KGS Spring Conference 2006 / March 24~25, 2006 / Seoul / Korea

유한요소법에 의한 얕은 기초의 지지력 및 침하 특성 연구
A Study of Bearing Capacity and Settlement of Shallow Foundation by FEM

박종수[1], Jong-Su Park, 박춘식[2], Choon-Sik Park, 장정욱[3], Jeong-Wook Jang

[1] 국립 창원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Changwon National Univ.
[2] 국립 창원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Changwon Nation Univ.
[3] 국립 창원대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Changwon National Univ.

SYNOPSIS : This thesis studied the scale effects on bearing capacity and settlement characteristics by using FEM. The conclusions of the study are as follows.

1) For sandy soil, the bearing capacity ratio increased in the form of logarithm as the foundation width increased. Hence application of static mechanic theory results in overestimation of the bearing capacity when the bearing capacity should be derived from plate loading test results.

2) In clayey soil, the characteristics of the bearing capacity associated with foundation width met Terzaghi's bearing capacity theory.

3) In sandy soil, the settlement ratio increased non-linearly as foundation width increased. However, in clayey soil, the settlement ratio increased linearly.

4) In ordinary soil, the foundation width - settlement ratio turned out to be close to that of sandy soil.

Key words : Bearing capacity, Settlement ratio, Scale effect, FEM

1. 서 론

토질 공학적 측면에서 구조물이 놓일 지반의 특성을 알고 지반의 지지력 및 침하량을 아는 것은 매우 중요하다. 평판재하시험 결과로부터 실제 기초지반의 지지력과 침하량을 추정하기 위해서는 반드시 기초의 Scale Effect를 고려해야 한다. 그러나, 기존 대다수의 연구가 순수 모래 또는 점토를 대상으로 한 기초 크기에 관한 연구이므로, 근래에 널리 사용되는 대규모의 기초 형식과 일반적으로 접하게 되는 점착력과 내부마찰각을 모두 가지는 흙의 경우에 대하여는 기존의 예측 방법의 적용성 검증에 어려움이 있다.

본 연구는 수치해석법을 이용하여 기초의 Scale Effect를 고려한 얕은 기초의 지지력 및 침하 특성을 평가할 목적으로 평판 및 다양한 기초크기 조건에 대한 기초 지반의 응력 변형 해석을 유한요소법 프로그램을 이용하여 실시하였으며 수행된 수치해석 결과를 토대로 기초 크기 변화에 따른 지지력 및 침하 특성을 규명한 후 평판재하 시험으로부터 실제 기초의 지지력 및 침하량 산정에 있어 일반 현장에서의 평판재하 시 Scale Effect의 영향을 분석하여 현장 적용에 있어 기초의 안정성에 대한 확신과 경제적인 시공이 되도록 하는데 연구의 목적이 있다.

2. 연구방법

2.1 수치해석방법

수치해석은 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS를 사용하여 평판재하 및 실물 기초의 재하시험을 모델링하였다. 해석 모델은 지반의 경우 선형 Mohr-Coulomb의 탄소성 모델을 적용하였으며 평판 및 기초의 경우 선형 탄성모델을 적용하였다.

수치해석시 지반 및 기초의 모델링은 6-Node Soil 요소를 사용하였으며 경계조건에 따른 영향을 최소화하기 위하여 연직 및 수평방향에 대하여 각각 50배 및 20배의 해석 영역을 적용하였으며 유한요소망 형태, 경계조건 및 하중재하 형태를 요약하면 그림 1과 같다.

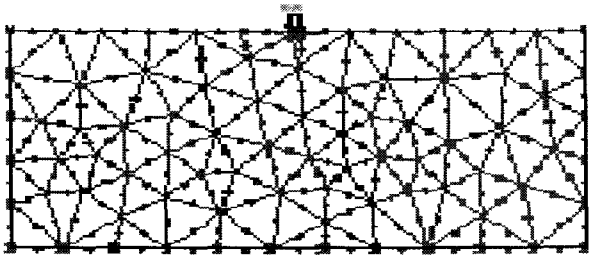


그림 1. 수치 해석시 모델링한 유한요소망

2.2 극한지지력 산정방법

평판재하시험의 결과 하중-침하량곡선을 통하여 사질지반의 경우에는 일반적으로 그림 2의 a곡선과 같이 재하초기에 직선적으로 변화하다가 항복점에 도달하면 침하속도가 커지면서 곡선이 절곡하고 하중증가에 따라 점차 침하량이 커지다가 파괴점에 도달하면 하중증가가 없어도 침하가 계속되면서 지반이 파괴되는 전반전단파괴의 경향을 나타내며, 점토질지반의 경우에는 일반적으로 그림의 b곡선과 같이 재하초기부터 곡선이 변곡하여 뚜렷한 항복점을 나타내지 않고 점진적으로 국부적인 지반파괴가 일어나면서 진행성파괴가 계속되는 국부전단파괴의 양상을 나타낸다.

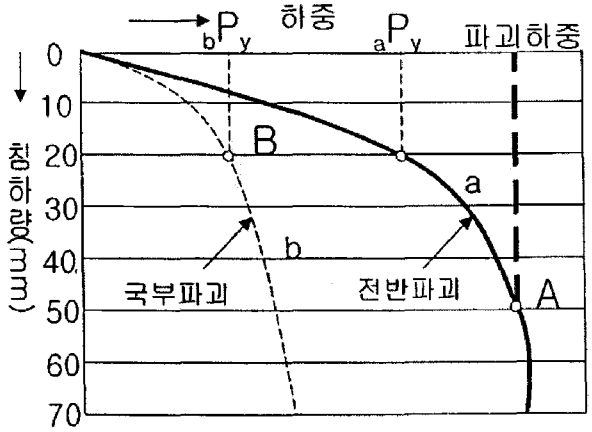


그림 2. 하중-침하량 곡선의 특성

따라서, a곡선과 같은 경우에는 항복하중 P_{ay} 및 극한하중 P_{au}를 쉽게 결정할 수 있지만, b곡선과 같은 경우에는 곡선의 곡률반경이 최소가 되는 최대 곡률점을 결정하기는 매우 어려우므로, 그림 3의 (a),(b),(c)와 같이 각각 침하량-대수시간 S-logt, 하중-대수침하속도 P-dS/d(logt), 대수하중-대수침하량 logP-logS 등으로 좌표변환을 시도하여 이들 곡선이 절곡되는 하중치를 항복하중 P_{by}로 결정한다. 그리고 극한하중 P_{bu}는 1.5 P_{by}로 결정된다.

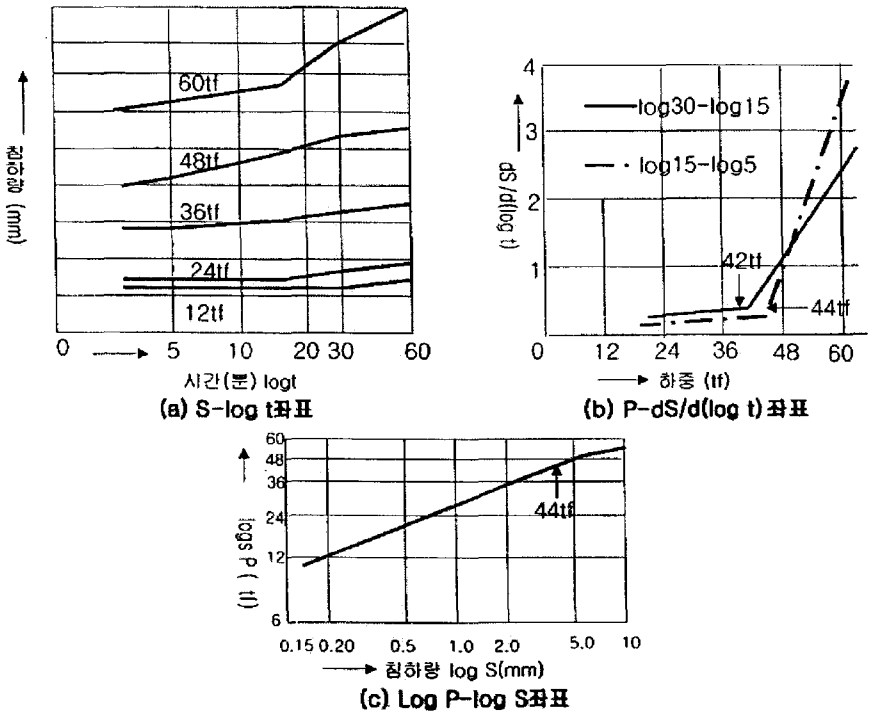


그림 3. 항복하중 P_y의 결정을 위한 좌표변환

장기 허용 지지력은 항복하중강도의 1/2과 극한하중강도의 1/3중에서 작은 값으로 결정되고, 단기 허용 지지력은 항복하중강도로 결정된다. 한편, 설계하중은 장기 또는 단기적인 설계목적에 따라 장기 또는 단기 허용하중 이하로 결정되며, 장기설계하중을 허용 침하량의 기준으로 결정할 때는 하중-침하량 곡선상에서 침하량 20mm 또는 25mm에 해당되는 하중의 1/2이하로 결정하고, 허용 지지력(allowable bearing value)을 기준으로 결정할 때는 장기 허용하중과 허용 침하량을 기준으로 결정된 하중 중에서 작은 값으로 한다. 여기서, 하중강도라 함은 단위 면적에 작용하는 하중을 말한다.

이상과 같이 정리된 하중-침하량 관계는 규격화된 재하판에 의한 모형 실험의 결과이므로, 이로부터 실제기초의 치수의 scale effect을 고려한 값을 추정하여야 한다. 지지력에 대한 기초폭의 영향은 얕은 기초에 대한 Terzaghi의 지지력 공식 (2.1)로부터 식(2.2)와 식(2.3)와 같이 표현된다.

$$q_u = \alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad \text{(Terzaghi)} \qquad (1)$$

$$q_u = \left(\frac{B}{30}\right) \cdot q_{u30} \qquad \text{(모래지반)} \qquad (2)$$

$$q_u = q_{u30} \qquad \text{(점토지반)} \qquad (3)$$

여기서 , q_u=실제 기초의 지지력 (kgf/cm^2) q_{30}=30cm 재하판에 대한 극한 지지력(kgf/cm^2)

3. 해석단면 및 가상지반조건

본 연구에서는 지반조건을 순수사질토, 순수 점토 및 c-øsoil의 3가지 경우에 대해서 기초형식과 기초폭을 변화시켜 해석하였다. 본 연구에 적용된 해석 단면의 형상 및 지반조건을 요약하면 표 1과 표 2와 같다.

표 1. 기초 형식 및 크기

기초형식	연속기초
기초폭(m)	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2

표 2. 적용된 토질 정수

구 분	순수 사질토	순수점토	c-øsoil
점착력(tf/㎡)	-	2	1
내부마찰각(。)	33	-	25
탄성계수(tf/㎡)	5000	200	3000
투수계수(m/day)	1	1×10^{-3}	1×10^{-2}
포아송비(v)	0.30	0.15	0.2

4. 해석 결과

4.1 지지력에 대한 Scale Effect

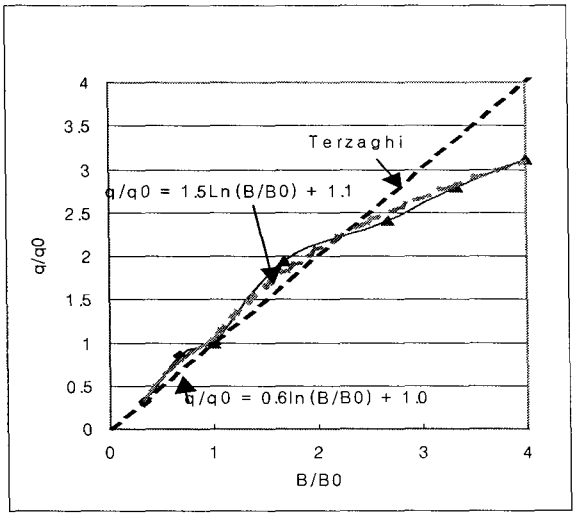
지지력에 대한 Scale Effect를 고찰하기 위하여 수치해석 결과를 Terzaghi(1943)의 연구결과와 함께 평판 30cm의 해석결과로 정규화하였다.

해석결과로부터 순수 사질토지반인 경우에 기초폭비가 증가할수록 지지력도 함께 증가하는 경향을 보였다. 그러나 Terzaghi가 제안한 정역학적 지지력 이론의 경우와 같이 정비례 관계에 있지 않은 것으로 나타났다. 기초폭비가 증가할수록 지수함수 형태로 증가하는 것으로 나타났다. 대략적인 추정식은 기초폭비가 1이하일 때는 $q/q_0=0.6\ln(B/B_0)+1.0$이고, 기초폭비가 1이상일 때에는 $q/q_0=1.5\ln(B/B_0)+1.06$이다. 지지력비-기초폭비의 관계는 $q/q_0 \propto \ln(B/B_0)$임을 알 수 있었다.

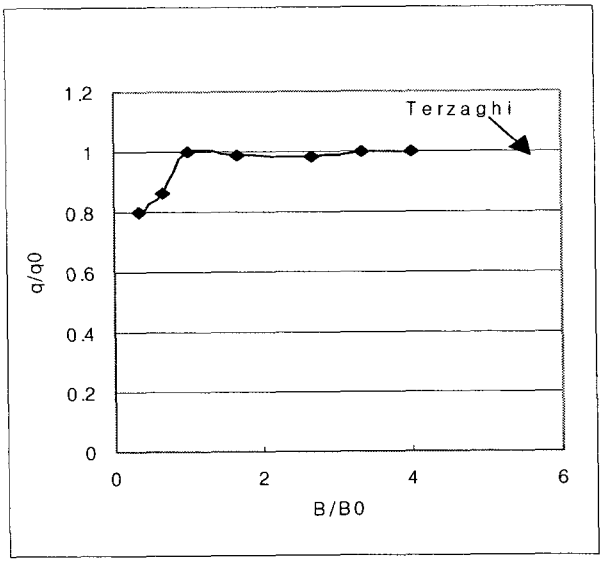
순수 점성토지반인 경우에 기초폭비 증가에 따른 지지력은 기초폭비 1이상에서 Terzaghi가 제안한 지지력 이론과 같이 지지력의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 기초폭비 1이하에서는 지지력비가 1보다 작았는데 이것은 관입(펀칭)에 의한 것으로 판단된다.

일반적인 흙인 경우에 기초폭비가 증가할수록 지지력도 함께 증가하는 경향을 보였다. 그러나 Terzaghi가 제안한 정역학적 지지력 이론의 경우와 같이 정비례 관계에 있지 않은 것으로 나타났다. 기초폭비 1이하에서는 정비례관계보다 큰 것으로 나타났다. 지지력비-기초폭비와의 관계는 대략 $q/q_0 \propto 0.2(B/B_0)$임을 알 수 있었다.

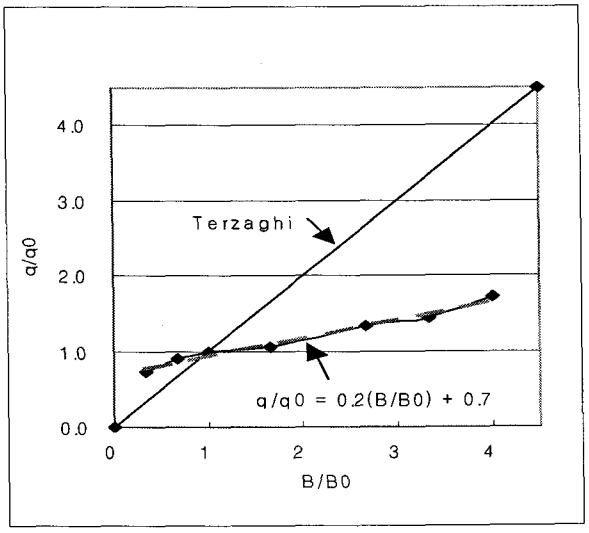
다음 그림은 지지력비-기초폭비를 평판 30cm로 정규화한 그래프이다.



(i) 순수 사질토



(ii) 순수 점성토



(iii) 일반적인 흙

그림 4. 지지력비-기초폭비를 평판 30cm로 정규화

4.2 침하에 대한 Scale Effect

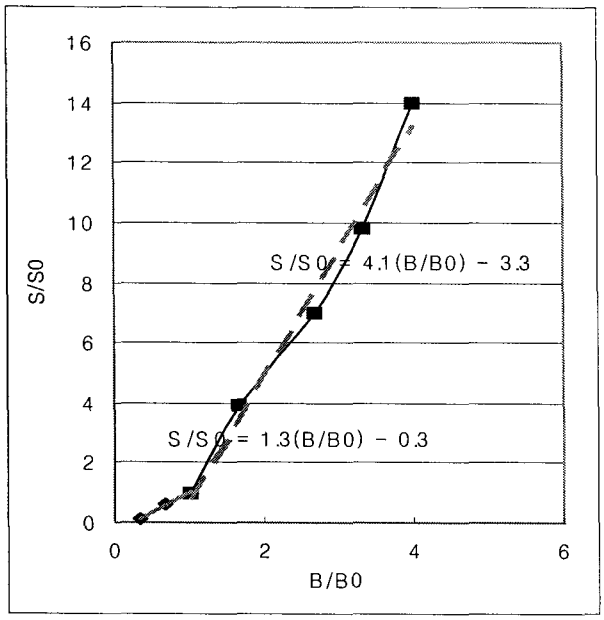
해석결과, 순수 사질토의 평판 30cm로 정규화한 침하비와 기초폭비와의 관계는 기초폭비가 증가할수록 침하비도 증가하는 경향을 보이고 있다. 기초폭비-침하비의 관계식은 대략적으로 기초폭비 1이하에서는 $S/S_0 = 1.3(B/B_0)-0.3$으로 나타났으며, 기초폭비 1이상에서는 $S/S_0 = 4.1(B/B_0)-3.3$으로 나타났다.

순수 점성토의 평판 30cm로 정규화한 침하비와 기초폭비와의 관계는 기초폭비가 증가할수록 침하비는 증가하는 경향을 보이고 있다. 기초폭비 증가에 따른 침하비의 대략적인 관계식은 $S/S_0 = 1.03(B/B_0)-0.06$으로 기울기가 거의 1에 근접하는 것으로 나타났다.

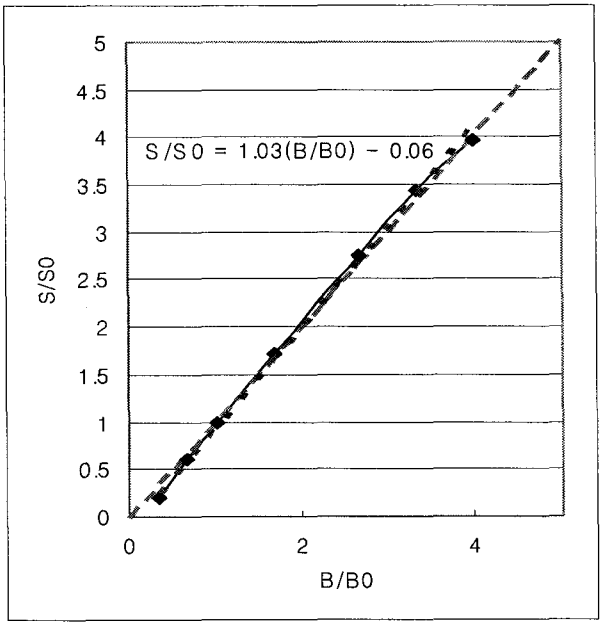
일반적인 흙의 평판 30cm로 정규화한 침하비와 기초폭비와의 관계는 기초폭비가 증가할수록 침하비도

증가하는 경향을 보이고 있다. 침하비-기초폭비의 대략적인 관계식은 기초폭비 1이하에서는 S/S_0 = $1.1(B/B_0)-0.1$로 나타났으며, 기초폭비 1이상에서는 S/S_0 = $1.9(B/B_0)-1.2$로 나타났다.

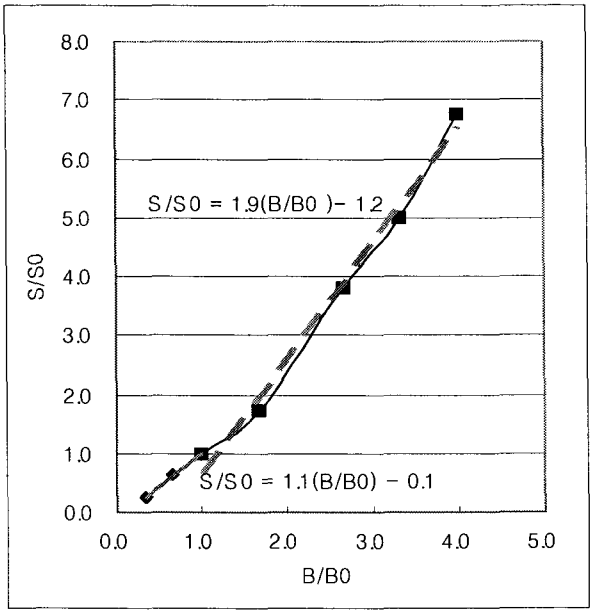
다음 그림은 침하비-기초폭비를 평판 30cm로 정규화한 그래프들이다.



(i) 순수 사질토



(ii) 순수 점성토



(iii) 일반적인 흙

그림 5. 침하비-기초폭비를 평판 30cm로 정규화

4.3 각 토질 조건에 따른 지지력에 대한 Scale Effect 비교

일반적인 흙의 기초폭비 변화에 따른 지지력비는 순수 사질토와 순수 점성토 사이에 있는 것으로 나타났다. 따라서 일반적인 흙의 지지력에 대한 Scale Effect를 고려할 경우 Terzaghi의 지지력 이론을 적용할 경우 지지력을 과대 평가할 우려가 있다고 사료된다. 일반적인 흙의 토질 정수 값이 c=1t/㎡, ø=25°일 때에는 기초폭비에 대한 지지력비는 순수 사질토의 대략 50%에 해당한다고 평가된다. 그림 6은 각 토질 조건에 따른 지지력에 대한 Scale Effect이다.

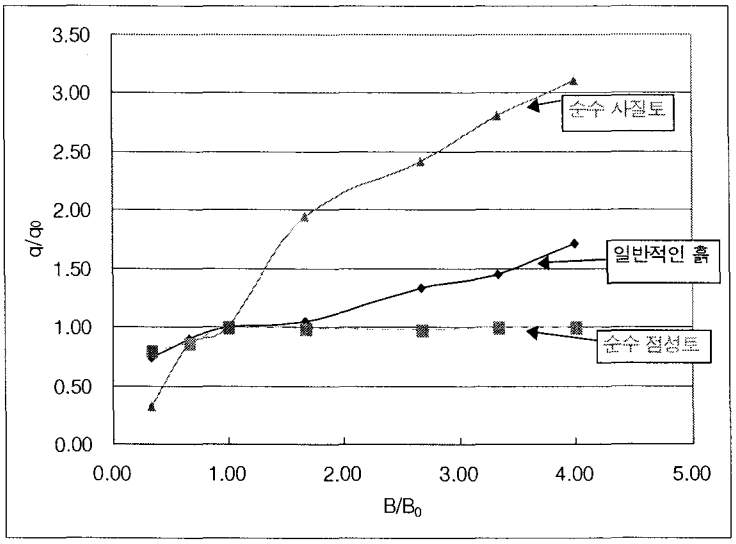


그림 6. 각 토질조건에 따른 지지력에 대한 Scale Effect 비교

4.4 각 토질 조건에 따른 지지력에 대한 Scale Effect 비교

일반적인 흙의 기초폭비 변화에 따른 침하비는 순수 사질토와 순수 점성토 사이에 있는 것으로 나타났다. 점착력과 내부 마찰각을 모두 갖는 지반의 경우 침하에 관한 기초의 Scale Effect는 순수 사질토의 특성과 유사한 것으로 나타났다. 그림 7은 각 토질 조건에 따른 침하에 대한 Scale Effect이다.

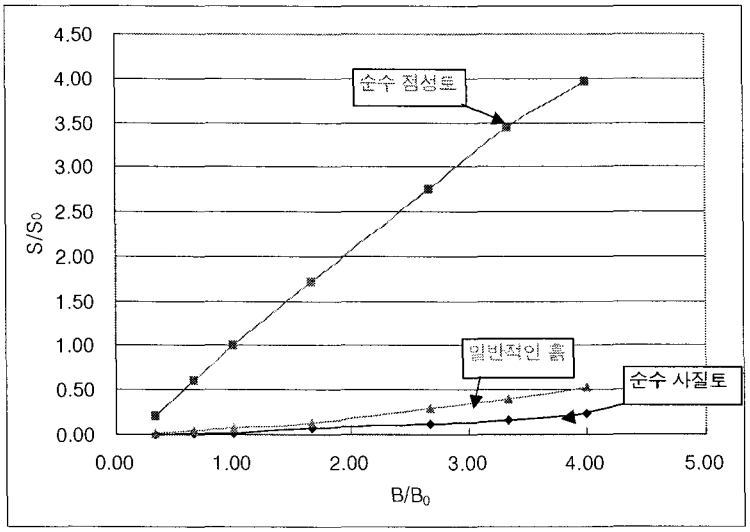


그림 7. 각 토질조건에 따른 침하에 대한 Scale Effect 비교

5. 결 론

본 연구에서 유한요소해석(PLAXIS)를 이용한 수치해석법을 이용하여 기초의 Scale Effect를 고려한 얕은 기초의 지지력 및 침하 특성을 평가하였으며 그 결과를 토대로 기초 크기 변화에 따른 지지력 및 침하특성을 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 순수 사질토 지반의 경우 기초폭이 증가할수록 지지력비는 Terzaghi의 정역학적 지지력 이론과 달리 지수함수 형태로 증가하였다. 지지력비-기초폭비의 관계는 $q/q_0 \propto \ln(B/B_0)$임을 알 수 있었다.

2. 순수 점성토 지반의 경우 기초 크기변화에 따른 지지력 특성은 기초폭비 1이상에서 Terzaghi의 지지력 이론을 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 기초폭 1이하에서는 관입(펀칭)형상 때문에 지지력이 작게 평가되었다고 판단된다.

3. 일반적인 흙인 경우 기초폭이 증가할수록 지지력도 증가하는 경향을 보였다. 하지만 Terzaghi가 제안한 정비례 관계에 있지 않았다. 지지력비-기초폭비와의 관계는 대략 $q/q_0 \propto 0.2(B/B_0)$임을 알 수 있었다. 따라서 평판재하시험 결과로부터 실제 기초의 지지력 산정시 정역학적 지지력 이론을 적용할 경우 실제 지지력을 과다하게 평가하는 것으로 사료된다.

4. 순수 사질토 지반의 경우 기초폭 변화에 따른 침하비는 기초폭이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 최종 침하가 14mm로 작은 값을 나타내고 있다.

5. 순수 점성토 지반의 경우 기초폭 변화에 따른 침하비는 기초폭이 증가할수록 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 기초폭의 증가에 따른 침하량의 증가가 기울기 200정도로 급격히 증가함을 알 수 있었다.

6. 일반적인 흙인 경우 기초폭비-침하비는 순수 사질토 영역에 가깝게 나타났다. 따라서 일반적인 흙의 Scale Effect는 순수 사질토의 특성에 따라 예측하여도 무방할 것으로 사료된다.

7. 본 논문에서는 일반적인 흙 중 아주 일부분의 흙에 한정하여 해석하였으며, 정확한 Scale Effect를 고려하려면 다양한 토질 조건과 환경을 고려하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 권호진 외 (2001) "기초공학" 구미서관 pp. 78~88
2. 신은철 역 (2002) "기초공학" 구미서관 pp. 235~240
3. 이상덕 (1996) "전문가를 위한 기초공학" 圓書出版 엔지니어즈 pp. 130~137
4. 정형식 외 (2002) 가을 지반공학회 논문집 "평판재하 시험으로부터 실제 기초의 지지력 및 침하량 산정시 Scale Effect" pp.350~357
5. 박관필 외 (2003) 대한 토목학회 "얕은 기초의 지지력 및 침하특성에 관한 수치해석적 연구" pp.3983~3987