

실규모 현장시험 및 유한요소해석을 통한 강관매입말뚝의 공학적 거동에 대한 연구

A Study on the Engineering Behaviour of Prebored and Precast Steel Pipe Piles from Full-Scale Field Tests and Finite Element Analysis

김 정 섭¹⁾ · 정 경 자²⁾ · 정 상 섬³⁾ · 전 영 진¹⁾ · 이 철 주[†]

Jeong-Sub Kim · Gyoung-Ja Jung · Sang-Seom Jeong · Young-Jin Jeon · Cheol-Ju Lee

Received: December 4th, 2017; Revised: December 21st, 2017; Accepted: March 13th, 2018

ABSTRACT : In the current study, the engineering behaviour of prebored and precast steel pipe piles was examined from a series of full-scale field measurements by conducting static pile load tests, dynamic pile load tests (EOID and restrrike tests) and Class-A and Class-C1 type numerical analysis. The study includes the pile load - settlement relations, allowable pile capacity and shear stress transfer mechanism. Compared to the allowable pile capacity obtained from the static pile load tests, the dynamic pile load tests and the numerical simulation showed surprisingly large variations. Overall among these the restrrike tests displayed the best results, however the reliability of the predictions from the numerical analysis was lower than those estimated from the dynamic pile load tests. The allowable pile capacity obtained from the EOID tests and the restrrike tests indicated 20.0%-181.0% (avg: 69.3%) and 48.2%-181.1% (avg: 92.1%) of the corresponding measured values from the static pile loading tests, respectively. Furthermore, the computed results from the Class-A type analysis showed the largest scatters (37.1%-210.5%, avg: 121.2%). In the EOID tests, a majority of the external load were carried by the end bearing pile capacity, however, similar skin friction and end bearing capacity in magnitude were mobilised in the restrrike tests. The measured end bearing pile capacity from the restrrike tests were smaller than was measured from the EOID tests. The present study has revealed that if the impact energy is not sufficient in a restrrike test, the end bearing pile capacity most likely will be underestimated. The shear stresses computed from the numerical analysis deviated substantially from the measured pile force distributions. It can be concluded that the engineering behaviour of the pile is heavily affected if a slime layer exists near the pile tip, and that the smaller the stiffness of the slime and the thicker the slime, the greater the settlement of the pile.

Keywords : Cement paste, Full-scale pile load tests, Numerical modelling and analysis, Prebored and precast steel pipe pile

요 지 : 본 연구에서는 현장에서 실규모로 시공된 8본의 강관매입말뚝의 공학적 거동을 정재하시험, 동재하시험(EOID 및 restrrike 시험) 및 Class-A 및 C1 type의 수치해석을 수행하여 상세히 고찰하였다. 이를 통해 말뚝의 하중-침하, 설계지지력 및 전단응력 전이 특성 등을 분석하였다. 정재하시험을 통해 평가된 설계지지력에 비해 동재하시험 및 수치해석은 이를 매우 상이하게 평가하는 것으로 분석되었으며, 이 가운데 restrrike 시험이 전반적으로 최상의 결과를 도출하였고, 수치해석 결과의 신뢰성은 동재하시험에 비해 낮은 것으로 분석되었다. 각 시험에서 산정된 설계지지력을 정재하시험의 결과와 비교할 때 EOID는 정재하시험값의 20.0%-181.0%(평균: 69.3%)의 범위를 보였고, restrrike 시험의 경우 48.2%-181.1%(평균: 92.1%)의 범위를 보였다. 또한 Class-A type에서는 37.1-210.5%(평균: 121.2%)로 가장 큰 분산을 보였다. EOID 시험에서는 선단지지력이 말뚝의 전체지지력의 대부분을 차지하는데 비해, restrrike 시험에서는 주면마찰력 및 선단지지력이 비슷한 정도로 발휘되었다. 이때 restrrike 시험에서 측정된 선단지지력은 EOID 시험에서 측정된 크기보다 작은 것으로 분석되었다. 즉 restrrike 시험에서 타격에너지가 충분하지 않은 경우 말뚝의 선단지지력이 과소평가될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 말뚝의 축력분포로부터 측정된 전단응력은 말뚝의 심도가 깊어질수록 증가하는 양상을 보였으며, 수치해석 결과는 정재하시험과는 상당한 정도의 차이를 보였다. 말뚝선단 인근에 슬라임이 존재하는 경우 말뚝의 거동에 매우 큰 영향을 주는 것으로 분석되었는데, 슬라임의 탄성계수가 작을수록 그리고 슬라임의 두께가 두꺼울수록 말뚝의 침하량이 큰 폭으로 증가하는 것을 확인하였다.

주요어 : 시멘트풀, 실규모 말뚝 재하시험, 수치해석, 강관매입말뚝

1. 서 론

항타공법은 말뚝 머리에 해머로 물리적인 타격을 가하여

말뚝을 선단 지지층까지 관입시키는 공법으로 효율적이고 경제적이며 지지력에 대한 신뢰성이 비교적 높기 때문에 전통적으로 널리 사용되어 왔다. 그러나 말뚝 타격으로 인한

1) Post Graduate Research Student, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

2) Deputy Principal Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute

3) Professor, Department of Civil and Environment Engineering, Yonsei University

† Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : cj32@kangwon.ac.kr)

소음 및 진동과 관련된 민원 발생은 물론이고 과도한 향타에 의한 말뚝 두부 및 선단부의 파손 발생 등 여러 문제점이 발생해 왔다. 따라서 이러한 문제점을 획기적으로 감소시킬 수 있는 매입말뚝 공법이 최근 널리 적용되고 있다. 매입말뚝 공법은 1980년대 초 일본에서 개발되어 1990년대 국내에 도입되었으며 국내의 지반조건 및 현장의 시공특성에 적합하게 다양한 공법이 개발되어 왔는데, 대표적인 공법으로는 SIP(Soil-Cement Injected Precast Pile), SDA(Separated Doughnut Auger) 및 PRD(Percussion Rotary Drill) 등이 있다(한국지반공학회, 2015). 매입말뚝 공법은 오거(auger)에 의한 천공, 천공 홀 내부에 시멘트밀크 주입과 교반, 최종 향타의 순서로 시공된다. 이러한 시공 과정을 통해 시멘트풀(soil cement) 양생 후 주면 지반의 강도가 증대되어 말뚝의 주면마찰력을 크게 증대시키고, 아울러 향타공법으로는 도달이 어려운 암반층까지도 천공을 수행하여 말뚝의 선단 지지력을 극대화시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 기존의 향타공법에 비해 진동이나 소음 측면에서도 만족할만한 결과를 얻을 수 있고 시공 속도가 빠른 장점이 있다(LG건설 기술연구소, 2002). 전경수 등(2011)은 2008-2010년 사이 한국도로공사의 고속도로 교량 183개소에 적용된 말뚝기초의 형식에 대해 조사한 바 있다. Table 1은 이를 통해 분석된 기시공된 기초의 말뚝재료 및 시공법을 정리하여 나타내고 있다. 이때 강관말뚝이 총 165,289m로 전체길이의 81.6%를 차지하는데, 이는 강관말뚝의 강도, 강성 및 이음부의 공학적 특성이 타 말뚝재료에 비해 우수하기 때문이다. 또한 말뚝의 대부분은 매입말뚝 공법을 통해 시공되는데 SDA 공법이 88,109m로 전체의 55.6% 그리고 SIP 공법이 58,218m로 전체의 36.8%로 매입말뚝 공법이 총 92.4%를 차지하고 있는 것으로 분석된다. 즉 고속도로 교량에 적용된 말뚝기초의 대부분은 강관을 이용한 매입말뚝 공법에 의해 시공되었음을 알 수 있다.

이와 같이 고속도로의 교량기초에는 대부분 강관매입말뚝이 적용되고 있지만 그 공학적 거동이 명확하게 규명되어 있지 못하며, 말뚝의 지지력을 명확하게 예측하기도 힘든 실정이다(연세대학교 등, 2016). 이로 인해 많은 경우 말뚝의 지지력이 과소하게 평가되어 말뚝이 비경제적으로 시공되고 있다. 이에 본 연구에서는 강관매입말뚝의 공학적 거동을

상세히 분석하고 그 설계지지력을 높은 신뢰성을 가지고 평가할 수 있는 방법을 도출하기 위해, 국내 A, B 현장에서 총 8본의 실규모 강관매입말뚝을 시공하고 정재하시험 및 동재하시험(EOID 및 restrrike 시험)을 실시하여 말뚝의 공학적 거동을 고찰하였다. 또한 유한요소해석 프로그램인 Plaxis-3D를 이용한 Class-A type(말뚝시공 이전에 수행된 사전 수치해석) 및 Class-C1 type(말뚝 정재하 및 동재하 시험 이후에 수행된 사후 수치해석) 수치해석(Lambe, 1973)을 수행하고 이를 통해 예측된 말뚝의 하중-침하 관계 및 축력분포를 현장 실측치와 심층적으로 비교분석 하였다.

2. 말뚝시험시공 및 재하시험

본 연구에서는 실규모 강관매입말뚝의 거동을 고찰하기 위해 총 8본의 실규모 말뚝을 시공하고 이후 정재하 및 동재하 시험을 실시하여 말뚝의 하중-침하 관계 및 축력분포를 측정하였다.

2.1 지반 및 현장조건

강관매입말뚝의 시공에 앞서서 지반조사를 실시하여 말뚝의 근입심도를 결정하였다(라운이엔지, 2015 & 2016). A 현장의 경우 지표면으로부터 3.4-3.5m까지 점토 섞인 실트질 모래인 매립층으로 구성되어 있으며, 그 하부는 실트질 모래(SM) 및 입도분포가 불량한 자갈층(GP)이 5.5-7.1m까지 분포하고 표준관입시험(SPT) N치의 평균이 28타/30cm인 붕적층인 것으로 조사되었다. 이후 10.0-10.8m까지 SPT-N치 평균이 50타/30cm 이상인 풍화토층이 분포된 것으로 나타났다 그 아래에는 풍화암층이 분포하는 것으로 조사되었다. 본 조사지역의 지하수위는 GL.(-) 1.2-3.2m로 주로 매립층 구간에 분포하고 있는 것으로 측정되었다. 한편 B 현장의 경우 지표로부터 약 1.7-1.8m까지 점토 섞인 실트질 모래로 구성된 매립층이 분포하며, 그 하부 약 2.5-2.7m까지 실트질 모래가, 3.9-4.1m까지는 입도분포가 불량한 자갈층이 각각 분포하였다. 또한 표준관입시험(SPT) N치가 평균 28타/30cm인 붕적층으로 나타났다. 10.1-12.4m까지 N치 평균이 50타/30cm 이상인 풍화토층이 분포하며 그 하부에는 풍

Table 1. Summary of pile material and piling methods for bridge foundations (전경수 등, 2011)

Pile material	Total length (m)	(%)	Piling methods	Total length (m)	(%)
Steel pipe piles	165,289	81.6	SDA	88,109	55.6
PHC piles	13,224	6.5	SIP	58,218	36.8
Bored piles	12,968	6.4	Driven	11,836	7.5
Composite piles	11,020	5.4	PRD	214	0.1

Table 2. Geological profile (라온이엔지, 2015 & 2016)

Sites	Piles	Fill (m)	Sedimentary soil (m)		Weathered soil (m)	Weathered rock (m)
			SM	GP		
A	Pile-1	3.4	2.4	-	4.2	5.0
	Pile-2	3.4	2.1	-	4.5	9.0
	Pile-3	3.5	3.0	0.6	3.5	6.0
	Pile-4	3.4	2.0	1.2	3.5	6.0
	Pile-5	3.4	1.4	1.8	4.2	5.0
	Pile-6	3.4	2.1	-	4.5	9.0
B	Pile-7	1.8	0.9	1.4	6.0	6.0
	Pile-8	1.7	0.8	1.4	8.5	4.0

화암이 분포하는 것으로 조사되었다. 또한 조사지역의 지하 수위는 GL.(-) 3.8-3.9m로 주로 붕적층 구간에 분포하고 있는 것으로 측정되었으며, 풍화토층 구간에도 일부 분포하는 것으로 조사되었다.

2.2 말뚝의 제원 및 시공방법

Table 3에는 본 연구에서 시공된 말뚝의 길이 및 직경, 천공경 및 풍화암 근입심도가 나타나 있다. 모든 말뚝은 SDA 공법으로 시공되었으며, 물시멘트비(W/C)가 70%인 시멘트 풀을 1차로 주입했고 강관말뚝을 삽입시킨 상태에서 2차 시멘트 풀을 주입하고 최종 경타한 후 외부 케이싱을 인발하였다. 천공경과 말뚝외부는 모두 시멘트 풀로 채웠으며 강관의 내부에도 최소 4D+1m (D=말뚝의 직경)의 깊이로 시멘트풀을 채웠다. Piles 1,3,6,8은 말뚝의 선단이 풍화암층에 최소 1D 이상 근입된 반면, 나머지 말뚝은 풍화암층에 약간 근입되도록 시공되었다. 매입말뚝의 공학적 거동을 분석하기 위해서는 하중-침하뿐만 아니라 전단응력전이를 검토하는 것도 매우 중요하므로 말뚝에 변형률계를 설치하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 각 지층별 단위면적당 주면마찰력 및 선단지지력을 측정하기 위해서 시험말뚝 1본당 총 10개소에 진동현식 변형률계를 180° 간격으로 2개

씩 부착하였다. 또한 변형률계를 말뚝의 표면에 설치하고 이를 보호하기 위해 보호용 앵글을 부착하였다. 이로 인해 천공경은 말뚝의 직경(D)에 비해 약 200mm 정도 큰데, 이는 통상적으로 매입말뚝에 적용되는 천공경인 D+100mm 과 비교하여 2배에 해당되는 값이다. 그러나 김성희(2017)의 연구에 의하면 매입말뚝의 단위면적당 주면마찰력 및 선단지지력의 크기는 천공경의 크기와 무관하게 거의 일정한 것으로 보고된 바 있어, 본 연구에서 시공된 매입말뚝의 공학적 거동은 국내실무에서 적용되는 천공경이 D+100mm 인 매입말뚝의 거동과 충분히 유사할 것으로 판단된다.

2.3 말뚝재하시험

본 연구에서는 강관매입말뚝 시공 직후 EOID 동재하시험을 실시하였고, 시멘트 풀이 충분히 경화할 수 있도록 A현장의 경우 92일이 경과된 이후에, B현장의 경우 75일이 경과된 이후에 말뚝별로 정재하시험을 수행하였다. 정재하시험에 적용되는 최대하중은 Class-A type의 수치해석을 통해 분석된 극한하중을 참조하여 결정되었다. 한편 각 말뚝의 정재하시험이 실시된 직후 restrrike 동재하시험을 실시하였다. 이를 통해 말뚝의 하중-침하특성은 물론 말뚝의 극한 지지력, 설계지지력 및 심도별 축력분포를 평가하였다. 모든

Table 3. Specifications of steel pipe piles

Site	Pile	Pile length (m)	Pile diameter (m)	Diameter of bored hole (m)	Embedded depth to weathered rock (m)
A	Pile-1	14.40	0.508	0.712	3.80
	Pile-2	8.93			0.43
	Pile-3	9.65			0.95
	Pile-4	10.70			0.03
	Pile-5	10.78			0.12
	Pile-6	10.70			0.70
B	Pile-7	10.50	0.457	0.650	0.20
	Pile-8	13.00			1.40

Thickness of piles: 12 mm

정재하시험에서는 8개의 반력앵커를 이용하여 하중을 작용시켰으며, 반력앵커의 천공경은 150mm이고 직경이 12.7mm인 강연선 10가닥을 압반에 정착시켰다. 앵커의 정착장은 5-6m 정도이고 앵커 1본이 1,000kN의 인장저항력을 발휘할 수 있도록 설계하였고 그라우트체의 W/C는 50% 이하로 적용하였다. 본 연구에서 수행된 정재하시험은 ASTM D1143-81 (1994)에서 규정하고 있는 완속표준재하시험방법과 반복재하방법을 혼합한 형태를 적용하였다. 하중 재하 주기는 총 시험하중을 25%, 50%, 75%, 100% 총 4단계로 나누어 시험을 실시하였으며, 말뚝머리 침하율이 0.25mm/hr(최대 2시간) 이하가 될 때까지 하중을 유지시켰다. 이후 하중이 완전히 재하되면 50%씩 단계적으로 제하하되 20분씩 유지하도록 하였다(주지텍크, 2016). 또한 초기입력값을 조정 한 후 낙하고를 조절하면서 EOID 시험 시 중량 5톤의 드롭해머를 사용하였으며, restrike 시험의 경우 중량 4톤의 드롭해머를 사용하였다(연세대학교 등, 2016).

말뚝 정재하시험으로부터 획득된 하중-침하 곡선을 이용하여 허용지지력을 결정하는 방법에는 여러 방법이 있는데, 본 연구에서는 국내에서 가장 널리 적용되며 비교적 신뢰도가 높다고 인정되는 Davisson 방법(1972)을 통해 파괴하중을 산정하였다. Davisson 방법(1972)은 말뚝재료의 탄성침하량과 선단부 지반의 탄소성 침하량을 고려한 것으로 아래의 Eq. (1-2)과 같이 말뚝두부에 침하량(S)이 발생했을 때의 하중을 파괴하중이라 정의한다. 여기에 안전율 2를 적용하여 말뚝의 설계지지력을 평가할 수 있다.

$$S = \Delta + \left(4.0 + \frac{D}{120}\right) D \leq 610mm \quad (1)$$

$$S = \Delta + \frac{D}{30} \quad D > 610mm \quad (2)$$

여기서, Δ 는 말뚝의 탄성침하량 $\left(= \frac{PL}{A_p E}\right)$ (mm)이고, P는 말뚝에 작용하는 상재하중, L은 말뚝의 길이, A_p 는 말뚝의 단면적, E는 말뚝의 탄성계수, D는 말뚝의 직경(mm)이다(조천환, 2007).

2.4 말뚝선단 인근의 슬라임의 분포 및 SPT-N 측정

말뚝시험 종료 후 말뚝선단 인근에 슬라임이 존재할 가능성이 제기되어 말뚝내부에 대한 시추조사 및 표준관입시험을 통해 말뚝의 선단인근에 존재하는 슬라임의 분포 및 SPT-N값을 측정하였다. 모든 말뚝에 대한 조사결과 8본 가운데 2본의 말뚝에서 슬라임이 존재하는 것으로 조사되었다. 그 결과 강관의 내부에 최대 2m의 슬라임이 존재하며

강관의 선단 하부에는 최대 0.5m의 슬라임이 존재하는 것으로 확인되었다. 또한 슬라임에 대한 SPT-N은 2-4타/30cm의 값을 가지는 것으로 조사되어 일부 말뚝의 선단부근에 매우 연약한 상태의 슬라임이 존재하는 것을 확인하였다.

3. 수치해석

본 연구에서는 말뚝에 대한 시공 및 각종 재하시험과 함께 3차원 유한요소 해석 프로그램인 Plaxis-3D를 이용하여 현장에 시공된 강관매입말뚝의 공학적 거동을 상세히 분석하였다. Plaxis-3D는 지반공학분야의 다양한 문제에 대한 변형 및 안정성 분석을 수행하는데 널리 사용되고 있다 (Brinkgreve et al., 2015). 본 연구에서는 앞서 기술한 것과 같이 현장지반조사 결과 및 시공조건을 반영한 Class-A type (사전수치해석)의 수치해석을 먼저 실시하여 정재하시험에 적용할 수 있는 극한하중 값을 추천하였다. 또한 정재하 및 동재하시험이 종료된 이후 Class-A type 해석의 예측값과 정재하시험 측정값을 비교하고 Class-C1 type(사후수치해석)의 수치해석을 추가로 실시하였다.

3.1 경계조건 및 Mesh

본 연구에서는 10개의 절점을 가지는 사면체 요소를 통해 지반 및 구조물에 대한 3차원 해석이 가능하도록 모델링하였고 이때 XY평면에 대하여 대칭조건을 이용하여 전체의 1/4에 해당되는 mesh를 적용하였다(Fig. 1). 수치해석에서는 매입말뚝 시공현장의 지반 및 시공 조건을 최대한 반영하여 모사하였다. Class-A 및 C1 type 수치해석에서는 말뚝시공 중 지반천공 및 경타에 의한 말뚝과 인접한 지반의 응력변화나 지반물성치의 변화 및 말뚝선단의 인접지반에

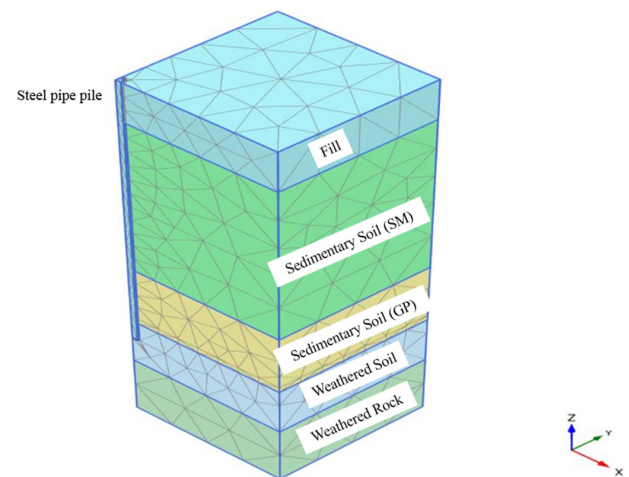


Fig. 1. A representative FE mesh

잔류할 가능성이 있는 슬라임에 대해서는 고려하지 않았으나, 이후 설명할 것과 같이 말뚝의 거동은 슬라임의 분포 유무 및 그 특성에 영향을 크게 받는 것으로 분석되어 이를 고려한 별도의 parametric 해석을 수행하였다. 수치해석 과정에 대한 상세한 설명은 김성희 등(2017)이 보고한 바 있다.

3.2 말뚝 및 지반의 물성치

본 해석에 적용된 지반 및 말뚝의 물성치는 지반조사 보고서를 참조하여 지반 및 말뚝의 물성치를 적용하였다(라온이엔지, 2015 & 2016). 이는 주로 SPT-N값을 기반으로 평가된 값이며, 이를 바탕으로 유한요소해석에서 요구되는 지반의 물성치를 산정하였다(Table 4). 한편 시멘트풀의 물성치는 연세대학교 등(2016)의 실험결과를 적용하였다. 말뚝 및 시멘트풀에는 등방탄성모델(isotropic elastic model)이 적용되었고, 매립층, 퇴적층(SM, GP), 풍화토 및 풍화암에는 비관련유동법칙(non-associated flow rule) 및 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 따르는 탄-소성모델을 적용하였다. 한편 강관말뚝, 시멘트 풀 및 지반에 interface 모델링을 하였는데 외부 시멘트 풀-인접지반, 강관말뚝-외부 시멘트 풀 및 내부 시멘트 풀-강관말뚝의 3개소의 경계면에 경계면요소(interface element)를 지정하여 소성항복이 발생하는 경우, 전단응력의 크기가 증가하는 것을 제한하고 미끄러짐이 발생할 수 있도록 하였다. 말뚝의 시공으로 유발된 경계면에서의 강도 감소를 고려하기 위해 강도감소 계수($R_{int}=0.7$)를 적용하였다(Brinkgreve et al., 2015). 이를 바탕으로 Eq. (3), (4)를 이용하여 전단강도 상수(c'_{int} , ϕ'_{int})를 산정할 수 있다. 여기서 c'_{soil} 은 지반의 점착력, ϕ'_{soil} 은 지반의 내부마찰각이다(Brinkgreve et al., 2015).

$$c'_{int} = R_{int} \times c'_{soil} \quad (3)$$

$$\tan(\phi'_{int}) = R_{int} \times \tan(\phi'_{soil}) \quad (4)$$

3.3 Class-A 및 C1 수치해석

Class-A type 해석에서는 말뚝시공 이전 수행된 지반조사 결과 및 말뚝시공 조건을 이용하여 정재하시험을 모사하였다. 이를 통해 말뚝의 하중-침하 관계를 분석하고 Davisson 방법(1972)을 이용하여 설계지지력을 산정하였으며, 말뚝에 단계별로 하중을 증가시켜 하중전이특성을 고찰하였다. 이를 바탕으로 주면마찰력 및 선단지지력을 산정하여 전체 지지력에서 선단 및 주면지지력이 차지하는 비율을 분석하였다. 또한 말뚝의 축력분포로부터 전단응력의 크기를 산정하였다. 이후 정재하시험 결과를 참값으로 가정하여 Class-C1 type 해석을 진행하였다. 이때는 주로 정재하시험에서 측정된 하중-침하 관계를 참조하여 지반의 강성을, 특히 선단지반의 강성, 적절히 변경시키면서 정재하시험과 가장 유사한 하중-침하를 나타낼 때의 강성을 도출하였다. 한편 앞서 언급한 바와 같이 일부 말뚝의 선단 인근에는 일정한 두께의 슬라임이 존재하는 것으로 조사되었으나(연세대학교 등, 2016) 4장의 Class-A 및 C1 type 해석에서는 이를 고려하지 않고 5장에서 그 영향을 분석하였다.

4. 현장시험 및 수치해석 결과 분석

실규모로 시공된 강관매입말뚝에 대해 수행된 정재하시험 및 동재하시험 그리고 이에 대한 수치해석을 통해 획득한 결과에 대해 상세한 분석을 실시하였다. 현장재하시험을 통해 말뚝의 하중-침하와 지지력, 축력 및 전단응력의 분포를 고찰하고, 이를 Class-A 및 C1 type의 수치해석과 비교 분석하여 수치해석의 신뢰성을 검토하였다. 본 연구에서는 총 8본 말뚝의 거동을 거시적으로 분석하는 가운데 그 거동의 차이가 특히 뚜렷한 Pile-1 및 Pile-2 2본의 말뚝에 대한 거동을 중점적으로 고찰하였다. Pile-1의 경우 말뚝내부에 1.9m, 선단하부에 0.5m의 슬라임이 존재하며 표준관입시험 결과 N치가 2타/30cm으로 측정되었는데 비해, Pile-2의 경우에는 슬라임이 존재하지 않는 것으로 조사되었다.

Table 4. Material parameters assumed in the numerical modelling (라온이엔지, 2015 & 2016)

Soil/Pile	Model	E (MPa)	c' (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	K ₀	v'	
Fill	Mohr-Coulomb	10-30	0	25-29	17	0.5	0.3	
Sedimentary soil		SM	5-20	3	28-32	19	0.5	0.3
		GP	40-80	5-19	29-33	20	0.5	0.3
Weathered soil			80-140	22-26	33-39	20	0.5	0.3
Weathered rock			180-250	30-35	32-34	21	0.5	0.3
Pile	Elastic	210,000	-	-	75	-	0.2	
Cement paste		3,000	-	-	20	-	0.25	

E=Young's modulus, c'=cohesion, ϕ' =friction angle of soil, γ =unit weight, K₀=earth pressure coefficient at rest, v'=Poisson's ratio

4.1 말뚝의 하중-침하 분포 및 설계지지력 산정

Figs. 2(a)-2(b)는 Piles 1-2에 대한 현장재하시험(EOID test, 정재하시험, restrrike 시험) 및 수치해석을 통해 획득된 말뚝의 하중-침하특성을 보여준다. 앞서 언급한 바와 같이 Pile-1의 경우 말뚝선단 인근지반에 슬라임이 존재하여 항복에 도달된 이후 하중의 증가가 거의 없이 급격한 침하가 발생하는데 비해, Pile-2에서는 슬라임이 존재하지 않기 때문에 항복에 도달된 이후에도 하중이 지속적으로 증가하여 뚜렷하게 대비되는 하중-침하 거동을 보이고 있다. 즉 말뚝의 선단이 근입된 풍화암의 심도는 Pile-1이 Pile-2 보다 더 깊지만 이보다는 슬라임이 하중-침하거동에 더 큰 영향을 준 것으로 분석된다. Pile-1의 경우 정재하시험을 통해 1,425kN의 설계지지력이 산정되는데 비해 EOID 및 restrrike 시험에서는 875kN의 동일한 설계지지력이 산정되어 정재하시험에 의한 결과의 61.4%의 수준을 보였다. 한편 Class-A type 수치해석에서는 정재하시험 결과의 약 2배인 3,000kN의 설계지지력이 도출되었으며, 5,000kN에서도 뚜렷한 항복점을 찾기 어려운 정도로 하중이 거의 선형에 가깝게 지속적으로 증가하는 것을 볼 때 수치해석에서 선단지반(풍화암)의 강성 및 강도가 너무 크게 평가된 것으로 판단된다. 이에 따라 Class-C1 수치해석에서는 선단지반의 탄성계수를 당초 적용한 값의 50% 정도로 조정한 결과 항복도달 이전까지는 정재하시험의 결과와 비교적 유사한 하중-침하 관계를 얻었다. 하지만 항복 이후에는 하중이 지속적으로 증가하는 것으로 예측되어 정재하시험과는 상이한 결과를 보였다. 한편 Pile-2의 경우 정재하시험에서 약 580kN의 설계지지력을 산정하였으며, EOID 시험과 restrrike 시험에서는 각각 약 1,050kN과 800kN의 설계지지력을 얻었다. 또한 Class-A 수치해석을 통한 지지력은 580kN으로 정재하시험과 유사한 수준인

것으로 나타났다. Pile-2의 경우 정재하시험과 Class-A 시험의 하중-침하가 상당히 유사하지만 항복 이후 수치해석에서의 load settlement ratio(stiffness of the pile-soil system)가 비교적 크게 평가되었기 때문에 Class-C1 해석 수행 시, 앞의 경우와 유사하게 선단지반의 탄성계수를 50%로 감소시켜 해석을 수행하였다. 그 결과 항복 이후의 거동이 정재하시험의 경우와 비교적 유사하게 산정되었으며 이로 인해 설계지지력이 435kN으로 약간 감소되었다. 동재하시험과 수치해석에서 산정된 말뚝의 설계지지력은 정재하시험을 통해 분석된 설계지지력과는 다소의 차이를 보였다. EOID 및 restrrike 시험 자체는 비교적 유사한 결과를 예측하지만 Pile-1의 경우는 설계지지력이 과소평가 되는 데 비해, Pile-2에서는 과대평가되는 서로 상반된 결과를 보이고 있어서 명확한 결론을 도출하기는 어렵다. 종합적으로 판단할 때 Class-C1 type 해석에서는 항복에 도달할 때까지는 정재하시험 결과와 유사한 하중-침하관계를 예측할 수 있으나, 항복을 초과하는 범위에서는 하중이 지속적으로 증가하여 정재하시험 결과와의 차이가 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 3은 정재하시험을 통해 평가된 8본 말뚝의 설계지지력을 동재하시험 및 수치해석을 통해 평가된 설계지지력과 비교하여 나타내고 있다. EOID의 경우 정재하시험에서 도출한 설계지지력의 20.0%-181.0%(평균 69.3%)의 범위를 보였고, restrrike 시험의 경우 48.2%-181.1%(평균 92.1%)의 분포를 가졌다. 정재하시험 이전에 수행했던 Class-A type 해석의 경우 37.1%-210.5%(평균 121.2%)로 그 분포가 가장 넓었으며, 정재하시험 이후 수행된 Class-C1 type 해석에서는 46.3%-120.5%(평균 88.5%)로 약간 개선된 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 3의 분포로부터 검토할 때 restrrike 시험이 가장 신뢰도가 높았고, 다음으로 EOID 시험이 뒤를 이었다.

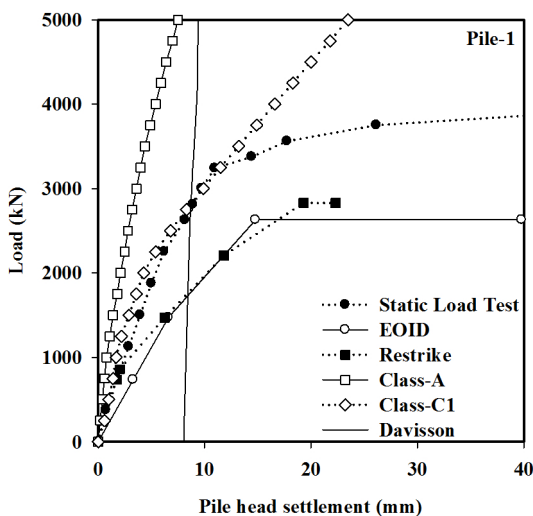


Fig. 2. (a) Load-settlement relation of Pile-1

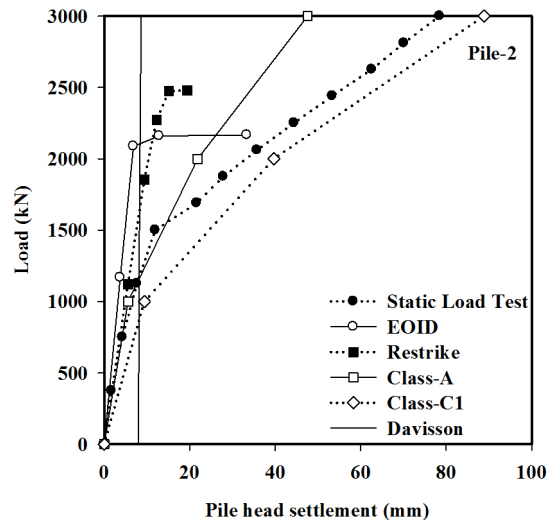


Fig. 2. (b) Load-settlement relation of Pile-2

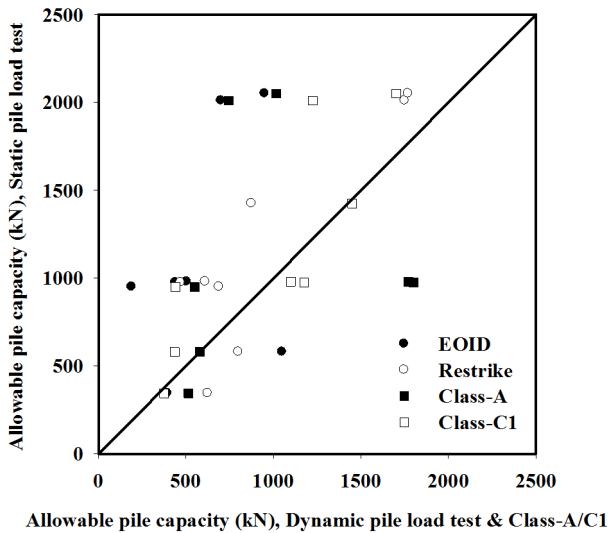


Fig. 3. A comparison between dynamic pile load tests, numerical analysis and static pile load tests for allowable pile capacity

그러나 Class-A type 수치해석은 정재하시험과 비교했을 때 다른 시험들에 비해 신뢰도가 가장 낮은 것으로 분석된다. 이러한 경향은 김성희 등(2017)이 보고한 바와 일치하는데, 현실적으로 수치해석에서 현장지반 및 시공 조건과 관련된 다양한 인자를 적절하게 모사하는 것의 어려움과 관련이 있는 것으로 판단된다.

4.2 말뚝에 작용하는 축력분포

Figs. 4(a)-4(b)는 정재하시험과 Class-A type 해석을 통해 산정된 정규화된 말뚝심도(Z/L)에 따른 말뚝축력의 분포를 보여준다. 이때 Z 는 임의의 말뚝심도, L 은 말뚝의 길이이다. 각각의 말뚝에 탄성범위의 하중, 파괴하중 및 극한하중과

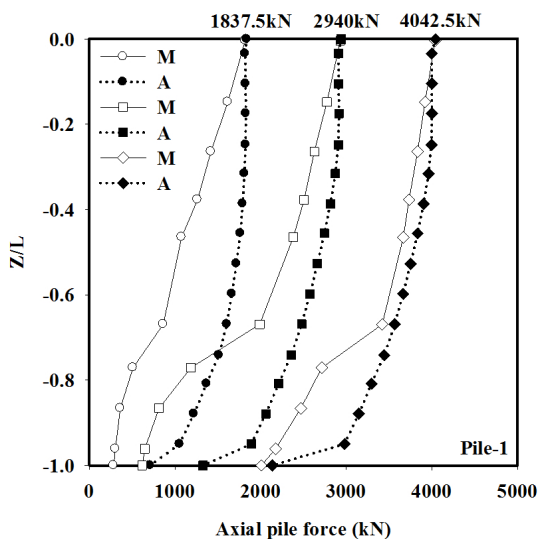


Fig. 4. (a) Distribution of measured and computed axial pile forces with depth for pile-1 (M: measured, A: Class-A)

유사한 하중이 작용하는 3가지의 상황을 고려하였다. Pile-1의 경우 선단이 풍화암에 깊게 근입되어 있고 Pile-2는 그 심도가 깊지 않으므로, Pile-1이 말뚝선단 인근에서 축력이 급격하게 감소하는데 비해 Pile-2에서는 축력의 급격한 감소는 관측되지 않았다. 두 말뚝 모두 파괴하중이 작용할 때까지는 선단에 작용하는 축력이 그리 크지 않은 것으로 측정되었으나, Pile-1의 경우 정재하시험과 Class-A type 해석상의 축력분포와는 상이한 거동을 보이며 특히 선단부로 갈수록 두 시험에서의 축력의 분포는 큰 차이를 보였다. 4,042.5kN의 하중이 작용할 때 말뚝 두부로부터 $Z/L=0.6$ 부근까지는 유사한 거동을 보였지만, 이후 말뚝의 선단부로 갈수록 축력은 수치해석에서의 축력이 정재하시험에서의 축력과 큰 차이를 보였다. Pile-2의 경우 말뚝에서의 축력분포는 Pile-1에 비해 두 결과가 매우 유사한 양상을 보였다. Pile-2에서는 1,102.5kN 및 1,470kN의 하중을 말뚝 두부에 가했을 경우 정재하시험과 수치해석의 예측이 매우 비슷하게 나타났으나, 2,800kN의 하중에서는 선단부를 제외한 구간에서의 축력분포가 다소 상이한 것으로 분석되었다. 말뚝두부에 1,140kN 및 1,470kN의 하중이 작용할 때 말뚝선단 인근($Z/L=0.8-0.9$)의 축력이 심도에 대해 약간 증가하는 기현상이 관찰되는데, 이것이 측정의 오류인지 실제로 발생한 물리적인 현상인지의 여부를 판정하기는 어렵다.

말뚝의 극한지지력은 극한선단지지력과 극한주면지지력의 합으로 구할 수 있다. Figs. 5(a)-5(b)는 정재하시험 결과를 기준으로 하여 각 시험의 극한선단지지력과 극한 주면마찰력을 비교하여 나타내고 있다. 또한 기존연구와의 비교검증을 위해 박종배 & 권영환(2017)이 보고한 PHC매입말뚝에 대한 동재하시험의 결과를 포함시켰다. 동재하시험 및

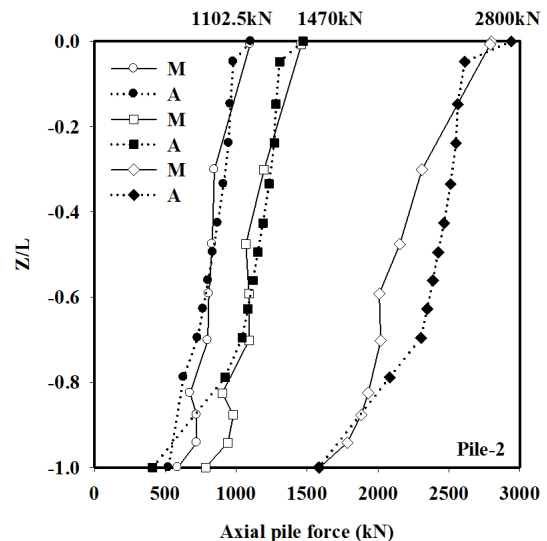


Fig. 4. (b) Distribution of measured and computed axial pile forces with depth for pile-2 (M: measured, A: Class-A)

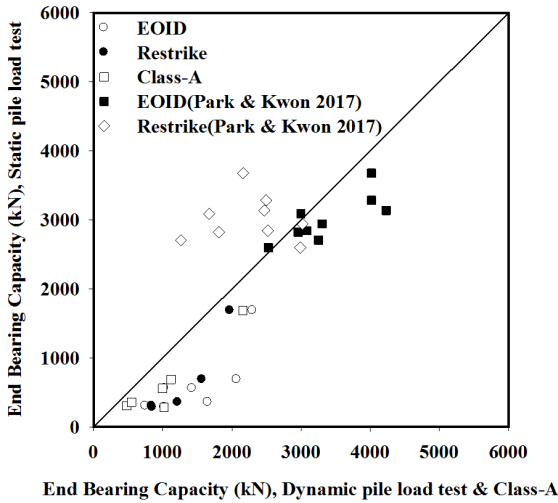


Fig. 5. (a) A Comparison between dynamic pile load tests, numerical analysis and static pile load tests for ultimate end bearing capacity

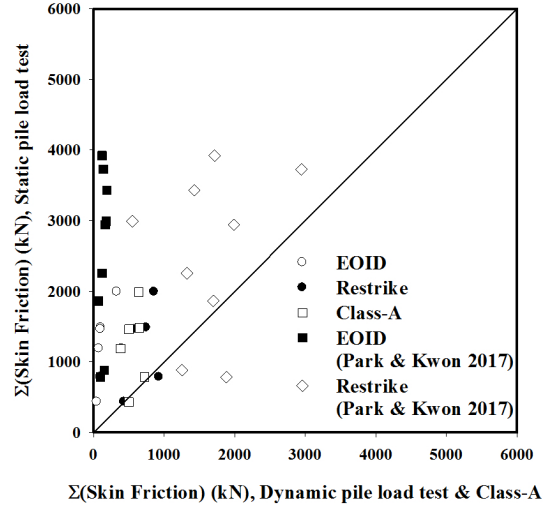


Fig. 5. (b) A Comparison between dynamic pile load tests, numerical analysis and static pile load tests for ultimate total skin friction

수치해석은 정재하시험 결과에 비해 선단지지력의 값을 대체로 크게 평가하는데 비해, 주면마찰력은 정재하시험의 결과보다 작게 평가하는 경향을 보이고 있다. 특히 EOID 시험에서는 주면마찰력이 매우 작게 산정되며, 주면마찰력에 비해서는 선단지지력이 정재하시험의 결과와 비교하여 보다 상대적으로 유사하게 평가되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 박종배 & 권영환(2017)의 연구결과와도 일치한다.

Fig. 6은 각 시험 및 수치해석 결과를 통한 전체 설계지지력에 대한 전체 주면마찰력의 비율을 나타내고 있다. 또한 본 연구에 대한 검증에 위해 박종배 & 권영환(2017) 및 최용규 등(2017)의 연구를 포함시켰다. 앞서 언급한 바와 같이 EOID 시험에서는 주면마찰력의 비율이 10% 이내로 전체 설계지지력에서 차지하는 비중이 매우 작은 반면, 수치해석에서는 전체 주면마찰력의 비율이 매우 크게 산정되었다. EOID 시험과 restrike 시험 결과를 비교해보면 선단지지력과 전체 주면마찰력의 분포가 확연한 차이를 보이고 있다. EOID 시험의 경우 시멘트풀이 경화되지 않은 상태에서 시험을 실시하였기 때문에 주로 선단지지력이 발현되었으나, restrike 시험에서는 선단지지력과 주면마찰력이 비슷한 정도로 평가된 것을 확인할 수 있다. 정재하시험 결과에 의하면 선단지지력은 말뚝 전체지지력의 평균 약 59.4%를 차지하였으며, EOID 시험 및 restrike 시험의 경우는 전체지지력에 대해 각각 평균적으로 91.6% 및 56.3%를 차지하는 것으로 분석된다. 한편 Class-A type 해석에서는 선단지지력을 평균 35.1%로 가장 낮게 평가하였다. EOID 및 restrike 시험에 대한 전체 마찰지지력의 경향은 박종배 & 권영환(2017)의 연구결과와 일치하는데 비해, 정재하시험에 대한 최용규 등(2017)의 기존연구와는 상이한 결과를 보이고 있다. EOID 시험과

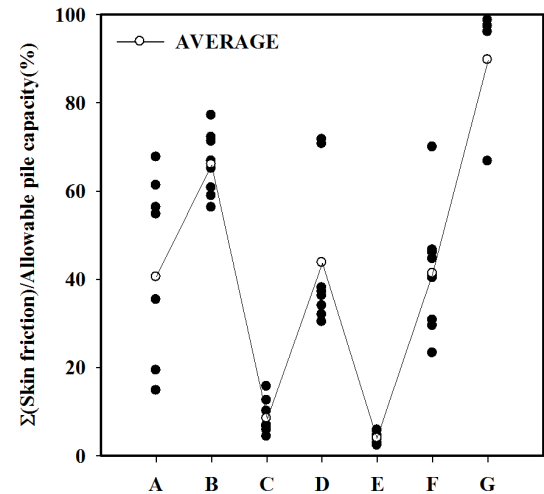


Fig. 6. Distributions of ratios of total skin friction to allowable pile capacity [A: static load test, B: Class-A, C: EOID, D: restrike, E: EOID (Park & Kwon, 2017), F: restrike (Park & Kwon, 2017), G: Static load test (Choi, 2017)]

restrike 시험에서의 선단지지력과 주면마찰력의 관계는 이전에 논의된 바(김성희, 2017; 박종배 & 권영환, 2017) 있다. Restrike 시험의 경우 말뚝두부의 손상을 막기 위해 타격에너지가 충분하지 크지 않고 따라서 대부분의 타격에너지가 주면마찰력으로 지지되어, 선단지지력이 충분히 발현되지 못할 수 있다. 즉 김성희(2017)가 주장한 바와 같이 동재하시험을 통해 말뚝의 지지력을 평가하는 데 있어서 EOID 시험을 통한 선단지지력과 restrike 시험에 의한 마찰지지력의 합을 고려할 경우보다 이를 좀 더 합리적으로 산정할 수 있을 것으로 보이며, 이는 박종배 & 권영환(2017)의 연구와도 일치한다.

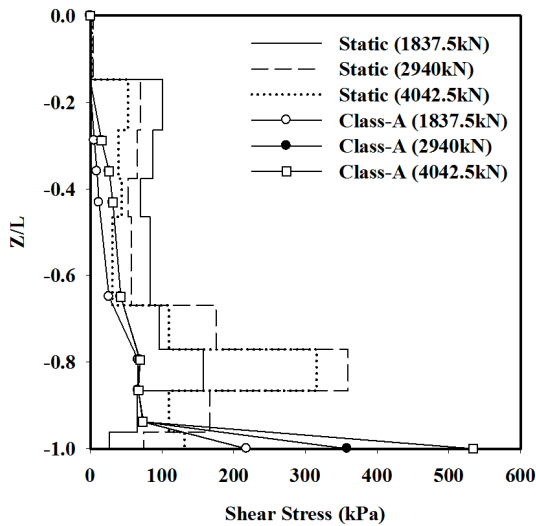


Fig. 7. (a) Distribution of measured and computed shear stresses with depth for pile-1

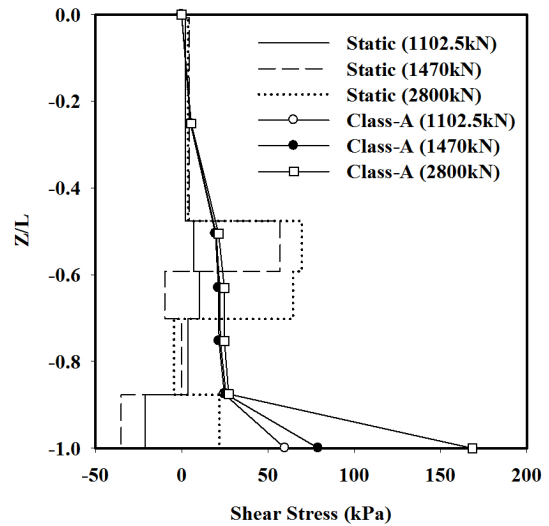


Fig. 7. (b) Distribution of measured and computed shear stresses with depth for pile-2

4.3 말뚝에 작용하는 전단응력의 분포

Figs. 7(a)-7(b)는 Piles 1-2에 대해 정재하시험 및 Class-A type 해석을 통해 산정된 정규화된 말뚝심도(Z/L)에 따른 전단응력의 분포를 보여준다. 이때 Z는 임의의 말뚝심도, L은 말뚝의 길이이다. 정재하시험의 경우 말뚝축력의 심도별 분포로부터 아래의 Eq. (5)를 이용하여 전단응력을 산정하였다.

$$\tau = \frac{\Delta P}{\pi \cdot D \cdot \Delta Z} \quad (5)$$

여기서 D=말뚝 천공경, ΔZ=말뚝의 두 지점 사이의 거리, ΔP=두 지점 사이에서의 축력의 차이를 의미한다. 심도에 따른 전단응력의 분포를 살펴보면 전반적으로 심도가 깊어질수록 그 크기가 증가하며 큰 하중이 작용할수록 전단응력의 크기도 증가하는 경향을 보이고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 말뚝의 선단이 풍화암층에 깊게 근입된 Pile-1이 그렇지 못한 Pile-2에 비해 훨씬 더 큰 전단응력을 발현시켰다. 그래프에 의하면 Pile-1에서는 대체로 정재하시험이 수치해석에 비해 더 큰 전단응력 분포를 보이며, Pile-2에서는 반대의 경향을 보이고 있어서 수치해석에 적용된 전단강도 상수가 충분히 적합하지 못했음을 추측할 수 있다. 한편 말뚝 선단 인근에서는 수치해석이 더 큰 전단응력을 예측하고 있다. 정재하시험은 Pile-2의 선단인근에 (-)의 부호를 가지는 전단응력 값을 도출하는데, 이는 실제로 말뚝에 발생한 물리적 현상인지 아니면 현장측정의 오류인지의 여부는 명확하지 않다.

Fig. 8은 모든 말뚝에 대해 정재하시험 및 Class-A type 수치해석을 통해 분석한 전단응력의 분포를 비교하여 나타

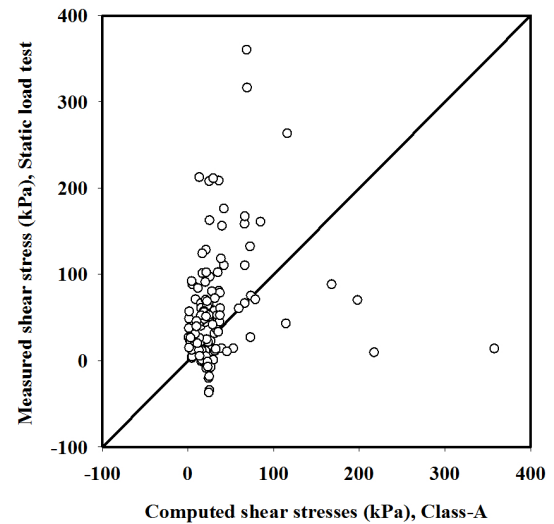


Fig. 8. A Comparison between deduced (static pile load test) and computed (Class-A type) shear stresses

낸다. 대체로 수치해석에 비해 정재하시험이 더 큰 전단응력 분포를 보이고 있어 수치해석의 신뢰도는 높지 못한 것으로 분석된다. 즉 앞서 언급한 바와 같이 수치해석에서 채택한 전단강도 상수가 충분히 적절하지 못했기 때문에 분석된다. 특히 전단응력의 크기가 커질수록 정재하시험과 수치해석의 차이가 점점 더 증가하는 경향을 보이고 있다.

4.4 정재하시험, 동재하시험 및 수치해석 결과에 대한 고찰

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 정재하시험과 EOID 시험, restrike 시험과 함께 Class-A 및 C1 type 수치해석을 수행하였다. 이러한 과정을 통해 획득된 하중-침하 관계를

고찰한 결과 정재하시험에 비해 비교적 상이한 결과가 나타났다. 수치해석은 정재하시험에 비해 주면마찰력을 대체로 작게 예측했는데 지반의 전단강도 상수가 작게 평가되었기 때문에 판단되며, 이로 인해 주면저항력에 비해 선단저항력이 비교적 크게 예측되는 것으로 나타났다. Piles 1-2의 하중-침하 거동이 뚜렷하게 차이를 보이는 점으로부터 슬라임이 말뚝의 거동에 매우 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 즉 슬라임은 탄성범위내에서는 그 영향이 크지 않지만, 주면마찰력의 대부분이 발현된 후 말뚝두부 하중의 일부가 선단에 도달하게 되는 항복하중에 도달된 이후에는 말뚝에 매우 큰 침하를 유발시켜 하중이 거의 증가하지 못하게 한다.

Class-A type 수치해석의 결과는 정재하시험에 의한 하중-침하 및 축력분포에 비해 비교적 크게 벗어나는 경향을 보였다. 이는 지반조건의 불확실성 및 복잡한 말뚝시공 과정을 수학적으로 모델링하는 것의 한계를 보여준다고 하겠다. 특히 수치해석에서는 말뚝의 선단인근에 존재할 수 있는 슬라임 그리고 경타여부와 최종관입량의 크기 및 시멘트풀의 품질이 일정치 않았던 점 등을 고려하기 어려운 점등은 수치해석의 신뢰성을 저하시키게 된다. 정재하시험의 경우 일정한 크기 이상의 두부하중이 재하되는 경우 항복이 발생하고 그 이후 침하량이 급격하게 증가하는데 비해, 수치해석의 경우 항복이 뚜렷하게 발생하지 않고 점진적으로 파괴에 도달하는 경향을 보였다. 이는 수치해석에서는 변형용경화 (strain hardening) 모델을 채택하기 때문에 항복에 도달한 이후에도 지속적으로 하중이 증가하면서 파괴에 도달하기 때문인 것으로 판단된다. 이상과 같이 수치해석을 통하여 말뚝의 거동을 분석함에 있어서 그 해석 결과는 가급적 정

량적이 아닌 정성적인 시각에서 접근하는 것이 합리적이며, 향후 실제 말뚝의 거동을 보다 정밀하게 모사할 수 있는 수치해석 기법이 개발되어야 할 것이다. 하지만 말뚝선단인근에 슬라임이 존재하는 경우는 수치해석을 통한 말뚝의 지지력 예측은 태생적으로 한계가 있을 수밖에 없다.

5. 슬라임의 영향 분석

본 연구에서는 현장에서 수행된 지반조사 자료를 바탕으로 지반의 물성치를 산정하여 수치해석을 수행했지만, 정재하시험의 결과와 비교하여 말뚝의 거동을 비교적 상이하게 평가하는 것으로 분석되었다. 이는 말뚝의 거동이 다양한 인자에 영향을 받지만, 앞서 언급한 바와 같이 말뚝선단부에 존재하는 슬라임에 가장 크게 영향을 받기 때문에 판단된다. 이에 대한 영향을 검토하기 위하여 슬라임에 대한 정확한 물성치를 알 수 없지만 정재하시험 이후 말뚝내부에서 수행된 표준관입시험값을 참조하여 적절하게 추정하여 별도의 parametric 해석을 수행하였다. GEO(2006)에 의하면 지반의 탄성계수는 표준관입시험값으로부터 추정할 수 있는데 대체로 $E(\text{MPa})=1-3N$ 정도의 범위를 보이며, N =표준관입시험값이다. 즉 현장에서 측정된 슬라임의 표준관입시험값인 2-4타/30cm를 위의 식에 적용할 경우 슬라임의 탄성계수는 (2-12)MPa로 산정할 수 있다. 이에 본 연구에서는 말뚝선단 인근에 슬라임이 존재하는 상황을 설정하여 슬라임의 강성을 5MPa로 고정시키고 그 두께를 변경하는 해석 (Fig. 9(a))과 슬라임의 두께를 말뚝의 직경인 $D=0.5\text{m}$ 로 가정하고 그 강성을 1-20MPa로 변경시키는 해석(Fig. 9(b))을

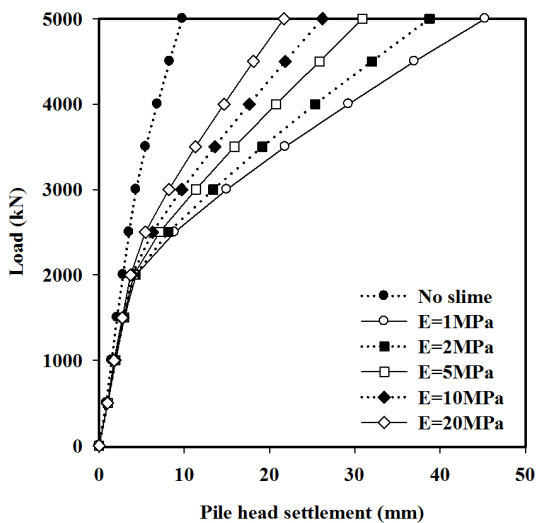


Fig. 9. (a) Load-settlement relation with different E (thickness of slime=1D, $D=0.5\text{ m}$)

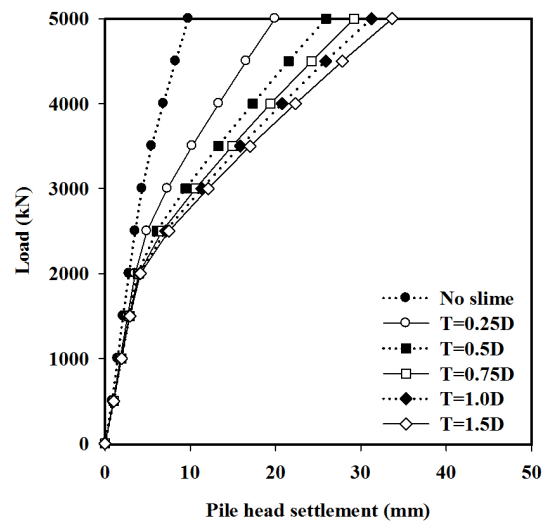


Fig. 9. (b) Load-settlement relation with different thickness of slime (E of slime=5 MPa, $D=0.5\text{ m}$)

수행하여 슬라임이 말뚝의 거동에 미치는 영향을 심층적으로 고찰하였다.

Fig. 9(a)는 슬라임의 탄성계수 변화에 따른 말뚝의 하중-침하 관계를 보여준다. 이때 슬라임의 두께는 1D로 일정하다고 가정하였다. 이에 대한 비교를 위해 슬라임이 존재하지 않는 경우도 포함시켰다. 슬라임의 탄성계수가 20MPa 인 경우 설계지지력은 1,550kN으로 산정되며, 탄성계수가 10MPa로 감소할 경우 말뚝의 설계지지력은 약 1,450kN으로 6.5% 감소하였다. 또한 탄성계수를 5MPa, 2MPa 및 1MPa로 감소시킨 경우 설계지지력은 각각 1,350kN, 1,300kN 및 1,225kN으로 확인되었다. 동일 하중에 대해 슬라임의 탄성계수가 작아질수록 침하량이 큰 폭으로 증가하며, 말뚝의 설계지지력 역시 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이와는 대조적으로 슬라임이 존재하지 않는 경우 2,500kN의 설계지지력이 예측되며 항복하중에 도달한 이후에도 말뚝두부 하중이 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. Fig. 9(b)는 슬라임의 두께에 따른 말뚝의 하중-침하 그래프이며, 여기서 D는 말뚝의 직경이다. 이때 슬라임의 탄성계수는 5MPa로 일정하다고 가정하였다. 슬라임이 존재하지 않을 때는 2,500kN의 설계지지력이 산정되지만, 1D 두께의 슬라임을 고려했을 경우 설계지지력은 1,650kN으로 약 34% 감소하는 것으로 분석되었다. 슬라임이 두꺼워질수록 설계지지력이 감소하기는 하지만, 그 두께가 0.5-0.75D 정도를 초과하면 지지력이 감소하는 정도는 상대적으로 크지 않은 것으로 분석된다.

본 수치해석을 통해 슬라임이 말뚝의 하중-침하에 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 슬라임의 탄성계수가 감소할수록 그리고 슬라임의 두께가 증가할수록 말뚝의 지지력이 감소하는 것으로 나타났다. 말뚝이 탄성범위에 있을 때는 대부분의 두부하중이 주변마찰력으로 지지되므로 슬라임 존재 유무나 그 강성에 거의 영향을 받지 않기 때문에 하중-침하 관계가 유사하지만, 하중이 전체 마찰저항력을 초과하여 그 하중의 일부가 선단으로 전이되는 경우 슬라임이 말뚝의 하중-침하 거동에 영향을 미치기 시작한다. 슬라임의 강성 및 두께를 고려할 경우 말뚝의 거동은 상대적으로 슬라임의 두께보다는 그 강성에 더 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 이와 같이 수치해석을 통해 분석된 결과는 앞서 고찰한 슬라임이 존재하는 조건(Pile-1) 및 슬라임이 존재하지 않는 조건(Pile-2)과 상당히 유사한 것을 알 수 있다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 강관매입말뚝에 대한 실규모 시공을 실시하고 이에 대한 정재하시험과 동재하시험 및 Class-A 및 C1

type의 수치해석을 수행하여 말뚝의 공학적 거동에 대한 분석을 실시하였다. 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 각 시험에서 산정된 설계지지력을 정재하시험으로부터 평가된 설계지지력과 비교한 결과 EOID 및 restrike 시험의 경우 각각 정재하시험 대비 평균 69.3% 및 92.1%의 크기를 가졌다. 한편 Class-A type 해석의 경우 평균 121.2%를 예측하며 신뢰도가 가장 낮은 것으로 분석되었다.
- (2) EOID 시험은 대부분의 지지력을 선단지지력으로부터 발현시키는데 이는 EOID 시험의 특성상 말뚝 주변의 시멘트풀이 경화되기 이전에 시험이 진행되므로 주변마찰력이 발현되기 힘든 것으로 분석되었다. 한편 restrike 시험의 결과는 주변마찰력과 선단지지력의 크기를 비슷하게 평가하지만 이때 측정된 선단지지력은 보통 EOID에서 측정된 것보다 작은 것으로 분석되었다. 이는 항타 에너지가 충분히 크지 못해 타격에너지가 선단까지 미치지 못했기 때문에 restrike 시험에서는 선단지지력을 작게 평가할 수 있는 가능성이 존재한다. 따라서 말뚝의 주변마찰력을 평가하기 위해서는 restrike 시험 결과를 적용하고, 선단지지력을 평가하기 위해서는 EOID 시험 결과를 적용하는 것이 실제 말뚝의 지지력과 가장 근접한 결과를 도출시킬 수 있을 것으로 보인다.
- (3) 말뚝선단의 인근에 슬라임이 존재하는 경우 말뚝의 거동에 매우 큰 영향을 주는 것으로 분석되었으며, 슬라임의 탄성계수가 감소할수록 그리고 슬라임의 두께가 두꺼워질수록 큰 침하가 유발되어 말뚝의 지지력이 감소하는 것으로 분석되었다. 향후 말뚝 내부의 슬라임에 의한 soil plug 미형성 및 선단하부의 슬라임의 영향에 대한 심도 있는 연구를 실시해야 할 것으로 판단된다.
- (4) Class-A 및 C1 type 수치해석에 의한 결과분석을 통해 말뚝의 지지력은 선단지반의 공학적 특성에 영향을 크게 받는 것으로 나타났는데, 특히 슬라임이 존재하는 경우 그 예측이 정재하시험 결과와 크게 상이하였다. 수치해석 결과는 탄성범위 안에서는 상대적으로 유사한 거동을 보이지만 항복 도달 이후에는 정재하시험 결과와 크게 차이를 보인다. 이는 수치해석에서 적용된 구성방정식은 변형경화(strain hardening)모델을 채택하기 때문에 항복 이후 침하가 급격하게 증가하는 현상을 적절하게 묘사하지 못하는 것으로 보인다. 또한 경타에 의한 지반의 교란과 응력변화, 시멘트풀의 특성 및 앞서 언급한 선단 인근에 존재할 수 있는 슬라임 등 현장에서 발생할 수 있는 여러 변수를 고려하기 어렵기 때문으로

판단된다. 향후 이러한 부분을 심도 있게 포함시킬 수 있는 해석기법을 개발할 필요가 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국도로교통공사 도로교통연구원의 지원으로 수행되었으며, 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구이며[MOIS-재난-2015-05], 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2017R1D1A1B05035579). 이에 감사의 말씀을 전합니다.

References

1. 김성희 (2017), 말뚝-지반 경계면에서의 상호거동을 고려한 부마찰 및 매입말뚝의 공학적 특성에 대한 연구, 강원대학교 석사학위 논문, pp. 1~111.
2. 김성희, 정경자, 정상섭, 전영진, 김정섭, 이철주 (2017), 현장 시험과 Class-A 및 C1 type 수치해석을 통한 강관매입말뚝의 거동에 대한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, 18(7), pp. 37~47.
3. 박종배, 권영환 (2017), PHC 매입말뚝의 한계상태설계정수 제시, 한국지반공학회 실무기술자를 위한 2017년 기초기술 세미나, pp. 85~98.
4. 연세대학교, 강원대학교, (주)지텍, (사)한국지반공학회 (2016), 매입말뚝 대표공법 지지거동 분석으로 저항계수 도출 연구, 연구보고서, pp. 1~212.
5. 전경수, 김낙영, 남문석 (2011), 고속도로의 강관말뚝 기술동향 및 적용현황, 한국지반공학회 기초기술위원회 특별세미나, pp. 1~29.
6. 조천환 (2007), 매입말뚝공법, 이엔지북, pp. 1~314.
7. ㈜라이엔지 (2015), 매입말뚝 지지거동 분석으로 저항계수 도출 연구용역 중 지반조사 보고서, pp. 1~62.
8. ㈜라이엔지 (2016), 매입말뚝 지지거동 분석으로 저항계수 도출 연구용역 중 지반조사 보고서, pp. 1~96.
9. ㈜지텍 (2016), 매입말뚝 대표공법 지지거동 분석으로 저항계수 도출 연구 말뚝 동재하시험 보고서, pp. 1~65.
10. 최용규, 이원재, 박재현, 김채민, 전병한 (2017), 다양한 선단 매입 PHC말뚝의 연직하중지지거동 특성 및 다양한 말뚝들의 마찰지지력 분담을 사례 분석에 관한 연구, 한국지반공학회 실무기술자를 위한 2017년 기초기술 세미나, pp. 1~28.
11. 한국지반공학회 (2015), 구조물 기초 설계기준 해설, pp. 1~894.
12. ASTM D1143-81 (1994), Standard test method for piles under static axial compressive load, pp. 1~11.
13. Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S. and Swolfs, W. M (2015), Reference Manual, Plaxis 3D 2015 user's manual (Edited by Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S. and Swolfs, W. M), pp. 1~284.
14. Davisson, M. T. (1972), "High capacity piles", Proceedings of Lecture Series in Innovations in Foundation Construction, ASCE, Illinois Section, pp. 81~112.
15. GEO (2006), Foundation design and construction, GEO publication No. 1/2006, pp. 153~154.
16. Lambe, T. W. (1973), "Predictions in soil engineering", Geotechnique, 23, No. 2, pp. 149~202.
17. LG Construction Technology Institute (2002), 말뚝 매입공법의 설계와 시공, pp. 1~183.