사질토 지반의 띠하중 재하에 따른 지중응력증가비의 실험적 고찰

An Experimental Study for Soil Pressure Increment Ratios according to Strip Load in Sandy Soil

봉태호* · 김성필**† · 허준*** · 손영환****

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

ABSTRACT

Soil stress distribution under loading is one of the important problems in civil engineering. Many models have been proposed to interpret the stress distribution in soil and most models assume that the soil is homogeneous and isotropic. Therefore, the actual stress distribution may be different. In addition, With the increase of the top load, soil stress does not increase linearly. In this study, vertical stress changes in sandy soil according to top load increase were measured through experiments. Experimental results, vertical soil stress due to top load increase showed an initial nonlinear behavior and when the load increases to some extent, vertical soil stress showed a linear behavior. α value obtained by existing theories always 1.00. But, α value by experiment was observed from 0.91 to 1.22 and α value was increased with increasing distance from the loading plate.

Keywords: Vertical stress distribution, strip load, soil pressure increment, sand foundation

1. 서 론

지표면이나 지중에 발생하는 하중에 의한 지중응력분포는 기초지반의 안정문제 및 침하문제를 해석하고 구조물의 기초 및 지하매설물 등을 설계하는 데 있어 필수적으로 고찰되어야 한다 (Chon et al., 2000). 특히 제방이나 방조제, 방수제와 같은 경우 지중에 유공관이나 배수암거, 배수관 등의 구조물이 매설되고 있으며 최근에는 경제적, 환경적, 관광적 측면에서 제체의 단면 확대가 시행됨에 따라 지중 구조물의 안전성 확보를 위해서는 상부 하중에 따른 지중응력분포를 규명하고 이를 설계에 반영하는 것이 중요하다.

지중응력을 해석하는 방법은 탄성해법, 근사해법, 수치해석법 등이 있으며 지표면의 상재하중이 작용하는 경우 지중에 발생하는 응력을 계산하는 이론은 탄성론이 널리 이용되어 Boussinesq (1885) 이론, Fröhlich (1934) 이론, Westergaard (1938) 이론

등이 제안되었고 이를 보완하는 이론들이 계속 발표되고 있다. 그러나 이들 방법은 지반을 실제와 다른 유사 탄성론에 의한 가정공식으로 흙을 균질성, 등방성으로 보고 응력분포를 산정하게 되므로 실제 지반의 응력분포와는 해석결과가 다르게 나타날 수 있다. 특히 이러한 방법은 토질의 특성을 고려하지 않고 모든 토질에 일률적으로 적용되는 불합리성이 내재되어 있어 지반에 작용하는 응력분포를 정확히 해석하기란 많은 어려움을 가지고 있다 (Park et al., 2005).

또한, 실제 지반은 강성체가 아니며 토립자 사이에 공극이 존재하므로 지반에 응력이 작용하게 되면 초기 지반상태에서 토립자의 골격구조변화와 공극 감소로 인하여 지중에서의 응력변화는 지표면에서의 하중증가에 대하여 선형적으로 발생하지 않는다. 그리고 지반의 깊이 및 수평거리에 따라서 응력 분산이 다르게 나타나므로 그 응력증가비도 다르게 나타날 것이다. 따라서 정확한 지중응력분포를 파악하기 위해서는 실내모형시험을 통하여 실제 지중에서 응력분포가 어떻게 되는지 파악할 필요가 있다. Abramov et al. (1968)과 Kim (2002), Lim (2004), Lee et al. (2005) 등은 실내모형시험을 통하여 실험결과와 기존 이론식과의 차이를 비교·분석하였으며 Skormin et al. (1970)과 Lee (2000), Woo (2005), Park (2005), Nam (2007) 등은 점증하중에 의하여 지중응력분포는 선형적으로 증가한다는 것을 제시하고 깊이에 따라 기존 이론치와 실측치의 차이가 달라짐을 제안한 바 있다. 하지만 재하하중에 따른 지반 위치별 오차 및 이를 통한 현장적용방법에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

** 한국농촌공사 농어촌연구원

*** 한국농촌공사 농어촌연구원

**** 서울대학교 조경·지역시스템공학과 조교수, 서울대학교 농업생명과학연구원

† Corresponding author Tel.: +81-31-440-1791

Fax: +81-31-400-1794

E-mail: agsol@ekr.or.kr

2011년 4월 26일 투고

2011년 6월 8일 심사완료

2011년 6월 10일 게재확정

본 연구에서는 제체의 단면확대에 따른 지중응력분포를 규명하고자 피하중 재하에 따른 지중응력분포의 실내모형실험을 수행하였으며, 기존 이론식에 의한 지중응력분포 산정은 탄성해법으로 Boussinesq 이론과 Westergaard 이론을 사용하였고 근사해법은 수정된 Kögler 이론과 2:1 분포법을 사용하였다. 수치해석법의 경우 상용 유한요소프로그램인 SIGMA/W를 사용하여 해석을 실시하였으며 지반 구성모델은 탄소성(Mohr-Coulomb)으로 가정하여 해석을 수행하였다. 해석결과, 재하하중 증가에 대한 깊이 및 수평거리별 지중응력증가비를 산정하고 기존 이론에 의한 해석결과와 비교·고찰하였으며 α 분포를 제시함으로써 실제 지반에서 기존 이론식을 적용할 경우 지반의 위치에 따라 실측치를 고려할 수 있는 방법을 제안하였다.

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

Sampling area	Specific Gravity (G_s)	USCS	LL (%)	PL (%)	γ_{dmax} (tonf/m ³)	OMC (%)
Saemangeum	2.69	SM	NP	NP	1.67	19.3

Fig. 1 Particle size distribution

2. 실험기기 제원

가. 하중재하장치

하중재하장치는 유압실린더를 이용하여 하중을 재하하며 재하

Table 2 Specifications of loading device

Item	Length	Load range	Max. Displacement	Velocity of loading	Min. Control load
Value	100 cm	0~7 tonf	40 cm	1 cm/s	1 kg

Table 3 Specifications of earth pressure gauge

Item	Capacity	Rated Output	Non-linearity	Hysteresis	Over Load	Resistance
Value	2 kgf/cm ²	1 mV/V	0.1 % RO	0.1 % RO	150 %	350 Ω

Fig. 2 Data logger

장치 길이는 100 cm (실린더 + 로드셀 + 재하판)이다. 하중의 크기는 실린더 아래 장착된 로드셀을 통하여 제어하게 되며 하중재하장치의 제원은 Table 2와 같다.

나. 토압계

연직응력측정을 위한 토압계는 국내에서 개발된 RAS-2로 직경 5 cm, 두께 1.2 cm 이며 토압계의 제원은 Table 3과 같다.

다. 데이터로거

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

3. 실험방법

가. 지층의 구성

본 연구에 사용된 모형토조의 내부 사이즈는 200 cm×100 cm×100 cm이며 토압계의 깊이별 배치간격을 고려하여 총 5 개 층으로 나누어 지층을 구성하였다. 지층의 목표단위중량은 시료토의 다짐실험결과를 고려하여 변형에 대한 영향을 최소화하고자 함수비를 OMC에 맞추고 습윤단위중량 1.9 tonf/m³로 설정하였으며 이에 따라 각 층별로 일정한 양의 시료를 채운 뒤

Fig. 3 Set up a sand foundation

Fig. 4 Location of earth pressure gauges

목표 단위중량에 맞게 다짐을 수행하였다. 한 층의 지반조성이 끝나면 토압계를 매설하고 다시 동일한 방법으로 지층을 구성하고 토압계를 매설하는 방법으로 지층을 구성하였다(Fig. 3).

나. 토압계 배치 및 간격

토압계는 한 층의 지층구성이 끝나면 Fig. 4와 같이 총 3 개의 토압계를 매설하였으며 지중응력이 토조의 중앙에 대하여 좌우대칭(bilateral symmetry)인 점을 고려하여 임의의 깊이에 대하여 한쪽에만 토압계를 매설하였다. 또한 토압계의 간섭을 최소화하기 위해서 재하판 중심에서 좌우 번갈아가며 토압계를 배치하였다. 토압계의 배치간격은 재하판의 중심에서 토압의 변화가 큰 점을 고려하여 중앙으로부터 0 cm, 10 cm, 25 cm간격으로 토압계를 매설하였다.

지반의 상부에는 지반의 중앙에 폭 30 cm, 길이 98 cm의 강성 재하판을 설치하고 그 위에 LVDT를 장착하여 지반의 침하량을 측정할 수 있도록 하였으며 토압계 매설 및 재하판 설치 전경은 Fig. 5와 같다.

다. 하중조건

하중의 증가에 따른 지중응력의 변화를 관찰하기 위하여 점중 하중에 대한 지중응력분포를 산정하였으며 초기에 낮은 응력에서 비선형적인 거동이 발생하는 것을 고려하여 재하하중은 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8 kgf/cm²로 총 9가지의 하중에 대한 지중응력분포를 산정하였다. Fig. 6은 시간에 따른 재하하중의 변화를 나타낸다.

Fig. 5 Laying earth pressure gauges and loading device

Fig. 6 Loading patterns

III. 결과 및 고찰

1. 재하하중에 따른 지중응력분포

하중의 증가에 따른 지중응력의 변화는 Fig. 7과 같으며 모든 측정점에서 재하하중이 증가함에 따라 지중응력도 증가함을 확인할 수 있었다. 각 측정에서의 재하하중에 따른 각 측정에서의 응력값은 Table 4에 나타내었다.

2. 지중응력증가비

Fig. 8은 재하하중에 따른 응력증가량을 나타낸 그래프로 초기 재하응력이 낮은 경우 공극의 감소와 토립자의 재배열 등으로 응력분산이 적고 재하판과 가까운 부분에서는 응력집중현상이 발생하여 재하판 중심에서 심도 15 cm 지점에서는 상대적으로 재하하중에 따른 지중응력증가비가 크게 나타났으며 하부층 및 재하판에서 수평거리가 떨어져 있는 경우는 초기 응력이

Fig. 7 Soil pressure distributions according to load size

Table 4 Vertical stress according to load size

Distance (cm)	Depth (cm)	Load Size (kgf/cm ²)								
		0.05	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
0	15	0.0410	0.1411	0.3002	0.4508	0.6494	0.8328	1.0008	1.1517	1.3179
	40	0.0282	0.0621	0.1420	0.1843	0.3027	0.4231	0.5529	0.6771	0.8261
	65	0.0121	0.0201	0.0311	0.0363	0.0745	0.1222	0.1757	0.2311	0.2980
	90	0.0095	0.0141	0.0198	0.0229	0.0497	0.0898	0.1356	0.1853	0.2502
10	15	0.0125	0.0256	0.0540	0.0850	0.1920	0.3467	0.5167	0.6905	0.8929
	40	0.0126	0.0301	0.0645	0.1012	0.1815	0.2750	0.3763	0.4737	0.5959
	65	0.0095	0.0132	0.0221	0.0306	0.0669	0.1127	0.1662	0.2197	0.2865
	90	0.0062	0.0088	0.0121	0.0115	0.0267	0.0516	0.0783	0.1070	0.1452
25	15	0.0021	0.0025	0.0075	0.0115	0.0229	0.0497	0.0802	0.1127	0.1509
	40	0.0025	0.0086	0.0154	0.0334	0.0716	0.1270	0.1900	0.2550	0.3314
	65	0.0022	0.0023	0.0109	0.0210	0.0420	0.0783	0.1184	0.1585	0.2101
	90	0.0013	0.0015	0.0032	0.0067	0.0162	0.0277	0.0449	0.0602	0.0831

Fig. 8 Soil pressure increment ratios according to load size

잘 전달되지 않아 낮은 지중응력증가비를 나타내었다.

재하하중이 일정 크기 이상이 되면 공극의 감소가 거의 발생하지 않고 토립자의 골격구조가 안정하게 되므로 재하하중에 따른 지중응력의 증가는 거의 선형적으로 나타났다. 재하하중 0.6 ~ 1.8 kgf/cm² 범위에서 재하하중에 대한 응력증가량의 선형회

귀식은 Table 5에 나타내었으며 모든 측정에서 R² 값이 1에 가깝게 나타나 매우 선형적인 관계임을 알 수 있다.

지중응력증가비/재하하중증가비를 $\alpha = (\sigma_2/\sigma_1)/(P_2/P_1)$ 라고 할 때 기존 지중응력분포 해석방법의 경우 탄성해법, 근사해법, 수치해법 모두 α 의 값이 해석의 특성상 깊이 및 수평거리에 관

Table 5 Relationship between load size and soil pressure increment, α values

Distance (cm)	Depth (cm)	Regression equation	$\Delta\sigma/\Delta P$	R^2	α
0	15	$y = 0.552x + 0.3281$	0.552	1.00	0.91
	40	$y = 0.434x + 0.0361$	0.434	1.00	0.98
	65	$y = 0.185x - 0.0420$	0.185	1.00	1.07
	90	$y = 0.166x - 0.0565$	0.166	0.99	1.14
10	15	$y = 0.582x - 0.1706$	0.582	1.00	1.12
	40	$y = 0.343x - 0.0306$	0.343	1.00	1.02
	65	$y = 0.182x - 0.0481$	0.182	1.00	1.09
	90	$y = 0.097x - 0.0351$	0.097	0.99	1.16
25	15	$y = 0.106x - 0.0443$	0.106	1.00	1.22
	40	$y = 0.216x - 0.064$	0.216	1.00	1.12
	65	$y = 0.139x - 0.0451$	0.139	1.00	1.14
	90	$y = 0.055x - 0.0201$	0.055	0.99	1.14

Fig. 9 α distribution

Fig. 10 Soil pressure distribution

계없이 동일한 값을 나타낸다. 즉, 재하하중이 n 배가 되면 지중 응력도 n 배가 되어 항상 1.0의 값을 갖는다. 하지만 실제 지반에서는 적용하중이 증가함에 따라 지중응력도 선형적으로 증가하지만 재하하중증가비와 동일한 값을 나타내지 않으며 α 는 깊이 및 거리에 따라 각기 다른 값을 나타내었다(Table 5). 만약 α 가 1일 경우 재하하중에 따른 지중응력분포는 초기 지중응력에 대하여 재하하중증가비만큼 지중응력이 증가하므로 재하하중에 따른 지중응력분포 및 해석방법별 오차도 쉽게 비교·예측할 수 있다. 하지만 실제 지반에서는 1 이하 또는 이상의 값이 나타내었으며 이는 깊이 및 수평거리에 따라 기존 이론식과의 오차는 재하하중의 크기에 따라서 커지거나 작아질 수 있음을 의미한다.

지반 내에서 α 값의 분포도는 Fig. 9와 같다. 등고선내의 원형은 토압계의 측정위치를 의미하며 일반적으로 α 값은 재하판 중심에서 깊이가 깊어질수록, 중심에서 멀어질수록 증가하였으며 등고선의 형태는 지중응력분포와 마찬가지로 재하판에서 영향원이 퍼지는 형태로 나타났다.

3. 재하하중에 따른 지중응력분포 비교 및 고찰

실내모형실험에 의한 실험결과와 기존 해석이론에 의한 지중응력을 비교하기 위하여 초기 낮은 수준의 재하하중 0.3 kgf/cm^2 과 이후 재하하중 증가에 따른 선형적인 응력분포를 나타내는 $0.6, 1.2, 1.8 \text{ kgf/cm}^2$ 의 세 가지 경우에 대하여 탄성해법과 근사해법, 수치해법에 의한 해석을 실시하였으며 각 해석방법과 실험결과에 의한 재하판 중심에서의 지중응력분포는 Fig. 11과 같다.

재하하중 0.3 kgf/cm^2 에서의 지중응력분포는 초기 응력집중 현상에 의하여 심도 15 cm과 40 cm에서 기존 해석이론에 비해 상대적으로 높은 응력값을 나타내었으며 심도 65 cm과 90 cm에서는 가장 작은 응력값을 나타내었다. 재하하중 $0.6, 1.2, 1.8 \text{ kgf/cm}^2$ 에 대한 지중응력분포는 기존 이론식의 경우 재하하중 증가율에 따라 각 해석이론과의 차이도 같은 비율로 증가하였다. 하지만 실험결과에 의한 지중응력분포는 재하하중 및 깊이에 따라 다른 증가율을 나타내었으며 이에 따라 기존 해석이론과의 차이도 다르게 나타났다. 즉, 재하하중이 증가함에 따라 상대적으로 낮은 심도에서는 기존 이론식과 비교하여 응력의 증가량이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있으며 깊은 심도에서는 점점 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 산정한 α 값의 분포로 유추할 수 있으며 α 값이 1 이하일 경우 지중응력 증가율은 재하하중의 증가율보다 작은 증가율을, 1 이상일 경우 재하하중의 증가율보다 더 큰 증가율을 나타내었다.

Fig. 11 Comparison between theoretical value and experiment value

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 제체의 축조 및 단면 확대에 따른 지중응력분포를 산정하고 재하하중에 따른 지중응력증가의 변화를 규명하기 위하여 새만금 사업단지에서 채취한 사질토를 대상으로 피하중 재하에 따른 지중응력분포를 산정하였으며 탄성해법, 근사해법, 수치해법과 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사질토 지반에서 재하하중이 증가함에 따라 지중응력도 증가하였지만 재하하중에 따른 지중응력증가비는 낮은 응력에서 비선형적인 거동을 나타내었다.
2. 재하하중 0.05~0.6 kgf/cm² 범위에서 심도 15 cm와 40 cm의 지중응력증가비는 그 이상의 재하하중을 적용했을 때 보다 크게 나타났으며 다른 축점의 경우 작게 나타났다. 이는 낮은 재하하중범위에서 공극의 감소와 토립자의 재배열 등으로 응력분산이 적게 발생하고 재하판 주위에 응력이 집중되기 때문인 것으로 판단된다. 재하하중 0.6~1.8 kgf/cm² 범위에서 모든 축점에서의 재하하중에 따른 지중응력증가는 R²값이 1.0으로 매우 선형적인 관계를 나타내었다.
3. 실험결과를 통하여 α 값을 산정한 결과 0.91~1.22의 값

을 나타내었으며 α 의 분포형태는 재하판 중심에서 깊이가 깊어질수록, 중심에서 멀어질수록 증가하는 것으로 나타났다.

4. 재하하중에 따라 기존 이론식과 실험결과에 따른 지중응력분포를 비교한 결과, 0.3 kgf/cm²의 재하하중에서는 낮은 심도에서는 실험결과에 의한 지중응력이 기존 이론식에 비하여 매우 크게 나타났으며 깊은 심도에서는 오히려 작게 나타나는 것으로 나타나 기존 이론식을 통하여 지중응력분포를 산정 시 낮은 심도는 과소평가, 깊은 심도에서는 과대평가될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 재하하중 0.6~1.8 kgf/cm² 범위에서 지중응력분포는 기존 이론치와 비교하여 재하하중의 크기에 따라 다른 오차를 나타내었다. 따라서 보다 정확한 지중응력분포의 산정을 위해서는 α 값의 분포를 고려하여 재하하중의 크기에 따른 영향을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Abramov, L. T., I. M. Kryzhanovskii, A. G. Patrova, 1968. Stress Distribution in Soils Under Static Loading,

- Soil Mechanics and Foundation Engineering* 5(6): 389-392
2. Boussinesq, J., 1885. Application de Potentials a l'etude de l'equilibre et du mouvement des solides elastiques. Paris
3. Chon, Y. B., 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. Fröhlich, O. K., 1934. Druckverteilung im Baugrund mit besonderer Berücksichtigung der plastischen Erscheinungen. Springer, Wien
5. 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)
6. Lee, I. H., 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)
7. Lee, T. H., 2000. Vertical Stress Acting under Ground by Incremental Load, Master's Thesis, University of Taegu. (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, S. W. Lee, 2005. An Experimental Study on Underground Vertical Stress due to an Increasing Loading, *Korean GEO-Environmental Conference 2005*, 2005(9): 299-306 (in Korean)
11. Skormin, G. A., 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. Westergaard, H. M., 1938. A Problem of Elasticity Suggested by a Problem in Soil Mechanics: A Soft Material Reinforced by Numerous Strong Horizontal Sheets, *In Contribution to the Mechanics of soils*, Stephen Timoshenko 60th Anniversary Volume, Macmillan, New York.
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)