

유류점도가 투수계수 및 지지력에 미치는 영향

The Effect of Oil Viscosity on Permeability and Bearing Capacity

신은철⁽¹⁾, Eun Chul Shin, 홍승서⁽²⁾, Seung-Seo Hong, 김두환⁽³⁾, Du-Hwan Kim

⁽¹⁾시립 인천대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng. Univ. of Incheon

⁽²⁾시립 인천대학교 대학원 토목공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

⁽³⁾시립 인천대학교 대학원 토목공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

SYNOPSIS : Contamination of soil due to an oil spill influences its subsequent behavior. An investigation was conducted to study the effect of oil viscosity on compaction characteristics, shear strength, coefficient of permeability, and bearing capacity. Water permeability was also determined by using lamp oil, engine oil, and Oman crude-oil as contaminants. The test results indicate that the compaction characteristics are influenced by oil contamination. The angle of internal friction of sand (based on total stress condition) decreases due to presence of oil within the pore spaces in sand. Water permeability was observed to be a function of the initial viscosity and the degree of saturation due to the contamination. Bearing capacity characteristics of sand are significantly influenced by oil contamination which resulting in a decreases in the ultimate bearing capacity with increase in the degree of oil contamination compared to the case of dry sand.

Key words : viscosity, oil contamination, permeability, bearing capacity

1. 서론

고도로 발전된 산업사회는 우리나라를 세계 4위의 석유수입국으로 변모시켰으며 막대한 양을 관리할 각종 유류저장시설은 노후화에 따라 많은 양의 오일을 유출하고 있다. 조사자료에 따르면 전국 주유소 지하저장탱크 한 개당 하루 기름누출량은 약 1.7ℓ로 이는 연간 2천 1백 60여만 ℓ (10만 8천여드럼)가 새어나와 지반을 오염시킨다는 자료가 발표되었다. 또 다른 조사자료에 의하면 전국 유류저장시설의 약 30% 정도가 파손 또는 부식 등으로 인하여 사고 있다는 결과가 나온 것으로 알려졌다. 이러한 기름유출에 대한 지반공학적인 문제는 환경생태학적인 문제 못지 않게 매우 중요한 사안이나 국내에서는 신은철과 이재범(1995), 신은철과 홍승서(1997)가 발표한 연구결과 외에는 연구가 매우 취약한 상태이다. 유류유출로 인한 지반오염은 물리적 성질인 흙의 내부마찰각(ϕ), 탄성계수(E_c), 투수계수(k), 포아슨비(μ_s) 등의 변화에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 일련의 토질역학적 물성시험 및 지지력 시험을 통하여 각기 점도특성이 다른 유류가 지반을 각각 오염시켰을 때, 기초지반에 미치는 영향을 고찰하여 보았다. 오염원으로 사용된 기름은 등유, 원유, 엔진오일을 사용하였으며 오염에 의한 사질토의 물리적 거동을 기름의 종류, 오염도, 그리고 상대밀도(D_r)에 따라 비교·분석하였다. 물성시험으로서 기름으로 오염된 모래

의 다짐시험을 실시하여 다짐특성을 규명하였고, 투수계수시험을 통하여 투수계수(k)를 도출하였다. 직접전단시험결과, 오염원의 종류에 따른 내부마찰각의 감소를 분석하였고, 비점착성 지반에 조성된 모형 지반에 점도가 다른 기름을 오염시켜 극한지지력의 변화를 규명하였다.

2. 유류의 점도특성

점도란 유체 흐름의 속도비이며 특성을 나타내는 한 척도이다. 즉, 액상물질의 흐르는 정도(유동성)를 수치로 나타내는 것으로서 일정량의 시료가 주어진 온도에서 일정 길이의 모세관을 통과 하는데 걸리는 시간을 측정하여 나타낸다. 다시 표현하면 유체마찰의 크고 작음을 나타내는 것으로 액체가 흐를 때 그 흐름에 대해 저항하는 내부마찰력을 말한다. 또한 점도는 특정온도에서 액체가 흐를 수 있는 능력의 척도가 된다. 지반오염원으로 사용된 유류는 각각 등유, 오만산 원유, 자동차용 내연유를 선택하였다. 동점도시험을 실시한 결과 온도의 변화가 점도에 미치는 영향을 그림 2.2와 같이 나타내었다.

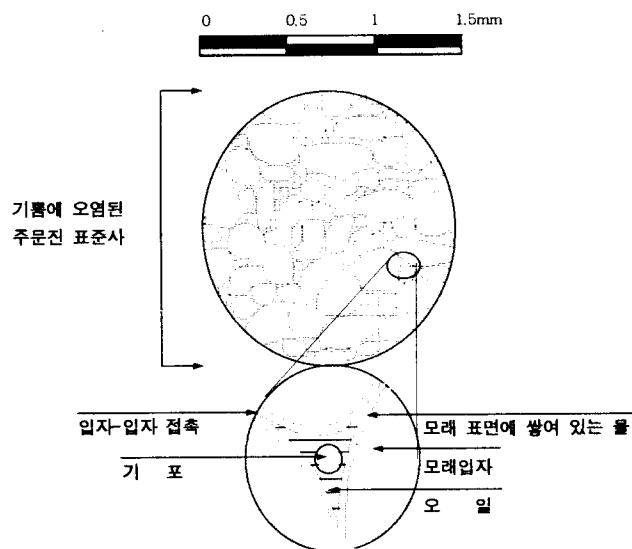


그림 2.1 기름에 오염된 모래의 구성

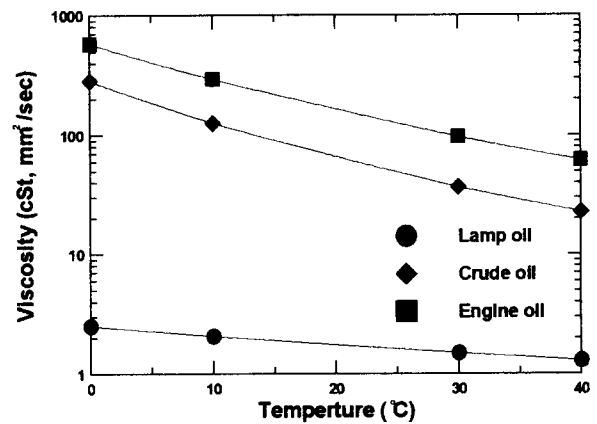


그림 2.2 온도에 따른 유류의 점도변화

3. 실내토질시험

3.1 기초지반의 시료

본 연구를 위해 인위적으로 만든 지반은 비점착성인 주문진 표준사를 사용하였으며 기본물성값은 아래의 표 3.1과 같다.

표 3.1 주문진 표준사의 특성

유효입경, D_{10}	0.375 mm
비중, G_s	2.65
균등계수, C_u	1.53
곡률계수, C_c	1.10
최대간극비, e_{max}	0.91
최소간극비, e_{min}	0.48
흙의 분류(통일분류법)	SP

3.2 다짐특성

다짐시험은 기초지반을 구성하고 있는 모래의 다짐특성을 알아보기 위한 시험으로서 표준다짐시험 (Standard Proctor Test)을 실시하였다. 다짐시험은 건조한 시료로부터 시작하여 점차로 점성도가 각각 다른 물, 등유, 원유, 내연유를 증가시키면서 최대건조밀도와 최적함수비 및 함유비를 도출하였다. 각 실험에 대한 결과는 표 3.2와 그림 3.1에 나타내었다. 다짐시험결과로부터 점도가 클수록 그래프는 좌측상부로 이동하는 경향을 나타내었다. 동일 다짐에너지와 함수비에서 최대건조밀도가 크게 발생되었다는 것은 이 때의 침하량이 더 크게 발생하며 지지력도 작게 발생할 수 있다는 것을 알수 있었다.

표 3.2 주문진 표준사의 특성

구 분	물	등 유	오만산원유	자동차 내연유
최대건조밀도(γ_{dmax} , kg/cm ³)	1.637	1.614	1.668	1.675
최적함수비, OMC(ω , %)	18.54	13.3	11.7	10.1

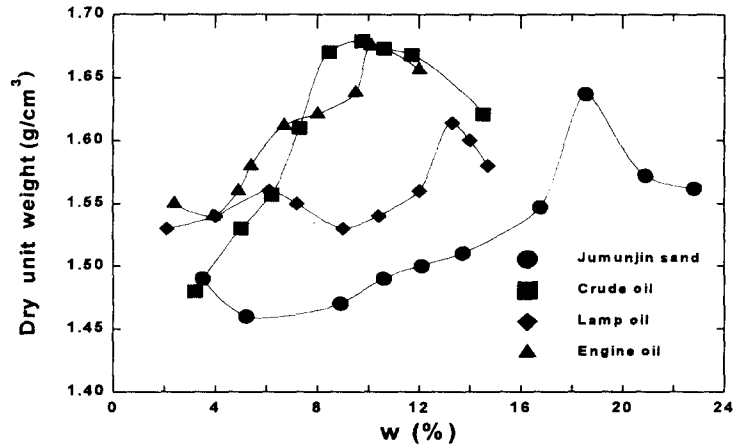


그림 3.1 유류별 다짐곡선

3.3 투수계수시험

모래지반의 상대밀도와 함유비 변화에 따른 투수계수의 영향을 평가하기 위하여 투수계수시험을 실시하였다. 매개변수는 수두의 높이 H, 수두차 Δh , 수두가 변화되는 시간 t, 유량 Q이다. 투수시험은 정확도를 기하기 위하여 동일한 조건과 불교란시료에 대하여 각각 3회씩 실시하여 평균한 값을 주어진 시료의 투수계수로 결정하였다. 또한 상대밀도(D_r)를 45%와 75%로 나누어 상대밀도 차이에 따른 투수계수의 변화를 고찰하였다. 그림 3.2와 그림 3.3의 결과에 의하면 등유의 투수계수는 상대밀도(D_r)가 각각 45%와 75%인 경우 투수계수의 최대감소율이 오염되지 않았을 때의 투수계수보다 각각 43.2%와 28.1%로 감소하였고, 원유는 53.4%와 51.2%정도 줄어들었다. 또한 점도가 높은 자동차 내연유는 55.7%와 68.1%로 가장 높은 감소율을 나타내고 있다. 점도가 낮은 등유는 상대적으로 점도가 높은 기름보다 투수계수가 작게 감소하나 점도가 높은 원유와 내연유는 투수계수의 감소폭이 높게 산출되었다. 또한 상대밀도(D_r)가 75%일때 함유비에 따른 투수계수의 감소폭이 상대밀도(D_r) 45%인 경우보다 높게 나타났다. 또한 점도가 큰 원유나 내연유는 단단한 지반상태($D_r=75%$)일 때, 함유비에 따른 투수계수가 오염되지 않은 지반에 대비하여 투수계수의 최대감소율이 급격히 떨어지고 있으나 등유에서는 투수계수가 완만하게 감소하고 있었다.

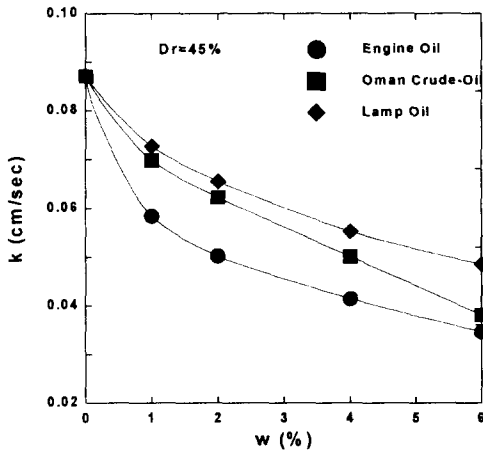


그림 3.2 $D_r=45\%$ 일 때의 투수계수 변화

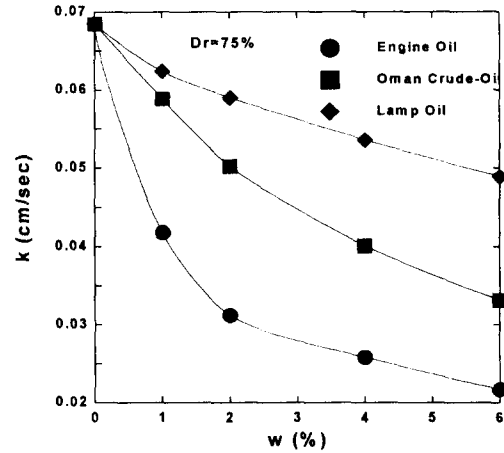


그림 3.3 $D_r=75\%$ 일 때의 투수계수 변화

3.4 직접전단시험

흙의 내부마찰각은 전단강도에서 중요변수이며 지반의 지지력을 평가하는데 있어서 기술된 지지력계수 N_c , N_q , N_γ 에 영향을 미치므로 사질토에서는 매우 중요하다. 따라서 전단시험은 기본물성시험 중에서 가장 중요한 부분을 차지한다. Meyerhof(1956)가 제안한 방정식 (1)에 의한 이론치와 본 연구에서 실시한 오염되지 않은 모래에 대한 직접전단시험에 의한 실험결과를 상대밀도별로 표 3.3에 비교하였다.

$$\phi = 28 + 0.15 D_r$$

표 3.3 내부마찰각의 이론치와 실험치 비교

상대밀도(%) \ 내부마찰각(ϕ)	이론치(deg)	실험치(deg)
30	32.50	33.58
45	34.75	35.8
75	39.25	41.8

직접전단시험 시료는 직경이 60mm, 높이가 20mm이며 요구되는 소정의 상대밀도(D_r)에 따라 시료를 각각 상대밀도(D_r)를 45%, 75%로 준비하였다. 모래지반의 간극사이를 기름으로 채웠을 때 내부마찰각의 영향을 분석하였다. 그림 3.4과 그림 3.5에서는 지반의 상대밀도가 45%와 75%일 때 지반이 오염되지 않았을 때와 오염되었을 때의 전단응력의 변화를 보여주고 있다. 이 때의 전단속도는 지지력시험의 하중재하속도와 같은 1mm/min으로 통일하였다. 그림 3.4에서 지반이 느슨한 상태($D_r=45\%$)의 내부마찰각변화를 살펴보면 함유비가 6%일 때, 등유의 내부마찰각은 30.2° 로 15.6%정도의 감소율을 보이고 있다. 원유로 오염된 지반은 28.5° 로 감소율이 19.3%로 나타났으며, 자동차 내연유의 내부마찰각은 28.2° 로 21.2%의 감소율로 산출되었다. 또한 모형지반이 단단한 상태($D_r=75\%$)인 경우에는 느슨한 상태일 경우와 비슷한 경향을 보이고 있으나 오일종류에 따라 18.4%~30.9%사이의 급격한 감소를 나타냈다. 동일한 상대밀도이지만 입자의 움직임이 기름의 점도에 따라 변화시키는 결과를 발생시키며 오일의 영향으로 내부마찰각, 전단응력, 체적의 감소가 발생하였다.

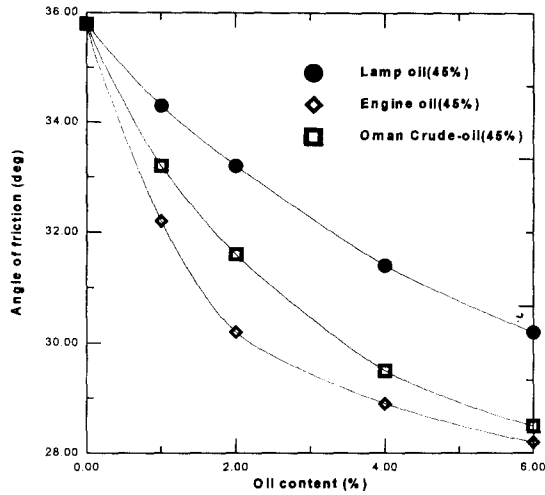


그림 3.4 함유비에 따른 내부마찰각(D_r=45%)

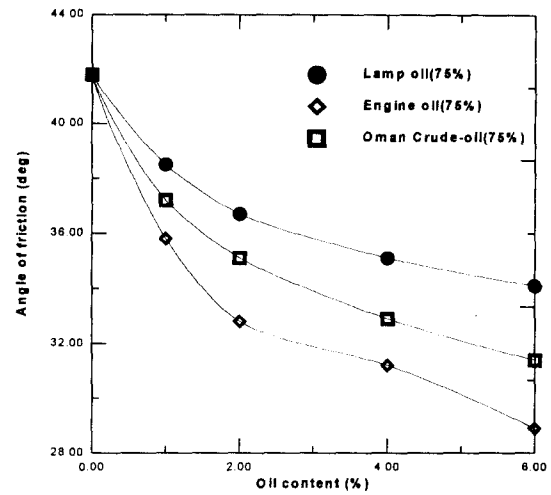


그림 3.5 함유비에 따른 내부마찰각(D_r=75%)

3.5 E_c값 산정

실내모형 기초지반의 탄성계수(Elastic Modulus)를 산정하기 위하여 지름 5cm의 PVC관을 12cm높이로 만들어 점도가 다른 등유, 내연유, 오만산 원유를 오염시켜 실험을 실시하였다. 따라서 이 때 산출된 탄성계수는 PVC관이 시료의 축방향을 구속하기 때문에 E_c(Constrained Modulus)라 한다. 그림 3.6에 의하면 지반상태가 중간정도의 느슨한 상태(D_r=45%)일 때, 오염되지 않은 모래의 탄성계수(E_c)는 157.9kg/cm²으로 나왔고 지반상태가 단단한 상태(D_r=75%)일 때, 398.1kg/cm²로 산출되었다. 탄성계수(E_c)는 유류의 점도에 따라 그 감소정도가 다르며 등유의 경우 D_r=45%일 때, 오염되지 않았을 경우보다 5.6%정도 작게 나타났으며 원유는 18.6%, 내연유는 25.3%로 줄어들었다. 또한 D_r=75%일 때, 각각 34.6%, 56.1%, 그리고 58.9%로 상대밀도가 높을수록 E_c값이 크게 떨어졌다. 표 3.4와 그림 3.6은 유류별 E_c값을 도시하였다.

표 3.4 유류별 E_c값, kg/cm² (함유비=1%)

구분	등유	내연유	원유
점도(CP, 30℃)	1.199	83.77	32.538
감소율, % (D _r =45%)	5.9	25.3	18.6
감소율, % (D _r =75%)	34.6	58.9	56.1

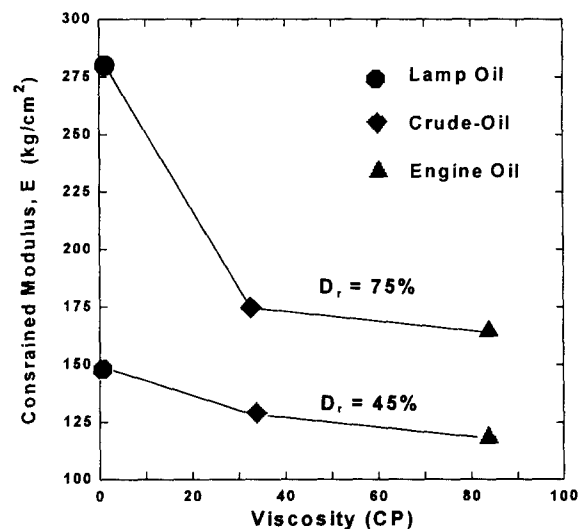


그림 3.6 오일 종류에 따른 E_c

4. 오염된 지반의 지지력 평가

기름에 오염된 사질토 지반의 지지력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실내모델시험을 실시하였다. 기초폭은 7cm로 하였고 상대밀도(D_r)가 45%일 때와 75%일 때, 함유비 0%, 1%, 2%, 4%, 6%로 지지력시험을 실시하였다. 그림 4.1과 그림 4.2는 상대밀도(D_r)별, 함유비에 따른 극한 지지력시험 결과를 도시하였다. 그림 4.1과 그림 4.2에 나타난 극한지지력의 감소변화는 점도가 상대적으로 높은 원유와 자동차 내연유는 직접전단시험 결과에서 도출된 내부마찰각(그림 3.4, 그림 3.5)의 변화와 동일한 추세이다. 원유와 자동차 내연유는 함유비가 1%가 못되었을 때부터 급격히 감소하고 그 이후에는 완만한 감소를 보이고 있다. 반면에 등유는 원유와 자동차 내연유보다는 그 감소율이 낮게 나타났다. 상대밀도(D_r)가 45%일 때의 지지력감소를 살펴보면, 등유는 오염되지 않은 지반의 지지력보다 71.9%감소하였고, 원유는 77.8%, 내연유는 81.7%로 점도가 높을수록 지지력이 감소하였다. 상대밀도(D_r) 75%인 경우에도 최대감소율이 각각 등유에서는 67.8%, 원유는 80.6%, 그리고 내연유는 87.8%줄어들었다.

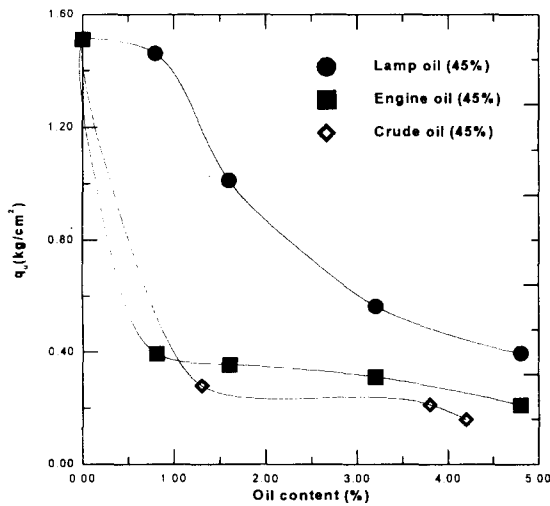


그림 4.1 유류별 함유비에 따른 지지력($D_r=45\%$)

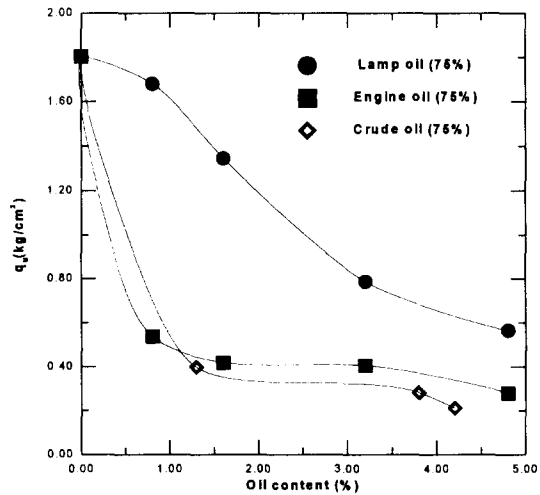


그림 4.2 유류별 함유비에 따른 지지력($D_r=75\%$)

5. 하중제하에 의한 지반파괴

일반적으로 균질한 사질토 지반에서의 전단파괴양상은 그림 5.1에 나타난 것과 같다. Meyerhof(1951)가 제시한 전단전단파괴면의 최대깊이(H) 및 파괴면이 수평길이(L_{sh})는 방정식 (2), (3)과 같다.

$$H = B \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2)$$

$$L_{sh} = (H + D) \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3)$$

여기서, H는 기초의 측면아래에서 최대깊이라고 가정한다. B는 기초의 폭(m)이며, D는 기초저면에서부터 지표면까지의 깊이(m)이다. L_{sh} 는 기초측면에서 파괴면까지의 수평길이이다. 지지력실험에서 모래 지반을 형성할 때 염색한 모래로 지반을 형성하여 지반파괴형상을 Meyerhof가 제시한 이론치(직접전단 실험에 의한 ϕ' 적용)와 실험치를 표 5.1과 표 5.2에 각각 비교하였다. 이론치와 실험치를 비교해 볼 때 기초파괴면의 깊이는 실험치가 일반적으로 적게 나타났다. 이러한 이유는 토조측면에서의 파괴양상으로

기초파괴깊이를 관찰하였고, 토조의 중간단면에서는 파괴깊이가 이론치와 유사할 것으로 예측된다. 수평 방향 파괴면의 길이는 중앙부분에서 관찰하여 이론치와 비슷한 결과를 가져왔다. 이유는 파괴면의 길이를 지반중앙에서 실측한 결과이기 때문이다. 오염도가 높을수록 이론치와 실험치의 차이가 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 오염도가 증가될수록 지반의 지지력이 감소되기 때문이다. 또한 상대밀도 (D_r)가 낮을수록 국부전단 파괴양상을 보이고 있고, 오염도가 증가할수록 관입파괴 양상을 보이고 있다.

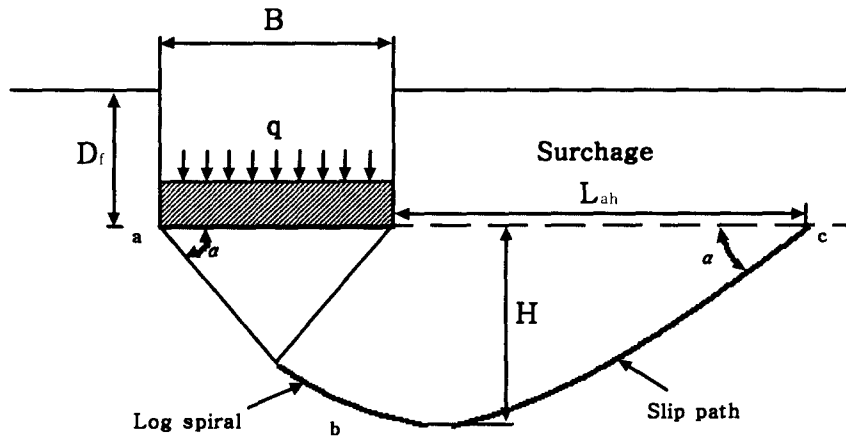


그림 5.1 균등질 지반에서의 전단파괴양상

표 5.1 파괴면의 깊이와 수평길이($D_r=45\%$)

상대밀도 (D_r) H, L_{sh} (cm)	$D_r=45\%$, 함유비=1%					
	등 유		원 유		내연유	
	이론치	실험치	이론치	실험치	이론치	실험치
기초파괴면의 깊이(H)	12.946	8.52	13.249	7.754	12.68	6.895
수평방향 파괴면의 길이(L_{sh})	24.508	18.687	24.504	17.525	22.97	19.774

() : 함유비

표 5.2 파괴면의 깊이와 수평길이($D_r=75\%$)

상대밀도 (D_r) H, L_{sh} (cm)	$D_r=75\%$, 함유비=1%					
	등 유		원 유		내연유	
	이론치	실험치	이론치	실험치	이론치	실험치
기초파괴면의 깊이(H)	14.513	8.564	14.101	7.545	13.679	7.654
수평방향 파괴면의 길이(L_{sh})	30.089	20.978	28.406	20.258	26.731	17.257

() : 함유비

6. 결론

기본물성시험 및 실내모형 지지력시험을 오염된 사질토지반에 대하여 실시하였다. 실험결과를 비교·분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 동일한 조건에서 다짐시험을 실시하였을 경우, 모래입자들 사이에서 기름이 윤활작용을 하므로 간극수가 물일 때보다도 침하가 더 많이 발생하였다. 점도가 높을수록 다짐곡선은 좌측으로 이동하는 경향을 나타냈다.
2. 투수시험에서 점도가 높은 기름일수록 투수계수의 최대감소를 크게 나타냈다. 또한 고점도의 원유와 내연유는 감소경향이 급격히 줄어들으나($D_r=75\%$) 등유의 경우 28.1%정도의 완만한 감소경향을 보이고 있다.
3. 기름에 의한 흙입자들간의 윤활작용에 의해 내부마찰각이 $D_r=45\%$ 일 때 15.6%~21.23%로 감소하였고, $D_r=75\%$ 일 때 18.4%~30.9%사이로 내부마찰각의 감소가 급격히 줄어들었다.
4. 실내모형 지지력시험 결과로부터 오염된 지반의 극한지지력은 오염되지 않은 지반의 극한지지력보다 등유의 경우 67.8%~71.9%정도 감소하였고, 원유와 내연유의 경우 77.8%~87.8%정도로 지지력이 오염되지 않았을 때의 지지력보다 작게 나타났다.

감사의 글

“이 논문은 1996년 한국학술진흥재단의 공모과제(신진교수과제)연구비에 의하여 연구되었음”

참고문헌

1. 유남재, 이상덕, 박병수(1995), “대상기초저면의 조도가 사질토지반의 침하 및 극한지지력에 미치는 영향,” **대한토목공학회지**, 제15권 제4호, pp. 1041~1053.
2. 신은철, 이재범(1995), “원유로 오염된 사질토의 특성,” '95봄 학술발표회 논문집, **한국지반공학회**, pp. 129~134.
3. 신은철, 홍승서(1997), “유류오염이 기초지반에 미치는 영향,” '97년도 학술발표회 논문집, **대한토목공학회지**, pp. 451-454.
4. 정하익, 이용수, 심한인, 우재윤(1995), “불량매립지 차폐방안 및 차폐재와 침출수의 반응성에 관한 연구,” **한국지반공학회지 '96 봄학술발표회 논문집**, pp. 191~198.
5. Altaee, E. and Evgin. E.(1992), “Performance of An Offshore Structure During An Oil Spill,” *OMAE*, Vol, IV, pp. 59~66.
6. Evgin. E.(1989), “Effect of an oil spill on soil properties,” *Proc. 8th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Eng.*, ASME, Vol. IV, pp. 715~720.
7. Hill, R.(1950), *The Mathematical Theory of Plasticity*, Clarendon Press, Oxford
8. Hjeldnes, E.I., Bretvik, S.K., and Skoglund, K.A.(1995), “An Experimental Study of Oil Contamination Spreading in Sand” *Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication No. 46*, ASCE, Vol, 1, pp.373~387.
9. Meyerhof, G.G.(1951), “The bearing capacity of foundations,” *Geotechnical Special Publication No. 5*, pp. 301~332.
10. Meyerhof, G.G.(1963), “Some recent research on the bearing capacity of foundations,” *Canadian Geotechnical Journal*, 1, No. 1, pp. 16~26.
11. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Willy & Sons, pp. 210~221.