

## 확률론적 방법을 이용한 인천송도지반 이차압축침하량의 공간적 분포 평가

### Evaluation of Spatial Distribution of Secondary Compression of Songdo Marine Clay by Probabilistic Method

김 동 휘<sup>1</sup> Kim, Dong-Hee

배 경 두<sup>2</sup> Bac, Kyung-Doo

고 성 권<sup>3</sup> Ko, Seong-Kwon

이 우 진<sup>4</sup> Lee, Woo-Jin

#### Abstract

Settlement at reclamation area caused by secondary compression should be considered using spatial evaluating method because the thickness of consolidation layer varies at every location. Probabilistic method can be implemented to evaluate uncertainty of spatial distribution of secondary compression. This study spatially evaluated mean and standard deviation of secondary compression in the overall analyzing region using spatial distribution of consolidation thickness estimated by ordinary kriging method and statistical values of soil properties. And then, the area where secondary compression exceeds a design criterion at the specific time was evaluated using probabilistic method. It was observed that the area exceeding the design criterion increased as the variability of  $C_\alpha / (1 + e_0)$  increased or the probabilistic design criterion  $\alpha$  decreased. It is considered that the probabilistic method can be used for the geotechnical design of soft ground when a probabilistic design criterion is established in the specification.

#### 요 지

해안매립지반에서 압밀층 두께는 위치마다 상이하기 때문에 이차압축침하를 공간적으로 평가해야 한다. 이러한 이차압축침하량의 공간적인 분포가 포함하고 있는 불확실성을 합리적으로 평가하기 위해 확률론적 방법의 도입이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 정규크리깅기법으로 추정된 압밀층의 공간적인 분포 추정결과와 지반정수들의 평균과 표준편차를 이용하여 이차압축침하량의 평균과 표준편차를 분석영역 전체에 대하여 산정하였다. 이러한 결과를 이용하여 이차압축침하량이 특정 시간에서 설계기준을 초과하는 영역을 확률론적 방법을 이용하여 평가하였으며, 허용기준을 초과하는 영역의 면적은  $C_\alpha / (1 + e_0)$ 의 변동계수가 크고 확률론적 설계기준  $\alpha$ 가 작을수록 증가하는 것으로 나타났다. 마지막으로 국내에서 확률론적인 설계기준이 확립될 경우에는 연약지반설계에 본 논문에서 제시한 확률론적인 방법들을 직접적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords** : Ordinary kriging, Probabilistic method, Secondary compression,  $C_\alpha / C_c$

1 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg, Korea Univ.)

2 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg, Korea Univ.)

3 포스코건설 건축사업본부 건축기술그룹 과장 (Manager, Architecture Technology & Design Group, Architecture Division, Posco E&C)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg, Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 국내뿐만 아니라 일본, 중국, 홍콩, 싱가포르 등에서 신도시 및 항만건설을 위해 대규모 해안매립공사가 활발하게 수행되고 있다. 이러한 해안매립공사는 대부분 연약지반에서 이루어지므로 매립공사 완료 후에도 매립지반의 장기적인 침하는 불가피하다. 이러한 장기적인 침하 즉, 이차압축침하가 크게 발생하여 구조물에 영향을 미칠 경우에는 유지보수 비용이 증가하는 등 많은 사회적 문제가 발생된다. 즉, 이차압축침하가 허용값보다 크게 발생할 경우에는 말뚝기초에 부주면마찰력이 작용하여 말뚝의 안정성을 저하시킬 수 있다. 또한, 말뚝으로 지지되어 있는 구조물 구간과 녹지 및 도로구간 사이에 부등침하가 발생하여 가스관, 상하수도관 등의 각종 관들의 파손을 발생시키므로 이차압축침하는 장기적으로 큰 문제를 야기시킬 가능성이 있다. 이와 같이 이차압축침하는 말뚝의 안정성 저하, 도로포장 및 관의 손상을 야기시키므로 설계 시 이차압축침하량 추정을 통한 대책방안 마련은 필수적이다.

이차압축에 대한 연구는 Mesri와 Godlewski(1977), Mesri와 Castro(1987), Leroueil 등(1985), Kabbaj 등(1988)에 의하여 연구되었다. Mesri와 Godlewski(1977)는  $C_a/C_c$  (이차압축지수와 압축지수의 비) 개념을 제안하였으며, Mesri와 Castro(1987)는 여러 흙의 종류에 따른  $C_a/C_c$  값을 제시하였다. 국내에서는 김규선 등(1999)이 남해안 해성점토, 임형덕 등(2002)이 군산지역 연약토의  $C_a/C_c$  값에 대한 연구를 수행하였다. 김찬기 등(2008)은 소성지수가  $C_a/C_c$ 에 미치는 영향을 분석하였다. 이와 같이 이차압축은 국내외적으로 많은 연구자들에 의해서 현재까지도 지속적으로 연구되고 있는 분야이다. 이차압축침하 및 일차압밀침하를 추정하기 위한 지반정수들은 단일 값이 아니라 불확실성을 내포하고 있는 확률변수로 취급될 수 있으므로 이차압축침하 및 일차압밀침하 또한 확률변수로 다루어질 수 있다. Corotis 등(1975), Freeze(1977), Athanasiou-Grivas와 Harr(1978), Chang(1985), Hong과 Shang(1998), Zhou 등(1999)은 일차압밀침하와 압밀시간의 불확실성을 확률론적 방법으로 연구하였다. 이혁진 등(2004)은 인천공항 부지의 이차압축침하량을 크리깅 및 확률론적인 방법을 이용하여 분석하였다.

전술한 바와 같이 대규모 매립지반에서는 매립층 하부의 압밀층 두께가 공간적으로 변화하여 위치마다 이차압축침하 발생 정도가 상이하므로 이차압축침하를 공간적

으로 평가하는 연구가 필요하다. 또한, 공간적인 이차압축침하량 추정결과와 불확실성을 합리적으로 평가하는 확률론적 방법의 도입이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 확률론적 방법으로 공간적인 이차압축침하량을 평가하는 방법을 제시하기 위하여 먼저 압밀층 두께의 공간적인 분포를 단순크리깅(Simple Kriging, SK), 정규크리깅(Ordinary Kriging, OK), 일반크리깅(Kriging with a trend, KT or Universal Kriging, UK)을 이용하여 추정하였다. 이러한 압밀층 두께 추정결과를 잭나이프 방법(Deutsch와 Journel, 1992)으로 검증하여 가장 신뢰성 높은 추정방법을 선정하였으며, 이 결과를 이차압축침하량 추정에 직접적으로 활용하였다. 두 번째로 이차압축침하량을 확률론적으로 추정하기 위해서  $C_a/C_c$ , 압축지수를 간극비로 정규화시킨  $C_c/(1+e_0)$  및 압밀계수  $c_v$ 의 통계량 및 확률분포형을 분석하였다. 이러한 압밀층 두께 추정결과와 지반정수들의 확률분포를 이용하여 매립공사 완료 후 시간경과에 따른 공간적인 이차압축침하량을 확률론적 방법을 이용하여 추정하였으며, 이러한 분석결과를 설계에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한, 이차압축침하량에 가장 큰 영향을 미치는 지반정수를 분석하였으며, 지반정수들의 변동성이 이차압축침하량 감소를 위한 대책공법 수립 면적에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 배경이론

### 2.1 이차압축

이차압축은 하중 재하에 의해서 발생하는 과잉간극수압이 대부분 소산된 후에 발생하는 체적의 변화로 정의된다. 이차압축이 발생하는 시점에 관한 문제는 Terzaghi가 압밀이론을 발표한 이후로 현재까지도 논란이 되고 있는 주제이기도 하다. Mesri와 Godlewski(1977), Jamiolkowski 등(1985)은 과잉간극수압의 소산 이후 즉, 일차압밀 종료시점(End of Primary, EOP) 이후에 이차압축이 발생한다고 주장하고 있으며, Leroueil 등(1985), Kabbaj 등(1988)은 과잉간극수압 소산이 발생하는 동시에 이차압축이 유발된다고 주장하고 있다. 이러한 각각의 주장을 Hypothesis A, B라고 하며, 어떠한 주장이 옳은가에 대한 논의는 현재까지도 계속되고 있다. 이차압축 동안의 시간의 변화( $\Delta \log t$ )에 따른 간극비 변화( $\Delta e$ )를 이차압축지수( $C_a = \Delta e / \Delta \log t$ )로 정의하며, 이차압축지수를 이용하여 이차압축침하를 산정할 수 있다.

Mesri와 Godlewski(1977)는 하중단계별로  $C_\alpha$ 와  $C_c$ 의 변화양상이 비슷하며  $C_\alpha/C_c$ 가 주어진 지반에 대해 일정한 상수 값을 보인다고 하였다. 이러한 연구를 통하여  $C_\alpha/C_c$  개념이 제안되었으며, 특정한 지반에 대하여 시간, 유효응력, 초기간극비에 관계없이  $C_\alpha/C_c$ 는 일정하다고 하였다. Mesri와 Castro(1987)는 여러 종류의 흙에 대해서  $C_\alpha/C_c$ 가 0.02~0.10의 범위를 보인다고 하였으며, 무기질 점토는  $0.04 \pm 0.01$ , 유기질 점토는  $0.05 \pm 0.01$ 의 범위에  $C_\alpha/C_c$ 가 존재한다고 하였다. 이러한  $C_\alpha/C_c$ 의 개념을 이용하여 일차압밀곡선에서의  $C_c$ 와 특정지반의  $C_\alpha/C_c$  값으로부터  $C_\alpha$ 를 추정할 수 있다. 즉,  $C_\alpha$ 를  $C_c$ 와  $C_\alpha/C_c$ 의 곱으로 표현한 식 (1)을 이용하여 최종압밀하중에 의존하는 이차압축침하량을 추정할 수 있다.

$$s_s = \frac{(C_\alpha/C_c) \times C_c}{1 + e_0} H_o \log \frac{t_f}{t_p} \quad (1)$$

여기서,  $H_o$ 는 압축되는 지반의 두께,  $t_p$ 는 일차압밀이 종료되는 시점,  $t_f$ 는 일차압밀 종료 후 이차압축침하를 추정하고자 하는 시간,  $e_0$ 는 초기 간극비이다.

## 2.2 지구통계학적 방법

### 2.2.1 베리오그램

공간정보를 분석하고 그 상관관계를 이용하여 자료가 없는 지점의 예측값을 얻기 위한 많은 지구통계학적 기법은 불변성 또는 정상성(stationarity) 가정을 전제로 하고 있다. 불변성이란 자료의 분포가 위치에 따라 변화하지 않는 것을 의미하며, 강한 불변성이란 위치에 따라 확률함수의 분포가 변하지 않는다는 뜻이다. 그러나 우리가 실제로 사용하는 대부분의 자료는 강한 불변성을 만족하지 못하므로 약한 불변성(weak stationarity)을 가정하게 된다. 약한 불변성은 첫째, 공분산이 존재하며 이는 분리거리에 대한 함수임을 의미하고 둘째, 자료의 평균은 위치에 무관하게 일정하다는 것을 의미한다. 이러한 약한 불변성은 많은 지구통계학적 기법의 기본이 되는 가정이며, 이를 내재가정(intrinsic hypothesis)이라 한다. 이러한 내재가정을 만족하는 경우 식 (2)로 표현되는 베리오그램 및 베리오그램과 공분산의 관계식 (3)을 유도할 수 있다(최종근, 2007; Isaaks와 Srivastava, 1989).

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

$$\gamma(h) = \sigma^2 - Cov(h) \quad (3)$$

여기서,  $2\gamma(h)$ 는 베리오그램,  $\gamma(h)$ 는 반베리오그램(semi-variogram),  $h$ 는 지연거리(lag distance) 또는 분리거리(separation distance),  $N(h)$ 는 자료 쌍의 개수,  $z(x_i)$ 는 임의 위치  $x_i$ 에서의 자료값,  $\sigma^2$ 은 자료의 분산,  $Cov(h)$ 는 분리거리  $h$  만큼 떨어진 자료들의 공분산이다. 지구통계학에서는 계산의 편의성을 위해 전통적으로 반베리오그램을 사용하며 이를 베리오그램이라고도 한다. 베리오그램은 거리  $h$  만큼 이격된 두 자료들간의 차이를 제공한 것의 기대값이며, 거리가 가까운 자료값들이 유사한 경향을 보이므로 베리오그램은 자료의 거리가 가까울수록 작고 멀어질수록 크다.

크리깅을 이용하여 미조사 구간의 자료값을 예측하기 위해서는 모든 분리거리  $h$ 에 대한 베리오그램  $\gamma(h)$ 가 필요하며, 이를 위해서는 주어진 자료로부터 계산된 실험적 베리오그램을 가장 잘 대표하는 이론적 베리오그램을 결정해야 한다. 이론적 베리오그램 모델로는 구형모델(spherical model), 지수모델(exponential model), 가우시안모델(gaussian model) 등이 있다. 베리오그램 모델은 앞에서 언급한 모델들을 독립적으로 또는 조합하여 사용하기도 하며, 실험적 베리오그램을 정확하게 나타내는 모델이 아니라 공간적인 자료의 구조를 적절하게 표현해 줄 수 있는 모델을 선택하는 것이 중요하다. 이론적 베리오그램은 너깃  $C_0$ , 문턱값( $C+C_0$ ), 상관거리  $a$ 의 세 모수를 이용하여 정의할 수 있다(최종근, 2007; Isaaks와 Srivastava, 1989; Journel과 Huijbergts, 1978; Cressie, 1991).

### 2.2.2 크리깅기법

분석영역  $A$ 의 지지 값  $z$ 를 이용하여 값을 알지 못하는 위치  $u$ 에서의  $z$  값을 추정하기 위해 사용되는 모든 크리깅방법들은 식 (4)로 정의되는 기본적인 선형회귀 추정자(linear regression estimator),  $Z^*(u)$ 의 일종이다.

$$Z^*(u) - m(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_\alpha(u) [Z(u_\alpha) - m(u_\alpha)] \quad (4)$$

여기서,  $\lambda_\alpha(u)$ 는 확률변수  $Z(u_\alpha)$ 의 실현치(realization)인  $z(u_\alpha)$ 에 적용되는 가중치이며,  $m(u)$ 와  $m(u_\alpha)$ 는 각각 확률변수  $Z(u)$ 와  $Z(u_\alpha)$ 의 기대값이다. 추정에 사용되는 자료의 수와 자료들의 가중치들은 위치마다 변하며, 실제 문제에서는 값을 추정하고자 하는 위치  $u$ 에 인접한  $n(u)$

개의 자료, 즉 일정한 영역 내의 자료 값들만이 추정에 사용된다. 위치  $u$ 를 중심으로 한 주어진 영역은  $W(u)$ 로 표현되며, 전체 영역  $A$ 의 부분집합이다. 확률변수  $Z(u)$ 와  $Z(u_0)$ 의 실현치로 미지 값  $z(u)$ 와 측정 값  $z(u_0)$ 를 취급할 때 추정오차(estimation error)인  $Z^*(u)-Z(u)$ 도 역시 확률변수로 취급할 수 있다. 모든 종류의 크리깅 기법들은 추정 값이 편향되지 않은 식 (6)의 조건 하에서 식 (5)로 표현되는 오차분산(error variance),  $\sigma_E^2(u)$ 을 최소화하는 것을 목적으로 한다.

$$\sigma_E^2(u) = \text{Var}\{Z^*(u) - Z(u)\} \quad (5)$$

$$E\{Z^*(u) - Z(u)\} = 0 \quad (6)$$

크리깅 추정자(kriging estimator)는 확률함수(random function)  $Z(u)$ 를 취급하는 모델에 따라서 변하며, 확률함수  $Z(u)$ 는 잔차성분  $R(u)$ 와 경향성분 또는 평균  $m(u)$ 로 구분될 수 있다. 크리깅 기법들은  $m(u)$ 를 어떻게 고려하는가에 따라서 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅으로 구분된다. 단순크리깅은 평균  $m(u)$ 를 알고 있으며 분석영역 전체  $A$ 에서 일정하다고 가정하는 반면, 정규크리깅은 추정하고자 하는 위치  $u'$ 에 인접한 영역  $W(u)$  내에서의 평균  $m(u')$ 는 일정하나 알지 못한다고 가정한다. 일반크리깅은 알지 못하는 국부적인 영역에서의 평균  $m(u')$ 가 분석영역에서 경향성을 보인다고 가정한다. 크리깅은 이러한 가정 하에서 식 (5)의 오차분산  $\sigma_E^2(u)$ 을 최소화 하는 식 (4)의 가중치  $\lambda_\alpha(u)$ 를 구하여 기지 값의 선형조합으로 미지 값을 추정하는 방법이며, 가중치를 구하는 방정식을 크리깅 방정식 또는 크리깅 시스템(kriging system)이라고 한다(Goovaerts, 1997; Isaaks and Srivastava, 1989; Cressie, 1991).

본 논문에서는 크리깅 추정결과를 검증하기 위해 전체 자료 중 값을 알고 있는 위치에서의 값을 크리깅 추정값과 비교하는 잭나이프 검증방법(Jackknife validation method)을 사용하였다(Deutsch와 Journel, 1992). 또한, 추정결과와 정확성을 정량적으로 평가하기 위해 추정값의 정확성을 평가하는 MAPE(Mean Absolute Percent Error), MAE(Mean Absolute Error), MSE(Mean Squared Error), 추정결과와 편향성을 평가하는 PBIAS(Percent of BIAS), 예측의 효율성(effectiveness)을 평가하는 G 값(goodness-of-prediction(G) measure)을 사용하였으며, 각각의 값은 식 (7)~(11)과 같이 계산할 수 있다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{z(x_i) - \hat{z}(x_i)}{z(x_i)} \right] \times 100 \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ |z(x_i) - \hat{z}(x_i)| \right] \quad (8)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ z(x_i) - \hat{z}(x_i) \right]^2 \quad (9)$$

$$PBIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( z(x_i) - \hat{z}(x_i) \right) \quad (10)$$

$$G = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left[ z(x_i) - \hat{z}(x_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n \left[ z(x_i) - \bar{z} \right]^2} \right) \times 100 \quad (11)$$

여기서,  $\hat{z}(x_i)$ 는 위치  $i$ 에서 추정한 값,  $\bar{z}$ 은 조사자료의 평균이다. MAPE, MAE, MSE는 계산 값이 작을수록 추정값이 정확하다는 것을 의미하며, PBIAS는 0에 가까울수록 추정결과가 편향되지 않았다고 할 수 있다. 또한, G값이 “100”일 경우에는 완벽한 추정이라고 할 수 있으며, G값이 음수일 경우에는 자료값의 평균을 추정자(predictor)로 사용하는 것보다 신뢰성이 없다는 것을 의미한다(Santra 등, 2008).

### 2.3 이차압축침하량의 평균과 표준편차 결정방법

이차압축침하의 확률밀도함수는 지반정수인  $C_\alpha / C_\epsilon$ ,  $C_\epsilon / (1 + e_0)$  및  $t_p$ 의 확률밀도함수를 식 (1)에 대입한 후 직접적으로 적분하여 구할 수 있다. 그러나 이차압축침하 산정 공식은 비선형함수이므로 확률밀도함수를 구하기 위해 식 (1)을 직접적으로 적분하는 것은 매우 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 이차압축침하의 평균과 표준편차를 구하기 위하여 테일러급수(Taylor series) 전개를 사용하였다. 테일러급수의 전개를 이용하여  $n$ 개의 확률변수로 이루어진 함수  $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 의 1계 근사 평균과 분산(first order approximate mean and variance)을 식 (12), (13)과 같이 구할 수 있다.

$$E(Z) \approx g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) \quad (12)$$

$$\text{Var}(Z) \approx \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 \text{Var}(X_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right) \left( \frac{\partial g}{\partial X_j} \right) \text{Cov}(X_i, X_j) \quad (13)$$

여기서, 미분은 각각의 변수들의 평균  $\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}$ 에서 수행된 것이며,  $Cov(X_i, X_j)$ 는 확률변수  $X_i$ 와  $X_j$ 의 공분산(covariance)이다. 확률변수  $X_i$ 와  $X_j$ 가 통계적으로 서로 독립(statistically independent) 이라면 식 (13)에서 두 번째 항은 사라지며, 본 논문에서는 이차압축침하 산정에 사용되는 지반정수들은 서로 독립이라고 가정하였다.

테일러급수 전개를 이용하여 이차압축침하의 1계 근사 평균과 표준편차를 결정하는 방법은 정해가 아닌 근사적인 해를 구하는 것이다. 따라서 이러한 근사해를 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS) 방법을 이용하여 산정한 결과와 비교해 보았다. MCS 방법에서는 식 (1)의 각 지반정수들의 확률분포형과 매개변수(표 2 참조)를 이용하여 생성한 난수들로 이차압축침

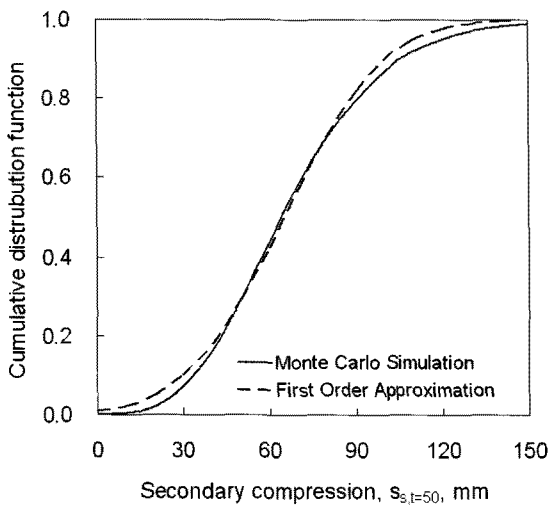


그림 1. 몬테카를로 시뮬레이션과 테일러급수 전개를 이용한 방법의 비교

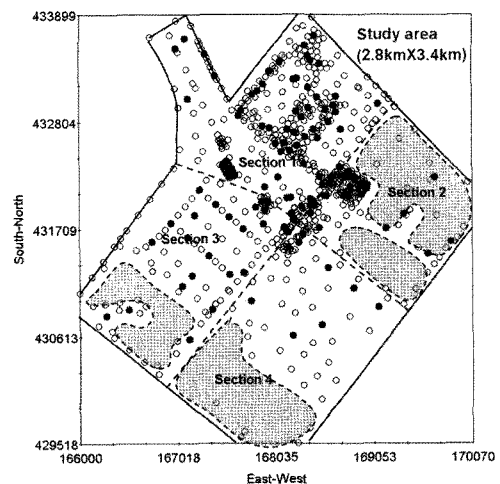
하량의 확률분포를 산정하였다. 이 결과를 이용하여 이차압축침하량이 특정 침하량 이상 발생할 확률을 산정하였으며, 이 결과를 이용하여 이차압축침하량의 누적확률분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 작성하였다. 그림 1은 몬테 카를로 시뮬레이션과 테일러급수 전개로 추정된 평균과 표준편차를 사용하여 작성한 누적확률분포함수이다. 이는 평균 두께 12.9m인 압밀층에서 50년 후에 발생하는 이차압축침하량의 누적확률분포함수를 정규분포로 가정한 후 도사한 것이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 이차압축침하량 40mm 이하와 90mm 이상의 누적확률은 테일러급수 전개를 이용한 방법이 MCS 방법보다 최대 약 2.0% 큰 것으로 나타났으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. Baecher와 Christian(2003)에 의하면 방정식의 분포를 정규분포로 가정했을 경우 분석 결과가 실제 값과 큰 오차를 보이지 않는다면 방정식의 분포로 정규분포를 사용해도 무방하다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 테일러급수를 이용한 근사방법을 사용하여 이차압축침하량의 통계량을 산정하였으며, 이차압축침하량의 분포를 정규분포로 가정하였다.

### 3. 분석대상 지반

인천광역시 연수구에 위치한 송도신도시 지역은 표고(elevation)가 약 E.L+7m인 지표면으로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암이 차례대로 분포하고 있으며, 퇴적층은 실트질 점토층 및 모래층이 번갈아 분포하고 있다. 김동휘 등(2010c)에 의하면 퇴적층 상부에 분포하는



(a) 매립현황 및 공구분할 현황



(b) 1~4공구 내의 분석자료(원)와 검증자료(점) 분포

그림 2. 매립현황 및 분석영역 내의 시추조사위치

평균 N값 5인 실트질 점토층에서 압밀침하가 발생할 것으로 판단되며, 이 층의 분포를 크리깅기법을 사용하여 공간적으로 추정하였다. 송도신도시 매립현황 및 분석영역(1~4공구, 2.8km×3.4km) 내의 분석자료와 검증자료 위치는 각각 그림 2(a), (b)와 같다. 분석에 사용한 시추자료는 1~4공구 내의 총 702개이며, 그림 2(b)의 점선으로 표시한 부분은 다른 구간에 비하여 상대적으로 조사자료가 충분하지 않은 구간이다. 전술한 잭나이프 검증에 위해 총 702개의 시추조사자료를 581개의 분석자료와 121개의 검증자료로 분리하였으며, 각각의 위치는 그림 2(b)와 같다.

#### 4. 지층분포 추정

크리깅기법을 이용하여 지층분포를 추정하기 위해 먼저 베리오그램 분석을 수행하였으며, 압밀층 두께에 대한 실험적 베리오그램과 이론적 베리오그램 분석결과는 그림 3과 같다. 분석결과 실험적 베리오그램을 가장 잘 나타내주는 구형모델을 크리깅 기법의 이론적 베리오그램으로 사용하였다(김동휘 등, 2010a). 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅을 사용하여 추정한 압밀층 두께의 신뢰성을 분석하기 위하여 잭나이프 검증방법을 사용하였으며, 표 1에서 볼 수 있듯이 정규크리깅과 일반크리깅의 신뢰성이 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나 일반크리깅은 일부 구간의 압밀층 두께를 음의 값으로 추정하여 최종 추정방법으로 정규크리깅을 선택

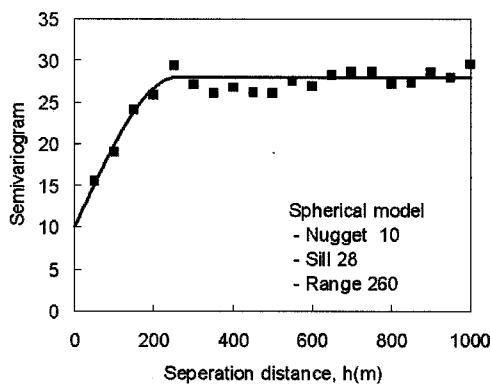


그림 3. 압밀층 두께 베리오그램

하였다(김동휘 등, 2010b). 따라서 본 논문에서는 그림 4의 정규크리깅에 의한 지층추정결과를 이용하여 이차 압축침하를 추정하였다.

#### 5. 지반정수 추정결과

본 논문에서는  $C_\alpha / C_c$ 를 구하기 위해 총 9회의 표준 압밀시험을 수행하였다. 압밀곡선에서 각 하중단계의 점선의 기울기에 해당하는  $C_c$ 를 구하였으며, 각 하중단계별로 이차압축 유발 부분의 기울기에 해당하는  $C_\alpha$ 를 구하였다.  $C_\alpha$ 는 시간-간극비 곡선에서 직선부가 나타나는 구간에서의 기울기로부터 구할 수 있다. 이러한 방법을 통하여 송도지반에 대한 하중단계별  $C_c$ 와  $C_\alpha$ 의 관계를 도출한 결과는 그림 5와 같다. 송도지반의  $C_\alpha / C_c$ 의 평균은 0.0337의 값을 보이고 있으며, 이는 Mesri와 Castro(1987)가 제안한 비유기질 점토에 대한  $C_\alpha / C_c$  값의 범위인  $0.04 \pm 0.01$ 과 유사한 것으로 나타났다.

$C_\alpha / C_c$ 의 확률분포형을 산정하기 위하여  $C_\alpha / C_c$  자료에 대한 빈도분석을 수행하였다.  $C_\alpha / C_c$ 의 확률분포형으로는 정규분포를 사용하였으며, 매개변수 추정방법으로는 모멘트법을 사용하였다. 매개변수 적합성 판정결과 표 2에서 볼 수 있듯이 정규분포형은 매개변수 적합성 조건을 만족하는 것으로 나타났다.  $C_\alpha / C_c$ 의 분포가 정규분포형에 적합한가를 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 방법을 이용하여 검증하였으며, 그 결과  $C_\alpha / C_c$  값의 분포

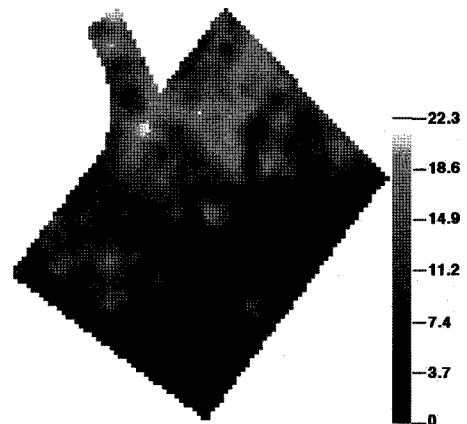


그림 4. 압밀층 두께 추정결과

표 1. 압밀층 두께 추정결과와 신뢰성 분석결과(김동휘 등, 2010b)

Estimation method	MAPE, %	MAE, m	MSE, m <sup>2</sup>	PBIAS, m	G
Simple kriging(SK)	31.825	2.593	11.677	-0.531	46.0
Ordinary kriging(OK)	26.104	2.408	9.831	-0.051	54.5
Kriging with a trend(KT)	25.741	2.447	9.843	0.018	54.5

표 2. 확률분포형 매개변수 추정 및 적합성 검정결과(유의수준  $\alpha=0.05$ )

지반정수	단위	자료수	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정				확률분포형 적합성 검정		
			확률 분포형	평균	표준 편차	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과
$C_a / C_c$	-	61	Normal	0.034	0.0087	OK	0.10	0.15	OK
$C_c / (1 + e_0)$	-	144	Normal	0.122	0.036	OK	0.09	0.11	OK
$c_v$	cm/sec <sup>2</sup>	58	Normal	0.00622	0.00276	OK	0.12	0.16	OK
			Log-Normal	-5.169	0.423	OK	0.06	0.16	OK

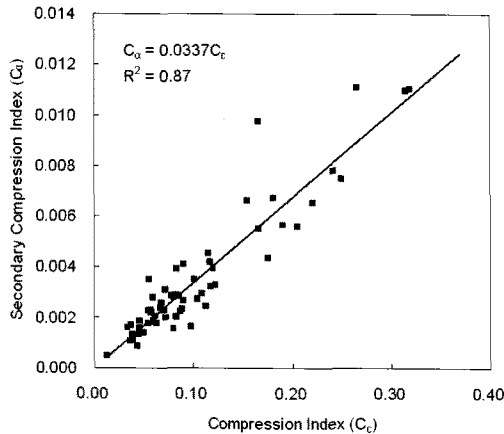


그림 5.  $C_c$ 와  $C_a$  관계

는 유의수준( $\alpha$ ) 0.05에서 정규분포에 적합한 것으로 평가되었다. 압축지수를 간극비로 정규화시킨  $C_c / (1 + e_0)$ 와 압밀계수  $c_v$ 의 빈도분석 결과  $C_c / (1 + e_0)$  값은 유의수준( $\alpha$ ) 0.05에서 정규분포가 적합한 것으로 나타났으며, 일차압밀 종료시간  $t_p$  추정에 사용되는  $c_v$ 는 대수정규분포가 정규분포보다 더 적합한 것으로 나타났다. 이와 같이 본 논문에서 산정한  $C_a / C_c$ ,  $C_c / (1 + e_0)$  및  $c_v$ 의 평균, 표준편차를 이용하여 이차압축침하량의 평균, 표준편차를 산정할 수 있다.

## 6. 이차압축침하량 산정

### 6.1 이차압축침하량의 민감도 분석

이차압축침하량을 공간적으로 평가하기 전에  $C_a / C_c$ ,

$C_a / (1 + e_0)$  및  $c_v$ 의 변동성이 이차압축침하량의 변동성에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 민감도 분석은 인천 송도지반의 압밀층 평균 두께 12.9m인 압밀층에서 공사시점으로부터 50년 후에 발생하는 이차압축침하량을 이용하였으며, 표 3과 같은 민감도 분석계획을 수립하였다. 표 3에서 CASE-1은 실제 지반조사결과를 이용하여 추정된 지반정수들의 평균과 변동계수(COV)이다.  $t_p$ 는  $c_v$ 에 영향을 받으므로 CASE-2에서는  $c_v$ 의 변동성에 따른 이차압축침하 변동성을 평가하였으며, 이를 위해 다른 지반정수들의 변동성은 고려하지 않았다. CASE-3과 CASE-4는 각각  $C_a / C_c$ 와  $C_c / (1 + e_0)$ 의 변동성이 이차압축침하량의 변동성에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다. 표 3의 맨 오른쪽 열은 각각의 CASE에 대한 이차압축침하량의 평균, 표준편차 및 변동계수이다.

이차압축침하량 계산에 사용한 세 지반정수들이 이차압축침하량의 변동성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 CASE-2, 3, 4를 비교하였다. 그 결과 표 3에서 볼 수 있듯이  $C_a / (1 + e_0)$ ,  $C_a / C_c$ 는 이차압축침하의 변동성에 유사한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 일차압밀종료시간 산정에 사용되는  $c_v$ 는 변동계수가 가장 크더라도 이차압축침하량의 변동성에 가장 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 모든 지반정수들의 변동성을 고려한 경우와 세 가지 지반정수 중 한 가지 지반정수의 변동성만 고려하였을 경우 이차압축침하량의 변동성에 미치는 영향을 분석한 결과(CASE-1, 2, 3, 4) 모든 지반정수들의 변동성을 고려했을 경우가 이차압축침하량의 변동성을 1.4~2.7배 크게 평가하는 것으로 나타났다.

표 3.  $s_s$ 의 민감도 분석을 위한 파라메타 및 분석결과

CASE	$c_v$ , cm/sec <sup>2</sup>		$C_a / C_c$		$C_c / (1 + e_0)$		$s_s$ , mm		
	Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV	Mean	SD	COV
1	0.0062	0.44	0.034	0.26	0.122	0.30	65.3	27.5	0.421
2	0.0062	0.44	0.034	0	0.122	0	65.3	10.4	0.158
3	0.0062	0	0.034	0.26	0.122	0	65.3	16.7	0.256
4	0.0062	0	0.034	0	0.122	0.30	65.3	19.3	0.295

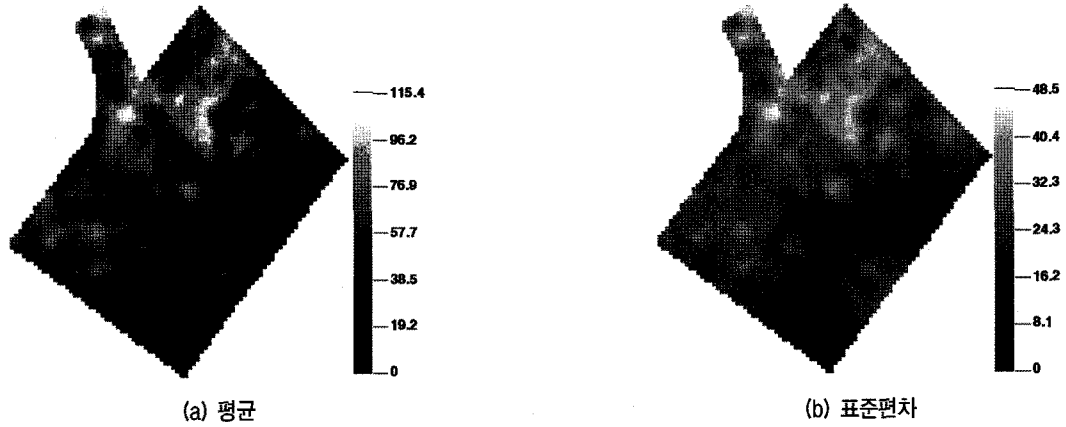


그림 6. 50년 후 이차압축침하량의 평균과 표준편차(단위: mm)

## 6.2 확률론적 방법에 의한 공간적인 이차압축침하량 산정

### 6.2.1 공간적인 이차압축침하량의 평균과 표준편차

대부분의 해안매립지역은 위치마다 압밀층의 두께가 다르기 때문에 일차압밀이 종료되는 시점 또한 다를 것이다. 따라서 일차압밀기간이 공사완료 기간 보다 긴 지역에 대해서는 일반적으로 연직배수공법을 적용하여 일차압밀기간을 단축한다. 본 논문에서는 일차압밀종료시간이 3년(36개월)을 초과하는 지역은 연직배수공법을 적용하여 3년 이내에 일차압밀이 완료될 뿐만 아니라 매립 완료 후 3년 경과시점에 모든 도로 및 시설물이 완공되었다고 가정하였다. 따라서 본 논문에서는 도로 및 시설물 완공시점으로부터 50년 후 이차압축침하량의 평균과 표준편차를 산정하였으며, 이 결과를 이용하여 모든 확률론적 분석을 수행하였다.

그림 6(a)는 지반정수들의 평균을 사용하여 계산한 이차압축침하량 평균의 공간적인 분포이다. 일반적으로 지반정수들의 평균을 사용하여 산정한 이차압축침하량의 평균과 허용침하량을 비교하여 대책공법 적용여부를 결정하게 되며, 이러한 방법을 결정론적인 방법이라고 한다. 분석대상인 인천 송도신도시의 경우 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 50년 후에 발생하는 1, 3공구의 이차압축침하량이 2, 4공구의 이차압축침하량에 비해 상대적으로 크게 발생하며, 이는 1, 3공구의 압밀층 두께가 2, 4공구의 압밀층 두께에 비해 상대적으로 두껍기 때문이다. 그림 6(b)는 지반정수들의 변동성을 고려하여 산정한 이차압축침하량의 표준편차이다. 이러한 평균과 표준편차를 이용하여 특정 위치에서 특정값 이상의 이차압축침하가 발생할 가능성을 평가할 수 있으며, 이를 확률론적 방법이라 한다.

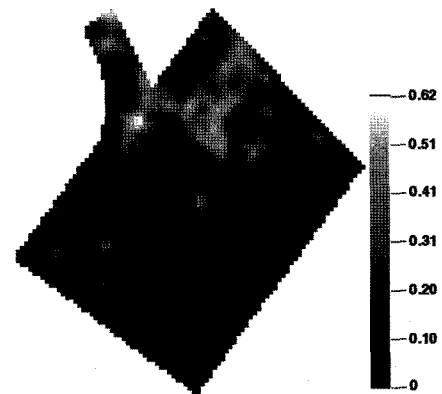


그림 7. 50년 후 이차압축침하량 발생 확률,  $P(s_s > s_{s,t=50yr})$

본 논문에서는 완공시점으로부터 특정 경과시간까지 발생하는 이차압축침하량이 특정값(threshold value)  $s_{s,t}$ 를 초과할 확률을  $P(s_s > s_{s,t})$ 로 나타내기로 한다. 본 논문에서는 이차압축침하량의 확률분포를 정규분포로 가정하였으므로 일정 시간 경과 후의  $P(s_s > s_{s,t})$ 는 위에서 산정한 평균과 표준편차를 이용하여 간단하게 계산할 수 있다. 그림 7은 공사완료 50년 경과 후 이차압축침하량이 100mm 이상 발생할 확률,  $P(s_s > s_{100,t=50yr})$ 을 분석 영역 전체에 대하여 나타낸 것이다. 1, 3공구에서 공사완료 50년 후의 이차압축침하량 평균은 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 최대 115.4mm가 발생하며, 공사완료 50년 후에 이차압축침하량이 100mm 이상 발생할 가능성도 그림 7에서 볼 수 있듯이 최대 0.62 정도되는 것으로 나타났다. 이와 같이 확률론적 방법을 사용할 경우에는 이차압축침하량의 평균뿐만 아니라 특정 값 이상의 이차압축침하량이 발생할 가능성도 평가할 수 있으므로 이차압축침하에 대한 대책공법 결정의 의사결정(decision-making) 과정에 그 결과를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

앞에서는 이차압축침하량의 평균과 표준편차를 이용



하여 이차압축침하량이 특정 값 이상 발생할 가능성을 분석하였다. 본 절에서는 허용침하량기준 100mm와 이차압축침하량의 차로 표현되는 한계상태함수 또는 성능함수(performance function)를 이용하여 이차압축침하량이 허용침하량 이상 발생할 가능성을 분석하였으며, 성능함수  $s_s'$ 는 식 (14)와 같다. 본 논문에서는 성능함수의 평균과 표준편차를 이용하여 신뢰성 지수(reliability index),  $\beta$ 를 구한 후 파괴확률, 즉 이차압축침하량이 100mm 이상 발생할 확률을 산정하였으며, 이러한 방법을 FOSM (First Order Second Moment) 방법이라고 한다. FOSM 방법으로 신뢰성지수를 산정하는 자세한 내용은 Ang과 Tang(1975), Baecher와 Christian(2003) 등의 문헌을 참고할 수 있다. FOSM 방법을 이용하여 신뢰성지수  $\beta$ 를 공간적으로 산정한 결과는 그림 8과 같으며, 신뢰성 지수  $\beta$ 가 3 이상은 모두 3으로 표시하였다. 또한, 이 신뢰성 지수를 이용하여 산정한 이차압축침하량이 100mm 이상 발생할 확률은 그림 7과 동일하다.

$$s_s' = 100 - \frac{(C_\alpha / C_c) \times C_c}{1 + e_0} H_o \log \frac{t_f}{t_p} \quad (14)$$

6.2.2 장기침하량에 대한 대책공법 적용면적의 결정  
앞에서 지반정수들의 변동성이 이차압축침하량의 변동성에 미치는 영향을 분석한 결과  $C_c / (1 + e_0)$ ,  $C_\alpha / C_c$ 의 변동성이  $c_v$ 의 변동성보다 이차압축침하량의 변동성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 이차압축침하량은  $C_c / (1 + e_0)$ ,  $C_\alpha / C_c$ 의 곱인  $C_\alpha / (1 + e_0)$ 에 의해서 결정된다. 따라서 본 절에서는  $C_\alpha / (1 + e_0)$ 의 변동계수가  $P(s_s > 100\text{mm}) \geq \alpha$ 인 영역의 면적에 미치는 영향을 평가해보았으며, 그 결과는 그림 9와 같다. 여기서,

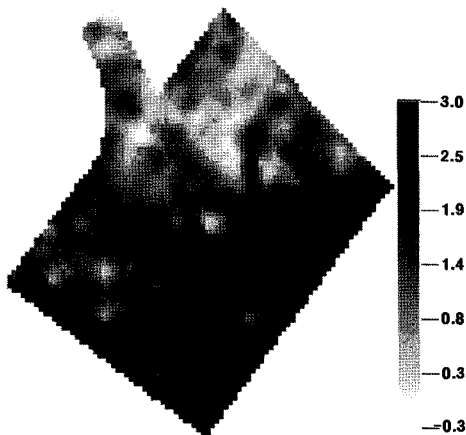


그림 8. 신뢰성 지수의 공간적 분포

$P(s_s > 100\text{mm}) \geq \alpha$ 는 이차압축침하가 이차압축침하의 허용기준 100mm를 넘을 가능성이 특정 확률론적 설계기준  $\alpha$  보다 큰 확률을 의미하며, 이차압축침하량의 허용기준으로 선정한 100mm는 국내 고속도로의 잔류침하량 기준이다. 그림 9에서 가로축은  $C_\alpha / (1 + e_0)$ 의 변동계수이고 세로축은 이차압축침하량이 100mm를 넘을 가능성이 확률론적 설계기준  $\alpha$  보다 큰 영역의 면적과 전체면적의 비를 나타내고 있다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 이차압축침하량이 100mm를 넘을 가능성이 확률론적 설계기준  $\alpha$  보다 큰 영역의 면적과 전체면적의 비는  $C_\alpha / (1 + e_0)$ 의 변동계수가 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 확률론적 설계기준  $\alpha$ 가 작을수록, 즉 확률론적 설계기준이 엄격할수록 이차압축침하량에 대한 대책을 수립해야 하는 면적이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 지반정수의 변동성과 확률론적 설계기준  $\alpha$ 는 대책공법을 적용해야 할 면적에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

결정론적인 방법으로 산정한 이차압축침하량이 100mm가 넘는 구간의 면적을 산정한 결과 전체면적의 0.013 (1.3%)인 것으로 나타났다. 그러나 이차압축침하량에 영향을 미치는  $C_\alpha / (1 + e_0)$ 와  $c_v$ 의 변동성을 고려하는 확률론적인 방법을 사용할 경우에는 각 지반정수의 변동성과 설계기준  $\alpha$ 에 따라서 대책공법을 도입해야 할 면적이 변한다. 즉, 분석대상 지역인 송도지반의  $C_\alpha / (1 + e_0)$ 의 변동계수는 0.39이므로  $\alpha$ 가 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 일 경우 각각 전체 연약지반 구간 중 0.47, 0.35, 0.26, 0.21, 0.16, 0.13의 면적에 이차압축침하량 감소를 위한 대책공법을 적용해야 하는 것으로 나타났다.

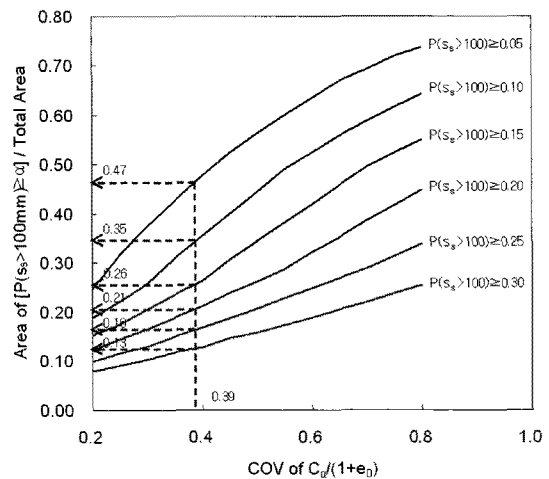


그림 9.  $C_\alpha / (1 + e_0)$ 의 변동계수와 확률론적 설계기준  $\alpha$ 에 따른 이차압축침하량 대책공법 적용면적

앞에서 언급한 이차압축침하량에 대한 확률론적 설계기준  $\alpha$ 는 아직까지 국내에서는 확립되지 않았으므로 이러한 확률론적 방법들은 설계에 직접적으로 사용되기 보다는 결정론적 방법들을 보완하는 방법으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이차압축침하량이 설계기준 100mm 이상 발생할 경우 구조물의 손상에 따른 유지관리비용과 확률론적 방법을 적용함으로써 증가한 연약지반 처리비용에 대한 분석결과를 함께 이용하여 최종 연약지반처리면적과 공법을 결정할 수 있을 것이다. 이러한 확률론적 설계는 설계자가 산정한 침하량이 어느 정도 수준의 위험도를 포함하고 있는가를 확인할 수 있는 정보를 제공해 준다. 또한, 확률론적 설계방법은 이러한 위험도를 고려하여 대책공법을 수립하는 의사결정 도구로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 7. 요약 및 결론

매립공사가 대규모로 수행되고 있는 지역의 압밀층 두께는 공간적으로 상이한 경우가 대부분이므로 이차압축침하량을 공간적으로 평가해야 한다. 또한, 공간적인 이차압축침하량 추정결과와 불확실성을 객관적으로 평가하기 위하여 확률론적 방법의 도입이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 송도지반의  $C_\alpha/C_c$ ,  $C_c/(1+e_0)$  및  $c_v$ 의 통계량과 확률론적 방법을 이용하여 공간적인 이차압축침하량 평가방법을 제시하고자 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 연약지반의 이차압축침하량을 추정하기 위해서는 먼저 압밀층 두께의 공간적 분포를 추정해야 한다. 본 논문에서는 신뢰성 분석을 수행한 결과 정규크리깅이 가장 신뢰성 있는 압밀층 두께분포의 추정치를 제공하는 것으로 나타났다.
- (2) 공간적인 이차압축침하량 분석대상 지역인 인천 송도지반의  $C_\alpha/C_c$ 를 산정한 결과 0.0337의 값을 보이는 것으로 나타났으며, 이는 Mesri와 Castro(1987)가 제안한 비유기질 점토에 대한  $C_\alpha/C_c$  값의 범위인  $0.04 \pm 0.01$ 과 유사한 것으로 나타났다. 또한, 이차압축침하량을 확률론적 방법을 이용하여 분석하기 위해서  $C_\alpha/C_c$ ,  $C_c/(1+e_0)$  및  $c_v$ 의 통계량 및 확률분포형을 분석하였다. 그 결과 유의수준( $\alpha$ ) 0.05에서  $C_\alpha/C_c$ ,  $C_c/(1+e_0)$ 는 정규분포,  $c_v$ 는 대수정규분포가 더 적합한 것

으로 나타났다.

- (3) 지반정수들의 통계량을 이용하여 이차압축침하량의 평균과 표준편차를 테일러급수의 1계 근사법으로 산정하였으며, 이 결과는 몬테 카를로 시뮬레이션으로 산정한 결과와 유사한 것으로 나타났다. 또한, 정규크리깅 기법으로 추정된 압밀층 두께와 지반정수들의 통계량을 이용하여 분석영역 전체의 이차압축침하량 평균과 표준편차를 산정하였으며, 이 결과를 이용하여 이차압축침하량에 대한 확률론적 분석을 수행하였다.
- (4) 지반정수들의 변동성이 이차압축침하량의 변동성에 미치는 영향을 분석한 결과  $C_\alpha/(1+e_0)$ ,  $C_\alpha/C_c$ 가  $c_v$ 에 비하여 상대적으로 이차압축침하량의 변동성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한,  $C_\alpha/C_c$ ,  $C_c/(1+e_0)$  및  $c_v$  중 어느 하나의 변동성을 고려하지 않을 경우 이차압축침하량의 변동성을 과소평가하는 것으로 나타났다.
- (5) 이차압축침하량에 대한 대책을 수립해야 하는 영역의 면적은  $C_\alpha/(1+e_0)$ 의 변동계수가 증가할수록 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 확률론적 설계기준이 엄격할수록 이차압축침하량에 대한 대책을 수립해야 하는 면적이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 지반정수의 변동성과 확률론적 설계기준  $\alpha$ 는 대책공법을 적용해야 할 면적에 직접적인 영향을 미친다.
- (6) 확률론적 설계는 설계자가 산정한 침하량이 어느 정도 수준의 위험도를 포함하고 있는가를 확인할 수 있는 정보를 제공해 준다. 또한, 확률론적 설계방법은 이러한 위험도를 고려하여 대책공법을 수립하는 의사결정 도구로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 국내에서 확률론적인 설계가 가능하도록 이에 대한 설계기준이 확립될 경우에는 설계에 확률론적인 방법들을 직접적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 포스코건설의 “송도 매립지반 지반조사 자료 DATABASE 구축 및 압밀침하량 평가” 연구과제의 일부분으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김규선, 임형덕, 이우진 (1999), “실내압밀시험에 의한 남해안 해상점토의  $C_u / C_c$ ”, *대한토목학회논문집*, 제15권, 제6호, pp.87-98.
2. 김동휘, 류동우, 최영민, 이우진 (2010a), “인천 송도지역 지층분포 추정을 위한 크리깅과 역거리가중치법의 적용”, *한국지반공학학회논문집*, 제26권 1호, pp.5-19.
3. 김동휘, 류동우, 이주형, 최인걸, 김종국, 이우진 (2010b), “인천 송도국제도시 지층분포추정을 위한 크리깅 방법의 비교연구”, *한국지반공학학회논문집*, 제26권 5호, pp.57-64.
4. 김동휘, 홍성진, 이우진, 고성권 (2010c), “인천 송도지역 지반의 압밀특성”, *한국지반공학학회논문집*, 제26권 1호, pp.21-33.
5. 김찬기, 조원범, 이승련, 최우정 (2008), “소성지수에 따른 점성토의 압밀특성에 관한 연구”, *한국지반공학학회논문집*, 제24권, 8호, pp.99-109.
6. 이혁진, 박사원, 유시동, 김진홍 (2004), “GIS 및 지구통계학을 이용한 대규모 매립지반의 장기침하량 예측 및 추가 지반조사 위치의 결정”, *한국지반공학학회논문집*, 제20권, 2호, pp.131-141.
7. 임형덕, 이우진, 김대규, 김낙경, 김형주 (2002), “현장 및 실내시험을 통한 군산 지역 연약토의 지반공학적 특성 연구”, *대한토목학회논문집*, 제22권, 제6호, pp.575-584.
8. 최종근 (2007), *지구통계학*, 시그마프레스, 서울.
9. Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (1975), *Probability concepts in engineering planning and design. Vol.1-Basic Principles*, John Wiley & Sons, New York, pp.191-199.
10. Athanasiou-Grivas, D., and Harr, M. E. (1978), “Consolidation-Probabilistic approach”, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.104, No.EM3, pp.681-690.
11. Baecher, G. B., and Christian, J. T. (2003), *Reliability and Statistical Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., pp.306-309.
12. Chang, C. S. (1985), “Uncertainty of One-Dimensional Consolidation analysis”, *Journal of geotechnical engineering*, Vol.111, No.12, pp.1411-1424.
13. Corotis, R. B., El-Moursi, H. H., and Krizek, R. J. (1975), “Probabilistic Approach to Prediction of Consolidation Settlement”, TRB, Transportation Research Board 548, pp.47-61.
14. Cressie, N. A. C. (1991), *Statistics for Spatial data*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
15. Deutsch, C.V., and Journal, A.G. (1992), *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, New York.
16. Freeze, R. A. (1977), “Probabilistic One-Dimensional Consolidation”, *Journal of geotechnical engineering*, Vol.103, No. GT7, pp.725-741.
17. Goovaerts, P. (1997), *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York.
18. Hong, H. P., and Shang, J. Q. (1998), “Probabilistic analysis of consolidation with prefabricated vertical drains for soil improvement”, *Canadian Geotechnical Journal*, 35, pp.666-677.
19. Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. (1989), *Applied geostatistics*, Oxford University Press, New York.
20. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R. (1985), “New developments in field and laboratory testing of soils”, *Proceedings of 11th ICSMFE*, San Francisco, Vol.1, pp.57-153.
21. Journel, A. G., and Huijberts, C. J. (1978), *Mining geostatistics*: Academic Press, London.
22. Kabbaj, M., Tavenas, F., and Leroueil, S. (1988), “In situ and laboratory stress-strain relationships”, *Geotechnique*, Vol.38, No.1, pp.83-100.
23. Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., and Bouchard, R. (1985), “Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays”, *Geotechnique*, Vol.35, No.2, pp.159-180.
24. Mesri, G. and Castro, A. (1987), “The  $C_u / C_c$  concept and K0 during secondary compression”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.113, No.GT3, pp.230-247.
25. Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977), “Time and stress compressibility interrelationship”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.103, No.GT5, pp.417-430.
26. Santra, P., Chopra, U. K., and Chakraborty, D. (2008), “Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in agricultural farm”, *Current science*, Vol.95, No.7, pp.937-945.
27. Zhou, W., Hong, H. P., and Shang, J. Q. (1999), “Probabilistic design method of prefabricated vertical drains for soil improvement”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No.8, pp.659-664.

(접수일자 2010. 2. 1, 심사완료일 2010. 9. 2)