

풍화토지반 얕은기초에 대한 LRFD 저항계수 분석

Analysis of LRFD Resistance Factor for Shallow Foundation on Weathered Soil Ground

김 동 건¹⁾ · 김 훈 태¹⁾ · 서 지 원²⁾ · 유 남 재[†]

Donggun Kim · Huntai Kim · Jeeveon Suh · Namjae Yoo

Received: November 25th, 2014; Revised: December 26th, 2014; Accepted: May 11th, 2015

ABSTRACT : Recently the necessity of developing the Load and Resistance Factor Design (LRFD) for shallow foundation has been raised to implement to the domestic design codes related to geotechnical engineering since the limit state design is requested as international technical standard for the foundation of structures. In this study, applicability of LRFD for shallow foundation on weathered soils was investigated and resistance factor for this case was proposed. The quantitative analyses on the uncertainty and resistance bias for shallow foundation on weathered soil ground were performed by collecting the statistical data about domestic case studies for design and construction of shallow foundation. Reliability analyses for shallow foundation were first performed using FDA (First-order Design value Approach) method. Resistance factors were calibrated using the load factors obtained from the specifications of shallow foundations on weathered soil ground. The influence of the load factors developed in this study on the resistance factors were discussed by comparing with the resistance factor obtained from using AASHTO load factors.

Keywords : Load and resistance factor design, Resistance bias factor, Plate bearing test, Resistance factors

요 지 : 최근 구조물 기초 분야에 대한 한계상태설계법이 국제적인 기술표준으로 요구됨에 따라 연구기반이 미약한 얕은기초에 대한 하중저항계수설계법 개발의 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 얕은기초 설계 시 풍화토 지반에 위치한 얕은기초에 대한 하중저항계수설계법의 적용 방안에 대하여 연구를 수행하고 그에 따른 저항계수를 제안하였다. 얕은기초 국내 설계 및 시공자료를 수집하여 확률통계학적 기법에 의한 분석을 수행함으로써 풍화토지반 얕은기초의 불확실성과 저항편향계수를 정량적으로 분석하고, 신뢰성 해석 LEVEL II를 이용하여 목표신뢰도 지수를 평가하였으며, 산정된 신뢰도지수를 기존 문헌 값과 비교·분석하여 풍화토 지반 얕은기초에 대한 목표신뢰도 지수를 선정하였다. 국내 풍화토지반 얕은기초에 대한 하중계수를 적용하여 저항계수를 보정하였으며, AASHTO의 하중계수를 적용한 저항계수와 비교·분석하였다.

주요어 : 하중저항계수설계법, 저항편향계수, 평판재하시험, 저항계수

1. 서 론

본 연구에서는 풍화토지반 얕은기초에 대하여 현재 적용되고 있는 설계법들이 내재하고 있는 불확실성을 통계학적 분석을 통하여 정량화하고, 기술 수준에 부합하는 신뢰도 수준을 확보할 수 있도록 목표신뢰도 수준을 설정하여 신뢰성이론에 기반한 저항계수를 보정하고자 한다.

얕은기초의 경우 활동, 전도, 지지력 등 여러 조건에 대한 안정성을 검토하고 있으나, 하중저항계수 설계법 적용을 위하여 실측된 자료와 예측자료 비교를 통한 편향 특성 연구가 필수적이므로 관련 실측 자료를 확보할 수 있는 지지력에 대한 연구방법을 선정하였다. 얕은기초에 대한 하중저항계수설계법의 적용방안을 강구하기 위하여 선행 연구된 구

조물 기초의 한계상태설계법을 고찰하여 연구의 신뢰성을 확보할 수 있는 데이터베이스를 구축하였다. 또한 평판재하시험과 극한지지력 판정법을 이용하여 얕은기초의 신뢰도 수준을 검토하고 목표신뢰도지수를 제안하고자 하였다.

하중저항계수설계법에 관한 문헌연구로부터 저항계수 산정에 필요한 주요 인자는 저항편향계수(λ_R)와 변동계수(COV_R), 목표신뢰도지수(β_T), 하중비(Q_D/Q_L)로 분석됨에 따라 이들을 중심으로 연구를 진행하였다.

신뢰성 이론에 근거한 하중저항계수설계법에서는 충분한 양의 데이터를 통한 저항계수의 보정이 이루어져야 하기 때문에 최초로 국내·외 문헌자료 및 평판재하시험 자료 54개를 수집 분석하였으며, AASHTO(2010) 시방서의 근간이 되고 있는 말뚝기초, 얕은기초, 쏘일네일링 등의 연구에서는

1) Department of Civil Engineering, Kangwon National University

2) Seongwoogeotec

† Department of Civil Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : njyoo@kangwon.ac.kr)

신뢰도 높은 데이터베이스 구축을 위한 데이터 품질 평가가 미흡하여 수집된 데이터의 품질을 평가하는 방법에 대한 연구가 필요한 실정이다.

평판재하시험으로부터 얻어진 하중-침하량 곡선을 이용해 극한지지력을 판정하는 과정에서 극한하중을 판정하기 어려운 현상이 발견되어 이를 예측하는 데 어려움이 있었다. 이를 위해 본 연구에서는 네 가지 극한지지력 판정법을 적용하였으며, 극한지지력 판정법과 지지력이론식에 따른 지지력 산정결과에 대한 비교·분석을 수행하였고, 각 이론식에 따른 저항계수 보정 결과를 분석하였다. 또한 얇은기초 파괴에 대한 신뢰도 수준을 평가하는 데 중점을 두고 연구를 수행함으로써 합리적인 목표신뢰도지수를 제시하였다.

국내·외 하중저항계수설계법에서 가장 많이 이용되고 있는 AASHTO(2010)의 교량 설계기준의 하중계수와 본 연구로부터 산출된 저항의 통계학적 특성값을 적용하여 얇은기초의 파괴에 대한 지지력 이론식별 저항계수를 보정하였다.

2. 얇은기초의 저항편향계수

2.1 개요

얇은기초란 상부구조물의 하중을 직접 지반으로 전달시키기 위하여 지반 위에 놓이는 기초 구조물을 말한다. 설계 단계에서는 지지력 산정식을 이용하여 상부하중에 대한 기초지반의 지지 여부를 판정하여 설계하며, 시공단계에서는 평판재하시험을 통하여 지지력을 확인한 후 기초를 시공하게 된다. 특히 평판재하시험은 얇은기초의 지지력을 평가하기 위하여 사용되고 있는 방법 중 하나이며, 다른 방법으로는 기초의 지지력이나 침하량을 추정하기 어려운 경우이거나, 중요한 구조물의 기초로서 지지력과 침하량을 정확히 예측할 필요가 있을 때 사용한다.

지지력의 또 다른 평가방법으로는 실내시험을 통해 기초지반의 내부마찰각(ϕ)과 점착력(c)을 구하여 Terzaghi(1943), Meyerhof(1955), Hansen(1970), Vesic(1973) 등이 제안한 이론적인 극한지지력산정 방법이 있다.

2.2 평판재하시험 데이터베이스

얇은기초의 하중저항계수설계법을 위한 데이터베이스를 구축하기 위해서는 실제 극한지지력을 평가하기 위한 평판재하시험 자료와 극한지지력 예측에 필요한 얇은기초의 제원과 지반특성 등의 자료수집이 요구되며, 데이터베이스 구성항목으로는 정재하시험 제원인 재하판폭, 재하판 직경이 사용되었으며, 얇은기초의 제원으로는 근입깊이, 기초폭이

사용되었고 지반 특성값으로는 단위중량, 내부마찰각, 점착력이 사용되었다.

본 연구에서는 국내 평판재하시험 보고서 및 학술 논문으로부터 최초 300여 종의 자료를 수집하였다. 본 연구는 풍화토 지반에 설치된 얇은기초의 저항편향 특성을 살펴보고자 하였으므로, 재하시험이 수행된 지반의 점착력 및 내부마찰각이 $c=15\text{kPa} \sim 25\text{kPa}$, $\phi=30^\circ \sim 40^\circ$ 범위 내에 해당하는 자료를 우선적으로 선별하였고, 재하시험 결과를 도시하여 하중(P)-침하(S) 곡선이 불분명해서 극한지지력을 확인할 수 없는 경우, 극한지지력의 저항편향계수가 $\pm 2\sigma$ 범위 내에 존재하지 않는 경우에 해당되는 데이터는 제외하고 Table 1과 같이 최종적으로 54개의 평판재하시험 데이터를 사용하였다.

2.3 평판재하시험에 의한 극한지지력 평가

얇은기초 설계를 위해 수행되는 재하시험 및 지반조사 결과를 수집하였고, SPT/CPT 등과 같은 지반조사 시험 결과에 따른 지반정수의 추정 등에 대한 불확실성을 피하기 위하여 평판재하시험 결과를 이용한 지반의 극한지지력 산정 방법을 사용하였다. 현재 대부분의 재하시험은 극한하중단계까지 수행되지 않고, 설계하중의 2배에 이르는 하중단계까지 재하하고 있어 재하시험을 통해 극한지지력을 결정하는 데 어려움이 있다. 따라서 재하시험 결과를 이용한 극한지지력을 산정하기 위하여 NCHRP 651(Paikowsky et al., 2010) 및 Vesic(1963) 등이 제안하는 극한지지력 산정방법 Minimum-slope법(Vesic, 1963), log-log법(De Beer, 1967), Two-slope법(NAVFAC, 1982), 0.1B법(Vesic, 1975)을 적용하였고, 그 결과를 Table 2와 같이 정리하였다.

Table 1. The status of data collection

Type	Domestic thesis	Plate load test report
Data	19	35

Table 2. Ultimate bearing capacity by load test

Ultimate bearing capacity by load test (kN/m ²)			
0.1B	Minimum-slope	Log-log	Two-slope
57.492	58.623	33.738	27.229
69.565	73.227	54.420	55.208
746.399	585.521	379.399	335.596
782.566	675.980	370.986	351.380
693.748	712.679	521.063	469.235
656.140	505.851	492.638	428.529
381.184	334.897	246.332	303.054
382.263	367.259	229.890	174.390
587.026	553.585	252.070	324.729
427.472	403.936	317.337	246.332

2.4 이론식에 의한 극한지지력 평가

편향계수 산정을 위하여 얇은기초의 설계 극한지지력을 산정하고자 기존의 문헌에서 제안하고 있는 Terzaghi, Meyerhof, Hansen, Vesic 방법을 적용하였다. 기초에 적용된 기초제원과 지반조건은 재하시험 시 조건과 동일하게 적용하였고, 재하시험 자료 선정 시 불확실성을 최소화하기 위하여 관련 변수값이 부족한 자료는 포함하지 않았다. 예측된 극한지지력을 정리한 결과, Table 3과 같이 Terzaghi 방법은 30.6~416.8kN/m³, Meyerhof 방법은 60.3~811.3kN/m³, Hansen 방법은 25.6~413.2kN/m³, Vesic 방법은 36.6~423.1kN/m³의 범위로 나타났다. Meyerhof의 평균 극한지지력이 가장 큰 값으로 예측되었고, Hansen의 이론식에 의해 산정된 극한지지력이 가장 보수적으로 평가되었다.

2.5 얇은기초의 저항편향계수

저항편향계수는 재하시험, 확인조사 등을 통해 측정된 저항값(R_m , Measured Resistance)에 대한 설계공식, 실내시험 등으로 예측된 저항값(R_n , Predicted or Nominal Resistance)의 비로써 Eq. (1)과 같이 정의되며, 저항편향계수의 변동계수는 Eq. (2)와 같다.

$$\lambda_{R_i} = \frac{R_m}{R_n}, \quad \lambda_R = \frac{\lambda_{R_i}}{N} \quad (1)$$

$$COV_R = \frac{\sigma_R}{\lambda_R} \quad (2)$$

여기서 λ_{R_i} : 저항편향치

λ_R : 저항편향계수(저항편향치의 평균)

저항편향계수에 대한 통계학적 분석은 저항값을 예측하는 해석모델의 정확성을 정량적으로 판단할 수 있다. 예측값이 정확한 예측모델일수록 저항편향계수의 평균값은 1에 가까워지며, 변동계수(COV)는 작은 값을 나타낸다. 또한 저항편향계수가 1에 근접한 예측방법은 동일한 조건하에서 저

Table 3. Predicted ultimate bearing capacity by theory

Theory	Ultimate bearing capacity (kN/m ²)				
	Min.	Max.	Mean	Standard deviation	Coef. of variation
Terzaghi	30.6	416.8	228.4	132.9	0.58
Meyerhof	60.3	811.3	340.5	176.6	0.52
Hansen	25.6	413.2	204.0	136.8	0.67
Vesic	36.6	423.1	229.9	132.4	0.57

항계수 값이 증가하는 결과를 보이게 된다.

지지력 이론식별 저항편향계수(λ_R)는 $\lambda_R=1.045 \sim 1.716$ $COV_R=0.385 \sim 0.53$ 으로 산정되었으며, 전체자료에 대한 저항편향계수와 변동계수의 평균은 각각 $\lambda_{R_{avg}}=1.274$, $COV_{R_{avg}}=0.433$ 으로 극한지지력 이론식은 실제 극한지지력을 과소평가하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 자세한 결과는 Table 4, 5에 정리하였다.

각 방법에 따라 결정된 실측 및 예측 지지력의 관계를 Fig. 1과 같이 실측지지력이 예측지지력보다 크게 산정된 경우 과소평가하는 경향이므로 Conservative, 그 반대의 경우를 Unconservative로 평가하여 나타내었다.

0.1B 방법의 경우, Meyerhof 방법을 적용하였을 때 저항계수는 1.045, COV는 0.400으로 나타나 0.1B 방법을 적용하는 경우 불확실성이 낮은 것으로 나타났다.

Minimum-slope 방법의 경우, 0.1B 방법을 적용하였을 경우와 마찬가지로 Meyerhof 방법을 적용하였을 때, 저항계수가 1.085, COV는 0.407로서 불확실성이 가장 낮은 것으로 나타났다.

Two-slope 방법의 경우, Vesic 방법을 적용하였을 때 저항계수는 1.074, COV는 0.457로 나타나 불확실성이 가장 낮은 것으로 나타났다.

LogP-LogS 방법의 경우에서도 Two-slope 방법과 마찬가지로 Vesic 방법을 적용하였을 때 저항계수는 1.054, COV는 0.449로 나타나 불확실성이 가장 낮은 것으로 나타났다.

전반적으로 볼 때 재하시험에 의한 극한지지력을 산정하고 이론식과 비교하여 저항편향을 살펴보면 Vesic 방법과

Table 4. The mean of resistance bias factor by ultimate bearing capacity theory

	Mean of resistance bias factor ($\lambda_{R_{avg}}$)			
	0.1B	Two slope	Minimum slope	LogP - LogS
Terzaghi	1.414	1.098	1.453	1.097
Meyerhof	1.045	1.200	1.085	1.077
Hansen	1.603	1.338	1.716	1.335
Vesic	1.378	1.074	1.417	1.054

Table 5. The mean of variation coefficient by ultimate bearing capacity theory

	Mean of variation coefficient ($COV_{R_{avg}}$)			
	0.1B	Two slope	Minimum slope	LogP - LogS
Terzaghi	0.396	0.439	0.396	0.468
Meyerhof	0.400	0.418	0.407	0.460
Hansen	0.385	0.512	0.400	0.530
Vesic	0.401	0.457	0.403	0.449

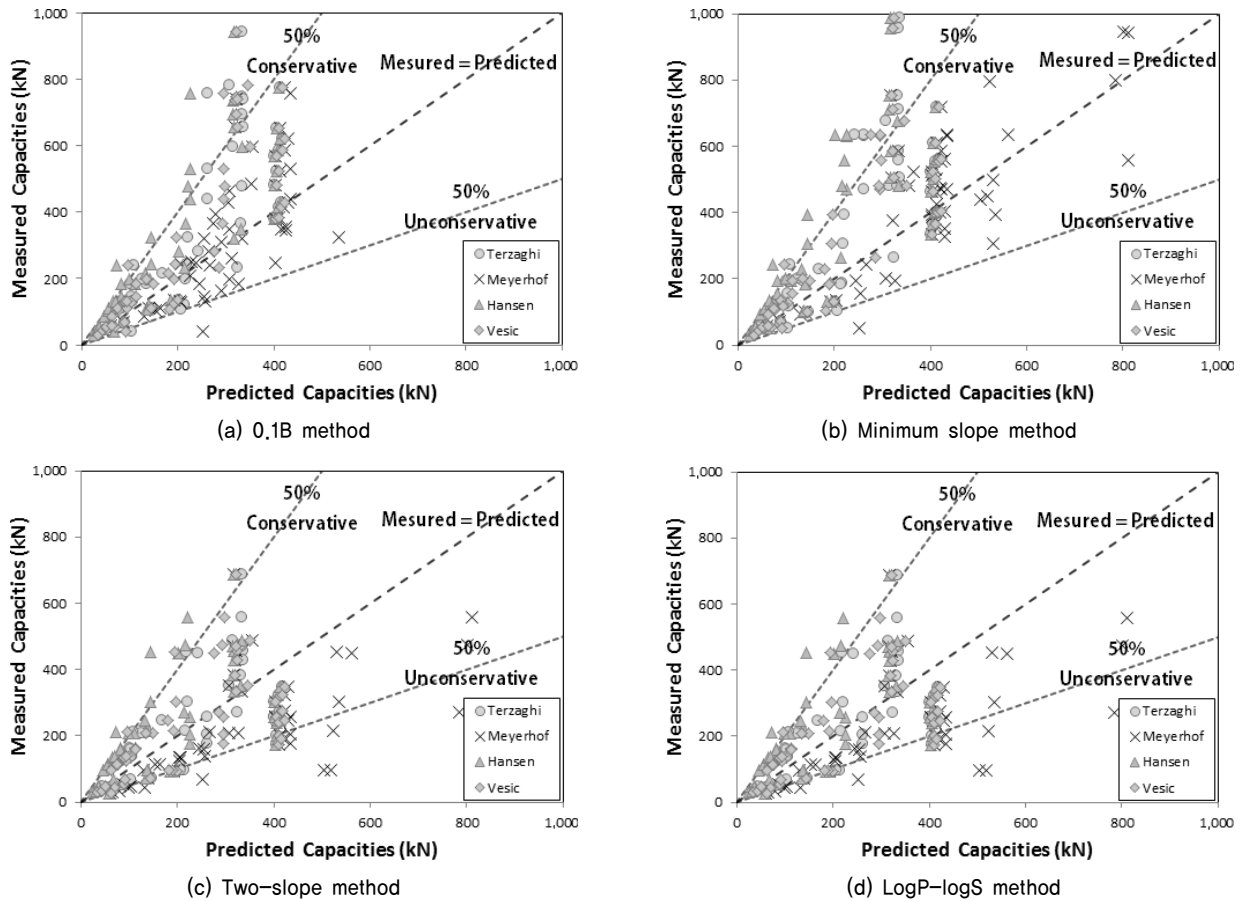


Fig. 1. Resistance bias factor estimation

Meyerhof 방법을 적용하여 설계지지력을 산정 시 불확실성이 가장 낮게 평가됨을 알 수 있다.

3. 얽은기초의 목표신뢰도지수

3.1 확률변수의 통계학적 특성

한계상태함수를 구성하는 설계변수는 확률변수로 취급되며, 저항함수(R)와 관련된 확률변수는 원지반의 내부마찰각, 점착력이다. 점착력과 내부마찰각에 대한 특성값은 문헌 제안값 및 국내 직접전단 시험결과를 이용해 얻을 수 있었으며, 하중은 Table 6에 보인 바와 같이 AASHTO(2010) 시방서를 인용하였다.

저항의 확률변수로 사용된 점착력과 내부마찰각에 대한 카이제곱검정을 통해 각 확률변수들의 분포특성을 분석한 결과 점착력과 내부마찰각 모두 정규분포를 따르는 것을 알 수 있었다. Fig. 2 또한 점착력(c)의 평균값은 1.71t/m^2 , 표준편차는 0.88로 분석되었고, 내부마찰각(ϕ)의 평균값은 31.64° , 표준편차는 5.94로 분석되었다.

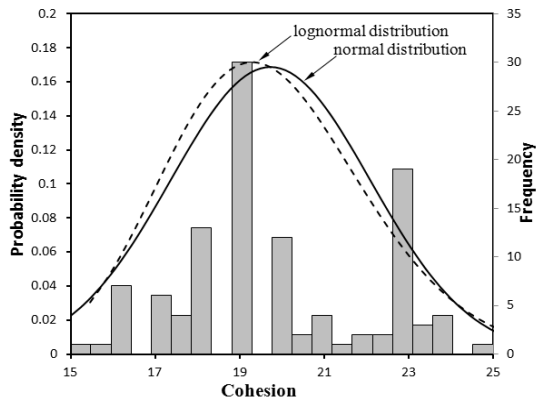
Table 6. The statistic characteristic of probability variation

Probability variation		Coefficient of variation	Probability distribution	Reference
Ground	Unit weight	0.1	Normal	Phoon & Kulhawy (1996)
	Cohesion	0.3	Lognormal	
	Internal friction angle	0.2	Normal	Direct shear test
Load	Dead load	0.10	Lognormal	AASHTO (2010)
	Live load	0.25	Lognormal	

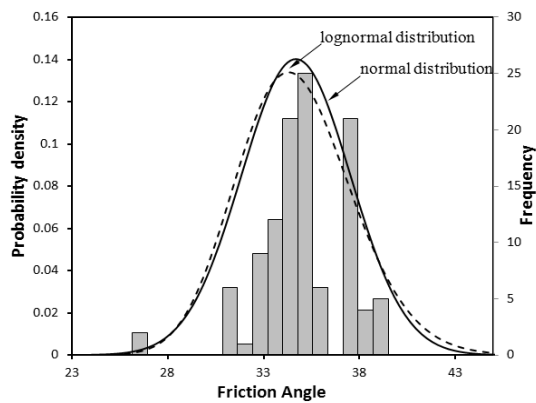
3.2 얽은기초의 목표신뢰도 지수

본 연구에서는 얽은기초의 적용사례를 수집하고 전단파괴에 대한 신뢰성 해석을 수행함으로써 현재 실무에서 적용되고 있는 얽은기초의 신뢰도 수준을 평가하고, 허용응력설계법에 의한 안전율과 신뢰도지수의 관계를 분석하였다.

Level II는 각 확률변수의 1차 모멘트인 평균과 2차 모멘트인 분산, 분포형태를 이용하여 파괴점으로부터 한계상태함수의 평균값의 떨어져 있는 정도를 나타내는 척도로 신뢰지수를 근사적으로 산정하는 방법이고, Level III는 파괴확률을 산정하는데 한계상태함수에 대하여 확률밀도함수를



(a) Distribution characteristic of cohesion



(b) Distribution characteristic of internal friction angle

Fig. 2. Distribution characteristic of probability variation

구성하고 다중적분을 수행하여 산정하는 방법이다.

최초에 국내 얇은기초 설계 및 시공 자료를 20여 종 수집 하였으나, 대부분이 교량기초이고 지지층이 풍화암인 경우가 대부분이었기 때문에 풍화토지반에 설치된 설계 단면 3 개소에 대해 신뢰성 해석을 수행하였으며, 신뢰성 해석이 수행된 얇은기초의 폭은 2.4~15.5m, 길이는 2.4~57.8m, 근입 깊이가 1.93~2.13m로 구성되었다. 신뢰성 해석을 위한 한계상태함수는 Eq. (3)을 기본으로 하여 Terzaghi(1943), Meyerhof (1955), Hansen(1970), Vesic(1973)의 이론식을 이용하여 구성하였다.

$$g(X) = R - Q = q_u \cdot A - (Q_D + Q_L) \quad (3)$$

본 논문에서 산정된 신뢰도 수준은 Table 7~9에서와같이 $\beta=1.84\sim3.55$ 의 범위로 분석되었으며, 평균 신뢰도지수 $\beta=2.71$ 로 산정되었다. Fig. 3에 표시된 기존 문헌의 목표신뢰도지수 및 허용응력설계법의 안전율을 이용하여 적용하였을 경우(Becker, 1996) 약 3~4의 목표신뢰도지수로 나타났고, 이와 비교한 결과 기존의 얇은기초의 목표신뢰도지수보다 낮게 평가되었다. 본 연구는 초기 자료 수집에서부터

Table 7. Reliability analysis result of Site 1

Probability variation	Level II		Level III
	Reliability index (β)	Failure probability (P_f)	Failure probability (P_f)
Terzaghi	2.54	0.0055	0.0064
Meyerhof	2.28	0.0113	0.0136
Hansen	1.84	0.0329	0.0401
Vesic	2.41	0.0080	0.0094

Table 8. Reliability analysis result of Site 2

Probability variation	Level II		Level III
	Reliability index (β)	Failure probability (P_f)	Failure probability (P_f)
Terzaghi	3.55	0.0002	0.0002
Meyerhof	3.15	0.0008	0.0009
Hansen	2.55	0.0054	0.0065
Vesic	3.03	0.0012	0.0015

Table 9. Reliability analysis result of Site 3

Probability variation	Level II		Level III
	Reliability index (β)	Failure probability (P_f)	Failure probability (P_f)
Terzaghi	3.14	0.0008	0.0008
Meyerhof	2.79	0.0026	0.0030
Hansen	2.26	0.0119	0.0138
Vesic	2.96	0.0015	0.0018

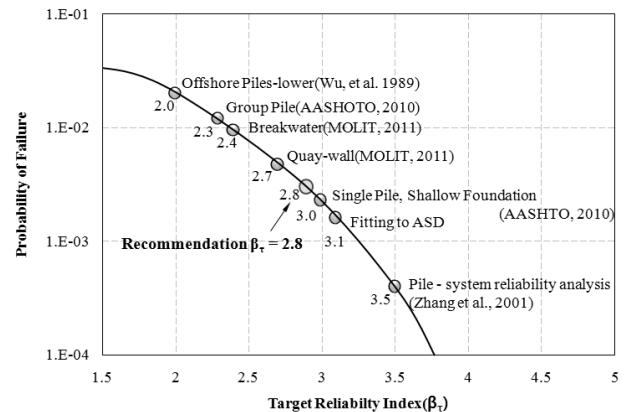


Fig. 3. Target Reliability index of structure foundation

풍화토 지반에 설치되는 얇은 기초에 대하여 분석되었으며, 앞서보았듯이 허용응력설계법의 안전율에 대응되는 목표 신뢰도 지수는 일반적으로 제안되는 구조물 기초의 목표신뢰도지수 범위보다 낮은 값을 보이고 있다. 따라서 상부구조물과의 일관된 신뢰성을 확보하고, 허용응력설계법의 안전율에 대응되는 목표신뢰도 지수를 확보할 수 있도록 파괴 확률 0.2%에 해당하는 $\beta_T=2.8$ 로 선정하였다.

4. 얇은기초의 저항계수 산정

4.1 안전율을 이용한 저항계수 보정

안전율에 의한 보정방법은 과거 경험적으로 안정성이 확인된 안전여유를 저항계수에도 동일하게 부여할 수 있으므로 지반공학 분야에서 하중저항계수설계법의 도입 시기에 저항계수 보정에 많이 이용되었다.

본 연구에서 수집된 데이터베이스를 이용하기에 앞서, 허용응력설계법의 안전율을 이용한 LRFD 예비 보정방법(Preliminary calibration scheme)으로 Eq. (4)(FHWA, 2001)를 이용하여 저항계수를 산정하였다.

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\gamma_{QD}Q_D + \gamma_{QL}Q_L}{F_s(Q_D + Q_L)} \\ &= \frac{\gamma_{QD}(Q_D/Q_L) + \gamma_{QL}}{F_s(Q_D/Q_L + 1)} \end{aligned} \quad (4)$$

저항계수 산정에 이용된 하중계수는 AASHTO(2010) 시방서를 이용하였으며, 허용응력설계법에서 얇은기초에 대한 안전율은 현재 실무에서 가장 많이 사용하고 있는 $F_s=3.0$ 값을 적용하였다. 하중비는 0.5~15 범위를 적용하였다.

해석결과 Table 10과 같이 안전율(F_s) 3으로 보정된 하중비(Q_D/Q_L)에 따른 저항계수의 범위는 0.53~0.44로 나타났으며, 하중비(Q_D/Q_L)=5 이상일 경우부터는 하중계수의 변화가 거의 없이 수렴하는 것으로 나타났다.

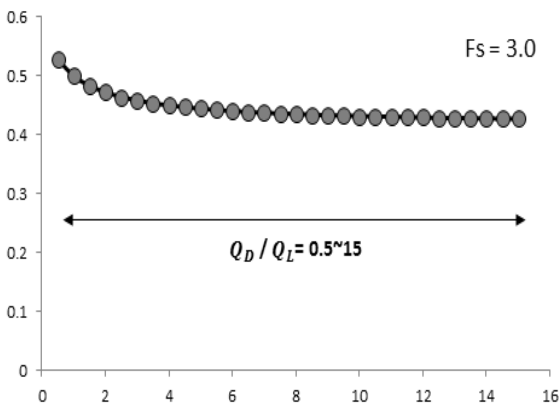


Fig. 4. Resistance factor by load ratio ($F_s = 3.0$)

Table 10. Resistance factor by load ratio

Load ratio (Q_D/Q_L)	0.5	1	1.5	2	3	5	10	15
Resistance factor (ϕ)	0.53	0.5	0.47	0.46	0.45	0.44	0.44	0.44

4.2 신뢰성 해석에 의한 저항계수 보정

하중계수($\gamma_Q, \lambda_{R_{avg}}, COV_{R_{avg}}$)는 Table 6 및 앞서 산정한 계수들의 평균값을 적용하였고, 하중비는 신뢰성 해석을 수행한 적용 설계 단면의 하중비($Q_D/Q_L=6.7$)를 적용하였으며, 목표신뢰도 지수를 $\beta_T=2.8$ 로 적용하였다. 저항편향 값의 분포 특성을 파악하기 위하여 Chi-square 검정을 수행하였으며, Table 11에서처럼 두 경우 모두 검정통계량이 한계 값보다 작은 값으로 나타났고, 유의수준 또한 모든 제안식에 대하여 5% 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 모든 제안식에 대하여 로그정규분포의 검정통계량이 정규분포보다 작게 나타나 로그정규분포에 적합한 것으로 평가되었다.

Eq. (5)는 로그정규분포를 가정한 경우에 적용되는 식으로서 앞서 저항편향 값의 적합성을 검토하였고, 이를 사용하여 저항계수를 산정한 결과 저항계수는 Table 12와 같이 $\phi=0.36\sim0.44$ 로 보정되었고, Meyerhof 이론식과 Terzaghi와 Hansen의 지지력 이론식 모두 안전율로 환산된 저항계수와 유사한 값을 나타냈으며, 저항계수는 저항편향계수의 크기에 비례하는 것으로 나타났다. 신뢰성 이론에 기반한 저항계수가 앞서 안전율로 보정된 저항계수에 비해 약 67~85% 수준으로 나타나 현행 얇은기초의 허용응력설계법의 안전여유가 부족한 것으로 평가할 수 있다.

$$\phi = \frac{\lambda_R \left(r_D \frac{Q_D}{Q_L} + r_L \right) \sqrt{\left(\frac{1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2}{1 + COV_R^2} \right)}}{\left(\lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{QL} \right) \exp(\beta_T \sqrt{\ln(1 + COV_R^2)(1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2)})} \quad (5)$$

Table 11. Review of suitability distribution

Theory	Chi-square test			
	Test statistics		Critical value	P-value
	Lognormal distribution	Normal distribution		
Terzaghi	2.242	3.024	7.815	0.672
Meyerhof	1.108	1.715	7.815	0.644
Hansen	1.422	2.317	9.488	0.546
Vesic	0.103	0.674	7.815	0.972

Table 12. The result of resistance factor correction ($\beta_T = 2.8$)

Theory	Resistance bias factor ($\lambda_{R_{avg}}$)	Coef. of variation ($COV_{R_{avg}}$)	Resistance factor (ϕ)
Terzaghi	1.26	0.42	0.41
Meyerhof	1.10	0.42	0.36
Hansen	1.50	0.46	0.44
Vesic	1.23	0.43	0.40

5. 결 론

본 연구는 최근 구조물 기초 분야에서 한계상태설계법이 국제적 기술 표준으로 정립되고 있는 세계적인 추세에 대응하기 위하여 구조물 기초로 활용되고 있는 얇은기초에 대한 한계상태설계법을 구성하고 그에 따라 신뢰성 이론에 근거한 저항계수를 보정하기 위해 수행되었다. 신뢰성 해석 이론에 근거한 저항계수 보정 및 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출해 내었다.

- (1) 재하시험 결과를 활용한 저항편향특성을 분석한 결과, 0.1B 방법의 경우 Meyerhof 방법을 적용하였을 때 저항편향계수가 1.045, COV는 0.400으로 나타나 불확실성이 가장 낮게 평가되었고, Minimum-slope 방법의 경우 0.1B 방법과 유사한 경향을 보였으며, 이 방법에서도 역시 Meyerhof 방법을 적용하였을 때 저항편향계수가 1.085, COV는 0.407로서 불확실성이 가장 낮은 것으로 나타났다. Two-slope 방법의 경우 Vesic 방법을 적용하였을 때 저항계수는 1.074, COV는 0.457로 나타나 불확실성이 가장 낮은 것으로 나타났고, LogP-LogS 방법의 경우 Vesic 방법을 적용하였을 때 저항계수는 1.054, COV는 0.449로 나타나 불확실성이 가장 낮은 것으로 나타났다.
- (2) 0.1B, Minimum-slope, Two-slope, LogP-LogS 방법을 통해 저항편향계수를 산정한 결과 모두 과소평가되는 것으로 나타났다.
- (3) 국내 얇은기초에 대한 3개소의 설계-시공 자료를 수집하여 신뢰성 해석에 의한 신뢰도지수를 평가한 결과, 평균 신뢰도지수는 2.71로 분석되었다.
- (4) 얇은기초는 말뚝기초에 비하여 비교적 높은 안정성을 요구하고 있으며, 본 연구에서 계산된 신뢰도 수준은 기존 문헌에서 제안하고 있는 목표신뢰도지수에 비해 상대적으로 낮게 평가되었다. 따라서 본 연구에서는 상부 구조물과 일관된 신뢰도를 확보할 수 있고, 허용응력설계법의 안전율에 대응되는 신뢰도 지수를 확보하기 위해 기존문헌과 비교·평가하여 목표신뢰도지수를 $\beta_T=2.8$ 로 선정하였다.
- (5) 허용응력설계법의 안전율($F_s=3.0$)에 의해 보정된 얇은기초의 전단파괴에 대한 저항계수는 $\phi=0.53\sim 0.44$ 로 보정되었다.
- (6) 극한지지력 이론식별 얇은기초의 저항계수는 $\phi=0.36\sim 0.44$ 의 범위로 나타났으며, 신뢰성 이론에 기반한 안전계수가 안전율로 환산된 저항계수에 비해 약 67~85% 수준으로 나타나 현행 얇은기초의 허용응력설계법의 안전여유가 부족한 것으로 평가할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 “2013년도 강원대학교 학술연구조성비” 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. AASHTO (2010), AASHTO LRFD bridge design specifications, fifth edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., pp. 3-1~3-159; 10-1~10-81.
2. Becker, D. E. (1996), Eighteenth canadian geotechnical colloquium : limit state design for foundations, part II. Development for the national building code of Canada, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, No. 6, pp. 984~1007.
3. De Beer, E. E. (1967), Proefondervindelijke bijdrage tot de studie van het gransdragvermogen van zand onder funderingen op staal; Bepaling von der vormfactor sb, Annales des Travaux Publics de Belgique, 68, No. 6, pp. 481~506; 69, No. 1, pp. 41~88; No. 4, pp. 321~360; No. 5, pp. 395~442; No. 6, pp. 495~522.
4. FHWA (2001), Load and resistance factor design (LRFD) of highway bridge substructures, Federal Highway Administration, Report No. FHWA HI-98-032, Washington D.C., pp. 84.
5. Hansen, J. B. (1970), A revised and extended formula for bearing capacity, Danish Geotechnical Institute Bulletin 28, Copenhagen, pp. 22.
6. Meyerhof, G. G. (1955), Influence of roughness of base and ground water condition on the ultimate bearing capacity of foundations, Geotechnique, pp. 5:227.
7. MOLIT (2011), Reliability design standards of quay - gravity and pier, pp. 72~86 (in Korean).
8. NAVFAC (Naval Facilities Engineering Command Design Manual) DM-7.2 (1982), Foundations and earth structures: design manual 7.2, Naval Facilities Engineering Command, pp. 244.
9. Paikowsky, S. G., Canniff, M. C., Lesny, K., Kisse, A., Amaty, S. and Muganga, R. (2010), NCHRP report 651: LRFD design and construction of shallow foundations for highway bridge structures, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., pp. 82~127.
10. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1996), Practical reliability based design approach for foundation engineering, Research Record 1546, Transportation Research Board, Washington, pp. 94~99.
11. Terzaghi, K. (1943), Theoretical soil mechanics, Wiley, New York, pp. 55~108.
12. Vesic, A. (1963), Bearing capacity of deep foundations in sand, Highway Research Record 39: Stresses in Soils and Layered Systems, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington D.C., pp. 112~153.
13. Vesic, A. (1973), Analysis of ultimate loads of shallow foundations, Journal of soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 99(SMI), pp. 45~73.
14. Vesic, A. (1975), Bearing capacity of shallow foundations, Foundation Engineering Handbook (eds. H.F. Winterkorn and H.Y. Fang), Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 121~147.
15. Wu, T., Tang, W., Sangrey, D. and Baecher, G. (1989), Reliability of offshore foundations—state of the art, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 2, pp. 157~178.
16. Zhang, L., Tang, W. and Ng, C. (2001), Reliability of axially loaded driven pile groups, Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, Vol. 127, No. 12, pp. 1051~1060.