

## FORM 신뢰성 기반 항타강관말뚝 저항계수 산정

## FORM Reliability-based Resistance Factors for Driven Steel Pipe Piles

박재현<sup>1)</sup>, Jaehyun Park, 허정원<sup>2)</sup>, Jungwon Huh, 이주형<sup>3)</sup>, Juhyung Lee, 정문경<sup>4)</sup>, Moonkyung Chung, 광기석<sup>5)</sup>, Kiseok Kwak

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 선임연구원, Senior Researcher, Earth Structure and Foundation Eng'g Research Div., KICT, e-mail: jaehyeon@kict.re.kr

<sup>2)</sup> 전남대학교 건설환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng'g, Chonnam National University

<sup>3)</sup> 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 연구원, Researcher, Earth Structure and Foundation Eng'g Research Div., KICT

<sup>4)</sup> 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 책임연구원, Research Fellow, Earth Structure and Foundation Eng'g Research Div., KICT

<sup>5)</sup> 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 책임연구원, Research Fellow, Earth Structure and Foundation Eng'g Research Div., KICT

**개요(SYNOPSIS) :** LRFD Resistance factors for static bearing capacity of driven steel pipe piles were calibrated in the framework of reliability theory. Reliability analysis was performed by the First Order Reliability Method (FORM) using resistance bias factor statistics. The target reliability indices are selected as 2.0 and 2.33 for group pile case and 2.5 for single pile case, based on the reliability level of the current design practice and considering redundancy of pile group, acceptable risk level, construction quality control, and significance of individual structure.

**Key words :** LRFD, resistance factor, FORM, driven steel pipe pile

### 1. 서론

북미지역을 중심으로 연구, 개발된 하중저항계수설계법은 구조물에 작용하는 하중과 지반저항 그리고 이들의 불확실성을 고려한 하중계수, 저항계수의 유기적인 조합으로 구성되며, 구조물 안전도를 정량적으로 평가하고 요구되는 안전성에 적합한 설계가 가능토록 한다. 변동성이 크고 복잡한 양상을 보이는 지반 저항계수의 결정에는 지반 특성 및 기초구조물 거동을 대변할 수 있는 많은 자료수집과 주요 설계 변수에 대한 자료 축적이 선행되어야 하며 불확실성을 정량화하기 위한 정확한 신뢰성 해석기법의 적용이 필요하다.

본 연구에서는 국내 항타강관말뚝에 대한 LRFD(Load and Resistance Factor Design) 저항계수 산정을 위해서 개선된 신뢰성 분석기법인 일차신뢰도법(First Order Reliability Method, FORM)을 적용하여 정역학적 지지력 공식에 대한 신뢰성 수준을 평가하고 목표 신뢰도지수를 결정하였다. 이를 위해 국내 전역에서 실시된 많은 수의 항타강관말뚝 정재하시험을 수집, 분석하여 총 57개의 극한지지력을 확인할 수 있는 자료를 확보하였다.

## 2. 일차신뢰도법을 이용한 저항계수 산정

LRFD 설계법의 기본개념은 식 (1)과 같다. 한계상태함수는 하중과 저항으로써 정의되며 설계변수의 통계특성치 및 확률론적 신뢰성 결과에 기초하여 저항계수와 하중계수를 산정한다.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (1)$$

여기서,  $\phi$ =저항계수,  $R_n$ =공칭저항,  $\gamma_i$ =하중계수, 그리고  $Q_i$ 는 공칭하중이다. 식 (1)의 LRFD 설계법 기본식에서 두 확률변수인 하중과 저항이 통계적으로 독립이고 모두 대수정규분포이며, 하중을 사하중과 활하중의 조합으로 고려하면 기초구조물의 한계상태함수는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$g = \ln \frac{\lambda_R(\gamma_{QD}QD + \gamma_{QL}QL)}{\phi(\lambda_{QD}QD + \lambda_{QL}QL)} = \ln \frac{\lambda_R(\gamma_{QD}QD/QL + \gamma_{QL})}{\phi(\lambda_{QD}QD/QL + \lambda_{QL})} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda_R$ ,  $\lambda_{QD}$ ,  $\lambda_{QL}$ 은 각각 저항, 사하중 및 활하중 편향계수의 평균값이며,  $\gamma_{QD}$ ,  $\gamma_{QL}$ 은 각각 사하중계수, 활하중계수,  $QD$ ,  $QL$ 은 각각 공칭 사하중, 공칭 활하중,  $\phi$ 는 저항계수이다. 일차신뢰도법은 비정규분포의 설계변수 또는 비선형 한계상태함수에 대하여 정식화 형태에 관계없이 일관된 신뢰도지수를 산정할 수 있으며(Rackwitz 와 Fiessler, 1978), 식 (2)의 한계상태함수에 대한 다중 적분을 수행하기 위해 라그랑주 승수기법 등을 이용한 반복법을 적용하여 목표 신뢰도지수에 대한 최적의 저항계수를 산정한다.

## 3. 신뢰성 평가

### 3.1 저항편향계수

국내 전역에서 실시된 2000여개 이상의 항타강관말뚝 재하시험 자료를 수집, 검토하여 극한지지력을 확인한 결과 극한지지력이 확인되어 신뢰성 분석에 적용된 항타강관말뚝 정재하시험 자료 수는 총 57개 이다. 선정된 재하시험 자료에 대한 분류 결과 말뚝의 직경은 406mm~812mm에 걸쳐 분포하고 있으며, 말뚝 길이는 10m 미만 20개, 10m~30m 18개, 30m 이상 20개로서 고르게 분포하고 있다. 또한 재하시험 수행 지역은 제주 지역을 제외한 전국 각지에 걸쳐 분포하고 있다. 즉, 선정된 자료의 말뚝 제원 및 지역 분포는 매우 양호한 것을 알 수 있다.

57개의 정재하시험 자료에 대해서 구조물기초 설계기준(건설교통부, 2003)과 Paikowsky 등(2004)이 제안한 6가지 기준(Davisson 기준, Shape of Curve, DeBeer,  $\Delta=25.4\text{mm}$ ,  $\Delta=0.1B$ , ASCE 20-96 기준(ASCE, 1997))을 적용하여 측정 지지력을 분석한 뒤 대표 측정 지지력을 결정하였다. 기존 연구 결과 Davisson 기준이 반복 가능한 과정을 통해 객관적 수치를 얻을 수 있는 방법으로서 분산성이 낮았고 우수한 적용성을 보였으므로(곽기석 등, 2006), 말뚝의 측정 지지력으로서 Davisson 기준에 의한 결과를 적용하였다.

분석대상 자료에 대한 설계 지지력을 산정하기 위해서는 구조물기초설계기준(건설교통부, 2003)에서 제안하고 있는 두 가지 정역학적 설계 공식인 정역학적 지지력공식과 N치를 이용한 Meyerhof 경험식을 적용하였다. 두 가지 공식은 다음과 같다.

$$Q_u = (\sigma'_v N_q + cN_c)A_p + \Sigma f_s A_s \quad (3)$$

여기서,  $\sigma'_v$ '는 말뚝 선단 깊이의 유효상재압(한계관입깊이=20B, B=말뚝직경),  $N_q$ ,  $N_c$ 는 깊은기초의 지지력계수, c는 말뚝지지층의 점착력,  $A_p$ 는 말뚝 선단 지지면적,  $A_s$ 는 말뚝 주변적,  $f_s$ 는 단위면적당 최

대주면마찰력( $= \alpha c_u + K_s \overline{\sigma_v} \tan \delta$ ),  $\alpha$ 는 부착력계수,  $c_u$ 는 주면지반 비배수전단강도,  $K_s$ 는 말뚝면에 작용하는 법선토압계수( $= 1.4(1 - \sin \phi)$ ),  $\delta$ 는 말뚝과 주변 흙사이의 마찰각( $= 20^\circ$ )이다.

$$Q_u = mN_{60}A_p + n\overline{N}_{60}A_s \quad (4)$$

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

Davisson 기준으로 산정된 측정 지지력과 설계 지지력을 비교 분석하여 항타강관말뚝에 대한 저항편향계수를 산정하였다. 저항편향계수는 측정 지지력과 설계 지지력의 비(측정 지지력/설계 지지력)로 정의되며, 저항의 불확실성을 정량화·대변하는 값이다(Goble, 1999). 정역학적 지지력공식과 Meyerhof 경험식의 저항편향계수 통계특성치를 분석 결과를 표 1에 나타내었다. 또한, 기존 연구결과 정역학적 지지력공식과 Meyerhof 경험식 저항편향계수의 분포는 대수정규분포에 적합한 것으로 나타났다(곽기석 등, 2006)

표 1. 저항편향계수 통계특성치

구 분		선단부 N치 50 미만		선단부 N치 50 이상	
		정역학공식	Meyerhof 경험식	정역학공식	Meyerhof 경험식
저항편향계수 ( $\lambda_R$ )	평 균	0.975	1.750	0.726	1.317
	표준편차	0.498	1.320	0.298	0.979
	변동계수	0.511	0.755	0.411	0.743

### 3.2 신뢰성 평가

항타강관말뚝의 두 가지 정역학적 설계법에 대한 신뢰성을 평가하기 위해서 앞서 설명한 일차신뢰도법을 적용하였고 식 (2)의 한계상태함수 정의에서 하중관련 정보인 하중편향계수 통계 특성치는 미국 AASHTO LRFD 교량설계 시방서(2007)에서 제안하고 있는 하중조합 중 국내 특성을 고려하여 연직방향의 보수적 평가 조건인 Strength Case I 경우를 적용하였다.

신뢰성 평가를 위해서 선단부 평균 N치를 기준으로 자료를 두 가지로( $N < 50$ ,  $N \geq 50$ ) 분류하였다. 지반 특성 및 말뚝 종류, 지지 거동이 상이한 자료에 대해서는 각기 개별적인 신뢰성 평가 및 저항계수를 산정하는 것이 적합하기 때문이다. 일차신뢰도법에 의한 신뢰성 분석 결과는 표 2와 같다.

표 2. FORM에 의한 신뢰성 분석 결과

구분 안전율	선단부 N치 50 미만( $N < 50$ )		선단부 N치 50 이상( $N \geq 50$ )	
	정역학 공식 신뢰도지수	Meyerhof 경험식 신뢰도지수	정역학 공식 신뢰도지수	Meyerhof 경험식 신뢰도지수
3.0	1.801	2.006	1.544	1.613
3.5	2.114	2.233	1.923	1.843
4.0	2.386	2.431	2.252	2.042
4.5	2.626	2.605	2.541	2.218
5.0	2.840	2.759	2.800	2.375

선단부 N치 50 미만의 자료에 대한 정역학적 지지력공식의 신뢰도지수는 1.80~2.84를 나타내었고 Meyerhof 경험식은 같은 조건에서 신뢰도지수 2.01~2.76을 나타내었다. 신뢰도지수 2.0은 파괴확률

약 2.3%에 해당하는 값이며 항타말뚝에 적합한 신뢰도지수 값으로서 다수의 연구자들이 제안한 바 있다(Paikowsky, 2004). 선단부 N치 50 이상의 경우 정역학적 지지력공식은 1.54~2.80, Meyerhof 경험식은 1.61~2.38의 신뢰도지수를 나타내었다. 이는 선단부 N치 50미만의 자료보다 다소 낮은 결과이며, 신뢰도지수 2.0에 해당하는 안전율은 두 가지 지지력공식 모두 3.5~4.0으로 평가되었다.

#### 4. 저항계수 산정

지반공학 분야의 국외 설계기준에서 제안된 목표 신뢰도지수는 2.0~3.0 수준이다(곽기석 등, 2008). 항타강관말뚝의 경우 대형 기초구조물에 비해서 상대적으로 중요도가 낮은 구조물에 적용되며, 주로 무리말뚝으로 시공되기 때문에 구조물 전체의 파괴확률을 고려하여 상대적으로 낮은 목표 신뢰도지수를 제안할 수 있다. 따라서, 곽기석 등(2008)은 국내 항타강관말뚝의 신뢰성 평가 결과와 기초구조물 전체 시스템의 안전성, 국제적 신뢰도 요구 수준, 무리말뚝 허용성, 말뚝 설계·시공의 경제성 등을 종합적으로 고려하여 국내 항타강관말뚝에 적합한 다음의 목표 신뢰도지수를 결정하였다: 무리말뚝 허용성을 고려할 수 있는 경우 (2.0과 2.33), 무리말뚝 허용성을 고려할 수 없는 경우 (2.5). 신뢰도지수 2.0, 2.33, 2.5는 각각 파괴확률 2.3%, 1.0%, 0.6%에 해당된다.

항타강관말뚝 설계법에 대한 저항계수 산정 결과는 표 3과 같다. 정역학적 지지력공식과 Meyerhof 경험식 모두 선단부 N치 50 미만인 경우의 저항계수가 N치 50 이상인 경우의 저항계수보다 크게 나타났는데, 이는 선단부 N치 50 미만인 경우의 신뢰도지수가 더 크게 산정되었기 때문이다. 정역학적 지지력공식의 저항계수는 0.32~0.43, Meyerhof 경험식의 저항계수는 0.26~0.48로서 미국 AASHTO LRFD 교량설계 사양서(2007)의 항타강관말뚝 저항계수인 0.30~0.45와 비슷한 수준으로 산정되었다.

표 3. FORM에 의한 저항계수 산정 결과

구분 목표 신뢰도지수	선단부 N치 50 미만(N<50)		선단부 N치 50 이상(N≥50)	
	정역학공식	Meyerhof 경험식	정역학공식	Meyerhof 경험식
2.00	0.436	0.481	0.397	0.373
2.33	0.372	0.385	0.351	0.296
2.50	0.342	0.345	0.327	0.268

#### 5. 결론

본 연구에서는 국내 지반특성과 현행 설계·시공 실무를 고려하여 항타강관말뚝에 대한 저항계수를 산정하였다. 정확한 신뢰성 분석기법인 일차신뢰도법을 적용하여 신뢰성분석을 실시하였고, 목표 신뢰도 지수에 대한 저항계수를 산정하였다. 본 연구에서 도출한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 많은 수의 국내 항타강관말뚝 정재하시험 자료를 수집하여 극한지지력을 확인할 수 있는 총 57개의 말뚝 정재하시험 자료를 선정하였고 지반 특성 및 말뚝 지지거동을 고려하기 위해서 선단부 N치 50을 기준으로 자료를 두 그룹으로(N<50, N≥50) 분류하였다.
- (2) 재하시험 결과로부터 측정 지지력을 산정하고 국내 설계 실무에 주로 적용되는 정역학적 지지력 공식과 Meyerhof 경험식을 적용하여 설계 지지력을 산정하여 저항편향계수의 통계 특성을 분석하였고 이를 이용하여 일차신뢰도법에 의한 신뢰성 분석을 수행하였다. 통상적인 구조물기초 안전율 수준인 3.0~5.0에 대해서 신뢰도지수를 산정한 결과 정역학적 지지력공식은 1.54~2.84, Meyerhof 경험식은 1.61~2.76 이었다.
- (3) 무리말뚝 허용성, 현행 설계, 실무 관행, 구조물 요구안전도 등을 고려하여 항타강관말뚝에 대한

목표 신뢰도지수를 결정하였고 일차신뢰도법에 의해 저항계수를 산정한 결과, 선단부 N치 50 미 만인 경우 정역학적 지지력공식과 Meyerhof 경험식의 저항계수는 각각 0.34~0.44, 0.35~0.48 이고, 선단부 N치 50 이상인 경우 저항계수는 각각 0.33~0.40, 0.27~0.37로 산정되었다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설교통 R&D 정책·인프라사업 연구과제 “LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 광기석, 박재현, 최용규, 허정원(2006) LRFD 설계를 위한 항타강관말뚝의 저항편향계수 산정, **대한토목학회 논문집**, 제26권, 제5C호, pp.343-350
2. 광기석, 허정원, 김경준, 박재현, 이주형(2008) 국내 항타강관말뚝 설계법의 목표 신뢰도지수. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제 28권, 제 1C호, pp. 19-29
3. 건설교통부(2003), **구조물기초 설계기준**, (사)한국지반공학회
4. American Association of State Highway and Transportation Official(AASHTO)(2007), *AASHTO LRFD Bridge Specification*, 4th edition, AASHTO, Washington, D.C.
5. American Society of Civil Engineers(1997), *Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundations*, ASCE 20-96, ASCE, Reston, Virginia, USA
6. Goble, G.(1999) *Geotechnical Related Development and Implementation of Load and Resistance Factor Design(LRFD) Methods*. NCHRP Synthesis of Highway Practice 276, Transportation Research Board, Washington, D.C.
7. Paikowsky, S.G.(2004), *Load and Resistance Factor Design for Deep Foundations*, NCHRP report 507, Transportation Research Board, Washington, D.C.
8. Rackwitz, R., and Fiessler, B. (1978) Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences, *Journal of Computers and Structures*, Vol. 9, pp. 489-494