

동역학적 지지력공식을 활용한 말뚝 항타 시공관리

토목연구지원팀
홍성진 차장



1 서론

항타공법은 햄머로 기성말뚝을 타격하여 말뚝을 지중에 설치하는 공법으로 고대 나무말뚝 부터 사용한 가장 오래된 말뚝 시공법이다. 항타공법은 빠르고 경제적인 것 뿐 아니라, 일정 타격에너지로 말뚝을 지지층에 관입시키므로 타격에너지와 관입량에 관계하여 시공 중 지지력을 간접적으로 확인하며 시공할 수 있는 신뢰성 높은 말뚝기초 시공방법이다. 단, 시공 중 소음 및 진동 때문에 생활권에서 사용에 제약이 있어 현재 국내에서는 사용빈도가 감소하고 있다. 그러나 빠른 시공속도, 신뢰성 때문에 여전히 널리 사용되고 있으며, 특히 넓은 지역에서 공사가 진행되는 대규모 토목사업에 적용성이 높다. 본고에서는 동역학적 지지력공식을 활용한 말뚝 항타 시공관리 방법에 대해 설명하고 동남아 000교량현장 활용사례를 소개하고자 한다. 이와 함께 국내에서 일반적으로 사용하는 최종관입량 기준 시공관리 방법과 비교하여 장·단점을 비교해 보고자 한다.

2 동역학적 지지력공식

동역학적 지지력공식의 기본개념은 항타에너지는 관입에 대한 지반에 저항력(지지력)과 에너지 손실의 합으로 구성된다는 것이며, 에너지 손실을 어떻게 정의할 건가에 따라 제안자 별로 지지력식에 차이가 발생하게 된다. 동역학적 지지력공식은 필요한 값을 시공 중 손쉽게 측정할 수 있는 장점이 있는 반면 경험계수의 타당성과 항타 중 측정되는 값들의 정확도가 추정식의 정확성에 문제가 된다(정충기와 김명모, 1985). 다음 [표 1]은 대표적인 동역학적 지지력공식을 정리한 것으로 오세욱과 이준대(2002)에 따르면 Hiley식과 Gate식이 비교적 높은 정확성을 보인다고 하였다.

대상 현장의 경우 대표적인 동역학적 지지력공식인 Hiely식을 이용하였으며, Hiely식의 k_1 , k_2 , k_3 는 파일캡, 파일, 지반에서 발생한 순간변위이다. Hiely식을 분리하여 보면 항타에너지는 말뚝을 관입시키는 일과 파일과 램의 충격손실 그리고 캡, 말뚝, 지반에서 발생하는 손실의 합으로 구성된다.

[표 1] 동역학적 지지력공식

구분	추정식	비고
Hiely식	$P_u = \frac{e_h W_r h}{s+C} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$	$C = \frac{1}{2} (k_1 + k_2 + k_3)$ $k_1 + k_2 + k_3$: 임시변위
ENR (Engineering New-Record) 식	$P_u = \frac{e_h W_r h}{s+2.54}$	s 단위는 cm
Canadian National Building code (PCUBC)식	$P_u = \frac{e_h W_r h C_1}{s+C_2 C_3}$	$C_1 = \frac{W_r + n^2 (0.5 W_p)}{W_r + W_p}$ $C_2 = \frac{P_u}{2A}, C_3 = \frac{L}{E} + 0.0001$
Gate식	$P_u = 104.5 \sqrt{e_h W_r h} 2.4 - \log(s)$	s 단위는 mm
Janbu식	$P_u = \frac{e_h W_r h}{k_u + s}$	$k_d = C_d (1 + \sqrt{1 + \lambda / C_d})$ $C_d = 0.75 + 0.15 \frac{W_r}{W_p}$
수정ENR (Engineering New-Record) 식(1965)	$P_u = \frac{1.25 e_h W_r h}{s+0.1} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$	

P_u : 말뚝지지력, e_h : 햄머 에너지효율, W_r : 램의 무게,
 W_p : 파일의 무게, h : 램의 낙하고, n : 반발계수, s : 선단관입량

3 동역학적 지지력공식을 이용한 항타 시공관리

Hiely식을 선단관입량(s)를 기준으로 정리하면 식(1)과 같이 표현되게 된다. 여기서 램의 무게와 햄머 에너지효율은 제조사 제원을 통해 알 수 있으며, 낙하고, 파일의 무게, 최종관입량, 리바운드량(순간변위: $k_1+k_2+k_3$)은 시공 중 측정 가능한 값이다. 즉, 반발계수를 제외하고는 시공 중 확인 가능한 값으로 반발계수는 동재하시험을 통해 결정할 수 있다. [식 1]을 보면 선단관입량은 말뚝지력, 말뚝무게, 리바운드량에 따라 결정되는 것을 알 수 있으며, 말뚝무게와 리바운드량은 말뚝길이와 지층 분포에 의해 변하는 값이다. 따라서 말뚝길이나 지층 분포가 변하는 조건이라면 말뚝선단 최종관입량만으로 항타 시공관리를 하는 것은 불합리하며, 대상현장에서는 동역학적 지지력공식인 Hiely식을 활용하여 최종관입량 외에 말뚝길이와 리바운드량을 고려하는 항타 시공관리 방법을 적용하였다.

[식 1]

$$P_u = \frac{e_h W_h}{s+C} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \Rightarrow s$$

$$= \frac{e_h W_h}{P_u} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} - \frac{1}{2} (k_1 + k_2 + k_3)$$

말뚝무게
리바운드량

대상현장인 동남아 000교량현장은 13km 구간에 직경 1.0m PHC파일과 직경1.0와 1.6m 강관말뚝을 항타 시공하도록 되어 있다. 말뚝기초는 퇴적층에 지지되는 마찰말뚝으로 교량의 연장이 긴만큼 지층조건과 말뚝 시공 길이가 다양하게 분포한다. 따라서 현장에서는 우선 지층조건과 사용되는 말뚝종류에 따라 대상현장을 13개 구간으로 구분하여 시험타 및 정·동 재하시험을 실시하여 말뚝항타 시공관리 기준을 정립한 후 공사에 착공하였다. 대상현장의 경우 25톤 및 30톤 유압햄머를 이용하여 말뚝을 시공하였으며, 시공 시 낙하고는 1.0m~1.2m 이다 [그림 1].

[그림 1] 대상현장 적용 햄머

25톤 햄머



30톤 햄머



대상현장은 Hiely식을 이용하여 Hiely set table이라는 항타관리 기준을 만들어서 항타말뚝 시공관리를 수행하였다. 우선 구간별 동재하시험 결과로부터 [그림 2]와 같이 반발계수를 구하였다. 반발계수를 결정한 후 [그림 3]과 같은 말뚝길이와 리바운드량에 따른 최종관입량을 제안할 수 있는 Hiely set table을 작성하여 말뚝항타 시공관리를 수행하였다. Hiely set table에 의한 항타관리 방법을 간략하게 요약하면 다음과 같다.

1) 말뚝종류별로 대표지층에 대해 Weap해석을 실시하여 햄머를 결정하고 말뚝 시공길이를 대략적으로 파악한다.

2) 말뚝종류, 말뚝 지지특성을 고려하여 구간을 선정하고 구간 별로 시항타 및 동재하시험을 실시, 항타 기록(최종관입량, 리바운드량)과 동재하시험 결과로부터 [식 1]의 반발계수(n)를 결정한다.

3) 결정된 반발계수를 바탕으로 [식 1]을 활용하여 [그림 3]과 같은 Hiely set table을 작성한다. Hiely set table은 일정 지지력을 만족하기 위한 최종관입량(set value)을 말뚝길이와 리바운드량에 따라 제시한 테이블로 소요 지지력 별로 작성할 수 있다.

[그림 2] 동재하시험을 이용한 반발계수 결정

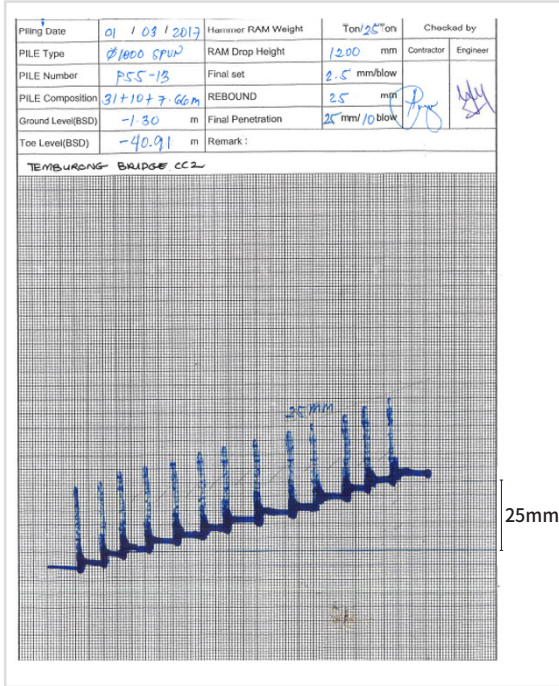
Pile Ref. No.	Bearing Capacity, R	Final Set Value per blow, s	Rebound	Pile Length	Rebound														
					17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
P53-04	9,383	23	21	39	0.55	0.58	0.61	0.64	0.67	0.70	0.72	0.75	0.77	0.79	0.82	0.84	0.86		
P53-06	9,162	25	23	39	0.54	0.58	0.61	0.63	0.66	0.69	0.71	0.74	0.76	0.79	0.81	0.83	0.85		
P53-11	11,200	24	24	42	0.69	0.72	0.75	0.77	0.80	0.83	0.85	0.88	0.90	0.93	0.95	0.97	0.99		
P53-13	10,485	14	24	42	0.58	0.61	0.64	0.67	0.70	0.73	0.76	0.78	0.81	0.83	0.86	0.88	0.90		
P54-12	10,031	25	26	44	0.62	0.65	0.68	0.71	0.73	0.76	0.78	0.81	0.83	0.85	0.88	0.90	0.92		
P55-03	9,437	25	22	44	0.58	0.61	0.64	0.67	0.69	0.72	0.74	0.77	0.79	0.81	0.83	0.86	0.88		
P55-09	9,583	25	32	44	0.59	0.62	0.65	0.68	0.70	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.84	0.87	0.89		
P55-15	9,496	25	26	51	0.61	0.63	0.66	0.69	0.71	0.73	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88		
P56-08	8,869	35	23	44	0.60	0.63	0.65	0.68	0.70	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85	0.87		
P56-10	9,362	45	20	44	0.69	0.71	0.74	0.76	0.78	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95		
P57-04	8,477	6.2	19	39	0.69	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94		
P57-06	9,166	5.2	21	39	0.70	0.72	0.75	0.77	0.79	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96		
P57-11	10,003	24	25	39	0.60	0.63	0.66	0.69	0.72	0.74	0.77	0.80	0.82	0.84	0.87	0.89	0.91		
P57-18	10,364	23	26	39	0.62	0.65	0.68	0.71	0.74	0.76	0.79	0.82	0.84	0.86	0.89	0.91	0.93		

4) 본말뚝 시공 시 항타기록지[그림 4] 리바운드량과 시공 말뚝길이를 바탕으로 지지력을 만족하는 최종관입량을 Hiely set table으로부터 찾아 현재 선단관입량이 만족하는지 확인한다. 예로 [그림 4]의 리바운드량은 25mm이며 말뚝길이는 40m이면 [그림 3]에서와 같이 소요지지력을 만족하기 위한 최종관입량은 49mm/10타이며, 항타기록지 선단관입량이 25mm/10타이므로 최종관입량을 만족한 것이다.

[그림 3] Hiely set table

PILE LENGTH (m)	n	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
20	0.780					49	44	39	34	29	
21	0.777					48	43	38	33	28	
22	0.774					48	43	38	33	28	
23	0.772					47	42	37	32	27	
24	0.769					46	41	36	31	26	
25	0.767					46	41	36	31	26	
26	0.764					45	40	35	30	25	
27	0.762				50	45	40	35	30		
28	0.760				49	44	39	34	29		
29	0.758				49	44	39	34	29		
30	0.755				48	43	38	33	28		
31	0.753				48	43	38	33	28		
32	0.751				47	42	37	32	27		
33	0.749				47	42	37	32	27		
34	0.748				46	41	36	31	26		
35	0.746				46	41	36	31	26		
36	0.744				45	40	35	30	25		
37	0.742				45	40	35	30	25		
38	0.740				45	40	35	30			
39	0.739				44	39	34	29			
40	0.737				49	44	39	34	29		
41	0.736				49	44	39	34	29		
42	0.734				48	43	38	33	28		
43	0.733				48	43	38	33	28		
44	0.731				47	42	37	32	27		
45	0.730				47	42	37	32	27		
46	0.728				47	42	37	32	27		
47	0.727				46	41	36	31	26		
48	0.726				46	41	36	31	26		
49	0.724				46	41	36	31	26		
50	0.723				46	41	36	31	26		

[그림 4] 항타 시공 기록지



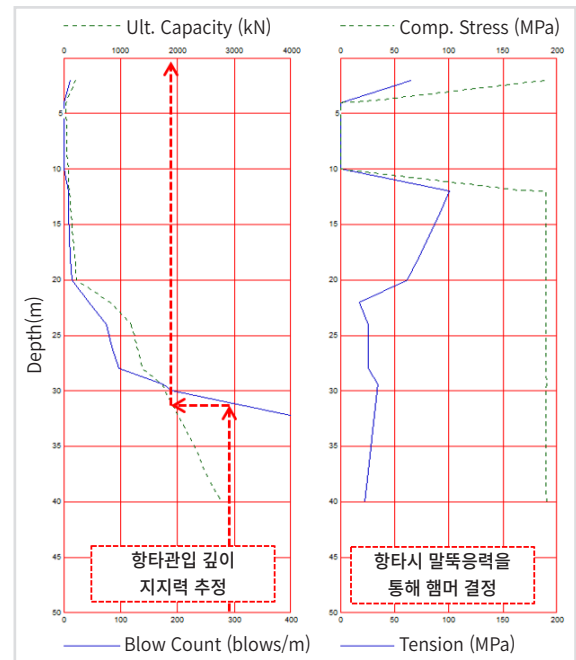
4 국내 항타 시공관리 방법과의 비교

국내의 경우 일반적으로 Weap해석을 통해 시공에 적합한 해머를 선정하고 이때의 대략적인 말뚝 시공길이와 지지력을 추정한다[그림 5] 참조. 말뚝 시공길이는 관입량으로부터 결정하게 되는데, 일반적으로 강관말뚝은 2mm/타 이상, PHC말뚝은 4~5mm 이상으로 최종관입량을 결정한다. 이후 현장 시항타 동재하시험을 통해 소요지지력에 적합한 최종관입량을 결정하고 이에 맞추어 항타시공을 수행한다.

국내에서 일반적으로 사용하는 최종관입량만을 이용한 항타 시공관리 방법과 Hiely set table을 이용하여 말뚝 길이와 리바운드량도 고려하는 항타 시공관리 방법을 비교하면 [표 2]와 같다. 우선 최종관입량만을 이용한 항타 시공관리의 경우 장점은 간단하다는 것이다. 큰 고려 없이 선단관입량이 최종관입량 이하가 될 때까지 말뚝 항타를 수행하면 된다. 반면, 지층변화에 따라 말뚝 시공길이가 변화되면 대응이 어려우며, 최종관입량은 관리기준일 뿐

이를 통해 지지력을 추정할 수 없으므로 소요지지력이 변경되었을 때에도 대응이 불가능하다. Hiely set table을 이용한 항타 시공관리의 경우 지층변화와 이에 따른 말뚝 길이가 변화에 대응가능하다는 점과, Hiely공식을 이용 현재 선단관입량에서 지지력을 대략적으로 추정가능하다는 장점이 있다. 반면, 반발계수나 해머효율 등이 가지는 편차에 의해 오차발생이 가능한데, [그림 2]를 보면 알 수 있듯이 동재하시험으로 역산한 반발계수 자체도 어느 정도의 편차를 가지고 있다.

[그림 5] Weap 해석결과



[표 2] 항타 시공관리 방법 비교

내용	최종관입량 기준 항타 시공관리	Hiely set table 이용한 항타 시공관리
장점	• 관리기준이 단순함	• 말뚝길이 변동에 대응가능 • Hiely식 이용 지지력 추정 가능
단점	• 말뚝길이 변동에 대응불가 • 시공관리 기준일 뿐 지지력 추정 불가	• 반발계수(n)와 해머효율의 편차에 따른 오차 발생 가능 • 리바운드량 측정오차에 따른 오차 발생 가능
적용 조건	• 좁은지역에 지층조건 유사한 경우 • 선단지지 말뚝에 적합	• 넓은지역에 지층 변동성이 있는 경우 • 마찰말뚝에 적합 (퇴적층 항타말뚝에 적합)

정리를 하면, 지층조건이 유사한 좁은지역에서 시공할 경우와 주변마찰력이 작고 선단부 단단한 지층에서 대부분의 지지력이 발휘되는 선단지지 말뚝의 경우 최종관입량만으로 항타 시공관리를 하는 것이 합리적이라고 판단된다. 연약층 하부 단단한 지층에 짧게 관입되는 선단지지말뚝의 경우 말뚝 지지력과 선단관입량이 선단지지층에 의해 좌우되고, 선단관입량 자체가 지지층 도달 후 급격히 감소하므로 Hiely set table을 이용하여 소요 지지력에 맞는 최적 관입량을 결정한다는 것 자체에 큰 의미가 없게 된다. 반면 넓은 구간에 지층변동으로 인해 말뚝길이 변화가 심할 경우 말뚝길이와 지반에 의한 리바운드량을 고려할 수 있는 Hiely set table을 이용하는 방법이 합리적이라고 판단된다. 두터운 지층에 말뚝하중을 전달하는 마찰말뚝의 경우 선단관입량이 점진적으로 감소하므로 Hiely set table을 이용하여 소요 지지력에 맞는 최적 관입량을 결정하는 것이 필요하다.

5 결론

본고에서는 동역학적 지지력공식을 활용한 말뚝 항타 시공관리 방법에 대해 설명하고 활용사례를 소개하였다. 이와 함께 국내에서 일반적으로 사용하는 최종관입량 기준 항타 시공관리 방법과 비교하여 보았다.

1) 동역학적 지지력공식의 기본개념은 항타에너지는 관입에 대한 지반에 저항력(지지력)과 에너지 손실의 합으로, 항타에너지와 항타 중 자료를 통해 말뚝의 지지력을 추정할 수 있다는 것이다. 본고에서 소개하는 말뚝 항타 시공관리 방법은 대표적인 동역학적 지지력 추정식인 Hiely식을 이용한 말뚝길이와 리바운드량을 고려한 말뚝 항타관리 방법이다.

2) Hiely식의 경우 말뚝의 반발계수를 제외하고는 장비제원과 시공 중 측정자료로 부터 구할 수 있는 값들이다. 대상현장은 말뚝종류와 지층조건에 따라 13개의 구간으로 구분하여 시항타를 실시하였으며, 시항타 동재하시험 결과로부터 구간별 반발계수를 결정하였다. 이를 통해 Hiely set table을 작성하고 말뚝 항타 시공관리를 수행하였다. Hiely set table은 말뚝길이와 리바운드량에 따라 최종관입량을 제시하는 표로, 소요지지력에 따른 각각의 표를 제시할 수 있다.

3) Hiely set table을 이용한 항타 시공관리 방법은 지층변화에 따른 말뚝길이 변화에 대응가능하다는 장점이 있는 반면, Hiely식 계수가 가지는 편차에 의해 오차발생이 가능한 문제점이 있다. 따라서 넓은 지역에 지층변동으로 인해 말뚝길이 변화가 심하거나, 선단관입량이 점진적으로 감소하여 Hiely set table을 이용한 최적 관입량 결정이 필요한 마찰말뚝에 적합하다. 반면, 지층조건이 유사한 좁은 지역이나, 연약층 하부 단단한 지층에 짧게 관입되는 선단지지말뚝의 경우 최종관입량을 이용한 항타 시공관리가 적합하다고 판단된다.

참고문헌

1. 정충기, 김명모 (1985), “말뚝 지지력 산정을 위한 동역학적 공식의 정확도 분석 및 수정”, 대한토목학회논문집, 5권, 4호, 23-30.
2. 오세욱, 이준대 (2003), “H-pile의 지지력 특성 및 동역학적 공식의 신뢰도 평가”, 한국안전학회지, 18권, 1호, 81-88.