

Article

이어도 해양과학기지 말뚝기초의 항타 관입성 연구

심재설 · 윤길림* · 이승준

한국해양연구원 연안·항만공학연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29Drivability of Offshore Pile Foundation at
Ieodo Ocean Research Station

Jae-Seol Shim, Gil-Lim Yoon*, and Seung-Jun Lee

Coastal and Harbor Engineering Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : When pile foundation is constructed by dynamic method, it is desirable to perform monitoring of drivability with pile penetration. Dynamic pile monitoring yields information regarding driving hammer, cushion, pile and soil behaviour that can be used to confirm the assumptions of wave equation analysis. In this study, dynamic monitoring of the steel pipe pile was performed with Pile Driving Analyser (PDA). The PDA utilizes the wave propagation theory to compute numerous variables which describe the conditions of the hammer-pile-soil system in real-time and following each hammer impact. This approach allows immediate field verification of hammer performance, driving efficiency, and estimation of pile bearing capacity. A series of PDA test were performed at the Ieodo Ocean Research Station (IORS) located in southeast of Marado, a southernmost small island south of Jeju Island. The drilling core sediments of Ieodo subsoil are composed of mud and sand, showing lamination and wavy or lenticular bedding, which were often bioturbated. This paper summarizes the results of PDA tests which were applied in measurement and estimation of large diameter open ended steel pipe pile driven by steam hammer, Vulcan-560 and MRBS-4600, at the marine sediments.

Key words : 동재하시험(PDA), 동적거동(dynamic monitoring), 말뚝관입성(pile drivability), 이어도(Ieodo), 토질역학(soil mechanics), 말뚝기초(pile foundation)

1. 서 론

국제적으로 해상시추선 건조 및 석유산업의 발전으로 해양자원탐사 및 개발에 다양한 분야의 연구가 진행되고 있다. 해양구조물을 시공하는 경우 기초로서 가장 많이 사용되는 방법은 말뚝기초이다. 해양기초로서 말뚝에 대한 국제적인 설계개념과 시공방법에 대한 분석으로 가장 학술적인 가치로 인정되고 있는 논문은 O'Neill(1993)이 있다. Pile Driving Analyzer(PDA)는 항타말뚝의 시공관리,

지지력확인 및 매입말뚝의 지지력 측정 등 기성말뚝에 널리 사용되고 있다. 대구경 현장타설말뚝의 지지력 확인에도 정재하시험을 대신하여 유용한 시험방법으로 적용되고 있는 추세이다. 본 연구는 직경 1524 mm인 대구경 강관말뚝을 사용하여 이어도 해양관측용 구조물 건설을 위해 해상에서 시공되는 항타과정에 PDA(Pile Dynamic, Inc. 1993)를 적용하여 항타관입성 모니터링을 중심으로 해양말뚝거동 및 말뚝의 지지력을 측정된 결과에 대하여 고찰하였다. 우리나라 최남단 섬인 마라도로부터 서남쪽으로 149 km 위치에 건설한 이어도 종합해양과학기지 자켓구조물의 기초로 사용된 직경 1524 mm인 강관말뚝은 서로

*Corresponding author. E-mail : glyoon@kordi.re.kr

다른 부등단면을 갖는 세부분으로 구성되었으며, 해상말뚝 항타장비인 Vulcan-560 및 MRBS-4600 스팀해머를 사용하여 관입심도 60 m까지 항타 시공되었다. 본 논문에서는 해양과학기지가 건설되는 이어도 설치지점의 지질구성을 소개하고, 지반조건을 토대로 설계된 말뚝의 지지력 및 항타시공성을 도모하기 위하여 대규모 해양구조물에 사용된 강관말뚝의 항타관입성과 지지력측정을 PDA를 이용하여 수행한 사례를 연구하였다. 특히 설계시 예측한 WEAP 해석과 항타중 측정결과를 이용한 PDAPLOT 결과를 비교하였으며, 부등단면으로 구성된 말뚝의 CAPWAP 해석에 의한 지지력 분석 등을 수행하였다.

2. 이어도 해저지반의 현황조사

이어도는 제주도 남쪽에 위치하고 있는 마라도로부터 서남쪽으로 149 km 지점에 놓여 있는 수중암초(해저섬)로서 주변수심 55 m의 평탄 해저면상의 해수면하 최저수심 4.6 m에 이르기까지 솟아 있다. 신생대 제4기 플라이스토세(160 만년 전 이후)시기에 퇴적된 하부의 쇄설성 퇴적층과 이를 얹게 덮는 상부의 화산쇄설성 퇴적층으로 구성되어 있다. 신생대 제4기 동안의 몇 차례 반복된 빙하기와 간빙기 기간 중 반복적인 퇴적과 화산작용, 그리고

차별적인 침식작용의 영향을 받아 현재의 지형과 같은 독특한 해저지형을 형성하게 된 것으로 추정된다(정대교 등 2001). 수심 40 m에 위치한 평탄한 이어도 종합해양과학기지 건설부지에서 시추깊이 51.4 m 코어 퇴적물을 분석한 지반조건을 강관말뚝기초 설계·시공에 이용하였다. 시추코어는 대부분 이질과 사질로 구성되어 있고 엽층리와 파동층리로서 규칙적으로 교호하는 양상을 보이는데, 많은 엽층리와 파동층리들은 퇴적 후 저서생물들의 생란작용에 의해 교란되어 있는 양상이다. 이러한 구조들과 다양한 크기의 패각편들이 함유되고 있는 점, 낮은 유기물의 함량, 퇴적물 조직이나 색 등을 종합해 보면 시추코어에서 획득된 퇴적층은 대륙붕과 같은 연해보다는 조간대 퇴적환경과 같은 해안환경에서 퇴적된 것으로 해석된다.

현재 이어도의 가장 높은 지형을 이루고 있는 정상 부분은 화성 쇄설류(pyroclastic flow)에 의해 운반 퇴적된 응회암층이 기존의 퇴적층을 피복한 후 풍화 침식에 의해 삭박되고 남은 잔류지형으로 추정되고 있다. 결국 이어도의 해저지형은 뚜렷한 암상 차이에 따른 차별 침식을 통해 현재와 같이 국부적인 봉우리 형태만 남기고 주변 지형은 침식되어 평탄지형을 이루게 된 것으로 보인다(정대교 등 2001). Fig. 1~3에 종합해양과학기지의 위치와 해저지형도 및 자세한 지층구성을 나타냈으며 본 위치에서의

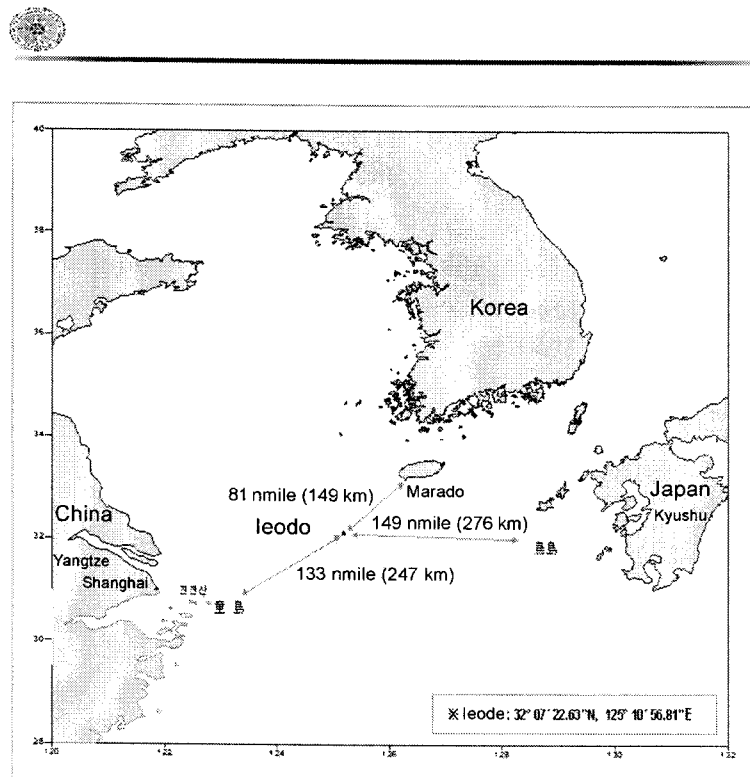


Fig. 1. Geographical site location of leodo.

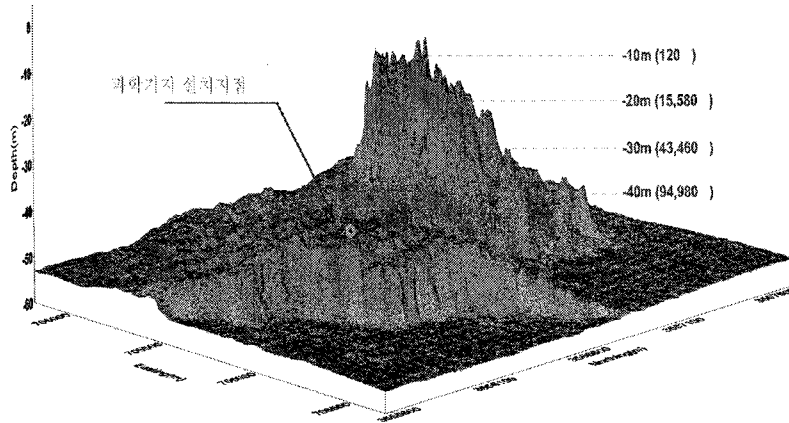


Fig. 2. Geological profile of Ieodo.

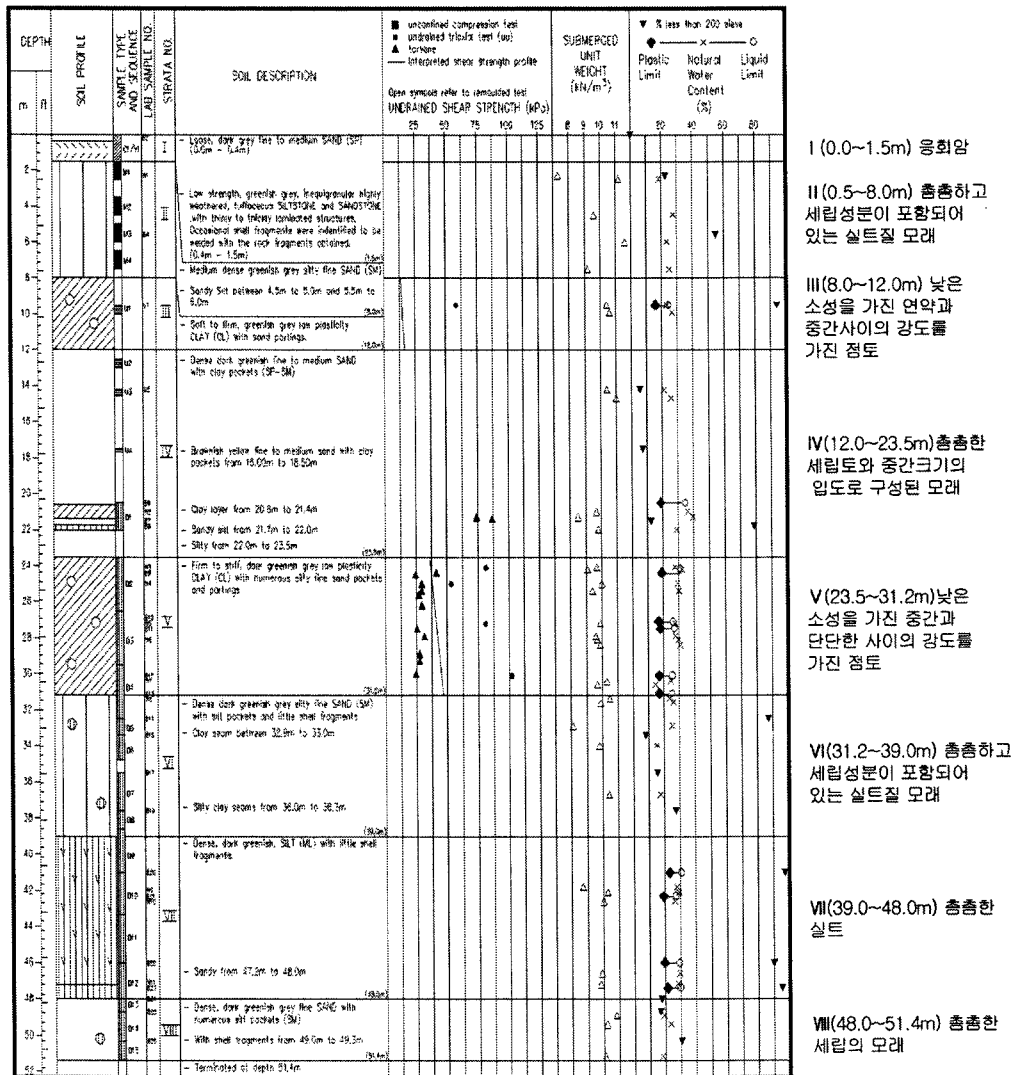


Fig. 3. Summary of field and laboratory test results.

Table 1. Characteristics of pipe pile.

| 말뚝의 종류 말뚝의 특성 | 주 말뚝 (main pile : Φ60") | | | 보조 말뚝 (skirt pile : Φ72") | |
|--------------------------------|----------------------------|------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| | 두께 (in) | 1.26" (32 mm) | 1.5" (38 mm) | 1.73" (44 mm) | 1.5" (38 mm) |
| 말뚝머리의 단면적(m ²) | 0.15 | 0.18 | 0.20 | 0.21 | 0.28 |
| 말뚝의 단위중량(KN/m ³) | | 76.97 | | 76.97 | |
| 말뚝의 수중단위중량(KN/m ³) | | 66.87 | | 66.87 | |
| 말뚝의 탄성계수(N/mm ²) | | 199,955 | | 199,955 | |

사전 말뚝기초의 설계 및 시공을 위한 지반조사에 대한 토질공학적 특성은 심재설 외 2인(1999)의 연구논문에서 자세히 상술하였다.

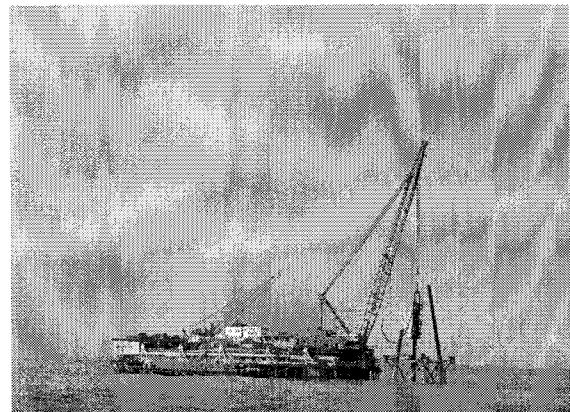
3. 강관말뚝 시공개요

이어도 종합해양과학기지 자켓구조물은 대구경 강관말뚝에 의해 지지되는 말뚝기초 형식으로 설계되었다. 말뚝은 4개의 주말뚝(Φ60") 및 4개의 보조말뚝(Φ72")으로 구성되어 있으며, 주말뚝과 보조말뚝의 특성치는 Table 1과 같다. 주말뚝은 직경 60"(=1524 mm)에 두께가 32 mm, 38 mm, 44 mm인 3개의 단면으로 구성되어 있어 각각 P1, P2, P3 말뚝으로 구분되며(Fig. 4 참조), 보조말뚝은 직경 72"(=1828 mm)에 두께가 38 mm, 50 mm인 2개의

단면으로 구성되어 있다.

Pic. 1은 자켓구조물 설치를 위한 강관말뚝(주말뚝)을 향타 시공하는 전체 광경이며, Pic. 2는 주말뚝중 가장 최하단에 타입되는 P1 말뚝을 삽입한 상태를 보여주고 있다.

향타 해머는 대구경 강관말뚝의 해상시공에 사용되는



Pic. 1. Driving preview of pipe pile.

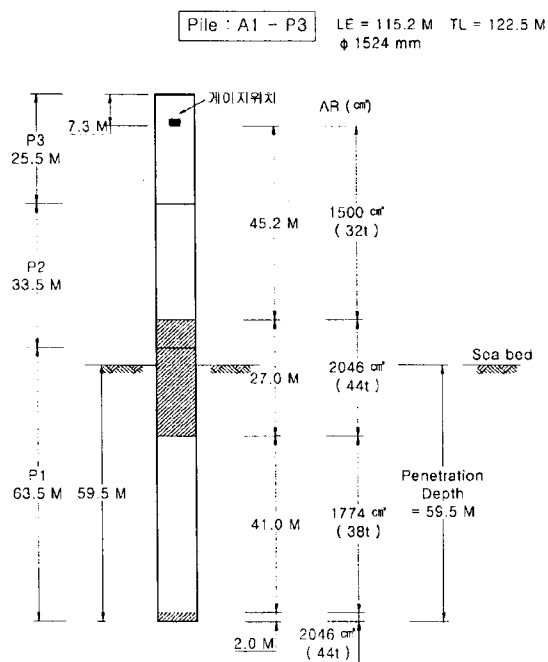
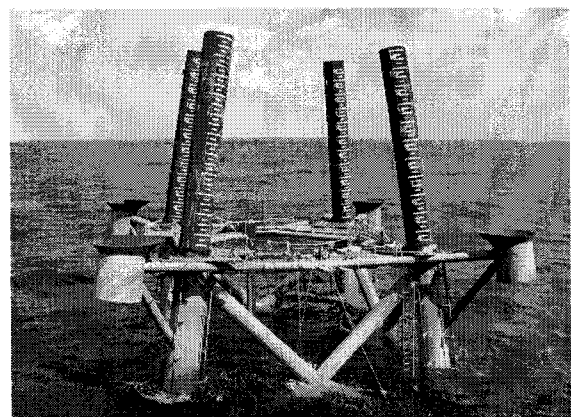


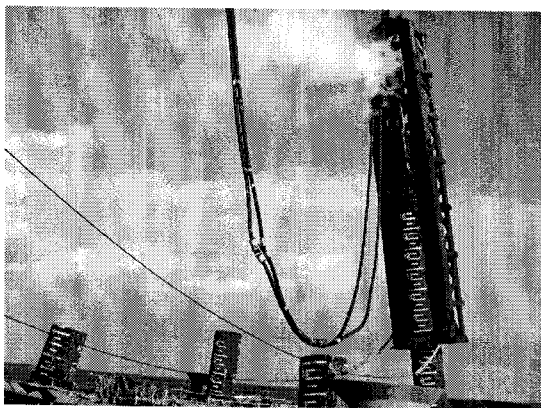
Fig. 4. Case of section profile of test pile (A1-P3).



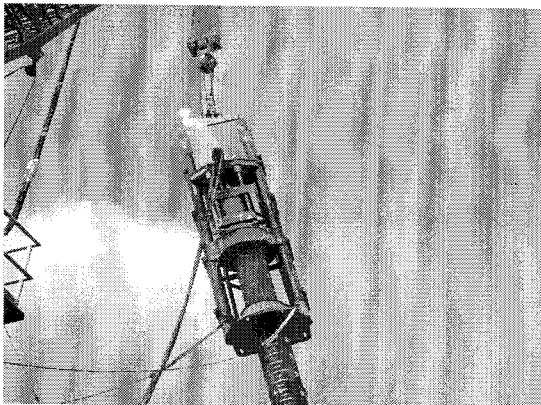
Pic. 2. Site view of inserted pipe pile.

Table 2. Specification of hammers.

| 해머의 종류 | 단위 | VUL-360 | VUL-560 | MRBS-4600 |
|--------------|-------|--------------------|--------------------|-----------------|
| rated energy | kN-m | 245.0 | 425.0 | 690.0 |
| 램(ram)의 무게 | kN | 266.9 | 278.0 | 451.0 |
| 말뚝 캡(cap) 무게 | kN | 142.4 | 192.0 | 265.22 |
| 해머의 효율 | % | 75 | 75 | 75 |
| 쿠션재료 | | Micarta & Aluminum | Micarta & Aluminum | bongossi + wood |
| 쿠션 스프링값 | kN/mm | 3032.0 | 3032.0 | 15689.0 |
| 쿠션 반발계수 | | 0.80 | 0.80 | 0.75 |
| 비고 | | 미적용 | 초기항타시 적용 1대 | 최종항타시 적용 2대 |



Pic. 3. Pile driving (VUL-560).



Pic. 4. Pile driving (MRBS-4600).

VULCAN과 MRBS 기종의 증기해머(Steam hammer)를 사용하였으며 해머 종류별 특성은 Table 2와 같다. Table 2에 제시한 특성치 중 쿠션재료 및 해머의 효율은 시공여건에 따라 변화될 수 있으나 제작사에서 제시한 사양을 나타냈다. VUL-560 해머(Pic. 3)는 말뚝의 초기 항타시(P1 및 P2 말뚝)에 사용하였고, MRBS-4600 해머(Pic. 4)는 최종항타(P3 말뚝)에 사용하였다.

4. 동재하시험(Dynamic Pile Monitoring)

동재하시험은 미국 PDI사에서 제작한 PDA(Pile Driving Analyzer)를 사용하였다. 동재하시험은 세부적으로 구분하여 부동단면을 갖는 자켓구조물의 주말뚝(main pile) 4본에 대하여 Table 3과 같이 항타과정 및 시간경과 후의 재항타함으로써 말뚝의 항타 관입성 모니터링, 장비의 효율, 말뚝재료의 건전성, 그리고 최종적 말뚝지지력을 측정함으로써 설계시의 예측값과 비교하고 설계하중의 만족여부를 판정코자 수행하였다. 동재하시험에 대한 자세한 측정일자, 사용장비 및 계측결과에 대한 내용은 (주)백경지앤씨(2002)의 보고서에 자세히 기술했다. 본 논문에서는 시공시 계측결과와 설계시 예측결과를 상호 비교하여 이어도 말뚝기초 구조물의 시공성을 분석하였다. 그리고 동재하시험에 사용되는 이론적 근거는 파동방정식이며 파동이론이 말뚝의 지지력 예측에 이용되는 수학적 전개과정과 이에 대한 이론적 설명은 Lee(1988)의 논문에서 자세히 설명되어 있다.

Table 3의 EOID(End Of Initial Drive)시험은 항타 과정에서 실시하는 동재하시험으로 말뚝의 관입성, 장비의 적정성 및 항타 당시의 지지력을 측정기 위해 시행하는 시험이며, 재항타(restrike)시험은 지지력의 시간경과효과(Set-up effect)를 확인하고 최종적인 지지력을 평가하기 위해 시행하는 시험을 의미한다.

4.1 항타관입성 해석

말뚝을 항타하는 과정에서 실시한 PDA측정결과를 관입깊이나 항타수에 대하여 항타응력(압축), 지지력, 단위 깊이당 항타수(BLC: Blow Count), 항타에너지 등을 검토하면 항타장비의 적정성이나 지반조건에 대한 말뚝 관입성, 말뚝재료의 건전도 등을 파악할 수 있다. 이 같은 해석을 PDAPLOT 프로그램을 사용하여 측정된 Table 4의 항목을 관입깊이(Penetration)나 항타수(Blow Count Number)와의 관계로 나타내는 도식화된 프로그램을 사용하여

Table 3. Test piles and testing conditions.

| 시험번호 | 말뚝종류 | 시공방법 | 시험방법 | 시공일자 | 시공 및 시험조건 |
|--------|--------------------------------------|----------------------------------|----------|--------------|---|
| A2-P2 | Φ1524 부등단면 PILE (Fig. 4 참조) | VUL-560 steam hammer 직항타 | - | 2002. 10. 9 | 낙하고0.5-1.1 M범위로 12m~38.5 m까지 시공하는 전과정에서 PDA 시험. |
| B1-P2 | | | - | 2002. 10. 12 | 낙하고0.5-1.1 M범위로 12.25 m~46.0 m까지 시공하는 전과정에서 PDA 시험. |
| A1-P3 | | MRBS 4600 steam hammer 직항타 | Eoid | 2002. 10. 12 | 낙하고0.5-1.1 M범위로 46.5 m부터 최종관입량 2.5-3.0 mm로 시공하는 전과정에서 PDA 시험, 최종관입깊이=59.5 m |
| A1-P3R | | | Restrike | 2002. 10. 14 | 시공후 2일 경과조건에서 말뚝의 set-up 효과 확인 |
| A2-P3 | | | Eoid | 2002. 10. 12 | 낙하고0.5-1.1 M범위로 46.5 m부터 최종관입량 2.5-3.0 mm로 시공하는 전과정에서 PDA 시험, 최종관입깊이=61.5 m |
| B1-P3 | | | | 2002. 10. 13 | 낙하고0.5-1.1 M범위로 46.5 m부터 최종관입량 2.5-3.0 mm로 시공하는 전과정에서 PDA 시험, 최종관입깊이=60.5 m |
| B2-P3 | | | | 2002. 10. 12 | 낙하고0.5-1.1 M범위로 46 m부터 최종관입량 2.5-3.0 mm로 시공하는 전과정에서 PDA 시험, 최종관입깊이=62.5 m |

Table 4. PDA output quantities.

| 출력치 | 내용 |
|-----------|---------------------------------------|
| CSX(CSB) | Gauge 위치(선단)에서의 최대 압축 응력 |
| EMX | Gauge 위치에서의 최대 항타 에너지 |
| FVP | 측정파형의 비례성(Proportionality) 정도 파악 |
| BLC | Blow Count로서 단위관입깊이당 타격수 |
| RMX (RX#) | Case방법에 의한 최대 정적 극한 지지력(RMX w/jc=0.#) |
| RSU | Case방법에 의한 극한 지지력(Long pile에 적용) |

수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

항타 개요

Jacket 구조물에 P1 말뚝을 삽입하고 5 m정도 인양 후, 자유 낙하하여 말뚝이 해저지반에 2.5~3.5 m정도 관입되도록 한 후, 말뚝 P1, P2를 Vul-560 해머로 항타하고, P3는 MRBS-4600 해머로 시공하였다. 이 때 말뚝에 표시된 25 cm 간격마다 항타수(Blow count)를 기록하였다. 그 결과를 Fig. 5 및 Fig. 6에 도시하였다. API-RP-2A-WSD의 추천값은 300 blows/ft(BPF)이며, 본 항타 관리 시에도 이 값을 적용하였으며, A1-P1 Pile Driving시 해저면 침도 기준 7.3~8.8 m에서, B2-P1 Pile Driving시 해저면 침도 기준 (-)6.4~(-)12.3 m에서 Run-down이 발생하였다.

해저면 기준 (-)45~(-)46 m에서 Blow-count가 증가하고 다시 감소하는 이유는 Vul-560에서 MRBS-4600해머로 교체시 경과된 시간과 말뚝 이음에 소요된 시간에 기인한 것으로 판단되며, 해머의 에너지 효율은 타격 초기에는 타격빈도가 분당 50-70회에 효율이 높으나, 타격 시간이 경과할수록 타격빈도가 분당 약 30회 전후로 타격력 또한 현저히 낮아지는 것으로 나타났다. 말뚝 선단이 해저면 기준 (-)60 m 이후에 MRBS-4600 해머로 타격시 말뚝

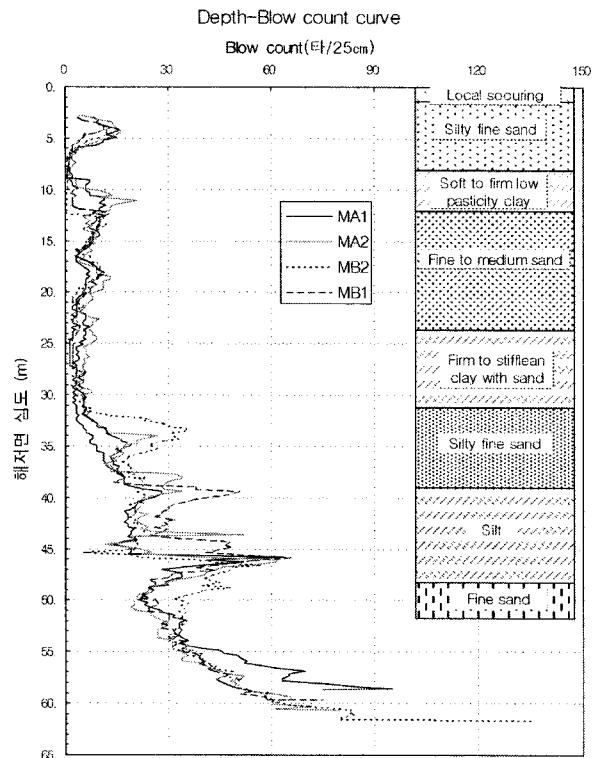


Fig. 5. Penetration depth - blow count curve.

의 항타응력은 관리한계 이내로서 쿠션재가 파손되는 상황이 속출하였으며, Set value가 2 mm로 격감되었다.

항타장비의 성능

본 건 P3 segment pile 연결 후 항타에 사용한 해머는 스틸해머인 MRBS-4600으로서 해머 제작사에서 제공하는 사양에 의하면 최대 낙하고는 1.5 m이며, 정격 항타에

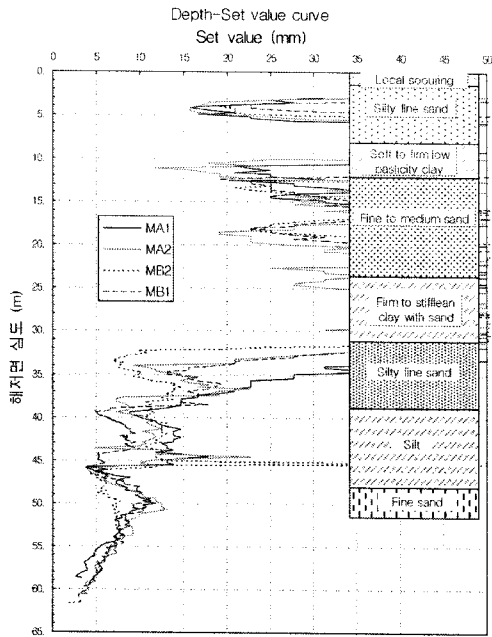


Fig. 6. Penetration depth - set value curve.

Table 5. Measured mean driving energy & efficiency of energy transfer.

| 시험말뚝 번호 | ① 평균 항타에너지 (ton-m) | ② 효율 (① ÷ 69.0 × 100) (%) | 비고 |
|------------|--------------------------|---------------------------------|----|
| A1-P3 | 35.84 | 51.9 | |
| A2-P3 | 40.42 | 58.6 | |
| B1-P3 | 38.88 | 56.3 | |
| B2-P3 | 34.67 | 50.2 | |

너지(Rated striking energy)는 69 ton-m이다. 항타장비의 성능(효율)은 주어진 낙하고 조건에서 측정된 항타에너지(EMX)를 이론적인 정격 항타에너지와 비교함으로써 효율을 평가할 수 있다. 본 시험말뚝들의 항타시 측정된 평균 항타에너지(Table 5)를 정격 타격에너지와 비교한 결과, 최소 50.2%, 최대 58.6%, 평균 54.3%의 항타에너지 전달 효율을 보이는 것으로 나타났다. 항타에너지는 최종 관입

깊이까지 항타하는 동안 측정/저장된 매 blow의 에너지를 PDAPLOT 프로그램상의 수치자료를 평균하여 산정하였다.

항타관입성 분석

항타관입성(Drivability)은 앞서 기술한 PDAPLOT 프로그램을 이용하였으며, 그 결과를 시험말뚝별로 검토하였다. 각 말뚝에 대한 관입성분석에 앞서 PDA를 이용하여 측정된 각 항목 중 항타시 말뚝의 건전도(Integrity)와 측정파형의 기본적 품질을 평가할 수 있는 말뚝머리부와 선단에서의 압축타격응력(CSX, CSB), 측정된 Force Wave 와 Velocity Wave 초기 비례성을 평가하는 FVP의 평균값을 정리하면 Table 6과 같다. Table 6에서 볼 수 있는 바와 같이 말뚝 머리부(게이지 위치)의 압축타격응력은 허용값(0.9σ_v=2.16 t/cm²)과 비교할 때 최대값을 기준으로 75% 내외에 불과하여 과잉항타응력(over stress)에 의한 말뚝손상은 없는 것으로 평가되었다.

선단부에서의 항타응력(CSB)은 더욱 작아 말뚝선단부의 손상우려는 전혀 없을 것으로 판단된다. CSB는 말뚝 선단이 매우 견고한 지반이나 암반층에 도달하고 주변마찰저항이 적을 경우 이론적으로 CSX보다도 최대 2배까지 크게 측정될 수 있다. 본 건 시험말뚝들의 결과로 볼 때 말뚝선단은 전술한 바와 같은 암반이나 매우 견고한 층 대신 상대적으로 견고하지 않는 지층에 위치하는 것으로 판단되며 주변마찰력의 저항으로 인한 감소효과도 예상된다. 한편 측정된 힘파(Force wave)와 속도파(Velocity wave)는 초기 첨두값(Peak value)까지 비례적인 거동을 보여야 측정 데이터의 기본적인 품질이 확보된다고 볼 수 있는데, Table 6에서와 같이 평균적으로 95%에 해당하여 기본적인 데이터의 품질은 확보되었다고 판단된다.

시험말뚝별 Drivability

Figs. 7~10까지는 시험말뚝별로 Table 4의 측정 데이터를 PDAPLOT 프로그램을 이용하여 도시하였다.

Figs. 7~10까지 도시한 데이터는 P3 pile segment를 최종적으로 용접 이음한 후 최종 근입심도까지 관입하는 과정에서 측정된 PDA data를 이용한 것이다. 이 그림으로부터 알 수 있는 사항은 다음과 같다.

Table 6. Measured maximum compression stress at pile head & tip.

| 시험말뚝 번호 | CSX (ton/m ²) | | | CSB (ton/m ²) | | | FVP | | | 비고 |
|------------|---------------------------|------|------|---------------------------|------|------|------|------|------|----|
| | 최소 | 최대 | 평균 | 최소 | 최대 | 평균 | 최소 | 최대 | 평균 | |
| A1-P3 | 1.06 | 1.56 | 1.28 | 0.18 | 0.94 | 0.56 | 0.78 | 1.09 | 0.93 | |
| A2-P3 | 0.94 | 1.54 | 1.42 | 0.11 | 0.88 | 0.65 | 0.94 | 1.11 | 0.99 | |
| B1-P3 | 1.13 | 1.60 | 1.33 | 0.32 | 1.02 | 0.60 | 0.94 | 1.00 | 0.96 | |
| B2-P3 | 1.00 | 1.52 | 1.34 | 0.47 | 0.96 | 0.73 | 0.81 | 1.03 | 0.95 | |

Note: CSX: Compression Stress Maximum, CSB: Computed Stress at Bottom, FVP: Proportionality(ratio)

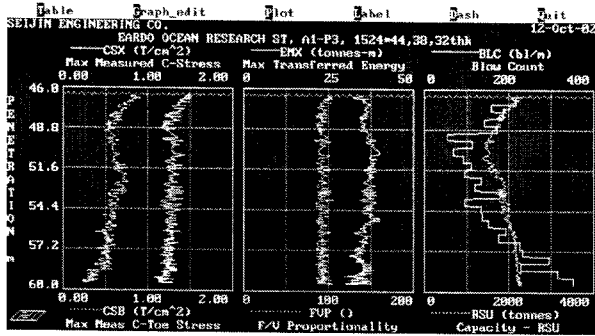


Fig. 7. Variations of driving stress, energy, bearing capacity with penetration depth (A1-P3).

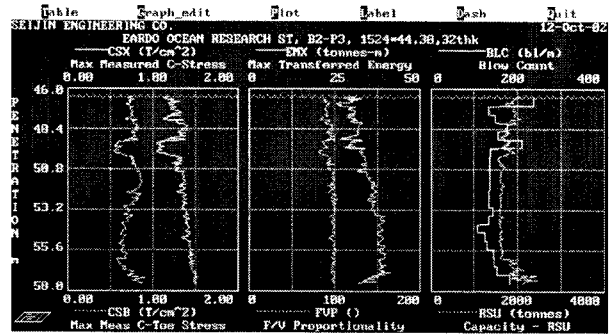


Fig. 10. Variations of driving stress, energy, bearing capacity with penetration depth (B2-P3).

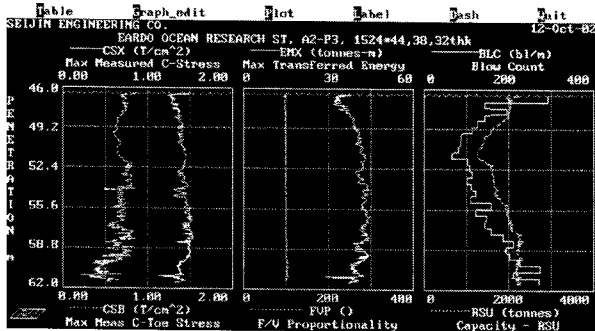


Fig. 8. Variations of driving stress, energy, bearing capacity with penetration depth (A2-P3).

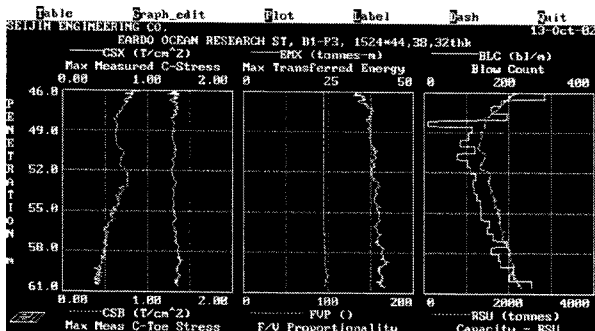


Fig. 9. Variations of driving stress, energy, bearing capacity with penetration depth (B1-P3).

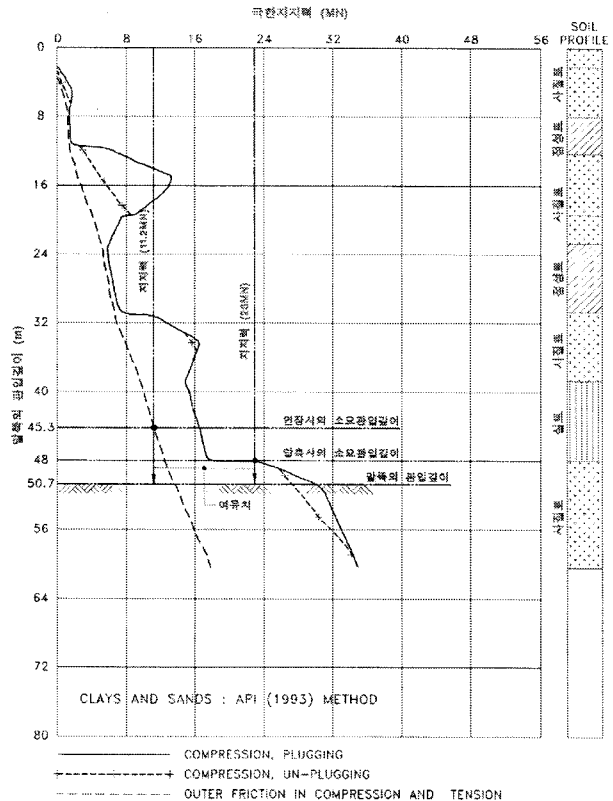


Fig. 11. Estimation of penetration depth of main pile (해양수산부 보고서 2002).

- 관입심도 46 m 전후에서 유사한 조건으로 항타와 측정이 시작되었으며 최종관입깊이는 59.5~62.5 m 범위로 각 말뚝마다 상이한 것으로 나타났다.
- 그림에서 간이계산법으로 산정된 지지력인 RSU의 깊이별 양상을 살펴보면 초기보다 깊이가 증가할수록 감소하다가 다시 증가하는 현상을 보이고 있는데 이는 46 m 전후의 지지력이 그 하부보다 작아서 나타나는 현상이기보다는 마지막 말뚝을 용접하기 위해 항타시

- 간이 지체되면서 지반지지력의 Set-up 현상에 의해 관입저항과 지지력이 발휘되는 과정에서 초래된 것으로 판단된다. 연속적인 항타가 이루어졌을 경우 관입깊이 따른 지지력의 발휘현상은 깊이에 비례할 것으로 추정된다.
- 50 m를 전후한 깊이에서 상대적으로 작은 지지력이 나타나는 현상으로 나타났는데 지반조사보고서상의 실트층과 사질토층의 전이부분이라는 점으로 미루어

볼 때 시험결과와 조사결과가 양호하게 일치하는 결과라고 판단된다.

- 타격에 의해 발생하는 압축응력은 깊이에 따른 변화경향이 적은 것으로 나타났으며, 항타에너지의 경우 비교적 일정한 경향을 보이고 있어 항타도중 해머의 효율은 일정한 값으로 유지된 것으로 판단된다.
- 항타에너지가 깊이에 따라 유사한 조건에서 관입 깊이가 증가하면서 비례적으로 지지력이 증가하는 현상으로 나타난 것을 볼 때 주면마찰력과 선단저항이 일정하게 발휘되는 유사한 밀도의 지층이 분포하는 것으로 추정된다.
- Fig. 10에서 알 수 있는 것은 측정 깊이에 따른 지지력 변화가 Fig. 11의 정역학적 공식을 이용하여 추정된 결과와 비교할 때, 지지력의 증가 경향은 서로 유사하나 지지력의 크기는 추정치보다 PDA로 측정된 값이 작은 것으로 나타났다.

4.2 말뚝의 지지력 해석

측정된 PDA data중 CASE 지지력(RMX, RSU 등)은 간이 계산방법에 의한 개략적인 지지력이므로 보다 정확한 지지력의 크기와 성분을 분석하기 위해 CAPWAP (CAse Pile Wave Analysis Program) 해석을 수행하였으며 시험말뚝별 결과를 Table 7에 나타내었다.

- Table 7에 나타난 지지력은 최종관입심도에 도달하여 항타를 종료한 시점에서 측정된 blow를 선정하여 CAPWAP 프로그램으로 분석한 결과로서, 관입심도가 다소 차이가 있으나 관입심도에 대한 지지력이 반드시 비례하지 않는 것으로 해석되고 있다. 이는 지반 조건의 불균질성에서 기인하는 결과라고 추정되며, 항타종료시의 종료기준(최종관입량, mm/타격)을 동일하게 설정하였을 경우 예상할 수 있는 결과라고 판단된다.
- A1-P3R의 시험말뚝은 시공 후 2일이 경과한 조건에서 시행한 동재하시험결과로서 주면 마찰력과 전체 지지력이 다소 증가한 결과로 측정되었다. 선단지지력의 경우는 시험시 가한 타격에너지가 주면마찰력 mobi-

- lization에 소요됨으로써 EOID에 비해 약간 작게 측정되었으나 이 차이는 미미하므로 소위 relaxation 현상에 의한 지지력 연화현상은 아닌 것으로 판단되며, 지지력 증가효과(set-up)를 충분히 발휘하기에는 부족한 시간적 조건과 전체지지력의 full mobilization에 필요한 항타에너지 부족에 기인하는 것으로 판단된다.
- 이상의 해석결과는 설계하중과 비교·평가하여야 하

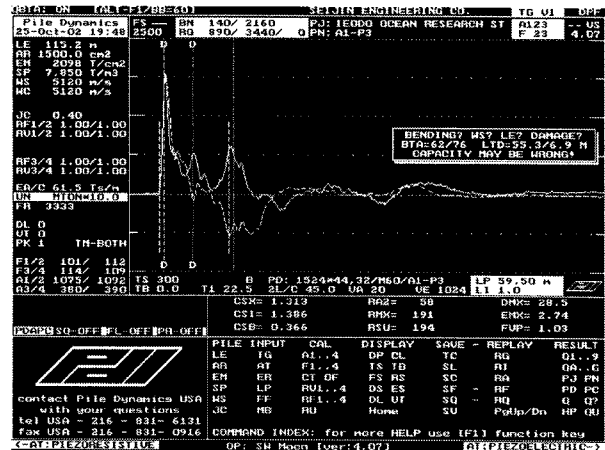


Fig. 12. Normal data analysis screen of PDA (A1-P3).

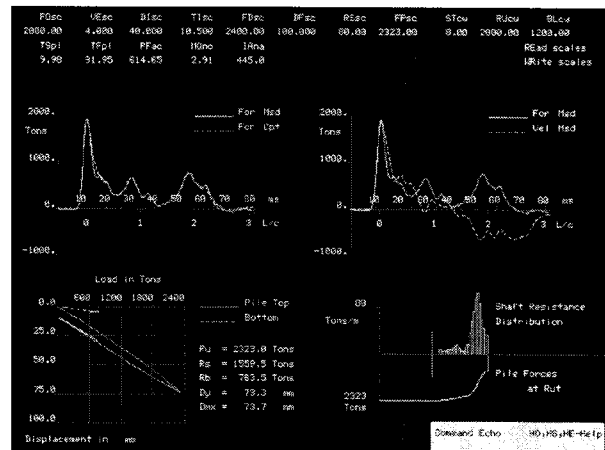


Fig. 13. CAPWAP output plot case (A1-P3).

Table 7. Analysis of pile bearing capacity (CAPWAP).

| 구분 | CAPWAP Capacity (ton) | 관입깊이 | | | 비고 |
|--------|-----------------------|--------|-------|--------|--|
| | | 주면마찰력 | 선단지지력 | 전체지지력 | |
| A1-P3 | EOID | 1559.5 | 763.5 | 2323.0 | 해석 Blow의 PDA화면출력과 CAPWAP PLOT의 예를 A1-P3말뚝에 대하여 각각 Fig. 12 및 Fig. 13에 예시함 |
| A1-P3R | RSTR | 1585.9 | 761.1 | 2347.0 | |
| A2-P3 | | 1517.4 | 893.1 | 2410.5 | |
| B1-P3 | EOID | 1620.5 | 769.2 | 2389.8 | |
| B2-P3 | | 1612.4 | 759.9 | 2372.3 | |

note) RSTR : Restrike Test, EOID : End Of Initial Drive

Table 8. Maximum ultimate reaction for main pile (해양수산부 보고서 2002).

| 말뚝머리 | 환경조건 | 하중유형 | 하중조건 | 말뚝머리반력 (kN) | 극한말뚝머리 반력(kN) | 최대극한반력 (MN) |
|------|--------------------|------|---------|-------------|---------------|-------------|
| 101 | 태풍시 조건 (S.F = 1.5) | 압축 | LC # 59 | 14520.5 | 21780.7 | |
| | | 인장 | LC # 63 | -8961.5 | -13442.3 | |
| 102 | 태풍시 조건 (S.F = 1.5) | 압축 | LC # 57 | 15036.7 | 22555.0 | 22.56 |
| | | 인장 | LC # 69 | -9534.7 | -14302.0 | |
| 103 | 태풍시 조건 (S.F = 1.5) | 압축 | LC # 55 | 14008.9 | 21013.3 | |
| | | 인장 | LC # 67 | -9281.6 | -13922.4 | |
| 104 | 태풍시 조건 (S.F = 1.5) | 압축 | LC # 62 | 10625.6 | 15938.3 | |
| | | 인장 | LC # 65 | -9690.2 | -14535.2 | |

는 바 Table 8의 최대극한반력(해양수산부 2002)과 비교하면 태풍시(SF=1.5)의 최대극한압축반력인 22.56 MN(≒2302 ton)은 전체지지력으로, 최대극한인장반력인 13.92 MN(≒1420 ton)은 주변마찰력으로 각각 공히 만족하는 것으로 해석되었다.

- Table 7의 해석 지지력은 항타종료시점의 지지력으로 서 A1-P3R 시험말뚝과 같은 시간경과에 따른 지지력 증가효과가 고려될 때 상기의 값은 최소지지력이라고 판단된다.

4.3 설계시 지지력과 동적해석 결과와 비교

설계단계에서 수행한 동적해석인 WEAP(Wave Equa-

tion Analysis for Pile Driving: GRL Associate Inc., 1996) 분석결과와 본 시험결과를 비교하여 예측과 실측결과 간의 상관성을 평가해보면 다음과 같다. Table 9는 설계시 수행한 “2001 이어도 종합해양과학기지 보고서” 중 말뚝의 설계 및 항타해석(해양수산부, 2002)의 WEAP 해석결과로서 시험결과와 비교하였다.

Table 9의 51.0 m 관입조건, 해머효율 65%, 해머종류 M4600(MRBS 4600, 시험당시 사용해머)에서의 지지력은 3010.2 ton(=29500 kN), 압축타격응력은 184.63 MPa(=1.881 ton/cm²)등으로 해석되었는데 이를 전술한 Table 6, 7의 값과 비교하면 Table 10과 같다.

- Table 10에서 보듯이 소요의 설계지지력을 충족하는

Table 9. Analysis of WEAP results for main pile (Φ1524 mm).

| Depth (m) | Hammer | Hammer Efficiency (%) | Ru @1000 bl/m (kN) | Maximum Compressive stress (Mpa) | Remarks |
|-----------|--------|-----------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 16.0 | V-560 | 65 | 25500.0 | 165.42 | P1+P2 drive |
| | | 75 | 27500.0 | 178.73 | |
| 34.0 | V-560 | 65 | 24500.0 | 133.07 | P1+P2 drive |
| | | 75 | 26000.0 | 142.72 | |
| 45.0 | V-560 | 65 | 24000.0 | 133.05 | P1+P2 end of drive |
| | | 75 | 26000.0 | 142.68 | |
| 45.0 | V 560 | 65 | 24000.0 | 133.00 | P1+P2+P3 start of drive |
| | | 75 | 26000.0 | 142.70 | |
| | M 4600 | 65 | 29500.0 | 183.70 | P1+P2+P3 start of drive |
| | | 75 | 32000.0 | 197.16 | |
| 51.0 | V 560 | 65 | 24000.0 | 132.61 | Planned drive case |
| | | 75 | 26000.0 | 142.28 | |
| | M 4600 | 65 | 29500.0 | 184.63 | Planned drive case |
| | | 75 | 32000.0 | 197.87 | |
| 48.0 | M 4600 | 80 | 35000.0 | 232.47 | Under drive case |
| 66.0 | M 4600 | 65 | 29500.0 | 184.04 | Over drive case |
| | | 75 | 32000.0 | 197.40 | |

Table 10. Comparison of the measured data with WEAP analysis.

| 구분 | 관입깊이(m) | 사용해머 | 압축항타응력 | 지지력 | 항타에너지(ton-m) |
|-----------------------------|-----------|-----------|---|--------------------------|------------------------|
| WEAP해석 보고서 (해양수산부, 2002) | 51.0 | MRBS 4600 | 184.63 MPa (=1.881 ton/cm ²) | 3010.2ton (=29500 kN) | 효율 65%적용 해석 결과: 약37 |
| 측정 결과 (Table 6, 7) | 59.5~62.5 | | 1.34 ton/cm ² (Table 3의 CSX 평균) | 2323.0~2410.0 ton | 34.67~40.42 |

관입심도를 51.0 m로 예측한 상태에서 해석된 WEAP 결과는 측정결과와 상이한 값을 보이고 있다. PDA를 통한 측정결과는 지지력의 Set-up effect가 확인되지 않아 최종지지력을 결정할 수 없으나 WEAP해석의 지지력이 큰 것으로 나타났다. 항타에너지는 거의 유사한 결과를 보이고 있으며, 항타응력의 경우도 WEAP해석 결과가 크게 해석되는 것으로 나타났다.

- WEAP 해석이 여러 가지 조건을 가정하여 항타과정을 simulation한다는 점을 고려할 때 합리적인 판단으로 사료된다. 한편, PDA를 이용한 동재하시험에서 원리는 WEAP과 동일하지만 실측한 값이라는 점을 감안할 때 신뢰도가 높은 해석결과임을 주지할 필요가 있다. 정적해석결과와 비교해보면, API-RP-2A-WSD (1993)에서 추천하는 정적해석방법(static method of analysis)으로 산정한 지지력해석 결과(전술 인용한 Fig. 11 참조)는 지층 깊이에 따른 지지력의 변화경향은 측정된 결과와 유사하나 그 절대값은 측정값보다 큰 것으로 해석되었다. 이는 동재하시험결과가 set-up effect를 충분히 확인하지 않은 상태임을 감안할 때 관입깊이를 51.0 m로 선정한 결과만을 기준으로 비교하면 상대적으로 과대평가한 것으로 판단된다.

5. 결론 및 토의

이어도 종합해양과학기지의 자켓구조물에 대한 말뚝기초의 항타관입성 모니터링을 PDA를 이용하여 말뚝항타 시공이 성공적으로 수행됨을 확인하였다. 그리고 육상 항타시공에서 접하기 어려운 스티트해머를 사용하여 대구경 강관말뚝의 해상 항타시스템 성능 및 기초지지력 등을 분석한 연구결과는 다음과 같다.

1) 최종관입 깊이까지 항타하는 동안 측정된 매 타격 에너지를 PDAPLOT 프로그램상의 수치자료로 말뚝의 항타 시공성 분석(Drivability analysis)한 결과, MRBS-4600의 평균 항타에너지는 34.67~40.42 ton-m로 나타나 에너지 전달효율은 최소 50.2%, 최대 58.6%, 평균 54.3%로 나타났다. 그리고 말뚝머리부(게이지 위치)의 압축 타격응력은 허용값($0.9\sigma_y=2.16 \text{ ton/m}^2$)과 비교할 때 최대값 기준 75% 내외로 과잉항타응력(over stress)에 의한 말뚝 손상은 전혀 없는 것으로 판단되었다.

2) 시험말뚝 A1-P3R은 시공 후 2일이 경과하여 시행한 동재하시험 결과는 시간효과로 인하여 주면 마찰력과 전체 지지력이 다소 증가한 결과로 측정되었다. 선단지지력의 경우는 시험시 가한 타격에너지가 주면마찰력이 작용(mobilization)하는데 소요됨으로써 EOID에 비해 작게 측정되었다. 그러나 그 차이는 매우 작아 지반이완(relaxation) 현상에 의한 지지력 연화현상이 그 원인이 아닌 것으로 판단되었다. 오히려 지지력 증가효과(set-up)를 충분히 발휘하기에는 부족한 시간적 제한조건과 전체지지력의 full mobilization에 필요한 항타에너지 부족에 기인하여 지지력 증가량이 작은 것으로 판단되었다.

3) 해저 50 m 깊이에서 상대적으로 작은 지지력이 나타났다. 이는 해저지반이 실트층과 사질토층의 전이부에서 발생한 것으로 판단된다. 동적시험 결과와 지반조사결과가 일치하는 결과라고 판단되며, 항타에너지가 깊이에 따라 유사한 조건에서 관입깊이가 증가하면서 비례적으로 지지력이 증가하는 현상으로 나타난 것을 볼 때 주면마찰력과 선단저항이 일정하게 발휘되는 유사한 밀도의 지층이 분포하는 것으로 추정된다.

4) 동적해석 결과와 설계하중을 상호 검토하면, 2002년도 해양수산부 보고서에서 제시된 "Maximum ultimate reaction for main pile"과 비교하여 태풍시(SF=1.5)의 최대극한압축반력인 22.56 MN(=2302 ton)은 전체지지력으로, 최대극한인장반력인 13.92 MN(=1420 ton)은 주면마찰력으로 각각 만족하는 것으로 해석되어 해양기초말뚝의 시공으로 안전한 것으로 판단되었다.

참고문헌

(주)백경지엔씨. 2002. 이어도 종합해양과학기지 Pile Monitoring 보고서.
 심재설, 윤길림, 권오순. 1999. Geotechnical Characterization of the Ieodo for offshore pile foundation design. 한국지반공학회 논문집, 15(5), 141-156.
 정대교, 심재설. 2001. 이어도(소코트라마초)의 생성과 진화. 대한지질학회지, 37(4), 537-548.
 해양수산부(MOMAF). 2002. 2001 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서.
 API. 1993. Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platform. API Recom-

- mended Practice 2A-WSD (RP-2A-WSD), Washington, D.C.
- Lee, S.L., Y.K. Chow, G.P. Karunaratne, and K.Y. Wong. 1988. Rational wave equation model for pile-driving analysis. *J. Geotech. Eng.*, ASCE, 114, 306-325.
- GRL Associate, Inc. 1996. GRLWEAP User Manual, USA.
- O'Neill, M.W. 1993. Group Action in Offshore Piles. *Proc. Conf. Geotech. Practice in Offshore Eng.*, Austin, USA, 25-64.
- Pile Dynamics, Inc. 1993. PDA User Manual. USA.
-

Received Jul. 4, 2003

Revised Aug. 20, 2003

Accepted Nov. 17, 2003