

불용 자원의 접촉면 마찰 특성 평가

Evaluation of Interface Friction Characteristic using Waste Resource

이승은¹⁾, Seung-Eun Lee, 장용채²⁾, Yong-Chai Chang, 존 바우더스³⁾, John J. Bowders

1) 목포해양대학교 해양토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Ocean Civil Eng. Mokpo National Maritime University

2) 목포해양대학교 해양토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Ocean Civil Eng. Mokpo National Maritime University

3) 미주리주립대학교 토목환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng. The University of Missouri-Columbia

SYNOPSIS : This study conducted a direct shear test to evaluate friction properties on contact surface of waste resources including turban shell, gastropod shell and PET bottle film. The contact surface that was considered for computation of shear strength in contact surface were turban shell/turban shell, gastropod shell/gastropod shell, and PET bottle film/PET bottle film. As a result of test, friction angle was found to be 16.7° for contact surface of turban shell/turban shell, 35.4° for gastropod shell/gastropod shell, and about 11° for PET bottle film/PET bottle film. Using the results, the author aims to provide a possibility for application of waste resource in the field.

Key words : Coarse grained materials, Direct shear test, PET bottle, Friction angle

1. 서 론

토목공사에서 건설재료로 사용되고 있는 기본재료는 흙, 모래와 자갈, 쇠석 등의 천연골재가 대부분이다. 이들 재료를 조립질 토목재료라 하며, 국내의 많은 건설현장에서 사용되고 있는 기본재료이다(이대수 등, 2006). 경제발전과 더불어 개발 등으로 대규모 토목공사를 시행함에 따라 건설재료 수급문제로 인한 한정된 자원의 활용과 생태계의 손상은 사회문제로까지 대두되고 있는 실정이다.

이에 따라 산업부산물 또는 해양부산물을 건설재료로 한정된 자원의 활용과 더불어 자원재활용이라는 측면에서 여러 연구를 실시하고 있으며 환경부에서는 향후 5년간 건설폐기물의 친환경 적정처리와 재활용을 촉진하기 위하여 건설폐기물 재활용 기본계획('07~'11)을 수립하여 발표하였다.

한편, 연안해역의 패류양식장 등으로 인하여 여러 패각의 매립 또는 적재로 인한 경비의 문제와 침출수가 바다로 유입되어 여러 가지 문제를 야기 시킨다. 또한 국민 생활수준이 향상됨과 더불어 음료소비량이 급속도로 증가함에 따라 무게가 가볍고 이동 및 보관이 용이한 Poly Ethylene Terephthalate(PET)병 사용이 급속하게 증가 하여 이를 폐기할 경우 환경오염의 발생 및 자원낭비 등의 문제점을 발전시키는 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 바닷가에서 흔히 볼 수 있는 패각류인 소라껍질, 고둥껍질과 무게가 가볍고 이동 및 보관이 용이한 Poly Ethylene Terephthalate(PET)병에 대하여 직접전단시험을 수행하여 전단저항 특성을 분석하였다.

2. 조립질 재료의 전단강도

조립질 재료의 전단강도는 본질적으로 마찰저항(frictional resistance)과 역물림 효과(interlocking effect)에 의한 구조적 저항의 합으로 이루어지며, 마찰은 활동마찰(sliding friction)과 회전마찰(rolling friction)로 나눌 수 있다. 활동마찰은 평면위에서 물체를 활동시킬 때 생기는 마찰이며 두 물체의 특성에 따라 결정된다. 또한 회전마찰은 다른 입자의 위를 오르내리거나 회전하면서 이동할 때 생기는 마찰이다.

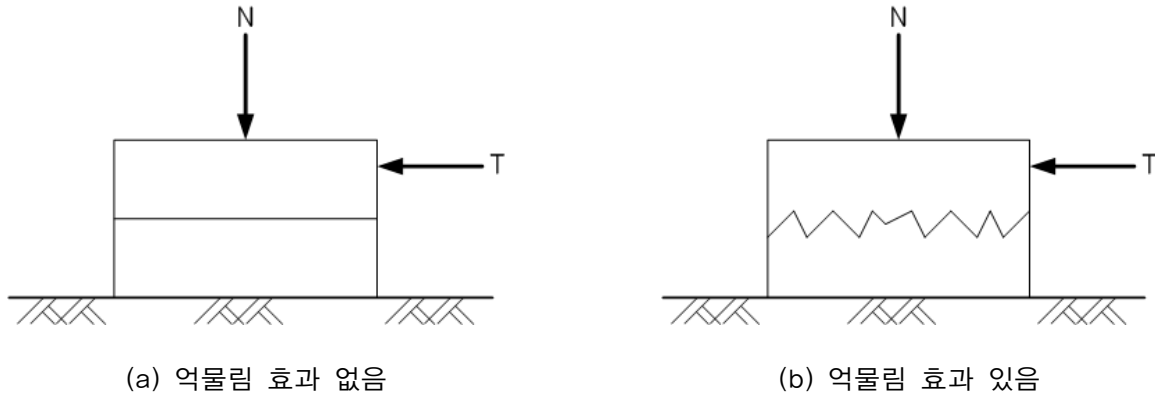


그림 1. 역물림 효과의 비교

그림 1은 역물림 효과를 비교하여 나타낸 그림인데, 그림 1(a)는 역물림이 없고 활동에 대한 마찰저항만 있는 경우이며, (b)는 역물림 효과가 있는 경우를 나타낸 것이다. 즉, 역물림이 있는 경우 활동을 일으키기 위해서는 마찰뿐만 아니라 연직응력 N 을 극복하고 상향 이동을 해야 하므로 큰 전단력을 소모하게 된다.

이러하듯 느슨한 조립질 재료를 전단하면 파괴면은 그림 1(a)와 비슷하며, 이와 반대로 조밀한 조립질의 경우 전단면은 조립질 재료 입자의 상하 운동에 의하여 곡면을 그리게 된다. 즉 역물림 효과는 조밀한 정도에 따라 달라지며, 이것은 전단강도 또는 내부마찰각의 크기를 결정하는 가장 중요한 요소가 조밀한 정도라는 것을 의미한다(Lambe & Whitman, 1979).

3. 실험방법

3.1 실험재료

본 연구에서 사용한 시료는 소라껍질, 고등껍질, PET병으로 소라껍질과 고등껍질은 건조로를 이용하여 완전히 건조 시킨 후 깨지 않고 그대로 사용하였다. 체가름을 통하여 분류한 크기는 소라껍질은 80mm체를 통과하고 40mm체에 잔류하였으며, 고등껍질은 시료의 균일성을 위하여 13.2mm체를 통과하고 9.5mm체에 잔류한 고등껍질을 사용하였다.

또한 PET병은 위아래를 절단하여 원통형 모양을 film으로 만들어 시료를 사용하였다. 그림 2는 연구에 사용된 시료를 나타내고 있으며, 소라껍질, 고등껍질, PET 병을 보여주고 있다.



(a) 소라껍질



(b) 고등껍질



(c) PET 병

그림 2. 불용자원의 종류와 모양

3.2 실험장비

본 시험 장치는 전단 및 인발이 가능한 시험기로서 전단 상자의 크기를 조절할 수 있는 시험기이다. 전단상자 크기는 길이, 폭, 높이가 각각 300×300×200mm 로 전단 상자가 상·하부로 분리되어 있으며, 상부 전단 상자에는 평면베어링(flat bearing)이 부착되어 있어 직접전단시험 시 상부 전단 상자의 이동이 가능하도록 되어있다.

상부와 하부 전단 상자는 각각 깊이가 100mm이다. 로드셀 최대용량은 최대 11,023 lbs이며, 변위속도 제어시스템에 의하여 임의의 속도로 조절이 가능하다. 그림 3은 직접전단시험기의 개략도를 보여주고 있다.

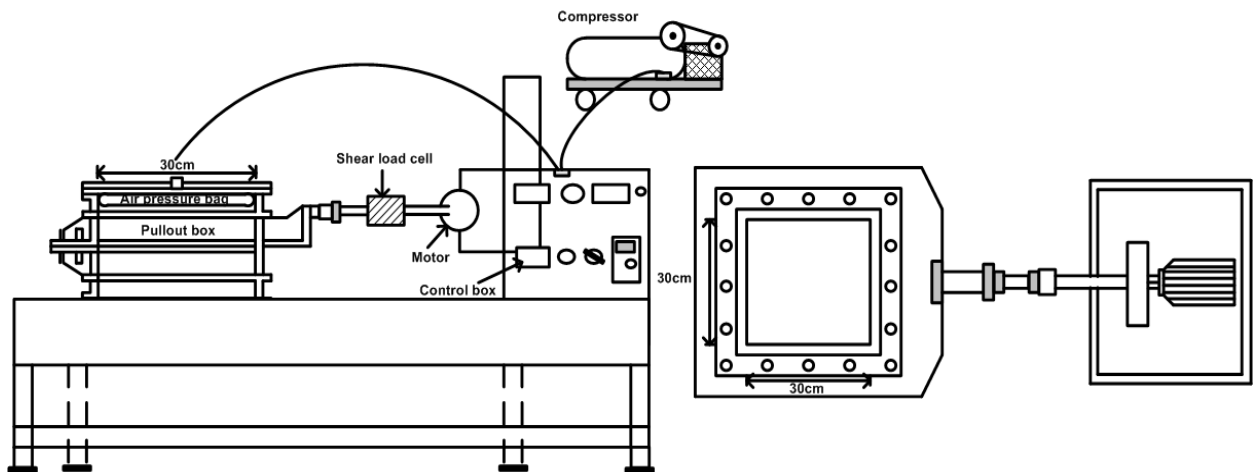


그림 3. 직접전단시험기

3.3 실내시험

불용자원의 접촉면 전단시험은 여러 가지 방법이 있지만 본 연구에서는 그림 4와 같은 방법으로 실시하였다. 그림 4(a)의 그림은 해양부산물을 각각 소라껍질과 고등껍질을 전단 상자에 채워 넣었을 때를 보여주고 있으며, 소라껍질과 고등껍질의 단위중량을 2.94kN/m^3 , 5.4kN/m^3 으로 채워 넣어 실험을 실시하였다. (b)는 PET병의 film을 전단시킬 때 모습을 나타내고 있다. 전단 상자 내 목재블록 위아래에 film

을 고정시킨 후 공기압을 50, 100, 150kPa 연직하중을 가하고 전단시킴으로서 해양부산물과 PET병 film의 마찰특성을 파악하였다.

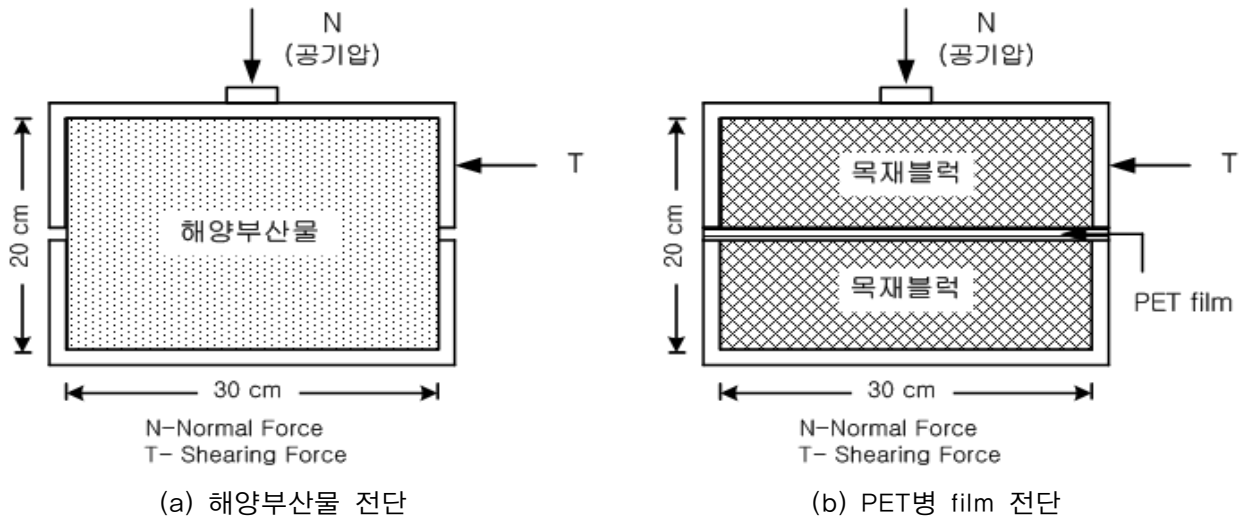


그림 4. 접촉면 전단시험 개략도

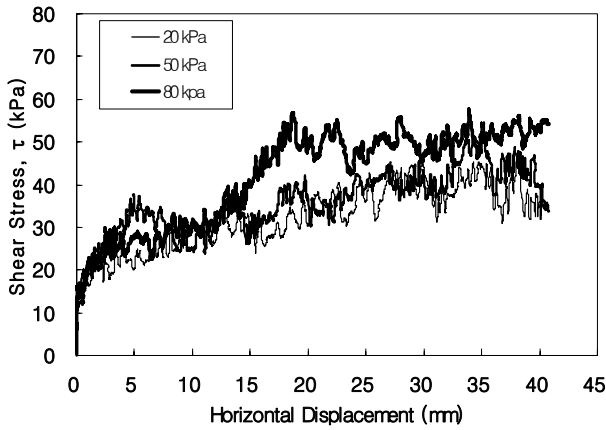
4. 실험결과

4.1 수평변위와 전단응력 관계

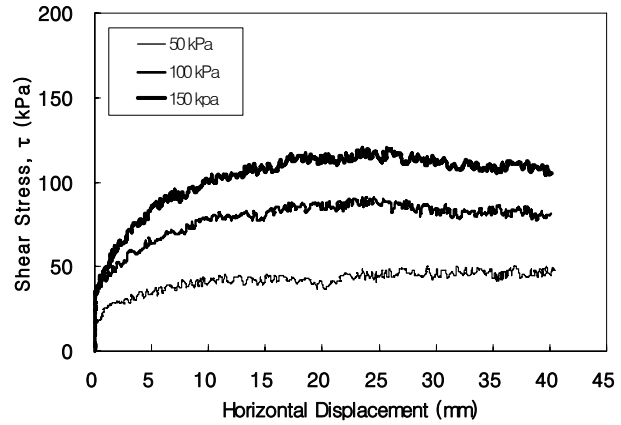
그림 5의 (a), (b), (c)는 전단 상자에 각각의 소라껍질, 고둥껍질, PET병 film을 전단하였을 경우 수평변위와 전단응력을 나타낸 그림이다. (a), (b), (c) 전체적으로 수직응력이 증가함에 따라 전단강도 역시 증가하는 것을 볼 수 있었으며, 그림 5(a)는 소라껍질을 전단하였을 경우 수평변위에 따른 전단응력을 나타낸 그림인데, 전단 상자 내 원형 그대로의 소라껍질을 시험재료로 사용하였기 때문에 소라껍질과 소라껍질의 자체의 크기가 커 전단 시 상대적으로 간극이 커진 양상의 그래프 즉, 그림 5(a)와 같은 형태의 그래프가 나타났다.

그림 5(b)는 소라껍질의 약 1/3 정도의 크기의 고둥껍질을 전단 상자에 채워 넣어 전단하였을 때 나타낸 그림이다. 수평변위에 따른 전단응력의 거동은 느슨한 모래와 유사한 거동을 하고 있으며, 피크강도가 나타나지 않고 있음을 알 수 있었다.

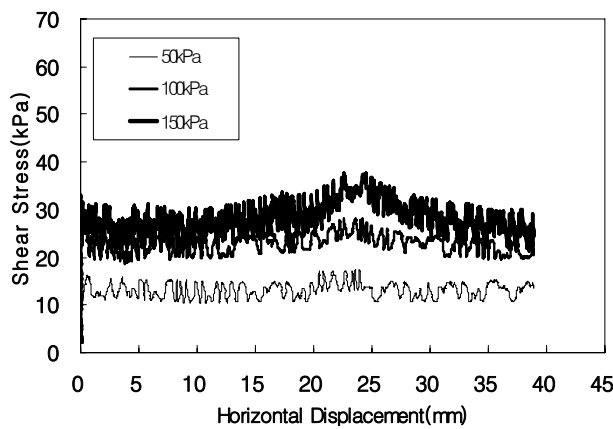
그림 5(c)는 PET병 film과 PET병 film을 전단하였을 경우의 수평변위에 따른 전단응력의 그래프를 보여주고 있는데, 전단재료의 특성상 상대적으로 전단면이 매끄럽기 때문에 그림 5(a), (b)의 형태와 달리 수평변위에 따른 전단응력의 거동도 상대적으로 작게 나타났다.



(a) 소라껍질 vs 소라껍질



(b) 고등껍질 vs 고등껍질



(c) PET병 film vs PET병 film

그림 5. 수평변위와 전단응력

4.2 수직응력에 따른 전단응력의 특성

그림 6은 전단시험으로부터 구한 소라껍질, 고등껍질, PET병 film의 수직응력에 대한 전단응력을 나타내고 있다. 시험결과를 이용하여 전단강도 곡선을 도시한 결과 소라껍질, 고등껍질 에서도 겉보기 점착력(apparent cohesion)이 나타남을 확인할 수 있었다. 이 결과는 조립재료를 이용한 선행연구에서 나타난 결과들과 유사한 경향을 보인다(Matsuoka, 1998a).

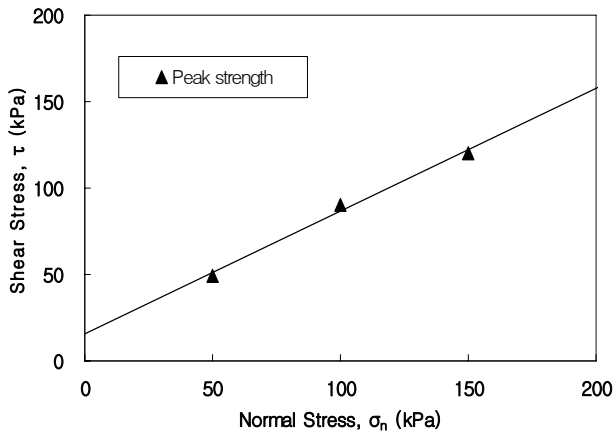
한편 소라껍질이나 고등껍질처럼 입경이 상대적으로 큰 재료는 낮은 전단강도와 파쇄율을 보이는데, 이러한 현상이 발생하는 주요 원인은 전단 시 입자 상호간의 역물림(interlocking)에 의한 부분도 있겠지만, 전단시험을 실시하기 전에 단계적으로 수직응력을 가할 때 입자의 파쇄가 발생하기 때문에 접촉면 마찰각이 감소하는 현상이 발생한다.

또한 접촉면 마찰각은 아래 표 1에서 나타나듯이 고등껍질 35.4°, 소라껍질 16.7°, PET병 film 11.3°로 나타남을 알 수 있었는데, 이것은 재료들의 조밀함과 거칠기가 마찰각에 큰 영향을 미쳤다고 판단되어지며, 장용채(2008)등은 조립재료의 일종인 해양부산물을 이용하여 조립재료와 지오신세틱스(geosynthetics)의 접촉면 마찰특성 평가에서 이러한 해양부산물이 종류에 따라서 토목현장에 사용이 가능함을 확인하였다.

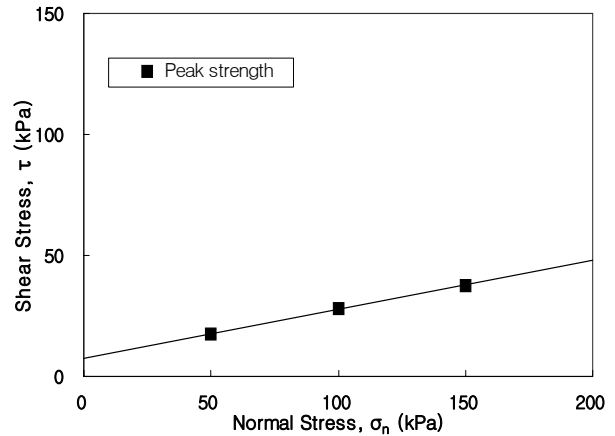
표 1. 불용자원의 전단강도 및 마찰각

시험 조건	고등경질(단위중량 5.4kN/m ³)		PET병 film		소라경질 (단위중량 2.94kN/m ³)	
	최대 전단강도(kPa)	마찰각(°)	최대 전단강도(kPa)	마찰각(°)	최대 전단강도(kPa)	마찰각(°)
수직응력	50 kPa	35.4°	50 kPa	11.3°	20 kPa	16.7°
	100 kPa		100 kPa		50 kPa	
	150 kPa		150 kPa		80 kPa	

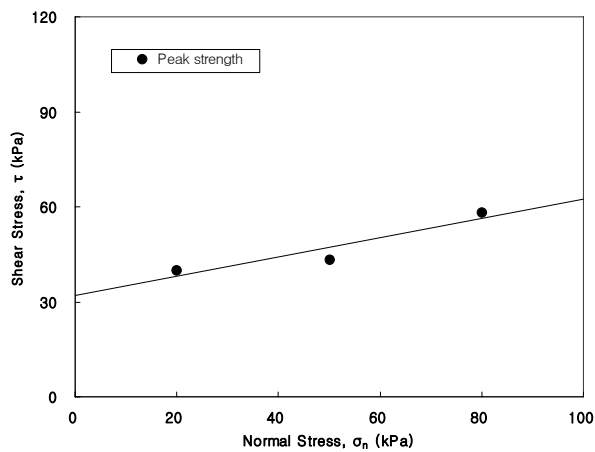
그림 6(d)는 각각의 그림 6(a), (b), (c)의 그래프를 종합하여 나타낸 그림이다. 그림 6(d)를 보면 수직응력이 20kPa~150kPa 까지 증가함에 따라 각각의 불용자원에 대한 전단응력이 증가함을 볼 수 있다.



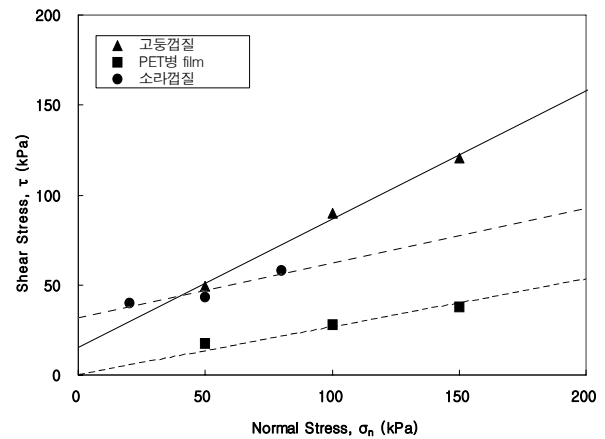
(a) 고등경질 vs 고등경질



(b) PET병 film vs PET병 film



(c) 소라경질 vs 소라경질



(d) 전단응력 vs 수직응력

그림 6. 파괴 포락선

5. 결론

본 연구에서는 불용자원인 소라껍질, 고등껍질, PET병 film의 접촉면 전단특성을 밝히기 위하여 직접 전단시험을 실시하여 전단 특성을 파악하였으며, 시험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 소라껍질, 고등껍질, PET병 film의 접촉면 전단특성은 수직응력이 증가함에 따라 수평변형에 따른 전단응력이 커짐을 알 수 있었다. 전단 시 접촉면 마찰각은 고등껍질/고등껍질로 구성된 지반이 35.4° , 소라껍질/소라껍질 16.7° , PET병 film/PET병 film 11.3° 로 나타났다.
- 2) 고등껍질/고등껍질로 구성된 지반이 소라껍질/소라껍질, PET병 film/PET병 film 으로 모사된 지반보다 접촉면 마찰각이 크게 나왔다. 이는 고등껍질/고등껍질의 지반이 소라껍질/소라껍질의 지반보다 상대적으로 조밀하게 모사되었기 때문이며, PET병 film/PET병 film은 접촉면이 매끄럽기 때문이라고 판단된다.
- 3) 소라껍질/소라껍질 전단 시 수평변위와 전단응력의 관계에서 알 수 있듯이 원형 그대로의 소라껍질을 시험재료로 사용하였기 때문에 전단 상자 내 소라껍질과 소라껍질의 간극이 커서 그림 5(a)와 같은 형태의 그래프가 나타났다. 그림 5(b)에서의 거동은 느슨한 모래와 같은 거동을 하고 있으며, 피크강도가 나타나지 않고 있음을 알 수 있었다. 또한 역물림(interlocking) 효과는 조밀한 정도에 따라 달라지며, 이것은 전단강도 또는 내부마찰각의 크기를 결정하는 가장 중요한 요소임을 알았다.

참고문헌

1. 이대수, 김경열, 홍성연, 황성춘 (2006), “대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(II)”, *한국지반공학회논문집*, Vol. 22, No, 4 pp. 51~59.
2. 장용채, 이승은, 서지웅 (2008), “조립재료와 지오신세틱스의 접촉면 마찰특성 평가” , *한국지반환경공학회, 논문집*, 제9권, 제5호, pp.53~59.
3. Matsuoka, H. (1998a), “Simplified Direct Box Shear Test on Granular Materials and Its Application to Rockfill Materials” , *Soils and Foundations*, Vol.38, No 4, pp.275~284.
4. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979), *Soil Mechanics, SI Version*, John Wiley & Sons, Inc., New York. pp. 66~69