

무소음·무진동 스크류콘크리트말뚝의 시공법 설정

Determination of Construction Method for Noise & Vibration-Free Screw Concrete Piles

최용규¹⁾, Yongkyu Choi, 김동철²⁾, Kim, Dong-chul, 김성수³⁾, Sung-su Kim, 남문석⁴⁾, Nam, Moom S.

¹⁾ 경성대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environ. Engineering, Kyung Sung University

²⁾ 경성대학교 건설환경공학과 박사과정수료, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engineering, Kyung Sung University

³⁾ 무성토건 상무, Managing Director, Musung Construction Industrial Co, LTD

⁴⁾ 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, Research Fellow, Highway & Transportation Technology Institute, Korea Expressway Corporation

SYNOPSIS : Noise and vibration triggered by pile driving in a construction site not only give hard time to the surrounding areas but could also cause residents nearby to file civil complaints to the extent of bringing construction to a halt. To deal with this issue, construction engineers have worked strenuously to develop low noise & low vibration pile methods. A noise & vibration-free screw concrete pile method proposed in this study is one of the successful outputs. It penetrates pile underground by rotating and pressing in body of the pile to avert noise and vibration while maximizing bearing capacity. A prototype of noise and vibration-free precast screw pile method was manufactured, which is not seen anywhere in Korea and elsewhere, and have undergone pilot tests twice to determine construction method.

Keywords : low noise & vibration pile methods, screw pile method, noise & vibration free screw concrete pile method, pilot test

1. 서론

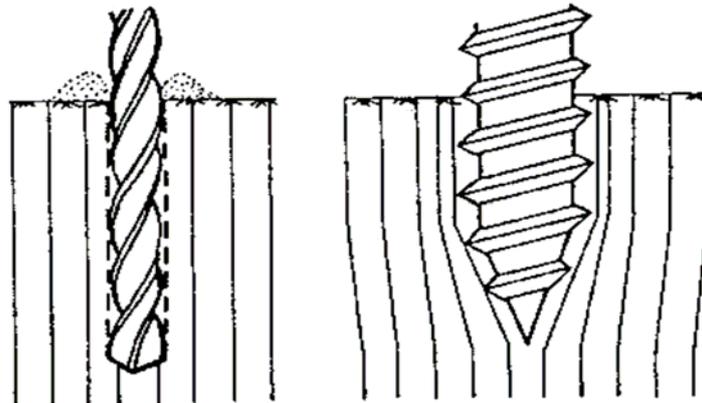
말뚝의 시공방법 중 기성말뚝공법을 사용한 직항타공법과 진동에 의한 압입공법은 도심지의 말뚝시공에서 거의 배제되고 있다. 그리고 한국과 일본에서 시공되고 있는 저소음·저진동 말뚝시공법으로 SIP (Soil injection pile), DRA (Double Rod Auger), SAIP (Special Auger Injected Precast Pile) 등이 사용되고 있다. 이들 공법은 공통적으로 지반을 선행 천공하고 기성말뚝을 삽입한 후 말뚝과 지반 사이의 틈새를 시멘트밀크와 같은 그라우트로 채우며 말뚝시공의 마무리 단계에 최종경타를 실시하게 되어 소음과 진동이 어느 정도는 발생하게 된다. 국내의 소음·진동규제는 점점 더 강화되고 있는 실정이다. 그러므로 도심지 근접시공을 위해서는 현재의 저진동·저소음공법보다 더욱 친환경적인 공법이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 소음과 진동을 줄이기 위한 노력 중의 하나인 무소음·무진동 스크류콘크리트말뚝공법의 시공원리와 특징에 대하여 설명하였으며 2차례의 시험시공 및 이를 통한 시공법 설정에 관하여 설명하였다.

2. 무소음무진동 스크류콘크리트말뚝 공법

2.1 공법의 특징

그림 1에는 변위말뚝의 시공단계에서 나타날 수 있는 주변지반 흙의 거동을 나타내었다. CFA말뚝(Continuous flight auger pile)과 같이 지반천공을 할 경우 굴착과 동시에 흙이 지상으로 배출되어 주변지반의 이동이 없게 된다. 그러나 Atlas말뚝이나 Omega 말뚝 등과 같은 스크류말뚝은 나사못과 같이 흙의 배출이 없게 되어 말뚝시공위치의 흙을 옆으로 밀어내면서 주변지반에 다짐이 발생하게 된다(Van Impe, 1988).



(a) 나사를 조이면서 굴착 (b) 나사를 조이면서 수평변위
그림 1. 나무 드릴과 나사의 원리에서 유추한 변위오거 및 비변위오거의 개념도 (Van Impe, 1988)

이러한 스크류말뚝의 시공원리를 이용한 무소음무진동 스크류콘크리트말뚝공법(Noise & Vibration-Free Screw Concrete Pile Method)에서는 배출되는 슬라임의 양이 현저히 감소되고, 말뚝의 선단과 주변 지반에서 이완이 없으며 최종경타와 같은 추가 작업이 없게 되므로 스크류콘크리트말뚝공법은 소음과 진동이 극히 적은 환경친화적인 공법(Environmentally friendly method)이 될 수 있다. 또 굴착공의 형성이 곤란한 사질토 지반에서도 별도의 케이싱 없이 시공이 가능하므로 경제성 및 시공성이 우수하다. 경타와 케이싱 등의 추가적인 공정이 없고 오거모터만 사용하는 단일 장비에 의하여 시공이 완료될 수 있으므로 공정이 단순하며 작업시간을 단축시킬 수 있다.

2.2 시공절차

무진동무진동 스크류콘크리트말뚝공법의 시공절차는 오거모터와 말뚝을 동력전달장치로 연결한 후 시공위치에 말뚝을 거치한 후 회전·압입하여 말뚝을 지중에 관입시키며 지지층에 도달되면 말뚝의 선단에 설치된 분사구를 통해 그라우팅재를 분사하여 선단부 그라우팅을 실시하면 시공이 완료된다. 심도가 깊은 경우 이음을 실시하고 연속적으로 관입을 진행한다.

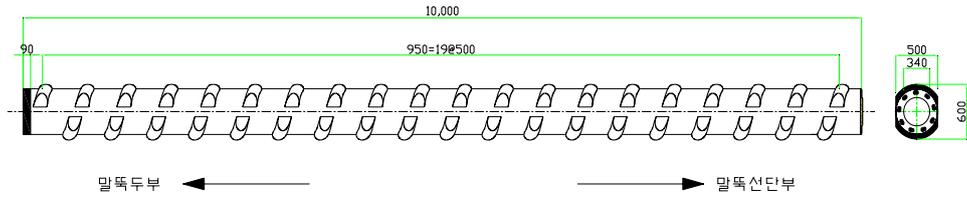
3. 스크류콘크리트말뚝의 시작용 제원

스크류콘크리트말뚝의 제원은 원심력 콘크리트 PC말뚝의 A종과 같으며 표 1에 나타내었다. 스크류콘크리트말뚝은 기존 PC말뚝과 스크류날이 일체로 제작되었다. 스크류날의 각도는 말뚝중심축에 대하여

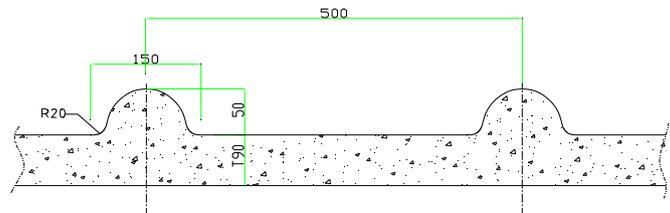
73°만큼 경사져 있다. 그 상세도는 그림 2에 나타내었다.

표 1. 스크류콘크리트말뚝의 시작품 제원

직경 (mm)	두께 (mm)	길이 (m)	균열 휨모멘트 (kN·m)	유효 인장력 (kN)	허용축 방향 하중 (kN)	유효 프레스트레스 (MPa)	콘크리트 배합강도 (MPa)
500	90	10	105	460	1,250	4	50 이상



(a) 일반도



(b) 스크류부분 상세도

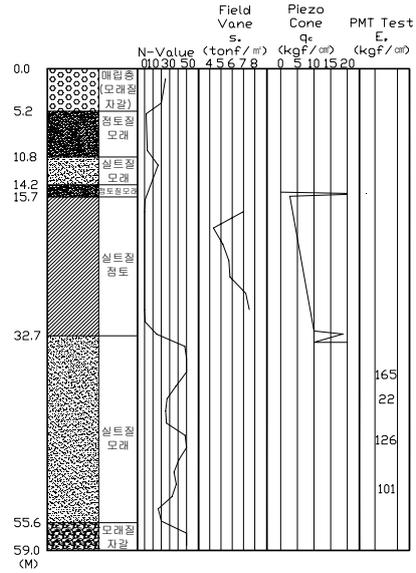
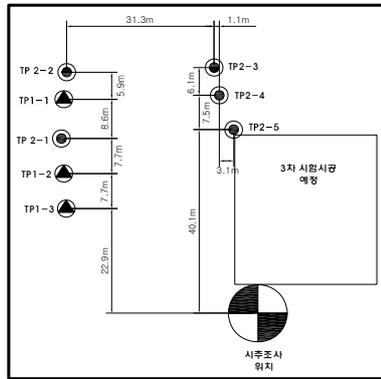
그림 2. 스크류콘크리트말뚝 상세도

스크류콘크리트말뚝의 이음부는 기존의 PHC말뚝의 연결방식과 같은 방법으로 연결판을 이용해 용접에 의해 연결하도록 제작하였다.

4. 시험시공

4.1 시험시공계획 및 시험부지

시험시공 위치는 부산 명지주거단지 내의 아파트 시공 예정부지이었다 (그림 3(a)참조). 지반조건은 낙동강하구의 연약점토층 위에 매립한 지반으로 지질주상도는 그림 3(b)에 나타내었다. 지표로부터 5.2 m까지는 매립층으로 보통 조밀한 모래질 자갈층이었으며 5.2~15.7 m는 느슨한 모래층, 15.7~32.7 m는 매우 연약한 점토층, 하부에는 조밀한 모래층으로 구성되어 있었다.



(a) 시험시공 위치 평면도 (b) 지질 주상도
 그림 3. 시험시공 부지 평면도 및 지질주상도 (최용규 외, 2009a)

2 차례에 걸친 시험시공계획은 표 2에 요약하였다. 1차 시험시공에서는 예상도달지층까지 관입시키지 못하였으므로 2차 시험시공을 계획하였다.

표 2. 시험시공계획 요약

시험시공구분	시험말뚝	선단형태	회전력	오거모터종류	천공방법		최대관입심도 (GL-m)	말뚝손상	
					물분사	공기분사			
						주입량 (m ³ /min)			주입압력 (MPa)
1차	TP 1-1	(평면형 전단면슈)	두부 회전	단일	-	25.5	2.5	15.5	손상
	TP 1-2		두부 회전	단일	-	25.5	2.5	20.0	손상
	TP 1-3		두부 회전	단일	주입	-	-	23.5	손상
2차	TP 2-1	(개방, 없음)	두부 회전	분리형	-	-	-	10.0	손상
	TP 2-2	(원추형, 전단면슈)	두부 회전 & 내부 로더로 선단 회전	분리형	주입	-	-	11.0	손상
	TP 2-3		내부로더로 선단 회전	분리형	주입	10.5	0.7	33.5	-
	TP 2-4		내부로더로 선단 회전	분리형	주입	25.5	2.5	33.5	-
	TP 2-5	(개방, 단두깨부슈)	내부로더비트로 선행굴진 & 두부 회전	분리형	-	25.5	2.5	28.5	-

4.2 1차 시험시공

4.2.1 시험시공의 준비

시공장비는 말뚝향타기와 오거모터를 구동하기 위한 발전기, 콤푸레샤, 물을 분사하기 위한 펌프, 전

기용점을 실시하기 위한 장비로 구성하였다.

시험말뚝의 선단부에는 슈 (그림 4 참조)를 부착하고 물이나 공기가 분사될 수 있도록 분사구를 설치하였다.

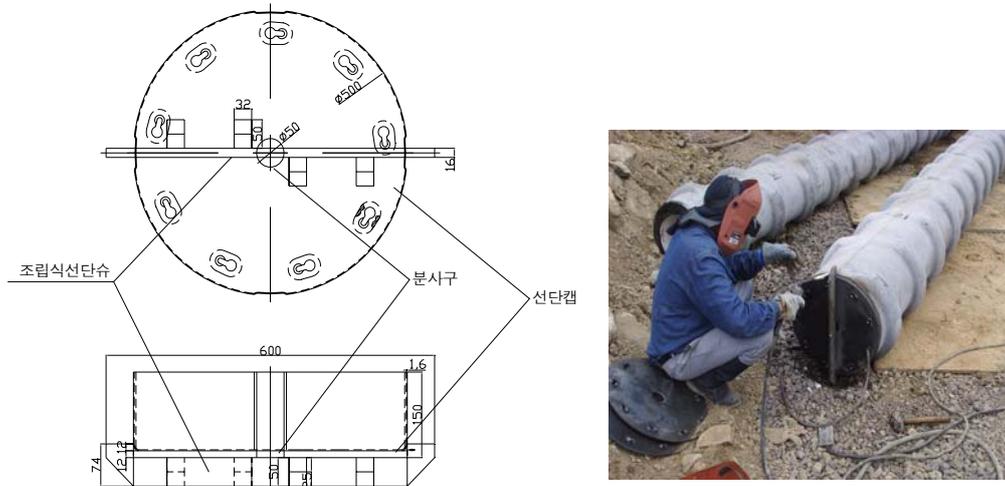


그림 4. 1차시험시공의 선단슈 (최용규 외, 2009a)

4.2.2 1차 시험시공

1차 시험시공에서는 2가지의 방법으로 3분을 시험시공하였다. 말뚝의 관입성을 향상시키기 위한 방법으로 첫 번째는 말뚝의 내부로 압축공기를 분사하면서 회전압입하였으며 두 번째는 말뚝의 내부로 물을 분사하면서 회전압입을 실시하였다. 말뚝의 최종 목표심도는 N치 30 이상의 모래층에 관입되도록 계획하였으나 첫 번째 방법의 경우 15~20 m까지 관입되었고, 두 번째 방법으로는 23.5 m까지 관입되었다. 그러나 말뚝을 시공하는 과정에서 말뚝이 파손되는 현상이 발생하였다. 파손의 발생부위는 말뚝이 지반면 위로 노출된 부분, 말뚝과 지반이 만나는 위치 부근 그리고 말뚝과 관입장치의 연결부 등으로 시공 중 말뚝이 지상에 노출된 부분에서 발생하였다 (그림 5).



(a) 말뚝이 노출된 부분의 파손

(b) 말뚝과 지반이 만나는 위치의 파손

(c) 말뚝과 관입장치 연결부손상

그림 5. 1차 시험시공에서 말뚝의 파손

말뚝이 지반에 관입되면 지반의 구속압력에 의해 부재의 비틀림 저항력이 증가하게 되어 지중에서는 파손이 발생하지 않으며 구속압력이 없는 지상에 노출된 부분에서 비틀림응력이 집중하게 되어 말뚝 부재가 파손되는 것을 확인하였다. 1차 시험시공의 결과 회전압입에 의하여 스크류콘크리트말뚝의 시공이 가능하기 위해서는 지상에 노출된 부분에 응력이 집중되는 것을 최소화 할 수 있는 시공방법을 선택하여야 할 것으로 판단되었다.

4.3 2차 시험시공

4.3.1 시험시공의 준비

2차 시험시공은 1차 시험시공과 같은 시험부지에서 실시하였으며 지반조건은 1차 시험시공과 동일하였다. 시공장비의 구성은 동일하였고 말뚝과 말뚝내부에 삽입된 내부로더가 별도로 회전할 수 있도록 하기 위하여 분리형 오거모터를 사용하였다.

4.2.2 2차 시험시공

(1) 시험말뚝 1

말뚝만을 하부오거모터로 두부를 회전시켜 관입하였는데 10m 관입시킨 후 두 번째 말뚝을 연결하여 회전시키는 과정에서 말뚝의 두부가 파손되었다. 말뚝 연결과정의 대기시간 동안 회전굴착하는 과정에서 이완되었던 지반의 강도가 복원되어 말뚝과 지반의 마찰력이 증가하게 되었고 이때 지반의 구속이 없는 노출된 부분에서 비틀림응력의 집중이 발생하여 파손된 것으로 판단되었다. 이 결과로 하부오거만을 이용하여 말뚝두부를 회전시킬 경우에도 10m를 관입할 수 있음을 확인하였다.

(2) 시험말뚝 2

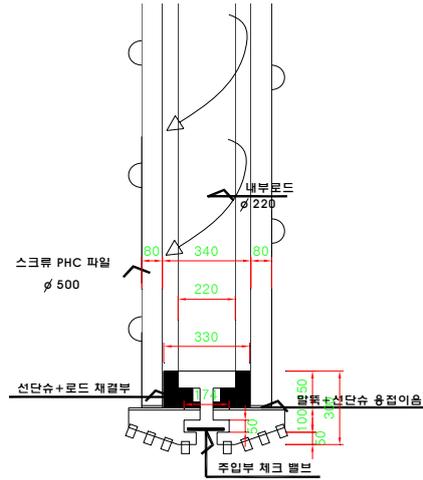
2번째 시험 말뚝은 선단슈에서 물만 분사하면서 말뚝선단과 말뚝의 두부를 동시에 회전시켰다. 11m를 관입시킨 후 말뚝과 지반이 만나는 지점에서 말뚝의 파손이 발생하였다. 말뚝과 선단을 동시에 회전시키는 경우도 역시 말뚝에 비틀림응력이 크게 작용하는 것을 알 수 있었다.

(3) 시험말뚝 3, 4

3, 4번째 시험말뚝에서는 말뚝의 내부에 내부로더를 삽입한 후 선단 굴착용 슈를 내부로더에 장착한 상태에서 슈와 말뚝을 용접하였다(그림 6(d), (e)). 굴착 시 상부오거모터만으로 내부로더를 회전시켜 말뚝을 시계방향으로 회전시키고 지지층에 도달하면 내부로더를 반시계방향으로 회전시켜 내부로더를 선단슈와 분리시키고 내부로더만 인발해 내어 시공을 완료하는 방법을 사용하였다. 그리고 굴착시 내부로더를 통하여 물과 공기를 동시에 분사하여 회전 시 지반과 말뚝사이의 마찰력을 감소시켰다. 이때 각각의 시험말뚝 시공 시 주입되는 공기량과 공기압력을 달리하였다(표 2 참조).



(a) 분리형오거의 개요도



(b) 선단부 상세도



(c) 선단슈 사진



(d) 선단슈와 내부로더의 결합



(e) 선단슈의 용접



(f) 시공사진

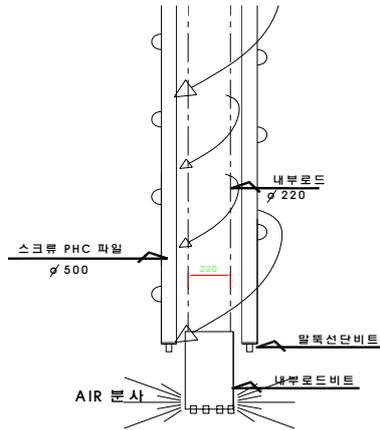
그림 6. 2차 시험시공 시 시험말뚝 3, 4의 선단부

이 방법으로 2분의 말뚝을 시험시공하였으며 33.5m까지 관입시킬 수 있었다. 말뚝의 선단이 N치 50이상의 견고한 지층에 도달하여 장비에 과부하가 걸리는 것이 확인되어 관입을 중단하였다.

스크류형태의 로더를 이용해 굴착을 실시할 경우 선단슈를 회전시킬 때 굴착에 필요한 회전력이 최대로 나타나게 된다고 알려져 있다(Van Impe, 1996). 따라서, 스크류콘크리트말뚝에 회전력을 두부에 작용시키면 말뚝과 주변지반의 마찰력에 의해 회전력은 선단부에 적게 전달되며 지상에 노출된 말뚝에 비틀림응력이 크게 작용하게 된다. 그리고 회전력이 말뚝의 선단에 작용하게 되면 지상에 노출된 부분에는 비틀림응력이 작용하지 않게 되고 굴착력은 최대로 작용하게 됨을 알 수 있었다.

(4) 시험말뚝 5

시험말뚝 5에서는 말뚝의 내부에 내부로더를 삽입하고 상부오거모터와 연결된 내부로더에 의해 말뚝 선단 하부에서 선행 굴진을 실시하였다. 이때 동시에 말뚝 선단두께부에만 굴착용슈를 용접하여 두었으므로 하부오거모터를 이용하여 말뚝두부를 회전시켜 말뚝을 관입시켰다 (그림 7). 그리고 내부로더의 선단에서 압축공기만 분사하여 말뚝과 지반의 마찰력을 감소시켰다. 이 방법을 통하여 28.5m 까지 시공하였으며 시험말뚝의 부족으로 관입작업을 종료하였다.



(a) 선단부 상세도



(b) 내부로더비트



(c) 선단슈와 로더의 장착



(d) 시공사진

그림 7. 2차 시험시공 시 시험말뚝 5번 시공

시험말뚝 5의 시공방법은 굴착속도가 가장 빨랐다. 말뚝에 내부로더를 삽입하고 상부오거모터에 연결하는 것만으로 작업이 가능하였으며 작업준비를 위한 시간을 최소화할 수 있었으므로 가장 작업효율이 좋은 방법이었다.

5. 시험시공 결과 분석

(1) 시공방법에 대한 결과 분석

회전압입에 의한 시공시 스크류콘크리트말뚝의 콘크리트 부재에 과도한 비틀림응력이 작용하게 되면 파손될 수 있음을 알 수 있었다. 즉, 말뚝의 두부에 회전력을 직접 작용시켜 회전압입 시킬 경우 지반의 구속이 없는 부분, 즉 지상에 노출된 부분에서 부재손상이 발생하였다. 따라서, 말뚝의 선단부에 회전력을 작용시켜 시공하는 방법을 사용하였다. 그리고 지지층에 도달한 말뚝에 PDA를 실시한 결과 손상된 부분이 없는 것을 확인하였다.

(2) 스크류콘크리트말뚝의 시공방법 설정

2차 시험시공에서 사용된 시공방법 중 지반조건에 따라 표 3과 같이 2가지로 시공방법을 설정하였다. 지지층심도가 10m 이내로 얇은 경우에는 말뚝두부와 오거모터를 직접 연결하여 회전압입 시킬 수 있었는데, 이 방법으로 20m 정도 까지도 시공할 수 있을 것으로 추정하였다. 지지층심도가 20m이상 깊은 경우 지반조건에 따라 시공방법을 설정하였으며 내부로더를 통하여 물과 압축공기를 주입하여 지반을 교란시키는 방법을 사용하였다. 매립층이나 자갈층이 있는 경우에는 말뚝의 선단에 전단면슈를 부착하고 굴착하고 그렇지 않은 경우에는 내부로더를 선행굴진하는 것으로 설정하였다 (표 3).

표 3. 스크류콘크리트말뚝의 시공방법결정

시공 조건		시공 방법
지지층 심도 20m 이내		- 말뚝을 연속적으로 시공할 경우 적용가능함 - 말뚝 두부와 오거모터를 연결하여 말뚝을 직접 회전시키면서 관입
지지층 심도 20m 이상	중간부에 N>30의 지층이 존재하는 경우	1. 전단면굴착슈를 말뚝선단에 용접으로 부착 2. 말뚝의 내부로 내부로더를 삽입하고 선단슈와 연결한 후 회전력을 말뚝선단에 작용시킴 3. 관입 시 물과 압축공기 등을 분사하여 관입성을 증가시키는 방법 적용
	상기 이외의 지반 조건인 경우	1. 내부로더비트를 말뚝내부에 삽입 2. 말뚝선단하부에서 내부로더비트로 선행천공하면서 하부오거로 말뚝두부를 회전시켜 관입 3. 관입 시 물과 압축공기 등을 분사하여 관입성을 증가시키는 방법 적용

6. 결론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 2차례의 시험시공 결과를 토대로 스크류콘크리트말뚝의 시공방법을 근입깊이와 지반조건에 따라 설정하였다. 근입깊이가 얇은 경우 (10 ~ 20m 이내)에는 말뚝두부에 회전력을 직접 작용 시키는 방법으로 시공할 수 있었다. 근입깊이가 깊은 경우 (20m 이상)에는 관입 시 내부로더를 통하여 물과 압축공기 등을 주입하여 지반을 교란시키는 방법으로 설정하였으며 이 경우에도 지반조건에 따라 시공법을 달리 설정할 수 있었다. 즉 중간에 N>30 이상의 단단한 지층이 존재하는 경우에는 전단면 굴착슈를 말뚝선단에 용접으로 부착하고 내부로더로 말뚝선단을 회전시켰으며, 그렇지 않은 경우에는 내부로더비트를 말뚝내부에 삽입하고 상부오거로 회전시켜 선행천공을 실시하면서 동시에 하부오거로 말뚝두부를 회전시켜 관입시켰다.
- 2) 회전관입 시 지상에 노출된 말뚝 부분에서 비틀림응력의 집중으로 인해 말뚝 부재의 손상이 발생되었다. 따라서 말뚝의 선단부를 회전시켜 관입시키는 방법을 시공법으로 설정하였다.
- 3) 향후 3차 시험시공에서는 시험말뚝에 대한 재하시험을 실시하여 말뚝의 거동 및 설계법 개발을 완성해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 및 한국산업기술재단의 2008년도 지역혁신인력양성사업(과제번호 : 20080703160336)의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. Van Impe, W.F. (1988), "Considerations on auger pile design", Proc. Of 1st 2nd Int. Conference on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, Balkma.
2. Van Impe, W.F. (1996), "Deep Foundations on Screw Piles", 한국지반공학회, 말뚝기초 국제 학술발표회 논문집, pp.109~151.
3. 최용규, 김동철, 김성수, 남문석(2009), "무소음·무진동 스크류PHC말뚝의 개발 및 시험시공 계획", 2009 한국지반공학회 기초기술위원회 Workshop, pp. 18~33.