

개단말뚝의 폐색효과 영향인자 분석

Influence Factors on the Degree of Soil Plugging for Open-Ended Piles

정 상 섬¹ Jeong, Sang-Seom

고 준 영² Ko, Jun-Young

Abstract

This paper presents the investigation of the major influence factors on the degree of soil plugging for open-ended piles based on the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) numerical technique. The main objective of this study was to investigate the effect of soil plugging on the response of piles in various conditions. Through comparison of the results of field load tests, the CEL methodology was found to be in good agreement with the general trend observed by in situ measurement. Additionally, the parametric studies were performed by controlling the soil conditions, soil elastic moduli, end-bearing conditions and multi layers. It was found that the degree of soil plugging for sand layers was greater than that of clay layers. Also, the degree of soil plugging increased with an increase in both the soil stiffness and length of pile embedded in the bearing layer.

요 지

개단말뚝은 폐색정도에 따라 지지력이 다르게 나타나므로 개단말뚝 설계시 폐색효과를 고려하여야 한다. 이에 본 연구에서는 대변형 수치해석 기법 중 하나인 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법을 이용하여 말뚝의 항타 관입을 모사하여 사질토, 점성토 지반조건, 단일 지반의 탄성계수, 말뚝 선단지지 조건, 다층지반 조건에 대한 영향 분석을 수행하였다. 해석 결과 사질토 지반에서 점성토 지반보다 폐색정도가 큰 것으로 확인되었고, 사질토의 경우 지반의 강성이 클수록 폐색정도가 증가하는 것으로 나타났다. 말뚝 선단이 지지층에 근입된 경우, 그렇지 않은 경우 보다 정지토압계수가 크게 나타나 폐색정도가 큰 것으로 확인되었다. 또한, 지반의 배열이 이질층인 경우 지반강성에 따라 정지토압계수가 다르게 결정됨을 알 수 있었다. 따라서 지반조건, 지층 등에 따라 정지토압계수를 다르게 적용하여 관내 내부마찰력을 산정할 필요가 있으며 이를 반영한 합리적인 지지력 산정을 할 필요가 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Open-ended piles, Influence factors, Degree of soil plugging, Coupled Eulerian-Lagrangian technique, Soil conditions, End-bearing conditions

1 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사 후 연구원 (Member, Post-doctoral Fellow, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-7489, Fax: +82-2-2123-8378, jyko1225@gmail.com, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 11월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 국내 및 해외에 시공되는 교량 및 항만구조물과 같은 토목구조물의 대형화로 인해 하부기초로 적용되는 말뚝기초 역시 대구경, 대심도 말뚝으로 설계되는 추세이다. 또한, 말뚝 재료의 성능이 우수하고 취급이 용이한 강관말뚝의 사용이 증가하고 있다. 이러한 강관말뚝은 일반적으로 선단부가 개방된 상태로 관입되는 개단말뚝(open-ended pile)으로 사용되고 있다. 관입초기의 개단말뚝은 말뚝의 관입깊이와 관내토 길이가 같은 완전개방상태 거동을 나타내지만, 관입이 진행될수록 말뚝 내부에 형성되는 관내토의 폐색현상에 의해 부분 폐색상태 또는 완전폐색상태 거동을 나타낸다(Ko and Jeong, 2015; Paikowsky, 1989). 특히 완전폐색상태일 때 개단말뚝의 지지력은 폐단말뚝의 지지력에 근접하게 되어 개단말뚝 폐색정도에 따라 관입특성 및 지지력 정도가 크게 달라지는 특징이 있다.

개단말뚝의 폐색효과에 대한 연구는 지반조건, 말뚝 조건, 시공방법 등 다양하게 진행되고 있다. 현재까지 말뚝조건에 관한 연구는 말뚝직경과 관입깊이에 관한 연구가 대부분이다. Szechy(1959)는 말뚝직경이 작을수록 관내토의 다짐이 증가하는 것을 규명하였고, 이를 통해 말뚝직경이 작을수록 말뚝의 폐색정도가 증가하는 것을 확인하였다. 또한, Beringen 등(1979)은 말뚝의 관입깊이가 말뚝직경의 15배 이상이면 말뚝이 완전폐색상태를 나타내고, 관입깊이가 증가할수록 말뚝의 폐색정도가 증가하는 것을 규명하였다.

개단말뚝의 시공방법에 관한 연구는 크게 항타 및 압입공법으로 구분되며, 특히 Nauroy와 Le Tirant(1983)은 압입공법이 항타공법보다 폐색정도가 크다고 보고하였다. 또한, 항타공법의 경우 항타에너지가 폐색효과에 큰 영향을 미치는데, 해머의 무게가 크고 낙하높이가 작을수록 폐색정도가 큰 것으로 보고되고 있다(Brucy, 1991; Ko et al., 2016). 이처럼 말뚝조건 및 시공방법에 관한 내용은 많은 연구(Kishida, 1967; Klos and Tejchman, 1981; Matsumoto and Takei, 1991; Paikowsky et al., 1989)를 통해 확인이 되었다. 그러나 지반조건에 대한 연구(Kishida and Isemoto, 1977; Kraft, 1991; Randolph et al., 1990)는 주로 소구경 말뚝 또는 실내모형실험을 대상으로 수행되어 현장데이터 및 재하시험자료가 극히 드물기 때문에 다양한 지반조건에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

한편 수치해석적인 연구에 있어서도 Ko와 Jeong(2016)에 의해 광범위한 연구가 수행되었는데 특히 항타에너지, 말뚝직경, 근입깊이, 선단부 지반조건 등에 대한 연구결과가 보고되고 있다. 그러나 그 밖의 지반조건에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대변형 수치해석을 통해 1) 사질토, 점성토에 대한 영향, 2) 지반의 탄성계수 변화에 대한 영향, 3) 말뚝 선단지지 조건에 대한 영향, 4) 다층지반에 대한 영향에 대해 분석을 하고자 한다. 항타 말뚝의 지반 관입 과정을 직접 모사하기 위하여 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법을 사용하여 대변형 해석을 수행하였고, 모델링 기법 및 분석결과는 현장 시험 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 개단말뚝의 폐색효과에 미치는 영향인자에 대한 분석을 통해 강관말뚝의 설계 및 해석 시 폐색효과 영향인자에 대한 고려의 필요성을 확인하였다.

2. 개단말뚝의 폐색효과

개단말뚝은 지반에 관입될 때 말뚝 속으로 밀려들어 간 흙으로 인하여 말뚝의 선단부가 막히는 현상을 폐색효과(plugging effect)라고 하며 관입하는 동안에 흙과 말뚝 벽과의 마찰로 인하여 말뚝 내부에 흙마개(soil plug)가 형성된다. 이 때 말뚝의 폐색상태는 완전개방상태, 부분폐색상태, 완전폐색상태와 같이 크게 3가지 상태로 구분할 수 있다. 개단말뚝의 폐색효과를 정량화하는 방법은 대표적으로 plug length ratio(PLR)가 있다. PLR은 항타시공 종료 후에 말뚝 관입깊이와 올라온 관내토 길이의 비로 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$PLR = \frac{L_i}{D_i} \quad (1)$$

여기서, L_i 는 관내토 길이, D_i 는 말뚝 관입깊이이다.

개단말뚝의 지지력 성분은 Fig. 1과 같이 외주면마찰력(Q_{out}), 말뚝 순단면적에 해당하는 선단부지지력(Q_{toc}), 내주면마찰력(Q_{in})으로 구분할 수 있다. 이 중 내주면마찰력은 관내토가 폐색됨에 따라 아칭 효과가 발생하며, 이로 인해 관내토의 수평응력이 증가한다(Paikowsky, 1989). 즉 폐색정도가 클수록 내주면마찰력이 증가하여 개단말뚝의 지지력에 영향을 미친다. Fig. 2는 개단말뚝 관내토의 아칭 효과를 나타낸다. 이 때 active convex arches는 말뚝 초기 관입 시, 느슨한 상태의 지반과 감소

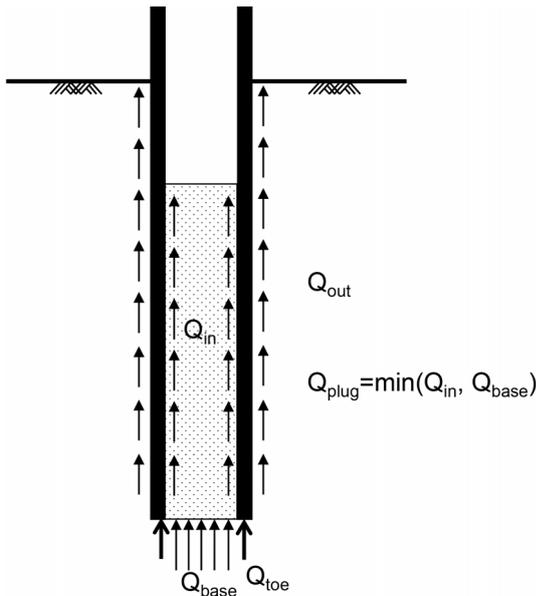


Fig. 1. Component of bearing capacity of open-ended pile, and force equilibrium of forces in soil plug element (Yamahara, 1964)

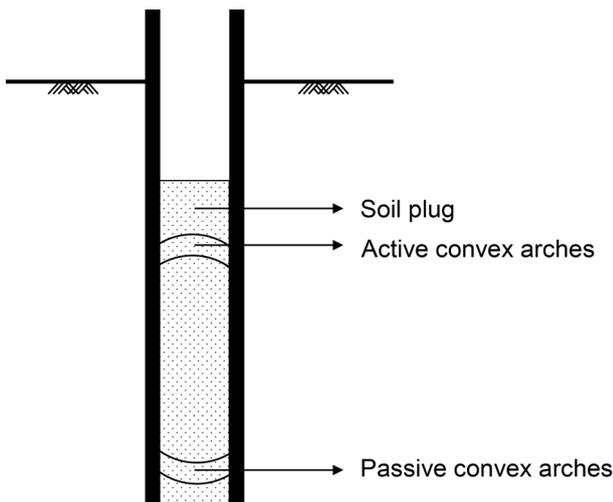


Fig. 2. Arching mechanism of soil plug for open-ended piles (Paikowsky, 1990)

된 응력으로 인하여 형성되며, passive concave arches는 폐색 또는 부분폐색 상태에서 관입이 되어 상대적으로 큰 수직 응력으로 인해 형성된다. 이 때문에 아칭 응력이 발생하며, 이는 내주면마찰력 증가와 관련이 크다 (Paikowsky, 1990).

극한하중상태에서 내주면마찰력은 관내토 전체에서 발생하는 것이 아니라 말뚝 선단부근에 일부의 관내토 범위에서 집중적으로 발현되는 것이 특징이다(Ko and Jeong, 2015; Paikowsky, 1990). 이러한 개념을 Ko와 Jeong(2015)이 다음 식 (2)와 같이 관내토 길이와 실제

내주면마찰력이 발생하는 길이의 비로 정량화하였다.

$$SPT = \frac{L_{is}}{L_i} \quad (2)$$

여기서, SPT 는 soil plugging index, L_i 는 관내토 길이, L_{is} 는 내주면마찰력이 발생하는 길이이다.

특히 Ko(2015)는 정지토압계수(coefficient of earth pressure at rest, K_0)를 이용하여 내주면마찰력을 산정하는 방법을 제안하였다. 이처럼 합리적인 내주면마찰력을 산정하기 위해서는 실제로 말뚝 내부에 발생하는 정지토압계수에 대한 분석이 필수적이지만, 현장시험에서는 항타말뚝의 내주면마찰력에 작용하는 정지토압계수 측정이 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 대변형 수치해석을 통해 다양한 폐색효과 지반영향인자에 대한 분석을 하고자 한다.

3. Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL)을 이용한 대변형 수치해석

Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법은 Lagrangian 해석법 및 Eulerian 해석법의 장점을 각각 적용한 방법으로, 기존 미소변형 해석과는 달리 메쉬의 왜곡이나 뒤틀림이 발생하지 않는 장점이 있다(Kim and Jeong, 2014; Qiu et al., 2011; Ko et al., 2015). 최근 지반공학 분야에서도 CEL 기법을 이용한 대변형 수치해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 가스, 석유 등의 시추 작업에 필요한 해상 앵커링 기술(Kim and Jeong, 2014), 산사태 및 토석류 해석(Jeong et al., 2014; Jeong et al., 2015), 말뚝의 관입에 따른 거동 분석(Ko et al., 2015; Ko et al., 2016), 터널 굴진 시 막장 전면 손상대 문제(Lee, 2016) 등 다양한 분야에서 적용되고 있다.

본 연구에서는 범용 해석 프로그램인 ABAQUS/EXPLICIT (2013)를 이용하였으며, 해석 기법은 ABAQUS에서 지원하는 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법을 적용하였다.

3.1 해석 모델링

본 연구에서는 지반을 Eulerian 좌표계, 말뚝을 Lagrangian 좌표계를 적용하였으며, 해석 영역은 Fig. 3(a)와 같이 상부에 물성이 정의되지 않는 구간인 void layer와 하부

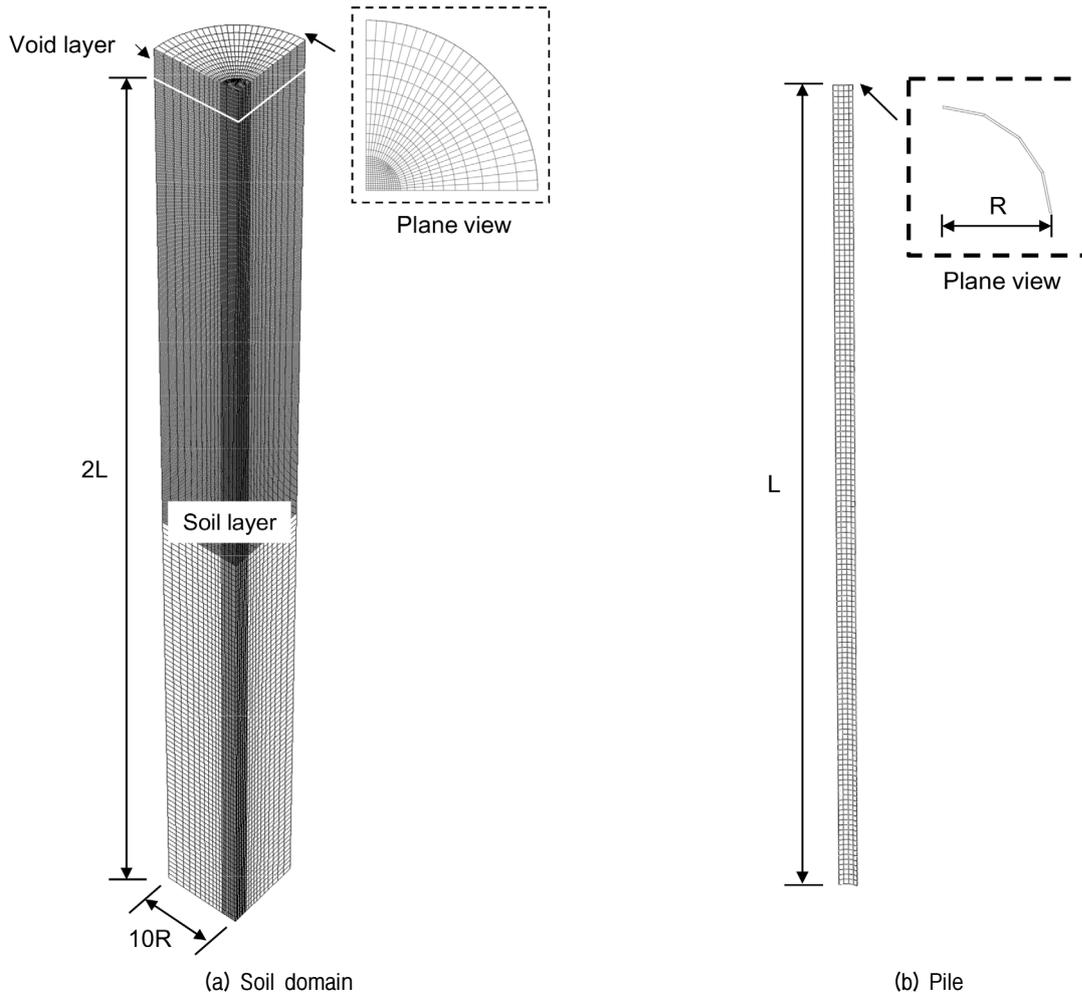


Fig. 3. Geometry and finite element mesh for soil domain and pile

에 지반 물성이 정의되어 있는 soil layer로 구성하였다. 본 해석의 모델링은 해석시간의 절약을 위하여 사분면 형상으로 모델링하였고, 해석 영역의 크기는 동적해석에 의한 wave 반사에 의한 간섭을 최소화하기 위해 방사 방향으로 말뚝 반지름의 10배(10R), 깊이 방향은 말뚝 관입깊이의 2배(2L)를 적용하였다(Ko et al., 2015; Ko et al., 2016). 경계조건은 방사방향 경계면에서 z축 방향으로 변위를 허용하기 위해 롤러구속조건을 적용하였으며, 하부 경계면에서는 모든 축방향으로 변위가 발생하지 않도록 힌지구속조건을 적용하였다. 해석에 적용된 말뚝 및 지반 요소는 8개의 절점(node)으로 구성된 Lagrangian brick 요소와 Eulerian brick 요소인 C2D8R, EC2D8R을 각각 적용하였다.

해석 시 접촉면 조건은 ABAQUS에서 제공하는 접촉 요소(contact element)를 사용하였다. 경계면 조건은 식 (3)과 같이 마찰계수와 한계변위 혹은 한계 전단응력으로 정의되는 Coulomb 마찰이론을 사용하였다.

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (3)$$

여기서, μ 는 마찰계수, p 는 접촉력이다.

초기 지중응력 상태를 고려하기 위해 초기 평형상태 (initial equilibrium state)를 구현하고 초기 단계 이후, 말뚝 두부에 항타 하중을 적용하여 항타 관입을 모사하였다. 말뚝의 항타 하중은 해머중량과 낙하고를 고려하여 항타에너지로 환산하였으며, 한 타에 대한 하중을 0.04 초 동안 말뚝 두부에 반복적으로 적용하였다(Goble et al., 1980; Ko et al., 2015). 그 밖에 메쉬 수렴 문제 등 수치해석에 대한 자세한 내용은 Ko et al. (2015)의 논문에 수록되어있다.

3.2 현장재하시험 결과와 비교를 통한 해석 검증

본 절에서는 개단말뚝의 폐색효과의 거동 분석을 위하여 수행된 광양 현장재하시험 사례(Ko and Jeong, 2014)

를 토대로 항타 말뚝의 거동을 비교·분석하였으며, 본 연구에서 적용한 CEL 해석의 타당성 및 모델링을 검증하였다.

현장재하시험은 직경에 따른 개단말뚝의 폐색효과를 분석하기 위하여 광양 현장에서 3본의 시험말뚝(강관말뚝)을 대상으로 수행되었고, 사질토 지반에 항타 시공되었다. 현장 지반조건은 상부에 준설 매립층이 15m 정도 두텁게 분포하며, N값은 8~18 정도로 나타났다. 본 현장 지반에서 준설 매립층에 해당하는 지층의 시료를 채취하여 입도시험을 수행한 결과, 비중(G_s)이 2.70이고, 균등계수(C_u)가 2.00, 곡률계수(C_c)가 1.01을 나타냈으며, 통일분류법 상 '입도 분포가 불량한 모래(SP)'에 해당하였다. 개단말뚝의 지지력 성분은 외주면 마찰력, 선단부 지지력, 내주면 마찰력으로 구분되는데, 이러한 지지력 성분을 분리 측정하기 위하여, 이중관 시험말뚝을 총 3본 (Table 1 참조)을 사전 제작하여 동재하시험과 정재하시험을 수행하였다. 본 연구에서는 수행된 3 case의 시험말뚝을 대상으로 해석을 수행하였고 사용된 재료정수는 Table 2에 정리하였다. 현장 재하시험에 대한 보다 자세한 내용은 Ko와 Jeong(2014)의 논문에 수록되어있다.

CEL 모델링 기법의 비교검증을 위해 2장에서 언급한 PLR과 SPI를 이용하였다. Table 3은 본 장에서 검증하고자 하는 PLR과 SPI의 현장 시험 결과 및 CEL 해석 결과를 정리하였다. PLR의 경우 해석결과와 현장 시험

결과를 비교한 결과, 약 98.7~118.2%의 정확도를 나타내었으며, SPI를 비교한 결과 약 75.3~116.3%의 정확도를 나타냈다. 따라서 현장계측치를 합리적으로 예측함을 알 수 있고, 따라서 본 방법을 이용하여 매개변수 연구를 수행하고자 한다.

4. 폐색효과 영향인자 분석

개단말뚝의 폐색효과의 다양한 지반조건에 대한 영향을 규명하기 위해, 대변형 수치해석을 통해 1) 사질토, 점성토에 대한 영향, 2) 지반의 탄성계수 변화에 대한 영향, 3) 말뚝 선단지지 조건에 대한 영향, 4) 다층지반에 대한 영향에 대한 분석을 하고자 한다. 2장에서 언급하였듯이 개단말뚝의 내주면마찰력은 내주면에 작용하는 정지토압계수와 상관성이 있으므로, 본 해석에서는 항타 후 선단부 내주면에 작용하는 정지토압계수를 주 분석대상으로 하여 폐색효과를 규명하였다. 또한, 결과 분석시 말뚝 선단(L_{tip})으로부터 실제 내주면마찰력이 작용하는 길이(L_{is})의 비로 정규화하였다. Table 4는 영향인자를 고려한 매개변수 연구를 나타낸다.

4.1 지반조건(사질토, 점성토)에 대한 영향

본 절에서는 사질토, 점성토의 폐색효과에 대한 영향

Table 1. Geometries of the test piles

Case	Outer pile		Inner pile		Length (m)
	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	
Case 1	508.0	9	406.4	9	8.6
Case 2	711.2	7	609.6	9	11.4
Case 3	914.4	8	812.8	8	15.5

Table 2. Input parameters (Kwangyang site)

Type	Model	γ_t (kN/m ³)	E (MPa)	ϕ (deg)	c (kPa)	Poisson's ratio, ν
Pile	L.E.*	75	210,000	-	-	0.2
Sand	M.C.*	17.6	13.5	32	0	0.3

L.E.* is Linear-elastic model, M.C.* is Mohr-Coulomb model

Table 3. Validation of numerical model

Type	Pile length (m)	Pile diameter (mm)	PLR		L_{is} (m)		SPI (%)	
			CEL	Measured	CEL	Measured	CEL	Measured
Case 1	8.6	508.0	0.52	0.44	1.80	1.30	40.0	34.4
Case 2	11.4	711.2	0.75	0.76	1.94	2.00	22.6	23.1
Case 3	15.5	914.4	0.90	0.85	1.84	2.30	13.1	17.4

Table 4. Input parameters for the parametric studies

Parameter	Case	Type	E^* (MPa)	E_B^* (MPa)	ϕ (deg)	c (kPa)	Poisson's ratio, ν
Sand/Clay	Sand1	Loose sand	12.5	-	26.0	-	0.30
	Sand2	Medium sand	22.5	-	34.0	-	0.30
	Sand3	Dense sand	32.5	-	39.5	-	0.30
	Clay1	Soft clay	9.0	-	0	18.0	0.30
	Clay2	Medium clay	18.0	-	0	36.0	0.30
	Clay3	Stiff clay	36.0	-	0	72.0	0.30
Soil elastic modulus	S1	S1	10.0	-	32.0	-	0.30
	S2	S2	15.0	-	32.0	-	0.30
	S3	S3	20.0	-	32.0	-	0.30
	S4	S4	25.0	-	32.0	-	0.30
End-bearing condition	Floating	Floating pile	22.5	-	32.0	-	0.30
	0 m	0 m Embedded	22.5	32.5	32.0	-	0.30
	1.5 m	1.5 m Embedded	22.5	32.5	32.0	-	0.30
	3.0 m	3.0 m Embedded	22.5	32.5	32.0	-	0.30
Multi layer	SL1-SL6 (Fig. 8)	Loose sand	12.5	-	26.0	-	0.30
		Medium sand	22.5	-	34.0	-	0.30
		Dense sand	32.5	-	39.5	-	0.30

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

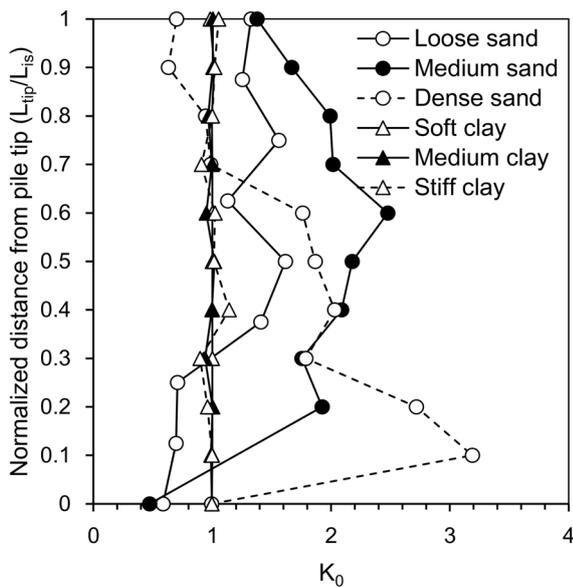


Fig. 4. K_0 with varying soil conditions

을 분석하고자 한다. 해석 case는 대표적으로 사질토와 점성토로 구분하였으며, 사질토는 ‘Loose sand’, ‘Medium sand’, ‘Dense sand’로 구분하였고 점성토는 ‘Soft clay’, ‘Medium clay’, ‘Stiff clay’로 구분하여 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 사질토, 점성토 지반별 말뚝 내주면에 작용하는 정지토압계수 분포를 나타낸다. 내주면에 작용하는 정지토압계수는 사질토의 경우 약 0.63~3.19로 변

화량이 큰 반면에, 점성토의 경우 약 1 정도로 변화량이 작게 나타났다. 또한 전체적으로 사질토가 점성토보다 정지토압계수가 크게 나타나 폐색정도가 큰 것으로 확인되었고, 사질토의 경우 지반의 강성이 클수록 폐색정도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 점성토 지반의 경우 전체지지력 대비 선단지지력이 차지하는 비중이 작고, 사질토 지반의 경우 그 비중이 크기 때문에 폐색효과가 말뚝의 지지력에 미치는 영향이 큰 것으로 분석된다. 따라서 사질토 지반에 시공되는 개단말뚝 설계 시 폐색효과를 고려한다면 경제적이고 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

4.2 탄성계수 변화에 대한 영향

본 절에서는 단일 지반에 탄성계수의 폐색효과에 대한 영향을 분석하고자 한다. 해석 case는 SPT결과인 N치가 10-35 범위의 지반을 대상으로 하였으며, 경험식을 통해 탄성계수의 변화에 따른 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 탄성계수에 따른 말뚝 내주면에 작용하는 정지토압계수 분포를 나타낸다. 내주면에 작용하는 정지토압계수는 약 0.45~3.15로 나타났으며, 탄성계수가 증가할수록 정지토압계수가 크게 나타나 폐색정도가 큰 것으로 확인되었다.

콘관입시험(Cone penetration test, CPT)과 개단말뚝

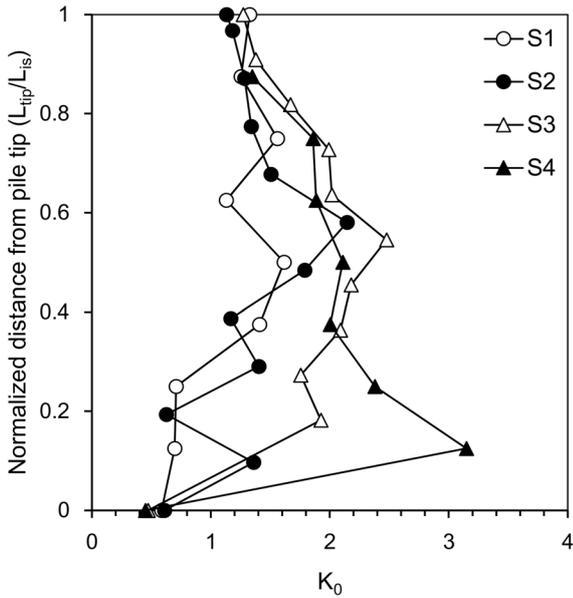


Fig. 5. K_0 with varying soil elastic moduli

의 폐색효과의 상관성에 대한 연구(Paik et al., 2003; Klos and Tejchman, 1977; De Nicola and Randolph, 1997)는 많이 수행되어 왔다. 특히 CPT 결과인 q_c 값이 증가할수록 폐색정도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 또한 K_0 와 Jeong(2015)은 표준관입시험(Standard penetration test, SPT) 결과인 N 치는 폐색정도와 비례관계인 것으로 보고하였다. 이처럼 본 해석 결과는 기존 연구와 유사한 결과를 나타내는 것으로 확인하였다.

4.3 말뚝 선단지지 조건에 대한 영향

본 절에서는 말뚝 선단지지 조건의 폐색효과에 대한 영향을 분석하고자 한다. 해석 case는 마찰말뚝, 지지층에 안착된 경우, 지지층에 1.5m 근입된 경우, 지지층에 3.0m 근입된 경우로 4개의 case를 해석하였다. Fig. 6은 말뚝 선단지지 조건에 대한 해석 case를 나타낸다.

Fig. 7은 말뚝 선단지지 조건에 따른 말뚝 내주면에 작용하는 정지토압계수 분포를 나타낸다. 내주면에 작용하는 정지토압계수는 모두 약 0.45~3.49로 나타났고, 지지층에 근입된 경우가 그렇지 않은 경우보다 정지토압계수가 크게 나타나 폐색정도가 큰 것으로 확인되었다. 특히, 선단부근의 주면부 정지토압계수 분포는 유사한 경향을 나타냈으나, 선단부의 상부에서는 값의 차이를 보이고 있다. 이는 말뚝 내부로 들어가는 관내토가 지지층이 있을 경우, 더 조밀한 상태로 들어가 폐색정도가 큰 것으로 분석된다. 본 해석 결과는 4.2절에서 지반

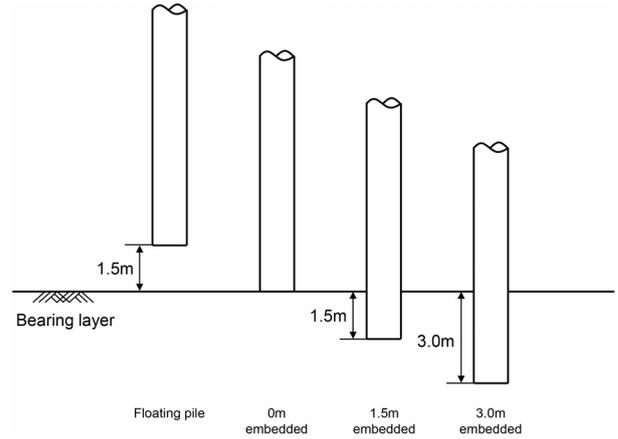


Fig. 6. Parametric studies for socketing length to end-bearing layer

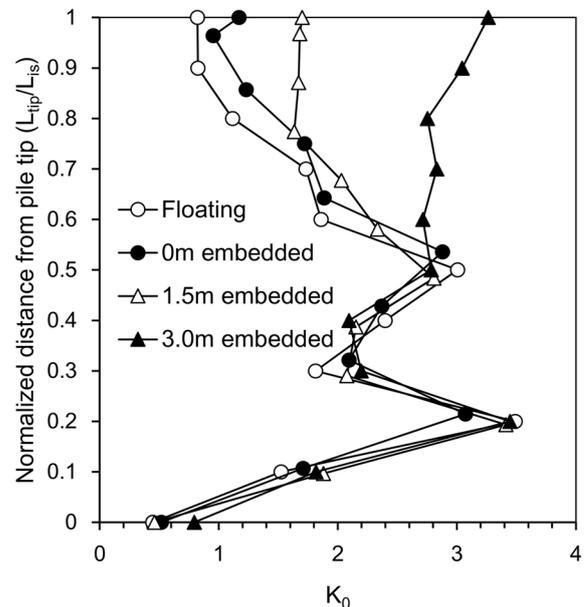


Fig. 7. K_0 with varying end-bearing conditions

탄성계수의 증가에 따라 폐색정도가 증가하는 결론과 유사한 것으로 확인하였다.

따라서 개단말뚝의 폐색효과로 인해 지지력을 증가시키기 위해서 일정깊이 이상의 지지층에 관입을 시키는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4.4 다층지반에 대한 영향

본 절에서는 다층지반과 지반의 층서에 따른 영향을 분석하고자 한다. 해석 case는 크게 2개층과 3개층으로 구분하였으며, 지층 순서에 대하여 정의하였다. Fig. 8은 다층지반에 대한 해석 case를 나타낸다.

Fig. 9는 다층지반과 지반의 순서에 따른 말뚝 내주면

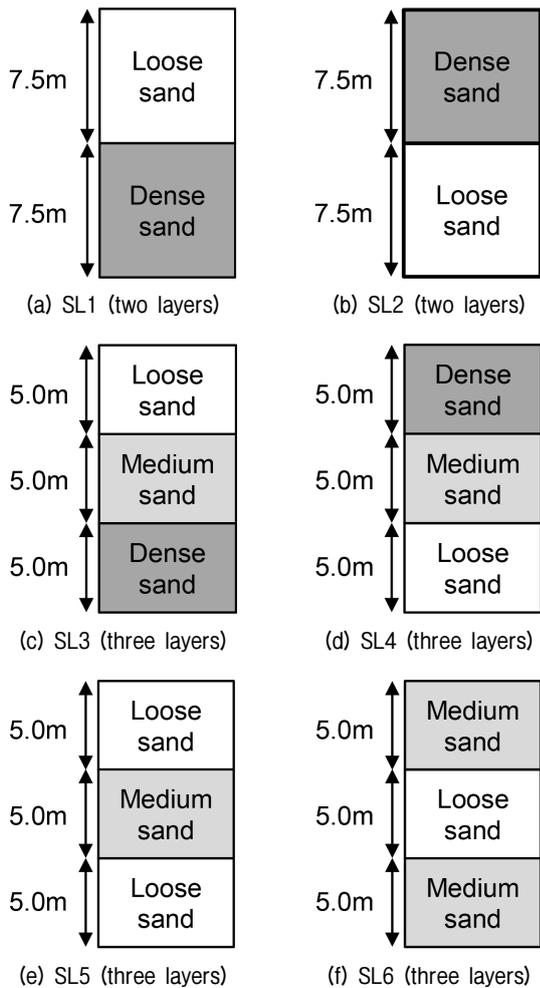


Fig. 8. Parametric studies for different soil profiles

에 작용하는 정지토압계수 분포를 나타낸다. Fig. 9(a)는 2개층의 결과를 나타내는데, 하부 지반이 견고할수록 정지토압계수는 크게 나타나므로 폐색정도도 큰 것으로 판단된다. 또한, Fig. 9(b)는 3개층이지만, Fig. 9(a)와 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

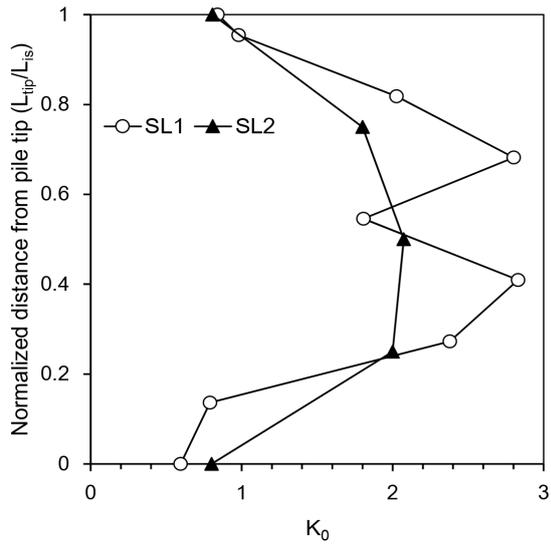
Fig. 9(c)는 상부 지반이 연약하고 하부 지반이 견고한 경우의 정지토압계수를 나타내며, 관내토의 상부와 하부에서 정지토압계수가 크게 나타났다. 하지만, Fig. 9(d)는 상부 지반이 견고하고 하부 지반이 연약한 경우로, 정지토압계수가 중앙에서 크게 나타나 경향성이 다른 것으로 확인되었다.

Fig. 9(e)는 지반이 3개층으로 구성되어 불규칙한 배열을 가지는 경우의 결과이다. 배열이 불규칙한 경우 지반의 강성에 따라 정지토압계수가 결정되는 것을 확인하였다. 이처럼 다층지반의 배열 및 지반 강성에 따라 정지토압계수가 달리 나타나므로 이를 고려한 지지력 산정이 필요함을 알 수 있다.

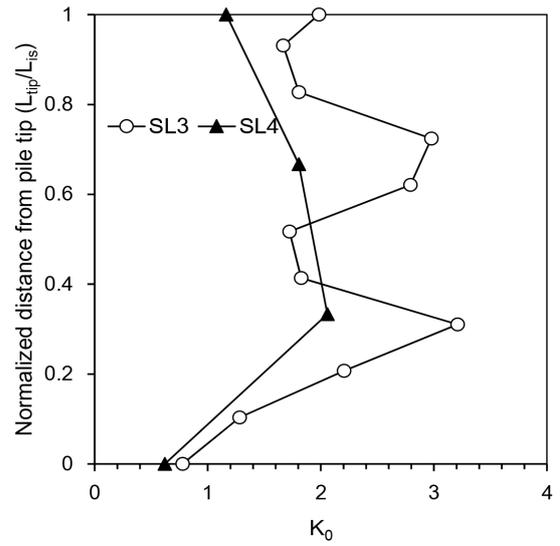
5. 결론

본 연구에서는 대변형 수치해석을 통해 1) 사질토, 점성토에 대한 영향, 2) 지반의 탄성계수 변화에 대한 영향, 3) 말뚝 선단지지 조건에 대한 영향, 4) 다층지반에 대한 영향에 대해 분석하였다. 항타 말뚝의 지반 관입 과정을 직접 모사하기 위하여 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 기법을 사용하여 대변형 해석을 수행하였고, 모델링 기법 및 분석결과는 현장 시험 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 개단말뚝의 폐색효과에 미치는 영향인자에 대한 분석을 통해 강관말뚝의 설계 및 해석 시 폐색효과 영향인자에 대한 고려의 필요성을 확인하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

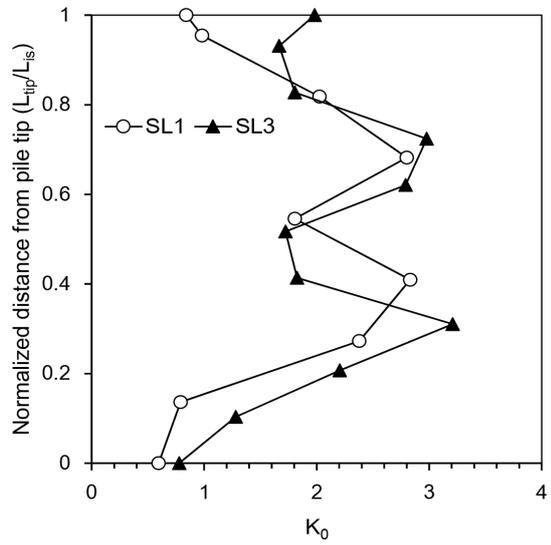
- (1) 사질토, 점성토의 폐색효과를 비교한 결과, 사질토가 점성토보다는 정지토압계수가 크게 나타나 폐색정도가 큰 것으로 확인되었고, 사질토의 경우 지반의 강성이 클수록 폐색정도가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 사질토 지반에 시공되는 개단말뚝 설계 시 폐색효과를 고려한다면 경제적이고 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.
- (2) 지반 탄성계수가 증가할수록 정지토압계수가 크게 나타나 폐색정도가 큰 것으로 확인되었다. 본 해석 결과는 기존 연구 결과인 CPT 결과인 q_c 값과 SPT 결과인 N치가 폐색정도와 비례관계를 가지는 것과 유사한 경향을 나타냄을 확인하였다.
- (3) 지지층에 근입된 경우가 그렇지 않은 경우보다 정지토압계수가 크게 나타나 폐색정도가 큰 것으로 확인되었다. 이는 말뚝 내부로 들어가는 관내토가 지지층이 있을 경우, 더 조밀한 상태로 들어가 폐색정도가 큰 것으로 분석된다. 따라서 개단말뚝의 폐색효과로 인해 지지력을 증가시키기 위해서 일정깊이 이상의 지지층에 관입을 시키는 것이 유리할 것으로 판단된다.
- (4) 상부 지반이 연약하고 하부 지반이 견고할수록 정지토압계수는 크게 나타나 폐색정도도 클 것으로 판단된다. 또한, 지반의 배열이 불규칙한 경우 지반의 강성에 따라 정지토압계수가 결정되는 것을 확인하였다. 따라서 다층지반의 배열 및 지반 강성에 따라 정지토압계수를 다르게 적용하여 내부마찰력을 산정할 필요가 있음을 알 수 있었다.



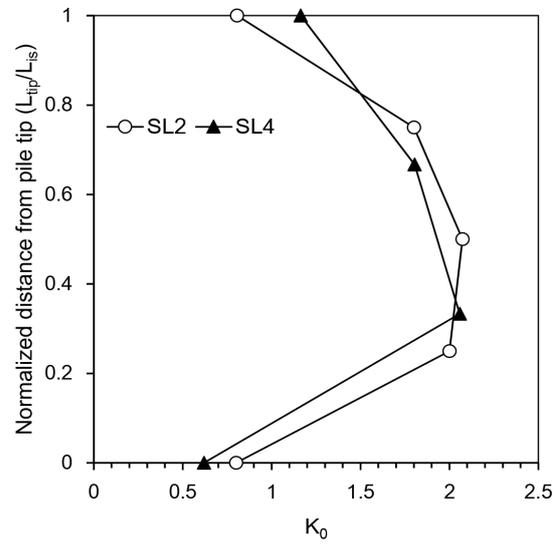
(a) SL1 and SL2



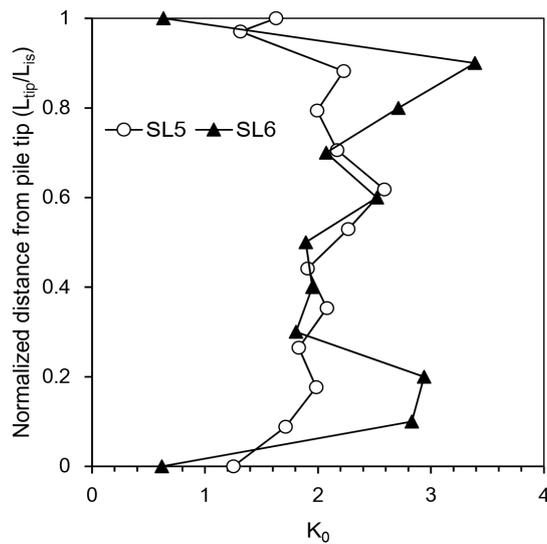
(b) SL3 and SL4



(c) SL1 and SL3



(d) SL2 and SL4



(e) SL5 and SL6

Fig. 9. K_0 with varying soil profiles

감사의 글

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030040)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. ABAQUS. (2013), *ABAQUS user's and theory manuals, Version 6.13. rhode island: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.*
2. Beringen, F. L., 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.
3. Bowles, J. E. (2002), *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, New York, USA.
4. Brucy, F., Meunier, J., and Nauroy, J.F. (1991), "Behavior of Pile Plug in Sandy Soils during and After Driving", *Proceedings of 23rd Annual Offshore Technology Conference*, Houston, 1, pp.145-154.
5. De Nicola, A. and Randolph, M.F. (1997), "The Plugging behaviour of Driven and Jacked Piles in Sand", *Geotechnique*, Vol.47, No.4, pp.841-856.
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.
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.
9. 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.
10. 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*, pp.196-199.
11. Kishida, H. and Isemoto, N. (1977), "Behavior of Sand Plugs in Open Ended Steel Pipe Piles", *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, Vol.1, pp.601-612.
12. Klos, J. and Tejchman, A. (1977), "Analysis of behavior of Tubular Piles in Subsoil", *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, pp. 605-608.
13. 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.
14. Ko, J. Y. (2015), "Evaluation of Bearing Capacity for Open-Ended Piles with Soil Plugging", Ph.D. thesis, Yonsei University, Seoul.
15. Ko, J. Y. and Jeong, S. S. (2014), "Analysis of Plugging Effect for Open-ended Piles based on Field Tests", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.12, pp.51-61.
16. 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.
17. 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.29-38.
18. 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.
19. Kraft, L. M. Jr. (1991), "Performance of Axially Loaded Pipe Piles in Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.2, pp. 272-296.
20. Lee, S. Y. (2016), "A Study on the Excavation Damage Zone (EDZ) under TBM Excavation", M.S. thesis, Yonsei University, Seoul.
21. 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.
22. Nauroy, J. F. and Le Tirant, P. (1983), "Model Tests of Calcareous sands", *Proceedings of conference on geotechnical practice in offshore engineering*, Austin, TX., pp.27-39.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Paikowsky, S. G. (1990), "The Mechanism of Pile Plugging in Sand", *Proceedings of the 22nd Offshore Technology Conference*, Houston, TX, pp.593-604.
27. 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.
28. Randolph, M. F., May, M., Leong, E. C., Hyden, A. M., and Murff, J. D. (1990), "Soil Plug Response in Open-ended Pipe Piles", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.118, No.5, pp.743-759.
29. Szechy, C. H. (1959), "Tests with Tubular Piles", *Acta Technica*, Hungarian Academy of Science, Vol.24, pp.181-219.
30. 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 : March 23rd, 2016

Revised : May 2nd, 2016

Accepted : May 2nd, 2016