

원유로 오염된 지반의 역학적 특성

Geotechnical Characteristics of Crude Oil-Contaminated Sandy Ground

신 은 철*1
Shin, Eun-Chul
이 재 범*2
Lee, Jae-Beom

Abstract

In this paper, the effects of crude oil contamination on the geotechnical properties of sand such as compaction characteristics, shear strength, permeability, and bearing capacity are presented. 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 analysis decreases due to the presence of oil within the pore spaces in sand. The bearing capacity of sand is significantly influenced by oil contamination.

요 지

본 연구는 토질 역학적인 측면에서 원유로 오염된 사질토의 압축강도 특성, 전단강도, 투수계수, 지지력 특성을 통하여 원유로 오염된 모래의 물리적 거동을 파악하였다. 실험 결과에 의하면 원유로 오염된 모래 지반의 내부마찰각이 오염되지 않은 지반의 내부마찰각보다 간극 속에 있는 원유로 인하여 감소하고 있으며, 오염도에 따라서 강도정수들 또한 현저한 영향을 보이고 있다. 모래지반의 지지력은 원유오염도에 따라 크게 영향을 받는다.

Keywords : Compaction, Crude oil, Contamination, Sand, Shear strength

1. 서 론

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

환경 생태학적 문제 못지 않게 중요한 사안이다. 오일유출로 인한 지반오염은 물리적 성질인 흙의 내부마찰각(ϕ), 탄성계수(E_s), 투수계수(k), 포아슨비(μ_s) 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

*1 정희원, 인천대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*2 정희원, 대우엔지니어링 기술연구소

Hill(1950), Meyerhof(1963) 등이 오염되지 않은 얇은기초의 지지력을 연구하였다. Evgin et al. (1989)은 배수 삼축실험을 통하여 오염도에 따른 사질토의 전단강도, 마찰계수, 탄성계수 등과 같은 토질정수를 도출하였다. Altaee와 Evgin(1992)은 오염된 사질토지반의 토질정수를 활용하여 강재케이슨 기초지반의 지지력에 관한 연구를 수행하였다. Hjeldnes et al. (1995)는 오일의 확산시험을 통하여 오염영역을 결정하는데 필요한 연구결과를 제시하였다. 본 연구에서는 물성시험으로서 원유로 오염된 모래의 다짐시험을 실시하여 사질토의 다짐특성을 규명하였고, 원유의 함유비와 함수비에 따른 모래의 투수 특성을 고찰하기 위하여 투수시험을 실시하였다. 원유로 오염된 모래층의 함수비와 내부마찰각의 변화에 따른 지지력을 평가하기 위하여 직접전단시험을 실시하였으며, 주문진 표준사로 기초지반을 조성하여 지지력 시험 및 이론적 고찰을 실시하였다.

2. 기본물성시험

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

표 1. 주문진 표준사의 특성

유효입경, $D_{10}=0.375\text{mm}$
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

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)kg/cm ²	0.39
염분(Salt), PBT	4.2
수분 및 침전물, Vol%	0.05
바나듐(Vanadium), ppm	-

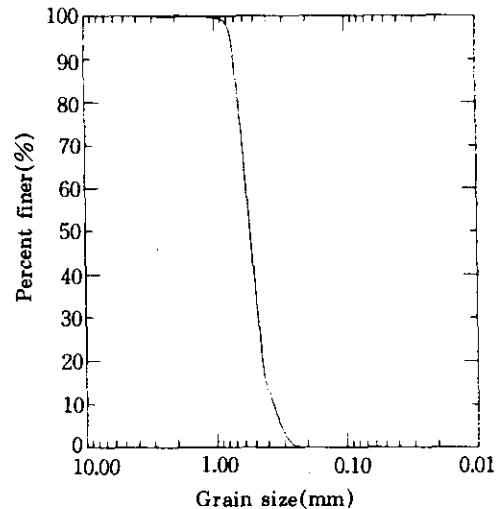


그림 1. 주문진 표준사의 입도분포곡선

2.1 다짐시험

다짐시험은 기초지반을 구성하고 있는 모래의 다짐특성을 알아보기 위한 시험으로서 수정 다짐시험(modified proctor test)을 실시하였다. 다짐시험은 건조한 시료로부터 시작하여 점차로 함유비 및 함수비를 증가시키면서 최대 건조밀도와 최적함수비 및 함유비를 도출하였다. 그림 2에 나타난 다짐시험결과로부터 원유를 섞은 시료의 최적함수비는 9.4%일 때 최대 건조밀도는 1.774t/m^3 이며, 물을 간극수로서 사용한 시료의 최적함수비는 18.2%이며 최대 건조밀도는 1.752t/m^3 이었다. 그림 2에서 보는 바와 같이 간극수가 원유일 때 그래프는 좌측

으로 이동하였다. 동알 다짐에너지와 함수비에
서 최대건조밀도가 크게 발생되었다는 것은 이
때의 침하량이 더 크게 발생할 수 있으며 극한
지지력도 작게 나타날 수도 있다는 것을 예측
할 수 있다.

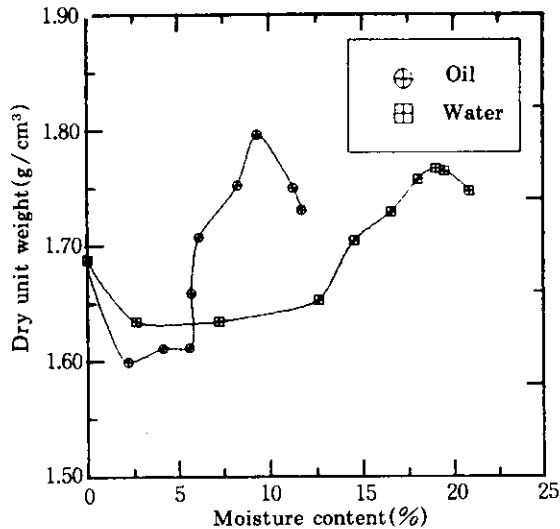


그림 2. 함수비와 함수비 변화에 따른 다짐곡선

2.2 투수시험

모래지반의 상대밀도와 함수비 및 원유함유
비 변화가 투수계수에 미치는 영향을 평가하기
위하여 정수위 투수시험을 실시하였다. 그림 3
에 나타난 시험결과에 의하면 조성된 모래지반
의 함수비가 약 4%상태에서 원유를 통과하였
을 때의 투수계수가 최대값을 나타냈다.

함수비가 더 증가할수록 점차 감소하여 함수
비가 0%일 때보다 더 감소한다. 이 실험결과
는 겨울이나 여름과 같은 온도와 지하수위의
변화가 발생하면 원유의 점성도가 변화하기 때
문에 확산범위와 모양에 상당한 영향을 미칠
것으로 판단된다. 그림 4에 나타난 시험결과에
의하면 함수비가 증가할수록 모래입자사이의
간극을 원유가 차지함으로 인하여 투수계수는
점차 감소한다. 또한 모래지반의 상대밀도가
낮을수록 투수계수의 감소폭이 크게 나타났다.

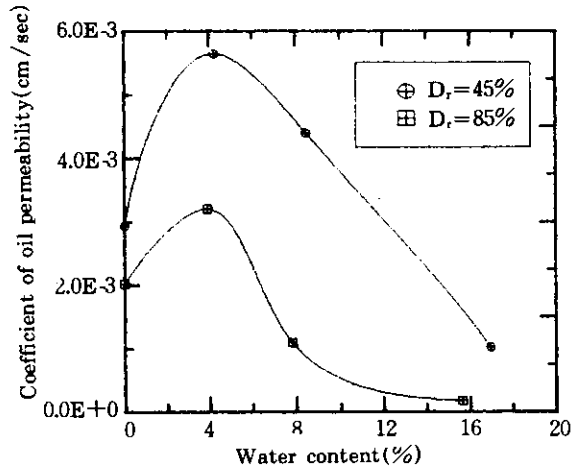


그림 3. 함수비 변화에 의한 원유의 투수계수

그리고 4%이상의 함수비에서는 투수계수가
상대밀도에 관계없이 거의 같다. 그림 3과 그
림 4에 나타난 결과를 분석하면 같은 실험조건
하에서의 투수계수는 원유의 투수계수보다 3.
7~32.3배 이상 큰 값을 나타내고 있다. 그림 5
는 노르웨이의 Hjeldnes et al. (1995)가 오일
의 확산시험 결과로서 α (shape contaminated
zone)는 확산된 모양의 직경을 길이로 나눈 것
으로서 작을수록 확산된 모양은 타원형으로 긴
모양을 나타내며 2%이상에서는 거의 변화가
없다. 본 연구에서 얻어진 결과(그림 3)로는

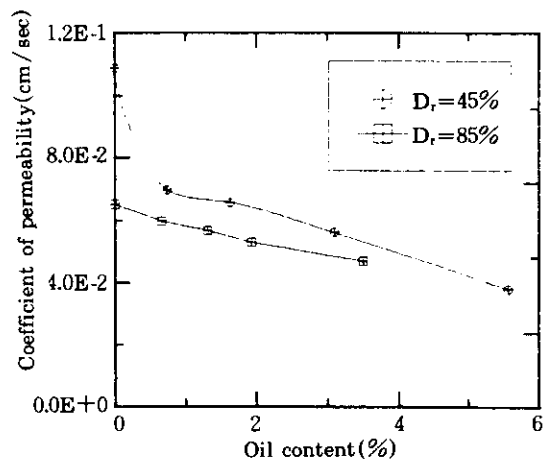


그림 4. 함수비 변화에 의한 투수계수

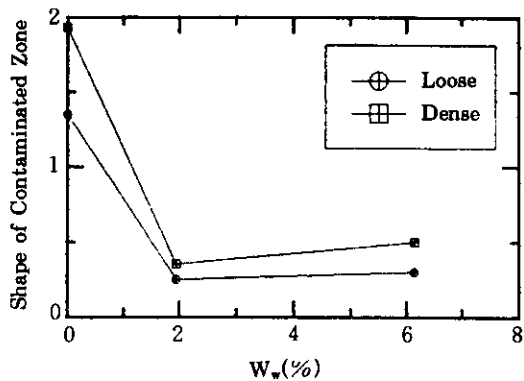


그림 5. 모래에서 함수비 변화에 의한 오염지역의 모양 (Hjeldnes, 1995)

약 4%에서 원유의 최대 투수계수를 나타내고 있다. 함수비가 증가할수록 토립자사이의 원유가 통과할 때 간극의 감소와 원유의 점성 때문에 점차 확산속도가 작아짐을 알 수 있다.

2.3 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 3에 비교하였다.

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

표 3. 내부마찰각의 이론치와 실험치 비교

상대밀도(%)	내부마찰(ϕ)	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 상대밀도

에 따라 시료를 준비하였다. 모래지반의 간극사이를 원유로 채웠을 때 내부마찰각과 전단강도변형에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하였다. 준비된 시료를 건조한 모래와 원유의 함수비를 변화시키면서 실시하였으며 수평변위는 1mm/min 이었다. 그림 6과 그림 7에서는 지반의 상대밀도가 50%와 75%일 때 지반이 오염되지 않았을 때와 오염되었을 때의 전단응력의 변화를 보여주고 있다. 이 때의 구속응력은 0.6kg/cm^2 를 가하였으며 전단속도는 1mm/min으로 통일하였다. 그림 6은 상대밀도 50%와 75%에서 원유의 오염도에 따른 직접전단 시험결과이다. 그림에 나타난 결과를 살펴보면 전단변위가 약 2mm 정도에서 최대전단응력값을 나타내고 잔류응력은 전단변위가 6mm에서 동일하게 발생하므로 입자들 상호간의 맞물림 현상(interlocking)을 관찰할 수 있다. 그림 6의 결과를 활용하여 오염도에 따른 내부마찰각을 도출하였다. 그림 7에 나타난 내부마찰각의 변화를 살펴보면 오일 함유비가 1.3%일 때까지는 급격히 감소하고 그 이후는 완만한 감소정도를 나타냈다. 지반이 오염되었을 경우, 함유비 4.2%까지, 내부마찰각은 오일에 의한

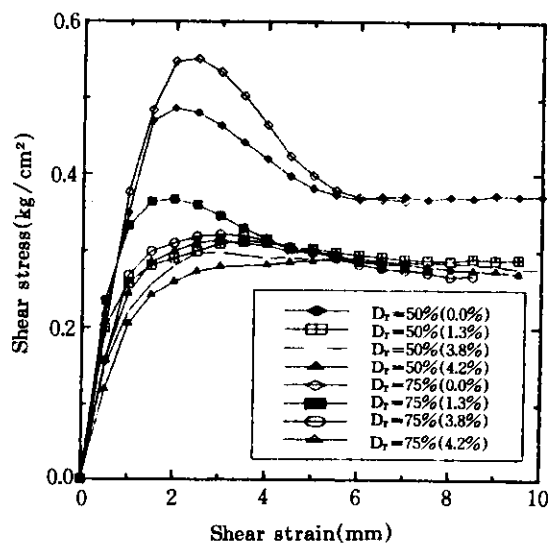


그림 6. 함유비와 상대밀도 변화에 따른 모래의 응력-변위관계

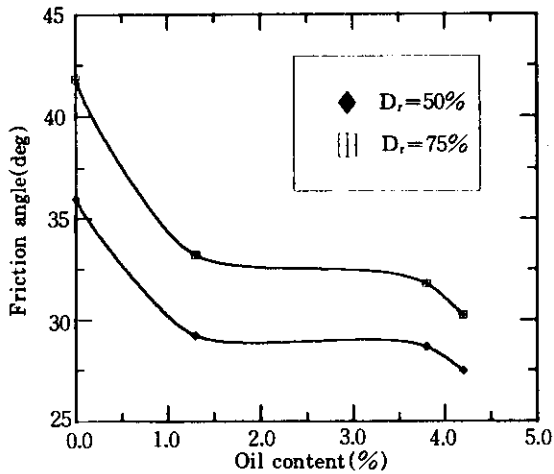


그림 7. 함유비 변화에 따른 모래의 내부마찰각

흡입자들 간에 윤활작용에 의하여 함유비가 0%일 때와 비교하면 약 25% 정도 감소함을 관찰할 수 있다. 이는 동일한 상대밀도이지만 입자의 움직임을 변화시키는 결과를 발생시키며 원유의 영향으로 내부마찰각, 전단응력, 체적의 감소가 발생한다. 지지력 시험에서 함유비가 증가에 의해서 전단전단파괴는 국부전단파괴, 관입전단파괴로 발생될 수 있다. 원유의 오염도를 4.2%까지로 결정한 이유는 그림 4에 나타난 것과 같이 최저투수계수의 한계를 나타냈기 때문이다.

3. 오염된 지반의 지지력시험 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 변형을 막았으며 밑면은 하중재하시 기초가 경사지는 것을 최소화하기 위해서 샌드페이퍼를 부착하였다. 지지력에 미치는 조도의 영향은 샌드페이퍼가 모래보다는 작고 비닐이나 알루미늄보다 큰 효과를 나타내므로 중간 정도의

영향을 미치는 샌드페이퍼를 사용하였다(유남재외 2인, 1995). 기초폭이 하중침하 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 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 여러 층으로 조성하였고 기초 중심부의 직경 1cm정도의 홈은 Loadcell이 하중전달시 힌지와 같은 역할을 하여 자유롭게 회전할 수 있게 만들었다.

Vesic, Banks, Woodward(1965)의 연구결과에 의하면 하중재하속도가 감소함에 따라 극한지지력이 감소하다 점차 증가한다. 이 영향은 하중재하속도가 약 1mm/min에 도달했을 때 내부마찰각이 약 2°의 감소효과와 일치하고 그때 극한지지력이 최저치이다. 그래서 본 시험에서도 이와 같은 속도로 직접전단시험과 지지력시험을 실시하였다.

원유유출에 의한 사질토 지반의 오염도가 지반의 지지력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실내모델시험을 실시하였다. 기초폭이 5cm, 7cm이며 상대밀도가 50%일 때와 75%일 때 함유비 0%, 1.3%, 3.8%, 4.2%로 16회의 지지

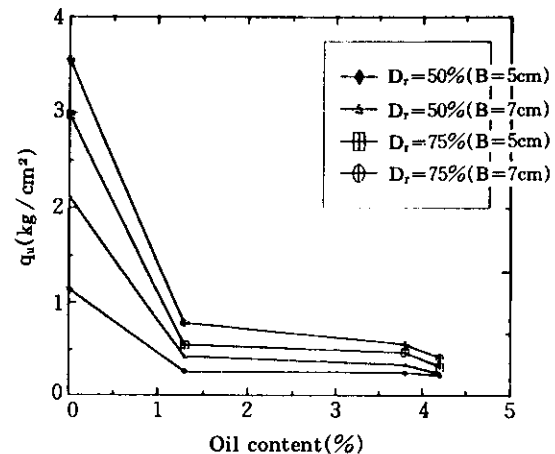


그림 8. 함유비 변화에 의한 얇은 기초의 극한지지력

력시험을 하였다. 그림 8에는 함유비에 따른 극한 지지력시험 결과가 지반의 상대밀도 및 기초폭에 따라 도시되어 있다. 그림 8에 나타난 극한지지력의 변화는 직접전단시험 결과에 의거하여 도출된 내부마찰각(그림 7)의 변화와 동일한 추세이다. 즉, 함유비가 1.3%일 때 급격히 감소하고 그 이후에는 큰 변화가 없다가 3.8%이하에서 다시 낮아지는 경향을 보였다. 또한 같은 지반조건일 때 기초폭의 영향은 상대밀도가 낮을 때 극한지지력에 더 영향을 미친다. 기초폭이 동일할 때 극한지지력의 감소율이 더 높은 것으로 판명되었다.

4. 하중재하에 의한 지반파괴

일반적으로 사질토지반에서의 전단파괴양상은 그림 9에 나타난 것과 같다. Meyerhof (1951)가 제시한 전반전단파괴면의 최대깊이(H) 및 파괴면이 수평길이(L_{sh})는 방정식 (2), (3)과 같다.

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

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

여기서, H는 기초의 측면아래에서 최대깊이라고 가정한다. B는 기초의 폭(m)이며, D는 기초저면에서부터 지표면까지의 깊이(m)이다. L_{sh} 는 기초측면에서 파괴면까지의 수평길이이다.

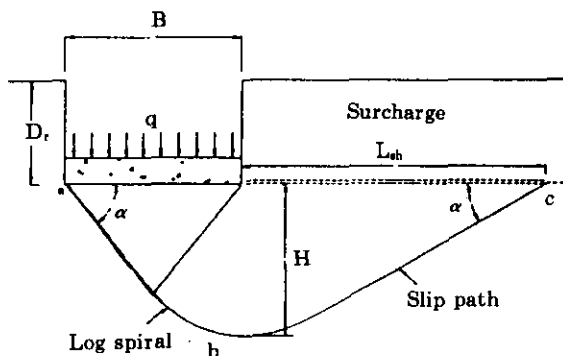


그림 9. 균등질지반에서의 전단파괴양상

지지력시험에서 모래지반을 형성할 때 염색한 모래로 지반을 형성하여 지반파괴형상을 Meyerhof가 제시한 이론치(직접전단시험에 의한 ϕ 적용)와 실험치를 표 4와 표 5에 각각 비교하였다.

표 4. 파괴면의 깊이와 수평길이($D_r=50\%$)

H, L_{sh}		D_r 기초폭	
		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

표 5. 파괴면의 깊이와 수평길이($D_r=75\%$)

H, L_{sh}		D_r 기초폭	
		5cm(3.8%)	7cm(1.3%)
기초파괴면의 깊이(H)	이론치(cm)	관 입 파 괴	12.38
	실험치(cm)		6.60
수평방향 파괴면의 길이(L_{sh})	이론치(cm)	관 입 파 괴	21.71
	실험치(cm)		16.00

() : 함유량

이론치와 실험치를 비교해 볼 때 기초파괴면의 깊이는 실험치가 적게 나타났다. 이러한 이유는 토조측면에서의 파괴양상으로 기초파괴깊이를 관찰하였고, 토조의 중간단면에서는 파괴깊이가 이론치와 유사할 것으로 예측된다. 수평방향 파괴면의 길이는 중앙부분에서 관찰하여 이론치와 비슷한 결과를 가져왔다. 이유는 파괴면의 길이를 지반중앙에서 실측한 결과이기 때문이다. 표 4로 부터 오염도가 높을수록 이론치와 실험치의 차이가 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 오염도가 증가될수록 지반의 지지력이 감소되기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 많이 발생되고 있는 원

유유출사고로 인해 사질토지반이 원유로 오염되었을 때 오염도가 지지력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실내모형시험을 실시하였다. 함유비와 함수비변화에 따른 다짐시험, 투수시험, 직접전단시험을 통하여 오염도에 따른 사질토의 토질 역학적 특성을 규명하였다. 지지력시험에서는 함유비, 상대밀도, 기초폭 등을 변화시키면서 이들 변수들이 극한지지력에 미치는 영향을 고려하였다. 기본물성시험 및 실내모형 지지력시험 결과를 이론에 의하여 도출된 결과와 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일한 다짐조건에서 사질토가 원유로 오염된 경우, 모래입자들 사이에서 원유가 윤택작용을 하므로 간극수가 물일 때보다도 최대건조단위중량이 1.7%정도 높은 것으로 나타났다.
2. 정수위 투수시험에서 물의 투수계수가 원유의 투수계수보다 약 30배정도 크게 나타난 것은 원유의 점성과 흡입자 사이의 간극을 원유가 차지하기 때문이라 판단된다.
3. 직접전단시험결과로부터 원유의 오염으로 인한 내부마찰각은 최대 25%까지 감소하였다.
4. 실내모형 지지력시험 결과로부터 오염된 지반의 극한지지력은 오염되지 않은 지반의 극한지지력보다는 약 5~6배정도 작게 나타났다.
2. 신은철, 이재범(1995), "원유로 오염된 사질토의 특성," 95봄 학술발표회 논문집, 한국 지반공학회, pp. 129~134.
3. 정하익, 이용수, 심한인, 우재운(1995), "불량 매립지 차폐방안 및 차폐재와 침출수의 반응성에 관한 연구," 한국지반공학회지 '96 봄학술발표회 논문집, pp. 191~198.
4. Altaee, E. and Evgin. E. (1992), "Performance of An Offshore Structure During An Oil Spill," OMAE, Vol, IV, pp. 59~66.
5. 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.
6. Hill, R. (1950), "The Mathematical Theory of Plasticity," Clarendon Press, Oxford
7. 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.
8. Meyerhof, G. G. (1951), "The bearing capacity of foundations," Geotechnical Special Publication No. 5, pp. 301~332.
9. Meyerhof, G. G. (1963), "Some recent research on the bearing capacity of foundations," Canadian Geotechnical Journal, 1, No. 1, pp. 16~26.
10. Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics," John Willy & Sons, pp. 210~221.
11. Vesic, A. S. (1965), "Ultimate loads and settlement of deep foundations in sand," Proceedings of Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke University, Duham, N. C., pp. 53~68.

참 고 문 헌

1. 유남재, 이상덕, 박병수(1995), "대상기초저면의 조도가 사질토지반의 침하 및 극한지지력에 미치는 영향," 대한토목학회지, 제15권 제4호, pp. 1041~1053.

(접수일자 1997. 8. 9)