

편심하중을 받는 줄기초의 지지력 산정에 관한 연구

A Study on Determination of Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Strip Footing

권오균* · 정충기** · 김태수*** · 김명모****

Kwon, Oh Kyun · Chung, Choong-Ki · Kim, Tae Soo · Kim, Myoung Mo

Abstract

In this study, the influence of eccentricity on bearing capacity of strip footing has been investigated by the model tests using the carbon rods, the upper bound method of limit analysis, and Meyerhof method of the limit equilibrium method. In applying the upper bound, the failure mechanism based on model tests was used. There was good agreement between the results of model tests and the upper bound method of limit analysis, but Meyerhof method yielded low bearing capacity and underestimated the effect of eccentricity on bearing capacity. Besides, the influences of footing width, embedment depth and base friction on the bearing capacity have been examined.

요 지

본 연구에서는 탄소봉을 이용한 모형실험, 극한해석 상계법, 그리고 극한평형법을 이용한 Meyerhof 방법을 통하여 편심량이 줄기초에 미치는 영향을 연구하였다. 극한해석 상계법에 적용된 파괴메카니즘은 모형실험에서 구하여 사용하였다. 세가지 방법에 의한 결과들을 분석한 결과, 모형실험과 극한해석 상계법에 의한 결과는 편심량에 상관없이 잘 일치하지만, Meyerhof 방법은 지지력을 보수적으로 평가하고, 편심량의 증가에 따른 지지력의 감소효과도 과소평가한다. 아울러 기초너비, 근입깊이, 바닥면의 마찰 등을 변화시켜 각 요소들이 지지력에 미치는 효과를 연구하였다.

1. 서 론

일반적으로 기초구조물에 작용하는 하중은 정확하게 기초의 중심에 작용하지 않고 어느 정도의 편심을 갖고 작용한다. 기초구조물에 편심하중이 작용하면, 이로 인하여 부등침하와 모멘트가 발생

하여 하중이 커지는 효과를 나타내게 된다. 그러므로, 정확한 설계를 위해서나, 중요한 기초구조물을 설계할 때에는 편심을 고려한 설계를 하여야 한다. 현재로는 기초 구조물에 편심하중이 작용하는 경우, 유효너비의 개념을 이용하여 해석하거나, 혹은 편심이 작을 경우 이를 무시하고 해석하고 있다.⁽¹⁾

편심이 없는 경우에 대한 연구는 많이 이루어졌으며, 여러가지 해석방법들과 많은 실험 결과들이 발표되었다. 그러나, 편심하중이 작용하는 기초구조

* 정회원 · 계명대학교 공과대학 토목공학과, 전임강사
** 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과, 조교수
*** 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과, 공학석사
**** 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과, 교수

물에 대해서는 현재까지 충분한 연구가 이루어지고 있지 않다. 편심하중을 받는 기초에 대한 기존의 해석방법들로는 극한평형법을 이용한 Meyerhof 방법^(1,2)과 Saran 방법^(3,4) 등이 있다. 그러나, 극한평형법은 먼저 파괴면을 가정한 뒤에 가장 위험한 파괴면의 위치를 찾는 방법으로서, 가정된 파괴면에서의 응력분포가 정해에 필요한 응력평형 조건을 만족하지 못하는 단점이 있다. 따라서, 극한평형법은 일반적으로 널리 이용되지만, 안정문제에 대한 근사해를 얻는 방법이라고 할 수 있다. 그러므로, 실제에 잘 맞고 계산이 간편한 새로운 방법이 요구되는데, 그 방법이 극한해석법이다.⁽⁵⁻⁷⁾ 극한해석법은 극한평형법과는 달리 단계적인 탄소성 해석을 행하지 않고 파괴하중을 구할 수 있으며, 다른 방법들에 비하여 파괴형태가 간명하고, 상대적으로 적용하기 쉬운 장점이 있다. 극한해석법은 상계법과 하계법으로 나눌 수 있는데, 편심하중이 작용하는 기초의 지지력을 극한해석으로 산정하려면 상계법으로 접근하는 편이 유리하다. 본 연구에서는 편심하중을 받는 줄기초의 지지력을 고찰하기 위하여 탄소봉을 이용한 모형실험을 수행하고, 모형실험에서 얻은 파괴메카니즘을 이용한 극한해석 상계법과 극한평형법을 이용한 Meyerhof 방법으로 지지력을 산정하고, 모형실험의 지지력과 비교함으로써 편심이 줄기초의 지지력에 미치는 효과와 해석방법의 신뢰성을 검토하였다. 그리고, 편심하중을 받는 기초의 지지력에 영향을 미치는 요소들을 연구하기 위하여 모형기초의 너비, 기초 바닥면의 마찰, 편심량, 그리고 근입깊이 등을 변화시켜 각 요소들이 줄기초의 지지력에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 해석방법에 관한 이론적 배경

2.1 극한평형법에 의한 해석방법

극한평형법은 토질역학의 안정문제에 대한 근사해를 얻는데 널리 이용되는 방법이다. 이 방법은 먼저 파괴면을 평면, 원호, 혹은 대수나선 등으로 가정하고, 가정된 파괴면에서 응력평형조건이 만족되도록 응력분포를 가정한 다음, 주어진 파괴면이나 활동면에 대하여 가장 위험한 위치를 찾는 방법이다. 그러나, 가정된 파괴면에서의 응력분포가 정해에

필요한 조건들 즉, 평형조건, 응력경계조건과 항복조건을 정확하게 만족시키지 못하는 단점이 있다. 그러므로, 이 방법은 정역학적으로 근사해를 얻는 방법이라 할 수 있다. 즉, 극한평형법은 극한해석 상계법의 기본 개념-파괴면을 먼저 가정하고 해를 찾는다-을 이용하지만, 극한평형법에 의한 해는 극한해석 상계법의 모든 조건들을 만족하지 못하기 때문에 극한해석 상계해가 될 수는 없다. 편심하중이 작용하는 기초의 지지력을 산정하기 위해 가장 널리 이용되는 극한평형법인 Meyerhof 방법에 대하여 간략히 언급하면 다음과 같다.

Meyerhof는 편심하중을 받는 줄기초의 지지력을 계산하는 데 감소된 너비의 개념을 이용하여 감소된 너비의 기초 중심에 하중이 작용하는 것으로 가정하여 해석하였다.⁽¹⁾ 편심량이 e 인 수직하중 Q 가 너비가 W 인 줄기초에 작용할 경우, 하중이 다음의 식 (1)과 같은 유효너비(effective width, W')를 갖는 기초의 중심에 작용한다고 가정할 수 있다(그림 1 참조).

$$W' = W - 2e \quad (1)$$

다소 보수적이지만 ($W - W'$)의 너비를 무시한다면, 편심이 작용하고 있는 쪽에 있는 흙에서의 소성평형영역들은 하중이 기초 중심에 작용하는 경우와 같아진다. 그러므로 기초의 지지력은 다음과 같다.

$$q = \frac{Q}{W'} = cN_c + p_0 N_q + \frac{1}{2} \gamma W' N_\gamma \quad (2)$$

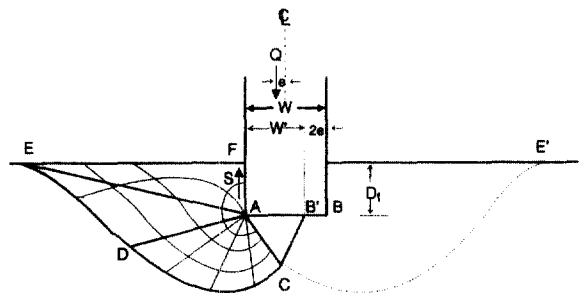


그림 1. Meyerhof 방법에서의 파괴면

윗 식에서 c 는 흙의 점착력, γ 는 흙의 단위중량, p_0 는 기초 윗 부분에서의 상재하중이고, N_v , N_q , N_c 는 흙의 내부마찰각 ϕ 에 의해 결정되는 기초 중심에 하중이 작용하는 경우의 지지력계수들이다. 식 (2)는 기초 바닥면에 작용하는 저항력이므로 편심하중이 작용하는 기초의 전지지력을 얻기 위해서는 식 (2)에 의한 지지력과 기초축 위에 작용하는 마찰력(S)을 합해야 한다. 윗 식에 의하면 편심하중에 의한 기초지지력의 감소는 흙의 성질(c , ϕ , γ), 기초의 크기, 상재하중 크기 등에 의존한다.

2.2 극한해석법^(5,6,8)에 의한 해석방법

정해에 필요한 역학적 조건으로는 응력평형 조건, 응력-변형을 관계, 적합 방정식 등이 있다. 탄성 이론에서는 응력-변형을 관계를 이용하여 유일한 해를 구하게 된다. 그러나, 탄소성체에서의 응력-변형을 관계는 초기 탄성단계, 중간에 구속된 소성 유동 단계, 그리고 최종 불구속 소성유동 단계로 나누어 진다.⁽⁵⁾ 일반적으로 토질역학적 문제에서는 소성파괴가 지배적인데, 매우 간단한 문제를 제외 하고는 구속된 소성유동영역을 포함하는 완전한 해석은 너무 복잡하고 비실용적이므로, 보다 직접적인 방법으로 파괴하중을 산정하면서 간편하고 결과가 좋은 방법이 요구된다. 이러한 요구에 의하여 나타난 극한해석법은 단계적인 탄소성 해석을 행하지 않고 파괴하중을 구하게 된다. 극한해석법이 확립된지 반세기도 안되지만, 여러 방면에 많이 이용되고 있다. 기존의 slip-line 방법과 극한평형방법에 비하여, 극한해석법은 흙의 응력-변형을 관계를 이상적인 방법으로 고려한다. 다른 방법들에 비하여 극한해석의 뛰어난 특징은 복잡한 문제형태나 하중조건하에서도 실질적인 파괴하중을 얻을 수 있고, 파괴형태가 간명하며, 적용하기가 상대적으로 쉽다는 점 등이다.

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 이론과 상계이론으로 나누어 진다. 상계이론에 의

하면, 속도 경계조건과 변형률-속도의 적합조건을 만족하는 가정된 속도장에서 내부에너지 소산률과 외부 일률을 같게 놓는 일률식으로부터 결정된 하중은 실제의 파괴하중보다 작지 않다는 것이다. 이러한 조건들을 만족하는 속도장을 동역학적 가용 속도장이라고 하며, 이 속도장에서 소성흐름에 의한 에너지 소산률은 이상화된 응력-변형률 속도관계 즉, 유동법칙으로 부터 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 파괴하중보다 크지 않다는 것이다. 이런 조건들을 만족하는 응력분포를 정적 가용 응력장이라고 한다. 상계이론과 다른 점은 파괴메카니즘과 일률식 대신에 단지 평형조건과 항복조건 만을 고려하며, 흙의 동역학적 조건은 고려하지 않는 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 통찰력 없이는 상당한 어려움이 뒤따른다. 극한해석법은 적당한 속도장과 응력장을 선택하여 상계 및 하계이론을 이용하여 실제의 파괴하중에 근접한 해를 얻는 방법이다. 상계이론과 하계이론을 이용하여 얻은 상계해와 하계해가 일치하게 되면, 그 해는 정해가 된다.

본 연구에서는 편심하중을 받는 기초의 지지력을 극한해석을 이용하여 산정하고자 한다. 편심하중이 작용하는 기초에서의 응력분포는 응력평형조건과 항복조건을 동시에 만족하지 못하기 때문에 극한해석 하계이론을 적용하는 것은 곤란하다. 그러므로, 편심하중이 작용하는 기초의 지지력은 극한해석 상계이론을 이용하여 산정하는 편이 유리하다. 극한해석 상계법으로 해석하는 경우, 적용되는 파괴메카니즘에 따라 그 결과가 달라지므로 정확한 파괴메카니즘을 적용하여야 한다.

3. 모형실험

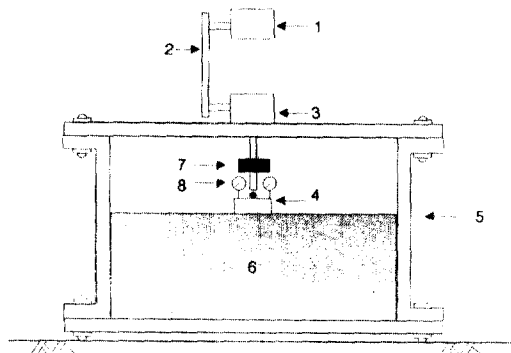
극한해석 상계법에서는 정확한 파괴메카니즘을 설정하는 것이 매우 중요하다. 대개의 경우 기존의 문헌이나 실험을 통하여 파괴메카니즘을 결정한다. 본 연구에서는 편심하중이 작용하는 기초의 파괴메카니즘 양상을 파악하고, 기초의 지지력을 얻기 위하여 모형실험을 행하였다.

3.1 모형실험 장치

편심하중을 받는 줄기초의 파괴메카니즘을 실험적으로 고찰하기 위하여 모형실험에 사용된 모형틀의 크기는 119 cm×60 cm×10 cm이며, 그 재료는 두께가 5 mm인 50 mm×100 mm 크기의 사각형강(SWS41)이다. 모형지반은 탄소봉을 이용하였으며, 모형지반의 밀도를 변화시키기 위하여 직경 6 mm와 직경 4 mm의 두가지의 탄소봉을 사용하였다. 이러한 모형지반은 정면에서 바라보는 방향의 길이가 비록 짧지만, 평면 변형을 상태로 볼 수 있다. 모형기초는 아크릴로 제작하였으며, 모터와 기어박스를 이용하여 모형기초에 재하하였다. 그리고, 로드셀과 두 개의 다이얼 게이지를 설치하여 각각 작용하중과 수직변위를 측정하였다(그림 2 참조).

3.2 실험방법

편심하중을 받는 기초의 지지력을 측정하고 파괴메카니즘을 고찰하기 위하여, 두가지 직경의 탄소봉을 이용하여 실험하고자 하는 밀도의 모형지반을 형성한 다음, 모형기초를 설치하고, 모터와 기어박



1. 모터 2. 체인 3. 기어박스 4. 모형기초
5. 모형틀 6. 모형지반 7. 로드 셀 8. 다이얼 게이지

그림 2. 모형실험장치

스를 이용하여 일정한 편심량을 유지하면서 재하시켰다. 모형기초의 지지력은 로드 셀로 측정하였고, 수직변위는 2개의 다이얼 게이지로 측정하였다(그림 2 참조). 기초의 지지력에 미치는 영향을 고려하기 위하여 모형기초 바닥면의 마찰, 모형기초의 크기, 편심량, 그리고 근입깊이를 변화시켜서 실험하였다. 실험에 사용된 모형기초의 너비는 100 mm와 120 mm이다. 100 mm의 모형기초에서는 근입깊이를 기초너비의 0.0, 0.36, 0.72배의 크기로, 120 mm의 모형기초에서는 기초너비의 0.0, 0.3, 0.6배로 변화시켜서 실험하였다. 120 mm 모형기초에 대하여 기초 바닥면의 마찰이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 실험하였다. 기초 바닥면에 마찰이 있는 경우는 모형기초의 바닥면에 #60의 사포를 부착하여 실험하였으며, 마찰이 없는 경우는 기초의 바닥면을 매끈한 상태의 쇠파인으로 처리하여 실험하였다. 모형지반에서 발생하는 파괴메카니즘의 형상은 기초에 하중이 재하되는 동안의 전 과정을 사진 및 비디오 촬영하여 파악하였다.

4. 실험결과 및 해석

일반적인 흙에 대하여 권오균 등⁹⁾에서 제안된 Saran의 파괴메카니즘을 속도장 조건에 맞게 변형시킨 파괴메카니즘은 그림 3(a)에 나타나 있으며, 3개의 지역으로 구분된다. A'CDE선 아래 지역의 흙은 정지상태에 있으므로 소성흐름은 A'CDE선 위의 지역에서만 발생한다. 삼각형 썰기 A'BC는 불연속선인 A'C면에 내부마찰각(ϕ) 만큼 경사지게 활동하며, 이러한 삼각형 썰기의 활동으로 인하여 인접한 방사전단 BCD지역과 BDEF지역은 옆으로 밀려나게 된다. BDEF지역은 불연속면인 DE면에 ϕ 만큼 경사지게 활동하며, 방사전단 BCD지역의 속도는 V_1 에서 V_3 로 대수적으로 증가한다. A'BC에서의 속도 diagram은 그림 3의 (b), (c), (d)와 같다. 기초는 기초 바닥면에 수직방향으로 V_1 의 속도로 움직이며, 기초와 기초 바로 아래에 있는 흙썰기 A'BC 사이의 상대속도는 기초 바닥면의 마찰에 의하여 발생한다. 이 파괴메카니즘에서 내부에너지 소산은 불연속면인 A'C면, BC면, DE면, 대수나선 CD면, 방사전단 BCD지역, 그리고 기초바닥과 인접한 흙 사이의 마

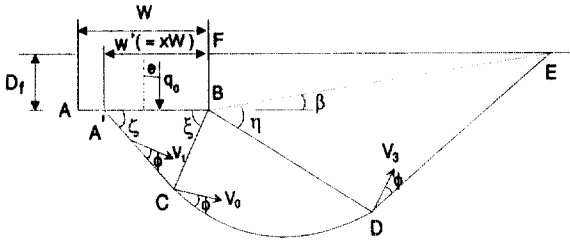


그림 3(a). 극한해석 상계법에 적용된 파괴메카니즘 형상

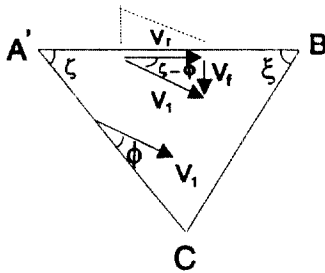


그림 3(b). 쉐기 A'BC에서의 속도 diagram

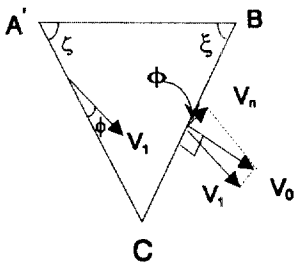


그림 3(c). BC면에서의 속도 diagram
($-\pi/2 - \phi + \xi + \zeta > 0$ 의 경우)

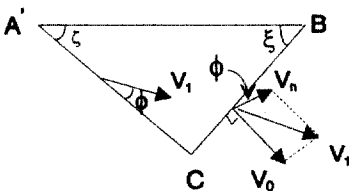


그림 3(d). BC면에서의 속도 diagram
($-\pi/2 - \phi + \xi + \zeta < 0$ 의 경우)

찰에 의해서 발생한다. 그리고, 외부 일율은 A'BC 지역, BCD지역, BDEF지역, 그리고 외부 힘에 의하여 발생한다. 이러한 파괴메카니즘을 극한해석 상계법에 적용하여 편심하중이 작용하는 줄기초의 지지력을 산정하는 식은 다음과 같다.

$$q_0(\xi, \zeta, \eta) = \frac{1}{c} \frac{1}{1 - \tan \delta \cot(\zeta - \delta)} [N_c + G N_r] \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} N_c(\xi, \zeta, \eta) &= \frac{x \cos \phi \sin \xi + x \sin \zeta \text{ ABS}[\cos(\xi + \zeta - 2\phi)]}{\sin(\zeta - \phi) \sin(\xi + \zeta)} \\ &+ \frac{x \alpha \sin \zeta \{ e^{[2(n+\beta-\xi-\eta)\tan\phi]} - 1 \}}{\sin \phi \sin(\zeta - \phi) \sin(\xi + \zeta)} \\ &+ \frac{x \alpha \sin \zeta \sin \eta e^{[2(n+\beta-\xi-\eta)\tan\phi]}}{\cos(\eta + \phi) \sin(\zeta - \phi) \sin(\xi + \zeta)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N_r(\xi, \zeta, \eta) &= \frac{-x^2 \sin \zeta \sin \zeta}{\sin(\xi + \zeta)} \\ &+ \frac{x^2 \alpha \sin^2 \xi}{\sin^2(\xi + \zeta) \cos \phi \sin(\zeta - \phi) (1 + 9 \tan^2 \phi)} \\ &\times \{ 3 \tan \phi \cos \xi + \sin \zeta + [3 \tan \phi \cos(\beta - \eta) + \sin(\beta - \eta)] e^{[3(n+\beta-\xi-\eta)\tan\phi]} \} \\ &+ \frac{x^2 \alpha \sin^2 \zeta \sin \eta \cos \eta e^{[3(n+\beta-\xi-\eta)\tan\phi]}}{\sin^2(\xi + \zeta) \cos(\phi + \eta) \sin(\zeta - \phi)} \\ &+ \frac{x^2 \alpha \sin \zeta \sin \eta \cos(\beta - \eta) e^{[2(n+\beta-\xi-\eta)\tan\phi]}}{\sin(\xi + \zeta) \cos \phi \sin(\zeta - \phi) \sin \beta} \left[\frac{D_f}{W_x} \right] \\ &+ \frac{x^2 \alpha \cos(\beta - \eta) e^{[(n+\beta-\xi-\eta)\tan\phi]}}{\sin(\zeta - \phi) \cos \phi \sin(\zeta - \phi) \sin \beta} \left[\frac{D_f}{W_x} \right]^2 \end{aligned} \quad (5)$$

그리고, 위 식에서의 x는 그림 3에 나타난 접촉 너비계수 ($= \frac{\text{유효너비}(W')}{\text{기초너비}(W)}$)이며, 무게정수(weight parameter, G)는 다음의 식(6)

$$G = \frac{\gamma W}{2c} = \frac{\gamma r_0 \sin(\xi + \zeta)}{2c x \sin \zeta} \quad (6)$$

과 같으며, 위 식에서 alpha와 beta는 각각 다음의 식 (7)과 식 (8)에 의하여 결정된다.

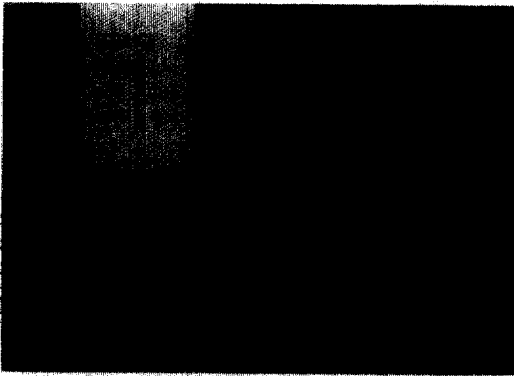
$$\begin{aligned} -\pi/2 + \xi + \zeta - \phi > 0 \text{의 경우, } \alpha &= \sin(\xi + \zeta - 2\phi) \\ -\pi/2 + \xi + \zeta - \phi \leq 0 \text{의 경우, } \alpha &= \sin(\xi + \zeta) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sin\beta \exp[\beta \tan\phi] = \frac{(D_f/Wx)\sin(\xi + \zeta)\cos(\phi + \eta)}{\sin\xi \cos\phi e^{[(\eta + \zeta - \xi)\tan\phi]}} \quad (8)$$

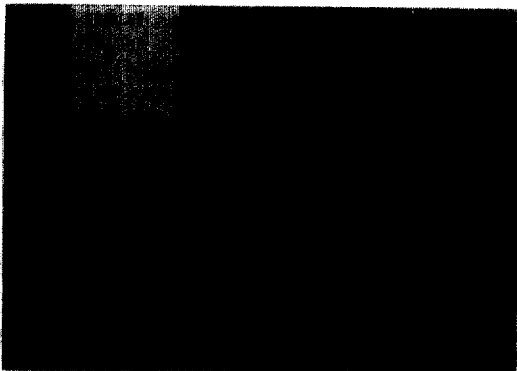
본 연구에서와 같이 비점성 흙에 대한 지지력 산정식은 식 (3)에서 다음의 식 (9)와 같이 된다.

$$q_0(\xi, \zeta, \eta) = \frac{\gamma W}{2} \frac{1}{1 - \tan\delta \cot(\zeta - \delta)} N_r \quad (9)$$

윗 식에서 지지력 계수 N_r 는 식 (5)와 같으며, α 와 β 는 각각 식 (7)과 식 (8)과 같다. 파괴메카니즘에 대한 모형실험 결과로부터, 편심하중이 작용하는 기초의 파괴모양은 편심이 가해지는 방향으로만 발생하며, 편심량이 커질수록 기초의 바닥면과 인접한 지반 사이의 접촉면적이 감소하며, 파괴영역의 크기도 감소하는 양상을 나타내고 있다. 파괴메카니즘



(a) $e/W=0.1$, $D_f/W=0$ 인 경우



(b) $e/W=0.1$, $D_f/W=0.2$ 인 경우

그림 4. 모형실험에 의한 파괴메카니즘 양상

모형실험의 전형적인 실험결과가 그림 4에 나타나 있다. 그러나, 편심량의 크기에 따라 파괴면의 크기가 변화하지만, 그 형태는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 모형실험 결과를 근거로 편심량의 크기에 따른 접촉너비계수를 다음의 식과 같이 제안하였다.

$$x = -0.145(e/W) + 1.0 \quad (10)$$

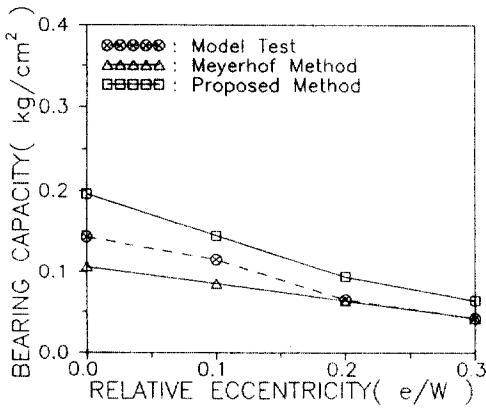
여기서, e = 편심

W = 기초너비

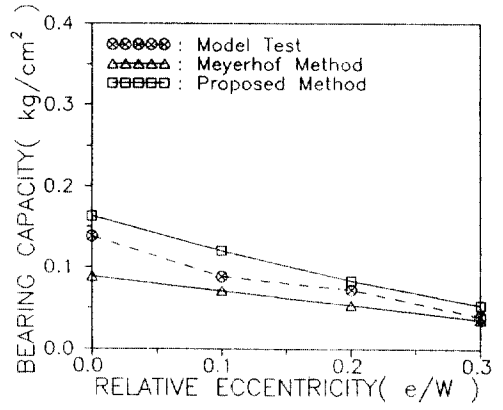
극한해석 상계법에 의한 편심하중이 작용하는 줄기초의 지지력은 편심량에 따라 식 (10)으로부터 결정되는 접촉너비계수 값을 적용하여 산정하였다. 이때 파괴면의 정확한 크기는 ξ , η , ζ 의 크기에 의하여 결정되는데, ϕ , γ , c , W , 그리고 D_f 의 값이 주어지면 함수 $q_0(\xi, \eta, \zeta)$ 를 매개변수 ξ , η , ζ 에 대하여 최적화시켜 파괴메카니즘의 크기를 결정한다.

본 연구에서 제안한 극한해석 상계법으로 편심하중을 받는 얇은 기초의 지지력 산정공식에 대한 신뢰성을 검토하기 위하여 기존의 극한평형법을 기초로 한 Meyerhof 방법과 함께 탄소봉을 이용한 모형실험에 의한 지지력 값들과 비교하였다. 지지력 산정에 필요한 탄소봉 모형지반의 내부마찰각은 동일한 밀도를 갖는 탄소봉 모형지반에 설치한 용벽에 수동토압을 가하는 실험을 행하여 파괴면과 힘들의 평형관계를 고려하여 역산하는 방법으로 산정하였다.

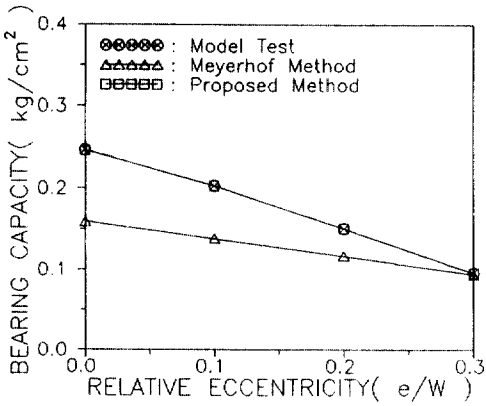
기초의 너비가 12 cm이고, 바닥면이 거친 기초의 지지력과 기초너비를 고려한 상대편심량(e/W) 사이의 관계를 각 상대근입깊이(기초너비에 대한 근입깊이의 비, D_f/W)에 따라 보여주는 그림 5로부터 실험결과와 두 가지 해석방법 모두 상대편심량의 증가에 따라 지지력이 감소함을 알 수 있다. 극한해석 상계법에 의한 해석결과는 표면기초의 경우에 모형실험 결과보다 약간 큰 지지력을 보여 주고 있으나, 근입기초의 경우에는 모형실험의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 표면기초의 경우, 모형실험시 탄소봉 모형지반 위에 놓인 기초에 편심하중이 작용할 때 기초판이 약간 옆으로 밀리면서 편심의 효과가 실제보다 증가하기 때문에 모형실험시 지지력이 작게 산출된 것으로 판단된다. 그러나,



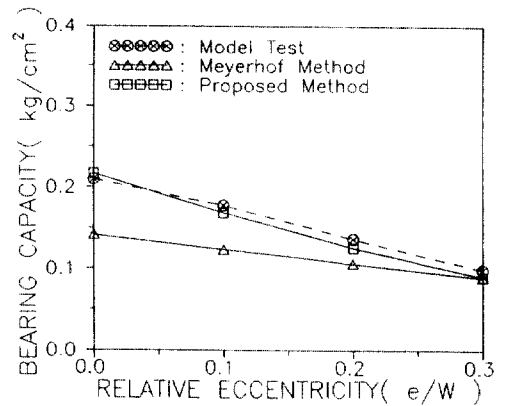
(a) $D_f/W=0.0$



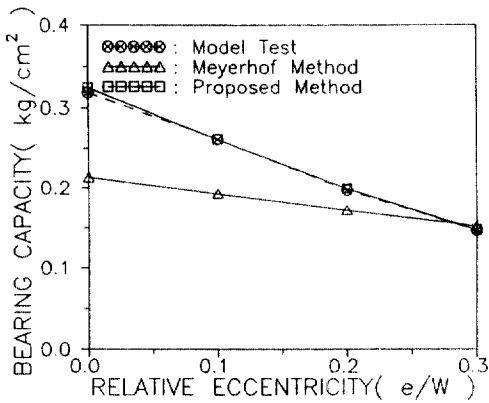
(a) $D_f/W=0.00$



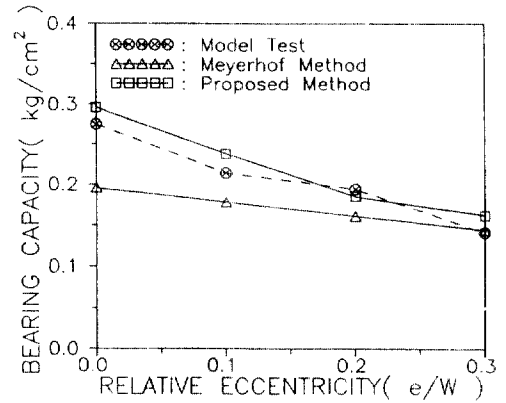
(b) $D_f/W=0.303$



(b) $D_f/W=0.36$



(c) $D_f/W=0.606$



(c) $D_f/W=0.72$

그림 5. 12 cm의 너비를 갖는 바닥면이 거친 기초의 지지력과 상대편심량 사이의 관계

그림 6. 10 cm의 너비를 갖는 바닥면이 거친 기초의 지지력과 상대편심량 사이의 관계

Meyerhof 방법은 모형실험의 결과와 비교할 때 지지력을 과소평가하며, 특히 편심이 없는 경우에 25%에서 35% 사이의 오차를 갖는다. 아울러 상대편심량의 증가에 의한 지지력의 감소효과도 매우 작아서 편심하중이 작용하는 얇은 기초에 대한 Meyerhof가 제안한 지지력 산정 방법이 편심의 효과를 제대로 반영하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 10 cm의 너비를 갖는 바닥면이 거친 기초의 지지력과 상대편심량과의 관계를 보여 주는 그림 6에서도 확인할 수 있다. 따라서, 기초너비에 관계없이 극한해석 상계법에 의한 지지력 산정방법이 높은 신뢰성을 갖으며, 극한평형법을 기초로 한 Meyerhof 방법은 상대편심량의 증가에 따른 지지력의 감소효과를 과소평가하며, 지지력의 크기도 특히 상대편심량이 작은 경우에는 지나치게 보수적으로 평가함을 알 수 있다.

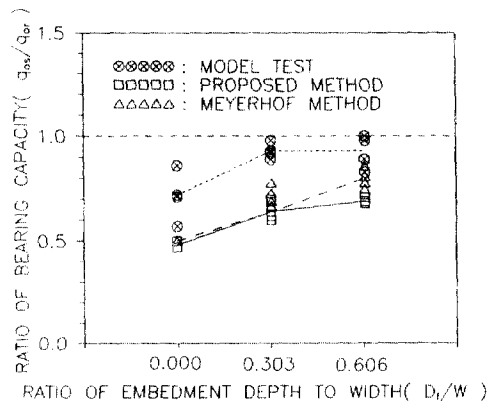
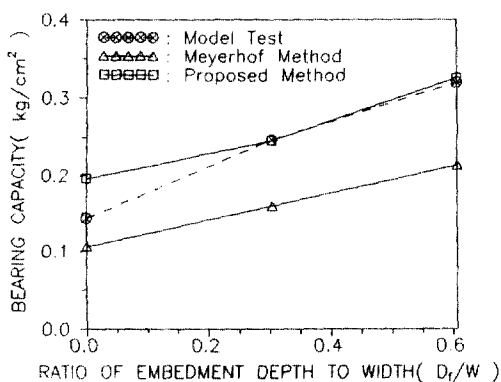
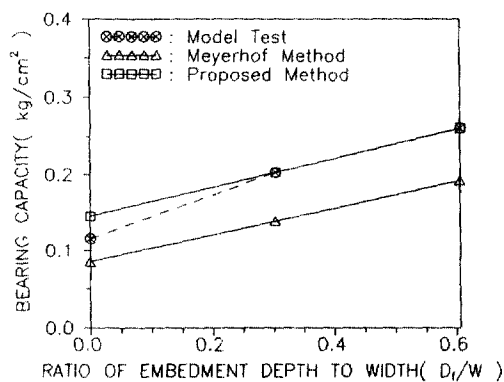


그림 7. 상대근입깊이에 따른 바닥면 거칠기가 지지력에 미치는 영향

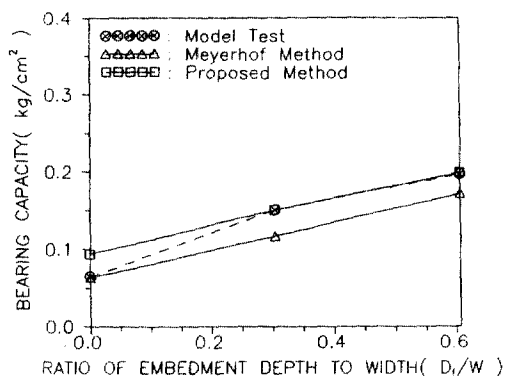
기초 바닥면의 거칠기에 대한 효과를 고찰하기 위하여 12 cm 너비의 기초에 대하여 매끄러운 바



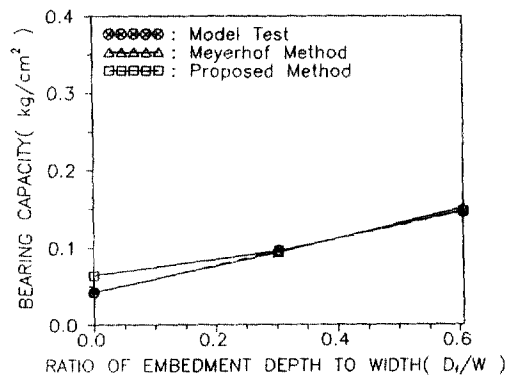
(a) $e/w=0.0$



(b) $e/W=0.1$



(c) $e/w=0.2$



(d) $e/W=0.3$

그림 8. 기초의 너비가 12 cm인 바닥면이 거친 기초의 지지력과 상대근입깊이 사이의 관계

다면 기초의 지지력(q_{os})과 거친 바닥면 기초의 지지력(q_{or})에 대한 비(q_{os}/q_{or})와 상대근입깊이 사이의 관계를 그림 7에 도시하였으며, 각 선들은 각 방법들에서 지지력 비의 값들을 평균한 점을 연결한 것이다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 지지력의 비는 항상 1보다 작고, 근입깊이가 커질수록 증가한다. 따라서, 바닥면이 매끄러운 기초의 지지력은 바닥면이 거친 기초의 지지력보다 작은 값을 가지며, 또한 기초 바닥면의 거칠기가 지지력에 미치는 효과는 기초의 근입깊이가 커질수록 감소한다는 사실을 알 수 있다. 그러나, 각각의 방법에 있어서 기초 바닥면의 거칠기가 지지력에 미치는 영향을 비교해보면, 극한해석 상계법과 Meyerhof 방법에서는 거의 비슷하게 나타나고 있으나, 모형실험과는 상당한 차이를 나타낸다. 즉, 모형실험에서는 그 차이가 해석적 방법보다 훨씬 작게 나타나는데, 그 이유는 바닥면이 매끄러운 기초의 실험을 위하여 사용된 매끄러운 쇠판에서도 약간의 마찰이 쇠판과 탄소봉 모형지반 사이에 작용하기 때문으로 판단된다. 즉, 해석방법에서는 바닥면의 마찰을 완전히 무시하고 해석하였으나, 모형실험에서는 기초 바닥면의 마찰의 영향이 어느 정도 작용하였기 때문에, 바닥면의 거칠기에 대한 효과가 작게 나타난 것으로 판단된다.

그림 8은 기초의 너비가 12 cm인 바닥면이 거친 기초의 지지력과 상대근입깊이 사이의 관계를 보여주고 있다. 기초의 지지력은 근입깊이가 커짐에 따라 증가하고 있으며, 앞에서 설명한 바와 같이 극한해석 상계법은 모형실험과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, Meyerhof 방법은 지지력 값을 보수적으로 산정하며, 그 차이는 편심량이 커질수록 감소하여 그림 8(d)에서와 같이 편심량과 기초너비의 비(e/W)가 0.3일 때에는 다른 방법들의 지지력 값과 거의 일치하게 됨을 알 수 있다. 아울러 근입깊이의 증가에 따른 지지력의 증가율은 두 해석방법 모두 모형실험의 결과와 거의 비슷하게 나온다는 점을 감안할 때, 비록 Meyerhof 방법이 지지력을 보수적으로 산정하지만 근입깊이가 지지력에 미치는 효과는 두 해석방법에서 모두 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론 및 앞으로의 연구과제

본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄소봉 모형지반을 이용한 모형실험으로부터 편심하중이 작용하는 줄기초의 파괴면은 편심하중이 작용하는 방향만으로 발생하는 사실을 알 수 있었다. 그리고, 파괴면의 양상은 극한평형 해석방법인 Saran 방법에서의 파괴면과 비슷하지만, 파괴영역의 크기와 접촉너비계수에서 차이가 있었다.

2. 모형실험으로부터 얻은 파괴메카니즘을 극한 해석 상계법에 적용하여 편심하중이 작용하는 줄기초의 지지력을 산정하는 방법을 제안하였으며, 제안된 방법은 타당성이 있는 것으로 나타났다.

3. 편심하중을 받는 줄기초의 지지력에 대하여, 극한해석 상계법은 편심량에 상관없이 모형실험에 의한 결과와 잘 일치하지만, Meyerhof 방법은 지지력을 보수적으로 평가하고, 편심량의 증가에 따른 지지력의 감소효과도 과소평가한다.

4. 기초 바닥면의 거칠기가 지지력에 미치는 효과는 기초의 근입깊이가 커질수록 감소한다.

앞으로의 연구과제로는 내부마찰각과 상대밀도 등의 변화에 따른 파괴메카니즘들을 고찰하여 본 연구에서 제안된 극한해석법을 이용한 지지력 산정 방법을 보완하는 것이다. 그리고, 현장실험을 통하여 실제 지반에서의 지지력과 극한해석법에 의한 지지력을 비교검토하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 1991년도 기초연구(KO-SEF 911-1306-007-2) 지원금으로 이루어졌으며, 이에 사의를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. Meyerhof, G.G., "The Bearing Capacity of Foundation under Eccentric and Inclined Loads", *Proc. 3th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg.*, Vol. 1, 1953, pp. 440-445.
2. Meyerhof, G.G., "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", *Geotechnique*, Vol. 2, 1951, pp. 301-332.
3. Saran, S., "Bearing Capacity of Footings Subjected to Moments", Thesis presented to the University of Roorkee, Roorkee, India, August, 1969, in Fulfil-

- lment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
4. 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.
 5. Chen, W.F., *Limit Analysis and Soil Plasticity*, Elsevier Scientific Pub., Comp. Inc., Amsterdam, 1975, pp. 1-294.
 6. Chen, W.F. and Liu, X.L., *Limit Analysis in Soil Plasticity*, Elsevier Scientific Publishers B.V., Amsterdam, 1990, pp. 309-324.
 7. Gudehus, G., "Lower and Upper Bounds for Stability of Earth Retaining Structures", *Proc. 5th ECS-MFE*, Vol. 1, Madrid, 1972, pp. 21-28.
 8. Chen, W.F. and Davidson, H.L., "Bearing Capacity Determination by Limit Analysis", *Jr. of Soil Mech. Found. Engg. Div.*, ASCE, Vol. 99, No. SM6, June, 1973, pp. 433-449.
 9. 권오관, 김명모, "극한해석 상계법을 이용한 편심하중하의 기초 지지력 산정", *대한토목학회논문집* 제 12권 제1호, 1991. 3, pp. 187-196.
(接受 : 1993. 8. 2)