

얕은기초 침하의 확률론적 해석

Probabilistic Analysis of Shallow Foundation Settlements

정 두 영*1
Jeong, Doo-Young
오 병 현*2
Oh, Byung-Hyun

Abstract

In the settlement analysis of shallow foundation, soil properties, loads and soil strata involve many uncertainties so it is necessary to do analysis of settlement that considers the probabilistic properties of each variable. This study is performed to probabilistic analysis for settlement of shallow foundation consisted of individual footings by using Monte Carlo Method. To consider the uncertainty of variables, both the soil properties and loads are assumed to be normal distribution random variables and get settlement mean and coefficient of variation of individual footing. And the settlement of each individual footing is also assumed to be normal distribution. Settlement of each individual footing which considers the probability of soft soil pockets in soil strata follows Markov process. Then it is performed to do sensitivity analysis which is involved to excess probability of allowable criteria of maximum settlement and differential settlement according to variety of each variable. It is thought to be proper that the settlement analysis of shallow foundation should be analyzed considering uncertainty of variables and soil stratum conditions.

요 지

얕은기초의 침하해석에 관련된 토질정수, 하중 및 지층구조는 많은 불확실성을 내포하고 있어 확률적 특성을 고려한 해석이 필요하다. 본 연구는 Monte Carlo Method를 이용하여 독립후팅들로 구성된 얕은기초의 침하에 관한 확률론적 해석을 하였다. 변수의 불확실성을 고려하기 위하여 토질정수와 하중은 정규분포의 확률변수로 가정하여 독립후팅의 침하평균 및 변동계수를 구하고 각 독립후팅의 침하도 정규분포하는 것으로 가정하였다. 또한 지반내에 존재할 수 있는 연약토질 포켓(soft soil pocket)의 확률을 고려한 각 독립후팅의 침하는 Markov process를 따르는 것으로 하였다. 이와같은 각 변수들의 변화에 따라 최대침하와 부등침하의 허용한계 초과확률에 대한 민

*1 정희원, 전북대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 전북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

감도분석을 하였으며, 얇은기초의 침하해석은 각 변수의 불확실성과 지반조건을 고려하는 것이 타당하다고 판단된다.

1. 서론

얇은기초의 설계는 일반적으로 허용침하기준에 의해 결정되며 침하해석은 얇은기초 설계의 중요한 요소이다.⁽¹²⁾ 예측침하와 실제침하가 잘 일치하는 경우도 있지만, 때로는 예측과 실제침하 사이에 많은 차이가 발생할 수 있는데 이러한 침하간의 불일치 이유는 다음과 같다.^(8, 9)

- a. 토질특성을 잘못 평가한 경우.
- b. 토층의 이질성과 불규칙성 및 토층내에 anomaly가 존재하는 경우.
- c. 침하를 유발시키는 깊이에 따른 순응력증가 계산의 착오.

침하해석에서 토질, 토층과 현장조건은 매우 유동적이며 기초에 작용하는 모든 하중의 특성과 크기는 예측하기 어렵다. 이러한 불확실성은 항상 존재할 수 있으며 그것들을 체계적으로 설명하기가 어려울뿐만 아니라 결정론적 침하해석에 의해 구체화 시킬 수 없으므로 토질, 토층 및 하중변수등에 관련된 불확실성은 예측침하에 불확실성을 야기시킨다.

기초침하의 예측에 입력변수의 불확실성을 고려한 확률론적 해석기법의 채택이 가능하다. 이러한 확률변수들의 함수인 얇은기초의 침하는 평균, 표준편차 또는 변동계수와 확률밀도함수(pdf)로 표현되는 확률적인 해석을 할 수 있다.⁽¹¹⁾ 이와 같은 불확실성은 많은 학자들에 의해 인식되어 왔으며 기초의 안정해석에 확률론을 이용한 신뢰도 해석론이 도입되었다.

Resendiz 등⁽¹⁷⁾은 주차건물의 침하에 대한 확률론적 해석을 하였으며, Komornik 등⁽¹³⁾은 9개의 독립후탕 위에 축조된 벽돌건물의 점토층 경계면 변동에 따른 부등침하를 연구하였고, Schultze 등⁽²⁰⁾은 148개의 기초침하를 10가지 계산법을 이용하여 통계적 해석을 하였다.

Usmen 등⁽²⁵⁾은 독립후탕의 사질토지반과 점성토지반에서의 탄성침하와 압밀침하의 확률론적 해석에 Point Estimated Method를 이용하였다.

본 연구에서는 독립후탕들이 2차원으로 구성된 얇은기초 모델의 침하예측을 위하여 독립후탕의 침하량 계산은 Schmertman의 침하식과 Terzaghi의 침하식을 이용하였으며 토질정수와 하중의 불확실성을 고려하기 위해 정규분포로 가정한 확률변수의 생성에 의해 침하평균과 변동계수를 구하였다. 또한 토층내에 연약토질 포켓의 존재여부에 대한 불확실성,^(4, 23, 24) 독립후탕의 침하간 상관관계 및 각 확률변수의 변화에 따른 얇은기초의 최대침하와 부등침하의 허용한계 초과확률을 분석하기 위하여 Monte Carlo Simulation Method⁽¹⁹⁾에 의한 프로그램을 개발하였으며 확률론적 해석에 의한 얇은기초 침하의 신뢰도 해석을 하는데 그 목적이 있다.

2. 침하이론 및 불확실성

2.1 침하방정식

사질토의 탄성침하는 Schmertman(1978)의 반경험적인 변형률영향계수를 사용하여 다음 식으로 계산할 수 있다.⁽⁷⁾

$$S_e = C_1 C_2 (\bar{q} - q) \sum_0^{z_B} \frac{I_z}{E_s} \Delta z \quad (1)$$

여기서,

S_e : 탄성침하량

$C_1 = 1 - 0.5[q/(\bar{q} - q)]$: 기초의 근입깊이에 대한 수정계수

$C_2 = 1 + 0.2 \log(\text{year}/0.1)$: 흙의 크리프에 대한 수정계수

\bar{q} : 기초의 접촉응력

$q = \gamma D_f$: 기초위의 흙하중에 의한 응력

(γ : 흙의 단위중량,

D_f : 기초 근입깊이)

B : 기초폭

I_z : 심도증가(Δz)에서의 변형률영향계수

E_s : 탄성계수

식(1)에서 I_z 는 지층깊이에 따른 변형률의 변화로부터 구해지며 E_s 는 표준관입시험치 또는 콘관입시험치를 이용하여 추정할 수 있다.

점성토의 압밀침하는 Terzaghi의 일차원 압밀식이 흔히 사용되며 정규압밀점토의 침하식은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$S_c = \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (2)$$

여기서, S_c : 압밀침하

C_c : 압축지수

H_c : 압밀층의 두께

e_0 : 초기 간극비

p_0 : 평균 유효 과하중 압력

Δp : 재하에 의한 평균응력 증가

2.2 불확실성 요소

얕은기초의 침하해석은 토질정수, 연약토질포켓등의 anomaly 및 하중조건등을 고려해야 한다. 확률론적 해석에 관여하는 토질정수의 통계적 연구는 많은 학자들에 의하여 발표되었다.^(2, 5, 14, 15, 20) Lumb,⁽¹⁵⁾ Schultze 등⁽¹⁴⁾은 흙의 단위중량, 간극비, 압축지수등의 확률분포특성을 정규분포나 대수정규분포로 하였고, 松尾稔⁽²⁾도 정규분포로 근사화할 수 있다고 했으며 각 토질정수의 변동계수를 발표하였다.

Rosenblueth,⁽¹⁸⁾ Krizek 등⁽¹⁴⁾은 점토지반에 놓인 건물의 침하는 정규분포하는 것으로 보았고, Schultze 등⁽²⁰⁾은 독립후팅의 침하는 정규분포를 나타내며 변동계수는 0.46 - 0.52의 범위라고 발표하였다. Komornik⁽¹³⁾은 단층 건물의

침하해석에서 최대부등침하는 전침하의 50%를 넘지 않아야 하며 Terzaghi와 Peck(1948)의 과정과 일치한다고 했다. 침하특성은 토질구성요소들의 압밀특성의 총합체이기 때문에 중심극한 정리에 의해 정규분포로 모형화할 수 있다.^(3, 14, 18)

기초지반의 보링, 표준관입시험, 콘관입시험 등의 지반조사에서 연약토질포켓등의 anomaly가 발견되지 않은채 남아 있을 수 있으며 이러한 anomaly의 갱신확률(updated probability)은 Bayesian approach를 이용하여 구할 수 있다.^(3, 23, 24)

$$f''(\theta) = KL(\theta) f'(\theta) \quad (3)$$

여기서,

K : 정규화상수(normalization constant)

L(θ) : 우도함수(likelihood function)

$f'(\theta)$: anomaly의 사전확률(prior probability)

기초나 구조물의 건축에 있어서 이와 같이 파악하지 못했던 연약토질포켓이 토층내에 존재할 경우에는 국부적인 과대침하로 인하여 예상치 못한 피해를 초래할 수 있으므로 연약토질포켓의 유무를 고려해야 할 것이다.

Tang은 사하중의 확률분포를 대부분의 경우 정규분포나 대수정규분포로 취급하였으며 변동계수는 0.06 - 0.13이고 활하중은 지수분포한다고 하였다. Chalk는 활하중이 정규분포나 감마분포한다고 하였으며, Ellingwood는 변동계수를 0.26 - 0.33의 범위로, Allen은 0.3으로 제시하였고, ANSI에서는 0.26으로 정하고 있다. 그 외에 지진하중, 풍하중등 여러하중의 분포특성이 있으며 이러한 하중들을 합하여 중심극한 정리에 의해 정규분포하는 것으로 간주할 수 있다.^(1, 2, 3, 14, 22)

2.3 확률변수생성

정규분포의 확률변수 생성은 중심극한 정리를 이용한 방법, Box - Muller방법등을 이용할 수 있다.⁽¹⁶⁾ 평균이 μ 이고 분산이 σ^2 인 정규분포

$N(\mu, \sigma^2)$ 의 확률밀도함수 $f(x)$ 는 다음과 같다.⁽³⁾

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$-\infty < x < \infty \quad (4)$$

정규확률분포 $N(\mu, \sigma^2)$ 를 따르는 변수 x 가 b 보다 클 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(x > b) = \int_b^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

$$= 1 - F_x(b) \quad (5)$$

여기서, $F_x(b)$ 는 누적분포함수(cdf)이다.

3. 얽은기초 침하 모델

3.1 모델의 구성

본 연구에서 고려한 침하예측모델은 그림 1과 같이 24개의 독립후텅들로 구성된 얽은기초에 적용하였으며 본 모델의 확률론적 해석에 있어 다음을 가정하였다.

- 1) 토질정수, 하중과 각 후텅의 침하는 정규분포를 따른다.^(2, 15, 18, 22)
- 2) 각 후텅 아래의 지반에서 연약토질포켓이 나타나 불규칙침하가 발생할 확률⁽²³⁾은 1%이며 이때의 침하평균은 규칙침하의 2배이고 변동계수는 규칙침하의 변동계수와 같다.
- 3) 연약토질포켓이 나타나는 경우에 규칙침하의 후텅이 또 다른 규칙침하의 후텅을 따를 확률^(4, 10)은 99%이다.

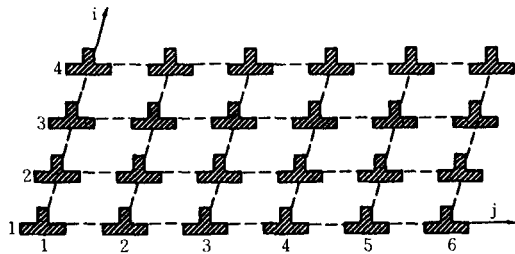


그림 1. 얽은기초 모델

4) 인접한 후텅들 사이의 침하 상관관계수⁽³⁾는 0.7이다.

5) 허용최대침하는 10cm이며 허용부등침하는 허용최대침하의 3/4이다.^(6, 7)

그림 1의 모델에서 첫번째 단계는 각 후텅의 상태를 결정하는 것이다. 예를 들어 후텅은 침하평균이 μ 이고 분산이 σ^2 인 정규분포 $N(\mu, \sigma^2)$ 의 규칙침하를 하거나 연약토질 포켓 위에 위치하여 불규칙침하를 한다. 일단 이러한 상태가 결정되면, 그에 의존하는 각 후텅의 침하($S_{i,j}$)와 인접 후텅들 사이의 침하($S_{i-1,j}$ 와 $S_{i,j-1}$) 상태가 얻어질 수 있으며 표 1과 같다.

표 1 인접후텅의 침하상태

CASE	$S_{i-1,j}$	$S_{i,j-1}$	명명법
1	규칙	규칙	RR
2	불규칙	불규칙	AA
3	규칙	불규칙	RA
4	불규칙	규칙	AR

Case 1과 Case 2는 인접 후텅들의 침하 $S_{i-1,j}$ 와 $S_{i,j-1}$ 가 둘 다 규칙침하이거나 둘 다 큰 국부적인 불규칙침하의 경우이며, $S_{i,j}$ 의 침하는 다음과 같은 모델화한 평균을 갖는다.

$$\mu_{i,j} | S_{i-1,j}, S_{i,j-1} = \mu + \frac{\rho}{2}(S_{i-1,j} - \mu) + \frac{\rho}{2}(S_{i,j-1} - \mu) \quad (6)$$

여기서, μ 는 규칙침하 또는 불규칙침하의 평균이며 ρ 는 후텅들 사이의 침하 상관관계수이다.

Case 3과 Case 4는 인접 후텅들이 서로 반대의 상태가 되는 경우이다. 즉, 한 후텅은 규칙침하를 따르고 다른 하나는 큰 국부적인 침하의 불규칙침하를 따를 경우에 후텅의 침하 $S_{i,j}$ 는 같은 상태를 갖는 인접 후텅에 의존할 것이다. 만약 후텅 i, j 가 규칙침하를 따르는 것으로 결

정이 되고, 후텁 $i-1, j$ 와 $i, j-1$ 가 각각 규칙침하이이고 불규칙침하인 것으로 결정된다면 규칙침하를 하는 후텁의 $S_{i,j}$ 는 식(7)과 같이 규칙침하($S_{i-1,j}$)의 후텁에 영향을 받는다.

$$\mu_{i,j} | S_{i-1,j}, S_{i,j-1} = \mu + \rho(S_{i-1,j} - \mu) \quad (7)$$

여기서, μ 는 규칙침하를 갖는 후텁의 평균침하이이다. 후텁 i, j 가 불규칙침하로 결정되고 후텁 $i-1, j$ 와 $i, j-1$ 가 각각 규칙침하와 불규칙침하를 한다면 $S_{i,j}$ 는 식(8)과 같이 불규칙침하를 갖는 후텁($S_{i,j-1}$)에 영향을 받는다.

$$\mu_{i,j} | S_{i-1,j}, S_{i,j-1} = \mu' + \rho(S_{i,j-1} - \mu') \quad (8)$$

여기서, μ' 는 불규칙침하를 갖는 후텁의 평균침하이이다.

후텁 아래의 지반에서 연약토질포켓이 나타난다면 후텁의 침하는 그 후텁의 위치로부터 멀리 떨어진 후텁보다 그것의 주변에 인접해 있는 후텁에 영향을 주며 Markov process^(4,10)를 따르는 침하모델의 적용이 가능하다.

$i=j=1$ 인 모서리 후텁(corner footing) 아래의 지반이 규칙적(R)이거나 불규칙적(A)일 상태는 연약토질포켓의 확률 p 에 의해 결정되며 가장자리 후텁(edge footing) $1, j$ 와 $i, 1$, 아래의 지반은 그 인접 후텁 $i, j-1$ 와 $i-1, j(i, j \neq 1)$ 가 규칙적(R)이거나 불규칙적(A)인 것에 의하여 결정된다. 나머지 후텁들 $i, j(i, j \neq 1)$ 은 인접해 있는 두개의 후텁이 모두 규칙적(RR)이거나 모두 불규칙적(AA)인 것에 의해서, 혹은 하나의 후텁은 규칙적이고 다른 하나는 불규칙적인 것(RA)에 의해서 결정된다. 이것은 다음의 추이확률매트릭스(transition probability matrix) P 에 의해서 모델화 된다.

$$\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{cc} R & A \end{array} \\
 \begin{array}{c} R \\ A \\ RR \\ AA \\ RA \end{array} & \left[\begin{array}{cc} q & 1-q \\ 1-r & r \\ q_1 & 1-q_1 \\ 1-r_1 & r_1 \\ q_2 & 1-q_2 \end{array} \right]
 \end{array}$$

이 매트릭스안의 매개변수는 다음과 같다.

q 는 인접 후텁이 규칙침하로 주어질때 가장

자리 후텁 $1, j$ 나 $i, 1(i, j \neq 1)$ 이 규칙침하이일 확률이며, $1-q$ 는 인접 후텁이 불규침하로 주어질때 가장자리 후텁은 불규침침하이일 확률이다. r 은 인접 후텁이 불규침침하이인 것으로 주어질때 가장자리 후텁 $1, j$ 나 $i, 1(i, j \neq 1)$ 가 불규침침하이일 확률이다. 이 모델에서 r 은 식(13)의 상관관계에 의한 p 와 q 의 함수이다.

추이확률매트릭스 P 가 ergodic특성을 갖는다면 추이상태의 수가 증가할 때 상태확률은 초기 상태에 독립인 정상상태확률 P^* 가 된다.⁽⁴⁾ 따라서 정상상태조건에서

$$P(n+1) = P(n) = P^* \quad (9)$$

이며, P^*_R, P^*_A 를 후텁의 규칙침하확률과 불규침침하확률이라하면 다음과 같다.

$$[P^*_R, P^*_A] \begin{bmatrix} q & 1-q \\ 1-r & r \end{bmatrix} = [P^*_R, P^*_A] \quad (10)$$

식(10)으로부터

$$P^*_R q + (1-r)P^*_A = P^*_R \quad (11)$$

이며, 확률의 합은 1 이어야 하므로

$$P^*_R + P^*_A = 1 \quad (12)$$

식(11)과 식(12)에서

$$P^*_R(1-q) = (1-r)P^*_A$$

$$P^*_R = \frac{1-r}{1-q} P^*_A$$

$$P^*_A \left(\frac{1-r}{1-q} + 1 \right) = 1$$

$$\frac{1-r}{1-q} + 1 = \frac{1}{P^*_A}$$

$$r = 1 - \left(\frac{1}{p} - 1 \right) (1-q) \quad (13)$$

이다. 이것은 후텁이 연약토질포켓이 있는 지반위에 있고 인접한 다른 후텁도 역시 연약토질포켓의 지반위에 있을 확률이다.

r_1 은 인접 후텁이 둘 다 불규침침하로 주어질때 내부 후텁(inside footing) $i, j (i > 1, j > 1)$ 이 불규침침하이일 확률이다. 이 모델에서 r 은 2/3의 경증률을, $1-r$ 은 1/3의 경증률을 갖는다면 $r_1 = r + 0.5(1-r)$ 을 가정할 수 있으며 r 의 두 극한값을 다음과 같이 구할 수 있다.^(4,21)

i) $r=1$ 일때

$$r_1 = 1 + 0.5(1-1) = 1$$

즉, 후팅 i, j는 불규칙침하를 한다.

ii) r=0 일때

$$r_1 = 0 + 0.5(1-0) = 0.5$$

후팅 i, j는 불규칙침하의 확률이 50%이다.

q₁은 인접 후팅이 둘다 규칙침하로 주어질 때 i>1, j>1의 내부 후팅, i, j는 규칙침하일 확률이다. 모델에서는 q는 2/3의 경증률을, 1-q는 1/3의 경증률을 갖는다면 q₁=q+0.5(1-q)를 가정할 수 있으며 q의 두 극한값을 다음과 같이 구할 수 있다.

i) q=1일때

$$q_1 = 1 + 0.5(1-1) = 1$$

즉, 후팅 i, j는 규칙침하를 한다.

ii) q=0일때

$$q_1 = 0 + 0.5(1-0) = 0.5$$

후팅, i, j는 규칙침하의 확률이 50%이다.

q₂는 그 인접 후팅의 하나가 규칙침하이고 다른 하나는 불규칙침하로 주어질 때 내부 후팅 i, j(i>1, j>1)가 규칙침하일 확률이다. 이 모델에서 다음을 가정할 수 있다.

$$q_2 = \frac{1}{2} [q + (1-r)] \quad (14)$$

규칙침하가 규칙침하를 따를 확률은 q에 의해서, 불규칙침하가 규칙침하를 따를 확률은 1-r에 의해서 똑같은 1/2의 경증률을 갖는다.

이러한 가정들을 이용하여 모델에서의 모든 독립후팅의 상태는 표 1과 같이 결정될 수 있고 각 후팅의 침하는 위에서 언급된 것처럼 모델에 따라 생성할 수 있다.

3.2 입력자료

독립후팅의 넓이, 하중, 토질정수, 토층깊이, 지하수위등은 그림 2와 같으며⁽⁷⁾ 각변수의 평균값을 나타냈다. 후팅의 넓이, 토층, 지하수위는 결정적인 값이고 토질과 관련된 나머지 변수와 하중은 확률변수로 취급하였으며 각 확률변수의 변동계수(COV)^(1, 2, 10, 15, 25)는 표 2와 같이 Low, Medium, High의 3가지 수준으로 가정하

였다. 각각의 표준편차는 그림 2의 평균값에 각 변동계수를 곱하여 구하였고 정규분포의 신뢰도를 99.73%로 하여 신뢰구간은 최대값 ($\mu+3\sigma$)와 최소값 ($\mu-3\sigma$)로 한정 했으며 각 확률변수의 범위를 고려하였다.^(6, 8, 11, 22) 토질정수와 하중의 각 확률변수를 1000개씩 생성하여 독립 후팅의 침하평균과 표준편차 및 변동계수를 구하였으며, 각 후팅의 침하확률 변수를 Box-Muller법으로 생성시켜 독립후팅들로 구성된 얇은기초의 최대침하와 부등침하의 허용한계 초과확률을 구하였다.

표 2 확률변수의 불확실성 수준

확률변수	Low C.O.V	Med. C.O.V	High C.O.V
하중	0.10	0.20	0.30
흙의 단위체적중량	0.05	0.10	0.15
표준관입시험치	0.10	0.30	0.50
초기간극비	0.10	0.25	0.40
압축지수	0.10	0.30	0.50

독립후팅의 침하평균(ftmean)과 변동계수(ftcov)는 식 (1)-(2)를 이용하여 그림 2와 표 2의 자료로 부터 직접 구해지며 얇은기초의 침하확률해석은 Medium COV의 경우로 하였고 위의 가정조건으로 부터 연약토질포켓에 의한 불규칙침하의 평균(aftmean)은 규칙침하의 2배, 변동계수(aftcov)는 규칙침하의 변동계수와 같은 값으로 하였으며 후팅의 침하간 상관계수(corr)는 0.7, 허용최대침하(amxS)는 10cm, 허용최대부등침하(amxD)는 7.5cm, 연약토질포켓이 나타날 확률(SSP)은 1%이고 이 경우에 규칙침하의 후팅이 또 다른 규칙침하의 후팅을 따를 확률(pRtoR)은 99%로 하였다.

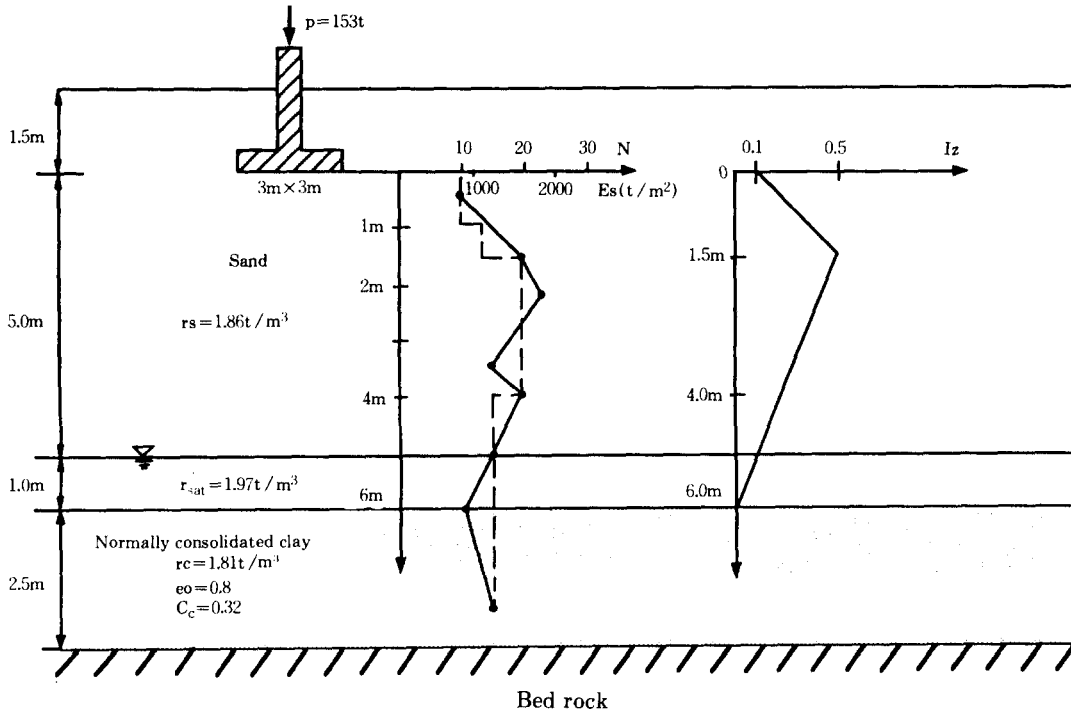


그림 2. 얽은기초의 독립후텅 및 주상도

4. 분석 및 결과

4. 1 민감도분석

각 변동계수별 독립후텅의 침하특성 및 각 침하량에 대한 초과확률의 해석결과는 표 3 및 그림 3과 같다. 표 3의 침하평균, 표준편차 및 변동계수와 그림 3의 그래프는 각 변동계수별로 신뢰구간내에서 생성한 1000개씩의 각 확률변수에 의해서 계산된 침하량 1000개씩에 대한 결과이다. 토질정수와 하중의 불확실성이 증가함에 따라 독립후텅의 침하평균과 변동계수가 증가함을 알 수 있으며 각 확률변수의 변동계수가 0인 결정론적 침하량에 비해 불확실성을 고려한 확률론적 침하는 본 모델의 최대허용침하기준인 10cm를 초과할 가능성을 보이며 또한 각 독립후텅간 침하의 차이로 인한 부등침하의 가능성도 보여주고 있다.

표 3 독립후텅의 침하분석

변 수	Low C.O.V.	Med. C.O.V.	High C.O.V.
침하평균(cm)	4.18	4.47	4.89
표준편차(cm)	0.55	1.38	2.30
변동계수	0.132	0.308	0.470
결정론적침하량(cm)	4.15	4.15	4.15

이러한 독립후텅들로 구성된 얽은기초의 허용침하기준의 초과확률을 해석하기 위하여 그림 4에서 그림 9는 각 확률변수의 변화에 대하여 1000번씩 시뮬레이션하여 구한값이며 최대 침하가 허용최대침하 한계를 초과할 확률(MXSP), 각 후텅의 최대침하와 최소침하의 차이가 허용부등침하한계를 초과할 확률(MXD-P), 인접 후텅쌍들 사이의 최대 부등침하가 허

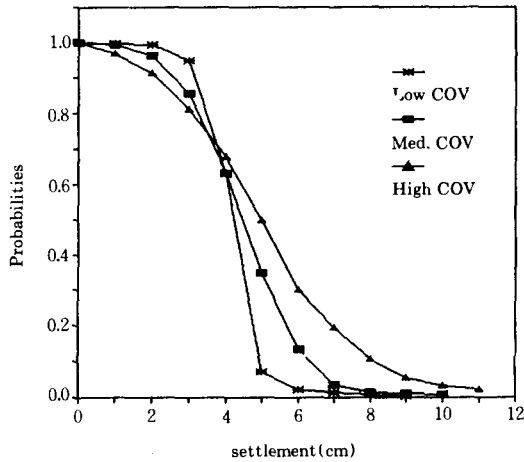


그림 3. 독립후팅의 침하별 초과확률

용한계를 초과할 확률(FTP-MXDP), 각 인접 후팅쌍에서의 각 부등침하가 허용한계를 초과할 확률(FTP-DP)에 대한 민감도 분석을 하였다.

각 독립후팅의 ft_{mean} 은 4.47cm, ft_{cov} 는 0.308, Aft_{mean} 은 8.94cm, Aft_{cov} 는 0.308, $corr$ 는 0.7, $amxS$ 는 10cm, $amxD$ 는 7.5cm, SSP 는 0.01, $pRtoR$ 은 0.99인 경우에 24개 독립후팅의 배열형태를 변화시킨 결과는 그림 4와 같다. 독립후팅의 배열을 1×24 의 배열로부터 2×12 , 3×8 , 4×6 의 배열까지 변화시킬 때 독립후팅의 인접쌍의 수는 23, 34, 37, 38로 증가한다. 배열변화에 따른 분석결과 독립후팅의 인접쌍들이 증가할수록 MXSP와 MXDP는 감소하고 FTP-MXDP와 FTP-DP는 증가하는 것을 보여주며, MXDP가 MXSP보다 큰 것을 알 수 있고 독립후팅들로 구성된 얇은기초에서 독립후팅의 배열은 정방형에 가까울수록, 즉 인접 후팅쌍의 수가 증가할수록 MXSP와 MXDP가 더 작게 나타남을 알 수 있다.

9개의 입력변수중 ft_{cov} 와 Aft_{cov} 를 0.2에서 0.5까지 변화시켰을 때 그림 5에서와 같이 모든 허용침하한계의 초과확률은 변동계수의 증가와

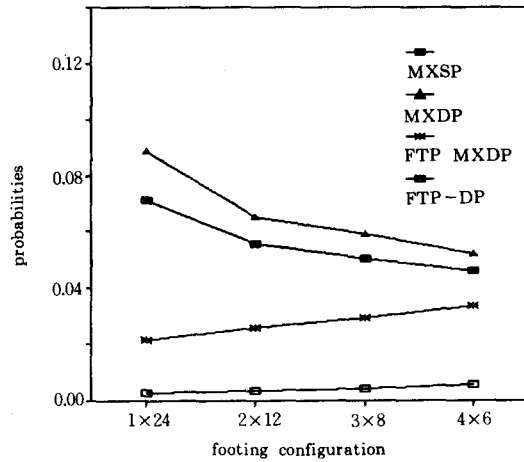


그림 4. 후팅배열의 변화에 의한 허용한계 초과확률

더불어 증가한다. 변동계수가 0.28보다 커지면 MXSP보다 MXDP가 더 커지게 되고 0.4이상의 경우에 MXSP와 MXDP가 급격히 커지며 허용침하기준의 초과확률이 10% 이상이 되는 것을 알 수 있다. 본 모델에서 후팅의 침하 변동계수는 0.4 이내일 때 허용침하기준 초과확률의 변화에 유리하며 변동계수가 0.4 이상이 되면 부등침하에 특히 유의해야 함을 알 수 있다.

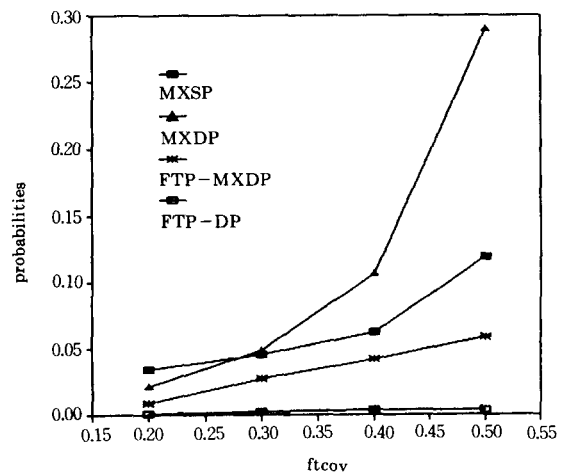


그림 5. ft_{cov} 의 변화에 의한 허용한계 초과확률

후팅들의 침하간 상관계수의 변화에 따른 허용침하한계 초과확률의 결과는 그림 6과 같다. 인접 후팅들의 침하간에 상관관계가 커짐에 따라 모든 허용침하기준의 초과확률은 일정하게 감소하여 침하에 안정적이 되는 것을 알 수 있으며 본 모델의 얇은기초는 MXSP 보다 MXDP가 약 2%정도 큰 것을 알 수 있다.

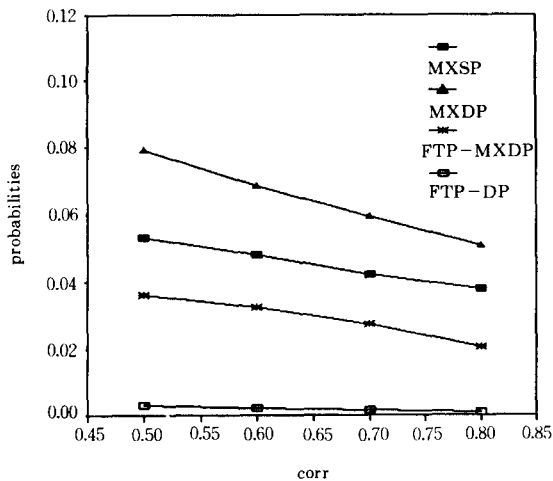


그림 6. 상관계수의 변화에 의한 허용한계 초과확률

연약토질포켓이 존재할 확률(SSP)을 0.00에서 0.15까지 증가시킨 경우에 얻어진 결과는 그림 7과 같다. 연약토질포켓에 의한 불규칙침하의 국부적인 침하가 증가하는 경우에 MXSP와 MXDP가 20% 정도까지 증가되는 것을 알 수 있다. SSP가 0.04 이상에서 MXSP가 MXDP보다 커지게 되며 연약토질포켓의 확률이 0.05 이내일 때 허용침하기준의 초과확률이 10% 이내임을 알 수 있고 연약토질포켓 확률의 증가는 기초의 최대침하와 부등침하에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.

각 확률변수중 pRtoR을 0.95부터 0.99까지 변화시킨 결과는 그림 8과 같으며, MXSP, MXDP, FTP-MXDP의 경우는 변화폭이 크고 MXSP와 MXDP의 경우 허용침하기준의

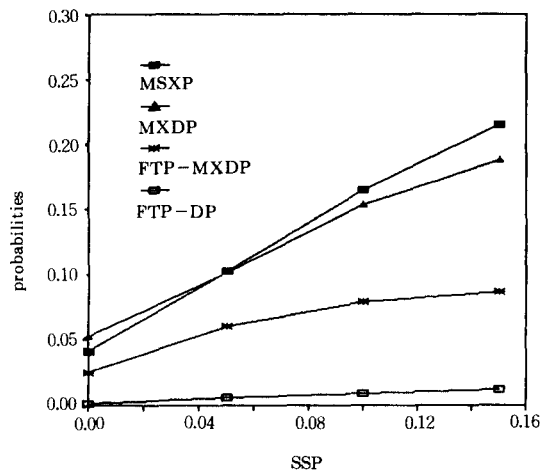


그림 7. SSP의 변화에 의한 허용한계 초과확률

초과확률과 감소의 폭이 비슷하였다. 본 모델의 기초에서 침하기준의 초과확률이 15%일 때 pRtoR은 0.96 이상이 되어야 하며 0.98이상이 될 때 허용침하기준의 초과확률이 10% 이내로 감소함을 알 수 있다.

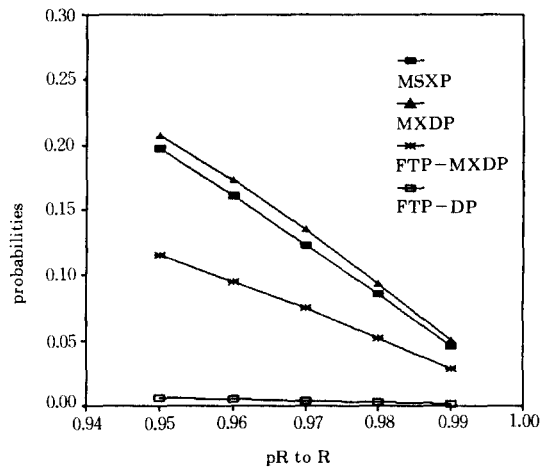


그림 8. pRtoR의 변화에 의한 허용한계 초과확률

4.2 결과분석

얇은기초의 침하확률에 대한 민감도를 분석

한 결과로부터 토질정수, 하중의 불확실성과 연약토질포켓이 존재할 수 있는 불규칙적인 기초지반에서 입력변수의 불확실성 증가는 기초침하의 불확실성 수준을 증가시키는 것을 알 수 있었으며 3.2절의 입력자료를 이용하여 본 논문에서 적용한 모델을 Monte Carlo Simulation으로 침하확률해석을 수행한 결과는 표 4와 같다.

표 4. 허용침하한계의 초과확률

변 수	MXSP	MXDP	FTP-MXDP	FTP-DP
평 균	0.04664	0.05327	0.02855	0.00135
표준편차	0.00459	0.00704	0.00393	0.00024
변동계수	0.09841	0.13216	0.13765	0.17778

표 4에서 최대침하가 허용최대침하한계를 초과할 확률은 $4.7 \pm 0.5\%$ 이고, 최대부등침하가 허용부등침하한계를 초과할 확률은 $5.3 \pm 0.7\%$, 인접 후텁쌍들 사이의 최대부등침하가 허용한계를 초과할 확률은 $2.9 \pm 0.4\%$, 각 후텁쌍의 각 부등침하가 허용한계를 초과할 확률은 0.1%임을 알 수 있다.

따라서, 허용침하기준에 대한 신뢰도가 90% 이상으로 요구된다면 본 모델의 얇은기초는 설계에 이용할 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 침하에 관련된 각 매개변수의 불확실성과 기초지반내에 존재할 수 있는 연약토질포켓의 확률을 고려하여 독립후텁들로 구성된 얇은기초의 침하확률을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. Monte carlo Simulation Method를 이용한 본 프로그램은 얇은기초를 갖는 건물의 침하에 대한 확률론적 해석에 의해 요구되는 신뢰도를 만족하는 얇은기초를 설계할 수 있을 것이다.

본 연구에서 얻은 얇은기초 침하의 확률론적 해석결과는 다음과 같다.

- 1) 토질정수와 하중의 불확실성이 커질수록 독립후텁의 침하와 변동계수가 커짐을 알 수 있으며 허용침하기준의 초과 가능성도 커지게 된다.
- 2) 얇은기초에서 독립후텁의 배열은 정방형에 가까울수록 인접 후텁쌍의 수가 증가되어 최대침하와 부등침하에 대하여 안전하다는 것을 알 수 있다.
- 3) 기초지반의 불확실성과 후텁간 침하 상관관계등의 각 확률변수의 변동은 기초 침하에 직접적인 영향을 주며, 특히 침하변동계수와 연약토질포켓확률의 영향이 큰 것을 알 수 있다.
- 4) 결정론적 침하해석에 의한 얇은기초를 설계할 때에 하중 및 표준관입시험치등의 토질정수와 연약토질포켓의 설계변수 변화에 유의해야 함을 알 수 있다.
- 5) 얇은기초의 침하해석은 확률론적 해석에 의한 허용침하기준의 초과확률을 이용하는 것이 합리적임을 알 수 있으며 허용침하에 대한 확률적 기준의 필요성을 인식하였다.

앞으로 더욱 정확한 침하예측모델을 수립하기 위해서 결정론적 모델의 개선과 아울러 각 매개변수의 불확실성 및 구조물의 허용침하에 대한 확률적 기준의 연구가 계속 되어야 하리라 고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 李松, "얇은기초의 安定性에 對한 確率論的 解析", 博士學位論文, 高麗大學校, 1985.
2. 松尾稔, "地盤工學 : 信賴性設計의 理念と實際", 技報堂出版, 1984.
3. Ang A. H-S. & Tang W. H., "Probability concepts in engineering planning and design", Vol. 1, John Wiley & Sons Inc., New York, 1975.
4. Ang A. H-S. & Tang W. H., "Probability

- concepts in engineering planning and design", Vol. 2, John Wiley & Sons Inc., New York, 1984.
5. Biernatowski K., "Statistical characteristic of subsoil", 11th ICSMFE, Vol.2, 1985, pp. 799-802.
 6. Bowles J. E., "Foundation analysis and design - 3rd", McGraw-Hill, New York, 1982.
 7. Das B. M., "Principles of foundation engineering", Brooks/Cole Engineering Division, 1984.
 8. Das B. M., "Principles of geotechnical engineering", 2nd, PWS-kent, 1990.
 9. Denver H., "Settlement calculation for footings on sand", 10th ICSMFE, Vol. 2, 1981, pp.2183-2190.
 10. Harr M. E., "Mechanics of particulate media - A probabilistic approach", McGraw-Hill, New York, 1977.
 11. Harr M. E., "Reliability-based design in civil engineering" McGraw-Hill, New York, 1987.
 12. Khadilkar B. S., and Varman, B. S., "Analysis of interference of strip footings by FEM", 9th ICSMFE, Vol. 1, 1977, pp.597-600.
 13. Komonik A. and Mazurik A., "Restrained settlements of Masonary building", 9th ICSMFE, Vol. 1, 1977, pp. 613-618.
 14. Krizek R. J., Corotis R. B. and El-moursi H. H., "Probabilistic analysis of predicted and measured settlements", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, No. 17, 1977, pp.17-33.
 15. Lumb P., "The variability of natural soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 3, No.2, 1966, pp.74-97.
 16. Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A. and Vetterling W. T., "Numerical recipes in C : The art of scientific computing", Cambridge KALA, 1988.
 17. Resendiz D. & Herrera I., "A probabilistic formulation of settlement Controlled design", 7th ICSMFE, Vol. 2, 1969, pp.217-225.
 18. Rosenbluth E., "Foundations of buildings in clay", 7th ICSMFE, Vol. 3, 1969, pp.230-241.
 19. Rubinstein R. Y., "Simulation and Monte Carlo Method", John Wiley & Sons Inc., New York, 1981.
 20. Schultze E. & Sievering W., "Statistical evaluation of settlement observations", 9th ICSMFE, Vol.1, 1977, pp. 711-714.
 21. Stark R. M. & Nicholls R. L., "Mathematical foundations for design: Civil engineering systems", McGraw-Hill, New York, 1972.
 22. Tang W. H., "Probabilistic evaluation of loads", Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 107, No. 3, 1981, pp.287-304.
 23. Tang W. H., "Updating anomaly statistics - Single anomaly case", Structural Safety, Vol. 4, No. 2, 1987, pp.151-163.
 24. Tang W. H. & Halim I., "Updating anomaly statistics - Multiple anomaly pieces", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 114, No. 6, 1988, pp.1091-1096.
 25. Usmen M. A., Wang C. & Cheng S. C., "Probabilistic analysis of shallow foundation settlements.", Proc., Int. Symp. on prediction and Performance in Geotech. Engrg., Calgary, 1987.

(접수일자 1993. 7. 10)