

불포화토의 투수특성

Characteristics of Permeability for an Unsaturated Soil

송 창 섭* · 신 창 섭**

Song Chang Seob · Shin Chang Seob

Abstract

In order to analyse the flow problems for an unsaturated soil, it is required to examine closely the characteristics of the coefficient of permeability which is changing with the matric suction. To this ends, a permeability test was conducted on the three samples; granular soil, cohesive soil and silty soil.

The specimen was made by pressing the static pressure on the mold filled with soil and the void ratio was controlled with the different compaction ratio. And the test was performed by using the modified apparatus of the steady state method which was proposed by Klute (1972). The range of matric suction was 0-90 kPa.

The measured results for the coefficients of permeability were analysed with the void ratio and the compaction ratio, and it was examined closely the characteristics of the permeability for an unsaturated soil.

Keywords: Unsaturated soil, Matric suction, Steady state method, Void ratio, Coefficient of permeability

I. 서 론

지반은 지하수의 위치에 따라 포화영역과 불포화 영역으로 나누어지는데, 포화영역은 흙 입자를 제외한 간극이 모두 물로 채워진 상태이고, 불포화 영역은 간극의 일부만 물로 채워진 상태이다. 불포화영역은 공기와 물의 접촉면을 포함하는 4상구조로 이루어져 있다 (Fredlund et. al., 1993). 불포화영역의 간극 속에는 물과 공기의 압력차에 의한

표면장력과 물분자를 결합하는 표면력이 모세관 현상과 흡착현상을 일으키고, 이 때 발생하는 부(-)의 간극수압은 유효응력과 흙 속의 물의 흐름을 변화시키므로, 기존의 포화토 이론을 적용하는 것은 불합리하다.

불포화토 내부를 통과하는 물과 공기의 흐름을 해석하기 위해서는 포화도 또는 흡인력의 크기에 따라 달라지는 투수계수를 고려해야 한다. 포화도가 낮아지고 흡인력이 증가하면, 물의 흐름을 방해하는 공기의 양이 상대적으로 증가하여 물의 흐름을 차단하기 때문에 투수계수가 감소된다. 따라서 불포화토의 흐름을 해석하기 위해서는 불포화토 내의 물, 공기, 물과 공기의 혼합상태의 흐름 및 이들 상호간의 작용에 대해서 규명되어야 한다.

* 충북대학교

** 충북대학교 대학원

* Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2578

Fax: +82-43-272-5922

E-mail address: cssong@cbnu.ac.kr

불포화토의 투수계수의 측정은 현장에서 직접적인 방법에 의해서 측정되면 가장 좋으나(Hillel, 1982), 비용이 많이 소요되고 측정 방법의 개선이 미진하고 표준화하기 어려운 점을 들어 대부분 실험실에서 현장조건을 재현하여 측정하고 있다. 불포화토의 투수계수의 측정에 대한 실내시험 방법은 Klute(1972) 등에 의해서 주로 연구되었다. Ingersoll(1981)은 정수위법으로 측정한 결과, 흡인력에 따른 불포화토의 투수계수가 흙-수분 특성곡선과 유사한 형태를 보인다고 제시하였다. 또한, Hillel(1982)은 정상법에 의한 불포화토의 투수계수의 측정에 더 긴 시간이 요구되지만, 측정결과는 변수위법보다 더 정확한 결과를 보인다고 발표하고 있다. Daniel(1983)은 불포화토의 투수계수의 측정을 위한 흐름이 흙 내부의 흡인력의 변화를 초래하므로 적당한 흐름량을 조절해야 된다고 제시하고 있다. 그러나, 흙의 공극상태와 흡인력에 따른 투수계수의 변화를 정확하게 측정된 예는 미미하다.

본 연구에서는 구성성분과 간극이 불포화토의 투수계수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 불포화토 투수시험기를 제작하고, 3가지 시료를 선정하여 흡인력과 다짐률에 따른 불포화 투수특성을 규명하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 시 료

시료는 전북 군산(A시료), 전북 부안(B시료) 및

충북 진천(C시료)에서 채취하였으며, A시료는 통일 분류법상 SM에 속하며 #200 통과량이 50% 이하로 사질성분이 비교적 많은 비소성의 흙이다. B시료는 통일 분류법상 CL에 속하며 #200 통과량이 50% 이상으로 점토성분이 많은 저소성의 흙이고, C시료는 ML에 속하며 #200 통과량이 50% 이상으로 실트성분이 많은 저소성의 흙으로 입도분포 곡선은 Fig. 1과 같다. 시료의 물리적 성질은 Table 1과 같고, 다짐률에 따른 포화투수계수는 Table 2에 정리하였다.

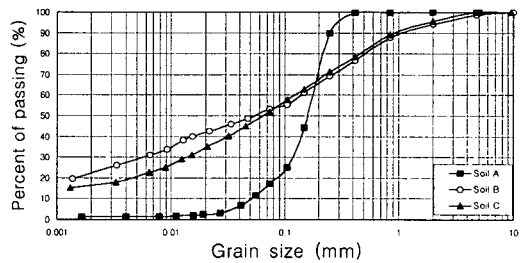


Fig. 1 Grain size distribution curve

Table 2 Saturated coefficient of permeability according to compaction ratios

Soil	Coefficient of permeability (k_s , cm/s)		
	100	90	80
A	1.80×10^{-4}	2.54×10^{-5}	4.52×10^{-5}
B	1.14×10^{-7}	2.03×10^{-7}	4.07×10^{-7}
C	6.83×10^{-8}	8.69×10^{-8}	1.11×10^{-7}

Table 1 Physical properties of soil samples

Soil	LL (%)	PI (%)	G_s	Grain size distribution (%)						γ_{dmax} (t/m ³)	OMC (%)	USCS
				4.76 mm	2.0 mm	0.42 mm	0.074 mm	0.01 mm	0.005 mm			
A	N.P	N.P	2.63	100	100	98.2	17.2	1.7	1.3	1.47	18.06	SM
B	35.0	12.0	2.62	98.8	94.3	76.8	53.4	33.8	28.1	1.77	16.75	CL
C	47.4	1.5	2.63	99.9	95.5	78.4	52.0	25.2	21.2	1.55	23.90	ML

Table 3 Initial condition of samples

Sample	Compaction ratio (%)	Void ratio	Dry unit weight (t/m ³)	Saturated water content (%)	Volumetric water content
A	100	0.75	1.50	28.7	0.429
	90	0.95	1.35	36.1	0.487
	80	1.19	1.20	45.4	0.544
B	100	0.49	1.77	18.5	0.326
	90	0.65	1.59	24.8	0.394
	80	0.86	1.41	32.7	0.461
C	100	0.70	1.55	26.7	0.414
	90	0.89	1.40	33.7	0.470
	80	1.12	1.24	42.7	0.529

2. 공시체의 제작

흙은 다짐상태에 따라 간극비가 달라지고, 동일한 수분량을 함유하더라도 간극비가 다르면 흡인력이 달라지므로, 간극비의 차이와 흡인력의 변화가 투수계수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 인위적으로 간극비를 조절하여 공시체를 제작하였다. 다짐율은 각 시료에 대하여 표준다짐(100%)을 기준으로 90%, 80%로 조절하였으며, 각 다짐률에 해당하는 정압을 가하여 제작하였다(Song et. al., 2003). Table 3은 각 공시체의 초기상태를 요약한 것이다.

공시체의 지름과 높이가 커지게 되면 시료가 평형 상태에 도달하기 위한 시간이 길어지고, 작게 설정하게 되면 몰드 내부에서 텐시오미터를 이용한 압력수두의 측정이 어려워지므로 지름은 25~100 mm, 높이는 10~50 mm로 제안하고 있으며(Klute, 1965), 본 시험에서는 평형도달시간의 감소와 원활한 압력수두의 측정을 위하여 지름 50 mm, 높이 50 mm의 몰드를 사용하였다.

3. 시험방법

가. 시험기구

시험은 Klute(1965)가 제안한 정상법을 수정한

불포화 투수계수 측정기를 제작하여 사용하였다. 실험기구의 모식도는 Fig. 2와 같으며, 세부 단면은 Fig. 3과 같다. 시료와 몰드의 상부와 하부의 뚜껑에는 1 bar의 세라믹 디스크를 설치하여 일정한 압력을 유지시켜 수분 유출을 방지하였고, 몰드의 좌측면에 약 20 mm 간격으로 1 bar의 세라믹 팁을 설치하여 마노미터를 연결하였다. 유출량의 측정을 위하여 하부에 부렛을 설치하고 하부 뚜껑에 연결시켰다. 측면에서 가해지는 공기압의 변화로 흡인력이 조절되고, 상부의 수조를 통해 물이 공급되며 세라믹 팁에 연결된 마노미터에서 측정되는 압력수두차를 고려하여 투수계수를 측정하도록

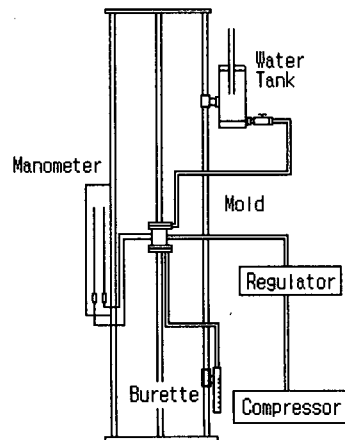


Fig. 2 Modified steady state method apparatus

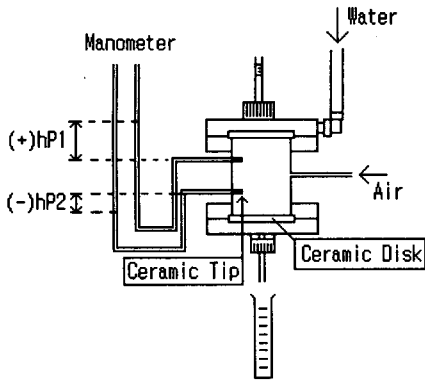


Fig. 3 Cross section of apparatus

고안되었다. 실험 과정에 발생하는 통과유량이 매우 작기 때문에 몰드를 통한 누수는 측정되는 투수계수에 큰 영향을 미치므로 이를 방지하기 위하여 몰드 벽면의 세라믹 팁의 연결구와 공기압 주입구를 나사식으로 만들어 "o-ring"을 설치하고, 몰드와 맞닿는 상부와 하부의 뚜껑에도 "o-ring"을 설치하였다. 또한, 시료의 상부 및 하부의 세라믹 디스크와 시료가 서로 부착되지 않으면 시험 중 연속적인 물의 흐름이 발생되지 않으므로, 측정에 상당한 오차를 발생하기 때문에 시료를 사이에 둔 뚜껑의 외부에 원형철판을 부착하고 나사형식의 봉을 서로 연결하여 고정함으로써 긴밀한 부착을 유지시켰다.

나. 시험방법

시험 전에 세라믹 디스크와 세라믹 팁은 미리 포화시켰으며, 공시체를 제작하여 시료와 몰드의 측면에 세라믹 팁을 부착하고 진공펌프를 이용하여 완전히 포화시킨 후, 몰드의 상부와 하부에 뚜껑을 밀착하여 고정시킨다. 상부의 저수조와 하부의 뷰렛으로 연결되는 튜브를 설치하여 튜브의 기포를 완전히 제거하고 시료를 완전히 포화시킨다. 세라믹 팁과 마노미터를 연결한 뒤, 튜브 내의 기포를 완전히 제거하고, 상부의 저수조와 하부의 뷰렛의 높이를 조절하여 일정수두를 유지시킨다. 마노미터의 눈금은 시료에 부착된 세라믹 팁의 높이와 같게

조절하고, 공기압 주입구에 연결된 압력조절기에서 공기압을 변화시키며, 일정한 압력에서 평형상태를 유지한 후, 마노미터 눈금의 변화와 뷰렛에서 유출량을 측정한다. 공기압은 0 kPa에서 90 kPa의 범위에서 4단계(30 kPa, 50 kPa, 70 kPa, 90 kPa)로 나누어 시험하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 흡인력에 따른 투수계수의 변화

각 시료의 흡인력에 따른 투수계수를 나타내면 Table 4와 같으며, 이를 흡인력의 크기에 따라 도시하면 Fig. 4와 같다. 같은 시료일지라도 간극비와 흡인력의 변화에 따라 투수계수가 달라지는 것을 알 수 있다. 포화상태의 투수계수와 흡인력 90 kPa 일때의 투수계수를 비교하면, 사질시료는 1×10^{-4} (cm/s), 실트질 시료 및 점토질 시료는 1×10^{-2} (cm/s) 정도의 차이를 보였다. 특히, 시료에 따라서 약간의 차이는 있으나 약 10~20 kPa 근처에서 투수계수의 크기가 급변하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Ingersoll (1981), Hillel (1982) 등의 연구결과에서도 나타나고 있다.

대수눈금으로 도시한 결과를 바탕으로 불포화토의 투수계수의 변화를 고찰하면, 다짐에 따른 투수계수의 변화는 사질토에 가장 크게 나타나고 실트질 흙이 다짐에 가장 영향을 작게 받는 것으로 나타났다. 또한, 흡인력에 따른 투수계수의 변화 폭도 사질토에서 가장 크게 나타나고, 점토질 흙, 실트질 흙 순으로 나타났다.

또한, 그림에서 보는 바와 같이 투수계수는 흡인력의 증가에 따라 완만하게 변화하다가 어느 범위를 경과하면 급격한 변화를 보이고 있다. 이는 수분의 감소에 따라 흙의 간극 속에서 공기가 유입되면서 물이 흘러 갈 수 있는 면적을 급격하게 줄이기 때문으로 사료된다. 이와 같이 공기가 간극 속에 유입되는 공기함입저항치(air entry value)를

Table 4 Variations of coefficient of permeability according to the matric suction

Soils	Suction (kPa) Compaction ratio (%)	Coefficient of permeability (k_w)				
		0	30	50	70	90
A	100	1.80×10^{-4}	1.85×10^{-7}	1.50×10^{-8}	2.96×10^{-9}	9.02×10^{-10}
	90	2.54×10^{-5}	4.62×10^{-6}	5.99×10^{-7}	1.03×10^{-8}	2.90×10^{-9}
	80	4.52×10^{-5}	1.90×10^{-5}	2.11×10^{-6}	4.50×10^{-8}	1.03×10^{-8}
B	100	1.14×10^{-7}	6.98×10^{-8}	1.20×10^{-8}	3.00×10^{-9}	9.30×10^{-10}
	90	2.03×10^{-7}	1.36×10^{-7}	3.40×10^{-8}	9.00×10^{-9}	3.00×10^{-9}
	80	4.07×10^{-7}	2.52×10^{-7}	8.72×10^{-8}	2.51×10^{-8}	7.99×10^{-9}
C	100	6.83×10^{-8}	2.49×10^{-8}	3.49×10^{-9}	9.59×10^{-10}	2.52×10^{-10}
	90	8.69×10^{-8}	5.50×10^{-8}	1.20×10^{-8}	3.50×10^{-9}	9.81×10^{-10}
	80	1.11×10^{-7}	8.40×10^{-8}	3.01×10^{-8}	9.79×10^{-9}	3.97×10^{-9}

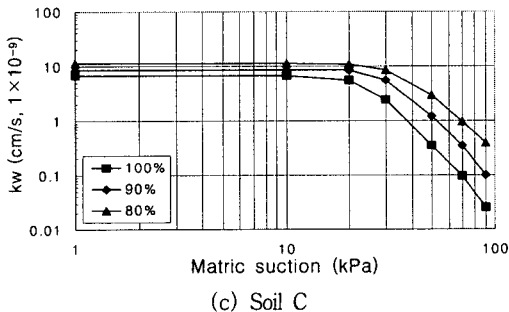
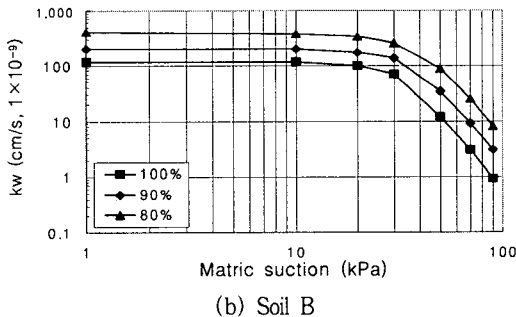
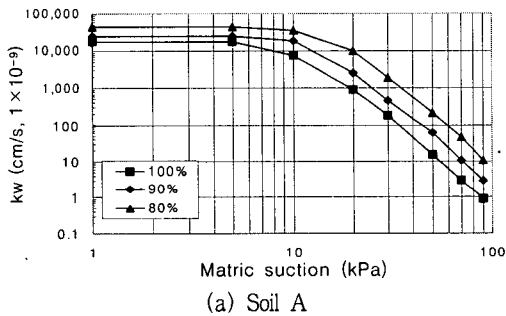


Fig. 4 The variation of coefficient of permeability with the matric suction.

전후하여 투수계수의 변화율도 크게 달라지는데, 그 변화율은 흙의 종류에 관계없이 비슷한 값을 나타내고 있다.

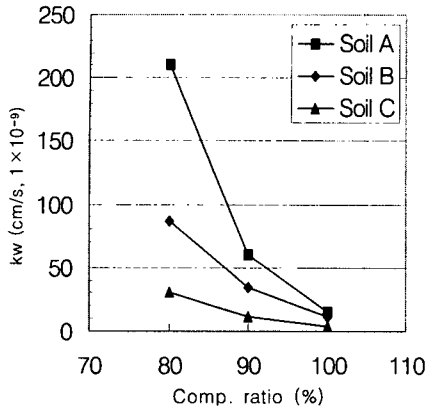
2. 다짐률에 따른 투수특성

투수계수의 변화를 다짐률에 따라 도시하면 Fig. 5와 같다. 그림에서 (a)는 흡인력이 50 kPa, (b)는 70 kPa인 경우에 대하여 도시하였다. 이러한 경향은 약간의 차이는 있으나, 측정된 흡인력의 범위내에서는 거의 비슷한 경향을 나타내었다.

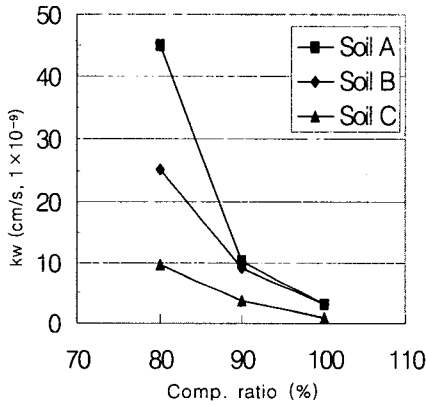
흡인력이 낮은 경우에는 사실시료는 다짐률에 따라 투수계수의 차이가 분명하지만, 점토질 또는 실트질시료인 경우에는 분명하지 않게 나타났다, 그러나 흡인력이 증가되면서 이러한 차이는 명확하게 나타나고 있다.

3. 투수계수에 대한 공기함입저항치의 변화

Fig. 4에서 언급한 공기함입저항치의 변화를 검토하기 위하여, 다짐률 또는 간극비에 따라 공기함입저항치를 정리하면 Table 5와 같다. 모든 시료는 다짐률의 감소, 즉, 간극비의 증가에 따라 간극내에 공기가 유입되는 흡인력의 크기는 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 공기함입저항치의 크기는



(a) Suction 50 kPa



(b) Suction 70 kPa

Fig. 5 The coefficient of permeability with various compaction ratios

Table 5 Air entry value with the compaction ratios.

Soils	Compaction ratio (%)	Void ratio (e)	Air-entry value (kPa)
A	100	0.753	9.06
	90	0.948	10.36
	80	1.192	10.83
B	100	0.485	29.90
	90	0.650	32.54
	80	0.856	34.46
C	100	0.698	23.86
	90	0.890	27.43
	80	1.123	28.59

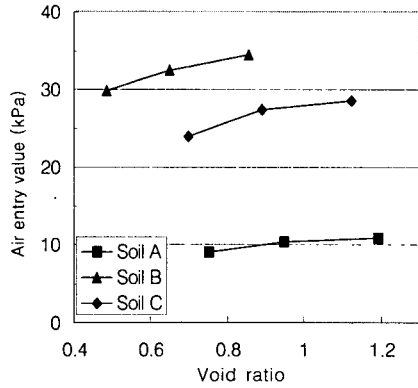


Fig. 6 Air entry value with the void ratio.

사질시료가 가장 작고, 실트질 시료, 점토질 시료 순으로 나타났다. 이는 입자의 크기에 따른 간극의 크기에 영향을 받기 때문으로 사료된다. 이러한 영향을 보다 명확하게 검토하기 위하여 공기함입저항치의 변화를 간극비에 따라 도시하면 Fig. 6과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 공기함입저항치는 간극비에 따라 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 간극비의 크기에 따라 명확하게 구분되는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 정상법 투수시험기를 수정하여 만든 불포화 투수측정기를 사용하여 사질시료와 점토질 시료, 실트질 시료를 다짐률을 선정하여 다짐률 및 흡인력을 변화시키면서 불포화토의 투수특성을 비교 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 불포화상태의 투수계수는 다짐률이 일정한 조건에서 흡인력이 증가하면 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 포화상태의 투수계수를 흡인력 90 kPa일 때의 투수계수와 비교하면, 사질시료는 10^{-4} (cm/s), 점토질 시료와 실트질 시료는 약 10^{-2} (cm/s) 정도의 차이를 보이며 흡인력에 따른 감소경향은 비슷하게 나타났다.

2. 다짐률에 따른 투수계수의 변화는 사질토에서

가장 급격하게 변화였고, 실트질 시료가 가장 적은 변화를 보이며, 흡인력이 증가될수록 그 차이가 분명하게 나타났다.

3. 공기함입저항치는 간극비에 따라 증가하였으며, 각 시료의 공기함입저항치는 사질 시료가 가장 작았고, 실트질 시료, 점토질 시료 순으로 나타났으며 그 크기는 비슷하였다.

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음
(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2004)

References

1. Daniel D. E. 1983, Permeability Test for Unsaturated Soil. *Geotech. Testing J. (ASTM)*, 6(2): 81-86.
2. Fredlund, D. G. and H. Rahardjo., 1993, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, New York: John Wiley and Sons, Inc.
3. Ingersoll J. E., 1981, Method for Coincidentally Determining Soil Hydraulic Conductivity and Moisture Retention Characteristics. Special Report 81-2, U. S. Army Cold Regions Res. and Eng. Lab., Hanover, NH.
4. Klute. A., 1965, Laboratory Measurement of Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil, *Amer. Soc. of Agronomy*, 253-261.
5. Klute. A., 1972, The Determination of The Hydraulic Conductivity and Diffusivity of Unsaturated Soils, *Colorado State University and USDA-ARS-SWCRD*, pp. 264-276.
6. Klute A. 1972, The Determination of the Hydraulic Conductivity and Diffusivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci.* 113(1): 264-276.
7. Hillel D. 1982, *Introduction to Soil Physics*. New York. Academic, pp. 364.
8. Song, C. S. and M. H. Kim. 2003, Experimental Study for Soil-Water Characteristic Curves of Unsaturated Soil. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 45(6): 153-161. (in Korean).