

다양한 환경인자를 고려한 PHC 말뚝-사질토 지반 접촉면의 동적 전단거동 특성

Dynamic Shear Behavior Characteristics of PHC Pile-cohesive Soil Ground Contact Interface Considering Various Environmental Factors

김 영 준¹ Kim, Young-Jun

곽 창 원² Kwak, Chang-Won

박 인 준³ Park, Inn-Joon

Abstract

PHC piles demonstrate superior resistance to compression and bending moments, and their factory-based production enhances quality assurance and management processes. Despite these advantages that have resulted in widespread use in civil engineering and construction projects, the design process frequently relies on empirical formulas or N-values to estimate the soil-pile friction, which is crucial for bearing capacity, and this reliance underscores a significant lack of experimental validation. In addition, environmental factors, e.g., the pH levels in groundwater and the effects of seawater, are commonly not considered. Thus, this study investigates the influence of vibrating machine foundations on PHC pile models in consideration of the effects of varying pH conditions. Concrete model piles were subjected to a one-month conditioning period in different pH environments (acidic, neutral, and alkaline) and under the influence of seawater. Subsequent repeated direct shear tests were performed on the pile-soil interface, and the disturbed state concept was employed to derive parameters that effectively quantify the dynamic behavior of this interface. The results revealed a descending order of shear stress in neutral, acidic, and alkaline conditions, with the pH-influenced samples exhibiting a more pronounced reduction in shear stress than those affected by seawater.

요 지

PHC 말뚝은 압축력 및 휨 모멘트에 대한 저항력이 우수하며, 공장에서의 생산으로 인해 품질 관리가 효율적으로 이루어진다. 이러한 장점으로 인해 다양한 토목 및 건축 현장에서 널리 활용되고 있지만, PHC 말뚝의 설계 과정에서 중요한 요소인 주변 마찰력은 주로 경험식이나 N 값 등의 추정치를 기반으로 하고 있다. 이에 대한 실험적 연구는 상대적으로 부족하며, 환경적 요소 중 하나인 pH 값과 지하수 또는 해수의 영향 역시 간과되는 경우가 많다. 본 연구에서는 진동기계 기초의 영향을 받는 PHC 말뚝 모델을 중심으로 다양한 pH 환경(산성, 중성, 염기성) 및 해수의 영향 하에 한 달 동안 수침 후, 해당 PHC 말뚝-사질토의 접촉면에 대한 반복 단순 전단시험을 수행하였다. 이를 위해

1 정회원, 한서대학교 건설공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Construction Engrg. Hanseo Univ.)

2 정회원, 인하공업전문대학 건설환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Inha Technical College)

3 정회원, 한서대학교 인프라시스템학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Infra System, Hanseo Univ., Tel: +82-41-660-1054, geotech@hanseo.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

교란 상태 개념(Disturbed State Concept)을 적용하여 접촉면의 동적 거동을 정량적으로 평가하였다. 연구 결과, 화학적 환경에 따른 동적 전단응력은 중성 > 산성 > 염기성 순으로 감소하였다. 또한, pH 영향을 받은 경우와 해수의 영향을 받은 경우를 비교했을 때, pH 영향을 받은 경우에 전단응력의 감소가 더 크게 나타났다.

Keywords : Disturbed state concept, Dynamic behavior, PHC Pile, Pile-soil interface, Vibrating mechanical foundation

1. 서 론

PHC 말뚝의 거친 표면으로 인해 PHC 말뚝-지반 접촉면에서의 거동은 복잡하며 이는 말뚝의 지지력에 결정적인 영향을 미친다. 특히, 발전소와 같은 중요 시설에서 필수적으로 설치되는 진동 기계 기초가 장기간에 걸쳐 PHC 말뚝-지반 접촉면에 미치는 영향은 아직 충분히 규명되지 않았다. 이러한 불확실성으로 인해 현재 많은 현장에서는 강관 말뚝을 기본적으로 사용하고 있으며, 이는 과다 설계와 경제적 손실을 초래할 수 있다. 따라서 PHC 말뚝-지반의 동적 거동 특성에 대한 체계적인 이해를 바탕으로 현장 적용을 위한 기준을 마련하는 연구가 시급하게 요구된다.

PHC 말뚝은 고강도 콘크리트(설계 기준 강도 80MPa 이상)를 사용하여 제작되므로 휨과 압축에 대한 저항력이 뛰어나다. 또한 강관 말뚝에 비해 경제적이며, 공장에서의 생산으로 인한 품질의 균일성과 관리의 용이성은 PHC 말뚝의 큰 장점이다. 또한, 오토클레이브 양생에 의해 말뚝의 콘크리트 조직 내에서 골재와 시멘트 페이스트 간의 결합이 강화되어 설계 지지력이 크고, 항타 내구성 및 휨 강도가 우수하다(Park et al., 2008). 이와 함께, 조직이 매우 치밀하여 불투수성이 뛰어나고, 염해, 화학적 침식, 동결융해, 탄산화 등에 대한 저항성이 높은 재료적 특성을 지니고 있다(Park et al., 2015).

이러한 장점들로 인해 많은 토목현장 및 건축공사에서 PHC 말뚝을 가장 많이 사용하고 있다(Yoo et al., 2002; Park et al., 2008; Shin and Lim, 2018). 말뚝기초는 연직압축하중을 지지하는 구조에 따라 주면 마찰력이 지배적인 마찰 지지말뚝과 선단 지지력이 지배적인 선단 지지말뚝으로 구분할 수 있으며(Kim et al., 2013). 특히 사용 하중 범위에서는 연직압축하중의 대부분이 주면 마찰력에 의해 지지되는 경향이 있다(Tomlinson, 1994). 그래서 말뚝기초의 설계에서 주면 마찰력은 매우 중요한 역할을 하며, 연직압축하중의 대부분을 부담

하게 된다(Choi et al., 2019). 하지만 PHC 말뚝의 설계 시에는 주면마찰력이 표준관입시험(N값)이나 간단한 경험식을 이용한 추정치로 계산하는 것이 일반적이며, 이는 지반의 실제 조건이나 PHC 말뚝의 재료 특성에 따라 달라질 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 제한적으로 수행되고 있다.

PHC 말뚝의 동적 거동에 관련해서는 말뚝과 지반의 동적 거동특성에 관한 연구 위주로 수행되어왔다. 국내에서는 Yoo et al.(2017)이 궤도지지 말뚝의 지진 시 동적 거동특성을 3차원 수치해석을 통해 파악하였고 Kwak (2022)에서는 PHC 말뚝-점성토 지반 접촉면에서의 동적 거동 특성 파악하였다. 해외에서는 PHC 말뚝-지반의 동적 상호작용에 관한 유사정적 진동시험을 통한 연구(Huang et al., 2018), 반복하중 재하 시 PHC 말뚝-지반 상호작용에 의한 말뚝 수평변위 계산(Luo et al., 2019) 등 지진 시 PHC 말뚝 자체의 거동에 대한 연구가 주로 진행되었다. Tran et al.(2021)은 3차원 수치해석을 이용하여 사질토 지반에서 지진하중을 받는 말뚝의 흙-말뚝 접촉면 강도 영향인자를 산정하였다. 반면에 기초진동 지반에서 PHC 말뚝-지반 접촉면의 동적 거동특성에 대한 연구는 제한적이며, 특히 진동기계 기초 지반의 pH 값, 해수 등 환경적 조건을 고려한 동적 전단 거동의 특성에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

기존 연구(Kwak et al., 2013)에 따르면, 접촉면에서의 동적 전단 거동 특성은 염도, pH(또는 산성도), 토질 조건(사질토, 점성토)과 같은 환경적 요인에 의해 크게 영향을 받으며, 이는 응력-변형률 특성을 변화시킨다. 발전소가 냉각수의 필요성으로 바다나 강, 호수 근처에 건설되는 경우가 많기 때문에 접촉면의 환경적 요인의 영향을 공학적으로 해석하고 설계에 반영하기 위해서는 PHC 말뚝-지반 접촉면의 동적 전단 거동 특성을 다양한 환경 조건 하에서 확립하는 연구가 필수적이다.

또한, 발전소 내에서 고진동을 유발하는 대표적인 기계는 터빈과 펌프이며, 이들은 회전진동을 발생시킨다.

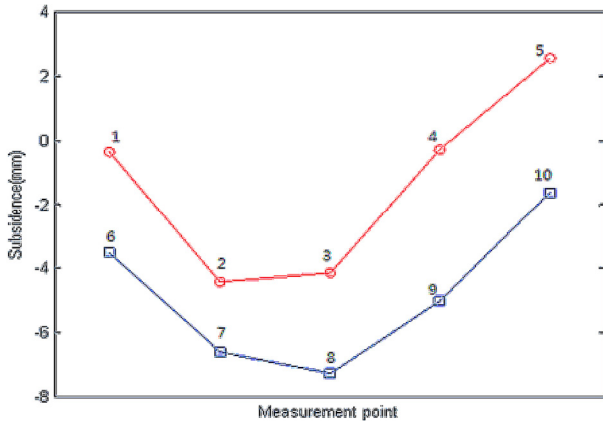


Fig. 1. Measurement results of steam turbine base sedimentation (Shin et al., 2012)

이러한 진동은 지진하중과 같은 일시적 하중이 아닌 반복하중으로, 기계의 회전에 따른 정현파 하중의 고주파 특성을 가진다. 이러한 진동 기초에 대한 실측 사례(Shin et al., 2012)에서는 증기 터빈과 기초의 공진에 의한 기초 침하를 확인할 수 있었으며(Fig. 1), 국내 OO 석탄화력발전소의 터빈발전기에 대한 6년간의 축 정렬 정비 결과, 정비 시마다 연결된 발전기 간의 맞닿은 축끼리 약 0.5~1.2mm의 변형이 측정되었다. 이러한 변형은 터빈의 고장이나 정전, 계통 구간의 전력 차단(Blackout)과 같은 심각한 문제를 야기할 수 있으므로, 진동 기계 기초의 동적 거동을 파악하는 것이 필수적이며, 이를 명확히 해석적으로 규명하는 것이 매우 중요하다.

2. PHC 말뚝-지반 접촉면

2.1 PHC 말뚝과 접촉면

PHC 말뚝은 콘크리트로 제작되어 표면이 거친 특성이 있어 지반과의 접촉면에서의 동적 거동이 복잡하고 말뚝 지지력에 영향을 미친다. 그러나 PHC 말뚝 설계 시 주변 마찰력은 표준관입시험 N 값, 점착력 등에 의한 경험적, 확률적 방법으로만 추정하여 적용하고 있는 실정이다.

말뚝의 주변 마찰력은 말뚝의 길이가 길수록 지지력에 더 영향을 주며, 마찰 말뚝의 경우 지지력을 전담하므로 말뚝의 전체 지지력에서 차지하는 중요도가 높다. 주변 마찰력은 주위 지반과 직접 접촉하고 있는 말뚝의 주변부에서 지반과의 접촉면을 형성하므로 주변 마찰력의 발현에서는 PHC 말뚝-지반 접촉면에서의 전단 거

동이 중요한 영향 요소이다.

PHC 말뚝 시공 시 해당 지점에 지형학적 특성에 따라 pH 농도가 변하게 되는데 바닷가 근처 토양이나 지하수에는 염기성을 띌 수 있으며, 광산 주변에서는 강한 산성을 띌 수 있다. 기존 연구(Kwak et al., 2017)에 따르면 접촉면에서의 동적 전단 거동 특성은 환경적 요인(pH 조건, 토질)에 많은 영향을 받으며 응력-변형률 특성 역시 달라짐을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 터빈이나 펌프 같은 회전 진동을 발생시키는 진동기기로 인한 주기적인 동적하중이 재하할 경우 PHC 말뚝-사질토 지반 접촉면에서의 거동을 파악하고자 한다.

이를 위하여 환경적 요소를 고려해서 진동기계 기초 지반에서의 PHC 말뚝-지반 접촉면에서의 동적 거동 특성을 적절하게 모사할 수 있는 모델을 도입하고, 실내시험 결과를 이용하여 이를 검증하여 동적 하중을 받는 PHC 말뚝의 접촉면 전단특성을 판단할 수 있는 합리적 평가 인자를 도출하였다.

2.2 교란상태개념(Disturbed State Concept, DSC)과 접촉면

교란 상태 개념은 두 재료가 하중을 받을 때 나타나는 접촉면의 거동을 그 미세구조의 변화를 통해 설명할 수 있다는 이론에 기반을 두고 있다. 이 개념에서는 하중에 의한 재료의 거동을 설명하기 위해 두 가지 기준 상태를 도입하였다. 하나는 외력에 의해 손상되지 않은 상대적으로 온전한 초기 상태(Relatively Intact State, RI)이고, 다른 하나는 외력에 의해 재료가 전단 저항력을 완전히 상실한 상태인 완전 파괴 상태(Fully Adjusted State, FA)이다(Jang et al., 2015).

교란도 상태 개념에 따르면 초기 상태에 외력이 가해지면 재료 내부에서는 점차 손상된 상태로 구성된 부분이 증가하여 재료 전체가 초기 상태에서 손상된 상태로 연속적으로 변화하게 된다(Fig. 2).

이때, 변화 과정을 정량적으로 정의하는 관계식을 교란도 함수(disturbance function)로 정의할 수 있다.

하중이 재하 될 경우 모든 재료는 응력 증가에 따른 변형률이 발생하는데 이러한 응력-변형률 관계는 정적 하중, 동적 하중에 따라 달라지며 각 경우 초기 상태 대비 손상된 상태의 차이를 교란도 함수를 이용하여 교란도(disturbance, D) 값으로 정량적인 산출이 가능하다.

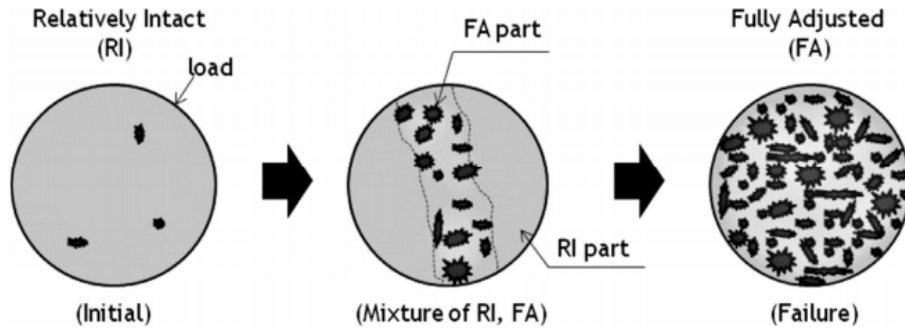


Fig. 2. Disturbed state concept (Kwak, 2014)

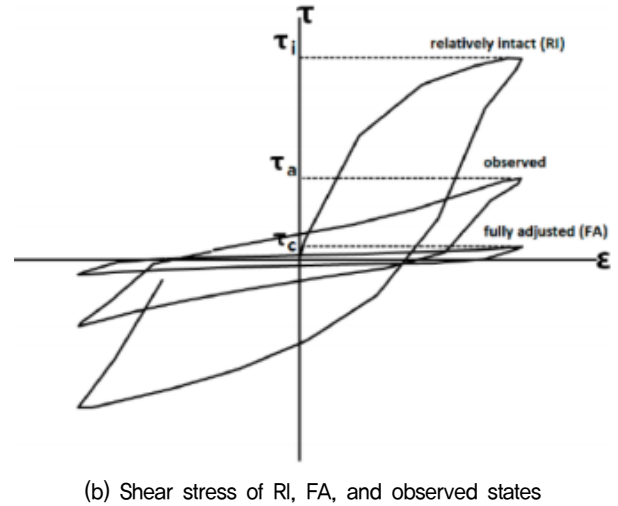
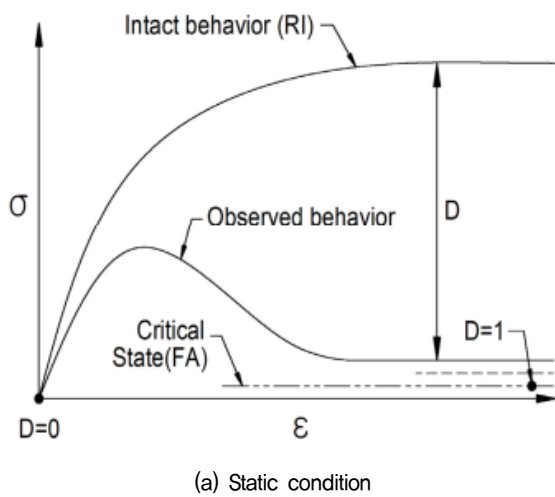


Fig. 3. Stress-strain behavior of the estimation of disturbance, D (Park et al., 2000; Kwak et al., 2017)

Fig. 3에서는 하중 종류에 따른 응력-변형률 곡선의 대표적 형태와 교란도 산출 개념을 설명하였다. 초기 상태는 손상된 영역이 없으므로 교란도 값은 0이 되며 완전 파괴 상태일 경우 교란도 값은 1로 정의한다. 하지만 실제 재료는 완전손상에 도달하기 전에 이미 항복상태 또는 한계상태에 도달하므로 0.99에 가까운 값이 된다.

Fig. 3(a)와 같이 정적 하중의 경우 하중 증가에 따라 변형률이 증가하는데 초기 상태의 경우 응력 증가 없이 변형률이 일정하게 발생하는 상태에 도달하는 반면 실제 재료 내부에서는 항복 이후 손상된 영역이 급증하면서 하중 감소 및 변형률 증가가 발생하게 된다. 이때 동일 변형률에서의 초기 상태와 실제 재하 상태의 응력 차이를 교란도로 정의한다.

Fig. 3(b)는 재료에 전단 하중이 반복돼서 재하 될 경우 전단응력-변형률 관계를 도식한 것이다. 처음 하중 재하 할 때를 초기 상태로 보고 하중이 반복 재하 함에 따라 재료 내부의 파괴되는 영역이 증가하면서 최대 전단응력 값이 감소하는 경향이 나타난다. 이를 일반식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$D = \frac{\tau^i - \tau^a}{\tau^i - \tau^c} \quad (1)$$

여기서, τ^i , τ^c , 그리고 τ^a 는 각각 초기 상태(RI), 완전 파괴 상태(FA), 그리고 임의 횡수의 반복하중 재하 상태 시 전단응력 값을 나타낸다. 하중의 반복 재하 시 재료에서 발생하는 소성변형의 누적값을 전단 소성변형률 상각궤도(deviatoric plastic strain trajectory, ξ_D)라 정의하며, 상각궤도를 이용하여 교란도 함수를 도출할 수 있다. 기존연구(Kwak et al., 2013)를 통하여 전단 소성변형률 상각궤도의 산정 방법을 알 수 있으며, 산정된 교란도 함수는 Fig. 4와 같이 표현할 수 있다.

Fig. 4는 반복 전단응력-변형률 곡선으로부터 식 (1)과 상각궤도를 이용하여 직접 산출한 교란도 함수 곡선이다.

산출된 교란도 함수 곡선은 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$D = D_u (1 - e^{-A \xi_D^Z}) \quad (2)$$

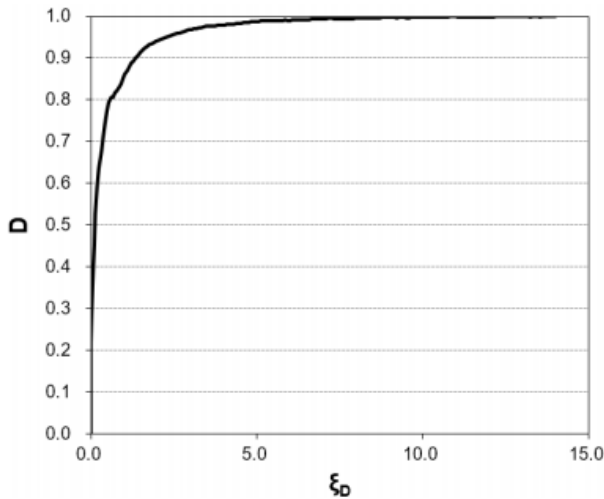


Fig. 4. Example of disturbance function

식 (2)에서 D_u 는 한계 교란이고 A, Z는 본 실험에서 찾고자 하는 접촉면의 재료 상수(interface material parameters)이다. D_u 는 여러 연구에서 0.99 에서 1 사이의 값으로 가정하였다(Armaleh and Desai, 1990; Alanazy, 1996).

본 연구에서는 지반의 화학적 영향을 고려한 사질토 지반에 관입된 PHC 말뚝의 접촉면에서의 동적 전단 거동 특성을 파악하기 위해 PHC 말뚝-사질토 접촉면에 대한 A, Z 영향인자를 실험적으로 결정하였다.

3. PHC말뚝-지반 접촉면 동적 전단시험

3.1 시험 조건

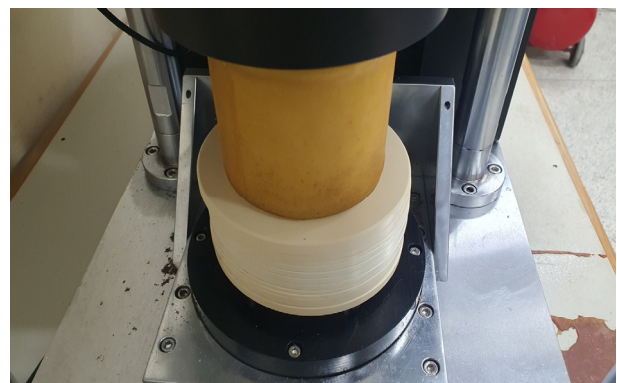
본 연구에서 진동기계 기초에서 PHC 말뚝과 화학적 영향을 받은 사질토 지반 사이에 형성되는 접촉면의 동적 전단 거동특성을 파악하기 위하여 반복 단순 전단시험을 수행하였다.

시험수행을 위해 접촉면 전단 시험기(Simple Shear Test Apparatus soil testing)를 이용하였다. 기기의 형상은 Fig. 5와 같으며 전단 시험기에 대한 상세한 내용은 다음 Table 1과 같다.

사질토 시료는 주문진 표준사를 사용하였고, 화학적



(a) Appearance



(b) Simple shear box

Fig. 5. Simple shear test apparatus soil testing

Table 1. Specifications of simple shear test apparatus soil testing

Component	Description
Loading System	• Max load : 10kN, horizontal & vertical • Max traveling dist : 150mm, horizontal & vertical • precise helical structure/linear motion slides
Servo motor	• Strain-controlled test : velocity range of 0.001 to 100mm/min • Vertical : helical servo motor system • Max velocity : 5,000 r/min • Screw jack : SJ32 Traveling shaft type
Range of horizontal vibration	• 0.01 to 10Hz
Data acquisition system	• 4 Ch of PID output • Data logging interval : 0.1s
Power	• 220v, 60Hz, 15kW
Load cell resolution	• Horizontal : 0.1N • Vertical : 0.1N

Table 2. Physical test results of sandy soil

Element	Moisture content W_n (%)	Specific gravity G_s	Coefficient of uniformity C_u	Coefficient of curvature C_g	Maximum Dry Unit Weight r_{dmax} (g/cm ²)	Minimum Dry Unit Weight r_{dmin} (g/cm ²)
Sand	0.04	2.63	1.90	1.11	1.57	1.38

조건을 표현하기 위해 산성, 중성, 염기성, 해수 용액에 수침시킨 후 물을 제거하여 제작하였으며, 이 중 해수는 바닷물의 평균 염도인 35‰로 설정하였다. 사질토 시료의 물리적 시험결과는 다음 Table 2와 같다. 본 연구에서는 각 용액에 수침기간을 1개월로 설정하였고, PHC 말뚝을 표현하기 위해 압축강도 24MPa의 포틀랜드 시멘트로 두께 20mm, 직경 100mm의 원형 시료를 제작하여 아래에 거치하였다. 시멘트 시료 또한 산성, 중성, 염기성, 해수 용액에 1개월간 수침하여 사용하였다. 실제 PHC 말뚝-지반 접촉면(Fig. 6(a))을 묘사하기 위해 실험에서는 해당 부분을 Fig. 6(b)와 같이 모델링하여 전단 시험을 진행하였다.

진동기계 기초에 영향을 받는 PHC 말뚝-지반의 접촉면을 표현하기 위해 식 (3)을 통해 대략적인 진동기계 기초의 RPM을 주파수로 표현하였다. 본 연구에서는 20Hz를 가하였다.

$$RPM = 120 F/P \quad (3)$$

여기서, F는 주파수(Hz)이고 P는 모터의 극수를 말한다.

시험 조건을 정리하면 Table 3과 같다.

Table 3. Test schedule

Case	Normal stress (MPa)	pH
1	0.2	Acid
2	0.2	Neutral
3	0.2	Basic
4	0.2	Seawater

실험은 다음과 같은 순서로 진행하였다. PHC 말뚝을 묘사하기 위해 직경 100mm의 원형 콘크리트 모델(Fig. 7(a))을 제작하여 멤브레인을 결합(Fig. 7(b))하여 pH 영향과 해수에 수침시켰던 사질토 시료를 모델링 하였다(Fig. 7(c)). 이후 접촉면에서의 움직임을 파악할 수 있게 전단링을 설치(Fig. 7(d))하고 전단기에 설치 후 레이저 센서를 통해 측정하였다(Fig. 7(e)). 전단기의 Shaking Box에 모델을 설치 시 콘크리트 시료가 미끄러지지 않게끔 홈을 파서 고정하여 진행하였다(Fig. 7(f)).

3.2 실험결과

본 실험에서는 산성, 중성, 염기성 환경과 해수의 영향을 받는 지반 조건에서 진동기계 기초에 의해 영향을 받는 PHC 말뚝-지반 접촉면에 대하여 반복 단순 전단 시험을 수행하였다. 시험 결과(Fig. 8)를 공학적으로 분

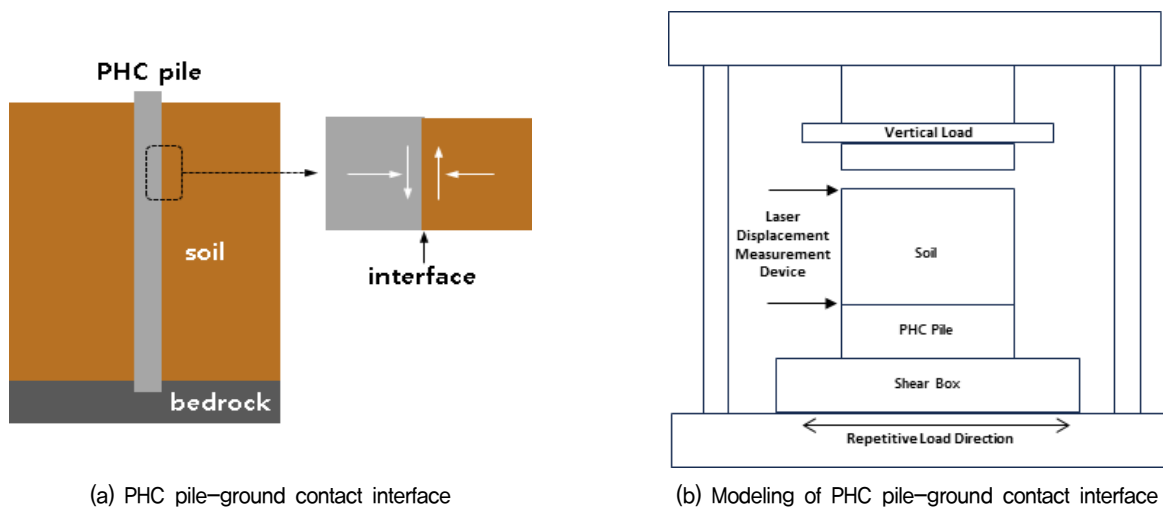
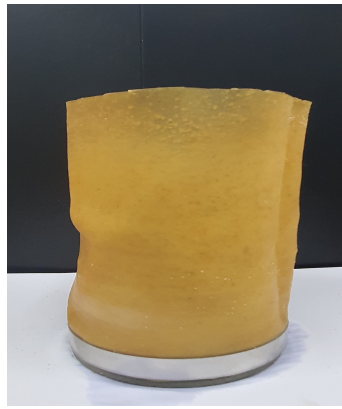


Fig. 6. PHC pile-ground contact surface experimental model



(a) PHC pile model



(b) Membrane bonding



(c) Specimen molding



(d) Shear ring installation

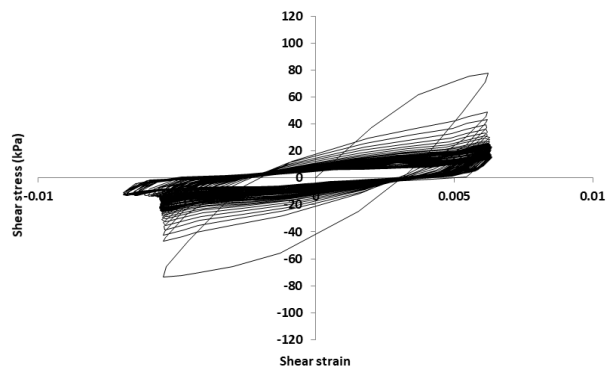


(e) Shear box installation

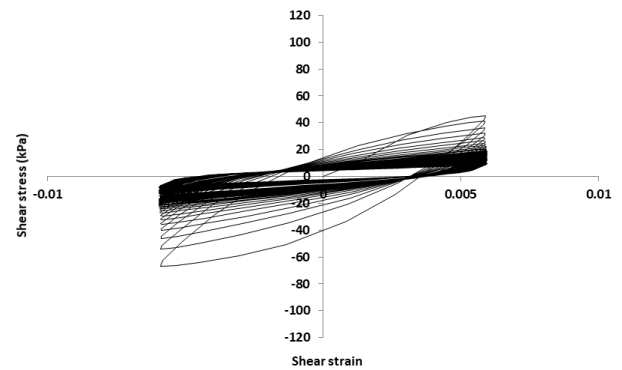


(f) Shaking box hole

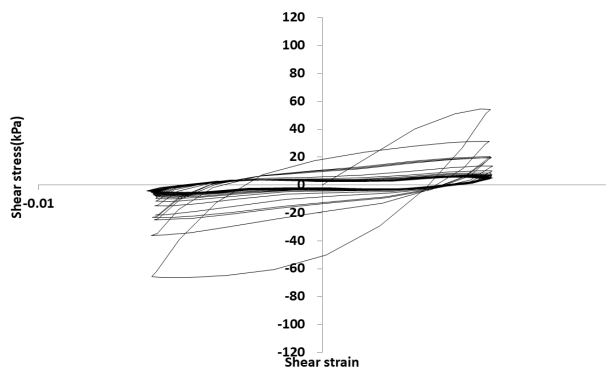
Fig. 7. Order of conducting shear test



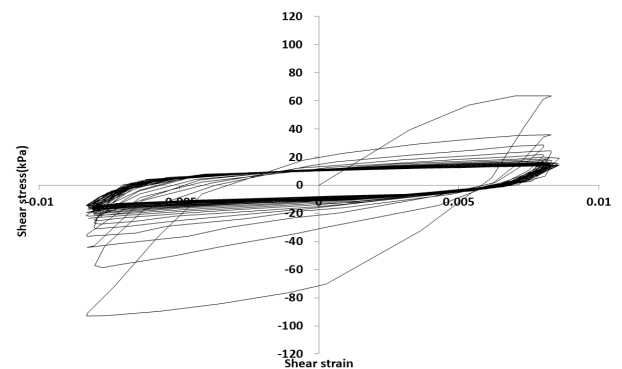
(a) Acid, 0.2MPa



(b) Neutral, 0.2MPa



(c) Basic, 0.2MPa



(d) Seawater, 0.2MPa

Fig. 8. Shear stress-strain curves

석하였다.

전단응력 감소량에 대한 실험 분석 결과, 최초 재하 후 두 번째 재하에서 최대 전단응력이 가장 크게 감소하였다. 이때 염기성 조건에서 최대 전단응력이 45.75%

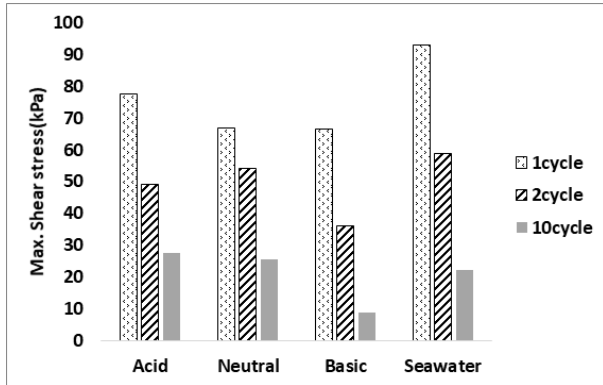
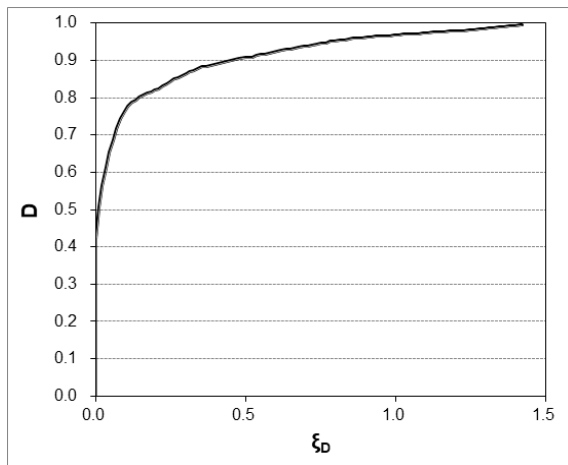


Fig. 9. Max. Shear stress degradation at 1 cycle, 2 cycle and 10 cycle

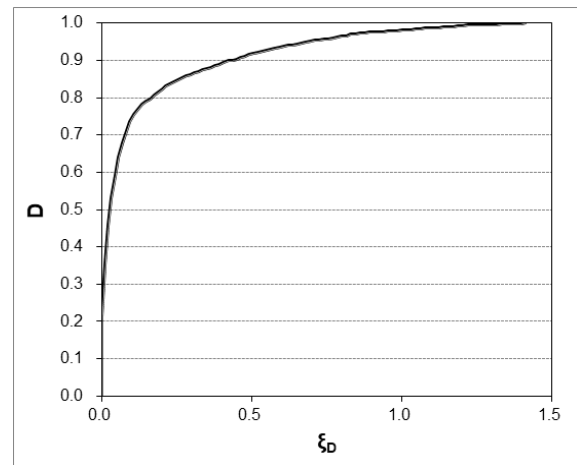
감소하여 가장 큰 변화를 보였고, 해수에 수침된 조건은 36.85%, 산성은 36.68%, 중성은 18.74% 감소하는 결과 (Fig. 9)를 나타냈다. 이러한 결과는 염기성 조건이 초기 재하에서 전단 저항력의 급격한 열화를 유발한다는 것을 시사하며, 중성 조건은 다른 조건에 비해 전단 저항력의 열화가 상대적으로 낮게 발생한다는 특성을 보였다. 염기성 조건에서 가장 큰 전단응력 감소를 보인 이유는 국부적 부식이 발생하여 토립자간의 미끄러짐이 발생하여 전단응력이 감소한 것으로 판단된다.

화학적 영향 및 해수의 영향 비교 결과, 화학적 영향을 받은 PHC 말뚝-사질토 지반 접촉면의 전단응력 감소는 해수의 영향을 받은 접촉면의 전단응력 감소와 비교하였을 때 더 크게 나타났다. 이는 다양한 화학적 조건이 해수의 영향에 비해 PHC 말뚝의 전단응력에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

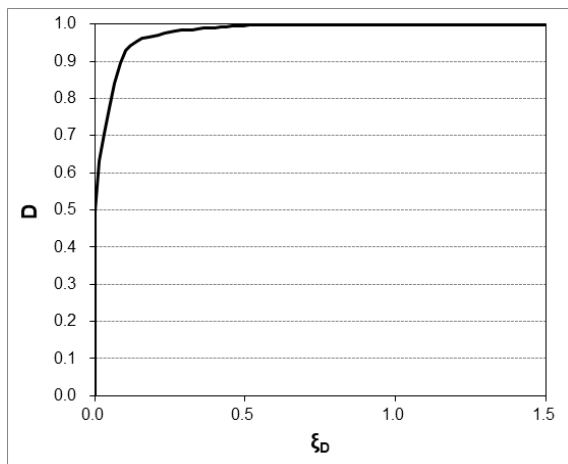
반복재하에 의한 접촉면의 손상 정도를 정량적으로



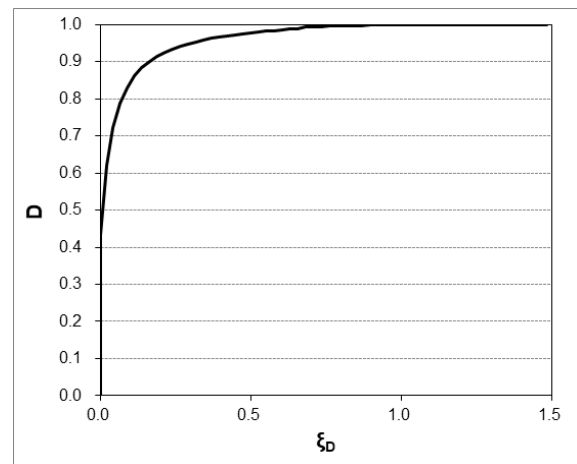
(a) Acid, 0.2MPa



(b) Neutral, 0.2MPa



(c) Basic, 0.2MPa



(d) Seawater, 0.2MPa

Fig. 10. Disturbance function

평가하기 위해, 전단응력-변형률 곡선으로부터 교란도 함수(Park and Desai, 2000)를 도출하였다. 이 교란도 함수는 주어진 식 (1)을 사용하여 전단응력-변형률 곡선으로부터 산출되며, 식 (2)를 통해 계산된 교란도 함수는 Fig. 10에 제시되어 있다. 각 환경요소에 따른 파괴 형상의 비교를 통해, 염기성 환경에서 교란도의 급격한 증가로 인해 가장 빠르게 파괴 형상이 나타났다. 산성과 해수의 영향을 받은 경우에는 비슷한 파괴 형상을 보였으며, 중성 조건은 상대적으로 더 늦은 파괴를 나타냈다.

이상의 실험 결과는 화학적 조건과 해수의 영향을 받는 PHC 말뚝-지반 접촉면의 동적 전단응력 거동을 이해하고, 구조물의 설계 및 유지 보수에 중요한 정보를 제공한다. 특히, 교란도 함수의 도출은 진동하중에 의한 PHC 말뚝-사질토 지반 접촉면 손상과 그 파괴 메커니즘을 파악하는 데 중요한 도구로 활용할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 기계진동을 받고 있는 PHC 말뚝과 지반 접촉면의 화학적, 해수 환경의 영향을 고려한 동적 전단 거동특성을 파악하기 위해 반복 단순 전단시험을 실시하였고, 다음과 같은 공학적인 결론을 도출하였다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 전단응력 감소의 경향성 분석: 실험 데이터에 따르면, 초기 재하 이후 두 번째 재하에서 전단응력이 가장 크게 감소하였으며, 특히 염기성 환경에서 전단응력이 45.75%로 가장 크게 감소하였다. 이는 해수(36.85%), 산성(36.68%), 중성(18.74%) 조건보다 현저히 높은 감소율을 보여 pH 값이 전단응력 감소에 중요한 변수임을 확인하였다. 10회 재하 후에도 같은 순서로 전단응력이 감소함으로써, 화학적 환경이 지속적으로 동적 전단 거동에 영향을 미친다는 것을 확인하였다.
- (2) 파괴 형상 및 교란도 함수 비교: 염기성 조건에서 교란도가 급격히 증가하여 가장 먼저 파괴 형상을 보였다. 산성과 해수 조건에서도 유사한 파괴 형상이 관찰되었으며, 중성 환경은 비교적 느리게 파괴가 진행되었다. 이러한 교란도의 정량적 분석을 통해 환경 조건에 따른 누적 소성변형률 발생 시점과 관련된 전단 변형률 상각계도(ξ_D)를 효과적으로 파악할 수 있다.

- (3) 동적 전단거동의 정량적 평가: 본 연구에서는 제한된 실내시험을 통해 진동기계 기초의 실제 조건을 유사하게 재현하여 접촉면의 동적 전단거동을 정량적으로 평가하였다. 이 연구 결과는 현장에서 채취한 시료를 이용한 동적 전단시험에 대한 검증 기준으로 활용될 수 있으며, 추후 다양한 환경 조건을 반영한 반복 시험을 통해 확보된 데이터는 더욱 신뢰성 있는 설계 및 예측에 기여할 것으로 기대된다.

이상의 결론은 진동기계 기초 설계와 관련된 지반공학 분야에서 동적 거동의 예측과 화학적 환경의 영향을 이해하는 데 있어서 중요한 기여를 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 중견연구지원사업(2021R1A2C10955891331682007070103)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Alanazy, A.S. (1996), "Testing and Modeling of Sans-Steel Interfaces Under Static and Cyclic Loading", Ph.D Dissertation, Dept. of Civil Engrg and Engrg. Mech. Univ of Arizona, Tucson, Arizona.
2. Armaleh, S.H. and Desai, C.S. (1990), "Modeling Include Testing of Cohesingless Soils under Disturbed State Concopt", Report to the NSF, Dept of Civil Engrg and Engrg Mech Univ of Arizona, Tuscon, Arizona.
3. Choi, Y.K., Lee, W.J., Lee, C.U., and Kwon, O.K. (2019), "Study(I) on Delvelopment of Charts and Formulae Prediction Allowable Axial Bearing Capacity for Prebored PHC Pile Socketed into Weathered Rock through Sandy Soil Layer – An Analysis of Sharing Ratio of Skin Friction to Total Bearing Capacity (SRF) by Analyzing Pile Load Test Data-", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.8, pp.17-30.
4. Huang, F.Y., Wu, S.W., Luo, X.Y., Chen, B.C., and Lin, Y. (2018), "Pseudo-static Low Cycle Test on the Mechanical behavior of PHC Pipe Piles with Consideration of Soil-pile Interaction", *Engineering Structures*, Vol.171, No.15, pp.992-1006.
5. Jang, D.I., Kim, Y.J., Kwak, C.W., and Park, I.J. (2015), "Dynamic Shear Behavior of the Ground-geosynthetics Interface in the Waste Landfill", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.4, pp.5-12.
6. Kim, B.I., Lee, S.H., Kim, Y.U., Jo, S.M., Yoon, C.Y., and Jo, Y.J. (2013), "Foundation Engineering", MoonUnDang, ISBN 978-89-7393-985-5, pp.167.
7. Kwak, C.W. (2022), "Characteristics of Dynamic Shear Bbehavior of Pile-Soil Interface Considering pH Conditions of Groundwater", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.38, No.5, pp. 55-17.

8. Kwak, C.W., Park, I.J., and Park, J.B. (2013), "Evaluation of Disturbance Function for Geosynthetic-soil Interface Considering Chemical Reactions based on Cyclic Direct Shear Tests", *Soils and Foundations*, Vol.53, No.5, pp.720-734.
9. Kwak, C.W. (2014), "Cyclic Shear Behaviors of Geosynthetic-Soil Interface Considering Chemical Effects", Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering Seoul National University, Seoul, Korea.
10. Kwak, C.W., Park, J.B., Jang, D.I., and Park, I.J. (2017), "Dynamic Shear Degradation of Geosynthetic-Soil Interface in Waste Landfill Sites", *Applied Science*, Vol.7, No.1225, doi:10.3390/app7121225
11. Luo, X., Huang, F., Zhuang, Y., Wu, S., and Qian, H. (2019), "Modified Calculations of Lateral Displacement and Soil Pressure of Pile Considering Pile-Soil Interaction under Cyclic Loads", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.49, No.4, 10.1520/JTE20190267.
12. Park, I.J. and Desai, C.S. (2000), "Cyclic Behavior and Liquefaction of Sand Using Disturbed State Concept", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.1236, No.9, pp. 834-846.
13. Park, T.K., Lee, J.C., and Lee, C.S. (2008), "Problems and Improvement Measure of PHC Pile Construction", *Proceedings of Korea Institute of Construction Engineering and Management*, Nov., No.07, pp.344-348.
14. Shin, B.S., Choi, Y.S., and Bong, S.K., (2012), "Vibration Reduction of a LP Steam Turbine having Support Subsidence", *Korean Society of Noise and Vibration Engineering Paper Collection*, Vol.22, No.1, pp.74-80.
15. Shin, K.S. and Lim, B.H. (2018), "Engineering Properties of PHC Pile Considering Replacement Ratio of Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Curing Conditions", *Journal of Korea Institute of Building Construction*, Vol.18, No.5, pp.439-446.
16. Tomlinson, M.J. (1994), "Pile Design and Construction Practice 4th Edition", E & FN Spon., pp.133-134.
17. Tran, N.X., Bong, T., Yoo, B.S., and Kim, S.R. (2021), "Evaluation of the Soil-pile Interface Properties in the Lateral Direction for Seismic Analysis in Sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.140, 106473.
18. Yoo, J.W., Kim, T.H., Kim, S.K., and Han, C.H. (2002), "A Study on the Improvement Method of Construction Management for PHC Pile in an Apartment house", *Proceedings of Korea Institute of Construction Engineering and Management*, pp.244-247.
19. Yoo, M.T., Back, M.C., Lee, I.H., and Lee, J.S. (2017), "Evaluation of Dynamic Behavior for Pile-Supported Slab Track System by 3D Numerical Analysis", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.21 No.5, pp.255-264.

Received : November 14th, 2023

Revised : January 16th, 2024

Accepted : January 16th, 2024