

## 쇄석-지오텍스타일간의 접촉면 전단강도 산정

### Interface shear strength between Crushed Stone and Geotextile

이 석 원<sup>1\*</sup> Lee, Seok-Won

윤 주 문<sup>2</sup> Youn, Choo-Moon

안 현 호<sup>2</sup> An, Hyun-Ho

서 병 옥<sup>2</sup> Seo, Byoung-Wook

#### ABSTRACT

Large-scale direct shear tests were conducted in order to evaluate both the shear strength of crushed stone itself and the interface shear strength between crushed stone and geotextile. Total three types of geotextile (i.e. one woven geotextile and two nonwoven geotextiles) were used in the experimental program, considering two different values for the unit weight of crushed stone. Total fifteen tests were conducted in this study. It has been found from the experimental results that the friction angles of crushed stone itself were 47° and 57° under the unit weights of crushed stone being 1.4 t/m<sup>3</sup> and 1.5 t/m<sup>3</sup>, respectively. Interface friction angle between nonwoven geotextile and crushed stone showed 39° for type A indicating an efficiency of 83% and 42° for type B indicating an efficiency of 89%. Similarly, interface friction angle between woven geotextile and crushed stone showed 39° indicating an efficiency of 83%.

#### 요 지

쇄석의 전단강도와 쇄석과 부직포사이의 접촉면 전단강도를 산정하기 위해서 본 연구에서는 대형직접전단시험기를 사용하였다. 두 개의 서로 다른 쇄석의 단위중량을 한 종류의 직포와 두 종류의 부직포인 총 3가지 형태의 토목섬유에 고려하였다. 본 연구에서는 총 15번의 시험을 수행하였다. 그 결과는 쇄석의 단위중량이 각각 1.4 t/m<sup>3</sup>과 1.5 t/m<sup>3</sup>일 때 47°와 57°의 내부마찰각을 나타내었다. 부직포와 쇄석의 접촉면 마찰각은 쇄석의 내부마찰각에 비하여 A타입에서 39°로 83%의 효율을 보였으며 B타입은 42°로 89%의 효율을 나타내었다. 이와 비슷하게 직포와 쇄석의 접촉면 마찰각은 39°로 83%의 효율을 나타내어 비교적 거칠기가 작은 A타입 부직포와 거의 동일한 결과를 보였다.

**Key words :** Crushed stone, Direct shear test, Geotextile, shear strength

#### 1. 서 론

최근 영종도, 부산, 광양, 군산 등의 지역에서 대규모 연약지반 관련공사가 설계·시공되고 있으며 연약지반처리를 위한 각종 지반개량공법이 적용되고 있다. 특히 영종도 신공항, 양산물금지구, 남악신도시 등 대규모 현장에서 모래의 대체 재료로 쇄석을 적용한 바 있으며 적용 빈도가 증가 추세이나 쇄석 재료의 공학적 특성 및 쇄석층의 거동 특성 등에 대한 연구는 미흡하고 설계적용기준도 없는 상

태이다. 즉, 국내는 모래 자원의 부존량 고갈 및 단가 상승 등의 문제로 모래에 비하여 경제성이 우수한 재료로의 전환이 필요하며, 이러한 대체 재료를 적용하기 위해서는 연구가 요구되나 아직까지 실험 및 이론적인 연구가 많이 이루어지지 않고 있다. 이러한 의미에서 본 연구에서는 쇄석 자체의 전단강도 및 쇄석-지오텍스타일 상호간의 접촉면 전단강도(interface shear strength)를 측정하기 위하여 대형직접전단시험을 수행하였다. 본 연구에서는 쇄석과 3종류의 지오텍스타일(geotextile), 즉 2종류의 부직포(non-

1\* 건국대학교 사회환경시스템공학과 조교수 (Assistant Professor, Civil and Environmental System Engineering, Konkuk Univ, E-mail: swlee@konkuk.ac.kr)

2 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Graduate Student, Civil and Environmental System Engineering, Konkuk Univ)

woven geotextile)와 1종류의 직포(woven geotextile)를 각각 사용하였다. 전단강도를 산정하는데 고려한 접촉면은 쇄석자체의 대형직접전단시험, 쇄석과 부직포-A의 접촉면전단시험, 쇄석과 부직포-B의 접촉면전단시험 그리고 쇄석과 직포의 접촉면전단시험이며, 시험 횟수는 쇄석의 직접전단시험은 1.4 t/m<sup>3</sup>, 1.5 t/m<sup>3</sup> 단위중량에서 각각 3회씩 총 6회 실시하였으며, 쇄석과 지오텍스타일(3종류)의 접촉면에서는 쇄석의 단위중량을 1.4 t/m<sup>3</sup>로 사용하여 각각 3회씩 총 9회를 실시하였다.

## 2. 기존 문헌 고찰

### 2.1 문헌 고찰

최근 지오텍스타일(geotextile)과 같은 토목섬유(geosynthetics)의 사용량이 급격히 증가하여, 이러한 토목재료들 간의 접촉면 및 흙과의 접촉면에서의 접촉면 전단강도(interface shear strength)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 초기의 연구들은 대부분 흙에서 사용된 직접전단시험기를 개조하여 사용되었으나, 이는 접촉면 전단강도를 정확히

측정하기에는 크기영향(size effect)으로 인하여 많은 문제점을 발생시키고 있다. 따라서 미국 ASTM에서도 토목재료들간의 접촉면 전단강도는 최소 전단상자의 크기를 본 연구에서 수행하듯이 300×300mm로 추천하고 있다.

본 연구에서는 기존에 수행된 다양한 접촉면 전단시험 중에서 흙과 지오텍스타일 사이의 접촉면에 관한 시험결과를 중심으로 문헌고찰을 수행하였다. Martin et al. (1984)은 여러 종류의 흙과 지오텍스타일 사이의 마찰각을 다음 표 1과 같이 제시하였다. 사용한 수직응력(normal stress)은 2 psi에서 15psi에 이른다. Williams and Houlihan(1987)은 여러 종류의 흙과 지오텍스타일 사이의 마찰각을 다음 표 2와 같이 제시하였다. 사용한 수직하중은 100, 250, 500 lb이다. Eigenbrod and Locker(1987)는 여러 종류의 부직포(nonwoven geotextile)과 직포(woven geotextile)를 사용하여 모래 및 점토와의 마찰각을 측정하였다. 평균 마찰각을 정리하면 다음 표 3과 같다. 주재우 등 (2003)은 전단시험 방법을 고정법(본 연구에서 수행한 방법)과 자유법으로 나누어 모래와 부직포(nonwoven geotextile)간의 마찰각을 다음 표 4와 같이 제시하였다. 사용한 수직응력(normal stress)은 0.5, 1.0, 1.5kg/cm<sup>2</sup> 이다.

표 1. 흙과 지오텍스타일 사이의 마찰각(Martin et al., 1984)

Geotextile \ Sand	Concrete sand( $\phi = 30^\circ$ )	Ottawa sand( $\phi = 28^\circ$ )	Mica schist( $\phi = 26^\circ$ )
CZ 600	30°(1.00)	26°(0.93)	25°(0.96)
Typar 3401	26°(0.87)	-	-
Polyfilter X	26°(0.87)	-	-
500 X	24°(0.80)	24°(0.86)	23°(0.88)

\* ( )안의 숫자는 접촉면에서의 전단각을 흙의 전단각으로 나눈값 (= tan (흙과 섬유와의 마찰각) / tan (흙 자체의 마찰각))을 의미하며 접촉면의 효율을 표시함.

표 2. 흙과 지오텍스타일 사이의 마찰각(Williams and Houlihan, 1987)

Geotextile \ Soil	Concrete sand( $\phi = 36^\circ$ )	Ottawa sand( $\phi = 38^\circ$ )	Sand-5% clay( $\phi = 36^\circ$ )
Typar 3401	27°(0.75)	25°(0.66)	22°(0.61)
Trevira 1155	34°(0.94)	28°(0.74)	27°(0.75)
Nicolon 900-M	35°(0.97)	35°(0.92)	31°(0.86)

표 3. 흙과 지오텍스타일 사이의 마찰각(Eigenbrod and Locker, 1987)

Geotextile \ Soil	Concrete sand( $\phi = 36^\circ$ )	Silica sand( $\phi = 33^\circ$ )	Clay, CH-MH( $\phi = 25^\circ$ )	Clay, CL( $\phi = 34^\circ$ )
Nonwoven geotextile	34°(0.93)	32°(0.96)	16°(0.62)	27°(0.78)
Woven geotextile	Direction of warp	32 (0.86)	-	-
	Direction of weft	29°(0.76)	-	16°(0.61)

표 4. 흙과 지오텍스타일 사이의 마찰각(주재우 등, 2003)

시험종류	마찰각, $\phi$ (°)
모래	28°
부직포/모래 (고정법)	30°
부직포/모래 (자유법)	27°

### 2.2 문헌 고찰 결과

본 연구에서 수행한 문헌 고찰 결과 다음과 같은 사항들을 발견할 수 있었다. 흙과 토목섬유를 포함한 토목재료간의 전단강도는 흙의 조밀도 등에 따라 그 값이 변화하므로 같은 흙이라도 시험자에 따라 많은 변화를 보여주고 있다. 위에서 제시된 여러 결과들은 이러한 연유로 같은 모래에서도 값이 변화할 수 있으며, 따라서 본 연구에서 수행한 시험결과와는 직접적으로 결과를 비교할 수 없다. 다만 아래에서 서술된 것처럼 다른 시험과의 비교분석은 접촉면에서의 효율성을 상대비교 함으로써 수행된 시험결과와의 타당성을 검토할 수 있다.

위의 표 1~3에서 제시한 ( )안의 값은 접촉면에서의 전단각을 흙의 전단각으로 나눈 값인 효율 E ( $E = \tan \delta / \tan \phi$ , 여기서,  $\delta$  : 흙과 섬유와의 마찰각,  $\phi$  : 흙자체의 마찰각)을 의미한다. 즉 다른 재질과 접하고 있는 흙 자체의 강도와 비교해서 접촉면에서의 강도의 비(효율)를 표시한다. 따라서 흙과 다른 토목재료가 접하여 있는 경우, 접촉면에서의 전단강도는 항상 흙 자체의 전단강도보다 작고 접촉면에서 충분히 지지할 수 있는 경우에는 흙에서 파괴가 일어남을 알 수 있다. 흙 자체에서 파괴가 일어나는 경우는 접촉면 근처의 흙에서 전단파괴가 일어난다. 이러한 연유로 효율은 항상 100% 이하로 산정된다. 만약 어떠한 시험결과가 효율이 100% 이상을 보이는 경우는 접촉면이나 흙에서 파괴가 일어나는 것이 아니라 토목재료의 인장력이 발생하고 있음을 암시한다.

표 5. 지오텍스타일의 물성

구 분	단 위	부직포 A	부직포 B	직포	시 험 방 법
재 질		Polyester	Polyester	Polyester	
중 량	$g/m^2$	600	1,000	540	KSK ISO 9864
인장강도	kgf/in	127(5t/m)	254(10t/m)	381	KSK 0743
인장신도	%	50 이상	50 이상	30 이상	KSK 0743
투수계수	cm/sec	$(1\sim9)\times 10^{-1}$	$(1\sim9)\times 10^{-1}$	$(1\sim9)\times 10^{-4}$	KSK ISO 11058
봉합강도	kgf/in	127(5t/m)	254(10t/m)	381	KSK 0530

### 3. 시험 조건

#### 3.1 토목재료의 특성

본 연구를 위하여 사용된 쇄석은 사진 1과 같이 현장 시공 시 사용가능한 일반적인 쇄석을 채취하여 사용하였다. 지오텍스타일은 아래 표 5와 같이 부직포(사진 2) 및 직포 두 종류를 사용하였다.

#### 3.2 시험장치 및 시험

본 연구의 전단시험에 사용된 대형직접전단시험기는 사진 3과 같이 전단상자가 300×300×200mm로 구성되어 있고, 수직하중은 공기압으로 가해진다. 수평하중은 로드 셀(load cell)의 전기신호를 데이터 로거(data logger)를 통



사진 1. 사용된 쇄석

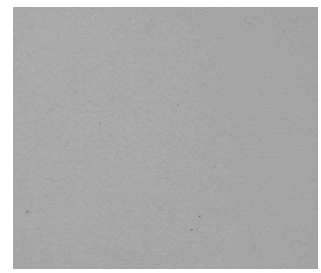


사진 2. 사용된 부직포

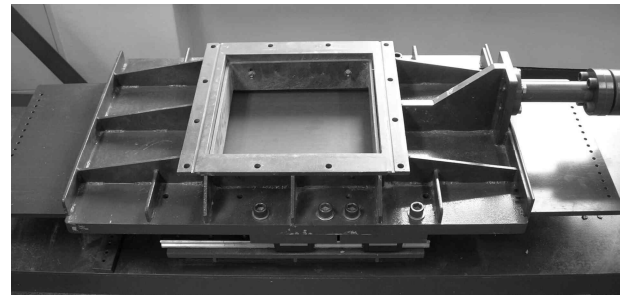


사진 3. 대형직접전단시험기

해 읽어 들인 후 프로그램을 통해 하중으로 해석한다. 수평 변위와 3곳의 수직변위는 LVDT를 이용하여 측정한다. 전단변형율은 별도의 콘트롤 박스(control box)를 통하여 임의의 속도로 조절이 가능하며, 본 연구에서는 모든 시험에 일괄적으로 1mm/min을 적용하였다. 쇄석의 시험은 (가로×세로×높이)가 (300×300×100)인 2개(상, 하)의 전단박스를 사용하여 시험하였으며 1.4 t/m<sup>3</sup>와 1.5 t/m<sup>3</sup> 단위중량의 쇄석을 채워 넣고 시험 하였다. 그리고 쇄석과 지오텍스타일 접촉면 전단시험에서는 가로×세로×높이(300×300×100)의 전단박스에 쇄석을 채우고 시험하였다.

쇄석과 지오텍스타일 접촉면 전단시험은 먼저 지오텍스타일 자체의 인장을 억제하기 위해 사진 4와 같이 지오텍스타일을 나무판 위에 본드로 고정시킨다. 그 이유는 지오텍스타일이 바닥하부에 고정이 되어 있지 않는 경우, 전단력에 의하여 흙과 지오텍스타일에서 전단력이 발생하는 것이 아니라 지오텍스타일 자체가 늘어나는 상황이 발생하기 때문이다. 그러나 지오텍스타일의 인장변형은 본 연구와 부합하지 않으므로, 지오텍스타일 자체의 인장강도가 아닌 지오텍스타일의 표면 거칠기만을 변수로 하고 다른 조건은 제한하기 위하여 합판에 지오텍스타일을 부착, 고정하는 형태를 취하였다. 따라서 본 연구에서는 정확한 흙-지오텍스타일 간의 전단강도를 측정하고자 시험장비 바닥부인 steel 위에 나무판을 설치하고 그 위에 부드러운



사진 4. 지오텍스타일 + 합판

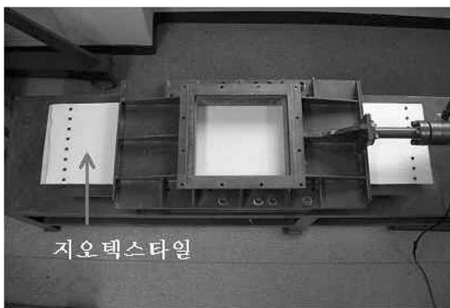


사진 5. 전단시험기에 고정된 지오텍스타일

재질인 PE 지오펜브레인(geomembrane)을 본드로서 고정시키고 다시 그 위에 본 연구의 지오텍스타일을 본드 및 상하부에 볼트로 고정하여 전단시험 중 지오텍스타일의 늘어짐을 방지하였다.

고정된 지오텍스타일은 사진 5의 하부에 볼트와 너트 그리고 지지대를 사용하여 고정시키고, 사진 6과 같이 전단박스에 쇄석을 채운다. 콘트롤 판(control panel)을 조작하여 공기압과 수평하중을 작용시키면서, 프로그램을 통해 저장한 데이터를 정리하고 엑셀을 사용하여 하중-변위 양상을 산정한다.

#### 4. 시험 결과

##### 4.1 전단강도와 수평변위와의 관계

본 연구에서 수행한 각각의 시험조건에서 구하여진 전단응력-수평변위와의 그래프가 그림 1~5에 나타나 있다. 그림 1 및 2는 쇄석을 각각 단위중량 1.4 t/m<sup>3</sup> 및 1.5 t/m<sup>3</sup>으로 시험하였을 경우를 나타내고, 그림 3 및 4는 각각 쇄석과 부직포-A, 쇄석 vs 부직포-B의 결과를 나타내고 있다. 또한 그림 5는 쇄석과 직포의 경우를 나타낸다. 이때 쇄석의 단위중량은 1.4 t/m<sup>3</sup>이다.

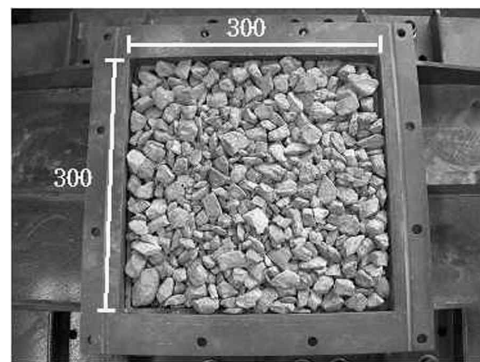


사진 6. 전단박스에 채워진 쇄석

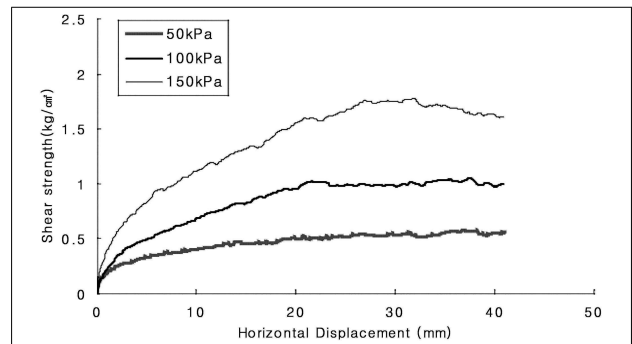


그림 1. 쇄석(1.4t/m<sup>3</sup>)의 전단응력-수평변위 곡선

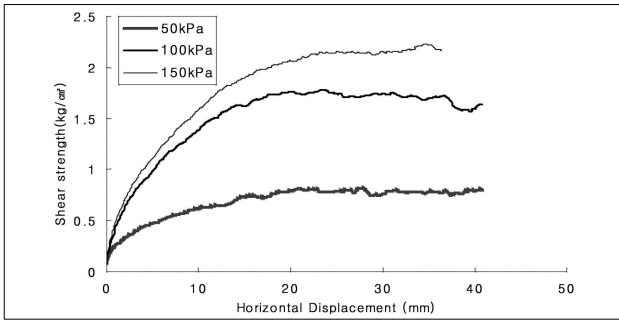


그림 2. 쇄석(1.5t/m<sup>3</sup>)의 전단응력-수평변위 곡선

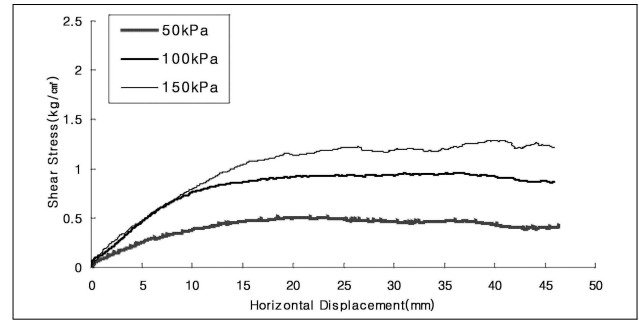


그림 4. 쇄석과 부직포-B의 전단응력-변위곡선

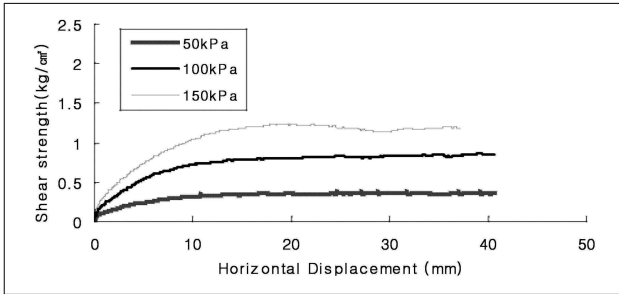


그림 3. 쇄석과 부직포-A의 전단응력-변위곡선

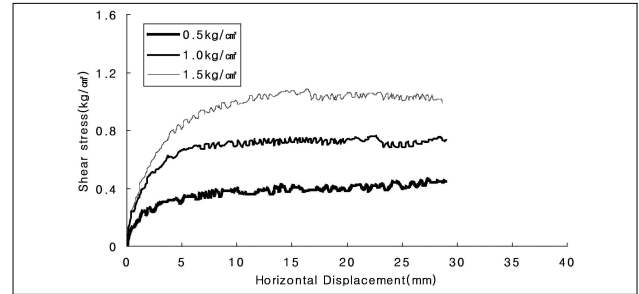


그림 5. 쇄석과 직포의 전단응력-수평변위 곡선

#### 4.2 파괴포락선을 이용한 전단 마찰력 산정

본 연구에서 수행한 각 조건에 대한 모든 전단시험의 파괴 포락선을 종합하여 도시하면 그림 6과 같다. 즉, 각 직선의 기울기가 그 접촉면에서의 전단 마찰각(friction angle)을 의미하며 이를 정리하면 다음 표 6과 같다.

#### 4.3 결과 분석

본 연구에서 수행한 대형직접전단시험의 결과를 종합하면 다음 표 7 및 8과 같다.

시험결과에서 알 수 있듯이 쇄석을 사용하는 경우 쇄석의 단위중량이 1.4 t/m<sup>3</sup>의 경우 전단 저항각은 47°이고, 단위중량이 1.5 t/m<sup>3</sup>의 경우 전단저항각은 57°로 나타났다.

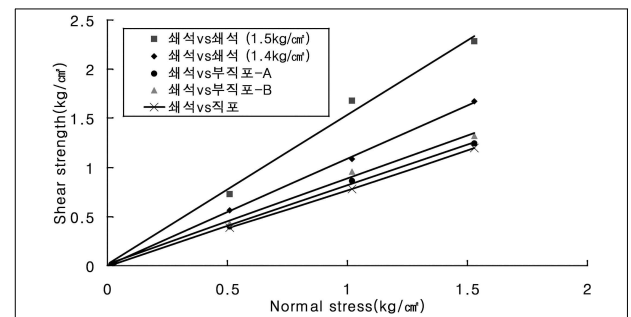


그림 6. 파괴 포락선(failure envelope)

쇄석과 지오텍스타일 사이의 전단각은 부직포 A의 경우는 39°를 부직포 B의 경우는 42° 그리고 직포의 경우는 39°를 나타냈다. 같은 단위중량인 1.4 t/m<sup>3</sup>일 경우에 쇄석 자체와 쇄석과 부직포간의 접촉면 전단저항각을 비교하여 보면, 부직포-A의 전단저항각은 쇄석에 비해 8.4°, 부직포

표 6. 전단 마찰각

	쇄석(1.4t/m <sup>3</sup> )	쇄석(1.5 t/m <sup>3</sup> )	부직포-A	부직포-B	직포
쇄석(1.4t/m <sup>3</sup> )	47.39°	-	38.95°	42.06°	39.00°
쇄석(1.5t/m <sup>3</sup> )	-	57.40°	-	-	

표 7 쇄석의 전단강도 및 마찰각

수직응력	시험조건	쇄석(단위중량 1.4t/m <sup>3</sup> )		쇄석(단위중량 1.5t/m <sup>3</sup> )	
		최대전단강도(kg/cm <sup>2</sup> )	마찰각(°)	최대전단강도(kg/cm <sup>2</sup> )	마찰각(°)
50kpa(0.5kg/cm <sup>2</sup> )		0.565	47.94	0.79	57.16
100kpa(1.0kg/cm <sup>2</sup> )		1.086	46.80	1.717	59.29
150kpa(1.5kg/cm <sup>2</sup> )		1.675	47.60	2.230	55.55

표 8. 쇄석과 지오텍스타일간의 전단강도 및 마찰각

시험조건 수직응력	쇄석 vs 부직포-A		쇄석 vs 부직포-B		쇄석 vs 직포	
	최대전단강도(kg/cm <sup>2</sup> )	마찰각(°)	최대전단강도(kg/cm <sup>2</sup> )	마찰각(°)	최대전단강도(kg/cm <sup>2</sup> )	마찰각(°)
50kpa(0.5kg/cm <sup>2</sup> )	0.372	36.12	0.508	44.90	0.39	37.9
100kpa(1.0kg/cm <sup>2</sup> )	0.863	40.24	0.959	43.24	0.78	37.9
150kpa(1.5kg/cm <sup>2</sup> )	1.240	39.03	1.285	40.03	1.20	38.6

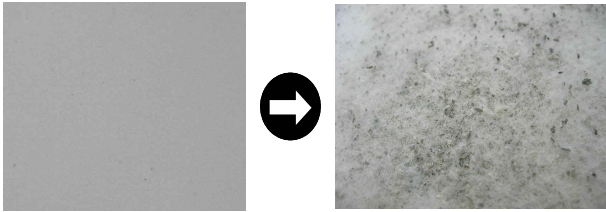


사진 7. 시험 전·후 부직포 비교

-B의 전단저항각은 5.3° 그리고 직포의 전단저항각은 8.3° 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 즉 전술한 효율관점에서 분석하여 보면 부직포-A의 경우는 접촉면에서 쇄석전단강도의 약 83%가 부직포-B의 경우는 89% 그리고 직포의 경우는 82%가 발현됨을 알 수 있다. 부직포-A와 부직포-B를 비교하여보면 상대적으로 중량이 큰 부직포-B가 큰 접촉면 전단강도를 유발하였으나, 두 제품 모두 상당부분 강도발현을 유도하는 것으로 나타났다.

시험 전·후 부직포의 변화 양상을 관찰하여 본 결과 아래 사진 7과 같이 쇄석이 부직포 섬유속으로 관입되어 부직포 섬유를 끊어트리는 것으로 나타났다.

### 5. 결론

본 연구에서는 쇄석과 2종류의 부직포 그리고 1종류의 직포를 사용하여 쇄석, 쇄석-지오텍스타일 상호간의 접촉면 전단강도(interface sheat strength)를 측정하기 위하여 대형직접전단시험을 수행하였다. 이러한 연구의 목적 하에 유추된 결론은 다음과 같다.

1. 쇄석을 사용하는 경우 쇄석의 단위중량이 1.4 t/m<sup>3</sup>의 경우 전단저항각은 47°이고, 단위중량이 1.5 t/m<sup>3</sup>의 경우 전단저항각은 57°로 나타났다. 쇄석과 부직포사이의 전단각은 부직포 A의 경우는 39°를 부직포 B의 경우는 42°를 나타냈다. 또한 쇄석과 직포사이의 전단각은 39°를 나타냈다.
2. 같은 단위중량인 1.4 t/m<sup>3</sup>일 경우에 쇄석 자체와 쇄석과 지오텍스타일간의 접촉면 전단저항각을 비교하여 보면, 부직포-A의 전단저항각은 쇄석에 비해 8.4°, 부직포

-B의 전단저항각은 5.3° 그리고 직포의 전단저항각은 8.3° 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 즉 부직포-A의 경우는 접촉면에서 쇄석전단강도의 약 83%가, 부직포-B의 경우는 89% 그리고 직포의 경우는 82%가 발현됨을 알 수 있다.

3. 부직포-A와 부직포-B를 비교하여보면 상대적으로 중량이 큰 부직포-B가 큰 접촉면 전단강도를 유발하였으나, 두 제품 모두 상당부분 강도발현을 유도하는 것으로 나타났다.
4. 시험 전·후 부직포의 변화 양상을 관찰하여 본 결과 쇄석이 부직포 섬유속으로 관입되어 부직포 섬유를 끊어트리는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

### 참고문헌

1. 주재우, 박종범, 장용채(2003), “전단시험방법에 따른 토목 섬유/모래 접촉면에서의 마찰특성”, *한국토목섬유학회논문집*, 제2권 제1호, pp.39-45.
2. Eigenbrod, K. D. and Locker, J. G.(1987), “Determination of friction values for the design of side slopes lined or protected with geosynthetics”, *Canadian Geotechnical Journal*, 24, pp. 509-519.
3. Martin, J. P., Koerner, R. M., and Whitty, J. E.(1984), “Experimental friction evaluation of slippage between Geomembranes, Geotextiles and soils”, *Proceeding of the International Conference on Geomembranes*, Denver, USA, pp.191-196.
4. Williams, N. D. and Houlihan, M. F.(1987), “Evaluation of interface friction properties between Geosynthetics and soils”, *Proceedings of Geosynthetics '87*, New Orleans, LA, USA, pp. 616-627.

(논문접수일 2006. 2. 19, 심사완료일 2006. 3. 16)