

# 수치해석을 통한 단일형 현장타설말뚝 외부강관의 적정 보강길이 산정

## Estimation of Appropriate Reinforcement Length of Casing for the Pile of Pile Bent System through Numerical Analysis

양 우 열<sup>1)</sup> · 김 완 호<sup>2)</sup> · 이 강 일<sup>†</sup>  
 Wooyeol Yang · Wanho Kim · Kangil Lee

Received: March 16<sup>th</sup>, 2021; Revised: April 5<sup>th</sup>, 2021; Accepted: May 3<sup>rd</sup>, 2021

**ABSTRACT** : One of the construction methods applied as a pier foundation type is a single type cast-in-place pile. In applying a pile bent system as a foundation type, the main concern in designing can be said to secure the lateral bearing capacity of pile structure in system. In addition, to increase the rigidity of the pile structure, a method of increasing the lateral bearing capacity by reinforcing the pile structure with a casing has been used. However, although the reinforcing effect and appropriate reinforcing length of casing may vary depending on the soil conditions, there is insufficient studies on this, and for this reason, the entire pile structure in a pile bent system is reinforced with a casing, in the field. In addition, if the length of the entire pile is reinforced with a casing, it may lead to delays in construction and increase in construction costs. That is, in order to more effectively reinforce the pile structure with a casing, it is necessary to study the lateral bearing characteristics of the reinforced pile structure in system. And it should be determined the appropriate reinforcing length of the casing from the evaluated bearing characteristics. Therefore, in this study, the lateral bearing characteristics of piles applied with the reinforcing length of casing for each condition were evaluated through a numerical analysis. And, based on the analysis results, the appropriate reinforcing length of casing was proposed. As a result of the study, it was found that in order to effectively increase the lateral bearing capacity of pile structure, the reinforcing length of casing should be applied twice the influence range of the bending behavior of the pile,  $1/\beta$ .

**Keywords** : Pile bent system, Numerical analysis, Reinforcing length of casing, Lateral bearing characteristics

**요 지** : 교각기초 형식으로 적용되는 기초공법 중 하나는 단일형 현장타설말뚝이다. 이 말뚝에 대한 설계 시 주된 관심사항은 말뚝체에 작용하는 수평지지력 확보 여부이다. 현재 말뚝체의 강성증가를 위해 외부강관으로 말뚝체를 보강하여 말뚝의 수평지지력을 증가시키는 방법이 활용되고 있다. 그러나 지반조건에 따라 외부강관의 보강효과와 적정 강관보강 길이가 달라질 수 있음에도 이에 대한 연구가 미흡하여 현장에서는 대부분 말뚝체 전체를 외부강관으로 보강하고 있다. 그러나 시스템 내의 전체 말뚝길이를 외부강관으로 보강할 경우 공사 지연과 공사비의 증가로도 이어질 수 있다. 따라서 좀 더 효과적으로 외부강관을 활용하기 위해서는 외부강관으로 보강된 말뚝체를 대상으로 말뚝의 수평지지특성을 평가하여 강관의 적정한 보강길이를 결정해야 한다. 이에 본 연구에서는 수치해석방법을 통해 각 조건별 외부강관의 보강길이를 적용한 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체에 대한 지지특성을 평가하고, 이 해석결과를 바탕으로 외부강관의 적정 보강길이를 제안하였다. 본 연구결과, 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체에 대한 수평지지력을 효과적으로 증가시키기 위해서는 강관의 보강길이가 말뚝의 휨거동 영향범위인  $1/\beta$ 의 2배를 적용해야 하는 것으로 나타났다.

**주요어** : 단일형 현장타설말뚝, 수치해석, 강관보강 길이, 수평지지특성

## 1. 서 론

전면기초와 무리 말뚝으로 구성된 기초시스템은 다수의 공정과 넓은 소요작업 공간 등의 요구로 인해 도심지의 시공일 경우 비용 및 환경적 요소에 대해 매우 까다롭게 고려된다. 특히 교량(교대, 교각) 기초로 활용되는 경우 교대, 교각기초는 설계 시 구조물의 기후영향을 고려해 동결심도를 고려한 소정의 깊이 이하에 설치됨이 일반적이고, 이로 인

해 큰 규모로 터파기 작업과 흙막이 벽체가 요구되므로 시간적, 경제적인 손실이 발생하는 문제가 있어 왔다.

이 같은 전면기초-말뚝 기초시스템의 한계를 극복하기 위해 현장에서는 다양한 방법이 개발·제안되었고, 제안된 공법들 중 하나가 기초 슬라브 없이 말뚝과 기둥을 일체화시켜 시공하는 단일형 현장타설말뚝 공법(Single column drilled pier foundation or Pile bent system; KGS, 2015)이다. 이 공법은 교각의 기둥과 말뚝체(Column and pile structure)를

1) Deputy Manager, Namkwang Engineering & Construction Co., LTD.

2) Ph.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Daejin University

† Professor, Department of Civil Engineering, Daejin University (Corresponding Author : kilee@daejin.ac.kr)

일체화시켜 설치해줌으로써 별도의 기초 슬라브가 요구되지 않는 장점이 있다. 이 말뚝은 구조상 기둥과 말뚝체가 일체 구조이고, 기둥과 말뚝체가 구조물 전체에 작용하는 하중을 전부 부담해야 한다. 즉, 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체인 대구경 현장타설말뚝은 수직하중에 대한 저항력이 크나, 말뚝의 수평저항력이 상대적으로 작아 좀 더 효과적으로 공법을 활용하기 위해서는 이 공법의 수평저항력 확보가 우선되어야 한다(Ahn et al., 2011; Jeong & Kim, 2013).

대구경 현장타설말뚝의 말뚝체에 대한 수평저항력을 증가시킬 수 있는 방안은 말뚝의 인접지반 강성을 증가시키는 방법과 말뚝체의 자체강성을 증가시키는 방법이 있다. 최근 철도, 도로현장의 교각구조물에 Fig. 1과 같이 적용되었던 올케이싱으로 보강된 말뚝체를 보강한 대구경 현장타설말뚝이 그 예라 할 수 있다. 이 말뚝체의 시공은 외부 강관을 설치한 후 속채움 콘크리트를 타설하는 순으로 작업이 진행된다.

이 방법은 말뚝체의 강성증가를 통해 어느 정도의 수평저항력 증가를 기대할 수 있으나, 시공 상 암반층까지 외부

강관을 설치해야 하므로 암반 내 강관의 근입이 용이하지 않으며, 기둥부까지 외부강관으로 보강하면 유지보수에도 문제가 있다. 또한 수평하중을 받는 말뚝의 경우 일정깊이 ( $\leq 1/\beta$  이내, 여기서,  $\beta$ =말뚝의 특성치; KGS, 2015)까지 휨 거동이 지배하고, 일정깊이 이상( $\geq 1/\beta$ )부터는 압축거동을 보임에도 이를 고려하지 않고 있으며, 적정 외부강관의 설치깊이에 대한 기준도 제시되어 있지 않다.

이에 본 연구에서는 SPT의 N치 값을 달리한 지반조건에서 외부강관의 길이를 달리 적용한 경우 대구경 현장타설말뚝에 대한 수평지지력의 증가효과 및 강관 보강깊이를 제안하고자 수치해석 방법 중 하나인 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과, 외부강관의 보강효과는 조밀한 모래지반 보다 느슨한 모래지반에서 큰 효과를 보이며, 강관의 보강깊이가 증가함에 따라 대구경 현장타설말뚝의 말뚝체의 수평지지력도 증가하나,  $1/\beta$ 의 2배 이상의 보강깊이를 증가시키면 더 이상의 수평지지력 증가를 기대할 수 없는 것으로 평가되었다.

## 2. 문헌연구

### 2.1 대구경 현장타설말뚝

일반적으로 말뚝기초는 상부 구조물의 하중을 안정하게 지지하고 견고한 지지층까지 작용하중을 전달하기 위해 사용되어 왔으며, 이에 구조물의 기초 슬라브 하부에 Fig. 2(a)와 같이 파일-전면기초 형식의 그룹말뚝(Piled raft system)을 설치한다. 그러나 이 기초형식은 기초 터파기 작업과 함께 가설벽체 설치, 지반 되메움 작업 등 복잡한 작업공정이 요구되므로, 공사지연과 공사비 증가 등 시공 상의 문제가 있어 왔다. 최근 기존 기초시스템(특히 교각기초)의 문제를 해결하기 위해 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 단일형 현장타설말뚝(Pile bent system)이 주로 검토, 적용하고 있다. 교각기둥과 말뚝체가 일체형으로 설치되는 단일형 현장타설말뚝은 대구경(직경 1.0~3.0m) 철근 콘크리트 말뚝체를 설치한 후 기둥설치 순으로 시공하는 방법이다.

단일형 현장타설말뚝의 형식은 Fig. 3에서 보인 바와 같이 기둥과 말뚝구조의 직경이 동일한 단면을 가진 형식과 기둥과 말뚝구조의 직경이 다른 변단면 형식으로 구분할 수 있다. 동일한 단면을 가진 형식인 경우 Fig. 3(a)에 보인 바와 같이 말뚝과 교각의 구분이 불분명하고, 모멘트가 지표면에서 약  $1 \sim 3D$  깊이에서 최대로 발생되며 휨모멘트의 변화가 크지 않는 것이 특징이다. 반면, 기둥과 말뚝의 직경이 다른 변단면인 경우에는 Fig. 3(b)와 같이 동일 단면과 달리

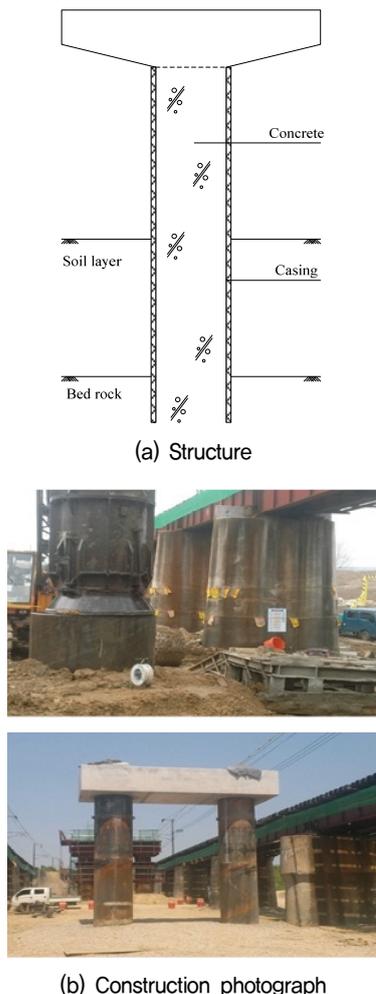


Fig. 1. All casing pile bent system

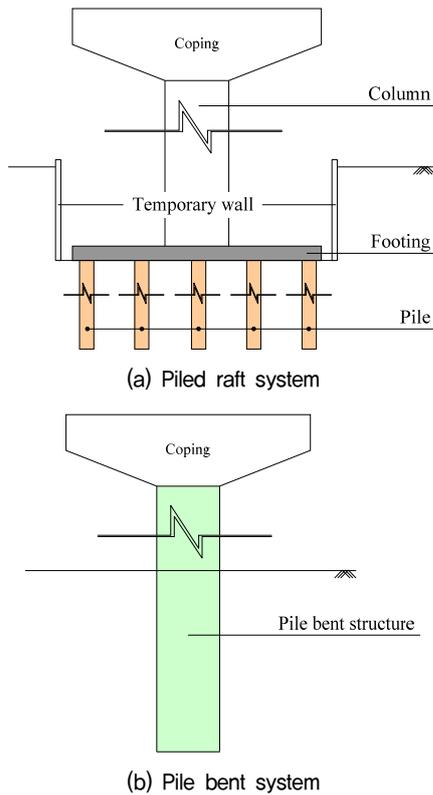


Fig. 2. Foundation system of pier

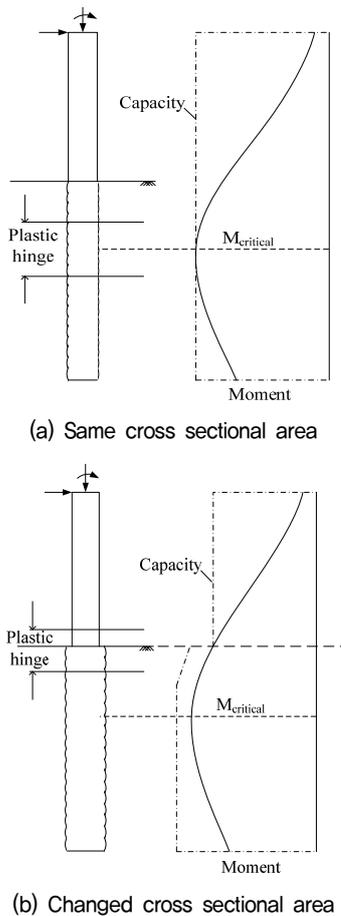


Fig. 3. Behavior of pile bent structure by the change of cross sectional area (KGS, 2015)

기둥과 말뚝구조의 직경의 경계가 명확하고, 기둥하단에 소성힌지가 발생되도록 함이 특징이라 할 수 있다. 또한 직경 변화는 연성능력이 감소되어 단면이 동일한 형식에 비해 상대적으로 취성거동이 예상되므로 적정수준의 직경변화를 유지해야 함이 바람직하다(KGS, 2015).

## 2.2 기존 연구사례

단일형 현장타설말뚝은 장대교량, 초고층 건물, 경전철 등의 도심지의 대규모 건설 사업 등에 사용되는 공법으로 대형구조물 시공에 수반되는 소음과 진동에 의한 제약이 작아 2000년대 초반부터 그 적용 실적이 증가하고 있는 추세이고, 이에 대한 연구도 함께 수행되고 있다. 최근 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체에 시공되는 대구경 현장타설말뚝에 대한 연구는 몇몇 연구자에 의해 진행되어 왔는데, Mohamed et al.(2018)은 2경간 연속교를 대상으로 수치해석을 통해 지진에 의한 근단층 지반운동에 대한 거동특성에 대해 평가한 바 있고, 연구결과를 통해 근단층까지의 거리가 가까울수록 상부구조의 변위가 증가함을 보인 바 있다. Sun et al. (2019)는 연약층이 매우 두꺼운 지반에 설치된 단일형 현장타설말뚝 교량의 근단층 지반운동에 대한 지진거동 특성과 내진성능 연구를 통해 단일형 말뚝에 최대모멘트가 발생하는 위치는 설계지반운동인 경우 지표 부근에서, 근단층 지반운동이면 말뚝 선단부에 발생하는 등 상이한 특성을 보인다고 제안한 바 있다.

Yang et al.(2020)은 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체에 대한 현장시험과 2차원 비선형 해석방법을 통해 지반조건별 말뚝의 영향범위( $1/\beta$ 의 위치)와 최대 발생모멘트의 위치관계가 대체로 선형 관계임을 보인 바 있다. 또한 Yoo et al. (2020)은 비선형해석을 통해 외부강관 보강조건에 따른 대구경 현장타설말뚝의 수평거동특성을 평가한 바 있고, 외부강관의 보강으로 기대할 수 있는 수평지지력의 증가는 무보강 콘크리트 말뚝인 경우보다 최대 9% 정도임을 제시한 바 있다. 그러나 이 연구는 2차원 비선형해석 프로그램인 L-PILE을 활용하였고, 이 경우 원형체를 완전히 모사하지 못하는 한계가 있어 이에 대한 검증이 요구된다.

단일형 현장타설말뚝과 관련된 기존 연구를 살펴본 바, 연구의 대부분은 단일형 현장타설말뚝체의 해석기법의 적정성 평가, 말뚝체의 거동특성이 국한되고 있다. 실제 단일형 현장타설말뚝을 시공하는 경우 시스템 내의 말뚝체 설치 직경이 대형말뚝 시공장비 성능에 크게 좌우되는 경우가 많고, 말뚝직경 3.0m 이상 이내로 시공함에 일반적이다. 즉, 말뚝체의 설치직경에 대한 제약이 있음을 의미하므로 수평저항력의 증가를 위한 다양한 방법이 연구되고 있다. 따라

서 말뚝체의 강성증가를 위한 보강방법 중 하나인 외부강관 보강방법에 대한 평가도 요구된다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 수치 모델링

Fig. 4는 본 연구에서 모델링한 지반단면과 단일형 현장 타설말뚝의 말뚝체를 나타낸 것이다. 지층조건은 하부 암반

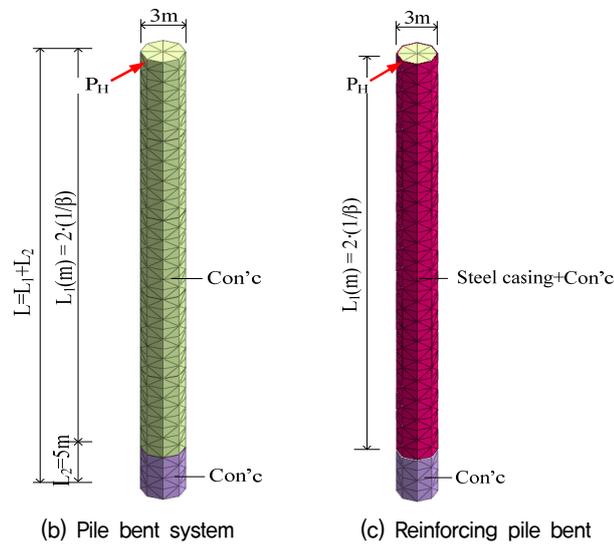
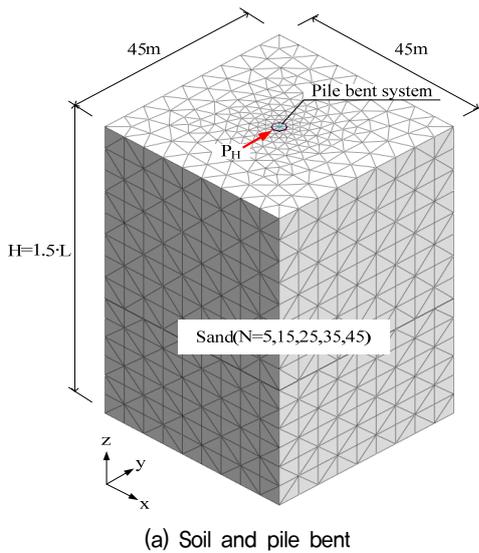


Fig. 4. Analysis modelling

층 존재 여부에 따라 수평거동특성이 달라질 수 있으므로, 말뚝에 대한 외부강관 보강효과를 명확히 규정지을 수 없다. 이에 지층조건을 Fig. 4(a)에 보인 바와 같이 단일 모래 지반을 대상으로 하였다. 지반밀도에 따라 수평거동 및 지지특성이 달라지는 점을 감안하여 N=5, 15, 25, 35, 45 경우인 지반조건을 나누어 지반 탄성계수, 프아송비, 강도정수를 달리하여 모델링하였다. 지반해석 모델은 모어-쿨롱모델 (Mohr-Coulomb's model)을 적용하였다.

말뚝체의 직경과 길이는 모델링 시 말뚝의 최대길이 L=35m를 고려해 해석단면의 크기를 결정하였고, 모델링한 단면크기(폭×길이, m)는 45×45m이다. 그리고 높이 H는 바닥부의 구속조건에 따라 해석결과가 달라질 수 있으므로 말뚝길이의 1.5배로 결정하였다(H=1.5·L). 해석단면의 경계조건은 측면인 경우 수평 구속조건을, 바닥면인 경우 완전 구속조건을 적용하였다. 유한요소는 3차원인 사면체 요소 (Tetrahedron element)이고, 요소절점 수는 절점(Node) 3개, 중간절점 3개로 총 6개이다. 단일형 현장타설말뚝에 인접한 지반의 유한요소 크기는 0.5m로 촘촘하게 모델링하였고, 해석단면의 경계부에 인접한 지반의 유한요소 크기는 5.0m이다.

모델링한 말뚝체의 직경은 Yang et al.(2020)의 시험말뚝의 직경과 동일한 3.0m를 적용하였다. 이는 시험결과와 해석결과를 서로 비교·분석하여 수치해석방법을 통해 말뚝의 지지특성에 대한 연구가 가능한지를 평가하기 위함이다. 말뚝길이 L은 Fig. 4(b)와 (c)에 보인 바와 같이 보강영역인 L<sub>1</sub>과 무보강 보강영역인 L<sub>2</sub>로 구분하였다(L = L<sub>1</sub> + L<sub>2</sub>). 여기서 보강영역인 L<sub>1</sub>은 말뚝의 특성치  $\beta(= \sqrt[4]{(k_h D)/(4EI)}$ ; Prakash & Shirma, 1990)와 관계되는 인자로 지반조건에 따라 좌우된다.

#### 3.2 재료 물성값

말뚝의 휨 영향범위인 1/β의 길이를 보강영역인 L<sub>1</sub>으로 설정할 경우 보강영역의 길이가 짧아질 수 있어 제대로 된 외부강관의 보강효과를 평가할 수 없다. 이에 보강영역인 L<sub>1</sub>은 2·(1/β)으로 설정하였으며, 모델링 시 적용된 L<sub>1</sub>의 길이는 Table 1과 같다. 이때 적용된 지반반력계수 k<sub>h</sub>는 Yoo

Table 1. Length of modeling pile bent system (m)

SPT, N	5	15	25	35	45	Note
1/β	17	13	12	11	10	$\beta = \sqrt[4]{(k_h D)/(4EI)}$
L <sub>1</sub> = 2·(1/β)	34	26	24	22	20	l <sub>max</sub> = L <sub>1</sub>
L <sub>2</sub>	5	5	5	5	5	
L = L <sub>1</sub> + L <sub>2</sub>	39	31	29	27	25	

et al.(2020)의 연구결과에서 제안한 바를 고려해 Eq. (1)과 같이 Vesic(1961)이 제안한 경험식을 적용하였다.

$$k_h = E_s/[D \cdot (1 - \mu^2)] \quad (1)$$

여기서,  $D$ 는 파일의 직경이고,  $E_s$ 와  $\mu$ 는 지반의 탄성계수와 프아송비를 의미한다. 보강영역인  $L_2$ 의 길이는 말뚝의 길이에 따라 저항성이 상이할 수 있어 이를 고려해 모든 조건의 말뚝에 동일한 5.0m를 적용하여 모델링하였다. 재질이 콘크리트인 말뚝체의 요소는 지반과 동일한 3차원 사면체 솔리드 요소이며, 요소의 크기는 1.0m이다. 재질이 철인 외부강관은 Fig. 4(c)에 보인 바와 같이 셸 요소를 적용하여 삼각형 요소로 모델링하였고, 요소크기는 0.5m이다. 모델링 시 말뚝과 외부강관의 해석모델은 탄성모델(Elastic model)을 적용하였다.

해석 시 지반 물성 값으로는 탄·소성모델 적용을 위해 단위중량, 프아송 비, 지반 탄성계수, 흙의 내부마찰각과 점착력 등이 요구된다. 다양한 지반에 대한 지반조사 결과를 통하여 지반 물성 값을 적용함이 바람직하나, 기초시스템 설계 시 현장시험, 문헌조사 결과 등을 종합적으로 고려해 물성 값을 결정한다. 이에 본 연구에서는 각 기관 또는 문헌 등 (Kim, 1991; KGS, 2015; Shin, 2015; etc)에 제안한 값을 참조하여 적용하였고, 적용한 재료 물성 값은 Table 2와 같다.

### 3.3 수치해석 조건

수치 모델링 시 Fig. 4(b)와 (c) 그리고 Table 1에 보인 바와 같이 지반조건별로 보강영역  $L_1$ 은 다르며, 이때 보강영역  $L_1$ 내의 외부강관에 의한 보강길이(Reinforcing length,  $l$ )의 최대치는 보강영역  $L_1$ 의 길이와 같다( $l_{max.} = L_1 = 2(1/\beta)$ ). 또한 보강영역  $L_1$ 의 범위가 상이하므로 외부강관의 보강길이  $l$ 도 달라진다. 이를 고려해 Yoo et al.(2020)이 고려한 Eq. (2)와 같이 보강길이비(Reinforcing length ratio,  $\kappa$ )를 정의하였고, 수치 모델링 시 Eq. (2)로부터 구한 외부강관에

의한 보강길이를 달리 적용할 수 있다.

$$\kappa = l/(1/\beta) \quad (2)$$

Table 3은 본 연구에서 고려한 해석조건이다. 표와 같이 지반조건의 N값에 따른 말뚝의 휨 거동 영향범위  $1/\beta$ , 연구 시 설정한 보강길이비  $\kappa$ (=0.4~2.0), 그리고 외부강관의 보강길이  $l$ 을 달리하여 해석을 수행하였다.

## 4. 수치해석 결과

### 4.1 단일형 현장타설말뚝의 수평거동

Fig. 5는 지반조건이 N=5이고 무 보강조건인 경우의 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체(말뚝길이,  $l=39m$ )에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 말뚝체 두부의 인접한 지반변위는 Fig. 5(a)에 보인 바와 같이 수평하중이 작용하는 방향(y방

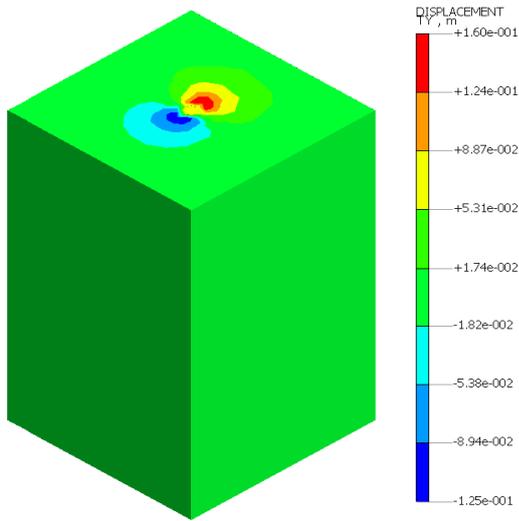
Table 3. Analysis conditions

Model type	N	$1/\beta$ (m)	Reinforced length
Non-reinforced pile bent system	5	17	-
	15	13	
	25	12	
	35	11	
	45	10	
Casing reinforced pile bent system	5	17	$\kappa = 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0$
	15	13	
	25	12	
	35	11	
	45	10	
All casing pile bent system	5	17	$\eta > 2.0$
	15	13	
	25	12	
	35	11	
	45	10	

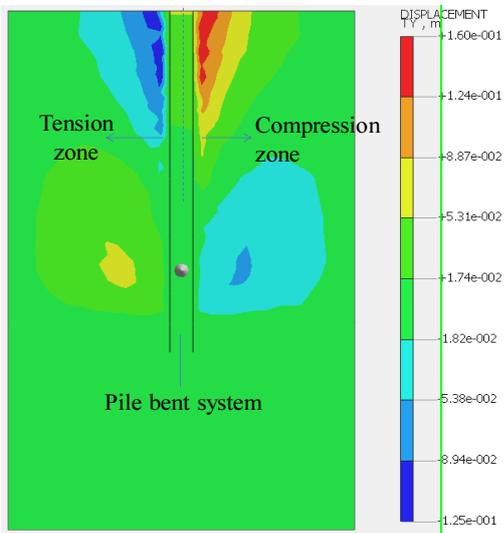
Table 2. Input data in numerical analysis

Material	N	Density	E (MPa)	$\mu$	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	Model
Sand	5	Loose	3.5	0.25	16.0	0	25°	Mohr-Coulomb model
	15	Medium	10.5	0.30	17.0	0	30°	
	25	Medium	17.5	0.30	17.0	0	30°	
	35	Dense	24.5	0.35	18.0	0	33°	
	45	Dense	31.5	0.35	18.0	0	33°	
Concrete	-	-	24,500	0.15	24	-	-	Elastic model
Casing	-	-	205,000	0.30	78.5	-	-	Elastic model

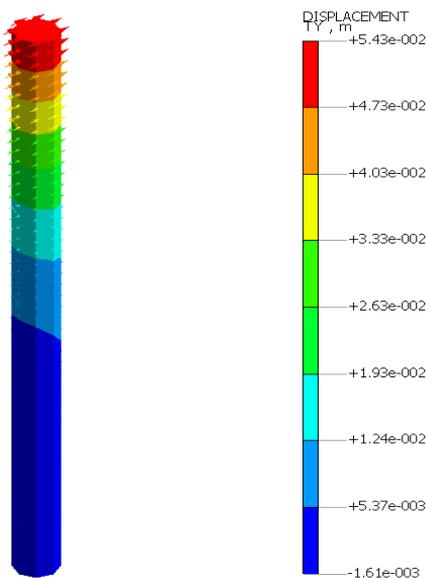
[Note] Elastic modulus of soil,  $E_s = 700N$  (kPa) ; NAVFAC (1986)



(a) Displacement contour (total)



(b) Vector contour of soil



(c) Displacement contour of pile

Fig. 5. Numerical analysis result in case of N=5 and non-reinforced condition

향; Fig. 5(a)으로 압축영역이, 하중 반대방향으로는 인장변위가 발생되고, 수평하중에 의한 압축영역이 인장영역보다 상대적으로 작게 발생되었다. 지중면위는 Fig. 5(b)에 보인 바와 같이 말뚝체의 상부에 집중되었다. 단일형 현장타설말뚝의 말뚝부에 발생된 변위형상을 보면 Fig. 5(c)에 보인 바와 같이 말뚝머리에 변위가 크게 발생하는 반면, 말뚝선단부에서는 변위가 거의 발생되지 않았다.

Fig. 6은 지반조건 N=35이고 외부강관 보강길이가 12m ( $l=12m$  또는  $\kappa=1.2$ )인 경우 말뚝체에 대한 해석결과를 보인 것이다. 이 조건에서는 지반변위가 Fig. 6(b)에 보인 바와 같이 압축영역이 인장영역보다 크게 발생된다. 이 결과는 지반조건 N=5인 경우(Fig. 5(b))와 다른 결과를 보이는데 이는 말뚝의 특성보다는 지반의 전단강도 특성과 관계된 것으로 판단된다. 지반조건 N=5인 경우보다 N= 35인 지반의 전단강도가 상대적으로 크다. 즉, 지반조건 N=35인 경우 말뚝의 인접지반에 의해 더 큰 수평하중에 저항하게 되며, 말뚝의 변형에 의해 발생하는 지반변형에 대한 저항성도 크다.

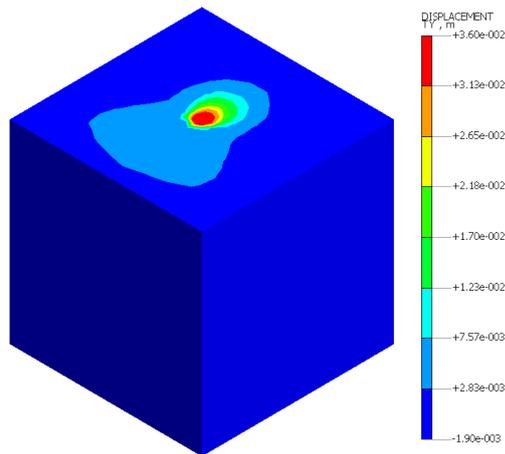
즉, 수평하중에 영향을 받는 압축영역이 크게 발생하는 반면, 수평하중에 의한 말뚝변형으로 발생된 인장영역은 N=5인 경우보다 작게 발생하는 것으로 판단된다. 말뚝의 변위형상은 Fig. 6(c)에 보인 바와 같이 말뚝상단에 변위가 집중되었다. 말뚝체에 설치한 외부강관의 변위형상의 경우 Fig. 6(d)에 보인 바와 같이 외부강관의 상단에 수평변위가 집중되고, Fig. 6(e)에 보인 바와 같이 외부강관의 전체길이에서 회전변위가 집중됨을 알 수 있다.

## 4.2 N치별 수평지지력

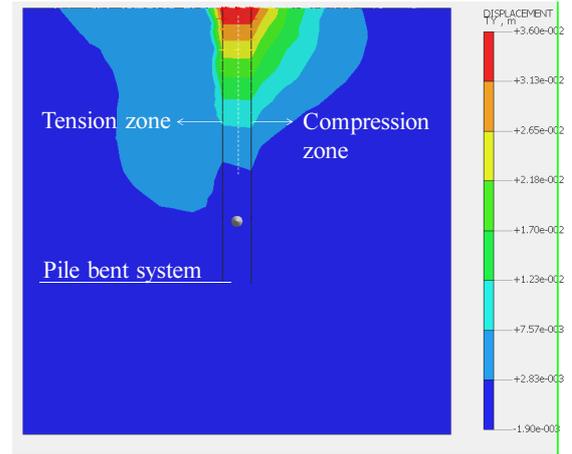
국내의 경우 설계 시 말뚝의 허용 수평변위는 말뚝직경의 1%를 적용함이 일반적이다(KGS, 2015). 또한 말뚝의 허용 수평기준치에 해당하는 수평하중을 말뚝의 허용 수평지지력으로 결정하므로, 본 연구에서는 허용 수평변위에 대한 기준치( $\delta_h=0.01 \times D=0.01 \times 3.0=0.3m=30mm$ )를 적용하여 각 조건별 말뚝체의 수평지지력을 결정하였다.

Fig. 7(a)은 Yang et al.(2020)이 수행한 현장시험( $N_{ave}=16$ ; non-reinforced condition)와 본 연구 시 수행한 해석결과( $N=15$ ; non-reinforced condition)를 통해 구한 수평하중-변위관계를 비교한 것으로 현장시험결과와 유사하였다. 하중-변위관계를 통해 구한 수평지지력은 수치해석의 경우 2,350kN, 현장시험의 경우 2,550kN 정도였으며, 두 결과의 수평지지력 차이가 크지 않았다. 이 비교결과는 수치해석을 통해 단일형 현장타설말뚝의 지지특성에 대한 평가가 가능하고, 관련 추가 연구가 가능함을 보여주는 것이라 할 수 있다.

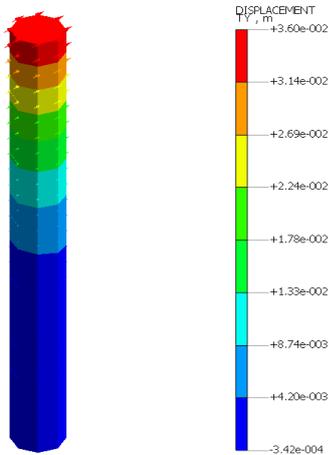
Fig. 7(b)는 본 연구에서 수행한 해석결과를 통해 구한 지



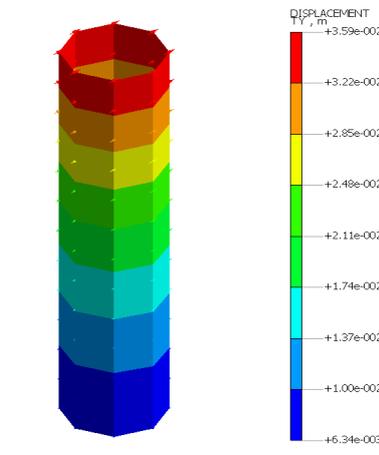
(a) Displacement contour (total)



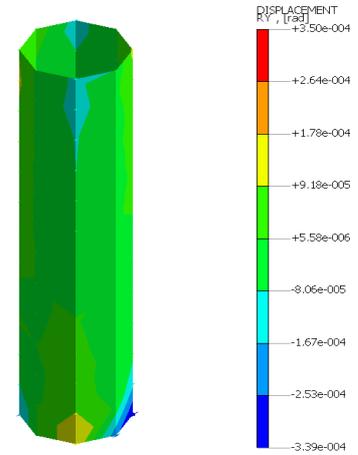
(b) Displacement contour (side)



(c) Displacement contour of pile

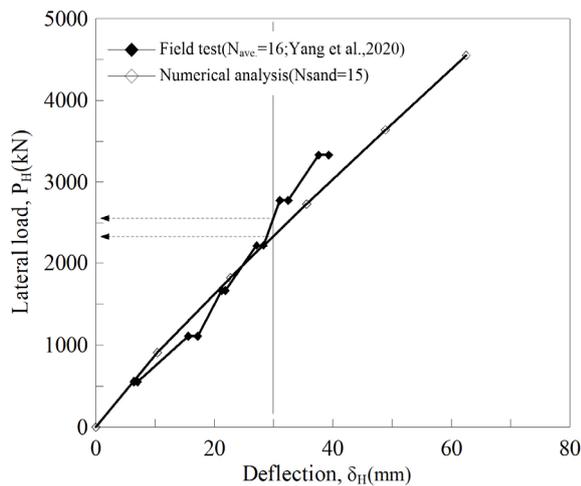


(d) Lateral displacement contour of casing

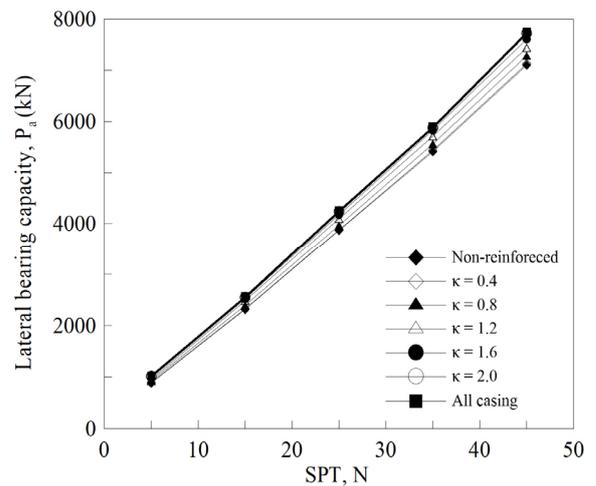


(e) Rotation displacement contour

Fig. 6. Numerical analysis result of reinforced pile by casing in case of  $N=35$  and  $\kappa=1.2$



(a) Comparison of results (non-reinforced condition)



(b)  $N-P_a$

Fig. 7. Lateral bearing capacity of non-reinforced or reinforced pile bent system by SPT,  $N$

반조건  $N$ 과 각 조건별 외부강관 보강길이를 적용한 경우 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체에 대한 수평지지력을 비교한 것이다. 그림과 같이 지반밀도가 증가함에 따라 말뚝체의 수평지지력도 증가하였고, 지반조건  $N$ 에 따른 말뚝의 수평

지지력의 증가는 대체로 선형적인 관계인 것으로 나타났다. 무 보강조건인 경우의 수평지지력은  $880 \sim 7,100\text{kN}$ 인 것으로 분석되었다. 외부강관 보강길이비  $\kappa=0.4$ 와  $\kappa=0.8$ 인 경우 말뚝의 수평지지력은 각각  $900 \sim 7,120\text{kN}$  및  $930 \sim 7,280\text{kN}$

이었고, 길이비  $\kappa=0.4$ 인 경우보다  $\kappa=0.8$ 인 경우 말뚝의 수평지지력이 좀 더 증가하였다. 외부강관 보강길이비  $\kappa=1.2$ 와  $\kappa=1.6$ 인 경우 말뚝의 수평지지력은 960~7,440kN, 990~7,610kN이었다. 또한 외부강관 보강길이비  $\kappa=2.0$ 과 All casing조건인 경우 말뚝의 지지력은 각각 1,010~7,720kN과 1,020~7,750kN 정도였으며, 두 조건의 지지력은 유사하였다.

Fig. 8은 외부강관으로 보강했을 경우 보강길이비  $\kappa$ 에 따른 지반별 말뚝체 수평지지력의 변화를 비교한 것이다. 보강길이비  $\kappa$ 가 증가함에 따라 각 N치 조건별 말뚝체의 수평지지력도 증가하였다. 지반조건이 N=5인 경우 Fig. 8(a)와 같이 외부강관 보강길이에 따라 최대 수평지지력 증가량 ( $\Delta P_{a(max.)} = P_{a(max.)} - P_{a(min.)}$ )은 140kN 정도였다. 또한 N=25인 경우 Fig. 8(b)와 같이 외부강관의 보강길이에 따라 말뚝의 수평지지력에 대한 최대 증가량  $\Delta P_{a(max.)}$ 는 약 390kN이었으며 N=35, 45인 경우는 Fig. 8(c), (d)에서 보인 바와 같이 외부강관 보강길이에 따라 단일형 현장타설말뚝의 수

평지지력 최대 증가량  $\Delta P_{a(max.)}$ 는 각각 490kN 및 650kN이었다.

## 5. 단일형 현장타설말뚝의 외부강관 보강효과

### 5.1 외부강관 보강효과 평가법

본 연구에서는 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체에 대한 외부강관에 대한 효과와 강관의 적정 보강길이를 평가하고, 제안하기 위해 수치해석을 수행하였고, Fig. 8의 연구결과와 같이 지반조건별 외부강관 보강길이에 대한 말뚝체의 수평지지력을 결정하였다. 이 결과를 통해 외부강관으로 단일형 현장타설말뚝을 보강하는 경우 강관의 보강효과에 대한 정량적인 평가가 가능함을 알 수 있다. 이에 Eq. (3)과 (4)에 보인 지지력비(Bearing capacity ratio, BCR)와 외부강관에 의한 지지력 증가율(Increase ratio of bearing capacity by casing, IR)로 산정하여 각 조건별 말뚝체의 수평지지력을 종합적

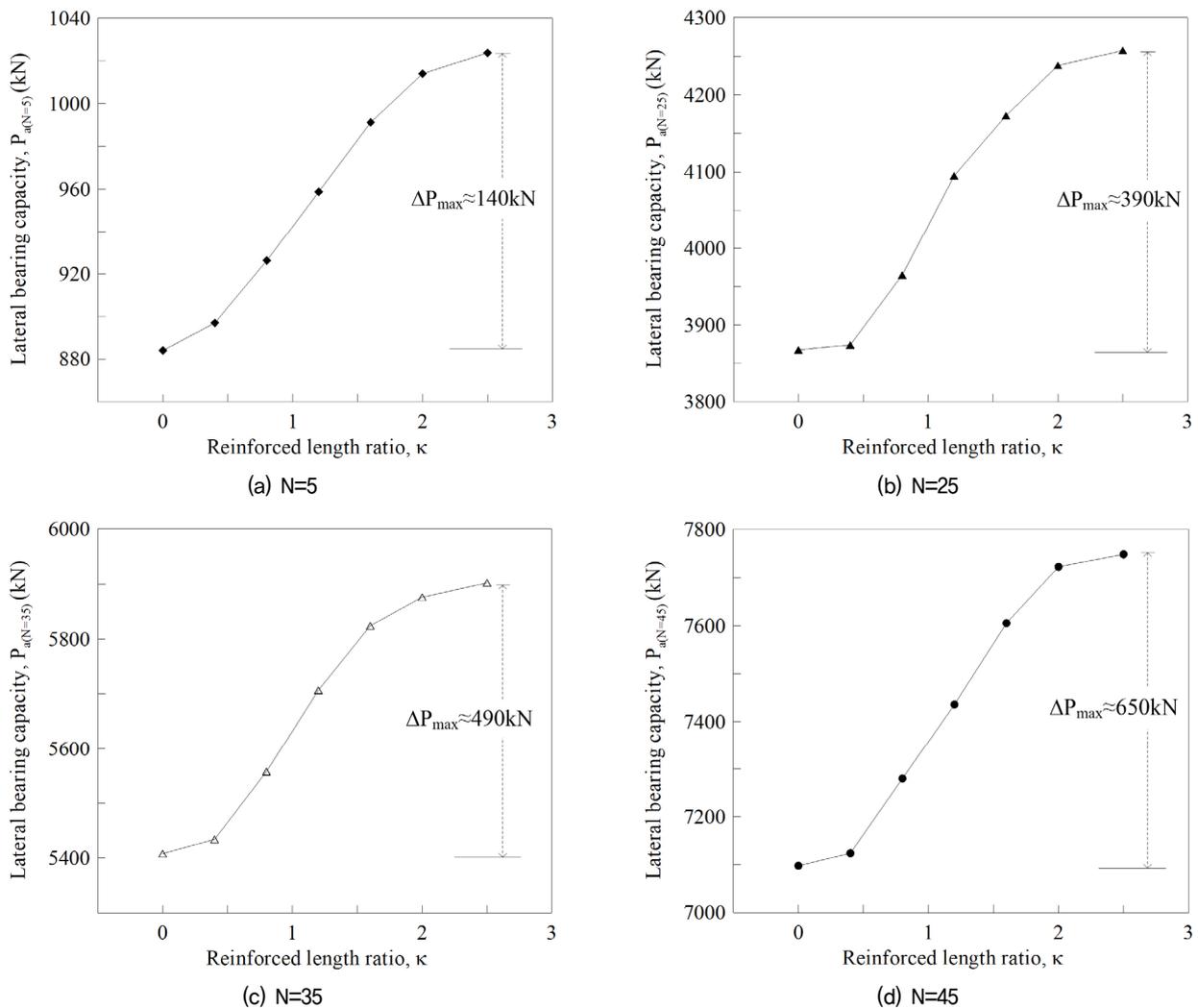


Fig. 8. Lateral bearing capacity of pile bent system by the reinforcing length of casing,  $\kappa$

으로 비교, 분석하였다.

여기서,  $P_{a(\kappa > 0)}$ 는 외부강관 보강조건인 경우 말뚝체의 수평지지력,  $P_{a(Non-re.)}$ 는 무 보강조건인 경우 수평지지력을 의미한다. 또한 조건별 말뚝체의 수평지지력 증가량  $\Delta P_a$ 는  $P_{a(\kappa > 0)} - P_{a(Non-re.)}$ 와 같다.

$$BCR = \frac{P_{a(\kappa > 0)} \text{ or } P_{a(Non-re.)}}{P_{a(Non-re.)}} \quad (3)$$

$$IR = \frac{P_{a(\kappa > 0)} - P_{a(Non-re.)}}{P_{a(Non-re.)}} \times 100(\%)$$

$$= \frac{\Delta P_a}{P_{a(Non-re.)}} \times 100(\%) \quad (4)$$

## 5.2 외부강관 보강효과 분석결과

Fig. 9는 Eq. (3)을 통해 산출한 각 조건별 결과를 비교한 것이다. 동일한 외부강관의 보강길이비를 적용했을 경우 지반조건에 따른 수평지지력비 BCR은 Fig. 9(a)에 보인 바와 같이 지반조건  $N < 15$ 인 경우  $N$ 이 증가함에 따라 말뚝의 지지력비가 감소하는 반면, 지반조건  $\geq 15$ 이면 말뚝의 지지력비의 변화가 일정해지는 것으로 나타났다. 보강길이비  $\kappa = 0.4$ 인 경우 지반별 지지력비는 약 1.0~1.01 정도였다.

보강길이비  $\kappa = 0.4$ 이고 지반조건  $N = 5$ 인 경우의 지지력비는 1.01로, 이 조건의 경우 최대인 반면, 지반조건  $N \geq 15$ 인 경우의 지지력비는 약 1.0 정도였다.

보강길이비  $\kappa = 2.0$ 인 경우도  $\kappa = 0.4$ 인 경우와 같이 지반조건  $N = 5$ 인 경우의 지지력비가 최대인 반면( $BCR_{(N=5)} = 1.16$ ), 지반조건  $N \geq 15$ 이면 지지력비는 1.10 정도이고 지지력비의 변화가 일정한 것으로 나타났다. 이 결과는 외부강관의 보강효과는 지반조건 변화보다 외부강관의 보강길이 증가에 의한 효과가 큰 것을 의미한다.

보강길이비  $\kappa$ 에 따른 지지력비 BCR의 변화는 Fig. 9(b)와 같이 보강길이비  $\kappa \leq 0.4$ 인 경우 지지력비의 증가가 미비한 반면, 길이비  $\kappa \geq 0.8$ 인 경우 지지력비의 증가가 큰 것으로 나타났다. 그리고 보강길이비  $\kappa > 2.0$ 이면 지지력비가 일정하였다. 지반조건  $N = 5$ 인 경우 보강길이비  $\kappa$ 에 따른 지지력비의 변화가 가장 컸으며, 이때 지지력비는 1.0~1.16 정도였다. 지반조건  $N \geq 15$ 인 경우 지반조건과 관계없이 외부강관의 보강길이비에 따른 지지력비의 변화는 1.0~1.10 정도인 것으로 나타났다.

이 결과는 외부강관 보강길이 증가로 기대할 수 있는 말뚝체의 수평지지력 증가는 연약지반인 경우( $N \leq 5$ ) 최대 1.16배 정도이고, 지반조건  $N \geq 15$ 인 경우 최대 1.10배 정도임을

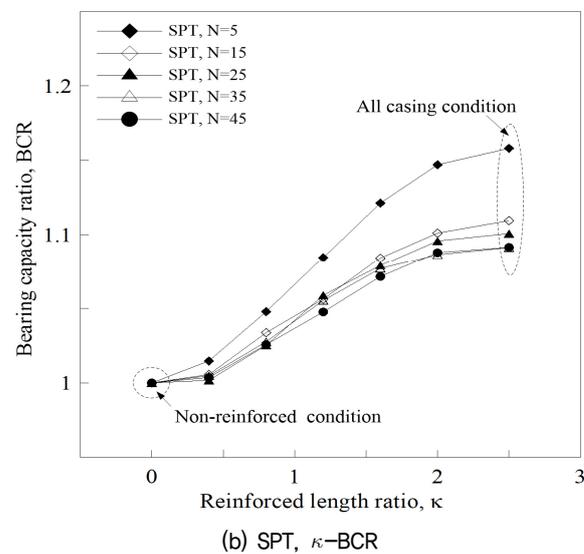
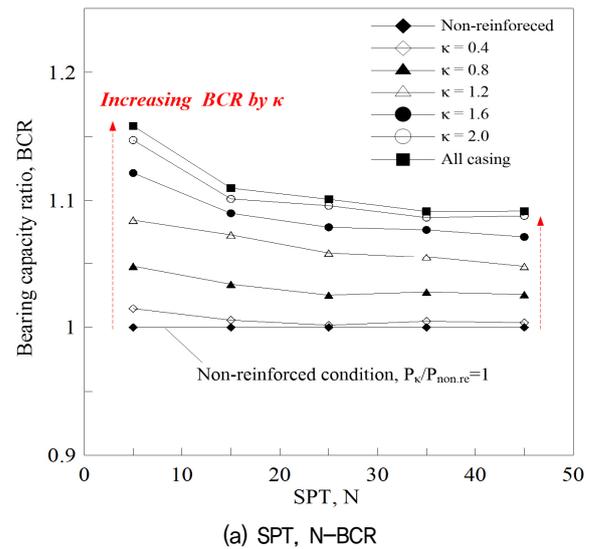


Fig. 9. Comparison of lateral bearing capacity ratio, BCR by  $N$  and  $\kappa$

보여준다. 또한 외부강관의 보강길이  $l$ 이 수평영향범위인  $1/\beta$ 의 0.4~2.0배를 적용할 경우 수평지지력의 증가를 기대할 수 있는 반면( $0.4 \cdot 1/\beta \leq l \leq 2.0 \cdot 1/\beta$ ), 보강길이  $l$ 이  $1/\beta$ 의 2.0배 이상( $l \geq 2.0 \cdot 1/\beta$ )이면 외부강관의 보강길이 증가에 의한 말뚝의 수평지지력 증가를 더 이상 기대할 수 없음을 보여준다.

Fig. 10은 외부강관의 보강길이에 대한 길이비  $\kappa$ 를 달리 한 경우 Eq. (4)와 같이 지지력 증가율 IR로 산정한 결과를 비교한 것이다. 외부강관에 의한 지지력 증가율 IR은 외부강관으로 보강했을 경우의 지지력 증가율(%)을 나타낸 것이다. 보강길이비  $\kappa$ 가 증가함에 따라 보강길이비  $\kappa$ 에 따른 지지력 증가율 IR도 Fig. 10에 보인 바와 같이 증가하나, 길이비  $\kappa > 2.0$ 이면 지지력 증가율 IR이 일정하였다.

이 결과는  $\kappa = 2.0$ 인 경우와 All casing 설치조건( $\kappa > 2.0$ )인 경우의 지지력이 유사하고 더 이상의 보강길이 증가로는 큰

수평지지력의 증가를 기대할 수 없음을 보여준다. 지반조건  $N=5$ 인 경우 외부강관의 보강길이의 증가로 무 보강조건인 경우보다 보강길이비  $\kappa=2.0$ 를 적용할 경우 최대 16% 정도의 지지력을 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 지반조건  $N \geq 15$ 인 경우 지지력의 증가율 IR은 지반조건보다 보강길이의 증가에 크게 좌우되고, 이 경우의 외부강관에 의해 기대할 수 있는 말뚝체의 수평지지력 증가는 보강길이비  $\kappa=2.0$ 를 적용할 경우 최대 9% 정도임을 알 수 있다.

각 조건별 해석결과를 종합적으로 비교한 바, 외부강관에 의해 보강된 말뚝체의 수평지지력은 무 보강조건인 경우에 지지력이 증가하였다. 또한 Fig. 9와 Fig. 10의 연구결과에서 알 수 있듯이 지반조건보다는 외부강관의 보강길이 증가가 말뚝체의 수평지지력을 증가시키는데 좀 더 효과적이

었다. 따라서 상기의 연구결과를 종합적으로 고려하면, 보강길이비  $\kappa$ 에 대한 수평지지력의 관계를 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있고, Fig. 11의 결과를 통해 외부강관 보강길이 적용 시 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체에 대한 수평지지력 증가효과를 정량적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구는 단일형 현장타설말뚝 말뚝체의 수평지지력 증가를 위한 방법으로 외부강관을 적용한 경우, 외부강관에 의해 지지력의 증가효과를 평가하고 말뚝에 대한 외부강관의 적정 보강길이를 제안하고자 수치해석을 수행하였으며 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 연약한 지반에 설치된 단일형 현장타설말뚝을 외부강관으로 보강하는 경우 말뚝의 수평지지력이 보통 또는 견고한 지반인 경우보다 크게 증가하였고, 따라서 연약 지반에 설치된 말뚝을 대상으로 외부강관을 보강하는 경우가 좀 더 효과적이다.
- (2) 단일형 현장타설말뚝의 말뚝체에 대한 외부강관의 보강길이  $l$ 가 휨거동 영향범위인  $1/\beta$ 의 0.4배 이상( $\kappa \geq 0.4$ )이면 보강길이의 증가에 의한 말뚝의 수평지지력의 증가도 큰 반면, 보강길이  $l$ 이  $1/\beta$ 의 2배를 초과한 경우 외부강관의 보강길이의 증가에 의한 지지력 증가는 더 이상 기대할 수 없다.
- (3) 외부강관의 보강길이  $l$ 이 휨거동 영향범위인  $1/\beta$ 의 2배( $\kappa=2.0$ )를 적용한 경우 연약한 지반( $N=5$ )이면 외부강관의 보강에 의한 말뚝의 수평지지력은 무 보강조건인 경우보다 16% 정도, 보통 또는 견고한 지반( $N \geq 15$ )인 경우는 약 9% 정도 증가하였다.

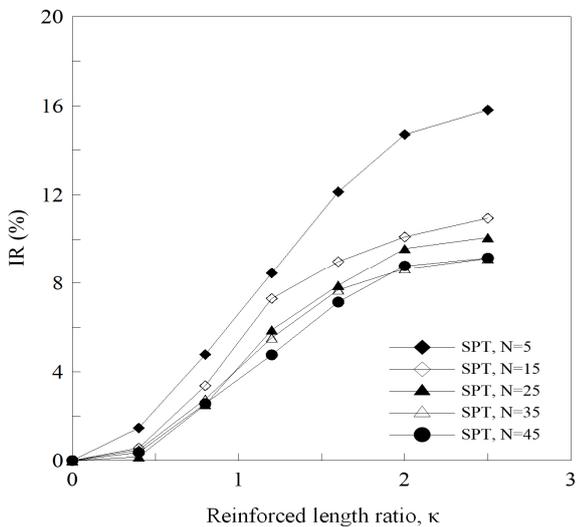


Fig. 10. Increase ratio of bearing capacity by the reinforcing length ratio and soil condition

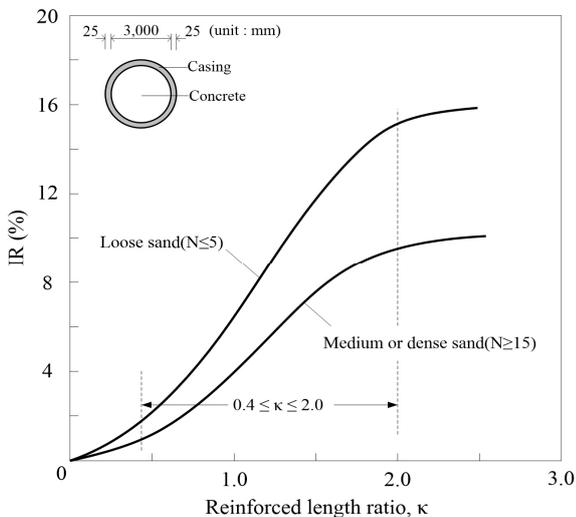


Fig. 11. Appropriate reinforcing length of casing and increase effect of bearing capacity

## References

1. Ahn, S. Y., Jeong, S. S. and Kim, J. Y. (2011), Proposal of a new design method of the pile-bent structure considering plastic hinge, Journal of Korean Geotechnical Engineering, Vol. 27, No. 2, pp. 91~101 (In Korean).
2. Jeong, S. S. and Kim, J. Y. (2013), Analysis of optimized column-pile length ratio for supplementing virtual fixed point design of bent pile structures, Journal of the Korean Society of Civil Engineering, Vol. 33, No. 5, pp. 1915~1933 (In Korean).
3. KGS (2015), Design code of structure foundation, CIR, Seoul, pp. 343~351 (In Korean).
4. Mohammad, H., Abdolrahim, J. and Ahmad, M. (2018), Effect of near fault and far fault ground motions on nonlinear dynamic

- response and seismic improvement of bridges, *Civil Engineering Journal*, Vol. 4, No. 6, pp. 1456~1466.
5. Prakash, S. and Sharma, H. D. (1990), *Pile foundations in engineering practice*, John Wiley & Sons, New-York, pp. 322~388.
  6. Shin, J. H. (2015), *Geomechanics & Engineering: analysis and design*, CIR, Seoul, pp. 571~608 (In Korean).
  7. Sun, C. H., An, S. M., Kim, J. H. and Kim, I. H. (2019), Seismic performance of bridge with pile bent structures in soft ground against near-fault ground motions, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 23, No. 7, pp. 137~144 (In Korean).
  8. Vesic, A. B. (1961), Bending of beams resting on isotropic elastic solid, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 87, No. 2, pp. 35~54.
  9. Yang, W. Y., Hwang, T. H., Kim, B. J., Park, S. B. and Lee, K. I. (2020), Evaluation of lateral subgrade reaction coefficient considering empirical equation and horizontal behavior range of large diameter drilled shaft, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 1~11 (In Korean).
  10. Yoo, J. H., Moo, I. J. and Lee, K. I. (2020), Lateral bearing characteristics of large diameter drilled shafts by casing reinforcement condition using non linear analysis, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 19, No. 3, pp. 23~33 (In Korean).