

## 조밀한 건조조립토와 건설재료(콘크리트) 사이의 동마찰계수

### Dynamic Friction Behavior of Interfaces Between Dense Dry Granular Soils and Construction Material(Concrete)

김 대 상\* Kim, Dae-Sang

#### Abstract

Shaking table tests to investigate the dynamic friction behavior of interfaces between dense dry granular soils and construction material(concrete) were performed and the results are reported. The results show the variation of dynamic interface friction coefficients between dense dry granular soils and construction material was small in the sliding velocity range employed in this study. It was also observed that dynamic interface friction coefficients decreased as mean grain sizes of granular soils increased. These coefficients were compared with the friction coefficients obtained from the peak internal friction angles of the same granular soils by plane strain compression tests.

#### 요 지

조밀한 건조조립토와 건설재료(콘크리트)사이의 경계에서의 동마찰계수를 구하기 위하여 진동대를 사용하여 동적직접전단시험을 실시하였다. 조밀한 건조조립토와 건설재료사이의 동마찰계수는 본 연구에서 고려한 미끄러짐 속도의 범위안에서는 크게 변하지 않음을 알 수 있었다. 그리고 동마찰계수는 조립토의 평균입경이 증가함에 따라 감소하였고, 이에 대한 관계식을 제안하였다. 또한 이 계수를 같은 조립토에 대하여 실시한 평면변형률시험으로 얻어진 내부마찰각으로부터의 마찰계수와 비교하였다.

**Keywords :** Dynamic direct shear test, Interface friction coefficients, Shaking table

#### 1. 서 론

최근에 발생한 많은 지진 피해사례를 보면, 구조물과 지반의 경계에서 미끄러짐이 발생한 것을 많이 볼 수 있다. 지반으로부터 구조물에 전달되는 응력은 미끄러짐으로 인하여 경계부분이 접촉된 경우와는 달라지게 되며, 지반-구조물계의 응답을 정확히 파악하기 위하여는 경계에서의 미끄러짐 현상에 대한 이해가 반드시 필요하게 된다.

또한, 지반-구조물 상호작용을 고려하는 많은 수치해석적 연구들은 지반과 구조물사이의 미끄러짐을 모델링하기 위하여 Mohr-Coulomb 파괴기준을 사용하여 왔

다(Toki,1981). 따라서, 미끄러짐을 정확히 모델링하기 위해서는 경계면에서 미끄러지는 조건에서의 접촉력과 경계마찰각이 필요하게 되나, 이에 대한 연구는 아직 미흡한 상태에 있다.

현재까지, 지반과 건설재료사이의 정적마찰계수를 구하기 위한 시험은 많이 실시되어져 왔다. Potyondy (1961)는 조립토와 건설재료사이의 표면마찰에 대한 구성식을 구하기 위하여 다양한 조립토에 대한 시험을 통하여 흙에 대한 Coulomb 파괴포락선과 유사한 형태의 파괴조건식을 제안하였다. Yoshimi와 Kishida(1981)는 조립토와 강재 표면사이의 마찰저항이 강재 표면의 거칠기에 의하여 좌우됨을 보여주었다. Yegian과 Lahlaf

\* 정회원, 지진공학연구소 전임연구원 (Member, Research Professor, Korea Earthquake Engrg., Research Center)

(1992)는 토목섬유들사이에서 전달할 수 있는 한계전단 응력이 있다는 것을 동적전단시험 결과로부터 보고한 바 있다.

그러나, 조립토와 가장 대표적인 건설재료인 콘크리트재사이의 동적 경계마찰계수를 구한 결과를 찾기는 쉽지 않다. 따라서, 본 논문에서는 우선 조밀한 건조조립토와 콘크리트재료사이의 경계에서 미끄러짐속도를 변화시켜가면서 동마찰계수의 변화를 조사해 보았다.

## 2. 조립토와 건설재료의 성질

### 2.1 조립토

표 1 은 시험에 사용한 3가지 종류의 조립토에 대한 여러 성질들을 보여주고 있다. 가장 입경이 작은 Toyoura (모래)는 석영 함유량이 풍부한 일본 표준사이다. Ticino (모래)와 Hime(자갈)는 동마찰계수에 대한 입자크기의 영향을 파악하기 위하여 사용하였다. 그림 1은 시험에

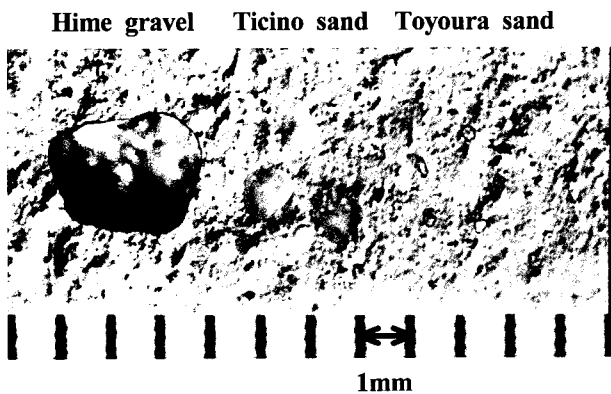


Fig. 1. Microscopic images of granular soils

Table 1. Properties of granular soils

Properties	Granular soils		
	Toyoura sand	Ticino sand	Hime gravel
$D_{10}(mm)$	0.137	0.372	1.50
$D_{50}(mm)$	0.206	0.527	2.01
$D_{60}(mm)$	0.216	0.564	2.09
$C_u$	1.58	1.52	1.40
$G_s$	2.636	2.680	2.650
$e_{max}$	0.973	0.960	0.633
$e_{min}$	0.612	0.590	0.514

$C_u$ =uniformity coefficient,

$G_s$ =specific gravity,

$e_{max}$ =void ratio of soil in loosest condition,

$e_{min}$ =void ratio of soil in densest condition

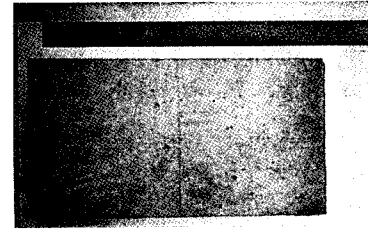


Fig. 2. Concrete plate

Table 2. Surface roughness of the concrete plate

Plates	$R_{max,2.5}(\mu m)$	$R_{max,12}(\mu m)$
Cconcrete	30~80	50~120

사용한 콘크리트 플레이트의 위에 놓인 조립토들의 사진으로, 조립토들의 상대적인 크기와 형상을 보여주고 있다. 지반-구조물 경계면에서 전달되는 최대전단응력을 구하기 위하여 가능한 조밀한 시험체를 제작하였다.

### 2.2 건설재료(콘크리트재와 강재)

그림 2는 시험에 사용된 콘크리트재 플레이트를 보여 준다. 두께 100mm의 보도용으로 사용되는 콘크리트 블록을 길이 300mm, 폭 140mm크기로 절단하여 19개의 콘크리트 플레이트를 만들었다.

플레이트들의 표면거칠기는 1  $\mu m$ 의 해상도를 가진 레이저 변위센서(KEYENCE LK030)를 이용하여 미끄러짐 방향과 미끄러짐 직각방향으로 12곳에 대하여 측정하였다. 플레이트의 표면거칠기는 정해진 측정길이(gage length)에서의 최대높이와 최저높이 사이의 상대높이( $R_{max,gage length}$ )로 표현하였다. 상대높이  $R_{max,gage length}$ 는 두 종류의 측정길이 2.5mm와 12mm에 대하여 측정

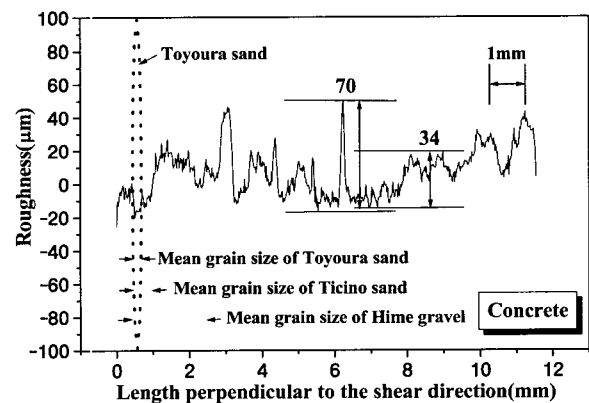


Fig. 3. Roughness of a concrete plate

하였다. 여기서, 측정길이 12mm는 Hime(자갈)의 평균 직경의 6배에 해당하는 값이다.

미끄러짐방향과 그 직각방향에 대한  $R_{max, gogelength}$ 의 차이는 적었으며, 그림 3은 콘크리트재의 미끄러짐 직각방향에 대한 표면거칠기를 보여주고 있다. 또한, 그림 3은 콘크리트플레이트의 표면거칠기와 함께 3종류의 조립토들에 대한 평균입径의 상대적인 크기를 보여준다. 표 2는 측정된 콘크리트재 플레이트의 표면거칠기의 상대높이를 정리한 결과이다. 표면거칠기의 상대높이는  $R_{max, 2.5}$ 에 대하여는 30~80  $\mu m$ ,  $R_{max, 12}$ 에 대하여는 50~120  $\mu m$ 의 범위에 있었다.

### 3. 시험개요

#### 3.1 시험장치

동적직접전단시험을 수행하기 위하여 새로운 시험장치가 고안되었다. 그림 4는 이 장치의 개요도이다. 전단 박스는 높이 40mm의 원형스틸로 내경 90mm에 두께 10mm로 제작되었다. 시험체 시료의 높이를 20mm로 하기 위하여, 전단박스의 뒷개는 높이 20mm에 직경 90mm로 만들었다. 이 전단박스는 시험시에 H-beam 위에 고

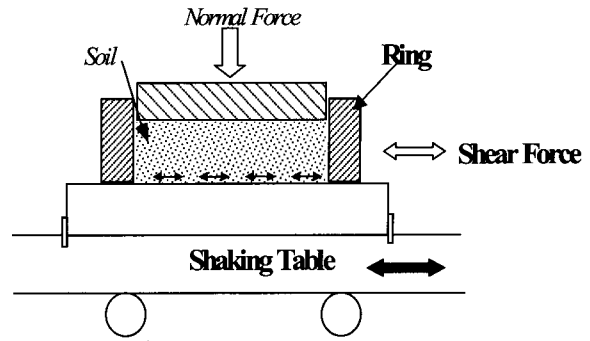


Fig. 5. Conceptual diagram of dynamic direct shear test using a shaking table

정된 프레임 안에 놓이는 콘크리트재 플레이트 위에 놓이게 된다.

245N의 용량을 가진 두 개의 로드셀로 경계면에서 발생하는 반력을 측정하였으며, 이들은 박스형의 프레임 앵커에 설치되었다. 전단박스와 로드셀을 연결하기 위하여 긴 너트형 막대를 사용하였으며, 이 막대의 끝부분에 전단박스의 수직운동으로 인해 발생하는 영향을 최소화하기 위하여 힌지를 설치하였다.

H-beam위에 설치한 두 개의 가속도계를 이용하여 플레이트의 수평, 수직운동을 측정하였고, 변위 센서를 이용하여 진동대 운동과 시험체 시료의 파괴변화를 측정하였다.

#### 3.2 시험방법 및 절차

총19회의 동적 직접전단시험을 실시하였다. 조립토와 건설재료사이에 동적 전단력을 가하기 위하여 진동대를 사용하였으며, 그림 5는 이 시험의 개념도를 보여준다. 진동대는 유압식으로 최대적재중량이 4900N이었다.

그림 6은 진동대의 변위를 측정하기 위하여 설치한 변위 센서로부터 측정된 입력운동을 보여주고 있다. 입력운동의 진폭은 10mm이었고, 최대 미끄러짐 속도로 각각 0.02, 2, 15 그리고 154mm/sec를 사용하였다. 이 미끄러짐 속도는 Newmark(1965)의 미끄러짐으로 인한 영구변형에 대한 연구 결과와 Yegian(1992)의 영구변위에 관한 연구로부터 평가되었다. 사용한 미끄러짐 속도들은 강진에 의한 미끄러짐 속도를 전부 고려할 수는 없으나, 어느 정도까지는 고려할 수 있으리라 판단된다.

지표로부터 깊이 5m까지의 토피압에 의한 영향을 고려하기 위하여 3종류의 수직응력 13.5kPa, 45kPa, 75kPa에 대하여 시험을 실시하였다. 다음은 각 시험시의 시험

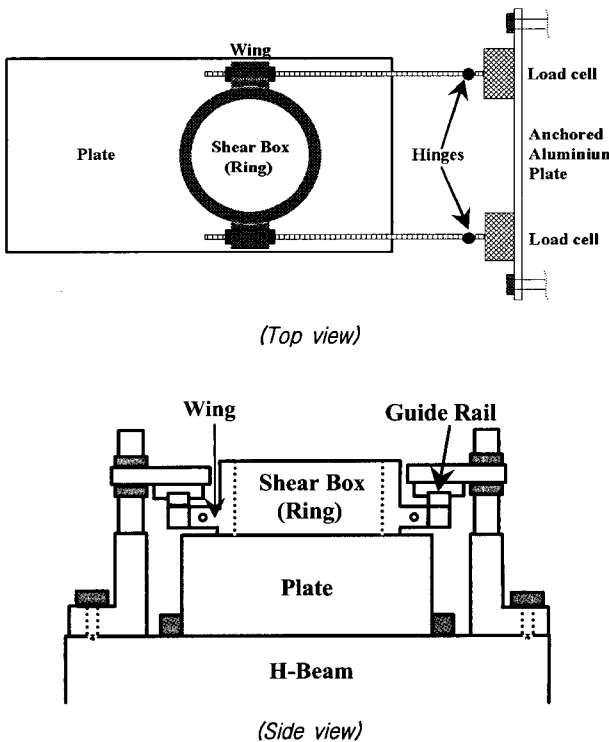


Fig. 4. Schematic layout for dynamic direct shear test

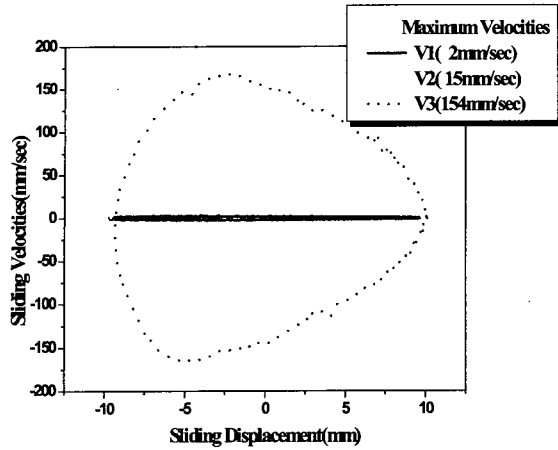


Fig. 6. Velocities of input motions

절차이다.

- 1) 콘크리트재 플레이트를 H-beam 위에 고정시킨다.
- 2) 전단박스과 플레이트사이에 간극을 형성하기 위하여 0.1mm 두께의 간극재를 두었다.
- 3) 전단박스를 간극재 위에 놓고 힌지를 가진 두개의 긴 너트형 막대를 사용하여 전단박스를 로드셀에 연결하였다.
- 4) 시험체는 정해진 중량의 조립토를 공중낙하법을 이용하여 만들었다. 이때, 95%의 상대밀도를 얻기 위하여 나무망치로 덮개를 두드려서 원하는 시험체를 만들었다.
- 5) 수직력은 알루미늄 막대에 매단 사하중을 이용하여 덮개 위쪽으로부터 가하였다.
- 6) 전단동안 발생하는 시료의 파괴변화를 측정하기 위하여 변위센서를 알루미늄 막대 바로 위에 설치하였다.
- 7) 삽입되어 있는 간극재를 뽑아내고, 진동대를 가동시켜 전단박스과 플레이트사이에 상대변위를 발생시켰다.

이 시험법에서는 H-beam 위에 고정된 플레이트와 함께 진동대가 움직이고, 시료를 포함하고 있는 전단박스는 정지한 상태로 있게 되므로, 전단박스의 운동으로 발생하는 관성력으로 인한 영향은 최소화 시킬 수 있었다. 또한, 전단시에 미끄러짐 변위가 증가함에도 불구하고 경계면의 면적은 항상 일정하게 유지할 수 있었다.

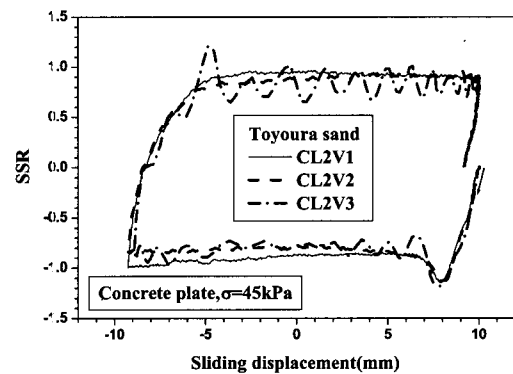
#### 4. 시험결과 및 고찰

##### 4.1 전단응력-미끄러짐 변위사이의 관계

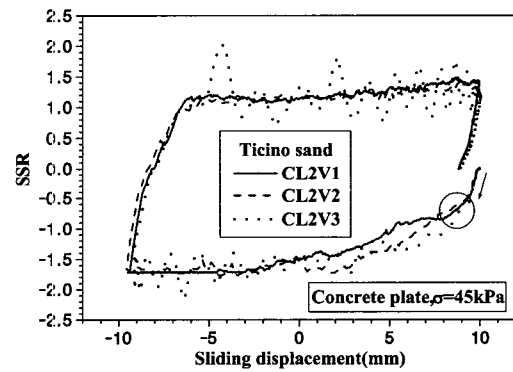
가해진 수직력과 측정된 전단력의 비로부터 전단응력비(SSR)를 구하였다. 건조한 조립토의 경계마찰각은 구해진 SSR로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta = \tan^{-1}(\tau/\sigma) \quad (1)$$

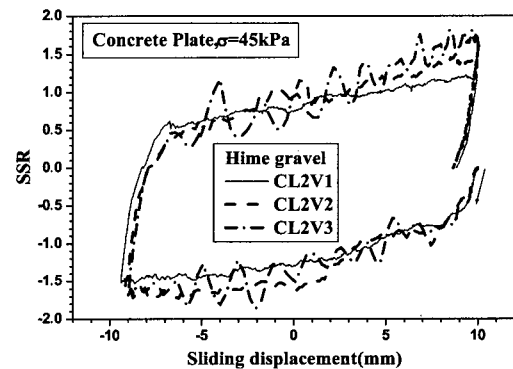
콘크리트재 플레이트와 3종류의 조립토에 대한 SSR-미끄러짐변위에 대한 시험결과가 그림 7a, 7b 그리고 7c에 주어져 있다. 이 시험들로부터 최대 응력 후 연화거동, 최대 응력 후 경화거동을 보이는 2종류의 이력곡선



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Relationships between SSR and sliding displacement

Table 3. PSSR and RSSR for concrete plates

Specimen	Types of plates	Granular soils	Toyoura sand		Ticino sand	Hime gravel
		Normal stresses (kPa)	PSSR	RSSR	PSSR	PSSR
CL1V0	Concrete	13.5	-	-	-	0.64
CL1V1	Concrete	13.5	1.3	0.85	0.84	0.64
CL1V2	Concrete	13.5	1.25	0.75	0.79	0.6
CL1V3	Concrete	13.5	1.2	0.75	0.88	0.75
CL2V1	Concrete	45	1.15	0.8	0.71	0.6
CL2V2	Concrete	45	1.15	0.75	0.62	0.58
CL2V3	Concrete	45	1.25	0.75	0.77	0.66

Note:L1(13.5kPa),L2(45kPa),V0(0.02mm/sec),V1(2mm/sec),V2(15mm/sec),and 3(154mm/sec) (- : not tested)

이 얻어짐을 알 수 있었다.

최대 응력 후 연화거동을 보이는 경우에 대하여는, 미끄러짐변위가 0~3mm범위에서 최대응력비(PSSR)를 구하였다. 여기서 3mm가 사용된 이유는 PSSR이 1~3mm 범위에서 주로 측정되었고, 이 값이 직접전단시험에 사용되는 전단박스 직경의 2~5%보다 작았기 때문이다(O'Rourke,1990). 잔류응력비(RSSR)은 최대응력비가 발생한 후에 나타나는 최소응력비로서 정의하였다. 최대 응력 후 경화거동을 보이는 경우에 대하여는, 가장 큰 곡률을 가지는 항복점으로부터 PSSR만을 정의하였다.

시험으로부터 구해진 콘크리트재에 대한 PSSR과 RSSR을 표 3에 정리하였다. 표 3에서 C는 콘크리트재를 의미하며, L1,L2 및 L3는 수직응력이 13.5kPa, 45kPa, 75kPa인 경우를, V0~V3는 최대 미끄러짐 속도가 0.02, 2, 15 및 154mm/sec인 경우를 나타낸다.

그림 8은 전단응력비에 대한 다이러턴시의 영향을 조사하기 위하여 측정된 알루미늄 막대와 변위계사이의 간극의 변화를 보여 주고 있다. 미끄러짐 변위에 대한

시료 높이 변화의 비 (1.04/40=0.026)가 3%보다 작아서, SSR에 대한 다이러턴시에 의한 영향은 크지 않다고 판단하였다.

#### 4.2 조립토와 콘크리트재사이의 PSSR과 RSSR

콘크리트 플레이트와 Toyoura(모래)사이에서의 SSR은 최대 응력 후 연화거동을 보였고, 따라서 PSSR과 RSSR이 모두 구하여 졌다. 다른 조립토, Ticino(모래)와 Hime(자갈), 에서는 최대 응력 후 경화거동이 관찰되어 PSSR만이 구해졌다.

Toyoura(모래)의 경우, PSSR은 1.2~1.3범위에, RSSR은 0.75~0.85범위에 있음을 확인할 수 있었다. 그림 9에서 보여지는 것처럼 PSSR의 평균값은 1.22로 이를 각도로 환산하면, 50.7°에 해당한다. 이 PSSR에 상응하는 경계마찰각은 같은 조립토에 대한 평면변형률시험으로부터 구한 내부마찰각보다 약간 크거나 같은 정도였다. 이는 Toyoura(모래)의 경우, 콘크리트재의 표면거칠기(70 μm)에 대하여 상대적으로 작은 평균입경(D<sub>50</sub>:0.2mm=200 μm)을 가지고 있기 때문에, 경계면에서의 구속으로 인하여 전단파괴면이 경계면에서 발생하지 않고, 시료의 내부에서 발생하였기 때문으로 판단된다. 표 4는 시험에 사용된 조립토에 대한 평면변형률시험 결과를 보여준다(Yoshida,1994).

Ticino(모래)와 Hime(자갈)의 경우, 최대 응력 후 경화거동으로 시험의 초기단계에서 PSSR만을 구할 수 있었으며, 이 경화거동은 다음과 같이 설명 될 수 있다. 미끄러짐 변위가 점차 증가함에 따라, 진동대 변위 증가 방향의 반대방향으로 조립토의 밀도가 증가하는 현상이 시험으로부터 관찰되었다. 이 증가된 밀도로 인한 전

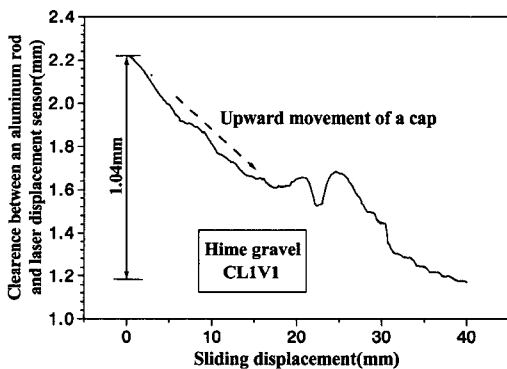


Fig. 8. Volume change of the soil specimen during shear

Table 4. Peak and residual internal friction angles from the plane strain compression test (axial strain velocity: 0.0625%/min)

Granular soils	Confining Pressure(kPa)	$D_r$ (%)	$\phi_{peak} (^{\circ})$	$\phi_{res} (^{\circ})$
Toyoura sand	78.4	84.5	46.1	39.5
	196	86.7	45.9	22.8
	392	86.4	45.0	33.7
Ticino sand	78.4	81.9	48.1	34.8
	392	75.9	45.7	34.5
Hime gravel	78.4	(83.2)	48.7	37.4
	78.4	(89.1)	49.9	40.2

Note : ( ) is the relative densities modified by Hardin's equation(1985).

단박스의 미세한 경사로 인하여 작은 조립토 입자가 전 단박스와 플레이트사이의 간극속으로 끼여 들어가는 현상을 관찰할 수 있었다. 이 끼여진 조립토 입자는 콘크리트 플레이트 표면에 긁힘현상을 발생시키면서, 결과적으로 SSR이 증가하는 현상을 초래하였다. PSSR 도 같은 영향을 받을 수 있으나, 시험초기단계에서는 이 현상에 의한 영향이 크지 않음을 확인할 수 있었다. Ticino (모래) 와 Hime(자갈)의 평균 PSSR은 각각 0.77( $\delta_{peak} = 37.6^{\circ}$ )과 0.64( $\delta_{peak} = 32.6^{\circ}$ )로 얻어졌다. 비록, 상대밀도에 있어서 약간의 차이(95%:동적직접전단시험과 80~90%:평면변형률시험)가 있으나, 경계마찰각은 같은 조립토에 대하여 구해진 평면변형률시험으로부터 구한 내부마찰각(표 4)의 약 3/4정도임을 확인할 수 있었다.

#### 4.3 미끄러짐 속도 및 조립토의 입자크기의 영향

그림 9는 조립토의 경계마찰계수가 시험에서 고려된 미끄러짐 속도의 범위안에서는 크게 영향을 받고 있지 않음을 보여준다. 그림 10은 Hime(자갈)의 L1경우의 미끄러짐 속도들을 다르게 한 경우에 대한 SSR의 변화를 비교하여 보여주고 있다. 이 그림으로부터 V3의 경우 PSSR이 약 10%증가하나, L2의 경우 표 3으로부터 PSSR이 증가하는 경향을 보이지 않는 것으로 보아, 작은 수직응력의 경우 미끄러짐 속도 증가 시 상재 하중의 요동이 PSSR증가의 원인인 것으로 판단되었다.

그림 11은 콘크리트재의 경우에 조립토의 평균입경이 PSSR에 어떻게 영향을 미치는 지를 보여 주는 그림이다. 그림 11은 CLIV0의 경우를 제외한 모든 속도와 수직응력에 대한 경우를 포함하고 있다. 조립토의 형상이 결과에 영향을 미칠수는 있으나, 그림으로부터 조밀한 조립토의 경우 평균입경이 커짐에 따라 PSSR이 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 회귀분석을 통하여 PSSR과 평균입경에 대한 관계식을 구하였다.

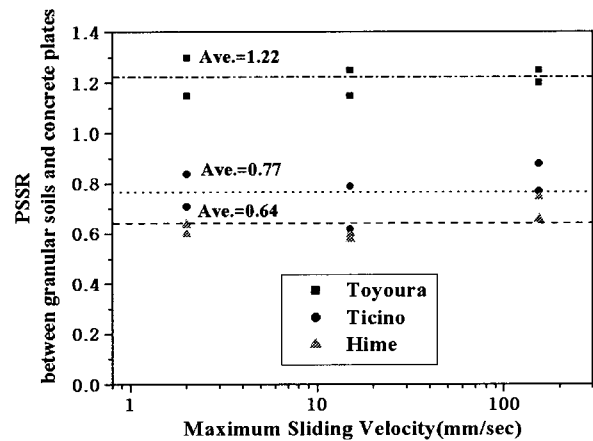


Fig. 9. PSSR between granular soils and concrete plates

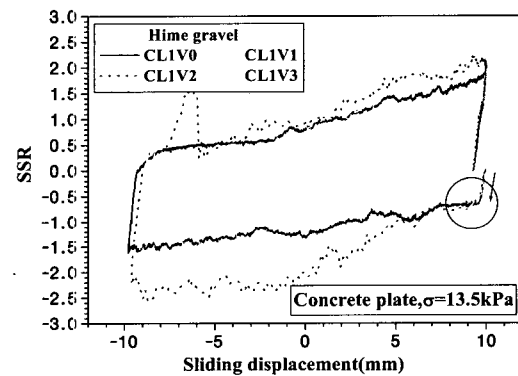


Fig. 10. Variation of SSR with four sliding velocities for Hime gravel

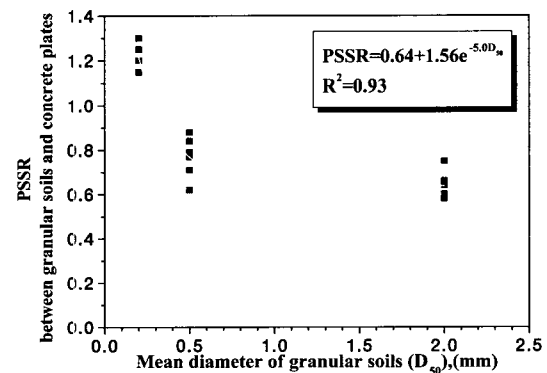


Fig. 11. Variation of PSSR with  $D_{50}$  between granular soils and concrete plates

## 5. 결 론

본 연구에서는 조밀한 건조조립토와 가장 대표적인 건설재료인 콘크리트재사이의 사이의 동적 경계마찰계수를 구하였다. 진동대를 이용한 실험을 수행하기 위하여 동적직접전단장치를 새롭게 고안하였으며, 다음과 같은 실험 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 미끄러짐 속도에 대한 조립토와 건설재료(콘크리트재)사이의 경계마찰계수 변화는 본 연구에서 사용한 속도 범위내에서는 작았다.
- (2) 두가지 유형의 전단응력-미끄러짐(최대 응력 후 연화거동과 경화거동) 이력곡선을 얻을 수 있었다. 최대 응력 후 연화거동은 사용한 콘크리트 플레이트의 표면거칠기에 대하여 상대적으로 작은 입경을 가진 조립토에서, 경화거동은 상대적으로 큰 입경을 가진 조립토를 사용한 시험에서 보여졌다.
- (3) 콘크리트재의 PSSR(최대전단응력비)은 Toyoura(모래)는 1.2~1.3, Ticino(모래)와 Hime(자갈)은 0.7~0.8 과 0.6~0.7범위에 있었다. 따라서 콘크리트 플레이트의 표면거칠기에 대하여 상대적으로 큰 입경을 가진 조립토에 대한 콘크리트재와의 경계마찰각은 같은 조립토의 평면변형률시험으로부터 구한 내부마찰각의 약 3/4의 값을 가짐을 알 수 있었다.
- (4) 조립토의 형상이 결과에 영향을 미칠수 는 있으나, 조밀한 조립토의 평균입경이 커짐에 따라 경계마찰계수가 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Frost, J.D. and Han, J.(1999), "Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(8), pp.633~640.
2. Hardin, B.O.(1985), "Crushing of soil particles. *Journal of Geotechnical Engineering Division*", ASCE, 111, No.GT10, Proc. Paper 20074.
3. Newmark, N.M.(1965), "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Fifth Rankine Lecture*, pp.139~159.
4. O'Rourke, T.D., Druschel S.J., and Netravali A.N.(1990), "Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces", *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(3), pp.451~469.
5. Potyondy, J. G.(1961), "Skin friction between various soils and construction materials", *Geotechnique*, 11(4), pp.339~353.
6. Toki, K., Sato, T., and Miura, F.(1981), "Separation and sliding between soil and structure during strong ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 9, pp.263~277.
7. Yegian, M.K. and Lahlaf, A.M.(1992), "Dynamic interface shear strength properties of geomembranes and geotextiles", *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(5), pp.760~779.
8. Yoshida, T.(1994), "Strain localization and shear banding during failure of sands", A Dissertation submitted for the degree of doctor of engineering at the graduate school of civil engineering, University of Tokyo.
9. Yoshimi, Y. and Kishida, T.(1981), "A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ. 4(4), pp.145~152.

(접수일자 2001. 10. 8, 심사완료일 2001. 12. 15)