

PHC 매입말뚝의 하중저항 설계정수 제안

Suggestion of Load and Resistance Factored Design Value for PHC Bored Pile

박종배¹ · 박용부² · 이범식³ · 김상연³

Jong-Bae Park¹, Yong-Boo Park², Bum-Sik Lee³ and Sang-Yeon Kim³

(Received June 21, 2012 / Revised July 16, 2012 / Accepted July 17, 2012)

요 약

뢰성에 기반한 한계상태설계법은 국제표준화기구인 ISO뿐만 아니라 국내외의 각종 건설관련 기준에서도 적용되는 등 국내외적으로 기존 허용응력설계법을 대체하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 국내에서 건축물의 기초로 많이 사용되고 있는 PHC 매입말뚝을 대상으로 한계상태설계법의 일종인 LRFD 설계정수를 제안하였다. PHC 매입말뚝의 LRFD 설계정수를 제안하기 위해 81개의 현장 동재하 시험자료와 이들 말뚝에 대한 지지력 설계(Meyerhof 설계법, SPT-CPT 전환 설계법) 자료를 분석하고 목표 신뢰도 지수 2.33과 3.0에 대해 하중저항계수를 제시하였다. PHC 매입말뚝의 저항계수는 목표 신뢰도 지수에 따라 Meyerhof 방법, SPT-CPT 전환법은 각각 0.36~0.44, 0.24~0.31을 나타내었다.

주제어 : PHC 말뚝, 매입말뚝, 한계상태설계법, 하중저항계수법, 목표 신뢰도 지수

ABSTRACT

The limit states design method is replacing the allowable stress design method worldwide, e.g. the design code of ISO and various construction codes of Korea are adopting the reliability based limit state method. This paper proposed LRFD design value which is one of limit states design method for the PHC bored pile used as building foundation. This paper analysed 81 load test results and the bearing design(Meyerhof method & SPT-CPT conversion method), and proposed LRFD value for each design reliability Index 2.33 and 3.0 for PHC bored pile. LRFD value of PHC bored pile represents 0.36~0.44 for Meyerhof method and 0.24~0.31 for SPT-CPT conversion method according to the design reliability index.

Key words: PHC Pile, Bored Pile, Limit States Design Method, LRFD(Load and Resistance factored Design Method), Design Reliability Index

1. 서 론

국제표준화기구인 ISO(International Organization for Standardization) 기준중에서 건설 설계분야와 직접적으로 관련 있는 것은 ISO 2394(구조물 신뢰성에 관한 일반 원리)이다. ISO 2394에서는 기본적으로 공용성(Serviceability) 및 신뢰성(Reliability)을 기준으로 하는 한계상태설계법(Limit States Design, LSD)을 채택하고 있다.

미국과 캐나다등 북미지역은 설계모델에 의해 산정된 저항에 불확실성을 반영하기 위한 하나의 저항계수를 지반 설

계정수에 곱하는 것이 특징이다. 이것은 미국 연방도로국의 교량 설계기준(AASHTO, 1994; 2004; 2007)과 구조물에 대한 미국 국립표준설계기준(ANSI)에 포함되었으며 2007년부터 교량설계시 하중저항계수설계법의 사용을 의무화하였다.

최근, 미국의 TRB(Transportation Research Board) 연구 프로그램인 NCHRP Report 507 “Load and Resistance Factor Design for Deep Foundations(2004)”을 통해 깊은 기초에 대한 저항계수를 산정하여 제안하였으며 캐나다의 온타리오 고속도로 교량설계기준(Ontario Highway Bridge Design Code, 1992) 및 캐나다 기초공학 매뉴얼(Canadian Foundation Engineering

본 논문은 토지주택연구원의 ‘말뚝기초의 설계법 선진화 및 시공법 다양화 연구’의 일부분을 정리한 내용입니다.

1) 토지주택연구원, 수석연구원(주저자: jbpark@lh.or.kr)

2) 토지주택연구원, 수석연구원(교신저자: parkyb@lh.or.kr)

3) 토지주택연구원, 수석연구원

Manual, 1992) 등 설계기준을 마련하였다. 또한, 하중저항계 수설계법을 뒷받침하기 위한 신뢰성 이론과 확률론적 접근을 통한 기초구조물 설계에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

국내에서는 1988년부터 콘크리트 분야에 극한강도설계법을 채택하여 1990년대 초반부터 실무적으로도 사용하고 있으며 강구조 분야도 2005년부터 건축구조기준 및 해설(KBC)에서 한계상태설계법(LRFD)과 허용응력설계법을 병행하여 사용하다가 2009년 개정때부터 한계상태설계법만을 사용하도록 규정하였다.

이렇듯 국내의 구조분야에서는 신뢰성 이론에 기반한 한계상태설계법의 사용이 이루어지고 있으나 말뚝을 포함한 지반공학 분야에서는 한계상태설계법의 도입 및 실무적용이 늦어지고 있다. 그 이유는 지반구조물의 한계상태(또는 극한파괴)를 확인이 어렵고 구조물보다 현장 및 지반조건이 매우 복잡하여 이를 반영한 기준을 만들기가 쉽지 않기 때문이다.

국내 지반공학 분야에서도 한계상태설계법에 대한 연구가 필요한 것으로 인식되어 2005년 건설교통부 국가 R&D 사업의 일환으로 “LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구”를 3년간(2005년~2008년) 수행하였으며 이를 통해, 국내 지반특성 및 시공현황을 고려한 깊은 기초(타입강관말뚝, 현장타설말뚝)에 대한 축방향 외말뚝 기초의 지지력공식별 저항계수가 한국건설기술연구원(2008)에 의해 제안되었으며 이 값들이 도로교 설계기준 해설(국토해양부, 2008)에 수록되었으나 의무적으로 적용되고 있지는 않는 실정이다.

기존 관련 국내 연구는 강관하타 및 현장타설 말뚝에 대한 연구만이 진행되었으며 건축구조물에 많이 사용하는 PHC 말뚝에 대해서는 연구가 진행되지 않다가 LH(한국토지주택공사)에서 2011년에 “말뚝기초의 설계법 선진화 및 시공법 다양화” 연구를 통하여 PHC 항타 및 매입말뚝공법에 대한 많은 현장재하시험결과를 바탕으로 LRFD 저항계수를 산정하였다.

2. 이론고찰

2.1 개요

2.1.1 한계상태설계

구조물에 있어 한계상태란 작용하중에 의해 구조물의 안정성 또는 주어진 기능이 상실되는 상태로 정의되며, 구조물이 정의된 한계상태에 이르지 않도록 설계하는 것을 한계상태설계법(Limit State Design)이라 한다. 한계상태설계법의 기본 설계조건은 허용응력설계법에서의 안전율과 비슷한 개념으로서 하중계수와 저항계수의 사용이 설계에 수반되므로 실제 미국에서는 한계상태설계법 대신 하중-저항계수 설계법(Load and Resistance Factor Design; LRFD)이란 이름이 일반

적으로 사용되고 있다. 그러나, 미국을 제외한 국가에서는 한계상태설계법이란 이름이 보다 넓은 의미로서 보편적으로 사용되고 있다(Goble, 1999).

일반적으로 한계상태는 구조물 또는 기초지반의 파괴를 수반하는 극한한계상태(Ultimate Limit State)와 구조물의 주어진 기능을 상실하게 되는 사용한계상태(Serviceability Limit State)로 구분된다. 한계상태설계는 각 한계상태에 도달하기 위한 발생확률의 산정이 우선되어야 하며, 산정된 발생확률이 허용수준 이내에 들도록 설계하는 것이라 할 수 있다. 신뢰성기반의 한계상태설계에서 구조물의 안전성과 파괴를 판단할 수 있는 한계상태식을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, g =한계상태식, Q =하중, R =저항을 나타낸다.

지반구조물의 설계에 적용되는 기존의 허용응력설계법은 대부분 저항과 하중의 확률적 분산특성이 배제된 대표값만이고 고려되며, 적절한 안전계수의 적용을 통해 설계가 이루어지고 있다. 또한 저항과 하중의 대표값에 의한 안전율이 동일한 수준이라도, 각 요소의 분산특성에 따라 초과하중에 의한 파괴확률은 다르게 되어, 동일한 안전수준 혹은 파괴확률을 나타내지는 못한다. 한계상태설계와 같은 신뢰성기반의 설계법은 이러한 설계 변수들의 통계적인 분산특성을 고려하며, 식 (2)와 같은 파괴확률식을 이용하여 구조물의 안전수준을 결정한다.

$$p_f = 1 - p_s = P(R < Q) \quad (2)$$

여기서, p_f =구조물의 파괴확률, p_s =구조물이 안전한 상태에 있는 확률을 나타낸다.

하중과 저항은 각각 다양한 분포를 가질 수 있으나, 많은 연구결과, 대수정규분포(Log-Normal Distribution)로 가정하고 있으며(Withiam et al., 2001, Yoon and O'Neill, 1997), 이때 한계상태식 식 (1)은 다음 그림 1과 같은 확률분포로 표현될 수 있다.

그림 1에서 빗금 친 부분은 파괴확률을 나타내고 있으며, 설계기준을 의미하는 한계상태식의 평균값 $\bar{g} = \ln(R/Q)$ 로부터 파괴영역의 한계점을 나타내는 $g = \ln(R/Q) = 0$ 까지의 거리는 한계상태에서 표준편차 σ_g 와 신뢰도 지수 β 의 곱으로 표현할 수 있다. 따라서, 신뢰도 지수 β 는 한계상태의 확률밀도함수 중심에서 한계상태까지의 거리 \bar{g} 를 한계상태식 g 의 표준편차 σ_g 로 정규화하여 표현한 것으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

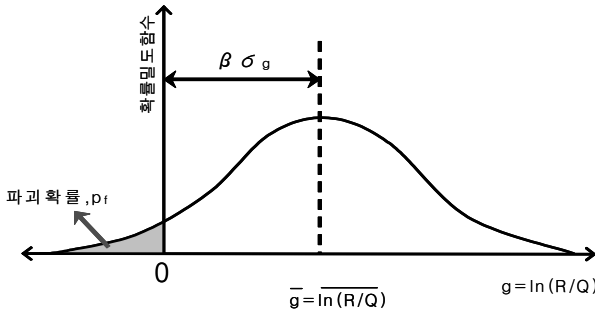


그림 1. 하중 Q, 저항 R, 파괴확률 Pf, 신뢰도지수 beta의 관계

$$\beta = \frac{\bar{g}}{\sigma_g} \quad (3)$$

여기서, β =신뢰도지수, \bar{g} =파괴확률 변수의 평균값, σ_g =파괴확률 변수의 표준편차를 나타낸다. 즉, 신뢰도지수 β 는 구조물의 파괴확률을 표현하는 또다른 기준으로 구조물의 안정성에 대한 신뢰도를 표현하는 지수가 될 수 있으며, 기존 허용응력설계법의 안전율에 상응하는 설계기준으로서의 의미를 내포하고 있다. 목표 신뢰도 지수 β_T 에 대한 저항계수(ϕ)는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \frac{\lambda_R(r_D \frac{Q_D}{Q_L} + r_L) \sqrt{\frac{1 + COV_R^2}{1 + COV_{QD}^2 + COV}}}{(\lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{QL}) \exp(\beta_T \sqrt{\ln[(1 + COV_R^2)(1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2)])}} \quad (4)$$

여기서, γ_D =사하중계수, γ_L =활하중계수, Q_D/Q_L =사하중/활하중비, λ_{QD} =사하중의 편향계수, λ_{QL} =활하중의 편향계수, λ_R =저항의 편향계수, COV_{QD} =사하중의 변동계수, COV_{QL} =활하중의 변동계수, COV_R =저항의 변동계수를 의미한다.

파괴확률과 신뢰도 지수와의 관계는 하중, 저항 분포와 직접적인 관련이 있으며, Withiam et al.(2001)에 의하면 하중과 저항이 대수정규분포를 보이는 경우에 구조물의 파괴확률과 신뢰도 지수는 그림 2와 같은 관계를 나타낸다.

단일 말뚝기초에 대해 Withiam 등(2001)은 말뚝기초의 파괴확률 1~10%에 해당하는 목표 신뢰도 지수인 β_T 는 2.0~2.5 이 적합하다고 제시하였고, AASHTO(2007)에서도 이와 동일한 목표 신뢰도 지수를 적용하고 있다. 이것은 단일 말뚝으로 구성되는 군말뚝으로 지지되는 전체 구조물의 파괴확률을 감안하여 단일 말뚝에 대한 상대적으로 높은 파괴확률의 허용을 고려한 값이다.

미국의 AASHTO 교량설계 시방서(2007)에서는 타입말뚝과 현장타설 콘크리트 말뚝에 대한 저항계수를 산정할 때 목표 신뢰도 지수는 타입말뚝과 현장타설 콘크리트말뚝에 대해

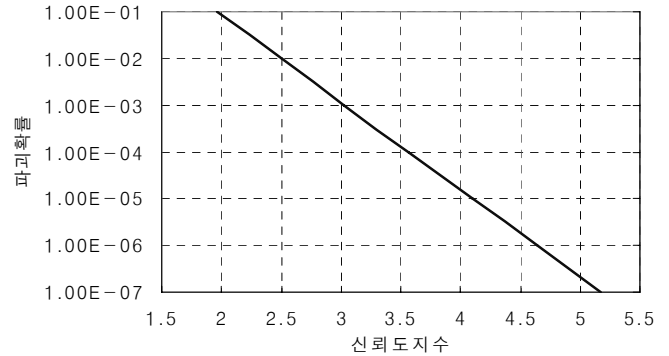


그림 2. 파괴확률(%)과 신뢰도 지수와의 관계

각각 2.33(파괴확률 1%), 3.0(파괴확률 0.1%)를 적용하였다 (구조물기초설계기준, 2008).

2.2 지지력 설계법

2.2.1 Meyerhof 방법

현재, 국내에서 풍화토 및 풍화암 지반에 근입된 항타말뚝 및 매입말뚝의 지지력 산정식은 Meyerhof(1976)가 항타말뚝에 대해 제안한 식 (5)를 기본적으로 사용하고 있다.

$$Q_{설계} = \frac{1}{3} [30\bar{N}'_b A_b + (0.2\bar{N}_{사질토}' L_{사질토} + 0.5q_u L_{점토}') \times L_p] \quad (5)$$

여기서, \bar{N}'_b 은 선단부의 평균 N값, A_b 는 말뚝선단면적, $\bar{N}_{사질토}'$ 는 말뚝주면 사질토의 평균 N값, $L_{사질토}$ 는 사질토층의 깊이, q_u 는 말뚝주면 점토층의 평균 일축압축강도(=1.25 $\bar{N}_{점토}'$), $L_{점토}'$ 는 점토층의 깊이, L_p 는 말뚝의 둘레길이(= $\pi \times$ 직경)을 나타낸다.

일본의 건설성 기준에 의하면 선단부의 시공방법에 따라서 선단지지력 계산식이 $20 \sim 30\bar{N}'_b A_b$ 로 변한다. 즉, 최종타격공법일 경우에는 $30\bar{N}'_b A_b$, 최종경타공법은 $25\bar{N}'_b A_b$ 이며 시멘트풀 주입공법인 경우에는 $20\bar{N}'_b A_b$ 이다. 최종경타공법을 많이 사용하고 있는 LH에서는 시험항타시에 초기 동재하시험(E.O.I.D)을 실시하는데 다년간의 동재하시험 자료를 분석한 결과, 선단지지력이 $25\bar{N}'_b A_b$ 를 상회하고 주면마찰력도 항타말뚝 수준의 0.2N 이상인 것으로 나타나 실무적으로 이들 계수를 사용하고 있다. 2008년에는 N값의 한계치를 기존 50에서 60으로 상향조정하였다.

2.2.2 SPT-CPT 전환법

유럽에서 많이 사용하는 방법으로 SPT 결과를 CPT 결과로 전환하여 말뚝의 지지력을 산정하는 방법으로 주면지지력

을 합리적으로 산정하는 것으로 알려져 있다(박중배 등, 2003).

(1) 표준관입시험 결과의 CPT 전환

표준관입시험 결과와 CPT 상호관계에 대한 많은 연구 결과들이 지금까지 발표되었는데, Robertson와 Campanella (1983)가 제안한 SPT-CPT 관계식(그림 3)이 많은 시험 결과를 토대로 하고 있어 널리 사용되고 있다.

(2) 지지력 산정 절차

가) 상재하중, 타격에너지 등에 의해 보정된 N값을 각종 q_c/N 관계에 의하여 CPT 수치(q_c)로 전환한다.

나) 선단 지지력 계산(Q_b : tonf)

$$Q_b = (A_b \times q_{c,b}) / 1,000 \tag{6}$$

여기서, A_b 는 말뚝선단의 면적(cm^2), $q_{c,b}$ 는 말뚝 선단부의 단위 콘선단 저항값(kgf/cm^2)을 나타낸다.

다) 주변 마찰력 계산(Q_s : tonf)

$$Q_s = (p \times \sum q_s \times L_{depth}) / 1,000 \tag{7}$$

여기서, p 는 말뚝의 둘레길이(cm), q_s 는 주변부의 단위 콘마찰 저항값($=q_{c,평균} \times \eta$)(kgf/cm^2), η 는 마찰계수(표 1 참조), L_{depth} 는 말뚝 길이(cm)를 나타낸다.

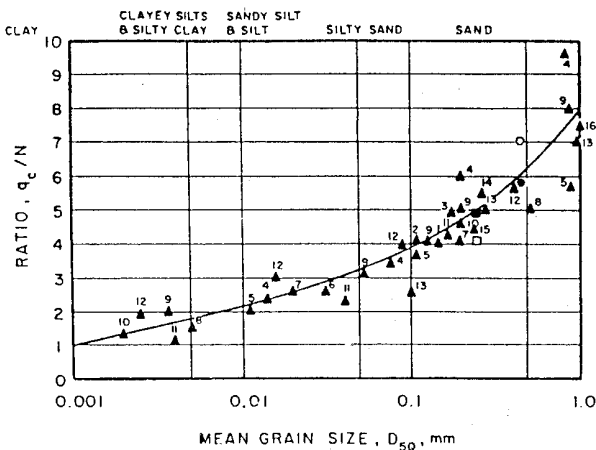


그림 3. SPT-CPT 관계(Robertson and Campanella, 1983)

3. 저항계수 산정

3.1 말뚝 재하시험 데이터 취득

표 2는 매입말뚝의 제원과 재하시험결과의 평균값을 나타내었다.

매입말뚝은 말뚝 본체의 직경보다 약 10cm 더 큰 직경으로 지반을 굴착하여 말뚝을 삽입하고 빈 공간에 물/시멘트비(w/c)가 83% 이하인 시멘트 페이스트로 채운다. 시멘트 페이스트가 굳기 전에 실시하는 초기 동재하시험(E.O.I.D)시에는 마찰력이 거의 없고 시멘트 페이스트가 경화된 후에 실시하는 재항타 동재하시험(Restrike)시에 마찰력을 포함한 전체 지지력이 발현되므로 재항타 동재하 시험결과를 이용하여 하중저항계수를 구하였다. 표 2에서 동재하 시험을 실시한 동

표 1. 마찰계수(η)의 범위(Van Impe et al., 1988)

토질의 종류	선단 지지력(q_c)의 범위(kgf/cm^2)	마찰계수(η)
실트질 점토 및 느슨한 모래	$30 < q_c < 50$	1/30
적당한 굳기의 점토($0.3 < IL < 0.6$)	$20 < q_c < 80$	1/85
굳은 점토($IL \geq 0.8$)	$q_c > 20$	1/80
단단한 실트	$q_c > 50$	1/100
사질토	$q_c \leq 150$	1/200
사질토	$q_c > 150$	1/300

표 2. 매입말뚝 제원 및 재하시험결과 평균

()안은 시험횟수

현장명	말뚝종류	시공방법	설계지지력 (tonf)	시공길이 (m)	재항타 동재하 시험결과 Rut(tonf)	정재하 시험결과 (tonf)
A현장	PHC 450	SIP+케이싱	100	12.0	282.4(20)	225 이상(5)
B현장	PHC 450	T4+케이싱	100	14.0	306.3(7)	225 이상(2)
C현장	PHC 400	T4+케이싱	80	10.5	237.7(23)	225 이상(4)
D현장	PHC 450	T4+케이싱	100	16.1	286.7(11)	225 이상(3)
E현장	PHC 400	SIP	80	11.9	257.3(20)	202.5 이상(3)
전체 평균				12.6	267.9(81)	207.6 이상(17)

일 말뚝에 대해 정재하 시험결과는 동재하 시험결과보다 작은 값을 나타내고 있다. 이는 설계하중의 2.25배를 재하하는 시험관례에 의해서 파괴하중을 충분히 파악할 수 없음을 보여주고 있으며 동재하 시험결과를 기준값으로 하는 것이 현실적인 하중저항계수를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 말뚝 지지력 해석

하중저항계수를 산정하기 위해 재하시험을 실시한 말뚝에 대해 설계식을 이용하여 지지력을 계산하였다(표 3 참조). 계산에 이용한 설계식은 Meyerhof(1976) 방법과 SPT-CPT 전환법이다.

매입말뚝 설계식에 의한 지지력을 산정한 결과, Meyerhof

방법은 평균 381.8tonf, SPT-CPT 전환법은 454.3tonf으로 SPT-CPT 전환법이 Meyerhof 방법보다 약 19% 더 컸다. 이것은 SPT-CPT 전환법에 의한 주면마찰력이 Meyerhof 방법보다 65% 더 크게 산정되었기 때문이다.

매입말뚝에 대한 재하시험 결과(동재하 Rut, 정재하 Davisson 산정법)와 설계식(Meyerhof 방법, SPT-CPT 전환법)에 의한 지지력 산정결과의 상관관계는 그림 4~그림 5와 같다.

매입말뚝의 재하시험결과와 설계지지력의 편향계수(재하시험 평균값/ 평균 설계지지력)는 표 4 및 그림 6~그림 7과 같다.

표 4에서 Meyerhof 방법과 SPT-CPT 전환법으로 산정한 설계지지력에 대한 매입말뚝의 편향계수가 각각 0.74, 0.63이

표 3. 매입말뚝 설계식에 의한 지지력 산정 평균값

현장명	말뚝종류	설계 지지력 (tonf)	시공길이 (m)	Meyerhof(tonf)			SPT-CPT(tonf)		
				전체 지지력	선단 지지력	주면 마찰력	전체 지지력	선단 지지력	주면 마찰력
A현장	PHC 450	100	12.0	427.9	286.2	142.2	452.5	238.6	213.9
B현장	PHC 450	100	14.0	463.4	284.9	178.3	647.7	238.6	409.2
C현장	PHC 400	80	10.5	335.2	207.1	128.1	375.9	188.5	187.4
D현장	PHC 450	100	16.1	381.6	193.4	188.2	499.3	215.3	283.9
E현장	PHC 400	80	11.9	361.0	225.7	148.8	460.7	188.5	272.2
전체 평균			12.6	381.8	233.2	148.8	454.3	208.6	245.7
편차				76.23	53.30	45.44	137.33	27.23	128.64
변동계수				0.20	0.36	0.19	0.30	0.13	0.52

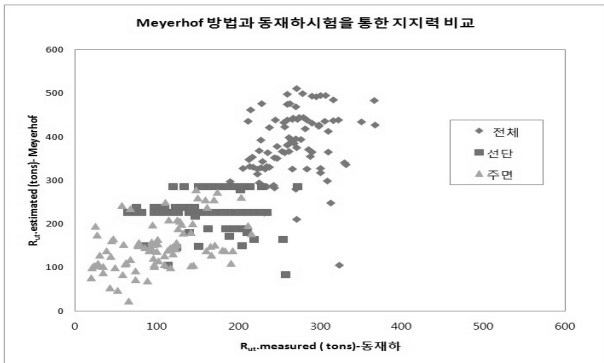


그림 4. Meyerhof 법-동재하 시험결과(Rut) 상관도

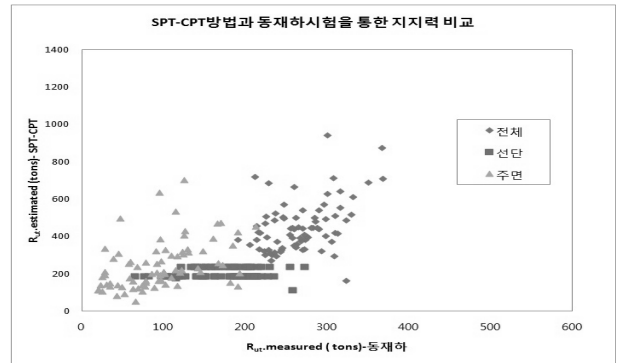


그림 5. SPT-CPT 전환법-동재하 시험결과(Rut) 상관도

표 4. 매입말뚝의 편향계수(재하시험 결과/설계지지력)

구 분		설계지지력	선단지지력	주면마찰력
동재하 Rut/ Meyerhof 방법	편향계수	0.74	0.75	0.73
	편향계수의 편차	0.29	0.35	0.42
	편향계수의 변동계수	0.40	0.47	0.57
동재하 Rut/ SPT-CPT 전환법	편향계수	0.63	0.84	0.44
	편향계수의 편차	0.21	0.27	0.25
	편향계수의 변동계수	0.33	0.32	0.57

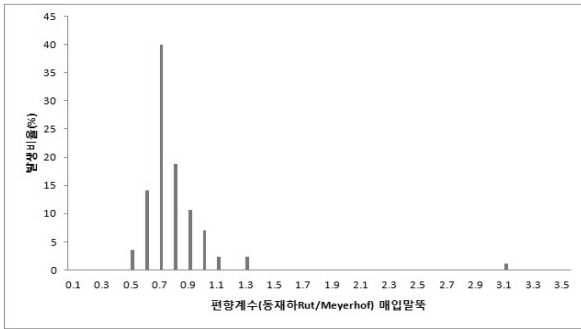


그림 6. 편향계수의 확률밀도(매입말뚝 : 동재하 Rut/Meyerhof 방법)

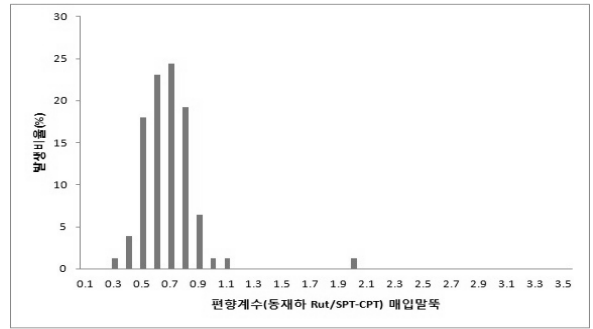


그림 7. 편향계수의 확률밀도(매입말뚝 : 동재하 Rut/SPT-CPT 전환법)

표 5. PHC 매입말뚝의 저항계수 산정결과

목표 신뢰도 지수(B)	동재하 Rut 기준			
	Meyerhof 방법		SPT-CPT 전환법	
	QD/QL=3.33	QD/QL=5.0	QD/QL=3.33	QD/QL=5.0
2.33	0.44	0.44	0.31	0.31
3.0	0.36	0.36	0.25	0.24

며 편향계수가 1보다 작기 때문에 동재하시험으로 구한 극한 지지력(Rut)보다 이들 설계법으로 구한 지지력이 크을 의미한다.

Meyerhof 방법으로 구한 설계지지력, 선단 및 주면마찰력의 편향계수가 0.73~0.75로 비슷하게 나온 반면 SPT-CPT 전환법은 주면마찰력의 편향계수가 0.44로 선단지지력의 편향계수인 0.84와 큰 차이를 보였다. 이것은 선단지지력의 설계값은 재하시험의 평균값과 비슷하나 주면마찰력의 설계값은 재하시험값보다 2배 정도 크을 의미하는 것으로 SPT-CPT 전환법이 주면마찰력을 크게 산정하는 경향이 있음을 알 수 있다.

편향계수에 대한 편차 및 변동계수는 SPT-CPT 방법이 각각 0.21 및 0.33으로 Meyerhof 방법의 0.29 및 0.40보다 작아 SPT-CPT 전환법의 상관성이 더 좋은 것으로 나타났다.

매입말뚝에 대한 편향계수의 확률밀도 그래프(그림 6~그림 7)를 보면 Meyerhof 방법 및 SPT-CPT 전환법에 의한 편향계수의 분포범위가 좁으며 정규분포 형태를 나타내는 것을 볼 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 Meyerhof 방법 및 SPT-CPT 전환법에 의한 편향계수의 평균값이 1.0보다 작았으며 편향계수의 확률밀도 그래프도 전반적으로 편향계수가 1.0보다 작게 분포하는 것을 보여주고 있다.

3.3 저항계수 산정 결과

재하시험결과(동재하 Rut)와 설계지지력(Meyerhof 및 SPT-CPT 전환법)을 이용하여 매입말뚝의 저항계수를 구한 결과를 정리하면 표 5와 같다. 사하중과 활하중의 하중비(QD/QL) 3.33과 5.0에 대해 목표 신뢰도 지수 2.33(파괴확률

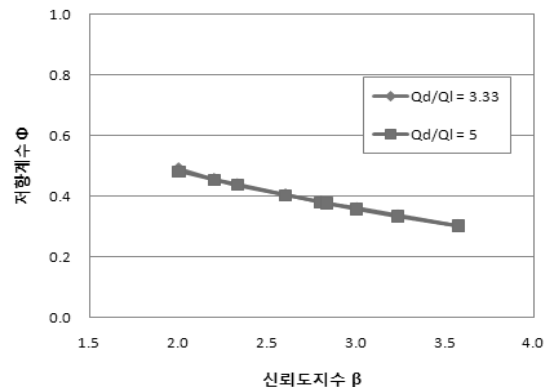


그림 8. 신뢰도지수와 저항계수의 관계 (매입말뚝 : Rut-Meyerhof)

: 1.0%)과 3.0(파괴확률 0.1%) 일 때 저항계수를 산정하였다. 이것은 미국의 AASHTO 교량설계 시방서(2007)에서 타입말뚝과 현장타설 콘크리트 말뚝에 대한 저항계수를 산정할 때 목표 신뢰도 지수는 타입말뚝은 2.33(파괴확률 1%), 현장타설 콘크리트말뚝에 대해서는 3.0(파괴확률 0.1%)를 적용한 구조물기초설계기준(2008)을 참고하였다.

① Meyerhof 방법

표 5에서 보면 QD/QL 값의 변화에 따른 저항계수의 차이가 없으며 목표 신뢰도 지수 2.33과 3.0일 때 Meyerhof 방법에 대한 PHC 매입말뚝의 저항계수는 각각 0.44와 0.36인 것으로 나타났다. 그림 8은 신뢰도 지수와 저항계수의 관계를 나타낸 것으로 신뢰도 지수가 2.0(파괴확률 2.28%)에서 3.57(파괴확률 0.02%) 범위일 때 저항계수는 0.30~0.49으로 분포하였다.

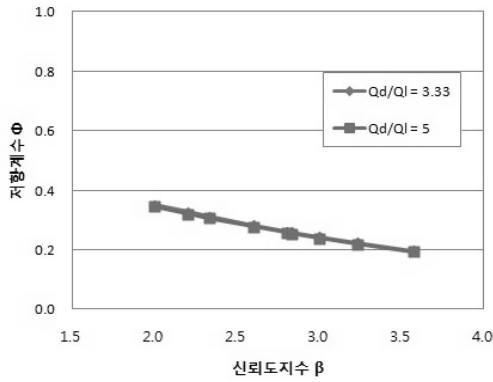


그림 9. 신뢰도 지수와 저항계수의 관계 (매입말뚝 : Rut-SPT-CPT)

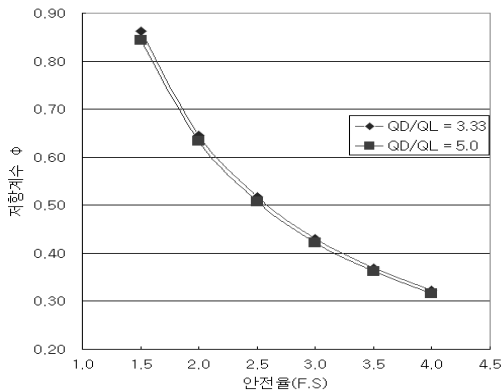


그림 10. 저항계수와 안전율의 관계

② SPT-CPT 전환법

표 5에서 QD/QL 값의 변화에 따라 저항계수의 차이가 없으며 목표 신뢰도 지수 2.33과 3.0일 때 SPT-CPT 전환법에 대한 PHC 매입말뚝의 저항계수는 각각 0.31과 0.24~0.25인 것으로 나타났다. 그림 9에서는 신뢰도 지수와 저항계수의 관계를 나타내었으며 신뢰도 지수가 2.0(파괴확률 2.28%)에서 3.57(파괴확률 0.02%) 범위일 때 저항계수는 0.19~0.35으로 분포하였다.

그림 10에서는 저항계수(ϕ)와 안전율(FS)의 관계 $\{\phi = (\gamma_D \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_L) / [FS(\frac{Q_D}{Q_L} + 1)]\}$ 를 나타내었으며 허용응력설계법에서 말뚝에 대한 안전율인 3일 때, 저항계수는 0.43($Q_D/Q_L=3.33$) 및 0.42($Q_D/Q_L=5.0$)를 나타내었다.

안전율 3에 대응하는 저항계수인 0.42~0.43은 목표 신뢰도 지수가 2.33(파괴확률 1%) 일 때의 Meyerhof 방법의 하중저항계수인 0.44와 큰 차이가 없어 PHC 매입말뚝을 Meyerhof 방법으로 설계할 때는 허용응력설계법과 LRFD 방법의 경제성에 있어서 차이가 거의 없는 것으로 판단된다. 목표 신뢰도 지수를 더 높여 3.0(파괴확률 0.1%)로 할 때는 Meyerhof 방

법의 저항계수가 0.36이기 때문에 LRFD 방법으로 설계했을 때 경제성은 허용응력설계법보다 떨어지게 된다.

SPT-CPT 전환법은 신뢰도 지수가 2.0(파괴확률 2.28%)에서 3.57(파괴확률 0.02%) 범위일 때 저항계수는 0.19~0.35의 범위를 나타내어(그림 9) 통상적인 신뢰도 지수 구간에서의 저항계수가 안전율 3에 대응하는 저항계수인 0.42~0.43 보다 작기 때문에 LRFD 방법을 적용하면 허용응력설계법으로 설계할 때 보다 PHC 매입말뚝의 경제성이 떨어지게 된다.

LRFD 방법으로 설계하여 허용응력설계법보다 경제성을 확보하기 위해서는 저항계수값이 0.43보다 커야 하며, 이를 위해서는 동재하시험으로 구한 매입말뚝의 Rut(극한지지력) 보다 더 큰 극한지지력을 구하여 저항계수값을 산정해야 할 것이다.

4. 결론

PHC 매입말뚝에 대한 81개의 동재하 시험결과와 이들 말뚝에 대한 지지력 설계값에 대한 신뢰성 분석을 통하여 LRFD 설계정수를 산정한 결과는 다음과 같다.

1. PHC 매입말뚝의 저항계수는 목표 신뢰도 지수 2.33과 3.0에 대해 Meyerhof 방법과 SPT-CPT 전환법은 각각 0.36~0.44, 0.24~0.31를 나타내었다.
2. 매입말뚝 편향계수(재하시험값/설계지지력)는 Meyerhof 방법은 0.74이고 SPT-CPT 전환법은 0.63을 나타내어, SPT-CPT 전환법의 편향계수가 Meyerhof 값보다 작아 동일한 조건에서 SPT-CPT 전환법의 설계지지력이 Meyerhof 방법에 의한 산정치보다 크며 두 방법 모두 편향계수가 1보다 작기 때문에 동재하시험으로 구한 극한지지력(Rut)보다 이들 설계법으로 구한 지지력이 큼을 의미한다.
3. 편향계수에 대한 편차 및 변동계수는 SPT-CPT 방법이 각각 0.21 및 0.33으로 Meyerhof 방법의 편향계수에 대한 편차 및 변동계수인 0.29 및 0.40보다 작아 SPT-CPT 전환법의 상관성이 우수한 것으로 나타났다.
4. 안전율과 저항계수의 관계에서 말뚝의 안전율 3일 때 저항계수는 0.42~0.43이며, 목표 신뢰도 지수 2.33일 때 Meyerhof 방법의 저항계수는 0.44로 나타나 큰 차이를 보이지 않았고, SPT-CPT 전환법의 저항계수는 0.31으로 산정되어 LRFD 방법이 허용응력설계법보다 경제적으로 불리한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 국토해양부(2010), 「도로교 설계기준 해설」, 한국도로교통협회, pp. 838~848.

2. 국토해양부, 한국건설교통기술평가원(2008), 「LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구」, 한국건설기술연구원.
3. 국토해양부(2009), 「구조물 기초 설계기준 해설」, 한국지반공학회, pp. 304~307.
4. 박종배, 김상연, 이범식, 박용부, 임해식, 최경륜, 김동수, 김범주 (2011), 「말뚝기초의 설계법 선진화 및 시공법 다양화」, 한국토지주택공사 토지주택연구원, pp. 90~173.
5. 박종배, 김정수, 정형식(2003), “SIP 공법의 지지력 특성에 관한 연구”, 「한국지반공학회 논문집」, 19(1): 51~60.
6. KBC (2009), 「건축구조기준 및 해설(강구조편)」, 대한건축학회, pp. 28~30.
7. AASHTO (2007), *LRFD Bridge and Construction Specifications*, AASHTO, Washington, D.C.
8. Bustamante, M. and L. Ganeselli (1982), “Pile Bearing Capacity Prediction by Means of Static Penetrometer CPT.”, *Proc. of 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, pp. 493~500.
9. Canadian Geotechnical Society (1992), *Canadian Foundation Engineering Manual*, 3rd Edition, Bi-Tech Publishers, Ltd., Richmond, British Columbia, Canada, 512.
10. Goble, G. G. (1999), *Geotechnical Related Development and Implementation of Load and Resistance Factor Design (LRFD) Methods*, NCHRP Program, Synthesis of Highway Practice 276, Transportation Research Board, Washington, D.C.
11. Eurocode 7 (1993), *Geotechnical Design Forth and Final Draft*, European Committee for Standardization, TC 250/SC7
12. Meyerhof, G. G. (1976). “Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, New York, NY, 102(GT3): 196~228.
13. NCHRP Report 507 (2004), *Load and Resistance Factor Design for Foundations*, Transportation Research Board, Washington, D.C.
14. Ontario Highway Department (1991), *Ontario Highway Bridge Design Code*, Third Edition, Ministry of Transportation and Communication, Toronto, Ontario, 370.
15. Robertson, P. K. and R. G. Campanella (1983), “SPT-CPT Correlations”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 109(11): 1449~1459.
16. Van Impe, W., E. E. DeBeer and E. Louisberg (1988), “Prediction of Single Pile Bearing Capacity in Granular Soils from CPT Results”, *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Specialty Session, Orlando, Fla, March 20-24, 1988. pp. 1~34.
17. Withiam, J. L., E. P. Voytko, R. M. Barker, J. M. Duncan, B. C. Kelly, S. C. Musser and V. Elias (2001), *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Substructures*, Publication No FHWA HI-98-032, NHI Course No.13068, Federal Highway Administration, Washington D.C.
18. Yoon, G. L. and M. W. O'Neill(1997), *Resistance Factors for Single Driven Piles from Experiments*, Transportation Research Record, 1569: 47~54.