

현장 투수시험 방법

In-situ Hydraulic Conductivity Testing Methods

권 무 남*
Kwon, Moo-nam

I. 서 론

지반을 형성하고 있는 흙의 투수계수를 정확히 측정한다는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 흙의 투수계수는 현장에서 시료를 채취하여 실험실에서 조립토는 정수위 투수시험 방법을, 점토와 같은 세립토에는 변수위 투수시험, 압밀 투수시험 및 삼축압축 시험 방법 등으로 측정하여 사용하고 있지만 실험실 시험은 사용되는 흙 시료의 양이 매우 적어 산정된 투수계수의 값이 대상 지반 전체를 대표할 수 없으며 실험할 때 여러 가지의 원인으로 오차가 발생하기 쉬워 그 결과에 대한 신뢰성이 낮다고 할 수 있다.

반면에 현장 투수시험 방법은 조사 대상 지반에 보링(Boring)공을 뚫어 이미 개발된 현장투수 시험장치를 설치하여 현장에서 직접 계측하고 시험 영역의 평균 투수계수를 공식으로 구할 수 있으며 현장조건에 따라 그 측정규모를 확대할 수 있어 실험실 시험에서 보다 더 크고 폭넓게 시험할 수 있는 기회를 부여할 수 있으므로 측정된 투수계수의 값에 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

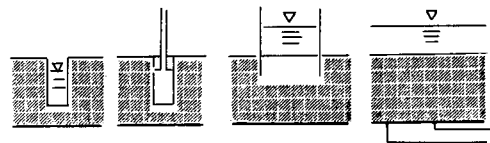
특히 선진 외국에서는 이와같은 현장 투수시험 장치들을 이용하여 산업 폐기물 처리장이나 생활 쓰레기 매립장에서 발생하는 각종 오염물질(침출수)의 누출을 차단하기 위하여 차단재(Liner)로 많이 사용되는 다져진 점토와 흙-벤토나이트 혼합

물의 투수성 측정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 고에서는 현재까지 사용되고 있는 여러가지 현장 투수시험 방법들 중 보링공 형(Borehole type)과 다공성 탐침형(Porous probe type)에 대하여 시험법의 원리, 개요, 가정조건, 측정법, 적용 공식의 해석 및 장단점의 분석 등을 소개하여 현장 조건에 쉽게 이용할 수 있는 적합한 측정 기법을 판단 선정하는데 필요한 자료를 제시하고자 한다.

II. 현장 투수시험 방법

다져진 점토에 대한 현장 투수계수 측정방법은 <그림-1>과 같이 보링공 형(Borehole type), 다공성 탐침 형(Porous probe type), 침투계 형(Infiltrometer type) 및 지하배수 형(Underdrain type)의 4가지 형태로 분류할 수 있다.



(A) Borehole (B) Porous probe (C) Infiltrometer (D) Underdrain

<그림-1> 다져진 점토에 대한 4가지 현장투수계수 측정방법

* 경북대학교 농과대학

1. 보링공 형(Borehole Type)

가. 부트웰 투수계(Boutwell Permeameter)

1) 시험법의 개요

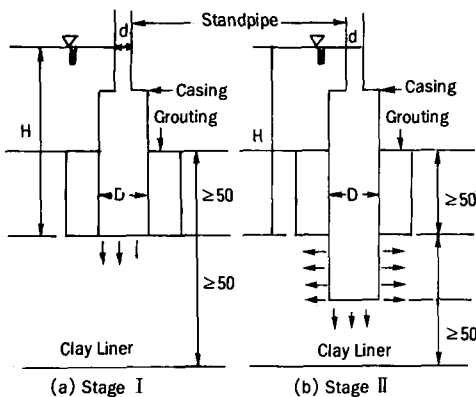
이 시험법은 Boutwell, G.P.(1983)가 개발한 것으로 보링 공의 상태에 따라 I, II 두 단계로 투수계수를 측정하며, 습윤구역의 형태를 케이싱 구역(Cased zone)과 케이싱이 없는 구역(Uncased zone)으로 구분하여 수평, 수직 투수계수를 변수두 시험으로 측정하고, 그 값은 계산 방법에 따라 달라진다.

2) 가정 조건

흙은 균질이고, 균일하게 물로 젖어 있으며, 보링 공의 표면은 오염되어 있지 않다. 경계조건은 무한이고, 흡인력의 효과는 무시하므로 건조한 흙에는 사용이 제한된다. 투수계의 바닥(I 단계)이나 케이싱이 안된 단면(II 단계)의 중심에서 간극수압은 영이고 I, II 단계에서 정상상태에 도달되며, 시험 중 체적변화는 없는 것으로 한다.

3) 시험장치의 설치 및 측정방법

〈그림-2〉와 같이 지반에 보링공은 1~수 m 굴착한 후 그 속에 직경 20~30cm의 케이싱을 박고, 케이싱과 보링공 사이의 간격은 그라우팅(Grouting)으로 봉합하여 측정하며, 식(1)과 같은 Hvorslev(1949)의 공식으로 I 단계의 투수계수(k_1)를 계산한다. 시간의 변화에 따른 k_1 의 값을 Plot하고 흐름이 정상상태에 도달하면 I 단계의



〈그림-2〉 Schematic diagram of two-stage in-situ permeability with Boutwell Permeameter for cases in which potentiometric level is below base of permeability

시험이 완료된다.

4) 적용 공식의 해설

가) I 단계 시험은 케이싱이 있는 보링공으로의 흐름을 평가하는 경우로서 식 (1)로 투수계수를 계산한다.

$$k_1 = \frac{\pi d^2}{11D(t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서,

k_1 : I 단계 시험에서의 투수계수(cm/s)

d : 스탠드 파이프의 직경(cm)

D : 케이싱의 직경 또는 보링공의 직경(cm)

t_1, t_2 : 최초 및 최종 측정시간(s)

H_1, H_2 : 최초 및 최종 측정 수위(cm)

나) II 단계 시험은 케이싱이 없는 보링공으로의 흐름을 평가하는 경우로서 이 단계에서는 k_2 의 값에 유의성이 있을 때까지 측정을 계속한다. 보링공을 오우거나 틈월 샘플러(Thin wall sampler)로 깊게 파고, 오염된 흙을 쇄술로 보링공 표면으로부터 제거한 후 투수계를 재조립하여 변수위시험으로 측정을 계속하여 식(2)로 투수계수를 계산한다.

$$k_2 = \frac{A}{B} \ln \frac{H_1}{H_2} \dots\dots\dots(2)$$

여기서,

$$A = d^2 \ln \left\{ \left[\frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D} \right)^2} \right] \right\} \dots\dots\dots(3)$$

$$B = 8 D \frac{L}{D} (t_2 - t_1) \{ 1 - 0.562 \exp [-1.57 \left(\frac{L}{D} \right)] \} \dots\dots\dots(4)$$

k_2 : II 단계시험에서의 투수계수(cm/s)

L : 케이싱 바닥으로부터 연장된 보링공의 길이(cm)

$$\frac{k_1}{k_2} = m \frac{\ln \left[\frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D} \right)^2} \right]}{\ln \left[\frac{mL}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{mL}{D} \right)^2} \right]} \dots\dots\dots(5)$$

$$m = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \dots\dots\dots (6)$$

$$k_h = mk_1 \dots\dots\dots (7)$$

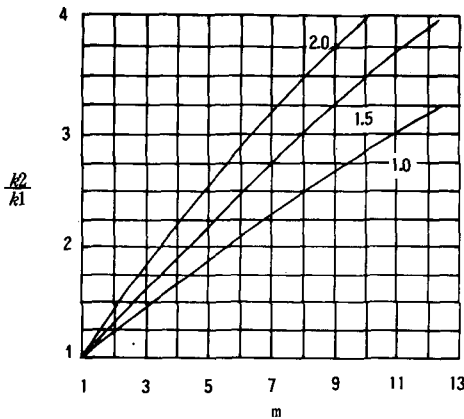
$$k_h = \frac{1}{m} k_1 \dots\dots\dots (8)$$

여기서,

m : 상수로서 <그림-3>으로부터 k_h, k_v 를 구하는데 사용된다.

k_h : 수평 투수계수(cm/s)

k_v : 수직 투수계수(cm/s)



<그림-3> Curves of k_2/k_1 versus m required to satisfy Eq.(5) for L/ D=1.0, 1.5 and 2.0

5) 장단점 분석

설치가 쉽고 설치비용이 저렴하고, 설치깊이와 경사지반에서도 측정이 가능하며 수직, 수평방향으로 투수계수를 측정할 수 있다. 투수계수가 약 10^{-7} cm/s 이하로 낮은 흠도 측정이 가능하다. 실험실과 현장 측정치의 결과가 서로 잘 맞는다.

그러나 시험된 흠의 양이 적고, 불포화토는 부적합하며, 흡인력의 효과를 설명할 수 없으며, 투수계수가 10^{-7} cm/s 이하인 흠에 대하여는 측정시간이 수일~수주일 소요될 수 있다.

나. 정수두 보링공 투수계(Constant Head Borehole Permeameter) 또는 겔프 투수계(Guelph Permeameter)

1) 시험법의 개요

이 시험법은 Olson & Daniel(1981)이 겔프 투

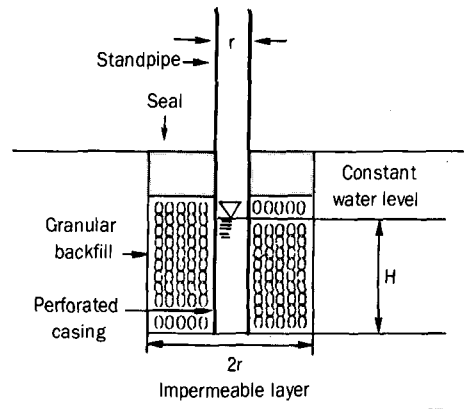
수계와 같이 보링공 내에서 정수위를 유지하기 위하여 마리오트 싸이폰(Mariotte syphon)이나 Float valve를 사용하여 개발한 것으로 정수위를 유지하기 위한 유량을 측정하고, 봉합은 증발손실을 최소화시키지만 흠속의 공기를 압축하지 않고 뒷채움 재료와 스탠드 파이프에서 수위차가 발생하지 않도록 해야 한다.

2) 가정조건

흠은 균질이고, 등방성이며, 물에 젖어 있고, 보링공의 표면은 오염되어 있지 않고, 젖었을 때 팽창하지 않는다. 흡인력이 고려되기 때문에 부트웰(Boutwell) 방법보다 정밀하나 높은 등방성 흠에 대하여 $k_h = k_v$ 라는 가정은 오차의 원인이 된다.

3) 시험장치의 설치 및 측정방법

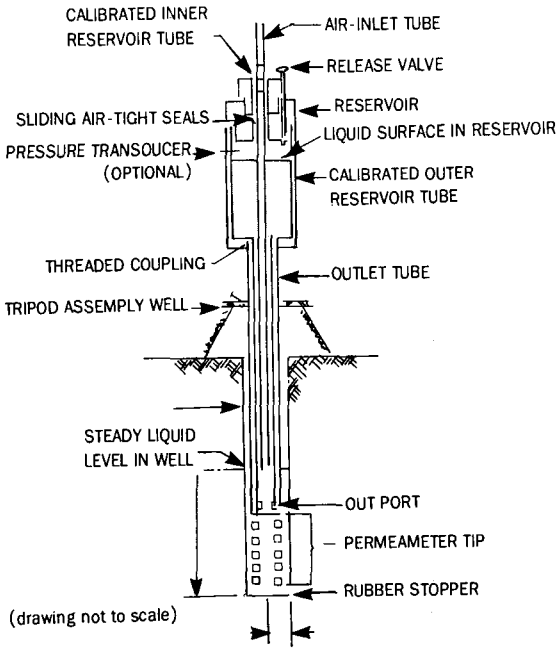
<그림-4>와 같이 지반에 직경 2r의 보링공을 굴착한 후 보링공에 직경 20~30mm의 구멍 뚫린 케이싱을 타입하고 그 주위를 입상토로 채운 후 벤트 나이트 그라우팅으로 봉합하여 설치한다.



<그림-4> Borehole test with constant water level

4) 적용공식의 해설

보링공 시험으로부터 k를 계산하는 최초의 해는 Glover(1953), Steven & Neuman(1982a)이 흡인력의 효과를 무시하여 개발하였고, 흡인력의 효과를 고려하여 개량한 식은 Steven & Neuman(1982 b, c, d), Philip(1985), Reynolds et al.(1985), Steven et al.(1987)등은 흡인력을 설명하는 k를 계산하기 위한 방법을 개발하기 위하여 수치모형에 대한 통계적 해석을 수행하였으며 k를 결정하기 위하여 다음과 같은 과정이 필요하다.



<그림-5> Guelph permeameter

가) 제1과정에서 k의 계산에 사용되는 Philip's Solution(1985)은 다음과 같다.

$$k = \frac{q}{r^2 \sqrt{R^2 - 1} \left[F_1 + \frac{F_2}{A} \right]} \dots\dots\dots(9)$$

여기서,

- q : 유량 (cm³/s)
- r : 보링공의 반경 (cm)
- R = H / R
- H : 정수두 (cm)

$$A = \frac{1}{2} ar \dots\dots\dots(10)$$

α : 흙의 모세관 성질을 측정하는 흡수수 (Sorptive number) 라는 변수로서 세립 토에 대한 대표적인 값은 0.002cm⁻¹ ~ 0.001cm⁻¹이다.

$$F_1 = \frac{4.117(1 - R^{-2})}{\ln[R + \sqrt{R^2 - 1}] - \left[\sqrt{1 - \frac{1}{R^2}} \right]} \dots\dots\dots(1)$$

$$F_2 = \frac{4.280}{\ln[R + \sqrt{R^2 - 1}]} \dots\dots\dots(12)$$

나) 제2과정은 식 (9)로 계산된 k를 Stephens et al.(1987)의 수치해석의 상관분석으로 계산된 k 값과 비교한다.

$$k = \frac{q}{rHC_u} \dots\dots\dots(13)$$

여기서, 무차원 계수 C_u = α_v(cm⁻¹), H(cm), r (cm)로 부터 다음 식으로 구한다.

$$\log(C_u) = [0.653 \log R] - [0.257 \log \alpha_v] - [0.633 \log(H)] + (0.021 \sqrt{R}) - \left[\frac{0.313}{\sqrt{N}} \right] + (1.456r) + 0.453 \dots\dots\dots(14)$$

여기서, 세립토에 대한 N과 α_v는 각각 약 1.8cm¹, 약 0.002cm⁻¹이다.(Stephens et al. 1988).

다) 제3과정은 다음 식(Elrick et al., 1988)으로 k를 계산한다.

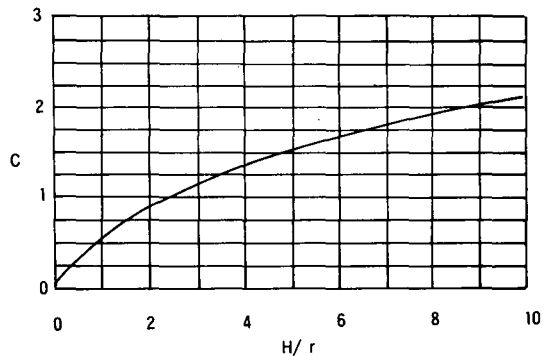
$$k = \frac{C_a}{2\pi H^2 + \pi r^2 C + \frac{2\pi H}{\alpha^*}} \dots\dots\dots(15)$$

여기서,

C : 그림 6으로 결정한다.

πH : 보링공에서 유체의 정상상태 깊이 (m)

α* : Eq.(10)의 α와 같으며, Elrick은 현장에서 다져진 점토에 대하여 약 0.001cm⁻¹을 제시하였다.



<그림-6> Factor C versus H/ r(Reynolds & Elrick 1987 : Soil Moisture Equipment Corp. 1987)

Reynolds & Elrick(1986)은 I 단계와 II 단계에서 H_1 과 $H_2(H_2 > H_1)$ 의 수심을 유지하는데 필요한 유량(q_1 과 q_2)으로부터 투수계수를 구하는 다음 식을 제안하였다.

$$k = G_2 - G_2 q_1 \dots\dots\dots(16)$$

여기서,

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi \{ 2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1) \}} \dots\dots\dots(17)$$

$$q_1 = G_2 \frac{H_2 C_2}{H_1 C_2} \dots\dots\dots(18)$$

H_1, H_2 : I, II 단계에서의 수심(cm)

C_1, C_2 : 그림 6에서 H/r 에 따른 I 단계와 II 단계에서의 C값

5) 장단점 분석

설치가 쉽고 비용이 저렴하며 설치깊이가 깊다. 시험기간이 짧다(수 시간~수일). 측정된 투수계수는 기본적으로 수평적인 값이다. 흡인력의 효과를 고려하므로 흙의 불포화 성질을 정밀하게 고려한다.

반면에 시험에 사용된 흙의 양이 비교적 적고 수직 투수계수 측정에 부적합하며, 투수계수가 10^{-7}cm/s 이하인 흙에 대하여는 측정이 곤란하다.

2. 다공성 탐침형(Probes Type)

가. 원추형 다공성 탐침(Cone Shaped Porous Probe) 또는 BAT 투수계

1) 시험법의 개요

이 시험법은 Torstensson, B.A.(1984)와 Torstensson & Petsonk, A.M.(1986)이 개발한 것으로 다져진 점토 차폐재에 사용되며 그 원리는 주사침으로 여러번 관입시킬 수 있는 고무 씬(Seal)이 조립된 직경 30mm, 높이 40mm의 필터 팁(Filter tip)을 파이프에 붙여 지반 속에 압입시키는 현장 피에조미터의 일종이다. 투수시험을 위한 필터팁은 압력을 받거나(Outflow test) 부분적인 진공하에 있을 수 있는 용기(Chamber)에 연결되어

있다. 이것은 용기내 가스의 압력변화가 수평 투수계수의 결정을 위하여 기록되고 사용하는 동안 변수위 투수시험을 시작한다. 가스 압력은 압력 변환기(Pressure transducer)로 측정하고 시험할 때 채수용기를 강하시켜 주사침에 필터 팁을 연결하면 지하수가 유입하여 채수용기내의 압력이 상승하는 것을 측정하므로써 유입량의 경과시간을 구한다.

2) 가정조건

흙은 균질이고, 동방성이며, 물에 균일하게 젖어 있고, 비압축성이다. 다공성 요소(Porous element)의 표면은 오염되어 있지 않고, 경계조건은 무한이며, 흡인력의 효과는 무시한다. 등온상태이고, 압력실에서 용해가스의 효과는 무시한다.

정수위와 변수위 시험을 수행하고, Hvorslev (1949)의 식을 사용하며 $k_h = k_v$ 인 흙속에서 k_h 와 k_v 사이의 어디에서 한 값을 측정한다.

3) 시험장치의 설치 및 측정방법

<그림-7>과 같이 직경 30mm, 높이 40mm의 원추형의 다공성 탐침을 보링공의 바닥 밑 흙속으로 지반이 교란되지 않도록 밀거나 돌려서 박고 그 표면에 케이싱을 설치한다. 채수용기는 케이싱을 아래로 낮추고 주사침과 격막을 사용하여 포러스 푸르부에 접촉시킨다. 채수용기는 물과 공기를 포함하며, 용기내의 공기는 규정된 압력으로 되어 있다.

물이 탐침으로 유출입함에 따라 용기의 공기압이 변화한다. 압력 변환기는 압력변화를 감지하고 유량과 수두는 보일(Boyle)법칙과 용기내에 있는 가스압력의 변화에 의하여 계산된다.

4) 적용 공식의 해설(Hvorslev 공식)

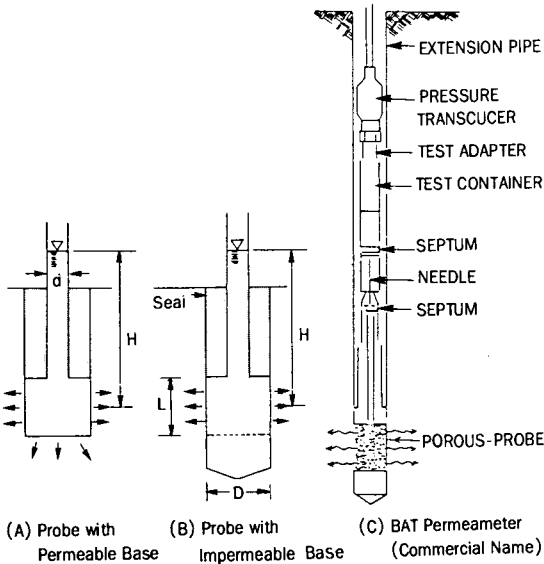
정수위 시험일 때 $k = \frac{q}{FH} \dots\dots\dots(19)$

변수위 시험일 때 $k = \frac{\pi d^2 / 4}{F(t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \dots\dots\dots(20)$

(A)의 경우 :

$$F = \frac{2\pi}{\ln[L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2}]} \dots\dots(21)$$

(B)의 경우 :



<그림-7> Hydraulic conductivity from porous probe test

$$F = \frac{2\pi L}{\ln[L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2}]} - 2.8D \dots\dots\dots (22)$$

(C)의 경우 :

$$k = \frac{P_o V_o}{F} \frac{1}{(P_t)_2 P_3} \frac{P_t}{t} \dots\dots\dots (23)$$

$$F = \frac{2\pi y}{\ln[y/d + \sqrt{1 + (y/d)^2}]} \dots\dots\dots (24)$$

여기서,

- k : 투수계수(cm /s)
- P_o : 시험 용기내에서 초기 가스 압력(cm), 물의 높이로 표시됨.
- V_o : 시험 용기내의 초기 가스의 체적(cm³)
- P_t : 시간 t₁과 t₂ 사이에 측정된 평균 압력 (cm), 물의 높이로 표시됨.
- P₃ : 시험 용기에 작용한 총압력(cm), 물의 높이로 표시됨.
- $\frac{P_t}{t}$: 압력 변화율(cm of water /s)

- F : Flow factor(cm)
- y : Porous probe의 길이(cm)
- d : Porous probe의 직경(cm)

5) 장단점 분석

설치가 비교적 쉽고, 시험시간이 짧으며(수분~수시간), 깊은 깊이에 사용할 수 있다. 푸르브로 간극수압의 측정이 가능하며, 투수계수가 낮은 흙에서 측정이 빠르다. 10⁻⁸cm/s 이하인 흙에서 측정되는 투수계수가 기본적으로 수평적인 값이다. 설치비가 다소 비싸나 많은 시험을 비교적 신속하게 실시할 수 있어 시험단가를 낮출 수 있다.

반면에 설치비가 다소 비싸고, 시험되는 흙의 양이 적으며, 포러스요소가 오염될 염려가 있어 수평 투수계수의 값을 평가절하할 수 있다. 불포화토에는 이용하지 못한다.

III. 요약

현장 투수시험 방법 중에서 Borehole type의 Boutwell Permeameter와 Constant head borehole permeameter, 그리고 Porous probe type의 cone shaped porous probe(BAT·Per-

<표-1> 현장 투수시험 측정법의 특징

Test type	Borehole type		Porous type
Device Items	Boutwell permeameter	Constant head permeameter	Cone shaped (BAT Permeameter)
Installation	Easy & Simple	Easy	Easy
Cost	Low	High	High
Soil volume	Small	Small	Very small
Soil condition	Unsaturated	Unsaturated	Unsaturated
Soil suction	Neglect	Consider	Neglect
Test depth	Deep & Slope	Deep	Deep
Testing times	Several days to several weeks	A few hours to several day	A few minutes to a few hours
Testing method	Falling head	Constant head	Constant & falling head
Direction of permeability	Vertical & horizontal	Horizontal	Horizontal
Coefficient of permeability (cm/ s)	10 ⁻⁸ cm/ s	10 ⁻⁷ cm/ s	10 ⁻⁸ cm/ s

meameter)에 대한 내용을 간단히 소개하였고, 각 측정법의 특징을 비교분석한 내용을 요약하면 <표-1>과 같으며, 기회가 있으면 Infiltrometer type와 Underdrain type에 대한 현장 투수시험법들도 소개하고자 한다.

참고문헌

1. Boutwell, G.P., and R.K. Derick, 1986. Groundwater protection for sanitary landfills in the saturated zone, Presented to Waste Tech '86, National Solid Waste Management Association, Chicago, Ill.
2. Bouwer, Herman, 1966. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis, Water Resources Research, Vol. 2, pp. 729~738.
3. Bouwer, Herman, 1978. Groundwater hydrology, McGraw-Hill Book Inc., New York, pp. 114~136.
4. Daniel B. Stephens, Kelvin Lambert, & David Watson, 1987. Regression models for hydraulic conductivity and field test of the borehole permeameter, Water Resoueces Research, Vol. 23, No. 12, pp. 2207~2214.
5. Daniel B. Stephens, and Shlomo P, Neuman, 1982. Vadose zone permeability Tests : Summry, Journal of the hydraulic division, ASCE, Vol. 108, No. HY5, pp. 623~639.
6. Daniel B. Stephens, and Shlomo P. Neuman, 1982. Vadose zone permeability tests : Steady state results, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 108, No. HY5, pp. 640~659.
7. Daniel B. Stephens, and Shlomo P. Neuman, 1982. Vadose Zone Permeability Tests : Unsteady flow, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 108, No. HY5, pp. 660~677.
8. David E. Daniel, 1982. Predicting hydraulic conductivity of clay liners, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 2, pp. 285~300.
9. David E. Daniel, 1989. In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol. 115, No. 9, pp. 1205~1226.
10. Dunn, R.J., and J.K. Mitchell, 1984. Fluid conductivity testing of fine grained soils, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 1648~1664.
11. George P. Korfiatis, Nidal Rabah, and Djmel Lekmine, 1987. Permeability of compacted liners in laboratory scale models, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 13, pp. 611~624.
12. Holtz, W.G., 1985. Predicting hydraulic conductivity of clay liners, dicussion, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp. 1457~1459.
13. 河野伊一郎(Ichiro Kono), 西坦誠(Makoto Noshigaki), 1983. 原位置 透水試験法の解析手法に関する 研究, 日本土質工學會 論文報告集, Vol. 23, No. 4, pp. 157~170.
14. James K. Mitchell, Don R. Hooper, and Richard G. Campanella, 1965. Permeability of compacted clay, Journal of the Soil Mechnics and Foundtion Engineering Division, ASCE, Vol. 91, No. SM4, pp. 41~65.
15. Joseph, o. Sai, and David C. Anderson, 1990. Field hydraulic conductivity tests for compacted soil liners, Geotecniel Testing Journal, ASTM, Vol. 13, No. 3 pp. 215~225.
16. J.R. Philip, 1985. Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil, Water Resources Research, Vol. 21, No. 7, pp. 1025~1033.
17. 赤井浩一, 1975. 地下水調査のための原位置試験の解析における諸問題, 日本京都大學防災研究所報, 第18號 B. pp. 305~321.
18. Neal Fernuik and M.D. Haug, 1990. Evaluation of in situ permeability testing methods. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 116, No. 2, pp. 297~311.
19. Olson R.E., and D.E. Daniel, 1981. Neasurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils, Permeability and

- groundwater contaminant transport, ASTM STP 746, T.F. Zimmie and C.O. Riggs, Eds., ASTM, pp. 18~64.
20. Reynolds, W.D., and D.E. Elrick, 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table, Soil Science, Vol. 136, No. 4, pp. 250~268.
 21. Reynolds, W.D., D.E. Elrick, and B.E. Clothier, 1985. The constant head well permeameter : Effect of unsaturated flow, Soil Science, Vol. 139, No. 2, pp. 172~181.
 22. Reynolds, W.D., and D.E. Elrick, 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the parameter using the Guelph permeameter, Soil Science, Vol. 140, No. 4, pp. 292~303.
 23. Reynolds, W.D., and D.E. Elrick, 1987. A laboratory and numerical assessment of the Guelph permeameter method, Soil Science, Vol. 144, No. 4, pp. 282~299.
 24. Stephen S. Boynton, and David E. Daniel, 1985. Hydraulic conductivity tests on compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 465~478.
 25. Stephens, D.B., and S.P. Neuman, 1982 a. Vadose zone permeability, tests : Summary. J. of Hydr. Div., ASCE, Vol. 108, No. 5, pp. 623~639.
 26. Stephens, D.B., and S.P. Neuman, 1982 b. Vadose zone permeability tests : Steady state results. J. of Hydr. Div., ASCE, Vol. 108, No. 5, pp. 640~459.
 27. Stephens, D.B., and S.P. Neuman, 1982 c. Vadose zone permeability tests : Unsteady flow. J. of Hydr. Div., ASCE, Vol. 108, No. 5, pp. 660~677.
 28. Stephens, D.B., and S.P. Neuman, 1982 d. Free surface and saturated-unsaturated analyses of borehole infiltration tests above the water table Adv. Water Resour., Vol. 108, No. 5, pp. 660~677.
 29. Stephens, D.B., et al., 1988. Vadose zone characterization of low-permeability sediments using field permeameters, Ground Water Monitoring Rev., Vol. 8, No. 2, pp. 59~66.
 30. Steven R. Day, and David E. Daniel, 1985. Hydraulic conductivity of two prototype clay liners, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 8, pp. 957~970.
 31. U.S. Department of the interior bureau of reclamation, 1974. Earth Manual, A Water resources technical publication, Second edition, pp. 573~593.
 32. 山本毅史(Yamamoto Tsyosi), 土谷尚(Tschiya Hitosi), 1988. 透水性を求めの現地調査法, 日本土質工學會, 土と基礎, Vol. 35, No. 5, pp. 77~84.

약 력

권 무 남



1965. 서울대학교 농과대학 농공학과 졸업
 1969. 서울대학교 대학원 농공학과, 농학석사
 1983. 충남대학교 대학원 농공학과, 농학박사
 현재 경북대학교 농과대학 농업토목공학과 교수
 한국농공학회 이사