

# 말뚝 기초지지력에 대한 안전율과 신뢰도지수 평가

## Relations of Safety Factor and Reliability for Pile Load Capacity

김 대 호 <sup>1</sup>	Kim, Dae-Ho	김 민 기 <sup>2</sup>	Kim, Min-Ki
황 성 욱 <sup>2</sup>	Hwang, Sung-Uk	박 영 환 <sup>2</sup>	Park, Young-Hwan
이 준 환 <sup>3</sup>	Lee, Jun-Hwan		

### Abstract

Reliability between safety factor and reliability index for driven and bored pile load capacity was analyzed in this study. 0.1B, Chin, De Beer, and Davisson's methods were used for determining pile load capacity by using load-settlement curve from pile load test. Each method defines ultimate yield and allowable pile load capacities. LCPC method using CPT results was performed for comparing results of pile load test. Based on FOSM analysis using load factors, it is obtained that reliability indices for ultimate pile load capacity were higher than those of yield and allowable condition. Present safety factor 2 for yield and allowable load capacities is not enough to satisfy target reliability index 2.0~2.5. However, it is sufficient for ultimate pile load capacity using safety factor 3.

### 요 지

최근 신뢰성 이론에 바탕을 둔 한계상태설계법(Limit State Design)이 국제적으로 도입되고있는 추세이다. 이에 본 연구에서는 사질토 지반에 근입된 항타 및 현장타설 말뚝의 지지력 산정법에 대한 신뢰도지수와 안전율과의 관계를 규명하고자 하였다. 본 연구는 말뚝 직경의 10% 침하 시 지지력을 결정하는 방법(0.1B), Chin의 방법, De Beer의 방법과 Davisson의 방법에 대한 말뚝 지지력 산정결과를 비교 분석하였고, 말뚝의 지지력 산정 시 유용하게 활용되는 CPT결과를 통한 말뚝의 지지력 산정법 중에서 LCPC법에 의한 지지력과의 비교를 통해 FOSM법을 바탕으로 각 산정법에 대한 신뢰도를 평가하였다. 각 말뚝지지력 해석 방법에 따른 안전율과 신뢰도지수 관계 분석결과, 극한지지력을 규정하는 0.1B와 Chin의 방법에 대한 신뢰도지수가 De Beer와 Davisson에 의한 신뢰도지수보다 높은 것으로 나타났으며, 목표신뢰도지수 2.0~2.5를 기준으로 하여 항타 말뚝에서의 안전율 2는 방법에 따라 다소 증대될 필요가 있고, 현장 타설 말뚝에서는 극한 지지력 확인시 안전율 3보다 작게 적용할 수 있는 여지가 있음을 확인하였다.

**Keywords :** Limit state design, Reliability index, CPT, Pile design

### 1. 서 론

현재 국내 지반 기초구조물의 설계는 대부분 허용응력 설계법(Allowable Stress Design; ASD)을 바탕으로 이루어지고 있다. 허용응력 설계법은 구조물의 하중과 지반의 지지력을 하나의 대표값으로 설정하고 이들에

대하여 안전율을 적용함으로써 안전성을 평가하는 것이다. 하지만 실제 하중 및 지반은 거동이 복잡하고 큰 편차를 지니고 있다. 이에 최근에 다양한 설계인자들의 불확실성을 고려한 신뢰성 이론에 바탕을 둔 한계상태 설계법(Limit State Design)이 국제적으로 도입되고 있다. 특히 북미 등지에서는 하중-저항계수 설계법(Load-

1 정회원, 대우엔지니어링 도로사업부 (Member, Engineer, Highways & Bridges, Daewoo Engrg. Company)

2 연세대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

3 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Resistance Factor Design)을 바탕으로 하여 지반의 저항 계수 적용을 통한 신뢰성 설계에 중점을 두고 있다. 그러나 국내에서는 한계상태 설계법에 대한 관련 연구 및 정착이 초기단계에 머물고 있으며, 설계사레 부족, 국내 지반 데이터에 대한 체계적 통계지수 및 정량적 분석결과 미흡, 설계개념변화에 따른 시행착오의 가능성 등에 기인해 실무 적용 또한 활성화되어 있지 못한 실정이다.

지반의 지지력을 판단하는 데에는 지반 자체의 불확실성에 대한 문제와 함께, 지지력을 산정하는 다양한 방법에 따른 지지력 산정결과의 차이로 인한 문제도 기초 설계의 신뢰성을 좌우하는 주요 인자이다. 말뚝 기초의 지지력 확인을 위해 수행되는 말뚝 재하시험의 결과를 분석하는 방법에도 매우 다양한 방법들이 제시되어 있으며, 이들은 각각 상이한 값과 수준의 지지력을 나타낸다. 따라서 이러한 요인은 말뚝기초 설계방법 및 시험방법에 있어, 각 방법에 따라 일관성이 결여된 신뢰성을 나타낼 수 있으며, 이에 대한 적절한 평가는 설계의 효율성과 안정성 확보를 위해 중요하다.

본 연구에서는 사실토 지반 말뚝의 선단이 위치하는 항타 및 현장타설 말뚝의 지지력 산정법에 대한 신뢰도 지수와 안전율과의 관계를 규명하고자 하였다. 이는 기존의 허용응력설계법과 지반공학적 신뢰성 설계와의 상호연관성을 평가하고, 향후 설계개념변화에 대비한 기초자료를 확보하기 위함이다. 이를 위해 문헌으로부터 말뚝재하시험결과와 콘관입시험 결과를 수집하였으며, CPT기반의 다양한 방법에 따라 말뚝 지지력을 산정하고, 통계적인 분석을 통하여 신뢰성 설계를 위한 인자들을 도출하여 적용하였다.

## 2. 한계상태 설계법

### 2.1 한계상태 설계 개념

한계상태설계법(Limit State Design)은 구조물이 본래의 기능을 상실하거나 손상 및 파괴를 일으키는 상태를 넘어서지 않도록 설계하는 것을 의미한다. 이를 위해서는 구조물의 한계상태를 넘어서게 되는 확률이 산정되어야 하며, 산정된 발생확률이 목표로 하는 허용확률 이내에 들도록 하여야 한다. 이러한 과정에서 저항과 하중에 작용하는 여러 설계 변수들에 대한 확률적인 특성을 고려하여야 한다. 구조물 안정성 판단의 기준이 되는 파괴확률은 다음과 같은 파괴 확률식을 통해 산정할 수

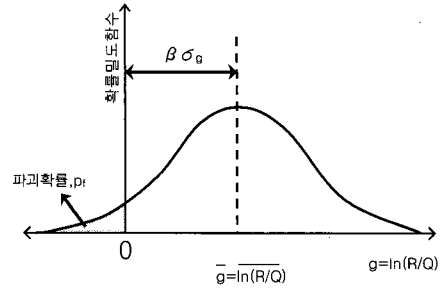


그림 1. 하중 Q, 저항 R, 파괴확률  $P_f$ , 신뢰도지수  $\beta$ 의 관계

있다(Withiam 등, 2001).

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

여기서  $p_f$ =구조물의 파괴확률;  $p_s$ =구조물이 안전한 상태에 있는 확률을 나타낸다. 하중과 저항은 각각 다양한 분포의 확률을 가질 수 있으나, 많은 연구에서 구조물의 하중과 저항은 각각 독립이며, 대수정규분포(Log-normal distribution)로 가정되어 적용하고 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  $\sigma_g$ 와 신뢰도지수  $\beta$ 의 곱으로 표현할 수 있다. 따라서 신뢰도지수  $\beta$ 는 한계상태의 확률밀도함수 중심에서 한계상태까지의 거리  $\bar{g}$ 를 한계상태식의 표준편차로 정규화하여 표현한 것으로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{\bar{g}}{\sigma_g} \quad (2)$$

여기서,  $\beta$ =신뢰도지수;  $\bar{g}$ =파괴확률 변수의 평균값;  $\sigma_g$ =파괴확률 변수의 표준편차를 나타낸다. 즉, 신뢰도지수는 구조물의 파괴확률을 나타내는 또 다른 기준으로 구조물의 안정성에 대한 신뢰도를 표현하는 지수가 될 수 있으며, 기존 허용응력설계법의 안전율에 상응하는 설계기준으로서의 의미를 지닌다.

### 2.2 신뢰도 지수

하중-저항계수설계법(Load-Resistance Factor Design: LRFD)은 한계상태 설계법에 바탕을 둔 설계법으로써 사하중과 활하중으로 구분된 설계하중과 저항값에 대한 하중 및 저항계수의 적용을 통하여 설계하는 방법으

로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi R_n \geq r_D Q_D + r_L Q_L = \Sigma r_i Q_i \quad (3)$$

여기서,  $\phi$ =저항계수;  $R_n$ =공칭저항;  $r_D$ =사하중계수;  $r_L$ =활하중계수;  $r_i$ =하중계수;  $Q_D$ =사하중;  $Q_L$ =활하중;  $Q_i$ =작용하중을 의미한다.

신뢰성 해석기법 중 일계이차모멘트분석법(First Order Second Moment; FOSM)에 의하여 사하중  $Q_D$ , 활하중  $Q_L$ , 저항  $R$ 이 각각 독립이며, 대수정규분포를 따른다고 가정하면, 신뢰도지수는 다음과 같이 표현할 수 있다 (Withiam 등, 2001).

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_R R_n}{\lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{QL}}\right) \sqrt{\frac{1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2}{1 + COV_R^2}}}{\sqrt{\ln(1 + COV_R^2)(1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2)}} \quad (4)$$

여기서,  $\lambda_{QD}$ =사하중의 편향계수;  $\lambda_{QL}$ =활하중의 편향계수;  $\lambda_R$ =저항의 편향계수;  $COV_{QD}$ =사하중의 변동계수;  $COV_{QL}$ =활하중의 변동계수;  $COV_R$ =저항의 변동계수를 의미한다.

편향계수  $\lambda$ 는 측정값의 평균과 예측(공칭)값의 비율로 정의되며, 변동계수  $COV$ (Coefficient of Variance)는 평균값에 대한 불확실성의 크기를 의미하는 분산을 무차원 형식으로 표현한 것으로, 다음과 같이 정의된다.

$$COV_{QD} = \frac{\sigma_{QD}}{Q_D}, \quad COV_{QL} = \frac{\sigma_{QL}}{Q_L}, \quad COV_R = \frac{\sigma_R}{R} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_{QD}$ ,  $\sigma_{QL}$ ,  $\sigma_R$ 은 각각 사하중, 활하중 및 저항의 분포에 대한 표준편차,  $\overline{Q_D}$ ,  $\overline{Q_L}$ ,  $\overline{R}$ 은 각각 사하중, 활하중 및 저항의 평균값을 표현한다.

식 (4)에서 보는 바와 같이 신뢰도 지수  $\beta$ 는 하중 및 저항과 관련된 다양한 계수들로 정의된다. 이 중 저항계수 산정을 위한 하중관련 계수는 각 기관별, 구조물의 종류별로 상이한 값을 보이고 있으나, 본 연구에서는 미국의 표준시방서인 AASHTO(1994)에서 제시한 다음의 값을 적용하였다.

$$\begin{aligned} \lambda_{QD} &= 1.08, \quad \lambda_{QL} = 1.15, \quad r_D = 1.25, \quad r_L = 1.75, \\ COV_{QD} &= 0.13, \quad COV_{QL} = 0.18 \end{aligned} \quad (6)$$

지반의 저항과 관련된 요소인  $\lambda_R$  및  $COV_R$ 의 경우, 말

뚝재하시험 사례를 통하여 예측 지지력에 대한 측정지지력의 비율을 평가하여 편향계수 및 이에 대한 변동계수를 산정하였다. 한편, 기존 연구결과에서 말뚝재하시험 자체가 지닌 불확실성에 대한  $COV$ 로 0.08~0.30이 제시되었으며, CPT결과인  $q_c$ 의  $COV$ 로 0.05~0.15가 제시되었다(Scott, 2002). 이에 본 연구에서는 말뚝재하시험 자체의 불확실성과 콘지지력의 불확실성을 고려하기 위해 각 요소의  $COV$ 로 제시된 값의 중간값을 적용하여, 실제 말뚝기초 지지력의 저항계수 산정을 위한 변동계수를 다음과 같은 식을 통하여 산정하였다.

$$COV_R = \sqrt{(COV_{RR})^2 + (COV_{RT})^2 + (COV_{RC})^2} \quad (7)$$

여기서,  $COV_R$  = 방법론적 불확실성과 실험적 불확실성이 반영된 전체적 지지력평가에 대한 변동계수;  $COV_{RR}$  = 주어진 모델에 의한 예측 지지력에 대한 측정 지지력비의 변동계수;  $COV_{RT}$  = 말뚝재하시험 자체의 변동계수;  $COV_{RC}$  = 콘관입시험 결과 자체의 변동계수를 의미한다.

### 2.3 목표 신뢰도 지수

신뢰도지수는 구조물의 하중과 저항에 대한 파괴확률을 나타내는 또 다른 지표로서, 구조물 파괴확률의 함수로 산정될 수 있는 유기성을 지니고 있다. 파괴확률과 신뢰도지수와의 관계는 하중과 저항의 분포와 직접적인 관련이 있으며, 결국 신뢰도지수를 기준으로 구조물의 안정성을 판단할 수 있다. 다양한 구조물의 안정성 확보를 위해 요구되는 신뢰도지수는 많은 학자들에 의해 연구되어 왔으며, 이러한 신뢰도지수를 기본으로 구조물의 종류에 적합한 신뢰도지수를 목표신뢰도지수로 정의하였다. 이를 통하여 한계상태설계 시 구조물의 안정성에 대한 신뢰도 확보 기준으로 적용할 수 있다.

단일 말뚝 기초의 경우, Withiam 등(2001)은 말뚝기초의 파괴확률 1~10%에 해당하는 신뢰도지수로서 2.0~2.5를 제시하였고, AASHTO(1994)에서도 단일 말뚝 기초에 대하여 이와 동일한 목표신뢰도지수를 적용하고 있다. 이는 일반적으로 단일 말뚝으로 구성되는 군말뚝으로 지지되는 구조물 전체의 파괴확률을 감안하여, 단일 말뚝에 대한 상대적으로 높은 파괴확률의 허용을 고려한 값이다. 따라서 본 논문에서는 연구대상인 단일 말뚝기초 구조물에 대한 목표신뢰도지수로 2.0~2.5를 기준으로 하였다.

### 3. 말뚝 지지력의 산정

#### 3.1 말뚝 재하시험을 통한 지지력 산정

현재 국내에서는 말뚝의 지지력 판정 및 확인을 위하여 일정규모 이상의 공사에서는 말뚝재하시험을 수행할 것을 권하고 있다(구조물 기초설계기준 해설, 2003). 이는 일반적으로 정역학적 지지력 공식이나, 현장시험결과를 이용한 경험식에 의한 지지력 산정결과와는 실제 현장 지반 조건을 충분히 반영하지 못하고, 현장에서 말뚝재하시험을 통하여 산정된 지지력보다 신뢰도가 낮기 때문이다. 말뚝재하시험 결과를 통한 말뚝 지지력의 판정은 기본적으로 말뚝재하시험을 통하여 얻을 수 있는 말뚝의 하중-침하량 곡선을 통하여 이루어진다. 이와 관련하여 기존의 많은 연구자들이 다양한 하중-침하량 곡선 분석방법을 제시하였다. 일례로 영국의 BS Code에서는 말뚝 직경 10%에 해당하는 지지력을 극한 지지력의 기준으로 제시하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 지지력 기준을 말뚝 직경을 B라고 할 때, 0.1B 방법이라 명명하여 지지력 산정에 적용하였다. 이러한 말뚝의 극한 지지력 산정의 개요는 그림 2(a)와 같다.

한편, Chin(1970)은 적용하중에 대한 침하량의 비율을 통하여 말뚝의 지지력을 추정하는 방법을 제시하였

다. 이는 결국 말뚝의 극한상태에서의 지지력을 의미한다. 그림 2(b)는 Chin의 방법을 통하여 말뚝 극한 지지력을 산정하는 방법을 도식적으로 나타내고 있다.

위의 두 가지 방법은 모두 말뚝 직경 10%이상의 침하량, 즉 말뚝의 극한 지지력이 분명하게 규명되는 경우를 통하여 극한 지지력 판정을 확인하거나 추정하는 방법을 나타내고 있으나, 현실적으로 말뚝재하시험을 통하여 지반이 극한상태에 이를 때까지 재하시험을 수행하는 경우는 드물다. 따라서 말뚝의 극한지지력이 분명하게 규명되지 않는 경우는 극한 상태에 이르기 전의 규정된 지반의 항복상태를 판정하여 이 상태에서의 지지력을 항복 지지력이라 정의하여 말뚝 기초 설계에 사용한다.

De Beer(1967)와 Davisson(1972)은 위와 같이 말뚝 재하시험을 통한 하중-침하량곡선으로 통하여 명확한 말뚝의 극한 지지력을 규명하지 못하는 경우의 말뚝 지지력 산정법을 제시하였다. De Beer(1967)는 재하시험을 통한 말뚝의 하중-침하량 곡선을 각각 대수눈금으로 표시하고, 각 점을 연결한 선이 급격하게 꺾이는 지점의 하중을 지반의 항복 지지력이라 제시하였다. 반면에 Davisson(1972)은 말뚝 자체의 탄성침하량을 고려하여 지지력을 산정하는 방법을 제시하였다. 이는 말뚝의 재료 특성에 따른 말뚝 자체의 탄성 압축량과 말뚝주변 지반의 소성변형

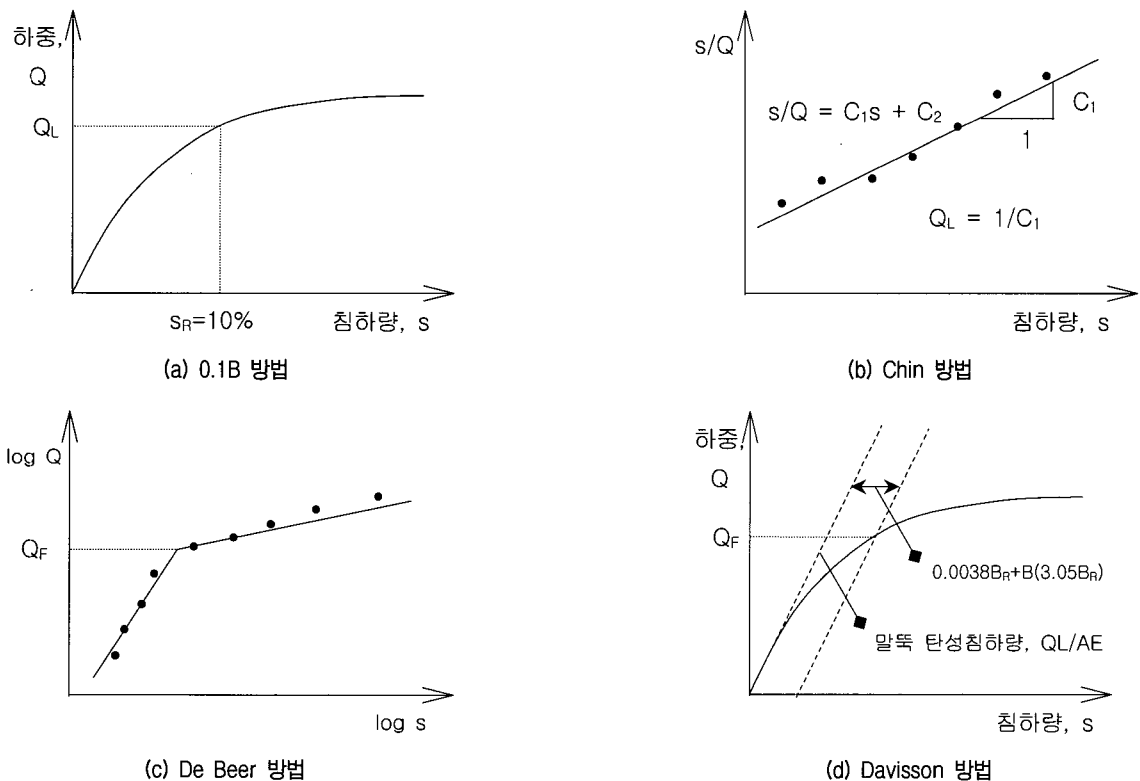


그림 2. 말뚝재하시험 결과인 하중-침하곡선을 통한 말뚝 지지력 산정방법

을 말뚝 직경에 관한 함수로 표현하여 이 두 가지 변형량, 즉 침하량에 해당하는 지지력을 극한지지력으로 판단하여 말뚝기초 설계에 적용하는 방법이다.

### 3.2 콘관입시험을 통한 지지력 산정

말뚝 재하시험을 통한 지지력 산정은 다른 방법에 비하여 비교적 실제에 가까운 말뚝 지지력을 산정할 수 있지만, 이는 시공 중에 수행되거나, 다른 방법을 통하여 지지력을 산정한 후, 이를 확인하기 위한 방법으로 활용되는 것이 일반적이다. 따라서 설계단계에서는 각종 지반조사 결과를 활용하여 말뚝의 지지력을 산정한다. 이중 표준관입시험(SPT)과 콘관입시험(CPT)에 의한 방법은 대표적인 현장시험으로 기초 지지력 산정에 많이 쓰이고 있다. 콘관입시험의 경우, 연약지반의 지반조사 등과 더불어, 말뚝설계에도 널리 적용되고 있으며, 이는 그 시험과정 및 방법이 말뚝의 타입 과정과 유사하여 말뚝기초의 거동을 비교적 잘 반영한다 간주되고 있기 때문이다.

콘관입시험을 통한 말뚝 지지력의 산정은 지반의 깊이 에 따라 측정되는 콘지지력  $q_c$ 를 매개로하여 이루어진다. 이와 관련하여 여러 연구자들에 의해 다양한 경험식이 제시되어 왔다. 그 가운데 LCPC방법(Bustamante와

Gianeselli, 1982)은 프랑스에서 수행된 시험결과를 토대로 제안된 방법으로 말뚝의 선단지지력은 물론 주면 지지력도  $q_c$ 를 이용하여 산정한다. LCPC방법에서 말뚝의 선단 지지력은 말뚝 선단에서 상부 및 하부에서 각각 1.5배의 말뚝 직경에 해당하는 영역에서의 대표 콘지지력  $q_{ca}$ 를 결정하고, 지반 및 말뚝의 종류에 따라 주어진 변환계수를 적용하여 산정할 수 있다. 주면 지지력 또한 각 지층에 해당하는 콘지지력 계수  $q_c$ 에 지반 및 말뚝의 종류에 따라 제시된 계수를 적용하여 산정된다. 이와 같은 과정을 통해 산정된 말뚝의 선단 및 주면 지지력을 종합하여 전체 말뚝 지지력을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 말뚝재하시험을 통한 말뚝의 지지력과의 비교 및 각 방법에 따른 상대적인 지지력 편차를 분석하기 위해서 앞서 설명한 LCPC방법을 통하여 각 지역에서의 말뚝 지지력을 비교하였다.

## 4. 말뚝 지지력 산정결과의 통계분석

### 4.1 말뚝 재하시험을 통한 지지력 산정

기존의 말뚝 지지력 신뢰성분석과 관련된 연구는 주로 한 지역에서 수행된 시험에 대한 분석결과를 바탕으로 이루어져 왔다. 하지만, 지반은 각 지역마다 상이한

표 1. 말뚝재하시험 및 CPT자료 현황

종류	인용문헌	말뚝 길이(m)	말뚝 직경(m)	말뚝 종류	CPT 수량	지역
항 타 말 뚝	Van Impe 등(1988)	12.02	0.6000	폐단 강관말뚝	3	벨기에
	Briaud 등(1989a)	9.14	0.2730	폐단 강관말뚝	4	미국
	Lee 등(2003)	6.87	0.3560	폐단 강관말뚝	2	미국
		7.04	0.3560	개단 강관말뚝		
	Vesic(1970)	3.01	0.4572	개단 강관말뚝	2	미국
		6.13	0.4572			
		8.87	0.4572			
		11.98	0.4572			
	Kautsoftas(2000)	14.02	0.4060	개단 강관말뚝	2	미국
	Briaud 등(1989b)	16.46	0.3706	H-형강	2	미국
		16.15	0.3706			
		17.68	0.3706		1	
		17.98	0.3706			
Witzel와 Kempfert(2005)	21.00	0.3500	콘크리트	1	독일	
Altaee 등(1992)	11.00	0.2850	콘크리트	2	이라크	
현 장 타 설 말 뚝	Van Impe 등(1988)	11.76	0.60	콘크리트	3	벨기에
	Mayne과 Harris(1993)	16.76	0.76	콘크리트	1	미국
	Matsui(1993)	36.30	1.20	콘크리트	1	일본
	Mandolini 등(2002)	24.00	0.84	콘크리트	2	이탈리아
		22.50	0.61			
	Kruizinga(1975)	12.55	0.59	콘크리트	1	네덜란드
		18.40	0.59			
Kruizinga 등(1985)	22.50	0.60	콘크리트	1	네덜란드	

특성을 지니며, 시공된 말뚝의 크기 및 설치방법에 따라 지지력 발휘 메카니즘 및 지반 거동이 각각 상이하므로 한 지역에서 제한된 말뚝에 대한 분석결과를 일반적으로 적용하기에는 다소 무리가 있다. 이에 본 연구에서는 여러 지역에서 수행된 말뚝재하시험 결과와 동일 지역에서 수행된 콘관입시험결과를 통하여 말뚝지지력을 산정하였다. 표 1은 본 연구에서 수집된 문헌들의 말뚝재하시험과 콘관입시험 수량을 요약한 것이다.

그림 3은 표 1에서 얻어진 말뚝재하시험과 콘관입시험 결과를 바탕으로 항타 말뚝과 현장타설 말뚝의 전체 지지력에 대한 산정결과를 도시한 것이다. 도표에서 점선은 말뚝재하시험과 콘관입시험 결과를 통한 지지력이 동일하게 산정되는 경우를 나타낸 것으로, 각 말뚝재하시험 분석방법에 따른 지지력 산정결과는 서로 상이한 것을 알 수 있고, 또한 콘관입시험을 통하여 산정된 지지력과 관계도 각 방법마다 조금씩 다른 것으로 나타나고 있다. 그림 3의 결과를 통하여 항타 말뚝 및 현장타설 말뚝 모두 말뚝재하시험 결과를 분석하는 각 방법에 따라 상이한 신뢰도를 지니고 있음을 알 수 있다.

## 5. 안전율과 신뢰도지수의 관계

식 (4)에서 제시된 바와 같이 신뢰도지수의 산정을 위해서는 구조물에 작용하는 하중 및 저항에 대한 통계변수는 물론, 활하중에 대한 사하중의 비율도 영향을 미친다. 그림 4는 항타 말뚝과 현장타설 말뚝에서 말뚝재하시험 결과 분석방법인 0.1B, Chin, De Beer 및 Davisson 방법의 신뢰도지수를 활하중에 대한 사하중의 비율에 대하여 산정한 결과를 보여주고 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이, 항타 말뚝과 현장타설 말뚝에서 모두 0.1B와 Chin의 방법에 의하여 산정된 신뢰도 지수가 De Beer 및 Davisson 방법에 의하여 산정된 신뢰도 지수보다 높음을 알 수 있다. 또한 활하중에 대한 사하중의 비율이 증가할 수록 신뢰도 지수는 다소 증가하는 추세를 보이지만 하중비율의 증가에 따른 신뢰도지수에 대한 영향은 점차 작아짐을 보이고 있다. 본 연구에서는 활하중에 대한 사하중의 비율에 의한 영향을 배제하기 위하여 신뢰도지수의 산정에 활하중에 대한 사하중의 비율이 영향을 미치지 않는 범위인 4.0에 대한 값을 기준으로 신

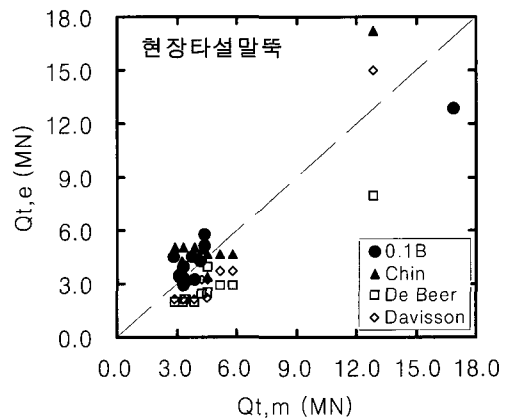
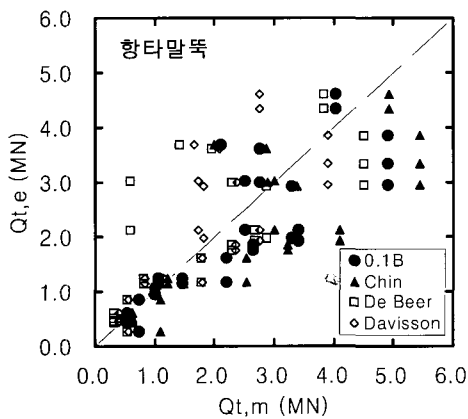


그림 3. 항타 말뚝과 현장타설 말뚝에 대한 말뚝재하시험 및 콘관입시험을 통한 지지력 산정결과

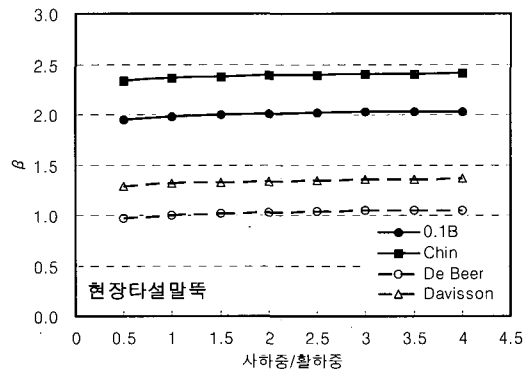
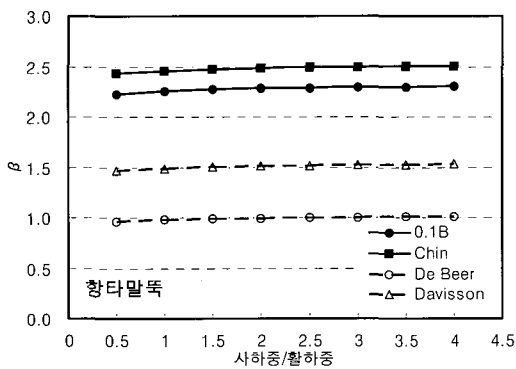


그림 4. 항타 말뚝과 현장타설 말뚝의 각 말뚝재하시험 분석방법별 사하중/활하중에 대한 신뢰도지수

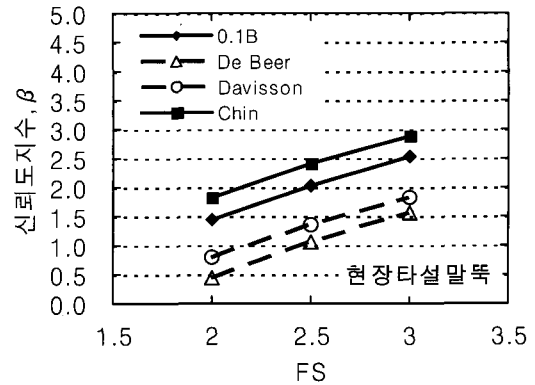
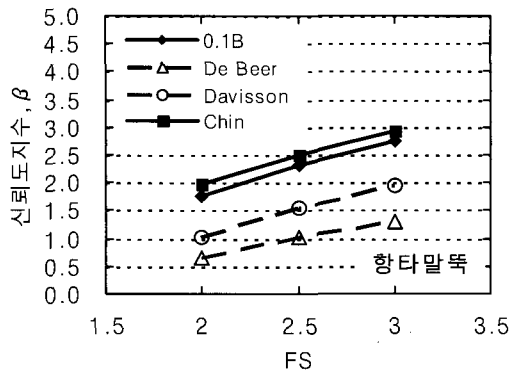


그림 5. 항타 말뚝과 현장타설 말뚝의 각 말뚝재하시험 분석방법별 안전율에 대한 신뢰도지수

뢰도지수와 안전율과의 관계를 분석하였다.

그림 5는 항타 말뚝과 현장타설 말뚝에서 말뚝재하시험 결과 분석방법인 0.1B, Chin, De Beer 및 Davisson 방법의 신뢰도지수를 안전율 2.0~3.0에 대하여 산정한 결과를 보여주고 있다. 이 도표에서 신뢰도 지수는 식 (4)로부터 산출된 것이며, 말뚝 지지력에 대한 편향계수  $\lambda$ 와 변동계수 COV를 제외한 입력변수는 식 (7)의 값을 적용하였다.

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 단일 말뚝의 목표신뢰도지수로 2.0~2.5를 적용하였다. 그림 5의 항타 말뚝에 대한 안전율과 신뢰도지수 산정결과 De Beer와 Davisson의 방법은 안전율 2.0~3.0에서 항상 목표신뢰도 지수에 미치지 못하며, 0.1B와 Chin의 방법에서도 안전율 2.5이상 적용일 경우만 목표신뢰도 지수를 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 그림 5의 현장타설 말뚝에서도 유사하게 나타나고 있다. 결국 극한지지력 산정에 대한 신뢰도가 항복 및 허용지지력 산정결과의 신뢰도 보다 높은 것을 알 수 있다. 또한 항타 말뚝과 현장타설 말뚝에서 동일한 말뚝지지력 산정방법에 대한 신뢰도 지수를 비교하면, 전반적으로 항타 말뚝에서의 신뢰도 지수가 다소 높은 것으로 보인다. 특히 Chin의 방법에 의한 항타 말뚝에서의 신뢰도 지수는 안전율 2.0~3.0에서 대부분 목표신뢰도 지수를 만족하는 범위에 놓여있다. 이를 통하여 말뚝 지지력의 안전율에 대한 신뢰성은 항타 말뚝에서 다소 우수하다고 할 수 있다.

한편, 국내의 구조물 기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2003)에 의하면, 말뚝재하시험 결과로부터 말뚝의 극한지지력을 확인할 수 있을 경우 안전율 3.0, 항복하중을 확인할 수 있는 경우 안전율 2.0을 적용토록 하고 있다. 본 연구에서 적용된 말뚝지지력 산정 방법 중 0.1B 및 Chin의 방법은 말뚝의 극한 지지력을 정의하는 방법

이고, De Beer방법은 말뚝 항복지지력을 결정하는 방법이다. Davisson 방법의 경우 이 방법을 통하여 산정된 지지력을 말뚝의 극한지지력으로 정의하는데, 이 때 안전율 2.0을 적용하여 설계지지력을 결정토록 하고 있어 산술적으로는 항복지지력과 유사한 수준의 지지력을 의미한다고 할 수 있다. 이와 같은 각기 다른 안전율의 적용은 극한 지지력이 지반의 완전한 파괴가 이루어지는 극한 상태에서의 지지력을 정의하는 것으로 극한 상태에 이르기 전의 정의된 수준의 지지력인 항복 및 허용 지지력보다 항상 크게 산정되므로 산술적인 지지력 차이를 감안하여 동일한 수준의 지지력을 고려하기 위하여 적용하는 것으로 판단된다.

그러나 그림 4에서 나타내고 있듯이, 각 지지력 수준에 따른 안전율에서의 신뢰도지수는 큰 차이를 나타내는 것으로 나타났다. 그림 5의 항타 말뚝 및 현장타설 말뚝에서 극한 지지력 적용 시, 즉 안전율 3.0에서의 신뢰도지수는 항상 목표신뢰도지수를 상회하는 것으로 나타났다. 반면에 안전율 2.0을 적용하는 항복지지력 및 Davisson법에서의 극한지지력에 대한 신뢰도 지수는 오히려 작게 산정되었다. 이러한 결과는 앞서 설명한 각 지지력 수준에 대한 안전율의 적용 의도와는 다소 상반되는 결과를 나타낸다. 즉 산술적으로 작은 지지력을 결정하는 항복 및 허용지지력에 대한 안전율은 오히려 신뢰성 측면에서 크게 적용될 필요가 있으며, 이와 반대로 극한 지지력에 대한 안전율은 경우에 따라 낮추어 적용할 수 있음을 보여준다.

## 6. 결론

본 연구에서는 국내 기초구조물 설계 기준을 근거로 말뚝 기초의 안전율에 대한 신뢰도를 분석하였다. 말뚝

시공방법에 따라 항타 말뚝과 현장타설 말뚝으로 나누어 분석을 수행하였으며, 말뚝재하시험을 통하여 지지력을 산정하는 다양한 방법 중 0.1B, Chin, De Beer 및 Davisson에 대한 신뢰성분석을 실시하였다. 각각의 방법은 말뚝의 극한 지지력과 항복 지지력 및 허용 지지력을 정의하는 방법으로써 현재 국내에서는 각각 안전율 3.0과 2.0을 적용토록 하고 있다. 각 말뚝재하시험을 통한 지지력과 비교를 위한 기준으로 말뚝 기초설계에 유용하게 사용되고 있는 콘관입시험의 결과를 통한 말뚝 지지력 결과를 사용하였다. 본 연구에서는 콘관입시험을 통한 다양한 말뚝 지지력 산정법 중 LCPC방법을 적용하였다. 일반화할 수 있는 결론을 도출하기 위해 여러 지역에서 수행된 말뚝재하시험 및 콘관입시험 결과를 통하여 말뚝 지지력을 산정하고 분석에 활용하였다. 신뢰도지수 산정을 위한 분석법으로는 일제이차모멘트 해석법(FOSM)이 적용되었으며, 이를 위한 각종 하중관련 계수들은 AASHTO(1994)에서 적용되고 있는 값을 기준으로 하였다. 이러한 과정을 통한 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) De Beer 방법을 제외한 나머지 모든 방법에 대해서 항타 말뚝에서의 신뢰도지수가 현장타설 말뚝에서의 신뢰도 지수보다 다소 크게 산정되었다. 이를 통하여 항타 말뚝의 지지력 산정결과가 현장타설 말뚝에서의 결과보다 보다 높은 신뢰도를 지니고 있음을 알 수 있다.
- (2) 목표신뢰도 지수 2.0~2.5를 기준으로 할 경우, 현행 구조물 기초설계기준에서 권유하는 말뚝의 극한 지지력 확인 시 안전율 3은 목표신뢰도 지수를 상회하지만, 말뚝의 극한 지지력을 명확하게 규명하지 못하는 경우에 대한 허용지지력 및 극한지지력 확인 시 안전율 2는 목표신뢰도 지수를 만족하지 못한 것으로 나타났다.
- (3) 실제 현장에서 말뚝의 안전율을 적용 시, 말뚝의 안정성을 확보하기 위한 목표파괴확률과 말뚝에 작용하는 하중 및 저항에 대한 확률통계 변수(변동계수, 편향계수)를 결정하여, 각각의 말뚝 지지력 확인 수준에 따라 안전율을 조정할 여지가 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 한국지반공학회 (2003), 구조물 기초설계기준 해설, 건설교통부 제정.

2. AASHTO (1994), *LRFD Bridge and Construction Specifications*, AASHTO, Washington, D.C.

3. Altaee, A., Fellenius, B. H., and Evgin, E. (1992), "Axial Load Transfer for Piles in Sand. I. Tests on an Instrumented Precast Pile", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, No.1, pp.11-20.

4. Briaud, J. L., Tucker, L. M., and NG, E. (1989a), "Axially Loaded 5 Pile Group and Single Pile in Sand", *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ICSMFE, Rio de Janeiro, pp.1121-1124.

5. Briaud, J. L., Moore, B. H., and Mitchell, G. B. (1989b), "Analysis of Pile Loading Tests at Lock and Dam 26", *In ASCE Proceedings of the Foundation Engineering Congress: Current Principles and Practice*, Evanston, Ill. June 25-29, 1989, F. H. Kulhawy, ASCE, Geotechnical Special Publication 22, Vol.2, pp.925-942.

6. Bustamante, M. and Gianeselli, L. (1982), "Pile Bearing Capacity Prediction by Means of Static Penetrometer CPT", *Proc. of 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, pp.493-500.

7. Chin, F. K. (1970), "Estimation of the ultimate load of piles not carried to failure", *Proceedings 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, pp.81-90.

8. Davisson, M. T. (1972), "High Capacity Piles", *Proceedings, Lecture Series, Innovation in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, pp.52

9. De Beer, E. (1967), "Proefondervindelijke Bijdrage tot de Studie van zand onder funderingern op stall", *Tijdschrift der Openbar Werken van het grensdrag vermogen van Beigie Nos 6-67 and 1-, 4-, 5-, 6-68*.

10. Kausoftas, D. C. (2002), "High Capacity Piles in Very Dense Sands", *Proceedings of the International Deep Foundations Congress*, O'Neill, M. W, and Townsend, F. C, Orlando, February 14-16, Vol.1, pp.632-646.

11. Kruijzinga, J. (1975), "Analysis of Test Results of Bored Piles in the Netherlands", *LGM-Mededeelingen XVII*, No. 2.

12. Kruijzinga, J., and Nelissen, H. A. M (1985), "Behavior of Board and Auger Piles in Normally Consolidated Soils", *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ICSMFE, San Francisco, August 12-16, Vol.3, pp. 1417-1420.

13. Lee, J. H., R. Salgado, and Paik, K. H. (2003), "Estimation of Load Capacity of Pipe Piles in Sand Based on Cone Penetration Test Results", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.6, pp.391-403.

14. Mandolini, A., Romandini, M., Russo, G., and Viggiani, C. (2002), "Full Scale Loading Tests on Instrumented CFA Piles", *Proceedings of the International Deep Foundations Congress*, O'Neill, M. W, and Townsend, F. C, Orlando, February 14-16, Vol.2, pp.1088-1097.

15. Matsui, T. (1993), "Case Studies on Cast-In-Place Bored Piles and Some Considerations for Design", *Proceedings of Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Van Impe, Ghent, Belgium, June 1-4, pp.77-101.

16. Mayne, P. W. and Harris, D. E. (1993), *Axially Load-Displacement Behavior of Drilled Shaft Foundations in Piedmont Residuum*, Technical Report, No. 41-30-2175, FHWA.

17. Scott, B. (2002), *Development of Load and Resistance Factor Design Method for Shallow Foundations*, Ph D thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

18. Van Impe, W., DeBeer, E. E., and Louisberg, E. (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, March20-24, 1988. pp.1-34.
19. Vesic, A. S. (1970), “Tests on Instrumented Piles, Ogeechee River Site”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.96, No.SM2, pp.561-584.
20. Withiam, J. L., Voytko, E. P., Barker, R. M., Duncan, J. M., Kelly, B. C., Musser, S. C., and Elias, V. (2001), *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Substructures*, Publication No FHWA HI-98-032, NHI Course No.13068, Fedral Highway Administration, Washington D.C.
21. Witzel. M., and Kempfert. H. J. (2005), “A Simple Approach to Predict the Load Settlement Behavior of Precast Driven Piles with due Consideration of the Driving Process”, *ASCE, Geotechnical Special Publication*, No.17, May, pp.134-156.

(접수일자 2006. 4. 28, 심사완료일 2006. 9. 18)