

DPRMs를 이용한 말뚝의 시공 관리

Quality Control of Pile Installation Using DPRMs

윤희석* · 석정우** · 황대진*** · 김명모****

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

1. 서론

말뚝의 시공관리를 위하여 현장에서 사용가능한 지지력 평가 방법으로는 일반적으로 동재하시험, 정재하시험, 정동재하시험, Osterberg cell 시험, 동력학적 지지력 공식 등을 들 수 있다. 이 중에서 가장 널리 사용되는 방법은 정재하시험과 동재하시험이다. 정재하시험은 가장 높은 신뢰도를 인정받고 있지만 시간과 비용이 매우 많이 들고 시공 중에 말뚝의 지지력을 평가할 수 없다는 단점이 있다. 동재하시험은 정재하시험에 비하여 신뢰도가 떨어진다는 단점이 있으나, 정재하 시험보다 저렴하고 비교적 신뢰할 만하며 시공 중에 지지력을 평가할 수 있고 말뚝의 건전도나 항타시 말뚝응력 등 시공상태에 대한 정보를 줄 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그러나 동재하시험이 정재하시험에 비해 비교적 시간과 비용이 적게 든다고는 하나 모든 시공 말뚝에 적용하는 것은 여전히 부담이 되는 것이 사실이다. 이에 대한 보완책으로 사용되는 것이 항타시 말뚝의 관입량을 이용한 시공관리방법으로서, 항타시 정확한 관입량을 예측할 수 있다는 것을 전제로 사용되는 방법이다. 그러나 국내 시공현장에서 항타 관입량의 측정은 거의 대부분 사람이 직접 펜을 들고 말뚝 측면에 붙인 모눈종이에 기록하는 방식으로 이루어지고 있다. 이 방법은 측정결과의 정확성, 객관성 및 작업자의 안전성 측면에서 많은 문제점을 가지고 있지만, 대안의 부재로 인하여 불가피하게 사용될 수밖에 없었다.

이 논문에서는 수계측 방법의 여러 가지 문제점을 해결하기 위한 대안으로 개발된 DPRMs에 대하여 간단히 설명하고, 말뚝 항타 현장에서 Level 및 수작업에 의한 계측결과를 DPRMs 계측결과와 비교함으로써 DPRMs의 신뢰성을 검증하였다. 또한, 현장계측을 통해 얻은 말뚝의 관입량 및 리바운드량과 동력학적 지지력공식을 이용하여 말뚝의 지지력을 산정하고, 이를 동재하시험 결과의 CAPWAP 분석을 통해 구한 지지력과 비교하여 보았다. 마지막으로 지금까지 연구된 바 없었던 여항타와 말뚝의 2차원 거동에 대해 살펴보았다.

2. 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. DPRMs는 비접촉식 계측장비이므로 항타시 안전사고 발생 가능성을 미연에 방지할 수 있으며, 측정 장비를 기계화 및 표준화하여 객관적인 계측값을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이와 더불어 기존의 방법을 통해서 얻을 수 없었던 시간이력에 따른 말뚝의 수평, 회전 변위 등도 측정할 수 있는 장점이 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.

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

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

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

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

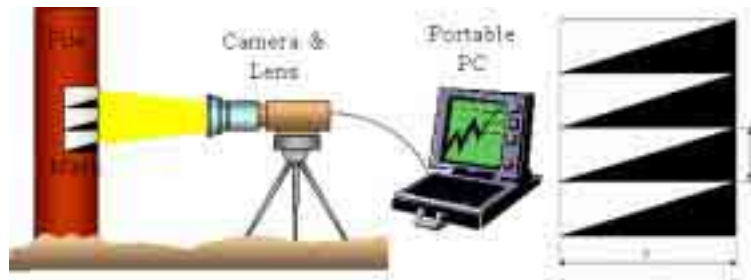


그림 1. DPRMs의 개념도

3. 현장계측

이 연구는 표 1과 같은 현장조건을 가진 세 개의 현장을 대상으로 이루어졌으며, 각 현장의 모든 말뚝은 풍화암에 근입되는 것으로 설계되었다.

DPRMs를 이용한 계측은 시험타 말뚝에 대하여 동태하시험과 함께 실시하였으며, Level과 수작업에 의한 침하량 계측을 동시에 실시하였다. DPRMs를 통한 말뚝의 변위 계측에는 폭 200mm, 높이 40mm의 삼각형이 연속적으로 배열된 표적을 사용하였으며 카메라는 말뚝으로부터 약 4m 거리에 설치하여 향타 종료시점까지 계측을 실시하였다. Level 계측은 향타 시작시점과 완료시점에서 각각 이루어졌다.

표 1. 현장조건

현장	말뚝				시공방법	향타기 종류
	부재종류	바깥지름	두께	길이		
A현장	PHC	500 mm	80 mm	6~9 m	DRA	드롭 향타기
B현장	강관	800 mm	16 mm	15~30 m	직타	유압 향타기
C현장	PHC	500 mm	80 mm	8~13 m	DRA	드롭 향타기

4. 계측자료분석

4.1 DPRMs의 신뢰도평가

DPRMs와 수작업에 의한 말뚝 관입량 계측결과의 신뢰도를 평가하기 위한 객관적인 기준으로 레벨 계측 자료를 사용하였다. 레벨로는 말뚝 향타시 동적인 움직임은 계측할 수 없으나, 향타 시작시점과 향타 완료시점에서의 말뚝의 위치변화를 측정하는 것이 가능하므로 향타 종료시의 말뚝 관입량을 비교적 정확하게 얻을 수 있다. DPRMs 및 수작업에 의한 계측값에서 레벨 계측치를 뺀 값을 신뢰도 평가기준으로 삼았다.

각각의 계측이 정확히 이루어졌을 때 발생할 수 있는 오차는 다음과 같다. 레벨 계측자료의 경우에는 최소눈금이 1mm인 자를 사용하였으므로 눈금을 읽을 때의 발생가능 오차는 ± 0.5 mm이고, 수계측자료의 경우에는 1mm의 눈금을 갖는 기록지로부터 관입량 및 리바운드량을 읽어낼 때 발생할 수 있는 오차는 ± 0.5 mm이다. DPRMs에서 카메라와 표적의 상대거리에 따른 측정 정밀도에 좌우되는 오차는 ± 0.01 mm 이하이며, 리바운드량 또는 말뚝의 변위가 일정한 값으로 수렴하기 전에 다음 타격이 이루어졌을 때 구간평균을 사용하는 경우에 발생가능한 오차는 ± 0.3 mm이다. 그러므로 수계측치에서 레벨 계측치를 빼는 경우의 오차범위는 ± 0.1 mm 이고, DPRMs 계측치에서 레벨 계측치를 빼는 경우의 허용오차범위는 ± 0.8 mm라 할 수 있다.

그림 2는 각 현장에서 얻은 수계측자료와 DPRMs 계측자료에서 신뢰도 판단기준으로 삼은 레벨 계측치를 빼 값을 도시한 것이다. 그림 2에 의하면, 수계측자료의 경우에는 허용오차인 ± 1 mm 이하의 차이를 나타내는 것이 단 8개에 불과할 정도로 레벨 계측값과 많은 차이를 나타내고 있다. 측정결과의 정량적인 분석으로 위하여 실시한 분산분석 결과에 따르면 평균과 표준편차는 각각 -3.57과 3.34로 계산되었다. 이는 평균이 수계측치와 레벨 계측치가 일치할 경우의 기대값인 0에서 표준편차 이상의 차이가 난 것으로, 레벨 계측자료와 수계측자료가 잘 맞지 않음을 보여준다. DPRMs 자료의 경우에는 이와 반대로 허용오차인 ± 0.8 mm 이상

의 차이를 나타내는 것이 6개에 불과할 정도로 대부분의 자료가 레벨자료와 잘 일치하고 있으며, 분산분석 결과는 평균이 -0.18, 표준편차가 1.50으로 나타났다. 이러한 결과는 DPRMs 계측자료가 레벨 자료와 잘 맞음을 뒷받침해주고 있다. 그림 2를 보면 DPRMs 자료가 x축 중심으로 고르게 분포되어 있는 것에 비해 수작업에 의한 계측은 레벨 계측자료에 비해 관입량을 주로 과소평가하였다. 관입량을 과소평가하는 경우에는 지지력을 과대평가할 우려가 있으므로, 지지력 예측과정에서 이에 대한 고려가 반드시 필요하다.

말뚝 향타로 발생하는 지반 진동이 DPRMs 계측결과에 미치는 영향을 평가하기 위한 가속도계 측정결과에 의하면, 1차 타격에 의한 최대 관입량 및 최대 리바운드량은 지반 진동 및 이로 인한 카메라 진동에 거의 영향을 받지 않았으며, 최종 말뚝 관입량 계산과정에서 평균값을 사용할 경우에는 지반 진동에 의한 영향을 배제할 수 있음을 확인하였다.

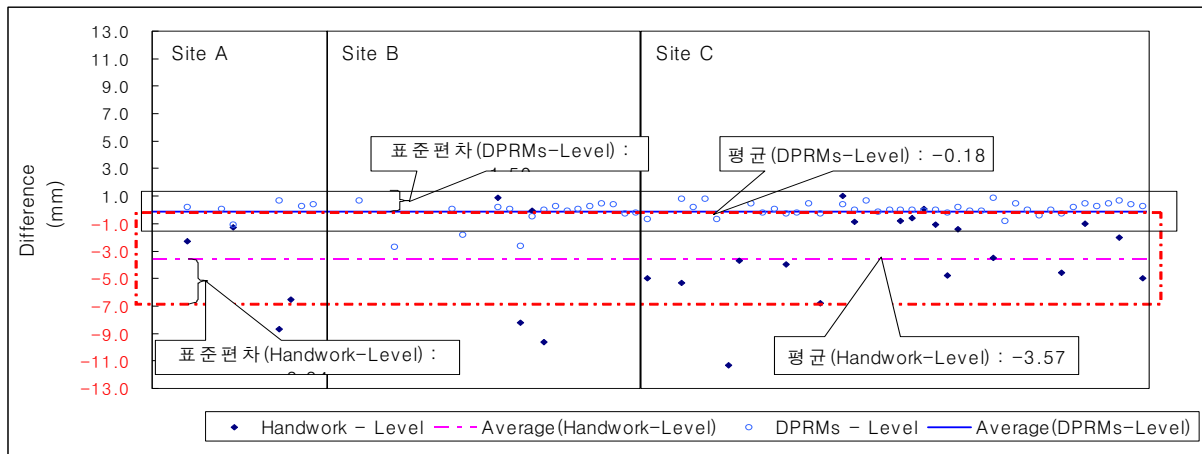


그림 2. 'Level계측 관입량-수계측 관입량'과 'Level계측 관입량-DPRMs계측 관입량'의 비교

4.2 동력학적 지지력 공식 결과와 동재하시험 결과와의 비교

DPRMs를 이용한 말뚝 향타시의 시공관리기법의 현장 적용성을 평가하기 위하여, DPRMs로 측정된 말뚝의 관입량 및 리바운드량을 기존의 동력학적 지지력 공식 중 현장에서 가장 많이 쓰이는 Hiley 공식과 일본 건설성에서 제안한 5S공식에 대입하여 지지력을 계산하고, 그 값을 동재하시험 결과에 대한 CAPWAP 분석으로 구한 지지력과 비교하여 보았다.

4.2.1 동력학적 지지력 공식

A. Hiley 공식

$$R_a = \left(\frac{e_h \cdot W_r \cdot h}{s + \frac{c + c_c}{2}} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \right) / FS$$

여기서, R_a : 말뚝 향타시, 흙의 허용저항력, $c = c_p + c_q$: 향타시 리바운드량으로 표시
 s : 최종관입량, c_c , c_p , c_q : 쿠션재료, 말뚝, 흙의 최대탄성압축 변형량

B. 일본 건설성 고시식(5S 식)

$$R_a = \frac{2W_h \cdot H}{5s + 0.1}$$

여기서, R_a : 말뚝의 허용지지력(ton), W_h : 해머중량(ton), H : 향타고(m), s : 최종관입량(m)

4.2.2 비교 결과

동력학적 지지력 공식으로 구한 말뚝의 허용지지력과 동재하시험 결과를 CAPWAP으로 분석해 얻은 허용지지력을 비교하기 위하여, Hiley 공식에서는 3.0을, CAPWAP 분석에서는 2.25를 각각의 안전율로 사용하였다. 5S 공식의 경우에는 공식 자체에 안전율이 포함되어 있으므로 별도의 안전율을 적용하지 않았다.

DPRMs 계측자료를 이용하여 Hiley 공식과 5S 공식으로 구한 지지력을 CAPWAP 분석에서 산정된 지지력으로 각각 나눈 결과를 각 현장별로 그림 3에 도시하였다. 5S 공식을 적용한 경우의 평균값은 69.9%, 표준편차는 14.0%였으며, Hiley공식을 적용한 경우에는 평균과 표준편차가 각각 59.2%와 18.0%로 나타나 5S공식으로 구한 지지력이 Hiley공식으로 구한 지지력에 비하여 CAPWAP 분석 결과와 더 유사한 경향을 보였다.

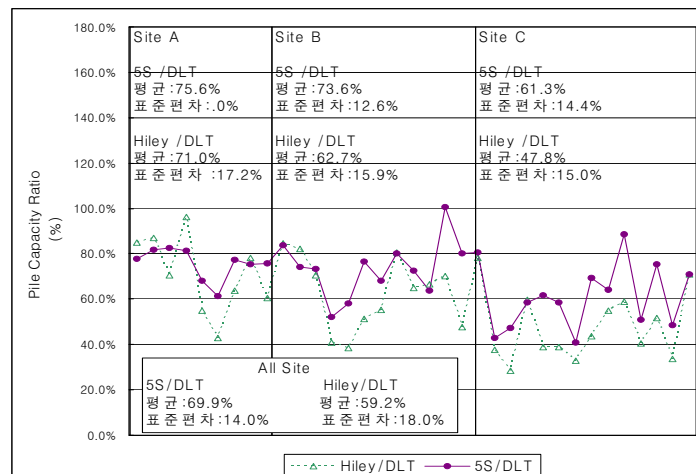


그림 3. DPRMs계측자료를 이용하여 동력학적지지력공식으로 구한 허용 지지력과 CAPWAP분석을 통해 얻은 허용지지력과의 비교

4.3여항타에 대한고려

일반적으로 1회 타격으로 간주하는 항타도 실제로는 타격 후 해머를 다시 들어올리는 시기에 따라 1차 타격 후에 해머와 말뚝간의 반발력과 자유낙하에 의해 1회 이상의 타격이 발생할 수도 있다. 여항타란 1회 타격 중에 발생하는 1차 타격을 제외한 모든 타격을 의미한다. 일반적으로 유압해머의 경우 시공속도를 높이기 위해 1차 타격 후 곧바로 해머를 들어올리게 되므로 여항타가 발생하지 않으나 드롭해머의 경우에는 타격과 타격 사이에 충분한 시간을 가지게 되므로 여항타가 발생하게 된다. 그림 4는 드롭해머로 항타하여 여항타가 발생했을 때 나타날 수 있는 말뚝의 연직변위-시간이력을 대표적인 형태로 나누어 정리한 것이다.

그림 4(a)는 최초타격에 의한 관입량이 0보다 크고 두 번째 관입량보다 큰 경우를 나타낸 가장 일반적인 형태의 그래프이다. 1회 항타 중에 여러 번의 타격이 이루어지면 각 타격에 의해 관입량이 발생하게 되는데 여항타가 계속될수록 해머에 전달되는 에너지가 감소할 것이므로 그림 4(a)와 같이 최초 타격에 의한 관입량이 제일 크고 이후로 관입량이 줄어든다고 추정할 수 있다. 이 경우 동력학적 지지력 공식으로 지지력을 산정할 때 기존의 수계측자료를 사용한다면 여항타로 인한 관입량 및 리바운드량을 구분할 수 없으므로 전체 관입량 및 리바운드량을 사용해야 할 것이나 DPRMs 계측자료를 사용할 경우에는 최초 타격에 의해 말뚝에 전달된 순수에너지와 이로 인해 발생한 1차 관입량 및 1차 리바운드량을 사용하는 것이 합리적일 것이다.

그림 4(b)는 최초타격에 의한 관입량이 0보다 크고 두 번째 관입량보다 작은 경우를 나타낸 것이다. 최초 타격에너지가 두 번째 타격에너지보다 큰 것이 분명함에도 관입량이 역전되었다는 것은 관입량이 순 항타에너지와 지지력에 의해 결정된다는 기본 가정에 어긋난다고 할 수 있다. 주변지지력이 거의 없고 단단한 선단부를 가지는 지반에서 항타를 하는 경우 항타에너지의 일부만이 관입에너지로 사용되고 대부분이 말뚝에 탄성에너지로 축적되게 되는데 1차타격 이후 해머가 반발에 의해 말뚝과 분리되면, 말뚝두부에 가해지던 힘이 사라지므로 선단부의 반발력에 의해 말뚝이 튀어 오르게 된다. 이 때 튀어 오른 말뚝은 일부 무너진 주변지

반이나 교란되어 부풀어 오른 바닥지반에 살짝 얹혀 작은 관입량을 나타내다가 여항타에 의해 바닥지반을 다지게 되어 관입량이 증가하는 경우에 이러한 양상이 나타날 수 있다. 이러한 경우는 1차 타격에너지가 1차 관입량으로 완전히 변환되지 못한 것으로 볼 수 있으며 동력학적 지지력공식으로 지지력을 산정할 때 1차 타격에너지와 1차 관입량 및 리바운드량을 사용하는 경우 실제 지지력을 과대 평가할 가능성이 있고 2차 타격에너지와 2차 관입량 및 리바운드량을 사용할 경우 1차 타격에너지가 2차 관입량에 미친 영향을 무시하게 되므로 오히려 지지력을 과소평가할 수 있다. 그러므로 이러한 경우 1, 2차 타격에너지를 합친 값과 1, 2차 관입량을 합친 값을 이용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

그림 4(c)는 최초타격에 의한 관입량이 0보다 작고 두 번째 관입량이 0보다 큰 경우를 나타낸 것이다. 해머가 전달하는 힘의 반대 방향으로 관입량이 발생한다는 것은 물리적으로 있을 수 없는 일이지만 주변지력이 거의 없고 단단한 선단부를 가지는 지반에서 항타를 하는 경우 PDA에 종종 음의 관입량이 나타나는 경우가 있다. 지금까지는 이러한 음의 관입량이 나타나는 이유에 대해 설명할 수가 없었으나 DPRMs을 이용한 계측을 통하여 그 이유를 확인할 수 있게 되었다. 그림 4(c)를 보면 최초타격 후 약 0.75초 동안 음의 관입량을 나타내다가 여항타에 의해 양의 최종 관입량을 보이는 것을 알 수 있다. PDA의 경우 일반적으로 동재하 시험시 최초타격 발생 후 0.2초 정도의 짧은 시간동안의 자료만을 이용하여 분석을 실시하므로 전 관입량이 양의 값을 갖더라도 최초타격 후 0.2초 사이에 1차 관입량이 음의 값을 갖는 경우 PDA에 계측되는 최종 관입량은 음의 값으로 나타나게 되는 것이다. 이렇게 음의 관입량이 나오는 것은 즉, 주변지력이 거의 없고 단단한 선단부를 가지는 지반에서 항타에너지의 일부가 대부분이 탄성에너지로 축적되어 있다가 말뚝이 튀어오른 후 일부 무너진 주변지반이나 교란되어 부풀어 오른 바닥지반에 살짝 얹혀 음의 관입량을 나타내다가 여항타에 의해 양의 관입량을 갖게 되는 것으로 판단된다. 이러한 조건하에서 동력학적 지지력공식을 사용하는 경우 말뚝지면의 공벽이 무너져 생성된 느슨한 지반이 다져지도록 말뚝에 정하중을 가하거나 낮은 항타고로 타격을 가하면 1차 타격에너지에 의해 발생한 실제 1차관입량에 가까운 값을 얻을 수 있을 것이므로 이 관입량을 구하여 5S공식과 같은 리바운드량이 배제된 공식에 적용한다면 비교적 합리적인 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이 경우에 대한 지지력 산정방법은 추후 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

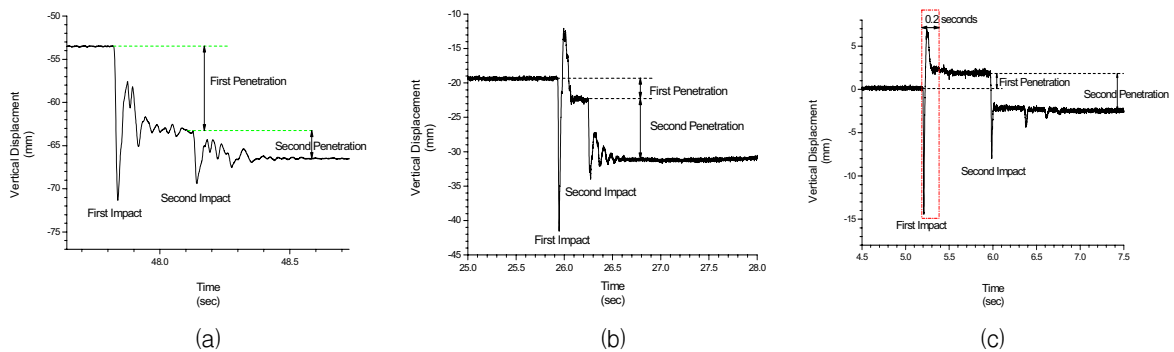


그림 4 항타시 말뚝의 연직변위-시간이력 (a) '1차관입량>2차관입량>0'인 경우 (b) '0<1차관입량<2차관입량'인 경우 (c) '1차관입량<0<2차관입량'인 경우

4.4 말뚝의 2차원 거동

말뚝에 관한 연구는 말뚝이 길이에 비해 폭이 좁은 구조체이고 일반적으로 축방향 거동이 지배적이기 때문에 일부 수치해석을 제외하고는 간편하게 1차원 문제로 단순화시켜 연구하는 것이 일반적이다. 설사 말뚝의 2차원 또는 3차원 거동에 대해 연구하고자 할지라도 기술 및 장비의 한계로 인하여 말뚝의 2차원 또는 3차원적인 실측자료들을 쉽게 얻을 수가 없었으므로 이에 대한 연구는 수치해석으로만 이루어져왔다.

그림 5는 DPRMs로 계측한 횡방향 자료와 연직방향 자료를 이용하여 나타낸 1회 타격시 말뚝두부의 2차원 거동을 그림으로 나타낸 것이다. 화살표는 두부의 움직임을 벡터로 나타낸 것으로 화살표의 크기는 운동 속도를 방향은 운동방향을 나타내고 있다. 이와 같이 DPRMs는 2차원 거동자료를 제공하므로 이를 이용한다

먼 기존에 할 수 없었던 말뚝두부의 횡방향 움직임이 말뚝의 관입에 미치는 영향 또는 항타효율에 미치는 영향에 대한 연구가 가능해지므로 기존의 동력학적 공식을 개선하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

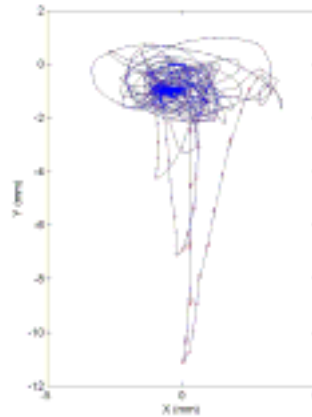


그림 5. 말뚝두부의 2차원 거동

5. 결론

항타시 말뚝의 관입량과 리바운드량을 측정하기 위해 개발된 DPRMs는 기계화 및 자동화된 측정시스템으로써, 작업자의 의도가 배제된 신뢰할 수 있는 객관적인 자료를 얻을 수 있으며 말뚝과 떨어져서 측정하므로 기존의 수계측에서 감수해야 했던 안전사고 위험성을 배제할 수 있다는 장점이 있는 장비이다. 3개 현장에서 레벨과 DPRMs, 그리고 수작업에 의한 계측을 실시하였으며, 각각의 계측자료를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 레벨계측자료 및 수계측자료와의 비교를 통하여 DPRMs 측정 정확도의 신뢰성을 검증하였다. 2) Hiley 공식에 3.0의 안전율을 적용하고 CAPWAP 분석 결과에 2.25의 안전율을 적용한 경우에 5S공식으로 구한 말뚝의 지지력이 Hiley공식으로 구한 지지력보다 CAPWAP 분석 결과에 더 가깝게 나타났다. 3) 동력학적 지지력공식을 사용하여 말뚝의 지지력을 계산할 경우 여항타를 고려하는 것이 합리적이다. 4) PDA로 측정한 관입량이 음의 값을 갖는 것은 계측시간이 짧기 때문이며 DPRMs를 이용할 경우 이러한 문제를 해결할 수 있다. 5) 말뚝 두부의 횡방향 움직임이 말뚝의 관입 또는 항타효율에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어진다면 기존의 동력학적 공식을 개선하는데 도움이 될 것이다.

참고문헌

1. Rausche, F., Moses, F., and Goble G. G., Soil Resistance Predictions from Pile Dynamics, *Journal of SMFE*, ASCE. Vol. 98, SM9, 1972, pp. 917-937
2. Se-Na Lee, Bum-Jae You, Mee-Seub Lim, Sang-Rok Oh, Song-Soo Han, and Sang Hun-Lee, 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
3. H. G. Poulos and E. H. Davis, *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley & Sons Inc., 1980, New York, pp. 54-57.
4. JSSMFE, From Site Investigation and Design to Construction of Pile Foundation, *Soils and Foundation Series for Engineers* Vol. 1, 1983, p. 330.
5. Garland Likins, Safety Factors for Pile Testing, *Piledriver*, Vol.4, No. 2, 2003, pp. 34-43