

# 단일 현장타설말뚝의 간편해석 및 최소 철근비 분석

## Simplified Analysis of Pile Bent Structures and Minimum Reinforcement Ratio

김 재 영<sup>1</sup> Kim, Jae-Young  
황 택 진<sup>2</sup> Hwang, Taik-Jean  
정 상 섬<sup>3</sup> Jeong, Sang-Seom

### Abstract

In this study, simplified analysis (discrete analysis of column and pile) of pile bent structures was performed on the basis of the equivalent base spring model. And the minimum reinforcement ratio in pile bent structures was evaluated by taking into account various factors. To obtain the detailed information, simplified analysis was performed for column-pile interactions and the behavior of a column-pile was estimated and highlighted. Based on this study, it is shown that previous design method based on virtual fixed point theory cannot adequately predict the physical behavior of pile bent structures. It is found that the maximum bending moment is located within cracking moment of the pile when material non-linearity is considered. It is also found that the minimum reinforcement ratio (=0.4%) is appropriately applicable for the optimal design of pile bent structure under ultimate lateral loading.

### 요 지

본 연구에서는 등가 지반면 스프링 모델을 적용한 단일 현장타설말뚝의 간편해석(기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석)을 수행하였다. 이 때 지반조건, 하중, 말뚝직경 등의 영향인자에 따라 검증하였으며, 단일 현장타설말뚝에 적용된 철근량을 분석하여 말뚝의 최소 철근비 적용성을 평가하였다. 본 연구결과, 기존 기둥과 말뚝을 단일부재로 모델링하는 일체해석과 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석의 결과에는 서로 차이가 없었으며, 이를 통해 가상 고정점을 통한 해석법은 단일 현장타설말뚝의 정확한 거동파악이 어려움을 알 수 있었다. 또한 재료의 비선형성을 고려한 해석결과, 말뚝부에서 발생하는 휨모멘트는 말뚝재료의 균열모멘트 이내에서 모두 발생하였으며, 수평변위도 허용 수평변위 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 단일 현장타설말뚝의 말뚝부에는 최소철근비 기준인 0.4% 철근량만을 배근하여도 안정성이 확보되는 것을 알 수 있었으며, 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석은 상하부 일체해석으로 가는 중간단계의 비교적 정확하고 경제적인 설계법임을 알 수 있었다.

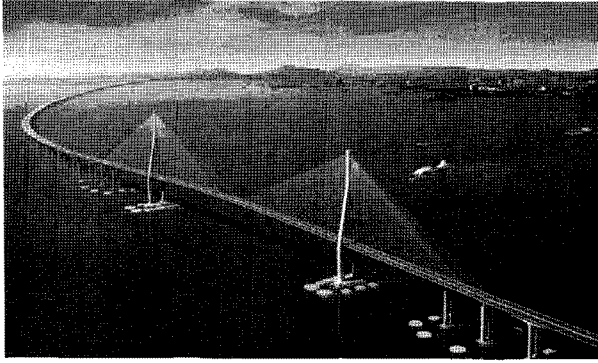
**Keywords** : Column-pile interactions, Equivalent base spring model, Minimum reinforcement ratio, Pile bent structures, Simplified analysis, Virtual fixed point theory

1 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

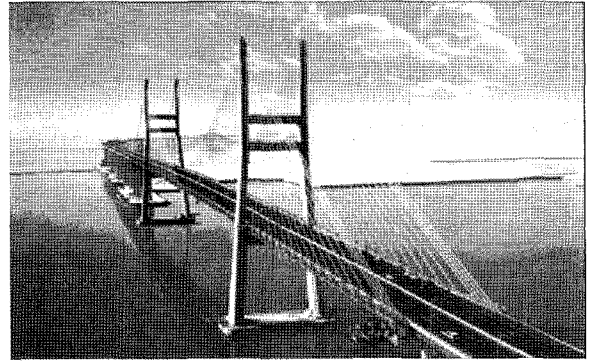
2 정회원, 동의대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Donggwi Univ.)

3 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.



(a) 인천대교



(b) 서해대교

그림 1. 국내 초장대교량 기초

## 1. 서론

최근 국토의 확장에 따른 서·남해안 개발 등과 관련하여 열악한 지반 조건에서 그림 1과 같은 대형 토목구조물의 건설이 이루어지고 있다. 이러한 대형 토목구조물의 기초형식으로 단일 현장타설말뚝을 채택하고 있는 경향이 증가하고 있다.

단일 현장타설말뚝은 일반적으로 사용하는 기둥-캡-말뚝의 3가지 요소로 구성되는 기초와 달리 말뚝캡을 설치하지 않고 말뚝과 기둥을 단일부재로 사용하는 기초를 말하며, 말뚝은 지름이 2.0~3.5m인 대구경 천공말뚝(Cast In Drilled Hole Pile)을 적용한다. 단일 현장타설말뚝은 간편한 시공성으로 인해 다른 말뚝기초에 비해 경제성이 우수하며, 교각과 기초의 철근 배근 등 연결이 간단하고, 횡방향 하중에 대하여 유연한 거동을 보임으로써 내진 저항능력이 우수하다.

단일 현장타설말뚝은 국외에서는 일반적인 공법으로 적용되고 있지만, 국내에서는 2003년 한국도로공사에서 단일 현장타설말뚝의 설계기준을 제정하고, 2004년 익산~장수간 고속도로 단양교에 시험시공을 실시한 것이 시작이라 할 수 있다. 국내에 처음 도입되었을 때에는 안정성 및 시공성이 검증되지 못하였으나 실제 시공 결과, 경제성 및 시공성이 매우 우수하고 구조적으로 안정성이 확인되면서 최근에는 점차 그 적용성이 증대되고 있다. 또한 인천대교 고가교 단일 현장타설말뚝 기초의 설계(손혁수 등, 2005), Pile-Bent 구조의 수평거동 분석에 대한 연구(정상삼, 2005), 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 내진해석 및 철근상세(손혁수 등, 2006), 경전철 기초 단일형 현장타설말뚝의 수평거동 분석(송화준, 2008), 양방향 선단재하시험에 의한 현장타설말뚝의 하중-침

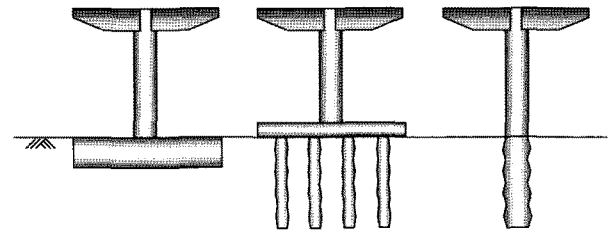


그림 2. 직접기초, 말뚝기초 및 단일 현장타설말뚝의 비교

하 거동분석(한근택, 2008), 단일형 현장타설말뚝의 최소 철근비 적용을 위한 연구(김재영 등, 2010), 단일형 현장타설말뚝의 소성힌지를 고려한 최적설계법 제안(안상용, 2010) 등의 단일 현장타설말뚝 기초에 관한 연구가 수행되고 있다. 그러나 아직까지 단일 현장타설 말뚝은 기초와 기둥의 일체화된 구조해석으로 상대적으로 지반분야에서는 연구가 미비하여, 하부기초 말뚝 연구를 통한 경제적이고 시공성이 우수한 설계법 마련이 절실한 실정이다.

현재 국내의 단일 현장타설말뚝 설계법은 도로교설계기준(2005)에서 제시하는 설계방법에 따라 설계하며, 필요시에는 AASHTO(2002), FHWA(1987) 등의 국외 기준을 적용할 수 있도록 되어 있다. 단일 현장타설말뚝 기초의 설계개념은 그림 2와 같이 푸팅을 시공하는 직접기초나 말뚝기초와 달리, 기둥과 기초의 경계가 불분명하므로 이들을 연속된 구조물로 고려하여 설계하여야 한다. 또한, 기둥의 거동 특성이 지반조건의 영향을 받게 되므로 그 영향을 고려하여야 한다.

일반적으로 FHWA(1987)에 따르면, 단일 현장타설말뚝의 설계를 위한 구조해석 모델링 방법으로는 그림 3과 같이 탄성스프링 모델, 등가 고정단 모델 및 등가 지반면 스프링 모델이 사용되고 있으며, 이 중에 등가 지반면

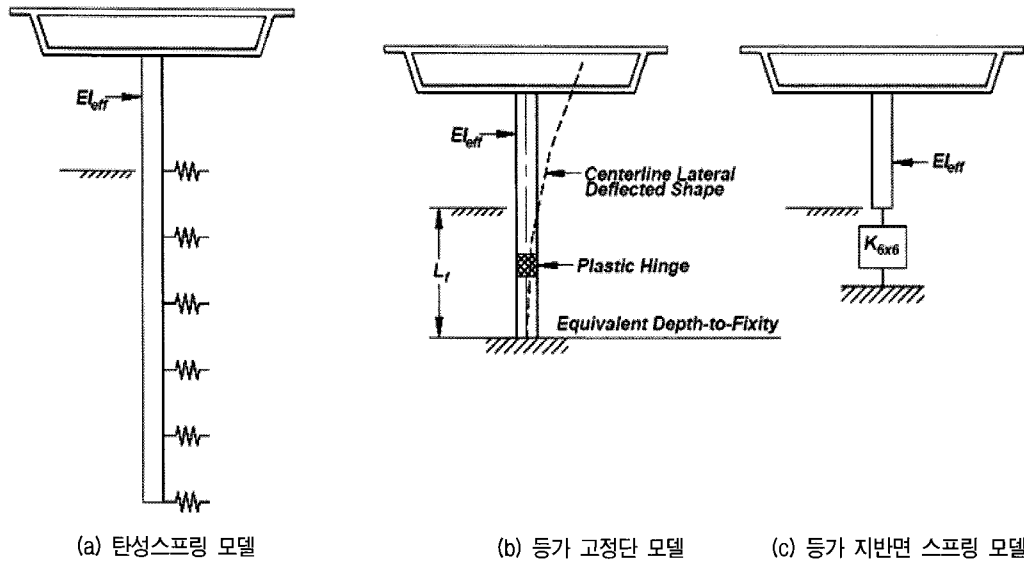


그림 3. 단일 현장타설말뚝 모델링 방법

스프링 모델은 기둥-말뚝의 상호작용을 고려할 수 있고, 실제 거동을 가장 근사하게 모사할 수 있는 방법이라고 할 수 있다. 그러나 탄성스프링 모델이나 등가 고정단 모델에 비해 반복해석에 따른 복잡한 단점이 있다.

단면검토 시에는 기둥의 길이를 말뚝의 수평저항에 관여하는 지반의 깊이인 가상고정점까지 적용하고 있으며(Hutchinson et al., 2002; 전경수 등, 2006), 최소 철근비에 대한 규정에서도 가상고정점을 기준으로 기둥과 말뚝을 구분하여 적용하고 있다. 이는 가상고정점이 말뚝의 최대 모멘트 발생지점보다 깊게 위치하므로, 가상고정점 깊이까지는 기둥의 최소 철근비(1%)를 적용하고, 그 이하의 깊이에서는 현장타설말뚝의 최소 철근비(0.4%)를 적용하도록 하고 있다.

그러나 이는 근사적인 방법으로 실제의 하부말뚝 거동에 맞지 않고 과대설계의 원인이 되므로, 보다 정확한 말뚝 거동과악이 필수적으로 요구된다. 이에 본 연구에서는 지반조건, 말뚝직경, 하중 등의 매개변수에 따라 단일 현장타설말뚝의 간편해석(말뚝과 기둥의 상호작용을 고려한 분리해석), 즉 등가 지반면 스프링 모델을 적용하여 단일 현장타설말뚝의 수평거동을 분석하였으며, 말뚝에 적용될 수 있는 최소 철근비를 확인하였다. 이를 통해 현재 단일 현장타설말뚝의 경제성 및 안정성이 고려될 수 있는 설계기준을 제시하고자 한다.

## 2. 단일 현장타설말뚝의 간편해석

단일 현장타설말뚝의 간편해석(Simplified Analysis)은

기둥부와 말뚝부의 상호작용을 고려한 분리해석(Discrete Analysis) 또는 등가 지반면 스프링 모델을 의미하며, 상부구조의 설계뿐만 아니라 하부기초의 설계에도 중요한 이슈가 되고 있다. 현재까지 기초와 지반의 상호작용에 관해서는 많은 연구가 이루어져 왔으나, 상부구조물과의 상호작용 해석에 관해서는 그 중요도에 비하여 상대적으로 국내·외 연구가 미진한 편이다. 이는 상부구조와의 상호작용이 고려된 분리해석을 위해서는 복잡한 상부구조의 모델링기법 및 복잡한 구조해석기법이 필요하기 때문이다. 현재까지 상부구조와 하부기초, 즉 접합부의 상호작용은 지반공학보다는 상부구조 해석에서 다루어져 왔으며, 지반공학에서는 상부구조 해석을 통해 산정된 기초 및 지반의 반력을 이용하여 지지력 및 변위를 검토하는 것이 일반적이었다. 그러나 이 경우 정밀한 해석기법을 통하여 개개 하부기초 해석을 수행한다 할지라도 상부구조물조건을 충분히 반영하지 못하기 때문에, 하부기초 두부에 작용하는 하중만을 적용한 해석이 하부기초의 거동을 정확히 대변하지 못할 수 있다. 따라서 그 결과는 실제 거동과는 차이를 나타낼 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 상부구조(기둥)해석을 통해 산정된 지반의 반력을 기초(말뚝)에 적용하여 분리해석을 수행하였다. 해석 시에 상부구조물과 하부기초의 분리해석을 수행하기 위해 Midas 및 FB-Pier 프로그램을 이용하였다. 지반조건, 수평하중 및 말뚝직경에 따라 FB-Pier 프로그램을 이용하여, 하부기초(말뚝)의 거동 및 스프링 강성행렬(Coupled Stiffness Matrix, CSM)을 산정하였으며

며, 산정된 스프링상수를 이용하여 구조해석 프로그램인 Midas를 통해 상부구조(기둥) 해석을 실시하였다. 해석을 통해 산정된 지반반력을 다시 말뚝두부에 작용하는 하중으로 적용시켜 말뚝의 깊이별 휨모멘트 및 수평 변위량을 확인하였으며, 이를 기존 말뚝과 기둥을 하나의 단일부재로 모델링하는 일체해석 결과와 비교하였다. 또한 단일 현장타설말뚝에 적용된 철근량을 분석하여 말뚝에 적용 가능한 최소 철근비를 확인하였다. 본 연구의 해석순서는 그림 4와 같다.

### 3. 수치해석을 통한 간편해석법의 검증

단일 현장타설말뚝은 지상부의 기둥과 지중부의 말뚝이 일체화된 형태로서, 상부구조 해석과 하부기초 해

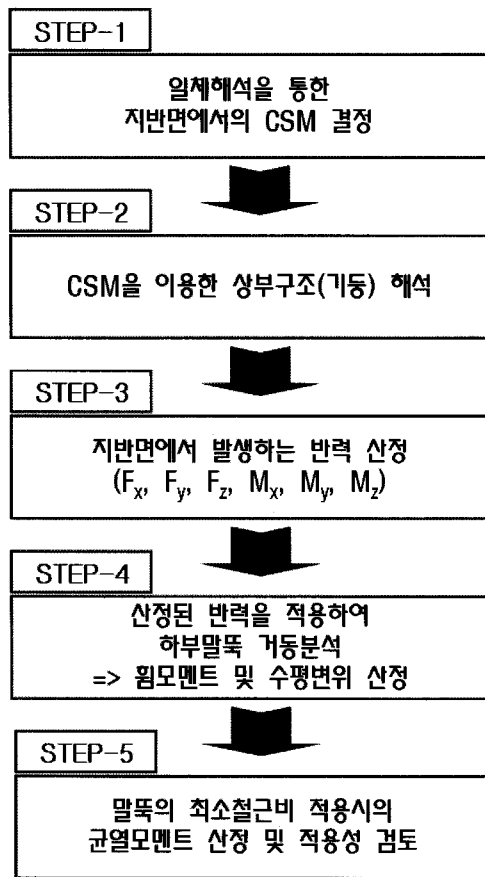


그림 4. 단일 현장타설말뚝의 기둥-말뚝 분리해석 흐름도

석이 동시에 고려되어야 한다. 그러나 기둥부와 말뚝부의 구분이 애매모호하고, 지반공학과 구조공학의 기준이 다르기 때문에 이를 동시에 고려 및 적용할 수 있는 해석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기존의 단일 현장타설말뚝을 단일부재로 간주하여 일체해석하는 방법을 보완할 수 있는 기둥과 말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석을 수행하였다. 이에 본 절에서는 기존의 단일 현장타설말뚝을 단일부재로 모델링한 해석(Unified Analysis)과 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석(Discrete Analysis)을 비교하여, 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석 기법의 적정성을 검증하고, 이를 통한 지중부 말뚝의 최소 철근비 적용성을 평가하였다.

#### 3.1 수치해석 개요

본 연구에서는 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석을 수행하기 위하여, 그림 5와 같이 지반조건(느슨

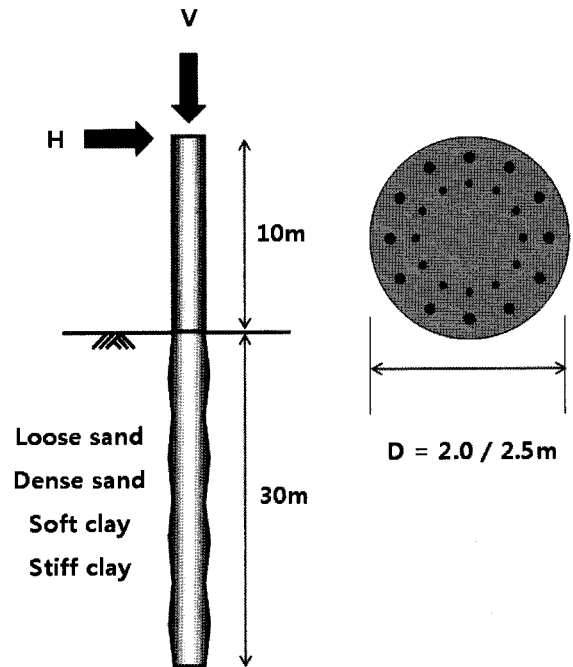


그림 5. 단일 현장타설말뚝의 수평거동분석을 위한 해석단면

표 1. 해석을 위한 지반조건

지반조건		하중전이곡선	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c(kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (deg)	K(kPa/m)	$\epsilon_{50}$
Sand	loose	Reese	18.1	-	32	10,000	-
	dense	Reese	19.1	-	40	34,000	-
Clay	soft	Matlock	17.6	40	-	27,000	0.01
	stiff	Reese	18.6	120	-	150,000	0.005

표 2. 해석을 위한 말뚝조건

구 분	단일 현장타설말뚝		
	concrete	steel	
Young's Modulus(kPa)	$2.46 \times 10^7$	$2 \times 10^8$	
일축압축강도(kPa)	27,000	400,000	
철근종류	-	H32	
철근단면적(mm <sup>2</sup> )	-	805	
피복두께(mm)	125(1단) / 225(2단)		
철근비(%)	(기둥부) 1.0 / (말뚝부) 0.4 & 0.3		
철근개수(EA)	직경 2,500mm	철근비 0.3%	18
		철근비 0.4%	25
	직경 2,000mm	철근비 0.3%	12
		철근비 0.4%	16
기둥 / 말뚝길이(m)	10 / 30		

표 3. 해석을 위한 매개변수

변 수	변 수 값		
지반조건	Loose sand / Dense sand / Soft clay / Stiff clay		
직경(mm)	2,000 / 2,500		
수평하중(kN)	직경 2,500mm	Loose sand	300 / 680
		Dense sand	300 / 700
		Soft clay	300 / 680
		Stiff clay	300 / 720
	직경 2,000mm	Loose sand	300 / 360
		Dense sand	300 / 380
		Soft clay	300 / 380
		Stiff clay	300 / 390

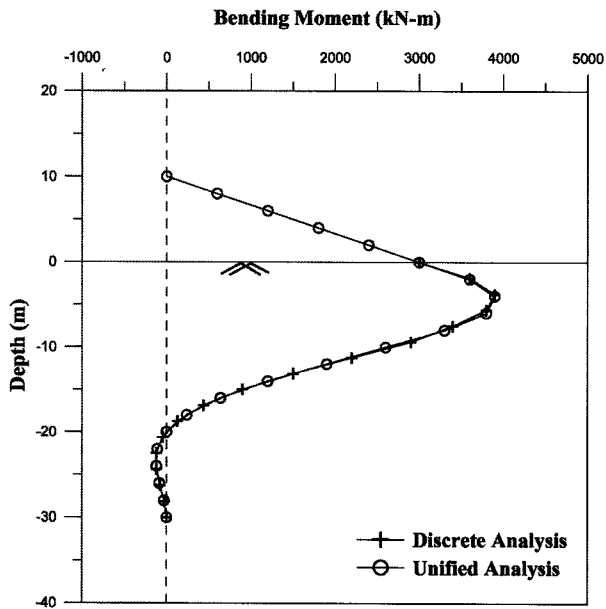
한 사질토, 조밀한 사질토, 연약한 점성토, 견고한 점성토), 말뚝직경 및 수평하중을 고려한 해석을 수행하였다. 본 해석에 적용된 지반 및 말뚝조건은 표 1 및 표 2와 같으며, 본 연구의 해석조건은 표 3과 같다. 표 3의 최대 수평하중은 각 해석조건에 따라 말뚝보다 지반의 파괴가 먼저 발생하면서 더 이상 프로그램 해석이 되지 않는 항복하중까지를 고려하였으며, 말뚝직경은 일반적인 단일 현장타설말뚝의 직경범위 2,000~2,500mm를 고려하여 적용하였다.

### 3.2 분리해석기법의 검증

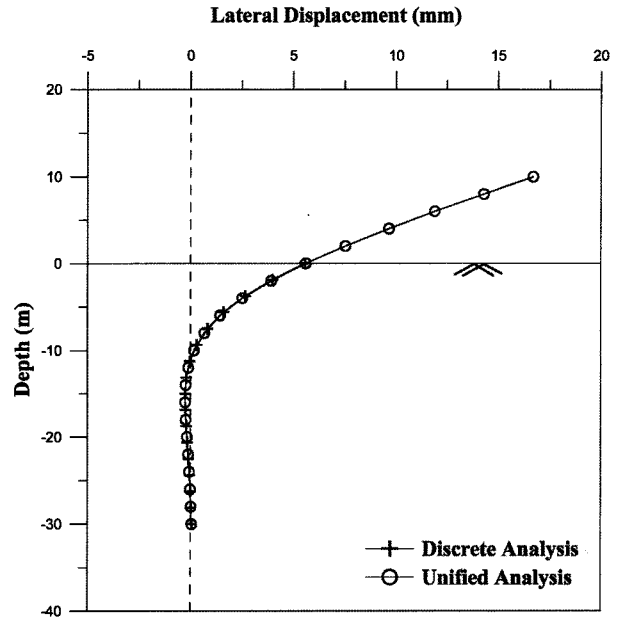
기존의 단일 현장타설말뚝을 단일부재로 모델링한 일체해석(Unified Analysis)과의 비교·분석을 통해, 본 연구에서 수행한 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석(Discrete Analysis)을 검증하였다. 분리해석의 방법은 1) 상부 구조해석을 통해 말뚝두부에서의 반력(R1)

을 산정하고, 2) 산정된 반력(R1)을 말뚝에 작용하는 하중으로 적용시켜 스프링강성행렬(Coupled Stiffness Matrix, CSM)을 산정하였다. 3) 산정된 스프링상수를 이용하여 다시 상부 구조해석을 실시하고, 4) 이를 통해 재산정된 반력(R2)을 초기 반력(R1)과 비교하여 차이가 없음을 확인한 후, 5) 재산정된 반력(R2)을 적용하여 하부 말뚝의 깊이별 휨모멘트 및 수평 변위량을 확인하였다. 만약 재산정된 반력(R2)과 초기 반력(R1)이 다를 경우, 반력이 수렴할 때까지 1)~3) 단계를 반복수행한다. 위와 같은 방법을 통해, 표 3의 사질토 지반(느슨한 사질토, 조밀한 사질토)에서의 말뚝직경 및 수평하중 변화에 따라 기존의 말뚝과 기둥을 단일부재로 모델링하는 일체해석 결과와 비교하였으며, 해석결과는 그림 6~9와 같다.

해석 결과, 최대 휨모멘트는 지표면 아래 약 3.75~4.0m에서 발생하였으며, 두 가지 해석법의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있었다. 또한 말뚝의 수평변위도 지표면 기준으로 최대 10mm 내외로 발생하여 말뚝의 허용

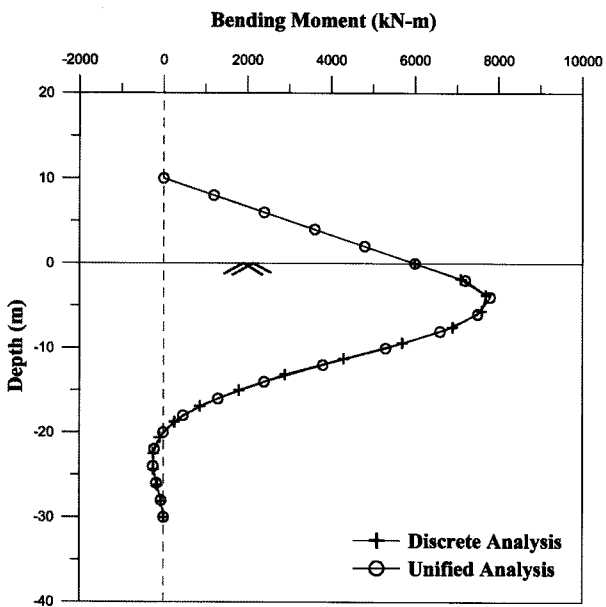


(a) 깊이별 휨모멘트

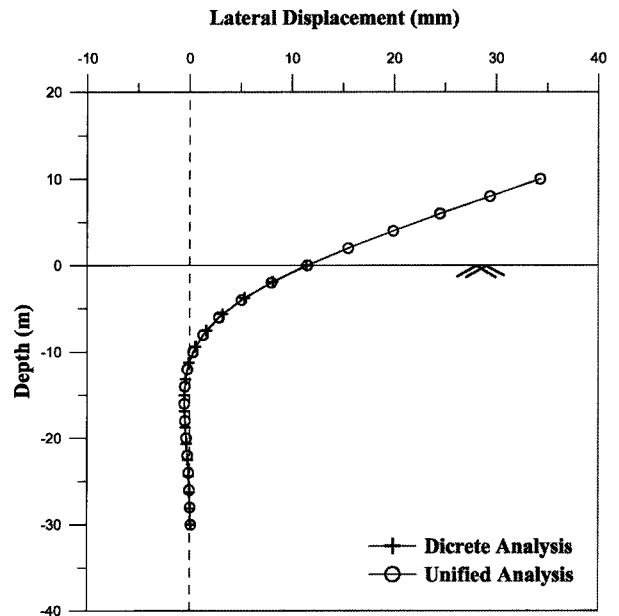


(b) 깊이별 횡방향 변위

그림 6. Loose sand에서의 단일 현장타설말뚝의 수평거동 (직경 2,500mm 및 수평하중 300kN)



(a) 깊이별 휨모멘트



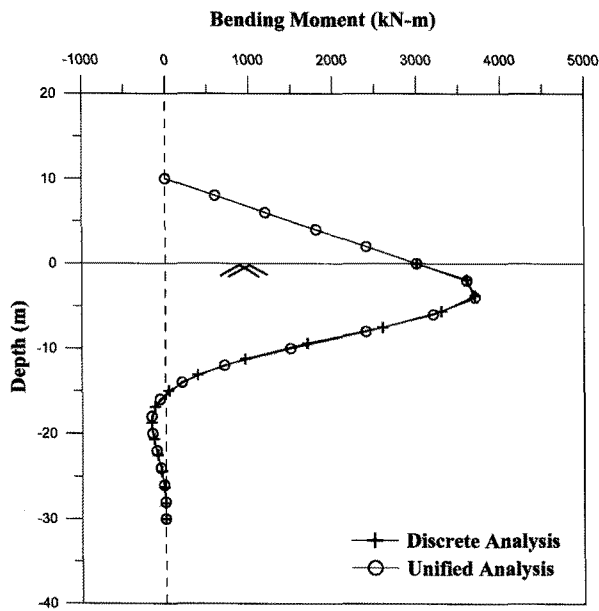
(b) 깊이별 횡방향 변위

그림 7. Loose sand에서의 단일 현장타설말뚝의 수평거동 (직경 2,500mm 및 수평하중 600kN)

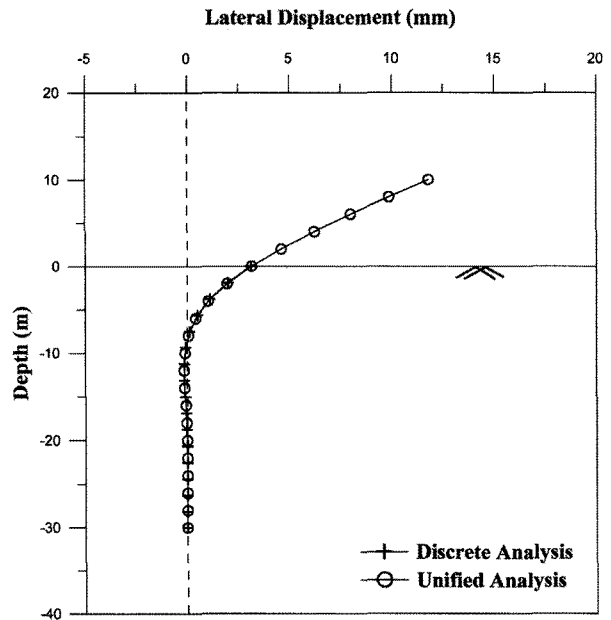
수평변위량 기준 38mm(AASHTO, 2002; FHWA, 1987) 또는 말뚝직경의 1%(도로교설계기준, 2008)에 만족하는 것으로 나타났다. 단, 산정된 말뚝의 수평변위는 일반적인 사질토층, 점성토층 및 일부 현장조건에 만족하는 제한적인 결과로서, 이에 대한 추가 연구 및 검토가 필요할 것으로 판단된다.

결론적으로 지반조건, 말뚝직경, 수평하중 크기 등에

상관없이 두 가지 해석법을 통해 산정된 깊이별 휨모멘트 및 깊이별 횡방향 변위는 큰 차이가 없이 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석(Discrete Analysis)을 단일 현장타설말뚝 해석 시에 적용하여도 무리가 없다고 판단되었으며, 일체 해석으로 가는 중간 단계로서 비교적 정확하고 경제적인 해석법으로 적용 가능할 것으로 기대된다.

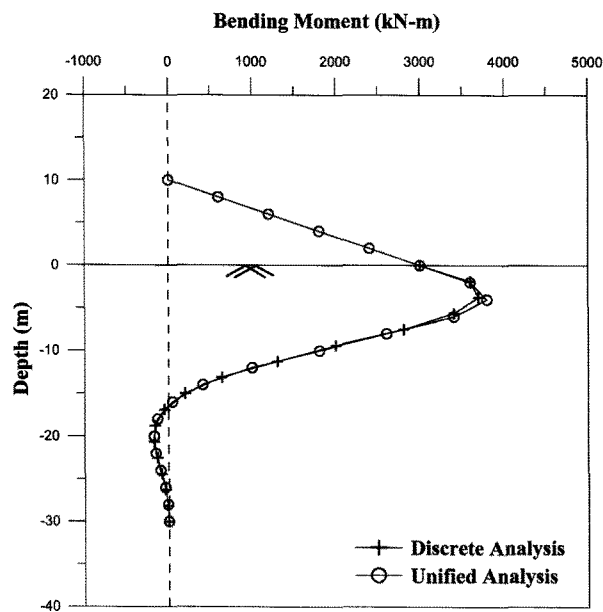


(a) 깊이별 휨모멘트

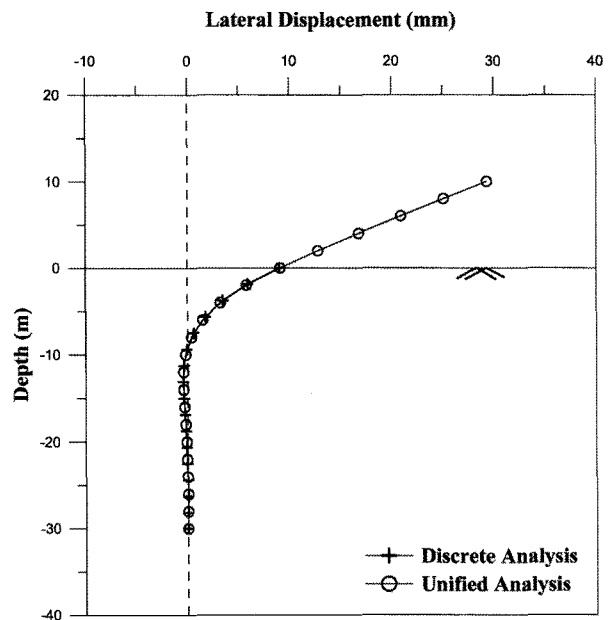


(b) 깊이별 횡방향 변위

그림 8. Dense sand에서의 단일 현장타설말뚝의 수평거동(직경 2,500mm 및 수평하중 300kN)



(a) 깊이별 휨모멘트



(b) 깊이별 횡방향 변위

그림 9. Loose sand에서의 단일 현장타설말뚝의 수평거동(직경 2,000mm 및 수평하중 300kN)

#### 4. 말뚝의 최소 철근비 적용성 평가

##### 4.1 현장 사례를 통한 단일 현장타설말뚝의 철근비 분석

국내에서는 아직까지 시공성, 경제성에 비해 안전성에 중점을 두는 설계가 이루어지기 때문에, 단일 현장타설말뚝의 철근배근 시에 기둥과 말뚝에 동일한 철근량을 적용하고 있다. 이에 본 절에서는 국내의 서울 도로

교 현장, 전라남도 도로교 현장, 경기도 경전철 현장, 경기도 철도교 현장 등의 실제 단일 현장타설말뚝이 적용된 현장사례를 통해, 실제 시공 시에 배근하는 철근량을 분석하였으며, 이를 통해 말뚝의 최소 철근비 적용성을 검토하였다.

분석 결과, 표 4와 같이 4개 현장에 적용된 단일 현장타설말뚝에는 현재 최소 철근비 기준과는 달리 기둥과 말뚝의 구분이 없이 동일한 철근비가 적용된 것을 알

수 있다. 또한 배근된 철근량도 대부분 기둥의 철근비 1% 이상으로서, 현재 말뚝부의 최소 철근비로 규정된 0.4%를 상회하는 것을 알 수 있었다.

이에 표 5와 같이, 서울 도로교 현장 및 전라도 도로교 현장에 대해 말뚝의 최소 철근비 0.4% 적용성을 검토하였다. 여기서, 하중 320kN 및 430kN은 현장의 실제

설계하중이며, 최대하중 750kN 및 840kN은 해석상에서 재료의 파괴가 일어나는 항복하중을 의미한다.

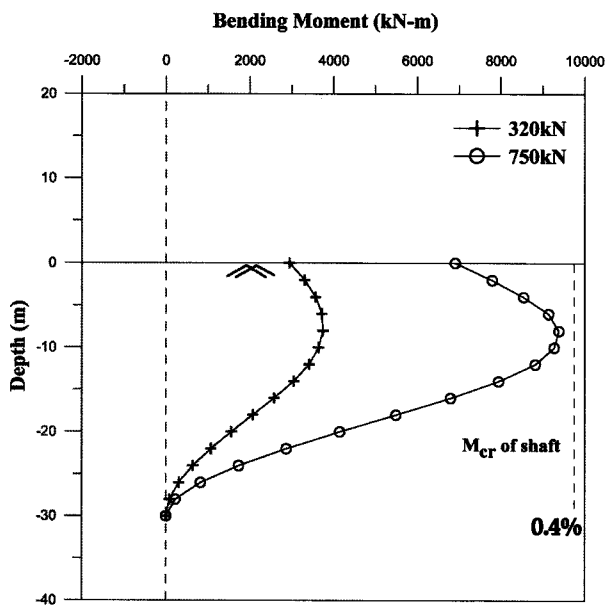
서울 도로교 현장의 분석결과, 그림 10(a)와 같이 최대 항복하중 750kN 적용 시에 최대 휨모멘트 9,386kN·m는 균열모멘트 9,749kN·m 이내에 있는 것으로 나타났다. 또한 그림 10(b)와 같이, 전라도 도로교 현장에서도

표 4. 현장별 단일 현장타설말뚝의 철근비

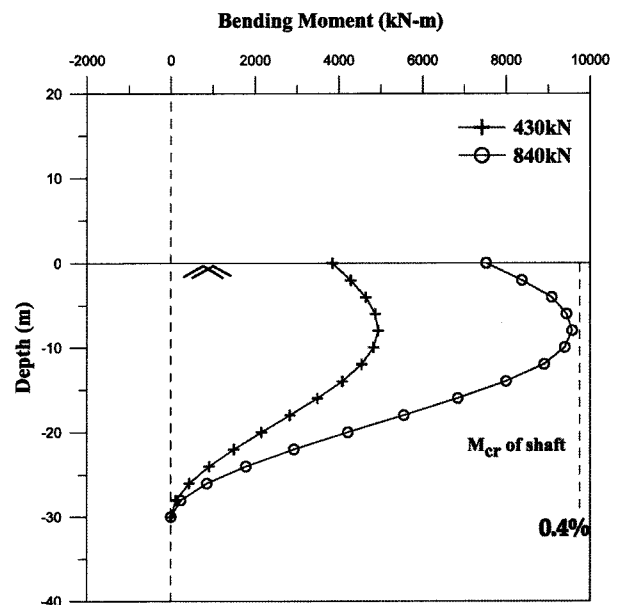
현장	교각형식	종류	말뚝부			기둥부		
			직경(m)	철근종류 및 개수	철근비(%)	직경(m)	철근종류 및 개수	철근비(%)
서울 도로교	II형	1	2.0	H29-50EA	1.05	2.0	H29-50EA	1.05
			2.5	H32-69EA	1.13	2.5	H32-69EA	1.13
전라도 도로교	II형	1 (상행선)	2.5	D32-67EA(1단)	2.09	2.5	D32-67EA(1단)	2.09
				D32-61EA(2단)			D32-61EA(2단)	
	II형	2 (하행선)	2.5	D32-67EA(1단)	1.92	2.5	D32-67EA(1단)	1.92
				D29-61EA(2단)			D29-61EA(2단)	
경기도 경전철	T형	1	2.2	H32-48EA(1단)	1.90	2.2	H32-48EA(1단)	1.90
				H32-42EA(2단)			H32-42EA(2단)	
경기도 철도교	T형	1	2.0	H38-50EA	1.81	2.0	H38-50EA	1.81

표 5. 현장별 해석조건

현장	지반조건	하중전이곡선	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c(kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (deg)	K(kPa/m)	$\epsilon_{50}$	기둥/말뚝 길이(m)	직경(mm)	수평하중(kN)
서울 도로교	Soft clay	Matlock	17	60	-	-	0.01	9.2/19	2,500	320/750
	Dense sand	Reese	18	-	30	38,000	-			
	Hard rock	bi-linear	21	10	33	480,000	-			
전라도 도로교	Dense sand	Reese	19	-	30	62,695	-	9.0/15.2	2,500	430/840
	Hard rock	bi-linear	20	30	31	505,000	-			



(a) 서울 도로교 현장



(b) 전라도 도로교 현장

그림 10. 현장별 휨모멘트 및 철근비 0.4% 적용 시 균열모멘트



최대 항복하중 840kN 적용 시에 균열모멘트 9,749kN·m 이내로 최대 휨모멘트 9,672kN·m가 발생하여, 말뚝의 최소 철근비 0.4%를 만족하였다.

이를 통해, 설계하중의 2배 이상인 항복하중을 적용하여도 최소 철근비 규정을 만족하는 것으로 나타나, 아직까지 단일 현장타설말뚝을 설계 시에 시공에 따른 불확실성과 이에 따른 안정성을 확보하기 위하여 철근을 과다하게 배근하고 있다고 판단되었다. 따라서 설계상의 충분한 안정성만이 확보된다면 지표면을 기준으로 하부 말뚝에는 0.4% 철근비만을 적용하는 것이 보다 경제적인 것이라고 판단된다.

#### 4.2 말뚝의 최소 철근비 제안

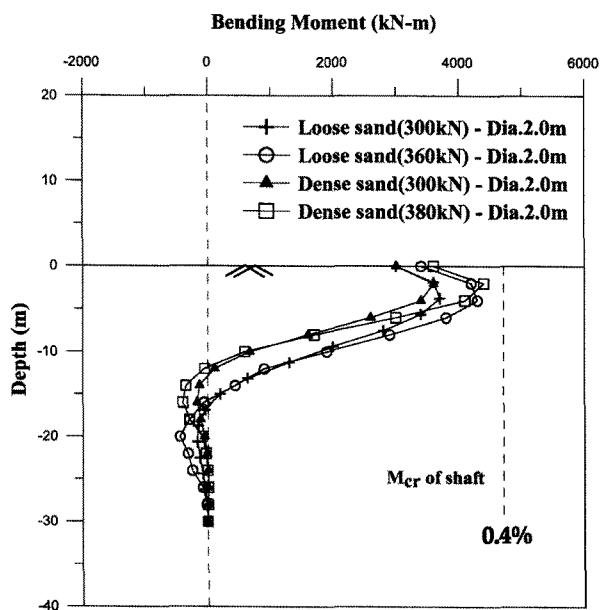
본 절에서는 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석(Discrete Analysis)을 통해, 말뚝의 최소 철근비(0.4%) 이하의 철근비 적용성을 평가하였다. 해석절차는 1) 말뚝의 최소 철근비 0.4% 및 그 이하의 철근비를 적용하여 말뚝의 균열모멘트 및 심도별 휨모멘트를 산정하였으며, 2) 최대 휨모멘트가 균열모멘트 이내에서 발생하는지에 따라 최소 철근비의 적용성을 평가하였다. 해석시 적용한 최대 수평하중은 일반적으로 단일 현장타설 말뚝이 적용되는 실제 현장의 설계하중을 상회하는 크기로서, 최소 철근비에 따라 말뚝보다 지반의 파괴가 먼저 발생할 때의 항복하중을 적용하였다. 여기서 말뚝의

균열모멘트 산정은 철근이 고려된 구조물의 단면조건에 따른 강도계산 프로그램인 Response 2000을 이용하였으며, 심도별 휨모멘트는 FB-Pier 프로그램을 이용하여 산정하였다.

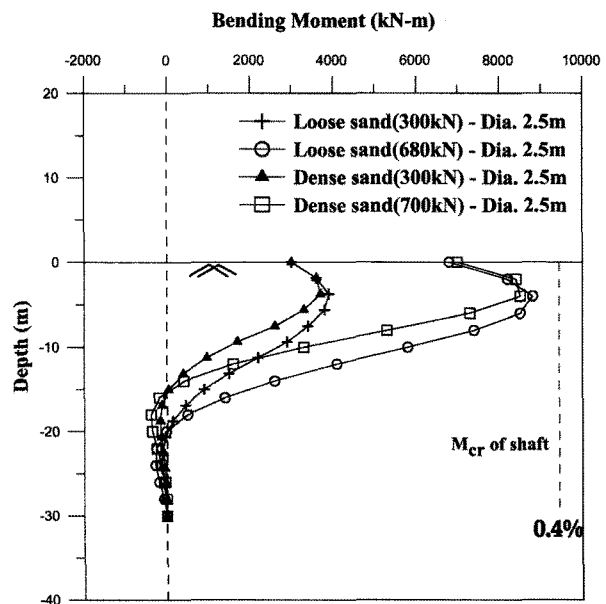
분석결과, 그림 11~12와 같이, 4가지 지반조건(느슨한 사질토, 조밀한 사질토, 연약한 점성토 및 견고한 점성토)에서의 말뚝의 심도별 최대 휨모멘트는 모두 말뚝의 균열모멘트 이내에 있는 것으로 나타났으며, 따라서 말뚝부에 철근비를 0.4%로만 적용해도 무리가 없는 것으로 판단되었다.

그림 11(a)와 같이, 사질토지반에서 말뚝직경이 2,500mm 일 경우에 최대 휨모멘트는 3,700~8,500kN·m 정도로 나타났으며, 최대 휨모멘트가 모두 균열모멘트 9,436kN·m 이내에서 발생하였다. 또한 그림 11(b)와 같이, 말뚝직경 2,000mm에서도 최대 휨모멘트는 4,400kN·m으로 균열모멘트 4,710kN·m이내에서 발생하였다. 점성토지반의 경우에는 그림 12(a) 및 (b)와 같이, 말뚝직경 2,500mm의 경우 최대 휨모멘트 3,700~8,700kN·m, 2,000mm에서 3,500~4,700kN·m정도 나타났으며, 모두 균열모멘트보다 작기 때문에 말뚝의 최소 철근비 0.4%를 적용해도 무리가 없는 것을 알 수 있었다.

그러나, 그림 13과 같이 말뚝부에 최소 철근비 기준 이하의 0.3%를 적용했을 경우에는 최대 휨모멘트가 균열모멘트보다 큰 것으로 나타났다. 따라서 0.4% 이하의 철근비를 말뚝에 적용하기는 어려운 것으로 판단되었다.

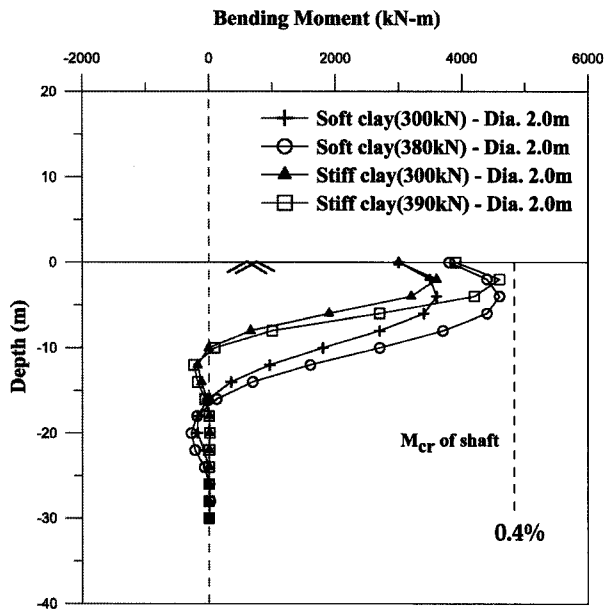


(a) 말뚝직경 2,000mm

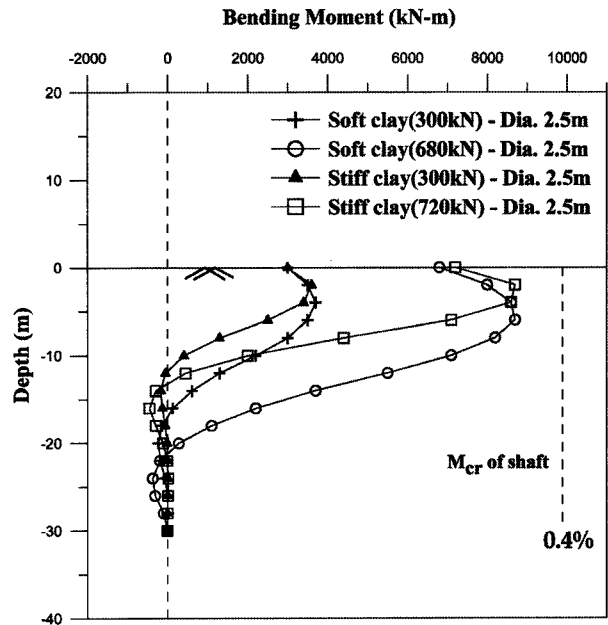


(b) 말뚝직경 2,500mm

그림 11. 말뚝의 깊이별 휨모멘트 및 철근비 0.4% 적용 시 균열모멘트(Sand)

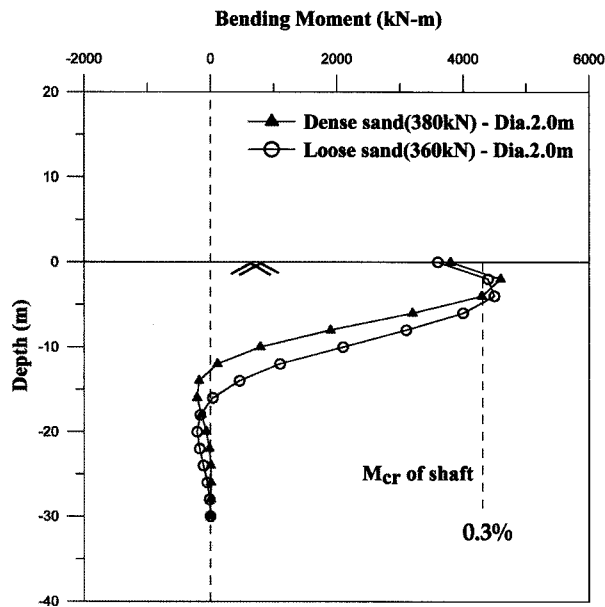


(a) 말뚝직경 2,000mm

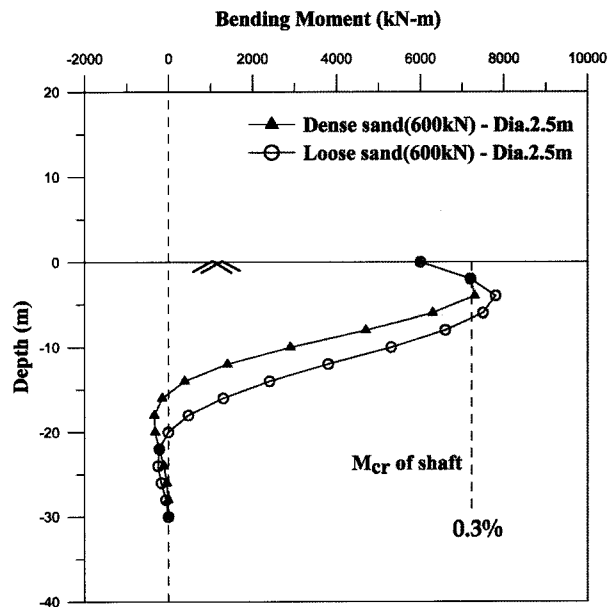


(b) 말뚝직경 2,500mm

그림 12. 말뚝의 깊이별 휨모멘트 및 철근비 0.4% 적용 시 균열모멘트(Clay)



(a) 말뚝직경 2,000mm



(b) 말뚝직경 2,500mm

그림 13. 말뚝의 깊이별 휨모멘트 및 철근비 0.3% 적용 시 균열모멘트(sand)

따라서 본 연구결과를 토대로, 현재 실제 설계 시에 기둥과 말뚝에 동일한 철근량을 배근하는 시공법을 수정하여 말뚝부에는 최소 철근비 0.4%만을 배근할 경우, 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 단일 현장타설말뚝의 기둥-말뚝의 상

호작용을 고려한 분리해석(Discrete Analysis)을 수행하여, 지반조건, 수평하중, 말뚝직경 등의 매개변수에 따라 기존 단일부재 해석법과의 심도별 휨모멘트 및 수평변위를 비교·분석하여 본 해석기법의 타당성을 검증하였다. 또한, 말뚝의 균열모멘트 산정하고, 이를 통해 말뚝의 최소 철근비 적용성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 해석결과, 단일 현장타설말뚝을 단일부재로 해석하는 방법(Unified Analysis)과 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석(Discrete Analysis)은 심도별 휨모멘트 및 수평 변위량의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 단일 현장타설말뚝 해석 시에 분리해석을 적용해도 무리가 없으며, 본 해석기법을 통해 상부구조 해석과 하부기초 해석을 동시에 고려할 수 있을 것으로 판단되었다.
- (2) 현장 설계하중 이상의 수평하중을 적용하여 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 분리해석을 수행한 결과, 말뚝의 깊이별 휨모멘트는 균열모멘트 이내에서 발생하여 말뚝의 최소 철근비 기준(0.4%)을 만족하였다. 그러나 그 이하의 철근비에 대해서는 적용이 어려울 것으로 판단되었다. 따라서 지중부 말뚝에는 최소 철근비 0.4%를 적용해도 무리가 없을 것으로 판단되며, 이를 통해 현재 기둥과 말뚝의 구분없이 기둥의 철근량을 동일하게 배근하는 방식이 개선된 경제적인 시공이 가능할 것으로 기대된다.
- (3) 해석조건에 따라 항복하중까지 적용한 결과, 지표면을 기준으로 산정된 수평변위는 현행 대표적인 말뚝의 허용 수평변위량 기준 38mm(AASHTO, 2002; FHWA, 1987) 또는 말뚝직경의 1%(도로교설계기준, 2008)에 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 따라서 최소 철근비를 배근하였을 경우에 수평변위로 인한 구조적인 문제도 발생하지 않을 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업 (08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 건설교통부 (2005), 도로교 설계기준.
2. 건설교통부 (2008), 도로교설계기준해설.
3. 김재영, 정상섭 (2010), "단일형 현장타설말뚝의 최소 철근비 적용을 위한 연구", 한국지반공학회 2010년도 가을 학술발표회 논문집.
4. 손혁수, 최인기, 강동욱, 양종호 (2005), "인천대교 고가교 단일형 현장타설말뚝 기초의 설계", 대한토목학회 2005년도 학술발표회 논문집, pp.959-962.
5. 손혁수, 최인기, 이상희, 양종호 (2006), "말뚝-기둥 일체형 교각기초의 내진해석 및 철근상세", 한국지진공학회 논문집, pp.300-307.
6. 송화준 (2008), "경전철 기초 단일형 현장타설말뚝의 수평거동 분석", 연세대학교 석사학위 논문.
7. 안상용 (2010), "단일형 현장타설말뚝의 소성힌지를 고려한 최적 설계법 제안", 연세대학교 박사학위 논문.
8. 전경수, 김경석, 김정열 (2006), "단일 현장타설말뚝 기초의 설계 및 시공", 한국 토질 및 기초기술사회 기술발표회, pp.86-100.
9. 한근택 (2008), "양방향 선단재하시험에 의한 현장타설말뚝의 하중-침하 거동분석", 연세대학교 석사학위 논문.
10. AASHTO (2002), Standard Specification for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Official.
11. FHWA (1987), Drilled Shaft, National Highway Institute.
12. 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.
13. Matlock, H. (1970), "Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay", The second annual offshore technology conference, Houston, Texas, April 22-24, OTC 1204, pp.577-607.
14. Reese, L. C. and Wright, W. (1977), Drilled Shaft Manual, U. S. Department of Transportation.

(접수일자 2010. 12. 28, 심사완료일 2011. 4. 15)