

매입말뚝 현장적용 개선에 대한 연구

윤호섭^{*1}, 최현길^{*2}, 문수동^{*3}

1. 서론

근래에 환경문제로 인하여 주로 적용되고 있는 매입공법은 직항타공법에 비하여 공정이 복잡하고 품질관리에 어려움이 있어 기 시공 말뚝의 설계하중 미 확보 사례가 종종 발생하고 있다. 또한 현장실무자는 매입공법에 대한 정확한 이해가 부족하여 여러가지 오류를 범하고 있는 것이 현실이다.

본 연구는 국내에 적용되는 말뚝시공 공법중 매입 말뚝 시공중에 나타나는 문제점과 해결방안을 제시 하는데 그 목적이 있다.

2. 연구 내용 및 범위

현재 국내에서 적용되는 매입공법에는 SIP(Soil-cement Injected Precast pile methods), SAIP(Special Auger Soil Cement Injected Precast Pile Method), SDA(Separated Doughnut Auger methods), PRD(Percussion Rotary Drill), 중굴공법 등이 있으며, 콘크리트 말뚝을 이용하여 시공하는 SIP, SDA 공법을 중심으로 시공중에 나타나는 문제점과 해결방안에 대하여 연구를 수행하였다.

^{*1} 정회원, 대림산업(주) 용인기술연구소 대리

^{*2} 정회원, 대림산업(주) 용인기술연구소 과장

^{*3} 정회원, 대림산업(주) 용인기술연구소 과장

3. 국내 매입말뚝 현장적용상의 문제점 및 개선방안

본 연구에서는 매입공법 적용시에는 여러 가지 문제가 발생할 수 있으며, 이를 항목별로 나열하고 원인을 분석하므로서 적절한 품질관리 방안을 제시하고자 한다. 말뚝재료별, 시공방법별로 모두 문제점 및 해결방안을 제시함이 바람직하나 일반적으로 자주 문제가 발생하고 있는 콘크리트말뚝을 이용한 SIP, SDA 공법을 중심으로 기술하였다.

3.1 적합하지 않은 보조말뚝 사용

3.1.1 보조말뚝 현장 적용시 발생하는 문제점

매입공법 뿐만 아니라 직항타공법에서도 보조말뚝은 종종 사용되고 있다. 보조말뚝의 사용은 시공중에 여러 가지 문제가 발생할 수 있으므로 가능하다면 사용을 자제하는 것이 바람직하다. 보조말뚝은 주로 연약지반에서 말뚝 시공시 말뚝손실을 줄이기 위해 사용되며, 설계 및 시공시에는 보조말뚝의 사용여부를 면밀히 검토 후 결정하여야 한다. 연약지반에서 말뚝 시공시 가장 문제가 되는 것은 항타 장비의 Trafficability 이다. 기초저면까지 굴착 후 잡석 등으로 치환하여 항타 장비를 진입시키거나 지반상부에 안정된 매립층이 있을 경우 지반굴착 없이 그대로 장비를 진입시킨후 보조말뚝을 이용하여 시공을 실시할 수 있다.(그림 1. 참조)

첫번째 방법은 굴착 및 치환을 위해 상당한 초기

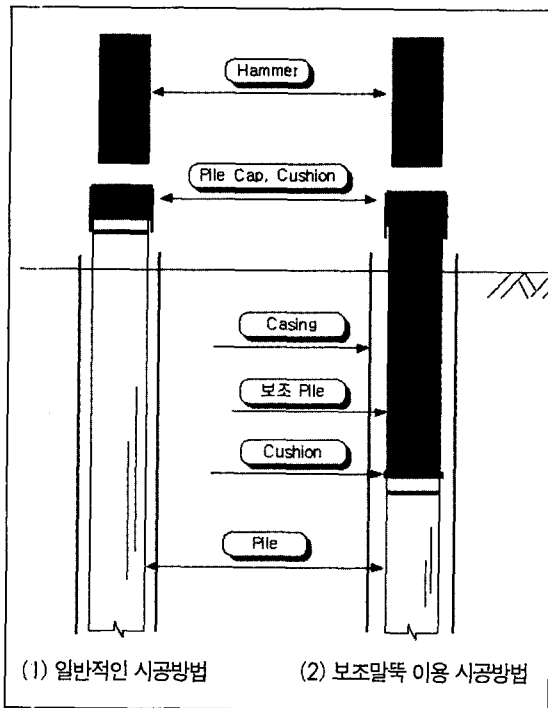


그림 1. 시공방법 비교

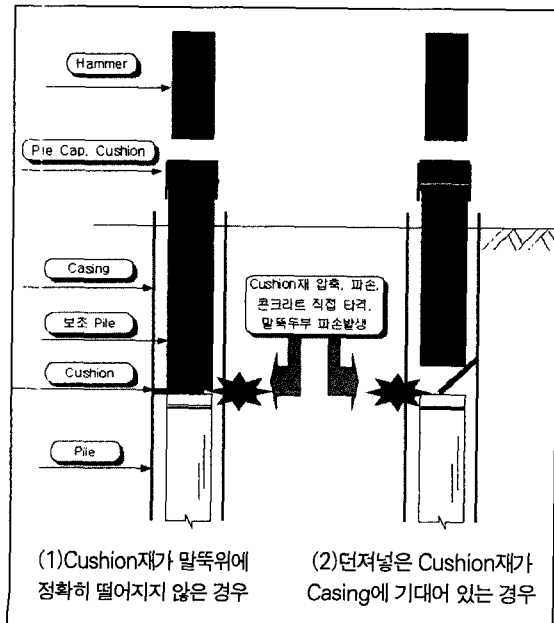


그림 2. 시공방법 비교

비용이 소요되지만 말뚝시공 상황을 언제든지 확인할 수 있어 품질관리에 매우 유리하다. 두번째 방법은 초기 굴착비용이 필요 없고 말뚝 손실을 방지하기 위해 설계길이의 말뚝과 보조말뚝을 사용하여 시공 하므로서 경제적이다. 또한 시공 후 말뚝은 지반 내에 묻혀 있는 형태가 되므로 기 시공된 말뚝지반을 야적장이나 가설 도로 등으로 사용할 수 있다. 그러나 말뚝시공상황을 확인할 수 없으므로 품질관리에 어려움이 있고, 기 시공된 말뚝의 지지력을 확인하기 위해서는 말뚝이 묻혀 있는 지반을 굴착한 후 재시험을 실시하여야 하므로 매우 위험하다. 또한 말뚝의 굴착깊이 까지 근입 시키기 위해 경타를 실시하는 과정에서 Steel 보조말뚝을 사용함에 따라 Cushion재 파손 및 두부파손의 우려가 있다. 보조말뚝은 강관에 상부 및 하부를 Steel plate로 막고, 상부는 Pile Cap과 연결할 수 있는 고리와 Cushion 재를 설치할 수 있도록 만들어져 있다. 지반굴착 후 말뚝을 삽입하고 보조말뚝의 하단이 콘크리트 말뚝을 직접 타격하지 않도록 말뚝머리와 보조말뚝 사이에 Cushion 재(합판)를 설치해야 하는데, 일반적으로 굴착공 내로 Cushion재를 낙하시키는 것이 현실이다. 다행히 Cushion재가 콘크리트 말뚝 위에 정확히 떨어진다 면 말뚝머리 파손이 적겠지만 한쪽으로 쏠려 있거나 Cushion재가 세워져 있다면 콘크리트말뚝 두부파손은 불가피하다(일반적으로 Casing의 내경은 말뚝 직경보다 5~10cm 크다).

그림 2에서 보는 바와 같이 Cushion재가 굴착공 내에 세워져 있는 상태에서 보조말뚝으로 타격함에 따라 Cushion재가 파손되고, 또한 콘크리트 말뚝이 손상될 수 밖에 없는 상황이 벌어진다. 결국 이러한 보조말뚝에 의한 두부 파손 발생은 충분한 타격에너지를 말뚝하부로 전달할 수 없게 하여 말뚝선단부 Slime 처리 및 설계하중 확보에 큰 문제를 초래할 수 있다.

3.1.2 개선 방안

아래 그림 3에서와 같이 보조말뚝 사용에 따른 두

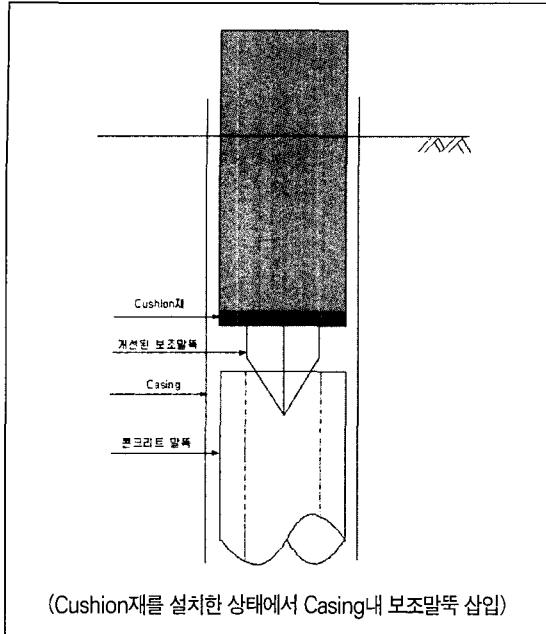


그림 3. 개선된 보조말뚝

부파손 문제는 개선된 보조말뚝을 이용하여 해결할 수 있었다. 개선된 보조말뚝은 말뚝 두부파손 없이 항타 에너지를 정확하게 말뚝 본체에 전달하여 성공적으로 말뚝시공이 이루어 질 수 있도록 하였다. 이는 각종 재하시험을 통하여 사용효과를 확인 하였다. 보조말뚝의 사용방법은 기존 보조말뚝과 같으며,



사진 1. 개선된 보조말뚝

Cushion 재를 Casing 내로 낙하시키지 않고 개선된 보조말뚝에 미리 설치하여 경타를 실시한다. 개선된 보조말뚝을 부산 00아파트현장 매입말뚝에 적용한 결과 두부파손이 현저하게 감소함을 확인하였다.

3.2 보조말뚝 사용에 따른 에너지효율 감소

보조말뚝 사용에 따른 또 다른 문제는 항타에너지 효율 감소이다. 항타에너지는 보조말뚝을 통해 말뚝 머리에 전달되는데 이 과정에서 에너지효율 감소현상이 발생한다. 특히 편타 발생 가능성이 매우 높으므로 신중한 검토가 요구된다.

말뚝시공관리 기준을 구하기 위해서는 시항타 및 동재하시험을 실시하게 되는데 대부분의 말뚝이 보조말뚝을 사용하여 지중내에 시공되더라도 시항타 및 동재하시험시에는 말뚝 두부를 지표면 위로 노출시키고 보조말뚝을 설치하지 않은 상태에서 시험을 실시하는 것이 일반적이다. 이는 시험시 조건과 본 시공시 조건이 일치하지 않으므로 무의미한 시험일 수 밖에 없다. 자칫 보조말뚝 사용에 따른 에너지 효율 감소 현상을 간과 한다면 설계하중 미확보라는 결과를 초래할 수도 있다. 따라서 보조말뚝을 이용하여 시공을 실시하는 경우에는 반드시 보조말뚝 사용에 따른 에너지효율 감소여부를 확인한 후 적절한 조치를 취하여야 한다.(사진 3 참조)

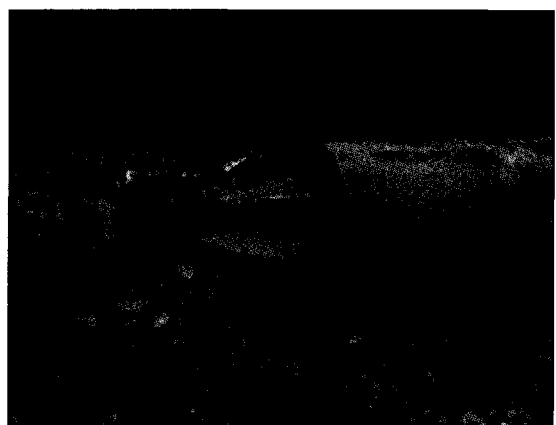


사진 2. 개선된 보조말뚝

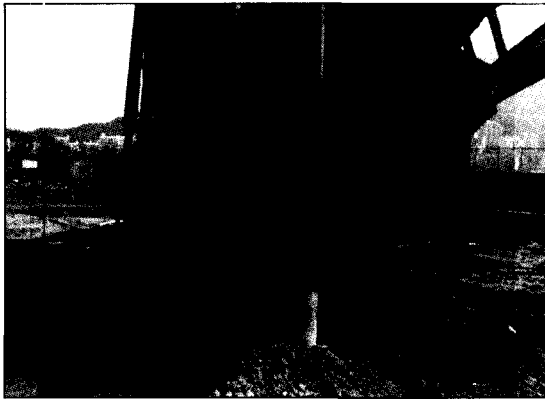


사진 3. PDA(Pile Driving Analyzer)를 이용한 보조말뚝
사용시 에너지효율 확인

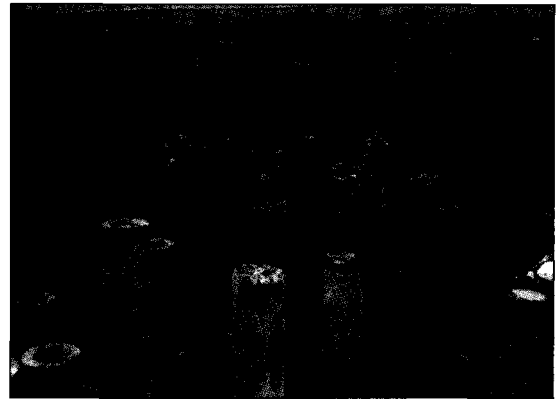


사진 4. PHC 말뚝 두부파손

3.3 지반굴착에 따른 말뚝손상

3.3.1 지반 굴착시 발생하는 문제점

상기한 바와 같이 보조말뚝을 이용하여 지중에 말뚝을 시공할 경우 보조말뚝에 의한 두부파손 뿐만 아니라 시공 종료 후 굴착시에도 말뚝 손상은 발생할 수 있다(사진 4 참조). 일반적으로 지반굴착은 Back hoe를 이용하며, 이때 기 시공된 말뚝은 여러 차례 충격을 받게 된다. 지반 굴착시 발생하는 말뚝 손상은 다음과 같은 문제를 야기할 수 있다.

- 1) Back hoe를 이용한 지반 굴착시 기 시공된 말뚝에 충격을 가하여 말뚝 주변 부에 양생된 Cement paste 의 강도 저하 및 상부지반 교란에 따른 주변마찰력 감소
- 2) 말뚝본체에 인장균열 발생에 따른 재료강도 저하. 기 시공말뚝의 안정성에 문제를 발생시킬 수 있음.

실제로 Back hoe에 의한 지반 굴착 후 기 시공말뚝에 대한 동재하시험 결과 많은 시험말뚝에서 심각한 손상을 확인할 수 있었다.

3.3.2 개선 방안

현장 실무자가 주의하여 말뚝 사이의 토사를 굴착하는 것 이외에는 특별한 개선 방안은 없다. 그러나

말뚝에 충격을 가하지 않고 말뚝사이의 토사를 제거하기는 불가능에 가까운 일이다. 따라서 콘크리트 말뚝을 이용하여 직항타 또는 매입공법 시공시에는 상기한 바와 같이 기초 저면까지 굴착 및 잡석 등으로 치환 후 장비를 진입시키는 방법 이외엔 별다른 방법이 없는 것으로 확인 되었다. 따라서 설계 및 시공시 이를 감안하여야 하며, 부득이한 경우 재료 파손의 우려가 적은 강관말뚝 적용을 적극 검토하거나 이도 여의치 않을 경우에는 소형 Back hoe를 이용하는 것이 유일한 방법이라 하겠다.

3.4 적합하지 않은 Hammer의 사용

3.4.1 적합하지 않은 Hammer의 사용으로 발생하는 문제점

적합하지 않은 Hammer의 사용은 말뚝의 지지력에 직접적인 영향을 미친다. 일반적으로 Hammer는 큰 중량이고, 낮은 낙하고에서 타격을 가할 때 효과적인 것으로 알려져 있다. 그러나 시공여건에 따라 큰 중량의 Hammer를 이용하여 시공된 말뚝에 대해서도 설계하중 미확보 현상이 종종 나타나고 있다. 이는 특히 말뚝 두부가 지표면 보다 낮고 SDA공법 적용시 Drop Hammer를 Wire에 매달아 Casing 내로 직접 낙하 시킬 때 주로 나타난다. 이때 시공 실

무자는 Casing 내부를 볼 수 없으므로 적절한 경타가 이루어지는지 확인할 수 없으며, 다만 Wire의 상하 운동만을 관찰할 수 있을 뿐 Hammer의 낙하고를 정확하게 관리 할 수 없다. Hammer의 낙하고를 정확하게 관리 할 수 없다는 것은 말뚝에 작용하는 타격응력을 제어할 수 없음을 의미하며, 이는 두부손으로 이어지거나 충분한 경타를 실시하지 못하게 되는 결과를 낳는다.(그림 4 참조) 특히 이러한 시공 방법은 상기에서 언급한바와 같이 Cushion재를 사람이 Casing내로 낙하시키기 때문에 정확하게 말뚝 머리 위에 Cushion재가 놓여질 가능성이 희박하며, 그에 따른 편타 및 두부손상 발생가능성이 매우 높다.

3.4.2 개선 방안

SDA공법 적용시 경타를 위하여 Drop Hammer를 Wire에 매달아 Casing 내로 직접 낙하시키는 방법은 적절하지 않으므로 개선된 보조말뚝을 사용하여 시공하여야 한다. 가장 바람직한 방법은 상기에서 언급한 바와 같이 기초저면까지 굴착 후 지반이 연약할 경우 잡석 등으로 치환 후 장비를 진입시키거나 지반상태가 양호하다면 그대로 장비를 진입시켜 말뚝두부를 Hammer로 직접 타격하는 것이다. 또한 개선된 보조말뚝을 사용할 경우에는 에너지효율 감소를 고려하여 유압 Hammer 5.0ton 이상을 사용하는 것이 바람직 하며, 부득이한 경우에는 3.0ton 이상의 중량을 가진 Drop Hammer를 사용하되 말뚝 동재하시험을 통하여 그 유효성을 입증한 후 사용하여야 한다. 특히 연약지반에서 Casing을 이용한 매입공법을 시공할 경우에는 Casing 내에 Heaving 현상이 발생할 가능성이 높으므로 유압 Hammer를 이용한 충분한 경타가 필요하다. 소음, 진동 등 환경문제를 해결하기 위해 적용된 매입공법에 유압 Hammer의 적용은 적합하지 않다고 생각할 수 있겠으나 지반조건에 따라서는(특히 연약지반) 유압 Hammer를 이용해 충분한 경타를 실시 하여야한다. 이때에는 시험타와 동시에 동재하시험을 실시하여 두부응력 및 선단부 응력, 인장응력을 측정하여 적절

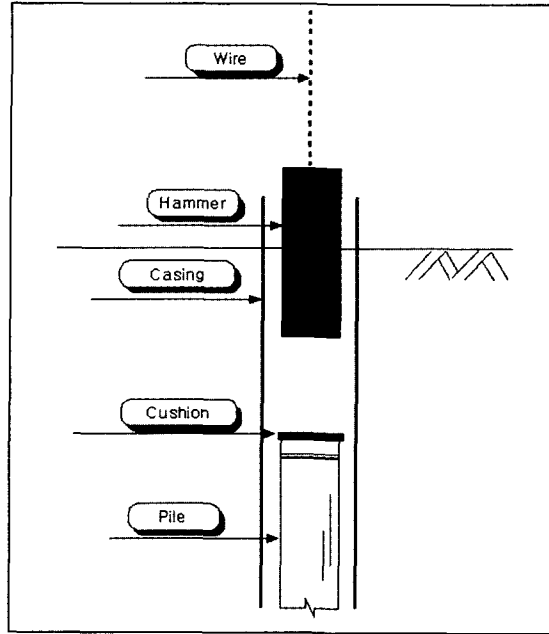


그림 4. Wire에 매달린 Drop Hammer

한 향타 방법을 결정한 후 본향타를 실시하여야 한다. 현장실무자의 매입말뚝 시공에 따른 잘못된 지식은 다음과 같다.

- (1) 매입말뚝의 경타는 말뚝 고정 개념으로서 말뚝 선단부를 굴착심도까지 근입시킬 필요는 없다.
- (2) 매입말뚝은 선단부 고정액을 사용하지 않으므로 말뚝선단부에 구근을 형성시키므로 충분한 경타를 실시하지 않는 것이 지지력 확보 면에서 유리하다.
- (3) 최종관입량 측정은 매입말뚝의 경우 무의미하다.
- (4) 말뚝시공후 시간이 경과함에 따라 말뚝의 지지력은 증가한다.
- (5) 매입말뚝 시공시 지하수위는 말뚝의 지지력과 무관하다.

이러한 잘못된 지식은 지반조건이 양호하거나 양호하지 않거나 동일한 시공방법에 의해 시공이 이루어지게 하며, 설계하중 미확보라는 심각한 문제를 초래한다. 위에 나열한 잘못된 지식은 다음과 같이 수정되어야 한다.

- (1) 매입말뚝의 경타 목적은 말뚝 선단부를 굴착심도까지 근입시키는데 있다. 말뚝 고정 개념의 경타라면 선단고정액 사용 및 구근형성 유무를 확인하여야 한다.
- (2) 일반적으로 국내에서 시공되는 매입말뚝에는 선단부 고정액을 따로 사용하지 않는다. 또한 지하수위가 높거나 피압수가 있을 경우 주입된 Cement paste는 희석되거나 유실 될 가능성이 매우 높다.
- (3) 매입말뚝 시공시라도 최종관입량 측정은 필수적이다. 이는 모든 말뚝에 대해 말뚝 선단부를 굴착 심도까지 근입 시켰는지 확인할 수 있는 유일한 방법이며, 말뚝 한본 한본에 대한 시공 품질관리 차원에서 반드시 실시되어야 한다.
- (4) 말뚝시공후 시간이 경과함에 따라 말뚝의 지지력은 증가(Set up)하거나 감소(Relaxation)하거나 변화가 없을 수 있다. 일반적으로 말뚝의 지지력은 시간경과에 따라 증가하나 지지층의 지반조건이 쉽게 풍화되는 지반이거나, 말뚝 떠오름 현상이 발생 하거나, 외부 환경요인 등에 의해 지지력은 감소할 수 있다.
- (5) 지하수위가 높을 경우 말뚝은 부력을 받게되고 인근에 말뚝을 시공할 경우 기존에 시공된 말뚝은 떠오를 수 있다. 이를 방지하기 위해 PHC 말뚝의 경우 말뚝 선단부에 구멍을 뚫어 지하수에 의한 부력이나 피압수의 영향을 감소시켜야 하며, 충분한 경타를 실시하여야 한다.
- (5) 앞서 언급한바와 같이 매입말뚝의 지지력은 지하수위와 밀접한 관계를 가진다. 따라서 말뚝 선단부를 굴착심도까지 근입시키는 것은 필수적이다.

3.5 Cement paste 배합비의 일률적용

3.5.1 Cement paste 배합비의 일률적용으로 발생하는 문제점

한국도로공사 특수공종 시공 및 품질관리 지침서

표 1. 고정액 표준배합표

구분	W/C (%)	단위시멘트량 (kg/m ³)	단위수량 (kg/m ³)	비고
선단고정액	60	1,090	654	
주면고정액	70	983	688	

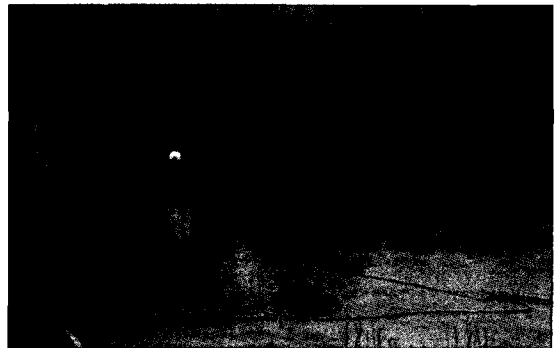


사진 5. 말뚝 삽입시 Casing내 지하수 배출

(1997)에서 제시한 SIP 시공시 고정액 표준배합표는 표 1과 같다.

SIP시공법은 국내에 도입되면서 다소 변형된 형태로 적용되고 있다. 실제로 ① 굴착시 굴착수를 사용하는 일이 거의없고 ② 말뚝을 회전시키면서 삽입하기 위한 선단금부 및 두부금부를 사용하는 일이 거의 없으며, ③ 선단 고정액을 거의 사용하지 않으며, ④ 말뚝을 회전시키면서 삽입하지 않고 ⑤ 최종경타를 실시하며, ⑥ 구근을 형성하지 않는다.

실제시공 순서는 대부분 ① 굴착 ② Cement Milk 교반 및 주입(선단고정액+주면고정액) ③ 말뚝삽입 ④ 최종경타의 순으로 이루어진다. 이에 따른 지지력 감소 요인이 존재하는지는 시공 전에 충분히 검토가 이루어져야 하지만 그렇지 못한 것이 현실이다. 특히 지하수위가 높거나 유수 또는 피압수가 있을 경우 부배합의 고정액이 필요하며, 고정액은 지질조건(자갈층의 경우 고정액의 손실이 큼)을 감안하여 적절히 사용하여야 하지만 이를 감안하여 시공하는 예는 거의 찾아 볼 수 없다. 지하수위가 매우 높을 경우에는 아예 고정액 주입이 무의미 하거나 주입할 수조차 없는 상황도 발생할 수 있다.(사진 5 참조)

3.5.2 개선 방안

사진 5에서 보는 바와 같이 매입공법 적용시 고정액은 지반조건에 따라 적절한 배합비로 사용되어야 하며, 연약지반에서는 Cement paste의 양생에 따른 구근형성이나 주변마찰력 증가 효과를 크게 기대하기 어려우므로 충분한 경타를 실시하여야 한다.

3.6 적절한 경타의 미 실시

상기 3.4.2 에서 언급한 바와 같이 매입말뚝 시공시 적절한 경타는 지지력 확보를 위해 매우 중요하다.

매입공법 또한 직항타 공법과 동일한 개념으로 동재하시험을 통하여 시항타 및 시공관리지침을 마련하고 이에 따라 시공을 실시 하여야 하나 일부 현장에서는 매입말뚝의 경우 시방서 등에 시항타를 통한 시공관리기준적용 규정이 없다는 이유로 시항타를 실시하지 않는 예가 있다. 상기한 바와 같이 지하수위가 높은 현장의 경우 확실한 선단지지가 필요하나 이를 간과하고 시공을 종료하는 예가 종종 발생하고 있다. 따라서 매입말뚝에 대해서도 직항타 공법과 마찬가지로 시항타시 동재하시험을 통하여 시공관리지침을 마련하고, 현장담당자는 시공관리지침에 따라 말뚝시공장비 운전자가 Hammer 낙하고와 최종관입량, Cushion재를 운영하고 있는지 수시로 확인하여야 한다. 또한 최종관입량 기록지는 100% 작성하여야 하며, 최종관입량 기록지 작성시 간혹 Hammer 낙하고를 낮추어 작성하는지 특히 유의하여 관리하여야 한다. 이는 보조말뚝 사용시에도 적용

되며, 보조말뚝 표면에 최종관입량 기록지를 부착하여 시공말뚝의 선단지지 여부를 확인하여야 한다.

3.7 말뚝 떠오름현상 발생

말뚝의 떠오름 현상은 98' 지반공학회 봄학술 발표회(이명환 외4)에서 언급된바 있으며, 이는 직항타말뚝 시공시 발생한 말뚝 떠오름 현상과 그 대책으로서 토사의 배토량이 작은 H-Pile을 적용하여 떠오름 현상 발생에 따른 말뚝지지력 미달현상을 해결한 사례가 언급되어 있다. 직항타말뚝의 경우 말뚝타입에 따라 배토된 토사는 일부 압밀이 발생하고 일부는 시공된 주변말뚝에 상향의 토압을 발생시켜 말뚝에 인장균열을 발생시키고 말뚝을 밀어 올리는 역할을 한다. 밀어 올려진 말뚝은 결국 선단지지력을 상실하게 되며, 이러한 말뚝위에 그대로 구조물을 시공할 경우 과다 침하에 따른 상부 구조물 손상이 발생할 수 있다.

말뚝 떠오름 현상 방지 공법중 하나가 매입공법이다. 매입공법은 지반을 Auger등에 의해 굴착한 후 기성말뚝을 삽입하는 공법으로서 말뚝시공에 따른 시공된 주변말뚝에 상향의 토압이 발생하지 않기 때문에 매우 유리하다. 그러나 지반조건에 따라서는 매입말뚝에서도 말뚝 떠오름 현상이 발생함을 확인하였다.

말뚝 떠오름 현상은 최종관입량을 직접 측정하여 확인하였으며, 말뚝의 지지력감소 정도는 PDA(Pile Driving Analyzer)를 이용한 말뚝동재하시험(Dynamic loading test)을 통하여 확인 하였다.

표 2. 시험말뚝 조건

구분	Pile 번호	시공방법	헬머제원	비고
106동	No.233(시공시)	PRD	DKH-5	말뚝제원 : PHC D450 설계하중 : 784.8 kN 말뚝길이 : 29.0m 관입깊이 : 28.0m
106동	No.233(1일 경과후)	PRD	DKH-5	
106동	No.233(20일 경과후)	PRD	DKH-5	

* 1) PRD : Prelocation Rotary Drilling Method

* 2) 1일 경과후 : 시험말뚝 시공후 1일 경과 및 시험말뚝 주위에 말뚝 10본 시공후

* 3) 20일 경과후 : 시험말뚝 시공후 1일 경과 및 시험말뚝 주위에 말뚝 325본 시공후

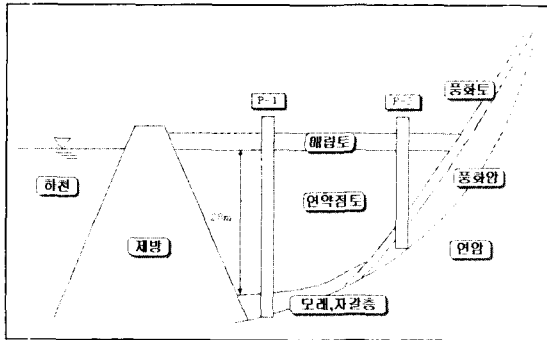


그림 5. 현장 지반조건

(1) 부산 00아파트현장 말뚝 떠오름현상 발생 사례

1) 현장 지반조건

현장 지반조건은 그림 5와 같다. 그림 5에서 보는 바와 같이 현장 지반조건은 하천에 근접한 연약점토층이 최대 28.0m 에 이르는 층과 비교적 연약점토층이 얇고 풍화토와 풍화암이 발달한 지반으로 크게 나눌 수 있다. 말뚝의 떠오름 현상은 P-1 말뚝과 같이 연약점토층이 두껍고 모래, 자갈층이 발달되어 있으며, 말뚝 선단부는 연암상단에 지지되었거나 연암에 알맞게 근입된 말뚝에서 발생하고 있다.

2) 시험결과

본 동재하시험 결과자료(CASE, CAPWAP 결과)를 요약하면 다음 표 3 및 표 4와 같다.

동재하시험시 얻은 CASE 자료에서 보는바와 같이 시험말뚝 시공시 실시한 동재하시험에서의 최대 정적지지력값은 2447kN, 최종관입량은 1.0mm/blow 이하 였으며, 시험말뚝 주변에 10본의 말뚝을 시공한 후(1일 경과) 2차 동재하시험을 실시한 결과 최대정적지지력값은 1976kN으로 감소하였고, 최종관입량은 5.0mm/blow로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 1일 경과 후 2차 Restrike시 최종관입량을 1.0mm/blow 상태로 말뚝선단부를 다시 지지층에 근입시킨후 20일 경과 시점에서 동일 말뚝에 대해 3차 동재하시험을 실시한 결과 최대정적지지력값은 2447kN, 최종관입량은 1.0mm/blow이하로 나타났다. 동재하시험시 얻은 CASE 자료를 이용하여 CAPWAP해석을 실시한 결과는 표 4와 같다. 표 4에서 보는바와 같이 시험말뚝의 주변마찰력은 시간 경과에 따라 점차 증가하는 것으로 나타났으나 선단 지지력은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 20일 경과후 시험에서 실제로 선단지지력이 감소 한 것은 아니라고 판단되며, 이는 주변마찰력이 상당히 증가하

표 3. CASE 결과

구분	타격에너지	최대정적지지력	최대압축응력	최종침하량	비고
	EMX kN·m	RMX kN	CSX MPa	DFN mm	
106-233(시공시)	34.3	2447	36.9	1.0 이하	시공시
106-233(Restrike시)	24.4	1976	28.7	5.0	1일 경과후
106-233(Restrike시)	24.4	2274	19.1	1.0 이하	20일 경과후

표 4. CAPWAP 해석결과 및 허용지지력

구분	설계하중	주면마찰력	선단지지력	전체지지력	허용지지력
	kN	kN	kN	kN	kN
106-233(시공시)	784.8	362.6	1773.1	2135.7	977.5 ⁽¹⁾
106-233 (Restrike시, 1일 경과)	784.8	651.3	1190.9	1842.2	921.1 ⁽¹⁾
106-233 (Restrike시, 20일 경과)	784.8	1293.9	926.4	2220.3	1110.2 ⁽¹⁾ 이상

- (1) Davisson 법으로 구한 허용지지력(안전율 2.0)

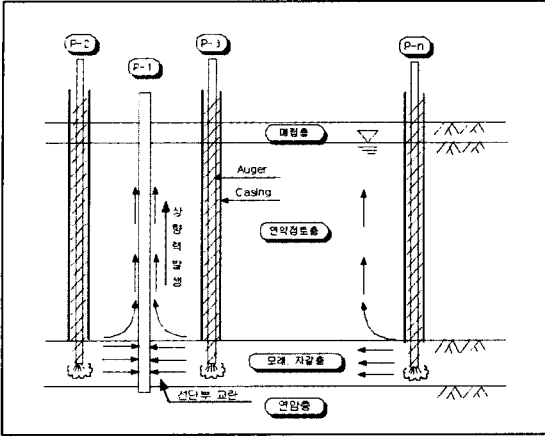


그림 6. 매입말뚝에서 떠오름현상 발생 원인

여 말뚝동재하시험시 타격에너지가 주변마찰력에 의해 말뚝선단부 까지충분한 타격에너지가 전달되지 않아 선단지지력이 작게 평가된 것으로 판단된다. 이는 하중-침하량 곡선 및 Davisson법에 의한 허용지지력 평가시 확인되었다.

3차에 걸친 동재하시험 및 최종관입량 확인시험 결과 매입말뚝에서도 지반조건에 따라 말뚝 떠오름 현상이 발생할 수 있음을 확인하였으며, 그에 따른 선단지지력 감소는 32.8%로 나타났다.

3.7.1 말뚝 떠오름현상 발생 원인

매입말뚝에서 말뚝 떠오름 현상 발생은 그림 6의 P-1 시험말뚝처럼 말뚝주면부가 연약점토이고 말뚝 선단부는 모래, 자갈층아래 연암에 지지된 경우 발생하기 쉽다.

매입말뚝 시공을 위해서는 연약지반의 경우 굴착공 붕괴를 방지하기 위하여 Casing과 Auger, 압축공기를 이용하여 지반을 굴착한다. 지반굴착 후 주변부 고정액인 Cement paste를 주입하고 시험말뚝인 P-1시험말뚝을 시공한 후 경타를 통하여 말뚝 선단부를 굴착심도까지 근입시킨다. 이때 지지층 상단에 모래자갈층이 있을 경우 Casing을 모래, 자갈층에 관입시킬 수 없고 굴착공이 붕괴되어 말뚝 선단부를 굴착심도인 연암 상단까지 근입시키기는 현실적으로

어렵다. 시험말뚝인 P-1 시공후 P-2, P-3 시공을 위해 지반굴착 및 압축공기를 사용하게 되고 이때 사용하는 고압의 압축공기는 기 시공된 P-1 시험말뚝의 선단부 지반을 교란시킴과 동시에 모래, 자갈층 상부의 연약점토층을 밀어올림에 따라 말뚝은 뿔히게 된다.

3.7.2 말뚝 떠오름현상 방지대책

상기와 같은 말뚝 떠오름현상을 방지하기 위해서는 다음과 같은 방법이 사용될 수 있다.

- (1) 선단부 면적이 상대적으로 작아서 항타관입성이 크고 큰 항타에너지로 타격 할 수 있는 강관말뚝 또는 H-말뚝을 사용하여 매입공법과 직항타공법을 병행하여 시공한다. 시공방법은 지반굴착 후 말뚝을 삽입하고 항타를 통하여 연암에 어느정도 근입시킨다. 이렇게 되면 주변에 다른 말뚝을 시공하더라도 직항타에 따른 말뚝선단부의 큰 주변마찰력과 수평저항력에 의해 횡방향력이나 상향력에 저항할 수 있게 된다. 또한 매입공법과 직항타공법을 병행함에 따라 직항타 공법보다 소음이나 진동발생이 적어 민원발생 가능성도 줄일 수 있다.
- (2) 말뚝간격을 압축공기에 의한 지반교란 영향범위 이상 유지한다. 이 방법은 큰 상부하중을 지지해야하는 아파트 기초말뚝 등의 경우 적용하기 어렵다.
- (3) 상기 시험결과에서도 확인하였듯이 시공종료 후 Restrike를 실시한다. 이 방법은 말뚝시공 본수가 많을 경우 적용하기 힘든 단점이 있으나 시험결과에서도 확인 하였듯이 지지력 감소 방지 방법으로서 효과가 상당히 큰 것으로 나타났다. 이 방법은 현장의 일부구간에서 떠오름 현상이 발생할 경우 PHC 말뚝을 적용할 수 있어 시공비용을 절감할 수 있다는 큰 장점이 있으나 재항타에 따른 말뚝본체 손상 가능성이 매우 크므로 주의하여야 한다.

3.8 Casing 인발시 말뚝 뽑힘현상 발생

SDA 공법등 Casing을 이용하여 말뚝을 시공하는 경우에는 Casing 인발시 기 시공된 말뚝이 Casing 과 함께 인발 될 수 있다. 그 원인은 말뚝과 Casing 사이의 공극에 토사 등이 끼어있어 마찰력이 작용하기 때문이다. 말뚝 두부가 지상에 노출된 경우에는 지반굴착 - Casing 인발 - 경타 순으로 시공이 이루어지므로 문제가 발생하지 않지만, 말뚝 두부가 지중에 위치한다면 지반굴착 - 보조말뚝을 이용하여 경타 - Casing 인발 순으로 시공이 이루어지므로 말뚝 뽑힘현상이 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 경타 실시 후 Auger 자중으로 말뚝 두부를 지압한 후 Casing을 인발하여 말뚝이 Casing과 함께 뽑히는 현상을 방지하여야 한다. 현장 실무자는 말뚝시공장비 운전자가 반드시 Auger를 말뚝 두부에 올려놓은 상태에서 Casing을 인발 하도록 교육하고 확인하여야 한다.

4. 결론

본 연구는 사용빈도가 증가하고 있는 매입말뚝에 대한 시공 및 품질관리시 문제점과 개선방안에 대한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구를 통하여 매입말뚝 적용시에는 시공 및 품질관리에 많은 문제가 발생할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 지반조건에 따라 매입공법 적용시에도 주변마찰력 및 선단부 구근형성을 고려하지 않은 선단지지 말뚝으로 시공해야하는 경우를 다수 확인할 수 있었다.
- (3) 매입공법은 작업공정이 직항타 공법에 비해 복잡하고 시공장비 운전자의 많은 숙련도가 요구되므로 현장 실무자는 품질관리에 특히 유의하여야 한다.
- (4) 매입공법적용 기성말뚝의 지지력 특성은 지반 조건별로 더 많은 연구가 이루어져야 한다.

감사의 글

본 연구는 대림산업(주) 기술연구소 2002년 연구 과제로 수행되었으며, 연구에 많은 협조를 아끼지 않은 현장실무자들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. (도서출판)과학기술(1999.1.15), "말뚝기초의 저소를 저진동 시공법과 지지력", pp.321~353
2. (사)한국지반공학회(1998.3.24), "구조물 기초설계기준", pp.174~214
3. 이명환 외4(1998), "군말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름 발생사례", 98 (사)한국지반공학회 봄학술발표회 논문, pp.173~178
4. 한국도로공사(1997), "특수공종 시공 및 품질관리 지침서", pp.145~163

광고 게재 모집 안내

월간 "地盤"에 게재할 광고를 다음과 같이 연중 수시로 모집하오니 지면을 통하여 회사를 홍보하고자 하는 업체 및 회원은 신청하여 주시기 바랍니다.

- 다 음 -

(단위: 만원 / 회)

	표지 2, 4	표지 3	내지
월간	60	50	45
특별	40	30	25

* 1년 단위 계약 10% DC, 특별회원사 15% DC
(1년 단위 계약 10% DC 추가)