

수직증축시 기존말뚝과 보강말뚝의 하중분담율 및 축강성 분석

A Study on the Load Distribution Ratio and Axial Stiffness on Existing and Reinforcing-Pile in Vertical Extension Remodeling

정 상 섬¹ Jeong, Sang-Seom

조 현 철² Cho, Hyun-Cheol

Abstract

This study presents the application of the numerical and analytical technique to simulate the Load Distribution Ratio (LDR) and to define axial stiffness on reinforcing pile foundation (K_{vr}) in vertical extension remodeling structure. The main objective of this study was to investigate the LDR between existing piles and reinforcing piles. Therefore, to analyze the LDR, 3D FEM analysis was performed as variables for elastic modulus, pile end-bearing condition, raft contacts, and relative position of reinforcing pile in a group. Also, using the axial stiffness (K_{ve}) of existing piles, the axial stiffness of reinforcing pile was defined by 3D approximate computer-based method, YSPR(Yonsei Piled Raft). In addition K_{vr} was defined by reducing the K_{ve} considering the degradation of the existing piles.

요 지

본 연구는 3차원 수치해석을 통해 기존말뚝과 보강말뚝의 하중분담율(Load Distribution Ratio)과 근사적 해석 기법으로 보강말뚝의 축방향 강성(Axial Stiffness)을 산정하였다. 시공단계를 고려하여 말뚝기초의 LDR에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해서 1) 말뚝기초의 강성, 2) 말뚝기초의 선단지지조건, 3) 기초판 접촉효과, 4) 보강말뚝의 설치위치에 따라 해석을 수행하여 기존말뚝과 신설말뚝의 하중분담율 거동을 확인하였다. 또한 5) 기존말뚝의 축방향 강성(K_{ve})를 사용하여 말뚝지지 전면기초의 3차원 근사적 해석기법(YSPR)으로 보강말뚝의 직경에 따른 강성(K_{vr})을 산정하고, 장기간 사용으로 인한 경화를 고려하여 K_{ve} 를 3단계로 나누어 감소시켜 보강말뚝의 강성 변화의 경향을 살펴보고, 신설 말뚝의 강성 산정방법을 제시하였다.

Keywords : Vertical Extension, Reinforcing Pile, Existing Pile, Load distribution ratio, Axial Stiffness

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

2 비회원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Non-Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-7489, Fax: +82-2-2123-8378, miniobox410@gmail.com, Corresponding author, 교신저자)

1. 서 론

국내 공동주택들의 노후화가 진행되고 도심지의 인구 밀도가 증가하며 국토자원이 부족해지는 추세를 반영하여 국토교통부에서는 2013년 최대 3개층까지 공동주택을 수직증축 리모델링을 허용하는 방침을 발표하였다(MOLIT, 2013). 수직증축형 리모델링을 통하여 노후화된 공동주택의 가치를 상승시키고 상권의 활성화를 유도하며 공동주택의 경제성과 안정성 및 사용성 확보를 유도하고있다. 이에 따라 수직증축형 리모델링 사업은 현재까지 활발하게 진행되고 있으며 앞으로도 다양하고 심도깊은 연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

수직증축 리모델링시 준공년수가 오래된 공동주택의 경우, 노출되어 있는 상부구조물과는 달리 지반에 매립되어 있는 말뚝기초 구조물은 말뚝의 채원, 구조도면, 재하시험 및 성능시험 등의 자료가 손·망실되어 시공 당시 및 현재 시점의 정량적인 성능을 파악하기가 어렵다. 그리고 장기간 사용으로 인한 말뚝기초의 경화(Degradation) 역시 고려해야한다는 문제점이 있다. 또한 수직증축과정에서 추가되는 증축하중을 지지하기 위해서는 기존말뚝 이외에 신설 보강말뚝을 추가적으로 설치하여야한다. 그러나 국내에서는 수직증축시 증축 공법, 보강 방안은 활발하게 연구가 진행중이나 말뚝기초의 하중분담율(Load Distribution Ratio)에 대한 연구와 말뚝의 축강성(Axial Stiffness)연구는 상대적으로 미비한 것이 현 실정이다.

그리고, 일반적으로 국내에서 수직증축형 리모델링 대상 구조물의 말뚝기초는 PC말뚝, PHC말뚝을 사용하고 기초 구조물의 보강말뚝은 마이크로파일(Micropile)을 사용한다. 이종의 말뚝은 재료 물성치와 시공 시점이 달라 하중-침하($P-\delta$) 거동이 상이하고 일체화된 거동을 보이지 않고 상부 하중에 대해서 하중분담이 이루어지는 메커니즘과 매개변수가 명확하지 않아 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 현재 수직증축시 말뚝 기초 보강시 기존말뚝의 지지력이 허용 지지력을 초과하지 않도록 하는 지지력 측면 보강설계(Capacity-based design)를 유도하고 있다. 그러나 지지력 측면에서의 말뚝 기초 보강은 장기간 사용된 말뚝의 성능을 제대로 확인 및 신뢰할 수 없어 신설말뚝의 보강이 과다하거나 과소할 가능성이 있고 다양한 지반의 불확실성을 고려하지 못하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 본 연구에서 제안하는 침하량을 고려한 말뚝기초의 축강성을 고려한 설계는 기존의 지지력 측면에서의 설계를 상호 보완 가능한 설계방법으로 판단된다.

그러므로 본 논문에서는 공동주택 수직증축 공사 시 일반해석단계와 시공단계를 고려한 해석 방법을 소개하고, 3차원 유한요소 해석을 통하여 1) 기존말뚝과 신설 보강말뚝간의 강성차이에 따른 하중분담율과 2) 말뚝의 선단지지조건이 하중분담율에 미치는 영향을 분석한다. 그리고 3) 기초판이 하중을 지지한다고 가정하여 기존말뚝-보강말뚝-기초판 (Existing Pile-Reinforcing

Pile-Raft)의 하중분담율을 분석하고 또한 4) 신설 보강말뚝의 설치 위치를 통하여 위치에 따른 하중분담율 변화를 정리하였다. 그리고 5) 3차원 근사적 해석기법(YSPR)으로 기존말뚝의 강성(K_{ve})을 사용하여 보강말뚝의 직경에 따라 축강성(K_{vr})을 산정하고, 장기간 사용된 기존말뚝의 성능 저하를 고려하여 K_{ve} 를 3단계로 감소시켜 보강말뚝의 축강성(K_{vr})을 산정하여 보았다.

2. 수직증축 구조물의 기존말뚝 및 보강말뚝에 대한 연구

2.1 시공단계를 고려한 해석방법

준공년수가 오래된 공동주택의 수직증축 공사시 증축에 따른 연직하중이 증가하여 기존 말뚝 기초에 가해지는 하중이 허용하중을 초과할 가능성이 매우 높아 말뚝기초의 보강은 필수적이다. 또한 수직증축 시공 전에 기존 말뚝은 기존 하중을 지지하고 있는 상태이므로 증축하중에 대해서는 기존 말뚝과 신설 보강말뚝이 함께 분담하여 지지하여야 하므로 기존 말뚝이 분담해야 하는 하중은 증가한다. 신축 구조물은 모든 말뚝이 전체 하중을 지지할 수 있으나 수직증축형 리모델링 구조물은 기존말뚝과 신설말뚝이 분담해야 하는 하중은 각각 국토교통부에서 고시한 원칙에 따라 분담하는 것으로 고려하여 해석을 수행하여야 한다(Choi et al., 2014).

실제 수직증축 리모델링 공사시에 시공단계를 고려한 설계절차는 Fig. 1에 정리한 바와 같다. 수직증축시 리모델링 공사 전 상태에서는 활하중(Live load), 마감재 하중(Finishing load), 구조하중(Frame load)으로 이루어진 전체 하중은 기존 말뚝이 부담한다. 그러나 시공이 진행되면서 활하중과 마감재 하중을 철거하고 허용하중의 44~52%정도의 순수 구조 하중만을 기존 말뚝이 부담하게 된다 (KICT, 2013). 추가적으로 신설 보강말뚝을 설치하여 기초구조물을 보강하고 증축되는 하중을 신설말뚝과 기존말뚝이 함께 분담하여 지지하도록 한다. 이러한 시공단계를 고려한 설계절차는 일반적으로 기존 말뚝과 신설 말뚝이 균등하게 기존 하중과 증축 하중을 분담하던 일반 해석법과는 다르게 기존 말뚝이 분담하는 하중이 구조기준에서 제시하는 허용 하중을 초과하는 결과를 초래할 수 있어 신설말뚝과 기존말뚝의 강성비 및 하중분담율을 고려하여 안전하게 보강량을 산정하여 설계하여야 한다(MOLIT, 2014).

Fig. 1 Load case along the construction stages of remodeling process (Choi et al., 2014)

2.2 말뚝기초에서의 강성 영향

일반적으로 기존 말뚝과 신설 보강말뚝의 강성비에 따라서 각 말뚝기초의 하중분담율이 큰 차이를 가진다(Choi et al., 2017). 이러한 하중분담율의 차이는 신설 보강말뚝의 보강량을 결정하는 중요한 요인으로 시공의 경제성에 큰 영향을 미친다. 그러므로 기존말뚝과 보강말뚝의 각각의 강성을 산정하는 것은 곧 수직증축형 리모델링 기초 보강 공사의 경제성과 안정성을 결정할 수 있는 중요한 요인이라고 볼 수 있다. 국토교통부 고시 제2017-94호 ‘수직증축형 리모델링 구조기준’에서 역시 하중분담원칙을 ‘기존말뚝과 신설말뚝이 기초강성에 따라 분담하여 지지’ 할 것으로 제시하였다. 그러나 30년 전 시공된 PC말뚝의 제원 및 도면이 손·망실되어 기존말뚝의 강성을 산정하기에 어려움이 있고 또한 존재한다고 하여도 장기간동안 사용된 기존 말뚝의 성능 역시 불확실하다. 그러므로 기존말뚝에 대한 강성 산정 연구는 지속적으로 진행 되어야 할 것으로 판단된다. 또한 보강말뚝의 강성 역시 기존말뚝기초에 신설말뚝을 설치하고 하중재하시험을 실시하여 하중-침하($P-\delta$)곡선으로 어느 정도의 값을 가지는지 결정하기에 한계가 존재한다. 목표값에 도달할 수 있는 기준을 제시할 수 있는 잦은 재하시험을 시행하는데 어려움이 있고 통제 불가능한 변수들이 많아 기존말뚝과 신설보강말뚝의 강성비를 산정하는 것이 쉽지 않은 실정이다.

강성을 산정하는 방법은 실제 하중재하시험을 통하여 얻어지는 하중-침하 곡선을 통하여 항복시의 활선기울기를 사용하는 것이 가장 신뢰성이 높으나(Das, 2015), 앞서 설명하였듯 시·공간적 제약이 존재하고, 도로교 설계기준 해설에서 제시하는 강성 산정식 역시 지반과 말뚝의 상호작용(Soil-Pile interaction)을 고려하지 못한다는 단점이 있어 신뢰성이 낮아 강성을 결정하는 것이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 기존말뚝의 말뚝지지 전면기초에서 기존 말뚝의 강성만을 가지고 말뚝지지 전면기초의 3차원 근사적 해석기법(YSPR)을 사용하여 보강 말뚝의 하중-침하($P-\delta$)곡선을 도출하여 강성을 산정하였다. 기존의 수치해석을 통하여 강성을 산정할 시에는 기존말뚝의 직경, 깊이 및 탄성계수 등 다양한 제원이 필요하였으나 본 해석에서는 매개변수 연구를 통해 기존말뚝과 보강말뚝의 강성에 대한 상관관계도 연구함으로써 상대적으로 간편하면서도 정확한 해석을 수행할 수 있어 수직증축형 리모델링 기초 보강 연구의 도움이 될 것으로 기대된다.

3. 수직증축 구조물 말뚝기초 모델링

3.1 해석 단면 및 경계조건

본 연구에서는 3차원 Finite Element Method(FEM) 해석프로그램 Plaxis 3D Foundation(Ver 2.2)을 사용하였다. 본 프로그램은 연약지반의 압밀거동 뿐만 아니라 과압밀 점토 그리고 사질토에도 적용이 가능한 다양한 재료 모형을 갖고 있을 뿐만 아니라 복잡한 비선형 거동을 고려한 재

료 모형과 수렴을 돕는 알고리즘을 보유하고 있다. 또한 각 단계별로 모델링이 가능하여 수직증축 리모델링시의 일련의 과정들에 대한 세부적인 모델링을 각각 수행할 수 있다는 장점이 있다 (Plaxis, 2005).

본 연구에서는 Fig. 2 에서 나타난 바와 같이 6m×6m×1.5m의 전면기초에 2×2형태의 기존말뚝을 설치하고 가운데에 보강말뚝 1개가 설치된 말뚝지지 전면기초(Piled Raft) 형태를 모사하여 해석을 수행하였다. 기존말뚝은 직경 500mm, 길이 20m의 PC말뚝으로 모델링하였으며, 신설보강말뚝은 수직증축 공사 시 사용되는 일반적인 마이크로 파일(Micro Pile)을 모사하기 위하여 직경 250mm, 길이 20m로 모델링하였다. 또한 군말뚝 효과(Group effect)를 최소화하기 위하여 기존말뚝간의 거리를 말뚝직경의 8배(4.0m)로 모델링하여 충분한 이격을 두어 배치하였다(말뚝기초실무, 2013). 또한 하중 재하 시 전면기초가 받는 하중을 무시하기 위하여 전면기초는 Fig. 3 과 같이 지표면과 1m가량 이격을 두어 전면기초가 지지하는 하중을 무시 할 수 있도록 유도하였다. 그리고 하중재하면적은 실제 상부구조물이 닿는 면적을 고려하여 기존말뚝의 외경에 맞도록 하중을 재하하도록 하였으며 말뚝지지 전면기초에 하중 재하 시 말뚝의 영향 범위를 고려하여 20m×50m의 지반을 형성하여 간섭이 없도록 모사하였다.

Fig. 2 Top view of model

Fig. 3 Front view of model

3.2 재료 물성치

본 연구에서는 조밀한 사질토층과 풍화 암반층으로 구성된 2개 층 지반을 모사하여 체적요소로 모델링하여 해석을 수행하였다. 각 지반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였고 세부 물성치는 표 Table 1에 정리하였다 (Cho, 2013). 또한 지반과 말뚝의 접촉면의 상호작용을 고려한 인터페이스 요소를 모사하기 위하여 인접 지반 물성치에 인터페이스 강도감소계수인 R_{inter} 를 적용하여 모델링 하였다. 지반-구조물 접촉면의 거칠기를 나타내는 강도감소계수(R_{inter})는 일반적으로 사질토지반에서는 0.67을 사용하고 상대적으로 사질토층에 비해 접촉면이 거친 암반층에서는 1.0을 적용하였다 (Tschuchnigg, 2013; Choi et al, 2017).

또한 말뚝과 전면기초는 재하되는 하중으로 인하여 재료 자체의 파괴는 일어나지 않는다고 가정하여 Linear-Elastic 모델을 사용하였고 말뚝과 전면기초는 콘크리트 재료의 일반적인 물성치를 적용하였다(Reul & Randolph, 2003). 또한 신설보강말뚝은 마이크로 파일의 탄성계수를 사용하므로 강봉과 그라우팅 구근의 면적비를 고려한 합성 탄성계수를 산정하여 적용하였다(Wang et al, 2018)

Table 1. Physical properties of soil

Table 2. Properties of piles and raft

3.3 하중 재하 단계

본 연구에서의 하중단계 설정은 일련의 수직증축시 리모델링 시공과정을 모사함에 반드시 고려해야한다. 그러므로 Table 3.과 같이 기초 구조물에 하중재하단계를 산정하였다. 이는 기존의 기초구조물에 신설보강말뚝을 모델링하지 않고 하중을 재하하였을 때, 약 11500kN 하중재하시 전침하량 기준 25mm의 침하가 발생하였을 때를 파괴상태라고 가정하였고 해당 하중을 극한하중으로 선정하였다. 실제 시공현장을 모사하기 위하여 해당 극한 하중에 대하여 안전율 3.0을 적용하여 허용하중을 선정하였고(말뚝기초실무, 2013) 이때의 하중을 Loading Level(L.L) 100% 설정하였다. 그리고 증축하중을 고려하기 위하여 허용하중의 50%를 증가시켜 Loading level 150%까지 하중을 재하하여 해석을 수행하였다. 또한 하중 재하시 초기에 Loading level 100%까지 하중을 재하>Loading)하고 마감재 및 활하중 등 철거하중을 고려하여 60%까지 제하(Unloading)한 후, 150%까지 재재하(Reloading)하여 총 11단계에 걸쳐 하중을 재하하여 해석을 수행하였다.

Table 3. Loading level applied on pile foundation

3.4 해석기법의 검증

본 절에서는 00기관에서 수행한 연세대학교 제 4 공학관 시공 현장에서 수행한 말뚝지지 전면 기초에 대한 하중재하시험 사례(Jeong et al, 2017)를 토대로 말뚝기초의 거동을 비교·분석하였으며, 본 연구에 적용한 FEM 해석기법을 검증하였다. 검증 대상 모델링은 앞선 구조물과는 다른 실제 연세대학교 시공 현장의 말뚝지지 전면기초 구조물을 모사하여 현장의 하중-침하 곡선 ($P-\delta$ curve)과 비교·검증(Validation)하였다. 대상 구조물은 실제 기초 구조물로 사용하기 위한 말뚝지지 전면기초이므로 항복 또는 파괴까지 시험을 수행하지 못하였으나, 해당 구조물의 하중-침하 곡선에서의 급격한 변곡점이 생기는 이유는 증축으로 인한 급격한 추가 침하가 발생하는 것이므로 구조물의 파괴 및 항복과는 무관하다. 수직증축시 말뚝기초 보강에 대한 실제 현장시험 누적된 자료가 미비하고 기초보강 구조물에 대한 하중재하시험은 현재 건설기술연구원(KICT)에서 지속적으로 진행중이므로 대상 구조물로 선택하기에 한계가 있었다. 따라서, 검증대상으로

말뚝지지 전면기초 구조물을 사용한 것은 수직증축시 보강 대상 기초구조물의 형식과 같고 말뚝간의 영향을 고려하고 실제 노후화된 공동주택의 기초구조물 역시 말뚝지지 전면기초 형식의 독립기초이기에 검증의 타당성을 확보하였다.

또한 Fig. 4 에 표기한 것과 같이 3.1m × 3.1m의 전면기초에 5본의 항타 말뚝을 사용하여 상부하중을 분담하도록 하였으며 상부하중은 상부구조물 기둥의 단면적을 계산하여 분포하중으로 해당면적에 재하하였다. 지층은 풍화암층이 11.6m로 가장 두껍게 이루어져 있으며 나머지 층은 매립층, 풍화토, 연암으로 분포되어있다. 단면 및 재료 물성치는 일반적인 Fig. 5 에 정리하였다. 이외에 모든 해석전개방법 및 경계조건, 하중재하 방식은 앞선 모델링의 방법과 동일하게 진행하였다.

본 해석의 타당성을 검토하기위하여 현장계측 결과와 FEM 해석기법의 하중-침하 곡선을 비교하였다. 그 결과, Fig. 6 에 나타낸 것과 같이, FEM 해석결과가 현장계측 결과를 적절히 예측할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 4 Top view of model

Fig. 5 Front view of model & material properties

Fig. 6 Load-Settlement curve

4. 하중분담을 영향인자 분석

4.1 강성의 영향

일반적으로 기존말뚝과 신설 보강말뚝은 강성비에 따라 하중분담차이가 크고 기존말뚝의 강성이 신설말뚝보다 클 경우 설계하중을 초과하는 결과를 초래하여 보강말뚝의 강성이 수직증축 리모델링시 중요한 요인 중의 하나이다(Choi et al., 2017).

그러므로 본 해석에서는 수직 강성(Axial Stiffness), 즉 축방향 스프링계수를 직접적으로 사용하지 않고 강성을 결정짓는 매개변수중 하나인 말뚝의 탄성계수(Elastic Modulus, E_p)를 통하여 조절하여 수치해석을 수행하여 보았다. Fig. 7 은 보강말뚝과 기존말뚝의 탄성계수를 변화시켜 강성에 대한 하중분담을 변화를 분석한 결과이다. 보강말뚝의 탄성계수를 기존말뚝의 탄성계수를 3단계로 증가시키며 수치해석을 수행하였다. 이에 대한 해석 결과 신설말뚝의 탄성계수가 기존말뚝의 각각 1/2배, 1배, 2배 일 때, 기존말뚝 4본 중 1본은 약 23.96%, 23.47%, 22.81%로 신설말뚝의 강성이 증가함에 따라 하중분담율이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 신설말뚝의

강성이 증가함에 따라 신설말뚝의 하중분담율은 4.16%, 6.13%, 8.77%로 하중분담율이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 신설말뚝의 탄성계수가 증가함에 따라 증축하중이 강성이 상대적으로 높은 쪽으로 전이되는 것으로 분석된다.

또한, 하중단계가 증가함에 따라 보강말뚝이 분담하는 하중이 증가하는 경향을 보이고 강성을 증가시킬수 있는 면적 혹은 길이를 조절함에 따라 하중분담율 변화가 있을 것이라 예상된다.

Fig. 7 Variable stiffness of reinforcing pile

4.2 말뚝의 선단지지 조건의 영향

기존말뚝과 신설말뚝이 암반에 지지된 선단지지말뚝(End Bearing Pile) 과 사질토 지반에 관입된 마찰말뚝(Friction Pile) 인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 본 해석은 암반관입 여부에 따라 하중분담율의 차이를 확인하고 침하량의 차이를 분석하는 것에 목적이 있다. 선단지지말뚝과 마찰말뚝의 지반조건을 변경하기 위하여 앞선 Fig 3. 의 지반 모델링 조건에서 암반을 제거하고 단일 사질토층으로 모델링하여 해석을 수행하였다.

해석결과는 Fig. 8 에서와 같이 선단지지말뚝에 대해서 기존말뚝 1본은 전체 하중의 23.04%를 분담하고 신설말뚝은 7.84%의 하중을 분담하는 것으로 나타났다. 또한 마찰말뚝의 경우 기존말뚝 1본은 약 23.04%의 하중을 분담하고 신설말뚝은 약 7.83%의 하중을 분담하는 것으로 선단지지 조건에 따라서는 하중분담율은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 하중-침하 곡선을 분석한 결과, 선단지지말뚝의 경우 신설 말뚝 두부에서 약 6.7mm, 보강말뚝 두부에서 9.1mm의 침하량이 발생하였고, 마찰말뚝의 경우 신설 말뚝 두부에서 약 11.1mm, 보강말뚝 두부에서 약 13.6mm의 침하량이 발생하여 마찰말뚝에서의 침하량이 약 1.7배 정도 더 크게 발생하는 것으로 확인 되었다. 이러한 침하량의 차이는 말뚝이 암반에 관입된 경우, 지지층의 강도가 증가하므로 마찰말뚝의 경우에 비해 침하량이 적게 발생하는 것으로 분석된다.

또한, 같은 선단지지조건에서도 기존말뚝과 신설말뚝간의 침하량 차이가 발생하는 것은 전면기초가 분담하는 하중을 고려하지 않고 해석을 수행하기 위하여 지반과 1m 이격하기 때문에 전면기초가 연성거동을 보이며 휨(Bending)이 발생하는 것 때문이라고 분석된다. 또한 신설 보강말뚝이 설치되는 위치에서의 침하량이 크게 발생한 것 역시 침하량 차이에 요인으로 판단된다. 결론적으로 침하량 측면에서는 같은 하중단계를 지지함에도 약 5mm정도의 침하량 차이가 발생하여 선단지지말뚝은 상대적으로 적은 침하량으로도 마찰말뚝에 비하여 많은 하중을 분담할 수 있을 것으로 분석된다.

4.3 기초판 접촉 효과

일반적으로 말뚝지지 전면기초(Piled Raft)의 해석은 말뚝(Piled)과 기초판(Raft) 간의 상호작용에 대한 누적된 정보가 현재까지 미비하고 수치해석시 해석시간이 길어지는 문제로 인하여 기초판의 지지효과를 배제하는 경향이 있었다. 그러나 최근 다양한 해석프로그램들을 통한 말뚝지지 전면기초에 대하여 정확한 해석방법들이 제시되고 있다(Reul et al, 2003; Mandolini, 2005; Cho and Jeong, 2012). 수직증축 시공시 기존말뚝의 하중분담율을 낮추고 보강말뚝의 하중분담율을 증가시키는 것이 시공 가능한 증축하중이 증가할 수 있는 방법 중 하나이다. 기초판, 즉 전면기초가 하중을 분담해줄 수 있다고 고려한다면 기존말뚝의 하중분담은 줄어들고 시공 가능한 증축하중이 크게 증가하여 신설말뚝의 보강량이 감소함으로써 경제적인 시공이 가능하다고 판단된다. 또한 현재까지의 연구결과 역시 말뚝지지 전면기초에서 전면기초의 하중분담율은 일반적으로 30% 가량 분담할 수 있어 전면기초의 하중분담율을 무시할 수 없어(Jeong et al., 2017) 명백히 수직증축시 말뚝기초 보강에 영향을 미칠것이라 판단된다.

본 해석은 기초판과 지반을 1m 이격시켜 말뚝의 지지효과만 고려했던 앞선 해석과는 달리 지반과 접촉한 기초판이 하중분담율을 파악하기 위해 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 기초판 즉, 전면기초의 지지력 효과를 극명하게 확인하기 위하여 기존의 해석조건과는 다르게 철거단계는 고려하지 않았으나 이를 제외한 다른 조건은 Table 2의 값을 동일하게 적용하였다.

해석 결과는 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 기초판의 지지효과를 고려하지 않는 군말뚝 상태에서의 기존말뚝 1본은 전체하중의 약 21.5%의 하중을 지지할 수 있고 신설말뚝은 13.9%까지 하중을 지지할 수 있다고 분석되었다. 그러나 강성 거동을 보이는 기초판을 지반과 부착하여 설계하였을 때 기존말뚝의 하중분담율은 약 14.2%까지 감소하고 보강말뚝은 7.8%까지 감소하는 것으로 나타나 기초판이 전체하중의 35.4%정도의 하중을 분담해줄 수 있는 것으로 나타났다. 또한 이와 유사하게도 연성 기초판을 설계하였을 경우, 기존말뚝의 하중분담율이 13.56%, 신설말뚝 1본이 10.99%의 하중을 분담해줄 수 있는 것으로 분석되었고 기초판이 전체하중의 34.8% 정도의 하중을 분담해줄 수 있는 것으로 나타났다. 분석 결과, 기초판을 설치하는 것은 기존말뚝의 하중분담율을 21%에서 약 13~14%정도까지 크게 낮춰줄 수 있는 것으로 기대된다. 그러나 보강말뚝의 하중분담율은 기초판이 연성거동을 보일시 강성거동에 비해 약 4%정도 하중을 추가적으로 분담하여 줄 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 9 Load Distribution ratio with Raft

4.4 보강말뚝 설치 위치의 영향

수직중축 리모델링 시공시 기존말뚝기초는 최초 설치시기에 최적위치에 시공되었기 때문에 신설말뚝의 설치위치는 제한적이다. 그러나 보강말뚝이 전면기초의 어떠한 위치에 설치되느냐에 따라 하중분담율의 차이가 발생할 것을 예상하고 확인하기 위하여 본 해석을 수행하였다.

앞선 기존의 수치 해석과는 다르게 2×2 형식이 아닌 2×3 말뚝지지 전면기초를 모델링하여 신설말뚝이 설치 가능한 위치를 다양화하여 해석을 수행하였다. 또한 2×3 말뚝지지 전면기초 형태에서 기존말뚝과 동일선상에 신설 보강말뚝을 설치한 경우와 침하량이 크게 발생할 것이라 예상되는 전면기초의 중앙부에 보강말뚝을 설치하였을 경우의 하중분담율 비교를 위하여 수치해석을 실시하였다. 해석 결과, 기존말뚝 6본과 신설 보강말뚝 6본에 작용하는 하중분담율에 대해 Fig. 10 에 정리하였다. 앞선 해석과 동일하게 철거단계를 모사하였고, 지반과 1m 이격하여 말뚝만이 하중을 분담한다고 가정하여 수치해석을 수행하였다. 그러나 앞선 해석에서 기존말뚝에 대해 1본의 하중분담율을 표기한 것과는 달리 이번 해석에서는 전체 기존말뚝과 전체 보강말뚝의 하중분담율을 나타내었다.

해석결과는 기존말뚝과 동일 선상에 신설 보강말뚝을 설치하였을 경우 기존말뚝은 약 60%의 하중을 분담하고, 신설말뚝은 약 40%의 하중을 분담할수 있는 것으로 나타났고, 침하량이 크게 발생할 것이라고 예상한 말뚝기초 중심부에 신설말뚝을 설치한 결과는 기존말뚝 6본이 약 64%, 신설말뚝이 약 36%정도 하중을 분담해줄 수 있는 것으로 분석되었다.

따라서 기존 말뚝기초와 동일 선상에 보강말뚝을 설치하는 것이 말뚝기초의 중심부에 설치하는 것보다 전체 하중의 4% 정도를 더 분담해 줄 수 있는 것으로 나타났다. 이는 변형이 크게 나타나는 중심부에 설치하는 것에 비하여 군말뚝효과(Group effects)의 영향이 적기 때문이라고 고려된다. 또한 전면기초의 강성거동 역시 영향을 미치는 것으로 판단된다. 본 해석결과를 통하여 신설말뚝의 설치위치가 하중분담율에 영향을 미치는 것을 고려하여 신설말뚝 설치 위치를 선정한다면 경제적인 설계가 될 것이라 기대된다.

Fig. 10 Reinforcing pile installation

5. 말뚝기초의 축강성 분석

말뚝의 축강성, 즉 축방향 스프링계수(K_v)는 국토교통부에서 제시한 하중분담원칙의 중요한 요인이며 기존말뚝과 신설말뚝의 강성비를 통해 기초보강시 신설말뚝의 보강량을 결정할 수 있어 시공의 경제성 및 안정성을 결정할 수 있다. 도로교 설계기준 해설(2008)에서는 연직재하 시험을 통한 하중-침하량 곡선으로부터 K_v 를 산정하는 것이 가장 신뢰성이 높다고 제시하였다. 그러나 20~30년 전에 시공된 PC말뚝 강성에 대한 자료가 손·망실되어 말뚝 제원, 구조 도면 등 자료가 부족하고 장기간 사용된 말뚝의 정량적인 성능을 신뢰할 수 없어 기존말뚝의 강성(K_{ve})를 결정하는 것은 현재까지 연구가 진행중이다. 그러므로 K_{ve} 값에 따라 K_{vr} 에 미치는 영향을 역시 판단하기 어렵다. 그리고, 기존말뚝의 성능저하가 신설말뚝의 강성에 어떤 영향을 미치는 지에 대한 연구가 미비하여 본 연구에서는 3차원 근사적 해석기법 Yonsei Piled Raft(YSPR) 프로그램을 사용하여 신설보강말뚝의 강성을 산정하여 보았다. 또한 신설말뚝의 직경을 $\phi 250\text{mm}$, $\phi 350\text{mm}$, $\phi 450\text{mm}$, $\phi 500\text{mm}$ 으로 변화시켜 하중-침하 곡선을 통해 K_{vr} 을 산정하여 보았다. 본 YSPR을 통한 강성 산정 방법은 근사해석 프로그램의 간편함을 유지하면서 간편해석기법 이상의 정밀성과 지반의 물성까지 고려하여 K_{vr} 을 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

5.1 YONSEI PILED-RAFT (YSPR)

본 해석에 사용된 YSPR은 Fig. 11 에서 나타낸 것과 같이 철지반의 비선형성을 고려한 말뚝지지 전면기초의 3차원 해석기법으로서 전면기초는 6개의 자유도를 가진 평면셸(Flat-shell) 요소로, 말뚝은 보-기둥(Beam-Column) 요소로 모델링하여 기존 모델에서 고려하지 못하는 다양한 연성 거동을 모사할 수 있는 장점이 있는 해석 프로그램이다. 말뚝두부 및 지반의 강성은 6×6 강성행렬로 모델링하였으며, 전면기초-말뚝-지반의 상호작용을 비선형 하중전이함수를 사용하여 선형/비선형 거동의 모사가 가능하여 말뚝지지 전면기초에서 말뚝의 침하량 및 축하중 분포를 비교적 정확히 산정하는 것으로 나타났다(Cho et al, 2012). YSPR은 말뚝지지 전면기초의 형식을 가진 기초구조물의 보강단계 해석에 적합하다고 판단되고, 기존 말뚝의 제원 및 물성치가 부족하여도 수직 강성(K_v)만을 사용하여 모델링 할 수 있고 보강말뚝의 하중-침하 곡선을 통한 강성 산정이 가능하여 수직중축시 기초 구조물 보강해석에 적합하다고 판단된다.

Fig. 11 YSPR (Yonsei Piled Raft)
(Cho et al. 2017)

5.2 추정식을 통한 기존말뚝의 강성 산정

말뚝의 강성, 즉 축방향 스프링계수(K_v)는 현장재하시험의 $P-\delta$ 결과로부터 산정되는 말뚝의 K_v 는 말뚝의 길이, 단면적, 시공 방법, 기타 제원 및 지반의 물성값 등이 복합적으로 상호작용한 결과이다. 그러므로 말뚝의 K_v 의 범위 역시 넓고 쉽게 규정지을 순 없으나, 도로교 설계기준해설 (KHS, 2008)에서는 말뚝의 축방향 스프링정수를 산정하는 추정식을 아래와 같이 정의하였다.

$$K_v = a \frac{A_p \times E_p}{L} \quad (1)$$

여기서,

K_v : 말뚝의 축방향 스프링계수 (kN/m)

A_p : 말뚝의 순단면적 (m^2)

E_p : 말뚝의 탄성계수 (kN/m^2)

L, D : 말뚝의 길이, 직경 (m)

$$a = 0.13(L/D) + 0.78 \quad (\text{타입 PC말뚝}) \quad (2)$$

식(1)의 a 는 말뚝의 시공방법에 의하여 정의되며 본 해석에서는 기존말뚝은 식(2)는 도로교 시방서(1996)에 제시된 타입PC말뚝 모델 등 다양한 모델을 사용하여 K_{ve} 값의 범위를 결정하였다.

5.3 기존말뚝의 축강성(K_{ve})을 통한 보강말뚝의 축강성(K_{vr}) 산정

말뚝의 강성, 즉 축방향 스프링계수(K_v)는 현장재하시험의 $P-\delta$ 곡선으로부터 도출하는 것이 가장 신뢰성이 높다. 그러므로 4장에서 사용한 기초구조물을 모델로 사용하여 기존말뚝의 위치에는 강성 추정식을 사용한 K_{ve} 값을 치환하고 보강말뚝은 동일하게 모델링하여 K_{vr} 값을 산정하였다. 해석과정을 간단히 도식화하여 Fig. 12 에 정리하였다. 앞선 3차원 유한요소해석을 통한 하중 분담율 거동분석에서는 기존말뚝에 대해서도 직경(D), 길이(L), 및 재료의 물성 값 역시 모두 사용하여 모델링하였으나 본 해석은 기존말뚝의 축강성(K_{ve})과 지반 물성값으로 모델링이 가능해 간편하고 신설말뚝은 직경(D), 길이(L), 제원 등을 조절해가며 모델링 할 수 있어 기존말뚝과 보강말뚝의 강성비를 산정할 수 있어 최적 설계를 유도할 수 있다. 또한 본 해석은 기존말뚝의 정량적인 성능저하를 고려하여 강성 추정식을 통한 최대 K_{ve} 값을 2/3배, 1/2배로 감소시켜가며 기존말뚝 강성 감소가 신설 보강말뚝의 강성에 미치는 영향을 분석하였다.

5.4 강성 산정 및 해석 결과

5.2절에서 소개한 축방향 스프링 정수 추정식을 토대로 앞선 모델링의 기존말뚝 축강성(K_{ve})을 산정한 결과는 약 300,000kN/m 이다. 도로교 시방서(1996), 도로교 설계기준(2008)에 제시된 여러 시공방법에 따른 a 로 K_{ve} 의 범위를 결정한 결과 약 160,000kN/m ~ 320,000kN/m 정도로 산정 되었다. 그러므로 해당 강성을 150,000kN/m, 200,000kN/m, 300,000kN/m 세가지로 나누어 YSPR의 K_{ve} 입력값으로 사용하였다. 또한 기존말뚝을 축강성(K_{ve})으로 치환하여 모델링하고, 신설말뚝은 각 지름을 변화시켜 가며($\phi 250\text{mm}$, $\phi 350\text{mm}$, $\phi 450\text{mm}$, $\phi 500\text{mm}$) K_{vr} 을 산정하였다.

신설 보강 말뚝의 지름이 $\phi 250\text{mm}$, $\phi 500\text{mm}$ 일 때, 기존말뚝의 K_{ve} 값을 150,000kN/m, 200,000kN/m, 300,000kN/m로 변화시키며 해석하여 하중-침하 곡선을 도출한 결과는 아래의 Fig. 13 과 같다. 보강말뚝의 지름에 따라서 ‘○’, ‘▲’, ‘□’의 기호를 통하여 구분하였고, 실선과 점선을 통하여 강성별로 구분하였다. 해석 결과, 신설말뚝의 지름이 증가하면서 신설말뚝이 받는 하중과 침하량 모두 증가하는 경향을 보인다. $\phi 350\text{mm}$, $\phi 450\text{mm}$ 의 경우에는 Fig. 13 의 곡선 사이에 위치하였다.

해당 하중-침하 곡선으로 침하량에 따른 보강말뚝의 축강성(K_{vr})을 산정한 결과는 Fig. 14 와 같다. 보강말뚝의 지름이 증가하면서 K_{vr} 값 역시 증가하는 경향을 보이며 매우 작은 변형률을 갖는 경우에 약 최소 210,000kN/m ~ 최대 280,000 kN/m의 강성을 갖는 것으로 나타났다.

또한, K_{ve} 값이 150,000kN/m, 200,000kN/m, 300,000kN/m 일 때, 즉 기존말뚝의 축강성이 높아질수록 보강말뚝의 지지력은 더 많이 받아 줄 수 있으므로, 보강말뚝의 침하량은 작아지며 그 결과, K_{vr} 은 증가하는 경향을 보이게 된다.

실제 현장에서는 K_{vr} 값을 말뚝의 제원 및 시공방법에 따라 결정하여 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구결과, K_{vr} 은 K_{ve} 의 영향을 받는다. 그러므로 기존말뚝을 고려한 K_{ve} 을 도출하기 위해서는 본 YSPR을 통한 강성 산정 방법을 사용하는 것이 기초보강 설계시에 유용할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 방법은 기존말뚝의 길이, 직경 및 제원에 대한 자료가 없어도 K_{ve} 를 이용해 신설 보강말뚝이 설치되기 전 보강말뚝이 어느 정도의 강성을 발현할 수 있을지에 대해 제

시 할 수 있다. 또한 시공 당시 보강말뚝의 목표 강성에 맞게 해석을 수행할 수 있어 보강말뚝의 제원을 상대적으로 간편하게 결정할 수 있다. 또한 해당 해석 과정을 통한 강성으로 기존말뚝과 신설보강말뚝의 강성비를 결정하고, 적절한 하중분담율을 산정하여 경제적인 최적 설계가 가능할 것으로 예상되어 수직증축시 리모델링 기초 보강 연구에 기틀이 될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 13 Load-Settlement curve of reinforcing pile by YSPR

Fig. 14 K_{vr} -settlement curve of reinforcing pile

5. 결론

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통하여 수직증축시 말뚝기초 구조물의 하중분담율을 분석하여 보았다. 기존말뚝과 보강말뚝의 현장 시공 상황을 최대한 모사하기 위하여 국토교통부에서 고시한 시공단계에 따른 해석방법을 통하여 해석을 수행하였고, 모델링 기법은 실제 현장 재하시험 결과와의 비교를 통해 검증하였으며 검증된 해석기법을 바탕으로 하중분담율을 분석하여 보았다. 또한 기존말뚝의 강성을 사용하여 보강말뚝의 강성을 산정하는 방법을 제시하여 분석하였다. 본 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수직증축시 기존말뚝과 신설 보강말뚝의 하중분담율에 미치는 영향을 1) 강성 2) 선단지지 조건 3) 기초판의 접촉효과 4) 보강말뚝의 설치 위치에 따라 3차원 수치해석을 수행한 결과, 탄성계수가 증가할수록 하중분담율은 기존말뚝은 감소, 보강말뚝은 증가하는 경향이 나타났다.
- (2) 이외에도 선단지지조건에 따른 말뚝기초의 하중분담율은 큰 차이가 없었다. 그러나 동일한 하중에 대해서 마찰말뚝의 침하량이 1.7배 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 기존의 수직증축시 고려하지않는 기초판 측, 전면기초의 접촉에 따른 지지력 역시 전체하중의 30% 가량 지지할 수 있는 경향을 보였다. 그리고 보강말뚝이 기존말뚝기초에 설치되는 위치에 따라서 하중분담율이 변하는 경향을 보여 신설말뚝 보강시 위치 선정을 고려해야 하는 것으로 나타났다.
- (3) 앞선 3D 유한요소해석기법으로 하중분담율 거동을 확인한 결과를 바탕으로 보강말뚝의 축강성(K_{vr})을 산정하는 방법을 제시하였다. 추정식을 통해 기존말뚝의 축강성(K_{ve})을 산정하고, 3차원 근사적 해석기법(YSPR)을 사용하여 K_{ve} 변화시켜 해석을 수행, 보강말뚝의 축

강성(K_{vr})에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 보강말뚝의 직경을 변화시켜 K_{vr} 을 도출하여 실제 시험을 수행하지 않더라도 신설말뚝 보강시 말뚝 제원에 따른 강성(K_{vr})을 예측할 수 있는 방법론을 제시하였다.

현재 수직증축시 말뚝 기초는 장기간 사용된 기존 말뚝의 허용지지력 절대적인 수치로 결정하고, 허용지지력을 초과하지 않도록 유도하는 지지력 측면의 보강설계(Capacity-based design)를 선호하는 추세이다. 그러나 지지력 측면의 설계는 기존말뚝의 성능에 대한 불확실성을 고려하지 못해 신설말뚝의 보강량 역시 크게 차이가 나타날 우려가 있다. 그러므로 지지력 측면의 보강 설계보단 기존말뚝의 불확실한 성능을 고려하기 위해서는 침하량 측면의 보강설계(Settlement-based design)가 더욱 적합할 것으로 판단되므로, 침하를 고려하여 산정하는 축강성 연구에 본 연구가 기틀이 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2018R1A6A1A08025348) 그리고 국토교통부/국토교통과학기술진흥원을 통하여 지원된 건설기술연구사업 ‘케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 가설공법 개발(과제 번호:19SCIP_B119960-04)’에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Cho, J.Y. and Jeong, S.S. (2012), "Development of Three-dimensional Approximate analysis method for piled raft foundation", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 4, 2012. pp. 67-78.
2. 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", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 33, No. 12, 2017. pp. 81-92.
3. 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", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 33, No. 8, 2017. pp. 41-52.
4. Cho, S.H., Choi, K.S., Cho, S.D., You, Y.C. and Choi, C.H., (2014), "Experimental study for load distribution characteristic of existing and reinforcing piles", *J. of the Korean Geo-environmental Society*, Vol. 15, No. 12, 2014. pp. 87-95.

5. 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", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 1, 2018. pp. 47-57.
6. Cho, J.Y. (2013), "Integrated design methods for piled raft foundations considering soil-structure interaction", *ph.D. thesis, Yonsei University*, Seoul, Republic of Korea
7. Lebeau, J.S. (2008), "FE-analysis of piled and piled raft foundation", *Graz University of Technology. Project Report*.
8. Tschuchnigg, F. and Schweiger, H. F. (2013), "Comparison of Deep Foundation Systems Using 3D Finite Element Analysis Employing Different Modeling Techniques", *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*. Vol. 44, No. 3, 2013. pp. 40-46.
9. Burland, J. B., Broms, B. B., and De Mello, V.F.B. (1977), "Behaviour of Foundations and Structures", *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo*. Vol. 2, 1977. pp. 495-549.
10. Randolph, M. F. (1994), "Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts", *Proceedings of 13th ICSMFE, New Delhi, India*. Vol. 5, 1994. pp. 61-82.
11. Katzenbach, R., Arslan, U., and Moormann, C. (2000), "Piled Raft Foundations Projects in Germany", Design applications of raft foundations, *Hemsley, J. A. Editor, Thomas Telford*, pp.323-392.
12. Poulos, H. G. (2001), "Piled Raft Foundations: Design and Applications", *Geotechnique*, 51, pp.95-113.
13. Mandolini, A., Russo, G., and Viggiani, C. (2005), "Piled Foundations: Experimental Investigations, Analysis and Design", *State-of-the-Art Rep. Proc., 16th ICSMGE, Osaka, Japan*, Vol.1, pp.177-213.
14. Reul, O. and Randolph, M.F. (2003), "Piled rafts in overconsolidated clay-Comparison of in-situ measurements and numerical analyses," *Geotechnique*, Vol. 53, No. 3, pp. 301-315.
15. KICT (2013), "Development of pre-loading method for reinforcement piles of apartment remodeling (I)", *KICT2013-260, KICT*, pp. 23~26.
16. MOLIT (2013), *Housing Act, Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport*, p.2.
17. MOLIT (2014), *Structural Standards for Condominium Remodeling with Vertical Extension, Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport*.
18. Das, B. M. (2015), *Principles of Foundation Engineering*, Cengage learning.
19. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nded, John Wiley and Sons, New York.
20. Plaxis, B. V. (2005), *PLAXIS User's manual*.
21. Cho, C.H. (2010), "Piling Engineering Practice", *E&G book*.
22. KHS (2008), *Korea Highway Bridge Design Standard, Explanation*, pp.885-887.

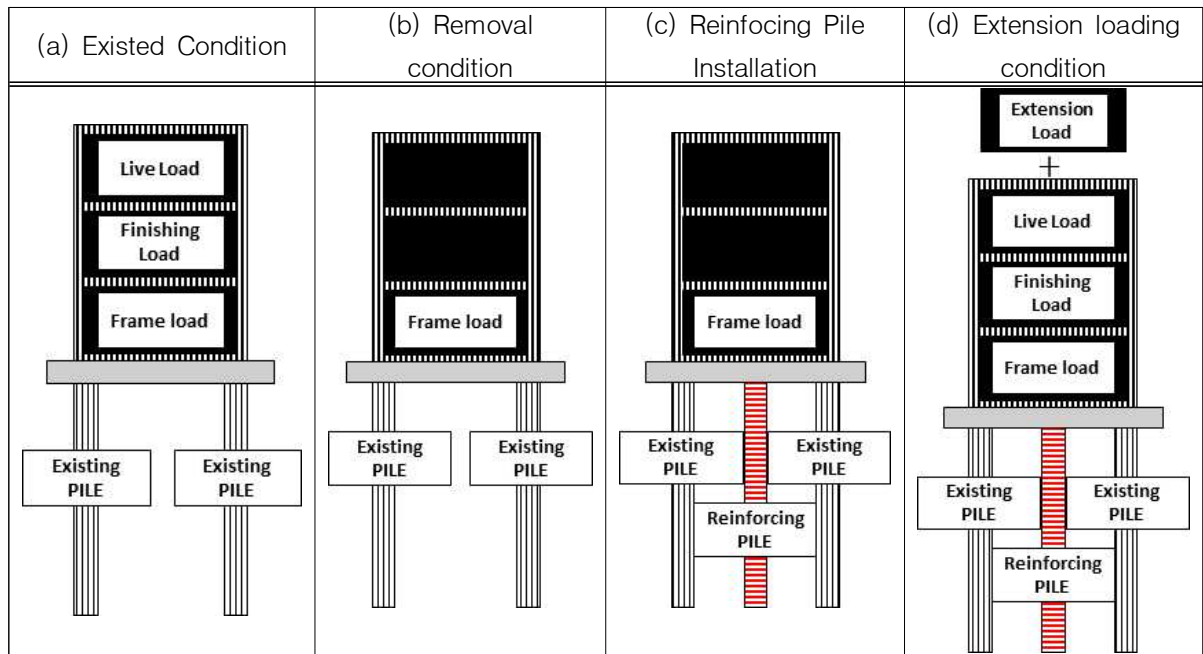


Fig. 1 Load case along the construction stages of remodeling process

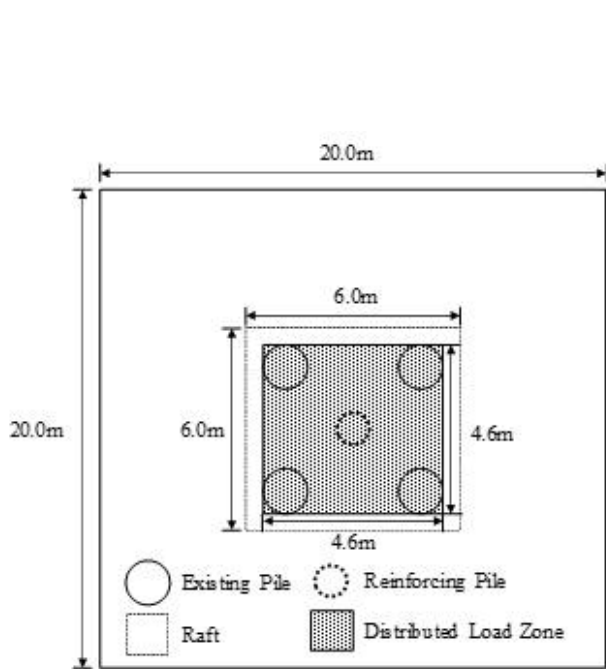


Fig. 2 Top View of model

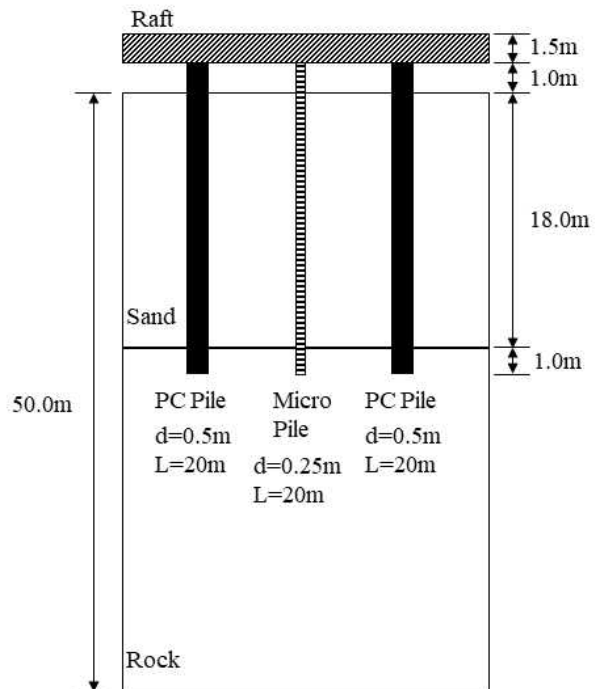


Fig. 3 Front View of model

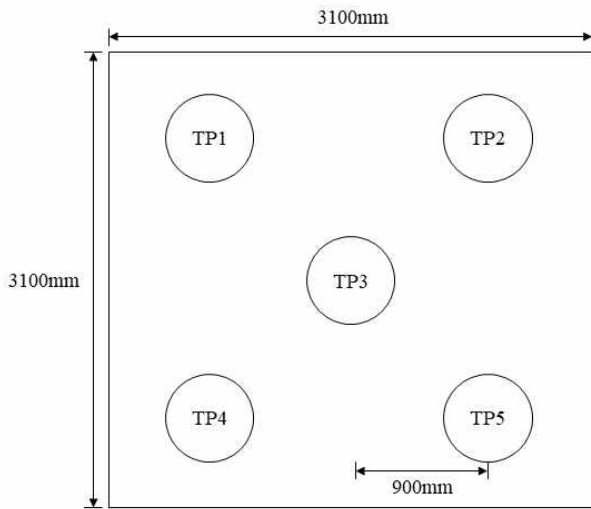


Fig. 4 Top View of model

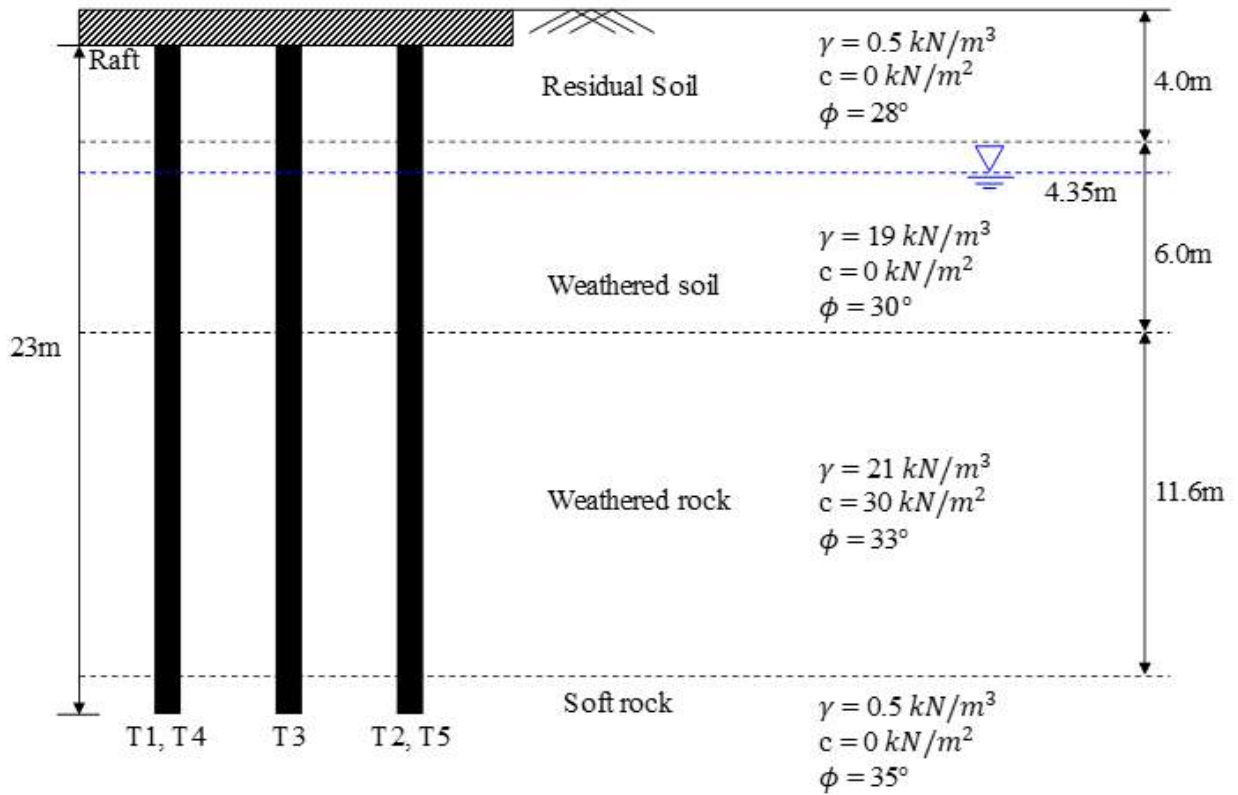


Fig. 5 Front View of model & material properties

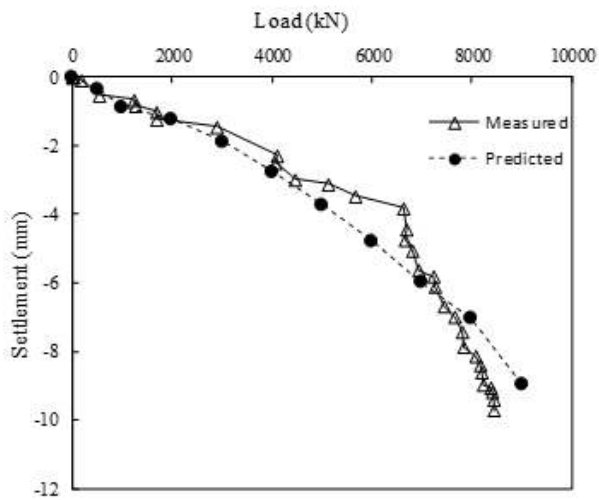
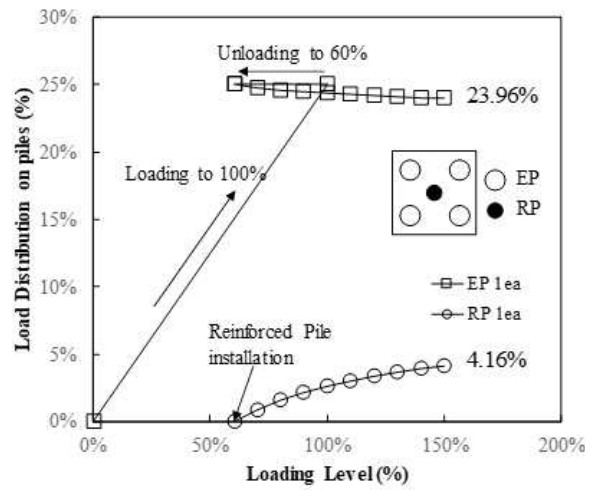
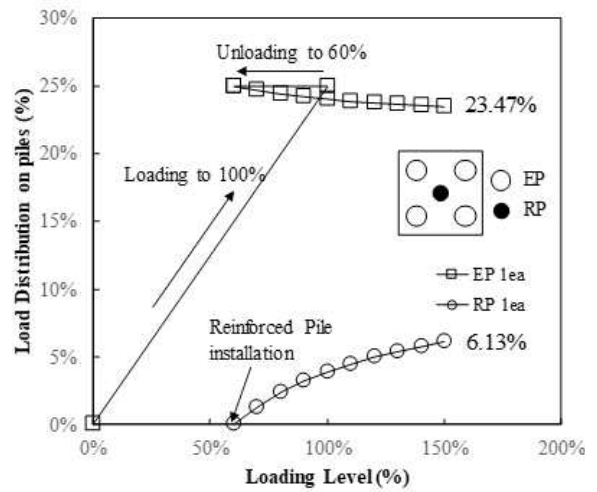


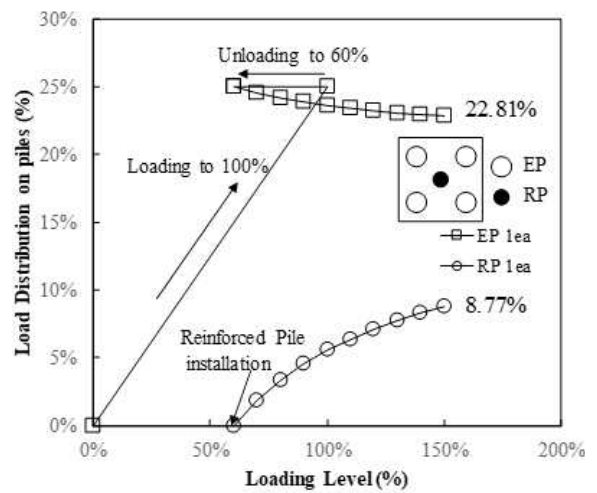
Fig. 6 Load-Settlement curve



(a) $E_{RP} = 0.5 E_{EP}$

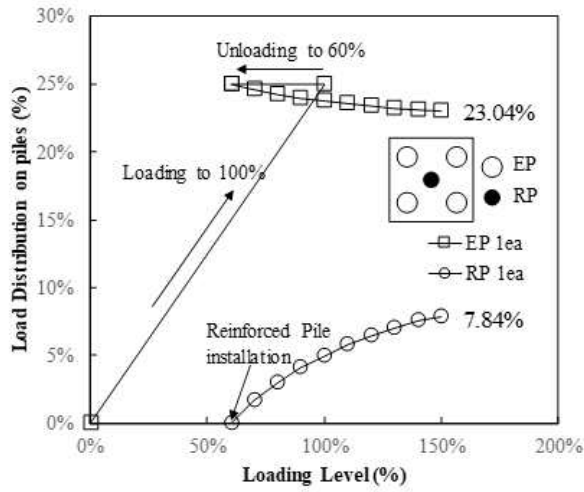


(b) $E_{RP} = 1.0 E_{EP}$

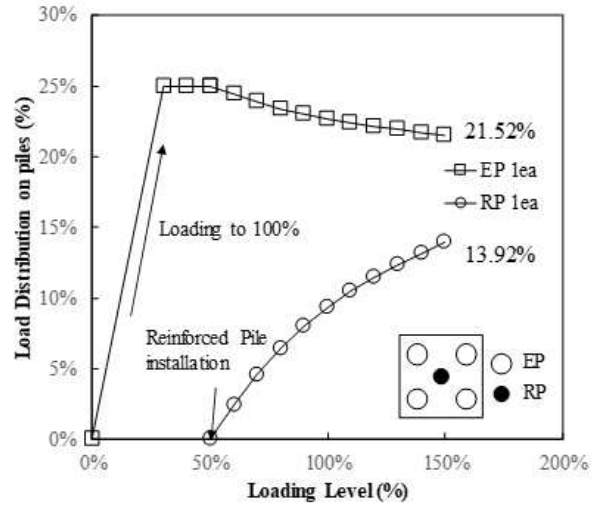


(c) $E_{RP} = 2.0 E_{EP}$

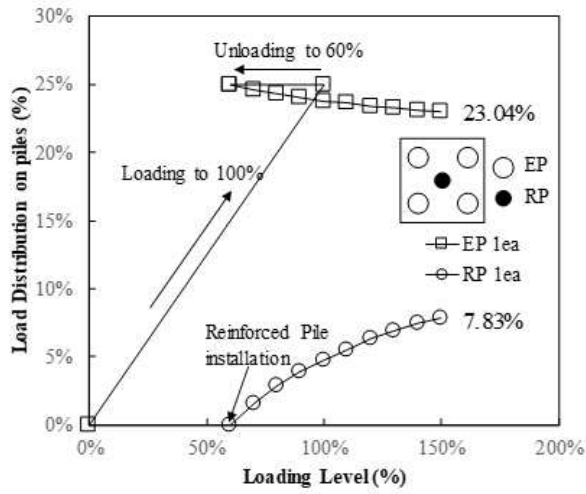
Fig. 7 Variable stiffness of reinforcing pile



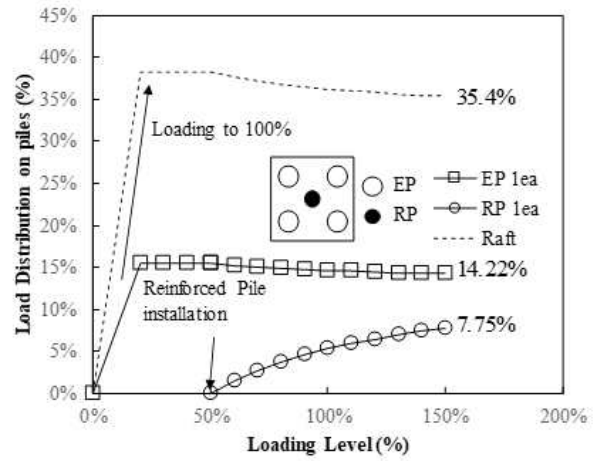
(a) End bearing Pile



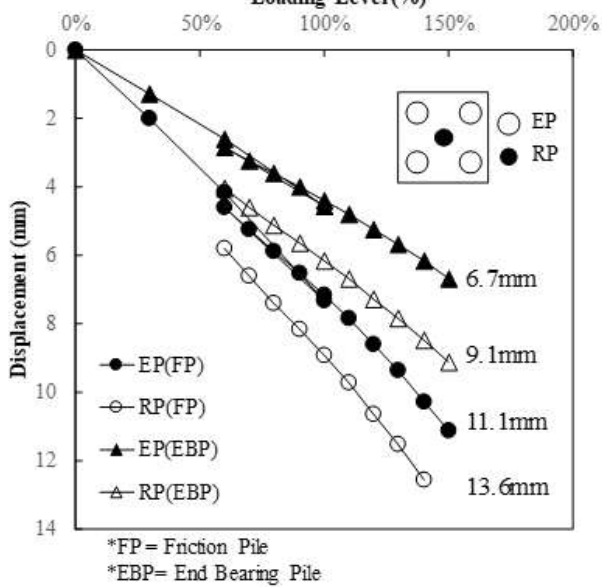
(a) No raft



(b) Friction Pile

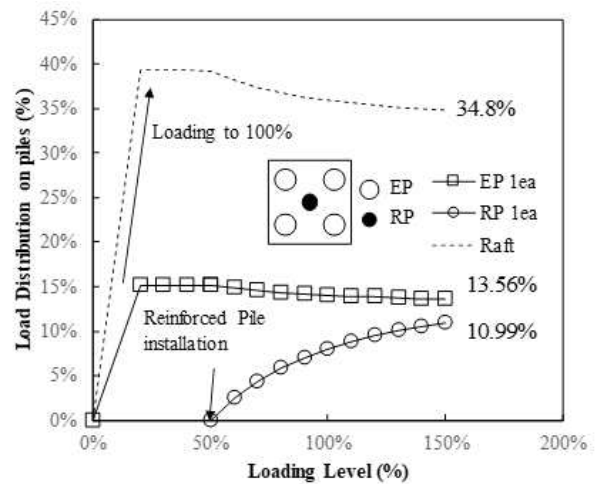


(b) Rigid raft



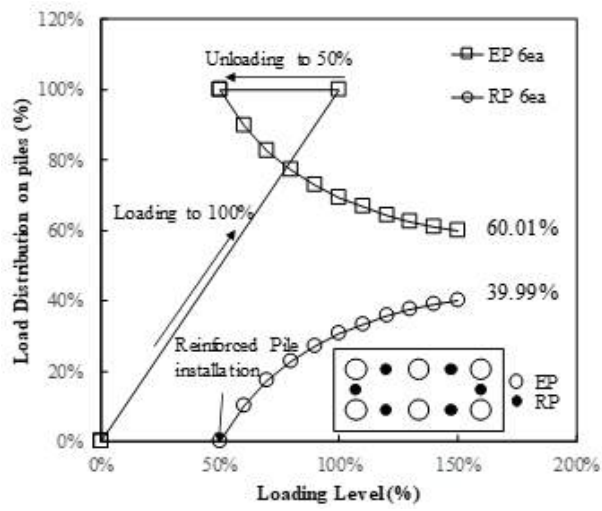
(c) Load-Settlement curve

Fig. 8 Pile end-bearing condition

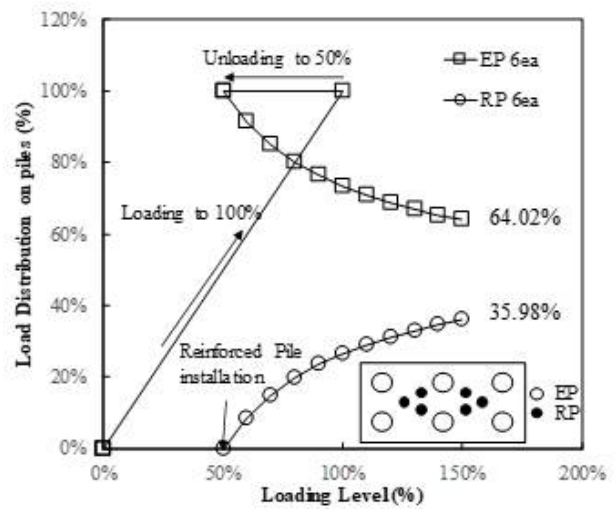


(c) Flexible raft

Fig. 9 Load Distribution ratio with Raft



(a) Installation at side



(b) Installation at center

Fig. 10. Reinforcing pile installation

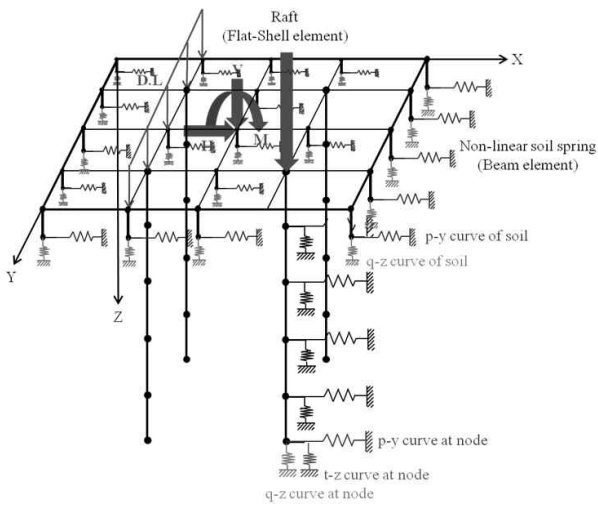


Fig. 11 YSPR (Yonsei Piled Raft)
(Jeong. 2015)

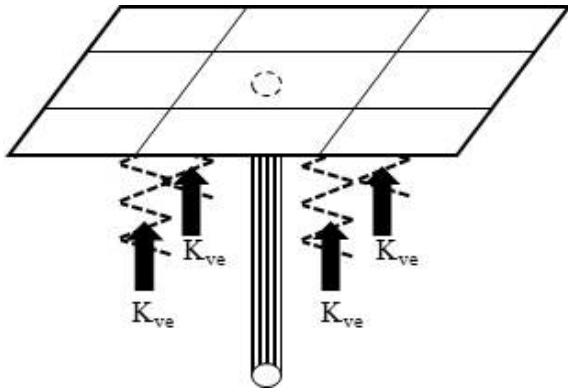


Fig. 12 Axial stiffness calculation

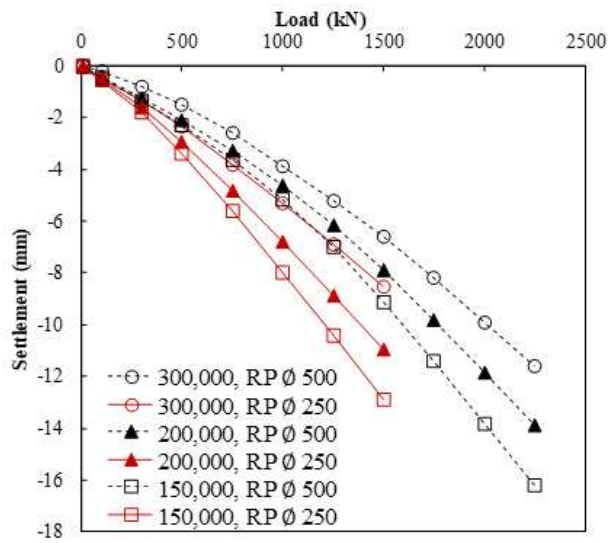
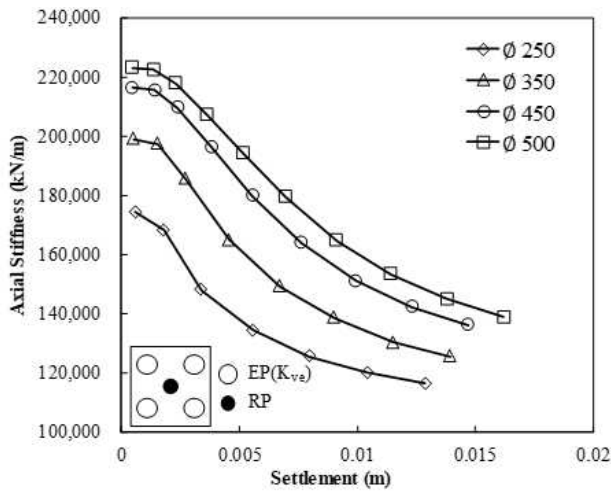
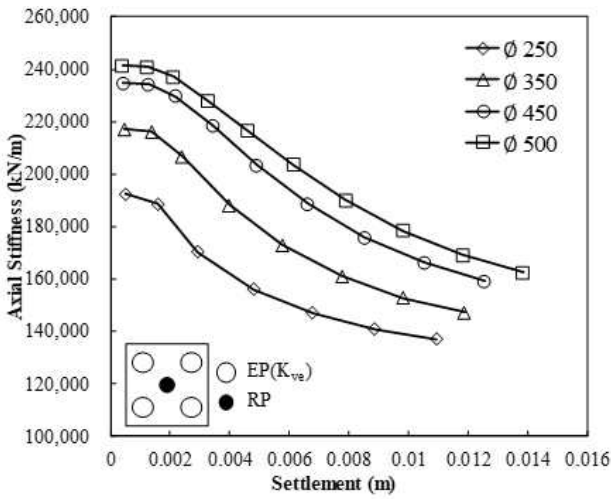


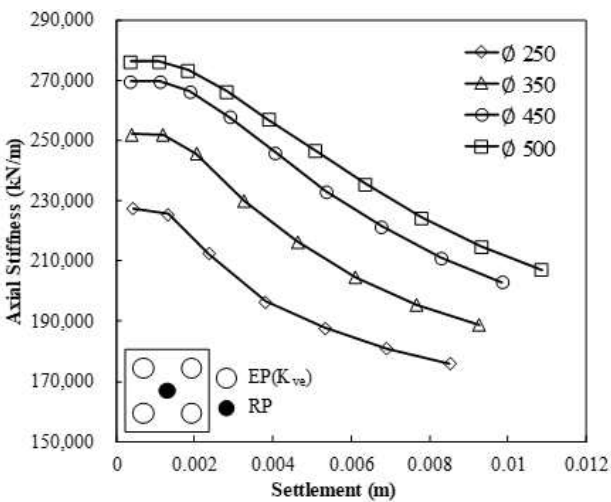
Fig. 13 Load-Settlement curves of different size of reinforcing piles



(a) $K_{ve} = 150,000$ kN/m



(b) $K_{ve} = 200,000$ kN/m



(c) $K_{ve} = 300,000$ kN/m

Fig. 14 K_{vr} -settlement curves depending on different K_{ve} values

Table 1. Physical properties of soil

	Depth (m)	Material Model	Unit weight (kN/m ³)	Friction angle (°)	cohesion (kN/m ²)	Young's Modulus (kPa)	Poisson's ratio	Interface
Sand	0 - 19	M.C	19	35	15	5.0*10 ⁴	0.32	0.67
Weathered rock	19 - 50	M.C	21	39	34	3.0*10 ⁵	0.3	1.0

Table 2. Properties of piles and raft

Description	Existing Piles (PC pile)	Reinforcing Piles (Micro pile)	Raft
Length (m)	20	20	6m x 6m x 1.5m
Diameter (mm)	500	250	
Material Model	Linear Elastic	Linear Elastic	Linear
Material Type	Non-porous	Non-porous	-
Unit weight (kN/m ³)	25	27	25
Young's Modulus (kPa)	2.4*10 ⁷	3.7*10 ⁷	3.0*10 ⁷
Poisson's ratio	0.2	0.2	0.2

Table 3. Loading level applied on pile foundation

Loading Level	Load (kN)
60%	2280
70%	2660
80%	3040
90%	3420
100%	3800
110%	4180
120%	4560
130%	4940
140%	5320
150%	5700

