

동재하시험을 이용한 말뚝 손상 평가 사례

A Case Study on Pile Damage Assessment by Dynamic Monitoring

김성희¹⁾, Sung-hoi Kim, 전영석²⁾, Young-suk Jun

¹⁾ (주)파일테크, 차장, Piletech Consulting Engineers

²⁾ (주)파일테크, 과장, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : Pile foundations must have adequate soil support and the pile material must structurally be sound. Driven piles including predrilled ones are the most common installation methods of piles. When hammer impacts the pile, impact stresses are induced and the pile would probably be faced the most severe conditions in its life. Thus piles are easily damaged during driving. Unfortunately even the most experienced engineers cannot always identify the pile damage from the pile driving records. Dynamic monitoring using the PDA would provide the useful informations for pile damage assessment. This paper presents the cases obtained from several dynamic pile tests where pile damages have been verified. Case studies of damaged piles include concrete and steel pipe piles.

Key words : pile damage, pile driving analyzer, driving stress, compression stress, tension stress

1. 서 론

말뚝이 구조물기초로써 충분히 그 역할을 수행하기 위해서는 소요 지지력 확보와 함께 말뚝재료의 건전도 유지가 필수적이다. 기성말뚝의 직항타공법은 건설공해 문제 등으로 최근 그 이용이 감소하고 있으나 지지력 확보의 확실성, 시공관리의 용이, 경제성, 말뚝 재료 품질의 확실성 등 때문에 아직까지도 많은 공사현장에서 채택되어 사용되고 있다. 또한 직항타시 발생하는 소음, 지반진동 등 건설 공해를 감소시키거나 견고한 중간층의 존재로 목표로한 지지층까지 항타가 불가능한 경우 선굴착 공법을 적용할 경우에도 지지력 확보를 위해서는 최종 항타과정이 필수적으로 요구된다. 그러나 이러한 기성말뚝을 이용한 각종 공법에서는 말뚝의 운반, 보관시 손상을 입을 수 있으며 특히 항타 시공과정에서 타격에 의해 말뚝에 작용하는 과대한 응력 등으로 인해 손상 가능성이 높은 조건에 놓이게 된다. 한번 손상된 말뚝은 말뚝 제작시 확보되었던 강도를 상실하게 되고 그 복구가 어려워 구조물 기초의 안전에 치명적 영향을 미치는 것은 물론 경제적 낭비를 초래하게 된다.

말뚝재료의 손상원인은 지반조건, 항타장비 등의 외적요인과 이음부위를 포함한 말뚝재료의 결함이 그 원인이 되는데 일반적으로 이러한 원인들이 복합적으로 작용하여 말뚝재료의 손상을 초래하게 된다.

그럼에도 불구하고 현재까지 말뚝손상에 대한 평가는 항타시에는 항타기록(타격당관입량, 리마운드량 등)과 시공자의 경험 등에 의존하거나 시공후에는 육안검사 등에 의해 손상을 평가하는 경우가 대부분 이어서 근본적인 대책을 수립하는데 한계가 있었다.

최근 말뚝재료의 손상을 PDA(Pile Driving Analyzer)를 사용하여 신뢰성 있게 조사할 수 있음이 보고되고 있다(이명환 등, 1998). 그러나 PDA를 사용하더라도 기술자가 말뚝재료 손상을 판정하지 못하는 경우가 많이 발견되고 있다. 이는 축조되는 구조물의 안전을 위협하는 것이며 조속히 시정되어야 할 부분이다.

본 논문에서는 PDA를 이용하여 말뚝재료의 손상을 평가하는 기본 원리를 설명하고 몇 개의 현장조사 사례를 소개하였다. 그리고 PDA분석 오류로 인하여 손상된 말뚝을 시공하였던 사례에서의 PDA 재분석 사례를 설명하였다.

2 . PDA로 말뚝재료손상을 판단하는 원리

말뚝항타분석기(PDA)를 이용한 동재하시험(dynamic monitoring)은 시공된 말뚝의 지지력 뿐만 아니라 항타 시공중 관입깊이에 따른 지지력, 항타응력, 말뚝재료의 건전도, 항타장비의 성능 등을 별도의 계측장비 없이 측정할수 있다. 따라서 합리적인 말뚝기초의 품질관리가 가능하여 현재 국내에서 그 적용이 확산되고 있다.

PDA는 말뚝에 부착된 변형율계(strain transducer)와 가속도계(accelerometer)로부터 측정된 변형율과 가속도를 적분 등 기타 대수학적 계산을 수행하여 그 결과를 디지털 및 아날로그 형태로 나타낸다. PDA에 의해 측정, 계산되어진 힘(force)과 속도(velocity)의 파형기록은 말뚝과 흙의 거동을 결정하는데 사용되며 기본적으로 응력파의 전달(stress wave propagation)과 이에 따른 힘과 속도의 비례관계(proportionality)에 이론적 배경을 두고 있다. 말뚝에 일정한 질량을 가진 물체로 타격을 가하였을 때 말뚝의 단면이 일정하고 어떠한 저항력도 작용하지 않는다면 힘과 속도의 파형은 비례관계를 유지하여야 한다. 이러한 관계는 흙의 저항력 또는 단면 변화 등에 의한 반사파가 측정계의 위치에 도달할 때 까지 지속된다. 그림 1은 동재하시험으로부터 얻어진 응력파의 전달과 지반의 저항과의 관계를 모델화 하여 나타낸 그림이다.

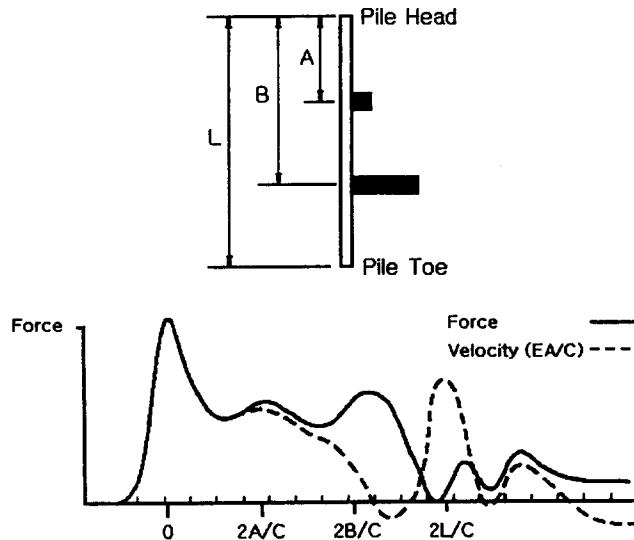


그림 1. 지반저항에 대한 힘과 속도 파형(Hannigan, 1990)

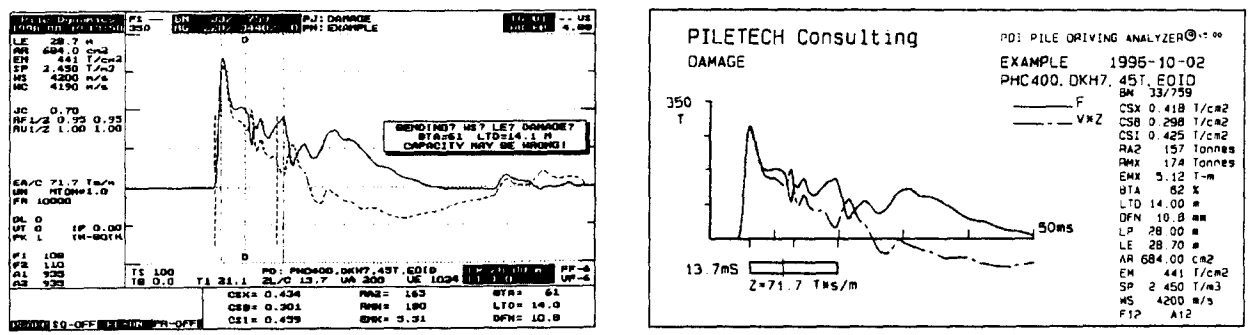
그림 1에서 보는 바와 같이 모델 말뚝은 지점 "A"에 작은 지반저항이 있으며 지점 "B"에는 이보다 큰 지반저항을 갖고 있다. 또한 깊이 "L" 되는 곳의 말뚝 선단부에는 아무런 저항도 작용하지 않고 있다.

이러한 지반저항에 의한 힘과 속도의 파형은 시간 $2A/C$ (C : wave speed)가 경과할 때까지는 비례관계 혹은 같은 형태를 이루게 된다. 시간 $2A/C$ 에서, A점의 지반저항력에 의한 반사파가 발생하여 힘의 파형에 대해서는 증가를 가져오고 속도의 파형에 대해서는 같은 크기의 감소를 일으킨다.

시간 2A/C와 2B/C사이에서는 더 이상의 지반 저항력이 나타나지 않고 있으므로 힘과 속도의 파형은 더 이상 분리가 발생치 않으며 두 파형은 평행 상태를 유지하게 된다. 시간 2B/C에서는 A점에서 보다 큰 지반의 저항력에 의한 반사파가 말뚝두부에 도달하게 되며 이로부터 상당한 크기의 증가와 감소가 힘과 속도의 파형에 대해 발생하게 된다. 시간 2L/C가 경과하면 말뚝선단부에서의 흙의 저항력이 반사되어 말뚝두부에 도달하게 되나, 말뚝선단부에는 저항력이 없는 상태이므로 힘과 속도의 두 응력파들은 자유단 상태를 만나게 되어 인장파(tensile wave)가 반사되게 된다.

이 인장파는 속도파에는 증가를 일으키고 힘의 파에 대해서는 감소를 가져오게 된다.

그림 2는 중간부위가 손상된 말뚝의 힘과 속도의 파형이다. (a)는 모든 입력값과 출력값, 경고상자(warning box)를 포함한 실제 동재하시험시 나타나는 PDA화면이며 (b)는 힘과 속도의 파형을 단순화시켜 출력한 화면이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 어떤 지반의 저항이 나타나기 전까지는 힘과속도의 파형이 일치하고 있으며 약간의 지반저항에 의해 속도 파형은 감소하고 힘의 파형은 증가하는 양상을 보이다가 게이지 위치로부터 약 14 m 정도 되는 지점에서 갑자기 속도의 파형은 증가하고 힘의 파형은 감소하여 두 파형이 교차하고 있으며 경고상자에 말뚝손상을 표시하고 있다.



(a) (b) **그림 2. 손상된 말뚝의 힘과 속도의 파형**

이와 같이 말뚝중간부위에서 힘과 속도의 파형이 교차하게 되는 것은 말뚝의 재질과 형상이 일정한 경우 말뚝의 임피던스(impedance : EA/C)가 감소하였음을 의미한다. PDA는 말뚝이 손상된 경우(실체는 단면적의 감소 등 임피던스의 감소) 반사되는 인장파를 화면에 나타내며 손상정도를 수치화한 건전도 지수(BTA) 및 손상 위치(LTD)를 경고상자를 사용하여 표시한다. 건전도 지수(BTA)는 말뚝재질이 일정한 경우 줄어든 단면적과 원단면적의 비율이며 Rausche and Goble(1979)은 건전도 지수와 말뚝상태와의 관계를 표 1과 같이 제안하였다.

표 1. Pile Damage Guidelines(Rausche and Goble, 1979)

| BTA(%) | severity of damage |
|----------|--------------------|
| 100 | undamaged |
| 80-100 | slightly damaged |
| 60-80 | damaged |
| below 60 | broken |

건전도 지수는 말뚝의 건전도를 평가하는 유용한 자료임에는 틀림없지만 매우 짧은 말뚝, 임피던스가 변화하는 복합말뚝, 해머와 말뚝의 중심축선이 일치하지 않아 과도한 휨응력이 작용하는 경우 BTA값만으로 건전도를 평가하는 경우 오류를 범할 수 있어 많은 경험과 세심한 주의가 필요하며 반드시 CAPWAP해석을 실시하여 BTA값과 종합하여 말뚝의 건전도를 판단하여야 한다.

3. PDA를 이용한 말뚝 손상 판단 사례

3.1 사례 1

일반적으로 국내에서 사용되고 있는 기성 콘크리트 말뚝(PC, PHC 말뚝)의 손상 원인은 항타중 과도한 항타응력으로 인해 발생한다. 견고한 지반에 항타하는 경우 과도한 압축응력(compression stress)으로 인해 말뚝두부 및 선단부에서 손상이 발생하며, 반면 연약한 지반에 말뚝을 항타할 때는 인장응력(tension stress)으로 인해 손상이 발생하기도 한다. 또한 해머와 말뚝의 중심축이 일치하지 않아 발생하는 휨응력(bending stress)으로 인해 말뚝이 손상되기도 한다. 말뚝항타시 발생하는 항타응력에 대한 허용기준은 각 나라마다 조금씩 다르나 국내의 콘크리트말뚝의 경우는 일반적으로 허용압축응력은 $0.5 \sim 0.6 f'_c$ ('97 개정 구조물기준 설계기준, f'_c :28일 압축강도), 허용인장응력은 $0.025\sqrt{f'_c + f_{pe}}$ (FHWA, AASHTO, f_{pe} :유효 프리스트레스)가 사용된다.

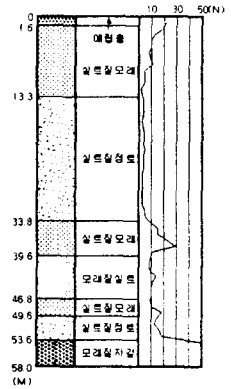
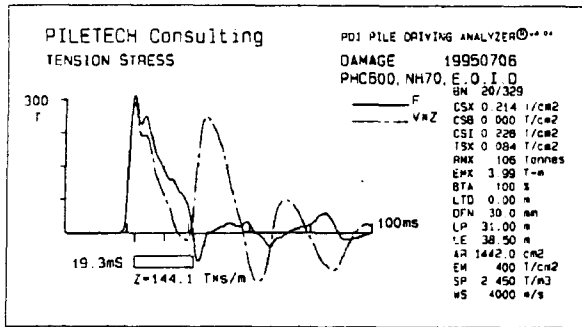


그림 3. 지반개요

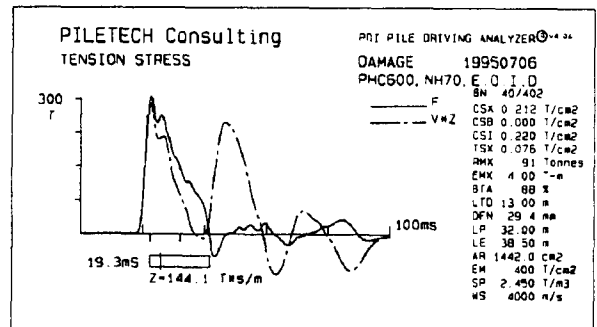
본 사례는 연약한 지반에 말뚝을 항타할 때 과도한 인장응력의 발생으로 인하여 말뚝이 손상된 사례이다. 말뚝은 ϕ 600 mm PHC(A-type: $f_{pe}=0.040$

ton/cm^2)말뚝이며 램중량 7 ton의 유압해머를 사용하여 직항타 방법으로 시공되었다. 지반조건은 그림 3에 나타난 바와 같이 상부 매립층에 이어 연약층이 40 m 이상 지속되고 50 m 정도 되는 깊이에 모래자갈층이 나타나고 있으며 말뚝선단부를 모래자갈층에 일정 깊이 이상 관입시키는 것으로 설계되었다. 일반적으로 이러한 연약지반에 말뚝을 항타 관입시키면 인장응력이 발생한다는 것은 잘 알려진 사실이다.

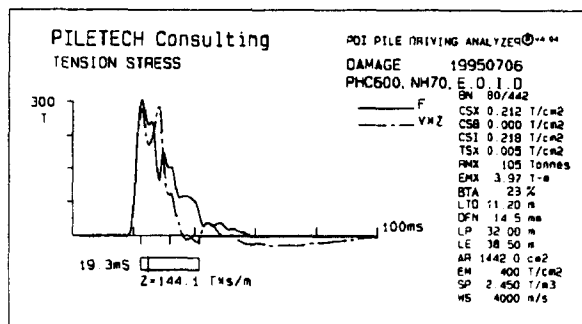
그림 4는 실제 말뚝 항타시 PDA로 측정된 힘과 속도의 파형 기록이다.



(a) 말뚝 손상전



(b) 말뚝 손상 시작



(c) 말뚝 손상

그림 4. 인장응력으로 인한 말뚝의 손상에

그림 4의 (a)는 말뚝손상 직전의 힘과 속도의 파형기록으로 그림의 오른쪽은 PDA에 의해 측정 또는 계산된 각종 출력값과 말뚝재료의 입력값을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝선단부(2 L/C, 19.3 m/s) 이전에서는 작은 지반의 저항으로 인해 힘은 약간 증가하고 속도는 감소하는 양상을 보여주고 있으며 말뚝선단부에서는 힘과 속도의 파형이 교차하고 있어 저항이 작은 항타관입(easy driving)과 인장파가 발생하였음을 알 수 있다. 이 때까지 말뚝의 손상은 나타나지 않고 있다(BTA=100). 말뚝두부(실제는 게이지 부착위치)에서의 압축응력(CSX)은 0.214 ton/cm^2 정도로 PHC말뚝의 허용압축응력 0.48 ton/cm^2 이내로 측정되었으며 인장응력(TSX)은 0.084 ton/cm^2 정도로 앞서 언급한 허용인장응력 0.062 ton/cm^2 ($0.025\sqrt{f'_c} + f_{pe} = 0.062 \text{ ton/cm}^2$)를 초과하고 있음을 알 수 있다.

그림 4의 (b)는 말뚝이 손상되기 시작한 힘과 속도의 파형으로 말뚝두부에서 13 m(LTD=13 m) 정도 되는 위치에서 속도의 파형은 약간 증가하고 힘의 파형은 약간 감소하고 있으며 건전도지수(BTA)는 88 % 정도로 나타나고 있어 말뚝이 손상되기 시작하였음을 보여주고 있다.

그림 4의 (c)는 말뚝이 크게 손상된 상태로 그림에서 보는 바와 같이 게이지 위치로부터 11.2 m 정도에서 힘과 속도의 파형이 교차하고 있으며 건전도 지수(BTA)는 23 %로 나타나고 있어 말뚝이 파손(broken) 되었음을 알 수 있다.

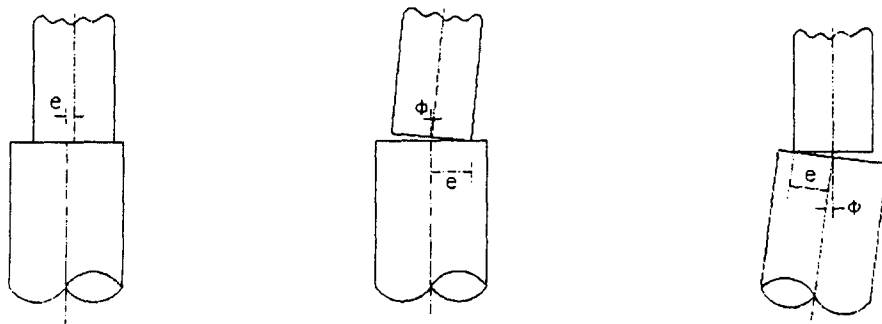
본건 사례는 연약층에 긴말뚝을 항타시공할 경우 허용인장응력을 초과하는 인장응력이 발생하여 말뚝이 손상될 수 있음을 보여주고 있다. 본건에서는 말뚝을 유효 프리스트레스가 큰 말뚝(B-type: $f_{pe} = 0.080 \text{ ton/cm}^2$)으로 변경하고 해머의 램중량을 상향조정(13 ton 유압해머)하는 등의 조치를 취하였다. 또한 항타시 PDA를 이용한 동재하시험을 수행하여 항타응력을 면밀히 검토함으로써 낙하고의 조정, 적절한 말뚝쿠션의 사용 등의 조치를 취해 항타시 인장응력으로 인한 말뚝 손상을 방지할 수 있었다.

3.2 사례 2

강관말뚝은 재료의 균질성에 대한 신뢰도가 높고 높은 재질 강도를 갖고 있어 큰 항타응력으로 관입시킬 수 있다. 또한 운반, 보관시 손상 우려가 작으며 특히 인장응력이 압축응력과 동일하여 인장응력으로 인한 손상이 적어 확실한 품질의 기초를 시공할 수 있는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 강관말뚝의 손상은 과도한 압축응력으로 인한 말뚝두부 및 선단부 손상이 대부분이며 용접부위 등에서 손상되는 경우도 있다. 강관말뚝의 항타시 압축응력에 대한 허용범위는 $0.9f_y$ ('97 개정 구조물기초설계기준, FHWA 등, f_y : 항복응력)가 일반적으로 사용된다.

강관말뚝 항타시공시 과도한 압축응력으로 인한 말뚝의 두부손상은 해머의 중량, 낙하고, 해머쿠션의 재질과 상태, 말뚝의 규격 등에 크게 영향을 받으며 적절한 조건에서 항타할 경우 편심항타(eccentric driving) 여부가 말뚝의 두부 손상을 크게 좌우한다. 편심항타의 원인은 그림 5에 나타낸 바와 같이 말뚝과 해머의 중심축 불일치, 해머가 경사진 경우, 말뚝이 경사진 경우 등에서 나타난다.



(a) 중심축의 불일치

(b) 해머가 경사진 경우

(c) 말뚝이 경사진 경우

그림 5. 편심 응력의 원인

그림 6은 램중량 13 ton 유압해머를 사용하여 해상에서 항타시공한 ϕ 812.8×12(t) mm 강관말뚝 (SPS 400)에 대한 PDA 측정 결과이다. 그림의 윗부분은 힘과 속도의 파형이고 아래부분은 2개의 변형율계(F_1 , F_2)에서 측정된 각각의 힘의 파형이다. 말뚝두부(실체는 게이지 부착위치)에서 측정된 평균 압축응력(CSX, 2개의 게이지 평균값)은 1.747 ton/cm^2 으로 강관말뚝의 항타시 허용압축응력 2.16 ton/cm^2 ($0.9f_y$, $0.9 \times 2.4 = 2.16 \text{ ton/cm}^2$)에 여유가 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나 2개의 게이지중 최대 항타응력(CSI, F_1)은 2.709 ton/cm^2 으로 항타시 허용압축응력을 크게 초과하고 있을 뿐만 아니라 강관말뚝의 항복응력도 크게 초과하고 있으며 말뚝두부가 크게 손상된 것을 육안으로 목격할 수 있었다. 본 사례와 같이 해상에서 항타선을 이용하여 말뚝을 항타하는 경우 조류와 파도 등의 영향으로 항타선을 고정하기가 어렵기 때문에 앞서 언급한 편심 항타로 인하여 말뚝두부 손상이 흔히 나타난다.

본건 사례의 경우 말뚝 두부만 손상된 경우로써 손상부분을 절단하고 조류와 파도를 면밀히 관찰한 후 항타와 병행하여 동재하시험을 실시하여 편심응력을 최소화 한 상태에서 말뚝을 소요의 깊이까지 관입시켰다.

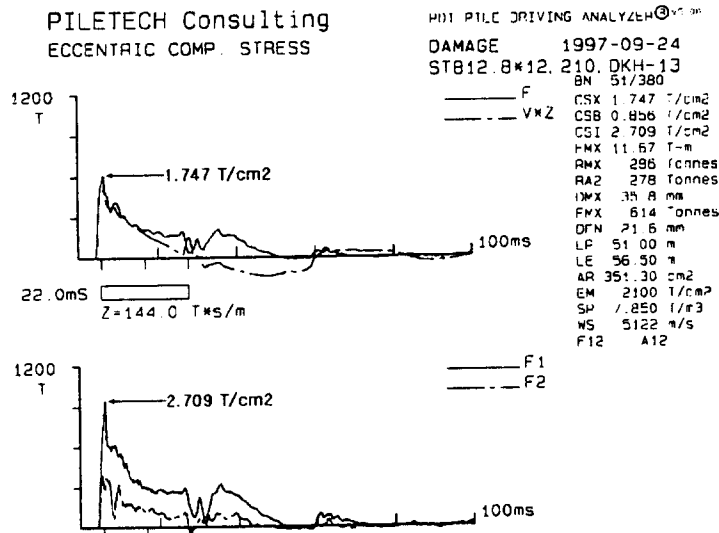


그림 6. 편타에 의한 두부손상 발생 예

3.3 사례 3

본 사례는 말뚝 선단부가 손상된 사례로 그림 7과 같은 지반에 연암층까지 선굴착한 후 ϕ 406×9(t) mm 강관말뚝을 램중량 7 ton 유압해머를 사용하여 최종항타하는 방법으로 시공되었다. 이러한 시공조건으로 말뚝을 시공하는 경우 주면마찰 저항이 전혀 없는 상태에서 말뚝을 항타하기 때문에 말뚝 선단부에 작용하는 이론적인 최대 압축응력은 말뚝두부에 작용하는 값의 2배까지 증가할 수 있으므로 특히 말뚝선단부가 손상되기 쉬운 조건에 놓이게 된다.

그림 8은 시공된 말뚝의 재항타(restrike)시험시 말뚝 선단부가 손상된 상태를 나타내는 PDA화면으로서 시험시 램낙하고는 시공시와 동일한 0.8 m(EMX : 4.88 ton-m)로 하였다.

그림 9는 항타시 동재하시험을 실시하여 낙하고를 0.8 m에서 0.4 m(EMX : 2.14 ton-m)로 하향조정하고 말뚝두부(CSX) 및 선단부(CSB)에서의 항타압축응력을 면밀히 검토하여 말뚝을 손상없이 시공을 완료하기 직전의 PDA화면이다.

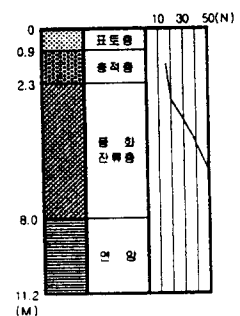


그림 7. 지반개요

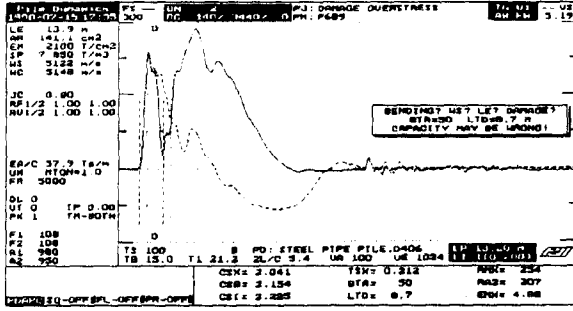


그림 8. 말뚝선단부 손상

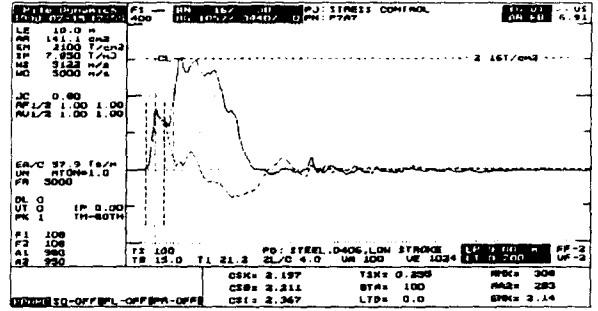


그림 9. 최대 항타용력에서 시공종료

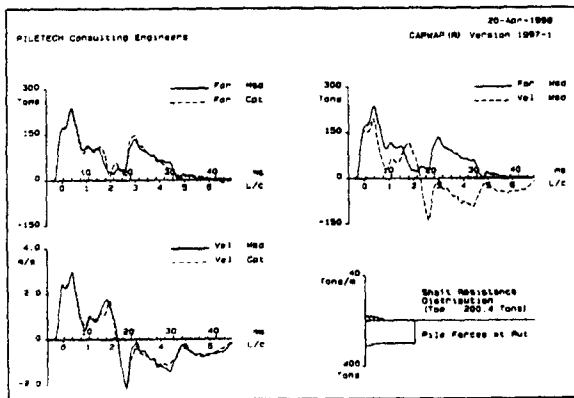
4. PDA분석 오류의 문제점 발생 사례

1994년 PDA가 우리나라에 처음 도입된 이래 그 적용이 급속도로 확장되어 현재에는 30대 이상의 장비가 활용되고 있다. PDA는 도입초기 정재하시험을 단순히 대체하는 동재하시험 목적으로 사용되었으나 근래에는 항타장비의 적합성, 시공관리 기준설정, 말뚝재료의 건전도, 지반조건의 확인 등 다양한 목적으로 적용이 확대되고 있다.

이처럼 PDA적용이 확산됨에 따라 예상치 않았던 문제점들이 발생하고 있다. PDA는 말뚝에 타격에너지 주어져 발생하는 파를 측정하고 그 결과를 해석하여 말뚝의 지지력 크기, 지지력 분포, 건전도 등을 판단하게 된다. 이 과정에는 말뚝기초에 대한 지식과 경험과 PDA에 대한 이해가 필수적으로 요구된다. 그러나 우리나라의 현실은 PDA를 단순기능으로 간주하여 비전문가에 의한 시험이 이루어 지는 경우가 자주 있다. 그 결과 PDA의 입력오류, 측정오류 및 분석오류 문제가 심각한 수위에 달하고 있다. PDA오류는 지지력 미달 말뚝을 양산하고 있으며 말뚝재료가 파손된 경우도 건전한 것으로 판정하여 향후 심각한 문제로 발전될 가능성도 배제할 수 없는 실정이다. 본 논문에서는 이러한 많은 사례들 중 최근 발생하였던 PDA분석 오류로 인하여 제기되었던 문제점을 소개하였다.

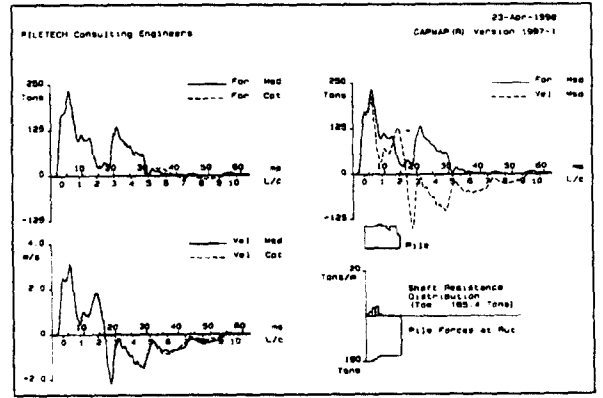
본 사례는 도심지 공사에서 소음진동 등 건설공해 문제로 지반을 소요의 지지층까지 강관케이싱을 사용하여 선굴착하고 시멘트풀을 주입한 다음 ϕ 400 mm PHC말뚝을 드롭해머를 사용하여 최종항타(SAIP공법)하는 방법으로 시공할 때 말뚝선단부가 손상된 사례이다.

그림 10은 말뚝시공 종료 직후 실시한 동재하시험 결과를 CAPWAP방법으로 분석한 결과이며 그림 11은 문제점 검토 도중 그림 10의 CAPWAP분석결과를 재분석한 결과이다.



- MQ_{no} 7.87
- R_s : 23.0, R_t : 200.4, R_u : 223.4

그림 10. 최초 분석결과(CAPWAP)



- MQ_{no} 3.42
- R_s : 25.1, R_t : 165.4, R_u : 190.5

그림 11. 재분석결과(CAPWAP)

그림 10을 살펴보면 측정된 파(For, Vel Msd)와 계산된 파(For, Vel Cpt)가 일치하지 않아 CAPWAP 분석결과의 적정성을 나타내주는 MQno(Match Quality Number)가 7.87로서 일반적으로 신뢰할 만한 수준인 3.0 내외를 크게 초과하고 있으며, 지지력(특히 선단지지력)이 과대 평가되고 있다. 특히, 그림 10의 재분석결과에서 보는 바와 같이 말뚝선단부가 손상되었음에도 불구하고 이를 발견하지 못하였다.

5. 결론

본 사례 연구에서는 기성말뚝항타시 말뚝의 손상 사례를 PDA를 이용하여 평가하였다. 연약한 지반에 긴 콘크리트 말뚝을 항타할 경우 허용 인장응력을 초과하는 인장응력이 발생하여 말뚝이 손상되는 것을 확인하였다. 또한 강관말뚝 항타시 편심항타로 인하여 허용응력 범위이내에서도 두부가 손상 되었으며 선굴착 후 최종항타하는 경우 말뚝선단부에 과도한 압축응력이 발생하여 말뚝이 손상됨을 알 수 있었다.

이와 같이 말뚝재료의 손상은 다양한 원인으로 발생하기 때문에 단순히 지지력 확인을 위한 정재하시험이나 시공기록 등의 검토만으로는 구체적인 원인 규명 및 해결책을 수립하는 데 한계가 있다. 따라서 말뚝의 손상원인을 구체적으로 규명하고 그 해결책을 수립하기 위해서는 PDA를 사용한 체계적인 검토가 필수적이라는 결론을 얻게 되었다.

특히 근래 적용이 확산되고 있는 PDA시험의 경우 비전문가에 의한 시험실적이 급증하고 있는 문제는 본 논문에서 예시한 바와 같이 구조물의 안전에 있어 치명적이다. 본 논문에서 소개한 사례 외에도 수많은 PDA 부실사례가 발견되고 있어 이에 대한 대책 수립이 절실히 요구되고 있다.

참고문헌

1. (사)한국지반공학회(1997), '97 개정 구조물기초설계기준
2. 이명환, 홍헌성, 이원제(1995. 5), "개단강관말뚝의 지지력 특성", 강관말뚝의 현장거동에 관한 세미나 자료집, 대한토목학회, 한국강관협회, pp. 3~5.
3. 이영남, 이종섭, 박영로, 이형주(1995. 5), "항타시 강관말뚝의 손상사례분석", 강관말뚝의 현장거동에 관한 세미나 자료집, 대한토목학회, 한국강관협회, pp. 67~90.
4. 한국건설기술연구원(1992), "말뚝기초의 문제점과 대책" pp. 51~52.
5. Hannigan, P, J(1990), "Dynamic Monitoring and Analysis of Pile Foundation Installations" DFI, A Continuing Education Short Course Text, pp. 1~67.
6. Webster, S. D. and Teferra, W(1996), "Pile Damage Assessments Using the Pile Driving Analyzer", Proceedings of Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles pp. 980~989.
7. Goble Raushe Likins and Associate, inc,(1996), "CAPWAP Introduction to Dynamic Pile Testing METHODS" pp. 4.1~4.9