

# 지반의 공간변동성을 고려한 액상화에 의한 침하량의 확률론적 해석

## Probabilistic Analysis of Liquefaction Induced Settlement Considering the Spatial Variability of Soils

봉 태 호<sup>1</sup> Bong, Tae-Ho

김 병 일<sup>2</sup> Kim, Byoung-II

### Abstract

Liquefaction is one of the major seismic damage, and several methods have been developed to evaluate the possibility of liquefaction. Recently, a probabilistic approach has been studied to overcome the drawback of deterministic approaches, and to consider the uncertainties of soil properties. In this study, the spatial variability of cone penetration resistance was evaluated using CPT data from three locations having different variability characteristics to perform the probabilistic analysis considering the spatial variability of soil properties. Then the random fields of cone penetration resistance considering the spatial variability of each point were generated, and a probabilistic analysis of liquefaction induced settlement was carried out through CPT-based liquefaction evaluation method. As a result, the uncertainty of soil properties can be overestimated when the spatial variability is not considered, and significant probabilistic differences can occur up to about 30% depending on the allowable settlement.

### 요 지

액상화는 지진에 의해 발생하는 대표적인 피해 중 하나로 이에 대한 가능성을 평가하기 위한 많은 방법들이 개발되었으며, 최근에는 지반이 갖는 불확실성을 합리적으로 고려하기 위한 확률론적 접근방법에 대한 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 지반의 물성치가 갖는 공간 변동성을 고려하여 확률론적 해석을 수행하고자 서로 다른 변동특성을 갖는 세 지점의 CPT 데이터를 활용하여 콘관입 저항치에 대한 공간 변동성을 평가하였다. 이후, 각 지점의 공간 변동성을 고려한 콘관입 저항치의 확률장을 생성하였으며, CPT기반 액상화 평가방법을 통하여 액상화에 의해 유발되는 침하량의 확률론적 해석을 수행하였다. 연구결과, 공간변동성이 고려되지 않을 경우 지반의 불확실성을 과대평가할 수 있으며, 기준 허용 침하량에 따라 약 30%까지 큰 확률론적 차이가 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Liquefaction, CPT (Cone Penetration Test), Spatial variability, Scale of fluctuation, Settlement, Probabilistic analysis

1 비회원, 오레곤 주립대학교 토목건설공학과 박사후 연구원 (Post Doctoral Researcher, School of Civil and Construction Engr., Oregon State Univ., U.S.A.)

2 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., Myongji Univ., Tel: +82-31-330-6415, Fax: +82-31-336-9705, bikim@mju.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

전 세계적으로 지진발생빈도는 꾸준히 증가하는 추세이며, 최근 국내에서도 크고 작은 지진들의 발생으로 국민의 불안감과 경각심이 고조되고 있다. 기상청(2016) 자료에 따른 우리나라 지진발생 추이를 살펴보면 지진의 발생횟수는 계속 증가하고 있으며 일정규모 이상의 강진이 꾸준히 관측되고 있다. 이에 따라 우리나라도 더 이상 지진에 대한 안전시대가 아니며 이에 대한 대비가 필요하다는 사회적 목소리가 확산되고 있다. 지진에 의한 피해 중 지반에서 발생하는 대표적인 형태는 액상화(liquefaction)로, 액상화가 발생하게 되면 지반은 전단 강도를 거의 상실하게 되며 이로 인하여 상부 구조물의 파괴나 부등침하, 측방유동, 제방붕괴 등 큰 피해를 가져올 수 있다.

지금까지 액상화의 가능성을 평가하기 위한 수많은 연구들이 이루어져 오고 있으며, 다양한 시험결과를 통한 액상화 가능성 평가기법이 제안되었다. 특히, 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)과 콘관입시험(Cone Penetration Test, CPT)을 통한 액상화 평가 기법에 대한 많은 연구들이 수행되었으며, 가장 일반적으로 활용되고 있는 방법이다. SPT기반 액상화 평가는 Seed and Idriss(1971)에 의하여 간이평가기법이 개발되었으며, 아직까지 SPT를 활용한 다양한 액상화 평가기법의 기반이 되고 있다. CPT기반의 액상화 평가기법은 Zhou (1980)에 의하여 처음 제시되었으며, 이 후 이에 대한 다양한 연구들이 이루어져 오고 있다(Shibata and Teparaksa, 1988; Olsen, 1997; Idriss and Boulanger, 2008). 국내의 경우, Kim et al.(2000)은 Seed and Idriss의 방법에 대한 수정 보완을 통하여 국내 여건을 고려할 수 있는 액상화 가능성 평가 기법을 제안하였으며, Kim et al.(2006)은 액상화 저항강도 산정 시 지진하중을 합리적으로 고려할 수 있도록 에너지 개념에 기초한 액상화 평가방법을 제안하였다. 또한, Jung et al.(2007)은 SPT기반 액상화 평가 시 N값의 유효상재압 보정의 문제점을 분석하고 국내 지반에 적합한 개선방안을 제시한 바 있다. 하지만 기존의 액상화 가능성 평가 방법은 주로 지반의 물성치를 대푯값으로 고려하는 결정론적 방법에 기초하고 있으며, 지반의 물성치가 갖는 많은 불확실성을 합리적으로 고려할 수 없는 단점이 있다(Juang et al., 1999; Hwang et al., 2004). 따라서 최근에는 기존 결정론적 방법에 기초한 액상화 평가의 단점을 극복하기 위해 확률론적 점

근방법을 통한 액상화 평가기법에 대한 많은 연구가 수행되고 있다(Cetin et al., 2004; Yi et al., 2006; Juang et al., 2006). 그러나 지반의 불확실성을 정량화함에 있어 지반이 갖는 불확실성의 가장 큰 특징은 지반 물성치가 무작위성(randomness)이 아닌 거리에 따라 점진적 변화(gradual variation) 양상을 나타내는 공간적 상관구조를 갖는다는 점이다.

지반의 공간변동성은 지질학적 이질성, 퇴적조건, 응력이력 등의 원인으로 발생하며 지반의 불확실성을 유발하는 본질적인 원인으로 지반 공학적 문제에 있어 지반의 거동 예측에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Eikateb et al., 2003). 이러한 공간 변동성은 제거하거나 줄일 수 없는 흙의 고유한 불확실성으로 이를 고려하여 지반 물성을 예측함으로써 보다 나은 결과를 얻을 수 있다. 특히, 지반 침하와 같은 공학적 거동은 극단치보다 국부적으로 평균화된 물성에 지배를 받으므로 확률론적 해석 수행 시 공간변동성의 고려가 매우 중요한 것으로 알려져 있다. 따라서 확률론적 해석에 있어 지반의 물성치는 모든 지점에서 동일한 값을 갖는 단일의 확률변수(random variable)가 아닌 공간적 상관구조가 고려된 확률장(random field)으로 취급되어야 한다. 국외의 경우 이러한 점을 반영하여 액상화의 확률론적 해석에 있어 지반의 공간변동성을 반영하여 보다 합리적인 결과를 얻고자 하는 연구가 이루어지고 있다(Popescu et al., 2005; Vivek and Raychowdhury, 2011; Saygili, 2016). 그러나 국내의 경우 액상화의 확률론적 해석에 대한 연구는 미비하며, 액상화 평가 시 지반의 공간변동성을 고려한 연구는 아직까지 전무하다. 또한, 지진 시 액상화에 의해 유발되는 침하는 건물의 파괴나 부등침하, 기초 시설물의 붕괴 등 큰 피해를 가져올 수 있지만 이에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 지반의 공간변동성을 고려하여 CPT 기반 액상화 평가 및 이에 따른 침하량의 확률론적 해석을 수행하였다. 이를 위하여 다른 변동성을 갖는 세 지점의 CPT 데이터를 활용하여 콘관입 저항치에 대한 공간변동성을 평가하고 변동모수 및 통계적 특성을 산정하였다. 액상화 평가 시 공간변동성을 반영하기 위하여 산정된 결과를 바탕으로 콘관입 저항치의 확률장을 Karhunen-Loeve 전개법을 통하여 생성하였으며, CPT기반 액상화 평가 방법과 결합하여 각 지층별 액상화의 안전율 및 이에 따른 침하량을 산정하였다. 확률론적 해석은 Monte-carlo 시뮬레이션 기법을 통하여 수행하였으며, 공간변

동성의 고려 유무에 따른 영향 및 침하량의 확률론적 결과의 차이를 비교 및 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 공간 변동성

자연 상태의 지반 물성치는 매우 높은 변동성을 갖고 있으며 공간에 따라 균질하지 않다. 이러한 흙의 이질성은 크게 지질학적 이질성과 퇴적환경이나 응력이력에 따라 발생하는 흙의 고유한 공간 변동성에 의한 이질성으로 분류할 수 있다(Elkateb et al., 2003). Lumb(1968; 1975)은 지반 물성치가 상대적인 위치에 따라 변하며 이를 선형적 추세와 무작위 변동의 합으로 표현되는 공간 상관구조에 대한 기본적인 모형을 제안하였으며, Agterberg(1970)는 자기상관함수를 도입하여 공간변동 구조를 나타내었다. 또한, 공간 변동성을 정량적으로 표현하기 위한 방법으로 Padilla and Vanmarcke(1974)는 상관거리(correlation distance)를 제안하였으며 DeGroot and Baecher(1993)는 자기공분산함수가  $1/e$ 까지 감소하는 거리인 자기상관거리(autocorrelation distance)를 공간적 상관성을 나타내는 지표로 사용하였다. Vanmarcke(1983)는 지반물성을 확률장으로 표현하는데 평균, 분산, 변동모수(scale of fluctuation, SOF)의 세 가지 매개변수가 필요하다고 하였다. 이 중 변동모수는 지반 물성이 강한 상관성이나 일관성을 보이는 공간적 범위를 나타내는 것으로 이를 추정하는 기법은 다음과 같다.

- 간편법(Vanmarcke, 1977)
- 분산감소함수를 이용하는 방법(Vanmarcke, 1977)
- 표본자기상관함수와 바트렛 한계를 이용하는 방법(Jaksa, 1995)
- 이론 자기상관모형 적합법(DeGroot and Baecher, 1993)

일반적으로 표본 자기상관함수(autocorrelation function,

ACF)와 바트렛 한계를 이용하는 방법과 이론 자기상관모형(autocorrelation model, ACM) 적합법이 널리 사용되고 있다. 바트렛 한계란 표본자기상관계수는 자기상관계수의 추정이므로  $\rho(\tau)=0$  일 때의 자기상관거리는 정확히 알 수 없지만 표본수( $n$ )에 대하여 이론 자기상관함수가 0 일 것으로 생각되는 지연거리에 대한 기준으로 다음 식과 같다.

$$\text{Bartlett's Limit} \approx \frac{\pm 1.96}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

추세성분을 제거한 변동성분에 대한 자기상관함수는 다음 식을 통하여 산정할 수 있다.

$$\rho(\tau_j) = \frac{\frac{1}{n_d - j} \sum_{i=1}^{n_d - j} w_i \cdot w_{i+j}}{\sigma^2} \quad (2)$$

여기서  $\rho(\tau_j)$ 는 지연거리  $j$ 에 대한 상관계수를 의미하며  $w_i$ 는  $i$  번째 변동성분,  $w_{i+j}$ 는  $i$ 로부터  $j$ 만큼 떨어진 지점의 변동성분,  $\sigma^2$ 은 자료의 분산을 나타낸다. 변동모수는 자기상관함수가 바트렛 한계와 만나는 교점에 대한 지연거리이며, 강한 공간상관성을 갖는 범위로 간주된다. 자기상관모형 적합법은 이론적 자기상관모형을 표본자기상관함수에 적합시켜 최적의 매개변수를 산출하고 이를 근거로 변동모수를 평가하는 방법으로 일반적인 자기상관모형의 종류는 Table 1에 정리하였다.

Lumb(1974)는 자기상관함수가 바트렛 한계를 벗어나면 신뢰성이 떨어지고 유의한 상관성이 간주되므로 변동모수를 선정할 때 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 바트렛 한계 이내의 표본점에 대한 상관계수만을 이용할 것을 제안하였다.

### 2.2 Karhunen-Loeve 전개법

지반의 공간 변동성은 확률장을 통하여 효과적으로 나

Table 1. ACM and corresponding scale of fluctuation

Autocorrelation model	Equation	Scale of fluctuation
Single exponential (SNX)	$\rho(\tau) = \exp(-k_{SNX} \tau )$	$\delta = 2/k_{SNX}$
Cosine exponential (CSX)	$\rho(\tau) = \exp(-k_{CSX} \tau )\cos(-k_{CSX} \tau )$	$\delta = 1/k_{CSX}$
Second-order Markov (SMK)	$\rho(\tau) = \exp(1 + k_{SMK} \tau )\exp(-k_{SMK} \tau )$	$\delta = 4/k_{SMK}$
Squared exponential (SQX)	$\rho(\tau) = \exp(-k_{SQX} \tau )^2$	$\delta = \sqrt{\pi}/k_{SQX}$

\*  $\tau$  = lag distance

타낼 수 있으며 Sudret and Der Kiureghian(2000)는 다양한 확률장의 생성기법에 대하여 정리하고 이를 비교하였다. 급수전개법 중 KLE(Karhunen-Loeve Expansion)은 가장 효율적이며 분산오차가 작은 것으로 알려져 있다(Ghanem and Spanos, 2003). 따라서 본 연구에서는 KLE을 통하여 확률장을 생성하였다. 평균  $\mu_x$ 과 분산  $\sigma_x^2$ 을 갖는 확률장,  $w(x, \theta)$ 는 KLE에 의하여 다음과 같이 표현할 수 있다(Spanos and Ghanem, 1989).

$$w(x, \theta) = \mu_x + \sigma_x \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} f_i(x) \xi_i(\theta), \quad x \in \Omega \quad (3)$$

여기서,  $\xi_i(\theta)$ 는 비상관 표준정규 확률변수이며,  $\lambda_i$ 와  $f_i(x)$ 는 각각 입력변수에 대한 공분산함수  $C(x_1, x_2)$ 의 고유치 및 고유함수를 나타낸다. 공분산 함수는 대칭, 양정치(positive definite)이며, Mercer의 정리에 따라 스펙트럼 분해를 통하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i f_i(x_1) f_i(x_2) \quad (4)$$

지반공학 분야에서 사용되는 공분산함수는 Li and Lumb (1987)과 Rackwitz(2000)에 의하여 제시되었으며, 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 지수형태의 상관함수를 적용하였다.

$$C(x_1, x_2) = \sigma^2 e^{-|x_1 - x_2|/r} \quad (5)$$

여기서,  $r$ 은 자기상관거리로 그 값이 클수록 공간적 상관성이 크게 나타남을 의미한다. KLE는 급수 전개법을 통한 근사적 확률장 생성 방법이므로 정확한 확률장의 재현을 위해서는 KLE의 전개항을 무한대로 수행하여야 하지만 현실적으로 불가능하며 요구되는 정확도에 따라 식 (6)과 같이 적절한 항의 수( $M$ )를 선정하여 전개할 수 있다.

$$w(x, \theta) = \mu_x + \sigma_x \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} f_i(x) \xi_i(\theta) \quad (6)$$

식 (6)에 의하여 생성된 확률장은 정규분포를 따르며 일반적으로 데이터의 불충분함과 편리함을 이유로 자주 사용된다. 하지만 확률변수가 항상 양의 값을 갖는

경우나 확률분포가 로그정규분포를 따르는 경우 적합하지 않다. 따라서 로그정규분포를 따르는 확률장은 다음 식을 통하여 산정할 수 있다.

$$w(x, \theta) = \exp(\mu_{\ln x} + \sigma_{\ln x} \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} f_i(x) \xi_i(\theta)) \quad (7)$$

여기서,  $\mu_{\ln x}$ 와  $\sigma_{\ln x}$ 는 정규분포를 따르는  $\ln x$ 의 평균과 표준편차를 나타낸다.

### 2.3 CPT 기반 액상화 평가

액상화 발생 가능성에 대한 평가는 현장시험 결과를 이용한 간편법, 진동삼축시험결과를 이용한 상세법, 수치해석 기법 등 여러 가지가 제안되었으며 실용적으로는 현장시험 결과를 이용한 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 현장 시험결과를 이용한 기존의 방법에는 크게 (1) 표준관입시험 결과를 이용하는 방법(Seed and Idriss, 1985), (2) 콘관입시험 결과를 이용하는 방법(Olsen et al., 1984; Robertson and Wride, 1998), (3) 전단파 속도를 이용하는 방법(Andrus and Stokoe, 2000), (4) 베커관입시험을 이용한 방법(Harder and Seed, 1986) 등이 있다. 이 중에서 CPT를 이용한 액상화 평가는 연속적인 콘관입 저항치를 얻을 수 있어 층별 해석이 용이하며, 표준관입시험에 비하여 높은 정밀도를 제공하고 다양한 지반 물성치의 추정이 가능한 장점이 있어 이를 활용한 액상화 평가가 증가하고 있는 추세이다.

지진에 따른 액상화 평가는 지진력에 대한 진동전단응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR)와 지진 시 액상화에 대한 저항력을 표현하는 진동저항응력비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 통하여 액상화에 대한 안전율( $FS_L = CRR/CSR$ )을 산정할 수 있다. 지진에 따른 진동전단응력비는 Seed and Idriss(1971)에 의하여 다음 식과 같이 제안되었다.

$$CSR = 0.65 \left( \frac{a_{\max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \gamma_d \quad (8)$$

여기서,  $a_{\max}$ 는 지진 시 지표면에서의 최대 수평가속도( $g$ ),  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $\sigma_v$ (MPa)와  $\sigma'_v$ (MPa)는 각각 연직 전응력과 연직 유효응력이며,  $\gamma_d$ 는 깊이에 따른 응력 감소계수를 나타낸다. CPT를 활용한 액상화 평가방법은 다양한 연구자에 의하여 제시되었으며 방법에 따른 가

장 큰 차이는 콘관입 저항치와 진동전단응력비 사이의 상관관계를 어떻게 규명하는가 하는 점이다. Boulanger and Idriss(2014)는 지진 발생사례 추가를 통하여 기존 상관관계를 보완하고 이에 대한 적용절차를 제시하였으며, 본 논문에서도 이를 적용하여 액상화 평가를 수행하였다. 최종적인 진동저항응력비는 다음 식을 통하여 산정할 수 있다.

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_m=1atm} = \exp\left(\frac{q_{clNcs}}{113} + \left(\frac{q_{clNcs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{clNcs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{clNcs}}{137}\right)^4 - 2.8\right) \quad (9)$$

여기서,  $q_{clNcs}$ 는 측정된 콘관입 저항치이며,  $q_c$ (Mpa)에 대하여 간극수압, 상재하중, 세립분에 따른 영향을 보정한 값이다.

## 2.4 액상화에 의한 침하량

Ishihara and Yoshimine(1992)는 Nagase and Ishihara (1988)에 의하여 보고된 실험 데이터에 기반하여 액상화에 대한 안전율과 지진 발생 시 전단 변형률의 최대 단일진폭을 통해 깨끗한 모래의 체적변화를 예측하기 위한 방법론을 제시하였다. 이에 기초하여 Yoshimine et al.(2005)는 지반의 최대체적변형률( $\epsilon_{v,max}$ )을 구할 수 있는 절차를 다음과 같이 제시하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{v,max}(\%) &= 1.5 \exp(-0.025 D_{r,ini}) \gamma_{max} & \text{if } \gamma_{max} \leq 8\% \\ \epsilon_{v,max}(\%) &= 12 \exp(-0.025 D_{r,ini}) & \text{if } \gamma_{max} > 8\% \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $D_{r,ini}$ (%)과  $\gamma_{max}$ (%)는 각각 초기상대밀도 및 최대전단변형률을 나타낸다. CPT 데이터를 활용한 상대밀도의 추정에는 많은 연구자들에 의하여 제안되었으며, 본 연구에서는 Mayne(2007)에 의하여 제안된 다음 식을 통하여 산정하였다.

$$D_r(\%) = 100 \left[ 0.268 \ln \left( \frac{q_t / \sigma_{atm}}{\sqrt{\sigma'_{vo} / \sigma_{atm}}} \right) - 0.675 \right] \quad (11)$$

여기서  $q_t$ (MPa)는 콘관입 저항치이며,  $\sigma'_{vo}$ (MPa)과  $\sigma_{atm}$ (MPa)은 각각 유효수직응력 및 대기압을 나타낸다. 최대전단변형률은 다음 식을 통하여 산정된다.

$$\begin{aligned} \gamma_{max}(\%) &= 3.5(2 - FS_L) \frac{1 - F_{ult}}{FS_L - F_{ult}} \\ &\text{if } F_{ult} \leq FS_L \leq 2.0 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $FS_L$ 는 액상화에 대한 안전율이며,  $F_{ult}$ 는 극한상태에 대한 안전율로 다음 식을 통하여 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{ult} &= -0.0006 D_{r,ini}^2 + 0.047 D_{r,ini} + 0.032 & \text{if } D_{r,ini} \geq 39.2\% \\ F_{ult} &= 0.9524 & \text{if } D_{r,ini} < 39.2\% \end{aligned} \quad (13)$$

만약  $FS_L$ 이 2.0보다 크면  $\gamma_{max} = 0$ 이고,  $FS_L \leq F_{ult}$ 이면  $\gamma_{max}$ 는 무한대인 것으로 간주된다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 CPT data

본 연구에서는 지반의 공간적 변동성을 분석하고 이에 따른 영향을 파악하고자 실트질 모래지반에 대한 서로 다른 세 지점의 CPT 데이터를 활용하였다. 항만 및 어항 설계기준(2014)에 따르면 지하수위 위의 지반 및 액상화 평가를 위한 대상지반심도가 20m 이상이면 액상화 평가를 생략할 수 있다. 또한, 콘관입 저항치에 상재하중의 보정계수를 곱한 값인  $q_{cl} = C_N \cdot q_c$ 가 13MPa 이상인 경우에도 액상화 평가를 생략할 수 있다. 액상화 평가를 위한 세 지점의 지하수위는 2m로 세 지점에서 동일한 것으로 가정하였으며 실트질 모래층의 심도는 각각 9.2, 9.5, 9.56m로 모두 20m 미만인 것으로 나타남에 따라 G.L-2m부터 각 지점의 실트질 모래층에 대한 깊이까지를 액상화 해석 영역으로 설정하였다. 실트질 모래의 포화단위중량은 약 1.65~1.85t/m<sup>3</sup> 범위의 값을 갖는 것으로 나타났다. 지반의 변동모수를 산정하기 위한 콘관입 저항치는 간극수압에 의한 영향을 보정한 결과( $q$ )를 활용하였다. Fig. 1은 각 지점의 깊이에 따른 보정된 콘관입 저항치 및 추세선과 추세성분이 제거된 변동성분을 나타내며, 이에 대한 통계적 특성 및 추세성분에 대한 결과는 Table 2에 정리하였다.

지반의 고유한 변동성은 추세성분의 평균과 추세성분이 제거된 변동성분의 표준편차를 이용하여 산정할 수 있으며(Phoon and Kulhawy, 1999), Case 1의 경우 변동계수는 35.9%로 Case 2에 비하여 약 4.6배 높은 변

동성을 갖는 것으로 나타났다.

추세성분이 제거된 변동성분은 정상성(stationary) 조건을 만족하여야 한다. 정상성은 위치에 따라 평균 및 분산이 변하지 않으며, 공분산은 위치에 의존하지 않고 오직 두 지점간의 거리에만 의존하는 것을 의미한다(Baccher and Christian, 2003). Bennett(1979)은 육안검사, 자기상관함수 검사, 추세의 유의성 확인 등 데이터의 정상성 확인을 위한 5가지 방법을 제안하였다. 하지만 어떤 방법도 그 자체로 완전하지 않다(Jaksa, 1995). 본 연구에서는 지반공학 분야에서 주로 사용되는 비모수적 기법 중 하나인 Kendall's tau 검정을 통하여 변동성분의 정상성을 검증하였다. Kendall's tau 검정은  $n_d$ 개의 측정점을 가지는 데이터 집합에서 측정점의 짝이 서로 조화될(concordant) 확률과 조화되지 않을(discordant)의 차( $S_{ken}$ )를 나타내는  $\tau_{ken}$ 을 검사하는 방법이다(Ravi, 1992). 각 측정점의 짝  $(x_i, y_i), (x_{ij}, y_j)$ 에서  $x_i > x_j$ 이고  $y_i > y_j$ 이거나  $x_i < x_j$ 이고  $y_i < y_j$ 이면 조화한다고 하고,  $x_i > x_j$ 이고  $y_i < y_j$ 이거나  $x_i < x_j$ 이고  $y_i > y_j$ 이면 조화하지 않는다고 한다. 이에 따라 Kendall's tau값은 다음 식을 통하여 산정할 수 있다.

$$\tau_{ken} = \frac{S_{ken}}{\frac{1}{2}n_d(n_d - 1)} \quad (14)$$

Kendall's tau 값은 -1에서 +1의 범위를 가지며 0에 가까우면 데이터가 정상상태를 갖는 것으로 간주할 수 있다. 선형 추세성분이 제거된 세 지점에 대한 Kendall's tau 값은 각각 0.055, -0.068, -0.016으로 깊이에 따른 상관성이 크게 나타나지 않아 세 지점의 변동성분은 모두 약정상성을 갖는 것으로 간주하였다.

### 3.2 콘관입 저항치의 공간 변동성 분석

세 지점에 대한 콘관입 저항치의 공간 변동성 분석을 위하여 지연거리(lag distance)에 대한 자기상관계수를 산정하고, 표본 자기상관함수와 바트렛 한계법 및 자기상관모형 적합법을 적용하여 변동모수를 산정하였다.

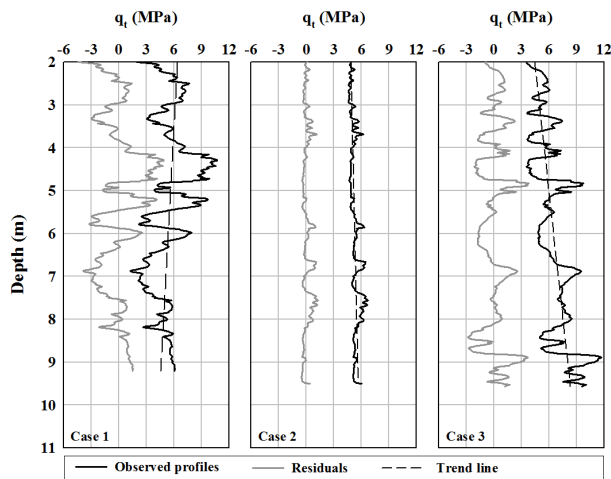
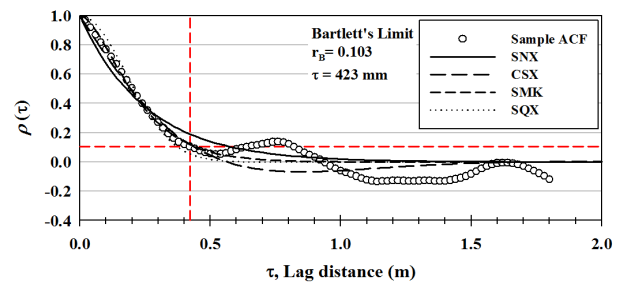


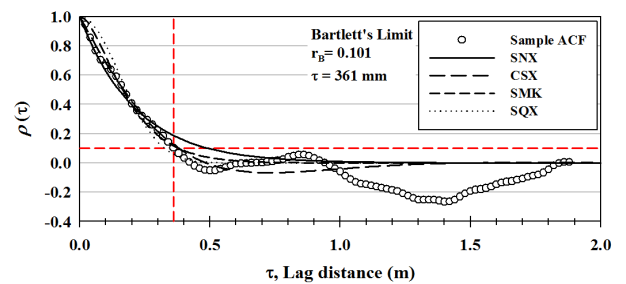
Fig. 1. Observed and de-trended  $q_t$

Table 2. Summary of statistical properties and trend for  $q_t$

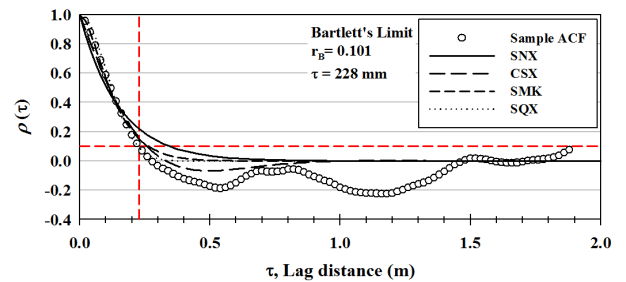
Case	Mean (MPa)	Trend		Residual	
		Slope (MPa/m)	Intercept (MPa)	Standard deviation	COV (%)
1	5.464	-0.251	6.872	1.961	35.9
2	5.250	0.105	4.645	0.408	7.8
3	6.411	0.512	3.451	1.375	21.4



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 2. Sample autocorrelation function and fitted autocorrelation models

자기상관계수의 측정간격은 콘관입 저항치의 간격과 동일한 20mm이며, 바트렛 한계는 식 (1)을 통하여 산정하였다. 따라서 표본 자기상관함수의 경우 자기상관계수가 바트렛 한계와 만나는 지점의 지연거리를 변동모수로 산정하였으며, 자기상관모형 적합법은 바트렛 한계 이내의 표본 자기상관계수와 자기상관모형에 따른 자기상관계수의 평균제곱근오차(RMSE)가 가장 작게 나타나는 매개변수를 산정하고 이에 따라 변동모수를 산정하였다. Fig. 2는 세 지점에 대한 표본 자기상관함수 및 4가지 자기상관모형 적합에 대한 결과를 나타내며, 이를 Table 3에 정리하였다.

보정된 콘관입 저항치의 표본 변동모수는 0.23~0.42m로 해석영역에 비하여 매우 작은 것으로 나타났다. 자기상관모형 적합에 따른 변동모수는 자기상관모형의 종류에 따라 조금씩 다른 값을 나타내긴 하였지만 바트렛 한계 내에서 표본 자기상관함수와 자기상관모형의 자기상관계수에 대한  $R^2$ 는 모든 자기상관모형에 대하여 0.98 이상이며, RMSE도 낮게 나타남에 따라 유의미한 범위내의 공간적 상관구조를 효과적으로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 공간변동성을 고려한 침하량의 확률분포

보정된 콘관입 저항치는 로그정규분포를 갖는 것으로 가정하였으며, 각 지점의 액상화에 의한 침하량은 지반의 공간변동성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 지진규모는 규모보정을 위한 기준 값인 7.5로 설정하였으며, 지표면 최대지반가속도는 진도 8에 해당하는 0.2g로 가정하고 이에 대한 액상화 안전율 및 침하량을 산정하였다. 결정론적 방법에 따른 CPT를 활용한 액상화 안전율 및 이에 따른 누적 침하량은 Fig. 3과 같다.

CPT데이터에 따라 각 깊이별 안전율을 산정할 수 있었으며 콘관입 저항치의 분포(Fig. 1)를 통하여 유추할 수 있듯이 Case 1의 경우 깊이에 따른 안전율의 변동이 가장 크게 나타났으며, Case 2의 경우는 깊이에 따른 안전율의 변동성이 크지 않은 것으로 나타났다. 안전율에 따른 각 지점의 누적침하량은 각각 27.1, 28.6, 25.0cm로 나타났다.

확률론적 해석은 Monte-carlo 시뮬레이션을 통하여 수행하였으며 그 수행절차는 Fig. 4와 같다. 확률장 생성을 위한 확률시행횟수는 침하량의 통계적 특성이 일정한 값에 충분히 수렴할 수 있도록 60,000회 이상 실시

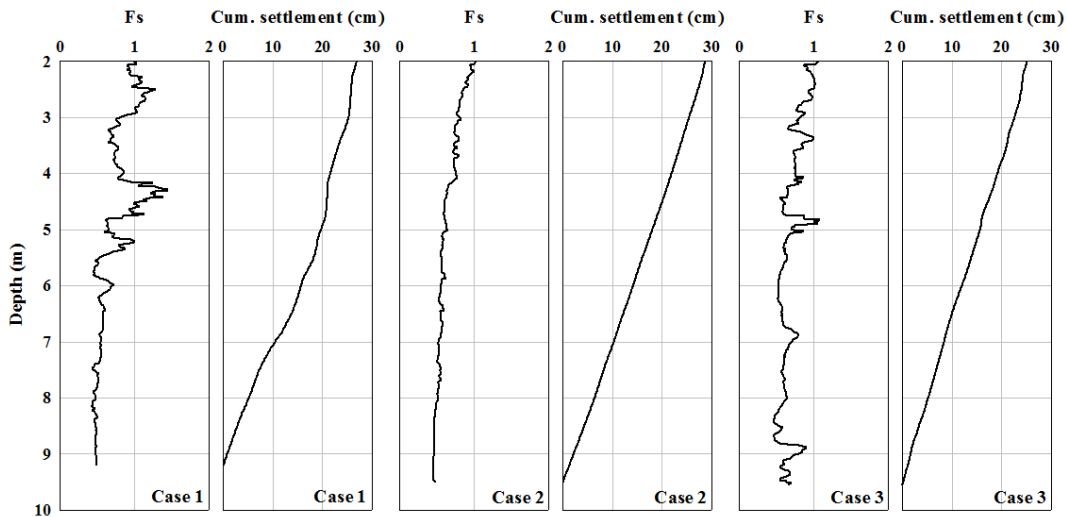


Fig. 3. Safety factor and cumulative settlement

Table 3. Scale of fluctuation for sample and autocorrelation models

Case	Sample SOF (m)	Autocorrelation model							
		RMSE				SOF (m)			
		SNX	CSX	SMK	SQX	SNX	CSX	SMK	SQX
1	0.42	0.070	0.029	0.019	0.048	0.51	0.36	0.46	0.44
2	0.36	0.047	0.020	0.047	0.083	0.43	0.31	0.39	0.38
3	0.23	0.076	0.047	0.027	0.034	0.30	0.21	0.27	0.26

하였다.

확률론적 해석에 따른 액상화에 의한 침하량의 확률 분포 및 누적확률분포는 Fig. 5에 나타내었으며 이에 대한 통계적 특성을 Table 4에 정리하였다. 공간변동성을 고려하지 않을 경우 변동모수(또는 자기상관거리)는 무한대( $\delta=\infty\text{m}$ )로 간주할 수 있으며, 이는 지반이 매우 균질함을 의미한다. 해석결과, 침하량의 평균은 공간변동성의 고려 유무에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타내었다. 하지만 침하량의 분포는 Fig. 4의 확률분포 그래프를 통해서 파악할 수 있듯이 매우 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. 지반의 공간변동성을 고려한 경우 세 지점 모두 침하량에 대한 표준편차가 감소함에 따라 변동계수는 약 74~79% 감소하였다. 특히, Case 1의 경우 콘관입 저항치의 변동성이 가장 높게 나타남에 따라 공간변동성 고려 유무에 따른 변동계수의 차이가 가장 크게 나타났으며, Case 2의 경우 상대적으로 낮은 차이를 나타내었다. 이는 단순히 지반 물성치를 하나의 확률변수로 취급할 경우, 지반 전체가 매우 낮거나 또는 매우 높

은 물성치를 갖는 비합리적인 지반조건에 대한 해석을 포함하게 되므로 확률론적 해석결과는 높은 변동성을 갖게 되기 때문이며, 콘관입 저항치의 변동성이 클 경우 확률론적 해석결과 또한 이를 반영하여 큰 변동성을 갖게 된다. 결과적으로 공간변동성이 고려되지 않을 경우 지반의 불확실성은 과대평가될 수 있으며, 콘관입 저항치의 변동성이 클수록 공간변동성 고려 유무에 따른 결과의 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

공간변동성 고려유무에 따른 확률적 차이를 정량적으로 비교하기 위하여 허용 침하량에 따른 초과확률의 차이를 다음과 같이 산정하고 Fig. 6에 나타내었다.

$$P_{\text{difference}} = P_1[S \geq S_{\text{allowable}}] - P_2[S \geq S_{\text{allowable}}] \quad (15)$$

여기서  $S$ 는 해석결과에 따른 침하량(cm),  $S_{\text{allowable}}$ 은 허용 침하량(cm)을 나타내며,  $P_1$ 은 공간변동성을 고려하지 않은 경우의 초과확률,  $P_2$ 는 공간변동성을 고려한 경우의 초과확률을 나타낸다.

공간변동성을 고려하지 않은 경우 공간변동성 고려 유무에 따른 누적확률분포가 서로 교차하는 지점의 침하량을 기준으로 이보다 큰 침하량에 대한 초과확률 산정 시 초과확률을 과대평가, 기준보다 작은 침하량에 대해서는 과소평가할 수 있으며, 기준 허용 침하량에 따라 약 30%까지 큰 확률론적 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 지반은 비균질하며, 지반의 물성치가 공간적 상관구조를 갖고 있는 점은 잘 알려진 사실이다. 따라서 지반의 불확실성을 보다 합리적으로 고려하기 위해서는 지반 물성치의 통계적 특성뿐만 아니라 공간적 상관구조를 파악하고 이를 고려하는 것은 매우 중요하다. 최근에는 빠른 시간 내에 지반에 대해 연속적으로 신뢰할 만한 값을 얻을 수 있는 CPT를 활용한 액상화 평가가 증가하고 있는 추세이다. 특히, CPT 데이터는 일정 간격으로 연속적인 값을 얻을 수 있음에 따라 이를 활용하여 지반의 공간변동성을 효과적으로 파악

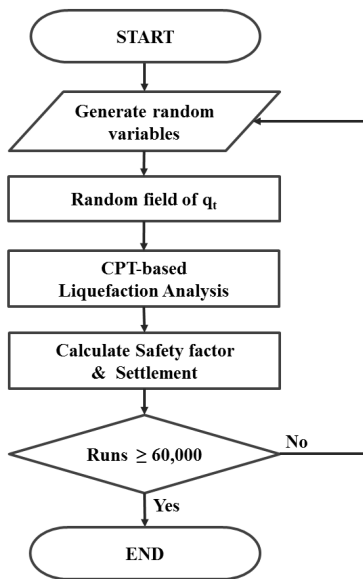
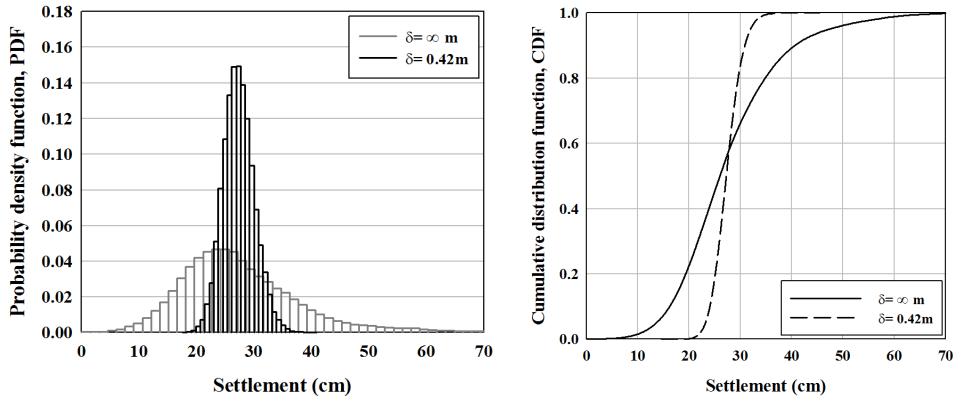


Fig. 4. Flowchart for probabilistic liquefaction analysis

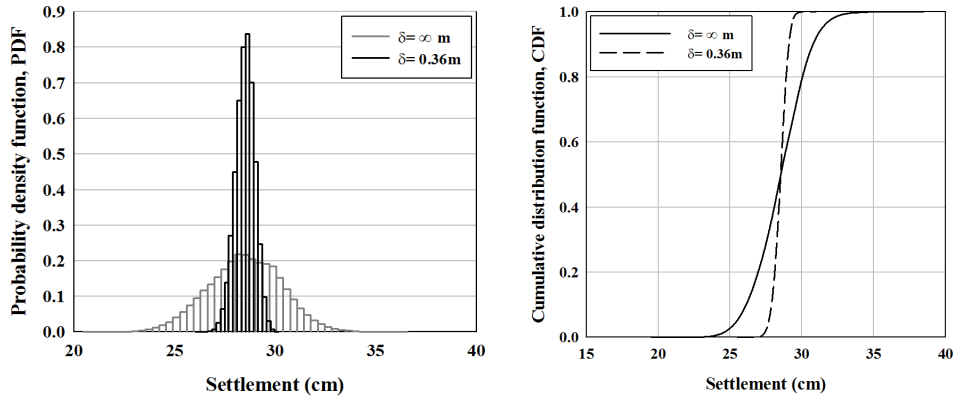
Table 4. Probabilistic results for liquefaction-induced settlement

Case	Liquefaction-induced settlement					
	Spatial variability (×)			Spatial variability (○)		
	Mean (cm)	Standard deviation	COV (%)	Mean (cm)	Standard deviation	COV (%)
1	27.54	10.35	37.58	27.42	2.69	9.80
2	28.50	1.82	6.37	28.50	0.47	1.66
3	25.48	5.52	21.68	25.49	1.16	4.55

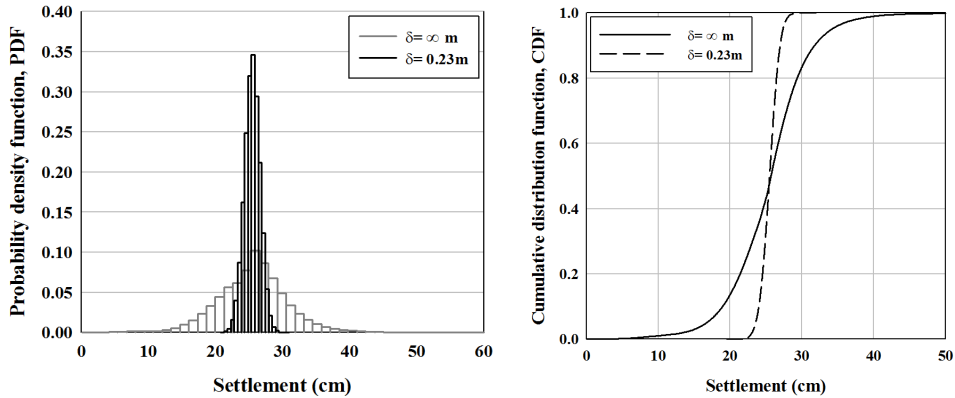




(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 5. Probability density and cumulative distribution functions for liquefaction-induced settlement

할 수 있으며, CPT결과와 다른 지반 물성치의 상관관계를 통하여 다양한 지반 물성치에 대한 공간변동성의 예측도 가능하다. 따라서 이를 활용하여 지반의 공간적 상관구조를 파악하고 지반 물성치를 확률변수가 아닌 확률장으로 고려한다면 지반의 불확실성을 보다 합리적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지반의 공간변동성이 액상화에 의한 침

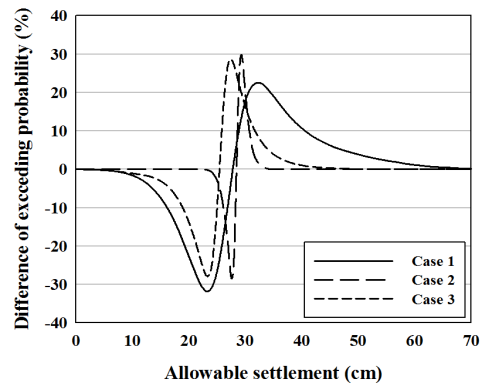


Fig. 6. Difference of exceedance probability for allowable settlement

하량의 확률론적 해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 콘관입 저항치의 공간변동성을 고려한 확률론적 해석을 수행하였다. 이를 위해 서로 다른 변동성을 갖는 세 지점의 콘관입 저항치에 대한 통계적 특성 및 공간변동성을 분석하였으며, 이를 고려한 콘관입 저항치의 확률장을 KLE를 통하여 생성하였다. 생성된 확률장은 액상화에 의한 침하량 해석과 결합하고 Monte-carlo 시뮬레이션을 통하여 확률론적 해석 수행하였으며, 공간변동성의 고려에 따른 침하량의 확률론적 결과를 비교·분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 콘관입 저항치의 변동성분에 대한 공간적 변동성을 분석하기 위하여 표본 자기상관함수 및 자기상관모형 적합법을 통하여 변동모수를 산정하였으며, 공간적 상관성을 갖는 범위는 약 0.2~0.5m로 지반의 해석영역에 비하여 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 특히, Case 1과 Case 2의 변동계수는 35.9%와 7.8%로 변동성의 차이는 매우 크지만 변동모수는 비슷한 것으로 나타났다. 이는 공간변동성은 변동성분의 통계적 변동성과는 구별되는 불확실성이므로 공간적 상관관계의 분석을 통하여 고려되어야 함을 알 수 있었다.
- (2) 자기상관모형 적합법에 따른 변동모수는 자기상관모형의 종류에 따라 조금씩 다르게 나타났으며, 오차에 따른 가장 적합한 모델의 선정은 데이터에 따라 다르게 나타났다. 하지만, 모든 자기상관모형에 대하여 바트렛 한계 내에서 표본 자기상관함수와 자기상관모형의 자기상관계수에 대한  $R^2$ 는 0.98 이상이며, 낮은 RMSE를 가짐에 따라 유의미한 범위내의 공간적 상관구조를 나타내기에 적합한 것으로 나타났다.
- (3) 기존 결정론적 방법에 의한 깊이에 따른 안전율의 변동성은 콘관입 저항치의 변동성에 큰 영향을 받음에 따라 Case 1의 경우 가장 크게 나타났으며, Case 2의 경우 가장 작게 나타났다. 또한, 안전율에 따른 각 지점의 누적침하량은 각각 27.1, 28.6, 25.0cm로 나타났다.
- (4) 침하량의 확률분포는 공간변동성의 고려 유무에 따라 매우 큰 차이를 나타내었으며, 지반의 공간변동성이 고려되지 않을 경우 지반의 불확실성을 과대 평가할 수 있는 것으로 나타났다. 특히, 변동성분의 통계적 변동성이 큰 경우 지반의 불확실성 또한 크

게 나타나므로 공간변동성의 고려 유무에 따른 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 보다 합리적으로 지반의 불확실성을 고려하기 위해서는 공간변동성의 고려가 매우 중요한 것으로 판단된다.

- (5) CPT는 지반에 대하여 연속적으로 신뢰할만한 값을 얻을 수 있음에 따라 지반의 공간변동성을 효과적으로 파악할 수 있다. 따라서 이를 활용하여 변동모수를 산정하고 신뢰성 해석 시 지반 물성치를 단일 확률변수가 아닌 확률장을 통하여 고려한다면 지반의 불확실성을 보다 합리적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌 (References)

1. Agterberg, F. B. (1970), "Autocorrelation Function in Geology, Proceeding of a Colloquium on Geostatistics", University of Kansas, Lawrence, pp.113-141.
2. Andrus, R. D. and Stokoe, K. H. (2000), "Liquefaction Resistance of Soils from Shear-wave Velocity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.11, pp.1015-1025.
3. Baecher, G. B. and Christian, J. T. (2003), *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley, Chichester, UK.
4. Bennett, R. J. (1979), *Spatial Time Series: analysis, forecasting and control*, London: Pion.
5. Boulanger, R. W. and Idriss, I. M. (2014), "CPT and SPT based Liquefaction Triggering Procedures", Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA.
6. Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Kayen, R.E., and Moss, R. E. S. (2004), "Standard Penetration Test-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, No.12, pp.1314-1340.
7. DeGroot, D. J. and Baecher, G. B. (1993), "Estimating Auto-covariance of In-situ Soil Properties", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.119, No.1, pp.147-166.
8. Elkateb, T., Chalaturnyk, R., and Robertson, P. K. (2003), "An Overview of Soil Heterogeneity: Quantification and Implications on Geotechnical Field Problems", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40, No.1, pp.1-15.
9. Ghanem, R. G. and Spanos, P. D. (2003), *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*, Revised Edition, Dover Publications.
10. Harder, L. F. and Seed, H. B. (1986), "Determination of Penetration Resistance or Coarse-grained Soils Using the Becker Hammer Drill", Rep. UCB/EERC-86/06, Earthquake Engrg. Res. Ctr., University of California at Berkeley.
11. Hwang, J. H., Yang, C. W., and Juang, D. S. (2004), "A Practical Reliability-based Method for Assessing Soil Liquefaction Potential", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, pp.761-770.
12. Idriss, I. M. and Boulanger, R. W. (2008), "Soil Liquefaction during Earthquakes", Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

13. Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992), "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Earthquakes", *Soils and Foundations*, Vol.32, No.1, pp.173-88.
14. Jaksa, M. B. (1995), "The Influence of Spatial Variability on the Geotechnical Design Properties of a Stiff, Overconsolidated Clay", Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, University of Adelaide.
15. Juang, C. H., Fang, S. Y., and Khor, E. H. (2006), "First-Order Reliability Method for Probabilistic Liquefaction Triggering Analysis Using CPT", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.3, pp.337-350.
16. Juang, C. H., Rosowsky, D. V., and Tang, W. H. (1999), "Reliability-based Method for Assessing Liquefaction Potential of Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.8, pp.684-689.
17. Jung, M. H., Kim, J. H., Jeong, S. G., and Lee, S. (2007), "Improvement Scheme of Simplified Liquefaction Potential Evaluation for a Dredged and Reclaimed Ground", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.8, pp.47-57.
18. Kim, S. I., Park, I. J., and Choi, J. S. (2000), "A Study on the Assessment of Liquefaction potential in Korea", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.20, No.2C, pp.129-139.
19. Kim, S. I., Yu, J. S., Park, K. B., and Park, S. Y. (2006), "Evaluation of Liquefiable Soils by Energy Concept", *Korea Geotechnical Society Spring Conference*, pp.590-599.
20. KMA, <http://www.kma.go.kr/weather/earthquake/domestictrend.jsp>
21. Li, K. S. and Lumb, P. (1987), "Probabilistic Design of Slopes", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, No.4, pp.520-535.
22. Lumb, P. (1975), "Spatial Variability of Soil Properties", In Proceedings, 2nd Intl Conference on Application of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering, 2, pp.397-421.
23. Lumb, P. (1968), "Statistical Aspects of Soil Measurements", In Proceedings, 4th Australian Road Research Conference, 4, pp. 1761-1770.
24. Lumb, P. (1974), "Chapter 3: Applications of Statistics in Soil Mechanics", *Soil Mechanics - New Horizons*, Lee, I.K., Editor, American Elsevier, New York, pp.44-111.
25. Mayne, P. W. (2007), "Cone Penetration Testing", NCHRP Synthesis 368: Transportation Research Board, Washington, DC.
26. MOF (2014), Port and Fishing Port Design Standard and Explanation, Ministry of Oceans and Fisheries, Vol.1, Chapter 11, Korea.
27. Nagase, H. and Ishihara, K. (1988), "Liquefaction-induced Compaction and Settlement of Sand during Earthquakes", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.66-76.
28. Olsen, R. S. (1997), "Cyclic Liquefaction based on the Cone Penetrometer Test", In Proceedings, NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, National Center for Earth-quake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Report No. NCEER-97-0022, pp.225-276.
29. Olsen, R. S. (1984), "Liquefaction Analysis Using the Cone Penetrometer Test", In Proceedings, 8th World Conference on Earthquake Engineering EERI, San Francisco.
30. Padilla, J. D. and Vanmarcke, E. H. (1974), "Settlement of Structure on Shallow Foundation", Research report R74-9, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge.
31. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), "Characterization of Geotechnical Variability", *Canadian Geotechnical Journal*, 36, pp. 612-624.
32. Popescu, R., Prevost, J. H., and Deodatis, G. (2005), "3D Effects in Seismic Liquefaction of Stochastically Variable Soil Deposits", *Géotechnique*, Vol.55, No.1, pp.21-31.
33. Rackwitz, R. (2000), "Reviewing Probabilistic Soils Modelling", *Computer and Geotechnics*, 26, pp.199-223.
34. Ravi, V. (1992), "Statistical Modelling of Spatial Variability of Undrained Strength", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, No.5, pp.721-729.
35. Robertson, P. K. and Wride, C. E. (1998), "Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test", *Canadian Geotechnical Journal*, 35, pp.442-459.
36. Saygili, G. (2016), "Probabilistic Assessment of Soil Liquefaction Considering Spatial Variability of CPT Measurements", *Georisk* 10, pp.1-11.
37. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.97, No.9, pp.249-1273.
38. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M. (1985), "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No.12, pp.1425-1445.
39. Shibata, T. and Teparaksa, W. (1988), "Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.2, pp.49-60.
40. Spanos, P. D. and Ghanem, R. G. (1989), "Stochastic Finite Element Expansion for Random Media", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.115, No.5, pp.1035-1053.
41. Sudret, B. and Kiureghian, A. D. (2000), "Stochastic Finite Element Methods and Reliability: A State-of-the-Art Report", Tech. Rep. Report No. UCB/SEMM-2000/8, Department of Civil Engineering & Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
42. Vanmarcke, E. H. (1977), "Probabilistic Modeling of Soil Profiles", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 103 (GT11), pp.1227-1246.
43. Vanmarcke, E. H. (1983), *Random fields: Analysis and synthesis*. MIT Press, Cambridge.
44. Vivek, B. and Raychowdhury, P. (2011), "Probabilistic Approach for Evaluation Soil Liquefaction Considering Spatial Variability of Soil", Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Kochi.
45. Yi, J. H., Kwon, O. S., and Park, W. S. (2006), "Evaluation of Liquefaction Potential for Soil Using Probabilistic Approaches", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(5C), pp. 313-322.
46. Yoshimine, M., Nishizaki, H., Amano, K., and Hosono, Y. (2005), "Flow Deformation of Liquefied Sand under Constant Shear Load and its Application to Analysis of Flow Slide of Infinite Slope", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, pp.253-264.
47. Zhou, S. (1980), "Evaluation of the Liquefaction of Sand by Static Cone Penetration Test", In Proceedings, 7th World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, Vol.3, pp.156-162.

Received : March 2<sup>nd</sup>, 2017

Revised : April 20<sup>th</sup>, 2017

Accepted : May 17<sup>th</sup>, 2017