

난지도 하수슬러지 매립지반의 공학적 특성

송영석^{1*} · 윤중만²

¹한국지질자원연구원 지질환경재해연구부,

²안산공과대학 건설계열 건설전공

Engineering Properties of Sewage Sludge Landfill Ground in Nanji-Do

Young-Suk Song^{1*} and Jung-Mann Yun²

¹Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Dept. of Civil Engineering, Ansan College of Technology

본 연구에서는 난지도 매립지내 하수슬러지지반으로 이루어진 8호 매립장에 대하여 환경 및 지반공학적 특성을 조사한다. 이를 위하여 대상현장에 대하여 시료를 채취하고, 용출시험, 중금속 총량시험 등을 실시하여 환경적인 특성을 조사하였다. 중금속 총량시험결과 Pb, Zn, Cu, Ni, Cd, Cr 등의 성분이 검출되었으며, Cu의 경우 캘리포니아주 규제기준을 초과하므로 하수슬러지 재활용시 함량을 낮추어야 할 것이다. 한편, 하수슬러지의 비중, 입도분석, 액소성한계, 다짐, 투수, 전단시험을 실시하여 지반공학적 특성을 조사하였다. 하수슬러지는 모래, 실트 및 점토로 구성되어 있으며, 소성지수는 42.3%로서 압축성이 큰 무기질 실트 혹은 유기질 점토인 것으로 분류된다. 다짐시험결과 건조단위중량이 낮고 다짐곡선이 비교적 평탄한 형태를 보이고 있으므로 함수비 변화에 따른 다짐효과가 비교적 적을 것으로 예상된다. 그리고 직접전단시험결과 점착력은 0.058 kg/cm²이고, 내부마찰각은 14° 것으로 나타났다. 대상현장의 하수슬러지는 다짐이 잘 되지 않으며, 전단강도도 비교적 낮으므로 매립지의 복토층 등으로 재활용할 경우 여러 가지 문제가 발생될 것으로 예상된다. 그리고 하수슬러지에 포함되어 있는 중금속의 용출에 따른 지하수 오염문제도 예상된다. 따라서 대상현장의 하수슬러지를 재활용하기 위해서는 이에 대한 보완 및 처리방안이 마련되어야 할 것이다.

주요어 : 하수슬러지, 지반공학적 특성, 환경공학적 특성, 재활용, 난지도

The environmental and geotechnical properties are investigated to the 8th landfill area made of only sewage sludge in Nanji-Do. To do this, the soils are sampled in this area, and leaching tests, heavy metal content tests, and so on are performed to research the environmental properties. As the result of heavy metal content tests, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd and Cr were leached from the sewage sludge. Because the leaching concentration of Cu is more than the standard value of California state, Cu content have to bring down during the recycling of the sewage sludge. Meanwhile, a series of tests concerning specific gravity, liquid and plastic limits, compaction, permeability and shear strength is performed to research the geotechnical properties. The sewage sludge is consisted of sand, silt and clay, and is classified into non-organic silt or organic clay with 42.3% of plastic index. As the result of compaction test, it is expected that the compaction effect according to variation of water contents is low relatively because the dry unit weight is low and the curve of compaction forms flatness. Also, as the result of direct shear tests, the cohesion is 0.058 kg/cm², and the internal friction angle is 14°. Taking everything into consideration, the various problems are happening in case of recycling the sludge like the cover layer of landfill and so on because the compaction is bad, and the shear strength is low. Also, it is expected that the ground water pollution caused by leaching the heavy metal into the sludge. To do recycling the sewage sludge in this site, supplementary and treatment programs should be prepared.

Key words : Sewage sludge, geotechnical properties, environmental properties, recycling, Nanji-do

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

서 론

최근 들어 도심지의 팽창으로 인하여 도시주변지역의 개발영역이 계속적으로 확장되고 있다. 그리고 과거 도시인근에 형성되었던 폐기물 매립지역을 건설부지, 주거용지, 공용시설용지 등으로 개발하고 있다. 특히, 미국에서는 과거의 매립지역을 굴착하여 재 활용하려는 Landfill mining에 대한 연구도 진행되고 있다(Kornberg *et al.*, 1993; EPA, 1993).

우리나라의 쓰레기 매립지 현황은 환경부의 조사에 따르면, 2003년 기준, 1,170개소로 총 매립면적은 17,863,000 m², 매립용량은 173,567,000 ton으로 확인되었고(환경부, 2003), 2004년 말 사용 중인 생활폐기물 매립시설은 전국 235개소로서 총 매립면적은 28,122,000 m², 매립용량은 359,917,000 m³으로 조사되었다(환경부, 2005).

폐기물 매립지역에 대한 사후관리 및 재활용을 위해서는 폐기물 매립지반에 대한 진단강도 및 침하등과 관련된 지반공학적인 측면에서의 연구가 필수적이다. 국외의 경우 Gbar and Valero(1995)는 폐기물 매립지반의 지반공학적인 특성을 조사한 바 있으며, Bjarngard and Edgers(1990)는 폐기물 매립지반에서 측정된 침하자료를 토대로 폐기물 매립지반과 침하에 대한 관계를 규명하고자 하였다. 그리고 Edil *et al.*(1990)은 폐기물 매립지반의 장기침하를 예측하기 위한 연구를 수행한 바 있다. 한편, 국내의 경우 Song *et al.*(2003)은 도로성토지반으로서 난지도 쓰레기 매립지반의 적용성을 검토하기 위하여 일련의 토질시험을 실시하고 이를 평가한 바 있다. 천병식 등(2001)은 건설부지로서 폐기물 매립지반을 활용하기 위하여 동다짐공법, PG pile 공법을 적용하고 이에 대한 개량특성을 조사한 바 있다. 윤중만과 남정만(2004)은 대형직접전단시험기를 이용하여 장기간 매립된 폐기물 매립지반의 진단강도 특성을 조사한 바 있다. 그리고 박현일 등(1997, 1998)은 쓰레기 매립지반에 대한 침하거동 및 특성을 조사한 바 있다.

서울특별시 북서쪽의 한강 하류주변에 위치하고 있는 난지도 폐기물 매립지는 1978년 3월부터 1993년 3월까지 Open dump 방식으로 매립되었다. 특히, 하수슬러지는 1987년 1월부터 난지도 매립지로 반입되기 시작하여, 1992년 8월까지 난지도 매립지내 9개 구역에 분산하여 매립하였다. 이 가운데 8호 매립장

은 하수슬러지만을 매립하였고, 다른 매립장은 산업폐기물, 일반폐기물, 하수슬러지 등을 혼합하여 매립하였다.

국내의 하수슬러지에 대한 연구는 이용수와 정하익(1997), 정문경 등(1998), 유남재 등(1999)에 의해 수행되었으며, 이들은 하수슬러지와 벤토나이트, 플라이애쉬 등을 혼합하여 폐기물 매립지의 차수재 혹은 복토재로 활용하고자 하였다.

전술한 바와 같이 여러 폐기물이 복합된 매립지반에 대한 연구는 현재까지 많이 수행되어져 왔으나, 하수슬러지만으로 이루어진 매립지반에 대하여 사후관리 및 재활용을 위한 지반공학적인 측면에서의 연구는 거의 없는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 난지도 매립지내 하수슬러지만으로 이루어진 8호 매립장에 대하여 지반공학적인 특성을 조사하고자 한다. 이를 위하여 대상현장에 대하여 시료를 채취하고, 용출시험, 중금속 총량시험, 유기물 총량시험을 실시하여 환경기준에 적합한지 검토한다. 그리고 채취된 하수슬러지의 비중, 입도분석, 액소성한계, 다짐, 투수, 전단시험을 실시하여 지반공학적인 특성을 살펴본다. 이들 시험결과를 토대로 하수슬러지만으로 이루어진 매립지반의 지반공학적인 특성을 조사하여, 추후 대상지역의 개발시 기초자료로 이용하고자 한다.

현장 개요

난지도 폐기물 매립지는 서울특별시 마포구 상암동에 위치하고 있으며, 1978년 3월부터 1993년 3월까지 생활쓰레기, 산업폐기물, 건설폐기물, 하수슬러지 등을 비위생 단순매립방식으로 매립하였다. 현재에는 생태공원이 조성되어 있으며, 골프장 등 시민의 휴식, 여가공간으로 활용되고 있다.

Fig. 1은 난지도 폐기물 매립지를 나타낸 것으로, 제1매립지와 제2매립지로 구성되어 있다. 그리고 매립면적은 약 823,000평이며, 매립된 폐기물의 총용량은 약 92,000,000 m³이다. 제1매립지는 매립고가 94 m이고 상부 평탄 면적이 392,000 m²이며, 제2매립지는 매립고가 98 m이고 상부 평탄 면적이 206,000 m²이다. 그리고 난지도 매립지 경사면의 기울기는 1:1.7~1:2.6으로 되어 있다(윤중만과 남정만, 2004).

하수슬러지는 1987년 1월부터 난지도 매립지로 반입되기 시작하여, 1992년 8월까지 난지도 매립지내

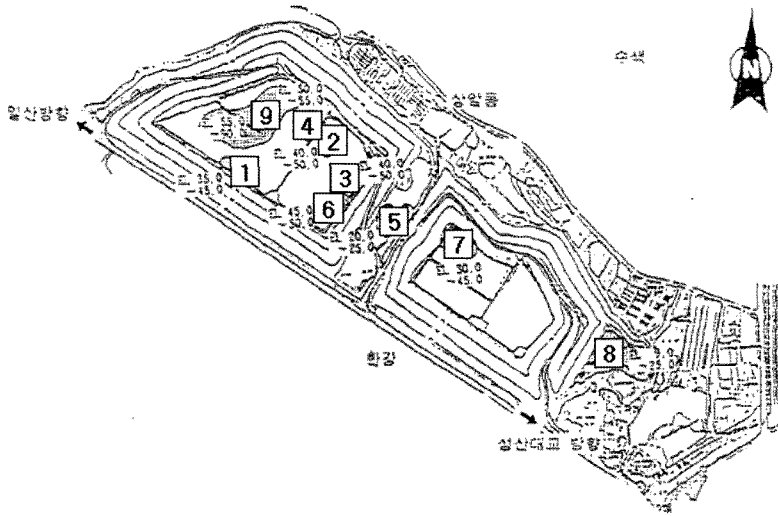


Fig. 1. Location map of the sewage sludge landfill in Nanji-Do.

9개 구역에 분산하여 매립하였다. 이 가운데 8호 매립장은 하수슬러지만을 매립하였고, 다른 매립장은 산업폐기물, 일반폐기물, 하수슬러지 등을 혼합하여 매립하였다. Table 1은 난지도 폐기물 매립지에 매립

Table 1. The filled period and area of the sewage sludge landfill.

Number of landfill	Period	Area	Height
1	87. 1 - 88. 6	9,000 m ²	EL(+) 35 - 45 m
2	88. 1 - 90. 2	7,000 m ²	EL(+) 35 - 50 m
3	88. 8 - 89.10	6,000 m ²	EL(+) 40 - 50 m
4	89.10 - 90. 2	3,000 m ²	EL(+) 40 - 50 m
5	89. 1 - 89. 9	3,500 m ²	EL(+) 20 - 25 m
6	89. 1 - 90. 2	2,000 m ²	EL(+) 45 - 50 m
7	88. 1 - 90. 5	2,500 m ²	EL(+) 30 - 45 m
8	88. 1 - 90.12	20,000 m ²	EL(+) 9 - 25 m
9	90. 3 - 92. 7	6,000 m ²	EL(+) 50 - 90 m
Total	-	59,000 m ²	-

Table 2. The filled quantity in each year.

Year	Filled quantity	Remarks
87-88	94,309 m ³	use the No. 1, 7, 8 landfill
89	340,000 m ³	use the No. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 landfill
90	347,692 m ³	use the No. 7, 8, 9 landfill
91	343,000 m ³	use the No. 9 landfill
92	237,000 m ³	use the No. 9 landfill
Total	1,362,000 m ³	-

된 하수슬러지의 구역별 매립기간 및 매립면적을 나타낸 것이고, Table 2는 연도별 난지도 매립지에 반입된 하수슬러지의 매립량을 나타낸 것이다. Table에서 보는 바와 같이 8호 매립장은 1988년 1월부터 1990년 12월까지 하수슬러지만으로 매립되었으며, 매립면적은 20,000 m²로서 매립장 가운데 가장 큰 것으로 나타났다. 한편, 8호 매립장에 대한 시추조사 결과와 매립장 사면의 경사를 1:1로 고려할 경우 하수슬러지 매립량은 약 565,800 m³으로 추정할 수 있다.

시료채취 및 시험

하수슬러지의 지반공학적 특성을 분석하기 위하여 8호 매립장에서 임의의 4개 지점을 선정하여 보링을 실시하고 시료를 채취하였다. 보링조사결과 하수슬러지는 13.8~16.8 m의 두께로 존재하며 평균적으로 15.0m인 것으로 나타났다. 그리고 시료의 색깔은 검은색에 가까운 짙은 갈색으로 약간의 악취가 감지되었다. 시료는 표층으로부터 약 40 cm 정도를 제거한 후 교란상태의 하수슬러지를 채취하였다.

하수슬러지의 공학적 특성 분석은 환경적인 측면과 지반공학적인 측면에서 실시되었다. 환경적인 측면에서는 용출시험, 중금속 총량시험, 유기물 총량시험 등을 실시하여 재활용시 환경기준에 적합한지를 조사하였다. 용출시험은 하수슬러지를 재활용할 경우

용출에 의한 지하수 오염에 대한 여부를 판단하기 위하여 실시하였다. 8호 매립장에서 채취한 하수슬러지 시료를 105°C의 건조로에서 24시간 건조시킨 후 분쇄하고 이를 채분석하여 입도를 균일하게 만든다. 그리고 폐기물공정시험방법(환경부, 2000)에 의해 시험을 실시하였다. 유기물 및 중금속 총량시험은 하수슬러지 내에 함유되어 있는 물질의 농도를 측정하고, 이를 기본 자료로 이용하기 위하여 실시하였다. 분석항목은 pH, TS, VS, TOC, TKN, T-C, T-N, T-P, 발열량 및 중금속 등이다. 이들 항목 중에서 pH, VS, TS는 채취한 시료를 전처리 없이 사용하였고, 그 이외의 항목들은 용출시험에서와 마찬가지로 전처리를 실시한 후 분석을 실시하였다.

한편, 지반공학적인 측면에서는 비중, 입도분석, 엑소성한계, 다짐, 투수, 압밀, 전단시험 등을 실시하여 향후 재활용 및 건설공사시 기본 자료로서 적용하도록 하였다. 하수슬러지의 물리적 특성을 조사하기 위하여 함수비, 비중, 입도분석, 엑소성한계, 다짐시험 등을 실시하였으며, 하수슬러지의 역학적 특성을 조사하기 위하여 투수, 압밀, 전단시험을 실시하였다. 입도분석시험은 체분석시험과 비중계분석시험을 모두 실시하였으며, 다짐시험은 Proctor(1933)에 의해 제안된 표준다짐시험을 실시하였다. 투수시험은 변수위 투수시험을 실시하였고, 전단시험은 직접전단시험을 실시하였다.

하수슬러지의 환경적 특성

용출시험

용출시험은 용출에 의한 지하수의 오염정도를 판단하기 위하여 실시하였다. 먼저 하수슬러지 시료를 105°C의 건조로에서 24시간 건조시킨 후 분쇄하고 이를 채분석하여 입도를 균일하게 만든다. 시료의 일정량을 정확하게 측정하고, 증류수에 염산을 혼합하여 pH를 5.8~6.3으로 조정된 용매와 1:10의 비율로 혼합하여 500 ml 이상의 혼합액을 만든다. 혼합액은 상온, 상압에서 진탕기를 이용하여 6시간 연속 진탕시킨 후 원심분리 및 여과작업을 실시하였다. 여기서, 진탕기는 진탕회수가 매분당 약 200회, 진폭은 4~5 cm인 것을 사용하였다. 이와 같은 작업을 실시한 여과액의 적당량을 이용하여 용출시험용 검액으로 이용하였다. 검액은 각각의 목적에 맞추어 전처리한 후 용출 항목인 6가지의 중금속 즉, 납(Pb), 구리

Table 3. The leaching test result of sewage sludge sampled from Nanji-Do.

Detected items	Result (mg/l)	Standard value (mg/l)	Remarks
Pb	0.972	3.0	OK
Cu	0.667	1.0	OK
Cd	Not detectable	0.3	OK
Cr	0.158	1.5	OK
Hg	Not detectable	0.005	OK
CN	0.001	1.0	OK

(Cu), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 수은(Hg) 및 시안(CN)의 농도를 측정하였다. 납, 구리, 카드뮴, 크롬, 수은 등의 중금속은 용출이 끝난 후 원심분리 및 여과작업을 실시하고 여과액에 질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 내렸다. 그리고 Microwave를 이용하여 Digestion을 시킨 다음 ICP를 사용하여 농도를 측정하였다. 한편, 시안은 수산화나트륨을 첨가하여 pH를 10 이상으로 올린 후 흡광 광도법에 의거한 DR-2000(HACH)으로 농도를 측정하였다.

Table 3은 난지도 하수슬러지의 용출시험결과를 나타낸 것으로 국내 지정폐기물의 용출기준치와 비교한 결과이다. 용출시험결과 Pb, Cu, Cr, CN 등의 성분이 검출되었고, Pb는 0.972 mg/l로 가장 많이 검출되었으나, 지정폐기물의 용출 기준치보다 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 Cu, Cr 및 CN의 검출결과도 지정폐기물의 용출 기준치보다 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 하수슬러지의 용출시험결과와 지정폐기물의 용출 기준치를 모두 만족함을 알 수 있다.

총량시험

총량시험은 하수슬러지내에 함유되어 있는 물질의 농도를 측정하기 위하여 실시하였다. 분석항목은 pH, TS, VS, TOC, TKN, T-C, T-N, T-P, 발열량 및 중금속 등으로 pH, VS, TS는 채취한 시료를 전처리 없이 사용하였고, 그 이외의 항목들은 용출시험에서와 마찬가지로 전처리를 하고 사용하였다. pH, TOC, TKN, T-P 등은 토양화학시험법에 의해 분석하였고, TS 및 VS는 폐기물공정시험법에 의해 분석하였다. 그리고 T-C, T-N 등은 EA(Elemental Analyzer, Fisons Ins, Model 1180)로 분석하고, 발열량은 단열 열량계(Bomb Calorimeter, Parr, Model 1261)로 분석하였으며, 중금속은 Microwave를 이용

Table 4. The heavy metals amount of sewage sludge sampled from Nanji-Do.

Detected items	Result (mg/kg)	Regulation concentration of california (mg/kg)	Remarks
Pb	367.5	1,000	OK
Zn	751.7	2,500	OK
Cu	635.4	250	NG
Ni	119.6	2,000	OK
Cd	6.4	100	OK
Cr	170.3	2,500	OK

하여 Digestion을 시킨 다음 ICP를 사용하여 분석하였다.

Table 4는 난지도 하수슬러지의 중금속 총량시험 결과를 나타낸 것으로 미국 캘리포니아주의 중금속 함량 규제기준과 비교한 결과이다. 국내의 경우 하수슬러지에 함유된 중금속의 총량에 대한 규제기준을 정하고 있지 않으므로 캘리포니아주의 규제기준과 비교하였다. 중금속 총량시험결과 Pb, Zn, Cu, Ni, Cd, Cr 등의 성분이 검출되었으며, Cu를 제외한 5 가지 중금속은 캘리포니아주 규제기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 Cu의 함유량은 635.4 mg/kg 으로서 캘리포니아주의 규제기준인 250 mg/kg의 2.5 배 정도 높은 것으로 나타났다. 따라서 난지도 하수슬러지를 재활용할 경우 Cu의 함유량을 낮추어 적용해야 할 것이다.

Table 5는 난지도 하수슬러지의 유기물 총량시험 결과를 나타낸 것으로 하수슬러지내 함유된 유기물의 농도 및 발열량을 조사한 결과이다. Table에서 보는 바와 같이 pH는 약 염기성을 나타내고 있으며, 발열량은 1673 kcal/kg으로 나타났다.

Table 5. The result of organic content test of sewage sludge sampled from Nanji-Do.

Analyzing items	Results
pH	7.53
TS (%)	24.00
VS (%)	20.38
TOC (%)	11.91
TKN (%)	1.43
T-C (%)	16.56
T-N (%)	1.57
T-P (mg/kg)	24.00
Calorific amount (kcal/kg)	1673.00

하수슬러지의 지반공학적 특성

물리적 특성

입도분포

입도분포시험은 하수슬러지내에 있는 입자들의 크기정도를 조사하기 위하여 실시하였다. 입도분포시험은 크게 체분석시험(KSF 2309)과 비중계분석시험(KSF 2302)으로 구분할 수 있다. 체분석시험은 직경이 0.075 mm 이상의 입자를 대상으로 실시하고, 비중계시험은 직경이 0.075 mm 이하의 입자를 대상으로 실시한다. 이와 같은 시험을 위하여 하수슬러지를 110°C의 건조로에서 24시간 이상 건조시켜 사용하였다.

Fig. 2는 하수슬러지의 입도분포곡선을 나타낸 것으로 체분석시험과 비중계분석시험의 결과를 함께 도시하였다. 그림의 횡축은 입자의 크기를 나타내고, 종축은 중량통과율을 나타낸 것이다. 입도분포시험결과 하수슬러지는 모래, 실트 및 점토로 구성되어 있으며, 구성 비율은 대략적으로 60%:26%:14%(모래: 실트: 점토)인 것으로 나타났다. 그리고 중량통과율 10%에 해당하는 입자의 직경을 유효입경이라고 하는데 본 실험결과에서는 유효입경을 구할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 균등계수 및 곡률계수를 이용한 입도분포특성을 설명할 수 없다. 그러나 입자들의 크기들이 넓은 범위에 분포하고 있으므로 입도분포가 양호하다고 판단할 수 있다.

비중

하수슬러지의 비중은 하수슬러지 입자의 중량과 같은 부피의 15°C 증류수의 중량과의 비를 의미한다.

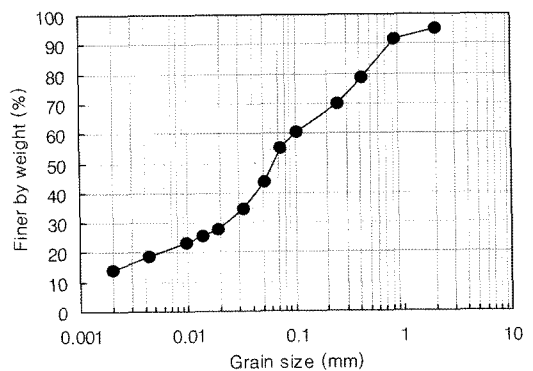


Fig. 2. Grain size distribution curve.

대상현장에서 채취된 하수슬러지에 대하여 비중시험(KSF 2308)을 실시하였다. 시험결과 하수슬러지의 비중은 평균 2.02인 것으로 나타났으며, 이는 2.00~2.55의 범위를 갖는 할로사이트(halloysite)로 구분할 수 있다. 할로사이트는 팽창성이 크고 공학적으로 매우 불리한 점토광물의 일종으로서, 이를 통하여 하수슬러지가 공학적으로 불리하다고 판단할 수 있다.

에터버그 한계

에터버그 한계는 세립토의 연경도(consistency)를 표시하는 방법으로, 세립분에 포함된 점토광물의 종류와 양을 암시해주는 기능을 하기도 한다. 에터버그 한계는 액성한계, 소성한계 및 수축한계로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 하수슬러지의 소성한계와 액성한계를 구하였다. 하수슬러지의 소성한계를 구하기 위하여 소성한계시험(KSF 2304)을 실시하였으며, 시험결과 하수슬러지의 소성한계는 40.7%인 것으로 나타났다. 한편, 하수슬러지의 액성한계를 구하기 위하여 액성한계시험(KSF 2303)을 실시하였으며, 시험결과는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보는

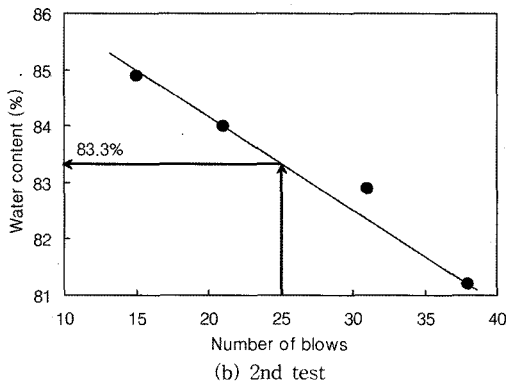
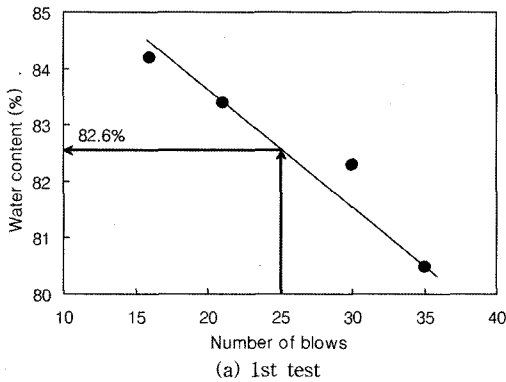


Fig. 3. Flow curve.

바와 같이 2번의 액성한계시험을 실시하였으며, 1차 시험결과 액성한계는 82.6%, 2차 시험결과 액성한계는 83.3%로 조사되었다. 따라서 하수슬러지의 평균 액성한계는 83.0%임을 알 수 있다.

액성한계와 소성한계의 차이를 소성지수라고 하며, 세립토가 소성을 보이는 함수비의 범위를 나타내는 지수이다. 대상현장 하수슬러지의 소성지수는 42.3%로서 점토에 가까운 소성지수를 갖는 것으로 나타났다. 그리고 Casagrande(1932)가 액성한계와 소성지수를 이용하여 제안한 소성도(plasticity chart)에 의하면 압축성이 큰 무기질 실트 혹은 유기질 점토인 것으로 나타났다.

다짐

다짐이란 흙에 인위적인 압력을 가하여 흙의 밀도, 강도, 투수성 등의 공학적인 특성을 개선하는 방법으로서, 본 연구에서는 Proctor(1933)에 의해 제안된 표준다짐시험을 실시하였다. 표준다짐시험방법은 내경 100 mm, 높이 127.3 mm의 몰드에 흙을 3층으로 나누어 넣고 각층마다 2.5 kg의 해머로 30 cm의 높이에서 25회씩 자유 낙하시켜 다짐을 하는 방법이다. 다질 때 흙에 물을 가해주면 물은 마치 윤활유처럼 흙입자들 간에 작용하게 되어 흙입자들이 서로 미끄러져 조밀하게 다져지게 된다. 대상현장에서 채취된 하수슬러지를 이용하여 다짐시험(KSF 2312)을 실시하였다. Fig. 4는 다짐시험결과를 나타낸 것으로 최적함수비는 81%, 최대건조단위중량은 0.71 g/cm³으로 조사되었다. 그리고 다짐곡선에서 건조단위중량이 낮고 곡선이 비교적 평탄한 형태를 보이고 있으므로 함수비 변화에 따른 다짐효과가 비교적 적을 것으로 예상된다.

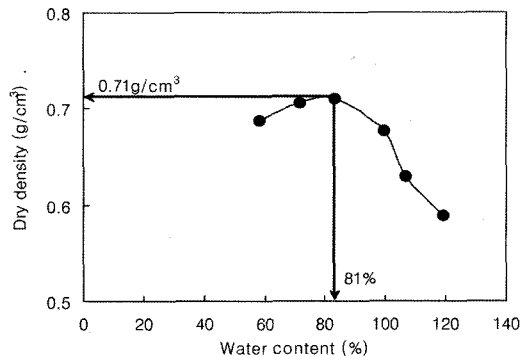


Fig. 4. Compaction curve.

역학적 특성

투수

대상현장에서 채취된 하수슬러지의 투수계수를 구하기 위하여 변수위 투수시험(KSF-2322)을 실시하였다. 투수시험은 총 2번에 걸쳐 수행되었으며, 투수계수는 1차 시험결과 1.883×10^{-6} cm/sec, 2차 시험결과 2.104×10^{-6} cm/sec로 나타났다. 따라서 이를 평균으로 계산하면 대상현장의 하수슬러지 투수계수는 1.9935×10^{-6} cm/sec라고 할 수 있다. Das(1990)에 의해 제안된 여러 종류의 흙에 대한 투수계수와 비교하여 보면 대상현장의 하수슬러지는 실트질 흙의 투수계수와 유사함을 알 수 있다.

압밀

대상현장에서 채취된 하수슬러지의 압밀특성을 조사하기 위하여 압밀시험(KSF-2316)을 실시하였다. 하수슬러지의 침하량을 구하는데 필요한 압축지수(Cc)는 e-logP 곡선의 기울기로부터 구할 수 있다. Fig. 5는 하수슬러지의 압밀시험을 통하여 구한 e-logP곡선을 나타낸 것이다. 따라서 e-logP 곡선으로부터 구한 하수슬러지의 압축지수는 1.76으로 나타났다. 그리고 하수슬러지의 압밀도 및 압밀소요시간을 구하는데 필요한 압밀계수(Cv)는 시간과 침하량의 상관관계를 통하여 구할 수 있다. Table 6은 하수슬러지의 압밀하중에 따른 압밀계수(Cv)를 나타낸 것이다.

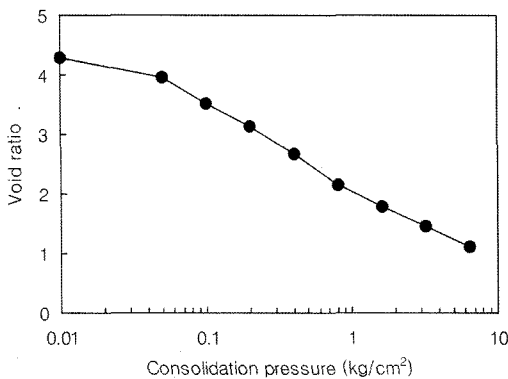


Fig. 5. e-logP curve.

각 하중단계에서의 압밀계수는 도해법인 \sqrt{t} 법으로 구하였다. 표에서 보는 바와 같이 압밀하중에 따른 압밀계수는 감소하는 것으로 나타났으며, 평균압밀계수는 0.00151 cm²/sec인 것으로 나타났다. Robinson & Allan(1996)에 의해 제안된 여러 방법에서 구한 압밀계수와 비교해 보면 대상현장의 하수슬러지는 Chicago 점토와 유사한 값을 갖는다. 따라서 대상현장의 하수슬러지는 점토질 흙의 압밀특성을 갖는 것으로 예상할 수 있다.

전단강도

대상현장에서 채취된 하수슬러지의 전단특성을 조사하기 위하여 직접전단시험(KSF-2343)을 실시하였다. Fig. 6은 구속압에 따른 전단응력과 변형률곡선을 나타낸 것으로 구속압이 클수록 전단강도는 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 구속압이 증가함에 따라 흙의 변형계수도 증가하는 것으로 나타났다.

한편, Fig. 7은 직접전단시험결과를 토대로 연직응력과 전단강도의 상관관계를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이들 결과에 대한 회귀분석을 실시하여 대상현장의 하수슬러지에 대한 내부마찰각과 점착력을 구할 수 있다. 하수슬러지의 점착력은 0.058 kg/cm²이고, 내부마찰각은 14°인 것으로 나타났다.

하수슬러지의 사후관리 및 재활용을 위하여 지반 공학적 특성을 조사한 결과 하수슬러지는 실트 혹은 점토와 같은 미세한 입자로 구성되어 있으며, 간극이

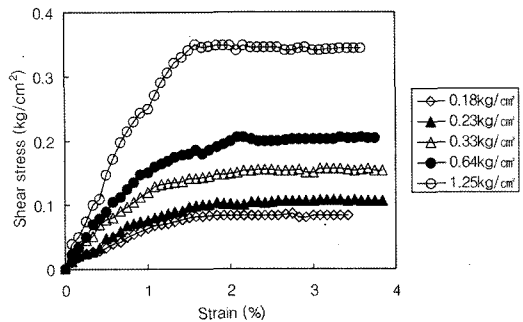


Fig. 6. Shear stress-strain curve.

Table 6. The consolidation coefficient according to consolidation stress.

Consolidation pressure (kg/cm ²)	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4
Consolidation coefficient, Cv (cm ² /sec)	0.0024	0.0018	0.0012	0.00118	0.00144	0.00106

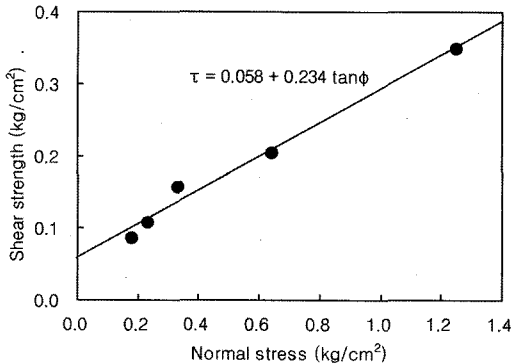


Fig. 7. The relationship between normal stress and shear strength.

비교적 큰 것으로 나타났다. 따라서 하수슬러지만을 이용하여 최종복토층으로 사용할 경우 복토층의 다짐 및 강도 등에 문제가 발생될 것으로 판단된다. 또한, 하수슬러지만으로 구성된 복토층의 경우 투수 계수가 매우 낮아 식생이 어려울 것으로 판단된다. 한편, 하수슬러지에 포함되어 있는 유기물의 분해현상, 중금속 등의 용출에 따른 지하수의 오염문제가 발생할 수 있으므로 대상현장의 하수슬러지만을 이용하여 재활용하는 것은 바람직하지 않을 것으로 예상된다. 따라서 추후 연구로서 하수슬러지를 재활용하기 위한 처리방안이 마련되어야 할 것이다.

결 론

1) 대상현장의 하수슬러지에 대한 중금속 총량시험결과 Pb, Zn, Cu, Ni, Cd, Cr 등의 성분이 검출되었으며, Cu의 경우 캘리포니아주 규제기준을 초과하므로 하수슬러지 재활용시 함량을 낮추어야 할 것이다.

2) 대상현장 하수슬러지는 모래, 실트 및 점토로 구성되어 있으며, 소성지수는 42.3%로서 압축성이 큰 무기질 실트 혹은 유기질 점토인 것으로 분류된다.

3) 대상현장 하수슬러지의 다짐시험결과 최적함수비는 81%, 최대건조단위중량은 0.71 g/cm^3 로서 건조단위중량이 낮고 곡선이 비교적 평탄한 형태를 보이고 있으므로 함수비 변화에 따른 다짐효과가 비교적 적을 것으로 예상된다.

4) 하수슬러지에 대한 변수위 투수시험결과 투수 계수는 $1.9935 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 로서 실트질 흙의 투수 계수와 유사함을 알 수 있다. 그리고 직접전단시험결과

와 점착력은 0.058 kg/cm^2 이고, 내부마찰각은 14° 인 것으로 나타났다.

5) 하수슬러지에 대한 압밀시험결과 e-logP 곡선으로부터 구한 압축지수는 1.76이며, 단계별 압밀하중에 따른 압밀계수의 평균치는 $0.00151 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 으로서 점토질 흙의 압밀특성과 유사함을 알 수 있다.

6) 대상현장의 하수슬러지는 다짐이 잘 되지 않으며, 전단강도도 비교적 낮으므로 매립지의 복토층 등으로 재활용할 경우 여러 가지 문제가 발생될 것으로 예상된다. 그리고 하수슬러지에 포함되어 있는 중금속의 용출에 따른 지하수 오염문제도 예상된다. 따라서 대상현장의 하수슬러지를 재활용하기 위해서는 이에 대한 보완 및 처리방안이 마련되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 박현일, 이승래, 고헌훈, 1998, 매립연한이 서로 다른 쓰레기 매립지의 장기침하거동, 한국지반공학회는문집, 제14권, 제2호, pp.21-30.
- 박현일, 이승래, 라일웅, 성상열, 1997, 난지도 쓰레기 매립지의 침하특성, 한국지반공학회는문집, 제13권, 제2호, pp.65-75.
- 유남재, 김영길, 박병수, 정하익, 1999, 하수슬러지의 차수재 및 복토재료의 이용타당성에 관한 연구, 한국지반공학회는문집, 제15권, 제2호, pp.43-71.
- 윤중만, 남정만, 2004, 장기간 매립된 폐기물 매립지반의 전단강도, 한국폐기물학회지, 제21권, 제2호, pp.91-99.
- 이용수, 정하익, 1997, 폐기물 매립지의 차수재 및 복토재로서 하수슬러지 재활용, 한국지반공학회는문집, 제13권, 제4호, pp.5-11.
- 정문경, 서경원, 이용수, 1998, 플라이애쉬 혼합차수재의 투수특성과 미세구조 분석, 한국지반공학회는문집, 제14권, 제1호, pp.109-124.
- 천병식, 여유현, 최춘식, 2001, 건설부지로서 폐기물 매립지반의 활용에 관한 연구, 한국지반공학회는문집, 제17권, 제6호, pp.69-83.
- 환경부, 2000, 폐기물공정시험방법, 환경부 고시 제2000-41호, p.189.
- 환경부, 2003, 사용종류 매립지 현황
- 환경부, 2005, 전국 매립시설 설치운영실태 조사결과 및 조치계획, p.13.
- Bjarngard, A., Edgers, L., 1990, Settlement of municipal solid waste landfills, Proceedings of the thirteenth Annual Madison Waste Conference, pp.192-205.
- Casagrande, A., 1932, Research of atterberg limits of soils, Public Road, Vol.13, No.8, pp.121-136.
- Das, B.M., 1990, Principles of geotechnical engineering, PWS-KENT, Boston.
- Edil, T.B., Ranguette, V.J., Wuellner, W.W., 1990, Settlement of municipal refuse, Geotechnics of Waste Fills: Theory and Practices, ASTM STP 1070, pp.225-239.

- Song, Y.S., Yun, J.M., Hong, W.P., Kim, T.H., 2003, Investigation of solid waste soil as road construction material, Environmental Geology, Vol.44, No.2, pp.203-209.
- EPA, 1993, Evaluation of the collier country, Florida landfill mining demonstration, EPA/600/ R-33/163.
- Gbar, M.A., Vlero, S.N., 1995, Geotechnical properties of municipal solid waste, Geotechnical Testing Journal, Vol.18, No.2, pp.241-251.
- Kornberg, F., Von Stein, E.L., Savage, G.M., 1993, Landfill mining in the United States: An analysis of current projects, Proc. 4th Int. Landfill Symp., pp.1555-1561.
- Proctor, R.R., 1933, Design and construction of rolled earth dams, Engineering News Record, Vol.3, pp.245-248.
- Robison, R.G., Allan, M.M., 1996, Detemination of coefficient of consolidation from early stage of log t plot, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.19, No.3, pp.316-320.

송영석

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
 Tel: 042-868-3035
 Fax: 042-861-9723
 E-mail: yssong@kigam.re.kr

윤종만

안산공과대학 건설계열 건설전공
 Tel: 031-490-6155
 Fax: 031-495-7828
 E-mail: jmyun@ansantc.ac.kr

2007년 2월 9일 원고접수, 2007년 3월 13일 게재승인