확률론적 하중에 따른 실트질 모래지반 내 지중응력의 변동계수 특성

The Coefficients of Variation Characteristic of Stress Distribution in Silty Sand by Probabilistic Load

봉태호* · 손영환**† · 김성필*** · 허 준***

Bong, Tae-Ho · Son, Young-Hwan · Kim, Seong-Pil · Heo, Joon

ABSTRACT

Recently, Load and Resistance Factor Design (LRFD) based on reliability analysis has become a global trend for economical and rational design. In order to implement the LRFD, quantification of uncertainty for load and resistance should be done. The reliability of result relies on input variable, and therefore, it is important to obtain exact uncertainty properties of load and resistance. Since soil stress is the main reason causing the settlement or deformation of ground and load on the underground structure, it is essential to clarify the uncertainty of soil stress distribution for accurately predict the uncertainty of load in LRFD. In this study, laboratory model test on silty sand bed under probabilistic load is performed to observe propagation of upper load uncertainty. The results show that the coefficient of variation (*COV*) of soil stress are varied depending on location due to non-linear relationship between upper load increment and soil pressure increment. In addition, when the load uncertainty is transmitted through ground, *COV* is decreased by damping effect.

Keywords: LRFD; stress distribution; uncertainty; damping effect

1. 서 론

최근 구조물의 대형화와 복잡화 경향에 따라 경제적이고 합리적인 최적 설계방안에 대한 요구가 증가하면서 기존 허용응력법을 대신하여 신뢰성 분석을 기반으로 하는 하중저항계수설계법 (Load and Resistance Factor Design, LRFD)이 세계적인 추세 가 되어가고 있다. 하중저항계수설계법은 하중 및 저항의 공칭 값에 대한 실제 값의 변동성으로 인한 불확실성을 고려할 수 있는 확률 통계적인 이론에 기초한 설계법으로 신뢰성 분석을 통해 구조물의 파괴확률 및 대응 신뢰도지수를 산정하고 이를 이용하여 구조물의 안전도를 정량적으로 평가함으로써 일관되고 경제적이면서 효율적인 설계가 가능하다. 이러한 하중저항계수설 계법을 적용하기 위해서는 하중 및 저항과 관련된 변수들에 대한 불확실성의 정량화가 우선적으로 이루어져야 하며 변수들의

불확실성은 신뢰성에 기초한 해석결과에 직접적인 영향을 미치 므로 정확한 불확실성의 예측 및 정량화는 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

기초지반의 안정문제 및 침하문제를 해석하고 구조물의 기초 및 지하매설물 등을 설계하는 데 있어서 상부하중에 의한 지중응 력분포는 필수적으로 고찰되어야 한다 (Chon and Lee, 2000). 하지만 상부의 하중은 지반을 통하여 지중에 전달되며, 지반은 흙입자, 물, 공기의 3상으로 이루어져 있어 다른 재료와는 달리 응력의 전달을 정확히 규명하기란 어려움이 있다. 이에 따라 실 내모형실험을 통하여 지중응력분포를 규명하고자 하는 많은 연 구가 진행되었다. Abramov et al. (1968)은 균질한 사질토 지반 에서 정적하중에 대한 지중응력분포를 규명하였으며, Kim (2002) 는 이동, 반복하중에 따른 지중응력분포를 규명하였다. 또한, Lee and Lim (2005)은 이층지반에서 등분포재하중에 따른 지중응 력분포를 규명하였으며, 많은 연구자들에 의하여 사질토지반에서 점층하중에 따른 지중연직응력의 증가량에 대한 연구가 수행되 었다 (Lim, 2004; Nam, 2007; Park et al., 2005; Skormin and Malyshev, 1970; Woo, 2005). 하지만 아직까지 재하하중의 불 확실성이 지반을 통하여 지중에 어떻게 전달되는지에 대한 연구 는 이루어지지 않았다. 지반 내 응력은 지반의 변형을 일으키는 주요 원인이고 지중 구조물에 하중으로 작용하므로 지중응력분

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

** 서울대학교 조경·지역시스템공학과 조교수,

서울대학교 농업생명과학연구원

*** 한국농어촌공사 농어촌연구원

† Corresponding author Tel.: +81-2-880-4585

Fax: +81-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

2012년 9월 24일 투고

2012년 10월 31일 심사완료

2012년 11월 5일 게재확정

포의 불확실성 규명은 하중저항계수설계법에서 하중에 대한 불확실성을 정확히 예측하고 정량화하기 위해서 필수적이라 할 수 있다. 특히, 상부하중이 일정한 크기를 갖는 정적하중이 아닌 교통하중이나 철도하중과 같은 동적하중으로 일정한 분포를 갖는 형태로 나타날 경우 지반 내 응력분포는 이에 따라 일정한 분포를 갖는 형태로 나타나게 된다. 하지만 기존 이론해의 경우 재하하중과 지중응력은 선형적인 관계를 나타내므로 재하하중의 불확실성 전파는 기존 이론에 의해서는 산정할 수 없으며 실험을 통하여 그 관계를 규명하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 실트질 모래지반에서 일정한 확률분포를 갖는 확률론적 하중에 따른 지중응력분포 및 변동성을 관찰하기 위하여 실내모형실험을 수행하였으며 점증하중에 따른 지중응력 증가를 관찰하고 지중응력의 위치별 변동성 변화에 대한 원인을 고찰하였다.

II. 재료 및 실험방법

1. 재료

본 연구에 사용된 시료는 전라북도 부안군 새만금 사업단지에서 채취한 준설토로 시료의 공학적 특성을 파악하기 위하여 KS F규정에 의거하여 체분석 시험, 비중시험, 다짐시험 등을 실시하였으며 시료의 물리적 특성 및 입도분포곡선은 Table 1, Fig. 1과 같다.

Table 1 Physical properties of soil

Specific Gravity (G_s)	USCS	LL (%)	PL (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)	OMC (%)
2.69	SM	NP	NP	16.7	19.3

Fig. 1 Particle size distribution

2. 실험기기 제원

가. 하중재하장치

하중재하장치는 유압을 이용하여 하중을 재하하며 하중의 크기는 실린더 아래 장착된 로드셀을 통하여 제어하게 된다. 하중재하장치의 제원은 Table 2와 같다.

나. 토압계

연직응력측정을 위한 토압계는 국내에서 개발된 RAS-2로 직경 5.0 cm, 두께 1.2 cm이며 토압계의 제원은 Table 3과 같다.

다. 데이터로거

데이터 수집장치는 일본 Yokogawa사의 DA100과 Sub-unit으로 DU500-13을 사용하였으며 350Ω 저항의 브릿지가 내장되어 있어 간편하고 안정적인 데이터 수집이 가능하다. 본 연구에서는 1초 가격으로 토압계 데이터를 수집하였으며 점증하중의 경우, 오차를 줄이기 위하여 한 개의 상재하중에 대하여 약 10초 동안 데이터를 측정된 뒤 평균값을 사용하였다.

3. 실험방법

가. 지층의 구성

본 연구에 사용된 모형토조의 내부 사이즈는 200 cm × 100 cm × 150 cm이며 토압계의 깊이별 배치간격을 고려하여 총 5

Table 2 Specifications of loading device

Length (cm)	Load range (ton)	Max. Displacement (cm)	Velocity of loading (cm/s)	Min. Control load (kg)
100	0~7	40	1	1

Table 3 Specifications of earth pressure gauge

Capacity (kPa)	Rated Output (mV/V)	Non-linearity (% RO)	Hysteresis (% RO)	Over Load (%)	Resistance (Ω)
196.13	1	0.1	0.1	150	350

Fig. 2 Data logger (Yokogawa)

개 층으로 나누어 지층을 구성하였다. 지층의 목표단위중량은 시료토의 다짐시험결과를 고려하여 변형에 대한 영향을 최소화하고자 함수비를 OMC에 맞추고 습윤단위중량을 18.6 kN/m^3 로 설정하였으며 이에 따라 각 층별로 일정한 양의 시료를 채운 뒤 목표 단위중량에 맞게 60 kg의 소형 다짐기와 다짐봉을 이용하여 다짐을 수행하였다. 한 층의 지반조성이 끝나면 토압계를 매설하고 동일한 방법으로 5개의 지층을 구성하였다.

나. 토압계 배치 및 간격

토압계는 한 층의 지층구성이 끝나면 3개의 토압계를 매설하였으며 지중응력이 토조의 중앙에 대하여 좌우대칭인 점을 고려하여 임의의 깊이에 대하여 한쪽에만 토압계를 매설하였다. 또한 재하판 중심에서 좌우 번갈아가며 토압계를 배치하여 토압계 사이의 간섭을 최소화하였다. 토압계의 배치간격은 재하판의 중심에서 토압의 변화가 큰 점을 고려하여 중앙으로부터 0 cm, 10 cm, 25 cm 간격으로 총 12개의 토압계를 배치하였다. 지반의 상부에는 지반의 중앙에 폭 30 cm, 길이 98 cm의 강성 재하판을 설치하고 그 위에 변위센서 (Linear Variable Differential Transformer, LVDT)를 장착하여 지반의 침하량을 측정할 수 있도록 하였다. 지반내 토압계 배치 및 위치별 토압계 번호는 Fig. 3과 같다.

다. 하중조건

1) 점증하중

하중의 증가에 따른 지중응력의 변화를 관찰하기 위하여 점증하중에 대한 지중응력분포를 산정하였으며 재하하중은 5, 10, 20, 29, 59, 88, 118, 147, 177 kPa로 총 9 가지의 하중에 대한 지중응력분포를 산정하였다. 특히, 초기 낮은 응력수준의 하중에서는 재하하중에 대한 지중응력의 증가량이 비선형적인 거동을 나타내므로 이를 명확히 규명하고자 작은 범위로 하중을 증가하였다. 점증하중의 재하는 Fig.4 와 같이 목표하중을 재하하고 일정시간동안 재하하중을 유지하며 지중응력을 측정한 뒤 하중을 증가시켜 다음 단계의 목표하중을 재하하고 일정시간동

Fig. 3 Location of soil pressure gauges and loading device

안 지중응력을 측정하는 방법으로 진행하였으며 이에 따라 각 단계별 하중에 대한 지중응력분포를 산정하였다.

2) 확률론적 하중

확률론적 하중은 특정 하중을 평균값으로 갖고 하중의 변동계수에 따라 일정한 확률분포를 갖는 하중으로 임의의 실행에 대한 하중값은 확률분포의 통계적 특성에 따라 임의적인 값을 나타낸다.

Bong et al. (2012)은 점증하중에 따른 실내모형실험결과, 재하하중 증가에 따른 지중응력의 증가량은 초기 낮은 응력수준 하에서는 비선형적 관계를 나타내고 일정 응력수준 이상이 되면 선형적인 거동을 나타내며, 재하하중 증가에 따른 지중응력증가비가 깊이 및 수평거리에 따라 다르게 나타남을 규명하 바 있다. 이러한 재하하중과 지중응력의 초기 비선형적인 거동은 지중응력의 변동성에도 영향을 미치게 된다. 신뢰성 해석의 하중-저항 관계에서 파괴의 발생은 일반적으로 하중이 클 경우 발생하게 되므로 하중이 큰 경우에 대한 변동계수를 명확히 규명하는 것이 더 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 점증하중 실험결과로부터 하중증가에 따른 지중응력증가가 선형적인 관계를 보이는 범위의 값을 확률론적 하중의 평균값으로 산정하였다. 변동계수는 15.0 %로 정규분포를 따른다고 가정하였으며 확률론적 하중의 조건은 Table 4에 나타내었다.

하중을 랜덤으로 생성하는 과정에서 너무 작거나, 큰 값이 나오는 것을 방지하기 위하여 최솟값, 최댓값을 각각 하위 및 상위 1.0 %에 해당되는 값으로 산정하였으며 최종적으로 확률론적 하중을 생성하여 변동계수를 확인한 결과 14.0 %로 나타났다. 이에 따라 하중재하장치에 적용된 하중의 시간에 따른 변화 및 확률밀도함수 그래프는 Fig. 5와 같다.

Fig. 4 Loading patterns of incremental load

Table 4 Conditions of probabilistic load

Load (ton)	COV (%)	Std. Dev.	Min (ton)	Max (ton)	Probability density function (PDF)
3.35	15.0	0.503	2.18	4.52	Normal

Fig. 5 Loading patterns and probability density function of probabilistic load

Fig. 6 Comparison of soil pressure distributions

IV. 결과 및 고찰

1. 확률론적 하중에 따른 지중응력분포

일정한 변동계수를 갖는 확률론적 하중에 따른 지중응력 및 지중에서의 변동계수 변화를 관찰하기 위하여 확률론적 하중에 대한 지중응력분포를 산정하였다. 적용한 확률론적 하중은 평균 112 kPa에 14.0 %의 변동계수를 갖는 확률밀도함수에 대하여 10,000회 이상의 임의적인 하중을 생성한 뒤, 하중재하장치의 하중입력프로그램을 통하여 임의적으로 생성된 하중을 10초간 재하한 뒤 자동으로 다음 하중을 가할 수 있도록 입력 자료를 생성하여 적용하였다.

Fig. 6은 112 kPa의 정적하중에 의한 지중응력분포와 확률론적 하중에 대한 지중응력분포의 평균값을 비교한 그래프이다. 정적하중은 시간에 관계없이 112 kPa의 하중을 지반에 일정하게 적용한 경우이며 실험결과, 지중응력값은 깊이에 따라 감소하는

Fig. 7 COV of soil pressures

경향을 나타내었으며 재하판 중심에서 감소율이 가장 큰 것으로 나타났다. 특히, 수평거리 25 cm에서는 깊이 15 cm에서 가장 작은 응력값을 나타내었는데 이는 일반적인 지중응력분포는 재하판에서 타원형태의 응력등고선이 아래로 퍼지는 형태를 나타내며 수평거리 25 cm의 경우 재하판 사이즈에서 벗어나 상부에

서 가장 작은 지중응력값을 나타내었다. 하지만 깊이 40 cm에서는 응력분산의 영향으로 응력이 증가하는 경향을 나타내었으며, 깊이가 증가함에 따라 다시 지중응력이 감소하는 경향을 나타내었다.

확률론적 하중에 의한 지중응력의 평균값은 정적하중에 의한

Table 5 Means, standard deviations, *COV* of soil pressures at measurement points

Depth (cm)	Horizontal distance (cm)								
	0			10			25		
	Mean (kgf/cm ²)	Std. Dev.	<i>COV</i> (%)	Mean (kgf/cm ²)	Std. Dev.	<i>COV</i> (%)	Mean (kgf/cm ²)	Std. Dev.	<i>COV</i> (%)
15	0.948	0.0444	4.7	0.449	0.0381	8.5	0.046	0.0110	23.9
40	0.449	0.0300	6.7	0.358	0.0256	7.2	0.186	0.0179	9.6
65	0.161	0.0153	9.5	0.159	0.0155	9.8	0.139	0.0161	11.5
90	0.121	0.0143	11.8	0.071	0.0082	11.5	0.050	0.0062	12.4

Fig. 8 The changes of *COV* according to random simulations

결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 확률론적 하중에 의한 지중 내 응력의 전달이 비교적 잘 수행되었음을 확인할 수 있었다.

2. 지중응력의 변동계수분포

가. 깊이 및 수평거리에 따른 변동계수

확률론적 하중에 의한 깊이에 따른 지중응력의 변동계수는 Fig. 7과 같다. 지중에서의 변동계수는 지표면에서 재하판에 의하여 하중이 작용하는 시작점으로 14.0 %라고 가정할 때, 재하판 중심에서 멀어질수록 변동계수는 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 상부층 (깊이 : 15 cm)에서는 수평거리 증가에 따른 변동계수의 변화가 매우 크게 나타나 수평거리가 25 cm 지점에서 가장 큰 변동계수를 나타내었다. 수평거리에 따른 변동계수의 변화는 깊이가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며 이에 따라 깊이 90 cm 지점에서는 수평거리에 따른 변동계수의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

각 측정지점에서의 평균 및 표준편차, 변동계수는 Table 5에 나타내었다.

나. 시행횟수에 따른 변동계수 변화

확률론적 하중과 같은 임의하중에 대한 지반의 변동계수를 정

확히 파악하기 위해서는 실험 결과값이 일정한 값에 수렴할 수 있도록 많은 시행횟수를 실시해야 한다. 만약 시행횟수가 부족하게 되면 변동계수가 일정한 값에 수렴하지 못하여 부정확한 결과를 초래할 수 있다. 따라서 실내모형실험의 임의하중 적용에 대한 시행횟수의 적합성을 판별하고자 각 측정지점에서 시간에 따른 변동계수의 변화를 관찰하였으며 그 결과는 Fig. 8과 같다. 시간에 따른 변동계수는 모든 측정지점에서 시간에 따라 점차 감소하는 경향을 보였으며 시행횟수 10,000회 이상에서는 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타나 변동계수 분포를 파악하기 위한 모형실험의 시행횟수는 적절한 것으로 판단된다.

3. 점증하중에 따른 지중응력분포

가. 하중별 지중응력분포

하중의 증가에 따른 지중응력의 변화는 Fig. 9 (a)~(c)와 같으며 모든 측정점에서 재하하중이 증가함에 따라 지중응력도 증가함을 확인할 수 있었다.

나. 지중응력증가비

Fig. 10 (a)~(c)은 재하하중에 따른 응력증가량을 나타낸 그래프이다. 초기 재하응력이 낮은 경우에는 공극의 감소와 토립자의 재배열 등으로 응력분산이 적고 재하판과 가까운 부분에서는

Fig. 9 Soil pressure distributions by incremental load

Fig. 10 Soil pressure increment ratios

응력집중현상이 발생하여 10 번 지점에서는 초기에 재하하중증가에 따른 지중응력증가비가 크게 나타났다. 또한 하부층 및 재하판에서 수평거리가 떨어져 있는 경우는 초기 응력이 잘 전달되지 않아 재하하중증가에 따른 지중응력증가비가 작게 나타내었다.

재하하중이 일정 크기 이상이 되면 공극의 감소가 거의 발생하지 않고 토립자의 골격구조가 안정하게 되므로 재하하중에 따른 지중응력의 증가는 거의 선형적으로 나타났다. 재하하중 59 ~ 177 kPa 범위에서 재하하중에 대한 응력증가량의 선형회귀식은 Table 6에 나타내었으며 모든 측정에서 R^2 값이 1.0에 가깝게 나타나 매우 선형적인 관계임을 알 수 있다.

다. 회귀식을 통한 변동계수 예측

실내모형실험에서 지반에 적용된 확률론적 하중의 평균값은 112 kPa로 재하하중과 지중응력이 선형적인 관계를 보이는 범위(59 ~ 177 kPa)에 있으므로 몬테칼로 시뮬레이션 (Monte Carlo simulation)을 통하여 동일한 통계적 특성을 갖는 확률론적 하중을 Table 6의 선형 회귀식에 대입하여 지중응력값을 예측하였

다. 몬테칼로 시뮬레이션에 의한 각 측정에서의 지중응력의 평균 및 편차, 변동계수는 Table 7과 같다.

Table 6 Relationship between load size and soil pressure increment

Distance (cm)	Depth (cm)	Regression equation ($y = ax + b$)		R^2
		a	b	
0	15	0.552	0.3281	1.00
	40	0.434	0.0361	1.00
	65	0.185	-0.0420	1.00
	90	0.166	-0.0565	0.99
10	15	0.582	-0.1706	1.00
	40	0.343	-0.0306	1.00
	65	0.182	-0.0481	1.00
	90	0.097	-0.0351	0.99
25	15	0.106	-0.0443	1.00
	40	0.216	-0.0640	1.00
	65	0.139	-0.0451	1.00
	90	0.055	-0.0201	0.99

Table 7 Means, standard deviations, COV of soil pressures

Depth (cm)	Horizontal distance (cm)								
	0			10			25		
	Means (kgf/cm ²)	Std. Dev.	COV (%)	Means (kgf/cm ²)	Std. Dev.	COV (%)	Means (kgf/cm ²)	Std. Dev.	COV (%)
15	0.9644	0.0911	9.4	0.4906	0.0917	18.7	0.0784	0.0221	28.2
40	0.5304	0.0694	13.1	0.3599	0.0548	15.2	0.1820	0.0346	19.0
65	0.1692	0.0297	17.6	0.1595	0.0292	18.3	0.1131	0.0222	19.6
90	0.1322	0.0265	20.0	0.0759	0.0156	20.6	0.0431	0.0089	20.6

Fig. 11 Comparison of COV between experiment and simulation results

4. 변동계수 비교 및 고찰

Fig. 11은 실험결과와 몬테칼로 시뮬레이션 예측을 통한 지중 응력의 변동계수 분포를 비교한 그래프이다.

깊이 및 수평거리별 변동계수의 변화는 점증하중에 따른 지중 응력분포의 실험결과를 통한 회귀식에서 재하하중 증가와 지중 응력 증가의 관계가 낮은 응력수준에서 비선형적 거동을 하기 때문인 것으로 판단된다. 점증하중에 따른 지중응력증가는 Fig. 12와 같이 초기 비선형적 거동에 의하여 크게 두 가지 유형으로 구분할 수 있었으며 재하판 바로 아래에서는 Type 1, 재하판에서 멀어질 경우 Type 2의 형태로 나타났다. 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 예측된 변동계수는 y 절편인 b 값이 (+)일 경우, 재하하중의 변동계수보다 작게 나타났으며 b 값이 (-)일 경우, 재하하중의 변동계수보다 큰 값을 나타내었다.

하지만 실험결과와 시뮬레이션의 변동계수 값은 차이를 나타내었으며 이는 흙의 재료적인 특성에 의한 감쇠 (damping)효과 때문인 것으로 판단된다 (Fig. 13). 지반은 강체가 아니며 내부에 공극이 존재하고 흡입자의 맞물림, 점착력 등에 의하여 일정한 구조를 이루고 있다. 지반에서 변동성의 감소는 기하학적 감쇠 (geometric damping)과 내부 감쇠 (internal damping)의 두 가지 다른 현상에 의하여 발생하게 된다. 기하학적 감쇠는 변동이 지반을 통하여 전파됨에 따라 발생하는 것으로 탄성체에 의하여 파장이 전파되는 경우 필연적으로 발생한다. 내부 감쇠는 흙 요소에서 에너지 소산에 의해 발생한다. 탄성에너지의 일부는 흙의 요소에 저장되며 흡입자의 구조파괴에 소비되거나 소리나 열에너지로 전환된다 (Tatsuoka et al., 1978). 변동계수의 감소는 이러한 내부 감쇠가 주 원인으로 작용하여 에너지의 일부가 흙의 요소에 저장, 흡수되고 흡입자의 구조변화에 소비됨에 따라 재하하중의 변동성은 지반을 통하여 전달되면서 감소하게 된다. 지반에서의 내부 감쇠는 지반의 응력-변형률의 비선형적인 특성

Fig. 12 Surchage load-soil stress curve types

에 의한 이력 감쇠 (hysteretic damping)가 주 원인이며 점성 감쇠 (viscous damping)에 의한 효과는 미미한 것으로 알려져 있다 (Haradin, 1965). 특히, 이력 감쇠는 변형 진폭, 시행횟수, 구속응력, 상대밀도 등에 많은 영향을 받는다 (Cuellar et al., 1977).

확률론적 하중에 따른 실험결과에 의한 변동계수가 시뮬레이션에 의한 변동계수보다 작게 나타났지만 그 차이는 지반의 위치에 따라 다르게 나타났으며 이는 지반의 위치에 따라 감쇠효과가 다르게 나타남을 의미한다. 하중이 지반에 재하되면 지반은 조밀화 (desification)가 진행되며 이에 따라 지반 내 공극비의 변화가 발생하게 된다. 공극비의 변화는 상대밀도 변화를 의미하며 이는 이력 감쇠 효과에 영향을 미치게 된다. 공극비가 감소하였다는 것은 그만큼의 에너지를 구조적으로 흡수한 것으로 간주할 수 있다. 지반내 공극비가 감소하게 되면 흙의 구조가 안정화되면서 더욱 강성을 띄게 되어 응력 전달이 잘 이루어진다. 따라서 지반내 상대밀도의 변화는 확률론적 하중 적용에 따른 지중 응력의 변화 경향을 통해서 유추할 수 있으며 그 값이 크다는 것은 공극비의 감소로 상대밀도가 많이 증가했음을 의미한다.

시간에 따른 지반내 지중응력의 변화 경향은 Fig. 14와 같으며 기울기 및 y 절편을 Table 8에 나타내었다. 지반의 침하에 따른 조밀화로 작지만 시간에 따라 지중응력의 경향이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 재하판 하부에서 가장 큰 상대밀도가 변화가 있음을 알 수 있다. 토압계 12번 지점 경우, 지중응력이 가장 작게 나타나는 지점으로 이에 따라 지중응력의 변화가 가장 작게 나타났다.

Fig. 13 Reduction of COV due to damping effect

Table 8 Gradient of incremental soil pressure

Depth (cm)	Horizontal distance (cm)					
	0		10		25	
	gradient (10 ⁻⁶)	y-intercept	gradient (10 ⁻⁶)	y-intercept	gradient (10 ⁻⁶)	y-intercept
15	6.0	0.9153	5.0	0.4249	0.0	0.0774
40	4.0	0.4294	3.0	0.3415	2.0	0.1771
65	2.0	0.1528	1.0	0.1516	1.0	0.1335
90	1.0	0.1154	0.6	0.0677	0.8	0.0460

Fig. 14 Changes of soil pressure according to random simulations

상대밀도 변화에 따른 감쇠 효과의 영향을 살펴보기 위하여 각 수평거리별 깊이에 따른 지중응력 증가경향 기울기와 변동계수의 감소율 ($\alpha = COV_{observed} / COV_{simulation}$)과의 관계를 Fig. 15에 나타내었다. 지중응력 증가경향의 기울기가 크다는 것은 공극이 감소하면서 상대밀도가 증가하고 이에 따라 감쇠효과가 많이 발생한 것을 의미한다. 따라서 지중응력 증가경향의 기울기가 클

수록 실험결과와 시뮬레이션에 의한 변동계수의 차이가 크게 발생함을 알 수 있다.

흙의 감쇠작용에 의하여 실험결과에 의한 변동계수가 시뮬레이션에 의한 변동계수보다 더 작은 변동계수를 나타내었으며 실험결과와 시뮬레이션에 의한 변동계수 관계를 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16을 통하여 알 수 있듯이 지반의 위치에 따라

Fig. 15 Relationship between α and gradient of $\Delta\sigma$

Fig. 16 Relationship between $COV_{Observed}$ and $COV_{Simulation}$

공극비 변화 (감쇠효과)가 다르게 나타났으며 확률론적 실험을 통한 변동계수와 몬테칼로 시뮬레이션에 의한 변동계수는 지수 함수의 관계를 나타내었다.

$$y = 2.041e^{0.086x} \quad (1)$$

여기서, y : 실제 지중응력의 변동계수

x : 몬테칼로 시뮬레이션에 의한 지중응력의 변동계수

식 (1)은 재하하중의 변동성이 실트질 모래지반을 통하여 전달 될 때 감쇠작용에 의하여 감소하는 정도를 나타낸다. 정확한 지중응력의 변동계수를 예측하기 위해서는 재하하중-지중응력 사

Fig. 17 Relationship between $COV_{Observed}$ and $COV_{Expected}$

이의 비선형적인 특성을 고려해야할 뿐만 아니라 지반의 감쇠작용에 따른 변동계수의 감소도 동시에 고려되어야 한다. Fig. 17은 확률론적 하중에 따른 지중응력 변동계수의 실측치와 흙의 감쇠작용에 따른 변동성 감소를 고려하여 몬테칼로 시뮬레이션을 수행한 결과를 비교한 그래프로 실측치를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 사질토 지반에서 확률론적 하중에 따른 지반 내 응력분포 및 변동계수 분포를 파악하고 원인을 분석하기 위하여 확률론적 하중 및 점증하중에 대한 실내모형실험을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 확률론적 하중에 의한 지중응력분포의 평균값은 정적하중에 의한 지중응력분포와 거의 일치하는 것으로 나타났으며 이에 따라 실내모형실험에 의한 지중 내 확률분포하중의 전달이 비교적 잘 수행되었음을 확인할 수 있었다.
2. 지중응력의 변동계수 분포는 재하판 바로 아래 측점에서 가장 작은 값을 나타내었으며 재하판에서 깊이 및 수평거리가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 특히 낮은 심도에서는 수평거리에 따른 변동계수의 변화가 크게 발생하였으며 깊이가 증가함에 따라 수평거리에 따른 변동계수의 변화가 감소하는 것으로 나타났다.
3. 위치에 따른 지중응력의 변동계수 변화는 실내모형실험 결과와 재하하중-지중응력의 선형회귀식을 통한 몬테칼로 시뮬레이션 결과가 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 위치에 따른 변동

계수 차이는 초기 낮은 재하하중과 지중응력증가량의 비선형적인 관계에 의한 것으로 판단되며 초기 비선형적 거동에 따라 두 가지 형태로 구분할 수 있었다.

4. 실험결과에 의한 변동계수가 몬테칼로 시뮬레이션을 통한 변동계수보다 더 작은 값을 나타내었으며 이는 흙의 감쇠 작용에 의한 것으로 실제 지반을 통한 하중의 불확실성 전파는 지반을 통하여 전달되면서 감소하는 것으로 나타났다. 감쇠 작용은 지반의 조밀화에 따른 상대밀도 변화로 판단할 수 있으며 상대밀도변화가 큰 지점일수록 감쇠효과가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

5. 재하하중의 변동성에 따른 지중응력의 변동성을 예측하기 위해서는 점중하중 실험결과에 따른 재하하중-지중응력의 초기 비선형적 거동뿐만 아니라 흙의 감쇠작용에 따른 효과를 동시에 고려하여야 하며 이를 고려하여 몬테칼로 시뮬레이션을 수행한 결과 확률론적 하중에 의한 실측치와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 실내모형실험을 통하여 확률론적 상재하중의 불확실성이 실트질 모래지반을 통하여 지중에 전달될 때 변동계수의 변화 및 그 원인에 대하여 고찰하였다. 하지만 아직까지 다양한 지반종류 및 조건에 대한 실험이 전무하여 향후 지속적인 연구가 이루어져야 하며, 다양한 자료가 구축된다면 보다 간편하게 지반 내 변동성을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이를 통하여 변동계수를 산정한다면 압밀이나 지중 구조물의 안정 해석 등에 대한 신뢰성 해석에 있어 하중에 대한 불확실성을 보다 합리적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Abramov, L. T., I. M. Kryzhanovskii, and A. G. Patrova, 1968. Stress Distribution in Soils Under Static Loading. *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 5(6): 389-392.
2. Bong, T. H., S. P. Kim, J. Heo, and S. Y. Son, 2011. An Experimental Study for Soil Pressure Increment Ratios according to Strip Load in Sandy Soil. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 21-27 (in Korean).
3. Chon, Y. B., and T. H. Lee, 2000. An Experimental study of vertical stress by incremental load. *In Proceeding of the 2000 Annual conference the Korean Society of Civil Engineers* 2000(2): 533-536 (in Korean).
4. Cuellar V., P. B. Zdenek, J. K. Raymond, and L. S. Marshall, 1977. Densification and Hysteresis of Sand under Cyclic Shear. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 103(5): 399-416.
5. Hardin, B. O., 1965. The nature of damping in sands. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* 94: 353-369.
6. Kim, Y. S., 2002. A Comparative Research on the Interpretation on Underground Stress According to the Model Test and Theoretical Equation. Master's Thesis, University of Kwandong. (in Korean).
7. Lee, I. H., and J. S. Lim, 2005. A Study on the Distribution Stresses beneath Loaded Ground Surface Area of Double Strata Ground on Soft Clay Layers. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 47: 47-57 (in Korean).
8. Lim, J. S., 2004. An Experimental Investigation of Boussinesq's Theoretical Value of Vertical Stress Increment in Sandy Soil Mass Caused by Surface Strip Loading. *Journal of the Korean Geotechnical Society Conference* 20(9): 5-15 (in Korean).
9. Nam, H. S., 2007. Characteristic of Stress Increment in Sandy Soil. Doctor's Thesis, University of Kyungpook. (in Korean).
10. Park, H. G., B. K. Woo, S. G. Park, and S. W. Lee, 2005. An Experimental Study on Underground Vertical Stress due to an Increasing Loading. *Korean GEO-Environmetal Conference* 2005, 2005(9): 299-306 (in Korean).
11. Skormin, G. A., and M. V. Malyshev, 1970. Experimental Investigation of The Stress Distribution in Sandy Foundation Beds Beneath a Circular Foundation with Increasing Load. *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 7(5): 297-302.
12. Tatsuoka, F., T. Iwasaki, and Y. Takagi, 1978. Hysteretic Damping of Sands Under Cyclic Loading and Its Relation to Shear Modulus. *Soils and Foundations* 18(2): 25-40.
13. Woo, B. K., 2005. An Experimental Study on Underground Vertical Stress due to an Increasing Loading. Master's Thesis, University of Kwandong. (in Korean).