토지주택연구
Land and Housing Review
pISSN: 2093-8829, eISSN: 2234-1765
Land and Housing Review 2025, 16(4):127-136 | https://doi.org/10.5804/LHR.2025.16.4.127

현장투수시험 시 Clogging 발생을 최소화하기 위한 시험절차 개선방안*

Study on the Reduction Method of Clogging Phenomena in In-situ Permeability Tests

윤성규** · 윤현수*** · 김탁용**** · 장지건***** · 강기천******
Seong-Kyu Yun** · Hyeonsu Yun*** · Tak-Yong Kim**** · Ji-Gun Chang***** · Gichun Kang******

Abstract

This study examines the impact of clogging, resulting from soil disturbance and fine particle deposition during in-situ permeability tests, on the estimation of the coefficient of permeability. Field tests using the water level descent method were conducted using two approaches: the Uncased Method and the Cased Method, each applied with top water injection and the newly proposed bottom water injection method. The results show that bottom injection significantly reduced clogging effects and yielded higher permeability values, especially in the uncased method. Comparisons between water level descent and rise methods revealed that the descent method generally yielded higher permeability coefficients, although site-specific factors, such as soil type and anisotropy, influenced the results. This study provides insights into the impact of test methods on permeability measurement and suggests methodological improvements for reliable in-situ testing procedures.

Keywords: Coefficient of Permeability, In-situ Permeability Test, Uncased Method, Cased Method, Water Level Descent Method, Bottom Water Injection, Clogging

1. 서 론

흙 내부의 간극수 흐름을 결정짓는 여러 계수 중, 정상상태 조건에서 유속과 유량을 Darcy 법칙을 통해 산정할 수 있는 투수계수(coefficient of permeability)는 가장 핵심적인 요소라 할 수 있다. 이 계수는 흙의 입자 크기, 입자의 형상, 간극비, 침투수의 점성 등에 따라 달라지므로, 정확한 산정이 필수적이다.

투수계수 산정 방식에는 실내시험(Darcy, 1856; Elhakim, 2016), 이론 해석식(Kozeny and Carman, 1956; Chapuis and Aubertin, 2003), 현장시험(Yang et al., 2025) 등이 있으나, 조립토의 경우 비교적 큰 입경과 시료 채취의 어려움, 적용조건의 제약으로 인해 실내시험이나 경험식을 활용하는 데 한계

*이 논문은 2022년 석사학위논문(김탁용, 2002)을 수정·보완하여 작성하였음.
**경상국립대학교 공학연구원 학술연구교수(주저자: tjdrb330@gnu.ac.kr)
***경상국립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
****한국토지주택공사 부장
*****㈜광림엔지니어링 사장
******경상국립대학교 공과대학 토목공학과 부교수(교신저자: gkang@gnu.ac.kr)
Received: April 7, 2025 / Revised: August 10, 2025 / Accepted: October 21, 2025

가 있다(Attewell and Farmer, 1976).

이에 따라, 대부분의 설계에서는 현장시험을 통한 투수계수 산정이 중심이 되고 있는 실정이다(Elhakim, 2016; Yang et al., 2025). 지반의 투수성뿐 아니라, 전단강도, 변형계수, 지하수위 영향 등도 실내시험보다는 현장 조건을 반영한 현장시험의 중요성이 강조된다. 이는 실내시험에서 발생하는 시료 교란, 스케일 효과 등의 한계로 인해 주요 설계 인자들이 현장시험 결과에 기반하여 결정되는 경향이 강하기 때문이다(김상연 외, 2014; 이해진 외, 2021).

현장투수시험 중에서는 시추공을 이용한 방법이 분석이 간단하고 신속하여 널리 사용되나, 수위하강시험 시 주수 과정에서 지반이 교란되고, 그로 인해 토립자에 의한 clogging 현상이 발생할 수 있음에도, 이러한 요소를 고려하지 않고 투수계수를 평가하는 경우가 많다. 이는 지반의 실제 투수 특성을 정확히 파악하는 데 한계를 초래할 수 있다.

이에 본 연구에서는, 시추공 내 주수 시 지반교란을 최소화할 수 있는 시험기법을 고안하고, 이를 기존 시험방법과 비교·분석함으로써 침전물에 의한 clogging 현상이 투수계수에 미치는 영향을 규명하였다. 또한, 이러한 영향을 최소화할 수 있는 적정 투수계수 산정 방법을 제안함으로써, 보다 합리적이고 신뢰성 있는 지반투수성 평가기법을 제시하고자 한다.

2. 기존의 연구사례

2.1 시추공 내 현장투수시험을 이용한 투수계수 결정에 대한 연구사례

시추공 내 현장투수시험을 지하수위 상부 구간 및 지하수위 하부 구간 위치로 나누어 실시하였으며, 사례현황은 Table 1, 시험조건은 Fig. 1과 같다. r은 케이싱의 반경, L은 시험구간의 길이, H_1은 T_1에서 케이싱 수두상단에서 케이싱하단까지의 거리, H_2는 T_2에서 H_1-H_3, T_2-T_1은 경과시간(시험측정 시간)을 나타낸다.

2.1.1 토질조건 및 시험구간 위치에 따른 투수시험 결과

1) 시험구간이 지하수위 상부인 경우

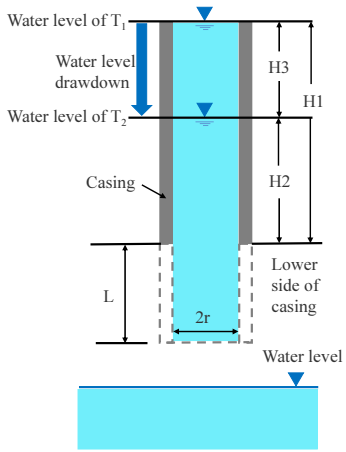
투수계수 시험 결과는 Fig. 2와 같다. 초기와 후기의 기울기가 서로 다르게 나타나며, 초기에 보다 후기에 투수계수가 감소하는 이유는 간극수와 토립자의 흡착에 따른 영향으로 판단된다.

2) 시험구간이 지하수위 하부인 경우

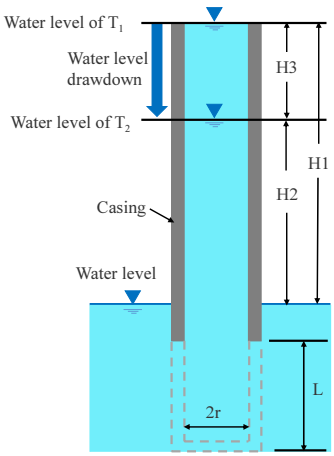
투수시험결과는 Fig. 3과 같다. 전체적으로 초기, 중기, 후기의 기울기가 다르게 나타났으며, 후기로 갈 수록 Clogging의 영향이 큰 것으로 판단된다.

Table 1. Field Permeability Test Conditions for Existing Research

NO.	Depth (GL, -m)	Layer	Water Level (GL, -m)	Test Section (cm)	R (cm)	Note
1	1.0~2.0	Colluvial Soil (Silty Sand, Silty Sand)	4.3	100	8.9	Upper Water Level
2	4.5~5.5	Weathered Soil	6.9	100	8.9	
3	12.0~14.0	Weathered Rock	13.5	200	8.9	
4	1.0~2.0	Weathered Layer (Silty Sand)	1.2	100	8.9	Under Water Level
5	4.5~5.5	Weathered Soil	4.8	100	8.9	
6	23.0~23.5	Weathered Rock	1.0	50	7.2	

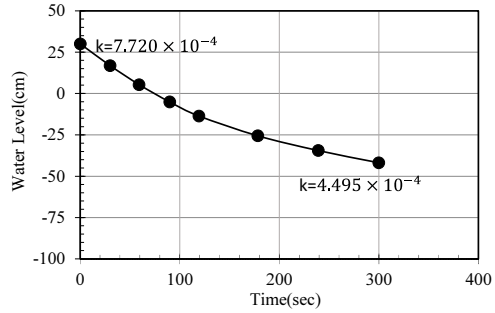


(a) Above the Groundwater Level

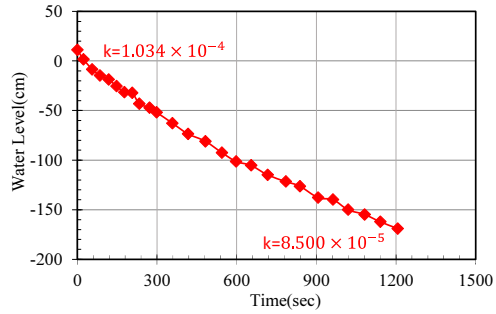


(b) Below the Groundwater Level

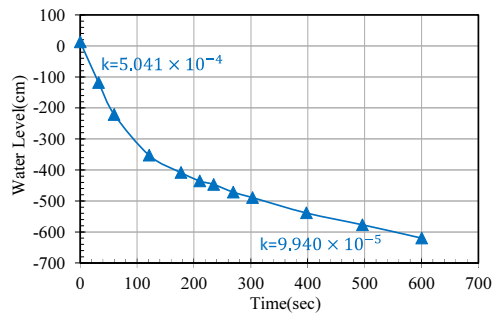
Fig. 1. Test Conditions of Variable Head Permeability Test



(a) Colluvial Soil



(b) Weathered Soil Layer



(c) Weathered Rock Formation

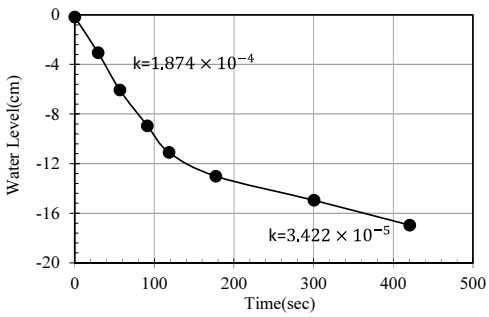
Fig. 2. Field Permeability Test Result Permeability Coefficient (Upper Groundwater Level)

2.1.2 토질에 따른 투수시험결과 변곡점 출현시간

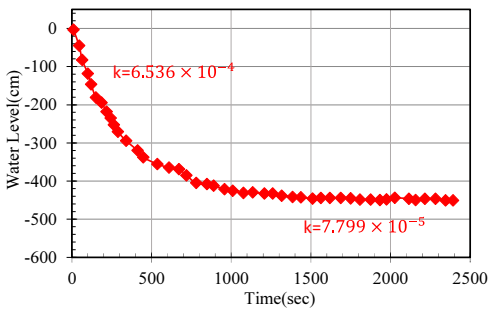
변곡점 출현시간은 Table 2와 같으며, 시험구간이 지하수위 하부의 시험결과가 상부에서의 결과 보다 길게 나타났다. 또한, 풍화토와 풍화암같이 투수성이 작은 흙에서는 변곡점의 출현시간이 투수성이 큰 붕적토나 실트질 모래층보다 길게 나타났다.

2.2 사례분석 결과

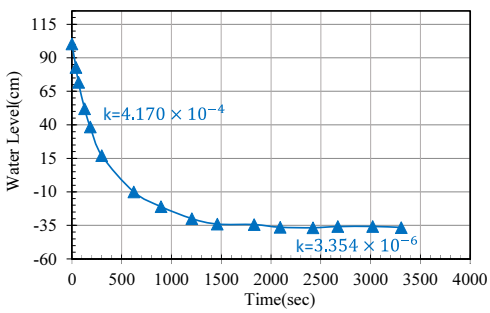
지하수위 아래에서의 현장투수시험 결과, 전체적으로 그래프 후반부에서 투수계수가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 Clogging에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 투수계수의 적용은 그래프 전반부의 기울기에 의한 값을 적용하는 것이 실제에 부합하였다. 지하수위 상부에서의 현장투수 시험 결과, 포화에 의한 간극수와 토립자의 흡착 및 막힘현상의 영향이 포함되어 있는 것으로 판단되므로 지하수위 하부에서의 현장투수시험 결과와 반대로 그래프 후반부의 기울기를 이용한 투수계수를 적용해야



(a) Silty Sand Layer



(b) Weathered Soil Layer



(c) Weathered Rock Formation

Fig. 3. Field Permeability Test Result Permeability Coefficient (Under The Groundwater Level)

Table 2. Time of Appearance of Inflection Point in Permeability Test Results According to Soil Quality

Upper Water Level		Under Water Level	
Colluvial Soil	130 s	Silty Sand	90~180 s
Weathered Soil	360~600 s	Weathered Soil	240~1020 s
Weathered Rock	60~180 s	Weathered Rock	300~1500 s

한다. 현장투수시험을 수행 할 경우 막힘현상의 발생을 최소화 하기 위해서 수위하강법(양수법)이 적용 가능하나 양수법의 경우 시추공벽의 교란이 발생할 경우 투수면적이 불확실하고, 교란부로의 지하수 유출로 실제보다 큰 투수계수가 산정될 수 있다. 현장투수시험 시 공내수에 포함된 세립토의 영향으로 막힘현상이 발생 가능함으로 깨끗한 공내수를 사용하고 시험시 나공구간에 스트레이너를 사용하는 등의 시험방법 개선이 요구된다.

3. 현장투수시험시 Clogging 현상을 고려한 투수계수 산정 방법

현장 투수시험을 위한 보링 및 주수 과정에서는 지반 교란에 의해 세립분이 유실되거나 침전되어, 시험 지반 내 간극을 막는 Clogging 현상이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 Clogging이 투수계수 산정에 미치는 영향을 분석하기 위해, 수위하강법을 이용한 투수시험을 수행하였다. 시험은 나공법(uncased method)과 공저법(cased method)으로 구분하고, 기존의 상부 주입 방식(water injection at top of borehole)과 본 연구에서 제안하는 하부 주입 방식(water injection at bottom of borehole)을 각각 적용하여 비교하였다.

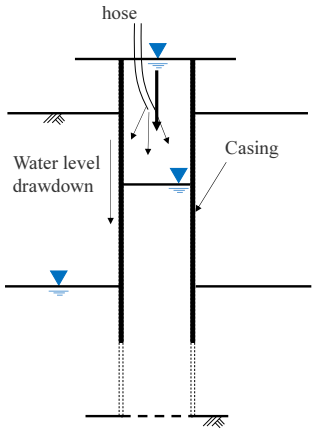
3.1 수위하강법에 의한 현장 투수시험 조건

수위하강법에 의한 현장투수시험 시 나공법과 공저법에 의한 현장 투수시험 중 상부주수법과 하부주수법으로 현장투수시험을 하였고, 시험조건은 Fig. 4와 같고 투수시험 현황은 Table 3과 같다.

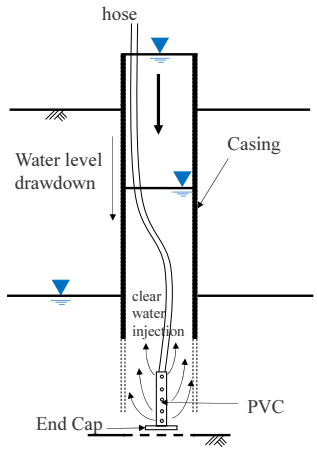
3.1.1 나공법과 공저법에 의한 현장 투수시험 결과분석

1) 나공법

현장투수시험(수위하강법)시 나공법에 의한 방법으로 상부주수법을 시험조건으로 한 결과 Table



(a) Water Level Descent Method
(Water Injection at the Top of Bore Hole)



(b) Water Level Descent Method
(Water Injection at the Bottom of Bore Hole)

Fig. 4. Test Conditions of the Field Permeability Test (Water Level Descent Method)

Table 3. Field Permeability Test Conditions

No.	Depth (GL, -m)	Layer	Water Level (GL, -m)	Test Section (cm)	Note
1	3.0~4.0	Silty Sand	1.45	100	Uncased-method (water injection at the top of bore hole, water injection at the bottom of bore hole)
2	7.0~8.0	Silty Sand	2.55	100	
3	46.0~47.0	Weathered Soil	3.75	100	
4	3.0~4.0	Silty Sand	1.45	100	Cased-method (water injection at the top of bore hole, water injection at the bottom of bore hole)
5	7.0~8.0	Silty Sand	2.55	100	
6	46.0~47.0	Weathered Soil	3.75	100	
7	3.0~4.0	Silty Sand	1.45	100	Water level rising method

Table 4. Result of Permeability Coefficient Test of Uncased-Method (Water Injection at the Top of Bore Hole)

No.	Depth (GL, -m)	Layer	Water Level (GL, -m)	k (cm/sec.)	Note
1	3.0~4.0	Silty Sand	1.45	4.30E-03	
2	46.0~47.0	Weathered Soil	3.75	1.48E-03	

4, Fig. 5와 같다. 실트질모래 지반의 투수계수는 k=4.30E-03cm/sec., 풍화토 지반의 투수계수는 k=1.48E-03cm/sec.로 나타났다.

현장투수시험(수위하강법)시 나공법에 의한 방법으로 Fig. 6과 같은 방법으로 상향주수 장치를 사용한 하부주수법에 따라 현장투수시험 시행하였으며, 결과는 Table 5, Fig. 7과 같다. 나공법 중 하부주수법의 투수시험결과 실트질모래 지반에서는 k=7.85E-03cm/sec., 풍화토 지반에는 k=3.47E-03cm/sec.의 투수계수가 나타났다.

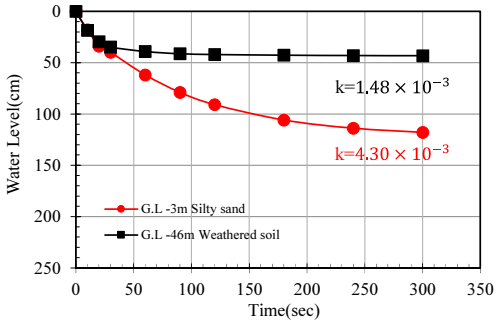


Fig. 5. Field Permeability Test Results Coefficient of Permeability (Silty Sand, Weathered Soil)



(a) Muddy Water in the Bore Hole



(b) Removing Muddy Water in the Bore Hole by Pouring Water Up

Fig. 6. Water Injection at the Bottom of Bore Hole_ Lab Reproduction

2) 공저법

현장투수시험(수위하강법)시 공저법에 의한 방법으로 상부주수법을 시험조건으로 한 결과 Table 6, Fig. 8과 같다. 실트질모래 지반의 투수계수는

Table 5. Result of Permeability Coefficient Test of Uncased-Method (Water Injection at the Bottom of Bore Hole)

No.	Depth (GL, -m)	Layer	Water Level (GL, -m)	k (cm/sec.)	Note
1	3.0~4.0	Silty Sand	1.45	7.85E-03	
2	46.0~47.0	Weathered Soil	3.75	3.47E-03	

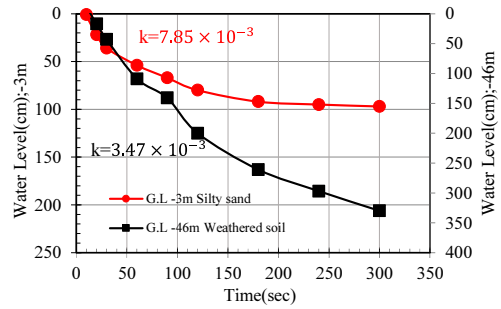


Fig. 7. Water Injection at the Bottom of Bore Hole_ Uncased-Method (Silty Sand, Weathered Soil)

Table 6. Result of Permeability Test on Cased-Method (Water Injection at the Top of Bore Hole)

No.	Depth (GL, -m)	Layer	Water Level (GL, -m)	k (cm/sec.)	Note
1	3.0~4.0	Silty Sand	1.45	2.66E-03	
2	46.0~47.0	Weathered Soil	3.75	2.09E-03	

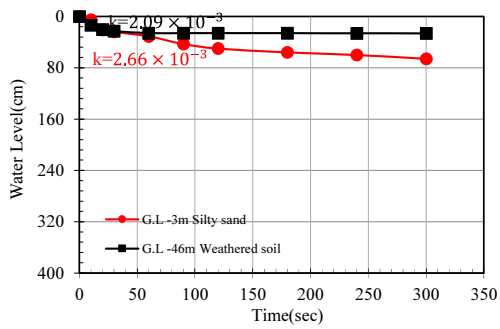


Fig. 8. Water Injection at the Top of Bore Hole_ Cased-Method (Silty Sand, Weathered Soil)

Table 7. Result of Permeability Test on Cased-Method (Water Injection at the Bottom of Bore Hole)

No.	Depth (GL, -m)	Layer	Water Level (GL, -m)	k (cm/sec.)	Note
1	3.0~4.0	Silty Sand	1.45	3.87E-03	
2	46.0~47.0	Weathered Soil	3.75	6.10E-03	

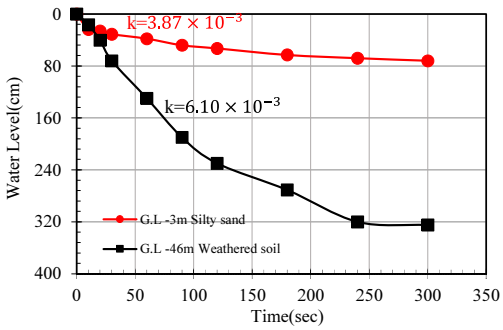


Fig. 9. Water Injection at the Bottom of Bore Hole_ Cased-Method (Silty Sand, Weathered Soil)

k=2.66E-03cm/sec. 풍화토 지반의 투수계수는 k=2.09E-03cm/sec.로 나타났다.

현장투수시험(수위하강법)시 공저법에 의한 방법으로 하부주수법에 따라 현장투수시험 시행하였으며, 결과는 Table 7, Fig. 9와 같다. 공저법 중 케이싱 하부주수법의 투수시험 결과 실트질 모래 지반에서 k=2.09E-03cm/sec., 풍화토 지반에서는 k=6.10E-03cm/sec.의 투수계수가 나타났다.

3.1.2 상부주수법과 하부주수법에 의한 투수계수 비교

상부주수법과 하부주수법을 통한 투수시험 비교결과는 Table 8과 같다. 현장투수시험 데이터를 비교 분석한 결과 토질과는 관계없이 케이싱 하부에서 주수하는 방법이 투수계수가 가장 크게 나타났다. 이 결과는 천공시 필연적으로 발생하는 케이싱 내부의 혼탁수에 의한 막힘현상이 시험결과에 영향을 주

Table 8. Field Permeability Test Result

Depth (GL, -m)	Layer	Water Level (GL, -m)	k (cm/sec.) Method of Water Injection	Note
3.0~4.0	Silty Sand	1.45	4.30E-03 (Top) 7.85E-03 (Bottom)	Uncased Method
46.0~47.0	Weathered Soil	3.75	1.48E-03 (Top) 3.47E-03 (Bottom)	
3.0~4.0	Silty Sand	1.45	2.66E-03 (Top) 3.87E-03 (Bottom)	Cased Method
46.0~47.0	Weathered Soil	3.75	2.09E-03 (Top) 6.10E-03 (Bottom)	

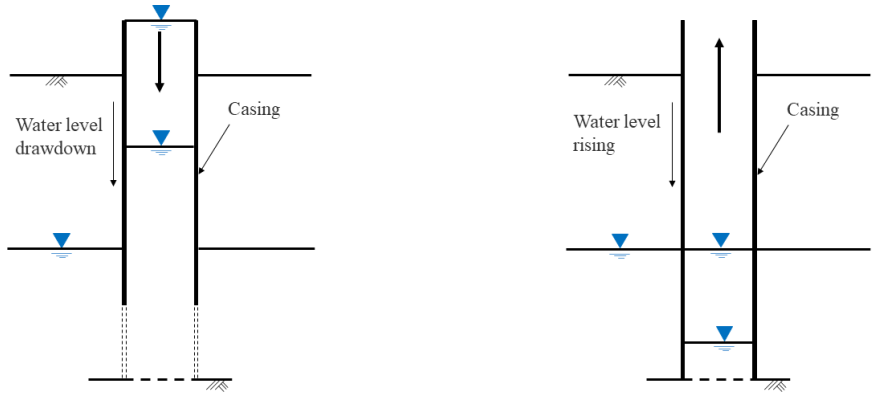
는 것으로 판단된다.

특히, 나공법이 공저법에 비해 주수방법(상부주수, 하부주수)에 의한 투수계수 차이가 더 큰 것으로 나타났는데 이는 나공법의 투수시험 대상단면이 공저법에 비해 넓어 막힘현상이 더욱 크게 영향을 미친 것으로 보인다.

또한, 실트질 모래층에서는 나공법이 투수계수가 크게 나타났고, 풍화토층에서는 공저법이 더 크게 나타났는데 이는 나공법에서 시추공벽 교란이 공저법에 비해 상대적으로 더 크게 나타나 투수계수에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.2 수위상승법에 의한 현장 투수시험 조건

Fig. 10은 현장 투수시험의 수위하강법과 수위상승법에 대한 모식도이다. 수위상승법의 경우 주변 지하수위보다 보링공 내 수위가 낮아 침투수압이 중력의 역방향으로 작용하기 때문에 보링공 내 세립토



(a) Water Level Descent Method (b) Water Level Rising Method

Fig. 10. Test Conditions When Applying the Field Permeability Test

침전에 의한 막힘현상이 수위하강법에 비해 상대적으로 적을 것으로 판단되어 수위하강법과 비교실험을 시행하였다.

3.2.1 나공법과 공저법의 수위상승법과 수위하강법에 의한 투수시험 결과

1) 나공법

지하수위 GL-1.45m 구간에서 나공법으로 동일한 보링공 내 연속해서 수위상승법과 수위하강법으로 투수시험을 하였고 투수시험 결과는 Fig. 11과 같다.

2) 공저법

지하수위 GL-2.55m 구간에서 공저법으로 동일한 보링공 내 연속해서서 수위상승법과 수위하강법으로 현장 투수시험을 하였고 투수시험 결과는 Fig. 12와 같다.

3.2.2 수위상승법과 수위하강법에 의한 투수시험 결과분석

Figs. 11과 12 및 Table 9와 같이 수위상승법(상부주수)과 수위하강법의 시험결과를 비교 분석한 결과 수위하강법을 이용한 시험방법이 수위상승법에 의한 투수계수보다 큰 것으로 나타났다.

이는 보링공 내 수위가 주변보다 낮아 상향 침투수

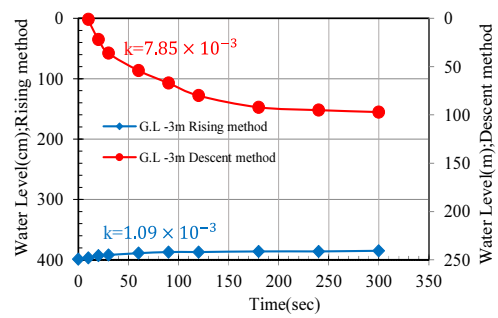


Fig. 11. Water Level Rising Method (Uncased-Method)

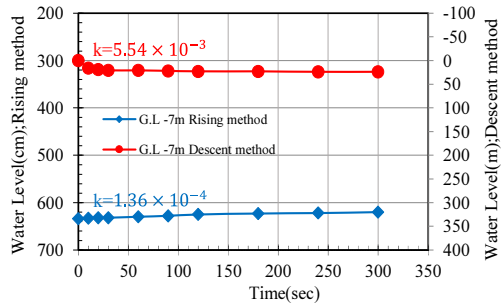


Fig. 12. Graph of Water Level Rising Method and Water Level Descent Method Permeability Test Result in Cased-Method

압이 발생하는 수위상승법 실험특성상 보링공 내 세립토에 의한 막힘현상의 영향이 적어 수위하강법의 실험값보다 더 크게 나올 것이라는 예상과는 달리

Table 9. Water Level Rising Method and Water Level Descent Method Field Permeability Test Results

Method	Depth (GL, -m)	Layer	Water Level (GL, -m)	k (cm/sec.)	Note
Water Level Descent Method	3.0~4.0	silty sand	1.45	7.85E-03	Uncased Method
Water Level Rising Method				1.09E-03	
Water Level Descent Method	7.0~8.0	silty sand	2.55	5.54E-03	Cased Method
Water Level Rising Method				1.36E-04	

시험결과 더 작은 투수계수 값이 산정되었다.

그 원인으로 수위상승법 시험 시 보링공 주변 배면 지반의 토질 중 점토질 성분이 포함되어 있는 지반의 경우 사실상 불투수층으로 작용하여 당초 기대했던 수두차가 작용하지 않은 점이 가장 큰 요인으로 판단되고, 지반의 수평투수계수와 수직투수계수가 상이한 투수계수의 이방성 등도 영향을 미친 것으로 판단된다.

다만, 이론적으로 수위상승법이 수위하강법에 비해 세립토에 의한 Clogging을 최소화 할 수 있기 때문에 수위상승법을 이용한 지반의 투수계수 산정방법에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 현장투수시험 시 보링공 내 흙탕물로 인해 시험대상 지반의 간극 Clogging을 고려하지 않아, 실제 지반의 투수계수와 상이하게 산정될 수 있어, 현장투수시험을 위한 주수 시 보링공 내 흙의 교란이 최소화 되도록 시험방법을 개선하고, 현장투수시험(상부주수법, 하부주수법) 결과를 비교하여 시험결과에 미치는 영향을 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구의 현장 투수시험결과 시험방법과 관계없이 투수시험 후반부에 투수계수가 감소하는 경향을 나타내며, 이러한 현상은 시간경과에 따른 시추공벽 교란 및 Clogging의 영향으로 판단되며, 이 경우 초기단계의 투수계수를 적용하는 것이 실제 지반과 유사하고, 공학적으로 안전할 것으로 판단된다.
2. 보링공 내 주수를 통한 수위하강법의 경우 보링공 내 현탁액 발생이 최소화 되도록 주수관을 보링공 저부까지 내려 상향으로 주수하는 하부주수법이 상부주수법에 비해 공법(나공법, 공저법)이나 토질(실트질 모래, 풍화토)과 관계없이 투수계수가 크게 나타났으며, 이는 천공 시 필연적으로 발생하는 케이싱 내부의 현탁액의 침전 등으로 인한 Clogging 현상이 투수계수에 영향을 미친 것으로 판단된다.
3. 현장 투수시험방법 중 시추공 내 양수를 통한 수위상승법 적용 시 막힘현상의 영향이 최소화되어 다른 시험방법에 비해 투수계수가 크게 나타날 것으로 예상하였으나, 시험결과 수위하강법의 하부주수법에 비해 투수계수가 작게 나타났다.

이는 보링공의 공벽교란 및 주변 지반의 토질(점성토 등 불투수층, 투수계수의 이방성 등) 특성이 영향을 미친 것으로 판단되며 이에 대한 영향분석은 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김상연·박종배·박용부·김동수(2014), "점성토 지반에 근입된 말뚝기초의 동적 원심모형 실험을 통한 응답 스펙트럼 평가", 「LHI Journal」, 5(2): 115~126.

2. 김탁용(2022), "지반의 현장투수시험에서 Clogging 현상이 투수계수에 미치는 사례연구", 석사학위논문, 경상국립대학교.
3. 이해진·조계춘·장일한(2021), "바이오폴리머-흙 처리(BPST) 기술의 강도 발현 거동에 대한 주요 영향인자 분석", 「LHI Journal」, 12(3): 109~119.
4. Attewell, P. B. and I. W. Farmer (1976), *Principles of Engineering Geology*, London: Chapman & Hall.
5. Chapuis, R. P. and M. Aubertin (2003), "Evaluation of the Kozeny-Carman Equation for Fine-Grained Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3): 616~628.
6. Darcy, H. (1856), *Les Fontaines Publiques de La Ville de Dijon*, Paris: Victor Dalmont.
7. Elhakim, A. F. (2016), "Estimation of Soil Permeability", *HBRC Journal*, 12(3): 282~287.
8. Kozeny, J. and P. C. Carman (1956), *Flow of Gases through Porous Media*, New York: Academic Press.
9. Yang, Y., J. Du, X. Shen, Z. Li, H. Jin and M. Jiang (2025), "Experimental Investigation on the Influence of Scale Effects on the Permeability Coefficient of Coarse-Grained Soil", *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 10(1): 1~16.

요 약

본 연구는 현장투수시험 중 보링 및 주수 과정에서 발생하는 지반 교란과 이에 따른 세립분의 침전으로 인해 발생하는 간극 막힘 현상(Clogging)이 투수계수 산정에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 수위하강법을 이용한 시험을 나공법(Uncased Method)과 공저법(Cased Method)으로 구분하고, 각각에 대해 상부주수법과 본 연구에서 제안한 하부주수법을 적용하여 비교 실험을 수행하였다. 시험 결과, 하부주수법이 상부주수법에 비해 막힘 현상이 감소하여 전반적으로 더 높은 투수계수를 나타냈으며, 특히 나공법에서 그 차이가 크게 나타났다. 수위상승법과 수위하강법 간 비교에서도 하강법이 더 높은 투수계수를 보였으나, 이는 보링공 주변 지반 조건(점성토, 불투수층 등)의 영향으로 해석되며, 향후 보다 정밀한 해석이 필요한 것으로 판단된다. 본 연구는 시험 방법에 따른 투수계수 차이를 규명함으로써, 보다 신뢰성 있는 현장투수시험 수행을 위한 개선방안을 제시하였다.

주제어: 투수계수, 현장투수시험, 나공법, 공저법, 수위하강법, 하부주수법, Clogging