

# 매입말뚝의 설계식 적정성 및 지지력 상향 가능성 분석 연구

## Analytical Study on the Appropriateness of Design Formula and Possibility of Improving Bearing Capacity of Bored Pile

박종배<sup>1</sup> · 이범식<sup>2</sup> · 박용부<sup>3</sup>

Jong-Bae Park<sup>1</sup>, Bum-Sik Lee<sup>2</sup> and Yong-Boo Park<sup>3</sup>

(Received July 22, 2015 / Revised August 29, 2015 / Accepted August 29, 2015)

### 요 약

말뚝 설계효율(설계지지력/재료강도)을 70%(160톤)에서 80%(190톤)로 개선하기 위해 기존 말뚝재하시험 자료 분석과 정밀 동재하시험 및 국내 최초의 양방향 재하시험을 실시하였다. 기존 동재하시험 데이터를 Davisson 방법으로 분석하면 풍화암 지지층(N치 50/15)에서도 설계지지력 190톤을 만족하였다. 그러나, 이를 CAPWAP으로 해석하면, 타격 에너지 부족으로 목표지지력을 만족하지 못한 말뚝이 전체의 40%가 나타났다. 따라서, 동재하시험 결과에서 목표 지지력을 확인하기 위해서는 6톤 이상의 해머에 의하여 충분한 타격력을 가하는 것이 필수적인 것으로 나타났다. 정적인 양방향 재하시험의 Davisson 분석에 의한 허용지지력은 260.0~335tonf(평균 285.3tonf)를 나타내어 목표지지력을 크게 상회하는 것으로 나타났다. 이 시험결과는 동일 말뚝에 대한 정밀 동재하시험의 허용지지력(평균 202.3tonf) 보다 약 40% 정도 크게 나타났는데, 동재하시험에서 충분하지 않은 타격력, 정적 양방향재하시험 시 주변말뚝에 의한 인터록킹에 의한 지지력 증가 등에 의한 차이로 판단된다.

**주제어** : 동재하시험, Davisson 분석법, CAPWAP, 지지력, 타격에너지, 양방향재하시험

### ABSTRACT

To improve the pile design efficiency(design bearing capacity/the strength of materials) from 70 percent(160tonf) to 80 percent(190tonf), this paper analysed the existing pile loading test data and performed the precise dynamic loading test and Bi-directional loading test for the first time in Korea. Analysis result of the existing dynamic loading test data by Davisson method showed that bearing capacity of piles penetrated at weathered rock stratum(N=50/15) exceeded 190tonf. But the analysis result by CAPWAP method showed that piles less than the target bearing capacity were 40% due to the lack of impact energy. To get the target bearing capacity from the dynamic loading test, using the hammer over 6tonf to trigger the enough impact energy is necessary. Allowable bearing capacity of Bi-directional static loading test by Davisson method was 260.0~335tonf(ave. 285.3tonf) and exceeded overwhelmingly the target capacity. And this exceeded the bearing capacity of precise dynamic loading test(ave. 202.3tonf) performed on the same piles over 40%. The difference between the capacity of Bi-directional loading test and dynamic loading test was caused by the insufficient impact energy during dynamic loading test and increase by interlocking effect by near piles during Bi-directional static loading test.

**Key words** : Dynamic Loading Test, Davisson Method, CAPWAP, Bearing Capacity, Striking Energy, Bi-directional Loading Test

## 1. 서론

최근에 건설공사에서의 원가절감에 대한 요구가 더 많아지고 있고, 구조물 건설공사 중 가장 큰 안전율을 적용하고 있는 공종의 하나인 말뚝공사에 대한 원가절감에 대한 관심이 집중되고 있다. 이러한 경향을 감안하여 민간뿐 아니라 공공기관에서도 말뚝설계 효율(설계지지력/재료강도) 향상을

위해 재하시험, 시범사업 등을 수행 중이다. 통상적인 국내 말뚝설계효율은 약 70% 정도이므로 LH에서는 80% 수준으로 높이고자 하고 있다. 이미 일부 민간 건설업체에서는 80% 이상의 설계효율을 적용하고 있지만, 전국적으로 다양한 지반조건에서 많은 양의 말뚝을 시공하는 LH 입장에서는 여러 시험 데이터가 필요하다. 한편, LH는 재하시험을 통한 품질 관리 기준이 잘 되어있어 기존의 재하시험 자료들이 풍부하

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(주저자: jbpark@lh.or.kr)  
2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원(교신저자: bslee417@lh.or.kr)  
3) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원

고, 추가적인 확인시험을 통하여 설계효율 향상이 가능할 것이라 판단하고 관련 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 국내에서 최초로 매입말뚝(PHC 600)에 대한 양방향 재하시험과 기존 동재하시험 결과를 분석하여 설계지지력 향상에 대한 가능성을 확인하였다. 후속 연구로 선행연구에서 검토되었던, 장비개선, 시공방법 등의 개선사항을 4개 현장에 우선 적용하는 시범사업 연구를 2015년도에 수행 중에 있으며, 시범사업에 대한 성과분석이 완료되면 LH 전 현장에 설계효율 80%를 적용할 계획이다. 본 연구는 선행 연구결과인 설계효율 개선을 위한 현장시험에 대한 분석 내용이다.

## 2. 연구용 재하시험결과 분석

본 시험은 매입말뚝의 시공성 및 말뚝지지력을 측정/분석하여 설계가능 지지력 평가를 위한 기초공학적 자료를 제공함으로써 PHC 말뚝의 설계효율(설계지지력 대비 재료허용하중의 비율) 제고 가능성 평가용 데이터를 확보하는데 목적이 있다.

### 2.1 시험내용 및 방법

PHC 매입말뚝의 설계효율 향상을 위해 3개 현장의 PHC 말뚝에 대해 동재하시험과 양방향 재하시험을 실시하였다. 말뚝은 LH 시방에 따라서 시공하였고 설계효율 개선을 위해 극한 지지력 확인이 필요하므로 동재하시험은 최대 타격력을, 양방향 재하시험에서는 극한 하중을 재하하였다. 시험횟수 등 개요는 표 1과 같다.

표 1. PHC 매입말뚝 설계효율 향상을 위한 시험개요

현장명	A현장 (서울)	B현장 (경북)	C현장 (서울)
말뚝종류	Φ600 PHC-A type( $f_{ck}=80\text{MPa}$ )		
시공방법	매입공법 (Casing+Grout+경타안착)		
동재하시험	E.O.I.D. : 3 Restrike : 3	E.O.I.D. : 2 Restrike : 3	E.O.I.D. : 3 Restrike : 3
양방향시험	1	1	1
비 고	양방향 시험말뚝에 대해서는 E.O.I.D.만 수행		

이 중 PHC 매입말뚝에 대한 양방향 재하시험은 국내에서 최초로 이루어졌다. 양방향 재하시험은 인접하여 진행되고 있는 공사에 미치는 영향이 작은 장점이 있으며, 최대한의 하중을 재하하기 쉬운 편이다. 이러한 장점들로 인해 국내에서는 직경 1m 이상의 대구경 현장타설 말뚝에 양방향 재하시

험이 활발히 시행되고 있다. 본 연구에서는 직경 600mm의 PHC 말뚝 하부에 경타의 충격을 견딜 수 있는 특수 유압잭을 설치하여 PHC 내부의 증공부를 통하여 테일게이트 및 유압호스 등을 그림 1과 같이 설치하였다.

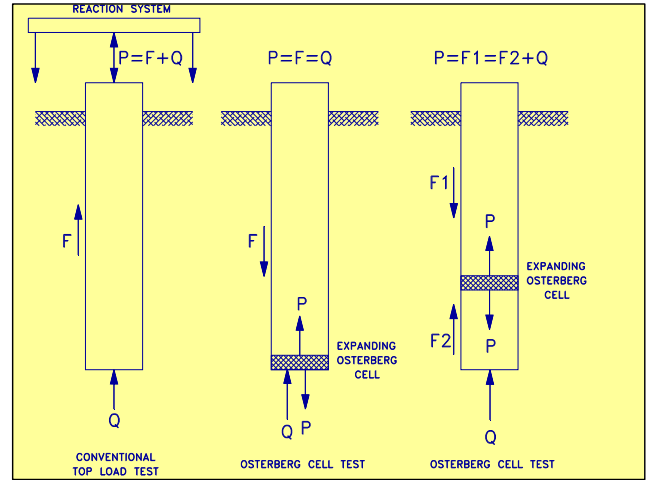


그림 1. 양방향 재하시험의 원리 및 PHC 매입말뚝의 양방향 재하시험 개요

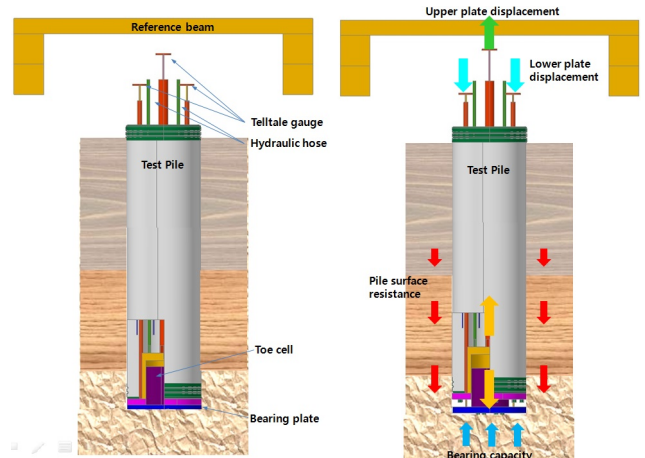


그림 2. 연구용 재하시험 결과

### 2.2 재하시험 결과

PHC 매입말뚝(직경 600mm)의 동재하시험 및 양방향재하시험결과는 표 2와 같다.

3개 현장에 대한 동재하 및 정적 양방향 재하시험을 실시한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 정적인 양방향 재하시험결과가 동재하시험(Restrike)보다 지지력이 크게 나타났다. 즉, 양방향 재하시험의 Davisson 분석에 의한 허용지지력은 260~335tonf(평균 285.3tonf)를 나타내어 Restrike시 허용지지력(100~234tonf : 평균 202.3tonf)보다 약 40% 정도 크게 나타났다. 이렇게 지지력 차이가 나

표 2. 연구용 재하시험 결과

A 현장 (서울)							
말뚝번호	길이 (m)	구분	주면마찰력(tf), (단위마찰력(tf/m <sup>2</sup> ))	선단지지력(tf), (단위선단력(tf/m <sup>2</sup> ))	총지지력 (tf)	허용지지력(tf) Rut값, Davisson값	허용침하량 지지력(tf)
TP-1	18.0	E.O.I.D	10.5 (0.58)	332.6 (1176.3)	343.1	137.2, 83.6	112.5
		Restrike	71.2 (2.1)	356.6 (1,261.2)	428.4	171.4, 100.0	138.0
TP-2	20.9	E.O.I.D	5.1 (0.2)	224.9 (795.4)	230.0	92.0, 41.4	69.0
		Restrike	92.9 (2.4)	154.4 (546.0)	247.3	98.9, 114.9	167.7
TP-3	22.3	E.O.I.D	7.0 (0.3)	302.0 (1,068.0)	309.0	123.6, 84.6	108.0
		양방향시험			440	220, 335	370.0
TP-4	21.0	Restrike	338.3(8.55)	111.1 (1,068)	449.4	180.0, 217 이상	365.0
B 현장 (경북)							
TP-1	17.0	E.O.I.D	8.1 (0.5)	391.3 (1,386.2)	400.0	160.0, 96.0	119.0
		Restrike	142.6 (4.5)	234.3 (845.9)	376.9	150.8, 168.0	211.0
TP-2	17.0	Restrike	141.2 (4.4)	327.7 (1,159.0)	468.8	187.5, 234.0 이상	229.0
TP-3	17.0	Restrike	245.1 (7.0)	200.8(710.3)	445.9	178.4, 223.0	255.0
TP-4	18.5	E.O.I.D	11.8 (0.7)	379.2	391.0	156.4, 150.0	153.0
		양방향시험			380	190, 260이상	288.0
C 현장 (서울)							
TP-1	11.6	E.O.I.D	14.5 (1.3)	315.3 (1,115.3)	329.9	132.0, 85.0	100.0
		Restrike	140.3 (6.4)	239.2 (845.9)	379.5	151.8, 168.5	189.0
TP-2	13.9	E.O.I.D	13.6 (1.0)	291.1 (1,029.6)	304.7	121.9, 59.0	98.0
		Restrike	164.6 (6.3)	212.5 (751.5)	377.1	150.8, 188.0	192.0
TP-3	13.7	E.O.I.D	10.2 (0.7)	331.8 (1,173.5)	342.0	136.8, 60.0	95.0
		양방향시험			640	213.0, 262.5	260.0
TP-4	13.2	Restrike	241.8 (9.7)	168.2 (595.0)	410.0	164.0, 205.0	300.0
평균	17.0	E.O.I.D	10.1 (0.6)	321.0 (1,135.4)	331.2	132.5, 84.5	106.8
		Restrike	175.3 (10.3)	222.8 (787.8)	420.3	171.4, 206.3	247.0

는 것은 동재하시험에서 불충분한 타격력과 시공 여건에 의한 차이에 기인한다. 타격력 부족의 문제는 아래의 두 번째 분석과도 동일하며, 시공여건 문제는 정재하시험 말뚝은 이미 주면에 말뚝들이 많이 시공된 상황에서 주면 지반이 그라우팅되고 말뚝간의 인터록킹으로 인해 지지력이 증가하는 것으로 판단된다.

둘째, E.O.I.D. 시험의 선단지지력이 Restrike 시험을 하면 오히려 감소하는 현상이다(321.0 → 222.8tonf). 이러한 현상은 시험 실무자들에 의해 많이 제기되어 왔던 문제이다. 즉, 매입말뚝의 시멘트 페이스트가 경화하여 마찰력이 증대됨에 따라 해머에 의한 타격력이 충분히 선단부에 전달되지 않으므로 CAPWAP분석에 의한 Rut의 허용지지력 평균이 171.4tonf으로 Davisson법에 의한 허용지지력 평균이 206.3톤 보다 약 20% 작은 지지력을 나타내었다. 충분한 타격력이 주어지면 이 둘의 지지력 차이가 줄어들 것이다. 본 시험은 PHC 600에 5톤의 드롭해머를 사용하여 시험하였는데, 5톤의 해머 보다 6톤 이상의 해머를 사용하여 적절한 낙하고로 시험하는 것이 필요한 것으로 판단되었다.

셋째, 마찰력이 없는 E.O.I.D 시험에서 Davisson 분석에 의한 허용지지력(평균 84.5tonf)은 CAPWAP 분석에 의한 Rut/2.5 값(평균 132.5tonf) 보다 현저히 작은 값을 나타내고, 반대로 Restrike 시험에서는 Davisson 분석에 의한 허용지지력이 크

게 CAPWAP Rut/2.5 보다 큰 값을 나타낸다는 점이다. 이는 Davisson 분석법은 마찰력이 없거나 길이가 짧은 말뚝의 지지력을 과소 평가한다는 널리 알려진 사실과 일치한다. 그러므로, 매입말뚝의 E.O.I.D. 시험에서는 Davisson 분석보다는 CAPWAP Rut 값을 사용하고, 경화 후의 Restrike 시험에서 충분한 타격력이 주어지지 않았다고 판단될 때에는 Davisson 분석법을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 적정 타격력 여부는 Restrike 시험에서 알 수 있는 CSB(Compression Stress at Bottom)로 시험자가 판단한다.

넷째, 재하시험 결과로부터 허용지지력을 산정할 때, 허용침하량 기준을 도입하는 방안도 고려해볼 수 있다. 허용 침하량 기준에 의한 허용지지력 산정은 싱가포르 지하철거기준이 대표적이다. 이 기준은 6mm 또는 9mm(대구경 현장타설 말뚝 : 12mm)를 허용침하량으로 간주하고 이에 상응하는 재하하중을 허용지지력으로 산정하고 있다. 실제로 구조물의 안전성과 사용성을 논할 때에는 지지력보다는 허용침하량으로 관리하는 것이 보다 합리적이며, 성능설계 등 보다 합리적인 설계로 발전하기 위해 허용침하량에 의한 지지력 판정법을 사용할 필요가 있다. 아래에서는 구조물 기초 설계기준 해설(2009)에 수록된 말뚝의 침하량 산정법을 이용하여 말뚝 길이별 허용침하량을 산정하는 방법을 소개하였다.

**(1) 외말뚝의 침하량(구조물기초설계기준해설, 2009)**

외말뚝의 말뚝머리 침하량(S)은 말뚝자체의 길이방향 변형(Ss)과 말뚝 선단부 침하량의 합이며, 말뚝 선단부 침하는 말뚝선단부에 가해지는 하중에 의한 침하량(Sp)과 주면마찰력에 의하여 지반에 전달된 하중에 의한 침하량(Sps)의 합으로 아래 식으로 표시할 수 있다.

$$St = Ss + Sp + Sps \quad (1)$$

$$Ss = (Qpa+asQfs)L/ApEp$$

여기서,

Qpa : 말뚝에 설계하중이 재하되었을 때 말뚝선단부에 전달되는 하중

Qfs : 말뚝에 설계하중이 재하되었을 때 말뚝주면에 전달되는 하중

L : 말뚝길이

Ap : 말뚝의 단면적(재료의 순단면적)

Ep : 말뚝의 탄성계수

as : 포물선 분포의 주면마찰력의 경우에는 as=0.5, 삼각형 분포 경우에는 as=0.67

1) 말뚝 자체의 길이방향 변형 Ss

$$Ss = (Qpa+asQfs)L/ApEp = L/0.318mm$$

여기서 : 설계하중 190tonf,

$$Qpa(\text{선단지지력}) = 1,500tf/m^2 \times Ap/3 = 141.4tf,$$

$$Qfs(\text{주면마찰력}) = 190tf - 141.4tf = 48.6tf$$

$$as = 0.67$$

2) 말뚝선단에 가해지는 하중에 의한 침하량 Sp

$$Sp = CpQpa/Dqp = 3.14mm(\text{말뚝 길이에 무관})$$

여기서,

Cp = 0.02(타입말뚝, 조밀모래) 적용, 가장 보수적인 값을 적용

$$Qpa(\text{선단지지력}) = 1,500tf/m^2 \times Ap/3 = 141.4tf$$

$$qp = 1,500tf/m^2$$

표 3. 흙의 종류별, 시공법별 Cp값

흙의 종류	타입 말뚝	굴착 말뚝
모래(조밀~느슨)	0.02 ~ 0.04	0.09 ~ 0.18
점토(굳은~연약)	0.02 ~ 0.03	0.03 ~ 0.06
실트(조미~느슨)	0.03 ~ 0.05	0.09 ~ 0.12

3) 주면마찰력에 의하여 지반에 전달된 하중에 의한 침하량 Sps

$$Sps = CsQfa/DBqp = 0.647 \times (0.93 + 0.16\sqrt{L/0.6})/L$$

여기서, Qfs = 48.5tf, qp = 1,500tf/m2(=25N, N=60)

4) 말뚝의 길이별 허용 침하량

말뚝(PHC 600)의 설계지지력을 190tonf로 하고, 열악한 지

반조건을 가정하여 허용침하량을 말뚝 길이별로 보수적으로 산정하면 표 4와 같다. Baumann(1873)은 철근콘크리트구조의 허용침하량을 40mm로 규정하였는데, 이 값보다 표 4의 값들은 상대적으로 보수적이라고 할 수 있다.

표 4. PHC 600(설계지지력 190tonf) 말뚝의 길이별 허용침하량

지지력(P)	길이(L, m)	허용침하량(S, mm)
P=190tonf = 선단지지력(141.4tf) +마찰지지력(48.6tf)	10	6.4
	11	6.7
	12	7.0
	13	7.4
	14	7.7
	15	8.0
	16	8.3
	17	8.6
	18	8.9
	19	9.2
	20	9.6
	21	9.9
	22	10.2
	23	10.5
	24	10.8
	25	11.1

허용침하량 기준은 말뚝이 길면 허용침하량이 늘어나 지지력도 계속 커지기 때문에, 허용지지력의 2배되는 하중에 해당하는 침하량이 25mm를 넘지 않도록 하는 제한이 필요하다.

2.3 실험값과 설계값의 비교

재하시험을 실시하여 얻는 지지력과 매입말뚝의 지지력식을 비교하여 설계값과 일치하는 재하시험 분석법을 찾고자 하였다. 먼저 LH에서 사용하는 매입말뚝의 설계식은 다음과 같다.

(1) LH 매입말뚝 설계식

1) 선단지지력

LH 건축물 말뚝설계기준에는 N값 50/15의 지층을 선단지 지층으로 하고 있으며, N값의 한계는 60으로 하고 있다. 허용선단지지력을 구하는 식은 (2)와 같다.

$$Qa = 25N_p A_p / F.S. \quad (2)$$

여기서, Np : 선단부의 N값 (≤ 60)

Ap : 선단면적, F.S. : 안전율 (=3)

2) 주면마찰력

LH 마찰력 설계식은 시멘트 페이스트를 w/c=83%로 시공

하였을 때를 전제 조건으로 하며 다음과 같다.

$$Q_{sa} = \frac{1}{3} [(0.2\overline{N_{\text{모래}}}' L_{\text{모래}} + 0.5q_u L_{\text{점토}}) \times L_p]$$

여기서,  $\overline{N_{\text{모래}}}'$ : 사질지반의 수정평균  $N_{\text{값}}$ ,  $0.2\overline{N_{\text{모래}}}' \leq 10t/m^2$   
 $L_{\text{모래}}$ : 모래층의 깊이  
 $q_u$ : 점토층의 평균일축압축강도 =  $1.25\overline{N_{\text{점토}}}' \leq 10t/m^2$   
 $L_{\text{점토}}$ : 점토층의 깊이  
 $L_p$ : 말뚝의 둘레 =  $\pi D$

기존의 매입말뚝에 대한 LH의 주변마찰력식은 항타말뚝의 절반인  $0.1N \leq 0.5tf/m^2$  식을 사용하였지만, 100여개의 LH 매입말뚝 동재하시험 자료 분석결과(박종배 등, 2004)를 토대로 항타말뚝과 동일한  $0.2N \leq 10tf/m^2$ 로 수정하였다.

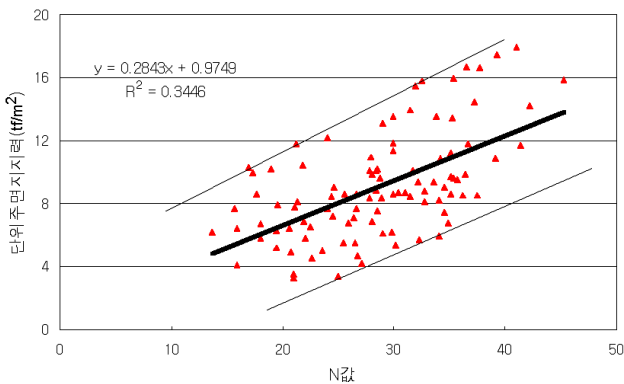


그림 3. N값과 극한단위주면지지력과의 관계(박종배, 2004)

## (2) LH 매입말뚝 설계식에 의한 계산 지지력 비교

위의 설계식을 사용하여 구한 시험말뚝에 대한 지지력과 재하시험결과를 여러 가지 분석법으로 구한 지지력을 비교한 결과는 그림 4와 같다. 앞서 Restrike에서 선단지지력이 실제와 다르게 작게 나타나므로 지지력 설계식과의 비교에서는 동재하시험결과를 보정하여 사용하였다. 보정 Rut 값은 E.O.I.D. 시의 선단지지력과 Restrike 시의 주변마찰력을 합하여 총 지지력을 구하고 여기에 안전율로 나누어 허용지지력을 구한 것이다.

재하시험 결과를 보면 A현장을 제외하며 설계지지력 190tonf을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. A현장은 풍부한 지하수가 경사지형을 따라 이동하여 시멘트 페이스트의 성형도 어렵고 선단부 지반도 Quake가 커서 지지력을 확보하기가 어려운 조건이었다. 설계지지력과 각종 재하시험 분석법을 비교한 결과, 설계지지력(평균 : 204.0tf)에 대해 Rut 보정값(평균 : 221.4tf)은 +9%, Davisson 방법(평균 : 210.4tf)은 +3%, 침하량 기준(평균 : 247.1tf)은 +21%의 차이를 나타내어 Davisson의 허용지지력이 설계지지력과 가장 유사한 것으로 나타났다. 국내에서는 CAPWAP Rut 값을 많이 사용하나, 구미에서는

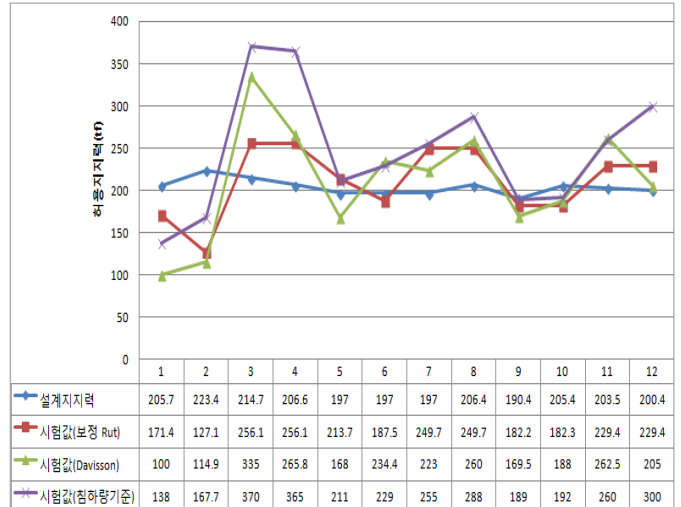


그림 4. LH 설계식에 의한 설계지지력과 재하시험결과와의 비교

거의 Davisson 지지력을 많이 사용하고 있는 실정이다. Davisson 방법은 소정의 타격 에너지를 확보하면, 타격력의 크기에 상관없이 일정한 지지력을 산정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, Davisson 방법은 매입말뚝의 E.O.I.D 시험에서 지지력을 과소 평가하며, Restrike 시험에서는 긴 말뚝의 지지력을 과대 평가하므로 말뚝의 시공단계, 시공조건 및 길이 등을 고려하여 적절한 분석법을 적용하는 것이 필요하다.

## 3. 기존 현장재하시험 결과분석

PHC 600를 종전의 설계지지력 160tonf로 설계/시공된 66개의 매입말뚝(E.O.I.D : 33회, Restrike : 33회)에 대한 동재하시험 데이터를 타격에너지별로 지지력을 분석하여 지지력 상향 설계의 가능성을 확인하였다.

### 3.1 CAPWAP(Rut) 방법에 의한 지지력 분석

동재하시험결과로부터 지지력을 분석하는 방법으로 CAPWAP (CAse Pile Wave Analysis Program)을 가장 많이 사용하고 있으며, 이 방법으로 구한 Rut(Ultimate Resistance)에 안전율(통상 2.5)로 나누어 허용지지력을 구하고 있다. 이 방법은 PDI사가 제공하는 정밀해석 프로그램에 의한 해석방법이기 때문에 신뢰할 수 있으나, 시험에서의 충분한 에너지로의 타격여부 및 해석자의 해석능력에 의해 많은 차이가 나기 때문에 정확한 결과가 얻기 위해서는 많은 주의가 필요하다. 66개 현장의 E.O.I.D.와 Restrike 시험결과를 CAPWAP 방법에 의해 분석한 Rut 값을 도시하면 그림 5와 같다.

E.O.I.D에서 50kN-m의 경타에너지로 set value가 5mm 미만인 경우에 허용지지력이 평균 1,418kN(145tonf) 정도이며, Restrike 시험결과는 허용지지력이 평균 1,920kN(196tonf) 정도로 나타났다. 즉, 시멘트 페이스트의 경화로 인한 마찰력의

증가로 502kN(51tonf)의 지지력 증가가 발생하였다. 기존 현장재하시험은 설계지지력 1,600kN을 확인하기 위한 것이고, 타격 해머도 50kN 용량을 사용하였기 때문에 평균값은 목표 지지력인 1,900kN 보다 컸으나, 1,900kN 보다 지지력이 작은 말뚝이 약 40% 정도 발생하는 문제가 생겼다. 이는 지반 지지력의 부족보다는 기존 설계지지력인 1,600kN 확인용 해머 용량과 타격에너지를 사용하였기 때문이다. 그러므로 설계 지지력 1,900kN(190tonf)를 안정적으로 확인하기 위해서는 해머의 용량을 키우고 Restrike 시험에서 충분한 에너지로 타격하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

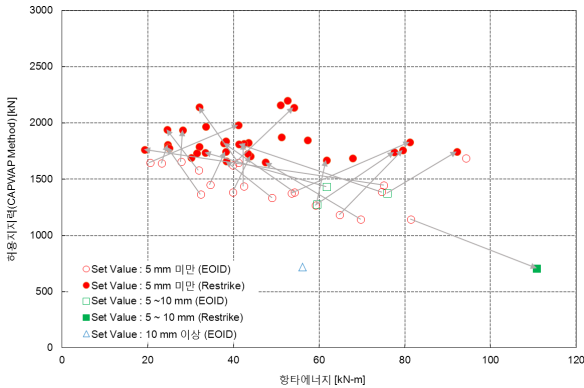


그림 5. CAPWAP(Rut) 분석으로 구한 허용지지력 분포

를 보이기 때문에 시험자의 적절한 판단에 의해 분석되어야 할 것으로 사료된다.

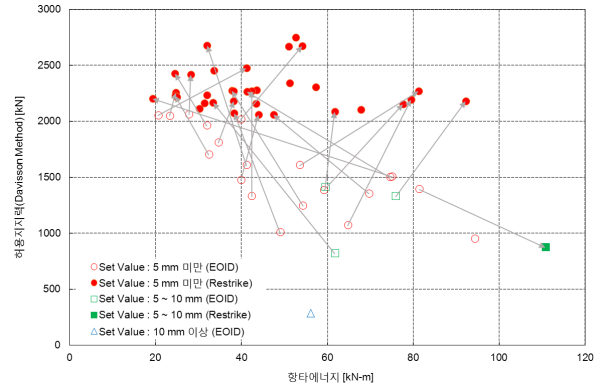


그림 6. Davisson 방법으로 구한 허용지지력 분포

### 3.2 Davisson 방법에 의한 지지력 분석

CAPWAP 분석에 의한 Rut 값은 상향 목표지지력을 만족하지 못하는 말뚝이 40% 정도 발생하였는데 이것은 지반 지지력의 부족이 아니라 해머 용량과 타격에너지가 불충분하기 때문이다. 한편, 타격에너지에 상관없이 일정한 지지력을 얻을 수 있고, 말뚝 자체의 탄성 침하량과 지반 선단부의 탄소성 침하량을 고려하여 서구에서 합리적인 판정법으로 알려져 있는 Davisson 방법으로 허용지지력을 구하였다(그림 6).

Davisson 방법으로 분석한 결과 E.O.I.D. 시험에서 50kN-m의 경타에너지로 set value가 5mm 미만인 경우에 허용지지력의 평균은 1,460kN(149tonf)이고, Restrike 시험의 허용지지력은 평균 2,245kN으로 나타났다. 따라서, 시멘트 페이스트 경화에 의해 지지력의 증가는 평균 785kN(80tonf)이다.

Davisson 방법에 의해 분석한 결과에서는 상향 목표지지력인 1,900kN을 만족하지 못하는 말뚝은 단 1본으로 Davisson 방법으로 Restrike 시험을 분석할 때 상향 목표지지력을 안정적으로 해석할 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 E.O.I.D. 시험의 허용지지력이 289~2,067kN이고, 그림 6에서 보듯이 분포가 매우 불규칙하여 E.O.I.D. 시험에는 실무적으로 적용하기에 다소 어려움이 있는 것으로 판단된다. 즉, Davisson 방법이 서구에서 널리 사용되고 있으나, 서구에는 없는 매입말뚝의 E.O.I.D. 시험에서는 지지력이 과소평가하거나 불규칙한 분포

### 3.3 E.O.I.D. 시험과 Restrike 시험의 지지력 분담 비율 변화

그림 4~5를 보면 E.O.I.D. 시험보다 Restrike 시험을 했을 때 지지력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 통상 시공 후 7일 후에 실시하는 Restrike 시험 시에는 시멘트 페이스트가 경화되어 주변마찰력이 증가하기 때문이다. 시멘트 페이스트의 경화에 따른 주변마찰력과 선단지지력의 변화는 그림 7~8과 같다.

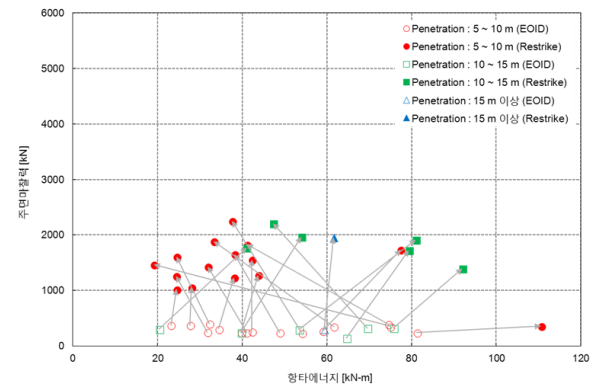


그림 7. 마찰지지력의 변화

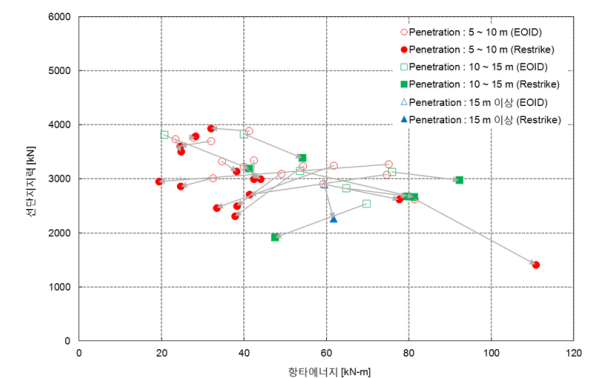


그림 8. 선단지지력의 변화

Restrike 시험의 마찰력이 E.O.I.D. 시험값 보다 커지는 경향(그림 6)을 보이고 있으나 선단지지력은 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다(그림 8). 수치적으로 표현하면 E.O.I.D. 시험의 극한마찰력은 평균 283kN이고, Restrike 시험의 극한마찰력은 1,560kN으로 약 6배 증가한 것으로 나타났다. 이는 시멘트 페이스트의 경화에 의한 일반적인 주면마찰력 증가 현상이다. 반면에, E.O.I.D. 시험과 Restrike 시험의 극한선단지지력은 각각 3,259kN, 2,860kN으로 오히려 줄어드는 현상이 발생하였다. 이는 주면마찰력의 증가하여 타격에너지가 충분히 전달되지 않았기 때문이다. 타격에너지의 평균을 보면 E.O.I.D. 시험에서는 51kN-m, Restrike 시험은 49kN-m으로 거의 같았다. Restrike 시험에서는 마찰력이 증가하기 때문에 선단지지력을 충분히 확인하기 위해서는 E.O.I.D. 시험보다 더 큰 에너지로 타격하여야 한다. 그러나 시험자의 이해부족 및 말뚝 파손 방지 등의 복합적인 이유로 충분한 타격이 이루어지지 않아 상향 목표지지력인 1,900kN을 만족하지 못하는 경우도 있다(그림 5). 그러므로 말뚝의 파손을 방지하고 상향 목표지지력을 확인하기 위해서는 해머용량을 키워서 충분한 에너지로 타격해야 된다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

LH 공동주택용 매입말뚝(PHC 600)의 설계지지력을 기존의 160tonf에서 190tonf으로 올리기 위해 매입말뚝에 최초로 실시한 양방향 재하시험 및 기실시된 LH 현장의 동재하시험 데이터를 분석한 결과, 기존의 풍화암 지지층(N치 50/15)에서도 설계지지력 190tonf을 만족하였다. 물론, 현장의 지반 및 지하수 조건에 따라서는 매입말뚝의 시멘트 페이스트 성형이 어려울 경우 등에는 지지력 확보가 쉽지 않은 사례도 있었다. 설계지지력 상향 조정을 위한 양방향 재하시험과 기존 현장 데이터를 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 매입말뚝에 대한 양방향 재하시험은 정재하시험에 비하여 동재하시험 지지력이 약 40% 작게 나타나는 현상이 발생하였는데 이것은 시공조건 및 시험 시기 차이 이외에 타격 에너지의 차이에 의해서도 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 동재하시험에서 소요의 지지력을 확인하기 위해서는 가능한 무거운 해머를 사용하여 충분한 타격력을 가하는 것이 필요하다.

- (2) 또, 매입말뚝의 E.O.I.D. 시험 시, 시멘트 페이스트의 미경화로 마찰력이 없는 상태이므로 Davisson 지지력이 과소하게 나타나는 경향이 있으나, Restrike 시험에서는 설계지지력과 유사한 지지력을 나타내었다.
- (3) LH에서 수행한 66개의 동재하시험 결과를 CAPWAP과 Davisson 방법으로 분석한 결과, Davisson 방법으로 분석한 허용지지력의 평균값은 2,245kN으로 상향 목표지지력인 1,900kN을 거의 만족하였으나, CAPWAP Rut 분석에 의한 허용지지력은 목표지지력을 만족하지 못한 말뚝이 전체의 40%로 나타났다. 이는 지반의 지지력 부족보다는 타격에너지의 부족으로 사료되었다.
- (4) 동재하시험 결과를 CAPWAP 방법에 의해 주면과 선단지지력의 변화를 분석하였을 때, 주면마찰력은 시멘트 페이스트의 경화에 의해 약 6배 증가하였으나, 선단지지력은 오히려 감소하는 현상이 나타났다. 이는 마찰력의 증가로 선단부에 충분한 타격에너지가 전달되지 않아 CAPWAP 분석에서 상향 목표지지력을 만족하지 못하기 때문이다. 또, 190tonf이 충분히 확인된 Davisson 분석결과를 고려하면, CAPWAP Rut 값이 상향 목표지지력에 도달하기 위해서는 해머 무게를 6tonf 톤 이상으로 증가시켜 충분한 타격에너지로 동재하시험을 실시하는 것이 타당하다.

#### 감사의 글

본 논문은 토지주택연구원에서 연구과제로 수행한 “공사 PHC 말뚝 설계지지력 개선 방안 수립”의 연구결과의 일부를 정리한 것이다.

#### 참고문헌

1. 박종배, 김정수, 임해식(2004), “개선된 기준으로 시공된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구”, 「한국지반환경공학회논문집」, 5(3): 5~15.
2. 토지주택연구원(2014), 「공사 PHC 말뚝 설계지지력 개선 방안 수립」.
3. 한국지반공학회(2009), 「국토해양부제정 구조물 기초설계 기준 해설」.