

개별요소법에 의한 다층지반의 지지력 산정

Evaluation of Bearing Capacity of Multi-layered Soil Deposits

박 준¹ Park, Jun

박 현 일² Park, Hyun-Il

지 성 현³ Jee, Sung-Hyun

이 승 래⁴ Lee, Seung-Rae

Abstract

In this paper, a method is presented for estimating the bearing capacity of shallow foundations based on the Discrete Element Method (DEM). By applying Winkler-springs for accounting for the compatibility between soil blocks, the proposed method can estimate the state of stress at failure surface and the ultimate bearing capacity. For the investigation of the application of the method, example problems about shallow foundations on the single layer and two layers soil are analyzed.

요 지

본 연구에서는 얇은 기초의 지지력을 평가할 수 있는 개별요소법에 근거한 해석기법이 제안되었다. 제안된 해석기법은 토체 간의 거동에 관한 적합조건을 탄소성 Winkler 스프링으로 모사함으로써 파괴면에서의 응력상태와 극한지지력을 함께 구할 수 있다. 기법의 적용성을 검토하기 위하여 단일층 및 이층지반에 설치된 얇은 기초의 지지력 해석을 수행하였다.

Keywords : Bearing capacity, Discrete element method, Foundation, Limit equilibrium method

1. 서 론

Terzaghi(1943)가 Prandtl(1921)의 소성파괴이론에 근거하여 단일층 지반에 설치된 얇은 연속기초에 대한 지지력 이론을 제안한 이후로 다양한 지지력 이론들이 제안되었다(Meyerhof, 1951, 1963; Lundgren과 Mortensen, 1953; Balla, 1962).

기존의 한계평형법에 근거한 지지력 이론을 사용하여 보강재가 설치된 점토지반 위에 위치하는 얇은 기초의 지지력을 평가하기란 쉽지 않다. 이는 하부 점토 지반이 전단강도가 다른 다층으로 구성되며, 점토층의 상부는 GEO-MAT와 같은 토목섬유재와 모래층으로 구

성되기 때문이다. 이러한 복잡한 지반 조건과 함께 토목 섬유재로 인한 보강효과를 적합하게 고려하여 지지력을 구하는 것은 매우 어려운 문제라 할 수 있다.

최근에는 이와 같은 복잡한 해석조건을 갖는 보강된 점토지반의 강성기초에 대한 지지력을 구하기 위하여 유한 요소법에 근거한 접근이 수행되기도 한다. 즉 보강재 사이의 복잡한 경계조건과 불균질한 토질조건에 대한 고려가 가능하기 때문이다. 그러나 유한 요소법의 경우 지반의 초기조건과 지반 자체의 거동, 보강재와 지반 사이의 경계면의 거동에 대한 적합한 구성모델 및 구성 모델계수 값들에 대한 정확한 추정이 반드시 만족되어야 한다. 따라서 기초의 거동특성을 살펴보기 위해

1 SK건설(주) 연구소, 연구원 (Research Engineer, R & D Center, SK Engrg. & Construction LTD.)

2 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소, 선임연구원 (Senior Researcher, R & D Team, Samsung Corporation, gomdori7@empal.com, 교신저자)

3 현대건설 기술연구소, 선임연구원 (Senior Engineer, Hyundai Institute of Construction Technology)

4 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과, 정교수 (Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg., KAIST)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 12월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

서 유한요소법에 근거한 접근이 수행되기도 하지만, 기초의 지지력을 추정하는 데에는 일반적으로 적용되지 않는다.

본 연구에서는 복잡한 지층 구조로 이루어진 보강된 점토지반에 대한 얇은 기초의 지지력을 간편하고 합리적으로 산정하고자 개별요소법(Discrete Element Method)에 근거한 수치해석기법을 제안하였다. 이를 위해 암반 블록의 변형해석에 사용된 동적 수식전개에 근거한 개별요소법(Cundall, 1971; Shi, 1988)과는 달리 토체의 한계평형해석에 적용된 정적인 수식전개에 근거한 개별요소법(Chang, 1992)과 유사한 해석과정을 따랐다(박현일 등, 2005; 2003a; 2003b). 해석을 위한 모델링을 위해 얇은 기초의 하부지반은 파괴면 내부에서 개별요소들로 구성될 수 있으며, 개별요소 사이의 접촉면은 탄소성 거동을 따른다고 가정되었다. 이를 통해 파괴면 내부의 지반은 탄소성 스프링으로 연결된 개별요소들로 고려함으로써 적합 조건을 간편하게 만족하고자 하였다. 개발된 해석프로그램을 사용하여 얇은 기초에 대한 예제 해석을 수행함으로써 제안된 해석기법의 적용성을 검토하였다. 점토지반과 모래지반에 설치된 얇은 기초에 대한 지지력이 평가되었으며, 또한 파괴면 내부의 전단 영역의 개별 요소 수와 지반의 탄성계수의 변화에 따른 영향들이 각각 검토되었다.

2. 한계 상태에서 토체에 대한 개별요소 모델링

얇은 기초의 하부지반의 개별 요소간의 적합조건(compatibility)을 만족하기 위하여 각각의 개별 요소는 그림 1에 나타난 바와 같이 Winkler 스프링으로 연결되었다. Winkler 스프링은 수직거동을 모사하기 위한 수직

방향 스프링과 미끄러짐에 의한 전단거동을 모사하기 위한 전단 스프링으로 구성되어 있다. 각각의 전단 및 수직 스프링은 그림 1에 나타난 바와 같이 탄-소성 거동을 따른다고 가정하였다. 수직 거동에서는 압축에 의한 항복은 유발되지 않으며, 전단거동시 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 준하는 전단강도에 도달되었을 때에 항복되는 것으로 모사되었다.

제안된 방법의 수식전개는 Chang(1992)의 연구와 유사한 과정을 따른다. 그림 2에 나타난 두 절편 사이의 중점 P 에서의 상대변위는 식 (1)처럼 절편 A 와 절편 B 의 질량중심점에서의 변위향으로부터 다음과 같은 행렬형식으로 표현될 수 있다.

$$\Delta u^p = R^{pb} u^b - R^{pa} u^a \quad (1)$$

여기서, R^p 는 각 절편 질량중심에서의 변위 u 를 측면 중심점 P 에서의 변위로 변환시켜 주는 행렬이다. 그리고 변위벡터 $u = (u_x, u_y, w)^T$ 는 절편 중심에서의 X , Y 방향 변위 및 회전각을 의미한다. 첨자 p 는 요소절편의 측면번호를 나타낸다.

전체 좌표계(X - Y)에서의 상대변위 Δu^p 는 변환행렬 A 를 사용하여 각 절편의 측면에서의 지역좌표계로 바꾸어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \bar{u}^p = A^p \Delta u^p \quad (2)$$

따라서, 각 절편의 측면에서 유발되는 수직 및 전단 응력은 수직 스프링계수(k_n)와 전단 스프링계수(k_s) 및 상대변위($\Delta \bar{u}^p$)의 향으로 표현될 수 있으며, 절편의 측면에 작용하는 힘과 모멘트의 값은 작용하는 응력값들을 적분함으로써 다음과 같이 구해질 수 있다.

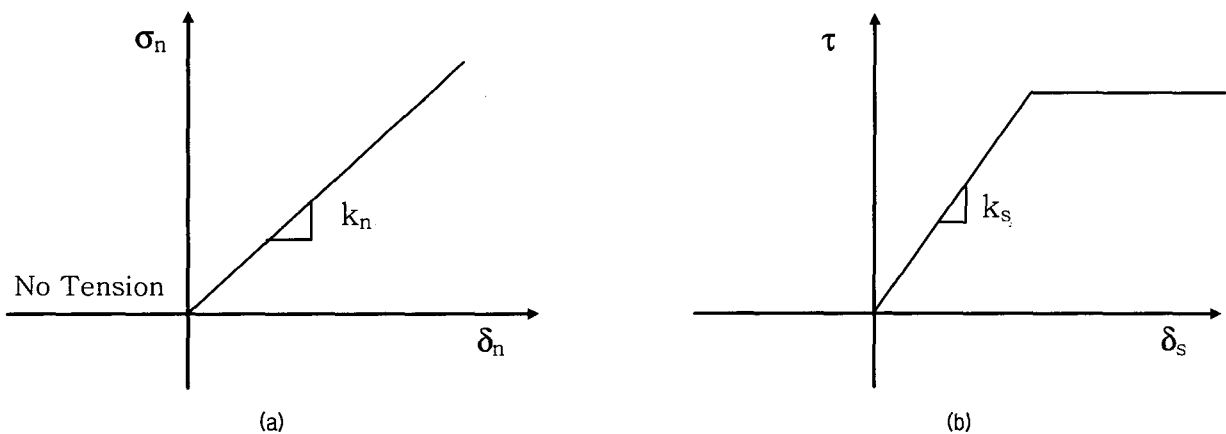


그림 1. 수직 및 전단 스프링의 거동

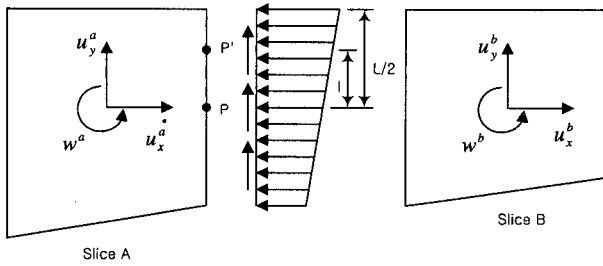


그림 2. 개별요소간의 인접면에 작용하는 힘과 변위

$$\bar{F}^p = K\Delta\bar{u}^p \quad (3)$$

지역좌표계로 나타낸 힘을 전체좌표계로 전환시키면 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F^p = (A^p)^T \bar{F}^p \quad (4)$$

그리고 지반을 모사하는 개별요소들에 작용하는 힘 평형식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_1^{N^s} f_a = \sum_1^{N^s} \left(\sum_p^N - (R^{pa})^T F^p \right) \quad (5)$$

여기서, N^s 는 개별요소의 갯수이며, N 은 개별요소의 측면 갯수를 의미한다. 그리고 f_a 는 A 절편 질량중심에서의 각 방향 물체력을 의미한다.

3. 단층지반에 설치된 얇은 기초의 지지력 해석

그림 3에 나타나 있는 일반지지력 이론에서 적용된 얇은 기초 하부의 파괴영역을 살펴보면 다음과 같다. 파괴영역은 Rankine의 주동영역(zone I), 대수(radial) 전단영역(zone II) 및 Rankine의 수동영역(zone III)으로 구성되어 있으며, 선분 CD는 대수 나선 형태를 갖는다. 점토지반과 모래지반에 대하여 적용되는 개별요소 형태가 그림 4에 각각 도시되어 있다. 토체의 자중이 모든 개별 요소에 점층적으로 가해진 이후 파괴면에서 작용되는 전단응력이 항복상태에 완전히 도달될 때까지 1번 요소에 작용하는 기초의 하중이 점층적으로 증가시킴으로써 파괴시의 항복하중을 구하게 된다.

그림 5(a)에서 얇은 기초 하부의 전단 마찰각, ϕ 값이 0° 인 점토지반은 총 15개의 개별요소로 구성되었다. 점토지반의 경우, 대수나선형태의 전단영역은 원호형태로 묘사되었다. 그림 6(a)에서는 전단영역의 요소수의 변화에 따른 지지력값의 변화가 나타나 있으며, 요소수에 따

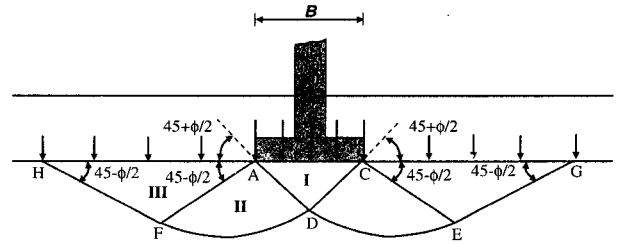


그림 3. 일반 지지력 이론 파괴 메커니즘(General bearing capacity theory)

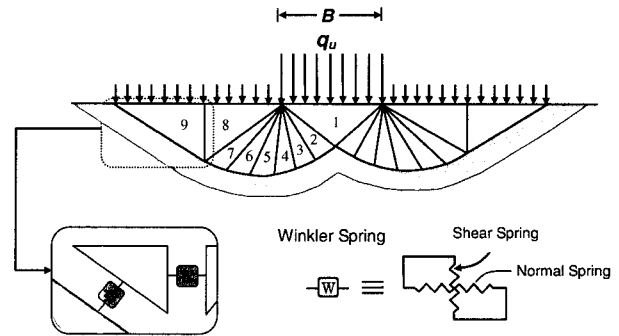


그림 4. 지지력 산정을 위한 개별요소 모델링

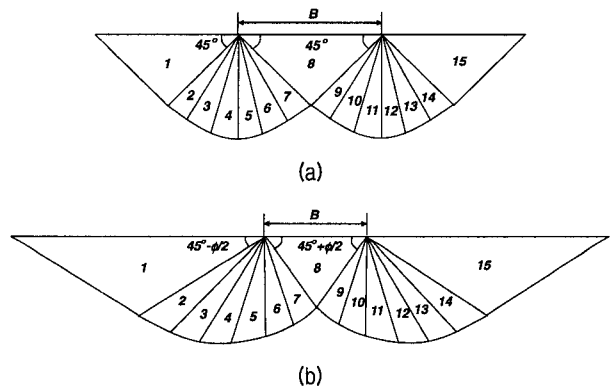


그림 5. 점토 및 모래지반에 대한 개별 요소 모델링

른 지지력 값의 변동은 거의 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서는 전단영역은 총 6개의 개별요소로 모델링 되었다. 그림 7(a)에서는 요소 사이의 힘과 변위의 관계를 나타내는 Winkler 스프링 계수 값인 k_n 과 k_s 값이 해석에 미치는 영향이 검토되었다. 요소 사이의 수직 및 전단방향의 강성계수 비는 재료의 전단탄성계수와 Young의 계수비로 표현될 수 있다. 특히 등방 탄성재료의 경우에는 이 값은 $2/(1+\nu)$ 값으로 구해진다. 포아송 비가 0~0.5의 범위에서는 k_n/k_s 의 비는 대략 2~3의 범위에 존재하게 된다. 그림 7(a)에서는 k_n/k_s 의 비가 1에서 10으로 증가함에 따라 지지력 값이 계산되어 있다. 계산된 지지력 값은 k_n/k_s 비에 관계없이 일반지지력 이론(Meyerhof, 1951, 1963; Lundgren과 Mortensen, 1953; Balla, 1962)

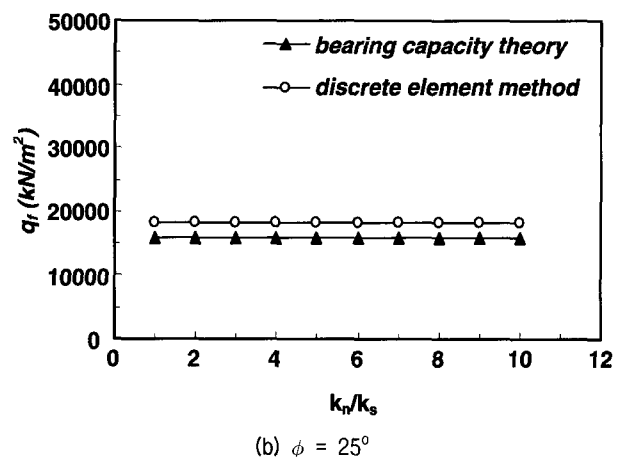
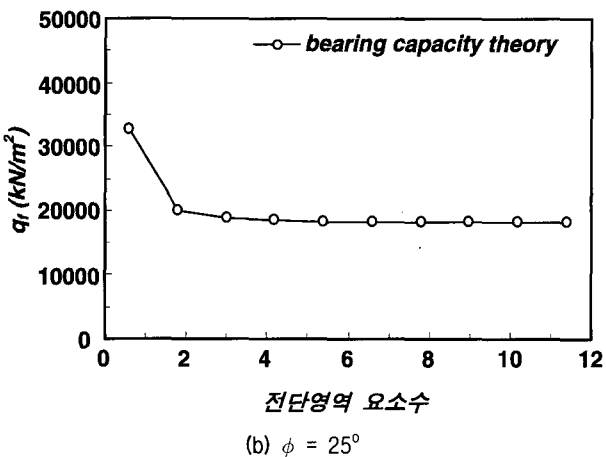
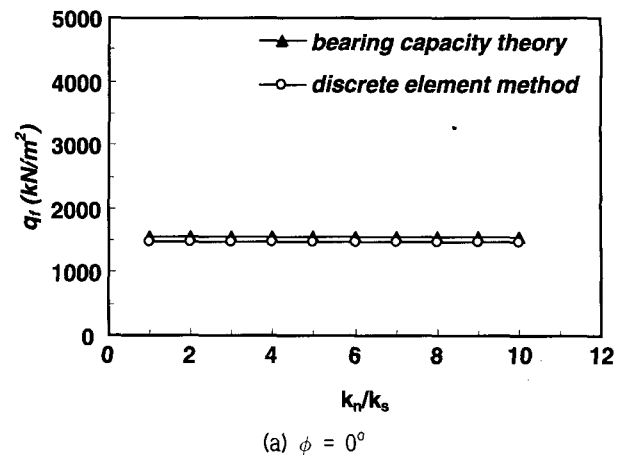
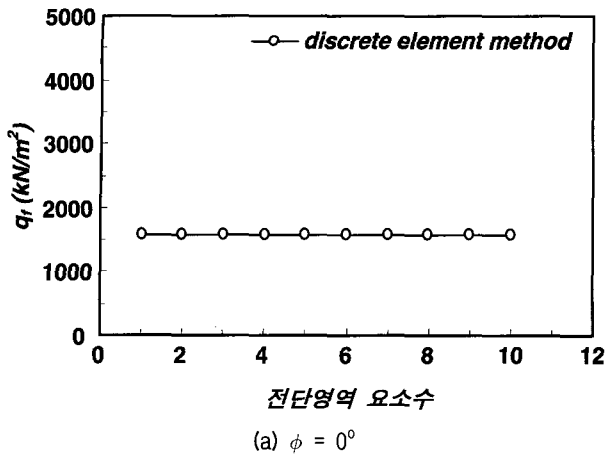


그림 6. 전단영역의 요소수에 따른 해석결과의 비교

그림 7. 탄성계수 변화에 따른 해석결과의 비교

으로 도출된 값과 거의 동일함을 볼 수 있다. 내부마찰 각, ϕ 값과 점착력, c 값이 각각 25° 와 0kN/m^2 인 모래지반에 대한 예제해석이 수행되었다. 그림 5(b)에서는 주동영역과 수동영역을 연결하는 전단영역이 대수나선 형태로 나타나 있다. 그림 6(b)에서는 전단영역의 요소수의 변화에 따른 지지력 값의 변화가 나타나 있으며, 요소수가 3개 이상이 됨에 따라 지지력 값이 수렴되는 양상을 보였다. 따라서, 본 연구에서는 모래지반의 전단영역도 점토지반의 경우와 동일하게 총 6개의 요소로 모델링 되었다. k_n/k_s 의 비의 변화에 따른 지지력 값이 그림 7(b)에 나타나 있다. 제안된 해석기법에 의한 지지력 값이 일반 지지력 값에 비해 약간 크게 산정되었다. 따라서 극한 지지력을 추정함에 있어서 개별요소법에 적용되어야 하는 k_n/k_s 비를 2~3의 범위로 적용하는 것이 현실적인 적용이라 할 수 있지만, 실제적인 적용 시에 k_n/k_s 비를 크게 증가시키더라도 구해지는 지지력 값에 있어서 차이는 거의 미소함을 알 수 있다.

4. 이층지반에 설치된 얇은 기초의 지지력 해석

점토층 위의 모래지반에 놓인 얇은 기초의 지지력에 관하여 실내 모형실험과 한계평형법 및 유한요소법에 근거한 연구들이 수행되었다(김대현과 야마모토, 2004; Mizuno와 Tsuchida, 2002; Okamura 등, 1998). 김대현과 야마모토(2004)는 ABAQUS에 근거한 탄소성 유한요소해석을 통하여 점토층 위 모래지반에 놓인 얇은 기초에 대한 지지력 해석을 수행하였다. 이로부터 Okamura(1998) 등에 의해 제안된 파괴메카니즘과 상한계 이론에 근거한 파괴메카니즘(Michalowski와 Shi, 1995)으로부터 구해진 지지력 값들이 다른 지지력이론 값들에 비해 유한요소 해석결과와 유사한 결과를 도출하였다고 보고하였다. Mizuno와 Tsuchida(2002)는 점토층 위의 모래층에 놓인 기초에 대한 탄소성 유한요소해석을 통하여 Okamura(1998) 등이 제안한 파괴메카니즘에 의한 지지력 값이 유한요소해석결과와 좋은 일치를 보인다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 Okamura(1998) 등이 원심모형시험에 근거하여 도출한 파괴 메커니즘에 근거하여 얇은

기초의 하부 이층지반을 개별요소 모델링 하였다(그림 8 참고). 그림 9에서 점토층 위에 전단 마찰각, ϕ 값이 35° 인 모래층이 설치된 이층지반을 총 26개의 개별요소로 모델링되었다. 점토지반의 경우, 대수나선형태의 전단영역은 원호형태로 나타내었다. 요소 사이의 힘과 변위의 관계를 나타내는 Winkler 스프링 계수 값인 k_n/k_s 의 비는 2로 적용되었으며, 전단영역의 요소수는 6개로 적용되었다.

김대현과 야마모토(2004)는 그림 10에 나타나 있는 해석조건에 대하여 ABAQUS를 이용한 유한요소해석 결과와 기존 한계평형법들로부터 얻어진 지지력값들을 서로 비교하였다. 본 연구에서는 그림 11에서 예제 해석 결과들과 제안된 해석기법의 결과를 서로 비교 검토하

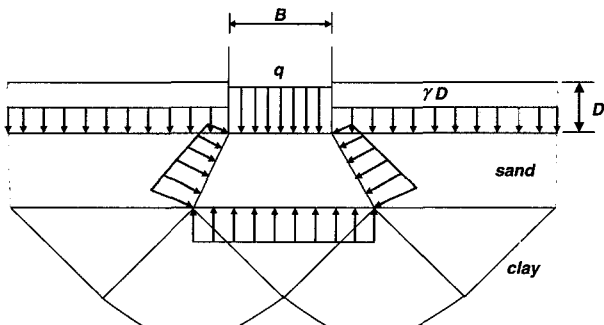


그림 8. 이층 지반에 대한 파괴 메커니즘(Okamura 등, 1998)

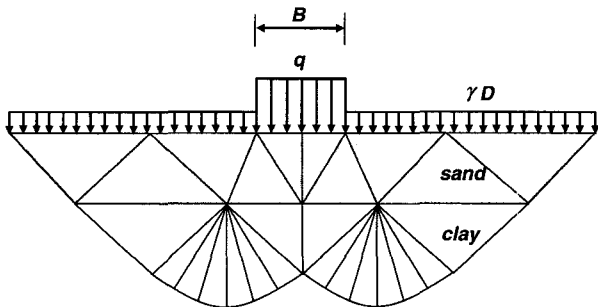


그림 9. 이층 지반에 대한 개별요소 모델링

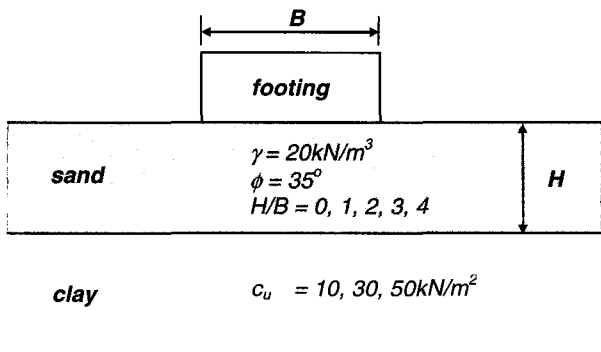
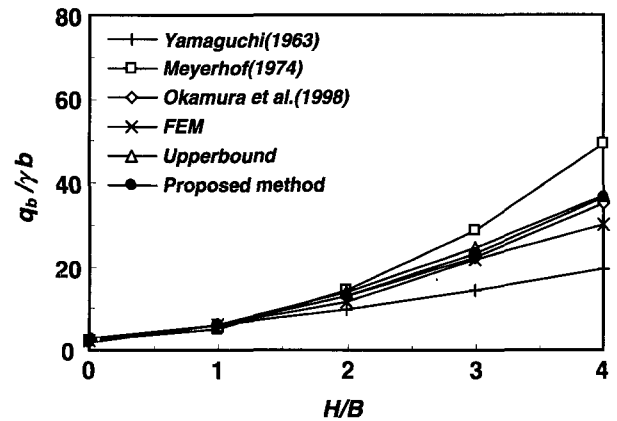
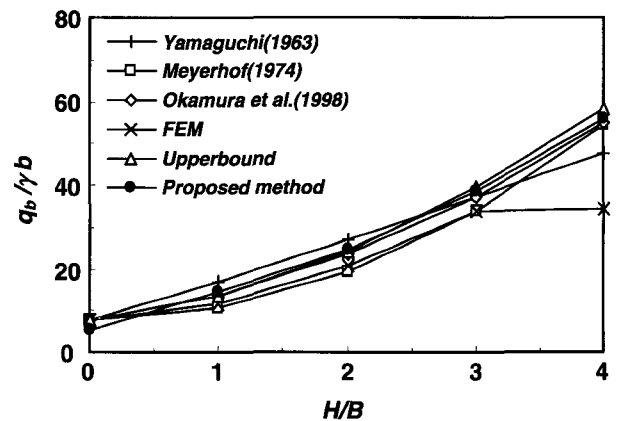


그림 10. 이층지반에 대한 해석조건

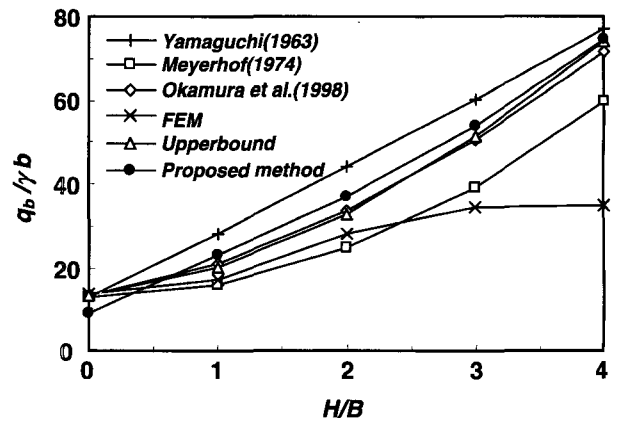
였다. 그림 11에서 기초의 규준화된 지지력값, $q_u/\gamma b$ 와 규준화된 모래층두께와 기초폭비, H/B 의 관계가 나타나 있다. H/B 의 값이 점차 증가할수록 $q_u/\gamma b$ 값은 증가하는 양상을 보인다. 전반적인 경향성을 살펴볼 때에 Okamura 등의 지지력값과 제안된 해석기법의 지지력 값이 Yamaguchi(1963)와 Meyerhof(1974)의 결과에 비해서 유한요소법으로 얻어진 지지력과 더 잘 일치함을 알 수



(a) $c_u/\gamma B = 0.5$



(b) $c_u/\gamma B = 1.5$



(c) $c_u/\gamma B = 2.5$

그림 11. 해석조건 변화에 따른 지지력 해석 결과들의 비교

있다. 이로부터 이층지반 지지력 해석을 위해 Okamura의 파괴메카니즘에 근거하여 기초 하부지반을 개별요소 모델링하는 것이 적절하다고 사료된다.

H/B 과 $q_u/\gamma b$ 의 경향성을 살펴보면 H/B 의 값이 2~3 정도보다 커짐에 따라서 유한요소법으로부터 구해진 지지력값이 다른 지지력값들에 비해 과소평가하며, 동시에 $c_u/\gamma B$ 이 증가함에 따라서 그러한 경향성은 더욱 커짐을 알 수 있다. 이는 기초폭에 비하여 모래층의 두께가 두꺼워짐에 따라 기초의 파괴가 하부 연약지반까지 관입되지 않고 상부 모래층에 주도적으로 형성되기 때문으로 사료된다. 즉 H/B 비가 큰 경우 $c_u/\gamma B$ 값에서 하부점토지반의 전단강도, c_u 값이 증가하면 한계평형법의 지지력 값은 증가하지만 유한요소해석법으로부터 얻어진 지지력 값은 하부점토지반의 전단강도, c_u 값의 영향을 받지 않게 된다. 김대현과 야마모토(2004)의 연구결과에 따르면 기초폭, B 보다 모래층의 두께, H 가 2~3 배 이상 큰 경우에는 이층지반 파괴메카니즘을 적

용하는 것은 다소 무리가 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 점토지반과 모래지반 및 점토와 모래층으로 구성된 이층지반에 대하여 개별요소법에 근거한 지지력 해석기법을 적용하였다. 제안된 기법은 다음과 같은 복잡한 해석조건을 갖는 지지력 해석문제에 보다 간편하게 적용 가능하다고 사료된다. 예를 들어 그림 12(a)에 나타난 경사기초 혹은 그림 12(b)의 사면에 인접한 기초에 추가적인 하중조건이 적용된 경우 지지력을 평가하기 위해서는 일반적으로 경험적인 감소계수를 보수적으로 적용하거나 유한요소법에 근거한 정교한 해석방법을 적용하여 지지력을 산정하게 된다. 이와 같은 형태의 문제의 경우 제안된 해석기법에 근거하여 보다 직접적이고 간편하게 지지력을 산정할 수 있을 것으로 사료된다. 점토지반의 경우 표면 건조로 인한 강도가 증진된 건조층이 형성되어 강도가 서로 다른 다층지반으로 형성될 수 있다(그림 12(c) 참고). 이러한 연약지반 상의 건설장비의 주행성을 확보하기 위해서는 여러 겹의 토목섬유재를 설치하며 상부에는 모래층을 포설하게 된다. 이와 같은 보강재가 설치된 복잡한 다층 지반의 지지력을 산정하기 위해서는 유한요소법에 근거한 복잡한 해석절차가 요구된다. 본 연구에서는 제안된 해석기법을 사용하여 이와 같은 복잡한 해석조건을 갖는 기초의 지지력 해석을 수행하기 위한 전 단계로서 단층 및 이층지반에 대한 해석을 수행하였으며, 이후의 연구에서는 개별요소법에 근거한 해석기법을 확장 적용하여 토목섬유재로 보강된 복잡한 다층 점토지반의 지지력 해석을 수행하고자 한다.

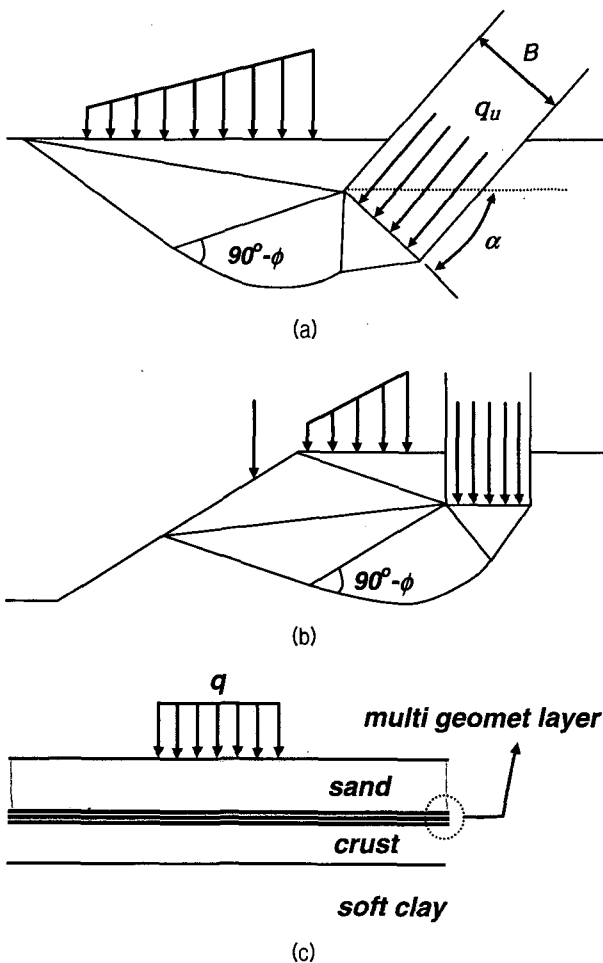


그림 12. 지지력 산정을 위한 다양한 해석 조건

5. 결론

본 연구에서는 얇은 기초의 지지력을 구할 수 있는 개별요소법에 근거한 해석기법이 개발되었다. 제안된 해석기법에서 모델링된 하부지반의 파괴면에서의 응력 값들은 힘 평형조건을 만족하며 지반의 전단강도를 초과하지 않는다. 따라서 제안된 기법은 확장된 한계평형법의 범주에 포함된다고 할 수 있으며, 구해진 지지력 값은 소성이론에서 상한계해의 범주에 포함된다고 할 수 있다. 한계상태하에서의 토체는 Winkler 스프링으로 연결된 개별요소로 모델링 되었으며, 지반의 전단강도와 Winkler 스프링의 탄성계수값들이 적용되었다. 지반의 전단강도로서 Mohr-Coulomb의 파괴규준이 적용되었으며, 탄성계수비 k_n/k_s 가 2~3 정도가 적합함을 알 수

있었다. 따라서 제안된 해석기법을 적용하고자 할 경우 k_n/k_s 비를 실내시험을 통하여 구할 필요는 없음을 알 수 있다.

제안된 해석기법을 사용하여 단층 및 이층지반에 대한 지지력 해석을 수행하여 한계평형법에 근거한 지지력 이론 및 유한요소해석 결과들과 비교함으로써 제안된 해석기법의 적용성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원에 의하여 수행되었으며, 저자들은 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김대현, 야마모토 켄타로 (2004), “점토층 위의 모래지반에 위치한 얇은 기초의 지지력에 대한 상한 한계해석”, *한국지반공학회 논문집*, 제 20권, 제 3호, pp.85-96.
2. 박현일, 이승래, 정구영 (2003), “개별요소법을 사용한 매립지 사면 치수 시스템의 안정성 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제 16권, 제 2호, pp.41-50.
3. 박현일, 이승래 (2003), “장비하중을 받는 매립지 사면 치수 시스템의 안정성 평가”, *대한토목학회 논문집*, 제 23권, 제 6C호, pp.365-372.
4. 박현일, 박준, 이승래, 황대진 (2005), 개별요소법과 유전자 알고리즘에 근거한 사면안정해석기법의 개발 I. 검증, *한국지반공학회 논문집*, 제 21권, 제 4호, pp.115-122.
5. Balla, A. (1962), “Bearing Capacity of Foundation”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.89, No.SM5, pp.12-34.
6. Chang, C.S. (1992), Discrete element method for slope stability analysis, *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.118, No.12, pp.1889-1905.
7. Cundall, P.A. (1971), “A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movements in Block Rock Systems”, *Proc. Int. Symp. On Rock Fracture*, Nancy, France, Vol.1, pp.8-17.
8. Lundgren, H. and Mortensen, K. (1953), “Determination by the Theory of Elasticity of the Bearing Capacity of Continuous Footing on Sand”, *Proceedings 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.409-412.
9. Meyerhof, G.G. (1951), “The Ultimate Bearing Capacity of Foundations”, *Geotechnique*, Vol.2, No.4, pp.301-331.
10. Meyerhof, G.G. (1963), “Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundation”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.1, No.1, pp.16-26.
11. Meyerhof, G. G. (1974), “Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.11, No.2, pp.223-229.
12. Michalowski, R.L. and Shi, L. (1995), “Bearing Capacity of Footing over Two-Layer Foundation Soils,” *Journal of Geotechnical Engineering*, May, pp.421-428.
13. Mizuno & Tsuchida (2002), “Practical use of finite element analysis for slope stability and bearing capacity”, *Proc. of Foundation design codes and soil investigation in view of international harmonization and performance*, Kamakura, pp.359-367.
14. Okamura, M., Takemura, J. and Kmura, T. (1998), “Bearing Capacity Predictions of Sand Overlying Clay Based on Limit Equilibrium Methods”, *Soils and Foundation*, Vol.38, No.1, pp.181-194.
15. Prandtl, L. (1921), “Uber die Eindringungsfestigkeit Plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden”, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Basel, Switzerland, Vol.1, No.1, pp.15-20.
16. Shi, G.H. (1988), “Discontinuous Deformation Analysis: A New Numerical Model for the Static and Dynamics of Block Systems”, *Journal of Computer and Geotechniques, Elsevier Sciences Publishers*, Vol.7, No.4, pp.269-287.
17. Terzaghi, K. (1943), “Theoretical Soil Mechanics”, Wiley, New York, John Wiley & Sons.
18. Yamaguchi, H. (1963), “Practical formula of bearing value for two layered ground”, *Proceeding of 2nd ARCMFE*, Vol.1, pp.99-105.

(접수일자 2006. 3. 31, 심사완료일 2006. 6. 21)