

광양지역에 적합한 항타강관말뚝의 목표신뢰성지수 및 저항계수 산정

김현태¹, 김대현*, 임재춘¹, 박경호¹, 이익효²
¹조선대학교 토목공학과, ²전남대학교 해양토목공학과

Resistance Factor and Target Reliability Index Calculation of Static Design Methods for Driven Steel Pipe Pile in Gwangyang

Hyeon-Tae Kim¹, Daehyeon Kim*, Jae-Choon, Lim¹, Kyung-Ho Park¹, Ik-Hyo, Lee²

¹Department of Civil Engineering, Chosun University

²Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University

요약 최근 구조물 기초 분야에 대한 한계상태설계법이 국제적인 기술표준으로 요구됨에 따라 연구기반이 미약한 연약지반 개량공법에 대한 하중저항계수설계법 개발의 필요성이 대두되었다. 본 연구는 신뢰성 분석을 통해 항타강관말뚝의 목표신뢰성지수 및 저항계수를 산정하여 기초 구조물에 대한 LRFD code를 개발하고자 하였다. 프로그램의 검증에 위해 광양지역 16개의 항타말뚝 재하시험 결과와 2008년 한국건설기술연구원에서 이용된 57개의 항타말뚝 재하시험 결과를 취합하였다. 구조물기초설계기준에서 제안하고 있는 두가지 정역학적 설계공식에 대해서 대표 측정지지력과 설계지지력을 비교함으로써 저항편향계수를 평가하였고, 저항편향계수의 통계특성을 이용하여 일차신뢰도법 및 몬테카를로 실험레이션에 의한 신뢰성 분석을 실시하였다. 그 결과, 항타강관말뚝의 목표 신뢰성지수 2.0, 2.33, 2.5에 대해서 선단부 N치 50이하인 경우 두 지지력 공식의 저항계수는 각각 0.611~0.684, 0.821~0.537, 선단부 N치 50이상인 경우 각각 0.608~0.545, 0.749~0.643으로 제안되었다. 본 연구결과는 향후 다양한 기초구조물 및 지반구조물의 하중저항계수설계법 개발을 위한 자료로서 그 활용성이 있을 것이다.

Abstract Recently, the necessity of developing the load and resistance factor design(LRFD) for soft ground improvement method has been raised, since the limit state design is requested as international technical standard for the foundation of structures. In this study, to develop LRFD codes for foundation structures in Korea, target reliability index and resistance factor for static bearing capacity of driven steel pipe piles were calibrated in the framework of reliability theory. The 16 data(in Gwangyang) and the 57 data(Korea Institute of Construction Technology, 2008) sets of static load test and soil property tests conducted in the whole domestic area were collected along with available subsurface investigation results. The resistance bias factors were evaluated for the tow static design methods by comparing the representative measured bearing capacities with the expected design values. Reliability analysis was performed by two types of advanced methods : the First Order Reliability Method (FORM), and the Monte Carlo Simulation (MCS) method using resistance bias factor statistics. As a result, when target reliability indices of the driven pipe pile were selected as 2.0, 2.33, 2.5, resistance factor of two design methods for SPT N at pile tip less than 50 were evaluated as 0.611~0.684, 0.537~0.821 respectively, and STP N at pile tip more than 50 were evaluated as 0.545~0.608, 0.643~0.749 respectively. The result from this research will be useful for developing various foundations and soil structures under LRFD.

Keywords : LRFD, Target reliability index, Resistance factor, Driven steel pipe piles, FORM, MCS

This research was conducted as a part of research program at Chosun University. The authors acknowledge the financial support from the Chosun University 2015

*Corresponding Author : Daehyeon Kim(Department of Civil Engineering, Chosun University)

Tel: +82-10-6631-8075 email: dkimgeo@chosun.ac.kr

Received November 12, 2015

Revised November 30, 2015

Accepted December 4, 2015

Published December 31, 2015

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

지반의 지지력이 충분하지 못하거나 침하가 과도하게 일어나는 경우에는 깊은 기초를 설치하여 지지력이 충분히 큰 하부의 토층이나 암반층에 구조물의 하중을 전달하게 하며, 깊은기초 중에서 가장 일반적인 방법이 강관말뚝기초이다.

구조물의 기초를 설계함에 있어 현재 국내에서는 일반적으로 허용응력설계법(ASD :Allowable Stress Design)을 적용하고 있으나, 이와 같은 확성론적 방법에 의한 지지력 산정공식의 신뢰성은 지반의 복잡 다양성으로 인하여 아직 확실하게 정립되지 못한 실정이다. 이 때문에 실제 지반에 설치된 강관말뚝에 직접 하중을 가하는 재하시험이 많이 이용되고 있으나, 말뚝의 재하시험 결과로부터 지지력을 판단하는 것도 용이하지는 않다. 따라서 보다 정확하고 과학적인 확률론적 지지력 판정기준의 개발이 절실한 실정이다.

현행 구조물의 대형화와 복잡화 경향에 따라 경제적이고 합리적인 최적 설계방안에 대한 요구가 증가하면서 신뢰성 분석을 기반으로 하는 하중저항계수설계법(LRFD:Load and Resistance Factor Design)이 세계적인 추세가 되어가고 있다.

국외를 살펴보면 북미와 유럽을 중심으로 구조물 설계와 관련하여 신뢰성 기반 설계방법을 이미 도입하여 그 기준이 정립되었으며, 특히 유럽에서는 부분안전율을 사용한 설계개념을 직접 실무에 적용해 지반구조물의 설계에 사용하고 있다. 또한 국제표준화기구(ISO)의 설계 표준 뿐만 아니라 미국의 대표적인 설계시방서인 미연방도로국의 시방기준(AASHTO, 2007), 유럽연합의 설계 코드(Eurocode, 7)에서 신뢰성기반 설계가 포함되었으며, 특히 미국의 경우 2007년부터 교량설계시 하중저항계수설계법의 사용이 의무화되었다[1,2]. 현재 국제기술의 표준화 작업이 급속도로 이루어지고 있는 상황을 고려해 볼 때 강관말뚝 기초의 설계에 있어서도 하중저항계수설계법으로의 변화는 필연적이며, 이를 위한 연구개발 등 국내의 대비가 필요한 시점이다.

본 연구에서는 광양지역 16개의 항타말뚝 재하시험 결과와 2008년 한국건설기술연구원(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 이하 K.I.C.T)에서 작성한 “LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수

결정 연구”에서 이용된 57개의 항타말뚝 재하시험 결과를 취합하여 하중저항계수설계법에 따른 목표신뢰성지수 및 저항계수 해석결과를 비교하였다. 이를 통해 강관말뚝 기초에 대한 LRFD의 적용성을 검토하고 광양지역에 적합한 강관말뚝 기초의 하중저항계수설계법에 의한 설계기준을 제시하고자 한다.

1.2 연구동향

말뚝기초의설계는 전통적으로 허용응력 설계법에 의해 지지력을 계산하고 있다. 말뚝기초의 지지력 문제는 상당히 오래된 문제이나 양질의 현장 실험 데이터의 부족 등으로 인해 아직도 연구가 필요하다[3].

신뢰성이론은 Freudenthal(1947)과 Pugsley(1995)에 의해 발표되면서 유럽과 북미지역을 중심으로 신뢰성에 기반을 둔 구조물 설계기준에 관한 연구가 활발히 진행되었다[4,5]. 특히 Cornell(1969)이 평균 제1계 2차모멘트 방법을 발표한 이래 신뢰성 방법의 적용에 대한 연구가 빠른 속도로 진행되었다[6]. 그러나 Cornell(1969)의 MFOSM방법은 확률분포의 범위가 정규 분포라야 한다는 제한, 한계상태 함수의 표현 형태에 따른 해의 유일성 결여 등이 문제점으로 지적되어 사용상에 한계가 있었다. 이 때문에 Hansofer and Lind(1974)가 표현 형태에 따른 문제를 해결하였고, Shinozuka(1983)가 연구에 확률변수의 상관관계를 포함시켜 AFOSM방법을 완성하였으며, 그 후 구조물의 신뢰성해석에 적용되고 있다 [7,8].

지반공학과 관련된 신뢰성 연구로는 덴마크 지반공학 협회의 Hansen(1953)에 의해 부분 안전율 개념이 제안되어 설계기준에 적용된 이후로 유럽연합위원회(Commission of European Communities, CEC)는 하중, 토질정수, 설계공식 및 시공오차 등에 대한 부분안전율 개념을 도입하였다[9].

유럽 건설설계표준위원회는 국제 표준화기구(ISO)의 부속 기술위원회인 TC 250에 Eurocode를 제정하면서 기초구조물의 설계와 관련된 Eurocode 1의 “Basis of Design and Action on Structures”와 Eurocode 2의 “Geotechnical Design”을 포함하여 소요 안전율의 확보를 위해서 부분안전율법을 도입하였다. 미국과 캐나다를 중심으로 한 북미 선진국에서는 Eurocode와는 달리 하중저항계수설계법을 개발하였으며, 이는 미국 연방도로국의 교량설계기준(AASHTO, 2007)과 구조물에 대한

미국표준설계기준(ANSI)에 포함되었다[1]. 캐나다에서는 기초공학 매뉴얼(Canadian Foundation Engineering Manual)에 기초구조물의 신뢰성 기반 설계기준을 포함하여 실무에 적용하고 있다[10]. 또한, 호주의 Austroads 교량설계기준에서도 깊은 기초의 시공에 관한 저항계수를 제시하고 있다.

국내에서는 신뢰성해석에 기초하여 항타말뚝과 현장타설말뚝에 대한 연구를 진행하였으며 얕은기초, 사면 및 항만 방파제 부분에서 연구가 진행중이다[11].

Kwak et al.(2006)은 항타강관말뚝의 저항편향계수를 산정하기 위하여 재하시험에 의한 Davisson 방법과 지지력 공식에 의한 설계지지력을 비교 분석하여 저항편향계수를 산정하였다. 그 결과, 정역학적 지지력 공식은 0.98, N치를 이용한 경험식은 1.46의 저항편향계수값을 나타냄으로써 N치를 이용한 경험식은 지지력을 과소평가하는 경향이 있음을 확인하였다[12].

Huh et al.(2007)은 항타강관말뚝의 저항편향계수를 산정하기 위하여 말뚝의 선단부 평균 N치 50을 기준으로 자료를 두 그룹으로 분류하여 정역학적 지지력 공식과 Meyerhof 경험식에 의한 설계 극한지지력을 이용하였다. 그 결과, 정역학적 지지력 공식은 자료의 변동성이 낮게 평가되었으며, Meyerhof 경험식은 내재적 보수성이 크게 평가되었다. 저항편향계수의 확률밀도함수는 두 가지 지지력 공식 모두 대수정규분포에 적합한 것으로 확인되었다[13].

Park et al.(2008)은 신뢰성에 기반한 항타강관말뚝의 저항계수를 산정하였다. 이는 Huh et al.(2007)과 마찬가지로 57개의 자료에 대해서 선단부 N치 50을 기준으로 두 그룹으로 분류하였고, 저항편향계수의 통계특성을 이용하여 일차신뢰도법 및 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 신뢰성 분석을 실시하였다. 신뢰성 분석 결과, 국내 말뚝 기초의 설계, 시공, 실무 특성을 고려하여 무리말뚝의 적용성을 적용할 수 있는 경우 2.0, 2.33, 무리말뚝의 적용성을 적용할 수 없는 경우 2.5의 목표신뢰도지수를 결정하였고, 선단부 N치 50미만인 정역학적 지지력공식과 Meyerhof 경험식의 저항계수는 각각 0.34~0.43, N치 50이상인 경우 두 지지력 공식의 저항계수는 각각 0.32~0.39, 0.27~0.37로 나타났다[14].

강관말뚝 기초의 설계에 있어 하중저항계수설계법의 도입을 위해서는 하중과 저항의 불확실성을 고려한 하중계수와 저항계수의 합리적인 정의가 선행되어야 하며,

특히 저항계수의 경우 지역의 지질학적 특성, 설계 및 시공관행, 경험특성 등 많은 요소에 의해 좌우되는 특정한 값이므로 국내 실정에 맞는 저항계수의 산정이 필연적이다.

2. 강관말뚝의 재하시험 및 지지력에 의한 극한지지력 산정방법

2.1 지지력에 의한 극한지지력 산정방법

분석대상 자료에 대한 설계 지지력을 산정하기 위해서 구조물기초설계기준에서 제안하고 두 가지 정역학적 설계법인 정역학적 지지력공식과 N치를 이용한 Meyerhof 경험식을 적용하였다. 말뚝 제원과 지반 조건 등은 정재하시험과 동일하게 적용하였다. Meyerhof 경험식은 보정하지 않은 N치 결과를 적용하였는데, 이는 국내 실무에서 표준관입시험 N치로부터 말뚝의 지지력을 추정하는 경우 일반적으로 N치의 보정이 행하여지지 않고 있으며, 실험장비, 에너지효율 측정 및 해석법에 따라 그 편차가 큰 것으로 알려져 있기 때문이다. 설계 지지력 산정에 적용된 정역학적 지지력공식 및 Meyerhof 경험식은 각각 식 1, 식 2와 같다.

$$Q = (\sigma'_v N_q + cN_c)A_p + \sum f_s A_s \quad (1)$$

여기서, σ'_v 는 말뚝 선단 깊이의 유효상재압(한계관입깊이=20B, B=말뚝직경), N_q , N_c 는 깊은 기초의 지지력계수, c 는 말뚝지지층의 점착력, A_p 는 말뚝 선단 지지면적, A_s 는 말뚝 주변 면적, f_s 는 단위면적당 최대주변 마찰력($=\alpha c_u + K_s \sigma'_v \tan \delta$), α 는 부착력계수, c_u 는 주면지반 비배수전단강도, K_s 는 말뚝면에 작용하는 법선도압계수($=1.4(1-\sin \phi)$), δ 는 말뚝과 주변 흙과의 마찰각($=20^\circ$)이다.

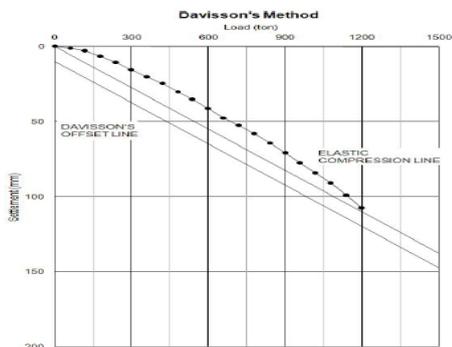
$$Q_u = mN_{60}A_p + n\overline{N}_{60}A_s \quad (2)$$

여기서 $m = 3(L_b/B) \leq 30$, $mN_{60} \leq 1500tf/m^2$ 이다.

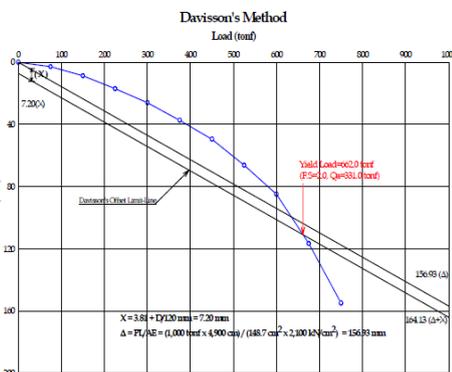
2.2 재하시험에 의한 극한지지력 산정방법

Davisson 기준은 많은 재하시험 결과로부터 말뚝두부의 침하가 말뚝의 탄성변형과 선단지반의 탄성변형의 합보다 크면 파괴가 일어난다고 제안하였으며, 이 한계하중은 말뚝두부 하중에 대한 탄성압축량 직선을 산정한 후 이 직선에 말뚝직경에 따른 상수값을 더한 만큼의 평행이동선을 구하여 하중-침하량 곡선과의 교차점을 찾는다[15].

Davisson 방법의 분석결과, 총 63개의 자료 중 60개 자료에 대해서 극한지지력을 확인할 수 있었으며, k_{sx} (평균 측정지지력/Davisson 방법에 의한 극한지지력)의 평균은 1.012 표준편차는 0.130으로 나타났고, 평균값이 1.0에 근접하기 때문에 다른 재하시험에 의한 극한지지력 산정 방법들에 비해서 전체적으로 평균적인 값을 나타내는 것을 알 수 있다[12, 13]. 따라서 본 연구에서 직접 수행한 광양지역 자료의 측정 극한 지지력을 결정하기 위한 대표적인 기준으로 Davisson(1972) 방법을 선정하였다. 다음 Fig. 1은 Davisson 방법에 의한 분석결과이다.



(a)



(b)

Fig. 1. Results of Davisson Method
(a) LNG OOO Tank (b) SNG Plant

3. 강관말뚝 기초의 신뢰성 해석

3.1 해석대상

본 연구에서는 광양지역에서 실시한 재하시험 16개의 자료는 신뢰성 해석을 위한 자료로서 충분하지 않다고 판단되어 K.I.C.T(2008)에서 신뢰성 해석 후 작성한 “LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구”에 사용된 신뢰성이 우수한 자료를 취합하여 신뢰성 해석으로 사용하였다.

신뢰성 해석을 하기위한 말뚝 직경, 지질, 길이에 대한 분류는 Table 1과 같으며, 광양지역의 말뚝은 재하시험의 대부분이 설계지지력의 2배 하중만 가해지고 말뚝 변위량은 탄성압축량 정도의 크기만 발생하여 대부분의 항복지지력을 확인 할 수 없었다. K.I.C.T에서는 신뢰도가 높은 자료 63개만 산정하였고, 직접 수행한 광양지역의 16개의 자료를 취합하여 신뢰성 분석 및 저항계수 산정을 실시하였다.

Table 1. The number of piles according to diameter and length of piles

	Diameter	Piles	Length	Piles
Gwangyang	406mm	7	30m less	1
	508mm	5	30~40m	6
	711mm	3	40~50m	6
	914mm	1	50m more	3
	Total	16	Total	16
K.I.C.T	Diameter	Piles	Length	Piles
	406mm less	8	10m less	20
	508mm	36	10~30m	23
	711mm	16	30m more	20
	914mm more	3		
Total	63	Total	63	

3.2 해석대상의 지형 및 지질

본 연구에서 직접 수행한 광양지역의 지반특성은 생성, 풍화, 운반, 퇴적 과정과 생성 후 구성 광물의 변화, 응력, 함수비 등 지역 특성과 위치에 따른 변화를 보이며, 연직방향과 수평방향에 따른 물성의 변화를 보인다. Fig. 2는 조사지역의 지형도이다.

표준관입시험 분석결과, 실트질 모래층은 부지조성 당시 인위적으로 매립·성토된 층으로 모든 시추공에서 확인되었으며 전 지역에 분포한다. 실트쉬인 세립~조립의 모래로 구성되며, 층후는 0.3~24.2m로 분포하며, 습윤~포화의 함수상태를 보인다. 실트질 점토층에서는 부분적으로 조개패 및 세립모래가 혼재되어 있으며, 층후

는 3.0~24.3m로 분포하고, N치는 1~8의 매우 연약~견고 한 연경도로 분석되었다. 실트질 모래층은 실트쉬인 세립~조립의 모래로 구성되며, 층후는 0.5~28.0m로 분포하며, N치는 6~50의 매우

느슨~조밀한 상대밀도로 분석되었다. 실트질 점토층에서의 층후는 1.5~21.3m로 분포한다. N치는 7~12의 매우 연약~견고 한 연경도로 분석되었다. 모래자갈층에서는 1.4~14.5m로 분포한다. N치는 12~64이상으로 느슨~매우 조밀한 상대밀도로 분석되었다. Table. 2는 광양지역 시추조사 및 N치 분석결과이다.



Fig. 2. Geography of research area

3.3 강관말뚝의 극한지지력 및 저항편향계수 산정

본 연구에서 직접수행한 광양지역의 16개 시료와 적용성이 높고, 객관적, 정량적 기준을 제시 할 수 있는 K.I.C.T 보고서의 63개의 자료 중 57개 자료를 통하여 선단부 N치를 재분류 하였다. 표준관입시험의 N치 50은 지반조사 및 말뚝설계 시공 실무에서 경질 지반의 기준 조건으로서 인식되고 있으므로 N치 50을 기준으로 자료를 두 가지로 분류하였다. 광양지역 자료는 선단부 N치 50미만(N<50)자료는 3개, 50이상(N≥50) 자료는 13개(Table 3참조), K.I.C.T 보고서 자료는 선단부 N치 50미만(N<50)자료는 26개(Table 4참조), 50이상(N≥50) 자료는 31개(Table 5참조)로 분석되었다. 또한, 광양지역의 목표신뢰성지수 및 저항계수를 구하기 위해 건기원 보고서의 57개 자료만을 비교하기엔 부족하다고 판단되어, 광양지역의 자료와 건기원이 자료를 취합하여 분석하였다.

분석된 추정지지력과 설계신뢰성분석에 적용되는 통계분석의 신뢰성 있는 결과도출을 위하여 일반적인 저항편향계수 범위 [평균±(2x표준편차)]를 벗어난 값은 통계 해석에서 제외하는 것이 합리적이므로, 이를 고려하여 저항편향계수의 통계 특성치를 산정하였다[16].

Table 2. Analysis results of drilling test and N value in Gwangyang

Bore Hole	Drilling test(m)													Depth	
	SM	N	ML	N	SM	N	ML	N	SW	N	Weathering soil	N	Total		
A	BH-1	13.1	9	3.0	3	6.3	6	3.8	7	7.4	64	1.4	100	35.5	34.0
	BH-2	13.1	9	3.0	3	6.3	6	3.8	7	7.4	64	1.4	100	35.5	34.8
	BH-3	13.8	2	10.6	1	0.5	29	-	-	10.3	50	0.3	50	35.5	35.2
	BH-4	13.8	2	10.6	1	0.5	29	-	-	10.3	50	0.3	50	35.5	35.0
B	BH-5	23.1	13	20.1	3	-	-	-	-	5.8	50	-	-	49	46.6
	BH-6	24.2	9	19.0	2	-	-	-	-	5.2	24	1.9	50	49.6	50.4
	BH-7	19.8	7	23.3	2	-	-	-	-	5.4	45	-	-	48.5	51.2
C	BH-8	23.0	8	24.3	3	-	-	-	-	2.2	60	-	-	49.5	52.5
	BH-9	23.0	8	24.3	3	-	-	-	-	2.2	60	-	-	49.5	49.0
D	BH-10	03.0	7	-	-	03.5	7	-	-	14.5	12	0.20	50	21.2	21.9
E	BH-11	10.2	14	09.0	1	14.7	20	21.3	11	1.4	48	-	-	48.5	47.4
	BH-12	10.2	14	09.0	1	14.7	20	21.3	11	1.4	48	-	-	48.5	47.4
F	BH-13	15.0	10	11.0	8	09.5	30	01.5	12	8.0	50	-	-	45.0	40.4
	BH-14	06.0	27	-	-	28.0	19	-	-	05.0	50	-	-	39.0	39.3
	BH-15	15.0	10	11.0	8	09.5	30	01.5	12	8.0	50	-	-	45.0	38.9
	BH-16	06.0	27	-	-	28.0	19	-	-	05.0	50	-	-	39.0	41.5

Table 3. Bearing power of piles in Gwangyang

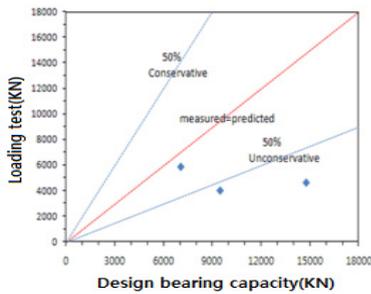
Number	Data of piles		Pile load test (Davisson) (kN)	Bearing capacity in design		Resistance bias factors		Tip of pile N value	
	Diameter (mm)	Length(m)		Static formula (kN)	Meyerhof (kN)	Static formula	Meyerhof		
N< 50	7	711.0	16.0	4625.6	14776*	7428	0.31	0.62	45
	11	406.4	12.0	5880.0	7060*	4251	0.83	1.38	48
	12	508.0	12.0	4018.0	9459*	5885	0.42	0.68	48
N ≥ 50	1	406.4	9.5	4625.6	3773	4182	1.23	1.11	64
	2	508.0	12.7	5880.0	5283	5823	1.11	1.01	64
	3	406.4	9.0	4018.0	6545	2949	0.61	1.36	50
	4	406.4	12.0	4900.0	6540	3041	0.75	1.61	50
	5	914.4	16.0	5292.0	19228	13811	0.28	0.38	50
	6	711.2	12.0	11760.0	10213	8013	1.15	1.47	50
	8	508.0	12.0	2646.0	6452	4541	0.41	0.58	60
	9	406.0	12.0	1960.0	4721	3141	0.42	0.62	60
	10	711.2	12.0	9917.6	7120	6840	1.39	1.45	50
	13	406.4	9.0	4692.2	6007	4436	0.78	1.06	50
	14	406.4	12.0	6517.0	6081	4254	1.07	1.53	50
	15	508.0	9.0	6166.1	8314	6162	0.74	1.00	50
	16	508.0	12.0	6311.2	9102	5935	0.69	1.06	50

Table 4. Bearing capacity of tip of pile N value < 50 from K.I.C.T

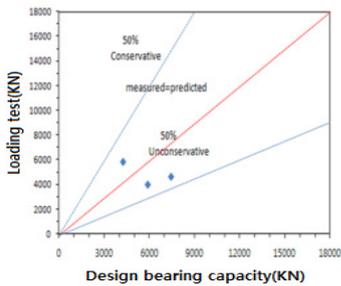
Number	Data of piles		Pile load test (Davisson) (kN)	Design bearing capacity		Resistance bias factors		Tip of pile N value
	Diameter (mm)	Length (m)		Static formula (kN)	Meyerhof (kN)	Static formula	Meyerhof	
T-2	508.0	30.0*	1529	3569*	3929*	0.43	0.39	27
T-3-1	609.0	11.7*	2254	3039*	2691*	0.74	0.84	26
T-3-2	508.0	9.6*	1470	3016*	1991*	0.49	0.74	26
T-3-3	609.0	7.4*	2087	2998*	4314*	0.70	0.48	43
T-4	508.0	7.3*	2352	2231*	1471*	1.05	1.60	31
T-6-1	609.0	22.9*	1911	1250*	2417*	1.53	0.79	10
T-7	508.0	7.3*	2205	2621*	2390*	0.84	0.92	32
T-9	609.0	7.7*	1264	5383*	1789*	0.23	0.71	37
T-10-1	813.0	54.6*	6086	6129*	2181*	0.99	2.79	4
R-2"	508.0	24.0*	6341	1317*	587*	4.81	10.8	11
R-3-1"	609.0	36.5*	5145	2267*	1575*	2.27	3.27	13
R-5-1"	609.0	42.4*	7056	6288*	4767*	1.12	1.48	27
R-6-1"	609.0	24.5*	6860	5266*	5797*	1.30	1.18	46
R-6-2"	609.0	23.3*	4929	5779*	1364*	0.85	3.61	37
R-7	508.0	31.4*	1323	1785*	1702*	0.74	0.78	25
R-8"	609.0	55.0*	3538	8613*	7072*	0.41	0.50	32
R-9"	508.0	17.0*	4880	1027*	612*	4.75	7.97	5
R-10"	508.0	9.5*	2960	3565*	2140*	0.83	1.38	44
R-11"	406.0	9.5*	3165	1698*	635*	1.86	4.98	47
R-12"	609.0	57.1*	7585	5416*	3467*	1.40	2.19	17
R-16	508.0	6.9*	1294	966*	274*	1.34	4.72	12
R-17-2	1548.0	6.4*	1548	3186*	1607*	0.49	0.96	47
R-24"	406.0	30.0*	750	1299*	541*	0.58	1.39	4
R-26"	406.0	30.0*	1325	1456*	525*	0.91	2.52	5
R-27"	508.0	30.0*	1325	1194*	1265*	0.00	0.00	15
J-3	406.0	9.5*	2891	1657*	1641*	1.74	1.76	33
Note	T-Thesis, R-Report, J-Journal							

Table 5. Bearing capacity of tip of pile N value ≥ 50 from K.I.C.T

Number	Data of piles		Pile load test (Davisson) (kN)	Design bearing capacity		Resistance bias factors		Tip of pile N value
	Diameter (mm)	Length (m)		Static formula (kN)	Meyerhof (kN)	Static formula	Meyerhof	
T-1	508	15.5	5292	3693	1513	1.43	3.50	55
T-5	508.0	6.5	960	1896.8	608.2	0.51	1.58	52
T-6-2	609.0	25.8	3332	6683	4471	0.50	0.75	65
T-10-2	16092.0	33.0	16092	3153	5078	5.10	3.17	63
T-12	508.0	28.0	2528	4333	6541	0.58	0.39	60
R-1"	508.0	33.0	4018	5425	4158	0.74	0.97	64
R-3-2"	508.0	24.0	3038	4933	869	0.62	3.50	60
R-3-3"	609.0	30.0	6664	6106	2362	1.09	2.82	60
R-4-1	609.0	13.1	7311	5378	1600	1.36	4.57	52
R-4-2	609.0	19.8	7203	6401	6546	1.13	1.10	53
R-4-3	609.0	30.3	7399	6756	2478	1.10	2.99	56
R-5-2"	609.0	57.4	4802	8460	7893	0.57	0.61	54
R-13-1	508.0	7.0	1558	3665	2027	0.43	0.77	72
R-13-2	508.0	7.8	1999	3800	1875	0.53	1.07	72
R-14-1	406.0	8.0	1377	1438	2334	0.96	0.59	71
R-14-2	508.0	6.8	1397	1875	2129	0.75	0.66	71
R-15	508.0	11.9	1264	3355	4456	0.38	0.28	65
R-17-1	508.0	6.0	1166	3569	784	0.33	1.49	80
R-18	508.0	5.7	1303	3230	656	0.40	1.99	70
R-19"	508.0	13.0	3009	2900	4038	1.04	0.75	60
R-20"	508.0	33.0	5586	7019	2607	0.80	2.14	79
R-21"	508.0	47.0	4145	4923	6340	0.84	0.65	64
R-22"	508.0	35.5	6370	6776	5054	0.94	1.26	66
R-23"	813.0	46.0	5439	7546	5084	0.72	1.07	50
R-25"	406.0	9.0	630	1038	696	0.61	0.91	69
J-1-1	508.0	12.0	2823	3848	3791	0.73	0.74	52
J-2-2	508.0	39.0	2008	4987	3688	0.40	0.54	56
Note	T-Thesis, R-Report, J-Journal							

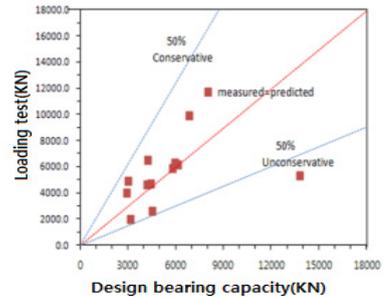


(a)

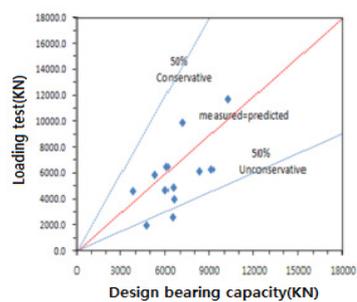


(b)

Fig. 3. Comparison of loading test and design bearing capacity of N value < 50 in Gwangyang
(a) Static formula (b) Meyerhof formula



(a)



(b)

Fig. 4. Comparison of loading test and design bearing capacity of N value ≥ 50 in Gwangyang
(a) Static formula (b) Meyerhof formula

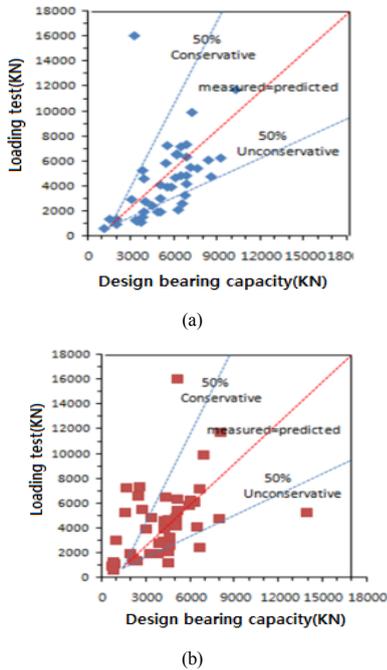


Fig. 5. Comparison of loading test and design bearing capacity of N value < 50 from K.I.C.T
(a) Static formula (b) Meyerhof formula

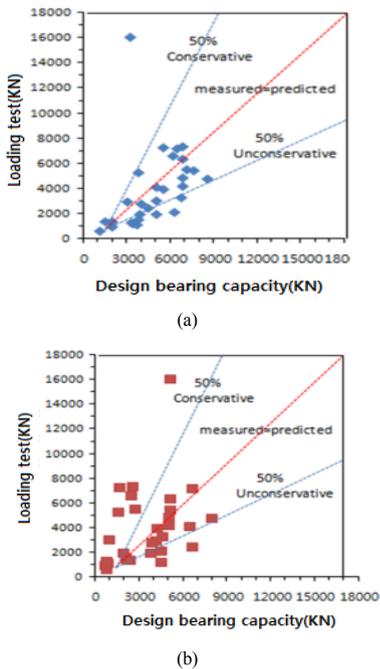


Fig. 6. Comparison of loading test and design bearing capacity of N value ≥ 50 from K.I.C.T
(a) Static formula (b) Meyerhof formula

극한지지력에 대하여 50% 큰 지지력을 나타내는 경계선과 50% 작은 지지력을 나타내는 경계선을 함께 도시하여 정역학적 지지력공식과 Meyerhof 경험식에 의한 설계 극한지지력의 경향성을 비교하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 K.I.C.T 보고서의 57개 항타강관말뚝 신뢰성 분석자료에 대해서 측정 극한지지력과 설계 극한지지력을 비교하여 저항편향계수 분석을 실시하였다.

$N < 50$ 자료의 경우 정역학적 지지력공식이 Meyerhof 식에 비해 더 많은 자료 수가 측정 극한 지지력의 $-50\% \sim +50\%$ 범위 내에 분포하는 것을 확인할 수 있으며 Meyerhof 경험식은 정역학적 지지력공식에 비해 지지력을 보수적으로 평가하는 자료 수가 많은 것을 알 수 있다. 또한 두 지지력공식 모두 측정 극한지지력과 일정한 경향성을 보이지 않았다.

$N \geq 50$ 자료의 경우 역시 정역학적 지지력공식이 Meyerhof 공식에 비해 많은 자료 수가 측정 극한지지력의 $\pm 50\%$ 범위 내에 분포하고 있지만, 다소 지지력을 과대평가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한 두 지지력공식 모두 측정 극한지지력과 일정한 경향성을 보이지 않았다.

Table 6은 직접 실시한 광양지역 16개의 자료와 건기원에서 수행한 57개의 자료를 취합한 자료를 ‘전체자료’라 명칭하고 저항편향계수의 평균과 표준편차, 변동계수 통계특성치이다.

Table 6. Statistics characteristic value of Resistance bias factors according to total tip of pile N value

Classification		Tip of pile N value < 50		Tip of pile N value ≥ 50	
		Static formula	Meyerhof formula	Static formula	Meyerhof formula
Resistance factors	Average	0.9192	1.6032	0.7597	1.2562
	Standard deviation	0.5193	1.2631	0.3083	0.8253
	Coefficient of variation	0.5650	0.7879	0.4059	0.6570

본 연구에서 직접 실시한 광양지역의 저평편향계수는 K.I.C.T에서 분석한 저평편향계수대비 선단부 N치 50미만의 정역학공식에서는 85%, Meyerhof식은 61%로 모두 과소평가되었으며, 선단부 N치 50이상의 정역학공식에서는 105%, Meyerhof식은 76%로 정역학공식은 과대

평가되었으나, Meyerhof식은 과소평가되었다. 또한 광양지역과 K.I.C.T의 자료를 취합한 전체자료의 저항편향계수에서도 선단부 N치 50이상에서 정역학적 공식을 제외하고는 광양지역의 저항편향계수가 과소평가 된 것을 알수 있었다. K.I.C.T의 보고서에서는 우리나라 여러지역에 분포한 말뚝에 대한 분석결과이며 본 연구에서 직접 실시한 말뚝은 광양 일부지역에 대한 결과로써 위와 같은 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

3.4 강관말뚝기초의 목표 신뢰성지수 결정

본 연구에서는 불특정 변수들이 대수정규분포를 따르고 한계상태해수가 비선형이라는 점을 고려하여반복알고리즘을 Form의 해석 기법으로 채택하였다. 이 알고리즘의 반복계산 수행을 원활하게 하기 위해 MATLAB에서 실행 가능한 신뢰성 해석 프로그램을 개발하였다.

선단부 N치 50 미만의 자료에 대하여 정역학적 지지력 공식 및 Meyerhof의 MCS 기반 신뢰성 해석을 수행한 결과(Table 7참조), 정역학적 지지력공식의 경우 안전율 3.0~5.0에 대하여 광양지역 자료의 신뢰성지수는 2.376~3.651, K.I.C.T 자료의 신뢰성지수는 1.785~2.817, 광양지역 자료와 K.I.C.T 자료를 취합한 전체 자료는 1.745~2.692이었다. 광양지역 자료의 신뢰성지수는 K.I.C.T 자료에 비해 23%이상 크게 나타났고, 전체 자료의 신뢰성지수에 비해 약 35% 이상 크게 나타났다.

Meyerhof식의 신뢰성지수 분석결과 광양지역의 신뢰성지수는 2.943~4.264, K.I.C.T 자료의 신뢰성지수는 1.992~2.743, 전체자료의 신뢰성지수는 1.161~1.566로 산정되었으며, 정역학공식에 대한 신뢰성지수와 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있으나, 광양지역 자료를 제외한 자료의 신뢰성지수 값이 가장 낮게 산정되어

저항편향계수의 산정에 핵심적인 재하시험, 현장조사 및 실내시험의 합리적 수행, 정확한 지지력 평가 및 엄격한 자료의 관리가 필요한 것으로 사료된다.

선단부 N치 50 이상의 자료에 대하여 정역학적 지지력 공식 및 Meyerhof의 MCS 기반 신뢰성 해석을 수행한 결과(Table 8참조), 정역학적 지지력공식의 경우 안전율 3.0~5.0에 대하여 광양지역자료의 신뢰성지수는 1.889~3.190, K.I.C.T 자료의 신뢰성지수는 1.528~2.777, 광양지역과 K.I.C.T 자료를 취합한 전체 자료의 신뢰성지수는 2.228~3.774이었다. 여기서, 선단부 N치 50미만 자료와 N치 50이상 자료의 신뢰성지수를 결과를 살펴보면 광양지역 자료의 경우 안전율 4.0에서 신뢰성지수는 3.190과 2.642로 차이를 나타내고 있다. 이는 신뢰성 해석시 기반조건이 다른 자료에 대한 분류의 필요성을 간접적으로 입증하는 것으로 판단된다.

Meyerhof식의 경우 안전율 3.0~5.0에 대하여 광양지역자료의 신뢰성지수는 2.258~3.459, K.I.C.T 자료의 신뢰성지수는 1.605~2.360, 광양지역의 자료와 K.I.C.T의 자료를 취합한 전체 자료의 신뢰성지수는 1.477~2.098로서 정역학적 지지력공식에 대한 신뢰성지수의 결과와 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있다.

광양지역 자료, K.I.C.T 자료 그리고 광양지역과 K.I.C.T 자료를 취합한 전체 자료에 대한 정역학적 지지력공식과 Meyerhof식을 이용한 신뢰성지수 결과를 살펴보면, 뚜렷하고 일관된 경향을 나타내고 있지 않다. 일반적으로 저항편향계수의 평균값이 높을수록 그리고 변동계수가 작을수록 높은 신뢰성지수를 가질 것으로 기대된다.

본 연구를 통해 광양지역 강관말뚝기초의 정재하시험 및 지반조사 자료를 대상으로 일계신뢰성해석기법과 몬테카를로 시뮬레이션기법을 적용하여 분석한 신뢰성지

Table 7. MCS-based reliability analysis of static and Meyerhof bearing capacity formula according to total tip of pile N value < 50

Classification	N < 50 / Static formula						Classification	N < 50 / Meyerhof formula					
	Gwangyang		K.I.C.T		Total			Gwangyang		K.I.C.T		Total	
	Probability of failure (%)	Resistance factor	Probability of failure (%)	Resistance factor	Probability of failure (%)	Resistance factor		Probability of failure (%)	Resistance factor	Probability of failure (%)	Resistance factor	Probability of failure (%)	Resistance factor
3.0	0.875	2.376	0.0371	1.785	0.0405	1.745	3.0	0.162	2.943	0.0232	1.992	0.1228	1.1609
3.5	0.285	2.784	0.0181	2.094	0.0215	2.023	3.5	0.046	3.313	0.0133	2.216	0.0994	1.2848
4.0	0.071	3.190	0.0089	2.368	0.0111	2.287	4.0	0.012	3.361	0.0079	2.416	0.0821	1.3911
4.5	0.029	3.440	0.0045	2.609	0.0059	2.516	4.5	0.005	3.889	0.0048	2.592	0.0674	1.4954
5.0	0.013	3.651	0.0024	2.817	0.0036	2.692	5.0	0.001	4.263	0.0030	2.743	0.0587	1.5658

Table 8. MCS-based reliability analysis of static and Meyerhof bearing capacity formula according to total tip of pile N value ≥ 50

Classification	N ≥ 50 / Static formula						Classification	N ≥ 50 / Meyerhof formula					
	Gwangyang		K.I.C.T		Total			Gwangyang		K.I.C.T		Total	
	Probability of failure (%)	Resistance factor	Probability of failure (%)	Resistance factor	Probability of failure (%)	Resistance factor		Probability of failure (%)	Resistance factor	Probability of failure (%)	Resistance factor	Probability of failure (%)	Resistance factor
3.0	2.945	1.889	0.0632	1.528	0.0129	2.228	3.0	1.198	2.258	0.0542	1.605	0.0698	1.477
3.5	1.080	2.297	0.0286	1.902	0.0034	2.703	3.5	0.481	2.589	0.0334	1.833	0.0485	1.660
4.0	0.412	2.642	0.0130	2.226	0.0009	3.124	4.0	0.189	2.895	0.0212	2.029	0.0331	1.836
4.5	0.175	2.919	0.0060	2.514	0.0003	3.480	4.5	0.082	3.148	0.0138	2.204	0.0244	1.969
5.0	0.071	3.190	0.0027	2.777	0.0001	3.774	5.0	0.027	3.459	0.0091	2.360	0.0179	2.098

수는 앞서 설명한 바와 같이 통상적으로 적용되는 안전율의 범위에서 정역학적 지지력공식의 경우 1.75~2.97, Meyerhof 경험식의 경우 2.99~4.41를 나타냈으며, Meyerhof 경험식의 신뢰성지수가 높게 나타남은 저항편향계수의 변동계수의 값이 정역학적 지지력공식의 변동계수의 값 보다 작기 때문이다. 또한 본 연구에서 개발한 신뢰성해석기법으로 산정한 정역학적 지지력공식의 신뢰성지수(1.75~2.97)는 Barker 등 및 미국의 깊은기초에 대한 LFRD의 신뢰성수준과 유사하게 나타났다.

강관말뚝의 경우 대형 기초구조물에 비해서 상대적으로 중요도가 낮은 구조물에 해당되며, 주로 무리말뚝으로 시공되기 때문에 Meyerhof 경험식의 신뢰성지수보다는 상대적으로 낮은 정역학적 지지력공식의 신뢰성지수인 2.5의 값을 목표신뢰성지수로 제안함이 타당하다고 본다.

3.5 저항계수 산정

목표 신뢰성지수(β_0)는 해당 사질토의 항타말뚝에 대해서 요구되는 수준의 안전율 또는 파괴확률을 대변하는 값으로서, 신뢰성설계법을 개발하는데 있어 가장 중요한 업무 중의 하나로서 여러 가지 요인들의 불확실성뿐만 아니라 지반공학의 체계적이고 연관된 기술수준, 지역특성과 기초구조물의 특성을 고려한 목표 신뢰성지수가 제안되어야 하는데 Barker 등은 일반적인 항타말뚝의 적정 신뢰성지수로 2.5~3.5 제안하였지만 본 연구에서는 직접 수행한 광양자료, 건기원에서 수행한 자료, 광양 자료와 건기원 자료를 취합한 전체 자료에 대해 신뢰성지수 2, 2.33, 2.5에 따른 저항계수를 계산하고 그 결과를 정역학적 지지력공식과 Meyerhof 경험식을 이용하여 산정하였다.

본 연구에서 직접 수행한 광양지역 16개 자료와

K.I.C.T에서 수행한 57개의 자료를 취합한 전체자료의 저항계수 산정결과는 Table 9와 같다.

전체 신뢰성지수에 따른 저항계수 산정결과, 목표신뢰성지수 2.0, 2.33, 2.5에 대해서 저항계수는 선단부 N치 50미만인 경우가 N치 50이상인 경우보다 정역학 공식에서 크게 산정되었다. 선단부 N치 50미만에서는 Meyerhof식이 크거나 작게 산정되었으나, 선단부 N치 50이상에서는 Meyerhof식이 크게 산정되었다. 이는 하중 조합식 $U=1.15L+1.05D$ 를 통해 산정한 값이며, 저항편향계수 및 변동계수 값의 차이에 따른 복합적인 영향이 기인한 것으로 판단된다.

Table 9. Calculation of resistance factor according to total reliability index

Classification	N < 50		N ≥ 50	
	Resistance factor		Resistance factor	
	Static formula	Meyerhof formula	Static formula	Meyerhof formula
2.0	0.611	0.821	0.608	0.749
2.33	0.741	0.552	0.570	0.671
2.5	0.684	0.537	0.545	0.643

4. 결론

1. 구축된 자료를 바탕으로 신뢰성 분석을 위해 선정된 재하시험 자료에 대해서 추정 극한지지력을 산정하였다. 산정결과 객관적인 수치를 얻을 수 있고 적용성이 높으며, 편차가 작은 Davisson 방법이 말뚝의 추정 극한지지력을 결정하기 위한 대표 방법으로 선정되었다.
2. 국내 설계 실무에 주로 적용되는 정역학적 지지력

공식과 Meyerhof경험식을 적용하여 설계 지지력을 산정하여 두 지지력의 비교·분석을 통해 저항편향계수를 산정하였다. 선단부 N치 50 미만, N치 50 이상에서 정역학적 지지력공식의 저항편향계수는 평균 0.829, 0.760이며, Meyerhof 경험식은 평균 1.066, 1.005이다. Meyerhof 경험식이 자료의 변동성이 낮고, 보수성이 크게 평가되었다.

3. 저항편향계수의 통계 특성을 이용하여 일계신뢰성 해석기법 및 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 신뢰성 분석을 수행하였다. 통상적인 구조물기초 안전을 수준인 3.0~5.0에 대해서 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 신뢰성지수를 산정한 결과 정역학적 지지력공식은 2.175~3.651, Meyerhof 경험식은 2.703~3.845이었다. 두 가지 지지력 공식 모두 선단부 N치 50 미만의 자료가 선단부 N치 50 이상의 자료보다 신뢰성수준이 높게 평가되었다.
4. 항타강관말뚝의 목표 신뢰성지수를 분석한 결과 광양지역에서 기초설계 정역학적 지지력 공식의 신뢰성지수인 2.5값을 목표 신뢰성지수로 제안함이 타당할 것으로 판단된다.
5. 직접 수행한 광양지역의 자료와 K.I.C.T 자료를 취합한 전체자료의 저항계수는 선단부 N치 50미만인 경우 정역학적 지지력공식과 Meyerhof 경험식의 저항계수는 목표 신뢰성지수 2.0, 2.33, 2.5에 대해서 0.611~0.684, 0.821~0.537, 선단부 N치 50이상인 경우 두 지지력 공식의 저항계수는 각각 0.608~0.545, 0.749~0.643으로 산정되었다.

국제적 기술표준으로 정립되고 있는 신뢰성 기반의 하중저항계수 설계법에 대비하여 본 연구를 통해 국내특성을 고려한 항타강관말뚝의 저항계수가 제안되었다. 본 연구 결과는 향후 다양한 기초구조물 및 지반구조물의 하중저항계수설계법 개발을 위한 자료로서 그 활용성이 있을 것이다.

References

- [1] American Association of State Highway and Transportation Official, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications Fourth Edition", AASHTO, Washington, D.C., 2007.
- [2] Eurocode 7, "Geotechnical Design, General Rules", European Committee for Standardization, Prestandard, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen., 1993.
- [3] Kim, D.W., Chang M.K., and Kwak, K.S., "Resistance Factor Calculations for LRFD of Axially Loaded Driven Piles in Sands", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 15, No. 7, pp. 1185-1196, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-011-1254-1>
- [4] Freudenthal, A.M., "The Safety of Structures", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 112, pp. 125-180, 1947.
- [5] Pugsley, A., "Report on Structural Safety", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 33, No. 5, pp. 141-149, 1995.
- [6] Cornell, C.A., "A Probability-Based Structural Code", Proceeding of The American Concrete Institute, Vol. 66, No. 12, pp. 974-985, 1969.
- [7] Hansofer A.M. and Lind, N.C., "Exact and Invariant Second Moment code Format", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, pp. 111-121, 1974.
- [8] Shinozuka, M., "Basic analysis of Structural Safety", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 721-740, 1983. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1983\)109:3\(721\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:3(721))
- [9] Hansen, B., "Earth Pressure Calculation", Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark, 1953.
- [10] Canadian Geotechnical Society, "Canadian Foundation Engineering Manual(CFEM)", 2nd Edition Canadian Geotechnical Society Technical Committee on Foundation, Ottawa, 1992.
- [11] Han, Y.B., Park, J.M. and Jang, Y.S., "Evaluation of the Resistance Bias Factors to Develop LRFD for Gravel Compaction Piles", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 28, No. 2, pp. 43-55, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2012.28.2.43>
- [12] Kwak, K.S., Park, J.H., Choi, Y.K. and Huh, J.W., "Evaluation of the Resistance Bias Factors to Develop LRFD for Driven Steel Pipe Piles", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 343-350, 2006.
- [13] Huh, J.W., Park, J.H., Kim, K.J., Lee, J.H. and Kwak, K.S., "Reliability Estimation of Static Design Methods for Driven Steel Pipe Piles in Korea", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 23, No. 12, pp. 61-73, 2007.
- [14] Park, J.H., Huh, J.W., Kim, M.M. and Kwak, K.S., "Resistance Factors of Driven Steel Pipe Piles for LRFD Design in Korea", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 367-377, 2008.
- [15] Davisson, M., "High Capacity Piles", Soil Mechanics Lecture Series on Innovations In Foundation Construction, Illinoissection, Chicago, 1972.
- [16] Paikowsky S.G., "Load and Resistance Factor Design(LRFD) for deep foundations", NCHRP Report 24-17 Transportation Research Board, Washington D.C., p. 76, 2004.

김 현 태(Hyeon-Tae Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 신성토건(주) 전무

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초

박 경 호(Kyung-Ho Park)

[정회원]



- 2011년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2015년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2015년 8월 ~ 현재 : 기찬토건(주) 연구팀장

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초

김 대 현(Daehyeon Kim)

[정회원]



- 1998년 8월 : 전남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 미국 PURDUE 대학교 (공학박사)
- 2009년 2월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초

이 익 효(Ik-Hyo Lee)

[정회원]



- 1982년 8월 : 건국대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 부산수산대학교 해양공학과 (공학박사)
- 1982년 2월 ~ 현재 : 전남대학교 해양토목공학과 교수

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초

임 재 춘(Jae-Choon Lim)

[정회원]



- 2006년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : 포스코 A&C

<관심분야>

사면안정, 연약지반, 기초