

# 추계론적 유한요소법을 이용한 지반의 부등침하 신뢰도 해석

Reliability Analysis of Differential Settlement  
Using Stochastic FEM

이 인 모\*  
Lee, In-Mo

이 형 주\*\*  
Lee, Hyung-Joo

---

---

## Abstract

A stochastic numerical model for predictions of differential settlement of foundation soils is developed in this paper. The differential settlement is highly dependent on the spatial variability of elastic modulus of soil. The Kriging method is used to account for the spatial variability of the elastic modulus. This technique provides the best linear unbiased estimator of a parameter and its minimum variance from a limited number of measured data. The stochastic finite element method, employing the first-order second-moment analysis for computations of error propagation, is used to obtain the means, variances, and covariances of nodal displacements. Finally, a reliability model of differential settlement is proposed by using the results of the stochastic FEM analysis. It is found that maximum differential settlement occurs when the distance between two foundations is approximately same with the scale of fluctuation in horizontal direction, and the probability that differential settlement exceeds the allowable value might be significant.

## 요 지

본 논문에서는 기초지반의 부등침하를 해석하기 위하여 추계론적 수치해석 방법을 사용하였다. 부등침하는 토질탄성계수의 공간적 변화와 밀접한 관계를 갖고 있다. Kriging 이론은 탄성계수의 공간적 변화를 설명하기 위하여 사용되었다. 이 방법은 선형최적불편추정기법으로 제한된 자료로 부터 최소의 분산을 가진 추정값을 구할 수 있다. 추계론적 유한요소법을 이용하여 일차근사 2 차모멘트 기법으로 변위의 평균값과 분산값 그리고 공분산값을 구한다. 최종적으로 부등침하의 신뢰도모델이 제시되었다. 해석결과 두 기초사이의 거리와 탄성계수의 수평방향 변동거리가 거의 같을 때 최대부등침하량이 일어난다는 것과 이 때 부등침하량이 허용값을 넘을 확률이 상당히 크다는 것이 밝혀졌다.

---

\* 정회원, 고려대학교 공과대학 토목공학과, 조교수

\*\* 현대건설(주), 해외토목사업본부, 사원

## 1. 서 론

기초를 설계하기 위해서는 지반의 총침하량과 부등침하량의 산정이 필요하다. 특히 부등침하는 구조물에 손상을 주기 때문에 정확히 예측되어야 한다. 토질자료는 여러 요인으로 인하여 그 값에 불확정성을 포함하고 있다. 토질자료 불확정성의 요인을 편의상 다음과 같이 3가지—비균질성, 통계적 불확정성, 측정오차—로 나누어 생각할 수 있다. 비균질성으로 인해 토질은 공간적 변화에 의한 불확정성을 갖는다. 토질의 공간적 변화에 의한 불확정성은 3개의 매개변수(Parameter) 즉 평균, 표준편차, 변동거리( $Z$ ,  $\bar{Z}$ ,  $\beta_z$ )로 표시될 수 있다. (Fig. 1)

침하에 영향을 주는 토성으로는 탄성계수  $E$ 와 포아손의 비  $\mu$  값이 있다. 그러나 포아손의 비는 탄성계수에 비해 침하량에 큰 영향을 미치지 않는다는 것이 밝혀졌으므로 본 연구에서는 탄성계수만 무작위변량으로 본다. 본 논문은 변동거리의 변화와 외력의 변화에 의한 부등침하량의 변화 및 기초 종류에 따른 부등침하량 변화를 고찰한 것이다.

본 논문의 최종 목적은 탄성계수의 불확정성을 고려한 변위량을 추정하여 건물에 구조적 손상을 주게 되는 부등침하량 즉  $L/300$  보다 클 확률을 구할 수 있는 모델을 제시하고 그 결과를 보이는 것이다.

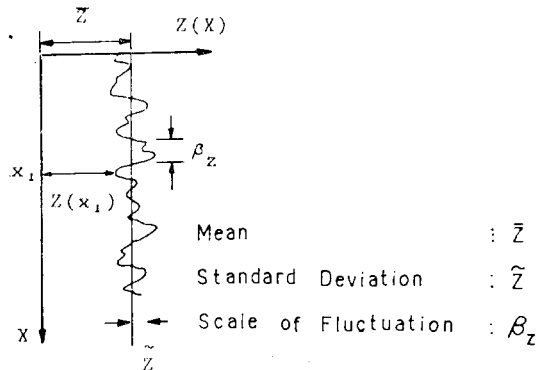


Fig. 1 Parameters of homogeneous randomly varying soil property

## 2. 토질강도 정수의 확률모델

본 장에서는 정상공간(Wide sense stationary field)에서 무작위공간(Random field)의 평균값의 변동을 정확히 추정할 수 있는 Kriging 방법을 기술한다.

Kriging 방법을 사용하기 위해서는 변동거리, 자기상관함수(Autocorrelation function), 분산감소함수(Variance reduction function) 등의 정의와 구하는 방법을 알아야 한다. 또한 부등침하량의 평균, 분산 그리고 공분산을 일차근사 2차모멘트기법(First-order second moment method)으로 구하기 위하여 본 논문에서는 추계론적 유한요소법을 사용하므로 본 장에서는 요소(Element)의 평균값, 분산값 그리고 공분산값을 구하는 방법을 기술한다.

### 2.1 확률변수

변동거리는 두점 사이의 강한상관을 보이는 거리로써 Vanmarcke<sup>10)</sup>에 의해 다음과 같이 정의되었다.

$$\beta_z = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(s) ds \quad (1)$$

여기서  $\rho(s)$  : 자기상관함수

그러므로  $\beta_z$ 는 평균값  $\bar{Z}$ 와,  $Z(X)$ 의 교차점 사이의 평균거리와 관계한다.

탄성계수에 대한 자기 상관함수는 삼각형, 사각형, 지수형 등 여러 형상으로 제안되어 왔다. 그러나 어떤 형상도 탄성계수의 공간적 변화(Spatial variability)를 정확히 표시하지 못한다. 그러나 1에서 0으로 감소하는 간단한 자기 상관함수를 선택한다면 함수의 선택은 해석에 큰 영향을 미치지 않는다는 것이 밝혀졌으므로<sup>11)</sup> 본 논문에서는 다음과 같은 자기 상관함수를 선택하였다.

$$\rho(X, Y) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|X|}{\beta_x}\right) \left(1 - \frac{|Y|}{\beta_y}\right) & |X| < \beta_x, |Y| < \beta_y \\ 0 & \text{그외} \end{cases} \quad (2)$$

분산감소함수는 측정자료의 점표준편차와 공간평균값의 표준편차 비로써 정의<sup>10)</sup>되며 분산

감소함수의 정확한 형상은 무작위공간의 자기 상관함수  $\rho(v)$ 에 의존한다.

$$I^2(X) = \frac{2}{X} \int_0^X \left(1 - \frac{v}{X}\right) \rho(v) dv \quad (3)$$

본 논문에서 사용하는 2차원공간의 분산감소 함수를 변동거리의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$I^2(X, Y) = \begin{cases} \left(1 - \frac{X}{3 \times \beta_x}\right) \cdot \left(1 - \frac{Y}{3 \times \beta_y}\right) & X \leq \beta_x, Y \leq \beta_y \\ \left(1 - \frac{X}{3 \times \beta_x}\right) \cdot \left(\frac{Y}{\beta_y}\right) \cdot \left(1 - \frac{\beta_y}{3 \times Y}\right) & X \leq \beta_x, Y > \beta_y \\ \left(\frac{\beta_x}{X}\right) \cdot \left(1 - \frac{\beta_x}{3 \times X}\right) \cdot \left(1 - \frac{Y}{3 \times \beta_y}\right) & X > \beta_x, Y \leq \beta_y \\ \left(\frac{\beta_x}{X}\right) \cdot \left(1 - \frac{\beta_x}{3 \times X}\right) \cdot \left(\frac{\beta_y}{Y}\right) \cdot \left(1 - \frac{\beta_y}{3 \times Y}\right) & X > \beta_x, Y > \beta_y \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 요소의 공분산

일차근사 2차모멘트방법으로 변위사이의 공분산을 얻기 위해서는 요소사이의 공분산을 구하여야 한다. 두 요소  $A_1 = X * Y$ ,  $A_2 = X' * Y'$  사이의 공분산을 구하는 식은 Vanmarcke<sup>12)</sup>에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$\text{Cov}[E_{A_1}, E_{A_2}] = \frac{\text{Var}[E]}{4 A_1 A_2} \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (-1)^i (-1)^j \phi(X_i, X_j) \quad (5)$$

여기서,

$$\phi(X_i, X_j) = (X_i Y_j)^2 I^2(X_i, X_j)$$

Kriging 방법을 사용하기 위해서는 측정데이터와 요소사이의 공분산을 알아야 한다. 식 (5)에서 A를  $2X * 2Y$ 라 하고 X, Y를 0으로 접근시킴으로서 측정데이터와 요소사이의 공분산을 구할 수 있다. 요소의 위치와 측정데이터 사이의 상호위치에 따라 4가지 경우로 나누어 그림으로 표시하면 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 Case 1인 경우 공분산은 다음과 같이 표시할 수 있으며

$$\text{Cov}[E_A, E] = \frac{\text{Var}[E]}{4 A} [\check{\phi}(a_1, a_2) - \check{\phi}(a_1, b_2) - \check{\phi}(b_1, a_2) + \check{\phi}(b_1, b_2)] \quad (6)$$

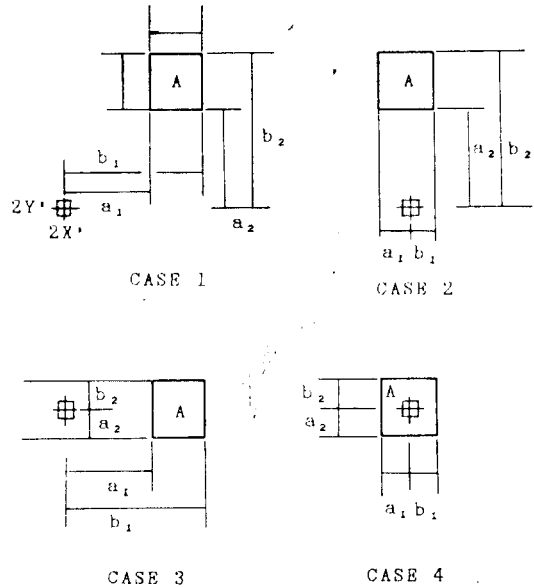


Fig. 2 Relative location of a point with respect to element A

여기서,

$$\check{\phi}(a, b) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \phi(X, Y) \Big|_{x=a, y=b}$$

위와 같은 방법으로 Case 2, Case 3, Case 4인 경우의 공분산도 구할 수 있다.

또한 Kriging을 사용하기 위해서는 측정탄성계수사이의 공분산을 알아야 하며 다음 식을 이용하여 구한다.

$$\text{Cov}[E_i, E_j] = \sqrt{\text{Var}[E_i]} \sqrt{\text{Var}[E_j]} \rho_E \quad (7)$$

식 (7)에서 사용된 자기 상관함수  $\rho_E$ 는 2.1절에서 언급한 식 (2)를 사용한다.

## 2.3 최적추정기법 : Kriging[4]

Kriging은 Fig. 3에서 보는 것과 같이 특정 지점에서 구한 자료를 가지고 면적(또는 체적)의 공간평균값과 공간분산값을 구하는 선형최적불편추정기법(The best linear unbiased estimator)이다. Grade를 측정된 N개의 시료로 Grade를 모르는 면적 V의 Z(V)를 추정하기 위해서는 가중치  $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 를 알아야 한다.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n a_i Z(X_i) \quad (8)$$

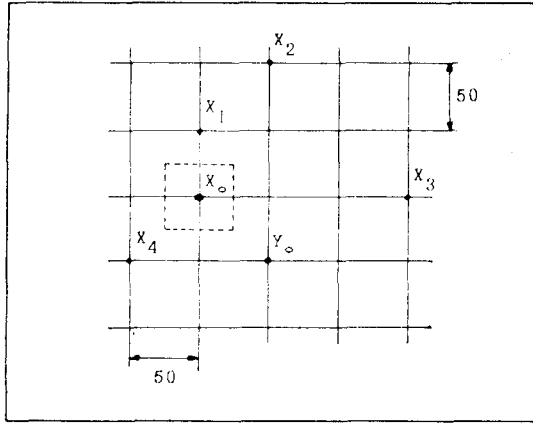


Fig. 3 Sketch of sample location

여기서,

$Z^*$  : The best estimator of  $Z(V)$

$Z(X_i)$  : 실측자료

가중치  $a_i$ 는 다음의 두 조건을 만족시켜야 한다. 첫째로  $Z^*$ 와  $Z(V)$ 의 추정분산이 최소화되어야 한다. 이런 조건안에서  $Z(V)$ 의 추정분산을 구해보면 다음과 같다.

$$\sigma_z^2 = \sigma_v^2 - 2 \sum_{i=1}^n a_i \sigma_{v x_i} + \sum_i \sum_j a_i a_j \sigma_{x_i} \sigma_{x_j} \quad (9)$$

여기서,

$$\sigma_z^2 = \text{Var}[Z(V)]$$

$$\sigma_{v x_i} = \text{Cov}[Z(V), Z(X_i)]$$

$$\sigma_{x_i x_j} = \text{Cov}[Z(X_i), Z(X_j)]$$

두번째로 추정값은 실제값과 같이 한쪽으로 편향되어서는 안된다. 이것이 불편조건으로 가중치의 합이 1이 되어야 한다는 것을 의미한다. 두 조건을 만족시키는  $a_i$ 를 구하기 위하여 Lagrange 이론을 이용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$[\Sigma] [A] = [D] \quad (10)$$

$$[\Sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1 x_1} & \sigma_{x_1 x_2} & \dots & \sigma_{x_1 x_n} & 1 \\ \sigma_{x_2 x_1} & \sigma_{x_2 x_2} & \dots & \sigma_{x_2 x_n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{x_n x_1} & \sigma_{x_n x_2} & \dots & \sigma_{x_n x_n} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} [A] = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \\ \mu \end{bmatrix} [D] = \begin{bmatrix} \sigma_{v x_1} \\ \sigma_{v x_2} \\ \vdots \\ \sigma_{v x_n} \\ 1 \end{bmatrix}$$

측정자료 사이의 공분산은 식 (7)로부터 구할 수 있으며 측정자료와 요소사이의 공분산은 식 (6)으로 부터 구할 수 있으므로 식 (10)으로 부터  $a_i$ 를 구할 수 있다. 식 (10)으로 구한  $a_i$ 를 식 (8)에 대입하여 탄성계수의 평균값을 얻는다.

최적추정치 of 분산을 구하기 위해 식 (9)를  $a_i$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_{v x_i}$ 의 함수로 전환하여 행렬형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{Var}[Z^*] = \text{Cov}[V, \tau] - [a]^T [D] \quad (11)$$

식 (11)를 이용하여 요소의 분산값을 구한다.

### 3. 부등침하의 신뢰도 모델

부등침하 해석의 목적은 구조물의 안전성과 신뢰성을 높이기 위하여 부등침하량이 구조물에 손상을 주게되는 어떤값을 넘을 확률을 구하는 것이다. 근년의 컴퓨터에 의한 수치해석 특히 유한요소법의 급속한 발달은 이 목적을 성취하기 위하여 크게 기여하였다.

기초는 불확정성을 갖는 지반위에 놓이게 된다. 따라서 의미있는 부등침하 해석을 하기 위해서는 첫째로 토질탄성계수의 불확정성이 규명되어야 하며 이러한 방법의 해석은 확률론에 기인하여 발전되어 왔다. 탄성계수의 불확정성에 대해서는 전술한 바 있다. 불확정성을 포함하는 구조계는 확률론에 기초하여 확률구조계로 취급하는 것이 좋다. Fig. 4는 그 개념을 도식적으로 표현한 것이다. 동일한 입력이 주어지더라도 구조계를 Fig. 4와 같이 어떤 통계량을 가진 집단으로 생각하면, 출력의 표본함수는 어떤 모집단을 형성한다고 생각할 수 있다. 우리의 목적은 출력모집단의 통계량을 해석하는 것이다.<sup>15)</sup>

외력이 기초 위에 가해질 때 통계량의 집단 즉 탄성계수값에 의해 침하량은 어떤 분포를 가지

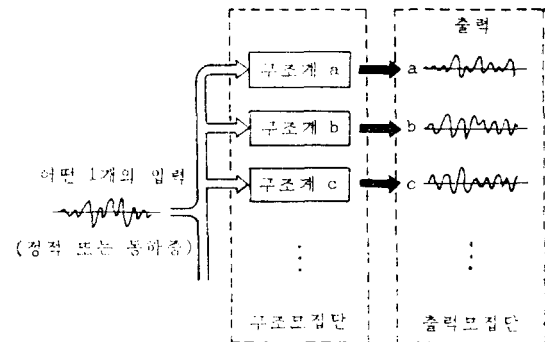


Fig. 4 Stochastic structural system

는 값으로 나온다. 이를 이용하여 부등침하량이 어떤 값을 넘을 확률을 구할 수 있다.

### 3.1 일차근사 2차모멘트해석(First-Order Second Moment Analysis)

본 논문에서는 침하량의 평균값과 분산값을 얻기 위하여 일차근사 2차모멘트 해석을 한다. 일차근사 2차모멘트 해석을 하는 이유는 무작위변량  $E$ 의 밀도함수를 구하기 어렵고 밀도함수를 알고 있어도 평균과 분산을 구하는 식에 대입하여 적분을 하기가 어렵기 때문이다. 또한 우리가 취할 수 있는 정보는 탄성계수의 평균과 분산값으로 제한되어 있다. 이상의 이유 때문에 무작위변량  $E$ 의 함수  $U$ 의 근사평균과 분산값이 실질적으로 유용한 경우가 많다.

### 3.2 이차원추계론적 유한요소모델

침하량을 구하기 위한 유한요소 식은 다음과 같다.

$$[K]\{U\} = \{P\} \quad (12)$$

침하량을 탄성계수의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\{U\} = [K]^{-1}\{P\} \quad (13)$$

부등침하를 해석하기 위한 기본적인 이차원도

$$\begin{pmatrix} \text{Var}[U_1] & \text{Cov}[U_1, U_2] & \dots & \text{Cov}[U_1, U_n] \\ \text{Cov}[U_2, U_1] & \text{Var}[U_2] & \dots & \text{Cov}[U_2, U_n] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{Cov}[U_n, U_1] & \text{Cov}[U_n, U_2] & \dots & \text{Var}[U_n] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial \langle E \rangle_1} & \frac{\partial U_1}{\partial \langle E \rangle_2} & \dots & \frac{\partial U_1}{\partial \langle E \rangle_m} \\ \frac{\partial U_2}{\partial \langle E \rangle_1} & \frac{\partial U_2}{\partial \langle E \rangle_2} & \dots & \frac{\partial U_2}{\partial \langle E \rangle_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial U_n}{\partial \langle E \rangle_1} & \frac{\partial U_n}{\partial \langle E \rangle_2} & \dots & \frac{\partial U_n}{\partial \langle E \rangle_m} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} \text{Cov}[\langle E \rangle_1, \langle E \rangle_1] & \text{Cov}[\langle E \rangle_1, \langle E \rangle_2] & \dots & \text{Cov}[\langle E \rangle_1, \langle E \rangle_m] \\ \text{Cov}[\langle E \rangle_2, \langle E \rangle_2] & \text{Cov}[\langle E \rangle_2, \langle E \rangle_2] & \dots & \text{Cov}[\langle E \rangle_2, \langle E \rangle_m] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{Cov}[\langle E \rangle_m, \langle E \rangle_1] & \text{Cov}[\langle E \rangle_m, \langle E \rangle_2] & \dots & \text{Cov}[\langle E \rangle_m, \langle E \rangle_m] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial \langle E \rangle_1} & \frac{\partial U_2}{\partial \langle E \rangle_1} & \dots & \frac{\partial U_n}{\partial \langle E \rangle_1} \\ \frac{\partial U_1}{\partial \langle E \rangle_2} & \frac{\partial U_2}{\partial \langle E \rangle_2} & \dots & \frac{\partial U_n}{\partial \langle E \rangle_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial U_1}{\partial \langle E \rangle_m} & \frac{\partial U_2}{\partial \langle E \rangle_m} & \dots & \frac{\partial U_n}{\partial \langle E \rangle_m} \end{pmatrix} \quad (18)$$

모델을 Fig. 5에 표시하였다.

절점변위의 평균을 구하기 위하여 식 (13)을 테일러급수로 전개하여 일차근사법에 적용 시킨 후 행렬형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[\{U\}] &= E[[K]^{-1}\{P\}] \\ &= E[[K]^{-1}]\{P\} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)에서  $E[[K]^{-1}]$ 는  $[K]^{-1}$ 의 평균값을 뜻하며 이는  $E[[K]]$ 의 역행렬과 같으므로<sup>5)</sup> 식

(14)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$E[\{U\}] = E^{-1}[[K]]\{P\} \quad (15)$$

이차원모델에서 응력은 식 (15)에서 보는 것과 같이 무작위변위량의 함수이므로 무작위변량이다.

변위의 분산과 공분산을 구하기 위해서는 변위를 탄성계수로 미분한 값이 필요하다. 식 (12)를 미분하면 다음과 같고,

$$[K] \frac{\partial \{U\}}{\partial \langle E \rangle_i} + \frac{\partial [K]}{\partial \langle E \rangle_i} \{U\} = \{0\} \quad (16)$$

식 (16)의  $\{U\}$ 에  $[K]^{-1}\{P\}$ 를 대입 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \{U\}}{\partial \langle E \rangle_i} = -[K]^{-1} \frac{\partial [K]}{\partial \langle E \rangle_i} [K]^{-1}\{P\} \quad (17)$$

절점변위의 분산과 공분산을 구하기 위해 식 (13)을 일차근사법에 적용 시킨 후 행렬형태로 표현하면 다음과 같다.

본 논문에서 부등침하는 두점간의 변위차로 정의하고 부등침하의 평균과 분산을 구해보면 다음과 같다.

$$\Delta U = U_i - U_j \quad (19)$$

$$E[\Delta U] = E[U_i] - E[U_j] \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[\Delta U] &= \text{Var}[U_i] + \text{Var}[U_j] \\ &\quad - 2\text{Cov}[U_i, U_j] \end{aligned} \quad (21)$$

### 3.3 부등침하의 신뢰도모델

Grant 등은 1974년<sup>6)</sup> 실측자료를 이용하여 최대부등침하량이  $L/300$ 을 넘게되면(이하 한계부등침하량) 건물에 손상을 주게된다고 제안하였다.

본 절에서는 3.2절에서 구한 평균부등침하량과 분산값을 이용하여 부등침하의 신뢰도모델을

제시하였다. 부등침하의 분포가 정규분포를 따른다고 가정하면 그 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(\Delta u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta u - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad -\infty \leq \Delta u \leq \infty \quad (22)$$

식 (22)을 이용하여 부등침하량이 한계부등침하량을 넘을 확률을 구해보면 다음과 같다.

$$P\left(-\frac{L}{300} > \Delta u, \Delta u > \frac{L}{300}\right) = 1 - \int_{-\frac{L}{300}}^{\frac{L}{300}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta u - \mu}{\sigma}\right)^2\right] d\Delta u \quad (23)$$

본 논문에서 식 (23)의 해를 구하기 위하여 Minitab을 사용하였다.<sup>9)</sup>

#### 4. 예제해석 및 결과분석

본 예제해석의 목적은 변동거리에 따른 부등침하량의 변화와 이 부등침하량이 건물에 구조적 손상을 주게되는  $L/300$ 을 넘을 확률을 구하는 것과 기초의 강성이 다른 경우 즉 강성기초 일때와 연성기초일 때 부등침하량에 미치는 영향에 대하여 고찰하는 것이다. 본 예제의 형상은 Fig. 5와 같다.

(1) 하중의 변화에 의한 부등침하량의 변화

기초에 작용하는 하중을 100, 1,000, 2,000, 3,000, KN/M<sup>2</sup>으로 증가시켰을 때 부등침하량의 변화는 Fig. 6에 있다. Fig. 6에서 보는 것과 같이 하중이 증가하면 부등침하량은 직선적으로 증가하며 연성기초보다 강성기초의 부등침하량이 일정비율만큼 적다.

(2) 하중의 변화에 의한 부등침하량 표준편차의 변화

기초에 작용하는 하중을 증가시켰을 때 부등침하량 표준편차는 선형적으로 증가한다. (1)과 (2)에서 구한 부등침하량의 평균과 분산을 이용하여 밀도함수를 구해보면 Fig. 7과 같다.

(3) 하중의 변화에 의한 임계확률의 변화

부등침하량이  $L/300$ 을 넘을 확률(이하 임계확률)은 식 (23)을 이용하여 구하였다. 하중의

변화에 의한 임계확률의 변화는 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 임계확률은 하중이 증가함에 따라 급격히 증가하는 것을 보여준다.

(4) 변동거리의 변화에 의한 부등침하량의 변화

변동거리를 기초 사이의 거리로 나눈(Normalize) 값을 X축으로 하고 부등침하량을 Y축으로 하여 변동거리의 변화에 의한 부등침하량의 변화를 Fig. 9, Fig. 10에 표시하였다. Fig. 9 Fig. 10으로 부터 부등침하량은 변동거리가 기초 사이의 거리와 같을 때 가장 큰 값을 보인다는 것을 알 수 있다.

(5) 변동거리의 변화에 의한 부등침하량 표준편차의 변화

변동거리의 변화에 의한 부등침하량 표준편차의 변화를 구해보면 Fig. 9, Fig. 10과 같은 형상을 보인다.

(6) 변동거리의 변화에 의한 임계확률의 변화  
변동거리의 변화에 의한 임계확률의 변화를 Fig. 11에 표시하였다.

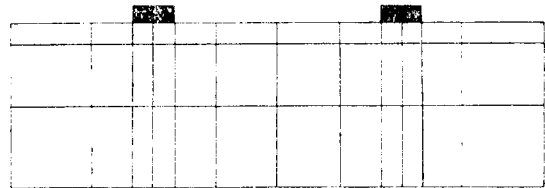


Fig. 5 Example foundation

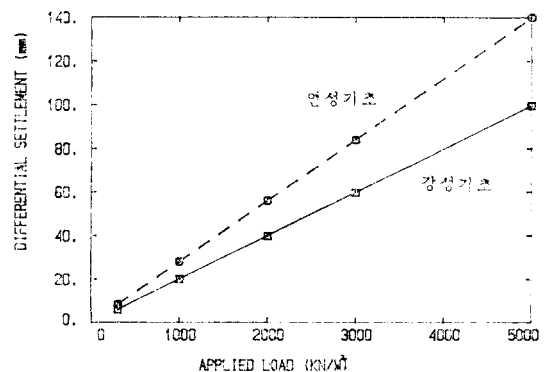


Fig. 6 Correlation between applied load and differential settlement( $\beta_x=20M$ ,  $\beta_y=5M$ )

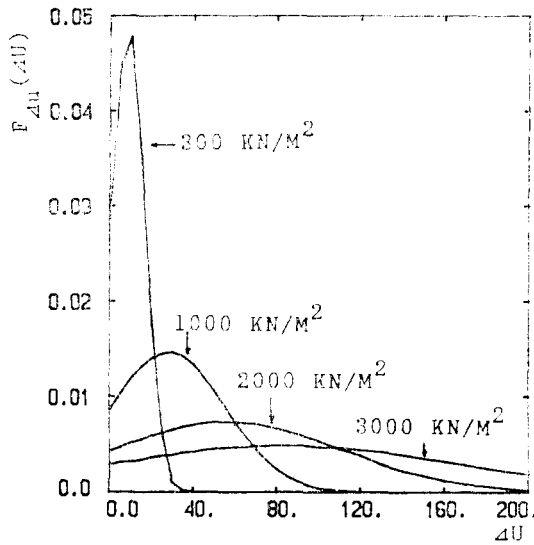


Fig. 7 Normal density function(Flexible base)

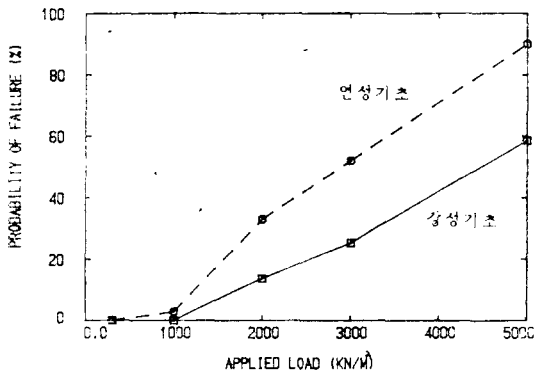


Fig. 8 Probability of failure v.s. applied load

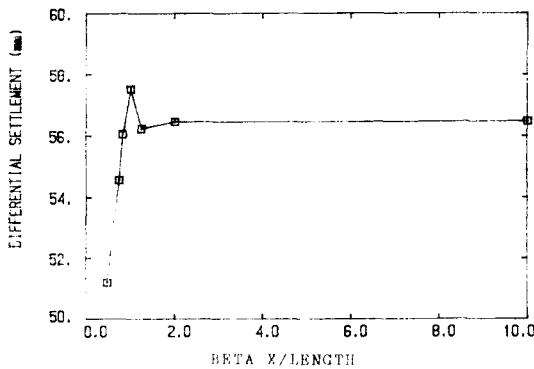


Fig. 9 Correlation between scale of fluctuation and differential settlement(Flexible base; Applied load=2000 KN/M<sup>2</sup>)

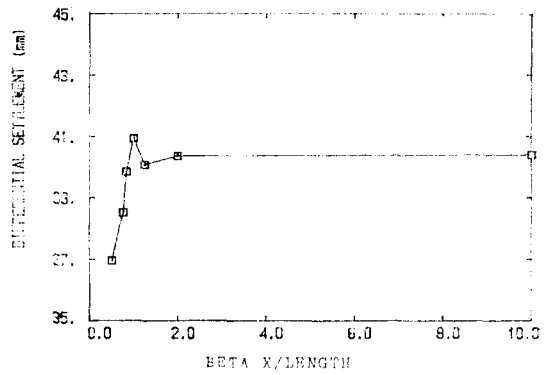


Fig. 10 Correlation between scale of fluctuation and differential settlement(Rigid base; Applied load=2000KN/M<sup>2</sup>)

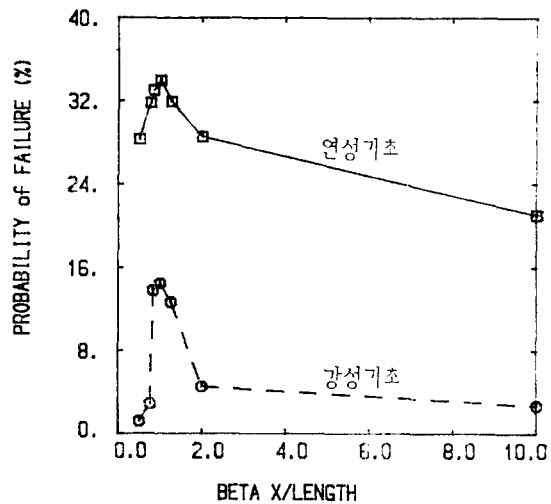


Fig. 11 Probability of failure v.s. scale of fluctuation(Applied load=2000KN/M<sup>2</sup>)

본 논문에서 제시한 Approach는 우선 탄성계수  $E$ 가 Constant하다고 가정하여 비선형효과는 고려하지 않았다. 따라서 이를 고려한 해석이 차후의 연구과제이다. 본 Approach를 실제문제에 적용하기 위하여는 필수적으로 적용할 지역에서의 변동계수의 추정이 필요하다. 다만 지질조건을 고려하여 각각의 대표적 토질에 대하여 실험으로 기준치를 정하여 이들 대표값을 사용하면 무리가 없을 것이다.

## 5. 결 론

본 논문은 하중의 변화, 변동거리의 변화에 의한 부등침하량의 변화와 부등침하 신뢰도에 대하여 연구하였다. Kriging 과 추계론적 유한요소법을 사용하여 부등침하에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Kriging 을 사용함으로써 Vanmarcke 가 제안한 토질확률모델보다 정확히 무작위공간을 설명할 수 있었고 요소의 평균탄성계수값을 더 합리적으로 구할 수 있었다.

2. 동일 하중상태하에서 수평방향 변동거리가 기초 사이의 거리와 같을 때 최대부등침하량이 발생한다는 것을 알 수 있다.

3. 부등침하 신뢰도모델을 사용함으로써 일반적인 안전율개념으로 해석할 때 안전한 지반도 탄성계수의 불확정성에 의해 발생하는 부등침하량의 불확정성에 의해 한계부등침하량을 넘을 가능성이 있다는 것을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Baecher, G.B. and Ingra, T.S., "Stochastic FEM in Settlement Predictions", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. GT4, Proc. Paper 16173, Apr., 1981, pp. 449~463.
2. Baecher, G.B., "Just a Few More Tests and We'll be Sure!", Proceedings, Geotechnical Engineering Conference on Probabilistic Characterization of Soil Properties, Atlanta, Georgia, ASCE, 1984, pp. 1~18.
3. Davenport, W.B.Jr, "Probability and Random Processes", McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y, 1970.
4. David, M., "Geostatistical Ore Reserve Estimation", Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1977.
5. Ditlevsen, O., "Uncertainty Modeling with Application to Multidimensional Civil Engineer Systems", McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1980.
6. Grant, R. and Cristian, J.T., "Differential Settlement of Buildings", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.100, No. GT9, Sept., 1973, pp. 973~991.
7. Hinton, H. and Owen, D.R.J., "Finite Element Programming", Academic Press Inc., London, 1979.
8. Lee, I.M., "A Probabilistic Analysis of Pore-water Predictions for Unsteady Groundwater Flow on a Sloping Bed", thesis presented to Ohio State University at Ohio in 1986, in partial fulfillment of the requirement for the degree Doctor of Philosophy.
9. Ryan, B.F., Joiner, B.L., and Ryan, T.A. Jr., "Minitab", Duxbury Press, 1985.
10. Vanmarcke, E.H., "Probability Modeling of Soil Profiles" Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT11, Proc. Paper 13364, Nov., 1977, pp. 1227~1246.
11. Vanmarcke, E.H. and Grigoriu, M., "Stochastic Finite Element Analysis of Beams", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 109, No. 5, Oct., 1983, pp. 1203~1214.
12. Vanmarcke, E.H., "Random Fields: Analysis and Synthesis", The MIT Press, 1984.

(접수일자 1988. 8. 12)