

사질토 지반에서의 강관 말뚝의 수직거동 연구

A Study on the Behavior of Steel Pipe Pile Subjected to Vertical Load in Sand

김 영 수*¹ Kim, Young-Su 허 노 영*² Heo, No-Young
김 병 탁*³ Kim, Byung-Tak 김 대 만*⁴ Kim, Dae-Man

Abstract

Model steel pile tests were conducted in order to investigate the characteristics of bearing capacity, settlement, and load transfer of model pile due to the changes of relative density, construction type of pile, required drop energy of ram and groundwater condition in sand.

In the case of embedded pile, soil was made after setting up piles. In the case of driven pile, piles had been driven by a model hammer with drop heights of 5, 10, 15cm to the same depth of embedded pile. After that, applying the static load on the pile gradually, we examined bearing capacity of model pile by load-settlement curve and load transfer of driven pile and embedded pile by using strain gage that was set along the pile regularly. In the test of the load transfer of driven pile, we examined the change according to the required driving energy of load transfer before and after driving. The test results of pile were compared with the solutions calculated by representative static bearing capacity equation widely used at present. It is shown that in the loose sand with small relative density Vesic equation was estimated to be the most closest and that in the dense sand with large relative density so was Janbu equation. In the driving by load transfer test, residual stress in all cases seemed to be very large around the surface and the tip. The tip bearing capacity ratio of pile increased in proportion to relative density.

요 지

모래지반의 상대밀도, 말뚝의 시공방법, 일정근입깊이에 따른 소요항타에너지 그리고 지하수 조건에 따라 말뚝의 지지력과 하중전이를 연구하기 위하여 강관말뚝을 이용한 모형실험을 수행하였다.

매입말뚝은 말뚝을 미리 설치한 후에 지반성형을 실시하였고, 타입말뚝은 매입말뚝과 같은 깊이까지 항타높이를 5, 10, 15cm로 달리하여 말뚝을 관입하였다. 그 뒤 정적하중을 단계적으로 가하여 하중-침하 곡선에 의한 모형말뚝의 지지력과 말뚝내의 등간격으로 설치된 변형 게이지를 이용하여 타입말뚝과 매입말뚝의 하중전이에 대해 살펴보았다. 타입말뚝의 하중전이시험에서는 항타 전과 항타 후 말뚝내 하중전이의 소요항타 에너지에 따른 변화를 관찰하였다. 매입말뚝의 시험결과는 현재 가장 많이 사용하고 있는 대표적인 정적 지지력 공식들에 의하여 계산되어진 값들과 비교 분석하였다. 그 결과 상대밀도가 작은 느슨한 모래지반에서는 Vesic 공식이 그리고 상대밀도가 큰 조밀한 모래지반에서는 Janbu 공식이 가장 근접한 평가를 나타내었다. 하중전이시험에 의한 항타시 잔류응력은 모든 경우에서 지표면과 선단부위에서 아주 큰 잔류응력이 나타났고, 말뚝의 선단 지지력비는 상대밀도에 비례하게 증가하였다.

Keywords : Bearing capacity, Load transfer, Model pile, Relative density

*1 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정회원, 경주대학교 건설환경시스템공학부 겸임교수
*3 정회원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사졸업
*4 정회원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서론

말뚝기초의 지지력을 토질역학 관점에서 합리적으로 산정한 것은 말뚝기초의 긴 역사에 비해 아주 최근의 일이다. 이러한 연구는 두가지 흐름으로 나뉘어지는 데, 하나는 말뚝기초의 시공시 동적관입성상에서 경험적으로 혹은 동역학적 이론에 의해 지지력을 구하는 방법으로 이 경우의 지지력 산정식을 동역학적 지지력 공식 또는 항타 공식이라하며, 다른 하나는 말뚝을 타설하는 지반의 성상에서 정역학적 이론에 의해 지지력을 구하는 방법으로 이를 정역학적 지지력 공식이라 일컫는다. 말뚝기초의 지지력은 지반의 전단특성, 압축특성, 응력조건, 상대밀도 등과 말뚝의 형상, 크기, 재질, 관입깊이, 시공방법, 그리고 말뚝간의 거리 등 다양한 인자들의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그리고, 이들 인자의 복합적인 상호작용 때문에 정확한 예측이 어려운 상황이다.

하중을 받는 말뚝의 수직거동을 이해하거나 평가하기 위해서는 실제 현장시험을 직접 실시 해 보는 것이 가장 확실하나, 막대한 비용과 장비가 소요되므로 실내모형시험을 통해서 지지력에 영향을 미치는 여러 가지 인자들 중 사질토의 상대밀도, 말뚝의 시공방법, 타입말뚝의 소요항타 에너지 및 지하수위 등의 인자에 따른 말뚝기초의 지지력 변화와 하중전이에 대하여 연구하였다.

기존의 정역학적 지지력 공식은 타입말뚝의 경우 항타시 발생하는 진동으로 인해 타입전의 지반조건과 상당히 다른 특성의 지반으로 변화하므로 강도정수 산정에 있어서 많은 문제점이 있다. 따라서, 정역학적 공식의 신뢰도를 평가하기 위해 매입말뚝의 경우 최종항타를 실시하지 않았다. 시험결과는 매입말뚝의 경우는 정역학적 지지력 공식을 사용하여 시험에서 얻어진 극한 지지력과 비교하였고, 각 시험에 대하여 모형말뚝의 항타시와 정재하시 하중전이에 관해서도 비교검토하였다.

2. 시험준비 및 과정

2.1 지반성형

시험결과에 흙입자 크기 효과를 최소화하기 위해서 균등계수, C_u 가 2이고 유효입경, D_{10} 가 $140\mu\text{m}$ 되는 균일하고 가는 낙동강모래를 시험에 사용하였고, 물리적 특성치와 입도분포곡선은 표 1, 그림 1과 같다.

균일한 모래지반을 유지하기 위하여 traveling spreader

표 1. 낙동강 모래의 물리적 특성

G_s	$D_{50}(\text{mm})$	$D_{10}(\text{mm})$	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}
2.675	0.265	0.140	2.0	1.235	1.189	0.877

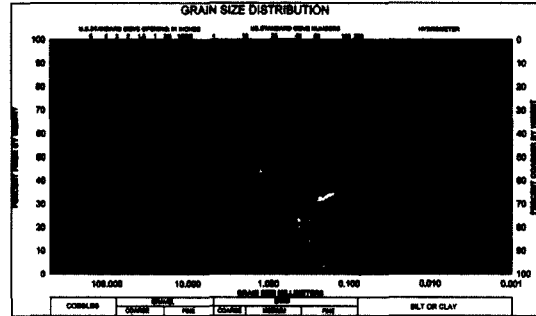


그림 1. 낙동강 모래의 입도곡선

방법을 사용하여 모래지반의 상대밀도를 32.8%(loose), 61.8%(medium), 90%(very dense)로 각각 맞추었고 지표면의 높이가 200mm 증가할 때마다 높이를 조절하여 균일성을 유지하였다.

상대밀도를 계산하기 위하여 limiting density test (ASTM standard)을 실시하여 시료의 최대간극비와 최소간극비를 찾았고, 이 결과로 여러 번의 반복시험을 통해 상대밀도에 따른 낙하높이와 통과구멍직경의 관계를 표 2와 같이 찾을 수 있었다.

표 2. 낙하고와 통과구멍직경의 관계에 따른 상대밀도

상대밀도 $D_r(\%)$	낙하고 (cm)	통과구멍직경 (mm)	단위중량 $\gamma_d (\text{g/cm}^3)$	내부마찰각 $\phi (^\circ)$
90.0	125.0	10.0	1.40	40
61.8	125.0	18.0	1.34	35
32.8	125.0	25.0	1.28	27

본 시험에서 traveling spreader 방법에 의한 상대밀도의 평균오차는 $\pm 3\%$ 로 나타났고, 표 2에서의 모래 평균 건조 단위중량과 내부마찰각은 각각 모형토조의 부피와 시료의 무게, 그리고 삼축압축시험에 의하여 구하였다.

2.2 시험 장치

2.2.1 모형말뚝

사진 1은 외경이 12mm이고, 길이가 400mm, 두께가

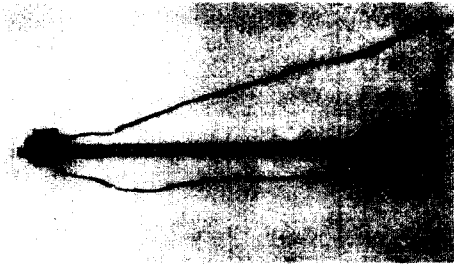
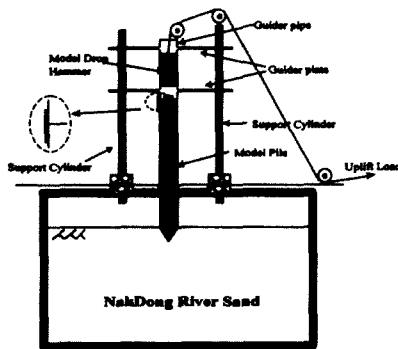


사진 1. 모형 말뚝

0.25mm, 탄성계수 $2.14 \times 10^7 \text{ t/m}^2$, 휨강성 $3.41 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ 인 스테인레스 모형강관말뚝이다. 사용된 모형강관말뚝은 길이에 따른 하중전이를 고려하기 위해 말뚝표면에 8개의 변형 게이지를 지표면 부위와 선단 부위를 기준해서 등간격으로 설치하였다. 변형 게이지는 접착제로 모형말뚝과 일체로 붙여졌고, 방수를 위해 말뚝표면에 니스를 발랐다. 시험 전 일정한 정적 축하중에 대한 각각의 변형 게이지의 값을 미리 읽어 하중과 변형의 직선식을 구하는 calibration을 실시하였다. 시험시 모형말뚝의 길이에 따라 등간격으로 붙여진 8개 변형 게이지 위치에서 모형말뚝 내 하중전달의 진행 과정인 하중전이를 읽을 수 있었다.

2.2.2 토조

토조는 300mm×500mm×800mm의 박스로 양측면과 후면, 밑면이 5mm 두께의 스테인레스 강판으로 되어 있다. 그리고, 앞면은 지반의 지하수위 위치파악을 위해 20mm의 투명 아크릴 판으로 만들었다. 양쪽측면에는 지하수의 유입을 위해 등간격으로 10개의 구멍을 만들었으며 그 둘레로 아크릴 통을 만들어 수위를 조절하였다.



(a) 항타 장치

모형토조의 크기에 의한 경계조건의 영향문제는 蘇田의 3인(1994)이 실시한 설치방법을 고려한 모형말뚝의 수평저항시험에서 말뚝직경에 대한 토조의 원형환산직경비는 각각 31.85, 57.01 배로 시험결과에 경계조건에 의한 문제가 발생하지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 본 시험의 말뚝직경에 대한 토조의 원형환산직경비는 36.42배로서 시험결과에 경계조건에 의한 문제는 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

2.3 시험 과정

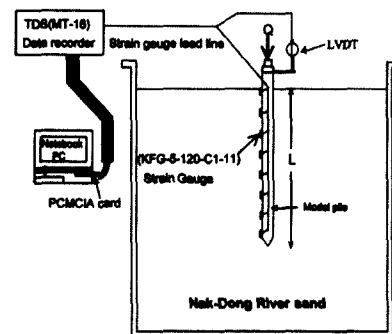
매입말뚝의 경우는 모형토조 속에 모형말뚝을 미리 설치해 놓은 상태에서 말뚝의 근입깊이가 약 35cm가 되도록 지반성형을 실시하였다. 그리고, 항타에 의한 지반교란을 방지하기 위해 매입말뚝 설치시 최종항타를 실시하지 않았으며 이로 인한 매입말뚝의 지지력은 분명히 차이가 있을 것으로 사료된다.

타입말뚝은 지반성형 후에 약 1kg의 스틸램머로 31.8, 62.8, 90%의 상대밀도에서 항타높이를 5, 10, 15cm의 세 가지로 하여 모형말뚝을 매입말뚝과 동일한 깊이로 관입시켰다.

모형말뚝의 항타에 의한 타입과 정적 재하시험시 모형말뚝의 수직을 유지하기 위해 guide plate와 guide pipe를 사용하였고, 자세한 상세도는 그림 2와 같다.

정적 재하시험은 12본의 타입말뚝시험과 4본의 매입말뚝시험을 실시하였다. 항타시 모형말뚝의 최종관입량은 최종 25mm관입에 따른 타격횟수에 대한 평균치를 사용하였고, restrike는 실시하지 않았다.

말뚝의 지반 관입 후 정적 재하시험은 단계하중으로서 서서히 가하였고, 두 개의 LVDT에 의해 TDS(MT-16)자료



(b) 정적 재하시험 장치

그림 2. 시험 장치 구조도

기록기에서 침하량을 측정된 후 편심제거를 위해 평균치를 구하였다. 정적 재하시험의 단계적 하중은 1kg까지는 0.1kg씩 하중을 증가시켰고, 5kg까지는 0.5kg, 30kg 이상은 1kg씩 증가시키며 축하중을 가하였다. 각 하중에 대한 재하시간은 침하량이 1 μ m이하가 될 때까지 유지하였다.

3. 시험 결과 분석

3.1 말뚝 지지력 산정 및 비교검토

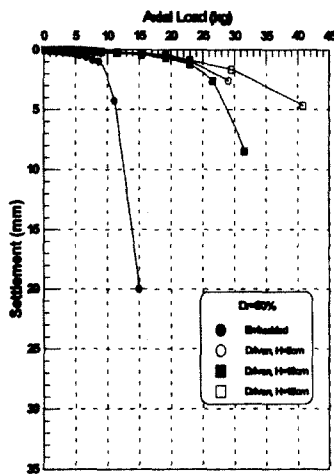
정적 재하시험을 통해 얻어진 하중(P)-침하량(S) 곡선 결과에서 극한 지지력과 항복 지지력을 찾을 수 있었다.

그림 3은 각각의 상대밀도 90%, 61.8%, 32.8%인 상태와 90%의 포화상태 일 때 항타높이를 달리한 타입말뚝과

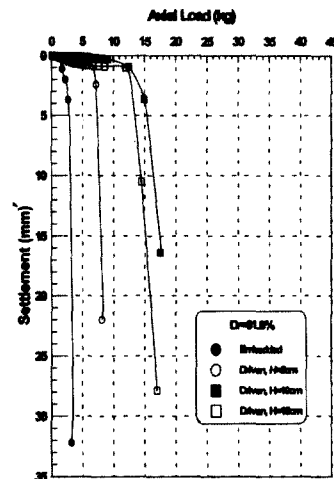
매입말뚝의 하중-침하량곡선을 보여주고 있다. 하중-침하량곡선은 아주 비선형적이고 이 현상은 상대밀도가 높을수록 더욱 뚜렷이 나타남을 볼 수 있는데, 상대밀도 32.8%의 경우는 거의 두 직선 형태로 나타나 하중증가에 따른 갑작스러운 침하로 인해 항복하중은 찾을 수가 없었다.

그림 3을 통하여 항복 지지력은 P-S 곡선법의 초기 직선부와 극한 직선부의 교점으로 구하였고, 극한 지지력은 상대밀도가 작은 경우는 극한 지지력이 명확하게 나타나지만 상대밀도가 큰 경우는 P-S 곡선이 비선형적이므로 극한 지지력이 명확하지 않았다. 따라서 큰 상대밀도에서도 극한 지지력을 *plunging failure*와 비슷하게 평가하는 Chin 방법을 사용하여 극한 지지력을 결정하였다.

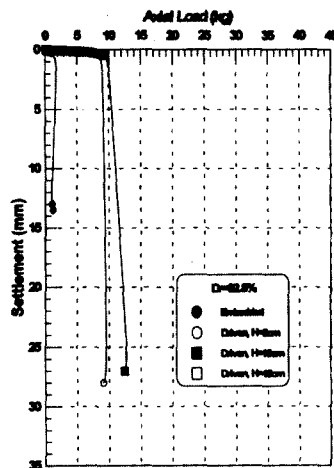
표 3은 각 경우에서 구하여진 항복 지지력과 극한 지지



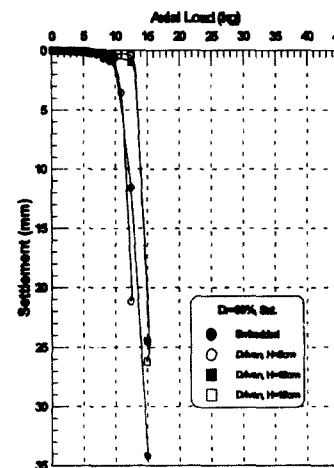
(a) $D_r=90\%$ (건조)



(b) $D_r=61.8\%$



(c) $D_r=32.8\%$



(d) $D_r=90\%$ (포화)

그림 3. 하중(P)-침하량(S) 곡선

표 3. 지지력 산정 결과

지반상태	상대밀도D _r (%)	시공 방법	항타 높이 H(cm)	총항타 횟수	소요항타 에너지 E(kg·cm)	2.5cm관입에 필요한 항타횟수	P-S 곡선법	Chin 방법	
							항복 지지력 Q _{yield} (kg)	극한 지지력 Q _{ult} (kg)	
건조상태	90.0	매입	-	-	-	-	10.41	12.51	
			항타	5	270	1350	18.53	21.51	30.81
				10	130	1370	9.02	24.93	32.53
	15	119		1785	8.30	25.12	40.99		
	61.8	매입	-	-	-	-	1.34	2.82	
			항타	5	59	295	4.31	7.10	9.27
				10	52	520	3.80	13.18	16.16
		15		35	525	2.54	14.31	17.76	
		32.8	매입	-	-	-	-	-	1.17
				항타	5	49	245	3.55	-
	10				33	330	2.40	-	12.52
	15	21	315		1.61	-	12.65		
포화상태	90.0	매입	-	-	-	-	10.62	12.53	
			항타	5	154	770	10.55	11.40	14.85
				10	102	1020	6.99	12.41	15.08
		15		60	1035	4.11	13.22	15.10	

력을 나타내었다.

표 3에서 보듯이 일반적으로 상대밀도와 소요항타 에너지에 비례해서 지지력이 증가하는 경향을 알 수 있다. 상대밀도 90%일 때의 지하수위 유무에 대한 지지력의 변화는 매입말뚝의 경우는 거의 비슷한 지지력을 나타내나, 타입말뚝의 경우는 포화상태인 경우에 비해 건조상태의 경우가 거의 2배 이상 정도 크게 나타났다. 상대밀도 61.8, 32.8%의 타입말뚝에서는 항타높이 H=5cm일 때보다는 H=10cm일 때가 지지력이 크게 증가하지만 H=10cm와 H=15cm일 때를 비교하여보면 지지력의 증가가 크지 않게 나타났다. 그 이유는 소요항타 에너지를 보면 쉽게 찾을 수 있는데 H=5cm일 때와 비교해서 H=10cm일 때의 소요항타 에너지는 크게 증가했지만 H=10cm와 H=15cm일 때는 소요항타 에너지가 거의 비슷함을 알 수 있다. 이런 경향은 상대밀도 90%의 포화상태 일 때도 비슷하게 나타난다. 그러나 상대밀도 90%의 건조상태의 경우는 H=15cm일 때도 소요항타 에너지가 크게 증가하여 지지력도 크게 증가함을 알 수 있다.

그림 4는 표 3의 타입말뚝에 대한 결과를 각 경우에 대하여 말뚝을 35cm 관입에 필요한 소요항타 에너지에 따른 극한 지지력의 변화를 나타낸 그래프이다. 여기서, 건조상태의 경우는 모두 소요항타 에너지 증가에 따라 지지력의 증가가 크게 나타났으며 증가직선의 기울기는 상

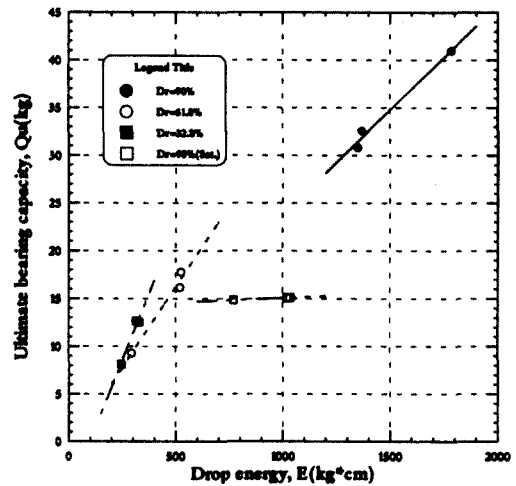


그림 4. 소요항타 에너지에 따른 극한 지지력의 변화

대밀도가 작을수록 크게 나타났다. 이 것으로 상대밀도가 작은 느슨한 사질토지반이 상대밀도가 높은 조밀한 모래지반보다 소요항타 에너지의 영향이 더 크게 작용한다는 것을 알 수 있다. 반면 상대밀도 90%의 포화상태인 경우는 소요항타 에너지가 증가함에 따른 지지력의 증가가 뚜렷하게 나타나지 않았다.

앞에서 구한 매입말뚝의 극한 지지력을 정역학적 지지력 공식에 의해 계산된 값들과 서로 비교해 보았다. 시공 방법의 성격상 타입말뚝은 항타에 따른 말뚝주변지반의

표 4. 매입말뚝의 시험치와 정역학적 이론에 의한 계산치의 비교

상대밀도 재안식	극한 지지력, Qult.(kg)			
	90.0(건조)	90.0(포화)	61.8(건조)	32.8(건조)
시험치	12.51	12.53	2.82	1.17
Terzaghi	9.93	6.23	6.09	3.29
Meyerhof	22.33	14.00	10.63	4.02
Vesic	12.53	7.87	7.41	3.77
Janbu	9.47	5.94	5.42	2.94

교란으로 인하여 정역학적 지지력 공식에 사용되는 물성치가 변하므로 매입말뚝의 극한 지지력으로 정역학적 지지력 공식에 의하여 구한 계산치와 비교하였다. 정역학적 지지력 공식들 중에 대표적인 Terzaghi, Meyerhof, Vesic, Janbu 공식을 사용하여 극한 선단 지지력을 구하였고, 여기에 극한 주면마찰력을 더하여 말뚝의 극한 지지력을 구하였다. 표 4는 각 지지력 공식에 의해 구하여진 극한 지지력과 시험을 통하여 얻어진 매입말뚝의 극한 지지력을 나타내었다.

표 4에서 Terzaghi 공식은 상대밀도 90%의 조밀한 모래지반에서는 시험치보다 작은 과소평가를 나타내지만 상대밀도가 작은 느슨한 지반의 경우에는 과대평가를 나타내었다. Meyerhof 공식은 모든 경우에서 시험치보다 큰 지지력의 평가를 나타내 본 시험결과와는 아주 다른 값을 보였으며, Vesic 공식은 상대밀도 90%의 건조 및 포화상태 지반에서 다른 공식들에 비해 시험치와 상대적으로 비슷한 값을 보이거나 느슨한 지반에서는 다른 공식들과 마찬가지로 지지력의 과대평가를 보였다. Janbu 공식은 조밀한 모래지반에서는 다른 공식들에 비해 가장 작은 지지력의 평가를 나타내나 느슨한 모래지반에서는 역시 과대평가로 나타났으나 다른 공식들보다 시험치에 가장 비슷한 평가를 나타냈다. 본 연구에서 사용된 네 가지 공식은 전체적으로 시험치보다 과대평가를 나타내고 이 현상은 상대밀도가 작은 느슨한 모래지반에서 심하게 나타났다. 이 중에서도 상대밀도가 큰 조밀한 모래지반에서는 Vesic 공식이, 상대밀도가 작은 느슨한 모래지반에서는 Janbu 공식이 가장 근접한 평가를 나타내었다.

3.2 하중전이 분포

모형말뚝에 설치된 변형 게이지로부터 전달된 하중을 계산하는 방법은 탄성론 공식을 이용하는 방법과 모형말뚝을 아무 구속이 없는 상태에서 작용된 하중과 변형의 관

계를 측정하여 하중계수를 시험 전에 구하여 이 하중계수로부터 전달된 하중을 측정하는 방법이 있다. 본 시험에서는 후자의 방법을 사용하여 8개의 변형 게이지로부터 측정된 변형률의 평균값을 하중계수로 결정하여 하중전이 시험을 실시하였다. 매입말뚝의 경우는 바로 정적 재하시험을 실시하여 하중전이를 구하였으나, 타입말뚝의 경우는 항타시 항타에너지에 의하여 말뚝에 잔류해 있는 응력, 즉 잔류응력이 정적 재하시험시에도 계속 잔류해 있어 타입말뚝의 하중전이에 있어서는 이 항타에 의한 잔류응력의 영향이 매우 크게 작용하였다. 따라서, 항타 시에도 말뚝에 부착된 변형 게이지로부터 변형률 값을 측정하고 난 뒤 정적 재하시험을 실시하여 하중전이를 구하였다.

그림 5는 각 경우의 상대밀도에서 매입말뚝과 H=10cm의 타입말뚝에 대하여서만 하중전이를 나타냈고 나머지는 지면상 생략하였다. 하중전이의 분석시 축하중 10kg의 일정한 값으로 일치시켜 비교하고자 하였으나 각 경우의 극한 지지력의 차이로 인하여 축하중을 달리하여 분석하였고 각 경우의 축하중은 표 5에 나타내었다. 타입말뚝의 경우는 잔류응력을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때로 각각 나타내어 잔류응력의 유무에 따른 차이를 관찰할 수 있었다.

모든 경우에서 잔류응력 제거시 매입말뚝과 비슷한 형태의 하중전이분포를 나타냈고, 타입시 항타에 의한 잔류응력은 거의 지표면부위와 선단부위에서 상대적으로 아주 크게 나타남을 알 수 있었다. 매입말뚝과 타입말뚝의 잔류응력 제거시 하중전이를 보면 축하중이 작용하는 말뚝 두부에서 지표면이 접하는 부위까지는 축하중이 일정한 것을 볼 수 있다.

하중전이시험에서 나타나는 가장 뚜렷한 현상은 그림 5(a), (d)의 상대밀도 90%에서의 건조상태와 포화상태에서 항타에 의한 잔류응력의 분포로 건조상태의 경우는 잔류응력이 선단부위에서도 나타나지만 특히 지표부위에서 크게 나타나는 반면 포화상태의 경우는 항타로 인한 잔류응력의 분포가 거의 선단부위에서 나타남을 알 수 있다. 이는 건조상태의 경우는 다른 상대밀도 32.8, 61.8%에서도 마찬가지로 항타에 의한 지표부위의 말뚝 주위지반이 조밀화 현상에 의해 선단부위보다는 지표부위에서 잔류응력이 크게 나타나는 것 같고, 포화상태의 경우는 항타에 따른 선단부위의 과잉간극수압이 발생하여 이로 인하여 변형 게이지의 읽음값이 크게 나타났으리라 사료된다. 시간이 지남에 따라 과잉간극수압이 감소할 것으로 생각되어지나 본 연구에서는 시간이 지남에 따른 관측은 실시하지 않았다.

현장에서 실시된 타입말뚝시험에 대한 문헌(Vesic, 1970 ; Tavenas, 1971)을 보면 대부분 항타 에너지에 의한 말뚝의 잔류응력에 대해서는 무시를 하였으나, 본 모형말뚝시험에서 보듯이 항타에 의한 잔류응력은 무시할 수 없을 만큼 아주 크게 나타나 말뚝기초의 시공관리상에 고려해야 할 사항으로 생각되어진다.

선단 지지력에 대한 작용하중의 비를 선단 지지력비 (Q_{tip}/Q), α 라 하는데 그림 5와 지면상 생략되어진 다른 항타높이에 대하여 선단 지지력비를 구하여 표 5에 나타내었다. 표 5의 각 경우는 잔류응력 제거시 선단 지지력비를

구한 결과이다.

표 5에서 타입말뚝의 경우 상대밀도가 작아짐에 따라 선단 지지력비도 작아져 상대밀도가 클수록 선단 지지력이 크게 작용한다는 것을 알 수 있었는데, 매입말뚝에서도 비슷한 경향을 볼 수 있었다. 그리고, 상대밀도 90%에서 지하시위 유무에 따른 선단 지지력비는 포화상태보다 건조상태의 경우가 더 크게 나타났다. 이는 포화상태의 항타시 발생된 선단부위의 과잉간극수압이 시간이 지남에 따라 소산되어 선단 지지력의 감소가 일어나는 것으로 생각되어진다. 타입말뚝에서의 소요항타 에너지에 따른 선단

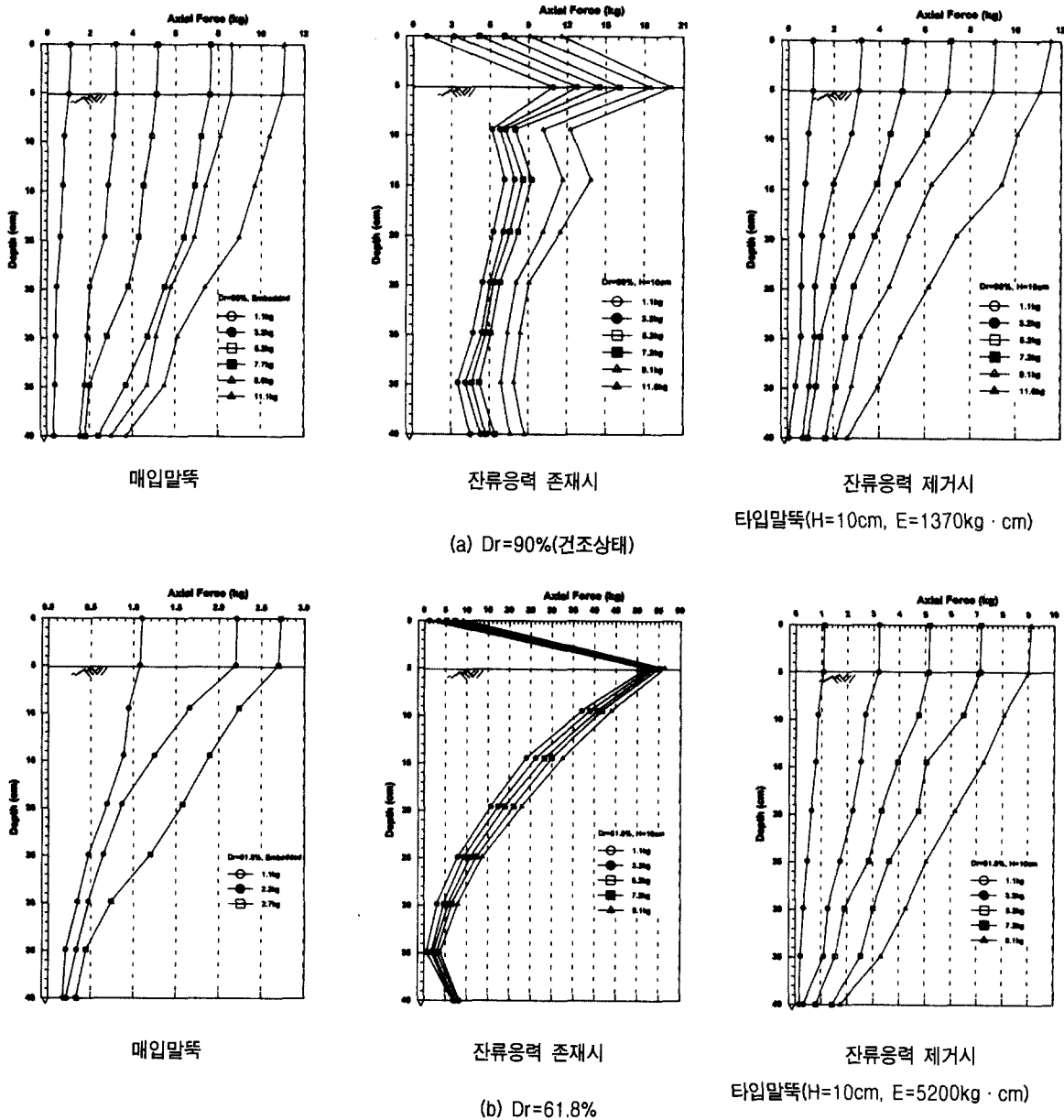


그림 5. 매입말뚝과 타입말뚝의 하중전이곡선

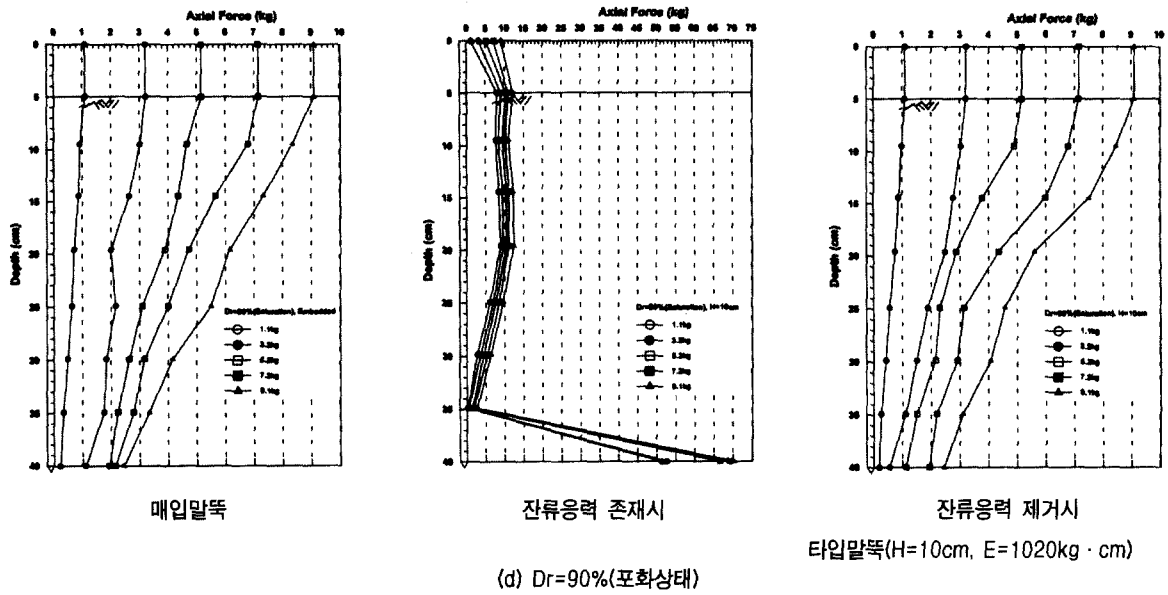
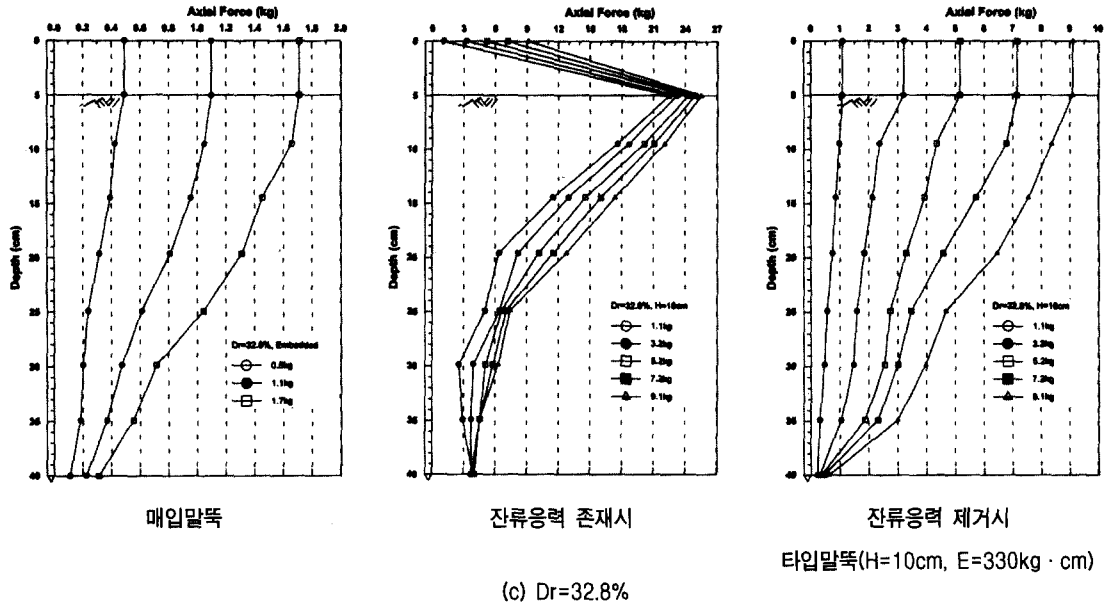


그림 5. 매입말뚝과 타입말뚝의 하중전이곡선

지지력비는 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었다.

Fellenius et al.(1991)의 연구결과에 의하면 말뚝의 선단 지지력비는 20~40%의 범위에 존재한다고 하였는데, 본 시험에서의 매입말뚝과 타입말뚝의 선단 지지력비는 각각 21.80%, 19.71%이며 평균 선단 지지력비는 20.23%로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 대구지역의 낙동강 모래를 모형토조에 지반을 성형하여 모형말뚝의 수직거동을 모래의 상대밀

도, 말뚝의 시공조건, 소요항타 에너지 그리고, 지하수위의 유무의 조건에 따라 지지력과 하중전이분포에 대하여 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 조밀한 모래지반에서 말뚝의 지지력은 타입말뚝이 지하수위 유무에 따라 차이가 크게 나타나 매입말뚝보다 지하수위에 의한 영향을 더 많이 받았다.
- (2) 타입말뚝의 지지력은 건조상태의 조밀한 모래지반보다 느슨한 모래지반에서 소요항타 에너지 증가에 따라 지지력 증가의 기울기가 크게 나타나 느슨한 모래지반에서 소요항타 에너지 증가의 영향이 조밀한 모래지반

표 5. 선단 지지력비

지반상태	상대밀도 Dr(%)	시공방법	항타높이 (cm)	작용하중 Q _i (kg)	선단 지지력 Q _{tip} (kg)	주변 마찰력 Q _s (kg)	선단 지지력비 α (%)
건조상태	90.0	매입	-	11.1	3.30	7.80	29.73
			5	11.6	3.70	7.90	31.90
		항타	10	11.6	2.60	9.00	22.41
			15	11.6	3.01	8.59	25.95
	61.8	매입	-	2.7	0.33	2.37	12.26
			5	7.2	1.42	5.78	19.75
		항타	10	9.1	1.74	7.36	19.10
			15	12.0	1.42	10.58	11.83
	32.8	매입	-	1.7	0.31	1.39	18.35
			5	9.1	1.26	7.84	13.85
		항타	10	9.1	0.62	8.48	6.77
			15	9.1	2.11	6.99	23.20
포화상태	90.0	매입	-	9.1	2.45	6.65	26.87
			5	9.1	1.74	7.36	19.15
		항타	10	9.1	2.44	6.66	26.84
			15	9.1	1.44	7.66	15.79

보다 더 크게 작용하였다. 반면 상대밀도 90%의 포화 상태인 경우는 소요항타에너지가 증가함에 따라 지지력의 증가가 뚜렷하게 나타나지 않아 소요항타에너지의 영향이 적게 작용하였다.

- (3) 정역학적 지지력 공식에 의해 구한 지지력은 시험에 의해 구하여진 지지력에 비해 보통 2~3배 정도 크게 나타나 모래지반에서 지지력의 과대평가를 보였는데 상대밀도가 큰 조밀한 모래지반에서는 Vesic 공식이 가장 효과적이었고 상대밀도가 작은 느슨한 모래지반에서는 Janbu 공식이 가장 근접한 평가를 나타내었다.
- (4) 항타에 의한 말뚝내 잔류응력은 무시할 수 없을 만큼 크게 나타났으며, 이 잔류응력은 모든 경우에서 지표면부위와 선단부위에서 항타시 아주 큰 잔류응력이 존재함을 알 수 있었다. 건조상태의 경우는 잔류응력이 지표면부위에 크게 나타나는 반면 포화상태의 경우는 항타로 인한 잔류응력이 거의 선단부위에 나타남을 알 수 있었다.
- (5) 말뚝의 선단 지지력비는 상대밀도에 비례하여 상대밀도가 클수록 선단 지지력비도 크게 작용하였고 본 연구에서의 매입말뚝과 타입말뚝의 선단 지지력비는 각각 21.80, 19.71%이며 평균 선단 지지력비는 20.23%로 나타났다. 조밀한 모래지반에서 포화상태보다 건조상태의 선단 지지력비가 5% 정도 더 크게 나타나 선단 지지력도 지하수위의 영향을 받았다.

참고문헌

1. 김대만(1998), "사질토 지반에서 모형말뚝의 수직거동 연구", 석사학위논문, 경북대학교.
2. 김병탁(1993), "낙동강유역 모래의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구", 석사학위논문, 경북대학교.
3. 김영수와 3인(1998), "모래지반에서의 모형말뚝의 시공방법에 따른 연직 지지력의 효과", 대한토목학회발표논문집, 제2권, pp. 417~420.
4. 일본토질공학회(1997), "말뚝기초의 설계법과 해설(김준석 역)", 도서출판 과학기술.
5. 蘇田外 3人(1994), "設置方法考慮おした杭の水平抵抗-群杭の荷重分擔", 日本土木學會 第49回年次學術講演會, pp. 1008~1001.
6. 蘇田外 3人(1994), "設置方法考慮おした杭の水平抵抗に関する基礎的研究-砂地盤-", 日本土木學會 第49回年次學術講演會, pp. 1012~1013.
7. Das, B.M.(1995), Principles of Foundation Engineering, PWS Publishing Company.
8. Fellenius, B.H., Altaee, A., and Evgin, E.(1991), "Axial Load Transfer for Piles in Sand", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, pp. 11~30.
9. Janbu, N.(1976), "Static Bearing Capacity of Friction Piles", Proceedings 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 479~482.
10. Meyerhof, G.G.(1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT3, pp. 197~228.
11. Tavenas, F.A.(1971), "Load Tests Results on Friction Piles in Sand", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 1, pp. 7~22.
12. Terzaghi, K.(1943), "Theoretical Soil Mechanics", Wiley, New York.
13. Vesic, A.S.(1967), "Ultimate Loads and Settlement of Deep Foundations in Sand", Proceedings, Bearing Capacity and Settlement of Foundations Symposium, Duke University, Durham, N.C., p. 53.
14. Vesic, A.S.(1970), "Test on Instrumental Piles, Ogeechee River Site", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM2, pp. 561~584.

(접수일자 1999. 7. 16)