

지표면 띠하중 재하에 따른 사질토지반 지중연직응력 증가량의 Boussinesq 이론값에 대한 실험적 고찰

An Experimental Investigation of Boussinesq's Theoretical Value of Vertical Stress Increment in Sandy Soil Mass Caused by Surface Strip Loading

임 종 석¹ Lim, Jong-Seok

Abstract

It is worthwhile to verify the vertical stress distribution in soil mass for rigorous design of foundation. A series of laboratory model tests were performed to investigate the Boussinesq's theory on vertical stress increment in sandy soil mass caused by surface loading. The test results were also compared with Boussinesq's theoretical values. The Boussinesq's theoretical values were always smaller than test results under the footing regardless of depth. Outside of the footing the values were larger than the measured stress at the depth of just footing width. The theory and the test showed similar results when the depth reached two and three times the footing width. The vertical stress decreased as the applied load increased. These trends were confirmed to be valid for the considered range of the relative density of sand and/or the width of footing. More accurate values can be acquired by correcting the theoretical values using these results when Boussinesq's theory is used.

요 지

정밀한 기초설계를 위하여 지중연직응력분포를 파악하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 지표면 재하에 의한 사질토 지반의 지중연직응력 증가량에 대한 Boussinesq의 이론을 고찰하기 위하여 일련의 실내모형시험을 수행하였으며 Boussinesq의 이론값을 실측값과 비교하였다. Boussinesq의 이론값은 깊이에 관계없이 기초판 하부에서는 실측값보다 작았다. 기초판의 바깥부분에서는 기초폭의 1.0배의 깊이에서는 이론값은 실측값보다 컸으나 기초폭의 2.0배 및 3.0배의 깊이에서는 이론값과 실측값이 거의 비슷해지는 경향이였다. 가해진 단위면적당 하중에 대한 지중연직응력은 하중이 증가함에 따라 감소하였다. 이러한 경향들은 상대밀도나 기초폭에 관계없이 나타났다. Boussinesq의 이론을 이용할 때 이와 같은 결과를 감안하여 이론값을 보정하면 보다 정확한 값을 얻을 수 있을 것이다.

Keywords : Boussinesq's solution, Model test, Relative density, Sandy soil, Surface loading, Vertical stress distribution

1. 서 론

기초지반은 상부구조물의 하중을 지지하고 과도한 침하를 일으키지 않아야 한다. 기초설계시 이를 검토

하기 위해서는 상부구조물로 인한 지반의 응력을 알아야 한다. 이 응력을 지반의 특성값과 비교, 분석하여 지지력과 침하량에 대한 안전을 검토할 수 있다. 연약 지반상의 기초나 신공법의 도입 등에 있어서는 보다

¹ 정희원, 목포대학교 건축조경토목공학부 토목공학전공 교수 (Member, Prof., Major in Civil Engrg., Mokpo National Univ., jslim@mokpo.ac.kr)

정밀한 기초설계가 필요하다. 정밀한 기초설계를 위하여는 지중연직응력분포를 파악하는 것이 더욱 중요하다.

상부구조물의 하중은 기초구조물에 의해 지반으로 전달되며 지반에는 기초구조물에 의한 압력이 작용한다. 그런데 상부구조물의 하중에 의해 지반이 받는 실제 외력은 접지압이다. 따라서 지반의 응력을 파악하기 위해서는 접지압을 알아야 한다. 그러나 접지압은 하중, 기초구조물 및 지반의 종류에 따라 복합적, 상대적으로 변화하므로 이를 정확히 예측하기는 매우 난해하다. 그래서 허용응력, 지지력 산정시 실무적으로는 등분포로 가정하여 지중응력을 구하고 있다(이상덕, 1997).

이와 같은 가정 하에 지표면에 재하되었을 때의 지중응력을 구하는 방법은 여러 가지가 있다. 먼저 탄성해법(elastic analysis method)이 있는데 그 중 Boussinesq(1885)의 방법이 대표적이다. 그러나 이 방법은 지반을 균질, 탄성, 등방으로 가정하였으므로 정해를 제공하지는 못하고 있으며 더욱이 하중의 변화, 기초의 종류, 토질의 특성을 고려하지 않고 모든 조건에 일률적으로 적용되는 불합리성이 있다. 이러한 문제를 감안하여 Fröhlich(1934), Westergaard(1938) 등은 보다 개선된 해법을 제안하였으나 이 또한 모형화(modelling)의 한계, 입력값의 불확실성 등으로 인해 만족스러운 결과를 제공하지는 못하는 실정이다.

Harr(1977)는 지중응력분포를 파악하는 데에 확률론을 도입하여 좋은 결과를 얻은 바 있다. 국내에서도 이에 관하여 김기웅과 백영식(1981)의 연구가 있었다. 그러나 실용화를 위해서는 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

실무적으로 지표면 재하에 의한 지중응력의 분포를 구할 때에는 적용이 간편한 근사해법(approximate method)을 많이 사용한다. 여기에는 Kögler법, 2:1분포법, 보스톤빌딩코드 등이 있다(건설부, 1987). 그러나 이는 지나친 단순화로 인하여 기초의 안전성 검토에 불합리성을 내재하게 되어 과도한 설계로 이어지며 정밀한 해석을 요구하는 연약지반에서의 기초설계나 신공법의 적용 등에 있어서는 사용이 곤란해진다.

이 밖에 수치해석법(numerical analysis method)이 있으며 이 방법들은 복잡한 기초형상이나 해에 흙의 비선형성을 포함할 필요가 있을 때를 위해 마련되었다. 이 경우에 있어서 응력분포와 침하의 유한요소법, 경계요소법, 유한차분법을 사용하여 평가될 수 있다. 수치해석법은 가장 다용도이고 다른 방법들의 단점을 보완할 수 있다. 전산기술의 발전과 함께 이 방법은 공학계에 널리

이용하게 되었다. 그러나 적용하기에 비경제적이고 시간이 걸린다는 데에다가 이 방법은 기초형상이 3차원 모형화를 필요로 하는 경우에는 엄두를 낼 수 없다. 이 경우 지반공학계에는 적절하다고 간주되는 프로그램이 없으며 있다 하더라도 적절한 입력 토질자료를 추정할 수 없다는 것은 이러한 프로그램의 사용이 실무에서 의문시되게 한다(황정규, 1992).

지표면 재하에 따른 지중연직응력의 정확한 예측은 새로운 이론의 개발과 실험을 통한 검증 또는 기존 이론의 상호비교를 통한 최적기법의 선택 등을 통하여 이루어질 수 있다. 이러한 작업은 지금까지 다양하게 이루어졌으며 현재 많은 진전이 이루어져 있다. 그러나 아직 정해에 도달하지는 못하고 있으며 결국 지표면 재하에 의한 지중응력의 분포를 정확히 파악하기란 현재로서는 어려운 실정이다. 그래서 현재 지반기술자들은 대부분의 실질적인 문제를 해결하기 위해 Boussinesq의 해를 선호한다(Das, 1998).

본 연구는 여기에 착안하여 기왕에 사용하는 Boussinesq의 해를 보다 정확히 사용하는 방안을 모색하기로 하였다. 즉, Boussinesq의 해를 사용함에 있어서 실제와 다른 사항을 파악하여 사용상 오류를 줄일 수 있는 보다 정확하고 적용가능한 방법을 개발한다면 안전한 기초설계는 물론 경제적인 설계기법의 확립이나 공법의 개발에 기여할 수 있을 것이다. 이는 이론의 수정 또는 결과의 수정을 생각할 수 있을 것이다. 본 연구는 이중 후자인 결과의 수정 즉, Boussinesq의 해에 의한 이론값을 수정하는 방안을 모색하기로 하였다.

따라서 본 연구에서는 현재 가장 널리 사용되고 있는 Boussinesq의 해를 이용한 이론값을 고찰하여 적절히 수정, 보완할 수 있는 방안을 강구하고자 하였다. 이를 위하여 별도로 제작한 시험장치에 의해 모형시험을 수행하고 거기서 얻은 실측값과 Boussinesq의 이론값을 비교, 분석하였다. 지중응력의 분포는 하중강도, 기초의 규모, 토질특성 등에 따라서 달라질 것으로 예상되므로 본 연구에서는 이들을 각각 달리하여 시험하고 이들에 따른 차이를 확인하였다.

2. 지중연직응력 분포 특성

2.1 Boussinesq의 해

Boussinesq(1883)는 반무한공간 표면에 작용하는 집

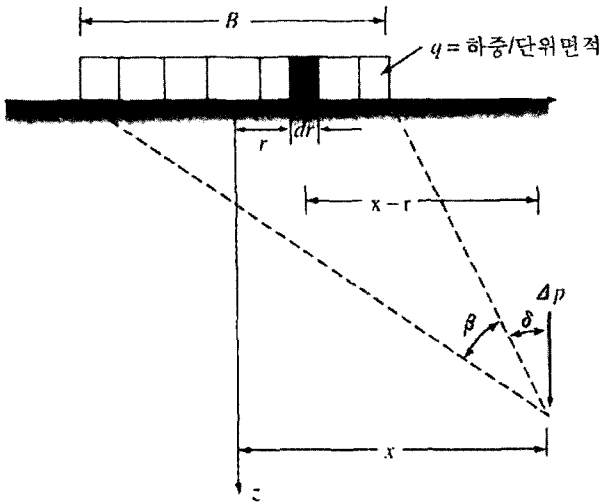


그림 1. 띠하중에 의한 연직응력증가

중하중에 의하여 균질, 탄성, 등방체 내에 있는 임의의 점에 발생하는 응력을 구하였다. 집중하중에 의한 지반 내 응력은 선하중 문제의 기본이 되는 것으로서 이를 기초로 선하중을 해석할 수 있다. 선하중을 기초로 폭이 B인 띠하중이 작용할 때에 지반내의 임의의 점에서 수직응력을 구하는 방법은 다음과 같다(그림 1 참조).

그림 1에서 나타난 띠하중에 대한 단위면적당 하중을 q라 하자. 만일 하중띠의 미세요소 폭을 dr이라 하면 이 띠에 대한 단위길이당 하중은 qdr이라 할 수 있으며 이 요소의 띠는 선하중으로 다루어질 수 있다. 선하중에 대한 식으로 이 요소의 띠하중에 의하여 발생된 지반 내의 점 A에서의 연직응력 증가량 dp를 구할 수 있다. 연직응력 증가량을 구하기 위해서는 q를 qdr로 바꾸

고 x를 (x-r)로 바꾸어야 한다. 따라서

$$dp = \frac{2(qdr)z^3}{\pi[(x-r)^2 + z^2]^2} \quad (1)$$

폭 B의 전 띠하중으로 인하여 점 A에서 발생한 연직 응력의 총 증가량 Δp는 r을 -B/2에서 +B/2까지 식 (1)을 적분하여 구할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \Delta p &= \int dp = \int_{-B/2}^{+B/2} \left(\frac{2q}{\pi} \right) \left[\frac{z^3}{[(x-r)^2 + z^2]^2} \right] dr \\ &= \frac{q}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{z}{x-(B/2)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{z}{x+(B/2)} \right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{Bz[x^2 - z^2 - (B^2/4)]}{[x^2 + z^2 - (B^2/4)] + B^2 z^2} \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

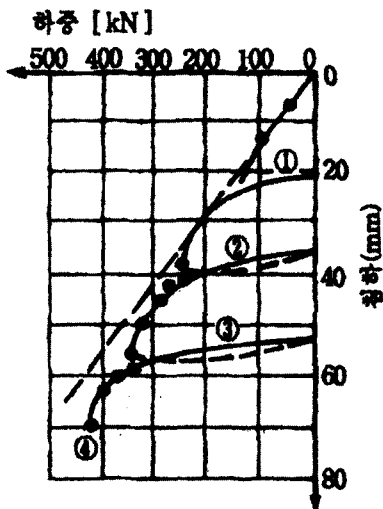
식 (2)를 간단히 표현하면

$$\Delta p = \frac{q}{\pi} [\beta + \sin \beta \cos(\beta + 2\delta)] \quad (3)$$

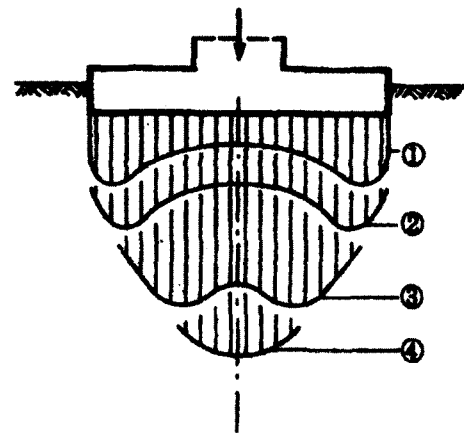
2.2 하중크기의 영향

지중연직응력의 분포에 절대적인 영향을 미치는 것은 앞에서 언급한 바와 같이 접지압이다. 접지압의 분포는 기초에 작용하는 하중의 크기, 기초의 종류 및 토질의 특성 등에 따라 달라진다. 이 중 먼저 하중의 크기에 따른 접지압의 분포특성을 알아보기로 한다.

그림 2는 중간 정도의 상대밀도를 갖는 사질토에서 하중의 증가에 따른 접지압을 나타내며(Leussink et al., 1966), 하중단계별 거동을 보면 다음과 같다.



(a) 재하단계에 따른 지반의 하중-침하관계



(b) 접지압분포

그림 2. 하중의 크기에 따른 접지압 분포(Leussink et al., 1966)

- ①단계 : 허용하중 또는 사용하중단계이며 침하는 하중에 거의 비례한다. 접지압은 기초의 가장자리에서 크다.
- ②단계 : 항복하중단계로서 하중-침하량 곡선이 직선관계에서 벗어나 휘어지기 시작한다. 최대접지압의 위치는 기초의 가운데 방향으로 움직이며 중앙부의 접지압이 크게 증가한다. 최대주응력의 방향이 기초 외곽으로 향하기 시작한다.
- ③단계 : 극한하중단계로서 지반 내에서 정역학적으로 가능한 응력의 전이가 끝난 한계상태이다. 이때 최대주응력은 기초의 중앙을 향한다.
- ④단계 : 파괴상태로서 기초 하에 생성된 지반파괴체는 불안정하여 전단면을 따라 활동을 일으키며 지반의 강성이 커질수록 큰 파괴체가 형성된다.

본 연구에서는 위의 각 단계에서의 지중응력분포를 시험으로 측정하고 이를 Boussinesq의 결과와 비교, 분석하기로 하였다. 다만 ④단계는 파괴상태로서 실질적으로 무의미하다고 판단되어 생략하기로 하였다. 이 밖에도 접지압은 기초의 강성, 토질의 특성 등 여러 가지 요인에 따라 달라지는데 이들은 본 연구에서는 다루지 않았다.

2.3 지반특성 및 기초크기의 영향

지중응력의 산정에 있어서 Boussinesq의 이론식은 지반의 특성이나 기초의 크기에 관계없이 일정한 값으로 나타난다. 그러나 지반의 특성이 달라지면 하중전달체계 달라질 뿐 아니라 앞에서 언급한 접지압에도 변화가 있을 것이므로 지중응력도 달라질 것으로 예상할 수 있다. 또한 기초의 크기가 달라지면 치수효과에 따라 응력도 변할 것으로 추측된다. 본 연구에서는 이러한 변화에 대해서도 알아보고자 하였다.

3. 시험장치 및 방법

3.1 개요

지중연직응력분포를 알아보기 위한 시험은 2차원적으로 수행하기로 하였다. 즉, 한 방향을 구속하여 평면

변형률상태를 만들었으며 이는 띠기초에 해당한다. 이렇게 함으로써 해석이 간편해지는 것과 동시에 반복되는 시험들의 조건을 일치시키는 데에도 효과적이다. 따라서 이를 만족할 수 있는 토조와 기초판을 제작, 사용하였다.

본 연구에서 지중연직응력을 파악하는 데에 있어서 앞에서 언급한 바와 같이 각 하중단계별 분포를 알아보는 것은 물론이고 기초의 크기 및 지반의 강도에 따른 차이도 알아보기로 하였다. 이를 위하여 기초폭을 2가지로 하였으며 지반의 강도는 상대밀도로 조절하기로 하였다.

3.2 시험지반

시험을 위한 지반은 모래지반으로서 사용된 모래는 주문진표준사이다. 본 토질의 특성은 표 1과 같다.

3.3 시험장치

본 연구에 사용된 시험장치를 그림 3과 그림 4에 보이고 있다. 본 시험에서는 토조와 기초판을 별도로 제작하여 사용하였는데 토조의 크기는 가로 150cm, 세로 80cm, 높이 100cm이고 기초판의 크기는 길이가 80cm이고 폭이 각각 10cm, 20cm로서 토조 중앙부에 기초판을 설치하고 재하하면 2차원적으로 거동하게 된다.

토조의 벽면은 아크릴로 되어있어서 지반의 변형을 볼 수도 있게 하였다. 토조의 모서리는 강재로 제작하였으며 벽면도 강재로 보강하여 커다란 하중에도 토조가 변형하지 않도록 하였다. 토조는 기차처럼 바퀴를 달고 레일 위에 설치하여 지반을 조성하는 위치와 재하 및

표 1. 모형지반에 사용된 모래의 토질특성

통과중량백분율 10% 입경, D_{10} (mm)	0.37
통과중량백분율 30% 입경, D_{30} (mm)	0.46
통과중량백분율 60% 입경, D_{60} (mm)	0.52
균등계수, C_u	1.42
곡률계수, C_g	1.11
최대간극비, e_{max}	0.89
최소간극비, e_{min}	0.59
최대건조단위중량, γ_{dmax} (t/m ³)	1.68
최소건조단위중량, γ_{dmin} (t/m ³)	1.41
비중, G_s	2.67

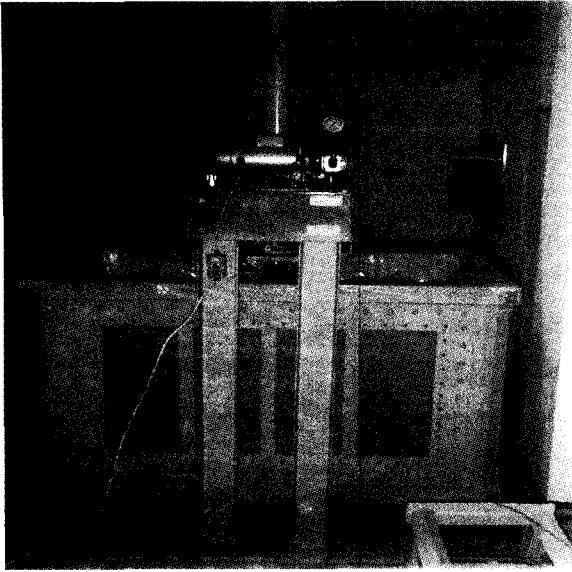


그림 3. 시험장치

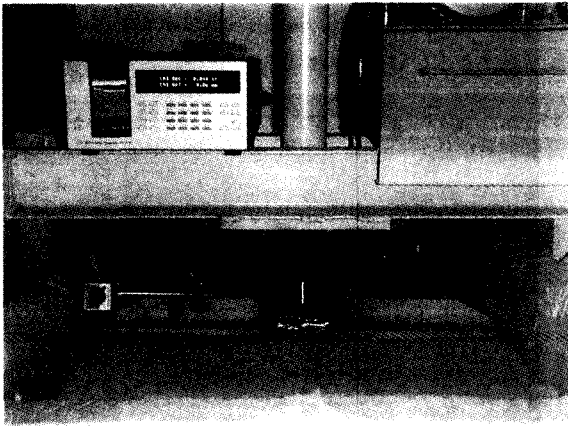


그림 4. 재하 및 계측장치

측정을 수행하는 위치 사이를 레일 위로 이동하도록 하였다.

재하장치는 유압 수동식을 사용하여 조절이 쉽도록 하였으며 재하장치와 기초판의 사이에는 하중계를 설치하여 하중을 측정하였다. 또한 기초판에는 LVDT를 설치하여 침하량을 측정하였다. 침하량을 측정할 때에는 하중계를 중심으로 양쪽 멀리에서 침하량을 측정하고 이를 평균하였다.

지중응력의 측정에는 토압계를 사용하였다. 토압계의 검증을 위하여 본시험 이전에 수조에 물을 채운 후 토압계를 수조에 가라앉혀 수압을 측정하고 해당 수압과 비교하여 압력이 정확히 읽히는지 확인하고 필요시 보정하였다.

하중계, LVDT, 토압계로 측정된 자료들은 데이터로거에 저장하고 분석하였다.

3.4 시험방법

시험을 위하여 먼저 토조에 모래를 소요 상대밀도로 채우기 시작한다. 상대밀도는 다짐판으로 모래를 다져서 필요한 양을 필요한 높이에 맞추는 방법으로 조절하였다. 이 때 토압계를 매설해야 할 높이에 도달하면 모래채움을 중지하고 토압계를 그림 5와 같이 설치하고 계속 모래를 채워 시험지반을 완성한다.

토압계는 10cm 간격으로 정확하게 배치한다. 토압계의 지름이 5cm이므로 간격을 10cm 이하로 하기는 어려웠다. 이 때 기초판을 중심으로 응력은 평행이기 때문에 한쪽에만 토압계를 배치하였는데 검증을 위하여 그림 5의 5번토압계의 반대쪽에도 토압계를 한개 설치하여 5번토압계의 결과와 비교하였다. 이 때 이 두 토압계의 결과에 차이가 있으면 편심이 작용한 것으로 판단하여 재시험을 하였으며 자료는 5번토압계의 값을 채택하였다.

토압계를 설치하는데 있어서 깊이별 지중응력을 알기 위하여는 그림 6과 같이 깊이별(3층)로 토압계를 설치하여야 한다. 그러나 이럴 경우 상부의 토압계가 응력전파에 간섭하여 하부 토압계에 나타나는 토압이 부정확해질 우려가 있다. 따라서 이를 방지하기 위하여 본

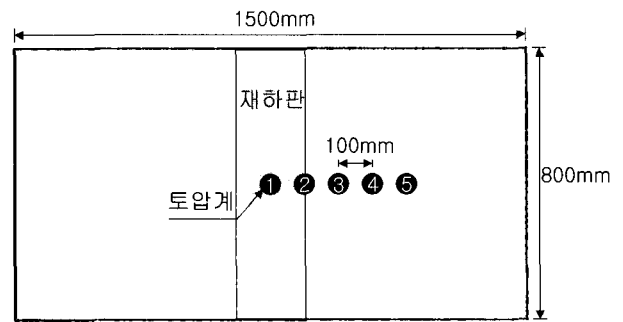


그림 5. 토압계 매설위치 평면도

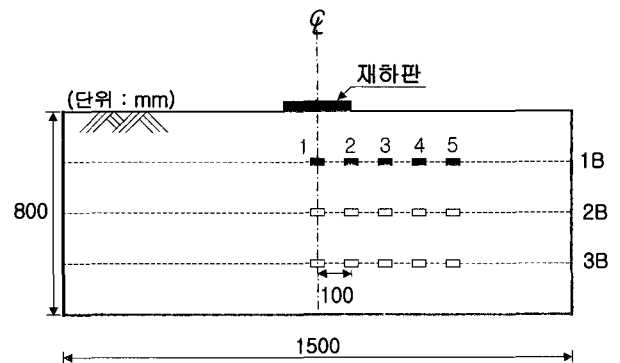


그림 6. 토압계 매설위치 정면도

연구에서는 깊이별 응력의 측정을 각각 별도로 수행하였다. 즉, 깊이 1B에만 토압계를 묻고 재하하여 하중에 따른 토압을 측정하면서 재하판의 침하량을 측정하였으며 토압계의 깊이 2B, 3B에 대해서도 마찬가지로 별도로 시험을 하였다. 결국 동일한 형태의 시험을 토압계 깊이에 따라 세 번 수행하였다. 따라서 같은 조건의 하중-침하량 곡선 3개를 얻게 된다.

이 세 번의 시험이 유사하게 이루어졌는지는 이 3개의 하중-침하량 곡선을 비교하여 판단하였다. 이 중 유난히 다른 결과를 보인 시험은 재시험을 실시하여 오차를 줄이도록 노력하였다.

시험지반이 완성되면 기초판, 하중계, LVDT 등을 설치하고 토압계, 하중계, LVDT를 데이터로거에 연결하여 계측준비를 한다. 재하장치를 사용하여 하중을 가하면서 토압계의 응력변화와 지반의 침하경향을 관측하면서 시험한다. 이와 같은 방법으로 지반의 상대밀도를 35%, 55% 그리고 65%, 기초판의 폭을 10cm 및 20cm로 바꾸어가면서 시험하였다.

4. 시험결과 및 분석

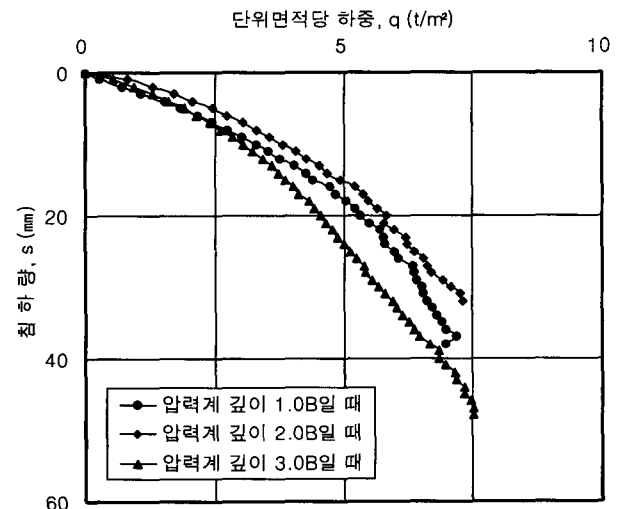
4.1 시험결과

상대밀도와 기초폭을 달리하여 시험한 결과가 그림 7~11에 나와 있다. 당초 계획에는 상대밀도 35%, 기초 폭 10cm에 대한 시험도 있었으나 기초판만 올려놓아도 급격히 침하하는 관계로 인하여 수행이 곤란하여 제외하였다. 여기서는 상대밀도 35%, 기초폭 20cm에 대한 시험결과인 그림 7을 위주로 하여 결과에 대해 분석한 내용을 설명하기로 한다.

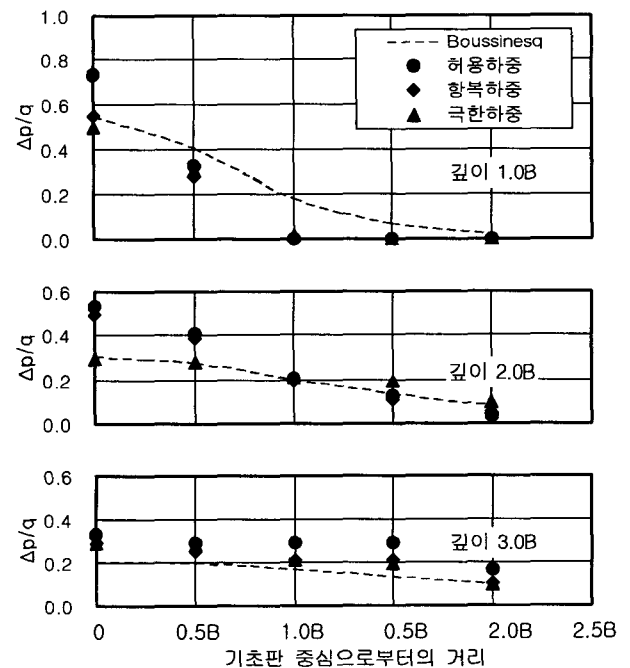
각각의 시험으로부터 극한하중, 항복하중 및 허용하중을 결정할 때에는 하중-침하량 곡선에서 급격한 침하가 발생하는 하중으로부터 극한하중을 구하고 이를 근거로 극한하중의 $\frac{1}{3}$ 을 허용하중, 극한하중의 $\frac{2}{3}$ 를 항복하중으로 삼았다. 여기서, 극한하중의 $\frac{2}{3}$ 를 항복하중으로 삼은 이유는 기초의 하중이 항복하중상태로 증가하면 지반이 항복하면서 국부전단파괴가 발생하고 계속해서 하중이 가해져서 극한하중상태가 되면 전반전단파괴가 발생하는데 이 때 항복하중은 극한하중의 약 $\frac{2}{3}$ 가 된다는 것에 근거한 것이다(Lambe and Whitman, 1979). 그러나 이는 본 연구에서 고려하는 항복하중단계가 특정한 값이 아닌 개략적인 범위만을 나타내도 무

방하기에 적용한 것이며 이 값이 적확히 항복하중이라는 의미는 아니라는 점에 유의하기 바란다.

그림 7(a)에는 토압계를 각각 1.0B, 2.0B, 3.0B에 매설했을 때의 하중-침하량 관계를 보이고 있다. 시험방법에서 언급한 바와 같이 토압계의 깊이별로 3회의 시험을 수행하였으며 각각의 시험마다 하중에 따른 기초판의 침하량을 측정하여 같은 조건의 하중-침하량 곡선 3개를 구하였다. 즉, 각 그림에 나타나있는 3개의 하중-침하량 곡선에서 침하량은 깊이별 침하량이 아니라 모두 재하판의 침하량이다. 또한 3개의 하중-침하량 곡선의



(a) 하중- 침하량곡선



(b) 깊이별 응력분포

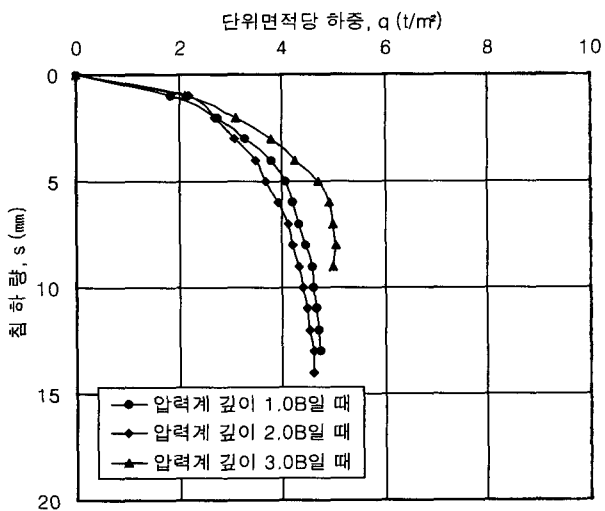
그림 7. 상대밀도 35%, 기초폭 20cm인 경우

경향이 토압계의 매설깊이와 무관하게 나타난 것으로 미루어 토압계의 매설깊이와 침하량 사이에는 특별한 관계가 없으며 단지 3차례의 시험마다 다소의 오차가 발생하여 차이를 보이는 것으로 판단된다.

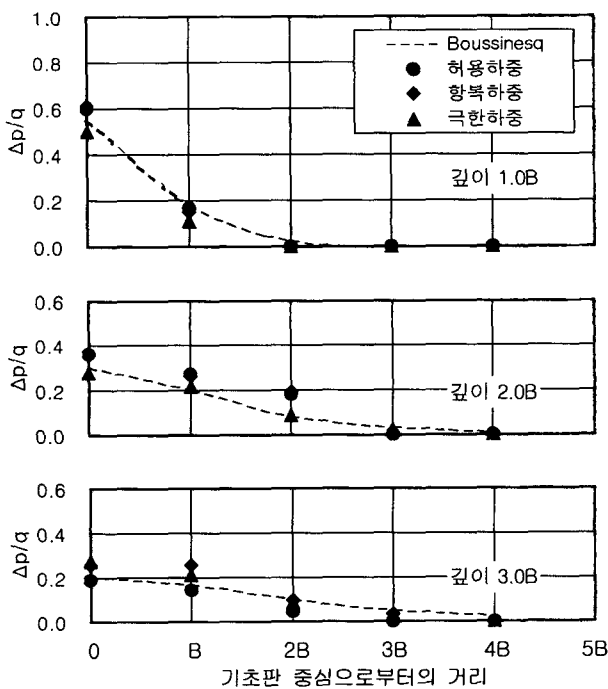
그림에서 보면 토압계를 3.0B 깊이에 매설했을 경우의 하중-침하량 관계는 다른 두 경우와 다소 차이가 난다. 이는 실험상의 오차로 인한 것으로 판단되며 이들이 일치한다는 것은 사실상 불가능할 것이다. 실제로 시험시 3개의 하중-침하량 곡선에서 특히 차이가 나는 곡선이 있는 경우에는 해당 곡선에 대해 한두차례 재시험하

였으며 논문에는 그 중 다른 2개와 비슷하게 나타난 결과만을 분석하고 제시하였다. 재시험한 결과가 계속 처음과 비슷하게 나오면 다른 2개의 시험에 오차가 있는 것으로 보아 다른 2개를 재시험하려고 하였으나 그런 경우는 없었다.

토압계의 깊이를 달리하여 3회에 걸쳐 재시험을 실시하고 각각의 시험마다 하중 및 기초판의 침하량을 측정된 결과 이들 세 경우에 있어서 극한지지력은 다소 차이는 있지만 모두 약 $7.5t/m^2$ 부근에서 나타난다고 보아도 무리가 없다. 따라서 이 경우는 허용하중단계로서 약

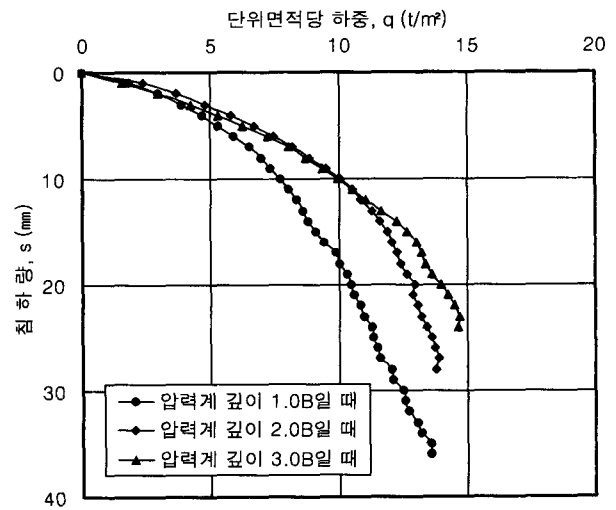


(a) 하중- 침하량곡선

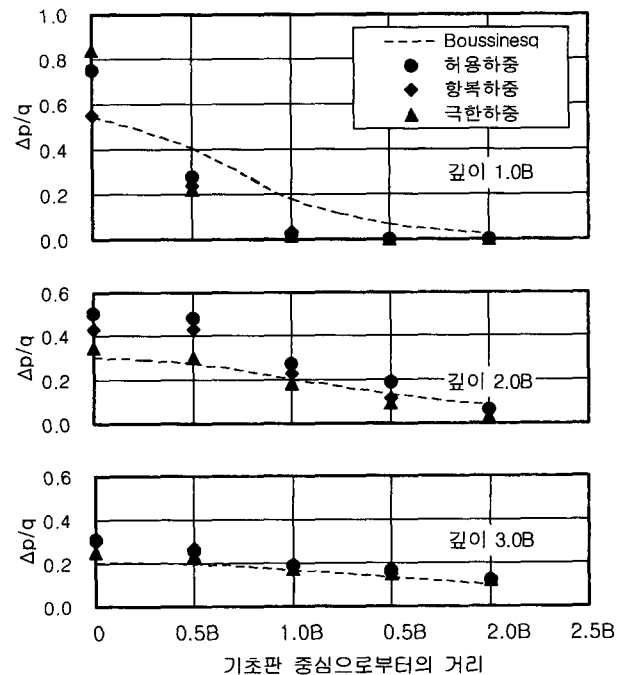


(b) 깊이별 응력분포

그림 8. 상대밀도 55%, 기초폭 10cm인 경우



(a) 하중- 침하량곡선

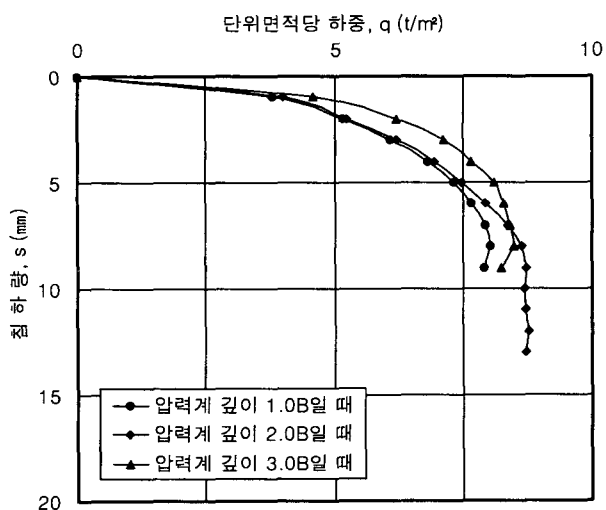


(b) 깊이별 응력분포

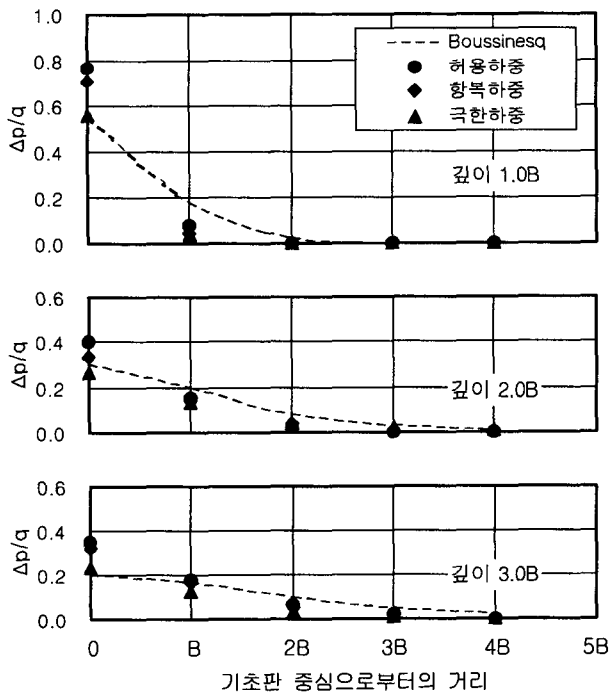
그림 9. 상대밀도 55%, 기초폭 20cm인 경우

2.5t/m², 항복하중단계로서 약 5.0t/m², 극한하중단계로서 약 7.5t/m²에 해당하는 토압계 읽음 즉, 지중연직응력을 취하였다. 그림 7(b)에는 이와 같이 얻은 지중연직응력 Δp 를 기초판에 가해진 단위면적당 하중 q 로 나눈 값 즉, $\Delta p/q$ 를 실측값으로 하여 깊이별로 기초판 중심으로부터의 횡방향 거리에 따라 나타내었다. $\Delta p/q$ 를 사용하면 가해진 하중에 대한 응력증가량을 무차원화함으로써 상대적인 비교가 용이하다. 그림에는 Boussinesq의 식에 의한 이론값도 나타내었다.

마찬가지 방법으로 그림 8에는 상대밀도 55%, 기초폭 10cm에 대한 실험결과를 보이고 있다. 이 경우는 허용하중단계로서 약 1.6t/m², 항복하중단계로서 약 3.2t/m², 극한하중단계로서 약 4.8t/m²에 해당하는 토압계 읽음을 취하였다. 상대밀도가 55%이고 기초폭이 20cm인 경우 및 상대밀도 65%에 기초폭 10cm, 20cm인 경우도 그림 9~그림 11에 나타내었으며 각 경우에 대한 허용하중, 항복하중 극한하중 및 그 때의 침하량을 표 2에 정리하였다.

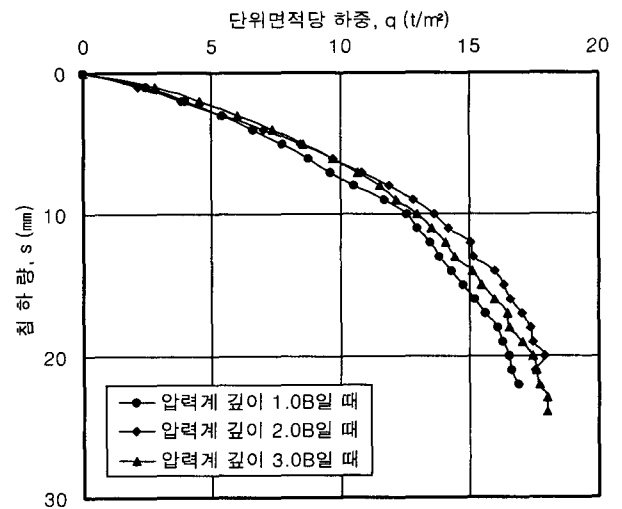


(a) 하중- 침하량곡선

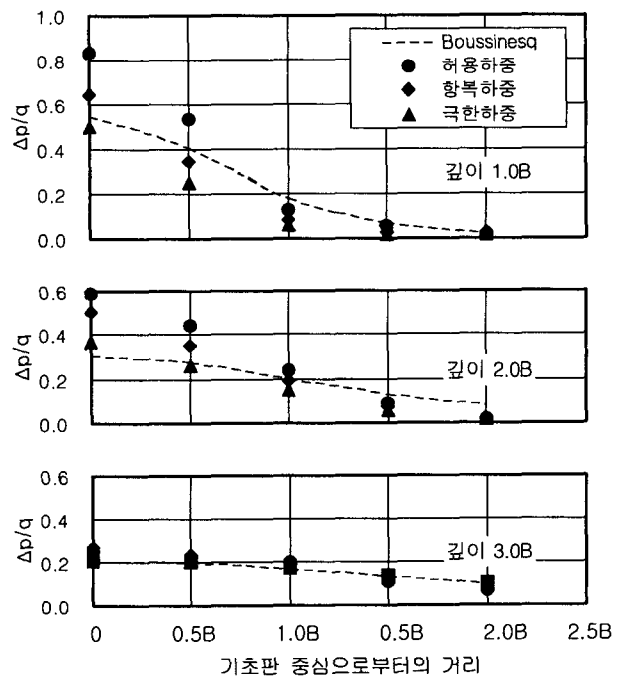


(b) 깊이별 응력분포

그림 10. 상대밀도 65%, 기초폭 10cm인 경우



(a) 하중- 침하량곡선



(b) 깊이별 응력분포

그림 11. 상대밀도 65%, 기초폭 20cm인 경우

표 2. 상대밀도 및 기초폭에 따른 하중단계 및 그 때의 침하량

상대밀도 (%)	기초폭 (cm)	하중단계		
		허용하중 (t/m ²) 침하량 (mm)	항복하중 (t/m ²) 침하량 (mm)	극한하중 (t/m ²) 침하량 (mm)
35	20	2.5	5.0	7.5
		7.1	18.1	38.1
55	10	1.6	3.2	4.8
		0.8	3.6	14.1
	20	4.5	9.0	13.5
		4.0	15.0	35.0
65	10	2.7	5.4	8.1
		0.8	2.1	8.1
	20	5.6	11.2	16.8
		3.0	9.1	21.1

그림 7~11에서 기초폭 20cm인 경우는 가로방향 토압계간격이 0.5B이고 10cm인 경우는 1.0B인 것은 토압계의 간격을 100mm로 유지하였기 때문이다.

4.2 측정값과 Boussinesq의 이론값의 비교분석

4.2.1 깊이별 횡방향 분포특성

그림 7~그림 11에서 깊이 1.0B에 해당하는 그림을 보면 상대밀도나 재하폭에 관계없이 전반적으로 기초판 하부에 대한 Boussinesq의 이론값은 실측값보다 작다. 다시 말하면 Boussinesq의 이론은 이 부분에 있어서 지중연직응력을 과소평가한다고 볼 수 있다. 이 차이는 허용하중단계에서 크고 항복하중단계에서는 작아지며 극한하중단계에서는 비슷해진다. 기초판 중심에 대한 허용하중단계에서의 실측값은 이론값의 약 1.5배에 달했으며 중심에서 멀어지면 차이가 점점 작아져서 기초판 끝단에서는 비슷해진다.

이 깊이에 있어서 기초판을 벗어난 범위에서는 전반적으로 이론값이 큰 것으로 나타났다. 즉, 기초판을 벗어난 범위에서는 Boussinesq의 이론은 지중연직응력을 과대평가한다. 그러나 그림들에서 보듯이 그 차이는 실험조건에 따라 불규칙하게 나타나서 정량적으로 정리하기는 곤란하였다.

깊이 2.0B에 있어서 기초판 하부의 이론값이 지중연직응력을 과소평가한다는 경향은 1.0B에서와 같으나 그 차이는 크게 줄어들어서 $\frac{1}{2}$ 정도가 된다. 기초판을 벗어난 범위에서는 이론값은 실측값과 비슷해진다.

기초폭의 3배에 해당하는 깊이에 있어서는 기초판 하부의 Boussinesq의 이론값이 실측값보다 작다는 경향은

여전하지만 그 차이는 경미하다. 기초판을 벗어난 범위에서는 이론값과 실측값이 거의 같게 나타났다.

이와 같은 결과가 나타난 이유는 지반은 탄성체가 아니므로 기초판의 하중에 의해 지반에 압력이 가해지면 지중의 응력은 일단 기초판 직하부에 집중하고 깊이가 깊어짐에 따라 넓은 범위로 분산되기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 약 2.0B 정도의 깊이까지는 중심부의 지중연직응력이 크게 나타나는 경향이 있다.

이 결과는 지중응력의 산정을 통한 침하량의 계산 등의 설계작업이 사용하중인 허용하중단계에서 이루어진다는 점을 감안하면 매우 중요하다. 즉, Boussinesq의 이론으로는 기초판 하부의 지중연직응력을 과소평가하게 되어 불안정한 설계로 나타날 수 있다. 따라서 기초판 하부의 지중연직응력을 Boussinesq의 이론으로 산정하는 경우에 실제로는 계산결과보다 크다는 것을 감안해야 할 것이다.

4.2.2 하중단계에 따른 분포특성

그림 7~그림 11에서 보면 전반적으로 깊이와 횡방향 거리에 관계없이 허용하중단계의 $\Delta p/q$ 가 가장 크고 그 다음으로는 항복하중단계, 극한하중단계의 순이었다. 즉, 하중이 증가함에 따라 가해진 단위면적당 하중에 대한 지중연직응력은 감소하였다. 이러한 결과를 정량적으로 나타내기에는 경우에 따른 값의 편차가 심하여 곤란하였다. 이 경향은 다소의 차이는 있지만 재하폭이나 상대밀도에 관계없이 나타났다.

시험결과로부터 허용하중, 항복하중, 극한하중단계에서 기초판 중심 하부에서 측정된 기초판에 가해진 단위면적당 하중에 대한 지중연직응력 $\Delta p/q$ 를 표 3에 정리하였다. 마찬가지로 깊이에 관계없이 전반적으로 하중이 증가함에 따라 가해진 단위면적당 하중에 대한 지중연직응력은 감소하였다.

이와 같은 이유는 하중이 허용하중으로부터 극한하중단계로 가면 지반의 변형 즉, 침하가 커져서 응력이 이완되는 현상이 나타나기 때문이라고 볼 수 있다. 이를 알아보기 위하여 표 2에는 각 하중단계에서의 침하량도 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 허용하중으로부터 극한하중단계로 갈수록 침하량이 급격히 커지는 것을 알 수 있다. 실제 기초의 사용상태는 대부분 허용하중단계이므로 이 결과는 주목할 필요가 있다. 설계시 이러한 경향을 반영하기 위해서는 표 3을 활용할 수 있을 것이다.

표 3. 각 하중단계에서의 기초중심 하부의 $\Delta p/q$

(a) 깊이 1.0 B인 경우

상대밀도 (%)	하중단계		허 용	항 복	극 한
	기초폭 (cm)				
35	20		0.75	0.55	0.50
	10		0.60	0.60	0.50
55	20		0.85	0.75	0.55
	10		0.75	0.70	0.55
65	20		0.85	0.65	0.50

(b) 깊이 2.0 B인 경우

상대밀도 (%)	하중단계		허 용	항 복	극 한
	기초폭 (cm)				
35	20		0.55	0.50	0.30
	10		0.35	0.35	0.25
55	20		0.50	0.45	0.35
	10		0.40	0.35	0.25
65	20		0.60	0.50	0.35

(c) 깊이 3.0 B인 경우

상대밀도 (%)	하중단계		허 용	항 복	극 한
	기초폭 (cm)				
35	20		0.35	0.30	0.25
	10		0.25	0.25	0.20
55	20		0.30	0.30	0.25
	10		0.35	0.30	0.20
65	20		0.30	0.25	0.20

그림 7~그림 11에서 보면 Boussinesq의 이론값과 실측값과의 관계는 하중단계에 관계없이 앞의 깊이별 횡방향 분포특성의 경향과 유사하다. 이는 하중단계별 지중연직응력의 차이가 별로 크지 않기 때문이다. 다만 깊이가 2.0B에서 기초판을 벗어난 범위에서는 Boussinesq의 이론값이 허용하중단계에서는 이론값보다 작고 극한하중단계에서는 크지만 그 차이는 매우 작다.

실제 설계에 있어서는 침하량 등을 산정하는 작업이 사용하중단계에 대해서 이루어진다. 일반적으로 사용하중은 허용하중으로 결정된다. 따라서 실질적인 문제에 있어서는 허용하중단계의 결과에 주목하여야 할 것이다.

4.2.3 토질특성 및 기초크기의 영향

당초에는 토질의 특성이나 기초의 크기에 따라 지중

응력이 달라질 것으로 예상하여 모래의 상대밀도를 35%, 55%, 65%로 달리하고 기초판의 폭도 10cm, 20cm로 달리하여 그 차이를 알아보는 시험을 수행하였다. 그러나 그림 7~그림 11의 시험결과들을 종합적으로 살펴보면 상대밀도나 기초폭에 따른 차이를 거의 알아보기 어려웠다. 그 이유는 이들로 인한 지중응력의 차이가 없기 때문이거나 또는 본 연구의 시험으로는 이 차이를 파악할 수 없을 정도로 작기 때문이라고 볼 수 있다. 그러나 차이가 없다고는 단정하기 어려우므로 이들로 인한 지중응력의 차이는 무시할 수 있을 만큼 작다고 판단된다. 따라서 사질토의 상대밀도나 기초의 크기는 지중응력 증가에 거의 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있으며 설계시 Boussinesq의 이론으로 지중연직응력을 구할 경우에는 사질토의 상대밀도나 기초의 크기를 특별히 고려할 필요는 없다고 볼 수 있다.

단, 이 결과는 본 연구에서 행한 시험의 범위 이내에서만 성립할 수도 있다. 상대밀도나 기초판의 크기를 좀 더 큰 폭으로 다양하게 변화시킨다면 보다 일반적인 결론을 도출할 수 있을 것이다.

5. 결 론

지표면 재하에 의한 지중연직응력을 구하는 데에 있어서 현재 가장 널리 사용되고 있는 Boussinesq의 해를 이용한 이론값을 고찰하여 설계에 적용시 이 값을 적절히 수정, 보완할 수 있는 방안을 강구하고자 하였다. 이를 위하여 Boussinesq의 이론값을 별도로 제작한 시험장치에 의한 모형시험을 수행하여 얻은 실측값과 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기초폭과 같은 깊이에서는 기초판 하부에 대한 Boussinesq의 이론값은 지중연직응력을 과소평가하여 기초판 중심에 대한 허용하중단계에서의 실측값은 이론값의 약 1.5배에 달하고 극한하중단계로 갈수록 비슷해진다. 기초판을 벗어난 범위에서는 전반적으로 이론값이 지중연직응력을 과대평가하는 경향이 있다. 기초폭의 2배에 해당하는 깊이에 있어서도 기초판 하부의 이론값이 지중연직응력을 과소평가한다는 경향은 여전히나 그 차이는 $\frac{1}{2}$ 정도로 줄어든다. 기초판을 벗어난 범위에서는 두 값이 비슷하다. 기초폭의 3배에 해당하는 깊이에 있어서는 기초판

하부의 이론값이 실측값보다 작다는 경향은 여전하지만 그 차이는 경미하다. 기초판을 벗어난 범위에 서는 두 값이 거의 같게 나타났다.

따라서 기초판 하부의 지중연직응력을 Boussinesq의 이론으로 산정할 경우에는 실제로는 계산결과보다 크다는 것을 감안해야 할 것이다.

- (2) 전반적으로 기초판에 가해진 단위면적당 하중에 대한 지중연직응력은 허용하중단계에서 가장 크고 그 다음으로는 항복하중단계, 극한하중단계의 순이었다. 즉, 하중이 증가함에 따라 가해진 단위면적당 하중에 대한 지중연직응력은 감소하였다.

Boussinesq의 이론값과 실측값과의 관계는 하중단계에 관계없이 첫째 결론의 깊이별 횡방향 분포특성의 경향과 유사하다.

- (3) 본 연구의 시험결과에 따르면 상대밀도와 기초폭에 변화에 따른 지중연직응력의 차이는 뚜렷이 나타나지 않았다. 이것은 본 연구에서 행한 시험의 범위 이내에서는 사질토의 상대밀도나 기초의 크기는 지중연직응력에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다.

이상의 결과는 주로 정성적으로 이루어졌으며 따라서 정량적인 설계지표를 제시하기에는 다소 미흡한 점이 있다. 향후 보다 다양하고 정밀한 실험을 통하여 Boussinesq의 해를 적절히 수정, 보완할 수 있는 추가적

인 방안을 제시한다면 보다 정확한 기초설계에 기여할 수 있을 것이며 나아가 새로운 이론의 개발도 이루어질 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 건설부 (1987), 구조물기초설계기준 해설, 대한토질공학회, pp. 97-184.
2. 김기웅, 백영식 (1981), "탄성론과 확률론에 의한 지중응력분포의 비교연구", 대한토목학회논문집, 제29권 제1호, pp.91-97.
3. 이상덕 (1997), 기초공학, 엔지니어즈, pp.111-206.
4. 황정규 (1992), 지반공학의 기초이론, 구미서관, 서울, pp.192-221.
5. Boussinesq, J. (1885), *Application des Potentials a L'Etude de L'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques*, Gauthier-Villars, Paris.
6. Das, B. M. (1998), *Principles of Geotechnical Engineering*, PWS, Boston, pp.263-277.
7. Fröhlich, O. K. (1934), *Druckverteilung im Baugrunde*, p.11.
8. Harr, M. E. (1977), *Mechanics of Particulate Media - A Probabilistic Approach*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y.
9. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, pp.195-199.
10. Leussink, H., Blinde, A., and Abel, P. G. (1966), *Versuche uever die Sohldruckverteilung unter starren Grundkoerpern auf kohaesionslosem Sand*, Veroeff. Institute fuer Bodenmechanik TH Karlsruhe, Heft 22.
11. 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 Soils*, Stephen Timoshenko 60th Anniversary Volume, Macmillan, New York.

(접수일자 2003. 10. 17, 심사완료일 2004. 12. 1)