

쓰레기 매립지 내 폐기물 혼합지반 특성 연구

A Study on Characteristics of Waste Mixed Soil in Landfill

박태순^{1*}
Tae-Soon Park^{1*}

(Received March 14, 2016 / Revised March 23, 2016 / Accepted March 24, 2016)

This paper presents the geotechnical characteristics of the soil mixed with various waste(waste soil) in the landfill. The physical and mechanical tests were conducted to find out the waste soil. The tests include the gradation, consistency tests, shear and compression and the consolidation tests using both the Rowe cell and the constant ration stress. The analyses of the test results show the waste soil belongs to the well graded sand(SW) in the laboratory and sand-gravel(SG) to fine sand(SF) in the field monitoring based on the unified classification soil system. The shear strength is increasing with increasing the shear displacement, however, the peak of the shear strength does not appear through the test and there is no distinct peak value of the strength obtained. The compression index(Cc) results in as increasing the amount of the sludge included and the compression index is proportional to the sludge included, which means more settlement is expected. The hydraulic conductivity of the waste soil ranges between 1.6×10^{-5} cm/sec and 1.8×10^{-7} cm/sec.

키워드 : 쓰레기 매립지, 지반특성, 물리적 시험, 전단, 압밀

Keywords : Landfill, Geotechnical characteristics, Physical test, Shear, Consolidation

1. 서론

쓰레기 매립지는 1950년 초반부터 도시 생활에서 발생하는 생활쓰레기, 건설폐자재, 산업폐기물, 매립하수슬러지가 구분 없이 매립된 매립지이다. 쓰레기 매립지는 매립 연한으로 인하여 쓰레기의 반입이 종료되었으며, 복토를 실시하였다. 향후 안정화작업을 실시 후 식재를 계획하였으나 주 도시의 발전과 대단위 체육시설 유입으로 인하여 본 매립지의 재활용성 검토에 착수하였다. 본 연구는 매립지의 지반공학특성 특성조사 시 필요한 폐기물 지반의 토질기초공학특성 분석하기 위하여 수행하였다.

본 연구에서는 지반공학특성에 근거한 시료를 채취하여 입도분포, 액성·소성한계와 같은 기본 물리적 시험을 실시하였으며 현장에서 채취된 교란시료를 재구성하여 투수특성, 압축 및 전단 특성을 분석하였다. 장기역학적 특성 분석은 매립지의 침하와 압

밀이 예상되므로 압밀 시험을 실시하여 침하 및 압밀특성을 분석하였다.

2. 시료의 채취 및 물리적 시험 결과

2.1 시료의 채취

넓은 범위의 시료채취를 통해 매립물의 성상확인역학적 특성을 파악하기 위하여 Fig. 10에 표시한 제 1, 2 매립지의 각 상단부, 중간부, 하단부를 선정하고 시료 채취를 실시하였다. 각 지점 Fig. 10에서 깊이 3m, 폭 2m 정도를 굴착하여 매립재료를 육안으로 확인하고, 비교적 입경이 큰 재료를 제거한 후 시료를 채취하였다. 각 채취 지점에서의 관찰 결과는 Table 10에 나타내었다. 전체적으로 불균일한 지반으로서 건설 폐자재, 목재, 비닐봉투 등 각종 재료가 혼합된 상태로 존재하고 있으며, 매립지 하단부는 전체적으로 부

* Corresponding author E-mail: tpark@seoultech.ac.kr

¹서울과학기술대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 232, Korea)

패·부식에 의한 화학적 반응으로 검은 색을 나타내고 있었다.

2.2 입도 시험

Fig. 2는 채취한 각 지점 시료의 입경가적곡선을 나타낸 것이다. 제 2 매립지 하단부는 비교적 입경 분포가 양호하며, 제 1매립지 상단부와 제 1, 2 매립지 중간부는 비슷한 입경가적곡선으로 일정한 범위에 분포하고 있다. 이러한 결과는, 채취시료가 서술한 바와 같이 대체적으로 양호하며, 건설 폐자재, 자갈, 산업폐기물에 기인한 것으로 판단된다.

2.3 액성, 소성한계 시험 및 공학적 분류

각 지점 채취시료의 액성 및 소성한계를 Table 2에 나타내었다. 매립 하수 슬러지는 미세한 입자가 많이 혼합되어 있어 점토에 가까운 값을 나타내었고, 매립토 시료는 복토재와 유사한 값을 나타내고 있다.

Table 1과 Table 2의 결과를 바탕으로 매립지반의 공학적 분류를 실시한 결과, 지반재료의 분류로는 암석분 50% 미만을 포함하고 있는 암석분 섞인 토질재료(Sm-R)로 분류할 수 있고, 토질재료

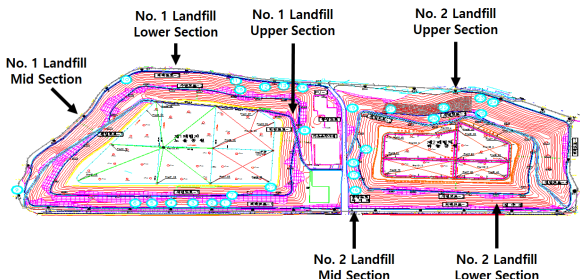


Fig. 1. Sampling points sampling points

Table 1. The remarks of sampling points

Survey site		Characteristics
No 1. Landfill	Upper section	Concrete including construction waste
	Mid section	Construction waste, rotten timber, etc.
	Lower section	Generally black and a lot of surplus soil, various waste and a horrible stench
No 2. Landfill	Upper section	A few construction waste, a few various wastes of the past
	Mid section	Generally dried soil, construction waste including rock of various grain size, timber, concrete
	Lower section	A considerable rock, old growth, loss of slope in the past

(암석분 함유율 0%) 로서의 분류로는 인공재료(Am)로 나타낼 수 있다. 또한 일반폐기물 및 산업폐기물의 경우는(Wa)로 나타낸다. 전체적으로 세립토는 15% 미만이고, 입경 2mm이상의 자갈도 10% 미만인 사질토로 입경분포가 양호한 SW로 분류되었다. 그러나 현장관찰결과에 의한 분류는 자갈질모래(SG) 또는 세립분 혼합모래(SF), 세립분이 섞인 자갈질 모래(SG-F)로 분류 할 수 있다.

3. 전단 및 압축 시험

3.1 전단시험 및 시험결과

매립토와 매립 하수슬러지의 전단특성을 파악하기 위해, 시료의 재료특성을 고려한 대형전단시험과 일반적인 전단시험을 실시하여 결과를 비교하였다. 본 연구조사에는 개량형 일면전단시험(CD), 간이전단시험(CU), 삼축압축시험(UU)을 통해, 각 시험결과에 의한 채취시료의 전단특성을 비교하였다.

3.1.1 개량형 일면전단시험

개량형 일면전단시험은 정압전단시험(CD)으로 매립 하수슬러지를 제외한 자연함수비로 조절한 2종류의 시료를 직경 6cm×높이 2cm 또는 직경 12cm×높이 4cm의 전단상자에 자연 함수비로 조절한 시료를 다짐법으로 채워 실시하였다. 시험결과는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 전단변위-전단강도의 관계는, 전단과정에 있어서 뚜렷한 전단강도가 나타내지 않고, 전단변위의 증가에 함

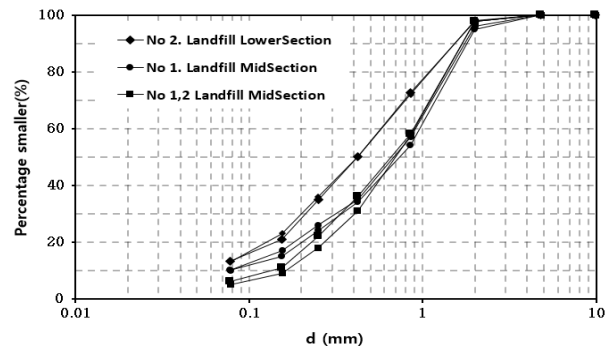


Fig. 2. The particle-size distribution curve

Table 2. The properties of samples

Specimen	Liquid limit(%)	Plastic limit(%)
Dredged soil	24	NP
Sludge landfill	84	40
Cover material	26	NP

계 강도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 전단변위-전단강도 곡선의 차이는 있지만, 하중단계별 최대전단강도는 거의 비슷하게 나타나고 있다.

연직하중-전단강도의 관계로부터 점착력과 내부 마찰각을 구한 결과, 복토재의 경우 $c_d = 0.14 \text{ kg/cm}^2$, $\phi_d = 35.45^\circ$, 매립토의 경우 $c_d = 0.14 \text{ kg/cm}^2$, $\phi_d = 37.35^\circ$ 을 산출하였다. 위 결과는 국내 도시폐기물 매립지 채취시료의 전단시험을 통한 점착력과 내부 마찰각 조사 범위에 포함되며 향후 활용 가능한 자료로서 판단된다.

3.1.2 삼축압축시험

본 연구에서는 삼축 압축시험방법 중 비압밀 비배수 시험을 실시하였다. 시료의 조성은 슬러지와 토사의 건조무게비 1:1 시료와 슬러지만 이루어진 시료 두 종류에 대해서 직경 7cm 높이 14cm의 마이터 박스에서 최대건조밀도에 가깝게 다짐을 하였다. 구속압력(σ_3)은 0.5 kg/cm^2 , 1.0 kg/cm^2 , 1.5 kg/cm^2 으로 각각 적용하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 구속압력 적용에 따른 파괴포락선을 나타낸 것이다. 슬러지와 토사의 건조무게비 1:1 시료에 대해서는 $C_u = 0.67 \text{ kg/cm}^2$, 슬러지의 경우 $C_u = 0.06 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났다. Fig. 7과 Fig. 8은 변형률-축차응력곡선을 나타낸 것인데, 슬러지의 경

우 일정한 파괴점이 나타나지 않고 변형률의 증가와 함께 축차응력이 계속 증가하는 추세를 보였다.

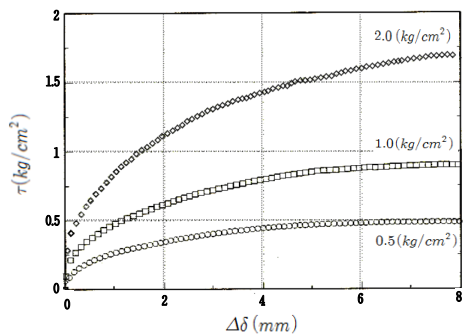
4. 압밀 시험 및 시험결과

4.1 Rowe cell 시험

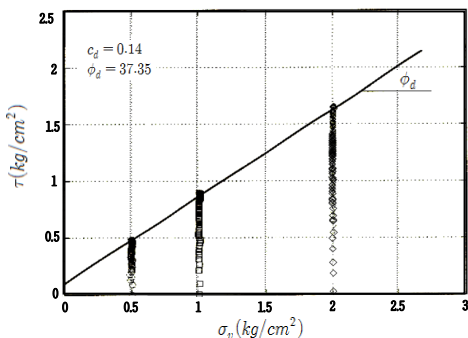
매립 하수슬러지와 복토재의 혼합비율에 따른 특성을 Rowe cell 압밀시험을 통해 조사하였다. 공시체의 크기는 직경 250mm, 높이 90mm, 혼합비율은 건조중량비를 기준으로 매립 하수슬러지 25%, 50%, 75%로 조절하여 시험하였다.

Table 3은 점토함유량과 작용하중에 따른 압밀계수와 수평투수계수를 나타낸 것이다. 투수계수는 혼합비율에 관계없이 $1.6 \times 10^{-5} \sim 1.8 \times 10^{-7} (\text{cm/sec})$ 의 범위에서 측정되었다.

Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 혼합시료의 e-log p 관계를 나타낸 것이다. 혼합비율에 관계없이 압밀항복응력은 0.2 kg/cm^2 이며, 슬러지 혼합율이 높을수록 압밀항복응력 이후에 큰 압축성(Cc)을 나타내고 있으며, 정규압밀영역에서는 선형에 가까운 압축량을 나타내고 있다.

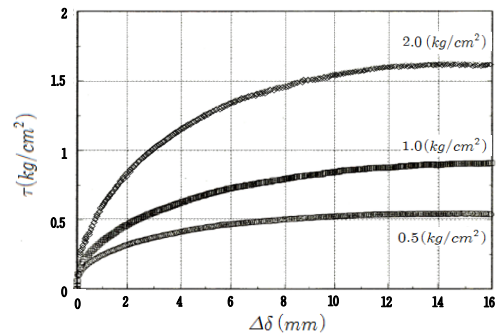


(a) The shear displacement vs. The shear stress

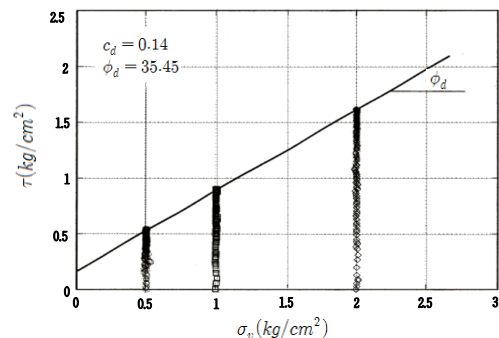


(b) The vertical stress vs. The shear stress

Fig. 3. The results of the direct shear box test(reclamation soil)



(a) The shear displacement vs. The shear stress



(b) The vertical stress vs. The shear stress

Fig. 4. The results of the direct shear box test(cover soil)

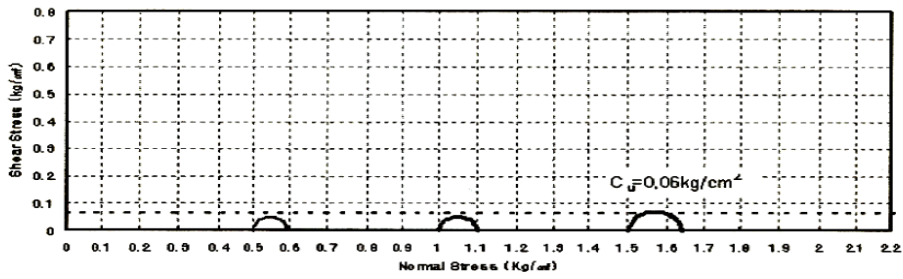


Fig. 5. The relation between deviatoric stress and strain of slurry

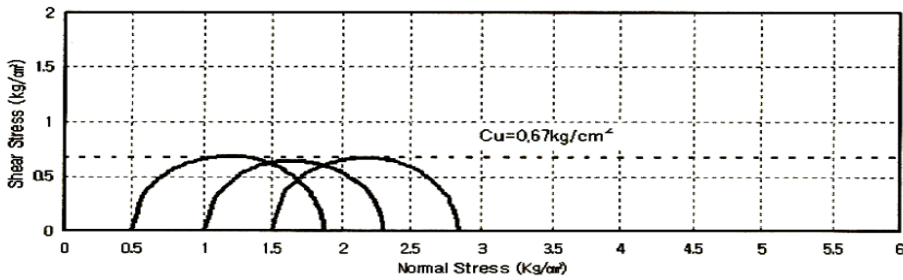


Fig. 6. The relation between deviatoric stress and strain of slurry and soil

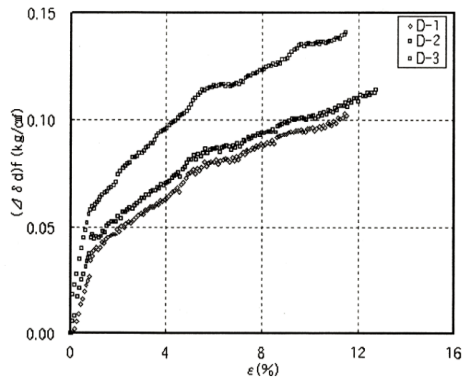


Fig. 7. The relation between deviatoric stress and strain of slurry

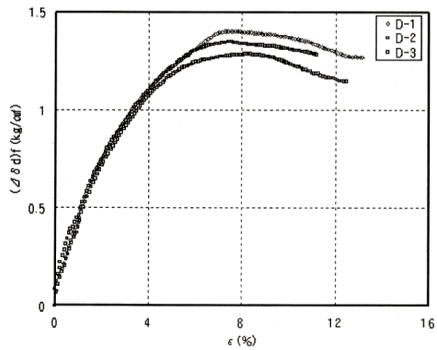


Fig. 8. The relation between deviatoric stress and strain of slurry and soil

Table 3. The results of Rowe cell test

Clay content %		Applied load Δp (kPa)			
		40	80	160	320
25	Ch <i>cm</i> ² /sec	1.198E-01	1.052E-01	9.302E-02	7.416E-02
	Kh <i>cm</i> ² /sec	1.204E-05	7.850E-06	3.231E-06	1.402E-06
50	Ch <i>cm</i> ² /sec	9.302E-02	7.416E-02	5.010E-02	7.416E-02
	Kh <i>cm</i> ² /sec	1.659E-05	5.474E-06	2.877E-06	1.809E-06
75	Ch <i>cm</i> ² /sec	5.336E-03	8.760E-03	6.984E-03	6.079E-03
	Kh <i>cm</i> ² /sec	1.028E-06	1.029E-06	4.201E-07	1.861E-07

4.2 CRS 시험

매립 하수슬러지와 복토재의 CRS 압밀시험을 통해 혼합비율에 따른 특성을 알아보았다. Rowe cell 시험과 마찬가지로 공시체의 크기는 직경 250mm, 높이 90mm, 혼합비율은 건조중량비를 기준으로 매립 하수슬러지 25%, 50%, 75%로 조절하여 시험하였다.

Table 4는 CRS 시험 결과를 나타낸 것이고, Fig. 12, Fig. 13, 그리고 Fig. 14는 혼합시료의 e-log p 관계를 나타낸 것이다. 압밀 시험결과 매립 하수슬러지와 복토재의 혼합시료의 경우 혼합비율

이 높은 시료는 뚜렷한 압밀항복응력을 나타내지 않고 압축량이 증가하는 경향을 보였으며 슬러지 혼합율이 25%인 시료는 압밀항복응력이 0.2kg/cm²로 Rowe cell 시험결과와 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 그 원인으로는 시료혼합에 의한 간극의 증가를 고려하지 않고, 단순한 액상한계를 기준으로 한 변형량을 적용한 결

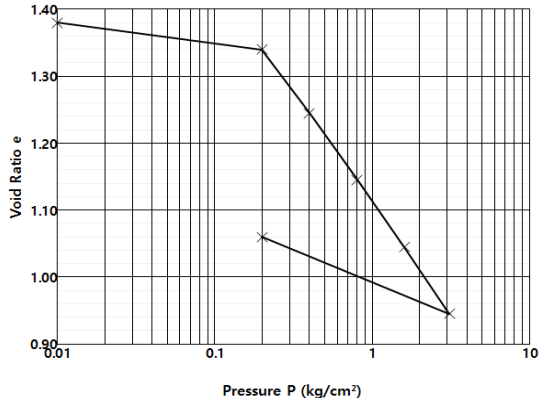


Fig. 9. The relation between void ratio and pressure(slurry 25%)

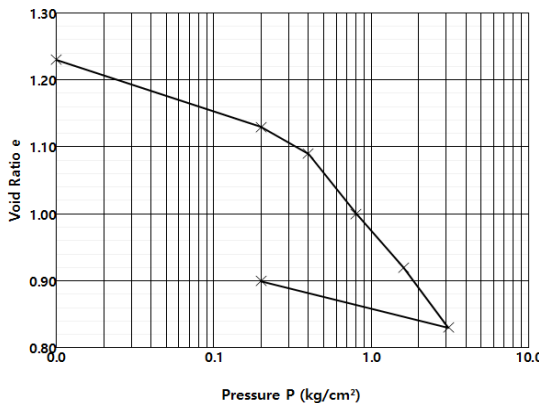


Fig. 10. The relation between void ratio and pressure(slurry 50%)

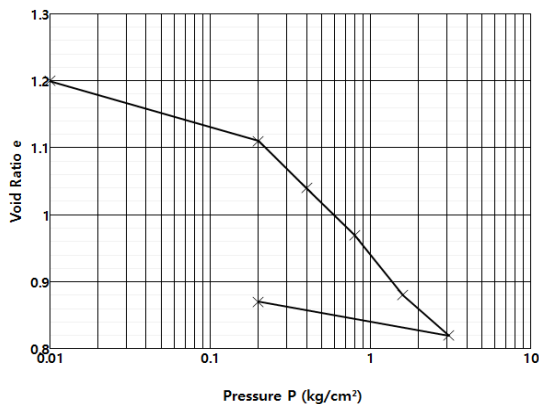


Fig. 11. The relation between void ratio and pressure(slurry 75%)

과로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 쓰레기 매립지에서 시료를 채취하여 현장채취시료와 매립 하수슬러지의 실내시험 결과로부터 매립지반의 물리적 및 공학적 특성에 대한 결론을 다음과 같이 도출하였다.

1. 쓰레기 매립지에서 깊이 3m, 폭 2m 정도를 굴착하여 매립 상태를 육안으로 확인한 결과 건설 폐자재, 목재, 비닐봉투 등 각종 재료가 혼합된 상태로 존재하고 있었으며, 특히 하단부는 부패부식에 의한 화학적 반응으로 검은 색을 나타내고 있었다.
2. 입도시험 및 액상소성한계 측정 시험 결과 지반재료로서의 분류로는 세립토 15% 미만이고, 입경 2mm이상의 자갈도 10% 미만인 사질토로 입경분포가 양호한 SW로 분류되었다. 현장관찰 결과, 자갈질 모래(SG) 또는 세립분이 섞인 모래(SF), 세립분이 섞인 자갈질 모래(SG-F)로 분류하였다.
3. 배수조건을 달리한 전단시험 결과 개량형 일면전단시험(CD)의 전단과정에 있어서 뚜렷한 전단강도가 나타나지 않고, 전단변위의 증가에 따라 강도도 증가하는 경향을 나타내었다. 점착력은 약 0.18kg/cm², 내부마찰각은 약 36°로서 사질토와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 삼축압축시험(UU)에 의한 매립하수슬러지와 복토재의 혼합재료의 경우 각각의 폐기물과는 달리 내부마찰각은 증가하나 점착력은 증가하지 않고 오히려 감소하는 경향이 나타났다.
4. 매립 하수슬러지와 복토재의 압밀중 투수성을 확인하기 위하여 실시한 Rowe cell 시험 결과 혼합비율에 관계없이 압밀항복응력은 약 0.2kg/cm²이며, 투수계수는 $1.6 \times 10^{-5} \sim 1.8 \times 10^{-7}$ cm/sec의 범위에서 측정되었다. 또한 슬러지 혼합율이 높을수록 압밀항복응력 이후에 큰 항복성(Cc)을 나타냈다.
5. 단시간내 매립 하수슬러지와 복토재의 압밀특성을 파악하기 위한 CRS시험 결과 매립 하수슬러지와 혼합비율이 높을수록 뚜렷한 압밀항복응력을 나타내지 않고 압축량이 증가하는 경향을

Table 4. The results of CRS test

Clay content %	CRS	
	Cc	Pc(kg/cm ²)
25	0.226	0.23
50	0.242	0.26
75	0.595	0.25

보였으며, 슬러지 혼합율이 25%인 시료는 압밀항복응력이 0.2 kg/cm²로 Rowe cell 시험결과와 비슷한 값을 나타내었다.

6. 종합분석결과, 쓰레기 매립지에서 채취한 복토재는 자갈질 모래에 가까운 특성을 나타내었으며, 하수슬러지와와의 혼합비율이 증가할수록 뚜렷한 전단강도 및 압밀항복응력이 나타나지

않았다. 따라서 실시설계시 고려되지 않았던 시설물을 축조하거나 증축하는 경우 매립지의 침하, 사면안정 등을 고려한 유지관리가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 일부 지원으로 수행되었습니다.

References

Cheon, B.S. (2001). Utilization of finished municipal landfill as a construction site, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, **17(6)**, 59–73 [in Korean].

Fasset, J.B., Leonards, G.A., Repetto, P.C. (1993). "Geotechnical properties of municipal solid waste and their use in landfill design", *Proc. of Waste Tech 93 Conference*.

Grisolia, M., Napoleoni, Q. (1996). "Geotechnical characterization of municipal solid waste", *Proc. of the 2nd Intl. Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, **2**, 641–646.

Jeong, D.Y. (1996). The solution of waste-landfill, *Journal of Civil Engineering*, **44(10)**, 55–61 [in Korean].

Kang, K.M. (1995). The stability analysis of a waste landfill considering consolidation effects, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, **3(3)**, 563–566 [in Korean].

Kim, D.Y. (2000). Application of Waste Landfill Foundation for Use of Construction Site, *Research Report*, Ministry of Construction & Transportation, 1–199 [in Korean].

Mitchell, J.K., Bray, J.D., Mitchell, R.A. (1995). Material Interactions in Solid Waste Landfills, *Geoenvironment 2000 – Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics*, *Geotechnical Special Publication*, **46**, ASCE, 568–590.

Oweis, I.S., Khera, R.P. (1998). *Geotechnology of Waste Management*, 2nd Ed., PWS Publishing Company, New York.

Park, H.I. (1997). Settlement characteristics of nanji-island refuse landfill, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, **13(14)**, 65–75 [in Korean].

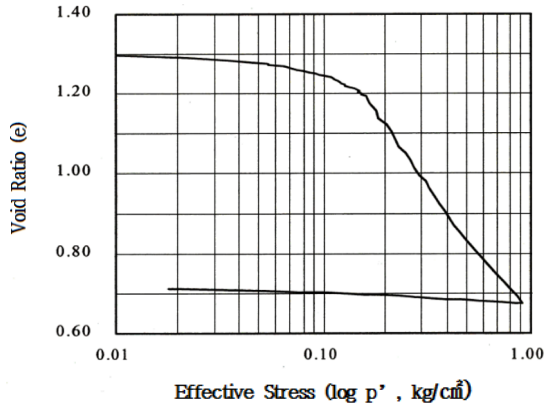


Fig. 12. The relation between void ratio and pressure(slurry 25%)

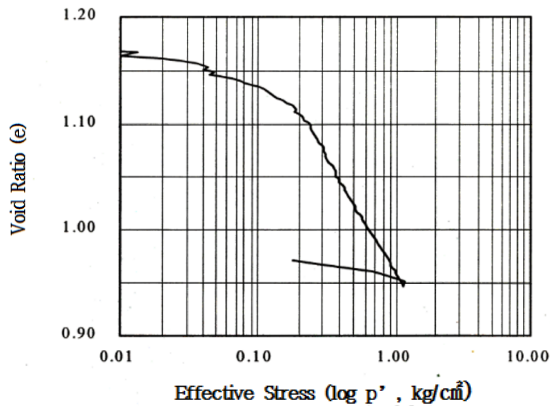


Fig. 13. The relation between void ratio and pressure(slurry 50%)

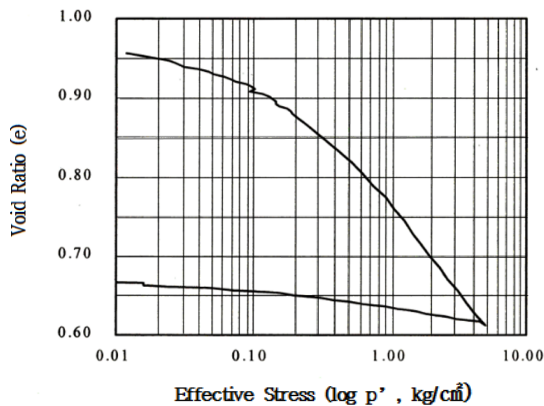


Fig. 14. The relation between void ratio and pressure(slurry 75%)

쓰레기 매립지 내 폐기물 혼합지반 특성 연구

본 연구는 쓰레기 매립지의 폐기물 혼합지반에 대한 특성을 연구하였다. 매립 현장에서 시료를 채취하여 물리적시험과 역학시험을 실시하여 지반공학적 특성을 분석하고 Rowe cell 시험과 CRS 시험을 통한 압밀분석을 하였다. 분석결과, 폐기물 혼합토는 통일분류법의 SW, SG으로 분류되었다. 전단강도의 경우, 전단변위가 증가할수록 전단응력이 증가하였으나 전단최대강도는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 믹싱비율이 증가할수록 시료의 압축지수는 증가하였으며 이를 통해 침하가 예상된다. 폐기물 혼합토의 투수계수는 $1.6 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 와 $1.8 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 가 측정되었다.