

대형삼축시험에 의한 상사입도 조립재료의 변형 및 전단강도 특성

Characteristics of Deformation and Shear Strength of Parallel Grading Coarse-grained Materials Using Large Triaxial Test Equipment

김 광 일¹ Jin, Guang-Ri

신 동 훈² Snin, Dong-Hoon

임 은 상³ Im, Eun-Sang

김 기 영⁴ Kim, Ki-Young

Abstract

Along with the advanced construction technologies, the maximum size of coarse aggregate used for dam construction ranges from several cm to 1m. Testing the original gradation samples is not only expensive but also causes many technical difficulties. Generally, indoor tests are performed on the samples with the parallel grading method after which the results are applied to the design and interpretation of the actual geotechnical structure. In order to anticipate the exact behavior characteristics for the geotechnical structure, it is necessary to understand the changes in the shear behavior. In this study, the Large Triaxial Test was performed on the parallel grading method samples that were restructured with river bed sand-gravel, with a different maximum size, which is the material that was used to construct Dam B in Korea. And the Stress - Strain characteristics of the parallel grading method samples and the characteristics of the shear strength were compared and analyzed. In the test results, the coarse-grained showed strain softening and expansion behavior of the volume, which became more obvious as the maximum size increased. The internal angle of friction and the shear strength appeared to increase as the maximum size of the parallel grading method sample increased.

요 지

최근 시공기술이 발전함에 따라 댐 축조재료로 사용되는 조립재료의 최대입경은 수cm에서 1m이상에 달하고 있다. 실제 현장 원입도 시료에 대한 시험을 실시하는 것은 비용적으로 고가일 뿐만 아니라 기술적으로도 많은 문제가 존재하므로 일반적으로 상사입도 시료에 대하여 실내시험을 실시하고 그 결과를 실제 지반구조물의 설계 및 해석에 적용한다. 지반구조물에 대한 보다 정확한 거동특성을 예측하기 위해서는 입자크기에 따른 전단거동 특성의 변화를 파악하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 국내 B댐 현장 댐 축조시료인 하상 사력재에 대하여 최대입경을 서로 달리하여 재구성한 상사입도시료를 대상으로 같은 상대밀도로 공시체를 제작하여 대형삼축시험을 실시하였으며, 최대입경의 변화에 따른 상사입도시료의 응력-변형특성, 전단강도특성을 비교·분석하였다. 시험결과 조립재료는 전단과정에서 응력연화 및 체적팽창 거동을 나타내고, 상사입도 시료의 최대입경이 증가할수록 그 현상이 더욱 뚜렷한 것으로 나타났다. 내부마찰각, 전단강도는 상사입도 시료의 최대입경이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

Keywords : Deformation, Fill dam, Large triaxial test, Parallel grading, Relative density, Sand-grave, Shear strength

1 한국수자원공사 K-water 연구원 (Researcher, K-water Institute, Kwater)

2 한국수자원공사 K-water 책임연구원 (Principal Researcher, K-water Institute, Kwater)

3 한국수자원공사 K-water 선임연구원 (Senior Researcher, K-water Institute, Kwater, esim89@kwater.or.kr, 교신저자)

4 한국수자원공사 K-water 선임연구원 (Senior Researcher, K-water Institute, Kwater)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

일반적으로 조립재료(coarse materials)라 함은 입경이 0.075mm 내지는 300mm 이상인 모래, 자갈, 암석을 포함한 토질 및 암석 질 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 재료원 확보가 용이한 특성으로 인하여 최근 필댐의 건설, 고속철도 노반공사, 건축구조물의 기초지반, 항만 방파제, 인공섬의 축조 등 시공에 광범위하게 적용되고 있다(신동훈, 2001; QIN 등, 2004).

최근 시공기술의 발전함에 따라 댐 축조재료로 사용되는 조립재료의 최대입경은 수cm에서 1m이상에 달하고 있다. 하지만 현재 실제 현장시료 입도에 대한 시험을 실시하는 것은 비용적으로 고가일 뿐만 아니라 기술적으로도 많은 문제가 존재한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 현재까지는 주로 상사입도로 축소된 원입도의 상사입도시료에 대한 실내시험을 통하여 산정된 시험결과로부터 시험재료에 대하여 전단특성을 파악하고 실제 지반구조물의 설계 및 해석에 적용하고 있다. 지반구조물에 대한 보다 정확한 거동특성을 예측하기 위해서는 입자크기에 따른 전단거동 특성의 변화를 파악하는 것이 필수적이라고 할 수 있다(서민우 등, 2007). 조립재료의 입자 크기가 전단강도에 미치는 영향에 대해서는 그동안 많은 연구가 이루어져 왔으나(Leslie, 1963; Marachi 등, 1972; Charles, 1973; Valstad & Storm, 1976) 연구자들 간 일관된 결과를 나타내고 있지 않은 실정이다. 특히, 댐 축조재료와 같은 조립재료는 본질적으로는 모래와 유사한 역학적 성질을 갖고 있으나 모래와 달리 입자의 크기가 크고 밀도, 입자간의 마찰, 다ierer턴시, 재배열 및 구속압 등 다른 여러 요인들에 영향을 받을 수 있는 것으로 알려져 있다(신동훈, 1999).

기존의 연구에서는 대부분 각 재료의 전단강도를 비교하는 지표로서 건조밀도 혹은 간극비를 이용하여왔지만 서로 다른 종류의 조립재료의 전단강성을 비교하는 경우 상대밀도를 이용하여 재료의 종류 구분 없이 전단강도특성을 평가한 경우도 있다(大野 등, 2001, 2002; 日本地盤工学会, 2001). 상대밀도는 액상화강도 평가를 시작으로 모래의 역학적특성을 비교적 잘 나타낼 수 있

다는 것이 확인되었으며, rook재료에서도 상대밀도를 적용하여 역학적 특성을 파악하고 그 유용성을 확인바 있다(赤司六哉 등, 1981). 하지만 실제 현장입도에 대하여 최소밀도 최대밀도의 측정이 어려우므로 상대밀도를 실무적인 측면에서 적용한 사례는 극히 적어 이에 대한 지속적인 연구가 필요한 상황이다.

이에 본 연구에서는 국내 B댐 현장 댐 축조시료에 대하여 최대입경을 달리한 3가지 상사입도시료를 대상으로 같은 상대밀도의 공시체를 제작하고 대형삼축시험을 실시하였으며, 같은 상대밀도의 조건하에서 최대입경의 차이가 조립재료의 전단강도, 변형특성에 미치는 영향을 규명하는데 있어 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 시험시료 및 시험 장비

2.1 시험시료

일반적으로 조립재료의 최대 입경과 공시체의 크기의 제한으로 인하여 실내 대형삼축시험에 시료의 입도를 조정하여 사용한다. 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(日本土質工學, 1986). 일반적으로 시험입도 조정 방법으로는 평행입자분포법(parallel grading method), 절단치환법(scalping and replacement method), 입자모형법(matrix modeling method) 등이 있다.

본 연구에서는 평행입자분포법(상사입도)을 적용하여 시험입도를 조정하였다. 시험에 사용된 조립재료는 B댐 축조재료 중 주를 이루는 Zone-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 2.60~2.70, 흡수율은 0.65%, 마모율은 32.1%로 나타났다.

시험시료의 입도는 대형삼축압축 공시체의 직경이 300mm임을 고려하여 시험시료의 최대입경을 각각 50mm, 20mm, 10mm(이하 D_{max50} , D_{max20} , D_{max10} 이라 함)로 조정하여 사용하였다. 그림 1은 현장시료 및 시험시료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 각각의 시료에 대하여 통일 분류법으로 분류하면 현장시료와 D_{max50} 시료

표 1. 조립재료의 기본 물성

구 분	비 중	흡수율(%)	마모율(%)	Cu	Cc	U.S.C.S
원 입도	2.60 ~ 2.70	0.65	32.1	27.97	1.05	GW
상사입도-D _{max50}				24.00	1.07	GW
상사입도-D _{max20}				24.26	1.13	SW-SM
상사입도-D _{max10}				24.23	1.03	SW-SM

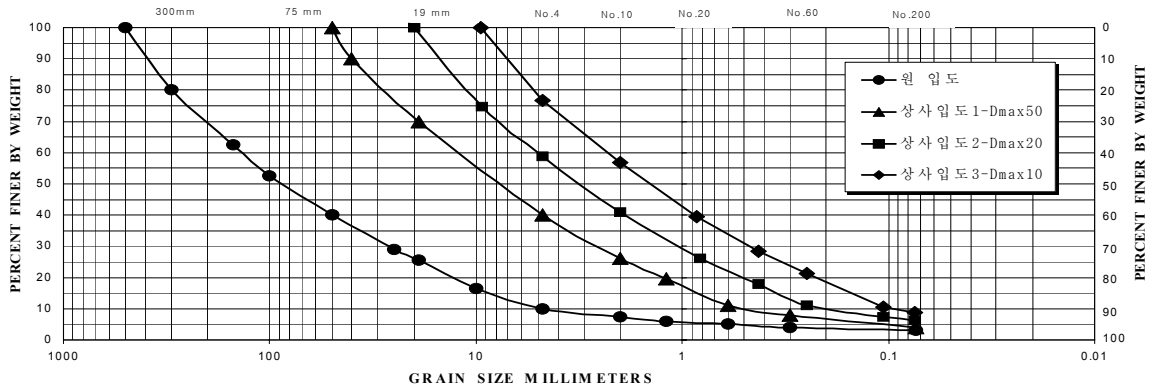


그림 1. 현장시료 및 시험시료의 입도분포곡선

는 GW, D_{max20}, D_{max10} 시료는 SW-SM으로 분류된다. 그림 1과 표 1에서와 같이 현장시료와 상사입도 즉 조정입도 시료의 균등계수 Cu는 24.00~27.97, Cc는 1.03~1.13으로 거의 유사하여 각 입도의 기본적 성질과 역학적 성질은 유사할 것으로 사료된다.

2.2 대형삼축시험 장비

본 연구에 사용된 대형삼축시험 장비는 직경 300mm, 높이 620mm 크기의 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-수압변환 방식으로 최대 2.0Mpa까지 가능하다(신동훈, 2001). 아래 그림 2는 대

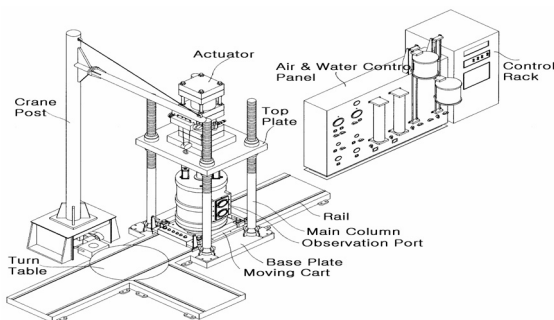


그림 2. 대형삼축압축시험장비의 전체도

형삼축압축 시험장비의 전체도를 나타낸 것이며 사진 1은 대형삼축압축시험 장비의 전경을 나타낸 것이다.

3. 시험 방법

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.

3.1 다짐특성

댐 축조재료와 같은 조립재료의 다짐 특성은 일반 흙

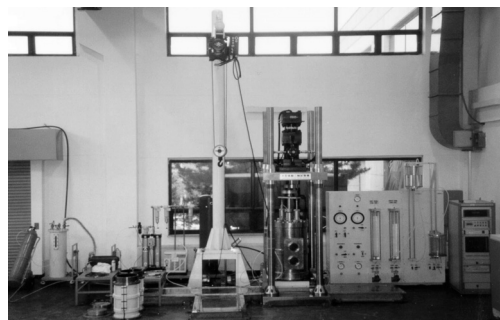


사진 1. 대형삼축압축시험기 전경

시료와는 달리 함수비에 의한 영향을 거의 받지 않으며 최적함수비로 나타내지 않고 상대밀도(D_r)로 나타낸다. 사질토에 있어서 밀도 또는 간극비가 전단강도를 비롯한 흙의 역학적 성질을 지배하는 중요한 요소임은 일반적으로 확인되고 있다. 그러나 밀도나 간극비는 절대적인 수치로서, 그 값으로 직접 흙의 역학적 상태와 관련 시키기는 어렵다(이종진 등, 2007). 사질토의 역학적 상태를 정량적으로 표현하기 위해 현재의 상태가 그 흙의 가장 잘 다져진 상태(최대상대밀도)와 가장 느슨한 상태(최소상대밀도)사이의 어느 정도인가를 퍼센트(%)로 나타내는 상대밀도가 사용되고 있다(Lambe & Whitman, 1979).

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 (1)과 같이 쌍곡선(Hyperbola)에 근사시켜 이론적으로 가능한 최대 건조단위중량을 산정하였다. 표 2는 다짐시험 조건을 나타낸 것이다.

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

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 상대밀도를 산정하였다.

표 2. 다짐시험 조건

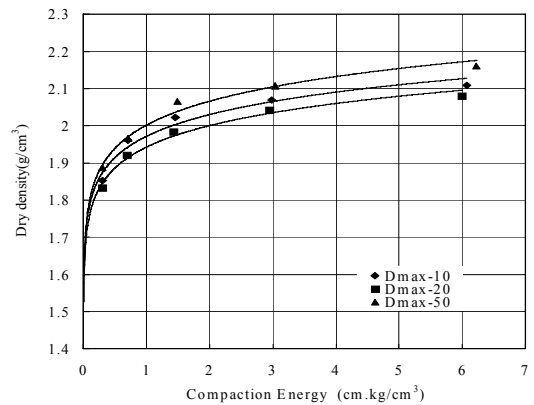
구 분	제 원
공시체 크기	직경 - 30cm, 높이 - 62cm
다 짐 층 수	3층(층당 시료 높이 20~21cm)
다 짐 횟 수	0회~72회
낙 하 고	50cm
래 머 무게	16kg

표 3. 최대입경별 실내시험 밀도

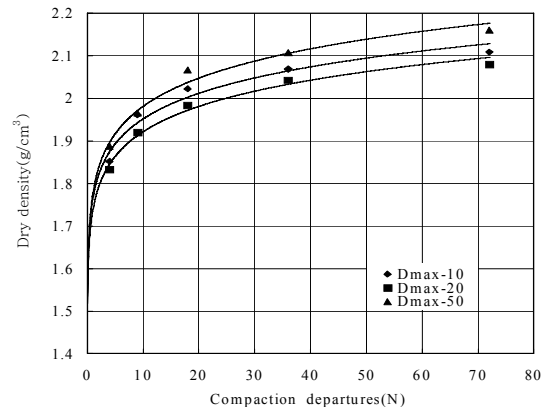
시험시료	최소건조밀도 (g/cm ³)	최대건조밀도 (g/cm ³)
D _{max50}	1.640	2.195
D _{max20}	1.514	2.108
D _{max10}	1.414	2.132

다. 표 3은 최대입경별 최대, 최소 밀도를 나타낸 것이며, 그림 3은 다짐 에너지, 다짐횟수와 건조밀도와의 관계를 도시한 것이다.

그림 3으로부터 알 수 있듯이 동일한 다짐에너지 경우 최대입경이 증가에 따라 밀도도 증가하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 조립재료의 밀도를 지배하는 주요한 요인으로서 입도분포(균등계수), 입자의 파쇄 등을 들 수 있다. 즉 다짐밀도는 균등계수가 동일한 상사입도 시료에서 입자의 파쇄의 영향을 크게 받고 있음을 알았다. 그림 3에서 D_{max20}는 D_{max10}에 비하여 다짐에너지를 받지 않는 경우 즉 최소밀도는 크게 나타났다. 하지만 다짐에너지를 받는 경우 같은 다짐에너지에서 상대적으로 낮은 밀도를 가지는 것으로 나타나 이는 입자파쇄에 의한 입도의 재배열에 기인 한 것으로 사료된다. 그림 4는 D_{max10}, D_{max20} 입시료에 대한 다짐 시험 전후 입도분포 곡선을 나타낸 것으로 D_{max20} 입의 경우 다짐 시험 후 파쇄가 상대적으로 많이 발생했음을 확인 할 수 있다.



(a) 다짐에너지-밀도



(b) 다짐횟수-밀도

그림 3. 실내다짐시험 결과(건조밀도-다짐에너지/횟수)

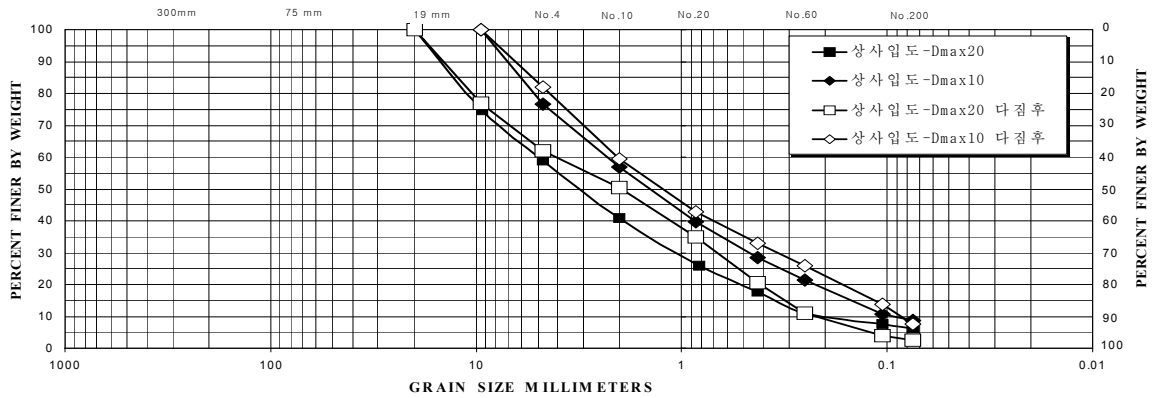


그림 4. 다짐 시험 전·후 D_{max10} , D_{max20} 입도분포곡선

3.2 공시체의 제작 및 시험과정

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

공시체의 성형은 대형다짐 시험기를 이용하여 소정의 시료를 5등분하여 소정의 높이가 될 때까지 다져 균일한 밀도의 공시체가 성형되도록 하였으며 시료의 자립을 위하여 몰드해체 시 공시체 내부에 약 10Kpa의 부압을 가하였다. 성형된 공시체는 삼축압축셀에 설치한 후 약 10Kpa의 저압하에서 1.6m의 수두차를 이용하여 24시간이상 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. 삼축압축시험

은 배수압밀시험을 실시하였다. 표 3은 최대입경에 따른 공시체의 초기 상태 및 시험 조건을 나타낸 것이다. 표 4로부터 알 수 있듯이 최대입경이 작을수록 동일한 상대 밀도에서 간극비는 증가하고 있음을 알 수 있다.

4. 시험결과 및 분석

본 연구에서는 최대입경별 상사입도 시료에 대하여 일련의 실내 물성시험 및 압밀배수삼축압축(CD)시험을 수행하였다. 표 5는 삼축시험 결과를 요약한 것이다.

시험 결과를 보면 D_{max50} 은 점착력 15.432Kpa, 내부마찰각 41.537°, D_{max20} 은 점착력 19.355Kpa, 내부마찰각 39.680°, D_{max10} 은 점착력 0.239kg/cm², 내부마찰각 38.675°로 나타났다. Φ_0 는 D_{max50} 에서 43.502°, D_{max20} 에서 42.990°, D_{max10} 에서 41.5831°로 나타나 최대입경이 작아짐에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. $\Delta\Phi$ 는 각각 3.062, 3.783, 4.217°로 나타나 최대입경이 작아짐에 따라 구속압에 대한 의존성이 큰 것으로 나타났다.

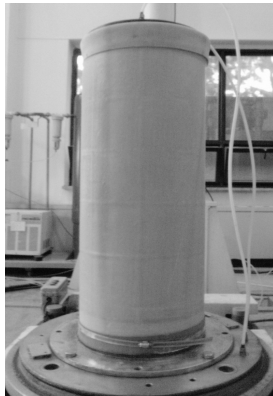
최대입경 10mm인 D_{max10} 시료에 비하여 최대축차응력

표 4. 공시체의 초기상태 및 시험조건

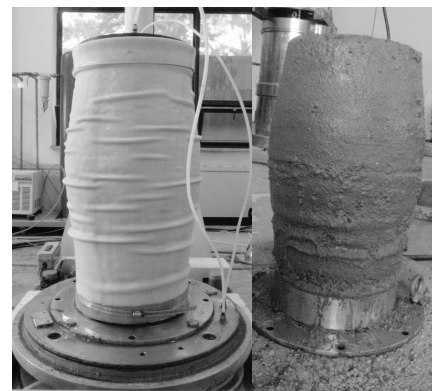
시험시료	초기 건조밀도 (g/cm^3)	초기 간극비 (e_i)	구속압 (Kpa)	압밀량 (cc)	압밀후 간극비 (e_c)
D_{max50}	2.017	0.340	100	489	0.324
			200	728	0.317
			400	1060	0.307
D_{max20}	1.917	0.357	100	258	0.323
			200	560	0.314
			400	989	0.320
D_{max10}	1.886	0.379	100	200	0.330
			200	369	0.329
			400	1040	0.308

표 5. 대형삼축시험 결과

구분	구속압 (Kpa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ (Kpa)	c (Kpa)	ϕ_i°	ϕ°	ϕ_0°	$\Delta\phi^\circ$	ε_{ap} (%)	ε_{vp} (%)
D _{amax50}	100	434.397	15.432	43.213	41.537	43.502	3.062	7.189	-0.274
	200	855.686		42.952				9.568	-0.207
	400	1558.360		41.355				8.622	-1.161
D _{amax20}	100	426.752	19.355	42.914	39.680	42.990	3.783	6.728	-0.103
	200	802.549		41.865				7.210	-0.758
	400	1490.709		40.599				9.009	-1.851
D _{amax10}	100	405.726	11.960	42.053	38.675	41.531	4.217	11.049	-0.996
	200	683.599		39.114				11.963	-1.854
	400	1392.343		39.427				12.444	-2.293



(a) 시험 전 공시체의 형상



(b) 시험 후 공시체의 형상

사진 2. 시험 전후의 공시체 형상(D_{max10}-100Kpa)

은 D_{max20}에서 105.18~107.40%로 평균 109.88%, D_{max50}에서 107.06~125.13%로 평균 114.69% 증가하였으며, 축변형률은 D_{max20}에서 60.26~72.39%로 평균 64.52%, D_{max50}에서 65.15~80.21%로 평균 71.61%로 감소한 것으로 나타났다. 각 구속압에서의 내부마찰각은 D_{max20}에서 102.05~107.03%로 평균 104.02%, D_{max50}에서 102.76~109.81%로 평균 105.82%로 증가한 것으로 나타났다.

4.1 응력-변형특성

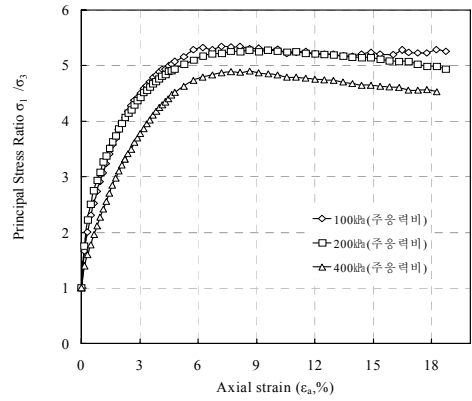
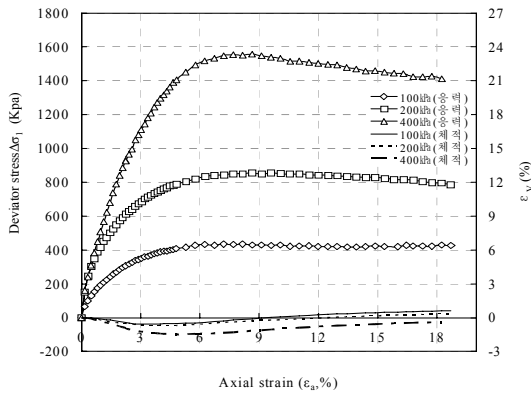
그림 5는 최대입경에 따른 상사입도 시료의 축차응력, 체적변형률, 주응력비-축방향변형률 관계를 나타낸 것이다. 그림 5로부터 알 수 있듯이 최대축차응력은 구속압의 증가에 따라 증가하나 주응력비는 구속압의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

그림 5와 같이 동일한시료에서 주응력비 σ_1/σ_3 는 구속압이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 상사입도시료의 최대입경이 작아짐에 따라 σ_1/σ_3 도

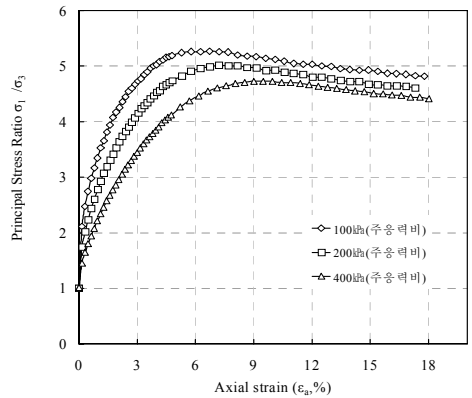
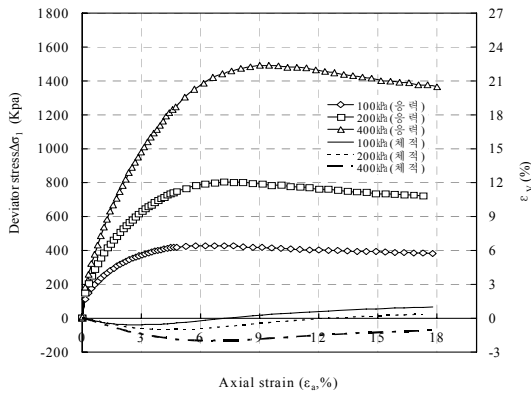
감소하는 것으로 나타났다. 모든 구속압하에서 3가지 시료 모두 최대축차응력 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ 발현 이후 연화특성을 나타내고 있다. 낮은 구속압(100Kpa)의 경우 연화현상이 미약하게 나타났으나 구속압이 200Kpa, 400Kpa로 증가함에 따라 연화현상이 구속압 100Kpa에 비하여 상대적으로 뚜렷이 나타나고 있다.

동일한 구속압하에서 최대입경이 커질수록 연화현상이 더욱 뚜렷하게 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.

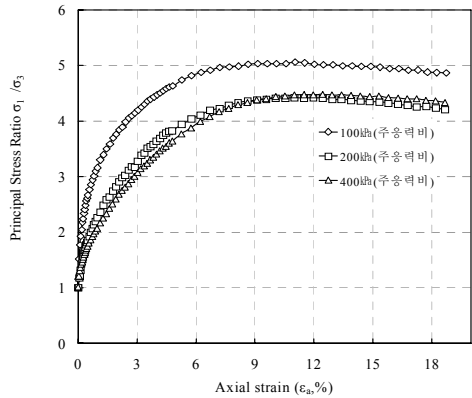
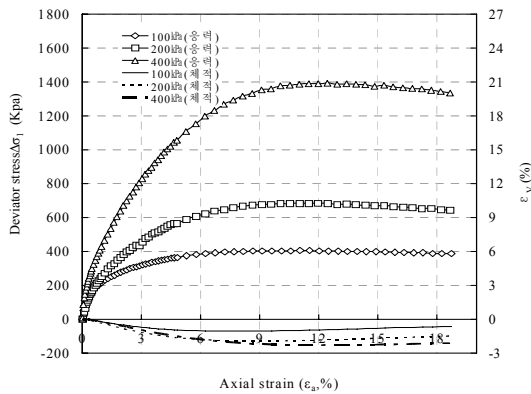
$\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 관계를 살펴보면 3가지 시료 모두 전단 초기 단계에서 압축되는 경향을 나타낸다. D_{max50}, D_{max20}의 경우 구속압 100, 200Kpa에서는 전단 초기에 압축되는 경향을 나타내다 축변형률이 증가함에 따라 현저히 팽창되는 경향을 나타내지만 높은 구속압 400Kpa에서는 여전히 압축상태인 것을 알 수 있다. D_{max10}의 경우 공시



(a) D_{max50}



(b) D_{max20}



(c) D_{max10}

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

체는 압축으로부터 다시 팽창되는 거동을 보이고 있지만 축변형률 15%를 초과하여도 여전히 압축(부의(-) 체적변형)의 범위에 머물러 있는 것으로 나타나 최대입경이 큰 시료일수록 dilatancy가 많이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 상사입도를 적용함으로써 최대입경이 작을수록 상대적으로 최대입경이 큰 시료에 비하여 세립분의 함유율이 높은 것에 기인한 것으로 사료된다.

또한 그림 6과 같이 동일한 시험조건(구속압)하에서 최대입경이 커짐에 따라 최대축차응력은 증가하며 구속압이 커질수록 그 증가폭이 큰 것으로 나타났다. 최대축차응력 발현시의 축변형률은 최대입경이 커짐에 따라 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 최대입경이 D_{max50}, D_{max20}, D_{max10}에서 최대축차응력 발현시의 축변형률은 6.7%~12.5% 범위로 나타났다.

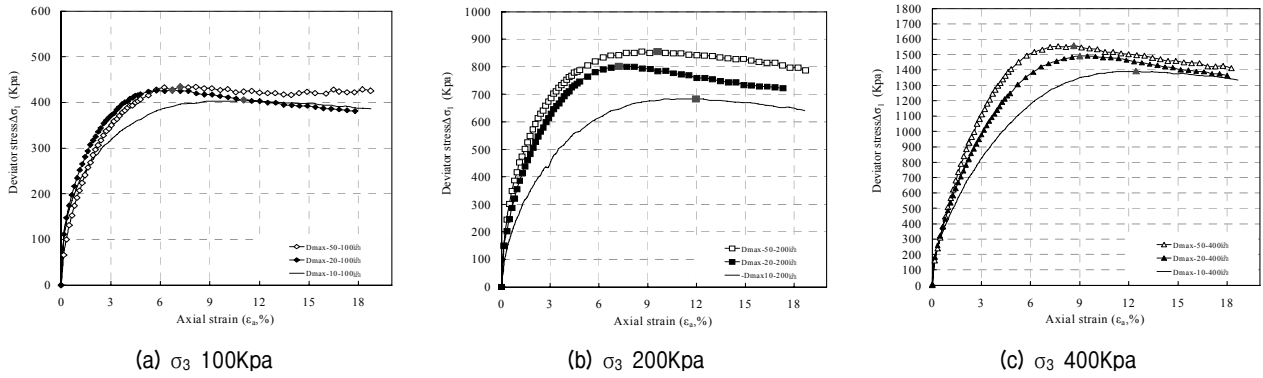


그림 6. 동일한 시험조건하에서의 최대입경에 따른 조립재료의 축차응력-축변형률 관계

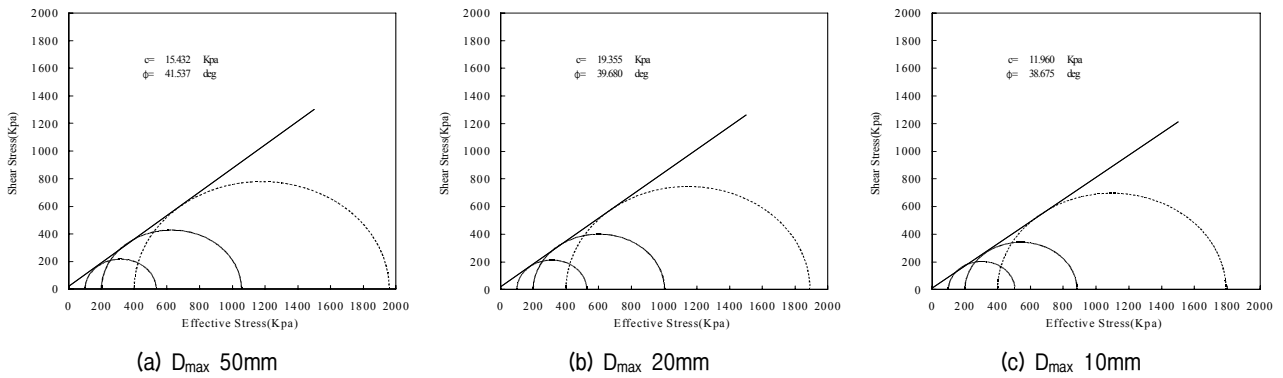


그림 7. 최대입경에 따른 조립재료의 Mohr-Coulomb 파괴포락선

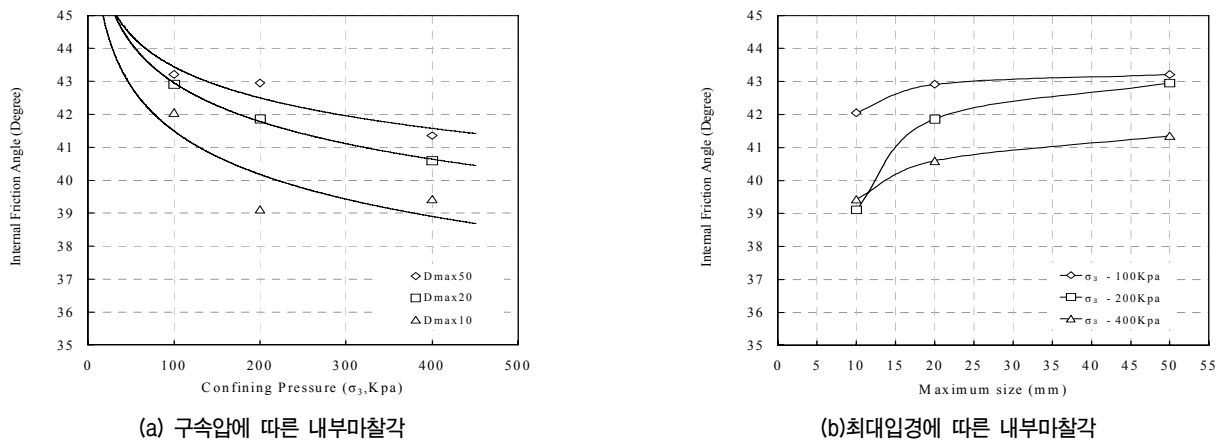


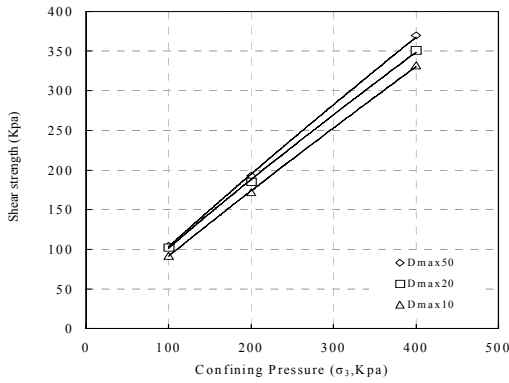
그림 8. 구속압, 최대입경에 따른 내부마찰각

4.2 전단강도 특성

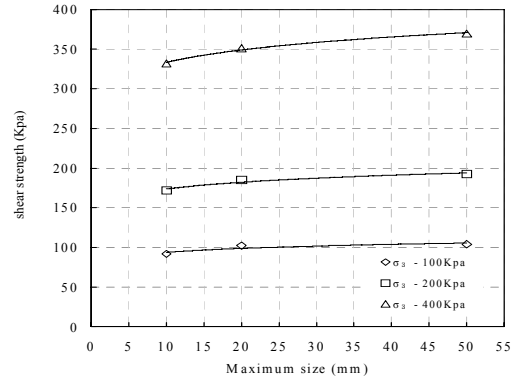
그림 7은 D_{max50} , D_{max20} , D_{max10} 의 강도정수를 산정하기 위하여 나타낸 Mohr-Coulomb 파괴포락선이다. 산정된 전단강도정수는 표 4에 나타내었다. 시험결과로부터 알 수 있듯이 내부마찰각은 각각 41.537°, 39.957°, 38.675°로 나타나 최대입경의 작아짐에 따라 내부마찰각도 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 상사입도법을 적용하여

시험시료를 재구성 할 경우 세립분의 함량의 증가에 의하여 내부마찰각이 감소하는 것으로 사료된다.

그림 8은 각 구속압하에서의 구속압-내부마찰각, 최대입경에 따른 관계를 도시한 것이다. 각 구속압하에서의 내부마찰각은 그림 8(a)에서와 같이 동일한 시료의 경우 구속압이 증가 할수록 감소하는 것으로 나타났으며, 그림 8(b)에서와 같이 동일한 시험조건(구속압)하에서 시료의 최대입경이 증가할수록 커지는 것으로 나타



(a) 구속압에 따른 전단강도



(b) 최대입경에 따른 전단강도

그림 9. 구속압, 최대입경에 따른 전단강도

났다.

그림 9는 Mohr-Coulomb의 파괴기준인 파괴포락선 식 $[\tau = c + \sigma \tan \phi]$ 를 이용하여 배수 전단강도 (S_d)를 산정한 결과를 나타낸 것이다. 최대입경별 전단강도는 그림 9(a)에서 동일한 시료의 경우 구속압이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 그림 9(b)에서는 동일한 구속압하에서 전단강도는 최대입경이 커짐에 따라 구속압 100Kpa에서 적은 상승폭으로 증가하는 경향을 보이고, 구속압 200, 400Kpa하에서는 구속압 100Kpa에 비하여 상대적으로 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타나 전단강도는 구속압의 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다.

4.3 Hyperbolic model의 parameter 산정

조립재료의 변형거동 특성을 파악하기 위해 조립재료의 거동특성을 비교적 잘 표현하는 Hyperbolic model의

parameter를 산정하였으며 산정된 parameter를 비교·분석하여 조립재료의 변형특성 고찰하였다. 산정된 주요 계수는 ①비선형 계수 및 응력영향 계수 - E_i , R_f , K , n (Duncan & Chang, 1970), ②비탄성 체적변형계수 - B , K_b , m (Duncan 등 1980), ③초기 포아송비 - ν_i (Duncan, 1980) 이다.

산정된 Hyperbolic model의 parameter를 표 6에 나타내었다. 시험 결과로부터 알 수 있듯이 상사입도시료의 초기 탄성계수 E_i 와 할선 탄성계수 E_{50} 은 최대입경의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. D_{max50} 과 D_{max20} 시료는 D_{max10} 에 비하여 E_i 는 각각 평균 139.3%, 124.6% 증가하였으며, E_{50} 은 각각 평균 141.3%, 135.4% 증가한 것으로 나타났다.

비탄성 체적변형계수 B 는 재료의 체적변화거동을 나타내는 계수로서 상사입도시료의 최대입경의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. D_{max50} 과 D_{max20} 시료는

표 6. 상사입도 시료의 Hyperbolic model의 parameter

구 분	구속압 (Kpa)	E_i (Mpa)	E_{50} (Mpa)	R_f	K	n	B (Mpa)	K_b	m	ν_i
D_{max50}	100	30.462	19.491	0.769	345.689	0.566	26.047	296.880	0.122	0.365
	200	64.268	44.646	0.806			39.4217			
	400	66.798	48.967	0.624			30.795			
	평균	53.843	37.701	0.733			32.088			
D_{max20}	100	39.798	33.441	0.791	402.724	0.263	19.496	207.970	0.116	0.384
	200	47.401	35.820	0.719			24.347			
	400	57.322	39.138	0.649			22.890			
	평균	48.174	36.133	0.719			22.244			
D_{max10}	100	38.957	24.905	0.906	360.456	0.111	18.103	155.760	0.236	0.344
	200	31.626	21.444	0.752			12.983			
	400	45.409	33.691	0.676			25.101			
	평균	38.664	26.680	0.778			18.729			

D_{max10} 에 비하여 평균 171.3% 118.8% 증가한 것으로 나타났다. 최대입경이 큰 시료가 최대입경이 작은 시료에 비하여 상대적으로 큰 값을 가지는 것으로 나타나 최대입경의 변화가 체적변형특성에 상당히 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다. 이와 같이 최대입경이 작은 시료에서 E_i 와 E_{50} 이 B 가 입경이 큰 시료에 비하여 작게 나타나는 것은 상대적으로 낮은 밀도와 상대적으로 많은 세립분의 함량에서 기인한 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 B담 축조시료-하상 사력재에 대하여 최대입경을 50mm, 20mm, 10mm로 변화하여 재구성된 상사입도시료에 대하여 동일한 상대 밀도의 공시체를 제작하여 대형삼축압축시험을 실시하였으며, 상사입도시료의 최대입경의 변화가 담 축조재료의 변형, 전단강도특성에 미치는 영향을 고찰하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 동일한 다짐에너지 경우 최대입경이 증가에 따라 밀도도 증가하는 것을 알 수 있었으며, 같은 상대밀도에서 최대입경의 증가에 따라 간극비는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 조립재료 상사입도 시료에서 입자의 파쇄가 조립재료의 밀도를 지배하는 주요한 요인으로 작용하고 있음을 알 있었다.
- (2) 상사입도시료는 동일한 시험조건(구속압)하에서 최대입경이 커질수록 최대축차응력은 증가하고 최대축차응력 발현시의 축변형율은 감소하는 것으로 나타났다. 체적변형거동은 최대입경이 커짐에 따라 압축으로부터 다시 팽창되는 거동을 보이고 있다.
- (3) 상사입도시료의 내부마찰각은 각각 D_{max10} 에서 38.675°, D_{max20} 에서 39.957°, D_{max50} 에서 41.537°로, Φ_0 는 D_{max10} 에서 41.5831°, D_{max20} 에서 42.990°, D_{max50} 에서 43.502°로 나타나 최대입경이 커짐에 따라 Φ 와 Φ_0 는 증가하는 것으로 나타났다. $\Delta\Phi$ 는 각각 3.062, 3.783, 4.217°로 나타나 최대입경이 작아짐에 따라 구속압에 대한 의존성이 큰 것으로 나타났다.
- (4) 최대입경 10mm인 D_{max10} 시료에 비하여 최대축차응력은 D_{max20} 에서 평균 109.88%, D_{max50} 에서 평균 114.69% 증가하였으며, 축변형율은 D_{max20} 에서 평균 64.52%, D_{max50} 에서 평균 71.61%로 감소한 것으로 나타났다.

- (5) 내부마찰각은 동일한 시험조건하에서 상사입도시료의 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.
- (6) Hyperbolic model parameter를 산정한 결과 초기 탄성계수 E_i 와 할선 탄성계수 E_{50} , 비탄성 체적변형계수 B 는 최대입경의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타나 최대입경의 변화가 상사입도시료의 응력, 체적변형 특성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 최대입경이 작은 상사입도 시료에서 E_i 와 E_{50} 이 B 가 입경이 큰 시료에 비하여 작게 나타나는 것은 상대적으로 낮은 밀도와 세립분의 함량이 많은 것에서 기인한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 최대입경별 상사입도 시료에 대하여 변형, 전단강도 특성에 대하여 고찰한 것으로 추후 같은 밀도, 응력경로, 고구속압 등 시험조건에 따른 상사입도시료의 거동, 시험과정 중의 시료 입자파쇄, 상사입도시료의 세립분의 함량이 전단거동에 미치는 영향 등에 대하여 추가적인 연구를 실시할 계획이다.

참고 문헌

1. 서민우, 하익수, 김범주 (2007), “시료입자 크기와 시험장치가 조립재료의 거동특성에 미치는 영향”, *대한토목공학회논문집*, 제27권, 제6C호, pp.393-400.
2. 신동훈 (1999), *댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화방안 연구*, 한국수자원공사 연구보고서, WRRI-GT-99-3, pp.16-18.
3. 신동훈 (2001), *대형삼축압축시험기를 이용한 댐재료의 전단강도특성 연구*, 한국수자원공사 연구보고서, WRRI-GT-01-2.
4. 이종진, 김명모, 이승현, 김병일 (2007), “최대상대밀도 산정 간편법 제안을 위한 실험연구”, *한국지반공학회논문집*, 제23권, 10호, pp.23-31.
5. 赤司六哉, 相場 明 (1981), “ロック材料の相手密度について”, *砂の相手密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集*, pp.109-116.
6. 大野 孝二, 沼田 淳紀, 長谷川 昌弘, 小西 雄介 (2001), “フィルダム粗粒材料のせん断強度特性”, *第36回 日本地盤工学研究発表会*, pp.1417-1418.
7. 大野孝二, 沼田淳紀 (2002), “風化度の異なる粗粒材料の密度とせん断強度定数”, *盤工学研究発表会 発表講演集 Vol.JGS37*, pp.589-590.
8. 日本土工学会 (1986), *粗粒材料の変形と強度*, 日本土工学会.
9. 日本地盤工学学会 (2001), “礫質土の力学特性に関するシンポジウム”, *発表論文集*, p.62.
10. 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.
11. Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970), “Nonlinear analysis of stress and strain in soils”, *Jour. of Soil Mechanics and Foundations division, ASCE*, Vol.96, No.SM5, pp.1629-1653.
 12. Duncan, J. M., Byrne, P., Wong, K. S. and Mabry, P. (1980), “Strength, Stress-strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses”, *Report, Department of civil engineering, UC Berkeley, Report*, No. UCB/GT/80-01.
 13. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979), *Soil Mechanics*, John Wiley & sons, pp.30-31.
 14. Leslie, D. D. (1963), “Large scale triaxial tests on gravelly soils”, *Proc. 2nd Pan-American Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Vol.1, Sao Paulo, pp.181-202.
 15. 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.
 16. Marachi, N. D., Chan C. K., Seed H. B. and Duncan J. N. (1969), “Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials”, Report No.TE-69-5. *University of California*.
 17. QIN, H.Y, LIU, H. L, GAO, Y. F, DAI, P.F. (2004), “Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large—scale triaxial tests”, *Jour. of Rock and Soil Mechanics, china*, Vol.25 No.10, pp.1575-1580.
 18. 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. Pul1. No. 110, Oslo, Norway, pp.3-8.

(접수일자 2009. 9. 14, 심사완료일 2009. 11. 30)