

극한해석 상계법을 이용한 편심하중하의 기초 지지력 산정

Computation of Ultimate Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Footing
By Upper Bound of Limit Analysis Method

권오균* · 김명모**

Kwon, Oh Kyun · Kim, Myoung Mo

Abstract

This paper estimates the bearing capacity of the eccentrically loaded footing by the upper bound of limit analysis method. Meyerhof method and Saran method used the limit equilibrium method in the estimation of bearing capacity. But, in this study the bearing capacity is estimated by the upper bound method. In applying the upper bound, the result depends on the failure mechanism. So this analysis uses the conventional failure mechanisms or the modified failure mechanisms. The comparisons are made between the results from this analysis and those obtained from the limit equilibrium method. Also, the influences of the parameters-eccentricity, internal friction angle, surcharge, G-value, and base friction of the footing on the bearing capacity factors have been examined.

요 지

본 연구에서는 편심 하중을 받는 기초의 지지력을 극한해석 상계법을 이용하여 산정하였다. 편심 하중이 작용하는 기초의 지지력을 산정하는 기존의 해석방법으로는 극한평형법을 이용한 Meyerhof 방법과 Saran 방법 등이 있으나, 극한해석법을 이용하여 해석하는 경우는 없다. 이에 본 연구에서는 극한해석 상계법을 이용하여 편심하중이 작용하는 기초의 지지력을 산정하였다. 극한해석 상계법으로 해석하는 경우, 적용하는 파괴메카니즘에 따라 그 결과가 달라지므로, 본 연구에서는 기존의 파괴메카니즘을 속도장 조건에 맞게 변형시킨 후, 극한해석 상계법을 적용하여 그 결과들을 상호·비교하였다. 그리고, 편심하중을 받는 기초 구조물의 지지력에 영향을 미치는 요소들을 연구하기 위하여 흙의 내부마찰각, 기초 바닥면의 마찰각, 편심량, 그리고 상재하중 등을 변화시켜 각 요소들이 기초의 지지력에 미치는 영향을 연구하였다.

* 정회원 · 계명대학교 토목공학과 전임강사

** 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서 론

건물, 교량, 댐 등 모든 구조물은 지반에 의해 지지되는데, 구조물의 일부분으로서 상부 구조물의 하중을 지반에 전달하는 기능을 갖는 구조를 기초라고 한다. 기초 구조물을 설계하는데 있어서는 기초의 침하와 지지력에 대한 충분한 검토가 이루어져야 하며, 특히 기초의 지지력은 기초 구조물을 설계하는데 매우 중요한 요소가 된다.

흔히 기초 구조물에 작용하는 하중은 정확하게 기초의 중심에 작용하지 않고 어느 정도의 편심을 갖고 작용한다. 기초 구조물에 편심하중이 작용하면, 그것으로 인하여 부등 침하와 모멘트가 발생하여 하중이 커지는 효과를 나타내게 된다. 그러므로, 정확한 설계를 위해서나, 중요한 기초 구조물을 설계할 때에는 편심을 고려한 설계를 하여야 한다. 현재로는 기초 구조물에 편심 하중이 작용하는 경우, 유효너비(effective width)의 개념을 이용하여 해석하거나, 혹은 편심이 작을 경우 이를 무시하고 해석하고 있다.^(9,10,14)

편심이 없는 경우에 대한 연구는 많이 이루어졌으며, 여러가지 해석방법들^(5,10-15)과 많은 실험 결과들^(3,7,10,12)이 발표되었다. 그러나, 기초에 편심 하중이 작용하는 경우에 대해서는 현재까지 충분한 연구가 이루어지고 있지 않다. 편심하중을 받는 기초에 대한 기존의 해석 방법들로는 극한평형법을 이용한 Meyerhof 방법⁽¹⁰⁾과 Saran 방법^(11,12) 등이 있다. 극한평형법(limit equilibrium method)은 먼저 파괴면을 평면, 원호, 대수나선 등으로 가정된 뒤에 가장 위험한 파괴면의 위치를 찾는 방법이다. 이 방법에서는 가정된 파괴면에서의 응력분포를 응력 평형조건을 만족하도록 정확하게 가정하지 못하기 때문에 정해에 필요한 조건들을 만족시키지 못하는 단점들이 있다. 극한평형법은 일반적으로 널리 이용되지만, 안정문제에 대한 근사해를 얻는 방법이라고 할 수 있다. 그러므로, 이론적으로 완벽하고 계산이 간편한 새로운 방법이 요구되는데, 그 방법이 극한해석법(limit analysis method)^(12,4)이다. 극한해석법은 극한평형법과는 달리 단계적인 탄소성 해석을 행하지 않고 파괴 하중을 구할 수 있으며, 다른 방법에 비하여 파괴 형태가 간명하고, 상대적으로 적용하기 쉬운 장점이 있다. 극한해석법은 상계법과 하계법으로

나눌 수 있는데, 편심하중이 작용하는 경우에는 하계법으로 해석하는 것이 곤란하므로, 상계법으로 접근하는 편이 유리하다. 현재까지 극한해석법을 이용하여 편심하중이 작용하는 기초의 지지력을 산정한 결과를 찾아볼 수 없다. 이에 본 연구에서는 편심하중이 작용하는 기초 구조물의 지지력을 극한해석 상계법을 이용하여 산정하였다. 극한해석 상계법으로 해석하는 경우, 적용하는 파괴메카니즘에 따라 그 결과가 달라지므로, 본 연구에서는 기존에 극한평형법에서 사용된 파괴메카니즘이나, 또는 이것들을 속도장에 맞게 변형시킨 파괴메카니즘에 극한해석 상계법을 적용하여 그 결과를 상호·비교하였다. 그리고, 편심하중을 받는 기초 구조물의 지지력에 영향을 미치는 요소들을 연구하기 위하여 흙의 내부 마찰각, 기초 바닥면의 마찰각, 편심량, 그리고 상재하중 등을 변화시켜 각 요소들이 기초의 지지력에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 이론적 배경

2.1 극한해석 이론

역학적으로 정해에 필요한 조건으로는 응력평형 조건, 응력-변형을 관계, 적합방정식 등이 있다. 탄성이론에서는 응력-변형을 관계를 이용하여 유일한 해를 구하게 된다. 그러나, 탄소성체에서의 응력-변형을 관계는 초기 탄성 단계, 중간적 구속된 소성 유동 단계, 그리고 최종 불구속 소성 유동 단계로 나누어 진다. 많은 토질 역학적 문제에서는 소성과 파괴가 지배적인데, 매우 간단한 문제를 제외하고는 구속된 소성 유동 영역을 포함하는 완전한 해석은 너무 복잡하고 비실용적이므로, 보다 직접적인 방법으로 파괴하중을 산정하는 간편하고 결과가 좋은 방법이 요구된다. 이러한 요구에 의하여 극한해석법이 개발되었으며, 단계적인 탄소성 해석을 하지 않고 파괴하중을 구하게 된다. 기존의 slip-line 방법과 극한평형방법에 비하여, 이 방법은 흙의 응력-변형을 관계를 이상적인 방법으로 고려한다. 그리고, 극한해석법의 특징은 복잡한 형태나 하중 조건하에서도 파괴하중을 얻을 수 있고, 파괴 형태가 간명하며, 다른 방법에 비하여 적용하기가 상대적으로 쉽다는 점이다.

극한해석에서의 가정들은 다음과 같다.

(1) 완전 탄소성 가정과 Coulomb의 항복조건

(2) 흙 변형에 대한 운동학적 가정과 유동법칙 (flow rule)

(3) 형상의 미소 변형 가정과 가상일의 원리

위에서 언급한 가정들을 근거로 극한해석은 하계 이론(lower-bound theorem)과 상계이론(upper-bound theorem)으로 나누어 진다. 극한해석법은 적당한 속도장과 응력장을 선택하여 상계 및 하계이론을 이용하여 실제의 파괴하중에 가장 근접한 해를 얻는 방법이다. 상계이론과 하계이론을 이용하여 얻은 상계해와 하계해가 일치하게 되면, 그 해는 정해가 된다.

상계이론에 의하면, 속도 경계조건과 변형률-속도의 적합 조건을 만족하는 가정된 속도장에서 내부 에너지 소산률과 외부 일률을 같게 놓는 일률식(work equation)으로부터 결정된 하중은 실제의 파괴하중 보다 작지 않다. 위의 조건들을 만족하는 속도장을 동역학적 가용 속도장이라고 한다. 이러한 동역학적 가용 속도장에서 소성흐름에 의한 에너지 소산률은 이상화된 응력-변형률 속도 관계 즉, 유동법칙으로부터 계산된다. 상계이론에서는 파괴면에서의 응력분포가 평형상태를 유지할 필요가 없으며, 오직 속도나 파괴메카니즘, 그리고 에너지 소산률만을 고려하여 해를 얻게 된다.

하계이론에 의하면, 평형방정식, 응력경계조건과 항복조건 등을 만족하는 응력분포로부터 결정된 하중은 실제의 파괴하중 보다 크지 않다는 것이다. 위의 세 조건들을 만족하는 응력분포를 정적 가용 응력장이라고 한다. 하계이론이 상계이론과 다른 점은 파괴메카니즘과 일률식 대신에 단지 평형조건과 항복조건만을 고려하며, 흙의 동역학적 조건은 고려하지 않는다는 것이다. 가정된 파괴메카니즘에서 일률식의 전개는 명확하지만, 소성평형 응력장의 작성은 직관력을 필요로 한다. 가정된 응력장에서의 해가 실제의 파괴하중과 차이가 많은 경우, 응력장을 효과적으로 변경해야 하는데, 직관력과 통찰력없이 는 상당한 어려움이 뒤따른다.

본 연구에서는 편심하중을 받는 기초의 지지력을 극한해석을 이용하여 산정하고자 한다. 편심하중이 작용하는 기초에서의 응력분포는 응력 평형조건과 항복조건을 동시에 만족하지 못하기 때문에 극한해석 하계이론을 적용하는 것은 곤란하다. 그러므로,

편심하중이 작용하는 기초의 지지력은 극한해석 상계이론을 이용하여 산정하는 편이 유리하다.

2.2 파괴메카니즘

본 연구의 해석에 사용된 각 파괴메카니즘은 그림 1, 2 그리고 3에 나타나 있다.

그림 1의 수정된 Hill 메카니즘은, 기초의 중심에 하중이 작용하는 경우, 바닥면이 거처는 기초에서 나타나는 Hill 메카니즘⁽¹⁾을 편심하중이 작용하는 기초에서의 파괴메카니즘으로 응용한 것이다. 여기서, Hill 메카니즘은 기초의 중심선을 대칭축으로 해서 양쪽이 닮은 꼴의 파괴 양상을 나타낸다.

그림 2는 수정된 Saran 메카니즘을 나타낸다. Saran 방법^(11,12)에서의 파괴메카니즘은 극한해석 상계법의 속도장 조건을 만족시키지 못하기 때문에, 본 연구에서 적용된 수정된 Saran 메카니즘은 속도장 조건을 만족시키기 위하여 대수나선의 중심을 B점으로 이동시킨 파괴메카니즘이다.

그림 3의 Meyerhof 파괴메카니즘은 편심하중이 작용하는 기초의 지지력을 극한평형법을 이용하여 해석하는 Meyerhof 방법^(10,15)에서 사용된 파괴메카니즘을 극한해석 상계이론의 속도장에 맞게 만든 파괴메카니즘이다.

2.3 극한해석 상계법에 의한 지지력 산정

앞에서 언급한 파괴메카니즘들을 극한해석 상계법에 적용하여 극한지지력을 산정하는 과정을 수정된 Saran 메카니즘을 이용하여 간략히 서술하면 다음과 같다. 수정된 Saran 메카니즘은 그림 6에 보인 바와 같이 3개의 지역으로 구분된다. A'CDE선 아래 지역의 흙은 정지상태에 있으므로 소성흐름은 A'CDE선 위의 지역에서만 발생한다. 삼각형 썩기 A'BC는 불연속선인 A'C면을 따라 ϕ 각 만큼 경사지게 활동하며, 이러한 삼각형 썩기의 활동으로 인하여 인접한 방사전단지역 BCD와 BDEF는 옆으로 밀려나게 된다. BDEF 지역은 불연속면인 DE면에 ϕ 각 만큼 경사지게 활동하며, 방사전단 BCD 지역에서 속도는 V_0 에서 V_3 로 대수적으로 증가한다. 이 경우 요소 A'BC에 대한 속도 다이어그램은 그림 4 (a), (b), 그리고 (c)와 같다. 기초는 기초 바닥면에 수직방향으로 V_1 의 속도로 움직이며, 기초와 기초 바로 아래에 있는 흙요소 A'BC 사이의 상대속도는

기초 바닥면의 마찰에 의하여 발생한다.

수정된 Saran 메카니즘에서 내부 에너지 소산은 불연속면인 A'C면, BC면, DE면, 대수나선 CD면, 방사선단 BCD지역, 그리고 기초바닥과 인접한 흙 사이의 마찰에 의해서 발생한다. 여기에서, 내부에너지 소산률은 각 불연속선의 길이와 점착력, 그리고 불연속선에서의 속도성분의 차이를 곱하여 계산한다. 그리고, 기초 바닥면과 인접한 흙 사이의 활동을 허용하기 때문에 이 면에서의 마찰에 의한 에너지 소산률도 고려하여야 한다. 이 마찰에 의한 에너지 소산률은 이 면에 작용하는 수직성분의 힘과 이 면에서의 속도성분에다 마찰계수, $\tan\delta$ 를 곱하여 계산한다.

그리고, 외부일률은 A'BC지역, BDE지역, 대수나선 BCD지역, 그리고 기초하중에 의하여 발생한다. 흙덩어리의 자중에 의한 일률은 각 지역의 면적과 흙의 단위중량, 그리고 그 지역에서의 속도의 수직성분을 곱하여 계산한다.

수정된 Saran 메카니즘을 극한해석 상계법에 적용하여 편심하중이 작용하는 기초의 지지력을 산정하는 경우, 기초의 지지력은 흙덩어리의 자중과 기초에 작용하는 힘에 의한 외부일률과 전 내부에너지 소산률을 같게 놓는 일률식으로부터 결정된다. 이렇게 결정된 지지력의 상계해는 다음의 식 (1)과 같다.

$$\frac{q_0(\xi, \zeta, \eta)}{c} = \frac{1}{1 - \tan\delta \cot(\zeta - \phi)} \{N_c + G N_r\} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} N_c(\xi, \zeta, \eta) &= \frac{x \cos\phi \sin\xi + x \sin\zeta \operatorname{abs}[\cos(\xi + \zeta - 2\phi)]}{\sin(\zeta - \phi) \sin(\xi + \zeta)} \\ &+ \frac{x \alpha \sin\zeta \{\exp[2(\pi + \beta - \xi - \eta) \tan\phi] - 1\}}{\sin\phi \sin(\zeta - \phi) \sin(\xi + \zeta)} \\ &+ \frac{x \alpha \sin\zeta \sin\eta \exp[2(\pi + \beta - \xi - \eta) \tan\phi]}{\cos(\eta + \phi) \sin(\zeta \div \phi) \sin(\xi - \zeta)} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_r(\xi, \eta, \zeta) &= \frac{-x^2 \sin\zeta \sin\xi}{\sin(\zeta + \xi)} \\ &+ \frac{x^2 \alpha \sin^2\zeta \times \{3 \tan\phi \cos\xi + \sin\xi + [3 \tan\phi \sin^2(\zeta + \xi) \cos\phi \sin(\zeta - \phi)(1 + 9 \tan^2\phi)]\}}{\sin^2(\zeta + \xi) \cos\phi \sin(\zeta - \phi)(1 + 9 \tan^2\phi)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\cos(\beta - \eta) + \sin(\beta - \eta) \exp[3(\pi + \beta - \xi - \eta) \tan\phi] \\ &+ \frac{x^2 \alpha \sin^2\zeta \sin\eta \cos\eta \exp[3(\pi - \xi - \eta) \tan\phi]}{\sin^2(\zeta + \xi) \cos(\phi + \eta) \sin(\zeta - \phi)} \\ &+ \frac{x^2 \alpha \sin\zeta \sin\eta \cos(\beta - \eta) \exp[2(\pi + \beta - \xi - \eta) \tan\phi]}{\sin(\zeta + \xi) \cos\phi \sin(\zeta - \phi) \sin\beta} \\ &\left[\frac{D_f}{W_x} \right] + \frac{x^2 \alpha \cos(\beta - \eta) \exp[(\pi + \beta - \xi - \eta) \tan\phi]}{\sin(\zeta - \phi) \cos\phi \tan\beta} \times \\ &\left[\frac{D_f}{W_x} \right]^2 \quad (3) \end{aligned}$$

여기서, G는 흙의 자중에 관련된 무게 정수(weight parameter)이며, 식 (4)와 같이 표현된다. 만약 G의 값이 매우 작다면, 그 흙은 자중을 무시한 점성토와 같은 거동을 한다. 그러나, 만약 G의 값이 크다면, 흙의 점성력 보다 흙의 자중이 지지력 강도에 더 큰 영향을 미치는 거동을 한다.

$$G = \frac{\gamma W}{2c} = \frac{\gamma r_0 \sin(\xi + \zeta)}{2c x \sin\zeta} \quad (4)$$

위의 식들에서 α 는 다음과 같다.

$$-\pi/2 + \xi + \zeta - \phi > 0 \text{의 경우} : \alpha = \sin(\xi + \zeta - 2\phi) \quad (5)$$

$$-\pi/2 + \xi + \zeta - \phi \leq 0 \text{의 경우} : \alpha = \sin(\xi + \zeta) \quad (6)$$

그리고 β 는 다음 식에 의하여 결정된다.

$$\begin{aligned} &\sin\beta \exp(\beta \tan\phi) \\ &= \frac{(D_f/W_x) \sin(\xi + \zeta) \cos(\phi + \eta)}{\sin\zeta \cos\phi \exp[(\pi - \eta - \xi) \tan\phi]} \quad (7) \end{aligned}$$

3. 해석 결과 및 분석

3.1 지지력 계수의 비교

기존의 파괴메카니즘들을 속도장 조건에 맞게 변형시켜서 극한해석 상계법에 적용하여 얻은 결과들을 극한평형법의 결과들과 상호·비교한 결과는 다음과 같다.

그림 5는 G가 10.0이고 내부마찰각이 30°인 표면 기초의 경우, 극한해석 상계법과 극한평형법에 의한 지지력 계수의 값들이 나타나 있다. 여기에서 점선은 극한평형법으로 해석한 결과이며, 실선은 극한해석 상계법으로 해석한 결과이다. 지지력 계수 N_c 에서, Meyerhof 파괴메카니즘을 적용한 결과는 극한평형

법의 결과들 보다 약간 작은 값을 나타내고 있지만 그 차이는 크지 않다. 그리고, 수정된 Saran 메카니즘을 적용한 결과는 편심량이 작은 경우에는 극한평형법의 결과들 보다 약간 작은 값을 나타내고 있지만, 편심량이 큰 경우에서 극한평형법의 결과들 보다 큰 값을 나타내고 있다. 그러나, 수정된 Hill 메카니즘을 적용한 결과는 다른 결과들과 다르게 편심량이 변화하더라도 거의 일정한 값을 보여주고 있다.

지지력 계수 N_r 의 경우에서, 수정된 Saran 메카니즘과 Meyerhof 메카니즘을 적용한 결과들은 극한평형법의 Meyerhof 방법의 결과보다 큰 값을 나타내며, 극한평형법의 Saran 방법의 결과보다 작은 값을 나타내고 있다. 그러나, 수정된 Hill 메카니즘을 적용한 결과는 편심량이 증가하여도 지지력 계수는 오히려 커지는 이상 경향을 보여주고 있다. 그러므로, 편심하중이 작용하는 기초에 수정된 Hill 메카니즘을 적용한 극한해석 상계법의 결과는 편심량이 증가하여도 지지력 계수는 일정하거나, 혹은 증가하는 경향을 보여주고 있기 때문에, 수정된 Hill 메카니즘은 편심하중이 작용하는 기초의 경우에 적합하지 않는 것으로 생각된다. 그러므로, 표면 기초의 경우, 수정된 Hill 메카니즘을 제외한 파괴메카니즘들을 극한해석 상계법에 적용한 결과는 기존의 극한평형법을 이용한 방법들의 결과들과 잘 일치하고 있다.

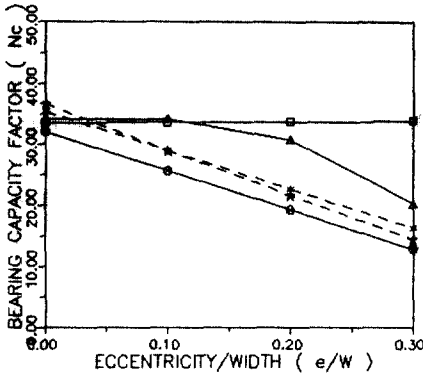
그림 6은 G 가 10.0이고, D_r/W 가 1.0이고 내부마찰각이 30° 인 얇은 기초의 지지력 계수를 나타낸 그림이다. 지지력 계수 N_c 에서, 극한해석법에 의한 결과들은 극한평형법의 결과보다 큰 값을 나타내고 있으며, 특히 Meyerhof 파괴메카니즘을 적용한 결과는 극한평형법의 결과와 거의 비슷한 경향을 보여주고 있다. 그리고, 지지력 계수 N_r 에서 극한해석 상계법의 결과는 극한평형법에 의한 결과보다 큰 값을 나타내고 있다. 얇은 기초에서 극한해석 상계법에 적용한 결과가 극한평형법에 의한 결과보다 크게 나타나는 이유는 기초의 근입 깊이에 의한 상재하중의 영향 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 지지력 계수 N_c 보다 지지력 계수 N_r 에서 극한해석 상계법의 결과와 극한평형법의 결과 사이의 차이가 더 크게 나타나는데, 그 이유는 상재 하중의 영향이 지지력 계수 N_c 보다 지지력 계수 N_r 에 더 크게

작용하기 때문이라고 판단된다. 얇은 기초의 경우, 극한해석 상계법에 의한 지지력 계수는 극한평형법에 의한 지지력 계수들과 큰 차이를 보여주고 있으며, 특히, 지지력 계수 N_r 에서 그 차이가 심하다. 그 이유는 극한해석법 상계법에서 상재하중의 영향이 지지력 계수 N_c 와 N_r 에 포함되어 있기 때문이라고 판단된다.

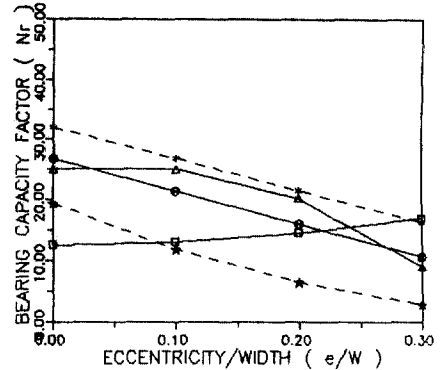
3.2 극한지지력의 비교

편심하중 작용시 기초의 지지력을 산정하는 극한해석법과 극한평형법의 이론이 서로 상이하기 때문에, 얇은 기초에서 극한해석 상계법에 의한 지지력 계수들과 극한평형법에 의한 지지력 계수들을 서로 비교하는 것은 바람직하지 못하다. 즉, 극한평형법에 의하여 지지력을 구하는 식 (2)에는 상재하중을 고려하는 지지력 계수 N_q 항이 있지만, 극한해석 상계법에서 지지력을 나타내는 식 (3)에는 지지력 계수 N_q 의 항이 없다. 따라서, 얇은 기초에서 극한해석 상계법과 극한평형법의 해석 결과를 서로 비교하려면, 지지력 계수가 아닌 전체의 지지력으로 비교하는 것이 합리적이다. 그러므로, 본 연구에서는 다음의 예제를 통하여 극한해석법의 결과와 극한평형법의 결과를 비교하였다. 예제에서 적용된 지반의 내부마찰각은 30° 이고, 점착력은 0.09 t/m^2 이며, 전체단위중량은 1.8 t/m^3 이다. 그리고, 이러한 지반 조건에서 너비가 1m인 줄기초가 지표면에 놓여 있을 때와 깊이 1.0m에 놓여 있을 때의 지지력을 극한해석 상계법에 의한 결과와 극한평형법에 의한 결과를 비교하였다.

그림 7에는 극한해석 상계법과 극한평형법에 의한 지지력을 비교한 결과가 나타나 있다. 그림 7(a)는 표면 기초의 경우이며, 그림 7(b)는 얇은 기초의 경우이다. 표면 기초에서 극한해석 상계법에 의한 결과는 극한평형법의 결과보다 큰 값을 나타내고 있으며, 특히 극한평형법을 이용한 Meyerhof 방법의 결과가 극한해석 상계법에 적용한 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그림 7(b)는 기초의 근입 깊이와 너비의 비가 1.0인 얇은 기초에서 극한평형법과 극한해석 상계법에 의한 지지력을 비교한 것이다. 수정된 Saran 메카니즘을 적용한 극한해석 결과는 극한평형법의 결과보다 큰 값을 나타낸다. 그리고, Meyerhof 파괴메카니즘을 적용한 결과는,

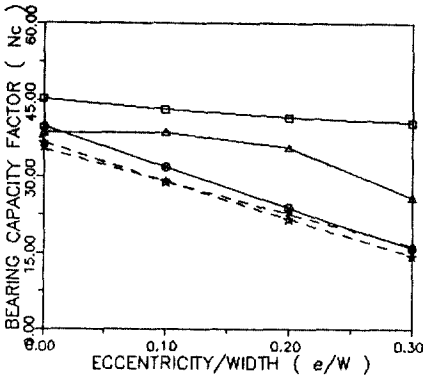


(a) N_c

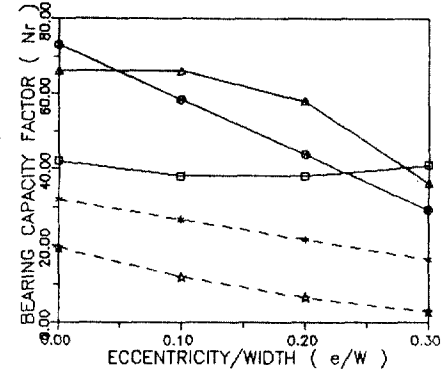


(b) N_r

그림 5. Bearing Capacity Factor of Surface Footing by each Method ($G=10.0$, $\phi=30^\circ$)

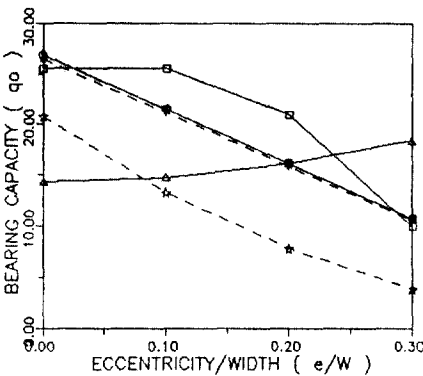


(a) N_c

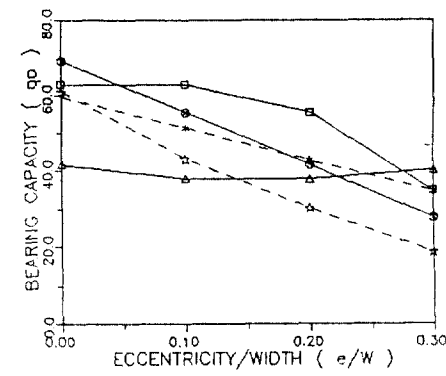


(b) N_r

그림 6. Bearing Capacity Factor of Shallow footing by each Method ($D_f/W=1.0$, $G=10.0$, $\phi=30^\circ$)



(a) Surface Footing



(b) Shallow Footing

그림 7. Comparison of Bearing Capacity by Limit Equilibrium Method and Limit Analysis Method

편심량이 작은 경우에서 극한평형법의 결과보다 큰 값을 나타내며, 편심량이 큰 경우에는 극한평형법 중 Meyerhof 방법의 결과보다 약간 작은 값을 나타내고 있지만, 그 차이는 그다지 크지 않다. 그러나, 수정된 Hill 메카니즘에 의한 극한해석 결과는 다른 결과들과는 상이한 양상을 나타내고 있으며, 편심이 증가하여도 지지력은 오히려 커지는 이상 경향을 보여주고 있다. 극한해석 상계법과 극한평형법에 의한 지지력 계수들은 표면 기초에서 잘 맞고 있으나, 얇은 기초에서 잘 맞지 않는다. 그러나, 얇은 기초에서 극한해석 상계법과 극한평형법에 의한 지지력은 비교적 잘 일치하고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 극한해석 상계법과 극한평형법에 의한 지지력을 검토한 결과, 극한해석 상계법에 Meyerhof 파괴메카니즘을 적용하는 방법이 극한평형법의 결과와 가장 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다.

3.3 지지력 계수에 영향을 미치는 요소

지지력 계수에 영향을 주는 요소들로는 내부마찰각, G , 기초바닥면의 마찰, 편심량, 그리고 근입 깊이 등이 있다. 본 연구에서는 이 요소들이 지지력 계수에 미치는 영향을 조사하기 위하여, G 값을 0.01, 0.1, 1.0, 10.0 등으로 변화시키고, 내부마찰각은 10° , 20° , 30° 등으로 변화시키고, 그리고 기초의 근입 깊이를 기초 너비의 0.2배, 0.4배, 0.6배, 0.8배, 1.0배 등으로 변화시켜 해석하였다.

그림 8은 내부마찰각이 30° 이고 $D_f/W=1.0$ 인 얇은 기초의 지지력 계수들에 대한 무게 정수 G 의 영향을 나타낸다. 여기에서는 Meyerhof 파괴메카니즘을 적용한 결과이며, 그림 8(a)는 지지력 계수 N_c 의 경우를, 그림 8(b)는 지지력 계수 N_f 의 경우를 나타낸다. 지지력 계수 N_c 는 G 가 증가함에 따라 약간 증가하는 반면, 지지력 계수 N_f 는 반대로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그러나, G 의 증감에 따른 지지력 계수들의 변화는 매우 작은 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 극한해석 상계법에서 무게 정수 G 는 지지력 계수들에 영향을 미치지 못한다. 그리고, 기초 바닥면의 마찰에 의한 영향은 지지력 계수 N_c 의 경우, 마찰을 고려하지 않는 경우보다 약간 크게 나타나지만, 지지력 계수 N_f 에서는 크게 나타나고 있다. 또한, 편심량에 따른 지지력 계수의 변화는 편심량이 증가함에 따라 지지력 계수는 감

소하는 경향을 나타내고 있다.

내부마찰각이 30° 인 얇은 기초에 수정된 Saran 메카니즘을 적용한 경우, 기초의 근입 깊이의 변화에 따른 지지력 계수의 변화가 그림 9에 나타나 있다. 그림 9(a)는 지지력 계수 N_c , 그림 9(b)는 지지력 계수 N_f 의 경우이다. 기초의 근입 깊이가 깊어짐에 따라 기초의 지지력 계수들 N_c 와 N_f 모두 약간씩 커지며, 지지력 계수 N_c 보다 지지력 계수 N_f 가 더 큰 폭으로 증가한다. 즉, 상재하중에 의한 영향이 지지력 계수 N_c 보다 지지력 계수 N_f 에 더 크게 작용한다. 극한평형법에서 기초의 근입 깊이가 변화하여도 지지력 계수 N_c 와 N_f 는 변화가 없지만, 극한해석 상계법에서 지지력 계수들은 기초의 근입 깊이에 따라 그 크기가 변화한다. 즉, 근입 깊이가 증가함에 따라 지지력 계수들도 같이 증가한다.

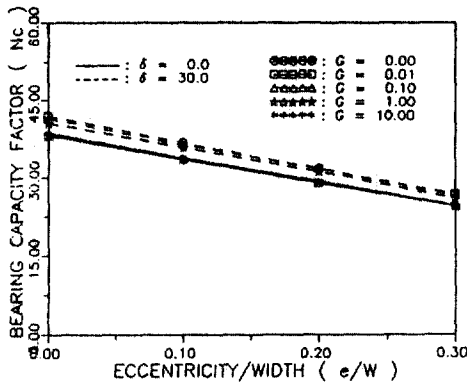
얇은 기초의 경우, 내부마찰각의 변화에 따른 지지력 계수, N_c 는 그림 10(a)에, 지지력 계수 N_f 는 그림 10(b)에 나타나 있다. 이 그림으로부터 내부마찰각이 커짐에 따라 지지력 계수들도 증가한다. 내부마찰각이 10° 인 경우, 지지력 계수들은 근입 깊이가 증가함에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있지만, 내부마찰각이 30° 인 경우에서는 큰 차이를 보여주고 있다. 그리고, 근입 깊이가 증가함에 따라 지지력 계수의 증가량은 지지력 계수 N_c 보다 지지력 계수 N_f 에서 더 크다. 즉, 내부마찰각이 커짐에 따라 지지력 계수들은 근입 깊이의 영향을 더 많이 받으며, 특히 지지력 계수 N_c 에서 그 정도가 심하다.

4. 결론 및 앞으로의 연구과제

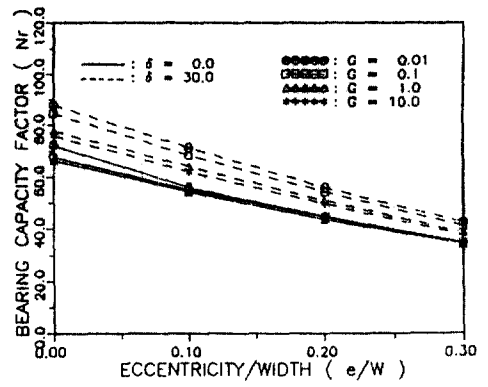
본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 편심하중이 작용하는 기초의 지지력을 극한해석 상계법으로 산정하는 방법을 제시하였다. 적용된 파괴메카니즘들 중에서 Meyerhof 파괴메카니즘을 적용한 방법이 기존의 극한평형법에 가장 근사한 결과를 나타낸다.

2. 극한해석 상계법으로 지지력을 구하는 식에는 상재하중의 영향을 고려하는 지지력 계수 N_{c0} 의 항이 없으므로, 극한해석 상계법에서 상재하중의 영향이 지지력 계수 N_c 와 N_f 에 포함되어 있다. 표면 기초의 경우, 극한해석 상계법에 의한 지지력 계수 및 지

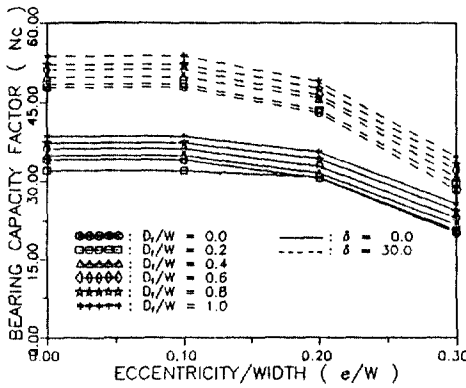


(a) N_c

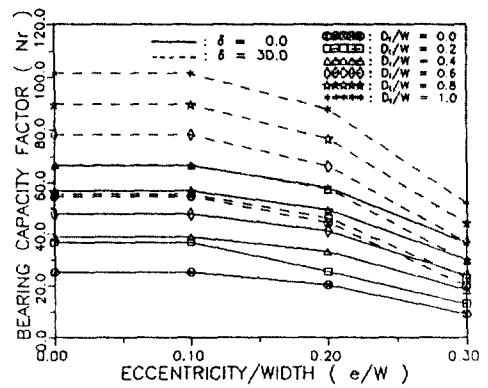


(b) N_r

그림 8. Effect of G-Values on Bearing Capacity Factor of Shallow Footing ($D_r/W=1.0, \phi=30^\circ$)

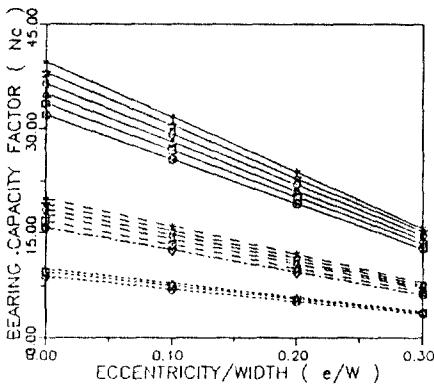


(a) N_c



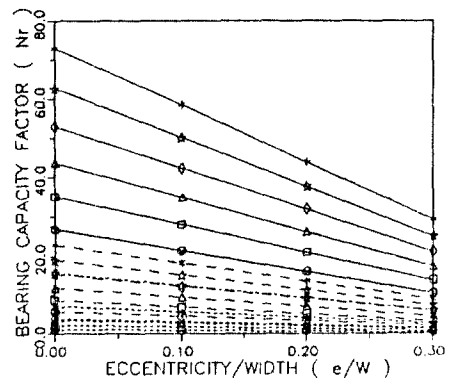
(b) N_r

그림 9. Effect of Embedment Depth on Bearing Capacity Factor of Shallow Footing ($G=10.0, \phi=30^\circ$)



(a) N_c

○○○○○○ : $D_r/W = 0.0$
 □□□□□□ : $D_r/W = 0.2$
 △△△△△△ : $D_r/W = 0.4$
 ◇◇◇◇◇◇ : $D_r/W = 0.6$
 ☆☆☆☆☆☆ : $D_r/W = 0.8$
 ++++++ : $D_r/W = 1.0$
 - - - - - : 10 DEGREE
 - - - - - : 20 DEGREE
 - - - - - : 30 DEGREE



(b) N_r

그림 10. Effect of Internal Friction Angle on Bearing Capacity Factor

지력은 기존의 극한평형법의 결과들과 대체로 잘 일치한다. 얇은 기초의 경우, 극한해석 상계법에 의한 지지력 계수는 극한평형법에 의한 지지력 계수들과 큰 차이를 보여주고 있는데, 그 이유는 상계하중의 영향이 지지력 계수 N_c 와 N_r 에 포함되어 있기 때문이다. 그러나, 기초의 극한지지력은 대체로 비슷한 값을 나타내고 있다.

3. 극한해석 상계법에 의한 지지력 계수에 영향을 주는 요소들은 근입 깊이, 편심량, 흙의 내부마찰각, 기초 바닥면의 마찰각, 그리고 무게 정수(G) 등이다. 무게 정수 G 는 지지력 계수에 영향을 크게 주지 않지만, G 가 증가함에 따라 지지력 계수 N_c 는 약간 증가하고, 지지력 계수 N_r 는 반대로 약간 감소하는 경향을 보여주고 있다. 기초의 근입깊이가 증가함에 따라 지지력 계수들도 함께 증가하며, 증가량은 지지력 계수 N_c 보다 N_r 에서 더 크다. 편심량이 커짐에 따라 지지력 계수는 감소한다.

4. 앞으로의 연구과제로는 편심량의 크기, 내부마찰각, 그리고 상대밀도 등에 따른 정확한 파괴메카니즘을 모형실험으로부터 찾아서 그것을 극한해석법에 적용하여 더 좋은 상계해들을 구하는 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 1991년도 기초연구 지원금으로 이루어 졌으며 이에 사의를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. Chen, W.F., *Limit Analysis and Soil Plasticity*, Elsevier Scientific Pub., Company Inc., Amsterdam, 1975.
2. Chen, W.F. and Davidson, H.L., "Bearing Capacity Determination by Limit Analysis", *Jr. of Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol.99, No. SM6, June, 1973, pp.433-449.
3. Eastwood, W., "The Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Foundation on Sandy Soils", *Structural Engineer*, Vol.29, 1955, pp.181.
4. Gudehus, G., "Lower and Upper Bounds for Stability of Earth Retaining Structures", *Proc. 5th ECSMFE*, Vol.1, Madrid, 1972, pp.21-28.
5. Hansen, J.B., "Simple Beregning of Fundamentern Bæreevne", *Ingeniøren*, Vol.64, 1955, pp.95-100.
6. Hansen, J.B., "A General Formular for Bearing Capacity", *Bulletin No.11*, Danish Technical Institute, Copenhagen, 1961, pp.38-46.
7. Lee, I.K., "Footings Subjected to Moments", *Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg.*, Vol.2, 1965, pp.108.
8. Lee, S.D., "*Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlitzten im Sand neben Einzelfundamenten*", Mitteilung Grundbauinstitut Uni. Stuttgart, Heft 27.
9. Meyerhof, G.G., "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", *Geotechnique*, Vol.2, 1951, pp. 301-332.
10. Meyerhof, G.G., "The Bearing Capacity of Foundation under Eccentric and Inclined Loads", *Proc. 3th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg.*, Vol.1, 19-53, pp.440-445.
11. Prakash, S., and Saran, S., "Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Footings", *Jr. of Soil Mech. Found. Engg. Div.*, ASCE, Vol.97, No. SM1, January, 1971, pp.95-117.
12. Saran, S., "*Bearing Capacity of Footings Subjected to Moments*", Theses Presented to the University of Roorkee, Roorkee, India, August, 1969, in Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
13. Tettinek, W., and Matl, F., "A Contribution to Calculating the Inclination of Eccentrically Loaded Foundations", *Proc. 3th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg.*, Zurich, Vol.1, 1953, pp.461-465.
14. Winterkorn, H.F. and Fang, H.Y., Editors, *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, 1975.
15. 建設部, 구조물 설계 기준, 1983, pp.97-119.
16. 日本土質工學會, 土の強さと地盤の破壊入門, 윤지선 역, 1990.
17. 정인준, 김명모, 알기쉬운 토질역학, 문운당, 1990.
18. 권오균, "편심하중 작용시 극한해석 상계법을 이용한 기초의 극한지지력 산정 방법", 서울대학교 박사학위논문, 1991.

(接受 : 1991. 12. 3)