

대형직접전단시험과 대형삼축시험을 통한 석산골재의 전단거동 특성 비교

Comparison of Shear Behavior for Quarry Blasted Rocks Based on Large Scale Direct Shear Test and Large Scale Triaxial Test

이 대 수¹ Lee, Dae-Soo

김 경 열² Kim, Kyoung-Yul

오 기 대³ Oh, Gi-Dae

Abstract

Shear characteristics of quarry blasted rocks were compared using large scale direct shear tests and triaxial tests. For comparison purpose, similar test conditions were simulated as much as possible and three types of relative density (50%, 70%, 90%) were employed for the test. Results indicate that stress-strain behavior shows the same trend for two tests, but the measured shear strengths differ for the different tests and depends on the relative density. At low relative density, the internal friction angles from direct shear test are smaller than those from triaxial tests. However, at high relative density, this phenomenon is reversed.

요 지

국내 석산에서 생산되는 골재를 사용하여 대형삼축시험과 대형직접전단시험을 동시에 수행한 후 전단특성을 비교하였다. 비교를 위하여 시험조건을 가능한 일치시켰으며, 상대밀도를 50%, 70%, 90%의 세 가지로 변화시켜 시험을 수행하였다. 시험결과 응력-변형률 거동은 두 가지 시험에서 동일하게 나타나며, 전단강도는 상대밀도의 크기에 따라 시험방법별로 추세가 달라진다. 즉, 낮은 상대밀도에서는 대형직접전단시험의 내부마찰각이 대형삼축시험 결과 값에 비하여 작게 나타나고, 높은 상대밀도에서는 이 현상이 역전됨을 확인하였다.

Keywords : Direct shear test, Large scale, Quarry-blasted rock, Relative density, Softening Internal friction angle, Triaxial test

1. 서 론

석산에서 생산된 쇄석재료는 사용되고 있는 분야가 매우 다양한 반면에, 대형시험설비의 미비로 설계정수

들의 산정에 있어 시험에 의존하지 않고, 외국에서 수행된 실험값이나 참고문헌에 의존하여 구조물의 설계를 수행하여 왔다. 이에 따라 구조물의 안정성에 대한 명확한 판단기준을 가지지 못하고, 계획구조물에 대해 안전

1 정희원, 한전 전력연구원 책임연구원 (Member, Korea Electric Power Research Institute, dslee@kepri.re.kr, 교신저자)

2 정희원, 한전 전력연구원 선임연구원 (Member, Korea Electric Power Research Institute)

3 정희원, 한전 전력연구원 일반연구원 (Member, Korea Electric Power Research Institute)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문에 게재하여 드립니다.

측의 강도 및 변형특성을 적용하여 구조물을 설계하게 되므로 과다설계 및 공사비 증액 요인이 발생할 가능성이 높다.

국내에서는 최근에 들어서야 대형전단시험의 중요성이 인식되기 시작하여 대형삼축압축시험기(한국수자원공사, 2001)와 대형직접전단시험기(한국전력공사, 2004)가 개발됨에 따라 다양한 연구들이 시작되고 있는 실정이다. 대형직접전단시험기와 대형삼축압축시험기는 모두 조립재료의 전단강도 산정에 전세계적으로 널리 사용되고 있는 장비이지만, 그 구조적 특징, 시험방법 및 파괴메커니즘 등 많은 부분에서 차이점을 가지고 있어 시험결과가 종종 비교의 대상이 되고 있는 실정이다.

이 두 가지 시험방법은 표 1과 같이 상반된 시험특성이 존재하며, 대체적으로 직접전단시험은 삼축시험에 비해 시험방법이 단순하며, 시험시간이 짧게 소요되고, 평면변형을 조건에서의 전단강도가 직접 산출되기 때문에, 지반활동의 안전성 평가에 있어서 보다 실제 조건에 부합되는 것으로 알려져 있다.

직접전단시험의 단점으로는, 파괴면이 전단상자의 상하 경계면으로 미리 정해지고, 전단하중을 가할 때 상부 전단상자의 기울어짐(tilting)이 발생하며, 시험기구의 특성상 진행성 파괴가 발생하여 전단면상의 응력이 불균질해지며, 이에 따라 전단변형율을 정의하기가 어렵다는 점이 있다. 반면에 삼축시험은 직접전단시험의 단점을 보완해 주는 면이 있으나, 시험이 정교하여 준비에 노력이 많이 필요하고, 본 연구에서 사용한 대형직접전단시험기가 허용하는 최대입경만큼 큰 시험재료를 시험할 수 없다는 단점이 있다.

따라서, 가장 좋은 실험결과를 얻기 위해서는 두 가지 시험을 동시에 실시하여 전단강도를 상호 비교하여, 설계자료를 산정하는 것이 가장 좋은 방법이 될 수 있으나, 전술한 바와 같이 대형시험에 소요되는 노력과 시간

을 감안할 때, 현실적으로는 어려운 감이 있으며, 국내에서는 이러한 비교 시험이 연구차원에서 시작되고 있는 실정이다.

선행연구결과로서 신동훈 등(2002b)은 최대입경이 50.8mm인 사석재료에 대하여 대형직접전단시험과 대형삼축시험을 수행하여 전단강도 특성을 비교하였다. 시험 결과, 전단강도는 대형직접전단시험에 의한 전단강도가 대형삼축시험에 의한 값보다 1.5~1.7배 정도 크게 평가된다고 보고하였다. 서민우 등(2006)은 대형삼축압축시험(공시체: 직경 30cm, 높이 60cm)과 대형직접전단시험(전단상자: 1.0m × 1.0m)을 수행하여 조립재료에 대한 전단강도를 비교하였으며, 시험결과 직접전단시험에서 6~28% 큰 전단강도가 산출됨을 보여주었으며, 보다 많은 시험자료를 축적하여 두 시험 사이의 상관관계 도출이 필요함을 제기하였다.

본 고에서는, 국내 석산에서 생산된 쇄석재료를 선정하여, 시험조건을 가능하면 일치시켜서 대형삼축시험과 대형직접전단시험을 동시에 수행한 후 결과를 비교하였다. 이를 위하여 상대밀도를 50%, 70%, 90%의 세 가지로 변화시켜 응력-변형률 거동을 상호 비교하였으며, 시험방법별로 전단강도의 차이점을 분석하였다.

2. 대형전단시험기 특징 및 시험방법

2.1 시험기 특징

본 비교시험에 사용한 대형직접전단시험기는 최대허용입경이 150 mm인 시료까지도 시험이 가능하도록 제작되었으며, 전단상자의 규모는 1.5m(W) × 1.5m(L) × 0.6m(H)로써 국내 최대규모이다. 시료에 가하는 수직하중은 최대 200ton, 수평하중은 최대 300 ton까지 재하가 가능하며, 하부 상자 가압방식으로 제작되었다. 또한 변위 측정을 위해서는 수평변위계 1개와 수직변위계 3개를 설치할 수 있다. 대형삼축압축시험기는 원형공시체를 사용하며 직경 30cm, 높이 60cm의 크기로서, 축압은 유압식으로 150ton을 재하시킬 수 있고, 유압설비는 210kgf/cm²의 용량으로써 축압을 20kgf/cm²까지 발생시킬 수 있다(연엔지니어링, 2006).

2.2 시료의 물리적 특성

경북 예천지역 석산에서 시료를 채취하여 물리적 특

표 1. 대형직접전단시험과 대형삼축압축시험의 비교

구 분	대형직접전단시험	대형삼축압축시험
파괴면형상	명확 (평면변형)	불명확 (파괴형상이 일정하지 않음)
응력상태	불명확	명확
전체 시험 소요 시간	짧음	길음
시험 가능 조건	제한적 (비배수 시험 어려움)	다양함 (배수, 비배수 제어 가능)
시험 가능 입경	큼	작음
소요 시료량	많음	적음

성을 조사한 결과는 표 2와 같으며, 재료의 성분을 확인하기 위하여 광학현미경을 이용한 결정분석을 실시한 결과, 그림 1과 같이 재료의 모암은 흑운모, 석영, 사장석과 휘석으로 구성된 변성암 계열의 흑운모-석류석 편마암(Biotite-Garnet Gneiss)으로 나타났다

2.3 시료의 입도조정

일반적으로 대형전단시험에서 시료의 허용최대입경의 결정에는 명시적인 시험기준이 없어 관용적인 방법이 쓰이고 있다. 대형직접전단시험의 경우에는 ① 공시체 가로방향 길이(직경 또는 변)의 1/10~1/5, ② 공시체 높이의 1/7~1/5, ③ 공시체의 가로방향 길이 또는 높이 최소치수의 1/9~1/5 중 적절한 최소값을 시험최대입경으로 결정하고, 대형삼축시험의 경우 공시체 직경의 1/4~1/8로 최대입경을 결정한다(日本土質工學會, 1986).

기준입도분포를 결정하기 위하여 인근지역의 댐시공시 사용된 입도분포를 참고하여, 최대입경은 1,500mm로 하고, 800mm 통과량이 85~100%, 500mm 통과량이 60~100%, 100mm 통과량이 10~60%, 50mm 통과량이

0~40%, 4.8mm(No. 4) 통과량이 5% 이하로 되도록 입도를 조정하였다(그림 2). 또한, 대형직접전단시험과 대형삼축시험기의 시험가능 최대입경이 150mm와 75mm로 차이가 나므로, 기준입도곡선을 수평 이동시켜 두 시료에서의 균등계수를 일치시키는($C_u=7$) 상사입도 방법을 이용하여 시료의 입도를 조정하였다(표 3, 4).

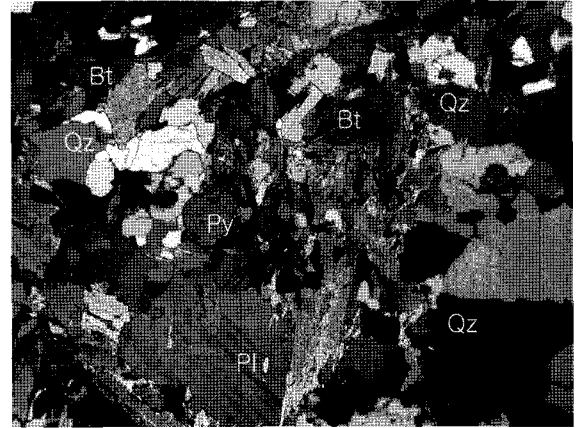


그림 1. 모암의 광학현미경 분석사진 (Cross N.)

Bt=biotite(흑운모), Qz=quartz(석영), Pl=plagioclase(사장석), Py=pyroxene(휘석)

표 2. 모암의 물리적 특성치

구 분	비 중			흡수율 Q(%)	탄성파속도 (Vp, km/s)	일축압축강도 (kgf/cm ²)
	절건	표건	진			
평 균	2.75	2.75	2.76	0.14	4.2	1,100

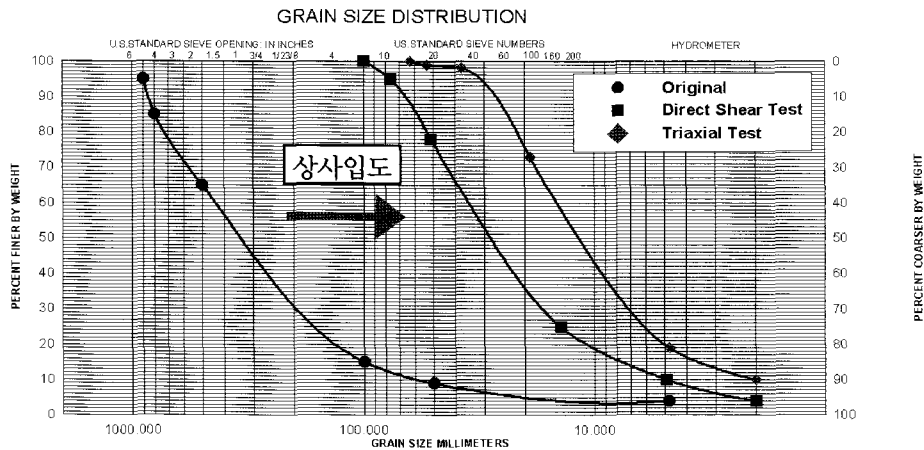


그림 2. 쇄석재료의 대형전단시험용 상사입도곡선

표 3. 대형직접전단시험용 입도

체 입경(mm)	100	76.3	50.8	15	4.5	2
통과율(%)	100	95	78	25	10	4

표 4. 대형삼축압축시험용 입도

체 입경(mm)	63	53	37.5	26.5	19	9.5	4.75	2
통과율(%)	100	99	98	89	73	41	19	10

2.4 다짐시험

표 3과 표 4의 상사입도에 따라서 입경이 큰 쇄석의 형상을 고려하여, 다짐시험 규격인 JIS A 1210과 ASTM E-12에 근거한 다짐시험방법으로 최대 및 최소건조단위중량을 각각 산정하였다. 이때 최대건조단위중량은 다짐용 램머의 직경(D) 및 무게(W)를 쇄석재료에 적합하게 각각 2배로 크게 한 시험기(D=10cm, W=10kg)를 이용하여 일정한 다짐에너지로 다짐횟수를 증가시켜 최대값에 수렴한 값으로 정하였고(日本土質工學會, 1986; 그림 3), 최소건조단위중량은 몰드내에 천천히 시료를 넣는 상태로 최대한 느슨하게 시료를 성형하여 구하였다. 이 결과를 이용하여 대형직접전단 및 삼축시험에 사용할 상대밀도 50, 70, 90%에서의 시험밀도를 산정하였다(표 5).

2.5 비교시험 방법

예천지역의 석산에서 생산된 쇄석재료를 사용하여 상대밀도를 달리하여(Dr : 50, 70, 90%) 시료를 성형하고, 구속응력(1, 3, 5kgf/cm²)을 달리하여 압밀과정을 거쳐 전단시험을 수행하였다. 전단시험은 변형률 제어방

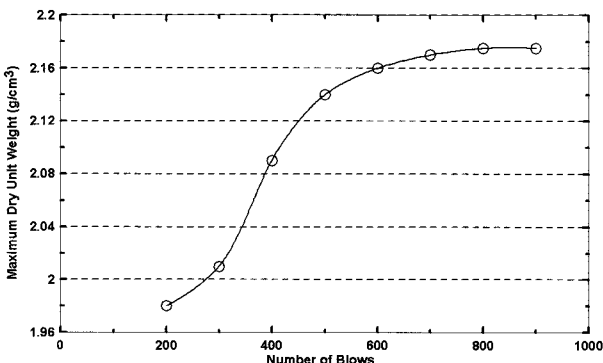


그림 3. 실내 다짐시험 곡선(건조밀도-다짐횟수)

표 5. 상대밀도별 실내시험밀도

상대밀도 (%)	50%	70%	90%	최대건조밀도 (γ_{dmax} g/cm ³)	최소건조밀도 (γ_{dmin} g/cm ³)
시험 밀도 (g/cm ³)	1.87	1.98	2.10	2.17	1.64

표 6. 시험조건

상대밀도 (Dr, %)	시료성형방법		구속응력(kgf/cm ²)		압밀방식	
	대형직접	대형삼축	대형직접	대형삼축	대형직접	대형삼축
50,70,90	충격식 (진동식램머)	충격식 (자유낙하식 램머)	1, 3, 5	1, 3, 5	건조상태 일축압축	포화후 압밀배수

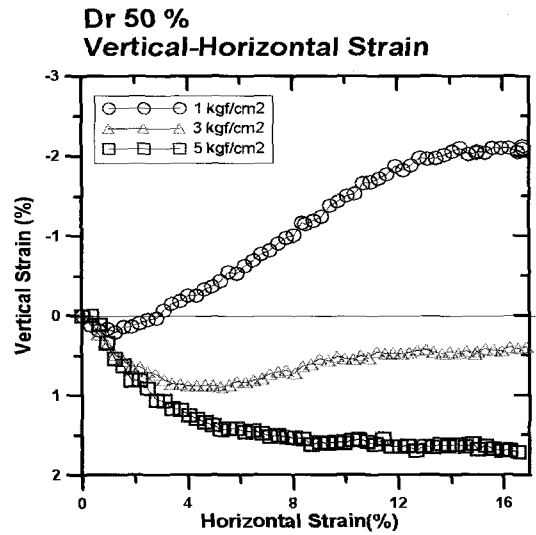
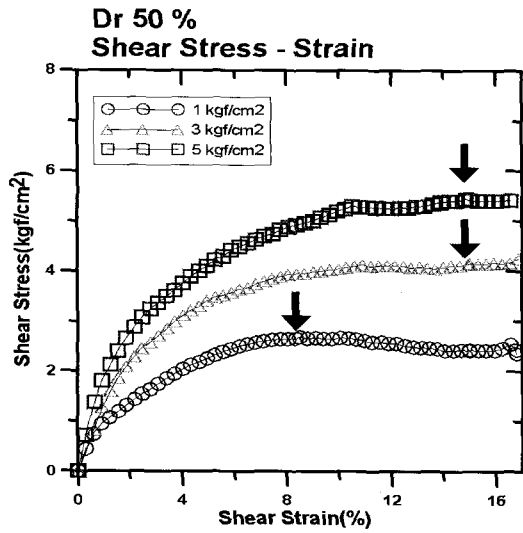
식으로 1%/min의 전단속도를 동일하게 적용하였다. 시료의 성형방법은 두 시험방법 모두 계량된 시료를 각 다짐층마다 일정높이가 될 때까지 다져 목표밀도를 관리하는 방법을 사용하였다. 이 때 다짐방법은 충격식으로 3층 다짐을 수행하였으나, 삼축압축시험에서는 램머를 자유 낙하시켜 다짐에너지를 조절하는 자동다짐기를 사용하였으나, 대형직접전단시험은 전단상자의 크기가 커, 자동다짐기 대신에 진동램머(자중 90kg)를 사용하였다(표 6). 한편, 직접전단시험시 파괴점은 최대전단응력이며, 이 값이 나타나지 않을 시에는 수평변형율 15%에서의 전단응력을 파괴점으로 간주하였고, 전단응력은 단면을 축소 보정하여 산정하였다(산업자원부, 2005).

3. 시험 결과

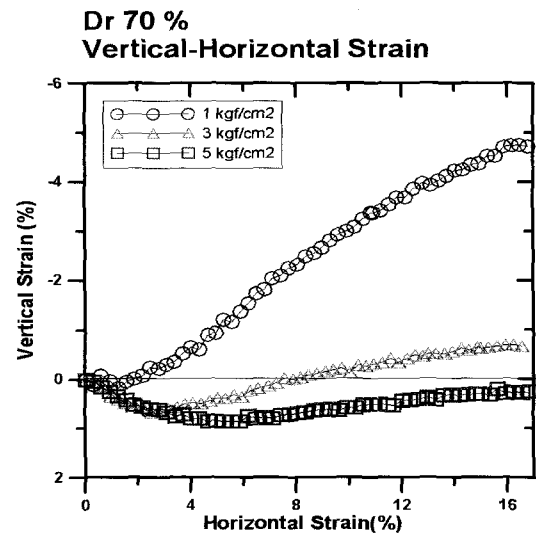
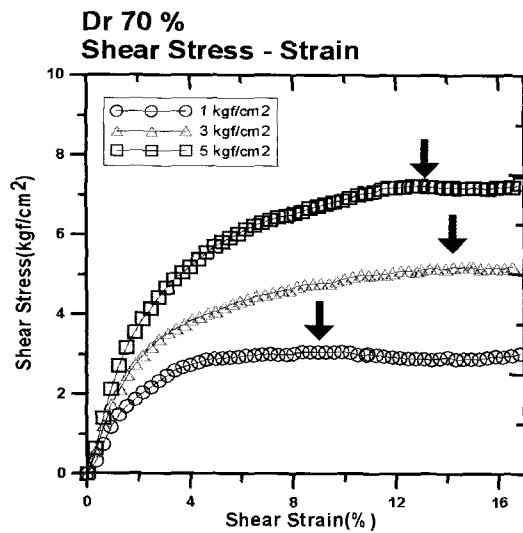
3.1 대형직접전단시험 결과

3.1.1 상대밀도 50%

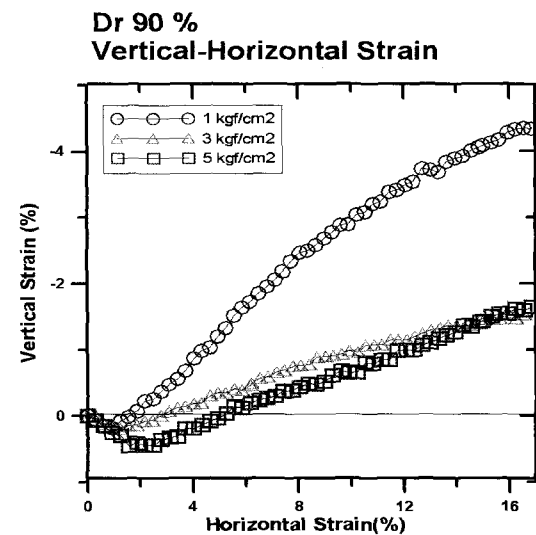
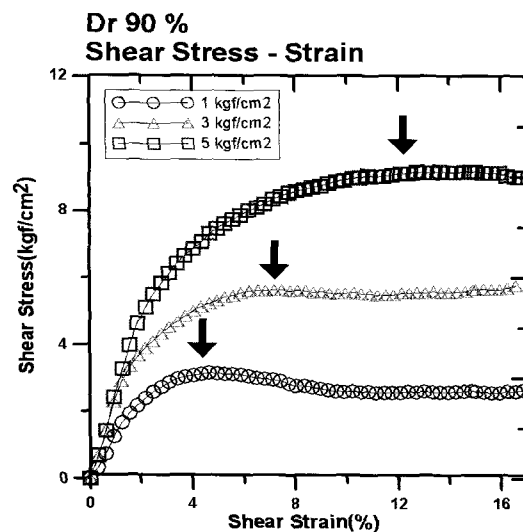
그림 4의 (a)를 살펴보면 수직하중이 작을 때(1kgf/cm²)에는 연화현상(softening)이 미약하게 나타나며, 수직하중이 커질수록 응력의 최대치가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 또, 수직하중이 작을 때(1kgf/cm²)에는 시료가 시험초기에 수축하였다가 체적팽창이 크게 나타나며, 그 외의 경우에는 체적팽창이 억제되고 있으며, 시료가 수축상태에서 최대전단응력에 접근한다. 즉, 낮은 구속압에서는 조밀한 모래의 거동을, 높은 구속압에서는 느슨한 모래의 거동을 보이고 있다. 한편, 수직응력 1, 3, 5 kgf/cm²에서의 최대 전단응력을 그림 4에 화살표로 표시하였으며, 이를 바탕으로 회귀분석을 실시하고 내부마찰각($\phi = 34.6^\circ$)과 점착력($C = 2.01\text{kgf/cm}^2$)을 산정하였다(표 7). 이 표에서와 같이 수직응력이 증가할수록 최대전단응력과 그 때의 전단(수평)변형율은 증가한다.



(a) 상대밀도 50%



(b) 상대밀도 70%



(c) 상대밀도 90%

그림 4. 상대밀도별 대형직접전단시험 결과

표 7. 전단강도(Dr = 50% 시료)

수직응력 (kgf/cm ²)	최대전단응력때 수평변형을 (%)	최대전단응력 (kgf/cm ²)	점착력 (kgf/cm ²)	내부마찰각 (°)
1	8.5	2.7	2.01	34.6
3	15.0	4.2		
5	15.0	5.5		

표 8. 전단강도(Dr = 70% 시료)

수직응력 (kgf/cm ²)	최대전단응력때 수평변형을 (%)	최대전단응력 (kgf/cm ²)	점착력 (kgf/cm ²)	내부마찰각 (°)
1	9.2	3.1	2.04	46.1
3	15.0	5.2		
5	12.9	7.2		

표 9. 전단강도(Dr = 90% 시료)

수직응력 (kgf/cm ²)	최대전단응력때 수평변형을 (%)	최대전단응력 (kgf/cm ²)	점착력 (kgf/cm ²)	내부마찰각 (°)
1	4.6	3.2	1.40	56.3
3	7.1	5.6		
5	12.7	9.2		

3.1.2 상대밀도 70%

그림 4의 (b)와 표 8을 보면, 전단응력과 체적팽창이 상대밀도 50%의 경우에서보다 증가함을 알 수 있다. 수직하중이 작을 때(1kgf/cm²)에는 상대밀도 50%에서와 같이 연화현상(softening)이 미약하게 나타나며, 수직하중이 커질수록 응력의 최대치가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 또한, 수직하중이 작을 때(1kgf/cm²)에 체적팽창이 더욱 크게 나타나, 상대밀도 50%의 경우에서 보다도 체적 팽창량이 2배 이상 커지며, 수직하중이 제일 클 때(5kgf/cm²)는 체적팽창이 억제되고 있으나, 상대밀도 50%의 경우와는 달리 수직응력이 3kgf/cm²일 때 도 체적팽창이 크게 발생하기 시작하여, 시료가 팽창상태에서 최대전단응력에 접근한다.

3.1.3 상대밀도 90%

그림 4의 (c)와 표 9를 보면, 전단응력과 체적팽창이 상대밀도 70%의 경우에서보다 약간 증가함을 알 수 있다. 그러나 이들과는 달리, 연화현상이 비교적 뚜렷이 나타나 전단응력이 피크치에 도달한 후 감소하는 현상이 보인다. 또한 이전 경우들과는 달리, 구속압의 크기와 관계없이 체적팽창이 모두 발생하여, 시료가 팽창상태에서 최대전단응력에 접근한다. 이는 밀도가 큰 시료의 경우 입자간의 높은 엉물림으로 말미암아 체적팽창이 커짐에 기인하며, 이에 따라 전단강도도 커짐을 예상할 수 있다.

표 10. 상대밀도별 강도정수(대형직접전단)

상대밀도 (%)	내부마찰각 (°)	점착력 (kgf/cm ²)
50	34.6	2.01
70	46.1	2.04
90	56.3	1.40

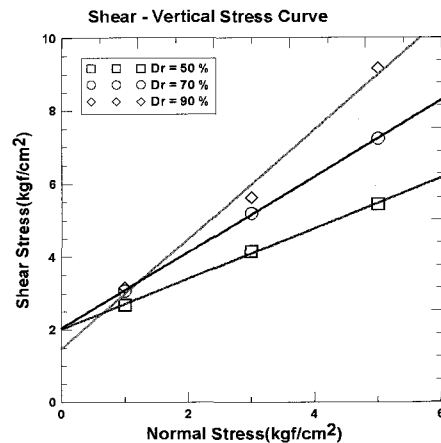


그림 5. 상대밀도별 전단강도

3.1.4 상대밀도별 강도정수 비교

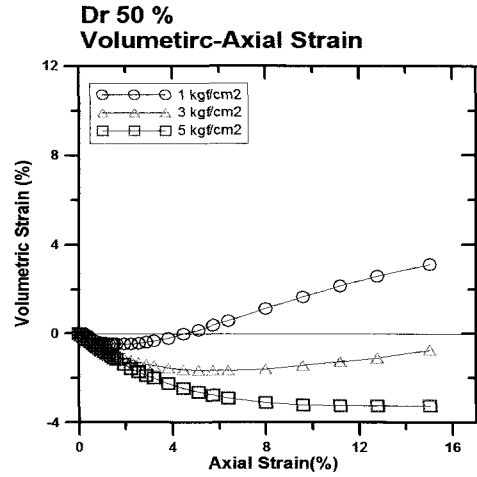
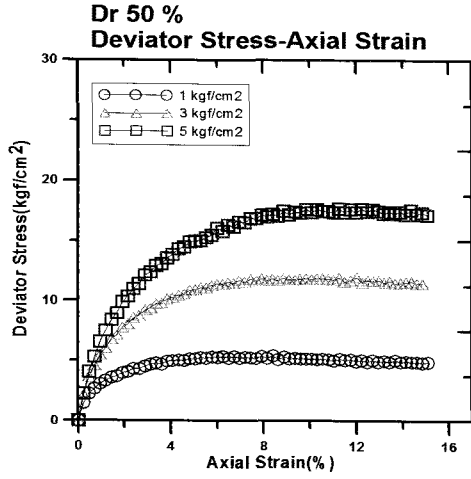
상대밀도를 50, 70, 90%로 변화시킬 때 전단강도를 산정한 결과는 표 10 및 그림 5와 같으며, 밀도가 증가함에 따라서 내부마찰각 역시 34.6°, 46.1°, 56.3°로 증가하고, 점착력은 상대밀도의 증가에 따라 2.01kgf/cm²에서 1.40kgf/cm²로 감소하는 경향을 나타냈다.

3.2 대형삼축압축시험 결과

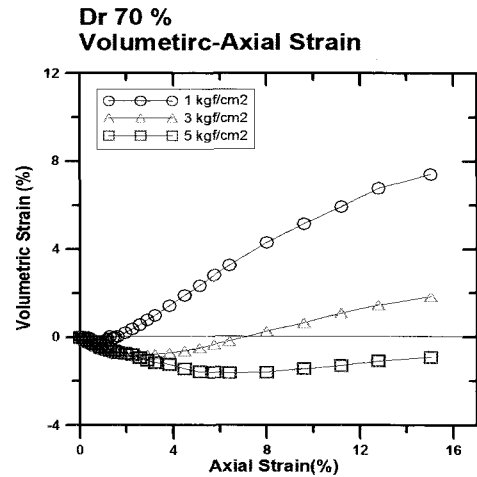
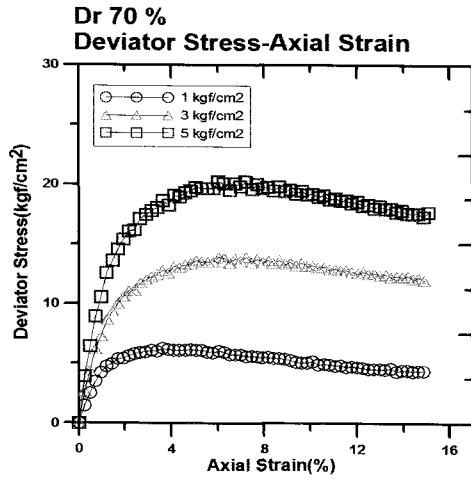
3.2.1 상대밀도 50%

그림 6의 (a)를 살펴보면 직접전단시험의 경우, 동일

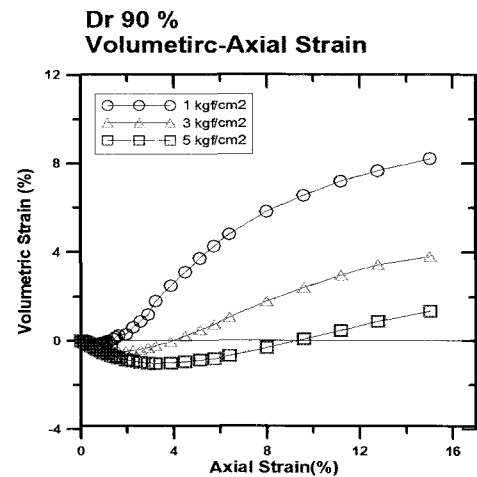
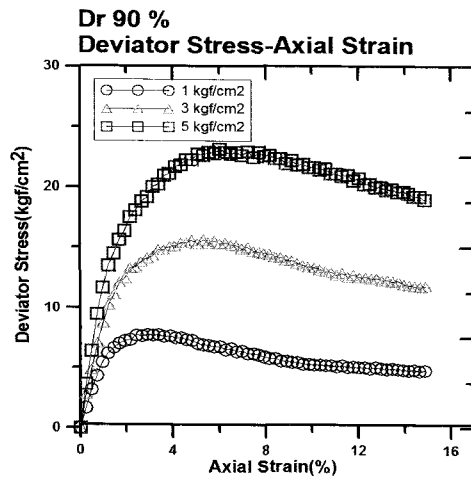
한 상대밀도에서 구속응력이 작을 때(1kgf/cm^2)에는 연화현상(softening)이 미약하게 나타나며, 구속응력이 커질수록 응력의 최대치가 뚜렷하게 나타나지 않으나, 삼축압축시험의 경우에는 연화현상이 발생하지 않는다.



(a) 상대밀도 50%



(b) 상대밀도 70%



(c) 상대밀도 90%

그림 6. 상대밀도별 대형삼축압축시험 결과

즉, 전단이 진행됨에 따라 응력이 피크치에 도달한 후 감소하는 현상이 일정 수준을 유지하고 있다. 또, 구속응력이 작을 때(1kgf/cm²), 체적팽창이 크게 나타나며, 그 외의 경우에는 체적팽창이 억제되고 있으며, 시료가 수축상태에서 최대전단응력에 접근한다. 이는 직접전단 시험의 경향과 일치한다.

강도정수의 산정을 위하여는 구속응력과 축차응력을 사용하여 Mohr원을 도시하고, 그 원의 접선들을 연결한 파괴포락선을 이용하여 이 파괴포락선의 접선과 기울기를 가지고 점착력(C = 0.65kgf/cm²)과 내부마찰각($\phi = 37.2^\circ$)을 구하여, 그림 7에 대표적으로 도시하였다.

3.2.2 상대밀도 70%

그림 6의 (b)를 살펴보면, 전단응력과 체적팽창이 상대밀도 50%의 경우에서보다 증가함을 알 수 있다. 직접전단시험의 경우에는 동일한 상대밀도에서, 구속응력이 작을 때(1kgf/cm²)에는 연화현상(softening)이 미약하게 나타나며, 구속응력이 커질수록 응력의 최대치가 뚜렷하게 나타나지 않으나, 삼축압축시험의 경우에는 구속응력의 크기에 관계없이 연화현상(softening)이 공통적으로 나타나고 있다. 또한, 구속응력이 작을 때(1 kgf/cm²), 체적팽창이 크게 나타나고 상대밀도 50%의 경우에서보다도 팽창량이 2배 이상 커지는 경향은 직접전단시험에서와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또, 구속응력이 제일 클 때(5kgf/cm²)는 체적팽창이 억제되고 있으나, 상대밀도 50%의 경우와는 달리 구속응력이 3kgf/cm² 일 때도 체적팽창이 크게 발생하기 시작하여, 시료가 팽창상태에서 최대전단응력에 접근하는 점도 직접전단시험의 경우와 일치한다.

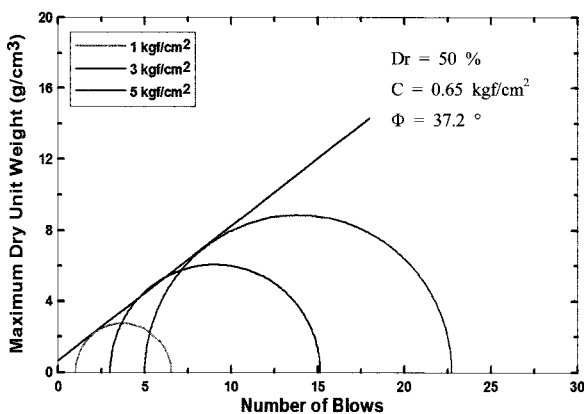


그림 7. 파괴 포락선(상대밀도 50%)

3.2.3 상대밀도 90%

그림 6의 (c)를 보면, 직접전단시험의 경우와 동일하게 상대밀도 50%와 70%의 경우와는 달리, 연화현상이 더 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 직접전단 시험의 경우에서와 같이 구속응력의 크기와 관계없이 체적팽창이 모두 발생하여, 시료가 팽창상태에서 최대전단응력에 접근한다.

3.2.4 상대밀도별 강도정수 비교

상대밀도를 50, 70, 90%로 변화시켰을 때의 내부마찰각은 표 11에서와 같이 37.2°에서 41.1°까지 증가하며, 점착력도 0.65kgf/cm²에서 0.93kgf/cm²로 증가한다. 즉, 이 경향을 도시하면 그림 8에서와 같이 상대밀도가 증가할수록 파괴포락선의 기울기가 급해짐을 알 수 있다.

3.3 시험결과 비교

3.3.1 응력 및 변형률 거동 비교

대형직접전단시험과 대형삼축압축시험 모두 쇄석재료에 대한 응력-변형률 및 수직변형률-수평변형률 거동은 유사하게 나타난다. 즉, 응력-변형률 거동은 비선형, 비탄성, 구속압 의존성을 보인다. 구속압이 높아질수록 전단응력은 커지며, 최대전단응력에서의 축변형률(혹은 수평변형률)은 증가하고 체적팽창율은 감소한다. 변화율 연화현상이 두 시험방법에서 약간의 차이는 있으

표 11. 상대밀도별 강도정수(대형삼축)

상대밀도(%)	내부마찰각(°)	점착력(kgf/cm ²)
50	37.2	0.65
70	39.7	0.71
90	41.1	0.93

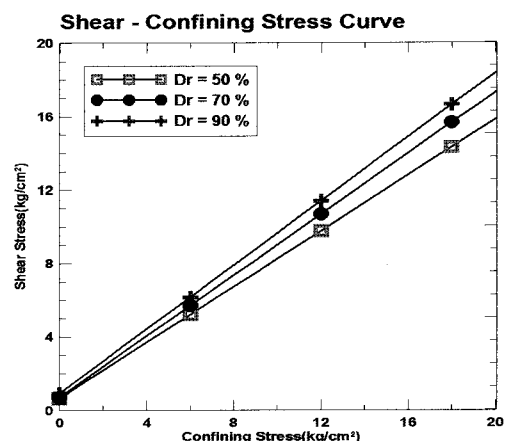


그림 8. 상대밀도별 파괴포락선

나 대체적으로 구속압이 커질수록 감소한다. 상대밀도의 증가에 따라서는 변형을 연화현상이 뚜렷해지며, 전단응력이 증가하고 체적팽창이 크게 나타난다.

3.3.2 전단강도 비교

대형직접전단시험과 대형삼축압축시험의 전단강도(내부마찰각)값에 대해서 비교한 결과, 낮은 상대밀도(50%)에서는 대형직접전단시험 결과치가 대형삼축압축시험 결과값에 비하여 약간 작게 나타나고(7%), 반면에 상대밀도가 커질수록 대형직접전단시험의 결과값이 최대 37%까지 크게 나타난다(그림 9와 표 12). 또한 직접전단시험에 의한 내부마찰각이 상대밀도의 변화에 따른 영향을 크게 받아 삼축압축시험에 비해 변동폭이 큼을 알 수 있다.

점착력의 경우에는 대형직접전단시험 결과치가 대형삼축압축시험 결과값에 비하여 51%~209%까지 크게 나타난다(그림 10과 표 12). 또한 직접전단시험에 의한

점착력은 상대밀도에 따라 감소하며, 이와는 반대로 삼축압축시험에서의 점착력은 상대밀도의 증가에 따라 그 값이 커져서, 낮은 상대밀도에서는 두 시험법에 의한 점착력의 차이가 크나, 상대밀도가 증가할수록 점착력의 차이가 감소한다.

한편, 두가지 시험을 통하여 산출한 전단강도(내부마찰각과 점착력)를 동시에 비교하기 위하여 응력수준을 10kgf/cm²로 하고, 전단강도를 산출하면, 표 12에서와 같이 직접전단시험에 의한 전단강도가 상대밀도가 증가함에 따라 삼축압축시험에 의한 값보다 1.1배에서 1.7배 정도까지 크게 평가된다.

따라서 알려진 바와 같이 시험방법에 따라서도 전단강도의 차이가 발생하며, 이는 구조물의 설계시 안전성과 시공성에 영향을 줄 수 있으므로, 현장여건에 따라 적절한 시험방법을 선택하는 것이 중요함을 의미한다. 또한 두 가지 시험방법에 의한 전단강도의 차이는 ① 시료입경의 차이 ② 시료의 강도 이방성 ③ 중간주응력의 상대적 크기 ④ 직접전단시험에서의 진행성 파괴 발생 등에서 기인하는 것으로서(日本土質工學會, 1986), 각각의 전단강도가 일치할 수 없는 본질적인 한계를 드러내고 있다.

4. 결론

국내 석산에서 생산된 쇄석재료를 대상으로 상대밀도를 세 가지로 변화시켜서 대형삼축시험과 대형직접전단시험을 동시에 수행한 후 결과를 비교하였으며, 그 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 응력-변형을 및 수직변형률-수평변형률 거동은 대형삼축시험과 대형직접전단시험에서 대체로 유사하게 나타난다. 즉, 구속압이 높아질수록, 변형을 연화현상이 감소하고, 전단응력은 커지며, 파괴시의 전단변형률(수평변형률)은 증가하고 최대전단응력에서의 체적팽창율은 감소한다. 상대밀도의 증가에 따라

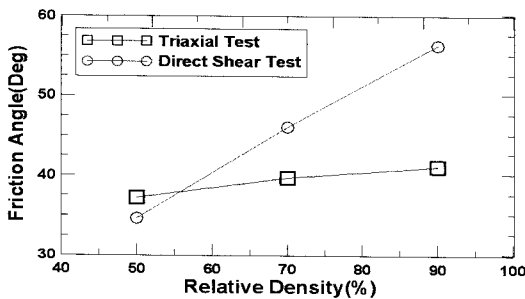


그림 9. 상대밀도별 내부마찰각

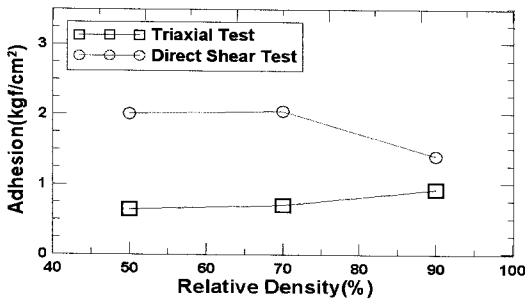


그림 10. 상대밀도별 점착력

표 12. 상대밀도별 전단강도 비교

상대밀도 (%)	내부마찰각 (°)			점착력 (kgf/cm ²)			전단강도 (kgf/cm ²)		전단강도비 τ_{DIR} / τ_{TRI}
	삼축 압축	직접 전단	차이 (%)	삼축 압축	직접 전단	차이 (%)	삼축 압축 τ_{TRI}	직접 전단 τ_{DIR}	
50	37.2	34.6	7.0	0.65	2.01	209.2	8.2	8.9	1.1
70	39.7	46.1	16.1	0.71	2.04	187.3	9.0	12.5	1.4
90	41.1	56.3	37.0	0.93	1.40	50.5	9.6	16.5	1.7

서는 변형을 연화현상이 뚜렷해지며, 전단응력이 증가하고, 체적팽창이 크게 나타난다.

- (2) 전단강도의 측면에서는 일반적으로 알려진 바와 다르게, 낮은 상대밀도(50%)에서는 대형직접전단시험의 내부마찰각이 대형삼축압축시험 결과값에 비하여 약간 작게 나타나고(7%), 반면에 상대밀도가 커질수록 대형직접전단시험의 내부마찰각이 최대 37%까지 크게 나타난다. 또한 직접전단시험에 의한 내부마찰각이 상대밀도의 변화에 따른 영향을 크게 받아 삼축압축시험에 비해 변동폭이 크게 나타난다. 점착력의 경우에는 대형직접전단시험 결과치가 대형삼축압축시험 결과값에 비하여 51%~209%까지 크게 나타난다. 또 직접전단시험에 의한 점착력은 상대밀도에 따라 감소하며, 이와는 반대로 삼축압축시험에서의 점착력은 상대밀도의 증가에 따라 그 값이 커져서, 낮은 상대밀도에서는 두 시험법에 의한 점착력의 차이가 크나, 상대밀도가 증가할수록 차이가 감소한다.
- (3) 두 가지 시험을 통하여 산출한 전단강도(내부마찰각과 점착력)를 동시에 비교하기 위하여 응력수준을 10kgf/cm²로 하고, 전단강도를 산출해본 결과 직접전단시험에 의한 전단강도가 상대밀도가 클 때는 삼축압축시험에 의한 값보다 1.1배에서 1.7배 정도까지 크게 평가된다. 따라서 시험방법에 따라서도 전단강도의 차이가 발생하며, 이는 구조물의 설계시 안전성과 시공성에 영향을 줄 수 있으므로, 현장여건에 따라 적절한 시험방법을 선택하는 것이 중요함을 의미한다.
- (4) 비록 대형시험의 특성상 다양한 조건하에서의 비교는 수행하지 못하였으나, 본 연구가 시작점으로서 갖는 의의는 충분하다고 판단하며, 다행히 최근 들어 대형전단시험장비가 추가로 확보되는 추세를 감안할 때, 장기적으로는 국내의 시험기관 혹은 시험기기별로 시험 결과치를 분석하고 DB화하여, 상호간의 자료를 비교 분석하는 작업이 수반되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구를 위하여 대형직접전단시험은 한국전력공사 전력연구원에서 수행되었으며, 대형삼축시험은 (주)연엔지니어링에서 수행되었음을 밝히며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 산업자원부 (2005), “구조물 단면절감을 위한 조립질 토목재료 변형특성 연구”, 최종보고서, R-2002-0-172.
2. 서민우, 하익수, 신동훈, 김원영 (2006), “대형전단시험에 따른 전단강도 특성 비교”, 2006 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.1300-1303.
3. 신동훈, 이경필, 구방서 (2002a), “락재료의 내부마찰각의 구속압 의존성”, 2002 한국지반공학회 가을학술발표회지, pp.253-258.
4. 신동훈, 안태봉, 이경필, 이한철 (2002b), “대형삼축압축시험 및 대형직접전단시험에 의한 사석재료의 전단강도 평가”, 한국지반공학회 가을학술발표회지, pp.259-264.
5. 신동훈, 이경필 (2002), “Dilatancy효과를 고려한 사석재료의 전단강도 평가”, 한국지반공학회 가을학술발표회지, pp.265-270.
6. 연엔지니어링(2006), “예천양수댐 제체에 대한 대형삼축시험결과 보고서”.
7. 이대수, 김경열, 홍성연, 조화경, 황성춘 (2005), “대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(I)”, 한국지반공학회 논문집, 제21권 제6호, pp.81-91.
8. 이대수, 김경열, 홍성연, 황성춘 (2006), “대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(II)”, 한국지반공학회 논문집, 제22권 제4호, pp.51-60.
9. 정철민, 김중수, 채영수 (2002), “대형삼축압축시험을 이용한 복제주 현무암 사석재의 강도정수 및 전단강도”, 한국지반공학회 논문집, 제18권 제2호, pp.81-91.
10. 한국수자원공사 (1999), “댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화방안 연구”, 최종보고서, WRRI-GT-99-3.
11. 한국수자원공사 (2001), “대형삼축기를 이용한 댐재료의 전단강도 특성 연구”, 최종보고서, WRRI-GT-01-2.
12. 홍성연, 김경열, 이대수 (2004), “조립재료의 변형 및 강도특성에 대하여 - 대형일면전단시험기 개발-”, 2004 대한토목학회 추계학술발표회지, pp.2362-2365.
13. 日本土質工學會 (1986), “組立材料の變形と強度”, (일본어).
14. Bishop, A.W. (1966), “The Strength of Soils As Engineering Materials”, *Geotechnique*, 16(2), pp.91-130.
15. Bolton, M.D. (1986), “The Strength and Dilatancy of Sands”, *Geotechnique*, Vol. 36, No.1, pp.65-78.
16. Chen, J.W., Lin, C.Y. and Lee, W.F. (2003), “Dilatative Behavior of Granular Materials”, *J. of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 13, No.4, pp.301-307.
17. Gupta, K.K. and Ramamurthy, T. (1978), “Prediction of the Behaviour of Rockfill Materials”, *Proc. of Geotech. Conf. GEOCON-India*, New Delhi, Vol.1, pp.25-31.
18. Lamb, T.W., and Whitman, R.V. (1969), “*Soil Mechanics*”, John Wiley & Sons, New York.
19. Lee, Y.H. (1997), “Engineering Characteristics of Crushed Rockfill Materials”, *J. of the Korean Geotech. Society*, Vol.13, No.3, pp.63-75.
20. JIS A 1210(1990), “Test Method for Soil Compaction Using a Rammer”, *Japanese Industrial Standard*.
21. ASTM Committee E-12(1984), “ASTM Standards on Color and Appearance Measurement”, *American Society for testing and Materials*.

(접수일자 2007. 1. 11, 심사완료일 2008. 2. 20)