

## 기초의 근입깊이가 보상기초의 거동에 미치는 영향

이승현<sup>1</sup>, 한진태<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>선문대학교 토목공학과, <sup>2</sup>한국건설기술연구원

### Effect of Embedment Depth of Footing on Behavior of Compensated Foundation

Seung-Hyun Lee<sup>1</sup>, Jin-Tae Han<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Sunmoon University

<sup>2</sup>Korea Institute of Construction Technology

**요약** 기초의 근입비가 보상기초의 극한지지력과 침하량에 미치는 영향을 살펴보고자 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 의한 극한지지력비는 이론식에 의한 극한지지력비보다 컸으며 전체적으로 극한지지력비가 근입비에 비례하는 결과를 보였으나 정사각형기초에 대한 수치해석결과만 극한지지력비가 근입비에 따라 급격하게 증가하는 양상을 보였다. 모래지반에 놓인 띠기초의 경우 근입비에 따른 극한지지력비는 수치해석과 Meyerhof 방법에 의한 경우가 비슷하였으며 대체로 근입비의 제곱에 가까운 값을 나타내었으며 점토지반에 놓인 띠기초의 경우 이론식에 의한 경우 극한지지력비는 근입비의 영향을 크게 받지 않았고 수치해석결과에 따르면 근입비를 약간 상회하는 값들을 보였다. 수치해석결과에 따르면 근입비에 따른 정사각형기초의 극한지지력비가 띠기초의 그것에 비하여 크게 계산되었다. 수치해석결과를 통해 볼 때 전체적으로 근입비가 1인 경우 침하량비는 0.4 정도의 값을 보이다가 근입비가 커짐에 따라 침하량비가 감소하는 양상을 보였으며 느슨한 모래의 경우 상대적으로 침하량비가 가장 작았다.

**Abstract** In order to find out the effect of embedment ratio on behavior compensated foundation, numerical analyses were performed. Bearing capacity ratios obtained from numerical analyses were greater than those obtained from theoretical equations and it could be seen that the bearing capacity ratio was proportional to the embedment ratio with only exception of the case of square footing in which bearing capacity ratio was increased rapidly with the embedment ratio. For the case of strip footing on sand, the bearing capacity ratios obtained from the numerical analyses and Meyerhof equation were similar with each other and magnitudes of those were as much as square of the embedment ratio but the bearing capacity ratios were little affected by the embedment ratios for the case of strip footing on clay. It can be said that the bearing capacity ratios obtained from the square footing are greater than those obtained from the strip footing. According to the numerical analysis, values of settlement ratios which correspond to the embedment ratio of one were about 0.4 and settlement ratios were decreased with increase of the embedment ratios. Settlement ratios of the loose sand were smaller than those of the dense sand and the clay.

**Key Words** : Embedment ratio, Bearing capacity ratio, Numerical analysis, Theoretical equation, Settlement ratio

### 1. 서론

기초지반의 지지력산정에 관하여 많은 연구[1-5]가 진행되어 왔는데 기초의 근입깊이를 고려하는 이론적 지

지력공식 중 Terzaghi가 제안한 지지력공식의 경우 기초 바닥위의 흙을 상재하중으로만 고려하다가 이후의 공식들에 있어서는 기초 바닥위의 흙의 전단저항력도 고려하게 되어 좀 더 합리적인 지지력 예측이 가능하게 되었다.

\*Corresponding Author : Jin-Tae Han(Korea Institute of Construction Technology)

Tel: +82-31-910-0259 email: jimmyhane@kict.re.kr

Received December 23, 2014

Revised February 4, 2015

Accepted February 12, 2015

기초의 근입깊이를 실제적으로 이용하는 경우로 보상기초(compensated foundation 또는 floating foundation)를 들 수 있다. 보상기초의 경우 기초의 극한지지력 증대 및 침하량 감소의 두 가지 목적을 달성하는데 그 의의가 있다. 보상기초를 적용한 최초의 건물은 영국 런던의 알바이언 제분소(Albion Mill)인데[6,7] 이후로 한동안 적용되지 못하다가 20세기 초반에 이르러서야 사용되기 시작하였다. 그러나 보상기초에 대한 지지력 및 침하량 감소효과에 대한 연구는 드문 실정이다. 본 연구에서는 기초의 근입깊이가 보상기초의 지지거동에 미치는 영향을 파악하고자 기초의 근입깊이를 달리하여 수치해석을 수행하였으며 그 결과를 이론적인 지지력공식과 비교해 보았다. 또한, 기초의 근입깊이가 기초의 침하량 감소에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

## 2. 수치해석

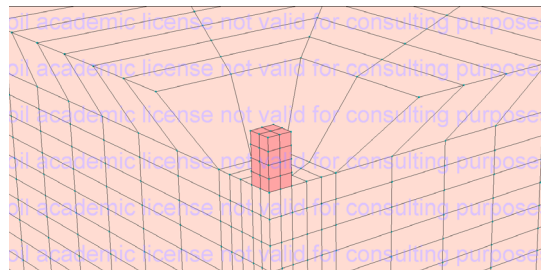
수치해석에 있어 적용한 프로그램은 상용 유한요소해석 프로그램인 ZSOIL이다[8]. 해석대상지반으로는 느슨한 모래지반(loose sand)과 조밀한 모래지반(dense sand) 그리고 점토지반(clay)을 고려하였는데 균질한 지반으로 가정하였다. 수치해석을 위한 해석대상지반에 대해서는 Mohr-Coulomb모형을 적용하였는데 해석에 적용한 흙의 물성값은 Table 1에 나타나 있다. Table 1에서 탄성계수( $E_s$ )와 포아송비( $\nu_s$ ), 점착력( $c$ ), 내부마찰각( $\phi'$ ), 팽창각( $\alpha$ ) 그리고 단위중량( $\gamma$ )은 문헌에 나타나 있는 일반적인 값을 참조하여 결정하였다[9-11].

[Table 1] Soil properties for numerical analyses

Soil type	$E_s$ (kPa)	$\nu_s$	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\alpha$ (°)	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )
Loose sand	20,000	0.2	0	27	0	17
Dense sand	75,000	0.35	0	36	12	19
Clay	40000	0.49	60	0	0	17

해석에서 고려한 기초는 탄성체로 가정하였는데 탄성계수와 포아송비는 각각 30GPa 과 0.2이다. 해석에서 고려한 보상기초 형상은 띠기초(strip footing)와 정사각형기초(square footing)인데 띠기초의 경우 평면변형률해

석을 수행하게 되고 정사각형기초의 경우 3차원해석을 수행하였다. 해석에서 고려한 기초의 폭( $B$ )은 2m 였으며 띠기초 및 정사각형기초 각각에 대하여 기초의 근입깊이( $D_f$ )는 근입깊이가 0인 표면기초(surface footing)인 경우를 비롯하여 기초 근입깊이가 기초폭의 1배, 2배, 3배 그리고 4배가 되도록 하여 해석을 수행하고 그 결과를 비교분석하였다. 하나의 근입깊이에 대하여 띠기초와 정사각형기초를 고려하고 각각에 대하여 3개의 지반을 고려하므로 총 30개의 해석이 수행되었다. 해석시 기초 바닥면은 흙과 기초바닥 사이에 상대변위가 없는 거친 바닥(rough base)으로 가정하였다. 근입깊이를 갖는 기초의 경우 해석시 실제 시공순서를 따르도록 원지반을 근입깊이만큼 굴착하고 기초를 놓은 다음 다시 채움(filling)을 하고 기초에 하중을 가하도록 하였다. Fig. 1에는 근입깊이만큼 굴착된 후 놓인 정사각형기초 및 인접 지반이 유한요소망으로 나타나 있다.

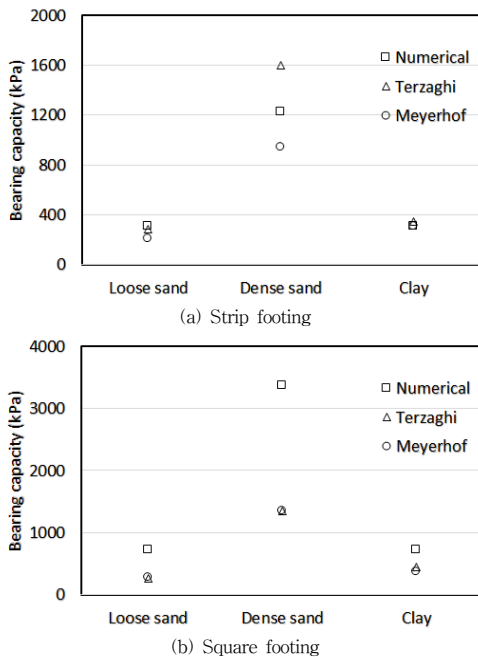


[Fig. 1] FEM mesh after excavation

## 3. 해석결과의 비교분석

### 3.1 극한지지력

수치해석을 통한 기초의 극한지지력은 연속적인 하중증분에 대하여 해가 발산할 때의 하중값으로 구할 수 있다. 기초가 근입되지 않은 경우에 대하여 지반종류별로 수치해석을 통해 구한 극한지지력과 Terzaghi 지지력공식 및 Meyerhof 지지력공식을 통해 구한 극한지지력을 띠기초 및 정사각형기초에 대하여 나타내면 Fig. 2에서와 같다.

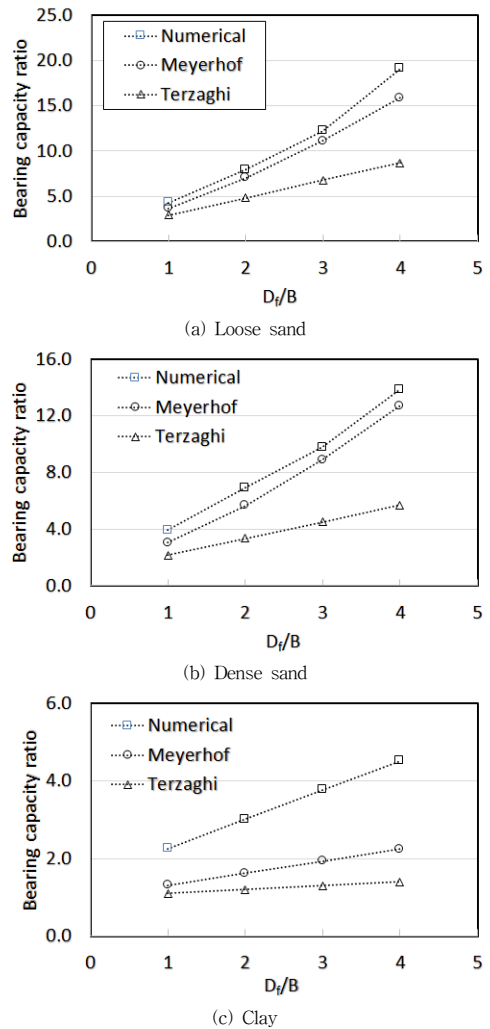


[Fig. 2] Bearing capacities of surface footings

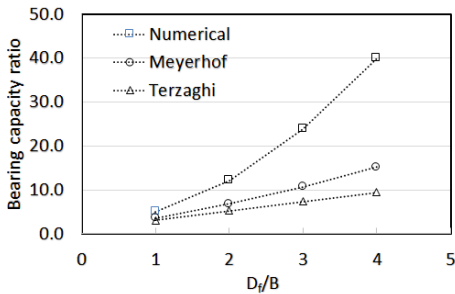
Fig. 2를 통해 알 수 있듯이 표면기초(surface footing)의 극한지지력은 기초의 형식에 관계없이 해석에서 고려한 느슨한 모래와 점토지반에 대하여 수치해석결과와 이론식에 의한 결과 사이에 큰 차이를 보이지 않으며 조밀한 모래지반의 경우 수치해석과 이론식 사이에 있어 비교적 큰 지지력 차이를 보인다. 띠기초의 경우 근입비 ( $D_f/B$ )에 따른 기초의 극한지지력의 변화양상을 지반종류에 따라 살펴보았는데 Fig. 3에서와 같다. Fig. 3에 나타나 있는 각각의 그래프는 지표면에 놓인 표면기초의 극한지지력에 대하여 근입비를 갖는 기초의 극한지지력의 비를 의미하는 극한지지력비(Bearing capacity ratio)를 나타내고 있는데 수치해석 및 이론식에 의한 극한지지력비가 나타나 있다.

Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 극한지지력비의 변화양상은 대체로 근입비에 비례하는 양상을 보임을 알 수 있으며 수치해석에 의한 극한지지력비가 이론식에 의한 것들보다 큼을 알 수 있다. Fig.3(a)와 Fig. 3(b)를 비교해 볼 때 모래지반의 경우 근입비에 따른 극한지지력비는 수치해석과 Meyerhof 방법에 의한 경우가 비슷함을 알 수 있다. Fig. 3(c)를 통해 알 수 있듯이 점토지반의 경우 이론식에 의한 극한지지력비는 상대적으로 큰 차이를 보이지 않으며 수치해석에 의한 극한지지력비보다 작은 값

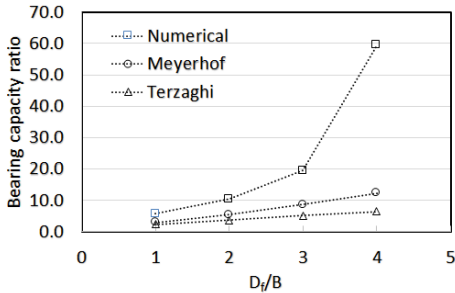
들을 보인다. 한편, 모든 경우에 대해 Terzaghi 방법에 의한 극한지지력비는 해석에서 고려한 근입비에 대하여 나머지 방법에 대한 극한지지력비보다 작은 값들을 보임을 알 수 있다. 근입비에 따른 극한지지력비의 크기를 고려해 볼 때 모래지반의 경우 수치해석과 Meyerhof 방법에 의한 극한지지력비는 대체로 근입비의 제곱에 가까운 값을 갖는다고 볼 수 있다. 점토지반에 있어서 근입비에 따른 극한지지력비의 크기를 살펴보면 이론식에 의한 경우 근입비의 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있고 수치해석 결과를 살펴볼 때도 근입비를 약간 상회하는 값들을 보인다. 정사각형기초에 대한 수치해석결과 및 이론식을 이용하여 구한 극한지지력비를 근입비에 대하여 나타내면 Fig. 4에서와 같다.



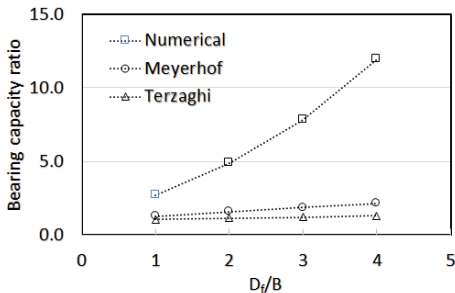
[Fig. 3] Bearing capacity ratio vs embedment ratio for strip footing



(a) Loose sand



(b) Dense sand



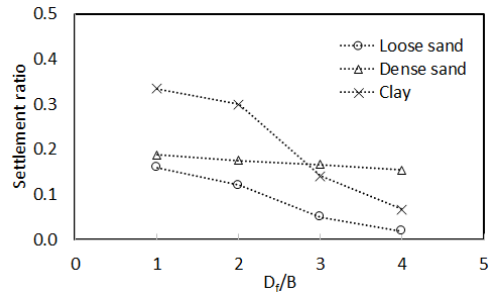
(c) Clay

[Fig. 4] Bearing capacity ratio vs embedment ratio for square footing

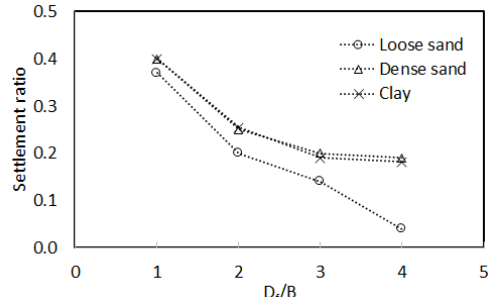
Fig. 4를 통해 알 수 있듯이 정사각형기초에 대한 수치 해석결과에 따르면 근입비에 대한 극한지지력비가 이론식에 의한 그것에 비해 상대적으로 큼을 알 수 있다. 정사각형기초에 대한 극한지지력비는, 띠기초의 경우 근입비에 대체로 선형적으로 비례하는 관계를 보이는 것과는 달리 근입비가 커질수록 비교적 급격하게 증가하는 양상을 보인다 할 수 있으며 정사각형기초의 극한지지력비의 크기 또한 띠기초의 경우에 비해 상대적으로 큼을 알 수 있다.

### 3.2 하중-침하거동

기초의 근입깊이가 기초의 침하에 미치는 영향을 살펴보기 위해 수치해석결과로부터 표면기초의 침하량에 대하여 근입깊이를 갖는 기초의 침하량의 비를 의미하는 침하량비(settlement ratio)를 계산해 보았다. 이때 침하량 결정의 기준이 되는 지지력은 표면기초의 허용지지력으로 하였다. 해석에서 고려한 근입비에 대하여 침하량비(settlement ratio)를 기초의 종류 및 지반종류에 따라 나타내 보았는데 Fig. 5에서와 같다.



(a) Strip footing



(b) Square footing

[Fig. 5] Settlement ratio vs embedment ratio

Fig. 5를 통해 알 수 있는 바와 같이 근입깊이를 갖는 기초의 경우 표면기초의 경우에 비해 동일한 지지력에 대하여 침하량이 작음을 알 수 있으며 근입비가 커짐에 따라 침하량비는 작아진다. 전체적으로 볼 때 침하량비는 근입비가 1인 경우 0.4 정도의 값을 보이고 이후 근입비에 따라 지속적으로 감소하는 양상을 보이는데 느슨한 모래의 경우 조밀한 모래와 점토에 비해 상대적으로 침하량비가 가장 작음을 알 수 있다.

## 4. 결론

기초의 근입비가 보상기초의 극한지지력과 침하량에 미치는 영향을 살펴보고자 느슨한 모래와 조밀한 모래 그리고 점토지반을 가정하여 수치해석을 수행하고 해석 결과를 비교해 보았다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 수치해석 및 이론적 지지력공식을 이용하여 계산한 표면기초의 극한지지력을 비교해 볼 때 기초의 형식에 관계없이 느슨한 모래와 점토지반에 대한 극한지지력은 비슷한 값을 보였으며 조밀한 모래지반의 경우 수치해석과 이론적 지지력공식을 통해 얻은 극한지지력 사이에 차이를 보였다.
- 2) 표면기초의 극한지지력에 대하여 근입깊이를 갖는 기초의 극한지지력의 비를 나타내는 극한지지력비의 변화양상은 수치해석에 의한 극한지지력비가 이론식에 의한 그것들보다 컸으며 전체적으로 볼 때 수치해석 및 이론식에 의한 극한지지력비가 근입비에 비례하는 결과를 보였으나 정사각형기초에 대한 수치해석결과만 극한지지력비가 근입비에 따라 급격하게 증가하는 양상을 보였다.
- 3) 띠기초에 있어 지반종류별로 근입비에 따른 극한지지력비를 비교해 볼 때 모래지반의 경우 근입비에 따른 극한지지력비는 수치해석과 Meyerhof 방법에 의한 경우가 비슷하였으며 점토지반의 경우 이론식에 의한 극한지지력비 사이에 큰 차이를 보이지 않았으며 수치해석에 의한 극한지지력비보다 작은 값들을 보였다.
- 4) 띠기초의 경우 근입비에 따른 극한지지력비의 크기를 고려해 볼 때 모래지반의 경우 수치해석과 Meyerhof 방법에 의한 극한지지력비는 대체로 근입비의 제곱에 가까운 값을 나타내었으며 점토지반에 있어서 근입비에 따른 극한지지력비의 크기를 살펴보면 이론식에 의한 경우 근입비의 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있었고 수치해석결과를 살펴 볼 때 근입비를 약간 상회하는 값들을 보였다.
- 5) 수치해석결과에 따르면 정사각형기초의 근입비에 따른 극한지지력비는 띠기초의 그것에 비하여 큰 값을 나타내었다.
- 6) 보상기초의 침하량 감소효과를 살펴보고자 수행한 수치해석결과에 따르면 전체적으로 근입비가 1인

경우 침하량은 0.4 정도의 값을 보이다가 근입비가 커짐에 따라 감소하는 양상을 보였으며 느슨한 모래의 경우 상대적으로 침하량이 가장 작음을 알 수 있었다.

## References

- [1] Terzaghi, K., *Theoretical soil mechanics*, John Wiley, New York, 1943.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470172766>
- [2] Skempton, A. W., "The Bearing Capacity of Calys", *Proceedings, Building Research Congress*, Vol. 1, 180-189, London, 1951.
- [3] Meyerhof, G. G. (1963). "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, No. 1, 16-26 (Reprinted in Meyerhof, 1982)  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/t63-003>
- [4] Brinch Hansen., "A General Formula for Bearing Capacity", *Bulletin No. 11, Danish Geotechnical Institute*, Copenhagen, 1961.
- [5] DeBeer, E. E. and Ladanyi, B., "Experimental study of the bearing capacity of sand under circular foundations resting on the surface", *Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, 577-585. Paris, 1961.
- [6] Farley, J. (1827). *A Treatise on the Steam Engine*, London (quoted in Golder, 1975)
- [7] Golder, H.Q., "Floating Foundations, Ch. 18" in *Foundation Engineering Handbook*, H.F. Winterkorn and H. Fang, Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 1975.
- [8] Zimmermann, T., *ZSOIL.PC Getting started*, Elmeppress international, Lausanne, Switzerland, 2013.
- [9] Coduto, D. P., *Foundation design*, Prentice-Hall, Inc., 63-93, 1994.
- [10] Craig, R. F., *Soil mechanics*, Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., 122, 1983.
- [11] Bolton, M. D., "The Strength and dilatancy of sands", *Geotechnique* 1/36, 65-78, 1986.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1986.36.1.65>

**이 승 현(Seung-Hyun Lee)**

**[정회원]**



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

---

**한 진 태(Jin-Tae Han)**

**[정회원]**



- 1999년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2006년 8월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2011년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원

<관심분야>

지반내진공학, 기초공학