

斜面安定(Ⅲ)

金 翔 圭*

2.1.2 유효응력 전응력 해석법

(1) 서론

자연사면이나 인공사면의 안정해석은 전응력 해석법과 유효응력해석법으로 나누어 생각할 수 있다. 전자는 비배수강도시험으로 얻은 강도정수를 써서 해석하는 방법이며, 간극수압은 고려하지 아니한다. 후자는 유효응력으로 얻은 강도정수와 간극수압을 써서 해석하는 방법이다.

이와 같이 두방법의 차이는 분명하지만, 기술자들이 강도정수, 간극수압, 단위중량 등을 각 방법에 적용하는데 있어서 명확하게 구별하지 못하고 있는 경우가 더러 있는 것 같다.

여기서는 각 해석방법에 따라 강도정수를 얻는 여러가지 시험방법을 소개하고, 다음에는 실제의 응력상태에 대한 구체적인 해석방법을 제시하여 방법의 선택에 도움이 될 수 있도록 하고자 한다. 마지막으로 실제 실무자에게 참고가 될 수 있도록 하기 위해 실제 흙댐이 받는 몇가지 응력상태에 대하여 전응력해석법과 유효응력해석법으로 계산한 안전율을 제시하고 그 결과를 비교하고자 한다.

(2) 전응력해석법과 유효응력해석법에 적용되는 강도정수

① 강도를 결정하는 공식

전단강도를 표시하는 강도규준은 전응력해석법과 유효응력해석법의 둘로 나누인다. 전자의

경우의 전단강도는

$$S = S_u \quad \dots\dots(2.1)$$

또는

$$S = C_u + \sigma \cdot \tan \phi_u \quad \dots\dots(2.2)$$

로 정해진다. 식 (2.1)의 강도규준은 $\phi=0$ 해석시⁸⁾ 적용한다. 후자의 경우에 있어서의 전단강도는

$$S = C' + \sigma' \tan \phi' = C' + (\sigma - u) \tan \phi' \dots\dots(2.3)$$

로 결정할 수 있다.

여기서

S : 전단강도

S_u : 비배수강도

C_u, C' : 각각 전응력과 유효응력으로 표시한 점착력

ϕ_u, ϕ' : 각각 전응력과 유효응력으로 표시한 전단저항각

σ, σ' : 각각의 전연직응력과 유효연직응력
 u : 간극수압

동일한 흙에 대해 전응력과 유효응력을 기준으로 하여 얻어진 강도정수는 다르다 하더라도 전단강도는 동일하다는 것을 여기서 留意할 필요가 있다.

② 흙의 파괴응력의 정의

흙이 파괴되었을 때의 응력상태는 그림 2.1에

* 正會員, 東國大學校 工科大學 土木工學科 教授

보인바와 같이 Mohr 원으로 표시할 수 있다. 이 Mohr 원상의 어떤 점을 흙이 파괴된 상태 즉 전단강도로 보느냐 하는 것은 여러가지로 생각할 수 있다. 첫번째, Mohr 원의 최대응력, 즉 그림의 τ_m 을 흙의 전단강도로 보는 개념이다. 포화토의 비배수전단강도는 흔히 이것을 근거로 하고 있다. 두번째, 파괴시 파괴면에서의 전단응력(τ_{ff})을 흙의 강도로 보는 개념이다. 이것은 가장 합리적이지는 않지만 파괴면이 분명히 밝혀지지 않으면 안된다. 세번째는 Mohr 원의 접선과 만나는 점(τ_{ff})을 전단강도로 보는 개념이다. 이 점은 여러개의 Mohr 원을 그렸을 때 각 원에 접하는 선을 그으면 이 점들을 쉽게 결정할 수 있다. 네번째는 수직응력에 대한 전단응력의 최대치(τ/σ) max을 전단강도로 정하는 것이다. 이것은 그림에서 보는 바와 같이 원점에서 Mohr 원에 접하는 선을 그었을 때 얻어질

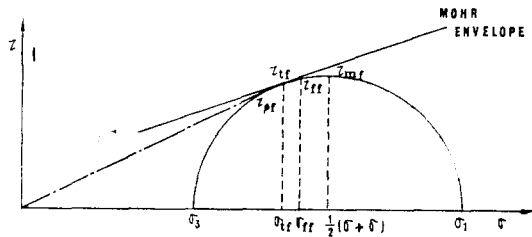


그림 2.1 파괴를 표시하는 전단응력의 여러가지 결정방법

수 있고 τ_0 로 표시하였다. 흙을 전단시험한 결과는 위의 4가지 개념에 따라 포락선이 달라진다는 것은 두말할 필요조차 없다.

③ 전응력 해석법에 쓰이는 강도정수를 얻는 시험과 방법

a. 비압밀비배수시험(UU 시험 또는 Q 시험)

포화된 점성토는 전응력이 증가하여도 전단강도는 일정한 값을 보이며 이 강도는 파괴되는 축하중의 반으로 삼는 것이 보통이다. 이것을 비배수강도라고 하며 $\phi=0$ 해석에 쓰인다. 그러나 흙댐재료와 같이 포화되지 않은 흙은 전응력이 증가하면 어느 응력에 이르기까지 강도가 증가하다가 더 이상의 증가없이 일정해진다. 이러한 응력상태를 표시하는 Mohr 원은 그림 2.2(a)에 보인 것처럼 그려진다.

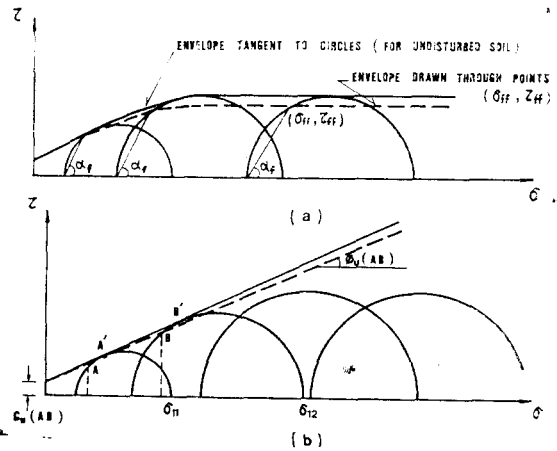


그림 2.2 파괴포락선의 작도

- (a) 포락선의 결정방법
- (b) 강도정수의 결정방법

일반적으로, 불교란상태로 채취한 시료에 대해서는 Mohr 원의 접선을 포락선으로 삼지만, 다짐을 하여 만든 댐재료와 같은 교란시료에 대해서는 파괴면에서의 파괴시의 수직응력(σ_{ff})과 전단응력(τ_{ff})을 기준으로 하여 포락선을 정한다(Corps of Engineer, 1970). 그림 2.2(a)에 보인 Mohr 원상의 (σ_{ff} , τ_{ff}) 좌표는 임의의 Mohr 원의 최소주응력을 표시한 점에서 수평면과 α_f 의 각도로 선을 그어 그 Mohr 원과 만나는 점이다. 유효응력으로 표시한 전단저항각 ϕ' 을 결정하였다면 $\alpha_f=45^\circ+\phi'/2$ 로 결정할 수 있고, 그렇게 하지 않았다면 시험시 파괴면이 최소주응력면과 이루는 각도를 직접 재어 정한다.

불포화토에 대한 Mohr 원포락선은 직선이 아니므로 사용하고자하는 응력범위에 따라 강도정수가 달라진다. 그림 2.2(b)는 이 경우에 대해 강도정수를 결정하는 방법을 보인 것이다.

사면활동해석의 대상이 정해지면 예상되는 원호활동면상의 한 요소가 받는 최대주응력을 대략 짐작하여 포락선의 사용범위를 결정한다. 예를 들면 예상되는 최대주응력의 범위가 그림 2.1(b)에 보인 것처럼 σ_{11} 과 σ_{12} 라면 이에 대응하는 σ_{ff} 의 값 또는 두 Mohr 원의 접선은 A 점과 B 점 또는 A' 점 또는 B' 점이므로 이 두점을 연결한 직선을 연장하여 C_u 와 ϕ_u 의 값으로 정한다.

b. 등방압밀비배수시험(CIU 시험 또는 R 시험)

이 시험은 시료를 등방압밀한 다음 간극수압

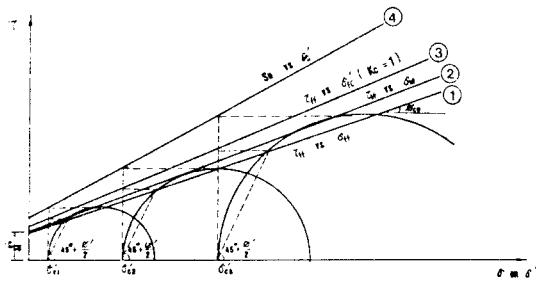


그림 2.3 등방압밀비배수시험의 결과 해석

이 소실되지 않도록 비배수상태로 전단시키는 시험이다. 비배수전단시에는 통상 간극수압을 측정하며 Mohr 원을 유효응력으로 나타낼 수 있다.

CIU 시험결과는 전단강도를 결정하는 개념에 따라(그림 2.1 참조) 그림 2.3에 보인바와 같이 4가지 경우로 해석할 수 있다.

곡선 ①로 보인 포락선은 σ_3 에서 수평축과 $(45 + \phi'/2)$ 의 각도로 그은 선이 Mohr 원과 만나는 점들을 연결하여 얻어진 것이다. 이 곡선은 Mohr 이론을 충실히 따른 것으로, 파괴면은 최소 주응력면과 $(45 + \phi'/2)$ 의 각도를 따라 생기며 이 면에서의 전단응력이 전단강도가 된다고 하는 개념이다. 美工兵團에서는 이 곡선을 R 시험(CIU 시험)의 포락선으로 정하고 있다. 이 그림의 곡선 ②는 각 Mohr 원의 접선인데, 접점의 좌표는 (σ_{1f}, τ_{1f}) 이다. 이것은 이론적인 합리성이 결여되어 있기는 하나 실용적으로 많이 사용되는 포락선이다.

어떤 등방압밀응력 σ'_c 으로 시료를 압밀하였다면, 이것을 표시하는 Mohr 원은 한 점으로 나타난다. 따라서 시료의 예상파괴면에서의 유효 수직응력 σ'_{3c} 은 이 압력과 동일하므로 이에 대응하는 전단응력을 τ_{1f} 라고 가정하면 σ'_{3c} 에 τ_{1f} 곡선은 곡선 ③과 같이 나타난다. 이때의 주응력비 $K_c = (\sigma'_{3c}/\sigma_1)$ 는 1이라는 사실을留意해야 한다. 그림 2.3의 가장 윗쪽에 그려진 곡선 ④는 압밀압력에 대한 비배수강도를 점찍어 그린 것이며 $\phi=0$ 개념을 근거로 한 것인데 이의 사용에 대해서는 주의를 요한다.

c. 비등방압밀비배수시험(CAU 시험)

자연상태의 토질구조물은 비등방성인 압력을

받고 있는 경우가 많으므로 CIU 시험으로 얻은 결과는 실제와 다를 수 있다. Lowe and Karafiath^{4,5)}는 수위 급강하시 사면안정해석을 할 때 CAU 시험으로 강도정수를 정할 것을 제안하였다. 이 시험에서 가장 중요한 것은 주 응력비 K_c 를 정하는 일이다. 이것을 정하는 방법을 요약하면 다음과 같다.

1) 정상침투하에서 사면안정해석을 하고 안전율 F 를 구한 다음 β α 를 다음 식으로 계산한다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi'}{F} \right) \quad \dots\dots (2.4)$$

2) 주응력비는 다음 식으로 구한다.

$$K_c = \frac{\sigma'_{3c}}{\sigma_1} = 1 + \frac{2 \tan \alpha / \sin 2\theta}{1 - \tan \alpha / \tan \theta} \quad \dots\dots (2.5)$$

여기서

σ'_{3c} : 압밀시의 최대유효주응력

σ_1 : 압밀시의 최소유효주응력

θ : 주응력면과 예상파괴면상의 각도

그림 2.4는 Lowe and Karafiath 방법으로 포

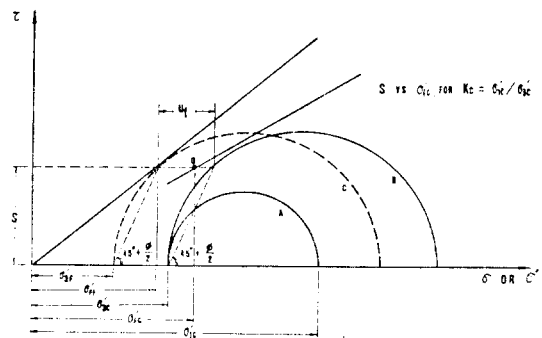


그림 2.4 Lowe and Karafiath 방법에 의한 $S-\sigma_{1f}$ 선의 각도

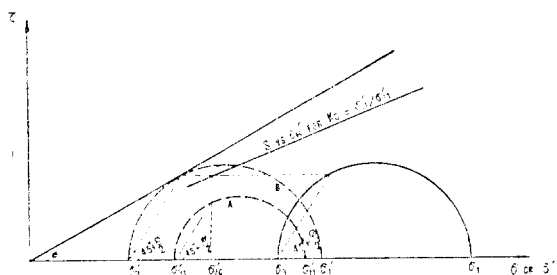


그림 2.5 CU 시험으로부터 CAU 강도를 얻는 방법 (Taylor 방법)

락선을 작도하는 방법을 보인 것이다.

이 그림의 Mohr 원 A 는 위의 공식을 사용하여 결정한 K_c 값으로 압밀한 결과를 나타낸 것이고, Mohr 원 B 와 C 는 전단파괴시의 결과를 각각 전응력과 유효응력으로 나타낸 것이다. 그림에서 자세히 보인 것처럼 Mohr 원 A 에서 σ'_{ic} 을 정하고 Mohr 원 C 에서 전단강도 S 를 정하면 $0(\sigma'_{ic}, S)$ 점이 주어진 K_c 값에 대한 Mohr 포락선의 한 점이 된다. 주어진 K_c 값으로 압밀압력만 바꾸어 시험하면 또 하나의 0점이 얻어지며 이러한 점들을 연결하면 포락선을 얻을 수 있다.

Taylor¹⁰⁾는 CIU 시험 결과를 이용하여 CAU 강도정수를 얻는 방법을 다음과 같이 제시하고 있다. 간극수압을 측정하면서 시료를 전단시켰다면, 그림 2.5에서 보인 바와 같이 임의의 K_c 값에 대한 Mohr 원 A 를 그릴 수 있다. 이 Mohr 원이 비등방압밀압력을 표시한 전자의 경우(그림 2.3 참조)와 동일하다고 가정하면 포락선을 결정하는 그 다음의 과정은 Lowe and Karafiath 방법과 다를 것이 없다.

④ 유효응력해석에 쓰이는 강도정수의 시험과 방법

유효응력해석에 쓰이는 강도정수는 CIU 시험(간극수압을 측정하는 등방압밀 비배수시험) 또는 CD 시험(압밀배수시험)으로 구한다. 이 두 시험의 결과는 본질적으로 동일하다고 알려지고 있으므로 어느 방법을 사용해도 무방하다. 그러나 시험기간관계상 점성토는 전자로 시험하고 사질토는 후자로 시험하는 것이 보통이다. 이에 대한 더 자세한 시험방법은 토질시험에 관한 서적(예, Bishop and Henkel,¹⁾ 김¹³⁾)을 참조하기 바란다.

유효응력으로 사면을 해석할 때에는 강도정수 c' 과 ϕ' 에 추가해서 간극수압을 알아야 한다. 간극수압은 (1) 현장에서 Piezometer로 직접 측정하거나 (2) 유선망을 그려 추정할 수 있고, (3) 또한 실험실에서 CIU 시험으로부터 간극수압계수를 구하고, 공식을 이용하여 그 변화를 추정할 수도 있다(Skempton, 1954).

$$\Delta U = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad \dots\dots(2.6)$$

여기서

ΔU : 간극수압의 변화

B : 간극수압계수 B

A : 간극수압계수 A

$\Delta\sigma_3$: 최소주응력의 변화

$\Delta\sigma_1$: 최대주응력의 변화

(3) 전응력해석 및 유효응력해석방법의 선택

① 선택의 원리

원칙적으로 보면 어떤 경우이든간에 전응력해석법 또는 유효응력해석법으로 비탈의 안정해석을 할 수 있다. 그러나 어느 방법을 선택하느냐에 따라 제(2)절에서 언급하였던 시험방법과 시험에서 얻어진 강도정수는 달라진다. 강도정수를 정확히 추정하였다면, 전응력해석 및 유효응력해석에 쓰일 강도정수가 다르다 하더라도 두 해석결과는 본질적으로 동일하다.

두 방법중 어느 방법을 쓰느냐 하는 것은 전적으로 기술자의 판단에 달려 있다. 예를 들면 토질구조물의 시공직후의 안정해석은 비배수강도를 사용하여 전응력해석을 할 수도 있고, C' , ϕ' 을 사용하고 시공직후의 간극수압을 추정하여 유효응력해석을 할 수도 있다. 이 경우에는 전자가 더 편리하지만 그렇다고 정확성이 떨어진다고 단정할 수는 없다.

장기안정해석에 있어서도 유효응력해석은 물론 전응력해석을 할 수도 있다. 후자의 경우에는 예상활동면상의 파괴시의 응력조건과 같도록 전응력과 간극수압을 가한 상태에서 3축압축시험을 행한 비배수강도의 값을 가지고 해석하면 된다. 그러나 이와 같이 현장의 조건과 일치시켜 강도정수를 얻는다는 것이 대단히 어려운 일이므로 C' , ϕ' 와 간극수압을 써서 유효응력으로 해석하는 것이 훨씬 더 편리하고 정확을 기할 수 있을 것이다. 따라서 해석조건에 따라 더 편리하고 더 나은 방법이 있을 수 있다. 표 3.1은 여러가지 해석조건에 대하여 편리와 정확성을 위해 권장할 수 있는 방법을 요약해서 보인 것이다.

다음 소질에서는 흙댐, 자연사면, 또는 인공사면이 받는 여러가지 응력상태에 대하여 전응력 및 유효응력의 해석방법을 더 자세히 언급하기로 한다.

표 3.1 전응력해석과 유효응력해석의 선택(Lambe & Whitman³⁾을 근거로 보임)

| 해석조건 | 권장방법 | 사용강도정수 | 비고 |
|--|----------------------|--------------------------------|--|
| 1. 포화점성토로 이루어진 절토 또는 비탈의 시공직후의 안정계산, 단 시공기간이 흙의 압밀시간에 비해 짧은 경우 | 전응력해석 ($\phi=0$ 해석) | $C=S_u$ | 시공시의 실제 간극수압을 사용하여 유효응력해석법으로 계산할 수 있다. |
| 2. 불포화토로 이루어진 비탈의 시공직후의 안정계산, 단 시공기간이 압밀시간보다 짧은 경우 | 유효응력해석 또는 전응력해석 | C', ϕ' 간극수압 C_u, ϕ_u | 시공전에는 추정 간극수압을 사용하여 해석하고, 시공중에는 실제치를 사용하여 계산할 수 있다. |
| 3. 시공직후의 비탈의 안정계산, 단 시공기간이 압밀시간보다 긴 경우 | 유효응력해석 | C', ϕ' 간극수압 | 사질토 지반은 여기에 해당됨 |
| 4. 비탈의 장기안정해석 | 유효응력해석 | C', ϕ' 간극수압 | 간극수압은 평형상태의 값을 사용함 |
| 5. 시공직후와 장기 안정사이의 중간단계 | 유효응력해석 | C', ϕ' 간극수압 | 간극수압을 예측하여 적용되되 간극수압의 일시적인 증가를 고려함. 예강우로 인한 자연지반의 안정해석 |

② 시공직후의 안정해석

a. 전응력해석법

$\phi=0$ 해석에 있어서는 S_u 값만을 토질정수로 쓰며, 불포화토에 대해서는 UU 시험에서 얻은 C_u, ϕ_u 를 입력자료로 쓰되 간극수압을 고려하지 아니한다. 그림 3.1(a)에 보인 바와 같이 제방이 사질토로 구성되어 있어서 압밀속도가 시공속도보다 빠르다고 판단된다면 이 부분의 흙의 강도 정수는 C' 과 ϕ' 으로 해야 한다. 제체바깥에 물이 있다면 그림에서 화살표로 표시한바와 같은 하중이 분포되어 있는 것으로 생각할 수도 있고, 물이 있는 부분을 $C=0, \phi=0, \gamma_s=1.0t/m^3$ 인 흙으로 간주하여 계산할 수도 있다.

만일 지하수위가 제체아래 놓여 있다고 할 때 (그림 3.1(b) 참조)는 단위중량을 적용하는데 조심하여야 한다. 지하수위 아래에 있는 흙에 대해서는 포화단위중량을 사용하되 계산과정을 줄이기 위해 수중단위 중량을 사용할 수도 있다. 다만 이때에는 $\phi=0$ 인 흙에 한하며, $\phi \neq 0$ 이면 틀린 결과를 얻는다. 그 이유는 그림 3.2에서 설명되어 있는데, $\phi=0$ 인 흙은 수직응력이 잘못계산되었다 하더라도 전단강도는 동일하나(그림 3.2(a)) $\phi \neq 0$ 인 흙에 있어서는 그림 3.2(b)에서 보인 것처럼 σ' 에 대응하는 전단강도 S_A

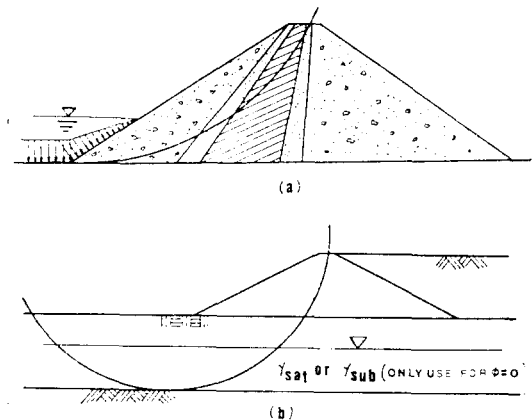


그림 3.1 시공직후의 안정해석

- (a) 물하중의 처리
- (b) 지하수위 아래 단위중량의 적용

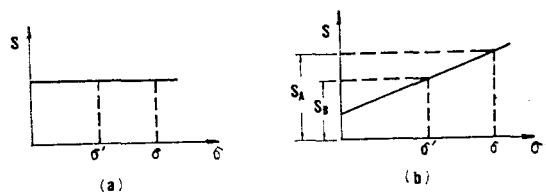


그림 3.2 단위중량의 정확한 사용방법

를 써야할 것을 σ 에 대응하는 S_B 를 쓰는 결과가 되기 때문이다.

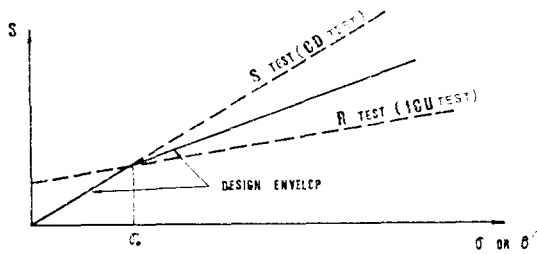


그림 3.3 정상침투시 안정해석에 대한 설계포락선(미공병단)

b. 유효응력해석법

시공직후의 사면안정을 유효응력해석법으로 할 수도 있다. 이 경우에는 CD 시험에서 얻은 C' 및 ϕ' 값과 간극수압을 이용해야 한다. 댐의 시공시 간극수압을 정확히 측정하였다면, 이것을 입력시켰을 때 가장 신뢰할 수 있는 안정해석을 할 수 있다. 유효응력해석에 있어서도 물하중은 전응력해석법과 동일하게 고려되어야 한다. 흙의 단위중량을 정할 때에는 지하수위이상에서는 전체단위중량으로 하고 그 이하에서는 포화단위중량과 간극수압을 동시에 사용하거나 아니면 수중단위중량을 직접 사용한다. 이때에는 어느 방법으로 하든 두 해석결과는 동일하다.

③ 정상침투시(장기안정)의 안정해석

a. 전응력해석법

장기적인 안정을 해석할 목적으로 정상침투시의 비탈은 전응력해석법으로 해석하여 신뢰성있는 결과를 얻기란 대단히 어렵다. 이 경우의 응력상태에 대하여 전응력을 기준으로 한 전단시험을 행하기가 대단히 어렵기 때문이다. 그러나 미공병단에서는 흙댐에 대해 S 시험(CD 시험)과 R 시험(CIU 시험, 그림 3.3의 ①곡선)의 결과를 이용하여 전응력해석법으로 정상침투시의 안정을 해석하는 방법을 다음과 같이 제시하고 있다(Corps of Engineers²¹).

먼저, S 시험으로 얻어진 강도가 R 시험으로 얻어진 강도보다 적은 경우에는 S 시험으로 얻어진 강도정수를 쓰고, S 시험으로 얻어진 강도가 R 시험으로 얻어진 강도보다 큰 경우에는 이 두 시험의 포락선의 중앙을 통하는 선을 전응력해석의 포락선으로 삼는다(그림 3.3 참조). 수직응력이 작을 때에는 R 강도가 S 강도보다 크

므로 S 강도가 설계포락선이 되며 수직응력이 어느 한계를 넘어서면 R 강도가 S 강도보다 작으므로 결국 그림 3.3에 보인 바와 같은 휘어진 포락선을 얻는다.

b. 유효응력해석법

정상침투시의 사면안정해석은 유효응력해석법으로 해석하는 것이 신뢰성이 높다. 제체내에 정상침투가 있다면 유선망을 그릴 수 있고 이로부터 예상활동면상의 간극수압을 결정한다. 더 간편한 방법으로서 침윤선이 결정되면 임의활동면상의 간극수압을 다음과 같이 결정할 수 있다(그림 3.4 참조).

$$U = \gamma_w \cdot h = \gamma_w \cdot y(1 - \sin^2 \theta) \quad \dots\dots(3.1)$$

여기서

γ_w : 물의 단위중량

h : 압력수두

θ : 침윤선의 접선이 수평면과 이루는 각도 (그림 3.4 참조)

y : 임의활동면상에서 침윤선까지의 높이

식 (3.1)의 유도는 그림 3.4를 보면 쉽게 이해할 수 있을 것이다.

$$u = \gamma_w \cdot h = \gamma_w \cdot y(1 - \sin^2 \theta)$$

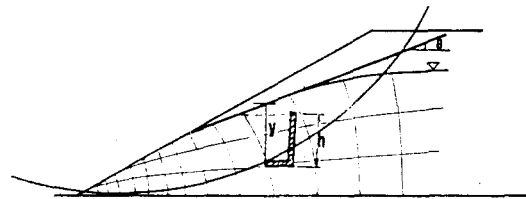


그림 3.4 유선망으로부터 압력수두를 결정하는 방법

④ 수위급강하시의 안정

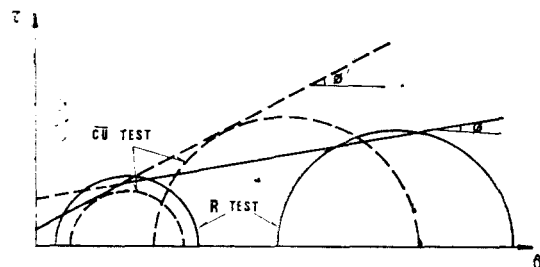


그림 3.5 수위급강하시의 해석을 위한 포락선(미공병단)

a. 전응력해석법

수위급강하시의 제체의 안정을 전응력법으로 해석하는 대표적인 방법은 미공병단의 방법²⁾과 Lowe and Karafiath의 방법,^{4,5)} Taylor의 방법,¹⁰⁾ CU방법 등이다.

미공병단의 방법은 S시험(CD시험)에서 얻은 포락선과 R시험(CIU시험)에서 얻은 포락선을 합성하여 折曲된 포락선을 이 경우의 강도정수로 삼는다. 다시 말하면 어느 수직응력 σ_v 이하에서는 유효응력의 강도정수 C' 과 ϕ' 를 사용하고 σ_v 이상에서는 CU시험에서 얻은 강도정수 C 과 ϕ 를 사용한다. 따라서 이 방법은 엄격히 말하면 전응력해석법과 유효응력해석법의 組合이라고 할 수 있다.

Lowe and Karafiath 방법에 사용되는 강도정수를 얻는 시험방법은 이미 제 2장에서 언급하였다. 시험방법이 대단히 복잡한 반면 시험그 자체는 수위급강하시의 실제응력상태를 잘 나타내고 있다. 이에 비해 Taylor의 방법은 등방압 밀비배수시험의 결과를 이용하여 비등방성의 강도정수를 구하여 이들을 입력자료로 쓰는 방법이므로 재래식의 CIU 시험결과로부터 쉽게 비등방성의 강도정수를 구하여 수위급강하시의 안정을 해석할 수 있다는데 큰 이점이 있다.

“CU 방법”은 제 2장에서 설명한 CIU 시험에서 구한 강도정수를 이용하는 것이다. 여기서 강도정수는 그림 2.2의 ①의 포락선에서 얻은 값을 사용한다. 한편 Sherard et al¹¹⁾은 전응력으로 표시한 Mohr의 접선인 그림 2.2의 곡선 ②를 사용하여 수위급강하시의 안정을 검토하도록 하고 있다.

b. 유효응력해석법

유효응력해석법에 있어서는 배수시험에서 얻은 C' 과 ϕ' 를 사용하고 수위급강하시의 간극수압을 입력으로 넣어야 한다. 따라서 수위강하가 급강하이든 완속강하이든 간극수압만 정확히 추정된다면 가장 신뢰할 수 있는 해석방법이다. 그러나 간극수압 추정을 위한 수위강하시 유선망의 작도는 쉽지 않다. 그 이유중의 하나는 상류면수위의 강하속도에 따라 유선망은 달라지기 때문이다. 수위의 강하속도를 달리하였을 때 이에 대응하는 제체내 침투는 최근에 발전된 수치

해석의 기법을 써서 해석할 수 있다.

Morgenstern⁶⁾은 거의 포화된 제체의 상류면에서 수위가 급강하한다면 제체내 간극수압의 변화와 제체의 한 요소의 주응력의 변화는 거의 동일하다고 가정하였다. 卽 이것을 식으로 쓰면

$$B = \Delta U / \Delta \sigma_1 = 1 \quad \dots\dots(3.2)$$

이 된다.

만일 흙이 균질하고, 강도정수가 C' 과 ϕ' 인 한개의 재료로 제체가 구성되어 있고 또 수위가 제체상단에서 하단까지 급강하하였다면 이 경우의 유선망은 그림 3.6에 보인 바와 같이 유선은 수평선이 되고 등압선은 수직선이 된다. 이와같은 가정하에서는 간극수압은 물의 단위 중량에 다 어느 위치에서 상류면까지의 높이를 곱한 값이 된다.

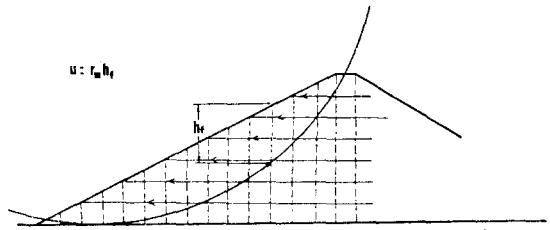


그림 3.6 수위급강하시의 유선망⁶⁾

⑤ 중간단계에서의 안정해석

여기서 중간단계란 흙댐의 경우에는 만수위가 되기전의 어느 수위에서 정상침투가 발생하였고 가정된 경우이고 자연사면인 경우에는 일정한 강도정수를 유지하고 있으나 간극수압이 갑자기 변화하는 경우를 의미한다.

a. 전응력해석법

미공병단에서는 정상침투시와 동일한 방법으로 절곡된 포락선을 적용하도록 하고 있고, 단위중량의 구분은 수위선에서 불투수층의 하류면까지 수평선을 그어 그 위는 전체단위중량, 그 아래는 포화단위중량으로 정하도록 하고 있다. 만일 이 단계에서 시공중에 발생하였던 간극수압이 소실되지 않았다면 해석시 유효수직응력이 감소된다는 사실을 감안해야 한다.

b. 유효응력해석법

폭우 등으로 지반내 간극수압이 급격히 변화

표 3.2 요약

| 조건 | 해석방법 | 강도식 | 간극수압 | 단위중량 | |
|----------------|-----------------------|--|--|---|---|
| 시공직후 | 전응력 | $S=C_u + \sigma \tan \phi_u$ 또는 $S=C_u$ | 적용하지 않음 | $\gamma_t, \gamma_{sat}, \gamma_{sub}$ (단 $\phi_u=0$) | |
| | 유효응력 | $S=C' + \sigma' \tan \phi'$ | γ_u 에서 구한 u 또는 측정치 | $\gamma_t, \gamma_{sat}, \gamma_{sub}$ | |
| 수위 급강하 | 전응력 | $\sigma_{ff} - \tau_{ff}$ 또는 $\sigma_{tf} - \tau_{tf}$ | $S=C_{icu} +$ $\sigma \tan \phi_{icu}$ | 적용하지 않음 | $\gamma_t, \gamma_{sat}, \gamma_{sub}$ (단 $\phi_u=0$) |
| | | Lowe & Karafiath | $S=C_{acu} + \sigma_{acu}$ | " | " |
| | 미공병단 | 절곡포락선 | " | " | |
| | 유효응력 (Morgenstern) | $S=C' + \sigma' \tan \phi'$ | $u = h_p' \cdot \gamma_w$ $h_p' =$ 상면까지의 높이 | $\gamma_t, \gamma_{sat}, \gamma_{sub}$ | |
| 정상침투 (장기해석) | 전응력(미공병단) | 절곡포락선 | 적용하지 않음 | $\gamma_t, \gamma_{sat}, \gamma_{sub}$ (단 $\phi_u=0$) | |
| | 유효응력 | $S=C' + \sigma' \tan \phi'$ | 유선망에서 구한다. | $\gamma_t, \gamma_{sat}, \gamma_{sub}$ | |
| 중간단계 | 전응력(미공병단) | 절곡포락선 | 적용하지 않음 | $\gamma_t, \gamma_{sat}, \gamma_{sub}$ (단 $\phi_u=0$) | |
| | 유효응력 | $S=C_r' + \sigma' \tan \phi_r'$ 또는 $S=C' + \sigma' \tan \phi'$ | 유선망에서 구한다. | $\gamma_t, \gamma_{sat}, \gamma_{sub}$ | |

할 때에는 간극수압만 정확히 추정되었다면 유효응력해석법이 가장 신뢰할 수 있는 방법이다. 이때에 전단강도정수는 잔류전단강도를 적용한다. 이에 대해서는 이미 지난 호에서 언급한 바 있으므로(김¹⁴), 여기서는 더 이상 언급하지 아니한다.

표 3.2는 흙 댐과 자연사면 또는 절토사면의 안정해석을 하는데 있어서 시공직후, 수위급강하시, 정상침투시 및 중간단계의 4가지 조건에 대하여 지금까지 설명한 해석방법, 강도정수의 적용성, 간극수압 및 단위중량의 적용방법 등을 요약한 것이다. 흙댐의 경우 어느 방법을 쓰든간에 상류면에 물이 있으면 물하중이 $1t/m^3$ 인 흙으로 간주하는 것이 계산상 편리하다.

(4) 흙댐의 안정해석에 대한 數值例

우리나라에서는 댐 재료에 대한 자세한 시험자료가 없으므로 부득이 미국의 Walter Boulder

Dam 재료에 대해 삼축압축시험을 한 자료¹⁵⁾를 이용하기로 한다. 표 4.1은 이 댐을 구성하는 4가지 재료에 대한 CIU 및 CIU 시험, CAU 시험, CD 시험의 결과를 요약한 것이다. 이 표에서 C_u 와 ϕ_u 의 값은 문헌에 나와있지 않았으므로 해석방법을 비교하기 위해 필자가 임의로 가정하였다.

해석의 대상이 되는 댐 단면은 소양강 댐으로 정하였다(그림 4.1 참조). 그러나 체체를 구성하는 각재료의 강도정수는 이것과는 전혀 다르므로 그 결과는 이 댐의 안정과 아무런 관련이



그림 4.1 흙 댐의 해석단면

표 4.1 토질시험자료¹²⁾

| Zone | Soil | γ_s (t/m ³) | Total Stress | | | | | | | | Effective S. | |
|------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|
| | | | C_u^* (t/m ²) | ϕ_u^* (°) | $\sigma_{tf}-\tau_{tf}$ | | $\sigma_{ff}-\tau_{ff}$ | | L&K($K_c=1$) | | C' (t/m ²) | ϕ' (°) |
| | | | | | C_{cu} (t/m ²) | ϕ_{cu} (°) | C_{cu} (t/m ²) | ϕ_{cu} (°) | C_{acu} (t/m ²) | ϕ_{acu} (°) | | |
| 1 | Gravel | 2.10 | — | — | — | — | — | — | — | — | 16.2 | 39 |
| 2 | Clayey Silt | 2.05 | 16.2 | 10 | 3.8 | 12.0 | 3.3 | 13.0 | 3.8 | 15 | 1.2 | 32.7 |
| 3 | Micaceous Silt | 1.95 | 9.8 | 7 | 2.5 | 10.0 | 2.3 | 11.0 | 2.4 | 13 | 1.1 | 22.5 |
| 4 | Cretaceous Clay | 2.00 | 7.9 | 8 | 1.3 | 15.0 | 1.1 | 13.0 | 1.4 | 15 | 0.9 | 19.0 |

표 2 해석 결과

| 해석조건 | 해석방법 | 안전율 | |
|-------|--------|----------------------------|------------------|
| 시공직후 | 전응력해석 | 1.202 | |
| | 유효응력해석 | 1.502 | |
| 수위급강하 | 전응력해석 | $\sigma_{tf}-\tau_{tf}$ 해석 | 1.009 |
| | | $\sigma_{ff}-\tau_{ff}$ 해석 | 1.033 |
| | | Lowe & Karafiath 법 | 1.191($K_c=1$) |
| | | 미공병단 | |
| | 유효응력해석 | Morgenstern | 0.987 |

없다는 것을 주의해야 한다.

표 4.1에 보인 여러 조건에 대한 강도정수를 적용하여 그림 4.1의 댐 단면의 안정해석을 하였다. 안정해석에 사용된 전산 프로그램은 ST-ABR와 STABRD(Wong et al., 1983)이다. 전자는 Fellenius의 방법과 Bishop의 방법을 근거로 한 것이고, 후자는 Lowe and Karafiath 방법과 미공병단의 방법으로 수위급강하시의 사면의 안정을 해석할 수 있는 프로그램이다.

계산결과는 표 4.2에 수록되어 있는데 시공직후와 수위급강하시의 조건에 대해서만 계산되었다. 시공직후의 조건에서 전응력해석법과 유효응력해석법으로 계산한 안전율이 각각 1.202와 1.502로 큰 차이를 보인 것은 실제의 간극수압을 이용할 수가 없어서 그 분포를 추정했기 때문이다.

수위급강하의 경우에는 전응력해석법인 Lowe & Karafiath 방법이 다른 방법에 비해 20% 정

도 크고 그 이외의 방법에서는 결과가 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다.

(5) 결론 및 요약

① 비탈의 안정은 전응력해석법과 유효응력해석법으로 나누어 해석할 수 있다. 적용하려는 해석방법에 따라 강도정수를 결정하는 시험방법이 달라진다.

② 전응력해석법에 있어서는 간극수압이 고려되지 않으며 여기에 쓰여지는 강도정수는 UU 시험, CIU 시험 또는 CAU 시험에서 얻어지는 점착력과 전단저항각을 해석에 적용한다.

③ 유효응력해석법에 있어서는 간극수압이 고려되어야 하며 여기에 쓰여지는 강도정수는 CIU 시험 또는 CD 시험에서 얻어지는 점착력과 전단저항각을 해석에 적용한다.

④ 비탈이 받고 있는 응력상태를 정확히 재현하여 시험을 하고 여기서 얻은 강도정수로 전응력해석법 또는 유효응력해석법으로 해석을 하였

다면 두 해석결과는 본질적으로 동일하다.

⑤ 어떤 해석방법을 적용하느냐 하는 것은 기술자의 경험과 판단에 의존한다. 그러나 해석조건에 따라 더 편리하고 더 정확을 기할 수 있는 방법이 있다. 표 3.1은 여러가지 해석조건에 권장할 수 있는 해석방법을 제시하고 있다. 그러나 미공병단에서는 전응력해석법이 흙 댐 안정 해석의 기본으로 되어 있다.

⑥ 수위급강하에 대하여 전응력설계법으로 해석할 수 있는 여러가지 방법이 제시되었지만 이들은 모두 수위의 강하가 제체내 흙의 침투속도보다 훨씬 빠르다고 가정한 고진적인 방법만을 기술하였다. 여기서는 언급하지 아니하였지만 수치해석에 의해 수위강하속도, 제체내 침투속도 등을 감안하여 더욱 실제와 접근할 수 있는 해석방법이 제시될 수 있다.

⑦ 수치예에서 보는 것처럼 실제로는 해석방법에 따라 안전율의 계산 결과는 차이가 있을 수 있다. 이것은 실제 응력상태를 재현하는 시험방법의 문제, 파괴시의 전단응력의 개념의 차이, 간극수압 추정치의 차이 등에서 비롯된 것이며 전응력해석법과 유효응력해석법으로 얻은 결과가 근본적으로 다르다는 것을 의미하는 것은 아니다.

참 고 문 헌

1. Bishop, A.W. and Henkel, D.J., "The Measurement of Soil Properties on Triaxial Test," 2nd ed. London, Edward Ltd. 1962.
2. Corps of Engineers, Engineering and Design Stability of Earth and Rock-Fill Dam, Engineering Manual, EM 1110-2-1902, 1970.
3. Lambe, T.W. and Whitman, R.V., Soil Mechanics, John Wiley and Sons, 1969.
4. Low, J. III and Karafiath, L., "Stability of Earth Dams upon Drawdown," Proc., 1st Panamerican Conference on SMFE, Vol. 2., Mexico, 1959, pp. 536-560.
5. Low, J. III and Karafiath, L. "Effect of Anisotropic Consolidation on the Undrained Strength of Compacted Clay," Proc., ASCE Research Conference on the Shear Strength of Soils, Boulder, Co., 1960, pp. 837-858.
6. Morgenstern, N., "Stability Charts for Earth Slopes During Rapid Drawdown," Geotechnique, Vol. 13, 1966, pp. 121-131.
7. Sherad, J.L., Woodward, R.J., Gizienski, S.F. and Clevenger W.A., Earth and Earth-Rock Dams, John Wiley and Sons, 1963.
8. Skempton, A.W., "The $\phi=0$ Analysis for Stability and its Theoretical Basis," Proc., 2nd Int. Conference of SMEF, Vol. 1, 1948, p. 72.
9. Skempton, A.W., "The Pore Pressure Coefficient A and B," Geotechnique, Vol. 4, 1954, pp. 143-147.
10. Taylor, D.W., Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, 1948.
11. Whitman R.V., "Some Considerations and Data Regarding the Shear Strength of Clays," Proc., ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, Univ. of Co., Boulder, Co., 1960. pp. 581-614.
12. Wong, K.S., Duncan, J.M. and Seed, B.S., "Comparison of Method of Rapid Drawdown Stability Analysis," Report No. UCB/GT/82-05, Dept. of Civil Engg., Univ. of Cal., Berkeley, 1982.
13. 김상규, 토질시험, 동명사, 서울, 1982.
14. 김상규, 강좌: 사면안정(I), 대한토질공학회지, 제 4권 제 1호, 1988, pp. 90-101.