

단일형 현장타설말뚝의 최소 철근비 적용을 위한 연구

A Study on the Application of Minimum Reinforcement Ratio in Pile-Bent structure

김재영¹⁾, Jae-Young Kim, 정상섭²⁾, Sang-Seom Jeong

¹⁾ 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

²⁾ 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

SYNOPSIS : In recent days, the foundations of huge structures in general and mega foundations of grand bridges in particular are required in geotechnical engineering. However, previous design method based on virtual fixed point theory cannot adequately predict Pile-Bent structure's physical behavior.

Therefore, this paper describes a new analysis and design of Pile-Bent structure for grand bridges. A detailed analysis was performed for column-pile interactions using FB-Pier program and Midas program. As a result, the behavior of a column-pile is estimated and highlighted. Moreover, based on this study, it is found that the minimum reinforcement ratio(=0.4%) is applicable for plastic behavior of columns.

Keywords : Grand bridge, Virtual fixed point theory, Pile-Bent structure, Column-pile interactions, Minimum reinforcement ratio

1. 서론

최근 사회기반시설에 대한 집중적인 투자와 더불어 국도 및 고속도로의 개량, 육지와 도서지역을 연결하는 도로망의 확충 등으로 그림 1과 같이 대규모 해상교량 및 장대교량의 건설이 증가하고 있으며, 국토의 확장에 따른 서·남해안 개발 등과 관련하여 열악한 지반 조건에서의 토목 구조물의 건설이 이루어지고 있다. 또한 최근에는 이러한 대형 토목구조물의 기초형식으로 단일형 현장타설말뚝을 채택하고 있는 경향이 증가하고 있다.

단일형 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. 단일형 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.



(a) 인천대교

(b) 서해대교

그림 1. 국내 초장대교량 기초

단일형 현장타설말뚝은 국외에서는 일반적인 공법으로 널리 적용되고 있지만, 국내에서는 2003년 한국도로공사에서 단일형 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.

현재 국내의 단일형 현장타설말뚝 설계법은 도로교설계기준(2005)에서 제시하는 설계방법에 따라 설계하며, 필요시에는 AASHTO(2002), FHWA(1988) 등의 국외 설계기준을 적용할 수 있도록 되어 있다. 단일형 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.

그러나 단일형 현장타설말뚝은 말뚝 내의 공극이나 균열, 병목부동과 같은 내적인 결함과 말뚝 선단부의 굴착 잔류토와 말뚝 선단 밑의 공동으로 인한 연약 선단 등과 같은 외적인 결함으로 말뚝의 지지력이 저하되거나, 침하가 발생하여 상부구조물에 치명적인 위험을 가지고 있으며, 따라서 이러한 측면에서 말뚝의 구조적 결함을 신뢰성 있고 효율적으로 설계할 수 있는 설계법에 대한 요구가 증가하고 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.

하지만 이는 근사적인 방법으로 실제의 하부말뚝 거동에 맞지 않고 과대설계의 원인이 되므로, 보다 정확한 말뚝 거동파악이 필수적으로 요구된다. 이에 본 연구에서는 지반조건, 말뚝직경, 하중 등의 매개변수에 따라, 말뚝과 기둥의 상호작용을 고려한 일체해석을 수행하였으며, 이를 통해 말뚝에 적용될 수 있는 최소 철근비 및 말뚝의 수평변위를 확인하였다. 또한 추후 연구를 통해, 기존의 말뚝과 기둥의 길이산정 방법을 보완 및 새로운 말뚝의 허용 수평변위를 제시하고자 한다.

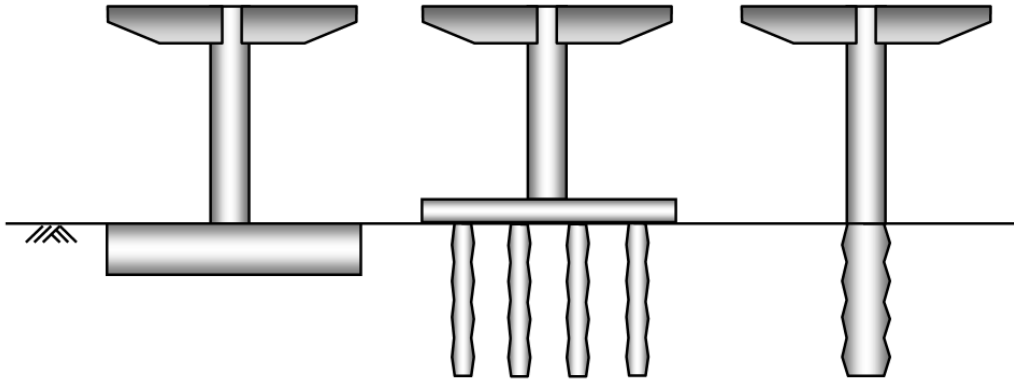


그림 2. 직접기초, 말뚝기초 및 단일형 현장타설말뚝의 비교

2. 단일형 현장타설말뚝의 기둥-말뚝의 일체해석

본 연구에서 수행한 단일형 현장타설말뚝의 기둥부와 말뚝부의 상호작용을 고려한 일체해석은 상부구조의

설계뿐만 아니라 하부기초의 설계에도 중요한 이슈가 되고 있다. 현재까지 기초와 지반의 상호작용에 관해서는 많은 연구가 이루어져 왔으나(손혁수 등, 2005), 상부구조물과의 일체화된 해석에 관해서는 그 중요도에 비하여 상대적으로 국내·외 연구가 미진한 편이다. 이는 상부구조와의 일체화된 해석을 위해서는 복잡한 상부구조의 모델링기법 및 복잡한 구조해석기법이 필요하기 때문이다. 현재까지 상부구조와 하부기초, 즉 접합부의 상호작용은 지반공학보다는 상부 구조해석에서 다루어져 왔으며, 지반공학에서는 상부구조해석을 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 반영하지 못하기 때문에, 하부기초 두부에 작용하는 하중이 하부기초의 거동을 정확히 대변하지 못할 수 있다. 따라서 그 결과는 실제와는 차이가 발생할 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 상부구조(기둥)해석을 통해 산정된 기초 및 지반의 반력을 이용한 하부기초(말뚝)의 거동을 분석하였으며, 이를 통하여 말뚝부에 적용 가능한 최소 철근비를 확인하였다. 상부구조물과 하부기초 전체의 일체해석을 진행하기 위해 FB-Pier 프로그램을 이용하였으며, 일체해석을 통해 하부기초의 거동 및 스프링강성행렬(CSM)을 산정하였다. 산정된 스프링상수를 이용하여 프로그램 Midas를 통해 상부 구조해석을 실시하였고, 해석결과 산정된 개개 지반반력 및 말뚝두부에서의 반력을 하중으로 작용시켜 하부 말뚝의 깊이별 휨모멘트 및 횡방향 변위량을 확인하였으며, 이를 기존의 단일부재 모델링 해석결과와 비교하였다. 본 연구의 해석순서는 그림 3과 같다.

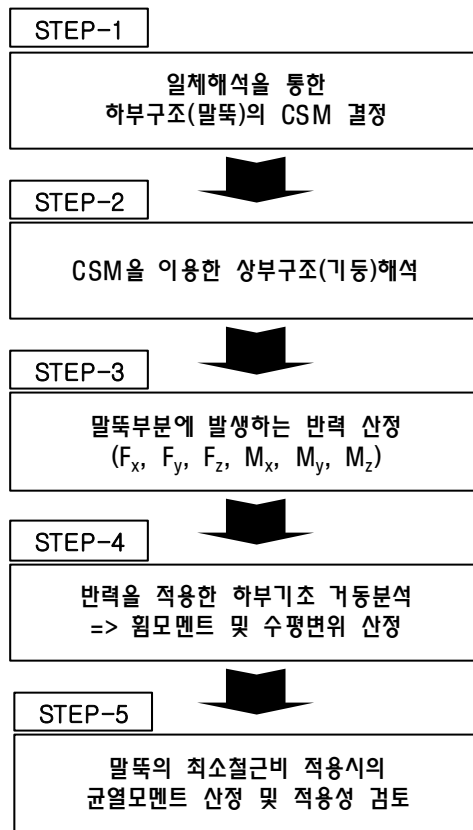


그림 3. 단일형 현장타설말뚝의 기둥-말뚝 해석절차

3. 수치해석 및 검증

단일형 현장타설말뚝은 지상부의 기둥과 지중부의 말뚝이 일체화된 형태로서, 구조적인 해석과 하부기초

해석이 동시에 고려되어야 한다. 그러나 기둥부와 말뚝부의 구분이 애매모호하고, 지반공학과 상부 구조해석적인 접근방식이 다르기 때문에 이를 동시에 고려 및 적용할 수 있는 해석이 필요하다.

따라서, 본 연구에서 수행한 기둥과 말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석은 기존의 단일형 현장타설말뚝을 단일부재로 간주하여 해석하는 방법을 수정한, 보다 합리적인 해석법이라고 할 수 있다. 이에 본 절에서는 기존의 단일형 현장타설말뚝을 단일부재로 모델링한 해석(Pile-Bent structure analysis)과 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석(column-pile interactions analysis)의 결과를 비교하여, 본 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석기법을 검증하고, 이를 통한 지중부 말뚝의 최소 철근비(0.4%) 적용성을 판단하였다.

3.1 해석조건

본 절에서 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석을 위하여, 지반조건(조밀한 사질토층, 느슨한 사질토층), 말뚝 직경(2.0m, 2.5m), 수평하중(300kN, 600kN)에 따른 매개변수 연구를 수행하였다. 본 해석에 적용된 지반 및 말뚝조건은 표 1 및 표 2와 같으며, 매개변수 연구를 위한 변수조건은 표 3과 같다. 표 3의 최대 수평하중 산정 시에는 세장비(λ)에 따른 항복하중을 고려하였다.

표 1. 해석을 위한 지반조건

지반조건		하중전이	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$c(\text{kN/m}^2)$	$\phi(\text{deg})$	K(kPa/m)
sand	loose	Reese	18.1	-	32	10,000
	dense	Reese	19.1	-	40	34,000

표 2. 해석을 위한 말뚝조건

구 분	단일형 현장타설말뚝	
	concrete	steel
Young's Modulus (kPa)	2.46×10^7	2×10^8
일축압축강도 (kPa)	27,000	400,000
철근종류	-	H32
피복두께 (mm)	125(1단) / 225(2단)	
기둥 / 말뚝길이 (m)	10 / 30	
철근량 (%)	(기둥부) 1.0 / (말뚝부) 0.4	

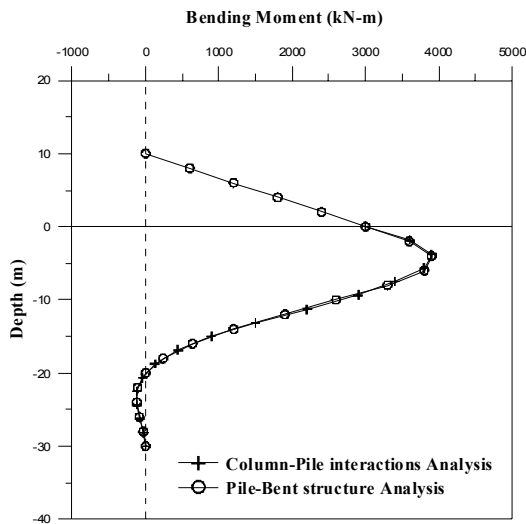
표 3. 해석을 위한 매개변수 조건

변 수	변 수 값
지반조건	loose sand / dense sand
직경 (mm)	2,000 / 2,500
수평하중(kN)	300 / 600

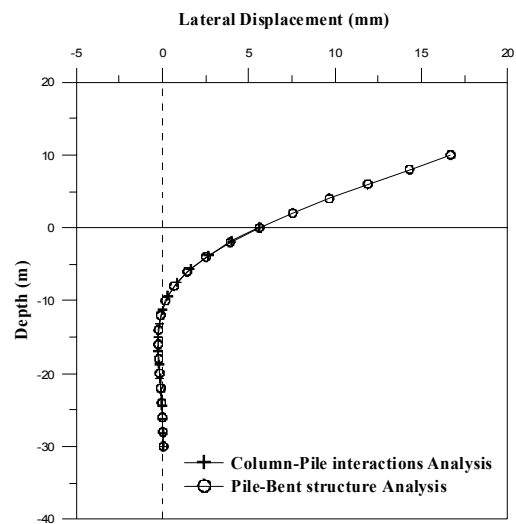
3.2 해석기법의 검증

기존의 단일형 현장타설말뚝을 단일부재로 모델링한 해석(Pile-Bent structure analysis)과 비교·분석하여, 본 연구에서 수행한 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석(column-pile interactions analysis) 결과를 검증하였다. 표 3과 같이 지반조건, 말뚝 직경, 수평하중 등의 해석조건에 따라 해석하였으며, 해석결과는 그림 4~7과 같다.

그림 4~7과 같이, 지반조건, 말뚝직경의 변화, 수평하중 크기 등의 변수에 상관없이 두 해석방법의 깊이별 휨모멘트 및 깊이별 횡방향 변위 결과는 차이가 거의 없으며, 따라서 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체 해석을 단일형 현장타설말뚝 해석에 적용하여도 무리가 없다고 판단되었다.

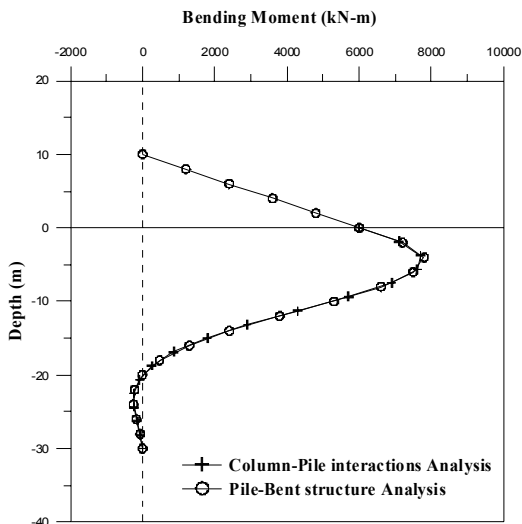


(a) 깊이별 휨모멘트

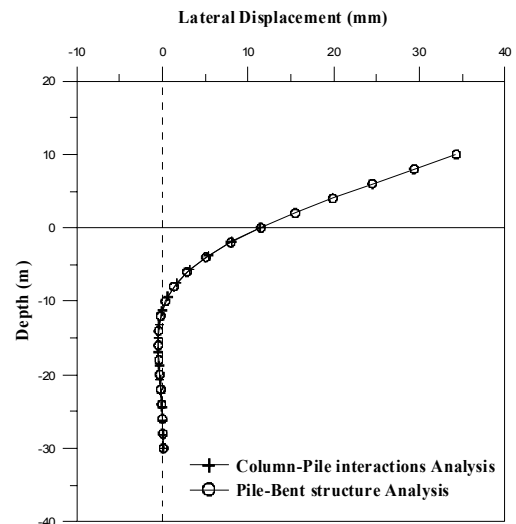


(b) 깊이별 횡방향 변위

그림 4. loose sand - 직경 2,500mm - 수평하중 300kN

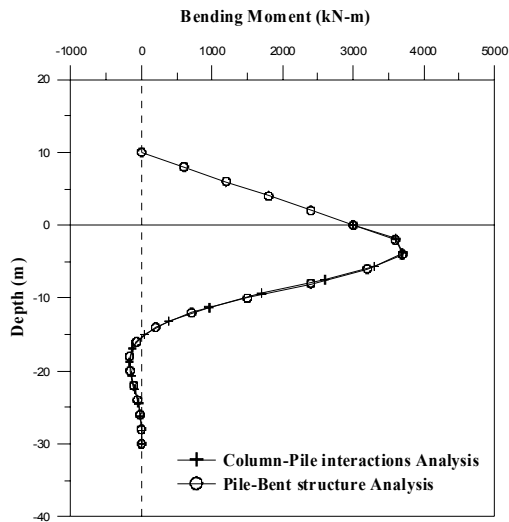


(a) 깊이별 휨모멘트

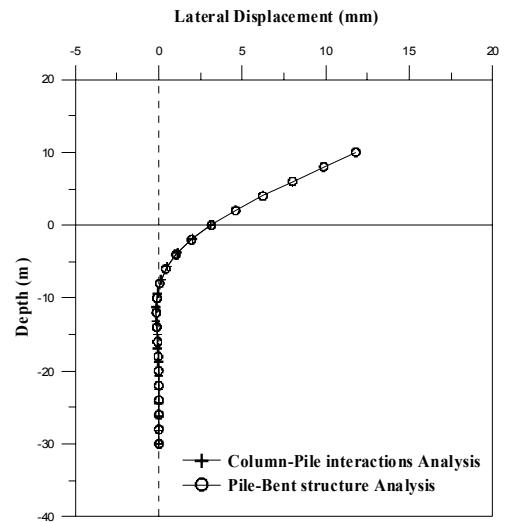


(b) 깊이별 횡방향 변위

그림 5. loose sand - 직경 2,500mm - 수평하중 600kN

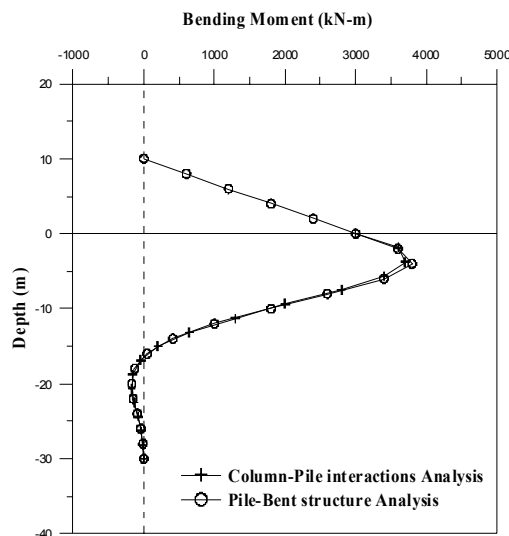


(a) 깊이별 휨모멘트

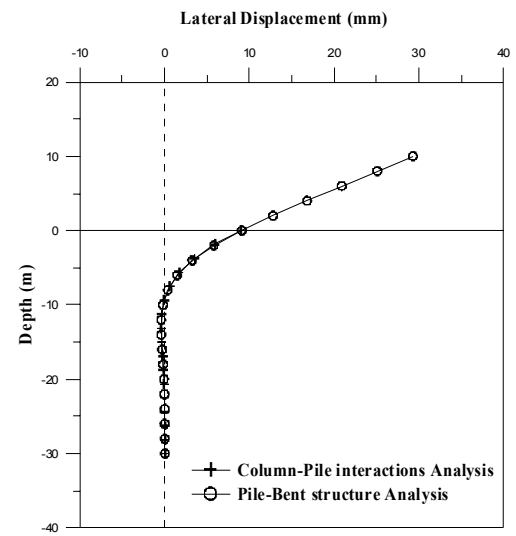


(b) 깊이별 횡방향 변위

그림 6. dense sand - 직경 2,500mm - 수평하중 300kN



(a) 깊이별 휨모멘트



(b) 깊이별 횡방향 변위

그림 7. loose sand - 직경 2,000mm - 수평하중 300kN

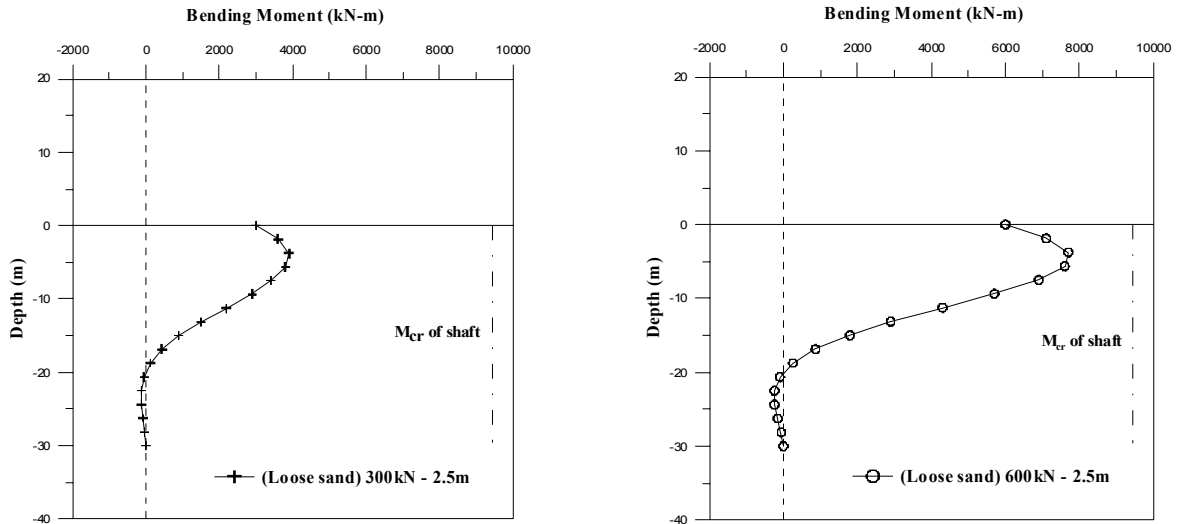
수치해석 결과, 최대 휨모멘트는 지표하 약 3.75~4.0m에서 발생하였으며, 두 가지 해석방법이 거의 동일한 결과값을 보였다. 깊이별 횡방향 변위 또한 거의 일치하는 경향을 보였으며, 지상부의 말뚝 두부의 최대 변위는 12~34mm 정도로 말뚝의 허용 수평변위량 38mm기준에 부합하는 것으로 나타났다.

따라서, 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석(column-pile interactions analysis)을 통해 단일형 현장 타설말뚝을 해석해도 문제가 없다고 판단되었으며, 추후 이를 통해 지반공학과 상부 구조해석이 함께 고려된 해석이 가능할 것으로 기대된다.

3.3 말뚝의 최소 철근비 적용성 평가

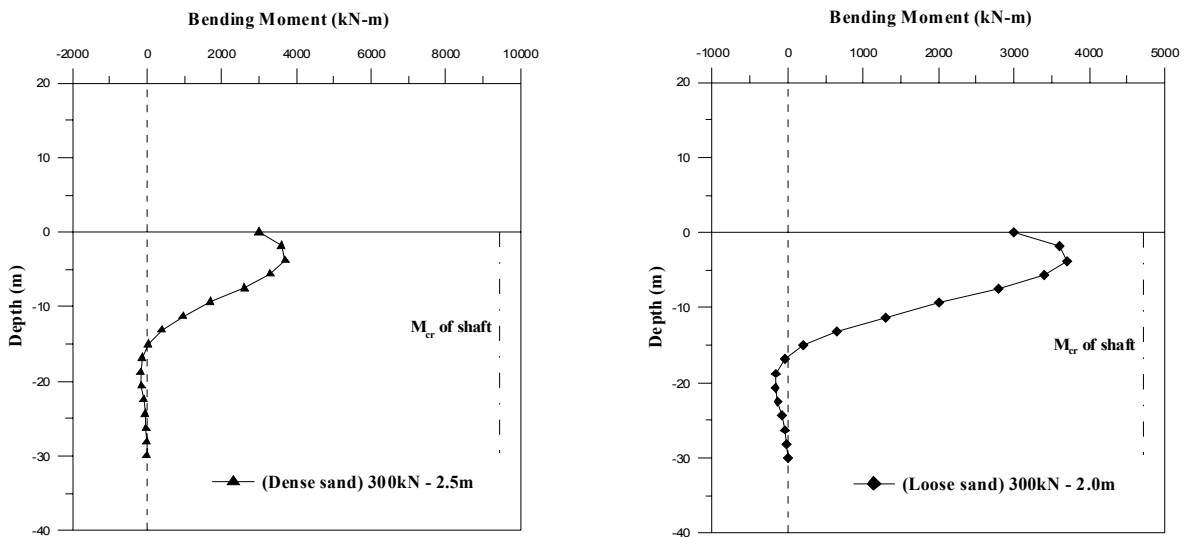
본 절에서는 앞 절에서 검증된 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석을 통해, 현재 적용되는 말뚝의 최소 철근비(0.4%) 기준을 평가하였다. 최소 철근비 0.4%를 적용하여 말뚝 자체의 균열모멘트를 산정하고, 말뚝의 깊이별 휨모멘트와 비교하여 그림 8~10과 같이 최소 철근비의 적용성을 분석하였다. 말뚝의 균열모멘트 산정은 철근이 고려된 구조물의 단면조건에 따른 강도계산 프로그램인 Response 2000을 이용하였다.

분석결과, 그림 8~10과 같이, 말뚝의 심도별 최대 휨모멘트는 말뚝의 균열모멘트 범위 이내에 있는 것으로 나타났으며, 따라서 말뚝의 철근비를 0.4%로 적용해도 무리가 없는 것으로 판단되었다.



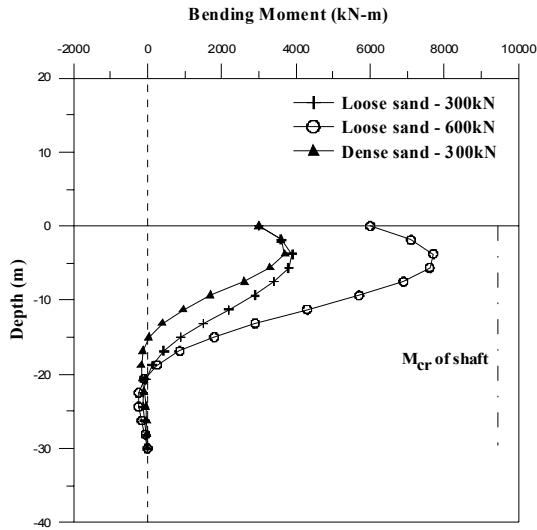
(a) 수평하중 300kN - 직경 2.5m (loose sand) (b) 수평하중 600kN - 직경 2.5m (loose sand)

그림 8. 말뚝의 깊이별 휨모멘트 - 말뚝의 최소 철근비 적용 시 균열모멘트

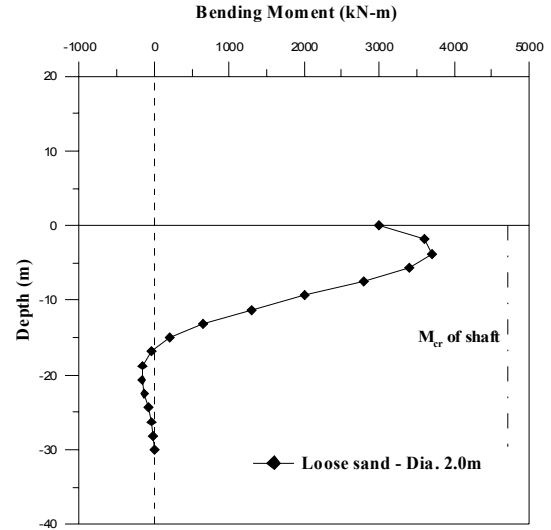


(a) 수평하중 300kN - 직경 2.5m (dense sand) (b) 수평하중 300kN - 직경 2.0m (loose sand)

그림 9. 말뚝의 깊이별 휨모멘트 - 최소 철근비 적용 시 균열모멘트(계속)



(a) 말뚝직경 2.5m



(b) 말뚝직경 2.0m

그림 10. 말뚝의 깊이별 휨모멘트 - 최소 철근비 적용 시 균열모멘트(계속)

그림 10과 같이, 말뚝직경 2.5m에서는 최대 휨모멘트가 3,700~7,800kN-m 정도로 나타났으며, 3가지 경우에서 모두 최대 휨모멘트가 균열모멘트 9,436kN-m 이내에서 발생하였다. 또한 말뚝직경 2.0m에서도 최대 휨모멘트는 3800kN-m로서, 균열모멘트 4,710kN-m보다 작기 때문에 말뚝의 최소 철근비 0.4%를 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 단일형 현장타설말뚝의 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석을 수행하기 위하여, 비선형 해석프로그램인 FB-Pier 및 상부구조 해석프로그램인 Midas를 이용하였다. 지반조건, 말뚝직경, 하중조건 등의 매개변수에 따라 기존 해석법과 심도별 휨모멘트와 수평변위를 비교·분석하여 본 해석기법을 검증하였다. 또한, Response 2000을 이용하여 균열모멘트 산정하고, 이를 통해 말뚝의 최소 철근비(0.4%) 적용성을 판단하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 해석결과, 현재 단일형 현장타설말뚝을 단일부재로 해석하는 방법과 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석은 심도별 휨모멘트 및 수평 변위량의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 일체해석기법을 적용해도 무리가 없을 것으로 판단되었으며, 이를 통해 단일형 현장타설말뚝을 해석할 시에 상이한 상부 구조해석과 기초지반공학 해석을 상호 보완할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 일체해석을 통해 산정한 말뚝의 깊이별 휨모멘트와 최소 철근비를 적용한 균열모멘트를 비교·분석한 결과, 말뚝의 최소 철근비 기준(0.4%)을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 지중부 말뚝에 최소 철근비만을 적용해도 무리가 없을 것으로 판단되며, 이를 통해 현재 기둥과 말뚝의 구분없이 철근량을 동일하게 배근하는 시공방식을 개선한 경제적인 시공이 가능할 것으로 기대된다.
- (3) 본 연구결과는 제한적인 지반조건 및 하중조건에서 얻어진 결론으로서, 추후 다양한 지반조건 및 하중조건 등의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2008), 도로교 설계기준.
2. 대한토목학회(2001), 도로교 설계기준 해설(하부구조편).
3. 손혁수, 최인기, 강동욱, 양종호(2005), “인천대교 고가교 단일현장타설말뚝 기초의 설계”, **대한토목학회 2005년도 학술발표회 논문집**, pp.959-962.
4. 전경수, 김경석, 김정열(2006), “단일 현장타설말뚝 기초의 설계 및 시공”, **한국토질및기초기술사회 기술발표회**, pp.86-100.
5. AASHTO (2002), Standard Specification for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Official.
6. FHWA (1988), Drilled Shaft, National Highway Institute.
7. 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.