

Rock재료의 내부마찰각의 구속압 의존성

Dependency of Internal Friction Angle of Rock Materials on Confining Pressure

신동훈¹⁾, Dong-Hoon Shin, 이경필²⁾, Kyoung-Pil Lee, 구방서²⁾, Bang-Seo Gu

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원, Senior Researcher, Water Resources Research Institute, KOWACO

²⁾ 한국수자원공사 수자원연구소 연구원, Researcher, Water Resources Research Institute, KOWACO

SYNOPSIS : In this study the confining pressure dependency of internal friction angle of rock materials are discussed based on the results of a series of large triaxial tests under consolidated-drained condition. The rock materials tested are two kinds of grain-size distribution ;one is well graded, the other poorly graded(a uniform distribution). The obtained results shows that the internal friction angle of rock materials decreases more sharply in low stress level than in high stress level, and the test constants A and b in De Mello's failure criterion on rockfill materials are $A=0.683\sim 1.584$, $b=0.712\sim 1.015$ for the well graded and $A=1.145\sim 1.523$, $b=0.788\sim 0.880$ for the poorly graded.

Key words : Rock재료, 내부마찰각, 구속압, 대형삼축시험

1. 서론

일반적으로 Rock재료 축조되는 댐 제체나 항만 케이슨 기초 마운딩 등의 안정성 평가는 대개 Bishop의 간편법, Morgenstern-Price법 및 Janbu법 등의 한계평형개념에 기초한 해석방법이 사용되고 있으며, 대부분의 경우 예상 활동 파괴면에 작용하는 활동력에 대한 전단저항력(전단강도)의 비인 안전율을 계산하여 그 성토구조물의 안정성을 평가하고 있다. Rock재료의 전단강도는 직접전단시험, 비틀림전단시험 또는 삼축압축시험 등으로 산정할 수 있으며, 최근 우리 나라에서는 주로 대형삼축압축시험이 많이 활용되고 있는 추세이다.

한편, Rock재료의 전단강도는 보통 식(1)과 같이 활동파괴면에 작용하는 연직응력(σ_n)의 함수로 나타낼 수 있으며, 그중 σ_n 의 일차함수로 표현되는 Mohr-Coulomb의 파괴규준식(식(2))이 사용되고 있다. 그러나 Rock재료의 경우에는 점착성이 없어 구속압이 작용하지 않을 경우에는 전단강도를 발휘할 수 없음에도 불구하고 식(2)에 따르면 어느 정도의 전단강도가 존재하는 것이 되어 실제와 불일치하는 모순이 있다. 이와 관련하여 De Mello는 Marsal이 수행한 Rock재에 대한 대형삼축시험 결과를 토대로 식(3)과 같은 파괴규준식을 제안한 바 있다. 식(3)은 Rock재료와 같이 점착력이 없고 구속압이 증가함에 따라서 내부마찰각이 감소하는 경향을 갖는 조립재료의 전단강도식으로 적합한 것으로 볼 수 있다. 그러나 De Mello의 전단강도식을 사용하는데 있어서 A값과 b값은 Rock재료의 성질에 따라서 달라지는 시험값으로서 사용 재료의 특성에 따른 분석이 이루어져야 할 필요가 있다.

$$\tau_f = f(\sigma_n) \tag{1}$$

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \tag{2}$$

$$\tau_f = A(\sigma_n)^b \quad (3)$$

여기서, τ_f : 전단강도, c : 점착력, σ_n : 수직응력, A와 b: 실험으로부터 얻어지는 상수값

따라서 본 연구에서는 비교적 입도가 양호한 댐 축조용 Rock재료(A-1 및 A-2)와 균등입도를 갖는 항만 케이슨 기초 마운딩 사석재료(B-1 및 B-2)를 대상으로 전단강도를 지배하는 내부마찰각의 구속압 의존성의 분석, Mohr-Coulomb이론식, Ab법에 의한 파괴규준식 등에 의한 전단강도의 평가 및 재료 특성에 따른 내부마찰각 변화의 요인 등에 대한 분석이 이루어졌다.

2. De Mello의 전단강도식(Ab법)

De Mello는 Marsal이 수행한 Rock재에 대한 대형삼축시험 결과를 토대로 제안한 전단강도식을 간략히 소개하면 다음과 같다. 먼저 압밀배수 조건하에 수행된 삼축시험결과로부터 구속압 σ_3' 와 파괴시 최대주응력 σ_{1f}' 의 관계를 양대수 그래프로 정리하면 그림 1과 같이 되어 이를 수식으로 나타내면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{1f}' = n_0 P_a \left(\frac{\sigma_3'}{P_a} \right)^m \quad (4)$$

여기서, P_a : σ_3' , σ_{1f}' 와 동일한 응력단위로 측정된 대기압 (보통 1.03 kg/cm^2), n_0 , m : 무차원의 정수이다. 또한, 임의의 σ_3' 과 σ_{1f}' 에서의 Mohr응력원은 그림-2와 같으며, 이때 내부마찰각은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 σ_3' 과 σ_{1f}' 은 식(4)의 관계가 있으므로 식(4)를 식(5)에 대입하면 식(6) 또는 (7)과 같이 나타낼 수 있어 내부마찰각의 구속압 의존성을 표현할 수 있게 된다.

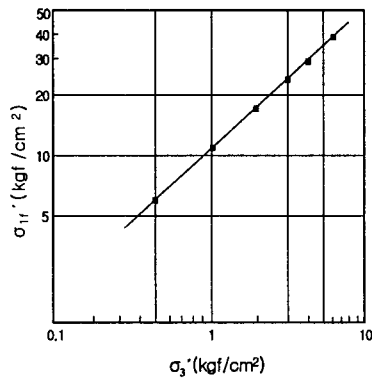


그림-1 σ_3' 와 σ_{1f}' 의 관계

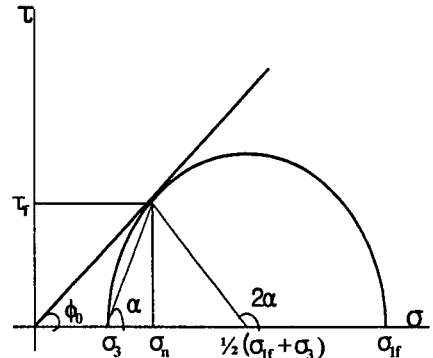


그림-2 Mohr의 응력원과 내부마찰각

$$\phi_0' = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{\sigma_{1f}' + \sigma_3'} \right) \quad (5)$$

$$\phi_0 = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_0 \cdot \left(\frac{\sigma_3'}{P_a} \right)^{m-1} - 1}{n_0 \cdot \left(\frac{\sigma_3'}{P_a} \right)^{m-1} + 1} \right\} \quad (6)$$

$$\phi_0' = \phi_{0f}'(\sigma_3') \quad (7)$$

한편, 그림-2에서 파괴면에 작용하는 수직응력과 전단응력은 식(8) 및 (9)와 같이 나타낼 수 있으며, 식(8) 및 (9)에 식(6)을 대입하여 정리하면 전단강도의 구속압 의존성을 식(10) 및 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 식(10) 및 (11)로부터 산정된 파괴면 작용하는 수직응력과 전단응력의 관계를 양대수 그래프에 도시하면 그림-3과 같이 되고, 이를 수식으로 정리하여 식(12)와 같은 전단강도식을 얻을 수 있

다. 식(12)에서 보는 바와 같이 De Mello의 식은 암석재료의 전단강도를 구속압력의 함수(엄밀하게는 파괴면에 작용하는 수직응력의 함수)로 정의하여 실제와 잘 부합하는 파괴규준식으로 볼 수 있다.

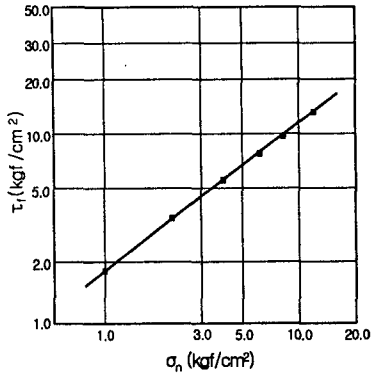


그림-3 τ_f 와 σ_n 의 관계

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_{1f}' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{2} \sin \phi_0' \quad (8)$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{2} \cos \phi_0' \quad (9)$$

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_{1f}' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{2} \sin \phi_0'(\sigma_3') \quad (10)$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{2} \cos \phi_0'(\sigma_3') \quad (11)$$

$$\tau_f = A(\sigma_n')^b \quad (12)$$

3. Rock재료에 대한 대형삼축시험

3.1 시험조건

한국수자원공사 수자원연구소가 보유하고 있는 대형진동삼축시험기를 사용하여 비교적 입도가 양호한 댐 축조용 Rock재료와 입도가 균등한 항만 케이슨 기초사석 재료에 대하여 압밀배수 삼축시험을 실시하였으며, 공시체의 크기는 직경 300mm, 높이 620mm의 원주형이고, 시험에 사용된 Rock재료의 기본물성 및 시험조건은 각각 표-1과 같다.

표-1 시험재료의 기본 물성 및 시험조건

구분	입도	암종	d_{max} (mm)	비중	흡수율 (%)	구속압 (kg/cm ²)	배수조건	
댐 축조용 Rock재료	양호한 입도	A-1	Granite	50.8	2.68	0.4	0.5, 2.0, 4.0 및 6.0	CD
		A-2	Shale & Sandstone	50.8	2.61	1.1	0.5, 2.0, 4.0 및 6.0	CD
		A-3	Soil & Rock	50.8	2.65	-	1.0, 2.0 및 4.0	CD
항만 케이슨 기초 사석	균등 입도	B-1	Sandstone	50.8	2.65	0.7	1.0, 2.0 및 3.0	CD
		B-2	Basaltic Andesite	50.8	2.51	2.3	1.0, 2.0 및 3.0	CD

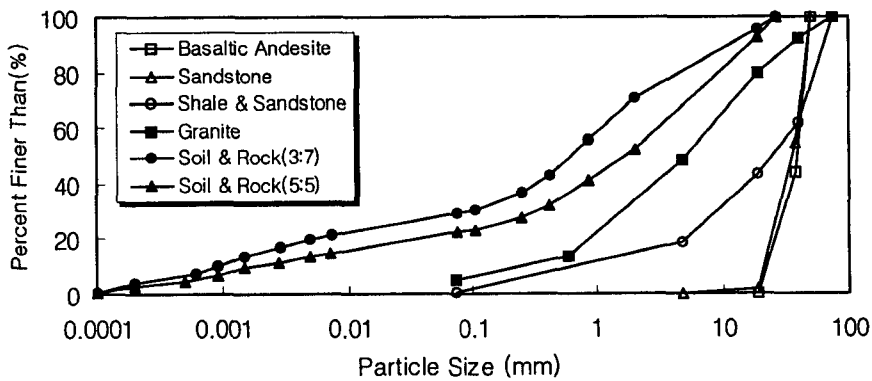
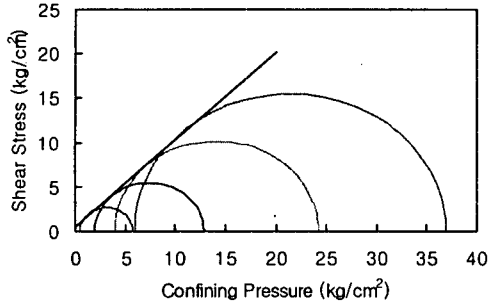


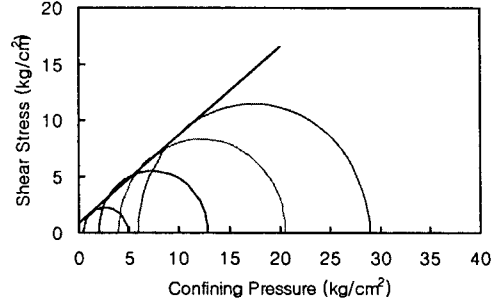
그림-4 입도분포곡선

3.2 시험결과

그림-4와 5는 각각 댐 축조용 Rock재료와 항만 케이슨 기초사석의 삼축시험 결과로서 내부마찰각과 점착력은, 양호한 입도의 Rock재료는 각각 $\phi=38.2\sim44.5^\circ$, $c=0.47\sim0.82 \text{ kg/cm}^2$, 균등한 입도의 Rock재료는 각각 $\phi=33.4\sim38.5^\circ$, $c=0.90\sim0.94 \text{ kg/cm}^2$ 이다.

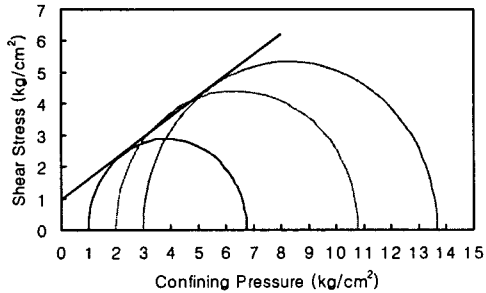


(a) A-1(Granite)

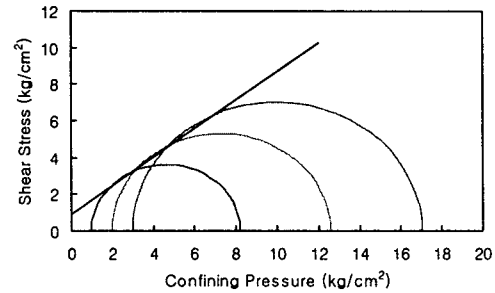


(b) A-2(Shale & Sandstone)

그림-4 양호한 입도의 Rock재료의 Mohr원과 파괴포락선



(a) B-1(Basaltic Andesite)



(d) B-2(Sandstone)

그림-5 균등한 입도의 Rock재료의 Mohr원과 파괴포락선

4. 내부마찰각의 구속압 의존성

4.1 구속압과 내부마찰각

그림-6은 양호한 입도(A-1 및 A-3)와 균등한 입도(B-1 및 B-2) 재료의 내부마찰각의 구속압 의존성을 나타내고 있다. A-1~A-3의 경우 B-1 및 B-2 보다 내부마찰각이 다소 크게 나타났는데 이는 암종 차이뿐만 아니라 입도차이에 따른 입자간 맞물림(interlocking) 정도의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 또한 내부마찰각은 3.0kg/cm^2 이하의 저구속압일 때 내부마찰각의 감소경향이 두드러지게 나타났다.

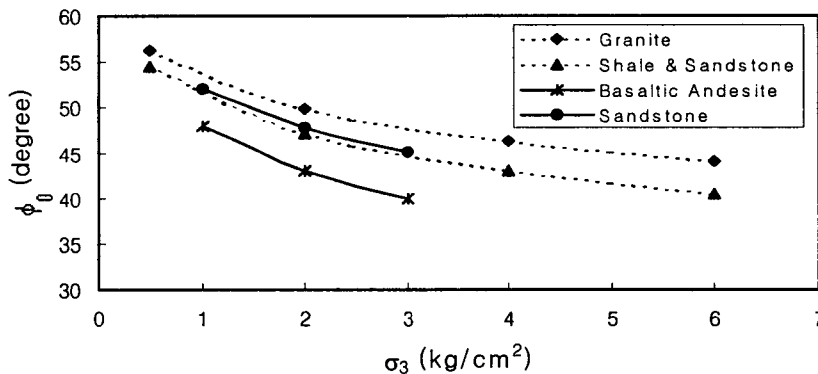


그림-6 구속압과 내부마찰각

4.2 Ab법에 의한 전단강도의 평가

4.2.1 n_0 와 m

그림-7은 각 재료에 대하여 파괴시의 최대주응력 σ_{1f} 와 구속압 σ_3 의 관계를 나타낸 것이고, 그림-8은 식(4)의 m 과 n_0 값을 구한 것이다. A-1~A-3재료는 $m=0.728\sim 1.023$, $n_0=2.672\sim 9.019$, B-1과 B-2재료는 $m=0.644\sim 0.800$, $n_0=5.409\sim 8.518$ 로 나타났다.

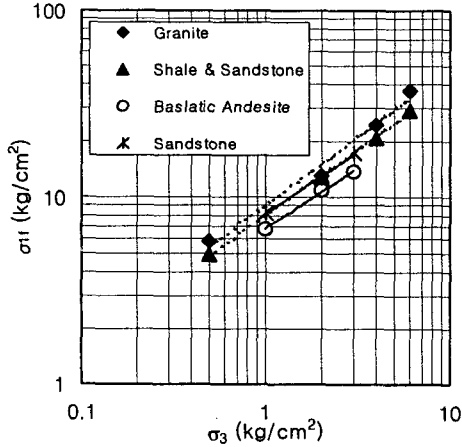


그림-7 σ_{1f} 와 σ_3 의 관계

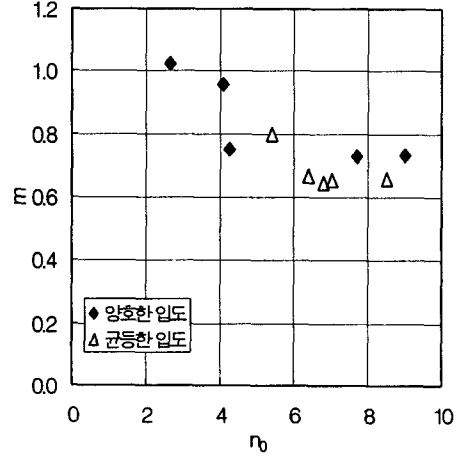


그림-8 n_0 와 m 의 관계

4.2.2 A와 b

그림-9은 각 재료에 대하여 파괴면에 작용하는 수직응력 σ_n 과 전단응력 τ_f 의 관계를 나타낸 것이고, 그림-10은 식(10)~(12)로부터 A와 b값을 구한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 A-1~A-3재료는 $A=0.683\sim 1.584$, $b=0.712\sim 1.015$, B-1과 B-2재료는 $A=1.145\sim 1.523$, $b=0.788\sim 0.880$ 로 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 균등입도인 경우에는 양호한 입도에 비하여 A와 b값의 변화폭이 작은 것을 알 수 있다. 또한 b값에 비하여 A값의 변화폭이 전반적으로 크게 나타나 Charles 등 및 일본 토목연구소의 연구결과와 유사한 결과를 얻었다.

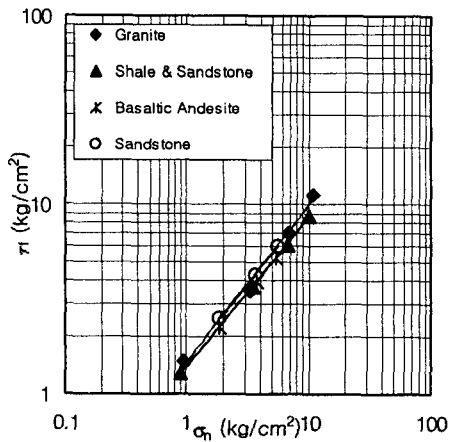


그림-9 τ_f 와 σ_n 의 관계

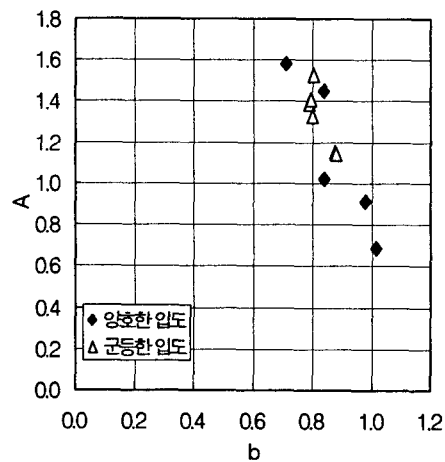


그림-10 A와 b의 관계

5. 결론

댐 축조재료, 안벽 뒷채움 재료 또는 마운딩 재료 등으로 사용되는 각종 Rock재료에 대하여 압밀배수 조건 하에서 대형삼축압축시험을 실시하여 내부마찰각의 구속압 의존성을 조사 분석하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Rock재료의 전단강도를 지배하는 내부마찰각의 구속압 의존성은 구속압이 작을 때 더욱 분명한 것으로 나타났으며, 균등입도의 경우가 양호한 입도의 Rock재료에 비하여 구속압 증가에 따른 내부마찰각의 감소량이 다소 큰 것으로 나타났다.
- (2) De Mello의 전단강도식에 의한 전단강도 평가결과 양호한 입도(A-1 및 A-3)의 Rock재료는 A-1~A-3재료는 $m=0.728\sim 1.023$, $n_0=2.672\sim 9.019$, $A=0.683\sim 1.584$, $b=0.712\sim 1.015$, B-1과 B-2재료는 $m=0.644\sim 0.800$, $n_0=5.409\sim 8.518$, $A=1.145\sim 1.523$, $b=0.788\sim 0.880$ 으로 나타났다.
- (3) De Mello의 전단강도식에 의한 전단강도 평가법(Ab법)은 구속압 의존성을 고려한 Rock재료의 전단강도를 사용하려고 할 때 유용하게 쓸 수 있는 방법으로 판단되며, 향후 암질 및 밀도 차이, 포화여부 등에 따른 영향을 고려한 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1.De Mello, V.F.B(1977), "Reflections on Design Decisions of Practical Significance to Embankment Dams", Geotechnique, Vol.27-3, pp.297-355.
- 2.Charles, J.A. and Watts, K.S.((1980), "The Influence of Confining Pressures on the Shear Strength of Rockfill", Geotechnique, Vol.30-4, pp.353-367.