KGS Fall '96 National Conference / 25~26, October, 1996 / Seoul / Korea

원유로 오염된 사질토지반의 지지력 평가
Bearing Capacity of Shallow Foundation on Crude-Oil Contamination Sand

신은철[1], Eun-Chul Shin, 이재범[2], Jae-Beom Lee

[1] 시립인천대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Inchon
[2] 대우엔지니어링 기술연구소, Research Engineer Technical Research Institute, Daewoo Engineering Company

SYNOPSIS : The paper presents th effect of crude-oil contamination on the geotechnical properties and bearing capacity of shallow foundation on crude-oil contaminated sand. The results of compaction test indicated that the maximum dry density of crude-oil contaminated sand gives higher value than that of water saturated sand whereas lower value in the optimum moisture content. The oil permeability is the greatest at the moisture content of 4% while the water permeability decreases continuously with the increase of moisture content. The reduction magnitude of internal soil friction under the oil content of 1.3% was greatly influenced with the increase of relative density of sand. From the load-settlement curve, the bearing capacity of contaminated ground was 5~6 times lower than that of uncontaminated ground.

Key words : Bearing Capacity, Crude-Oil, Contamination

1. 연구배경

산업사회가 급속도로 발달되면서 에너지의 소모는 기하급수적으로 증가되고 있으며 에너지원의 중요 요소인 원유는 대륙간 이동이 더욱 빈번해지고 있다. 오일에 의한 흙의 오염은 육상에서 운송도중에 사고나 해상의 유조선의 침몰, 파이프라인, 지하저장소에서의 유출등 여러가지 이유에서 발생되어 심각한 정도로 지반에 영향을 미치고 있다. 도심지에 설치된 지하유류저장탱크의 경우 저장탱크가 부식 등으로 인해 유류가 유출되면 지하수 오염은 물론 기초지반의 국부적인 지지력 감소로 유류저장시설 및 주위 구조물이 안정성을 잃게 된다. 오일유출로 인한 지반오염은 물리적 성질인 흙의 내부마찰각(ϕ), 탄성계수(E_s), 투수계수(k), 포아슨비(μ_s)등의 변화에 직접적인 영향을 미친다. 오염되지 않은 얕은기초의 지지력 연구는 Terzaghi(1943)와 Hill(1950), Meyerhof(1963)등이 하였으며, 오염된 지반의 지지력력에 관한 연구는 Evgin(1989)과 Altaee와 Evgin(1992)이 수행하였다. 지반환경분야의 국내 연구는 신은철과 이재범(1995), 정하익외 3인(1995)이 발표한 연구결과외에는 연구가 매우 취약한 상태이며 국내에서는 아직도 그 심각도를 인지하지 못하고 있다.

본 연구에서는 주문진 표준사로 기초지반을 조성하였으며 물성실험으로서 원유로 오염된 모래의 다짐실험을 실시하여 사질토의 다짐특성을 규명하였고 원유의 함유비와 함수비에 따른 투수 및 원유의 투수특성을 고찰하기 위하여 투수계수, 원유의 투수계수실험을 실시하였다. 원유로 오염된 모래층의 함수비와 내부마찰각의 변화에 따른 지지력을 평가하기 위하여 직접전단시험을 실시하였다. 물성실험 결과를 바탕으로 지지력 실험 및 이론적 고찰을 실시하였다.

2. 기본물성실험

본 연구에 사용된 주문진 표준사의 입도분포는 유효입경이 0.36mm이며, 균등계수와 곡률계수가 각각 1.61과 1.10으로 나타났다. 초대건조밀도와 최소건조밀도는 1.68 g/cm^{3}와 1.384 g/cm^{3}이며 최대간극비와 최소간극비는 0.877과 0.546이다 지반 오염원으로 사용된 원유는 OMAN산으로 그 특성은 표 1.과 같다. 모래지반이 원유로 오염되었을때의 공학적특성을 규명하기 위하여 다짐실험, 오염도및 지반의 상대밀도에 따른 투수계수와 내부마찰각의 변화를 관찰하기 투수계수실험과 직접전단실험을 각각 실시하였

표 1. 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^2	0.39
염분(Salt), PTB	4.2
수분 및 침전물(BS&W), Vol%	0.05
바나듐(Vanadium), ppm	-

2.1 다짐실험

다짐실험은 기초지반을 구성하고 있는 모래의 다짐특성을 알아보기 위한 실험으로서 수정다짐실험(Modified Proctor Test)에 의거하여 실시하였다. 다짐실험은 건조한 시료로부터 시작하여 점차로 함유비 및 함수비를 증가시키면서 최대건조밀도와 최적함수비 및 함유비를 도출하였다. 그림 1.에 나타난 다짐실험결과로부터 원유를 섞은 시료의 최적함유비는 9.4%일 때 최대건조밀도는 1.796 g/cm^{3}이며 물을 간극수로서 사용한 시료의 최적함수비는 19.1%이며 최대건조밀도는 1.766 g/cm^{3}이었다. 그림 1.에서 보는 바와 같이 간극수가 오일일 때 그래프는 좌측으로 이동하였다. 동일 다짐에너지와 함수비에서 최대건조밀도가 크게 발생되었다는 것은 이때의 침하량이 더 크게 발생할 수 있으며 극한지지력도 작게 나타날 수도 있다는 것을 예측할 수 있다.

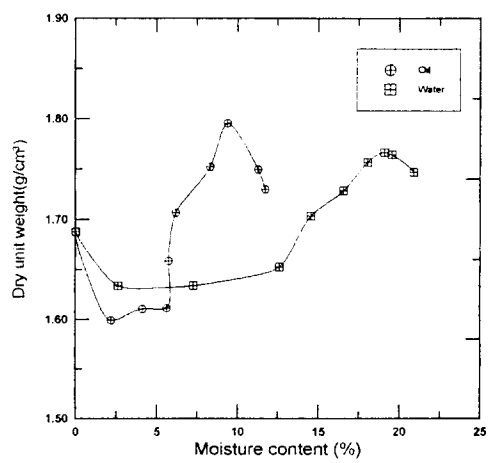

그림 1. 함수비와 함유비 변화에 따른다짐곡선

2.2 투수실험

모래지반의 상대밀도와 함수비 및 함유비 변화에 따른 투수계수와 원유의 투수계수(Coefficient of Oil Permeability)의 영향을 평가하기 위하여 정투수위실험을 실시하였다. 그림 2.에 나타난 실험결과에 의하면 함수비가 0%일 때는 간극사이를 원유가 가득 채워 흘러 물보다 기름의 점착력이 크므로 이로 인한 영향 때문에 각각의 상대밀도에서 원유의 투수계수는 약 4%에서 최대값을 나타내며 함수비가 더 증가할수록 점차 감소하여 함수비가 0%일 때보다도 더 감소한다. 이 실험결과는 겨울이나 여름과 같은 온도와 지하수위의 변화가 발생하면 원유의 점성도 변화하기 때문에 확산범위와 모양에 상당한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

그림 3.에 나타난 실험결과에 의하면 함유비가 증가할수록 투수계수는 점차 감소하며 상대밀도가 낮을수록 투수계수의 감소폭이 크다. 그리고 4%이상의 함유비에서는 투수계수가 상대밀도에 관계없이 거의 같다. 그림 2., 그림 3.에 나타난 결과를 분석하면 같은 실험조건하에서의 투수계수는 원유의 투수계수보다 3.7~32.3배 이상 큰 값을 나타내고 있다. 그림 4.는 노르웨이의 Hjeldnes(1995)가 오일의 확산실험을 통해서 얻은 결과로서 α(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 결과(그림 2.)로는 약 4%에서 원유의 최대 투수계수를 나타내고 있다. 함수비가 증가할수록 토립자사이의 원유가 통과할 때 공극의 감소와 원유의 점성 때문에 점차 확산속도가 작아짐을 알 수 있다.

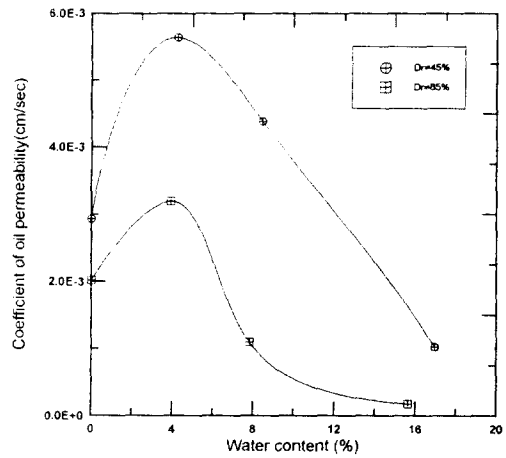

그림 2. 함수비 변화에 의한 원유의 투수계수

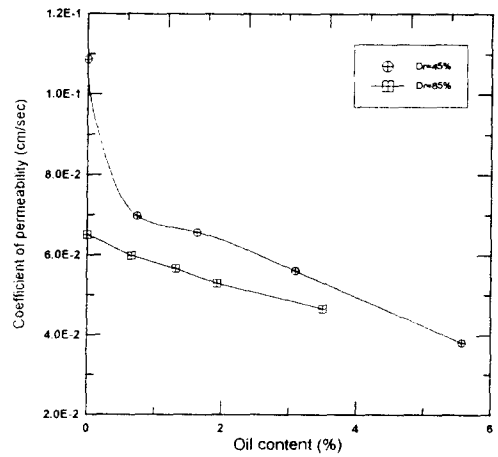

그림 3. 함유비 변화에 의한 투수계수

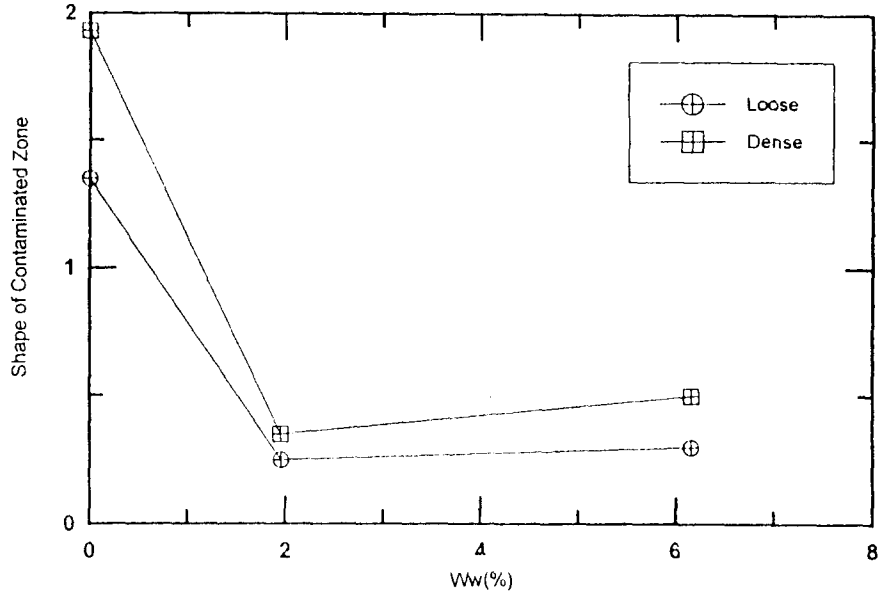

그림 4. 모래에서 함수비 변화에 따른 오염지역의 모양(Hjeldnes, 1995)

2.3 직접전단실험

흙의 내부마찰각은 전단강도에서 중요변수이며 지반의 지지력을 평가하는데 있어서 기술된 지지력계수 N_c, N_q, N_γ에 영향을 미치므로 사질토에서는 매우 중요하다. 따라서 전단실험은 기본물성실험 중에서 가장 중요한 부분을 차지한다. Meyerhof(1956)가 제안한 방정식(1)에 의한 이론치와 직접전단실험에 의한 실험결과를 상대밀도별로 표 2.에 비교하였다.

$$\phi = 28 + 0.15D_r \qquad (1)$$

표 2. 내부마찰각의 이론치와 실험치 비교

내부마찰각 / 상대밀도(%)	이론치(deg)	실험치(deg)
30	32.50	33.58
50	35.50	35.58
75	39.25	41.49

직접전단실험 시료의 크기는 직경이 60mm, 높이가 20mm이며 요구되는 소정의 상대밀도에 따라 시료를 준비하였다. 모래지반의 간극사이를 원유로 채워졌을 때 모래의 내부마찰각과 전단강도-변형에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하였다. 준비된 시료를 건조한 모래와 원유의 함수비를 변화시키면서 실시하였으며 수평변위는 1mm/min이었다.

그림 5.에 지반의 상대밀도가 75%와 50%일 때 함유비 변화에 의한 전단응력의 변화를 보여주고 있다. 이때의 구속응력은 0.4 kg/cm^2를 가하였으며 전단속도는 1mm/min으로 통일하였다.

그림 5.은 함유비가 0%일 때 상대밀도 50%와 75%에서 상대밀도에 따라 전단변위가 약2mm정도에서 최대전단응력값을 나타내고 잔류응력은 전단변위가 6mm에서 동일하게 발생하므로 입자들 상호간의 맞물림현상(Interlocking)을 관찰할 수 있다. 상대밀도가 75%일 때의 함유비 증가에 따른 최대전단응력의

감소율은 33.3%~42.9%이며 상대밀도가 50%일 때의 감소율은 35.7%~40%이었다. 맞물림 현상은 오일에 입자들 간에 윤활작용을 하여 함유비가 0%일 때와 비교하면 상당히 감소함을 관찰할 수 있다. 이는 동일한 상대밀도이지만 입자의 움직임을 변화시키는 결과를 발생시키며 지지력 실험에서 함유비의 증가에 의해서 전반전단파괴는 국부전단파괴, 관입전단파괴로 발생될 수 있다.

그림 5.에 나타난 전단응력-전단변위에 따른 체적변화-전단변위의 결과는 그림 6.에 상대밀도 및 함유비별로 도시되어 있다. 상대밀도가 75%일 때의 체적변화율은 함유비증가에 따라 감소하였지만 전체적으로 ⊕상태에서 변위를 보여주고 있다. 이는 구속응력이 비교적 낮아 전단변위가 증가함에 따라 체적이 팽창(Dilation)하였으며 그 팽창정도는 함유량이 증가함에 따라 감소하였는데 그 정도는 그림 5.에 나타난 전단강도의 감소량과 일치하는 결과를 보여주고 있다. 또한 함유율이 1.3%일 때의 전단강도 및 체적변위는 오염되지 않은 시료에 비하여 상당히 감소되는 것을 주목할 수 있다. 지반의 상대밀도가 75%일 때 함유비가 0%에서 1.3%로 증가함에 따른 내부마찰각, 전단응력, 체적의 감소율은 각각 20.1%, 33.3%, 41.2%를 보여주고 있다. 지반의 상대밀도가 50%일 때의 체적변화율은 함유비가 증가함에 따라 상대밀도가 75%일 때와 같이 감소하였으며 함유비가 3.8%와 4.2%에서는 체적감소율이 ⊖상태로 원래의 체적보다 감소된 것을 인지할 수 있다.

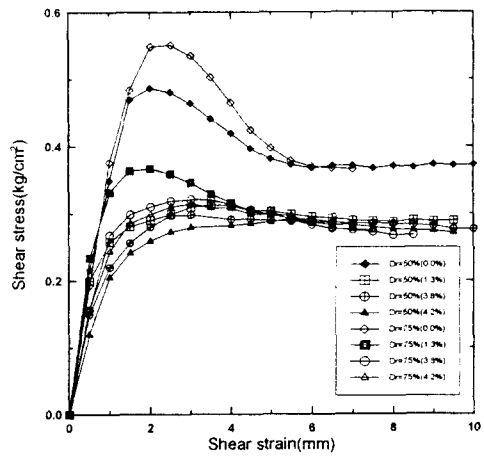

그림 5. 함유비 변화에 의한 모래의 응력-변위의 특성

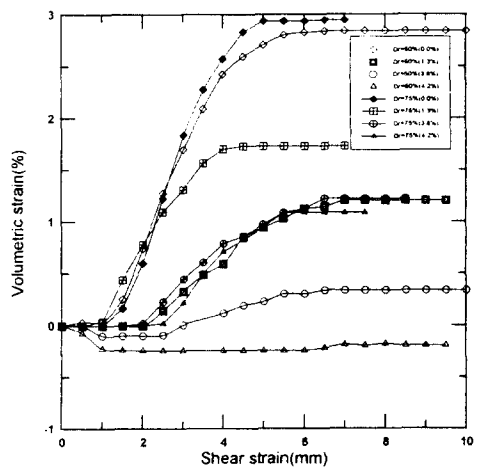

그림 6. 함유비와 체적변화와의 관계

3. 오염된 지반의 지지력 실험 및 결과

원유로 오염된 사질토 지반과 오염되지 않은 지반상에 위치한 대상기초의 극한지지력을 측정하기 위하여 실내모형실험을 실시하였다. 모델 기초의 크기는 폭(B)이 50mm와 70mm, 길이(L) 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 미치므로 이를 사용하였다. 기초폭이 하중-침하 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 여러층으로 조성하였고 기초 중심부의 직경 1cm정도 홈은 Loadcell이 하중전달시 힌지와 같은 역할을 하여 자유롭게 회전하게 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 실험에서도 이와같은 속도로 직접전단실험과 지지력실험을 하였다.

원유유출에 의한 사질토 지반의 오염도가 지반의 지지력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실내모델실험을 실시하였다. 기초폭이 5cm일 때 상대밀도가 75%일 때와 50%일 때 함유비가 0%, 1.3%, 3.8%, 4.2%별로 8회의 지지력실험을 하였다. 실내실험에 의해 구한 극한지지력은 직접전단실험에서 구한 흙의 내부마찰각을 바탕으로 이론적으로 평가한 극한지지력과 비교 고찰하였다. 극한지지력비(BCR_u)은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 q_u는 함유비가 0%일 때의 극한지지력이고 $q_{u(oc)}$는 원유로 오염된 지반의 극한지지력이다.

지지력감소율(β)은 백분율로 다음과 같은 방정식에 의해서 산정하였다.

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

그림 7.에는 이론에 의해 평가된 극한지지력비와 실험에 의한 극한지지력비를 함유비에 따라 나타내었다. 극한지지력은 직접전단실험 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(β)은 이론에 의한 결과가 2~3% 높은 것으로 나타났으나 전체적으로 볼 때 거의 일치한다고 볼 수 있다.

그림 8.에는 함유비에 따른 극한 지지력실험 결과가 지반의 상대밀도 및 기초폭에 따라 도시되어 있다. 같은 지반조건일 때 기초폭의 영향은 상대밀도가 낮을 때 극한지지력에 더 영향을 미친다. 기초폭이 동일할 때 극한지지력의 감소율이 더 높은 것으로 판명되었다.

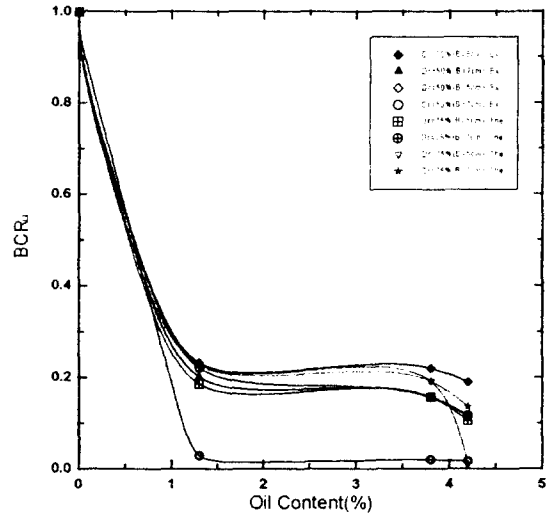

그림 7. 이론치 BCR_u과 실험치 BCR_u의 비교

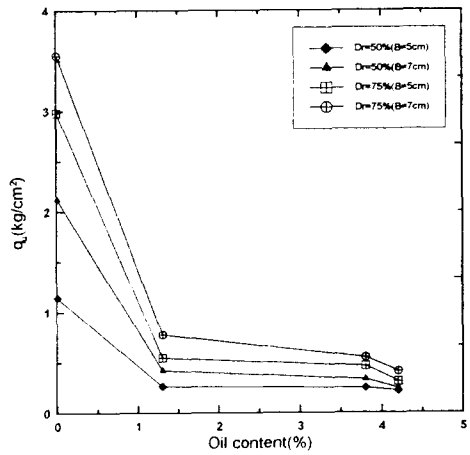

그림 8. 함유비 변화 따른 얕은기초의 극한지지력

4. 결 론

본 연구에서는 최근 많이 발생되고 있는 원유유출사고로 인해 모래지반이 원유로 오염되었을 때 오염도가 지지력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실내모형실험을 실시하였다. 함유비와 함수비변화에 따른 다짐실험, 투수실험, 직접전단실험을 통하여 오염도에 따른 사질토의 토질 역학적 특성을 규명하였다. 지지력실험에서는 함유비, 상대밀도, 기초폭등을 변화시키면서 이들 변수들이 극한지지력에 미치는 영향을 고찰하였다. 기본물성실험및 실내모형 지지력실험 결과를 이론에 의하여 도출된 결과와 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사질토가 원유로 오염된 경우 모래입자들 사이에서 원유가 윤활작용을 하므로 간극수가 물일 때보다도 최대건조단위중량이 1.7%로 높은 것으로 나타났다. 이 결과로부터 원유로 오염된 지반이 원지반보다도 침하량이 크게 발생될 것으로 예측된다.
2. 정수위투수실험에서 물의 투수계수가 원유의 투수계수보다 약 30배 정도 크게 나타난 것은 원유의

점성 때문이라 판단된다. 지반의 함수비가 4%일 때 원유의 투수계수가 최대로 나타났으므로 확산범위가 가장 크다는 사실을 알 수 있다. 이 결과로부터 기초지반이 사질토일 경우 상대밀도와 함수비가 주어지면 지반의 확산모양과 깊이를 추정할 수 있다.

3. 직접전단실험에서 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. 이러한 현상은 상대밀도가 감소하는 효과와 같다.
4. 실내모형 지지력실험 결과로부터 오염된 지반의 극한지지력은 오염되지 않은 지반의 극한지지력 보다는 약 5~6배 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.

기초공학적인 차원에서 생각할 때 원유로 오염된 지반은 물리적 거동이 매우 중요하다. 또한 기초의 과다침하로 인한 구조물의 불안정은 구조물 자체의 파괴 및 심각한 환경파괴의 주원인이 된다. 그러므로 원유로 오염된 흙의 응력-변형에 대한 집중적인 연구가 더욱 필요하다. 오일의 종류와 온도에 따른 확산문제, 오염원의 처리 등 좀 더 폭넓은 연구가 요망된다.

5. 참 고 문 헌

1. 유남재, 이상덕, 박병수(1995), "대상기초저면의 조도가 사질토지반의 침하 및 극한지지력에 미치는 영향에 관한 연구," 대한토목공학회지, 제15권 제 4호, pp.1041~1053.
2. 신은철, 이재범(1995), "원유로 오염된 사질토의 공학적 특성," 95봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.129~133.
3. Altaee, E. and Evgin. E.(1992), "Performance of An Offshore Structure During An Oil Spill," OMAE, Vol. Ⅳ, pp. 59~66.
4. Cook, E. E., Puri, V. K and Shin, E. C.(1992), "Geotechnical Characteristics of Crude Oil-Contamination Sands," The Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, Vol. I, pp.384~387.
5. Das, B. M.(1994), "Principles of Geotecnical Engineering" PWS-KENT, 3rd Ed.
6. Das, B. M.(1995), "Principles of Foundation Engineering" PWS-KENT, 3rd Ed.
7. Dusseault, M. B. and Morgenstern, N. R.(1978), "Shear Strength of Althabasca Oil Sands," Canadian Geotech, J., 15, pp.216~238.
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(1963), "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundation," Canadian Geotechnicl Journal, Vol. 1, No. 1, pp.16~26.