

수직증축 리모델링 시 말뚝지지 조건에 따른 말뚝기초 거동 분석

노유진* · 박종전** · 오경석*** · 장서용**** · 고준영*****

Noh, Yujin* · Park, Jongjeon** · Oh, Kyuoung Seok*** · Jang, Seo-Yong**** · Ko, Junyoung*****

Analysis of Pile Behavior according to Bearing Condition for Vertical Extension Remodeling

ABSTRACT

In this study, three-dimensional finite element analysis was used to analyze the behavior of existing and reinforcing piles according to the pile support conditions for vertical extension remodeling. Cap support conditions (group pile, piled raft foundation) and pile tip conditions (rock, soil embedment) were considered as factors influencing existing and reinforcing piles behavior. For the quantitative analysis of existing and reinforcing piles, the displacement, load distribution ratio, and axial force by depth according to the analysis stage were analyzed. As a result of the analysis, it was confirmed that the largest settlement occurred in the reinforcing pile due to the pre-loading method. In particular, a large amount of settlement occurred in group piles regardless of the embedment conditions. In the piled raft foundation, it was confirmed that the displacement and load distribution ratio of existing piles and reinforcing piles were reduced due to the influence of the raft. The axial force by depth showed a difference between group pile and piled raft foundation, which appears to be a major factor affecting displacement and load distribution ratio. Based on the numerical analysis results, it was confirmed that cap support conditions and pile tip embedment conditions should be considered in the design of pile foundations for vertical extension remodeling.

Keywords : Vertical extension remodeling, Piled raft foundation, Group pile, Reinforcing pile, Preloading method, Load distribution ratio

초 록

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석을 이용하여 기존 건축물의 수직증축 리모델링을 위한 말뚝지지 조건에 따른 기존 및 보강말뚝의 거동에 대해 분석하였다. 수치해석에서 기존 및 보강말뚝 거동의 영향인자로는 캡지지 조건(군말뚝 기초, 말뚝지지 전면기초)과 기존말뚝의 선단근입조건(암반근입, 토사근입)을 고려하였다. 기존말뚝과 보강말뚝의 정량적 거동 분석을 위해 침하량, 하중분담률, 해석 단계에 따른 심도별 축력을 결과로 도출하였다. 분석 결과, 선재하공법 적용에 기인하여 보강말뚝에서 가장 큰 침하량이 발생한 것을 확인하였다. 특히 선단근입조건에 관계없이 군말뚝에서 큰 침하량이 발생하였다. 말뚝지지 전면기초에서는 기초관(Raft)의 영향으로 인해 침하량 및 기존말뚝과 보강말뚝의 하중분담률이 작아지는 것을 확인하였다. 심도별 축력 분포도에서는 군말뚝과 말뚝지지 전면기초 간의 축력 분포에 차이가 나타났으며, 이는 침하량과 하중분담률에 영향을 미치는 주요 요소로 작용하는 것으로 보인다. 수치해석 결과를 바탕으로 수직증축 리모델링을 위한 말뚝기초 설계에 있어서 캡지지 조건과 선단근입 조건을 고려해야 함을 확인하였다.

검색어 : 수직증축 리모델링, 말뚝지지 전면기초, 군말뚝 기초, 보강말뚝, 선재하 하중, 하중분담률

* 충남대학교 토목공학과 석사과정, 이학사 (Chungnam National University · bisa_09@naver.com)

** 정회원 · 일신지질 서울지사 지사장, 공학박사 (Ilshin Geological Engineering · yunapie@isgeo-seoul.co.kr)

*** 정회원 · GS건설 중부지사 책임(충남대학교 토목공학과 석사과정), 공학사 (GS E&C · ksoh1@gsenc.com)

**** 전남대학교 건축공학과 대학강사, 공학박사 (Chonnam National University · prakash1@naver.com)

***** 정회원 · 교신저자 · 충남대학교 토목공학과 부교수, 공학박사 (Corresponding Author · Chungnam National University · jyko@cnu.ac.kr)

Received November 20, 2023/ revised December 29, 2023/ accepted January 9, 2024

1. 서론

국내 공동주택들은 준공 이후 약 30여년의 시간이 흐름에 따라 노후화가 진행되는 반면에, 국민들의 생활수준 향상 및 시대 변화에 따른 주택 평면에 대한 선호가 변화함에 따라 거주환경 개선 등을 위한 리모델링 수요도 지속적으로 증가하고 있다(Kim et al., 2020). 이에 대응하여 국토교통부에서는 2013년 주택법 개정을 통해 준공 후 15년이 경과된 공동주택을 대상으로, 15층 이상의 공동주택은 최대 3개 층까지, 14층 이하의 공동주택은 최대 2개층까지 수직증축 리모델링을 허용하는 방침을 발표하였다(MOLIT, 2013). Fig. 1은 리모델링의 수직증축 및 수평증축의 개념도를 나타낸다.

리모델링은 구조물을 횡방향으로 확장시키는 수평증축과 종방향으로 확장시키는 수직증축으로 나눌 수 있다. 수평증축의 경우, 기존 골조 인접 공간에 보강말뚝을 시공하고 그 위에 수평 확장을 위한 구조물을 건설하여 기존 구조물을 증축하게 된다. 수직증축의 경우, 기존 구조물에서 골조하중을 제외한 나머지 하중을 제거한 상태에서 토공장비가 들어가 보강말뚝을 시공하게 된다. 이때 기존 구조물의 골조가 남아있는 상태이기 때문에 공간이 협소하므로 말뚝을 시공하는데 제약이 있고, 기존말뚝 사이에 보강말뚝을 설치해야한다는 복잡한 문제가 발생하여(Jeong and Cho, 2019), 수직증축은 수평증축보다 기술적으로 더 어려운 문제이다. 또한 수직증축 리모델링은 앞으로 수요가 급증할 것으로 예상되지만, 수직증축 구조물의 기초보강 공법에 대한 연구는 부족한 실정이다(Wang et al., 2018; Jeong and Cho, 2019; Kim et al., 2020; An et

al., 2022; Ko et al., 2023; Noh et al., 2023). 따라서 본 연구에서는 수직증축 리모델링 시 기초 보강에 따른 말뚝 기초의 거동을 분석하고자 하였다. 말뚝기초 거동에 영향을 주는 인자로는 말뚝강성, 지반조건, 선단지지 조건, 캡지지 조건, 선재하 하중 비율 등이 있다. 본 연구에서는 수직증축 리모델링 시 선재하 공법을 적용할 때 캡지지 조건과 기존말뚝 선단 근입 조건에 따른 말뚝 거동에 대해 3차원 수치해석을 통해 분석하였다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 캡지지 조건과 기존말뚝 선단 근입 조건에 따른 말뚝 기초 거동에 대해 분석하고자 하였다. 대부분의 경우 말뚝은 구조적 하중을 지반에 전달하기 위해 무리(군)의 형태로 시공되는데 이러한 기초 형태를 군말뚝(Group pile)이라 한다. 군말뚝의 경우 말뚝 캡의 지지능력은 고려하지 않고 말뚝의 지지력만 고려하는 반면, 말뚝기초와 전면기초가 결합된 형태의 복합 기초인 말뚝지지 전면기초의 경우 기초판과 지반의 상호작용까지 고려하여 설계가 이루어진다(Kim and Jung, 2012). 대부분의 구조물은 말뚝지지 전면기초로 시공되어 있으나, 설계 과정에서 군말뚝 기초로 가정하여 말뚝만으로 구조물을 지지하는 것으로 계산되며, 기초판의 지지력 분담효과는 고려되지 않고 있다. 이는 설계 시 말뚝기초판-지반 사이의 상호 작용이 복잡하여 고려하기 어렵고, 보수적 설계를 선호하기 때문이다(Lee et al., 2007). 말뚝지지 전면기초를 군말뚝 기초로 보고 보수적 설계를 하게 되면, 과다 설계가 되고, 이는 시공 및 경제적 측면에서 비효율적인 설계로 이어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 실제 기초 형태인 말뚝지지 전면기초와 일반적인 설계 상태인 군말뚝 기초의 거동을 비교해보고자 두 조건에 대해 수치해석을 수행하였다.

선재하 공법은 증축단계에서 증축으로 인한 하중재하 이전에 보강말뚝에 선재하 하중을 가하는 공법이다. 본 공법의 주요 목적은 보강말뚝이 증축하중을 받기 이전에 선재하를 가함으로써 변위를 발생시키고 이로 인하여 증축하중 작용 시 보강말뚝의 하중분담율을 높이기 위함이다(Wang et al., 2018). 선재하 공법을 기초 보강에 활용할 때에는 보강말뚝에 유압잭을 사용하여 하중을 재하하는게 일반적이며(O'Neill and Pierry, 1989; Cole, 1993; Lehtone and Hyypä, 2010), 중국에서 기존 3층 건물을 7층까지 수직증축 시 유압잭을 활용한 선재하공법 적용사례가 보고되었다(Liu et al., 2005). 그 결과, 선재하 공법을 적용한 보강기초에서의 최종침하량이 감소하였으며, 해당 건물의 기초보강 이후 5년이 지나도록 안정성에 문제가 없는 것으로 확인되었다(Wang et al., 2018). 현재 국내에서는 2013년부터 공동주택 리모델링을 위한 기초구조물 하중 선재하 기술 연구가 진행 중이고, 선재하 장치도

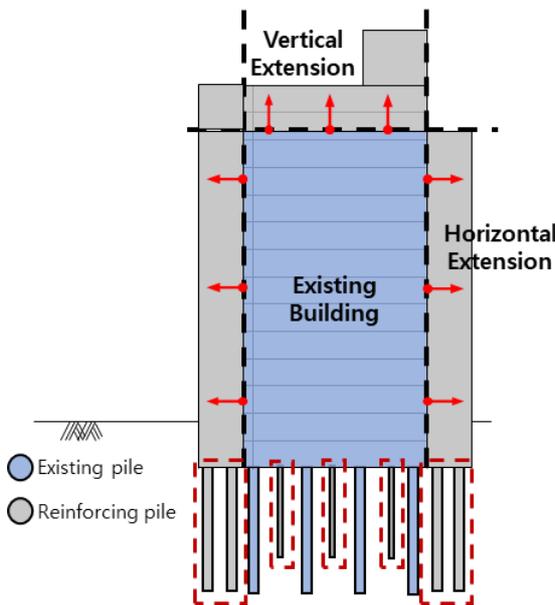


Fig. 1. Concept Diagram of Extension of Remodeling

개발되었으나 아직 실무에 적용은 하지 못한 상태이다. 개발된 선재하 장치는 신설기초 말뚝 두부에 설치되고 콘크리트를 타설하여 기초판과 일체화 된다. 기초판에 일체화된 선재하 장치는 장치 내에 매립된 나사볼트를 조임으로써 신설기초 말뚝 두부에 하중을 도입시킨다. 기존 연구에 따르면 선재하 공법을 적용하였을 때 기존말뚝에 가해지던 하중을 보강말뚝이 더욱 효과적으로 분담하였으며, 보강말뚝의 지지력이 조기에 발현되는데 효과가 있는 것으로 확인되었다(Wang et al., 2018). 따라서 본 연구에서는 증축하중을 재하하기 전 미리 보강말뚝에 침하를 발생시켜 지지력을 조기 발현시키는 것뿐만 아니라, 기존말뚝에 가해지던 하중 중 일부를 새로 시공한 보강말뚝으로 전이시키고자 보강말뚝에 선재하 하중을 가하는 단계를 구현하였다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 케이스 및 물성치

본 연구에서는 수직증축 시 캡지지 조건 및 기존말뚝 선단 근입조건에 따라 말뚝 기초 거동에 대해 분석하고자 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 3차원 유한요소 해석프로그램인 PLAXIS 3D (Bentley, 2023)를 이용하여 수행하였다. Fig. 2는 본 연구에서 적용한 수치해석 모델링을 나타낸다. 좌측 그림은 암반근입조건을, 우측 그림은 토사근입조건을 나타낸다. 말뚝지지 전면기초 거동을 분석할 때 PLAXIS 3D를 적용한 기존 연구 결과(Kim et al., 2019)가 다수 발표되었으며, 본 연구를 위해 본 프로그램을 적용하는 것이 적합한 것으로 판단하였다. 수치해석에 사용된 기초 구조물의 제원과 해석 케이스는 Fig. 3에 나타내었다.

기초 구조물은 기존말뚝 4본에 보강말뚝 1본이 기초판에 연결되어 있는 것으로 가정하고 모델링 하였다. 기존말뚝의 경우 1980~1990년 대에 공동주택의 말뚝기초로 많이 사용되었던 PC

말뚝(Prestressed concrete pile, PC pile)으로 모델링하였다(Choi et al., 2017). 수직증축 리모델링 시, 기존 구조물의 골조가 남아있는 상태이므로, 보강말뚝 시공에 있어 공간상의 제약이 존재하고, 기존말뚝 사이에 보강말뚝을 설치해야 한다는 문제점으로 인해 일반적으로 보강말뚝은 접근성과 시공성이 우수한 마이크로파일을 주로 사용한다(Jang and Han, 2016). 따라서 해석에도 이를 반영하여 보강말뚝은 마이크로파일로 모델링 하였다. 마이크로파일은 지반 천공 후 고강도 보강재(강봉)를 설치하고 공내에 그라우트를 주입하여 시공한다(Jang and Han, 2016). 마이크로파일의 재질은 그라우팅-강봉 복합체이며 탄성계수를 산정할 때에는 강봉과 그라우팅구근의 면적비를 고려한 합성탄성계수를 산정하여 적용한다(Wang et al., 2018). 따라서 본 연구에서의 보강말뚝(마이크로파일) 물성값은 Wang et al.(2018)의 연구 결과를 참고하였다.

기존말뚝의 직경은 0.35 m, 길이는 11 m로 설정하였고, 신설 보강말뚝의 직경은 0.23 m, 길이 7 m인 마찰말뚝으로 모델링하여 수치해석에 적용하였다. 기초판은 정사각형 3.6 m×3.6 m의 크기와 1 m의 두께로 모델링되었다. 균말뚝과 말뚝지지 전면기초 모두 동일한 구조물로 모델링 하였으나, 지반과의 이격 유무를 통해 거동차이를 구현하였다. 균말뚝의 경우 기초판의 하중지지 효과를 배제시키고자 지반과 1 m 이격 거리를 두어 모델링 하였고, 말뚝지지 전면기초의 경우 지반과 기초판을 접촉시킨 상태로 모델링 하였다.

토사근입의 경우 균일한 사질토층에 말뚝이 설치되어 있는 것으로 모델링하였고, 암반근입의 경우 균일한 사질토층 아래에 암반층이 있어 암반층에 말뚝이 1 m 근입되어 있는 것으로 모델링 하였다. 수직증축의 대상이 되는 노후화된 공동주택은 암반근입 말뚝기초로 상부구조물을 지지하고 있는 경우가 일반적이나, 지상에 노출되어 있는 상부 구조물과 달리 지층 하부에 매립되어 있는 기초구조물 특성상 설계 자료에 부합하게 시공되었는지에 대해 정확히 파악하

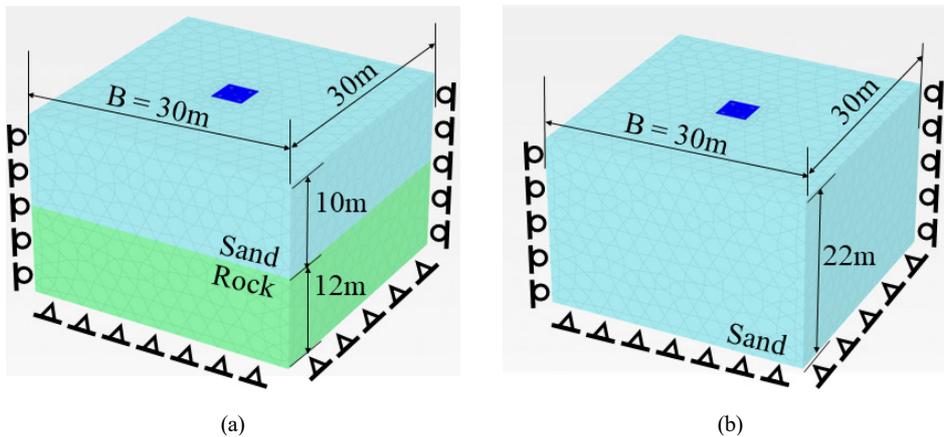


Fig. 2. Typical 3D Numerical Model: (a) Rock Embedment, (b) Sand Embedment

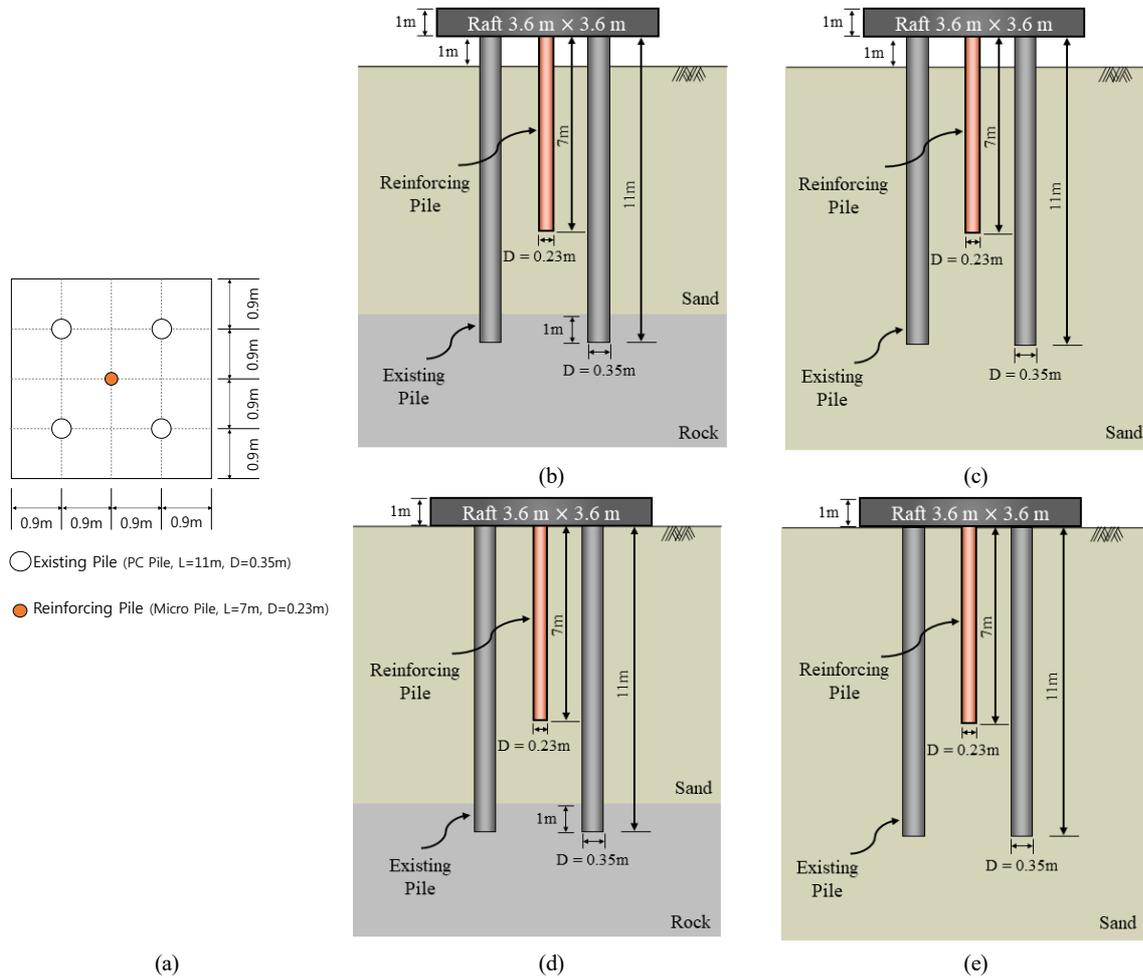


Fig. 3. Geometry of Foundation and Analysis Cases: (a) Plan View, (b) Case 1: Group Pile (Rock Embedment), (c) Case 2: Group Pile (Sand Embedment), (d) Case 3: Piled Raft Foundation (Rock Embedment), (e) Case 4: Piled Raft Foundation (Sand Embedment)

기가 어렵다(Kim et al., 2020). 따라서 기존말뚝의 불확실성을 고려하여 암반근입과 토사근입 조건으로 구분하여 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 지반과 말뚝기초는 체적(Volume) 요소로, 기초 판은 플레이트(Plate) 요소로 모델링 하였다. 기초구조물은

Linear-Elastic 모델로 모델링 하였으며, 지반은 사질토층과 암반층 2개의 층으로 구성하고, Mohr-Coulomb 모델로 모델링 하였다. 기초 구조물 및 지반 물성치는 Table 1에 정리하였다. 본 연구에서 사용한 물성치는 기존 문헌자료(Wang et al., 2018)를 참고하여 결정하였다. 수치해석 영향인자로 캡 지지 조건과 말뚝 선단 근입조

Table 1. Properties of Foundation Structures and Soil

Type	Model	Unit weight (kN/m^3)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Friction angle ($^\circ$)	Cohesion (kPa)	R_{inter}
Existing Pile	L.E.*	23.5	24,000	0.167	-	-	-
Reinforcing Pile	L.E.*	23.5	43,000	0.167	-	-	-
Raft	L.E.*	23.5	24,000	0.167	-	-	-
Sand	M.C.*	17.0	30	0.3	35	0	0.67
Rock	M.C.*	24.5	500	0.25	40	150	1.0

* L.E. : Linear-Elastic model, M.C. : Mohr-Coulomb model.

건 2가지를 고려하였다. 따라서 수치해석 케이스는 캡지지 조건 2가지(균말뚝, 말뚝지지 전면기초)와 기존 말뚝 선단 근입 조건 2가지(압반근입, 토사근입)를 조합하여 총 4개의 케이스로 선정하였다. 보강말뚝은 마이크로파일로 시공되므로 모든 케이스에서 토사근입말뚝으로 모델링하였다(Fig. 3 참조).

3.2 시공단계를 고려한 수치해석 단계

수직증축 리모델링 시공 현장을 최대한 묘사하고자 기존 문헌자료를 참고하여(MOLIT, 2014) 시공단계에 따른 해석을 구현하였다. 선재하 공법을 적용한 수직증축 리모델링 시공단계는 Fig. 4와 같다.

수직증축 리모델링 시 기존 구조물의 하중(골조하중+마감하중+활하중)을 3000 kN으로 설정하고, 기초판에 등분포 하중으로 작용하도록 모델링하였다. 그리고 기존구조물에서 골조하중을 제외한 마감하중과 활하중을 제거하는 철거 단계를 구현하였고, 이때의 하중은 기존 구조물 하중의 25%까지 제한하여 750 kN이 기초판에 등분포 하중으로 작용하도록 모델링 하였다. 다음으로 보강말뚝을 설치하고 보강말뚝 두부에 30 kN의 등분포 하중을 선재하 하중으로 가하였다. 마지막으로 선재하 하중 재하 후 제거되었던 기존 구조물의 하중(3000 kN)과 증축하중(300 kN)을 모두 재하하여 총 3300 kN의 하중을 기초판에 등분포 하중으로 모델링 하였다.

본 연구에서는 수직증축 리모델링의 시공단계를 고려하여 단계

Table 2. Numerical Analysis Steps

Step	Details
1	Initial condition
2	Existing pile installation
3	Raft installation
4	Existing building construction
5	Removal load
6	Reinforcing pile installation
7	Pre-loading to reinforcing piles
8	Extension loading

적인 수치 해석을 진행하고자 하였다. 따라서 수치해석은 위에서 언급한 시공단계에 맞춰 총 8단계로 진행하였다. Table 2는 수치해석 단계를 정리하여 나타낸 것이다. 초기 지반 상태를 제외하고, 기존 구조물은 step 2~4, 총 3단계에 걸쳐서 구현되었고, 수직증축 리모델링 과정은 step 5~8에 걸쳐 구현되었다.

4. 수치해석 결과

본 연구에서는 수직증축 리모델링 시 기존말뚝 선단 근입 조건 및 캡지지 조건에 따른 말뚝기초 거동 분석에 대한 모델링을 진행하였다. 해석 결과로는 각 말뚝의 침하량, 하중분담률, 해석 단계에 따른 심도별 말뚝 축력을 도출하였다.

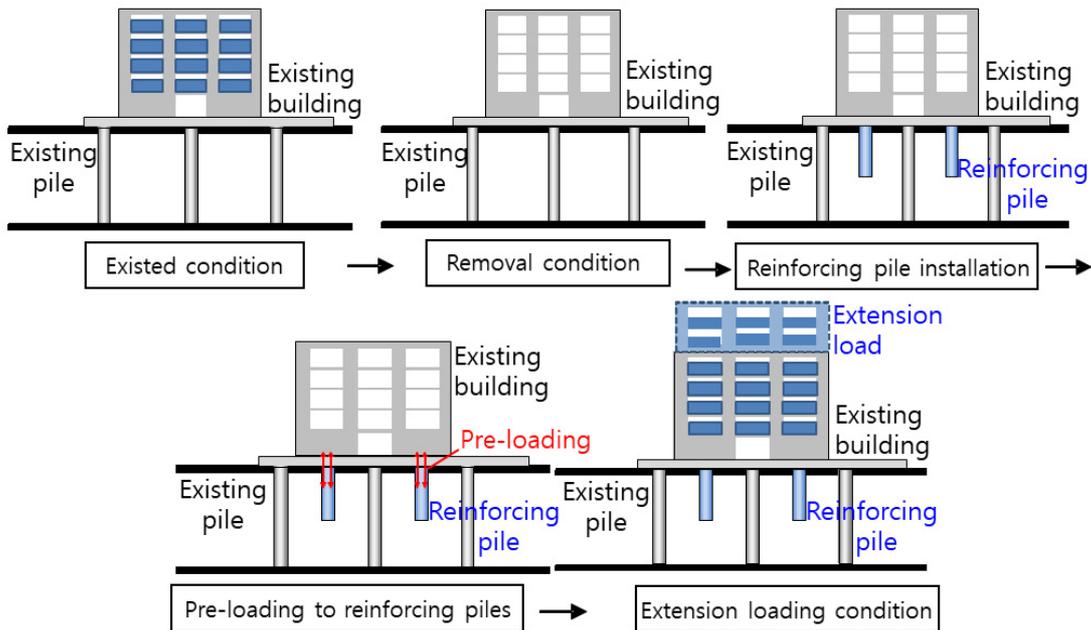


Fig. 4. Schematic of Vertical Extension Remodeling Process Using Pre-loading Method

Table 3. Settlement according to Cap Support Conditions and Embedment Conditions

Case	Cap support condition	Embedment condition	Settlement (mm)		Settlement standards	Note
			Existing pile	Reinforcing pile		
1	Group pile	Rock embedment	Existing pile	6.16	O.K.	Criteria for settlement of structures: 25 mm
			Reinforcing pile	48.16	N.G.	
Sand embedment		Existing pile	126.03	N.G.		
		Reinforcing pile	166.2	N.G.		
3	Piled raft foundation	Rock embedment	Existing pile	4.11	O.K.	
			Reinforcing pile	17.99	O.K.	
Sand embedment		Existing pile	15.44	O.K.		
		Reinforcing pile	23.79	O.K.		

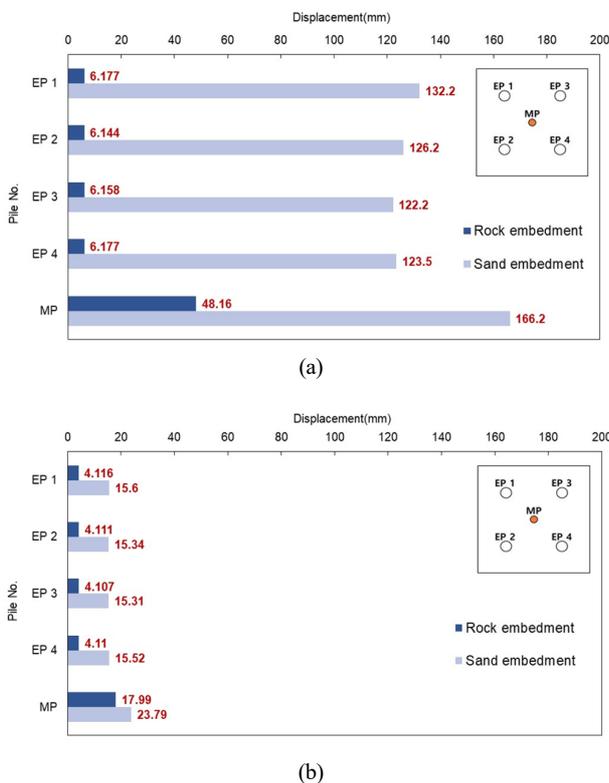


Fig. 5. Result of Displacement: (a) Group Pile, (b) Piled Raft Foundation

4.1 침하량

Fig. 5는 캡지지 조건(말뚝지지 전면기초, 군말뚝)과 기존말뚝 선단근입조건(압반근입, 토사근입)에 따른 말뚝들의 침하량을 분석한 결과이다. 캡지지 조건과 무관하게 보강말뚝에서 가장 큰 침하량이 발생하였으며, 이는 선재하공법 적용의 결과로 판단된다. 또한, Fig. 6(b)에서 나타나듯 말뚝지지 전면기초에서 압반근입시 기존말뚝의 침하량은 보강말뚝보다 작게 나타났다. 이는 보강말뚝의 선단지지 조건이 압반근입이 아닌 영향으로 판단된다.

군말뚝 기초에서는 선단근입조건과 무관하게 말뚝지지 전면기초보다 침하량이 크게 나타났다. 이는 말뚝지지 전면기초의 경우 기초 형식의 특성상 구조물의 침하를 기초관과 말뚝이 함께 분담하고, 침하를 억제하기 때문이다. 말뚝지지 전면기초는 모든 선단근입 조건에서 구조물 침하량 기준인 25 mm를 만족하는 것으로 나타났으나, 군말뚝의 경우 압반근입시 보강말뚝에서 48.16 mm가 발생하여 기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 토사 근입시 기존말뚝(평균 값)과 보강말뚝 모두 25 mm 기준을 초과하는 것으로 확인되었다.

일반적으로 구조물 기초의 경우 말뚝지지 전면기초로 시공되지 만 안전측 설계를 위하여 대체로 군말뚝 설계가 이루어지고 있다. 하지만 수직중축 구조물의 기초 보강을 위한 설계 시 군말뚝의 경우 과도하게 침하량이 발생하는 것으로 나타나므로 구조물 안정성에 문제가 발생하거나 과다설계가 될 수 있다. 따라서 향후 수직중축

Table 4. Load Distribution Ratio according to Cap Support Conditions and Pile Tip Conditions

Case	Cap support condition	Embedment condition	Load distribution ratio (%)	
			Existing pile	Reinforcing pile
1	Group pile	Rock embedment	Existing pile	24.2
			Reinforcing pile	5.0
Sand embedment		Existing pile	24.0	
		Reinforcing pile	5.8	
3	Piled raft foundation	Rock embedment	Existing pile	14.6
			Reinforcing pile	3.7
Sand embedment		Existing pile	10.5	
		Reinforcing pile	4.0	

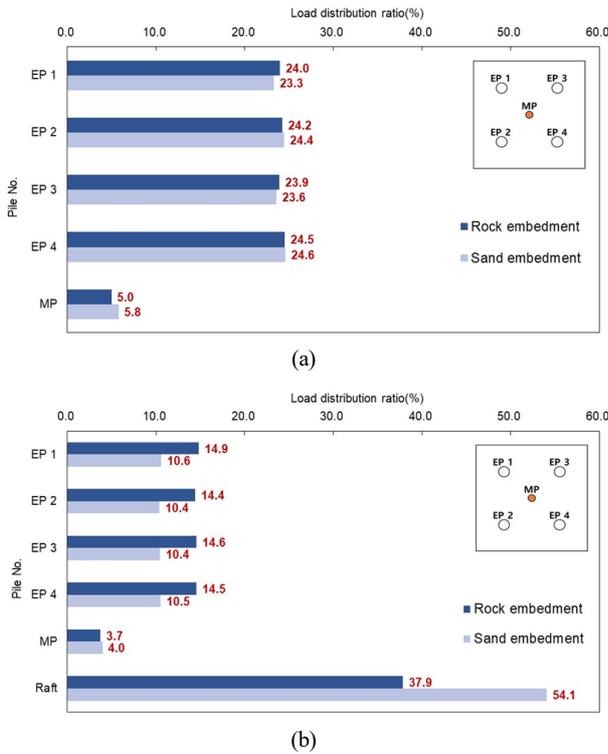


Fig. 6. Result of Load Distribution Ratio: (a) Group Pile, (b) Piled Raft Foundation

리모델링 시 캡지지 조건별 침하량 검토가 반드시 수행되어야 한다. 또한 합리적이고 경제적인 설계를 위해서는 말뚝지지 전면기초를 고려한 설계검토가 필요할 것으로 판단된다. Table 3는 군말뚝과 말뚝지지 전면기초의 근입조건에 따른 침하량을 정리한 결과이다. 여기서 기존말뚝 침하량은 기존말뚝 4본의 산술평균값으로 나타내었다.

4.2 하중분담률

수직증축 리모델링을 필요로 하는 구조물은 대체로 준공연수가 오래되었고, 기초의 말뚝은 사용연한이 경과됨에 따라 노후화와 열화가 발생하여 보강이 시급한 경우가 많다(Jeong et al., 2019). 더욱이 지반에 매입되어 있는 말뚝의 경우 새로운 시험을 통하여 현재 품질과 지지력을 파악하기 힘들 뿐 만 아니라, 시공 시의 구조적인 정보와 성능 정보 또한 조사 자료의 손망실로 인하여 수직증축 리모델링 과정에서 활용이 어려운 현상이 대부분이다(Jeong et al., 2019). 수직증축 후 기존 구조물의 하중은 기존말뚝이 대부분 분담하게 되고, 증축 하중은 말뚝의 강성에 비례하여 기존말뚝과 보강말뚝이 분담하여 지지하게 되는데(Choi et al., 2017), 성능 및 제원 정보에서 불확실성이 큰 기존말뚝에 하중이 많이 분담되므로 수직증축 리모델링 후 구조물 안정성에 문제가 발생할

가능성이 높아진다. 기존말뚝의 하중분담률은 줄이고 보강말뚝의 하중분담률은 높여주는 것은 구조물의 안정성에 있어서 중요한 문제이므로 수직증축 리모델링에서 하중분담률은 매우 중요하고 고려 인자이다. 수직증축시 보강말뚝으로 하중을 전이시키고, 하중분담률을 높이기 위해 선재하공법이 시도되고 있다.

하중분담률은 재하된 하중에 대해 각 말뚝이 분담하는 하중의 비율을 나타내는 값으로 말뚝이 받고 있는 최대 축력을 재하된 하중으로 나눈 후 백분율로 환산하여 나타내었다. 이를 식으로 나타내면 Eq. (1)과 같다.

$$Load\ Distribution\ Ratio = \frac{F_{max}}{P} \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서, F_{max} : 말뚝의 최대 축력, P : 총 재하 하중

Table 4와 Fig. 6는 수직증축시 군말뚝과 말뚝지지 전면기초의 기존말뚝 선단근입조건에 따른 말뚝 분담 하중분담률 결과를 나타낸다. 해석결과 군말뚝에서 선단근입조건과 상관없이 기존말뚝과 보강말뚝에 작용하는 하중분담률은 유사하게 나타났다. 그러나 말뚝지지 전면기초의 경우, 암반근입일 때 기존말뚝은 하중분담률이 평균 14.6%, 보강말뚝은 3.7%이며, 토사근입일 때 기존말뚝은 평균 10.5%, 보강말뚝은 4.0%으로 나타나 토사근입보다 암반근입 조건에서 기존말뚝의 하중분담률이 크게 나타났다. 이는 기존말뚝이 암반근입에서 하중전이가 크게 된 것으로 판단된다. 또한 말뚝지지 전면기초는 기초판의 영향으로 인해 말뚝 선단 근입 조건에 관계없이 기존말뚝과 보강말뚝에서 하중분담률이 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다. 말뚝지지 전면기초일 때, 기초판은 암반근입의 경우 37.9%, 토사근입의 경우 54.1%의 하중분담률을 가지는 것으로 확인되었다. 이는 말뚝지지 전면기초의 특성상 하중재하 시 말뚝뿐만 아니라 전면기초에서 하중을 분담하기 때문이다.

4.3 심도별 축력 분포도

Table 2에서 총 8단계의 해석을 수행하였으나, 심도별 축력은 원지반 상태를 제외한 나머지 7단계에 해당하는 결과값을 도출하였다. Table 5는 심도별 축력을 도출한 단계를 나타낸 것으로 보강말

Table 5. Extraction Steps of Result for Axial Force

Step	Details	Note
1	Existing pile installation	-
2	Raft installation	-
3	Existing building construction	-
4	Removal load	Graphs of 4, 5, 6 Steps existing pile appears same.
5	Reinforcing pile installation	
6	Pre-loading to reinforcing piles	
7	Extension loading	-

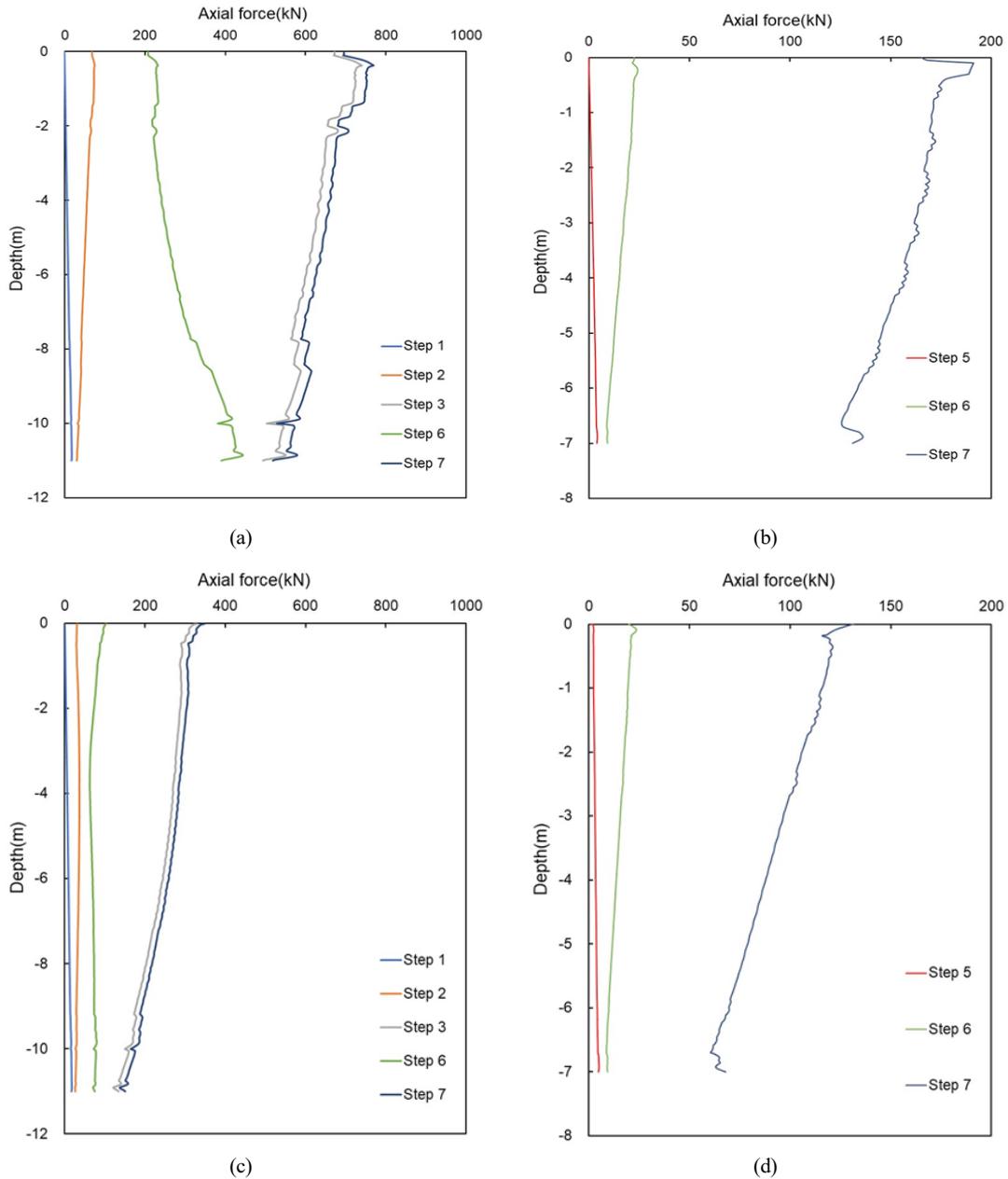


Fig. 7. Axial Force of Piles (Sand Embedment): (a) Existing Pile (Group Pile), (b) Reinforcing Pile (Group Pile), (c) Existing Pile (Piled Raft Foundation), (d) Reinforcing Pile (Piled Raft Foundation)

뚝은 5단계 이후로 시공되어 축력을 도출할 수 있다. 해석단계 중 4~6단계는 기존말뚝 거동에는 영향을 미치지 않는 단계로, 오직 보강말뚝을 설치하고 선재하하중을 재하하였으며 7단계에서는 기존 및 증축하중을 적용하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 토사근입 및 암반근입인 경우의 군말뚝, 말뚝지지 전면기초에서 기존말뚝과 보강말뚝의 심도별 축력 분포도를 나타낸다. 1~7단계에 해당하는 기존말뚝의 심도별 축력 그래

프를 나타냈는데, 4~6단계는 동일한 결과가 도출되어 중첩되므로 4, 5단계 그래프는 생략하고 6단계 결과만 나타내었다.

Fig. 7은 토사근입 조건의 결과로 최종단계(7단계)에서 축력은 캡지지 조건과 관계없이 두부에서 가장 크게 나타나고 선단에서 가장 작게 나타났다. 이때 기존말뚝 및 보강말뚝은 말뚝지지 전면기초 조건보다 군말뚝 조건에서 선단지지력이 크게 나타났으며, 이는 말뚝지지 전면기초 조건에서 전면기초의 하중분담 효과로 군말뚝

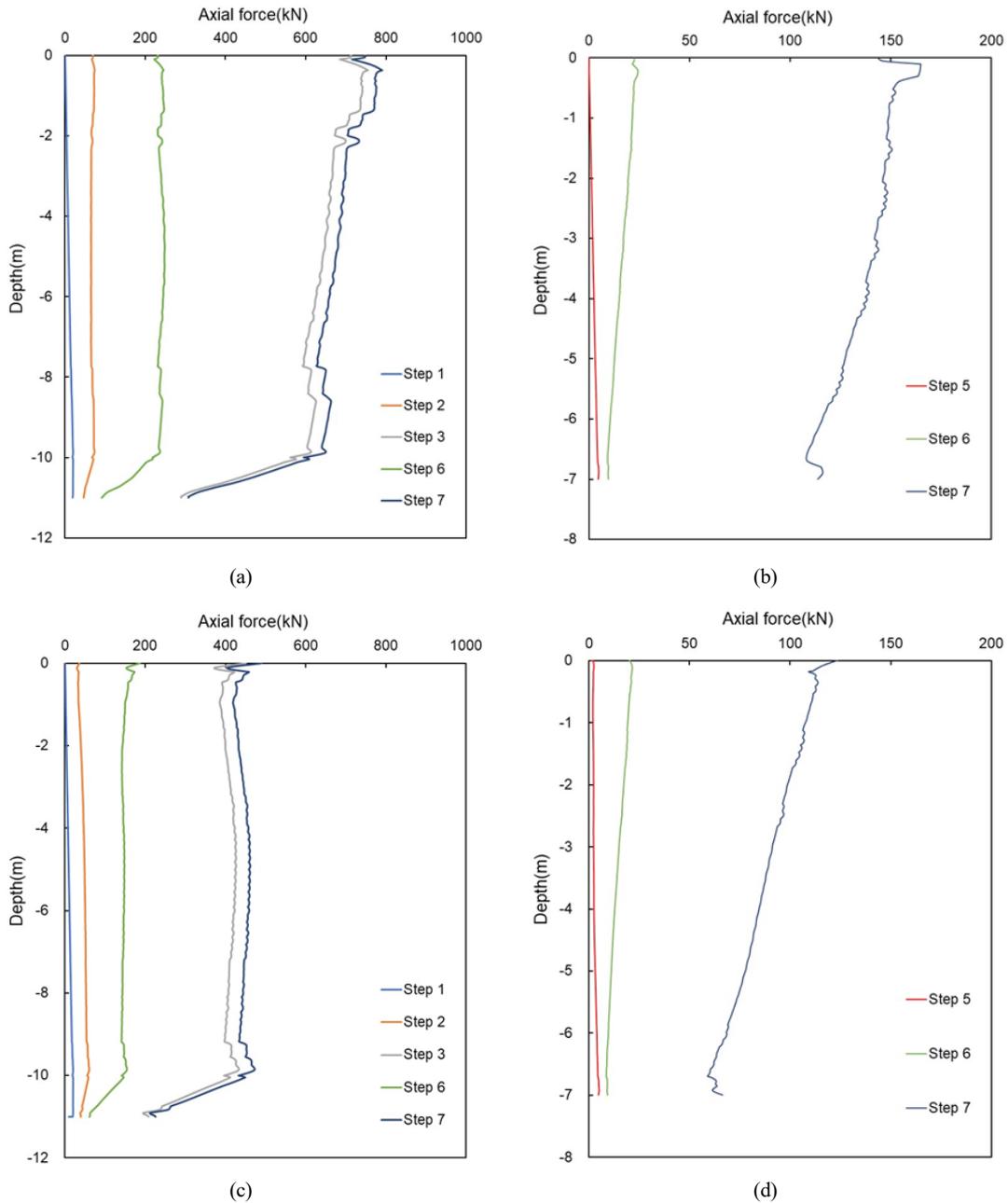


Fig. 8. Axial Force of Piles (Rock Embedment): (a) Existing Pile (Group Pile), (b) Reinforcing Pile (Group Pile), (c) Existing Pile (Piled Raft Foundation), (d) Reinforcing Pile (Piled Raft Foundation)

보다 상대적으로 작은 축력이 발생한 결과로 판단된다. Fig. 8은 암반근입 조건의 결과로 최종단계(7단계)에서 선단지지력 및 주변 마찰력 모두 군말뚝에서 더 크게 나타났다. 두부에서 발생하는 축력은 토사근입조건 보다 크게 나타났지만, 선단에서는 군말뚝인 경우 암반근입보다 토사근입에서 더 큰 선단지지력이 발생하였다. 이러한 결과는 과도한 침하량 발생으로 주변마찰력이 크게 발현되

지 않고 선단으로 전이된 결과로 판단된다. 전체적으로 말뚝지지 전면기초 결과가 군말뚝 보다 축력이 작게 나타났으며, 이는 말뚝 기초뿐만 아니라 전면기초가 하중을 함께 분담하기 때문으로 분석된다.

각 단계별 축력변화는 기존건물 시공단계인 3단계에서 하중을 제한한 6단계로 가면서 축력이 감소하였으며, 보강말뚝 설치 이후

추가하중을 재하하면서 7단계에서 축력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 균말뚝의 경우 추가하중 단계(6단계→7단계)에서 기존 말뚝은 토사근입보다 암반근입일 때 하중 증가량이 더 크게 나타났으며 반대로 보강말뚝은 토사근입일 때 하중 증가량이 더 크게 나타났다(Fig. 7, 8 참조). 이는 암반근입의 영향으로 기존말뚝으로 전달되는 축력이 크고, 나머지 하중이 보강말뚝으로 전달된 결과로 판단된다.

말뚝지지 전면기초의 경우 추가하중 단계(6단계→7단계)에서 기존말뚝은 토사근입보다 암반근입일 때 하중 증가량이 더 크게 나타났으나 보강말뚝은 하중 증가량이 유사하게 나타났다(Fig. 8 참조). 즉 균말뚝에서의 기존말뚝과 보강말뚝에 전달되는 축력 증가율은 토사근입과 암반근입 모두에서 차이가 나타나고, 말뚝지지 전면기초에서는 기존말뚝은 차이가 발생하지만 보강말뚝은 하중 증가량이 근입조건에 상관없이 유사하게 나타났다. 이는 수직증축 리모델링시 문제가 되고 있는 기존말뚝으로의 하중전이에 있어 균말뚝 기초보다 말뚝지지 전면기초가 기존말뚝에 작게 전이되는 것을 확인하였다. 따라서, 향후 선재하공법을 고려한 수직증축 리모델링 설계 시 기존말뚝 및 보강말뚝으로 전이되는 축력 검토가 필요하며 이때 캡지지 조건을 고려한 설계가 중요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석으로 캡지지 조건 및 말뚝 선단 근입 조건을 변화시켜 수직증축 리모델링 시 말뚝기초 거동을 분석하여 보았다.

수직증축 리모델링 시공과정을 모사하고자 8단계에 걸쳐 해석을 수행하였고, 선재하 하중 공법을 적용하여 기존말뚝의 하중분담율을 감소시켜 증축 후 구조물의 안정성 확보 가능성을 확인하고자 수치해석을 수행하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 보강말뚝에서 가장 큰 침하량이 확인되었으며, 이는 선재하 공법의 적용한 결과로 판단된다. 특히, 캡지지 조건이나 선단 근입 조건에 상관없이 균말뚝 기초에서는 침하량이 더 크게 나타났다. 이때, 말뚝지지 전면기초는 말뚝의 침하를 억제하는 특성을 보였으며, 이는 구조물의 전체 안정성에 중요한 역할을 하는 것으로 확인하였다.
- (2) 균말뚝의 경우 암반근입과 토사근입에서 하중분담율의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 말뚝지지 전면기초의 경우 기존말뚝은 토사근입보다 암반근입일 때 하중분담율이 높았고, 보강말뚝은 암반근입일 때 보다 토사근입일 때 하중분담율이 더 높게 나타났다. 말뚝지지 전면기초에서는 균말뚝

과 비교하였을 때, 기존말뚝 및 보강말뚝의 하중분담율이 작게 나타났는데 이는 기초판(래프트)이 하중 일부분을 분담하기 때문인 것으로 판단된다. 기초판의 경우 암반근입 시 37.9%, 토사근입 시 54.1%의 하중분담율을 가지는 것으로 확인되었다.

- (3) 심도별 축력 분포도는 해석단계에서 첫번째 단계인 원지반 상태를 제외한 나머지 7단계에 걸쳐 결과값을 출력하였다. 균말뚝에서의 기존말뚝과 보강말뚝에 전달되는 축력 증가율은 토사근입과 암반근입 모두에서 차이가 났지만, 말뚝지지 전면기초에서는 기존말뚝은 차이가 있었지만 보강말뚝에 전달되는 축력 증가율 차이는 거의 없었다.
- (4) 본 연구 결과 수직증축 리모델링을 위한 말뚝기초 설계에 있어서 캡지지 조건과 선단 근입 조건을 고려해야 함을 확인하였다. 특히, 보강말뚝과 기존말뚝 간의 적절한 하중 분배와 침하량 관리가 구조물의 전체적인 안정성과 수명 연장에 결정적인 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2022R1C1C1011477).

This paper has been written by modifying and supplementing the KSCE 2023 CONVENTION paper.

ORCID

Yujin Noh  <https://orcid.org/0009-0001-7374-4436>

Junyoung Ko  <https://orcid.org/0000-0003-3757-9813>

References

- An, T. C., Ryu, J. Y., Kim, Y. S., Park, J. J., Kim, J. H. and Ko, J. Y. (2022). "Analysis of the pre-loading effect for extension remodeling of existing building structures." *Proceedings of 2022 KGS Fall National Conference*, Korean Geotechnical Society, Daejeon, Korea (in Korean).
- Bentley (2023). *PLAXIS 3D User's Manual*.
- Choi, C. H., Lee, H. J., Choi, K. S., You, Y. C. and Kim, J. Y. (2017). "A study of prestressed concrete pile stiffness for structural analysis of condominium remodeling with vertical story extension" *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 33, No. 12, pp. 81-92, <https://doi.org/10.7843/kgs.2017.33.12.81> (in Korean).
- Cole, K. W. (1993). "Conventional piles in underpinning." *In*

- Underpinning and Retention*, Springer US, pp. 63-83.
- Jang, Y. E. and Han, J. T. (2016). "A field study on the constructability and performance evaluation of waveform micropile." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 32, No. 10, pp. 67-79, <https://doi.org/10.7843/kgs.2016.32.10.67> (in Korean).
- Jeong, S. S. and Cho, H. C. (2019). "A study on the load distribution ratio and axial stiffness on existing and reinforcing-pile in vertical extension remodeling." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 35, No. 1, pp. 17-30, <https://doi.org/10.7843/kgs.2019.35.1.17> (in Korean).
- Jeong, S. S., Kim, D. H. and Cho, H. C. (2019). "Proposed deterioratopm-induced axial stiffness of existing piles in vertical extension structures." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 35, No. 12, pp. 25-33, <https://doi.org/10.7843/kgs.2019.35.12.25> (in Korean).
- Kim, B. S. and Jung, D. H. (2012). "Finite element analysis on the behavior of piled raft and group pile depending on ground conditions." *Proceedings of KSCE 2012 Convention*, KSCE, Gwangju, Korea, pp. 1086-1089 (in Korean).
- Kim, D. H., Jeong, S. S. and Cho, H. C. (2019). "Estimation of the axial stiffness of reinforcing piles in vertical extension structures." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 35, No. 12, pp. 35-44, <https://doi.org/10.7843/kgs.2019.35.12.35> (in Korean).
- Kim, S. J., Wang, C. C. and Han, J. T. (2020). "Analysis of load distribution behavior in vertical extension remodeling from stiffness of existing and reinforcing pile by load test." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 36, No. 8, pp. 61-72, <https://doi.org/10.7843/kgs.2020.36.8.61> (in Korean).
- Ko, J. Y., Noh, Y. J., Oh, K. S. and Park, J. J. (2023). "A study on pile behavior according to pile stiffness in vertical extension remodeling." *2023 KGS Fall National Conference*, Korean Geotechnical Society, Daegu, Korea.
- Lee, S. H., Park, Y. H. and Song, M. J. (2007). "A practical analysis method for the design of piled raft foundations." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 23, No. 12, pp. 83-94, <https://doi.org/10.7843/kgs.2007.23.12.83> (in Korean).
- Lehtone, J. and Hyypää, V. V. (2010). "Classification of micropile underpinning methods exemplified by projects in Turku." *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 15, pp. 295-310.
- Liu, L. P., Li, X. Y., Wang, D. W. and Yan, F. (2005). "Foundation reinforcement and building rectification of deviation by jack-up and preloading underpinning pile" *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol. 24, No. 15, pp. 2795-2801 (in Chinese).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2013). *Housing Act*, Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, p. 2 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2014). *Structural Standards for Condominium Remodeling with Vertical Extension*, Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- Noh, Y. J., Park, J. J., Oh, K. S. and Ko, J. Y. (2023). "Analysis of pile behavior according to bearing conditions for vertical extension remodeling." *Proceedings of KSCE 2023 Convention*, KSCE, Yeosu, Korea, pp. 253-254 (in Korean).
- O'Neill, M. W. and Pierry, R. F. (1989). "Behavior of mini-piles used in foundation underpinning in beaumont clay, Houston, Texas, USA." *Proceedings of the International Conference on Piling and Deep Foundations*, Deep Foundations Institute, London, UK, pp. 101-109.
- Wang, C. C., Han, J. T., Jang, Y. E., Ha, I. S. and Kim, S. J. (2018). "Study on the effectiveness of preloading method on reinforcement of the pile foundation by 3D FEM analysis." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 34, No. 1, pp. 47-57, <https://doi.org/10.7843/kgs.2018.34.1.47> (in Korean).