

기존말뚝과 보강말뚝의 하중분담 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study for Load Distribution Characteristics of Existing and Reinforcing Piles

조성훈¹⁾ · 최기선²⁾ · 조삼덕³⁾ · 유영찬²⁾ · 최창호[†]

Seonghun Cho · Kisun Choi · Samdeok Cho · Youngchan You · Changho Choi

Received: September 2nd, 2014; Revised: September 23rd, 2014; Accepted: October 21st, 2014

ABSTRACT : Recently, there are increasing technical needs for foundation retrofit project such as vertical extension of apartment building. This paper focuses on the load distribution characteristics of existing and reinforcing piles when reinforcing pile is installed to the existing foundation. Allowable bearing load was initially applied on the foundation slab supported with four existing piles and then, one reinforcing pile was installed at the center of foundation slab and additional load was applied. The experimental results showed the Load Distribution Ratio (LDR) between existing and reinforcing piles converged after the applied load exceeded allowable bearing capacity of all piles. Laboratory tests were also performed for the cases of 60 %, 80 %, 100 % unloading level of allowable bearing load. After unloading step, one reinforcing pile was installed at the center of foundation slab and additional load was applied. The results showed that reloading load level at which LDR between existing and reinforcing piles converged decreased as the amount of unloading load increased.

Keywords : Reinforcing pile, Foundation retrofit, Vertical extension, Load distribution ratio

요지 : 최근 공동주택 수직증축 리모델링 사업 등 기초구조물을 보강하기 위한 기술적 수요가 증가하고 있다. 본 논문에서는 기존 구조물을 지지하는 기존말뚝에 보강말뚝을 추가로 설치할 경우 추가하중에 의한 기존말뚝과 보강말뚝의 하중분담 특성을 연구하였다. 정사각형의 기초판에 설치된 기존말뚝 4본에 허용하중을 재하한 후, 기초판 중앙에 보강말뚝 1본을 추가로 설치하고 추가하중을 재하하였다. 실험결과로부터 기존말뚝에 재하되는 하중이 허용지지력을 초과한 이후에 기존말뚝과 보강말뚝이 하중을 균등하게 분담하는 것으로 분석되었다. 기존말뚝에 허용하중 재하 후, 허용하중 대비 60 %, 80 %, 100 %까지 제하(unloading)하고, 보강말뚝을 설치한 후 추가하중을 재재하(reloading)하는 실험을 수행하였다. 연구 결과 제하 하중의 양이 증가함에 따라 재재하 시 기존말뚝과 보강말뚝이 하중을 균등하게 분담하는 재재하 하중이 감소하는 경향을 파악하였다.

주요어 : 보강말뚝, 기초보강, 수직증축, 하중 분담률

1. 서론

건축 구조물의 내진보강 또는 증축을 할 경우 추가하중을 지지하기 위한 보강말뚝 설치가 필요하다. 최근 법안이 통과된 공동주택 수직증축형 리모델링이 대표적인 건축물 증축의 경우이다(국토교통부, 2013). 공동주택 수직증축은 추가 층수 시공으로 추가하중을 발생시키며 기존말뚝에 더하여 보강말뚝의 설치가 필요하다. 일반 구조물을 신축하는 경우에는 지반에 말뚝기초를 시공한 후 구조물을 시공한다. 하지만 공동주택 수직증축 시공은 ‘마감재 철거→말뚝보강→증축 및 마감’ 순으로 진행된다.

수직증축을 포함하는 공동주택 리모델링 시공과정은 Table

1에 제시되었다. 리모델링 시공을 시작하기 전인 기존상태의 구조물은 골조하중, 마감하중, 활하중에 의해 설계하중의 100 % 하중이 하부에 설치된 말뚝기초에 재하된다. 이후 세대 평면변경 등을 위해 마감하중 및 활하중은 제거되어 구조물에는 골조하중(Frame load)만 작용한다. 공동주택 구조물의 골조하중은 설계하중 대비 56~58 %로 알려져 있다(한국건설기술연구원, 2013). 보강말뚝은 기존말뚝이 골조하중을 지지하고 있는 상태에서 시공된다. 보강말뚝은 철거 이후 단계인 기초보강 단계에서 시공되어 기존말뚝이 설치되어 있는 기초판에 연결되므로, 골조하중을 기존말뚝과 하중 분담률 판단에 대한 기술적 근거가 부족하다. 마지막 증축단계에서는 기존의 골조하중, 마감하중, 활하중을 포함하

1) Department of Geotechnical & Geo-Space Engineering, Korea University of Science & Technology

2) Advanced Building Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

3) Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Geotechnical & Geo-Space Engineering, Korea University of Science & Technology (Corresponding Author : chchoi@kict.re.kr)

Table 1. Loading condition along construction stage of vertical extension for apartment remodeling

Construction stage	Existing condition	Removal condition (FML, LL)	Foundation reinforcement	Retrofitting of floor and finish
Load condition	FL+ FML+ LL	FL	FL	FL + FML + LL
Load level with respect to design load	100 %	56 ~ 58 %	56 ~ 58 %	More than 100 %
Schematic diagram				
Installed piles	Existing piles	Existing piles	Existing and reinforcing piles	Existing and reinforcing piles

where, FL = Frame load, FML = Finishing material load, LL = Live load

여 증축하중이 추가되며, 기존말뚝은 기존구조물의 골조하중, 마감하중, 활하중, 증축하중을 부담한다. 반면에 보강말뚝은 기존구조물의 골조하중을 제외한 마감하중, 활하중, 증축하중을 부담하게 된다.

일반적으로 P-δ(하중-침하) 거동으로 대표되는 말뚝의 거동은 비선형적이며, 기존의 골조하중을 지지하는 기존말뚝은 침하가 적정수준으로 진행되어 안정화된 상태이다. 반면에 철거단계에서 추가된 보강말뚝은 마감하중, 활하중, 증축하중에 의해 새로운 P-δ 거동을 시작하므로, 기존말뚝과 보강말뚝이 부담하는 하중 비율이 다를 것으로 판단된다. 또한 리모델링 시공단계에서 기존말뚝은 철거 단계에 의하여 활하중과 마감하중이 제하(Unloading) 되고, 증축 시 발생하는 하중에 의해 재재하(Reloading)를 경험하게 된다. 기존말뚝은 철거된 하중만큼 제하 되어 기존의 하중-침하 거동과 다르며, 보강말뚝이 신설된 상황에서의 하중-침하 거동은 구조물 신축 시의 하중-침하 거동과 다를 것으로 예상된다. 보강말뚝은 활하중과 마감하중이 제거된 이후에 설치되므로, 기존 말뚝에 발생하는 제하(Unloading) 하중의 정도에 따라 재재하(Reloading) 단계에서 보강말뚝으로 전이되는 하중 분담률이 변화할 것으로 예상되며, 제하하중 변화에 따라 재재하 시 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담 특성에 관한 연구가 필요하다.

Shin(2011)은 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담률을 말뚝의 강성비(k)에 기반하여 산정할 수 있다고 제시하였으

나, 지반특성에 따른 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담률에 대한 연구 필요성을 지적하였다. 본 연구에서는 소형 토조 내에 기존말뚝과 보강말뚝을 설치하고 기존하중과 증축하중에 의한 각 말뚝의 하중분담 특성을 분석하였다. 기존말뚝과 보강말뚝은 동일한 기초판에 연결되었으며, 기초판의 강성은 무한 강성으로 가정하여 전체 말뚝의 침하량이 동일하도록 실험을 수행하였다. 실험은 실제 수직증축 리모델링 시공단계 상황을 모사하였으며, 이에 따른 기존말뚝과 보강말뚝의 하중분담 특성을 분석하였다.

2. 실내 실험 장치 및 방법

기존말뚝과 보강말뚝의 P-δ(하중-침하) 거동을 분석하기 위하여, 주문진 표준사로 구성된 지반에 모형말뚝(알루미늄봉)을 설치하여 모형말뚝 두부에 하중 또는 변위를 재하하는 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 4개의 모형실험을 수행하였다(Table 2 참조). 단말뚝 실험(ST: Single Test)은 군말뚝 실험에 앞서 단일말뚝의 지지력 산정을 위하여 수행하였다. 군말뚝 실험에서는 세 가지 조건으로 실험을 수행하였으며, 보강말뚝과 기존말뚝의 하중 분담률을 분석하기 위한 ‘하중 분담률 실험(LDR100; Load Distribution Ratio)’, 실제 수직증축 리모델링 단계를 모사한 ‘리모델링 시공단계 모사실험(LDR80, LDR60)’이다. 단말뚝 실험은 제작된 실험

장치로 변위를 제어하여 말뚝의 극한지지력을 산정한다. 하중 분담률 실험(LDR100)은 기존말뚝에 하중을 재하한 후, 보강말뚝을 추가하여 기존말뚝을 포함한 전체 말뚝에 하중을 추가적으로 재하한다. 리모델링 시공단계 모사실험은 기존말뚝에 허용하중을 재하한 후 하중을 제하(Unloading)하고, 보강말뚝을 추가하여 기존말뚝을 포함한 전체 말뚝에 하중을 재재하(Reloading)하였다. 제하된 하중정도에 따라 LDR80, LDR60 실험을 수행하였는데, 여기서 LDR80은 4개 말뚝의 허용하중(Q_{all})을 재하한 후 하중수준을 Q_{all} 의 80%까지 제하(Unloading)하고 다시 재재하(Reloading)하였고, LDR60은 제하(Unloading)를 Q_{all} 의 60%로 제어하여 실험을 수행하였다.

2.1 실험 장치

2.1.1 모형말뚝 및 토조

모형말뚝은 탄성계수 69 GPa, 단위중량 26.48 kN/m³(2.7

g/cm³)인 알루미늄 환봉으로 지름(D) 20 mm, 매입 길이(L) 300 mm로 제작하였다. 단말뚝은 토조 바닥으로부터 40 mm (2D)로 이격하였고, 군말뚝인 경우에는 60 mm(3D)로 이격하여 시료를 조성하였다. 모형말뚝이나 실제 크기 말뚝의 파괴양상을 관찰한 바에 의하면 조밀한 모래에 관입된 말뚝 선단 아래에는 대략 $45^\circ + \phi/2$ 정도의 썩기가 관측되는데, 본 실험에서의 침하량을 고려해도 토조 바닥으로부터의 영향은 없는 것으로 판단된다(Meyerhof, 1951). 토조의 내경은 380 mm이며, 말뚝으로부터 토조 경계까지 거리는 4D 이상이다.

2.1.2 지지력 평가 실험 장치

단말뚝의 지지력을 평가하기 위해 Fig. 1(a)와 같은 하중재하 장치를 제작하였다. 아크릴로 구성된 하중재하 장치는 내부에 나사산을 구성하였다. 상부에 렌치를 회전하여 내부에 형성된 나사산을 통해 말뚝 두부에 변위를 가할 수 있다. 렌치에 의해 회전되는 내부볼트는 1회전당 1 mm씩 관입된다. 가

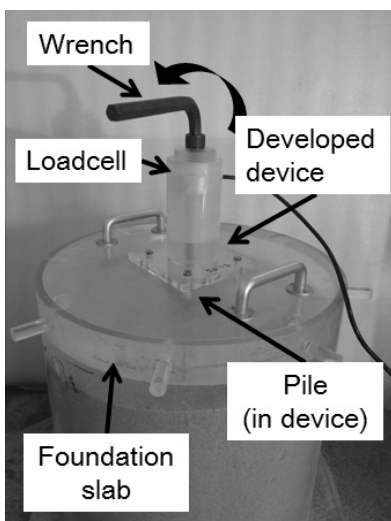
Table 2. Experimental tests of model piles

Test	Purpose	Load application method			
ST	Single pile load test to obtain bearing capacity of pile	Displacement on the top of pile head			
LDR100	Group pile tests to obtain load distribution characteristics of existing and reinforcing piles. In here the number 100, 80, and 60 represents load level upon unloading with respect to total allowable bearing capacity of group piles	① Loading Q_{all} on E	-	③ Installation of R	④ Reloading up to Q_{all}^* to A
LDR80		① Loading Q_{all} on E	② Unloading up to 80 % of Q_{all} on E	③ Installation of R	④ Reloading up to Q_{all}^* to A
LDR60		① Loading Q_{all} on E	② Unloading up to 60 % of Q_{all} on E	③ Installation of R	④ Reloading up to Q_{all}^* to A

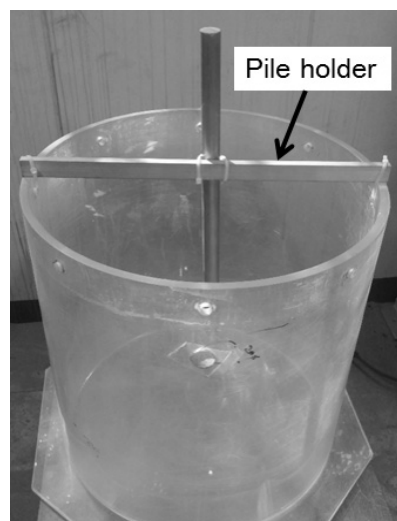
E: four existing piles, R: one reinforcing pile, A: all piles (E+A)

Q_{all} : total allowable load of four existing piles

Q_{all}^* : total allowable load of four existing and one reinforcing piles



(a) Load application device for single pile test



(b) Installation of single pile



(c) Preparation of ground by air-pluviation

Fig. 1. Test setup of single pile experiment

해진 변위는 로드셀(Loadcell)을 지나 말뚝머리에 하중을 가하여 말뚝을 관입시킨다. 내부 나사산과 로드셀 사이에는 0.5 mm의 유격이 존재한다. 이 유격은 로드셀과 내부 나사산과의 마찰을 감소시켜 내부볼트에 관입에 따라 말뚝 두부에 변위를 가할 수 있으며, 로드셀이 말뚝 두부 중앙에 하중을 재하할 수 있도록 한다. 로드셀은 CAS사의 MNC-50L 모델을 사용하였으며, 최대 계측하중은 490 N(50 kgf)이고 자중은 2.9 N(0.3 kgf)이다. 단말뚝 지지력 평가 실험에서는 로드셀 자중에 의한 영향을 무시하였다. Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)는 각각 모형 말뚝을 거치하고, 지반을 조성하는 과정을 보여주며, 2.2.1절 단말뚝 지지력 평가 실험 방법에서 자세히 설명한다.

2.1.3 군말뚝 실험 장치

군말뚝 실험은 기존말뚝 4본과 보강말뚝 1본으로 구성된 기초판에 하중을 재하하는 실험이다. Fig. 2(a)는 기존말뚝 4본과 보강말뚝 1본이 시험 준비를 위해 토조에 거치된 모습을 보여준다. 지지대에서 기존말뚝 4본의 간격은 8D이며, 기존말뚝과 보강말뚝의 간격은 5.7D이다. 이는 말뚝 주변 지반의 교란되는 정도를 감소시킴과 더불어 시공 시 발생하는 오차를 고려하여 말뚝의 최소간격을 2.5D 이상 확보하였다. 지지대를 토조에 거치하여 주문진 표준사를 강사하였다. 강사한 후에는 지지대를 말뚝으로부터 제거하여 Fig. 2(b)와 같이 말뚝과 지반을 조성하였으며, 말뚝 두부에는 로드셀 하우스를 설치하였다. 로드셀 하우스의 자중은 0.5 N(0.05 kgf)이고, 실험 분석 결과 자중에 의한 영향은 무시할 수 있는 수준으로 판단되었다. 로드셀 하우스에는 침하를 측정하기 위한 다이얼게이지 기준점을 설치하였다. 강성이 상대적으로 매우 큰 기초판을 설치한 후 다이얼게이지를 통해 발생하는 침하량을 측정하였다. Fig. 2(c)와 같이 기존말뚝에 기초판을 설치하고 4본 말뚝의 허용하중($P_1 = Q_{all}$)을 재하한다. 이때 중앙에 설치된 보강말뚝은 기초판에 연결·고정되지 않아 하중이 전달되지 않는다.

알루미늄판으로 제작된 기초판의 자중은 로드셀을 포함하여 24.5 N(2.5 kgf)이다. 기초판의 재료는 알루미늄 봉과 같으며, 가로(W) 240 mm, 세로(D) 240 mm, 두께(t) 10 mm이다. 기초판의 강성이 충분히 크므로 말뚝에서 발생한 하중에 의한 휨은 발생하지 않는 것으로 가정하였다. Fig. 2(d)에 제시된 상부 실험 장치는 기초판 위에 가해진 무게추(P1) 위에 설치된다. 상부 실험 장치는 단말뚝 실험과 동일하게 내부에 로드셀이 설치된다. 설치된 로드셀을 보강말뚝에 접촉하도록 내부볼트를 이용해 관입한다. 이후 상부 실험 장치 위에 가해진 하중에 의해 기존말뚝과 보강말뚝이 동일한 침하 거동을 하게 된다. 하중을 재하하는 무게추는 기초판의 크기와 동일하게 제작되었으며, 내부 중앙에 가로(B) 145 mm, 세로(H) 145 mm의 공간이 있어, 상부 실험 장치와 별개로 기초판에 하중을 재하할 수 있다.

2.1.4 지반조성방법

실내 말뚝 실험에서 사용한 주문진 표준사의 공학적 특성은 Table 3에 나타냈으며, 비중 2.65, 단위중량 14.12 kN/m³ (1.44 g/cm³), 최대건조단위중량 16.28 kN/m³ (1.66 g/cm³), 최소건조단위중량 13.04 kN/m³ (1.33 g/cm³), 통일분류법(USCS)에 의해 SP로 분류되는 비점착성 모래이다. 토조에 말뚝을

Table 3. Properties of Jumunjin standard sand and aluminum model pile

Jumunjin standard sand		Model pile	
Specific gravity (G_s)	2.65	Material	Aluminum
Unit weight	14.12 kN/m ³ (1.44 g/cm ³)		
Maximum dry density (γ_{max})	16.28 kN/m ³ (1.66 g/cm ³)	Young's modulus	69 GPa
Minimum dry density (γ_{min})	13.04 kN/m ³ (1.33 g/cm ³)		
USCS	SP	Diameter	20 mm
Relative density	40 %	Pile length	300 mm

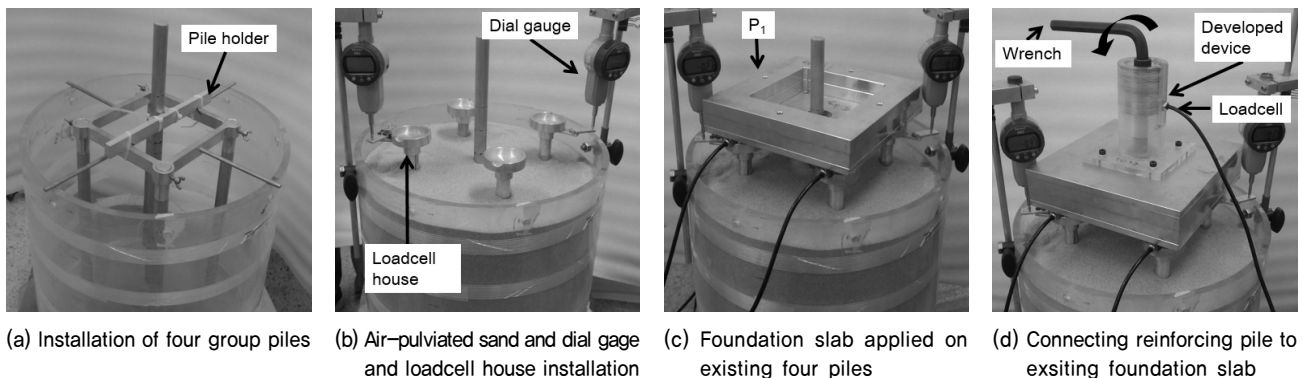


Fig. 2. Test setup of multiple pile experiment

거치하고 균질한 밀도를 형성하기 위해 강사장치를 상승시켜 7.5 cm 층당 두께로 총 5회 주문진 표준사를 강사하였다. 지반 표면으로부터 0.68 m의 높이에서 시료를 강사하여 상대밀도(D_r)가 40 %인 지반을 형성하였다.

2.2 실내모형말뚝 실험방법

2.2.1 단말뚝지지력 평가 실험 방법

단말뚝의 지지력을 평가하기 위해서 Fig. 1(b)와 같이 토

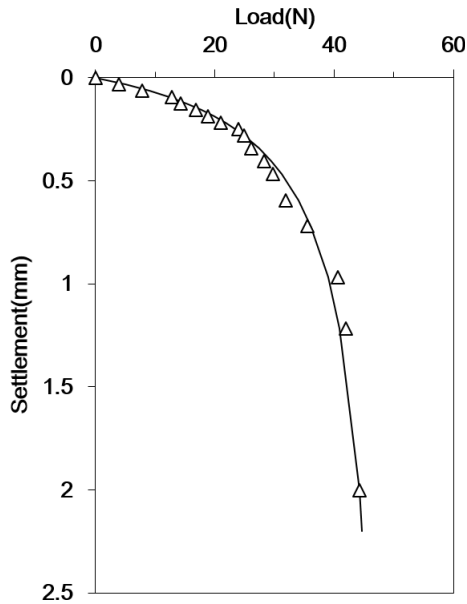


Fig. 3. P- δ (Load-settlement) curve of single pile test

조 내부에 말뚝을 임시 거치하고, 토조 내부에 주문진 표준사를 강사하여 Fig. 1(c)의 지반을 조성하였다. 지반 조성이 완료된 후 아크릴 토조 상부에 Fig. 1(a)와 같이 변위 제어 장치를 설치하였다. 변위 제어 장치 하부에는 50 mm 두께의 아크릴 토조 덮개를 설치하였다. 토조 덮개는 토조로부터 제작된 실험 장치를 적용하기 위해 설치된다. 설치된 토조 덮개는 말뚝과 실험 장치 간에 발생한 하중에 의해서 침하 또는 휨 발생 가능성이 없는 것으로 판단되었다. 변위 제어 장치 내부에는 로드셀을 설치하여 말뚝에 가해지는 변위에 따른 하중을 계측하였다. 말뚝의 P- δ 곡선은 3개의 구간으로 분류할 수 있다(Lambe & Whitman, 1969). 말뚝의 탄성구간(Plastic zone)에는 작은 변위에도 큰 하중을 발생하기 때문에 이를 고려하여 실험 초반에는 1/32 mm 9회 변위를 제어하였다. 또한 말뚝의 국부 전단파괴(Local shear failure) 구간인 P- δ 곡선의 중반과 말뚝의 일반전단파괴(General shear failure)가 발생하는 P- δ 의 후반에는 1/16 mm 3회, 1/8 mm 2회, 1/4 mm 2회, 그 이후는 1/4 mm 단위로 변위를 증가하면서 최종적으로 2 mm의 변위를 말뚝에 발생시켰다. 변위를 증가함에 따라 하중이 발생하며, 하중이 평형상태에 이르는 시점의 계측값을 기록하였다.

2.2.2 하중 분담률 실내모형실험 방법

지반에 설치된 기존말뚝과 보강말뚝의 하중분담 거동을 확인하기 위해 하중 제어조건의 말뚝 재하실험을 수행하였다. 하중 분담률 실험(LDR100)은 주문진 표준사를 강사하

Table 4. Load stage of LDR100 test

Load stage		Supporting piles	ΔP (N)	Accumulated load (N)	Remark
P ₁	S1	E	24.5 N (2.5 kgf)	24.5 N (2.5 kgf)	
P ₁	S2	E	23.5 N (2.4 kgf)	48.0 N (4.9 kgf)	
P ₁	S3~S5	E	9.8 N × 3 (1.0 kgf × 3)	77.4 N (7.9 kgf)	
P ₁	S6	E	4.9 N (0.5 kgf)	82.3 N (8.4 kgf)	
P ₂	S7~S9	E+R	9.8 N × 3 (1.0 kgf × 3)	111.7 N (11.4 kgf)	
P ₂	S10	E+R	18.6 N (1.9 kgf)	130.3 N (13.3 kgf)	
P ₂	S11~S14	E+R	19.6 N × 4 (2.0 kgf × 4)	208.7 N (21.3 kgf)	
P ₂	S15~S16	E+R	29.4 N × 2 (3.0 kgf × 2)	267.5 N (27.3 kgf)	
P ₂	S17	E+R	9.8 N (1.0 kgf)	277.3 N (28.3 kgf)	

E: four existing piles, R: one reinforcing pile

여 지반을 조성한 후, Fig. 2(c)와 같이 기존말뚝 4본의 허용하중($P_1 = Q_{all}$)을 재하 하였다. 군말뚝의 허용하중은 말뚝 지지력 평가 실험에서 산정한 한계하중(Limiting load)을 안전율(Factor of safety)과 군말뚝 본수를 고려하여 군말뚝의 허용하중(Q_{all}, Q_{all}^*)으로 산정하였다. 이후 Fig. 2(d)와 같이 기존말뚝과 추가된 보강말뚝을 포함하여 전체 말뚝의 한계하중 이상의 하중을 가하였다. 기존말뚝과 보강말뚝의 하중분배 거동을 말뚝 두부에 설치된 로드셀과 다이얼게이지를 통해 측정하였다. 말뚝에 가해지는 하중은 Table 4에 제시된 단계(S1-S17)별로 제어하였다. 하중 재하단계는 총 17단계이며, 기존말뚝의 허용하중(Q_{all})을 재하하는 P1단계와 기존말뚝 및 보강말뚝에 한계하중을 재하하는 P2단계로 구성하였다. P1단계에서는 6단계에 걸쳐 총 82.3 N(8.4 kgf)의 누적하중을 기존말뚝에 재하하였으며, P2단계에서는 총 277.3 N(28.3 kgf)의 누적하중을 11단계에 걸쳐 보강말뚝을 포함한 전체 말뚝에 재하하였다. 여기서 하중단계 6은 기존말뚝 4본의 허용하중(Q_{all})이며, 하중단계 8과 하중단계 14는 각각 보강말뚝이 포함된 5본의 허용하중(Q_{all}^*)과 한계하중 값을 나타낸다. 하중을 제어하는 단일 무게추의 최소 무게가 4.9 N(0.5 kgf)으로 실험에서 1.0 N(± 0.1 kgf)의 오차가 발생하였다.

2.2.3 철거 → 보강 → 증축 단계를 고려한 실내모형실험 방법

공동주택 수직증축 리모델링은 철거, 기초보강, 수직증축

순으로 공사가 진행된다. 실제 시공단계의 철거, 증축 상태를 모사하기 위해 앞에서 설명한 하중 분담률 실험에 제하(Unloading) 단계를 추가하였다. 실험순서는 Table 5와 같이 기존말뚝 4본에 허용하중(Q_{all})을 재하한 후, 기존말뚝 허용하중(Q_{all})의 60%(LDR60), 80%(LDR80)까지 제하(Unloading)하였다. 단위 무게추의 최소 무게로 인해 실제 제하 하중수준은 LDR60의 경우 58%, LDR80의 경우 82%이다. 이후 보강말뚝을 기초판에 연결·설치하고 보강말뚝을 포함한 전체 말뚝에 한계하중을 재하(Reloading)하였다. 여기서 LDR100 실험의 경우 허용하중(Q_{all})을 재하한 후 무게추를 이용하여 제하를 실시하지 않았는데, LDR100 실험의 보강말뚝 추가 지점은 말뚝 4본의 허용하중(Q_{all})이 말뚝 5본의 허용하중으로 변화하는 단계이기 때문이다. 즉 기존에 가해진 4본의 허용하중 100%에서 5본의 허용지지력 80%로 감소한다. 80%로 감소된 5본의 허용하중 상태에서 무게추(S7)를 이용하여 재하를 실시하였다.

3. 실험 결과

3.1 말뚝의 지지력

군말뚝 실험을 위한 단일말뚝의 지지력산정 실내실험 결과는 Fig. 4와 같다. 본 실험에서는 발생된 침하량이 Davisson의 방법에 적용하기에 곤란하며, 도해법인 logP-logS 방법

Table 5. Loading stage of LDR80 and LDR60 tests

Test	Unloading level with respect to Q_{all}	Loading to existing piles	Unloading from existing piles	Reloading to all piles
LDR80	80 %	S1: 24.5 N (2.5 kgf*) S2: 23.5 N (2.4 kgf**)*) S3: 9.8 N (1.0 kgf) S4: 9.8 N (1.0 kgf) S5: 9.8 N (1.0 kgf) S6: 4.9 N (0.5 kgf)	S7: -4.9 N (-0.5 kgf) S8: -9.8 N (-1.0 kgf)	S9: 9.8 N (1.0 kgf) S10: 9.8 N (1.0 kgf) S11: 9.8 N (1.0 kgf) S12: 9.8 N (1.0 kgf) S13: 19.6 N (2.0 kgf) S14: 19.6 N (2.0 kgf) S15: 19.6 N (2.0 kgf) S16: 19.6 N (2.0 kgf) S17: 19.6 N (2.0 kgf) S18: 19.6 N (2.0 kgf)
LDR60	60 %	S1: 24.5 N (2.5 kgf*) S2: 23.5 N (2.4 kgf**)*) S3: 9.8 N (1.0 kgf) S4: 9.8 N (1.0 kgf) S5: 9.8 N (1.0 kgf) S6: 4.9 N (0.5 kgf)	S7: -4.9 N (-0.5 kgf) S8: -9.8 N (-1.0 kgf) S9: -9.8 N (-1.0 kgf) S10: -9.8 N (-1.0 kgf)	S11: 9.8 N (1.0 kgf) S12: 9.8 N (1.0 kgf) S13: 9.8 N (1.0 kgf) S14: 4.9 N (0.5 kgf) S15: 9.8 N (1.0 kgf) S16: 9.8 N (1.0 kgf) S17: 9.8 N (1.0 kgf) S18: 19.6 N (2.0 kgf) S19: 19.6 N (2.0 kgf) S20: 19.6 N (2.0 kgf) S21: 19.6 N (2.0 kgf) S22: 19.6 N (2.0 kgf)

* : weight of foundation slab and loadcells, ** : weight of load applicable device

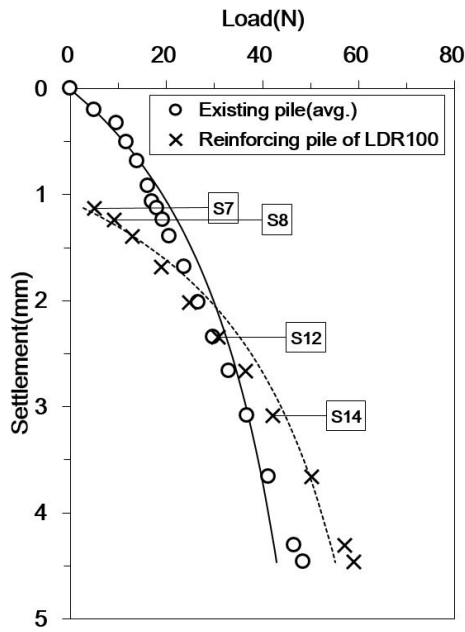


Fig. 4. P- δ (Load-settlement) curve of LDR100 test

도 불명확하다. 그러므로 침하량이 말뚝직경의 10 %일 때의 하중을 한계하중(Limiting load)으로 가정하였다. 한계하중을 극한하중(Ultimate load)으로 간주하여 안전율(Factor of safety) 3.0을 적용하면 재하시험결과를 안전측으로 평가할 수 있으므로, 본 실험에서는 안전율을 2.0을 적용하여 허용하중으로 산정하였다(조천환, 2010; 한국지반공학회, 2009). 실험결과로부터 산정된 말뚝의 한계하중은 41.2 N(4.2 kgf)이며, 안전율(Factor of safety) 2.0을 고려하여 허용지지력($Q_{all, single}$)은 20.6 N(2.1 kgf)으로 산정하였다. 군말뚝의 경우 군효율을 1로 가정하여, 기존말뚝 4분에 대한 허용지지력은 82.3 N(8.4 kgf), 보강말뚝을 포함한 전체 말뚝 5본인 경우의 허용지지력은 102.9 N(10.5 kgf)으로 산정하였다.

3.2 하중 분담률 실험결과

각 하중 단계에 따른 P- δ 곡선은 Fig. 4와 같다. 도식화된 P- δ 곡선은 기존말뚝 4본의 평균 하중과 보강말뚝 1본의 하중-침하의 관계를 보여준다. 보강말뚝은 기존말뚝 4본이 연결된 기초판이 약 1 mm 정도 침하된 이후에 추가 설치되었다. 여기서 군말뚝의 침하량은 단말뚝의 침하량에 비해 매우 크게 발생하는데, 이는 기존 연구결과에 제시된 사항과 유사한 결과이다(한국지반공학회, 2002). 추가된 보강말뚝과 기존말뚝은 서로 상이한 P- δ 거동을 나타냈다. 특히 보강말뚝이 추가된 후 재하하중의 분담률은 매우 낮았으나, 기존말뚝에 침하가 발달함에 따라 보강말뚝이 하중을 분담하는 비율이 증가하였다.

보강말뚝이 추가 설치된 이후 기존말뚝과 보강말뚝의 하

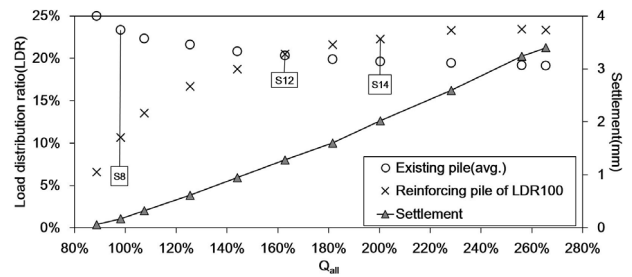


Fig. 5. Load distribution ratio and settlement results of LDR100 test

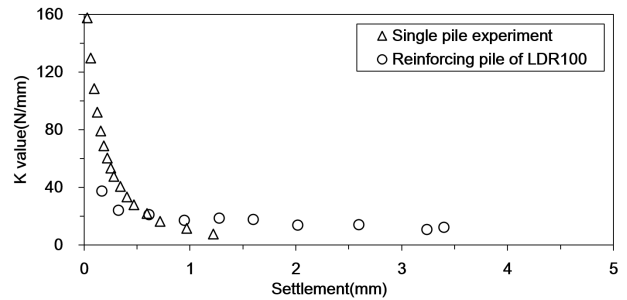


Fig. 6. K-value of single pile test and reinforcing pile of LDR100 test

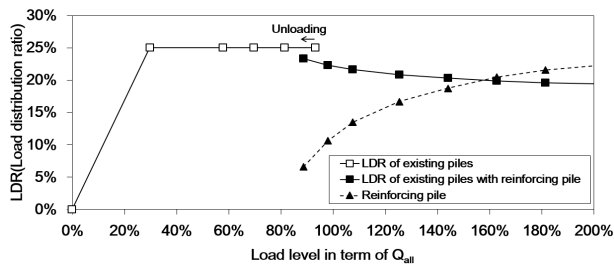
중 분담률(LDR, Load Distribution Ratio)을 비교하면 Fig. 5와 같다. 좌측 y축은 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담률을 나타내며, 우측 y축은 침하량을 나타낸다. 여기서 기존말뚝의 하중 분담률은 4본 말뚝의 평균값을 나타낸다. x축은 보강말뚝이 추가된 이후의 허용하중(Q_{all}^*) 대비 하중비율을 나타낸다. Q_{all}^* 은 4본의 기존말뚝과 1본의 보강말뚝의 허용하중인 102.9 N(10.5 kgf)이다. 일반적인 방법에 의하면 보강말뚝을 추가한 이후부터 기존말뚝과 하중을 균등하게 분담해야 하지만, 실제로 보강말뚝은 변위가 발생함에 따라 하중을 분담하는 정도가 증가하였다. 또한 전체 말뚝의 허용하중이 재하된 하중단계 S8에서 보강말뚝은 전체하중의 약 11 % 정도를 분담하였으며, 하중단계 S12에서 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담률이 상호 수렴되었다. 이는 보강말뚝과 기존말뚝이 P- δ 곡선에서 초기 상태가 서로 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 즉 기존말뚝은 이미 변위가 발생하여 P- δ 곡선의 중간 부분에 위치하고 있는 상태인 반면, 보강말뚝은 변위가 전혀 없는 상태에서 P- δ 곡선의 초기에 위치하고 있는 상태이기 때문에 발생하는 하중이 상대적으로 적기 때문이다.

보강말뚝의 P- δ 곡선과 단말뚝 실험 P- δ 곡선으로부터 변위 증가에 따른 하중증가량 $K(\Delta P/\Delta \delta)$ 을 산정하여 비교하였다. Fig. 6은 단말뚝 실험의 K값과 하중 분담률 실험에서의 보강말뚝의 K값을 비교하여 보여준다. 단말뚝의 경우 하중 재하실험이 진행됨에 따라 K값이 140.1 N/mm(14.3 kgf/mm)

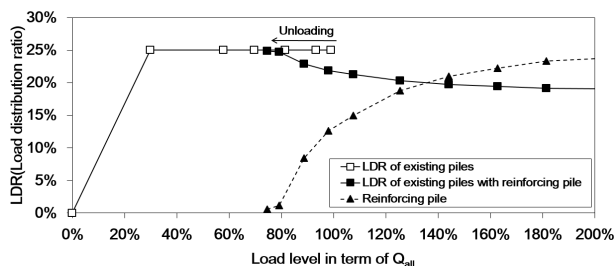
에서 8.82 N/mm(0.9 kgf/mm)로 감소하였다. 반면 보강말뚝의 경우 K값이 대부분 9.8 N/mm(1 kgf/mm)~29.4 N/mm(3 kgf/mm)로 나타났다. 보강말뚝의 K값은 단말뚝 극한상태의 소성거동 시의 K값과 유사한 수치이므로, 보강말뚝은 극한상태의 소성거동을 하는 것으로 분석되었다.

3.3 철거 → 보강 → 증축 단계에서 말뚝에 하중이 작용하는 하중 산정 실험 결과

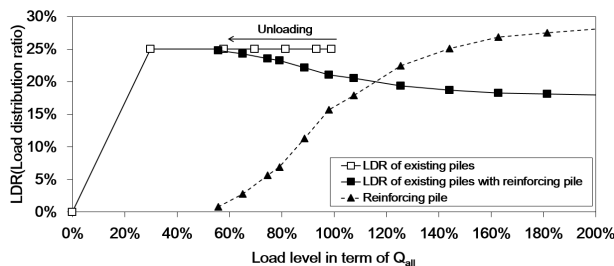
기존말뚝에 하중을 재하하고 허용하중의 80 % 수준까지 제한한 LDR80 실험과 허용하중의 60 % 수준까지 제한한 LDR60 실험을 수행하였다. 제한된 이후에는 보강말뚝을 추가하여 기초판에 연결·설치하였으며, 보강말뚝을 포함하여 전체말뚝에 하중을 재재하 하였다. Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)는 각각 LDR80과 LDR60 실험의 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분배율을 보여준다. Fig. 7(a)는 LDR100의 실험결과로부터 산정한 하중분배를 결과이다. 앞서 설명한 바와 같이 LDR100 실험에서는 실질적인 제하 단계는 없다. 하지만 보강



(a) Loading 100 % → Unloading 100 % → Reloading 200 %



(b) Loading 100 % → Unloading 80 % → Reloading 200 %



(c) Loading 100 % → Unloading 60 % → Reloading 200 %

Fig. 7. Load distribution ratio of existing and reinforcing piles along loading, unloading, and reloading stages from LDR100, LDR80, LDR60 tests

말뚝이 추가된 순간부터 말뚝 4분의 지지력이 말뚝 5분의 지지력으로 바뀌게 된다. 각 그래프에서 화살표는 제하된 구간을 나타낸다. 기존말뚝의 흰색 심볼(Symbol)은 재하 및 제하 과정의 실험결과를 나타내며, 검은 심볼은 보강말뚝을 포함하여 재재하 과정의 실험 결과를 나타낸다. x축은 보강말뚝이 추가되기 전에는 기존말뚝(4본)의 총 허용지지력($Q_{all} = 82.3 N$) 대비 하중비율이며, 보강말뚝이 추가된 이후부터는 전체 말뚝(5본)의 총 허용지지력($Q_{all} = 102.9 N$) 대비 하중비율이다.

Fig. 7을 분석해보면 기존말뚝은 보강말뚝이 추가된 이후 지속적으로 하중분배율이 감소하는 경향을 나타낸다. 기존말뚝 허용하중($Q_{all} = 82.3 N$)의 60 %, 80 %, 100 %까지 제한하고 재재하하였을 때 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담률이 수렴하는 하중수준은 전체 말뚝 허용하중($Q_{all} = 102.9 N$) 대비 각각 116 %, 136 %, 158 %이다. 이러한 결과로부터 제한된 하중의 양이 증가함에 따라 하중 분담률이 수렴하는 하중 수준이 감소하는 경향을 파악하였다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이 하중을 상당량 재하하였을 때, 보강말뚝의 하중 분담률은 기존말뚝의 하중 분담률을 초과한다. 지반이 균일하고 말뚝의 제원이 동일한 조건에서 각 말뚝의 하중 분담률은 동일해야 한다. 하지만 이러한 현상이 나타난 이유는 기존말뚝과 보강말뚝이 P-δ 곡선 상에서 위치상태가 서로 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 즉 기존말뚝은 보강말뚝 추가시점 이전부터 P-δ 곡선 중간에 위치하기 때문에 하중이 추가됨에 따라 보강말뚝보다 먼저 극한상태에 도달하게 된다. 그러므로 추가하중에 의해 발생하는 침하량에 대응하는 보강말뚝의 하중증가량이 항상 기존말뚝 대비 크게 발생하게 된다.

제하 하중비율에 따른 재재하 시 하중 분담률이 수렴하는 하중수준을 선형회귀분석으로 도식화하면 Fig. 8과 같다. 선형회귀분석 결과로부터 기존말뚝 허용하중의 45 % 수준까지 제한한 후 재재하를 실시하면, 기존말뚝과 보강말뚝이 전체 말뚝의 허용하중 내에서 하중을 균등하게 분담할 것으로 분석된다. 즉 보강말뚝은 기존말뚝과 동일하게 하중을 분담함으로써, 보강말뚝의 하중분담 효율이 향상된 것으로 판

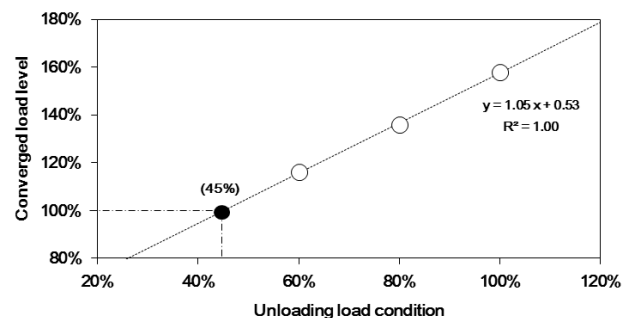


Fig. 8. Converged load level of existing and reinforcing pile with unloading load conditions

단된다. 본 연구를 위해 개발된 실험장치는 기초판과 실험 장치의 자중이 기존말뚝 허용지지력의 58 % 수준으로 제한할 수 있는 장치적 한계로 인해 허용하중의 45 % 수준까지 제한한 후 재재하를 실시하는 실험을 수행하지 못하였다. 본 실험 결과로부터 수직증축 리모델링 시공 시 철거된 하중정도에 따라 기존말뚝과 보강말뚝의 거동이 다를 것으로 판단되며, 기존말뚝에 작용하는 철거된 하중이 상당할 경우 기존말뚝과 보강말뚝은 허용지지력 내에서 증축하중에 의해 하중을 균등하게 분담할 수도 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 추가하중이 발생하여 기존말뚝에 보강말뚝을 설치하고 동일한 기초판에 연결하였을 경우, 기존말뚝과 보강말뚝은 P- δ (하중-침하) 거동이 발달된 정도가 다르므로, 기존말뚝과 보강말뚝이 분담하는 하중 비율이 다를 것으로 판단되어 기존말뚝과 보강말뚝에 작용하는 하중분담 현상을 실험적으로 규명하고자 수행하였다. 이를 위해 기초판의 강성은 무한 강성으로 가정하여 실내실험을 수행하였고, 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담률과 P- δ (하중-침하) 거동을 분석한 결과로부터 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 모형말뚝에 대한 단말뚝 실험으로부터 상대밀도가 40 % 지반조건에서 허용지지력은 20.6 N(2.1 kgf(F.S.=2))으로 분석되었다. 4본의 군말뚝에 허용하중 82.3 N(8.4 kgf)을 재하한 후 보강말뚝을 추가·설치하고 하중을 재하한 실험으로부터, 전체 말뚝의 허용하중을 초과해야 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담률이 수렴하는 것으로 나타났다. 보강말뚝과 단말뚝의 거동을 상호 비교한 결과 보강말뚝은 하중재하 초기 단계에서도 $K(\Delta P/\Delta \delta)$ 값이 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 보강말뚝이 기존말뚝과 하나의 기초판으로 연결되고 추가하중을 받게 되어, 기존말뚝이 P- δ 곡선 상에서 위치한 K값으로 수렴했기 때문에 발생한 현상으로 판단된다.
- (2) 기존말뚝 4본의 허용하중을 재하한 후 허용하중대비 60 %, 80 %, 100 %까지 하중을 재하하였다. 이후 보강말뚝을 설치하고 하중을 재재하하는 실내실험을 수행하였다. 실험 결과 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담률이 수렴하는 하중수준은 전체 말뚝 5본 허용하중의 116 %, 136 %, 158 %로 나타났다. 선형회귀분석 결과 기존말뚝과 보강말뚝이 허용하중 내에서 전체하중을 기존말뚝과 균등하게 분담하기 위해서는 허용하중의 45 %까지 제한한 후 하중을 재재하해야 하는 것으로 분석되었다.

허용하중의 45 %까지 제한한 경우에는 기존말뚝과 보강말뚝의 하중을 분담하는 비율이 동등함으로, 기존말뚝과 보강말뚝이 추가하중을 균등히 분담할 수 있다. 하지만 제한된 정도가 감소함에 따라 보강말뚝의 효율이 감소하는 경향을 파악하였다.

- (3) P- δ 곡선에서 기존말뚝은 기존하중에 의해 적정 수준까지 침하가 진행된 상태이며, 신설된 보강말뚝은 추가하중에 의해 침하가 시작된다. 이는 P- δ 곡선 상에서 기존말뚝과 보강말뚝의 위치 상태가 서로 상이하다는 점을 의미한다. 즉 기존말뚝과 보강말뚝이 추가하중에 의해 하중을 균등하게 분담하기 위해서는 기존말뚝에 가해진 하중을 제한하여, 기존말뚝과 보강말뚝이 P- δ 곡선 상에서 유사한 곳에 위치하도록 한 후 하중을 재재하하면 기존말뚝과 보강말뚝이 하중을 균등히 분담할 수 있을 것으로 판단된다. 또는 기존말뚝에 가해진 하중을 재재하를 실시하기 전에 인위적으로 보강말뚝으로 일부 전이시켜, P- δ 곡선 상에서 보강말뚝이 기존말뚝과 유사한 곳에 위치하도록 하는 기술적용을 통해 기존말뚝과 보강말뚝의 하중 분담률을 균등하게 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 ‘공동주택 리모델링을 위한 기초구조물 하중 선재하 기술 개발’ 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

1. 국토교통부 (2013), 수직증축 관련 심재철 의원 대표발의 주택법 개정안 참고자료 - 최대 3개층까지 허용, 세대수 증가범위 15%로 확대, 보도참고자료, 국토교통부 주택정비과, 2013년 6월 5일, pp. 1~2.
2. 조천환(2010), 말뚝기초실무, 이엔지북, pp. 244~248.
3. 한국건설기술연구원 (2013), 공동주택 리모델링을 위한 기초구조물 하중 선재하 기술 개발(I), KICT2013-260, 한국건설기술연구원, pp. 23~61.
4. 한국지반공학회 (2002), 깊은기초, 기초공학 시리즈 4, 구미서관, pp. 71~72.
5. 한국지반공학회 (2009), 구조물 기초 설계기준 해설, 구미서관, p. 399.
6. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1969), Soil mechanics, John Wiley & Sons, New York, pp. 195~197.
7. Meyerhof, G. G. (1951), The ultimate bearing capacity of foundations, Geotechnique, Vol. 2, No. 4, London, pp. 301~331.
8. Shin, H. Y. (2011), Optimal design and verification of transfer-frame footing system for the construction of adjacent existing wall to control the stiffness and share the load, Master's thesis, University of Seoul, pp. 2~58 (in Korean).