에 의해서도 영향을 받으며, 또한 주어진 대상사면지반의 투수특성에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 강우 등에 의한 불포화토 지반 내에서의 음의 간극수압 변화 영향을 적절히 고려하기 위한 방안이 요구된다. 이때 강우로 인한 침투 영향을 적절히 고려하기 위하여 불포화 지반 내 침투 특성을 고려한 해석결과를 이용할 수 있다. 이를 위해서는 많은 연구자들에 의해 연구가 수행되어 왔으며 현재 이용 가능한 많은 해석방법들이 제안되어 있다.

본 연구에서는 이들 여러 가지 방법 중 비교적 검증이 이루어진 상용 유한요소 프로그램인 SEEP/W(1998)를 사용하여 산정된 음의 간극수압을 사면안정 해석시 이용하는 방안을 고려하였다. 즉 유한요소 침투해석에 의해 산정된 음의 간극수압을 다음과 같은 방법에 의한 한계평형법에서 이용할 수 있도록 하였다.

- 1) 유한요소 해석 결과에 의해 얻어진 각 요소의 절점 좌표와 간극수압값들을 입력받는다.
- 2) 각 절점 좌표 x, y 에 해당하는 국부좌표 ξ, η 값들을 구한다. 이때 본 프로그램에서는 3절점 삼각형 요소와 4절점 사각형 요소에 대하여 해석이 가능하도록 하였다.
- 3) ξ, η 를 이용하여 형상함수(shape function) N_a 를 다음과 같이 구한다.

$$N_a(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi_a \xi)(1 + \eta_a \eta) \quad (2)$$

- 4) N_a 와 각 절점의 간극수압 값들을 이용하여 가상활동

면 내 임의 해당 위치에서의 간극수압값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_k = \sum N_a d_a^e \quad (3)$$

여기서 d_a^e : 절점에서의 간극수압

3. 임계단면 탐색방법

3.1 원호 임계단면 탐색방법

Bishop의 간편법(1955)에서와 같이 원호형상의 가상 활동면을 찾기 위한 최적화 수식형태는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\min F_s(x_c, y_c, x_1) \quad (4)$$

여기서, F_s : 안전율

x_c, y_c : 원호활동면의 중심좌표

x_1 : 원호활동면의 시작점에 대한 x 좌표

이 경우에는 원호형상의 활동면을 단지 3개의 형상변수들에 의하여 정의할 수 있으므로 최적해를 찾는 방법이 비교적 간단하다. 이를 위해 본 연구에서는 BFGS 방법을 적용하였다.

3.2 비원호 임계단면 탐색방법

Spencer 방법(1967) 등의 비원호 파괴단면을 갖는 사면에 대하여 임계단면을 결정하기 위한 방법으로 최적화 기법을 적용한 수식 형태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min F_s(x) \quad (5)$$

제약조건

$$y_i^{LB} \leq y_i \leq y_i^{UB} \quad \text{for } i=2, \dots, n-2 \quad (5a)$$

$$G_j(x_j, x_{j+1}) = x_j - x_{j+1} - \Delta \quad \text{for } j=1, \dots, n-1 \quad (5b)$$

$$\theta_k^{LB} \leq \theta_k(x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, y_{k-1}, y_k, y_{k+1}) \leq \theta_k^{UB} \quad \text{for } k=2, \dots, n-2 \quad (5c)$$

여기서,

x : 형상변수벡터($x_1, \dots, x_n, y_2, \dots, y_{n-1}$)

y_i^{UB} : 사면의 형상에 의하여 결정되는 y_i 좌표의 상한값

y_i^{LB} : 지반의 기존 암반층 등에 의하여 결정되는 y_i 좌표의 하한값

Δ : x 좌표들이 겹쳐지지 않도록 임의의 폭을 갖도록 구속하는 양의 실수값

θ_k : k 번째 절점에 대한 이웃하는 선분사이의 각도

$\theta_k^{LB}, \theta_k^{UB}$: θ_k 에 대한 하한값과 상한값

n : 절점들의 총수

3.3 최적화 전략

본 연구에서는 비원호 파괴형상을 갖는 경우 나타낼 수 있는 비효율적인 결과를 배제하기 위하여 Li & White (1987)와 Greco(1996)에 의해 제안된 바와 같이 최적화 초기에는 적은 개수의 형상변수들로부터 최적해를 탐색하고, 그 이후 가상활동면을 구성하는 각 선분의 중점에 새로운 절점을 생성시키면서 이러한 과정을 반복함으로써 결과적으로 실제 형상에 가까운 최적해를 탐색하는 방법을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 Spencer 방법에서 가정된 가상활동면에 대한 임계단면을 탐색하는 최적화과정을 나타내면 다음과 같다(그림 1).

- 1) 주어진 예상 사면지반 특성을 고려하여 원호 형태의 초기 가상활동면을 선택한다.
- 2) 최적화 기법을 사용하여 3개의 형상변수로 구성되는 원호형상의 임계단면을 탐색한다.
- 3) 비원호 임계단면을 탐색하기 위하여 전 단계에서 결정된 임계단면을 초기 가상활동면으로 가정하여 최적화 탐색을 계속한다.
- 4) 새로운 절점이 가상활동면을 구성하는 각 선분 중점에 생성되어 3)의 최적화 과정이 반복된다.
- 5) 매끄러운 가상활동면을 얻을 때까지 4)를 반복하여 실행한다.
- 6) 만약 가정된 또 다른 초기 가상활동면이 있는 경우에는 2)로 간다. 하지만 그런 경우가 아니면 최종 임계단면과 최소안전율을 결정하고 해석을 끝마친다.

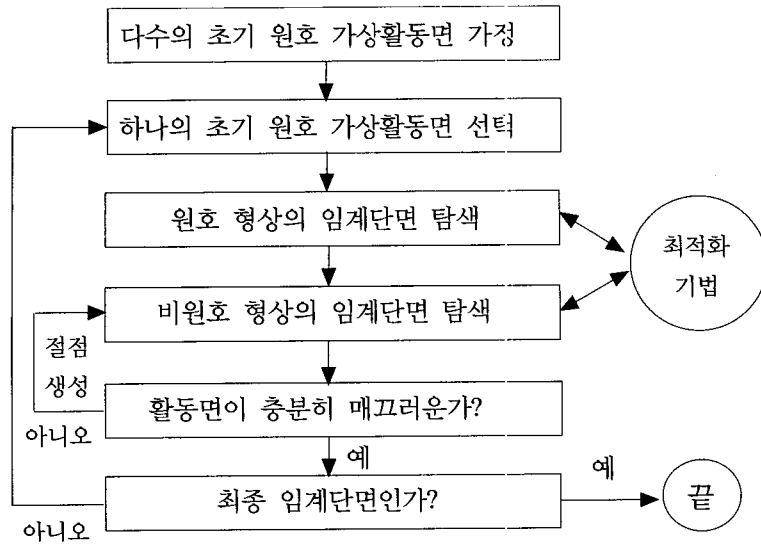


그림 1. 최종적인 임계단면 결정을 위한 최적화 전략(김주용, 1998)

4. 불포화 삼축압축 실험

4.1 실험 장비

기존의 삼축압축 실험 장비를 그림 2와 같이 개조하여 불포화상태를 유지시키며 실험을 수행하였다. 시료에 모관흡수력을 발생시키기 위해서는 음의 간극수압을 유지시키도록 해야 하지만 실제로는 음의 간극수압을 1기압까지밖에 발생시킬 수 없어 실험을 위해서 축변환기법(axis-translation technique)을 사용하였다. 이는 실제 음의 간극수압을 양의 값으로 시료의 받침대를 통해 작용시키고 그와 더불어 간극공기압을 간극수압 증가량만큼 증가된 값으로 시료의 cap을 통해 작용시켜 실제 시료에 작용되는 모관흡수력($u_a - u_w$)은 일정하도록 하였다. 이를 위해서는 간극공기압과 간극수압을 각각 독립적으로 조절할 수 있어야 하므로 5(bar)의 공기압까지 공기를 통과시키지 않고 물의 연속성을 유지시킬 수 있는 높은 공기함입치(air entry value)를 갖는 세라믹 디스크를 시료의 받침에 설치하였다.

4.2 시료와 실험 과정

본 연구에서는 충청북도 옥천에 위치한 ○○건설의 토공구간 사면에서 화강풍화토를 시료로 채취하여 비교란시료와 다짐시료에 대해 기존의 포화 삼축실험과 불포화 삼축실험을 수행하였다. 다짐시료의 경우 95% 최대건조단위증량으로 최적함수비의 5.97% 습윤층으

로 직경 50(mm), 높이 100(mm)의 몰드에 5층으로 다져서 실험하였다.

Fredlund(1995), 류지협(1997) 등의 연구결과들에서 모관흡수력이 증가함에 따라 ϕ' 는 미세하게 증가하는 경향을 보이기는 하나 거의 같은 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 따라서 이번 연구에서도 각 모관흡수력에서 하나의 순수직응력(net normal stress)에 대한 실험만을 수행하여 모관흡수력의 겉보기 점착력(apparent cohesion)에 대한 기여도를 측정하였다.

불포화토에 대한 배수삼축압축실험은 내부에서 발생하는 간극수압의 완전한 소산을 위해 매우 느린 변형률 속도로 수행되어야 하고, 각 모관흡수력에서 평형을 이

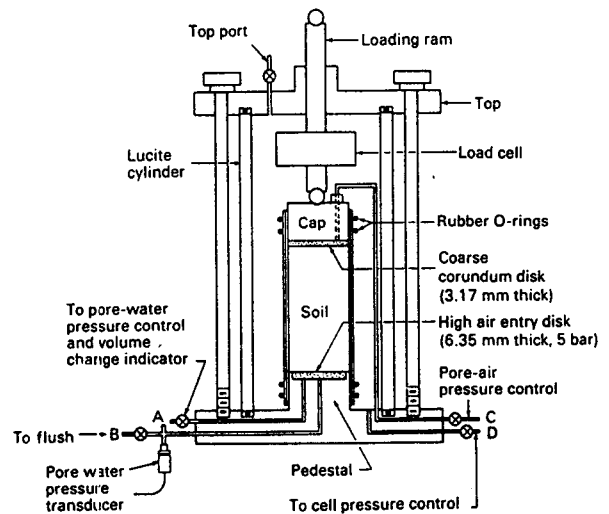


그림 2. 불포화 삼축압축실험 셀 내부구조

루는데 필요한 시간이 매우 길어 시간소모가 크다. 본 연구에서는 이를 위한 적절한 변형률 속도 기준을 마련하여 실험을 수행하였고 시료에 대한 균일성을 유지하기 위해 하나의 시료에 대해 여러 모관흡수력 단계에 대해 실험하는 다단계(multistage) 실험 방법을 채택하여 실험하였다(Fredlund 등, 1995).

불포화토의 삼축압축 실험을 위해 개조된 삼축압축 셀에 포함된 세라믹 디스크의 공기함입치가 500(kPa)인 점을 고려하여 본 실험에서는 다짐시료는 100(kPa)의 순수직응력에 대해 각각 25, 50, 100, 150, 200, 300 및 400(kPa)의 모관흡수력으로, 비교란시료는 각각 50, 200 및 400(kPa)의 모관흡수력을 유지하여 삼축압축실험을 수행하였다.

각 모관흡수력 단계에서 얻어진 최대축차응력으로 각 모관흡수력에 대한 응력상태로부터 파괴시 모아원을 얻을 수 있다. 그리고 포화시료의 배수삼축압축실험에서 구한 내부마찰각(ϕ')의 기울기로 각각의 모아원에 접하는 직선과 모관흡수력-전단강도 면이 만나는 점들로부터 겹보기 점착력(apparent cohesion)을 구할 수 있다(그림 3).

4.3 실험 결과

다짐시료와 비교란 시료에 대해 포화 삼축압축 실험으로부터 얻어진 강도정수 c' , ϕ' 는 각각 표 1, 표 2와 같고, 여러 모관 흡수력에 대해 실험한 불포화 삼축압축 실험의 응력변형률 곡선은 그림 4, 그림 5와 같다. 그리고 앞서 설명한 바와 같이 각 모관흡수력 단계의 마찰각

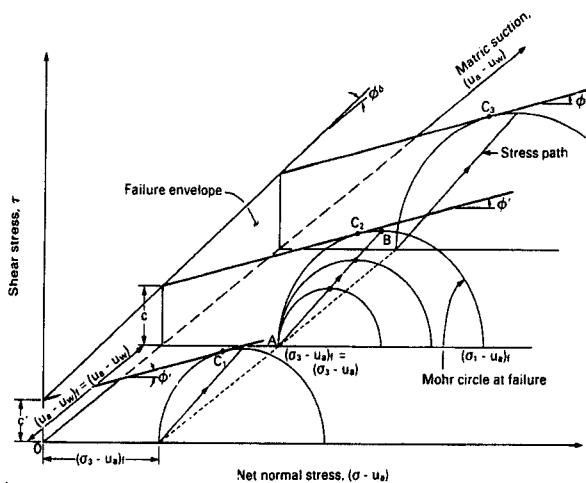


그림 3. 불포화 입밀배수 삼축압축실험의 응력경로와 강도정수

표 1. 습윤축 다짐시료 강도정수

강도정수	c'	ϕ'
		20.45(kPa)

표 2. 비교란시료 강도정수

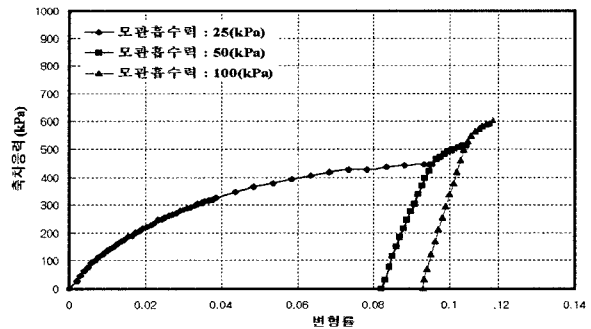
강도정수	c'	ϕ'
		12.4(kPa)

이 일정함을 가정하면 겹보기 점착력은 각각 그림 9, 그림 10과 같이 얻을 수 있다.

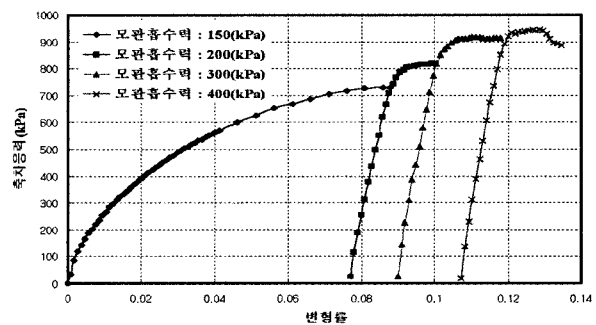
4.4 불포화 강도특성의 수식화

4.4.1 겹보기 점착력의 비선형 수식화

그림 3에서 설명한 바와 같이 모관흡수력과 전단강도면의 겹보기 점착력은 낮은 모관흡수력 범위에서는 포화시료의 내부마찰각, ϕ' 의 기울기로 선형증가하다가 모관흡수력이 증가하면 겹보기점착력의 기울기가 감소하는 비선형 특성을 보이는 것은 여러 연구자들에 의해 밝혀진 사실이다. 따라서 본 논문에서는 이와 같이 모관흡수력에 따라 비선형적으로 증가하는 겹보기 점착력



(a) 모관흡수력 25, 50, 100(kPa)



(b) 모관흡수력 150, 200, 300, 400(kPa)

그림 4. 다짐시료 불포화 응력-변형률 곡선

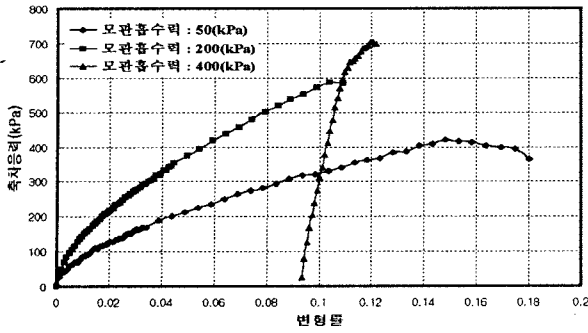


그림 5. 비교란시료 불포화 응력-변형률 곡선

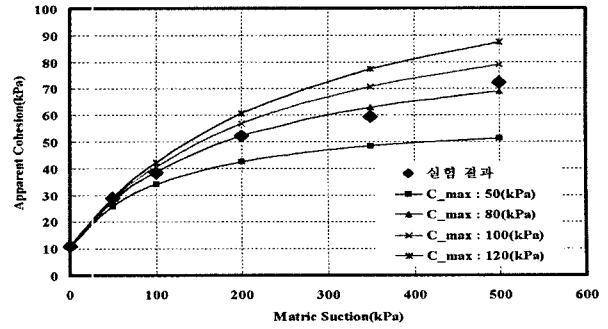


그림 7. TII재료의 실험 결과(Vanapalli, 1996)

Apparent Cohesion(C)

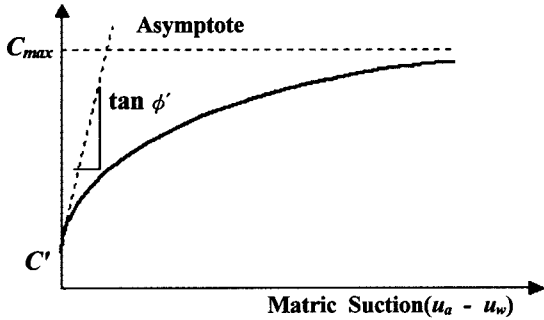


그림 6. 쌍곡선 형태의 걸보기 점착력 변화

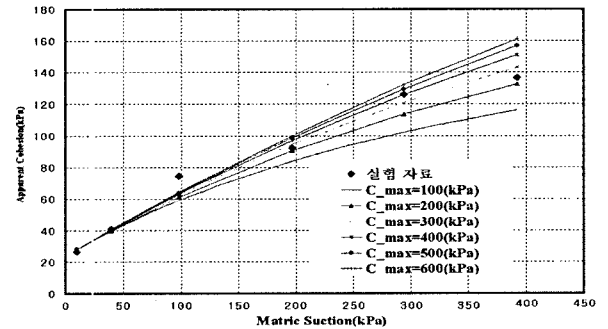


그림 8. 화강풍화토 실험결과(류지협, 1997)

을 사면안정해석에 적용하기 위해 수식화하였다.

그림 6은 기본적으로 가정한 쌍곡선(hyperbolic) 형태를 보여주고 있다. 여기서 초기기울기(1/a)와 최대값(1/b)을 상수로 하여, 모관흡수력에 대한 걸보기 점착력도 이와 같이 초기기울기와 최대값에 해당하는 내부마찰각과 최대 걸보기 점착력을 이용해서 식 (6)과 같이 수식화 할 수 있다.

$$C = c' + \frac{(u_a - u_w)}{a + b(u_a - u_w)} \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{\tan \phi'}, \quad b = \frac{1}{C_{max}}$$

4.4.2 기존 불포화 강도 자료의 적용

위와 같은 걸보기 점착력 변화를 고려한 수식화의 적용성을 검토하기 위해 먼저 기존의 문헌에 발표된 실험 자료인 Vanapalli(1996)와 류지협(1997)의 실험결과를 각각 그림 7과 8에 비교한 결과, 적절한 C_max (최대 걸보기 점착력)에 대해서 가정한 쌍곡선식이 주어진 실험 결과를 비교적 잘 표현하는 것으로 나타났다.

4.4.3 옥천 다짐시료와 비교란시료의 적용

옥천지역의 화강풍화토 다짐시료와 비교란시료에 대한 불포화 배수 삼축압축실험을 수행하여 모관흡수력에

대한 걸보기 점착력의 증가분에 대한 결과를 위에서 설명한 바와 같은 방법으로 수식화하여 비교하였다(그림 9, 그림 10).

5. 함수특성곡선 실험

함수특성곡선은 불포화지반에서 반드시 고려해야 하는 지반의 고유한 특성으로 불포화지반의 다른 물성치를 추정하는데 기본적으로 사용되므로 보다 정확한 함수특성곡선을 구하는 것이 불포화토 거동을 파악하는데 중요한 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 함수특성곡선을 이용해서 불포화 사면지반의 투수특성을 추정하는데 이용하였다.

함수특성 실험을 하는 과정에서 시료는 그 기본적인 물성에 따라 정도의 차이는 있으나 건조와 습윤의 과정을 겪으면서 함수비의 변화에 의해 부피변화가 생기게 된다. 따라서 간극비의 변화와 함께 체적함수비가 변하게 되어 함수특성곡선에 영향을 미치게 되므로, 보다 정확한 함수특성곡선을 얻기 위해서는 부피변화를 측정하는 것이 필요할 것으로 인식되고 있다(이인모 등, 2000). 이에 본 연구에서는 기존의 건조와 습윤과정의 함수특성곡선을 모두 측정할 수 있는 Volumetric Pressure Plate Extractor를 수정하여 부피를 측정할 수 있게 하였다(그림 11).

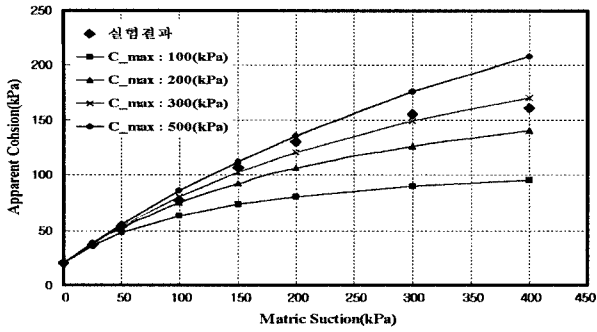


그림 9. 다짐시료의 겉보기 점착력 결과 비교

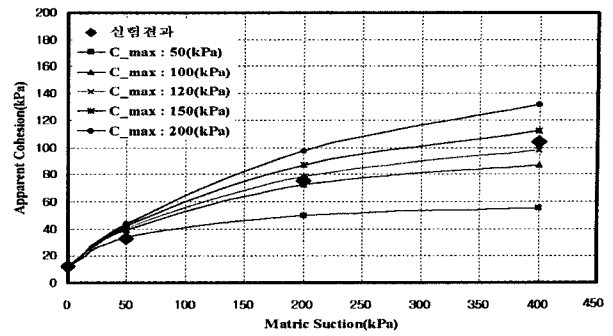


그림 10. 비교란시료의 겉보기 점착력 결과 비교

그림 11에서 보이는 프록시미터는 에디커런트 로스 (Eddy current loss) 원리를 이용해서 작동하는 비접촉식 트랜스듀서이다. 에디커런트는 센서의 코일에 의해 금속판에서 유발되고, 이 에디커런트의 크기는 금속판과 센서 사이의 거리의 함수가 된다. 실험 중에는 시료에 물이 들어오고 나가면서 유발되는 부피의 변화에 따라 금속판의 위치가 변하게 되고, 유발되는 에디커런트의 크기도 변하게 된다. 이때 코일의 임피던스가 변하고 결과적으로 직류전압의 변화를 일으킨다. 이 결과를 이용해서 시료의 부피변화를 측정할 수 있다. 각 모관흡수력에서 평형을 이룰 때 부피변화 측정 이외에는 기존의 Volumetric Pressure Plate Extractor의 실험과정을 따른다.

실험을 위한 시료는 삼축압축실험에 사용하였던 옥천의 화강풍화토의 비교란 시료와 다짐시료를 이용하였다. 실험은 건조과정의 함수특성곡선을 위한 실험으로 진행되었으며, 다짐시료와 비교란시료의 함수특성곡

선은 각각 그림 12와 13에 부피변화를 고려하지 않은 경우와 초기 포화과정의 부피만 고려한 경우, 그리고 모든 과정의 부피변화를 고려한 경우로 비교하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 부피를 보정하지 않는 기존의 실험방법으로 얻은 결과는 실제 부피변화를 고려한 경우에 비해 같은 모관흡수력에서의 함수능력을 과대평가하는 경향을 보였으며, 그 차이는 모관흡수력이 작은 범위에서 더 크게 나타났다.

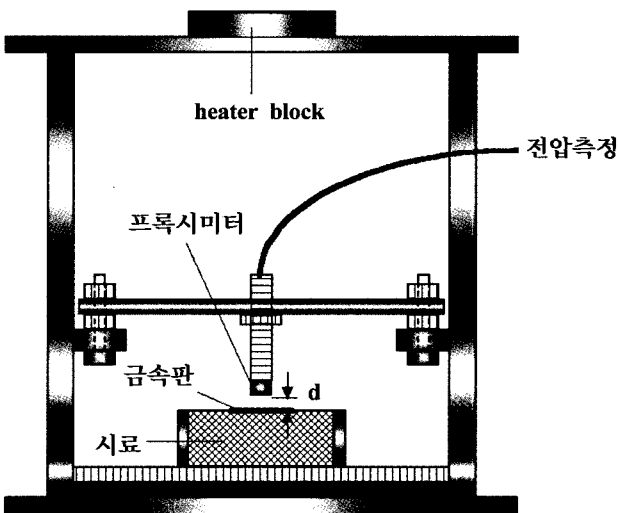


그림 11. 개조한 함수특성 실험 장치

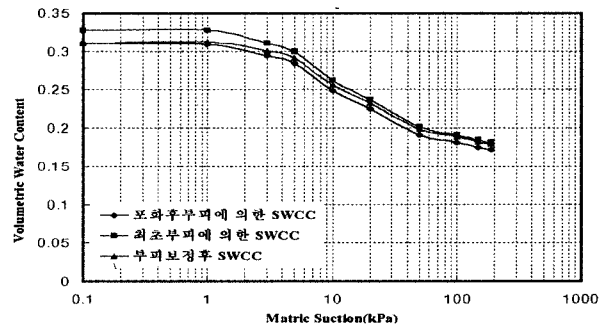


그림 12. 옥천 풍화토 다짐시료의 함수특성곡선

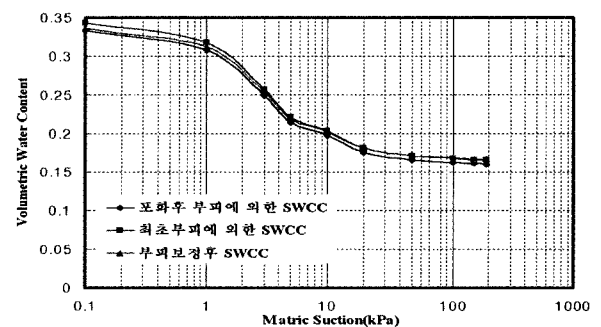


그림 13. 옥천 풍화토 비교란시료의 함수특성곡선

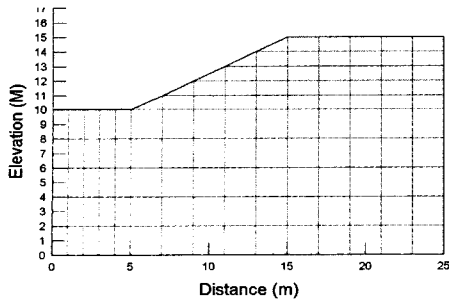


그림 14. 해석 단면

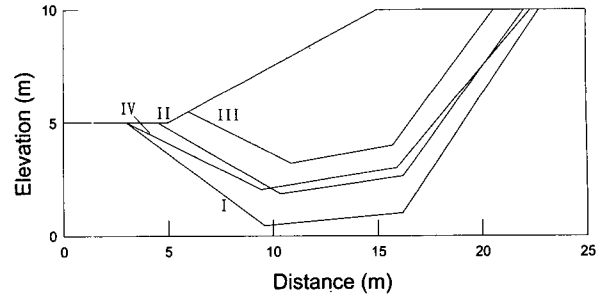
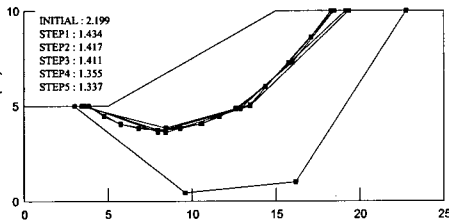
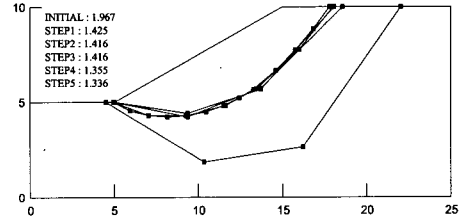


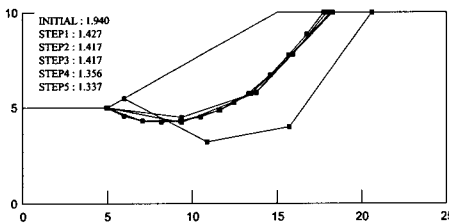
그림 15. 해석 단면과 초기활동면



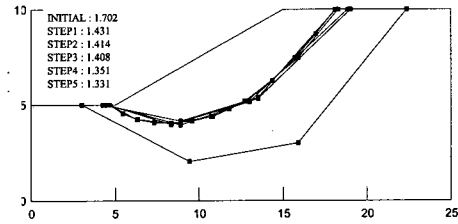
(a) 파괴면 I



(b) 파괴면 II



(c) 파괴면 III



(d) 파괴면 IV

그림 16. 파괴면의 형상 변화로 살펴본 최적화 과정

6. 프로그램 검증 및 적용

6.1 불포화 사면지반의 안정해석 결과 검증

본 연구에서 제안된 최적화기법을 적용한 사면안정 해석 프로그램을 검증하기 위하여 불포화 지반 특성을 고려할 수 있는 상용 프로그램으로 널리 사용되고 있는 SLOPE/W와 SEEP/W를 사용하여 얻어진 안전율과 비교하였으며 강우에 따른 사면의 안정성 변화를 살펴보았다.

지하수면 상층에 존재하는 불포화토 층에서의 간극 수압 변화는 유한요소 침투해석 프로그램 해석결과를 이용하였다. 그림 14와 표 3으로 표현되는 대상 지반에 대하여 최소안전율을 갖는 파괴면을 구할 수 있다(표 4). 해석 결과 비교된 안전율 값들은 매우 근사한 결과를 나타내고 있다.

본 연구에서 개발된 프로그램에서 비원호 파괴단면

표 3. 지반 물성치들

c' (kPa)	ϕ'	ϕ^b	γ (kN/m ³)
9.8	10°	15°	17.64

표 4. 해석 결과 얻어진 안전율

검증 프로그램	본 프로그램
1.541	1.543

표 5. 안전율 비교

방법	안전율 범위
Yamagami and Ueta (1988)	
BFGS	1.338
DFD	1.338
Powell	1.338
Simplex	1.339-1.348
본 프로그램	1.331-1.337

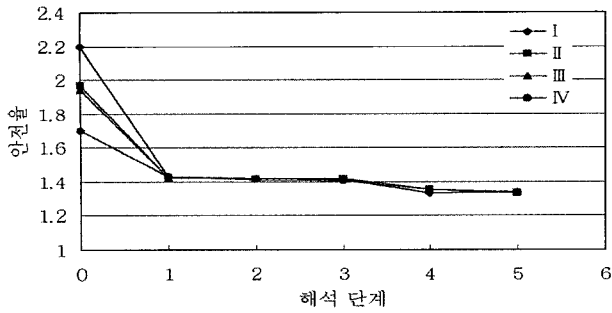


그림 17. 안전율 수렴 과정

을 갖는 사면에 대해 사용된 최적화 방법은 가용방향방법(Feasible direction method)이며, 또한 Yamagami & Ueta(1988)는 그림 15의 대상사면에 대하여 여러 가지 최적화기법을 적용하여 해석을 수행하였다. 본 연구의 해석기법을 적용해서 그림 15의 지반 조건에 대해서 4개의 다른 초기 가상활동면을 가정하여 사면안정해석을 수행한 결과 그림 16, 17과 같이 단계별로 안전율 변화를 보이면서 최종적으로 거의 유사한 안전율과 파괴면을 찾아가는 것으로 나타났다.

6.2 실제 현장 안정해석에 적용

6.2.1 균일한 모관흡수력을 갖는 경우

앞에서 설명된 최적화 기법을 고려한 사면안정해석방법과 불포화지반의 실험 결과를 실제 대상사면에 적용하여 그 효과를 검토해 보았다. 하지만 실제 사면 내부의 지층 구조와 물성 변화 등에 대한 상세한 조사는 이루어지지 않아, 깊이 1m 근처에서 채취되어 실험된 물성을 갖는 균일한 사면으로 가정하여 해석하였다(그림 18).

먼저 포화 강도정수만을 이용해서 실제 지반의 불포화 특성을 무시한 경우에 대해 사면의 안정성 해석을 수행하였다. 그리고 불포화 강도 특성을 고려하기 위해서는 겉보기 점착력의 증분을 선형으로 전체의 모관흡수력 단계에 대해 일정한 기울기(ϕ^b)를 적용한 경우와, 비선형으로 수식화된 겉보기 점착력을 고려할 수 있도록 한 경우, 두가지 경우에 대해 사면의 안정성을 해석해 보았다. 사면의 초기 모관흡수력은 $-50(\text{kPa})$ 로 일정한 상태로 가정하였으며, 비교란 시료에 대해 수행된 실험결과로 얻어진 강도정수로 $c' = 12.4(\text{kPa})$, $\phi' = 36.3^\circ$ 를 사용하였고, 모관흡수력에 대한 겉보기 점착력의 기울기(ϕ^b)는 낮은 모관흡수력에서 $\phi^b = \phi'$ 인 점을 고려하여 36.3° 로 사용하였으며, 최대 겉보기 점착력은 실험

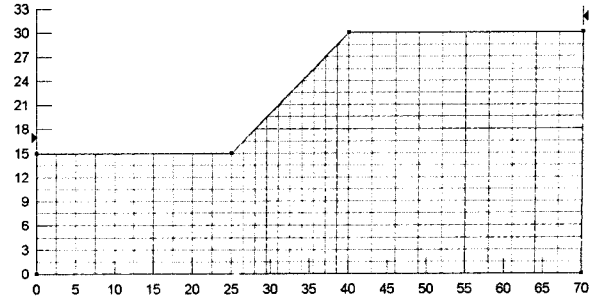


그림 18. 지반형상

결과를 가장 잘 표현한 $C_{\max} = 120(\text{kPa})$ 로 추정하여 식 (7)과 같이 수식화함으로써 모관흡수력에 대한 겉보기 점착력을 추정하여 적용할 수 있도록 하였다.

$$C = 12.4 + \frac{(u_a - u_w)}{1.36 + 0.0083(u_a - u_w)} \quad (7)$$

해석방법과 조건을 달리해서 기존의 포화강도를 입력으로 하여 수행한 결과(I), 불포화 강도를 적용하지만 겉보기 점착력의 선형식을 이용한 경우(II), 그리고 본 연구에서 제안한 비선형 겉보기 점착력 식을 적용하여 수행한 경우(III), 3가지로 나누어서 수행한 결과는 다음 표 6과 그림 19에서 볼 수 있는 바와 같이 안전율과 임계단면을 보였다. (I)의 경우는 1.32의 안전율로서 불포화 특성을 고려한 경우(II, III)에 비해서 사면의 안정성을 매우 과소평가하는 것으로 나타났으며, 불포화 특성을 고려한 경우에도 모관흡수력에 대한 겉보기 점착력의 증분을 선형으로 가정한 경우(II)의 안전율이 2.34로 비선형을 고려한 경우(III)의 2.14에 비해 과대평가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 모관흡수력이

표 6. 해석방법에 따른 안전율 비교

	(I) 포화강도 해석	(II) 선형 불포화강도 해석	(III) 비선형 불포화강도 해석
안전율	1.32	2.34	2.14

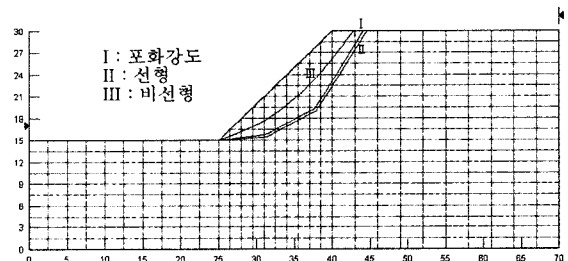


그림 19. 해석방법에 따른 임계면 차이

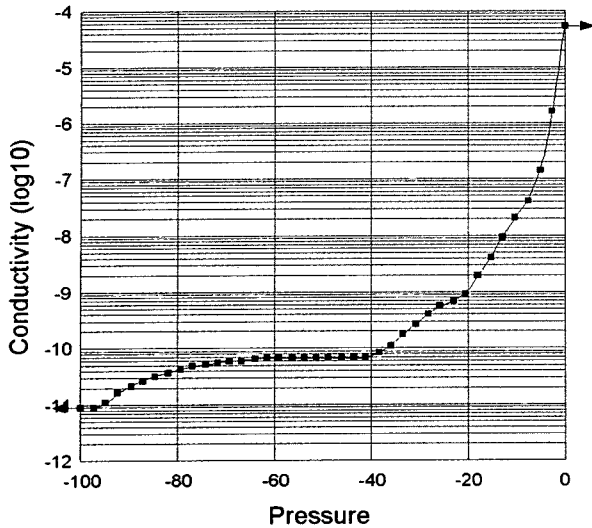


그림 20. 모관흡수력에 따른 투수계수

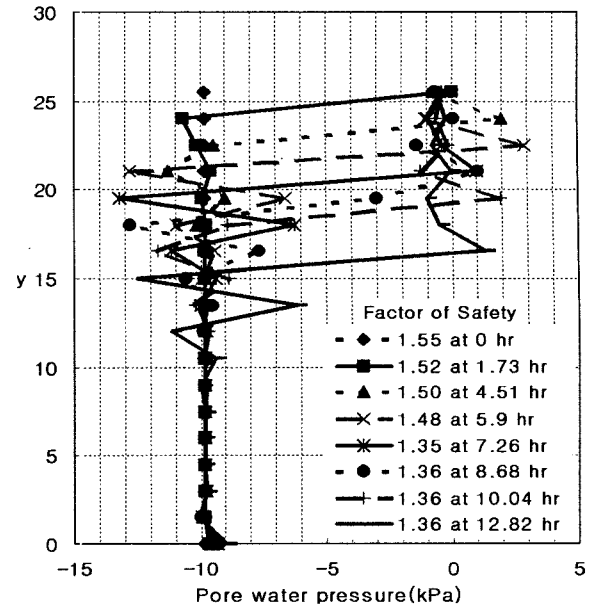


그림 22. A단면에서의 간극수압 분포 변화

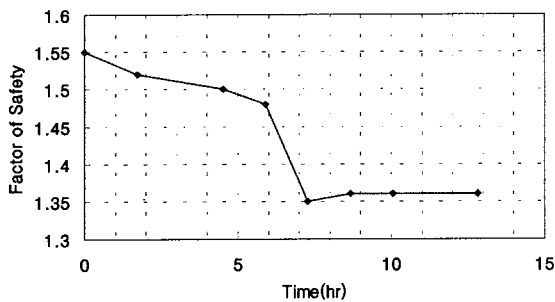


그림 21. 강우지속시간에 따른 안전율의 변화

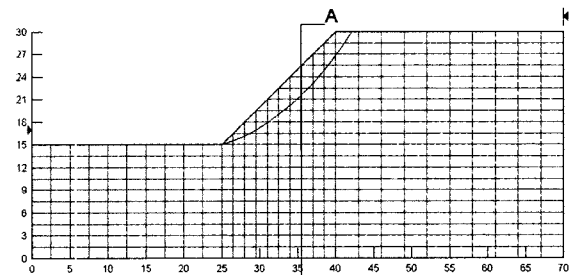


그림 23. 마지막 시간에서의 임계단면

증가할수록 더 크게 나타나게 되므로, 불포화 강도의 비선형성을 고려하는 것이 사면의 안정성 해석에 중요한 영향 요소로 작용함을 알 수 있다.

6.2.2 침투해석 결과를 이용한 사면안정해석

실제 사면은 강우와 침투로 인한 지반 내부의 간극수압의 변화에 의해 그 안정성이 크게 영향을 받게 된다. 따라서 보다 합리적이고 효율적인 사면안정해석을 위해서는 강우로 인한 침투의 영향을 고려하고 그에 따른 강도 변화를 반영할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 앞에서 제시한 옥천지역 풍화토 사면을 대상으로 하여 대상지반에서 실험으로 얻은 물성값을 바탕으로 함수특성곡선 결과와 침투해석 프로그램(SEEP/W)을 이용해서 주어진 강우강도에 대해 시간에 따른 간극수압의 변화를 해석한 후, 그에 따른 강도변화를 고려함으로써 안전율의 변화를 확인할 수 있었다.

침투해석을 위해 포화투수계수는 $5.4 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ 로 가정하였으며, 침투시 사면내에서 모관흡수력의 변화로 야기되는 투수계수는 실험으로 얻은 함수특성곡선과 Green & Corey(1971)식으로 추정하였다(그림 20). 이때 $2.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 의 강우강도가 계속될 때 지속시간에 따른 안전율의 변화를 그림 21과 같이 얻을 수 있었다.

그림 22에는 강우가 지속됨에 따라 물이 침투되면서 단면 A(그림 23)에서의 간극수압 분포가 변화되는 과정을 안전율 변화와 함께 보여주고 있다. 시간이 지남에 따라 양의 간극수압으로 변화되는 깊이가 깊어지는 현상을 볼 수 있고, 그에 따라 안전율 또한 감소되는 결과를 볼 수 있다. 그림 23에는 마지막 단계에서의 얻어진 임계단면을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 주어진 조건에서 강우가 지속될 때 물이 침투되면서 강도의 증분으로 작용되던 모관흡수력, 즉 음의 간극수압이 작아지면서 그에 따라 안

전율도 낮아지고 있는 경향을 보이고 있다. 이러한 안전율의 변화양상은 어느 정도의 강우지속시간이 지난 후 더욱 급격한 안전율의 변화를 나타내는데 이는 강우로 인해 임계단면과 가까운 부분까지 모두 침투되면서 간극수압이 증가되어 모관흡수력이 감소된 시점으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 임계단면 탐색을 위하여 최적화 기법을 적용한 한계평형법을 이용하여 포화토 뿐만 아니라 불포화토 지반에서의 사면안정해석을 수행할 수 있도록 불포화 지반의 거동특성을 고려하였다. 필요한 불포화지반의 설계변수들을 얻기 위해 국내의 대표적인 지반 재료인 화강풍화토 사면에 대한 실험을 수행하였으며 연구결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) 화강풍화토 시료는 함수특성곡선 실험에서 포화중에 팽창하는 경향을 보였으며, 실험 중에 발생하는 부피변화를 고려하지 않은 경우는 같은 모관흡수력에 대해 함수능력을 과대평가하는 경향을 볼 수 있었다.
- (2) 불포화 특성인 함수특성곡선을 적용하여 주어진 강우특성을 받는 경우 투수해석을 수행함으로써 사면내의 간극수압 분포를 얻을 수 있었다. 그리고 이와 같이 해석된 사면내의 모관흡수력과 이에 상응하는 불포화 강도, 즉 겉보기 점착력을 포화 삼축압축실험에서 얻어진 내부 마찰각과 추정된 최대 겉보기점착력을 이용하여 모관흡수력에 대해 수식화하여 안정해석에 적용함으로써 보다 합리적인 안정해석을 수행할 수 있었다.
- (3) 불포화 강도를 고려한 기존의 상용프로그램(SLOPE/W 등)의 겉보기 점착력의 선형가정은 상대적으로 큰 모관흡수력에서 강도를 과대평가하며, 겉보기점착력의 비선형 수식화의 적용은 보다 정확한 안정해석을 가능하게 하였다.
- (4) 지반의 불포화 특성인 모관흡수력에 따른 강도와 투수계수의 변화와 함수특성곡선을 고려하였을 때, 강우와 침투에 따른 안전율의 변화를 보다 합리적으로

판단할 수 있었다.

- (5) 국내 지반의 대부분을 차지하고 있는 풍화토에 대해 보다 많은 자료를 축적한다면 복잡한 장비와 많은 시간을 필요로 하는 제안된 불포화 전단강도의 현장 적용성을 크게 높일 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 시설안전기술공단의 연구비지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. 김주용 (1998), "유한요소법을 이용한 사면안정해석", 박사학위논문, 한국과학기술원, pp.1~34.
2. 류지협 (1997), "불포화 화강풍화토의 투수 및 강도 특성", 공학박사 학위논문, 동국대학교, pp.101~118.
3. 이인모, 이형주, 김기섭, 김영옥(2000), "채적이 변하는 흙의 흠수분 특성곡선식 개발 비교", 한국지반공학회논문집, 제16권, 제6호, pp.15~21.
4. Bishop, A. W. (1955), "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Geotechnique*, 5, pp.7~17.
5. Geo-slope, (1998). User's Guide for SEEP/W, version 4. Geoslope International Ltd, Canada.
6. Geo-slope, (1998) User's Guide for SLOPE/W, version 4. Geoslope International Ltd, Canada.
7. Greco, V. R. (1996), "Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface", *ASCE. J. Geotechnical Engineering*, 122, pp.517~525.
8. Green, R. E. and Corey, J. C. (1971), "Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods", *Soil Science Society of America Proceedings*, 35, pp.3~8.
9. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978), "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 15, pp.313~321.
10. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.(1995), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons Inc.
11. Li, K. S. and White, W. (1987), "Rapid evaluation of the critical slip surface in slope stability problems", *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 11, pp.449~473.
12. Spencer, E. (1967), "A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces", *Geotechnique*, 17, pp.11~26.
13. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W.(1996), "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.3, pp.379~392.

(접수일자 2001. 8. 11, 심사완료일 2001. 12. 10)