

유류로 오염된 점성토의 지반공학적 특성 분석

Geotechnical Characteristics Analysis of Oil Contaminated Clayey Soil

권 무 남* · 김 현 기**
Kwon, Moo Nam · Kim, Hyun Ki

Abstract

This test was performed to evaluate the change of the unconfined compressive strength, strength parameters which resulted from direct shear test and oil residue percents analyzed by GC-MS as time lapse, oil addition. Unconfined compression strength of 10% kerosene added by weight of dry soil recovered as time passed. In the case of 5% kerosene added, the strength recovered as much as clean clayey soil after about 50 days passing. For the case of diesel added, the recovery of unconfined compressive strength was not shown even though about 60 days passed. The strength parameters (c , ϕ) of kerosene added not changed but for diesel added, the cohesion was very decreased as diesel addition increased. Residual percent of kerosene in the soil was less than that of diesel as time passed.

Keywords : oil, clayey soil, kerosene, diesel, unconfined compressive strength, cohesion, internal friction angle, contaminate

I. 서 론

유류 제품의 저장 및 수송 시설들의 노후화로 등유와 경유 등의 유출사고가 빈번하게 일어나고 있고, 이러한 시설들은 상당수 지하에 설치되어 있기 때문에 지반 내 유류유출에 대한 모니터링이 어려운 상태이다. 최근 환경에 대한 관심이 고조됨에 따라 송유관의 파손, 군사시설 내 저유탱크의 파손

및 사용중이거나 사용중지된 주유소로부터의 유류 유출사고 등 유류오염에 의한 지반오염이 문제화되고 있다.

지반의 유류오염이 지반공학적 측면에서 문제가 되는 것은 지반에 유류가 침투되어 오염되면 간극이 점성과 윤활성을 가지는 유류로 채워져 지반의 공학적 성질이 변화되는데, 이로 인한 강도의 변화는 주변 지반에도 영향을 주어 기존 구조물의 안전에 영향을 미치게 된다. 특히 점성토는 간극유체변화에 아주 민감하게 반응하는데, 강(1999)은 유류가 점성토 지반에 침투할 경우 간극 내 유류와 흡착수가 혼합되지 않고 막을 형성함으로써 점성토 입자간의 점착력을 저하시키고 유류의 윤활현상을

* 경북대학교 농업생명과학대학
** 밀양대학교 토목학과 겸임교수
* Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5730
Fax: +82-50-950-6752
E-mail address: mmkwon@knu.ac.kr

발생시켜 강도저하를 가져오는 것으로 보고한 바 있다. 또한 이미 발표된 유류오염 지반에 대한 공학적 연구들이 대부분 사질토에 집중되어 있기 때문에, 실제 현장에서의 문제해결에 한계를 보이고 있다. 따라서 유류오염된 점성토의 지반공학적 강도특성변화에 대한 연구가 필요한 것으로 판단되며 본 실험이 성공적으로 이루어진다면 유류오염된 사질토에 대한 연구에 추가하여 보다 효율적인 유류오염지반의 평가에 기여할 것으로 예상된다.

이에 본 연구에서는 유류오염된 점성토의 강도특성 변화를 중심으로 일축압축실험과 직접전단실험을 실시하여 오염도와 오염경과시간에 따라 분석하였으며, 유류오염 점성토지반의 안정성 검토를 위한 기초자료제공에 본 실험의 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 실험재료

가. 실험대상토

경남 부곡 인근 도로공사현장의 성토재를 습식체가름법으로 0.074 mm체를 통과시켜 채취된 시료에 대하여 실험을 실시하였다.

1) 실험대상토의 물리적 특성

기본적인 토성분석은 한국공업규격 및 ASTM에 준하여 실시하였고 결과는 Table 1에 요약하였다. 시료의 입도분석 결과 Fig. 1과 같이 나타났고 점토함유량은 34% 정도로 분석되었다.

Table 1 Basic physical properties of clayey soil

Item	Value	Remark
Specific gravity Gs	2.56	KS F 2308
Liquid limits LL (%)	46.10	KS F 2303
Plastic limits PL (%)	18.80	KS F 2304
Plastic index PI (%)	27.30	
Soil classification	CL	USCS

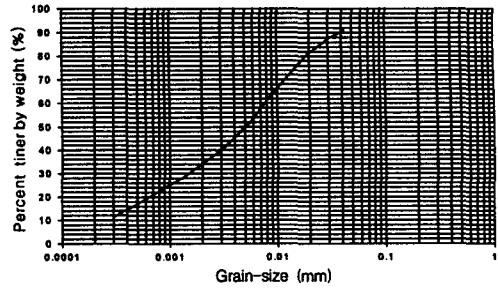


Fig. 1 Grain size distribution curve of clayey soil.

2) 다짐 특성

시료의 다짐실험은 KS F 2312에 준하여 실시하였고 결과는 Fig. 2와 같이 나타났다. 포화도는 약 90% 정도이며, 최대건조밀도 (γ_{dmax})는 1.56 gf/cm³, 최적함수비 (OMC)는 21.4%로 나타났다.

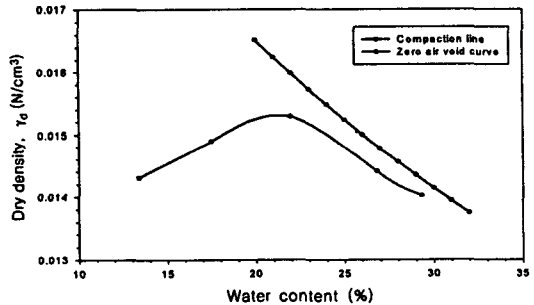


Fig. 2 Standard proctor compaction test of clayey soil.

나. 유 류

등유와 경유는 다중고리탄화수소 (C_nH_{2n+2})로 구성된 복합물질로, 실온에서 물에 대한 용해도는 대략 0.075~31.3 ppm 정도로 대단히 낮다. 비극성 탄화수소분자는 점도표면과는 van der Waals 인력에 의해서만 상호작용을 하므로 표면 흡착량은 많지 않다 (Young등, 1991). 따라서, 등유와 경유는 대부분 간극유체에 용해되지 않은 상태로 존재하며 물과 윤택작용을 일으키는데 이로 인해 흙의 강도감소현상이 나타나며, 휘발 후의 잔류성분들은

Table 2 General properties of kerosene and diesel

Items	Class	
	Kerosene	Diesel
Flash point (°C)	over 38	over 40
Pour point (°C)	-	under 0.0
Distillation (90% streaming point, °C)	under 265	under 360
10% carbon residue in remaining oil (weight, %)	-	under 0.15
Ash content (weight, %)	-	under 0.02
Sulfur content (weight, %)	under 0.01	under 0.05
Kinematic Viscosity (40 °C, cSt)	-	1.9~5.5
Soft point (mm)	over 21	-
Copper corrosion (50 °C, 3 h)	under 1	under 1

점성이 높아 흡의 강도를 회복시키는 경향을 나타낸다.

본 실험에서는 유류에 오염된 점성토의 강도특성을 분석하기 위하여 국내 H사에서 생산되고 있는 실내 난방용 등유와 일반 자동차 연료용 경유를 사용하였으며, 일반적인 성질은 Table 2와 같다.

2. 실험방법

유류오염점성토의 오염정도에 따른 강도특성과 시간경과에 따른 강도특성의 변화경향을 파악하기 위해 일축 및 직접전단 시험을 실시하였다.

가. 유류오염 공시체 제작

다짐실험으로 얻어진 최적함수비에 따라 중류수를 건조상태의 점토에 공급한 후 점토입자간의 수분평형상태를 형성하고자 밀폐용기 내에서 24시간 보관하였다. 이후 건조토의 중량 5, 10, 15 및 20%에 해당하는 등유 및 경유를 공급하여 혼합한 후, 흡의 간극 내에 유류가 잘 스며들도록 24시간 동안 밀폐용기에 보관 후 일축압축 및 직접전단실험용 공시체를 제작하였다.

나. 일축압축 및 직접전단실험용 공시체 제작

일축압축 및 직접전단실험용 공시체 제작에 일반적으로 이용되고 있는 방법은 유류오염공시체 제작 시 유류의 외부유출 및 층의 발생 등 여러 문제점들을 발생시켰고, 새로운 공시체 제작법이 필요하였다. 따라서 본 실험의 정확성을 높이고자 공시체 제작을 위한 새로운 공시체 제작물드 및 낙하추를 제작하였다. 일축압축실험에서는 직경 5 cm의 몰드에 직경 5 cm, 무게 1.285 kg의 추를 20 cm 높이에서 47회 자유낙하시켜 표준 A다짐에너지와 동일한 55.125 N·cm/㎠를 적용하였다. 직접전단실험용 공시체는 내경 6 cm, 높이 2 cm 크기의 몰드 내에 시료를 넣은 후 무게 2.017 kg의 추를 높이 12.5 cm에서 18회 자유낙하시켜 제작하였다.

다. 일축압축실험과 직접전단실험

비오염 점성토, 오염토, 시간경과 오염토의 강도특성을 평가하기 위하여 일축압축시험을 실시하였다. 점성토와 오염 점성토는 공시체 제작 후 즉시 실험을 실시하였으며, 오염 점성토 중 시간경과 시료는 공시체 제작후 비닐용기에 넣은 후 밀봉하여 각 경과시간 10, 30, 60일 동안 상온에서 보관한 후 실험을 실시하였다. 일축압축실험결과를 유류오염도와 오염후 시간경과에 따른 강도 변화 특성에 대하여 비교·분석하였다. 유류로 오염된 점성토의 전단 특성을 평가하기 위하여 연직 응력을 3~4단계로 변화를 주면서 직접전단시험을 실시하였으며, 내용분석은 일축압축실험과 동일하다.

라. 시간경과시료 진류유량 측정

휘발성 및 중간휘발성 유기성분의 정량 및 정성 분석이 가능한 GC-MS (Gas Chromatography Mass Spectrometer)는 환경유해물질, 농약, 석유류 제품의 성분 분석에 이용되고 있으며, 유류오염 점성토의 오염도를 확인하는 방법으로 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 시간에 따른 오염농도의 변화경향을 관찰하고자 각 유류함유량

에 대한 시료 10 g을 샘플링하여 순도 99.99%의 메탄올에 넣어 약 5분간 교반한 후, 30분간 방치하여 상등액을 추출한 뒤 GS-MS를 사용하여 분석하였으며, 각 오염도를 100%로 하여 이에 대한 잔류 유류 함유량을 %로 표기하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 점성토의 강도특성

유류로 오염되지 않은 점성토의 일축압축강도 및 직접전단실험결과는 다음 Table 3과 같으며 4.9, 9.8, 14.7 및 19.6 N/cm²의 연직응력을 적용하여 실시하였다.

Table 3 The results of unconfined compression and direct shear test of clay

item soil	q _c (N/cm ²)	c (N/cm ²)	friction angle (°)
clay	24.108	3.528	23.0

2. 유류오염에 따른 일축압축강도 특성

가. 오염도에 따른 일축압축강도의 변화경향

일축압축강도의 변화경향은 Fig. 3과 같으며, 등유를 첨가했을 경우에 대한 강도는 오염도 5% 일 때 11.074 N/cm²로 점성토의 약 46% 수준으로 감소되었고, 오염도 10%에서는 5.978 N/cm²로 약 25%, 오염도 15%와 20%에서는 오염도 10%인 경우와 유사한 값으로 나타났다.

Fig. 3에서 경유 첨가시 오염도가 5% 이상인 경우 강도가 급격히 감소하며 오염도 10% 이상에서는 그 감소의 폭이 완화되는 경향을 보이는데 이는 Pamukcu 등(1992)의 연구 결과인 경유 오염도 5%와 10%사이의 강도가 급격하게 감소한다는 사실과 잘 일치하고 있다. 이러한 강도의 변화 경향은 경유의 윤활작용으로 내부마찰의 감소에 의한

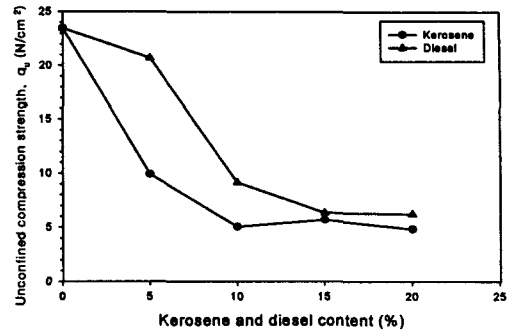


Fig. 3 Variation of unconfined compressive strength for kerosene and diesel contaminated clayey soils.

것으로 판단되며 직접전단실험 결과가 이를 잘 입증하고 있다.

나. 시간경과에 따른 오염 점성토의 일축압축강도 특성

Fig. 4는 시간경과시 유류 종류에 따른 변형특성의 변화경향을 나타내고 있는데 Fig. 4(a)는 등유를, 4(b)는 경유를 첨가한 것에 대한 것이다. 등유 10% 오염시킨 후 60일 경과된 시료를 제외하고는 유류의 종류에 큰 관계없이 오염도 5~10%사이에서 변형률이 크게 감소하는데 이는 간극내 잔류유류성분에 의한 것으로 판단된다. 또한 시간이 경과함에 따라 변형률은 감소하는 경향을 보이고 있는데 점성토 내에 함유된 유류가 휘발됨에 따른 것으로 판단되며 이는 GC-MS의 분석결과와 잘 일치한다.

Fig. 5는 시간경과시 유류 종류에 따른 강도변화 경향이며, Fig. 5(a)는 등유, 5(b)는 경유를 첨가한 것에 대한 실험결과이다. 등유의 경우 오염정도에 관계없이 시간경과에 따라 강도가 회복되는 경향을 보이고 있으며, 10일 이내에서 강도의 회복이 급격히 발생되었고 이후 회복정도가 완만해졌다. 또한 오염도가 상대적으로 낮은 5% 경우 60일 경과시료의 강도가 26.558 N/cm²으로, 40일과 50일 사이에서 오염되지 않은 점성토의 강도의 수준까지

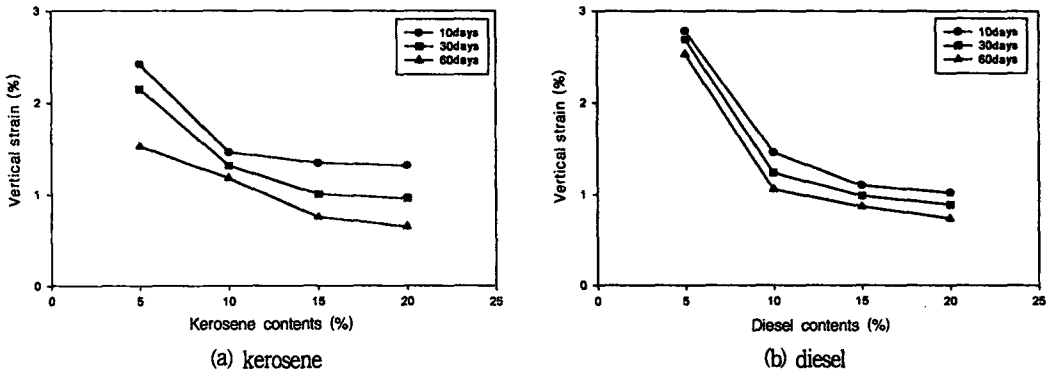


Fig. 4 Variations of vertical strain for oil contaminated clayey soils according to elapsed time.

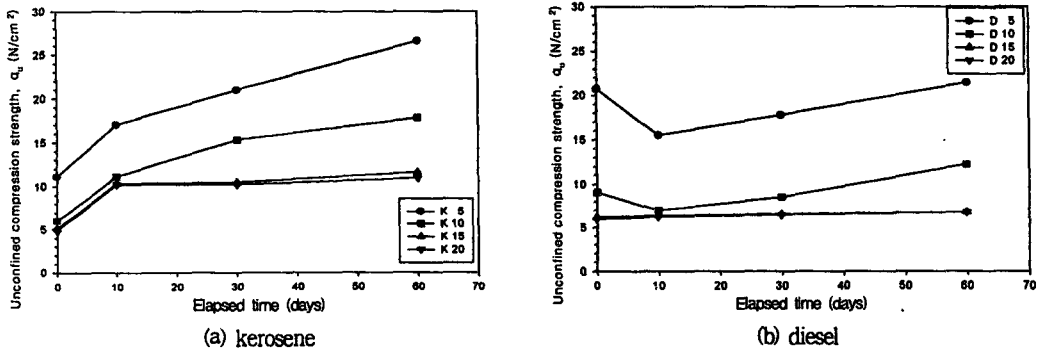


Fig. 5 Variations of unconfined compressive strength for oil contaminated clayey soils according to elapsed time.

회복되었다. 따라서 실험결과에서 볼 때 등유로 오염된 경우, 그 오염도가 5% 이하일 때는 50일 정도의 시일이 경과함에 따라 강도는 오염 전 상태로 회복가능할 것으로 판단되며, 5~15% 정도의 오염도에서는 60일 경과시료의 강도가 17.836~26.558 N/cm²로 나타나 원상태의 강도수준까지는 어렵겠지만 상당히 강도회복이 발생될 것으로 여겨진다. 그러나 15% 이상으로 심하게 오염될 경우 강도회복은 기대하기 어려울 것으로 판단된다.

경유의 경우 오염도에 따라 강도는 감소되고 특히 오염도가 5, 10%에서 10일 경과시 강도는 15.484 N/cm²과 9.016 N/cm²로 오염직 후 강도에 비해 감소되었다가 다시 회복되는 현상이 발생되는데 그 원인은 Table 2에서 나타났듯이 경유의 점

성이 점성도 내 침투를 지연시킴에 따른 것으로 판단된다. 또한 오염도가 상대적으로 낮은 5~10%에서는 시간경과에 따라 강도는 원상태 수준까지는 아니지만 21.364 N/cm²과 12.152 N/cm²로 나타나 일정 크기로 회복되는 경향을 보이고 있다. 오염도 10% 및 20%에서는 강도가 거의 일치하며 따라서 10%이상 경유로 오염될 경우 경과시간에 관계없이 강도의 회복현상을 기대하기 어려우며 이는 장기적인 강도저하를 발생시킬 것으로 판단된다.

3. 유류오염에 따른 전단특성

가. 오염정도에 따른 전단특성

유류 오염정도에 따른 내부마찰각 및 점착력의

변화경향은 Fig. 6과 같으며, 유류의 종류는 내부마찰각보다는 점착력에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었고 경유로 오염된 점성토의 경우 오염도가 증가함에 따라 점착력은 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였으며 특히 오염도 5~15%에서 감소의 폭은 크게 나타났다.

전단강도는 점착력과 내부마찰각의 함수로 내부마찰각이 일정하다면 전단강도는 점착력에 더 큰 영향을 받게 된다. 경유 첨가시 강도회복이 미세하거나 나타나지 않는 오염정도 15% 이상인 경우 강도는 매우 작은 값을 보이며 거의 일치하는 경향을 보이는데 이는 점착력에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있으며 간극에 유류가 침투하여 물과 분리된 상태에서 토립자 간에 마찰에 의한 저항이 거의 발생되지 않도록 유효작용을 발생시키는 것으로 추측된다.

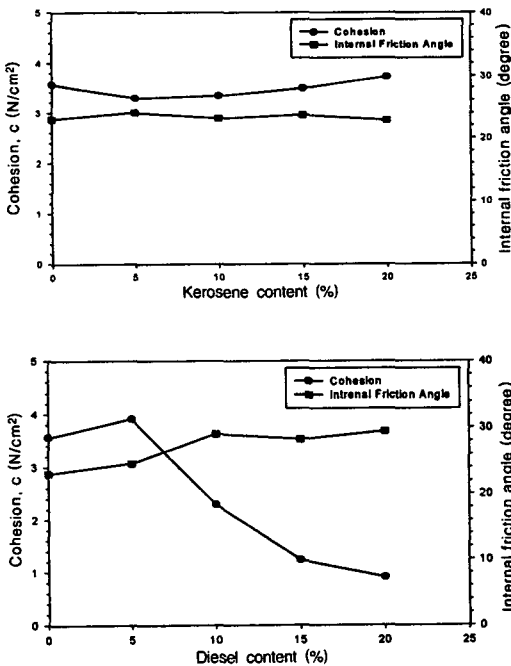


Fig. 6 Variation of cohesion and internal friction angle for kerosene and diesel contaminated clayey soils.

나. 경과시간에 따른 유류 오염 점성토의 전단 특성
Fig. 7과 8은 등유와 경유의 경과시간에 따른 점착력 및 내부마찰각의 변화경향을 나타낸 것이다. 유류 종류에 관계없이 점착력은 시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 보였고, 내부마찰각은 시간 경과에 따라 등유는 증가를 경유는 일정하였다.

등유는 GC-MS 분석을 참고해 보면 시간이 경과함에 따라 등유성분의 잔류량은 감소하여 적은 양으로 분포하였는데 이것은 등유오염의 경우 휘발에 의해 점성토의 강도가 원상태의 크기 또는 어느 정도까지 강도회복이 가능함을 보여준다. 그러나 경유의 경우 시간이 경과함에 따라 흙 내부에 경유 성분이 감소되기는 하나 잔류량은 많은 편이며 내부마찰각이 시간이 경과함에도 불구하고 일정하게 유지되는 것으로 볼 때 강도회복측면에서 상당한 문제로 작용할 가능성이 큰 것으로 판단된다.

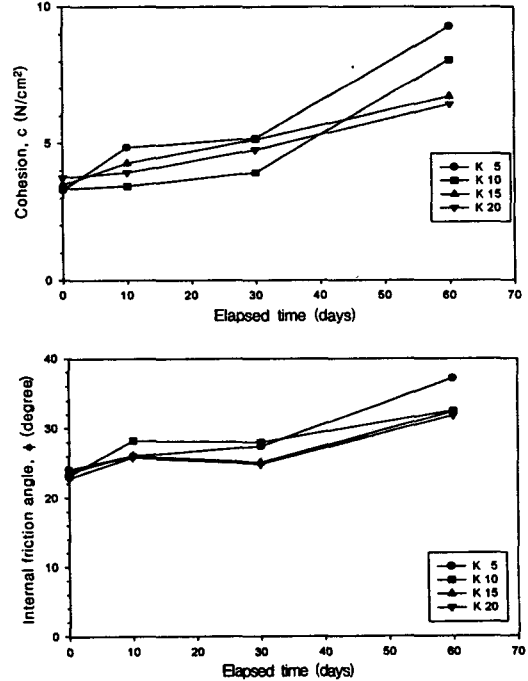


Fig. 7 Variation of cohesion and internal friction angle for kerosene contaminated clayey soils according to elapsed time.

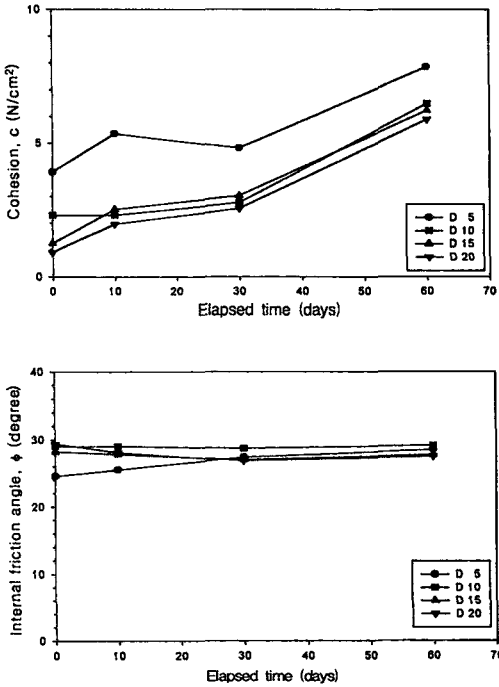


Fig. 8 Variation of cohesion and internal friction angle for diesel contaminated clayey soils according to elapsed time.

4. 시간경과에 따른 점성토 내의 잔류유류량의 변화

Table 5는 점성토에 유류를 침투시킨 후 시간경과에 따른 유류의 잔류량을 GC-MS로 분석한 결과이다. 등유의 경우 60일 경과후 흙에 잔류된 양은 매우 적은 상태이고, 경유는 시간이 경과함에

Table 5 The oil concentration in soils with time

Time (day)	Concentration (%)							
	Kerosene				Diesel			
	5	10	15	20	5	10	15	20
0	100	100	100	100	100	100	100	100
10	0.48	2.21	5.76	10.24	2.23	8.17	18.32	28.26
30	0.33	1.11	2.01	4.46	1.27	4.78	8.93	14.90
60	0.19	0.89	1.55	3.36	1.18	4.14	7.62	13.56

따라 잔류량의 감소는 발생되나 60일 경과 후에도 잔류량은 등유에 비해 많은 양이다. 따라서 경유로 점성토 지반이 오염될 경우 지반공학적인 평가시 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 등유 및 경유 오염 점성토의 일축압축강도와 전단강도의 특성변화를 0~20% 범위의 오염도와 오염 후 60일까지의 경과시간에 대하여 측정·분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 점토함유량이 약 34%인 점성토를 등유 및 경유로 오염시킨 결과, 오염도가 증가함에 따라 강도 감소가 발생하였고 유류함유량 5~10%에서 강도 감소의 폭이 크게 나타났다.
2. 등유 5~10% 오염점성토는 시간경과에 따라 일축압축강도의 회복현상이 발생되었고, 오염도가 5%인 경우 오염되지 않은 점성토의 강도수준까지 회복되었다. 그러나 경유로 오염된 경우 강도회복 현상은 상대적으로 작거나 나타나지 않았다.
3. 직접전단실험결과 등유 오염점성토는 강도정수의 변화특성은 크지 않았으나 경유 오염점성토는 오염도가 증가함에 따라 점착력은 크게 감소되었고 내부마찰각은 시간경과에 따라 회복되지 않았다.
4. 점성토 내 유류잔류량은 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 보였으나 경유의 경우 잔류량은 등유에 비해 상대적으로 많았다.

본 연구는 2001년도 경북대학교 공모과제 연구비에 의하여 수행되었습니다.

References

1. 강병희, 1999, "오염된 세립토의 지반공학적 성질", 지반공학 김상규심포지움, pp.133-148.

2. 석유제품품질기준, 2001, 산업자원부 고시 2001-73호.
3. 신은철 외, 1995, "원유로 오염된 사질토의 공학적 특성", 대한토목학회 1995년 봄 정기 학술발표회, pp.129-134.
4. 신은철 외, 1997, "원유로 오염된 지반의 역학적 특성", 한국지반공학회지, 제13권, 제6호, pp.37-43.
5. 장연수 외, 2000, "지반환경공학", 구미서관, pp.262-274.
6. 조태룡 외, 2000, "산업용 기름으로 오염된 지반의 강도 특성에 관한 연구", 한국지반공학회논문집, 제16권, 제2호, pp.125-134.
7. Al-Sanad, H.A., Eid, W.K. and Ismael, N.F., 1995, "Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Kuwaiti Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, May, pp.407-412.
8. Al-Sanad, H.A. and Ismael, N.F., 1997, "Aging Effects on Oil-Contaminated Kuwaiti Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, March, pp.290-293.
9. Matz, G., Schroder, W. and Kubler, J., 1997, "Field Method for the Detection of Total Petroleum Hydrocarbon in Water and Soil Samples", Fifth International Symposium on Field Analytical Methods for Hazardous Wastes and Toxic Chemicals, pp.29-31.
10. Srivastava, R.K. and Pandey, V.D., 1997, "Geotechnical Evaluation of Oil Contaminated Soil", *Contaminated and Derelict Land th Proceeding of Green 2*, pp.204-209.
11. Young, R.N. and Rao, S.M., 1991, "Mechanistic Evaluation of Mitigation of Petroleum Hydrocarbon Contamination by Soil Medium", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.28, pp.84-91.