

## 지표면 재하시 토층구성에 따른 지중응력분포에 관한 연구

### A Study on the Stress Distribution in Soil According to the Composition of the Soil Layer in Case of Surface Loading

임종석<sup>1)</sup>, Jong-Seok Lim, 정상균<sup>2)</sup>, Sang-Kyun Jung, 하 혁<sup>2)</sup>, Hyuk Ha

<sup>1)</sup> 국립목포대학교 건설공학부 토목공학전공 교수, Professor, Major in Civil Engineering, Division of Construction Engineering, Mokpo National University

<sup>2)</sup> 국립목포대학교 건설공학부 토목공학전공 석사과정, Graduate Student, Major in Civil Engineering, Division of Construction Engineering, Mokpo National University

**SYNOPSIS** : This research aims to verify the stress distribution in soil according to the composition of the soil layer in case of surface loading. For this purpose, loading tests with measurement of stresses in the soil on four kinds of layered model ground in laboratory were performed. Those are ① homogeneous sand, ② gravel underlain by sand, ③ sand underlain by clay and ④ gravel underlain by clay. Test results are compared and analysed for the compositions of the soil layers. Based on the results obtained, it is found that the larger the difference of the strengths of upper and lower layer is, the smaller the stress in the soil in case of surface loading is.

**Keywords** : Stress Distribution, Soil Layer, Surface Loading, Loading Test, Model Ground

## 1. 서 론

연약지반 위에 성토한 경우 지표면 재하에 따른 지중응력의 예측은 연약지반의 지지력 안정성을 판단하는 중요한 작업이다. 이와 같은 경우 지중응력을 구하는 방법은 여러 가지가 있다. 현재 기술자들은 그 중 Boussinesq(1883)의 방법이나 약산법을 일반적으로 사용하고 있다. 그러나 이들 방법에서는 지반을 균질, 등방으로 보고 있다. 앞의 예와 같이 지반이 층을 이루는 경우에는 Boussinesq의 가정과는 조건이 달라지며 따라서 지중응력은 Boussinesq의 방법으로 구한 결과와는 달라질 것으로 예상된다. 이 경우 Burmister(1956)의 방법을 예상할 수 있으나 이 방법은 도로포장과 같은 경우로서 직접 적용하기에는 다소 문제가 있다. 따라서 성층지반의 지표면 재하시 지중응력을 구하는 적절한 방법이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 층을 이룬 지반의 표면에 재하하는 경우 지반의 구성에 따라 지중응력의 분포가 어떻게 나타나는가를 알아보려고 하였다. 이를 위하여 실험실에서 토조에 층을 이루는 모형지반을 다양하게 조성하고 지표면 재하시험을 하면서 지중의 응력을 측정하였다. 시험결과를 지반구성에 따라 정리, 분석하고 이론식에 의한 결과와 비교하여 층을 이룬 지반의 표면에 재하하는 경우 지중응력의 분포를 예측할 수 있는 방안을 모색하였다.

## 2. 문헌연구

### 2.1 균질지반의 지중응력

#### 2.1.1 개 론

지표면 또는 지반 중에 작용하는 하중에 의하여 지중응력이 분포되는 상태는 기초지반의 안정문제 및 침하문제를 해석하고 구조물의 기초 및 지하매설물 등을 설계하는데 있어서 필요불가결한 요소이다. 자연 지반은 균질성 또는 등방성이 아닐 뿐 아니라 완전한 소성체 또는 탄성체도 아니므로 지반중의 응력분포를 정확하게 규명하기는 매우 어려우나 응력이 지반의 강도에 비하여 충분히 작은 범위 내에서는 탄성적으로 해석하여도 실용상 지장이 없다는 것이 경험적으로나 실험적으로 알려져 있으므로 이러한 전제조건 하에서 탄성체에 대한 응력분포상태를 직접 또는 어느 정도의 수정을 가하여 적용하고 있다.

#### 2.1.2 탄성해법

이 방법들의 모음은 Poulos and Davis(1974)가 쓴 교재에 제공되어 있다. 이 방법들은 흙이 선형탄성 매질처럼 거동한다는 가정에 근거하였다. 최초의 개발수행은 Boussinesq(1883)에 의해 이루어졌으며 Westergaard(1938)는 교호하는 단단한 층이 있는 탄성 흙에 대한 해를 제공하였다. Fröhlich(1934)는 Boussinesq의 식을 수정하고 응력집중계수를 도입하였다. 층이 진 토층 및 강성 경계가 있는 토층에 대한 탄성해는 후에 Burmister(1956, 1958, 1962)와 다른 이들에 의해 개발되었다.

#### 2.1.3 근사해법

근사해법의 공식으로는 Strohschneider의 근사식, Kögler의 근사식, 2:1 분포법, Boston Building Code 식 등이 잘 이용된다. 그러나 이들 공식도 지반조건을 매우 단순화, 균일화 시키고 있어 연약지반 장비주행성 판정의 불합리성이 내재되어 있다. 따라서 정밀한 해석을 요구하는 기초의 안정성 검토 등 연약지반 설계에 신뢰성 및 정확성을 제공하지 못하고 있다.

## 2.2 2층지반의 지중응력

### 2.2.1 개 론

지반이 서로 다른 특성의 토층으로 2층구조를 이루고 있을 경우 응력전달상황이 이들의 존재양식이나 재하방식에 따라 상이할 것이 예상된다. 이와 같은 문제는 지반공학에서보다는 도로공학에서 도로나 비행장 설계의 필요성에 따라 이론적으로 연구되었다. 즉, 2층계에 있어 응력과 변위의 이론은 탄성이론의 수학적 방법에 따라 개발되었고 하중-침하 관계를 조절할 수 있는 물리적인 인자사이에 존재하는 어떤 근본적인 관계를 알아보기 위해 연구되었고 실용화되었다.

지반공학에서는 이와 같은 다층이론에 의한 해석방법은 고려되지 않았고 응력분포는 Boussinesq계의 이론을 이용하여 구하는 것이 관례가 되어있으며 여기에는 다층구조의 개념이 들어있지 않다. 그러나 도로나 활주로가 그러하듯이 인공적인 지반의 축조에서도 이와 같기 때문에 지반에 대한 층이론의 적용은 검토단계에 와 있다.

### 2.2.2 Burmister이론의 적용 예

실제 지반의 경우에는 지층이 구분되어 있어서 각 층마다 각기 다른 탄성계수를 갖게 되는 일이 흔히

발생한다. 하부에 연약한 층이 있고 상부에 단단한 층이 있는 지반상태가 본 연구에서 다루는 경우이다. 주어진 하중조건 하에서는 상부의 단단한 토층으로 인해 하부의 연약한 토층에 응력이 집중되는 경향이 감소할 것이다.

Das(1992)에서는 상부의 단단한 지층으로 인한 응력집중의 감소효과를 탄성계수의 비로 나타내었다. 여기서는 2층 구조로 이루어진 지반표면에 하중을 받는 연성 원형 재하단면을 고려하였다. 연성 다층지반에서의 응력분포는 고속도로 포장설계시 중요하다.

### 3. 실내모형시험

#### 3.1 시험개요

본 연구에서는 실내모형시험을 통하여 2층으로 구성된 지반 표면에 하중이 가해질 때 지중의 응력을 측정하여 토층구성에 따라 지중응력이 어떻게 다른지를 알아보고자 하였다. 이를 위하여 토조에 균질모래지반, 모래+점토지반, 자갈+점토지반, 자갈+모래지반을 각각 조성하고 재하시험을 시행하였으며 그 결과로부터 허용하중을 결정하고 허용하중상태에서의 지중응력분포를 비교분석하였다.

#### 3.2 시험장치

본 실내모형시험에서는 그림 1과 같이 모형지반의 종류별 조성을 위하여 주문 제작된 토조를 사용하여 실험 중의 토조내부 가시화를 위해 아크릴로 전·후면을 제작하였다.

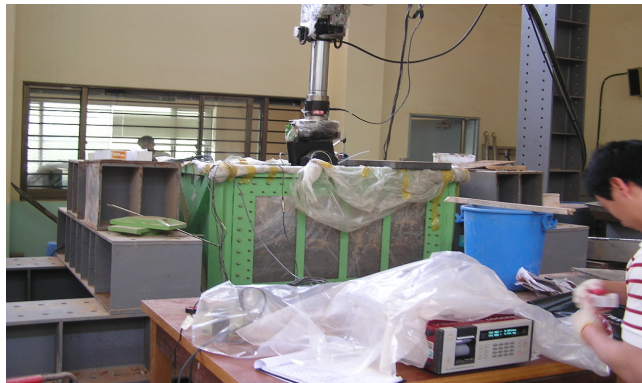


그림 1. 시험전경

실내모형 시험에 필요한 시험장치 크기와 종류는 표 1과 같다.

표 1. 시험장치 (단위: m)

모형토조	재하장치	재하관	토압계	침하량측정장치	데이터로거
1.5 × 0.8 × 1.0	actuator	0.8 × 0.2	KDE-2MPA(8개)	actuator, LVDT	데이터 인쇄

#### 3.3 시험지반의 토질 특성

시험지반 조성에 사용된 점토는 함수비  $w=55\%$ , 비배수전단강도  $c_u=0.066 \text{ kgf/cm}^2$ 이며, 모래와 자갈의 실험에 대한 토질 특성은 아래의 표 2 및 3과 같다.

표 2. 모래의 특성

$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{60}$	$C_u$	$C_g$	$e_{max}$	$e_{min}$	$\gamma_{d(max)}$	$\gamma_{d(min)}$	$G_s$	$\phi^\circ$	$D_r$
0.37	0.46	0.52	1.42	1.11	0.89	0.59	1.68	1.41	2.67	32°	55%

표 3. 자갈의 특성

$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{60}$	$C_u$	$C_g$	$\phi^\circ$	$D_r$
3.18	3.35	4.1	1.244	0.861	38°	55%

### 3.4 시험방법

토압계의 매설깊이는 재하판의 폭  $B$ 에 따라  $1B$  및  $2B$ 로 하였다. 토압계는 간섭을 방지하기 위하여 서로 중첩되지 않는 방식으로 필요한 위치에 토압계를 매설하고 지반 위에 재하판을 설치한다. 그 후 하중을 가하면서 측정장치를 연결하여 측정값을 인쇄하는 방식으로 시험지반종류별로 시험을 행하였다. 그림 2는 시험방법을 나타내고 있다.

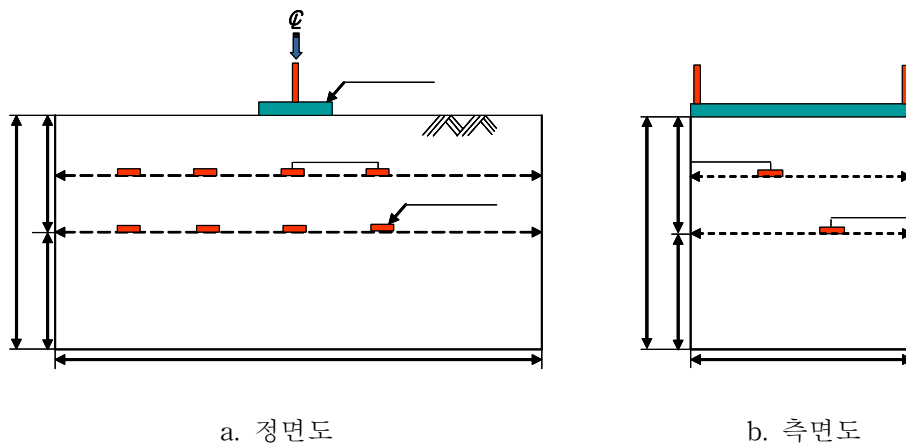


그림 2. 시험방법

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 토층구성에 따른 지중응력

#### 4.1.1 허용응력 결정

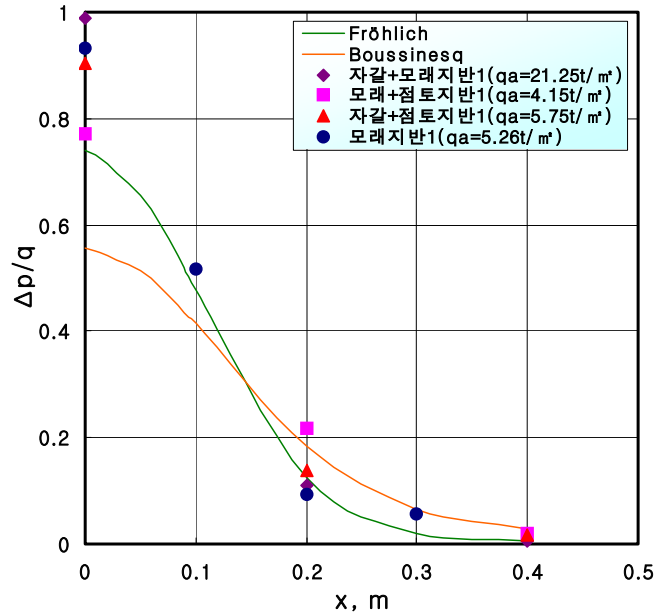
항복응력의 결정을 위하여 각 지반종류별 재하시험 결과로부터 나온 하중-침하량곡선을 이용하여  $\log q - \log s$  그래프를 그리고 초기의 직선부와 후기의 직선부를 연장하여 만나는 점을 항복응력으로 하고 이 값의 2분의 1을 허용응력으로 하였다. 각 토층구성에 따른 항복응력과 허용응력 값은 다음 표 4와 같다.

표 4. 토층구성에 따른 항복응력 및 허용응력

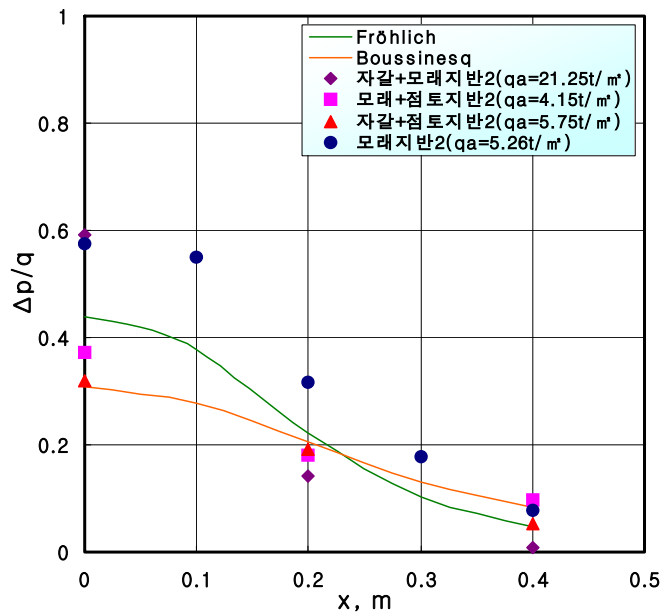
구 분	균질모래	모래+점토	자갈+점토	자갈+모래
허용응력	5.425 $t/m^2$	4.15 $t/m^2$	5.75 $t/m^2$	21.25 $t/m^2$
항복응력	10.52 $t/m^2$	8.3 $t/m^2$	11.5 $t/m^2$	42.5 $t/m^2$

### 4.1.2 허용응력에 따른 이론값과 실험값 비교

그림 3은 각 토질에 따른 허용응력 상태에서의 깊이  $1B$ ,  $2B$ 에서의 지중응력분포를 나타낸 것이다. 각 지반의 토층구성에 따른 시험조건은 상대밀도  $D_r=55\%$  비배수전단강도  $c_u=0.066 \text{ kgf/cm}^2$ , 함수비  $w=55\%$ 이며, 허용응력상태에서 표층부와 깊이( $Z$ )별  $1B$ ,  $2B$ 에서의 지중응력분포특성에 따라 이론값과 실험값의 비교를 나타내고 있다.



a. 깊이(0.2m) =  $1B$



b. 깊이(0.4m) =  $2B$

그림 3. 깊이에 따른 이론값과 실험값

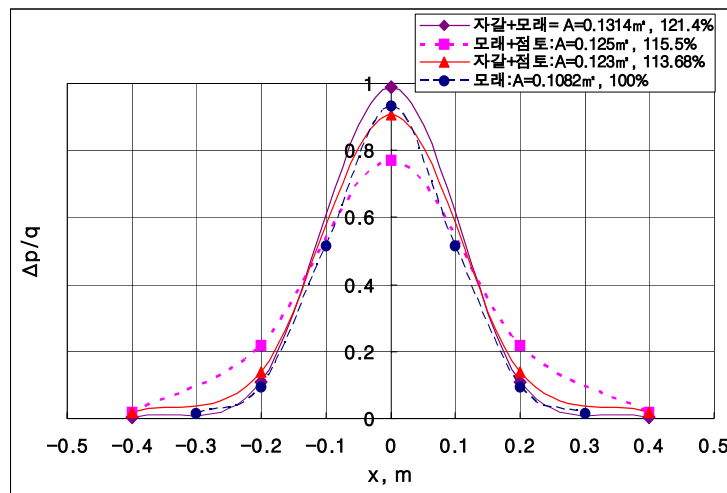
### 4.1.3 토층구성에 따른 이론값과 시험값 분석

토층구성의 깊이  $1B$ 에서는 이론값 보다 실험값이 크게 나타나며, 균질모래지반에서의 실험값은 Fröhlich의 방법과 유사하게 나타나고 있다. 지반별 실험값은 모래+점토지반 < 자갈+점토지반 < 균질모래지반 < 자갈+모래지반 순으로 응력 분포도가 증가 하여 나타나고 있다.

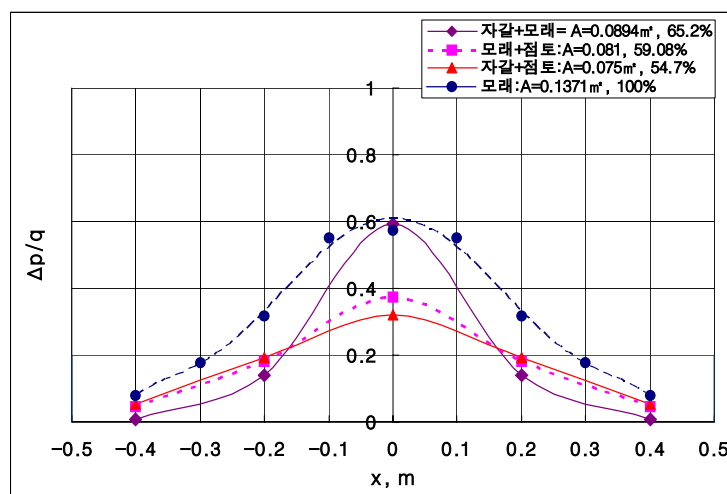
깊이  $2B$ 에서는 균질모래지반과 자갈+모래지반이 이론값 보다 실험값이 크게 나타나고 모래+점토지반과 자갈+점토지반은 Fröhlich의 방법보다 작게 나타나며 Boussinesq 방법 보다는 크게 나타나고 있다. 모래+점토지반과 자갈+점토지반은 Boussinesq의 방법과 유사하게 나타나며 지반별 실험값은 자갈+점토지반 < 모래+점토지반 < 균질모래지반 < 자갈+모래지반 순으로 응력 분포도가 증가하여 나타나고 있다.

### 4.1.4 허용응력에 따른 지중응력 회귀분석 비교

그림 4는 각 토층구성에 따른 허용응력 상태에서의 깊이  $1B$ ,  $2B$ 에서의 지중응력분포를 나타낸 것이다. 시험결과로부터 회귀분석하여 각 지반조건에 따른 분포곡선을 구하였으며 이를 기준으로 곡선과 가로축이 이루는 면적을 구하여 그림에 나타내었다. 그림 4에서  $x$ 는 재하판 중심으로부터의 수평거리이다.



a. 깊이(0.2m) =  $1B$



b. 깊이(0.4m) =  $2B$

그림 4. 깊이에 따른 지중응력분포

#### 4.1.5 토층구성에 따른 지중응력 회귀분석

토층구성에 따라 지중응력 분포가 달라진다. 본 연구의 시험에서 지반의 강도는 점토<모래<자갈 순으로 볼 수 있으므로 상부층의 강도가 하부층에 비해 클수록 하부층으로 전달되는 지중응력은 더 작아진다고 할 수 있다.

깊이 2B에 경계면이 존재하는 경우 균질모래층을 100%로 보았을 때 자갈층 아래 모래층인 경우 65.2%, 모래층 아래 연약점토층인 경우 59.1%, 자갈층 아래 연약점토층인 경우 54.7%로 감소하고 있다. 즉, 균질모래지반 > 자갈+모래지반 > 모래+점토지반 > 자갈+점토지반 순으로 성토재료에 따라 지중응력 분포가 감소하고 있다.

### 5. 결론

본 시험에서는 지표면재하에 의한 지중응력이 토층 구성별 하중강도에 따라 어떻게 변화하는가를 정확하게 파악하고자 지반 구성을 균질모래지반 시험1, 모래+점토지반 시험2, 자갈+점토지반 시험3, 자갈+모래지반 시험4 순으로 행하였다.

이상 토층 구성에 따른 지표면 재하시 Model의 시험 결론은 다음과 같다.

- 첫 째, 지반의 토층상태가 단층, 이층 지반조성 조건에 따라 지중응력 분포형태와 크기가 달라진다.
- 둘 째, 상부층의 강도가 하부층에 비해 클수록 하부층으로 전달되는 지중응력은 더 작아진다.
- 셋 째, 균질모래지반의 깊이1B(0.2m)의 지중응력분포 특성은 Fröhlich의 방법이 유사하고 모래+점토지반과 자갈+점토지반의 깊이2B(0.4m)에서는 Boussinesq의 방법이 유사하게 나타나고 있다.
- 넷 째, 깊이1B(0.2m)에서 지반조성 조건에 따른 지중응력 회귀분석 감소량은 비교적 비슷하다.
- 다섯째, 깊이 2B(0.4m)에 경계면이 존재하는 경우 균질모래층을 100%로 보았을 때 자갈층 아래 모래층인 경우 65.2%, 모래층 아래 연약점토층인 경우 59.1%, 자갈층 아래 연약점토층인 경우 54.7%로 감소하고 있다.

### 참고문헌

1. 임종석, 이인형, 정원중(2002), “지표면 재하시 사질토지반의 지중 연직응력 분포특성”, **대한토목학회지**, pp.54~57.
2. 임종석 한완균, 최청환(1995) 공역의 **고급토질역학**(Advanced Soil Mechanics by Braja M. Das), 엔지니어즈, 서울, pp.208~210
3. Boussinesq, J.(1883), Application des potentials à L'Etude de L'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques, Gauthier-Villars, Paris.
4. Burmister, D. M.(1956), "Stress and Displacement Characteristics of a Two-Layer Rigid Base Soil System : Influence Diagrams and Practical Applications.", *Proceedings of Highway Research Board*, Vol.35, pp.773~814.
5. Burmister, D. M.(1958), "Evaluation of Pavement Systems of the WASHO Road Testing Layered System Methods," *Proceedings of Highway Research Board*, Bulletin 177.
6. Burmister, D. M.(1962), "Application of Layered System Concepts and Principles to Interpretations and Evaluations of Asphalt Pavement Performance and to Design and Construction.", *Proceedings International Conference on Structural Design of Pavements*, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp.218~233.
7. Das, B. M.(1998), *Principles of Geotechnical Engineering*. PWS, Boston pp.263~277.
8. Fröhlich( 1934 ).