

베이지안 이론을 이용한 타입강관말뚝의 신뢰성 평가

Reliability Updates of Driven Piles Based on Bayesian Theory Using Proof Pile Load Test Results

박 재 현¹ Park, Jae-Hyun

김 동 욱² Kim, Dong-Wook

곽 기 석³ Kwak, Ki-Seok

정 문 경⁴ Chung, Moon-Kyung

김 준 영⁵ Kim, Jun-Young

정 충 기⁶ Chung, Choong-Ki

Abstract

For the development of load and resistance factor design, reliability analysis is required to calibrate resistance factors in the framework of reliability theory. The distribution of measured-to-predicted pile resistance ratio was obtained based on only the results of load tests conducted to failure for the assessment of uncertainty regarding pile resistance and used in the conventional reliability analysis. In other words, successful pile load test (piles resisted twice their design loads without failure) results were discarded, and therefore, were not reflected in the reliability analysis. In this paper, a new systematic method based on Bayesian theory is used to update reliability indices of driven steel pipe piles by adding more proof pile load test results, even not conducted to failure, to the prior distribution of pile resistance ratio. Fifty seven static pile load tests performed to failure in Korea were compiled for the construction of prior distribution of pile resistance ratio. The empirical method proposed by Meyerhof is used to calculate the predicted pile resistance. Reliability analyses were performed using the updated distribution of pile resistance ratio. The challenge of this study is that the distribution updates of pile resistance ratio are possible using the load test results even not conducted to failure, and that Bayesian updates are most effective when limited data are available for reliability analysis.

요 지

기초구조물의 저항계수 산정 및 하중저항계수설계법의 개발을 위해서는 충분한 양의 데이터베이스 구축을 바탕으로 정확한 신뢰성 분석이 수행되어야 한다. 기존 국내의 말뚝기초의 신뢰성 분석 연구에서는 말뚝의 측정지지력 확인이 가능한 재하시험 자료만을 이용하여 저항편향계수의 분포특성을 산정하였다. 따라서, 파괴에 이르지 않은 말뚝재하시험 자료는 신뢰성 분석에서 제외되었다. 본 연구에서는 베이지안 이론을 이용하여 타입강관말뚝 저항편향계수의 사전 분포특성에 측정지지력을 확인할 수 없는 재하시험 결과를 추가하여 현장 특성을 반영한 저항편향계수의 사후분포특성을 산정하였다. 그리고 저항편향계수의 사후분포특성을 이용하여 말뚝의 신뢰성 평가를 수행하고 신뢰도수준을 갱신하였다. 국내 전역에서 수행된 양질의 정재하시험 자료를 수집, 분석하여 57개의 자료에 대한 측정지지력을 확인하였고, 이들 자료에 대해서 구조물기초설계기준에서 제안하고 있는 Meyerhof 공식을 이용하여 설계지지력을 산정하였다.

1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotech. Research Eng'g Div., KICT, jaehyeon@kict.re.kr, 교신저자)
2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 박사후연수 (Member, Post-Doc., Researcher, Dept. of Geotech. Research Eng'g Div., KICT)
3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Geotech. Research Eng'g Div., KICT)
4 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Geotech. Research Eng'g Div., KICT)
5 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng'g, Seoul National Univ.)
6 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng'g, Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이를 통해 저항편향계수의 사전분포 특성을 정량화 하였으며, 베이시안 기법을 적용하여 다양한 현장재하시험 결과에 따라 저항편향계수의 사후분포를 산정하였다. 갱신된 저항편향계수 통계특성을 적용하여 일차신뢰도법을 이용하여 강도 높은 신뢰성 해석을 수행하고 시험결과에 따른 신뢰도 수준을 평가하였다. 본 연구에서 제시된 방법을 통해 양질의 측정지지력 데이터가 부족한 경우 베이시안 기법을 이용하여 신뢰성 분석이 가능함을 확인하였다.

Keywords : Bayesian theory, Driven steel pipe pile, FORM, Reliability analysis, Reliability index, Static pile load test

1. 서론

구조물기초 및 지반공학 분야에서 신뢰성 분석을 기반으로 한 하중저항계수설계법(Load and Resistance Factor Design, LRFD)이 세계적인 추세가 되어가고 있다. 하중저항계수설계법의 개발을 위해서는 합리적인 하중계수와 저항계수의 결정이 필수적이며, 하중계수에 비해 저항계수는 지역적인 가변성이 크고 구조물별 불확실성이 큰 차이를 보이므로 저항계수의 산정이 무엇보다 중요하다. 또한, 신뢰성 있는 저항계수 도출을 위해서는 국내 특성을 충분히 대변할 수 있는 양질의 데이터베이스 구축이 선행되어야 한다. 데이터베이스 구축을 바탕으로 저항의 불확실성에 대한 정량적인 통계분석이 수행되고, 면밀한 신뢰성 분석을 거쳐 정확한 저항계수가 도출된다. 말뚝기초의 경우 지반조사 자료가 포함된 현장재하시험 결과를 이용하여 데이터베이스를 구축하고 저항의 불확실성을 평가한다. 말뚝기초를 포함한 지반구조물의 하중저항계수설계법 개발에 있어 가장 중요한 부분은 지지력을 확인할 수 있는 충분한 양의 데이터베이스 구축이다. 정재하시험은 여러 가지 다양한 재하시험법 중 기초의 지지력을 확인할 수 있는 가장 신뢰성이 높은 시험법으로 인식되고 있으며, 최근 수행된 대다수 국내외의 하중저항계수설계법 관련 연구들은 말뚝의 신뢰성 분석 및 저항계수 산정 시 저항의 통계특성치 분석을 위해 지지력을 확인할 수 있는 정재하시험 자료를 적용하였다(McVay 등, 2000, 2002, Phoon 등, 2003, Paikowsky 등, 2004; Allen, 2005; 박재현 등, 2008; Kwak 등, 2010). 그러나, 신뢰성 분석에 필요한 측정지지력을 확인할 수 있는 정재하시험은 많은 비용과 시간이 소요되므로 일부 대형공사 및 연구용 시험으로서 수행되고 있으며, 대부분의 정재하시험은 기초 설계에 대한 검증용으로서 설계하중의 2배까지만 재하하고 중단하므로 정확한 측정지지력을 확인할 수 있는 자료는 극히 제한

적이다. 이러한 이유로 인해 신뢰성 분석에 적용하기 위한 정재하시험 자료를 확보하는 것은 국내외를 막론하고 하중저항계수설계법 개발 과정에서 가장 힘든 업무 중의 하나이다. 국내 타입강관말뚝에 대한 저항계수 산정 연구시 약 2,000여개 이상의 정재하시험 자료를 수집하였으나, 지지력을 확인할 수 있는 자료는 60여개 뿐이었으며(한국건설기술연구원, 2008), 미국 AASHTO LRFD 교량설계시방서(2007)의 타입말뚝 저항계수 산정에 적용된 데이터베이스의 수도 비슷한 수준이었다.

하중저항계수설계법의 세계적인 추세와 함께 실측 데이터가 부족한 기초구조물 및 지반구조물에 대한 신뢰성 분석 연구의 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 신뢰성 분석을 수행하기 위해 재하시험 데이터를 확보하기 위한 노력과 함께 실측 데이터가 부족할 경우 저항의 불확실성 통계특성치인 평균과 표준편차(또는 변동계수)를 추정할 수 있는 추계론적 방법으로서 베이시안 기법(Bayesian updating)이 최근 국외 일부 연구자를 중심으로 적용되고 있다. 이용할 수 있는 자료가 한정된 경우 그 모수 추정에 있어 전통적인 통계분석 방법은 많은 불확실성과 결과의 편향성(bias)을 나타내는데 반해 베이시안 기법은 실험에 의해 얻어지는 데이터와 기존 문헌에서 제시된 사전분포를 결합하여 보다 합리적인 추론 결과를 도출한다. 베이시안 기법을 적용한 지반공학 분야의 주요 연구들을 살펴보면, Honjo 등(1994)이 베이시안 기법을 적용하여 연약 점성토 물성치에 대한 역해석을 통해 제방 안정성 분석을 수행하였고, Zhang 등(2004)은 동일 지역 내에서의 실험치와 광역지역에서의 실험치에 대한 불확실성을 분석하고 베이시안 기법을 적용하여 지반강도정수의 경험적인 상관관계에 대한 불확실성을 저감시킬 수 있는 개선된 방법을 제안하였다. Goh 등(2005)은 현장타설말뚝의 주변마찰력 산정을 위해 베이시안 기법을 적용한 인공신경망 학습효과를 통해 지반의 비배수 전단강도와 유효상재압, 비배수

부착계수와와의 상관성을 향상시킬 수 있는 연구를 수행하였다. Juang 등(2006)은 콘관입저항시험(CPT) 결과로써 액상화 가능성을 산정할 수 있는 기법을 제안하였으며 인공신경망 기법과 베이지안 기법을 적용하여 신뢰도지수와 액상화 가능성의 상관성을 분석하였다. Moss 등(2006)은 전세계의 CPT 결과에 기초한 액상화 사례를 분석하고 베이지안 기법을 적용하여 각 매개변수들의 액상화 영향성에 관한 개선된 결과를 도출하였다. 이를 바탕으로 Cetin과 Ozan(2009)은 지반 특성과 토질 분류에 따른 확률론적 액상화 평가기법을 제안하였다. Bolduc 등(2008)은 기존 세굴심 측정자료 데이터베이스를 이용하여 베이지안 기법을 적용한 세굴발생 가능성 평가에 관한 연구를 수행하였고, Hsiao 등(2008)은 인접 지역 굴착으로 인한 지반 침하량의 추정 시 베이지안 기법을 적용하여 건물 사용성에 관한 신뢰성 분석을 수행하였다. Li 등(2008)은 현장타설말뚝의 건전도시험 결과를 이용하여 결함의 발생가능성 및 결함 크기에 대한 통계분석을 수행하고 베이지안 기법을 적용하여 합리적인 건전도 시험 수행 방안을 제안하였다. Yan 등(2009)은 국내에서 수행된 795개의 지반조사 자료를 이용하여 베이지안 기법을 적용한 다중변수 회귀분석을 수행하여 압축지수에 영향을 미치는 지반 물성치의 상관성 연구를 수행하였고 초기 간극률과 액성한계가 지배적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. Zhang 등(2008, 2009)은 지반 물성치의 변동성이 원심모형시험결과에 미치는 영향을 분석하고 다중변수 베이지안 기법을 적용하여 모델의 불확실성을 정량화 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 베이지안 기법을 적용한 새로운 방법을 통해 하중-침하 곡선을 통한 측정지지력을 확인할 수 없는 검증용 정재하시험의 결과를 활용하여 타입강관말뚝의 저항 통계특성을 갱신하고 갱신된 저항 통계특성에 근거하여 다양한 신뢰성 분석을 실시하였다. 기존 연구를 통해 수집된 측정지지력 확인이 가능한 재하시험 데이터베이스의 말뚝 저항 통계특성을 사전정보(prior information)로 활용하고, 베이지안 기법을 적용하여 검증용 정재하시험 자료의 결과를 우도정보(likelihood information)로 적용하여 저항 통계특성을 갱신하였다. 갱신된 저항 통계특성을 적용하여 정확한 신뢰성 분석 방법인 일차신뢰도법(First-Order Reliability Method, FORM)에 기반하여 타입강관말뚝의 신뢰성 분석을 수행하였다.

2. 베이지안 기법(Bayesian Updating)

구조물 설계 및 시공과 관련된 공학 문제에서 통계적 특성치 도출 시 그 자료의 양이 적고, 실험에 의해 평가되는 확률변수 역시 많은 불확실성을 내포하고 있을 경우 정확한 모수추정을 위해서 베이지안 기법이 적용되고 있다. 베이지안 기법은 사전정보에 의한 모델과 실험, 계측에 의한 모델 등 크게 두 가지 요소로 구성되며, 식 (1)과 같이 전확률법칙(law of total probability)에 기초한 베이즈의 정리(Bayes' theorem)를 일반화하여 확률모수의 사후정보를 추정할 수 있다(Ang과 Tang, 1975).

$$f''(\theta) = \frac{P(\epsilon|x=\theta)f'(x=\theta)}{\int P(\epsilon|\theta)f'(\theta)d\theta} \quad (1)$$

여기서, $P(\epsilon|x=\theta)$, $f'(x=\theta)$ 은 각각 확률변수 $x=\theta$ 일 경우에 대한 우도함수와 사전분포함수이고, $f''(\theta)$ 은 $x=\theta$ 일 경우 우도함수에 대한 사후분포함수이다. $\int P(\epsilon|\theta)f'(\theta)d\theta$ 는 주변분포(marginal distribution)로서 정규화상수이다.

기초구조물의 신뢰성 평가는 정재하시험을 통해 확인된 측정지지력과 설계공식을 통해 산정된 예측지지력의 비인 저항편향계수($R_{M/P}$)의 통계특성치 분석 과정을 거쳐 수행된다. 일반적으로 정재하시험은 비용과 시간적인 문제로 인해 기초 설계에 대한 검증용으로서 설계하중의 2배까지 재하하고 시험이 종료되므로 신뢰성 분석에 필요한 측정지지력을 확인할 수 있는 자료는 제한적이다. 그러나 극한지지력을 확인할 수 없는 시험 결과임에도 불구하고 정재하시험 결과는 말뚝의 설계와 시공요소에 대한 불확실성을 감소시키는 것은 물론, 여타 방법에 비해 낮은 안전율로써 설계하중을 결정할 수 있도록 함으로써 경제적인 설계가 가능하도록 한다. 허용응력설계법에서는 이러한 검증용 정재하시험 결과를 단순히 설계하중을 분석하고 안전율을 확인하는 것에서 그치지만, 베이지안 기법을 적용한 신뢰성 분석에서는 극한하중을 확인할 수 없는 검증용 정재하시험 결과를 이용하여 말뚝기초의 저항 통계특성을 갱신하고 이를 통해 신뢰성 수준을 보정할 수 있다. 측정지지력과 예측지지력의 비로써 정의되는 저항편향계수($R_{M/P}$)는 기존 국내 말뚝기초에 대한 연구 결과 대수정규분포 특성을 나타내었으며(한국건설기술연구원, 2008), 최대 재하하중을 설계하중의 2배까지 가했을 때 정재하시험이 파괴에 이르지 않을 확률은 다음과 같이 구할 수 있다. 이때

κ 는 특정 안전율을 적용했을 경우에 대한 저항편향계수 값이다. 즉, 최대 재하하중이 설계하중의 2배이고, 안전율 2.0을 적용한 경우 $\kappa = 1$ 이다.

$$P(R_{M/P} \geq \kappa) = \int_{\kappa}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi R_{M/P}} \exp\left[-\frac{(\ln R_{M/P} - \eta)^2}{2\xi^2}\right] dR_{M/P} \quad (2)$$

여기서, η 와 ξ 는 각각 저항편향계수의 대수정규분포 평균 및 표준편차이다. 식 (2)는 표준정규분포의 누적확률분포 Φ 를 적용하여 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$P(R_{M/P} \geq \kappa) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln \kappa - \eta}{\xi}\right) = \Phi\left(\frac{\eta - \ln \kappa}{\xi}\right) \quad (3)$$

저항편향계수($R_{M/P}$)의 기댓값을 μ 라 하고, 설계하중의 2배까지 최대 재하하중을 가하는 n 번의 정재하시험이 수행될 경우 n 번의 시험 중 r 번이 파괴에 이를 확률은 다음과 같다.

$$L(\mu) = nCr [1 - P(R_{M/P} \geq \kappa)|\mu]^r [P(R_{M/P} \geq \kappa)|\mu]^{n-r} \quad (4)$$

여기서, $L(\mu)$ 는 실험 결과 즉, μ 의 우도함수이다. 따라서, 식 (4)의 우도함수 정보와 μ 의 사전분포함수 $f'(\mu)$ 와 결합하여 식 (1)에 적용하면 다음 식을 이용하여 저항편향계수의 기댓값에 대한 사후분포함수를 산정할 수 있다.

$$f''(\mu) = \frac{nCr [1 - P(R_{M/P} \geq \kappa)|\mu]^r [P(R_{M/P} \geq \kappa)|\mu]^{n-r} f'(\mu)}{\int_{-\infty}^{\infty} nCr [1 - P(R_{M/P} \geq \kappa)|\mu]^r [P(R_{M/P} \geq \kappa)|\mu]^{n-r} f'(\mu) d\mu} \quad (5)$$

최종적으로 저항편향계수($R_{M/P}$)의 갱신된 사후분포함수는 다음 식과 같이 도출할 수 있다.

$$f(R_{M/P}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(R_{M/P}|\mu) f''(\mu) d\mu \quad (6)$$

여기서, $f(R_{M/P})$ 는 기댓값 μ 가 주어졌을 경우의 저항편향계수($R_{M/P}$)의 사후분포함수이며 이를 정의하기 위해서는 저항편향계수($R_{M/P}$)의 동일지역 내에서의 불확실성을 대변할 수 있는 변동계수와 분포형태에 대한 정의가 필요하다. Zhang과 Tang(2002)은 동일지역 내에서 수행된 여러 연구자들의 말뚝기초 지지력에 대한 불확실성 분석을 통해서 그 분포특성은 대수정규분포에 가

장 적합하며 변동계수 약 0.2 정도의 분산성을 갖는 것으로 보고하였다. 따라서, 본 연구에서 저항편향계수($R_{M/P}$)의 동일지역 내 분포특성은 변동계수가 0.2인 대수정규분포함수를 적용하였다.

3. 저항 통계특성 분석

3.1 기존 데이터베이스 분석

기존 연구를 통해 타입강관말뚝의 신뢰성 수준 평가에 적용된 측정 지지력을 확인할 수 있는 정재하시험 자료는 총 57개 이었으며, 본 연구에서는 이들 자료를 이용하여 저항편향계수의 사전 분포특성을 분석하였다. 선정된 재하시험 자료에 대한 분류 결과 다양한 말뚝 제원과 전반적인 국내 지반 특성을 대변할 수 있는 자료로 확인 되었으며, 또한 선단 및 주변 지층 분석 결과 단일 지층 보다는 모래질, 자갈질, 실트질, 점토질 등 여러 가지 상이한 지층이 섞여 있는 혼합토 지층으로서 국내의 지반 특성이 그대로 반영된 것으로 나타났다(한국건설기술연구원, 2008). 선정된 57개 재하시험 자료에 대해 지반 특성 및 말뚝 지지거동을 고려한 신뢰성분석을 실시하기 위해서 선단부의 평균 표준관입시험(SPT) N치 50을 기준으로 자료를 두 그룹으로 분류하였다 ($N_{tip} < 50$, $N_{tip} \geq 50$). 전체 재하시험 자료 중 선단부 평균 N치가 50보다 작은 경우는 27개, 50보다 큰 경우 30개 로써 선단부 N치 50을 기준으로 자료가 양분되었고 각각 통계적 유의성을 가질 수 있는 것으로 확인되었다(한국건설기술연구원, 2008).

57개의 정재하시험 자료에 대해서 하중-침하 곡선으로부터 측정 지지력을 산정하기 위해서 구조물기초설계기준(국토해양부, 2009)과 깊은 기초의 저항계수 결정에 관한 연구결과인 미국의 NCHRP 507 연구보고서(Paikowsky 등, 2004) 등 국내외 설계기준에서 제안하는 여섯 가지 방법을 적용한 결과 Davisson 기준(1972)은 반복 가능한 과정을 통해 객관적 수치를 얻을 수 있는 방법으로서 분산성이 낮았으며 모든 자료에 적용 가능하여 우수한 적용성을 보였다(Kwak 등, 2008). 따라서 본 연구에서는 말뚝의 측정 지지력 산정 시 Davisson 기준(1972)을 적용하였다.

분석대상 자료에 대한 예측 지지력을 산정하기 위해서 구조물기초설계기준(국토해양부, 2009)에서 제시하고 있는 두 가지 지지력 공식 중 국내 설계 실무에서

가장 일반적으로 적용되고 있는 N치를 이용한 Meyerhof 경험식(1976)을 적용하였다. 말뚝 제원과 지반조건 등은 정재하시험과 동일하게 적용하였다. 지지력 산정시 보정하지 않은 N치 결과를 적용하였는데, 이는 대부분의 국내 실무에서 N치로부터 말뚝의 지지력을 추정하는 경우 일반적으로 N치의 보정이 행해지지 않고 있으며, 실험 장비, 에너지효율 측정 및 해석법에 따라 그 편차가 상당히 큰 것으로 알려져 있기 때문이다(한국지반공학회, 1997). 설계 지지력 산정에 적용된 Meyerhof 경험식(1976)은 다음 식과 같다.

$$Q_u = mN'_{60}A_p + n\bar{N}_{60}A_s \quad (7)$$

여기서, $m = 3\left(\frac{L_b}{B}\right) \leq 30$, $mN'_{60} \leq 1500 \text{ tf/m}^2$, L_b 는 말뚝의 지지층 관입깊이(m), A_p 는 말뚝 선단 지지면적(m^2), A_s 는 사질토 지반에 묻힌 말뚝의 겉면적(m^2), N'_{60} 은 말뚝 선단부근의 N치, \bar{N}_{60} 은 말뚝 주면부 사질토 지반의 평균 N치, $n = \frac{1}{5}$, $n\bar{N} \geq 10 \text{ tf/m}^2$ 이다.

Davisson 기준(1972)으로 산정한 측정 지지력과 Meyerhof 경험식(1976)으로 산정한 예측 지지력을 비교 도시한 결과는 그림 1과 같다. 예측 지지력의 분산정도를 확인하기 위해 재하시험 결과보다 50% 큰 값을 나타내는 경계선과 50% 작은 값을 나타내는 경계선을 표시하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 측정 지지력과 예측 지지력은 뚜렷한 상관성을 나타내지 않았으며 분산정도가 큼을 알 수 있다. 신뢰성 분석을 수행하기 위해 측정 지지력과 예측 지지력을 이용한 저항편향계수 통계특성 분

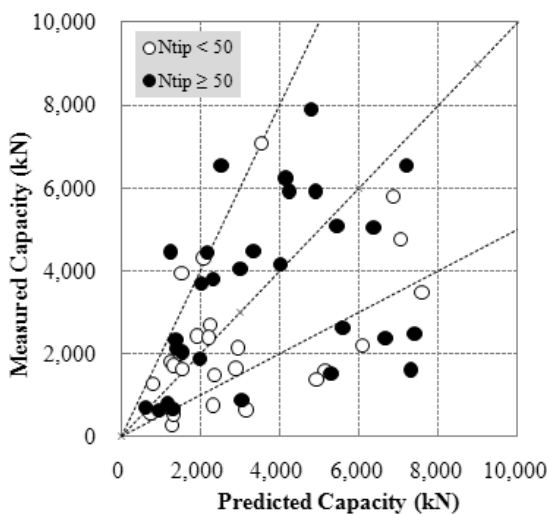


그림 1. 측정 지지력과 예측 지지력 비교

석 결과는 표 1과 같다. 통계분석의 신뢰성 있는 결과도 출을 위하여 일반적인 저항편향계수 범위[평균±(2×표준편차)]를 벗어난 값은 통계해석에서 제외하는 것이 합리적이므로(Paikowsky 등, 2004), 이를 고려하여 저항편향계수의 통계특성치를 산정하였다.

선단부 N치가 50미만인 경우와 50이상인 경우 모두 저항편향계수의 평균값이 1.0보다 크므로 측정 지지력에 비해서 예측 지지력이 보수적으로 산정되는 경향을 보였고, 두 가지 경우 모두 변동계수가 0.75 내외로서 큰 값을 나타내었다. AASHTO LRFD 교량설계시방서(2007)에서는 지반의 분산정도를 변동계수 값의 범위로써 세 가지로 제시하고 있으며, 변동계수의 값이 0.25보다 작으면 분산성이 낮음, 변동계수 값이 0.25~0.40이면 분산성이 보통, 변동계수 값이 0.40 보다 크면 분산성이 큰 것으로 분류하고 있다. 따라서 위에서 제시된 Meyerhof 경험식(1976)의 저항편향계수의 분산성은 큰 것을 알 수 있다. 저항편향계수의 평균값이 1.0보다 크므로 내재적 보수성을 바탕으로 신뢰도지수가 크게 산정될 수 있지만, 높은 변동계수에 따른 불확실성의 증가로 인해 신뢰도지수가 낮아질 수 있는 요인이 공존함을 확인할 수 있다.

3.2 베이지안 기법을 이용한 저항 통계특성 갱신

앞서 기술한 베이지안 기법을 적용하여 기존 데이터베이스 저항편향계수 사전분포에 검증용 정재하시험을 실시한 추가 정보를 반영하면 측정 지지력을 확인할 수 없는 재하시험 결과 일지라도 그 결과로 인해 갱신된 사후분포를 얻을 수 있다. 선단부 N치 50미만($N_{tip} < 50$)과 50이상($N_{tip} \geq 50$)의 데이터베이스에 대하여 저항편향계수의 사전분포에 우도함수 정보로서 n번의 정재하시험을 수행하여 모두 연속하여 파괴가 발생하지 않을 경우의 갱신된 저항편향계수의 사후분포(probability density function, PDF) 결과를 도시하면 각각 그림 2, 그림 3과 같다. 그림 2, 그림 3에서 나타낸 바와 같이 파괴가 발생

표 1. 저항편향계수($R_{M/P}$)의 통계특성

구 분	$N_{tip} < 50$	$N_{tip} \geq 50$
평 균	1.75	1.32
변동계수	0.75	0.74
분포형태	대수정규분포	대수정규분포
분석에 사용된 자료 수	25 개	29 개

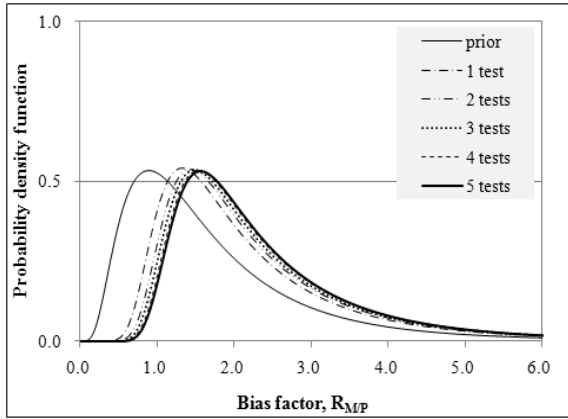


그림 2. 검증용 정재하시험에서 파괴가 발생하지 않을 경우 저항편향계수의 갱신된 사후분포 그래프 변화($N_{tip} < 50$)

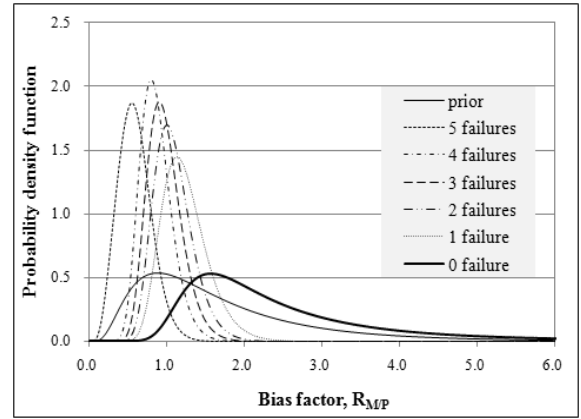


그림 4. 검증용 정재하시험에서 파괴가 발생했을 경우 저항편향계수의 갱신된 사후분포 그래프 변화($N_{tip} < 50$)

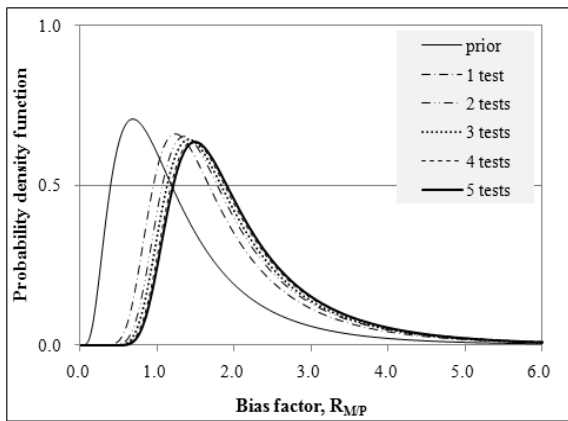


그림 3. 검증용 정재하시험에서 파괴가 발생하지 않을 경우 저항편향계수의 갱신된 사후분포 그래프 변화($N_{tip} \geq 50$)

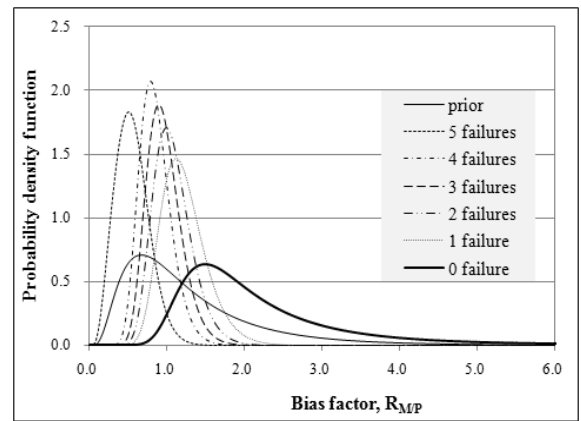


그림 5. 검증용 정재하시험에서 파괴가 발생했을 경우 저항편향계수의 갱신된 사후분포 그래프 변화($N_{tip} \geq 50$)

하지 않은 검증용 정재하시험의 횟수가 증가함에 따라 갱신된 사후분포 그래프가 오른쪽으로 이동하며 그 폭이 조금씩 줄어들음을 알 수 있다. 즉, 저항편향계수의 평균값이 증가하고 변동계수가 감소하게 되며, 이로 인해 갱신된 사후분포의 신뢰도지수가 증가하게 될 것을 예측할 수 있다.

재하시험 결과의 보다 일반적인 경우로서 검증용 정재하시험에서 시험 말뚝이 최대재하하중을 견디지 못하고 파괴가 발생할 수 있다. 이 경우에도 앞서 설명한 식 (6)을 이용하여, 재하시험 수행 결과를 반영한 저항편향계수의 사후분포를 산정할 수 있다. 선단부 N치 50 미만($N_{tip} < 50$)과 50이상($N_{tip} \geq 50$)의 경우에 대해서 각각 검증용 정재하시험을 5회 실시했다고 가정하였을 때 파괴가 발생한 검증용 정재하시험의 수에 따른 갱신된 저항편향계수 사후분포 그래프는 그림 4, 그림 5와 같다.

동일한 방법으로 여러 차례 검증용 정재하시험이 수행될 경우 발생가능한 모든 경우에 대한 저항편향계수

표 2. 저항편향계수($R_{M/P}$)의 갱신된 사후분포 통계특성치

총 시험수	비파괴 시험수	$N_{tip} < 50$		$N_{tip} \geq 50$	
		평균	변동계수	평균	변동계수
4	4	2.17	0.44	2.01	0.43
	3	1.20	0.25	1.19	0.25
	2	1.04	0.24	1.03	0.24
	1	0.90	0.24	0.89	0.24
	0	0.61	0.37	0.56	0.39
3	3	2.13	0.45	1.96	0.44
	2	1.15	0.25	1.13	0.25
	1	0.96	0.25	0.94	0.25
	0	0.63	0.37	0.59	0.40
2	2	2.08	0.46	1.90	0.45
	1	1.06	0.27	1.04	0.27
	0	0.67	0.38	0.62	0.41
1	1	1.99	0.49	1.79	0.48
	0	0.74	0.41	0.68	0.44

의 갱신된 사후분포를 구할 수 있다. 각 경우에 대해서 산정된 저항편향계수의 사후분포에 대한 평균과 변동

계수를 정리하면 표 2와 같다. 일정 횟수의 검증용 정재하시험이 수행된 경우, 파괴가 발생하지 않은 검증용 정재하시험의 횟수가 증가할수록 저항편향계수의 평균값은 증가하고 변동계수는 대체적으로 감소하다가 증가하는 추세를 보인다. 검증용 정재하시험 횟수가 증가하고 모든 시험에서 파괴가 발생하지 않을 경우 저항편향계수의 평균값은 증가하고 변동계수는 약간 감소한다. 이는 그림 2와 그림 3에서 확인한 바와 같다.

$$Q_D/Q_L = (1 + IM)(0.0132L) \quad (9)$$

여기서, IM은 동하중 허용계수로서 LRFD 하중에 대해서 0.33을 적용하며, L(ft)은 교량지간장이다. 한국의 교량지간장 조사에 의하면 30m(또는 98ft) 안팎의 범위가 가장 일반적 경우인 것으로 보고되어, 식 (9)에 의해 $Q_D/Q_L=1.72$ 의 값을 신뢰성해석에 적용하였다. 본 연구에서는 신뢰성 해석기법 중 정확하고 개선된 방법으로 인정받고 있는 일차신뢰도법(FORM)(Rackwitz와 Fiessler, 1978)을 적용하였다. 일차신뢰도법은 설계변수의 표준 정규분포 공간 원점으로부터 한계상태함수 파괴면까지의 최단거리를 신뢰도지수로 정의하며, 비정규분포의 설계변수 또는 비선형 한계상태함수에 대하여 정식화 형태에 관계없이 일관된 신뢰도지수를 도출할 수 있는 장점이 있다.

4. 신뢰성 분석

4.1 하중조합 및 하중통계

말뚝기초설계의 신뢰성은 파괴확률 또는 신뢰도지수로써 표현된다. 신뢰성 분석을 위해서는 하중관련 정보인 하중편향계수의 통계특성치와 저항관련 정보인 저항편향계수의 통계특성치가 결정되어야 한다. 저항편향계수의 통계특성치는 앞서 설명한 연구결과를 적용하였고, 하중조합 및 통계특성치는 미국 AASHTO LRFD 교량설계시방서(2007)에서 제안하고 있는 하중조합 중 국내 특성을 고려하여 연직방향 보수적 평가조건인 Strength case I 경우를 적용하였다. 하중편향계수의 통계특성치는 표 3과 같다.

하중저항계수설계법에서 두 확률변수인 하중과 저항이 통계적으로 독립이고 모두 대수정규분포이며, 하중을 사하중과 활하중의 조합으로 고려하면, 기초구조물의 한계상태함수는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = \ln \frac{\lambda_{R_{M/P}} FS(QD/QL + 1)}{\lambda_{QD}(QD/QL) + \lambda_{QL}} \quad (8)$$

여기서, g는 한계상태함수, $\lambda_{R_{M/P}}$ 은 저항편향계수의 평균값이며, λ_{QD} , λ_{QL} 은 각각 사하중 편향계수와 활하중 편향계수의 평균값, QD, QL은 각각 공칭 사하중, 공칭 활하중, FS는 안전율이다. 식 (8)에서 사하중과 활하중의 비(QD/QL)는 Hansell과 Viest(1971)가 제안한 다음의 실험식으로 산정할 수 있다.

4.2 신뢰도지수 산정(Reliability Updating)

검증용 정재하시험 결과가 반영된 저항편향계수의 갱신된 사후분포 통계특성을 이용하여 일차신뢰도법에 의한 신뢰성 분석을 수행하였다. 구조물기초설계기준(2009)에서 제안한 바와 같이 정재하시험 결과로 얻어진 지지력에 대해서는 안전율 2.0을 적용할 수 있으며 본 연구에서는 검증용 정재하시험 결과를 반영한 말뚝기초의 신뢰도지수 변화를 파악하기 위해서 식 (8)에서 안전율 2.0을 적용하였다. 기존 연구결과 선단부 N치 50미만 ($N_{tip} < 50$)과 50이상($N_{tip} \geq 50$)의 사전 저항편향계수 통계특성을 바탕으로 산정된 신뢰도지수 값은 각각 1.41, 1.01이다. 두 가지 사전 데이터베이스 그룹($N_{tip} < 50$ 과 $N_{tip} \geq 50$)에 대해서 일정 횟수의 검증용 정재하시험 결과를 반영한 저항편향계수의 갱신된 신뢰도지수 결과는 각각 그림 6, 그림 7과 같다.

그림 6, 그림 7에서 실선은 모든 시험에서 파괴가 발생하지 않을 경우에 대한 신뢰도지수 변화를 나타낸다. 시험횟수 0일 때의 시작점은 사전분포에 대한 신뢰도지수를 의미한다. 시험횟수가 증가할수록 신뢰도지수는 증가하였고, 그 증가율은 감소함을 확인할 수 있다. 일

표 3. 하중편향계수의 통계특성치

구 분	사하중 편향계수(λ_{QD})			활하중 편향계수(λ_{QL})		
	평 균	변동계수	분포특성	평 균	변동계수	분포특성
값	1.05	0.10	대수정규분포	1.15	0.20	대수정규분포

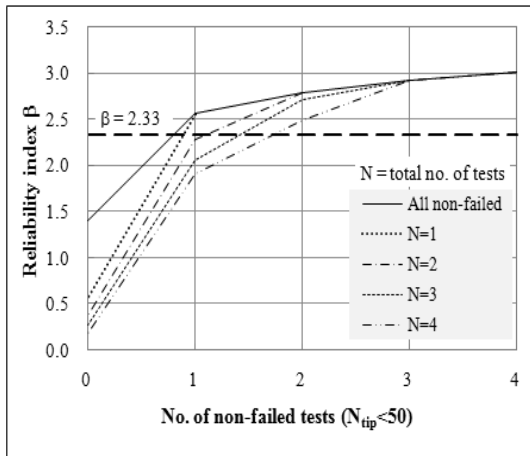


그림 6. 검증용 정재하시험 결과에 따른 신뢰도지수 변화($N_{tip} < 50$, $FS=2.0$)

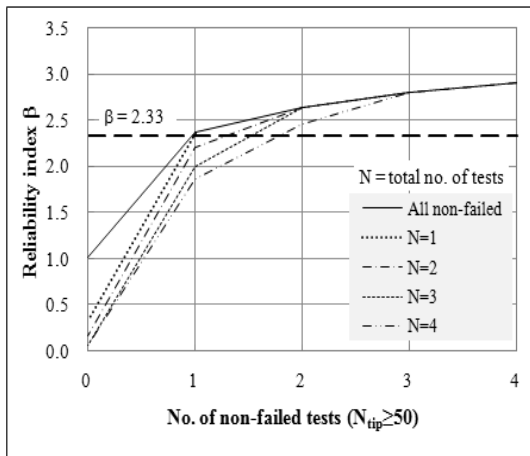


그림 7. 검증용 정재하시험 결과에 따른 신뢰도지수 변화($N_{tip} \geq 50$, $FS=2.0$)

정 횟수의 시험에서 파괴가 발생한 경우 그 수가 증가할수록 신뢰도지수는 감소하였다. 그림 6, 그림 7에서 나타난 다양한 경우의 정재하시험 결과를 반영한 신뢰도지수 결과를 정리하면 표 4와 같다.

기존 연구결과 타입강관말뚝의 목표 신뢰도지수(β)는 2.33($\approx P_f=0.01$)으로 제안되었으며(Kwak 등, 2008), 표 4의 신뢰도지수 결과를 살펴보면 선단부 N치로 구분된 두 가지 경우($N_{tip} < 50$ 과 $N_{tip} \geq 50$) 모두 1회의 검증용 정재하시험을 수행하여 파괴가 발생하지 않으면 신뢰도지수 2.33을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 2회의 시험이 수행된 경우는 모두 파괴가 발생하지 않으면 신뢰도지수 2.33을 만족함을 알 수 있다. 3회 이상 여러 차례의 검증용 재하시험이 수행되는 경우는 일부 시험에서 파괴가 발생하더라도 신뢰도지수 2.33을 만족할 수 있는 것으로 나타났다.

표 4. 검증용 정재하시험 결과를 반영한 신뢰도지수 결과

총 시험수	비파괴 시험수	신뢰도지수(β)	
		$N_{tip} < 50$	$N_{tip} \geq 50$
4	4	3.01	2.90
	3	2.91	2.80
	2	2.45	2.45
	1	1.90	1.86
3	3	2.92	2.80
	2	2.71	2.64
	1	2.05	2.00
	0	0.26	0.06
2	2	2.79	2.64
	1	2.28	2.21
	0	0.38	0.16
1	1	2.56	2.36
	0	0.58	0.33

5. 결론

기초구조물의 신뢰성 분석 및 저항계수 산정 과정 중 극한지지력을 확인할 수 있는 정재하시험 자료를 확보하는 것은 가장 힘든 업무 중 하나로 인식되고 있다. 최근 이러한 실측 데이터가 부족한 경우에 대한 신뢰성 분석기법 방안으로써 베이지안 이론 등의 추계론적 해석적 접근법이 일부 연구들에서 수행되고 있다. 본 연구에서는 베이지안 기법을 적용한 새로운 해석 방법을 통해 측정지지력을 확인할 수 없는 검증용 정재하시험의 결과를 활용하여 타입강관말뚝의 저항 통계특성을 갱신하고 신뢰성 분석을 실시하였다. 국내 전역에서 수집, 분석된 측정지지력을 확인할 수 있는 데이터베이스를 사전정보로 활용하였고, 검증용 정재하시험 자료의 여러 가지 결과에 근거한 우도정보를 이용하여 갱신된 저항 통계특성을 산정하였다. 갱신된 저항 통계특성을 적용하여 일차신뢰도법에 의해 신뢰도지수를 산정하였고 신뢰도 수준을 분석하였다. 본 연구에서 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 측정 지지력을 확인할 수 있는 타입강관말뚝의 정재하시험 자료 57개에 대해서 말뚝의 선단부 N치를 기준으로 두 그룹으로 나누어($N_{tip} < 50$, $N_{tip} \geq 50$), Davisson 기준에 의해 측정 지지력을 산정하고 Meyerhof 공식을 적용하여 예측 지지력을 산정하였다. 저항편향 계수의 사전분포 통계특성을 분석한 결과 Meyerhof

공식은 내재적 보수성이 크고 자료의 분산정도가 심한 것으로 평가되었다.

- (2) 저항편향계수의 사전분포특성에 검증용 정재하시험 수행 결과를 우도정보로 반영하여 갱신된 사후분포의 통계특성을 산정한 결과, 검증용 정재하시험에서 파괴가 발생하지 않는 시험 수가 증가할수록 갱신된 사후분포 그래프는 오른쪽으로 이동하여 저항편향계수의 평균값이 증가하고 변동계수는 감소하였다.
- (3) 검증용 정재하시험 결과가 반영된 저항편향계수의 갱신된 사후분포 통계특성을 이용하여 일차신뢰도법에 의한 신뢰성 분석을 수행하였다. 파괴가 발생하지 않은 재하시험의 수가 증가할수록 신뢰도지수 증가하였으나 그 증가율은 감소하였다. 또한, 전체 수행된 재하시험 중 파괴가 발생할 경우 파괴가 발생하는 시험수가 증가할수록 신뢰도지수는 감소하였다.
- (4) 목표 신뢰도지수(β) 2.33과 비교하여 1회 또는 2회의 검증용 정재하시험이 수행될 경우 모든 시험에서 파괴가 발생하지 않을 경우 Meyerhof 공식의 신뢰도지수가 2.33을 만족할 수 있는 것으로 확인되었다. 재하시험이 3회 이상 여러 차례 수행될 경우 일부 시험에서 파괴가 발생하더라도 목표 신뢰도지수 2.33을 만족할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제안된 방법을 통해 기존 신뢰성 분석 및 저항계수 산정 과정에서는 제외되었던 극한하중을 확인할 수 없는 검증용 정재하시험 자료를 활용하여 말뚝기초의 신뢰성 평가가 가능함을 확인하였다. 이를 바탕으로 향후 추가 연구를 통해 합리적인 저항계수의 수정, 보완이 가능할 것이다. 또한, 본 연구에서는 국내 재하시험 데이터베이스를 바탕으로 Meyerhof 경험식(1976)을 적용한 경우, 검증용 정재하시험 수행 결과에 따라 신뢰도지수 즉, 안전성의 변화 양상을 제시하였다. 따라서, 향후 구조물별 또는 설계공식별로 본 연구와 유사한 연구성과가 축적된다면 기초구조물의 설계기준에서 제안된 기존의 재하시험 수행 방안에 대해서 논리적 근거를 바탕으로 재하시험 수행기준에 대한 검증 및 재검토도 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 R&D 연구과제 “초장대교량사

업단”의 연구비 지원 및 교육과학기술부 BK 21 SNU SIR 그룹 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 국토해양부 (2009), *구조물기초설계기준 해설*, (사)한국지반공학회.
2. 박재현, 허정원, 김명모, 광기석 (2008), “LRFD 설계를 위한 국내 항타강관말뚝의 저항계수 산정”, *대한토목학회 논문집*, Vol.28, No.6C, pp.367-377.
3. 한국건설기술연구원 (2008), *LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구*, 건설교통 R&D 정책·인프라사업 3차년도 최종 연구보고서, 국토해양부.
4. (사)한국지반공학회 (1997), *지반조사 결과의 해석 및 이용*, 지반공학시리즈 1, 도서출판 구미서관.
5. Allen, TM (2005), “Development of Geotechnical Resistance Factors and Downdrag Load Factors for LRFD Foundation Strength Limit State Design”, Publication No. FHWA-NHI-05-052, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
6. American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO) (2007), *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications Fourth Edition*. AASHTO, Washington DC.
7. Ang, A.H.-S. and Tang, W.H. (1975), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Vol. I, Basic Principles*, John Wiley & Sons, New York.
8. Bolduc, L.C., Gardoni, P., and Briaud, J.-L. (2008), “Probabilistic of exceedance estimates for scour depth around bridge piers”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.134, No.2, pp.175-184.
9. Cetin, K.O. and Ozan, C. (2009), “CPT-Based probabilistic soil characterization and classification”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.135, No.1, pp.84-107.
10. Davisson, M. (1972), “High Capacity Piles”, *Proceedings of Soil Mechanics Lecture Series on Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, Chicago, IL, pp.82-112.
11. Goh, A.T.C., Kulhawy, F.H., and Chua, C.G. (2005), “Bayesian neural network analysis of undrained side resistance of drilled shafts”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.1, pp.84-93.
12. Hansell, WC and Viest, IM (1971), “Load factor design for steel highway bridges”, *Engineering Journal of AISC*, Vol.18, No.4, pp.113-123.
13. Honjo, Y., Liu, W.-T., and Guha, S. (1994), “Inverse analysis of an embankment on soft clay by extended bayesian method”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.18, pp.709-734
14. Juang, C.H., Fang, S.Y., and Khor, E.H. (2006), “First-order reliability method for probabilistic liquefaction triggering analysis using CPT”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.3, pp.337-350.
15. Kwak, K., Kim, K.J., Huh, J., Park, J.H., Chung, M., and Lee, J.H. (2008), “Target reliability indices of static bearing capacity evaluation of driven steel pipe piles”, *Proceedings of the 87th Annual Meeting of Transportation Research Board*, Transportation Research Board, Washington, D.C. (CD-ROM).

16. Kwak, K., Kim, K.J., Huh, J., Lee, J.H., and Park, J.H. (2010), "Reliability Based Calibration of Resistance Factors for Static Bearing Capacity of Driven Steel Pipe Piles", *Canadian Geotechnical Journal*, to be published (accepted in September 2009).
17. Li, D.Q., Tang, W.H., and Zhang, L.M. (2008), "Updating occurrence probability and size of defect for bored piles", *Structural Safety*, Vol.30, pp.130-143.
18. McVay, M.C., Birgisson, B., Nguyen, T., and Kuo, C.L. (2002), "Uncertainty in load and resistance factor design phi factors for driven prestressed concrete piles", *Transportation Research Record*, No. 1808, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 99-107.
19. McVay, M.C., Birgisson, B., Zhang, L., Perez, A., Putcha, S., and Lee, S.M. (2000), "Load and resistance factor design (LRFD) for driven piles using dynamic methods-A Florida perspective", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.23, No.1, pp.55-66.
20. Meyerhof, G.G. (1976), "Bearing capacity and settlement of pile foundations", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.102, No.GT3, pp.196-228.
21. Moss, R.E.S., Seed, R.B., Kayen, R.E., Stewart, J.P., Kiureghian, A.D., and Cetin, K.O. (2006), "CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.8, pp.1032-1051.
22. Paikowsky, S.G., Birgisson, B., McVay, M.C., Nguyen, T., Kuo, C.L., Baecher, G., Ayyab, B., Stenersen, K., O'Malley, K., Chernauskas, L., and O'Neill, M. (2004), *Load and Resistance Factor Design for Deep Foundations*, NCHRP Report 507, Transportation Research Board, Washington, D.C.
23. Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., and Grigoriu, M.D. (2003), "Development of a reliability-based design framework for transmission line structure foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.9, pp.798-806.
24. Rackwitz, R. and Fiessler, B. (1978), "Structural reliability under combined random load sequences", *Computers and Structures*, Vol.9, pp.489-494.
25. Yan, W.M., Yuen, K.-V., and Yoon, G.L. (2009), "Bayesian probabilistic approach for the correlations of compression index for marine clays", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.135, No.12, pp.1932-1940.
26. Zhang, L.L., Tang, W.H., and Zhang, L.M. (2009), "Bayesian model calibration using geotechnical centrifuge tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.135, No.2, pp.291-299.
27. Zhang, L.L., Zhang, L.M., and Tang, W.H. (2008), "Similarity of soil variability in centrifuge models", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.45, No.8, pp.1118-1129.
28. Zhang, L.M. and Tang, W.H. (2002), "Use of load tests for reducing pile length", *Proceedings of Deep Foundation 2002*, ASCE, Orlando, Florida, pp.993-1005.
29. Zhang, L.M., Tang, W.H., Zhang, L.L., and Zhang, J. (2004), "Reducing uncertainty of prediction from empirical correlations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.5, pp.526-534.

(접수일자 2010. 4. 27, 심사완료일 2010. 7. 26)