

# CPT 결과를 이용한 기초해석 및 설계 : 얇은 기초의 침하량 산정

## Foundation Analysis and Design Using CPT Results : Settlement Estimation of Shallow Foundation

이 준 환<sup>1</sup> Lee, Jun-Hwan

박 동 규<sup>2</sup> Park, Dong-Gyu

### Abstract

The settlement of foundations under working load conditions is an important design consideration. Well-designed foundations induce stress-strain states in the soil that are neither in the linear elastic range nor in the range usually associated with perfect plasticity. Thus, in order to accurately predict working settlements, analyses that are more realistic than simple elastic analyses are required. The settlements of footings in sand are often estimated based on the results of in-situ tests, particularly the standard penetration test (SPT) and the cone penetration test (CPT). In this paper, we analyze the load-settlement response of vertically loaded footings placed in sands using both the finite element method with a non-linear stress-strain model and the conventional elastic approach. Based on these analyses, we propose a procedure for the estimation of footing settlement in sands based on CPT results.

### 요 지

얇은기초의 설계에 있어 작용하중에 의한 침하량 산정은 기초의 지지력 산정과 함께 매우 중요한 고려사항이다. 상부구조물에 의한 설계하중이 지표면의 기초지반에 직접 작용하는 얇은기초의 경우, 기초지반의 거동은 일반적으로 완전 선형탄성도 아니며, 파괴에 도달한 소성상태도 아닌 비선형 응력-변형률의 거동을 보이게 된다. 이러한 지반의 비선형성은 침하량 산정에 있어 매우 중요한 요소로 간주될 수 있으나, 실제 설계에 있어서는 대표탄성계수의 적용에 의한 간편법이 보편적으로 적용되고 있다. 일반적으로 사질토지반에 놓인 얇은기초 침하량 산정은 표준관입시험(SPT) 나 콘관입시험(CPT) 등의 현장시험 결과를 토대로 이루어진다. 본 연구에서는 비선형 유한요소해석에 의한 얇은기초 하중-침하량 분석을 수행하였으며, 기존의 탄성론에 근거한 침하량 산정법과의 비교분석 또한 수행하였다. 이와 같은 해석을 통하여 콘관입시험(CPT) 결과에 근거한 새로운 얇은기초 침하량 산정법 및 얇은기초 설계법을 제안하였다.

**Keywords :** Cone penetration test, Foundation design, Numerical analysis, Schmertmann's method, Settlements, Shallow foundation

### 1. 서 론

얇은기초의 설계에 있어 구조물의 안정성 확보를 위한 지지력 추정과 설계하중 하의 침하량 산정은 가장중

요한 고려사항이다. 이 중 설계하중에 의해 발생하는 침하량은 구조물의 실질적 기능성을 좌우하는 핵심 고려사항으로 허용 침하량 범위 내에서 발생하여야 한다. 기초의 허용 침하량은 구조물의 종류, 규모, 위치 등에 따

1 정희원, 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 조교수 (Member, Asst. Prof., School of Civil & Env. Engrg., Yonsei Univ., junlee@yonsei.ac.kr)

2 정희원, 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil & Environ. Engrg., Yonsei Univ.)

라 변화하는 설계기준으로써, 설계시 예측되는 침하량과의 비교를 통해 설계의 적합성을 검토하게 된다. 사질토 지반에 놓인 얇은기초 침하량 추정에 있어서 대부분의 산정법들은 선형탄성적인 접근법에 기초하고 있다. 이 경우 지반의 거동을 대표하는 탄성물성치의 산정은 얇은기초 침하량을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 그러나 실제 구조물의 하중이 작용하는 얇은기초 저면지반은 선형탄성도 아니며, 파괴에 도달한 소성 상태도 아닌 비선형 응력-변형률의 거동을 보이게 된다. 따라서 허용하중에서의 얇은기초 침하량을 엄밀하게 예측하기 위해서는 지반의 비선형 거동 특성 또한 반영되어야 한다.

사질토 지반의 경우, 불교란 시료채취를 통한 지반정수의 추정이 용이하지 않는 특성으로 인해 현장시험결과를 직접 얇은기초 침하량 산정에 적용하는 방법이 널리 쓰이고 있다. 사질토 지반에서의 침하량 추정을 위한 현장시험으로는 표준관입시험(SPT)나 콘관입시험(CPT) 등이 대표적으로 사용되고 있다. CPT시험결과를 이용한 침하량 산정법은 콘지저력  $q_c$  값으로부터 기초지반의 압축성 및 탄성계수를 추정하여 이를 토대로 침하량을 산정하는 예측법 있다(Schmertmann 1970, 1978; Berardi, 1991). 대표적 CPT 침하량 산정법으로는 Schmertmann (1970, 1978)에 의한 방법이 있으며, 지반의 깊이별 가중치 및 콘지저력  $q_c$  값을 통해 깊이별 지반의 강성을 직접적으로 고려할 수 있는 장점으로 인해 국내외적으로 많이 적용되고 있다. 그러나 Schmertmann(1970, 1978)방법은 기본적으로 선형 탄성론에 근거하고 있어, 지반거동의 비선형성을 고려하고 있지 않으며, 이는 기초침하량 산정에 있어 설계하중 혹은 허용침하량의 범위에 따라 과다 또는 과소추정의 결과를 낳을 수 있다.

본 연구에서는 사질토 지반에 놓인 얇은기초에 대하여 다양한 지반조건에 따른 얇은기초 하중-침하 거동의 변화를 유한요소해석을 통해 분석하였다. 각각의 해석에 있어서 지반의 비선형성을 고려하였으며 지반의 상대밀도, 기초의 크기에 따른 기초의 거동변화를 정량화하였다. 이와 같은 해석에 근거하여 얇은기초 침하량 산정시 지반의 비선형성을 고려한 침하량 산정법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 침하량 산정법은 CPT 시험결과를 이용한 Schmertmann방법을 기본으로 하고 있으며, 지반의 상대밀도, 얇은기초의 크기, 구조물의 허용침하량 등을 고려할 수 있도록 하였다.

## 2. 사질토 지반에서 얇은 기초의 침하량 추정방법

### 2.1 SPT에 근거한 방법들

표준관입시험(SPT)의 결과를 이용한 얇은 기초의 침하량 추정방법에 관해서는 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔으며 다양한 방법들이 제안되어 왔다. Meyerhof (1965)는 사질토 지반에 놓인 확대기초(spread footings)의 침하량 산정을 위해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$s = \frac{0.203 L_R}{N_{45}} \left[ \frac{q_b}{P_A} \right] \quad \text{단, } B \leq 1.2 L_R \quad (1)$$

$$s = \frac{0.305 L_R}{N_{45}} \left[ \frac{q_b}{P_A} \right] \left[ \frac{B}{B + L_R/3.28} \right]^2 \quad \text{단, } B > 1.2 L_R \quad (2)$$

여기서,  $s$  = 기초 침하량,  $q_b$  = 기초저면에서의 단위하중,  $N_{45}$  = 에너지 효율 45%의 보정 표준관입 타격치,  $B$  = 기초의 폭,  $L_R$  = 기준 길이(1m  $\approx$  3.28ft),  $P_A$  = 기준압력(100kPa  $\approx$  1tsf) 이다. 식 (1)과 (2)에 사용된 SPT  $N_{45}$  값은 수직 유효응력이나 지하수위 등의 다른 요인들에 대해 보정하지 않은 값이다.

한편 Peck과 Bazaraa(1969)은 식 (2)를 수정하여 다음과 같은 사질토에 근입한 기초 침하량 추정식을 제안하였다.

$$s = C_w C_d \left[ \frac{0.051 L_R}{N_B} \right] \left[ \frac{q_b}{P_A} \right] \left[ \frac{2B}{B + L_R/3.28} \right]^2 \quad (3)$$

$$N_B = \left[ \frac{4N_{45}}{1 + 4\sigma'_v/P_A} \right] \frac{\sigma'_v}{P_A} \quad \text{단, } \sigma'_v \leq 0.75 P_A \quad (4)$$

$$N_B = \left[ \frac{4N_{45}}{3.25 + 4\sigma'_v/P_A} \right] \frac{\sigma'_v}{P_A} \quad \text{단, } \sigma'_v > 0.75 P_A \quad (5)$$

여기서,  $C_w$  = 지하수위 보정계수,  $C_d$  = 깊이 보정계수,  $q_b$  = 기초저면에서의 단위하중,  $\sigma'_v$  = 유효수직응력,  $N_{45}$  = 에너지 비율 45%일 경우의 보정 표준관입 타격치,  $B$  = 기초의 폭,  $L_R$  = 기준길이(1m  $\approx$  3.28ft),  $P_A$  = 기준압력(100kPa  $\approx$  1tsf) 이다. 식 (3)은 Terzaghi와 Peck (1967)에 의해 제안된 침하량 산정식에 바탕을 두고 있으며 매우 보수적인 결과를 얻게 된다.

사질토나 자갈이 많은 지반에서 사용되는 또 다른 방법으로는 Burland와 Burbidge(1985)의 제안식이 있으며, 아래의 식으로 표현된다.

$$s = f_s \cdot f_I \cdot f_t \cdot I_C \left( q_b - \frac{2}{3} \sigma_{v,p}' \right) \left[ \frac{100}{P_A} \right] \left[ \frac{B}{L_R} \right]^{0.7} \quad (6)$$

여기서,  $s$  = 기초 침하량,  $f_s$  = 형상계수,  $f_t$  = 사질토 혹은 자갈층의 깊이계수,  $f_t$  = 시간계수,  $q_b$  = 기초저면에서의 단위하중,  $\sigma'_{v,d}$  = 최대 유효수직응력,  $B$  = 기초폭,  $I_c$  = 압축지수,  $L_R$  = 기준길이 (= 1m = 3.28ft = 39.37in),  $P_A$  = 기준압력(100kPa  $\approx$  1tsf) 이다. 압축 지수  $I_c$ 의 값은 SPT 타격횟수  $N$ 치의 함수로 나타나며,  $\sigma'_{v,p}$ 는 굴착으로 인한 기초지반의 과압밀 영향이 포함된 값이다.

## 2.2 CPT에 근거한 방법들

Schmertmann(1970, 1978)의 침하량 산정법은 콘관입 시험(CPT) 결과를 이용한 가장 대표적인 방법으로 하부 기초지반을 여러 개의 층으로 분할한 후, 각 층에서 산출된 콘지지력( $q_c$ )을 바탕으로 흙의 강성을 결정한다. 그림 1은 침하량 산정에 적용되는 수직변형률 영향계수를 나타낸 것으로 정사각형 기초와 연속기초의 경우 각각의 영향깊이는 기초하부로부터 각각 2B, 4B 까지이다. 그림에서 나타난 수직변형률 영향계수 값은 실제 관측된 기초저면지반의 수직변형률을 기준으로 제안된 값으로써 침하량 산정시 지반 깊이별 가중치 고려할 수 있는 장점으로 인해 국내외에서 많이 적용되고 있다. Schmertmann (1970, 1978) 방법에 의한 사질토 지반에서의 얇은기초 침하량 산정식은 다음과 같다.

$$s = C_1 \cdot C_2 \cdot (q_b - \sigma'_{v,d}) \cdot \Sigma \left( \frac{I_z \cdot \Delta z_i}{E_i} \right) \quad (7)$$

$$C_1 = 1 - 0.5 \left( \frac{\sigma'_{v,d}}{q_b - \sigma'_{v,d}} \right) \quad (8)$$

$$C_2 = 1 + 0.2 \log \left( \frac{t}{0.1 \cdot t_R} \right) \quad (9)$$

여기서,  $s$  = 기초 침하량,  $C_1$  = 깊이계수,  $C_2$  = 시간계수,  $q_b$  = 기초저면에서의 단위하중,  $I_z$  = 깊이 영향계수,  $\sigma'_{v,d}$  = 기초저면에서의 유효수직응력,  $\Delta z_i$  = 각 층의 두께,  $E_i$  = 각 층의 탄성계수,  $t$  = 시간,  $t_R$  = 기준 시간(1년 = 365일) 이다. 콘지지력  $q_c$ 와 기초지반의 탄성계수  $E_i$ 와의 상관관계식은 다음과 같이 나타난다(Schmertmann, 1978; Robertson과 Campanella, 1989).

$$E_i = 2.5 \sim 3.5 q_c \text{ (정규압밀된 사질토)} \quad (10)$$

$$= 6.0 q_c \text{ (과압밀된 사질토)}$$

Beradi(1991)는 CPT 결과를 이용하여 또 다른 기초 침하량 산정식을 제안하였다. 이 산정방법 역시 탄성론에 근간하고 있으며, 다음과 같이 나타난다.

$$s = I_s \cdot \frac{q_{bi} \cdot B}{E'} \quad (11)$$

여기서,  $s$  = 기초 침하량,  $I_s$  = 기초의 형상, 강성에 따른 영향계수,  $q_{bi}$  = 기초저면에서의 단위하중,  $B$  = 기초폭,  $E'$  = 기초지반의 탄성계수로서, 상대밀도  $D_R$ 과 변형률 단계로부터 얻을 수 있는 콘지지력  $q_c$ 로부터 추정된다. 위 식에 적용한 콘지지력  $q_c$ 값은 기초 선단으로부터  $B/2$  깊이에서의 값이다.

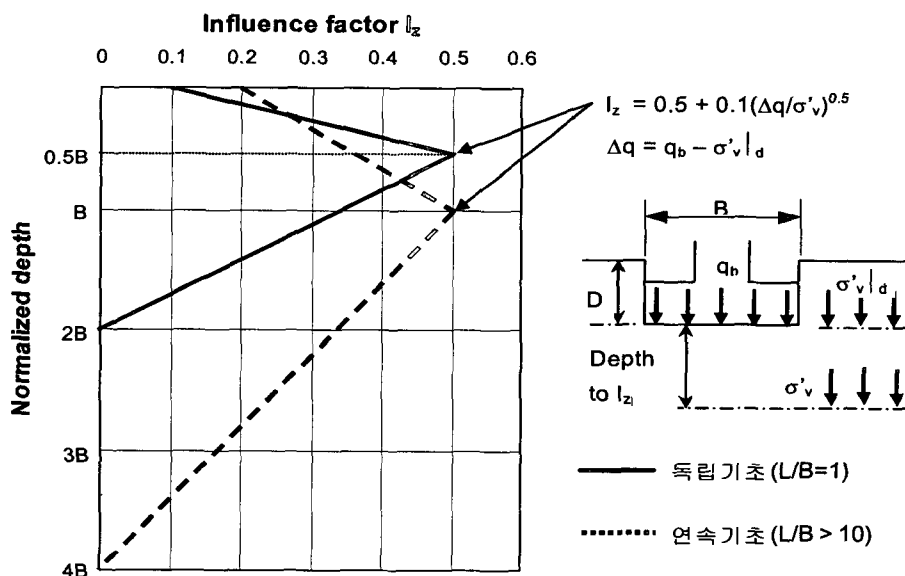


그림 1. Schmertmann 방법에서의 깊이별 영향계수

### 3. 수치해석을 통한 얇은기초 하중-침하량 분석

#### 3.1 응력-변형을 관계

유한요소해석을 통해 기초-지반의 상호거동의 분석에 있어 지반의 특성을 반영한 적절한 응력-변형을 관계의 적용은 정확한 결과를 도출하기 위한 필수조건이다. 사질토 지반의 경우 하중의 초기단계에서부터 비선형 거동을 보이고 있으며, 지반의 구속응력, 축차응력, 파괴상태의 도달 여부에 따라 지반의 강성이 크게 변화하게 된다. 이와같은 사질토 지반의 실질적인 비선형 거동을 유한요소해석에 적용되기 위해, 본 연구에서는 다음과 같은 3차원 비선형 응력-변형을 관계(Lee와 Salgado 2000)를 적용하였다.

$$\frac{G}{G_0} = \left[ 1 - f \left( \frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_{20}}}{\sqrt{J_{2max}} - \sqrt{J_{20}}} \right)^g \right] \left( \frac{I_1}{I_{10}} \right)^{n_g} \quad (12)$$

여기서,  $G$  = 할선 전단탄성계수,  $G_0$  = 초기 전단탄성계수,  $J_2, J_{20}, J_{2max}$  = 현재, 초기, 및 파괴상태에서의 축차응력텐서 이차 불변량,  $I_1, I_{10}$  = 현재 및 초기상태에서의 응력텐서의 일차 불변량,  $f, g$  = 비선형특성 정수,  $n_g$  = 지반고유변수이다. 식 (12)는 지반의 비선형 거동을 지반 조건에 따른 지반의 강도 감소특성을 통해 구현한 관계 식으로써 Hyperbolic 모델(Duncan과 Chang, 1970; Fahey와 Carter, 1993)을 기본으로 하고 있으며, 여기서  $f$ 는 Duncan과 Chang(1970)의 파괴비율  $R_f$ 와 같은 의미이며  $g$ 값은 응력조건에 따른 강도감소곡선의 형태를 결정하는 지반고유 변수이다.  $n_g$ 값은 지반의 구속응력에 따른 전단 탄성계수의 변화를 지반 강도감소 거동에 적용하여 더욱 실질적인 지반의 비선형성을 반영하도록 적용한 것이다. 또한 파괴 후의 소성거동을 나타내기 위해 다음과 같은 Drucker-Prager 파괴기준식이 사용되었다.

$$F = \sqrt{J_2} - (\alpha I_1 + k) = 0 \quad (13)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $k$ 는 각각 내부마찰각 및 점착력에 대한 파괴기준 적용 식으로써 축차응력텐서 2차 불변량과 구속응력에 해당하는 응력텐서 1차 불변량 및  $\alpha$ 와  $k$ 의 관련 식을 기준으로 지반의 파괴를 결정하게 된다. 사질토 지반의 최대 내부마찰각은 한계상태의 내부마찰각과 dilatancy 각으로 나타낼 수 있다(Bolton, 1986). 본 연구에서는 이에 근거하여 지반의 응력조건에 따라 변화하는 비선형 파괴기준을 해석에 적용하였다.

#### 3.2 얇은기초 해석과 재하시험 결과 비교

본 연구에서 사용된 수치해석 모델의 적합성을 검증하기 위하여 유한요소해석에 의한 얇은기초 침하량 해석 결과와 실제 사질토 지반을 대상으로 수행된 하중재하시험 결과를 비교 분석하였다. Texas A&M 대학에서 수행된(Briaud와 Gibbens, 1994) 4가지 크기(1.0×1.0m, 1.5×1.5m, 2.5×2.5m, 3.0×3.0m)의 정방형 얇은기초를 대상으로 유한요소해석 모델링을 하였으며, 각각의 기초에 대해 하중-침하곡선의 변화를 비교하였다. 하중재하시험이 이루어진 지반은 깊이 12-14m까지는 사질토, 깊이 33m까지는 매우 단단한 점토질 지반으로 구성되어 있으며, 현장시험에 의해 산출된 지반물성치를 유한요소해석에 적용하여 지반의 거동을 해석에 직접 반영하도록 하였다.

유한요소모델의 하부경계는 깊이 17m, 횡방향의 경계는 15m로 설정하여 경계조건의 영향이 얇은기초의 거동에 영향을 미치지 않도록 하였다. 지반 및 기초의 모델링은 20개의 절점으로 구성된 3차원 연속체 요소로 구성하였으며, 재하시험에서 기초가 약 0.76m 정도 근입된 상태였으므로 이를 모델링하여 해석에 적용하였다. 얇은기초의 해석에 적용된 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS로써 앞서 기술된 3차원 비선형 응력-변형률 모델을 통해 지반의 비선형 거동을 해석에 적용하였다. 지반위에 놓인 얇은기초 해당하는 요소망은 지반의 탄성계수에 비해 매우 큰 값을 갖는 탄성체로 모델링하

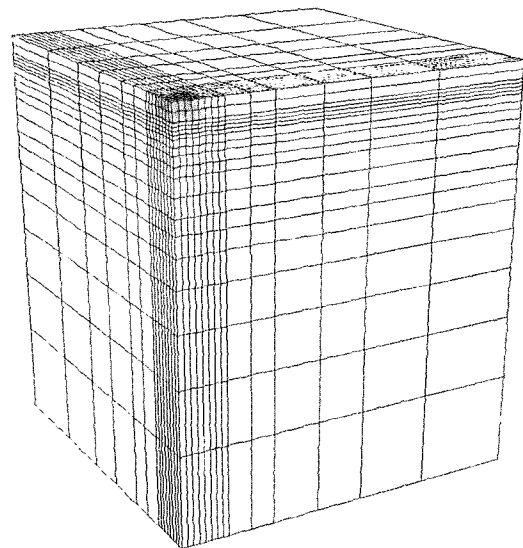


그림 2. 현장재하시험에 대한 유한요소모델

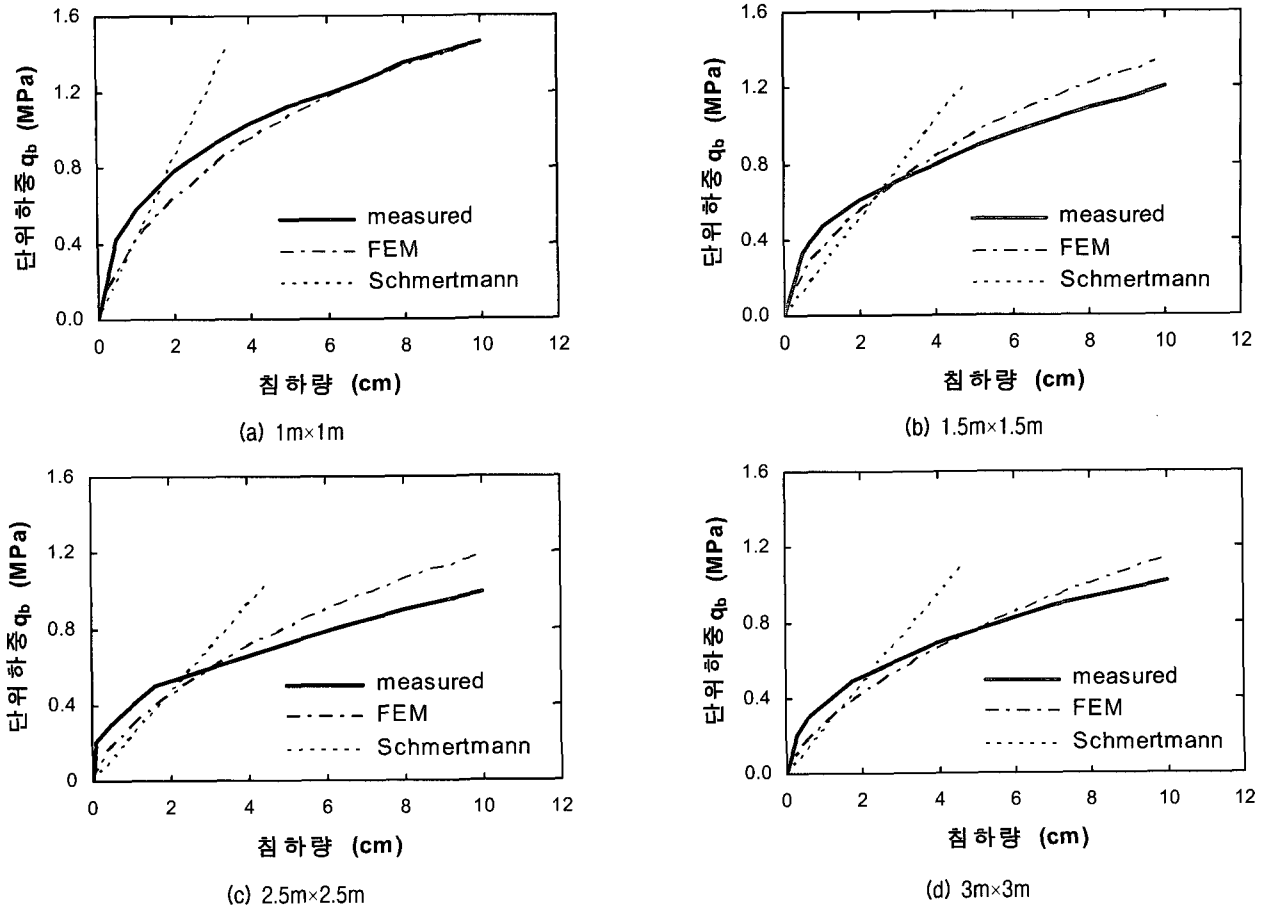


그림 3. 현장재하시험과 비선형 유한요소해석에 의한 하중-침하량 비교

여 콘크리트의 거동을 반영하였다. 그림 2는 해석에 사용된 유한요소모델중 1m x 1m인 경우를 나타내고 있다.

그림 3은 유한요소해석에 의한 얇은기초 하중-침하 해석, 실제 재하시험에 의한 결과 및 Schmertmann(1978)의 침하량 산정법에 의한 예측 결과를 비교하여 나타내고 있다. 그림 3에서 보는바와 같이 재하시험에서 얻어진 하중-침하량의 곡선과 비선형 유한요소해석에 의한 해석 결과가 다양한 기초크기에서 매우 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. Schmertmann(1978)의 침하량 산정법에 의한 예측 결과는 앞서 언급한대로 침하량 2cm부근에서는 실측치와 근접한 결과를 나타내고 있으며, 이외의 부분에서는 과다 또는 과소 추정된 결과를 보여주고 있다.

#### 4. 얇은 기초의 하중-침하량 관계

##### 4.1 지반조건에 따른 하중-침하량 곡선

사질토 지반의 경우 지반의 역학적 거동을 좌우하는 가장 중요한 요소는 지반의 상대밀도이다. 기존의 현장시험을 이용한 대부분의 얇은기초 침하량 산정법들은 침하량 산정에 있어 상대밀도를 고려하지 않고 있다. 이는 지반의 상대밀도가 직접적으로 표준관입시험의 N치나 콘관입시험의 콘저항치  $q_c$ 에 직접적으로 영향을 미치며, 각각 지반 깊이에서의 구속응력에 의해 정량화된 현장시험 결과 값이 지반의 상대밀도를 그대로 반영하는 것으로 인식 되어져 왔기 때문이다. 그러나 실제 지반시험 및 CPT결과에 의하면 상대밀도에 따라 콘저항치  $q_c$

표 1. 해석에 사용된 모래의 기본물성치

| $D_{10}$<br>(mm) | $D_{50}$<br>(mm) | $G_s$ | $C_u$ | $\phi_c$ | $e_{max}$ | $e_{min}$ | $\gamma_{max}$<br>( $kN/m^3$ ) | $\gamma_{min}$<br>( $kN/m^3$ ) | $n_g$ |
|------------------|------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|-------|
| 0.36             | 0.54             | 2.623 | 1.5   | 34.8°    | 0.922     | 0.573     | 16.68                          | 13.65                          | 0.44  |

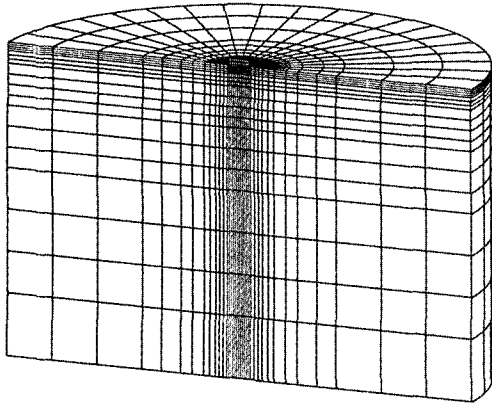
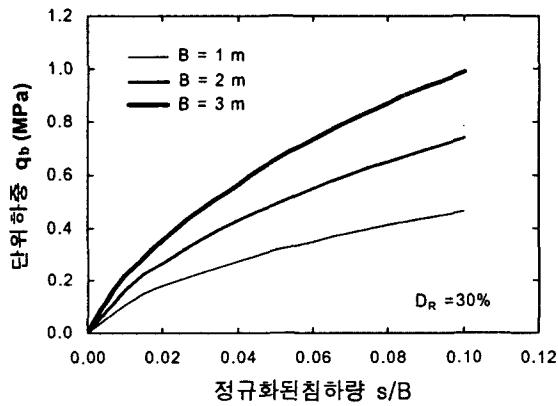


그림 4. 얇은 기초의 유한요소모델

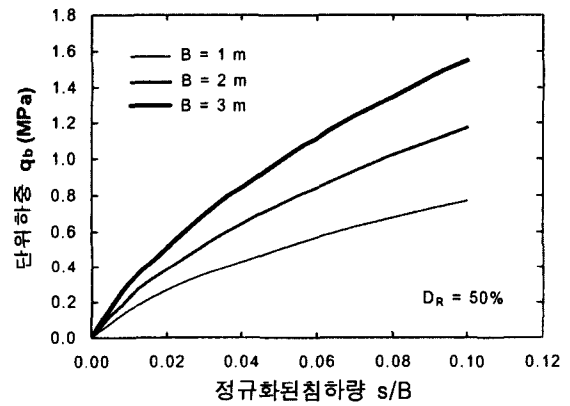
와 지반강성의 비율 또한 변화하는 것으로 나타났으며 (Berardi 등, 1991; Lee와 Salgado, 2000), 이는 얇은기초 침하량 산정에 있어 기초의 크기, 지반의 비선형 거동과 함께 지반의 상대밀도 또한 중요한 영향인자로 고려되어야함을 나타내는 결과라 할 수 있다. 본 연구에서도 이러한 요소를 고려하여 유한요소해석을 수행하였다. 다양한 지반조건에서 얇은 기초의 하중-침하량 곡선

을 도출하기 위해, 앞서 기술된 유한요소해석이 사용되었으며, 직경 1, 2, 3m의 원형기초가 균질한 사질토 지반위에 놓인 것으로 모델링 하였다. 해석에 사용된 지반은 정규압밀상태의 사질토 지반으로 가정하였으며 기본 특성은 표 1과 같다. 지반의 상대밀도는 각각의 기초크기에 대해 30, 50, 70, 90%로 가정하였다. 유한요소모델의 경계 설정은 측면의 경우 기초 선단 중심에서 수평방향으로 12m, 하단의 경우 기초 선단 중심에서 수직으로 15m 지점으로 설정하였으며, 기초저면과 지반은 경계면 요소를 사용하여 상호작용 효과를 고려하였다. 그림 4는 기초 직경 1m에 대한 유한요소모델을 나타내고 있다.

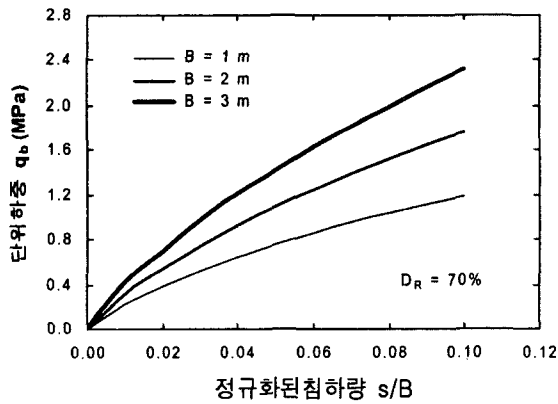
그림 5는 비선형 유한요소해석을 통해 도출된 얇은 기초의 하중-침하량 곡선을 나타내며, 상대밀도 및 기초 직경의 함수로서 도시되었다. 그림에서 침하량값은 기초 직경 B에 의해 정규화된 침하량( $s/B$ )으로서 나타내었다. 그림 5와 같이 기초 직경에 의해 정규화된 침하량이 사용되었음에도 단위하중은 모든 상대밀도에서 기초 크기가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 상대밀도 30%인 경우, 직경 3m의 기초가 직경 1m의 기초보다 약



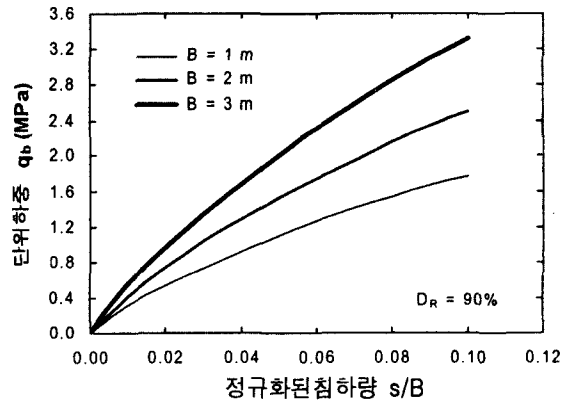
(a)  $D_R = 30\%$



(b)  $D_R = 50\%$



(c)  $D_R = 70\%$



(d)  $D_R = 90\%$

그림 5. 지반조건별 하중-침하량 곡선

2배 가량 큰 단위하중 값을 보였으며, 다른 상대밀도에 서도 비슷한 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 지반의 강성은 깊이에 따라 증가하는 구속압의 함수로 표현되며, 기초의 크기가 증가할수록 영향범위내의 지반강성 또한 증가하기 때문으로 판단된다.

#### 4.2 허용침하량 기준의 기초지지력

일반적으로 통용되는 얇은 기초의 허용 침하량은 25mm(≈ 1 in)이다. 그림 6(a)는 유한요소해석결과로부터 얻어진 침하량 25mm에서의 단위하중을 나타내고 있으며, 기초크기 및 상대밀도에 따른 변화량을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이, 기초크기가 감소할수록 단위하중은 증가하였으며, 이는 정규화된 침하량( $s/B$ )이 아닌 절대 침하량의 값이 적용되었기 때문이다. 또한 기초크기의 영향은 상대밀도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있으며,  $D_R = 90\%$ 에서 1, 2, 3m 기초에 대한 침하량 25mm에서의 단위하중은 각각 0.628, 0.493, 0.456MPa로 나타난 반면,  $D_R = 30\%$ 의 경우에는 기초크기의 영향이 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다. 이러한 결과는 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 Terzaghi와 Peck(1967)이 제안한 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 6(b)는 Terzaghi와 Peck(1967)가 현장실험결과를 토대로 제안한 것으로 기초 크기와 표준관입시험의 N 치에 따른 허용지지력을 나타내고 있다.

#### 5. 콘지지력을 이용한 얇은기초 설계

Schmertmann 방법에서 침하량 산정에 사용되는 탄성

계수는 아래와 같은 관계식에 의해 추정될 수 있다.

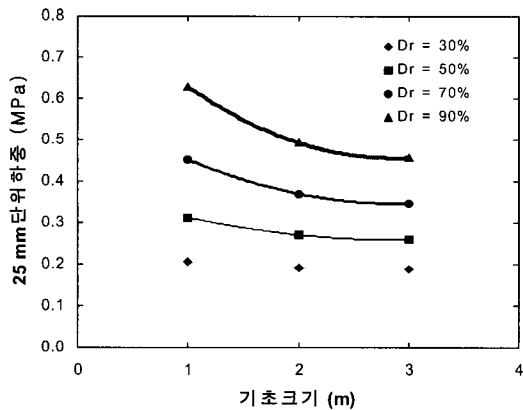
$$E_i = \delta_i \cdot q_{ci} \quad (14)$$

여기서,  $E_i$  = 임의의 층 i에서의 지반 탄성계수,  $\delta_i$  = 임의의 층 i에서 콘지지력에 대한 지반 강성비,  $q_{ci}$  = 임의의 층 i에서의 대표 콘지지력이다. 변수  $\delta_i$ 의 값은 일반적으로 식 (10)을 통해 얻어질 수 있으나, 이는 지반의 비선형성이나 상대밀도와 같은 지반특성이 반영되지 않은 매우 단순화된 결과이다. 동일한 기초크기와 지반조건 하에서도, 허용 침하량은 달라질 수 있으며 이에 따른 지반강성의 감쇠 정도 또한 변화하여 결과적으로 상이한  $\delta_i$ 값을 적용해야 한다. 또한 동일한 허용 침하량 기준이라도 지반강성의 감쇠 정도는 기초크기 및 상대밀도에 따라 달라지게 되며, 이에 따른  $\delta_i$ 값의 변화를 고려해야 한다.

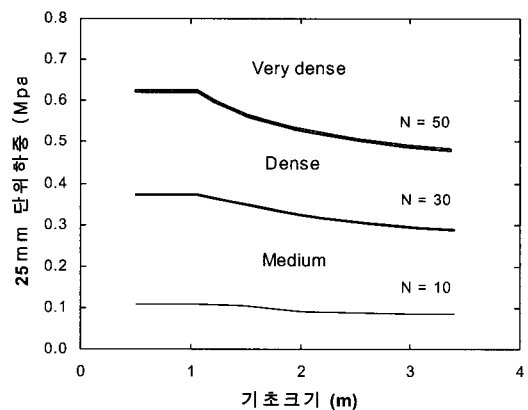
#### 5.1 정사각형 얇은기초 설계

그림 7은 동일한 조건하에 비선형 유한요소해석과 Schmertmann 방법으로 부터 얻어진 하중-침하량곡선을 나타내며, 상대밀도가 30%, 90%인 사질토 지반에서의 직경 1m, 3m 의 원형기초에 대한 결과이다. Schmertmann 방법을 위한 콘지지력  $q_c$ 의 산정은 CPT 해석프로그램인 CONPOINT(Salgado와 Randolph, 2001)를 사용하였으며, 식 (10) 중 정규압밀 사질토의 경우에 해당하는  $\delta = 2.5$ 를 이용하여 지반탄성계수를 산정하였다.

그림 7에서 볼 수 있듯이, 각각의 경우에 있어 동일한 침하량을 기준으로, 비선형 유한요소해석에 의한 단위하중 값이 Schmertmann 방법으로 얻은 값보다 작게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 상대밀도가 증가함에

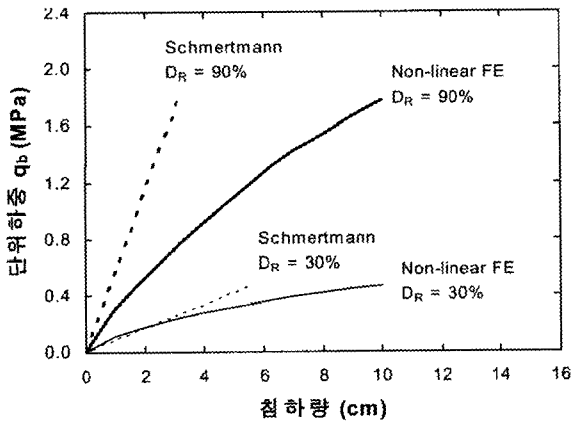


(a) 유한요소해석

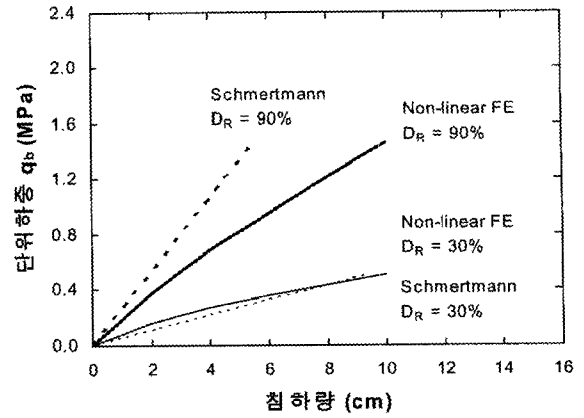


(b) Terzaghi and Peck(1967)

그림 6. 침하량 25 mm에서의 단위하중



(a) 직경 1m



(b) 직경 3m

그림 7. 상대밀도 30%와 90%일 경우의 하중-침하량 곡선

따라 더욱 두드러지게 나타났으며, 실제로 상대밀도  $D_R = 30\%$ 인 경우 하중-침하량 곡선은 비교적 근사하게 나타나고 있으나, 상대밀도  $D_R = 90\%$ 인 경우 상당한 차이를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 결과를 반영하여 앞서 검증된 유한요소모델 해석결과를 토대로 지반 및 기초조건이 고려된 콘지지력에 대한 지반강성비  $\delta$  값을 제안하고자 한다.

그림 8은 유한요소해석결과와 Schmertmann 방법의 비교분석을 통해 도출된  $\delta$  값을 나타내며, 침하 25는 얇은 기초에서 일반적으로 사용되는 허용침하량 25mm를 기준으로 한 값을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이, 기초의 크기와 상대밀도에 따라  $\delta_{25}$  값이 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 기초의 크기가 증가할수록  $\delta_{25}$  값 또한 증가하였다. 상대밀도의 영향은 기초 크기에 의한 영향보다 더욱 크게 나타났으며, 상대밀도가 증가할수록  $\delta_{25}$  값은 감소하였다. 또한 느슨한 지반( $D_R = 30\%$ )에서는  $\delta_{25}$  값이 정규압밀 조건 하에 일반적으로 사용되는

2.5 보다 크게 나타났다. 상대밀도가 증가할수록  $\delta_{25}$ 는 상당히 감소하는 경향을 보였고,  $D_R = 90\%$ 일 경우에는 1.1-1.7의 값을 보였다.  $\delta_{25} = 2.5$ 는 일반적으로 평균값 상태로 간주될 수 있는 상대밀도  $D_R = 50\%$ , 기초 직경 2-3m 범위에 해당하는 결과를 나타내고 있다.

그림 8에 나타난  $\delta_{25}$  값은 침하량 25mm에 대해서만 해당하는 결과이므로, 보다 다양한 허용 침하량 기준을 대상으로  $\delta$  값을 도출하였다. 그림 9은 기초 및 지반조건에 따른  $\delta_{25}$  값에 의해 정규화된  $\delta$  값을 침하량 2~10cm의 범위에 대해 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 정규화된 값( $\delta/\delta_{25}$ )을 사용하였기 때문에, 각각의 침하량에 대해서 모든 값은 일정한 범위 내에 존재하고 있으며, 침하량의 증가에 따라  $\delta/\delta_{25}$  값의 범위 또한 증가함을 알 수 있다. 이는 상대밀도에 따른 지반강성의 감쇠율이 동일 침하량이라 할지라도 다르기 때문이다. 그림 9에 나타난 결과는 주어진 침하량 기준에 대해 임의의 층에서의 적정  $\delta$  값을 결정하기 위해 적용될 수

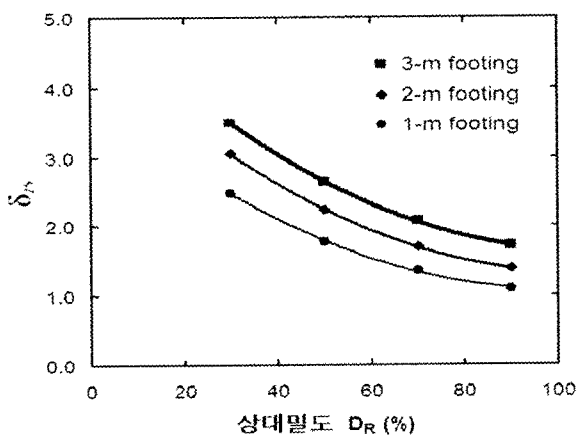


그림 8. 상대밀도에 따른  $\delta_{25}$  값

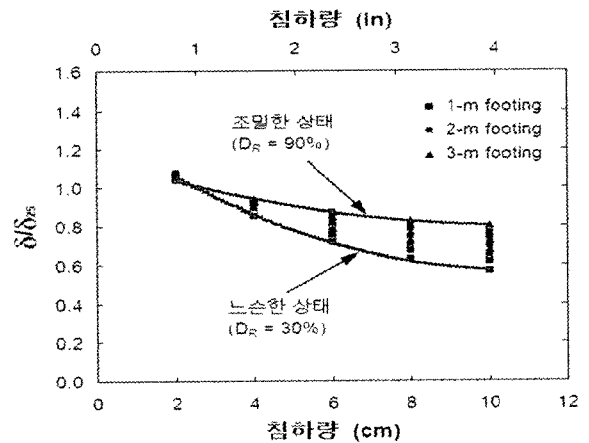


그림 9. 침하량에 따른  $\delta/\delta_{25}$  값



있다. 다음은 얇은기초의 해석을 통해 제안된 정사각형 얇은기초의 설계과정으로써 각각의 허용침하량, 기초의 폭, 지반의 상대밀도 등을 설계에 반영할 수 있으며, 얇은기초의 설계하중에 따른 침하량 및 허용침하량 기준의 설계하중을 산정할 수 있다.

- (a) 구조물의 규모, 중요도, 위치 등을 고려한 허용 침하량의 결정
- (b) 기초지반의 영향구역을 분할하고, 분할된 각 층의 대표 콘지력  $q_{ci}$  결정
- (c) 분할된 각 층에서의 평균 상대 밀도  $D_R$  추정
- (d) 그림 8과 9를 이용하여 각 층에 대해 주어진 허용 침하량에서의  $\delta_i$  값 결정
- (e) 도출된  $\delta$ 값을 이용하여 식 (14)을 통해 각 층의 대표 탄성계수  $E_i$  결정
- (f) 식 (7)을 이용하여 기초의 허용 침하량에 상응하는 허용설계 하중 계산

## 5.2 연속기초 설계

앞서 언급된 결과들은 독립 확대기초(spread footing)에 대한 내용이다. 얇은 기초의 형식 중, 연속기초(strip footing) 또한 중요한 형식에 포함되므로, 본 연구에서는 연속기초에 대한 강성비  $\delta$ 를 동일한 기초 및 지반조건에 따라 도출하였다. 이를 위해 연속기초의 응력 상태에 상응하는 평면변형을 조건 하에서 유한요소해석을 수행하였으며, Schmertmann 방법의 적용 시 기초 지면으로부터의 영향구역 역시 기초 폭의 4배에 해당하는 깊이로 설정하였다. 독립기초의 경우와 마찬가지로 지반조건은 상대밀도의 변화를 통해 고려되었으며, 기초폭은 각각 1, 2, 3m로 하였다. 연속기초의 침하량 산정 및 설계하중의 산정법은 5.1의 정사각형 얇은기초 설계과정과 동일하다.

그림 10는 연속기초에 대한  $\delta_{25}$ 의 값을 나타내고 있다. 상대밀도가 30%에서 90%까지 증가함에 따라 1m, 3m 기초의  $\delta_{25}$ 값은 각각 2.4에서 1로, 3.4에서 1.6으로 변화하였다.  $D_R = 90\%$ 에서 연속기초의  $\delta_{25}$ 값은 독립기초에서의 결과와 매우 유사한 값을 보이고 있다. 이는 연속기초의 높은 구속력으로 인해 기초지반의 강성이 증가되는 경향을 보이고 있으나, 침하량 산정시 적용되는 영향깊이 증가에 의해 보완되었기 때문이다. 그림 11은 연속기초에서의 정규화된 강성비인  $\delta/\delta_{25}$  값을 나타내고 있다.

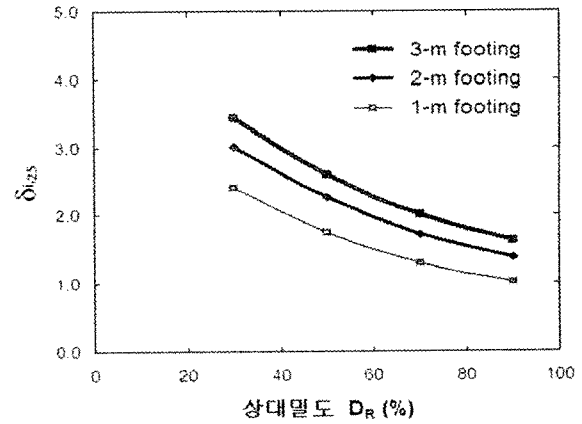


그림 10. 연속기초에 대한  $\delta_{25}$  값

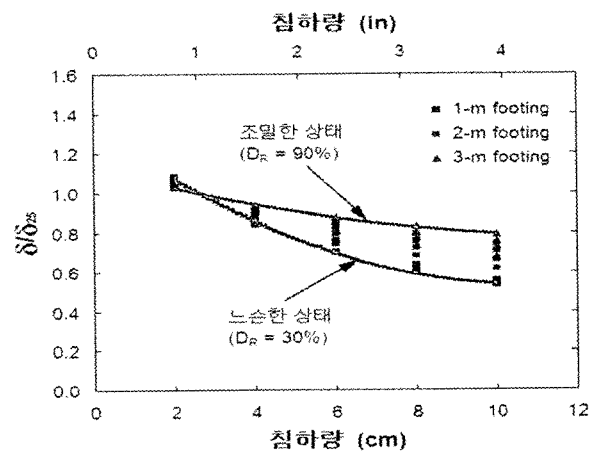


그림 11. 연속기초에 대한  $\delta/\delta_{25}$  값

그림 9에 나타나 있는 독립기초의 경우와 비교해서 유사한 결과를 보임을 알 수 있으며, 이는 연속기초 침하량 산정 시 적용되는 영향깊이 증가(4B)를 통해 구속응력 증가에 의한 지반의 강성변화를 상쇄하였기 때문이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 얇은기초 해석을 통해 지반의 상대밀도, 기초의 크기, 허용침하량에 따른 얇은기초 설계법을 제안하였다. 각각의 얇은기초 해석에 있어 지반의 상대밀도, 기초의 크기에 따른 지반거동의 변화를 분석하였으며, 3차원 비선형 응력-변형률 모델을 적용하여 사질토 지반의 비선형 거동을 반영할 수 있도록 하였다. 수행된 얇은기초 해석의 타당성을 검토하기 위해 실제 사질토 지반에서 수행된 재하시험 결과와 비교하였으며, 3차원 비선형 응력-변형률 모델을 통해 다양한 크기의 얇은기초 비선형 하중-침하 거동을 매우 잘 반영함을 확인할 수 있었다. 얇은기초의 하중-침하량 분석은 정규일

밀로 가정된 상대밀도 30, 50, 70, 90%의 지반을 대상으로 하였으며, 각각의 경우에 있어 기초의 크기를 1, 2, 3m 로 변화하며 지반의 거동변화를 분석하였다. 해석결과를 토대로 일반적으로 통용되는 얇은기초 구조물의 허용침하량 25mm 기준에서의 상대밀도, 기초의 크기에 따른 단위하중을 산정하였으며, Terzaghi 와 Peck(1967) 이 제안한 단위하중과 매우 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다.

얇은기초 침하량 산정과정에 있어서 기초저면 지반의 강성을 예측하는 것은 전체 침하량을 좌우하는 매우 중요한 단계이다. 본 연구에서 제안된 침하량 산정법은 Schmertmann방법을 토대로 하고 있으며, CPT 콘지력  $q_c$ 를 이용하여 지반의 탄성계수를 산정함에 있어 지반조건, 기초의 크기, 허용침하량에 따른 지반의 비선형 거동을 반영한 수정강성비 제안을 통해 새로운 침하량 산정법을 제안하였다. 제안된 수정 강성비  $\delta$ 값은 기초가 커질수록 증가하였으며, 상대밀도가 증가할수록 감소되는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 해석 결과에 근거하여 얇은기초 설계 시 얇은기초 설계하중에서의 침하량 산정법 및 구조물 허용침하량 기준에서의 허용 지지력의 산정 절차를 제안하였다.

## 참 고 문 헌

- Berardi, R., Jamiolkowski, M., and Lancellotta, R. (1991), "Settlement of Shallow Foundations in Sands Selection of Stiffness on the Basis of Penetration Resistance", *Proceedings of the Congress Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the ASCE*, Vol.1, Geotechnical Special Publication 27, pp.185-200.
- Bolton, M. D. (1986), "The Strength and Dilatancy of Sands", *Geotechnique*, Vol.36, No.1, pp.65-78.
- Briaud, J. L. and Gibbens, R. (1994), "Test and Prediction Results for Five Large Spread Footings on Sand", *Proceedings of a Prediction Symposium Sponsored by the Federal Highway Administration at the Occasion of the Settlement 94 ASCE Conference at Texas A&M University*, ASCE, Geotechnical Special Publication, No.41, pp.92-128.
- Burland, J. and Burbidge, M. (1985), "Settlement of Foundations on Sand and Gravel", *Proceedings of Institute of Civil Engineers*, Part I, Vol.78, London, pp.1325-1381.
- Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970), "Nonlinear Analysis of Stress-Strain in Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.96, No.5, pp.1629-1653.
- Lee, J. H. and Salgado, R. (2000), "Analysis of Calibration Chamber Plate Load Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, No.1, pp.14-25.
- Meyerhof, G. (1965), "Shallow Foundations", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.91, No2, pp.21-31.
- Peck, R. and Bazzara, A. (1969), "Discussion of Settlement of Spread Footings on sands, by DAppolonia and Brisette", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.95, No.3, pp.905-909.
- Robertson, P. K. and Campanella, R. G. (1989), *Guidelines for Geotechnical Design Using the Cone Penetrometer Test and CPT with Pore Pressure Measurement*, 4th ed. Hogentogler & Co., Columbia, MD.
- Salgado, R. and Randolph, M. (2001), "Analysis of Cavity Expansion in Sand", *International Journal of Geomechanics*, Vol.1, No2, pp.175-192.
- Schmertmann, J. H. (1970), "Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.96, No.3, pp.1011-1042.
- Schmertmann, J. H., Hartman, J. P., and Brown, P. R. (1978), "Improved Strain Influence Factor Diagrams", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.104, No8, pp. 1131-1135.
- Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd Edition, John Wiley and Sons Inc, New York, N.Y.

(접수일자 2004. 2. 4, 심사완료일 2004. 9. 15)