

무용접 장대강관말뚝 공법의 향타 및 지지력 특성 Characteristics of Driving Efficiency and Bearing Capacity for Non-welded Long Steel Pipe Pile Method

백규호¹⁾, Kyu-Ho Paik, 이상일²⁾, Sang-Il Lee, 박진석²⁾, Jin-Seok Park

¹⁾ 관동대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kwandong Univ.

²⁾ 관동대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kwandong Univ.

개요(SYNOPSIS) : The existing methods for installation of long steel pipe pile have some uneconomical problems such as increase of installation cost and period due to the welding of two piles and removal of soil plug, and decrease of driving efficiency due to the increase of driving resistance by time effect during the welding of piles and removal of soil plug, etc. Thus, in this study, new installation method for long steel pipe pile is suggested to work out the existing problems, and calibration chamber tests are performed to investigate both driving and economical efficiency for the suggested method. The test results showed that the new installation method has increase bearing capacity as well as reduce installation cost and period for long steel pipe piles as compared with existing methods.

주요어(Key Words) : long steel pipe pile, new installation method, bearing capacity, driving efficiency, economical efficiency

1. 서론

국가경제의 급속한 발전과 더불어 주택수요가 지속적으로 증가하고 각종 사회간접자본에 대한 투자가 확대되면서 말뚝기초의 사용물량은 계속 증가하고 있다. 더욱이 향후 시공되는 관련 공사의 상당량이 비교적 지반조건이 양호한 내륙지방보다는 지지층까지의 심도가 깊은 연약한 지반조건인 해안지역에서 수행될 것을 감안할 때 기초공사에 사용되는 말뚝은 대구경화 및 장대화 할 전망이다. 이에 따라 말뚝의 재질강도가 크고 취급이 손쉬운 강관말뚝을 이용한 장대말뚝의 시공이 증가할 것으로 생각되며, 이러한 장대말뚝의 시공을 위해서는 말뚝의 이음시공이 불가피하게 된다. 현재 사용되고 있는 장대말뚝의 시공법으로는 말뚝의 이음방법에 따라 용접이음방식과 충전재이음방식을 들 수 있으며, 국내에서는 용접이음방식이 일반적으로 사용되고 있다. 그럼에도 불구하고 장대말뚝과 관련한 연구의 부족으로 인하여 현재 사용되고 있는 장대말뚝공법은 말뚝의 이음시공과 관련하여 많은 비경제적인 문제점을 내포함으로써 강관말뚝의 최적 시공을 저해하고 있으며, 그 결과 장대강관말뚝 기초의 경제성을 저하시키는 결과를 초래하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 용접이음방식과 속파기방식의 장대강관말뚝 공법이 갖고 있는 여러가지 비경제적인 문제점들을 해결함으로써 장대강관말뚝 기초의 경제성을 향상시킬 수 있는 무용접 장대강관말뚝공법을 제안하였다. 그리고 가압토조를 이용한 모형말뚝실험을 통해서 기존의 공법에 의한 말

뚝과 항타시공성 및 지지력, 그리고 1본당 설치에 소요되는 시간 등을 비교·분석함으로써 무용접 장대 강관말뚝공법의 실용성과 경제성을 검증하였다.

2. 기존의 장대 강관말뚝 공법

일반적으로 장대강관말뚝은 항타기가 설치할 수 있는 말뚝길이의 제한으로 인하여 두개의 강관말뚝을 연결시켜서 시공하게 되며, 말뚝의 연결방법에 따라서 용접이음방식과 충전재이음방식으로 구분된다. 먼저, 용접이음 방식은 그림 1에 보이는 바와 같이 일정 길이의 강관말뚝을 지반에 타입하고 동일 직경의 또 다른 강관말뚝을 기 설치된 강관말뚝의 두부에 용접하여 두 개의 말뚝을 일체화 시킨 후 다시 햄머를 이용하여 말뚝을 지지층까지 타입하는 공법이다. 그러나, 용접이음방식에 의한 장대강관말뚝공법은 강관말뚝의 이음을 위한 용접작업으로 인하여 많은 비경제적인 문제점들을 갖고 있다. 즉, 용접이음에 의해 말뚝의 타입 길이가 증가하게 되면 말뚝의 주면마찰저항이 증가하기 때문에 말뚝의 타입이 점증적으로 어려워지게 되며, 이러한 관입저항의 증가로 인해 말뚝의 좌굴은 물론 두부 파손의 위험성도 증가하게 된다⁽¹⁾. 그리고 말뚝의 이음을 위하여 용접작업이 행해지는 동안에 말뚝 항타장비의 작업이 불가능해짐으로써 장비의 효율성이 떨어지게 되고, 이것은 결국 말뚝의 시공비 증가로 연결된다. 일 예로 광양제철소의 기초공사를 위하여 강관말뚝을 시공할 때 길이 20m의 말뚝을 시공하는데 소요된 시간중에서 말뚝의 용접을 위해 소요된 시간은 말뚝의 직경과 두께에 따라 약간의 차이는 있지만 대략 38~53%에 달하는 것으로 나타났다⁽³⁾. 이처럼 말뚝의 용접작업에 소요되는 시간이 전체 시공시간에서 차지하는 비중이 상당히 크기 때문에 말뚝의 시공성 저하로 인하여 공기는 증가하게 되고, 이로 인해 공사비는 증가하게 된다. 또한, 용접이 행해지는 동안 시간효과(time effect)로 인해 말뚝과 지반간의 마찰저항이 증가함으로써 말뚝의 관입저항력이 커지게 되면서 말뚝의 재항타 시 햄머에 의한 말뚝의 관입이 더욱 어려워지게 된다. 특히, 시간경과에 따른 지지력의 증가는 점성토 지반과 불포화 사질토 지반에서 크며, 선단지지력보다는 주면마찰력에서 매우 큰 것으로 보고되고 있다⁽²⁾. 따라서 장대강관말뚝이 점성토 지반이나 불포화 사질토 지반에 시공되는 경우에 이음작업을 위해 항타작업을 일시 정지하게 되면 시간효과로 인해 말뚝의 주면마찰저항이 증가하게 되어서 말뚝의 타입길이가 감소되므로 주면마찰력이 저하될 뿐만 아니라 말뚝의 폐색효과 저하에 따른 선단지지력의 저하도 발생하게 된다.

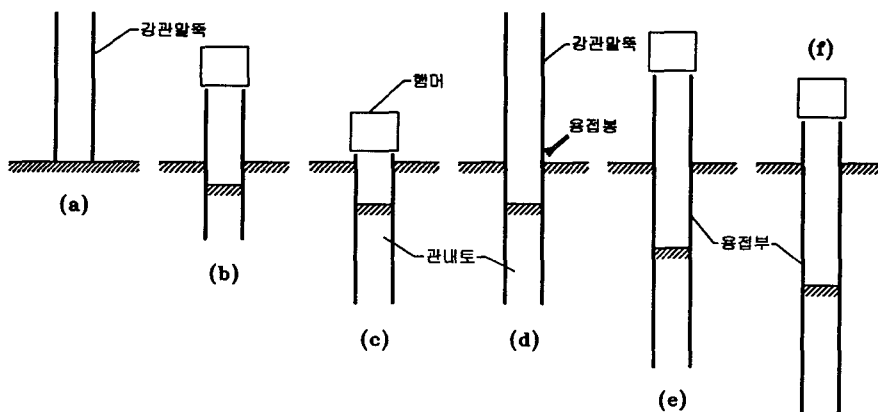


그림 1. 용접이음방식에 의한 장대강관말뚝의 시공방법

한편, 충전재이음방식은 그림 2와 같이 일정 길이의 강관말뚝을 지반에 타입한 후 오거(auger)를 이용하여 강관말뚝 내부의 관내도를 굴삭해 내고 항타보조말뚝을 이용하여 기 타입된 말뚝보다 작은 직경의 강관말뚝을 관내도가 완전히 제거된 강관말뚝의 내부에 타입한 다음, 타입이 완료된 두 개의 강관말뚝을 일체화시키기 위하여 말뚝 내부를 시멘트밀크로 채우는 공법이다⁽⁴⁾. 이러한 충전재이음방식은 오거에 의한 관내도 굴삭작업이 행해짐으로써 말뚝의 설치에 소요되는 공기는 물론 공비도 증가하게 되며, 용접이음방식과 마찬가지로 속파기작업이 행해지는 동안 항타작업이 불가능해지기 때문에 항타장비의

효율성이 떨어져서 말뚝기초의 경제성 저하를 초래하게 된다. 그리고 관내토를 제거하는 과정에서 상부 강관말뚝의 선단부근에 작용하는 지반응력이 이완될 수 있기 때문에 용접이음방식에 비하여 말뚝의 지지력이 뒤틀릴 수 있게 된다.

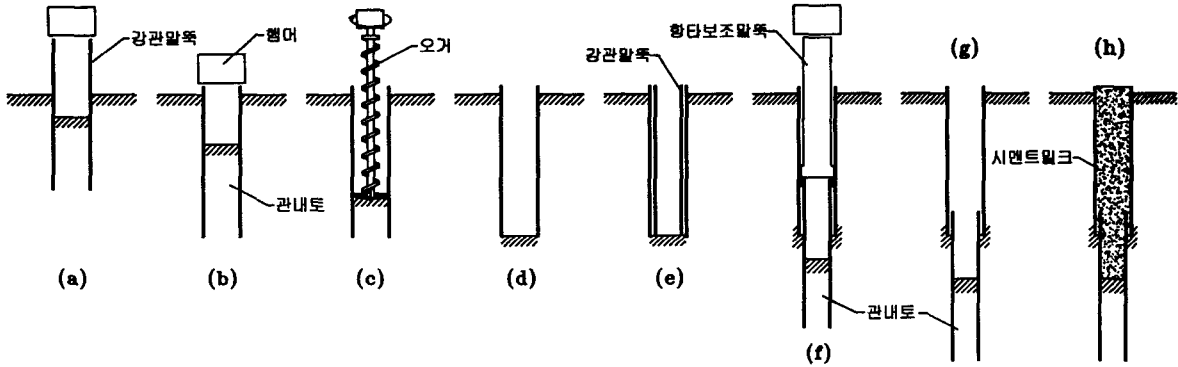


그림 2. 충전재이음방식에 의한 장대강관말뚝의 시공방법

3. 무용접 장대강관말뚝공법

본 연구에서 제안된 무용접 장대강관말뚝공법은 직경이 다른 두개의 강관으로 이루어진 이중강관말뚝과 항타보조말뚝을 이용하여 용접이음이나 속파기 작업을 행하지 않고 심도가 깊은 지지층까지 강관말뚝을 설치함으로써 종래의 용접이음방식이나 충전재이음방식의 장대강관말뚝공법이 갖는 많은 비경제적인 문제점들을 제거할 수 있는 공법이다. 이 공법에 사용되는 이중강관말뚝은 그림 3과 같이 직경이 서로 다른 두개의 강관으로 구성되어 있으며, 내부강관의 선단부에는 보강밴드를 부착하였다. 이 보강밴드는 이중강관말뚝을 타입할 때 두 개의 강관 사이로 흙이 유입되어 내부강관 타입시 관입저항이 커지는 것을 방지함은 물론 내부강관의 선단부가 손상되지 않고 지지층에 정착될 수 있도록 하는 역할을 하게 된다. 이렇게 제작된 이중강관말뚝을 이용하여 무용접 장대강관말뚝을 시공하기 위해서는 먼저 그림 4에 보이는 바와 같이 햄머에 의하여 이중강관말뚝을 동시에 소정의 깊이까지 타입시킨 후 내부강관의 두부에 항타보조말뚝을 결합시키고 항타보조말뚝을 타격함으로써 내부강관을 지지층까지 도달시키게 된다. 그리고 내부강관이 지지층에 도달하게 되면 항타보조말뚝을 내부강관으로부터 분리시킨 후 내부강관과 외부강관이 완전히 일치되도록 연속된 두 개의 강관 내부에 시멘트 밀크를 주입·고결시킴으로써 무용접 장대강관말뚝의 시공을 완성하게 된다.

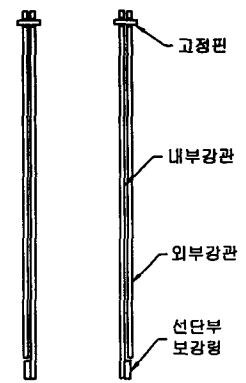


그림 3. 이중강관말뚝

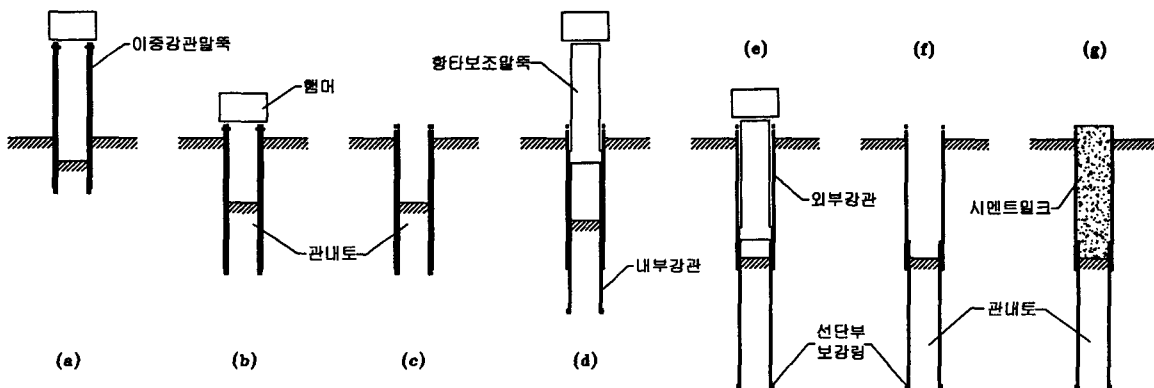


그림 4. 무용접 장대강관말뚝의 시공방법

4. 모형말뚝실험

4.1 지반조성 및 실험방법

기존의 장대강관말뚝공법이 갖고 있는 각종 비경제적인 문제들을 개선하기 위하여 제안된 무용접 장대강관말뚝공법의 타당성을 검증하기 위하여 모형말뚝실험을 실시하였다. 실험에는 다양한 조건의 인공지반을 조성하기 위하여 주문진 모래와 응력 조절이 가능한 가압 토조를 사용하였다. 그리고 그림 5와 같이 단위중량이 $\gamma=2.0 \text{ t/m}^3$ 인 포화 지반에 말뚝이 20m 깊이까지 타입된 상태를 재현하기 위하여 인공지반에 가한 압력은 타입된 말뚝의 중간부분에 작용하는 응력에 해당하는 $\sigma_v=1.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_h=K_0\sigma_v$ 으로 하였다. 또한 다양한 지반상태에 대하여 무용접 장대강관말뚝공법의 시공성 조사를 위하여 표 1과 같이 지반의 밀도와 응력상태를 변화시키면서 시험을 수행하였다. 즉, 지반의 밀도에 따른 거동변화를 조사하기 위하여 지반의 상대밀도를 45%와 85%로 변화시켰으며, 과압밀상태의 지반에서 말뚝의 거동을 조사하기 위하여 $K_0=0.8$ 인 지반에서도 시험을 실시하였다. 이상과 같이 조성된 인공지반에 그림 6과 같은 두 개의 모형말뚝을 먼저 34cm까지 타입(1차 타입과정)한 후 용접이음방식의 경우에는 용접이음을 행한 후에 68cm 깊이까지 타입하였고, 무용접 방식의 경우에는 내부강관을 68cm까지 타입(2차 타입과정)하는 방법으로 모형말뚝을 시공하였다. 각 공법의 시공성과 지지력을 비교하기 위하여 말뚝이 설치되는 동안 항타수와 폐색정도를 측정하였으며, 설치가 완료된 말뚝에 대해서는 말뚝재하시험을 수행하였다.

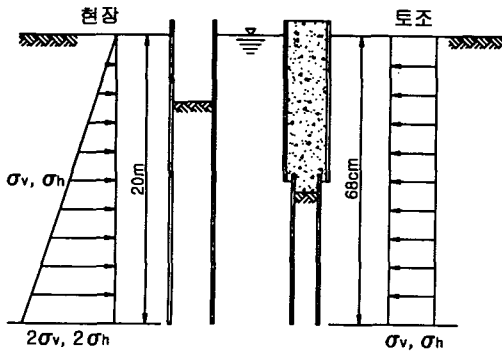


그림 5. 인공지반의 응력상태

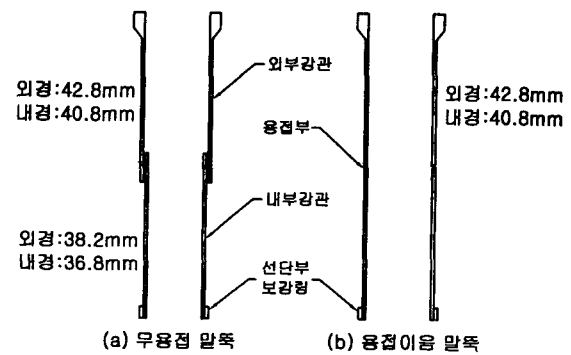


그림 6. 모형말뚝

표 1. 지반조건과 말뚝의 시공법

시험명칭	상대밀도(%)	σ_v (kg/cm ²)	σ_h (kg/cm ²)	시공방식
T1	85	1.0	0.4	용접이음 방식
T2	85	1.0	0.4	속과기 방식
T3	85	1.0	0.4	무용접 방식
T4	45	1.0	0.4	용접이음 방식
T5	45	1.0	0.4	무용접 방식
T6	85	1.0	0.8	용접이음 방식
T7	85	1.0	0.8	무용접 방식

4.2 시험결과 및 분석

그림 7은 세가지 지반조건에 대한 장대말뚝의 시공방법별 항타시공성을 비교한 것이며, 그림 8은 일정한 지반상태에서 말뚝의 시공방법별 폐색정도의 변화를 나타낸 것이다. 항타시공성에 대한 결과에서 보듯이 말뚝을 34cm까지 관입시키는 1차 타입과정에서는 이중강관말뚝을 사용하는 무용접방식의 관입저항이 용접방식과 충전재방식에 비해 상당히 컸다. 이러한 현상은 말뚝의 관입저항은 말뚝의 관입 시

말뚝 외부로 밀리는 흙의 체적에 비례해서 증가하며, 흙의 밀리는 정도는 말뚝의 폐색정도가 클수록 커진다는 연구결과를 이용하여 해석될 수 있다^(5,6). 즉, 그림 8에 보이는 바와 같이 무용접방식에 사용되는 이중강관말뚝은 용접방식과 충전재방식에 사용되는 말뚝에 비해 말뚝의 벽두께가 두껍고 직경이 작아서 말뚝의 타입시 폐색정도가 커지기 때문에 기존의 두가지 방식에 비해 관입저항이 크게 된다. 이러한 공법별 관입저항 특성은 지반조건과 무관하게 1차 타입과정에서는 모두 동일하였다.

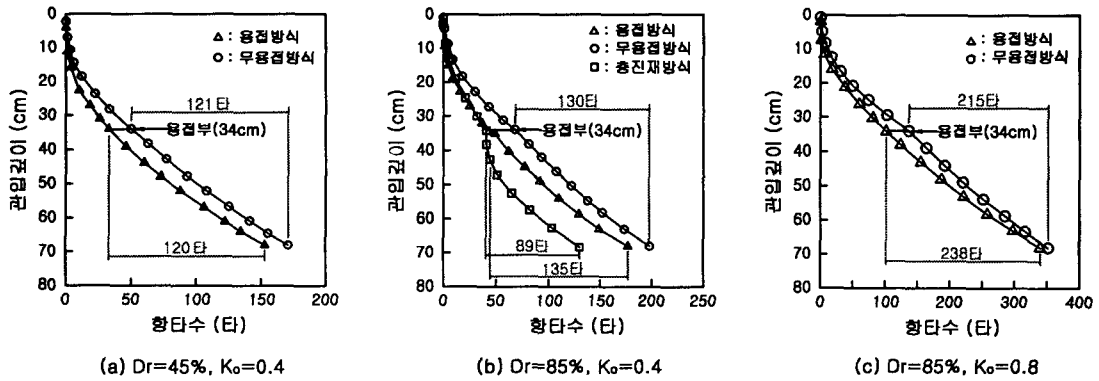


그림 7. 지반조건과 말뚝의 설치방법에 따른 항타시공성의 변화

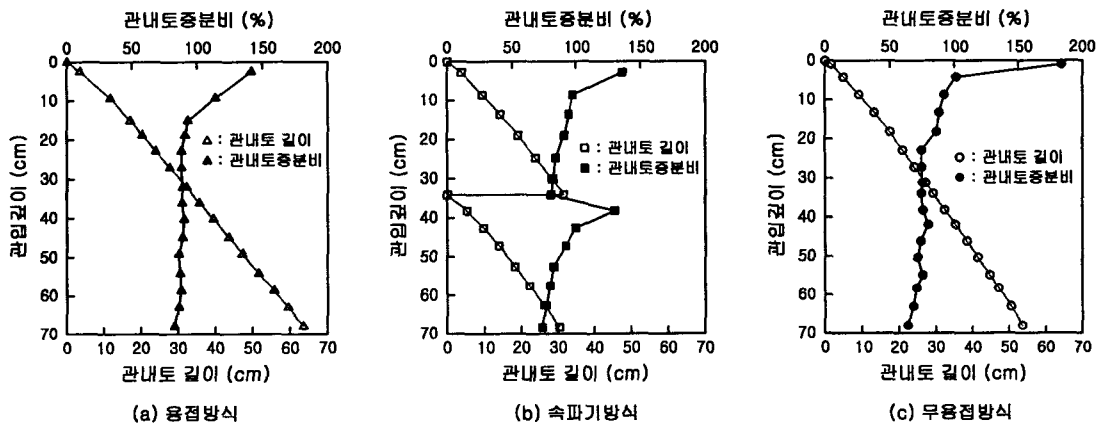


그림 8. 조밀한 지반($Dr = 85\%$, $K_o = 0.4$)에서 말뚝의 설치방법에 따른 폐색정도의 변화

그리고 34cm에서 68cm까지 관입시키는 2차 타입과정에서는 1차 타입 때 발생한 관내토를 제거한 충전재방식에 대한 항타수가 가장 작았으며, 용접방식과 무용접방식의 항타수는 비슷했다. 즉, 용접방식에서는 말뚝의 관입에 따라 마찰저항이 계속 증가하는 반면, 무용접방식에서는 타입말뚝의 직경이 작아짐에 따른 폐색정도의 증가로 인하여 선단저항은 증가했으나 내부강관의 타입으로 마찰저항이 상당히 감소됨으로써 용접방식과 무용접방식의 항타수가 비슷해졌다. 그리고 속파기방식의 경우에는 내부강관말뚝의 타입으로 용접방식에 비해 마찰저항이 상당히 감소됨과 동시에 관내토의 제거로 인한 지반응력의 이완과 폐색정도의 감소로 인하여 용접방식과 무용접방식에 비해 항타수가 상당히 작았음을 알 수 있다. 그러나 이상과 같은 항타특성은 과압밀상태의 지반을 재현한 $K_o = 0.8$ 인 지반의 2차 타입과정에서는 결과가 다르게 나타났다. 즉, 과압밀상태의 지반에서 무용접 장대말뚝은 완전폐색상태에 도달했음에도 불구하고 말뚝직경이 감소해서 폐색정도가 증가함에 따른 선단저항의 증가보다 관입깊이의 증가로 인한 마찰저항의 증가가 더 커서 용접방식 보다 비해 무용접방식의 항타수가 더 작았다. 따라서 무용접 장대말뚝공법은 정규압밀상태의 지반보다는 과압밀상태의 지반에서 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

한편, 각종 방법으로 설치가 완료된 말뚝에 대하여 재하시험을 실시한 결과 그림 9와 같은 결과를 얻었다. 그림 9와 표 2에서 보이는 바와 같이 지반조건과 관계없이 용접방식에 의한 것보다 무용접방식에 의한 말뚝의 지지력이 10% 이상 크게 나타났으며, 과압밀상태의 지반에서는 30%가량 크게 측정

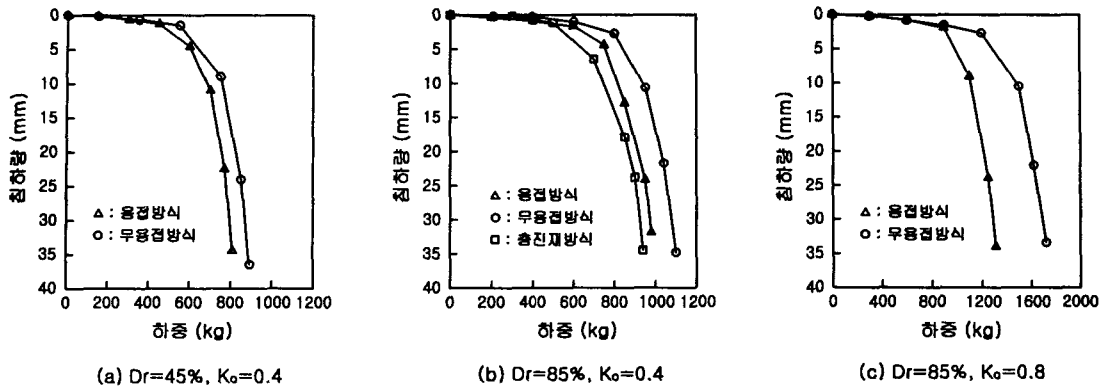


그림 9. 지반조건과 말뚝의 설치방법에 따른 지지력의 변화

되었다. 반면, 충전재방식에 의한 말뚝의 지지력은 용접방식에 의한 말뚝의 지지력보다도 작은 것으로 나타났다. 이것은 용접방식에 비해 상대적으로 작은 직경의 말뚝을 사용하는 무용접 장대말뚝의 폐색정도가 더 커지면서 말뚝 주변지반의 다짐정도가 더욱 증가하여 지지력이 증가한 것으로 생각된다. 그리고 충전재방식의 경우에는 관내토를 제거할 때 발생하는 폐색정도의 감소와 지반응력의 이완으로 인한 지지력 감소분과 용접방식에 비해 직경이 작은 내부강관말뚝을 타입하는 2차 타입과정에서 발생하는 폐색정도의 증가로 인한 지지력의 증가분이 서로 상쇄되면서 용접방식에 의한 말뚝의 지지력과 그다지 큰 차이를 보이지 않았다.

표 2. 지반조건과 시공법에 따른 말뚝의 항타시공성과 지지력의 변화

시험명칭	시공방법	1차 항타수	2차 항타수	전체 항타수	관내토증분비(%)	극한지지력(kg)
T1	용접방식	42	135	177	83.0	980
T2	충진재방식	41	89	130	73.3	930
T3	무용접방식	68	130	198	64.0	1100
T4	용접방식	33	120	153	57.3	820
T5	무용접방식	50	121	171	42.3	910
T6	용접방식	102	238	340	78.6	1310
T7	무용접방식	137	215	352	0.0	1720

이상과 같은 실험결과를 종합해 볼 때 말뚝이 34cm까지 관입되는 1차 타입과정에서는 무용접 말뚝의 관입저항이 기존 방식의 말뚝에 비해 상당히 컷지만, 68cm까지 관입시키는 2차 타입과정에서는 무용접 말뚝의 관입저항이 기존 방식과 큰 차이를 보이지 않았다. 그리고 전체적으로는 무용접방식에 의한 말뚝의 항타수가 용접방식에 비해 약 12% 많은 것으로 나타났다. 반면, 말뚝재하시험 결과 무용접 장대말뚝의 지지력이 기존 방식에 의한 장대말뚝의 지지력보다 10%이상 크게 측정되었다. 따라서 말뚝의 지지력과 직접적으로 관계되는 말뚝의 최종 타입심도는 관입저항이 작게 작용하는 항타 초반부(1차 타입과정)보다는 관입심도가 커서 관입저항이 큰 항타 후반부(2차 타입과정)에 의해 결정된다는 것을 고려할 때 기존 공법에 비해 지지력이 큰 무용접 장대말뚝의 시공에는 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

5. 무용접 장대강관말뚝의 장점

무용접 장대강관말뚝은 용접 및 속파기작업의 생략이 가능해서 말뚝의 연속적인 타입이 가능하게 되므로 항타장비의 작업 효율성이 증대되어 장대강관말뚝의 시공성을 증대시킬 수 있다. 표 3은 광양제철소의 기초로 사용된 강관말뚝의 시공사례와 같은 조건에서 무용접방식으로 말뚝을 시공할 때의 설치시

간을 나타낸 것이다. 여기서 무용접 장대말뚝의 설치시간은 말뚝의 설치를 위한 항타수가 용접방식에 비해 약 12% 증가한다는 실험결과를 이용하여 20m 길이의 말뚝을 타입하는데 소요되는 시간의 120%에 해당하는 시간에 항타보조말뚝의 설치 및 해체를 위하여 필요한 시간인 10분을 더하는 방법으로 계산되었다. 이 같은 계산된 결과에 근거할 때 용접방식으로 시공할 때에 비해 무용접방식으로 말뚝을 시공하면 1일 시공능력이 32~81%까지 증가함으로써 공기의 절감이 가능하게 된다. 또한, 시공되는 말뚝의 직경이 작아져서 폐색정도가 증가함에 따라 말뚝의 지지력이 기존 방식의 말뚝에 비해 증가하게 되므로 말뚝 본 수의 감소를 통한 공비 절감도 기대할 수 있다.

한편, 충전재방식과 비교할 때 무용접방식에서는 속파기작업이 생략되기 때문에 말뚝 항타장비의 작업효율 극대화를 통한 시공비의 절감과 시공기간의 단축이 가능하며, 관내토의 굴삭으로 말뚝 선단지반의 응력이 이완되어 말뚝의 지지력이 감소하는 현상을 방지할 수 있다. 이처럼 무용접 장대강관말뚝공법은 말뚝의 시공성을 향상시켜서 경제적이고 효과적인 시공이 가능하도록 함으로써 궁극적으로는 공비의 절감과 공기의 단축은 물론 구조물의 안정성에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

표 3. 말뚝 시공법에 따른 말뚝의 시공성 비교

(시간단위 : 분)

기준	말뚝직경 (mm)	두께 (mm)	용접이음 방식			무용접 방식		1일 시공본수 증가율(%)
			용접시간	타입시간	1일 시공본수 ^(주)	설치시간	1일 시공본수 ^(주)	
시공 사례	406.4	9.5	63.25	103.55	2.88	125.97	3.81	31.4
		12.7	83.5	92.52	2.73	113.62	4.22	54.9
	508.0	9.5	76.69	90.31	2.87	111.15	4.32	50.3
		12.7	110.0	100.22	2.28	122.25	3.93	72.0
	558.8	12.7	110.5	121.22	2.07	146.40	3.28	58.7
	711.2	12.7	162	140.0	1.59	166.80	2.88	81.1

주) 1일 시공 본수는 하루 8시간 작업을 기준으로 계산함

5. 결 론

본 연구에서는 항타보조말뚝을 이용하여 동일 위치에서 직경이 다른 두개의 강관을 연속적으로 타입한 후 강관 내부를 시멘트밀크로 채워서 두 개의 강관을 하나로 일체화시킴으로써 장대말뚝을 완성시키는 무용접 장대강관말뚝공법을 제안하였으며, 제안된 공법의 시공성과 경제성을 분석하기 위하여 모형 말뚝시험을 실시하였다. 토조를 이용한 모형시험 결과 무용접 장대강관말뚝공법은 기존의 용접방식이나 충전재방식에 비해 관입 초기의 관입저항은 상당히 컷으나 관입깊이가 증가함에 따라 관입저항이 거의 같아졌으며, 전체적으로는 기존의 방식보다 관입저항이 약 12% 증가하였다. 그러나 무용접 장대강관말뚝은 말뚝의 내경이 상대적으로 작아서 폐색정도가 커짐에 따라 기존 방식에 비해 지지력은 크게 측정되었다. 또한 무용접방식과 용접방식의 말뚝에 대하여 말뚝의 본당 설치시간을 비교한 결과 무용접방식이 용접방식보다 1일 시공능력 면에서 약 31~81%까지 큰 것으로 나타났다. 따라서 장대말뚝의 지지력은 타입이 상대적으로 쉬운 타입 초반부보다는 관입심도가 커서 관입저항이 큰 타입 후반부의 시공성에 좌우된다는 것을 고려할 때 기존 공법에 비해 시공에는 큰 무리가 없을 것으로 생각되는 반면, 말뚝의 지지력의 증대와 시공성 증대를 통한 공비와 공기의 절감이 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 1999년 포항종합제철의 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로, 이에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 이영남, 이종섭, 박영호, 이형주 (1995), "항타시 강관말뚝의 손상사례 분석", 강관말뚝의 현장거동에 관한 세미나 논문집, 대한토목학회·한국강관협회 주최, pp. 67-89.
2. 이원제, 전영석, 홍헌성, 이명환 (1995). "시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력변화 연구", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 69-90.
3. 포항종합제철(1984), 광양제철소 기초항 항타 및 재하시험 보고서, pp. 420-429.
4. API(1991), "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform", *American Petroleum Institute Recommended Practice 2A (RP2A)*, API, 19th Ed. Washington, D.C.
5. Nauroy, J.F. and Le Tirant, P. (1983), "Model Tests of Calcareous Sands", *Proceedings of the Conference on Geotechnical Practice in Offshore Engineering*, ASCE, pp. 356-369.
6. Paikowsky, S.G. (1989), *A Static Evaluation of Soil Plug Behavior with Application to the Pile Plugging Problem*, Sc. D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 523p.