

대형삼축시험 장비를 이용한 조립재료의 전단강도 특성 Characteristics of shear strength of coarse-grained materials using large triaxial test equipment

김광일¹⁾, Guang-Ri Jin, 신동훈²⁾, Dong-Hoon Snin, 임은상³⁾, Eun-Sang Im, 김기영³⁾, Ki-Young Kim

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 연구원, Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation.

²⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation.

³⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation.

SYNOPSIS : In the past few decades, the rockfill embankment dam, which has superior workability and economy, has become a major trend. In Korea, most of the embankment dams are rockfill dams, but recently, in response to the demand for sustainable development and environmentally-friendly water resource development, the sand and gravel in streams has become a major construction material for dams, rather than the non-economic rockfill, and its application examples have also increased.

In this study, a large triaxial test was performed, with construction samples of different maximum sizes, in parallel with the grading method at the 'B Dam' construction site in Korea, and the effects of the different maximum sizes on the strain of the dam construction material and on the shear strength characteristics were analyzed to provide the basic data for determining the strength characteristics of the coarse-grained materials by the maximum size.

Keywords : fill dam, parallel grading method, sand-gravel, large triaxial test, shear strength

1. 서론

일반적으로 조립재료(coarse materials)라 함은 입경이 0.075mm 내지는 300mm 이상인 모래, 자갈, 암석(cobble or boulder)을 포함한 토질 및 암석질 재료를 총칭한 것으로 주로 조립자로 구성된 점성이 없는 혼합시료, 혹은 점성시료 중 대량의 조립자를 함유하고 있는 혼합토를 조립재료라 한다. 조립재는 시공 중 양호한 다짐특성, 투수특성, 큰 축조밀도, 높은 전단강도, 적은 침하변형, 높은 내하력, 내진특성뿐만 아니라 댐 건설 현장부근에서의 골재원 확보가 용이한 특성으로 인하여 최근 필댐의 건설, 고속철도 노반공사, 건축구조물의 기초지반, 항만 방파제, 인공섬의 축조 등 시공에 광범위하게 적용되고 있다.

최근에는 시공성, 경제성 및 누수에 대한 저항성 등이 뛰어난 표면차수벽형석괴댐(Concrete Faced Rockfill Dam, CFRD)이 Fill댐 형식의 주류를 이루고 있다(박동순 등, 2004a, 박동순 등, 2004b). 이러한 CFRD의 이점으로 인해 현재 전 세계적으로 건설이 진행 중인 대부분의 댐이 CFRD 형식으로 축조되지만, 일부 지역에서는 지형적 및 환경적 특성으로 인해 석산재(rockfill)를 대신하여 사력재(sand and gravel)가 댐의 주 축조재료로 이용하기도 한다(서민우 등, 2006). 뿐만 아니라 시공기술의 발전함에 따라 축조재료로 사용되는 조립재료의 최대입경은 수cm에서 100cm 이상에 달하고 있다. 하지만 현재 실제 현장시료 입도에 대한 시험을 실시하는 것은 비용적으로 고가일 뿐만 아니라 기술적으로도 많은 문제가 존재한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 일반적으로 원입도의 상사입도시료에 대한 실내시

험을 통하여 산정된 강도정수를 실제 구조물 해석에 적용하고 있다. 현재까지 조립재료의 입자 크기가 전단강도에 미치는 영향에 관해서는 그동안 많은 연구가 이루어져 왔으나(Marachi, 1972 ; Charles, 1973 ; Valstad & Storm, 1976) 연구자들간 일관된 결과를 나타내고 있지 않아 여전히 추가적인 연구가 필요한 상황이다.

이에 본 연구에서는 국내 B댐 현장 축조시료의 최대입경이 서로 다른 상사입도시료에 대하여 대형삼축시험을 실시하였으며 최대입경의 변화가 댐 축조재료의 변형, 전단강도특성에 미치는 영향을 고찰하고 최대입경에 따른 조립재료의 강도특성을 규명하는데 있어 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 시험시료

시험에 사용된 조립재료는 B댐 축조재료 중 주를 이루는 Zine-3B 축조재료로서 댐 건설 현장 부근에서 채취된 하상골재이다. 현장 원입도 시료는 최대 직경이 500mm이며 통일분류법으로 분류하면 GW로 분류된다. 표 1과 같이 시험에 사용된 조립재료의 비중은 2.60~2.65, 흡수율은 0.65%, 마모율은 32.1%로 나타났다.

표 1. 조립재료의 기본 물성

구 분	비 중	흡수율(%)	마모율(%)	Cu	Cc	U.S.C.S
원 입도	2.60 ~ 2.65	0.65	32.1	27.97	1.05	GW
상사입도-D _{max} 50				24.00	1.07	GW
상사입도-D _{max} 20				24.26	1.13	SW-SM
상사입도-D _{max} 10				24.23	1.03	SW-SM

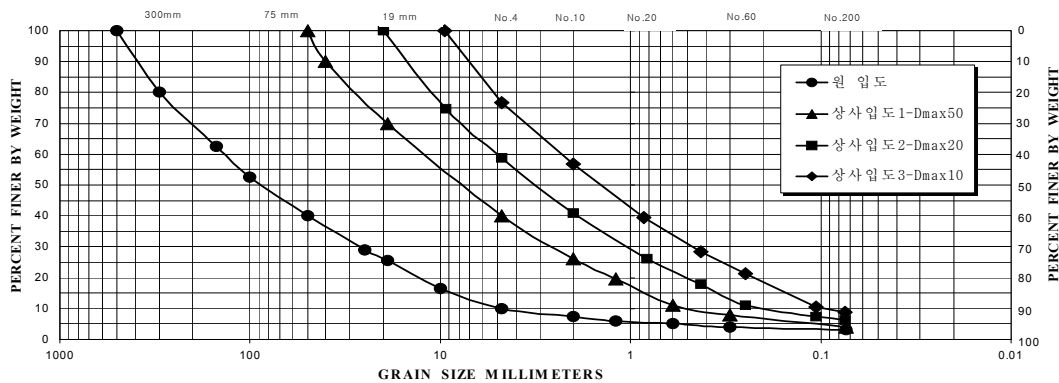


그림 1. 현장시료 및 시험시료의 입도분포곡선

조립재료의 최대 입경과 공시체의 크기의 제한으로 인하여 실내 대형삼축시험에 시료의 입도를 조정하여 사용하였다. 일반적으로 대형전단시험에서는 시료의 최대입경의 결정에 대한 명시적인 시험기준이 없어 관용적인 방법이 쓰이고 있다. 대형삼축시험의 경우에는 시료의 최대입경과 공시체의 비는 주로 1/4~1/8을 사용하고 있으며 가장 많이 사용되고 있는 비는 약 1/6이다(日本土木工學,1986). 일반적으로 시험입도조정 방법으로는 평행입자분포법(parallel grading method, Marachi, et al., 1969), 절단치환법(scalping and replacement method, Donaghe and Townsend, 1976), 입자모형법(matrix modeling method, Fragaszy, et al., 1992)등이 있다. 본 연구에 적용된 시료는 평행입자분포법(상사입도)을 적용하여 시험입도를 조정하였다.

시험시료의 입도는 대형삼축압축 공시체의 직경이 300mm임을 고려하여 시험시료의 최대입경을 각각 50mm, 20mm, 10mm(이하 D_{max}50, D_{max}20, D_{max}10이라 함)로 조정하여 사용하였다. 그림 1은 현장시료 및 시험시료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 각각의 시료에 대하여 통일 분류법으로 분류하면 현장시료와 D_{max}50 시료는 GW, D_{max}20, D_{max}10 시료는 SW-SM으로 분류된다. 그림 1과 표 1에서와 같이 현장시료와 상사입도 즉 조정입도 시료의 균등계수 Cu는 24.00~27.97, Uc는 1.03~1.13으로 거의 근접하게 나타나고 있다.

3. 시험장비 및 시험 방법

3.1 대형삼축시험 장비

본 연구에 사용된 대형삼축시험 장비는 직경 300mm, 높이 620mm크기의 공시체를 전단할 수 있는 대형시험 장비로서 정적, 동적하중 조건하에서 모두 동작 가능하다. 축방향의 하중은 전기유압서보 방식으로 최대 600KN까지의 재하 할 수 있으며, 재하속도는 0.01~60mm/min의 범위이다. 구속압은 공기-수압 변환 방식으로 최대 2.0Mpa까지 가능하다(서민우 등, 2005). 아래 그림 2는 대형삼축압축시험장비의 전체도를 나타낸 것이며 사진 1은 대형삼축압축시험 장비의 전경을 나타낸 것이다.

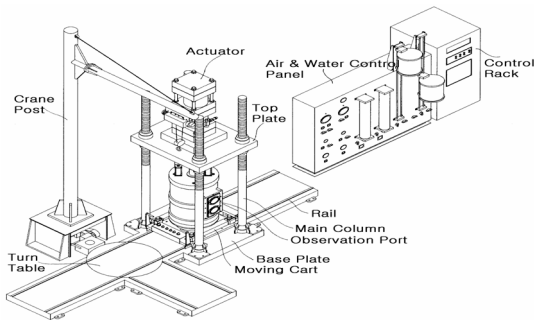


그림 2. 대형삼축압축시험장비의 전체도



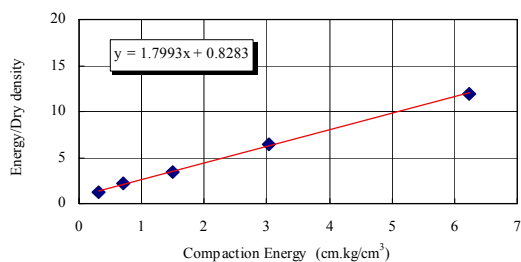
사진 1. 대형삼축압축시험기 전경

3.2 시험방법

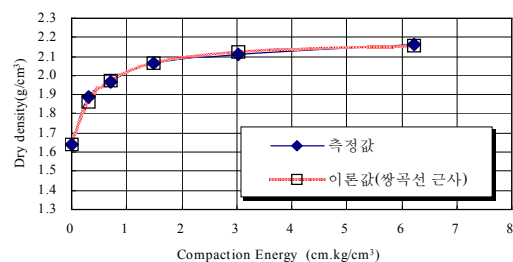
본 연구의 대형삼축시험에서는 실제 현장시료를 시험 공시체의 크기에 맞추어 최대입경을 50mm, 20mm, 10mm로 축소시킨 후 상사입도법을 적용하여 그림 1과 같이 시험 시료를 재구성 하였다. 다음 재구성된 시료를 소정의 밀도(상대밀도 75%)로 다짐 성형한 후 포화, 압밀, 전단과정을 거쳐 시험을 실시하였다.

3.2.1 다짐특성

댐 축조재료와 같은 조립재료의 다짐 특성은 일반 흙 시료와는 달리 함수비에 의한 영향을 거의 받지 않으며 최적함수비로 나타내지 않고 상대밀도(D_r)로 나타낸다. 본 연구에서는 JIS A1210과 ASTM E-12에 근거한 다짐시험 방법으로 최대, 최소단위중량을 각각 산정하였다. 최대건조단위중량은 대형다짐 시험기를 이용하여 일정한 다짐에너지로 다짐횟수를 증가하여 최대값에 수렴한 값으로 하였으며 식 1과 같이 쌍곡선(Hyperbola)에 근사시켜 이론적으로 가능한 최대건조단위중량을 산정하였다. 그림 3은 D_{max50} 의 실내 다짐시험 곡선을 예시한 것이다.



(a)다짐에너지-밀도



(b)다짐에너지-밀도 및 쌍곡선 근사

그림 3. 실내다짐시험 곡선(건조밀도-다짐에너지)

$$\gamma_d = \frac{E_c}{a + b \cdot E_c} \quad (1)$$

여기서 γ_d : 건조단위중량

E_c : 다짐에너지

a 및 b : 실험계수($\frac{E_c}{\gamma_d} = a + b \cdot E_c$)

본 연구에서는 최대입경 별 대형다짐 시험결과를 이용하여 대형삼축시험에 사용할 상대밀도 75%를 산정하였다. 아래 표 2는 최대입경별 최대, 최소 밀도 및 적용 상대밀도를 나타낸 것이다.

표 2. 최대입경별 실내시험 밀도

시험시료	최소건조밀도(g/cm^3)	최대건조밀도(g/cm^3)	상대밀도 75% (g/cm^3)
D _{max} 50	1.640	2.195	2.024
D _{max} 20	1.514	2.108	1.919
D _{max} 10	1.414	2.132	1.892

3.2.2 공시체의 제작 및 시험과정

본 연구에서는 시료의 최대입경의 크기를 각각 50mm, 30mm, 20mm, 10mm로 변화하여 재구성한 시료에 대하여 상대밀도 75%로 공시체를 성형하고 구속압을 달리하여 압밀 후 전단을 실시하였다.

공시체의 성형은 대형다짐 시험기를 이용하여 소정의 시료를 5등분하여 소정의 높이가 될 때까지 다져 균일한 밀도의 공시체가 성형되도록 하였다. 다음 시료의 자립을 위하여 몰드헤체 시 공시체 내부에 약 10Kpa의 부압을 가하였다.

성형된 공시체는 삼축압축셀에 설치한 후 약 10Kpa의 저압하에서 1.6m의 수두차를 이용하여 24시간 이상 통수시켜 포화하였다. 시료가 포화된 후에는 소정의 구속압으로 등방압밀시험을 실시하였으며 체적변화량이 일정하면 압밀이 끝난 것으로 간주하고 공시체를 3mm/min(0.5%/min)의 속도로 전단하였다. 기존의 연구결과에 따르면 0.086%~1.810%의 축변형률 속도는 모래-자갈(sand-graver)질 시료의 응력-변형에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고된 바 있다. 삼축압축시험은 JGS 0524방법에 근거하여 배수압밀 시험을 실시하였다.

표 3은 최대입경에 따른 공시체의 초기 상태 및 시험 조건을 나타낸 것이다.

표 3. 공시체의 초기상태 및 시험조건

시험시료	초기 건조밀도 (g/cm^3)	초기 간극비 (e_i)	구속압 (Kpa)	압밀량 (cc)	압밀후 간극비 (e_c)
D _{max} 50	2.017	0.314	100	489	0.299
			200	728	0.292
			400	1060	0.282
D _{max} 20	1.917	0.357	100	258	0.323
			200	560	0.314
			400	989	0.320
D _{max} 10	1.886	0.379	100	200	0.330
			200	369	0.329
			400	1040	0.308

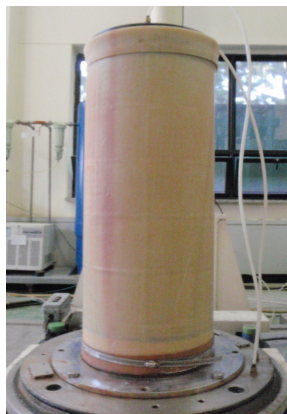
4. 시험결과 및 분석

본 연구에서는 최대입경별 상사입도 시료에 대하여 일련의 실내 물성시험 및 압밀배수삼축압축(CD) 시험을 수행하였다. 아래 표 4는 삼축시험 결과를 요약한 것이다.

시험 결과를 보면 $D_{max}50$ 은 점착력 15.432Kpa, 내부마찰각 41.537° , $D_{max}20$ 은 점착력 19.355Kpa, 내부마찰각 39.680° , $D_{max}10$ 은 점착력 $0.239\text{kg}/\text{cm}^2$ 내부마찰각 38.675° 로 나타났다. 사진 2는 시험전후의 공시체($D_{max}10-100\text{Kpa}$) 형상을 예시로 나타낸 것이다.

표 4. 대형삼축시험 결과

구 분	구속압(Kpa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (Kpa)	c (Kpa)	ϕ°	ϕ_0°	$\Delta\phi^\circ$	$\varepsilon_{af}(\%)$	$\varepsilon_{vf}(\%)$
D_{amx50}	100	434.397	15.432	41.537	43.502	3.062	7.189	-0.274
	200	855.686					9.568	-0.207
	400	1558.360					8.622	-1.161
D_{amx20}	100	426.752	19.355	39.680	42.990	3.783	6.728	-0.103
	200	802.549					7.210	-0.758
	400	1490.709					9.009	-1.851
D_{amx10}	100	405.726	11.960	38.675	41.531	4.217	11.049	-0.996
	200	683.599					11.963	-1.854
	400	1392.343					12.444	-2.293



(a) 시험 전 공시체의 형상



(b) 시험 후 공시체의 형상

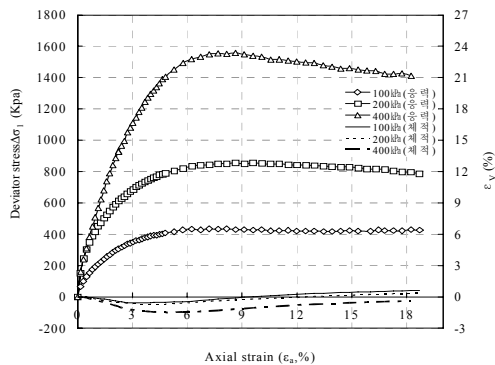
사진 3. 시험 전후의 공시체 형상($D_{max}10-100\text{Kpa}$)

4.1 응력-변형특성

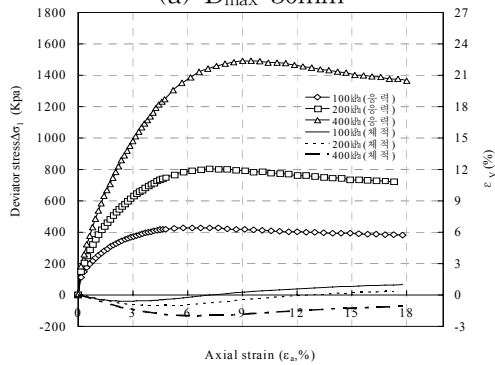
그림 5는 최대입경에 따른 상사입도 시료의 축차응력, 체적변형률-축방향변형률 관계를 나타낸 것이다. 그림 5로부터 알 수 있듯이 최대축차응력은 구속압의 증가에 따라 증가에 따라 증가하며, 모든 구속압에서 3시료 모두 최대축차응력 발현 이후 연화특성을 나타내고 있다. 낮은 구속압(100Kpa)의 경우 연화현상이 미약하게 나타났으나 구속압이 200Kpa, 400Kpa로 증가함에 따라 연화현상이 낮은 구속압에 비하여 상대적으로 선명히 나타나고 있다. 같은 구속압하에서 최대입경이 커질수록 연화현상이 더욱 선명하게 나타나고 있음을 알 수 있으나 세립토와 같이 현저하지 않고 최대축차응력 발현된 후에도 여전히 큰 응력상태를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 조립토의 경우 시료의 밀도가 상대적으로 세립토에 비하여 큰 것에 기인하는 것으로 사료된다.

$\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 관계를 살펴보면 3가지 시료 모두 전단 초기 단계에서 압축되는 경향을 나타낸다. $D_{max}50$, $D_{max}20$ 의 경우 구속압 100, 200Kpa에서는 전단 초기 압축되는 경향을 나타내다 축변형률이 증가에 따라 현저히 팽창되는 경향을 나타내지만 높은 구속압 400Kpa에서는 여전히 압축상태인 것을 알 수 있다. $D_{max}10$ 의 경우 모든 구속압에서는 압축으로부터 다시 팽창되는 거동을 보이고 있지만 축변형률 15%를 초과하여도 여전히 압축의 범위에 머물러 있는 것으로 나타났다. 이는 상사입도를 적용함으로써 최대입경이 작을수록 상대적으로 최대입경일 큰 시료에 비하여 세립분의 함유율이 높은 것에 기인한 것으로 사료된다.

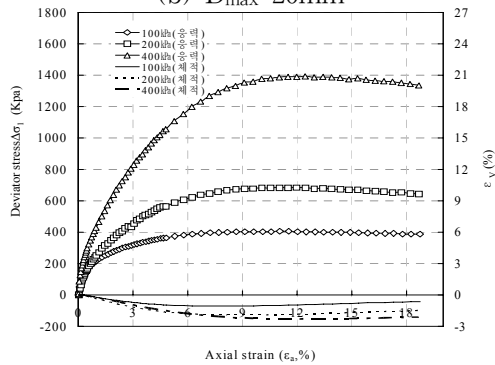
또한 같은 구속압하에서 최대입경이 커짐에 따라 최대축차응력은 증가하며 구속압이 커질수록 그 증가 폭이 큰 것으로 나타났다. 이에 반하여 같은 구속압하에서 최대입경이 증가함에 따라 최대축차응력 발현 시의 축변형률은 감소하는 경향을 보이나 최대입경이 20mm부터 감소율이 적은 것으로 나타났다. 모든 시료 $D_{max}50$, $D_{max}20$, $D_{max}10$ 에서 최대축차응력 발현시의 축변형률은 6.7%~12.5% 범위로 나타났다.



(a) D_{max} 50mm

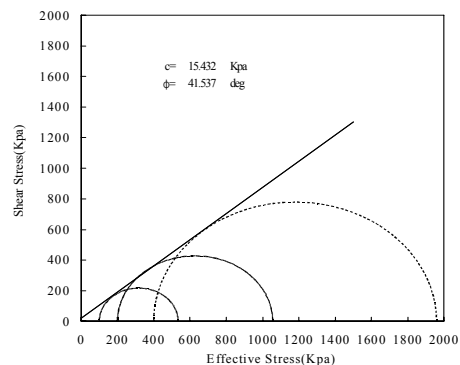


(b) D_{max} 20mm

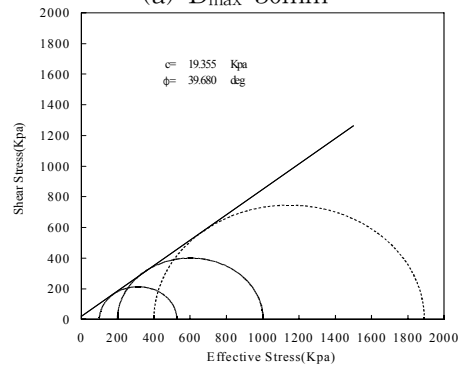


(c) D_{max} 10mm

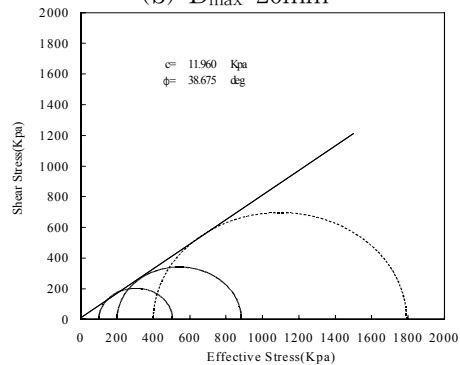
그림 5. 최대입경에 따른 조립재료의 축차응력, 체적변형률-축변형률 관계



(a) D_{max} 50mm



(b) D_{max} 20mm



(c) D_{max} 10mm

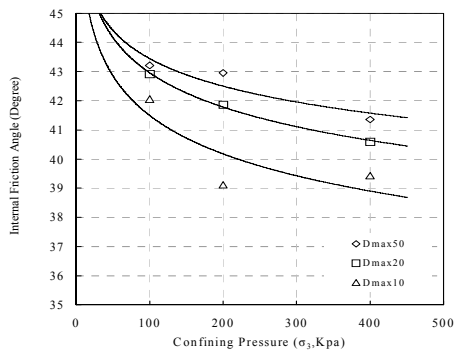
그림 6. 최대입경에 따른 조립재료의 Mohr-Coulomb 파괴포락선

4.2 전단강도 특성

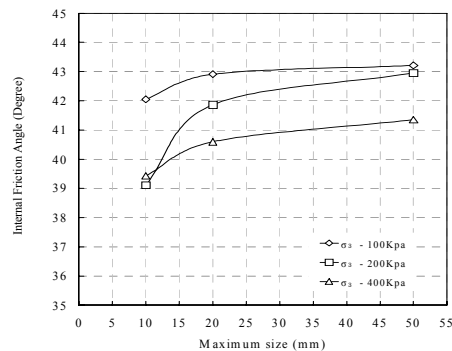
그림 6은 $D_{max}50$, $D_{max}20$, $D_{max}10$ 의 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 나타낸 것이다. 산정된 전단강도정수는 표 4에 나타내었다. 시험결과로부터 알 수 있듯이 내부마찰각은 각각 41.537° , 39.957° , 38.675° 로 나타나 최대입경의 작아짐에 따라 내부마찰각도 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 상사입도법을 적용하여 시험시료를 재구성 할 경우 세립분의 함량의 증가하는 것에 기인 한 것으로 사료된다.

그림 7은 구속압-내부마찰각, 최대입경에 따른 관계를 도시한 것이다. 그림 7(a)에서 내부마찰각은 최대입경이 같은 경우 구속압이 커질수록 감소하고 있으며, 그림 7(b)에서는 같은 구속압하에서 시료의 최대입경이 증가할수록 커지는 것으로 나타났다.

그림 8은 Mohr-Coulomb의 파괴기준인 파괴포락선 식 $[\tau = c + \sigma \tan \phi]$ 를 이용하여 배수 전단강도 (S_d)를 산정한 결과를 나타낸 것이다. 최대입경별 전단강도는 그림 8(a)에서 구속압이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 그림 8(b)에서는 같은 구속압하에서 전단강도는 최대입경이 커짐에 따라 구속압 100Kpa에서 작은 폭으로 증가하는 경향을 보이고, 구속압 200, 400Kpa하에서는 구속압 100Kpa에 비하여 상대적으로 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타나 전단강도는 구속압의 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다.

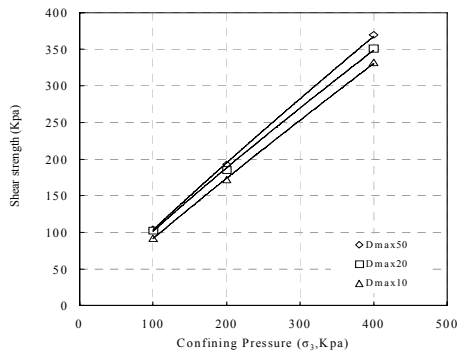


(a) 구속압에 따른 내부마찰각

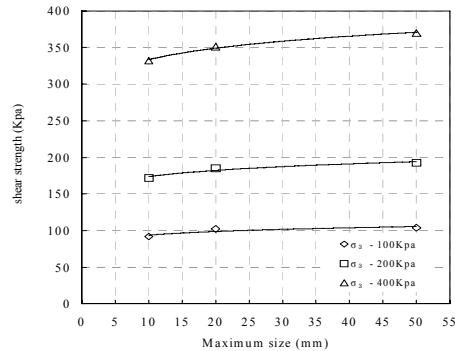


(b) 최대입경에 따른 내부마찰각

그림 7. 구속압, 최대입경에 따른 내부마찰각



(a) 구속압에 따른 전단강도



(b) 최대입경에 따른 전단강도

그림 8. 구속압, 최대입경에 따른 전단강도

5. 결론

본 연구에서는 국내 B댐 축조시료-하상골재의 최대입경을 변화하여 재구성된 상사입도시료에 대한 대형삼축시험을 실시하였으며 상사입도시료의 최대입경의 변화가 댐 축조재료의 변형, 전단강도특성에 미치는 영향을 고찰하고자 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 최대입경에 따른 상사입도시료는 같은 시험조건(구속압)하에서 최대입경이 커질수록 최대축차응력은

증가하고 최대축차응력 발현시의 축변형율은 감소하는 것으로 나타났다. 체적변형거동은 최대입경이 커짐에 따라 압축으로부터 팽창되는 거동을 보이고 있다.

- (2) 상사입도시료의 내부마찰각은 각각 $D_{max}10$ 에서 38.675° , $D_{max}20$ 에서 39.957° , $D_{max}50$ 에서 41.537° , $^\circ$ 로 나타나 최대입경이 커짐에 따라 내부마찰각은 증가하는 것으로 나타났다. 같은 시험조건(구속압)하에서 내부마찰각은 최대입경이 커질수록 증가하는 것으로 나타났으며, 전단강도는 최대입경이 커짐에 따라 구속압 200Kpa, 400Kpa에서는 증가하는 것으로 나타났으나 구속압 100Kpa에서는 거의 근접한 값을 나타내고 있다. 이로부터 내부마찰각 및 전단강도는 구속압 및 최대입경의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.
- (3) 본 연구에서는 최대입경별 상사입도 시료에 대하여 변형, 전단강도 특성에 대하여 고찰한 것으로 추후 응력경로, 고구속압 등 시험조건에 따른 상사입도시료의 거동, 시험과정 중의 시료 입자파쇄, 상사입도 시료의 세립분의 함량이 전단거동에 미치는 영향 등에 대하여 추후 계속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 박동순, 신동훈, 김형수, 임정열, 박한규(2004a), “CFRD의 현재와 미래”, 지반, **한국지반공학회지**, Vol.20, No.7, pp.16~27.
2. 박동순, 신동훈, 김형수, 임정열, 박한규(2004b), “CFRD의 거동 특성 이해”, 지반, **한국지반공학회지**, Vol.20, No.8, pp.6~16.
3. 서민우, 신동훈, 하익수, 박한규(2006), “대형 삼축시험을 통한 석산재와 사력재의 거동 특성 평가”, **한국지반공학회 2006 가을학술 발표회 논문집**, pp. 844-853.
4. 日本土質工學會(1986), “粗立材料の變形と強度” **日本土質工學會**.
5. Charles, J. A. (1973), “Correlation between Laboratory Behavior of Rockfill and Field Performance with Particular Reference to Scammonden Dam”, Ph. D. Thesis, Univ. of London, U. K.
6. Donaghe, R. T. and Townsend, F. C.(1976)“Scalping and replacement effects on the compaction characteristics of earth-rock mixtures” *ASTM STP* 5999.
7. Fragaszy, R.J., Su, J., Siddiqi, F. H. and Ho, C. L.(1972), “Modeling strength of sandy gravel”, Proc, *ASCE*, GE6.
8. Marachi, N. D., Seed, H. B. & Chan, C. K. (1972) “Evaluation of Properties of Rockfill Materials, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, Vol. 98, No. SM1, pp. 95-114.
9. Marachi, N. D., Chan C. K., Seed H. B. and Ducan J. N.(1969), “Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials”, Report No.TE-69-5. *University of California*.
10. Valstad, T. & Strom, E. (1976), “Investigation of the Mechanical Properties of Rockfill for the Svartevann Dam (Norway) using Triaxial”, *Oedometer and Plate Bearing Tests*, N. G. I. Pull. No. 110, Oslo, Norway, pp. 3-8.