

# 수직증축형 공동주택 리모델링 구조해석을 위한 PC말뚝 강성에 관한 연구

## A Study of Prestressed Concrete Pile Stiffness for Structural Analysis of Condominium Remodeling with Vertical Story Extension

최 창 호 <sup>1</sup>	Choi, Changho	이 현 지 <sup>2</sup>	Lee, Hyunjee
최 기 선 <sup>3</sup>	Choi, Kisun	유 영 찬 <sup>4</sup>	You, Youngchan
김 진 영 <sup>5</sup>	Kim, Jinyoung		

### Abstract

According to the revision of the Housing Act in 2013, it has been possible to carry out an apartment remodeling project involving two to three floor vertical extension. The remodeling project with vertical extension requires foundation reinforcement because structural safety due to additional load and enhanced seismic criteria must be met. In this case, structural analysis is performed to analyze the load distributed to existing PC pile and reinforced additional pile. The vertical stiffness ( $K_v$ ) of the pile is required for structural analysis, but the research on the 20~30 year old PC pile stiffness is very limited. In this paper, the stiffness of the PC pile in accordance with the change of diameter and length was analyzed by examining the results of 38 field pile load tests performed during the construction of the apartments in the 1990's. As a result of the analysis, the pile stiffness decreases with the increase of the length-diameter ratio ( $L/D$ ). In addition, the results of on-site pile load test are compared with the coefficient 'a' for estimating pile stiffness proposed in Korea Highway Bridge Design Standard (2008) and the Pile Foundation Design Guideline of Korea Railroad Corporation (2012). It shows that 'a' obtained through the estimation of the literature is very similar to the field test results in the range of  $10 < L/D < 50$ .

### 요 지

2013년 주택법 개정에 따라 최대 3개층까지 공동주택의 수직증축 리모델링 사업이 가능해졌다. 수직증축 리모델링은 추가하중으로 인한 구조 안전성 및 강화된 내진기준을 만족해야 하므로 기초보강을 필요로 하며, 말뚝 보강설계에서는 기존 말뚝과 보강 말뚝의 하중분담을 고려해야 한다. 말뚝의 하중분담을 계산하기 위해서는 말뚝의 수직 강성( $K_v$ )이 필요하지만, 20~30년 전에 설치된 PC 말뚝 강성에 대한 연구는 매우 미미한 실정이다. 본 논문에서는 1990년

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Tel: +82-31-910-0785, Fax: +82-31-910-0211, [chchoi@kict.re.kr](mailto:chchoi@kict.re.kr), Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 한국건설기술연구원 건축도시연구소 연구원 (Non-member, Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology)

3 비회원, 한국건설기술연구원 건축도시연구소 연구위원 (Non-member, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology)

4 비회원, 한국건설기술연구원 건축도시연구소 선임연구위원 (Non-member, Senior Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology)

5 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

대 아파트 신축시 수행된 38건의 현장 말뚝재하 시험 결과를 검토하여, 직경 및 길이의 변화에 따른 PC말뚝의 강성을 분석하였다. 분석 결과 말뚝강성은 장경비( $L/D$ )가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 현장 말뚝재하 시험결과를 도로교설계기준해설(2008) 및 한국철도시설공단 말뚝기초의 설계(2012)에서 제안하고 있는 말뚝강성 산정을 위한 계수 'a'와 비교하였다. 비교결과  $10 < L/D < 50$  구간에서 문헌의 산정식을 통해 구한 'a'는 시험결과와 매우 유사한 것으로 나타났다.

**Keywords** : Pile stiffness, Pile reinforcement, PC pile, Apartment remodelling

## 1. 서론

2013년 주택법 개정에 따라 15층 이상의 공동주택은 최대 3개 층까지, 14층 이하는 최대 2개 층까지 수직증축 리모델링을 수반하는 사업이 가능해졌다(MOLIT, 2013). 이에 따라 현재 서울 및 1기 신도시를 중심으로 약 25개 단지가 리모델링 사업을 진행하고 있으며, 이중 10개 단지가 안전진단 및 기본설계를 완료한 상황이다. 수직증축 리모델링은 증축에 의한 하중 증가 및 강화된 내진기준의 적용으로 인해 대부분의 경우 기존 말뚝의 내력이 부족하여 기초보강을 필요로 한다. 이 때 기존 말뚝이 기존 건물의 하중을 지지하고 있는 상태에서 보강 말뚝이 시공되어 동일한 기초판으로 연결되므로 시공단계별 기존 말뚝과 보강 말뚝의 하중분담 특성이 다르게 나타난다. 또한 제원 및 시공방법이 다른 이종의 말뚝이 적용되므로 각각의 말뚝강성이 다르고, 말뚝의 하중분담 효과는 말뚝의 강성비에 지배적인 영향을 받는다. 따라서 리모델링 공사의 말뚝 보강 설계는 기존 말뚝과 보강 말뚝의 강성비에 기초한 시공단계별 구조해석을 통하여 하중분담 효과를 고려한 말뚝의 지지력을 계산하고 설계되어야 한다.

현재 수직증축형 리모델링 사업의 대상이 되는 구조물은 1980년대 말부터 진행된 신도시 건설 정책 사업으로 주로 수도권 및 광역도시에 건설된 아파트 단지이다. 2000년 이전까지 시공된 건축물의 경우 타격식(driving) 또는 SIP(Soil-cement Injected Precast Pile) 방법으로 말뚝을 시공하였으며, 재료에 따라 PC(Prestressed Concrete) 및 PHC 말뚝이 일반적으로 사용되었다. 증축형 리모델링 사업을 위해 반드시 필요한 건설당시 설계 및 시공 도면을 살펴보면 말뚝에 대한 정보는 직경, 형식, 지지력 항목에 한정된다. 따라서, 구조해석을 위한 말뚝 강성에 대한 정보는 지반조사 결과로부터 추정된 말뚝 길이와 직경의 비( $L/D$ )로부터 산정하게 된다. 말뚝 강성

과 관련하여 국내에서는 도로교설계기준해설(KHS, 2008) 및 한국철도시설공단 말뚝기초의 설계(KRC, 2012; 이하 본 논문에서는 한국철도시설공단으로 명칭)의 추정식을 적용하고 있다.

본 논문에서는 1)수직증축 리모델링 공사의 기초보강 설계 시 말뚝 하중분담을 고려한 구조해석 절차를 소개하고, 2) 말뚝 강성이 기존 말뚝과 보강 말뚝의 하중분담률에 미치는 영향을 분석하며, 3) 1995년~1997년 사이에 시공된 SIP-PC 말뚝에 대한 현장재하시험 결과 38건을 수집하여, 하중-침하( $P-\delta$ )곡선의 접선 기울기, 설계하중에서의 활선 기울기 등의 값을 활용하여 말뚝의 강성을 산정하고, 4) 말뚝의 장경비(길이와 직경의 비) 변화에 따른 말뚝 강성의 변화 양상을 분석하고자 한다. 또한, 각 재하시험 말뚝의 제원을 활용하여 도로교설계기준해설(KHS, 2008) 및 한국철도시설공단(KRC, 2012)에서 제시하는 말뚝 수직 강성 추정식을 적용하여 강성값을 산정하였다. 이를 통해 현장 시험 결과와 문헌에서 제안하는 추정식과의 상관성을 분석하고자 한다.

## 2. 증축형 리모델링을 위한 구조해석 방안

본 절에서는 증축형 리모델링 공동주택의 말뚝 기초 설계 시 고려하여야 할 말뚝 기초의 하중분담 특성 및 해석 절차를 설명하고, 리모델링 대상이 되는 실제 공동주택에서 말뚝 기초의 강성비가 하중분담 특성에 미치는 영향을 분석함으로써 기존 말뚝 기초의 강성 추정에 관한 연구 필요성을 제시하고자 한다.

### 2.1 말뚝 기초의 하중분담 해석 절차

기존 노후 공동주택의 수직증축형 리모델링 공사는 증축에 따른 연직하중의 증가 및 강화된 내진기준의 적용으로 기존 말뚝 기초에 재하되는 하중이 설계하중을

초과할 가능성이 높으며 이에 따라 보강 말뚝 기초가 추가로 요구되어 진다. 한편 리모델링 공사에서는 기존 말뚝 기초가 이미 기존 건축물의 하중을 지지하고 있는 상태이며 보강 말뚝 기초는 시공 이후 추가되는 하중에 대해서만 기존 말뚝 기초와 하중을 분담하여 지지하게 된다. 따라서 모든 말뚝 기초를 동시에 시공하고 전체 하중을 분담하는 신축 건축물과는 다르게 리모델링 건축물은 기존 말뚝 기초와 보강 말뚝 기초가 각각 분담하는 하중특성이 상이하므로 이를 고려한 시공단계별 해석 및 설계 절차가 요구된다(Choi et al., 2014).

국토교통부 고시 제2017-94호 ‘수직증축형 리모델링 구조기준’은 이러한 리모델링 공사의 말뚝 기초 하중분담 특성을 고려하여 설계할 수 있는 절차를 제시하고 있다(MOLIT, 2014). 구조기준에서는 아래와 같이 기존 말뚝 기초와 신설 말뚝 기초의 하중분담 원칙을 제시하고 있는데, 기존 말뚝과 신설 말뚝은 활하중 및 추가 연직하중을 분담하고 각각의 기초강성에 따라 하중을 분담하는 것을 원칙으로 하고 있다.

위치	기초 구분	하중 부담 범위	분담 원칙
기존 벽체 구간	기존 말뚝	· 활하중을 제외한 기존 연직하중은 기존 말뚝만 부담 · 활하중 및 추가 연직하중을 신설 말뚝과 분담	· 기존말뚝과 신설말뚝이 기초강성에 따라 분담 하여 지지
	신설 말뚝	· 활하중 및 추가 연직하중을 기존 말뚝과 분담	

구체적인 설계 절차는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 시공단계별로 리모델링 전 기존 건물 상태에서는 작용하는 모든 하중을 기존 말뚝기초가 부담한다. 그러나 증축형 리모델링 공사에서는 통상 보강 말뚝이 시공되기 전에 기존 마감 등의 교체가 선행되므로 철거 된 상태의 순수 골조 자중(D1)만 기존 말뚝 기초가 부담하게 된다. 보강 말뚝이 시공된 이후 추가되는 증축 골조의 자중, 신설되는 마감하중 등의 고정하중(D2)과 활하중(L)은 기존 말뚝 기초와 보강 말뚝 기초가 분담하여 지지한다. 또한 증축 공사가 완료된 시점 이후에는 전체 하중이 작용한 상태에서 풍하중과 지진하중을 기존 말뚝 기초와 보강 말뚝 기초가 분담하여 지지한다.

이와 같이 리모델링 공사에서는 시공단계별로 기존 말뚝 기초와 신설 말뚝 기초가 강성비에 따라 하중을 분담하여 지지하므로 말뚝기초의 보강량 산정시 강성비는 매우 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 또한, ‘수직증축형 리모델링 구조기준’에서는 기존 말뚝 기초는 시공당시의 설계하중을 초과하여 재하되는 하중을 지지할 수 없다고 규정하고 있으므로, 구조해석 및 설계시 이러한 점을 고려해야 한다.

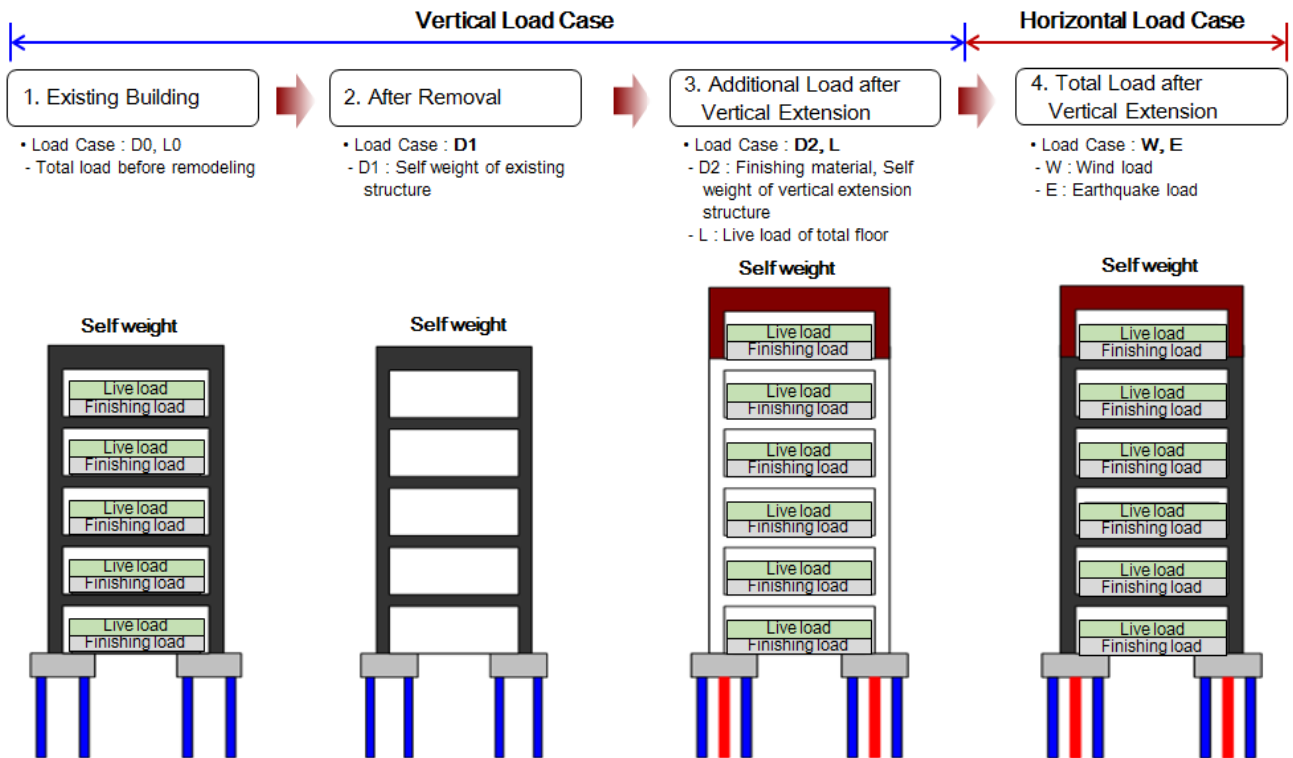


Fig. 1. Load cases along the construction stages of condominium remodeling process

## 2.2 말뚝 강성 변화에 따른 구조해석 결과

1990년대 초기 준공된 공동주택의 3개층 수직증축 리모델링에 따른 말뚝 보강 설계 사례를 대상으로 기존 말뚝 기초와 보강 말뚝 기초의 강성비에 따른 말뚝 기초 하중분담 영향을 분석하였다. 본 해석에 사용된 구조해석 프로그램은 건축구조분야 상용프로그램인 MIDAS를 활용하였다. 공동주택 상부구조는 MIDAS GEN으로 해석하였으며 상부구조의 하중을 말뚝으로 전달시키기 위하여 기초/말뚝해석은 GEN의 연계프로그램인 MIDAS SDS로 해석하였다. 일반적으로 건축구조 해석에서 지반조건은 말뚝의 강성 즉, 스프링 계수로 모델링된다.

대상 공동주택에 적용된 말뚝 기초는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 기존 말뚝 기초는  $\phi 350\text{mm}$ 의 PC 말뚝 372본이 시공되었으며, 보강 말뚝 기초는 강봉 직경  $\phi 150\text{mm}$ 의 마이크로파일 227본이 시공되었다. 말뚝 강성비에 따른 하중분담 특성을 비교하기 위하여 Table 1에 나타난 바와 같이 기존 말뚝 기초의 강성을 조정하여 보강 말뚝 기초와의 강성비를 변수로 해석을 수행하였다. Case 1은 말뚝 강성비,  $\frac{K_{ve}}{K_{vr}}$  (기존말뚝 강성 대비 마이크로파일 강성)가 0.95이고, Case 2는 말뚝강성 비가 2.10이 되도록 모델링하였다. Case 1에 대하여 2.1절의 절차에 따라 시공단계별 말뚝 기초의 하중분담 특성을 고려하여 모

든 말뚝 기초가 설계하중 이내가 되도록 보강 말뚝 기초를 설계하였다. 동일한 말뚝 배치에 대하여 말뚝 강성비를 2.10로 변화시켜 기존 말뚝 기초에 재하되는 작용하중을 계산하였다. Fig. 3은 Case 1과 Case 2의 말뚝 강성비에 따른 모든 기존 말뚝 기초의 설계하중에 대한 작용하중의 비( $\frac{P_{apply}}{P_{design}}$ )를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 당초 말뚝 강성비 0.95에서는 모든 말뚝 기초가 설계하중 이내로 설계된 상태에서 말뚝 강성비가 2.10으로 증가할 경우 전체 기존 말뚝 기초의 56%인 210본이 설계하중을 초과하는 것으로 나타났다.

이와 같이 리모델링 공사에서는 기존 말뚝 기초와 보강 말뚝 기초의 강성비에 따라서 하중분담 특성의 차이가 크게 발생하며, 이로 인해 보강량이 급격히 증가할 수 있다. 따라서 리모델링 공사의 말뚝 기초 설계 시에는 합리적인 말뚝 기초의 강성 추정이 중요하다. 한편 리모델링 대상이 되는 1990년대 국내 공동주택에 적용된 PC 말뚝은 현재는 제작 및 사용되지 않고 있으며 강성 관련 연구가 거의 이루어지지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서는 1990년대 수행된 SIP-PC말뚝 재하시험 결과를 바탕으로 기존 PC말뚝의 수직 강성 현황을 분석하고 합리적인 말뚝 기초 강성 추정의 기본 자료를 제공하고자 한다.

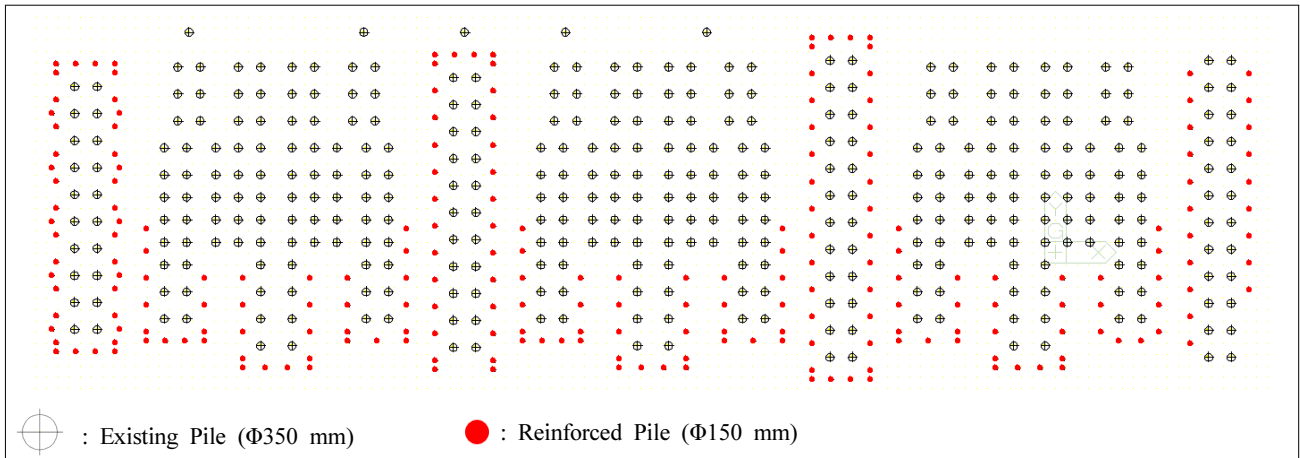


Fig. 2. Existing and reinforcing pile location for structural analysis of condominium remodeling with three floor vertical extension

Table 1. Vertical Stiffness of existing and reinforcing piles for structural analysis

Classification	Pile type	The number of piles	Diameter (mm)	Case 1		Case 2	
				$K_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\frac{K_{ve}}{K_{vr}}$	$K_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\frac{K_{ve}}{K_{vr}}$
Existing pile stiffness ( $K_{ve}$ )	PC pile	372	350	110,742	0.95	245,490	2.10
Reinforcing pile stiffness ( $K_{vr}$ )	Micro pile	227	150	117,045		117,045	

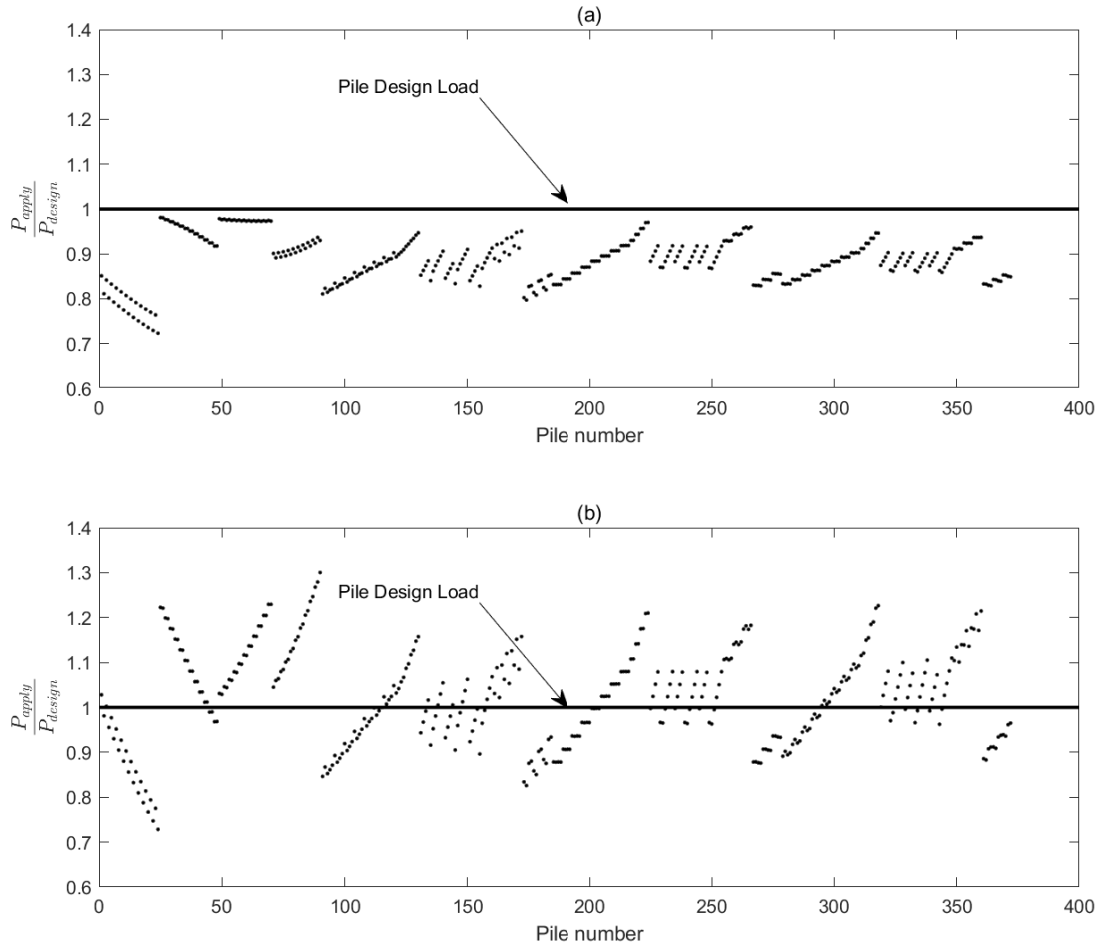


Fig. 3. Ratio between applied and design loads with different stiffness ratio; (a)  $\frac{K_{ve}}{K_{vr}} = 0.95$  and (b)  $\frac{K_{ve}}{K_{vr}} = 2.10$

### 3. 현장 말뚝 재하 시험 및 추정식에 따른 말뚝 강성 분석

말뚝머리에 가해지는 하중은 주변마찰력과 선단지지력에 의해 지지되는 것이 일반적인 말뚝의 하중전이 메카니즘이다(Bowles, 2012). 말뚝에 가해지는 수직하중은 깊이에 따라 토사와의 인터페이스에서 발현하는 주변마찰력에 의해 상쇄되어 말뚝하부로 갈수록 축하중은 점차 감소한다. 주변마찰력은 말뚝의 침하 진행에 따라 점차 크게 발현하고, 주변마찰력에 의해 상쇄되지 않은 하중이 최종적으로 말뚝의 선단지지력으로 발현된다. 이러한 말뚝 머리 하중이 지반으로 전이되는 양상은 지층의 형상, 각 지층 토사의 공학적 특성(내부 마찰각, 점착력, 구속압 등), 말뚝의 구조 및 재료 특성, 지하수위 특성 등에 의해 결정되는 지반과 말뚝의 복합적인 상호작용에 따라 변화한다.

진술한 바와 같이 말뚝의 하중전이는 지반과의 상호

작용에 의해 분석되어야 한다. 따라서, 현장 재하시험의  $P-\delta$  결과로부터 산정되는 말뚝의 수직강성( $K_v$ )은 말뚝의 제원(단면 형상, 길이, 시공 방법) 및 재료 특성과 지층의 물성값이 복합적으로 반영된 결과이다. 하지만, 국내에서 활용되고 있는 말뚝 수직 강성 추정식은 말뚝의 시공방법과 제원을 적용하여 강성을 산정하고 있다. 본 절에서는 38건의 현장 재하시험 결과를 분석하여 말뚝의 수직강성을 다양한 방법으로 분석하고, 국내에서 활용되고 있는 도로교설계기준해설(KHS, 2008) 및 한국철도시설공단(KRC, 2012)의 추정식으로부터 산정한 값과 상호·비교한다.

#### 3.1 현장 말뚝 압축 재하 시험 결과 데이터

본 논문에서는 1995~1997년에 아파트 신축을 위해 수행된 38건의 SIP(Soil-cement Injected Precast Pile) PC 말뚝의 현장 압축 정재하 시험보고서를 분석하였다.

시험데이터는 시설물 안전관리에 관한 특별법에 따라 한국시설안전공단에 취합·관리하는 시설물정보관리종합시스템(Facility Management System)에 등록된 자료 중 국내 아파트단지 건설을 위해 수행된 말뚝 압축 정재

하 시험 결과이다(KISTEC, 2017). 38건의 말뚝재하시험이 수행된 대상 아파트 단지는 조치원, 전라남도 광주, 인천, 수원, 남양주, 서울에 위치한다.

Table 2는 38개의 말뚝 압축 정재하 시험보고서로부

Table 2. Pile static load test data for SIP (Soil-cement Injected Precast Pile) pile between 1995 and 1997

ID	Year	City <sup>+</sup>	Pile properties						Displacement at $P_{design}$		Displacement at $2 \times P_{design}$		$\delta$ for $P_{ultimate}$	
			Pile type	D (mm)	t (mm)	L (m)	$\frac{L}{D}$	$P_{design}^*$ (ton/KN)	$\delta_d^s$	$\delta_d^p$	$\delta_{2d}^s$	$\delta_{2d}^p$	$\delta^s$ (0.1D)	$\delta^p$ (0.025D)
1	1997	J	PC	0.35	0.065	11.6	33	40/392	7.550	4.305	14.455	7.265	35	8.75
2	1997	J	PC	0.35	0.065	11.4	33	40/393	4.165	1.465	9.325	3.590	35	8.75
3	1997	J	PC	0.35	0.065	11.7	33	40/394	2.260	0.530	5.595	1.675	35	8.75
4	1997	J	PC	0.35	0.065	13.5	39	40/395	1.810	0.170	4.810	0.900	35	8.75
5	1997	J	PC	0.35	0.065	12	34	40/396	2.505	0.450	5.750	1.335	35	8.75
6	1997	J	PC	0.35	0.065	14.5	41	40/397	2.885	1.000	6.835	2.395	35	8.75
7	1997	J	PC	0.35	0.065	13.5	39	40/398	1.975	0.050	6.830	1.680	35	8.75
8	1995	G	PC	0.4	0.075	11	28	50/490	1.375	0.245	2.785	0.770	40	10.00
9	1996	I	PC	0.4	0.075	13.2	33	50/490	3.345	0.785	8.643	2.952	40	10.00
10	1995	I	PC	0.4	0.075	14.3	36	50/490	2.534	0.443	6.028	1.362	40	10.00
11	1997	G	PC	0.4	0.075	5.4	14	50/490	1.057	0.279	2.975	1.170	40	10.00
12	1997	G	PC	0.4	0.075	7.2	18	50/490	1.367	0.229	3.562	0.909	40	10.00
13	1997	Su	PC	0.4	0.075	6.8	17	50/490	3.110	1.840	9.490	4.540	40	10.00
14	1997	Su	PC	0.4	0.075	5.4	14	50/490	6.080	3.080	13.660	8.330	40	10.00
15	1997	N	PC	0.4	0.075	10.3	26	50/490	2.750	1.940	9.700	8.850	40	10.00
16	1997	N	PC	0.4	0.075	9.2	23	50/490	1.700	1.090	5.060	2.160	40	10.00
17	1997	N	PC	0.4	0.075	10	25	50/490	3.620	1.900	10.280	5.320	40	10.00
18	1997	N	PC	0.4	0.075	10.2	26	50/490	2.420	1.770	7.690	5.440	40	10.00
19	1997	N	PC	0.4	0.075	5.9	15	50/490	5.530	2.820	16.190	5.880	40	10.00
20	1997	N	PC	0.4	0.075	6.1	15	50/490	5.020	2.430	14.190	5.910	40	10.00
21	1997	N	PC	0.4	0.075	9.7	24	50/490	2.050	1.170	5.180	3.790	40	10.00
22	1997	N	PC	0.4	0.075	9.7	24	50/490	3.190	2.160	6.920	5.250	40	10.00
23	1997	N	PC	0.4	0.075	7.3	18	50/490	3.450	2.120	10.900	5.000	40	10.00
24	1997	G	PC	0.4	0.075	7.2	18	45/441	1.835	0.510	3.765	1.260	40	10.00
25	1996	G	PC	0.4	0.075	7.1	18	45/442	1.915	0.900	2.990	1.350	40	10.00
26	1996	S	PC	0.5	0.09	8	16	65/637	3.820	1.650	8.455	4.385	50	12.50
27	1996	S	PC	0.5	0.09	15.8	32	65/638	1.965	0.370	4.770	0.760	50	12.50
28	1996	S	PC	0.5	0.09	8.4	17	65/639	1.055	0.145	2.880	0.590	50	12.50
29	1996	S	PC	0.5	0.09	8.8	18	65/640	1.205	0.210	3.200	0.740	50	12.50
30	1996	S	PC	0.5	0.09	6.2	12	65/641	2.275	0.850	8.220	4.250	50	12.50
31	1996	S	PC	0.5	0.09	9.4	19	65/642	3.210	0.980	10.755	4.425	50	12.50
32	1996	S	PC	0.5	0.09	13.3	27	65/643	2.890	0.910	11.805	6.060	50	12.50
33	1996	S	PC	0.5	0.09	7	14	65/644	2.175	0.375	6.125	1.135	50	12.50
34	1996	S	PC	0.5	0.09	9.7	19	65/645	2.660	0.575	9.360	3.755	50	12.50
35	1996	S	PC	0.5	0.09	6.7	13	65/646	2.715	0.945	8.535	3.955	50	12.50
36	1996	S	PC	0.5	0.09	8.2	16	70/686	2.295	0.565	7.255	2.395	50	12.50
37	1996	S	PC	0.5	0.09	8.6	17	70/687	1.640	0.330	3.850	0.860	50	12.50
38	1996	S	PC	0.5	0.09	10.5	21	70/688	1.230	0.179	3.885	1.029	50	12.50

+ J: Jochiwon, G: Gwangju, I: Incheon, Su: Suwon, N: Namyangju, S: Seoul

\*  $P_{design}$  : Pile design load from field load test report

#  $E_p$  : Young's modulus of PC pile (4.00E+05 kg/cm<sup>2</sup>, 4.00E+06 tf/m<sup>2</sup>, 4.00E+07 kN/m<sup>2</sup>)

터 파악한 시험말뚝의 제원을 보여준다. 시험보고서는 조치원 1개단지(7건), 전라남도 광주 3개 단지(5건), 인천 1개단지(2건), 수원 1개 단지(2건), 남양주 1개단지(9건), 서울 1개 단지(13건)에서의 시험결과이다. 대상 말뚝은 모두 PC(Prestressed Concrete)이며, SIP 시공방법으로 설치되었다. 말뚝의 직경은 350mm, 400mm, 500mm이며, 두께는 각각 65mm, 75mm, 90mm이다. 말뚝의 길이는 현장 조건에 따라 다양하며, 말뚝길이와 직경의 비율을 나타내는 장경비(L/D)는 12~41이므로 다양한 장경비에 따른 말뚝의 강성을 분석하는데 적합한 것으로 판단된다. 설계하중은 직경에 따라 다르며 각각  $\Phi 350$ : 40ton(392kN),  $\Phi 400$ : 50ton(490kN),  $\Phi 500$ : 65ton(642kN) 또는 70ton(686kN)으로 재하시험 보고서에 명기되어 있다.

말뚝 정재하 시험의 재하과정은 KS 2445 및 ASTM 1143에서 제시한 표준재하시험 과정에 따라 수행되었다. Table 3은 수집된 보고서에서 제시한 말뚝재하시험의 재하시험과정을 보여준다. 말뚝설계 하중인  $P_{design}$  과 대비하여, 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, 200%까지 하중을 재하(load)하였고, 제하(unloading)는 3단계, 6단계, 9단계, 12단계에서  $P \rightarrow 0\%$ 로 수행하였다. Table 3의 ‘변위 기호(Displacement ID)’에서 위첨자 ‘r’는 전침하량, ‘p’는 순침하량(소순침하량)을 각각 나타내며, 아래첨자에서 숫자는 각 하중단계(step)에서의

침하량을 나타낸다. 침하량과 관련하여  $\delta_d^r$ 와  $\delta_d^p$ 는 각각 말뚝의 설계하중( $P_{design}$ )에서 전침하량과 순침하량을 나타내고,  $\delta_{2d}^r$ 와  $\delta_{2d}^p$ 는 200% 말뚝설계하중에서 전침하량과 순침하량을 나타낸다.

설계하중( $P_{design}$ ) 및 2배의 설계하중에서 압축재하 시험결과에 따른 말뚝의 침하량 결과는 Table 2에 제시되었다. 말뚝의 극한하중(지지력) 또는 항복하중(지지력)은 재하시험을 통해 분석하고, 이로부터 안전율을 적용하여 허용하중(지지력)을 산정한다. 즉, 말뚝의 설계하중은 허용하중(지지력) 이내로 결정하게 된다. 일반적으로 극한하중에 대응하는 전침하량은 0.1D 또는 25mm 기준을 적용하고, 순침하량은 0.025D 기준을 적용한다. 항복하중의 경우  $\log P - \log S$  곡선 분석 등의 도해법을 통해 하중을 산정한다(KGS, 2015). Table 2의 전침하량( $\delta_{2d}^r$ ) 및 순침하량( $\delta_{2d}^p$ )으로부터 본 연구에서 분석한 압축재하 시험결과는 2배의 설계하중을 재하해도 항복하중 또는 극한하중까지 다다르지 않은 것으로 나타났다.

### 3.2 말뚝 수직강성( $K_v$ ) 분석 방법

#### 3.2.1 현장 재하 시험 결과의 말뚝 수직강성( $K_v$ ) 분석 방법

말뚝의 수직강성, 즉 축방향 스프링정수( $K_v$ )는 말뚝 머리에서 축방향으로 단위 탄성변위량을 발생시키는 축

Table 3. Loading schedule for static axial load test (refer to KS 2445 and ASTM 1143)

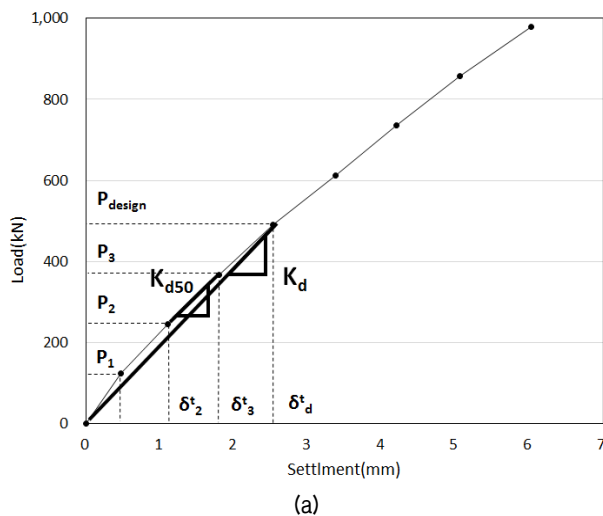
Step	Loading ID	Displacement ID	Load level relative to $P_{design}$	Description
1	P1	$\delta_1^r$	25%	Maintain each load increment until the rate of axial movement does not exceed 0.25 mm per hour, with a minimum time adequate to verify this movement rate based on the accuracy of the movement indicator readings, and with a maximum of 2 hr
2	P2	$\delta_2^r$	50%	Same as step 1
3	P2→0	$\delta_2^p$	Unloading	Measure residual ( $\delta_2^p$ ) displacement
4	P3	$\delta_3^r$	75%	Same as step 1
5	P4 ( $P_{design}$ )	$\delta_d^r = \delta_4^r$	100%	Same as step 1
6	P4→0	$\delta_d^p = \delta_4^p$	Unloading	Measure residual ( $\delta_d^p$ ) displacement
7	P5	$\delta_5^r$	125%	Same as step 1
8	P6	$\delta_6^r$	150%	Same as step 1
9	P6→0	$\delta_6^p$	Unloading	Measure residual ( $\delta_6^p$ ) displacement
10	P7	$\delta_7^r$	175%	Same as step 1
11	P8 ( $P_{2 \times design}$ )	$\delta_{2d}^r = \delta_8^r$	200%	Same as step 1
12	P8→0	$\delta_{2d}^p = \delta_8^p$	Unloading	Measure residual ( $\delta_{2d}^p$ ) displacement

방향력으로 정의된다. 따라서, 현장 재하시험의  $P-\delta$  곡선으로부터  $K_v$ 를 산정할 수 있으며, 도로교설계기준해설(KHS, 2008)에서는  $\log P-\log S$  곡선법 등을 이용하여 판정되는 항복 시 할선 기울기를 실측  $K_v$ 로 추천하고 있다. 하지만, 본 연구의 기본데이터인 38개의 현장 말뚝재하시험 결과는 모든 결과가 항복하중에 이르지 못하였으므로, Table 4에서 제시한 바와 같이 1) 전침하량 기준 설계하중 50%에서 접선 기울기( $K_{d50}$ ), 2) 전침하량 기준 설계하중에서 할선 기울기( $K_d$ ), 3) 탄성침하량( $\delta_d^e - \delta_d^p$ ) 기준 설계하중에서 할선 기울기( $K_d^e$ )로부터 각 시험말뚝의  $K_v$ 를 산정하였다.

Fig. 4는 Table 2의 No. 10 시험결과 데이터를 대상으로 현장 재하시험 결과로부터  $K_v$ 를 산정하는 예를 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 하중의 제하(unloading)단계를 제외하고 재하/loading)단계의 점진적인 하중증가와 그에 따른 변위관계를 도시화한 것이며, 해당 그래프를 통하여 상기한 방법(Table 4)에 따라  $K_{d50}$  및  $K_d$ 를 산정한다. 또한 Fig. 4의 (b)는 재하 및 제하단계를 포함하여

Table 4. Various  $K_v$  corresponding to loading steps of Table 3

$K_v$ analysis	Description
$K_{d50} = \frac{P_3 - P_2}{\delta_3^e - \delta_2^e}$	Incremental stiffness between P2 and P3
$K_d = \frac{P_{design}}{\delta_d^e}$	Secant stiffness at the design load
$K_d^e = \frac{P_{design}}{\delta_d^e - \delta_d^p}$	Secant Elastic stiffness at the design load



재하시험의 전체 하중이력에 대한 변위 관계를 나타낸 그래프이며, 해당 그래프를 통하여  $K_d^e$ 를 산정한다.

### 3.2.2 문헌에 따른 말뚝 수직 강성 산정

도로교설계기준해설(KHS, 2008)에서는 말뚝의 축방향 스프링정수를 산정하는 방법을 아래와 같이 정의하고 있다.

#### 5.8.8.1 말뚝의 축방향 스프링정수

외말뚝의 축방향 스프링정수는 연직재하시험을 통해 구한 하중-침하량 곡선으로부터 구하며, 기존의 연직재하시험에 기초한 추정식, 토질시험 및 현장시험의 결과를 이용하여 추정할 수도 있다.

여기에서, 축방향 스프링정수( $K_v$ )는 말뚝머리에서 축방향으로 단위변위량을 발생시키는 축방향력으로 정의된다. 문헌에서는 항복하중에서의 할선 기울기를 말뚝의 수직강성으로 산정하는 것을 추천하고 있다(KHS, 2008).

식 (1)은 도로교설계기준해설(KHS, 2008) 및 한국철도시설공단(KRC, 2012)에서 제안하고 있는 말뚝 수직 강성( $K_v$ ) 추정식을 보여준다. 추정식은 말뚝의 구조적 제원인 단면적( $A_p$ ), 길이 및 직경( $L, D$ ), 말뚝단면의 탄성계수( $E_p$ )의 함수이며, 말뚝 시공방법 및 재료에 따른 영향을 계수  $a$ 로 반영한다. 만약  $a$ 가 없다면 식 (1)은 축하중을 받는 기둥의 강성산정식과 동일하다.

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

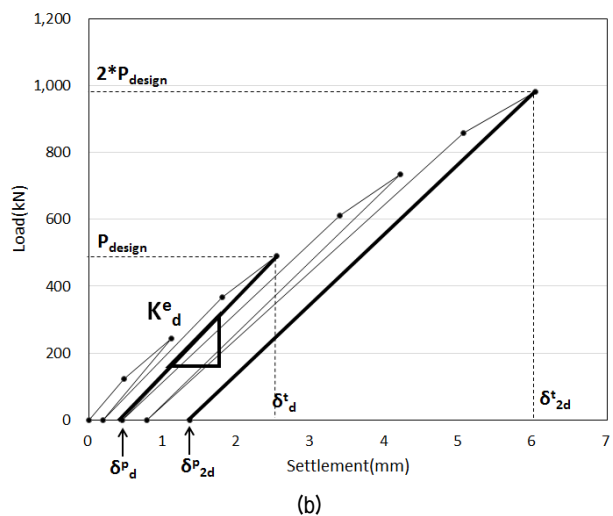


Fig. 4. Analysis of  $K_{d50}$ ,  $K_d$  and  $K_d^e$  for Data #10 of Table 2: (a) Gross  $P-\delta$  curve and (b) Loading-unloading  $P-\delta$  curve



여기서,

$K_v$  : 말뚝의 축방향 스프링정수(kN/m)

$A_p$  : 말뚝의 순단면적(m<sup>2</sup>)

$E_p$  : 말뚝의 탄성계수(kN/m<sup>2</sup>)

$L, D$  : 말뚝의 길이, 직경(m)

식 (1)에서  $a$ 는 말뚝의 시공방법 및 재료에 따라 정의되며, 본 연구의 대상 말뚝은 도로교설계기준해설(KHS, 2008)의 경우 프리보링말뚝형으로 식 (2)로 산정되며, 한국철도시설공단(KRC, 2012)에서는 내부굴착 PC·PHC 말뚝으로 식 (3)으로 산정할 수 있다.

$$a = 0.013(L/D) + 0.53 \quad (2)$$

$$a = 0.011(L/D) + 0.36 \quad (3)$$

식 (1)~식 (3)은 일본도로 협회의 도로교 시방서 하부 구조편을 참고하여 제시된 것으로 알려져 있다(JHS, 2012). 식 (1)~식 (3)을 관찰하면, 도로교설계기준해설 및 한국철도시설공단의 추정식은 말뚝이 시공된 지반의 조건 및 공학적 특성을 반영하기 어려운 것을 알 수 있다. 따라서, 현장 재하 시험 결과가 있을 경우 말뚝 머리에서의  $P-\delta$  곡선으로부터 수직 강성을 구하는 것이 가장 신뢰성이 높은 것으로 제시된다(KHS, 2008).

### 3.3 말뚝 수직강성( $K_v$ ) 분석 결과

일반적으로 구조물은 허용하중 또는 탄성범위 내에서 설계가 진행된다. 즉, 말뚝의 수직강성  $K_v$ 는 말뚝과 지반

의 상호작용에 의해 거동이 탄성범위에 있을 때 말뚝 머리 하중과 변위의 그래프에서 접선의 기울기가 사용되는 것이 현실적인 조건이 된다. 앞서 설명한 바와 같이 문헌에서는  $P-\delta$  곡선의 항복하중에서 할선 기울기를 말뚝의 수직강성으로 산정하는 것을 추천하고 있다. 그러나, 본 연구에서 수집한 말뚝 재하시험 결과는 항복하중 또는 극한하중에 이르지 못한 것으로 판단되므로, Table 3에서 제시한 하중 단계를 고려하여  $K_v$ 를 산정하였다.

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7은 각각  $K_{d50}$ (50%의 설계하중),  $K_d$ (설계하중),  $K_d^c$ (설계하중에서의 탄성침하량)의 값을 장경비( $L/D$ ) 변화에 따라 보여준다. 각 그림에서 ‘o’, ‘□’, ‘△’은 PC 말뚝의 직경별 현장 재하시험 결과로부터 산정한  $K_v$ 를 나타내는데, 각각  $\phi 350, \phi 400, \phi 500$ 의 데이터이다.  $K_{d50}$ 은 50%의 설계하중에서  $P-\delta$  곡선의 접선기울기를 산정한 값이며,  $K_d$ 는 설계하중에서 전침하량과의 할선기울기이고,  $K_d^c$ 은 설계하중에서 탄성침하량 즉, 전침하량에서 순침하량을 제외한 값의 할선기울기이다. Fig. 5~Fig. 7의 (a) 그래프에서 실선 및 점선은 도로교설계기준해설(KHS, 2008)의 추정식이고, (b) 그래프에서 실선 및 점선은 한국철도시설공단(KRC, 2012)의 추정식을 나타낸다. 추정식은 일반적으로 장경비( $L/D$ )가 10 이상인 경우에 적용되므로, 횡축의 스케일은 10 이상의 값을 보여주고 있다. 결과들로부터 장경비가 증가함에 따라 세 개 방법에 따른  $K_v$ 값이 감소하는 경향을 볼 수는 있으나, 현장 시험 결과가 매우 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 이에 따라 각 직경별로 회귀분석 등을 통해  $K_v$ 와  $L/D$ 의 이상적인 관계식을 찾는 것은 어려운 것으로 판단된다. 이와 더불어, 결과로부터 실측

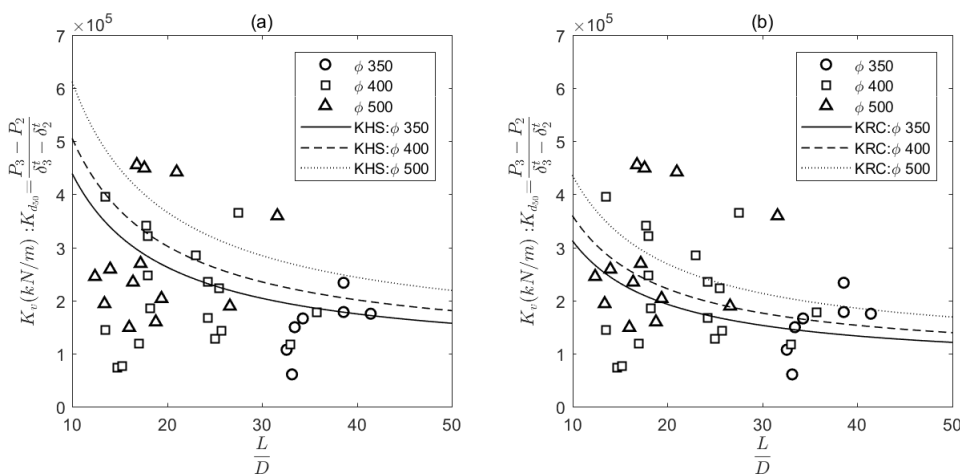


Fig. 5.  $K_{d50}$  vs.  $L/D$ : (a) Comparison with KHS (2008) and (b) Comparison with KRC (2012)

$K_v$ 는  $K_{d50} < K_d < K_d^c$ 로 나타났고, 결과의 육안관찰로부터 도로교설계기준해설(KHS, 2008)과 한국철도시설공단(KRC, 2012)의 추정식과 가장 유사한 값을 나타내는 것은 말뚝의 설계하중에서  $P-\delta$  곡선의 활선 기울기인  $K_d$ 인 것으로 나타났다.

Fig. 8은 현장 시험결과로부터 분석한 식 (1)의  $a$ 를 도로교설계기준해설(KHS, 2008) 및 한국철도시설공단(KRC, 2012)의 계수  $a$ 와 비교한 결과를 보여준다. Fig. 8(a), (b), (c)의 ‘o’심볼은  $a$  값을 각각  $K_{d50}$ ,  $K_d$ ,  $K_d^c$ 로부터 산정한 결과이다. 검은색 실선은 각 데이터를 선형으로 회귀분석한 결과이며, 회귀분석에 따른 1차원 식은 각각 그림에 표기되었다. 각 그림에서 검은색 점선은 선형 회귀분석 공식을 활용하여 장경비에 따라  $a$  값을 예측할 경우 발생하는 에러의  $\pm$ 표준편차를 나타낸다. 즉, 향후에 SIP-PC 말뚝에 대한 재하시험을 수행하여  $K_{d50}$ ,

$K_d$ ,  $K_d^c$ 로부터 말뚝의 강성 산정을 위한  $a$ 를 분석할 경우 위쪽과 아래쪽 점선의 범위 내에 들어올 확률이 50%임을 나타낸다(Mathworks, 2017). 또한, 각 그림의 회색 실선과 회색 점선은 각각 도로교설계기준해설의 식 (2)와 한국철도시설공단의 식 (3)의 장경비에 따른  $a$  값을 나타낸다.  $K_{d50}$ 과  $K_d$ 으로부터 산정한  $a$  값이 식 (2)와 식 (3)에 매우 유사한 것으로 알 수 있으며,  $K_d^c$ 로부터 산정한  $a$  값은 식 (2) 및 식 (3)과 비교하여 상당히 크게 분석되는 것으로 나타났다. 식 (1)로부터  $a$  값은  $K_v$ 의 값과 비례관계 있는 것을 고려할 때,  $K_{d50}$ 과  $K_d$ 를 활용한  $a$  값 산정이 보다 보수적인 말뚝의 강성을 제시하는 것으로 분석되었다. 또한, Fig. 8(b)로부터  $10 < L/D < 50$  구간에서 도로교설계기준해설의 식 (2)와 한국철도시설공단의 식 (3)은 위쪽과 아래쪽 검은색 점선의 범위 내에 모두 포함되고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 도로교설계기

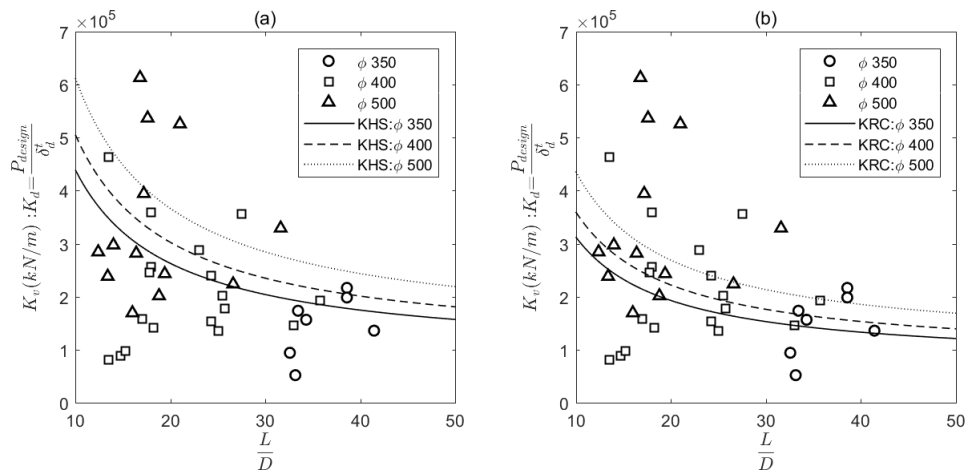


Fig. 6.  $K_d$  vs.  $L/D$ ; (a) Comparison with KHS (2008) and (b) Comparison with KRC (2012)

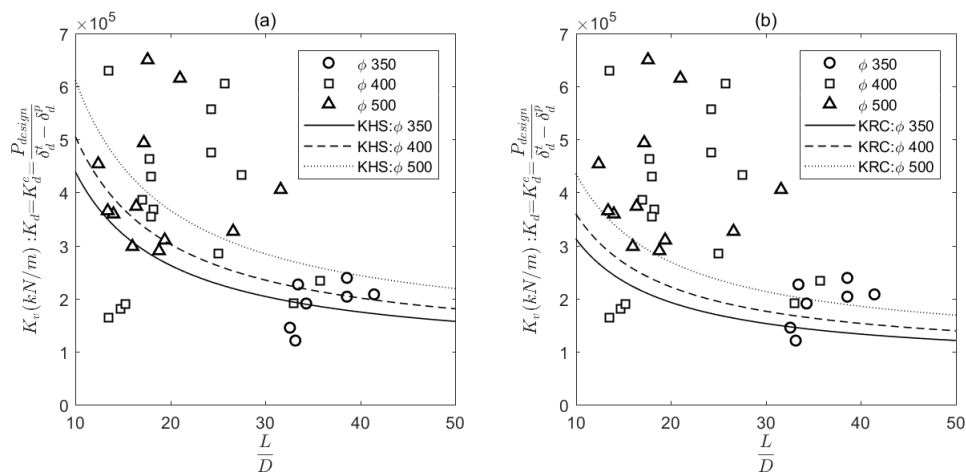


Fig. 7.  $K_d^c$  vs.  $L/D$ ; (a) Comparison with KHS (2008) and (b) Comparison with KRC (2012)

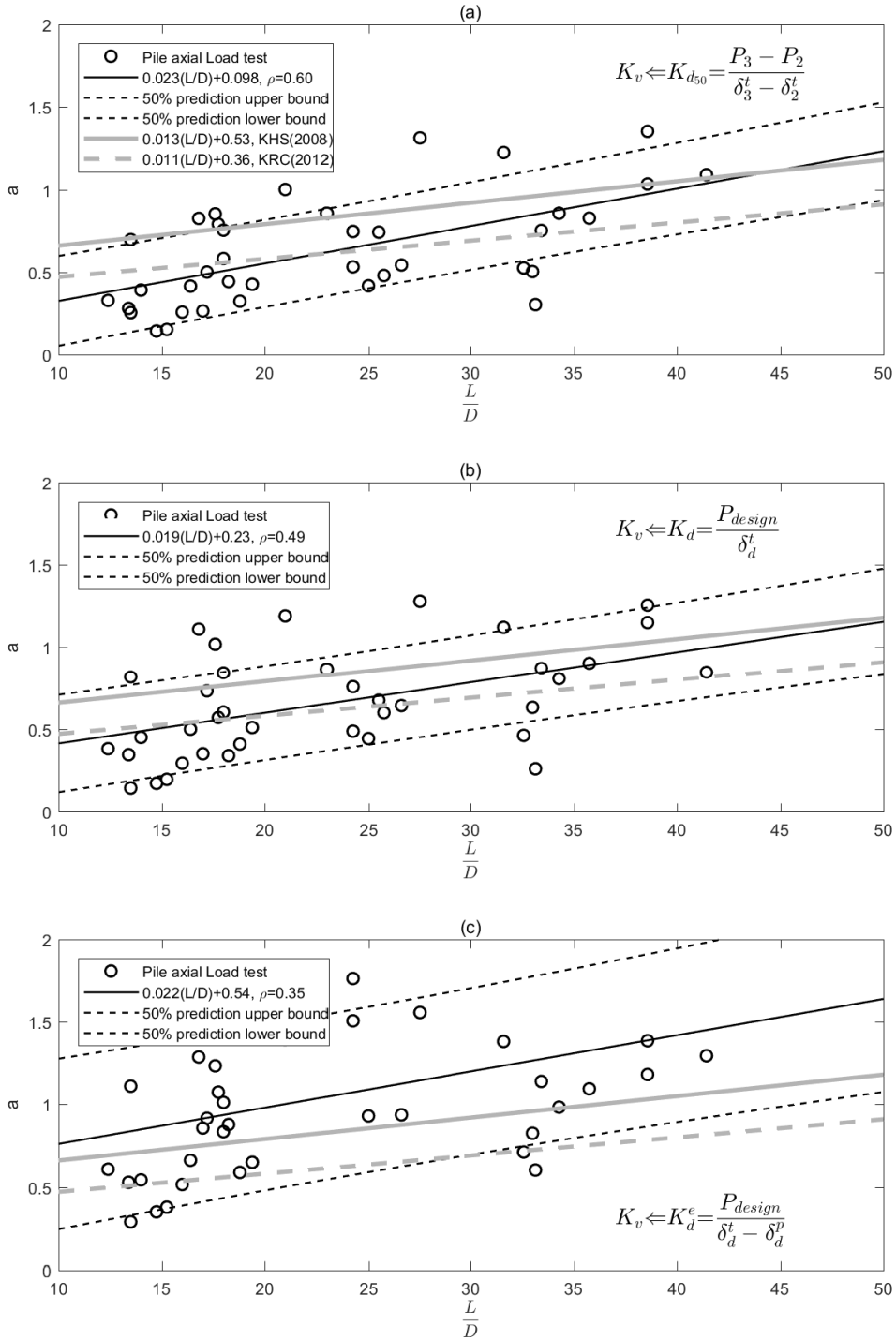


Fig. 8. Coefficient  $a$  vs.  $\frac{L}{D}$ ; (a)  $a$  from  $K_{d50}$ , (b)  $a$  from  $K_d$  and (c)  $a$  from  $K_d^e$

준해설과 한국철도시설공단의 추정식을 통해 말뚝 강성 산정을 위한  $a$  값을 분석할 경우 실제 재하시험 결과의 50% 확률의 범위 내에 위치한다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

주택법 개정에 따라 최대 3개 층까지 수직증축이 가

능한 공동주택 리모델링 사업이 현재 서울 및 1기 신도시를 중심으로 진행 중에 있다. 증축형 리모델링 사업은 하중 증가 및 강화된 내진기준의 적용으로 인해 대부분의 경우 기존 말뚝의 내력이 부족하여 기초보강을 필요로 한다. 말뚝 보강 설계는 기존 말뚝과 보강 말뚝의 강성비에 기초한 시공단계별 구조해석을 통하여 수행하게 되는데, 공동주택 건설 당시의 말뚝 강성에 대한 자

료가 미비한 상태이다. 본 논문에서는 1995년~1997년 사이에 시공된 SIP-PC 말뚝에 대한 현장 압축 정재하 시험 결과 38건을 수집하여 말뚝의 강성을 산정하였다. 또한, 정재하 시험 데이터를 도로교설계기준해설(KHS, 2008) 및 한국철도시설공단의 말뚝기초의 설계 기준(KRC, 2012)의 말뚝 강성 추정식과 비교하였다. 이로부터 다음과 같은 연구결과를 도출하였다.

- (1) 말뚝 압축 정재하 시험결과로부터 축방향 스프링정수( $K_v$ )를 다양한 방법으로 산정하였다. 산정 방법은  $P-\delta$ 곡선에서 1) 전침하량 기준 설계하중 50%에서 접선 기울기( $K_{d_{50}}$ ), 2) 전침하량 기준 설계하중에서 할선 기울기( $K_d$ ), 3) 탄성침하량( $\delta'_d - \delta''_d$ ) 기준 설계하중에서 할선 기울기( $K'_d$ )를 적용하였다. 분석 결과로부터 장경비가 증가함에 따라 세 개 방법에 따른  $K_v$ 값이 감소하는 경향을 볼 수는 있으나, 현장 시험 결과의 분산도가 높아 말뚝 직경별로 회귀분석 등을 통해  $K_v$  vs.  $L/D$ 의 이상적인 관계식을 찾는 것은 어려운 것으로 판단된다. 재하시험 결과로부터 산정된  $K_v$ 는  $K_{d_{50}} < K_d < K'_d$ 로 나타났고, 육안 관찰로부터 도로교설계기준해설(KHS, 2008)과 한국철도시설공단(KRC, 2012)의 추정식과 가장 유사한 값을 나타내는 것은  $K_d$ 인 것으로 나타났다.
- (2) 도로교설계기준해설(KHS, 2008) 및 한국철도시설공단 말뚝기초의 설계(KRC, 2012)에서 제안하는 말뚝 강성 추정식의 말뚝 형식에 따른 계수  $a$ 와 시험 결과로부터 산정한 값을 비교하였다. 비교결과  $P-\delta$  곡선에서 전침하량 기준 설계하중에서 할선 기울기( $K_d$ )를 활용하여 산정한  $a$  값이 문헌의 값과 가장 유사한 것으로 나타났다. 시험결과에 대한 에러분석을 통해 도로교설계기준해설과 한국철도시설공단의 추정식으로  $a$ 를 산정할 경우  $10 < L/D < 50$  범위 내에서 현장 재하시험 결과와 유사한 것으로 나타났다. 즉, 도로교설계기준해설과 한국철도시설공단의 추정식을 통해  $a$  값을 예측할 경우 실제 재하시험 결과의 50% 확률의 범위 내에 위치하는 것으로 나타났다.

본 연구는 SIP 시공방법을 적용하여 설치된 PC 말뚝의 현장 재하시험 결과를 통해 분석된 말뚝 기초의 수직 강성에 관한 것이다. 현재 수직중축형 공동주택 리모델링 사업의 대상 단지는 주로 1990년대 초반에는 시공되

었으며, 당시에는 타격식 PC 말뚝이 널리 적용된 것으로 알려져 있다. 따라서, 시공방법 및 말뚝재료에 따른 말뚝 강성의 변화에 대한 추가 연구가 반드시 필요할 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 분석된 SIP-PC 말뚝의 수직 강성은 향후 리모델링 구조해석시 참고자료가 될 수 있을 것으로 사료되며, 도로교설계기준해설(KHS, 2008)과 한국철도시설공단 말뚝기초의 설계(KRC, 2012)에서 제시하고 있는 추정식의 한계 및 적용성을 판단하는 기초자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 주거환경연구사업의 연구비지원(15RERP-B099826-01#)에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. ASTM 1143 (1994), Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, *American Society for Testing and Materials*.
2. Bowles, J. E. (2012), *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill College.
3. Choi, C., Cho, S-D, Yoo, Y-C, Choi, K-S, and Cho, S. (2014), Development of Pre-loading Method for Reinforcement Piles of Apartment Remodeling, *Technical Report*, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp.18-65.
4. JHS (2012), *Japan Road Association: Design Specifications of Highway Bridges, Part IV Foundations*, pp.22-23.
5. KGS (2015), Pile foundation design guideline explanation, Korean Geotechnical Society, pp.211.
6. KHS (2008), *Korea Highway Bridge Design Standard, Explanation*, pp.885-887.
7. KISTEC (2017), <http://www.fms.or.kr>, Facility Management System, Korea Infrastructure Safety Corporation.
8. KRC (2012), *Pile Foundation Design Guideline*, Korea Rail Network Authority, pp.76-77.
9. KS 2445 (1997), Standard method of testing piles under axial compressive load, *Korean Industrial Standards*.
10. Mathworks (2017), <https://kr.mathworks.com/help/matlab/ref/polyval.html>.
11. MOLIT (2013), *Housing Act*, Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, p.2.
12. MOLIT (2014), *Structural Standards for Condominium Remodeling with Vertical Extension*, Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Received : October 29<sup>th</sup>, 2017  
 Revised : November 10<sup>th</sup>, 2017  
 Accepted : November 20<sup>th</sup>, 2017