

## 사질토 지반에 시공된 얇은 기초 침하예측식의 신뢰도 및 정확도 분석

### Reliability and Accuracy Analyses of Prediction Equations for Settlement Calculation of Shallow Foundations Constructed on Sandy Soils

임유진\*

Lim, Yu-Jin

#### Abstract

A database program is constructed by collecting all information related to shallow foundations such as measured load-settlement data, foundation shapes and sizes, properties of soils under the foundation and various measured data obtained from field investigation methods including CPT, PMT and SPT etc.. Based on the database program, a special program module is developed for performing statistical analyses of reliability and accuracy of predicting equations used for calculation of settlement of the shallow foundations. Special interests are focused not only on the settlement, but also on the settlement to width ratio ( $s/B$ ). Results of the reliability and accuracy analyses on five available settlement equations are provided. Conclusions based on the provided results can be confirmed by extending number of related reliable data about the shallow foundations and can be adapted as guidelines for design of the shallow foundations.

**Key words** : Shallow foundation, Database, Settlement calculation

#### 요 지

현재 사용되고 있는 여러 가지 얇은기초 침하량 예측식에 대한 신뢰성 평가를 위해 얇은기초에 대한 각종 재하시험 데이터, 기초의 형상과 위치 및 지반 원위치시험 관련사항을 조사하여 데이터베이스(D/B)로 구축하였으며 이를 바탕으로 통계분석을 실시할 수 있는 해석프로그램을 제작하여 기존 침하량 산정 공식의 정확도(accuracy)와 신뢰수준(reliability), 특히, 기존 침하량 공식의 침하비( $s/B$ ) 대비 안정성을 평가하여 기 사용 5개식에 대한 평가결과를 제시하였다. 현재수준의 분석결과는 D/B의 양과 질에 좌우되므로 양질의 데이터를 추가로 확보하고 5가지 이외의 방법까지 분석하면 신뢰성과 정확성을 파악하면서 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 얇은 기초, 데이터베이스, 침하량 계산

#### 1. 서 론

국내 도로교통량의 큰 증가로 인해 각종 도로의 신설 또는 확장 및 선형개량 등에 의해 소요되는 교량의 수가 크게 늘고 있으나 보수적 설계관행으로 인해 교대기초는 대부분 강관말뚝을 선택하거나 지지층을 확실히 확보할 수 있는 경우를 제외하고 얇은 기초를 선택하는 경우가 드물다. 통상의 국내 관행에 따르면 깊은 기초(말뚝)와 얇은 기초를 선택하는 기준은, 지표면으로부터 최소 5~6m이하 깊이에 지지층이 확보되면 말뚝기초를 선택하고 그 이내가 되면 메스콘크리트를 타설하여 얇은 기초로 처리하여 왔다. 이는 말뚝 근입깊이가 최소 5~6m는 확보되어야 말뚝이 장주로서 거동할 수 있기 때문이며 이 이하면 단주로 간주되어 횡방향 하중에 취약하기 때문이다. 반면 깊은 기초의 시공단가는 일반적으로 얇은

기초의 경우에 비해 고가인 것으로 알려져 있으며 최근의 선형개량 추세에 따라 고성토가 빈발함으로써 시공단가를 낮추기 위해서는 얇은기초의 사용을 확대시켜야 할 시점에 와있다.

얇은 기초에 대한 최근의 연구로는, 파동이론을 현장비파괴 시험에 적용한 WAK(Wave Activated Stiffness (K))시험으로부터 얇은 기초의 강성을 파악하여 얇은 기초의 하중-침하 관계를 예측하는 기법(Briaud와 Gibbens, 1999), 실물 30개 교량의 얇은 기초 실측조사를 통한 침하량 예측식의 평가(Sargand와 Masada, 1999), 탄성론과 기초 근입깊이, 기초강성도 및 지반탄성계수의 영향 등 각종 영향계수를 이용한 이론 침하식의 개발(Mayne와 Poulos, 1999), 잔적토 상 재하시험 및 원위치 시험결과와 전단강도 정수를 바탕으로 탄성론 또는 경험을 바탕으로 한 기존 침하량 산정공식의 수정방법 제안(Fonseca, 2001) 등이 있다. 반면 설계에 사용중인

\*정회원 · 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과 부교수 (E-mail: yujin@pcu.ac.kr)

침하량 및 지지력 관련식에 대한 깊이 있는 연구가 진행되지 않고 있어 대부분 설계시 보수적 공식(건설교통부, 1996; 한국도로공사, 1992)이 사용되고 있다.

설계시 같은 하중조건과 지반조건이라면 얇은 기초가 깊은 기초보다 더 큰 침하가 발생할 것으로 판단하는 경향이 있으나 이에 대한 뚜렷한 근거가 없으며 오히려 외국의 경우, 오랜 추적과 분석결과 얇은 기초와 깊은 기초 사이의 침하량 차이가 없는 것으로 밝혀진 바 있다(Sargand와 Masada, 1999; Briaud와 Gibbens, 1999). 따라서 본 연구에서는 현재 사용 중인 이론적 및 경험적인 침하량 산정공식에 대한 통계분석과 정확도(accuracy) 및 신뢰도(reliability)분석을 실시하였다. 이를 위해 얇은 기초 구조물의 재하데이터를 수집하여 데이터베이스(이하 D/B)로 구축하였다. 구축된 D/B에는 토질시험 및 원위치 시험결과, 기초의 형상, 크기, 근입깊이 및 재하시험결과 등의 관련사항을 포함한다. D/B 프로그램은 추가 재하데이터에 대한 자료를 확보함으로써 계속 확장 될 수 있도록 하였으며, 지지력 또는 침하량 공식 중 대표적인 공식을 선정 후 이를 프로그램 내에서 구동하여 비교평가하고 적정 신뢰 수준에서 소정의 공식을 선택하여 기초의 안정성을 검토할 수 있는 기능을 갖추었다. 따라서 침하량 공식에 대한 정확도와 신뢰도 분석을 통해 설계시 특정 요건에 가장 적합한 설계공식을 선택할 수 있는 지침을 제공하고자 하였다.

## 2. 얇은기초의 침하량 계산식

침하량의 산정에 있어서 두 가지 관점에서 침하량을 검토할 필요가 있다. 첫째는 허용 침하량( $S_{allow.}$ )을 산정하는 것이고 두 번째는 주어진 하중에서 예상되는 최대 침하량을 산정하는 것이다. 따라서 기존의 침하량 산정방법도 모두 이 두 가지 산정기준에 맞추어 제안된 것들이다.

사질토 지반에서의 경험적인 침하량 산정식은 대부분 원위치 시험법인 표준관입시험(SPT) N치, 콘관입시험(CPT)의 선단관입저항( $q_c$ ) 및 공내재하시험(PMT)에 의한 탄성계수( $E_s$ ) 등을 이용한다. 본 연구에서 수행하려는 통계분석의 신뢰도 확보와 국내 실무 현장에서의 관행적 친숙함을 고려하여 D/B 프로그램 내 통계 해석 프로그램 모듈에서는 표준 관입시험 결과치(SPT N치)를 사용하는 침하량 예측식을 위주로 분석을 실시하였다.

### 2.1 Terzahi와 Peck(1967) 방법

이 방법은 표준 관입시험결과치(N)를 이용하여 사질토 지반상 얇은 기초의 침하량을 산정하는 방법으로서 아래 식으로 계산한다.

$$S = C_w C_D \left( \frac{3P}{N} \right) \left( \frac{2B}{B+1} \right)^2 \quad (1)$$

여기서  $C_w$  = 지하수위에 대한 보정계수,  $C_D$  = 성토하중에 대한 보정계수,  $P$  = 단위면적당 재하중 (tsf),  $N_{60}$  = 평균 SPT N치,  $B$  = 기초폭. 이 방법은 주로 표준관입시험결과(N)값과

지지력(bearing pressure) 및 기초의 폭(B)으로 구성된 차트를 이용해 침하량을 계산하며 이때 지지력은 허용침하량을 1 inch (25.4 mm)로 하였을 때 소요되는 단위면적당 지지력을 뜻한다.

이 방법은 일반적으로 실 침하량에 비해 매우 보수적인 침하량을 계산하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다. 위의 식에 대한 Tan과 Duncan(1991)의 분석에 의하면 대상 조사 기초중 약 85% 이상의 구조물에서 실 침하량보다 과다한 침하량을 계산하는 경향을 보이는 것으로 보고된 바 있다.

### 2.2 Meyerhoff 방법 (1956, 1965)

Meyerhoff(1956, 1965)는 Terzaghi와 Peck(1967)방법에 기초하여 순기초접지압(net foundation pressure)  $q$ 를 받는 건조된 사질토 상의 얇은 기초 침하량 계산식을 아래와 같이 제안하였다.

$$S_{dry} = \frac{q}{q'} \quad (2)$$

여기서  $q'$ 은 1 inch(25.4 mm)의 침하를 발생시키는 단위면적당 재하중이며 표준관입시험 결과치(N)와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$q' = \frac{N}{3} \left( \frac{B+1}{2B} \right)^2 \quad (3)$$

$q'$ 의 단위는 (ton/ft<sup>2</sup>) 이며 침하량(S)은 모두 inch로 표시된다. 다만 기초하부지반이 습윤상태일 경우 침하량은 건조상태일 때의 두 배가된다고 하였다. 즉, 아래와 같다.

$$S_{sat.} = 2 \cdot S_{dry} \quad (4)$$

### 2.3 Peck과 Bazaraa(1969) 방법

이 방법은 Terzaghi와 Peck(1967)의 침하량 산정법에 근거하여 개발되었으며 원 방법에 유효상재하중과 지하수위에 대한 고려가 포함되었다.

$$S = C_w C_D \left( \frac{2P}{N'} \right) \left( \frac{2B}{B+1} \right)^2 \quad (5)$$

측정된 SPT-N치(N')는 Bazaraa방법에 따라 수정된 것이며  $C_w$ 는 기초저면 B/2지점에서 지하수위가 없을 경우에 대한 지하수위가 있을 때의 유효상재하중비이다.

### 2.4 Burland와 Burbidge(1985) 방법

Burland와 Burbidge(1985)는 사질토 상에 축조된 얇은기초, 제방 및 저류탱크 등의 침하에 대한 정밀 측정기록 200여개를 취합하여 분석한 후 침하량과 기초의 지지력, 기초 재하면의 형상비 및 표준관입시험결과  $N_{60}$  사이에 고유한 연관성이 성립되는 것을 고려하여 이를 바탕으로 SPT결과를 이용한 침하량 계산식을 아래와 같이 제안하였다.

$$S_f = q' B^{0.75} I_C = \frac{1.7' B^{0.75}}{(N'_{60})^{1.4}} \quad (6)$$

여기서, B = 기초의 폭 (meter 단위), N' = 표준관입시험(SPT) 결과치 N값의 영향깊이에 대한 산술평균값. 위의 식은 즉시 침하량 계산식으로서 정규압밀상태인 사질성 지반에서의 침하량 계산식으로 사용된다. 한편, Terzaghi, Peck 및 Mesri (1996)는 체적변형계수  $m_v$ 와 N'에 대한 구속응력의 영향이 비슷하기 때문에 유효상재하중에 대한 N'값의 보정은 불필요하다고 지적한바 있다. 그러나 Burland와 Burbidge(1985)의 제안식에는 표준관입시험결과와 N'치의 에너지 전달효율에 대한 보정여부가 명확히 설명되어있지 않다. 따라서 본 연구에서는 원 제안식의 N을  $N_{60}$ 으로 간주하였다.

### 2.5 Alpan(1964) 방법

Alpan(1964)은 표준관입시험(SPT) 시험결과 N값과 직경 30.0 cm 평판재하시험에 의한 침하량 결과치를 연관시켜 기초폭 B인 실대형 기초의 침하량 계산식을 제안하였다. 재하중에 의해 평판에 발생하는 압력이  $q$ 이고 기초폭 B인 기초에 동일한 크기의 압력이 가해질 때 이 기초의 침하량  $S_B$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$S_B = S_o \left( \frac{2B}{B+1} \right)^2 \quad (7)$$

이때 재하압  $q$ 에 의한 평판의 침하량  $S_o$ 는 SPT N값과 아래의 연관성을 갖는다.

$$S_o = 0.14 a \frac{N'^{-1.8}}{25} \quad (8)$$

여기서 N값은 유효상재하중( $\sigma'_{ov}$ )에 대한 보정을 실시(Peck과 Bazaraa, 1969)한 것이다. 먼저 Alpan은 재하판 또는 기초에 발생하는 재하압력( $q$ )과 발생 침하량( $\delta$ ) 사이에 압축성지수( $\alpha_o$ )를 아래 식과 같이 정의하고 이를 이용해 기초의 침하( $\delta$ )-재하압( $q$ ) 사이에 선형관계가 유효하다고 간주하였다. 따라서 평판의 압축성지수( $\alpha_o$ )가 표준관입시험결과치 N'에 대해 주어지면 기초폭 B의 기초에 대한 압축성지수( $\alpha_B$ )를 구할 수 있으며 이로부터 기초의 침하량을 구한다.

$$\alpha_o = \frac{\delta_o}{q} \quad (9)$$

## 3. 얇은기초 재하데이터의 데이터베이스 프로그램 구축

### 3.1 데이터베이스의 구축 및 기능

얇은기초에 대한 재하시험은 주로 연구목적 또는 현장에서 지지력 확인을 위해 시행되어 왔으며 본 연구에서 수집한 재하시험 관련 데이터(Briaud, 1993)는 표 1과 같다. 원위치 시험결과는 주로 표준관입시험(SPT)-N치를 중심으로 구성하였으며 이는 국내사용 계산식이 상당부분 N치를 이용하는 것

표 1. 재하데이터에 포함된 정보

|          | 포함 정보                                  | 관련 데이터   |
|----------|--|--|
| 도로관련     | 기초 상부구조물의 용도<br>기초 하부구조물의 용도<br>도로 노선명 |  |
| 기초구조물 관련 | 기초형상 (직사각형, 정사각형, 원형 등)                | 기초폭(B)<br>길이(L)<br>근입깊이(D <sub>f</sub> )<br>두께(t)  |
|          | 기초주변 기하조건                              | 근접 성토/절토사면까지의 거리<br>기초사면 수평길이<br>기초사면 수직고<br>기초사면 경사각                                      |
| 지반관련     | 지반정보                                   | 시추주상도<br>지층구성<br>지하수위<br>흙분류(USCS)<br>기반암위치<br>해발고도  |
|          | 실내 토질시험 결과                             | 토질특성관련-상대밀도(D <sub>r</sub> )<br>전단위중량( $\gamma_t$ )  |
|          | 현장 원위치 시험결과                            | SPT-N치<br>CPT의 선단저항( $q_c$ )과 주면마찰력( $f_c$ )<br>PMT의 한계압력( $P_L$ ) 및 초기 횡방향 탄성계수값( $E_o$ ) |

임을 고려하였다. 이와 같은 데이터는 모두 데이터베이스 프로그램에 저장되었으며 기존 침하량 산정식의 신뢰도와 정확도 평가를 위해 사용하였다.

제작된 주프로그램은 데이터베이스의 수집, 확장, 구동 및 분석기능과 더불어 기존의 침하량 예측식과 지지력공식을 계산하고 그 결과를 비교할 수 있는 기능을 포함한다. 주프로그램 중 데이터베이스 관련 프로그램은 Microsoft사의 ACCESS와 FARPoint사의 SPREAD, APPEX사의 TrueDBGRID와 MabObject 2.0프로그램을 개발언어로 사용하여 제작하였다. 전체 프로그램 개발언어로는 VisualBasic 6.0을 사용하여 Windows 95이상의 OS환경에서 구동되도록 하였다. 제작된 프로그램 중 본 연구의 목적을 이루기 위해 특별히 고려된 기능은 하중(q)-침하량(s)관계의 재하그래프를 하중-침하비(s/B)로 변환하는 것과 불규칙한 재하 (q-s/B) 그래프를 최적화하는 것이다. (그림 1 참조). 재하그래프의 최적화는 3가지의 내삽기법(interpolation)을 이용하여 수행되었다. ① 쌍곡선기법(parabolic test), ② 멱승기법(power equation), ③ hyperbolic 기법. hyperbolic 모델(Duncan과 Chang, 1970)을 이용할 경우 재하데이터의 외삽기능(extrapolation)을 사용하여 극한 지지력의 추정이 가능하다.

### 3.2 하중(q)-침하(s) 곡선의 정규화

Meyerhoff(1983)와 Briaud와 Jeanjean (1994)은 얇은기초의 침하량을 기초폭으로 정규화(s/B = 침하비)시킬 경우 동일 지반상 크기가 다른 여러 기초의 하중-침하 그래프가 하나의 하중(q)-침하비(s/B) 그래프로 일치 될 수 있을 것으로 예측한 바 있다. 이것은 얇은기초 하부의 평균변형률로 간주되는 침하비(s/B)와 극한지지력을 비교함으로써 분명해진다. 즉, 기

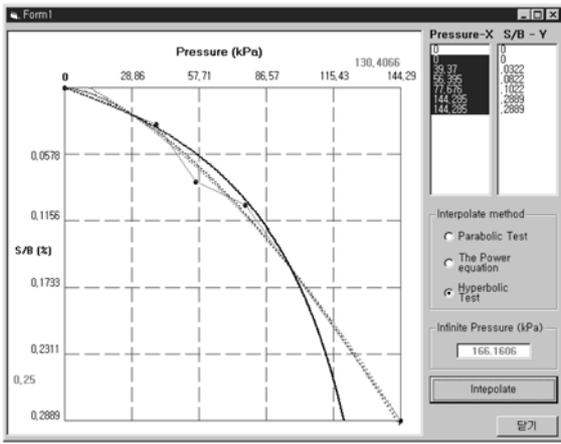


그림 1. 재하데이터의 정규화 및 하중(q)-침하비(s/B) 곡선의 최적화 기능

초의 크기효과에 따른 침하량의 차이를 보다 명확히 설명하기 위해 직경 1.0 m, 2.0 m, 3.0 m인 원형 흙샘플에 대한 대형 삼축압축시험을 고려해 볼 수 있다. 이 흙 샘플 상단에 강성의 얇은기초가 놓이고 샘플에 가해지는 구속압력( $\sigma_3$ )과 흙조건이 모두 같은 조건이라고 가정한다면 샘플에 대한 삼

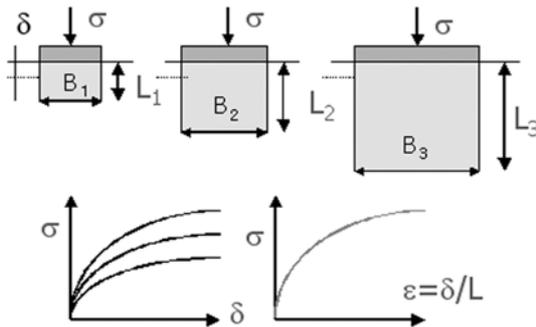
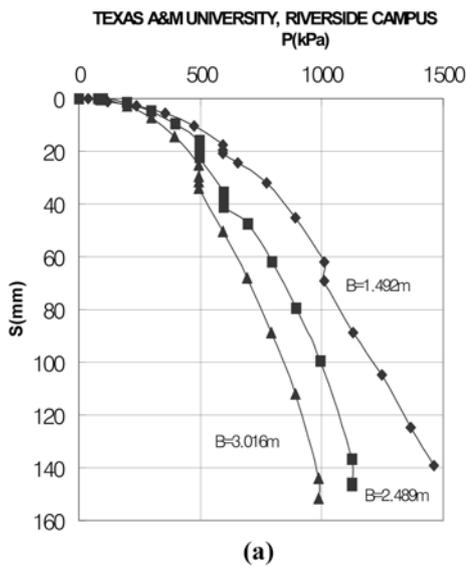


그림 2. 대형삼축압축시험으로 모사한 얇은기초의 응력-침하량 관계도



축압축시험으로부터 샘플의 직경(B) 또는 원형기초의 직경에 상관없이 동일한 응력( $\sigma$ )-변형율( $\epsilon$ ) 관계를 얻는다(그림 2 참조). 그러나 얻어진 응력-변형율관계 그래프를 응력 수직변위(침하량) 관계로 다시 그리면 기초크기에 따라 서로 다른 그래프를 얻는다. 그러므로 이 경우에 같은 수직변위(침하량)에 대해 발생하는 지지력(응력)이 기초 크기에 따라 다르게 되며 큰 기초일수록 발생하는 지지력(응력)은 작아지게 된다.

그러나 이들의 예측은 구체적인 해석결과 또는 수집된 D/B에 직접 근거한 것은 아니었다. 따라서 본 연구에서는 구축된 재하데이터 D/B를 이용해 이들의 예측 정당성을 확인하고자 하였다. 구축된 D/B 중 국외에서 엄밀 재하 시험된 3개소를 선정하여 하중(q) - 침하비(s/B) 관계의 설정 가능성을 검토하였다.

그림 2는 Texas A&M 대학 내 미국 국가 지정 토질시험장(NGES; National Geotechnical Experimentation Site)에서 실시한, 3개의 얇은 기초에 대한 재하 시험결과(Briaud 와 Gibbens, 1999)이다. 기초폭 B에 따라 하중(q)-침하량(s) 관계가 서로 다르게 나타나지만(그림 3(a)) 하중(q)-침하비(s/B) 곡선(그림 3(b))은 기초폭(B)의 영향이 사라지고 단일 그래프로 겹치는 현상을 확인할 수 있다. 그림 4는 건조한 모래지반(Qwait case)타설된 얇은기초에 대한 재하시험결과(Ismael, 1985)이며 그림 5는 스웨덴에서 실시(Kolbyttemon case)한 재하데이터(Larsson, 1998)를 도시한 것이다. 추가분석한 두 경우 모두 하중(q)-침하비(s/B) 관계가 하나의 단일 그래프상에 겹치는 현상을 재확인할 수 있었다.

#### 4. 신뢰도(Reliability) 및 정확도(Accuracy) 평가

실측 침하량과 예측 침하량의 상관도 분석을 위한 주 프로그램 해석창은 그림 6과 같다. 예측식별 신뢰도를 분석하였으며 각 침하비(s/B)=0.25, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0(%)에 해당하는 상관도 분석을 실시하였다. 또한 침하량 예측식별로 계산

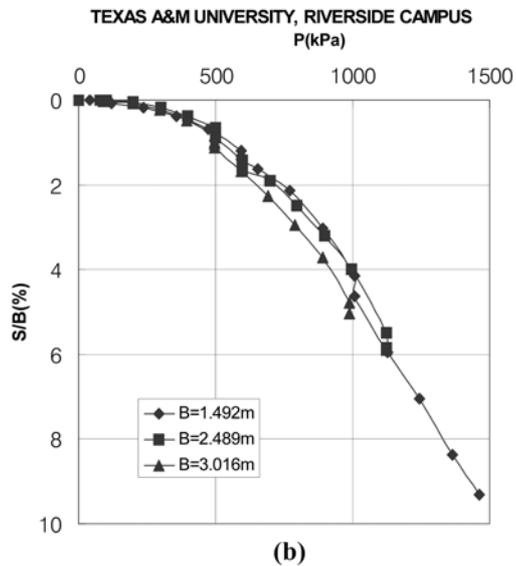


그림 3. 얇은기초에 대한 엄밀 재하 데이터 (Texas A&M University Case): (a) 하중(q)-침하량(s)곡선, (b) 하중(q)-침하비(s/B) 곡선 (Briaud와 Gibbens, 1999)

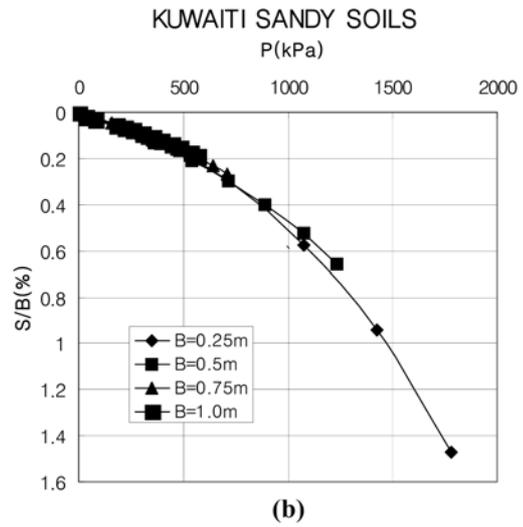
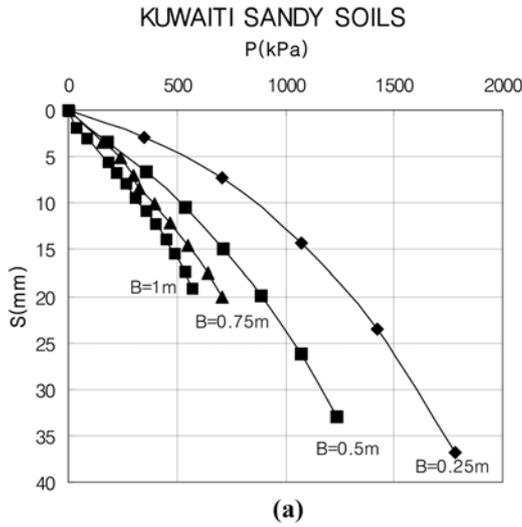


그림 4. 얇은기초에 대한 엄밀 재하 데이터(Kuwait case): (a) 하중(q)-침하량(s)곡선, (b) 하중(q)-침하비(s/B) 곡선 (Ismael, 1985)

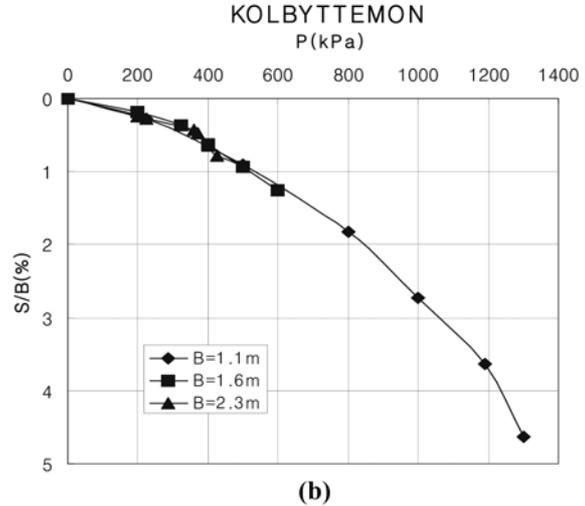
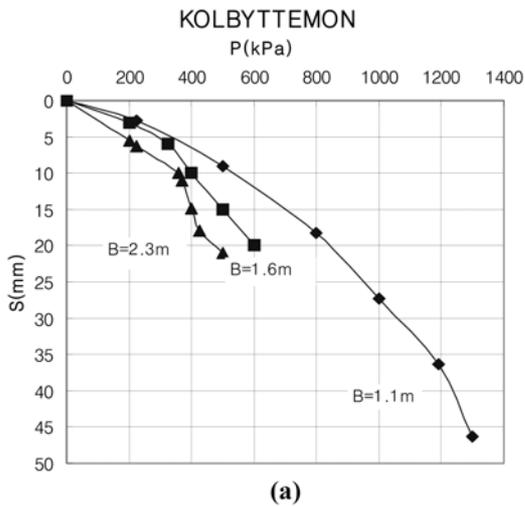


그림 5. 얇은기초에 대한 엄밀 재하 데이터(Kolbyttemon case): (a) 하중(q)-침하량(s)곡선, (b) 하중(q)-침하비(s/B) 곡선 하중(q)-침하비(s/B)곡선 (Larsson, 1998)

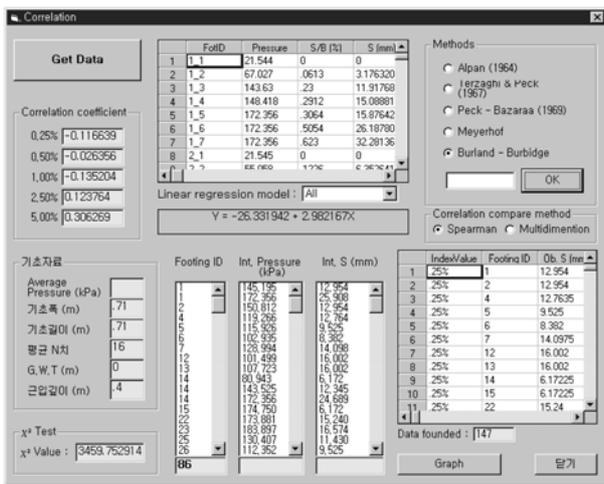


그림 6. 통계분석을 위한 창

된 침하량과 유사한 지반상에서 수집된 재하데이터로부터 얻은 침하량을 비교하여 설계하고자 하는 기초의 계산 침하량

사질토 지반에 시공된 얇은 기초 침하예측식의 신뢰도 및 정확도 분석

에 대한 신뢰지수를 판단할 수 있도록 하였다. 이를 위해 표준관입시험(SPT)결과 N치를 이용하여 예측식별 침하량을 계산하고 측정침하량과 비교하였다. 침하계산에 필요한 각종 자료 즉, 기초폭(B) 및 길이(L), 형상, 근입깊이(D<sub>f</sub>), 흙의 단위중량( $\gamma$ ), 흙의 내부마찰각( $\phi$ )과 점착력(c), 지하수위(D<sub>w</sub>) 및 소정식에서 필요로 하는 N치 대표(또는 평균값)을 D/B에서 입력데이터로 읽는다. 침하비 s/B= 0.25, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0%에서 각 침하비 (s/B)에 해당하는 하중(압력 단위, q)을 읽고 이를 예측 식에 대입하여 침하량을 산출한 후 실측값과 예측값을 비교하는 절차를 따랐다.

완전한 예측공식은 계산침하량과 측정침하량이 같아야 하므로 1 : 1의 관계가 설정된다. 그러나 토질시험데이터의 측정 오차와 비균질성, 공식 자체의 여러 가지 한계로 인해 오차가 발생하므로 어떤 방법도 완벽한 정확성을 제공하지 못한다. Tan과 Duncan(1991)은 얇은기초 침하량 예측식의 정확성과 신뢰도를 다음과 같이 각각 정의하였다: (a)정확성 (accuracy): 측정침하량에 대한 예측침하량의 평균값으로 정

의되며 이 값이 1.0에 가까울수록 정확한 예측식이 된다, (b) 신뢰도(reliability): 예측침하량이 측정침하량 이상이 되는 경우의 전체 경우 수에 대한 비율을 뜻하며 100%에 가까울수록 신뢰도가 높은 식이 된다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\text{정확성(accuracy)} = \hat{\alpha}_{\text{computed}} / \hat{\alpha}_{\text{measured}} \quad (1)$$

$$\text{신뢰도(reliability)} = x_n [\hat{\alpha}_{\text{predicted}} / \hat{\alpha}_{\text{measured}}] \geq 1.0 / \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

계산된 각 예측식의 신뢰도를 표 2에 정리하였으며 표 3은 예측식의 정확도를 정리한 것이다.

신뢰도 해석결과표로부터 얻은 결론은 다음과 같다. 1) 전 침하비 영역에 걸쳐 Terzaghi와 Peck 방법(이하 T-P방법)이 가장 신뢰수준이 높았다. 또한 각 침하비 대역에서 매우 균등한 신뢰수준을 보였으며 침하비 2.5%에서는 100%의 신뢰도를 보였다. 전 침하비에 걸쳐 신뢰수준이 높은 순서는 다음과 같다. ①T-P ②Peck-Bazaraa(이하 P-B), ③Alpan ④Meyerhoff, ⑤Burland-Burbidge(이하 B-B). 2) B-B 방법은 가장 최근에 제안된 방법이고 정확성이 높을 것으로 인정되어 지침서 등에 표준 모델로 소개되고 있으나 전 침하비에 걸쳐 신뢰수준이 매우 낮은 결과를 보였다. 또한 침하비(s/B)가 높을수록 신뢰수준이 떨어지는 추세를 보여 s/B = 2.5%에서 50%이하의 신뢰도를, s/B = 5%에서 약 20% 수준까지 떨어지는 결과를 보였다. 3)T-P 방법과 더불어 Alpan 방법과 P-B방법이 s/B = 5% 대를 제외하고는 95%에 근접하는 높은 신뢰도를 보였으나 두 방법 모두 s/B = 5%이상이 되면 신뢰수준이 크게 떨어졌다. Meyerhoff 방법은 s/B = 1%까지 85%의 신뢰수준을 보였으나 그 이상의 침하비에서 신뢰수준이 크게 떨어져 s/B = 5%대에서는 35%수준까지 떨어졌다.

정확도 해석결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다. 1) 모든 방법에서 침하비(s/B)가 증가함에 따라 정확성도 비례하여 증가 즉, 정확도가 1.0에 근접하는 경향을 보였다. 2) s/B = 5.0%에서 가장 정확한 방법은 Meyerhoff 방법이었으며 가장 부정확한 것은 T-P방법이었다. 3) 전침하비영역에서 B-B방법이 가장 정확도가 컸으며 T-P방법이 가장 낮았다. 정확도는 ①B-B, ②Meyerhoff, ③P-B, ④Alpan, ⑤T-P순서로 나타났다. 정확성이 떨어질수록 즉, 정확도가 1.0보다 크게 멀

표 3. 침하비(s/B) 대역별 각 침하량 예측법에 따른 정확도

| s/B(%) 방법        | 전체  | 0.25 | 0.5  | 1.0 | 2.5 | 5.0  |
|------------------|-----|------|------|-----|-----|------|
| Alpan            | 6.9 | 8.6  | 8.6  | 6.2 | 3.7 | 1.67 |
| Terzaghi-Peck    | 9.5 | 11.1 | 12.2 | 9.3 | 5.9 | 2.7  |
| Peck-Bazaraa     | 6.4 | 7.4  | 8.16 | 6.2 | 3.9 | 1.8  |
| Meyerhoff        | 4.2 | 5.2  | 5.3  | 3.8 | 2.3 | 1.0  |
| Burland-Burbidge | 3.2 | 4.2  | 3.9  | 2.7 | 1.6 | 0.6  |

어질수록 설계의 낭비적요소가 심할 것으로 판단된다.

계산한 정확도와 신뢰도를 각 침하량 예측식 별로 비교하여 그림 7에 도시하였다. 각 그림 상에서 ⊗점에 근접 즉, 신뢰도 100%에 정확도 1.0값에 일치하는 방법이 최적의 침하량 예측방법이 된다. 그림 상에서 보면 일반적으로 비교적 덜 정확한 예측식(정확도가 1.0보다 멀어지는 경우)이 보다 신뢰도가 높은 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그림 8은 침하비 전체 대역에 대하여 신뢰도와 정확도를 비교한 것이다.

각 예측방법별로 신뢰도와 정확도를 분석하면 다음과 같다.

- Terzaghi & Peck 방법: 신뢰도는 분석된 5가지 방법중 가장 높으나 정확도는 가장 떨어진다.
- Alpan방법: 신뢰도가 비교적 높은편(80% 이상)이지만 정확도는 떨어진다.
- Peck-Bazaraa 방법: 신뢰도가 비교적 높은 편(80%이상)이지만 정확도는 떨어진다. Alpan방법과 매우 유사한 결과를 보였다.
- Meyerhoff 방법: 신뢰도가 80%에 육박하여 높은 편이며 아울러 정확도도 4.0 정도로 타 방법에 비해 상대적으로 높게 계산되었다.
- Burland & Burbidge 방법: 가장 높은 정확도를 보였다. 그러나 신뢰수준은 가장 낮게 계산되었다.

### 5. 통계기법을 이용한 알은기초 침하량 예측식의 평가

통계기법을 이용하여 프로그램상에서 각 예측식별로 상대 오차(relative error), 표준편차(standard deviation), 신뢰수준(confidence interval), 과도예측비율(Over prediction) 등을 분석하였다. 침하비(s/B)의 크기에 따라 측정침하량에 대비한 예측침하량의 여러 가지 통계지수가 어떠한 경향을 보이는지

표 2. 침하비(s/B) 대역별 각 예측법에 대한 신뢰도 조사 결과

| s/B              | 전체        |       | 0.25      |       | 0.5       |       | 1.0       |       | 2.5       |       | 5.0       |       |
|------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|                  | 이상수<br>총수 | R (%) |
| Alpan            | 128/147   | 87    | 49/55     | 89    | 30/33     | 90.9  | 24/26     | 92.3  | 18/19     | 94.7  | 8/14      | 57.1  |
| Terzaghi-Peck    | 137/147   | 93.2  | 51/55     | 92.7  | 31/33     | 94    | 24/26     | 92.3  | 19/19     | 100   | 13/14     | 92.9  |
| Peck-Bazaraa     | 130/147   | 88.4  | 48/55     | 87.3  | 30/33     | 90.9  | 24/26     | 92.3  | 18/19     | 94.7  | 11/14     | 78.6  |
| Meyerhoff        | 112/147   | 76.2  | 43/55     | 78.2  | 30/33     | 90.9  | 22/26     | 84.6  | 12/19     | 63.2  | 5/14      | 35.7  |
| Burland-Burbidge | 92/147    | 62.5  | 38/55     | 69.1  | 25/33     | 75.8  | 17/26     | 65.4  | 9/19      | 47.4  | 3/14      | 21.4  |

(주) 이상수: 총 비교수(총수) 중 측정치보다 예측치가 크게 나온 개수를 뜻함, R: 신뢰도

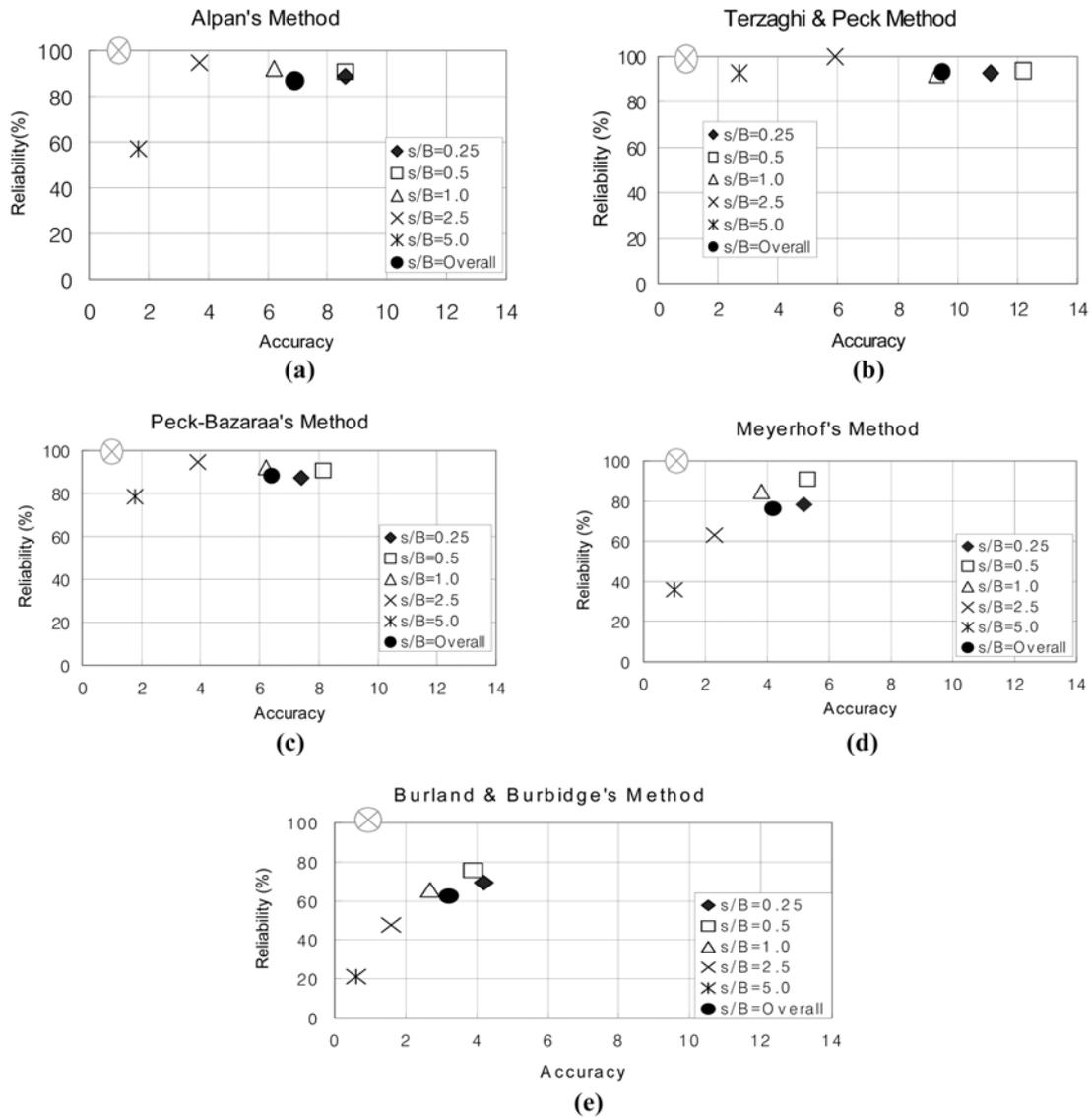


그림 7. 침하비(s/B)에 따른 신뢰도 및 정확도 변화 비교: (a) Alpan 방법, (b) Terzaghi와 Peck 방법, (c) Peck-Bazaraa 방법, (d) Meyerhof 방법, (e) Burland-Burbidge 방법

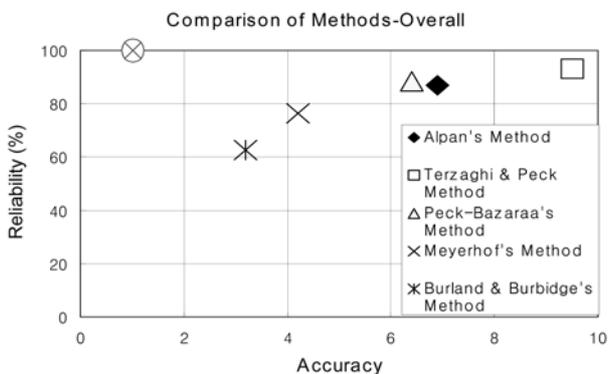


그림 8. 예측방법별 신뢰도 및 정확도 비교 (전체비교)

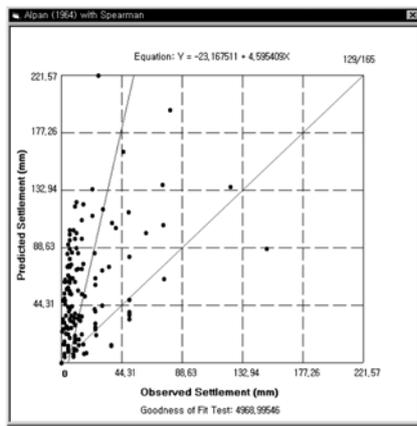
를 조사하였다. 이와 같은 침하량 예측식의 측정침하량에 대한 통계분석 결과를 표 4에 정리하였으며 요약하면 다음과 같다. 1) 전체침하비(overall s/B)기준, 측정치에 비해 예측치의 상대오차가 가장 큰 것은 T-P방법이었고 가장 작은 것은 B-B방법이었다. 2) 전체 침하비 기준, 측정치에 대한 예측치

의 과도예측비율이 가장 높은 것은 T-P방법이었다(9배 이상). 반면 B-B방법은 과도예측비가 가장 작았다(약 3.5배). 모든 방법에서 s/B가 증가함에 따라 과도예측비가 점차감소하는 경향을 보였다. 3) 모든 방법에서 침하비가 증가할수록 측정치에 대한 예측치의 상대오차는 감소하였고 s/B=5.0%에서 상대오차가 가장 작았으며(약 0.1) 표준편차도 매우 작았다. 4) 상대오차에 대한 80% 이상의 신뢰수준(confidence interval)에서 음(-)의 값이 나오지 않으면서 가장 안정적인 상대오차 즉, 작은값의 상대오차를 보인 것은 Alpan방법과 P-B방법이었다. 따라서 통계기법상의 해석결과로는 Alpan방법과 P-B방법이 안정성이 뛰어난 것으로 판명되었다.

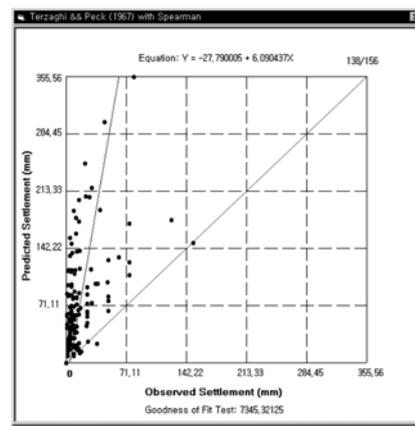
그림 9는 개발된 프로그램으로부터 각 침하량 예측방법에 의한 예측치와 측정치를 비교 도시한 것이다. 그림 상의 가운데 경사선(기울기 1:1)이 정확도 1.0에 해당하는 선(측정치=예측치)이며 이 경사선에 근접하여 분산된 점이 많을수록 신뢰도가 높은 방법으로 평가할 수 있으나 과예측 방법은 시공상의 낭비를 초래할 수 있다.

표 4. 침하량 예측식에 대한 통계분석 결과표

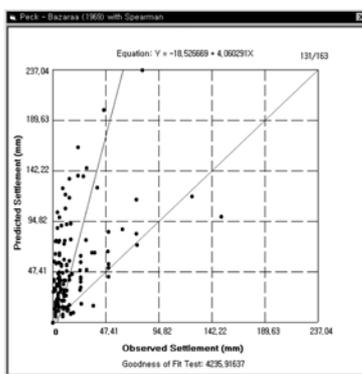
| 예측방법             | S/B (%)        | Relat. error | Standard deviation | 99% Conf. Interval | 95% Conf. Interval | 90% Conf. Interval | 80% Conf. Interval | Over Predict. (%) |
|------------------|----------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Alpan            | <b>Overall</b> | <b>5.9</b>   | <b>6.7</b>         | <b>(4.5-7.4)</b>   | <b>(4.9-7.0)</b>   | <b>(5.0-6.9)</b>   | <b>(5.2-6.7)</b>   | <b>694.5</b>      |
|                  | 0.25           | 7.6          | 7.5                | (5.0-10.2)         | (5.6-9.6)          | (6.0-9.3)          | (6.3-8.9)          | 861.1             |
|                  | 0.50           | 7.7          | 7.5                | (4.4-11.1)         | (5.2-10.3)         | (5.6-9.9)          | (6.1-9.4)          | 872.4             |
|                  | 1.00           | 5.3          | 5.4                | (2.5-8.0)          | (3.2-7.4)          | (3.5-7.0)          | (3.9-6.6)          | 627.9             |
|                  | 2.50           | 2.8          | 3.0                | (1.0-4.6)          | (1.4-4.1)          | (1.6-3.9)          | (1.9-3.7)          | 378.0             |
| 5.00             | 0.7            | 1.2          | (-0.1-1.5)         | (0.1-1.4)          | (0.2-1.3)          | (0.3-1.1)          | 173.3              |                   |
| Terzaghi-Peck    | <b>Overall</b> | <b>8.7</b>   | <b>11.0</b>        | <b>(6.3-11.0)</b>  | <b>(6.9-10.5)</b>  | <b>(7.2-10.2)</b>  | <b>(7.5-9.8)</b>   | <b>968.8</b>      |
|                  | 0.25           | 10.2         | 12.3               | (6.0-14.5)         | (7.0-13.5)         | (7.5-13.0)         | (8.1-12.4)         | 1125.9            |
|                  | 0.50           | 11.6         | 12.9               | (5.8-17.4)         | (7.2-16.0)         | (7.9-15.3)         | (8.7-14.5)         | 1264.6            |
|                  | 1.00           | 8.6          | 9.2                | (3.9-13.3)         | (5.1-12.1)         | (5.6-11.6)         | (6.3-10.9)         | 964.8             |
|                  | 2.50           | 5.2          | 5.2                | (2.1-8.3)          | (2.9-7.5)          | (3.2-7.1)          | (3.7-6.7)          | 624.0             |
| 5.00             | 1.8            | 2.1          | (0.3-3.3)          | (0.7-2.9)          | (0.9-2.7)          | (1.1-2.5)          | 288.2              |                   |
| Peck-Bazara      | <b>Overall</b> | <b>5.5</b>   | <b>7.3</b>         | <b>(3.9-7.0)</b>   | <b>(4.3-6.7)</b>   | <b>(4.5-6.5)</b>   | <b>(4.7-6.3)</b>   | <b>649.3</b>      |
|                  | 0.25           | 6.6          | 8.1                | (3.8-9.4)          | (4.4-8.7)          | (4.8-8.4)          | (5.2-8.0)          | 760.6             |
|                  | 0.50           | 7.6          | 8.4                | (3.8-11.4)         | (4.7-10.5)         | (5.2-10.0)         | (5.7-9.5)          | 863.8             |
|                  | 1.00           | 5.6          | 6.0                | (2.6-8.6)          | (3.3-7.9)          | (3.7-7.5)          | (4.1-7.1)          | 664.2             |
|                  | 2.50           | 3.3          | 3.3                | (1.3-5.3)          | (1.8-4.8)          | (2.0-4.6)          | (2.3-4.3)          | 435.6             |
| 5.00             | 1.0            | 1.4          | (0.0-1.9)          | (0.2-1.7)          | (0.3-1.6)          | (0.3-1.4)          | 204.4              |                   |
| Meyerhoff        | <b>Overall</b> | <b>3.2</b>   | <b>4.1</b>         | <b>(2.4-4.1)</b>   | <b>(2.6-3.9)</b>   | <b>(2.7-3.8)</b>   | <b>(2.8-3.7)</b>   | <b>423.5</b>      |
|                  | 0.25           | 4.3          | 4.5                | (2.7-5.8)          | (3.1-5.5)          | (3.3-5.3)          | (3.5-5.0)          | 529.0             |
|                  | 0.50           | 4.5          | 4.4                | (2.6-6.5)          | (3.0-6.1)          | (3.3-5.8)          | (3.6-5.5)          | 557.5             |
|                  | 1.00           | 3.0          | 3.2                | (1.4-4.6)          | (1.8-4.3)          | (2.0-4.1)          | (2.2-3.8)          | 407.4             |
|                  | 2.50           | 1.5          | 1.8                | (0.4-2.5)          | (0.7-2.3)          | (0.8-2.1)          | (1.0-2.0)          | 252.6             |
| 5.00             | 0.1            | 0.8          | (-0.4-0.6)         | (-0.3-0.5)         | (-0.2-0.4)         | (-0.2-0.4)         | 118.2              |                   |
| Burland-Burbidge | <b>Overall</b> | <b>2.2</b>   | <b>3.3</b>         | <b>(1.5-2.9)</b>   | <b>(1.7-2.7)</b>   | <b>(1.8-2.7)</b>   | <b>(1.9-2.6)</b>   | <b>321.1</b>      |
|                  | 0.25           | 3.2          | 3.7                | (1.9-4.5)          | (2.2-4.2)          | (2.4-4.0)          | (2.5-3.8)          | 420.4             |
|                  | 0.50           | 3.1          | 3.6                | (1.5-4.7)          | (1.9-4.3)          | (2.1-4.1)          | (2.3-3.9)          | 413.5             |
|                  | 1.00           | 1.9          | 2.6                | (0.5-3.2)          | (0.9-2.9)          | (1.0-2.7)          | (1.2-2.5)          | 289.7             |
|                  | 2.50           | 0.7          | 1.5                | (-0.2-1.5)         | (0.0-1.3)          | (0.1-1.2)          | (0.2-1.1)          | 172.3             |
| 5.00             | (0.3)          | 0.6          | (-0.7-0.1)         | (-0.6-0.0)         | (-0.6-0.0)         | (-0.5-0.1)         | 76.3               |                   |



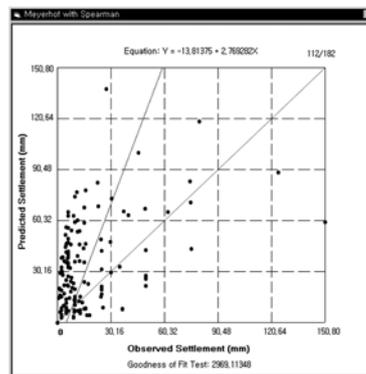
(a)



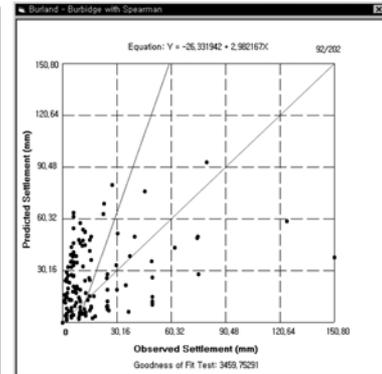
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 9. 침하량 예측치와 측정치의 비교: (a) Alphan방법, (b) Terzaghi & Peck방법, (c) Peck & Bazaraa방법, (d) Meyerhoff 방법, (e) Burland-Burbidge방법

얇은 기초의 재하데이터와 관련 정보를 수집하여 D/B로 구축하고 대표적 5개 침하량 예측 공식에 대한 정확도, 신뢰도 및 통계분석을 실시하였다. 정확도 해석결과표로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 모든 침하량 예측방법에서 침하비(s/B)가 커짐에 따라 정확도도 비례하여 증가하는 즉, 예측치와 측정치가 근접하는 경향을 보였다.
- (2) 침하비 5.0%에서 가장 정확한 예측치를 보인 방법은 Meyerhoff 방법이었으며 같은 침하비에서 가장 정확도가 떨어지는 것은 Terzaghi와 Peck 방법이었다.
- (3) 전체 침하비 영역에서의 정확도의 순서는 ①Burland & Burbidge, ②Meyerhoff, ③Peck-Bazaraa, ④Alpan, ⑤Terzaghi와 Peck으로 나타났다.

신뢰도 해석결과표로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 전 침하비(s/B) 영역에 걸쳐 Terzaghi와 Peck 방법이 가장 신뢰수준이 높았다. 또한 각 침하비 대역에서 매우 균등한 신뢰수준을 보였다. 전체 침하비 대역에 걸쳐 신뢰수준이 높은 순서는 ①Terzaghi & Peck ②Peck-Bazaraa, ③Alpan ④Meyerhoff, ⑤Burland-Burbidge로 나타났다.
- (2) Burland-Burbidge 방법은 가장 최근에 제안된 방법이지만 전 침하비 영역에 걸쳐 신뢰수준이 매우 낮은 결과를 보였다. 또한 침하비(S/B)가 높을수록 신뢰수준이 떨어지는 추세를 보였다.
- (3) Terzaghi와 Peck방법과 더불어 Alpan방법과 Peck-Bazaraa방법이 침하비 5% 대를 제외하고는 95%에 근접하는 매우 높은 수준의 신뢰도를 보였으나 두 방법 모두 침하비 5%이상이 되면 신뢰수준이 매우 떨어지는 양상을 보였다. Meyerhoff 방법은 침하비 1%까지는 85%의 신뢰수준을 보였으나 그 이상의 침하비에서는 35%수준까지 떨어지는 불안정성을 보였다.

통계분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전체 침하비를 기준, 측정 침하량에 비해 예측침하량의 상대오차가 가장 큰 방법은 Terzaghi와 Peck 방법이었다. 가장 상대오차가 작은 것은 Burland-Burbidge 방법이었다.
- (2) 전체 침하비를 기준, 측정 침하량과 비교하여 예측침하량의 과도예측 비율이 가장 높은 것은 Terzaghi와 Peck 방법으로서 9배 이상의 과도 예측비율을 보였다. 반면 Burland-Burbidge 방법은 과도예측비율이 가장 작았다. 모든 예측방법에서, 침하비가 증가함에 따라서 과도예측비율이 점차 감소하는 경향을 보였다.

### 감사의 글

본 연구 성과물은 2001년도 한국도로공사 외부 공모과제 수행 결과물의 일부로서 지원에 감사드립니다.

- 건설교통부 (1996) 도로교표준시방서. pp. 622-623.
- 한국도로공사 (1992) 품질관리 실무. pp. 193-201.
- Alpan, I. (1964) *Estimating the settlements of foundations on sands*. Civil Engineering and Public Works Review, November, London, U. K.
- Bazaraa, A. R. S. (1967) *Use of the Standard Penetration Test for Estimating settlements of Shallow Foundations on Sand*, Ph.D. dissertation, Univ. of Illinois, at Urbana, IL, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- Briaud, J. L. (1993) *The National Geotechnical Experimentation Sites at Texas A&M University: Data Collected until 1992*. Research Report, Civil Engineering, Texas A&M University.
- Briaud, J. L., and Gibbens, R. M. (1994) Test and prediction results for five large spread footings on sand: Predicted and measured behavior of five spread footings on sand. *Geotech. Spec. Publ.*, No. 41, ASCE, New York, pp. 92-128.
- Briaud, J. L. and Gibbens, R. M. (1999) Behavior of Five Large Spread Footings in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 9, ASCE, pp. 787-796.
- Briaud, J.-L. and JeanJean, P. (1994) *Load Settlement Curve Method for Spread Footings on Sand*. Geotechnical Special Publication NO. 40, Edited by A. T. Yeung and G. Y. Felio, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, pp. 1774-1804.
- Burland, J. B., and Burbidge, M.C. (1985) Settlement of foundations on sand and gravel. *Proc. Inst. of Civil Engrs.*, (Part 1), 78, London, pp. 1325-1381.
- Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970) Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *J. Soil Mech. Found. Div.*, Proc. ASCE, 96(SM5).
- Ismael, N. F. (1985) Allowable pressure from loading tests on Kuwaiti soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 151-157.
- JeanJean, P. (1993) *Load settlement curves for spread footings on sand from the pressuremeter test*, Ph.D. dissertation, Civil Engineering, Texas A&M University.
- Larsson, R. (1998) Calculation of Settlements of Shallow Foundations on Sand and Silt Based on In Situ Test Results. *Transportation Research Record*, Transportation Research Board of the National Academies, Vol. 1614.
- Mayne, P. W. and Poulos, H. G. (1999) Approximate Displacement Influence Factors for Elastic Shallow Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 6, pp. 453-460.
- Meyerhoff, G. G. (1956) Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. *J. Soil Mech. Found. Div.*, Proc. ASCE, Vol. 82, No. SM1.
- Meyerhoff, G. G. (1965) Shallow foundations. *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol. 91, No. SM2.
- Meyerhoff, G. G. (1983) Scale Effect of Ultimate Pile Capacity. *J. Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 109, No. 6, pp. 797-806.
- NAVFAC DM 7.1 (1982) pp. 7.1-100-102, pp. 211-219.
- Peck, R. B. and Bazaraa, A. R. S. (1969). Discussion to Settlement of Spread Footings on Sand. *J. of Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol. 95, No. SM3, pp. 905-909.
- Sargand, S. M., Masada, T. (1999) Spread Footing Foundation for Highway Bridge Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp. 373-382.
- Schultze, E., and Sherif, G. (1973) Prediction of Settlements from

Evaluated Settlement Observation for Sand, *Proceedings, Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Vol. II.

Tan, C. K., and Duncan, J. M. (1991) Settlement of Footings on Sands - Accuracy and Reliability, *Geotechnical Special Publication No.27*, ASCE, New York, pp. 446-455.

Terzaghi, K., and Peck, R. B.(1967) *Soil Mechnacics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc., 2nd Ed.,

Terzaghi, K., and Peck, R. B., and Mesri, G. (1996) *Soil Mechanics*

*in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, Inc., 3rd Ed.,  
Vianna da Fonseca, A. (2001) Load Tests on Residual Soil and Settlement Prediction on Shallow Foundation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 10, pp. 869-883.

◎ 논문접수일 : 2007년 10월 25일  
◎ 심사의뢰일 : 2007년 11월 08일  
◎ 심사완료일 : 2008월 04월 01일