사질토 지반의 상대다짐도 및 토층에 따른 연직지중응력 분포 특성

Characteristics of Vertical Stress Distribution in Sandy Soil According to the Relative Compaction and Composition of the Soil Layer

남효석^{*,†} · 이상호^{**}

Nam, Hyo Seok^{*,†} · Lee, Sang Ho^{**}

ABSTRACT

This study was carried out to evaluate the vertical stress properties in sandy soil according to changes of foundation condition in soil bin compacted three layers. The following conclusions and comparisons have been made based on careful analysis from theoretical and experimental methods. : When sandy soil subjected to circular uniform load, the vertical stress increments ($\Delta\sigma_z$) was increased as load increasing, the maximum values of $\Delta\sigma_z$ was achieved at the point loading axis, and $\Delta\sigma_z$ was not shown over at a distance of three times of loading plate width (B). The vertical stress increments were achieved largely at 80 % relative compaction (R_c) compared to 95 % relative compaction due to stress concentration in sandy soil. When sandy soil subjected to circular uniform load, the $\Delta\sigma_z$ differences between theoretical and experimental values as load increased were more increased and its maximum differences were achieved at stress axis. When gravel surface macadamized over sandy soil subjected to load, the $\Delta\sigma_z$ was concentrated to load axis as load increasing, so that macadamization will be decreased load transmission.

Keywords: Vertical stress increment; Foundation conditions; Relative compaction; Layer soil; Gravel surface

1. 서 론

상부구조물의 하중은 기초구조물에 의해 지반으로 전달되며 상부구조물의 하중에 의해 지반이 받는 실제외력은 접지압으로 작용한다. 따라서 지반의 응력을 파악하기 위해서는 접지압의 크기와 형태를 알아야 하지만 접지압은 하중의 크기와 형태, 기초구조물 및 지반의 종류 등에 따라 복잡적이고 상대적으로 변화하므로 이를 정확히 예측하기는 매우 어렵다. 그래서 지반의 허용응력, 지지력 산정 시 실무에서는 등분포로 가정하고 Boussinesq (1883)의 이론으로 지중응력을 구하고 있다 (Das, 2002).

그러나 Boussinesq의 이론은 지반을 균질, 탄성, 등방으로 가정하여 지반의 응력분포를 정확하게 구명하기는 어려우며 더욱이 하중의 변화, 기초의 종류, 토질의 특성 등을 고려하지 않고 모든 조건에 일률적으로 적용되는 불합리성이 있다. 자연 상

태의 지반은 균질성 또는 등방성이 아닐 뿐만 아니라 완전한 소성체도 완전한 탄성체도 아니므로 실제 지반에서는 지반의 상태를 변화시키는 요인들이 매우 많아 지반 내의 응력분포를 정확히 해석하는 데는 많은 어려움이 있다 (Hwang, 1992). 그러나 하중이 지반의 강도에 비해 충분히 작은 범위 내에서는 탄성적으로 해석하여도 실용상 지장이 없다는 것이 연구자들의 경험 및 실험에 의해 알려져 있으며, 이러한 전제조건하에서 탄성체에 대한 응력분포상태를 직접 또는 어느 정도 수정을 가하여 실제 지반에 적용하고 있다 (Hwang, 1992).

연구동향을 살펴보면 Chon et al. (2000)은 사질토 지반에 원형등분포 하중이 작용할 때 지중의 응력분포가 Fröhlich (1934)의 이론과 유사하다고 제안하였으며 Lim (2004)은 지표면 재하에 의한 사질토 지반의 지중연직응력 증가량에 대한 Boussinesq의 이론을 고찰하기 위해 실내시험을 수행하여 Boussinesq의 이론값과 실측값을 비교하여 기초폭과 같은 깊이에서는 기초판 하부에 대한 Boussinesq의 이론값은 지중연직응력을 과소평가하며 실측값은 이론값의 약 1.5배에 달하고 깊이가 깊어질수록 두 값의 차이는 줄어들며 기초판에서 거리가 멀어질수록 두 값이 비슷하다고 제시하였다. Lim and Lee (2005)는 연약점토층위 이층지반의 지표면에 등분포재하중이 작용할 때 지반의 특성에 따라 발생하는 지중연직응력의 변화

* 경북대학교 농업토목공학과 강의교수

** 경북대학교 농업토목공학과 교수

† Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5730

Fax: +82-53-950-6752

E-mail address: petrus913@knu.ac.kr

2010년 2월 1일 투고

2010년 3월 15일 심사완료

2010년 3월 15일 게재확정

Table 1 Physical properties of materials

Properties	Specific gravity (G_s)	Maximum dry unit weight (γ_{dmax} , tf/m ³)	Optimum moisture content (w_{opt} , %)	Modulus of elasticity (E , tf/m ²)	Coefficient of uniformity (C_u)	Coefficient of gradation (C_g)	USCS
Sand	2.68	1.525	16.7	4,300	2.9	1.2	SP
Gravel	2.70	1.425	-	15,000*	1.9	1.0	GP

* Das, B. M. (2002)

를 측정하여 근접한 이론값과 비교분석하여 상부층의 강도가 하부층에 비해 클수록 하부층으로 전달되는 지중응력은 작아지고, 지반 상하층의 강도차가 클수록 지중응력은 감소하는 경향이 있으며 원형하중에 비해 띠하중의 감소비율이 작아진다고 제시하였으며 Schmertmann (2005)은 수평응력이 조절되는 토조에서 토압계수의 변화에 따른 연직응력 변화를 Boussinesq의 이론과 Harr의 확률이론으로 비교분석하고 토압계수와 응력집중 및 분산과의 관계를 구명하였다. Nam et al. (2009)은 원형등분포하중이 작용하는 토조 내의 사질토 지반에서 하중의 재하방법에 따른 사질토 지반의 연직응력 특성을 기존의 여러 이론식들의 결과와 비교·분석하였다.

본 연구에서는 지반상태에 따른 사질토 지반의 연직응력특성을 구하기 위해 모형토조와 재하장치를 이용하여 상대다짐도가 각각 다른 사질토 지반과 사질토층 위에 자갈층이 성토된 사질토 지반의 지표면에 원형등분포하중을 재하하여 지반 내의 연직응력특성을 분석하여 실험에서 구한 사질토 지반의 지중응력과 기존의 이론결과들을 비교·분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험재료

본 연구의 실험에 사용한 모래는 낙동강 유역에서 채취하였으며, 자갈은 경상남도 창녕군 일대의 채석장에서 채취한 부순 자갈을 사용하였다. 실험에 사용한 모래와 자갈의 물리적 특성은 Table 1과 같고 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다. 모래의 다짐곡선은 Fig. 2와 같다. 모래의 탄성계수는 3축압축시험으로 구하였고, 자갈의 탄성계수는 문헌에 나타나 있는 대표값을 인용하였다.

2. 모형토조 및 실험장치

본 연구에 사용한 토조는 안쪽치수를 3000×3000×1150 mm로 제작하고 토조의 바닥과 벽면은 50×50×2 mm의 강관을 사용하여 격자형으로 보강하였다. 재하하중의 반력으로 사용하기 위해 200×200×12 mm의 H형강을 토조의 바닥에 설치하고 재하장치의 지지대와 토조 외부에서 연결하였다. 재하장

Fig. 1 Particle size distribution curves

Fig. 2 Compaction curve of sand

Fig. 3 Schematic diagram of load equipments

Table 3 Specifications of pressure cell

Item	Value
Measurement range	0 ~ 200 tf/m ²
Resolution	0.025 %
Accuracy	±0.5 %
Nonlinearity	±1.0 %
Over range capacity	150 %
Thermal zero shift	Less than 0.03 tf/m ² /°C
Operating temperature	-30 ~ 70 °C
Weight	2 kgf

치 지지대는 토조의 상부 중앙에 H형강을 2열로 설치하고 지지대 가운데에 재하장치를 설치하였다.

공기압축기에서 발생된 압축공기가 오일탱크를 거쳐 직경 100 mm 유압실린더에 작용하여 재하하중이 발생하도록 하였다. 릴리프밸브를 조절하여 실린더로 유입되는 유압의 크기를 조절하였으며 유압의 크기는 압력센서에 부착된 인디케이터에서 확인하였다. 유압실린더와 재하장치의 개략도는 Fig. 3과 같다.

국내의 A사에서 생산하는 진동현식 토압계를 사용하여 지중응력을 측정하였다. 진동현식 토압계는 직경이 114 mm이고 최대 측정범위가 200 tf/m²으로 토압계의 제원은 Table 3과 같다. 재하면 아래 30 cm (z=1B면), 60 cm (z=2B면), 90 cm (z=3B면) 깊이에서 재하축 중심으로부터 수평거리 0 cm (r=0B), 30 cm (r=1B), 60 cm (r=2B), 90 cm (r=3B), 120 cm (r=4B)의 15곳에서 깊이별, 거리별 연직응력의 변화를 측정하였으며 토압계의 설치위치와 각 측정점의 명칭은 Fig. 4와 같다.

3. 하중재하방법

지표면에 등분포하중 재하 시, 지반조건에 따른 사질토 지반의 연직응력변화를 구명하기위해 토조 내의 모래를 상대다짐도 80 %와 95 %로 다짐을 하였다. 표준다짐시험으로 구한 모래의 최대진조단위중량으로부터 각 층에 필요한 모래의 체적을 구한다음 진동다짐기를 이용하여 소요체적에 이를 때까지 각

면을 고르게 다짐하였다. 재하는 확대기초에서 정적하중에 대한 흙의 지지력 시험방법 (KS F 2444)에 의해 0 tf/m²부터 지반파괴가 발생될 때 (80 tf/m²)까지 10 tf/m²씩 증가하여 재하 하였으며 각 하중단계에서 침하량이 0.01 mm/분 이하가 될 때를 침하가 정지된 것으로 보고 각 하중단계에서의 지중응력과 재하면의 침하량을 측정하고 다음 단계의 하중을 재하 하였다. 상대다짐도가 다른 사질토지반의 연직응력을 측정하기 위한 각 층의 토압계 위치와 재하면은 Photo 1과 같다.

이질층 지반에 등분포하중이 작용할 때 지반내의 연직응력변화를 구명하기위해 상대다짐도 95 %의 모래층 위에 두께 30 cm의 자갈층을 다짐을 한 후 확대기초에서 정적하중에 대한 흙의 지지력 시험방법 (KS F 2444)에 의해 0 tf/m²부터 지반파괴가 발생될 때 (130 tf/m²)까지 10 tf/m²씩 증가시키면서 지중의 연직응력변화를 측정하였다. 이질층 지반의 연직응력을 측정하기 위한 각 층의 토압계 위치와 재하면은 Photo 2와 같다.

(a) Photo of soil bin

(b) Longitudinal section

(c) Plan

Fig. 4 Location of pressure cells

Photo 1 Location of pressure cells and loading plane to measure vertical stress with sand foundation

Photo 2 Location of pressure cells and loading plane to measure vertical stress with gravel foundation

Table 4 Vertical stress increments caused by load increasement

Location		Load (tf/m ²)								Location		Load (tf/m ²)									
		10	20	30	40	50	60	70	80			10	20	30	40	50	60	70	80		
R _c =80 %	z=1B	r=0B	5.34	11.18	17.55	24.97	33.76	48.28	68.76	77.01	R _c =95 %	z=1B	r=0B	3.09	6.39	11.11	17.52	25.82	45.07	64.90	74.11
		r=1B	0.24	0.56	0.83	0.99	1.22	1.59	1.13	0.86			r=1B	0.34	0.74	1.02	1.39	1.83	2.34	1.73	1.18
		r=2B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			r=2B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		r=3B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			r=3B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		r=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			r=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	z=2B	r=0B	2.57	5.07	7.59	10.71	12.68	15.95	21.76	27.27		z=2B	r=0B	1.34	3.07	4.54	6.27	8.79	11.76	13.70	15.00
		r=1B	1.36	2.74	3.14	4.57	6.01	8.51	11.11	13.53			r=1B	0.90	2.08	3.00	4.23	5.14	6.74	7.12	9.21
		r=2B	0.45	0.76	1.02	1.21	1.21	0.95	0.32	0.00			r=2B	0.12	0.26	0.35	0.40	0.40	0.35	0.12	0.00
		r=3B	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			r=3B	0.09	0.14	0.14	0.14	0.09	0.05	0.00	0.00
		r=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			r=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	z=3B	r=0B	1.76	3.17	4.64	6.23	8.00	10.12	13.66	16.92		z=3B	r=0B	0.73	1.56	2.19	2.97	4.28	6.00	7.72	9.19
		r=1B	0.73	1.51	2.36	3.27	4.37	5.65	7.29	8.76			r=1B	0.30	0.87	1.52	2.30	3.00	3.78	4.56	5.25
		r=2B	0.20	0.40	0.56	0.79	1.02	1.25	1.38	1.52			r=2B	0.13	0.26	0.33	0.49	0.69	0.89	1.02	1.15
		r=3B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			r=3B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		r=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			r=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

III. 결과 및 고찰

1. 상대다짐도에 따른 연직응력특성

원형등분포하중 재하 시, 지반의 상대다짐도 (R_c)에 따른 지반 내의 연직응력변화를 고찰하였다. 하중증가에 따른 각 지점의 연직응력증가분 ($\Delta\sigma_z$)은 Table 4와 같다.

대부분의 위치에서 재하하중이 증가함에 따라 지중의 연직응력증가분은 증가하였으며 $r=3B$ 와 $r=4B$ 지점에서는 연직응력증가분이 거의 나타나지 않았다. 하중이 증가함에 따라 재하축 연직하의 위치인 $r=0B$ 의 연직응력증가분이 각 면에서 가장 크게 나타났으며 항복하중 60 tf/m^2 이후에서 급격히 증가하였다.

$z=1B$ 면 $r=1B$ 와 $z=2B$ 면 $r=2B$ 지점의 경우 하중이 증가함에

따라 재하축 부근에서의 응력집중과 지반의 균열로 인해 항복 하중 이상의 하중에서 연직응력증가분이 감소하는 것으로 판단 된다.

재하축 연직하의 $z=1B$ 면에서 상대다짐도 80 %일 때 연직응력증가분은 $5.34 \text{ tf/m}^2 \sim 77.01 \text{ tf/m}^2$ 이고 상대다짐도 95 % 일 때 연직응력증가분은 $3.09 \text{ tf/m}^2 \sim 74.11 \text{ tf/m}^2$ 으로 상대 다짐도 변화에 따른 연직응력증가분은 상대다짐도 95 %에서 보다 상대다짐도 80 %에서 더 크게 나타났다.

이는 상대다짐도가 작은 지반에서 응력분산이 적고 하중이 증가함에 따라 지반의 변형이 크고 응력이 집중되어 연직응력 증가분이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

Chon et al. (2000)은 한 층의 두께를 20 cm로 다짐한 모래지반과 한 층의 두께를 10 cm로 다짐한 모래지반에서의 연직응력특성을 구명한 연구에서도 20 cm두께로 다짐한 모래의 지중응력증가분이 10 cm두께로 다짐한 모래의 응력증가분보다 크게 나타났으며 본 연구와 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 5 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 30 tf/m^2

Fig. 6 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 60 tf/m^2

Fig. 7 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 80 tf/m^2

Fig. 5, 6, 7은 재하하중 30 tf/m², 60 tf/m², 80 tf/m²에서 실험에서 측정된 $\Delta\sigma_z$ 와 지중응력에 대한 이론들로부터 구한 $\Delta\sigma_z$ 를 재하하중에 대한 비로 나타낸 것이다.

깊이가 깊어질수록 Kögler의 수정식에 의한 결과는 다른 이론식들에 의한 결과와도 상당한 차이를 나타내며 r=1B까지는 Kögler의 수정식을 제외한 이론식들로 구한 $\Delta\sigma_z$ 가 본 연구에서 구한 $\Delta\sigma_z$ 보다 작게 나타나서 설계 시 실제 지반의 $\Delta\sigma_z$ 가 과소평가되어 불안정한 설계로 나타날 수 있다. 상대다짐도가 작은 경우에 두 결과의 차이가 크게 나타났으며 상대다짐도 95 %의 지반은 실험값과 Fröhlich (1934)의 결과가 비슷한 크기로 나타났다.

Lim et al. (2002)의 피하중에 의한 연직응력 특성에 대한 연구에서 상대밀도가 작은 경우에 실험값과 이론값들의 차이가 크게 나타난다고 보고하여 본 연구와 유사한 경향을 나타내고 Lim (2004)의 연구결과에서와 같이 본 연구 결과 재하축 부근에서 깊이가 깊어질수록 실험값과 이론값의 차이가 작게 나타나는 경향이 있다.

2. 이질층의 연직응력특성

이질층 지반에 등분포하중이 작용할 때 지반내의 연직응력변화를 구명하기위해 상대다짐도 95 %의 모래층 위에 두께 30 cm의 자갈층을 다짐을 한 후 하중을 10 tf/m²씩 증가시키면서 지중의 연직응력변화를 측정하였다. 하중증가에 따른 각 지점의 연직응력증가분은 Table 5와 같다.

대부분의 위치에서 재하하중이 증가할수록 연직응력증가분은 증가하였으며 r=3B와 r=4B지점에서는 연직응력증가분이 거의 나타나지 않았다. 하중이 증가함에 따라 재하축 연직하 r=0B의 연직응력증가분이 가장 크게 나타났다. 특히, z=1B r=0B의 경우에는 재하하중이 증가할수록 연직응력증가분이 크게 증가하였으며 z=2B r=0B보다 약 4배 정도 크게 나타났다. 자갈의 입경이 모래보다 크기 때문에 토압계에 접촉하는 면적이 모래의 접촉면적보다 매우 적다. 하지만 토압계에서 응력측정은 토압계 전체면적으로 계산되기 때문에 실제 자갈층에서의 연직응력증가분은 토압계로 측정되는 값보다 더 크게 나타날 것으로 판단된다.

z=1B면에서 연직응력증가분은 재하축 직하에 집중되어 r=1B에서는 재하하중의 약 5 %정도로 매우 작게 나타났다. z=2B면과 z=3B면의 응력증가분은 재하하중의 약 20 %와 10 %이하로 자갈층과 비교해서 매우 작게 나타났으며 재하하중 80 tf/m²에서 모래 균일층 연직응력증가분의 약 40 % ~ 80 %정도로 작게 나타났다.

모래보다 입경과 강도가 큰 자갈층이 모래지반위에 성토되는 경우 지표면 재하에 의한 연직응력증가는 자갈층에 집중되고 모래층으로의 응력전달이 감소될 것으로 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 자갈성토층에서 재하하중 50 tf/m²과 100 tf/m²에서 구한 $\Delta\sigma_z$ 와 이론식으로 계산한 $\Delta\sigma_z$ 를 재하하중에 대한 비로 나타낸 것이다.

자갈성토층의 연직응력증가량은 하중이 증가함에 따라 크기의 차이는 있으나 응력분포형태는 재하하중의 증가와 무관하게

Table 5 Vertical stress increments caused by load increasement in gravel

Location \ Load(tf/m ²)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
z=1B	r=0B	7.87	18.91	28.53	38.57	47.27	54.33	64.02	76.21	86.11	94.57	105.26	115.57	121.97
	r=1B	0.79	1.39	1.94	2.36	2.91	3.09	3.10	3.21	3.21	4.12	3.94	3.94	4.12
	r=2B	0.09	0.09	0.09	0.04	0.09	0.22	0.22	0.27	0.36	0.40	0.45	0.46	0.46
	r=3B	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06	0.10
	r=4B	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
z=2B	r=0B	1.21	2.92	4.66	6.34	8.19	10.04	12.14	14.50	16.96	20.00	22.93	25.15	28.32
	r=1B	0.94	2.22	3.54	4.82	6.25	7.82	9.39	11.21	13.03	14.71	16.16	17.41	18.77
	r=2B	0.09	0.18	0.24	0.29	0.35	0.38	0.38	0.35	0.32	0.29	0.29	0.32	0.26
	r=3B	0.03	0.07	0.10	0.07	0.07	0.07	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	r=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
z=3B	r=0B	0.53	1.29	2.08	2.84	3.63	4.52	5.47	6.56	7.72	8.97	10.09	11.35	12.60
	r=1B	0.48	1.01	1.73	2.38	3.21	4.02	4.74	5.66	6.54	7.32	7.79	8.51	9.04
	r=2B	0.10	0.23	0.33	0.43	0.56	0.66	0.80	0.93	1.06	1.20	1.26	1.40	1.43
	r=3B	0.00	0.06	0.06	0.13	0.19	0.25	0.32	0.45	0.51	0.51	0.51	0.38	0.32
	r=4B	0.00	0.04	0.05	0.08	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	0.15	0.18

Fig. 8 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for 1B-gravel under 50 tf/m²

Fig. 9 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for 1B-gravel under 100 tf/m²

비슷한 형태로 나타났다. 하중 50 tf/m² 재하 시, z=1B면, r=0B에서 응력집중이 크게 발생하여 이론식들에 의한 연직응력증가량보다 약 2배정도 크게 나타났으며 r=1B이후에서는 재하축 중심에서의 응력과 비교해서 상대적으로 작은 응력이 발생하여 이론식에 의한 결과들과 유사하게 나타났다.

z=2B면에서는 r=0B, r=1B에서 실험값들이 Kögler의 수정식을 제외한 이론값들보다 조금 크게 나타나지만 r=2B이후에서는 실험결과와 이론식에 의한 결과들이 유사하게 나타났다.

z=3B면에서는 재하하중이 증가함에 따라 실험결과들과 이론값의 차이가 조금 증가하는 경향이 있지만 실험결과들이 Fröhlich의 이론결과와 비슷하게 나타났다.

Lim et al. (2005)은 연약점토층위 이층지반 지표면 재하 시 지중응력특성 연구에서 성층조건에 따라 지중응력분포가 달라지며 상부층의 강도가 하부층에 비해 클수록 하부층으로 전달되는 지중응력이 작아진다고 보고하여 본 연구결과와 유사한 경향을 나타내었다.

IV. 결 론

사질토 지반 지표면에 원형 등분포하중이 재하될 때 지반특

성에 따른 지반 내 연직응력특성을 구명하기 위해, 토조 내에서 상대다짐도를 변화하여 3층으로 다짐된 사질토 지반과 자갈층이 성토된 사질토 지반에 각각 원형등분포 하중을 재하시켜 지중응력 변화를 측정하였다. 실험에서 구한 실측치와 기존 이론식에서 구한 이론치들을 비교, 분석하였다.

1. 사질토 지반의 지표면에 원형등분포하중 재하 시, 하중이 증가할수록 연직응력증가분 ($\Delta\sigma_z$)은 증가하였으며 $\Delta\sigma_z$ 는 재하축 연직하에서 가장 크게 나타나고 재하폭의 3배 이상의 거리에서는 거의 나타나지 않았다.

2. 사질토 지반에서 지표면 재하에 따른 연직응력증가는 응력집중으로 인해 상대다짐도 95 % 지반보다 상대다짐도 80 % 지반에서 더 크게 나타났다.

3. 사질토 지반의 지표면에 원형등분포하중 재하 시, 하중이 증가할수록 실측에 의한 $\Delta\sigma_z$ 와 이론식들로 구한 $\Delta\sigma_z$ 의 차이는 증가하였으며 재하축 부근에서 두 결과의 차이가 더 크게 나타났다.

4. Kögler의 수정식을 제외한 이론식들로 구한 $\Delta\sigma_z$ 가 본 연구에서 구한 $\Delta\sigma_z$ 보다 작게 나타나서 설계 시 실제 지반의 $\Delta\sigma_z$ 가 과소평가되어 불안정한 설계로 나타날 수 있다. 상대다짐도가 작은 경우에 두 결과의 차이가 크게 나타났으며 상대다짐

도 95 %의 지반은 실험값과 Fröhlich의 결과가 비슷한 크기로 나타났다.

5. 자갈층이 성토된 사질토 지반에 하중이 재하되는 경우, 하중증가에 따른 $\Delta\sigma_z$ 는 자갈층의 재하축 부근에 집중되며 이로 인해 자갈층 아래로의 응력전달을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Chon, Y. B., and Lee, T. H., 2000. An experimental study of vertical stress by incremental load. In *Proceeding of the 2000 Annual conference the Korean Society of Civil Engineers* 533-536 (in Korean).
2. Hwang, J. G., 1992. *Principles of geotechnical engineering for civil engineers*. Seoul, Goomibook (in Korean).
3. Lim, J. S., Lee, I. H., and Jung, W. J., 2003. Characteristics of vertical stress distribution in soil according to the relative density of sandy soil in case of surface loading. *Proceedings of the Korean geotechnical Society Conference* 54-57. Daejon, Korea (in Korean).
4. Lim, J. S., 2004. An experimental investigation of Boussinesq's theoretical value of vertical stress incremental in sandy soil mass caused by surface strip loading. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 20(9): 5-15 (in Korean).
5. Lim, J. S., and Lee, I. H., 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(6): 47-57 (in Korean).
6. Nam, H. S., Lee, S. H., and Kwon, M. N., 2009. Characteristic of vertical stress in sandy soil according to loading types. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(6): 83-90 (in Korean).
7. Ahlvin, R. G., Ulery, H. H., 1962. Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains, and deflections beneath a uniform circular load on a homogeneous half space, *Highway Research Bulletin 342, Transportation Research Board*: 1-13.
8. Boussinesq, J., 1883. Application des potentiels à L'Etude de L'Equilibre et du mouvement des Solides Elastiques, *Gauthier-Villars*, Paris.
9. Das, B. M., 2002. *Principles of Geotechnical Engineering*, 5th ed, Brooks/Cole: 224-258.
10. Fröhlich, O. K., 1934. *Druckverteilung in baugrunde*, Springer-Verlag OHG.
11. Kögler, F. and Scheidig, A., 1927. *Druckver Teiling im Baugrunde*, Bautechnik.
12. Schmertmann, J. H., 2005. Stress diffusion experiment in soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 131(1): 1-10.
13. Westergaard, H. M., 1938. A problem of elasticity suggested by a problem in soil mechanics; soft material reinforced by numerous strong horizontal sheets, contribution to the mechanics of soils, *Stephen Timoshenko 60th Anniversary Volume*, MacMillian Company.