

WEAP 프로그램을 이용한 U형 널말뚝의 항타관입성 해석

김병일^{1*}, 김재규², 이승현³, 이종구⁴

Driveability Analysis of U-type Sheet Pile using WEAP Program

Byoung-Il Kim^{1*}, Jae-Kyu Kim², Seung-Hyun Lee³ and Jong-Ku Lee⁴

요약 진동해머를 이용한 널말뚝 시공은 소음에 민감한 도심지 굴착 공사에 유용하다. 그러나 널말뚝의 진동-항타 시공시 항타관입성에 대한 연구는 거의 수행된 적이 없다. 이 연구에서는 국내에서 많이 사용되고 있는 U형 널말뚝을 진동해머를 이용하여 시공할 때 여러 가지 조건에 따른 항타관입성을 WEAP 프로그램을 이용하여 분석하였다. 해석결과 널말뚝의 관입속도는 N값이 클수록 느려지며, 20m 이내로 시공되는 경우 단면적이 클수록 느려지는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 진동해머, 항타관입성, 널말뚝, WEAP, 관입속도

Abstract Vibratory pile driving has an advantage of reduced noise pollutions compared to impact pile driving and it has been very widely used in the installation of sheet piles. However, very little has been known about the driveability characteristics of sheet pile under vibratory driving. So, the proper sheet piles and vibratory hammer for an given soil profile and depth are determined on a empirical basis. In this study, the driveability of U-type sheet piles are analytically estimated using the commercial WEAP(Wave Equation Analysis of Piles) program. The WEAP analysis shows that penetration rate of sheet pile decreases as N value increases. And if penetration length is not over 20 meters, the rate of penetration decreases as the sectional area of sheet pile increases.

Key Word : Vibratory driver, Driveability, WEAP, Rate of penetration

1. 서론

널말뚝은 굴착을 위한 흙막이 벽체로 이용될 뿐만 아니라 제방 및 하천 독에서 차수목적으로, 그리고 항만 부두공사 등 다양한 장소에서 여러 가지 목적으로 사용되고 있다. 널말뚝은 타격, 정적압입, 진동 등에 의해 시공되는데, 특히 도심지에서는 시공에 따른 소음 발생을 줄이기 위해 진동-항타시공을 사용하는 것이 보통이다. 그러나 국내에서의 널말뚝 진동-항타시공 사례는 증가하고 있지만 진동-항타시공에 따른 계측 및 연구 사례는 거의 없는 실정이다. 진동-항타시공이란 진동을 주된 관입력으

로 변화시키는 진동해머를 이용하여 강관말뚝, 강널말뚝을 지반에 시공하는 것이다.

이 논문은 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 널말뚝 단면에 대한 항타관입성 해석을 그 목적으로 한다. Smith(1960)가 개발한 말뚝의 파동이론해석법(Wave Equation Analysis of Pile Driving, WEAP)을 적용한 GRLWEAP 프로그램을 이용하여 널말뚝 단면에 대한 진동-항타관입성 및 지지력을 예측하고 압축 및 인장응력을 산정하여 널말뚝의 진동-항타관입성을 분석하였다. 이를 통하여 널말뚝 시공시 항타관입성 평가의 자료로 사용할 수 있도록 하고자 한다.

¹명지대학교 토목환경공학과

²명지대학교 토목환경공학과

³선문대학교 토목공학과

⁴포항산업과학연구원 강구조연구소

*교신저자: 김병일(bikim@mju.ac.kr)

2. WEAP 해석 일반

2.1 WEAP 프로그램 일반

WEAP프로그램은 1976년에 최초로 개발되었으며 현

재의 버전은 GRLWEAP2005[1]로 해머 제조사와 판매사가 승인한 해머자료 파일을 포함하고 있다. 2000여개의 해머자료를 포함하고 있지만, 국내에서 주로 사용되는 해머자료는 없는 경우가 많아 해석에서 사용된 EP-120해머에 대한 자료는 수동으로 입력하였다. 지반조건으로 N값이나 단위주면마찰력과 선단지지력을 입력하여 널말뚝의 진동-항타관입성을 해석할 수 있다.

2.2 파동방정식을 이용한 해석 및 결과

(1) 파동이론해석법의 등장배경 및 용도

Smith(1960)[2]가 개발한 말뚝의 파동이론해석법(Wave Equation Analysis of Pile Driving, WEAP)은 원래 항타시 말뚝의 관입성 및 지지력을 예측하기 위해 개발되었다. 그러나 WEAP은 항타 후 일정기간이 경과한 시점의 재항타시(restrike) 지지력을 예측하는 데에도 이용되고 있다.

(2) 파동이론식을 이용한 항타관입성 분석

“진동-항타관입성(이하 항타관입성이라 함)”이라는 용어는 보통 말뚝이나 널말뚝을 진동 관입시킬 때 사용하며, 보통 흙 속을 관입할 때의 관입속도(rate of penetration)와 관계한다. 관입속도(v_p)는 보통 mm/sec로 나타낸다. 미국 휴스턴 대학에서 수행된 축소 모형시험 연구에 따라서 Rao(1993)는 표 1과 같이 항타관입성과 관입속도의 관계를 제안하였다. 또한 TESPA(Technical European Sheet Piling Association)[3]에서 발간한 안내책자(1995)에 따르면 v_p 값이 8 mm/sec 정도가 되면 진동-항타관입성이 한계에 이른다고 한다. TESPA는 v_p 값이 8mm/sec 이하가 되면 이음새 부분에서 과도한 열이 발생할 수 있으므로 주의 깊게 관찰할 것을 추천하고 있다.

표 1. 항타관입성과 관입속도(mm/sec)의 관계(Rao, 1993)[4]

항타관입성	불가	어려움 (단단한)	상대적으로 쉬움	쉬움
v_p (mm/sec)	$v_p < 8$	$v_p < 22$	$22 < v_p < 60$	$v_p > 60$

널말뚝의 허용항타응력은 GRLWEAP 매뉴얼에 따르면 인장응력과 압축응력 모두 $0.9f_y$ 이다. 이 값은 미국에서 사용하는 값으로 여기서 f_y 는 항복강도(ksi or MPa)이다. 바이브로 해머를 사용한 널말뚝 시공 중에는 압축응력과 인장응력이 동시에 발생하는데 인장응력은 압축응

력의 80% 정도이거나 훨씬 작은 수치를 나타낸다고 한다.

(3) 해석 결과의 산출

파동방정식을 이용한 WEAP(Wave Equation Analysis for Pile)[1] 프로그램을 이용하면 다음과 같은 값을 얻을 수 있다.

- (a) 깊이-극한지지력(선단지지력과 주면마찰력)
- (b) 말뚝에 걸리는 항타 및 진동-항타응력
- (c) 깊이-타격수 또는 관입속도
- (d) 깊이-출력 또는 항타에너지

(4) WEAP 해석의 적용

그동안 WEAP 해석은 주로 말뚝의 항타관입성 해석, 해머의 적정성 검토, 말뚝에 걸리는 응력 산정 등 시공관리 목적으로 사용되어 왔으며, 널말뚝에 사용된 예는 많지 않다.

3. 항타관입성 해석

3.1 해석 조건

이 논문에서는 EP-120 해머를 이용하여 3가지 U형 널말뚝을 깊이 10m, 20m, 30m까지 각각 N값 15, 30, 50인 지반에 시공할 때의 항타관입성을 해석하였다. 해석을 위한 입력조건과 지반조건은 표 2와 같으며, 표 3과 같이 총 27Cases에 대해 수행하였다.

EP-120해머(90kw)는 EP-180해머(135kw)와 함께 국내 강관말뚝 및 널말뚝 시공현장에서 빈번하게 사용되는 KENCHO사의 진동해머이다.

일반적으로 널말뚝은 Z형과 U형이 있는데, U형 널말뚝은 타입과 인발시 변형이 적어 재사용이 유리하다. 해석에 사용한 U형 널말뚝의 형상은 그림 1과 같으며, WEAP 해석시 사용된 단면제원은 표 2에 나타내었다.

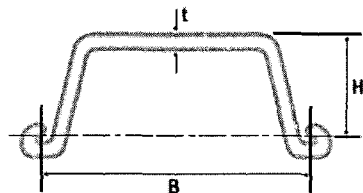


그림 1. 강널말뚝 단면형상

표 2. 해석을 위한 입력자료

Vibrator Parameters	Vibrator Model	EP-120		
	출력(kw)	90		
	편심모멘트(kg·m)	41.2		
	진동수(Hz)	18.33		
	기진력(ton)	55.8		
Pile Parameters	본체중량(kg)	7300		
	단면형상	U형 널말뚝		
	길이(B×H×t, mm)	400×100×10.5	400×150×13	400×170×15.5
	단면적(cm ²)	61.2	76.4	96.9
	단면 명칭	A	B	C
Soil Parameters		사질토, 지하수위는 지표면까지 포화		

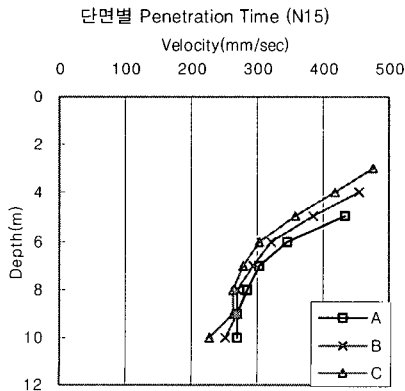
표 3. 해석조건

말뚝길이(m)	10	20	30
N값	15	30	50
단면	A	B	C

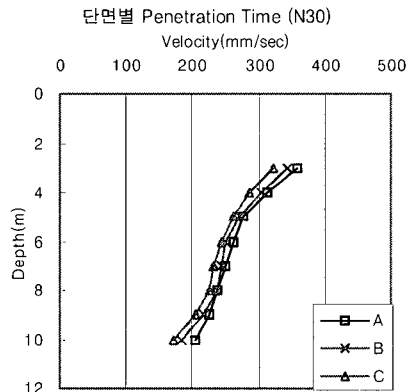
* 3×3×3=27Case에 대해 해석

3.2.1 10m까지 시공

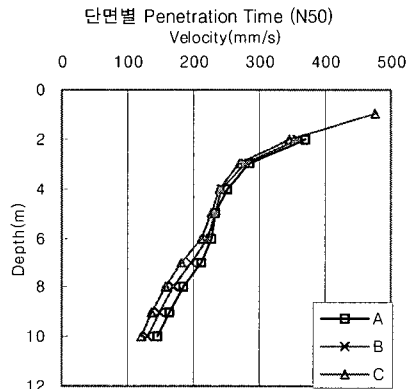
관입초기 자중에 의해서 관입되는 경우 해석상 관입속도가 무한대가 되는데, 이러한 경우 그래프에서 그 값을 제외하였다. 말뚝길이가 10m이며, N값이 15, 30 및 50인 경우 널말뚝의 관입속도는 세 단면이 비슷하며, 모든 단면은 10m까지 관입이 가능하였다. 또한, 그림 2에서 보는 바와 같이 관입속도는 단면적이 클수록 말뚝길이가 커질수록, 그리고 N값이 커질수록 작아지는 것으로 나타났다.



(a) N15



(b) N30



(c) N50

그림 2. 말뚝길이가 10m에 대한 관입속도

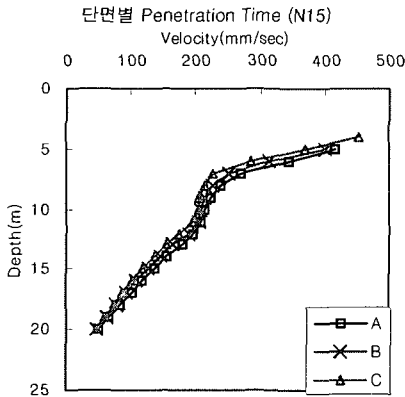
3.2.2 20m까지 시공

이 경우에도 N값이 15, 30 및 50인 지반에서 관입속도는 세 단면이 근소한 차이만을 보이며 20m까지 관입이

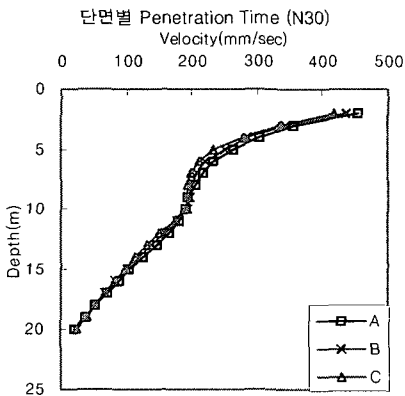
가능하였다. 또한, 그림 3에서 보는 바와 같이 말뚝길이 가 커질수록 N값이 커질수록 작아지는 것으로 나타났다. 한편, 단면적이 커질수록 관입속도는 작아졌으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

3.2.3 30m까지 시공

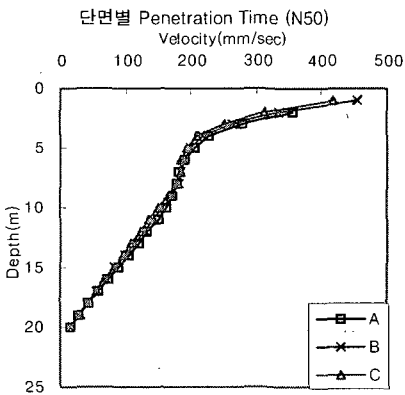
말뚝길이가 30m인 경우에는 N값 15일 때는 세 단면 모두 21m까지만 관입이 가능한 것으로 나타났다. 또한 N값 30인 지반에서는 세 단면 모두 말뚝길이인 20m까지, N값 50인 지반에서는 세 단면 모두 19m까지만 관입이 가능한 것으로 나타났다. 또한 그림 4에서 보는 바와 같이 시공깊이가 커질수록, N값이 커질수록 관입속도는 작아졌으나 단면적에 대한 해석결과는 앞의 10m 및 20m까지 시공할 때와는 다르게 나타났다. 즉, 시공가능 깊이의 대략 절반 정도인 6~10m까지는 앞의 두 경우와 마찬가지로 단면적이 작을수록 관입속도가 컸으나, 그 이하 깊이에서는 오히려 단면적이 클수록 관입속도가 컸으며, 이러한 현상은 N값이 클수록 뚜렷하게 나타났다.



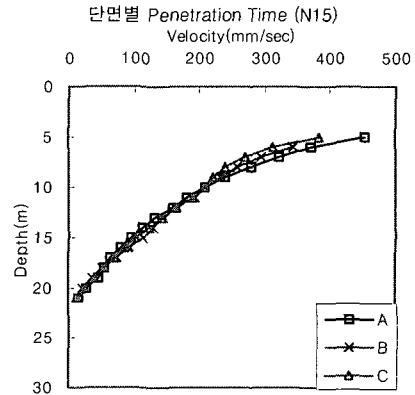
(a) N15



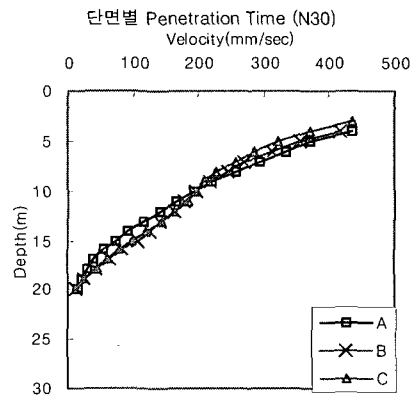
(b) N30



(c) N50

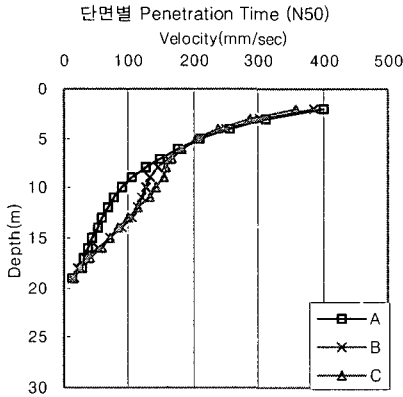


(a) N15



(b) N30

그림 3. 말뚝길이 20m에 대한 관입속도



(c) N50

그림 4. 말뚝길이 30m에 대한 관입속도

3.2.4 N값과 단면적에 따른 관입속도

해석결과 중 A단면의 N값에 따른 관입속도를 특정깊이에 대해 표 4에 나타내었다. 표 4에서 보는 것처럼 N값이 15에서 30, 50으로 커짐에 따라 관입속도 상대값은 0.76~0.78(평균 0.77), 0.46~0.66(평균 0.56)인 것으로 나타났다.

또한 해석결과 중 N값 15인 경우의 단면적에 따른 관입속도를 표 5와 같이 특정 깊이에서 비교하였다. 말뚝길이 10, 20m인 경우 단면적이 61.2cm²에서 76.4cm² 및 96.9cm²로 증가함에 따라 관입속도의 상대값은 각각 0.92~0.95 및 0.84~0.88인 것으로 나타났다. 말뚝길이가 30m인 경우에는 앞에서 언급한 것처럼 시공가능깊이의 대략 중간지점을 기준으로 단면적에 따른 관입속도 변화가 다른 양상으로 나타났다. 즉, 표 5에서 보는 것처럼 6m 지점에서는 단면적이 커짐에 따라 관입속도 상대값이 0.93 및 0.84로 작아졌으나 15m지점에서는 1.21 및 1.07로 일정한 경향은 아니나 단면적이 큰 경우가 관입이 더 잘되는 것으로 나타났다.

표 4. N값에 따른 관입속도 비교(A단면)

시공 깊이	검토 깊이	N값	관입속도 (mm/s)	관입속도 상대값
10m	10m	15	270.3	1.00
		30	204.1	0.76
		50	144.9	0.54
20m	15m	15	135.1	1.00
		30	105.3	0.78
		50	89.3	0.66
30m	15m	15	95.2	1.00
		30	72.5	0.76
		50	44.4	0.47

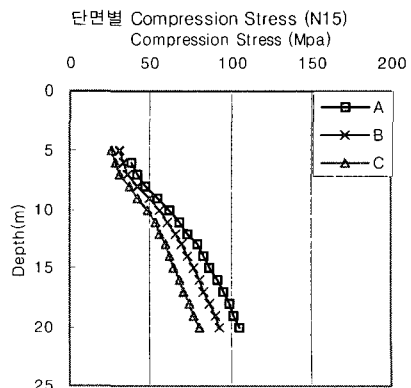
표 5. 단면적에 따른 관입속도 비교(N값 15)

시공 깊이	검토 깊이	단면적 (cm ²)	관입속도 (mm/s)	관입속도 상대값
10m	10m	61.2(A)	270.3	1.00
		76.4(B)	250.0	0.92
		96.9(C)	227.3	0.84
20m	15m	61.2(A)	135.1	1.00
		76.4(B)	128.2	0.95
		96.9(C)	119.1	0.88
30m	6m	61.2(A)	370.4	1.00
		76.4(B)	344.8	0.93
		96.9(C)	312.5	0.84
	15m	61.2(A)	95.2	1.00
		76.4(B)	114.9	1.21
		96.9(C)	102.0	1.07

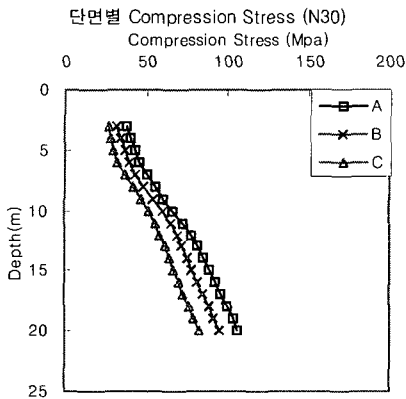
3.3 압축응력 해석결과

널말뚝의 허용항타응력은 WEAP 매뉴얼에 따르면 허용인장응력과 압축응력 모두 0.9 f_y 이다. 이 값은 KS F 4604의 규격에 따른 값으로 여기서 f_y = 강재의 항복강도 (ksi or MPa)이다. 따라서 허용항타응력은 SY30의 강재 재질을 사용한 경우 강재의 강도인 200MPa의 90%인 180MPa이다.

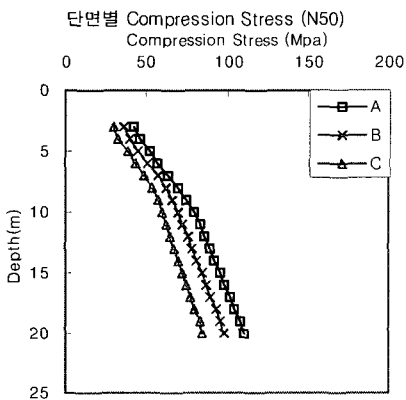
널말뚝의 진동-항타관입시의 압축응력은 널말뚝의 단면적이 커짐에 따라서 감소한다. 또한 관입 초기 자중에 의해서도 쉽게 관입되는 경우 압축응력이 0으로 나타나 그래프에서 그 값을 제외하였다. 항타응력은 주로 널말뚝의 단면적과 관련된 값으로, 항타응력 값의 차이는 있으나 모든 해석결과가 비슷한 양상을 보였으므로 해석결과 중 말뚝길이 20m에 대한 해석결과만 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보는 바와 같이 압축응력의 최대 값이 110.7MPa로 나타났으며, 이 값은 허용 값인 0.9 f_y 보다 훨씬 작아 이번 해석에서 항타시 발생하는 압축응력은 문제가 없는 것으로 나타났다.



(a) N15



(b) N30



(c) N50

그림 5. 말뚝길이 20m에 대한 항타시 압축응력

3.4 지지력 해석결과

극한지지력은 주변마찰력과 선단지지력으로 구성되는데, 해석에 사용된 널말뚝의 단면적 차이가 작아 그 차이로 인한 선단지지력의 차이는 나타나지 않았다. 즉, 극한

지지력에 주로 영향을 미치는 요소는 주변마찰력이다. 해석결과 중 N값30, 말뚝길이 10m에 대한 지지력을 표 6에 나타내었다. 표 6에서 보는 것처럼 주변 마찰력은 널말뚝의 주변둘레 길이와 관입깊이에 따라 변하며, 시공깊이가 깊어질수록 극한지지력에서 차지하는 비율이 증가함을 알 수 있다.

3.5 해석 결과 요약

해석결과를 요약하면 표 5와 같다. 표 5에서 보는 바와 같이 N값이 커질수록, 시공깊이가 깊어질수록 관입속도는 느려진다. 그러나 단면적의 영향은 말뚝길이에 따라 다른 결과를 얻었다. 즉, 말뚝길이 10m의 경우에는 단면적이 커짐에 따라 관입속도가 느려졌으며, N값이 가장 큰 N50의 지반에서도 3종류의 널말뚝이 모두 쉽게 관입되는 것으로 나타났다. 그러나 말뚝길이 20m의 경우에는 단면적이 커짐에 따라 관입속도가 느려지는 경향은 말뚝길이 10m일 때와 같았으나 지반조건에 따라 관입속도가 상당히 달라졌다. 즉, N값 15인 경우에는 20m까지 쉽게 관입되었으나, N값 30, 50의 지반에서는 모두 관입불가에 가까운 관입속도까지 낮아지는 것으로 나타났다. 한편, 말뚝길이가 30m일 때는 지반조건 및 널말뚝 종류에 관계없이 최대 21m까지 밖에 관입되지 않는 것으로 나타났다. 또한, 단면적에 따른 관입속도는 N15 및 N30 지반에서는 깊이 10m까지는 앞의 두 경우와 마찬가지로 단면적이 작은 경우가 더 빨랐으나 10m보다 깊은 깊이에서는 오히려 단면적이 클 때 관입속도가 빠른 것으로 나타났다. N50인 지반에서는 깊이 6m 지점을 기준으로 이러한 현상이 나타났다.

따라서 말뚝길이가 10m, 20m인 경우 관입가능 깊이의 차이가 없으며, 관입속도에서도 작은 차이만을 보이므로 단면적이 큰 B, C단면 보다는 단면적이 작은 A단면을 사용하는 것이 경제적이라고 할 수 있다. 또한, 말뚝길

표 6. N값30, 말뚝길이 10m에 대한 지지력

단면 깊이 (m)	400 X 100 X 10.5(mm)			400 X 150 X 13(mm)			400 X 170 X 15.5(mm)		
	극한지지력 (kN)	주변마찰력 (kN)	선단지지력 (kN)	극한지지력 (kN)	주변마찰력 (kN)	선단지지력 (kN)	극한지지력 (kN)	주변마찰력 (kN)	선단지지력 (kN)
1	64.4	6.3	58.1	65.1	7.0	58.1	65.8	7.7	58.1
2	79.2	21.0	58.1	81.7	23.5	58.1	84.0	25.9	58.1
3	94.2	36.0	58.1	98.4	40.3	58.1	102.5	44.3	58.1
4	108.8	50.7	58.1	114.8	56.7	58.1	120.5	62.4	58.1
5	124.4	66.2	58.1	132.2	74.0	58.1	139.6	81.5	58.1
6	142.1	83.9	58.1	152.0	93.8	58.1	161.4	103.3	58.1
7	162.2	104.1	58.1	174.4	116.3	58.1	186.2	128.0	58.1
8	184.8	126.7	58.1	199.7	141.6	58.1	214.0	155.9	58.1
9	210.1	151.9	58.1	228.0	169.8	58.1	245.1	186.9	58.1
10	238.0	179.8	58.1	259.2	201.0	58.1	279.4	221.3	58.1

이가 30m이고, N값이 30, 50인 경우 각각 10m 또는 6m 이하에서는 단면적이 작은 A단면의 관입속도가 단면적이 큰 B, C 단면의 관입속도보다 느려지므로, 이러한 경우에는 시공면에서 B, C단면이 더 효율적인 것으로 나타났다.

표 7에 보이는 것처럼 압축응력은 모두 항복응력인 180MPa에 훨씬 못 미치는 것으로 나타나 시공시 널말뚝 내 응력으로 인한 문제는 없는 것으로 판단되었다.

표 7. 기존 널말뚝의 항타관입성 해석 결과

단면	시공 깊이 (m)	N값	최대 관입깊이 (m)	극한지지력 (kN)	압축응력 (MPa)
단면 A 400×100 ×10.5 (61.2cm ²)	10	15	10	216.4	60.4
		30	10	238.0	65.1
		50	10	309.1	73.0
	20	15	20	607.8	105.4
		30	20	669.2	106.7
		50	20	701.1	110.7
30	15	21	658.1	103.9	
	30	20	647.7	101.9	
	50	19	648.2	104.2	
단면 B 400×150 ×13 (76.4cm ²)	10	15	10	239.7	53.1
		30	10	259.2	55.7
		50	10	338.3	62.7
	20	15	20	677.2	93.4
		30	20	741.1	95.0
		50	20	776.5	98.4
30	15	21	733.4	91.9	
	30	20	719.7	89.0	
	50	19	717.4	91.6	
단면 C 400×170 ×15.5 (96.9cm ²)	10	15	10	262.0	44.1
		30	10	279.4	46.4
		50	10	366.2	52.4
	20	15	20	743.6	80.5
		30	20	809.9	82.4
		50	20	848.6	84.9
30	15	21	805.4	81.4	
	30	20	788.5	76.6	
	50	19	783.4	79.5	

표에서 극한지지력과 압축응력은 최대 관입깊이에서의 값이다.

4. 결론

WEAP 프로그램을 이용하여 U형 널말뚝을 EP-120 진동해머로 시공할 때의 항타관입성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 널말뚝의 관입속도는 지반의 N값이 클수록 느려지는 것으로 나타났다.
- 2) 말뚝길이가 10m 및 20m인 경우에는 널말뚝의 관입속도는 단면적이 클수록 느려지는 것으로 나타났으나 말뚝길이가 30m인 경우에는 대략 상부를 시공할 때는 단면적이 클수록 관입속도가 느려졌으나 하부지반을 시공할 때는 오히려 단면적이 클 때 관입속도가 더 큰 것으로 나타났다.
- 3) 시공깊이가 깊어짐에 따라 관입속도는 느려지는 것으로 나타났으며, EP-120 해머를 사용한 경우 시공깊이가 21m를 넘어가면 N값 15인 지반에서도 관입이 불가능한 것으로 나타났다.
- 4) 시공되는 널말뚝의 압축응력과 인장응력은 대부분 허용치 이내이며, 최대 관입가능 깊이 이상으로 무리하게 관입하지 않는 한 압축응력은 허용치 이내로 발생하는 것으로 나타났다.
- 5) 주변마찰력과 선단지지력으로 구성되는 극한지지력에서 단면적의 영향을 받는 선단지지력은 극한지지력의 일부에 불과하며, 극한지지력을 이루는 주 성분은 주변둘레의 길이에 따른 주변마찰력인 것으로 나타났다. 따라서 시공되는 널말뚝에 대해 큰 지지력이 요구되지 않으며, 좌굴의 우려가 없는 경우 단면 대비 주변둘레의 길이가 긴 단면을 선택하는 것이 경제적이다.

참고문헌

- [1] GRLWEAP 2005 Manual, "Wave Equation Analysis of Pile Driving", BasisSoft Inc., 2005.
- [2] Smith, E.A.L., "Pile Driving Analysis by the Wave Equation, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division", ASCE, Vol. 86, August 1960.
- [3] TESPA, "Installation of Steel Sheet Piles", Technical European Sheet Piling Association TESPA, 1995.
- [4] Rao, Pramod M., "Effect of Pile Geometry and Soil Saturation in the Behavior of Non Displacement Piles Installed by Vibration", MS Thesis Presented to the Faculty of Dep. of Civil & Environmental Engineering, University of Houston, Texas, 1993.

김 병 일(Byoung-Il Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과(공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목 공학과 부교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학

김 재 규(Jae-Kyu Kim)

[정회원]

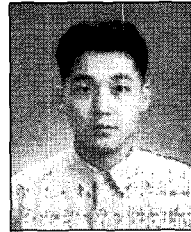


- 2005년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

<관심분야>
토질역학, 기초공학

이 종 구(Jong-Ku Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2003년 11월 ~ 현재 : 포항산업과학 연구원 강구조연구소 선임 연구원

<관심분야>
토질역학, 기초공학