

수직증축 공동주택 하부 신설 보강말뚝의 축강성 산정

Estimation of the Axial Stiffness of Reinforcing Piles in Vertical Extension Structures

김 도 현¹ Kim, Do-Hyun
정 상 섬² Jeong, Sang-Seom
조 현 철³ Cho, Hyun-Chul

Abstract

In this study, the axial stiffness of reinforcing piles (K_{vr}) for the vertical extension remodeling structures was estimated through 3D finite element analysis. In the computation of the minimum required axial stiffness of reinforcing piles, proposed maximum axial stiffness of old and deteriorated existing piles (K_{ve}) based on theoretical and experimental approaches will be applied. Through this, the required increase rate of axial stiffness of reinforcing piles in order to support the increased structural loading was proposed for end-bearing and friction piles by different slenderness ratio (L/D). The numerical model was validated by comparing the computed results with actual field measurements. Based on the computed results, it was concluded that the end-bearing reinforcing pile needs 44% - 67% increase in axial stiffness to deal with the deterioration of existing piles and support the additional structural load due to vertical extension remodeling.

요 지

본 연구에서는 수직증축 공동주택 하부 신설 보강말뚝의 축강성(K_{vr})을 기존말뚝의 열화를 고려한 이론적인 접근과 수치해석을 통하여 산정하였다. 3차원 유한요소 수치해석을 수행하는 과정에서, 이론적인 접근과 38본의 시험 말뚝 계측 결과를 통하여 제안된 열화를 고려한 기존말뚝 축강성(K_{ve})의 상한 값을 적용하였다. 이를 통해, 수직증축 리모델링으로 인하여 증가된 하중을 안정적으로 지지하기 위한 신설 보강말뚝의 최소 축강성을 산정하였다. 신설 보강말뚝의 축강성 제안은 선단지지 말뚝과 마찰말뚝에 대해 수행하였고, 다양한 세장비(L/D)에 따라 제안하였다. 해석기법은 기존말뚝의 설계 당시의 양호한 상태를 고려한 말뚝지지 전면기초 거동 해석과 열화가 고려된 기존말뚝의 축강성을 적용한 말뚝지지 전면기초 거동 해석을 수행하였다. 두 해석기법에 대한 검증을 수행한 결과 말뚝지지 전면기초 거동 해석이 가능한 것으로 확인되었고, 이를 통하여 기존말뚝의 열화가 발생하였을 때 선단지지 신설 보강말뚝 축강성이 44 - 67% 증가되어야 수직증축 구조물의 안정성이 확보됨을 알 수 있었다.

Keywords : Axial stiffness, Numerical analysis, Reinforcing pile, Piled-raft foundation, Pile deterioration, Vertical extension remodeling

1 정회원, 매사추세츠 공과대학 토목환경공학과 박사 후 연구원 (Member, Post-doctoral Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Massachusetts Institute of Technology)

2 정회원, 연세대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-7489, Fax: +82-2-2123-8378, soj9081@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 현대엔지니어링 사원 (Member, Hyundai Engineering and Construction)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

‘수직증축 공동주택 하부 기존말뚝의 열화를 고려한 축강성 제안(이하 ‘논문 1’)’에서 언급한 바와 같이 국토교통부에서는 2013년 공동주택에 대한 수직증축 리모델링을 기존 전체 구조물 면적의 10%에서 최대 15%까지 허용하는 방침을 발표하였다(MOLIT, 2013). 구조물의 전체 용적이 증가함에 따라, 증가한 구조물의 하중을 안정적으로 지지하기 위한 신설 보강말뚝 시공의 중요성은 더 높아졌다. 일반적으로 국내에서 수직증축 리모델링 대상 구조물은 PC말뚝이나 PHC말뚝을 사용한 기존말뚝과 주로 강재로 제작된 소구경 말뚝으로 설치되는 보강말뚝으로 구성된다. 이와 같이 다른 재질의 말뚝은 일반적으로 물성치와 설치시기, 말뚝의 품질 상태에 따라 하중-침하 거동이 상이하게 나타난다. 또한 지지력 측면에서의 말뚝 기초 보강은 장기간 사용된 말뚝의 품질을 제대로 확인을 할 수 없고, 다양한 지반의 불확실성을 고려하지 못할 수도 있다. 그러한 이유로 기존의 허용지지력 설계(capacity-based design)를 적용할 수 없는 경우가 많다(Cho, 2019; Jeong and Cho, 2019; Kim et al., 2019a; Kim et al., 2019b).

본 연구에서는, 이러한 상황에 대응하기 위하여 말뚝의 초기 침하량을 고려하여 말뚝기초의 축강성을 이용한 설계(stiffness-based design)를 제안하였다. 신설 보강말뚝의 최소 설계 축강성을 제안하기 위하여, 축강성

산정 공식을 통한 실제 말뚝의 이론적인 상·하한 범위와 38본의 실제 말뚝의 축강성 계측 결과를 고려한 기존 말뚝의 축강성 상한 값을 두 가지 해석기법에 적용하여 신설 보강말뚝의 최소 설계 축강성을 산정하고자 한다. 두 가지 해석기법을 적용하기 위하여 1) 말뚝지지 전면 기초 거동을 해석할 수 있도록 검증을 수행하고, 2) 열화가 고려된 기존 말뚝의 축강성 상한 값을 적용한 수치 해석을 통하여 보강말뚝의 최소 설계 축강성을 제안하였다.

2. 구조물의 수직증축 리모델링 연구

일반적인 수직증축 리모델링 과정은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 기존 구조물의 하중(사하중 + 활하중 + 마감하중)을 기존말뚝만으로 지지하는 상태에서 시작한다. 수직증축 리모델링 과정의 초기에는 마감하중(벽과 바닥재)과 활하중이 제거되고, 구조물의 뼈대만 기존 말뚝 기초에 의해 지지된다(KICT, 2013). 말뚝과 함께 기존 구조물을 지지하던 전면기초에 천공을 하여 신설 보강말뚝을 설치하는 경우가 일반적인데, 이때 주로 소구경 말뚝을 설치한 후 말뚝 두부를 전면기초에 결합하여 하중이 전이될 수 있도록 한다. 기초에 신설 보강말뚝이 설치된 후, 기존말뚝과 보강말뚝은 기존 구조물의 하중과 함께 증축된 부분의 하중까지 지지하게 된다(Jang et al., 2016; Artes et al., 2017). 말뚝기초의 각 말뚝은 구

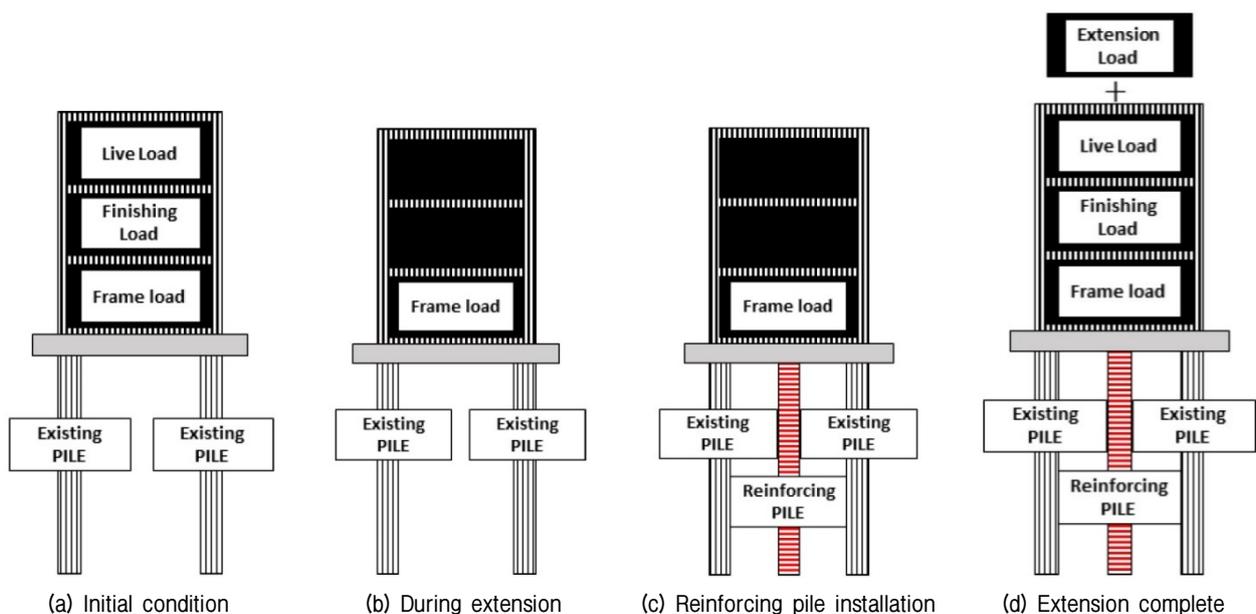


Fig. 1. Schematic of structural load during vertical extension remodeling process

조물의 하중을 최대한 균등하게 지지하도록 설계되지만, 기존말뚝의 품질과 지지력은 불확실한 경우가 대부분이다. 그러므로 기존말뚝의 불확실성을 극복하기 위해서 열화된 기존말뚝의 축강성을 현실적으로 산정하고, 이를 고려하여 신설 보강말뚝의 축강성을 산정하여 설계에 적용하는 것이 중요하다.

3. 수직증축 리모델링 구조물 기존말뚝의 축강성 산정

논문 1에서 기술한 바와 같이, Randolph and Wroth (1978)가 제안한 공식을 통해 산정된 이론적인 축강성과 38개의 시험말뚝 재하시험으로부터 도출된 하중-침하곡선을 통해 산정된 축강성 결과를 바탕으로 기존말뚝의 축강성을 말뚝 세장비에 따라 제안하였다(Choi et al., 2017, Jeong et al., 2019). Fig. 2는 이론적인 공식에 따른 말뚝 축강성의 세장비에 따른 추세선과 38개의 시험말뚝의 축강성 계측 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 나타난 하한선을 기준으로 노후화와 열화에 의하여

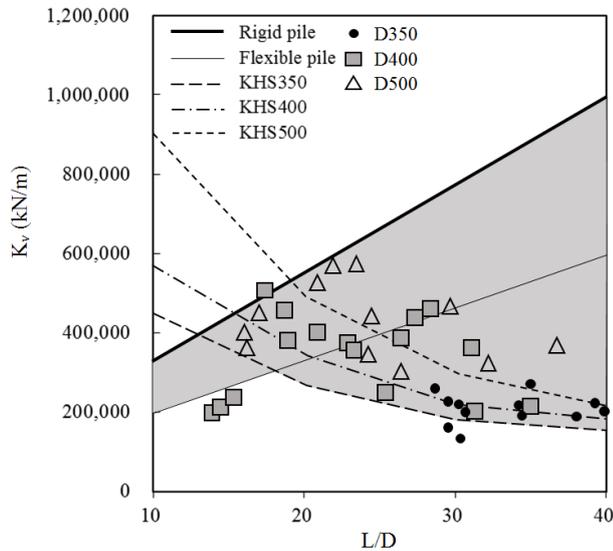


Fig. 2. Axial stiffness of field test piles (theoretical and 38 field cases)

Table 1. Proposed axial stiffness of existing piles considering deterioration

Length-diameter ratio (L/D)	Axial stiffness (K_v) (kN/m)
10	200,000
20	200,000
30	200,000
40	160,000

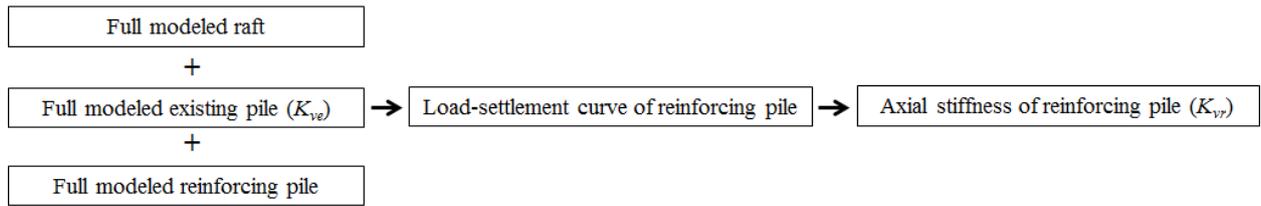
감소한 기존말뚝 축강성의 상한 값을 Table 1에 나타내었다. 시험말뚝 38본의 현장 계측결과를 정규화 하여 분석한 결과, Table 1에 나타난 제안 축강성 값은 전체 계측결과와 정규분포화를 통하여 분석한 결과 하위 95%에 해당 값으로 확인되었고, 이를 바탕으로 신설 보강말뚝의 최소 설계 축강성을 산정하는 데에 적합하다고 결론지을 수 있다.

4. 기존말뚝의 열화를 고려한 신설 보강말뚝 축강성 산정

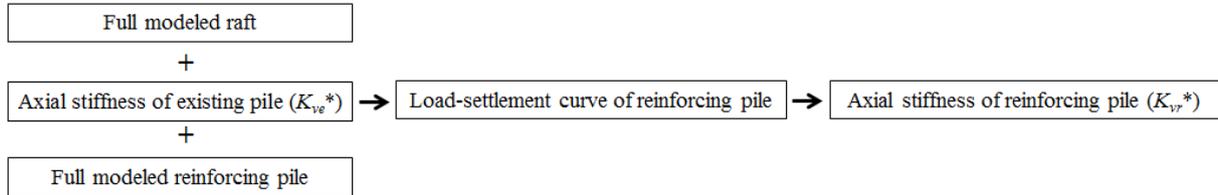
본 장에서는 제안된 기존말뚝의 축강성을 적용하여 신설 보강말뚝의 최소 설계 축강성을 선정하였다. 기존말뚝의 노후화와 열화를 고려한 신설 보강말뚝의 설계 축강성 산정을 위하여 본 연구에서는 두 가지 수치해석을 수행하였다. 첫 번째는 상용 3차원 유한요소 프로그램인 PLAXIS 3D를 통해서 양호한 상태의 기존말뚝 전단면(말뚝 물성치 + 단면)을 신설 보강말뚝과 함께 모델링하여 신설 보강말뚝의 하중-침하곡선을 도출하였다. 여기서 도출된 하중-침하곡선을 통해 산정된 신설 보강말뚝의 축강성을 기준 값(목표 값)으로 설정하였다. 두 번째는 자체 개발한 3차원 말뚝지지 전면기초 해석 프로그램인 Yonsei Piled-Raft(YSPR)을 이용하여 기존말뚝의 축강성 제안 값을 기존말뚝 위치에 대체 모델링하여 감소된 기존말뚝의 축강성에 따른 신설 보강말뚝의 하중-침하곡선을 도출하고, 축강성을 산정하였다. 여기서 산출된 축강성을 기준으로, 수직증축된 구조물의 하중-침하곡선이 양호한 상태로 회복되기 위하여 요구되는 신설 보강말뚝 축강성의 증가율을 제안하였다. 본 연구에서 수행한 수치해석의 흐름은 Fig. 3에 나타내었고, 수행한 해석 케이스는 Table 2에 요약하여 나타내었다. Fig. 3에서 K_w 는 양호한 기존말뚝의 물성치와 단면으로부터 산출된 축강성이며, K_v 는 양호한 기존말뚝과

Table 2. Summary of numerical analysis case

Pile type	Length-diameter ratio (L/D)	Length (m)	Diameter (m)
End-bearing pile	10	3.5	0.35
	20	7.0	0.35
	40	14.0	0.35
Friction pile	10	3.5	0.35
	20	7.0	0.35
	40	14.0	0.35



(a) PLAXIS 3D (without pile deterioration)



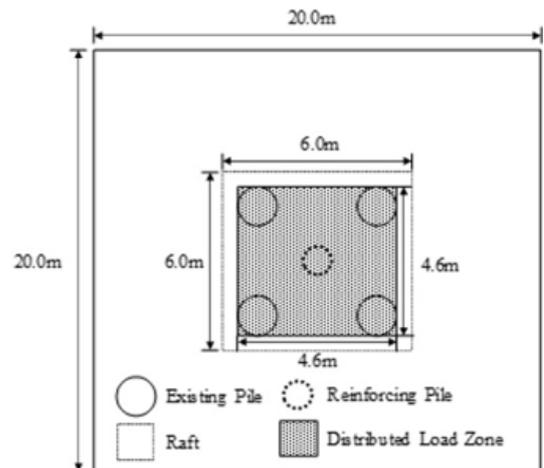
(b) Yonsei piled-raft (with pile deterioration)

Fig. 3. Summary of numerical computation

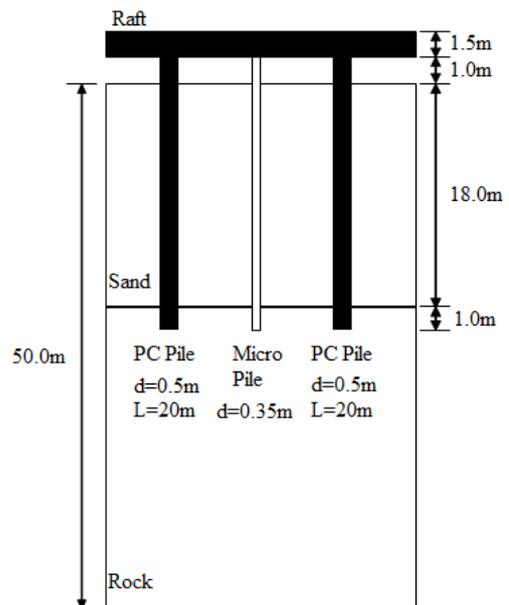
함께 구조물을 지지했을 때의 하중-침하곡선으로부터 도출된 목표 축강성이다. K_{ve}^* 는 노후화와 열화에 의해 감소된 기존말뚝 축강성의 제안 값이며, K_{vr}^* 은 기존말뚝의 열화로 인하여 침하량이 과도하게 발생한 신설 보강말뚝의 축강성이다. 본 연구에서는 K_{vr} 값과 K_{vr}^* 값의 비교를 통하여 수직증축 공동주택이 증축 후에도 양호한 상태의 하중-침하 거동을 보이기 위한 하부 신설 보강말뚝의 축강성을 도출하고자 하였다.

4.1 PLAXIS 3D에 의한 수치해석

노후화나 열화가 발생되지 않은 기존말뚝 전단면을 모델링한 말뚝지지 전면기초에 대한 수치해석을 수행하여 신설 보강말뚝 축강성의 기준 값을 산정하였다. 3차원 유한요소 해석프로그램인 PLAXIS 3D를 이용하여 Fig. 4와 같이 2×2의 기존말뚝 배열에 가운데에 신설 보강말뚝이 설치되어 있는 말뚝지지 전면기초를 모델링하였다. PLAXIS 3D는 말뚝지지 전면기초 거동 해석에 적합한 것으로 여러 연구를 통하여 검증되었다(PLAXIS, 2005; Kim et al., 2018; Jeong and Kim, 2018; Kim and Jeong, 2019). 기존말뚝의 직경은 0.5m, 길이는 20m로 설정하였고, 신설 보강말뚝의 직경은 0.35m, 길이는 3.5m, 7.0m, 14.0m로 수치해석에 반영되었다. 수치해석에 사용된 말뚝과 지반의 물성치는 Table 3에 나타내었으며, 말뚝의 강성은 PLAXIS 3D에서 말뚝의 물성이 반영되어 계산된 하중-침하곡선으로부터 도출하였다. 상부 구조물의 하중은 전면기초 상부에 분포하중으로 모델링하여 고려하였다.



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 4. Numerical modeling (PLAXIS 3D)

Table 3. Material and soil properties (PLAXIS 3D)

Type	Model	E (kPa)	ν	γ_t (kN/m ³)	ϕ (deg.)	C_u (kPa)	R_{int}
Weathered soil	Mohr-Coulomb	5.0×10^4	0.32	19	35	20	0.67
Weathered rock		3.0×10^5	0.30	21	39	50	1.00
Soft rock		2.0×10^6	0.26	23	42	500	1.00
Existing pile	Linear elastic	2.4×10^7	0.20	25	-	-	-
Reinforcing pile		3.7×10^7	0.20	27	-	-	-
Raft		3.0×10^7	0.20	25	-	-	-

4.2 Yonsei Piled-Raft(YSPR)에 의한 수치해석

Yonsei Piled-Raft(YSPR)은 말뚝지지 전면기초를 해석함에 있어서 기초의 연성도, 지반의 비선형성 뿐만 아니라 말뚝-지반 사이의 상호작용까지 고려할 수 있다. YSPR은 향상된 지반 스프링 모델과 Flat-shell 요소를 사용함으로써 지반 내의 지점-지점 간의 영향을 고려하여 현실적으로 전면기초-말뚝-지반 시스템의 거동을 해석한다. 지반 스프링 모델과 탄성 Flat-shell 요소를 통하여 기존 해석의 한계를 극복하고 지반 내에 시공된 축하층이 작용하는 말뚝지지 전면기초의 거동을 정확하게 분석한다. 뿐만 아니라, 지반 내의 말뚝의 물성치나 구조적인 정보가 확보되지 않은 경우 말뚝을 축강성으로 대체 모델링하여 말뚝지지 전면기초의 거동을 분석할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 5는 지반 스프링 모델을 기초로 한 YSPR의 말뚝지지 전면기초와 전면기초-말뚝-지반 간의 상호작용을 나타낸 것이다. Fig. 6은 YSPR을 통해 말뚝의 축강성을 해석하는 과정을 순서대로 나타내었다(Jeong, 2015).

PLAXIS 3D 해석과는 달리, YSPR을 통한 해석은 노후화와 열화가 발생한 기존말뚝을 실제 모델링이 아닌 위에서 제안한 감소된 축강성의 상한 값으로 대체하여 해석에 고려하였다. 전면기초 중심에 있는 신설 보강말뚝은 직경 0.35m로, 길이는 3.5m, 7.0m, 그리고 14.0m로 모델링하였다. 기존말뚝의 물성을 제외한 신설 보강말뚝과 지반의 물성치는 PLAXIS 3D와 동일하게 적용되었다. Fig. 7은 이러한 모델링 과정을 도식화한 것이다. 기존말뚝을 PLAXIS 3D의 전체 모델링과는 다르게 축강성을 이용하여 모델링한 수치해석을 수행함으로써, 신설 보강말뚝의 하중-침하곡선을 도출하고, 이를 통하여 기존말뚝 열화의 고려 유무에 따른 축강성의 차이를 비교하였다.

4.3 해석 모델 검증

수치해석에 사용된 두 가지 프로그램에 대한 검증은 ○○대학교 제4공학관 시공 현장에서 계측된 말뚝의 하중-침하곡선을 이용하여 수행하였다(Jeong et al., 2017).

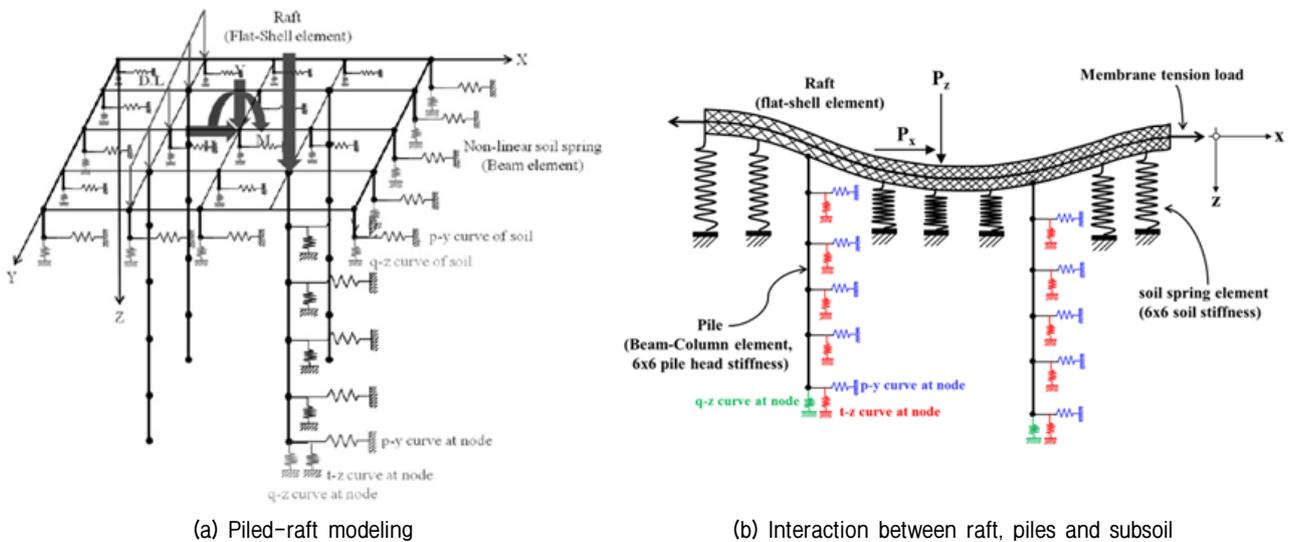


Fig. 5. Schematic of piled-raft modeling using YSPR (Jeong, 2015)

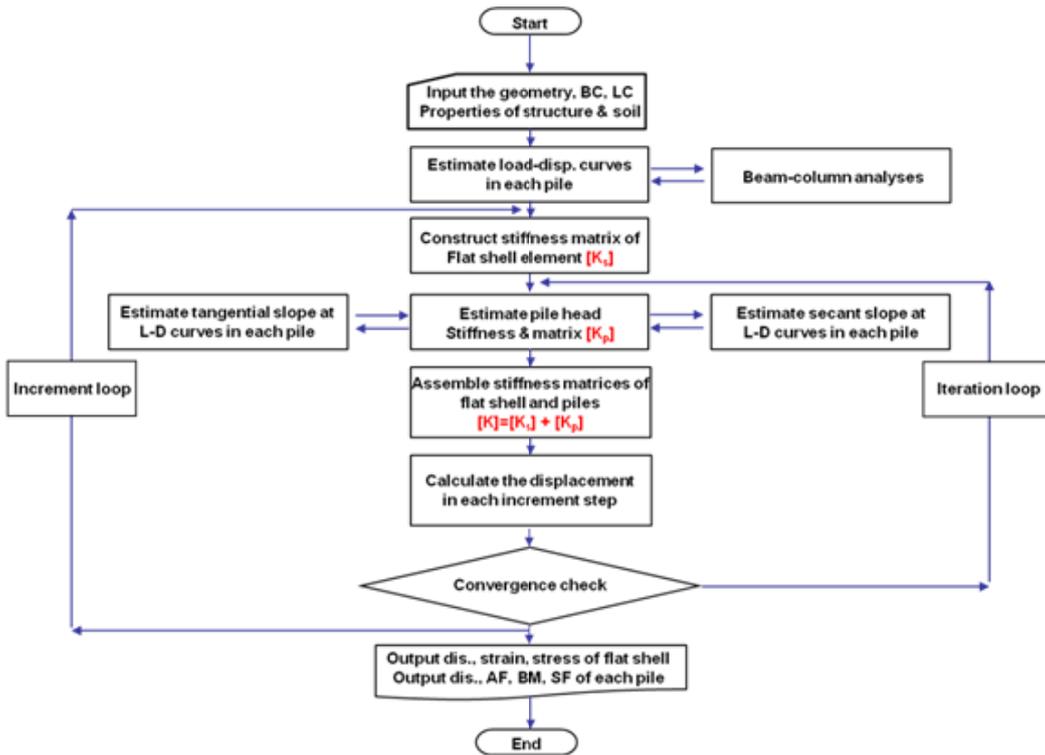
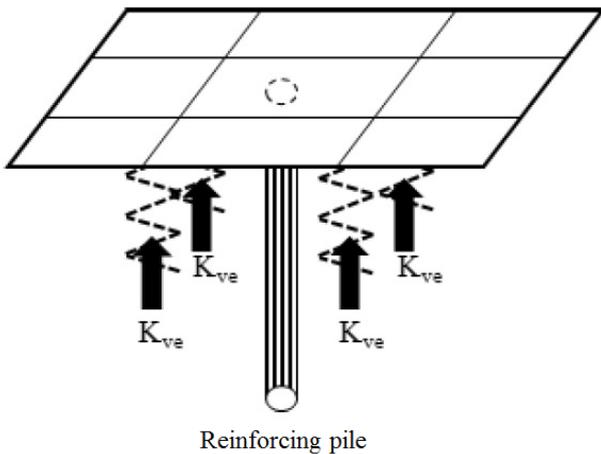


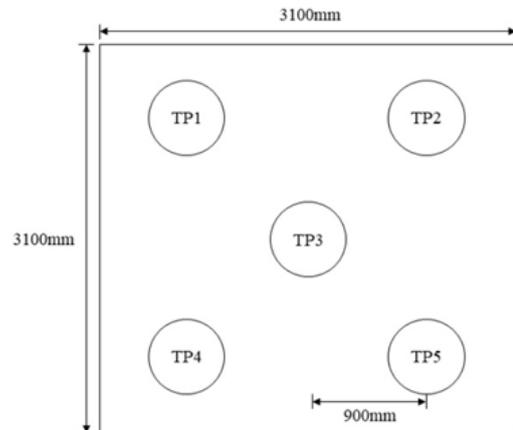
Fig. 6. Flow chart of YSPR



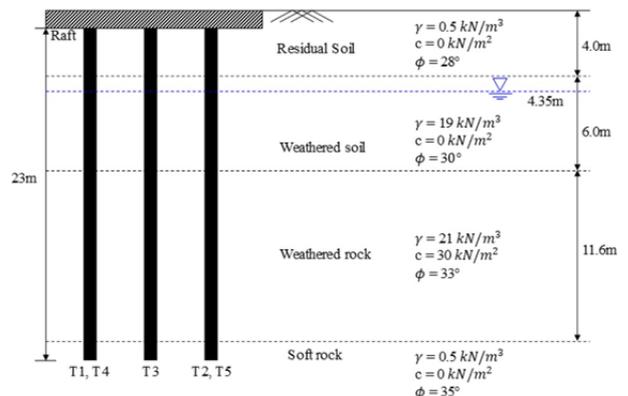
Reinforcing pile

Fig. 7. Modeling of piled-raft system by using axial stiffness of existing piles (K_{ve})

검증에 사용된 현장의 상태와 물성치는 Fig. 8과 같이 도식화하여 나타냈다. PLAXIS 3D와 YSPR을 이용한 신설 보강말뚝의 축강성 산정에 적용된 수치해석 모델링 과정을 동일하게 수행하고, 계측 대상 말뚝의 하중-침하곡선을 도출한 결과는 Fig. 9와 같다. 두 해석 프로그램을 이용하여 도출된 하중-침하곡선을 실제 계측된 결과보다는 더 많은 침하를 보이는 것으로 나타났으나, 대체로 해석결과와 계측결과가 비슷한 결과를 산정하는 것으로 확인되었다. 그러므로 본 해석 프로그램을 통



(a) Top view of piled-raft modeling



(b) Side view of piled-raft modeling and soil conditions

Fig. 8. Schematic of numerical model validation case

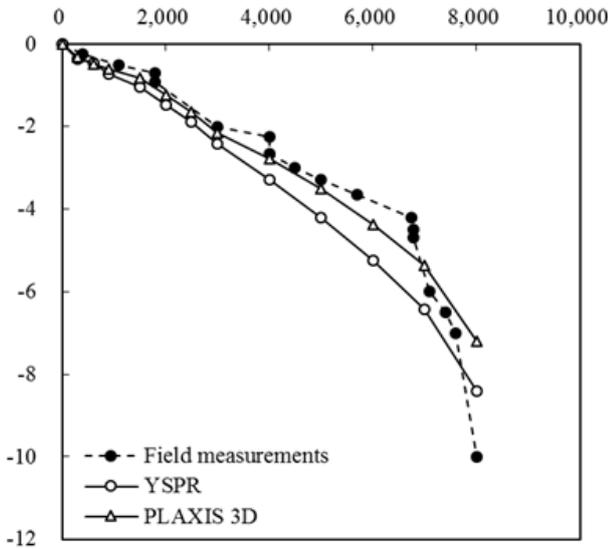


Fig. 9. Results of numerical model validation

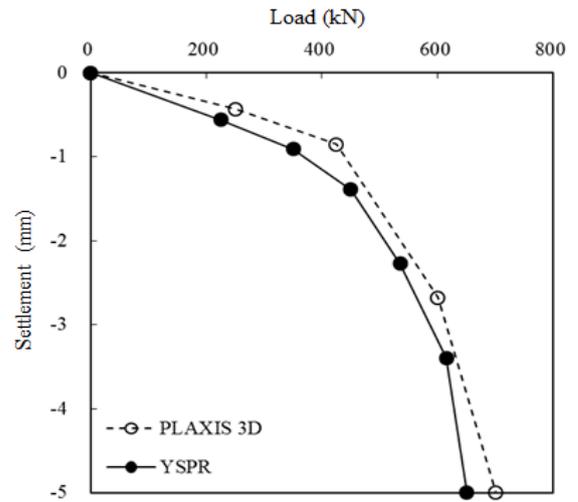
하여 말뚝의 거동을 예측하는 것이 가능하고, 더 나아가 기존말뚝의 열화를 고려한 신설 보강말뚝의 설계 축강성을 제안함이 적절하다는 결론을 내릴 수 있다.

4.4 신설 보강말뚝의 축강성 산정 예시

본 연구에서는 현장 계측결과를 통하여 검증된 두 수치해석 모델을 이용하여 수직중축 공동주택 하부 신설 보강말뚝의 강성 산정법을 제안하였다. 하지만 말뚝지지 전면기초의 거동은 기존말뚝의 배열(configuration), 간격(spacing), 전면기초의 두께(raft thickness), 그리고 신설 보강말뚝의 설치 위치(relative position of reinforcing pile in raft) 등에 영향을 받아 신설 보강말뚝의 최소 설계 축강성을 일반적인 수치로 정량화하는 것은 어렵다. 따라서 본 장에서는 제안한 산정법을 활용하여 정방형 2x2 배열을 가진 말뚝지지 전면기초의 중심에 신설 보강말뚝을 설치한 경우에 대한 대표 해석 케이스를 수행하였다. 도출된 결과는 선단지지 말뚝(선단지지력 + 주변마찰력)과 마찰말뚝(주변마찰력만 작용)으로 구분하여 나타내었다. 신설 보강말뚝의 축강성은 Table 3에 명시된 물성치와 직경을 적용하여 PLAXIS 3D에 의해 산정된 결과를 기준 값으로 설정하였다. 수치해석을 통한 축강성의 산정은 하중-침하곡선의 초기 탄성영역의 접선을 통하여 수행하였다(Das, 2015).

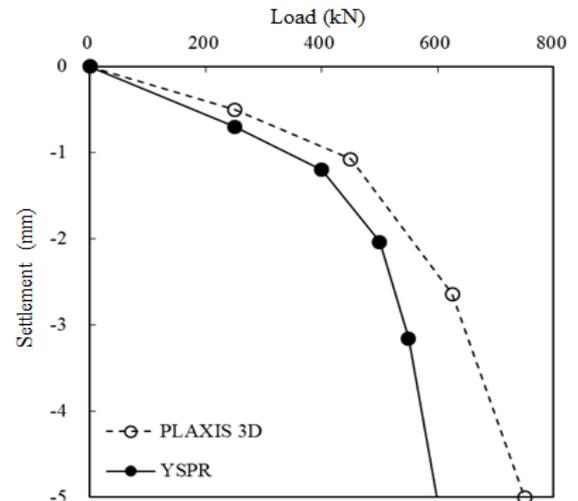
4.4.1 선단지지 말뚝

Fig. 10은 세장비가 10, 20, 그리고 40일 때 신설 보강



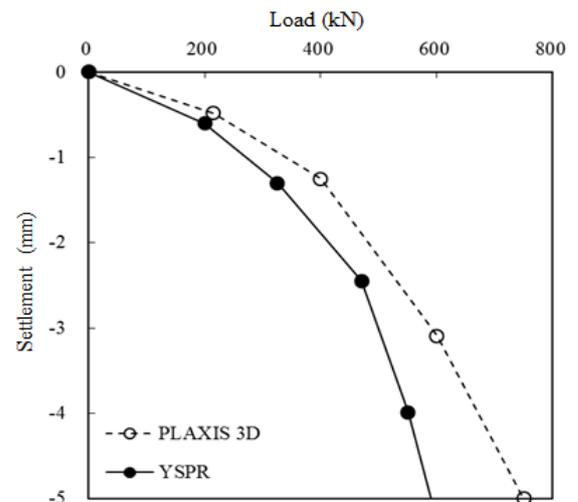
45% decrease in axial stiffness due to deterioration

(a) L/D = 10



40% decrease in axial stiffness due to deterioration

(b) L/D = 20



37% decrease in axial stiffness due to deterioration

(c) L/D = 40

Fig. 10. Numerical analysis results of end-bearing reinforcing piles

선단지지말뚝의 하중-침하곡선을 나타낸 것이다. Fig. 10에 나타낸 PLAXIS 3D와 YSPR 해석 결과로 도출된 하중-침하곡선을 이용하여 신설 보강말뚝의 축강성을 산정하였다.

정방형 2×2 말뚝 배열 중간에 신설 보강말뚝을 설치한 경우 기존말뚝의 열화가 발생하였을 때 축강성을 산정한 결과, 신설 보강말뚝의 축강성은 양호한 기존말뚝과 함께 구조물을 지지할 때보다 축강성을 세장비 10, 20, 40일 때, 각각 45%, 40%, 37% 증가시켜 설계해야 수직증축 과정 이전의 안정적인 구조적인 거동을 회복할 수 있음을 알 수 있었다. 본 결과를 통하여, 기존말뚝의 열화가 발생하면 더 많은 하중이 축강성이 높은 신설 보강말뚝으로 전이되고, 세장비가 커질수록 그 경향성이 덜 뚜렷하게 나타나는 것으로 확인되었다.

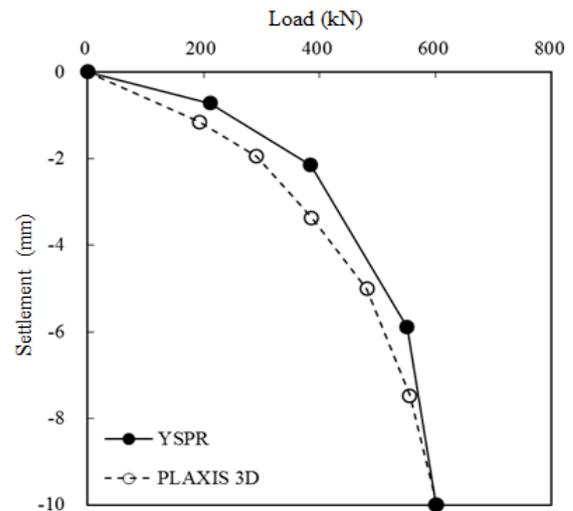
4.4.2 마찰말뚝

Fig. 11은 세장비가 10, 20, 그리고 40일 때 신설 보강마찰말뚝의 하중-침하곡선을 나타낸 것으로, PLAXIS 3D와 YSPR 해석 결과로 도출된 하중-침하곡선을 이용하여 신설 보강마찰말뚝의 축강성을 산정하였다.

하중-침하곡선을 이용하여 축강성을 산정한 결과, 마찰말뚝은 선단지지 말뚝에 비하여 낮은 축강성을 보였고, 기존말뚝의 열화가 발생하였을 때 신설 보강마찰말뚝의 축강성은 열화가 발생하지 않은 기존말뚝과 함께 말뚝지지 전면기초를 구성하였을 때에 비하여 축강성을 세장비 10, 20, 40일 때, 각각 84%, 53%, 40% 증가시켜 설계해야 수직증축 이전의 하중-침하거동을 회복하고 안정적으로 구조물을 지지할 수 있는 것으로 나타났다. 본 산정 결과를 통하여, 마찰말뚝 또한 선단지지 말뚝과 마찬가지로 기존말뚝의 열화가 발생하면 더 많은 하중이 축강성이 높은 신설 보강말뚝으로 전이되고, 세장비가 커질수록 그 경향성이 덜 뚜렷하게 나타나는 것으로 확인되었다. 하지만 마찰말뚝은 선단지지 말뚝인 경우와 비교하여 기존말뚝의 열화에 대하여 신설 보강말뚝의 축강성 증가폭을 다소 더 크게 설계해야 함과 지반조건, 세장비의 영향을 더 많이 받는 것으로 확인되었다.

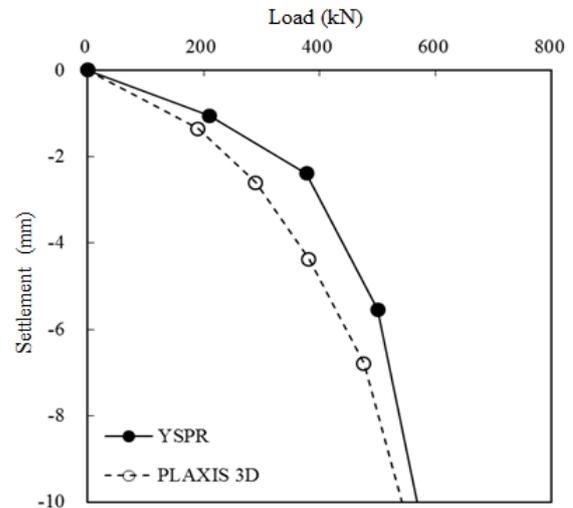
4.5 신설 보강말뚝의 축강성 제안

본 연구에서 수행한 기존말뚝을 고려한 해석결과와 고려하지 않은 해석결과를 비교한 결과, 수직증축 리모



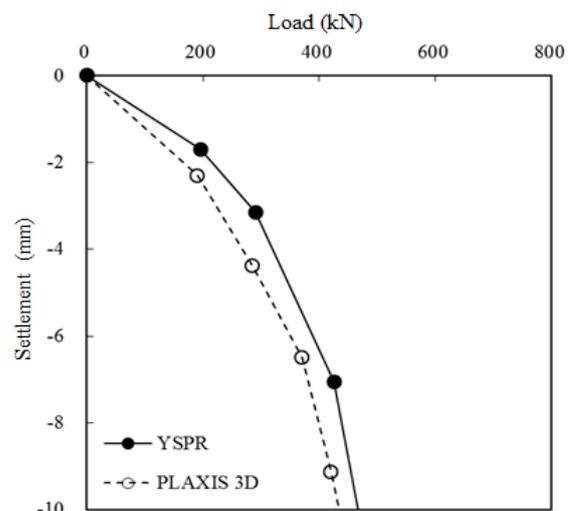
84% decrease in axial stiffness due to deterioration

(a) L/D = 10



53% decrease in axial stiffness due to deterioration

(b) L/D = 20



40% decrease in axial stiffness due to deterioration

(c) L/D = 40

Fig. 11. Numerical analysis results of friction reinforcing piles

Table 4. Summary of computed results

Pile type	Slenderness ratio (L/D)	Length (m)	Diameter (m)	Axial stiffness (kN/m)		
				PLAXIS 3D (without deterioration)	YSPR (with deterioration)	Required increase rate
End-bearing pile	10	3.5	0.35	581,395	400,000	45%
	20	7.0	0.35	500,000	357,647	40%
	40	14.0	0.35	452,432	330,692	37%
Friction pile	10	3.5	0.35	299,625	163,265	84%
	20	7.0	0.35	200,000	129,350	53%
	40	14.0	0.35	114,286	81,609	40%

델링을 한 구조물이 증축 이전의 안정적인 거동을 회복하기 위해서는 신설 보강말뚝은 선단지지 조건과 무관하게, 선단지지 말뚝과 마찰말뚝 모두 기존말뚝 보다 더 높은 축강성을 갖도록 하는 설계가 필수임을 확인할 수 있었다. 다만 마찰말뚝에서는 그 증가폭이 더 크고, 세장비에 더 민감하게 영향을 받는다는 것 또한 확인할 수 있었다. 수치해석 결과의 정리는 Table 4에 나타내었다.

5. 결론 및 요약

본 연구는 수직증축 리모델링 구조물 말뚝지지 전면 기초의 말뚝 축강성을 이론적, 수치해석적 방법을 통하여 분석하고 산정하였다. 말뚝지지 전면기초의 말뚝 축강성에 따라 하중이 전이되는 것을 확인하고, 수직증축으로 인하여 증가한 구조물의 하중을 안정적으로 지지하기 위하여 기존말뚝의 열화를 고려한 신설 보강말뚝의 설계 축강성을 산정하고자 하였다. 수직증축 리모델링이 요구되는 사용연한이 오래된 구조물의 기존말뚝은 열화가 발생하여 설계 당시의 지지력과 안정성 측면에서 불확실성을 많이 내포하고 있기 때문에 신설 보강말뚝의 시공이 필수적이다. 하지만 설계 당시 말뚝의 시험이나 구조적 자료가 손실되는 경우가 많아 기존말뚝의 현재의 지지력을 산정하고 이를 적용한 신설 보강말뚝의 설계는 불가능한 상황이다. 이러한 상황에서, 지반과 말뚝의 시공법의 영향으로부터 비교적 자유로운 말뚝의 축강성을 통한 신설 보강말뚝의 설계에 대한 연구가 중요하다. 이론적, 수치해석적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

강성 값을 바탕으로 신설 보강말뚝 설계 시 요구되는 최소 설계 축강성 값을 제안하였다.

- (2) 말뚝지지 전면기초에 대한 두 가지 수치해석을 수행하여 논문 1의 기존말뚝 축강성을 활용하여 신설 보강말뚝의 축강성을 세장비 별로 산정하였다. 수치해석 결과, 기존말뚝의 열화가 진행되면서 전면 기초에 작용하는 하중은 축강성이 상대적으로 높은 신설 보강말뚝으로 전이됨을 확인할 수 있었고, 선단지지 조건에 상관없이 기존말뚝의 열화가 발생한 경우 신설 보강말뚝의 설계 축강성을 증가하여 설계해야 수직증축으로 인한 하중 증가를 안정적으로 지지할 수 있는 것으로 확인되었다.
- (3) 신설 보강말뚝의 축강성은 마찰말뚝의 경우 더 낮게 나타났고, 기존말뚝의 열화가 발생하면 선단지지 말뚝에 비하여 상대적으로 더 증가시켜 설계해야 되는 것으로 수치해석 결과 확인되었다. 더욱이 마찰말뚝은 선단지지 말뚝에 비하여 지반조건, 세장비의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원을 통하여 지원된 건설기술연구사업 ‘케이블 교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 가설공법 개발(19SCIP-B119960-04)’과 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2018R1A6A1A08025348)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) ‘수직증축 공동주택 하부 기존말뚝의 열화를 고려한 축강성 제안(논문 1)’에서 이론적, 실험적 산정을 통하여 도출된 세장비에 따른 기존말뚝의 최대 축

1. Artes, J., Wadel, G., and Marti, N (2017), “Vertical Extension and Improving of Existing Buildings”, *The Open Construction and Building Technology Journal*, pp.83-94.

2. Cho, H. (2019), *A Study on the Axial Stiffness and Load Distribution Ratio on Existing and Reinforcing Piles in Vertical Apartment Extension*, Master thesis, Yonsei University, Seoul, Korea.
3. 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*, Vol.33, No.12, pp. 81-92.
4. Das, B. M. (2015), *Principles of Foundation Engineering*, Cengage learning.
5. Jang, Y., Wang, S., Han, J., Park, K., and Pyun, M. (2016), "Development of Optimal Reinforcement Foundation Method for Vertical Extension Remodeling", *Proceedings of KSEG Spring Conference*, pp.119-120.
6. Jeong, S.S. (2015), *YSPR User's manual*.
7. 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*, Vol.35, No.1, pp.17-30.
8. Jeong, S. S. and Kim, D. H. (2018), "Estimation of the Load Sharing Ratio of Pre-installed Columns in Top-down Buildings on Korean Rock", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.22, No.12, pp.4852-4861.
9. Jeong, S.S., Lee, J.H., Park, J.J., Roh, Y.H., and Hong, M.H. (2017), "Analysis of Load Sharing Ratio of Piled Raft Foundation by Field Measurement", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.8, pp.41-52.
10. KICT (2013), "Development of Pre-loading Method for Reinforcement Piles of Apartment Remodeling (I)", KICT2013-260, KICT, pp. 23-26.
11. Kim, D. H. (2018), *Proposed shaft resistance of prebored precast pile using field loading test*, Doctoral dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
12. Kim, D. H., Jeong, S. S., Jung, G. J., and Park, J. J. (2018), "Load Sharing Ratio of Prebored and Precast Pile in Top-down Method Construction Process", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27, pp.1-14 (doi: 10.1002/tal.1472).
13. Kim, D. H. and Jeong, S. S. (2019), "Comparative Study of Load Distribution Ratio of Various Piled raft Foundations based on Coupled Stiffness Matrix", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, <https://doi.org/10.1002/tal.1669>.
14. Kim, D. H., Kim, J. H., and Jeong, S. S. (2019), "Estimation of Axial Stiffness on Existing and Reinforcing Piles in Vertical Extension Remodeled Buildings", *Engineering Structures*, <https://doi.org/10.1016/J.engstruct.2019.109466>.
15. MOLIT (2013), *Housing Act*, Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, p.2.
16. PLAXIS, B. V. (2005), *PLAXIS User's manual*.
17. Randolph, M. F. and Wroth, C.P. (1978), "Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles", *Journal of Geotechnical Engineering Division of ASCE*, Vol.104, No.12, pp.1465-1488.

Received : August 19th, 2019
 Revised : November 6th, 2019
 Accepted : November 7th, 2019