

## 원유(Crude-Oil)로 오염된 지반의 역학적 특성

신은철·홍승희·강옥현

인천대학교 토목공학과

### GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF CRUDE OIL-CONTAMINATED GROUND

*Eun Chul Shin, Seung Seo Hong, Uk Hyun Kang*  
*Department of Civil Engineering, University of Incheon*

#### ABSTRACT

The results of an investigation conducted to study the effect of crude oil contamination on the geotechnical properties of sand is presented. The effect of the degree of oil contamination on compaction characteristics, shear strength, and one-dimensional compression characteristics has been investigated. The test results indicate that the compaction characteristics are somewhat influenced by oil contamination. The angle of internal friction of sand (based on total stress basis) decreases due to the presence of oil within the pore spaces in sand. The compression characteristics of sand are significantly influenced by oil contamination. The details of the tests conducted and the results are presented in the paper.

**Key word** : Compaction, Crude oil, Contamination, Sand, Shear strength

#### 1. 연구 배경

고도로 발전된 산업사회는 우리나라를 세계 4위의 석유수입국으로 변모시켰으며 막대한 양을 관리할 유류저장시설과 운송관로는 노후화에 따라 많은 양의 오일을 유출하고 있다. 또한 매년 200여건의 해상 사고는 지반 오염을 유발시키며 이에 대한 토질역학적인 연구는 환경생태학적 문제 못지 않게 중요한 사안이다. 오일유출로 인한 지반오염은 물리적 성질인 흙의 내부마찰각( $\phi$ ), 탄성계수( $E_s$ ), 투수계수( $k$ ), 포아슨비( $\mu$ ) 등의 변화에 직접적인 영향을 미친다. 이에 관한 국내 연구는 신은철과 이재범(1995), 정하익 외 3인(1995)이 발표한 연구결과 외에는 연구가 매우 취약한 상태이다. 외국의 경우에는 있어서 Terzaghi(1943)와 Hill(1950), Meyerhof(1963) 등이 오염되지 않은 얇은기초의

지지력 연구를 하였으며, Evgin(1989)과 Altaee와 Evgin(1992)이 오염된 지반의 지지력에 관한 연구를 수행하였다.

#### 2. 기본물성시험

본 연구에 사용된 모래는 주문진 표준사로서 그 특성은 표 1에 나타내었다. 지반 오염원으로 사용된 원유는 OMAN산으로 그 특성은 표 2와 같다. 모래지반이 원유로 오염되었을 때의 공학적 특성을 규명하기 위하여 다짐시험, 오염도 및 지반의 상대밀도에 따른 투수계수와 내부마찰각의 변화를 관찰하기 위하여 투수계수시험과 직접전단시험을 각각 실시하였다.

표 1 주문진 표준사의 특성

Effective size, $D_{10} = 0.375$ mm
Specific gravity, $G_s = 2.65$
Uniformity coefficient, $C_u = 1.53$
Maximum void ratio, $e_{max} = 0.91$
Minimum void ratio, $e_{min} = 0.48$
Unified soil classification = SP

표 2 원유의 특성

비중(Density), 15°C	0.854
황분(Sulfur), WT%	1.05
유동점(Pour Point), °C	-33
동점도(Viscosity), 37.8°C	15.1
증기압(레이드법, RVT)kg/cm <sup>2</sup>	0.39
염분(Salt), PBT	4.2
수분 및 침전물(BS&W), Vol%	0.05
바나듐(Vanadium), ppm	-

2.1 다짐시험

다짐시험은 기초지반을 구성하고 있는 모래의 다짐특성을 알아보기 위한 시험으로서 수정 다짐시험(Modified Proctor Test)을 실시하여 최대건조밀도와 최적함수비 및 함유비를 도출하였다. 그림 1에 나타난 다짐시험결과로부터 원유를 섞은 시료의 최적함수비는 9.4%일 때, 최대건조밀도는 1.774 t/m<sup>3</sup> 이며 물을 간극수로서 사용한 시료의 최적함수비는 18.2%이며 최대건조밀도는 1.752t/m<sup>3</sup>이었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 간극수가 원유일 때 그래프는 좌측으로 이동하였다. 동일 다짐에너지와 함수비에서 최대건조밀도가 크게 발생되었다는 것은 이 때의 침하량이 더 크게 발생할 수 있으

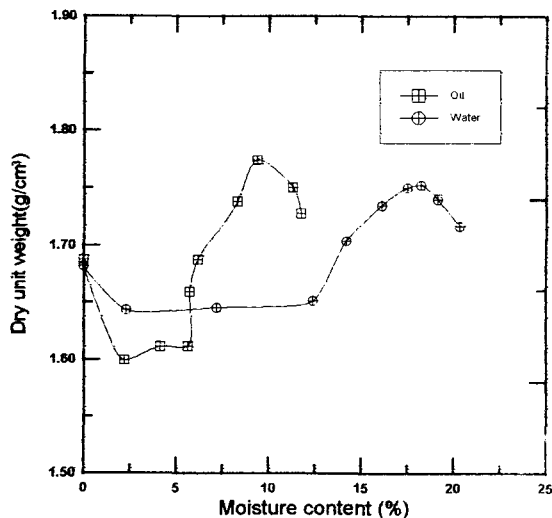


그림 1 함수비와 함유비 변화에 따른 다짐곡선

며 극한지지력도 작게 나타날 수도 있다는 것을 예측할 수 있다.

2.2 투수시험

모래지반의 상대밀도와 함수비 및 함유비 변화에 따른 투수계수와 원유의 투수계수(Coefficient of Oil Permeability)의 영향을 평가하기 위하여 정투수시험을 실시하였다. 그림 3에 나타난 시험결과에 의하면 원유의 투수계수는 약 4%에서 최대값을 나타내며 함수비가 더 증가할수록 점차 감소하여 함수비가 0%일 때보다 더 감소한다. 이 실험결과는 겨울이나 여름과 같은 온도와 지하수위의 변화가 발생하면 원유의 점성도 변화하기 때문에 확산범위와 모양에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그림 2에 나타난 시험결과에 의하면 함유비가 증가할수록 투수계수는 점차 감소하며 상대밀도가 낮을수록 투수계수의 감소폭이 크다. 그리고 4%이상의 함유비에서는 투수계수가 상대밀도에 관계없이 거의 같다. 결과에 의하면 같은 실험조건하에서의 투수계수는 원유의 투수계수보다 3.7~32.3배 이상 큰 값을 나타내고 있다. 그림 3은 노르웨이의 Hjeldnes(1995)가 오일의 확산시험 결과로서  $\alpha$ (Shape Contaminated Zone)는 확산된 모양의 직경을 깊이로 나눈 것으로서 작을수록 확산된 모양은 타원형으로 긴 모양을 나타내며 2%이상에서는 거의 변화가 없다. 본 연구에서 얻어진 결과로는 약 4%에서 원유의 최대 투수계수를 나타내고 있다. 함유비가 증가할수록 토립자사이의 원유가 통과할 때 간극의 감소와 원유의 점성 때문에 점차 확산속도가 작아짐을 알 수 있다.

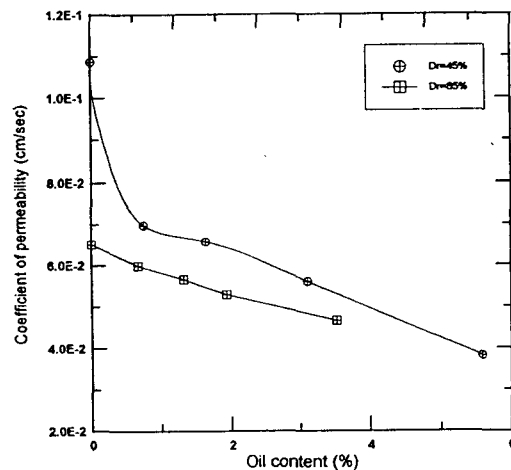


그림 3 함유비 변화에 의한 투수계수

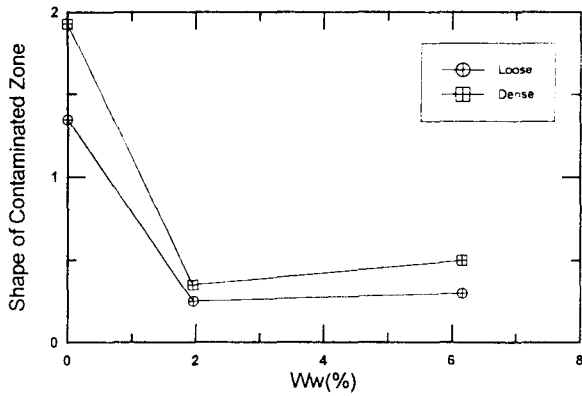


그림 4 모래에서 함수비 변화에 의한 오염지역의 모양(Hjeldnes, 1995)

### 2.3 직접전단시험

흙의 내부마찰각은 전단강도에서 중요변수이며 지반의 지지력을 평가하는데 있어서 기술된 지지력계수  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  에 영향을 미치므로 사질토에서는 매우 중요하다. 따라서 전단시험은 기본물성시험 중에서 가장 중요한 부분을 차지한다. Meyerhof(1956)가 제안한 방정식(1)에 의한 이론치와 직접전단시험에 의한 실험결과를 상대밀도로 표 3에 비교하였다.

$$\phi = 28 + 15D_r \quad (1)$$

표 3. 내부마찰각의 이론치와 실험치 비교

내부마찰( $\phi$ ) 상대밀도(%)	이론치(deg)	실험치(deg)
30	32.50	33.58
50	35.50	35.58
75	39.25	41.49

직접전단시험 시료의 크기는 직경이 60mm, 높이가 20mm이며 요구되는 소정의 상대밀도에 따라 시료를 준비하였다. 준비된 시료를 건조한 모래와 원유의 함수비를 변화시키면서 실시하였으며 수평변위는 1mm/min 이었다. 구속응력은  $0.4\text{kg/cm}^2$ 를 가하였으며 전단속도는 1mm/min으로 통일하였다. 지반이 오염되지 않았을 경우 상대밀도에 따라 전단변위가 약 2mm정도에서 최대전단응력값을 나타내고 잔류응력은 전단변위가 6mm에서 동일하게 발생하므로 입자들 상

호간의 맞물림현상(Interlocking)을 관찰할 수 있다. 반면에 지반이 오염되었을 경우(4.2%), 맞물림현상은 오일에 입자들 간에 윤활작용에 의하여 함유비가 0%일 때와 비교하면 상당히 감소함을 관찰할 수 있다. 이는 동일한 상대밀도이지만 입자의 움직임을 변화시키는 결과를 발생시키며 원유의 영향으로 내부마찰각, 전단응력, 체적의 감소가 발생한다.

### 3. 오염된 지반의 지지력 시험 및 결과

원유로 오염된 사질토 지반과 오염되지 않은 지반상에 위치한 대상기초의 극한지지력을 측정하기 위하여 실내모형시험을 실시하였다. 모델 기초의 크기는 폭(B)이 50mm와 70mm, 길이(L)는 175mm인 직사각형 기초이고 상부면에는 알루미늄판을 접합하여 하중재하시 기초의

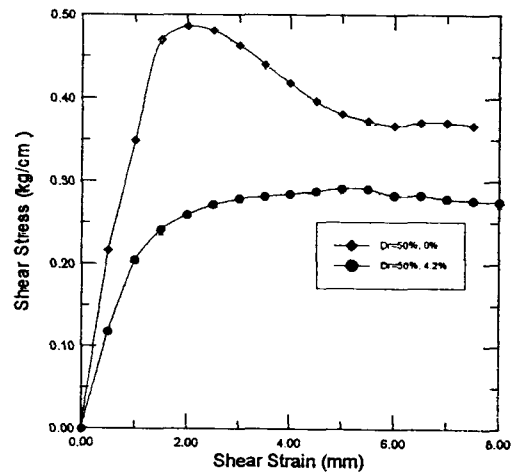


그림 5 함수비 변화에 의한 모래의 응력-변위의 특성( $D_r=50\%$ )

변형을 막았으며 밀면은 하중재하시 기초가 경사지는 것을 최소화하기 위해서 샌드페이퍼를 부착하였다. 기초지반은 주문진 표준사를 사용하여 사질토 지반을 조성하였으며, 지반의 형성은 일정한 상대밀도 유지를 위하여 강사법을 사용하였다. 또한 강사법에 의하여 모형지반 형성시 지반파괴형상을 관찰하기 위하여 염색된 모래를 약 2cm두께의 층을 파괴가 예상되는 임의의 깊이까지 교대로 사용하여 여러층으로 조성하였다. 기초폭이 5cm일 때 상대밀도가 75%일 때와 50%일 때 함유비가 0%, 1.3%, 3.8%, 4.2%별로 8회의 지지력시험을 하였다. 실내시험에 의해 구한 극한지지력은 직접전단시험에

서 구한 흙의 내부마찰각을 바탕으로 이론적으로 평가한 극한지지력과 비교 고찰하였다. 이와 같은 극한지지력비( $BCR_u$ )는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$BCR_u = \frac{q_{u(oc)}}{q_u} \quad (2)$$

여기서,  $q_u$ 는 함유비가 0%일 때의 극한지지력이고  $q_{u(oc)}$ 는 원유로 오염된 지반의 극한지지력이다. 지지력감소율( $\beta$ )은 백분율로 다음과 같은 방정식에 의해서 산정하였다.

$$\beta = \frac{q_u - q_{u(oc)}}{q_u} \times 100 \quad (3)$$

표 4는 이론에 의해 평가된 극한지지력비와 시험에 의한 극한지지력비를 함유비에 따라 나타내었다. 극한지지력은 직접전단시험 결과에 나타난 것과 같이 함유비가 1.3%일 때 급격히 감소하고 그 이후에는 큰 변화가 없다가 3.8% 이하에서 다시 낮아지는 경향을 보이고 있다. 단 기초폭이 5cm일 때 이론에 의해 산정된 극한지지력은 예외적으로 매우 적은 것으로 나타났다. 극한지지력비와 지지력감소율( $\beta$ )은 이론에 의한 결과가 2~3% 높은 것으로 나타났으나 전체적으로 볼 때 거의 일치한다고 볼 수 있다. 기초폭의 영향은 상대밀도가 낮을 때 극한지지력에 더 영향을 미친다. 기초폭이 동일할 때 극한지지력의 감소율이 더 높은 것으로 판명되었다.

표 4 파괴면의 깊이와 수평길이(  $D_r=50\%$  )

$D_r$ , 기초폭		$D_r=50\%$	
		5cm(3.8%)	7cm(1.3%)
기초파괴면의 깊이(H)	이론치(cm)	8.43	11.94
	실험치(cm)	5.20	6.10
수평방향 파괴면의 길이 ( $L_{sh}$ )	이론치(cm)	14.21	20.36
	실험치(cm)	12.40	13.20

( ) : 함유량

#### 4. 결 론

1. 사질토가 원유로 오염된 경우, 간극수가 물

일 때보다도 최대건조단위증량이 1.3%정도 높은 것으로 나타났다.

- 정수위 투수시험에서 물의 투수계수가 원유의 투수계수보다 약 30배정도 크게 나타났다. 지반의 함수비가 4%일 때 원유의 투수계수가 최대로 나타났다. 이 결과로부터 기초지반이 사질토일 경우 상대밀도와 함수비가 주어지면 지반의 확산모양과 깊이를 추정할 수 있다.
- 직접전단시험에서 원유로 인한 영향은 상대밀도가 높을수록 내부마찰각과 맞물림(Interlocking)현상의 감소폭이 크게 나타났으나, 오염도가 증가함에 따라 체적팽창(Dilatancy)현상은 상대밀도가 낮고 함유비가 증가함에 따라 점차 압축현상으로 변화한다.
- 실내모형 지지력시험 결과로부터 오염된 지반의 극한지지력은 오염되지 않은 지반의 극한지지력보다는 약 5~6배정도 작다. 이러한 차이는 모형토조 측면에 의한 구속효과가 필요이상으로 크고 오염된 지반을 형성하는 과정에서 발생된 결과인 것으로 판단된다. 기초지반을 형성하고 있는 흙의 지지력에 의하여 안정성을 유지하지만 원유가 지반을 오염시킴으로서 기초의 과다침하를 유발시켰다. 정적콘관입시험에서 얻어진 콘값은 원지반과 오염된 지반을 비교할 때 약 2배 감소한다.

#### 5. 참고문헌

- 신은철, 이재범.(1995) "원유로 오염된 사질토의 특성", 95봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp 129~134.
- Altaee, E. and Evgin, E.(1992) "Performance of An Offshore Structure During An Oil Spill," OMAE, Vol, IV, pp. 59~66.
- Das, B.M.(1994) *Principles of Geotechnical Engineering* PWS-KENT, 3rd Ed.
- Das, B.M.(1995) *Principles of Foundation Engineering* PWS-KENT, 3rd Ed.
- Dusseault, M.B. and Morgenstern, N. R.(1978) "Shear Strength of Althabasca Oil Sands," *Canadian Geotech, J.*, 15, pp.216~238.
- Terzaghi, K.(1943) *Theoretical Soil Mechanics* John Wiley & Sons, pp. 210~221.