

## PDA 시험을 이용한 말뚝손상 판단에 관한 사례 연구

### A case study on the evaluation of pile damage during driving by PDA testing.

송명준<sup>1)</sup>, Myung-Jun Song, 박영호<sup>2)</sup>, Young-Ho Park, 이영남<sup>3)</sup>, Young-Nam Lee

<sup>1)</sup> 현대건설 기술연구소 주임연구원, Junior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology.

<sup>2)</sup> 현대건설 기술연구소 수석연구원, Principal Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology.

<sup>3)</sup> 현대건설 기술연구소 소장, Director, Hyundai Institute of Construction Technology.

**SYNOPSIS :** Nowadays, owing to the development of analysis techniques for PDA test, we can evaluate the serious damage of pile during driving in site. In this study, we checked the damage of pile by pulling it out after evaluation of the pile damage during driving by PDA testing. After that, almost damaged pile was checked and the outline depth of damage could be verified. To increase the quality of driven pile, we have to increase the number of PDA testing for drivability analysis with checking the damage especially for preliminary pile driving and dynamic load test for checking the bearing capacity and consider the application of driving by energy monitoring.

Key words : Pile Driving, Pile Damage, PDA, Dynamic Load Test, Drivability

## 1. 서론

항타말뚝으로 사용되는 말뚝은 콘크리트 RC 말뚝과 PHC 말뚝 그리고 강관말뚝이 있으며, 최근에는 주로 PHC말뚝과 강관말뚝이 사용된다. 콘크리트 말뚝의 경우는 재료의 강도가 강관말뚝에 비해 상대적으로 약하기 때문에 항타시 쉽게 파괴가 발생된다. 강관말뚝은 강하고 가벼우며 운반시 손상을 입지 않을 뿐만 아니라 말뚝의 연결이 상대적으로 쉽기 때문에 해상 및 육상공사에서 널리 사용되고 있으나, 적절한 항타관리 기법을 도입하지 않고 항타시, 지반조건의 변화에 따라 두부와 선단부가 손상될 수 있다. 말뚝 두부손상의 경우 대부분이 육안으로 확인이 가능하므로 이에 따른 적절한 대책을 현장에서 즉시 수립가능하다.

말뚝의 손상에는 여러 가지 원인이 있으나 주로 항타시의 압축응력이 허용기준을 초과하기 때문에 발생한다. 말뚝에 작용하는 응력은 주로 해머 크기, 낙하고, 쿠션재의 상태, 말뚝크기 및 지반조건에 의해 결정된다. 강말뚝의 경우 주로 압축응력에 의해 손상이 발생하지만 콘크리트 말뚝의 경우는 압축응력외에도 인장응력에 의해서도 쉽게 파괴가 발생한다.

본 연구에서는 항타시 말뚝의 손상을 방지하는 방법과 실제 현장 사례를 중심으로 말뚝선단부의 손상을 판단하는 방법에 관하여 검토하였다.

## 2. 말뚝손상 판단 방법

말뚝의 항타시 손상을 판단하는 방법은 PDA(Pile Driving Analyzer-말뚝항타분석기)에 의하여 항타시의 최대압축응력과 파형을 분석하여 종합적으로 판단하여야 하며, 말뚝손상 가능성이 판단되면 즉시

항타를 중지하고 대책을 모색하여야 한다. 표1에서는 PDA시험과 동재하시험(Dynamic Load Test)을 사용 목적에 따라 세분하게 구분을 하였다. 표1의 PDA시험과 동재하시험(EOID)은 같은 말뚝에 대해서 연속적으로 이루어지나 각 시험결과의 사용목적에 따라 분류를 하였다.

표 1 PDA장비를 이용한 시험종류와 명칭

시험명칭	시험목적	권장 시험시기
PDA Test	항타관입성 분석	시험시공시, 시항타시
Dynamic Load Test 동재하시험(EOID)	초기 지지력산정	시험시공시, 시항타시
Dynamic Load Test 동재하시험(Restrike)	지지력산정(재항타)	시간에 따른 지지력평가가 권장됨

## 2.1 허용 압축응력

말뚝 항타시 손상은 주로 압축응력이 허용기준을 초과하기 때문에 발생한다. 말뚝에 작용하는 응력은 주로 해머 크기, 낙하고, 쿠션재의 상태, 말뚝크기 및 지반조건에 의해 결정된다.

항타시 압축응력과 인장응력은 PDA 시험시 가속도계와 스트레인게이지를 이용하여 측정된 속도와 힘의 측정치를 이용하여 구할 수 있다. PDA 시험시 측정되는 최대압축응력은 CSX, 최대인장응력은 CTN 으로 현장에서 매 항타시마다 계산되어서 디스플레이된다. 여기서, 최대압축응력은 말뚝두부에서 직접 산정된 값으로 말뚝두부에서의 최대압축응력이 항상 말뚝에 작용하는 최대 압축응력이 아닐 수 있으므로 CAPWAP 해석을 통하여 전체 말뚝에 대한 최대압축응력을 산정해야 한다. 말뚝의 최대 압축응력의 측정은 낙하고의 결정과 말뚝의 손상여부를 판단하는데 매우 중요한 요소이다.

말뚝의 손상여부는 CAPWAP 분석으로 해석된 최대압축응력을 근거로 하여, PDA시험과 동재하시험(Dynamic Load Test) 결과의 힘과 속도 파형을 분석하여서 종합적으로 판단을 하여야 한다. 표 2에는 AASHTO(1992)와 구조물 기초 설계기준(1997)에서 제시한 항타시 허용압축응력을 도시하였다.

표 2 AASHTO와 구조물기초설계기준의 항타시 허용응력

Pile Type	AASHTO		구조물기초 설계기준	
	Compression	Tension	Compression	실제 적용치 예
Steel	0.9 Fy	0.9 Fy	0.9 Fy	2150 kg/cm <sup>2</sup> (SPS410)
Precast Concrete	0.85 $\sigma_{ck}$	0.7 Fy (철근)	0.6 $\sigma_{ck}$	300 kg/cm <sup>2</sup>
Prestressed Concrete	0.85 $\sigma_{ck} - \sigma_{pe}$	$\sqrt{\sigma_{ck} + \sigma_{pe}}$	0.6 $\sigma_{ck}$	480 kg/cm <sup>2</sup>

여기서, Fy : 항복강도,  $\sigma_{ck}$  : 28일 압축강도,  $\sigma_{pe}$  : 유효 prestressing 값

실제 위의 값들을 적용하여 시험시, 강관 말뚝의 경우 실제 제작시 항복강도가 각 말뚝마다 다르나 약 10-20% 정도 크게 제작되므로 위 규준값들을 약간 상회해도 큰 문제가 발생하지는 않는다. 하지만, 반드시 이 값들을 기준으로 항타관리를 하여야 하며, 콘크리트 말뚝의 경우, 쿠션재의 두께등을 고려해서 최대압축응력을 결정하여야 한다.

## 2.2 PDA 시험의 반사파형 분석

PDA 시험에서 말뚝 선단부 손상을 판단하는 방법은 단면변화에 의한 인장파가 반사되어 돌아오는

시간을 거리로 환산하여 그 위치를 판단하는 방법이다. 그림 1에서의 두 개의 수직선은 파가 전달되는 초기 시간과  $2L/C$  후의 시간, 즉 말뚝 선단부의 정보를 나타내는 시간을 의미한다.

측정된 힘과 속도의 그래프에서도 인장파의 반사가 나타나지만. 인장파의 반사위치는 Wave Down 과 Up 곡선에서 정확하게 결정할 수 있다. Wave Up에서 급격한 (-) 기울기의 발생(힘에 대한 상대적인 속도의 증가)은 인장파를 의미하며,  $2L/C$  시간 전에 Wave Up 파형이 단순증가 추세이면 손상된 부분이 없음을 의미하며,  $2L/C$  시간전에 Wave Up 파형의 감소는 임피던스의 차이를 의미한다. 즉, 균열 혹은 Gap 등을 의미하는 것이다. 만약, Wave Up 파형이  $2L/C$  전에 급격하게 감소한다면 이것은 말뚝 손상의 가능성을 의미하는 것이다. 이 경우 더욱 정확한 판단을 위해서는 CAPWAP 해석을 수행하고 각 단면에서의 압축응력을 확인하여, 손상으로 파악된 위치에서의 압축응력이 허용응력을 초과하는지의 여부등을 종합적으로 검토하여야 한다(Seidel, 2001).

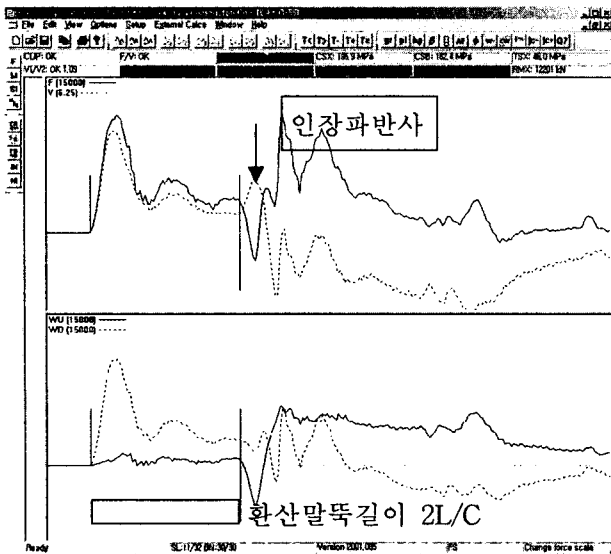


그림 1. 선단부 손상이 없는 것으로 판단된 말뚝의 파형

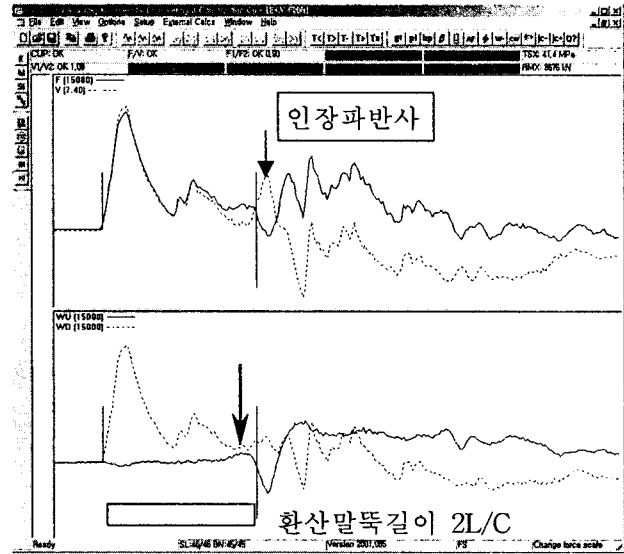


그림 2 선단부가 손상을 입은 것으로 판단된 말뚝의 파형

그림 1은 인장파의 반사는 발생되었지만 그 위치가 말뚝 선단 위치로 판단되었으며, 압축응력 역시 허용치 이내에 들어 말뚝 선단부가 이상이 없는 것으로 판단된 파형을 나타낸다. 이와 같은 인장파의 반사가 말뚝길이를 넘어선 위치에서 반사된 것은 말뚝 선단 손상이 아닌, 항타시 말뚝선단에서의 반사파로 판단된다. 따라서, 말뚝선단의 시간적 위치파악( $2L/C$ )이 매우 중요하며, 말뚝길이와 압축파 속도를 정확히 입력하여야 한다. 강말뚝의 경우 압축파 속도는 대부분 5120m/sec 정도로 균일한 반면, 콘크리트 말뚝의 경우 압축파속도가 말뚝마다 상이하므로 PDA 시험 전에 PIT 장비를 이용한 압축파속도 시험으로 각 말뚝 마다의 정확한 압축파 속도를 산정하거나, PDA 장비를 이용하여 시험 전에 rise-to-rise 방법으로 미리 정확한 속도를 파악한 후에 PDA 시험을 실시하여야 한다(PDI, 1995).

그림 2는 인장파가  $2L/C$  전에서 반사되어서 말뚝 선단부가 손상을 입은 것으로 판단된 파형이며, 이 경우 Wave Up 파형의 변곡점의 위치를 이용하여 선단 손상부위의 위치 파악도 가능하다.

### 2.3 동재하시험(Restrike)에서의 반사파형 분석

동재하 시험에서의 말뚝손상 판단방법은 기본적으로 2.2절의 PDA시험에서와 동일하나 동재하시험(Restrike)시에는 Set-Up 등의 영향으로 정확한 판단이 매우 어려울 수 있으므로, 반드시 PDA 시험이나 동재하시험(EOID) 시험시에 말뚝 손상의 여부를 판단하여야 한다. Set-Up으로 증가된 주면마찰력에 의하여 말뚝선단의 손상이 가려질 수 있으므로, 이를 고려하여 상당히 큰 에너지로 동재하시험을 실시하여야 하며, 이 경우 말뚝이 더욱 손상될 수 있으므로 주의하여야 한다. 그리고, PDA시험이나 동재

하시험 시 말뚝 손상가능성이 있는 것으로 판단된 파형에 대해서는, 반드시 CAPWAP 해석을 수행하여 말뚝의 각 위치별 최대 압축응력의 허용압축응력 초과여부를 확인 하여야한다.

### 3. 말뚝손상 방지 방법

#### 3.1 파동이론식을 이용한 항타관입성 분석

항타말뚝의 손상을 방지하는 가장 좋은 방법은 적절한 해머의 선정이다. 말뚝두부의 응력은 램의 중량보다 낙하고에 영향을 받으며 말뚝 선단부까지의 에너지 전달은 램 중량에 영향을 받기 때문에 동일한 에너지를 발휘할 수 있는 해머 중에서 램 중량이 무거운 해머를 선택해야 한다. 즉, 가벼운 램으로 높은 낙하고에서 항타하는 해머보다 무거운 램으로 낮은 낙하고로 항타하는 유압해머를 사용하는 것이 말뚝의 손상을 방지하기에 더 유리하다.

해머의 선택을 위하여 파동이론분석(WEAP)을 수행하면 말뚝재료 조건(허용압축응력)과 지반조건 및 항타장비 조건을 고려한 보다 정확한 항타관입성(drivability) 분석이 가능하다. 즉, 항타시 소요지지력을 얻기 위한 해머의 낙하높이 및 항타 시공성, 낙하높이에 따른 허용압축응력의 변화등을 분석하여 현장 조건에 적합한 해머와 낙하고를 결정할 수 있다(GRL, 1995). 파동이론분석으로 결정된 해머의 낙하높이, 압축응력 및 지지력에 대해서는 시항타시 PDA 시험을 통해서 반드시 확인 및 검증이 되어야한다.

#### 3.2. 시항타시 PDA 시험

정확한 현장의 항타 상황을 분석하기 위해서는 시항타시 단순하게 말뚝의 관입여부만 확인하는 기존의 방법 대신에, PDA시험을 병행하여 현장의 소요지지력을 얻기 위한 말뚝의 근입심도 확인 및 낙하높이에 따른 압축응력의 변화를 파악하는 방법이 더욱 효과적이며, 이때 반드시 힘-속도 파형과 wave up 파형을 참고하여 인장파의 발생여부와 발생위치를 확인하여야 한다.

시항타시 PDA 시험은 지반조건에 따라 지층조건이 상이한 곳에서 각각 수행되어야 하며, 2장에서 기술된 말뚝손상 판단방법을 적용하여, 시험시 힘-속도파형과 wave up파에서 인장파의 발생여부와 최대압축응력을 지속적으로 체크하여야한다. 따라서, 시항타시와 공사초기에 가능한 많은 수의 시항타와 PDA 시험을 수행하는 것이 필요하다. 시항타시 많은 수의 PDA 시험을 동재하시험(EOID)과 병행하여 수행하여 초기 항타시의 지지력을 분석하고, 추후에 동재하시험(Restrike)을 추가적으로 실시하여, 많은 수의 말뚝들에 대하여 초기항타와 재항타시의 지지력의 변화를 확인함으로써, 현장의 전반적인 말뚝들의 시간경과 효과를 판단 할 수 있다.

#### 3.3 에너지모니터링 방법을 이용한 항타관리

해머의 낙하높이는 유압의 변화등에 의해서 정확한 낙하고의 조절이 힘들며, 항타자료들이 기록으로 남지 않으므로 현장에서 전체 말뚝의 시공 상황을 파악하기가 쉽지 않다. 또한, PDA 시험 및 동재하시험에 의한 항타관리도 전체말뚝 중 일부에 대해서만 시행하는 것이므로, 대규모의 항타말뚝 현장에서는 에너지모니터링을 이용한 항타관리 방법이 매우 효율적일 것으로 판단된다.

본 방법은 현장에서 매 항타시의 항타직전의 에너지를 측정하여 디스플레이하고, PDA 시험등으로 결정된 항타에너지로 계속적으로 항타할 수 있도록 항타에너지를 조절하여 항타하는 방법이다. 본 방법은 항타기 자체에 장착이 되어서 운행됨으로써, 계측이나 측정을 위한 추가적인 시간 소요없이 모든 말뚝에 대해서 실시가능하다. 그림 3에는 항타에너지 모니터링 시스템의 프로그램의 디스플레이부가 도시되어있으며, 그림 4에는 에너지모니터링 시스템과 해머 항타조절기 사진이 도시되어있다.

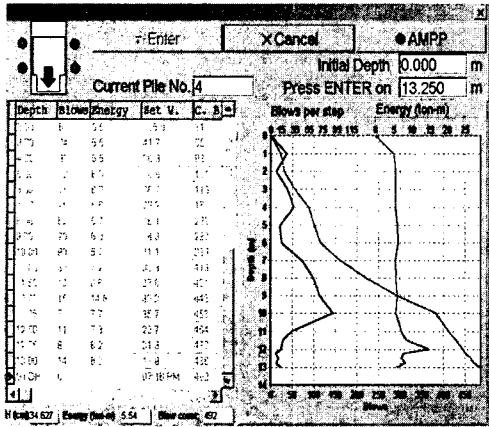


그림 3. 해머에 부착된 자동 에너지 모니터링 시스템의 Output

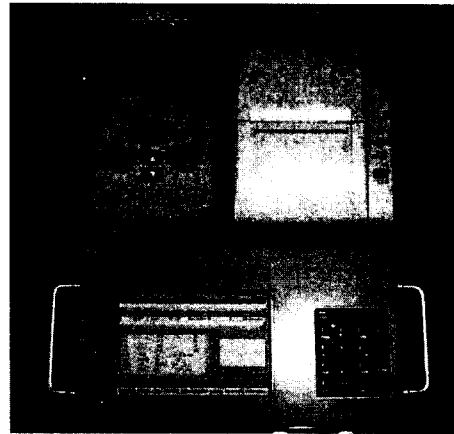


그림 4. 해머 에너지모니터링 시스템과 해머 조절기

#### 4. 말뚝 선단 손상사례

해상에서의 항타시, 수면아래 연약한 준설패립층 혹은 부유층과 바로아래 연암 혹은 경암층이 존재하여 지반조건이 급격하게 변하는, Hard Driving의 조건이 되는 경우가 존재할 수 있다. 이 경우는 말뚝을 연암혹은 경암층에 바로 항타하게 되는 것과 유사한 경우이며, 말뚝선단의 손상이 발생할 가능성이 매우 높다.

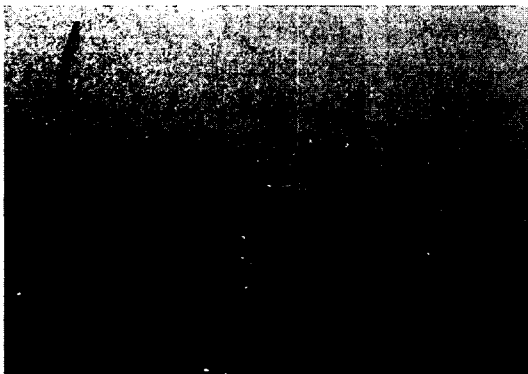


그림 5. 현장의 말뚝 항타 현장전경

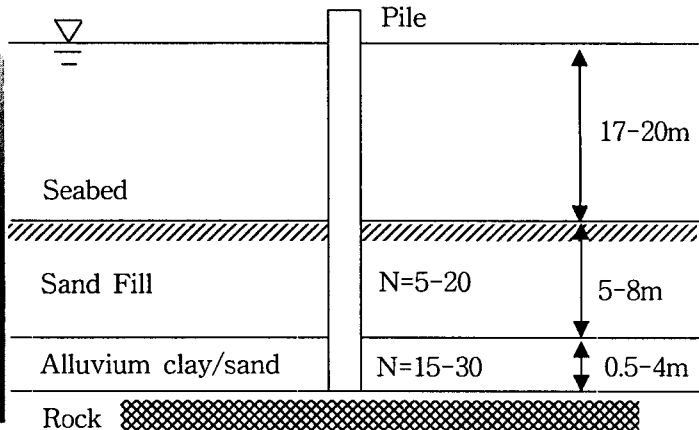


그림 6. 현장의 대표적인 지층구성도

본 현장은 해상에서 강관말뚝 약 2000본을 항타시공하는 현장이며, 사용되는 말뚝은 직경 1000mm\*16t와 19t 두 종류이며, 고강도 강관말뚝이다. 지반조건은 수심이 약 20m 정도이며, 약 10m의 준설패립층과 층적층아래 연암-경암층이 존재한다. 따라서, 주변마찰력은 거의 없이 선단지지력만으로 하중을 받는 Hard Driving 조건이며 말뚝 항타 위치내에서도 암반선의 변화가 상당히 심하다. 사용된 말뚝의 평균길이는 34-40m 이며 모든 말뚝은 0.6m 길이로 선단부가 보강된 말뚝이다. 말뚝 선단이 암반층 위에 위치하도록 설계가 되었으며, 부족한 수평력을 보강하기 위해 말뚝내에 Typhoon anchor와 콘크리트 속채움으로 시공하게 되어있다. 현장의 항타전경은 그림 5에 그리고 대표적인 지층 구성도는 그림 6에 도시되어있다.

본 현장의 항타관리 방법은 에너지모니터링을 실시하여, 항타에너지, 최종관입량 그리고 PDA 시험결과인 CASE 방법에 의한 지지력인 RMX 값, 이 3가지를 모두 만족하여야만 항타가 종료되는 철저한 항타관리를 수행한 현장이다. 이렇게 철저한 항타관리를 하였기 때문에, 항타중에 발생한 일부 16t 두께 말뚝의 선단부 손상을 감지하고 대책수립이 가능하였다. 손상으로 판단된 말뚝들의 PDA 시험 결과와

CAPWAP 해석 결과 설계지지력은 대부분 만족하였으며, 정재하시험 결과도 지지력은 만족하는 것으로 판단되었다.

본 현장의 말뚝의 항타과정에서 말뚝두부가 손상되었다고 판정된 PDA 시험결과는 그림 7에 도시되어 있으며, 12번째 blows부터 말뚝이 손상되는 것을 알 수가 있다. 초기에는 Wave-Up 파형의 감소가 말뚝 선단부(2L/C)에서 발생하였으나, BN 12(그림 7-(c)) 부터는 선단부가 손상되면서, 말뚝 선단부(2L/C) 이전에서 Wave-Up 곡선이 급격하게 감소하며, 항타가 계속됨에 따라 기울기가 급해지며, 파형의 계곡이 깊어짐을 알 수가 있다.

본 경우에도 동재하시험과 정재하시험결과 지지력은 설계지지력을 만족하였다. Wave-Up 곡선과 CAPWAP 해석결과 선단부 상단으로 약 1m 부근의 압축응력이 허용 압축응력을 훨씬 초과하는 것으로 판단하여, 손상부위는 말뚝선단에서 약 1m 부근의 선단부가 손상된 것으로 결정을 내렸으며, 말뚝을 직접 인발하여 말뚝의 선단부를 확인하였다. 인발된 말뚝 사진은 그림 8에 도시되어 있으며, 손상부위는 약 1m로 확인이 되었다(말뚝 직경: 1000mm, 두께 16t, 0.6m 선단보강 두께 32t). 여러 겹이 겹쳐져서 손상된 것은 항타에 의한 직접적인 손상과 지지력을 확인을 위한 여러 번의 정재하시험 실시가 원인 것으로 판단된다.

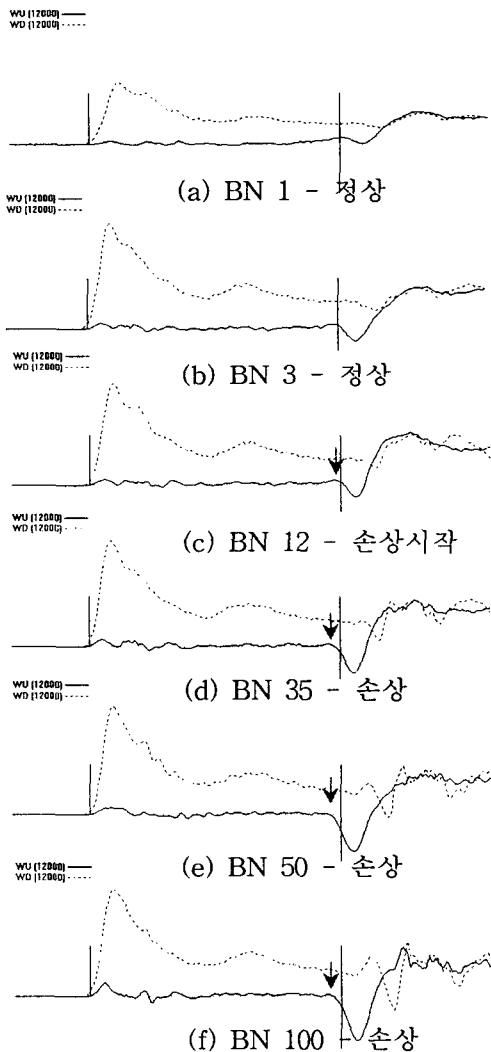


그림 7. 말뚝 선단부가 손상되는 과정의 PDA 시험결과

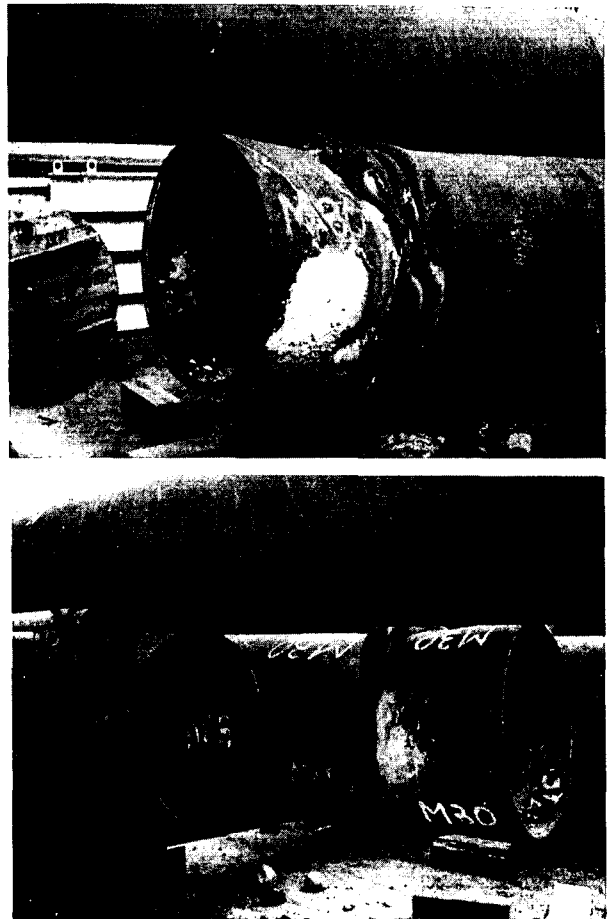


그림 8. PDA 시험으로 말뚝손상 판단 후 확인을 위해 인발된 말뚝들

손상으로 판단된 다른 말뚝들의 PDA 시험결과들과 인발 후의 사진들은 그림 9-12에 도시되어 있으며, 본 말뚝들의 경우에도 선단부 손상을 고려한 단면적으로 해석을 수행하였으며, 대부분 설계지지력은 만족하는 것으로 평가가 되었다.

그림 10와 12에서와 같이 선단이 보강된 말뚝의 선단부와 선단 보강부의 상단이 손상을 입은 것으로 판단되었으며, 말뚝선단에서 약 60cm -100cm 위치에서 대부분 손상이 발생한 것으로 확인되었다.

이상과 같이 PDA 시험결과와 분석을 통해 말뚝 선단부의 손상가능성을 판단할 수가 있었으며, 손상된 부위의 위치는 비교적 정확하게 파악이 가능한 것으로 판단되었다.

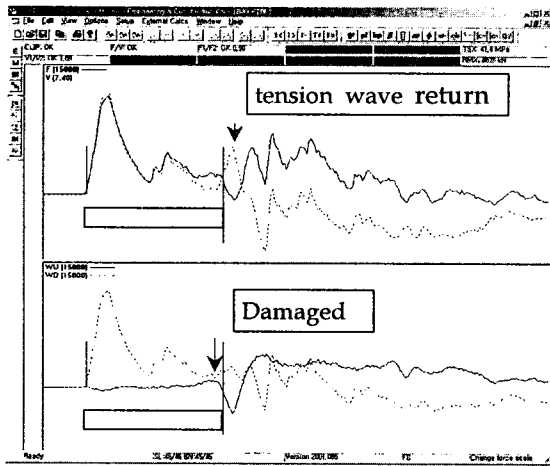


그림 9. 선단부가 손상된 말뚝의 PDA 시험결과

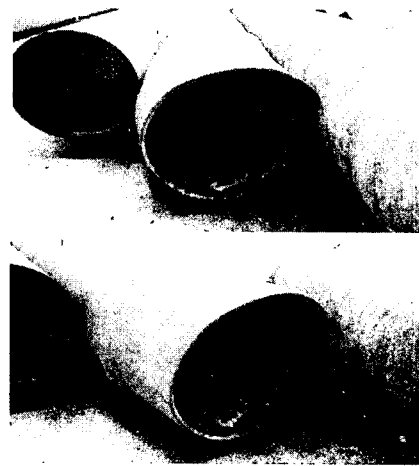


그림 10. 인발된 확인된 말뚝(PDA-그림 9)

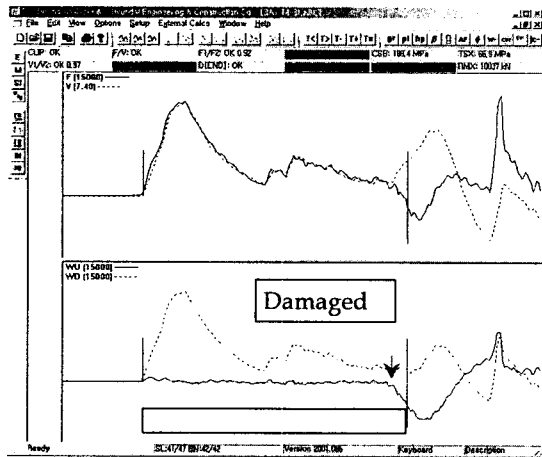


그림 11. 선단부 손상된 말뚝의 PDA 시험결과

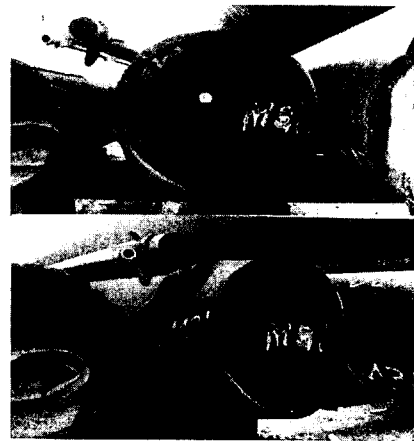


그림 12. 인발 확인된 말뚝(PDA-그림 11)

본 현장의 말뚝 선단부 손상의 주원인은 소요지지력의 관점에서 분석하면 말뚝단면의 부족인 것으로 판단되었으며, 이는 Hard Driving을 해야 하는 지반조건을 고려하지 않고 16t 및 19t 말뚝 모두 같은 소요지지력을 얻기 위해 약 200KJ 이상의 항타에너지로 항타함으로써 상대적으로 단면이 작은 16t 말뚝에서 일부 선단부 손상이 발생하였다. 하지만 본 현장은 PDA 시험과 동재하시험(EOID)의 실시 수량이

전체말뚝의 20% 이며, 이중 대부분을 항타초기에 PDA시험과 동재하시험(EOID) 방법으로 시험을 수행 하였으므로, 말뚝의 손상여부를 감지할 수 있었으며, 이에 따른 적절한 대책을 세울 수가 있었다.

## 5. 결론

현재 PDA 분석 및 해석 기술은 계속해서 발전하여 아주 경미한 손상을 제외한 말뚝의 손상은 현장에서 항타시 판단이 가능하다. 하지만, 국내의 경우 외국의 경우와 달리, PDA 시험이 대부분 지지력 평가를 위해서만 이루어지며(동재하시험, Restrike) 시험개소도 외국의 사례에 비해 매우 적게 실시되고 있는 현실이므로, 국내 현장에서 PDA 시험으로 말뚝 손상 여부를 즉시 판단하기가 어려운 실정이다.

따라서, 국내 말뚝 시공의 품질을 높이기 위해서는 항타에너지 모니터링 기법의 도입하고 항타관리를 위한 PDA 시험 개수를 시방서에 반영하고, 지지력확인을 위한 동재하시험 개수도 증가시켜야 할 것으로 판단된다.

이상의 현장사례 연구에서 나타난 PDA시험을 이용한 말뚝의 선단부 손상판단 방법과 방지대책을 정리하면 다음과 같다.

1. PDA 시험결과 분석을 통해 말뚝 선단부의 손상여부를 판단할 수 있으며, 손상된 부위의 위치도 비교적 정확하게 판단할 수 있다.
2. PDA 시험 결과에서 말뚝 선단부의 손상을 판단하는 방법은 힘-속도 곡선을 참고로 하여, Wave Up 파형에서 2L/C 전에 급격한 (-) 기울기의 발생여부와 각 단면에서의 압축응력을 검토하여 종합적으로 판단하여야 한다.
3. PDA 시험은 반드시 숙련된 기술자에 의하여 실시되어야 하며, 항타관입시 최대압축응력과 파형을 지속적으로 체크하여 말뚝의 손상여부를 현장에서 확인 한 후, 본 항타를 시작하기 전에 CAPWAP 해석을 통하여 말뚝 전구간에서의 항타시 압축응력의 분포를 체크하여 선단에서 허용 압축응력이상의 압축응력이 작용시에는 선단보강길이 및 두께를 재산정하여야 하며, 더욱 두께가 두꺼운 말뚝으로의 재료 변경을 고려하여야 한다.
4. 급격하게 지반조건이 변하여 Hard Driving이 예상되는 지역에서의 시항타시에는 반드시 PDA 시험과 동재하시험(EOID)을 병행하여 실시하고, 허용지지력과 최대허용압축응력을 만족하는 낙하고 또는 항타에너지를 산정한다.
5. 국내에도 항타에너지 모니터링 시스템을 이용한 항타말뚝 전체에 대한 항타품질을 관리하는 기법을 도입을 검토하여야한다.
6. 항타시 말뚝 선단부 손상 가능성이 초기에 판단되었을 경우에는 즉시 항타를 중지하고, 원인을 판단하여 낙하고, 항타에너지의 변경 혹은 선단보강이나 재료변경등의 여부등을 결정해야한다.

## 6. 참고문헌

1. 한국지반공학회(1997), "구조물 기초 설계기준"
2. AASHTO(1992), " Standard Specifications for Highway Bridges ", American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc. Fifteen Edition.
3. FHWA(1996), " Design and Construction of Driven Pile Foundations", Publication No. FHWA-HI-96-033
4. GRL(1995), " GRLWEAP - Wave Equation Analysis of Pile Driving", Cleveland, Ohio.
5. PDI(1995), " PDA-Pile Driving Analyzer : PAK User's manual", Pile Dynamics Inc.
6. Seidel. J.P.(2001), " Workshop on evaluation of PDA testing for specifiers and providers of PDA testing", HongKong.