

단일 현장타설말뚝의 변단면 분석을 통한 최적 기둥-말뚝 직경비 제안

김재영* · 정상섭** · 안상용***

Kim, Jaeyoung*, Jeong, Sangseom**, Ahn, Sangyong***

Proposed Optimized Column-pile Diameter Ratio with Varying Cross-section for Bent Pile Structures

ABSTRACT

In this study, the behavior characteristics of bent pile structures with varying cross-section was examined through the measured results of field load test. A framework for determining the bending stress is calculated based on the stresses in the circumference of the pile using 3D finite element analysis. It is found that the bending stress near the pile-column joint changes rapidly and fracture zones occurs easily at variable cross-sections in bent pile structures. Also, the optimized column-pile diameter ratio was analyzed through the relationship between the column-pile diameter ratio and lateral crack load ratio. Based on this study, the optimized column-pile diameter ratio can be obtained near the inflection point of the curve between the column-pile diameter ratio and lateral crack load ratio. Therefore, a present study by considering the optimized variable cross-section condition would be improved bent pile structures design.

Key words : Bent pile structures, Variable cross-section, Finite element analysis, Optimized column-pile diameter ratio, Bending moment

초록

본 연구에서는 변단면 단일 현장타설말뚝의 거동 특성을 평가하고자 현장재하시험 사례를 분석하였으며, 또한 3차원 유한요소해석을 이용하여 말뚝 내부에서 발생하는 응력을 통해 심도별 휨응력을 산정하였다. 분석 결과, 단일 현장타설말뚝의 변단면 부근에서 휨응력이 집중되어 재료 파괴가 발생하기 가장 쉬운 것을 알 수 있었다. 이를 토대로, 단일 현장타설말뚝의 기둥-말뚝 직경비와 수평 균열하중비 관계를 통해 최적의 기둥-말뚝 직경비를 제안하였다. 연구 결과, 최적의 기둥-말뚝 직경비는 기둥-말뚝 직경비와 수평 균열하중비 관계 곡선의 변곡점 부근에서 산정되었으며, 단일 현장타설말뚝 설계에 최적 변단면 특성을 고려한다면 개선된 설계가 이루어질 수 있을 것으로 판단되었다.

검색어 : 단일 현장타설말뚝, 변단면, 유한요소해석, 최적 기둥-말뚝 직경비, 휨모멘트

1. 서론

현재 장대교량, 초고층 건물, 도로 및 경전철 등의 대규모 건설 사업에서 상부 구조물의 대형화·중량화 추세와 말뚝기초의 도심지 시공 시 발생하는 소음·진동 등에 따른 민원 증가로 기존 항타말뚝 대신 현장타설말뚝의 시공이 증대되고 있다. 특히 해상 교량 및 도로교, 경전철 등의 구조물은 일반 구조물에 비해 풍하중 및 지진하중 등의 수평하중에 민감하기 때문에 수평하중을 고려한 설계가 중요하고, 구조형식에 있어 상부 기둥과 하부 말뚝의 일체화된 설계 및 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이에 최근 말뚝캡이 없어 상대적으로 지반굴착 및 지반교란이 적고, 항타말뚝에 비해 근입에 따른 소음·진동을 최소화할 수 있는 단일 현장타설말뚝(bent pile

* 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 (kjkjy222@yonsei.ac.kr)

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

*** 정회원·(주)포스코엔지니어링 인프라사업본부 상무, 공학박사 (koen@poscoen.com)

Received May 21, 2013/ revised June 25, 2013/ accepted August 7, 2013

structures)이 빈번히 사용되고 있다(Fig. 1).

Fig. 2와 같이, 단일 현장타설말뚝은 일반적인 말뚝기초와 달리 말뚝캡을 설치하지 않고 말뚝과 기둥을 하나의 일체화된 부재로 이루어진 직경 1.0~3.0m의 말뚝기초를 말한다. 다른 기초형식에 비해 상부 기둥과 하부 말뚝의 중간에 말뚝캡이 없이 기둥과 말뚝이 일체화되어 지상부로 돌출된 구조적인 특성 상, 수평하중에 민감하여 수평거동에 대한 검토가 중요하다. 이는 지상부로 돌출된 기둥 재료가 수평하중에 대해 소성단계로 넘어가게 될 수 있어 재료의 파괴 메커니즘을 파악해야 하기 때문이다.

수평하중을 받는 말뚝기초의 해석 방법은 수십 년에 걸쳐 여러 방법들이 제안되었으며, 대표적인 해석방법으로는 경험적인 방법 (Brinch Hansen, 1961; Broms, 1964), 수평하중전이법(Matlock, 1970; Reese and Wright, 1977; O'Neill and Gazioglu, 1984; Jeong et al., 2004; Kim et al., 2011), 유한요소법(Brown and Shie, 1991; Jeremic and Yang, 2002)이 있다. 최근 연구결과 (Kim 등, 2009)에 의하면, 이 중 수평하중전이법 또는 유한요소법이 지반의 비선형성과 연속성을 고려할 수 있기 때문에 말뚝기초 해석기법으로 적절하다고 보고되고 있다. 유한요소법에 의한 수치 해석적 모델링 기법은 재료의 비선형성과 말뚝과 지반의 경계면 모델링, 그리고 3차원 경계 조건 등의 묘사가 가능하다. 특히, 유한요소해석법 자체가 연속체 해석이기 때문에 기타 방법(하중전 이함수법, 탄성해석법 등)들이 고려하기 어려운 지반의 연속성을 모사할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 유한요소해석을 통한 3차원 말뚝-지반의 모델링의 정확성은 지반과 말뚝의 재료 모델 및 물성값에 따라 달라지므로 현장 재하시험과의 비교 등을 통해 모델링 검증이 일차적으로 이루어져야 하는 단점도 있다.

국외에서는 단일 현장타설말뚝에 관한 연구(John, 2001; Kerop, 2001; Chai, 2002) 및 적용사례가 다수 진행되어 왔다. 하지만, 국내의 경우 2004년 익산~장수간 고속도로 단양교에 시험시공을 실시한 것이 처음인 만큼 실제 적용된 시기가 길지 않아 상대적으로 시공사례가 많지 않고, 상부 기둥과 하부 기초의 경계가 불분명한 단일 현장타설말뚝의 구조적 특성 상 구조해석으로 국한하여 지반 공학 측면에서의 연구는 미비한 실정이다. 현재 국내 단일 현장타설 말뚝 설계법은 도로교설계기준(2004)에서 제시하는 설계방법에 따라 설계하며, 필요시에는 AASHTO(2002), FHWA(1987) 등의 국외 기준을 적용할 수 있도록 되어 있다. 단일 현장타설말뚝에 관한 연구로는 손혁수 등(2005)은 인천대교 고가교 구간의 기초형 식으로 단일 현장타설말뚝을 적용하여 평가하였고, 정상섭 등 (2005; 2006)은 수평하중에 민감한 단일 현장타설말뚝의 수평거동 특성에 관한 연구 및 P- Δ 효과를 고려한 단일 현장타설말뚝의 거동 연구를 수행하였으며, 손혁수 등(2006)은 단일 현장타설말뚝의 내진해석 및 철근 설계에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 최근에

는 김상규 등(2008)은 단일 현장타설말뚝의 수평거동특성에 관해 분석하였고, 변단면 단일 현장타설말뚝의 수평거동 분석(성철규, 2008), 단일 현장타설말뚝의 소성힌지를 고려한 최적설계법 제안 (안상용, 2010) 및 단일 현장타설말뚝의 간편해석 및 최소 철근비 분석(김재영 등, 2011) 등의 단일 현장타설말뚝 기초의 설계 및 해석방법에 관한 연구가 수행되었다.

단일 현장타설말뚝의 구조형식은 크게 상부 기둥과 하부 말뚝의 직경이 동일한 형식과 직경이 다른 변단면 형식으로 구분할 수 있다. 말뚝과 기둥의 직경이 동일한 단일 현장타설말뚝의 경우,

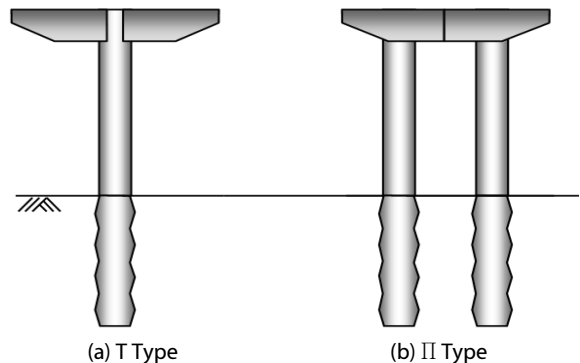


(a) Incheon Bridge



(b) Seohae Grand Bridge

Fig. 1. Application Examples of Bent Pile Structures



(a) T Type

(b) II Type

Fig. 2. Typical Types of Bent Pile Structures

최대 휨모멘트는 지표면 아래 약 1~3D(D는 말뚝 직경) 정도의 깊이에서 발생되며, 이 최대 모멘트 위치에서 소성힌지가 발생하는 것으로 보고되고 있다(Caltrans, 2006). 그러나 소성힌지가 지중에서 발생될 경우, 단일 현장타설말뚝의 구조적인 취약부를 직접 확인하기 어렵고 유지관리가 곤란하므로 소성힌지가 지상부에 유도하여 경제적인 설계를 도모하기 위한 방안이 제시하고 있다(AASHTO, 2002). 이를 위해 기둥 직경을 말뚝 직경보다 작게 설계하거나 말뚝 상단부를 강관으로 보강하는 등의 변단면 효과를 적용하여, 소성힌지를 변단면으로 유도하고 재료의 파괴가 변단면 부근에서 발생할 수 있도록 하고 있다. 이와 같이, 변단면을 고려한 단일 현장타설말뚝의 설계는 시공성 및 경제성을 동시에 만족할 수 있지만, 한편으로는 변단면 단일 현장타설말뚝은 기둥과 말뚝의 직경이 동일한 경우에 비해 소성힌지의 형성길이가 비교적 짧아 상대적으로 취성적(brittle) 거동이 유발되므로(손혁수 등, 2005; 정상섭 등, 2006) 변단면 설계에 대한 체계적이고 합리적인 검토가 요구된다. 하지만 아직까지 변단면을 적용함에 있어 적절한 기둥-말뚝의 변단면비에 대한 연구가 미비하고 이에 대한 기준도 마련되어 있지 않아, 실제 시공 시 대부분 상부 기둥-하부 말뚝의 단면을 동일하게 시공하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 변단면을 가지는 단일 현장타설말뚝의 거동 특성을 평가하기 위해, 현장시험 사례를 분석함과 동시에 말뚝과 지반의 3차원적인 상호작용을 적절히 모사할 수 있도록 일련의 3차원 유한요소(finite element, FE)해석을 수행하였으며, 이를 통해 말뚝 내의 3차원적인 발생응력을 바탕으로 수평응력을 산정하였다. 또한, 지중부에서 발생하는 소성힌지의 위치(구조적 취약부)를 지상부의 변단면 부근으로 유도함으로써 단일 현장타설말뚝의 유지보수가 용이해질 수 있는 개선된 설계법을 제시하고자, 주요 영향인자를 고려한 단일 현장타설말뚝의 최적 기둥-말뚝 직경비를 제안하였다.

2. 변단면을 가지는 단일 현장타설말뚝의 구조 특성

캘리포니아 연방도로국(California department of transportation, Caltrans)에서 작성된 seismic design criteria ver1.4(2006)에 따르면 단일 현장타설말뚝의 형식은 Fig. 3과 같이, 동일단면과 변단면 형식으로 구분할 수 있다. 동일단면 구조는 상부 기둥과 하부 말뚝의 직경이 동일한 구조로서, 구조적인 취약부가 지반 내에서 발생한다. 이는 기둥과 말뚝의 단면이 동일한 단일 현장타설말뚝은 말뚝과 기둥의 강성 차이가 거의 없기 때문에 모멘트 분포가 완만하며 최대 휨모멘트 발생위치는 지표면 이하 말뚝직경(D) 1~3배 정도 깊이에서 발생한다고 보고되고 있는데, 이와 같이 단면력이 일정한 경우 소성힌지(plastic hinge)의 발생위치는 최대 휨모멘트

발생위치가 된다. 따라서 파괴가 발생하기 쉬운 소성힌지 위치가 지중에 발생하는 경우 유지관리가 곤란한 문제점이 있다. 이에 최근에는 소성힌지를 지상부 기둥으로 유도하기 위해, Fig. 3(b)와 같이 지상부 기둥 직경을 말뚝 직경보다 작게 설계하여 지상부 기둥의 단면력을 작게 하거나, 지중부 말뚝의 상단부위를 강관 등으로 보강하여 단면력을 증가시키는 단일 현장타설말뚝의 시공이 이루어지고 있다. 이와 같은 변단면을 가지는 단일 현장타설말뚝은 말뚝 직경이 기둥 직경보다 크기 때문에 말뚝-기둥의 강성 차이로 인하여 말뚝-기둥 접합부에 변곡점이 형성되고 최대 부재력이 변단면 부근에서 발생하여, 변단면 부근이 가장 취약해짐에

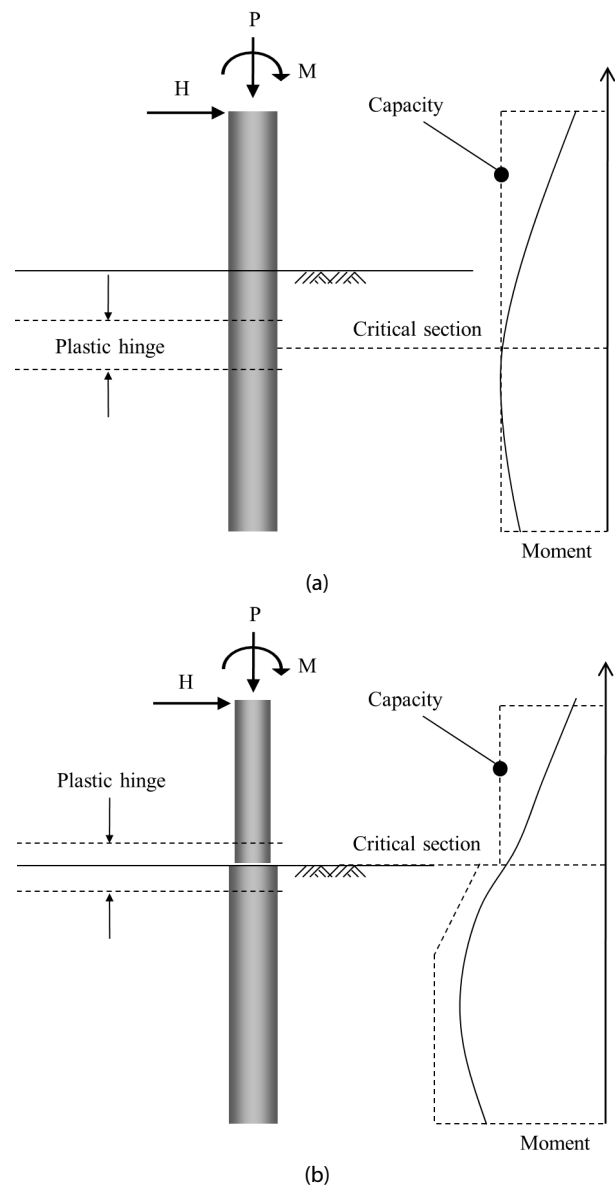


Fig. 3. Typical Types of Bent Pile Structures and Bending Moment Distributions: (a) Type 1; (b) Type 2

따라 소성인지는 최대 휨모멘트가 발생하는 지중부 말뚝이 아닌 지상부 기둥 부위로 이동한다고 보고되고 있다. 따라서 최대 부재력이 지상으로 유도되면, 구조적 취약부를 유지보수하는데 용이하므로 변단면 구조의 적용이 유리하다. 하지만, 상대적으로 변단면 부근에서 급격한 휨모멘트의 변화로 인해 동일한 직경의 말뚝에 비해 콘크리트의 압축파괴가 빨리 발생하여 소성회전 능력이 감소되며, 연성능력이 감소되어 상대적으로 취성적(brittle)인 거동과 큰 변위가 발생할 수 있다. 그러나 변곡점의 유무나 변단면에 따른 소성인지의 위치 변화에 대한 영향은 아직 의견이 분분한 상태(정철규, 2008; 정상섭 등, 2009)로서, 단일 현장타설말뚝의 소성인지 발생지점에 대한 상세 검토가 필요한 실정이다.

3. 현장시험 사례의 분석을 통한 변단면 특성 분석

3.1 현장시험 개요

본 절에서는 Fig. 4와 같이, 인천 00지역에서 전경수 등(2009)에 의해 수행된 6본의 단일 현장타설말뚝(RC3~RC8)의 수평재하시

험 사례를 토대로 변단면 단일 현장타설말뚝의 거동 특성을 분석하였다. Fig. 4(a)와 같이, 본 시험에 적용된 말뚝 6본은 실트질 모래 및 풍화토로 구성된 지반에 근입되어 있고, 말뚝 직경(D_p) 1,000mm, 기둥 직경(D_c) 850mm 또는 1,000mm, 말뚝 길이 11m~12m이며, 기둥 길이는 4m로 모두 동일하다. 시험말뚝 중, RC5~RC8 말뚝은 변단면 특성을 고려하기 위한 말뚝으로 적용되었으며, RC5와 RC6 말뚝의 기둥 직경(D_c)은 850mm로 말뚝 직경보다 작은 변단면 구조를 가지고 있다. 또한, RC7과 RC8 말뚝은 수평하중 작용 시 최대 휨모멘트가 발생하는 소성인지 위치 ($1\sim 3D_p$)에 두께 12mm(부식 2mm 고려) 및 길이 3.0m의 강관 케이싱을 시공하여 소성인지 발생지점을 지상부로 유도할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 기둥 직경의 변화 및 강관 케이싱 보강에 따른 변단면 특성을 구현하여 단일 현장타설말뚝의 수평거동을 분석하였다. 시험말뚝에 적용된 수평하중은 각 하중단계마다 15분간 지속하여 발생하는 수평변위를 확인하였으며, 이 때 수평하중의 크기는 말뚝별로 최대 300~500kN으로서 말뚝 재료의 파괴가 일어나기까지의 극한하중이 아닌 탄성거동을 넘어 소성거동이 나타나

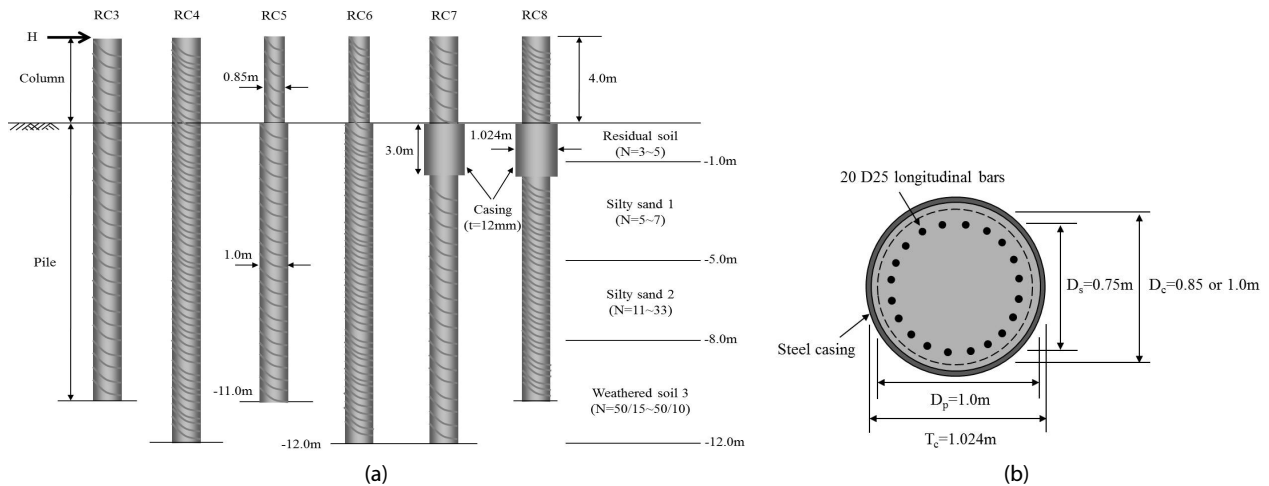


Fig. 4. Subsurface Soil Profile and Shaft Embedments of Field Load Test Site: (a) Subsurface Profile and Pile Embedment; (b) Pile and Column Configuration

Table 1. Material Properties in Field Load Test Site (Jeon et al., 2009)

Site	Type	Material Properties								
		γ_t (kN/m ³)	c_u (kN/m ²)	ϕ (deg)	ν	f_c (MPa)	f_y (MPa)	K(MPa/m)	E(MPa)	
Incheon (2009)	Pile	Concrete	24.5	-	-	0.2	45.0	-	-	26,000
		Steel	-	-	-	0.33	-	420.0	-	210,000
		Casing	-	-	-	0.33	-	420.0	-	210,000
	Soil	Residual soil	16.7	0.5	22.0	0.30	-	-	2.7	-
		Silty sand 1	16.8	2.0	27.0	0.35	-	-	6.79	-
		Silty sand 2	16.7	2.1	28.0	0.45	-	-	24.4	-
		Weathered soil 3	19.4	2.2	27.0	0.45	-	-	61.0	-

는 하중 범위까지를 적용하였다. 심부 구속철근에 대한 영향은 Fig. 4(a)와 같이 횡방향 철근 배근간격을 달리하여 이에 따른 거동특성을 분석할 수 있도록 하였으며, 이에 RC3, RC5, RC7 말뚝의 경우 HD16을 300mm 간격으로 나선형태로 적용하였으며, RC4, RC6, RC8 말뚝은 65mm 간격으로 철근을 배근하였다. 대상 지반은 8m 깊이까지 잔류토 및 실트질 모래로 구성되어 있으며, 그 하부에는 풍화토층이 존재한다. 해석 시 적용된 물성은 일반적인 콘크리트 물성과 현장 지반조사결과(N치) 및 기존문헌에 제시되어 있는 값을 토대로 대표적인 값을 산정하였다. 6본의 시험 말뚝의 제원 및 현장 지반조건은 Table 1에 나타내었다.

3.2 현장시험 결과 분석

Fig. 5는 단일 현장타설말뚝 6본(RC3~RC8)의 수평하중-말뚝 두부(지표면)의 수평변위 관계를 나타낸다. RC3과 RC4 말뚝과 같이 말뚝 직경과 기둥 직경이 동일하고 소성힌지 부분에 추가적인 보강이 없는 일반적인 형태의 경우, 하중 350kN(수평변위 약 70~90mm 부근)에서 소성거동이 일어났음을 알 수 있었으며, 심부 구속철근이 조밀하게 시공된 RC4가 RC3보다 큰 하중을 지지할 수 있으나 그 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

기둥 직경과 말뚝 직경이 다른 변단면 구조를 가지는 RC5와 RC6의 경우, 초기 수평하중-변위 기울기는 기둥-말뚝 직경이 동일한 RC3 및 RC4와 거의 비슷하지만, 보다 낮은 하중인 220kN 정도에서 소성거동이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 하부 말뚝에 비해 상부 기둥의 단면적이 작아지면서 구조적 취약부가 지표면 부근(기둥-말뚝 경계부)으로 이동함과 동시에 일정 이상의 하중(탄성거동을 넘어 소성거동을 하는 단계의 하중)이 작용할 경우에는

직경이 동일한 RC3 및 RC4보다 상대적으로 말뚝 재료의 부재력이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

케이싱으로 소성힌지 부분(최대 휨모멘트 위치)을 보강한 RC7과 RC8의 경우, 수평하중-변위 그래프의 초기 기울기가 다른 시험 말뚝(RC3~RC6)과 비슷하지만, 하중 200kN이 넘어 소성단계로 진입할수록 점차 변단면을 가지는 시험말뚝(RC5 및 RC6)과 비슷한 기울기를 보이는 것으로 나타났다. 또한 작용하중에 따른 말뚝의 수평지지력은 일반적인 형태의 단일 현장타설말뚝(RC3, RC4)보다 다소 높은 500kN에 이르지만, 탄성거동을 넘어 소성거동 단계를 보이는 시점이 다른 시험말뚝에 비해 분명하게 나타나지 않았다. 이는 지표면 이하 3m 정도 보강된 케이싱에 의해 휨모멘트의 분산정도가 RC3 및 RC4 말뚝보다 다소 넓어졌기 때문이라고 판단된다.

3.3 수치해석을 통한 현장시험 사례 분석

본 절에서는 단일 현장타설말뚝의 변단면 거동 특성을 보다 상세히 평가하고 유한요소해석 모델링의 정확성을 검증하기 위해, 현장시험 결과와 3차원 유한요소해석(FEM)을 통한 결과를 비교분석하였다. 본 해석에서는 지반 상용 3차원 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 3D Foundation(Ver. 2.2, 2008)을 사용하였다. 해석에 사용된 지반 및 말뚝 물성은 현장조건과 동일하게 적용하였다.

Fig. 6은 현장시험의 수평하중-말뚝두부(지표면) 변위 결과값과 수치해석을 통한 예측값을 비교하여 도시한 것이다. 비교 결과, 전반적으로 초기 탄성단계(약 200~300kN)를 넘어 소성단계로 갈수록 수치해석을 통해 산정된 수평하중-변위 곡선 결과가 현장시험 결과보다 지지력을 다소 크게 예측하는 것으로 나타나, 수치해석을 이용한 해석은 지지력을 과대평가하는 것을 알 수 있었다. 특히, Fig. 6(e)의 강관으로 보강된 RC7 말뚝의 경우, 실제 현장재하시험에서는 소성단계가 뚜렷하게 나타나지 않았지만, 수치해석 결과에서는 약 200kN의 탄성단계를 넘어 소성단계가 나타나면서 두 결과값의 차이를 보였다. 그러나 일반적으로 지반분야에서는 지반에 비해 말뚝의 강성이 매우 크기 때문에 말뚝 재료의 파괴보다 지반 파괴가 먼저 발생하게 된다. 따라서 말뚝의 수평거동 분석을 위해서는 말뚝 재료만을 고려한 해석이 아닌 지반-말뚝의 상호작용을 고려한 해석을 수행해야 하며, 말뚝 거동 평가 시 말뚝 재료가 파괴되는 극한상태보다 탄성거동 또는 소성거동을 보이는 단계까지를 고려하는 것이 중요하다. 이에 수치해석과 현장시험을 비교한 결과, 본 연구에서 적용한 수치해석방법은 단일 현장타설말뚝의 거동을 어느 정도 적절히 예측하고 있다고 판단되었으며, 따라서 4장에서는 PLAXIS를 이용하여 현장시험으로는 상세히 고려하기 어려웠던 단일 현장타설말뚝의 변단면에 대한 영향을 상세히 평가를 하고자 한다.

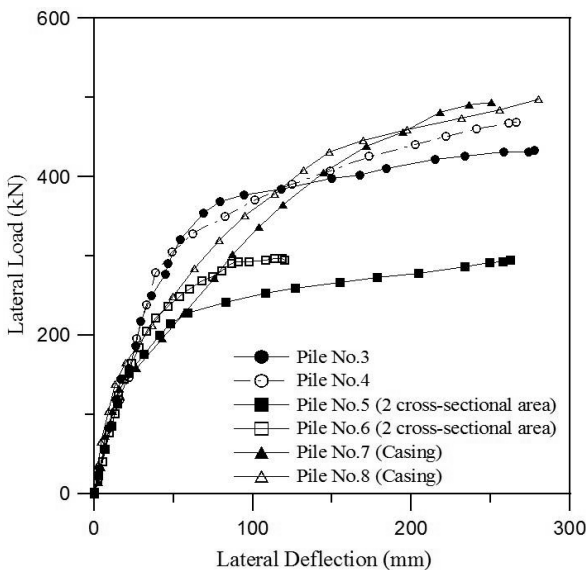


Fig. 5. Lateral Load-Deflection Curves in Field Load Tests

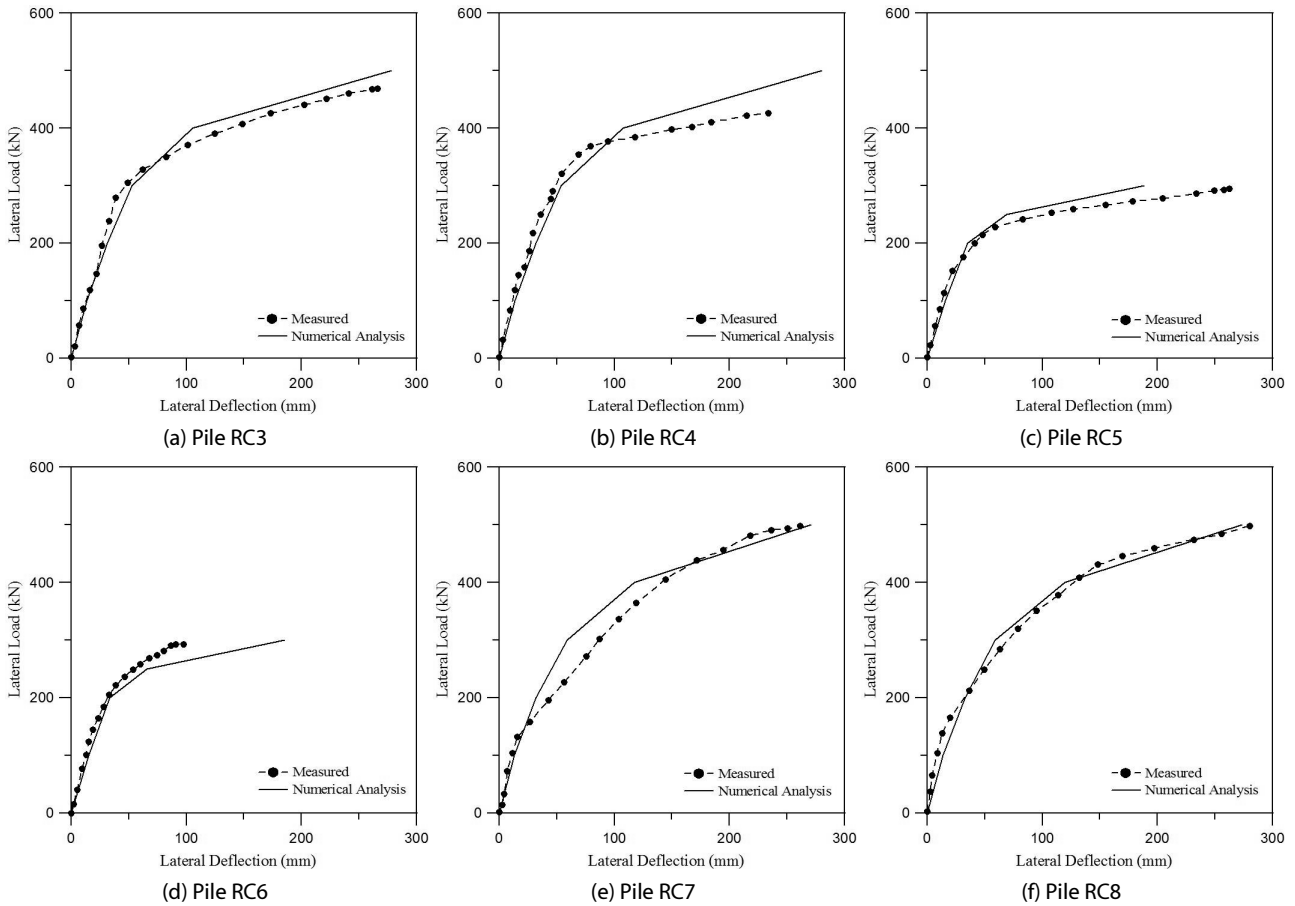


Fig. 6. Measured and Computed Lateral Load-Deflection Curves at Pile Head

4. 유한요소해석을 통한 단일 현장타설말뚝의 변단면 분석

본 절에서는 지반-말뚝의 상호작용을 고려한 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS를 이용하여 단일 현장타설말뚝의 기둥과 말뚝 직경이 다른 변단면 구조의 영향을 상세히 분석하고자 하였다. 본 해석에 적용된 조밀한 사질토 지반 및 말뚝 물성은 Table 2와 같다.

4.1 해석 개요 및 적용 물성

Fig. 7은 해석에서 사용된 대표적인 유한요소 메쉬 및 경계조건을 보여주고 있다. 메쉬의 전체적인 크기는 말뚝의 거동이 경계면의 영향을 받지 않도록 하기 위하여, 넓이 방향은 말뚝 경계로부터 말뚝 직경(D)의 10배($10D$), 깊이 방향은 말뚝 선단부로부터 말뚝 길이(L)의 0.5배($0.5L$)를 적용하였다(Wallace et al., 2002). 해석에 적용된 요소(element)는 15개의 절점으로 구성된 쐐기(wedge) 요소이며, 총 절점 수는 약 17,500개이다. 지반과 말뚝 부근에서는 두 재료간의 큰 강성차이 및 수평하중으로 인해 전단 변형이 예상되

므로 조밀한 메쉬를 사용하였고, 말뚝으로부터 거리가 멀어질수록 메쉬의 밀도를 감소시켰다. 본 유한요소해석에서 말뚝은 탄성모델(linear-elastic)을 적용하였으며, 토사층은 Mohr-Coulomb모델을 사용하였다. 해석에 적용한 재료 정수는 대표적인 조밀한 사질토 지반 물성을 토대로 산정하였다. 말뚝과 지반 사이의 경계면(interface)에는 PLAXIS에서 제공하는 접촉요소(contact element)를 사용하여 지반과 말뚝 사이의 미끄러짐(slip behavior) 및 말뚝의 가력 반대방향에서 발생할 수 있는 인장력에 의한 지반-말뚝 분리현상(gap behavior)을 모델링하였다. 경계면의 각 요소는 3D quadrilateral 8-node 요소에 의해 구성되었다. 수평하중을 받는 말뚝의 말뚝-지반 경계면 모델을 적용한 기존 연구들(Won 등, 2006; Jeong 등, 2009)에서 보고된 바와 같이, 지반과 접해있는 말뚝 요소의 절점은 Coulomb 마찰이론에 의해 미끄러지게 된다. Coulomb 마찰이론은 경계면 내에서 발생하는 미소변형 상태의 탄성 거동과 영구 변형 상태의 소성 거동으로 구분할 수 있다. 탄성거동 상태에서의 경계면 요소는 주변 지반 및 구조 요소와 동일하게 거동하지만, 탄성거동 상태를 넘어서는 변형이 발생하게 되면 소성거동 상태로 전이되어

Table 2. Material Properties for Numerical Analysis

Soil condition		Load transfer analysis	$\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	$c_u(\text{kN/m}^2)$	$\phi(\text{deg})$	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
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)				

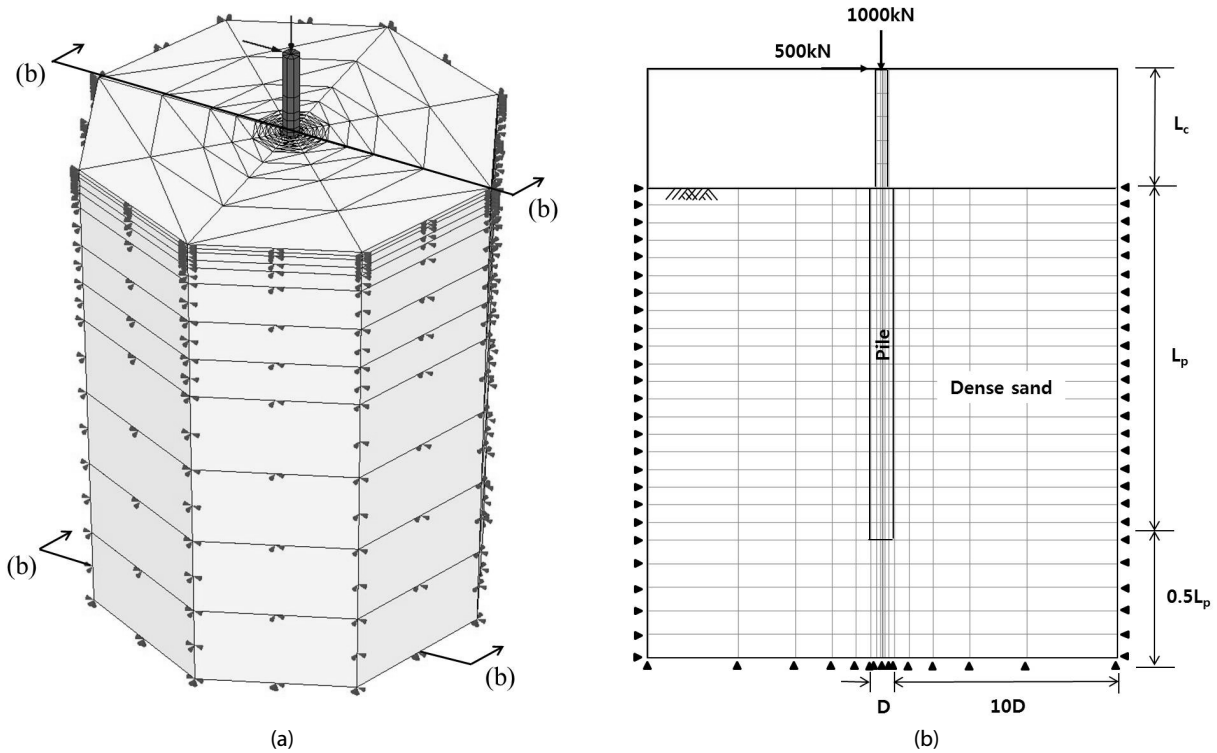


Fig. 7. Typical Idealized 3D Model for FE Analysis: (a) 3D View; (b) Plane View

경계면 요소의 미끄러짐 거동(slip behavior)이 일어나게 된다. 이는 전단강도 등의 경계면 물성 감소로 구현할 수 있으며, 이러한 경계면 요소의 강도 감소는 말뚝주변부 특성을 바탕으로 산정된 강도 감소계수(R_{inter})를 사용하여 다음과 같이 산정한다.

$$c_{inter} = R_{inter} c_{soil} \quad \tan \phi_{inter} = R_{inter} \tan \phi_{soil} \quad (1)$$

여기서, c_{inter} 와 ϕ_{inter} 는 경계면의 점착력과 마찰각이고, c_{soil} 와

ϕ_{soil} 는 지반의 점착력과 마찰각이다. R_{inter} 는 경계면 감소계수 (interface reduction factor)로 완전한 rigid 상태에서는 1.0을, 반대의 경우는 0을 사용한다. 본 연구에서는 PLAXIS에서 제공하는 일반적인 범위의 값 (사질토 0.7, 점성토 0.5)을 적용하였다.

수치해석에서는 말뚝 및 지반물성을 토대로 한 초기 응력상태를 구현하기 위해 원지반 상태(initial condition)를 고려하는 것이 필요하며, 따라서 초기 평형상태(initial equilibrium state)의 산정이 매우 중요하다. 본 해석에서는 재료의 지중을 고려한 초기 응력

분포를 산정하였으며, 초기 단계(initial step) 이후, 말뚝에 가해지는 수평하중은 말뚝 두부에 단계별 증가하중으로 모델링하였다. 또한 말뚝의 근입에 의한 주변지반의 응력변화나 말뚝에 발생하는 잔류하중(residual-force) 등을 수치해석으로 해석하기 위해서는 많은 시간이 필요하므로, 본 연구에서는 말뚝의 근입효과는 고려하지 않았다.

4.2 해석결과를 통한 변단면에서의 수평응력 검토

유한요소해석은 연속성이 고려된 연속체 해석이기 때문에, Fig. 8과 같이 3차원적인 말뚝 내 응력을 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서의 말뚝 내 응력을 적분하는 방법을 사용하였다. 말뚝 내부의 응력은 말뚝 내 Gauss 절점에서의 발생응력을 사용하였으며, 이러한 방법을 통하여 수평하중을 받는 말뚝의 입체적인 응력을 파악할 수 있다. Fig. 8은 수평하중이 x-방향으로 가해졌을 때의 임의의 심도에서의 말뚝의 해석 단면을 나타내며, 그림의 점선원은 말뚝 내부의 Gauss 절점을 이은 것이다. 말뚝의 단위 길이당 수평응력(p_x)은 말뚝 내부에서 작용하는 응력의 x-방향 성분들을 통하여 산정할 수 있으므로, 임의의 심도에서의 각 발생 응력을 다음과 같이 x-방향 성분으로 정리하였다.

$$T_x = \sigma'_{xx}n_x + \sigma'_{xy}n_y + \sigma'_{xz}n_z \quad (2)$$

여기서, T_x 는 x-방향 벡터이고, n_x, n_y, n_z 는 각 방향의 단위벡터를 나타낸다.

본 해석에서 y-방향은 지표면에 연직인 깊이 방향이므로 n_y 는 0이다. 따라서, 얻어진 x-방향 응력 값을 바탕으로, 단위길이 당

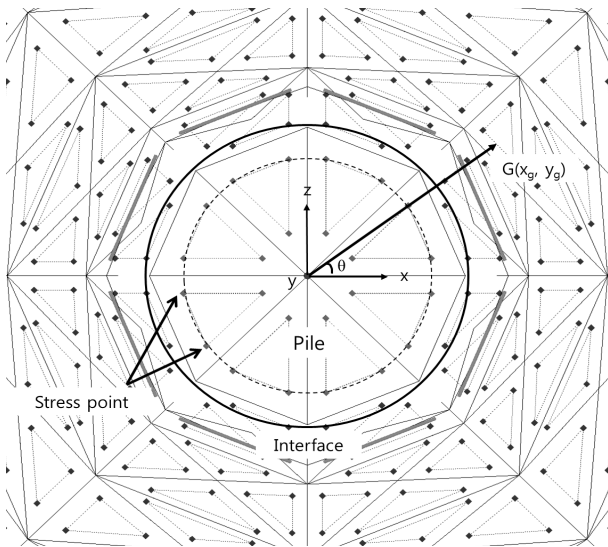


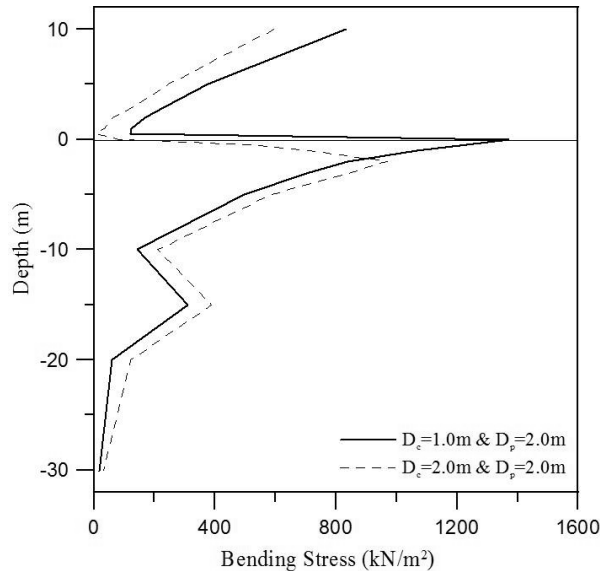
Fig. 8. Cross-Section of Bent Pile Structures in the Horizontal Direction

수평응력은 점선원을 따라 다음과 같이 적분하여 산정한다.

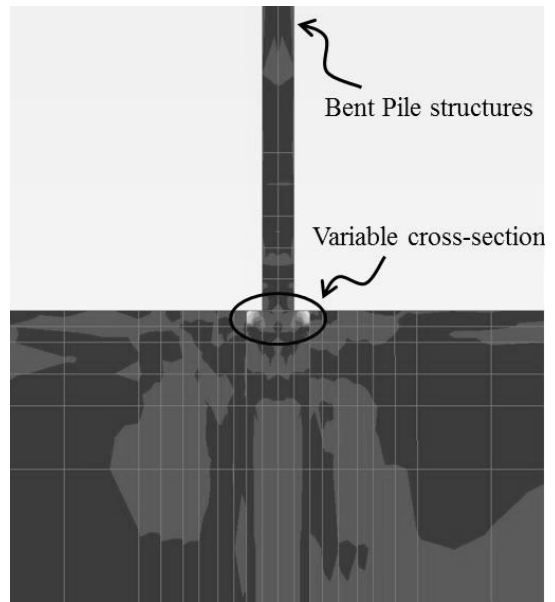
$$p_x = \int T_x dL \quad (3)$$

여기서, L 은 gauss 절점들을 이은 점선원의 원주다.

위와 같은 과정을 통해, Fig. 9(a)와 같이 심도별 수평응력을 산정하였다. 기둥과 말뚝의 직경이 동일한 경우와는 달리, 변단면



(a)



(b)

Fig. 9. Behavior Characteristics of Bent Pile Structures with Variable Cross-Section: (a) Bending Stress Distribution; (b) Stress Contour of Bent Pile Structures with Variable Cross-Section

단일 현장타설말뚝에서는 변단면 부근(지표면)에서 응력의 변화가 큰 것을 알 수 있었다. 이는 기둥의 직경이 감소함에 따라 기둥의 강성이 감소하게 되어 구조적으로 변단면이 가장 취약하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, Fig. 9(b)와 같이, 하중을 받는 변단면 단일 현장타설말뚝에서는 변단면 부근에 가장 큰 응력이 집중되는 것을 알 수 있었다. 따라서, 변단면을 가지는 단일 현장타설말뚝에서는 최대 휨모멘트 위치로 정의되는 소성힌지의 위치가 지표면 근처로 충분히 이동할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 단일 현장타설말뚝의 최적 기둥-말뚝 직경비 제안

5.1 최적 기둥-말뚝 직경비 조건

앞서 기술한 바와 같이, AASHTO(2002)를 비롯한 단일 현장타설말뚝의 설계 기준에서는 지상부 기둥의 직경을 지중부 말뚝 직경보다 작게 설계하여 지중부에 발생하는 소성힌지를 지표면 부근으로 유도할 수 있고 이를 통해 유지보수가 용이하다고 보고하고 있다. 하지만 기둥-말뚝의 변단면을 고려하기 위해 기둥의 직경을 부적절하게 감소시키는 설계는 오히려 소성힌지의 지상부 유도가 이루어지지 않고, 지중부 말뚝의 직경이 필요 이상으로 과도하게 설계되는 등 여러 문제점이 발생할 수 있다.

이에 본 절에서는 최적 기둥-말뚝 직경비를 산정하여 단일 현장타설말뚝의 최적 변단면 조건의 제시하고자 하였다. 이를 위해 지반조건(조밀한 사질토, 느슨한 사질토, 견고한 점성토, 연약한 점성토), 말뚝 세장비, 철근비 등 여러 인자를 고려하여 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 단일 현장타설말뚝은 말뚝 직경(D_p)이 2,000mm, 기둥 길이(L_c) 10m이며, 지반 및 말뚝재료 물성은 앞선 Table 2와 같다. 또한, 최적 기둥-말뚝 직경비를 산정하기 위한 변수조건은 Table 3과 같다.

본 해석에서는 단일 현장타설말뚝의 재료 파괴가 발생할 때의 균열 휨모멘트 및 균열하중을 산정하기 위한 말뚝 단면해석 프로그램 Response 2000과 변단면 효과를 정확히 구현하기 위한 FB-Multiplier (Ver. 4, 2012) 프로그램을 동시에 사용하였다. 이 때, 균열 휨모멘

트와 균열하중은 단일 현장타설말뚝 재료의 파괴 시 가지는 고유한 값으로서, 이를 산정하기 위한 해석과정은 다음과 같다.

- (1) Response2000을 이용하여 단일 현장타설말뚝 재료의 단면 및 물성변화에 따른 moment-curvature 관계를 구하고 이를 통해 균열 모멘트를 산정한다.
- (2) FB-Multiplier를 이용하여 수평하중을 받는 단일 현장타설말뚝의 각 하중에 따른 최대 휨모멘트를 산정하고, 이를 통해 하중-최대 휨모멘트 관계식을 구한다.
- (3) (1)단계에서 구한 균열 모멘트가 (2)단계로부터 산정된 하중-최대 휨모멘트 관계식에서 해당하는 위치를 찾고, 그 때의 하중을 산정한다. 이 때 산정된 하중을 균열 수평하중이라고 할 수 있다.

최적 기둥-말뚝 직경비 조건을 산정하기 위해, Fig. 10과 같이 기둥-말뚝 직경비(D_c/D_p)와 수평 균열하중비($F/F_{Dc=Dp}$)의 관계를 분석하였다. 이 때, F 는 기둥의 직경이 감소함에 따라 변단면을

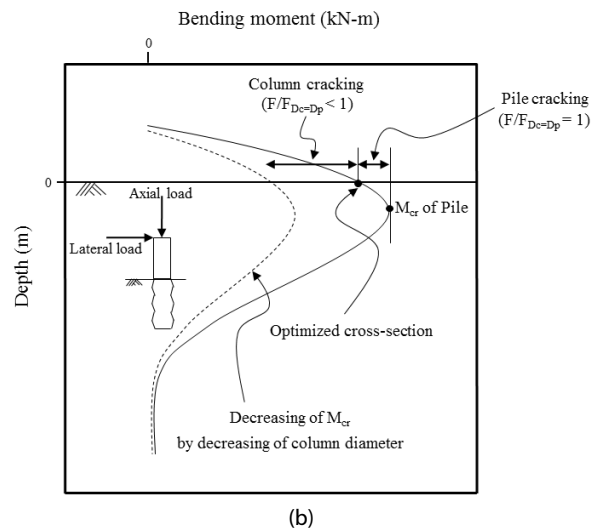
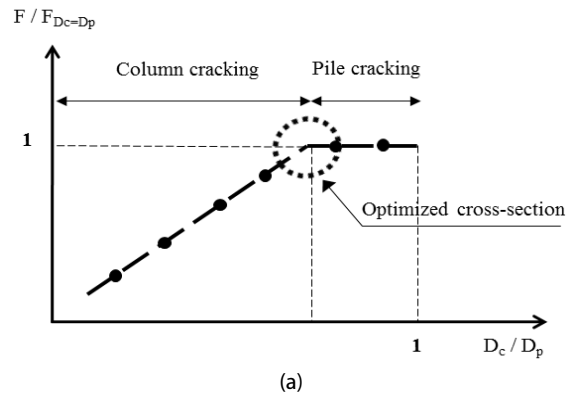


Fig. 10. Optimized Column-Pile Diameter Ratio: (a) Column-Pile Diameter Ratio Curve; (b) Bending Moment-Depth Distribution

Table 3. Material Properties and Geometries for Optimized Column-Pile Diameter Ratio

Condition	Variables
Pile length (m)	10 / 30
Pile diameter (m)	2.0
Column length (m)	10
Column diameter (m)	1.5 / 1.75 / 2.0
Steel reinforcement ratio (%)	1.0 / 1.5 / 2.0
Soil condition	Loose sand / Dense sand / Soft clay / Stiff clay

가지는 단일 현장타설말뚝의 수평 균열하중을 의미하며, $F_{D_c=D_p}$ 는 기둥과 말뚝의 직경이 동일한 단일 현장타설말뚝의 수평 균열하중을 나타낸다. 따라서 기둥과 말뚝의 직경이 동일한 경우($D_c/D_p=1.0$), 수평 균열하중비($F/F_{D_c=D_p}$)는 1.0이 된다. 하지만 소성힌지를 지표면 부근으로 유도하기 위해서 기둥-말뚝 직경비(D_c/D_p)를 감소시키면, 즉 기둥의 직경이 감소하게 되면 기둥의 균열모멘트는 감소하게 되고 수평 균열하중비($F/F_{D_c=D_p}$)는 1.0보다 작아지게 된다(Fig. 10(a)). 이와 같이, 기둥-말뚝 직경비(D_c/D_p)가 감소함에 따라 변단면 단일 현장타설말뚝의 수평 균열하중(F)을 산정한 후 이를 기둥과 말뚝의 직경이 동일한 단일 현장타설말뚝의 수평 균열하중($F_{D_c=D_p}$)로 정규화하면 Fig. 10(a)와 같이 이중직선 형태의 곡선이 나타난다. 이 때, 기둥 직경이 감소하더라도 수평 균열하중비가 일시적으로 변하지 않는 초기구간($F/F_{D_c=D_p}=1$)이 발생하게 되는데, 이는 기둥 직경이 감소함에 따른 변단면 적용의 효과가 없이 동일한 직경을

갖는 단일 현장타설말뚝과 마찬가지로 지상부 기둥보다 지중부 말뚝의 파괴가 먼저 발생하는 구간을 나타낸다. 하지만, 기둥 직경이 더 감소하게 되면 수평 균열하중(F)은 $F_{D_c=D_p}$ 보다 작아져 지상부 기둥-지중부 말뚝의 변단면 위치에서 파괴가 가장 먼저 일어나게 되며, 이 때를 변단면 효과가 발휘되기 시작하는 기둥의 최적 직경($D_{c,max}$)이라고 할 수 있다. 따라서 기둥-말뚝의 변단면에서 파괴가 일어나는 기둥의 최적 직경($D_{c,max}$)은 기둥-말뚝 직경비(D_c/D_p)와 정규화된 수평 균열하중비($F/F_{D_c=D_p}$) 관계 곡선의 변곡점이며, 이로부터 최적의 기둥 직경 조건은 $D_{c,max}$ 에서 산정할 수 있음을 알 수 있다.

5.2 지반조건에 따른 최적 기둥-말뚝 직경비 제안

Fig. 11은 지반조건, 말뚝 세장비, 철근비 등을 고려한 변단면 단일 현장타설말뚝의 최적 기둥-말뚝 직경비를 산정한 결과를 나타

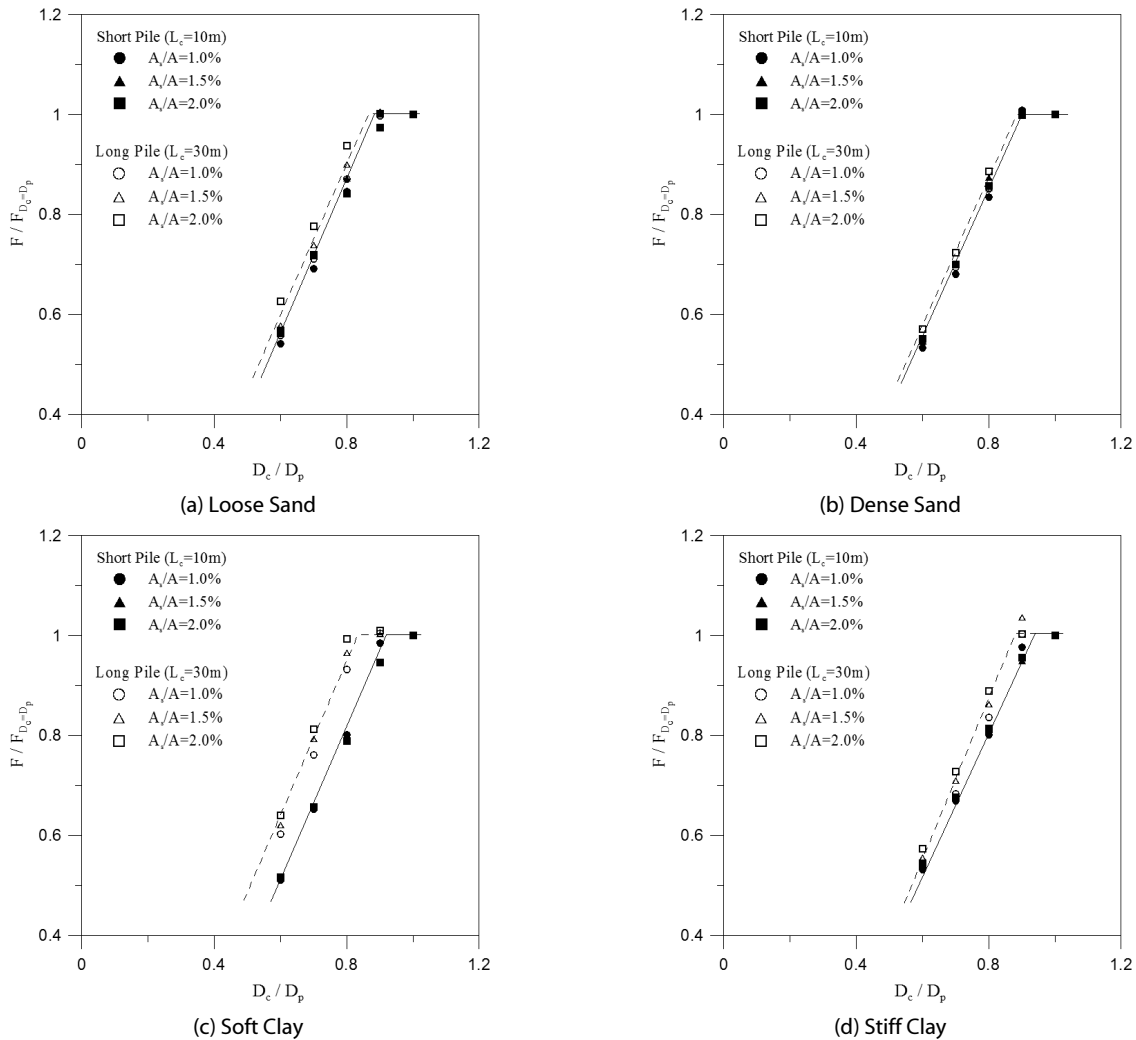


Fig. 11. Optimized Column-Pile Diameter Ratio Under Lateral Crack Load Ratio

낸다. 사질토 지반의 경우, Fig. 11(a) 및 (b)와 같이 최적 단면 조건은 지반강성(조밀한 사질토, 느슨한 사질토)에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 말뚝 세장비의 영향은 장말뚝($L=30m$)의 경우, 기둥과 말뚝이 동시에 균열과괴가 발생하는 기둥 직경비 ($D_{c,max}/D_p$)가 0.84로서 0.85인 단말뚝($L=10m$)보다는 작으나 그 편차가 크지 않은 것으로 나타났다. 또한, 기둥과 말뚝의 철근량이 동일할 경우, 기둥과 말뚝이 동시에 균열과괴 되는 기둥직경비의 크기($D_{c,max}/D_p$)는 철근비(A_s/A)와 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났다. 여기서 A 는 말뚝 단면적이며, A_s 는 철근의 총 단면적을 의미한다.

Fig. 11(c) 및 (d)와 같이, 점성토 지반에서는 지반강성(견고한 점성토, 연약한 점성토)에 따라 최적 기둥-말뚝 직경비가 사질토 지반보다 다소 차이가 있는 것으로 나타났으며, 변단면 적용에 따른 효과가 발현되기 위해서는 견고한 점성토보다 연약한 점성토에서 직경비가 더욱 작아야 됨을 알 수 있다. 또한, 견고한 점성토에서는 말뚝 세장비에 따른 최적 기둥-말뚝 직경비 구간의 영향이 사질토에서만큼 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 연약한 점성토에 근입되어 있는 장말뚝의 경우, 기둥-말뚝의 변단면 부근에서 균열과괴가 발생하는 최적 기둥-말뚝 직경비($D_{c,max}/D_p$)가 0.8으로서 단말뚝일 때의 0.95와 비교하면 다소 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 연약한 점성토에서는 최적 기둥-말뚝 직경비를 적용할 경우 세장비의 영향이 존재함을 알 수 있었으며, 최근 국내 서남해안의 연약 점성토 지반에 변단면 단일 현장타설말뚝의 시공이 이루어지고 있음을 고려할 때 최적 기둥-말뚝 직경비를 적용할 시 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다. 한편, 점성토에 적용된 단일 현장타설말뚝의 최적 기둥-말뚝 직경비는 철근비에 대한 영향이 사질토보다는 크지만 그 차이는 미소한 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 변단면을 가지는 단일 현장타설말뚝의 거동 특성을 평가하기 위해, 현장시험 사례 분석 및 3차원 유한요소(finite element, FE)해석을 수행하였으며, 말뚝 내의 3차원적인 발생응력을 바탕으로 수평응력을 산정하였다. 또한, 지중부 말뚝에서 발생하는 소성힌지의 위치를 변단면 부근으로 이동시키기 위해, 주요 영향인자를 고려하여 지반조건에 따른 최적 기둥-말뚝 직경비를 제안하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 단일 현장타설말뚝의 변단면 특성을 평가하기 위한 현장시험 사례 분석 및 3차원 유한요소해석 결과, 변단면을 가지는 단일 현장타설말뚝은 말뚝-기둥의 강성 차이로 인하여 변단면에서 응력이 크게 변하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해, 변단면

- 단일 현장타설말뚝의 구조적 취약부는 최대 휨모멘트 위치가 아닌 변단면으로 이동하기 때문에 소성힌지도 지중부 말뚝이 아닌 지상부 기둥으로 충분히 유도될 수 있는 것으로 판단되었다.
- (2) 단일 현장타설말뚝의 최적 기둥-말뚝 직경비($D_{c,max}/D_p$)를 제안하기 위해, 기둥-말뚝 직경비(D_c/D_p)와 수평 균열하중비($F/F_{Dc=Dp}$)의 관계를 분석하였다. 분석 결과, 변단면에서 파괴가 일어나는 최적 기둥 직경($D_{c,max}$)은 기둥-말뚝 직경비와 수평 균열하중비 관계 곡선의 변곡점임을 알 수 있었다. 사질토 지반의 경우, 최적 기둥-말뚝 직경비는 지반강성 및 세장비에 큰 영향없이 0.85 정도로 일정하게 나타났다. 하지만, 점성토 지반에서의 최적 기둥-말뚝 직경비는 장말뚝일 경우 0.95, 단말뚝인 경우 0.8로 나타나 세장비에 따라 다소 편차가 존재함을 알 수 있었다. 따라서 단일 현장타설말뚝의 변단면을 적용할 시 세장비에 대한 세심한 주의가 필요할 것으로 판단되었다.

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).
- Brinch Hansen, J. (1961). "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces." *Bulletin No. 12*, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, pp. 5-9.
- Broms, B. (1964). "Lateral resistance of piles in cohesive soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, ASCE, Vol. 90, No. 4, pp. 27-63.
- Brown, D. A. and Shie, C. F. (1991). "Some numerical experiments with a three-dimensional finite element model of laterally loaded piles." *Computers and Geotechnics*, Vol. 12, pp. 149-162.
- 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.
- Jeong, S. S. and Seo, D. H. (2004). "Analysis of tieback walls using proposed p-y curves for coupled soil springs." *Computers and*

- Geotechnics*, Vol. 31, pp. 443-456.
- 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., 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., Seo, D. H. and Kim, Y. H. (2009). "Numerical analysis of passive pile groups in offshore soft deposits." *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, pp. 1164-1175.
- Jeong, S. S., Sung, C. G., Ko, J. Y. and Kim, S. I. (2009). "Analysis of laterally loaded pile-bent structure with varying cross-sectional area." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 25, No. 4, pp. 69-75 (in Korean).
- Jeremic, B. and Yang, Z. (2002). "Numerical analysis of pile behavior under lateral loads in layered elastic-plastic soils." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 26, pp. 1385-1406.
- 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, 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, 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, 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.
- Kim, Y. H., Jeong, S. S. and Won, J. O. (2009). "Effect of lateral rigidity of offshore piles using proposed p-y curves in marine clay." *J. Marine Geosources and Geotechnology*, Vol. 27, No. 1, pp. 53-77.
- Korea Expressway Corporation (2004). *Design criteria for pile bent structure*, Vol. 68, pp. 14-27 (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.
- 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 2.2*, Brinkgreve, R.B. and Swolfs, W. M., PLAXIS Inc.
- 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).
- Wallace, J. W., Fox, P. I. and Stewart, J. P. (2002). *Cyclic large deflection testing of shaft bridges part II: Analytical Studies*, Rep. No. 59A0183, California Dept. of Transportation. California.
- Won, J. O., Ahn, S. Y., Jeong, S. S., Lee, J. H. and Jang, S. Y. (2006). "Nonlinear three-dimensional analysis of pile group supported columns considering pile cap flexibility." *Computers and Geotechnics*, Vol. 33, pp. 355-370.