



## 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 단일 현장타설말뚝의 철근비 분석

김재영<sup>1)\*</sup> · 정상섭<sup>1)</sup> · 김장호<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 사회환경시스템공학부

## Analysis of Steel Reinforcement Ratio for Bent Pile Structures Considering Column-Pile Interaction

Jae-Young Kim,<sup>1)\*</sup> Sang-Seom Jeong,<sup>1)</sup> and Jang-Ho Jay Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-794, Korea

**ABSTRACT** In this study, an interactive analysis considering column-pile interaction is performed on the basis of an equivalent base spring model for supplementing virtual fixed point design of bent pile structures. Through this analytical method, the application of the minimum steel reinforcement ratio of the pile (0.4%) is analyzed by taking into account the major influencing parameters. Furthermore, the limit depth for steel reinforcement ratio is proposed through the relationships between column and pile conditions. To obtain the detailed information, it is found that an interactive analysis is intermediate in theoretical accuracy between the virtual fixed point model analysis and full-modeling analysis. Base on this study, it is also found that the maximum bending moment is located within cracking moment of the pile when material nonlinearity is considered. Therefore, the minimum steel reinforcement ratio is appropriately applicable for the optimal design of bent pile structures. Finally, the limit depth for steel reinforcement ratio ( $L_{As=x\%}$ ) is proposed by considering the field measured results. It is shown that the normalized limit depth ratio for steel reinforcement ratio ( $L_{As=x\%}/L_p$ ) decreases linearly as the length-diameter ratio of pile ( $L_p/D_p$ ) increases, and then converges at a constant value.

**Keywords** : bent pile structures, column-pile interaction, virtual fixed point design, minimum steel reinforcement ratio, limit depth for steel reinforcement ratio

### 1. 서 론

최근 교량, 고속철 및 경전철 등 도심과 해상의 대형구조물의 시공이 증가하면서, 이에 대한 기초형식으로서 상부구조와 하부기초가 일체화된 단일 현장타설말뚝의 적용사례가 늘고 있다. 단일 현장타설말뚝(bent pile structures, single column drilled pier foundation)은 일반적으로 상부구조와 하부 말뚝 사이에 적용되는 기초판 없이 기둥과 말뚝을 하나의 단일 부재로 시공하는 기초로서, 다양한 지반조건에 적용 가능하고 지진에 대해서는 유연한(flexible) 거동을 보일 수 있다. 하지만, 기둥과 말뚝 경계부에 기초판이 존재하지 않기 때문에 횡방향 하중에 대한 영향을 크게 받으므로 횡방향 거동에 관한 정밀한 검토가 필요하다.

단일 현장타설말뚝과 관련하여, 국내에서 단일 현장타설말뚝의 설계기준<sup>11)</sup>이 마련된 것을 시작으로 이재훈 등<sup>12)</sup>은 새로운 기초형식으로 단일 현장타설말뚝을 소개하였다. 또한, 손혁수 등<sup>16,17)</sup>은 인천대교 일부 고가교 기초형식으로 단일 현장타설말뚝에 대한 적용 및 내진해석과 철근 설계에 대한 연구를 수행하였으며, 정상섭 등<sup>8)</sup>은 단일 현장타설말뚝의 수평거동특성에 대한 연구를 수행하는 등 초기적인 연구가 진행되었다. 최근에는 경전철 기초 단일 현장타설말뚝의 수평거동 분석,<sup>18)</sup> 단일 현장타설말뚝의 소성힌지를 고려한 최적설계법 제안,<sup>1)</sup> 단일 현장타설말뚝의 간편해석 및 최소 철근비 분석,<sup>9)</sup> 단일 현장타설말뚝의 가상고정점 설계 및 분리해석 적용성 평가<sup>10)</sup> 등과 같이 단일 현장타설말뚝의 설계 및 해석방법에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다.

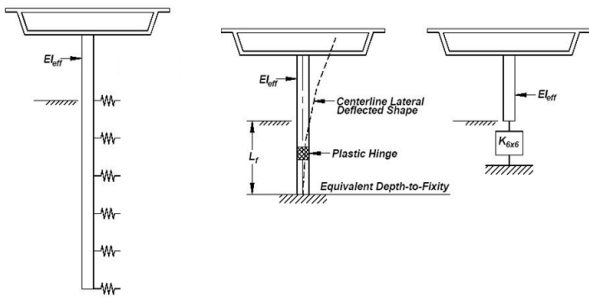
일반적으로 단일 현장타설말뚝의 해석방법은 Fig. 1과 같이 탄성스프링 모델(equivalent soil spring model), 등가 고정단 모델(equivalent cantilever model) 및 등가 지반면 스프링 모델(equivalent base spring model)을 적용할 수 있다.<sup>4)</sup> 이 중 등가 지반면 스프링 모델은 기둥과 말뚝의 상

\*Corresponding author E-mail : kjkj222@hotmail.com

Received October 8, 2013, Revised December 3, 2013,

Accepted January 3, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute



(a) Equivalent soil spring model (b) Equivalent cantilever model (c) Equivalent base spring model

Fig. 1 Modeling methods for pile bent structures

호작용을 고려하여 실제 거동을 가장 근사적으로 모사할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 그러나 등가 지반면 스프링 모델의 반복해석에 따른 복잡성 때문에 실제 설계 및 시공 시에는 단일 현장타설말뚝을 단순히 상부 기둥이 지표면 이하로 확장된 단순 구조물로 간주하고 구조분야에서 대부분 등가 고정단 모델을 통한 근사해석을 하고 있다. 등가 고정단 모델이란 단일지반에 근입된 수평 하중을 받는 말뚝을 임의의 가상고정점까지만 고려하여 설계하는 근사적인 방법이다.<sup>5,6)</sup> 하지만, 실제 구조물에는 복합하중 및 다층지반에 대한 영향이 존재하기 때문에 가상고정점을 통한 하부 말뚝 거동의 예측은 정확하지 못하고 과대설계의 원인이 될 수 있다.

단일 현장타설말뚝에 적용되는 최소철근비 기준도 등가 고정단 모델을 바탕으로 가상고정점의 상부는 기둥의 최소철근비(1%)를 적용하고 하부는 현장타설말뚝의 최소철근비(0.4%)를 적용하도록 하고 있다.<sup>11,14)</sup> 이와 같이, 단일 현장타설말뚝의 실제 거동을 예측하기 어려운 가상고정점 이론을 바탕으로 철근비 기준을 적용하는 문제점이 존재하지만, 더 큰 문제점은 실제 시공에서는 기준보다 더 과다한 방식으로 철근비가 적용되고 있다. 국내에서는 아직까지 시공성 또는 경제성에 비해 안전성에 중점을 두는 설계가 대부분 이루어지기 때문에, 단일 현장타설말뚝의 철근비는 기둥과 말뚝의 구분없이 기둥의 철근비에 맞춰 동일한 철근량을 적용하고 있기 때문이다. 이에, 지금까지 주로 지반분야보다 구조분야에서 다뤄져 왔던 설계방식을 탈피하여, 상부 구조-하부 기초 간의 상호작용을 고려한 정확한 단일 현장타설말뚝의 설계방법이 필요하다.

이 연구에서는 현행 단일 현장타설말뚝의 과다한 철근 배근 기준 및 방법을 보완하고 경제적인 설계법을 마련하고자, 말뚝과 기둥의 상호작용을 고려한 해석(등가 지반면 스프링 모델)을 이용하여 현장사례분석 및 수치해석을 수행하였으며 최소철근비의 적용성을 분석하였다. 또한, 이를 통해 단일 현장타설말뚝의 보다 경제성 및 안전성이 고려될 수 있는 철근비별 적용 가능한 한계깊이를 제시하였다.

## 2. 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석

단일 현장타설말뚝 설계 시 주로 적용되어 온 등가고정단 모델은 상부 구조-하부 기초-지반의 적절한 강성을 고려하지 못하고 근사적으로 설계하여, 전체 구조물의 실제 거동을 예측하지 못하는 단점이 있다. 이에 최근에는 지반의 비선형성 및 지반-구조물의 상호작용을 고려한 해석(등가 지반면 스프링 모델)을 일부 적용해오고 있으나, 그 중요도에 비하여 상대적으로 연구가 미진한 편이다.<sup>2,7,10)</sup>

기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석은 Fig. 2와 같이 상부 구조해석 시 기둥 하부에 6×6 스프링 강성행렬(coupled stiffness matrix)을 고려한 스프링을 통해 말뚝 두부의 강성을 적용하여 구조해석을 실시한다. 6×6 스프링 강성행렬은 하부기초-지반의 상호작용을 고려한 6×6의 강성행렬로서 식 (1)과 같이 이동, 회전, 상호 커플링(cross-coupling)이 모두 고려된다. 단일 현장타설말뚝의 경우, 강성행렬의 대각행렬이 거동에 지배적인 역할을 하기 때문에,<sup>19)</sup> 커플링 강성은 고려하지 않았다. 상부 기둥해석을 통해 말뚝 두부에서의 반력을 산정하고, 하부 말뚝의 해석 및 설계에서는 반력을 하중으로 작용시켜 거동분석을 하고 하중조건에 따른 말뚝 두부에서의 6×6 스프링 강성행렬을 산정하여 기초-지반의 강성을 상부 구조해석에 반영할 수 있게 한다.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & -K_{15} & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & K_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{42} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ -K_{51} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $K_{11}$ 과  $K_{22}$ 은 수평방향 강성(kN/m)을,  $K_{33}$ 은 수직방향 강성(kN/m),  $K_{44}$ 과  $K_{55}$ 는 회전강성(rocking stiffness, kN-m/rad)을,  $K_{66}$ 은 비틀림 강성(torsional stiffness, kN-

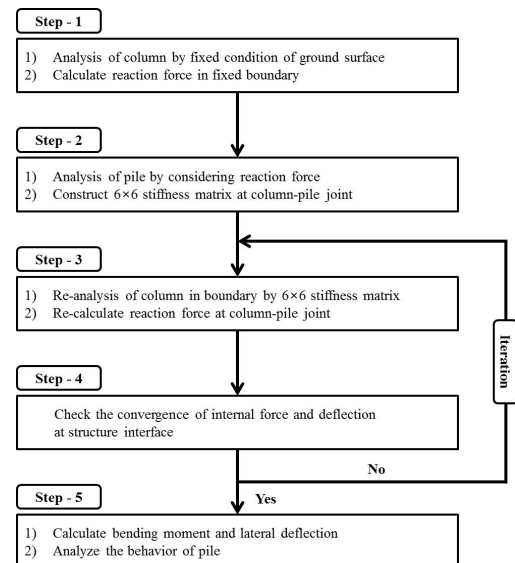


Fig. 2 Flow chart for interactive analysis of column-pile

m/rad)를 나타내며,  $K_{15}, K_{51}$  과  $K_{24}, K_{42}$  는 상호 커플링강성 (cross coupling stiffness, kN/rad 또는 kN-m/m)을 나타낸다.

기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석과정은 1) 지표면을 기준으로 하부 기초를 고정단 조건으로 가정하고 상부 구조 해석을 수행하고, 2) 그 결과 산정된 지표면에서의 지반 반력을 적용하여 하부 기초 해석을 수행한다. 3) 이를 통해 얻는 지표면에서의 6×6 스프링 강성행렬을 가지고 상부 구조를 재해석하게 된다. 이와 같이, 지표면 경계에서의 구조물의 부재력 또는 변위가 수렴할 때까지 반복 과정을 통해 상부 구조와 하부 기초의 안전성을 평가한다.

### 3. 말뚝의 최소철근비 적용성 평가

#### 3.1 현장 사례를 통한 철근비 분석

앞서 언급했듯이, 단일 현장타설말뚝 설계 시 가상고정점을 기준으로 기둥의 최소철근비(1.0%)와 현장타설말뚝의 최소철근비(0.4%)로 구분하여 적용하도록 하고 있다. 하지만, 실제 설계에서는 안전성에 중점을 두고 기둥과 말뚝의 구분없이 기둥의 철근비를 동일하게 적용하고 있으며, 이는 근사적인 방법으로서 실제 구조물 거동을 예측하기 어렵고 과대설계의 원인이 된다. 이에 이 절에

서는 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석을 이용하여, 국내 단일 현장타설말뚝이 시공된 현장(서울 도로교 현장 및 전라남도 도로교 현장)의 말뚝 최소철근비(0.4%) 적용성을 검토하였다.

기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석 시에는 상부 구조해석 프로그램인 Midas Civil<sup>13)</sup> 및 하부 기초해석 프로그램인 FB-MultiPier<sup>3)</sup>를 이용하였으며, 말뚝의 균열모멘트 산정을 위해서는 단면조건에 따른 강도계산 프로그램인 Response 2000<sup>15)</sup>을 이용하였다. 해석에 사용된 지반 및 말뚝 물성은 현장조건과 동일하게 적용하였으며, Table 1과 같다. 여기서, 하중 320 kN 및 430 kN은 현장의 실제 설계하중이며, 각 현장의 설계보고서를 참고하였다. 또한, 최대하중 750 kN 및 840 kN은 해석상에서 지반의 파괴가 일어나기 직전까지의 최대하중을 고려한 것이다. 분석과정은 1) 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석을 통해 최종적으로 말뚝 해석을 수행하여, 말뚝의 균열모멘트 및 심도별 휨모멘트를 산정한다. 이 때 말뚝의 최소철근비 0.4%를 적용한다. 2) 산정된 최대 휨모멘트가 Response 2000을 통해 얻어진 균열모멘트 이내에서 발생하는지에 따라 최소철근비의 적용성을 평가하였다.

Fig. 3(a)와 같이, 서울 도로교 현장의 경우 최대하중 적용 시의 최대 휨모멘트는 9386 kN-m으로 나타나 균열

Table 1 Material properties (case histories)

Site	Subsurface profile		Load transfer analysis	$\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c_u$ (kPa)	$\Phi$ (°)	$K_h$ (MPa/m)	$\epsilon_{50}$	$L_c$ (m)	$L_p$ (m)	$D_c, D_p$ (m)	Lateral load (kN)	
	Types	Depth (m)										Working load	Ultimate load
Seoul	Soft clay	0~4.0	O'Neill	17	60	-	-	0.01	9.2	19.1	2.5	320	750
	Dense sand	4.0~13.5	O'Neill	18	-	30	38.0	-					
	Hard rock	13.5~24	Bi-linear	21	10	33	480.0	-					
Jeolla-do	Dense sand	0~10.5	O'Neill	19	-	30	62.7	-	9.0	15.2	2.5	430	840
	Hard rock	10.5~22	Bi-linear	20	30	31	505.0	-					

Note)  $\gamma_i$  is the total unit weight;  $c_u$  is the undrained shear strength;  $\Phi$  is the internal friction angle;  $K$  is the modulus of subgrade reaction;  $\epsilon_{50}$  is the strain at 50% maximum principal stress difference;  $L_c$  is the column length;  $L_p$  is the pile length;  $D_c$  is the column diameter;  $D_p$  is the pile diameter.

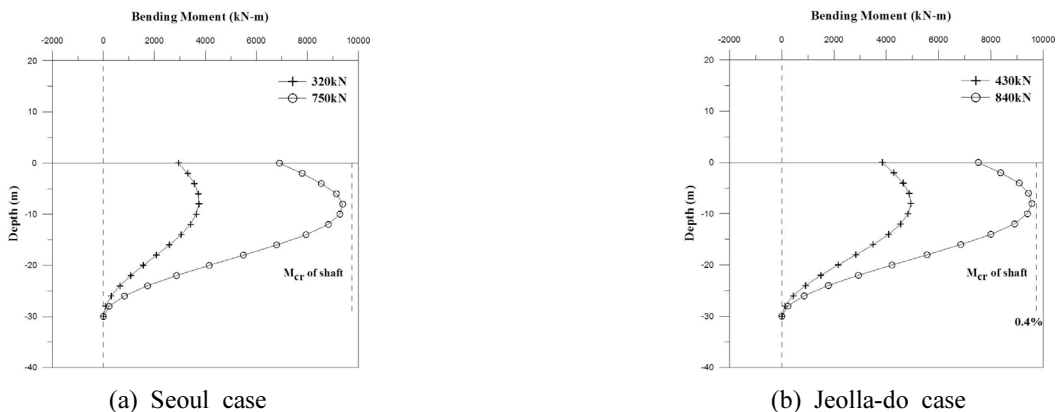


Fig. 3 Bending moment and crack-bending moment subjected to minimum reinforcement ratio (0.4%)

모멘트 9749 kN-m 이내에 있음을 알 수 있었다. 또한 전라도 도로교 현장에서도 Fig. 3(b)와 같이 최대하중 840 kN 적용 시 균열모멘트 9749 kN-m 이내로 최대 휨모멘트 9672 kN-m가 발생하여, 말뚝의 최소 철근비 0.4%를 만족하였다. 이를 통해, 설계하중의 2배 이상인 하중이 작용하여도 최소철근비 기준을 만족하는 것을 알 수 있었으며, 따라서 실제 설계에서 단일 현장타설말뚝의 시공에 따른 불확실성과 이에 따른 안전성을 확보하기 위하여 철근을 과다하게 배근하고 있다고 판단되었다. 따라서 설계상의 충분한 안전성만이 확보된다면 지표면을 기준으로 말뚝에는 최소철근비 0.4%를 적용하는 것이 보다 경제적인 것이라고 판단된다. 단, 이는 제한적인 현장 및 설계조건에 따른 결과이므로 말뚝의 최소철근비(0.4%) 적용 시 상세한 검토가 요구된다.

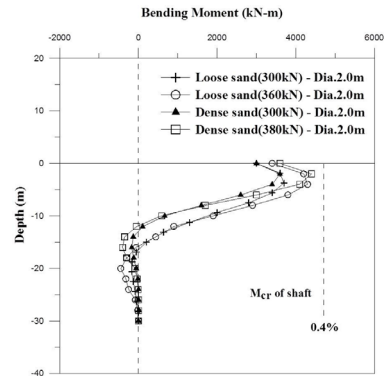
### 3.2 수치해석을 통한 말뚝의 최소철근비 분석

이 절에서는 말뚝의 최소철근비 적용성을 보다 상세히 분석하고자, 말뚝의 최소철근비 0.4% 및 그 이하의 철근비를 적용하여 해석하였다. 이 해석에 적용된 지반 및 말뚝 물성은 Table 2와 같다. 해석 시 적용한 수평하중은 앞서 적용한 방식과 동일하게 최소철근비에 따라 지반의 파괴가 발생할 때까지의 최대하중을 적용하였다. 또한, 4가지 지반조건(느슨한 사질토, 조밀한 사질토, 연약한 점성토 및 견고한 점성토)은 가장 보수적인 조건에서 최소철근비 적용성을 판단하고자 단일지반으로 가정하였다.

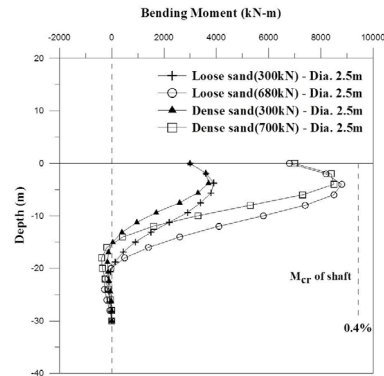
분석 결과, Fig. 4, 5와 같이, 모든 지반조건에서의 말뚝의 심도별 최대 휨모멘트는 모두 말뚝의 균열모멘트 이내에 위치하는 것을 알 수 있었으며, 따라서 말뚝에 철근비 0.4%를 적용해도 구조적 안전성에 무리가 없는 것으로 판단되었다. Fig. 4(a)와 같이, 사질토에서 말뚝직경 2500 mm인 경우에 최대 휨모멘트는 3700~8500 kN-m로 나타나, 최대 휨모멘트가 모두 균열모멘트 9436 kN-m 이내에서 발생하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 4(b)와 같이, 말뚝직경 2000 mm인 경우에도 최대 휨모멘트는 4400 kN-m로 균열모멘트 4710 kN-m이내에서 발생하였다. Fig. 5(a), (b)와 같이, 점성토의 경우도 말뚝직경 2500 mm의 경우 최대 휨모멘트 3700~8700 kN-m, 2000 mm의 경우 3500~4700 kN-m정도 나타나, 사질토에서와 마찬가지로

**Table 2** Material properties for evaluating the steel reinforcement ratio

Soil condition		Load transfer analysis	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c_u$ (kPa)	$\Phi$ (°)	$K_h$ (MPa/m)	$\epsilon_{50}$
clay	soft	O'Neill	17.6	40	-	20	0.02
	stiff	O'Neill	18.6	120	-	136	0.005
sand	loose	O'Neill	18.1	-	32	5.5	-
	dense	O'Neill	19.1	-	40	34	-

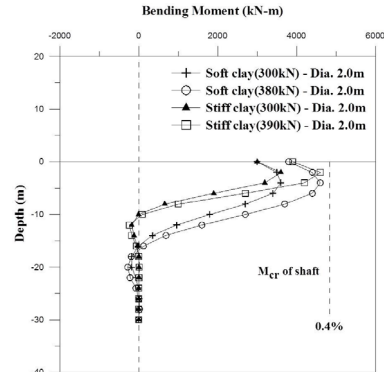


(a) D=2000 mm

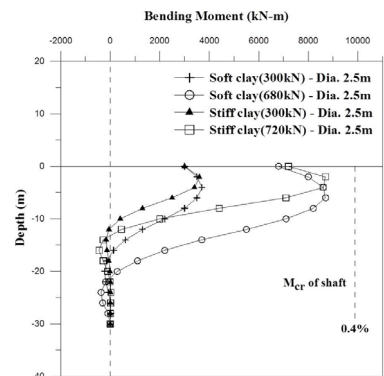


(b) D=2500 mm

**Fig. 4** Bending moment and crack-bending moment subjected to minimum reinforcement ratio (0.4%) in sand



(a) D=2000 mm



(b) D=2500 mm

**Fig. 5** Bending moment and crack-bending moment subjected to minimum reinforcement ratio (0.4%) in clay

모두 균열모멘트보다 작게 발생하였기 때문에 말뚝의 최소철근비 0.4%를 적용해도 무리가 없을 것으로 판단되었다. 그러나, Fig. 6과 같이 말뚝에 최소철근비 이하의 0.3% 철근비를 적용한 경우에는 최대 휨모멘트가 균열모멘트보다 큰 것으로 나타나, 0.4% 이하의 철근비를 적용하기에는 어려운 것으로 판단되었다.

해석 결과, 실제 설계 시에 단일 현장타설말뚝의 기둥과 말뚝에 동일한 철근량을 배근하는 설계방법을 수정하여 말뚝의 최소철근비를 적용할 경우, 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 철근비별 적용 가능한 한계깊이 제한

##### 4.1 철근비별 적용 가능한 한계깊이 조건

앞서 기술한 바와 같이, 단일 현장타설말뚝의 설계 시 철근비 적용에 대한 적절한 기준이 마련되어 있지 않기 때문에 단일 현장타설말뚝 전체에 동일한 기둥의 철근비를 적용하고 있는 실정이다. 하지만 이러한 방법은 필요 이상의 철근비가 적용되어 과다하게 설계되는 등 여러 문제점이 발생할 수 있다. 이에 이 절에서는 Table 3과 같이 인천, 부산, 울산 등 국내 4개 현장에서 시공된 단

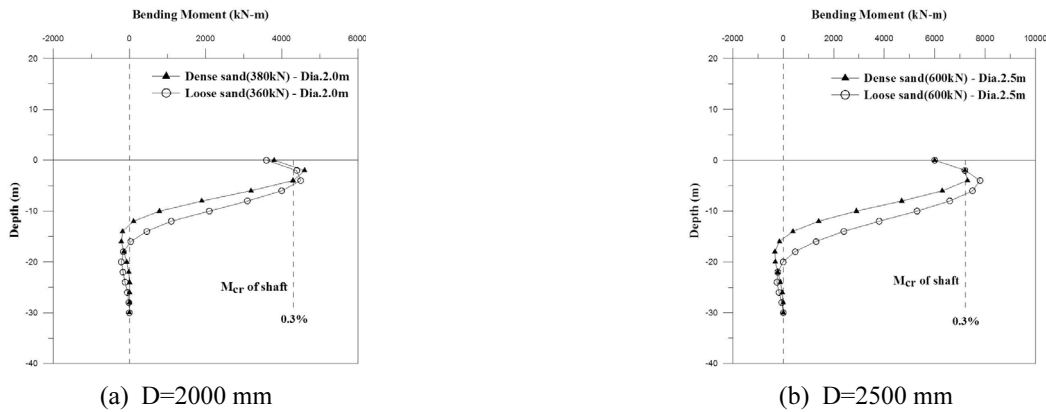


Fig. 6 Bending moment and crack-bending moment subjected to minimum reinforcement ratio (0.3%) in sand

Table 3 Summary of material properties (field test sites)

Site	Soil profile		Material properties					
	Type	Depth (m)	$E$ (MPa)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\Phi$ (°)	$c_{ul}$ (kPa)	$K_h$ (MPa/m)	
Busan	Pile	-	24600	24.5	-	-	-	
	Soil	Sand	0.0~12.0	-	17.5	28.0	0.0	10.7
		Silty clay	12.0~23.0	-	17.0	-	-	3.3
		Weathered rock	23.0~70.0	-	21.0	33.0	10.0	480.2
Ulsan	Pile	-	24600	24.5	-	-	-	
	Soil	Fill	0.0~3.0	-	17.0	18.0	0.5	2.7
		Weathered soil 1	3.0~4.5	-	19.0	22.0	2.2	27.0
		Weathered soil 2	4.5~8.0	-	19.0	27.0	2.1	61.4
		Weathered rock	8.0~21.0	-	21.0	32.0	4.0	456.6
Incheon 1	Pile	-	26000	24.5	-	-	-	
	Soil	Residual soil	0.0~1.0	-	16.7	22.0	0.5	2.7
		Silty sand 1	1.0~5.0	-	16.8	27.0	2.0	6.79
		Silty sand 2	5.0~8.0	-	16.7	28.0	2.1	24.4
		Weathered soil 3	8.0~22.0	-	19.4	27.0	2.2	61.0
Incheon 2	Pile	-	25000	24.5	-	-	-	
	Soil	Sand	0.0~4.0	-	19.0	30.0	0.0	62.7
		Clay 1	4.0~18.0	-	18.0	0.0	70.0	18.7
		Clay 2	18.0~33.5	-	18.0	0.0	100.0	22.0
		Weathered soil	33.5~46.0	-	19.0	31.0	15.0	276.2

일 현장타설말뚝의 실제 자료를 토대로 철근비별 적용 가능한 한계깊이를 제시하고자 하였다.

하중을 받는 단일 현장타설말뚝의 일반적인 휨모멘트는 Fig. 7과 같다. 일반적으로 단일 현장타설말뚝의 거동은 지반조건에 따라 다소 차이는 있으나, 지표면 이하 5D 이내에서 대부분의 수평거동이 발생하며, 특히 횡방향 하중에 큰 영향을 받는 단일 현장타설말뚝의 단면설계는 지표면 아래 약 1~3D 정도 깊이에서 발생하는 최대 휨모멘트 값과 변단면 위치에서의 휨모멘트 값을 기준으로 이루어지고 있다. Fig. 7에서와 같이, 깊이별 휨모멘트는 기둥 최상단에서부터 점차 증가하여 지표면 아래 약 1~3D 정도 깊이에서 최대값을 가지며, 이후 말뚝의 심도가 깊어질수록 지반저항력에 의해 급격히 감소하여 일정 깊이 이하에서는 매우 작은 값을 가지게 된다. 이는 휨모멘트가 크지 않은 일정심도 이하에서는 적은 철근비를 적용함으로써 말뚝 및 구조물의 안전성을 확보하는 동시에 철근량을 감소시켜 경제적인 시공이 가능함을 나타낸다. 따라서, 지반조건 및 말뚝조건 등 단일 현장타설말뚝의 여러 조건을 정규화하면 말뚝의 길이와 직경 관계로부터 수평거동이 수렴하는 깊이를 예측할 수 있을 것으로 판단되며, 이 연구에서는 이와 같은 단일 현장타설말뚝의 수평거동을 분석하여 정규화함으로써 철근비별 적용 가능한 한계깊이를 제안하였다.

이 해석에서는 단일 현장타설말뚝의 재료 파괴가 발생할 때의 균열 휨모멘트 및 균열하중을 산정하기 위한 말뚝 단면해석 프로그램 Response 2000과 변단면 효과를 정확히 구현하기 위한 FB-Multiplier를 동시에 사용하였다. 이 때, 균열 휨모멘트와 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 현

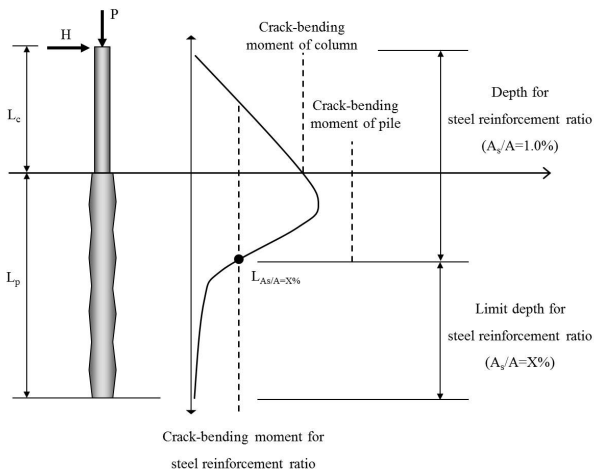


Fig. 7 Bending moment distribution and limit depth for steel reinforcement ratio

장타설말뚝의 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.
- 4) 3)단계에서 구한 균열 수평하중을 적용하여, 단일 현장타설말뚝의 심도별 휨모멘트를 산정한다. 이와 같은 방식으로 말뚝의 철근비별(0.3, 0.4, 0.5, 0.7 및 0.9%) 균열 휨모멘트와 심도별 휨모멘트를 구한다.
- 5) 그래프에 도식하여 두 결과값이 만나는 지점을 찾아, 이 값을 철근비별 적용 가능한 한계깊이로 산정할 수 있다.

## 4.2 철근비별 적용 가능한 한계깊이 제안

국내 4개 현장의 단일 현장타설말뚝의 설계자료를 토대로 수평 균열하중과 균열 휨모멘트를 산정하였으며, 동일한 방법으로 각 철근비를 적용한 경우의 심도별 휨모멘트를 산정하였다. 이를 이용하여 각 철근비에 따른 심도별 휨모멘트가 그 때의 균열 휨모멘트보다 작은 구간을 단일 현장타설말뚝의 철근비별 적용 가능한 한계깊이( $L_{As=x\%}$ )로 산정하였으며, Fig. 8과 같다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이,  $L_p$ 로 정규화된  $L_{As=x\%}$ 는 일정한 경향을 보이고 있다. Y축은 말뚝 길이( $L_p$ )와 한계깊이( $L_{As=x\%}$ )의 비를 나타내며,  $L_{As=x\%}/L_p=1$ 인 경우는 각 철근비를 적용할 수 있는 구간이 존재하지 않음을 의미한다. 반대로  $L_{As=x\%}/L_p=0$ 일 때에는 지표면 이하 전체 말뚝에 철근비를 적용할 수 있음을 나타낸다. 말뚝길이( $L_p$ )로 정규화된 철근비별 적용 가능한 한계깊이( $L_{As=x\%}/L_p$ )는 말뚝 직경으로 정규화된 말뚝길이( $L_p/D_p$ )가 증가함에 따라 선형적으로 감소되며,  $L_p/D_p=X$  이후부터는 일정한 값에 수렴한다. 또한, 철근비가 증가할수록  $L_{As=x\%}/L_p$ 는 더 급

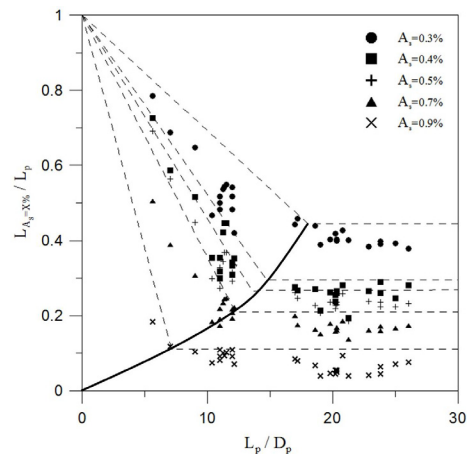


Fig. 8 Limit depth for steel reinforcement ratio curve subjected to pile length-diameter ratio

격히 감소하여, 보다 낮은 값에서 수렴함을 알 수 있었다. 이는 말뚝에 더 많은 철근비를 적용하게 되면, 그만큼 말뚝의 강성이 증가하여 말뚝에 철근비를 적용할 수 있는 구간이 증가하게 됨을 의미한다. 특히, 철근비 0.9% 일 경우에는  $L_{As=x\%}/L_P=0.1$ 로 나타나, 말뚝 길이 대부분에 적용 가능한 것으로 나타났다. 반면, 철근비가 0.3% 이하가 되면,  $L_P/D_P$ 는 18이상 이 되고  $L_{As=x\%}/L_P$ 도 0.45를 보여 안전성과 경제성에서 모두 적절치 못한 철근비라고 판단되었다. 이 해석 결과로부터 각 철근비별 적용 가능한 한계깊이를 보수적 입장에서 이중직선의 형태로 표현하면 Table 4와 같이 나타낼 수 있다.

**Table 4** Results of limit depth for steel reinforcement ratio

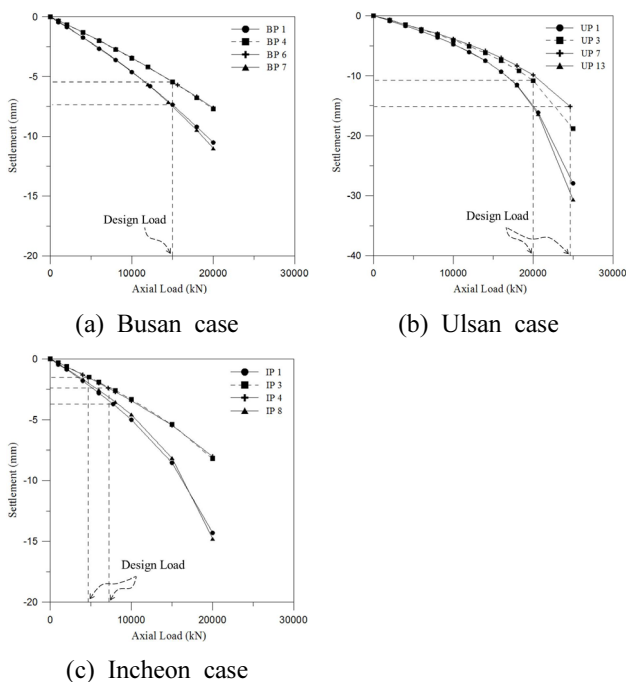
Steel reinforcement ratio (%)	Equation of limit depth for steel reinforcement ratio
0.3	$L_{As=0.3\%} = L_P - 0.03 \left( \frac{L_P^2}{D_P} \right) \quad (L_P \leq 18D_P)$
	$L_{As=0.3\%} = 0.45L_P \quad (L_P > 18D_P)$
0.4	$L_{As=0.4\%} = L_P - 0.05 \left( \frac{L_P^2}{D_P} \right) \quad (L_P \leq 14D_P)$
	$L_{As=0.4\%} = 0.30L_P \quad (L_P > 14D_P)$
0.5	$L_{As=0.5\%} = L_P - 0.06 \left( \frac{L_P^2}{D_P} \right) \quad (L_P \leq 12.5D_P)$
	$L_{As=0.5\%} = 0.25L_P \quad (L_P > 12.5D_P)$
0.7	$L_{As=0.7\%} = L_P - 0.07 \left( \frac{L_P^2}{D_P} \right) \quad (L_P \leq 11.5D_P)$
	$L_{As=0.7\%} = 0.20L_P \quad (L_P > 11.5D_P)$
0.9	$L_{As=0.9\%} = L_P - 0.15 \left( \frac{L_P^2}{D_P} \right) \quad (L_P \leq 6D_P)$
	$L_{As=0.9\%} = 0.10L_P \quad (L_P > 6D_P)$

결론적으로 기존의 단일 현장타설말뚝 철근배근 방법은 과다설계의 원인이 될 수 있으며, 이를 이 연구에서 제안한 철근비별 적용 가능한 한계깊이를 통해 경제성이 확보된 개선된 설계가 가능할 것으로 판단된다. 하지만, 이 연구에서 제시한 철근비별 적용 가능한 한계깊이는 수직하중과 수평하중이 동시에 작용하는 복합하중을 고려하였을 때 제안된 값으로서, 상부 기둥보다 적은 철근량이 적용된 하부 말뚝이 수직하중에 대한 안정한지를 알기 어렵다. 따라서, 수직하중만을 고려하였을 경우에도 충분한 지지력이 확보되는지를 검토할 필요가 있다. 이에 현장별로 임의로 선별된 단일 현장타설말뚝에 단계별 수직하중을 적용하여 그 때 발생하는 침하량을 검토하였으며, 이를 토대로 수직하중에 대해서도 안전성에 문제가 없는지를 확인하였다. 해석 결과, Fig. 9와 같이 모든 현장의 말뚝에 수직하중만 작용하더라도 침하량이 말뚝 직경의 1% 미만으로 충분히 허용할 수 있는 범위 내로 발생하였다. 따라서, 철근비별 적용 가능한 한계깊이는 복합하중에 대해 안전성이 확보됨을 알 수 있었으며, 실제 현장에서 세심한 주의와 함께 충분히 적용가능하다고 판단된다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 단일 현장타설말뚝의 가상고정점 이론을 통한 근사해석법을 보완하고자, 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석법을 제시하였으며 이를 이용하여 단일 현장타설말뚝의 철근비 적용성을 현장사례를 수치해석을 바탕으로 검토하였다. 또한, 경제성과 안전성을 모두 만족할 수 있는 개선된 철근비 적용을 위해 여러 조건 하에 철근비별 적용 가능한 한계깊이를 제안하였다. 이 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 이 연구에서 말뚝과 지반의 강성을 6×6 스프링 강성행렬으로 고려하여 기둥-말뚝의 상호작용 해석을 제시하였다. 제시된 상호작용 해석기법은 상부 기둥의 강성 변화에 따른 반력의 산정, 하부 말뚝-지반의 강성과 하중조건의 변화에 따른 6×6 강성행렬 경계조건을 반복적으로 계산하는 방법이며, 상부 기둥과 하부 말뚝 경계면에서의 오차를 감소시킴으로써 전체구조물의 거동을 파악할 수 있다. 따라서, 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석은 가상고정점 모델에 의한 부정확한 설계와 기둥-말뚝 전체를 고려한 해석의 많은 시간과 복잡성으로 인한 비경제적 설계를 극복할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석을 이용하여 단일 현장타설말뚝의 철근비 적용성을 분석한 결과, 말뚝에 최소철근비(0.4%)를 적용하였을 경우 말뚝의 깊이별 휨모멘트는 균열모멘트 이내에서 발생하여 최소철근비 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 그 이하의 철근비에 대해서는 만족하지 못하여 적용하기 어려울 것으로 판단되었다. 따라



**Fig. 9** Axial load-settlement curves in field cases

서, 지표면 이하 말뚝에는 최소철근비 0.4%를 적용해도 무리가 없을 것으로 판단되며, 이를 통해 기둥과 말뚝의 구분없이 기둥의 철근비를 적용하는 현재 설계방법을 개선하여 경제적인 시공이 가능할 것으로 기대된다.

- 3) 국내 단일 현장타설말뚝의 현장적용사례를 토대로 철근비별 적용 가능한 한계깊이를 분석한 결과, 정규화된 한계깊이( $L_{AS=x\%}$ )는 말뚝 직경과 말뚝길이의 비( $L_p/D_p$ )에 따라 선형적으로 감소하며 일정한 값에서 수렴함을 알 수 있었다. 또한, 철근비가 증가함에 따라, 적용 가능한 한계깊이도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 설계단계에서의 세심한 검토를 통해 재료의 비선형성과 말뚝-지반 강성에 따른 정확한 심도별 휨모멘트 예측이 가능하다면, 철근비별 적용 가능한 한계깊이를 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며, 지원에 감사드립니다(No.2011-0030040).

### References

1. Ahn, S. Y., "Proposed New Design Method of the Pile Bent Structure Considering Plastic Hinge," Ph. D. Thesis, Yonsei University, 2010 (in Korean).
2. Cho, J. Y. and Jeong, S. S., "Development of Three-Dimensional Approximate Analysis Method for Piled Raft Foundations," *Journal of Korean Geotechnical Society, Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 4, 2012, pp. 67-77 (in Korean).
3. FB-MULTIPIER, *User's Manual*, Ver. 4, Ensoft Inc, 2012.
4. FHWA, *Drilled Shaft*, National Highway Institute, 1987.
5. Hutchinson, T. C., Boulanger, R. W., Chai, Y. H., and Idriss, I. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, New York, USA, 2002.
6. Jeon, K. S., Kim, K. S., and Kim, J. Y., "Design and Construction of Single Drilled Shaft Foundation," *Korean Geotechnical Engineer Conference*, 2006, pp. 86-100 (in Korean).
7. Jeong, S. S. and Cho, J. Y., "Nonlinear 3D Coupled Analysis of Piled Raft Foundations for High-rise Building," *Proceedings of IS-Kanazawa 2012*, Kanazawa, Japan, 2012, pp. 461-466.
8. Jeong, S. S., Kwak D. O., and Ahn, S. Y., "Analysis of Pile-Bent (CIDH Shaft/Column) Structure Subjected to Lateral Loading," *Korean Society of Civil Engineers Conference*, 2005, pp. 3968-3971 (in Korean).
9. Kim, J. Y., Hwang, T. J., and Jeong, S. S., "Simplified Analysis of Pile Bent Structures and Minimum Reinforcement Ratio," *Journal of Korean Geotechnical Society, Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 5, 2011, pp. 33-43 (in Korean).
10. Kim, J. Y. and Jeong, S. S., "Application of Virtual Fixed Point Theory and Discrete Analysis for Pile Bent Structures," *Journal of Korean Geotechnical Society, Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 7, 2013, pp. 57-74 (in Korean).
11. Korean Expressway Corporation, *Design Criteria for Pile Bent Structure*, Vol. 68, 2004, pp. 14-27 (in Korean).
12. Lee, J. H. and Yang, J. H., "New Concrete Bridge Column System," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 2, 2004, pp. 24-30 (in Korean).
13. MIDAS-CIVIL, *Online Manual*, MIDAS Information Technology, 2006.
14. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Design Criteria for Highway Bridges*, 2008 (in Korean).
15. RESPONSE 2000, *User's Manual*, Ver. 1.1, University of Toronto, Ontario Canada, 2000.
16. Son, H. S., Choi, I. K., Kang, D. O., and Yang, J. H., "Design of Single Column Drilled Pier Foundation in Incheon Bridge Viaduct," *Korean Society of Civil Engineers Conference*, 2005, pp. 959-962 (in Korean).
17. Son, H. S., Choi, I. K., Lee, S. H., and Yang, J. H., "Seismic Analysis and Reinforcement Details of Integral Pile Shaft-Column Foundations," *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, 2006, pp. 300-307 (in Korean).
18. Song, H. J., "Analysis of Single Shaft/Column of Light Rail Transit Structure subjected to Lateral Loading," Master thesis, Yonsei University, 2008 (in Korean).
19. Zafir, Z., "Seismic Foundation Stiffness For Bridges," *Deep Foundations 2002*, 2002, pp. 1421-1433.

**요 약** 이 연구에서는 기존의 가상고정점 모델을 통한 단일 현장타설말뚝 설계를 보완하고자, 등가 지반면 스프링 모델을 바탕으로 한 기둥과 말뚝의 상호작용을 고려한 해석법을 제시하였으며, 이를 토대로 주요 영향인자에 따라 말뚝의 최소철근비 적용성을 분석하였다. 나아가, 기둥과 말뚝 조건을 고려하여 말뚝에 철근비별 적용 가능한 한계깊이를 제안하였다. 이 연구 결과, 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 해석은 가상고정점 모델 해석에서 전체 모델링 해석으로 넘어가는 중간단계의 비교적 정확하고 경제적인 설계법임을 알 수 있었으며, 이 해석법을 통해 최소철근비 적용성을 평가한 결과, 말뚝의 최대 휨모멘트는 말뚝재료의 균열모멘트 이내에서 모두 발생하는 것으로 나타나 말뚝에는 최소철근비(0.4%)를 적용하여도 만족하는 것을 알 수 있었다. 이를 토대로, 현장사례를 통해 철근비별 적용 가능한 한계깊이( $L_{AS=x\%}$ )를 제안하였으며, 정규화된 철근비별 적용 가능한 한계깊이( $L_{AS=x\%}/L_p$ )는 정규화된 말뚝길이( $L_p/D_p$ )에 따라 선형적으로 감소하여 일정한 값에서 수렴함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 단일 현장타설말뚝, 기둥-말뚝의 상호작용, 가상고정점 모델 해석, 최소철근비, 철근비별 적용 가능한 한계깊이