

항타시공성을 고려한 대구경 항타강관말뚝의 폐색효과 분석(CEL해석)

Analysis of Plugging Effect for Large Diameter Steel Pipe Piles Considering Driveability (CEL Method)

정 상 섬¹ Jeong, Sang-Seom

송 수 민² Song, Su-Min

고 준 영³ Ko, Jun-Young

Abstract

This paper presents the analysis of plugging effect especially when the large diameter steel pipe pile was installed by considering driveability (BPM, blow per meter). The Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) technique was used to simulate the driving of open-ended piles into soil. To consider the driveability, the applied driving energy for each pile was obtained from the analysis results by using the wave equation. The parametric studies were performed for different pile diameters, penetration depths of pile, soil elastic modulus and BPM. It was found that the SPI is almost constant with increasing both the pile diameter and the required driving energy. It is also found that the plugging effect increases with increasing the pile length, resulting in the increase of lateral earth pressure. Based on this study the apparent magnitude and distribution of the lateral earth pressure is proposed for inside portion mobilizing soil plug.

요 지

본 연구에서는 항타시공성(BPM, blow per meter)을 고려하여 대구경 항타강관말뚝을 시공하였을 때 발생하는 폐색 효과를 분석하였다. Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL)해석 시 적용된 항타에너지는 파동방정식을 이용하여 산정하였고, CEL 대변형 3차원 유한요소 해석을 수행하여 말뚝 항타시공 과정을 모사하였다. 본 연구 결과, 말뚝 직경이 증가함에 따라 목표 깊이까지 소요되는 항타에너지는 증가(일정한 BPM인 경우에 해당함) 하였으며, 그 결과 soil plugging index(SPI)는 서로 유사하게 나타나지만 폐색효과는 감소함을 알 수 있었다. 또한, 말뚝의 근입 깊이가 증가할수록 SPI는 서로 유사한 값을 나타냈으나 관내토에서 발생하는 수평토압이 증가하게 되어 폐색효과는 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구결과, 폐색효과의 대표적 영향인자인 말뚝 직경, 말뚝 근입 깊이, 지반 탄성계수, BPM에 따른 관내토의 수평토압계수 분포 경향을 제안하였다.

Keywords : Large diameter steel pipe pile, Large deformation FE analysis, Coupled Eulerian-Lagrangian technique, Driveability, Plugging effect, Soil Plugging Index (SPI), Lateral earth pressure coefficient

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduated Student, Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-6642, Fax: +82-2-2123-8378, ssm9780@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정희원, Texas Tech Univ. 박사후연구원 (Member, Post-doctoral Research Associate, Dept. of Civil, Environmental and Construction Engrg., Texas Tech Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 지지층이 매우 깊은 위치에 존재하는 지반에 초장대 교량이나 항만구조물과 같은 대형 토목구조물을 설치하는 경우 대구경 항타강관말뚝이 주로 사용되고 있다. 이러한 대구경 항타강관말뚝은 대부분 선단부가 개방된 상태로 관입되는 개단말뚝(open-ended pile)으로 사용되고 있다. 하지만 대구경 항타강관말뚝 설계 시, 선단부 폐색 메커니즘이 복잡하여 현재까지 AASHTO (2002) 등에도 명확한 설계기준이 제시되지 않고 있는 실정으로 현장에서는 보수적인 설계가 일반화 되어 있는 실정이다.

기존 개단말뚝의 폐색효과에 대한 연구는 말뚝조건, 시공방법, 지반조건 등 다양하게 진행되고 있으며 현재까지 말뚝조건에 관한 연구는 말뚝 직경과 말뚝 근입 깊이에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 말뚝 직경에 관한 연구로는 말뚝 직경이 작아짐에 따라 관내토의 다짐 현상이 증가하는 현상을 실험을 통해 보고하였고(Szechy, 1959), 반대로 말뚝 직경이 커짐에 따라 폐색정도는 줄어든다고 보고되고 있다(Paikowsky, 1989; Ko and Jeong, 2015). 또한 말뚝 근입 깊이가 길어질수록 말뚝의 폐색 정도는 증가하는 것으로 보고되고 있다(Beringen et al., 1979; Matsumoto and Takei, 1991). 개단말뚝의 시공방법에 관한 연구는 대표적으로 항타공법과 압입공법으로 구분된다. 항타공법의 경우, 낙하고, 해머의 무게 등 항타에너지가 폐색효과에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Brucy et al., 1991; Ko et al., 2016). 지반조건에 따른 개단말뚝의 폐색효과에 대한 연구(Kishida, 1967; Klos and Tejchman, 1981; Paikowsky et al., 1989; Matsumoto and Takei, 1991; Paik, 1994; Paik et al., 2003)는 대부분 소구경 또는 실내실험(1G, 가압토조)으로 수행되었고 대구경 말뚝에 대한 현장데이터 및 재하시험 자료가 매우 부족하여 실제 설계에 적용하는데 어려움이 있다. 또한, 항타말뚝의 설계 및 시공단계에서 적정 항타장비의 선정, 적정규격의 말뚝재료 선정, 말뚝 지지력의 예측 등을 반드시 검토해야 한다. 이를 위해 일반적으로 항타시공성 분석이 수행되고 있지만, 기존 연구에서 항타말뚝의 항타시공성을 고려하지 않고 있기 때문에 항타말뚝의 폐색효과를 고려한 설계에 어려운 점이 있다. 따라서 항타시공성을 반영하여 대구경 항타강관말뚝의 폐색효과를 예측한다면 실제 설계 시 지지력을 적절하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구

에서는 대구경 항타강관말뚝의 경우 실제 현장시험을 수행하는 것은 경제적 및 시간적인 어려움이 따르므로, 최근 보고된 항타말뚝의 지반관입 과정을 모사할 수 있는 대변형 수치해석기법인 CEL기법을 이용하여 연구를 수행하였다(Ko et al., 2016). 항타시공성을 고려하기 위해 CEL 해석에 적용된 항타에너지는 GRL-WEAP의 driveability 해석을 통해 산정하였다. 폐색효과의 대표적인 영향인자인 1) 말뚝 직경, 2) 말뚝 근입 길이, 3) 사질토 지반의 탄성계수, 4) 항타시공성(BPM)에 대한 영향을 분석하고자 매개변수연구를 수행하였다.

2. GRL-WEAP을 이용한 항타시공성 분석

말뚝의 항타공식에 대해 많은 연구가 있었지만, 말뚝의 지지력 예측에 한계점이 있어 흔히 사용되지 않고 있는 실정이다(Bowles, 2002). 파동방정식을 이용한 말뚝 해석의 경우 말뚝을 여러 질량계의 합으로 가정하여 파동방정식을 풀이하여, 상대적으로 이론상 문제점이 적은 장점이 있고, 특히 말뚝의 극한지지력 및 말뚝에 작용하는 항타에너지가 예측 가능하다. 이를 통해 적절한 항타장비 조합이 가능하며, 항타시공성(driveability)을 고려한 말뚝해석이 가능하다(Pile dynamics inc, 2010).

이러한 파동방정식에 의한 해석프로그램인 GRL-WEAP (2010)은 말뚝이 타격되었을 때 말뚝을 따라 이동하는 수직 방향 응력파의 전달이론을 이용한다. 즉, 램(항타하중)이 말뚝을 타격하게 되면 말뚝재질과 관련되는 일정한 속도를 갖는 충격파가 말뚝을 따라 전달되며 이 충격파는 말뚝 주변 지반 저항에 의해 감소하게 된다. 충격파가 말뚝의 선단에 도달하면 이 충격파는 반사파로 작용하게 될 것이며, 이 때 형성된 최대 충격력이 말뚝 선단의 극한지항력을 초과할 때 말뚝은 지반 속으로 관입되게 된다.

2.1 항타시공성(BPM)

실무에서 말뚝의 항타시공 시 말뚝의 단위길이당 타격횟수(blow per meter, BPM)를 통해 소정의 지지력에 도달하였는지를 판단한다. 단위관입량당 타격횟수가 커지는 경우 시간과 비용면에서 경제성이 떨어지며 말뚝에 무리한 타격으로 인해 말뚝이 손상되는 경우가 발생하기 때문에 현재 실무에서 적용하고 있다. 일반적으로 콘크리트 말뚝의 경우는 BPM 200타/m로, 강관말뚝이 경우는 500타/m로 제한하고 있으며 이를 초과하는 경

우에는 시공성이 없는 것으로 판단하여 항타시공을 종료한다. 지반과 말뚝에 비해 상대적으로 하중이 작은 해머를 사용한 경우에는 BPM기준을 넘어가는 상황이 나타나게 되며 이런 경우 목표관입깊이까지 관입이 되지 않으므로 지지력이 설계지지력에 못 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 항타관입성을 고려한 대구경 항타말뚝의 폐색효과를 분석하기 위하여 각 영향인자에 대해 일정 BPM을 기준으로 항타에너지를 계산하여 적용하였다.

2.2 GRL-WEAP Driveability 해석

GRL-WEAP은 대상 지반에 적합한 항타에너지를 수치해석을 통해 산출할 수 있어 실무에서 가장 많이 사용되는 프로그램이다. 이는 말뚝의 파동이론해석법(Wave Equation Analysis of Pile Driving)에 근거한 프로그램으로 본 프로그램을 이용하여 driveability해석을 수행한 후 목표 관입깊이에서 나타나는 BPM을 기준으로 항타에너지를 결정하였다. 단일 지층을 기준으로 해석함에 따라 이에 발생하는 BPM은 심도가 깊어짐에 따라 점점 크게 나타났으며, 말뚝의 목표 관입깊이인 45m에 도달하였을 때 BPM값은 500에 도달하는 것을 확인할 수 있고, 이때 사용한 항타에너지를 결정하게 된다.

본 해석에서는 지반 모델링을 단일 사질토 층으로 가

정하여 SPT N치가 일정한 단일층으로 해석을 수행하였고, 항타 효율은 재료의 파괴를 고려하여 0.8로 고정하여 해석하였다. 항타 시 대구경 항타강관말뚝의 재료 파괴를 검토하기 위하여 허용응력을 SKK590 기준 440MPa로 해석하였다. 또한 본 연구에서는 대구경 강관말뚝이 목표 관입깊이에 시공된 경우에 대해 폐색효과 분석을 목적으로 연구를 수행하였기 때문에, 말뚝 이음 및 결함으로 인한 영향은 따로 고려하지 않았다.

2.3 영향인자 별 항타시공성 해석 결과

본 절에서는 GRL-WEAP프로그램을 이용하여 대구경 항타강관말뚝의 영향인자 별 항타에너지를 구한 결과를 BPM을 기준으로 나타내었다. Table 1은 각 case 별 해석 시 각 영향인자에 따른 BPM을 고려한 항타에너지를 산출하여 정리한 표이다.

3. 대변형 수치해석 기법 (CEL Method)을 통한 폐색효과 분석

3.1 개단 말뚝 폐색효과 분석

개단말뚝이 지반에 관입될 때, 말뚝 내부로 밀려들어

Table 1. Input parameters for the parametric studies

Parameter	Case	D (m)	t (cm)	L (m)	BPM	Required Driving Energy (kN·m)	E* (MPa)	φ (deg)	c (kPa)	Poisson's ratio, ν
D	D1	1.5	4	45	500	441	22.5	34	-	0.30
	D2	2	5			774				
	D3	2.5	6			1161				
	D4	3	7			1655				
	D5	3.5	8			2189				
L	L1	2	5	15	500	149	22.5	34	-	0.30
	L2			30		589				
	L3			45		774				
Sand	Sand1 (Loose)	2	5	45	500	240	12.5	26	-	0.30
	Sand2 (Medium)					774	22.5	34		
	Sand3 (Dense)					1736	32.5	39.5		
BPM	BPM1	2	5	45	200	2003	22.5	34	-	0.30
	BPM2				300	1215				
	BPM3				400	881				
	BPM4				500	774				

* is obtained from a equation as follows : $E=500(N+15)$ (Bowles, 2002)

가 압축된 관내토로 인해 말뚝의 선단이 막혀 지지력을 발생하는 현상을 폐색효과라고 한다. 이러한 말뚝의 폐색상태는 완전개방상태, 부분폐색상태, 완전폐색상태와 같이 크게 3가지 상태로 구분할 수 있다(Paikowsky, 1989).

개단말뚝의 지지력에 영향을 미치는 성분은 크게 3가지로 Fig. 1과 같이 외주면마찰력(Q_{out}), 선단부 지지력(Q_{tip}), 내주면마찰력(Q_{in})으로 구분할 수 있다(Yamahara, 1964). 여기서 흙마개(soil plug)의 폐색효과로 인한 지지력(Q_{plug})은 Q_{in} 과 Q_{base} 둘 중 작은 값을 사용한다.

항타로 인해 발생하는 모든 관내토에서 지지력이 발현되는 것은 아니며, 말뚝 선단근처 일부분에서 지지력이 발현된다는 것이 기존 연구(Ko and Jeong, 2015; Paikowsky, 1989)로부터 밝혀져 왔고, 특히 이러한 이론을 Ko와 Jeong (2015)이 다음 식 (1)과 같이 항타 후 발생된 관내토 높이와 실제 내주면 마찰력이 발생하는 길이의 비를 SPI로 정의하였다.

$$SPI = \frac{L_{stress}}{L_{plug}} \quad (1)$$

여기서, SPI는 soil plugging index이고, L_{plug} 는 관내토 높이, L_{stress} 는 내주면마찰력이 발생하는 높이이다.

또한 Jeong et al.(2015)는 관내토의 수평토압계수(lateral earth pressure coefficient of soil plug)를 이용하여 내주면마찰력을 산정하는 방법을 제안한 바 있다. 이렇게 관내토와 말뚝내부사이에서 발생하는 내주면마찰력을 산정하기 위해서는 관내토의 물성이나, 현장검증이 필수

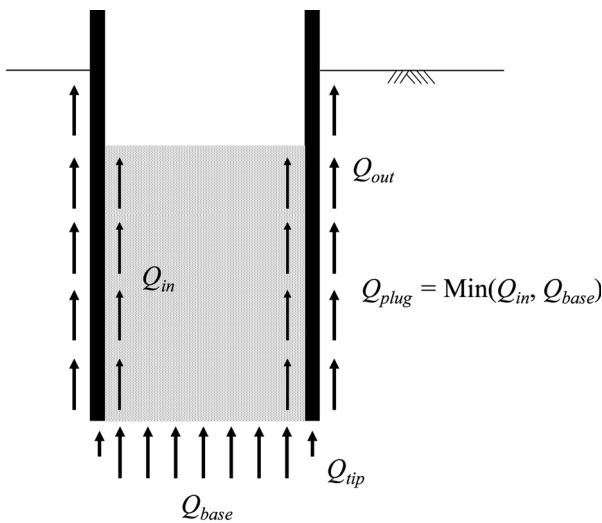


Fig. 1. Components of bearing capacity for open-ended driven pile

적이지만 현장시험에서는 항타말뚝의 내주면마찰력에 작용하는 수평토압계수의 측정이 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 한계로 인해 실제 항타시공 과정이 모사가능한 대변형 수치해석을 통해 폐색효과 영향인자들을 분석하고자 한다.

3.2 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL)을 이용한 대변형 수치해석

최근 산사태로 인한 토석류 발생(Jeong et al., 2014; Jeong et al., 2015)이나 해상 앵커의 인발 거동 분석(Kim and Jeong, 2014), TBM 작업 시 굴진 영향 분석(Lee, 2016; Lee et al., 2017)과 같은 변형이 크게 발생하는 지반공학 적 현상을 모사하기 위해 Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL)기법을 이용한 대변형 수치해석이 많이 연구되고 있다. 기존 미소변형 수치해석의 경우 Lagrangian analysis만을 이용하여 대변형 발생 시 mesh의 찢어짐 또는 수렴하지 않는 현상이 나타났으나, 본 CEL 해석은 Eulerian analysis와의 결합을 통해 모델의 mesh 왜곡이나 파괴가 일어나지 않아 대변형 해석이 가능하다(Kim and Jeong, 2014; Qiu et al., 2015; Ko et al., 2016).

최근 말뚝의 관입에 따른 거동분석(Ko et al., 2015; Ko et al., 2016)을 통해 CEL기법을 통해 항타말뚝 시공 과정에서 발생하는 폐색효과에 대한 영향분석을 한 바 있다. 본 연구에서는 이를 연장하여 항타관입성을 고려한 대구경 항타강관말뚝의 발생하는 폐색효과에 대한 영향을 분석하고자 한다.

본 연구에서는 범용 해석 프로그램인 ABAQUS/EXPLICIT (2013)를 사용하였으며 CEL기법은 ABAQUS에서 지원하는 기법으로 적용하였다.

3.3 경계조건 및 유한요소 모델링 및 검증

본 연구에서는 지반모델은 Eulerian 좌표계, 말뚝모델은 Lagrangian 좌표계로 모델링하였다. 본 해석의 모델링은 Fig. 2에 나타나있다. 해석시간의 절약을 위해 Axisymmetric으로 사분면 형상으로 모델링하였다. 본 연구에서는 대구경 말뚝의 동적해석에 의한 영향범위를 고려하여 말뚝 지름의 10배(10D)를 적용하였고, 기존 연구와 동일하게 관입깊이의 2배(2L)를 적용하였다. 경계조건은 반지름방향 경계면에서 x, y축 방향 변위를 억제하고 z축 방향 변위만 허용하기 위해 롤러구속조건을 적용하였

고, 하단 경계면에서는 모든 축방향으로 변위가 발생하지 않도록 힌지구속조건을 적용하였다. 해석에 적용된 요소는 8개의 절점(node)으로 구성된 Eulerian brick 요소인 EC3D8R 요소와 Lagrangian brick 요소인 C2D8R 요소를 적용하였다. 또한 initializing 단계에서 void layer 내부, soil layer 위에 위치하는 말뚝의 초기 위치를 표시하기 위해 Fig. 2에 start point로 표시하였다.

해석시 접촉조건(contact)은 ABAQUS에서 제공하는 접촉요소(contact element)를 사용하였다. 경계면 조건은

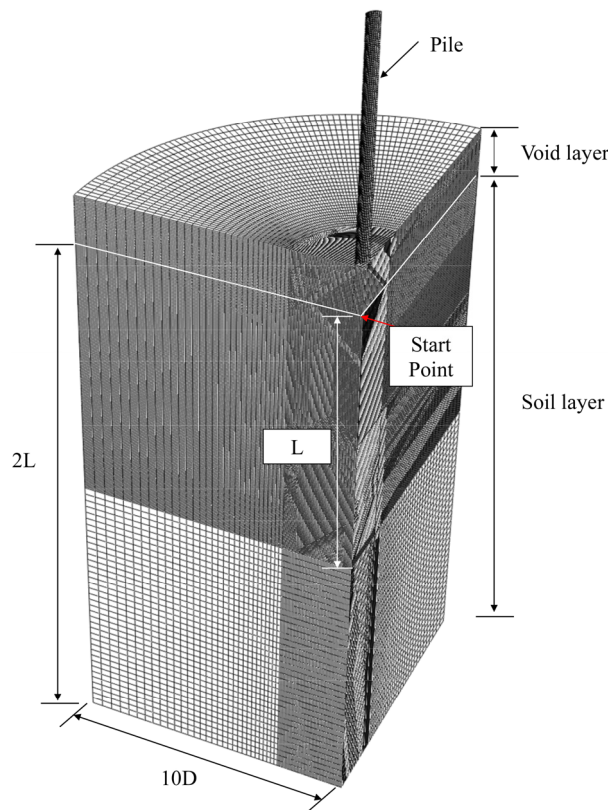


Fig. 2. CEL finite element model

식 (2)와 같이 마찰계수와 한계변위, 한계 전단응력으로 정의되는 Coulomb 마찰이론을 적용하였다. 이때 경계면 조건은 해석의 모든 접촉조건에 일괄적으로 작용하였다.

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (2)$$

여기서, μ 는 마찰계수, p 는 접촉력이다.

말뚝에 가하는 항타하중은 GRL-WEAP을 통해 구한 항타에너지(해머중량, 낙하고)를 이용하여 한 타에 대한 하중을 0.04초 동안 말뚝 두부에 반복으로 적용하였다(Goble et al., 1980; Ko et al., 2016).

본 해석의 검증을 위해 기존 연구결과인 광양 현장재하시험 사례(Ko and Jeong, 2015)를 토대로 항타 강관말뚝의 거동을 비교, 분석하였다(Table 2). 이 때 사질토 지반의 탄성계수(E)와 내부마찰각(ϕ)의 관계는 기존연구(Bolwes, 2002)를 통해 산정하였다. 이를 통해 본 연구에서 적용한 대구경 항타강관말뚝의 CEL 해석의 모델링 및 타당성을 SPI를 통해 검증하였다.

또한 CEL 해석에서는 구조물과 지반의 경계면 사이의 mesh의 크기에 따라 해석결과의 정확성이 결정된다. 따라서 CEL 해석을 수행하기 이전에 적절한 mesh 크기를 찾는 mesh convergence study는 필수적이다. 본 연구에서는 지반 mesh 크기를 변화해가며 mesh convergence study를 수행하였고, 해석 정확도가 수렴하고 해석시간이 짧은 최적의 mesh 크기를 선정하였다(Ko et al., 2016). 본 연구에서는 말뚝 직경 (D)이 2m, 말뚝 길이 (L)가 15m인 말뚝을 대상으로 해석을 수행하였다. Table 3은 mesh convergence study에서 적용한 말뚝 물성 및 광양 현장재하시험 케이스의 지반 물성(Ko et al., 2016)을 정리한

Table 2. Validation of CEL numerical model

	L_{plug}			SPI (%)		
	Measured	Ko et al., 2016	This study	Measured	Ko et al., 2016	This study
Case 1	1.30	1.80	1.82	34.4	40.0	41.2
Case 2	2.00	1.94	1.99	23.1	22.6	20.3
Case 3	2.30	1.84	1.85	17.4	13.1	14.3

Table 3. Input parameters of mesh convergence study (Gwangyang site)

Type	Model	γ_t (kN/m ³)	E (MPa)	ϕ (deg)	c_u (kPa)	Poisson's ratio, ν
Pile	Linear-Elastic	75.0	210,000	-	-	0.2
Sand	Mohr-Coulomb	18.0	13.5	32	0	0.3

Table 4. Result of mesh convergence study

Case	Minimum size of mesh	D/mesh size	Number of elements	Computation time (h)	Ultimate penetration force, P_u (kN)
Mesh 15.4	0.13	15.4	4,751,388	148	56,398
Mesh 12.5	0.16	12.5	2,527,322	24	56,837
Mesh 10.0	0.20	10.0	1,320,084	9	58,250

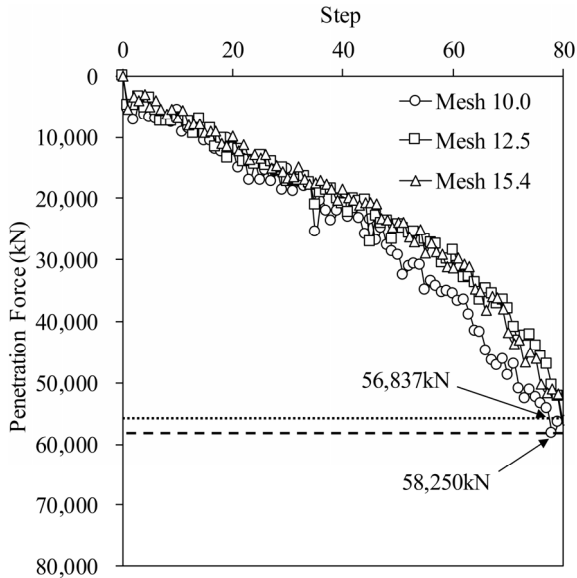


Fig. 3. Ultimate penetration force with varying mesh sizes

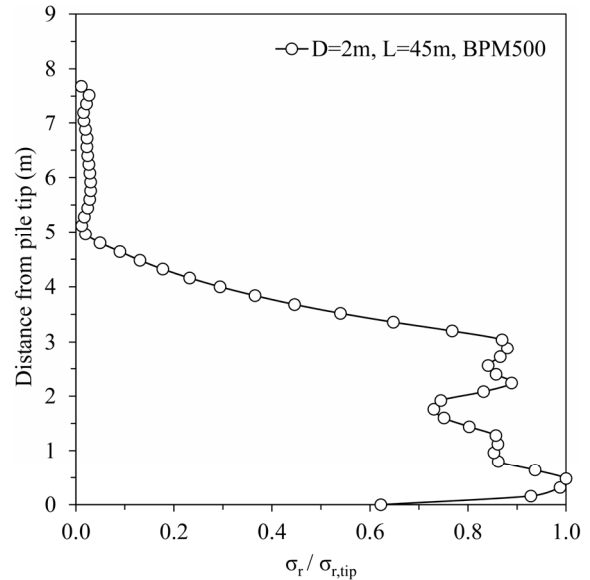


Fig. 4. Normalized radial stress with varying distances from pile tip

표이다. Table 4는 mesh 크기를 변화시키면서 해석한 결과를 정리하였다. mesh의 조밀한 정도는 mesh의 개수에 따라 결정되며, 해석시간과의 상관성으로 mesh를 결정하였다. Fig. 3은 각 mesh 크기에 대한 극한관입저항력(ultimate penetration force)을 나타낸 것으로 mesh 크기가 12.5의 경우와 15.4의 경우의 관입저항력의 크기가 크게 차이가 나지 않지만, 해석소요시간이 약 6배 정도 차이가 나므로 본 연구에서는 mesh 크기가 12.5일 경우를 최적 mesh 크기로 결정하고 매개변수연구를 수행하였다.

4. 항타시공성을 고려한 폐색효과 영향인자 분석 결과

항타시공성을 고려한 대구경 항타강관말뚝의 폐색효과를 분석하기 위하여 대변형 수치해석을 이용하여 대표적 영향인자인 1) 말뚝 직경, 2) 말뚝의 근입 깊이, 3) 사질토의 탄성계수, 4) 항타시공성(BPM)에 대해 매개변수 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 항타시공성을 고려한 항타에너지를 적용하여 해석을 수행하였을 때,

발생하는 내주면 마찰력 발생 높이를 기존 연구(Jeong et al., 2015; Ko, 2015)에서 제안한 SPI를 이용하여 경향성을 분석하고자 한다. 또한 3장에서 언급하였듯이 항타강관말뚝의 폐색효과로 인한 지지력은 말뚝 내주면에 작용하는 수평토압계수와 관련이 있으므로, 본 해석 결과 분석 시, 관내토 선단부 부근의 내주면에서 발생하는 수평토압계수를 분석하였다. Table 1은 각 영향인자별 매개변수 연구를 나타낸다.

Fig. 4는 대표 해석 case인 말뚝 직경 2m, 말뚝 길이 45m, BPM500인 경우의 해석 결과로, 관내토와 말뚝 내주면 사이에 작용하는 radial stress를 선단 부근의 최대 radial stress 값으로 정규화한 값을 말뚝의 선단부로부터의 거리로 나타낸 결과이다. 이를 통해 radial stress가 말뚝 내경의 2.5배 정도의 높이까지의 범위에서 주로 발현되는 것을 확인할 수 있다. 이는 다시 말해 말뚝 선단부에서 폐색효과로 인한 관내토와 말뚝 내주면 사이에서 발생하는 저항력의 범위가 말뚝 내경의 2.5배 높이까지 나타나는 것을 의미한다. 따라서 본 영향인자 연구에 대한 결과를 선단부에서 말뚝 내경의 2.5배 높이까지의 범위에서의 결과를 분석하였다.

4.1 말뚝 직경의 영향

본 절에서는 단일지반에 설치된 대구경 항타말뚝의 직경에 대한 영향을 분석하였다. 해석 case는 단일 지반인 Medium sand 지반에 말뚝 직경 (D)이 1.5~3.5m, 말뚝 두께 (t)가 4~8cm인 대구경 항타강관말뚝으로 가정하였으며 폐색효과의 영향을 SPI와 수평토압계수를 이용하여 분석하였다.

항타시공성을 고려하여 말뚝 직경 별 SPI를 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 항타시공성(BPM)을 500 기준으로 항타하였을 때, 말뚝 직경이 증가할수록 항타시공성(BPM)을 유지하기 위해 필요한 항타에너지도 커지게 된다. 기존 연구 결과에 따르면 말뚝 직경이 증가할수록 SPI는 증가하고, 항타에너지가 증가할수록 SPI는 감소하는 경향성을 나타냈다(Ko et al., 2016). 따라서, 두 영향인자가 증가할수록 폐색효과에 미치는 영향 정도가 상쇄되어 SPI는 12~14% 범위에서 일정하게 분포하는 것으로 확인되었다. 하지만, SPI가 아닌 L_{stress} 를 분석하기 위해 말뚝 내경 (D_i)으로 정규화 시켜 말뚝 직경 별로 나타낸 결과, 말뚝 직경이 증가할수록 L_{stress}/D_i 는 감소하는 것으로 나타났(Table 5).

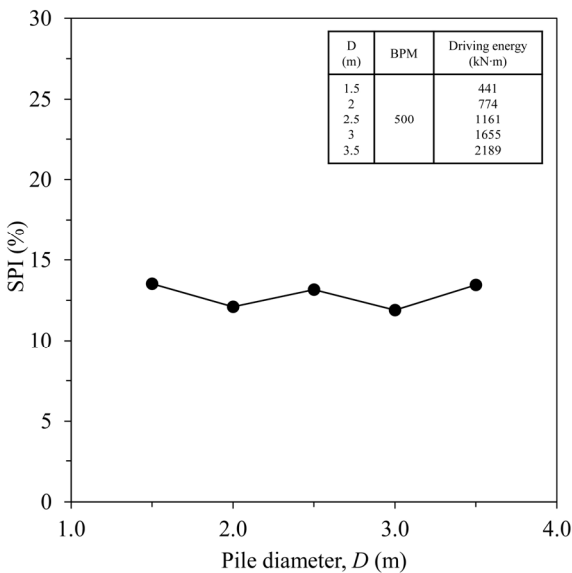


Fig. 5. SPI with varying pile diameters

Table 5. Normalized stress height with varying pile diameters

Diameter	1.5 m	2.0 m	2.5 m	3.0 m	3.5 m
L_{stress}	4.8	4.9	5.2	4.4	4.4
L_{stress}/D_i	3.2	2.6	2.1	1.5	1.3

다음으로 단일 지반에서 말뚝의 직경 변화에 따른 수평토압계수의 분포는 Fig. 6과 같다. 여기서 수평토압계수의 분포는 CEL 항타 해석 시뮬레이션 종료 후 말뚝내부의 관내토와 말뚝 사이에 인접한 mesh에 작용하는 수평방향 응력을 수직방향 응력으로 나누어 나타내었다.

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (3)$$

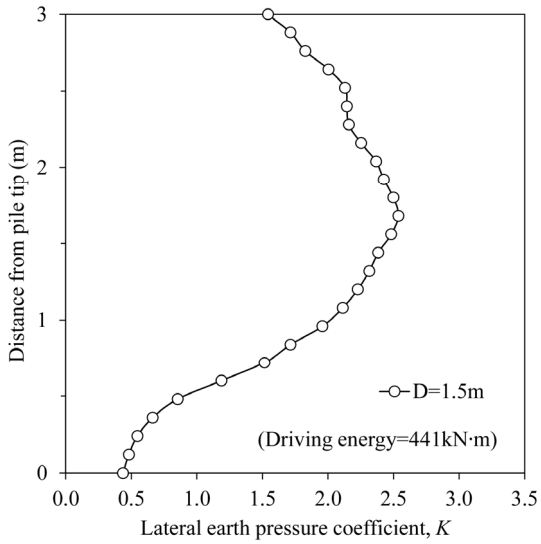
여기서, K 는 수평토압계수, σ_h 는 수평방향응력, σ_v 는 수직방향응력이다.

수평토압계수를 분석한 결과, 말뚝 직경이 변함에 따라 어느 정도 값의 차이는 있지만 전체적인 분포 경향은 유사하게 나타났다. 말뚝의 선단부의 수평토압계수는 0.4~0.5의 값을 나타냈으며, 말뚝 내경의 2배 정도의 높이에서 2~3.5 정도의 최대 수평토압계수를 가지는 경향을 보였다. 또한, 관내토 상부로 갈수록 수평토압계수가 감소하여 심도별로 볼록한 형태의 분포를 나타냈다.

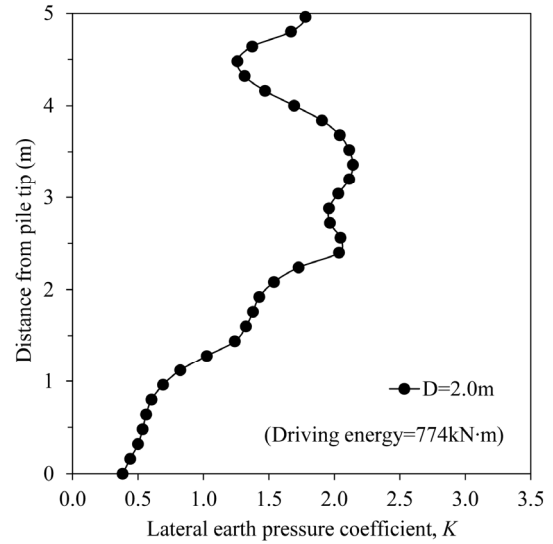
4.2 말뚝 근입 깊이의 영향

본 절에서는 단일지반에 설치된 대구경 항타말뚝의 길이에 대한 영향을 분석하였다. 해석 case는 단일 지반인 Medium Sand 지반에 말뚝 직경 (D)이 2m, 말뚝 길이 (L)가 15~45m인 대구경 항타강관말뚝으로 가정하였으며, 폐색효과의 영향을 SPI와 수평토압계수를 이용하여 분석하였다.

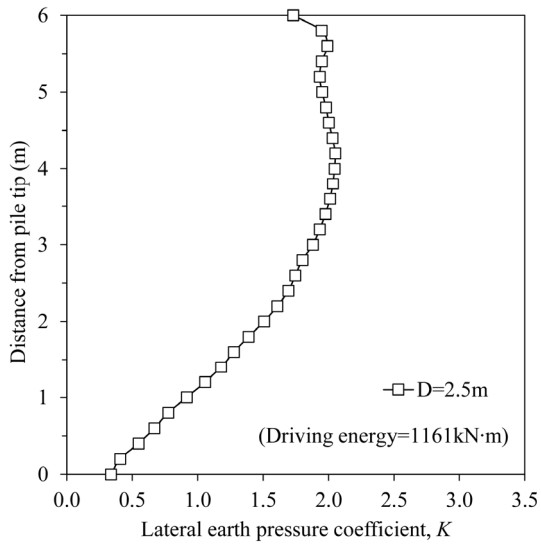
항타시공성을 고려하여 말뚝 길이 별 SPI를 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 단일 지반에서 말뚝 길이가 변함에 따른 SPI는 12~13% 범위에서 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 단일 지반에서 말뚝의 길이 변화에 따른 수평토압계수의 분포는 Fig. 8과 같다. 수평토압계수를 분석한 결과, 말뚝 길이가 각각 15, 30, 45m일 경우, 최대수평토압계수가 1.88, 2.13, 2.14로 나타났다. 즉, 말뚝 길이가 증가할수록 최대 수평토압계수가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 말뚝 직경에 대한 영향 해석 결과와 유사하게 말뚝 선단부의



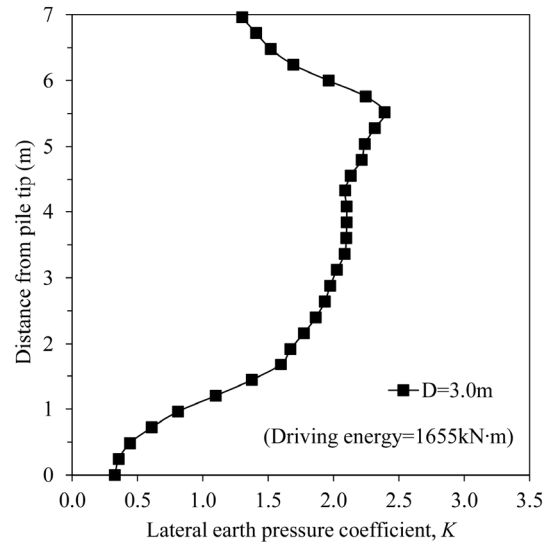
(a) $D=1.5\text{ m}$



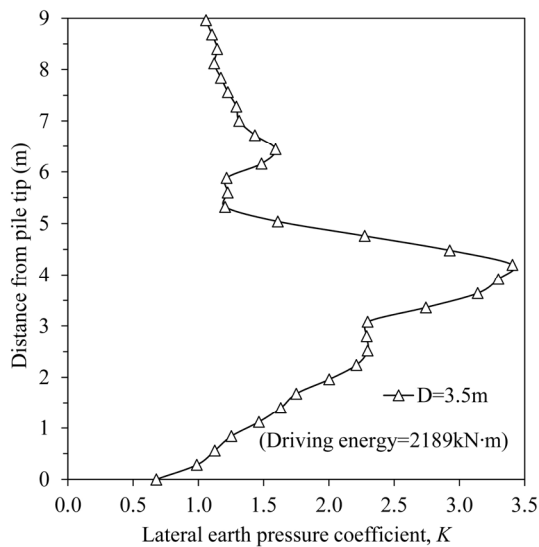
(b) $D=2.0\text{ m}$



(c) $D=2.5\text{ m}$



(d) $D=3.0\text{ m}$



(e) $D=3.5\text{ m}$

Fig. 6. Lateral earth pressure coefficient with varying pile diameters

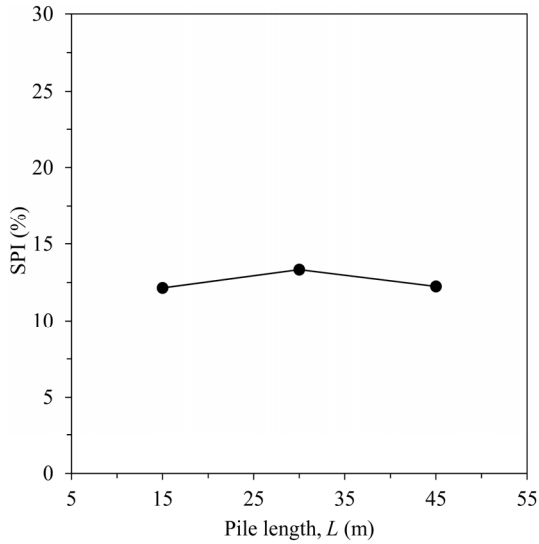


Fig. 7. SPI with varying pile lengths

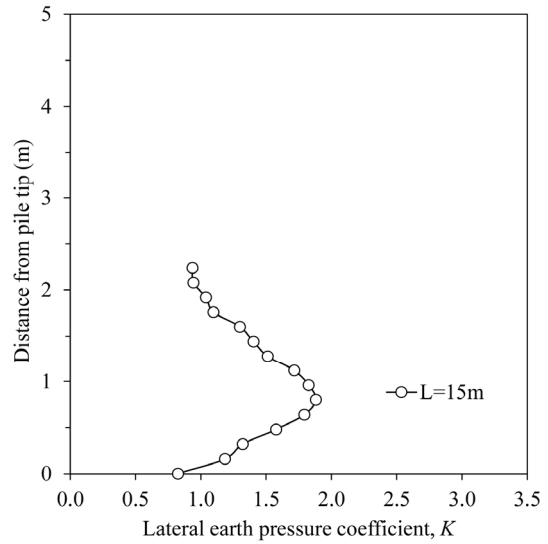
수평토압계수는 0.3~0.8의 값을 나타내며, 선단부에서 점점 올라갈수록 수평토압계수가 증가하여 최대 수평토압계수를 나타낸다. 관내토 상부의 경우, 수평토압계수가 감소하여 전체적으로 볼록한 형태를 나타낸다.

4.3 지반 탄성계수의 영향

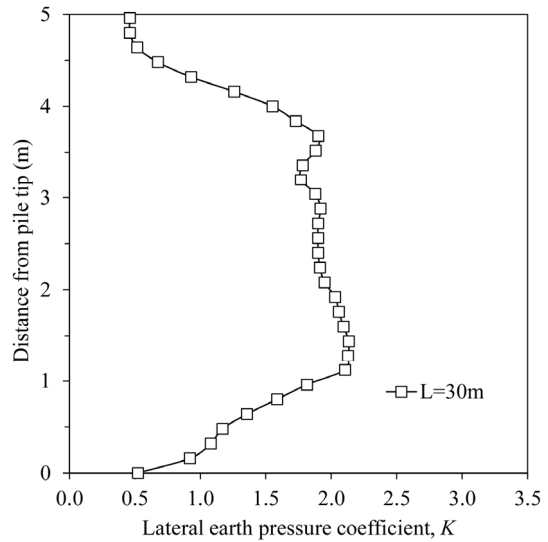
본 절에서는 대구경 항타말뚝이 설치되는 사질토의 탄성계수에 대한 폐색효과를 분석하였다. 해석 case는 사질토의 탄성계수를 변화시키며, ‘Loose sand’, ‘Medium sand’, ‘Dense sand’로 구분 하였으며, 말뚝 직경 (D)은 2m, 말뚝 길이 (L)는 45m로 가정하여 해석을 수행하였다. 여기서 사질토의 탄성계수 (E)와 SPT N값의 관계는 기존 연구에서 제안한 식으로 산정하였다(Bolwes, 2002).

사질토의 탄성계수별 SPI를 분석한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 해석 결과, 사질토의 탄성계수가 각각 12.5, 22.5, 32.5MPa일 경우, SPI가 11.9, 12.6, 18.3%로 나타났고, 이를 통해 사질토의 탄성계수가 증가할수록 SPI도 증가하는 경향을 확인하였다.

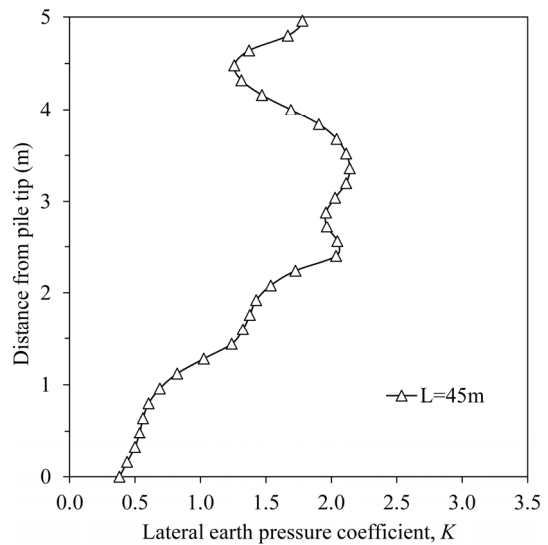
다음으로 사질토의 탄성계수별 말뚝 내주면에 작용하는 수평토압계수 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 말뚝 내주면에 작용하는 수평토압계수는 말뚝 선단부에서 0.4~0.6 범위로 나타나고, 선단으로부터 내경(약 2 - 3m)만큼 올라왔을 때, 2.14~2.84의 최대수평토압계수를 나타냈다. 선단으로부터 2D_i 높이보다 높아지는 경우 수평토압계수는 점차 감소하는 경향을 보였으며 전체적으로 심도별로 볼록한 형태를 나타냈다.



(a) L=15 m



(b) L=30 m



(c) L=45 m

Fig. 8. Lateral earth pressure coefficient with varying pile lengths

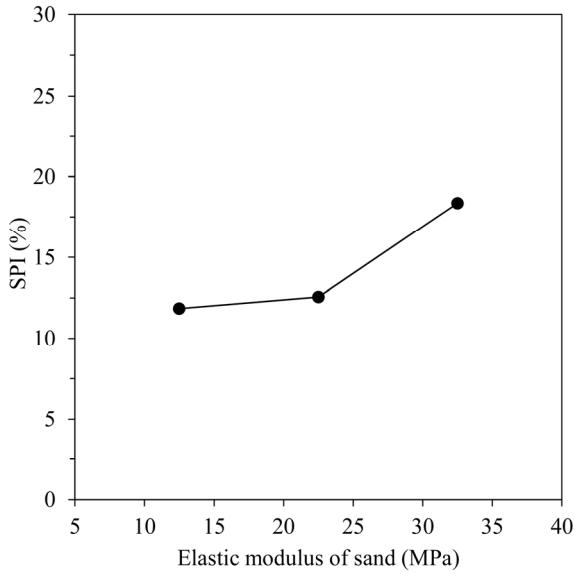


Fig. 9. SPI with varying elastic moduli of sand

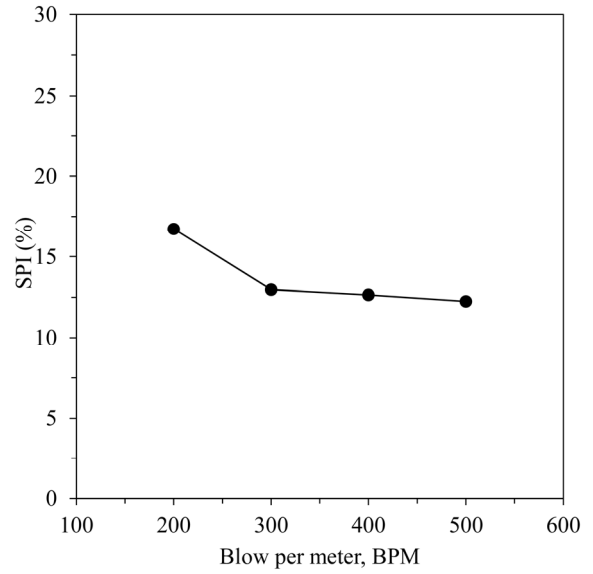


Fig. 11. SPI with varying BPM

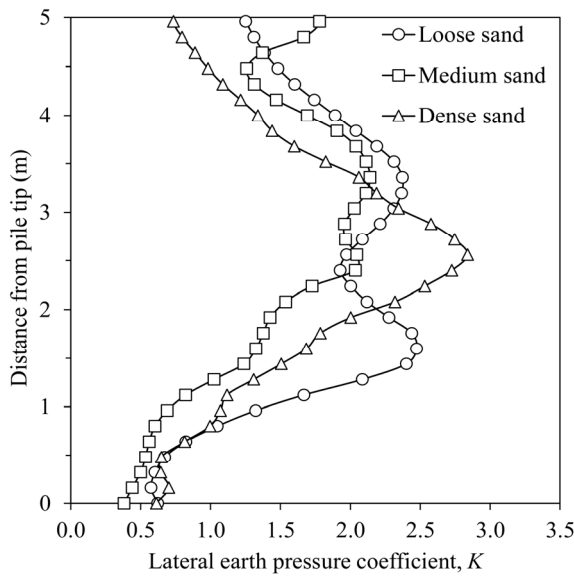


Fig. 10. Lateral earth pressure coefficient with varying elastic moduli of sand

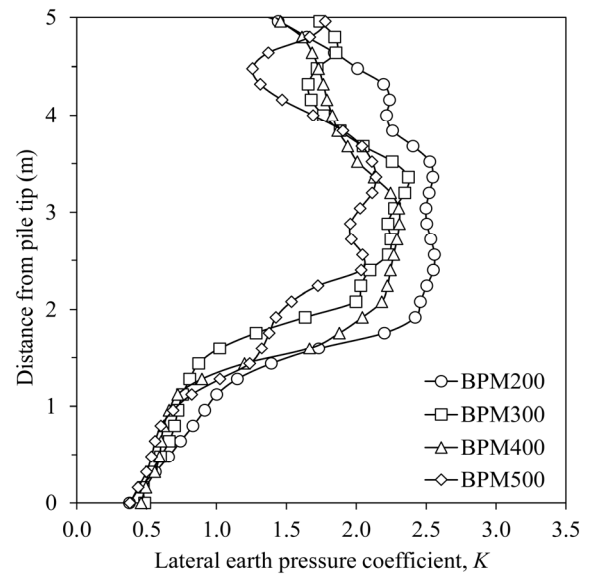


Fig. 12. Lateral earth pressure coefficient with varying BPM

4.4 BPM의 영향

본 절에서는 단일지반에 설치된 대구경 항타말뚝의 항타시공성 기준인 BPM에 대한 영향을 분석하였다. 해석 case는 단일 지반인 Medium Sand 지반에 말뚝 직경 (D)이 2m, 말뚝 길이 (L)가 45m인 대구경 항타강관말뚝으로 가정하였으며, 항타시공성(BPM)을 200~500으로 변화시키며 해석을 수행하였다.

항타말뚝의 항타시공성에 따른 SPI를 분석한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. SPI 분석 결과, BPM이 각각 200,

300, 400, 500일 경우, SPI가 16.7, 13.0, 12.6, 12.3%로 나타났으며, 이를 통해 BPM이 증가할수록 SPI는 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 BPM이 증가할수록 필요한 항타에너지는 점차 감소하는 것을 의미하며, 다시 말해 본 해석 결과는 항타에너지가 감소할수록 SPI는 감소하는 것을 의미한다. 기존 연구 결과(Ko et al., 2016)는 항타에너지가 감소할수록 SPI가 감소하는 것으로 보고하고 있으며, 본 해석 결과는 기존 연구와 유사한 결과를 보이고 있다.

다음으로 단일 지반에서 BPM 변화에 따른 수평토압계수의 분포는 Fig. 12와 같다. 수평토압계수 분석 결과,

BPM이 각각 200, 300, 400, 500일 경우, 최대수평토압 계수가 2.56, 2.37, 2.31, 2.14로 나타났다. 이는 BPM이 증가할수록 최대수평토압계수는 감소하는 것을 의미한다. 또한 수평토압계수 분포는 말뚝 선단부에서 0.4~0.5의 값을 나타내고, 선단으로부터 내경(약 2 - 3m)만큼 올라왔을 때, 최대수평토압계수를 나타냈다. 관내토 상부로 갈수록 수평토압계수는 점차 감소하는 경향을 보였다.

5. 관내토의 수평토압계수 분포 제안

앞서 수행한 매개변수연구를 통해 관내토의 심도별 수평토압계수 분포 곡선은 전체적으로 불룩한 형태로 유사한 경향을 나타내는 것을 확인하였다. 대표 수평토압계수 분포 곡선을 제안하기 위하여 관내토의 말뚝 선단부로부터의 거리를 말뚝 내경(D_i)으로 정규화하여 각 영향인자별 수평토압계수 분포 곡선을 Fig. 13과 같이 도시하였다. 여기서 세로축은 말뚝선단부에서부터 2.5 D_i 까지의 높이를 나타내고, 본 해석 결과 중 관내토의 저항력 범위가 일정하게 나타나지 않은 말뚝길이 조건을 제외한 모든 결과를 도시하였다. 이러한 전체 수평토압계수 분포 곡선들을 평균하여 Fig. 14와 같이 하나의 대표 수평토압계수를 구하였고, 또한 대표식 제안을 위해 Fig. 15와 같이 축을 변환하여 나타내었다. Fig. 15에 대표 수평토압계수 분포 곡선의 6차 추세선을 산정한 결과, Fig. 14에 나타난 추세식과 같고, 이 식을 관내토

의 저항력 범위까지 적분한 결과는 약 $4.0D_i$ 로 나타났다. 여기서 구한 추세선 식의 경우 6차 다항식으로 실무에서 적용 시 실용성이 떨어진다고 판단하여 이를 Fig. 16과 같이 구간별로 나누어 제안하였다. 여기서 구간별로 제안된 수평토압계수 분포 제안식은 다음 식 (3)과 같다. 이 때 적분으로 구한 면적을 비교하여 추세식과 수평토압계수 분포 제안식이 같은 값이 나오도록 구간별 수평토압계수 분포식을 제안하였다. 이를 관내토와 내주면 사이에서 발생하는 수평토압계수와 관내토의 내주면 마찰력 발생 높이간의 경향을 분석하기 위해 면적으로 나타내었고, 이 때의 적분식은 (4)와 같이 제안

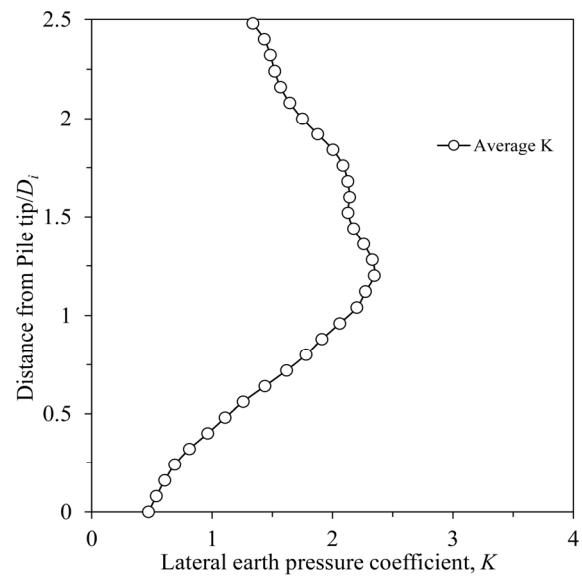


Fig. 14. Average distribution curve of lateral earth pressure coefficient

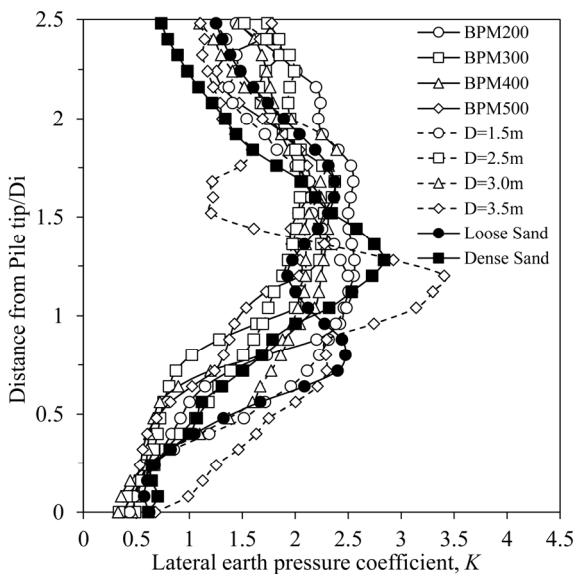


Fig. 13. Distribution curves of lateral earth pressure coefficient with normalized distance from pile tip

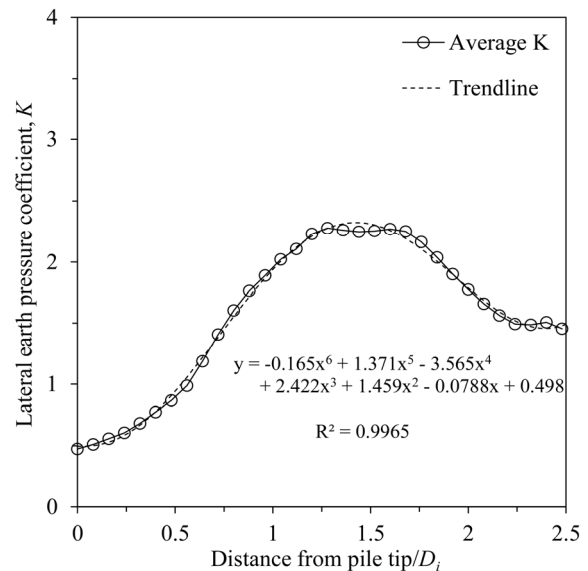


Fig. 15. Axis transformation of an average distribution curve

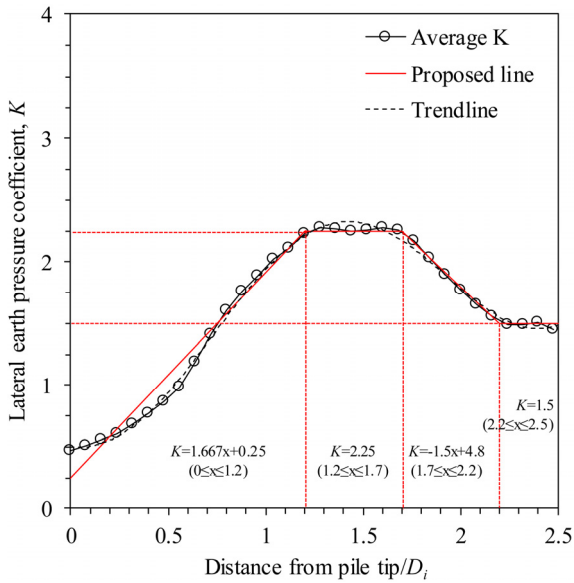


Fig. 16. Proposed curve for lateral earth pressure coefficient in soil plug

할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 K &= 1.667x + 0.25 \quad (0 \leq x \leq 1.2), \\
 &2.25 \quad (1.2 \leq x \leq 1.7), \\
 &-1.5x + 4.8 \quad (1.7 \leq x \leq 2.2), \\
 &1.5 \quad (2.2 \leq x \leq 2.5)
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\int_0^{2.5} K dx = 4D_i \tag{4}$$

여기서, x 는 선단에서부터 응력을 발휘하는 관내토의 높이를 말뚝 내경으로 정규화한 값, D_i 는 말뚝의 내경, K 는 관내토와 내주면 사이에서 발생하는 수평토압계수이다.

식 (4)로 얻어진 면적은 $4.0D_i$ 로 기존 추세선으로 구한 제안식과 일치하는 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 절에서는 관내토와 내주면 사이에서 발생하는 수평토압계수와 관내토의 내주면 마찰력 발생 높이간의 경향을 분석한 결과를 Fig. 16과 같이 제안하고자 한다.

6. 결론

본 연구에서는 대변형 수치해석을 통해 항타시공성을 고려한 대구경 항타강관말뚝의 폐색효과를 분석하였다. 실

제 현장에서 사용하는 항타시공성(BPM)을 적용해 항타에너지 기준을 산정하였고 이를 강관말뚝의 항타과정을 모사할 수 있는 대변형 해석기법인 CEL기법에 적용하였다. 모델링 기법 및 해석 결과를 실제 현장시험결과 및 기존 연구와 비교를 통해 검증하였다. 또한, 폐색효과 영향인자에 따른 매개변수 연구를 통해 대구경 강관말뚝의 폐색효과를 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) GRL-WEAP 프로그램을 이용하여 강관말뚝의 항타시공성을 고려하는 해석방법을 제안하였다. 이는 일반적으로 적용되는 BPM 기준을 대상으로 항타에너지를 산출하였으며, 이를 CEL기법을 이용한 대변형 해석기법에 항타 하중으로 적용하였다. 본 해석 방법은 항타시공성을 고려할 수 있는 해석법으로 비교적 실제에 가까운 항타 조건을 모사할 수 있는 장점이 있다.
- (2) 항타시공성(BPM)을 고려하여 해석한 결과, 각 영향인자별로 SPI와 수평토압계수에 미치는 영향 정도는 차이가 있었다. 즉, 항타시공성(BPM)이 고려됨에 따라 각 영향인자별로 말뚝의 폐색효과에 미치는 영향 정도가 차이가 있으므로, 실제 대구경 항타 강관말뚝 설계 시 항타시공성이 고려된 폐색효과 분석과 이를 반영한 설계가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 매개변수 연구를 통해 산정된 심도별 수평토압계수 분포 곡선을 분석한 결과, 말뚝 선단부에서는 1 이하인 약 0.5의 수평토압계수를 나타냈고, 선단부로부터 내경의 약 2 - 3배의 높이에서 최대 수평토압계수를 가졌다. 또한, 관내토 상부로 올라갈수록 수평토압계수는 점차 감소하여 전체적으로 볼록한 형태를 나타냈다.
- (4) 이러한 경향성을 바탕으로 전체 수평토압계수 분포 곡선을 분석하였다. 전체 수평토압계수 분포 곡선을 평균화하여 하나의 대표 수평토압계수 분포 곡선을 산정하였으며, 이를 구간화하여 실용적인 수평토압계수 분포 곡선을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비지원(과제번호 17SCIP-B119960-02)에 의해 수행되었으며, 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-0030040,

NRF-2014R1A2A1A11054606)입니다. 또한 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구(No.2016R1A6A3A03010454)입니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. AASHTO (2002), *Standard Specifications for Highway Bridges*, 17th Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
2. ABAQUS. (2013), *ABAQUS user's and theory manuals, Version 6.13. rhode island*: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
3. Beringen, F. I., Windle, D., and Van Hooydonk, W. R. (1979), "Results of Loading Tests on Driven Piles in Sand", *Proceedings of the Conference on Recent Development in the Design and Construction of Piles*, ICE, London, Vol.21-22, pp.213-225.
4. Bowles, J. E. (2002), *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, New York, USA.
5. Bruzy, F., Meunier, J., and Nauroy, J.K. (1991), "Behavior of Pile Plug in Sandy Soils during and After Driving", *Proceedings of 23rd Annual Offshore Technology Conference*, Houston, 1, pp. 145-154.
6. Goble, G. G., Raushe, F. R., and Likins, G. E. (1980), "The Analysis of Pile Driving-a State-of-the-art", *Proceedings of International Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles*, Stockholm, Sweden, pp.131-162.
7. Jeong, S. S., Lee, K. W., Kim, Y. M., and Kim, J. H. (2014), "A Study on the Landslide/debris Flow based on Large Deformation Analysis", *Proceedings of the 40th KSCE Conference*, Daegu, Korea, pp.271-272 (In Korean).
8. Jeong, S. S., Lee, K. W., and Ko, J. Y. (2015), "A Study on the 3D Analysis of Debris Flow based on Large Deformation Technique (Coupled Eulerian-Lagrangian)", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.12, pp.45-57. (In Korean)
9. Jeong, S. S., Ko, J. Y., Won, J. O., and Lee, K. W. (2015), "Bearing Capacity Analysis of Open-ended piles considering the Degree of Soil Plugging", *Soils and Foundations*, Vol.55, No.5, pp.1001-1014.
10. Kim, Y. H. and Jeong, S. S. (2014), "Analysis of Dynamically Penetrating Anchor based on Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) Methods", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.34, No.3, pp.895-906 (In Korean).
11. Kishida, H. (1967), "The Ultimate Bearing Capacity of Pipe Piles in Sand", *Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, Vol.1, pp.601-612.
12. Klos, J. and Tejchman, A. (1981), "Bearing Capacity Calculation for Pipe Piles", *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, Vol.2, pp.751-754.
13. Ko, J. Y. (2015), *Evaluation of Bearing Capacity for Open-Ended Piles with Soil Plugging*, Ph.D. thesis, Yonsei University, Seoul.
14. Ko, J. Y., Jeong, S. S., and Lee, S. Y. (2015), "A Study on the 3D Analysis of Driven Pile Penetration based on Large Deformation Technique (Coupled Eulerian-Lagrangian)", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.8, pp.82-97 (In Korean).
15. Ko, J. Y. and Jeong, S. S. (2015) "Plugging Effect of Open-ended Piles in Sandy Soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.52, No.5, pp.535-547.
16. Ko, J. Y., Jeong, S. S., and Lee, J. K. (2016), "Large Deformation FE Analysis of Driven Steel Pipe Piles with Soil Plugging", *Computers and Geotechnics*, Vol.71, pp.82-97.
17. Lee, S. Y. (2016), *A Study on the Excavation Damage Zone (EDZ) under TBM Excavation*, M.S. thesis, Yonsei University, Seoul.
18. Lee, S. Y., Kim, D. H., and Jeong, S. S. (2017), "A Study on the Excavation Damage Zone (EDZ) under TBM Advancement Based on Large Deformation Technique(CEL)", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.32, No.12, pp.5-13 (In Korean).
19. Matsumoto, T. and Takei, M. (1991), "Effects of Soil Plug on behavior of Driven Pipe Piles", *Soils and Foundations*, Vol.31, No.2, pp.14-34.
20. Paik, K. H. (1994), *Characteristics of bearing capacities for open-ended steel pipe piles driven into cohesionless soil*, Ph.D. thesis, Korea Advanced Institute of Science Technology, Daejeon, Korea.
21. Paik, K.H., Salgado, R., Lee, J. H., and Kim, B. J. (2003), "Behavior of Open-and Closed-ended Piles Driven into Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.4, pp.296-306.
22. Paikowsky, S. G. (1989), *A Static Evaluation of Soil Plug behavior with Application to the Pile Plugging Problem*, D.Sc. thesis, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA.
23. Paikowsky, S. G., Whitman, R. V., and Baligh, M. M. (1989), "A New Look at the Phenomenon of Offshore Pile Plugging", *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.8, pp.213-230.
24. Pile Dynamics Inc. (2010), *GRLWEAP: Wave Equation Analysis of Pile Driving, Procedure and Models Manual*, Cleveland.
25. Qiu, G., Henke, S., and Grabe, J. (2011), "Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian Approach on Geomechanical Problems Involving Large Deformations", *Computers and Geotechnics*, Vol.38, pp.30-39.
26. Szechy, C. H. (1959), "Tests with Tubular Piles", *Acta Technica, Hungarian Academy of Science*, Vol.24, pp.181-219.
27. Yamahara, H. (1964), "Plugging Effects and Bearing Mechanism of Steel Pipe Piles", *Transportation of the Architectural Institute of Japan*, Vol.96, pp.28-35.

Received : August 24th, 2017

Revised : October 16th, 2017

Accepted : October 18th, 2017