

시험밀도에 따른 조립재료의 전단강도 특성

Characteristics of Shear Strength of Coarse Grained Materials Depending on Experimental Densities

김경열¹⁾, Kyoung-Yul Kim, 이대수²⁾, Dae-Soo Lee, 홍성연³⁾, Sung-Yun Hong, 오기대⁴⁾, Oh, Ki-Dae

¹⁾ 한전 전력연구원 선임연구원, Member, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

²⁾ 한전 전력연구원 책임연구원, Member, P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

³⁾ 한전 전력연구원 일반연구원, Member, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

⁴⁾ 한전 전력연구원 일반연구원, Member, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

SYNOPSIS : The density of coarse grained materials which is used in rock-fill dam or the piling the ground are used as 1.85~2.10 g/cm³. Hereupon, the effect of variation of density on shear strength of ones was analyzed from the results of large scale shear test. The sample for the test was obtained from the local quarry sites. The test conditions are that density(1.85 versus 2.10 g/cm³), material size range(76.3~2.0 mm), water content(air dry condition) and uniformity coefficient(5.0). Test result shows that the shear strength of 2.10 g/cm³ is relatively larger than that of 1.85 g/cm³.

Key words : Shear strength, Direct shear box, Cohesion, Friction angle, Density

1. 서 론

통상 록필댐(Rockfill Dam) 또는 대형성토지역과 같은 곳에 사용하는 조립재료는 밀도의 크기가 최소 1.6 g/cm³부터 최대 2.1 g/cm³까지 다양하게 사용되고 있으며, 기타 현장조건에 따라 시공되는 밀도의 조건이 달라지게 된다. 이에 시험 밀도의 크기의 차가 조립재료의 강도특성에는 어느 정도의 영향을 미치는가를 확인하기 위하여 동종의 재료를 바탕으로 시험밀도를 다르게 하여 대형직접전단시험을 수행하였다. 시험 재료는 현재 전국 석산에서 생산중인 골재를 이용하였다. 시험에 사용한 밀도의 크기는 1.85 g/cm³와 2.1 g/cm³이며 입경의 크기는 2.0 mm부터 76.3 mm까지의 크기로 구성되어 있다. 시험에 사용한 함수비는 공기건조상태의 재료를 이용하였으며, 균등계수는 5.0으로 맞추어 시험을 수행하였다. 시험결과 2.10 g/cm³에서의 전단강도의 크기가 1.85 g/cm³일때의 전단강도 보다 상대적으로 더 큰값을 보이는 것으로 나타났다.

2. 대형일면전단시험

본 연구에 사용된 대형일면전단시험기, 석산재료, 시험계획 및 절차 등에 대한 내용은 다음과 같다.

2.1 대형일면전단시험기

대형 일면전단시험기는 약 80평 규모의 단층 철골구조방식의 시험실에 위치하고 있다. 시험실 내부에는 시험기를 제어할 수 있는 계측실과 공구보관실이 위치하고 있으며, 시험실 외부에는 시료를 야적해 놓을 수

있는 야적장이 별도로 위치하고 있다(그림 1).

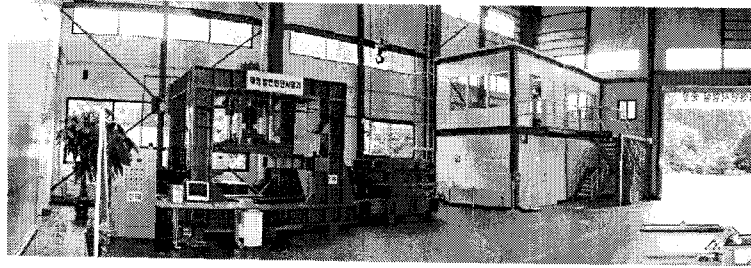


그림 1. 대형 일면전단시험기 전경

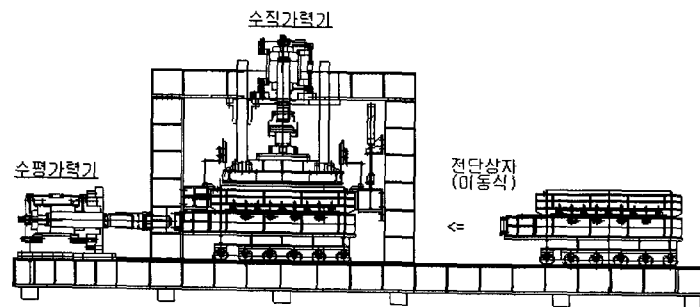


그림 2. 대형 일면전단시험기 단면도

표 1. 대형 일면전단시험기 사양

시험기의 구조	전단부의 구조	전단상자	상부상자크기(cm)	150 × 150 × 30
			하부상자크기(cm)	150 × 150 × 30
		수직가압판	전단상자 사이 간격(cm)	1.0
			길이×폭×두께(cm)	148 × 148 × 31
	재하부의 구조	수직력 재하	수직하중의 고정형상	고정
		수평력 재하	이동상자와 구속방식	하부상자 수평이동
	수평이동에 대한 마찰저감 방식		하부 전단상자 하단 및 상·하부 전단상자 사이에 롤러베어링 설치	
계측항목	수직방향	하중	로드셀 1점 (max 200 ton)	
		변위	LVDT 3점(max 300 mm)	
	수평방향	하중	로드셀 1점 (max 300 ton)	
		변위	LVDT 1점(max 300 mm)	

본 시험기는 국내 자체 기술로 제작한 장비로 특수 설계된 구조프레임을 이용해 조립재료의 최대허용입경이 150 mm 인 시료까지도 시험이 가능하도록 제작되었다. 메인 프레임은 길이 8.5 m, 높이 4.4 m, 폭 2.8 m 의 크기로 직사각형 형태이다. 직접적으로 조립재료를 담는 전단을 시키게 되는 전단상자의 규모는 1.5m(W)×1.5m(W)×0.6m(H)로써 국내 최대규모이다. 시료에 가해지는 수평 및 수직하중은 유압 서보 방식을 채택하여 하중 제어의 정밀도를 높였으며, 수직 및 수평 최대하중은 각각 200 ton과 300 ton까지 가력이 가능하다. 시료의 변위를 측정할 수 있는 변위계는 총 4분으로 수평변위계 1개와 수직 변위계 3개이다. 이 변위계의 최소 측정변위량은 0.1 mm이며, 최대 300 mm까지 변위측정이 가능하다. 기기별 상세 사양은 다음과 같다(표. 1).

특히 본 시험기가 갖고 있는 가장 큰 특징은 기존의 일면전단시험기가 가지고 있는 단점을 일부 보완한 것인데, 가압판이 가압축에 고정되어 전단중에 기울어지지 않으며, 수직, 수평변위계는 가력기 내부에 내부 변위계 형태로 위치하여 변위측정의 정밀도가 높으며, 전단시 전단상자 내부에 발생하는 정(+) 또는 부(-)의 체적팽창이 상부에 작용하는 수직하중을 변화시키지 않도록 자동 조절해 주는 정압시험을 할 수 있는 특징이 있다.

2.2 석산재료의 물리적 특성

시험에 사용된 석산재료는 경북 달성군 가창면 삼산리 지역의 채석장에서 생산하고 있는 사석을 대상 시료로 사용하였다. 석산의 암종은 안산암질 응회암으로 나타났다.

재료의 물리적 특성은 절대건조비중 2.64~2.69, 흡수율 0.71% 및 암석의 일축압축강도는 약 133.9 MPa의 범위로 나타났다(표 2). 이 값들은 건설표준품셈에 의한 암석의 분류시 주로 보통암 이상의 값에 해당하는 수치이다.

표 2. 석산재료의 물리적 특성

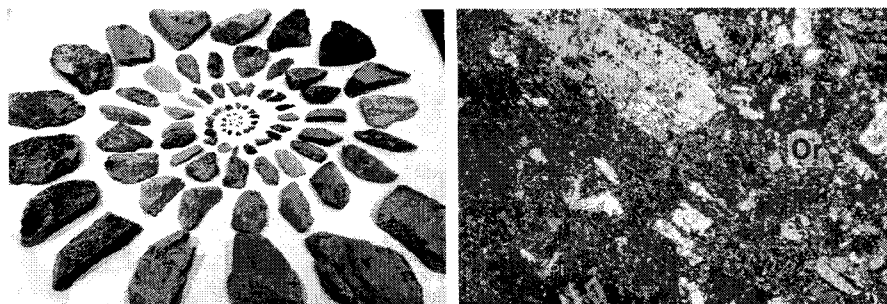
구 분	비 중			흡수율 Q(%)	탄성파속도 (Vp, km/s)	일축압축강도 (MPa)
	절건 ¹⁾	표건 ²⁾	진 ³⁾			
평 균	2.64	2.66	2.69	0.71	5.62	133.9

2.3 시험 계획

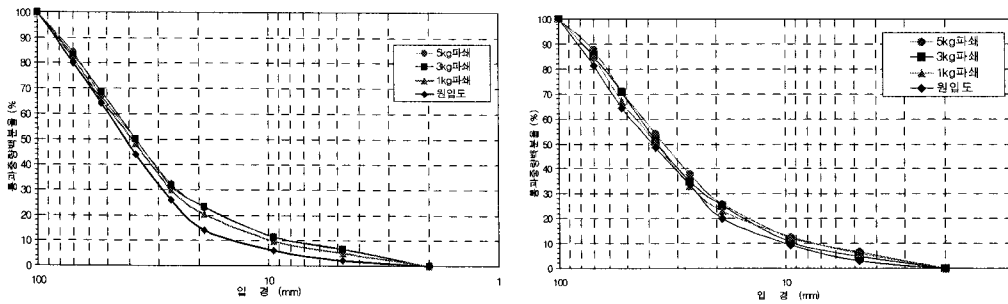
대형일면전단시험은 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 소형전단시험기와는 규모 및 재료특성 등에 있어 매우 다른 부분이 많기 때문에 대형 시험기 고유의 시험절차가 새로 수립되어야 하며 이에 따라 시험이 수행되어야 한다. 이와 관련된 상기 내용은 2004년 이대수(참고문헌 2)에 의하여 작성된 기술기사를 참조하기 바란다.

2.3.1 시험 입경 및 입도

본 시험에 사용된 재료의 입경은 최대 76.3 mm, 최소 2.0 mm로 하였는데 이는 채석장에서 생산하고 있는 입경 최대치수가 이 범위를 넘지 않기 때문이며, 직접전단시험이 가능한 시료의 최대입경은 전단상자 길이의 1/(14~15) 또는 전단상자 높이의 1/(5~6)의 값중 작은 값을 최대입경으로 선택하게 되는데, 대부분의 선행연구결과도 이와 유사한 크기로 시험을 수행하였기에 향후 본 시험결과와 비교의 목적으로 이 범위의 입경을 채택하였다.



(a) 시험재료 형상 및 광학현미경 사진



(b) 시험밀도 1.85 g/cm³ (c) 시험밀도 2.10 g/cm³
 그림 3. 시험재료 사진 및 시험밀도별 시험전후의 입도분포 곡선

일반적으로 댐체체 또는 항만공사에서 사용되는 사석의 입경은 최대 385 mm의 크기까지 사용되고 있다. 이러한 크기의 입경으로 구성된 재료를 시험하기 위해서는 대형시험기의 크기가 이에 맞게 대형화 되어야 하나, 경제성과 시험결과 신뢰도 측면에서 시험기를 무한정 크게 하기에는 무리가 있어 대부분 시험시 사용되는 재료의 입경은 줄여서 시험하게 된다. 이처럼 실제 입경보다 작은 입경으로 시험을 수행하기 위해 공시체를 제작하는 방법에는 상사입도법(Parallel grading method)과 전두입도법(Scalping and replacement method) 등이 있으며, 본 시험에서는 상사입도법을 이용하여 시료를 조제하였다. 시험에 사용된 시험입도는 균등계수가 5.0이 되도록 하여 공시체를 제작하였으며, 재료의 모양과 시험전의 입도분포곡선은 다음과 같다(그림 3).

2.3.2 시험밀도, 수직하중 및 전단속도

시험밀도는 기본적으로 1.85, 2.10g/cm³로 하였으며, 시험에 사용한 수직하중의 크기는 일률적으로 98, 294, 490 kPa의 수직하중을 상재하여 시험을 수행하였다. 전단방식은 변형을 제어방식을 이용하고 전단속도는 전단상자길이의 (0.5~1%)/min정도인 10 mm/min의 속도로 배수전단(CD)시험을 실시하였다.

2.3.3 시험절차

다음은 대형일면전단시험과 관련한 시험절차를 간략하게 서술한 것이다.

(1) 시료 준비

- ① 시험대상이 되는 시료를 준비한다.
- ② 체분석(150, 106.6, 76.3, 50.8, 38.1, 25.4, 19.1, 9.52, 4.75, 2.0mm)을 실시해 입도분포별 시료를 분리한다.
- ③ 시험에 맞는 입도(균등계수)로 시료를 제조한다.

(2) 공시체 성형

- ① 시험 시료는 공기건조상태가 되도록 그늘지고 서늘한 곳에서 24시간이상 건조시킨다.
- ② 전단상자에 시험밀도에 맞게 3층으로 나누어 시료를 넣는다.
- ③ 각 층별로 충격식램머(자중 90 kg)를 이용하여 소요밀도가 되도록 층별 다짐을 실시한다.
- ④ 시료제작이 완료되면 전단상자를 시험위치로 이동시킨다.

(3) 수직하중 재하, 시료 전단 및 결과 정리

- ① 제작이 완료된 공시체 상부에 가압판을 미세하게 상재 시킨 후, 소요수직하중 또는 98, 294, 490 kPa의 상재하중을 각 시험 단계별로 상재시킨다. 이때 너무 순간적인 큰 하중을 상부에 가압하면 시료에 너무 많은 파쇄가 발생하여 강도에 영향을 줄 수 있으므로, 응력제어를 통하여 최초 98 kPa을 1분에 걸쳐 상재시키고 5분이 지난 후, 다음 상재하중까지 증압시킨다. 증압이 완료되면 30분정도 압밀을 시켜 시료의 재배열이 완료되도록 한다.
- ② 소요 수직하중에 도달한 후, 일정시간이 지나면 전단하중 10 mm/min의 속도로 전단을 한다.
- ③ Peak강도 발생 후 전단변형률 약 20 % 까지 추가 전단을 시킨다.

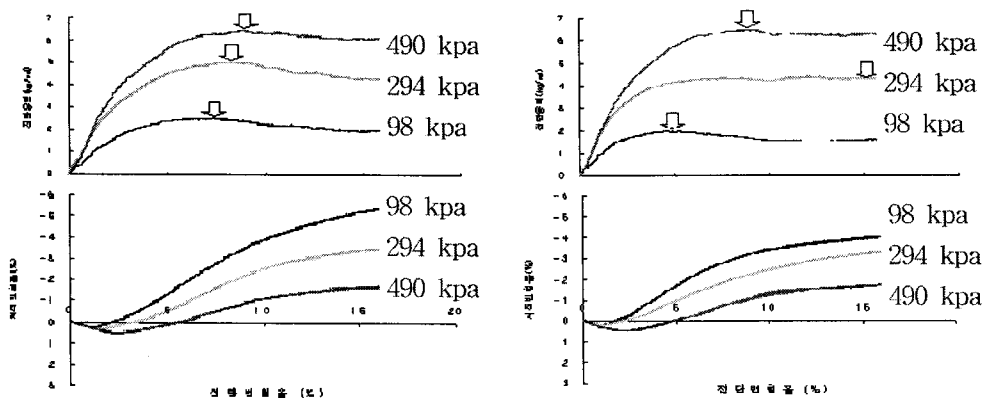
- ④ Peak강도가 없을 시에는 전단변형률 15 %를 Peak강도로 본다.
- ⑤ 전단응력-전단변형률 곡선을 통해 전단강도를 산출한다.
- ⑥ 시험후 채분석을 실시하여 입자의 파쇄율을 분석한다.
- ⑦ 시험결과를 정리, 분석한다.

3. 시험결과 및 분석

석산재료를 바탕으로 대형일면전단시험을 수행한 결과, 재료의 파쇄율을 나타내는 시험전후의 입도분포는 그림 3에 원입도와 비교하여 도시하였으며, 전단변형률과 전단응력, 체적변형률과의 관계는 그림 4에 나타내었다. 더불어 전단강도 정수를 도출하기 위한 전단응력-수직응력 곡선은 그림 5에, 강도 정수는 표 3에 나타내었다.

우선 재료의 파쇄율을 살펴보면, 경상지역은 수직응력에 따라 7 %~11 %범위의 파쇄율을 보이며, 시험밀도가 높은 곳에서 재료의 파쇄가 상대적으로 더 발생하였다. 그 이유는 시험밀도를 맞추기 위하여 수행하는 다짐작업에서 다짐에너지가 재료에 가해져 축적되고, 낮은 밀도일때 보다 재료간 인터록킹 면적이 많아지면서 파쇄율이 커지는 것으로 판단된다.

그림 4에는 전단변형에 따른 체적팽창곡선을 그림으로 도시하였는데, 특이하게도 기존의 시험결과(참고문헌 1)와는 다르게 전단변형-체적팽창곡선에서 모든 결과가 조밀한 모래와 같은 거동을 하고 있는 것으로 나타났다. 기존의 일부시험에서는 낮은 수직하중에서의 체적팽창곡선은 느슨한 모래와 같은 거동하는 것으로 나타났었다. 이는 시험에 사용한 재료가 암분류상 보통암 이상의 강도를 가지고 있는 것으로 나타났는데, 암의 특성중 일축압축강도가 재료의 거동에도 영향을 주고 있음을 보여주는 것이라 하겠다.



(a) 시험밀도 1.85 g/cm³

(b) 시험밀도 2.10 g/cm³

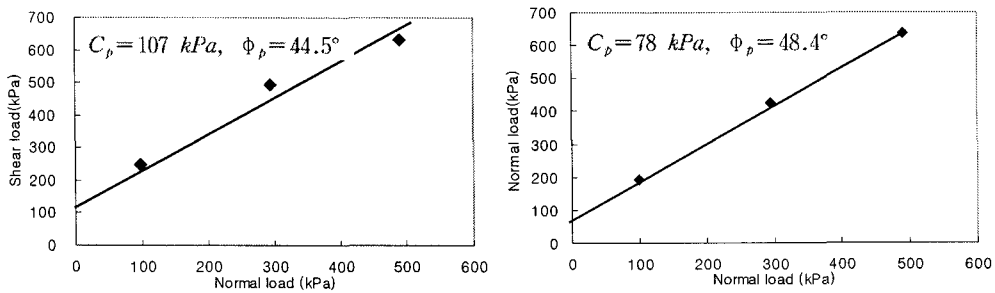
그림 4. 시험밀도별 시험결과

전단강도는 시험결과 일부 겉보기 점착력이 존재하는 것으로 나타나고 있으나, 본 고에서는 안전측의 구조물 설계를 위하여 전단강도중 내부마찰각만을 비교분석하였으며, 조립재료의 경우 겉보기 점착력은 대부분 무시하여 사용하는 것으로 알려져 있다(참고문헌 3).

그림 5에는 시험밀도별 내부마찰각의 크기를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 시험밀도 2.10 g/cm³의 조립재료의 내부마찰각(48.4°)의 크기가 시험밀도 1.85 g/cm³의 내부마찰각(44.5°)보다 약 8%정도 큰 값을 갖는 것으로 나타나 시험밀도가 높은 조립재료의 내부마찰각이 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 시험밀도가 큰 경우에 더 큰 내부마찰각을 갖는 것은 재료안에 있는 재료의 공극이 작아짐에 따라 상대적으로 마찰을 일으키는 면적이 많아지게 되므로 내부마찰각의 크기가 커지는 것은 당연한 결과라 하겠다.

더불어, 시험결과 나타난 내부마찰각의 크기는 기존의 시험결과(38.1°~44.0°, 참고문헌 1) 나타난 내부마찰각의 크기보다 더 큰 값으로 나타나고 있는데, 이는 재료의 모암특성인 일축압축강도와 비례하는 양상을 보이고

있다. 즉, 재료의 기본 물성인 일축압축강도의 크기가 커질 경우 같은 밀도에서는 일축압축강도가 더 큰 재료에서 내부마찰각이 더 커진다는 것을 알 수 있다.



(a) 시험밀도 1.85 g/cm³ (b) 시험밀도 2.10 g/cm³

그림 5. 시험밀도별 전단강도 결과

표 3. 시험 결과

구 분		내부마찰각 (°)	비 고
시험밀도 (g/cm ³)	1.85	44.5	
	2.10	48.4	

4. 결 론

본 연구에서는 시험밀도에 따른 조립재료의 전단강도 특성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시험에 사용한 조립재료는 경상도지역에서 생산하고 있는 안산암질 응회암으로써, 재료의 물리적 특성은 절대건조비중 2.64~2.69, 흡수율 0.71% 및 암석의 일축압축강도는 약 133.9 MPa로써 보통 암이상의 값을 갖는 재료이다.
- (2) 시험결과, 시험밀도 1.85 g/cm³와 2.10 g/cm³의 내부마찰각은 각각 44.5°와 48.45°도로 나타나 시험 밀도가 상대적으로 높은 재료가 약 8 %정도 더 크게 나타났다.
- (3) 재료의 파쇄율은 시험밀도가 높은 곳에서 재료의 파쇄가 상대적으로 더 발생하였는데 이는 높은 시험밀도를 맞추기 위하여 수행하는 다짐작업에서 다짐에너지가 재료에 가해져 축적되고, 낮은 밀도일 때 보다 재료간 인터록킹 면적이 많아지면서 파쇄율이 커지는 것으로 판단된다.

본 연구는 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행한 『구조물 단면절감을 위한 조립질 토목재료 변형 특성 연구』의 일부이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이대수, 김경열, 홍성연, 조화경, 황성춘(2005), “대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(I)”, 한국지반공학회논문집, 제21권 제6호, pp81-91.
2. 이대수, 김경열, 홍성연(2004), “조립질 토목재료 강도평가를 위한 대형 일면전단시험기 개발”, 한국지반공학회지, 11월호, pp8-16
3. 日本土質工學會(1985), “組立材料の變形強度”, pp.5-85