단일 현장타설말뚝의 가상고정점 설계를 보완한 상부기둥-하부말뚝 최적 길이비 분석

정상섭* · 김재영**

Jeong, Sangseom*, Kim, Jaeyoung **

Analysis of Optimized Column-pile Length Ratio for Supplementing Virtual Fixed Point Design of Bent Pile Structures

ABSTRACT

In this study, the virtual fixed point analysis and 3D fully modeling analysis for bent pile structures are conducted by considering various influencing factors and the applicability of the virtual fixed point theory is discussed. Also, the optimized column-pile length ratio is analyzed for supplementing virtual fixed point design and examining a more exact behavior of bent pile structures by taking into account the major influencing parameters such as pile length, column and pile diameter, reinforcement ratio and soil conditions. To obtain the detailed information, the settlement and lateral deflection of the virtual fixed point theory are smaller than those of 3D fully modeling analysis. On the other hand, the virtual fixed point analysis overestimates the axial force and bending moment compared with 3D fully modeling analysis. It is shown that the virtual fixed point analysis cannot adequately predict the real behavior of bent pile structures. Therefore, it is necessary that 3D fully modeling analysis is considered for the exact design of bent pile structures. In this study, the emphasis is on quantifying an improved design method (optimized column-pile length ratio) of bent pile structures developed by considering the relation between the column-pile length ratio and allowable lateral deflection criteria. It can be effectively used to perform a more economical and improved design of bent pile structures.

Key words : Bent pile structures, Virtual fixed point theory, 3D fully modeling analysis, Optimized column-pile length ratio, Lateral deflection

초 록

본 연구에서는 단일 현장타설말뚝의 가상고정점을 고려한 해석과 기둥-말뚝을 3차원 전체 모델링한 해석을 비교·분석하여 가상고정점 해석법의 적정성을 평가하였다. 또한, 말뚝 길이, 기둥 및 말뚝 직경, 철근비, 지반조건 등 주요 영향인자에 따라 단일 현장타설말뚝의 거동 평가를 수행하였으며, 이를 통해 가상고정점 해석을 보완한 최적 기둥-말뚝 길이비를 분석하였다.

본 연구결과, 가상고정점을 고려한 해석은 전체 모델링한 해석과 비교하여 침하량과 수평변위를 작게 예측하였으나, 반대로 축력과 휨모멘트는 가상고정점을 고려한 해석에서 크게 나타났다. 따라서 가상고정점을 통한 해석법은 실제 구조물 거동과 다른 단부조건으로 단일 현장타설말뚝의 정확한 거동을 파악하기엔 무리가 있음을 알 수 있었으며, 이에 단일 현장타설말뚝의 정확한 설계를 위해서는 3차원 전체 모델링한 해석이 필요한 것으로 판단되었다. 또한 본 연구에서는 하부 말뚝 길이와 말뚝의 허용 수평변위 관계를 통해 최적 기둥-말뚝 길이비를 분석하였으며, 이를 통해 가상고정점을 고려한 설계를 다소 보완한 경제적이고 개선된 단일 현장타설말뚝 설계를 수행할 수 있을 것으로 기대되었다.

검색어 : 단일 현장타설말뚝, 가상고정점 해석, 3차원 전체 모델링 해석, 최적 기둥-말뚝 길이비, 수평변위

* 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Yonsei University · soj9081@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 (kjyky222@yonsei.ac.kr)

Received May 8, 2013/ revised June 17, 2013/ accepted June 29, 2013

1. 서론

최근 국토의 확장에 따른 서·남해안 개발과 더불어 국도 및 고속도로의 개량, 육지와 도서지역을 연결하는 도로망의 확충 등과 관련하여 해상 대형교량, 고속철 및 경전철 등의 대형 토목구조물의 건설이 이루어지고 있으며, 이에 따른 소음·진동 등에 대한 민원 증가와 점차 복잡해지는 구조물 기초의 설계 및 시공 난이도가 높아지면서 보다 높은 기술력과 정확성이 요구되고 있는 추세이다. 이에 일부 토목구조물의 기초형식으로 지중 지장물과 간섭현상과 소음·진동문제를 최소화하는 동시에 시공성과 경제성을 향상시킬 수 있는 단일 현장타설말뚝(bent pile structures, single column drilled pier foundation, cast-in-drilled-hole shaft/column)을 적용하는 사례가 증가하고 있다.

Fig. 1과 같이, 단일 현장타설말뚝은 일반적으로 가동-캡-말뚝의 3가지 요소로 구성되는 말뚝기초와 달리 말뚝캡을 설치하지 않고 직경 1.0~3.0m의 철근 콘크리트로 말뚝과 기둥을 단일부재로 시공하는 기초를 말하며, 무리말뚝기초 공법에 비해 시공하는 말뚝의 갯수가 줄어들어 시공이 간편하고 공기를 단축할 수 있는 장점이 있다. 또한, 말뚝캡의 시공으로 인한 과도한 지반취척 없이 다양한 지반조건에 적용 가능하고, 수평하중에 대해 유연한(flexible) 거동을 보임으로써 내진 저항능력이 우수하다. 하지만, 단일 현장타설말뚝은 기둥과 말뚝이 일체되어 있는 구조인 만큼 수평하중이 작용하면 다른 기초형식에 비해 큰 수평변위가 발생하여 말뚝 재료가 소성단계를 넘어갈 수 있기 때문에, 재료의 거동 형태 및 손상 메커니즘을 파악하는 것이 매우 중요하다. 또한, 단일 현장타설말뚝의 적용이 증가하고는 있지만, 아직까지 적용 구조물의 대부분이 교량 및 경량 구조물에 국한되어 있다. 이는 국내에서는 아직까지 국외와 비교하여 시공성이나 경제성에 비해 안정성에 중점을 두는 보수적인 설계가 이루어지고 있기 때문에 대부분 대구경 무리말뚝 기초(group pile)를 적용하고 있기 때문이다.

지난 수십 년 동안 수평하중을 받는 단독말뚝과 무리말뚝에

Fig. 1. Typical Types of Bent Pile Structures

대해서는 많은 연구가 진행되어 왔다. 수평하중을 받는 말뚝 거동에 대한 대표적인 해석방법으로는 Broms법(Broms, 1964a; 1964b), 탄성법(Poulos, 1971a; 1971b) 및 p-y해석법(Matlock, 1970; Reese, 1977; O'Neill and Gazioglu, 1984; Jeong et al., 2011; Kim et al., 2011) 등이 있다. 그 중 Matlock(1970)과 Reese(1977)의 p-y해석법이 그 해석절차가 간편하여 수평하중을 받는 말뚝의 해석에 가장 일반적으로 사용되고 있다.

단일 현장타설말뚝의 경우, 국외에서는 일반적인 공법으로 연구 및 시공사례는 다양하게 진행되어 왔다(John, 2001; Kerop, 2001; Chai, 2002). 그러나 국내의 경우는 지반분야에 속한 말뚝기초의 수평, 연직 지지력 등에 관한 연구는 다수 진행되었으나, 아직까지 단일 현장타설말뚝의 시공사례가 많지 않고 단일 현장타설말뚝을 구조해석으로 국한하여 지반공학 측면에서의 연구도 미비한 실정이다. 단일 현장타설말뚝은 2004년 한국도로공사에서 국내 설계기준을 제정하고, 2004년 익산-장수간 고속도로 단양교에 시험시공을 실시한 것이 처음인 만큼 최근 들어 적용되기 시작했다. 단일 현장타설말뚝에 관한 연구로는 Lee et al.(2004)은 새로운 형식의 기초로써 단일 현장타설말뚝을 소개하였고, Son et al.(2005)은 인천대교 고가교 구간의 기초형식으로 단일 현장타설말뚝을 적용하여 평가하였다. 또한, Jeong et al.(2005; 2006)은 수평하중에 민감한 단일 현장타설말뚝의 수평거동특성에 관한 연구 및 P-Δ 효과를 고려한 단일 현장타설말뚝의 거동 연구를 수행하였고, Son et al.(2006)은 단일 현장타설말뚝의 내진해석 및 철근 설계에 대한 연구를 수행하였다. 최근에는 Kim et al.(2008)은 단일 현장타설말뚝의 수평거동특성에 관해 분석하였고, 변단면 단일 현장타설말뚝의 수평거동 분석(Sung, 2008), 단일 현장타설말뚝의 소성힌지를 고려한 최적설계법 제안(Ahn, 2010) 및 단일 현장타설말뚝의 간편해석 및 최소 철근비 분석(Kim et al., 2011) 등의 단일 현장타설말뚝 기초의 설계 및 해석방법에 관한 연구가 수행되었다. 또한 단일 현장타설말뚝 적용은 교량 및 도로교, 경전철 현장에 주로 적용되었으며, 실제 현장에 적용된 대표적인 사례로는 인천대교 고가교와 평택대교, 경기도 경전철, 전라도 도로교 등을 들 수 있다. 이와 같이, 점차 단일 현장타설말뚝의 국내 적용사례와 연구가 점차 활발히 진행됨에 따라, 국내 초장대교량의 설계기술 자립화를 위한 “초장대교량사업단”을 구성됨과 동시에(국토해양부 및 건설교통기술평가원, 2009-2014), 국내 실정에 맞는 단일 현장타설말뚝의 설계법이 개발 중에 있어 향후 최적 설계가 가능할 것으로 기대된다.

이와 같이, 단일 현장타설말뚝에 관한 연구는 점차 활발히 진행되고 있지만, 아직까지 실제 설계 및 시공에 있어서는 단일 현장타설말뚝을 단순히 기둥과 말뚝이 연속된 구조물로 간주하고 도로교설계기준(2008)의 현장타설말뚝 설계방법에 따라 설계되고 있다. 또한,

지반에 근입된 부분의 변위가 발생되어 기둥이 연성거동을 한다고 판단하고 탄성설계만으로 제한하고 있으며(한국도로공사, 2004), 지표면을 기준으로 한 하부 말뚝은 가상고정점 이론에 의해 일부만 고려하고 있다. 일반적으로 국외의 경우, FHWA(1987)에서는 단일 현장타설말뚝의 해석 모델링 방법으로 Fig. 2와 같이 탄성스프링 모델(equivalent soil spring model), 등가 고정단 모델(equivalent cantilever model) 및 등가 지반면 스프링 모델(equivalent base spring model)을 제시하고 있으며, 이 중 등가 지반면 스프링 모델이 기둥-말뚝의 상호작용을 고려하고, 실제 구조물 거동을 가장 근사적으로 묘사할 수 있는 방법이라고 평가하고 있다. 그러나 국내에서는 실제 설계 시에 등가 지반면 스프링 모델의 반복해석에 따른 복잡함 때문에 등가 고정단 모델 또는 탄성스프링 모델을 대부분 사용하고 있다.

등가 고정단 모델이란 지표면을 중심으로 하부 말뚝 기초를 수평하중에 대해 저항하는 깊이인 가상고정점($1/\beta$)까지만 고려 및 설계하는 근사적인 방법(Hutchinson et al., 2002; Jeon et al., 2006)으로서, 실제 하부 말뚝의 거동을 정확히 예측하기 어렵고 과대설계의 원인이 될 수 있다. 일반적으로 구조물은 수평하중과 수직하중에 대한 영향을 동시에 받기 때문에 수평하중만이 가정된 가상고정점 이론을 적용하게 되면, 수직하중을 고려하지 못함과 동시에 실제 말뚝의 거동을 반영할 수 없기 때문이다. 또한, 단일 현장타설말뚝에 적용되는 최소 철근비에 대한 규정도 가상고정점 이론을 기준으로 적용하는 문제점이 있다. 대개 가상고정점의 위치는 단일 현장타설말뚝의 최대 휨모멘트 발생위치보다 깊은 곳에 위치함에 따라, 가상고정점을 기준으로 상부는 기둥의 최소 철근비(1%)를 적용하고 하부는 현장타설말뚝의 최소 철근비(0.4%)를

적용하도록 하고 있으며, 경우에 따라 지표면 아래 말뚝 길이와 $1/\beta$ 값과의 차이가 작으면 모두 기둥으로 간주하도록 하고 있다(도로교설계기준, 2008). 이와 같이, 아직까지 단일 현장타설말뚝은 상부 기둥과 하부 말뚝이 일체화된 구조물인 특성상, 지반분야보다는 구조분야에서 주로 다루어져 왔으며 이에 상대적으로 지반분야에서는 연구가 미비한 실정이다. 따라서, 상부 구조-하부 기초 간의 상호작용을 고려한 보다 정확한 단일 현장타설말뚝의 설계를 위해서는 지반기술자와 구조기술자의 협업이 필요하다.

이에 본 연구에서는 지반조건, 지반강성, 말뚝직경 및 하중조건에 따라, 단일 현장타설말뚝의 가상고정점을 고려한 해석과 기둥과 말뚝을 일체화하여 전체 모델링한 해석을 비교·분석하여 가상고정점 이론의 단일 현장타설말뚝 설계에의 적용성을 평가하였다. 또한, 현재 가상고정점 이론을 통한 단일 현장타설말뚝 설계를 보완하고자 단일 현장타설말뚝 기둥-말뚝의 최적 길이비를 분석하였으며, 이를 통해 단일 현장타설말뚝 설계가 보다 경제성과 안정성을 가질 수 있을 것으로 기대된다.

2. 단일 현장타설말뚝의 가상고정점 모델 평가

2.1 가상고정점 모델(등가 고정단 모델) 이론

앞서 기술하였듯이, 지금까지 상부 구조와 하부 기초로 구성된 구조물의 설계 시 하부 기초와 지반은 주로 가상고정점을 가정하고 해석해왔으며, 이에 기초-지반의 적절한 강성을 고려하지 않은 단순히 상부 구조만이 상세히 설계되어 왔다.

단일 현장타설말뚝 설계에 주로 사용되는 가상고정점 모델이란 위에서 언급한 등가 고정단 모델을 의미하며, 지반을 탄성스프링으

Fig. 2. Modeling Methods for Bent Pile Structures

로 치환하여 계산한 결과와 동일한 말뚝두부의 반력과 휨모멘트가 발생하도록 지반 내 가상의 고정점을 결정하는 이론이다. Fig. 3과 같이, 가상고정점은 지표면 아래 $1/\beta$ 에 위치한다고 가정하여 가상고정점 이하는 말뚝길이를 무시하고 지반 변위는 더 이상 발생하지 않는다고 간주하고 단항의 횡저항 설계법을 통해 말뚝을 설계한다. 여기서, β 는 말뚝의 횡저항 특성치로서, Eq. (1)과 같다.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}} \quad (cm^{-1}) \quad (1)$$

여기서, k_H 는 수평방향 지반반력계수, D 는 말뚝의 직경, EI 는 말뚝의 휨강성을 나타낸다.

가상고정점을 결정하는데 있어서 중요한 수평방향 지반반력계수는 수평방향 재하시험에 의해 구하는 것을 원칙으로 하지만, 재하시험을 수행하기 어려운 경우에는 표준관입시험 결과인 N 치를 이용하여 Eq. (2)를 통해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} k_H &= k_{H_0} \left(\frac{B_H}{30} \right)^{-\frac{3}{4}} \quad (kN/cm^3) \\ &= \frac{\alpha E_0}{30} \left(\frac{B_H}{30} \right)^{-\frac{3}{4}} \quad (kN/cm^3) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, k_{H_0} 는 지름 30cm 강체원관에 의한 평판재하시험의 값에 해당하는 수평방향 지반반력계수, B_H 는 하중작용방향에 직교하는 말뚝의 환산 재하폭, α 는 수평방향 지반반력계수 산정에 필요한 계수(평상 시 1, 지진 시 2), E_0 는 표준관입시험의 N 치를 통한 지반의 탄성계수($E_0 = 28N$)를 의미한다.

이와 같은 현재 단일 현장타설말뚝 설계에서는 가상고정점 모델을 대부분 적용하여 근사해석을 해오고 있다. 하지만 가상고정점 모델의 정확한 개념을 파악하지 않고 설계에 적용할 경우, 몇 가지

문제점을 파악할 수 있다. 우선, 가상고정점 이론은 말뚝은 탄성 캔틸레버로, 지반은 선형 탄성체로 가정한다는 한계가 있다(지반반력이 깊이에 관계없이 일정하다고 가정). 가상고정점을 계산할 시에는 지반은 단일지반일 경우에만 적용가능하고, 가상고정점이 수평하중에만 관계된 특성치이기 때문에 수직하중에 대한 고려가 어렵다. 또한, 가상고정점을 구하기 위해서 말뚝 두부의 모멘트를 일치시켜야 한다는 이론적 근거가 부족하며, 말뚝길이에 대한 영향과는 상관없이 가상고정점이 항상 동일하다는 문제점이 있다.

이에 가상고정점 이론에 따라 하부 기초를 근사적으로 설계한다면, 상부 구조를 아무리 상세하게 설계한 해석도 지표면을 기준으로 한 상부 구조-하부 기초간의 상호작용을 적절히 반영하지 못하여 전체 구조물의 실제 거동을 예측하지 못하게 된다.

2.2 수치해석을 통한 가상고정점 모델 분석

현재 단일 현장타설말뚝 설계에 적용되는 가상고정점 모델은 실제 하부 말뚝의 특성 및 거동을 제대로 반영하지 못하는 가정사항이 많고 근사적인 해석법임을 파악할 수 있다. 이에 본 절에서는 가상고정점 모델의 적용성을 분석하고자, 단일 현장타설말뚝의 기둥과 말뚝을 하나의 단일부재로 간주하여 3차원 전체 모델링 해석결과와 비교분석하였다. 본 해석에는 지반 상용 3차원 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 3D Foundation(Ver. 2.2, 2008)을 사용하였다.

2.2.1 해석 개요

3차원 수치해석 시, 가상고정점($1/\beta$)의 위치는 위의 식 1을 이용하여 계산하였으며 가상고정점을 고려한 모델링은 가상고정점 이론에 부합하도록 가상고정점에서의 변위가 발생하지 않게 고정하였다. 참고로 지반조건에 대한 영향을 파악하고자 지표면과 가상고정점 중간지점을 기준으로 느슨한 사질토와 조밀한 사질토로 나누어진 복합지반을 고려하였으며, 현재의 가상고정점 산정식으로는 복합지반에 대한 계산을 할 수 없어 느슨한 사질토와 조밀한 사질토의 평균값을 이용하여 산정하였다.

2.2.2 해석 대상 및 적용 물성

해석 대상은 Fig. 4와 같이, 지반조건(단일지반, 복합지반) 및 지반강성(느슨한 사질토, 조밀한 사질토), 말뚝직경 및 하중조건(수평하중, 수직하중, 수직하중+수평하중)을 고려하여 분석하였다. 이 때 상부 기둥은 10m, 하부 말뚝은 30m로 적용하였다. 위에서 언급했듯이 복합지반의 경우, 지표면과 가상고정점의 중간지점을 기준으로 상부 느슨한 사질토와 하부 조밀한 사질토로 나뉘어 모델링하였다. 해석에 적용된 지반 및 말뚝조건은 Table 1과 같으며, 해석을 위한 매개변수는 Table 2와 같다. 이 때, 본 유한요소해석

Fig. 3. Virtual Fixed Point Model for Bent Pile Structures

에서 지반은 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb의 구성 법칙을 만족시키는 재료로 가정하였으며, 말뚝은 탄성모델(linear-elastic)을 적용하였다. 말뚝과 지반 사이의 경계면(interface)에는 PLAXIS에서 제공하는 접촉요소(경계면 강도 감소계수)를 사용하여 지반과 말뚝

Fig. 4. Soil Profile and Bent Pile Structures Embedment for Virtual Fixed Point Model

사이의 미끄러짐(slip behavior) 및 말뚝에서 발생할 수 있는 인장력에 의한 지반-말뚝 분리현상(gap behavior)을 모델링하였다. 대상 지반은 대표적인 사질토 범위의 값을 산정하여 적용하였으며, 말뚝 직경은 일반적인 단일 현장타설말뚝의 직경범위(1,000~3,000mm)에 해당하는 1,000 및 2,000mm를 사용하였다. 해석 영역은 응력 및 변위의 영향이 거의 없는 영역까지 확장하여 경계조건을 설정하였다. 좌우 경계면은 말뚝 직경의 10배, 하부 경계면은 말뚝 길이의 1.5배를 해석영역으로 적용하였다. 단, 지하수위의 영향은 고려하지 않았다. Fig. 5는 대표적인 단일 현장타설말뚝의 가상고정점 해석과 전체 모델링 해석을 위한 모델링이다.

본 해석에서는 재료의 자중을 고려한 초기 응력분포를 산정하여 초기 평형단계(initial equilibrium state)를 구현하고 초기단계 이후, 단일 현장타설말뚝에 수직 및 수평하중을 적용하여 거동을 분석하였다. 단, 수치해석에서는 기초의 근입에 의한 근입효과, 주변지반의 응력변화 및 말뚝에 발생하는 잔류하중 등을 구현하기 어려워 고려하지 않았다.

2.3 가상 고정점 모델의 분석 결과

본 절에서는 단일 현장타설말뚝을 단일부재로 전체 모델링한 해석 결과와 가상고정점을 고려한 해석결과를 비교·분석하여 가상 고정점 모델의 설계에의 적용성을 검토하였다.

Table 1. Material Properties for Numerical Analysis

Soil condition		Load transfer analysis	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$c(\text{kN/m}^2)$	$\phi(\text{deg})$	K(kPa/m)	ε_{50}
Sand	Loose	O'Neill	18.1	-	32	10,000	-
	Dense		19.1	-	40	34,000	-
Clay	Soft	O'Neill	17.6	40	-	20,000	0.02
	Stiff		18.6	120	-	136,000	0.005
Weathered rock		Bi-linear	20.9	-	-	423,000	-
Bent pile structures			concrete		steel		
Young's Modulus (kPa)			2.46×10^7		2×10^8		
Unconfined compressive strength (kPa)			27,000		400,000		
Steel rebar type			-		H32		
Cross-section area of steel rebar (mm ²)			-		805		
Thickness of steel rebar (mm)			125(outer) / 225(inner)				

Table 2. Material Parameters for Virtual Fixed Point Model

Condition	Variables
Soil condition	Single layer (Loose sand or Dense sand) Multi layer (Loose sand+Dense sand)
Soil stiffness	Loose sand / Dense sand
Pile diameter (mm)	1,000 / 2,000
Loading type	Lateral loading / Axial loading / Axial loading+Lateral loading

단일 현장타설말뚝의 가상고정점 설계를 보완한 상부기둥-하부말뚝 최적 길이비 분석

(a) Virtual Fixed Point Modeling Analysis($L_p=1/\beta$)

(b) 3D Fully Modeling Analysis($L_p=30m$)

Fig. 5. Modeling for Bent Pile Structures

(a) Bending Moment

(b) Lateral Displacement

Fig. 6. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Lateral Loading (Dense Sand and $D=1,000mm$)

(a) Bending Moment

(b) Lateral Displacement

Fig. 7. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Lateral Loading (Loose Sand and $D=1,000mm$)

Fig. 8. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Lateral Loading (Dense Sand and D=2,000mm)

Fig. 9. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Lateral Loading (Multi Layer and D=2,000mm)

2.3.1 수평하중 분석

수평하중을 받는 단일 현장타설말뚝의 경우, Figs. 6~9와 같이 가상고정점 해석과 전체 모델링 해석의 휨모멘트 차이는 거의 발생하지 않았으나, 가상고정점 해석 결과가 다소 크게 나타났다. Fig. 9와 같이, 두 해석방법의 휨모멘트는 복합지반인 경우에 가장 큰 차이를 보였으며, 가상고정점 해석에서의 최대 휨모멘트 위치는 전체 모델링 해석인 경우보다 깊은 위치에서 발생하였다. 또한, 복합지반의 경우에는 최대 휨모멘트 이후부터 휨모멘트가 거의 감소하지 않아, 두 해석방법의 결과 차이가 증가하였다. 수평변위도 휨모멘트와 마찬가지로 두 해석방법의 큰 차이는 보이지 않았으나, 지반조건이 달라지는 경우에는 단일 현장타설말뚝 두부에서 다소 큰 차이를 보였다. 또한, 전체 모델링 해석에서는 가상고정점 이상의 깊이에서도 수평변위가 발생하는 것으로 나타나 가상고정점의 기

본 개념에 부합되지 않았으며, 따라서 가상고정점에서는 발생하는 변위가 없다는 가정은 적절하지 않다고 판단된다. 본 해석 결과, 수평하중이 작용하는 경우에는 대체로 두 해석방법 결과는 큰 차이를 보이지 않았지만, 가상고정점 이후의 깊이에서도 변위가 발생하고 최대 휨모멘트 이후에 휨모멘트의 차이가 증가한다는 점에서 수평하중을 기본 개념으로 내포하는 가상고정점 모델이 단일 현장타설말뚝의 실제 거동을 정확히 반영하지는 못하는 것을 알 수 있었다.

2.3.2 수직하중 분석

수직하중이 작용하는 경우, 단일 현장타설말뚝에서 발생하는 축력과 침하량을 통해 단일부재로 전체 모델링한 해석 결과와 가상고정점을 고려한 해석을 비교·분석하였다. 축력과 침하량은

위에서 검토한 휨모멘트 및 수평변위보다 두 해석법의 차이가 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이는 수평하중과 관련한 가상고정점 모델이 수직하중의 영향은 제대로 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

Figs. 10~13과 같이, 축력의 경우에 두 해석방법의 결과 모두 심도에 따라 점진적으로 감소하였으며, 지표면 이상의 기둥부에서는 동일하였다. 그러나, 지표면 이하 말뚝부에서는 심도가 깊어짐에 따라 가상고정점을 고려한 해석의 축력 감소폭이 전체 모델링한 해석에 비해 매우 작았으며, 느슨한 지반인 경우에는 더 큰 차이를 보였다. 또한, 가상고정점 해석은 복합지반일 경우에 지반종류가 바뀌는 지점에서 축력이 오히려 증가하는 것을 볼 수 있었다. 심도별 발생 침하량은 가상고정점 해석과 전체 모델링 해석의 결과 차이가

가장 큰 것으로 나타났으며, 특히 가상고정점 해석은 가상고정점에서의 침하량이 발생하지 않는 것을 확인하였다. 두 해석방법 모두 지반이 연약하거나 말뚝 직경이 감소할 경우에 침하량이 더 크게 발생하였으며, 결과 차이는 최소 2배에서 최대 5배까지 발생하였다. 이를 통해, 수평하중을 받는 말뚝이 단일지반에 근입되어 있는 경우에 적용 가능한 가상고정점 모델의 한계점이 잘 나타난다고 판단된다. 하지만, 실제 현장에서는 수평하중만이 작용하지도 않을 뿐 아니라 하나의 동일한 지반으로 구성되어 있지도 않다. 따라서 가상고정점 모델을 단일 현장타설말뚝 설계에 그대로 적용할 경우, 수직하중 및 지반조건의 영향을 고려하지 못해 말뚝 거동을 정확히 파악하지 못하며 과대설계로 인한 비경제적인 설계가 이루어질 가능성이 있다.

Fig. 10. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Axial Loading (Dense Sand and D=1,000mm)

Fig. 11. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Axial Loading (Loose Sand and D=1,000mm)

Fig. 12. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Axial Loading (Dense Sand and $D=2,000\text{mm}$)

Fig. 13. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Axial Loading (Multi Layer and $D=2,000\text{mm}$)

2.3.3 복합하중 분석

일반적으로 구조물에는 수평하중과 수직하중이 동시에 작용하게 되며, 따라서 실제 설계에서는 수직하중과 수평하중이 모두 고려되어야 할 필요가 있다. 이에 본 절에서는 복합하중을 받는 경우에 대한 해석을 수행하였다.

해석 결과, Figs. 14~17에서와 같이 수평변위는 2.3.1절의 수평하중만 작용하는 경우보다 다소 크게 발생하였고 두 해석방법의 결과 차이도 증가하였다. 또한, 다층지반인 경우에 수평변위의 차이는 증가하여, 전체 모델링 해석에서는 가상고정점 이상의 깊이에서도 수평변위가 발생하는 것으로 나타나 가상고정점이 본 말뚝의 거동을 정확히 반영하지 못하는 것을 알 수 있었다. 침하량의 경우, 2.3.2절의 수직하중만 작용하는 경우보다는 두 해석방법의

차이가 감소하는 경향을 보였으나 여전히 가상고정점 해석에 비해 전체 모델링한 해석에서 크게 발생하였으며, 지반강성이 약해지거나 말뚝직경이 작아짐에 따라 침하량이 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 결론적으로, 복합하중이 작용하는 경우의 두 해석방법의 결과 차이는 수직하중만 작용할 때보다는 작게 나타나지만 수평하중만 작용하는 경우보다는 큰 차이를 보였다.

따라서 가상고정점 모델은 발생하는 수직 및 수평변위를 임의의 가상고정점을 통해 억제시키고 이로 인해 부재력이 크게 작용하여 실제 말뚝의 거동을 정확히 반영하지 못하는 것을 알 수 있었다. 이에 실제 단일 현장타설말뚝을 설계 시에는 가상고정점 해석에 대한 충분한 검토를 통해 적용 여부를 판단해야 할 것으로 판단된다.

단일 현장타설말뚝의 가상고정점 설계를 보완한 상부기둥-하부말뚝 최적 길이비 분석

Fig. 14. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Combined Loading (Dense Sand and $D=1,000\text{mm}$)

Fig. 15. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Combined Loading (Loose Sand and $D=1,000\text{mm}$)

Fig. 16. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Combined Loading (Dense Sand and $D=2,000\text{mm}$)

(a) Lateral Displacement

(b) Settlement

Fig. 17. Virtual Fixed Point Analysis and 3D Fully Modeling Analysis Under Combined Loading (Multi Layer and D=2,000mm)

(a) Subsurface Soil Profile and Pile Embedments

(b) Lateral Load-Deflection Curves

Fig. 18. Soil Profile and Measured Results in Field Load Test Site

2.4 현장시험 사례 분석을 통한 검증

본 절에서는 현장시험 사례와의 비교·분석을 통해 앞서 수행한 두 해석법이 실제 단일 현장타설말뚝 거동을 정확히 반영할 수 있는지 평가하고자 한다. Fig. 18(a)와 같이, 인천 지역에서 실시된 2본의 단일 현장타설말뚝의 수평재하시험 자료(Jeon et al., 2009)를 토대로 분석하였다. 본 시험에 적용된 말뚝은 모두 풍화토 지반에 근입되어 있고, 말뚝 직경(D_p) 1,000mm, 기둥 직경(D_c) 850mm 또는 1,000mm, 말뚝 길이 11m이며, 기둥 길이는 4m로 모두 동일하다. 특히 시험말뚝 2본의 경우, 변단면 특성을 고려하기 위한 말뚝으로 적용되어 기둥 직경(D_c)은 850mm로 말뚝 직경보다 작은 변단면 구조를 가지고 있다. 시험말뚝에 적용된 수평하중은 각 하중단계마다 15분간 지속하여 단일 현장타설말뚝 두부에서 발생하는 수평변위를 확인하였으며, 이 때 수평하중의 크기는 말뚝

별로 최대 300~500kN으로써 재료의 파괴가 일어나기 이전의 항복 거동을 볼 수 있는 설계하중 이상을 적용하였다. 시험말뚝의 제원 및 현장조건은 Table 3에 나타내었다. 또한 현장시험 결과와의 비교·분석을 위해 PLAXIS 3D Foundation을 사용하여 현장조건과 동일하게 수치해석을 수행하였다. 이 때, 시험말뚝의 가상고정점은 Eq. (1)을 통해 산정하였으며, 지표면 이하 5m에 위치한 것으로 적용하였다.

Fig. 18(b)는 단일 현장타설말뚝 2본에 대해 현장시험과 수치해석을 통한 수평하중-변위 관계를 나타낸다. 1번 시험말뚝은 말뚝 직경과 기둥 직경이 동일하고 소성관지 부분에 추가적인 보강이 없는 일반적인 형태로서, 하중 350kN(수평 변위 약 70~90mm 부근)에서 항복이 일어났음을 알 수 있었다. 기둥 직경과 말뚝 직경이 다른 변단면 구조를 가지는 2번 말뚝의 경우, 초기 수평

Table 3. Material Properties in Field Load Test Site

Site	Type		Material Properties							
			$\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	$c_u(\text{kN/m}^2)$	$\phi(\text{deg})$	ν	$f_c(\text{MPa})$	$f_y(\text{MPa})$	$K(\text{MPa/m})$	$E(\text{MPa})$
Incheon (2009)	Pile	Concrete	24.5	-	-	0.2	45.0	-	-	26,000
	Soil	Weathered soil 1	16.8	29.6	29.6	0.45	-	-	6.79	-
		Weathered soil 2	16.7	33.6	29.1	0.45	-	-	24.4	-
		Weathered soil 3	19.4	42.0	31.0	0.45	-	-	61.0	-

하중-변위 기울기는 1번 말뚝과 거의 비슷하지만, 보다 낮은 하중인 220kN 정도에서 항복이 발생하였다. 현장시험과 수치해석을 비교한 결과, 수치해석을 통한 수평하중-변위 곡선이 현장시험 결과보다 다소 크게 예측하는 것으로 나타났으나, 단일 현장타설말뚝 전체를 모델링한 해석은 가상 고정점을 고려한 해석보다 항복하중 이하의 거동(수평 하중-변위 곡선의 초기 기울기) 및 항복하중 이후의 거동 모두를 잘 예측함을 알 수 있었다. 이는 가상고정점 모델은 가상 고정점 위치에서 발생하는 변위를 억제시킴과 동시에 상대적으로 말뚝 길이가 짧아 강성말뚝과 같은 거동을 보여 실제 말뚝의 거동과는 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 따라서, 단일 현장타설 말뚝의 실제와 같은 거동을 분석하기 위해서는 기둥-말뚝을 전체 모델링한 해석이 필요함을 알 수 있었다.

3. 단일 현장타설말뚝 거동 분석을 위한 영향인자 매개변수 연구

본 연구에서는 단일 현장타설말뚝의 비선형 거동 특성을 파악하기 위하여, Fig. 19와 같은 지반조건에 영향, 상부 기둥의 길이에 따른 세장비 영향, 기둥과 말뚝의 직경비 영향을 비교분석하였다.

3.1 해석 개요

본 연구에서는 단일 현장타설말뚝의 거동특성을 파악하기 위해, 지반조건, 세장비 및 기둥-말뚝 직경비에 대한 영향을 분석하였다. 본 해석에 적용된 지반 및 말뚝조건은 앞서 해석에 적용된 Table 1과 같으며, 본 연구의 해석을 위한 영향인자는 Fig. 19와 같다. 참고로 최대 수평하중은 각 해석마다 말뚝보다 지반의 파괴가 먼저 발생하면서 해석이 수행되지 않는 상태인 항복하중까지를 고려하였다. 본 해석에서는 beam-column 이론을 기반으로 한 FB-Multiplier(Ver. 4 2012) 프로그램을 사용하였다.

3.2 지반조건에 따른 영향

지반조건에 따른 단일 현장타설말뚝의 거동 분석을 위해, Fig. 19(a)와 같이 총 8가지 지반조건(연약한 점성토, 견고한 점성토, 느슨한 사질토, 조밀한 사질토 및 (상부) 각 4가지 종류의 지반+(하부) 풍화암)에 대해서 해석을 수행하였다. 이 때 작용하는 하중은 수평하중 700kN과 수직하중 1,000kN을 동시에 적용하였고, 기둥 길이(L_c) 10m, 말뚝 길이(L_p) 30m 및 기둥과 말뚝 직경(D)은 2m를 고려하였다.

수평변위는 Fig. 20(a)와 같이 지반이 연약할수록 상대적으로

Fig. 19. Soil Profile and Bent Pile Structures Embedment for Influencing Parameters

크게 발생하며 점성토의 경우 그 차이가 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 단일 현장타설말뚝의 거동특성상 지표면 부근에 위치한 지반의 영향이 크므로 지반의 강성이 약해질수록 수평변위는 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 국내 지반 특성상 말뚝 기초가 풍화암 이상에 근입되어 있는 경우가 많으므로 이를 고려한 해석을 수행하였으며, 해석 결과 단일 지반인 경우보다 수평변위가 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 상부 지반이 단단한 경우보다 연약한 경우에 수평변위의 감소폭이 더 큰 것을 알 수 있었으며, 연약한 점성토가 상부에 존재할 경우에 가장 크게 감소하였다.

휨모멘트의 경우도 Fig. 20(b)에서 보는 바와 같이 수평변위와 마찬가지로 지반이 약해질수록 감소하는 것으로 나타났으며, 연약한 점성토 지반에서 차이가 가장 크게 발생하였다. 또한 지반이 단단할수록 최대 휨모멘트는 지표면 부근에서 발생하며, 반대로

지반강성이 약해질수록 심부에서 발생하는 것으로 나타났다. 풍화암에 근입되어 있는 경우, 수평변위 결과와 마찬가지로 휨모멘트가 감소하는 것을 알 수 있었으며, 상부가 연약한 점성토 또는 느슨한 사질토일 경우에 감소폭이 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 모든 경우에서 최대 휨모멘트는 지표면 이하 2~3D(D는 말뚝직경, 2m) 이내에 존재함을 알 수 있었다.

3.3 세장비에 따른 영향

본 절에서는 기둥의 직경과 길이비로 정의되는 세장비 영향에 따라 단일 현장타설말뚝의 거동을 파악하기 위해, Fig. 19(b)와 같이 도로교설계기준(2008)에서 제시한 장단주 기준에 따라 기둥의 높이를 각각 5m, 10m, 25m로 구분하여 해석하였다. 적용된 하중은 수직하중을 1,000kN으로 고정된 후 수평하중은 3.1절에서

Fig. 20. Effect of Soil Condition on Lateral Pile Behavior

Fig. 21. Effect of Slenderness Ratio on Lateral Pile Behavior

언급했듯이 항복하중을 선정하여 해석에 적용하였다.

세장비에 따른 단일 현장타설말뚝 두부에서의 수평변위를 Fig. 21(a)에 도시하였다. 결과 그림에서 볼 수 있듯이, 세장비가 커질수록 수평변위는 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기둥의 길이가 증가하게 되면, 단일 현장타설말뚝이 수평방향 휨에 대한 지배적인 영향을 받음으로써 연성거동을 보이기 때문이다. 또한, 단주에서는 재료의 항복거동이 수평변위에 큰 영향을 미치지만, 장주일 경우에는 상대적으로 구조적인 비선형 거동이 강한 영향인자로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 21(b)는 세장비에 따른 최대 휨모멘트를 도시하였는데, 최대 휨모멘트는 모든 경우에서 지표면 이하 약 $2D_p$ 부근에서 발생함을 알 수 있었다. 또한, 최대 휨모멘트 크기는 상대적으로 다른 영향인자에 비해 세장비의 영향이 미비하였다. 이는 지중부에 발생하는 최대 휨모멘트의 경우, 지반의 반력과 관련이 크기 때문에 지상부 기둥과 관련된 세장비는 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 판단된다.

3.4 기둥-말뚝 직경비에 따른 영향

California department of transportation(Caltrans, 2006)에서 작성된 seismic design criteria ver.1.4(2006)에 따르면 변단면을 가지거나 기둥과 말뚝 접합부에 케이싱을 보강한 단일 현장타설말뚝의 경우에는 말뚝기둥의 강성 차이로 인하여 기둥-말뚝 접합부가 구조적으로 취약해지고, 지중부에 발생하던 최대 휨모멘트가 지상부 기둥 또는 기둥-말뚝 접합부로 유도된다고 보고하고 있다. 이는 결국 최대 휨모멘트 위치로 정의되는 소성힌지 발생위치가 지중부가 아닌 지상부에서 발생하므로 육안으로 확인 가능하여 유지보수가 용이한 반면, 소성힌지의 형성 길이가 상대적으로 짧아져 콘크리트

트의 압축파괴가 빨리 발생하여 소성능력이 감소하고 상대적으로 취성적(brittle)인 거동이 예상되는 단점이 있다(Caltrans, 2006).

이에 최근에는 지상부 기둥 직경을 말뚝 직경보다 작게 설계하여 지상부 단면력을 작게 하는 단일 현장타설말뚝의 시공이 많이 이루어지고 있다. 그러나 기둥-말뚝의 직경을 포함한 단면설계가 적절히 이루어지지 않는다면 지상부 기둥 단면력의 상대적 크기에 따라 소성힌지의 지상부 유도가 이루어지지 않을 수도 있으며, 지중부 말뚝의 직경이 필요 이상으로 과다하게 설계될 수도 있다.

이에 본 절에서는 Fig. 19(c)와 같이 수직하중 1,000kN과 말뚝 재료보다 지반이 먼저 파괴될 때까지의 최대 수평하중(항복하중)을 동시에 받는 단일 현장타설말뚝을 대상으로 해석을 수행하여 기둥-말뚝 직경비에 따른 거동특성을 분석하였다. 본 해석에 적용된 단일 현장타설말뚝은 앞선 해석과 동일하게 기둥 길이 10m, 말뚝길이 30m이며, 지반물성 및 말뚝재료 물성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 기둥의 직경은 말뚝 직경과 동일한 2m부터 1.75m, 1.5m까지 감소시키면서 해석을 수행하였다.

Fig. 22는 지상부 기둥의 직경변화에 따른 단일 현장타설말뚝의 심도별 수평변위 및 휨모멘트를 나타낸다. 해석결과, 단일 현장타설말뚝의 수평변위는 기둥 직경이 감소함에 따라 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 휨모멘트의 경우도 수평변위와 마찬가지로 기둥 직경이 감소함에 따라 작아지는 것을 알 수 있었다. 또한, 기둥 직경의 변화에 따라 수평변위가 기둥 두부와 지표면(말뚝두부)에서 모두 큰 차이가 발생하는 것을 통해, 단일 현장타설말뚝의 기둥 직경이 감소하는 구조적인 변화는 앞선 3.2절의 기둥 길이가 변하는 경우보다 하부 말뚝의 거동에 미치는 영향이 큰 것으로 판단되었다.

Fig. 22. Effect of Column-Pile Diameter Ratio on Lateral Pile Behavior

4. 최적 기둥-말뚝 길이비 분석

4.1 최적 기둥-말뚝 길이비 조건

앞서 기술하였듯이, 상부 기둥과 하부 말뚝이 일체화된 단일 현장타설말뚝의 설계에서는 구조분야에서 주로 다루왔으며, 하부 지반 및 말뚝은 가상고정점 모델을 통해 고려해왔다. 이에 기초-지반의 적절한 강성을 고려하지 않고 근사적으로 설계함에 따라 상부 구조-하부 기초간의 상호작용을 적절히 반영하지 못하여 전체 구조물의 실제 거동을 예측하지 못하게 되는 결과를 볼 수 있었다. 따라서, 일반적으로 수치해석을 이용하여 구조물의 거동을 분석하기 위해서는 지반-기초의 상호작용을 고려한 3차원 전체 모델링 해석법이 가장 정확한 방법이라고 할 수 있다. 그러나 가상고정점을 고려한 설계의 부정확성을 해결하고자 설계 시 하부 말뚝 전체를 고려한 해석은 많은 시간과 복잡성으로 인해 효율성이 떨어지고, 사공 시의 비용과 시간적인 측면에서도 비경제적이고 과다한 설계가 될 수 있다.

Fig. 23. Soil Profile and Bent Pile Structures Embedment for Optimized Column-Pile Length Ratio

Table 4. Material Parameters for Optimized Column-Pile Length Ratio

Condition	Variables
Column length (mm)	1,000
Pile length (mm)	500 / 800 / 1,000 / 1,500 / 2,000 / 3,000 / 4,000
Column and pile diameter (mm)	2,000 / 2,500
Steel reinforcement ratio (%)	1.0 / 1.5 / 2.0
Soil condition	Soft clay+(weathered rock) Stiff clay+(weathered rock) Loose sand+(weathered rock) Dense sand+(weathered rock)

이에 본 연구에서는 전체 모델링의 어려움과 가상고정점 해석의 부정확성을 피하고, 구조적으로 안정성을 만족하는 범위 내에서 가상고정점 이론을 통한 설계방법을 보완하고자 최적의 상부 기둥-하부 말뚝 길이비를 분석하였다. 일반적으로 하부 기초의 설계에서는 상부 구조물의 안정성에 문제가 없는 범위 내에서 허용 변위기준이 만족하는지를 검토하고 있다. 이에 Fig. 23과 같이, 수직하중과 수평하중을 동시에 받는 단일 현장타설말뚝의 기둥 길이(L_c)를 10m로 고정하고, 말뚝의 길이(L_p)를 총 7가지(5, 8, 10, 15, 20, 30, 40m)로 변화시키면서 말뚝 두부에서의 수평변위를 검토하여 수평변위 기준에 만족하는지를 평가하였다. 최적 기둥-말뚝 길이비 (L_c/L_p)를 분석하기 위한 영향인자(말뚝 길이, 기둥 및 말뚝 직경, 철근비, 지반조건)는 Table 4에 나타내었다. 본 해석은 beam-column 이론을 기반으로 한 FB-Multiplier를 사용하여 수행하였으며, 이때 지반은 말뚝-지반의 상호작용을 효과적으로 고려하기 위해 독립된 비선형 지반 스프링으로 표현되는 하중전이곡선(nonlinear p-y curves)을 적용하였다. 단일 현장타설말뚝은 지상부의 기둥과 지중부의 말뚝이 일체화된 형태이고 이를 고려하여 가장 정확한 거동을 분석하기 때문에 선형 탄성모델을 적용하여 하나의 단일부재로 모델링하였다. 최적 기둥-말뚝 길이비를 산정하기 위한 과정은 다음과 같다.

- (1) 기둥-말뚝 길이비($L_c/L_p=0.25, 0.33, 0.5, 0.67, 1.0, 1.25, 2.0$)를 변화시키면서 수직하중과 수평하중을 동시에 고려한 단일 현장타설말뚝 해석
- (2) 말뚝 두부(지표면)에서 발생하는 수평변위 확인
- (3) 말뚝 두부에서의 수평변위와 허용 수평변위 기준 $0.01D$ (말뚝직경의 1%)의 비가 1.0 이상일 경우, 말뚝의 허용 수평변위기준을 만족하지 않는 것으로 판단

일반적으로 말뚝의 허용 수평변위 기준은 38mm(AASHTO, 2002; FHWA, 1987) 또는 말뚝직경의 1%(도로교설계기준, 2008)을 적용하고 있다. 본 연구에서는 해석 시 고려한 단일 현장타설말뚝의 직경이 2,000mm 및 2,500mm의 대구경인 것을 감안하여, 보다 안전측으로 말뚝직경의 1%를 허용 수평변위 기준으로 적용하였다.

4.2 지반조건에 따른 최적 기둥-말뚝 길이비 분석

Figs. 24~26은 단일 현장타설말뚝의 최적 기둥-말뚝 길이비 (L_c/L_p) 결과를 나타낸다. 여기서, x축은 기둥 길이(L_c)와 말뚝 길이(L_p)의 비를 의미하며, y축은 말뚝 두부(지표면)에서의 수평변위(δ)와 허용 수평변위 기준($0.01D$)의 비를 나타낸다. 또한, 최적 기둥-말뚝 길이비가 클수록 기둥 길이 10m에 대한 설계 시 고려되어야 할 말뚝의 길이는 감소함을 의미한다.

Fig. 24. Optimized Column-Pile Length Ratio in Sand

Fig. 25. Optimized Column-Pile Length Ratio in Clay

4.2.1 사질토 지반

조밀한 사질토에서의 단일 현장타설말뚝 직경이 2.0m일 경우에는 Fig. 24(a)와 같이, 기둥과 말뚝의 길이비 1.0, 즉 말뚝 길이가 점차 감소하여 기둥 길이와 동일할 때까지 수평변위 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 다시 말해, 말뚝 길이가 기둥 길이보다 길거나 또는 최소한 기둥 길이와 같을 경우에 변위에 대한 안정성은 충분히 확보된다고 판단할 수 있다. 이는 앞선 2장에서 살펴본 조밀한 사질토 지반에서 하부 말뚝을 가상고정점 5.8m까지만 고려하는 것이 충분치 못한 것임을 알 수 있었다. 직경 2.5m에서는 수평변위 기준을 만족하기 위한 기둥-말뚝의 길이비가 1.25로 직경 2.0m일

경우보다 다소 큰 것으로 나타났다. 이는 기둥에 비해 말뚝 길이가 짧아도 구조적으로 안정성이 확보된다는 것으로써, 직경이 커지게 되면 상대적으로 말뚝 재료의 강성(부재력)이 증가하면서 수평변위에 대한 저항력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 이 경우에도 요구되는 말뚝의 최소한의 길이는 8m로 나타나, 가상고정점 모델을 통한 말뚝 길이 5.8m보다는 큰 것으로 나타났다. 느슨한 사질토의 경우, Fig. 24(b)와 같이 기둥-말뚝 길이비는 직경 2.0m에서는 0.5, 직경 2.5m에서는 0.67로 나타났다. 이는 직경 2.0m의 단일 현장타설말뚝은 기둥 10m에 대해 말뚝은 최소 20m 이상, 직경 2.5m일 경우에는 말뚝 길이를 최소 15m까지 고려되어야

구조적으로 문제가 없다는 것이다. 본 결과 역시 가상고정점 모델을 통한 말뚝의 길이 7.8m를 훨씬 상회하는 결과로서, 가상고정점까지만 하부 말뚝을 고려하면 구조적인 안정성 확보가 어려울 것으로 판단된다.

4.2.2 점성토 지반

Fig. 25와 같이, 점성토 지반에서는 요구되는 최소 말뚝의 길이가 사질토 지반에서보다 큰 것으로 나타났다. 견고한 점성토의 기둥-말뚝 길이비는 직경 2.0m에서는 0.67, 직경 2.5m일 경우에는 1.0으로 나타나, 조밀한 사질토보다 요구되는 말뚝 길이가 약 50% 증가하였다. 또한, 연약한 점성토 지반에서는 직경 2.0m의 경우 0.33~0.5와 직경 2.5m의 경우 0.5~0.67의 길이비를 보였으며, 이에 설계 시 필요한 최소 말뚝 길이는 최대 30m로 말뚝 전체를 고려해야 만족하

는 것으로 나타났다. 또한, 앞선 사질토 지반과 마찬가지로 가상고정점까지만 말뚝을 고려한다면, 실제 단일 현장타설말뚝의 거동을 제대로 반영하지 못하고 충분한 안정성이 확보되지 않을 것으로 판단되었다.

4.2.3 풍화암에 근입된 경우

국내 현장에서는 대부분 말뚝 기초를 풍화암에 근입하여 시공하고 있으며, 따라서 실제 현장조건에 맞게 풍화암에 근입된 경우를 고려해야 할 필요가 있다. 이에 본 절에서는 단일 현장타설말뚝이 풍화암에 근입된 경우에 대한 해석을 수행하였다.

해석 결과, Fig. 26과 같이 앞선 4.2.1절 및 4.2.2결과 비교하여 전체적으로 고려되어야 할 최소 말뚝 길이가 감소한 것을 알 수 있었다. 특히, 상부 지반이 연약한 점성토 또는 사질토인 경우에

Fig. 26. Optimized Column-Pile Length Ratio in Weathered Rock-Socketed

더욱 큰 효과를 보여, 상부에 느슨한 사질토가 존재할 경우 직경 2.5m에서는 최적 기둥-말뚝 길이비는 1.0, 직경 2.0m일 경우에는 0.67로 나타났다. 또한, 상부 지층이 연약한 점성토인 경우, 최적 기둥-말뚝 길이비는 직경 2.0m에서 0.5, 직경 2.5m에서는 0.67로 나타나 단일층으로 구성되어 있을 때보다 약 33~50% 정도 증가함을 알 수 있었다. 이는 말뚝 선단부(본 연구에서는 3m로 가정)가 풍화암 지반에 근입되면서 지지력 증가 및 이에 따른 변위가 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

여러 지반조건 및 말뚝직경 변화에 따라 단일 현장타설말뚝의 최적 기둥-말뚝 길이비를 분석한 결과, 가상고정점의 가장 큰 한계점 중 하나인 말뚝 길이에 상관없이 가상고정점은 항상 동일하게 산정된다는 문제점을 확인할 수 있었다. 또한, 실제 설계 시 하부 말뚝을 기존의 단순한 가상고정점 위치가 아닌 각 현장조건에 맞는 최적 기둥-말뚝 길이비를 적용한다면 말뚝의 거동을 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 판단되며, 시공 시에도 지표면 이하 근입되는 말뚝부의 최적 길이를 적용함으로써 가상고정점 모델을 통한 설계보다 경제성과 안정성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 단일 현장타설말뚝의 가상고정점을 적용한 해석과 기둥-말뚝을 단일부재로 전체 모델링한 해석을 비교·분석하여, 가상고정점 해석법의 적정성을 분석하였다. 또한, 단일 현장타설말뚝의 거동에 영향을 미치는 주요 인자에 대한 분석을 수행하였으며, 현재 가상고정점 이론을 통한 단일 현장타설말뚝 설계를 보완하고자 기둥-말뚝의 최적 길이비를 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 가상고정점을 고려한 해석과 기둥-말뚝을 전체 모델링한 해석을 비교한 결과, 가상고정점을 고려한 경우가 참하량 및 수평변위는 작게 나타났으나 축력과 휨모멘트는 크게 나타났다. 또한, 수직하중이 작용하거나 지층이 다층으로 구성되어 있을 경우는 그 차이가 보다 증가하였다. 이를 통해, 가상고정점 모델은 가상의 고정점을 설정함으로써, 변위 발생을 억제시키고 이로 인해 반력이 크게 작용하게 됨을 알 수 있었다. 또한, 수평하중과 단일지반을 기본조건으로 하는 가상고정점 모델은 수직하중과 복합지반의 영향을 제대로 고려하지 못하여, 실제 하부 말뚝의 거동을 정확히 예측하기 어려운 것으로 판단되었다. 따라서, 단일 현장타설말뚝의 정확한 거동 분석을 위해서는 기둥-말뚝을 3차원 전체 모델링한 해석이 필요함을 알 수 있었다.
- (2) 단일 현장타설말뚝은 지반의 강성에 따라 거동이 크게 달라지며, 단일 현장타설말뚝의 구조적 특성상 최대 휨모멘트는 지표

면 이하 2D~3D에서 발생하였다. 특히, 풍화암 지반에 근입된 경우에는 상부 지반이 연약할수록 풍화암에 따른 거동변화가 뚜렷하게 나타났다. 세장비에 따른 단일 현장타설말뚝의 거동은 기둥의 길이가 증가함에 따라 휨에 대한 지배적인 영향으로 연성거동을 보였으나, 최대 휨모멘트에는 상대적으로 세장비의 영향이 미비하였다.

- (3) 기둥의 직경변화에 따른 단일 현장타설말뚝의 휨모멘트와 수평변위는 직경이 감소함에 따라 작아지는 것을 알 수 있었으며, 기둥 두부와 말뚝두부 모두에서 큰 차이가 발생하는 것으로 보아 기둥의 직경 변화는 기둥의 길이 변화보다 하부 말뚝 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다.
- (4) 최적 기둥-말뚝 길이비 분석결과, 설계 시 고려해야 할 말뚝의 최소 길이는 가상고정점 결과를 훨씬 상회하는 것으로 나타났다. 사질토 지반에서는 최적 기둥-말뚝 길이비(L/L_p)가 최소 0.5, 최대 1.25로 나타났으며, 점성토 지반의 경우에는 최소 0.33 및 최대 1.0으로 나타나 사질토 지반보다 말뚝을 더 고려하여 설계해야 함을 알 수 있었다. 또한, 풍화암에 근입된 경우에는 단일층으로 구성되어 있을 때보다 최적 기둥-말뚝 길이비가 약 33~50%정도 증가하여, 설계 시 고려되어야 할 말뚝의 최소 길이가 감소함을 알 수 있었다. 이를 통해, 실무에서 단일 현장타설말뚝의 실제 거동을 반영하지 못하는 근사해석법인 가상고정점 해석법을 다소 보완하여 경제성과 안정성이 확보될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2011-0030842). 연구 지원에 감사드립니다.

References

- AASHTO (2002). *Standard specification for highway bridges*, American Association of State Highway and Transportation Official.
- Ahn, S. Y. (2010). *Proposed new design method of the pile bent structure considering plastic hinge*, Ph. D. Thesis, Yonsei University (in Korean).
- Broms, B. (1964a). "Lateral resistance of piles in cohesive soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, ASCE, Vol. 90, No. 4, pp. 27-63.
- Broms, B. (1964b). "Lateral resistance of piles in cohesive soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, ASCE, Vol. 90, No. 4, pp. 123-156.
- California Department of Transportation Division of Engineering

- Services (2006) Caltrans seismic design criteria (Version 1.4).
- Chai, Y. H. (2002). "Flexural strength and ductility of extended pile-shafts. I: Analytical Model." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 5, pp. 586-594.
- FB-MultiPier (2012). *User's manual: Ver. 4*, Ensoft Inc.
- FHWA (1987). *Drilled shaft*, National Highway Institute.
- Hutchinson, T. C., Boulanger, R. W., Chai, Y. H. and Idriss, I. M. (2002). *Seismic design and retrofit of bridges*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Jeon, K. S., Kim, K. S. and Kim, J. Y. (2006). "Design and construction of single drilled shaft foundation." *Korean Geotechnical Engineer conference*, pp. 86-100 (in Korean).
- Jeong, S. S., Kwak D. O. and Ahn, S. Y. (2005). "Analysis of Pile-Bent(CIDH Shaft/Column) structure subjected to lateral loading." *Korean Society of Civil Engineers conference*, pp. 3968-3971 (in Korean).
- Jeong, S. S., Ahn, S. Y., Kwak D. O. and Lee, J. K. (2006). "A study on the lateral behavior of pile-bent structures with p- Δ effect." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 22, No. 8, pp. 77-88 (in Korean).
- Jeong, S. S., Kim, Y. H. and Kim, J. Y. (2011). "Influence on lateral rigidity of offshore piles using proposed p-y curves." *Journal of Ocean Engineering* 38, pp. 397-408.
- John, W. (2001). *Cyclic large deflection testing of shaft bridges*, Report No. 59A0183, University of California, Los Angeles.
- Kerop, D. J. (2001). *Interaction between soil and full scale drilled shaft under cyclic lateral load*, Ph. D. Thesis, University of California, Los Angeles.
- Kim, S. k., Yea, G. G., Kim, G. S. and Choi, Y. K. (2008). "A case study on horizontal displacement characteristics for single drilled shaft foundation." *Korean Society of Civil Engineers conference*, pp. 2017-2020 (in Korean).
- Kim, J. Y., Hwang, T. J. and Jeong, S. S. (2011). "Simplified analysis of pile bent structures and minimum reinforcement ratio." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 5, pp. 33-43 (in Korean).
- Kim, Y. H. and Jeong, S. S. (2011). "Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction." *Computers and Geotechnics*, Vol. 38, No. 2, pp. 248-257.
- Korea Expressway Corporation (2004). *Design Criteria for Pile Bent Structure*, Vol. 68, pp. 14-27 (in Korean).
- Lee, J. H. and Yang, J. H. (2004). "New Concrete Bridge Column System." *Journal of the Korea concrete institute*, Vol. 16, No. 2, pp. 24-30 (in Korean).
- Matlock, H. (1970). "Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay." *The second annual offshore technology conference*, Houston, TX, pp. 577-607.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2008). *Design criteria for highway bridges* (in Korean).
- O'Neill, M. W. and Gazioglu, S. M. (1984). "Evaluation of p-y relationships in cohesive soils." *Proceedings of a Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE Geotechnical Engineering Division, 192-213.
- PLAXIS 3D Foundation (2008). *PLAXIS 3D foundation user manual: Version 2.0*. Brinkgreve, R.B. and Swolfs, W. M., PLAXIS Inc.
- Poulos, H. G. (1971a). "Behavior of laterally loaded piles : Part 1 - Single Piles." *Journal of Soil Mechanics and foundation Div.*, ASCE, Vol. 97, No. 5, pp. 771-731.
- Poulos, H. G. (1971b). "Behavior of laterally loaded piles : Part 2 - Group piles." *Journal of Soil Mechanics and foundation Div.*, ASCE, Vol. 97, No. 5, pp. 733-751.
- Reese, L. C. and Wright, W. (1977). *Drilled shaft manual*, U. S. Department of Transportation.
- Son, H. S., Choi, I. K., Kang, D. O. and Yang, J. H. (2005). "Design of single column drilled pier foundation in incheon bridge viaduct." *Korean Society of Civil Engineers Conference*, pp. 959-962 (in Korean).
- Son, H. S., Choi, I. K., Lee, S. H. and Yang, J. H. (2006). "Seismic analysis and reinforcement details of integral pile shaft-column foundations." *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, pp. 300-307 (in Korean).
- Sung, C. G. (2008). *Analysis of lateral behavior of pile-bent structure subjected to change of pier's cross-sectional area*, Master Thesis, Yonsei University (in Korean).