

투수계수의 공간적 변동성을 고려한 층상지반에 대한 확률론적 침투해석

Probabilistic Seepage Analysis Considering the Spatial Variability of Permeability for Layered Soil

조 성 은¹ Cho, Sung-Eun

Abstract

In this study, probabilistic analysis of seepage through a two-layered soil foundation was performed. The hydraulic conductivity of soil shows significant spatial variations in different layers because of stratification; further, it varies on a smaller scale within each individual layer. Therefore, the deterministic seepage analysis method was extended to develop a probabilistic approach that accounts for the uncertainties and spatial variation of the hydraulic conductivity in a layered soil profile. Two-dimensional random fields were generated on the basis of the Karhunen-Loève expansion in a manner consistent with a specified marginal distribution function and an autocorrelation function for each layer. A Monte Carlo simulation was then used to determine the statistical response based on the random fields. A series of analyses were performed to verify the application potential of the proposed method and to study the effects of uncertainty due to the spatial heterogeneity on the seepage behavior of two-layered soil foundation beneath water retaining structure. The results showed that the probabilistic framework can be used to efficiently consider the various flow patterns caused by the spatial variability of the hydraulic conductivity in seepage assessment for a layered soil foundation.

요 지

본 연구에서는 수리구조물이 설치된 2층으로 이루어진 포화 기초지반에서의 구속흐름(confined flow)에 대하여 확률론적 침투해석을 수행하였다. 투수계수는 지반의 층상구조에 따라 명확한 변동성을 보일 뿐 아니라 각각의 층 내에서도 공간적인 변동성을 보인다. 따라서 기존의 결정론적 침투해석기법을 층상지반에서의 투수계수의 불확실성과 공간적 변동성을 고려할 수 있도록 확률론적 해석으로 확장하였다. 각 층에 지정된 입력 확률분포함수와 자기상관함수(autocorrelation function)를 따르는 2차원의 랜덤필드를 생성하기 위하여 Karhunen-Loève 전개법을 사용하였다. 제안된 절차의 적용성을 검토하고 수리구조물 하부의 2층 지반을 통한 흐름에 공간적 불균질성이 미치는 영향을 연구하기 위해 생성된 랜덤필드를 이용하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 해석결과는 층상지반에서의 침투거동 평가에서 지반의 층상구조와 지층내에서의 투수계수의 공간적 변동성에 의한 지반에서의 다양한 침투패턴을 확률론적 해석기법을 통하여 효율적으로 고려할 수 있음을 보여주었다.

Keywords : Confined flow, Layered soil, Probabilistic analysis, Monte-Carlo simulation, Random field

¹ 정회원, 한경대학교 토목안전환경공학과 조교수 (Member, Assistant Professor, Department of Civil, Safety, and Environmental Engineering, Hankyong National Univ., Tel: +82-31-670-5149, Fax:+82-31-678-4674, drsecho@hanmail.net, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

자연 상태의 지반은 매우 변동적이며 비균질한 특성을 가지고 있음에도 불구하고 일반적으로 침투해석은 주어진 하나의 지층을 균질하다고 가정하여 일정한 물성치를 적용하는 결정론적인 방법에 의해 수행하고 있다(Gui et al., 2000). 그러나 지반을 통한 물의 흐름을 해석하고 예측하는 것은 지반의 수리화학적 특성에 대한 이해가 완벽하지 않음으로 인하여 필연적으로 불확실성을 유발하게 된다.

통상 침투에 대한 지반의 안정해석은 안전율을 계산함으로써 수행된다. 그러나 안전율은 위험도(risk)에 대한 일관된 척도를 주지는 않으며 동일한 안전율을 가진 지반일지라도 지반 물성의 변동정도에 따라 다른 위험도를 주게 되므로 안전율에 의한 안정성 평가는 경험에 의지하게 되는 측면이 있다. 기존의 결정론적 침투해석의 경우 불확실성을 정량적으로 고려하지 않고 주관적 판단에 의한 보수적인 투수계수 및 안전율을 통하여 고려하나 이러한 보수적인 설계가 파괴에 대한 안전을 보장하지 않는다는 사실은 경험적으로 잘 알려져 있다. 확률론적 해석법은 불확실성을 침투 안정성 해석과 설계에 정량적으로 반영할 수 있고 투수계수의 변동에 따른 영향을 파악할 수 있는 합리적인 접근법이다.

투수계수는 문헌에 보고된 변동계수(coefficient of variation)가 통상 60~90% 정도이며(Duncan, 2000) 심지어는 500%를 넘는 경우도 보고될 정도로 지반의 거동 관련 변수 중 불확실성이 큰 변수로 알려져 있다(Baecher and Christian, 2003).

지반의 특성은 하나의 지층 내에서도 퇴적과정이나 이후의 이력에 따라 공간적인 변동성을 보이게 된다. 지반의 공간적인 변동성을 반영하기 위하여 랜덤필드 이론을 이용한 침투해석에 대한 연구가 수행되었다(Fenton and Griffiths, 1996; Fenton and Griffiths, 1997; Gui et al., 2000; Srivastava et al., 2010; Ahmed, 2009; Griffiths and Fenton, 1997, 1998; Cho, 2011).

그러나 이들 연구들은 모두 하나의 지층에서의 공간적 변동성만을 고려하였다. 즉, 투수계수의 평균이 해석 영역에서 항상 일정하며 지반의 두 점 사이의 공분산(covariance)은 실제 두 점들의 위치에 상관없이 두 점 사이의 거리에만 의존한다고 가정하여 지반을 정상 상태의 랜덤필드(stationary random field)로 고려하였다. 그러나 실제 지반에서 투수계수는 다양한 규모(scale)에

의한 공간적 변동성을 보인다. 즉, 실험실 수준에서 흙의 간극의 변동에 따른 국부적인 작은 규모의 공간적 변동을 보이는 동시에 현장지반에서는 지반의 층상구조에 의한 변동성을 보이며, 지질학적인 구조와 같은 큰 규모의 변동성을 보이기도 한다(Lu and Zhang, 2007). Cho(2012)는 2층으로 이루어진 지반에 대하여 각각의 층에 대한 투수계수의 변동성과 층의 변화에 따른 변동성을 동시에 고려하여 투수계수의 공간적 변동성이 기초지반에 축조된 제방에서의 비구속흐름(unconfined flow)거동에 미치는 영향을 연구한 바 있다.

본 연구에서는 명확한 2개의 지층으로 구분되는 지반에서 각 층의 투수계수가 공간적으로 변동하는 경우의 침투거동을 포화 구속흐름(confined flow)에 대하여 해석함으로써 투수계수의 공간적인 변동특성이 침투거동에 미치는 영향을 연구하였다. 침투해석에는 유한요소법을 이용하였으며 투수계수의 수평방향과 연직방향의 공간적 상관성이 상이한 비등방성을 고려하였다. 2층지반에 대하여 각각 지정된 입력 확률분포함수와 자기상관함수(autocorrelation function)를 따르는 2차원의 랜덤필드를 생성하고 생성된 랜덤필드를 이용하여 확률론적 응답을 얻기 위해 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 이로부터 투수계수의 불확실성과 공간적 변동성이 지반을 통한 침투유량, 구조물 하부에 작용하는 양압력, 하류 유출면에서의 유출동수경사 등의 침투거동에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 침투해석(Seepage analysis)

수리구조물의 설계에 있어서 기초지반에서의 침투유량, 침투수가 구조물 및 기초지반의 안정성에 미치는 영향을 검토하여야 한다. 침투수가 지반의 안정성에 미치는 영향의 검토는 파이핑(piping)과 보일링(boiling)에 대한 안정성 검토, 유선망의 결정을 통한 기초의 안정해석을 통하여 이루어진다. 파이핑이나 보일링을 방지하거나 침투수 자체를 감소시키고 양압력을 감소시키기 위한 적절한 방법을 선택하기 위해서 침투해석이 필요하다.

침투수가 지반의 간극을 통과할 때 받는 저항은 주로 흙의 표면에 작용하는 점성마찰에 의한 것이다. 간극 폭이 좁고 유속이 낮으면 일반적으로 층류가 된다. 토석 내 간극은 서로 연결되어 있고 복잡한 형상이지만 침투류가 층류인 경우에는 거시적으로 흐름의 평균 운동 방향을 생각하면 하나의 유선을 형성하는 것으로 볼 수

있으며, 임의 점에서의 평균유속 v 와 동수구배 i 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$v = k \cdot i \quad (1)$$

식 (1)은 Darcy의 법칙으로 알려져 있으며, 여기서 k 는 투수계수이며 m/sec의 단위를 갖는다.

균질한 지반을 통한 2차원 정상상태(steady state) 침투의 미분방정식은 유체를 비압축성으로 가정하여 연속방정식과 Darcy의 법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

여기서, h 는 총수두, k_x, k_y 는 x 와 y 방향의 투수계수이다.

유선망과 같은 방법으로는 단면의 기하학적 형상, 지반조건의 변동성, 복잡한 경계조건 등을 고려하는데 한계가 있어 현재 대부분의 설계에서는 유한요소법, 유한차분법 등의 수치해석 기법이 활용되고 있다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 침투해석을 수행하였다. 유한요소법에 의해 해가 구해지면 동수경사는 각 절점에서의 총수두를 이용하여 요소의 각 적분점에서의 총수두의 미분값으로 구할 수 있다.

3. 랜덤 필드 모델

실제 지반은 지질학적 형성과정과 지역적 특성으로 인하여 투수계수가 명확하게 구분되는 여러 층상의 구조를 가짐과 동시에 하나의 지층 안에서도 투수계수는 공간적인 변동성을 보인다. 뿐만 아니라 동일한 평균 투수계수를 갖는 두 지층은 다른 공간적 변동성을 가질 수도 있다(Chok, 2009). 따라서 여러 지층으로 구성된 지반에서의 흐름에 대한 불확실성을 정량화하기 위해서는 비정상 상태의 랜덤필드(nonstationary random field)를 효과적으로 이산화하는 방법이 필요하다.

3.1 지반의 공간적 변동성

자연재료로서 지반은 균질한 지층에서도 위치에 따라 특성에 변동성을 보인다. 이러한 공간적인 변동성은 지반의 조성 성분, 퇴적상황, 응력이력 등의 원인으로

발생하며 지반의 불확실성을 유발하는 본질적인 원인이다(Lacasse and Nadim, 1996; Elkateb et al., 2002).

지반의 공간적인 변동성은 무작위적 특성을 가지지는 않으며 공간에서의 위치에 의해 지배된다. 평균이나 분산 같은 하나의 값으로 주어지는 통계적 정보는 지반의 공간적인 변동특성을 나타낼 수 없다. 지반물성의 공간적 변동성은 랜덤필드 모델의 이론적 틀에서 상관구조(correlation structure)에 의해 효과적으로 설명될 수 있다(Vanmarcke, 1983).

지반의 특성이 강한 상관성을 나타내는 공간적인 범위를 표현함으로써 지반의 상관성을 나타내기 위하여 사용되는 자기상관거리(autocorrelation distance)는 자기상관함수값이 $1/e$ 로 감소하는 거리로 정의된다(DeGroot and Baecher, 1993).

큰 값의 자기상관거리는 지반의 물성이 넓은 공간적 범위에 걸쳐서 강한 상관성을 나타내어 지층 내에서 점진적인 변화를 보이는 것을 의미한다. 반대로, 작은 자기상관거리는 지반의 변동폭이 크게 나타나는 것을 의미한다.

보통 등방의 상관구조(isotropic correlation)가 많이 사용되어져 왔지만 대부분의 자연적으로 생성된 지반의 경우 보통 지질학적 형성 과정으로 인하여 연직방향의 상관거리가 수평방향의 상관거리에 비하여 훨씬 작은 경향이 있으며 이들 값의 비가 약 10배 이상이 되는 경우도 흔하다(Baecher and Christian, 2003).

Gaussian 랜덤필드는 평균 $\mu(x)$, 분산 $\sigma^2(x)$ 및 자기상관함수 $\rho(x, x')$ 에 의해서 완전히 정의될 수 있다. 지반공학 분야에서 널리 사용되는 자기상관함수는 Li와 Lumb(1987) 및 Rackwitz(2000)에 의해 주어졌다. 본 연구에서는 식 (3)과 같은 지수형태의 상관함수를 사용하였으며 연직과 수평방향의 상관구조가 다른 비등방 상관구조를 적용하였다.

$$\rho(x, y) = \exp\left(-\frac{|x-x'|}{l_h} - \frac{|y-y'|}{l_v}\right) \quad (3)$$

여기서, l_h, l_v 는 각각 수평 및 연직 방향의 자기상관거리이다.

3.2 랜덤필드의 이산화

지반의 공간적 변동성은 지반 특성을 하나의 랜덤 변

수로 모델링하면 고려할 수 없으므로 랜덤필드로 모델링해야 한다. 한계평형법, 유한요소법이나 유한차분법 같은 수치해석법은 불연속적인 특성을 가지므로 해석을 수행하기 위해서는 지반물성의 랜덤필드 또한 유한개의 랜덤변수들로 표현되어야 한다. 이러한 과정을 랜덤필드의 이산화(discretization)라 한다.

랜덤필드의 이산화를 수행하기 위하여 공간 평균법(spatial averaging method), 중심점법(midpoint method), 형상함수법(shape function method), KLE(Karhunen-Loève Expansion), OSE(Orthogonal Series Expansion), EOLE(Expansion Optimal Linear Estimation) 방법 같은 여러 방법들이 개발되어져 왔다. 이들 이산화 방법들에 대한 자세한 소개와 비교는 Matthies et al.(1997) 및 Sudret and Der Kiureghian(2000)에 의해 주어졌다.

본 연구에서는 2차원 공간의 다층 지반에서 지반물성의 비등방 랜덤필드를 모사하기 위하여 Karhunen-Loève 전개법을 사용하였다. Karhunen-Loève 전개법은 다른 방법들과 비교하여 소정의 정확도를 얻기 위해 요구되는 항의 수(즉, 랜덤변수의 수)가 가장 작은 방법으로 알려져 있다(Ghiocel and Ghanem, 2002).

D 가 시스템의 기하학적 형상을 나타내는 \mathbf{R}^n 의 열린 집합(open set)이고 $\omega \in \Omega$ 는 시행 결과(outcome space) 공간의 한 좌표이면 랜덤필드 $H(\mathbf{x}, \omega)$ 는 연속인 $\mathbf{x} \in D$ 와 연관된 랜덤변수들의 집합이다.

시뮬레이션 영역은 겹치지 않는 M 개의 하위영역들(subdomains)로 분할된다고 생각하면(즉, $D = \bigcup_{i=1}^M D_i$ and $D_m \cap D_n = \phi$ for $m \neq n$) 투수계수의 랜덤필드는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Lu and Zhang, 2007).

$$H(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{i=1}^M H^{(i)}(\mathbf{x}, \omega^{(i)}) \text{ for each event } \omega = (\omega^{(1)}, \dots, \omega^{(M)}) \in \Omega \quad (4)$$

수학적 편의상 $H^{(i)}(\mathbf{x}, \omega^{(i)})$ 는 $\mathbf{x} \notin D_i$ 에 대하여 $H^{(i)}(\mathbf{x}, \omega^{(i)}) = 0$ 이라고 하면 전체 영역 D 로 확대될 수 있다.

각각의 하위영역에서 지반의 어느 두 점 사이의 공분산(covariance)은 점들의 위치에 상관없이 거리에만 의존한다(statistically stationary). 그러나 다른 하위영역에 속하는 점들 사이의 공분산은 0이므로 혹은 전체적인 의미에서 비정상상태(nonstationary)이다.

각각의 하위영역 D_i 에 대한 Karhunen-Loève 전개는

자기상관함수 $\rho^{(i)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ 의 주성분 분석에 의한다.

랜덤 필드의 실현 $H^{(i)}(\mathbf{x}, \omega_o)$ 를 전개하기 위해 필요한 기저 함수들은 다음의 고유치문제(eigenvalue problem)에 의해 정의된다.

$$\int_{D_i} \rho^{(i)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \varphi_j^{(i)}(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' = \lambda_j^{(i)} \varphi_j^{(i)}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

여기서 $\varphi_j^{(i)}$ 와 $\lambda_j^{(i)}$ 는 식 (5)의 해인 고유벡터와 고유치이다.

투수계수의 Karhunen-Loève 전개는 다음과 같이 주성분 분석에 의한 기저함수들의 선형조합으로 표현할 수 있다.

$$H(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{i=1}^M \mu^{(i)}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^M \sigma^{(i)}(\mathbf{x}) \sum_{j=1}^{\infty} \xi_j^{(i)}(\omega^{(i)}) \sqrt{\lambda_j^{(i)}} \varphi_j^{(i)}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in D \quad (6)$$

여기서, 고유벡터 $\varphi_j^{(i)}(\mathbf{x})$ 는 영역 D_i 외부에서는 0이며 $\xi_j^{(i)}$ 는 직교(orthogonal) 랜덤 변수들(평균이 0이고 분산이 1인 비상관 랜덤변수들)이다.

식 (6)의 고차항들을 생략하면 랜덤필드의 근사값은 다음과 같다.

$$H(\mathbf{x}, \omega) \approx \sum_{i=1}^M \mu^{(i)}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^M \sigma^{(i)}(\mathbf{x}) \sum_{j=1}^{N_{term(i)}} \xi_j^{(i)}(\omega^{(i)}) \sqrt{\lambda_j^{(i)}} \varphi_j^{(i)}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in D \quad (7)$$

이때 $N_{term(i)}$ 은 자기상관함수와 요구되는 정확도에 따라 결정되어야 한다.

식 (5)는 몇몇 제한된 자기상관함수와 해석영역에 대해서만 해석적으로 풀 수 있으며 지수 형태의 자기상관함수에 대한 일차원 영역의 해석적인 해가 Ghanem and Spanos(1991)에 의해 주어졌다. 2차원 고유치문제의 해는 1차원 해의 곱으로 나타낼 수 있다.

사용의 편리함과 실제 데이터의 부족 등으로 인하여 Gaussian 랜덤필드가 공간적인 변동성을 포함하는 불확실성을 모델하기 위하여 자주 사용되지만 랜덤변수가 항상 양의 값을 가질 때에는 사용할 수 없는 경우가 많다. 랜덤변수가 대수정규분포(lognormal distribution)를 따른다면 대수정규 랜덤필드는 다음과 같이 Gaussian 필드로부터 구할 수 있다.

$$\widetilde{H}(\mathbf{x}, \omega) = \exp \left[\sum_{i=1}^M \mu^{(i)}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^M \sigma^{(i)}(\mathbf{x}) \sum_{j=1}^{N_{term(j)}} \xi_j^{(i)}(\omega^{(i)}) \sqrt{\lambda_j^{(i)}} \varphi_j^{(i)}(\mathbf{x}) \right] \quad (8)$$

4. Monte Carlo 시뮬레이션

지반공학에서의 확률론적 접근은 지반구조물의 확률론적 거동을 결정하거나 신뢰성을 평가하기 위한 것이다. 지반공학 문제는 지반의 거동이 강한 비선형성을 가지며 물성의 변동성이 크다는 특징을 가지고 있다. 이 경우 제안된 많은 확률론적 방법 중 정확한 해를 얻을 수 있는 유일한 보편적인 방법은 Monte Carlo 시뮬레이션이다. 지반의 공간적 변동성을 고려하는 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 지반의 특성을 나타내는 통계적 정보인 확률분포와 상관구조를 만족하는 일련의 랜덤필드를 생성하고 각각의 생성된 랜덤필드에 대하여 해석을 수행함으로써 지반구조물의 거동을 계산하게 된다. 이러한 과정을 여러 번 반복하여 지반거동에 대한 파괴확률을 구할 수 있다. Monte Carlo 시뮬레이션은 파괴확률 뿐 아니라 지반구조의 거동에 대한 평균, 표준편차, 확률밀도함수 및 누적확률분포 등의 정보를 평가할 수 있으므로 주어진 시스템에 대한 보다 폭 넓은 정보를 제공해준다.

5. 예제해석

투수계수는 지반의 침투거동과 관련된 모든 변수들을 계산하기 위해 사용되므로 투수계수의 공간적 변동성과 관련된 불확실성을 알면 침투해석을 통하여 투수계수의 불확실성이 간극수압, 침투량, 동수경사 등으로 어떻게 전파되는지를 이들 값의 평균, 분산 또는 확률밀도함수를 계산함으로써 알 수 있다.

본 연구에서는 투수계수를 랜덤필드로 고려하여 2층 지반위에 설치된 수리 구조물의 하부 지반을 통한 침투거동을 해석하였다. 적용된 방법은 상·하부층의 투수계수의 평균 및 표준편차가 다른 경우도 적용이 가능하나 본 연구에서는 상·하부층의 투수계수의 평균과 표준편차는 동일하게 가정하고 공간적인 변동성이 다른 경우를 다루어 2층 지반에서 상이한 자기상관거리가 침투거동에 미치는 영향을 중점적으로 연구하였다.

5.1 결정론적 해석

Fig. 1과 같은 수리구조물의 침투에 대한 안정성을 검토하기 위해서는 침투수가 집중되는 유출부에서의 유출 동수경사, 기초 지반을 통해 발생하는 침투량, 구조물의 바닥에 작용하는 양압력(uplift pressure)을 계산해야 한다.

결정론적 침투거동과 사용된 수치해석 기법의 정확성을 평가하기 위하여 Table 1에 나타낸 투수계수의 평균값을 사용하여 균질한 지반(상·하부층의 투수계수의 평균값이 동일한 경우)의 침투거동에 대하여 해석하였다.

투수계수의 평균값에 대한 결정론적 해석의 결과는 Fig. 2 및 Table 2와 같다. 기초지반을 통한 침투량 Q_{det} 은 $2.504 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ 이고 하류 구조물 근처 지표면 (Fig. 1의 A)에서의 유출동수경사 i_e 는 0.619로 계산되었다. 침투로 인하여 구조물의 바닥에는 간극수압이 작용하며 바닥면을 따라 사다리꼴 규칙(trapezoidal rule)을 사용하여 작용하는 수압을 적분하여 구한 합력 F_{det} 은 617kN/m로 계산되었다. 본 연구에서는 침투해석을 위해 Fortran으로 작성한 유한요소해석 프로그램을 사용하였으며 상업용 프로그램인 SEEP/W와 동일한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다(Table 2). Fig. 2(a)는 총수두의 분포와 흐름 경로(flow path)를 나타내며 Fig. 2(b)는 동수경사와 흐름벡터의 분포를 보여주고 있다. 상부 지층에서는 유입부와 유출부에서 각각 하향과 상향의 흐름이 발생하고 구조물 아래에서는 수평흐름이 지배적

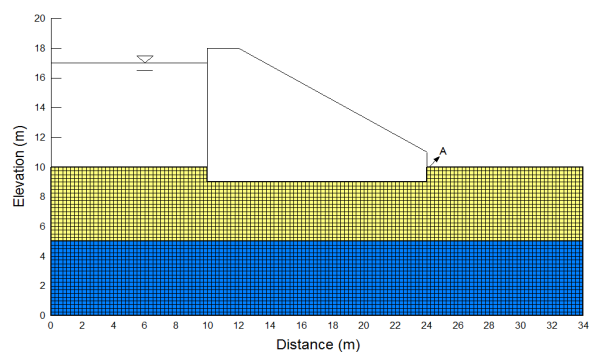


Fig. 1. Cross-section and finite element discretization

Table 1. Statistical properties of soil parameters used for seepage analysis (lognormal distribution)

Parameter	Average μ (m/sec)	COV	Autocorrelation distance (m)
k	1×10^{-5}	0.5	$5 \leq l_h \leq 30$ $1 \leq l_v \leq 10$

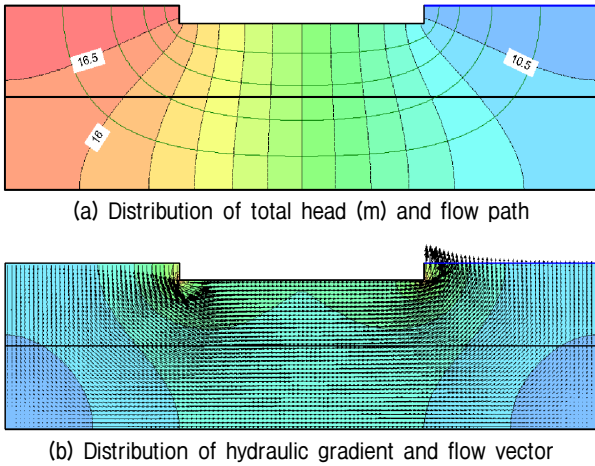


Fig. 2. Results of deterministic seepage analysis.

Table 2. Results of deterministic seepage analysis

	Flow quantity (m ³ /sec/m)	Exit gradient	Uplift force (kN/m)
SEEP/W	2.504 × 10 ⁻⁵	0.619	617.84
This study	2.504 × 10 ⁻⁵	0.619	617.84

이다. 하부층에서는 수평흐름이 지배적임을 알 수 있다. 동수경사는 유선망의 크기가 가장 작은 구조물 하부 모서리 부근에서 큰 값을 나타내고 있으며 유출동수경사는 구조물에 근접한 하류 유출면에서 가장 큰 값을 보이고 있다.

5.2 확률론적 해석

Table 1은 사용된 투수계수의 통계학적인 특성을 나타낸다. 투수계수가 대수정규분포를 따른다는 것은 실험적 증거들로부터 여러 연구자들에 의해 제안되어 널리 받아들여지고 있다(Freeze, 1975; Griffiths and Fenton, 1998; López-Acosta and Auvinet, 2011). 따라서 투수계수는 확률론적으로 평균 μ_k 와 표준편차 σ_k 로 정의되는 대수정규분포를 따른다고 가정하였다. 무차원의 변동계수 $COV_k(=\sigma_k/\mu_k)$ 를 정의하면 투수계수의 대수값은 정규분포를 따르게 되며 평균과 표준편차는 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_{\ln k} = \sqrt{\ln\{1 + COV_k^2\}} \quad (9)$$

$$\mu_{\ln k} = \ln \mu_k - 0.5\sigma_{\ln k}^2 \quad (10)$$

2층의 지반으로 이루어진 지반의 투수계수의 공간적 분포를 모사하기 위해 Karhunen-Loève 전개를 이용하여 두 개의 서로 독립적인 투수계수의 랜덤필드를 생성하였다. 명확히 구분되는 이 두 지층은 투수계수에 대하여 서로 다른 평균, 표준편차, 자기상관함수를 가질 수 있다. 생성된 투수계수의 랜덤필드를 바탕으로 일련의 침투해석을 수행하였으며 결정론적 해석에서 사용되었던 유한요소망과 경계조건을 동일하게 적용하였다. 랜덤필드의 생성은 Matlab을 사용하여 수행하였고 생성된 랜덤필드는 Fortran으로 작성한 침투해석 루틴과 연동하여 해석을 수행하였다. 해석결과와 가시화를 위해서는 SEEP/W의 후처리기를 사용하였다.

Karhunen-Loève 전개법은 해석영역의 임의의 점에서 랜덤변수 값을 계산하는 것이 가능하도록 랜덤필드를 공간적으로 연속적인 함수의 향으로 표현해준다. 따라서 이산화된 랜덤필드에서 투수계수는 해석영역의 모든 점에서 계산이 가능하다. 본 연구에서는 요소의 적분점에서 투수계수를 계산하여 유한요소해석에 활용하였다.

지반의 자기상관거리에 대해서는 축적된 자료가 많지 않아 연구가 필요한 실정이지만 El-Ramly et al.(2003)이 수행한 문헌연구의 결과에 따르면 수평방향의 자기상관거리는 10~40m의 범위이고 연직방향의 자기상관거리는 1~3m 정도인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 수평 자기상관거리 5~30m와 연직 자기상관거리 1~10m를 적용하였으며 10,000회의 랜덤필드를 생성하여 이에 대한 침투해석을 수행하였다. 각각의 생성된 랜덤필드는 해석영역에 대하여 가능한 하나의 투수계수의 분포를 나타낸다.

기본 해석 대상으로 $l_h = 20m$, $l_v = 2m$, $COV_k=0.5$ 인 조건을 고려하였고, 이 조건을 중심으로 다른 값들은 고정한 상태에서 각 층에서의 자기상관거리를 변화시키며 침투거동에 미치는 영향을 연구하였다.

5.2.1 해석결과: 평균과 표준편차의 공간적 분포

Monte Carlo 시뮬레이션에 의하면 침투에 관련된 변수의 확률분포를 구할 수 있다. Fig. 3은 침투량의 누적확률분포에 대한 예를 나타내고 있다. 이 누적확률분포 곡선을 이용하면 댐이나 보와 같은 수리구조물이 설치된 층상의 포화 기초지반에서 침투에 대한 지반의 안정성 평가에 신뢰성 기반의 설계기법(reliability-based design) 적용이 가능하다.

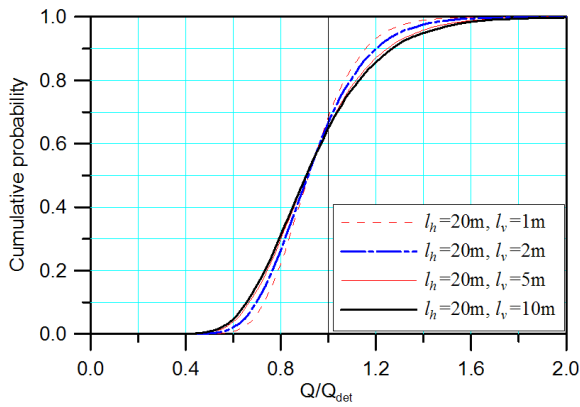
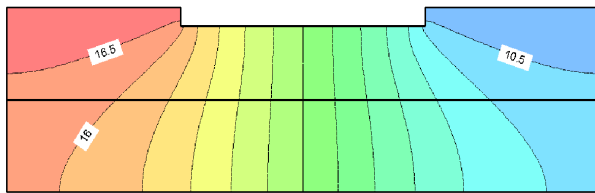
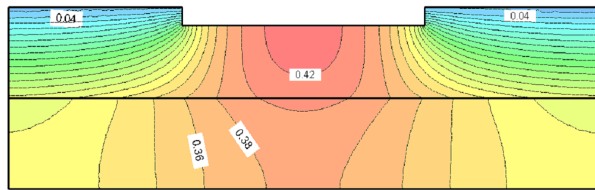


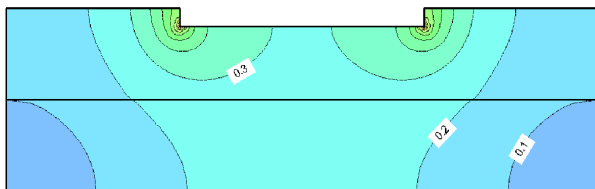
Fig. 3. Influence of the vertical autocorrelation distance in upper layer on the cumulative probability distribution of flow quantity obtained from simulation (lower layer: $l_h = 20m$, $l_v = 2m$, $COV_k=0.5$)



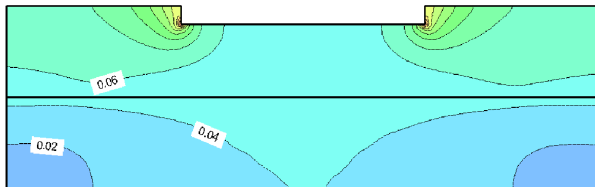
(a) Distribution of average total head (m)



(b) Distribution of standard deviation of total head (m)



(c) Distribution of average hydraulic gradient



(d) Distribution of standard deviation of hydraulic gradient

Fig. 4. Results of the Monte Carlo simulation (upper layer: $l_h = 20m$, $l_v = 10m$, $COV_k=0.5$; lower layer: $l_h = 20m$, $l_v = 2m$, $COV_k=0.5$)

Fig. 4는 Monte Carlo 시뮬레이션(상부층: $l_h = 20m$, $l_v = 10m$, $COV_k=0.5$; 하부층: $l_h = 20m$, $l_v = 2m$, COV_k

$=0.5$)의 결과를 나타낸 것이다. 즉, 10,000회의 해석에 의한 평균 총수두의 공간적 분포를 나타낸 것으로 평균 값을 이용한 결정론적 해석의 결과와 유사한 분포를 보이고 있다. Fig. 4(b)는 총수두의 표준편차 분포를 나타낸 것으로 경계조건이 고정된 상·하류면에서는 작은 값을 나타내고 여기서 멀어질수록 큰 값을 보이고 있다. 특히 구조물바닥 중앙 부근에서 큰 값을 보이고 있어 투수계수의 불확실성으로 인하여 이곳에서의 총수두의 예측 불확실성이 큰 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 평균 동수경사의 분포를 나타내며 결정론적 해석의 결과와 유사한 분포를 보이고 있다. Fig. 4(d)는 동수경사의 표준편차 분포를 나타낸 것으로 구조물 선단부와 침투수가 유출되는 하류 지표면 부근에서의 값이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 침투에 대한 파이핑의 안정성을 검토해야 하는 하류 유출면에서의 동수경사의 값과 양압력에 대한 안정성을 검토해야 하는 구조물 바닥에 작용하는 양압력의 변동성(총수두의 변동성과 동일)이 투수계수의 불확실성에 따라 큰 변동성을 보임을 알 수 있다.

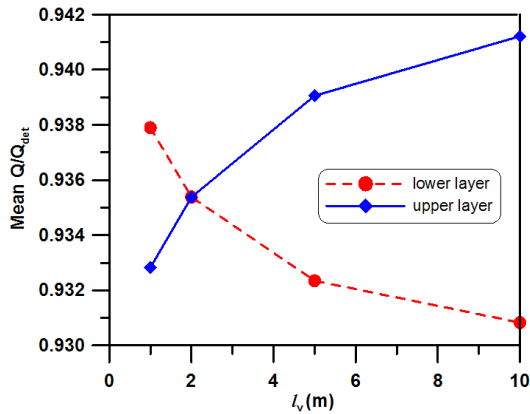
5.2.2 해석결과: 각 층에서의 연직방향 자기상관거리 l_v 의 영향

본 절에서는 각층에서의 연직방향 자기상관거리의 변화가 침투거동에 미치는 영향에 대하여 살펴본다. 문제를 단순화하기 위해 상·하부 지층에서 투수계수의 평균과 변동계수($COV_k=0.5$)는 동일하다고 가정하였다. 해석결과들로부터 추정된 기초지반을 통한 시간당 침투량의 평균은 결정론적 해석에 의한 값보다는 작게 평가되며, 상부층의 l_v 의 증가에 따라 약간 증가하는 경향을 보인다(Fig. 5(a)). 이러한 현상은 상부지층에서는 유입부와 유출부에 상당한 연직방향의 흐름이 발생하고 있기 때문이다. 연직방향의 자기상관거리가 크다는 것은 지반의 투수계수가 연직방향으로 더 연속적으로 분포할 수 있음을 의미하며 흐름통로를 확보하게 되어 침투량이 증가한다. 그러나 하부층에서는 수평방향의 흐름이 지배적이며 연직방향의 l_v 가 증가하면 연직방향으로 연속적인 투수계수가 작은 영역들이 연속적으로 형성되어 수평방향의 흐름이 방해받을 가능성이 증가하게 되므로 침투량은 약간 감소하는 경향을 보이게 된다(Fig. 5(a)). Fig. 5(b)는 추정된 침투율의 표준편차를 나타내며 l_v 의 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. Fig. 5(b)는 또한 상부층의 l_v 변화가 침투량의 변동성에 더

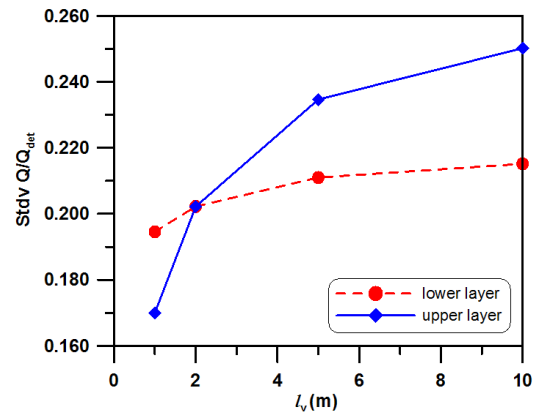
큰 영향을 미치고 있음을 보여주며, 이는 상부층을 통한 물의 흐름이 하부층을 통한 흐름보다 크기 때문이다. 기초지반 위에 제방이 설치된 2층지반의 비구속 흐름에 대한 Cho(2012)의 연구에서는 하부 기초층의 흐름이 더 지배적이었기 때문에 하부층의 영향이 크게 나타났다.

Fig. 5(c)는 유출동수경사의 평균값을 나타내며 전체적으로 결정론적 해석에 의한 값보다 큰 값을 나타내고

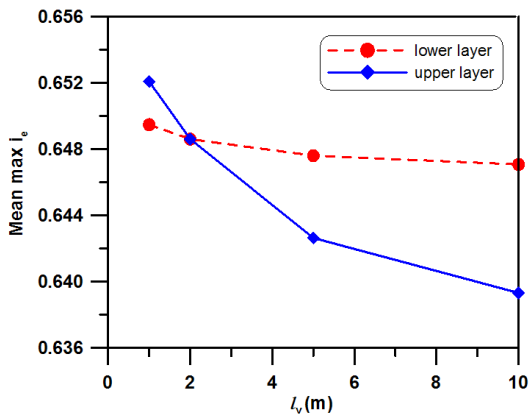
있다. 연직방향의 자기상관거리가 증가함에 따라 동수경사는 감소하는 경향을 보이며 상부층의 l_v 가 하부층의 경우보다 큰 영향을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 l_v 의 변화에 따른 유출동수경사의 표준편차의 변화를 나타내는 것으로 표준편차는 상부층의 l_v 증가에 따라 감소하는 경향을 보이나 하부층의 l_v 증가는 큰 영향을 미치지 않음을 나타낸다. 결과적으로 구조



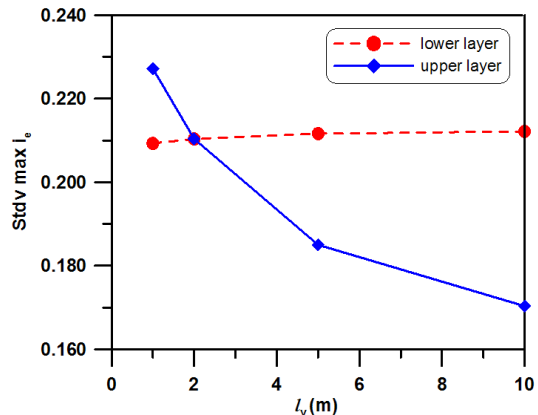
(a) Variation in the mean of the normalized flow rate



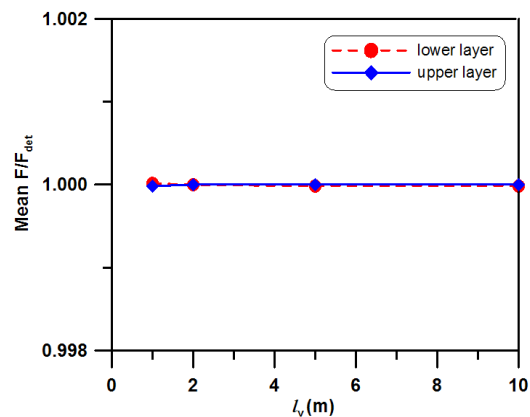
(b) Variation in the standard deviation of the normalized flow rate



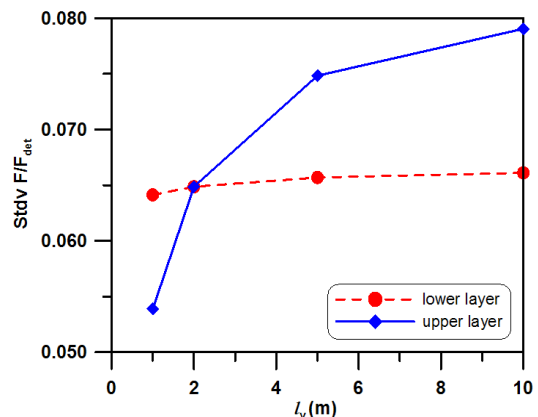
(c) Variation in the mean of the exit gradient



(d) Variation in the standard deviation of the exit gradient



(e) Variation in the mean of the uplift force



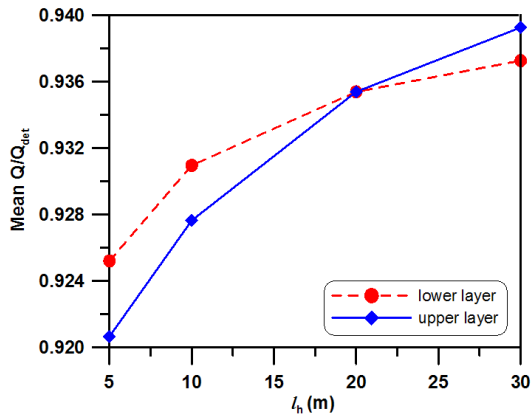
(f) Variation in the standard deviation of the uplift force

Fig. 5. Influence of the vertical autocorrelation distance in each layer on the estimated statistical response obtained from simulation

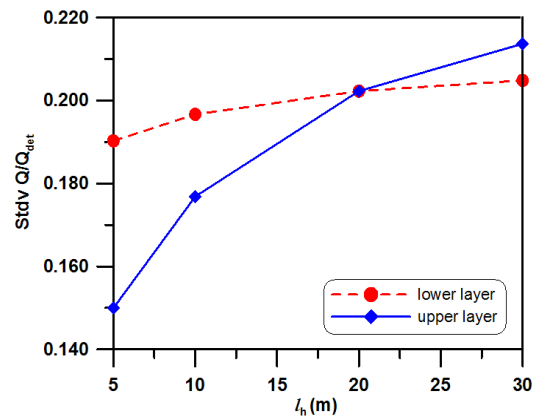
물 주변 지반의 연직방향 자기상관거리가 길어지면(즉, 연직방향으로 투수계수가 더 연속적인 지반), 유출동수 경사의 평균과 표준편차가 감소하여 침투에 대한 지반의 불안정(instability) 가능성을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 하부층의 연직방향 자기상관거리는 유출동수 경사에 큰 영향을 미치지 않았는데, 이는 유출동수경사가 침투수가 유출되는 구조물 주변 상부층의 영향을 주

로 받기 때문이다. 역시 비구속 흐름에 대한 Cho(2012)의 연구 결과(하부 기초지반의 영향이 크고 상부지층의 영향은 매우 작음)와는 다른 결과를 나타내고 있다.

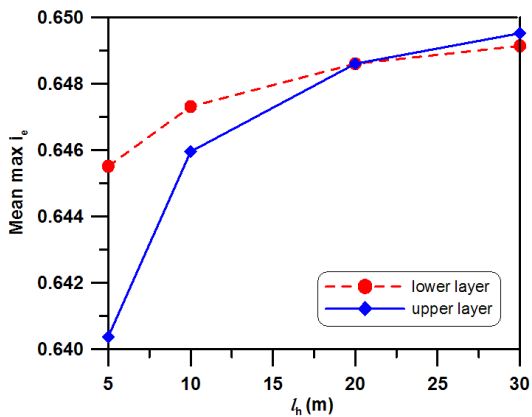
Fig. 5(e)와 Fig. 5(f)는 l_v 의 변화가 구조물의 바닥에 작용하는 양압력의 평균과 표준편차에 미치는 영향을 나타낸 것으로 양압력의 평균은 l_v 의 변화에 영향을 받지 않았으며 표준편차도 매우 작게 나타났다.



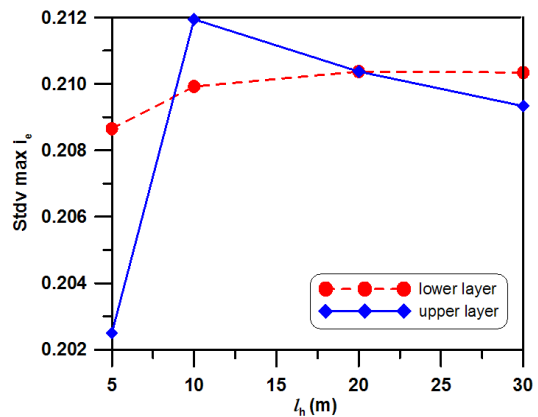
(a) Variation in the mean of the normalized flow rate



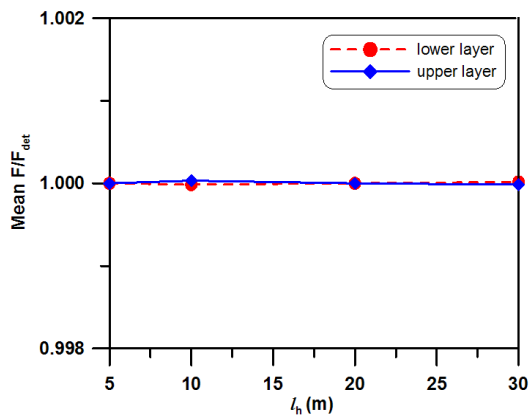
(b) Variation in the standard deviation of the normalized flow rate



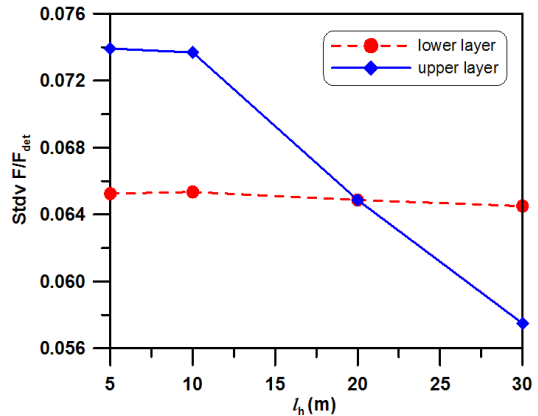
(c) Variation in the mean of the exit gradient



(d) Variation in the standard deviation of the exit gradient



(e) Variation in the mean of the uplift force



(f) Variation in the standard deviation of the uplift force

Fig. 6. Influence of the horizontal autocorrelation distance in each layer on the estimated statistical response obtained from simulation

5.2.3 해석결과: 각 층에서의 수평방향 자기상관거리 l_h 의 영향

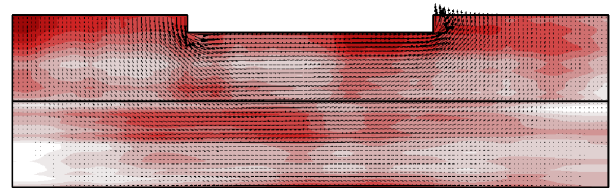
본 절에서는 각층에서의 수평방향 자기상관거리의 변화가 침투거동에 미치는 영향에 대하여 살펴본다. 해석결과들로부터 추정된 기초지반을 통한 시간당 침투량의 평균과 표준편차는 상·하부 층에서의 수평방향 자기상관거리 l_h 의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며 흐름이 집중되는 상부층의 영향이 큰 것으로 나타났다 (Fig. 6(a)와 6(b)). l_h 가 증가한다는 것은 수평방향으로 투수계수가 높은 상관성을 보인다는 것을 의미한다. 즉, 수평방향으로 연속적인 투수성이 큰 층을 형성하여 물이 흘러갈 수 있는 통로를 형성할 수 있는 가능성이 높다는 것을 의미하므로 l_h 가 증가할수록 침투율은 증가한다.

Fig. 6(c)는 유출동수경사의 평균을 나타내며 l_h 가 증가할수록 평균값은 증가하고 있다. Fig. 6(d)는 유출동수경사의 표준편차의 변화를 나타내며 상부층에서의 l_h 가 증가하면 표준편차는 일정 값까지는 증가하다가 이후로 감소하는 모습을 보인다. 이는 구속흐름을 유발하는 구조물의 바닥 치수에 대한 자기상관거리의 크기와 연관된 것으로 판단된다. 하부층에서의 l_h 의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

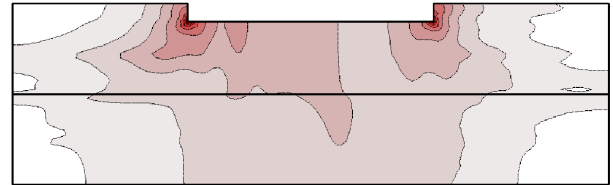
Fig. 6(e)와 6(f)는 양압력의 평균과 표준편차의 변화를 나타내며 평균값은 l_h 에 거의 영향을 받지 않으나 표준편차는 상부에서의 l_h 증가에 따라 약간 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 표준편차의 값은 매우 작았다. 수평방향의 자기상관거리의 경우도 Cho(2012)의 연구 결과와는 반대로 상부지층의 영향이 크게 나타났다. 이는 여러 층으로 이루어진 지반에서 지배적인 흐름이 발생하는 지층과 방향에 따라 침투거동에 미치는 영향 정도가 결정되기 때문이다.

5.2.4 해석결과: 생성된 특정 랜덤필드에 따른 흐름 특성

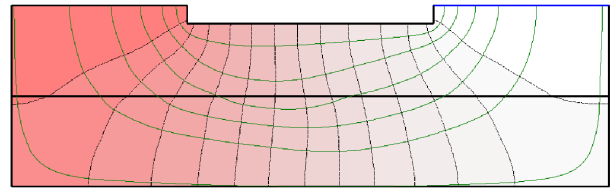
Fig. 7은 생성된 랜덤필드 중 일부와 이에 따른 해석 결과를 나타낸 것이다. 투수계수의 분포를 나타내는 Figure에서 어두운 부분은 투수계수가 큰 영역을 나타내고 밝은 부분은 투수계수가 작은 영역을 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 상부층의 연직방향 자기상관거리가 하부층보다 큰 경우(즉, 상부층이 연직방향으로 더 연속적)를 나타내고 있다. 투수계수의 공간적 분포에 따라 투수계수가 큰 영역을 통과하여 침투경로가 생성되므로 균



Distribution of permeability and flow vector

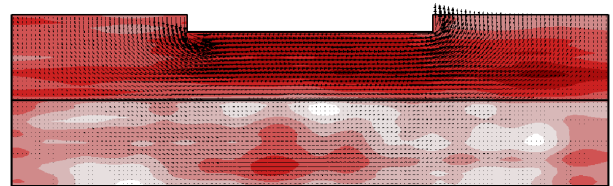


Distribution of exit gradient

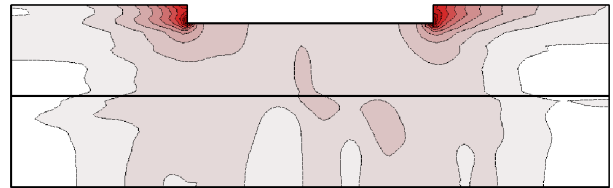


Distribution of total head and flow path

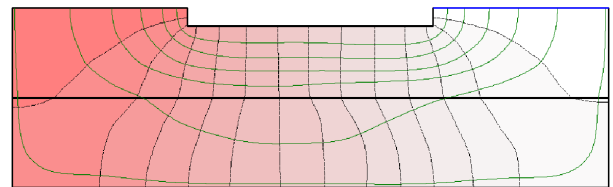
(a) (upper layer: $l_h = 20m, l_v = 10m$; lower layer: $l_h = 20m, l_v = 2m$);
flow quantity= $0.416 \times 10^{-4} (m^3/sec/m)$, exit gradient =0.55, uplift force= $597.9(kN/m)$



Distribution of permeability and flow vector



Distribution of exit gradient



Distribution of total head and flow path

(b) (upper layer: $l_h = 20m, l_v = 2m$; lower layer: $l_h = 5m, l_v = 2m$);
flow quantity= $0.590 \times 10^{-4} (m^3/sec/m)$, exit gradient=0.91, uplift force= $618.5(kN/m)$

Fig. 7. Typical realizations of the random field and the corresponding analysis results

질한 지반에서의 침투거동(Fig. 2)과는 상당히 다른 거동이 생성되고 있으며 이에 따라 침투량, 유출동수경사, 총수두 분포 등도 다르게 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 상부층의 수평방향 자기상관거리가 하부층보다 커서 상부층에 수평방향으로 흐름통로가 잘 형성된 상황을 보여준다. 이 경우 흐름은 대부분 큰 투수계수층이 형성된 상부층을 통하여 일어나고 하부층으로는 흐름이 거의 발생하지 않게 된다.

투수계수를 랜덤필드로 고려하여 지반의 층상구조와 층 안에서의 공간적 변동을 반영하는 방법은 투수계수를 하나의 랜덤변수로 고려하는 경우나 단일 지층에서의 공간적 변동만을 고려하는 경우에 나타나지 않는 다양한 지반의 침투거동을 반영하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 다층지반에서 투수계수의 공간적인 변동성이 침투거동에 미치는 영향을 연구하기 위하여 수리구조물이 설치된 2층으로 이루어진 포화 기초지반에서의 흐름에 대하여 확률론적 침투해석을 수행하였다. 침투해석은 유한요소법을 이용하였으며 투수계수의 수평방향과 연직방향의 공간적 상관성이 상이한 비등방성을 고려하였다. 각 층에 지정된 입력 확률분포함수와 자기상관함수(autocorrelation function)를 따르는 2차원의 랜덤필드를 생성하기 위하여 Karhunen-Loève 전개법을 사용하였다. 제안된 절차의 적용성을 검토하고 수리구조물 하부의 2층 지반을 통한 흐름에 공간적 불균질성이 미치는 영향을 연구하기 위해 생성된 랜덤필드를 이용하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 연구결과는 층상지반에서의 침투거동 평가에서 지반의 층상구조와 지층내에서의 투수계수의 공간적 변동성에 의한 지반에서의 다양한 침투패턴을 확률론적 해석기법을 통하여 효율적으로 고려할 수 있음을 보여주었다.

- (1) 투수계수의 공간적 변동성으로 인하여 침투량과 유출동수경사는 큰 변동을 나타냈으나 양압력의 변동은 매우 작은 값을 보였다. 상·하부 지층에서의 비등방인 자기상관거리의 변동에 따른 침투거동을 해석한 결과에 따르면 지배적인 흐름이 발생하는 지층과 방향에 따라 침투거동에 미치는 영향 정도가 결정되는 것으로 나타났다.
- (2) 유출동수경사의 평균값은 전체적으로 결정론적 해

석에 의한 값보다 큰 값을 나타내었다. 연직방향의 자기상관거리가 증가함에 따라 동수경사는 감소하는 경향을 보이며 상부층의 l_v 가 하부층의 경우보다 큰 영향을 나타냈다. 유출동수경사의 표준편차는 상부층의 l_v 증가에 따라 감소하는 경향을 보이거나 하부층의 l_v 증가는 큰 영향을 미치지 않았다. 결과적으로 구조물 주변 지반의 연직방향 자기상관거리가 길어지면(즉 연직방향으로 투수계수가 더 연속적인 지반), 유출동수경사의 평균과 표준편차가 감소하여 침투에 대한 지반의 불안정(instability) 가능성을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

- (3) 기초지반을 통한 시간당 침투량의 평균과 표준편차는 상·하부 층에서의 수평방향 자기상관거리 l_h 의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며 흐름이 집중되는 상부층의 영향이 큰 것으로 나타났다. l_h 가 증가한다는 것은 수평방향으로 연속적인 투수성이 큰 층을 형성하여 물이 흘러갈 수 있는 통로를 형성할 수 있는 가능성이 높다는 것을 의미하므로 l_h 가 증가할수록 침투율은 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 한경대학교 2012년도 학술연구조성비의 지원에 의한 것입니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Ahmed, A. A. (2009), "Stochastic analysis of free surface flow through earth dams", *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, No.7, pp.1186-1190.
2. Baecher, G. B. and Christian, J. T. (2003), *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley & Sons.
3. Cho, S. E. (2012), "Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation", *Engineering Geology*, Vol.133-134, pp.30-39.
4. Chok, Y. H. (2009), *Modeling the effects of soil variability and vegetation on the stability of natural slopes*, Ph.D. thesis, The University of Adelaide, Australia.
5. DeGroot, D. J. and Baecher, G. B. (1993), "Estimating autocovariance of in-situ soil properties", *Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol.119, No.1, pp.147-166.
6. Duncan, J. M. (2000), "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.4, pp.307-316.
7. Elkateb, T., Chalaturnyk, R., and Robertson, P. K. (2002), "An overview of soil heterogeneity: Quantification and implications on geotechnical field problems", *Canadian Geotechnical Journal*,

- Vol.40, No.1, pp.1-15.
8. El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., and Cruden, D. M. (2003), "Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on presheared clay-shale", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40, No.1, pp. 192-208.
 9. Fenton, G. A. and Griffiths, D. V. (1996), "Statistics of free surface flow through stochastic earth dam", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.122, No.6, pp.427-436.
 10. Fenton, G. A. and Griffiths, D. V. (1997), "Extreme hydraulic gradient statistics in stochastic earth dam", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, No.11, pp.995-1000.
 11. Freeze, R. A. (1975), "A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media", *Water Resour. Res.*, Vol.11, No.5, pp.725-741.
 12. Ghanem, R. G. and Spanos, P. D. (1991), *Stochastic Finite Element-A Spectral Approach*, Springer Verlag, New York.
 13. Ghiocel, D. M. and Ghanem, R. G. (2002), "Stochastic Finite-element Analysis of Seismic Soil-structure Interaction", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.128, No.1, pp.66-77.
 14. Griffiths, D. V. and Fenton, G. A. (1997), "Three-dimensional seepage through spatially random soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, No.2, pp.153-160.
 15. Griffiths, D. V. and Fenton, G. A. (1998), "Probabilistic analysis of exit gradients due to steady seepage", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.9, pp.789-797.
 16. Gui, S., Zhang, R., Turner J. P., and Xue, X. (2000), "Probabilistic slope stability analysis with stochastic hydraulic conductivity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.1, pp.1-9.
 17. Cho, S. E. (2011), "Probabilistic Seepage Analysis by the Finite Element Method Considering Spatial variability of Soil Permeability", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.27, No.10, pp.93-104.
 18. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), "Uncertainties in characterizing soil properties", *Uncertainty in the Geologic Environment: From theory to practice*, (eds Shackelford, CD, Nelson, PP and Roth, MJS.), Geotechnical Special Publication, ASCE, No.58, pp.49-75.
 19. Li, K. S. and Lumb, P. (1987), "Probabilistic design of slopes", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.520-535.
 20. López-Acosta, N. P. and Auvinet, G. (2011), "Uncertainty in analyses of one-dimensional steady-state seepage through random porous media", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.26, No.3, pp.501-510.
 21. Lu, Z. and Zhang, D. (2007), "Stochastic simulations for flow in nonstationary randomly heterogeneous porous media using a KL-based moment-equation approach", *SIAM*, Vol.6, No.1, pp.228-245.
 22. Matthies, G., Brenner, C., Bucher, C., and Soares, C. (1997), "Uncertainties in probabilistic numerical analysis of structures and solids-stochastic finite elements", *Structural Safety*, Vol.19, No.3, pp.283-336.
 23. Rackwitz, R. (2000), "Reviewing probabilistic soils modeling", *Computers and Geotechnics*, Vol.26, No.3, pp.199-223.
 24. Srivastava, A., Sivakumar Babu, G. L., and Haldar, S. (2010), "Influence of spatial variability of permeability property on steady state seepage flow and slope stability analysis", *Engineering Geology*, Vol.110, No.(3-4), pp.93-101.
 25. Sudret, B. and Der Kiureghian, A. (2000), *Stochastic Finite Element Methods and Reliability: a State-of-the-art Report*, Tech. Rep. Report No. UCB/SEMM-2000/08, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Berkeley, Institute of Structural Engineering, Mechanics and Materials.
 26. Vanmarcke, E. H. (1983), *Random Fields: Analysis and Synthesis*, The MIT Press, Cambridge, MA.

(접수일자 2012. 8. 16, 심사완료일 2012. 11. 23)