

강재면과 사질토 사이의 경계면 마찰각 예측식 개발 및 불확실성 평가

Development and Uncertainty Assessment of Interface Friction Prediction Equation Between Steel Surface and Cohesionless Soils

이기철¹, 김소연², 김동욱^{3*}

Kicheol Lee¹, So-Yeun Kim², Dongwook Kim^{3*}

¹Member, Graduate Student, Dept of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

²Nonmember, Assistant Professor, College of Business Management, Hongik University, 2639 Sejong-ro, Jochiwon-eup, Sejong 30016, Republic of Korea

³Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

ABSTRACT

Characteristics of interface friction between cohesionless soils and geotechnical structure surfaces play an important role in the analysis of earth load and resistance on the structure. In general, geotechnical structures are mainly composed of either steel or concrete, and their surface roughnesses with respect to soil particle sizes influence the interface characteristics between soils and the structures. Accurate assessment of the interface friction characteristics between soils and structures is important to ensure the safety of geotechnical structures, such as mechanically stabilized earth walls reinforced with inextensible reinforcements, piles embedded into soils, retaining wall backfilled with soils. In this study, based on the database of high quality interface friction tests between frictional soils and solid surfaces from literature, equation representing peak interface friction angle is proposed. The influential factors of the peak interface friction angle are relative roughness between soil and solid surface, relative density of frictional soil, and residual (constant volume) interface friction angle. Furthermore, for the developed equation of the interface friction angle, its uncertainty was assessed statistically based on Goodness-of-fit test results.

요 지

지반구조물에서는 흙과 구조물 사이의 상호 마찰 특성이 구조물에 작용하는 하중과 저항 분석에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 지반구조물의 주재료로서 콘크리트 또는 강재가 많이 사용되며, 흙 입자 크기와 비교하여 마찰면의 거칠기 정도에 따라 경계면 마찰 특성이 큰 차이를 보인다. 특히 비신장성 보강재를 사용하는 보강토 옹벽, 말뚝 주면, 옹벽면 등의 지반구조물에 대해서는 흙과 구조물 사이의 마찰특성을 합리적으로 분석하여 구조물의 안전성을 확보하여야 한다. 구조물면과 사질토 사이의 마찰특성에 대하여 보다 정확한 예측식을 제시하고 이 예측식이 가지고 있는 불확실성을 제시하는 것은 지반-지반구조물의 신뢰성 분석에 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 기존 양질의 연구 문헌들에 보고된 흙과 거칠기가 다른 면 사이의 마찰실험결과를 분석하여, 강재와 사질토 사이의 침투 경계면 마찰각을 구하는 식을 제안하였다. 침투 경계면 마찰각을 결정하는 주요인자는 경계면의 상대조도, 흙의 상대밀도, 구속압, 한계상태 경계면 마찰각이다. 본 연구에서 개발한 침투 경계면 마찰각 예측식에 대한 불확실성을 통계적으로 Goodness-of-fit 시험 결과를 반영하여 평가하였다.

Keywords : Interface friction, Steel plate, Soil-structure interaction, Frictional soil, Uncertainty assessment

Received 11 Jun. 2018, Revised 19 Jun. 2018, Accepted 19 Jun. 2018

*Corresponding author

Tel: +82-32-835-8460; Fax: +82-32-835-0775

E-mail address: dwkim@inu.ac.kr (D. Kim)

1. 서 론

1990년대부터 많은 보강토의 시공이 이루어지고 있으

며, 최근에는 보강토 옹벽이 전체 옹벽의 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 보강토 옹벽은 매트나 띠 형태의 보강재를 잘 다진 성토흙 사이에 수평 또는 약간의 경사가 있게 설치하여 단단한 구조물 옹벽을 대체하는 다소 유연한 구조물이다. 이러한 보강토 옹벽에서 보강재와 되메움토 사이의 마찰특성이 내적 안정성 분석에 큰 영향을 미친다. 일반적인 옹벽, 지하구조물, 말뚝 주면, 개착식 터널 등 다양한 강재 또는 콘크리트를 경계로 가지는 지반구조물들은 흙 또는 암반과 경계하는 경우가 많다. 따라서 합리적인 지반구조물의 설계 및 시공을 위해서는 “강재, 콘크리트”와 “흙, 암” 사이의 마찰 특성 예측이 중요하다. 이러한 마찰 특성을 예측하기 위해서는 다양한 인자(하중조건, 흙의 조밀한 정도, 암반의 강도, 흙 또는 암반의 고유 마찰 특성, 강재 또는 콘크리트의 조도 등)에 대해 고려해야 한다.

강재 또는 콘크리트 지반구조물이 암반과 접할 경우, 암반과 구조물 사이를 흙 되메우기 또는 그라우팅 공법이 많이 사용된다. 하지만 암반과 구조물 사이의 마찰 특성을 직접적으로 규명하기는 현실적으로 어려운 실정이다. 사질토 흙과 이질재료와의 경계 마찰 특성에 대해서는 국외의 많은 연구자들이 수행하였다(Reddy et al., 2000; Uesugi et al., 1990; Subba et al., 1998; Lings and Dietz, 2005; Porcino et al., 2003). Reddy et al.(2000)은 말뚝의 지지력 추정과 관련하여 토양과 말뚝 경계면의 마찰각을 측정하였으며, Uesugi et al.(1990)은 반복하중에 따른 모래와 콘크리트의 마찰 실험을 진행하였다. Subba et al.(1998)은 두 이질재료의 상대거칠기에 대해 정의하였으며, Lings and Dietz(2005)는 다양한 거칠기의 모래와 강판에서 전단시험을 수행하고, 침투 계면 마찰발생 비율은 주로 모래의 입자 크기와 관련된다 고 하였다. 또한, Porcino et al.(2003)의 경우 마찰 거동을 제어하는 주요 요인의 영향을 파악하고자 하였다. 이밖에도, Paikowsky et al.(1995)는 기존의 직접전단시험기를 응용하여 흙과 고체면과의 사이에 경계면 마찰특성을 실험적으로 분석하였으며, Uesugi and Kishida (1986)는 직접단순전단시험기(simple shear test apparatus)를 이용하여 흙-강재 사이의 경계면 마찰특성을 분석하였다. 하지만, 국내에서는 Lee et al.(1999)가 소일 네일링과 흙과의 경계 마찰특성에 대한 연구를 진행하기는 하였지만 많은 연구가 진행되지는 않았다.

흙과 구조물 경계면의 마찰 특성을 분석하기 위해서는 경계면의 거칠기에 대한 상대적인 흙의 입경 크기를 분석해야 한다. 이러한 분석을 위해서는 두 개의 상하부 박스

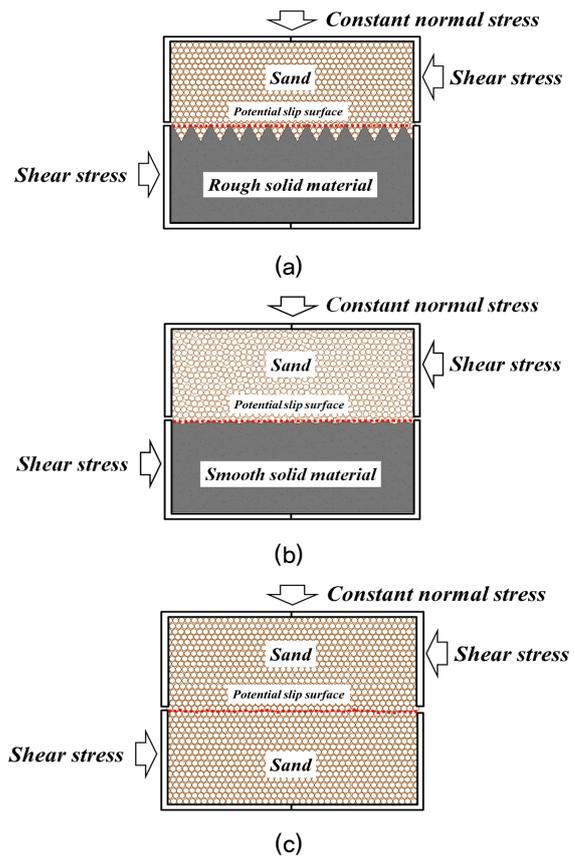


Fig. 1. Interface between materials in the upper and lower cases: (a) sand to rough solid material, (b) sand to smooth material, and (c) sand to sand

에 이질적인 재료를 넣고 전단시험을 하게 된다. 일반적으로 응용이 가장 쉬운 이질 경계면 마찰특성을 알기 위해서 수행하는 수정된 직접전단시험 모식도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1(a)는 흙의 입자 크기에 비하여 거칠기가 큰 재료면을 과장하여 모사하였다. 이 경우, 거친 흙(큰 요철) 사이의 틈에 흙의 입자들이 밀실하게 채워지게 된다. 흙과 거친 재료면 사이 경계면에 전단력이 작용할 경우 흙 입자들의 맞물림(interlocking)이 충분히 발생하여 요철과 입자 사이의 미끄러움이 잘 발생하지 않게 된다. 따라서, 가상의 파괴면은 거친 요철 상단부 근처에서 형성되고 이면을 기준으로 상대변위가 발생하기 때문에 흙 입자 사이에서 가상의 파괴면이 발생된다고 할 수 있다.

Fig. 1(b)는 거칠기가 크지 않고 부드러운 경계면을 가질 경우를 나타낸다. 해당 경우에 경계면 사이의 작은 요철 내에 흙 입자들은 맞물림(interlocking)이 될 정도로 충실히 채워지 못하게 된다. 따라서 흙과 재료면 사이의 경계면에 전단력이 가해질 경우, 흙 입자들은 거칠지 않은 면 요철을 쉽게 넘어 타기 때문에 큰 전단력이 발생하지

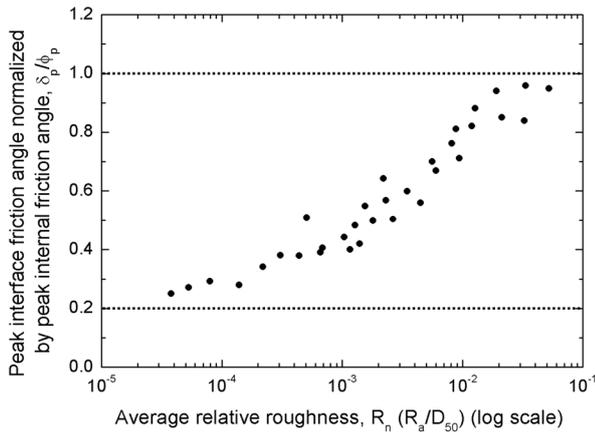


Fig. 2. Relationship between average relative roughness $R_n (=R_a/D_{50})$ and peak interface friction angle normalized by peak internal friction angle (δ_p/Φ_p) of soils [revised using data from Subba et al.(1998) and Lings and Dietz(2005)]

않는다. 이 때, 가상 파괴면은 재료면에 따라 형성될 것이다.

Fig. 1(c)는 아래 위 박스에 모두 모래를 넣고 가상 경계면에 전단력을 가한 경우를 나타낸다. 전단시험기의 가상 파괴면을 따라 전단력이 가해질 경우, 가상 파괴면 주변의 흙 입자들이 서로 저항하며 맞물림이 발생하게 된다. 따라서, 가상 경계면에서는 흙 입정에 비례하는 거칠기가 모사된다. 결과적으로 직접전단시험 관점에서 보면 Fig. 1(c)와 같은 조건의 실험은 Fig. 1(a)와 같은 조건(흙과 인접한 면의 거칠기가 아주 클 경우)과 유사한 마찰거동 결과를 나타낼 것이다. 단지, Fig. 1(a)의 경우에는 강성이 큰 재료면이 전단될 경우에도 변하지 않는 절대 경계조건과 같다면, Fig. 1(c)의 경우에는 전단되는 동안 가상 파괴면 기준 양쪽(아래와 위) 모두 입자들이 움직이기 때문에 가상 파괴면 주변 강성에서는 다소 차이가 날 수 있다.

위에 언급된 바와 같이 Fig. 1(a)의 경우와 Fig. 1(c)의 경우에는 경계면 거동이 유사하기 때문에, 다양한 연구자들(Potyondy, 1961; O'Rourke et al., 1990; Reddy et al., 2000; Uesugi et al., 1990; Subba et al., 1998)은 거칠기가 아주 거친 면에서의 흙과 면 사이의 경계면 마찰각은 흙의 내부마찰각과 유사하다는 것을 실험적으로 확인하였다. Fig. 2는 Subba et al.(1998)과 Lings and Dietz(2005)에서 수행된 흙과 어느 정도 거칠기가 있는 면 사이의 전단시험 결과를 정리하여 도출된 “평균상대조도(R_n)”와 “흙의 첨두 내부마찰각 대비 발견되는 첨두 경계면 마찰각(δ_p/Φ_p)”의 관계를 나타낸다. 사용된 흙은 두 종류의 사질토이며, 각각의 D_{50} 은 0.44mm와 0.78mm이다. 또한 구조물면을 모

사한 재료면 평균 조도는 0.36~300 μ m의 범위이다. 이때 D_{50} 은 전체 흙의 중량 100%에 대하여 입도분포의 누적곡선이 50%에 해당하는 점의 입경이다. D_{50} 은 흙입자의 크기의 평균값이라고는 할 수 없지만 다양한 크기의 흙입자들이 혼합되어 있을 경우 대표 입경으로 간주된다.

2. 강재면과 사질토 사이의 마찰 특성 시험 데이터 수집

사질토와 구조물면과의 경계면 마찰각에 대한 여러 가지 연구들이 수행되었다(Reddy et al., 2000; Uesugi et al., 1990; Subba et al., 1998). 기존 연구에서는 사질토와 구조물면 사이의 경계면 마찰각을 분석하기 위하여 다음과 같이 세 가지 변수들을 고려하였다. 세 가지 변수는 (1) 사질토 입자의 크기에 대한 상대적인 구조물면의 거칠기 정도; (2) 구조물면과 수직되게 사질토에 작용하는 구속압; (3) 사질토의 상대밀도이다. 구조물면의 상대적 거칠기 정도는 사질토-구조물면의 경계면 마찰각(또는 마찰계수)을 결정하는 중요한 변수이며, 실제 구조물에서의 연직 구속압과 사질토의 상대밀도는 사질토-구조물면 상호작용에 의해 전단력이 가해지는 동안 변화하는 변수이다. 전단력이 가해질 경우 변화할 수 있는 사질토 내부 구속압과 상대밀도는 시험 과정에서 정량적으로 분석하기가 불가하기 때문에 모두 시험전 초기 값을 사용하였다.

두 이질재료의 경계면 마찰각을 결정하는 방법은 여러 가지가 있지만, 대표적인 방법 중 하나로는 직접전단시험 장치를 Fig. 3과 같이 구성하여 경계면 마찰각을 결정하는 방법이 있다(Porcino et al., 2003). 시험 방법은 두 개의 상하부 전단박스에 각각 이질재료를 넣고 전단력을 가하며 상부에 일정한 연직압력을 작용시킨다. 이 때 일반적으로 느슨한 사질토의 경우 수축거동(contractive behavior)을 보이고, 조밀한 사질토의 경우 팽창거동(dilative behavior)을 보이게 된다.

3. 강재면과 사질토 사이의 마찰각 공식 산정

사질토의 내부마찰각을 구하는 식은 Bolton(1986)에 의해 제시되었다. Bolton(1986)은 마찰특성이 강한 사질토의 첨두 내부마찰각(ϕ_p)과 한계상태 내부마찰각(ϕ_c)의 차이는 시험조건, 사질토의 상대밀도, 파괴 시 받는 평균 구속 압력에 영향을 받는다고 가정하고 식 (1)과 같은 식을

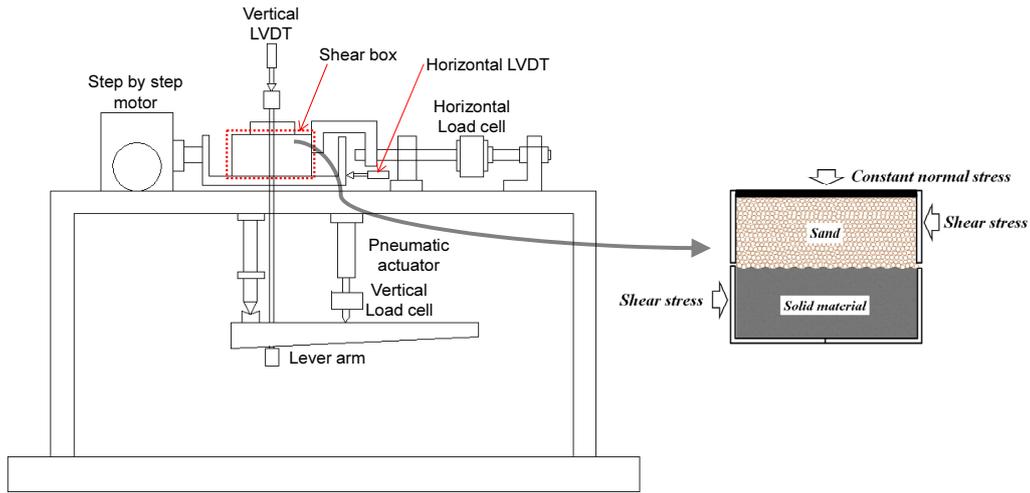


Fig. 3. Schematic figure of modified direct shear test for interface friction angle between two different materials (modified after Porcino et al., 2003)

많은 실험결과를 바탕으로 제시하였다.

$$\begin{aligned} \phi_p - \phi_c &= A_\psi \left\{ \left(\frac{D_R}{100} \right) \left[Q - \ln \left(\frac{100\sigma'_{mp}}{p_A} \right) \right] - R_Q \right\} \\ &= [5 - 2(k-1)] \left\{ \left(\frac{D_R}{100} \right) \left[Q - \ln \left(\frac{100\sigma'_{mp}}{p_A} \right) \right] - R_Q \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, A_ψ 는 시험조건을 고려한 변수, D_R 은 상대밀도(%), σ'_{mp} 는 마찰각(전단저항력)이 최대일 때의 평균구속압, p_A 는 기준압(reference pressure of 100 kPa \approx 대기압), Q 와 R_Q 는 흙 종류에 따른 fitting parameter들이다. 일반적인 사질토 흙의 Q 와 R_Q 값은 각각 10과 1이다. 마지막으로 k 는 삼축시험 조건에서는 1이고 평면변형률 조건에서는 2이다.

사질토와 사질토 사이의 경계면은 사질토와 거친면 사이의 경계면의 마찰특성과 유사하다. 따라서 본 연구에서는 Bolton(1986)이 제시한 $\phi_p - \phi_c$ 를 나타내는 관계식[식 (1)]에서 고려된 주요인자들[사질토의 상대밀도(D_R)와 파괴시 평균구속압력(σ'_{mp})]을 사질토-거친면 사이의 침투 경계면 마찰각(δ_p)을 산정하는데도 반영하고자 하였다. 하지만 흙-경계면 조건의 직접전단시험에서는 침투 경계면 마찰각(δ_p) 발현 순간의 구속압력을 측정하기 어렵기 때문에, 실험에서 항상 같은 값이 유지되는 초기 연직구속압력(σ'_{v0})을 고려하였다.

Bolton(1986)이 제시한 식 (1)에서는 사질토의 내부마찰각이 구속압이 증가할수록 감소하는 경향을 보여준다(Fig. 4).

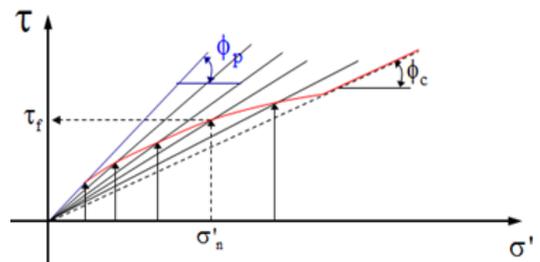


Fig. 4. Relationship between shear stress and normal stress of frictional soils showing decreasing internal friction angle with increasing confining stress until reaching the critical state

사질토에 작용하는 구속압이 작은 경우는 사질토가 전단력을 받을 때 흙 입자와 흙 입자 사이를 타넘으며 발생하는 부피팽창(dilatancy)에 의해 마찰각이 크게 발현된다. 이러한 부피팽창(dilatancy) 현상은 사질토에 작용하는 구속압이 증가할수록 감소하다가, 구속압이 흙 입자 사이의 부피팽창을 억제할 정도로 클 경우 부피팽창은 더 이상 발생하지 않는다. 이러한 상태를 한계상태(critical state)라고 정의하며, 한계상태에 도달 할 경우 사질토의 부피팽창이 더 이상 발생하지 않는다. 또한, 사질토의 내부마찰각은 사질토가 전달될 때의 부피팽창과 관련이 있는데, 부피팽창이 클수록 내부마찰각이 커진다. 사질토가 한계상태에 도달하게 되면 이후 더 높은 구속압에서도 내부마찰각은 한계상태 마찰각(ϕ_c)으로 수렴하게 된다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 침투 경계면 마찰각은 사질토의 침투 내부마찰각(ϕ_p)의 20%~100% 범위에서 log scale 인 상대조도(R_q/D_{50})가 증가할 경우 선형에 유사하게 증가

Table 1. Collected data of high-quality interface shear tests between frictional soils and solid material surface with different degrees of roughness [data extracted from Lings and Dietz(2005)]

Test No.	D ₅₀ (mm)	R _a (μm)	R _n (unitless)	D _R (%)	σ' _{v0} (kPa)	Measured δ _p (degree)	Measured δ _{cv} (degree)	Predicted δ _p (degree)
1	0.78	300	0.3846	97	25.4	48.2	31.90	49.16
2	0.78	300	0.3846	90	88.0	46.1	31.90	46.08
3	0.78	300	0.3846	90	169.7	45.5	31.90	45.05
4	0.78	300	0.3846	91	251.3	45.1	31.90	44.56
5	0.78	2.49	0.0032	93	25.2	29.1	24.23	27.01
6	0.78	2.49	0.0032	95	86.9	26.1	24.23	25.87
7	0.78	2.49	0.0032	99	169.4	25.1	24.23	25.48
8	0.78	2.49	0.0032	91	251.0	26.1	24.23	24.39
9	0.78	9.40	0.0121	90	25.1	31.4	26.50	33.26
10	0.78	9.40	0.0121	99	128.6	29.2	26.50	32.20
11	0.78	9.40	0.0121	88	25.1	33.2	26.50	33.00
12	0.78	9.40	0.0121	99	251.4	26.5	26.50	31.30
13	0.78	180	0.2308	70	25.0	49.0	31.38	44.28
14	0.78	180	0.2308	70	86.9	45.6	31.38	42.77
15	0.78	180	0.2308	74	169.6	45.4	31.38	42.47
16	0.78	180	0.2308	86	25.2	48.1	31.38	46.87
17	0.78	180	0.2308	74	251.6	44.7	31.38	41.96
18	0.78	0.36	0.0005	94	25.2	16.7	15.64	15.80
19	0.78	33.7	0.0432	83	25.2	39.9	29.25	39.56
20	0.78	114	0.1462	89	25.2	47.5	30.96	46.94
21	0.44	300	0.6818	73	25.3	43.6	31.00	44.34
22	0.44	300	0.6818	64	25.4	40.9	31.00	42.87
23	0.44	300	0.6818	20	25.5	31.9	31.00	35.73
24	0.44	0.356	0.0008	93	25.3	15.3	11.30	15.04
25	0.44	0.356	0.0008	78	25.1	13.3	11.30	13.73
26	0.44	0.356	0.0008	69	25.2	11.5	11.30	12.94
27	0.44	2.49	0.0008	94	25.1	10.8	11.30	8.92
28	0.44	2.49	0.0057	79	25.3	27.7	24.20	29.22
29	0.44	2.49	0.0057	69	25.3	25.1	24.20	27.48
30	0.44	9.40	0.0057	93	25.2	25.1	24.20	26.32
31	0.44	9.40	0.0057	75	25.3	22.6	24.20	21.12
32	0.44	9.40	0.0214	68	25.4	39.0	27.50	36.65
33	0.44	9.40	0.0214	22	25.1	35.8	27.50	34.22
34	0.44	33.7	0.0214	92	25.3	33.4	27.50	33.27
35	0.44	33.7	0.0214	70	25.2	29.1	27.50	27.07
36	0.44	33.7	0.0766	26	25.3	47.1	31.00	44.82
37	0.44	114	0.0766	93	25.3	42.8	31.00	41.45
38	0.44	114	0.0766	78	25.3	33.7	31.00	34.69
39	0.44	114	0.2591	62	25.4	49.0	31.80	48.42
40	0.44	114	0.2591	27	25.2	43.4	31.80	45.98

하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 사질토-경계면 사이의 상대적 조도(R_a/D₅₀)의 효과를 반영한 침투 경계면 마찰각(δ_p)은 다음과 같이 R_a/D₅₀, D_R, σ'_{v0}, δ_{cv}의 함수로 가정할 수 있다.

$$\delta_p = \text{Func}(R_n, D_R, \sigma'_{v0}, \delta_{cv}) \quad (2)$$

여기서, R_n은 면의 평균 거칠기(R_a)에 대한 흙 입경(D₅₀)인 상대조도, D_R은 상대밀도(%), σ'_{v0}는 연직구속압(kPa), δ_{cv}는 임계 경계면 마찰각이다.

사질토-경계면 사이의 상대적 조도(R_a/D₅₀)는 어느 정도

이상이 되면 아주 거친면으로 표현이 되기 때문에 1.0을 초과할 수 없다고 가정하고 다음과 같은 식 (3)으로 회기 분석을 하여 최적 fitting parameter를 결정하였다.

$$\delta_p = \min \left[C_1 \ln(R_n) + C_2, 1.0 \right] \left\{ \left[\frac{D_R}{100} \left(C_3 + C_4 \ln \frac{\sigma'_{v0}}{p_A} \right) + C_5 \right] + \delta_{cv} \right\} \quad (3)$$

Table 1은 흙과 표면의 거칠기가 다양한 물질을 접촉시키고 전단 시험을 수행한 Lings and Dietz(2005)의 40개

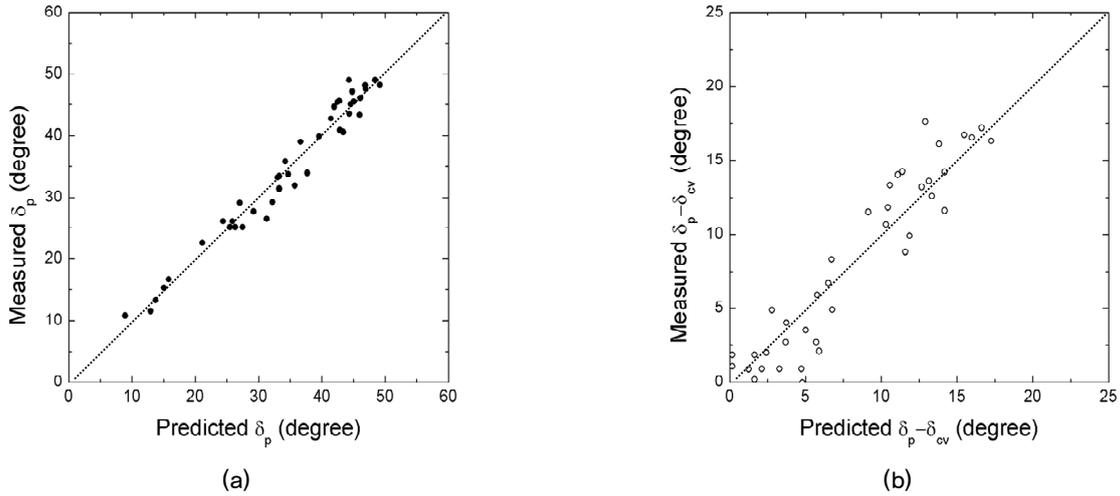


Fig. 5. Relationship between average relative roughness $R_n (=D_{50}/R_a)$ and peak interface friction; (a) predicted and measured peak interface friction and (b) differences of peak and critical state interface friction

시험 결과를 나타낸다.

Lings and Dietz(2005)의 실험 결과로부터 구한 40개의 데이터를 식 (3)을 이용하여 회기분석하였다. 회기 분석 결과 각각의 상수를 $C_1=0.0894$, $C_2=1.175$, $C_3=13.844$, $C_4=1.522$, $C_5=1.740$ 으로 설정하였으며, 해당 상수를 최적의 fitting parameter 조합으로 결정하였다. Fitting parameter 조합을 적용한 침두 경계면 마찰각(δ_p) 예측식은 식 (4)와 같다.

$$\delta_p = \min \left[0.0894 \ln(R_n) + 1.175, 1.0 \right] \left\{ \left[\frac{D_R}{100} \left(13.844 - 1.522 \ln \frac{\sigma'_{v0}}{p_A} \right) + 1.740 \right] + \delta_{cv} \right\} \quad (4)$$

실험으로 측정된 40개의 데이터로부터 실측된 침두 경계면 마찰각($\delta_{p,meas.}$)과 식 (4)에 의하여 예측된 침두 경계면 마찰각($\delta_{p,pred.}$)를 비교하여 침두 경계면 마찰각의 예측 정확도를 평가하였다[Fig. 5(a)]. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이, 예측식에 의해 구해진 침두 경계면 마찰각($\delta_{p,pred.}$)은 이에 대응하는 실측 침두 경계면 마찰각($\delta_{p,meas.}$)과 큰 오차 없이 정확한 것으로 분석되었다. Fig. 5(b)에서는 Bolton (1986)이 제안한 식 (1)과 같이 침두 내부마찰각과 한계상태 내부마찰각의 차이를 분석해 보았다. 하지만 식 (4)에서 보는 바와 같이 한계상태 경계면 마찰각(δ_{cv})이 상대조도(R_n)를 반영한 계수로부터 독립적이지 않아 δ_p 와 δ_{cv} 의 차이에 대하여 예측값과 실측값을 비교하는 것은 의미가 크지 않다.

4. 침두 경계면 마찰각의 예측 불확실성 평가

침두 경계면 마찰각의 불확실성을 평가하기 위해서는 측정된 침두 경계면 마찰각과 예측된 침두 경계면 마찰각의 비($\delta_{p,meas.}/\delta_{p,pred.}$)에 대한 편향계수, 변동계수, 확률밀도 함수를 구해야 한다. ($\delta_{p,meas.}/\delta_{p,pred.}$)에 대한 통계분석을 수행한 결과, 평균은 1.002이고, 표준편차는 0.069이다.

또한, ($\delta_{p,meas.}/\delta_{p,pred.}$) 값에 부합하는 확률분포모델을 파악하기 위해 Goodness-of-fit test를 수행하였다. Goodness-of-fit test는 통계적으로 파악할 수 있는 모델을 다양한 확률밀도함수에 적용하여 가장 적합한 확률밀도함수를 선정하는 것으로 예상 값과 관찰된 값의 차이를 분석할 수 있는 방법 중 하나이다(Alberto and Carlos, 2010). 통계모델은 Kolmogorov Smirnov test, Anderson Darling test, Chi-Squared test에 적용되며 각 test에 가장 적합한 확률밀도함수가 rank로 표기된다. Kolmogorov Smirnov test는 경험적 누적분포함수(Empirical Cumulative Distribution Function, ECDF)을 기반으로 하며, 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)로부터 임의의 샘플 x_1, x_2, \dots, x_n 을 가지고 있다고 가정하여 확률을 산정한다. Anderson Darling test는 가장 일반적인 확률밀도함수 결정 방법으로 관측된 누적분포함수와 예상되는 누적분포함수의 적합성을 비교하게 된다. Chi-Squared test는 특정 분포를 가진 모집단에서 표본이 추출되었는지 파악하는 방법이다(Mathwave, 2004).

($\delta_{p,meas.}/\delta_{p,pred.}$)의 Goodness-of-fit test는 56개의 이론적

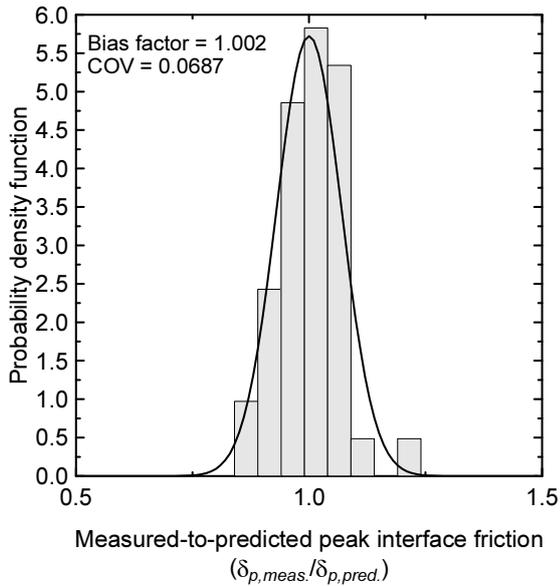


Fig. 6. Histogram of measured-to-predicted peak interface friction and its fitted normal distribution

인 확률밀도함수와 피팅(fitting) 하였으며, 각 확률밀도함수의 통계값과 rank를 표기하였다. 통계값이 낮을수록 각 Kolmogorov Smirnov test, Anderson Darling test, Chi-Squared test에 적합한 확률밀도함수라는 것을 의미하며, rank는 적합성 순위를 나타낸다. Kolmogorov Smirnov test에서는 “Gumbel Min” 확률밀도함수가, Anderson Darling test에서는 “Dagum(4P)” 확률밀도함수가, Chi-Squared test에서는 “ERROR” 확률밀도함수가 적합한 것으로 판정되었다. 종합적으로 판단하여 rank를 계산 하였을 때 ($\delta_{p,meas.}/\delta_{p,pred.}$)의 확률밀도함수 분석에 있어서 해당 모델을 적합하게 표현할 수 있는 확률밀도함수는 Dagum(4P)였다.

위와 같이 ($\delta_{p,meas.}/\delta_{p,pred.}$)의 불확실성을 표현하는 이론적인 확률밀도함수의 경우, 일반적으로 잘 사용하지 않고 인위적으로 fitting을 위하여 제안된 확률밀도함수이다. 따라서, 실질적으로 많이 사용되는 대표 확률밀도함수들 중에서는 정규분포곡선이 ($\delta_{p,meas.}/\delta_{p,pred.}$) 데이터에 잘 맞는 것으로 확인되었다. Fig. 6은 40개의 실험데이터로 부터 구한 히스토그램과 데이터에 맞춘 정규분포곡선(normal distribution curve)이다.

5. 결론

사질토와 구조물면 사이의 마찰특성을 분석하기 위하여 기존에 수행된 양질의 이질면 전단시험자료를 이용하여 침두 경계면 마찰각을 구하는 식을 제안하였다. 전단시

험자료는 Lings and Dietz(2005)의 전단시험결과를 사용하였다. 고려된 침두 경계면 마찰각에 영향을 미치는 주요 인자로는 사질토-구조물면 사이의 상대조도, 사질토의 상대밀도, 사질토에 작용하는 연직 구속압력이 있으며 분석 및 산정, 평가 결과는 다음과 같다.

- (1) 사질토-구조물면 사이의 상대조도가 증가할수록(흙입자크기에 비하여 거친면의 요철이 클수록) 침두 경계면 마찰각이 증가하였으며, 상대조도가 일정 수준(상대조도 $R_n = 0.1412$)까지는 상대조도가 증가할수록 침두 경계면 마찰각은 증가하였다. 하지만 상대조도가 0.1412를 넘을 경우, 침두 경계면 마찰각은 상대조도에 큰 영향을 받지 않았다.
- (2) 사질토의 상대밀도가 증가할수록 경계면에서 전달될 경우 팽창거동을 보이기 때문에 침두 경계면 마찰각은 증가하였으며, 수직 구속압이 증가할수록 팽창거동이 억제되어 침두 경계면 마찰각이 감소하였다.
- (3) 본 연구를 통하여 40개의 양질의 데이터를 이용하여 개발된 침두 경계면 마찰각의 경우 정확도가 아주 높았다. 측정된 침두 경계면 마찰각과 예측된 침두 경계면 마찰각의 비의 평균은 1.0022이며 변동계수는 0.0687로 결정되었으며, Goodness-of-fit test를 통해서 몇가지 대표적인 확률밀도함수에 대입시켜본 결과, 정규분포곡선에 잘 맞는 것으로 판단되었다.
- (4) 개발된 침두 경계면 마찰각 산정 공식은 거칠기가 다른 이질재료의 interface 특성을 보다 자세히 모사할 수 있다. 대표적으로 보강토 옹벽에 시공되는 비신장성 강재의 인장력 평가, 현장타설말뚝과 지반과의 마찰각에 따른 지지력 등에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 본 논문에서 제시한 침두 경계면의 마찰각은 Lings and Dietz (2005)의 직접 전단 시험 결과로부터 산출되었다. 하지만 Lings and Dietz (2005)가 사용한 강판과 모래의 치수는 국내 기준과는 상이하기 때문에 국내 설계 및 수치해석 등에 적용하기에는 어려움이 따른다. 따라서 회귀분석을 통한 계수($C_1 \sim C_3$)를 국내 수준에 맞게 산정하여야 한다. 또한, 마찰각의 영향을 미치는 중요 인자인 c (점착력)에 대한 고려가 이루어지지 않아 이를 바탕으로 추가적인 실험이 진행되어야 하며, 이에 따른 국내 현장에 맞는 침두 경계면의 마찰각 산정이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. 2015R1C1A1A02037490).

References

1. Alberto, M. O., and Carlos, G. F. (2010), "Goodness-of-fit Testing", *International Encyclopedia of Education*, Vol.7, pp.190-196.
2. Bolton, M. D. (1986), "The Strength and Dilatancy of Sands" *Geotechnique*, Vol.36, No.1, pp.65-78.
3. Lee, S., Lee, Y. W., and Yi, C. T. (1999), "Study on the interaction of soil-nail by in-situ pull-out test", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol.19, No.3-5, pp.975-983. (in Korean)
4. Lings, M. L. and Dietz, M. S. (2005), "The Peak Strength of Sand-Steel Interfaces and the Role of Dilation", *Soils and Foundations*, Vol.45, No.6, pp.1-14.
5. Mathwave (2004), Goodness of Fit Tests, http://www.mathwave.com/articles/goodness_of_fit.html.
6. O'Rourke, T. D., Druschel, S. J., and Netravali, A. N. (1990), "Shear strength characteristics of sandpolymer interfaces", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.116, No.3, pp.451-469.
7. Paikowsky, S. G., Player, C. M., and Connors, P. J., (1995), "A Dual Interface Apparatus for Testing Unrestricted Friction of Soil along Solid Surfaces," *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18, No.2, pp.168-193.
8. Porcino, D., Fioravante, V., Ghionna, V. N., and Pedroni, S. (2003), "Interface Behavior of Sands from Constant Normal Stiffness Direct Shear Tests", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.26, No.3, pp.1-13.
9. Potyondy, J. G. (1961), "Skin Friction between Various Soils and Construction Materials", *Geotechnique*, Vol.11, No.4, pp.339-353.
10. Reddy, E. S., Chapman, D. N., and Sastry, V. V. R. N. (2000), "Direct Shear Interface Test for Shaft Capacity of Piles in Sand", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.23, No.2, pp.199-205.
11. Subba, R. K. S., Allam, M. M., and Robinson, R. G. (1998), "Interfacial Friction between Sands and Solid Surfaces", *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*, Vol.131, pp.75-82.
12. Uesugi, M. and Kishida, H. (1986), "Influential Factors of Friction between Steel and Dry Sand", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.2, pp.33-46.
13. Uesugi, M., Kishida, H., and Uchikawa, Y. (1990), "Friction between Dry Sand and Concrete under Monotonic and Repeated Loading", *Soils and Foundations*, Vol.30, No.1, pp.115-128.