Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 16, No. 1 pp. 778-784, 2015

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.1.778
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

기초의 크기효과에 관한 수치해석

이승현[1], 한진태[2*]
[1]선문대학교 토목공학과, [2]한국건설기술연구원

Numerical Analysis on the Size Effect of a Footing

Seung-Hyun Lee[1], Jin-Tae Han[2*]
[1]**Department of Civil Engineering, Sunmoon University**
[2]**Korea Institute of Construction Technology**

요 약 얕은기초의 지지력과 침하에 미치는 크기효과를 파악하기 위해 평판과 다양한 크기의 기초를 가정하여 유한요소해석을 수행하고 이론식에 의한 결과와 비교해 보았다. 해석에서 고려한 평판에 대하여 유한요소해석결과 얻은 극한지지력은 이론식에 의한 극한지지력에 비해 큰 차이를 보이지 않았다. 수치해석결과에 따르면 모래지반에 놓인 띠기초의 극한지지력은 이론식에 의한 극한지지력보다 크기효과의 영향을 크게 받았으며 점토지반에 놓인 띠기초의 경우 크기효과의 영향은 없었다. 정사각형기초에 대해서는 대체로 기초지반의 종류에 관계없이 크기효과의 영향이 없었다. 수치해석결과에 따르면 기초의 침하량은 기초지반 종류에 관계없이 이론식과는 달리 크기효과의 영향을 받아 대체로 그 크기가 기초폭에 비례하였다.

Abstract Finite element analyses were conducted to investigate the size effect on the bearing capacity and settlement of shallow foundations, and the results were compared with those of theoretical equations. The calculated bearing capacity of the plate by numerical analysis and the theoretical equation was similar. Numerical analyses showed that the ultimate bearing capacity of strip footing on sand was affected by the size effect, whereas the ultimate bearing capacity of strip footing on clay was not affected by the size effect. Numerical analyses showed that the square footing was unaffected by the size effect regardless of the type of foundation soil. In contrast to theoretical equations, settlement of the footing was affected by the size effect and was proportional to the footing width.

Key Words : Size effect, Finite element analysis, Plate, Strip footing, Square footing

1. 서론

기초의 지지력을 예측하는 다양한 이론적인 방법들[1-5]이 쓰이고 있으나 가장 신뢰성 있게 기초의 지지력을 예측하는 방법은 기초가 놓이는 지반에 대한 재하시험일 것이다. 이러한 재하시험의 가장 대표적인 방법이 평판재하시험(plate load test)인데 시험에 쓰이는 평판은 보통 강철 재질로 두께는 25mm이고 지름은 150mm에서부터 722mm까지 다양하며 때로는 305mm ×305mm의 정사각형 평판이 쓰이기도 한다[6]. 현장재하시험에서 실제 크기의 기초에 대한 시험 대신 평판을 이용하여 시험을 하는 이유는 시험비용이 과다하다는 점과 더불어 단일 구조물이라도 다양한 크기의 기초가 쓰이기 때문이다. 평판과 실제 기초의 크기가 다르므로 평판과 실제 기초 사이에 지지력과 침하량에 있어 차이가 있을 수 있는데 이를 크기효과(size effect)라 한다. 본 연구에서는 기초의 크기가 지지력과 침하량에 미치는 영향을 살펴보기 위해 기초의 형식에 따라 다양한 크기를 고려하여 유한요소해석을 수행하고 해석을 통해 구한 지지력과 침하량에 미치는 기초의 크기효과를 살펴보았다.

*Corresponding Author : Jin-Tae Han(Korea Institute of Construction Technology)
Tel: +82-31-910-0259 email: jimmyhan@kict.re.kr
Received July, 29, 2014 Revised(1st September, 25, 2014, 2nd October, 1, 2014) Accepted January, 08, 2015

2. 크기효과

크기효과가 유발되는 주된 요인은 응력이 전달되는 영향깊이(influence depth)에 차이가 있다는 점과 깊은 위치의 흙에는 더 큰 상재압력(overburden pressure)이 작용하게 되어 흙을 구속함으로써 지표면 근처의 흙보다 더 단단한 흙으로서 거동하게 된다는 점이다. 이러한 요인들 때문에 기초의 폭이 커짐에 따라 지지력과 침하량이 비선형적으로 증가하게 된다[7]. 지지력이론에 따르면 기초지반이 점토지반인 경우 실제 기초의 지지력($q_{u(f)}$)과 평판의 지지력($q_{u(p)}$) 사이에 식 (1)과 같은 관계가 성립된다.

$$q_{u(f)} = q_{u(p)} \tag{1}$$

식 (1)은 기초지반이 점토인 경우 기초의 지지력이 평판의 크기와 무관함을 의미한다. 기초지반이 사질토인 경우 실제 기초의 지지력은 식 (2)와 같이 표현된다. 식 (2)에서 B_f와 B_p는 각각 실제기초의 폭과 평판의 폭을 의미한다.

$$q_{u(f)} = q_{u(p)} \frac{B_f}{B_p} \tag{2}$$

식 (2)와 같이 사질토지반에 대한 평판재하시험을 통해 실제 기초의 지지력을 예측하는 경우에도 실제 기초의 폭이 평판폭의 3배보다 작은 경우에만 지지력이 기초폭에 비례한다는 가정이 적용된다[7]. 기초지반이 점토인 경우 기초에 작용하는 하중강도(intensity of load)에 의한 실제 기초의 침하량(s_f)은 평판의 침하량(s_p)을 이용하여 식 (3)과 같이 표현되고 기초지반이 사질토인 경우 실제 기초의 침하량은 평판의 침하량을 이용하여 식 (4)와 같이 표현된다[8].

$$s_f = s_p \frac{B_f}{B_p} \tag{3}$$

$$s_f = s_p \left(\frac{B_f}{B_p} \right)^2 \left(\frac{3.28B_p + 1}{3.28B_f + 1} \right)^2 \tag{4}$$

식 (4)에서 B_f와 B_p의 단위는 m 이다.

3. 수치해석

기초의 크기효과가 지지력과 침하에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 가정한 기초지반에 대하여 기초의 폭을 달리하여 유한요소해석을 수행하고 해석결과로부터 크기효과가 기초의 지지력과 침하에 미치는 영향을 살펴보고 식 (1)~(4)에 나타나 있는 이론식과 비교해 보았다. 유한요소해석에 적용한 프로그램은 상용 유한요소해석 프로그램인 ZSOIL이다[9]. 해석에서 고려한 기초지반은 느슨한 모래, 조밀한 모래 그리고 점토지반이었으며 각각의 물성값은 Table 1에 나타나 있다. Tabel 1에서 E_s, ν_s, c, ϕ', α 그리고 γ는 각각 탄성계수, 포아송비, 점착력, 전단저항각, 팽창각(dilatancy angle) 그리고 단위중량을 의미한다.

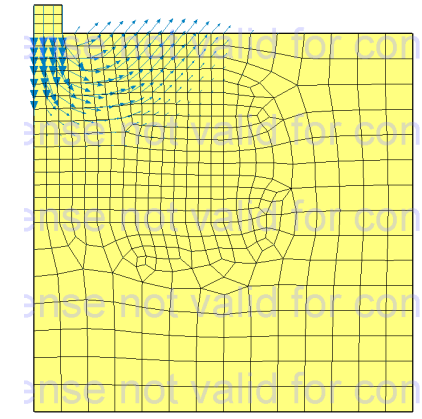
[Table 1] Input parameters of foundation soils

Soil type	E_s (kPa)	ν_s	c (kPa)	ϕ' (°)	α (°)	γ (kN/m^3)
Loose sand	20,000	0.2	2	27	5	17
Dense sand	75,000	0.35	2	36	12	19
Clay	2,000	0.49	40	0	0	16

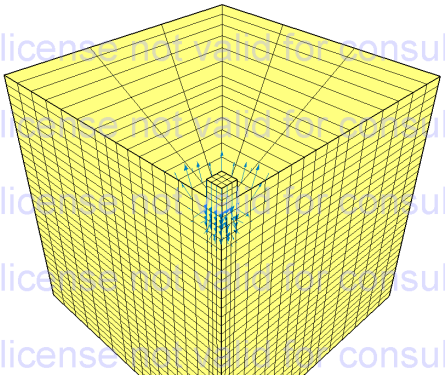
해석대상지반은 Mohr-Coulomb모델을 적용하였다. 사질토의 전단거동특성에 영향을 미치는 팽창각(α)은 Table 1에서 느슨한 모래의 경우 5 ° 로 하였고 점토의 경우 0 ° 로 하였으며 조밀한 모래의 경우 전단저항각(ϕ')의 1/3 로 보았다[10]. 크기효과 파악을 위해 고려한 평판은 폭이 305mm인 띠기초형태와 305mm ×305mm 크기의 정사각형 평판을 고려하였다. 평판에 대한 해석결과와의 비교를 위해 띠기초와 정사각형기초를 고려하였는데 각각의 기초폭은 1m, 2m, 3m, 4m 로 하였다. 해석에서 고려한 모든 기초는 탄성체로 가정하였는데 탄성계수와 포아송비 그리고 단위중량은 각각 30,000,000kPa과 0.2 그리고 $24kN/m^3$이다. 해석시 띠기초에 대해서는 평면변형률해석(plane strain analysis)이 수행되고 정사각형기초의 경우 3차원해석을 수행하게 된다. 기초는 표면기초(surface footing)로 가정하였는데 기초 바닥면은 흙과 기초바닥 사이에 상대변위가 없는 거친 바닥(rough base)으로 가정하였다.

4. 해석결과의 비교분석

해석에 있어 기준이 되는 평판에 대한 파괴시의 변위벡터와 하중-침하곡선을 기초지반 종류별로 나타내면 각각 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

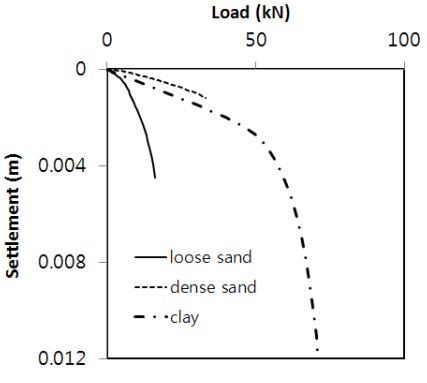


(a) Strip plate on loose sand

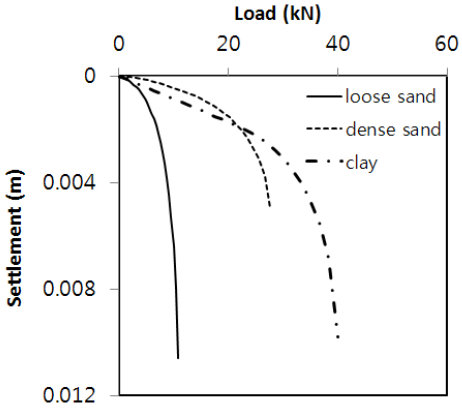


(b) Square plate on loose sand

[Fig. 1] Examples of displacement vectors at failure for plate



(a) Strip plate



(b) Square plate

[Fig. 2] Load-settlement curve for plate

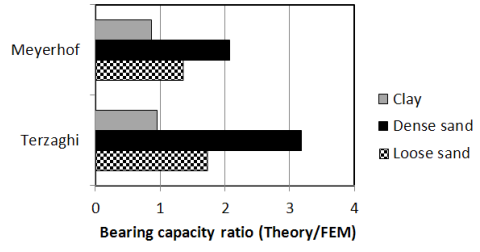
Fig. 1(a)에는 느슨한 모래지반에 놓인 띠기초 형태의 평판에 대한 파괴시의 변위벡터가 나타나 있다. Fig. 1에는 나타내지 않았지만 Fig. 1(a)와 관련하여 조밀한 모래지반에 대한 변위벡터는 Fig. 1(a)와 같이 인접지반의 지표면에 상향의 변위가 발생하지 않았으며 점토지반에 대한 변위벡터는 Fig. 1(a)와 유사한 변위벡터를 보였으나 변위벡터 발생영역이 상대적으로 좁게 나타났다. Fig. 1(b)에는 느슨한 모래지반에 놓인 정사각형 평판에 대한 파괴시의 변위벡터가 나타나 있다. Fig. 1에 나타내지 않은 조밀한 모래와 점토의 경우 파괴시의 변위벡터는 Fig. 1(b)의 그것과 상당히 유사하였다. Fig. 2를 통해 알 수 있듯이 조밀한 모래에 대한 기초의 하중지지능력이 느슨한 모래에 놓인 그것에 비해 크다. Fig. 2(a)에 나타나 있는 띠기초 형태의 평판에 대한 하중-침하곡선을 통해 볼 때 조밀한 모래의 경우 항복점이 나타나지 않음을 알 수 있는데 반해 그 외의 경우 항복점이 뚜렷함을 알 수 있다. 해석에서 고려한 모든 경우에 대하여 극한지지력을 구해 표로 나타내 보았는데 Table 2에 나타나 있는 1m, 2m, 3m, 4m는 기초폭의 크기를 의미한다. Table 2에는 유한요소해석을 통해 구한 기초의 극한지지력과 더불어 이론식을 적용하여 구한 기초의 극한지지력이 나타나 있는데 이론식으로는 실제 설계에 많이 쓰이고 있는 Terzaghi 방법과 Meyerhof 방법을 고려하였다.

[Table 2] Ultimate bearing capacities

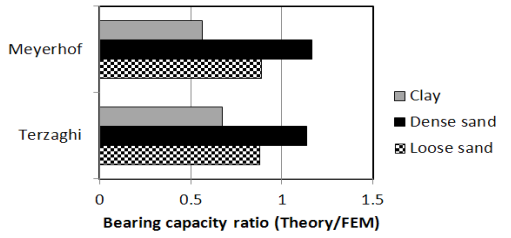
Method	Types of footing		Ultimate bearing capacity (kPa)		
			Loose sand	Dense sand	Clay
FEM	Strip plate		54	110	239
	Square plate		118	304	439
	Strip	1m	197	787	238
		2m	327	1275	229
		3m	432	1883	226
		4m	515	2354	220
	Square	1m	125	313	470
		2m	109	295	353
		3m	104	267	372
		4m	119	278	589
Theory	Strip plate		93*	350	228
			73**	228	206
	Square plate		104	345	296
			105	354	247
	Strip	1m	172	863	228
			130	523	206
		2m	285	1596	228
			211	945	206
		3m	398	2330	228
			293	1367	206
		4m	511	3063	228
			374	1788	206
	Square	1m	167	755	296
			177	763	247
		2m	258	1342	296
			280	1348	247
		3m	348	1929	296
			384	1932	247
		4m	439	2515	296
			487	2516	247

* : Terzaghi ** : Meyerhof

Table 2를 참조하여 평판에 대하여 이론식을 이용하여 구한 극한지지력을 유한요소해석을 통해 구한 극한지지력으로 나눈 값을 흙의 종류별로 나타내면 Fig. 3과 같다.



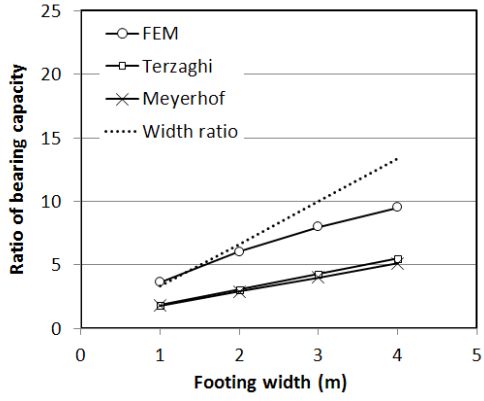
(a) Strip plate



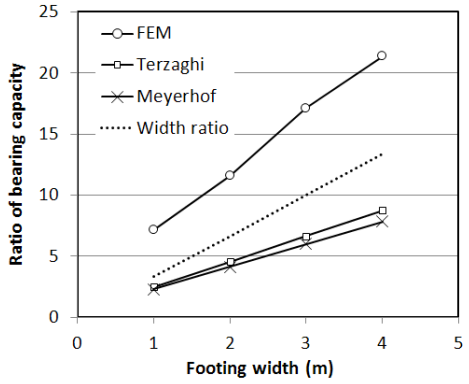
(b) Square plate

[Fig. 3] Comparison of bearing capacity ratios for plate

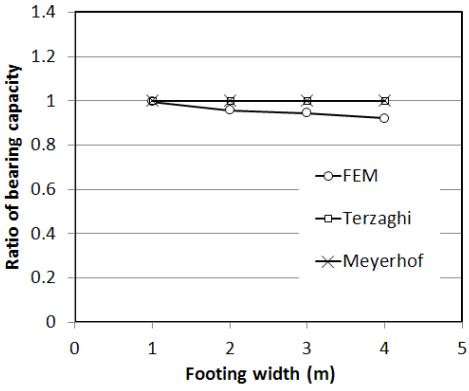
Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 대체로 평판에 대한 유한요소해석결과와 이론식에 의한 결과에 큰 차이는 없다고 볼 수 있다. 다만, Fig. 3(a)에 나타나 있는 띠기초 형태의 평판의 경우 조밀한 모래에 대하여 Terzaghi 방법을 통해 구한 극한지지력이 유한요소해석을 통해 얻은 극한지지력의 3.2배로서 가장 크며 Fig. 3(b)를 통해 볼 때 점토의 경우 Meyerhof 방법을 통해 구한 극한지지력이 유한요소해석을 통해 구한 극한지지력의 0.6배 정도로서 가장 작다. 기초의 극한지지력에 미치는 크기효과를 살펴보고자 해석에서 고려한 4가지 기초폭을 갖는 띠기초의 극한지지력을 띠기초 형태의 평판에 대한 극한지지력으로 나눈 값을 흙의 종류별로 나타낸 것이 Fig. 4 이다. Fig. 4(a),(b)에 나타나 있는 점선은 띠기초의 폭을 띠기초 형태의 평판의 폭으로 나눈 값을 연결한 선을 의미한다.



(a) Loose sand



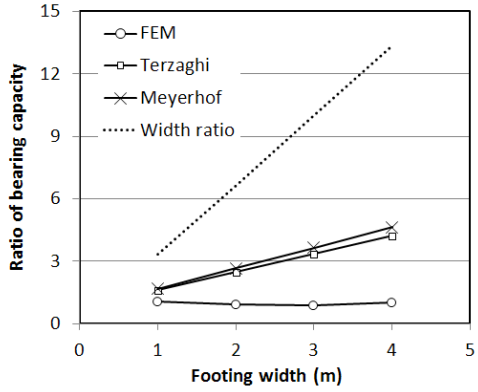
(b) Dense sand



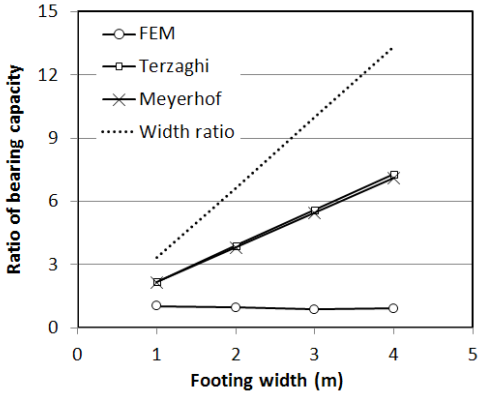
(c) Clay

[Fig. 4] Bearing capacity ratios of strip footings with respect to strip plate

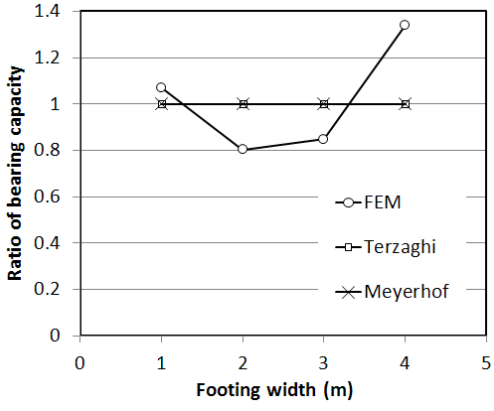
Fig. 4(a),(b)를 통해 알 수 있듯이 모래지반의 경우 띠기초의 극한지지력은 대체로 기초폭에 비례하는 경향을 보인다. 이론식에 의할 경우 Terzaghi 방법과 Meyerhof 방법에 의한 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 유한요소해석결과가 이론식에 의한 결과에 비해 크기효과의 영향을 크게 받음을 알 수 있는데 조밀한 모래의 경우가 느슨한 모래의 경우에 비해 크기효과의 영향이 더 큼을 알 수 있으며 점선으로 나타낸 기초폭비보다 훨씬 큰 지지력비를 나타낸다. 점토지반에 설치된 띠기초의 경우에 대한 Fig. 4(c)는 수치해석 및 이론식 모두의 경우에 있어서 크기효과의 영향을 받지 않음을 보여주고 있는데 수치해석과 이론식에 의한 지지력이 거의 일치함을 알 수 있다. 띠기초의 경우와 유사하게 정사각형 기초의 극한지지력에 미치는 크기효과를 살펴보고자 해석에서 고려한 4가지 기초폭을 갖는 정사각형기초의 극한지지력을 정사각형 평판에 대한 극한지지력으로 나눈 값을 흙의 종류별로 나타내면 Fig. 5와 같다.



(a) Loose sand



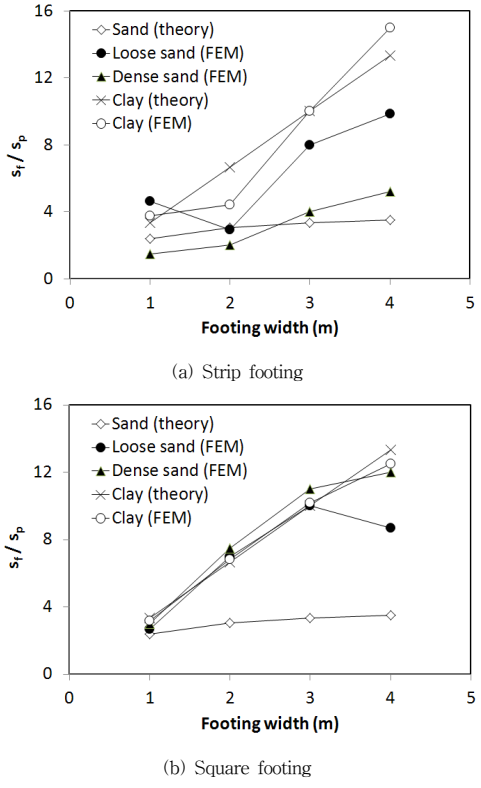
(b) Dense sand



(c) Clay

[Fig. 5] Bearing capacity ratios of square footings with respect to square plate

Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 정사각형기초에 대한 수치해석결과에 따르면 대체로 기초의 크기효과에 의한 영향을 받지 않는다고 볼 수 있다. Fig. 5(a)에서 수치해석에 의한 극한지지력비의 최대값은 1.1이고 최소값은 0.9이며 Fig. 5(b)에서의 수치해석에 의한 극한지지력비의 최대값은 1.0이고 최소값은 0.9이다. Fig. 5(c)에는 점토에 대한 극한지지력비가 나타나 있는데 이론식에 의할 경우 크기효과의 영향은 없다. 수치해석결과 또한 대체로 크기효과를 반영한다고 볼 수는 없는데 극한지지력비의 최대값은 1.3이고 최소값은 0.8이다. 기초의 크기효과가 침하량에 미치는 영향을 살펴보고자 식 (3),(4)에 의한 계산값과 수치해석결과를 비교해 보았는데 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 결과와 관련하여 기준이 되는 하중강도는 평판의 단위 극한지지력을 3으로 나눈 허용지지력으로 보았으며 허용지지력에 대응하는 기초의 침하량(s_f)을 평판의 침하량(s_p)으로 나눈 값(s_f/s_p)을 기초지반 종류별로 기초폭에 대해 나타내었다.



(a) Strip footing

(b) Square footing

[Fig. 6] Comparison of settlement ratio

띠기초에 대한 침하량비(s_f/s_p)를 나타내는 Fig. 6(a)를 통해 볼 때 식 (4)로 표현되는 사질토의 침하량비가 기초폭의 영향을 거의 받지 않는데 반해 수치해석결과는 대체로 침하량비가 기초폭에 영향을 받음을 알 수 있다. 식 (3)을 통해 알 수 있듯이 점토지반에 놓인 기초의 경우 기초침하량은 기초폭에 비례하게 되는데 수치해석 결과 또한 그러한 경향을 보인다고 할 수 있다. 정사각형기초의 경우 Fig. 6(b)를 통해 알 수 있듯이 느슨한 모래에 놓인 폭 4m인 기초를 제외한 모든 경우에 있어 기초의 침하량은 식 (3)으로 표현되는 바와 같이 기초의 폭에 비례하는 결과를 보임을 알 수 있다.

5. 결 론

얕은기초의 지지력과 침하에 미치는 기초의 크기효과를 살펴보기 위해 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 이론식에 의한 결과와 비교해 보았는데 연구결과 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 크기효과 파악에 있어 기준이 되는 평판을 수치모델링하여 해석결과를 살펴보았는데 대체로 해석에서 고려한 모든 경우에 대하여 뚜렷한 파괴거동을 보임을 알 수 있었으며 하중-침하곡선 또한 항복점이 뚜렷하였다.
2) 평판에 대하여 구한 이론식에 의한 극한지지력은 유한요소해석을 통해 구한 극한지지력에 비해 최소 0.6배에서 최대 3.2배의 값을 보였으나 해석에서 고려한 대부분의 경우에 있어 그 차이가 크지는 않았다.
3) 수치해석결과에 따르면 모래지반에 놓인 띠기초의 극한지지력은 이론식에 의한 극한지지력보다 크기효과의 영향이 컸는데 조밀한 모래의 경우가 느슨한 모래의 경우에 비해 크기효과의 영향을 더 크게 받았다. 점토지반에 설치된 띠기초에 대한 수치해석결과를 통해 볼 때 이론식에서와 같이 크기효과의 영향을 받지 않았다.
4) 수치해석결과에 따르면 정사각형기초에 대해서는 대체로 기초지반의 종류에 관계없이 크기효과의 영향이 없었다.
5) 기초의 침하에 미치는 크기효과 파악을 위한 유한요소해석결과에 따르면 기초지반 종류에 관계없이

이론식과는 다르게 크기효과의 영향을 받아 대체로 침하량의 크기가 기초폭에 비례하였다.

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, pp. 180-189, London, 1951.

[3] Meyerhof, G. G, "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 16-26 (Reprinted in Meyerhof, 1982), 1963.
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, pp. 577-585. Paris, 1961.

[6] Das, B. M, Principles of foundation engineering, PWS-KENT Publishing Co., pp. 195-199, 1990.

[7] Bowles, J. E, Foundation anlaysis and design, McGraw-Hill Book Co., pp. 224-226, 1988.

[8] Terzaghi, K., and Peck, R. B. Soil mechanics in engineering practice, 2nd ed., Wiley, New York., 1967.

[9] Zimmermann, T. ZSOIL.PC Getting started, Elmepress international, Lausanne, Switzerland, 2013.

[10] Bolton, M. D, "The Strength and dilatancy of sands". Geotechnique 1/36, pp. 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