확인코어공이 현장타설말뚝의 선단지지력에 미치는 영향
Effect of verification core hole on tip capacity

Heejung Youn, 윤희정[1], Fulvio Tonon[2]

[1] 한국해양연구원 연수연구원, Postdoctoral Researcher, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Development, KORDI

[2] 텍사스대학교 조교수, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin

SYNOPSIS : In this study, numerical simulations were carried out to investigate the effect of verification core hole on the shaft tip capacity. The verification core extreted at shaft tip may deteriorate the shaft tip capacity when the clay shales (Taylor Marl) surrounding the shaft degrades and the empty core hole remains unfilled. Series of finite element analyses were conducted using Mohr-Coulomb model with total stress material parameters that were obtained from laboratory testing. The numerical analyses indicate that the shaft tip capacity does not decrease for most cases, and the maximum reduction does not exceed 5%.

Keywords : verification core hole, numerical analysis, point bearing capacity, drilled shafts, clay shales

1. 서 론

미국 내의 건설현장에서 현장타설말뚝 시공 시 말뚝 선단 아래에 위치하고 있는 지반을 확인하기 위해서 확인코어(verification core)를 채취하도록 명시하고 있는 경우가 있다. 예를 들면 텍사스교통국(TxDOT)에서는 시공사에게 적어도 1.5m길이 이상의 확인코어를 말뚝 선단에서 채취하도록 하고 있다(Item 416, TxDOT, 2004). 그 첫 번째 이유는 현장타설말뚝의 설계 단계에서 선단 아래로 직경의 두 배 길이 이내에 있는 지반 중 가장 연약한 지반의 물성치를 이용하도록 하기 때문에 채취한 코어를 이용 검증하게 한 것이며, 두 번째 이유는 텍사스 지역에서 자주 발견되는 탄산화 지반 (carbonate geomaterials)에서는 지반 내부에서 종종 발견되는 커다란 공극이 때문이기도 하다. 텍사스 주 이외에도, 알라바마, 콜로라도, 코네티컷, 플로리다, 조지아, 하와이, 켄사스의 도료교통국들은 시공메뉴얼에 확인코어를 채취하도록 명시하고 있다 (Vipulanandan et al.,2007). 확인코어를 채취하도록 한 규정에도 불구하고, 텍사스를 포함한 많은 주에서는 확인코어 공에 대한 사후작업들을 요구하지 않고 있어 어떤 경우에는 코어공이 없는 것처럼 시공하기도 하며 어떤 경우에는 코어공에 그라우팅을 요구하기도 한다. 아무런 사후작업이 없는 경우는 선단지지력에 대한 검증이 필요하고, 그라우팅을 요구하는 경우에는 추가적인 비용이 발생하기 때문에 확인코어에 대한 영향에 대한 연구가 필요하다.

확인 코어가 말뚝 선단에서 채취된 경우, 풍화되지 않은 점토셰일 (clay shales)은 공기와 접촉하게 되며 이 결과로 코어공 주변의 점토셰일들의 가장 약한 부분을 시작으로 균열이 발생하며 발생한 균열을 따라 건조가 일어나게 된다. 이후 건조된 셰일이 지하수면의 변화나 자연스러운 지하수의 유입에 의해서 건조-습윤의 과정을 거치며 코어공을 둘러싸고 있는 점토셰일이 풍화될 가능성이 높다. 특히 텍사스에서 자주 마주치는 점토셰일 중 하나인 Taylor Marl의 경우 slaking이 일어날 가능성이 매우 높은 지반으로 풍화에 매우 연약한 종류다. 이미 발생한 균열을 통해 물이 흡수되기 시작하면서 slaking의 영역은 균열이 잘 발생하지 않는 암에 비해 더 멀리 뻗어나가기도 한다.

이 연구에서는 일련의 수치해석을 수행하여 확인코어공이 현장타설말뚝의 선단지지력에 미치는 영향

을 살펴보았다. 지반의 마찰각, 점착력, 그리고 탄성계수 등의 공학 물성치들은 실내실험을 통해서 얻었으며, 확인코어공을 채우는 물질의 물성치들은 본 연구과제와 병행해서 수행한 다른 연구과제로부터 직접적으로 도입했다 (Youn, 2008; Raibagkar, 2008). 수치해석 전용 프로그램인 PLAXIS를 이용하여 코어공직경, 건조시간, 그리고 코어공채움재에 따라 변수연구를 실행하여 선단지지력의 감소폭을 감소계수를 이용하여 제시하였다.

2. 수치 해석

2.1 물성치

Youn(2008)은 실내실험을 수행하여 Taylor Marl의 공학 물성치를 구했으며, 그 결과 값들이 본 논문의 수치해석에 사용되었다. 실내실험에 사용된 시편들은 실험실 조건인 온도 (22°C)와 습도 (40%)에서 각각 다른 시각동안 건조했으며 건조 후 습윤을 시켰다. 건조-습윤을 거친 각 시편들은 삼축실험을 통해 공학 물성치를 구하여 표1에 나열했다. 이 물성치들은 삼축실험에서 배수나 압밀이 일어나지 않은 상태로 구한 전응력에 대한 물성치를 일컫는다. 표에는 건조시간, 물성치, 탄성계수, Poisson′s ratio, 마찰각, 점착력, 밀도가 표시되어 있다. Poisso′s ratio는 콘크리트에 0.15, 그리고 점토세일은 0.3으로 가정했으며(Hanssan, 1994), 팽창성이 거의 없는 점토세일의 팽창각(dilation angle)은 0°로 가정했다. Taylor Marl의 공학적 성질은 건조시간의 증가에 따라 감소하는 것으로 측정되었다 (Youn, 2008).

표 1. 건조시간에 따른 Taylor Marl의 전응력(total stress) 물성치

종류	건조시간 (hr)	E (MPa)	ϕ (deg)	c (kPa)	ρ_{unsat} (Mg/m^3)	ρ_{sat} (Mg/m^3)	두께 (cm)
Taylor Marl	0	240.7	1.1	1050	2.08	2.10	0
	4	181.9	1.5	883	2.08	2.10	12.7
	8	141.6	2.0	775	2.08	2.10	12.7
	16	95.1	2.7	665	2.08	2.10	12.7
	24	73.2	3.2	623	2.08	2.10	12.7
	48	55.7	3.5	598	2.08	2.10	12.7

Raibagkar (2008)은 코어공 채움물질을 이용하여 공학적 특성을 연구하였는데, 그 결과는 표 2에 정리되었다. 표에 나타난 dry pour는 코어공 내부가 빈 상태에서 콘크리트를 타설하는 경우를 지칭하며 wet pour는 코어공 내부가 물로 채워져 있는 상태에서 타설한 경우를 일컫는다. Dry pour 시 확인코어공의 빈공간은 콘크리트로 채워지며, wet pour 시에는 코어공안에 존재하는 물이 시멘트가루를 씻어 내기 때문에 자갈-사질토의 혼합물로 채워지는 것으로 나타났다. 자갈-사질토의 혼합물은 코어공직경에 따라 공학적 성질이 변화한다.

표 2. 수치해석에 사용된 코어공 채움물질의 배수 물성계수 (Raibagkar, 2008).

타설 조건 (코어직경)	물질	E (MPa)	v	ϕ (deg)	c (kPa)	Ψ (deg)	ρ_{unsat} (Mg/m^3)	ρ_{sat} (Mg/m^3)
Dry Pour	LE	23,580	0.15	n/a	n/a	n/a	2.37	2.37
Wet Pour (15.2 cm)	MC	514.3	0.15	52.1	71.7	22.1	1.51	1.51
Wet Pour (25.4 cm)	MC	810.1	0.15	52.1	71.7	22.1	1.60	1.60
Wet Pour (35.6 cm)	MC	1,107	0.15	52.1	71.7	22.1	1.68	1.68

* LE: linear elastic, MC: Mohr−Coulomb model

2.2 수치 해석 모델

PLAXIS에서는 단계별 시공을 수치해석으로 표현 가능하며, 각 각의 단계에서는 모델의 형상이나 하중, 그리고 지하수위 등을 변화시켜 해석 할 수 있다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 PLAXIS안에서의 확인코어를 채취한 현장타설말뚝의 시공 순서를 보여주고 있다. 아무런 변형도 없는 평형상태로부터 현장타설말뚝 설치를 위해 지반을 오거링하는 것과 확인코어공을 만드는 것은 점토세일 요소들을 비활성화 함으로써 표현한다. 그 다음 단계에서는 콘크리트 타설 구현을 위해 콘크리트물질의 요소들을 현타말뚝이 설치될 공간에 활성화 하고, 코어공 내부에 채우는 물질은 표 2에 따라 활성화시켜 표현한다. 이후 말뚝의 머리에 지지 지반이 충분히 항복할 수 있는 크기인 대략 10cm가량의 변위를 주고, 그에 따른 하중-변위 곡선들을 구한다.

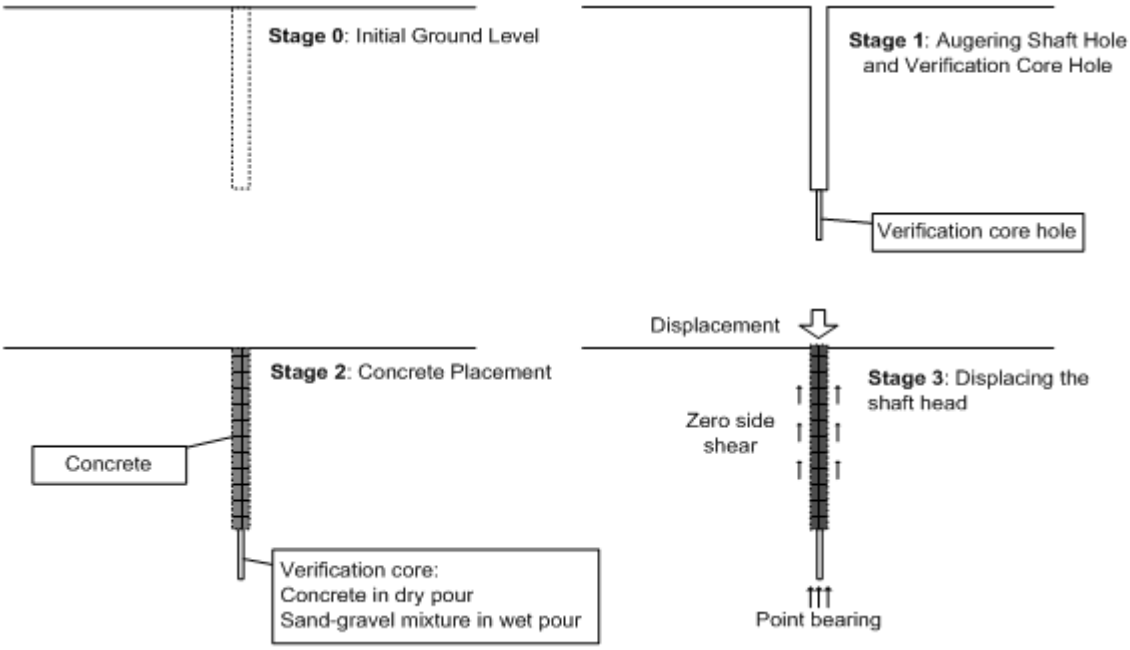

그림 2. PLAXIS에서 구현한 현장타설말뚝의 단계별 시공

약 2,500개의 15-노드 axisymmetric 삼각형 요소들로 지반 및 콘크리트를 구성하였으며, 지반과 현장타설말뚝의 접착면은 interface element로 구현되었다. 그림 3에서 모델의 왼편 경계면이 중심축이며 중심에는 0.9m 직경, 9.1m 길이의 현장타설말뚝을 설치했다. 해석에 사용한 수치는 텍사스주에서 가장 많이 사용되는 현장타설말뚝의 직경과 길이값 들이다. 왼쪽과 오른쪽 경계면은 수평방향 변위가 제한되어 있으며 바닥면은 수평 수직 방향 모두 제한되었고, 오른쪽 경계면은 현장타설말뚝 재하시 발생할 수 있는 응력이 미치치 않을 정도로 충분한 거리에 (15.2m) 생성하였다. 같은 이유로 말뚝 선단으로부터 바닦 경계면까지의 거리도 10m 가량 떨어진 곳에 생성되었고, 각각의 요소들은 현장타설말뚝, 확인코어공, 신선한 점토세일, 그리고 풍화존으로 나뉘어져 해석을 수행하였다.

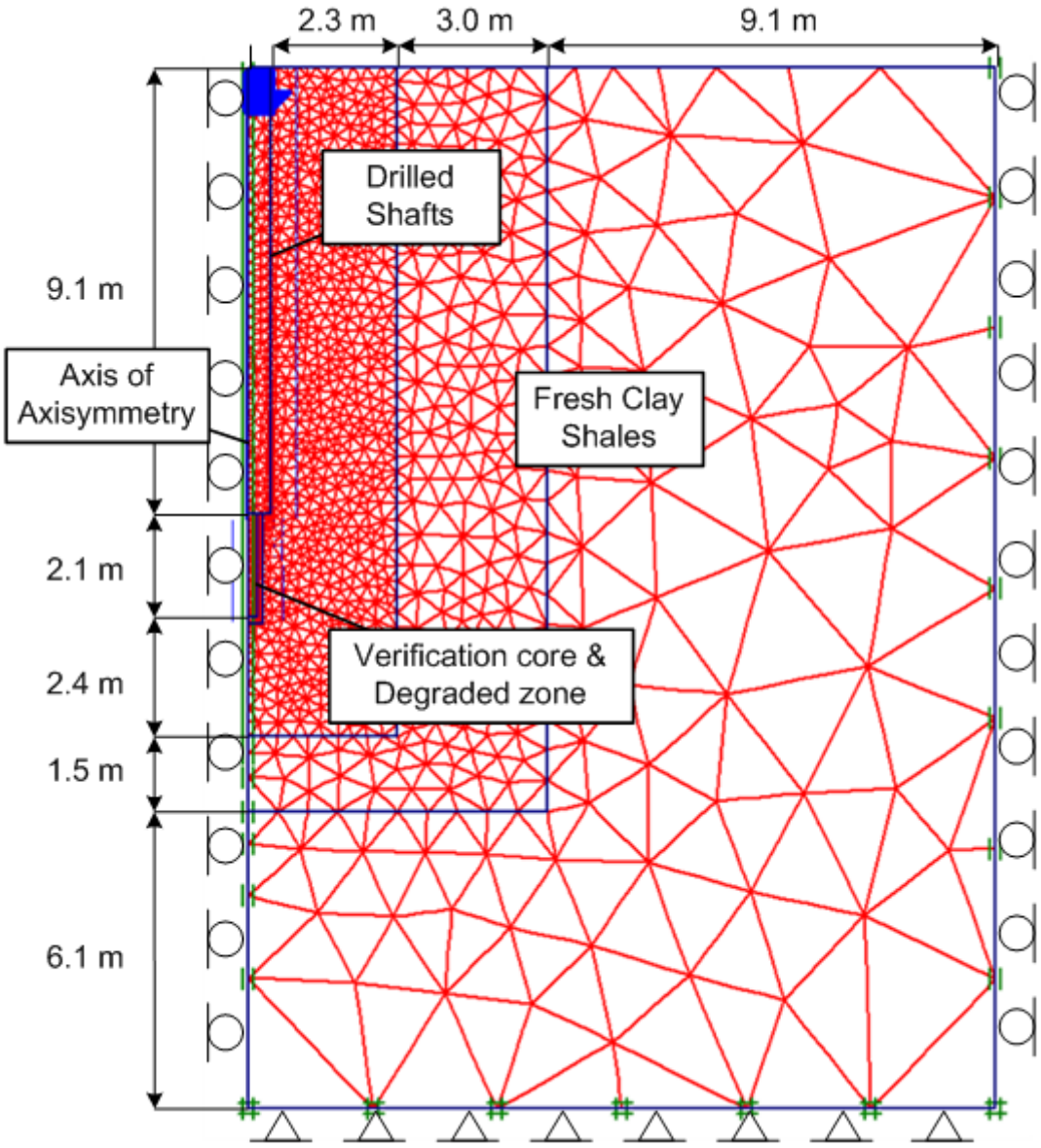

그림 3. PLAXIS에서 사용된 수치모델의 모양과 메쉬

Taylor Marl에 근입된 현장타설 말뚝의 선단지지력을 6개의 건조 기간 (0, 4, 8, 16, 24, 48시간), 3개의 코어직경 (15.2, 25.4, 35.6 cm)에 대한 변수조건을 변화시켜 변수연구 수행하였다. 이들 18개 조건에 추가적으로 4개의 추가적인 연구가 이루어 졌는데, 첫 번째로 확인코어공이 없는 현장타설말뚝 (비교모델, reference model), 두 번째로 확인코어공이 채워지지 않은 경우 (with empty hole), 세 번째로 건조-습윤을 거치지 않은 지반에서 코어공에 콘크리트가 채워진 경우 (dry pour), 그리고 마지막으로 48시간의 건조-습윤을 거친 지반의 코어공에 콘크리트가 채워진 경우 (48 hour drying and pumping) 이다. 첫 번째 경우는 비교군으로 사용되었으며, 두 번째 경우는 코어공이 채워지지 않은 경우의 최악의 경우를 나타낸다. 세 번째의 경우에는 코어공이 물로 채워지지 않은 상태에서 타설을 한 "dry pour"의 조건을 나타내고, 네 번째의 경우 Taylor Marl이 건조-습윤을 거쳤으나 코어공에 있는 지하수를 펌프를 이용하여 없애주어 콘크리트가 채워진 경우를 나타낸다. 표 3은 하중-변위 곡선에서 사용한 범례를 보여주고 있으며 그에 상응하는 건조 시간 (drying-duration), 그리고 코어공채움물질을 나타내고 있다.

표 3. 각 범례별 풍화존에 해당하는 건조시간과 코어공채움물질

범례 (Legend)	건조시간 (hours)	코어공채움재
No hole (reference)	0	N/A
With empty hole	0	Empty
Dry pour	0	콘크리트
48 hour drying and pumping	48	콘크리트
Wet pour without drying	0	자갈-모래 혼합물
Wet pour after 4 hour drying	4	자갈-모래 혼합물
Wet pour after 8 hour drying	8	자갈-모래 혼합물
Wet pour after 16 hour drying	16	자갈-모래 혼합물
Wet pour after 24 hour drying	24	자갈-모래 혼합물
Wet pour after 48 hour drying	48	자갈-모래 혼합물

3. 수치 해석 결과

수치 해석의 결과를 제시하기에 앞서, 모든 수치해석은 실제 현장 실험을 이용하여 보정하지 않은 결과임을 밝혀둔다. 그러나 본 연구의 결과는 실제 지지력의 크기가 얼마인지를 밝혀 내는 것 것에 주안점을 두기보다 코어를 채취하지 않은 경우인 비교모델(reference model)에 비해 코어공을 채취한 현장타설말뚝의 지지력의 상대적인 크기를 보여준다는 점에서 가치가 있다고 할 수 있다.

하중-변위 곡선들은 재하된 하중과 그에 의한 말뚝의 변위 사이의 관계를 나타낸다. 주면 마찰력의 영향을 배재하고 선단지지력의 상대적인 크기만을 고려하기 위해 주면마찰력은 해석에 포함하지 않았다. 물론 이런 방법이 지지력 발현이 변위와 관계가 있다는 점이나 현실에서는 말뚝에 재하되는 하중이 대부분 주면 마찰력으로 지지된다는 사실을 고려하고 있지는 않지만, 극한지지력이 발현되었을 경우 선단지지력간의 비교를 주안점으로 삼고 있기 때문에 선단지지력만을 사용하였다. 따라서 PLAXIS 모델에서 주면 마찰력과 관계된 interface element의 계수는 최소값인 0.01로 잡아 말뚝머리에 재하되는 하중이 대부분 말뚝의 선단에서 지지가 되도록 하였다. 반면, 코어공과 코어공채움물질 사이의 계수는 0.5로 가정하여 코어채움재에 의한 주면마찰력은 고려하였다.

선단지지력은 주면마찰력을 발현시키는데 필요한 변위보다 훨씬 큰 변위에서 발현되는데, O'Neill 과 Reese (1999)는 점성토에서 현장타설말뚝의 선단지지력이 발현하는데 보통 말뚝직경의 5%에 해당하는 변위가 필요하다고 발표하였다. 현장타설말뚝의 선단지지력은 대략 직경의 3%변위에서 88%, 직경의 5%변위에서 94%정도 발현된다. 따라서 이 두 개의 변위가 하중-변위 곡선들로부터 극한 선단지지력을 구하는데 사용되었으며, 하중-변위곡선으로부터 읽은 극한지지력은 감소계수(reduction factor)를 구하는데 사용되어졌다. 감소계수란 비교모델(reference model)의 선단지지력과 코어공을 채취한 말뚝의 선단지지력사이의 비율을 나타내며, 계수가 1이 넘을 경우에는 코어공을 채취한 말뚝의 선단지지력이 큼을 나타낸다.

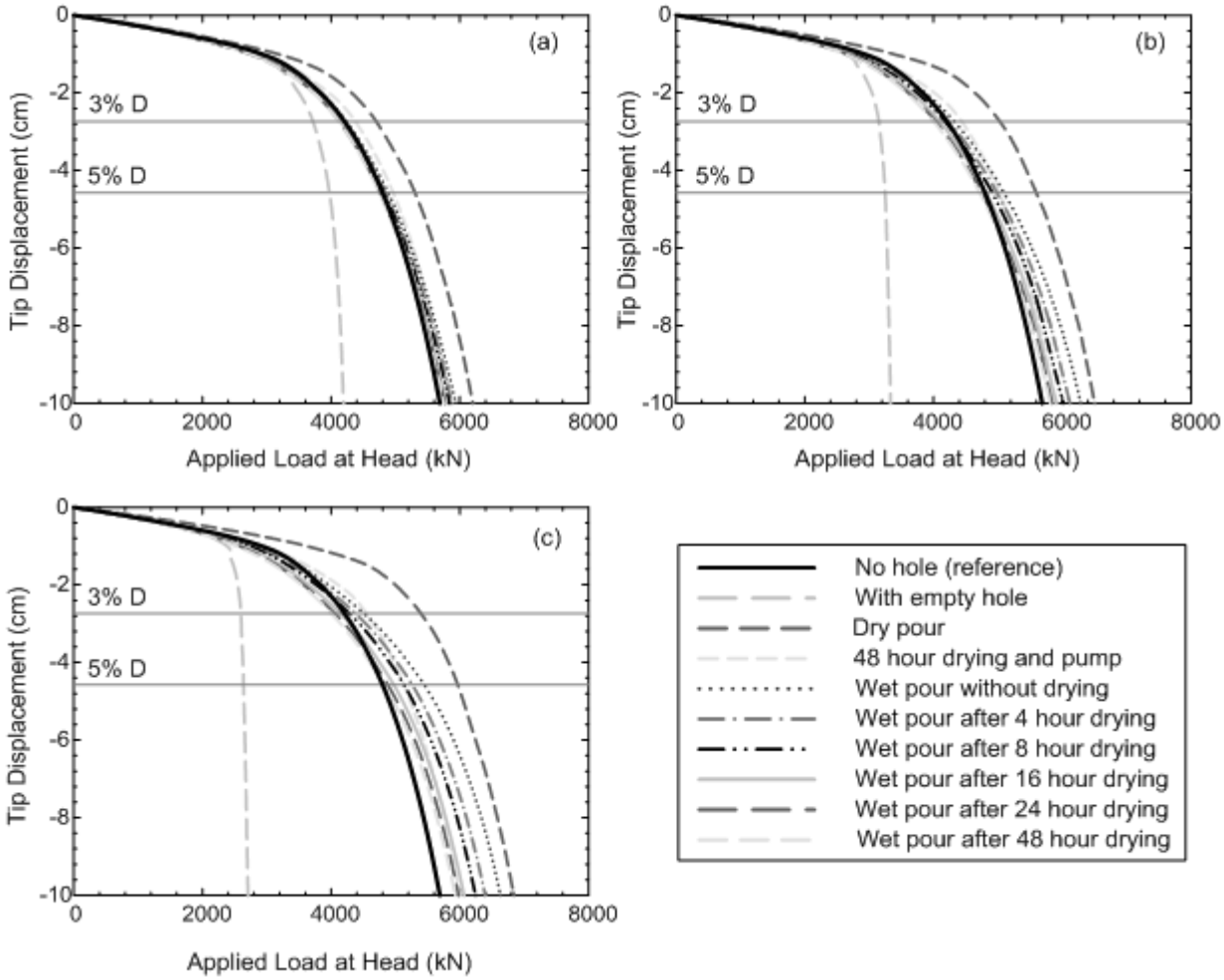

그림 4. Taylor Marl에 설치한 현장타설말뚝의 하중-변위 곡선:
(a) 15.2 cm (0.17D), (b) 25.4 cm (0.28D), 그리고 (c) 35.6 cm (0.39D).

Taylor Marl에 설치된 현장타설말뚝의 선단변위-하중에 관계식이 그림 4에 도식되었다. 그림으로부터 알 수 있는 점은 1) 작은 변위에서는 비교모델의 선단지지력이 다른 조건들의 지지력보다 상대적으로 높으며, 2) 말뚝의 변위가 증가함에 따라 코어를 채취한 모델들의 선단지지력이 증가하고, 3) 가장 큰 코어직경(35.6cm)에서 "dry pour"인 경우의 선단지지력이 가장 크며, 4), 확인코어공의 선단지지력에 끼치는 영향은 코어공직경이 커질수록 크다는 것이다. 또한, 코어공이 채워지지 않은 "with empty hole" 경우의 선단 지지력은 비교모델을 포함한 다른 경우에 비해 절반정도의 수치를 보여주었다.

수평방향의 점선은 3%직경, 5%직경에 각각 표시되어 있으며, 이는 선단지지력을 정의하는 한계 변위를 나타낸다. 이 변위들에서 얻어진 선단지지력은 표 4 에 감소계수(reduction facotr)와 함께 정리했다. 비교모델의 선단지지력은 3%직경에서 4.2MN, 5%직경에서 4.8MN로 구해졌으며, 코어공을 채취한 모델들의 선단지지력중 최소값은 비교모델값의 95%로 가장 큰 코어직경(35.6cm)의 "wet pour after 48 hour drying"의 경우였다. 비록 선단지지력에서 5%정도의 감소가 기대되었으나, 콘크리트 타설 전 코어공에 채워져 있는 물을 펌프해 낸 경우인 "48hour drying and pumping"의 선단지지력은 오히려 6-8%가량 증가하는 것으로 나타났다. 그 이유는 콘크리트채움재가 자갈-모래 혼합물 대신에 코어공에 채워짐으로써 선단지지력의 향상효과를 나타낸 것으로 보여진다. 따라서 본 수치해석 결과에 비추어 보면 확인코어를 채취한 현장타설말뚝의 선단지지력은 감소를 한 경우에도 그 차이가 미미하며 단순히 내부의 물을 제거해주는 방식으로도 선단지지력의 감소에 대해서 고려할 필요가 없음을 나타낸다.

표 4. Taylor Marl의 현장타설말뚝의 선단지지력과 감소계수 정리

VC Diameter	Tip Displacement	Point Bearing Capacity (kN) (ReductionFactor)									
		No hole (reference)	Empty	Dry	Pumping	0hr	4hr	8hr	16hr	24hr	48hr
15.2 cm (0.17D)	0.03D (2.7cm)	4,208 (1.0)	3,718 (0.88)	4,701 (1.12)	4,378 (1.04)	4,237 (1.01)	4,202 (1.00)	4,180 (0.99)	4,149 (0.99)	4,134 (0.98)	4,124 (0.98)
	0.05D (4.6cm)	4,798 (1.0)	3,975 (083)	5,302 (1.11)	4,963 (1.03)	4,886 (1.02)	4,845 (1.01)	4,818 (1.00)	4,783 (1.00)	4,765 (0.99)	4,751 (0.99)
25.4 cm (0.28D)	0.03D (2.7cm)	4,208 (1.0)	3,151 (0.75)	5,035 (1.20)	4,440 (1.06)	4,327 (1.03)	4,240 (1.01)	4,180 (0.99)	4,100 (0.97)	4,038 (0.96)	4,006 **(0.95)**
	0.05D (4.6cm)	4,798 (1.0)	3,248 (0.68)	5,596 (1.17)	5,023 (1.05)	5,091 (1.06)	4,983 (1.04)	4,912 (1.02)	4,812 (1.00)	4,752 (0.99)	4,719 (0.98)
35.6 cm (0.39D)	0.03D (2.7cm)	4,208 (1.0)	2,598 (0.62)	5,395 (1.28)	4,553 (1.08)	4,510 (1.07)	4,382 (1.04)	4,286 (1.02)	4,148 (0.99)	4,059 (0.96)	4,008 **(0.95)**
	0.05D (4.6cm)	4,798 (1.0)	2,640 (0.55)	5,962 (1.24)	5,128 (1.07)	5,445 (1.130)	5,260 (1.10)	5,133 (1.07)	4,972 (1.04)	4,878 (1.02)	4,819 (1.00)

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소법 프로그램인 PLAXIS를 사용하여 확인코어공이 현장타설말뚝의 선단지지력에 미치는 영향에 대해서 알아보았다. 선단지지력은 수치해석으로부터 얻은 하중-변위 곡선들을 직경의 3%와 5% 변위에서 각각 구했으며, 코어공을 채취하지 않은 경우인 비교모델과 코어를 채취한 모델의 선단지지력을 비교하기 위해 감소계수로 나타내었다. 확인코어공의 영향은 코어공의 직경, 건조시간, 그리고 코어공채움재에 따라 변하는 것으로 조사되었다. 확인코어공의 건조시간이 늘어날수록 선단지지력은 줄어드는 것으로 경향을 보여주었으나, 그 감소폭이 비교모델과 비교했을 때 5%내외로 현실적으로 무의미한 것으로 판단되었다. 또한 콘크리트 타설 이전에 코어공 내부에 있는 물을 퍼내는 방법으로 선단지지력을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Hassan, K. (1994) "Analysis and design of drilled shafts socketed into soft rock," Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Houston
2. O'Neill, M. W., and L. C. Reese (1999) "Drilled shafts: construction procedures and design methods," FHWA Publication No. FHWA-IF-99-025. McLean, VA: Department of Transportation, Federal Highway Administration.
3. Raibagkar, A. (2008) "Simulation of concrete flow into verification core hole at the bottom of drilled shafts," Thesis, Department of Civil Engineering, University of Texas at Austin
4. TxDOT (2004) "Standard specifications for construction and maintenance of highways, streets, and bridges," Texas Department of Transportation.
5. TxDOT (2006) "Geotechnical manual," Texas Department of Transportation, Bridge Division.
6. Vipulanandan, C., A. Hussain, and O. Usluogulari (2007) "Parametric study of open core-hole on the behavior of drilled shafts socketed in soft rock," GeoDenver 2007. Denver, CO, United States: ASCE.
7. Youn, H. (2008) "Effect of verification core hole on the point bearing capacity of drilled shafts," Doctoral Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin