

## 대형직접전단시험을 활용한 국내 조립질 재료의 전단강도 특성 Shear Strength of Coarse Grained Materials In the Domestic Crushed Stone Based on Large Scale Shear Test

이대수<sup>1)</sup>, Dae-Soo Lee, 김경열<sup>2)</sup>, Kyoung-Yul Kim, 홍성연<sup>3)</sup>, Sung-Yun Hong

<sup>1)</sup> 한전 전력연구원 책임연구원, P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

<sup>2)</sup> 한전 전력연구원 선임연구원, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute(patric@kepri.re.kr)

<sup>3)</sup> 한전 전력연구원 일반연구원, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

**SYNOPSIS** : The coarse grained materials which is produced in the domestic stony mountains are used as principle materials in the construction sites such as dams, ports, pavement structures and etc. Despite using of various fields like this, There is few apparatuses to experiment these materials in the country. some design parameters of the structures until these days was used from the result of former research abroad. Hereupon, We have developed the large scale direct shear test apparatus and we conduct research in order to get a shear strength of the coarse grained materials from the domestic stony mountains in Kyung-gi, Choong-chung and Kyung-sang province. As results of the test, it was revealed that the internal friction was ranging from 38.6° to 44.5° and the cohesion was from 1.1kg/cm<sup>2</sup> to 1.7kg/cm<sup>2</sup> depending on the local rock conditions.

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

### 1. 서 론

“조립질 토목재료”라 함은 쇄석 또는 자갈 등을 일컫는 말로써, 국내의 많은 건설현장에서 사용되고 있는 기본재료이기도 하다. 우선 본 재료들이 사용되고 있는 곳들을 대표적으로 살펴보면 국책사업의 일환인 댐, 항만시설, 원자력폐기물 저장소, 철도노반 및 도로 등을 들 수 있다.

하지만 이처럼 사용되고 있는 분야가 방대한 반면에 조립질 토목재료들의 특성 규명을 위한 시험절차 및 장치의 개발은 매우 미미한 실정이다. 국내에서는 설계에 필요한 조립재료의 물성값들을 시험에 의존하기 보다 외국에서 수행된 경험치들과 참고문헌에 의존하여 설계를 수행하고 있어 구조물의 안정성에 대한 정확한 판단을 하기가 어렵고 과대안전측의 설계가 이루어질 가능성이 많다. 반면 외국의 경우는 항만시설, 대형 댐 및 도로 성토 등과 같은 곳에 사용되는 조립질 토목재료는 반드시 특성시험을 실시하여 그 특성값들을 바탕으로 설계를 수행하고 있다.

한편, 조립재료는 다른 지반재료와는 공학적특성에 있어 많은 차이를 나타내는 것으로 나타나고 있는데, 모암의 종류, 입자의 크기(Scale effect), 시료밀도 및 다짐에너지에 따른 입자의 파쇄 등에 의해 실제 조립재료가 갖고 있는 것과는 많은 차이를 보인다. 조립재료를 포함하는 지반의 거동은 큰 입자의 영향에 의해 기존의 토질역학 이론으로는 그 특성을 설명하기 곤란하며, 기본적인 성질에 대한 자료가 부족한 경우가 많아 이에 대한 실험적 연구가 더욱더 필요한 실정이다. 더불어, 조립재료와 같은 큰 입자의 영향을 파악하기 위해서는 그에 맞는 대형시험이 필수적이라 하겠다.

본 연구에서는 전국을 5개 권역(경기, 충청, 강원, 호남, 경상 지역)으로 나누어 대형일면전단시험기(전단상자 크기 : 가로×세로×높이=1500mm×1500mm×600mm)을 이용하여 각 지역별로 생산중인 석산재료(최대입경 76.3mm, 최소입경 2.0mm)에 대한 전단강도 특성을 분석하기 위한 시험을 수행중에 있으며, 현재까지 시험이 완료된 경기, 충청, 경상 지역에 대한 전단강도 특성을 분석하였다.

## 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

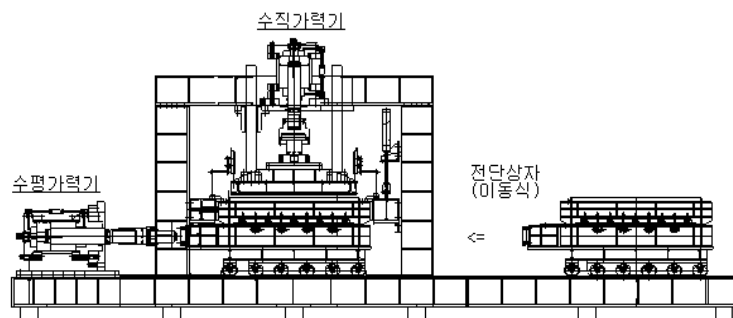


그림 2. 대형 일면전단시험기 단면도

본 시험기는 국내 자체 기술로 제작한 장비로 특수 설계된 구조프레임을 이용해 조립재료의 최대허용입경이 150mm 인 시료까지도 시험이 가능하도록 제작되었다. 메인 프레임은 길이 8.5m, 높이 4.4m, 폭 2.8m의 크기로 직사각형 형태이다. 직접적으로 조립재료를 담아 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 것

인데, 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.

표 1. 대형 일면전단시험기 사양

시험 장치의 구조	전단부의 구조	전단상자	상부상자크기(cm)	150 × 150 × 30
			하부상자크기(cm)	150 × 150 × 30
		수직 가압판	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 사이에롤러베어링 설치	
계측 항목	수직방향	하중	로드셀 1점 (max 200ton)	
		변위	LVDT 3점(max 300mm)	
	수평방향	하중	로드셀 1점 (max 300ton)	
		변위	LVDT 1점(max 300mm)	

## 2.2 석산재료의 물리적 특성

시험에 사용된 석산재료는 경기도 안성시 대덕면 소내리, 충남 금산군 진산면 막현리 및 경북 달성군 가창면 삼산리 지역의 채석장 3곳에서 생산하고 있는 사석을 대상시료로 사용하였다. 각 지역별 석산의 암종은 경기지역이 화강암, 충청지역은 화성암중 현무암, 경상지역은 안산암이 주를 이룬다.

각 지역별 재료의 물리적 특성은 절대건조비중은 2.61~2.71, 흡수율은 0.21%~0.71% 및 암석의 일축압축강도는 약 612kg/cm<sup>2</sup>~1,366kg/cm<sup>2</sup>의 범위로 나타났다(표 2). 이 값들은 건설표준품셈에 의한 암석의 분류시 주로 연암, 보통암, 경암의 값에 해당하는 수치이다.

표 2. 석산재료의 물리적 특성

구 분	비 중		흡수율 (%)	일축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	비 고
	절건	표건			
경기	2.71	2.72	0.21	612.50	
충청	2.61	2.63	0.65	1,093.00	
경상	2.64	2.66	0.71	1,366.00	

## 2.3 시험 계획

대형일면전단시험은 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 소형전단시험기와는 규모 및 재료특성 등에 있어

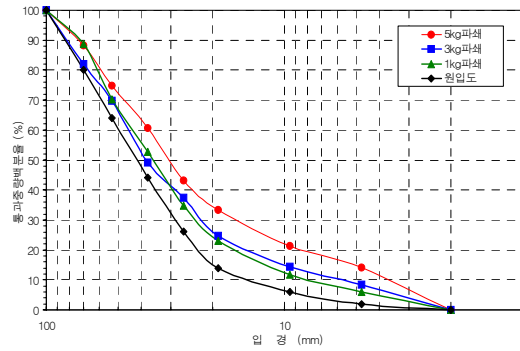
매우 다른 부분이 많기 때문에 대형 시험기 고유의 시험절차가 새로 수립되어야 하며 이에 따라 시험이 수행되어야 한다. 이와 관련된 상기 내용은 2004년 이대수(참고문헌 1)에 의하여 작성된 기술기사를 참조하기 바란다.

### 2.3.1 시험 입경 및 입도

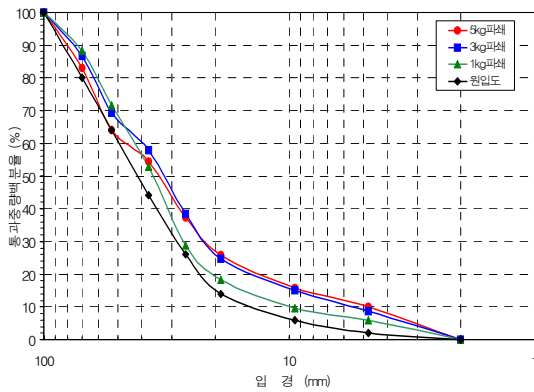
본 시험에 사용된 재료의 입경은 최대 76.3mm, 최소 2.0mm로 하였는데 이는 채석장에서 생산하고 있는 입경 최대치수가 이 범위를 넘지 않기 때문이며, 직접전단시험이 가능한 시료의 최대입경은 전단상자 길이의 1/(14~15) 또는 전단상자 높이의 1/(5~6)의 값중 작은 값을 최대입경으로 선택하게 되는데, 대부분의 선행연구결과도 이와 유사한 크기로 시험을 수행하였기에 향후 본 시험결과와 비교의 목적으로 이 범위의 입경을 채택하였다. 일반적으로 댐제체 또는 항만공사에서 사용되는 사석의 입경은 최대 385mm의 크기까지 사용되고 있다. 이러한 크기의 입경으로 구성된 재료를 시험하기 위해서는 대형시험기의 크기가 이에 맞게 대형화 되어야 하나, 경제성과 시험결과와의 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, 4).



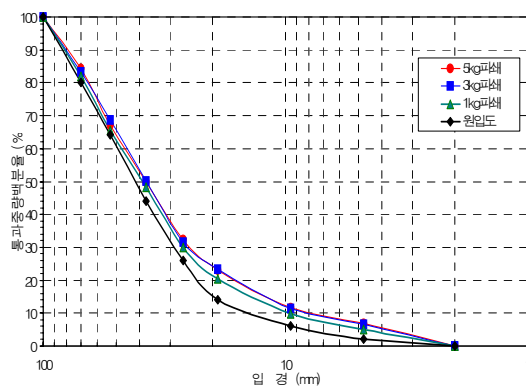
그림 3. 시험에 사용된 석산재료의 형태



a. 경기지역 입도분포



b. 충청지역 입도분포



c. 경상지역 입도분포

그림 4. 각 지역별 시험 전후의 입도분포곡선

### 2.3.2 시험밀도, 수직하중 및 전단속도

시험밀도는 기본적으로 1.85g/cm<sup>3</sup>로 통일하였으며, 시험에 사용한 수직하중의 크기는 일률적으로 1, 3, 5 kg/cm<sup>2</sup>의 수직하중을 상재하여 시험을 수행하였다. 전단방식은 변형을 제어방식을 이용하고 전단속도는 전단상자길이의 (0.5~1%)/min정도인 10mm/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 90kg)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 1, 3, 5 kg/cm<sup>2</sup>의 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 1kg/cm<sup>2</sup>을 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 10mm/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.
- ⑩ 시험후 체분석을 실시하여 입자의 파쇄율을 분석한다.
- ⑪ 시험결과를 정리, 분석한다.

## 3. 시험결과 및 분석

경기, 충청, 경상지역의 석산재료를 바탕으로 대형일면전단시험을 수행한 결과, 재료의 파쇄율을 나타내는 시험전후의 입도분포는 그림 4에 원입도와 비교하여 도시하였으며, 전단변형률과 전단응력, 체적변형률의 관계를 그림 5에 나타내었다. 더불어 전단강도 정수를 도출하기 위한 전단응력-수직응력 곡선은 그림 8에, 강도 정수는 표 3에 나타내었다.

우선 각 지역별 재료의 파쇄율을 살펴보면, 경기지역의 파쇄율은 수직하중의 크기에 따라 11%~19%, 충청지역은 11%~15% 그리고 경상지역은 7%~11%범위의 파쇄율을 보인다. 즉, 파쇄율의 크기는 경기>충청>경상지역의 순으로 나타났으며, 이중 가장 큰 파쇄율을 보이는 지역은 경기지역 석산재료로 충청지역에 비해서는 1.3배, 경상지역에 비해서는 1.7배정도 더 큰 파쇄율을 보인다(그림 6).

전단변형에 따른 각 지역별 침투강도(최대전단응력)의 크기는 수직응력의 크기와 상관없이 경상>충청>경기지역의 순으로 크게 나타났으며, 파쇄율과는 반비례하는 현상을 보인다. 즉, 파쇄율이 클수록 침투강도는 작아지는 것으로 나타났으며, 이는 전단변형률-체적팽창률 곡선에서도 잘 나타나고 있다(그림 5).

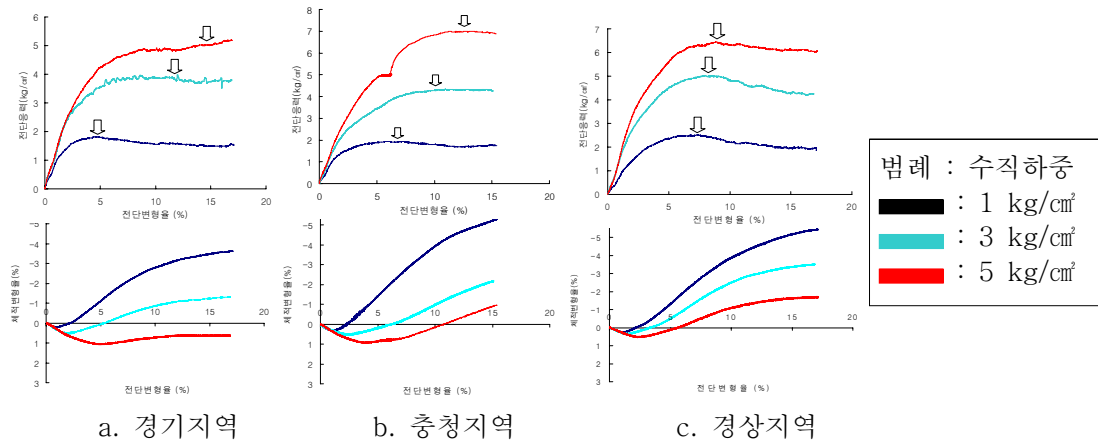


그림 5. 각 지역별 전단변형률-전단응력-체적변형률 곡선

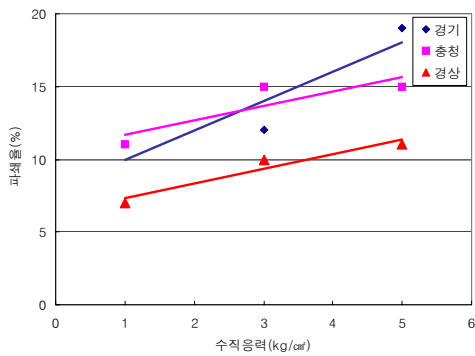


그림 6. 수직응력 vs 파쇄율 곡선

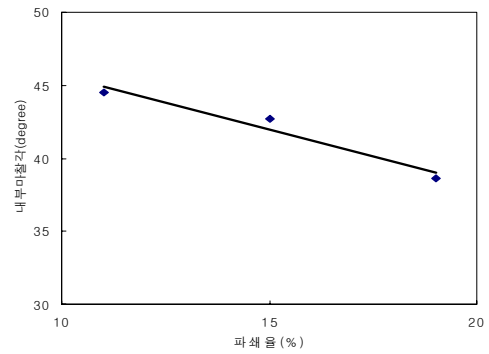


그림 7. 파쇄율(수직응력 5kg/cm<sup>2</sup>) vs 내부마찰각

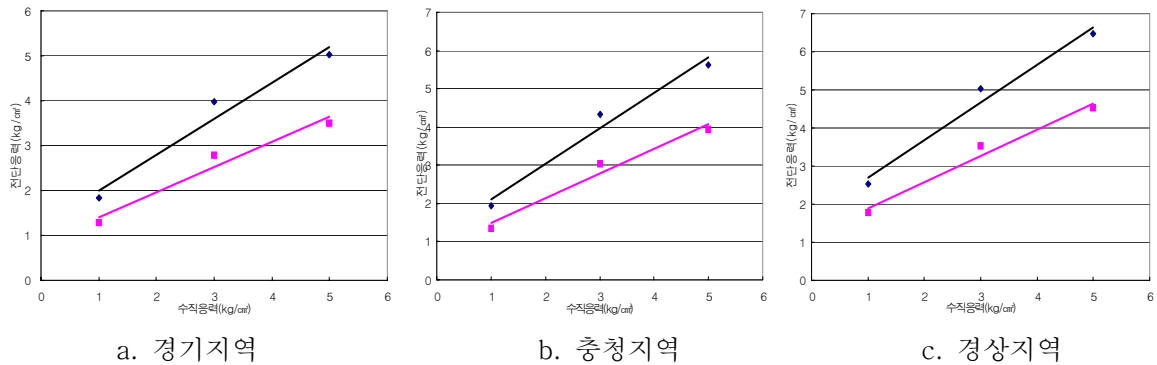


그림 8. 각 지역별 전단응력-수직응력 곡선(■ : 피크강도, ■ : 잔류강도)

표 3. 대형일면전단시험에 의한 전단강도정수 산정 결과

구 분	점착력 (kg/cm <sup>2</sup> )		내부마찰각 (°)	
	피크	잔류	피크	잔류
경 기	1.1	0.7	38.6	30.5
충 청	1.1	0.8	42.7	32.8
경 상	1.7	1.2	44.5	34.5

다시 말해, 경기지역 석산재료의 체적팽창곡선은 다른 두 지역의 재료보다도 상대적으로 낮은 팽창율을 보이고 있는데, 전단시 입자간의 마찰운동에 따른 파쇄가 상대적으로 더 많이 발생하면서 입자간의 재배열이 이루어져 팽창현상이 줄어드는 것으로 판단된다. 이는 반대로 파쇄율이 적은 경상지역의 재료는 파쇄율의 크기가 적은 반면 체적팽창현상은 커지는 것을 알 수 있다.

각 지역별 강도정수중 내부마찰각의 크기는 경상지역(44.5°)이 충청지역(42.7°)에 비해서 1.8°, 경기지역(38.6°)에 비해서는 5.9°정도 더 크게 나타났으며, 점착력도 경상지역(1.7kg/cm<sup>2</sup>)이 경기와 충청지역(1.1kg/cm<sup>2</sup>)에 비해 더 크게 나타나고 있다(표 3).

각 재료의 파쇄율과 내부마찰각의 상관관계를 분석한 결과(그림 7), 재료는 파쇄율이 증가할수록 내부마찰각이 감소하는 것으로 나타났으며, 큰 내부마찰각을 발휘하기 위해서는 입자의 파쇄가 적게 발생하는 재료를 선택해야 하는 것으로 확인되었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 각 지역별 석산재료의 전단강도 특성이 서로 다른 원인은 지역별로 생산 중인 석산재료의 모암의 종류와 풍화도에 차이가 있는 것이 주 원인으로 판단되며, 각 지역의 석산재료를 이용하여 구조물을 설계시 대형시험을 통한 강도정수의 확인이 선행되어야 합리적이고 신뢰도 높은 구조물을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 전국을 5개 권역(경기, 충청, 강원, 호남, 경상 지역)으로 나누어 각 지역별로 생산 중인 석산재료에 대한 전단강도 시험을 수행하고 그중 시험이 완료된 경기, 충청, 경상 지역에 대한 전단강도 특성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시험결과, 경기지역 석산재료의 점착력과 내부마찰각은 1.1kg/cm<sup>2</sup>, 38.6°, 충청지역은 1.1kg/cm<sup>2</sup>, 42.7° 그리고 경상지역은 1.7kg/cm<sup>2</sup>, 44.5°로 나타나, 경상>충청>경기지역 순으로 큰 값을 보이고 있다.
- (2) 각 지역별 재료의 파쇄율은 경기>충청>경상지역 순으로 나타났으며, 파쇄율이 커질수록 전단강도는 작아지는 것으로 나타났다. 더불어, 수직응력에 따른 파쇄율의 크기는 수직응력의 크기가 커질수록 커지는 것으로 나타났다.
- (3) 석산재료의 전단강도는 각 지역별로 위치한 모암의 종류와 풍화정도에 따라 점착력과 내부마찰각의 크기가 다르게 확인되었으며, 각 지역의 석산재료를 이용하여 구조물을 설계시 대형시험을 통한 강도정수의 확인이 선행되어야 합리적이고 신뢰도 높은 구조물을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행 중인 『구조물 단면절감을 위한 조립질 토목재료 변형특성 연구』의 일부이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 이대수(2004), “조립질 토목재료 강도평가를 위한 대형 일면전단시험기 개발”, 한국지반공학회지, 11월호, pp8-16
2. 신동훈(2002), “Rock재료의 내부마찰각의 구속압 의존성”, 한국지반공학회논문집, pp253-258
3. KOWACO(1999), Standardization of Large Scale Shear Tests for Rock Materials of a Rockfill Dam