

낙동강 모래와 건설재료간의 직접전단시험에 의한 마찰각 특성

Characteristics of Friction Angles between the Nak-dong River Sand and Construction Materials by Direct Shear Test

김 영 수¹ Kim, Young-Su

김 대 만² Kim, Dae-Man

Abstract

In this study, a series of direct shear tests were performed to investigate the characteristics of friction angles for sands and interface friction angle between sands and construction materials with respect to different relative density of the Nak-dong River sands and shearing velocity. The result of the test shows that friction angles of sands are always higher than interface friction angle between sands and construction materials. As the shearing velocity get faster, the friction angles of sand became higher. With respect to the density of sand by reducing void ratio, friction angles increase linearly, and relevant equations were proposed to calculate the friction angle by changing void ratio and relative density of sand. The interface roughness of construction materials was also an important factor in interface friction angle.

요 지

본 연구에서는 낙동강 모래의 내부마찰각과 모래와 건설재료들과의 접촉면에서 발생하는 표면마찰각의 특성을 파악하기 위하여 모래의 상대밀도와 전단속도를 변화시켜 목재, 강재, 몰탈, 그리고 역청재와 일련의 직접전단시험을 실시하였다. 시험결과 모든 경우에서 모래의 내부마찰각이 건설재료와의 표면마찰각보다 항상 크게 나타났고, 전단속도가 빠를수록 마찰각이 조금 증가되었다. 모래의 간극비가 작아짐에 의한 조밀화에 따라 마찰각은 선형적으로 증가하였으며, 간극비와 상대밀도의 변화에 따라 마찰각을 산정할 수 있는 식을 제시하였다. 또한 건설재료의 표면거칠기는 표면마찰각에 있어 중요한 인자임을 알 수 있었다.

Keywords : Construction materials, Direct shear test, Interface friction angle, Nak-dong River sand

1. 서 론

구조물의 기초, 옹벽, 케이슨, 그리고 토류판 등 대부분의 토목구조물들은 흙과 맞닿은 면이 존재하며, 흙과 직접적으로 접하는 면을 접촉면(interface)이라한다. 접촉면을 따라 외력에 의하여 전달되는 힘은 표면 마찰(skin friction)을 발생시킨다. 토목 구조물에 있어서 다

양한 건설 재료와 여러 종류의 흙과의 상호작용은 많은 접촉면 문제를 발생시킨다. 표면마찰에 대한 초기 연구는 현장에서 관찰을 통하여 표면마찰에 대한 값을 얻거나 파일 항타에서의 저항, 케이슨의 내려앉음으로부터 계산을 통하여 평균적인 값을 구하여 설계에 반영하였다. 그 후 실내에서 행하여진 연구로 Potyondy(1961)는 흙의 입도, 함수비, 수직하중을 변화시켜 강재(steel), 나

1 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

2 정회원, 경북대학교 토목공학과 연구원 (Member, Researcher, Dept. of Civil Engrg., KNU, ksmans11@hanmail.net, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

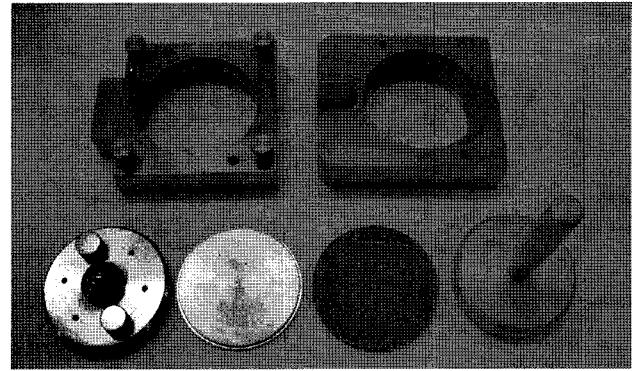
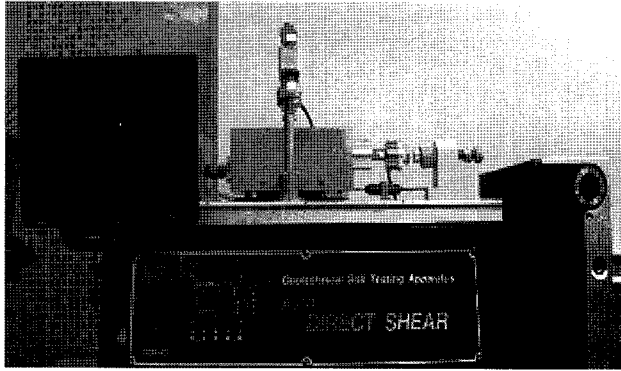


사진 1. 직접전단시험기 및 전단상자

무, 그리고 콘크리트의 표면거칠기를 달리하여 실시한 직접전단시험결과로부터 여러 흙과 건설재료들 사이의 표면마찰각(δ)을 연구하였으며, Coyle 등(1967)은 모래 지반의 간극비, 포화도 그리고 횡방향 압력을 변화시켜 강발톱의 표면마찰에 대하여 연구하였다. 또한 Acar 등(1982)은 직접전단시험을 실시하여 모래와 건설재료사이 경계면에서 응력-변위의 실제 거동은 hyperbolic 모델에 가깝고 구속압과 흙 밀도의 영향은 무시할 수 있다고 하였다. 국내의 접촉면에 대한 연구로 신강호(1990)는 한강 모래와 철판 그리고 콘크리트와의 직접전단시험을 통하여 모래의 초기 간극비에 따른 건설재료들의 전단 및 마찰거동에 대하여 연구하였으며, 김상규 등(1996)은 보강토에 사용되는 보강재료와 뒷채움재인 화강암풍화토와의 경계면에서 발생하는 마찰계수를 연구하였다.

본 논문에서는 낙동강 유역의 모래와 여러 건설재료들로 직접전단시험을 실시하여 그 결과로부터 표면마찰각을 산정하여 제시하고자 한다. 시료 채취장소인 낙동강 유역은 영남지방의 중앙저지를 흘러 부산 을숙도에 이르는 모래 지반이 넓은 지역에 걸쳐 분포되어있다. 이러한 지역에 크고 작은 제방, 댐 그리고 교량을 비롯한 많은 토목 구조물뿐만 아니라 대단위 주택단지를 포함한 건축 구조물들이 건설되어 있고, 더욱이 2012년까지 14조원을 투입해 낙동강을 포함한 4대강 정비 사업을 실시할 계획이어서 앞으로도 많은 구조물의 시공이 예상되는 지역이다. 따라서 낙동강 모래와 다양한 건설재료들과의 접촉면에서 발생하는 표면마찰각을 정량적으로 분석함으로써 낙동강 유역에 건설되는 다양한 지반구조물의 설계 시 도움이 될 것으로 생각된다. 표면마찰각의 변화를 살펴보기 위하여 모래의 상대밀도, 수직응력, 그리고 전단속도를 변화시켜 목재, 강재, 몰탈, 그리고 역청재료와의 직접전단시험을 실시하였다.

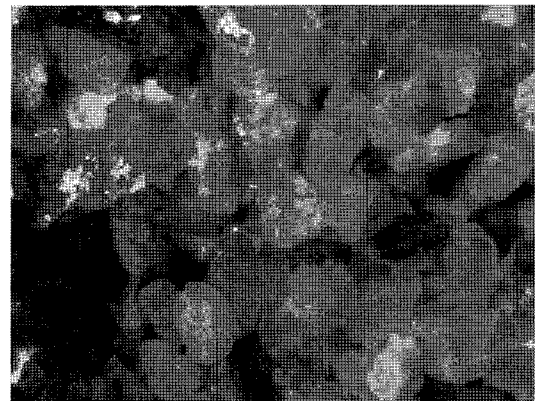


사진 2. 모래의 SEM 사진

2. 재료특성 및 시험방법

2.1 시험장치

시험에 사용된 시험기기는 수직응력을 air-actuator로 재하하고, 수평응력은 모터로 변위를 제어할 수 있는 자동직접전단시험기이다. 사진 1은 시험기와 전단상자를 나타낸 것으로 사용되는 시료의 크기는 직경 9cm, 높이 4.5cm이다. 전단시 전단상자간의 마찰을 최소화시키기 위하여 사진 1에서 보듯이 상부 전단상자에 나사가 설치되어 있어 상자간의 간격을 0.2mm 이하로 이격시킬 수 있다. 또한 수직과 수평방향으로 각각 로드셀과 LVDT가 설치되어 있으며, 모든 시험은 컴퓨터로 제어되고 시험결과는 사용자 설정에 따라 자동으로 저장되는 시스템이다.

2.2 재료 특성

2.2.1 모래

본 연구에서는 사용된 모래는 낙동강 중류 지역의 모래로 채취 후 균질한 모래에 대한 시험을 위하여 #20체

~#200체 사이의 잔류모래를 흐르는 물에 씻어서 clean sand로 만들어 시험에 사용하였다. 사진 2와 같이 입자는 약간 모나거나 둥글며, 균등계수는 1.76으로 통일분류법(USCS)에 의한 분류는 SP로 나타났다. 모래시료에 대한 입도곡선 및 기본 물성치의 시험결과는 그림 1 및 표 1과 같다.

표 1. 모래의 기본 물성치

Index properties	Sand
G_s	2.637
D_{10} (mm)	0.25
D_{30} (mm)	0.35
D_{60} (mm)	0.44
C_u	1.760
C_z	1.113
e_{min}	1.138
e_{max}	0.727
Roundness	Subangular or Subrounded
USCS	SP

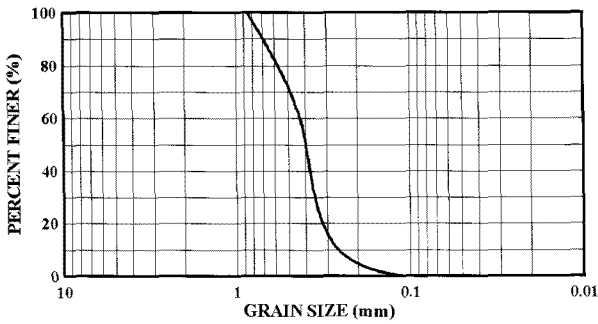


그림 1. 모래 입도곡선

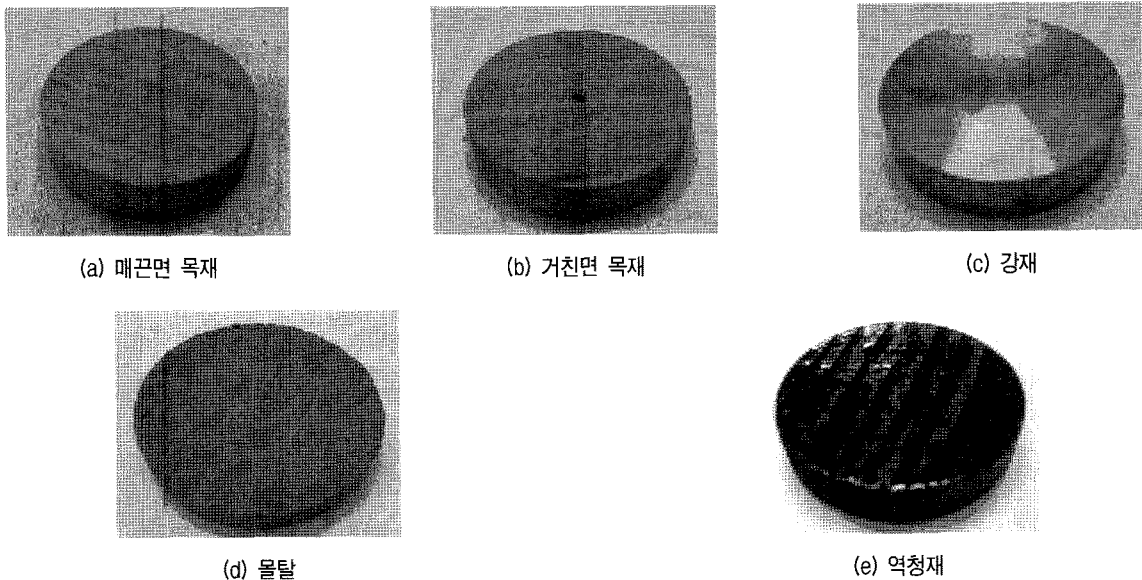
2.2.2 건설재료

시험에 사용된 건설재료는 목재, 강재, 몰탈 그리고 역청재료로서 목재의 경우 거친면과 매끈한 면을 가진 두 종류의 목재를 사용하였다. 거친면은 절단 톱을 사용한 면을 그대로 사용하였고, 매끈한 면은 절단 뒤 사포를 통하여 표면을 부드럽게 처리하였다. 강재는 일반 합금강을 사용하였고, 표면은 매끈하게 연마처리 하였다. 몰탈은 전단상자의 규격과 같은 링을 거푸집으로 사용하여 7일간의 양생 후 사용하였다. 그리고 역청재료는 아스팔트 포장에 사용하는 것으로 역청재료만으로는 모래와의 직접전단시험을 할 수 없기 때문에 목재에 역청을 입혀 시험을 실시하였는데, 나뭇결의 영향을 제거하기 위하여 역청재료를 충분히 두텁게 하였다. 사진 3은 본 연구에 사용된 건설재료들을 나타낸 것이다.

2.3 시험 방법

2.3.1 모래 성형 방법

시험에 사용된 모든 모래시료는 건조 퇴적법(dry deposition method)으로 성형하였다. Oda 등(1972)과 Yamamuro 등(1999)의 연구에 의하면 건조 퇴적법은 자연적으로 퇴적된 모래와 유사한 입자구조를 만들고 시료에 매우 낮은 퇴적에너지를 가하므로 이는 실제 호수나 강바닥의 퇴적 상태를 재현한 느슨하고 압축성의 시료를 성형할 수 있다고 하였다. 성형과정은 먼저 상·하부 전단상자를 결합한 뒤 낙하고가 없도록 하여 깔때기로 모래를 낙하시켜 시료를 성형하였다. 모래의 상대밀도는 조밀,



(a) 매끈면 목재

(b) 거친면 목재

(c) 강재

(d) 몰탈

(e) 역청재

사진 3. 시험에 사용된 건설재료들

표 2. 시험조건 및 시료 초기상태

전단속도 (%/min)	상부재료			하부재료	수직응력 (kg/cm ²)
	모래상태	상대밀도(%)	간극비		
0.1	느슨	23.8	1.040	모래(상부재료와 동일상태) 매끈(smooth)면 목재 거친(rough)면 목재 몰탈 강재 역청재료	0.5
	조밀	72.2	0.841		
1.0	느슨	23.8	1.040		1.0
	조밀	72.2	0.841		

중간, 느슨 상태의 3가지로 성형하였으며, 일정한 전단상자의 부피에 모래의 소요 건조단위중량을 채웠다. 시험조건과 모래시료의 초기상태는 표 2에 나타내었다. 모래의 직접전단시험에서는 상·하부 전단상자에 모두 모래시료를 채웠으며, 건설재료들과 모래의 직접전단시험에서는 하부 전단상자에 건설재료를 넣고 상부 전단상자에 모래시료를 성형하여 전단면이 모래와 건설재료 사이가 되게 하였다.

2.3.2 직접전단시험

수직응력(normal stress)은 0.5, 1.0, 그리고 2.0kg/cm²로 가하였으며, 수직응력을 준 뒤 모래의 재정렬에 따른 압축이 모두 발생될 때까지 기다린 후 전단을 실시하였다. 전단시 전단속도의 영향을 알아보기 위하여 0.1, 1.0%/min 두 가지의 전단속도로 하였고, 모든 시험에서 변위는 재료 직경의 15%인 13.5mm까지 전단을 실시하였다.



사진 4. Tilting test

표 3. 각 재료의 표면 거칠기 정도

재료	매끈면 목재	거친면 목재	몰탈	강재	역청재
각도(°)	17.3	21.7	22.7	12.3	20.0
강재기준	1.41	1.76	1.85	1.00	1.63

3. 시험 결과 및 분석

3.1 건설재료의 상대적 표면거칠기

각 건설재료의 상대적 표면거칠기 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 tilting test를 실시하였다. 사진 4와 같이 시험기 바닥에 건설재료를 놓고 고정시킨 후 그 위에 건설재료들과 같은 크기의 직경 9cm, 무게 약 1kg의 매끈한 강재료를 얹은 다음 기울기를 차츰 증가시켜 강재료가 움직일 때의 각도를 측정하였다. 각 재료마다 3번씩 측정을 실시한 후 평균값을 구하였으며, 그리고 가장 작은 거칠기를 보인 강재를 기준하여 각 재료의 상대적 거칠기 정도를 표 3에 나타내었다. 상대적 거칠기 정도는 몰탈, 거친면 목재, 역청재, 매끈면 목재, 강재 순으로 나타났다. 이 시험을 통하여 각 재료들의 정확한 거칠기는 구할 수는 없지만 본 연구에서 각 재료들 간의 상대적 거칠기 정도를 정량적으로 비교하기 위하여 실

시하였다.

3.2 전단시험결과

그림 2는 전단속도 0.1%/min일 때 느슨한 모래와 건설재료들과의 직접전단시험결과를 나타낸 것이고, 그림 3은 전단속도 1.0%/min일 때 조밀한 모래와 건설재료들과의 직접전단시험결과를 나타낸 것으로 나머지 시험 결과는 지면상 생략하였다.

전단변형률의 증가에 따라 일정한 수직응력을 유지하기 위해서는 감소되는 전단면적에 비례하여 수직응력이 감소되어야 하나 시험에 사용된 시험기는 전단면적 변화에 따라 수직응력을 일정하게 제어할 수 없는 이유로 시험결과 해석 시 변형률 증가에 따른 전단면적의 감소를 고려하지 않았다. 전단시험 결과 대부분 수직응력이 클수록 최대전단응력(peak)이 뚜렷이 나타났으며, 최대전단응력 이후 잔류변형은 소성변형의 형태

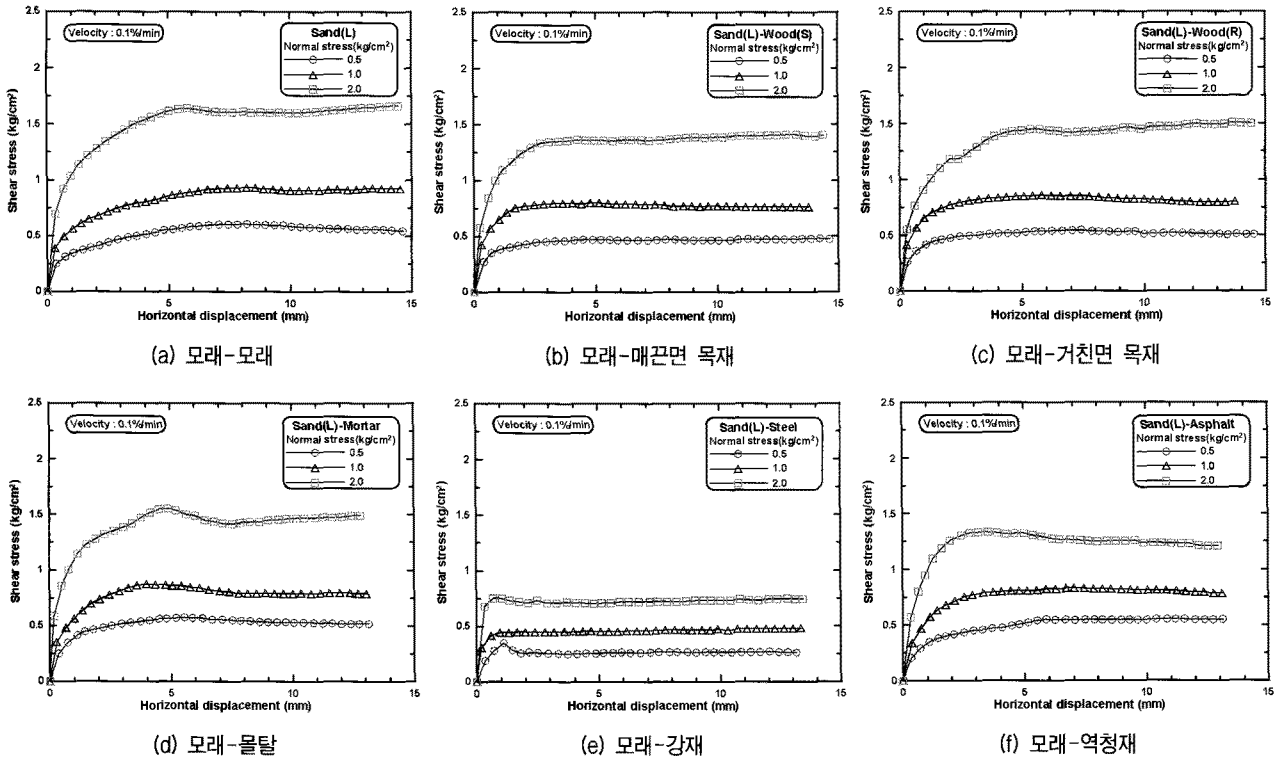


그림 2. 느슨한 모래와 건설재료의 직접전단시험결과(전단속도 0.1%/min)

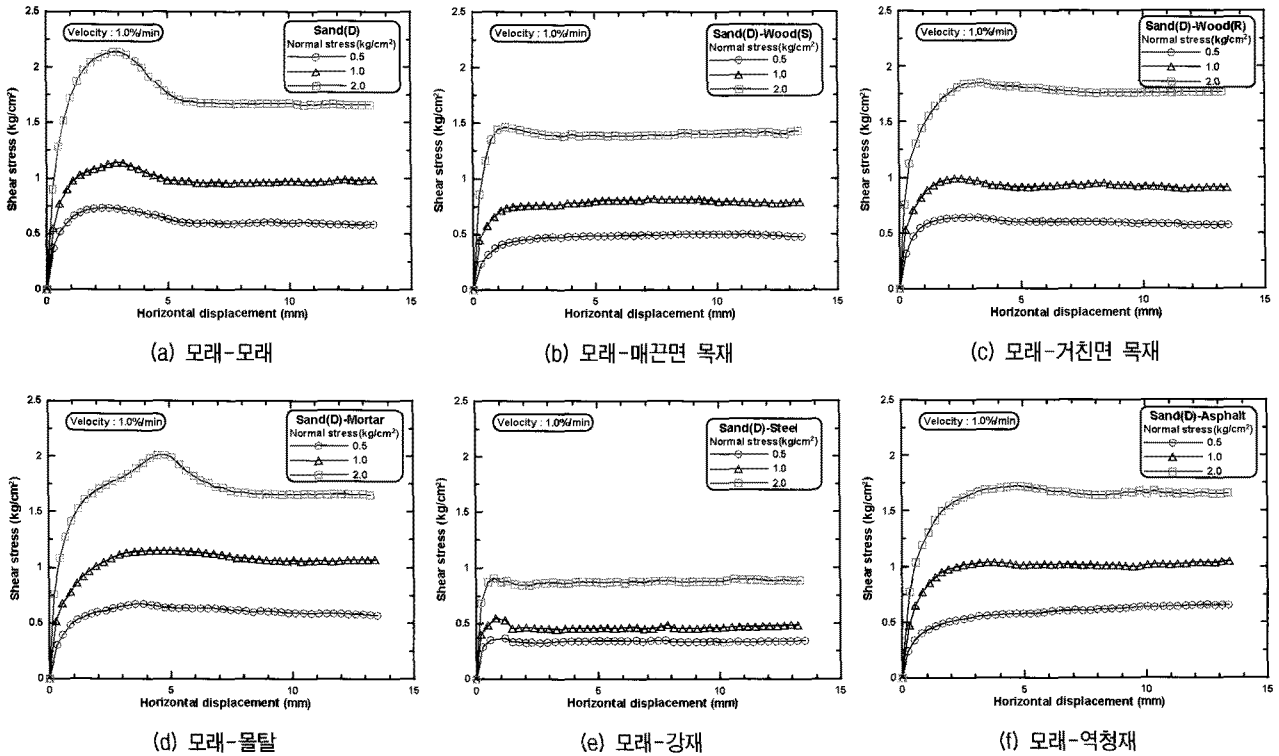


그림 3. 조밀한 모래와 건설재료의 직접전단시험결과(전단속도 1.0%/min)

로 진행되었다. 몰탈의 경우에는 비교적 큰 변형인 5mm 정도에서 최대전단응력이 나타난 반면, 강재의 경우는 1mm 정도의 작은 변형에서 최대전단응력이 나타나고 그 후 잔류변형은 완전소성변형의 형태로 진행

되었으며, 최대전단응력과 잔류전단응력이 거의 비슷하였다. 그리고 매끈(smooth)면과 거친(rough)면 목재의 경우 매끈면 목재는 2~3mm에서 최대전단응력이 발생하였으나 거친면 목재에서는 3~5mm의 변형에서

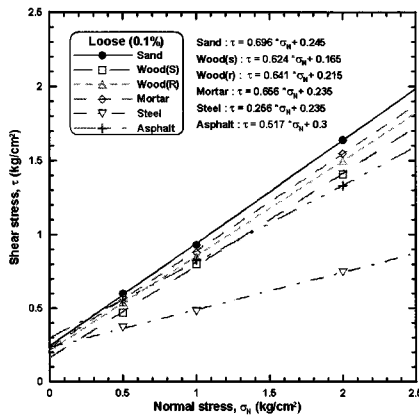
최대전단응력이 발생하였다. 따라서 건설재료의 표면이 거친 재료일수록 최대전단응력 발생 시의 변형은 표면이 매끈한 재료에 비하여 크게 나타나는 경향이 있었으며, 또한 전단속도가 빠를수록 최대전단응력이 빨리 발생되고 파괴 이후의 잔류변형도 비교적 일정하게 나타났다.

3.3 내부 및 표면 마찰각 산정

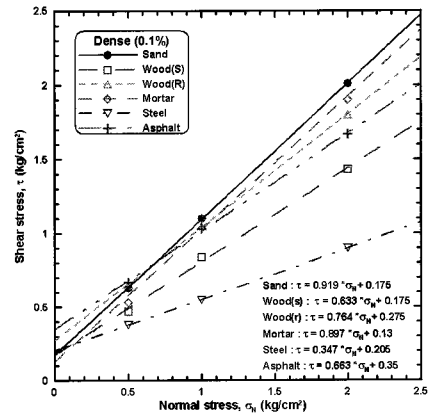
모래와 건설재료들 간의 직접전단시험 결과에서 얻어진 최대전단응력을 이용하여 그림 4, 5에 파괴포락선을 도시하였다. 도시된 파괴포락선으로부터 모래의 내부마찰각(ϕ)과 모래와 건설재료들 간의 표면마찰각(δ), 그리고 마찰계수비, $\mu(=\tan\delta/\tan\phi)$ 를 산정하여 표 4에 나타내었다.

Potyondy(1961)는 여러 흙의 함수비를 변화시키며 강재(steel), 나무, 그리고 콘크리트의 표면거칠기를 달리

하여 실시한 직접전단시험결과로부터 모든 경우에서 흙의 내부마찰각(ϕ)이 건설재료와의 표면마찰각(δ)보다 큰 값을 나타낸다고 하였는데, 본 연구에서도 모래의 내부마찰각이 모래와 건설재료간의 표면마찰각보다 항상 크게 나타났다. 표면마찰각의 크기는 상부모래가 느슨한 상태의 전단속단 0.1%/min일 때를 제외하고는 모두 몰탈, 거친면 목재, 역청재, 매끈면 목재, 그리고 강재의 순으로 크게 나타나 앞서 살펴본 건설재료의 상대적 표면거칠기 크기의 순서와 동일하였다. Uesugi 등(1986)은 건조모래와 강재(steel) 사이에 발생하는 표면마찰각의 영향인자를 연구한 결과 수직응력과 모래 입자크기에 비하여 표면거칠기가 표면마찰각에 더 큰 영향을 미치는 인자라 하였는데, 본 연구의 결과에서도 건설재료의 표면마찰각은 표면거칠기에 비례하게 나타나 표면거칠기가 표면마찰각에 큰 영향을 미치는 주요인자임을 알 수 있었다.

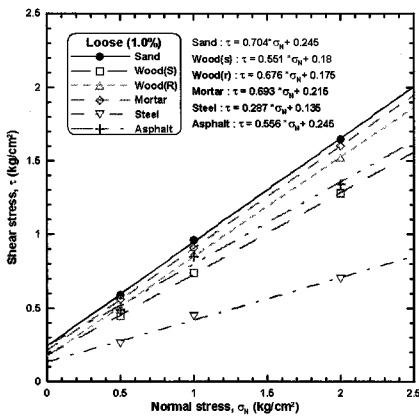


(a) 느슨 모래

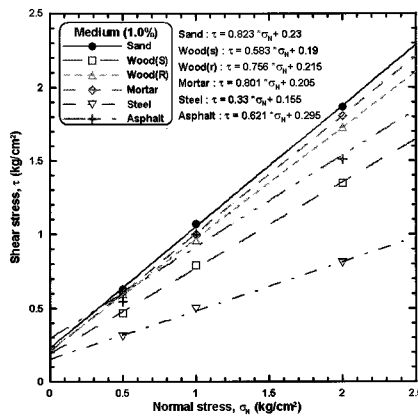


(b) 조밀 모래

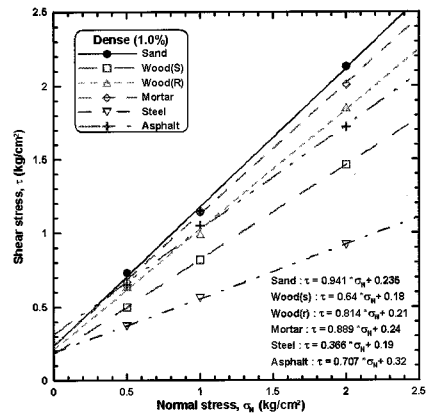
그림 4. 파괴 포락선(전단속도 0.1%/min)



(a) 느슨 모래



(b) 중간 모래



(c) 조밀 모래

그림 5. 파괴 포락선(전단속도 1.0%/min)

표 4. 모래 내부마찰각(ϕ) 및 건설재료들의 표면마찰각(δ)

전단속도	상부 모래상태	마찰각 및 계수	하부재료					
			모래	매끈면 목재	거친면 목재	물탈	강재	역청재
0.1%/min	느슨	ϕ or $\delta(^{\circ})$	34.84	31.96	32.66	33.26	14.36	27.34
		μ^*	-	0.896	0.921	0.942	0.368	0.743
	조밀	ϕ or $\delta(^{\circ})$	42.58	32.33	37.38	41.89	19.14	33.54
		μ	-	0.689	0.831	0.976	0.378	0.721
1.0%/min	느슨	ϕ or $\delta(^{\circ})$	35.15	28.85	34.06	34.72	16.01	29.07
		μ	-	0.782	0.960	0.984	0.408	0.790
	중간	ϕ or $\delta(^{\circ})$	39.45	30.24	37.09	38.69	18.26	31.84
		μ	-	0.708	0.919	0.973	0.401	0.755
	조밀	ϕ or $\delta(^{\circ})$	43.26	32.62	39.15	41.64	20.10	35.26
		μ	-	0.680	0.865	0.945	0.389	0.751

$$* \mu = \frac{\tan \delta}{\tan \phi}$$

3.4 전단속도의 영향

전단속도의 영향을 파악하기 위하여 느슨한 상태와 조밀한 상태의 모래에 대하여 0.1, 1.0%/min의 두 가지 전단속도로 시험을 실시하였다.

전단속도에 대한 연구는 기존의 많은 학자들에 의하여 연구되었으며, 연구결과 일반적으로 전단속도가 빨라짐에 따라 마찰각이 증가된다고 하였다. Al-Mhaidib(2005)은 5 가지의 전단속도로 모래와 강재의 직접전단시험을 실시한 결과 전단속도가 빨라짐에 따라 모래의 내부마찰각(ϕ)은 반대수 그래프 상에서 1.5의 기울기로 증가되었으며, 강재와의 표면마찰각(δ)은 1.4의 기울기로 증가되었다고 하였다.

기존의 연구결과와 마찬가지로 본 연구에서도 그림 6과 같이 두 가지 전단속도에 대한 마찰각을 비교한 결과 전단속도 1.0%/min의 마찰각이 0.1%/min일 때 보다 전반적으로 약간 크게 나타났다. 평균적으로 느슨한 모래에서는 1.0%/min의 결과가 0.1%/min의 결과보다 약 1.9%, 조밀한 모래에서는 약 2.5%정도 크게 나타나 전단속도가 빠를수록 마찰각의 조금 증가되었고, 또한 느슨한 모래보다 조밀한 모래에서 전단속도에 대한 영향이 더 크게 미치는 것을 알 수 있었다.

3.5 간극비의 영향

낙동강 모래의 간극비 혹은 상대밀도에 따른 모래의 내부마찰각과 그리고 건설재료들의 표면마찰각 변화를 살펴보기 위하여 일반적으로 가장 많이 사용되는 전단속도 1%/min의 경우에 대하여 그림 7과 같이 간극비(e)

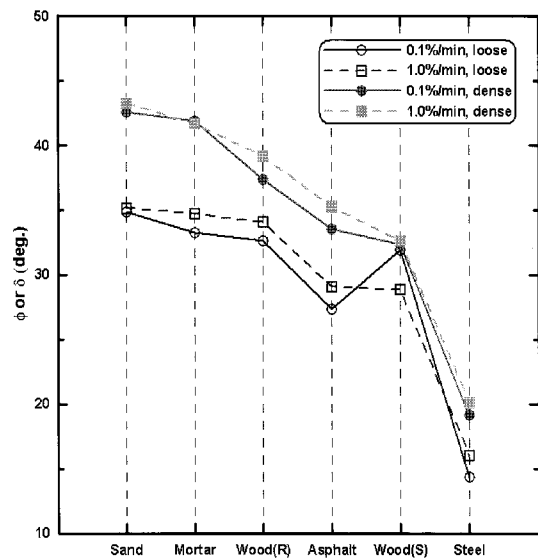


그림 6. 전단속도에 따른 마찰각 비교

와 상대밀도(Dr)의 변화에 따른 마찰각을 도시하였으며, 또한 낙동강 모래의 간극비와 상대밀도로부터 내부마찰각과 건설재료간의 표면마찰각을 산정할 수 있는 식을 제시하였다. 제시된 식을 통하여 낙동강 모래지반의 상태와 건설재료에 따라 마찰각을 간단히 구할 수 있어 낙동강 유역에 건설되는 다양한 구조물의 기초설계 시 도움이 되리라 생각된다.

그림 7에서 보듯이 모든 경우에 있어서 모래의 간극비가 작아짐에 의한 조밀화에 비례하여 마찰각의 선형적인 증가를 보였다. 모래의 조밀화에 따른 마찰각의 증가는 모래에서 가장 크게 나타났고, 물탈, 역청재, 거친면 목재, 강재, 매끈면 목재의 순으로 크게 나타나 건설재료의 상대적 표면거칠기 크기와는 연관성이 없었다.

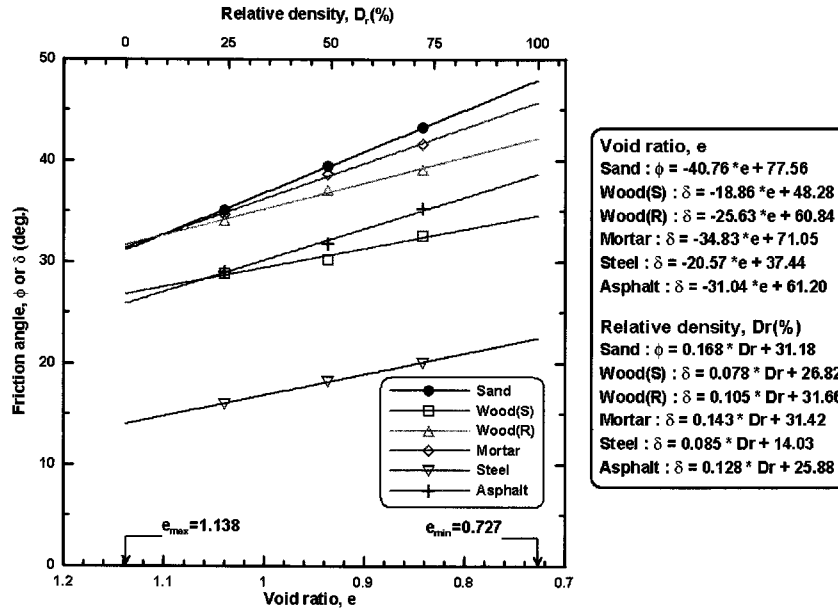


그림 7. 간극비(상대밀도)에 따른 마찰각의 변화

4. 결론

본 연구에서는 낙동강 유역에 분포하는 모래의 내부 마찰각과 모래와 건설재료들과의 접촉면에서 발생하는 표면마찰각의 특성을 파악하기 위하여 모래의 상대밀도와 전단속도를 변화시켜 목재, 강재, 몰탈, 그리고 역청재와 같은 건설재료에 대하여 일련의 직접전단시험을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모래의 내부마찰각이 모래와 건설재료간의 표면마찰각보다 항상 크게 나타났다. 건설재료의 표면마찰각 크기는 상부모래가 느슨한 상태의 전단속도 0.1%/min일 때를 제외하고는 모두 몰탈, 거친면 목재, 역청재, 매끈면 목재, 그리고 강재의 순으로 크게 나타났으며, 이는 각 건설재료의 상대적 표면거칠기 크기의 순서와 동일하여 표면거칠기가 표면마찰각에 큰 영향을 미치는 주요인자임을 알 수 있었다.
- (2) 기존의 연구결과와 마찬가지로 전단속도에 따른 마찰각을 비교한 결과 평균적으로 느슨한 모래에서는 1.0%/min의 결과가 0.1%/min의 결과보다 약 1.9%, 조밀한 모래에서는 약 2.5%정도 크게 나타나 전단속도가 빠를수록 마찰각의 조금 증가되었고, 또한 느슨한 모래보다 조밀한 모래에서 전단속도에 대한 영향이 더 크게 미치는 것을 알 수 있었다.
- (3) 모래의 간극비가 작아짐에 의한 조밀화에 따라 모든 경우에서 마찰각 증가는 선형적으로 비례하여

증가하였으며, 간극비와 상대밀도의 변화에 따른 낙동강 모래의 내부마찰각과 건설재료간의 표면마찰각을 산정할 수 있는 식을 제시하였다.

참고 문헌

1. Acar, Y. B., Durgunoglu, H. T., and Tumay, M. T. (1982), "Interface Properties of Sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.108, No.4, pp.648-654.
2. Al-Mhaidib, A. I. (2005), "Shearing Rate Effect on Interfacial Friction Between Sand and Steel", *Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2005)*, Seoul, Korea, Vol.2, pp.633-640.
3. Coyle, H. M., and Sulaiman, I. H. (1967), "Skin Friction for Steel Piles in Sand", *Journal of Soil mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.93, SM6, pp.261-278.
4. Oda, M. (1972), "Initial Fabrics and Their Relations to the Mechanical Properties of Granular Material", *Soils and Foundations*, Vol.12, No.1, pp.17-36.
5. Potyondy, J. G. (1961), "Skin Friction Between Various Soils and Construction Materials", *Geotechnique*, Vol.11, No.4, pp.339-353.
6. Uesugi, M., and Kishida, H. (1986), "Influential Factors of Friction Between Steel and Dry Sands", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.2, pp.33-46.
7. Yamamuro, J. A., Covert, K. M., and Lade, P. V. (1999), "Static and Cyclic Liquefaction of Silty Sands", *Proceedings of the International workshop on physics and mechanics of soil liquefaction*, Baltimore, Maryland, USA, pp.55-65.
8. 김상규, 이은수 (1996), "화강토와 보강재 경계면에서의 마찰계수에 관한 연구", *한국지반공학회는논문집*, 한국지반공학회, 제12권, 제2호, pp.107-114.
9. 신강호 (1990), "직접전단 실험에 의한 조립토와 건설재의 전단 및 마찰거동연구", 석사학위논문, 한국과학기술원.

(접수일자 2009. 3. 3, 심사완료일 2009. 4. 23)