

지하공동이 연속기초의 지지력에 미치는 영향

이준대[†] · 이봉직^{*} · 오세욱^{**} · 강종범^{**}

세명대학교 토목공학과 · ^{*}충주대학교 건설도시공학과 · ^{**}충북대학교 토목공학과
(2000. 3. 3. 접수 / 2000. 5. 10. 채택)

Effects of the Bearing Capacity of Strip Footing by Underground Cavity

Jun-Dae Lee[†] · Bong-Jik Lee^{*} · Se-Wook Oh^{**} · Jong-Beom Kang^{**}

Department of Civil Engineering, Semyung University

^{*}Department of Construction & Urban Engineering, Chungju National University

^{**}Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

(Received March 3, 2000 / Accepted May 10, 2000)

Abstract : In this study, the bearing capacity behavior of strip footing located above a continuous cavity in sand was investigated experimentally. The model footing test was performed in a model box made by using raining method in sand. The model footing test results were compared with those obtained from theoretically proposed equations. The results of the analysis indicate that there is a critical region under the footing. For strip footing, there exists a critical depth below which the presence of the cavity has negligible influence on the footing performance. Only when the cavity is located within this region will the footing performance be significantly affected by the presence of the cavity. The size of the critical region depends on several factors such as footing shape, soil property, cavity size and cavity shape. When the cavity is located within the critical region, the bearing capacity of the footing varies with various factors, such as the size and location of the cavity and the depth of foundation.

Based on the experimental study, the following conclusions were induced.

1. The ultimate bearing capacity due to the eccentricity of a underground cavity increases at the rate of the small rather than that due to the depth of a underground cavity. This indicates that the bearing capacity of a strip footing is influenced on the depth rather than the eccentricity of a underground cavity.
2. The critical depth $(D/B)_{cr}$ by underground cavity in sand soil ground that is made by the relative density $(D_r)=55\%$, 65% , 75% , approaches a range of about $8\sim 10$ in case of $W/B=1$, and about $11\sim 13$ in case of $W/B=2$.
3. In case of the relative density (D_r) 75% , the most outstanding differential settlement trend is shown in the depth of $4\sim 8\text{cm}$ regardless of the size of cavity, namely, when the value of D/B is $1\sim 2$. Therefore, a underground cavity influences on not only the decrease of the bearing capacity but also the differential settlement of a strip footing.

1. 서론

지하공동의 영향을 고려한 상부구조물 기초의 해석 및 설계를 위해서는 무엇보다도 상부구조

물과 지하공동의 상호작용 여부의 파악이 선행 되어져야 하는데, 이는 상부구조물의 안정 확보 측면에서 상부구조물 기초의 지지력 평가를 통해 이루어질 수 있다. 이러한 관점에서 지하공동이 기초의 지지력에 미치는 영향에 관한 연구^{1,2)}가 수행되어져 왔으나, 실무에 적용할 수 있는

[†]To whom correspondence should be addressed.
jdlee@venus.semyung.ac.kr

안정해석과 실험적 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 모래지반에서 지하공동위에 위치한 연속기초의 극한지지력과 지하공동3)4)에 의한 거동변화를 알아보기 위해 평균 상대밀도를 55%, 65%, 75%로 조성하고 공동의 직경(W) 및 깊이(D), 그리고 공동의 편심(E)의 변화에 따른 2차원 평면변형조건의 기초재하실험을 수행하였다. 또한, 본 연구 범위내에 해당하는 실제 현장문제에 대한 적용성을 검토하기 위해 기존의 이론식과 비교·분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

2차원 평면변형 조건하에 모형기초 재하시험을 실시하기 위하여 100cm×20cm×60cm의 모형박스를 제작하였다. 측면과 저면은 0.5cm 두께의 강제판을 사용하고, 모형기초의 재하에 따른 변형을 최소화하기 위해 박스의 상단과 하단에 5cm×5cm의 강제 프레임을 설치하였다.

한편, 기초하중 재하에 따른 지반의 파괴 및 침하형태를 관찰하기 위하여 박스의 전면을 1cm 두께의 투명한 Plexiglas를 사용하였다. 또한, 강성연속기초(rigid strip footing)를 모사하기 위하여 박스와 같은 폭의 20cm 고강도 알루미늄을 사용하여 모형기초를 제작하는 한편, 지하공동은 두께 1 cm, 길이 20cm의 벤토나이트와 모래

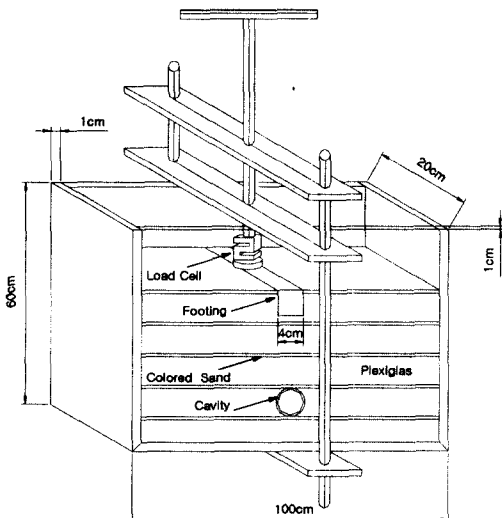


Fig. 1. Schematic diagram of model test box

혼합토를 원형관으로 성형하였다.

지반의 밀도변화에 따른 거동을 비교하기 위하여 1948년 Kolbuszewski에 의해 제안된 강사법(raining method)을 이용하였다.

2.2. 실험방법

본 실험에 사용된 기초지반은 함수비 0.5 %이내의 No.10~No.200 번째 자연건조모래를 사용하였으며, 통일분류법(USCS)에 의한 분류결과는 SP에 해당하는 빈입도의 시료이고 시료의 기본적인 물리적 특성은 Table 1과 같다.

Vesic(1973)이 제안한 모래지반상 기초의 지지력과 파괴형태를 근거로 평균 상대밀도 55%, 65%, 75%로 변화시켜 실험을 수행함으로써 지반의 상대밀도 변화와 지하공동의 직경(W) 및 깊이(D), 그리고 공동의 편심(E)의 변화에 따른 연속기초의 지지력과 침하특성을 고찰하기 위한 실내모형실험을 수행하였다.

또한, 기초저면의 지하공동 크기 및 위치 변화에 따른 활동선의 형성 및 파괴메카니즘⁵⁾을 확인하기 위하여 시료를 염색하여 일정한 총별로 강사시켜 기초재하시 발생하는 활동면의 양태를 관찰하였다.

Table 1. Average physical properties of the sand

	2.60
	3.25
	0.94
	1.735
	1.382
	55,65,75

Table 2. Material properties of test soil, model footing, and underground Cavity

Property	Soil	Footing	Cavity
Modulus of elasticity (t/m ²)	2400~3500	7,443,000	1000~1700
Poisson's ratio	0.25~0.35	0.33	0.2~0.4
Unit cohesion (t/m ²)	0.05	-	-
Angle of internal friction(°)	33.2~37.4	-	-
Unit weight(t/m ³)	1.55~1.63	2.85	1.80

Table 3. Details of the model tests

Test No.	Relative Density (Dr)	Width (B)	Depth (D)	Offset (E)	Condition
A	55, 65, 75	4cm	1		(Dr) = 55%, 65%, 75% Cavity (x)
B	55	4cm	1		(W/B) = 1 (D/B) = 3, 6, 9 (E/B) = 0, 3, 6, 9
C		8cm	1		(W/B) = 2 (D/B) = 3, 6, 9, 12 (E/B) = 0, 3, 6, 9, 12
D	65	4cm	1		(W/B) = 1 (D/B) = 3, 6, 9 (E/B) = 0, 3, 6, 9
E		8cm	1		(W/B) = 2 (D/B) = 3, 6, 9, 12 (E/B) = 0, 3, 6, 9, 12
F	75	4cm	1		(W/B) = 1 (D/B) = 3, 6, 9 (E/B) = 0, 3, 6, 9
G		8cm	1		(W/B) = 2 (D/B) = 3, 6, 9, 12 (E/B) = 0, 3, 6, 9, 12

지반에 파괴가 일어나거나 더 이상 변형이 없을 때까지 하중에 따른 침하량을 측정하고 하중-침하 곡선으로부터 극한지지력을 산정하고, 기존의 이론식들과 비교 분석하였다. 본 연구에서 수행한 모형실험은 Table 3.과 같다.

3. 실험결과 및 분석

모래지반에서 연속기초의 하중-변위특성과 극한지지력 등 거동특성을 평면변형조건으로 알아보고, 지하공동에 의한 영향범위를 알아보기 위하여 영향인자들인 지반특성(c, ϕ)과 공동의 크기(W) 및 깊이(D), 그리고 공동의 편심(E)에 따른 거동특성을 실내모형실험을 수행하였다.

3.1. 지하공동이 없는 모래지반의 극한지지력

연속기초의 극한지지력 산정방법은 비교적 명확하게 항복점이 나타나므로 하중-침하량 곡선에서 마지막 직선부분이 시작되는 점에서 하중을 극한지지력으로 하는 Terzaghi/Yelinek의 방법을 채택하여 최소곡률반경을 보이는 점, 즉 곡선의 기울기가 급격히 변하는 지점에서 극한지지력을 결정하였다.

지하공동이 없는 모래지반에서 상대밀도(Dr)에 따른 지지력 실험결과는 Fig. 2에 하중-침하

Table 4. Ultimate bearing capacities obtained from Test series A

Test No.	Relative Density (Dr)	Ultimate Bearing Capacity (kN/m²)	Settlement (mm)
A	55%	6.31	21.75
	65%	8.85	21.75
	75%	12.12	25.38

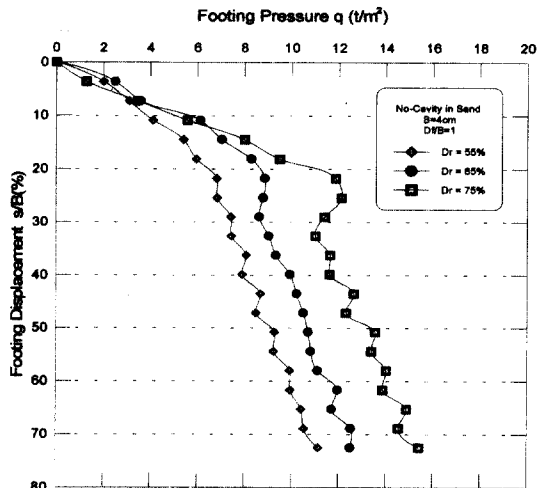


Fig. 2. Variation of load per unit area and s/B of Strip Footing under Plane-Strain Condition

곡선으로 나타났다.

Fig. 2는 지반의 평균 상대밀도가 55%로 조성된 느슨한, 중간 상태에서는 뚜렷한 극한하중 값을 보이지 않는 반면에, 평균 상대밀도가 75%로 조성된 조밀한 지반의 경우는 하중-침하곡선이 확연한 극한하중 값을 보인 후 연직변위의 증가에 따라 하중이 급격히 감소하는 전반전단파괴의 거동을 관찰할 수 있었다.

하중-침하곡선에서 극한하중을 지난 후 다소 하중이 증가하는 것은 Bruce 및 Kimura⁹⁾ 등의 실험결과와 마찬가지로 하중재하시 기초의 연직변위가 일어남에 따라 지반은 초기 공극비보다 더 조밀해지고, 기초의 근입깊이가 증가하는 이유에 기인함을 알 수 있었다.

Fig. 3은 지하공동이 없는 상태에서 평균 상대밀도가 각각 55%, 65%, 75%인 경우에 기초의 침하 영향 범위와 용기상태를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 상대밀도가 높을수록 침하의 영향범위가 넓어지고 용기높이 또한 높아짐을 알 수 있었다. 또한, 상대밀도에 따라 파괴면

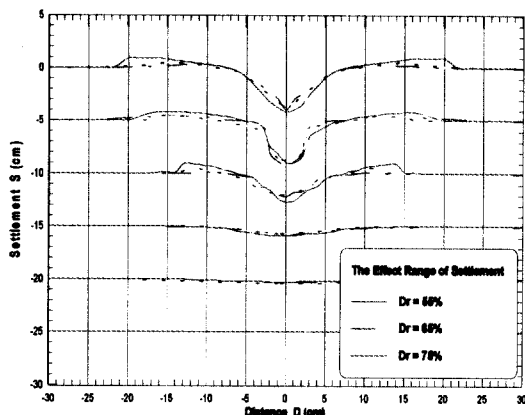


Fig. 3. The effect range of footing settlement under no-cavity condition

이 선명하게 구분됨을 알 수 있고, 기초하부의 침하형태⁷⁾를 보면 강성 기초의 침하형태를 보여 주고 있음을 알 수 있다.

평면변형률 조건에서 조밀한 모래의 평면변형률 시의 압축시험에 의한 내부마찰각은 삼축압축시험에 관한 것보다 약 10% 크다는 것이 판명되어 왔다. 이와 같은 현상은 특히, 소규모 기초의 재하시험에 있어서 중요하므로, 본 비교에서는 평면변형률조건으로 기초실험을 실시하는 경우 파괴각도가 삼축압축시험에 의해 구한 내부마찰각보다 1.1배 가량 증가됨을 제안한 Cornforth⁸⁾의 값을 적용하여 비교하였다.

$$\phi_{pc} \cong 1.1 \cdot \phi_{tr} \quad (\text{단, } \phi_{tr} > 30^\circ \text{ 인 경우})$$

그림에 나타나 있듯이 실험치를 기존의 한계 평형이론에 의한 극한지지력 산정 식들과 비교한 결과는 Vesic의 극한지지력 증가치와 유사한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

3.2. 지하공동이 있는 모래지반의 극한지지력

모래지반에서 상대밀도에 따른 지반특성(c, ϕ)과 공동의 크기(W) 및 깊이(D), 그리고 편심거리(E)를 변화시켜가며 지하공동이 연속기초의 지지력에 미치는 영향을 살펴보았다.

Fig. 4는 평균 상대밀도(Dr)가 55, 65, 75%이고 공동의 크기(W/B)가 1인 모래지반에서 공동의 깊이(D/B)와 편심거리(E/B)의 변화에 따른 연속기초의 지지력변화 양상을 보여주는 것으로 공

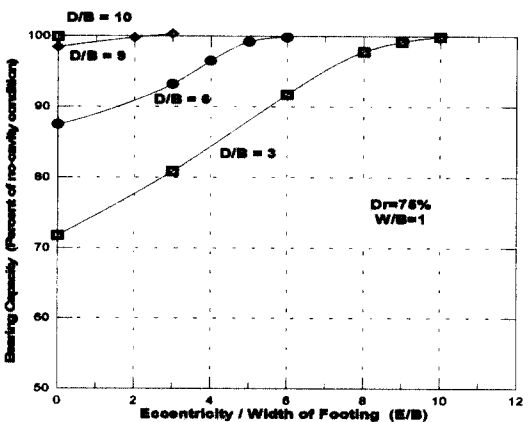
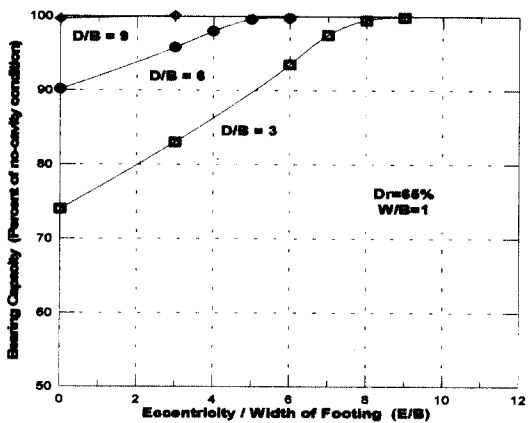
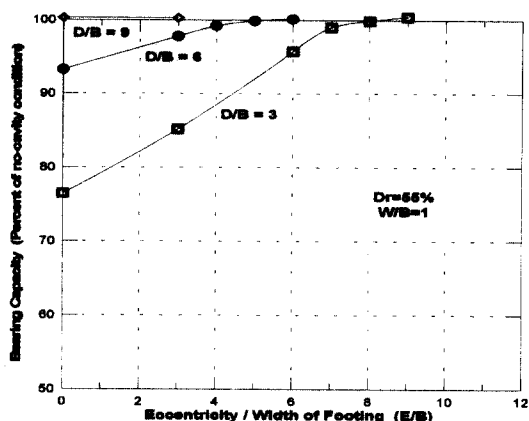


Fig. 4. Variation of Bearing Capacity with Cavity Eccentricity for Various Depths to Cavity (Dr=55%,65%,75%, W/B=1)

동깊이(D/B)=3으로 일정한 경우 상대밀도 55%인 경우는 편심거리(E/B)=8을 지나면서, 상대밀도 65%인 경우는 편심거리(E/B)=9를 지나면서, 상대밀도 75%인 경우는 편심거리(E/B)=10을 지

나면서, 지하공동의 존재가 지지력에 무시할만한 영향을 주는 영향범위가 존재한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 공동의 크기(W/B)가 2인 경우로 상대 밀도 55%인 경우는 편심거리(E/B)=9를 지나면

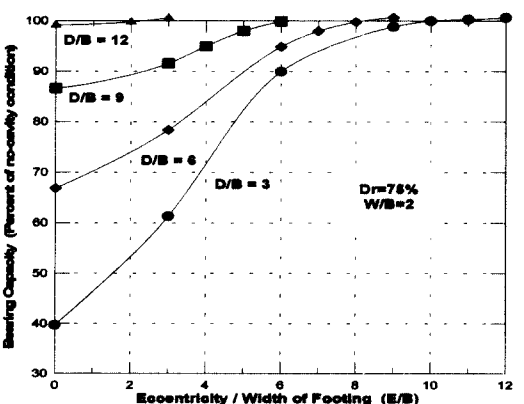
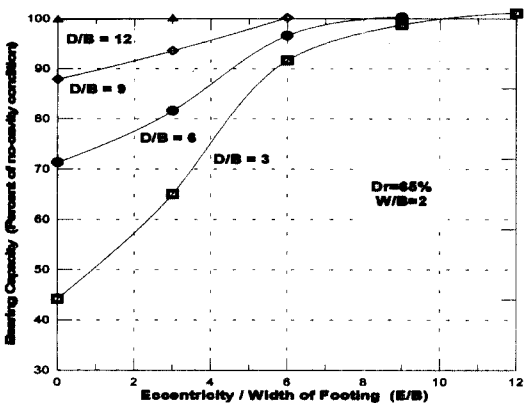
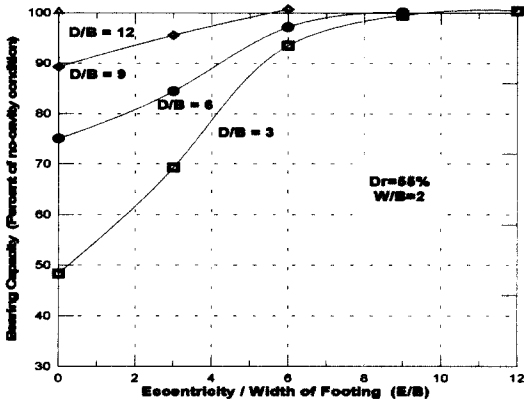


Fig. 5. Variation of Bearing Capacity with Cavity Eccentricity for Various Depths to Cavity ($D_r=55,65,75\%$, $W/B=2$)

서, 상대밀도 65%인 경우는 편심거리(E/B)=10을 지나면서, 상대밀도 75%인 경우는 편심거리(E/B)=11을 지나면서 지하공동의 존재가 지지력에 무시할만한 영향을 주는 영향범위가 존재한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6과 7은 평면변형을 조건에서 상대밀도에 따라 공동의 깊이(D)와 편심거리(E)별로 연속기초의 극한지지력 증가 양상을 살펴본 것이다.

연속기초와 지하공동의 편심거리(E)에 따른 극한하중의 증가폭은 공동깊이(D)에 따른 극한하중의 증가폭보다 작은 폭으로 증가됨을 관찰할 수 있으며, 이것은 지하공동이 연속기초의 지지력에 미치는 영향력이 편심거리(E)보다는 공동의 깊이(D)에 더 좌우되고 있음을 보여준다.

3.3. 상대밀도에 따른 지지력계수 변화경향

Fig. 6과 7은 공동이 존재하는 경우의 지지력(qc)을 공동이 존재하지 않는 경우의 지지력(qnc)으로 표준화하여 얻어진 지지력비(qc/qnc)를 토대로 공동의 깊이(D)와 편심거리(E)에 따른 지지력계수 변화경향을 공동의 크기와 상대밀도별로 나타낸 것이다.

Fig. 6은 편심거리(E/B)가 0으로 일정할 때, 공동의 깊이(D/B)에 따른 지지력계수 변화경향을 나타낸 것으로 공동의 크기(W/B)와 각각의 상대밀도(Dr)에 따라 한계 편심거리(E_{cr}/B) 변화경향을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 상대밀도(Dr)에 대하여 공동의 크기(W/B)가 1인 경우는 공동의 깊이(D/B) 8~10을 지나면서, 공동의 크기(W/B)가 2인 경우

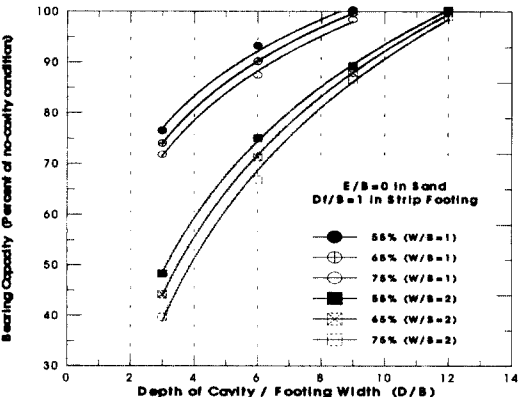


Fig. 6. Variation of Bearing Capacity Ratio with Depths to Cavity for the Size of the Cavity ($W/B=1,2$, $E/B=0$)

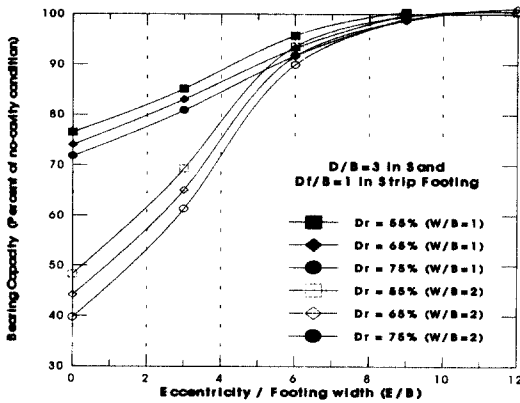


Fig. 7. Variation of Bearing Capacity Ratio with Cavity Eccentricity for the Size of the Cavity ($W/B=1,2$ $D/B=3$)

는 공동의 깊이(D/B) 11~13을 지나면서 지하 공동의 존재가 지지력에 무시할만한 영향을 미치는 한계깊이(D_{cr}/B)가 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 공동의 깊이(D/B)가 3으로 일정할 때, 편심거리(E/B)에 따른 지지력계수 변화경향을 나타낸 것으로 각각의 상대밀도(Dr)에 대하여 공동의 크기(W/B)가 1과 2인 경우 편심거리(E/B)가 6을 지나면서 수렴하여 9~11을 지나면서 지하공동의 존재가 지지력에 무시할만한 영향을 미치는 한계 편심거리(E_{cr}/B)가 존재하고 있음을 알 수 있다.

3.4. 기존 이론식과의 비교

Fig. 8은 지하공동이 얕은기초 아래에 위치할 경우에 유한요소해석을 통해 수집된 데이터 베이스에 대한 다중회귀분석을 통해 수치해석적 접근법을 제안한 “유⁹⁾”의 이론식에 의한 한계깊이(D_{cr}) 변화경향과 사질토지반에서 실내모형실험을 통하여 얻은 한계깊이(D_{cr}) 변화경향을 상대밀도(Dr)에 따라 비교한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 유사한 증가경향을 보이고 있으며 상대밀도가 증가할수록 다소 한계 깊이에 차이를 보여주고 있다.

3.5. 지중침하 및 부등침하량 분석

Fig. 9와 10은 상대밀도 75%인 경우에 지하공동의 크기에 따라 공동깊이(D)와 편심거리(E)별로 침도에 따른 지중침하 및 부등침하를 관찰한 결과이다.

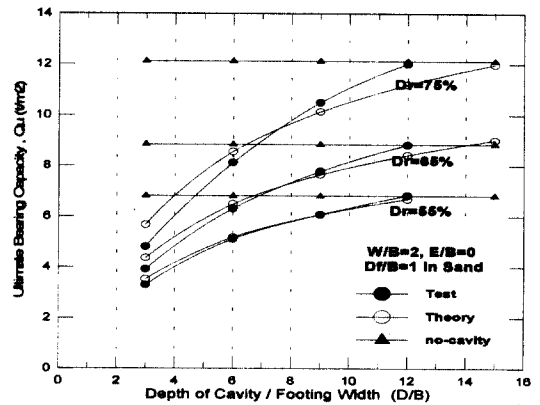
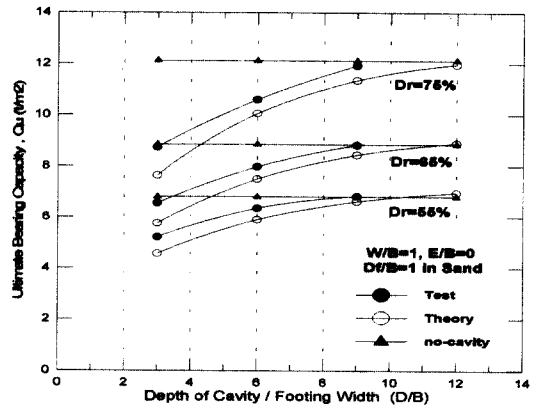


Fig. 8. Comparison of Theoretical Critical Depth and Experimental Critical Depth with Respect to Relative Density

Fig. 9와 10은 공동깊이와 편심거리에 따른 침도별 지중침하 및 부등침하량 변화경향을 나타

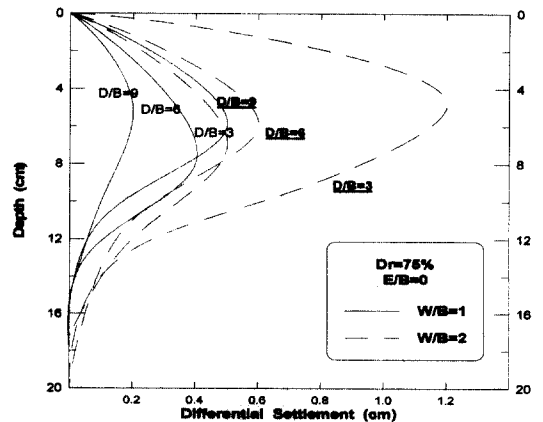


Fig. 9. Variation of settlement and depth with respect to size of cavity ($Dr=75%$, $E/B=0$)

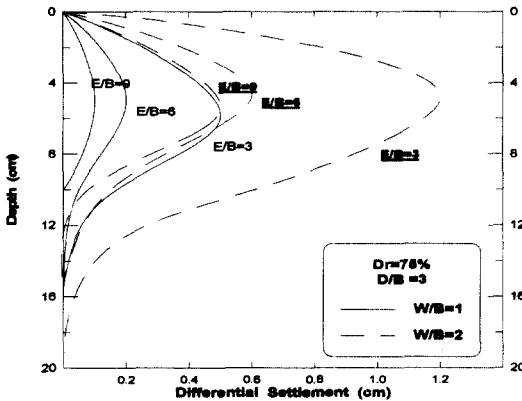


Fig. 10. Variation of differential settlement with depth with respect to size of cavity ($D_r=75\%$, $D/B=3$)

낸 것으로 상대밀도가 75%인 경우, 공동의 깊이와 편심거리에 따라 부등침하량을 관찰한 결과 지하공동의 크기에 관계없이 동일하게 심도가 4~8cm인 경우에 가장 큰 부등침하 양상을 보여주고 있음을 알 수 있다.

본 실험에서는 (D/B)=1~2인 위치에서 가장 두드러진 부등침하 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 따라서, 연속기초의 지지력에 미치는 지하공동의 영향은 편심거리(E)에 따른 지지력 감소뿐만 아니라 연속기초의 부등침하에도 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

4. 결론

모래지반의 상대밀도와 지하공동의 위치변화에 따른 연속기초의 극한지지력 및 지지력에 영향을 미치는 여러 변수를 토대로 기존의 경험식과 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 지하공동의 편심거리(E)에 따른 극한하중의 증가폭은 공동깊이(D)에 따른 극한하중의 증가폭보다 현저히 작은 폭으로 증가됨을 관찰할 수 있으며, 이것은 지하공동이 연속기초의 지지력에 미치는 영향력이 편심거리(E)보다는 공동의 깊이(D)에 더 좌우되고 있음을 보여준다.
2. 평균 상대밀도 $D_r=55\%$, $W/B=1,2$ 로 조성된 느슨한 모래지반에서의 한계깊이(D_{cr}/B)는 각각 8,11을 지나면서, $D_r=65\%$, $W/B=1,2$ 로 조성된 중간질 지반에서는 각각 9,12을 지나면서, $D_r=75\%$, $W/B=1,2$ 로 조성된 조밀한 지반에서는 각각 10,

13을 지나면서, 지하공동의 존재가 지지력에 무시할만한 영향을 주는 한계영역이 존재하고 있음을 알 수 있다.

3. 상대밀도가 75%인 경우, 부등침하량을 관찰한 결과 지하공동의 크기에 관계없이 동일하게 심도가 4cm~8cm인 경우에 가장 큰 부등침하 양상을 보여주고 있음을 알 수 있다. 즉, 기초 폭(B)에 대한 공동의 깊이(D)로 나타내면, (D/B)=1~2인 위치에서 가장 두드러진 부등침하 경향을 보여주고 있다.

따라서, 연속기초의 지지력에 미치는 지하공동의 영향은 편심거리(E)에 따른 지지력 감소뿐만 아니라 연속기초의 부등침하에도 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) Baus, R. L. and Wang, M. C. (1983), Bearing Capacity of Strip Footing above Void, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 1, pp. 1~14.
- 2) Badie, A. and Wang, M. C. (1984), Stability of Speed Footings above Voids in Clay, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, No. 11, pp. 1605~1891.
- 3) Wang, M. C. and Badie, A. (1985), Effect of Underground Void on Foundation Stability, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 8, pp. 1008~1019.
- 4) Bruce L. K., Abbas. A. and James A. C., "Strength Parameters for Bearing Capacity of Sand", J. Geot. Engr. Div. ASCE, Vol. 114. GT4. pp. 491~498, 1988.
- 5) Wood, L. A. and Larnach, W. L. (1985), The Behavior of Footings Located above Voids, Proceedings, Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 4, pp. 2273~2276.
- 6) Kimura, T., Kusakabe, O. and Saitoh, K., "Geotechnical Model Tests of Bearing Capacity Problems in a Centrifuge", GT35, No. 1, pp. 33~45, 1985.
- 7) 배규진 (1989), "사질토층의 터널굴착에 따른 지반침하의 예측", 대한토목학회, Vol. 9, No. 3, pp. 143~151.
- 8) Cornforth, D. H., "Some Experiments on the Influence of Strain Condition on the Strength of Sand", Geotechnique, Vol. 16, pp. 193, 1964.
- 9) 유충식 (1994), "Three Dimensional Behavior of Square Footing and Unlined Soft Ground Tunnel", 한국지반공학회지, Vol. 10, No. 3, pp. 97~109.