

대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험에 의한 조립재료의 전단강도 비교

Comparison of Shear Strength of Coarse Materials Measured in Large Direct Shear and Large Triaxial Shear Tests

서민우¹⁾ · 김범주[†] · 하익수²⁾

Seo, Minwoo · Kim, Bumjoo · Ha, Iksoo

ABSTRACT : Since the particle sizes of the coarse materials used in dam or harbor constructions are much larger than those of typical soils, it is desirable that large shear testing apparatuses are used when performing shear tests on the coarse materials to obtain as accurate results as possible. Two large-scale shear testing apparatuses, large direct shear testing apparatus and large triaxial shear testing apparatus, are commonly used. Currently in Korea, however, there have not been many cases in which shear tests were done using the large apparatus due to mainly difficulties in manufacturing, diffusing, and operating them. In present study, both large direct shear tests and large triaxial shear tests were performed on the coarse materials, which are used as dam fill materials, for 6 test cases in which particle sizes, specimen sizes, vertical pressure (confining pressure) conditions were little different, and then, the shear strength characteristics of the materials were compared with the two different shear tests. The test results showed that, by the Mohr-Coulomb failure criterion, overall the shear strength obtained by the large direct shear tests was larger than that by the large triaxial shear tests. Moreover, the shear strength under the normal stress of 1,000 kPa was about 10 to 70% larger for the large direct shear tests than for the large triaxial shear tests, revealing the larger differences in the coarse materials, compared to typical soils.

Keywords : Coarse material, Dam, Large-scale shear testing apparatus, Large direct shear test, Large triaxial shear test

요 지 : 댐이나 항만 건설시 재료로 사용되는 조립재는 입자크기가 일반 토사에 비해 매우 크기 때문에 이러한 재료에 대해서 전단시험을 수행할 때에는 가급적 대형 전단시험장치를 사용하는 것이 보다 정확한 결과를 얻기 위해 바람직하다. 대형 전단시험장치로는 일반적으로 대형 직접전단시험장치와 대형 삼축압축시험장치가 있으나 일반 토질시험장치와 비교해 제작과 보급, 운영 등의 어려움 때문에 현재까지 국내에서 두 시험장치를 사용하여 시험을 수행한 실적은 많지 않은 편이다. 본 연구에서는 댐 축조재료로 사용되는 입경이 큰 조립재료를 대상으로 시료의 평균 입자크기와 공시체 크기, 연직응력(구속압) 조건 등에 차이가 있는 총 6개 case에 대해서 대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험을 수행하고 두 시험간 전단강도 특성의 차이를 비교하였다. Mohr-Coulomb 강도규준에 의한 전단강도를 기준으로, 대형 직접전단시험을 통해 산정된 전단강도가 대형 삼축압축시험을 통해 산정된 전단강도보다 전체적으로 크게 나타났으며 또한, 1,000kPa 수직응력에 대해 두 시험간 산정된 전단강도를 비교한 결과 대형 직접전단시험에 의한 전단강도가 대형 삼축압축시험에 의한 전단강도보다 약 10~70% 크게 나타나 입경이 작은 일반 토사와 비교해 그 차이가 크고, 대형 직접전단시험결과의 분산도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

주요어 : 조립재료, 댐, 대형 전단시험장치, 대형 직접전단시험, 대형 삼축압축시험

1. 서 론

댐, 항만, 철도 노반, 도로 등 대규모 토목시설물의 건설시 일반적으로 입자크기가 큰 조립재료가 성토 및 축조재료로 널리 사용되고 있다. 이러한 구조물의 안전하고 경제적인 설계 및 시공을 위해서는 사전에 사용되는 조립재료의 전단특성을 정확하게 파악하는 일이 중요하다. 하지만 토목시설물의 종류에 따라 사용되는 조립재료의 입자크기는 작게는 수 cm에서 크게는 몇 m에 이르기 때문에 재료의 평균 입자크기가 커서 일반적인 실내 토질 전단시험장

치를 통해 시험이 불가능한 경우에는 해당 재료의 전단특성을 정확하게 파악하기 어렵다. 이러한 경우 국내에서는 대부분 외국 문헌에 제시된 자료를 근거로 추정하거나 직접 시험을 수행할 경우 원재료에 대하여 매우 큰 비율의 상사비를 적용하여 해당 결과를 직접 설계 등에 적용해 왔으나, 두 경우 모두 원재료에 대한 직접적인 정보를 이용하는 것이 아니므로 적용 결과의 신뢰성에 문제가 있었다(서민우 등, 2007; 김범주 등, 2006). 이와 같은 문제들을 해소하고자 비교적 근래에는 국내 몇몇 기관에서 대규모 전단시험장치들을 제작하여 입자크기가 큰 조립재료에 대

1) 비회원, 미국 UIUC 박사후 연구원

† 정회원, 동국대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 조교수(E-mail : bkim1@dongguk.edu)

2) 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원

해서도 직접 시험을 수행하고 있으나(한국수자원공사, 1999; 유병모 등, 2001; 홍성연 등, 2004; 이대수 등, 2006), 현재까지는 대형 시험기의 제작과 조작, 시험인력 수급의 어려움, 고가의 시험비용 등 여러 제약 요인들로 인해 대형 전단시험이 기존의 소형 전단시험만큼 일반적이지는 않다. 그러나, 장비 제작기술의 발달과 대형 시험의 중요성에 대한 인식 확대로 그 수요는 점차 증가할 것으로 판단된다.

대형 전단시험의 종류로는 일반적인 소형 토질전단시험과 마찬가지로 크게 대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험을 들 수 있다. 대형 직접전단시험은 대형 삼축압축시험과 비교해 시험원리가 단순하고 장비의 조작이 간편하여 조립재료의 전단강도를 비교적 간단히 측정할 수 있다는 장점이 있는 반면, (1)파괴면이 미리 가정되어 있고, (2)수평전단시 전단상자의 tilting 현상이 발생할 수 있으며, (3)유한요소해석시 필요한 응력-변형 특성을 완전히 설명할 수 없고, (4)밀도가 커질수록 결과의 분산도도 증가한다는 단점이 있다. 한편, 대형 삼축압축시험의 경우 대형 직접전단시험의 단점으로 열거한 내용과 같은 문제들이 없어 재료의 응력변화와 그에 따른 전단거동을 보다 실제에 가깝게 나타낼 수 있으나, 대형 직접전단시험과 반대로 시험방법과 그에 따른 시험장치의 구조가 복잡하고 고가여서 시험기의 제작과 운영에 많은 어려움이 따른다는 단점이 있다(한국수자원공사, 2001). 시험결과의 실무 활용도에 있어서 두 시험을 비교하면, 대형 삼축압축시험이 실제 재료의 전단거동 특성을 보다 정확히 평가할 수 있음에도 불구하고 여러 면에서 상대적인 간편성 때문에 대형 직접전단시험의 활용도가 높은 편이다. 그러나, 대형 직접전단시험의 경우 앞서 언급했던 것처럼 시험결과의 신뢰도가 대형 삼축압축시험에 의해 낮은 편이므로 결과의 적용시 신중한 검토가 필요하다 할 수 있다. 그리고 그러한 검토 방법의 하나로 대형 삼축압축시험을 통한 결과와 비교하는 방법이 있었으나 현재까지 유사 조건에 대하여 대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험간의 결과를 비교한 사례

는 많지 않다. 따라서, 본 연구에서는 동일한 조립재료에 대하여 대형 삼축압축시험과 대형 직접전단시험이 동시에 수행된 전단시험 결과를 비교하여 각 시험장치에 따른 재료의 전단강도 양상을 상세히 분석하였다. 총 6개 case에 대하여 수행된 시험결과를 분석하였으며 이로부터 전단시험 방법에 따른 전단강도의 차이를 비교하였다. 아울러 직접전단시험의 전단상자 크기와 시료 입자 크기의 차이가 두 시험간 전단강도의 차이에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 대형 전단시험 개요

2.1 직접전단시험과 삼축압축시험

직접전단시험과 삼축압축시험은 지반 재료의 전단강도와 변형특성을 산정하기 위해 사용되는 대표적인 시험법으로, 사력재 혹은 조립재료와 같이 비교적 입자크기가 큰 재료에 대해서도 널리 사용되고 있다.

입경이 큰 조립재료를 대상으로 수행되는 대형 직접전단시험은 전단상자 내의 재료를 진동 및 충격 등의 다짐을 통해 소요 밀도로 다져 공시체를 제작한 후, 수직하중이 가해진 상태에서 전단상자 상·하부 경계면(수평면)을 따라 수평방향으로 변위를 발생시켜 공시체의 최대 전단응력을 구한 후 이로부터 조립재료의 전단강도, 즉 마찰각과 점착력을 산정하는 시험이다. 앞서 언급한 바와 같이, 직접전단시험은 시험장치와 방법이 간단하다는 장점에도 불구하고 여러 단점(즉, 상·하부 전단상자의 경계면으로만 시료가 파괴되고, 원형 전단상자의 경우 시료의 수평방향 변형률과 평균 단면적 계산이 곤란해 시험결과가 부정확할 수 있으며, 전단시험 전·후의 주응력의 방향이 변하고(그림 1 참조), 전단시킬 때 상·하부의 전단상자 경계면에서 마찰저항이 발생할 수 있다는 점 등)이 존재한다. 이러한 이유 등으로 인해 일반적으로 대형 직접전단시험을 통해 측정된 전단강도, Mohr-Coulomb의 강도규준 관점에서 마찰각

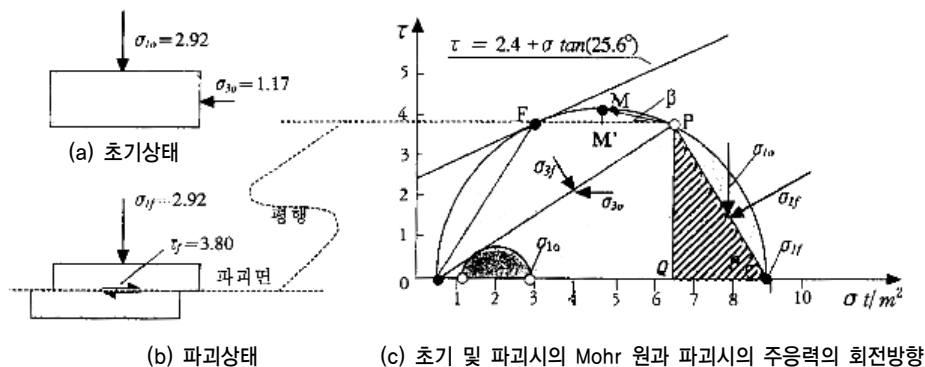


그림 1. 직접전단시험시 주응력 방향의 회전(김용필 등, 2000)

과 점착력은 대형삼축시험을 통해 측정된 마찰각과 점착력에 비해 상대적으로 큰 분산성을 나타낸다(한국수자원공사, 1999). 그리고, 만약 시료 중앙부의 강도를 증가시키거나, 상대적으로 시료 내의 강도가 큰 부분이 파괴면에 포함되어 있으면 결과적으로 전단강도가 과대 산정될 수 있다. 따라서 보수적인 설계에는 직접전단시험이 적합할 수 있으나, 동시에 실제보다 크게 산정된 전단강도로 인해 과도한 설계로 이어질 가능성도 높다. 일반적인 토질 재료에서 직접전단시험을 통해 산정된 내부마찰각은 삼축압축시험에서 측정되는 값보다 약 15% 정도 큰 것으로 알려져 있다(김용필 등, 2000).

한편, 조립재료를 대상으로 하는 삼축압축시험은 직접전단시험과 유사하게 진동 및 충격 다짐법을 통해 공시체를 제작한 후, 구속압을 가하여 압밀을 시키고, 압밀 완료 후 구속압 상태에서 수직하중을 증가시켜 전단강도와 변형특성을 산정하는 순서로 시험이 수행된다. 삼축압축시험에서는 전단시 공시체의 가장 약한 부분을 따라 파괴가 발생하게 되며, 따라서 직접전단시험에 비해 재료의 실제 전단강도를 보다 정확하게 측정하는 것으로 알려져 있다. 과거 동일한 조립재료에 대하여 대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험이 동시에 수행된 사례에서 시료의 평균 초기밀도가 17.6kN/m^3 이하인 범위에서는 직접전단시험을 통해 측정된 전단강도가 삼축압축시험을 통해 측정된 전단강도보다 작으나, 밀도가 증가할수록 반대의 결과가 나타나며 동시에 전단강도의 분산 정도가 증가한다고 보고된 바 있다(한국수자원공사, 1999). 이처럼 대형 직접전단시험 결과의 분산성이 커서 실제로 그 결과를 설계에 적용할 때에는 실제 측정값에서 약 20-30% 저감하거나 혹은 산정된 내부마찰각에 약 0.8 정도의 보정계수를 적용하고 점착

력은 무시하여 사용하기도 하나(한국수자원공사, 1999), 이는 명확한 근거에 의한 기준이 아니라 과거의 사례들을 바탕으로 경험적으로 적용된 기준으로 실제 다양한 경우에 대해서 일괄적으로 그러한 경험적인 기준을 적용시키기에 는 무리가 따를 것으로 사료된다. 일반화된 기준으로 적용하기에는 현재까지 국내에서는 동일한 조립재료에 대하여 대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험을 수행하고 결과를 비교·분석한 사례가 극히 제한적이며 앞으로도 다양한 경우에 대하여 꾸준한 자료가 축적되어야 하기 때문이다(서민우 등, 2007).

2.2 시험조건 및 절차

본 연구에서는 여러 종류의 조립재료를 대상으로 대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험을 동시에 수행하고 기존의 사례를 포함한 총 6개 case에 대하여 전단시험 결과를 비교·분석 하였다. 표 1에 모든 case에 대하여 조립재료의 입도분포, 물리적 특성 및 다짐밀도 등을 나타내었다. 또한, 시험종류별로 시료의 최대 입자크기를 함께 나타내었는데 각 case에 대해서 두 시험간 시료의 최대 입자크기가 서로 다른 이유는 대형 직접전단시험장치와 대형 삼축압축시험장치의 공시체 크기에 차이가 있었기 때문이다. 그러나, 최대 입자크기가 서로 다른 경우에도 상사입도를 적용하여 입도를 조성하였기 때문에 입도분포상의 두 재료간 균등계수와 곡률계수는 동일하였다. 그림 2는 시험재료의 입도분포곡선을 나타낸다.

그림 3은 본 연구 수행을 위해 사용된 대형 직접전단시험기와 대형 삼축압축시험기를 나타내며, 표 2에 각 시험 case에 대한 공시체 크기와 연직응력 및 구속압 조건을 나타내었다. 대형 삼축압축시험에서는 모든 case에서 동일한 시험

표 1. 시험종류 및 재료

항 목	시험종류	최대 입자크기, d (mm)	균등 계수	곡률 계수	비중	흡수율 (%)	마모율 (%)	밀도 (kN/m^3)	비고	
Case 1	대형 직접전단	100	37.0	1.8	2.60	0.51	-	21.1	안산암질 응회암 (100~130)*	
	대형 삼축압축	50								
Case 2	대형 직접전단	100	37.0	1.8	2.69	1.47	-	19.6		
	대형 삼축압축	50								
Case 3	대형 직접전단	150	39.3	1.9	2.61	1.06	34.0	20.1		모래/자갈 혼합 사력재
	대형 삼축압축	50								
Case 4	대형 직접전단	150	39.4	1.07	2.63	1.09	32.1	20.1	화강암	
	대형 삼축압축	50								
Case 5	대형 직접전단	40	33.3	1.14	2.59	0.60	16.3	19.6	화강암 (107~155)*	
	대형 삼축압축	50								
Case 6	대형 직접전단	40	54.4	0.30	2.61	1.11	18.7	19.6	화강암 (76~121)*	
	대형 삼축압축	50								

* : 일축압축강도(MPa)

장치가 이용되었으나, 대형 직접전단시험의 경우, 전단상자의 길이가 1,000mm인 장치(case 1, 2, 3, 4)와 300mm(cases 5, 6)인 두 종류의 시험장치가 사용되었고, 적용된 연직응

력 및 구속압은 50~600kPa 범위에 있었다.

대형 직접전단시험의 수행 절차는 다음과 같다. 우선 시료 준비단계에서 원입도를 바탕으로 합성입도를 만든 후 전단상자의 크기와 시료의 최대입경 크기를 고려하여 상사입도 또는 전두입도법으로 입도를 조정하였다. 그리고, 입도 조정된 시료를 전단상자에 투입하여 재료분리가 일어나지 않도록 주의하면서 총 3층으로 소정의 밀도까지 다짐을 수행하였다. 이 때 시험밀도는 동일하게 입도조정된 시료에 대하여 미리 대형 다짐시험을 실시하여 최대밀도를 산정하고 이를 근거로 일반적인 시공시 다짐기준을 반영하여 결정된 값이다. 그리고 전단상자내 시료의 다짐은 시험밀도로부터 산정된 층당 소요 시료량에 대하여 예비시험을 통해 미리 결정된 다짐방법에 따라 진행하였다. 다짐 완료 후, 시료의 윗면에 재하판을 위치시키고 시료의 초기높이를 측정하여 시료의 초기밀도(또는 초기간극비)를

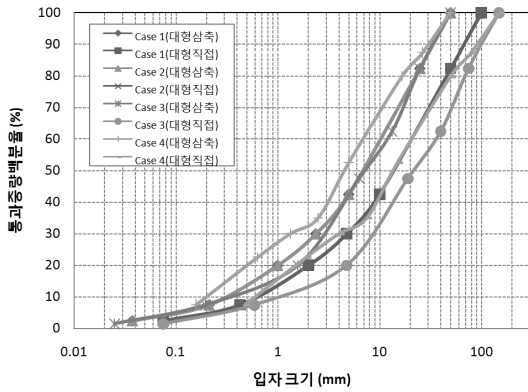
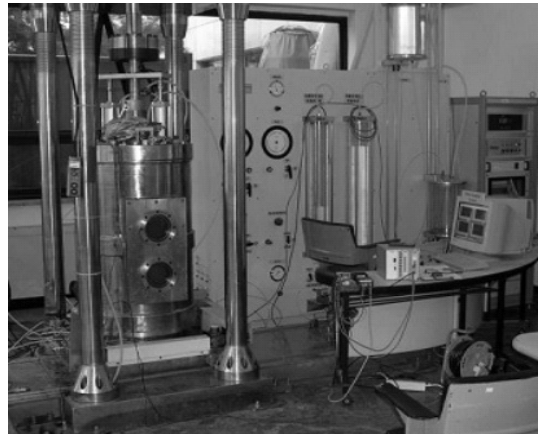


그림 2. 시험재료의 입도분포곡선



(a) 대형 직접전단시험기



(b) 대형 삼축압축시험기

그림 3. 대형 전단시험 장치

표 2. 시험조건

항 목	시험 종류	최대 입자 크기, d (mm)	공시체 크기, 직경, D(mm)	연직응력 및 구속압 (kPa)	d/D	비 고
Case 1	대형 직접전단	100	1,000×1,000	50, 100, 150	1/10	ECRD ¹⁾ Zone 2
	대형 삼축시험	50	300 (D)	50, 100, 150	1/6	
Case 2	대형 직접전단	100	1,000×1,000	50, 100, 150	1/10	ECRD ¹⁾ Zone 2
	대형 삼축시험	50	300 (D)	50, 100, 150	1/6	
Case 3	대형 직접전단	150	1,000×1,000	50, 100, 200, 300	1/6.7	CFRD ²⁾ Zone 3A
	대형 삼축시험	50	300 (D)	100, 200, 400	1/6	
Case 4	대형 직접전단	150	1,000×1,000	50, 100, 200, 300	1/6.7	CFRD ²⁾ Zone 3C
	대형 삼축시험	50	300 (D)	100, 200, 400	1/6	
Case 5 ³⁾	대형 직접전단	40	300×300	200, 400, 600	1/7.5	CFRD ²⁾ Zone 3
	대형 삼축시험	50	300 (D)	200, 400, 600	1/6	
Case 6 ³⁾	대형 직접전단	40	300×300	200, 400, 600	1/7.5	CFRD ²⁾ Zone 4
	대형 삼축시험	50	300 (D)	200, 400, 600	1/6	

1) ECRD : Earth Cored Rockfill Dam, 2) CFRD : Concrete Faced Rockfill Dam

3) 출처 : 한국수자원공사, 2001

※ 각 Zone에 대한 설명은 한국수자원학회(2003) 참조

산정하였다. 그리고, 재하판을 통해 수직하중을 가한 후 시료의 압축 변형량이 수렴되면, 수직하중을 유지한 채 10mm/min의 속도로 수평방향으로 전단변위를 가하고 이에 따른 전단하중과 수직변위를 측정하였다. 이 때 시료의 전단은 시료가 최대 전단응력(peak shear stress)에 도달한 후 5% 이상의 추가 변위시까지 진행하는 것으로 하였다.

한편, 대형 삼축압축시험의 수행 절차는 다음과 같다. 우선 대형 직접전단시험에서와 동일한 방법으로 시료의 입도를 조성하고 대형 다짐시험을 실시하여 다짐에너지와 밀도 관계로부터 시험밀도와 다짐조건을 결정하였다. 대형 다짐시험시 사용된 대형 자동 다짐장치의 램머 중량은 156N(16kgf), 낙하고는 50cm였으며 동일 장비가 공시체 제작에도 이용되었다. 공시체 제작을 위한 시료의 다짐은 미리 결정된 다짐조건에 따라 멤브레인이 손상되지 않도록 유의하면서 시료를 총 5등분하여 실시하였다. 다짐 완료 후 공시체 몰드를 해제하는데 이 때 공시체가 자립할 수 있도록 공시체 내부에 낮은 진공압을 가하였다. 이후 저압을 유지한 채 시료를 24시간 이상 통수시켜 포화시킨 후 구속압을 가하였다. 구속압에 따른 압밀 중 시료의 체적변화를 내체적 측정용 이중관부렛과 차압계로 측정하였으며, 압밀 완료 후에는 동일 구속압하의 배수조건에서 시료의 축변형을 증가시키며 그에 따른 축응력을 측정하였다. 이상의 시험절차 및 시험장비에 대한 보다 자세한 설명은 서민우 등(2005, 2006), 김범주 등(2006), 하익수 등(2005)에 기술되어 있다.

일반적으로 사질토를 포함한 조립재에서는 상대밀도(혹은 상대다짐)가 전단강도에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 모든 시험조건에 대해서 시료별 밀도의 차이가 크지 않고 대부분 가능한 최대밀도로 공시체를 다진 후 시험을 수행하였기 때문에 각 시료별로 상대밀도의 차이가 크지 않다고 판단하였다. 따라서 상대밀도 차이에 따른 전단강도의 영향을 분석에서 배제하였다.

3. 대형 전단시험 결과 및 분석

3.1 응력-변형 특성

본 연구에서 수행된 4개 case(표 1과 2의 case 1~4)의 대형 직접전단시험 및 대형 삼축압축시험으로부터 얻어진 조립재료의 응력-변형 곡선을 그림 4에 도시하였다. 그림 4의 (a)와 (b)는 각각 조립재료의 수평변위와 전단응력 및 축변형률과 축차응력의 관계를 나타낸다. 대형 직접전단과 대형 삼축압축시험간 조립재의 응력-변형 관계를 비교하면 전체적으로 대형 직접전단시험에서 보다 뚜렷한 최대

전단응력이 나타나고, 최대값 발현 이후 응력 감소 현상도 두드짐을 확인할 수 있다. 최대 전단응력에 도달하는 변형율을 비교하면, 대형 직접전단시험의 경우에 보다 적은 변형율(약 1~3% 변형율, 수평변위 10~30mm 전후)에서 최대 전단응력에 도달해 대형 삼축압축시험에 비해 재료의 강성이 크게 나타났다. 또한, 동일한 크기의 연직응력과 구속압에 대해서 최대 전단강도 역시 대형 직접전단시험에서 더 큰 값이 산정되었다.

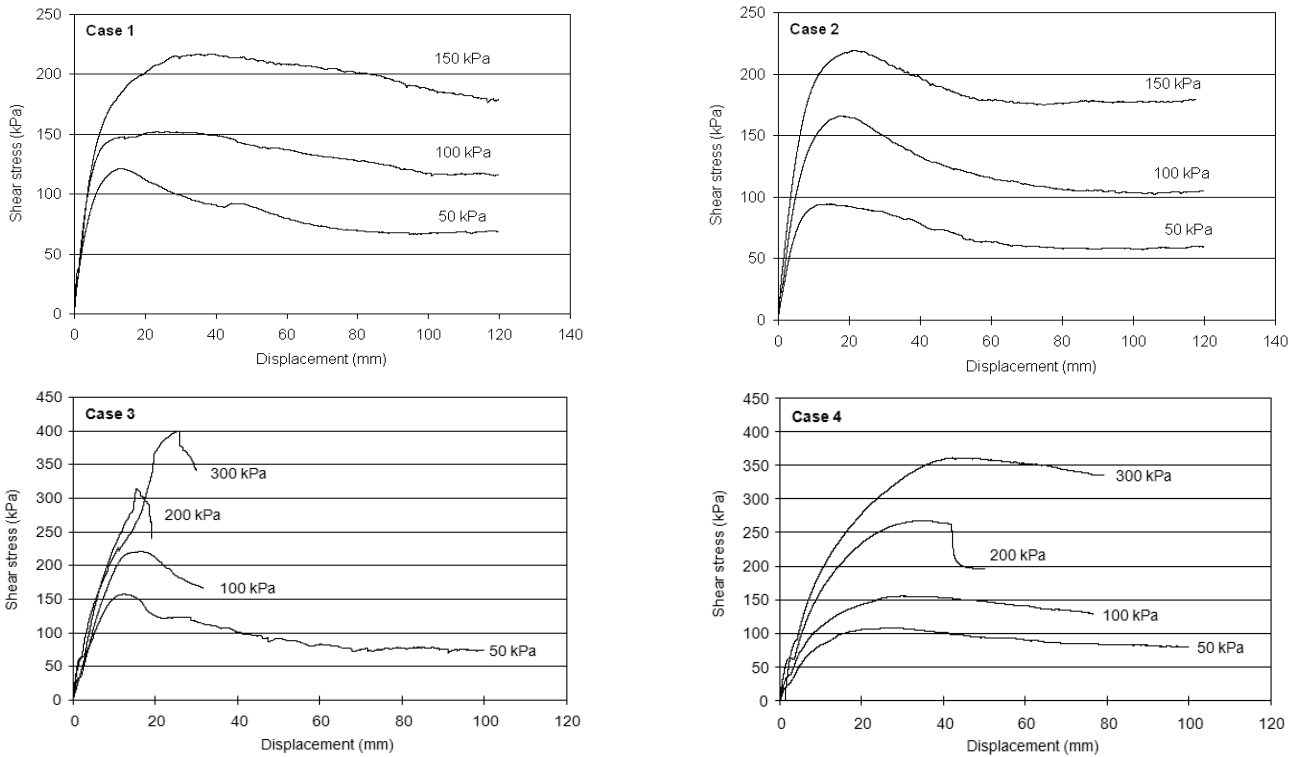
대형 직접전단시험에 있어서 case 3, 4와 case 1, 2를 비교하면, 상대적으로 시료의 최대 입경이 크고(case 3, 4의 경우 최대 150mm), 연직 재하하중의 크기가 큰 경우에 최대 전단응력 도달 후 응력-변형 관계 곡선의 형태가 불안정하게 나타남을 알 수 있는데, 이는 전단상자의 상하부 경계인 전단면상에 상대적으로 입경이 큰 입자들이 존재하여 전단 변형에 대한 급격한 저항과 부분적인 입자 파쇄가 유발되고 동시에 하중 재하장치가 불안정해짐에 따라 나타난 현상으로 설명할 수 있다.

한편, 본 시험결과가 동일한 크기의 연직응력과 구속압에 대해서 얻어진 것이었는지라도 두 시험간 평균 주응력의 크기는 다소 차이를 보인다. 즉, 대형 직접전단시험에서 재료의 정지상태를 가정하면 수평응력은 정지토압 계수를 이용하여 구하게 되므로, 결국 모든 방향에서 동일한 구속응력이 가해지는 삼축압축시험에 비해 평균 주응력이 작게 된다. 따라서, case 1~4의 대형 직접전단시험은 동일한 case의 대형 삼축압축시험에 비해 다소 작은 평균 주응력 상태에서 구한 결과가 된다.

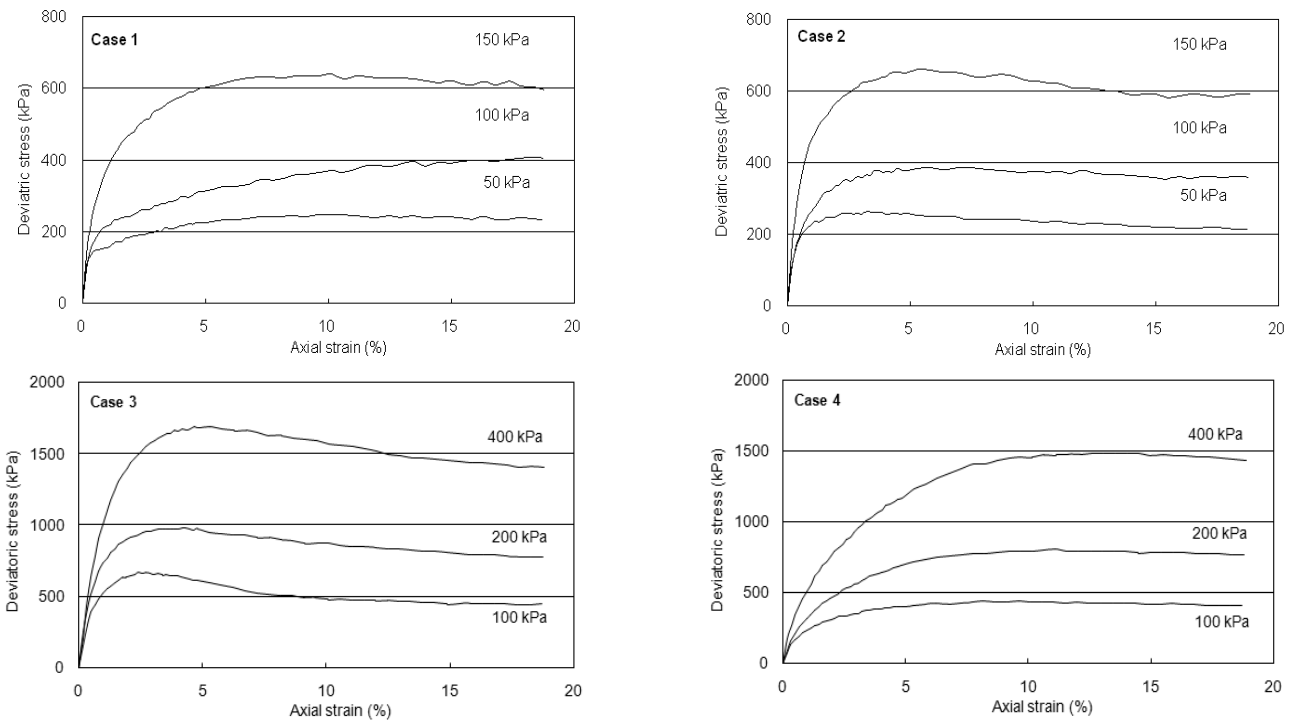
3.2 전단강도 비교

대형 직접전단과 대형 삼축압축시험 결과로부터 조립재료의 전단강도를 Mohr-Coulomb의 강도규준에 따라 산정하였으며 그 결과를 표 3에 나타내었다. 본 연구에서 대상이 된 조립재료는 락필댐과 사력댐 등의 축조재로 활용되고 있거나 예정인 재료였으므로, 댐을 대상으로 하여 두 시험에 의한 전단강도 차이를 보다 간단히 비교해 볼 수 있도록 일반적인 밀도 19.6kN/m³(=2.0tf/m³)의 축조재로 축조된 100m 높이의 댐을 가정하고 그 중간 깊이인 50m 지점의 1,000kPa 수직응력에 대한 전단강도(이하 τ_{1000} 으로 표시)를 산정하여 함께 비교하였다.

전단강도 비교 결과 전체적으로 대형 직접전단시험을 통해 산정된 마찰각과 점착력의 크기가 대형 삼축압축시험을 통해 산정된 값보다 큼을 알 수 있으며, τ_{1000} 에 대하여 대형 직접전단시험 결과에 대한 대형 삼축압축시험 결과의 비율(즉, τ_{1000} 에 대한 전단강도비)은 조사된 모든 case에 대



(a) 대형 직접전단시험(Case 1 – Case 4)



(b) 대형 삼축시험(Case 1 – Case 4)

그림 4. 대형 직접전단시험 및 대형 삼축압축시험의 응력-변위(변형) 관계

하여 1보다 작은 0.59~0.94의 범위에 존재하는 것으로 나타났다. 이는 1,000kPa의 연진응력 하에서 대형 직접전단 시험을 통해 측정된 전단강도가 동일한 크기의 구속압 상태에서 대형 삼축압축시험에 의해 측정된 전단강도보다

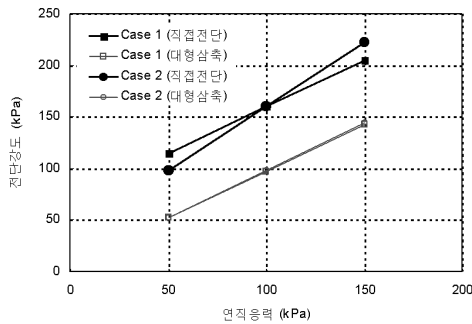
약 1.1~1.7배(즉, 10~70% 차이) 크게 나타난 것을 의미하는 것으로, 김용필 등(2000)이 언급한 바와 같이 본 연구의 조립재료에 비해서 입경이 작은 일반적인 토질 재료의 경우 약 15% 정도 직접전단시험에서 전단강도가 크게 측

표 3. 시험종류에 따른 전단강도 비교

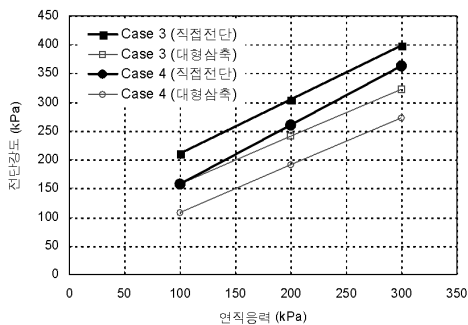
항 목	시험종류	전단 강도		$\tau_{1000}^{2)}$	$\frac{\tau_{1000}(\text{대형삼축압축})}{\tau_{1000}(\text{대형직접전단})}$
		마찰각($^{\circ}$)	점착력(kPa)		
Case 1	대형 직접전단	41.9	69.9	967	0.94
	대형 삼축시험	42.0	7.2	908	
Case 2	대형 직접전단	51.3	35.0	1283	0.72
	대형 삼축시험	42.6	5.9	919	
Case 3	대형 직접전단	43.3	116.1	1058	0.85
	대형 삼축시험	39.5	75.7	900	
Case 4	대형 직접전단	45.7	55.9	1080	0.79
	대형 삼축시험	39.6	25.5	853	
Case 5	대형 직접전단	47.0	91.0	1163	0.89
	대형 삼축시험	44.5	47.0	1030	
Case 6	대형 직접전단	46.8	88.0	1153	0.76
	대형 삼축시험	36.9	120.0	871	
참고자료 1 ¹⁾ (이대수 등, 2008)	대형 직접전단	46.1	200.1	1239	0.73
	대형 삼축시험	39.7	69.6	900	
참고자료 2 ¹⁾ (이대수 등, 2008)	대형 직접전단	56.3	137.3	1637	0.59
	대형 삼축시험	41.1	91.2	964	

1) 참고자료 1 : 시험 밀도 19.4 kN/m³, 참고자료 2 : 시험 밀도 20.6kN/m³

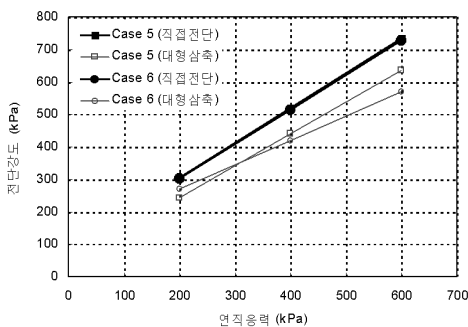
2) $\tau_{1000} : \sigma_v = 1,000\text{kPa}$ (높이 100m인 댐의 중간깊이에서의 대략적인 수직응력 크기)에서의 전단강도



(a) Case 1과 Case 2



(b) Case 3과 Case 4



(c) Case 5과 Case 6

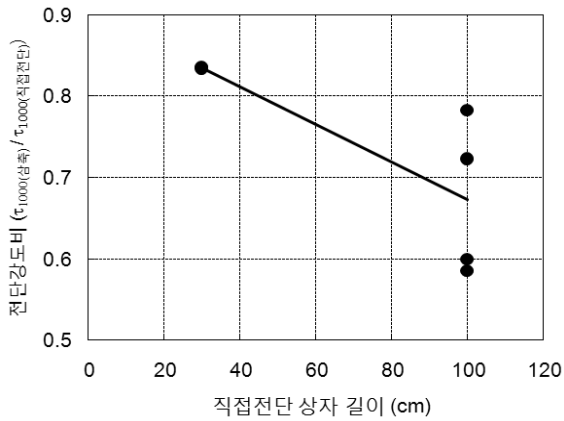
그림 5. 대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험을 통한 전단강도 비교

정된다는 경향과 비교할 때 전체적으로 차이가 크고 그 범 위도 넓다는 것을 알 수 있다.

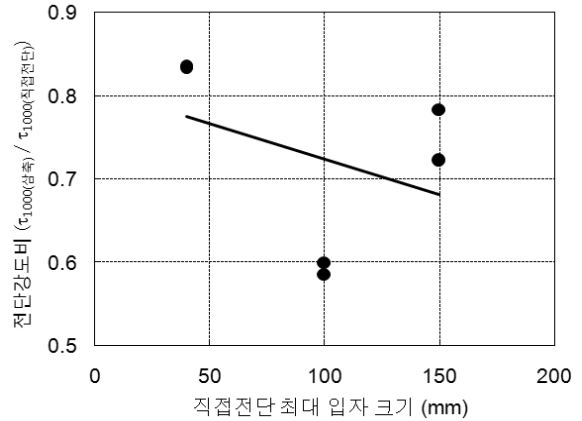
그림 5의 (a)~(c)는 case 1~6에 대하여 대형 직접전단 과 대형 삼축압축시험을 통한 Mohr-Coulomb의 파괴포락 선을 함께 도시한 것으로 이를 통해서도 case마다 연직응 력의 크기별로 다소 차이는 있을 지라도 전체적으로 대형 직접전단시험을 통해 산정된 전단강도가 대형 삼축압축시 험을 통한 전단강도보다 큼을 알 수 있다.

3.3 전단상자와 시험재료의 최대 입경 크기 영향

표 2에 나타난 바와 같이 대형 삼축압축시험시 공시체 크 기와 시험재료의 최대 입경은 모든 case에 대해서 동일했던 반면(즉, 공시체 직경 300mm, 시험재료 최대 입경 50mm), 대형 직접전단시험의 경우는 전단상자의 크기가 다르고(즉, 1,000×1,000mm와 300×300mm), 전단상자의 규모에 따라 시 험재료의 최대 입경이 달랐으므로(150mm, 100mm, 40mm), 전단상자의 크기와 최대 입경 크기의 차이에 따른 대형 직 접전단시험과 대형 삼축압축시험의 전단강도 차이를 비교 하였다. 그림 6은 그 결과를 나타낸 것으로, 비록 충분한 자료가 비교된 것이 아니라 뚜렷한 경향은 확인 할 수 없 으나, τ_{1000} 을 기준으로 할 경우 데이터에 대한 선형 추세 선에서 보는 바와 같이 직접전단시험의 전단상자 크기가 증가하거나, 시험재료의 최대 입경이 커질수록 두 시험간 전단강도비(즉, $\tau_{1000}(\text{대형삼축압축})/\tau_{1000}(\text{대형직접전단})$)는 대략 감 소하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 이는 다시 말해서, 대형 직접전단시험에 의한 전단강도가 대형 삼축압축시험



(a) 전단상자 크기 영향



(b) 시료 최대 입경 크기 영향

그림 6. 전단상자와 시료 최대 입경 크기의 차이에 따른 전단강도 비교

에 의한 전단강도보다 큰 정도가 전단상자 크기나 시험재료의 최대 입경이 증가함에 따라 함께 증가하는 경향이 있다는 의미로 해석될 수 있다. 그러나, 이에 대한 보다 일반화된 결론을 도출하기 위해서는 향후 보다 많은 수의 대형 전단시험 혹은 실규모 현장 전단시험들에 대한 비교와 분석이 이루어져야 할 것이다.

3.4 대형 전단시험에 의한 전단강도 범위와 분산도

국내에서 대형 전단시험을 통해 산정되는 조립재료의 전단강도 범위와 분산 정도를 대략적으로 살펴 보고자, 본 연구의 결과와 함께 기존 문헌의 대형 직접전단시험을 통한 조립재료의 전단강도 산정 사례(이대수 등, 2005; 김경렬 등, 2006)를 조사하여 그림 7에 보는 바와 같이 Mohr-Coulomb의 강도정수값(즉 마찰각과 점착력)을 함께 도시하였다. 기존 문헌의 강도정수들은 국내 석산에서 모암을 파쇄하여 얻은 골재로 모암이 섬록암, 변성암, 응회암인 석산 골재로부터 최대입경 76.3mm 정도의 조립재료를 약 19-21kN/m³ 범위의 밀도로 조성한 후 98-490kPa 범위의 연직하중 하에서 대형 직접전단시험을 수행하여 얻은 결과이다. 비록 그림 7의 결과는 조립재료의 종류, 구속압과 상대밀도 등의 시험 조건, 그리고 시험기 규모의 차이 등이 고려되지 않은 것으로 해당 요소들에 의한 영향을 파악하기는 어려우나, 대형 전단시험에 있어서 직접전단과 삼축압축간 전단시험 방법의 차이에 따른 대략적인 강도정수의 범위와 분산도의 차이를 파악할 수 있는 자료가 될 수 있을 것으로 판단하였다.

그림 7로부터 case 6의 대형 삼축압축시험결과를 제외한다면, 대형 직접전단시험에 의한 강도정수의 분산도가 훨씬 큼을 알 수 있다. 즉, 대형 직접전단시험으로부터 산정된 강도정수의 분포가 마찰각의 경우 약 37°~52°, 점착

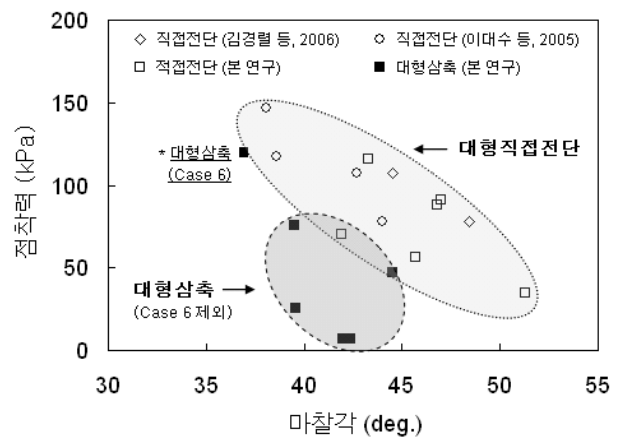
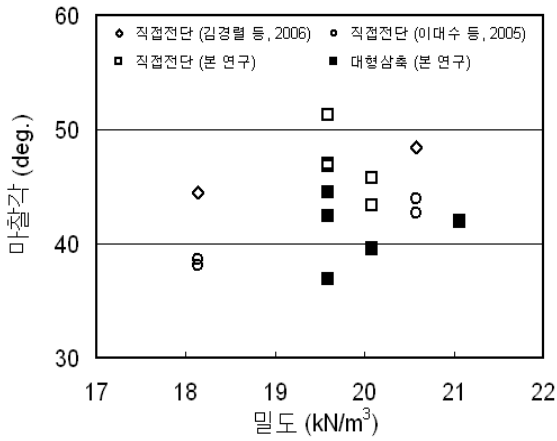
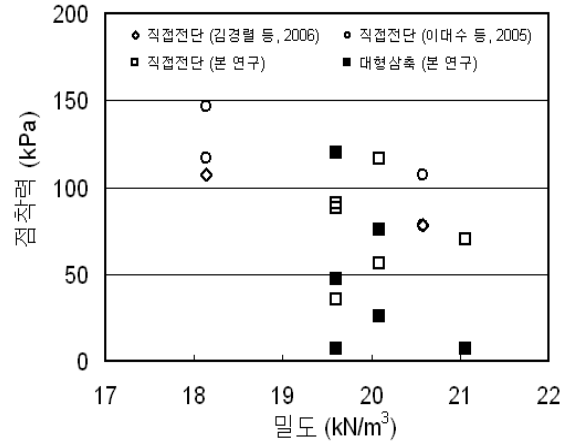


그림 7. 대형 전단시험의 종류에 따른 강도정수의 범위와 분산도

력은 35~150kPa의 범위에 분포하는 반면, 대형 삼축압축 시험의 경우 마찰각이 약 39°~44°, 점착력이 약 0~75kPa에 분포하였다. 또한, 강도정수 값의 크기에 있어서도 그림 5의 결과와 마찬가지로 전반적으로 대형 직접전단시험이 대형 삼축압축시험에 비해 상대적으로 큰 값을 보이는 것으로 판단할 수 있었다. 한편, 각 시험에서 밀도와 강도정수간의 분포를 파악하기 위하여 그림 8에서 같이 밀도와 마찰각 및 점착력과의 관계를 나타낸 결과, 대형 직접전단시험이 대형 삼축압축시험보다 대체로 더 큰 값을 보여줌을 확인할 수 있었고, 그림 8(b) case 6의 사례(대형 삼축압축시험, 점착력=120kPa)를 제외하면, 마찰각과 점착력의 분산도도 상대적으로 훨씬 큼을 알 수 있었다. 이러한 이유는 3.1절의 시험 결과에 대한 설명에서 언급한 바와 같이, 미리 전단면이 결정되는 직접전단시험에서 특히 입경이 큰 재료를 사용하는 경우에는 이들이 전단 결과의 일관성에 미치는 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 마찰각



(b) 점착력

그림 8. 밀도와 마찰각 및 점착력의 관계

4. 결 론

본 연구에서는 댐 축조재료 이용되는 입경이 큰 조립재료를 대상으로 시료의 평균 입자크기와 공시체 크기, 연직 응력(구속압) 조건 등에 차이가 나는 총 6개 case에 대해서 대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험의 결과를 비교, 분석하였다.

- (1) 두 시험간 조립재의 응력-변형 특성을 비교하면 전반적으로 대형 직접전단시험에서 보다 뚜렷한 최대 전단 응력이 나타나고, 최대값 발현 이후 응력 감소 현상도 두드러졌으며, 보다 적은 변형율에서 최대 전단응력에 도달하여 재료의 강성이 대형 삼축압축시험의 경우보다 크게 나타났다.
- (2) Mohr-Coulomb 강도규준에 의한 전단강도 차이를 비교했을 때 전체적으로 대형 직접전단시험을 통해 산정된 전단강도가 대형 삼축압축시험을 통해 산정된 전단강도보다 큰 것으로 나타났다. 또한, 1,000kPa 수직응력에 대한 두 시험간 전단강도비($\tau_{1000(\text{대형삼축압축})} / \tau_{1000(\text{대형직접전단})}$)는 0.59~0.94의 범위로, 대형 직접전단시험을 통해 측정된 전단강도가 대형 삼축압축시험에 의해 측정된 전단강도보다 약 10~70% 크게 나타나 입경이 작은 일반적인 토질재료와 비교해 그 차이와 범위가 큰 것으로 나타났다.
- (3) 전단상자 크기와 전단강도비($\tau_{1000(\text{대형삼축압축})} / \tau_{1000(\text{대형직접전단})}$), 그리고 시험재료의 최대 입자 크기와 전단강도비의 관계는 비록 비교 데이터의 수가 적고 분산도가 커 뚜렷한 관계를 파악하기는 어려우나 대략적으로 두 경우 모두 반비례적인 관계가 있는 것으로 판단할 수 있

었다.

- (4) 또한, 본 연구에서 수행된 시험결과를 포함하여 기존 문헌에 시험된 사례들로부터 강도정수값의 분포를 조사한 결과 전반적으로 대형 직접전단시험에 의한 강도 정수의 범위와 분산도가 대형 삼축압축시험에 비해 큰 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김범주, 조성은, 임은상, 김기영 (2006), Rockfill 재료의 입자 크기가 전단강도에 미치는 영향, 2006년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 1276~1279.
2. 김용필, 송용선, 이광열, 장용채 (2000), 지반공학 시험법 및 응용, 세진사, pp. 381~393.
3. 서민우, 신동훈, 하익수, 박한규 (2006), 대형 삼축압축시험을 통한 석산재와 사력재의 거동 특성 평가, 2006년도 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 844~853.
4. 서민우, 하익수, 김범주 (2007), 시료 입자 크기와 시험 장치가 조립 재료의 거동 특성에 미치는 영향, 대한토목학회 논문집, Vol. 27, No. 6C, pp. 393~400.
5. 서민우, 하익수, 정우성, 김범주 (2005), 대형 지반 시험장비를 이용한 댐축조재료의 전단 강도 평가, 2005년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 5352~5355.
6. 유병모, 김양운, 서성호, 이상덕 (2001), 굵은 골재 함유율에 따른 직접전단거동 특성, 2001년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 2641~2644.
7. 이대수, 김경열, 오기대 (2008), 대형직접전단시험과 대형삼축시험을 통한 석산골재의 전단거동 특성 비교, 한국지반공학회 논문집, 제24권 2호, pp. 5~14.
8. 이대수, 김경열, 홍성연, 조화경, 황성춘 (2005), 대형직접전단 시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(I), 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제6호, pp. 81~91.
9. 이대수, 김경열, 홍성연, 황성춘 (2006), 대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(II), 한국지반공학회 논문집, 제22권 4호, pp. 51~59.

10. 하익수, 신동훈, 정우성, 김우구 (2005), 입경이 큰 조립재료의 강도정수 산정을 위한 국내 대형삼축압축시험 수행 사례, *한국지반공학회지*, Vol. 21, No. 9, pp. 21~32.
11. 한국수자원공사 (1999), *댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화방안 연구*, 한국수자원공사 연구보고서, WRRI-GT-99-3, pp. 16~18.
12. 한국수자원공사 (2001), *대형삼축압축시험기를 이용한 댐재료의 전단강도특성 연구*, 한국수자원공사 연구보고서, WRRI-GT-01-2.
13. 한국수자원학회 (2003), *댐설계기준*, 219p.
14. 홍성연, 김경열, 이대수 (2004), 조립재료의 변형 및 강도특성에 대하여 - 대형일면전단시험기 개발, *2004년도 학술발표회 논문집*, 대한토목학회, pp. 2362~2365.

(접수일: 2008. 11. 4 심사일: 2008. 11. 11 심사완료일: 2008. 12. 22)