

## 실제 설계 사례를 통한 항타강관말뚝의 LRFD 저항계수 검증

### Verification of LRFD Resistance Factors of Driven Steel Pipe Piles Using a Real Bridge Foundation Design

박재현<sup>1)</sup>, Park, Jaehyun, 이주형<sup>2)</sup>, Lee, Juhjung, 정문경<sup>3)</sup>, Chung, Moonkyung, 최영석<sup>4)</sup>, Choi, Youngseok, 광기석<sup>5)</sup>, Kwak, Kiseok

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotech. Div., KICT  
(e-mail: jaehyeon@kict.re.kr)
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotech. Div., KICT
- 3) 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotech. Div., KICT
- 4) 유신코퍼레이션 기초설계팀 과장, Manager, Foundation Design Div., Yooshin Co.
- 5) 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotech. Div., KICT

**SYNOPSIS** : Resistance factors for static bearing capacity of driven steel pipe piles were calibrated in the framework of reliability theory. A comprehensive foundation design case study on an actual bridge was performed using resistance factors developed in this study. Comparing with Allowable Stress Design (ASD), LRFD design method provides quantitative evaluation of safety level of designed foundation and exhibits considerable potential economy in design.

**Keywords** : LRFD, resistance factor, driven steel pipe pile

## 1. 서론

국내 기초구조물에 대한 저항계수 산정 및 하중저항계수설계법 개발의 일환으로 항타강관말뚝의 지지력 공식에 대한 신뢰성수준을 평가하고 저항계수를 결정하였다. 신뢰성 해석 결과 및 구조물 요구 안전도, 현행 설계·실무 관행, 국제적 신뢰도 요구 수준, 경제성 등을 종합적으로 고려하여 저항계수를 산정하였다. 개발된 저항계수를 실제 교량의 기초구조물 설계에 적용하여 허용응력설계법과 하중저항계수설계법의 결과를 비교하고 본 연구에서 개발된 저항계수 및 하중저항계수설계법의 적용성을 분석하였다.

## 2. 항타강관말뚝 저항계수

저항계수 산정에 있어 현재 국내 실무에서 적용되고 있는 설계법에 대한 신뢰성 해석과 목표 신뢰도 지수 결정 그리고 허용응력설계법(ASD)의 안전율과의 보정 작업은 필수적이다. 기초구조물 설계와 시공 및 지반 불확실성에 대한 제반 신뢰도 수준에 적합한 저항계수를 산정하고 파괴확률 또는 정량적인 신뢰도 수준에 근거한 설계법을 개발하는 것이 LRFD 설계법의 목적일 뿐만 아니라 기존의 설계법이 아닌 새로운 설계법의 개발과 설계기준의 제정으로 인한 혼란을 완화시키기 위함이다.

Paikowsky(2004)는 미국 교통연구회(TRB)의 깊은기초에 대한 LRFD 저항계수 산정 연구(NCHRP 507)를 통해 항타말뚝의 신뢰도지수로서 무리말뚝 효과를 기대할 수 없는 경우(4분 이하의 말뚝이 하부

구조를 지지하는 경우) 3.0, 무리말뚝 효과를 기대할 수 있는 경우(5분 이상의 말뚝이 하부구조를 지지하는 경우) 2.33의 값을 제안하였으며 이는 개정된 AASHTO LRFD 교량설계 시방서(2007)에 적용되어 현재 미국에서 사용되고 있다. 이를 비롯하여 국외 설계기준에서 제안하고 있는 말뚝기초의 목표 신뢰도지수는 2.0~3.0 수준이다. 본 연구를 통해 분석된 항타강관말뚝의 신뢰도지수는 통상적으로 적용되는 안전율의 범위에서 정역학적 지지력공식의 경우 1.54~2.84, Meyerhof 경험식의 경우 1.61~2.76을 나타내었다(박재현 등, 2008). 이는 미국의 연구(NCHRP 507) 결과와 유사한 값이다. 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. 본 연구에서는 이를 토대로 국내 말뚝기초의 신뢰성 수준과 기초구조물 전체 시스템의 안전성, 국제적 신뢰도 요구 수준, 경제성 등을 종합적으로 고려하여 이에 적합한 목표 신뢰도지수를 다음과 같이 결정하였다(표 1).

표 1. 목표 신뢰도지수 결정

구분	항타강관말뚝
• 무리말뚝 효과를 기대할 수 있는 경우 (5분 이상의 말뚝이 하부구조를 지지하는 경우)	2.0, 2.33
• 무리말뚝 효과를 기대할 수 없는 경우 (4분 이하의 말뚝이 하부구조를 지지하는 경우)	2.5

2000여개 이상의 수집된 말뚝 재하시험, 설계자료 중 항복하중 이상의 측정지지력을 확인할 수 있는 재하시험 자료 수는 57개였다. 이들에 대해서 지반 특성 및 말뚝 지지거동을 고려한 신뢰성분석을 실시하기 위해서 선단부 평균 N치 50을 기준으로 자료를 두 그룹으로 분류하였다:  $N < 50$ ,  $N \geq 50$ . 또한, 전체 자료 중 본 연구에서 직접수행한 14회의 재하시험 자료를 포함한 엄격한 관리 하에 수행된 23개의 재하시험 자료에 대해서 추가로 신뢰성 분석을 실시하고 저항계수를 산정하여 전체 자료와 비교하였다.

목표 신뢰도지수 2.0과 2.33(무리말뚝) 및 2.5(단말뚝)에 대하여 일차신뢰도법 및 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 저항계수를 산정한 결과는 표 2와 같다. AASHTO LRFD 교량 설계기준(2007)에서 제시하고 있는 항타말뚝의 저항계수가 목표신뢰도지수 2.33에 대해서 0.30~0.35인 점을 고려해볼 때 본 연구를 통해 도출된 국내 항타강관말뚝의 저항계수는 미국의 LRFD 설계법의 저항계수와 비슷한 수준이다. 또한 엄격한 관리 하에 수행된 우량 데이터를 대상으로 산정된 저항계수는 정역학적 지지력공식 0.39~0.64, Meyerhof 경험식 0.35~0.62로서 상대적으로 높은 값을 나타내었으며, 실무 관리 수준이 엄격해지고 정밀시공이 가능할 경우 충분히 저항계수의 값은 높아질 수 있음을 의미한다. 이는 궁극적으로 기초구조물의 경제적, 합리적 설계와 시공이 가능해 짐을 의미한다.

표 2. 항타강관말뚝 저항계수

구분 목표 신뢰도지수	전체 Data				우량 Data			
	선단부 N치 50 미만		선단부 N치 50 이상		선단부 N치 50 미만		선단부 N치 50 이상	
	정역학적 지지력공식	Meyerhof 경험식	정역학적 지지력공식	Meyerhof 경험식	정역학적 지지력공식	Meyerhof 경험식	정역학적 지지력공식	Meyerhof 경험식
2.0	0.43	0.48	0.39	0.37	0.49	0.62	0.64	0.46
2.33	0.37	0.38	0.35	0.29	0.42	0.49	0.59	0.38
2.5	0.34	0.34	0.32	0.27	0.39	0.43	0.57	0.35

### 3. LRFD 설계 예제

#### 3.1 대상교량 및 설계현황

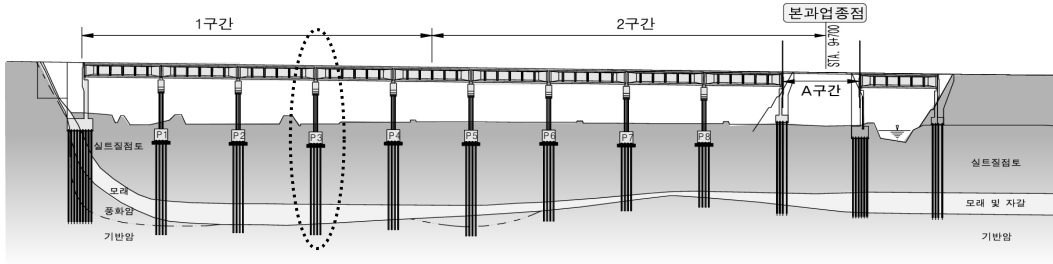


그림 1. ○○교 종단면도

앞서 나타난 저항계수를 실제 교량의 기초구조물 설계에 적용하여 허용응력설계법과 하중저항계수설계법의 결과를 비교하고 본 연구에서 개발된 저항계수의 적용성을 분석하였다. 본 연구에서 설계에 적용된 ○○교는 전라남도 ○○군에 위치하는 총 연장 390m, 폭 24m, 왕복 4차로 해안 접속도로 교량으로서 경간장 35m의 9경간 P.S.C Beam교이다. 8기의 교각과 양쪽 2기의 교대는 모두 항타강관말뚝으로 구성되었으며, 이 중 시추조사 위치와 가장 근접하고 지층 상태 분석이 용이한 P3 교각 기초를 대상으로 하였다(그림 1). ○○교가 위치한 구간의 지반은 지형에 따라 매립층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층으로 구성되어 있으며, 전반적으로 연약점성토와 하부 퇴적층이 발달한 특성을 보이고 있다. 기반암층은 코어 회수율과 RQD가 낮은 풍화암층의 특성을 나타내었다. 말뚝기초 지지력 설계에 적용된 P3 교각 근처에서 실시된 심도별 시추조사 결과는 표 3과 같다. 말뚝 직경은 508mm, 배치는 3×3, 길이는 14.3m로서, 본 항타강관말뚝은 풍화암층에 0.5m 근입된 경우이다.

표 3. P3 교각 위치 시추조사 결과

심도(m)	층후(m)	토 질 층		SPT N 값	단위중량( $\gamma_{sub}$ )(kN/cm <sup>3</sup> )
0~5.0	5.0	퇴적층(1)	점 토	2/30	6.86
5.0~10.2	5.2	퇴적층(2)	자갈섞인 점토질 모래	15/30	8.82
10.2~13.8	3.6	풍화토	실트질 모래	30/30	9.80
13.8~	0.5	풍화암	풍화암	50	20.0

#### 3.2 설계하중 산정

말뚝 설계를 위해서 P3 교각의 양쪽 기둥에 각각 작용하는 하중을 푸팅 저면에서 집계한 결과는 표 4와 같다. 사하중은 구조물 자중 및 2차 고정하중(포장, 연석 등)을 적용하였고 활하중은 차량하중 DB-24, DL-24를 적용하였다. ○○교의 경우 연직력이 지배적으로 작용하고 상대적으로 수평력과 모멘트는 영향이 작은 하중조건이다. 푸팅 저면에서 집계된 하중을 바탕으로 표 5와 같이 말뚝기초 설계에 적용될 연직력, 수평력, 모멘트 등의 하중을 산정하였다. 이때 LRFD 설계법에서는 말뚝기초의 연직 지지력 설계시 축방향 최대 조합하중을 설계하중으로 적용하기 위해서 AASHTO LRFD 교량 설계기준의 Strength case I 경우의 하중계수를 적용하였다.

표 4. 푸팅 저면에서의 하중 분포

구 분	상부 사하중(D)	상부 활하중(L)	Footing 자중	모멘트 증가 <sup>주)</sup>
연직력(kN)	6,670	1,310	800	-
수평력(kN)	45	20	-	-
모멘트(kN-m)	120	55	-	90+40=130

주) 모멘트 증가량은 푸팅 저면으로 집계되는 과정에서 수평력에 의한 영향임.

표 5. 말뚝 기초 설계를 위한 하중 산정

구 분	설계하중 산정	
	허용응력설계법	LRFD 설계법
연직력(kN)	8780	11630
수평력(kN)	65	91
모멘트(kN·m)	305	429

푸팅 저면의 설계하중에 대하여 말뚝 반력해석 결과는 표 6과 같다. 해석은 도로교설계기준(건설교통부, 2005)에서 제안하고 있는 변위법을 적용하였다. 반력 해석 결과 연직력에 비해서 수평력 및 모멘트 반력이 매우 작게 산정되었으며 이는 연직 방향 설계 하중이 지배적으로 작용하는 경우이기 때문이다.

표 6. 말뚝반력 해석 결과

구 분	단말뚝에 작용하는 반력			말뚝머리 수평변위 (mm)
	연직력(kN)	수평력(kN)	모멘트(kN-m)	
허용응력설계법	936~1015	7	8	1.4
LRFD 설계법	1237~1347	10	11	1.9

### 3.3 말뚝기초 설계

허용응력설계법 및 LRFD 설계법에 의한 말뚝의 허용지지력을 산정하여 두 설계방법에 의한 말뚝기초 설계를 수행하고 비교하였다. 설계 지지력공식은 구조물기초 설계기준에서 제안하고 있는 정역학적 지지력 공식과 N치를 이용한 Meyerhof 경험식을 적용하였다. 강관말뚝의 부식을 고려하여 부식두께 2 mm를 적용하였으며, 표준관입시험 N치는 보정하지 않은 값을 적용하였다. 지하수위는 지표면에 위치하고 있다.

구조물기초설계기준(건설교통부, 2003)에서 제안하고 있는 정역학적 지지력공식과 N치를 이용한 Meyerhof 경험식을 적용하여 허용응력설계법(ASD)에 의한 말뚝 허용지지력을 산정하였으며, 이를 요약 정리하면 표 7과 같다.

본 설계 예제에서 제시된 항타강관말뚝의 경우 3×3의 무리말뚝으로 설계되었으며, 해안 접속도로의 교량으로서 본 연구에서 제안한 목표신뢰도지수( $\beta_p$ )는 2.0을 적용할 수 있다. 이 경우 무리말뚝을 구성하고 있는 단말뚝의 파괴확률( $p_f$ )은 2.3%이다. 표 2에서 제시된 저항계수를 적용하여 LRFD 설계법에 의한 항타강관말뚝의 LRFD 허용지지력을 산정하면 표 8과 같다.

표 7. 허용응력설계법에 의한 말뚝 허용지지력

구 분		정역학적 지지력공식	Meyerhof 경험식
말뚝 최대 연직반력		1015	1015
지지력	선단지지력	3657.60	2956.03
	주면지지력	609.09	434.63
	극한지지력	4266.69	3390.66
	허용지지력(FS=3.0)	1422.23	1130.22

표 8. LRFD 설계법에 의한 말뚝 허용 지지력

구 분		정역학적 지지력공식		Meyerhof 경험식	
		$\phi=0.39$	$\phi=0.64$	$\phi=0.37$	$\phi=0.46$
말뚝 최대 연직반력		1347	1347	1347	1347
지지력	극한지지력	4267	4267	3391	3391
	허용지지력	1664	2731	1255	1560

### 3.4 허용응력설계와 LRFD 설계 비교

이상에서 산정된 허용응력설계법과 LRFD 설계법의 설계 결과를 표 9에 요약하였다. 허용응력설계법에서 안전율은 3.0을 적용하였고 LRFD 설계법에서 저항계수는 두 가지 지지력 공식에 대한 신뢰성 분석 결과 산정된 저항계수를 각각 적용하였다. 또한 LRFD 설계법의 경우 엄격한 관리하에 수행된 자료를 대상으로 분석한 저항계수를 비교 적용하여 자료의 신뢰성 및 조사·시험의 분석 정확도가 설계 및 시공에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 함께 비교하였다.

정역학적 지지력공식의 경우 허용응력설계법과 LRFD 설계법 모두 9본의 말뚝으로 설계할 경우 말뚝에 작용하는 반력에 비해서 저항력이 크게 산정되었고 특히, 신뢰성이 높은 우량 데이터에 대해서 산정된 저항계수( $\phi=0.64$ )를 적용한 결과 설계 비율이 50%이하로 저감되어 9본의 말뚝보다 훨씬 경제적으로 시공 가능할 것으로 나타났다.

Meyerhof 경험식에 대한 기초 설계 결과 허용응력설계법은 설계 비율이 90%정도로서 반력에 비해서 저항력이 약간 크게 산정되었고 LRFD 설계법은 반력과 저항력이 비슷한 수준으로 산정되었다. Meyerhof 경험식 역시 신뢰성이 높은 우량 데이터에 대해서 산정된 저항계수( $\phi=0.46$ )를 적용한 결과 허용응력설계법에 비해서 유의할 만한 수준으로 설계 비율이 낮아지고 보다 경제적 시공이 가능해짐을 확인하였다.

표 9. 허용응력설계법과 LRFD 설계법의 기초설계 비교

구 분	정역학적 지지력공식			Meyerhof 경험식		
	허용응력설계법 (FS=3.0)	LRFD 설계법		허용응력설계법 (FS=3.0)	LRFD 설계법	
		( $\phi=0.39$ )	( $\phi=0.64$ )		( $\phi=0.37$ )	( $\phi=0.46$ )
말뚝 본수	9	9	9	9	9	9
최대연직반력(kN)	1015	1347	1347	1015	1347	1347
설계극한지지력(kN)	4267	4267	4267	3391	3391	3391
허용지지력(kN)	1422	1664	2731	1130	1255	1560
설계 비율(% (반력/허용지지력))	71	81	<b>49</b>	90	107	86
판 정	O.K	O.K	O.K	O.K	-	O.K

정역학적 지지력공식에 대해서 우량 데이터로 산정된 저항계수를 적용하여 말뚝기초 설계를 재수행한 결과 7본의 말뚝으로도 요구 안전도를 충분히 만족할 수 있음을 확인하였다(표 10). 또한 그 설계비율은 65%로서 9본의 말뚝으로 설계된 허용응력설계법보다 더 큰 안전성이 확보될 수 있음을 나타내었다. 해석적 결과로서 7본 이하의 말뚝으로도 설계가 가능하지만 말뚝간 중심간격과 교각 및 푸팅의 연단거리에 대한 구조적 제약조건을 고려하여 7본으로 결정하였다. 7본의 말뚝에 대한 무리말뚝 해석과 푸팅저면에 집계되는 하중을 재산정하여 설계된 해석결과를 표 10에 나타내었다. 분석 자료의 신뢰성이 확보되고 조사, 분석의 정확성에 기초한 LRFD 설계법이 개발되고 개선된다면 기존 허용응력설계법에 비해서 확실히 경제적이고 더 안전하며 위험성과 안전성의 정량적 평가가 가능함을 확인할 수 있다.

표 10. 정역학적 지지력공식의  $\phi=0.64$ 인 경우에 대한 기초설계 비교표

구 분	정역학적 지지력공식	
	허용응력설계법(FS=3.0)	LRFD 설계법( $\phi=0.64$ )
말뚝 본수	9	<b>7</b>
최대연직반력(kN)	1,015	<b>1,761</b>
설계극한지지력(kN)	4,267	4,267
허용지지력(kN)	1,422	2,731
설계 비율(%)	71	<b>65</b>
판 정	O.K	O.K

## 4. 결론

국내 기초구조물에 대한 저항계수 산정 및 하중저항계수설계법 개발의 일환으로 항타강관말뚝의 지지력 공식에 대한 신뢰성수준을 평가하고 저항계수를 산정하였다. 개발된 저항계수를 실제 교량의 기초구조물 설계에 적용하여 허용응력설계법과 하중저항계수설계법의 결과를 비교하고 본 연구에서 개발된 하중저항계수설계법의 적용성을 분석하였다. 본 연구에서 도출한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 신뢰성 분석 결과 및 결정된 목표 신뢰도지수를 적용하여 항타강관말뚝의 저항계수를 산정하였다. 엄격한 관리하에 수행된 23개 우량 데이터를 분류하여 신뢰성 높은 자료에 대한 저항계수를 함께 산정하였으며, 전체 자료에 대한 저항계수와 비교분석하였다. 전체 자료의 경우 항타강관말뚝의 저항계수 산정 결과 정역학적 지지력공식이 0.43~0.32, Meyerhof 경험식이 0.48~0.27을 나타내었고 엄격한 관리 하에 수행된 23개 우량 데이터를 대상으로 산정된 저항계수는 정역학적 지지력공식 0.64~0.39, Meyerhof 경험식 0.62~0.35로서 상대적으로 높은 값을 나타내었다.
- (2) 실제 교량기초에 대해서 허용응력설계법과 LRFD 설계법을 적용한 기초 설계를 수행한 결과 정역학적 지지력공식의 경우 두 설계법 모두 말뚝에 작용하는 반력에 비해서 저항력이 크게 산정되었다. Meyerhof 경험식에 대한 기초 설계 결과 허용응력설계법은 반력에 비해서 저항력이 약간 크게 산정되었고 LRFD 설계법은 반력과 저항력이 비슷한 수준으로 산정되었다.
- (3) 신뢰성이 높은 우량 데이터에 대해서 산정된 저항계수를 적용하여 LRFD 설계법으로 설계한 결과 정역학적 지지력공식의 경우 설계 비율이 50%이하로 저감되고 말뚝 본수는 기존의 9본에서 7본으로 줄어들었다. 또한 설계비율이 65%로서 9본의 말뚝으로 설계된 허용응력설계법보다 더 큰 안전성이 확보됨으로써 결과적으로 허용응력설계법에 비해서 상당히 경제적 설계가 가능한 것으로 나타났다. Meyerhof 경험식 역시 신뢰성이 높은 우량 데이터에 대해서 산정된 저항계수를 적용한 결과 허용응력설계법에 비해서 유의할 만한 수준으로 설계 비율이 낮아지고 보다 경제적 시공이 가능해짐을 확인하였다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 건설교통부(2001) 도로교설계기준. 대한토목학회
2. 건설교통부(2003) 구조물기초설계기준 해설. (사)한국지반공학회
3. 박재현, 허정원, 김명모, 광기석(2008) LRFD 설계를 위한 국내 항타강관말뚝의 저항계수 산정. 대한토목학회 논문집, Vol. 28, No. 6C, pp. 367-377
4. American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO)(2007) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications Fourth Edition*. AASHTO, Washington DC.
5. Paikowsky, S.G.(2004) *Load and Resistance Factor Design for Deep Foundations*. NCHRP report 507, Transportation Research Board, Washington, D.C.