

Dilatancy 효과를 고려한 사석재료의 전단강도 평가

Evaluation of Shear Strength of Rockfill Materials Considering Dilatancy Effect

신동훈¹⁾, Dong-Hoon Shin, 이경필²⁾, Kyoung-Pil Lee

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

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

SYNOPSIS : Dilatancy is a unique characteristics of granular materials showing the tendency to change volume upon shearing. In this study large triaxial tests were performed for both the well graded rock and the poorly graded rock. And the shear strength of rockfill materials considering dilatancy is evaluated based on the test results. For the rock materials of this study the contribution of dilatancy in the maximum internal friction angle is as much as -6.0%~3.0% of the internal friction angle measured at peak

Key words : 사석재료, Dilatancy, 전단강도, 내부마찰각, 대형삼축시험

1. 서론

조립재료의 전단강도는 ①응력조건(구속압, 중간주응력 및 응력이력 등), ②실험조건(삼축시험, 평면변형율시험, 단순전단시험 및 일면전단시험 등) ③재료특성(밀도, 상대밀도, 물의 영향 및 입자파쇄 등) 및 ④진동 등에 의하여 영향을 받는다. 특히 입자간의 마찰, 다일러턴시(dilatancy), 입자재배열 및 입자의 파쇄 등은 전단강도의 크기를 지배하는 인자들이다.

이중에서 다일러턴시 거동(전단시 체적이 변화하는 거동)은 입상체 재료의 고유한 특성으로서 그 재료의 내부마찰각의 크기에 영향을 미친다(Bishop, 1966; Tombs, 1969). 즉, 전단 중에 외부로부터 가해진 에너지의 일부는 공시체의 체적팽창에 사용되므로 그 나머지가 전단강도로 사용된다고 하는 것이다. 최대 내부마찰각 ϕ_{max} 와 다일러턴시로 소산된 에너지에 대한 영향을 고려한 내부마찰각 ϕ_r 의 관계는 (1)과 같다.

$$(\sigma_1' - \sigma_3')_r = (\sigma_{1f}' - \sigma_3') + \sigma_3' \cdot \frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_a} \quad (1.a)$$

$$\sin \phi_{max} = \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{\sigma_{1f}' + \sigma_3'} \quad (1.b)$$

$$\sin \phi_r = \frac{(\sigma_1' - \sigma_3')_r}{(\sigma_1' - \sigma_3')_r + 2\sigma_3'} \quad (1.c)$$

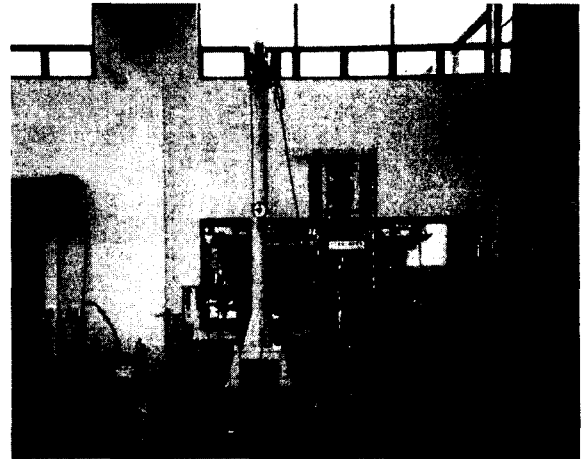
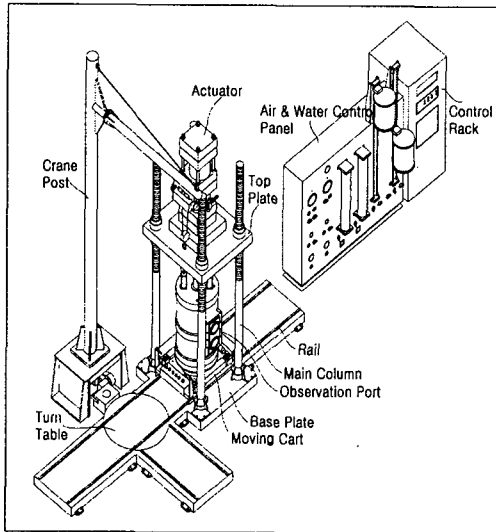
여기서, $d\epsilon_v/d\epsilon_a$: 다일러턴시 계수(dilatancy index)이며, 체적이 압축하는 경우를 정(+의) 다일러턴시 로 정의한다.

본 연구에서는 최대입경이 50.8mm인 사석재료로서 입도가 양호한 경우와 입도가 불량(입도가 균등)

한 경우에 대하여 압밀배수(CD) 조건하에 대형삼축압축시험을 실시하여 다일리턴시 효과에 따른 내부 마찰각의 변화거동을 조사 분석하였다

2. 사석재료에 대한 대형삼축시험

한국수자원공사 수자원연구소가 보유하고 있는 대형진동삼축시험기(그림-1)를 사용하여 비교적 입도가 양호한 댐 축조용 Rock재료와 입도가 균등한 항만 케이슨 기초사석 재료(그림-2)에 대하여 압밀배수 삼축시험을 실시하였으며, 공시체의 크기는 직경 300mm, 높이 620mm의 원주형이고, 시험에 사용된 Rock재료의 기본물성 및 시험조건은 각각 표-1과 같다. 시료는 대형자동다짐기를 사용하여 층다짐하여 제작하였고, 포화도를 높이기 위하여 탄산가스(CO₂)를 최소 3시간 이상 저압 주입한 후 1.6m의 수두차를 이용하여 공시체 하부에서 상부측으로 통수시켰다. 포화도는 B값이 0.97이상일 때 완전포화된 것으로 간주하였고, 소정의 압밀압으로 압밀하여 3t 범으로 1차압밀이 완료된 것을 확인하였다. 축하중은 축변형율이 18%이상일 때까지 약 3mm/min의 속도로 가하였으며, 전단 중 체적변화를 이중관뷰렛과 차압계를 사용하여 측정하였다.



(a)

(b)

그림-1 대형진동삼축시험기(한국수자원공사)

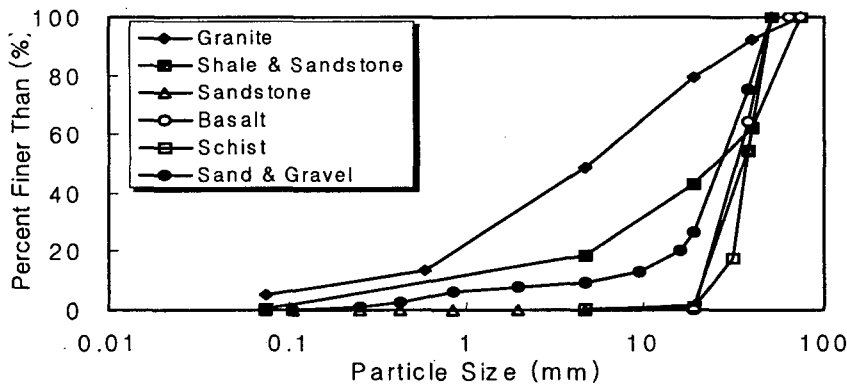


그림-2 입도분포곡선

표-1 시험재료의 기본 물성 및 시험조건

입도	암종	d_{max} (mm)	비중	흡수율 (%)	구속압 (kg/cm ²)	배수조건
양호한 입도	Granite	50.8	2.68	0.4	0.5, 2.0, 4.0 및 6.0	CD
	Shale & Sandstone	50.8	2.61	1.1	0.5, 2.0, 4.0 및 6.0	CD
균등입도	Sandstone	50.8	2.65	0.7	1.0, 2.0 및 3.0	CD
	Basaltic Andesite	50.8	2.51	2.3	1.0, 2.0 및 3.0	CD
	Sand & Gravel	50.8	2.67	0.8	1.0, 2.0 및 4.0	CD

3. 대형삼축시험 결과

사석재료의 전단거동 중 다일러턴시에 의한 성분을 구분해내는 것은 현실적으로 쉽지 않다. 실제로 식(1)에 있어서 ϕ_r 은 전단시 체적팽창에 사용된 에너지를 보정한 것에 지나지 않으므로 ($\phi_{max} - \phi_r$)이 다일러턴시 효과의 전체를 나타낸 것이 아니다 따라서 본 연구에서는 파괴시의 다일러턴시 계수 $d\epsilon_v/d\epsilon_a$ 를 산정하고, 식(1.a)와 (1.c)를 사용하여 ϕ_r 을 산정하여 ϕ_{max} 와 비교검토하는 것으로 하였다. 표-2는 각 재료의 대형삼축시험 결과를 요약한 것이다.

표-2 대형삼축시험 결과

구분	암종	구속압 (kg/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ (kg/cm ²)	ϵ_f (%)	ϕ_0 (°)	다일러턴시 계수 $\frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_a}$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$
Group (1)	Granite	0.5	5.32	4.54	57.3	0.014	11.62
		2.0	10.93	5.06	47.1	-0.061	6.45
		4.0	20.25	5.72	45.8	0.019	6.06
		6.0	30.98	7.04	46.1	-0.098	6.11
	Shale & Sandstone	0.5	4.431	9.56	54.7	-0.541	9.86
		2.0	10.9	15.00	47.0	-0.182	6.44
		4.0	16.6	15.00	41.2	0.033	5.15
		6.0	22.9	15.00	41.0	0.048	4.81
Group (2)	Sandstone	1.0	6.861	9.11	50.7	-0.501	7.86
		2.0	10.744	13.44	46.8	-0.280	6.37
		3.0	14.316	14.53	44.8	-0.093	5.77
	Basaltic Andesite	1.0	5.76	9.67	42.9	-0.048	6.76
		2.0	8.80	15.00	41.8	0.181	5.40
		3.0	10.66	13.20	39.8	0.221	4.60
	Schist	1.0	5.162	11.98	46.1	0.211	6.16
		2.0	7.706	15.00	41.2	0.022	4.85
		3.0	10.866	14.42	40.1	-0.035	4.62
	Group (3)	Sand & Gravel	1.0	4.564	8.63	44.1	-0.285
2.0			9.015	10.62	43.8	-0.085	5.50
4.0			15.066	8.56	40.8	-0.166	4.76

4. 다일러턴시를 고려한 전단강도의 평가

4.1 내부마찰각과 구속압

그림-3은 시험재료의 구속압과 내부마찰각의 관계를 나타낸 것으로서 모든 재료가 구속압이 증가함에 따라서 내부마찰각이 감소하는 경향을 나타내고 있으나 Sand & Gravel재료의 경우 변화가 작게 나타났

다.

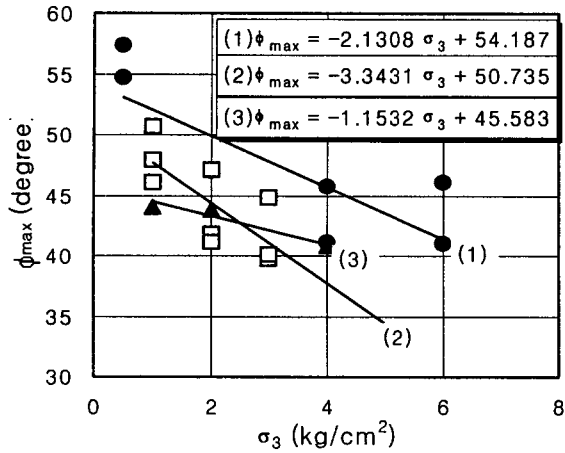


그림-4 내부마찰각과 구속압

4.2 다일러턴시 계수와 내부마찰각의 관계

각 재료에 대하여 그림-5~그림-7에 내부마찰각 ϕ_0 와 다일러턴시 계수의 관계를 나타내었으며, 그림에서 보는 바와 같이 사석재료인 경우(그림-5와 6)에는 전단시 체적팽창(부(-)의 다일러턴시 현상)이 많이 일어나고 그에 따라서 내부마찰각도 크게 평가되는 것으로 나타났다. 그러나 모래-자갈시료의 경우에는 전단시 체적변화량이 작고 내부마찰각의 변화도 작은 것으로 나타났는데 이는 큰 입자와 입자 사이에 채워져 있는 작은 입경의 입자들이 전단에너지를 흡수하기 때문으로 판단된다. 그림-8은 전체 시료에 대하여 다일러턴시 계수와 내부마찰각의 관계를 나타낸 것이다.

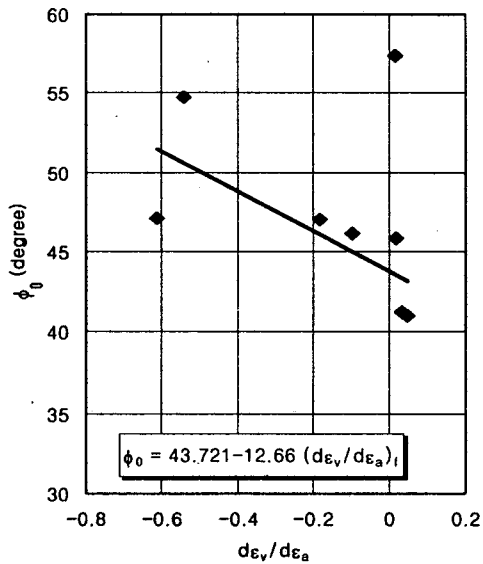


그림-6 $\phi_0 \sim (d\epsilon_v/d\epsilon_a)$ (양호한 입도)

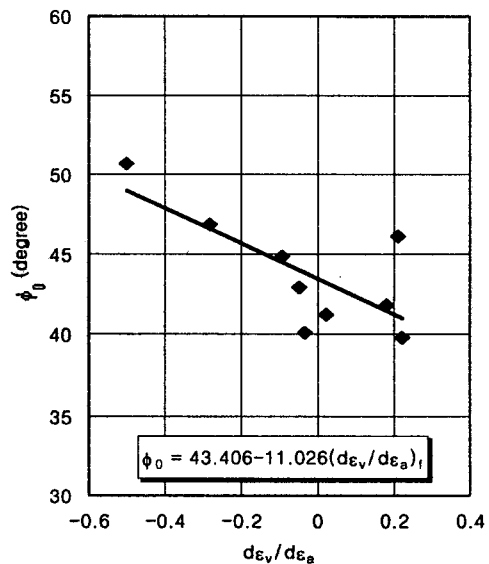


그림-5 $\phi_0 \sim (d\epsilon_v/d\epsilon_a)$ (균등한 입도)

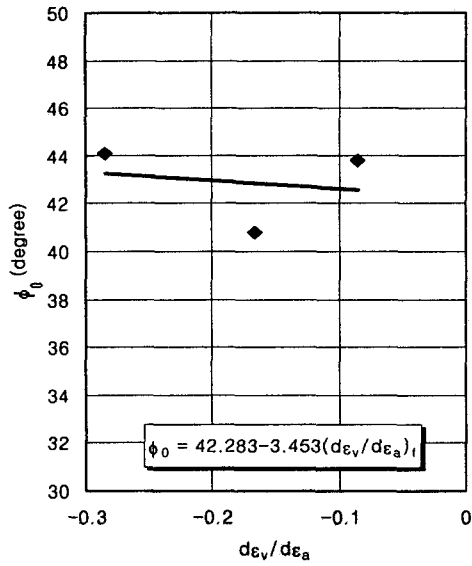


그림-7 $\phi_0 \sim (d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)$ (모래-자갈)

전 체

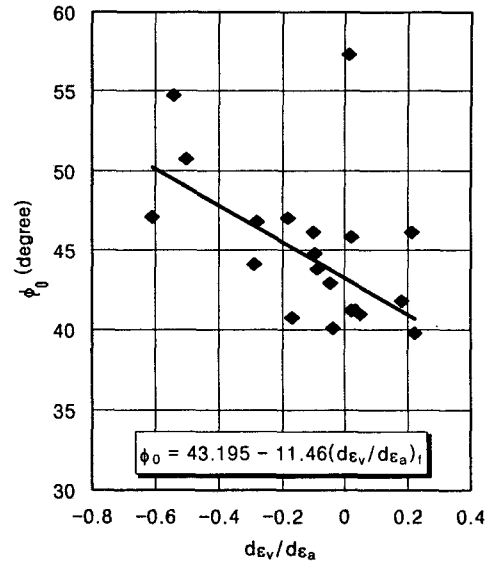


그림-8 $\phi_0 \sim (d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)$ (전체)

4.3 다일러턴시에 의한 내부마찰각의 변화량 검토

다일러턴시 현상이 내부마찰각에 미치는 영향 정도를 평가하기 위하여 식(1.b)와 (1.c)로부터 ϕ_{max} 와 ϕ_r 을 산정하였으며, 그림-9와 같이 ϕ_{max} 에 대한 $(\phi_{max} - \phi_r)$ 의 비를 구하여 각 구속압 수준에 따른 다일러턴시의 영향 정도를 평가하였다. 그림에서 보는 바와 같이 다일러턴시의 효과는 측정된 내부마찰각 ϕ_{max} 의 -6.0%~3.0% 정도인 것으로 나타났다.

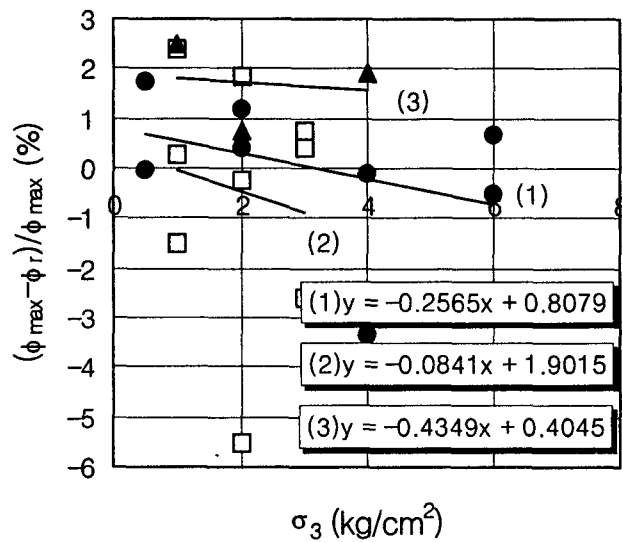


그림-9 다일러턴시가 내부마찰각에 미치는 영향정도

5. 결론

본 연구에서는 최대입경이 50.8mm인 사석재료로서 입도가 양호한 경우와 입도가 불량(입도가 균등)한 경우에 대하여 압밀배수(CD) 조건하에 대형삼축압축시험을 실시하여 다일러턴시 효과에 따른 내부마찰각의 변화거동을 조사 분석하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다

- (1) 사석재료는 구속압이 증가함에 따라서 내부마찰각이 감소하는 경향을 나타내고 있으나 모래-자갈재료의 경우 상대적으로 변화가 작게 나타났다.
- (2) 사석재료의 내부마찰각 ϕ_0 은 입도조건에 거의 관계없이 전단시 체적팽창(부(-)의 다일러턴시 현상이 발생)이 많이 일어나고 그에 따라서 내부마찰각도 크게 평가되는 것으로 나타났으나 모래-자갈시료의 경우에는 상대적으로 다일러턴시 현상에 의한 체적팽창도 적고 내부마찰각의 변화량도 작게 평가되었는데 이는 큰 입자와 입자 사이에 채워져 있는 작은 입경의 입자들이 전단에너지를 흡수하기 때문으로 추정된다
- (3) 사석재료의 다일러턴시의 영향을 고려한 내부마찰각 ϕ_r 을 구하여 파괴시의 내부마찰각 ϕ_{max} 에 대한 $(\phi_{max} - \phi_r)$ 의 비로부터 각 구속압 수준에 따른 다일러턴시의 영향정도를 평가해본 결과 다일러턴시의 효과는 측정된 내부마찰각 ϕ_{max} 의 -6.0%~3.0% 정도인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 粗粒材料の現場締固めの編集委員会(1990), 粗粒材料の現場締固め, (社)土質工學會.
2. Taylor, D.W.(1948), Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley, New York, p.700.
3. Bishop, A.W.(1950), "Discussion on Paper by A.W. Skempton and A.W. Bishop; The Measurement of the Shear Strength of Soils," Geotechnique, Vol.2, No.2, p.113~116.