

현장조사에 의한 국내 해안 폐기물 매립장의 침출수 거동과 수리특성 Leachate Behavior and Hydraulic Property of Domestic Seashore Landfill From Field Investigation

장연수(Yeon-Soo Jang) · 조용주(Yong-Ju Cho)

동국대학교 토목환경공학과

ABSTRACT

In this paper, the role of intermediate cover soils with respect to the leachate and gas flow is investigated from various field investigations and the hydraulic conductivity of the disposed waste is obtained using pumping and slug tests. From the results of field investigations, it was found that the flow of leachate and gas is prevented by the buried cover soils. The hydraulic conductivities of field pumping test and slug tests are well matched and stayed in the range of hydraulic conductivities of well compacted wastes in the literature.

Key words : cover soil, waste, leachate, hydraulic conductivity, pumping test, slug test

I. 서론

최근 해안 쓰레기 매립장의 경우 단계별 쓰레기 매립이 진행됨에 따라 침출수의 누적 수위도 함께 증가되는 사례가 보고되고 있으며 이러한 누적수위 증가는 매립사면의 구조적 안정성을 저해할 뿐만 아니라 매립장내의 수두를 증가시킴으로 인하여 하부지반을 통한 침출수의 이동 가능성을 높이게 된다. 이러한 누적수위 증가 원인으로 복토재를 통한 강우의 침투와 국내 음식쓰레기의 고함수량 등이 거론되고 있으며 국내 매립지의 경우 복토재를 통한 강우 침투를 최소화하기 위하여 저 투수성의 양질복토재를 사용하고 있다. 이러한 저 투수성 복토재의 사용은 복토가 표면에 있을 때에는 강우 침투율을 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있으나 상부 단계의 쓰레기 매립 진행에 따라 쓰레기에 묻힐 경우에는 불투수층으로 작용하여 하부에 있는 집배수관로로의 수직흐름을 방해하는 역작용을 나타내게 된다.

이 논문에서는 쓰레기에 덮인 저 투수성 복토재 시스템의 흐름거동을 파악하기 위하여 수도권 매립지 1공구 1개 블록을 선정하여 현장 수리특성조사 및 지반조사를 실시하였다. 현장 시추조사를 통해서 쓰레기와 중간복토재의 공학적 특성을 분석하고, 누적수위 변화와 복

토재를 만났을 때의 주변 쓰레기의 함수비와 복토재 상하부의 함수비를 검토하여 매립지내의 침출수 거동 메카니즘을 파악하였다. 그리고 현장 양수시험(pumping test)과 순간충격시험(slug test)을 수행하여 쓰레기의 수리적 특성을 파악하였다.

II. 쓰레기 투수계수 값에 대한 사례연구

생활쓰레기 매립지의 투수특성을 파악하기 위해서는 일반적으로 지역적인 경험과 발표된 자료를 기초로 추정하고 실제 매립장의 설계시공을 위한 자료로 사용하기 위해서는 쓰레기의 성질과 밀도의 고려와 연계된 현장시험이 필요하다(Oweis and Khera, 1990).

쓰레기에 대한 투수계수는 여러 연구자들에 의하여 발표되었으며 다음에 일부를 소개한다.

Oweis와 Khera(1986)는 Northern New Jersey에 Hackensack Meadows에 있는 매립지에서 침출수 누적수위와 침투 값으로부터 Harr(1962)의 식을 이용하여 쓰레기의 투수계수를 역계산하여 결정하였으며 역계산된 쓰레기의 투수계수 값은 2.6×10^{-3} cm/sec이었다. 그 후 같은 매립지에서 현장 양수시험을 실시한 결과 약 10^{-3} cm/sec로 역계산된 값과 거의 일치하였음을 보고하고 있다.

Rowe와 Nadarajah(1996)는 New York에 있는 Fresh Kills Landfill에서 쓰레기의 이방성의 영향을 검토하였으며 깊이에 따라 수평투수계수가 감소하는 경향이 있음을 보고하고 있다. Landva 등(1998)은 쓰레기의 실내 수직투수계수 장치와 수평투수계수 장치를 소개하였고 쓰레기의 깊이에 상당하는 수직응력을 가하여 투수계수를 계산하였다. 이 실내시험 결과를 Rowe와 Nadarajah(1996)의 깊이에 따른 결과와 비교하였는데 거의 일치된 결과를 나타내고 있으며 20m 이내의 깊이에서는 대부분 10^{-4} cm/sec 보다 크다고 보고하고 있다. 이들은 실내시험에서 쓰레기의 투수계수를 측정할 때 중요한 요소는 샘플의 크기가 커야하며 현장과 같은 다짐밀도를 가진 샘플에서 의미 있는 결과가 나타난다고 제안하였다.

Table 1.은 문헌에 의한 쓰레기 투수계수 값의 범위를 요약하여 나타낸 것이다.

Table 1. Summary of Hydraulic Conductivities of Waste

Method	Unit weight (t/m ³)	Hydraulic conductivity (cm/s)	Reference
Estimated based on field data	0.657	2.6×10^{-3}	Oweis and Khera(1986)
Pumping tests	0.657	10^{-3}	Oweis et al.(1990)
Falling head field test	0.961 ~ 1.442	1.5×10^{-4}	Oweis et al.(1990)
Lysimeter	0.112 ~ 0.416 (shredded waste)	$10^{-5} \sim 2 \times 10^{-2}$	Fungaroli et al.(1979)
Laboratory tests	0.881	$5.12 \times 10^{-3} \sim 3.15 \times 10^{-3}$	Koriatis et al.(1983) ¹⁾
Laboratory tests	0.573 ~ 1.137 (baled waste)	$7 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-2}$	Fang(1983)
field data (Depth : 1 ~ 40 m)	-	$10^{-2} \sim 10^{-6}$	Rowe와 Nadarajah(1996)
Laboratory tests (Vertical stress : 1 ~ 40 t/m ²)	1.0	Vertical : $10^{-2} \sim 10^{-6}$ Horizontal : $2 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-5}$	Landva et al.(1998)

III. 매립지 대상 관련시험

1. 현장 지반조사

Fig. 1은 현장 지반조사에 사용한 3개 시추공과 양수시험과 순간충격시험이 수행된 시추공의 위치를 나타내고 있다. O-1공~O-3공은 가스농도를 측정하기 위해서, BH-1공~BH-3공은 흙과 쓰레기 샘플의 공학적 특성과 심도에 따른 함수비 및 N치를 획득하기 위해서, 그리고 H-5 공과 H-8 공은 가스와 침출수를 제거하기 위해서 설치되었다. 매립지의 높이는 20m이고 쓰레기와 복토재에서 침출수위의 높이는 11m~14m범위에 있다. N치는 깊이에 관계없이 10~30 범위에 불규칙하게 분포하고 있으며 높은 N치가 획득된 장소는 나무, 강판, 자갈 등과 같은 단단한 물질의 쓰레기가 위치하는 것으로 보인다(Fig. 2). 복토층의 통일분류는 SM~ML이고 하부퇴적토층의 통일분류는 CL로 나타났다. 현장에서 다짐된 복토재의 건조단위중량은 2.05 t/m^3 이고 다짐된 쓰레기의 단위중량은 1.05 t/m^3 인데 실내다짐시험에서 획득될 수 있는 최대 값에 근접하고 있다.

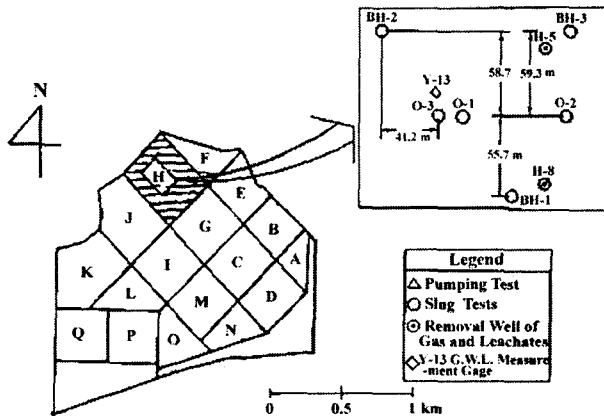


Fig. 1. Location of the boreholes for pumping and slug tests, and the wells for the removal of gas and leachate.

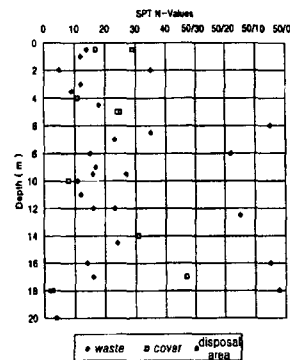


Fig. 2. Standard penetration N values with respect to depth.

Fig. 3은 심도에 따른 함수비의 분포와 매립된 세 시추공에 대한 쓰레기와 복토재의 지층을 옆에 덧붙여서 나타내었는데 중간복토와 쓰레기의 함수비는 중간복토재 하부에서는 낮고 중간복토재 상부에서는 높게 나타나고 있다. 이는 중간복토층이 가스의 상향이동을 방해하여 중간복토층 하부에 가스가 집적되어 있어 함수비가 낮게 나타나는 것으로 보인다. 9m~14m 깊이 사이에서 BH-1공 샘플에 대한 함수비가 다른 두 시추공의 함수비와 비교해 볼 때 매우 낮게 나타났다. 이는 복토층이 없어 쓰레기가 매우 투수성이 좋은 곳에서는 침출수가 이들 층을 통하여 매우 쉽게 통과할 수 있기 때문에 쓰레기 샘플의 함수비는 매우 낮게 나타나는 것으로 보인다. 다른 두 시추공에서는 중간복토재가 불투수층을 형성하여 하부 집배수시스템으로 침출수의 수직흐름을 방해하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 2개월동안 3개

시추공으로부터 측정된 침출수위의 변화를 나타내었는데 누적수위가 7m를 나타내는 BH-1공의 초기계측을 제외하면 10~15m 사이에 형성되고 있다. BH-1공의 낮은 수위는 매립지 가스(LFG)가 시추공에 축적되어 있다가 시추시 장시간에 걸쳐 누출되면서 나타나는 현상으로 풀이된다.

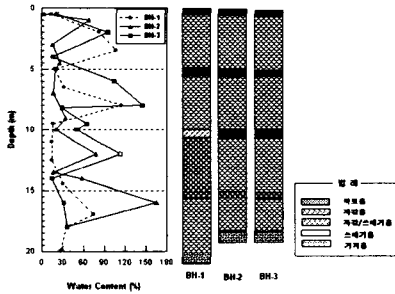


Fig. 3. Waste profiles and variation of water contents with respect to depth.

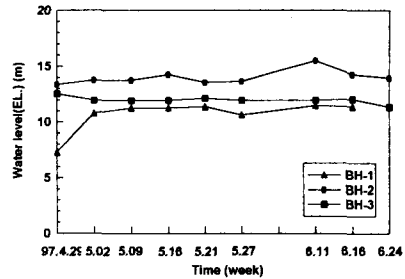


Fig. 4. Variation of leachate levels for boreholes with time.

Fig. 5는 95년 7월부터 수개월에 걸쳐 쓰레기의 매립높이가 1단(5m) 상승하였을 때 변화된 수위를 현장에 시설된 침출수위계 계측자료로부터 도시한 것이다. 쓰레기가 1단이 높아짐에 따라 수위도 단 높이에 상응한 높이로 상승하였다가 수개월동안 천천히 저감하여 일정한 값에 수렴되는 현상을 보이고 있다. 이는 쓰레기 매립시 고함수비의 쓰레기내에 포함된 수분이 표면부의 다짐으로 인하여 빠져나와 누적된 수위를 이루는 것으로 보여지며 저투수 중간복토층의 영향으로 하부로의 수직흐름이 저해되고 있기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

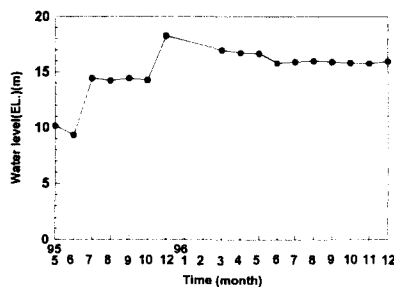
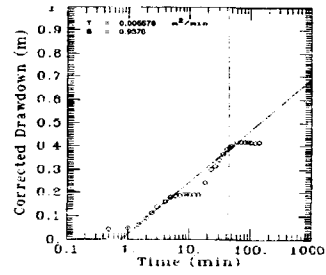
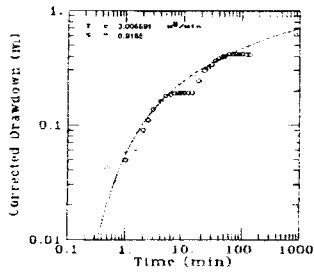


Fig. 5. Variation of leachate level at the Y-13 G.W.L. measurement gage with time.

2. 현장 수리특성시험

쓰레기의 투수계수 자료는 1개의 양수시험(pumping test)과 6개의 순간충격시험(slug test)으로부터 획득되었으며 이 자료를 이용하여 양수시험은 Theis(1935)의 type curve 분석법과 Cooper-Jacob(1945)의 semilog plot 분석법을 이용 분석하였다(Fig. 6a, 6b 참조).



(a) Theis Type curvemethod (b) Cooper and Jacobsemilog plot

Fig. 6. Drawdown-time plot of pumping test.

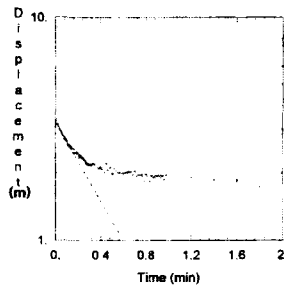


Fig. 7. Curve fitting of drawdown-time data of slug test using Bouwer and Rice Method (BH-2).

Table 2는 이 두 방법에 의하여 구한 투수계수를 요약하였으며 이들 투수계수는 문헌 (Oweis 등, 1990; Rowe와 Nadarajah, 1996)에 나타난 생활 쓰레기 매립장의 투수계수 범위 내에 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 Bouwer-Rice 분석법(1976)을 이용해서 획득한 6개의 slug test중에서 BH-2공 1개의 예를 도시한 것으로 결과는 Table 3에 요약하였다. Table 2와 Table 3의 결과에서 알 수 있듯이 두 가지 다른 형태의 투수시험으로 수행된 결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Hydraulic Property obtained from Pumping Test

Hydraulic Property	Cooper-Jacob	Theis Type curve	average
T (m ² /min)	0.005578	0.005591	0.005585
S _y (dimension-less)	0.938	0.917	0.928
K (cm/sec)	2.20 × 10 ⁻³	2.22 × 10 ⁻³	2.21 × 10 ⁻³

Table 3. The Results of Slug Test

NO.	1	2	3	4	5	6	average
Well No.	O-1	BH-1	BH-2	O-2-1	O-2-2	O-3	
K (cm/sec)	4.47 × 10 ⁻³	1.67 × 10 ⁻³	9.6 × 10 ⁻⁴	2.2 × 10 ⁻³	3.86 × 10 ⁻³	7.06 × 10 ⁻³	3.37 × 10 ⁻³

* depth of pumping well : 7.8 m,
saturated thickness (b) : 4.2 m

IV. 결론

현장조사에 의한 국내 폐기물 매립장의 침출수 거동과 수리적 특성을 분석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 시추공을 통한 누적수위 변화와 심도에 따른 함수비의 분포, Y-13 수위계의 수위계측 결과로부터 침출수가 저 투수성의 중간복토재 상부에 누적되어 있으며 중간복토층이 불투수층으로 작용하여 침출수의 하향 수직흐름과 가스의 상향 수직흐름을 방해하고 있음을 알 수 있다.
2. 현장 투수시험을 통한 쓰레기의 투수계수 결과는 양수시험과 순간충격시험의 다른 형태의 시험으로 수행된 두 경우가 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 양수시험은 2.21×10^{-3} cm/sec, 순간충격시험은 3.37×10^{-3} cm/sec으로 잘 다져진 쓰레기의 다짐밀도에서 나타나는 쓰레기 투수계수 값의 범위에 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Bouwer, H. and Rice, R.C., "A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells," *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 423-428 (1976)
2. Cooper, H.H. and Jacob C.E., "A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history," *Am. Geophys. Union Trans.*, Vol. 27, pp. 526-534 (1946)
3. Fang, H.Y., *Physical properties of compacted disposal materials*, Unpublished report (1983)
4. Fungaroli, A.A. and Steiner, R.L., Investigation of sanitary landfill behavior, *Final report, USEPA 600/2-79-053*, Vol 1, p. 314 (1979)
5. Harr, M.E., *Groundwater and Seepage*, McGraw-Hill, New York, pp. 43-44 (1962)
6. Landva, A.O., Pelkey, S.G. and Valsangkar, A.J., "Coefficient of permeability of municipal refuse," *Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnique*, Lisbon, Published by A.A. Balkema, Rotterdam (1998).
7. Oweis, I.S., Ellwood, R.B., and Greene, D. S., "Hydraulic characteristics of municipal refuse," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 116(4), pp. 536-553 (1990).
8. Oweis, I.S. and Khera, R.P., "Criteria for geotechnical construction on sanitary landfills," *Int. Symp. on Environmental Geotechnology*, Vol. 1, pp. 205-222 (1990).
9. Rowe, R.K. and Nadarajah, P., "Estimating leachate drawdown due to pumping wells in landfills," *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1), pp. 1-10 (1996).
10. Theis, C.V., "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage," *Am. Geophys. Union Trans.*, Vol. 16, pp. 519- 524 (1935).