

쇄석다짐말뚝으로 개량된 지반의 극한한계상태에 대한 저항편향계수 산정

Estimation of Resistance Bias Factors for the Ultimate Limit State of Aggregate Pier Reinforced Soil

봉 태 호¹ Bong, Tae-Ho
김 병 일² Kim, Byoung-II
김 성 렬³ Kim, Sung-Ryul

Abstract

In this study, the statistical characteristics of the resistance bias factors were analyzed using a high-quality field load test database, and the total resistance bias factors were estimated considering the soil uncertainty and construction errors for the application of the limit state design of aggregate pier foundation. The MLR model by Bong and Kim (2017), which has a higher prediction performance than the previous models was used for estimating the resistance bias factors, and its suitability was evaluated. The chi-square goodness of fit test was performed to estimate the probability distribution of the resistance bias factors, and the normal distribution was found to be most suitable. The total variability in the nominal resistance was estimated including the uncertainty of undrained shear strength and construction errors that can occur during the aggregate pier construction. Finally, the probability distribution of the total resistance bias factors is shown to follow a log-normal distribution. The parameters of the probability distribution according to the coefficient of variation of total resistance bias factors were estimated by Monte Carlo simulation, and their regression equations were proposed for simple application.

요 지

이 연구에서는 쇄석말뚝공법의 한계상태설계법 적용을 위하여 양질의 현장재하시험 자료로부터 저항편향계수의 통계적 특성을 분석하고 지반 불확실성 및 시공 오차를 고려한 총 저항편향계수를 산정하였다. 저항편향계수 산정을 위한 예측모델은 기존 모델들에 비하여 높은 예측성능을 보인 Bong and Kim(2017)의 MLR 모델을 활용하였으며 그 적합성을 평가하였다. 저항편향계수의 확률분포를 산정하기 위하여 카이제곱 적합도 검정을 수행하였으며 정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 공칭저항의 총 변동성은 점토의 비배수전단강도 및 쇄석말뚝 시공 시 발생할 수 있는 시공 오차에 대한 불확실성을 포함하여 산정하였다. 최종적으로 총 저항편향계수의 확률분포는 로그정규분포를 따르는 것으로 나타났다. 총 저항편향계수의 변동성에 따른 확률분포의 매개변수는 Monte Carlo 시뮬레이션을 통하여 산정하였으며, 간편한 적용을 위하여 이에 대한 회귀식을 제안하였다.

1 정희원, 서울대학교 건설환경종합연구소 연구 조교수 (Member, Research Assistant Prof., Institute of Construction and Environmental Engr., Seoul National Univ.)

2 정희원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., Myongji Univ., Tel: +82-31-330-6415, Fax: +82-31-336-9705, bikim@mju.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 12월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

구조물의 대형화와 복합화 경향에 따라 경제적이고 합리적인 최적 설계방안에 대한 요구가 증가하면서 신뢰도를 기반으로 하는 설계법이 세계적인 추세가 되어 가고 있다. 특히, 미국의 하중-저항계수 설계법(Load and Resistance Factor Design, LRFD)과 유럽의 유로코드(Eurocode)는 세계 대부분의 국가에서 사용하고 있으며, ISO2394(구조물의 신뢰도에 관한 일반 원리)를 기반으로 설계기준의 국제표준화가 가속되고 있다. 두 설계법의 차이점은 LRFD의 경우 설계모델에 의해 계산된 저항(또는 강도)에 재료나 설계모델의 불확실성을 반영하기 위한 저항계수를 곱해주는 반면, Eurocode에서는 설계 저항(또는 강도)을 이루는 다양한 지반 정수들에 부분안전계수를 적용하여 저항의 불확실성을 반영한다는 점이다. 국내의 경우, 2012년 도로교 설계기준(한계상태설계법)이 제정되었고 2015년부터 의무적으로 시행되고 있다. 도로교 설계기준(한계상태설계법, 2016) 중 하부구조에서는 구조물 기초의 극한한계상태에 대한 LRFD 적용을 위하여 확대기초, 타입말뚝, 그리고 현장 타설말뚝에 대한 저항계수를 제시하고 있다.

쇄석다짐말뚝 공법은 지중에 자갈이나 쇄석을 이용하여 다짐말뚝을 형성함으로써 연약지반을 보강하는 공법으로 기초지반의 지지력 증가, 침하량 감소, 액상화 방지 등 다양한 지반개량 효과를 얻을 수 있으며 환경적, 경제적 공법으로 알려져 널리 사용되고 있다. 우리나라에서는 1990년대부터 해성 점성토 지반의 개량을 위해 주로 모래다짐말뚝 공법이 많이 사용되어 왔으나 최근에는 모래수급 부족 및 단가 상승으로 모래 대신 쇄석다짐말뚝의 적용이 증가하고 있다. 하지만 아직까지 쇄석다짐말뚝으로 개량된 지반에 대하여 LRFD 적용을 위한 저항계수는 국내설계기준에 반영되지 않고 있다. 또한, 한계상태설계법을 적용하고 있는 다른 국가에서도 쇄석다짐말뚝에 의하여 보강된 연약지반 기초에 대한 연구는 아직까지 미흡하며 지속적인 연구가 필요하다(Park et al., 2013).

쇄석말뚝공법의 LRFD 적용을 위한 국내 연구로 Han et al.(2012)은 LRFD 적용을 위한 쇄석다짐말뚝공법의

저항편향계수를 산정하기 위하여 국내외에서 수행된 41개의 현장시험 결과에 대하여 다양한 극한지지력 공식들을 적용하여 저항편향계수를 산정하고 그 적용성을 평가하였다. 이후, Han(2013)은 동일한 절차에 따라 단일쇄석말뚝에 대한 저항편향계수를 평가하고, 신뢰도 수준을 반영하여 저항계수를 보정하였다. You et al.(2014)은 단일쇄석말뚝공법의 한계상태설계 시 목표 신뢰도 지수를 산정하기 위하여 국내외 6개소에서 수집된 자료를 바탕으로 평균 신뢰도지수를 산정하였으며, 목표 신뢰도지수를 파괴확률 1%에 해당하는 2.33으로 제안한 바 있다.

적절한 신뢰성 기반 한계상태 모델의 교정은 일반적으로 주어진 모델의 저항 매개변수를 특성화하고 하중-저항인자를 평가하기 위하여 실규모(full scale) 현장시험에 대한 데이터를 통하여 이루어진다(Huffman et al., 2015). 그러므로 현장시험을 통하여 실측된 극한지지력과 설계에서 이용되고 있는 예측모델 사이 저항편향의 통계적 특성을 올바르게 파악하기 위해서는 양질의 현장시험 데이터를 사용하는 것이 매우 중요하다. 또한, 이를 위한 예측모델은 예측값이 어느 한쪽으로 편향되지 않아 실측값을 과소 또는 과대평가하지 않아야 하며, 예측 변동성이 작을수록 신뢰도 있는 모델이라 할 수 있다. 기존 연구에서 쇄석말뚝공법의 저항편향계수를 산정하기 위하여 평가된 극한지지력 예측모델들은 대부분 1980년대 이전에 제안된 것들로 관측지지력과 예측지지력 사이의 편향이 심하여 실측값을 과소/과대평가할 수 있으며, 저항편향계수의 변동계수 또한 대부분 40% 이상으로 매우 높은 것으로 나타났다.

Stuedlein(2008)은 연약지반에 설치된 쇄석말뚝에 대한 58개의 현장재하시험 결과를 수집하고 신뢰성 있는 데이터를 획득하기 위하여 지반특성, 재하시험 조건과 지반 균질성, 비배수 조건, 재하속도, 그리고 충분한 변위까지 재하 했는지 등 6가지 기준에 부합하는 30개의 현장재하시험 결과를 선별하였으며, Stuedlein and Holtz(2013)는 이를 바탕으로 기존 모델들의 예측 오차를 평가하고, 수정된 극한지지력 예측식 및 다중선형회귀(Multiple Linear Regression, MLR) 모형을 제안하였다. Bong and Kim(2017)은 Stuedlein and Holtz(2013)에 의하여 제안

된 MLR 모형의 단점을 보완하고자 다양한 입력변수의 수 및 조합을 고려하였으며, 새로운 자료에 대한 예측성을 고려하고자 교차검증을 통한 수정된 MLR 모형을 제안하였다.

이 연구에서는 쇄석말뚝공법에 대한 LRFD 적용을 위하여 기존 모델들에 비하여 높은 예측성을 보인 Bong and Kim(2017)에 의하여 제안된 MLR 모형을 활용하여 쇄석말뚝공법에 대한 저항편향계수를 산정하였다. 저항편향계수 산정에 대한 MLR 모형의 적합성을 평가하기 위하여 실측과 예측지지력에 따른 저항편향계수의 극한지지력 범위에 따른 독립성을 평가하였으며, 통계적 특성을 분석하고 이에 적합한 확률밀도함수를 선정하였다. 기존 연구의 경우 저항편향계수의 통계적 특성은 오직 예측모델의 변환에 따른 불확실성만을 고려하여 산정되었다. 하지만 실제 저항편향계수의 변동성은 지반의 불확실성 및 쇄석말뚝 시공에 따른 오차 등 다양한 불확실성을 포함하게 된다. 이에 따라 이 연구에서는 지반의 비배수전단강도와 쇄석말뚝 시공에 따른 불확실성을 저항편향계수의 변동성에 추가적으로 고려하였다. 총 저항편향계수의 통계적 특성은 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 활용하여 파악하였으며 결합확률밀도 함수에 적합한 이론적 확률밀도함수를 선정하였다. 최종적으로 저항편향계수의 총 변동성에 따른 확률분포의 매개변수를 산정하였으며 이에 대한 회귀식을 제안하였다.

2. 이론적 배경

2.1 한계상태설계법

구조물 기초의 한계상태(limit state)는 기초가 요구하

는 성능을 상실한 상태, 즉 기초의 파괴와 비파괴의 경계를 의미한다. 한계상태는 크게 기초의 전단파괴, 압축 파괴 등 강도에 관계되는 극한한계상태(Ultimate Limit State, ULS)와 기초의 침하, 변위 등 사용성에 관계되는 사용한계상태(Serviceability Limit State, SLS)로 구분된다. 구조물 기초의 한계상태는 구조물의 파괴와 비파괴의 경계를 나타내는 한계상태함수(g)로 표현되며 식 (1)과 같이 정의된다.

$$g = R - Q \quad (1)$$

여기서, R 과 Q 는 각각 기초의 저항과 기초에 작용하는 하중을 나타낸다. 하지만 실제 구조물에 작용하는 하중과 기초의 강도는 일반적으로 확정적이지 아니며 수많은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 신뢰성 해석에서는 지반정수와 하중에 대한 불확실성을 고려하여 R 과 Q 는 대푯값(또는 평균값)을 중심으로 이산성을 나타내는 확률변수로 취급된다. 이에 따라 R 과 Q 를 확률밀도 함수로 표현하면 Fig. 1(a)와 같고, 파괴확률은 두 확률 밀도함수가 겹치는 부분으로 음영으로 채워진 영역에 해당된다. 이를 두 확률변수를 결합하여 한계상태함수의 확률분포로 표현하면 Fig. 1(b)와 같고, g 가 0보다 작을 경우 파괴로 간주되므로 한계상태함수의 확률분포에서 0보다 작은 영역이 파괴확률에 해당된다. 만약 g 의 확률분포가 정규분포를 따른다고 한다면, 파괴확률은 신뢰도지수(reliability index, β)를 통하여 표현할 수 있으며 g 의 평균값, \bar{u} 를 g 의 표준편차, σ 로 나눈 값에 해당된다.

한계상태설계법에서는 이러한 개념을 설계에 반영하여 구조물의 안전수준을 일관성있게 확보할 수 있도록 저항과 하중에 대한 불확실성을 부분안전계수를 도입

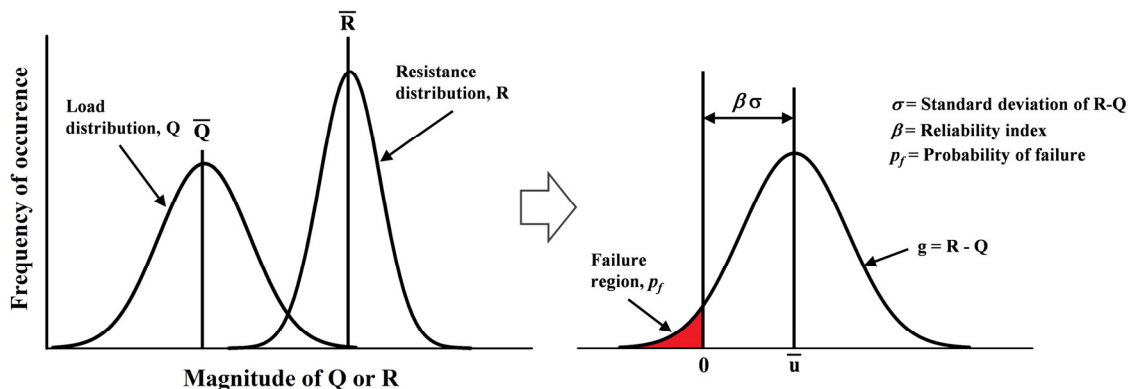


Fig. 1. Probability of failure in reliability-based design

함으로써 고려하였으며, 한계상태설계법에서 대한 기본적인 한계상태함수는 식 (2)와 같다.

$$g_i = \phi \cdot R_n - \sum_{i=1}^k \gamma_j Q_{n,i} \geq 0 \quad (2)$$

여기서, ϕ 는 저항계수, R_n 은 공칭저항, γ_i 은 하중계수, 그리고 $Q_{n,i}$ 는 공칭하중을 나타낸다. 만약 하중의 종류를 사하중(Q_{DL})과 활하중(Q_{LL})만을 고려할 경우, 사하중, 활하중, 그리고 저항(R_n)이 각각 독립이며, 로그 정규분포(log-normal distribution)를 따른다고 가정하면, 저항계수는 일계이차모멘트법(first-order second-moment, FOSM)에 의하여 식 (3)과 같이 산정할 수 있다(Paikowsky, 2004).

$$\phi = \frac{\lambda_R \left(\frac{\gamma_{DL} Q_{DL} + \gamma_{LL}}{Q_{LL}} \right) \sqrt{\frac{(1 + COV_{Q_{DL}}^2 + COV_{Q_{LL}}^2)}{1 + COV_R^2}}}{\left(\frac{\lambda_{DL} Q_{DL} + \lambda_{LL}}{Q_{LL}} \right) \exp\left\{ \beta \sqrt{\ln[(1 + COV_R^2)(1 + COV_{Q_{DL}}^2 + COV_{Q_{LL}}^2)]} \right\}} \quad (3)$$

여기서, λ_{DL} , λ_{LL} 그리고 λ_R 은 각각 사하중, 활하중 그리고 저항의 편향계수이며, γ_{DL} 와 γ_{LL} 은 사하중계수와 활하중계수이다. COV_{DL} , COV_{LL} 그리고 COV_R 은 사하중과 활하중, 저항의 편향에 대한 변동계수를 의미한다. 편향계수(λ)는 관측값과 예측값의 비율로 정의되며, 변동계수(coefficient of variance, COV)는 평균값에 대한 불확실성의 크기를 나타내는 것으로 표준편차를 평균으로 나눈 값이다. AASHTO(2012)의 교량설계기준에서는 다양한 하중조합에 대한 하중계수를 제시하고 있으며, 신뢰성 해석을 위하여 일반적으로 사용되는 λ_{DL} 과 λ_{LL} 의 값은 1.05와 1.15이고 이에 대한 변동성인 COV_{DL} 과 COV_{LL} 은 각각 10%와 20%이다.

2.2 쇄석말뚝공법 극한지지력 모델

쇄석말뚝이 설치된 지반의 극한지지력을 산정하기 위한 많은 예측식들이 제안되었으며 이들은 Kim and Lee (2005)와 Han et al.(2012)에 의하여 정리되어 있다. 저항 편향계수 산정 시 올바른 극한지지력 예측식의 선정은 저항에 대한 확률분포를 산정하는데 직접적 영향을 미치므로 매우 중요하다. 일반적으로 예측식의 편향이 1에 가까우며, 그 변동성이 작을수록 예측값을 과대/과소

평가하지 않으며 예측에 대한 불확실성이 작게 나타나므로 신뢰성 있는 모델이라 할 수 있다. Han et al.(2012)은 기존 LRFD 설계를 위한 저항편향계수를 산정하기 위하여 기존 7개의 예측모델을 평가하였으며, 일부 예측모델들은 측정지지력과 예측지지력이 1:1로 대응되는 선에 대하여 한쪽으로 편향되어 있거나 그 변동성이 매우 크게 나타나 실제 극한지지력을 예측하기에 부적합한 것으로 평가되었다. Han et al.(2012)에 의하여 저항편향계수를 산정하기 위하여 최종적으로 선정된 예측모델인 Greenwood(1970)의 저항편향 평균값은 0.91, 이에 대한 변동성은 38%이며, Hughes and Withers(1974)의 저항편향 평균값은 1.19, 이에 대한 변동성은 39%로 나타났다. Stuedlein and Holtz(2013) 또한 기존 예측모델들에 대한 오차를 평가하였으며 실제 극한지지력과 비교하여 기존 예측모델들은 많은 편차가 존재하고 예측 변동성 또한 매우 큰 것으로 나타났다. Stuedlein and Holtz(2013)은 기존 모델들(Mitchell, 1981; Hughes et al., 1975)을 개선한 두 가지 반경험식과 경험적 다중회귀식을 제안하였으며, 기존 모델들에 비하여 정확도를 향상시킬 수 있음을 보였다. Bong and Kim(2017)은 다중회귀식의 올바른 검증을 위해서는 교차검증의 수행을 통하여 독립적인 데이터에 대한 오차를 평가할 필요가 있음을 강조하고, 합리적인 다중회귀식 산정을 위하여 다양한 매개변수의 형태를 고려한 교차검증을 수행하였으며 식 (4)와 같은 수정된 극한 지지력 예측식을 제안하였다.

$$q_{ult} = -230.5 + 130.3 \sqrt{s_u} - 0.087 s_u^2 + 12.55 s_u a_s - 557.7 \frac{d_p}{L_p} \quad (4)$$

여기서, s_u 는 비배수전단강도(kPa), a_s 는 쇄석말뚝의 치환율, d_p 는 쇄석말뚝의 직경(m), 그리고 L_p 는 쇄석말뚝의 길이(m)이다. 말뚝의 세장비(S_r)는 말뚝의 지름에 대한 길이의 비(L_p/d_p)이므로 d_p/L_p 는 세장비의 역함수(S_r^{-1})로 표현할 수 있다. Bong and Kim(2017)에 의하여 제안된 MLR 모형은 Stuedlein and Holtz(2013)에 의하여 제안된 MLR 모형보다 예측 오차 및 편향, 편향에 대한 변동성을 모두 감소시킬 수 있는 것으로 나타났으며, 모든 실험데이터에 대한 교차검증을 고려함에 따라 새로운 조건에 대해서도 강건한(robust) 극한지지력 예측이 가능한 것으로 나타났다. Bong and Kim(2017)에

Table 1. Summary statistics for proposed MLR

Variable	Fitted coefficient	Coefficient Standard error	VIF
Intercept	-230.469	99.655	NA
s_u^2	-0.0871	0.018	7.95
$s_u a_s$	12.5533	0.913	2.68
$\sqrt{s_u}$	130.309	22.013	7.31
d_p/L_p	-557.698	199.951	1.33

의하여 제안된 MLR 모형의 각 매개변수에 대한 표준오차 및 분산팽창계수(variance inflation factor, VIF)는 Table 1에 정리되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 극한지지력 모델평가

본 연구에서는 쇄석말뚝공법의 저항편향계수 산정을 위한 극한지지력 모델로 기존 예측모델들 중 가장 작은 오차를 보인 Bong and Kim(2017)에 의하여 제안된 MLR 모형을 활용하였다. Bong and Kim(2017)에 의하여 제안된 식에 따라 예측된 극한지지력과 관측된 극한지지력

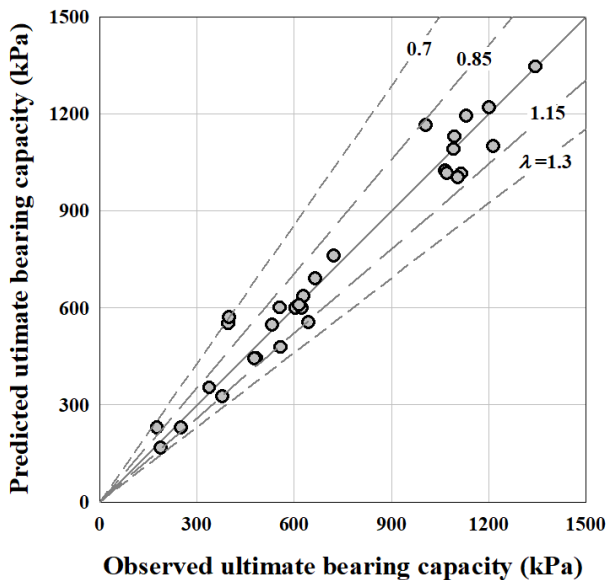


Fig. 2. Comparison of estimated and observed ultimate bearing capacity

Table 2. Performance of MLR model by Bong and Kim (2017)

Model	Absolute error (kPa)			Bias, λ		
	Mean	St. Dev.	COV (%)	Mean	St. Dev.	COV (%)
Bong and Kim (2017)	52.9	48.0	90.6	1.002	0.119	11.9

의 비교는 Fig. 2와 같으며, 이에 대한 오차평가는 Table 2에 정리하였다.

Table 2에서 보는 것처럼 예측식에 대한 MAE는 52.9 kPa로 극한지지력을 효과적으로 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 예측식에 따른 저항편향의 평균값은 약 1.00으로 예측에 대한 편향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 제안된 식은 평균 지지력을 과대 또는 과소평가하지 않는 것을 의미하며 저항편향의 변동성($COV_{q_{ult}}$)은 11.9%로 기존 예측모델들에 비하여 매우 낮은 것으로 나타났다. 예측식을 통한 편향은 예측값의 크기에 상관없이 일정해야 하므로 예측에 대한 편향과 예측값 사이의 의존성은 반드시 평가되어야 한다(Stuedlein et al., 2014). 이를 평가하기 위하여 예측 극한지지력과 편향의 관계를 살펴보았으며 이를 Fig. 3에 나타내었다.

예측 극한지지력과 편향의 상관계수는 -0.04로 거의 0에 가까우며, 추세선의 기울기도 거의 0으로 나타나 예측값과 편향 사이에는 아무런 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 이에 따라 Bong and Kim(2017)에 의하여 제안된 MLR 모형을 통하여 실제 극한지지력을 효과적으로 예측할 수 있으며, 신뢰성 있는 저항편향계수 산정이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 제안된 MLR 모형은 쇄석말뚝의 치환율을 통하여 단말뚝과 군말뚝을 고려할 수 있으며, 진동방식(vibrator type)과 직접다짐방식(rammer

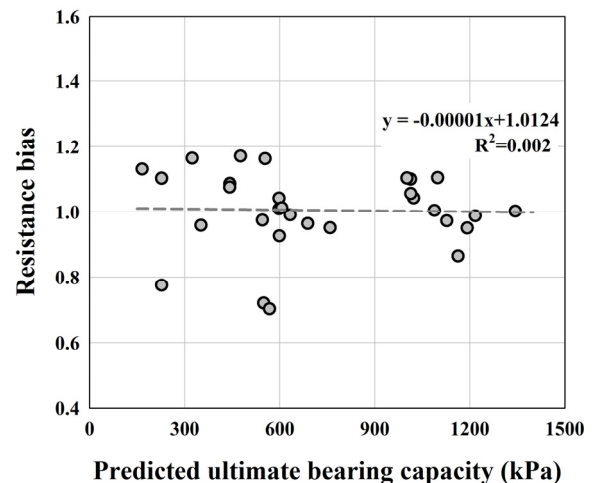


Fig. 3. Relationship between the predicted ultimate bearing capacity and the resistance bias

type) 등 다양한 시공방법에 따른 결과를 포함하여 회귀식이 산정됨에 따라 쇄석말뚝공법의 극한지지력 예측을 위한 범용적인 적용이 가능하다.

3.2 저항편향계수 확률분포 선정

Bong and Kim(2017)에 의하여 제안된 예측식의 저항편향계수에 대한 확률분포를 산정하기 위하여 카이제곱 적합도 검정(Chi-square goodness of fit test)을 수행하였으며 일반적으로 활용되는 5개의 확률분포에 대한 검정통계량 및 유의수준 5%에 대한 기각유무를 Table 3에 정리하였다.

분석결과, 5개의 확률분포 모두 유의수준 5%에 대하여 적합한 것으로 나타났다. 검정통계량은 정규분포가 1.58로 가장 낮은 것으로 나타났으며, 로지스틱(Logistic) 분포와 와이블(Weibull) 분포가 각각 1.61과 1.93로 정규분포 다음으로 낮은 검정통계량을 갖는 것으로 나타났다. 기존 연구에서 주로 사용되었던 대수정규분포의 경우 유의수준 5%를 만족하지만 검정통계량은 2.97로 다른 분포에 비하여 다소 높은 것으로 나타났다. 이에

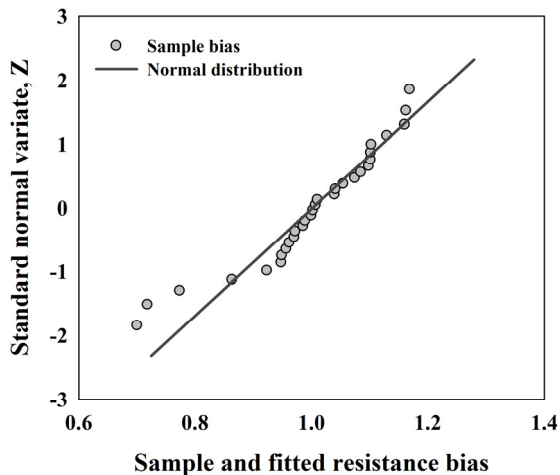


Fig. 4. Cumulative distribution of sample resistance biases and fitted normal distribution

Table 3. Summary of results of Chi-square test

Rank	Probability distribution	Test statistic	Reject? for $\alpha=0.05$
1	Normal	1.58	No
2	Logistic	1.61	No
3	Weibull	1.93	No
4	Log-normal	2.97	No
5	Gamma	3.12	No

α : Significance level

따라 예측식에 대한 편향의 확률분포는 정규분포를 따르는 것으로 가정하였으며 정규확률지를 활용한 예측식에 따른 편향의 누적분포 및 이에 대한 정규분포를 Fig. 4에 나타내었다.

낮은 편향구간에 대해서는 편향의 범위가 0.72부터 0.84까지 상대적으로 넓게 분포하며 데이터 수가 작음에 따라 정규분포와 잘 일치하지 않는 것으로 나타났다. Han et al.(2012)은 너무 크거나 작은 저항편향계수를 포함하여 확률분포를 산정할 경우 확률밀도함수의 왜도(skewness)가 증가하여 저항편향계수의 통계량이 왜곡될 수 있으므로 평균값의 $\pm 2\sigma$ (표준편차) 내의 자료만을 활용하여 확률밀도함수를 선정하였다. 이것은 기존 예측식들에 따른 예측지지력이 편향되어 분포하고 있으며 저항편향계수의 변동성 또한 매우 크게 나타나 모든 자료를 포함하여 확률분포를 선정할 경우 변동성이 과대평가될 수 있기 때문으로 판단된다. 하지만 Bong and Kim(2017)에 의하여 제안된 식의 저항편향계수는 평균이 거의 1.0으로 나타나 예측결과가 어느 한쪽으로 편향되지 않으며, 변동계수 또한 11.9%로 작기 때문에 모든 데이터를 활용하더라도 통계적 특성은 크게 왜곡되지 않는다. 또한, 저항편향계수에 대한 확률분포의 낮은 꼬리(lower tail) 영역이 하중의 확률분포와 중첩되어 파괴확률이 산정되므로 낮은 저항편향계수의 고려는 매우 중요하다. 따라서 저항편향계수의 확률분포는 낮은 편향구간에 대한 데이터를 제외하지 않고 모두 활용하였으며 정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 저항편향계수의 경험적 확률분포와 정규분포 사용에 따른 확

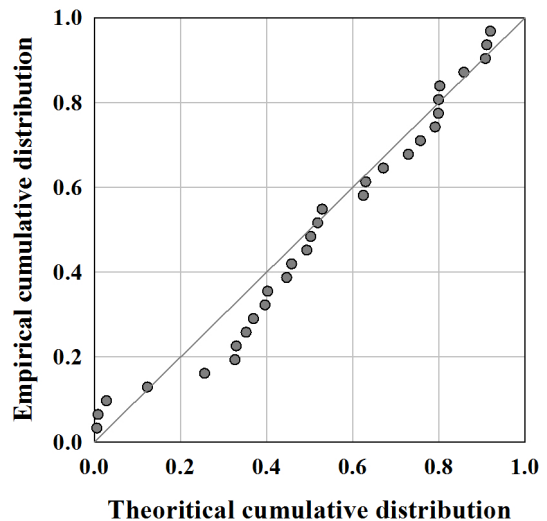


Fig. 5. P-P plot for diagnosing normal distribution of sample resistance biases

률적 차이를 살펴보기 위하여 P-P(probability-probability) 곡선을 도시하였으며(Fig. 5), 30개의 저항편향계수에 대한 평균 확률절대값오차는 4.5%로 나타났다.

3.3 총 저항편향계수 변동성

기존 저항편향계수의 변동성은 일반적으로 예측모델에 대한 편향의 변동성만 고려되었다. 하지만 쇄석말뚝은 기성말뚝과 달리 현장에서 시공되는 말뚝으로 쇄석말뚝의 다짐방식(진동 또는 직접 다짐)이나 쇄석 투입 방식, 작업조건 등에 따라 설계된 값과 차이가 발생할 수 있고 이러한 변동성은 말뚝 주변 지반의 강도에 대한 변동성을 포함하여 공칭저항의 불확실성 증가에 기여하게 된다(Stuedlein and Holtz, 2012). 지반조건 및 시공에 따른 추가적인 불확실성을 고려한 저항편향계수의 총 변동성은 다음 식을 통하여 산정할 수 있다.

$$COV_{Total}^2 = COV_{q_{ult}}^2 + COV_{s_u}^2 + COV_{con}^2 \quad (5)$$

여기서, COV_{s_u} 와 COV_{con} 은 비배수전단강도와 쇄석말뚝의 시공 시 발생할 수 있는 변동성을 의미한다. COV_{con} 은 지반조건 및 시공기술의 차이가 그 원인이며 실제 현장에서는 필연적으로 발생하지만 적절한 시공관리를 수행함으로써 최소화할 수 있다. 이에 따라 COV_{con} 은 쇄석말뚝 직경 및 길이에 대한 불확실성, 치환율에 대한 불확실성, 말뚝 기울기에 대한 불확실성 등 시공 시 발생할 수 있는 다양한 불확실성을 종합하여 5%의 변동성을 가지며 그 확률분포는 정규분포를 따르는 것으로 가정하였다. COV_{s_u} 은 일반적인 점토의 경우 5~35%이

며 확률밀도함수는 로그정규분포를 따르는 것으로 알려져 있다(Lacasse and Nadim, 1996). 이러한 지반의 불확실성은 지질학적 이질성, 퇴적조건, 응력이력 등에 의하여 지반의 생성단계부터 발생하는 것으로(Eikateb et al., 2002) 없애거나 감소시킬 수 없다. 그러므로 신뢰성 있는 LRFD 적용을 위해서는 현장에 대한 비배수전단강도의 통계적 특성을 파악하고 이를 정량적으로 설계에 반영할 필요가 있다. 세 가지 불확실성을 모두 고려한 총 저항편향계수의 통계적 특성을 파악하기 위하여 Monte Calro 시뮬레이션을 수행하였다. COV_{s_u} 는 일반적인 범위인 5~35%를 고려하여 5% 간격으로 해석을 수행하였으며 Monte Calro 시뮬레이션의 시행횟수는 결과가 충분히 수렴할 수 있도록 100,000번으로 설정하였다. COV_{s_u} 에 따른 총 저항편향계수의 확률분포를 비교하기 위하여 10, 20, 그리고 30%의 COV_{s_u} 대한 총 저항

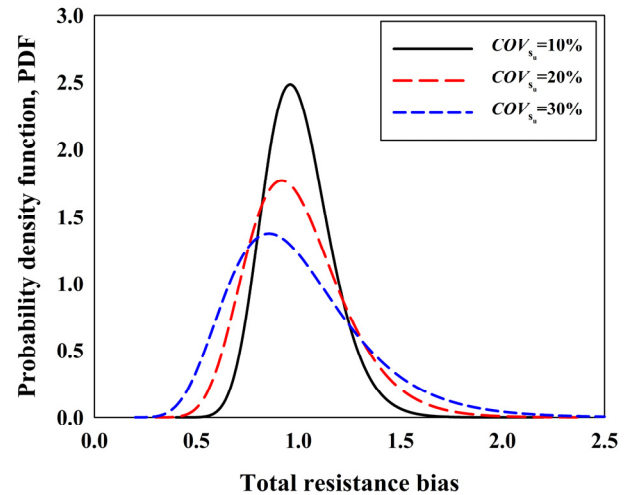


Fig. 6. Probability density function of total resistance according to COV_{s_u} of 10, 20, and 30%

Table 4. Statistic properties of total resistance bias

Coefficient of variation (%)					Total resistance bias		
$COV_{q_{ult}}$	COV_{con}	COV_{s_u}	COV_{Total}^a	COV_{Total}^b	PDF	Parameter ^c	
						μ	σ^2
11.9	5.0	5	13.8	14.0	Log-normal	-0.00975	0.14108
		10	16.3	16.5	Log-normal	-0.01372	0.16517
		15	19.8	20.0	Log-normal	-0.01954	0.19941
		20	23.8	24.0	Log-normal	-0.02858	0.23842
		25	28.1	28.4	Log-normal	-0.03869	0.27915
		30	32.7	33.0	Log-normal	-0.05206	0.32220
		35	37.3	37.6	Log-normal	-0.06653	0.36523

^ausing Eq. (5)

^busing Monte Carlo simulation

^c $\ln X \sim N(\mu, \sigma^2)$

편향계수의 확률분포를 Fig. 6에 나타내었으며, COV_{s_u} 의 5% 간격에 따른 총 저항편향계수의 통계적 특성을 Table 4에 정리하였다.

Fig. 6에서 보는 것처럼 총 저항편향계수의 결합확률분포는 로그정규분포를 따르는 것으로 나타났으며 COV_{s_u} 가 증가함에 따라 확률분포가 더 넓게 퍼지는 것을 확인할 수 있다. Monte Carlo 시뮬레이션 결과에 따른 COV_{Total} 는 식 (5)에 의하여 산정된 값과는 약간의 차이를 나타내었는데 이것은 각 확률변수의 확률밀도함수가 서로 다르기 때문이며 그 차이는 약 0.2~0.3%로 작아 무시할 수 있는 것으로 나타났다. 임의의 COV_{Total} 에 대한 저항편향계수의 통계적 특성을 쉽게 파악하기 위하여 COV_{Total} 와 저항편향계수의 확률분포에 대한 매개변수의 관계를 분석하였다. 저항편향계수가 로그정규분포를 따름에 따라 확률분포의 매개변수는 자연로그를 취한 저항편향계수, $\ln(\lambda_R)$ 에 대한 평균(μ) 및 분산(σ^2)이며, 각 매개변수와 COV_{Total} 의 관계는 Fig. 7에 나타

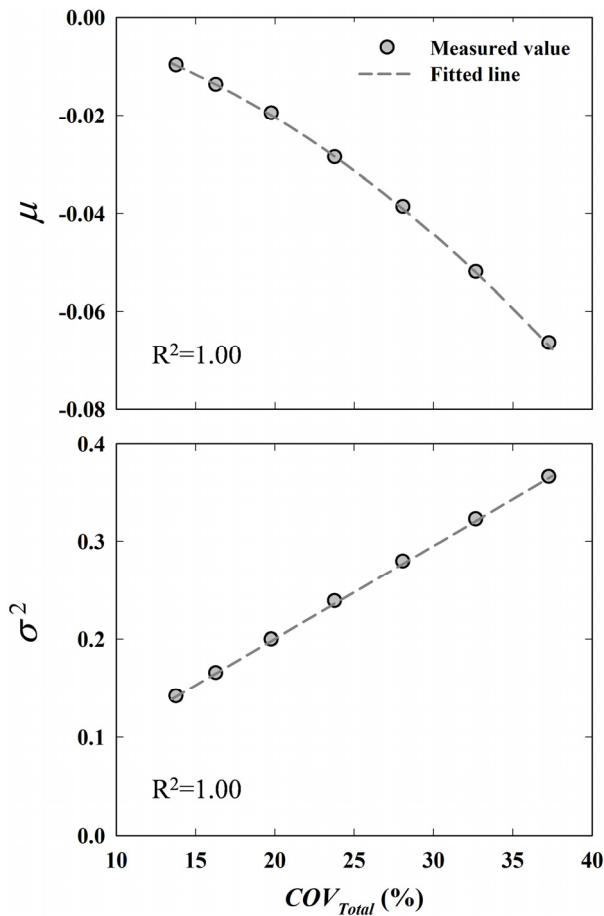


Fig. 7. Relationships between parameters for probability distribution of $\ln(\lambda_R)$ and COV_{Total}

내었다.

두 매개변수와 COV_{Total} 의 관계는 2차 및 1차 다항식을 통하여 효과적으로 표현할 수 있었으며, 이에 따른 확률분포의 각 매개변수에 대한 회귀식은 다음과 같다.

$$\mu = -0.000042 COV_{Total}^2 - 0.000293 COV_{Total} + 0.00225 \quad (6)$$

$$\sigma^2 = 0.0095 COV_{Total} + 0.0101 \quad (7)$$

두 회귀식에 대한 결정계수(coefficient of determination, R^2)는 모두 1.00으로 나타나 COV_{Total} 에 따른 확률분포의 매개변수를 효과적으로 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 결과적으로 COV_{Total} 는 식 (5)를 통하여 쉽게 산정할 수 있으며 현장의 COV_{s_u} 를 고려하여 COV_{Total} 이 산정되면 식 (6)과 (7)을 활용하여 저항편향계수의 통계적 특성을 쉽게 파악할 수 있을 수 있다.

이 연구에서 활용된 MLR 모형 적용의 또 다른 장점은 추후 예측식을 보완하고 업데이트하기 용이하다는 점이다. 기존 예측모델들의 경우 예측성능이 좋지 않을 뿐만 아니라 양질의 현장재하시험 자료를 확보하더라도 이를 통하여 예측모델을 수정·보완하는 것은 쉽지 않거나 불가능하다. 하지만 MLR 모형의 경우 현장재하시험 자료추가에 따른 회귀계수의 보정으로 예측모델을 쉽게 보완할 수 있으며 이것은 예측성능에 대한 신뢰도 향상에 있어서 매우 중요한 부분이다. 일반적으로 현장재하시험 결과를 통하여 도출된 MLR 모형의 회귀계수들은 다양한 원인에 의한 불확실성을 포함하고 있으며 표본 크기에 의해 결정되는 추정 불확실성과도 관련이 크다. 그러므로 추후 양질의 데이터를 추가적으로 고려한다면 중심극한정리에 의하여 실제값 주변의 데이터 클러스터링을 향상시킬 수 있으며 점추정에 대한 분산은 안정되어 보다 강건한(robust) 예측이 가능하다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 쇄석말뚝공법의 LRFD 적용을 위하여 Bong and Kim(2017)에 의하여 제안된 MLR 모형을 활용하였으며, 30개의 현장재하시험 자료를 통하여 저항편향계수의 통계적 특성을 분석하고 이에 대한 확률밀도함수를 선정하였다. 저항편향계수의 변동성은 지반의

불확실성 및 쇄석말뚝 시공에 따른 오차를 추가적으로 고려하여 산정하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 쇄석말뚝공법의 저항편향계수를 산정하기 위한 극한지력 예측식은 Bong and Kim(2017)의 MLR 모형을 활용하였으며, 저항편향의 평균은 1.00, 변동성은 11.9%로 나타났다. 또한, 극한지력과 예측식에 따른 저항편향은 상관관계가 없는 것으로 나타나 쇄석말뚝공법의 저항편향계수를 산정하기 적합한 것으로 나타났다.
- (2) Bong and Kim(2017)의 MLR 모형에 대한 저항편향계수는 정규분포를 따르는 것으로 나타났으며, 비배수전단강도 및 쇄석말뚝 시공 시 발생할 수 있는 불확실성을 고려하여 총 저항편향계수의 통계적 특성을 파악하였다. 총 저항편향계수의 변동성은 비배수전단강도의 변동성(5~35%)에 따라 13.8~37.3%이며 로그정규분포를 따르는 것으로 나타났다.
- (3) 저항편향계수의 통계적 특성을 쉽게 파악하기 위하여 COV_{Total} 와 저항편향계수의 확률분포에 대한 매개변수의 관계를 분석하였다. 저항편향계수가 로그정규분포를 따름에 따라 자연로그를 취한 저항편향계수에 대한 평균과 분산을 매개변수로 간주하였으며 이에 대한 각 회귀식을 제안하였다. 제안된 두 회귀식에 대한 R^2 는 1.00으로 COV_{Total} 에 대한 확률분포의 매개변수를 정확하게 산정할 수 있는 것으로 나타났다.
- (4) 저항편향계수 산정을 위하여 적용된 MLR 모형은 현장재하시험 자료 추가에 따른 보완 및 업데이트가 용이하며, 이에 따라 예측성능에 대한 신뢰도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 추후 양질의 현장재하시험 자료 추가 및 모델 업데이트를 통하여 쇄석말뚝공법의 한계상태설계법 적용에서 신뢰성 있는 저항편향계수의 제공이 가능할 것이다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1C1C1010053).

참고문헌 (References)

1. AASHTO (2012), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed, American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC, USA.
2. Bong, T. H. and Kim, B. I. (2017), "Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Soft Soils Reinforced by Gravel Compaction Pile Using Multiple Regression Analysis and Artificial Neural Network", *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.6, pp.27-36.
3. Elkateb, T., Chalaturnyk, R., and Robertson, P. K. (2002), "An Overview of Soil Heterogeneity: Quantification and Implications on Geotechnical Field Problems", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40, No.1, pp.1-15.
4. Greenwood, D. A. (1970), "Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface", *Proceedings of the Ground Engineering Conference, Institution of Civil Engineers*, London, pp.11-22.
5. Han, Y. B. (2013), "Analysis of LRFD Resistance Factors for Single Aggregate Piers in Cohesive Soil", *MS. thesis, Dongguk university*, Seoul, Republic of Korea.
6. Han, Y. B., Park, J. M., and Jang, Y. S. (2012), "Evaluation of the Resistance Bias Factors to Develop LRFD for Gravel Compaction Piles", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.2, pp. 43-55.
7. Huffman, J. C., Martin, J. P., and Stuedlein, A. W. (2015), "Assessment of Reliability-based Serviceability Limit State Procedures using Full-Scale Loading Tests", *Proceedings of the 5th Geotechnical Safety and Risk*, Rotterdam, the Netherlands, pp.313-319.
8. Hughes, J. M. O. and Withers, N. J. (1974), "Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Column", *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, pp.42-49.
9. Hughes, J. M. O., Withers, N. J., and Greenwood, D. A. (1975), "A Field Trial of the Reinforcing Effect of a Stone Column in Soil", *Geotechnique*, Vol.25, No.1, pp.31-44.
10. Kim, B. I. and Lee, S. H. (2005), "Comparison of Bearing Capacity Characteristics of Sand and Gravel Compaction Pile Treated Ground", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.9, No.3, pp.197-203.
11. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), "Uncertainties in Characteristic Soil Properties", *Proceedings of Uncertainty 96, Geotechnical Special Publication No. 58*, Vol.1, pp.49-75.
12. Mitchell, J. K. (1981), "Soil Improvement—State-of-the-art Report", *Proceedings of the 10th Soil Mechanics and Foundation Engineering, Session 12, Int. Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, Vol.4, pp.506-565.
13. Paikowsky, S. G. (2002), "Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Deep Foundations", *Proceedings of the IWS Kamakura 2002 Conference*, Tokyo, Japan, pp.59-94.
14. Park, J. M., Han, Y. B., and Jang, Y. S. (2013), "Estimation of Ultimate Bearing Capacity of Gravel Compaction Piles Using Nonlinear Regression Analysis", *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.25, No.2, pp.112-121.
15. Stuedlein, A. W. (2008), "Bearing capacity and displacement of spread footings on aggregate pier reinforced clay", *PhD. thesis, University of Washington*, Seattle.
16. Stuedlein, A. W. and Holtz, R. D. (2012), "Analysis of Footing Load Tests on Aggregate Pier Reinforced Clay", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.138, No.9, pp.1091-1103.
17. Stuedlein, A. W. and Holtz, R. D. (2013), "Bearing Capacity of

Spread Footings on Aggregate Pier Reinforced Clay”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.139, No.1, pp.49-58.

18. Stuedlein, A. W., Huffman, J. C., and Ressay, S. (2014), “Reliability-based ultimate limit state design of spread footings on aggregate-pier-reinforced clay”, *Ground Improvement*, Vol.167, No.14, pp. 291-300.
19. You, Y. K., Lim, H. D., and Park J. M. (2014), “Target Reliability

Index of Single Gravel Compaction Piles for Limit State Design”, *J. the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.15, No.2, pp.5-15.

Received : March 29th, 2019

Revised : April 30th, 2019

Accepted : May 5th, 2019