

편심하중 작용시 극한해석 상계법을 이용한 얇은 기초의 지지력 분석 Analysis on Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Shallow Footing Using Upper Bound Method of Limit Analysis

상 현규¹⁾, Hyun-Kyu Sang, 최 명진²⁾, Myong-Jin Choe, 김 팔규³⁾, Pal-Kyu Kim, 권 오균⁴⁾, O-Kyun Kwon

¹⁾한국전력 전력연구원 위촉연구원, 충남대학교 토목공학과 박사과정,
KEPRI MTS., Student, Dept. of Civil Eng., Chung Nam National University

²⁾NESGEO 사장, President of NESGEO

³⁾충남대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Chung Nam National University

⁴⁾계명대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Keimyung University

SYNOPSIS : In this study the bearing capacity of the eccentrically loaded shallow footing is estimated by means of the upper bound method of limit analysis. In the case of applying the upper bound, the results depend on the failure mechanism. So the failure surface is correctly studied through the model test using sand. New method is proposed to estimate the bearing capacity of the eccentrically loaded shallow footing by means of the upper bound method to apply the failure mechanism based on the model test. The propriety of new method is verified by the results of various methods. And the influences of the variables eccentricity, embedment depth, variations of contact width factor by model test using sand are also studied in this paper

1. 서 론

기초 구조물에 편심하중이 작용하면, 그것으로 인하여 기초는 부등침하와 모멘트가 발생하여 하중이 커지는 효과를 나타내게 된다. 그러므로, 정확한 설계를 위해서나, 중요한 기초구조물을 설계할 때에는 편심을 고려한 설계를 하여야 하나, 현재로서는 기초구조물에 편심하중이 작용하는 경우, 유효너비(effective width)의 개념을 이용하여 해석하거나, 혹은 편심이 작을 경우 이를 무시하고 해석하고 있다.

일반적으로 극한평형법이 널리 이용되지만, 안정문제에 대한 근사해를 얻는 방법이라고 할 수 있다. 그러므로, 실제 잘 맞고 계산이 간편한 새로운 방법이 요구되는데, 그 방법이 극한해석법(Limit Analysis Method)이다. 극한해석법은 극한평형법과는 달리 단계적인 탄소성 해석을 행하지 않고 파괴하중을 구할 수 있으며, 다른 방법에 비하여 파괴형태가 간명하고 상대적으로 적용하기 쉬운 장점이 있다. 편심하중이 작용하는 기초의 지지력을 극한해석으로 산정하려면 상계법으로 접근하는 편이 유리하다.

극한 평형법을 이용한 해석방법으로 Meyerhof(1951)는 기초에 작용하는 편심의 영향을 고려하기 위해 유효폭의 개념을 도입하여 해석 하였고, Saran(1969)은 유발계수(mobilization, m)를 이용해 편심을 받는 기초의 극한지지력을 해석하였다. 극한 해석법을 이용한 방법으로는 Kwon(1991)이 탄소봉 모형실험을 통해 접촉면적비와 파괴 메카니즘을 산정하고, 수치해석을 수행해서 편심하중 작용시 기초의 극한지지력을 해석하였다. Choe(1992)는 경사지에 조성된 기초지반의 지내력 판단에

극한해석법을 이용하여 해석하였다.

본 연구에서는 실제 지반과 유사한 모래지반 모형실험을 수행하여, 편심하중을 받는 기초 구조물의 지지력에 영향을 미치는 요소들을 연구하기 위해 편심량, 근입깊이 등을 변화시켜 각 요소들이 기초의 지지력에 미치는 영향을 연구하였다. 특히, 사질토에서 근입깊이와 편심량의 변화에 따른 접촉면적비의 변화를 중점적으로 연구하였다.

2. 실험

2.1 실험 장비

편심하중을 받는 줄기초의 파괴메카니즘을 실험적으로 고찰하기 위하여 Fig. 2.1과 같은 모형 실험상자를 이용하여 실험을 수행하였다. 상자의 크기는 122cm×70cm×4.8cm 이며, 재질은 전면은 파괴메카니즘을 관찰하기 위하여 아크릴판을 이용했고, 나머지 부분은 합판을 사용하여 만들었다. 하중이 가해졌을 때 상자자체의 변위를 구속하기 위하여 전·후·옆면에 충분한 보강을 해서 실험에 이용하였다.

Fig. 2.1의 상단에 나와있는 모형기초의 크기는 12cm×4.8cm×10cm 이고, 재질은 아크릴을 사용했으며 편심을 주기 위해 그림과 같이 e/W가 0.0, 0.1, 0.2, 0.3되게 구멍을 뚫어 사용하였다. 모형 지반으로는 $\phi = 39^\circ$, $\gamma = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 모래를 사용하였고, 이 수치는 수치해석시에 사용된다. 모형 지반에 하중을 가하는 장치로는 Shimadzu사의 Autograph장비를 이용하였다. Fig. 2.2는 완벽하게 준비된 실험장비의 모습이다.

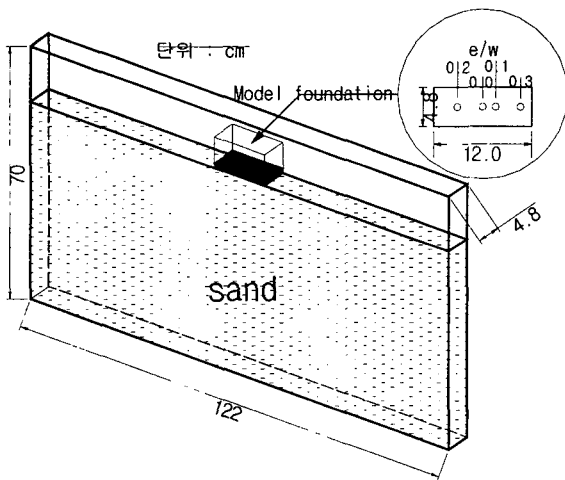


Fig. 2.1 Box for model test

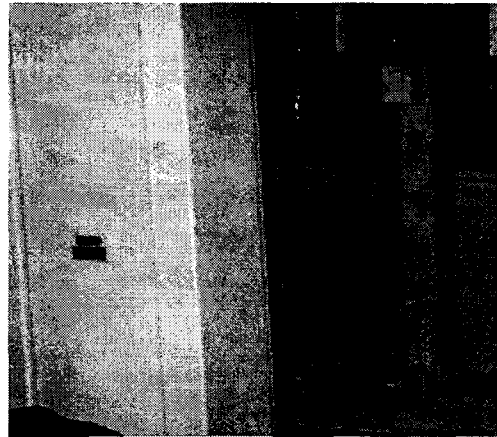


Fig. 2.2 Model test equipment

2.2 실험 방법 및 계획

상자에 모래를 2cm두께로 채우고 20kg 램머로 층당 20회 다짐을 실시하여 상부의 일정높이까지 모래를 채우고 그 위에 모형기초를 설치한 다음 일정한 편심량을 유지하면서 압축 시험기로 하중을 재하시켰다. 재하속도는 파괴형상이 가장 잘 나타나는 30mm/min로 하였다. 일반적인 파괴메카니즘을 관찰하기 위하여 근입깊이가 없는 표면 기초와 근입깊이를 갖는 얇은 기초의 경우로 나누어 실험하였다. 얇은 기초의 경우에는 근입깊이를 기초너비의 0.4, 0.6배의 두 가지로 변화시켰고,

편심량을 기초 너비의 0.1, 0.2, 0.3 배의 세가지로 변화시켰다.

본 모형실험은 상대 근입 깊이, 편심량에 중점을 두고 실험하였다. 각각의 조건들을 서로 조합하면 모두 12개의 실험결과를 얻을 수 있는데 각각의 실험을 3회이상 반복하여 결과를 정리하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 파괴메카니즘

모형 실험을 수행해 지반파괴시 파괴메카니즘을 관찰해 보니 편심하중이 작용하는 기초에서 재하에 의한 파괴는 편심이 가해지는 방향으로만 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 편심량이 커질수록 기초의 바닥면과 지반사이의 접촉 면적도 감소하는 경향을 보였다.

이러한 결과로부터 편심하중이 작용하는 기초의 경우, Fig. 3.1과 같이 편심량이 증가함에 따라 기초와 지반 사이의 접촉면적은 작아지며, 파괴영역의 크기도 감소하는 모양의 파괴메카니즘을 제안할 수 있다.

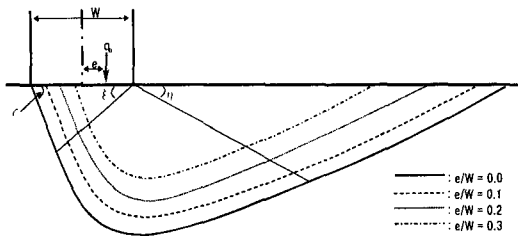


Fig. 3.1 Failure mechanism by e/W

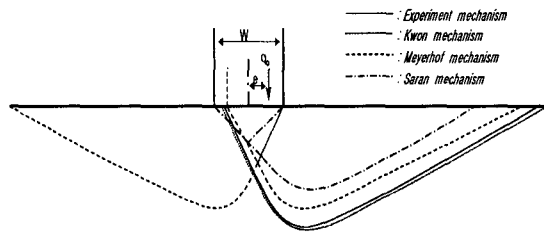


Fig. 3.2 Failure mechanism by each method

Fig. 3.2는 지반의 내부 마찰각이 39° 이고, $e/W=0.1$ 일 경우에 시험을 통해 구한 파괴메카니즘과 기존의 Saran 파괴메카니즘, Meyerhof 파괴메카니즘 및 Kwon의 파괴메카니즘을 비교한 것이다. 제안된 파괴메카니즘은 수정된 Saran 파괴메카니즘이나 Kwon이 제안한 파괴메카니즘과 유사한 파괴메카니즘을 나타내고 있다. 그러나, Saran의 파괴면은 접촉면적비의 감소가 없으며, 파괴면의 영역도 제안된 파괴메카니즘 보다 작게 나타난다. 한편 Kwon의 파괴메카니즘과는 같은 양상을 보였고, Kwon이 실험으로부터 구한 접촉면적비(x)와 본 실험으로부터 구한 접촉면적비(x)를 비교한 결과 차이를 보였다.

3.2 접촉면적비

본 연구에서 행한 모형 실험의 결과에 의하면 편심의 크기에 대한 기초 바닥면과 지반의 접촉면적비는 Table 3.1에 나타난 바와 같이 근입깊이에 거의 무관하며, 편심에 따라 감소하는 경향을

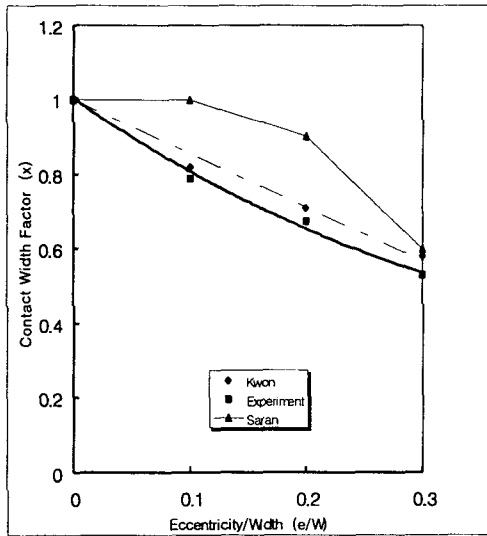
Table 3.1 Contact width factor(x) by model test

e / W D_f / W	0.0	0.1	0.2	0.3
0.0	1	0.75	0.67	0.52
0.4	1	0.80	0.67	0.53
0.6	1	0.81	0.68	0.54

보였다. 이는 Kwon이 제안한 메카니즘의 접촉면적비와 비슷한 경향을 보이거나 접촉면적비 자체에 있어서는 대체적으로 0.01~0.05정도 더 낮은 수치를 보였다.

Fig. 3.3은 기존의 Saran의 해석방법에서 사용된 접촉 너비계수 및 Kwon의 해석방법에서 사용된 접촉 너비계수와 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 Saran 방법에서 사용된 기초 바닥면과 지반의 접촉너비 계수는 실험 결과치와는 상당한 차이를 보이며, 특히, 실험결과와는 달리 작은 편심의 영향을 거의 나타내지 않았음을 알 수 있다. Kwon의 해석방법에서 사용된 접촉 너비계수는 거의 직선적으로 감소하는 경향을 보인다. 이것을 본 모형실험에서 얻은 접촉 너비 계수와 비교해보면 작은 편심의 경우에는 근사치를 보이지만 편심량이 커질수록 차이가 커짐을 알 수 있다.

다음 식은 Saran(식 1), Kwon(식 2)의 해석방법에서 사용된 접촉 너비 계수의 결과와 본 실험(식 3)에서 얻은 접촉 너비 계수의 결과들을 회귀 분석(regression analysis)하여 얻은 식이다.



$$y = -3.0x + 1.5 \quad (1)$$

$$y = -1.4429x + 1 \quad (2)$$

$$y = 1.9184x^2 - 2.1197x + 1 \quad (3)$$

여기서 y : 접촉 면적비(x)
 x : 편심량 / 기초 너비(e/W)

Fig. 3.3 Variation of contact width factor by each method

3.3 제안 파괴메카니즘

이러한 결과로부터 다음과 같은 파괴메카니즘을 제안할 수 있다.

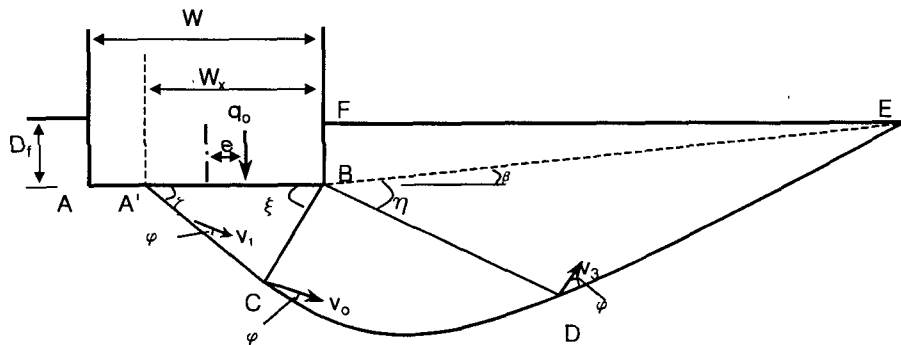


Fig. 3.4 Experiment failure mechanism

Fig. 3.4에서 보듯이, 파괴영역은 3개의 지역으로 구분된다. A'CDE선 아래 지역의 흙은 정지 상

태에 있으므로 소성흐름은 A'CDE선 위의 지역에서만 발생한다. 삼각형 썩기 A'BC는 불연속선인 A'C면을 따라 ϕ 경사지게 활동하며, 이러한 삼각형 썩기의 활동으로 인하여 인접한 방사전단 BCD 지역과 BDEF지역은 옆으로 밀려나게 된다. 편심하중이 작용하는 기초의 지지력을 본 실험에서 제안한 파괴메카니즘에 적용하여 극한해석 상계법으로 해석하는 경우, 기초의 지지력은 흙덩어리의 자중과 기초에 작용하는 힘에 의한 외부 일률과 전 내부 에너지 소산률을 같게 놓는 일률식에 의해 결정된다. 이러한 결과로부터 다음 식(4)와 같은 극한해석 상계법을 이용한 극한 지지력 공식을 유도해 낼 수 있는데, 이는 Kwon과 Saran의 해석방법에서 사용된 공식과 같은 형태이고, 지지력 계수는 본 실험에서 구한 접촉면적비를 사용하여 수치해석을 통해 구하여 사용한다.

$$q_0/c = N_c + GN_r \quad (4)$$

$$\text{여기서, } G = \frac{\gamma W}{2c}$$

N_c , N_r : 지지력 계수

3.4 수치 해석

Saran과 Kwon이 제안한 메카니즘에 의한 해는 극한해석 상계법에 의한 지지력 산정식을 이용하여 수치해석을 수행하여 그 값들을 얻게 되며, 이 둘의 메카니즘의 해는 ξ , η , ζ 에 의해 결정되므로, 각각의 최적값은 ϕ , G 그리고 D_f/W 의 값들이 주어진 상태에서 ξ , η , ζ 에 대하여 함수 $q_0(\xi, \eta, \zeta)/c$ 를 최소화시켜서 얻게 된다. Meyerhof 메카니즘의 해는 ξ 와 η 에 의해 크기가 결정되므로 최적값은 $q_0(\xi, \eta)/c$ 를 ξ 와 η 에 대하여 최소화시켜서 얻게 된다.

3.4.1 지지력 계수

Fig. 3.5~3.7은 일정한 편심량하에서 근입깊이의 변화에 따른 지지력 계수 N_r 값의 변화추이를 보인 것인데, 대체적으로 근입깊이가 증가함에 따라 지지력 계수 N_r 값이 증가하는 경향을 보였다. 이는 지지력 계수가 상재하중의 영향에 민감하다는 것을 나타낸다. Saran, Meyerhof, Kwon, Experiment 순으로 N_r 값이 작아짐을 볼 수 있고, 특히 Kwon의 지지력 계수가 실험에 의한 지지력 계수와 비슷한 경향을 보이는데, 이는 Kwon의 파괴메카니즘과 실험에 의한 파괴메카니즘이 거의 같은 형상에서 기인한 것으로 보이며, 지지력 계수 N_r 값의 차이는 사용된 접촉면적비의 차이에서 기인한 것으로 보인다.

Fig. 3.8~3.13는 일정한 근입깊이하에서 편심량의 변화에 대한 N_r 값의 변화추이를 보인 것인데, 대체적으로 편심량이 증가함에 따라서 지지력 계수의 값은 감소하는 경향을 보였다. 이는 지지력 계수가 편심의 영향에 민감하다는 것을 나타낸다. 본 연구에서 제안한 지지력 계수와 기존의 지지력 계수를 비교해 보면, Saran의 경우는 편심량이 작을 경우에 지지력에 미치는 영향이 거의 없고, Meyerhof, Kwon 및 실험에 의한 N_r 값은 대체적으로 편심량이 증가함에 따라 N_r 값이 감소하는 경향을 보였고, 그 중에서 실험에 의한 값이 제일 작은 값을 보였다. 특히, 권의 값과 실험에 의한 값이 비슷한 경향을 보이는데, 이는 권의 파괴메카니즘과 실험에 의한 파괴메카니즘이 거의 같은 형상에서 기인한 것으로 보이며, N_r 값의 차이는 수치해석에 사용된 접촉면적비의 차이에서 기인한 것으로 보인다.

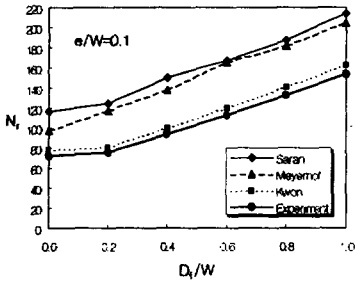


Fig. 3.5 Variation of N_r by each method

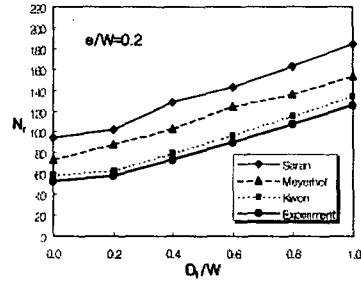


Fig. 3.6 Variation of N_r by each method

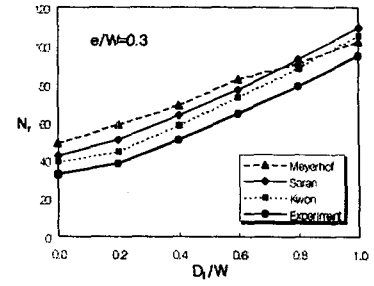


Fig. 3.7 Variation of N_r by each method

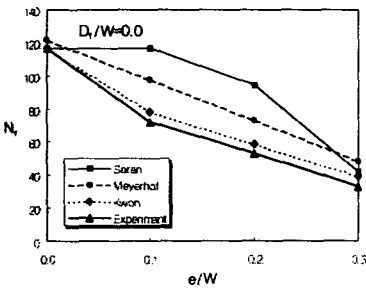


Fig. 3.8 Variation of N_r by each method

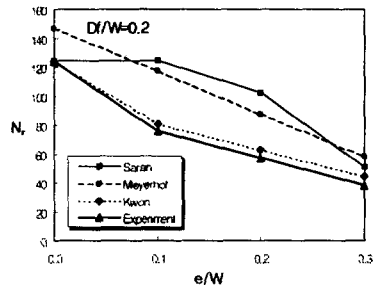


Fig. 3.9 Variation of N_r by each method

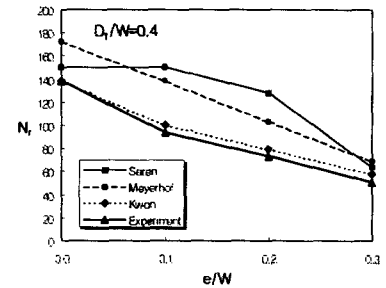


Fig. 3.10 Variation of N_r by each method

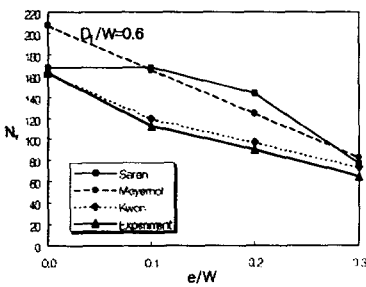


Fig. 3.11 Variation of N_r by each method

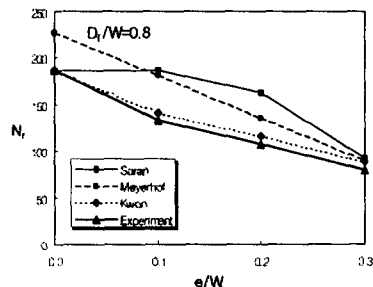


Fig. 3.12 Variation of N_r by each method

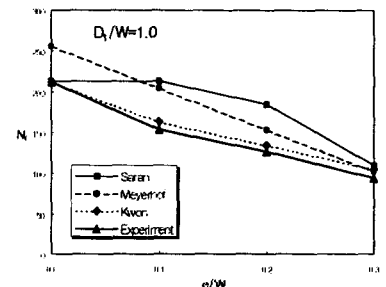


Fig. 3.13 Variation of N_r by each method

3.4.2 극한지지력

Fig. 3.14~3.19은 각각의 일정한 근입깊이에서 편심량의 변화에 따른 지지력의 변화를 나타낸 것이다. 대체적으로 편심량이 증가함에 따라 지지력은 감소하는 경향을 보이고 있다. Saran의 경우는 작은 편심량에 대한 고려가 전혀 없고, Meyerhof와 L.E.M(Limet Equilibrium Method : 극한 평형법)은 편심량 증가에 따라 거의 직선적으로 감소하며, Kwon과 실험의 경우는 $e/W=0.0\sim 0.1$ 사이에서 급격한 변화를 보이다가 점차 편심량이 증가하면서 완만한 변화를 보인다.

탄소봉 모형실험에 의한 Kwon의 제안식으로 구한 지지력과 극한 평형법으로 구한 지지력 및 본 연구의 제안식으로 구한 지지력값이 대개 같은 변화추이를 보이고, 지지력값 자체도 큰 차이없이 감소하는 경향을 보이는 것은 모래지반 모형실험으로부터 구한 접촉면적비(x)를 사용해 수치해석한 값들이 타당한 값을 증명해 주었고, 특히, 탄소봉 모형실험에 의한 지지력값(Kwon)보다 모래지

반 모형실험에 의한 지지력(Experiment)값이 더 작은 경향을 보이는데, 이것은 실제 지반과 유사한 모래지반에서는 탄소봉 모형실험에 의한 지지력값보다 더 작은 값을 나타내 준다. 그리고, 실제 설계에 사용시에는 이에 대한 보완이 필요할 것으로 보인다.

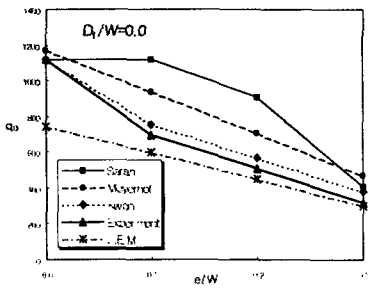


Fig. 3.14 Variation of q_0 by each method

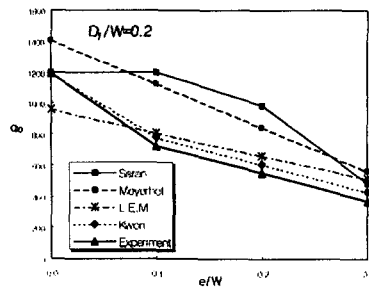


Fig. 3.15 Variation of q_0 by each method

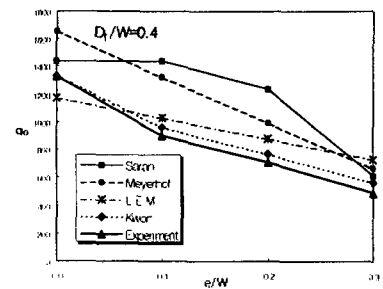


Fig. 3.16 Variation of q_0 by each method

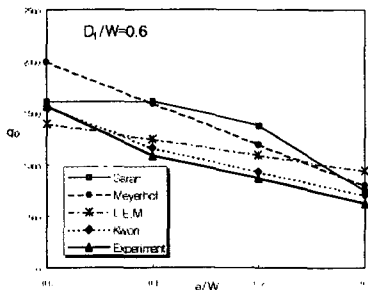


Fig. 3.17 Variation of q_0 by each method

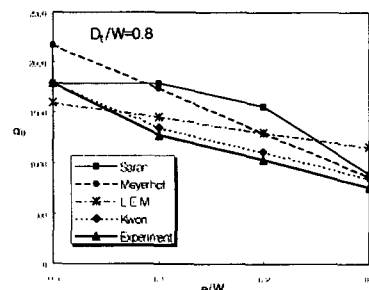


Fig. 3.18 Variation of q_0 by each method

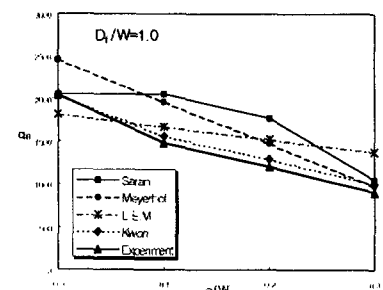


Fig. 3.19 Variation of q_0 by each method

4. 결론

본 연구에서는 모래지반 모형실험을 수행하여, 정확한 파괴메카니즘을 관찰하고, 접촉 면적비를 구해내서 이에 따라 극한해석 상계법을 적용하여 편심하중 작용시 얇은 기초의 극한 지지력을 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 편심하중이 작용하는 기초의 파괴면은 편심이 작용하는 방향으로만 발생하며, 편심량이 증가하면 $e/W=0.1$ 당 11%~38%까지 극한지지력이 감소하는 경향을 보였다.
2. 모래지반 모형실험으로부터 접촉면적비에 대한 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$y = 1.9184x^2 - 2.1197x + 1 \quad (5)$$

여기서, y : 접촉 면적비(x)

x : 편심량 / 기초 너비(e/W)

이는 kwon의 일차방정식에 비해 대략 0.01~0.05정도 더 낮은 수치를 나타낸다.

3. 수치해석을 통해 얻은 지지력값들을 비교한 결과, 본 실험에서 구한 접촉면적비를 사용해 구한 지지력값이 극한 평형법에 의한 값 및 Kwon이 제안한 식에 의한 값과 비슷한 경향을 보이는 것은 제안 식이 타당함을 증명해 주었다.
4. 모래지반 모형실험으로부터 구한 접촉면적비는 탄소봉 모형실험으로부터 얻은 접촉면적비 보다 대체적으로 작은 값을 가지며, 이를 이용해 수치해석을 통해 얻은 지지력값은 편심량의 변화에 따라 비슷한 경향을 보이지만, 지지력값 자체에 있어서는 본 실험에서 구한 접촉면적비를 사용해 구한 지지력값이 5%~16%정도 더 작은 값을 나타냄을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Meyerhof, G. G.(1951), "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations, Geotechnique", Vol.2, pp. 440~450.
2. Saran, S.(1969), "Bearing Capacity of Footing Subjected to Moments", Theses Presented to the University of Rookee, India, August.
3. Kwon, O. K.(1991), "A Study on Determination of Ultimate Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Footing Using Upper Bound Method of Limit Analysis", Seoul Univerity.
4. Choe, M. J.(1992), "A Study on Ultimate Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Footing by Model Test Using Carbon Rods", Seoul University.
5. Chen, W. F., and Liu, X.L.(1990), "Limet Analysis in Soil Mechanics", Amsterdam, Elsevier Scientific Pub.,Company Inc.
6. Lambe, T. W., and Whitman, R.V.(1979), "Soil Mechanics", New York, John Wiley & Sons, Inc.
7. 김 팔규외 16(1993), 最新 土質力學 詳論, 學研社.
8. 윤 지선(1997), 흙 강도와 지반파괴 입문, 구미서관.
9. 이 상덕(1997), 토질시험, 새론출판사.
10. 홍준표(1998), 컴퓨터 수치해석, 文運堂.