

## 이동하중에 의한 지중응력 해석

### The Interpretation on Underground Stress of Soil Layer Subjected to Moving Repeated Loads

박 흥 규<sup>1</sup> Park, Heung-Gyu

김 대 영<sup>2</sup> Kim, Dae-Young

#### Abstract

In this research, we have compared and analyzed the value driven from theoretical equation of Boussinesque, Westergaard, Newmark and Kögler with our experimental value from the model test on the underground stress distribution condition. As a result of conducting the Model Test, a change in the underground stress according to the loading was proven to be very similar to the tendency shown in the theories of Westergaard. A tendency of increasing in a straight line was shown in the underground stress according to the increase of loading. When compared to that of the theoretical equation, underground stress values were great until the depth of 15 cm. However, after that depth, a tendency of showing smaller value than that of the theoretical equation was shown. Correlations between Moving Repeated Load ( $\sigma_r$ ) and Underground Stress ( $\Delta\sigma$ ) show  $\Delta\sigma = 0.009 \cdot \sigma_r - 0.1$ (depth 60 cm).

#### 요 지

본 연구는 모형실험을 통하여 지중응력 분포상태를 기존의 Boussinesque, Westergaard, Kögler, Newmark의 이론식 값과 Model Test에 의한 실험값을 비교 검토하였다. 본 모형실험 결과 깊이별 재하하중에 의한 지중응력의 변화는 Westergaard이론과 가장 유사하게 나타났으며, 재하하중의 증가에 따라 지중응력은 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보였고, 이론식과 비교하면 깊이 15cm 까지는 크게 나타났으나 그 이하의 깊이에서는 이론식 보다 작아지는 경향이 나타났다. 재하하중( $\sigma_r$ )과 지중응력( $\Delta\sigma$ )의 상관관계식은  $\Delta\sigma = 0.009 \cdot \sigma_r - 0.1$ (깊이 60cm)로 나타났다.

**Keywords :** Loading, Model test, Theoretical equation, Underground stress

#### 1. 서 론

이동하중에 의해 지표면과 지반중에 작용하는 지중 응력의 분포상태를 파악하여 기초지반의 침하와 안정성을 해석하고, 도로노면이 받는 하중과 지하 구조물이 받는 응력분포를 해석하여 구조물 설계에 고려해야 한다. 그러나 하중의 이동이 동일하거나 지반의 형태가 균질하고 등방성인 완전한 탄·소성체가 아니므로 지반

의 형태를 변화시키는 원인이 많기 때문에 지반에 작용하는 응력분포의 정확한 해석은 매우 어려운 상황이다. 일반적으로 지반의 응력분포를 이용하여 침하량을 산정하거나 구조물 깊이에 따른 응력의 작용범위를 해석하는데 큰 의미가 있으며, 많은 연구자들의 경험 및 실험결과 범위가 작은 지반에 작용하는 응력은 반무한 탄성체로 해석하여도 큰 차이가 없음을 연구결과로 나타냈다. 지표면 및 구조물 깊이에 작용하는 응력은 확

1 정회원, 관동대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Kwandong Univ., parkhg@kwandong.ac.kr)

2 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원 (Member, Hyundai Institute of Construction Technology Senior Researcher)

를이론에 의한 방법과 탄성론에 의한 방법이 있으며, 지표면의 상재하중이 작용하는 경우 지중에 발생하는 응력을 계산하는 이론은 탄성론이 널리 사용되고 있다. 이를 이용하여 Boussinesque(1983)는 1921년 지반의 수평면을 경계면으로 하는 균질하고 등방이며, 자중이 없는 반무한 탄성체 지반 표면에 상재하중이 가해졌을 때 지중의 한 요소부분에 발생하는 응력해석을 발표하였고, Westergaard(1938)는 Boussinesque식에 의한 지반내 수직응력은 탄성계수 및 포아송비와는 관계가 없으며 단지 하중의 크기와 위치에 따라서 달라지고, 지반이 모래층이나 실트층, 점토층의 경우 지표면에 재하된 하중이 지중으로의 분산을 고려한 독자적 이론식을 발표하였으며, 침하량 계산에 주로 사용되고 있다. Kögler와 Scheidig(1927)는 등분포대상하중에 의한 수직 지중응력에 대한 근사해로서 응력이 하중단에서 일정한 분포각을 갖고 지중수평면상에 등분포하는 것으로 가정한 이론식을 제안하였다. Newmark(1942)는 Boussinesque의 식으로 등분포 직사각형하중이 작용할 때 하중 우각부 연직선상의 응력과 영향치에 대한 식을 제안하였다. Fadum(1948), Janbu 등(1956), Burmister(1956), Harr(1966) 등이 지반내 응력 해석에 관한 연구가 발표되었다.

본 연구에서는 이러한 이론식들을 해석하는 방법으로 다양한 문헌과 자료를 수집하여 기존 연구결과를 분석해석하여 모형실험에 필요한 재하장치를 제작하였고, 모형지반에 작용하는 응력을 측정하기 위해 토압계를 설치하였다. 이를 이용하여 이동반복하중에 따른 지중응력의 변화를 측정하여 이론식에 의한 값과 비교하였으며, 깊이에 따른 응력분포와 하중의 증가에 따른 응력범위를 규명하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 시료토

시료토는 강원도 양양군 남대천에서 채취한 모래로서 No.4체에 통과한 것을 사용하였으며 최대( $r_{dmax}$ ) 및 최소건조단위중량( $r_{dmin}$ )은 DIN 18126에 의거하여 행하

표 1. 시료토의 공학적 특성

시험항목	$G_s$	$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	$C_u$	$C_g$	$r_{dmin}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$r_{dmax}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$D_r$ (%)	USCS
물성값	2.65	0.23	0.57	1.22	5.3	1.1	15.47	17.47	63.0	SP

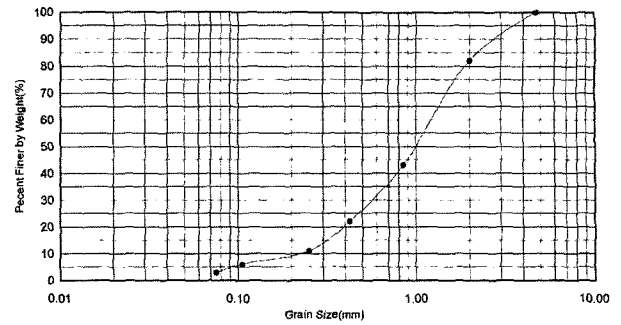


그림 1. 시료토의 입도분포곡선

였다(이상덕 1997). 시료토의 공학적 성질은 표 1과 같으며 입도분포곡선은 그림 1과 같다.

### 2.2 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 모형실험 장치의 구성은 3단의 이동식 토조, 토압계 및 데이터 수집장치, 롤러로 구성되어 있다(그림 2). 토조는 길이 120cm, 폭 30.5cm, 높이 90cm(1단:30cm)크기의 강철제로서 제작하였다. 토압계(일본 Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd)는 정격용량이 196kpa(PCG-2KS)이고 크기는  $\phi 30\text{mm} \times 15\text{mm}$ 이며 지중응력을 측정하고, 측정치는 데이터 수집장치에 저장된다. 롤러는 다짐용 롤러(그림 3)와 전동식 롤러(그림 4)가 있으며, 각 크기는 30cm  $\times$  50cm이다. 다짐용 롤러는 토조에 시료토를 다질 때 사용하며 전동식 롤러는 재하하중을 가하여 이동시킬 수 있도록 제작하였고 반



그림 2. Model Test의 모형

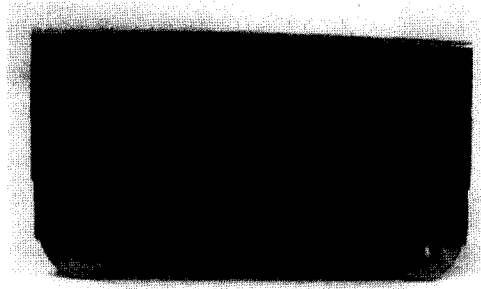


그림 3. 다짐용 롤러

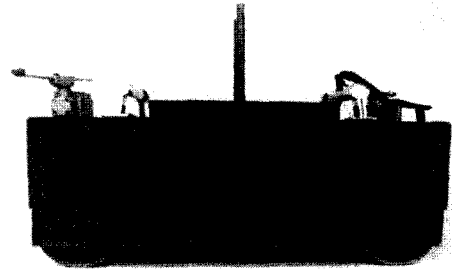


그림 4. 전동식 롤러

복작용의 속도를 변화시킬 수 있도록 속도조절장치와 반복재하횟수를 설정하는 컨트롤박스가 있다.

본 실험은 토조에 시료토를 다짐용 롤러(중량 24.5kg)로 15cm의 높이로서 다짐을 하면서 지반의 상대밀도가 63.0%되도록 하였고 토압계의 설치위치는 깊이 15cm, 30cm, 45cm, 60cm, 75cm, 90cm에 중앙점과 좌우 30cm 지점에 총 18개의 토압계를 설치하였다. 시험시 토압계의 검정은 토압계의 정상적인 작동상태 여부를 검정하기 위해 캘리브레이터(일본 Yokogawa CA-11)를 이용하여 각각의 토압계에 나타난 수치와 게이지의 값을 비교하여 토압계가 정상적으로 작동되는지의 여부를 확인하였고 다른 경우 토압계의 교정계수를 수정하는 방법으로 토압계를 검정하여 사용하였으며 실험은 여러 번 수행하여 측정값의 정확성을 기하였다.

재하하중을 가하는 자동롤러는 접지면적이 162cm<sup>2</sup> (2.7cm × 30cm × 2)이고, 속도 4cm/sec가 되도록 하였으며, 재하하중은 자동롤러(중량40kg)에 10kg, 20kg, 30kg, 40kg, 50kg의 하중으로 증가시켰다. 또한 동일한 속도로 반복재하횟수를 10회, 20회, 30회씩 증가시켰을 때 15cm, 30cm, 45cm, 60cm, 75cm, 90cm에 작용하는 연직방향의 지중응력을 측정하였다. 측정된 값은 자동데이

터 수집장치를 통해 컴퓨터로 전송되어 해석하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 각 이론식의 지중응력 분포

모래지반에 대한 재하하중에 따른 깊이별 지중응력은 표 2의 Boussinesque, Westergaard, Kögler, Newmark의 이론식을 적용하였으며 시료토의 포아송비는 모래의 일반적인 값 0.3을 사용하였다.

그림 5~8은 각 이론식에 재하하중 50, 60, 70, 80, 90kg이 작용하였을 경우 깊이별 연직방향의 지중응력 분포를 나타낸 것이다.

깊이에 따른 지중응력은 모든 재하하중에 대해서 30cm까지는 급격히 감소하다가 그 이상의 깊이에서는 완만히 감소하는 경향을 보였으며 이런 경향은 모든 이론식에서 유사하게 나타났다.

표 3은 각 이론식의 깊이별 실험 재하하중(50~90kg)의 범위를 나타냈다. 재하하중 50kg이 작용하였을 경우 깊이 15cm에서의 지중응력은 Westergaard 이론식에서 구한 지중응력은 6.1kpa, Kögler식은 5.4kpa, Boussinesque식

표 2. 적용 이론식

제안자	이론식	이론식	영향계수
Boussinesque	$\Delta P_z = \frac{P}{Z^2} \cdot I_B$		$I_B = \frac{3}{2\pi} \cdot 1 / \left[ \left( \frac{r}{z} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{5}{2}}$
Westergaard	$\Delta P_z = \frac{P}{Z^2} \cdot I_B$		$I_B = \frac{1}{2\pi \cdot \eta^2} \cdot \left[ \left( \frac{r}{\eta z} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{-3}{2}}$
Kögler	$\sigma_z = \frac{q \cdot B}{2Z}$		
Newmark	$\sigma_z = q \cdot (IV) \cdot (n)$		IV는 도표의 영향치

여기서,  $\Delta P_z$  : 지중응력의 증가량(kpa),  $P$  : 집중하중(kg),  $Z$  : 깊이(cm),  $q$  : 등분포하중(kpa),  $B$  : 등분포 하중이 가해지는 기초의 폭(cm),

$n$  : 재하면적 내의 영향원 블록수,  $r$  : 집중하중의 작용점과 지반내 임의점의 수평거리(cm),  $\eta = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2-2\mu}}$ ,  $\mu$  : 시료의 포아송비

표 3. 깊이별 지중응력의 분포

(단위: kpa)

제안자	깊이	15cm	30cm	45cm	60cm	75cm	90cm
Boussinesque		5.2~9.4	1.4~2.5	0.7~1.3	0.4~0.8	0.3~0.6	0.2~0.4
Westergaard		6.1~11.1	1.6~2.9	0.8~1.4	0.5~0.9	0.3~0.6	0.2~0.4
Kögler		5.4~9.8	2.7~4.9	1.8~3.3	1.4~2.5	1.1~2.0	0.9~1.6
Newmark		0.6~1.1	0.3~0.5	0.2~0.4	0.2~0.3	0.2~0.3	0.1~0.2

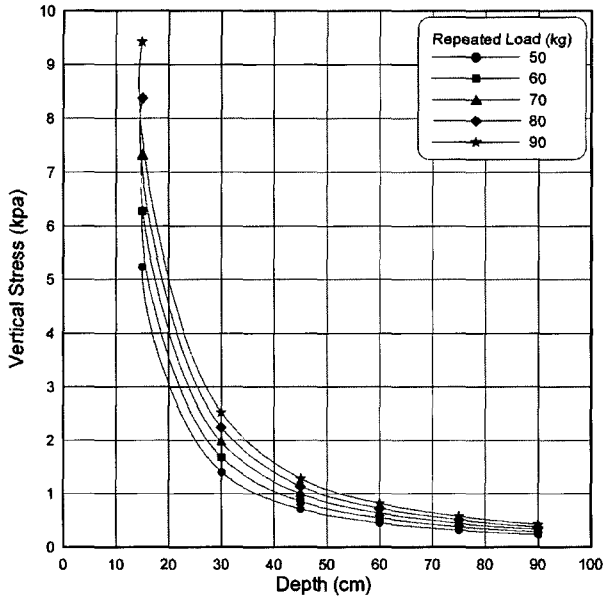


그림 5. Boussinesque의 깊이별 지중응력 분포

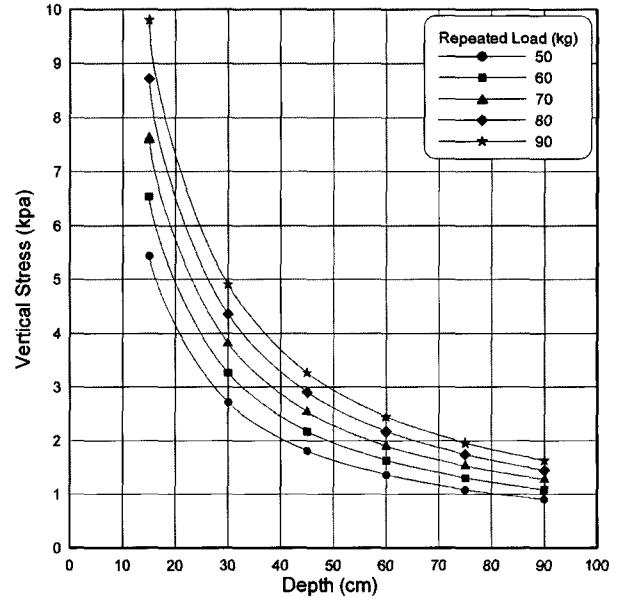


그림 7. Kögler의 깊이별 지중응력 분포

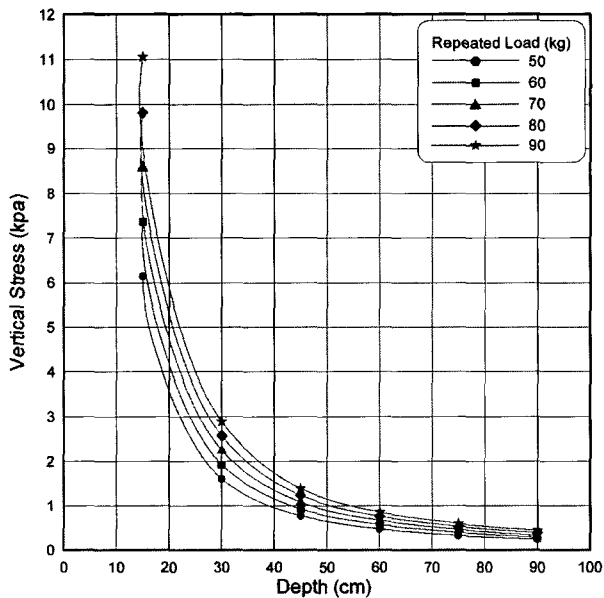


그림 6. Westergaard의 깊이별 지중응력 분포

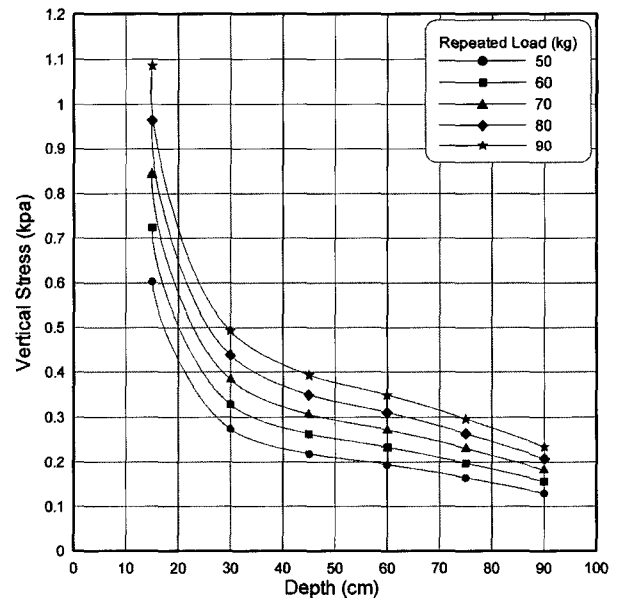


그림 8. Newmark의 깊이별 지중응력 분포

은 5.2kpa Newmark식은 0.6kpa의 순으로 나타났으나, 깊이 30cm이상에서는 지중응력이 Kögler, Westergaard, Boussinesque, Newmark의 순으로 작게 나타났다.

### 3.2 Model Test에 의한 지중응력 분포

그림 9~12는 모형토조에 시료토의 상대밀도 63.0%

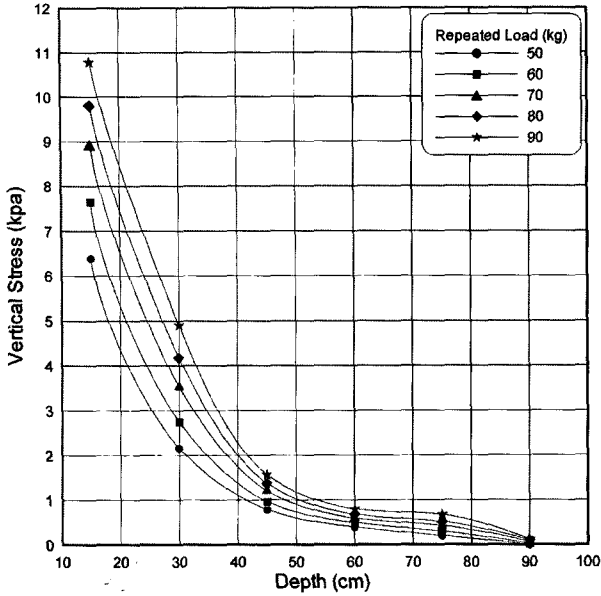


그림 9. Model Test의 깊이별 지중응력의 분포(N=1회)

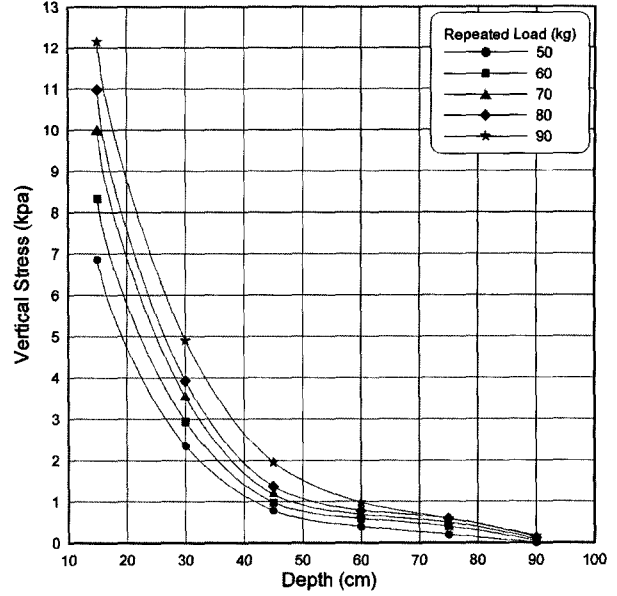


그림 11. Model Test의 깊이별 지중응력의 분포(N=20회)

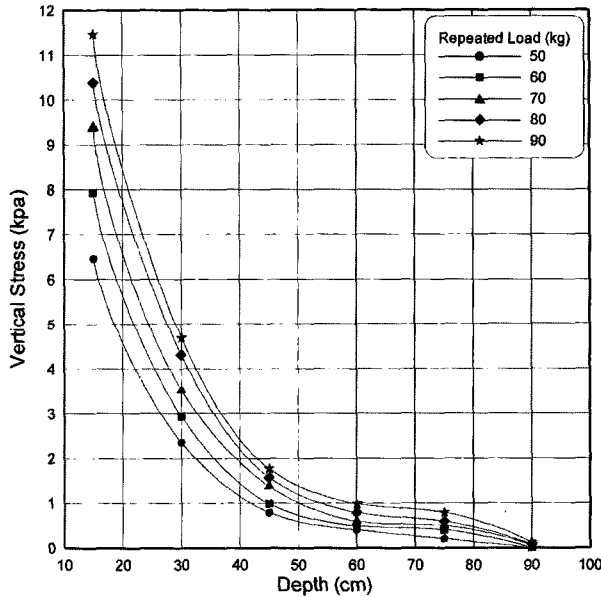


그림 10. Model Test의 깊이별 지중응력의 분포(N=10회)

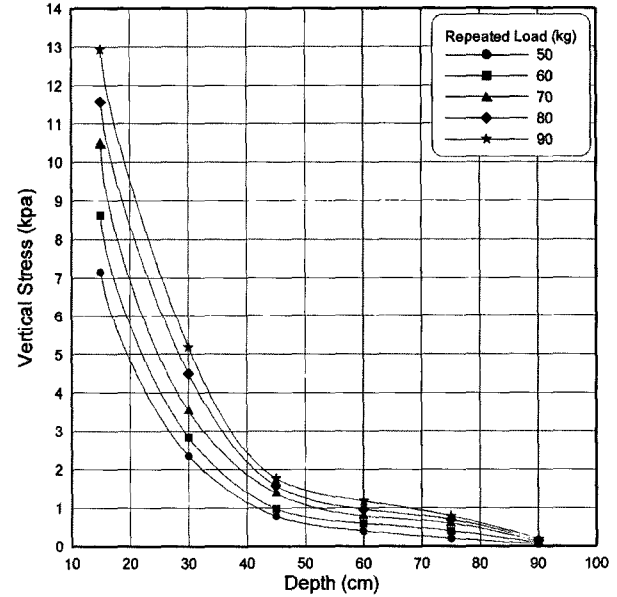


그림 12. Model Test의 깊이별 지중응력의 분포(N=30회)

인 상태에서 50, 60, 70, 80, 90kg 재하하중으로 N=1, 10, 20, 30회 반복재하하였을 때 깊이별 연직방향의 지중응력 분포를 나타낸 것이다.

모형실험에 의한 지중응력은 재하하중 90kg을 가했을 경우 깊이 15cm에서의 지중응력은 10.8kpa로 나타났으며 이 응력은 Westergaard식으로 구한 11.1kpa, Kögler식 9.8kpa, Boussinesque식 9.4kpa순으로 비슷한 경향을 나타냈고 Newmark식은 1.1kpa으로 많은 차이가 나타났다. 깊이 90cm에서는 지중응력이 0.1kpa로 나타났으며 Kögler식 1.6kpa, Westergaard식 0.4kpa, Boussinesque식

0.4kpa, Newmark식 0.2kpa 순으로 나타났다.

모형토조에 의한 깊이에 따른 지중응력의 분포는 모든 재하하중에 대해서 45cm까지는 급격히 감소하다가 그 이하의 깊이에서는 완만히 감소하는 경향으로 나타났다. 또한 반복재하횟수가 많을수록 지중응력은 크게 나타났다.

### 3.3 반복재하횟수별 거리에 의한 지중응력 분포

그림 13~17은 토압계를 토조의 중앙(기준점)에 설

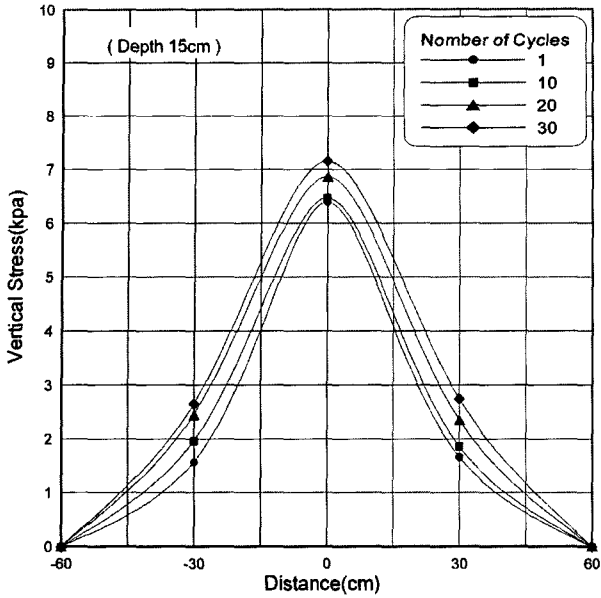


그림 13. 반복재하횟수별 거리에 의한 지중응력 분포(재하하중 50kg)

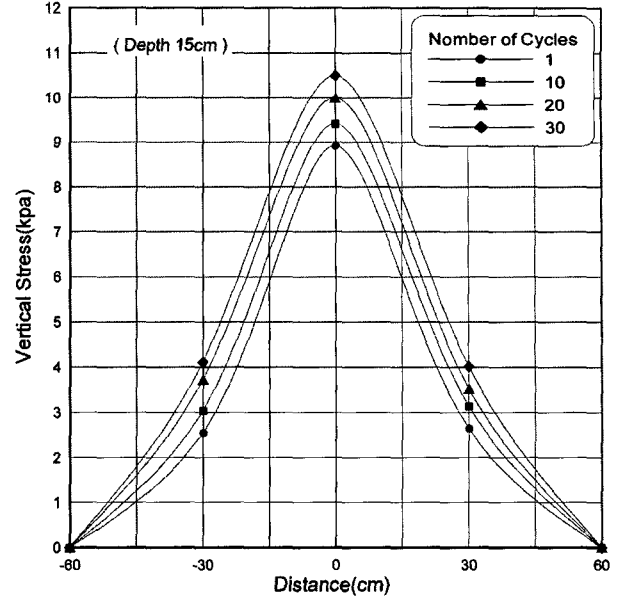


그림 15. 반복재하횟수별 거리에 의한 지중응력 분포(재하하중 70kg)

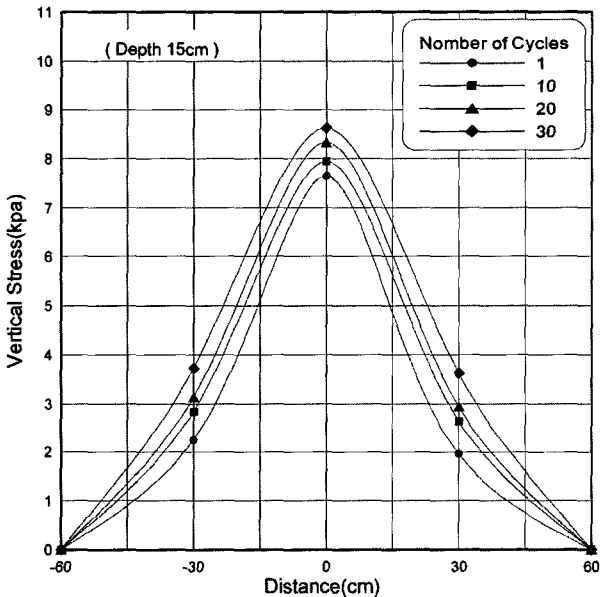


그림 14. 반복재하횟수별 거리에 의한 지중응력 분포(재하하중 60kg)

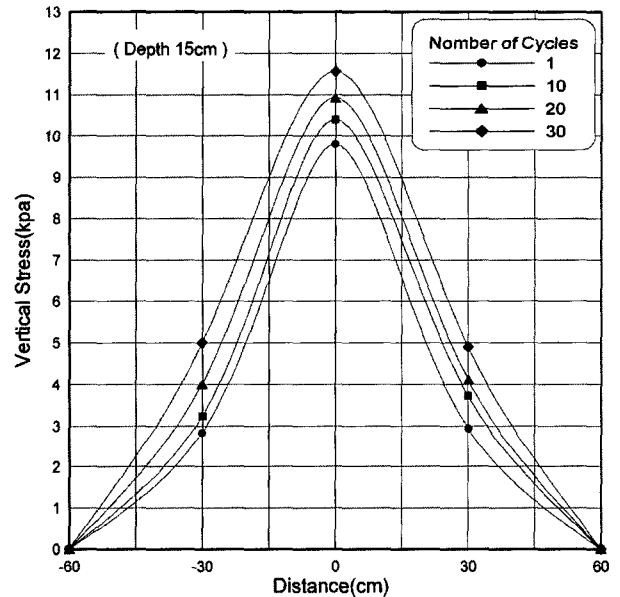


그림 16. 반복재하횟수별 거리에 의한 지중응력 분포(재하하중 80kg)

치하고 지중응력의 변화가 가장 심한 15cm 깊이에서 재하하중 50, 60, 70, 80, 90kg으로 가했을 경우 반복재하 횟수 1회, 10회, 20회, 30회에 따른 거리별 연직방향의 지중응력 분포를 나타냈다. 재하하중 90kg으로 N=30회 반복하였을 때 깊이 15cm에서 중앙점의 지중응력은 13.0kpa이고 중앙점에서 거리 30cm일 때 5.6kpa 거리 60cm일 때 0kpa으로서 기준점(중앙)을 중심으로 거리에 따라 지중응력은 감소하였고 좌우 대칭인 종모양으로 나타났다. 이런 경향은 각 재하하중에서 같은 경향을 보였다. 반복재하횟수가 많을수록 지중응력은 크게 나

타났으며, 재하하중 50kg을 가했을 경우 1회 재하시의 지중응력은 6.4kpa이고 30회 반복재하시의 지중응력은 7.2kpa로서 1.12배 증가하였고, 재하하중 60kg일때 1.14배, 70kg일때 1.17배, 80kg일때 1.18배, 90kg일때 1.20배로 증가하는 경향을 보였으며, 재하하중이 클수록 지중응력의 증가가 약간 크게 나타났다.

### 3.4 깊이별 재하하중에 의한 지중응력 검토

그림 18은 재하하중 50, 60, 70, 80, 90kg을 N=1회 재

하하였을 때 깊이 15cm, 30cm, 45cm, 60cm, 75cm, 90cm의 지중응력의 분포를 나타낸 것이다.

재하하중 90kg을 N=1회 재하하였을 때 깊이 15cm에서의 지중응력은 10.8kpa이고 깊이 30cm일 때 4.9kpa 깊이 45cm일 때 1.6kpa 깊이 60cm일 때 0.8kpa 깊이 75cm일 때 0.7kpa, 깊이 90cm일 때 0.1kpa로서 깊이가 깊을수록 지중응력은 점차 감소하였으며 깊이 45cm까지는 크게 감소하다가 그 이상에서는 점차 작게 감소하는 경향을 보였다.

동일 깊이에서의 재하하중의 증가에 따라 지중응력은

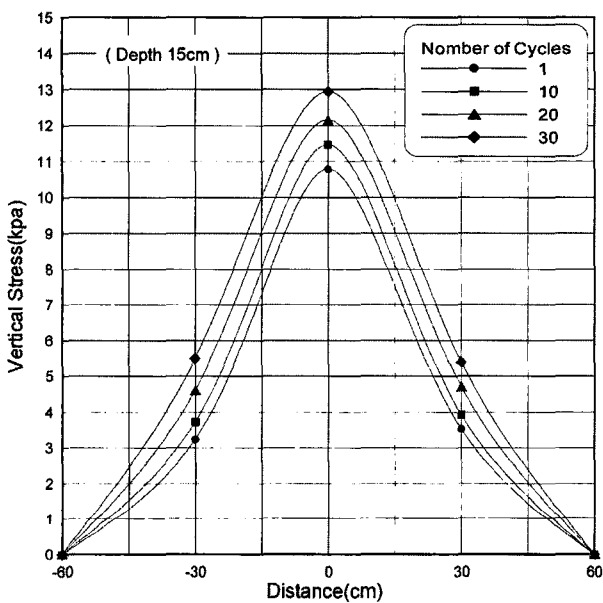


그림 17. 반복재하횟수별 거리에 의한 지중응력 분포(재하하중 90kg)

거의 직선적으로 증가하는 경향을 보였다. 깊이별 재하하중( $\sigma_r$ )과 지중응력( $\Delta\sigma$ )의 상관관계식은 표 4와 같다.

그림 19~24는 깊이별 Boussinesque, Westergaard,

표 4. 깊이별 재하하중과 지중응력의 상관관계식

깊이(cm)	관계식
15	$\Delta\sigma = 0.109 \cdot \sigma_r + 1.05$
30	$\Delta\sigma = 0.069 \cdot \sigma_r - 1.34$
45	$\Delta\sigma = 0.019 \cdot \sigma_r - 0.21$
60	$\Delta\sigma = 0.009 \cdot \sigma_r - 0.10$
75	$\Delta\sigma = 0.011 \cdot \sigma_r - 0.39$
90	$\Delta\sigma = 0.003 \cdot \sigma_r - 0.16$

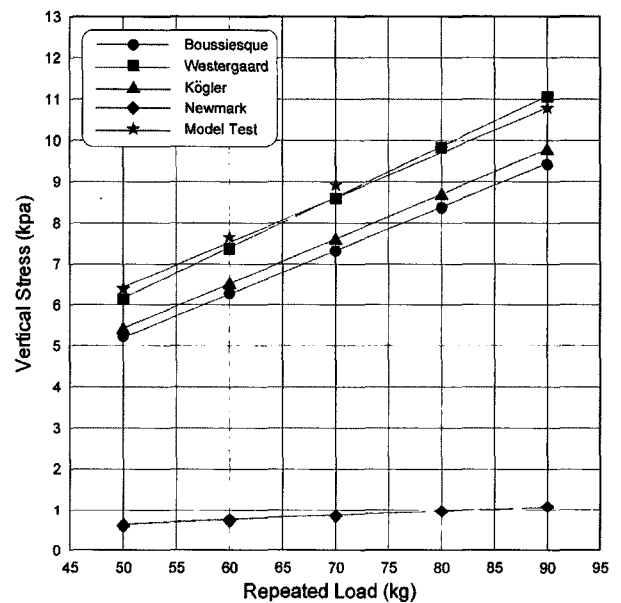


그림 19. 재하하중에 의한 지중응력 분포(깊이 15cm)

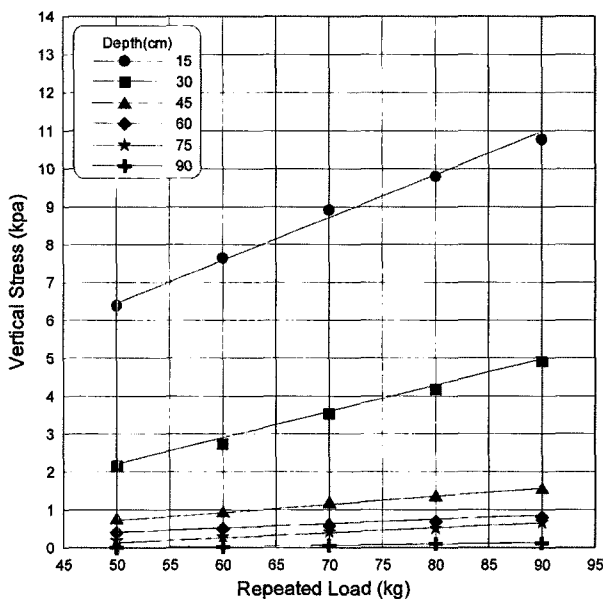


그림 18. 깊이별 재하하중에 의한 지중응력 분포(Model Test)

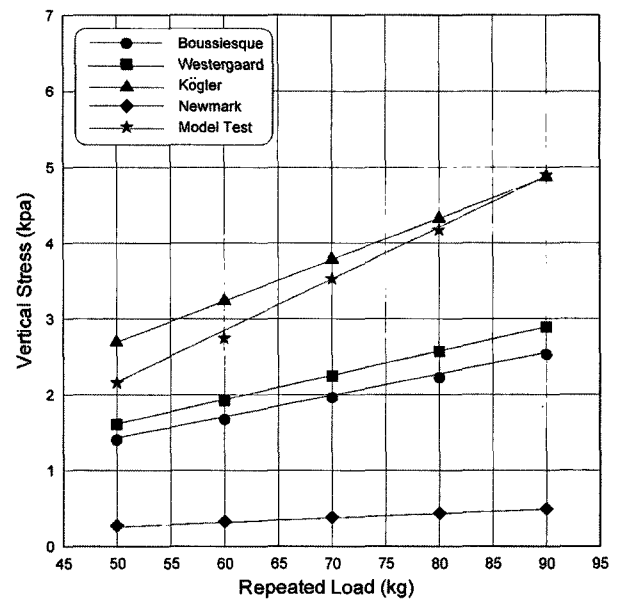


그림 20. 재하하중에 의한 지중응력 분포(깊이 30cm)

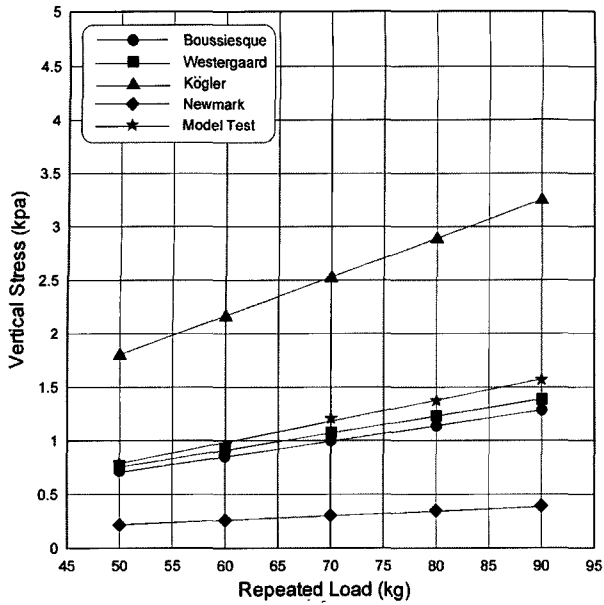


그림 21. 재하하중에 의한 지중응력 분포(깊이 45cm)

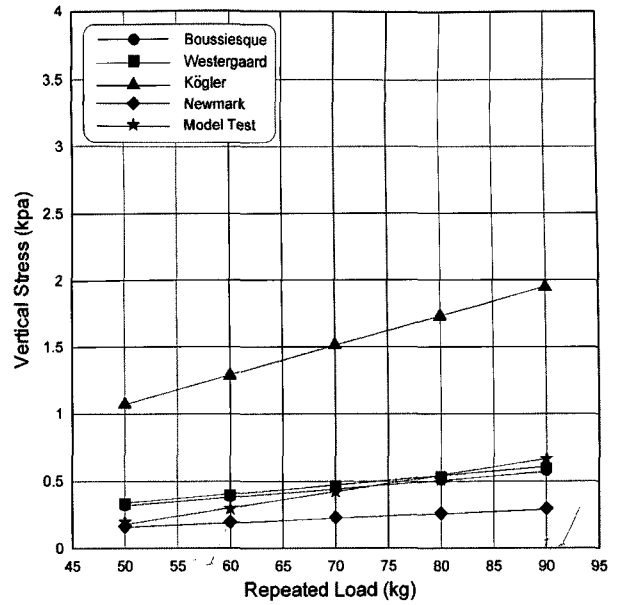


그림 23. 재하하중에 의한 지중응력 분포(깊이 75cm)

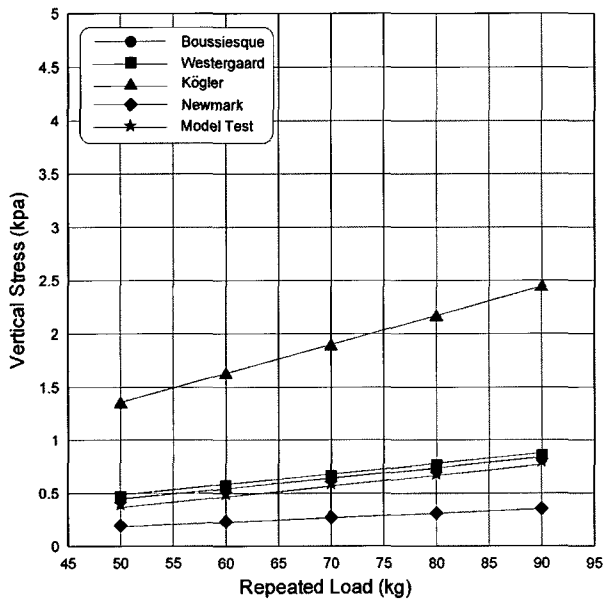


그림 22. 재하하중에 의한 지중응력 분포(깊이 60cm)

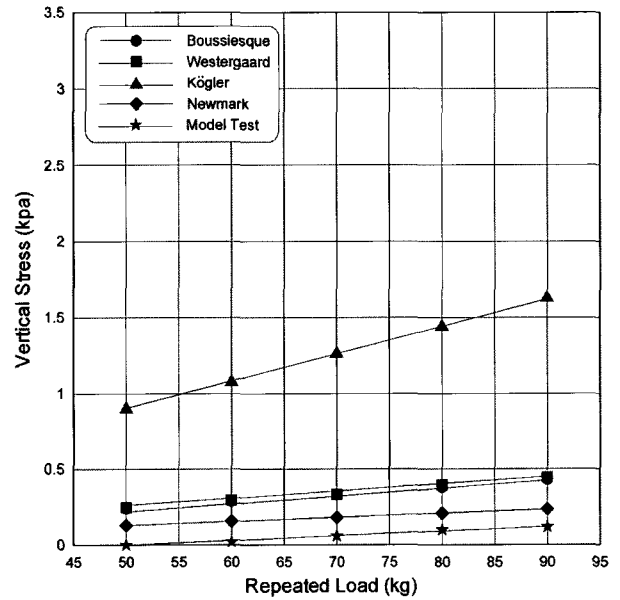


그림 24. 재하하중에 의한 지중응력 분포(깊이 90cm)

Kögler, Newmark의 이론식과 Model Test의 재하하중에 의한 연직방향의 지중응력 분포를 나타낸 것이다.

Model Test에 의한 지중응력은 이론식과 비교하면 깊이 15cm 까지는 크게 나타났으나 그 이하의 깊이에서는 이론식 보다 점차 작아지는 경향이 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구는 모형실험을 통하여 지중응력 분포상태를 기존의 Boussinesque, Westergaard, Kögler, Newmark의

이론식 값과 Model Test에 의한 실험값을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 각 이론식에 의한 깊이에 따른 지중응력은 모든 재하하중에 대해서 30cm까지는 급격히 감소하다가 그 이하의 깊이에서는 완만히 감소하는 경향을 보였고, 지중응력은 Kögler, Westergaard, Boussinesque, Newmark 순으로 작게 나타났다.
- (2) 본 모형실험 결과 깊이별 재하하중에 의한 지중응력의 변화는 Westergaard이론이 가장 유사하게 나



타났으며, 깊이가 증가할수록 지중응력은 감소하는 경향이 나타났다.

- (3) 반복재하횟수가 많을수록 지중응력은 크게 나타났으며, 재하하중 50kg을 가했을 경우 1회 재하시의 지중응력은 6.4kpa이고 30회 반복재하시의 지중응력은 7.2kpa로서 1.12배 증가하였고, 재하하중 60kg일때 1.14배, 70kg일때 1.17배, 80kg일때 1.18배, 90kg일때 1.20배로, 재하하중이 클수록 지중응력의 증가가 약간 크게 나타났다.
- (4) 재하하중의 증가에 따라 지중응력은 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보였고, 이론식과 비교하면 깊이 15cm 까지는 크게 나타났으나 그 이하에서는 이론식 보다 점차 작아지는 경향이 나타났다.
- (5) 재하하중( $\sigma_r$ )과 지중응력( $\Delta\sigma$ )의 상관관계식은  $\Delta\sigma = 0.069 \cdot \sigma_r - 1.34$ (깊이 30cm),  $\Delta\sigma = 0.009 \cdot \sigma_r - 0.10$ (깊이 60cm),  $\Delta\sigma = 0.003 \cdot \sigma_r - 0.16$ (깊이 90cm)이다.

## 참 고 문 헌

1. 이상덕 (1997), “기본토질시험”, 새론, pp.54-64.
2. Boussinesque, J. (1983), “Application des potentiels a L'Etude de L'Equilibre et du mouvement des solides Elastque”, Gauthier-Villars, Paris.
3. Burmister, D. M. (1956), “Stress and Displacement Characteristics of a Two-layer Rigid Base Soil system: Influence Diagrams and Practical Applications”, Proc. HRB 35, pp.773-814.
4. Fadum, R. E. (1948), “Influence Value for Estimating Stresses in Elastic Foundations”, Proceeding 2nd International Conference. Soil Mech. and Found. Eng., Rotterdam, Vol.3, pp.77-84.
5. Harr, M. E. (1966), “Foundations of Theoretical Soil Mechanics”, McGraw-Hill, New York, pp.55-110.
6. Janbu, N., Bjerrum, L., and Kjaernli, B. (1956), “Veilendning ved Losning av Fundamenterings Oppgaver”, NGI Publicatin, No.16, pp.93.
7. Kögler, F., and A. Scheidig (1927), “Druckver Teilung im Baugrunde”, Bautechnik, Berlin.
8. Newmark, N. M. (1942), “Influence Charts for Computation of Stresses in Elastic Soil”, Univ. Illinois Engineering Experiment. Station. Bulletin No.338.
9. Westergaard, H. M. (1938), “A Problem of Elasticity Suggested by a Problem in Soil Mechanics: Soft Material Reinforced by Numerous Strong Horizontal Sheets”, in Contribution to the Mechanics of Solids, Stephen Timoshenko 60th Anniversary Volume, MacMillian Co., New York.

(접수일자 2004. 7. 29, 심사완료일 2005. 3. 15)