

재하방법에 따른 사질토 지반의 연직응력 특성

Characteristic of Vertical Stress in Sandy Soil according to Loading Types

남효석^{*†} · 이상호^{**} · 권무남^{***}

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

ABSTRACT

This study was carried out to evaluate the vertical stress properties in sandy soil according to changes of loading type 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 cycle-loading, compression of foundation and diffusion of vertical stress increment($\Delta\sigma_z$) were influenced by magnitude of loading plate. When sandy soil subjected to reloading after removing of pre-loading, the distribution of $\Delta\sigma_z$ depth at one time of loading plate width was different from its distribution at more deep point cause of load hysteresis, so in case of design of structure, the effect of $\Delta\sigma_z$ as depth must be considered. The increment of vertical stress will be different as loading condition and foundation depth, the loading condition must be considered in case of structure design.

Keywords: Vertical stress properties; stress increment; load hysteresis; loading condition

1. 서 론

구조물의 기초지반은 상부구조물의 하중을 지지하고 과도한 침하를 일으키지 않아야 하므로 기초설계 시 이를 검토하기 위해서는 상부하중으로 인한 지반의 응력변화를 파악하고 상부하중에 의한 응력의 변화를 지반의 특성과 비교, 분석하여 지지력과 침하량에 대한 안전을 검토해야 한다. 특히 연약지반에서의 기초나 신공법의 도입 등에 있어서는 보다 정밀한 기초설계가 필요하므로 지중응력분포를 파악하는 것이 더욱 중요하다.

지표면 재하에 따른 지중응력의 정확한 예측은 새로운 이론의 개발과 실험을 통한 검증과 기존이론의 상호비교를 통한 최적의 방법을 통하여 이루어질 수 있다. 이러한 연구들은 지금

까지 다양하게 이루어졌으며 현재까지 많이 진전되어 있지만 지중응력을 구하는 정해에 도달하지는 못하고 있으므로 지표면 재하에 의한 지중응력의 분포를 정확히 파악하는 것은 어려운 문제이다. 그래서 대부분의 지반기술자들은 지중응력을 구하기 위해 Boussinesq의 이론을 선호하고 있다 (Das, 2002).

국내의 연구동향을 살펴보면 Chon et al. (2000)은 사질토 지반에 원형등분포 하중이 작용할 때 지중의 응력분포가 Fröhlich의 이론과 유사하다고 제안하였으며 Lim (2004)은 지표면 재하에 의한 사질토 지반의 지중연직응력 증가량에 대한 Boussinesq의 이론을 고찰하기 위해 실내시험을 수행하여 Boussinesq의 이론값과 실측값을 비교하여 지표면에 대상하중이 작용하는 경우, 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. Park et al. (2005)은 사질토 지반에 이동하중이 재하되는 경우, 깊이별 지중응력의 변화는 Westergaard 이론과 가장 유사하게 나타났으며 재하하중의 증가에 따른 지중응력의 증가는 거의 직선적으로 증가하고 깊이 15 cm까지는 이론식보다

* 경북대학교 농업토목공학과 강의교수
** 경북대학교 농업토목공학과 교수
*** 경북대학교 농업토목공학과 명예교수
† Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5730
Fax: +82-53-950-6752
E-mail address: petrus913@knu.ac.kr

2009년 11월 2일 투고
2009년 11월 19일 심사완료
2009년 11월 23일 게재확정

실측치가 크게 나타나는 경향이 있다고 제안하였다. Lee et al. (2005)은 연약점토층위 이층지반의 지표면에 등분포재하중이 작용할 때 지반의 특성에 따라 발생하는 지중연직응력의 변화를 측정하여 근접한 이론값과 비교분석 하여 성층조건에 따라 지중응력 분포가 달라지며 상부층의 강도가 하부층에 비해 클수록 하부층으로 전달되는 지중응력은 더 작아지고, 지반 상하층의 강도차가 클수록 지중응력은 감소하는 경향이 있으며 원형하중에 비해 피하중의 감소비율이 작아진다고 제시하였다.

하지만 근래에 들어 인구의 증가와 사용부지의 제약으로 인해 구조물의 대형화, 중량화로 인해 지반에 미치는 상부하중이 증가하고 있으며, 기존 구조물을 제거한 후 새로운 구조물의 건설 등으로 인해 하중의 증가, 제거 및 재하중의 작용 등으로 지반에 작용하는 하중이 일정하지 않으므로 기존의 방법으로 지중응력의 특성을 구하여 설계를 하면 과대 또는 과소 설계가 될 우려가 있으므로 상부하중의 변화로 인한 지반 내의 지중응력의 특성을 보다 정확하게 이해할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 사질토 지반의 지표면에 작용하는 하중의 변화에 의한 지반 내 연직응력의 특성을 구하기 위해 재하하중의 특성을 변화시켜 지반 내의 연직응력특성을 구명하고, 사질토 지반의 지중응력과 기존의 이론결과들을 비교·분석하여 실무에서 적용 가능한 지중응력특성을 구하여 안전하고 경제적인 기초구조물의 설계에 적용할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 모래

본 연구의 실험에 사용한 모래는 경상남도 창원군 부곡면 낙

Table 1 Physical properties of sand

Properties	G_s	γ_{dmax} (tf/m ³)	w_{opt} (%)	E (tf/m ²)	C_u	C_g	ϕ (°)
Values	2.68	1.525	16.7	4,300	2.9	1.2	30

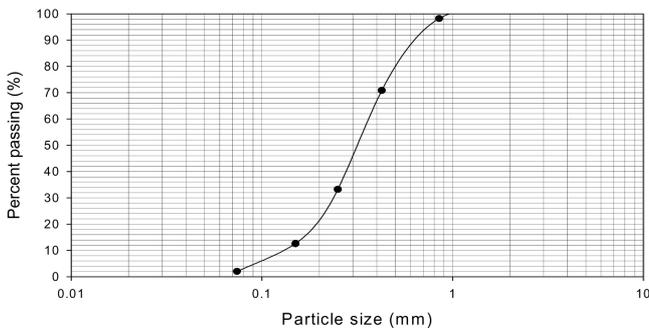


Fig. 1 Particle size distribution curve of sand

동강 유역에서 채취한 것으로 비중은 2.68, 균등계수는 2.9, 곡률계수는 1.2로 통일분류법에 따라 SP로 분류되었다. 모래의 물리적 특성은 Table 1과 같고 입도분포곡선은 Fig. 1, 다짐곡선은 Fig. 2와 같다.

2 재하장치와 계측장치

본 연구에 사용한 토조는 인폭치수를 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. 재하장치 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 인디게이터에서 확인하였다. 유압실린더와 재하장치의 개략도는 Fig. 3과 같다.

지중응력을 측정하기 위해 국내의 A사에서 생산하는 진동현

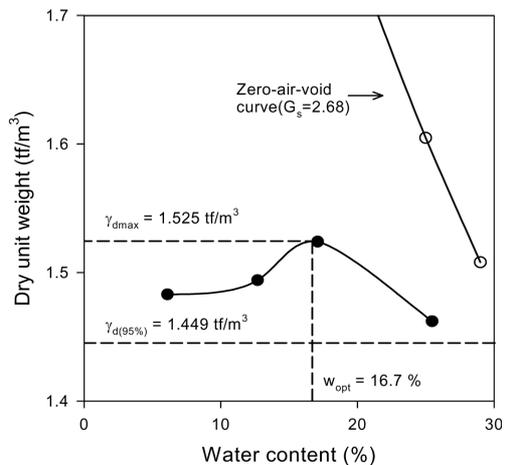


Fig. 2 Compaction curve of sand

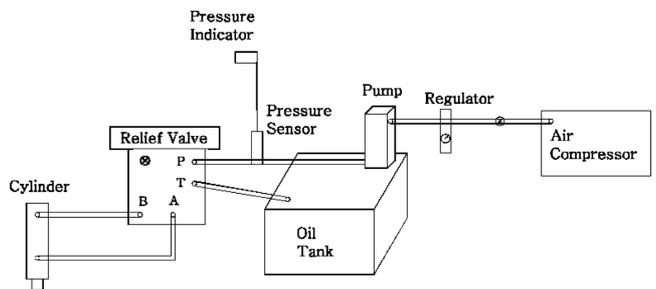


Fig. 3 Schematic diagram of load equipments

Table 2 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

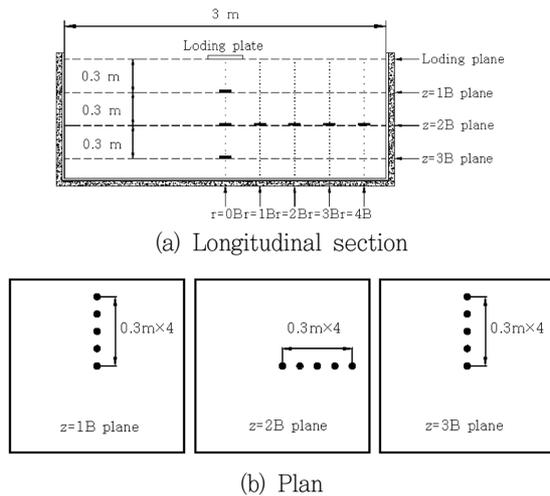


Fig. 4 Location of pressure cells

식 토압계를 사용하였다. 진동현식 토압계는 내부에 스트레인 게이지를 내장한 형태로 직경이 114 mm이고 최대 측정범위가 200 tf/m²으로 토압계의 제원은 Table 2와 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) 등의 총 15곳에서 깊이별, 거리별 연직응력의 변화를 측정하였으며 토압계의 설치위치와 각 측정점의 명칭은 Fig. 4와 같다.

3. 하중재하방법

지표면에 등분포하중 재하 시, 하중조건에 따른 사질토 지반의 지중응력특성을 구명하기 위해 토조 내의 모래를 상대다짐도 95 %로 다짐을 하여 3가지 재하하중을 각각 재하 하였다.

가. 점증하중 재하방법

점증하중 재하는 KSF 2444 방법에 의해 0 tf/m²부터 80 tf/m²까지 10 tf/m²씩 증가하여 재하 하였으며 각 하중단계에

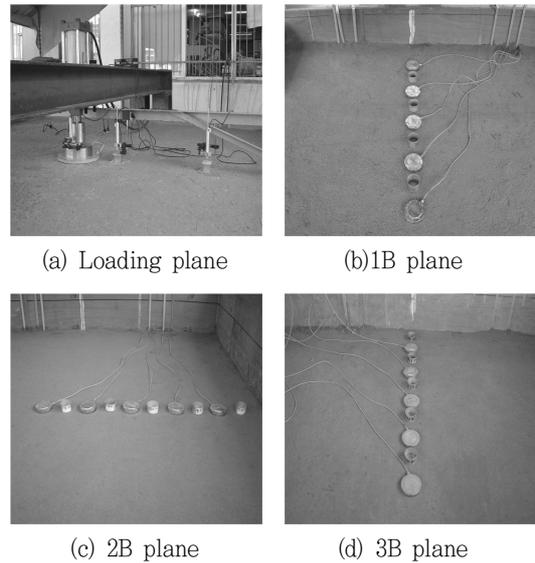


Photo 1 Location of pressure cells and loading plane to measure vertical stress with sand foundation

서 침하량이 0.01 mm/min 이하가 될 때를 침하가 정지된 것으로 보고 각 하중단계에서의 지중응력과 재하면의 침하량을 측정하고 다음 단계의 하중을 재하하였다.

나. 반복하중 재하방법

크기가 다른 하중이 반복적으로 작용하는 경우의 사질토 지반의 지중응력특성을 구명하기 위해 토조 내의 모래를 상대다짐도 95 %로 다짐을 하여 10 tf/m² 재하, 하중제거, 20 tf/m² 재하, 하중제거, …… , 70 tf/m² 재하, 하중제거, 80 tf/m² 재하의 순서로 10 tf/m² 단위로 재하와 하중제거를 반복하였으며 각 하중단계에서 지중응력과 재하면의 침하량을 측정하였다.

다. 점증하중 재재하방법

선행 하중이 제거 된 후, 새로운 하중이 재하되는 경우의 사질토 지반의 지중응력특성을 구명하기 위해 토조 내의 모래를 상대다짐도 95 %로 다짐을 하여 0 tf/m²부터 80 tf/m²까지 재하한 후, 하중을 제거시킨 다음 0 tf/m²부터 110 tf/m²까지 10 tf/m²단위로 재재하 하였으며 각 하중단계에서의 지중응력과 재하면의 침하량을 측정하였다.

연직응력을 측정하기 위한 각 층의 토압계 위치와 재하면은 Photo 1과 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 점증하중재하에 따른 연직응력특성

하중증가에 따른 각 지점의 연직응력증가분($\Delta\sigma_z$)은 Table

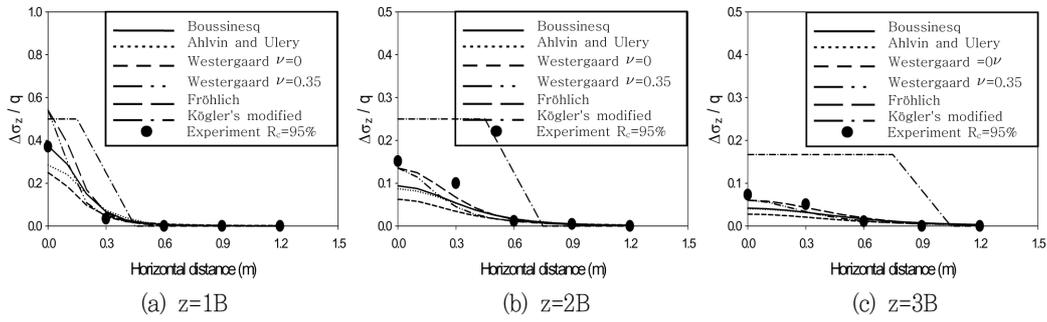


Fig. 5 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 30 tf/m²

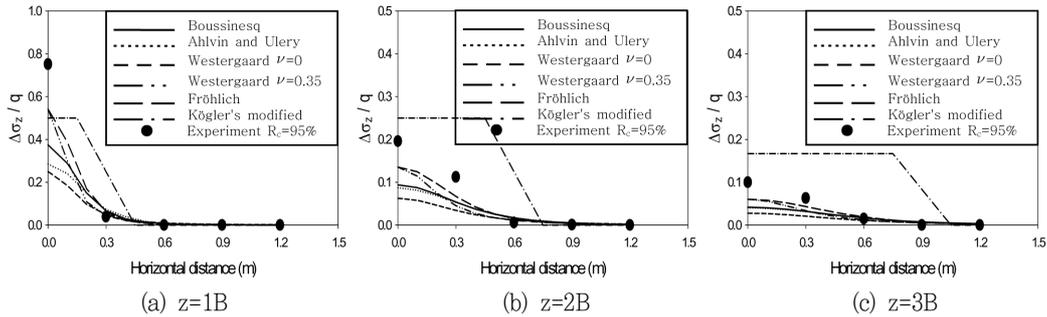


Fig. 6 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 60 tf/m²

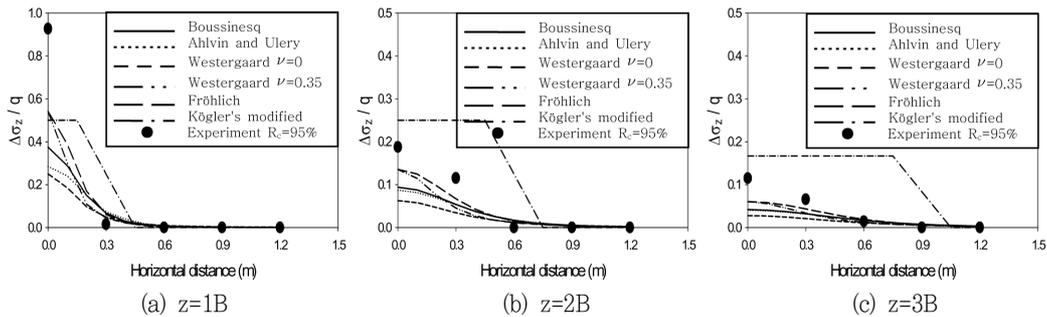


Fig. 7 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 80 tf/m²

3과 같다.

대부분의 위치에서 재하하중이 증가함에 따라 지중의 연직응력증가분은 증가하였으며 r=3B와 r=4B지점에서는 연직응력증가분이 거의 나타나지 않았다. 하중이 증가함에 따라 재하축 연직하의 위치인 r=0B의 연직응력증가분이 각 면에서 가장 크게 나타났으며 항복하중 60 tf/m² 이후에서 급격히 증가하였다.

z=1B면 r=1B지점과 z=2B면 r=2B지점의 경우 하중이 증가함에 따라 재하축 부근에서의 응력집중과 지반의 균열로 인해 항복하중 이상의 하중에서 연직응력증가분이 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 5, 6 및 7은 재하하중 30 tf/m², 60 tf/m², 80 tf/m²에

서 측정된 $\Delta\sigma_z$ 와 지중응력에 대한 이론들로부터 구한 $\Delta\sigma_z$ 를 재하하중에 대한 비로 나타낸 것이다.

항복하중 전 30 tf/m²일 때 z=1B면에서는 Boussinesq의 결과와 측정된 $\Delta\sigma_z$ 가 비슷하게 나타났다. z=2B면, z=3B면에서는 실험에서 측정된 $\Delta\sigma_z$ 와 Fröhlich의 결과가 비슷한 크기로 나타났다. Kögler의 수정식에 의한 결과는 다른 이론식들에 의한 결과와도 상당한 차이를 나타내며 r=1B까지는 Kögler의 수정식을 제외한 이론식들로 구한 $\Delta\sigma_z$ 가 작게 나타나서 설계 시 실제 지반의 $\Delta\sigma_z$ 가 과소평가되어 불안정한 설계로 나타날 수 있다.

Fig. 6과 7에서와 같이 재하하중이 증가함에 따라 실험값과 이론값의 차이는 증가하였으며 재하축 부근에서 두 값의 차이

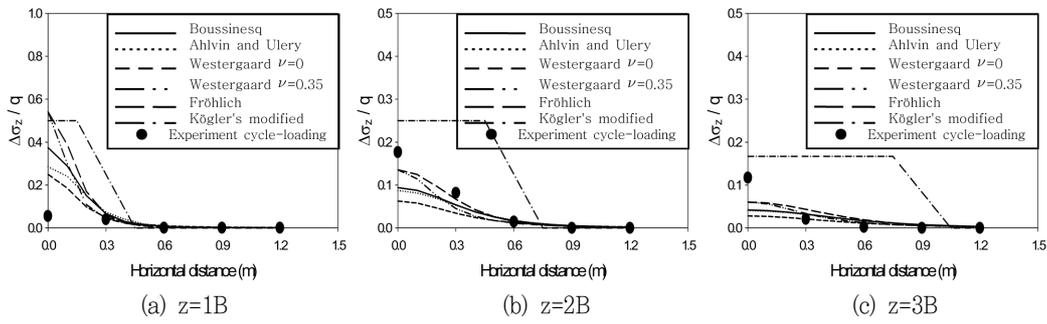


Fig. 8 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 30 tf/m² of cycle-loading

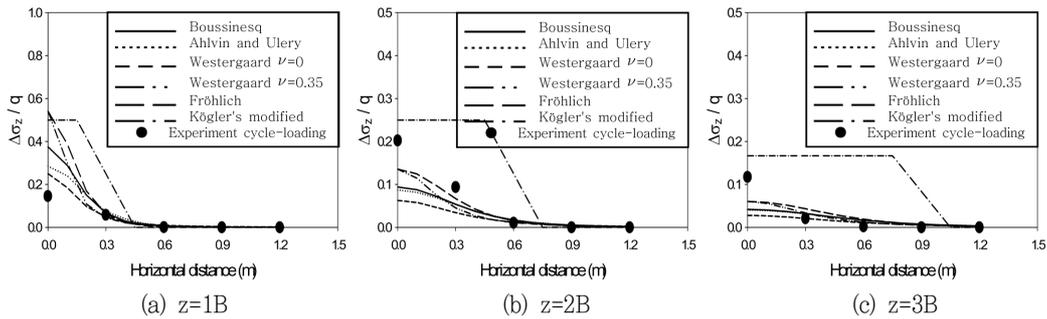


Fig. 9 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 60 tf/m² of cycle-loading

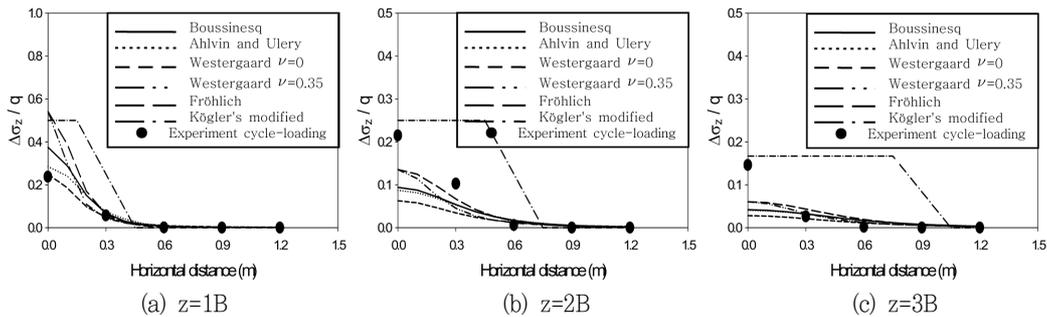


Fig. 10 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 80 tf/m² of cycle-loading

가 크고 r=2B이상에서는 두 값은 비슷한 크기를 나타낸다.

Lim (2004)의 연구결과에서와 같이 본 연구 결과 재하축 부근에서 깊이가 깊어질수록 실험값과 이론값의 차이가 작게 나타나는 경향이 있다.

2. 반복하중재하에 따른 연직응력특성

지표면에 작용하는 하중의 특성에 대한 지중의 연직응력변화를 구명하기 위해 재하-제하-재제하를 반복하여 하중을 10 tf/m² 씩 증가시키면서 지중의 연직응력변화를 측정하였다. 반복하중 재하의 하중증가에 따른 각 지점의 연직응력증가분은 Table 4와 같다.

Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10은 반복하중 30 tf/m², 60 tf/m², 80 tf/m²에서 실험에서 측정된 $\Delta\sigma_z$ 와 이론들식으로 구한 $\Delta\sigma_z$ 를 재하하중에 대한 비로 나타낸 것이다.

반복하중 30 tf/m² 재하 시, z=1B면에서 응력집중현상은 거의 나타나지 않았으며 r=0B와 r=1B의 연직응력증가비($\Delta\sigma_z/q$)는 비슷하고 모든 이론식의 결과보다 작게 나타났다. z=2B면에서 $\Delta\sigma_z/q$ 는 Fröhlich의 결과와 비슷하고 z=3B면 r=0B에서는 Kögler의 결과를 제외한 이론식의 결과보다 크게 나타났다.

반복하중이 증가함에 따라 z=1B면 r=0B지점에 응력집중이 증가하며 재하하중 80 tf/m²에서 z=1B면의 $\Delta\sigma_z/q$ 는 Fröhlich의 결과와 유사한 경향을 나타내고 z=2B, z=3B면의 r=0B지

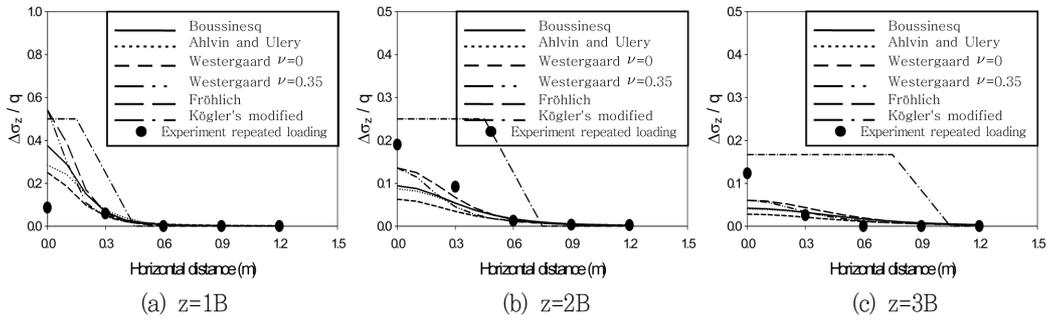


Fig. 11 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 30 tf/m² of repeated loading

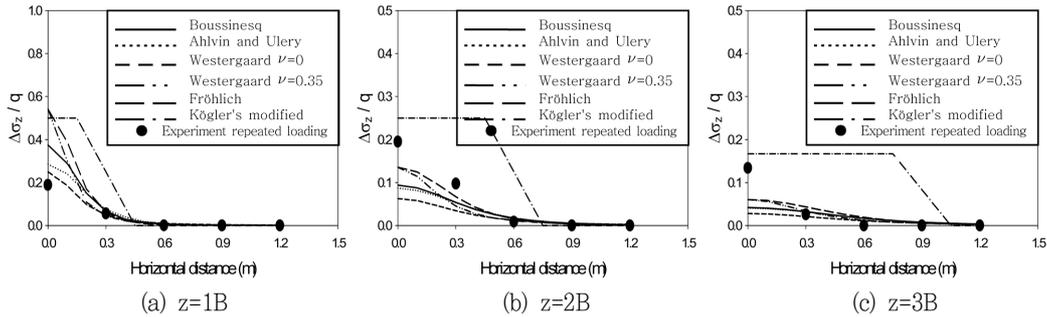


Fig. 12 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 60 tf/m² of repeated loading

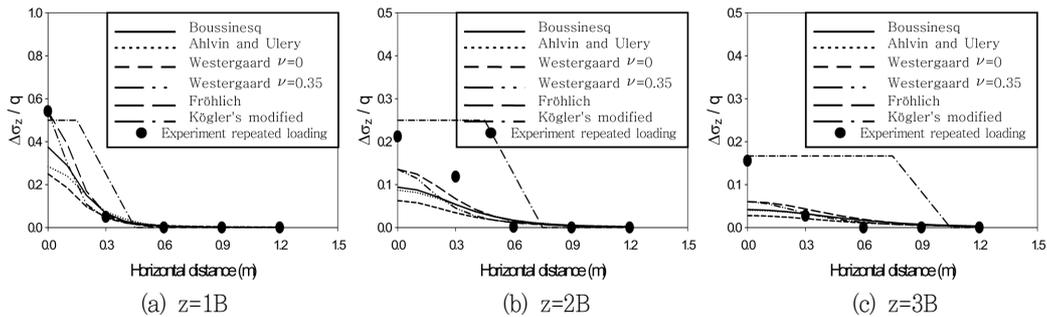


Fig. 13 Ratio of stress increments by theoretical and experimental methods for sand under 110 tf/m² of repeated loading

점은 Kögler의 결과를 제외한 이론식의 결과보다 크게 나타나고 거리가 멀어질수록 비슷한 경향을 나타내었다.

반복하중 재하 시, z=2B면과 z=3B면은 크기의 차이는 있지만 이론식들의 결과와 유사한 경향을 보이지만 하중이 증가함에 따라 z=1B면은 다른 형태를 보인다. 이는 이론식들은 하중 조건은 고려하지 않고 하중의 크기만 고려하여 연직응력증가분을 구하지만 반복하중은 재하와 제하의 반복으로 인한 하중이력(hysteresis)으로 연직응력증가분의 분포형태가 이론식들과는 다르고, 재하면적의 크기가 하중이력의 범위에 영향을 미치기 때문에 반복재하에 의한 지중응력증가를 구하기 위해 탄성론에 의한 기존 이론식들을 사용하기에는 다소 문제점이 있을 것으로 판단된다.

3. 점증하중 재재하에 따른 연직응력특성

지표면 굴착 후 하중이 재하되거나 기존 구조물을 제거한 후 새로운 구조물의 시공 등으로 인해 지반에 재하되었던 하중이 제거된 후에 새로운 하중이 재재하될 경우의 지반 내 연직응력변화를 구명하기 위해 사질토지반에 80 tf/m²의 하중을 재하한 후 하중을 제거하고 다시 하중을 10 tf/m²의 크기로 증가시키면서 재하하였다.

점증 하중 재재하의 하중증가에 따른 각 지점의 연직응력증가분은 Table 5와 같다.

Fig. 11, Fig. 12 및 Fig. 13은 재하하중 30 tf/m², 60 tf/m², 110 tf/m²에서 실험에서 측정된 $\Delta\sigma_z$ 와 지중응력에 대한 이론들로부터 $\Delta\sigma_z$ 를 재하하중에 대한 비로 나타낸 것이다.

Table 3 Vertical stress increments caused by load increase

Location		Load (tf/m ²)							
		10	20	30	40	50	60	70	80
z=1B	r=0B	3.09	6.39	11.11	17.52	25.82	45.07	64.90	74.11
	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=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
z=2B	r=0B	1.34	3.07	4.54	6.27	8.79	11.76	13.70	15.00
	r=1B	0.90	2.08	3.00	4.23	5.14	6.74	7.12	9.21
	r=2B	0.12	0.26	0.35	0.40	0.40	0.35	0.12	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
z=3B	r=0B	0.73	1.56	2.19	2.97	4.28	6.00	7.72	9.19
	r=1B	0.30	0.87	1.52	2.30	3.00	3.78	4.56	5.25
	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=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table 4 Vertical stress increments caused by cycle-loading

Location		Load (tf/m ²)							
		10	20	30	40	50	60	70	80
z=1B	r=0B	1.40	1.04	1.65	3.01	5.50	8.72	13.01	19.00
	r=1B	0.62	0.22	1.20	2.26	2.87	3.48	4.10	4.55
	r=2B	0.14	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.03
	r=3B	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
	r=4B	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
z=2B	r=0B	0.91	3.25	5.30	7.42	9.74	12.13	14.59	17.19
	r=1B	0.16	1.48	2.45	3.44	4.53	5.63	6.87	8.21
	r=2B	0.01	0.29	0.43	0.55	0.63	0.63	0.58	0.46
	r=3B	0.00	0.05	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	0.44	2.13	3.52	4.91	6.43	7.99	9.76	11.66
	r=1B	0.10	0.36	0.63	0.89	1.19	1.48	1.75	2.08
	r=2B	0.00	0.03	0.07	0.13	0.16	0.16	0.16	0.13
	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

z=1B면에서 항복하중 이전까지는 응력집중이 생기지 않았으며 항복하중 90 tf/m² 이후에는 응력집중에 의해 r=0B지점의 $\Delta\sigma_z/q$ 의 크기가 증가하며 Fröhlich의 결과와 비슷하게 나타난다.

z=2B면에서는 Fröhlich의 결과와 비슷한 경향을 나타내지만 Fröhlich의 결과보다는 $\Delta\sigma_z/q$ 의 크기가 크고 하중이 증가할수록 그 차이가 다소 증가하는 경향이 있다.

Table 5 Vertical stress increments caused by repeated loading

Location		Load (tf/m ²)					
		20	40	60	80	100	110
z=1B	r=0B	1.25	4.91	11.32	19.90	36.20	59.56
	r=1B	0.77	2.26	3.35	4.41	5.14	5.45
	r=2B	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
	r=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
z=2B	r=0B	3.64	7.63	11.70	15.86	20.69	23.32
	r=1B	1.73	3.75	5.83	7.97	10.67	13.02
	r=2B	0.29	0.43	0.52	0.52	0.34	0.14
	r=3B	0.09	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
	r=4B	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
z=3B	r=0B	2.35	5.03	8.02	11.09	14.94	17.09
	r=1B	0.53	1.02	1.55	2.04	2.64	3.00
	r=2B	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
	r=4B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

z=3B면에서는 z=2B면보다 재하축중심에 응력이 집중되고 하중이 증가할수록 이론값들과의 차이가 다소 증가하는 경향이 있다.

Fig. 11에서 Fig. 13의 경우는 80 t/m²의 상재하중을 재하한 후, 하중을 제거하고, 다시 상재하중을 10 t/m²씩 증가하는 경우로 항복하중 (90 t/m²) 이상에서 응력집중으로 인해 z=1B면의 r=0지점에서 $\Delta\sigma_z/q$ 의 크기가 크게 나타나는 것으로 판단되나 차후의 연구를 통한 비교/검증이 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

지표면에 등분포하중이 재하될 때 지반특성과 재하하중의 변화에 따른 사질토 지반의 지중응력 특성을 구명하기 위해, 토조 내에서 3층으로 다짐된 사질토 지반에 원형등분포 하중을 재하시켜 지중응력 변화를 측정하였다. 실험에서 구한 실측치, 기존 이론식에서 구한 이론치들을 비교, 분석하였다.

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 않았으며, 하중이 증가할수록 실측에 의한 $\Delta\sigma_z$ 와 이론식들로 구한 $\Delta\sigma_z$ 의 차이는 증가하였으며 재하축 부근에서 두 결과의 차이가 더 크게 나타났다.

사질토 지반에 반복하중이 재하되는 경우, 재하면적의 크기는 지반의 압축과 $\Delta\sigma_z$ 의 확산범위에 영향을 미치고 하중이 증가

하고 깊이가 깊어질수록 응력확산의 영향은 작은 것으로 나타났다.

지반에 재하되었던 하중이 제거된 후에 새로운 하중이 재재하되는 경우에는 재하폭의 1배 깊이에서의 $\Delta\sigma_z$ 분포형태는 하중이력으로 인해 깊이가 깊은 곳의 분포형태와 다르게 나타나므로 구조물 설계 시 하중이력에 의한 $\Delta\sigma_z$ 의 변화를 고려하여야 한다.

반복하중과 재하중에 의한 연직응력증가분은 하중이 증가함에 따라 대부분의 위치에서 비슷한 경향을 나타낸다. 이는 각 하중단계의 재하시간이 약 30분 정도로 비교적 짧은 시간으로 반복하중과 재하중의 하중이력이 연직응력증가에 비슷한 영향을 미치는 것으로 판단되며 실제 현장상태를 고려하여 재하시간에 의한 사질토 지반의 지중응력 특성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

재하축 연직 하에서 지반의 깊이가 얇은 곳에서는 점증하중에 의한 연직응력증가분이 크게 나타나고 깊이가 깊어질수록 반복하중과 재하중에 의한 연직응력증가분이 크게 나타난다. 하중의 재하형태와 기초지반의 깊이에 따라 연직응력증가분의 크기가 다르게 나타나므로 구조물 설계 시 재하형태와 기초지반의 특성을 반드시 고려해야 할 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. 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).
3. 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).
4. Park, H. G. and Kim, D. Y., 2005, The interpretation on underground stress of soil layer subjected to moving repeated loads. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 21(3): 55-63 (in Korean).
5. 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.
6. Boussinesq, J., 1883. Application des potentiels à L'Etude de L'Equilibre et du mouvement des Solides Elastiques, *Gauthier-Villars*, Paris.
7. Das, B. M., 2002. *Principles of Geotechnical Engineering*, 5th ed, Brooks/Cole: 224-258.
8. Fröhlich, O. K, 1934. *Druckverteilung in baugrunde*, Springer-Verlag OHG.
9. Kögler, F. and Scheidig, A., 1927. *Druckver Teiling im Baugrunde*, Bautechnik.
10. 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.