

수정변형률 영향계수에 근거한 직사각형 및 복합 얽은기초 침하량 산정법 Improved Strain Influence Diagram and Settlement Estimation for Rectangular and Multiple Footings in Sand

박동규¹⁾, Park, Dong-Gyu, 이준환²⁾, Jun-Hwan Lee

¹⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Ph. D. student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

²⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

SYNOPSIS : Most existing methods for the footing settlement estimation are for either isolated or strip footings. No sufficient details are available for settlement calculation of footings with different shapes and multiple footing conditions, which are commonly adopted in actual construction projects. In this paper, estimation of footing settlements for various footing conditions of different shapes and multiple conditions is investigated based on Schmertmann's method with focus on values of the strain influence factor I_z . In order to examine the effect of multiple footing conditions, field plate load tests are performed in sands using single and double plates. 3D non-linear finite element analyses are also performed for various footing conditions with different footing shape and distance ratios. Results obtained in this study indicate that there are two significant components in the strain influence diagram that need to be taken into account for settlement estimation of rectangular and multiple footings: depth of I_{zp} and depth of strain influence zone. Based on results from experimental and 3D non-linear finite element analyses, improved strain influence diagrams available for various footing conditions are proposed.

Keyword : Multiple footing, Schmertmann's method, settlement, strain influence factors, 3D non-linear finite element analyse

1. 서 론

얽은기초는 지표면 근처의 지반상태가 양호하여 충분한 지지력을 확보할 수 있는 경우 기초하중을 직접 지반에 전파하는 가장 대표적인 기초형식이다. 얽은기초의 설계에 있어 구조물의 안정성 확보를 위한 지지력 추정과 설계하중에 의한 침하량 산정은 가장 중요한 고려사항이다. 사질토 지반에 놓인 얽은기초 침하량 산정은 대부분 정방형 및 연속기초의 형식을 대상으로 하고 있다. 그러나 실제 구조물 설계에 있어 적용되는 얽은기초의 형상은 매우 다양하며, 다수의 얽은기초가 복합적으로 건설되는 경우가 일반적이다. 이 경우 단독 기초와는 상이한 거동을 보일 것이며, 대부분의 얽은기초 침하량 산정법들은 이와 같은 영향을 직접적으로 고려하고 있지 않다. 본 연구에서는 다양한 얽은기초 조건을 고려하기 위해 Schmertmann의 산정법에 근거한 수정 변형률 영향계수 I_z 를 제안하였다. 이를 위해 균질한 지반에서 단독, 복합 얽은기초 조건의 평판재하 시험을 수행하였으며, 3-D 비선형 유한요소해석을 통해 기초의 형상 및 복합조건에서의 인접기초의 갯수, 거리에 따른 영향을 분석하였다. 각각의 기초 조건에서 얽은기초 침하량 산정 시 적용되는 최대변형률 영향계수 I_{zp} 깊이 및 I_z 의 영향깊이 두 가지 요소가 고려되어야 함을 확인하였으며, 이를 정량화하여 다양한 기초조건에서의 수정 변형률 영향계수를 제안하였다.

2. 사질토 지반에서 얇은 기초의 침하량 추정

표준관입시험(SPT)이나 콘관입시험(CPT) 등의 현장시험 결과를 이용한 얇은기초 침하량 산정법에 대해 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔으며 다양한 방법들이 제안되어 왔다. Schmertmann 방법은 (Schmertmann 1970, Schmertmann 등. 1978) 콘관입시험(CPT) 결과를 이용한 가장 대표적인 방법으로 하부 기초지반을 여러 개의 층으로 분할한 후, 각 층에서 산출된 콘지지력(q_c)을 바탕으로 흙의 강성을 결정한다. 침하량 산정에 적용되는 수직변형률 영향계수를 나타낸 것으로 정사각형 기초와 연속기초의 경우 각각의 영향깊이는 기초하부로부터 각각 2B, 4B까지 이다. Schmertmann이 제안한 수직변형률 영향계수는 실험에 의해 측정된 수직변형률을 정량화하여 제안된 값으로 침하량 산정 시 실제 지반에서 발생 될 지반변형을 직접 고려하는 장점을 갖고 있다. Schmertmann 방법(Schmertmann 1970, Schmertmann 등. 1978)에 의한 얇은기초 침하량 산정식은 다음과 같다.

$$s = C_1 \cdot C_2 \cdot (q_b - \sigma'_{vd}) \cdot \Sigma \left(\frac{I_z \cdot \Delta z_i}{E_i} \right) \quad (1)$$

여기서, s = 기초 침하량, C_1 = 깊이계수, C_2 = 시간계수, q_b = 기초저면에서의 단위하중, I_z = 깊이 영향계수, σ'_{vd} = 기초저면에서의 유효수직응력, Δz_i = 각 지층의 두께, E_i = 각 층의 탄성계수 이다.

3. 복합조건에서의 얇은기초 하중-침하량 분석

다수의 얇은기초 사이의 상호작용을 분석하기 위해 이를 “복합조건”으로 분류하여 이에 따른 침하량의 변화 추이 및 영향을 분석하였다. 복합조건에서 실제 얇은기초의 거동을 분석하기 위해 일련의 평판재하 시험을 수행하였다. 시험은 부산 신항만 건설공사 현장의 균질한 사질토 지반을 대상으로 실시되었다. 시험 현장의 지반은 15m 두께의 모래질 상부지반과 15m - 45m에 이르는 점토층으로 이루어져 있다. 상부의 모래질 지반은 균질한 규산질 모래로, 상부 모래층의 단위중량은 상대밀도 약 50%에 해당하는 14.41 kN/m³이다. 단독기초의 거동과 복합조건에서의 거동을 비교하기 위해 30cm 평판을 사용한 단독 평판재하시험과 두개의 30cm 평판에 동시에 하중을 재하 하는 방법으로 구분하여 시험이 수행되었다. 두개의 평판을 사용한 복합조건의 재하시험은 평판 사이의 거리를 평판의 지름 B를 기준으로 0.5B, 1.0B, 2.0B에 해당하는 15, 30, 60cm로 변화하며 시험을 수행하였다.



그림 1. 평판재하시험 전경

그림 2는 재하시험의 하중-침하량 곡선을 나타내고 있다. 단독 평판시험에 대한 하중-침하량 곡선의 경우, 그림 2(a)과 같이 평판재하하중이 약 245kPa에 도달하였을 때 지반 균열과 함께 많은 침하가 발생하였다. 그림 2(b), (c), (d)은 복합조건에서의 재하시험 결과로 양쪽의 평판에서 유사한 침하량이 발생하였다. 평판의 극한지지력 q_{bL} 은 단독 평판재하시험 및 평판사이의 거리 15, 30, 60cm에 따라 각각 256, 184, 203, 249kPa로 추정되었으며, 상대침하량 $s/B = 5\%$ 에서 측정된 평판의 지지력 $q_{b,5\%}$ 는 각각 185, 138, 157, 183kPa로 나타났다. 평판사이의 거리가 60cm(2B)의 경우 $q_{b,5\%}$, q_{bL} 은 각각 183, 249로써 단독 평판재하 시험결과 185, 256와 매우 유사한 값을 나타내고 있다. 이와 같은 결과를 토대로 복합조건에서의 경우 인접기초 사이의 상호작용이 침하량 발생에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있었으며, 이러한 영향은 인접기초 사이의 거리에 따라 달라짐을 확인하였다.

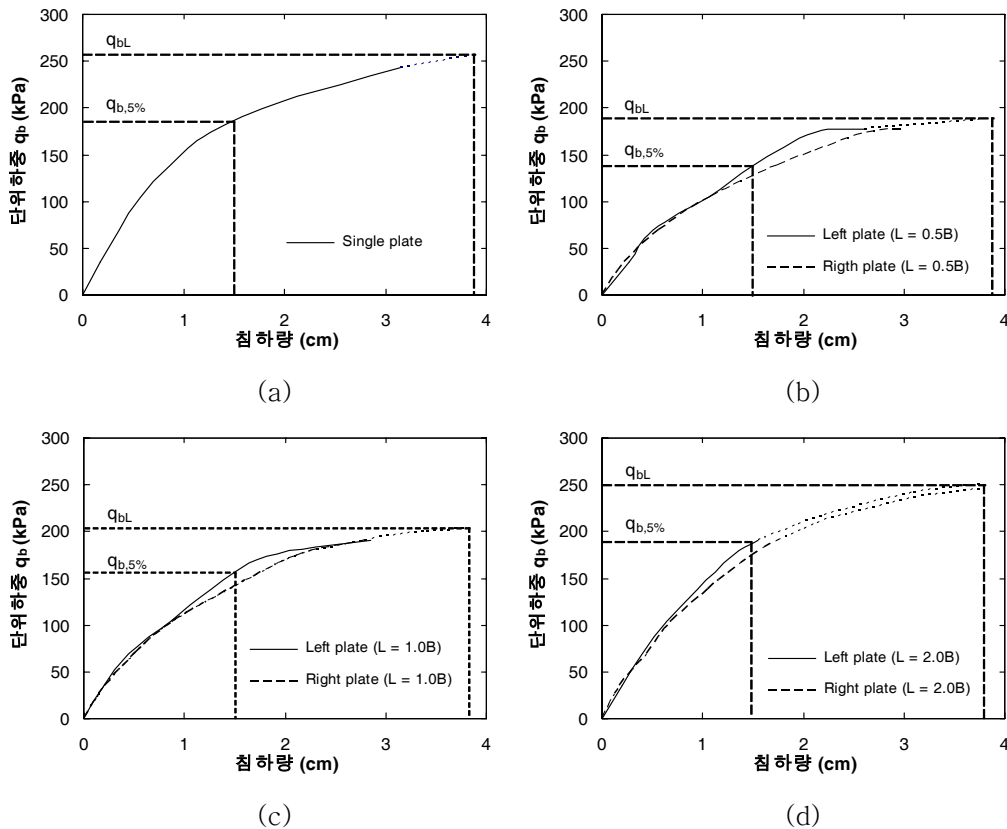


그림 2. 평판재하시험 결과: 하중-침하곡선 (a) 단독 평판재하시험 (b) 복합조건에서의 평판재하시험 (평판사이의 거리 15cm) (c) 복합조건에서의 평판재하시험 (30cm) (d) 복합조건에서의 평판재하시험 (60cm)

4. 수치해석을 통한 얽은기초 하중-침하량 분석

4.1 응력-변형률 관계

사질토 지반의 경우 하중의 초기단계에서부터 비선형 거동을 보이고 있으며 지반의 응력, 변형률 조건에 따라 지반의 강성 또한 변화한다. 이러한 지반의 비선형성을 고려하기 위해 다양한 지반 모델이 제안되어 왔으며, Hyperbolic 모델은 가장 널리 적용되고 있는 비선형 모델중 하나이다(Kondner 1963, Duncan과 Chang, Fahey와 Carter, 1993). Hyperbolic 모델은 지반 물성치를 근거로 실제 지반의 응력-변형률의 관계를 반영할 수 있는 장점으로 지반의 비선형 문제에 있어 비교적 폭 넓게 적용되어 왔다. Lee 와 Salgado(1999a, b, 2000)는 응력 변형률 곡선의 Hyperbolic 함수를 토대로 다음과 같은 3차원 비선형 응력-변형률 관계를 제안하였다.

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

여기서, G = 활선 전단탄성계수, G_0 = 초기 전단탄성계수, J_2, J_{20}, J_{2max} = 현재, 초기, 및 파괴상태에서의 축차 응력텐서 이차 불변량, I_1, I_{10} = 현재 및 초기상태에서의 응력텐서의 일차 불변량, f, g = 비선형특성 정수, n_g = 지반고유변수이다. 식(2)는 초기의 최대전단계수 G_0 값으로부터 지반의 전단응력항 ($\sqrt{J_2}$)과 구속응력(I_1)의 관계에 따른 지반의 비선형 거동을 고려한 식으로써, f 와 g 값에 의해 전단계수(G)값의 감소 정도를 결정하게 된다. 지반 파괴후의 소성거동을 반영하기 위해 Drucker-Prager 파괴기준식을 해석에 적용하였으며 Bolton (1986)과 Salgado 등. (2000)의 연구에 근거하여 비선형 파괴기준을 적용하였다.

4.2 3D 유한요소해석에 의한 직사각형 및 복합조건 얽은기초 해석

본 연구에서는 다양한 조건에서의 얽은기초 거동을 분석하기 위해 앞서 전술한 3차원 비선형 응력-변형률 모델을 적용한 3D 유한요소해석을 수행하였다. 기초 조건에 따라 다양한 형상의 직사각형 얽은기초 및 복합조건 얽은기초 등의 두 가지 범주로 분류하여 영향을 분석하였다. 그림 3는 해석에 적용된 기초 조건들을 도시한 것이다. 그림 3(a)는 형상(L/B)에 따른 직사각형 얽은기초의 기초조건으로, 직사각형 얽은기초의 형상(L/B = 1, 1.25, 1.5, 2, 3, 4)에 따른 지반거동 변화를 분석하였다. 그림 3(b), (c), (d)는 인접기초의 조건에 따른 복합조건을 도시한 것으로 인접기초의 개수, 거리에 따라 Case1, 2, 3 세 가지로 분류하였다. Case 1과 2는 각각 정사각형 얽은기초가 한 방향으로 두개, 세 개가 연속으로 놓여있는 경우이며, case 3은 다섯 개의 정사각형 기초가 교차형상으로 놓여있는 경우로 각각 경우에 있어 중앙부의 기초를 대상으로 거동을 분석하였다. 복합조건 Case1, 2, 3에서 그림 3과 같이 각각 L_1, L_1 과 L_2 의 거리에 따른 영향을 분석하였으며, 해석에 적용된 자세한 기초조건은 표 2와 같다.

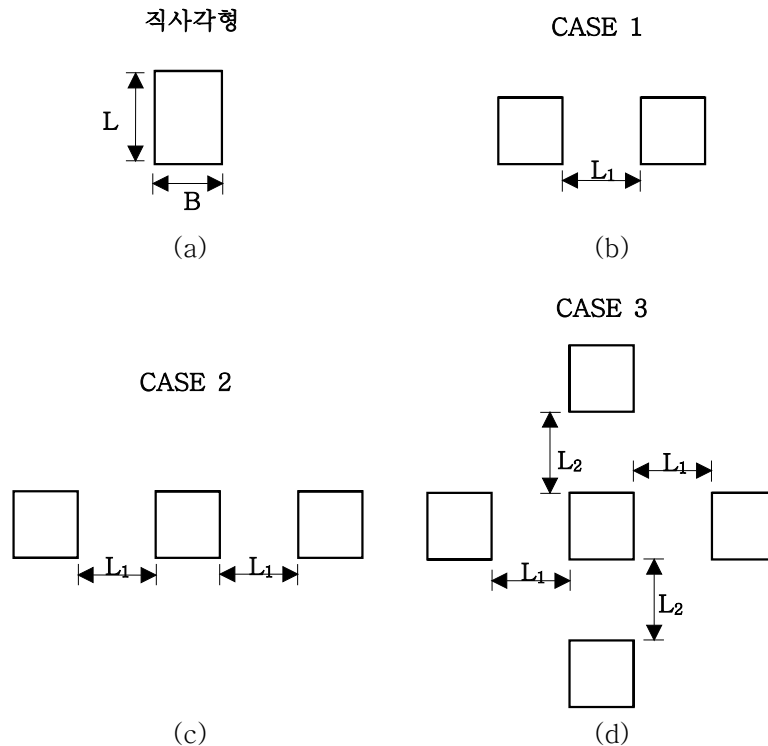


그림 3. 해석에 적용된 기초 조건 (a) 직사각형 얽은기초 (b) 복합조건 얽은기초 case 1 (c) 복합조건 얽은기초 case 2 (d) 복합조건 얽은기초 case 3

본 연구에서의 수치 모델링을 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS가 사용되었으며 앞서 기술된 비선형 모델을 해석에 적용하였다. 유한요소해석에 있어 지반은 규산질 모래의 사질토 지반으로 가정되었으며, 해석에 적용된 세부 지반조건은 표 1에 나타나 있다. 사질토 지반의 단위중량은 상대밀도 약 60%에 해당하는 15.3 kN/m^3 이며, 하중 재하전의 초기조건은 정지토압계수 $K_0 = 0.5$ 을 적용하여 자중에 의한 깊이별 구속응력 증가효과를 고려하였다. 얽은기초 해당하는 요소망은 매우 큰 값의 탄성계수를 갖는 탄성체로 모델링 하였으며,

얕은기초와 지반의 상호작용을 고려하기 위해 접촉면 요소를 적용하였으며 기초와 지반 사이의 마찰각은 35°로 가정하였다.

표 1. 해석에 사용된 모래의 기본물성치

D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	G _s	C _u	Φ _c	e _{max}	e _{min}	γ _{max} (kN/m ³)	γ _{min} (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

5. 다양한 얕은기초 조건에 따른 변형을 영향계수

5.1 직사각형 얕은기초

Schmertmann(Schmertmann 1970, Schmertmann 등. 1978) 방법에 의한 얕은기초 침하량 산정 시, 수직 하중에 의해 발생하는 침하량은 기초의 크기(B)에 따라 변화하는 변형률 영향계수 I_z에 의해 계산된다. 역학적 관점에서 변형률 영향계수 I_z는 지반의 강도와 수직하중에 의해 정량화된 수직변형률로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_z = \epsilon_z \frac{E}{P} \quad (3)$$

여기서 ϵ_z = 수직변형률, P = 수직하중, E = 기초저면지반의 탄성계수이다. 만약 지반이 일정한 강성($E = \text{const}$)을 갖는 선형탄성체일 경우 식 (3)에 의한 변형률 영향계수 I_z값은 탄성계수에 따라서는 변화하지 않으며, 유일한 I_z 값을 갖게 된다. 그러나 사질토 지반의 경우 비선형 거동에 의해 지반의 탄성계수는 변화하며 식 (3)에 의한 직접적인 변형률 영향계수 I_z값의 산정은 불가능하다. 선형 및 비선형 지반특성에 따른 얕은기초 거동을 분석하기 위해 선형탄성 및 3차원 비선형 응력-변형률 모델을 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. 선형 탄성지반의 경우 정량화된 수직변형률(ϵ_z/P)은 하중 P 와 무관하게 일정한 값을 나타내었으며, 비선형 모델을 적용한 경우 각각의 하중 P 에 대해 상이한 수직변형률(ϵ_z/P)이 산정되었다. 본 연구에서는 이러한 사질토 지반의 비선형성을 고려하기 위해 평균 탄성계수 E_{avg} 를 산정하여 식 (3)에 적용하였다. E_{avg} 산정에 적용된 지반깊이는 약 90%의 침하량이 발생하는 깊이로, 정사각형 얕은기초의 경우 약 2B에 해당한다(Schmertmann, 1970).

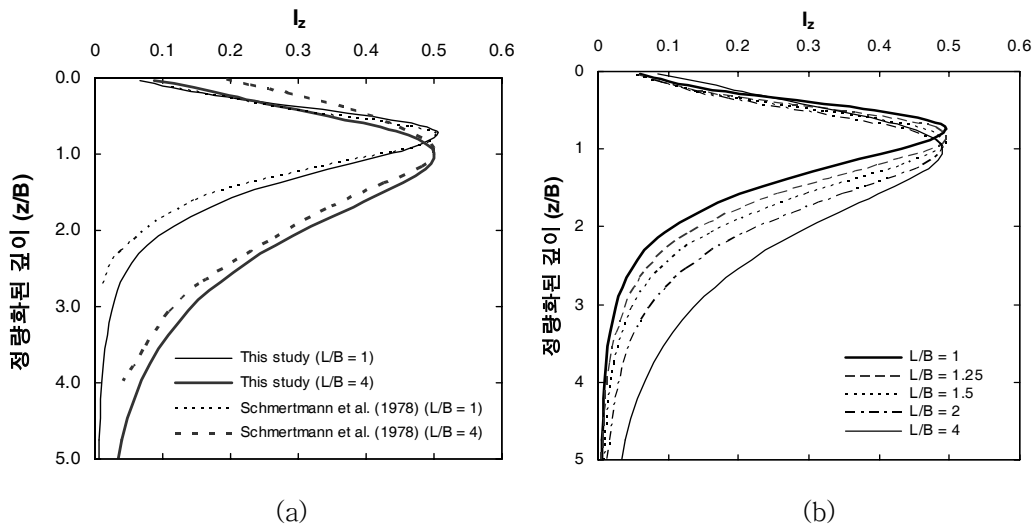


그림 4. 변형률 영향계수 I_z (a) 비선형 유한요소해석과 Schmertmann 등. (1978) (b) 다양한 직사각형 얕은기초 형상(L/B)에서 변형률 영향계수 I_z

그림 4는 E_{avg} 를 통해 산정된 변형률 영향계수 I_z 를 도시한 것이다. 그림 4(a)는 비선형 해석을 통해 산정된 변형률 영향계수 I_z 와 Schmertmann 등. (1978)의 결과를 함께 도시한 것으로 기초의 형상($L/B = 1, 4$)에 따라 매우 유사한 값이 산정되었다. 그림 4(b)는 본 연구를 통해 산정된 변형률 영향계수 I_z 를 기초의 형상(L/B)에 따라 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기초의 형상(L/B)에 따라 최대 변형률 영향계수 $I_{z,max}$ 은 0.5로 일정하였으며, 기초의 길이 대 폭(L/B) 비율 증가에 따라 깊이별 I_z 값 및 I_z 값 적용깊이는 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 해석결과는 Schmertmann 등. (1978)의 결과와 일치하는 것으로, Schmertmann 등. (1978)은 얇은기초 침하량 산정시 적용되는 변형률 영향계수 I_z 영향깊이를 정사각형, 연속기초에서 각각 2B, 4B 및 최대 변형률 영향계수 $I_{z,p}$ 를 0.5로 제안하였다.

5.2 복합 얇은기초

그림 5는 복합 얇은기초 조건 case1, 2, 3에서 인접 얇은기초의 거리에 따른 깊이별 변형률 영향계수 I_z 를 나타내고 있다. 해석결과를 통해 복합조건 얇은기초에서 $I_{z,p}$ 값 및 $I_{z,p}$ 깊이는 일정하며, 인접기초의 개수가 증가할수록 인접기초사이의 거리가 감소할수록 I_z 값이 증가하는 것으로 분석되었다. 그림 5(a)의 case 1 경우 기초사이의 거리비율(L_1/B)의 감소에 따라 변형률 영향계수 I_z 의 값이 증가하는 형상을 보이고 있으며 $L_1/B = 3$ 의 경우 단독 얇은기초와 유사한 분포를 보이고 있다. 이는 인접기초와의 거리 L_1/B 가 3 이상일 경우 인접기초와의 상호작용 효과가 발생하지 않는 것으로 해석할 수 있다. 그림 5(b)의 복합조건 case 2에서의 영향계수 I_z 의 분포는 case 1과 비슷하나 I_z 값이 조금 증가된 형상을 나타내고 있다. 복합조건에서 변형률 영향계수 I_z 의 값은 일정깊이 이내에서는 동일한 값을 유지하고 있으며, 이는 이 구간의 지반에서는 인접기초의 영향이 발생하지 않는 것으로 해석할 수 있다.

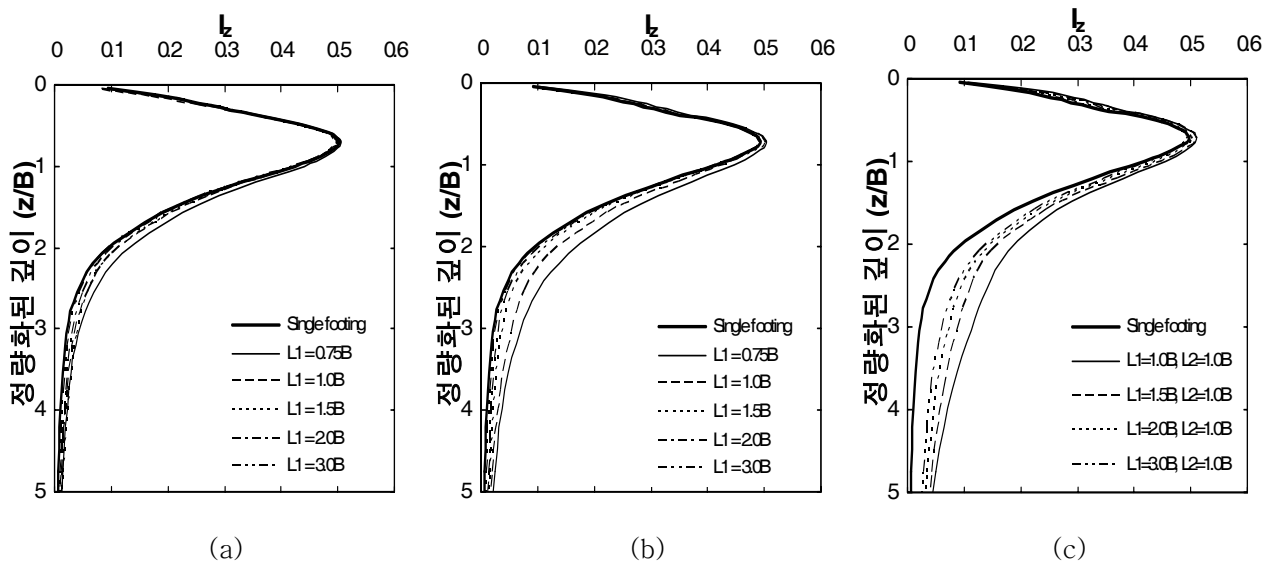


그림 5. 복합조건 얇은기초 조건에서 변형률 영향계수 I_z (a) case 1 (b) case 2 (c) case 3

그림 5(c)는 복합조건 Case 3에서 기초사이의 거리 L_1, L_2 의 변화에 따른 변형률 영향계수 I_z 를 도시한 것이다. Case 1, case 2에 비해 깊이별 변형률 영향계수 I_z 의 증가가 뚜렷하며, 이는 인접기초에 의한 상호작용이 다른 case 1, 2에 비해 현저하게 큰 것으로 해석될 수 있다. Case 3에서 변형률 영향계수 I_z 는 인접기초들 사이의 거리 L_1, L_2 에 의해 복합적인 영향을 받게 되며, $L_1/B = 1, L_2/B = 1$ 일 경우 가장 큰 변화를 보이고 있다. 또한 case 1, case 2와 같이 L_1, L_2 가 3B이상에서 인접기초의 영향은 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

6. 기초조건에 따른 수정 변형률 영향계수

본 연구에서는 유한요소해석결과를 통해 직사각형 및 복합 얇은기초 조건에서 $I_{z,p}$ 가 발생하는 깊이 및 I_z 의 영향깊이 등의 두 가지 요소가 고려되어야 함을 확인하였다. $I_{z,p}$ 깊이의 경우 얇은기초의 형상(L/B)에 의해 변

화하였으며, 복합 얽은기초 조건의 영향은 받지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서 복합 얽은기초의 영향 분석 시 고려된 범위 0.75 - 3B 내에 해당하는 것으로, 직사각형 얽은기초($L_1/B = 0$)등의 0.75B 이내의 범위 내에 인접기초의 존재 시 I_{zp} 깊이 또한 영향을 받을 것이다. 그러나 실제 얽은기초 설계시 위의 조건에서 얽은기초가 복합조건으로 설계되는 경우는 매우 드물며, 시공상의 어려움이나 경제적인 이유에 의해 전면기초로 설계되는 것이 일반적이다. Schmertmann 등.(1978)의 연구에 의하면 I_{zp} 깊이를 정사각형 얽은기초와 연속기초에서 각각 0.5B, 1.0B로 제안하였다. 표 2는 본 연구에서 제안된 직사각형 얽은기초의 형상(L/B)에 대한 I_{zp} 깊이를 도기한 것으로서 L/B의 비율이 증가할수록 I_{zp} 의 깊이 또한 증가함을 볼 수 있다. 본 연구에서 제안된 I_{zp} 깊이는 정사각형 얽은기초의 경우 0.7B로써 Schmertmann 등.(1978)의 결과에 비해 조금 큰 값이 산정되었으며, 연속기초의 경우 약 1B로 Schmertmann 등.(1978)에 의해 제안된 값과 동일하다.

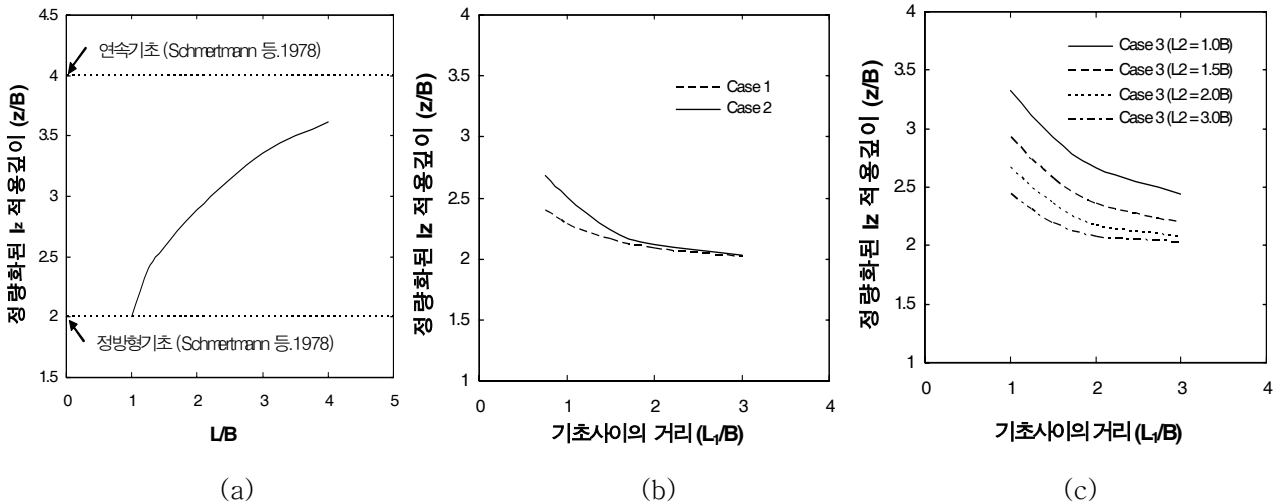


그림 6. 복합 얽은기초 조건에서 변형률 영향계수 I_z 적용깊이 (a) 얽은기초 형상(L/B) (b) case 1과 2 (c) case 3

표 2. 직사각형 얽은기초에서 I_{zp} 깊이

얽은기초 형상 (L/B)	1	1.25	1.5	2	3	4
I_{zp} 깊이	0.7 B	0.83 B	0.91 B	0.94 B	0.98 B	1.03 B

변형률 영향계수 I_z 적용깊이의 경우 얽은기초의 형상(L/B) 및 복합 얽은기초 조건에 따라 변화하는 경향을 나타냈다. 그림 6(a)는 얽은기초 형상(L/B) 1 - 4 범위에서 I_z 적용깊이를 도기한 것으로, 기초저면지반에서 발생한 총 수직변형률 중에서 90%의 수직변형률이 발생한 깊이를 기준으로 산정되었다. 그림 6(a)를 통해 얽은기초의 형상비 L/B의 증가에 따라 I_z 적용깊이 또한 증가하는 경향을 보이고 있으며 정사각형 얽은기초(L/B = 1)과 직사각형 얽은기초(L/B = 4)의 경우 제안된 I_z 적용깊이는 각각 2B, 3.6B로써 Schmertmann 등.(1978)에 의해 제안된 결과와 일치한다. 그림 6(a)를 기준으로 얽은기초 침하량 산정 시 다양한 얽은기초의 형상(L/B)의 영향이 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 6(b), (c)는 복합 얽은기초 조건 case 1, 2, 3에서 변형률 영향계수 I_z 적용깊이를 각각 인접기초의 거리의 향으로써 정량화한 것으로 그림 6(a)와 같이 90%의 수직변형률이 발생한 깊이를 기준으로 산정되었다. 복합조건 case1, 2에서 $L_1/B = 1$ 의 경우 정사각형 얽은기초의 I_z 적용깊이 2B 보다 14%, 25% 크게 산정되었으며, $L_1/B = 3$ 의 경우 인접기초의 상호작용효과는 거의 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 복합조건 case3의 경우 변형률 영향계수 I_z 적용깊이는 그림 6(c)와 같이 인접기초의 거리 L_1 , L_2 의 복합적인 영향에 의해 결정되며, case 1, 2의 경우와 같이 기초사이의 거리가 감소할수록 상호작용 효과가 증가함을 볼 수 있다. case 3은 L_1 , L_2 의 복합적인 영향에도 각각 $L_1/B = 3$, $L_2/B = 3$ 이상에서 상호작용효과가 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 그 이내의 범위에서는 그림 6(c)를 기준으로 복합 얽은기초 조건이 고려되어야 할 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 다양한 기초조건에서 발생하는 실질적인 얇은기초 침하량을 산정하기 위해 3-D 비선형 유한요소해석 및 평판재하시험을 수행하였으며, 해석 결과를 정량화하여 수정 변형률 영향계수를 제안하였다. 본 연구에서 제안된 수정 변형률 영향계수는 직사각형 얇은기초 및 복합 얇은기초의 상호작용을 반영하였으며, 침하량 산정 절차는 Schmertmann 등.(1978)의 연구에 근거하고 있다. Schmertmann의 침하량 산정법에서 적용되는 변형률 영향계수 I_z 는 기초의 작용하중, 지반의 탄성계수, 기초 저면지반의 수직변형률을 기준으로 정량화된 값이다. 본 연구에서는 수행한 비선형 유한요소해석을 통해 얇은기초 하중-침하를 분석하였으며 이 경우 지반의 탄성계수는 작용하중에 의해 계속 변화한다. 이를 보정하기 위해 평균 탄성계수 E_{avg} 를 변형률 영향계수 I_z 산정에 적용하였으며, 본 연구에서 산정된 변형률 영향계수 I_z 값은 Schmertmann 등.(1978)의 연구결과와 일치하였다.

본 연구에서 수행된 유한요소해석을 통해 얇은기초 형상(L/B) 및 복합 얇은기초 조건 case1, 2, 3에서 기초 사이의 거리에 따른 변형률 영향계수 I_z 를 산정하였다. 각각의 기초 조건에서 산출된 정량화된 변형률 영향계수 I_z 를 통해 직사각형 및 복합 얇은기초 조건에서 얇은기초 침하량 산정시 I_{zp} 가 발생하는 깊이 및 I_z 의 영향깊이 등의 두 가지 요소가 고려되어야 함을 확인하였다. I_{zp} 깊이의 경우 얇은기초의 형상(L/B)에 의해 변화하였으며, 복합 얇은기초 조건의 영향은 받지 않는 것으로 나타났다. 변형률 영향계수 I_z 적용깊이의 경우 얇은기초의 형상(L/B) 및 복합 얇은기초 조건에 따라 변화하는 경향을 나타냈다. 본 연구에서는 산정된 변형률 영향계수 I_z 기준으로 수정 변형률 영향계수 I_z 를 제안하였으며, I_{zp} 깊이 및 I_z 의 영향깊이를 통해 다양한 기초조건을 고려하도록 하였다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2001), **도로교표준시방서**, 건설교통부
2. 건설교통부 (2002), **구조물 기초설계기준**, 한국지반공학회
3. Bolton, M. D. (1986). "The Strength and Dilatancy of Sands", *Geotechnique*, 36(1), 65-78.
4. Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970). "Nonlinear Analysis of Stress-Strain in Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, 96(SM5), 1629-1653.
5. Fahey, M. and Carter, J. P. (1993). "A Finite Element Study of the Pressuremeter Test in Sand Using Non-Linear Elastic Plastic Model", *Canadian Geotechnical Journal*, 30(2), 348-361.
6. Kondner, R. L. (1963). "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soil", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, 189(SM1), 115-143.
7. Lee, J. H. and Salgado, R. (1999a). "Determination of Pile Base Resistance in Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 125 (8), 673-683.
8. Lee, J. H. and Salgado, R. (1999b). "Pre-failure Loading Response of Foundations on Sand", *Proceedings of 2nd International Symposium on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Jamiolkowski, Lancellotta, and Lo Presti eds, Balkema, Rotterdam, pp. 667-674.
9. Lee, J. H. and Salgado, R. (2000). "Analysis of Calibration Chamber Plate Load Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, 37 (1), 14-25.
10. Salgado, R., Bandini, P. & Karim, A. (2000). "Stiffness and Strength of Silty Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(5), 451-462.
11. Schmertmann, J. H. (1970). "Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 96(SM3), 1011-1042.
12. Schmertmann, J. H., Hartman, J. P., and Brown, P. R. (1978). "Improved Strain Influence Factor Diagrams", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 104(GT8), 1131-1135.