

디지털 항타관리기(DPRMs)를 이용한 항타말뚝의 시공 관리

Quality Control of Driven Piles Using DPRMs

윤희석* · 석정우** · 황대진*** · 김명모****

Yun, HeeSuk · Seok, JeongWoo · Hwang, DaeJin · Kim, MyoungMo

1. 서론

항타말뚝의 시공관리는 시공 중에 말뚝의 손상이 발생하지 않으면서 설계 지지력을 확보하는 것이 주 목적이다. 현장에서 말뚝의 지지력을 평가하는 방법은 크게 정적인 방법과 동적인 방법으로 나눌 수 있다. 동적인 평가방법은 정재하시험에 비하여 다소 정확도가 떨어진다는 단점이 있으나, 시공 중에 말뚝의 지지력을 수시로 평가할 수 있고 정적인 시험방법에 비해 경제적이라는 장점이 있다. 특히, 동재하시험은 정재하시험보다 시험과정이 간편하고 시험결과가 비교적 신뢰할 만하며 시공 중에 말뚝의 건전도를 평가할 수 있다는 장점 때문에 대다수의 항타말뚝 시공현장에서 시공관리목적으로 사용되고 있다. 대부분의 시공현장에서는 일부 표본 말뚝에 대하여 동재하시험을 실시한 후 나머지 말뚝에서는 이 동재하시험으로부터 결정된 최종관입량을 관리기준으로 하여 항타말뚝의 시공관리를 하고 있다.

본 논문에서는 수작업을 대신하여 항타말뚝의 최종관입량을 정확하게 측정하기 위하여 개발된 디지털 항타관리기를 이용하여 간단하게 항타말뚝의 지지력과 항타응력을 평가할 수 있는 새로운 시공관리방법을 제안하였다.

2. 디지털 항타관리기(DPRMs; Digital Pile Penetrations and rebounds monitoring system)

항타시 말뚝 관입량 및 반발량의 실시간 계측을 통한 시공관리를 목적으로 개발된 DPRMs는 그림 1과 같이, 특별히 고안된 표적, 고속 라인스캔 카메라, 렌즈, 그리고 휴대용 PC 등으로 구성되어 있다.

DPRMs를 이용한 말뚝 변위계측 방법은 다음과 같다. 항타를 시작하기 전에 측정 대상 말뚝의 측면에 그림 1과 같이 표적을 부착하고 적당한 위치에 카메라를 설치한다. 항타가 시작되면 카메라로 촬영된 자료가 휴대용 PC에 저장되고 영상처리과정을 통하여 2차원 변위로 변환된 측정결과가 화면으로 출력된다.

DPRMs는 비접촉식 계측장비이므로 항타시 안전사고 발생 가능성을 미연에 방지할 수 있으며, 측정 장비를 기계화 및 표준화하여 객관적인 계측값을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

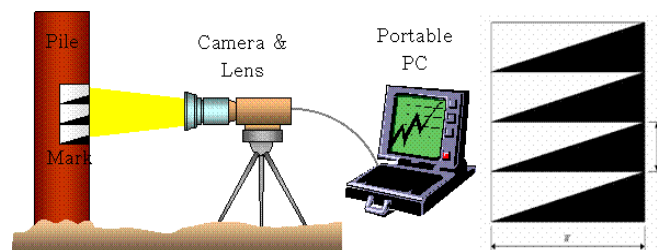


그림 1. DPRMs의 개념도

* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 · 공학석사 · E-mail: b612@snu.ac.kr

** 정회원 · 삼성물산 건설부문 기술연구소 선임연구원 · 공학박사 · E-mail: jw.seok@samsung.com

*** 정회원 · 삼성물산 건설부문 기술연구소 수석연구원 · 공학박사 · E-mail: djhwang@samsung.com

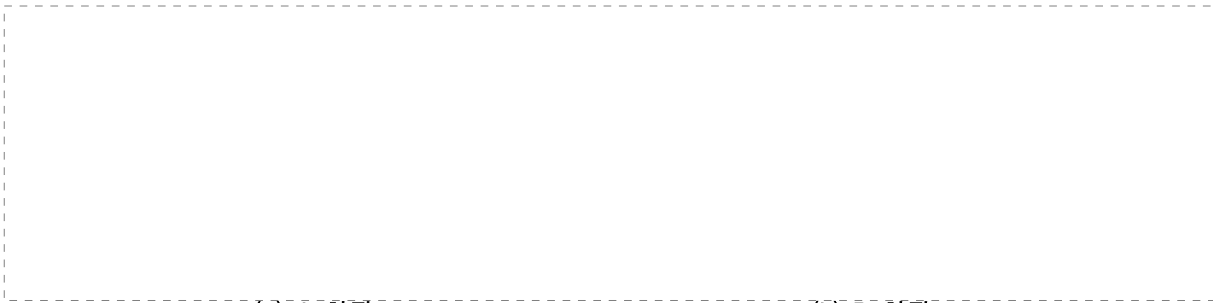
**** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · 공학박사 · E-mail: geotech@snu.ac.kr

3. 현장시험

본 연구를 위하여 영종도현장(이후 A 현장으로 통칭)에서 실규모 말뚝시험을 실시하였으며 LNG 탱크 건설이 진행 중인 xx현장(이후 B 현장으로 통칭)에서는 서로 10~15m정도 떨어진 시험타말뚝들에 대해 재하시험과 디지털항타기를 이용한 계측을 실시하였다. 각 현장의 시험말뚝과 항타시스템에 대한 정보를 표 1에 정리하여 나타내었다. A 현장과 B 현장의 지반정보는 그림 2에 나타내었다.

표 1. 각 현장의 시험말뚝과 항타시스템에 대한 정보

| | 말뚝번호 | 말뚝재질 | 직경 (mm) | 두께 (mm) | 관입깊이 (m) | 자유단 길이 (m) | 항타시스템 (항타기 종류/항타고) | 비고 |
|-------|----------|-------|---------|---------|----------|------------|--------------------|------------------|
| A 현장 | PHC-#1 | PHC | 400 | 65 | 14.8 | 4.2 | 유압 7t-1m | |
| | PHC-#2 | PHC | 400 | 65 | 16.4 | 3.6 | 유압 7t-1m | |
| | PHC-#3 | PHC | 400 | 65 | 15.2 | 4.8 | 유압 7t-1m | |
| | PHC-#4 | PHC | 400 | 65 | 16.1 | 4.9 | 유압 7t-1m | |
| | PHC-#5 | PHC | 400 | 65 | 15.2 | 5.8 | 유압 7t-1m | |
| | PHC-#6 | PHC | 400 | 65 | 14.8 | 7.2 | 유압 7t-1m | |
| | PHC-#7 | PHC | 400 | 65 | 14.3 | 7.7 | 유압 7t-1m | |
| | ST-#1 | 강관 | 406.4 | 9 | 14.3 | 7.4 | 유압 7t-1m | PDA 계측자료 이상으로 제외 |
| | ST-#2 | 강관 | 406.4 | 9 | 15.3 | 5.4 | 유압 7t-1m | |
| | ST-#3 | 강관 | 406.4 | 9 | 15.5 | 5.2 | 유압 7t-1m | |
| ST-#4 | 강관 | 406.4 | 9 | 14.9 | 6.8 | 유압 7t-1m | PDA 계측자료 이상으로 제외 | |
| ST-#5 | 강관 | 406.4 | 9 | 15.3 | 6.4 | 유압 7t-1m | | |
| B 현장 | TK12-57 | 강관 | 800 | 16 | 27.7 | 2.3 | 유압 13t-1m | |
| | TK12-85 | 강관 | 800 | 16 | 21.1 | 2.9 | 유압 13t-1m | |
| | TK12-113 | 강관 | 800 | 16 | 29.2 | 6.5 | 유압 13t-1m | |
| | TK12-680 | 강관 | 800 | 16 | 25.5 | 4.5 | 유압 13t-1m | |



(a) A 현장 (b) B 현장
그림 2 지질주상도 (A, B 현장)

4. 디지털 항타관리기를 이용한 항타응력의 추정

말뚝두부에 해머 타격이 가해지면 말뚝두부에 발생하는 축력과 입자속도는 주면이나 선단에서 발생한 반사파가 전달될 때까지 서로 비례하며 이 때의 축력과 입자속도는 식 (1)과 같이 표현된다. 일반적으로 최대 압축응력은 항타 후 초기에 발생하므로 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다

$$F = \frac{EA}{c} V \tag{1}$$

여기서 F 는 항타에 의해 발생한 계측위치에서의 말뚝 내 축력, E 는 말뚝의 탄성계수, c 는 말뚝 내 파의 전파속도($c = \sqrt{E/\rho}$), ρ 는 말뚝의 밀도, A 는 말뚝의 단면적, 계측위치에서의 말뚝 내 입자속도

디지털 항타관리기는 항타 시 말뚝의 변위-시간 이력을 계측할 수 있으므로 이를 시간에 대해 미분하면 말뚝두부의 최대입자속도를 얻을 수 있고, 이를 식 (1)에 대입하면 항타 시 말뚝의 최대압축응력을 추정할 수 있다. 이 방법을 A현장 시험말뚝의 각 항타에 적용하여 구한 최대압축응력과 PDA로 구한 최대 압축응력의 비를 모두 정리하여 표 2에 나타내었다. DPRMs 로 구한 최대압축응력이 PDA로부터 얻은 최대압축응력의 평균 105±13%의 값을 갖는 것으로 나타난 결과는 DPRMs 측정만으로도 말뚝 부재의 허용압축응력을 초과여부를 판단하는 항타 관리가 가능함을 뒷받침하고 있다.

표 2. DPRMs와 PDA를 이용하여 구한 최대압축응력비

| Pile No. | PHC -#1 | PHC -#3 | PHC -#5 | PHC -#6 | PHC -#7 | 평균 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 최대압축응력비(DPRMs/PDA) | 99±7 % | 93±8 % | 95±4 % | 117±9 % | 105±12 % | 105±13 % |

5. 시항타결과와디지털 항타관리기계측자료를이용한말뚝의지지력평가

PDA를 이용한 동재하시험에서는 말뚝 두부에 설치한 가속도계와 변형률계에서 계측된 말뚝두부의 입자 가속도 및 변형률로부터 입자속도와 축력을 구하고 이를 이용하여 대상말뚝의 지지력이나 건전도 등의 시공 관리를 위한 파라미터들을 계산해낸다. 그러므로 어떠한 방법이든 말뚝두부의 입자속도와 축력-시간 이력을 알아낼 수 있다면 PDA와 같은 기능을 할 수 있는데 DPRMs 계측자료를 이용하여 입자속도를 구하는 방법은 이미 앞에서 설명하였다.

5.1 하향축력파-시간이력곡선을이용한축력-시간이력곡선의추정

하향축력파(Wave Down)는 인장에 저항하는 최소 하향압축력을 구하는데 유용하게 사용되는 PDA용 파라미터로서 식 (2)와 같이 축력-시간이력곡선과 입자속도-시간이력곡선의 평균으로 나타낸다. 항타 시 지반 지지력에 의해 발생하는 축력-시간이력곡선과 입자속도-이력곡선에서의 변화량은 크기는 같지만 부호가 서로 다른 값을 갖게 되므로 두 곡선의 평균값, 즉 하향축력파는 지반지지력에 상관없이 일정하게 나타난다.

$$F(down) = (P + Zv) / 2 \tag{2}$$

여기서 $F(down)$ 은 하향축력파, P 는 말뚝 내 계측위치에서의 축력, Z 는 말뚝의 임피던스, v 는 말뚝 내 계측위치에서의 입자속도

위의 식 (2)를 말뚝에서 계측되는 축응력 향에 대하여 다시 정리하면 아래 식 (3)과 같이 된다. 우변 첫째 항의 하향축력파는 시항타 말뚝의 동재하시험결과로부터 구하고 입자속도는 DPRMs 계측자료로부터 구하면 말뚝 내 축력(P_{Est})을 추정할 수 있다.

$$P_{Est} = 2 \times F(down)_{Pilot} - Z \times v_{DPRMs} \tag{3}$$

여기서 P_{Est} 는 말뚝 내 계측위치에서의 추정축력, $F(down)_{Pilot}$ 은 시항타말뚝에서 얻은 하향축력파, Z 는 말뚝의 임피던스, v_{DPRMs} 는 DPRMs로 계측한 입자속도

5.2 디지털 항타관리기를이용한항타말뚝의지지력평가

현장에서 동재하시험결과로부터 간편하게 말뚝의 지지력을 구하기 위해 개발된 CASE 방법은 가속도-시간이력과 변형률-시간이력으로부터 입자속도-시간이력과 축력-시간이력을 산출하여 지지력을 산정한다.

본 논문에서는 앞 절에서 설명한대로 추정한 축력-시간 이력과 DPRMs로 구한 입자속도-시간 이력을 CASE방법의 입력값으로 사용하여 지지력을 구하는 방법을 새로 제안하고자 한다. 새로 제안한 지지력 평가 방법의 적용성을 살펴보기 위하여 현장 A, B에서 동재하시험을 실시한 말뚝 중 하나씩 시항타말뚝으로 가정하고 나머지 주변말뚝을 분항타말뚝으로 가정하여 시항타말뚝에서 얻은 하향축력파-시간이력을 이용하여 각 분항타말뚝의 축력-시간 이력을 추정하였다. 추정한 축력-시간 이력과 DPRMs 계측속도-시간 이력을 이용하여 구한 CASE 지지력을 동일 말뚝에서 CAPWAP 분석결과와 비교한 결과를 그림 3과 표 3에 정리하여 나타내었다. 그 결과 말뚝두부에서의 하향축력파를 이용한 추정지지력이 CAPWAP분석결과의 120±20%로 나

타났다(표3). 그림 에서 보면 말뚝에서 새로 제안한 방법으로 추정된 CASE 지지력은 대부분 CAPWAP 분석 결과의 80%~140%에 위치해 있으나 A현장의 PHC #5~#7 말뚝에서 174%까지 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 강성이 작은 PHC 말뚝의 경우 자유단(지표면으로부터 말뚝두부까지의 길이)의 길이가 지지력 평가에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.

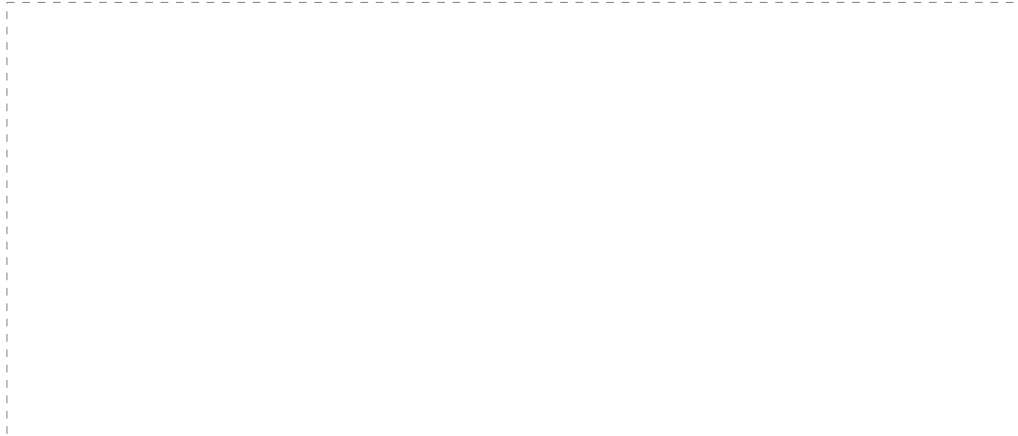


그림 6 새로운 방법으로 구한 CASE 지지력과 CAPWAP 분석결과의 비교

표 3. DPRMs 계측자료를 이용하여 구한 입력값을 사용한 CASE 지지력과 CAPWAP 분석결과의 지지력비

| | 디지털 향타관리기 계측자료를 이용하여 구한 CASE 극한지지력 / CAPWAP 분석으로 구한 극한지지력 | | |
|---------------|---|------|--------|
| | 평균±표준편차 | 최대값 | 제안 안전율 |
| PHC 말뚝 (A 현장) | 125±19 % | 174% | 4.0 |
| 강관말뚝 (A 현장) | 115±6% | 122% | 2.8 |
| 강관말뚝 (B 현장) | 110±20% | 145% | 3.3 |

6. 결론

디지털 향타관리기는 수작업을 대신하여 향타말뚝의 최종관입량을 정확하게 측정하기 위하여 개발된 장비이다. 본 논문에서는 디지털 향타관리기의 향타말뚝 시공관리수단으로서의 적용범위를 확장하기 위하여 시공 중 향타응력과 향타말뚝 지지력을 평가하기 위한 새로운 방법을 제안하고 현장시험 및 현장계측자료를 사용하여 검증작업을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- ① 디지털 향타관리기로 계측한 말뚝두부의 변위-시간이력을 이용하여 향타 시 말뚝내 최대압축응력을 계산한 결과, 디지털 향타관리기를 이용하여 구한 최대압축응력과 PDA로 구한 최대압축응력의 응력비가 105±13%로 나타났다. 이 결과는 디지털 향타관리기가 향타응력 관리수단으로 유용함을 뒷받침한다.
- ② 시험향타말뚝에 대한 동재하시험결과와 같은 현장의 여타 향타말뚝에 대한 디지털 향타관리기 계측자료를 이용하여 각 향타말뚝의 지지력을 평가할 수 있는 새로운 방법을 개발하였다. 새로운 방법으로 예측한 지지력은 평균적으로 CAPWAP 결과의 120±20%의 값을 갖는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Lee, S. N., You, B. J., Lim, M. S., Oh, S. R., Han, S. S., and Lee, S. H., Visual Measurement of Pile Penetration and Rebound Movement Using a High-Speed Line-Scan Camera, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2002, Washington DC, pp. 4307-4312
2. Hannigan, P. J., Dynamic Monitoring and Analysis of Pile Foundation Installation, *A Continuing Education Short Course Text*, DFI, 1990, pp. 14-18, 33-36