

조밀한 층을 포함하는 사질 지반의 지지력에 관한 연구

A Study on the Bearing Capacity of the Sand Foundation Including the Dense Sand Layer

박은영* · 이상덕** · 권오엽*** · 허창택****

Park, Eun Young · Lee, Sang Duk · Kwon, Oh Yeob · Hu, Chang Tack

Abstract

The bearing capacity of the sand foundation including a thin dense sand layer depends on the stiffness, thickness and the location of the dense sand layer.

In this paper was the influence of the dense sand layer on both the bearing capacity and the failure configuration is studied by means of K.E.M(Kinematic Element Method).

K.E.M was implemented to get the exact solution starting from the upper bound of the analysis. The result show that the bearing capacity of the foundation and the failure configuration is greatly influenced by the dense sand layer, when the layer is located not deeper than 3/5 of the foundation width.

요 지

기초 지반이 몇개의 토층으로 구성된 경우 그 지지력은 각 토층의 강성도와 두께 및 위치 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 기초 설계시에 기초의 지지력을 정확히 구하고 파괴면을 예측하기 위해서는 토층의 상태를 지지력 계산에 고려해야 한다.

본 연구에서는 기초 지반이 사질지반이고 중간에 상대적으로 조밀한 지층을 포함하는 경우에 조밀한 층의 두께나 위치가 기초의 지지력 및 파괴모양에 미치는 영향을 극한 해석의 상한한계 (upper bound) 쪽에서 완전해에 가까운 해를 구하는 K.E.M (Kinematical Element Method)을 이용하여 검토 하였으며, 기초 폭(B)의 3/5 B 보다 깊지 않은곳에 조밀한 층이 위치하는 경우에는 기초의 지지력과 파괴모양이 조밀한 층의 영향을 받는 것으로 나타났다.

1. 서 론

기초를 설계할 때에 지지력을 정확히 산정하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 사질 지반의 지지력은

지반의 내부마찰각, 단위 중량, 기초의 크기, 깊이 및 모양, 기초 바닥면의 마찰각 등에 따라서 달라지며^(1,2) 여러 개의 지층으로 이루어진 다층지반에서는 각 지층의 강성도, 두께, 위치, 지반의 생성시기 및 각 지층의 물성치에 의해 영향을 받는다. 균질한 사질 지반의 지지력에 관하여는 이론적, 경험적으로 많이 연구되어 왔으나^(3,4,5) 여러개의 지층으로 이루

* 성희원 · 코오롱건설기술연구소

** 성희원 · 아주대학교 토목공학과 조교수

*** 성희원 · 건국대학교 토목공학과 부교수

**** 성희원 · 부산전문대학 토목과 강사

어진 지반의 지지력 및 파괴 형태를 연구한 경우는 드물다.

따라서 본 연구에서는 사질지반의 중간에 상대적으로 조밀한 사질층이 위치하는 층상구조 지반에서의 지지력 및 파괴 모양을 K.E.M(Kinematical Element Method)을 적용하여 검토하였다. 이러한 층상구조는 지반의 다짐 성토 및 지층의 생성이력에 따라 나타날 수 있으며, 조밀한 층의 두께 및 위치 변화가 기초의 지지력과 파괴모양에 미치는 영향을 살펴봄으로서 보다 정확하고 신뢰성 있는 기초 설계를 유도하고자 하였다.

2. K.E.M 이론의 배경

K.E.M(Gussmann, 1982)은 상한한계 쪽에서 시도하여 일반적인 정밀해를 구하는 방법으로서 해석 대상 지반을 합당한 파괴 메카니즘에 맞게 여러개의 강성요소로 나누고 이 요소들이 극한 평형상태 일때 내부에서 소산된 에너지와 외력의 행한 일이 같다고 가정하여 목적함수를 구하는 이론으로^(7,8) K.E.M은 크게 운동학(Kinematics), 정역학(Statics), 목적함수(Object Function) 및 Optimization으로 구성되며 다음과 같다.

2.1 Optimization

K.E.M을 이용하여 해석 대상지반의 지지력을 계산할 때 Optimization은 가장 중요한 부분이며 인장응력이 발생하는 것을 인지하고 이를 효과적으로 피하여 합당한 해를 구하기 위한 처리 기술(Technique)로서^(9,10) K.E.M에서는 Box(1965)가 제안한 Complex (Constrained Simplex) Strategy 방법을 적용하였다. 이때 이 방법은 Geometry 변화시에 범위를 정해 주기 때문에 각 강성요소 (rigid element)들 간에 부분적으로 인장이 발생 하더라도 용이하게 벗어나 계산 할 수 있다.⁽¹²⁾

2.2 Geometry

Geometry 부분에서는 각 강성요소들의 자중, 활동면에 작용하는 마찰력, 점착력 및 면적과 변의 길이를 구하는 부분으로서 Optimization 과정에서 강성요소(rigid element) 들의 결정 좌표가 변할 때 마다 면적과 변의 길이를 새로 계산한다.⁽⁷⁾ 이때 각

강성요소에 작용하는 자중은 일정하며 활동면에 작용하는 마찰력, 점착력은 면적과 변의 길이에 따라 다르게 나타난다.

3.3 Kinematics(운동학)

운동학에서는 강성요소 시스템의 운동가능성을 확인하고 시스템 내부에서 소모되는 에너지를 계산하기 위한 상대변위를 구하는 단계로서 상대변위는 요소간의 접촉면에서 평행하게 작용하며 변위도(Hodograph)를 그려서 구하거나 전체 방정식 시스템(Global Equation system)을 풀어 구한다.^(8,9) 그림 1은 전체 K.E.M 시스템의 변위와 Hodograph 보기를 보여준다.

그림 1에서 e와 f 요소간의 상대변위의 X-, Z-성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{e/f,x} &= V_{e/f,x} \cdot \cos \alpha_{f/x} = -V_{e/f,x} \\ V_{e/f,z} &= V_{e/f,z} \cdot \sin \alpha_{f/z} = -V_{e/f,z} \end{aligned} \quad (1)$$

각요소 d, e, f, g가 변위를 일으키기 전에 공유하였던 점 i에 대한 적합조건은

$$\begin{aligned} V_{c/d,x} + V_{d/e,x} \cdot V_{e/f,x} + V_{f/g,x} &= 0 \\ V_{c/d,z} + V_{d/e,z} \cdot V_{e/f,z} + V_{f/g,z} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에 식 (1)의 상대변위 X-, Z- 성분을 대입하면 모든 공유점에 대한 미지의 상대변위 V_i 를 구할 수 있는 식 (3)과 같은 선형 방정식을 얻을 수 있다.

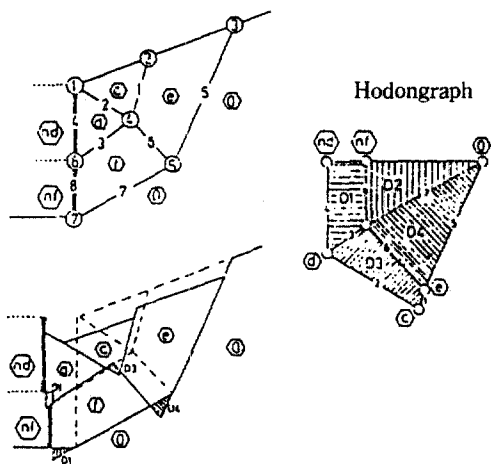


그림 1. KEM 시스템의 변위와 Hodograph

$$K_s \cdot V_s + V_a = 0 \quad (3)$$

여기에서 계수 K_s 는 공유점 i 를 지나는 변들의 sine, cosine 값으로 나타내어지며, 상대변위 V_s 는 각 요소에 대하여 반시계 방향을 양으로 나타낸다. 또한 V_a 는 외부에서 가해진 변위를 나타낸다.

2.4 정역학(Statics)

전체 시스템에서 각 요소들은 서로 접하는 면에서 활동만을 일으키며 회전하지 않는다. 이때 각 변에서 상대변위 V_s 를 알고 있으면 그 변에 작용하는 힘들의 작용방향이 결정되며 임의 요소 한변 s 에 작용하는 합력과 분력은 그림 2와 같다.

임의 요소 한변 s 에 작용하는 힘 S_s 는 수직으로 작용하는 힘 N_s 와 접선방향으로 작용하는 힘 T_s 의 합력이며 N_s 는 압축때, T_s 는 시계방향으로 작용할 때를 양으로 정의한다. 여기에서 N_s 는 유효수직력 N_s' 와 수압 $U_s = u \cdot l_s$, T_s 는 마찰력 R_s 와 점착력 $C_s = c_s \cdot l_s$ 의 합이다.

변 s 에 작용하는 미지의 힘 N_s' , R_s 를 수직방향에 대하여 내부마찰각 ϕ_s 만큼 기울게 작용하는 합력 Q_s 로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N_s' &= Q_s \cdot \cos \phi_s \\ R_s &= Q_s \cdot \sin \phi_s \end{aligned} \quad (4)$$

또한, 임의의 요소 f 의 변 S 에 작용하는 힘의 합력 S_s 에 대하여 X , Z - 성분으로 분력하면 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{sx} &= -Q_s \cdot \sin(\alpha_s + \delta_s \cdot \phi'_s) + \delta_s \cdot C_s \cdot \cos \alpha_s \\ &+ U_s \cdot \sin \alpha_s \end{aligned}$$

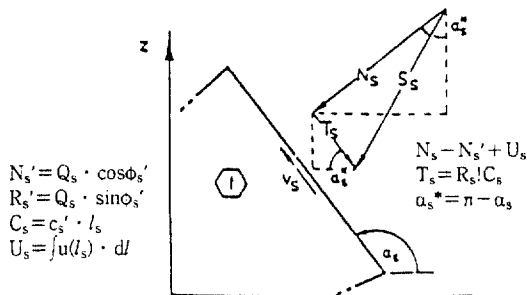


그림 2. 임의 요소 한변에 작용하는 힘과 분력

$$\begin{aligned} S_{sz} &= -Q_s \cdot \sin(\alpha_s + \delta_s \cdot \phi'_s) - \delta_s \cdot C_s \cdot \cos \alpha_s \\ &+ U_s \cdot \sin \alpha_s \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서, δ_s 는 상대변위의 부호를 나타낸다. 즉 모든 요소에 작용하는 힘들의 X , Z - 방향의 평형식을 계산하여 정리하면 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$K \cdot Q + F = 0 \quad (6)$$

여기서, K : Global Friction Matrix

Q : 미지의 힘

F : 요소의 자중 및 점착력, 수압을 포함하는 하중 벡터

2.5 목적함수(Object Function)

K.E.M에서 목적함수는 주로 가상변위를 일으키는 요소(Element)에서 외력이 행한일로 정의하며 Numerical Optimizing Technique을 써서 그 극한치를 구한다.

$$E = V \cdot S$$

여기서, E : 외력이 행한일

V : 가상변위를 일으키는 요소의 가상변위

S : 가상변위를 일으키는 요소의 경계력

3. 사질지반의 지지력 계산을 위한 K.E.M 모델

지층의 중간에 상대적으로 조밀한 층을 포함하는 사질지반에서 조밀한층이 기초의 지지력 및 파괴형태에 미치는 영향을 파악하기 위하여 6개의 삼각형 요소와 1개의 벽체요소로 이루어진 K.E.M모형을

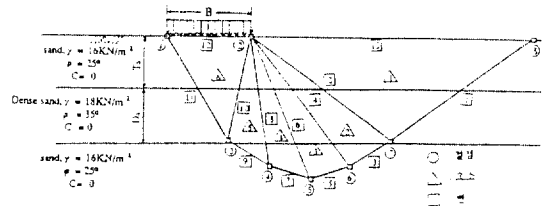


그림 3.1 다층 사질 지반의 지지력을 계산하기 위한 K.E.M 모델.

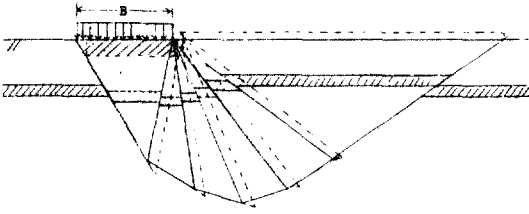


그림 3.2 기초의 관입으로 인한 기초 및 요소들의 거동.

적용하였고, 균질한 사질지반에 대한 결과와 비교하였다. 해석 과정에서 각 요소들의 기본 형태는 변하지 않았다(그림 3.1).

요소가 조밀한 층을 포함하는 경우에는 토질정수는 평균값을 적용하였으며⁽¹³⁾ 층경계면에서의 상대적인 변위는 없다고 가정하였다.⁽¹³⁾

강성인 기초는 수평인 지표에 위치하여 연직으로 관입하며, 기초 저면의 마찰을 무시하였다. 기초의 관입으로 인한 기초 및 요소들의 거동은(Kinematic) 그림 3.2와 같다.

4. 결과 및 고찰

기초 지반의 지지력 해석시에 기초아래 지반이 완전소성상태가 되기에 충분하도록 기초 변위를 크게 주었으며, 기초의 지지력 계산에 대한 K.E.M의 적용성을 검토하기 위하여 균질한 사질지반에 대해서 K.E.M으로 계산한 지지력과 기존 지지력 공식에 의한 지지력을 비교 하였다.

그림 3.3은 균질한 사질 지반에서 내부 마찰각(ϕ)이 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° 로 변하는 각각의 경우에 대하여 Terzaghi, Meyerhof, Bell식과 Din 4017규정에 의한 기존의 지지력 계산 값과 K.E.M으로 계산된 값을 비교 도시 하였다.

균질한 사질 지반에서와 같이 내부마찰각(ϕ)이 커짐에 따라 지지력이 증가함을 알 수 있고 K.E.M에 의한 지지력 값은 Terzaghi, Meyerhof 값 보다는 약간 작은 안전측 값으로 나타났으며, Bell 값과 Din 4017규정에 의한 값 보다는 크게 나타났다.

그림 3.4, 3.5는 조밀한 층을 포함하는 사질지반에서 각각 조밀한 층의 깊이와 두께에 따른 영향을 나타낸다. 그림 3.4는 기초 저면으로부터 조밀층의

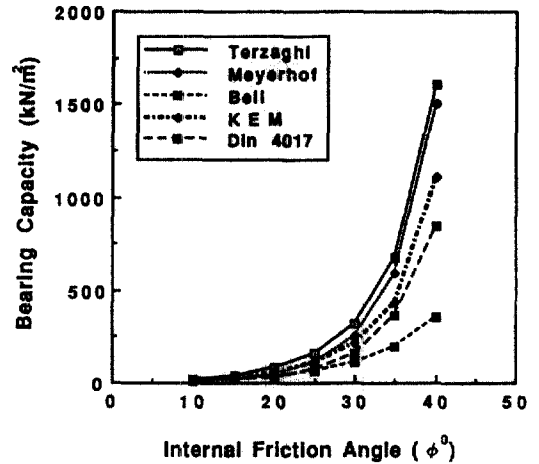


그림 3.3 균질한 사질 지반의 지지력 비교.

($\gamma=16\text{kN/m}^3$, 근입깊이(D_f)=0, 점착력 $C=0$)

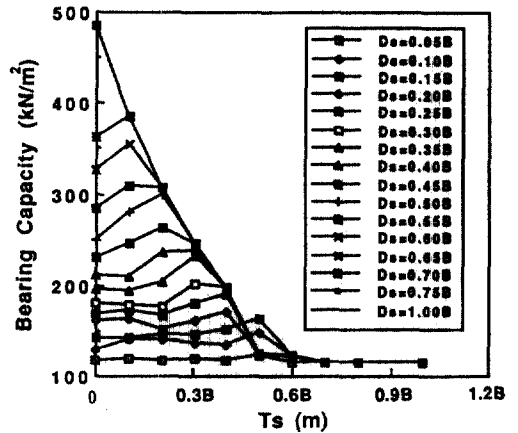


그림 3.4 조밀층의 깊이(T_s) 변화에 따른 지지력 비교.

(사질토층: $\gamma=16\text{kN/m}^3$, $\phi=25^\circ$, 점착력 $C=0$ 조밀한층: $\gamma=18\text{kN/m}^3$, $\phi=35^\circ$, 점착력 $C=0$)

깊이(T_s)가 기초 폭(B)에 대하여 $B/10$, $2B/10$, $3B/10$, ..., B 일 때에 극한 지지력을 나타낸다. 여기에서 조밀층의 두께(D_s)가 일정한 경우 조밀층이 특정한 깊이(T_s)에 위치할 때에 지지력이 최대가 되며(예를 들어, 두께 0.1B 조밀층은 깊이 0.5B에서, 두께 0.25B 조밀층은 깊이 0.4B에서, 두께 0.45B 조밀층은 깊이 0.2B에서, 두께 0.6B 조밀층은 깊이 0.1B 일때 지지력이 가장 커진다) 조밀층이 기초의 저면으로부터 $3B/5$ 보다 깊게 위치할 경우는 조밀층에 의한 지

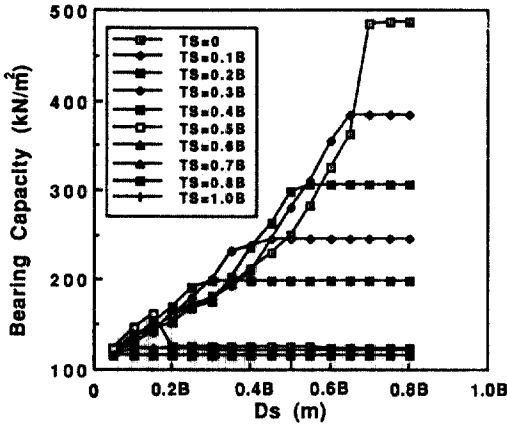


그림 3.5 조밀층의 두께(D_s) 변화에 따른 지지력 비교.
(사질토층: $\gamma = 16\text{kN/m}^3$, $\phi = 25^\circ$, 점착력 $C = 0$ 조밀한층: $\gamma = 18\text{kN/m}^3$, $\phi = 35^\circ$, 점착력 $C = 0$)

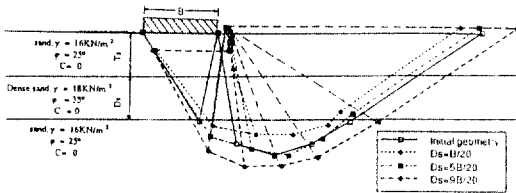


그림 3.6 조밀층의 깊이(T_s)가 $2B/10$ 이고, 조밀층의 두께(D_s)가 $B/20$, $5B/20$, $9B/20$ 일때의 파괴형태

지지력의 증가는 없었다. 즉, 조밀층의 두께(D_s)가 증가하여도 지지력은 일정한 크기를 나타내었다. 사질토층의 중간에 위치하는 조밀층은 어느 특정 깊이 이하에서는 기초 지반의 지지력에 영향을 미치지 못하였다.

그림 3.5에서는 두께(D_s)가 0, $B/20$, $2B/20$, ..., B 인 조밀층이 여러가지 다른 깊이(T_s)에 위치한 경우의 지지력을 나타낸다. 일정한 깊이(T_s)에 조밀층이 있는 경우 조밀층이 특정한 두께(D_s)까지는 지지력이 증가하나(예를 들어, 조밀층의 깊이(T_s)가 $0.1B$ 일 경우는 $0.65B$ 까지, $0.4B$ 인 경우는 $0.25B$ 까지) 조밀층의 깊이(T_s)가 어느 한계깊이 보다 깊으면(조밀층의 깊이(T_s)와 두께(D_s)를 합한값이 기초폭 B 에 대하여 약 $3B/5$ 이상일 경우) 조밀층의 두께(D_s)가 증가하여도 지지력은 일정한 값으로 나타난다.

그림 3.6은 일정한 깊이(T_s)가 $2B/10$ 이고 두께(D_s)가 각각 $B/20$, $5B/20$, $9B/20$ 인 조밀층이 위치한 경우에 기초가 지표면으로부터 $0.1B$ 관입 하였을 때 파괴모양을 나타낸다. 여기에서 기초지반의 파괴모양은 조밀층에 의해 영향을 받으며 조밀층이 두꺼울수록 파괴모양이 크게 형성됨을 알 수 있다.

5. 결 론

이상에서 조밀한 층을 포함하는 사질지반에서 조밀층이 기초의 지지력에 미치는 영향을 K.E.M(Kinematical Element Method) 이론을 적용하여 연구한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 균질한 사질지반에서 K.E.M에 의한 지지력 값은 Terzaghi, Meyerhof, Din 4017 규정에 의한 값에 비해 큰 차이가 없었다.

2) 조밀한 층이 지표 가까이 있을 때는 지지력에 큰 영향을 주며, 조밀한 층이 기초 저면으로부터 깊어질수록 그 영향이 점점 감소하여 특정한 깊이 보다 깊게 위치 할 때는 그 영향이 나타나지 않았고 그 깊이는 조밀한 층의 두께에 따라 다르다.

3) 조밀한 층이 두꺼울수록 지지력이 증가하였으나 특정한 깊이 즉, $3/5B$ 보다 깊지 않은 범위에 위치하는 조밀한 층 만이 기초의 지지력에 영향을 미친다.

4) 두께가 일정한 조밀층이 특정한 위치에 있을때 지지력이 최대가 되며, 이는 조밀층의 두께에 따라 다르게 나타난다.

이상의 해석 결과로 판단해 보면 K.E.M 프로그램은 여러 지층으로 형성되어 있는 다층 지반의 지지력 해석에 적용 가능하며 본 연구의 결과를 지반보강에 적용할 수 있다. 추후에 실험을 통하여 계산결과를 검증하고자 한다.

참 고 문 헌

1. Meyerhof, G. G., "The Bearing Capacity and Settlement of Foundations", 1981, pp. 115-121.
2. Meyerhof, G. G., "The Ultimate bearing Capacity of foundations." *Geotechnique*, 1951, pp. 301-332.
3. Bowles, J. E., "Foundation Analysis and Design", 3th, pp. 130-167.

4. Terzaghi, K. Peck, R. B., "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2th, pp. 217-224.
5. Braja, M. D., "Theoretical Foundation Engineering", 1987, pp. 286-305.
6. Craig, R. F., "Soil Mechanics", 1983, pp. 296-303.
7. Gussmann, P., "Kinematical Elements for Soils and Rocks", *Proc.4. Int. Conf. On. Num. Meth. in Geomech*, Edmonton, 1982, pp. 47-52.
8. Gussmann, P., "Kinematical Element Method In Geomechanics, Numerical Methods in Geomechanics", Vol.2, 1988, pp. 823-828.
9. LEE, S.D., "Untersuchungen zur standsicherheit von Schlitzten im Sand neben Einzelfundament", Institut für Geotechnik, Uni. Stuttgart. Mitt. Heft. 27. 1987.
10. Gussmann, P. / Ochmann H. "Probabilistic theory and kinematical Element Method". *11th ICSMFE*, San Francisco, 2,(1985) pp. 825-829.
11. Gussmann, P. "Application of the Kinematical Element Method to Collapse problems of Earth Structures," *IUTAM Conf. Deform. Failure Granular Materials*, Delft, (1982 a) pp. 545-550.
12. Box, M. J., "A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with other Methods", *Comp. J.*8, 1965, pp. 45-52.
13. Ochmann, H. "Ebene Grenzstände von Erdbo-schungen im stochastischen Sicherheitskonzept", Institut für Geotechnik, Uni. Stuttgart, Mitt. Heft 28, 1988.

(接受：1991. 12. 20)