

해안매립지 대심도 굴착지역의 불포화 함수특성에 따른 침투류 거동

Seepage Behavior with Unsaturated Soil-Water Characteristic in Reclaimed Deep Excavation Area

신방웅* · 이흥길**

Shin, Bang-Woong · Lee, Heung-Gil

Abstract

Development of underground space is conducted for various useful facility and underground structures and deep excavation technology for reclaimed area has been researched and developed. The seepage flow and behavior of phreatic line in reclaimed area was predominated by transient flow caused by tidal action. Also the soil-water characteristic relation is most important factor for transient flow analysis, therefore the research about the soil-water characteristic is strongly required. In this paper, laboratory tests (pressure cell, desiccator, and tensiometer test) and theoretical analysis were performed to investigate the soil-water characteristic such as air-entry value, metric suction, and residual water content. And the feasibility of prediction method for soil-water characteristic are presented by transient seepage analysis and comparison between analysis results and in-situ measured seepage flux in LNG TK-00 storage tank. Based on the result of laboratory and theoretical analysis, Fredlund and Xing's method provide to work out well for reclaimed ground soils. Also, the transient analysis result is more reasonable and effective for design of deep excavation work in coastal and reclaimed ground.

Keywords : Seepage analysis, Deep excavation, Unsaturated soil, Soil-water characteristic, Transient flow

요 지

지하공간의 효율적인 이용을 위하여 여러 분야에서 활발한 연구와 개발이 이루어지고 있으며 최근 들어 해안지역의 대심도 굴착을 통한 지하공간 활용방안에 관한 연구와 시공이 지속적으로 이루어지고 있다. 해안지역 및 매립지반의 침투류 거동은 조위영향에 의한 부정류 흐름이 발생되므로 부정류 흐름해석의 지배인자인 불포화토의 함수특성에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 불포화 함수특성에 따른 대심도 굴착지역의 침투류 거동을 분석하기 위하여 해안 준설매립지역 토사에 대한 함수특성시험을 수행하였으며, 불포화 함수특성에 따라 침투류 해석을 수행하여 실제 계측된 침투유량과 비교 분석하였다. 해안 매립지 토사에 대한 함수특성시험 결과 및 함수특성 계수에 대한 분석결과, Fredlund and Xing의 경험방정식이 해안 매립지반 토사에 대하여 높은 정확도로 실험결과 값을 나타내었다. 함수특성을 고려한 침투 해석 결과, 부정류해석 결과가 정류해석 결과에 비하여 양수시험 결과 및 실제 계측된 용수량과 근접한 침투유량이 도출되어 해안 준설매립지반과 같이 불포화토 특성이 지배적인 지반에 대해서는 함수특성을 고려한 부정류 침투해석을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

주요어 : 침투류 해석, 대심도 굴착, 불포화토, 함수특성, 부정류

* 정회원 · 충북대학교 총장

** 정회원 · 충주대학교 토목공학과 교수

1. 서론

지하공간의 효율적인 이용을 위하여 여러 분야에서 활발한 연구와 개발이 진행되고 있으며 최근에는 토목분야에서도 대심도 굴착을 통한 지하공간 활용방안에 관한 연구와 시공이 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 대심도 지하공간을 확보하기 위해서는 굴착공법의 효과적인 선정이 매우 중요하며 또한 주변 여건과 지층을 구성하는 토질조건 및 지하수의 상태 등 굴착시공과 관계되는 주요 인자들이 무수히 작용하고 있다. 이러한 대심도 굴착공사에서 발생하는 시공 상의 여러 가지 문제점들 중에 굴착에 따른 지하수위의 변동 및 지하수 용출에 따른 침투류 거동분석이 중요한 설계요소로 작용한다. 대심도 굴착에서 발생하는 굴착면에서의 침투유량에 대한 처리대책을 적절히 수립하지 못한 상태에서 시공을 하게 되면 터파기 시공에 따른 지하수위의 저하 및 부지내로의 지하수 유입 등으로 시공 상의 어려움이 발생하게 되며 이로 인하여 인접주변 지역에도 피해를 유발시킬 수 있는 문제점들이 항시 대두되어 왔다. 현재 국내의 일반적인 대심도 굴착에서 침투유량 산정은 지반조사와 간단한 실내시험 결과를 이용하여 침투류 해석을 실시하고 있는 실정이므로 굴착과정에서 발생하는 침투유량을 정확히 산정하고 이에 걸맞은 양수시설을 갖추어 시공을 시행한다면 보다 안전하고 효과적인 굴착시공이 가능하리라 판단된다. 특히 해안지역 및 매립지반에 대한 대심도 굴착에는 조위영향에 의한 부정류(transient flow)흐름이 침투류 거동을 지배한다. 따라서 부정류 흐름해석의 지배인자인 불포화토의 함수특성에 대한 연구가 요구된다.

불포화토(unsaturated soil)는 토립자를 제외한 물과 공기가 차지하고 있는 공극이 일부만 물로 채워진 경우를 말하며, 불포화토의 함수특성 연구는 불포화토의 구성연구에서부터 시작되었다. Cronney(1952)는 인공적으로 다져진 점토는 점토입자가 균등한 상태로 존재하는 것이 아니라 점토가 뭉쳐 비교적 큰 공기공극을 가지는 구조형태를 보인다고 발표하였다. Seed 등(1960)은 다짐 점토의 구조는 최적함수비보다 낮은 상태에서 다지면 입단구조를 가지며 최적함수비보다 높은 상태에서 다지면 이산형태의 구조를 가진다고 발표하였다.

Brackley(1975)는 불포화된 점토의 구조에 대한 모델을 제시하면서 'packet'개념 즉, packet내의 공극

(packet void)은 물로 포화되어 있고, packet내의 공극에는 물과 공기로 채워져 있는 구조를 소개하였다. 이러한 구조적인 결합은 Baver(1972)이 설명하고 있다. Fredlund 등(1994)은 불포화토는 물과 공기의 접촉면에 발생하는 접촉압을 고려하여 토립자, 물, 공기 외에 물과 공기의 접촉면(contractile skin)도 하나의 구성요소로 4상 구조(solids, water, air, contractile skin)의 함수특성 이론을 발표하였다.

해외 연구기관과 연구자들에 의하여 지금까지 많은 종류의 흙에 대한 함수특성 실험과 해석모델 연구가 이루어져 상당히 진보된 연구결과를 발표하였다. 그러나 우리나라의 흙에 대한 함수특성 연구결과는 전무한 실정이기 때문에 불포화 지반의 침투해석에 마땅히 입력할 계수나 함수특성 값이 부재한 실정이다. 우리나라에서는 국토를 확장하기 위하여 많은 준설매립을 시행하여 택지와 공업단지를 건설하고 있으며, 이러한 준설매립지역은 조위영향에 의한 지하수위의 변화가 시간적 변화에 따라 지속적으로 발생하는 불포화토 지반을 형성하게 된다. 특히 서해안의 경우에 조위변화가 커서 지하수위 변화의 폭도 클 것으로 예상되어 다른 어떤 지반보다도 함수특성에 관한 연구가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 일차적으로 준설매립지의 주요 토사인 준설토와 그 하부층에 존재하는 모래, 그리고 복토재로 사용되는 화강풍화토에 대한 함수특성을 규명하여 불포화 지반의 침투류 해석에 필요한 계수를 도출하였으며, 두 번째 실내 함수특성시험 결과를 함수특성 예측모델에 적용하여 비교 분석하였다. 최종적으로 해안 매립지역에서의 대심도 굴착시공에서 발생하는 지하수 용출에 따른 양수량을 합리적으로 산정하기 위하여 LNG 지하저장 탱크 굴착공사 지역에 대하여 함수특성을 고려한 침투해석을 통하여 굴착에 따른 침투유속 및 침투유량을 산정하고, 실제 양수시험 및 굴착과정에서 침투유량을 계측한 결과와 비교 분석을 수행하였다.

2. 함수특성 이론 및 침투류 해석

2.1 불포화 함수특성 예측

불포화 영역에 대한 침투류 해석을 하기 위해서는 불포화토의 특성을 나타내는 모델과 입력변수의 결정이 요구된다. 최근까지 많은 연구자들의 연구를 통하여 불포화토의 모델과 입력변수들은 함수특성곡

선으로 대표화 되었다. 불포화토의 종류에 따른 함수특성곡선의 예측방법은 크게 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 건조 및 습윤곡선을 얻는 함수특성시험을 통한 경험적 예측방정식을 이용하는 방법이 있으며, 두 번째는 입도분포와 습윤단위중량으로 함수특성곡선을 예측하는 방법이 있다. 본 연구에서는 실내시험을 통한 함수특성곡선으로, Fredlund and Xing(1994), van Genuchten(1980), Mualem(1976) 등에 의하여 제안된 경험방정식을 적용하여 실험결과와 경험방정식에 의한 함수특성곡선을 비교하였다. 각각의 경험방정식은 식 (1)~(3)에 나타낸 바와 같다.

$$\omega_w = \omega_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\Psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \times \left[\frac{1}{\left[\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{\Psi}{a_f}\right)^{n_f}\right]\right]^{m_f}} \right] \quad (1)$$

여기서, ω_w 는 모관흡인력 단계별 중량함수비, ω_s 는 포화중량함수비, a_f 는 공기함입저항치와 관련된 계수(kPa), n_f 는 공기함입저항치를 초과한 후의 경사와 관련된 계수, m_f 는 잔류함수비와 관련된 계수, h_r 는 잔류함수비에 대응하는 모관흡인력, Ψ 는 모관흡인력을 나타낸다.

$$\omega_w = \omega_{rv} + (\omega_s - \omega_{rv}) \left[\frac{1}{\left[1 + (a_{vg}\Psi)^{n_{vg}} \right]^{m_{vg}}} \right] \quad (2)$$

$$\omega_w = \omega + (\omega_s - \omega) \left[\frac{1}{\left[1 + (a_m\Psi)^{n_m} \right]^{(1 - \frac{1}{n_m})}} \right] \quad (3)$$

여기서, ω_{rv} , ω_{rm} 는 잔류중량함수비, a_{vg} , a_m 는 공기함입저항치와 관련된 계수(kPa), n_{vg} , n_m 는 공기함입저항치를 초과한 후의 경사와 관련된 계수, m_{vg} 는 잔류함수비와 관련된 계수를 나타낸다

2.2 불포화영역의 침투류 해석

불포화 영역의 침윤선은 임의 지점에서 대기압력 $P_a = 0$ 인 지점까지 수주가 올라가는 높이를 연결한

선이다. 침윤선은 포화 및 비포화 경계선이며, 침투류 문제는 흐름 포텐셜(fluid potential) 또는 표면장력 포텐셜(capillary potential)을 이용하는 것이 일반적이다. 흐름 포텐셜 ϕ 은 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = g(z - z_0) + \int_{p_0}^p \frac{1}{\rho} dp \quad (4)$$

여기서, z_0 는 기준표고(m), P 는 P_0 를 기준으로 하여 측정된 수압, P_0 는 기준압력 (보통대기압), ρ 는 유체(물, 해수) 밀도, g 는 중력가속도를 나타낸다. 대기압을 기준으로 하고($P_0=0$), 기준점($z_0=0$)이 원점인 경우 식 (4)는 식 (5)와 같다.

$$\phi = gz + \int_0^p \frac{1}{\rho} dp \quad (5)$$

단위 면적을 가진 높이의 dh 의 액주의 압력 dp 는 식 (6)과 같으므로

$$dp = \rho dh \quad (6)$$

흐름 포텐셜은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\phi = gz + \int_0^h g dh = g(z + h) \quad (7)$$

여기서, h 는 압력수두, 또한 전수두 H 는 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$H = \phi/h = h + z \quad (8)$$

따라서 침윤선은 식 (8)의 전수두 H 를 연결한 선으로 압력수두 h 는 포화되면 양의 값으로, 비포화에서는 음의 값을 갖는다. 흙속의 물의 흐름에서 $h+z$ 는 수두관에 올라가는 높이로 보통 수치해석 프로그램으로 계산한다. 그림 1과 같이 침윤선의 높이가 변하면서 임의의 요소 x_1, h_1, x_2, h_2 를 통과하여 침투가 발생할 경우에 침투유량을 계산하면 다음과 같다.

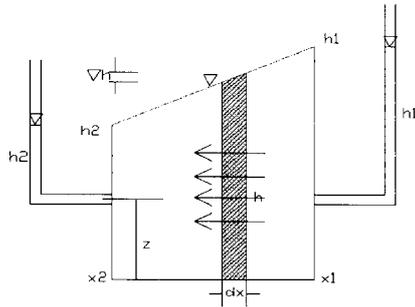


그림 1. 침윤선 변화에 따른 침투유량 산정

그림 1에서 dx 를 통과하는 유량은 다음 식 (9)를 통하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A_x &= bh \\
 \Delta Q &= ki_x A_x = k \frac{\Delta h}{dx} dh \\
 Q &= \int_{x_1}^{x_2} Q_x dx = bk \int_{h_1}^{h_2} h dh \\
 Q &= Q_x (x_1 - x_2) = bk \left(\frac{1}{2} h^2 \right)_{h_2}^{h_1} = bk \frac{1}{2} (h_1^2 - h_2^2) \\
 \therefore Q &= \frac{bk(h_1^2 - h_2^2)}{2\Delta x} \quad (9)
 \end{aligned}$$

여기서, b 는 유체가 통과하는 단위 폭. k 는 성토체의 투수계수, h_1, h_2 는 침윤선의 높이, Δx 는 유체가 통과하는 거리이다.

3. 실내시험방법 및 결과분석

3.1 해안준설매립지 토사

그림 2와 그림 3은 각각의 시료에 대한 입도분포곡선과 다짐곡선을 나타낸 것이다. 모래는 유효입경이 0.12mm이고 균등계수가 8.2, 곡률계수가 1.12로 나타났다. 준설토는 유효입경이 0.005mm이고 균등계수가 14.3, 곡률계수가 8.21로 나타났으며, 화강풍화토의 유효입경은 0.07mm, 균등계수가 7.14, 곡률계수가 1.14로 나타났다. 표준다짐시험결과, 모래의 최대건조단위중량은 1.95t/m³, 최적함수비는 11.6%로 나타났고, 준설토의 최대건조단위중량은 1.72t/m³, 최적함수비는 15.2%이다. 화강풍화토는 최대건조단위중량은 1.87t/m³, 최적함수비는 12.4%로 나타났다. 변수위 투수시험에 의한 모래의 투수계수는 2.1×10⁻⁴cm/sec이며, 준설토의 경우에는 1.7×10⁻⁵cm/sec이며, 화강풍화토는 2.0×10⁻⁶cm/sec로 나타났다. 해안준설매립 토

사의 지반공학적 특성시험 결과를 표 1에 나타내었다.

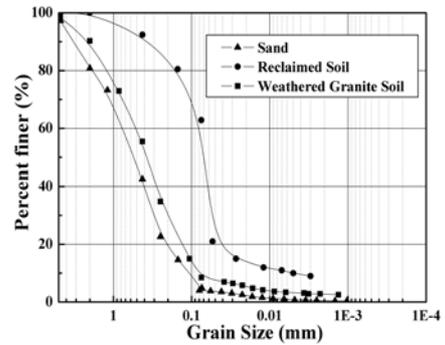


그림 2. 입도분포곡선

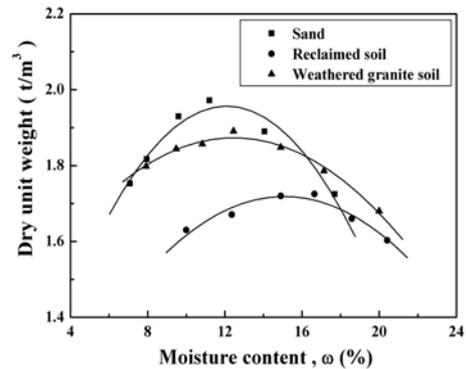


그림 3. 다짐곡선

표 1. 해안 준설매립토사의 지반공학적 특성

특성 \ 시료	모래	준설토	화강풍화토
G_s	2.65	2.69	2.67
γ_{dmax} (t/m ³)	1.95	1.72	1.87
ω_{opt} (%)	11.6	15.2	12.4
D_{10} (mm)	0.11	0.005	0.07
C_u	8.2	14.2	7.14
C_c	1.12	8.21	1.14
k_s (cm/sec)	2.1×10 ⁻⁴	1.7×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁶
USCS	SW-SM	ML	SM

3.2 실험방법

3.2.1 건조곡선 시험

건조곡선 시험은 흡인력 단계에 따라 데시게이터 시험과 압력셀 시험을 실시하였다. 데시게이터 시험은 포화염용액을 이용하였으며, 압력셀 시험은 공기함입저항치가 큰 세라믹판을 이용하였다. 압력셀 시험은 내부에 공기압을 가해주어 압력셀에서 추출되는 물의 양을 측정하여 변화하는 함수비를 측정하는 방법이다. 각각의 시험장비는 그림 4, 그림 5에 나타내었다. 압력셀 실험방법은 시료를 높이가 2cm이고 직경이 10cm인 몰드에 시료를 성형한 후에 각 공기압 단계별 지체시간은 공기함입저항치가 500kPa인 세라믹판의 경우는 시간당 1.0kg/cm²의 공기압 조건에서 60ml 정도의 물을 통과시킨다. 본 실험에서는 공기압이 1.0kg/cm²이하인 단계에서는 대략 48시간 이상의 지체시간을 두었고, 그 이상의 압력단계에서는 대략 24시간의 지체시간을 두었다. 그러므로 압력셀 실험은 단계적으로 탈수를 시키면서 수행됨으로 건조곡선이 얻어진다.



그림 4. 데시게이터 시험장치



그림 5. 압력셀 시험장치

3.2.2 습윤곡선시험

함수특성곡선의 습윤곡선 측정을 위한 텐시오미터는 길이가 18inch이며 100kPa의 공기함입저항치를 가진 세라믹 컵과 플라스틱 튜브 및 100kPa까지 측정 가능한 게이지 등 세 부분으로 구성된다. 실험방법은 시료의 높이 13.0cm, 직경 10.0cm의 몰드에 압력셀 실험과 같은 조건의 건조단위중량으로 시료를 재성형 한 후에 텐시오미터를 삽입한다. 게이지의 부압은 계속 증가하게 되는데 평형상태에 도달하게 되면 게이지의 읽음 값은 간극수의 부압과 같게 된다. 평형상태에 도달하기 위한 시간은 보통 24시간이면 충분하므로 각 함수비 단계별로 24시간 후의 게이지 읽음 값을 부의 간극수압으로 측정하였다. 함수비를 단계별로 증가시키기 위하여 전 함수비 단계의 실험이 끝나면 흙에 물을 첨가시켜 교반한 후에 다음 실험단계를 진행시킨다.

3.3 시험결과 분석

3.3.1 함수특성시험 결과

본 연구의 실험결과에 따른 함수특성시험 결과는 그림 6에 나타난 바와 같다. 모관흡인력의 증가에 따른 함수비의 감소는 No. 200번체 통과량이 적고 상대적으로 조립질인 모래에서 가장 급격하게 나타났으며, 준설토와 화강풍화토에서는 완만한 곡선을 그리며 감소하였다. 모래의 경우에 모관흡인력이 2kPa까지는 거의 함수비의 감소가 발생하지 않다가 그 이상의 모관흡인력에서는 급격한 함수비의 감소를 보였으며, 100kPa 정도에 이르러서는 함수비의 감소가 다소 줄어들며 잔류함수비상태로 진행되었다. 준설토의 경우에 모관 흡인력이 10kPa까지는 거의 포화상태를 유지하다가 그 이상의 모관 흡인력에서 급격한 함수비의 감소가 발생하였으며, 400kPa까지도 어느 정도의 함수비를 유지하면서 계속적으로 함수비가 감소하였다. 화강풍화토의 경우는 8kPa 정도의 모관흡인력에서 급격한 함수비 감소가 일어났으며 높은 흡인력 범위까지 함수비의 감소가 가장 완만하였다. 모관흡인력이 20kPa까지는 화강풍화토에 비하여 준설토의 함수비 감소율이 적었으나 그 이상의 범위에서는 준설토의 함수비 감소율은 계속적으로 증가하였고 화강풍화토는 상대적으로 적은 함수비 감소율을 보였다. 모관 흡인력이 91,000kPa

과 150,000 kPa인 범위 내에서 실험한 데시게이터 실험결과, 모래의 함수비가 가장 작게 나타났고, 준설토와 화강풍화토에서는 거의 비슷한 함수비로 모래의 함수비보다 높게 나타났다.

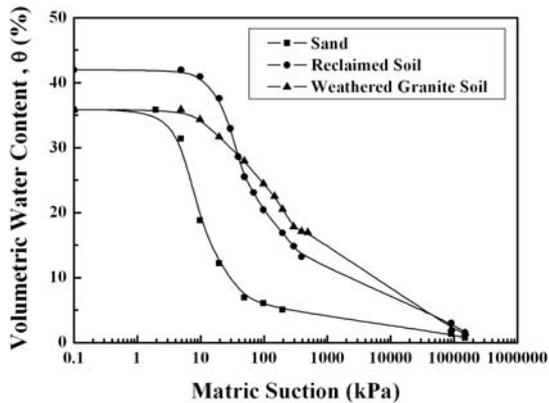


그림 6. 함수특성시험 결과

3.3.2 함수특성 계수분석

본 논문에서는 세 가지의 함수특성곡선 경험방정식으로 방정식별 계수를 결정하여 모래, 준설토, 화강풍화토에 대하여 실험결과를 이용할 수 있게 하였다. 실험결과 값과 각각의 방정식의 결정계수를 구하여 시료별로 가장 높은 정확도를 나타내는 방정식을 결정하였다. 실험결과와 경험방정식의 분석은 SoilVision (ver. 3.04)을 사용하여 분석하였으며, 경험방정식별 계수를 결정하기 위하여 최소제곱회귀분석을 이용하였다. 각각의 시료에 대한 함수특성 계수분석 결과는 그림 7~9과 표 2에 나타낸 바와 같다.

Fredlund and Xing의 경험방정식은 모래, 준설토, 화강풍화토 모두에 대하여 결정계수가 0.999 이상의 높은 적합성을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히, 데시게이터 실험을 실시한 높은 모관 흡인력 범위에서는 다른 방정식에 비하여 상당히 정확한 결과를 나타내었다. 모든 시료에 대하여 높은 정확성을 보이는 Fredlund and Xing의 방정식으로 회귀분석하여 결정된 공기함입저항치와 잔류체적함수비는 No. 200 번째 통과량에 대하여 그림 10와 같은 선형관계를

보이며, 공기함입저항치는 지수함수관계를 나타내었다. 각각의 시험결과에 대한 회귀식은 그림 내에 명기하였다.

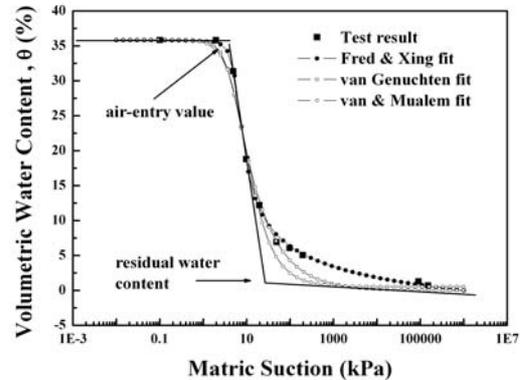


그림 7. 모래에 대한 회귀분석결과

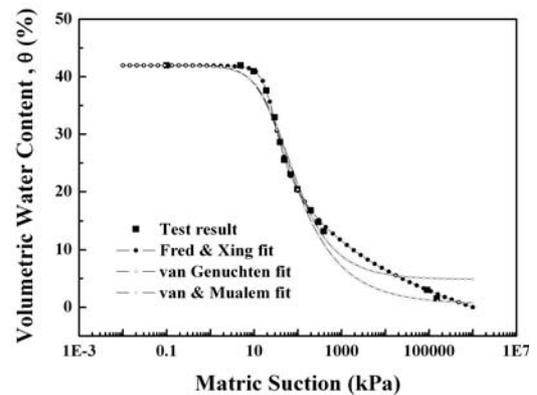


그림 8. 준설토에 대한 회귀분석결과

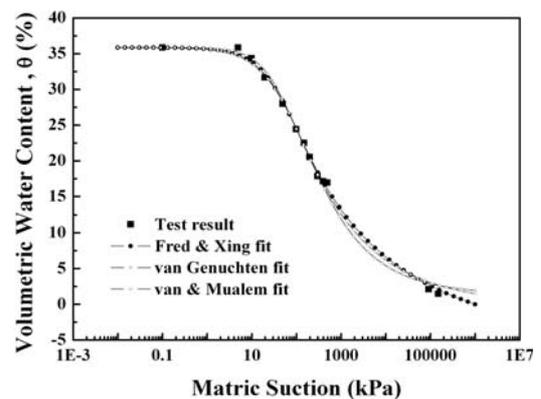


그림 9. 화강풍화토에 대한 회귀분석결과

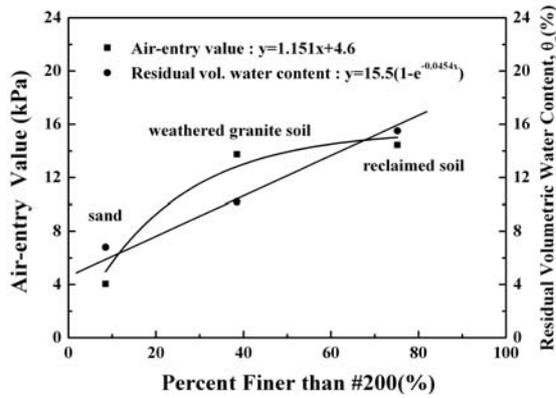


그림 10. No. 200번체 통과량에 따른 공기함입저항치와 잔류체적함수비

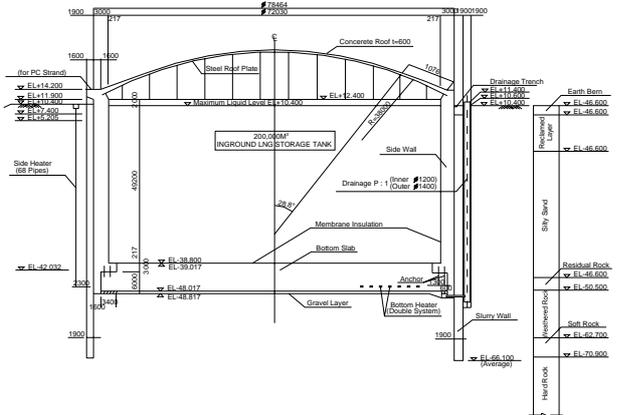


그림 11. 침투류 해석 구조물 및 지반조건

표 2. 함수특성 계수분석결과

예측모델	경험 계수		분석결과	모래	준설토	화강풍화토
Fredlund & Xing	a_f	5.57 kPa	공기함입저항치	4.05 kPa	14.44 kPa	13.74 kPa
	n_f	4.65	잔류체적함수비	6.80 %	15.50 %	10.20 %
	m_f	0.59	결정계수(R^2)	0.999762	0.999728	0.999989
	h_r	18.2				
van Genuchten	a_{vg}	0.23 (1/kPa)	공기함입저항치	2.81 kPa	10.95 kPa	15.26 kPa
	n_{vg}	2.72	잔류체적함수비	0.00 %	4.85 %	1.40 %
	m_{vg}	0.25	결정계수(R^2)	0.9745289	0.999748	0.9978937
Mualem	a_m	0.15 (1/kPa)	공기함입저항치	3.18 kPa	10.29 kPa	15.10 kPa
	n_m	2.07	잔류체적함수비	0.52 %	0.57 %	0.00 %
			결정계수(R^2)	0.9886007	0.9909415	0.995791

4. 침투류 해석

4.1 현장조건 및 침투류 해석개요

본 연구에서 침투류 해석을 수행한 해안매립지반 대심도 굴착공사 현장은 저장용량 20만 kl급의 LNG 지하식 저장탱크 TK-00이다. 탱크의 내경은 72m, 굴착심도는 EL-49.2m로 설계되었으며, 탱크의 기초형식은 풍화암층을 지지층으로 하는 직접기초형식으로 설계되었다. 침투대책으로는 약 1.2m의 자갈층을 포설하며, 배수층을 포설한 후에 9m 높이의 바닥슬래브를 타설하여 직

접기초를 완성하게 된다. 저장탱크 단면도와 대표지층 단면도는 그림 11에 나타낸 바와 같다. 본 연구의 침투류 해석은 불포화 함수특성에 따른 대심도 굴착지역의 침투류 거동을 분석하기 위하여 정류침투해석과 조위함수 및 불포화 함수특성을 고려한 부정류침투해석을 수행하였다.

4.2 침투류 해석조건

정류 및 부정류 조건에 따른 침투류 해석은 TK-00 지하저장 탱크의 상세설계 단면(슬러리월 시공)과 양수시험 결과를 바탕으로 과다 용수 대책공

법으로 적용된 커튼 그라우팅의 시공 전·후의 침투류 거동을 분석하였다. 본 연구의 침투류 해석은 SEEP/W 프로그램을 이용하였으며, 적용한 해석모델은 Cylindrical Axisymmetric 모델을 적용하였다. 또한 정류, 부정류해석을 공동 경계조건은 바다하부 경계층(H=150m)은 불투수층으로 굴착바닥면과 슬러리월은 투수층으로 고려하였으며 해석영향반경은 150m까지 고려하였다.

4.2.1 정류해석조건

본 연구의 침투류 해석에 적용한 투수계수는 상세설계를 위한 지반조사 결과와 양수시험 결과 구분하여 적용하였다. 암반층의 투수계수는 수압시험에 의한 결과이며, 각 지층별 투수계수는 표 3에 나타낸 바와 같다. 또한 슬러리월의 투수계수는 $1.07 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 를 사용하였으며, 커튼그라우팅의 평균심도는 11m이며, 방위별 시공단면을 고려하여 적용하였다.

4.2.2 부정류 해석조건

조위의 변화에 따른 침투류 해석을 실시하기 위한

조위주기함수는 해수면의 상승과 하강을 12시간으로 근사화하고 진폭을 고극조위 $EL \pm 4.52\text{m}$ 를 기준으로 한 sine함수로 설정하였다. 또한 지하수위는 임의의 시간 및 수위조건의 함수로 변화하기 때문에 연구대상지역의 인근에서 실제 계측된 조위자료 분석을 통하여 조위조건을 적용하였다. 본 연구대상지역의 조위계측자료는 TK-00지하저장 탱크에서 인접해 있는 두 지점에서 계측된 결과를 이용하였으며 계측된 결과에 대한 sine함수분석을 수행하여 조위함수를 결정하였으며, 그림 12에 나타낸 바와 같다. 전체 침투류 해석의 시간조건은 준설 매립지만 내 간극수압 및 침윤선이 주기적 균형 상태에 도달했을 때의 결과를 얻기 위하여 주어진 경계조건에 대하여 16일 동안의 침투해석을 실시하여 결과를 도출하였다. 해석에 적용한 구성 재료는 10개의 층으로 구성되며, 실내 함수특성시험 및 분석을 수행한 매립준설토, 모래, 풍화토층에 대하여는 실험결과에 따른 입력 자료로 활용하였으며, 이외의 구성 재료에 대해서는 SEEP/W 프로그램에 내재되어 있는 함수특성 함수를 선정하여 모델링하였다. 본 침투해석에 사용한 SEEP/W 프로그램을 통한 대표단면에 대한 격자요소망 및 경계조건은 그림 13에 나타낸 바와 같다.

표 3. 지층별 설계투수계수

토층	상부층심도(m)	두께(m)	투수계수, k(cm/sec)	
			상세설계	C.G. 설계
준설토	7.4	10.0	3.7×10^{-4}	3.7×10^{-4}
모래층1	-2.6	14.3	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
점토층1	-16.9	5.4	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
모래층2	-22.3	15.3	1.5×10^{-4}	1.5×10^{-4}
점토층2	-37.6	1.5	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
모래질	-39.1	8.2	6.5×10^{-4}	6.5×10^{-4}
풍화토층	-47.3	4.0	6.5×10^{-4}	6.5×10^{-4}
풍화암층	-51.3	12.0	5.1×10^{-5}	3.7×10^{-4}
연암층	-63.3	6.8	3.0×10^{-5}	6.5×10^{-4}

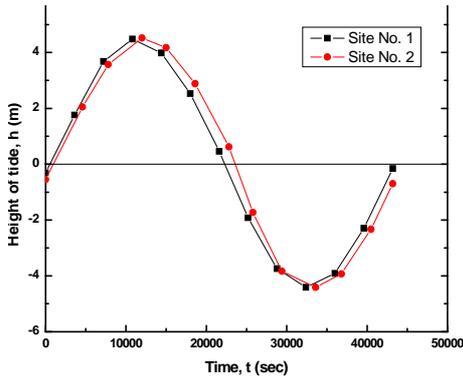


그림 12. 침투류해석에 적용한 조위함수

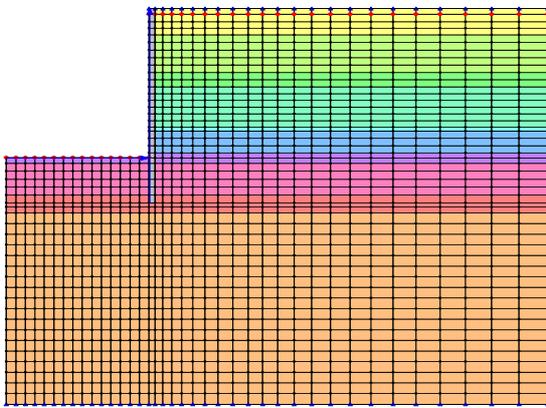


그림 13. 침투류해석 격자요소망 및 경계조건

4.3 침투류 해석결과 및 분석

SEEP/W 프로그램을 이용한 침투류 해석은 상세 설계, 커튼그라우팅 시공 전 및 시공 후의 3가지 경우에 대하여 분석을 실시하였다. 침투유속 및 침투유량 분석한 결과는 표 4와 표 5에 나타낸 바와 같으며, 침투류 해석에 의한 침투유속 및 침투유량 분포도는 각각 그림 14~16, 그림 17~20에 나타낸바와 같다. 각각의 해석결과에서 보여주는 바와 같이, 부정류해석에 의한 침투유속은 정류해석의 침투유속보다 약 1.10~2.16배 크게 도출되었다. 이러한 결과는 최대수위조건과 정류투수계수 조건을 고려한 정류해석에 비하여 불포화토의 함수특성과 조위영향에 따른 체적함수비의 변화 및 불포화 투수계수의 변화에 기인한 것으로 사료되며, 침투유량에서도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 침투류 해석결과에 따른 침투유량은 함수특성 및 조위영향을 고려한

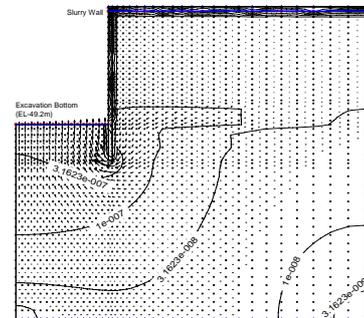
부정류해석 결과 440.09m³/day이며, 정류해석에 의한 침투유량과 비교하면 상세설계 검토의 경우에 약 38%, 커튼그라우팅 시공전의 검토한 경우에 약 45%, 최종 커튼그라우팅 시공후의 검토한 경우에는 약 35% 크게 발생되었다. 또한 시공 전에 수행한 양수시험에 의한 침투유량이 488m³/day이며, 시공과정에서 지하수위를 굴착면 하부로 유지시키기 위한 양수우물에서 계측된 평균용수량(그림 21)이 524m³/day로서 부정류해석에 의한 침투유량이 현장에서 계측된 결과와 근접한 것으로 도출되었다. 이러한 원인은 수위경계조건과 해석지반의 불포화토의 함수특성의 영향으로 볼 수 있다. 동일수위조건만을 고려하는 정류해석에 비하여 조위영향에 따라 침윤선의 분포변화가 해석결과에 영향을 미치고 있으며, 특히 포화투수계수 조건만을 고려한 정류해석에 비하여 체적함수비 및 불포화 투수계수의 변화와 같은 불포화토의 함수특성을 고려한 해석이 비교적 근접하는 결과로 도출된 것으로 판단된다.

표 4. 침투유속 분석결과 (m/sec)

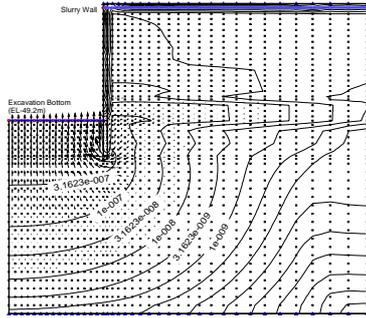
	상세설계 검토	커튼그라우팅 시공 전	커튼그라우팅 시공 후
정류해석	1.13×10 ⁻⁷	0.92×10 ⁻⁶	2.32×10 ⁻⁷
부정류해석	2.45×10 ⁻⁷	1.02×10 ⁻⁶	3.16×10 ⁻⁷

표 5. 침투유량 검토결과 (m³/day)

	상세설계 검토	커튼그라우팅 시공 전	커튼그라우팅 시공 후
정류해석	250.95	1129.77	327.72
부정류해석	346.73	1641.59	440.09

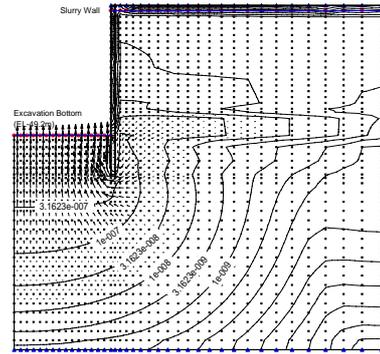


(a) 정류해석



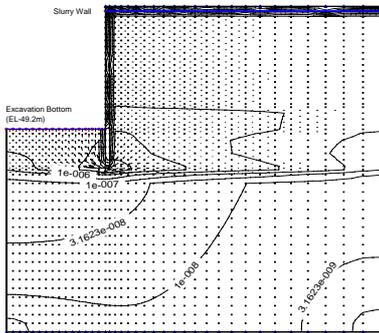
(b) 부정류해석

그림 14. 침투유속분석결과(상세설계)

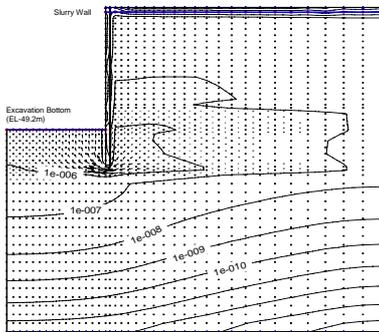


(b) 부정류해석

그림 16. 침투유속분석결과(커튼그라우팅 시공 후)

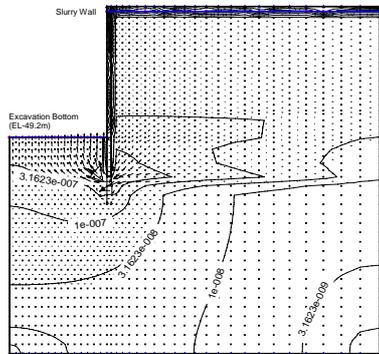


(a) 정류해석



(b) 부정류해석

그림 15. 침투유속분석결과(커튼그라우팅 시공 전)



(a) 정류해석

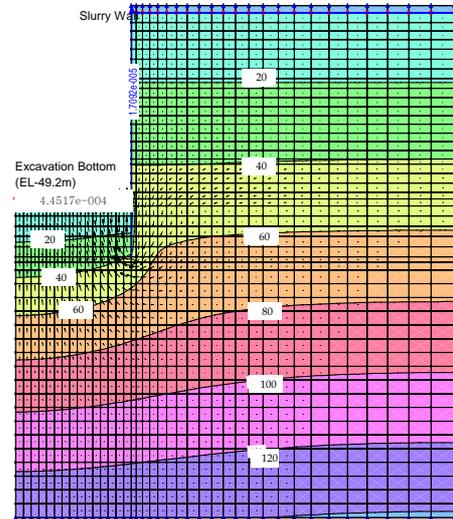


그림 17. 상세설계시 정류해석결과

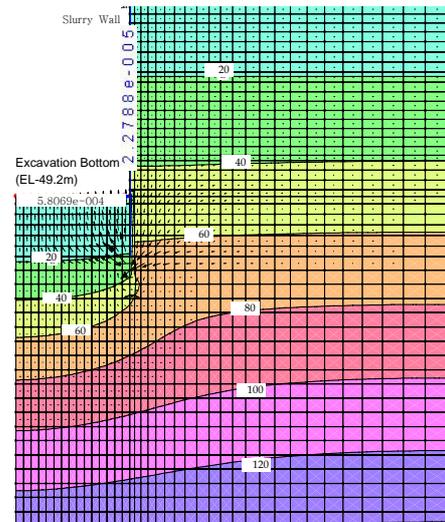


그림 18. 커튼그라우팅 시공 후 정류해석결과

5. 결 론

본 연구에서는 불포화 함수특성에 따른 대심도 굴착지역의 침투류 거동을 분석하기 위하여 해안 준설매립지역 토사에 대한 함수 특성시험을 수행하였으며, 불포화 함수 특성에 따라 침투류 해석을 수행하여 실제 계측된 침투유량과 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 해안매립지 토사에 대한 함수특성시험 결과, 각 시료별로 함수특성시험 결과를 가장 적합하게 나타내는 방법은 모래와 화강풍화토에서는 Fredlund and Xing의 경험방정식이며, 준설토의 경우 van Genuchten의 경험방정식으로 나타났다. Fredlund and Xing의 방정식은 세 가지 시료 모두에 대하여 높은 정확도로 실험결과가 나타내었다.
- (2) 함수특성 계수분석 결과, Fredlund and Xing의 경험방정식은 모래, 준설토, 화강풍화토 모두에 대하여 결정계수가 0.999 이상의 높은 적합성을 나타내는 것으로 도출되었다. 특히 데시게이터 실험에 적용된 높은 모관흡인력 범위에서는 다른 방정식에 비하여 상당히 정확한 결과를 나타내었다.
- (3) LNG 지하저장 탱크에 대하여 침투류 해석한 결과에서, 부정류해석에 의한 침투유속 및 침투유량이 정류해석 결과보다 크게 도출되었으며, 양수시험 결과와 계측된 용수량과 근접한 침투유량이 도출되었다.

따라서 해안 준설매립지반과 같이 불포화토의 특성이 지배적인 지반에 대해서는 함수특성 및 조석침투 영향을 고려한 부정류침투해석을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2005년 8월 2일)

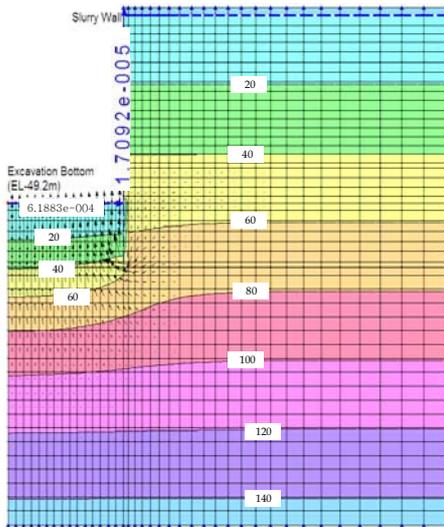


그림 19. 상세설계시 부정류해석결과

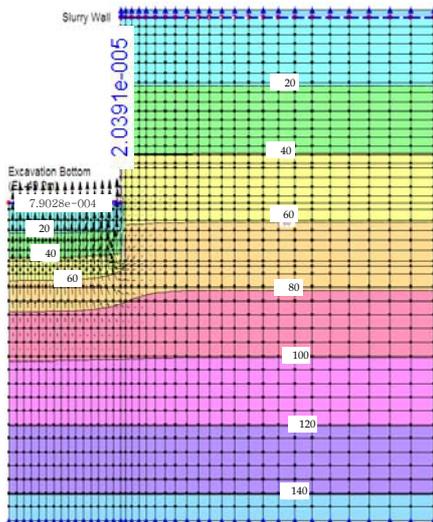


그림 20. 커튼그라우팅시공후 부정류 해석 결과

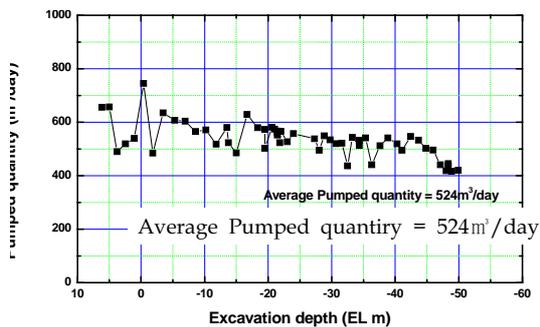


그림 21. 시공 굴착심도별 계측용수량 (양수우물 계측 값)

참 고 문 헌

1. Baver, L. D., Gardner, W. H., and Gardner, W. R., (1972), Soil Physics. 4th edition, New York, John Wiley and Sons Inc.
2. Brackley, I. J. A., (1975), A Model of Unsaturated Clay Structure and its Application to Swell Behavior. Proceedings 6th Africa Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Durban, Balkema.
3. Brooks R. H. and Corey, A. T., (1964) Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Hydrology Paper, No. 3, 27, pp. 71~78.
4. Burdine, N. T., (1953), Relative Permeability Calculation from Pore Size Distribution Data. Petroleum Trans. AIME, Vol. 198, pp. 71~77.
5. Croney, D., (1952), The Movement and Distribution of Water in Soils. Geotechnique, 3(1), pp. 1~16.
6. Fredlund, D. G., Xing, A., (1994), Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 521~532.
7. Gardner, W. R., (1956) Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. HRB Special Report 40 Inter. Symp. on Physico-Chemical Phenomenon in soils, Washington D.C., pp. 78~87.
8. Mualem, Y., (1976), A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resource Research, Vol. 12, pp. 513~522.
9. Seed, H. B., Mitchell, J. K., and Chan, C. K., (1960), The Strength of Compacted Cohesive Soils. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, Vol. 2, Colorado, pp. 877~964.
10. van Genuchten, M. T., (1980),. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44, pp. 892~898.