



비균질 지반에서 압밀계수의 확률분포가 압밀의 확률론적 해석에 미치는 영향

Effect of Probability Distribution of Coefficient of Consolidation on Probabilistic Analysis of Consolidation in Heterogeneous Soil

봉태호* · 허 준**† · 손영환***

Bong, Tae-Ho · Heo, Joon · Son, Young-Hwan

Abstract

In this study, a simple probabilistic approach using equivalent coefficient of consolidation (c_e) was proposed to consider the spatial variability of coefficient of vertical consolidation (c_v), and the effect of the probability distribution of coefficient of consolidation on degree of consolidation in heterogeneous soil was investigated. The statistical characteristics of consolidation coefficient were estimated from 1,226 field data, and four probability distributions (Normal, Log-normal, Gamma, and Weibull) were applied to consider the effect of probability distribution. The random fields of coefficient of consolidation were generated based on Karhunen-Loeve expansion. Then, the equivalent coefficient of consolidation was calculated from the random field and used as the input value of consolidation analysis. As a result, the probabilistic analysis can be performed effectively by separating random field and numerical analysis, and probabilistic analysis was performed using a Latin hypercube Monte Carlo simulation. The results showed that the statistical properties of c_e were changed by the probability distribution and spatial variability of c_v , and the probability distribution of c_v has considerable effects on the probabilistic results. There was a large difference of failure probability depend on the probability distribution when the autocorrelation distance was small (i.e., highly heterogeneous soil). Therefore, the selection of a suitable probability distribution of c_v is very important for reliable probabilistic analysis of consolidation.

Keywords: Consolidation; spatial variability; random field; probability distribution; soil heterogeneity

1. 서 론

지반의 비균질성은 지질학적 이질성, 퇴적조건, 응력이력 등 다양한 요인에 의하여 발생하며, 여기에 실험오차, 측정오차, 해석모델 오차 등으로 인한 불확실성이 더해지면서 지반의 거동을 예측하는데 있어 불확실적인 요소로 작용한다 (Christian, 2004). 이에 따라 지반의 불확실성을 정량적으로 고려하고자 하는 많은 연구들이 이루어져 왔으며 확률론적 해석의 수행을 통하여 이를 효과적으로 고려할 수 있다. 특히, 지반의 불확실성은 공간적 상관구조를 갖고 있으며 지반의 공학적 거동은 극단치보다 국부적으로 평균화된 물성에 지배를 받으므로 지반의 공간적 변동성을 고려하는 것은 매우 중

요하게 인식되고 있다. 공간 변동성은 지반의 생성단계에서 부터 발생하는 고유한 불확실성으로 제거하거나 줄일 수 없으며 확률장 (random field) 이론을 통하여 효과적으로 고려할 수 있다 (Vanmarcke, 1983). 따라서 다양한 지반 공학적 문제에서 이를 고려한 안정해석이나 설계에 반영하고자 하는 연구가 이루어지고 있다 (e.g., Fenton and Griffiths, 2001; Popescu et al., 2005; Cho, 2010; Bong and Stuedlein, 2017).

압밀은 중요한 지반 공학적 문제 중 하나이며, 지반 전체에 걸쳐 발생하는 거동으로 지반 물성치의 공간적 분포는 압밀 거동에 많은 영향을 미친다. 따라서 압밀해석에 있어 지반의 공간 변동성을 고려한 연구가 수행되었으며 (Huang et al., 2008; Bong et al., 2012, 2014), 압밀계수의 공간 변동성을 고려하지 않을 경우 지반의 불확실성을 과대평가할 수 있는 것으로 나타났다. 확률론적 해석 시 압밀계수의 확률분포는 일반적으로 자료의 제한이나 수학적 편리함을 이유로 대수정규 분포나 정규분포를 따르는 것으로 가정되며 확률분포에 따른 영향은 무시되었다. 하지만 평균화된 지반 물성치는 공간 변동성뿐만 아니라 확률분포에도 영향을 받으며 공간 변동성에 따라 미치는 영향이 달라지므로 이에 대한 규명이 필요하다. 공간 변동성을 고려한 확률론적 해석을 수행하기 위해서는 일반적으로 확률장과 수치해석의 결합이 필요하며 기존 수치

* Post-doctoral Scholar, Oregon State University, 101 Kearney Hall, Corvallis, OR, 97331

** Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

*** Department of Rural Systems Engineering and Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-31-400-1792 Fax: +82-31-400-1794

E-mail: jheo01@ekr.or.kr

Received: March 8, 2018

Revised: March 12, 2018

Accepted: March 21, 2018

해석에 비하여 복잡한 절차를 요구하게 되므로 사용자 친화적 (user-friendly)이지 않다. 특히, 기존 수치해석 코드가 존재 하더라도 그대로 활용할 수 없으며 확률장과의 결합을 위한 추가적인 작업을 필요로 한다.

본 연구에서는 간편하게 압밀계수의 공간 변동성을 고려하여 확률론적 해석을 수행할 수 있도록 등가압밀계수 (equivalent coefficient of consolidation)를 활용한 간편법을 적용하였으며 확률장과 수치해석을 분리하여 수행함으로써 쉽고 간편하게 공간 변동성을 고려할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 통하여 지반의 공간 변동성 및 압밀계수의 확률분포가 확률론적 압밀해석 결과에 미치는 영향을 분석하고자 ○○지구의 지반조사 결과로부터 수직압밀계수의 통계적 특성을 파악하였으며, 4가지 확률분포 (Normal, Log-normal, Gamma, Weibull)에 대한 모수를 산정하였다. 압밀계수의 확률장은 KLE (Karhunen-Loeve Expansion)기법을 통하여 재현하였으며, 지반의 공간 변동성 및 확률분포에 따른 등가압밀계수의 통계적 특성을 파악하고 이에 따른 확률론적 결과를 비교·분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 확률장 (Random field)

자연 상태에서 지반 물성치는 변동성을 갖으며 공간에 따라 균질하지 않다. 특히, 지반 물성치는 공간에 따른 상관구조를 갖지만 평균과 분산과 같은 매개변수는 한 지점에 대한 통계적 특성으로 이러한 공간적 특성을 정확하게 반영할 수 없다 (El-Ramly et al., 2002). Fig. 1은 지반 물성치를 단일 확률변수 (random variable)와 확률장으로 재현할 경우의 비교를 나타낸다.

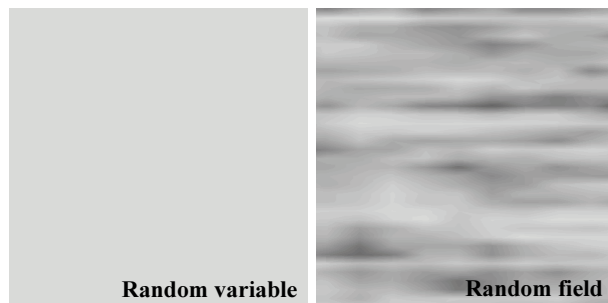


Fig. 1 Reproduction of random variable and random field

지반 물성치를 단일 확률변수로 재현할 경우, 모든 지점에 대한 지반 물성치는 동일한 값을 갖도록 재현되며 이에 따라

지반 전체가 매우 취약하거나 강한 상태인 비현실적인 조건을 포함하게 된다. 하지만 확률장의 경우 지반 물성치의 공간적 상관구조를 고려하여 보다 합리적인 불확실성의 재현이 가능하다. 지반 물성치의 공간적 상관구조를 표현하기 위하여 Vanmarcke (1983)는 지반 물성이 강한 상관성이나 일관성을 보이는 공간적 범위를 나타내는 변동모수 (scale of fluctuation)를 제안하였으며, DeGroot and Baecher (1993)는 자기공분산함수가 $1/e$ 까지 감소하는 거리인 자기상관거리 (autocorrelation distance)를 공간적 상관성을 나타내는 지표로 사용하였다. 기존 문헌들에는 다양한 종류의 자기상관모형이 제안되었으며, 지반공학에서 일반적으로 사용되는 자기상관모형은 Li and White (1987), Rackwitz (2000)와 Vanmarcke (1983)에 의하여 제시되었다. 본 연구에서는 식 (1)과 같이 지반공학에서 가장 일반적으로 사용되는 지수형태의 자기상관함수를 적용하였다.

$$C(x_1, x_2) = \sigma^2 e^{-|x_1 - x_2|/r} \quad (1)$$

여기서, r 과 σ 은 자기상관거리와 표준편차이며, x_1 과 x_2 는 일정한 거리를 갖는 두 지점의 값을 나타낸다. Sudret and Der Kiureghian (2000)는 다양한 확률장의 생성기법에 대하여 정리하고 이를 비교하였으며, 급수전개법 중 하나인 KLE (Karhunen-Loeve Expansion)은 가장 효율적이며 분산오차가 작은 것으로 알려져 있다 (Ghanem and Spanos, 2003).

평균 $\mu_w(x)$ 과 분산 $\sigma_w^2(x)$ 을 갖는 Random field, $w(x, \theta)$ 는 KLE에 의하여 다음과 같이 표현할 수 있다 (Spanos and Ghanem, 1989).

$$w(x, \theta) = \mu_w(x) + \sigma_w \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} f_i(x) \xi_i(\theta), \quad x \in \Omega \quad (2)$$

여기서, $\xi_i(\theta)$ 는 비상관 표준정규 확률변수이며, λ_i 와 $f_i(x)$ 는 각각 입력변수에 대한 공분산함수 $C(x_1, x_2)$ 의 고유치 및 고유함수를 나타낸다. 정확한 확률장의 근사를 위해서는 KLE를 무한대로 수행해야 하지만 현실적으로 불가능하며 식 (3)과 같이 적절한 항의 수 (M)를 선정하여 전개할 수 있다.

$$w(x, \theta) = \mu_w(x) + \sigma_w \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} f_i(x) \xi_i(\theta) \quad (3)$$

전개항의 수는 요구되는 정확도에 따라 달라지게 되며 해석영역에 대한 자기상관거리의 비가 증가할수록 주어진 정확도를 얻기 위한 전개항의 수는 감소한다 (Zhang and Lu,

2004). 식 (3)에 의하여 생성된 확률장은 정규분포를 따르며 특정 확률분포를 갖는 비정규 확률장을 재현하기 위하여 가장 널리 사용되는 방법은 표준정규 확률장에 대한 무기억 (memory-less) 비선형 변환이며 (Papadrakakis and Stefanou, 2014; Phoon et al., 2005), 특정 확률분포를 갖는 변수를 생성하기 위하여 다음과 같은 변환법이 적용된다.

$$y = F_Y^{-1}[\Phi(\xi)] \quad (4)$$

여기서, y 는 누적확률분포 (cumulative distribution function) F_Y 을 따르는 변환된 비정규 확률변수이며, F_Y^{-1} 는 누적확률분포의 역함수, Φ 는 표준정규분포의 누적확률분포이다. 만약 식 (3)의 μ_w 과 σ_w 이 각각 0과 1일 경우 표준정규 확률장 ($w_s(x, \theta)$)이 생성되며, 다음과 같이 식 (4)의 ξ 를 $w(x, \theta)$ 로 치환하여 특정 확률분포를 갖는 확률장 ($w_t(x, \theta)$)으로 변환할 수 있다.

$$w_t(x, \theta) = F_Y^{-1}[\Phi(w(x, \theta))] \quad (5)$$

본 연구에서는 확률분포가 압밀도의 확률론적 해석에 미치는 영향을 분석하기 위하여 정규분포 (Normal), 대수정규분포 (Log-normal), 감마분포 (Gamma), 그리고 와이불분포 (Weibull)를 고려하였다.

2. 다층지반의 압밀해석

균질한 지반에 대한 일차원 압밀의 해석은 다음과 같은 Terzaghi의 압밀이론을 통하여 수행할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (6)$$

여기서, c_v , u , t , z 는 각각 수직압밀계수, 과잉간극수압, 시간, 구하고자 하는 점까지의 깊이이다. 하지만은 흙은 본질적으로 비균질하며 Terzaghi의 압밀이론은 단일층에 대한 해석해로 서로 다른 두 층사이의 연속흐름조건을 만족할 수 없다. 이러한 단점을 극복하고자 다층지반의 압밀해석에 대한 다양한 연구가 수행되었다 (Koo and Jeon, 2004; Yune et al., 2008; Sadiku, 2013; Liu et al., 2014; Xie et al., 2016). 하지만 지반의 공간 변동성을 고려하기 위해서는 확률장과 수치해석에 대하여 동일한 크기의 이산화 (discretization) 및 수치해석과의 결합을 필요로 하므로 복잡한 절차가 요구되며, 비록 압밀해석에 대한 기존 수치해석 코드가 존재하더라도 추가적인

작업을 필요로 한다.

간편하게 다층지반의 압밀해석을 수행하기 위한 방법으로 다층지반을 대표적인 지반으로 정규화하여 압밀해석을 수행할 수 있는 간편법이 제안되었다. NAVFAC (1986)은 다층지반의 압밀을 예측하기 위하여 각기 다른 압밀특성을 갖는 n 개 층의 지반을 하나의 단일토층으로 환산하여 압밀해석을 수행하는 방법을 제안하였다. 우선 정규화 대상이 되는 압밀층을 선택한 후, $n-1$ 개의 지층을 선택된 지층에 대해 다음 식을 통하여 환산토층두께를 산정한다.

$$h'_j = h_j \sqrt{\frac{c_{vi}}{c_{vj}}} \quad (7)$$

여기서 h_j 는 원래의 토층두께, h'_j 는 환산 토층두께, c_{vi} 는 정규화 대상토층의 수직압밀계수, 그리고 c_{vj} 는 환산토층에 대한 수직압밀계수를 의미한다. 이와 유사한 방법으로는 토층의 두께는 그대로 두고 다음 식을 통하여 각 토층에 대한 등가압밀계수 (c_e)를 구한 뒤 이를 압밀해석에 사용하는 방법이다 (CUR, 1996).

$$c_e = \frac{\left[\sum_{i=1}^n h_i \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\sqrt{c_i}} \right]^2} \quad (8)$$

두 간편법은 동일한 개념에서 도출된 방법으로 동일한 다층지반에 대한 압밀해석 결과는 동일하다. 하지만 식 (7)을 사용할 경우 확률론적 해석을 수행함에 있어 압밀계수가 변경되면 지반 해석영역 (압밀층 두께)의 크기가 매번 바뀌게 되므로 이에 따른 지반의 재모델링이 요구된다. 따라서 지반의 공간 변동성을 보다 간편하게 고려하기 위하여 등가압밀계수에 대한 식 (8)을 활용하였다. 비록 간편법은 $k_1/k_2 = \sqrt{c_1/c_2}$ (여기서 k_i 는 i 번째 층의 투수계수)를 만족하지 않으면 엄밀해 (exact solution)와 비교하여 정확도가 낮을 수도 있지만 (Urzua and Christian, 2002), 아직까지 현장에서 널리 적용되고 있으며, 이를 통하여 쉽고 간편하게 공간 변동성의 영향을 고려할 수 있다.

3. 확률론적 해석

기존 지반 물성치의 공간 변동성을 고려한 확률해석의 경우 확률장과 수치해석의 결합이 요구된다. 하지만 다층지반의 압밀해석을 위해 간편법을 활용할 경우 확률장과 압밀해

석을 분리하여 해석을 수행할 수 있으므로 압밀해석에 대한 기존 수치해석 코드를 그대로 사용할 수 있으며, 해석해 (analytical solution)를 통해서도 공간 변동성을 고려할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 압밀계수의 공간 변동성을 고려하여 간편하게 확률론적 압밀해석을 수행할 수 있는 방법을 제안하였으며, 그 수행절차는 Fig. 2와 같다.

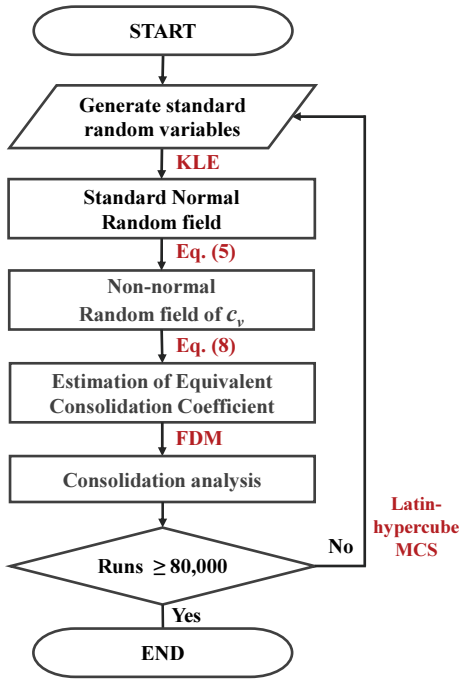


Fig. 2 Flowchart for the proposed probabilistic approach

우선, KLE의 전개항 수를 고려하여 표준정규분포를 따르는 확률변수들을 생성하고 KLE를 통하여 자기상관거리 (또는 변동모수)에 따른 확률장을 생성한다. 생성된 확률장은 표준정규분포를 따르므로 이를 식 (5)를 통하여 특정 확률분포를 갖는 압밀계수에 대한 비정규 확률장을 생성한 뒤, 식 (8)을 사용하여 등가압밀계수를 산정한다. 최종적으로 등가압밀계수를 활용하여 유한차분법 (finite difference method, FDM)을 통한 압밀해석을 수행하여 깊이별 압밀도를 산정할 수 있다. 확률론적 해석은 효율적인 랜덤변수 샘플링을 위하여 Latin hypercube 샘플링 기법 (LHS) (Stein, 1987; Olson et al., 2003)을 사용하였으며 시행횟수는 압밀도의 분포가 충분히 수렴할 수 있도록 80,000회 이상 실시하였다.

4. 대상지반

압밀해석을 위한 대상지반은 ○○지구의 점토층 10 m를 대상으로 하였으며, 지하수위는 거의 지표면과 일치하여 지

반은 포화되어 있는 것으로 간주하였다. 흙의 통일분류법 (USCS) 상 분류는 대부분 CL이며, ML과 SM 등으로 이루어져 있다. 지반조사결과 총 1,226개의 수직압밀계수를 활용하였으며 Fig. 3은 깊이에 따른 수직압밀계수의 분포를 나타낸다.

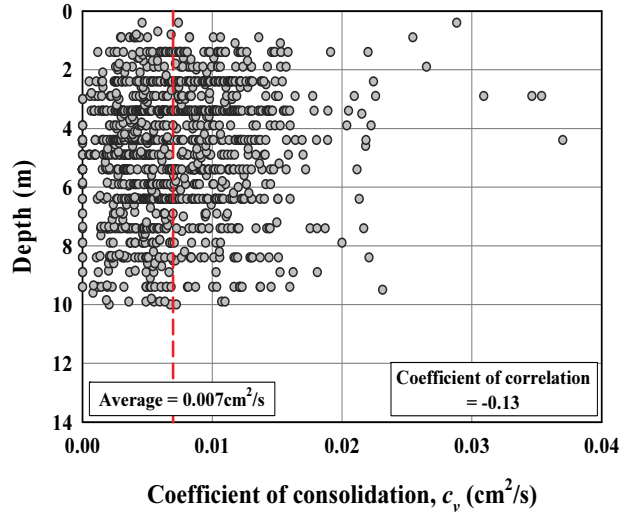


Fig. 3 Distribution of c_v according to depth

수직압밀계수의 평균값은 $0.007 \text{ cm}^2/\text{s}$, 표준편차는 $0.0047 \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 약 66%의 변동계수 (coefficient of variation, COV)를 갖는 것으로 나타났으며, 깊이와 압밀계수의 상관계수는 -0.17로 깊이에 따른 상관성은 없는 것으로 간주하였다. 압밀계수의 확률분포 및 공간 변동성에 따른 영향을 분석하기 위해 다양한 상관거리에 대한 압밀계수의 확률장을 생성하였으며 해석조건은 표 1에 정리하였다.

Table 1 Conditions for random field of c_v

Autocorrelation distance (m)	Mean (cm^2/s)	Standard deviation	COV (%)	Probability distribution
0.5	0.0072	0.0047	65.3	Normal
1.0				Log-normal
3.0				Gamma
5.0				
10.0				
15.0				Weibull

공간 변동성의 영향을 파악하기 위한 자기상관거리는 해석 영역의 크기를 고려하여 총 6개를 선정하였으며 확률분포는 정규분포, 대수정규분포, 감마분포, 와이불분포로 4개를 고려하여 최종적으로 24개의 확률장을 생성하였다.

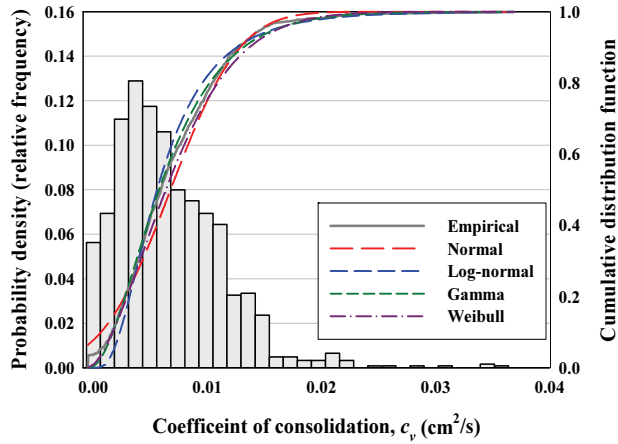


Fig. 4 Comparison of theoretical probability distributions

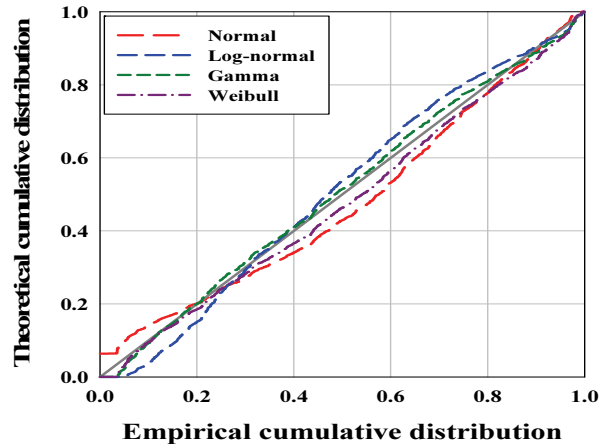


Fig. 5 P-P plots of theoretical probability distributions

III. 결과 및 고찰

1. 확률분포재현

압밀계수의 확률분포에 따른 영향을 비교하기 위하여 4개의 확률분포를 적용하였으며 각 확률분포의 모수는 최대우도법 (maximum likelihood estimation)을 이용하여 산정하였다. 정규분포의 경우 음(-)의 값이 나오는 것을 방지하기 위해 관측값의 최솟값을 하한값으로 설정하였으며 Fig. 4는 압밀계수의 확률분포에 대한 비교를 나타낸다.

확률분포의 종류에 따라 약간의 차이가 있지만 대부분 실제 압밀계수의 확률분포와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 경험적 확률분포와 이론적 확률분포의 차이를 비교하기 위하여 P-P 그래프를 Fig. 5에 나타내었으며, K-S (Kolmogorov Smirnov) 검정을 통한 적합도 (Goodness-of-fit) 검정결과 및 확률구간에 따른 수직압밀계수의 평균절대오차 (Mean Absolute Error, MAE)를 Table 2에 정리하였다.

비록 압밀계수의 확률분포는 대수정규분포가 가장 널리 사용되지만 전 확률구간에 대하여 감마분포가 가장 낮은 K-S 통계량 값과 MAE를 나타내었다. 이것은 감마분포의 형태가 정규분포나 대수정규분포에 비하여 보다 적응적이기 때문인 것으로 판단된다.

2. 등가압밀계수의 통계적 특성

수직압밀계수의 통계적 특성 및 확률분포에 따라 재현된 확률장을 통하여 등가압밀계수를 산정하였으며 확률분포 및 자기상관거리에 따른 등가압밀계수의 평균과 표준편차의 변화는 Fig. 6에 나타내었다.

확률분포에 관계없이 등가압밀계수의 평균과 표준편차는 자기상관거리가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며 이것은 자기상관거리가 증가함에 따라 지반은 균질한 것으로 간주되기 때문인 것으로 판단된다. 공간 변동성을 고려하지 않을 경우 등가압밀계수의 통계적 특성은 수직압밀계수의 통계적 특성과 동일하며 가장 큰 평균과 표준편차를 갖게 되므로 평균 압밀도를 과대평가할 수 있는 것으로 나타났다. 비록 동일한 데이터를 통하여 도출되었지만 확률분포에 따라 각 자기상관거리에 대한 평균 및 표준편차는 다르게 나타났으며 자기상관거리가 작을수록 그 차이는 매우 큰 것으로 나타났다. 이것은 지반의 비균질성이 높을수록 확률분포에 따른 영향이 매우 크게 나타날 수 있음을 의미한다.

3. 확률론적 해석 결과비교

압밀해석은 경과시간 280일 후 지반의 평균 압밀도를 산정하였으며, 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 목표 압밀도 (U_{tar})

Table 2 K-S test results and MAE for probability distributions

Probability distribution	K-S test	Probability interval				
		0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1	Total
Normal	0,0799	0,00088	0,00062	0,00071	0,00047	0,00067
Log-normal	0,0640	0,00073	0,00012	0,00067	0,00081	0,00058
Gamma	0,0351	0,00022	0,00012	0,00027	0,00052	0,00028
Weibull	0,0465	0,00021	0,00031	0,00040	0,00079	0,00042

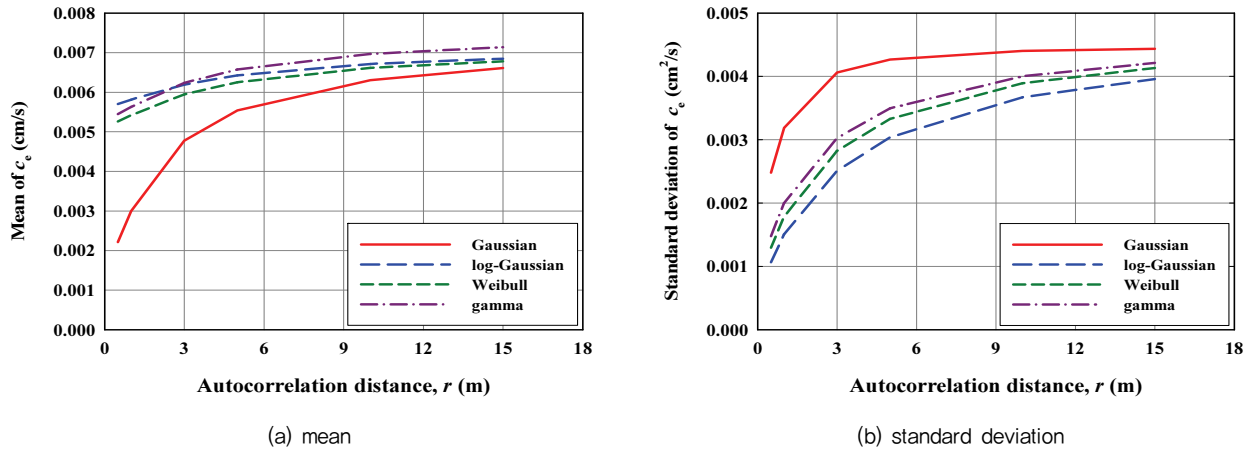


Fig. 6 Changes in the mean and standard deviation of c_e

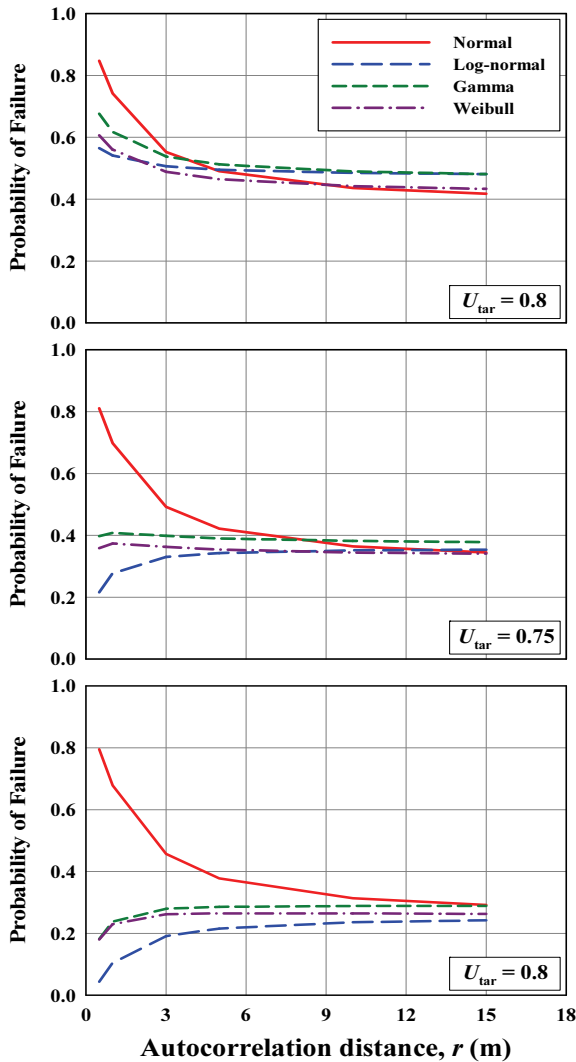


Fig. 7 Failure probability according to the probability distribution and autocorrelation distance

0.7, 0.75, 0.8에 대한 실패확률을 산정하였다. 시뮬레이션의 시행횟수는 각 지점의 압밀도가 일정한 값에 수렴할 수 있도록 80,000회 이상 실시하였으며, 자기상관거리 및 확률분포에 따라 목표 압밀도에 도달하지 못할 확률 (실패확률)을 Fig. 7에 나타내었다.

자기상관거리에 따른 실패확률은 목표 압밀도에 따라 증가 또는 감소하는 것으로 나타났다. 정규분포를 가정한 경우 실패확률은 다른 분포들과 다른 경향을 나타내었는데 이것은 정규분포의 경우 음(-)의 값이 나오는 것을 방지하기 위하여 하한값을 설정하였기 때문이다. 실패확률은 확률분포의 종류에 따라서도 많은 차이가 발생함을 확인할 수 있으며 이러한 결과는 등가압밀계수의 통계적 특성 변화를 통하여 유추할 수 있다. 자기상관거리가 작다는 것은 지반이 비균질함을 의미하며 자기상관거리가 작을수록 확률분포에 따른 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 정규분포의 경우 자기상관거리가 클 경우 다른 분포와 큰 차이를 나타내지 않았지만 작은 경우 약 20~70% 정도의 큰 차이를 나타내었다. 압밀계수의 확률분포로 가장 널리 활용되는 대수정규분포와 현장 데이터와 가장 높은 적합도를 나타낸 감마분포사이의 실패확률에 대한 차이를 비교하였으며 Fig. 8에 나타내었다.

두 분포 사이의 실패확률은 자기상관거리가 0.5 m인 경우 약 18%까지 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 자기상관거리가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 두 분포에 대한 등가압밀계수의 통계적 특성이 자기상관거리가 증가함에 따라 수직압밀계수의 통계적 특성에 수렴하기 때문이다. 하지만 일반적으로 지반은 비균질하며, 특히 수직방향에 대한 지반 물성치의 자기상관거리는 매우 작은 것으로 알려져 있다 (Phoon and Kulhawy, 1999). 따라서 보다 신뢰성 있는 확률론적 결과를 획득하기 위해서

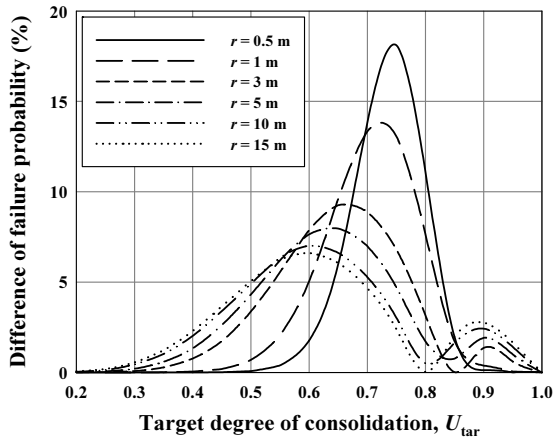


Fig. 8 Difference of failure probability between Log-normal and Gamma distributions

는 지반의 공간변동성의 고려와 함께 올바른 확률분포의 선정 및 고려가 매우 중요할 것이라 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 공간변동성을 고려한 압밀의 확률론적 해석을 수행함에 있어 압밀계수의 확률분포가 해석결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 ○○지구 현장데이터를 바탕으로 4가지 확률분포를 고려하였으며, 공간변동성에 따른 확률론적 해석을 수행하였다. 이에 따라 공간변동성 및 확률분포에 따른 확률론적 해석결과를 비교·분석하였으며 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압밀해석 시, 공간변동성을 쉽고 간편하게 고려하기 위해 등가압밀계수 활용하여 공간변동성을 고려할 수 있는 방법을 제안하였으며, 확률장과 수치해석을 분리하여 해석을 수행할 수 있음에 따라 보다 효율적으로 공간변동성을 고려한 확률론적 해석을 수행할 수 있었다.
2. 확률분포의 영향을 고려하기 위하여 4가지 확률분포 (Normal, Log-normal, Gamma, Weibull)를 고려하였으며 K-S 적합도 검정결과 감마분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 공간변동성의 고려를 위하여 6개의 자기상관 거리를 고려하였으며 이에 따라 24개의 확률장을 KLE 기법을 통하여 생성하였다.
3. 생성된 확률장을 통하여 등가압밀계수를 산정하였으며 자기상관거리가 증가함에 따라 등가압밀계수의 평균 및 표준편차는 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 자기상관거리가 작을수록 확률분포에 따른 차이가 큰 것으로 나

타났다.

4. 효과적인 확률론적 수행을 위해 LHS기반 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 확률론적 압밀해석을 수행하였으며, 목표 압밀도에 따른 실패확률은 공간변동성 뿐만 아니라 확률분포에도 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 확률분포에 따른 차이는 등가압밀계수를 통해서도 유추할 수 있듯이 자기상관거리가 작을수록 큰 차이를 나타냈으며 공간변동성을 고려한 확률론적 해석을 수행함에 있어 보다 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서는 올바른 확률분포의 고려가 매우 중요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Bong, T. H., Y. H. Son, S. K. Noh, and J. S. Park, 2012. The probabilistic Analysis of Degree of Consolidation by Spatial Variability of c_v . *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 55-63. doi:10.5389/KSAE.2012.54.3.055 (in Korean).
2. Bong, T. H., Y. H. Son, S. K. Noh, and J. S. Park, 2014. Probabilistic analysis of consolidation that considers spatial variability using the stochastic response surface method. *Soils and Foundations* 54(5): 917-926. doi:10.1016/j.sandf.2014.09.005.
3. Bong, T., A. W. Stuedlein, 2017. Spatial Variability of CPT Parameters and Silty Fines in Liquefiable Beach Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 143(12): 04017093. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001789.
4. Cho, S. E., 2010. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136(7): 975-984. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000309.
5. Christian, J. T., 2004. Geotechnical engineering reliability: How well do we know what we are doing?. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(10): 985-1003. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(985).
6. CUR, 1996. *Building on Soft Soils*. CRC Press, the Netherlands.
7. DeGroot, D. J., and G. B. Baecher, 1993. Estimating autoconvariance of In-situ soil properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 119(1): 147-166. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:1(147).
8. El-Ramly, H., N. R. Morgenstern, and D. M. Cruden, 2002.

- Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal* 39(3): 665-683. doi:10.1139/t02-034.
9. Fenton, G. A., D. V. Griffiths, 2001. Bearing capacity of spatial random soil: the undrained clay Prandtl problem revisited. *Geotechnique* 51(4): 351-359. doi:10.1680/geot.2001.51.4.351.
 10. Ghanem, R. G., and P. D. Spanos, 2003. Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach. Revised Edition, Dover Publications.
 11. Huang, J., D. V. Griffiths, and G. A. Fenton, 2008. One-dimensional probabilistic uncoupled consolidation analysis by the random finite element method. GeoCongress 2008, 138-145. doi:10.1061/40971(310)17.
 12. Koo, J. K., and J. S. Jeon, 2004. Consolidation Analysis of Multi-layered Systems Considering Drainage Conditions and Geotechnical Properties. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 24(6C): 345-356 (in Korean).
 13. Li, K. S., and W. White, 1987. Probabilistic Characterization of Soil Profiles. Res. Report 19, Dept. Civil Engrn., Australian Defence Force Academy, Canberra, Australia.
 14. Liu J. C., G. H. Lei, and M. X. Zheng, 2014. General solutions for consolidation of multilayered soil with a vertical drain system. *Geotextiles and Geomembranes* 42(3): 267-276. doi:10.1016/j.geotextmem.2014.04.001.
 15. Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC), 1986. Design manual 7.01, Soil Mechanics, 235-236.
 16. Olson, A., G. Sandberg, and O. Dahlblom, 2003. On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis. *Structural Safety* 25: 47-68. doi:10.1016/S0167-4730(02)00039-5.
 17. Papadarakakis, M., and G. Stefanou, 2014. Multiscale Modeling and Uncertainty Quantification of Materials and Structures. Springer, Switzerland.
 18. Phoon, K. K., and F. H. Kulhawy, 1999. Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal* 36: 612-624. doi:10.1139/t99-038.
 19. Phoon, K. K., H. W. Huang, and S. T. Quek, 2005. Simulation of strongly non-Gaussian process using Karhunen-Loeve expansion. *Probabilistic Engineering Mechanics* 20: 188-198. doi:10.1016/j.probengmech.2005.05.007.
 20. Popescu, R., G. Deodatis, A. Nobahar, 2005. Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity. *Probabilistic Engineering Mechanics* 20: 324-341. doi:10.1016/j.probengmech.2005.06.003.
 21. Rackwitz, R., 2000. Reviewing probabilistic soils modeling. *Computers and Geotechnics* 26(3-4): 199-223. doi:10.1016/S0266-352X(99)00039-7.
 22. Sadiku, S., 2013. Analytical and computational procedure for solving the consolidation problem of layered soils. *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics* 37(16): 2789-2800. doi:10.1002/nag.2162.
 23. Spanos, P. D., and R. G. Ghanem, 1989. Stochastic finite element expansion for random media. *Journal of Engineering Mechanics* 115(5): 1035-1053. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:5(1035).
 24. Stein, M., 1987. Large sample properties of simulations using Latin Hypercube Sampling. *Technometrics* 29(2): 143-151. doi:10.2307/1269769.
 25. Sudret, B., and A. Der Kiureghian, 2000. Stochastic finite element methods and reliability: A state-of-the-art Report. Technical Rep., UCB/SEMM-2000/08. Department of Civil and Environmental Engineering, UC Berkeley.
 26. Urzua, A., and J. T. Christian, 2002. Limits on a Common Approximation for Layered Consolidation Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128(12): 1043-1045. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:12(1043).
 27. Vanmarcke, E. H., 1983. Random fields: Analysis and synthesis. MIT Press, Cambridge.
 28. Xie, K. H., C. Q. Xia, R. An, H. W. Ying, and H. Wu, 2016. A study on one-dimensional consolidation of layered structured soils. *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics* 40(7): 1081-1098. doi:10.1002/nag.2477.
 29. Yune, C. Y., K. J. Cho, and C. K. Chung, 2008. Consolidation Analysis for the Interface of Multi-layered and Smeared Soil by Finite Difference Method. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(5C): 283-292 (in Korean).
 30. Zhang, D., and Z. Lu, 2004. An efficient, high-order perturbation approach for flow in random porous media via Karhunen-Loeve and polynomial expansions. *Journal of Computational Physics* 194(2): 773-794. doi:10.1016/j.jcp.2003.09.015.