

보조말뚝을 이용한 말뚝기초공 사례연구

A case study on piling works using follower

이명환¹⁾, Myung-Whan Lee, 홍헌성²⁾, Hun-Sung Hong, 조천환³⁾, Chun-Whan Cho, 서영화⁴⁾, Woung-Hwa Seo, 최도웅⁵⁾, Do-Woong Choi, 김성회⁶⁾, Sung-hoe Kim, 전영석⁶⁾, Young-Suk Jun

¹⁾ (주)파일테크 연구소장, Principal Researcher, PILETECH Consulting Engineers

²⁾ (주)파일테크 사장, President, PILETECH Consulting Engineers

³⁾ 삼성물산(주), (02)2145-6584

⁴⁾ LG건설(주) 기술연구소 소장겸 기술본부장, Principal Researcher and Vice-President, LG Construction Co.

⁵⁾ LG건설(주) 기술연구소, Researcher, LG Construction Co.

⁶⁾ (주)파일테크 부장, Senior Researcher, PILETECH Consulting Engineers

SYNOPSIS : A follower is a structural member interposed between the piling hammer and the pile, to transmit driving energy to the pile head when the pile is installed below ground surface. From this study, stress change imposed on pile due to use of a follower was reviewed, and also change of pile bearing capacity due to excavation of subsoil on the piles was examined. It was found that the proper size of follower is to use a follower with same impedance as that of main pile. One case on piling works using follower was investigated and analysed.

Key Words : follower, hammer, driving stress, impedance

1. 서론

말뚝기초 시공시 현장 여건상 최종 말뚝두부 높이가 시공 지표면보다 아래쪽에 설치되도록 시공하는 경우가 흔히 있다. 이와 같은 조건에서의 시공방법은 계획심도까지 지반을 선 굴착한 후 말뚝을 시공하는 방법과 말뚝을 선 시공한 후 설계심도까지 굴착하는 방법으로 나눌 수 있다.

현장여건상 지반굴착에 앞서 말뚝의 선시공이 불가피한 경우에는 보조말뚝(follower)의 사용 등 항타시공이 보다 복잡해지고 이에 따른 시공관리 또한 단순하지 않다. 말뚝시공 후 주변지반을 굴착하게 되면 지중응력의 감소로 인하여 지지력도 감소하므로 설계시 이를 고려해야 하며 또한 시공시 및 지반굴착이 완료된 후에도 지지력, 건전도 등 품질에 대한 최종 확인이 필요하다.

본 사례 연구에서는 말뚝 시공후 지반굴착이 계획된 국내 현장의 사례에 대한 설계 및 시공상의 문제점을 살펴보고 각 현장의 시공성 및 품질관리 내용을 평가하였다.

2. 굴착이 계획된 현장의 말뚝기초 설계 및 시공시 고려사항

2.1 지지력 감소

특수한 경우를 제외하면 국내의 말뚝은 사질지반에 설치되는 것이 일반적이다. 말뚝이

지표면 이하의 사질토에 설치된 후, 말뚝 두부 상부의 지반을 굴착하게 되면 지중응력(σ_v' 및 σ_h')의 감소로 인하여 지지력은 굴착전보다 감소한다.

정역학적 이론해석에 의한 사질토지반의 주면마찰력($f_s=K\cdot\sigma_v'\cdot\tan\delta$)과 선단지지력($q_b=\sigma_{vb}'\cdot N_q$)은 각각 σ_v' , σ_{vb}' 의 함수로 나타낼 수 있다. 여기서 지반을 굴착하면 σ_v' 값과 σ_{vb}' 값이 감소하게 되며 이의 결과 주면마찰력과 선단지지력이 각각 감소하게 된다(US DOT, 1996; NAVFAC, 1982).

이와같이 지반의 굴착 전후의 지중응력을 산정하기 위해서는 흙의 단위중량, 지하수위 등 보다 정밀한 지반조사 데이터가 필요하게 된다. 이를 토대로 이론해석에 의한 말뚝지지력 공식을 적용하여 굴착전후의 지지력의 변화를 예상할 수 있다.

이론해석에 의한 말뚝의 지지력 산정방법은 실제와 상이할 수 있기 때문에 설계 및 시공 단계에서 굴착에 의한 지지력 감소영향을 신뢰성 있게 정량적으로 해석하는 것은 무리가 있다. 결국 이론해석의 한계를 인정한 조건에서 굴착 전후의 지지력 관계를 고찰하여 지지력 감소를 예상하고 최종적으로 지반굴착 후 재하시험에 의한 지지력 변화를 확인하는 것이 최선의 방법이 될 수 있을 것이다.

2.2 보조말뚝을 이용한 항타 및 동재하시험의 적용성

타입말뚝(선굴착후 경타 포함)시공시 말뚝두부가 지표면보다 아래에 설치되는 경우 항타 시 지표면이하에 매입되는 말뚝을 타격하기 위해서는 해머의 타격력을 말뚝에 전달하기 위한 보조 장치가 필요한데, 일반적으로 이를 위해 보조말뚝(follower)이 많이 사용되고 있다. 국내에 사용하고 있는 보조말뚝은 보통 강관으로 만들어진 것으로 직경 300mm부터 600mm정도까지 다양한 규격이 있다.

보조말뚝을 사용하는 경우에도 동재하시험은 시공관리기준을 설정하고 항타시점에서의 지지력을 평가할 수 있는 유일한 방법이라 할 수 있다. 이 경우 시험을 위한 측정계이지는 보조말뚝에 부착되기 때문에 본 말뚝의 재질이 콘크리트인 경우 시험 및 해석조건은 비균일단면(nonuniform pile)조건이 되어 해석시 이를 고려해 주어야 한다. 강관말뚝의 경우 본 말뚝과 동일한 재질 및 단면을 갖는 보조말뚝의 사용이 가능하기 때문에 균일단면(uniform) 조건에서의 해석이 가능하고 시공상의 문제가 없다면 시험 및 해석상의 문제도 없다.

그러나 강관말뚝의 경우에도 항타시 보조말뚝과 본말뚝사이의 틈(gap)이 발생하는 경우가 있기 때문에 이를 고려하여 시험과 해석이 이루어져야 한다.

이와 같은 이유로 보조말뚝을 사용한 항타에 대한 동재하시험은 해석이 쉽지 않기 때문에 시험 및 분석자에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있으므로 신뢰성 있는 시험결과를 도출하기 위해서는 파동이론 및 동재하시험에 대한 풍부한 경험과 전문성을 가진 기술자에 의해 시험과 해석이 이루어지는 것이 필요하다. 경우에 따라서는 보조말뚝을 이용한 동재하시험을 회피하는 경향이 있거나 시험 및 해석이 불가능하다는 잘못된 인식을 가지는 경우도 있다.

2.3 타격응력, 말뚝의 건전도와 보조말뚝의 규격

보조말뚝을 이용하여 타입하는 말뚝에 동재하시험을 실시할 경우 측정 계이지는 보조말뚝에 부착하게 됨으로 본말뚝의 손상방지 및 항타시공관입성(driveability) 분석을 위해서는 본말뚝에 전달되는 타격응력에 대한 사전 검토가 필요하다.

항타시 두부에 가해진 초기 충격에 의한 하향응력파는 지반저항이 작용하거나 말뚝재료의 탄성계수 또는 단면적이 변화하는 지점(즉, 임피던스(impedance)가 변화하는 지점), 그리고 말뚝의 선단부에서 상향인장파로 반사되어 말뚝두부에 도달하게 된다. 임피던스(Z)는 식

2.1로 표시되는 말뚝 재질과 관련된 함수이다(PDI, 1995).

$$Z=EA/c=\rho cA \quad \text{식 (2.1)}$$

식(2.1)에서 E는 말뚝의 탄성계수, A 는 말뚝의 단면적, ρ 는 재료의 밀도, c 는 wave speed 이다.

그림 2.1은 임피던스가 서로 다른 보조말뚝과 본말뚝에 전달되는 타격응력을 설명하기 위하여 말뚝의 임피던스가 Z_1 에서 Z_2 로 변하는 곳에서의 하향(응력)파 $F_1\downarrow, F_2\downarrow$ 와 상향(응력)파 $F_1\uparrow, F_2\uparrow$ 의 관계를 나타낸 것이다.

그림 2.1에서 상·하향파는 기본파동이론 및 힘의 평형조건 과 입자속도의 연속성에 의해 식(2.2)로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_1\downarrow + F_1\uparrow &= F_2\downarrow + F_2\uparrow \\ F_1\downarrow/Z_1 + (-F_1\uparrow)/Z_1 &= F_2\downarrow/Z_2 + (-F_2\uparrow)/Z_2 \end{aligned} \quad \text{---식 (2.2)}$$

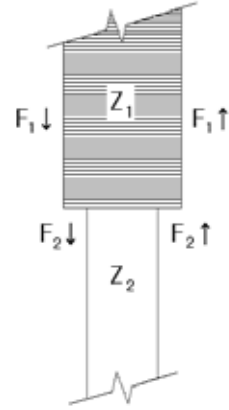


그림 2.1 불규칙단면에서의 응력파

식(2.2)에서 말뚝 중간 부위의 지반저항이 없다고 가정하면 초기 $2L/c$ 시간동안 상향 반사파는 발생하지 않으므로 $F_2\uparrow$ 는 0이 되며 따라서 하향파 $F_2\downarrow$ 와 임피던스 변화로 인한 상향반사파 $F_1\uparrow$ 을 초기하향(응력)파 $F_1\downarrow$ 의 함수로 다음과 같이 풀 수 있다.

$$F_2\downarrow = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}F_1\downarrow, \quad F_1\uparrow = \frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2}F_1\downarrow \quad \text{-----식 (2.3)}$$

식 (2.3)에서 재질이 동일한 보조말뚝을 사용하는 경우 임피던스(Z)는 단면적(A)으로 대 치할 수 있으므로 본말뚝에 작용하는 힘 F_2 는 식 (2.4) 로 나타낼 수 있다.

$$F_2 = \frac{2A_2}{A_1+A_2}F_1 \quad \text{-----식 (2.4)}$$

식 (2.4)에서 A_1 은 보조말뚝의 단면적, A_2 는 본말뚝의 단면적이다. 따라서 단면 A_1 및 A_2 에 작용하는 타격응력 σ_1, σ_2 의 관계는 식 (2.4)로부터 식 (2.5)로 나타낼 수 있다

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{A_2} = \frac{2}{A_1+A_2}F_1 = \frac{2}{A_1+A_2}\sigma_1A_1 = \frac{2A_1}{A_1+A_2}\sigma_1 \quad \text{-----식 (2.5)}$$

식 (2.5)에서 보는 바와 같이 본말뚝의 단면적에 비해 보조말뚝의 단면적 (A_1)이 클수록 본말뚝에 작용하는 압축타격응력 σ_2 은 보조말뚝에 작용하는 응력보다 증가하게 된다. 즉, 보조말뚝을 사용할 때 단면적이 본말뚝에 비해 큰 것을 사용할수록 본말뚝에는 과잉항타응력 이 작용할 가능성이 높아지게 된다.

이상의 검토 결과에서 보는 바와 같이 보조말뚝을 사용하여 항타하는 경우, 보조말뚝의 단면적(재질이 다른 경우 임피던스)은 본말뚝과 같은 것을 사용하거나, 이러한 것이 곤란할 경우 경우 본 말뚝보다 작은 단면(또는 임피던스)의 것을 사용하는 것이 과잉항타응력 발생 으로 인한 재료 손상을 예방할 수 있다.

3. 시공사례 평가

3.1 현장 및 시공개요

사례 현장의 시공개요는 다음과 같다.

- 말뚝종류 및 설계하중 : $\Phi 600\text{mm}$ PHC말뚝 / 160ton
 - 시공방법 : DRA공법(보조말뚝 사용, 7톤 유압해머에 의한 최종 향타)
 - 보조말뚝 규격 : $\Phi 609.6 \times 12\text{th} \times 1400\text{L}(\text{mm})$ steel pipe
 - 시공관리 및 시험: PDA(PDI, 1995)를 이용한 동재하시험
 - 지반조건 : 상부로부터 잔자갈섞인 실트질모래로 구성된 매립층(0~4m), 충적층(4~16m : 점토질 실트 또는 모래질 실트), 풍화토(16~18m), 풍화암(18~25m), 경암(25m이하) 순으로 나타나며 시공은 말뚝 선단부를 풍화암 하부에 안착.
- 말뚝시공후 13.0m 굴착

본 현장에서는 본시공에 앞서 위치별로 시험시공을 실시하였으며 향타시공관입성, 지지력 및 시간효과 등을 분석하여 시공방법의 적정성을 확인하고 시공관리기준을 설정하였다.

보조말뚝은 2.3절에서 논의한 바와 같이 품질관리 및 말뚝건전도 유지에 유리한 단면, 즉 본말뚝과 유사한 임피던스를 가지는 규격의 보조말뚝을 사용하도록 제작하였다(사진 3.1).



(a) 보조말뚝 선단



(b) 보조말뚝 두부

사진 3.1 보조말뚝제작 상태

또한 시험시공에서는 보조말뚝을 사용하는 경우(설계조건대로 두부가 지표아래에 설치된 말뚝)과 사용하지 않는 경우(인접한 위치에 지표면 위까지 이음하여 노출한 말뚝)에 대하여 각각 동재하시험을 실시, 보조말뚝을 사용하는 경우의 동재하시험의 적용성을 검증하여 분석의 신뢰도를 높일 수 있었다.

이러한 결과를 바탕으로 본시공 과정에서도 동재하시험이 위치별로 실시되었으며 이를 통하여 향타장비의 에너지효율, 향타시공관입성 및 지지력 등을 수시로 확인하였다. 아울러 말뚝시공이 끝나고 지반굴착이 완료된 상태에서도 동재하시험을 통하여 실제 지반굴착의 영향이 반영된 지지력을 평가할 수 있었으며 건전도 등 말뚝 품질을 최종적으로 확인하였다.

본 사례에서는 시험시공의 대표적인 결과와 지반굴착후의 시험결과를 함께 소개하였다.

3.2 시험결과 및 평가

시험시공에서 실시한 동재하시험의 결과를 표 3.1에 요약하였다. 표 3.1에서 지지력은 PDA를 이용하여 동적측정을 실시한 후, 이 결과를 CAPWAP(GRL Associate, 1996)으로 본

석한 것이다.

표 3.1 동재하시험결과

시험말뚝번호	시험구분	관입깊이(m)	허용지지력(ton)	비고
1-1	E.O.I.D	19.8	211	지표면 까지 용접이음
	Restrike(7)		249(185)*	
1-2	E.O.I.D	19.8	265	14m보조말뚝사용
	Restrike(7)		267(259)*	
1-3	Restrike	3.8	216	보조말뚝시공/터파기후
비고	()은 경과 일수	굴착깊이 13.0m	항타에너지 차에 의한 지지력 차이	

주) ()*이론해석에 의한 지지력 공식을 이용하여 터파기를 감안한 주변마찰력을 감소시킨 총 지지력 산정 값임.

표 3.1에서와 같이 굴착이 고려되지 않은 허용지지력은 설계하중을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 지반굴착으로 인한 지지력 감소를 예상하기 위해 이론해석에 의한 지지력 공식이 실제와 부합하는 것으로 가정하여 터파기를 감안한 주변 마찰력의 감소를 고려한 허용 지지력도 설계지지력을 만족하는 것으로 나타났다. 선단지지력은 풍화암 하부에 설치되는 것을 고려하여 지지력의 감소를 고려하지 않았다.

표 3.1에서 두 말뚝이 인근에 위치하면서도 얻어진 지지력 차이가 큰 것은 적용에너지 차이에 기인한 것이다. 즉 말뚝 1-2의 경우 에너지가 상대적으로 커서 선단지지력이 충분히 측정되어 주변마찰력의 감소의 영향이 작아 허용지지력이 크게 평가되었다.

시험말뚝에 대하여 시간효과를 확인하기 위하여 7일 후에 재항타시험을 실시하였으며 이의 결과 표 3.1에서와 같이 시간경과에 따라 지반의 set-up 및 시멘트풀의 양생효과로 지지력이 증가하는 현상을 나타내었다.

실제로 지반굴착이 완료된 조건에서 품질을 평가한 시험말뚝 1-3의 경우 허용지지력(216 ton) 및 건전도 모두 양호한 것으로 확인되었다.

그림 3.1 은 말뚝의 관입 깊이별 주변마찰력 분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 주변 마찰력 분포에 의해 시간경과 효과를 확인할 수도 있고 또한 에너지 차이에 의한 지지력의 차이도 확인할 수가 있다.



《 시험말뚝번호 : 1-1 》

《 시험말뚝번호 : 1-2 》

그림 3.2 말뚝의 관입

그림 3.1 말뚝의 관입 깊이별 주면 마찰력의 분포 깊이별 항타응력의 분포

그림 3.2는 말뚝의 관입 깊이별 말뚝에 전달된 응력분포를 도시한 것이다. 보조말뚝의 길이는 13.8 m(관입길이 10.8m)인데 그림에서와 같이 보조말뚝의 사용 여부에 관계없이 말뚝에 전달된 응력은 허용치(PHC말뚝 : 480kg/cm², 강관말뚝 : 2160kg/cm²) 이내로 관리되었음을 알 수가 있다. 보조말뚝을 사용한 경우(1-2) 역시 보조말뚝과 본말뚝의 접촉부에서 응력의 큰 증가 없이 허용응력 이내로 항타되었음을 알 수가 있다.

4. 결론

본 논문에서는 현장여건상 보조말뚝(follower)의 사용하여 지표면 이하에 말뚝을 설치하는 경우에 대한 설계 및 시공 시 고려해야 할 점을 고찰하였다. 본 사례연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 이론해석에 의한 사질토에서의 말뚝지지력 공식을 적용하여 굴착전후의 지지력의 변화를 예상할 수 있다. 그러나 이론해석에 의한 말뚝의 지지력 산정방법은 실제와 상이할 수 있기 때문에 굴착 전후의 지지력 관계를 고찰하여 지지력 감소를 예상하고 최종적으로 지반굴착 후 재하시험에 의한 지지력 변화를 확인하는 것이 최선의 방법이 될 수 있다.
- 보조말뚝을 사용하여 항타하는 경우, 보조말뚝의 단면적(재질이 다른 경우 임피던스)은 본 말뚝과 같은 것을 사용하거나, 이러한 것이 곤란할 경우 경우 본 말뚝보다 작은 단면(또는 임피던스)의 것을 사용하는 것이 과잉항타응력 발생으로 인한 재료 손상을 예방할 수 있다.
- 동재하시험은 보조말뚝을 사용하는 경우에도 시공관리기준을 설정하고 항타시점에서의 지지력을 평가할 수 있는 유일한 방법이라 평가된다. 보조말뚝을 사용한 항타에 대한 동재하시험은 쉽지 않으므로 신뢰성 있는 시험결과를 도출하기 위해서는 파동이론 및 동재하시험에 대한 경험과 전문성을 가진 기술자에 의해 시험과 해석이 이루어지는 것이 필요하다.

감사의 글 ; 보조말뚝의 제작, 시험파일의 시공관리 및 재하시험에 도움을 주신 LG건설 신도림 아파트 이상건 소장님 이하 직원분들에게 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

- 1) DPT. of The Navy(1982), Foundations and Earth Structures(Design Manual 7.2).
- 2) GRL Associates, Inc.(1996), CAPWAP User Manual.
- 3) Pile Dynamics, Inc.(1995), PDA User Manual.
- 4) US Dpt. of Transportation(1996), Design and Construction of Driven Pile Foundation, FHWA Workshop Manual.