

파일 항타진동이 인접 비탈면에 미치는 영향

Influence of Pile Driving-Induced Vibration on the Adjacent Slope

곽 창 원¹ Kwak, Chang-Won

Abstract

A pile is a structural element that is used to transfer external loads from superstructures and has been widely utilized in construction fields all over the world. The method of installing a pile into the ground should be selected based on geotechnical conditions, location, site status, environmental factors, and construction costs, among others. It can be divided into two types: direct hammering and preboring. The direct hammering method installs a pile into the bearing layer, such as rock, using a few types of hammer, generating a considerable amount of pile driving-induced vibration. The vibration from pile driving influences adjacent structures and the ground; therefore, quantitatively investigating the effects of vibration is inevitably required. In this study, two-dimensional dynamic numerical modeling and analysis are performed using the finite difference method to investigate the influence on the adjacent slope, including temporary supporting system. Time-dependent loading induced by pile driving is estimated and used in the numerical analysis. Consequently, large surface displacement is estimated due to surface waves and less wave deflection, and refraction at the surface. The total displacement decreases with the increase of the distance from the source. However, lateral displacement at the top of the slope shows a larger value than vertical displacement, and the overall displacement tends to be concentrated near the face of the slope.

요 지

말뚝은 상부 구조물의 하중을 지지층으로 전달하는 구조체로 국내외 건설 현장에서 널리 사용되고 있다. 말뚝을 시공하는 방법은 지반조건, 시공위치, 주변현황, 환경적 요소, 공사비 등을 종합적으로 고려하여 결정하며 크게 직항타에 의한 타입방식과 선굴착 후 경타 또는 항타하는 방식으로 나눌 수 있다. 이 중 직항타는 말뚝 두부를 해머로 항타하여 원지반 내 소정의 심도까지 근입시키므로 항타 시 가해지는 에너지가 크고 이에 따른 항타진동 및 소음도 증가한다. 말뚝의 항타진동은 주변 시설물 및 지반에 영향을 미치므로 그 영향을 정량적으로 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 말뚝의 항타진동을 시간영역에서 산정하고, 직항타 시 말뚝과 인접하여 위치한 굴착면 및 가시설에 대하여 항타진동에 의한 영향을 유한차분해석법에 의한 2차원 동적수치해석을 통하여 분석하였다. 그 결과 파의 반사 및 재료감쇠가 적은 지표면에서 표면파에 의하여 지중보다 변위가 현저히 크게 발생하는 경향을 나타내었고 전체 변위 크기는 이격거리 증가에 따라 감소하나 수평방향 변위는 진동원과 먼 사면 상단부에서 연직방향 대비 더 큰 값을 보이며 법면부에 변위가 집중적으로 발생하는 특징을 확인하였다.

Keywords : Dynamic numerical modeling, Finite difference method, Pile driving, Slope, Vibration

¹ 정희원, 인하공업전문대학 건설환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environmental Engineering, Inha Technical College, Tel: +82-32-870-2233 Fax: +82-32-870-2510, geotech@inhatec.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 11월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

말뚝(pile)은 기초 지반의 부족한 지지력을 확보하기 위하여 상부 구조물의 하중을 지지층으로 전달하는 구조체로 국내외 건설 현장에서 널리 사용되고 있다. 이러한 말뚝을 시공할 때 지반조건, 시공위치, 시공장비의 규모, 인접 구조물 또는 건축물 현황, 소음 및 진동과 같은 환경적 요소, 공사비, 공사기간 등을 종합적으로 고려하여 지반 내로 근입하는 방법을 결정하게 된다. 지반 내로 근입하는 방법은 크게 직항타에 의한 타입방식과 선굴착 후 경타 또는 항타하는 방식으로 나눌 수 있다. 이중 주변에 민원 또는 진동 예민 구조물이 없는 경우 경제성과 시공성이 우수한 직항타 공법을 주로 사용하게 된다. 직항타 공법은 일정 규격을 가진 항타기로 말뚝 두부를 직접적으로 타격하여 그 에너지로 말뚝을 지중에 근입시키므로 선굴착 공법에 비해 항타 에너지가 크고 이에 따른 항타진동 및 소음도 증가하므로 이러한 항타진동으로 인하여 주변 시설물 또는 구조물은 손상을 입게 된다(Hindmarsh et al., 2018; Rahman et al., 2017). 예를 들어 설치하고자 하는 구조물의 기초가 말뚝이며 지하공간이 존재하여 지반굴착이 필요하다면 굴착으로 인하여 형성되는 비탈면 및 흩막이 가시설에 말뚝 항타 진동이 영향을 미치게 되므로 이에 대한 사전 영향 검토가 필요하다. 즉 말뚝을 항타하기 전 항타진동에 의한 영향을 검토하여 진동으로 인한 인접 지반 및 구조물의 영향을 검토하여 진동으로 인한 피해를 사전에 예방하는 것이 중요하다. 이를 위하여 항타진동의 특성을 파악하고 유발될 수 있는 진동의 최대치를 예측하여야 한다.

말뚝 항타로 인한 지반진동은 말뚝 항타 과정에서 발생하는 여러 인자의 영향을 받은 복합적인 결과이며 주요 영향인자는 (1) 말뚝에서 지반으로 전달되는 에너지 (2) 현장 지반조건 (3) 진동원으로부터의 거리 (4) 인접 구조물 또는 건축물의 특성 등이다(Colaco et al., 2021). 따라서 항타진동은 매우 복잡한 거동 특성으로 보이므로 인하여 항타진동과 관련된 기존 연구는 대부분 경험적인 방법에 의존하고 있는 실정이다(Cleary et al., 2016; Massarsch et al., 2015). 그러나 경험적인 방법은 그 신뢰성과 적용성이 특정 지반조건이나 위치, 환경 등에 지대한 영향을 받으므로 항타진동의 근본적인 특징을 공학적으로 이해하기에 한계가 있다. 또한 현장실험이나 실내 모형실험을 이용한 방법은 시간과 비용이 과다하게 소요되는 단점이 있다(Daryaei et al., 2020). 따

라서 이러한 경험적 및 실험적 방법의 한계점을 보완하기 위하여 적용할 수 있는 대표적인 방법이 수치해석이다.

초창기의 연구로서 Ramshaw et al.(2000)은 축대칭 조건에서의 말뚝-지반 시스템을 모델링하면서 유한요소 해석법을 적용하는 방법을 제안하였다. 이를 발전시켜 Homayoun and Hamidi(2019)는 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 이용하여 경계면에서의 반사파 영향을 억제하기 위하여 경계지반 감쇠비를 점진적으로 증가시키는 인공 경계를 도입하였다. Masoumi and Degrande(2008)은 말뚝 항타에 의한 진동특성을 말뚝과의 이격 거리에 따라 수치해석에 의하여 분석하여 인접지반의 진동은 연직방향의 전단파 영향이 크고 먼 지반은 레일리파(Rayleigh wave)의 영향이 크다는 특성을 파악하였다. Daryaei et al.(2020)은 충격식 해머와 진동해머를 사용하여 모래층에 말뚝을 관입시킬 때 지반진동 특성을 항타진동수 및 진동시간에 따라 수치해석적으로 비교 분석하여 조밀한 모래층에서 진동해머 적용 시 지반다짐 효과와 말뚝 근입에 필요한 운동량이 더 적음을 확인하였다. Paik(2001)은 모래지반에서 말뚝 항타에너지의 크기가 강관말뚝의 지지력에 미치는 영향을 모형토조 실험을 통하여 파악하였다. 그 결과 타입말뚝에서는 항타에너지 증가 시 선단폐색효과의 증가로 지지력이 상승하고 유압잭에 의해 지중에 근입시키는 압입말뚝에서는 동일 조건에서 폐색효과가 더 크게 나타남을 확인하였다. Lee et al.(2007)이 모래지반에 대해 강널말뚝을 진동항타 시 계측을 통하여 항타거동을 분석하여 진동항타기(vibro-hammer)를 이용하여 말뚝 관입 시 말뚝은 강제거동을 하며 실제 말뚝 두부에 전달되는 진동하중은 이론값 대비 약 72%에 해당하는 것을 규명하였다. Kim and Chung(2007)은 대심도 연약지반에서 장대 PHC말뚝을 항타 시 항타로 인하여 증가된 점토층 내의 과잉간극수압이 소산되면서 말뚝본체 내의 부마찰력이 증가하였고 말뚝체가 받는 전체 압축력 중 약 30%가 부마찰력에 의하여 유발된 것임을 계측을 통하여 분석하였다.

이와 같은 말뚝 항타진동의 특성에 대한 연구와 더불어 항타진동 발생 시 주변 지반 및 구조물에 미치는 영향에 대한 연구도 진행되었다. Park and Chon(1989)은 디젤해머로 콘크리트 말뚝을 항타할 경우 발생하는 지반진동의 측정을 통하여 타격에너지를 산정하고 적절한 디젤해머의 제원을 제안하였다. Park(2009)은 말뚝의 항타진동을 이격거리별로 측정하고 말뚝과 근접하여 설치된 송전탑의 고유주기를 산정하여 공진여부를

검토하였다. 그 결과 말뚝의 향타진동은 이격거리 증가에 따라 감소하는 것을 확인하였고 기초 지지층인 암반의 구속효과가 공진을 억제하는 것을 입증하였다. Kwak and Kim(2000)은 유압식 해머로 말뚝 향타시 인접 건축물에 미치는 영향을 검토하기 위하여 건축물의 위치별 진동계측을 수행하고 주파수 특성을 분석하였다. 그 결과 진동원으로부터 거리가 멀어질수록 저주파 진동이 감쇠되고 건축물 상부로 갈수록 가속도 수준이 증가하는 특성을 확인하였다. Park et al.(2010)은 PRD(Percussion Rotary Drill) 공법과 SIP(Soil-cement Injected precast Pile) 공법을 대상으로 향타 시 발생하는 진동을 측정하여 이격 거리에 따른 향타진동 추정식을 제안하였다. Jayawardana et al.(2018)은 병원, 실험실 등과 같은 진동 민감 구조물에 인접하여 시공되는 말뚝의 향타진동을 억제하기 위하여 트렌치를 설치하는 방법을 제안하고 수치해석적으로 검토하였다. 그 결과 향타진동이 클수록 트렌치의 진동저감효과가 증가하였고 이는 지반의 탄성계수에 따라 큰 영향을 받으며 트렌치 내부의 채움재 강성이 약할수록 진동저감 효과가 커지는 것을 확인하였다.

이와 같이 말뚝 향타진동과 관련한 국내 연구는 주로 진동계측에 의하여 진동 추정식을 합리적으로 산정하기 위한 목적으로 수행되었고 동적 수치해석에 대한 연구는 수행된 사례가 많지 않다. 또한 비탈면과 같이 근접 향타 시 변위 발생 가능성이 높은 조건에서는 시공 전 안정성에 대한 수치해석적 검토를 우선적으로 수행하는 것이 바람직하나 역시 관련 연구 사례는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 말뚝 향타진동의 특성을 분석하고 이를 수치해석에 반영하기 위하여 향타진동하중

을 합리적으로 산정하였다. 이를 바탕으로 지반 굴착에 의해 형성된 깎기비탈면과 인접하여 말뚝을 향타할 경우 말뚝과 지반을 포함한 전체 구조물계에 대한 모델링을 수행하고 2차원 동적 수치해석을 통하여 진동속도 및 향타진동 특성을 중점적으로 고찰하였다.

2. 말뚝 향타진동

말뚝의 향타진동을 수치해석적으로 검토하기 위해서 우선적으로 향타진동하중을 산정하여야 한다. 기존 경험식(Masoumi and Degrande, 2008)에서는 향타주기에 따른 향타진동값을 산정하지 않고 해머중량 및 낙하고를 고려한 에너지값으로 산출하므로 진동하중으로서의 향타진동의 특성을 구체적으로 반영하기 어렵다. 일반적으로 향타하중은 계측에 의하여 산정하는 것이 가장 정확할 것이지만 향타에 의한 계측기의 파손, 오작동 등의 문제로 향타 지점에서 직접적인 계측이 곤란하고 대부분의 경우 인접 지반에서 계측하게 되므로(Hong and Lee, 1992) 해석적인 방법에 의하여 향타하중을 산정하는 것이 보다 합리적이다. 이 때 향타장비 특성 및 램(ram) 중량, 낙하고, 말뚝 본체 물성 등을 이용하여 향타하중 시간이력을 산정하게 되는데 본 절에서는 이를 위하여 향타하중의 기본적인 특성을 분석하고 제안식에 의하여 향타하중을 산정하였다.

2.1 향타하중의 전달

말뚝 향타하중이 주위 지반 및 구조물에 전달되는 과정은 Fig. 1과 같다. 말뚝 두부에서 해머 타격에 의하여

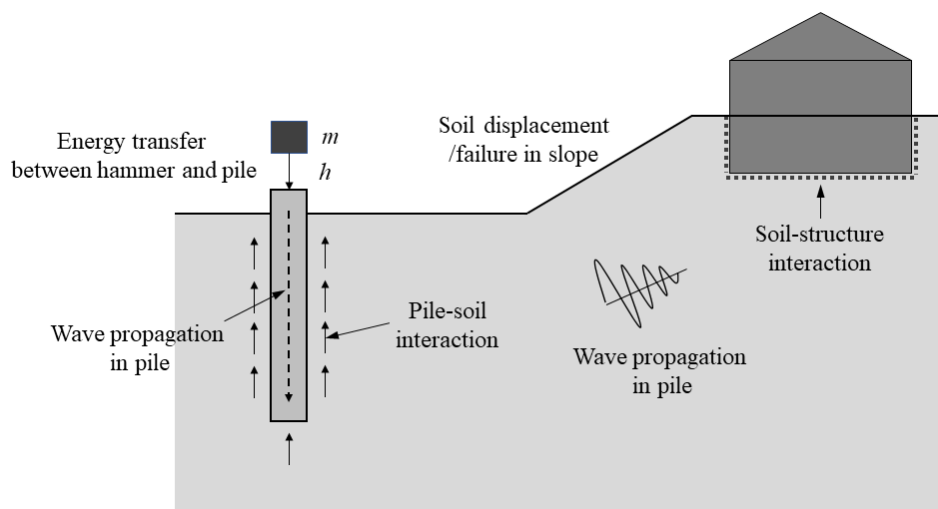


Fig. 1. Schematic diagram of the vibration transfer during pile driving

해머 중량(m)과 낙하고(h)에 의하여 생성된 운동에너지가 응력파의 형태로 말뚝 선단까지 전달된다. 이와 같이 말뚝 본체로 전달된 응력파는 말뚝-지반 접촉면에서의 상호작용에 의하여 지반으로 이동한다. 지반 내에서는 지반의 질량, 감쇠비와 같은 물리적 특성에 따라 전파되며 인접 구조물과 만나 상호작용(soil-structure interaction)에 의해 구조물로 전달된다.

Fig. 2는 지반을 통해 항타하중이 전파될 때 전파 위치 및 지반 강성에 따라 발생하는 다양한 진동파의 형태를 주변 구조물과 함께 도시하였다. 항타하중에 의한 에너지는 말뚝 주변-지반 접촉면에서 연직방향 전단파 성분이 방사방향으로 원통의 형태로 발산하고 지표면에 도달 후 일부가 굴절되어 표면파(surface wave)인 레일리파(Rayleigh wave)의 형태로 전파된다. 말뚝 선단에서는 압축파인 P파(P wave)와 전단파인 S파(S wave) 성분이 모든 방향으로 구의 형태로 발산한다. 특히 말뚝 주변면적이 증가할 경우 연직방향의 전단파 성분이 지중으로 전파되는 에너지의 대부분을 차지하게 된다(Masoumi and Degrande, 2008). 이러한 형태로 전파되는 에너지는 말뚝 하부에 굳은 층 또는 암반층이 있을 경우, 그리고 지표면에서 매질의 현저한 물성차이로 인하여 반사파가 생성되기도 한다.

말뚝 항타하중으로 발생하는 에너지는 크게 말뚝을 관입시키는 에너지, 말뚝 선단에서 반사되는 에너지 및 지반으로 전달되는 에너지로 나눌 수 있으며 이 중 지반으로 전달되는 에너지에 대한 반사 에너지의 비는 대략 2:1 로서 지반으로 전달되는 에너지의 양이 많다. 또한 지반으로 전달된 에너지가 전파될 때 지반의 밀도가 높을수록, 그리고 말뚝 임피던스(impedance, Z^p)가 낮을수록 보다 효과적으로 전파되는 특성을 보인다(Rahman et al., 2017). 여기서 말뚝 임피던스는 항타 시 속도 변화에 대한 말뚝의 저항을 의미하며 다음 식에 의하여 계산한다(Massarsch and Fellenius, 2015).

$$Z^p = A^p c^p \rho^p = \frac{E^p A^p}{c^p} \quad (1)$$

여기서, A^p 는 말뚝의 단면적(m^2), c^p 는 말뚝 내 응력파 속도(m/s), ρ^p 는 말뚝의 질량(kg/m^3), E^p 는 말뚝의 탄성계수(Pa) 이다.

2.2 항타하중의 산정

말뚝 항타 시 인접 지반 및 구조물의 응답거동을 파악하기 위하여 적절한 항타하중을 산정하는 것이 필수

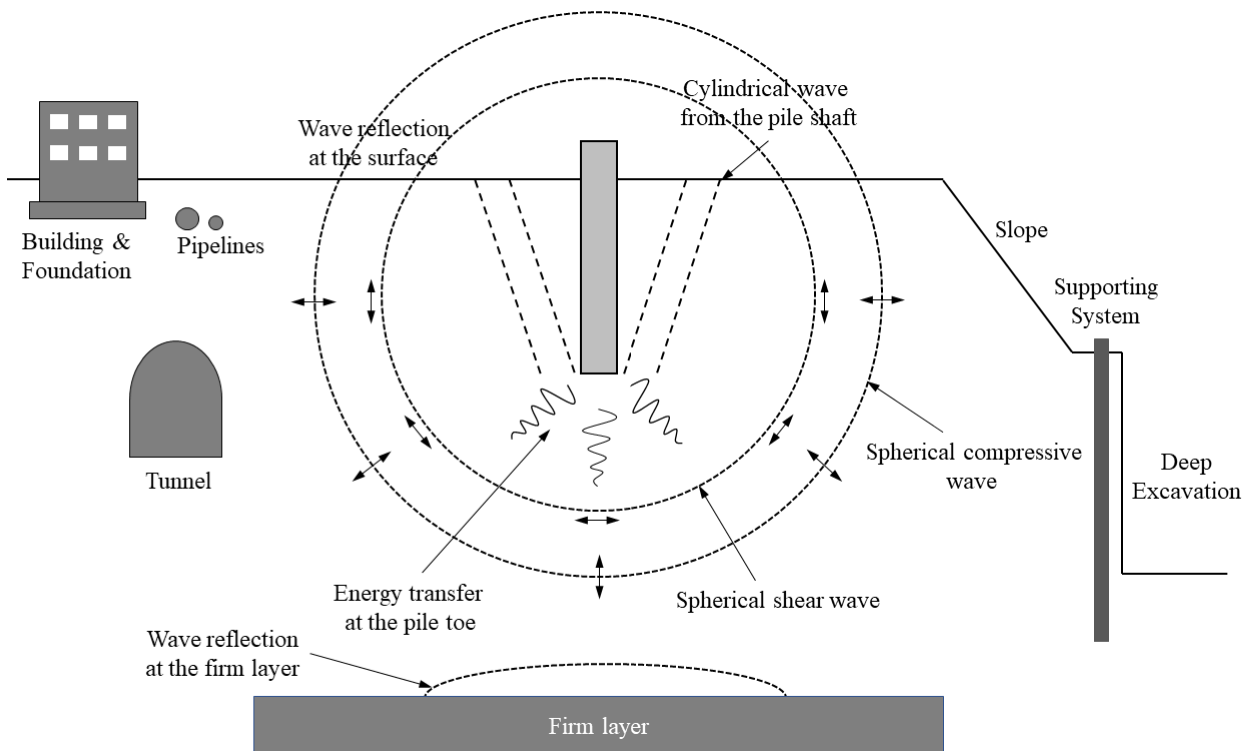


Fig. 2. Various wave types by pile driving and adjacent structures

적이다. 본 연구에서는 램(Ram)을 근사적으로 강체로 가정하고 긴 탄성 봉이 충돌할 때 강체 관성력과의 평형 조건에 의하여 유도된 St. Venat의 해(Kim, 2020)를 적용하여 다음 식과 같이 말뚝 항타응력을 산정하였다.

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\gamma_p A_p}{W_H} C_p t} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \frac{E_p}{C_p} \sqrt{2gh} \times 10^{-3} \quad (N/mm^2) \quad (3)$$

여기서, γ_p 는 말뚝의 질량(kN/m^3), A_p 는 말뚝의 단면적(m^2), W_H 는 램의 중량(kN), C_p 는 말뚝 내 탄성과 속도(m/s), E_p 는 말뚝의 탄성계수(kN/m^2), g 는 중력가속도(m/s^2), h 는 램의 낙하고(m), t 는 경과시간(sec)을 의미한다. 말뚝 내 탄성과 속도(C_p)는 다음 식에 의하여 산정할 수 있다(Wei et al., 2022).

$$C_p = \sqrt{\frac{E_p(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (4)$$

여기서, ν 는 말뚝의 포아송비, ρ_p 는 말뚝의 질량(kg/m^3)이다.

말뚝 항타에너지는 항타장비 제원에 의하여 결정되며 Table 1과 같다.

말뚝은 길이 17m, 직경 500mm, 두께 80mm인 PHC 말뚝을 고려하였고 이를 토대로 항타하중 산정을 위한 물성을 산정한 결과는 Table 2와 같다.

식 (2)는 상수 σ_0 에 비례하는 시간(t)의 함수이므로

Table 1. Specifications of the pile driving equipment

Type	Weight of ram (kN)	Height-of-fall (m)	Frequency of impulse (rpm)
Drop hammer	60	2.0	10

Table 2. Parameters on a pile for estimating of pile driving load

Item	Parameter	Unit
Type	PHC ($\phi 500$, 80t)	-
Section area (A_p)	0.19635	m^2
Poisson's ratio (ν)	0.27	-
Mass (ρ_p)	25	kN/m^3
Young's modulus (E_p)	3.78×10^7	kN/m^2
Wave velocity (C_p)	4,350	m/s

이를 시간영역에서 계산할 수 있다. 시간 증가분을 0.01초로 설정하고 분당 10회 타격 시 식 (2)를 이용하여 항타응력을 산정 후 말뚝 단면적을 고려하여 항타하중 시간이력을 산정한 결과는 Fig. 3과 같다. 항타하중 재하 시간이 매우 짧으므로 하중 최대값 전후의 0.16초 동안의 구간을 도시하면 Fig. 4와 같다.

3. 해석 조건

3.1 해석영역 및 입력물성

해석 영역은 지표면 하부 15m 깊이의 구조물 기초 설치를 위하여 높이 8.95m의 깎기 비탈면을 형성하고 비탈면 활동방지 및 잔여심도(6.05m) 굴착을 위하여 비탈면 선단부에 흙막이 가시설을 먼저 설치한 후 PHC말뚝을 항타하는 것으로 계획하였다. 해석 영역의 크기는 경계면에서의 중복 반사파 영향을 최소화하기 위하여 충분한 연단거리를 확보하여야 한다. Kwon et al.(2016)은 말뚝의 동적수치해석 시 수평으로 말뚝 직경의 10배까지 동적 영향이 크게 작용한다는 것을 해석적으로 제시하였고 Song et al.(2022)은 그 거리를 말뚝 직경의 19배로 제안한 바 있다. 또한 Choi and Yoo(2011)은 수평 방향으로 말뚝 직경의 13배, 연직방향으로 말뚝직경의 19.7배로 제안하였다. 본 연구에서는 수평, 연직방향으

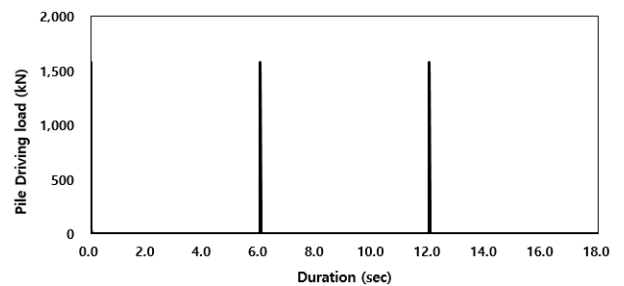


Fig. 3. Time histories of pile driving load

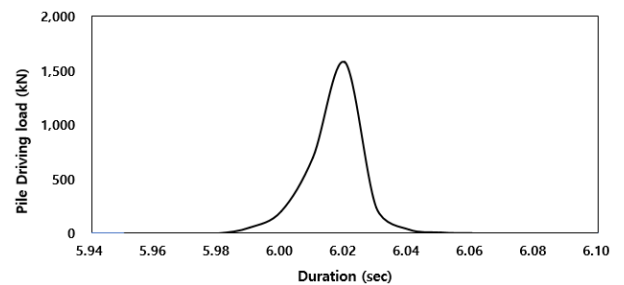


Fig. 4. Time histories of pile driving load between 5.94s and 6.10s

로 각각 말뚝직경(0.5m)의 120배인 60m, 연직방향으로 말뚝직경의 46배인 23m의 연단거리를 확보함으로써 경계면에서의 중복 반사파 영향을 최소화하였다. 해석 영역 및 대상은 Fig. 5에 도시하였다.

지층 구조는 지표면으로부터 모래질의 풍화토와 풍화암으로 구성되어 있고 말뚝 항타지점에서 풍화암선이 최대 10.78m 깊어진다. 흙막이 가시설은 2열 자립식 구조로서 H-Pile(300×300×10×15) 2열이 종방향 1.2m 간격으로 설치되며 H-Pile 두부는 H-Pile 가로보(250×250×9×14)로 연결되어 있으며 가로보의 종방향 중심간격은 2.4m이다. 또한 전면과 후면 H-Pile 사이에는 SGR그라우팅을 시공하고 굴착 전면부에 설치되는 토류판 두께는 7cm로 선정하였다. 수치해석에 적용된 지반정수 및 구조부재 물성은 지반조사 결과를 바탕으로 Table 3과 같이 적용하였다.

3.2 검토대상 및 기준

본 연구의 검토 대상은 말뚝 항타진동으로 인한 인접

비탈면의 동적 안정성이다. 통상 비탈면의 정·동적 안정성은 상시 및 지진시에 대한 한계평형해석을 수행하여 안전율을 산정하여 기준안전율과 비교하여 평가하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서와 같이 비탈면 인접부에서 지진하중이 아닌 동적하중(파일 항타진동)이 가해질 경우 한계평형해석 수행 시 변위 및 변형률 산정이 불가능하므로 동적하중에 의한 비탈면의 응답거동 및 영향을 파악할 수 없다. 따라서 2차원 동적수치해석을 수행하여 파일 항타진동 재하 시 시간영역에서의 비탈면의 응답거동을 파악하고 변형에 따른 거동특성을 분석하였다.

동적하중 재하 시 비탈면 안정성은 국가설계기준 KDS 11 90 00 :2020 (비탈면 내진설계기준) 내 지진 시 비탈면 안정해석 기준을 준용하여 변위해석법에 기반을 둔 허용변위기준을 Table 4와 같이 적용하여 비탈면 상단부(P-1)의 변위 발생 경향을 검토하였다. 또한 램에 의한 파일 항타라는 진동원의 특성을 고려하여 진동원 위치와 근접한 비탈면 선단부(P-3) 및 중간부(P-2)에서의 변위 발생 경향도 추가적으로 검토하였다. 변위 검토 위치는 Fig. 6과 같다.

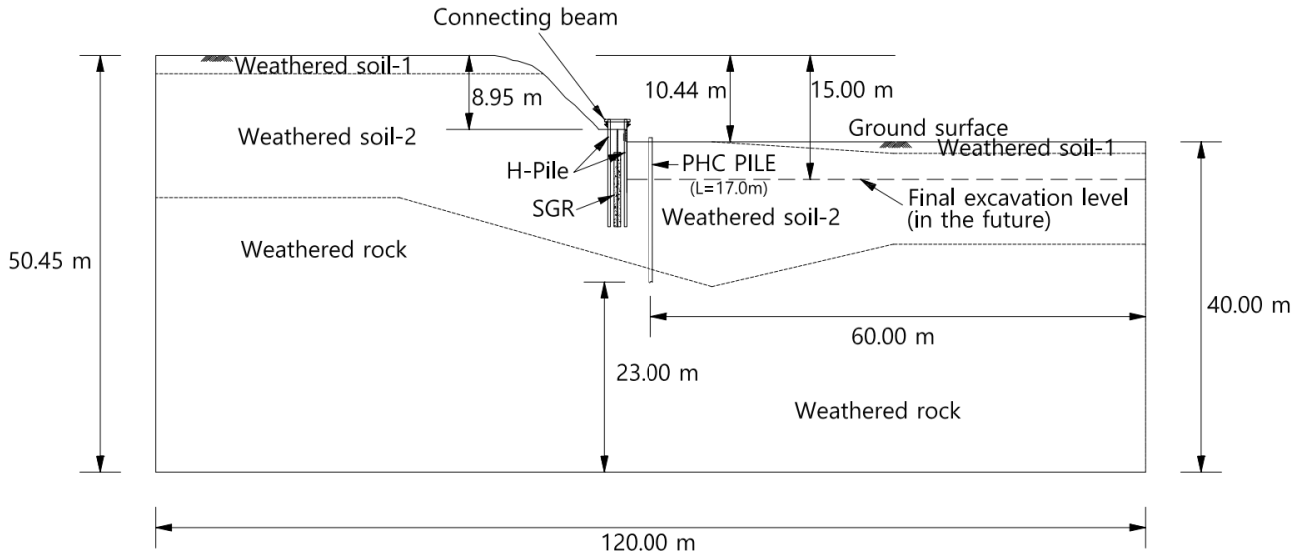


Fig. 5. Section for numerical analysis

Table 3. Input geotechnical and structural properties

Ground condition	Coeff. of deformation (kN/m ²)	Density (kN/m ³)	Poisson's ratio	Friction angle (deg)	Cohesion (kPa)
Weathered soil-1 (N<30)	30,000	18.0	0.32	27	10
Weathered soil-2 (N≥30)	50,000	19.0	0.30	30	20
Weathered rock	200,000	20.0	0.30	32	25
SGR grouting	60,000	20.0	0.30	30	20
H-Pile	2.0×10 ⁸	78.0	0.20	-	-
Connecting beam (H-Pile)	2.0×10 ⁸	78.0	0.20	-	-

Table 4. Criteria for dynamic numerical analysis of slope

Check	Criteria	Reference
Displacement magnitude of slope	1% of slope height	KDS 11 90 00 :2020
	$8.95 \text{ m} \times 1\% = 89.5 \text{ mm}$	

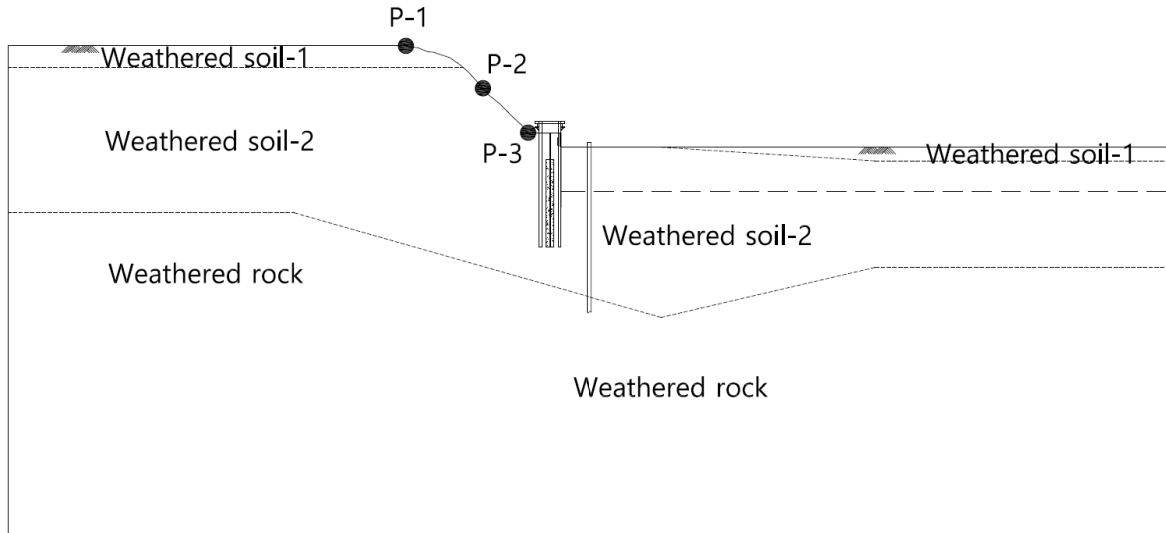


Fig. 6. Locations of 3 monitoring points (P-1~P-3)

3.3 수치해석 조건

2차원 동적수치해석은 유한차분해석법(FDM, Finite Difference Method)을 이용한 상용 프로그램인 FLAC2D를 이용하여 수행하였다. 유한차분해석법은 지반을 연속체 모델로 구성하고 유한개의 작은 요소로 분할하여 분할된 경계절점에서의 미지수를 경계조건을 이용하여 구하고, 구한 미지수를 이용하여 인접한 미지수를 순차적으로 구하는 방법이다. 즉 기지의 미지수로부터 미지의 해를 구하는 방법이므로 시간의존적인 동적해석법 적용에 유리하다는 장점이 있으며 특히 구조요소-지반 요소 간 절점공유가 불필요하여 본 연구에서와 같이 흙막이 가시설 등 구조요소가 포함된 해석 수행 시 편의성이 높다.

수치해석을 위한 지반모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였고 PHC말뚝 및 H-Pile 등 구조 부재는 탄성(elastic) 모델을 적용하였다. PHC말뚝 및 H-Pile은 프로그램에서 내장하는 말뚝부재(pile element)를 적용하였으며(Itasca, 2001) 입력 물성은 Table 5와 같다.

시공 순서는 깎기비탈면을 먼저 시공하고 파일을 향타하게 되므로 수치해석 시 파일 향타하중 재하 직전의 지반변위는 초기화(변위수렴)한 후 향타하중 재하에 따른 비탈면의 응답거동을 산출하는 것이 실제 시공과정

과 유사한 조건이 된다. 따라서 모델링 이후 중력가속에 의한 초기지반응력 구현 후 변위를 초기화 시키고, 동적하중을 재하하게 되는데, 초기화 시와 동적하중 재하 시의 하중조건이 다르므로 각 단계에 따라 지반경계조건을 다르게 적용하여야 한다. 따라서 수치해석은 (1) 원지반 초기응력 구현을 위한 정적해석, (2) 지반-구조물계 전체의 고유진동수 산정을 위한 고유치해석, (3) 말뚝 향타하중을 재하하여 시간영역에서 동적 응답을 계산하는 동적해석의 순서로 수행하였다. 정적해석 후 지반 및 구조물 변위를 초기화하고 비감쇠(undamped) 조건에서의 자유진동을 구현하여 고유진동수를 산정하고 이를 동적해석의 입력자료로 활용하였다. 말뚝 향타

Table 5. Input parameters for pile modeling

Description	Parameter	Unit
Radius of pile	0.25	m
Density of pile	7,800	kgf/m ³
Perimeter of pile	0.698	m
Stiffness of shear spring	3.91×10^5	kN/m ²
Cohesive strength of shear spring	15,404	N/m ²
Frictional resistance of shear spring	31.0	deg
Stiffness of normal spring	5.80×10^5	kN/m ²
Cohesive strength of normal spring	5.00×10^6	N/m ²
Frictional resistance of normal spring	77.0	deg

하중은 2.2절에서 산출한 시간이력을 연직방향으로 말뚝 두부에 18초간 3회를 재하하였다.

정적해석 시 경계조건은 해석 요소망 좌, 우측방향 수평변위 및 바닥부 연직변위를 구속(fixed)하였고 이는 고유치 해석에도 동일하게 적용하였다. 이후 동적해석 시 경계면에서의 반사파 영향을 최소화하기 위하여 해석 프로그램에서 제공하는 흡수경계(quiet boundary)를 요소망 좌, 우 수평 및 연직방향에 대하여 적용하였고 바닥부 연직변위는 구속하여 반복재하에 의한 연직변위 발산을 억제하였다. 또한 정적해석 시 비탈면 상부에는 상시활하중 13kN/m^2 을 적용하였다.

전체적인 해석 조건 및 순서는 Table 6과 같다.

3.4 수치해석 모델링

2차원 모델링 시 말뚝 주변 요소망의 크기를 0.25m로 조밀하게 구성하여 해석의 효율성 및 정확성을 높일 수 있도록 모델링하였다. 또한 해석 요소망은 경계

부에서의 변위간섭 및 중복반사파 영향을 최소화하기 위하여 동적하중이 재하되는 위치를 기준으로 수평방향으로 좌, 우측 각 60m, 연직 하방으로 23m의 충분한 이격거리를 확보하였다. 해석 요소망 작성 결과 및 지반 물성에 따른 요소망의 분리(grouping) 결과는 Fig. 7과 같다.

4. 해석 결과

4.1 정적해석 결과

비탈면을 포함한 구조물계 전체의 원지반 초기응력을 분포시키기 위하여 정적해석을 수행하였다. 또한 원지반 초기응력 구현 후 전체 변위 및 속도는 0으로 초기화하여 말뚝 향타 전 지반조건을 형성하였다. 정적해석을 위한 고정경계조건 적용 결과 및 비탈면 상부 활하중 재하 결과는 Fig. 8, 원지반 초기응력 산정 결과는 Fig. 9와 같다.

Table 6. Overall conditions of numerical analysis

Conditions	Description
Analysis models	<ul style="list-style-type: none"> · Ground : Mohr–Coulomb (Elasto–perfectly Plastic) model · Structural element : Elastic model
Analysis procedures	<ol style="list-style-type: none"> ① Static analysis : Initial stress distribution <ul style="list-style-type: none"> – Building up the finite element mesh – Modeling of temporarily supporting structures including SGR grouting – Modeling of PHC pile – Applying gravity – Initializing all displacements and velocities ② Eigenvalue analysis : Estimating dominant frequency of overall model <ul style="list-style-type: none"> – Free oscillation under undamped condition – Applying dominant frequency as input data in dynamic analysis ③ Dynamic analysis : Estimating responses against pile driving load histories <ul style="list-style-type: none"> – Applying pile driving load – Analyzing ground response
Boundary conditions	<ol style="list-style-type: none"> ① Static analysis <ul style="list-style-type: none"> – Lateral boundaries : Fixed in vertical and lateral directions – Bottom boundaries : Fixed in vertical direction ② Eigenvalue analysis <ul style="list-style-type: none"> – Lateral boundaries : Fixed in lateral direction – Bottom boundaries : Fixed in vertical direction ③ Dynamic analysis <ul style="list-style-type: none"> – Lateral boundaries : Quiet Boundaries in vertical and lateral directions – Bottom boundaries : Fixed in vertical direction – Pile top : Quiet Boundaries in vertical and lateral directions
Load conditions	<ol style="list-style-type: none"> ① Static analysis : 13 kN/m^2 at surface of slope top ② Eigenvalue analysis : No external load ③ Dynamic analysis : pile driving load histories

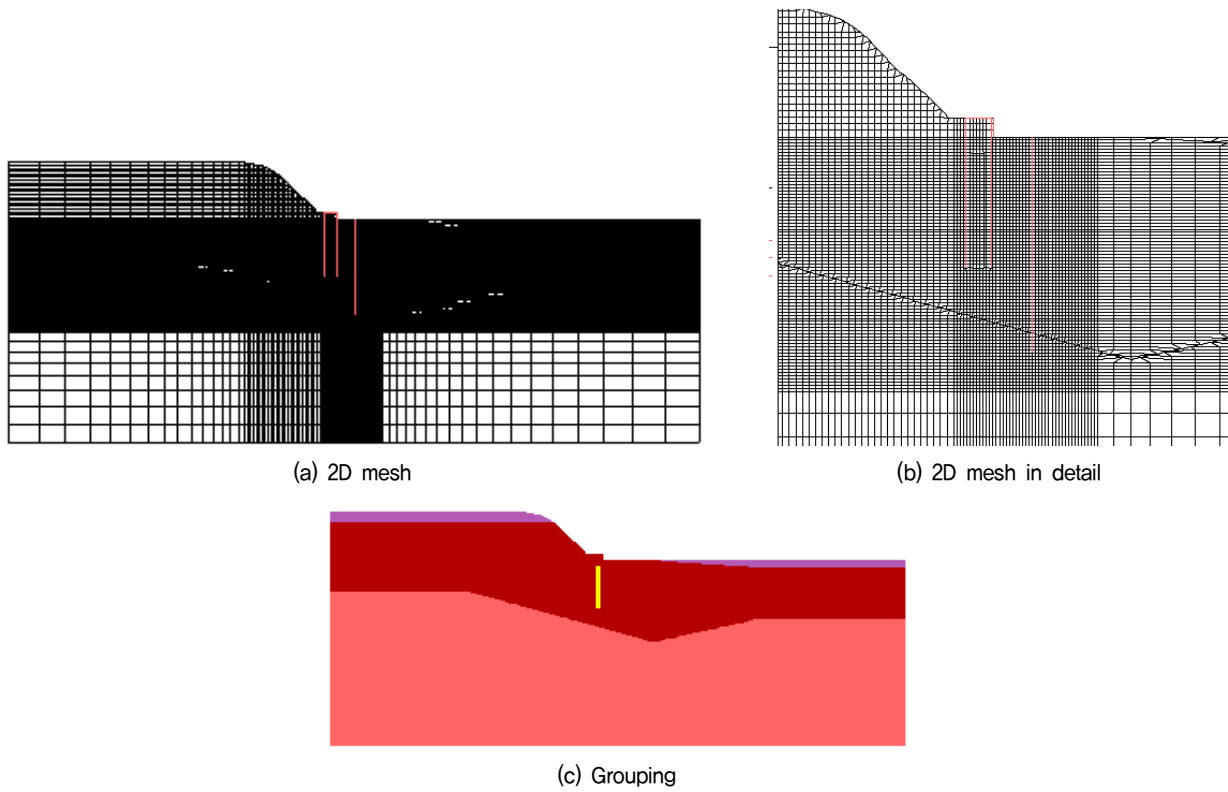


Fig. 7. Mesh generation and grouping

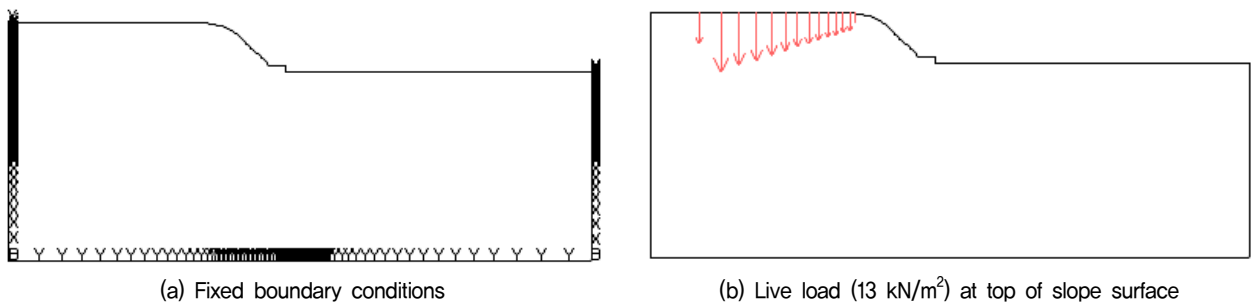


Fig. 8. Boundary conditions for static analysis

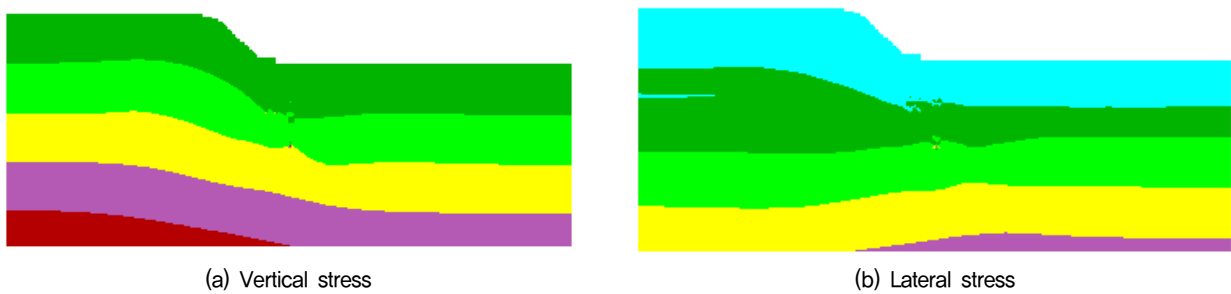


Fig. 9. Initial stress distribution

4.2 고유치해석 결과

정적해석 수행 후 중력가속도 재하조건에서 재료의 감쇠효과를 제거(undamped)하고 지반-구조물계 전체를

자유진동으로 가진하여 임의 지점(비탈면 상부)에서의 입자속도 시간이력곡선을 도출하여 고유주파수를 구하였다. 총 3초간 가진하였고 이 때 고유주파수는 1.73Hz로 산정되었으며 동적해석 수행 시 감쇠모델에 적용하

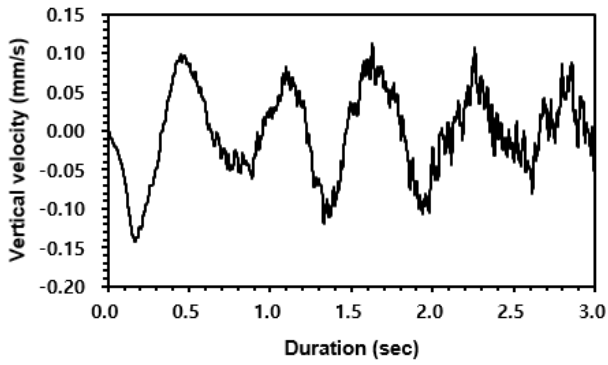


Fig. 10. Particle velocity histories at P-1

였다. 고유주파수 산정을 위한 비탈면 상단부(P-1)에서의 입자속도 시간이력은 Fig. 10과 같다.

4.3 동적해석 결과

정적해석 수행 후 모델 좌우측 경계조건을 Fig. 11과 같이 흡수경계(quiet boundary)로 수정하고 고유치해석

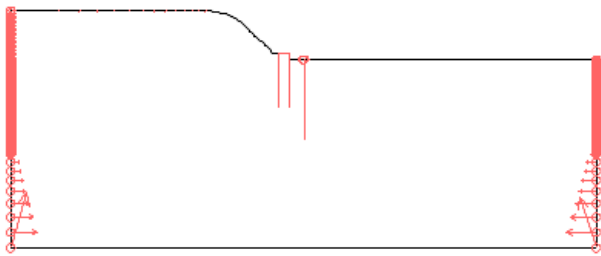
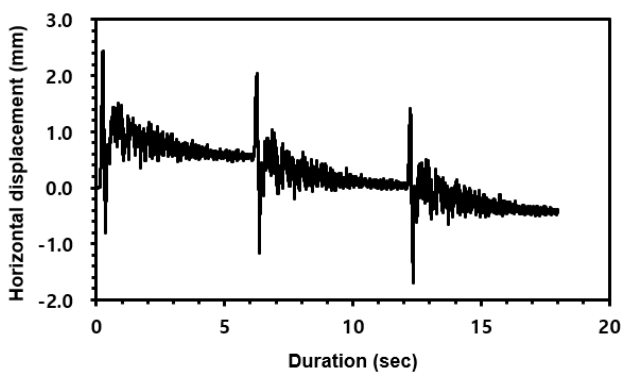
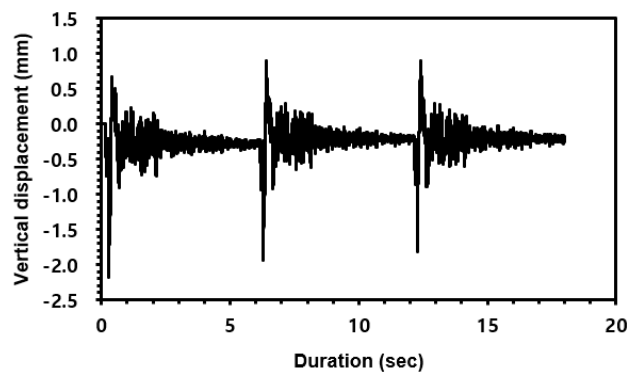


Fig. 11. Quiet boundary



(a) Horizontal displacement



(b) Vertical displacement

Fig. 12. Displacement response result at P-1

Table 7. Estimation of Slope stability

Location	Maximum displacement magnitude (mm)	Maximum allowable displacement (mm)	Result
P-1	3,265	89,500	O.K (3.65% of allowable displacement)

에서 산정한 고유주파수를 입력 후 파일 항타하중 시간 이력을 파일 두부에 연직방향으로 재하하였다.

동적해석에서는 파일 항타하중에 대한 비탈면의 안정성을 검토하기 위하여 최대 합변위량을 계산하였으며 허용치(89.500 mm)와 비교하였다. 합변위는 최대변위 발생 시점에서 수평변위와 연직변위의 벡터합으로서 구할 수 있다. 비탈면 상단(P-1)에서의 방향별 입자변위 시간이력은 다음 Fig. 12와 같고 수평방향 최대 변위는 2.433mm, 연직방향 최대 변위는 2.177mm로 산정되었다. 따라서 최대 합변위를 기준으로 비탈면의 안정성을 검토한 결과는 Table 7과 같다.

전체적인 변위 발생 경향은 변위 벡터도를 도시하여 파악할 수 있다. Fig. 13과 같이 파의 반사 및 재료감쇠가 적은 지표면에서 표면파에 의하여 지중보다 변위가 현저히 크게 발생하며 말뚝이 근입된 풍화암과 상부 풍화토의 경계면을 기준으로 상방으로 실린더 형태의 변위벡터가 형성되므로 Fig. 2에서 살펴본 바와 같이 파 전달 이론과 부합하는 결과라 판단된다.

수평변위 및 연직변위 발생 경향과 요소망의 변형 형상은 Fig. 14와 같다. 비탈면의 수평변위는 비탈면 경사를 따라 등고선 형태를 보이며 지중에서 범면으로 확산되는 경향을 나타내며 선단부에는 흠막이 가시설에 의하여 변위 구속이 발생하여 주로 비탈면 범면부에 변위가 집중적으로 발생한다. 반면 연직변위는 하중 재하 지점인 말뚝 주위에서 크게 발생하며 흠막이 가시설에 의하여 다소 변위 구속이 발생하나 비탈면으로 확산되는

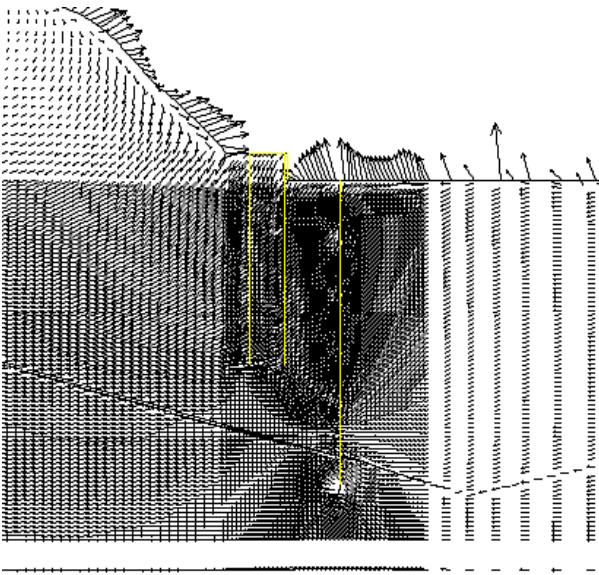
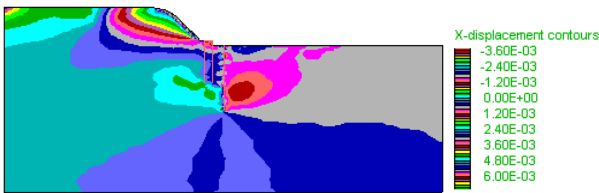
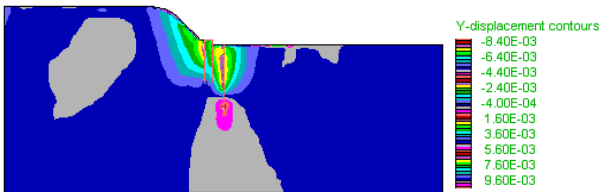


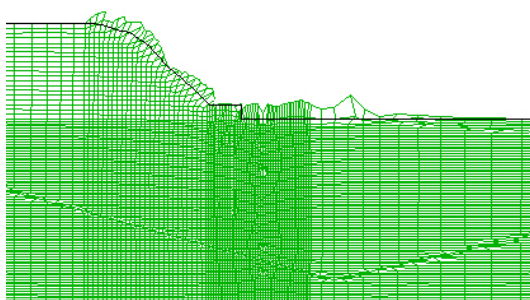
Fig. 13. Displacement vector distribution adjacent pile



(a) Horizontal displacement contour



(b) Vertical displacement contour



(c) Mesh deformation (×30 magnified)

Fig. 14. Displacement contour and mesh deformation

경향을 보이는데 이는 수평변위 대비 연직변위 발생량이 현저히 크기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 14(c)는 요소망의 변형을 30배 과장하여 도시한 것으로서 비탈면 변위는 말뚝 항타진동에 의하여 법면과 직교하는 방향으로 발생하는 현상을 확인할 수 있다. 따라서 비탈면과 인접하여 항타 진동하중이 재하될 경우 비탈면 법면의 인장균열이나 토사 유실에 유의하여야 할 것으로 판단된다.

진동원으로부터 이격거리 증가에 따른 변위 감소 경향을 확인하기 위하여 진동원과 가까운 비탈면 선단부로부터 중간부 및 상단부의 3개 지점에 대한 변위응답을 비교 검토하였다. 진동원과 가장 가까운 비탈면 선단부(P-3)에서는 최대 연직변위 4.190mm, 최대 수평변위 1.430mm로 산정되었고 중간부(P-2)에서는 최대 연직변위 2.404mm, 최대 수평변위 3.549mm로 산정되었다. 비탈면 상단부(P-1)을 포함한 3 지점의 최대 변위를 비교한 결과는 Fig. 15에 도시하였고 변위 검토 지점별 진동원으로부터의 이격거리 및 최대 변위값은 Table 8에 요약하였다.

진동원과 가장 가까운 비탈면 선단부(P-3)에서는 최대 연직변위가 최대 수평변위 대비 293%로 현저히 크게 나타남으로서 연직방향 재하에 따른 진동영향을 직접적으로 받는 것으로 판단된다. 반면 비탈면 중간부(P-2)에서는 최대 수평변위가 최대 연직변위 대비 148%

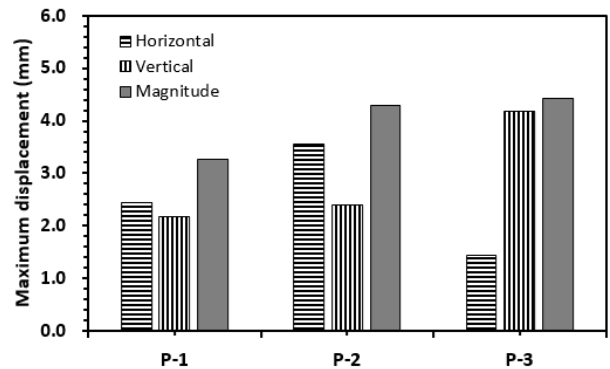
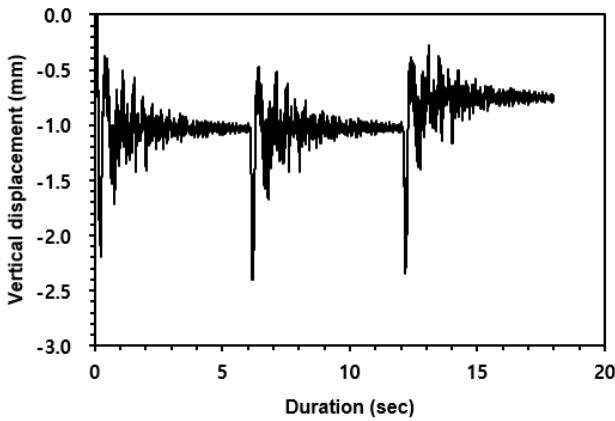


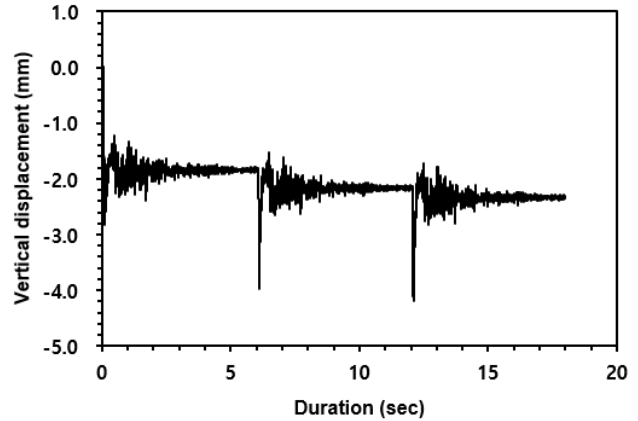
Fig. 15. Comparison of maximum displacement response

Table 8. Summary of maximum displacement and distance from source

Location	Distance from source (m)	Horizontal displacement (mm)	Vertical displacement (mm)	Displacement magnitude (mm)	Results
P-1	28,3	2,433	2,177	3,265	O.K (< 89,5 mm)
P-2	14,8	3,549	2,404	4,287	O.K (< 89,5 mm)
P-3	8,5	1,430	4,190	4,427	O.K (< 89,5 mm)



(a) P-2



(b) P-3

Fig. 16. Displacement response result at P-2 and P-3

로 더 크게 산정되는데 이는 비탈면의 기하형상에 따라 수평방향으로의 입자이동이 발생하기 때문인 것으로 사료된다. 이와 유사하게 비탈면 상단부(P-1)에서도 최대 수평변위가 최대 연직변위 대비 증가하나 그 값은 최대 연직변위 대비 112%로서 상대적으로 편차가 줄어드는 경향을 나타내었다. 이는 진동원으로부터 이격거리가 증가함에 따라 진동에너지의 감쇠가 커지고 변위 검토 위치가 비탈면 경사가 시작되는 상단부에 위치함에 따라 수평방향의 입자이동이 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 16에서는 비탈면 중간부 및 선단부에서 도출한 연직변위 시간이력을 도시하였다.

말뚝 항타에 의한 비탈면의 이상변위 및 전단파괴 여부를 확인하기 위하여 지반의 전단변형률 증분을 Fig. 17과 같이 산출하였다. 비탈면 전단변형률과 같이 대변형률에 대한 문제를 해석할 때 실제 변형이 변형 시간을 가지며 점진적으로 발생하므로 이를 고려하는 전단변형률 증분은 미소변위 하에서 실제 변형을 예측하기 적합한 지표로 활용할 수 있다. 검토결과, 최대 전단변형률 증분은 1.75×10^{-2} 로서 변형률 증가 속도가 미소하게 산정되어 비탈면의 전단활동면 형성 및 활동변위는 관찰되지 않았다. 또한 본 연구에 적용된 지반모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델이므로 비탈면을 구성하는 흙입자의 응력상태가 Mohr-Coulomb의 파괴기준 이내인지를 확인하여 해석 전 과정에 걸쳐 비탈면 파괴 여부를 검토할 수 있다. 검토결과 Fig. 18과 같이 비탈면 내 모든 흙입자의 응력상태가 Mohr-Coulomb 파괴포락선 아래에 위치하므로 비탈면 파괴는 발생하지 않은 것으로 판단된다.

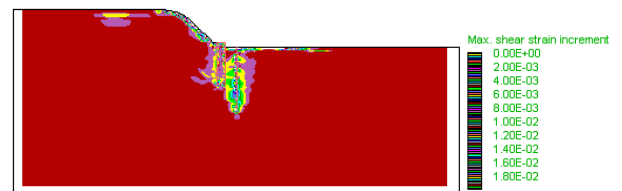


Fig. 17. Shear strain increment

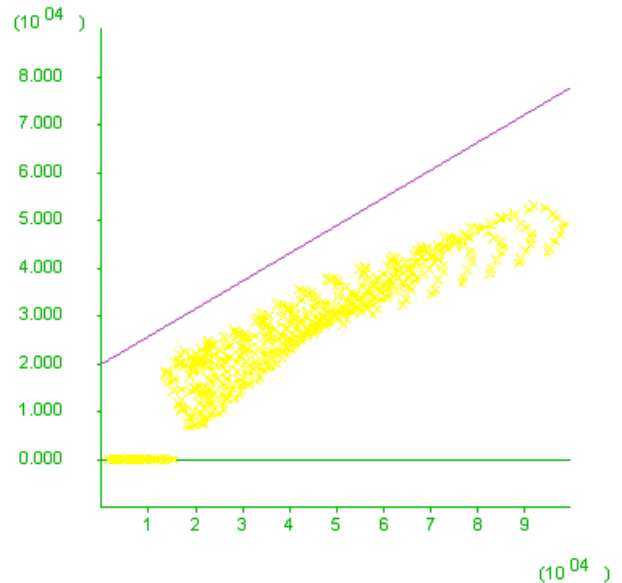


Fig. 18. Soil stress conditions with Mohr-Coulomb failure criteria

5. 결론

본 연구에서는 PHC말뚝 항타진동에 대하여 그 특성을 분석하고 이를 수치해석에 반영하기 위하여 항타진동하중을 합리적으로 산정하였다. 그리고 지반 굴착에 의해 형성된 깎기비탈면과 인접하여 말뚝을 항타할 경우 말뚝과 지반을 포함한 전체 구조물계에 대한 2차원

모델링을 수행하고 유한차분해석법에 의한 동적 수치 해석을 통하여 변위 및 향타진동 특성을 중점적으로 고찰하였으므로 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 향타진동에 의하여 파의 반사 및 재료감쇠가 적은 지표면에서 표면파에 의하여 지중보다 변위가 현저히 크게 발생하는 경향을 나타내었다. 또한 말뚝이 근입된 풍화암과 그 상부 풍화토의 경계면을 기준으로 상방으로 실린더 형태의 변위벡터가 형성되므로 파 전달 이론과 부합하는 입자진동 특성을 확인하였다.
- (2) 비탈면의 수평변위는 비탈면 경사를 따라 등고선 형태를 보이며 지중에서 법면으로 확산되는 경향을 나타내며 선단부에는 흠막이 가시설에 의하여 변위 구속이 발생하므로 주로 비탈면 법면부에 변위가 집중적으로 발생하는 특징을 나타내었다. 반면 연직변위는 하중 재하지점인 말뚝 주위에서 크게 발생하며 흠막이 가시설에 의하여 다소 변위 구속이 발생하나 비탈면으로 확산되는 경향을 보이는데 이는 수평변위 대비 연직변위 발생량이 현저히 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 비탈면과 인접하여 향타 진동하중이 재하될 경우 비탈면 법면의 인장균열이나 토사 유실에 유의하여야 할 것으로 판단된다.
- (3) 진동원으로부터 이격거리 증가에 따른 변위 감소 경향을 확인하기 위하여 진동원과 가까운 비탈면 선단부(P-3)로부터 중간부(P-2) 및 상단부(P-1)의 3개 지점에 대한 변위응답을 비교 검토하였다. 그 결과 전체 변위 크기는 이격거리 증가에 따라 감소하나 수평방향 변위는 진동원과 먼 지점(P-2, P-1)에서 연직방향 대비 더 큰 값을 보이는데 이는 비탈면의 기하형상에 따라 수평방향으로의 입자이동이 발생하며, 특히 진동원으로부터 이격거리가 가장 먼 상단부(P-1)에서는 이격거리 증가에 따라 진동에너지의 감쇠가 커지고 변위 검토 위치가 비탈면 경사가 시작되는 상단부에 위치함에 따라 수평방향의 입자이동이 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구는 수치해석적 접근 사례가 많지 않은 말뚝 향타진동에 따른 주변 지반의 거동을 시공 전 수치해석적으로 모델링하여 정량적으로 분석하였으나 수치해석 자체의 한계점(근사해)과 지반의 불확실성(비등방성 및 비균질성) 등의 변수가 있을 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2022년도 인하공업전문대학 학술연구사업 지원에 의하여 연구되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Choi, G.N. and Yoo, C.S. (2011), "Numerical Investigation on Load Supporting Mechanism of a Pile Constructed above Underground Cavity", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.1, pp.5-16.
2. Cleary, J.C. and Steward, E.J. (2016), "Analysis of Ground Vibrations Induced by Pile Driving and a Comparison of Vibration Prediction Methods", *The Journal of the Deep Foundations Institute*, Vol.10, No.3, pp.125-134.
3. Colaco, A., Alves, C.P., Mont'Alverne, P.C., and Silva, C.A. (2021), "Ground-borne Noise and Vibrations in Buildings Induced by Pile Driving: An Integrated Approach", *Applied Acoustics*, Vol.179, No.108059, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108059>
4. Daryaei, R., Bakroon, M., Aubram, D., and Rackwitz, F. (2020), "Numerical Evaluation of the Soil behavior during Pipe-pile Installation Using Impact and Vibratory Driving in Sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.134, doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106177.
5. Hindmarsh, J.J. and Smith, W.L. (2018), "Quantifying Construction Vibration Effects on Daily Radiotherapy Treatments", *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, Vol.19, No.5, pp.733-738.
6. Homayoun, R.A.F. and Hamidi, A. (2019), "A Numerical Model for Continuous Impact Pile Driving Using ALE Adaptive Mesh Method", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.118, pp.134-143.
7. Hong, S.W. and Lee, W.J. (1992), "Research and Practice of Deep Foundations : Survey of Pile Foundation Construction Practice in Korea and Ground Vibration induced by Pile Driving", *Proceedings of the Korean Geotechnical Society*, No.1, pp.115-135.
8. Itasca Consulting Group. (2001), "Fast Lagrangian Analysis of Continua", Program Manual.
9. Jayawardana, P., Achuhan, R., Silva, G.H.M.J.S.D., and Thambiratnam, D.P. (2018), "Use of In-filled Trenches to Screen Ground Vibration due to Impact Pile Driving: Experimental and Numerical Study", *Heliyon*, No. e00726, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00726.
10. Kim, S.K. (2020), "Evaluation of Stability of Reinforced Earth Retaining Walls by Pile Construction", M.S thesis, Department of Civil Engineering Graduate School, Dongshin University, pp.77-79.
11. Kim, S.R. and Chung, S.G. (2007), "Pile and Ground Responses during Drivign of a Long PHC Pile in Deep Soft Clay", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.5, pp.131-141.
12. Korean Design Standard 11 90 00 (2020), Korea Construction Standard Center, pp.4.
13. Kwak, K.S. and Kim, J.S. (2000), "A Study on the Effect of Piling Vibration by Oil Pressure Method on the Building", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.20, No.2, pp.817-820.
14. Kwon, S.Y., Kim, S.J., and Yoo, M.T. (2016), "Numerical Simulation of Dynamic Soil-pile Interaction for Dry Condition Observed in

- Centrifuge Test”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 32, No.4, pp.5-14.
15. Lee, S.H., Lee, J.K., Yoo, W.K., and Kim, B.I. (2007), “A Study on Vibratory Behavior of Steel Sheet Pile Installed in Sand Ground”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.4, pp. 79-90.
 16. Masoumi, H.R. and Degrande, G. (2008), “Numerical Modeling of Free Field Vibrations due to Pile Driving Using a Dynamic Soil-structure Interaction Formulation”, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol.215, pp.503-511.
 17. Massarsch, K.R. and Fellenius, B.H. (2015), “Engineering Assessment of Ground Vibrations Caused by Impact Pile Driving”, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol.46, No.2, pp. 54-63.
 18. Paik, K.H. (2001), “Effect of Pile Driving Energy on Steel Pipe Pile Capacity in Sands”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.6, pp.99-110.
 19. Park, J.B. (2009), “The Influence of Ground Vibration Caused by Pile Driving on Power Line Tower Foundation”, *Explosives & Blasting*, Vol.27, No.2, pp.42-47.
 20. Park, S.J, Kang, S.H., and Jung, S.G. (2010), “Estimate of Ground Vibration and Noise Responses by the Pile Driving Methods”, *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers*, pp.1353-1356.
 21. Park, Y.S. and Chon, C.S. (1989), “Measurement and Control of Ground Vibrations due to Precast Concrete Pile-driving by Diesel Hammer”, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.9, No.1, pp.71-78.
 22. Rahman, N.A.A., Musir, A.A., Dahalan, N.H., Ghani, A.N.A., and Khalil, M.K.A. (2017), “Review of Vibration Effect during Piling Installation to Adjacent Structure”, *Proceedings of AIP Conference*, Vol.1901, No.1, pp.110009-1-110009-10.
 23. Ramshaw C.L., Selby A.R., and Bettis A.R. (2000), “Computation of Ground Waves due to Piling in Application of Stress Wave Theory to Piles”, pp.495-502.
 24. Song, S.M., Park, J.J., and Jeong, S.S. (2022), “The Analysis of Single Piles in Weathered Soil with and without Ground Water Table under the Dynamic Condition”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.38, No.1, pp.17-33.

Received : March 21st, 2023

Revised : March 30th, 2023

Accepted : March 30th, 2023