

바이브로해머를 이용한 광폭 Hat형 강널말뚝의 현장 관입시험

김병일¹, 김재규¹, 백인철¹, 이승현^{2*}

Field Driveability Test of Wide Hat-type Sheet Pile using Vibro-Hammer

Byoung-II Kim¹, Jae-Kyu Kim¹, In-Chul Back¹ and Seung-Hyun Lee^{2*}

요약 본 논문에서는 시스템 파라미터의 변동이나 모델의 불확실성 및 외부 외란 등에 강인한 외란 관측기에 기초로 한 강인 제어기의 설계를 제안한다. 제어기는 두 개 루프의 구조를 갖는 모델기반 보상기와 궤환 제어기 구조로 구성되어 있다. 내부 루프 보상은 내외부의 외란을 제거하고, 외부 루프 궤환 제어기는 주어진 사양을 만족하도록 하는 역할을 수행한다. 결과적으로, 제안한 강인 제어기를 이용함으로써 외란에 대해 시스템을 안정화시킬 수 있으며, 제어 성능을 향상시킬 수 있음을 보인다.

Abstract A new steel sheet pile of wide hat-type was developed. Advantage of using wide type of sheet pile is reducing steel weight and consequently cutting down construction cost. Field driveability tests were conducted in order to verifying vibro-driveability of wide hat-type sheet pile. As a result of the tests, penetration rates of newly developed sheet piles were less than those of U-type sheet piles. Axial stresses developed in sheet pile during driving were far less than yield stress of sheet pile. Furthermore, initial penetration rates of sheet piles were much larger than those obtained from WEAP program.

Key Word : wide hat-type of steel sheet pile, vibro-driveability, field driveability test, WEAP

1. 서론

최근 지속적인 강재의 가격상승으로 강재 제품의 경쟁력이 약화되고 있으며, 또한 다양한 소재의 신제품 등장, 새로운 주입액 개발을 통한 콘크리트 소재 차수벽의 시장 점유율 증가 등으로 기존의 강널말뚝의 사용이 감소 추세에 있다. 이러한 문제를 타개하기 위해서는 고강도화 및 광폭화를 통하여 새로운 형태의 강널말뚝을 개발하여 가격 경쟁력을 확보할 필요가 있다. 이미 유럽 등 선진국에서는 국내에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 강널말뚝보다 폭이 200mm 가까이 큰 807×352×8mm 사양도 상용화되어 사용되고 있다.

국내에서의 널말뚝 진동-항타시공 사례는 증가하고 있지만 널말뚝의 진동-항타시공에 따른 계측을 포함하는

현장시험 관련 연구 사례는 국외의 경우에는 일부 발표된 바가 있으나(Viking, 2002)[1], 국내의 경우에는 거의 없는 실정이다. 진동-항타시공이란 진동을 주된 관입력으로 변화시키는 진동해머를 이용하여 강관말뚝, 강널말뚝을 지반에 시공하는 것이다.

이 논문은 이번에 시험제작된 광폭 Hat형 강널말뚝의 항타관입성을 현장시험을 통해 파악하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 800×150×8mm 및 900×200×9mm Hat형 강널말뚝과 현재 차수목적으로 많이 사용되고 있는 400×150×13mm U형 강널말뚝의 항타관입성을 현장시험을 통해 비교하고자 하였다. 또한, 항타관입성 시험으로 smith[2]가 개발한 말뚝의 파동이론해석법(Wave Equation Analysis of Pile Driving, WEAP)을 적용한 WEAP 프로그램[3]을 통해 해석한 널말뚝 단면에 대한 진동-항타관입성 및 지지력을 예측하고 이를 현장시험 결과와 비교하였다. 또한 압축 및 인장응력을 측정하고 WEAP해석결과와 비교해 보았다.

¹명지대학교 토목환경공학과

²선문대학교 토목공학과

*교신저자: 이승현(shlee02@sunmoon.ac.kr)

2. 현장 관입시험

2.1 시험 개요

인천대교 제3공구 31번 교각 현장에서 새로 제작된 800×150×8mm 및 900×200×9mm 두 가지 광폭 Hat형 강널말뚝(항복강도 $f_y = 450MPa$)에 대한 항타관입성 시험을 실시하였다. 또한 현장시험에는 기존의 대표적인 강널말뚝인 400×150×13mm 단면도 함께 항타시공되어 항타관입성을 시제품과 비교하였다. 시험에 사용된 단면의 형상은 그림 1과 같다. 또한 시험에 사용된 바이브로해머는 국내 현장에 많이 사용되는 EP-120 해머로 제원은 표 1과 같다.

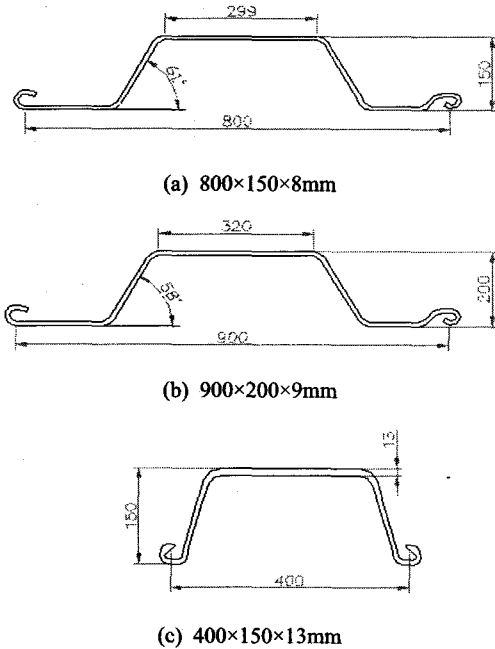


그림 1. 시험에 사용된 강널말뚝 단면형상

표 1. 해머제원

Vibrator Model	EP-120
출력(kW)	90
편심모멘트(kg·m)	41.2
진동수(Hz)	18.33
기진력(ton)	55.8
본체중량(kg)	7300

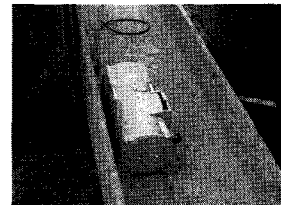
2.2 시험횟수 및 계측계획

관입시험은 표 2와 같이 총 11회에 걸쳐 육안 관측 및

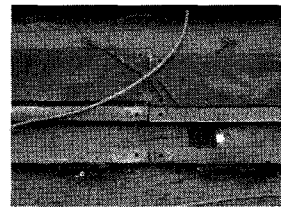
계측기를 이용하여 수행하였으며, 그중 계측기를 설치한 경우는 4가지였다. 시험에는 그림 2와 같이 줄변위계, 변형률계, 가속도계 등의 계측기를 사용하였으며, 부착 위치는 그림 3과 같다. 시험을 통해 진동 항타시 강널말뚝의 관입속도, 강널말뚝에 발생하는 응력, 가속도 등을 측정하였다.

표 2. 관입시험 내용

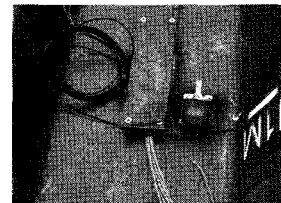
시공일	강널말뚝 단면(mm)	길이 (m)	단독/연결 시공 여부	계측기 설치여부
06.06.26	900×200×9	18.0	단독	미설치
06.06.26	800×150×8	12.0	단독	설치
06.06.27	400×150×13	15.0	단독	미설치
06.06.27	900×200×9	10.0	단독	미설치
06.06.27	900×200×9	10.0	연결	미설치
06.06.27	900×200×9	10.0	연결	설치
06.06.27	800×150×8	12.0	단독	미설치
06.06.28	800×150×8	12.0	연결	미설치
06.06.28	800×150×8	12.0	연결	설치
06.06.28	400×150×13	15.0	단독	미설치
06.06.28	900×200×9	10.0	단독	설치



(a) 줄변위계

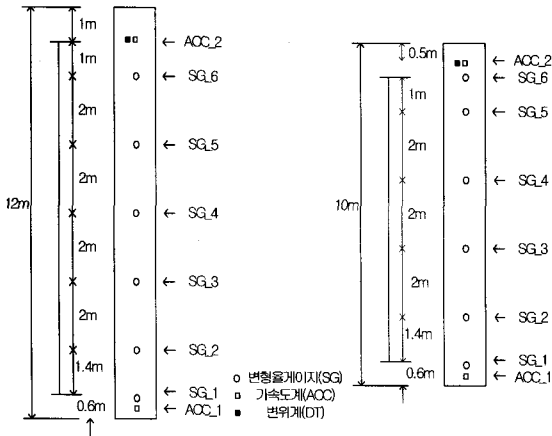


(b) 변형률계



(c) 가속도계

그림 2. 시험에 사용된 계측기



(a) 800 X 150 X 8mm 단면 (b) 900 X 200 X 9mm 단면

그림 3. 계측기 설치위치

2.3 지반조건

시험 현장은 실트질 점토지반(CL)이며, 깊이별 N값은 그림 4와 같다. 그림 4에서 보는 것처럼 해안지역으로는 비교적 N값이 큰 것으로 나타났다.

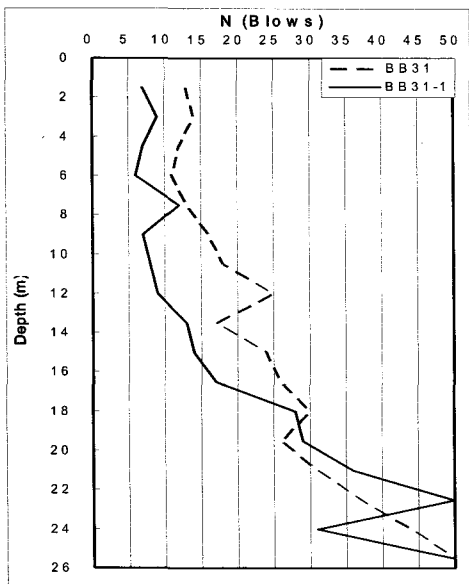


그림 4. 현장의 표준관입시험결과

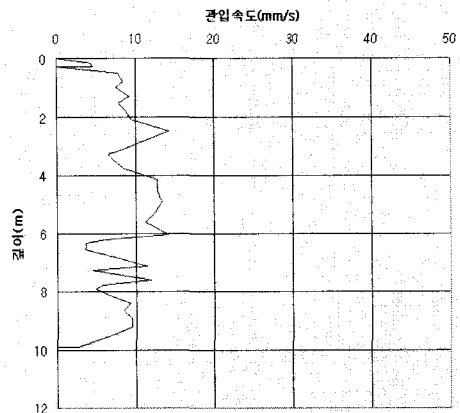
3. 현장시험 결과

3.1 줄변위계 측정결과

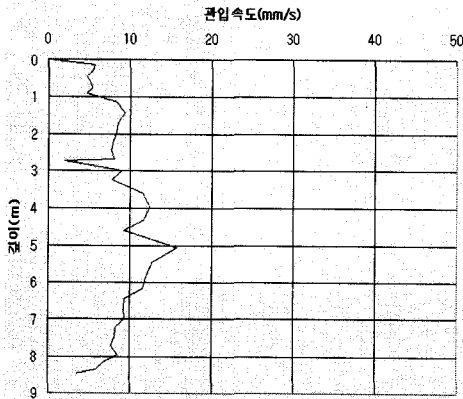
줄변위계를 이용하여 관입속도를 측정한 결과는 그림

5~6 및 표 3과 같다. 표 3에서 보는 바와 같이 관입속도는 400×150×13mm 단면이 가장 빠른 것으로 나타났으며, 800×150×8mm 단면, 900×200×9mm 단면의 경우 평균 관입속도가 400×150×13mm 단면에 비해 대략 1/4~1/3 정도로 나타났다. 하지만 단위 폭당 관입시간을 고려하면 대략 1.5~2배 정도 느리다고 할 수 있다. 이렇게 시제품의 관입속도가 느린 것은 무엇보다 강널말뚝의 주면면적이 상대적으로 커진 이유때문으로 판단되며 추가적으로 시제품이 기존 제품을 잘라서 만드는 과정에서 여러 지점에서 용접이 되어 단면적이 커진 점, 계측장치 보호를 위해 덮개를 붙여 단면적이 커진 점 등도 관입속도에 약간의 영향을 미친 것으로 추정된다.

표 3에서 보는 것처럼 800 X 150 X 8mm 단면의 경우 단독 시공한 경우와 연결 시공한 경우의 관입속도는 큰 차이가 없으나, 단독 시공한 경우가 약간 더 빠른 것으로 나타났으며, 900 X 200 X 9mm 단면의 경우는 연결 시공한 경우보다 단독 시공한 경우가 훨씬 빠른 관입속도를 보이는 것으로 나타났다. 이렇게 연결 시공한 경우가 더 느리게 관입되는 이유는 이음부에서 마찰(interlock friction)이 발생하기 때문이다. 기존의 연구결과 중에서 이음부 마찰저항의 값을 1.0kN/m로 제안하고 있는 것도 있으나 다양한 연구결과에 의한 이음부 마찰저항의 값들은 큰 편차를 보이며 이러한 이유로는 이음부의 형상과 이음부 틈새에 존재하게 되는 흙입자의 존재 등을 들 수 있다[4]. 시공지반이 비교적 N값이 큰 점토지반인 관계로 전체적으로 Rao[5]가 제안한 표 4의 항타관입성 평가에 따르면 관입이 “어려움”으로 나타났지만, 항타 “불가”(보통 8mm/sec 이하)는 아닌 것으로 나타나 최종 깊이까지 관입되었다.

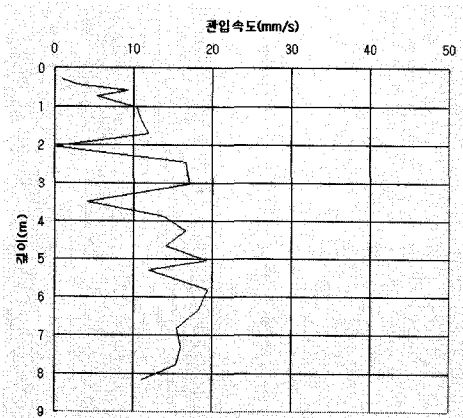


(a) 단독

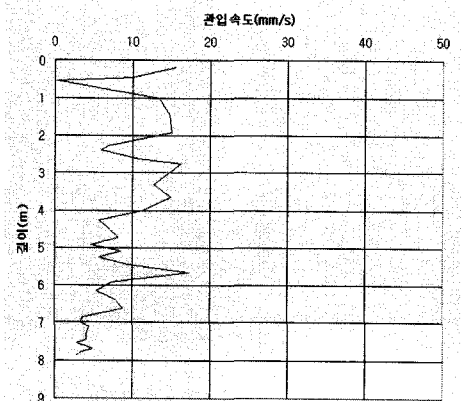


(b) 연결

그림 5. 800X150X8mm 단면의 관입속도(1초 평균)



(a) 단독



(b) 연결

그림 6. 900X200X9mm 단면의 관입속도(1초 평균)

표 3. 평균 관입속도

강널말뚝 단면 (mm)	평균 관입속도 (mm/s)	단독/연결시공 여부
800X150X8	8.57	단독
800X150X8	8.48	연결
900X200X9	12.03	단독
900X200X9	7.78	연결
400×150×13*	35.5	단독

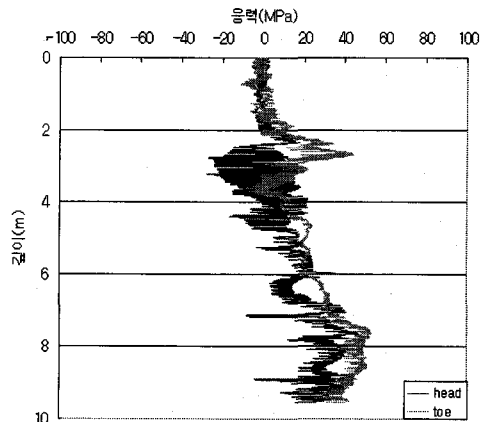
* 육안 관측

표 4. 항타관입성과 관입속도의 관계(Rao, 1993)

어려움(단단함)	상대적으로 쉬움	쉬움
$v_p < 22$	$22 < v_p < 60$	$v_p > 60$

3.2 변형률계 측정결과

현장 시험에서는 그림 3과 같이 단면별로 6개의 변형률 게이지를 부착하여 시험을 실시하였으며, 측정된 결과로부터 항타시 발생하는 응력을 나타낸 것이 그림 7이다. 그림 7은 800X150X8mm 단면에 대한 것으로 6개의 변형률 게이지 중에서 가장 큰 값을 보이는 두부(head)에 설치된 6번 게이지와 그 다음으로 큰 값을 보이는 선단(toe)에 설치된 1번 게이지에서 측정된 값을 변형율로 나타내었다. 그림 7에서 보는 것처럼 항타시 발생한 응력은 허용값($0.9f_c = 403MPa$)보다 훨씬 작은 것으로 나타났으며, 한편 연결 시공한 경우가 단독 시공한 경우에 비하여 평균 응력이 다소 크게 나타났다. 또한 두부에서는 진동으로 인해 인장과 압축이 단시간에 반복되는 것으로 나타났다.



(a) 단독

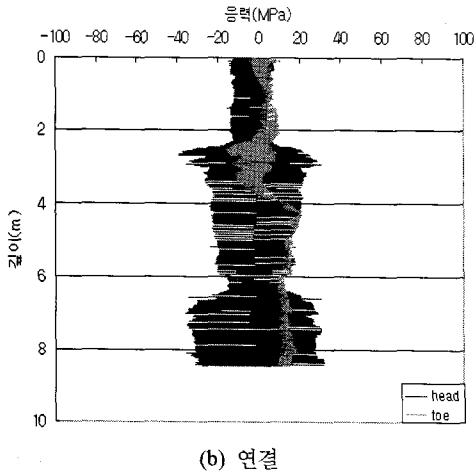


그림 7. 800×150×8mm 단면의 응력

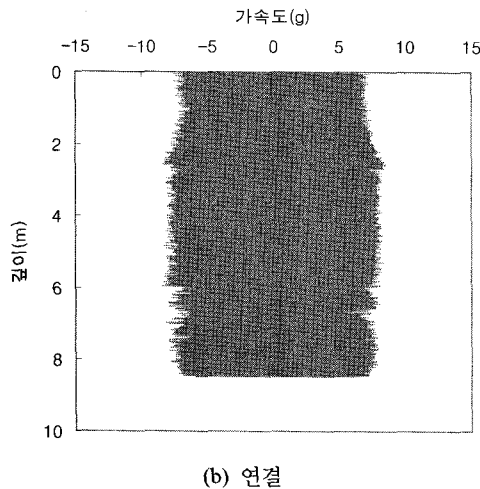
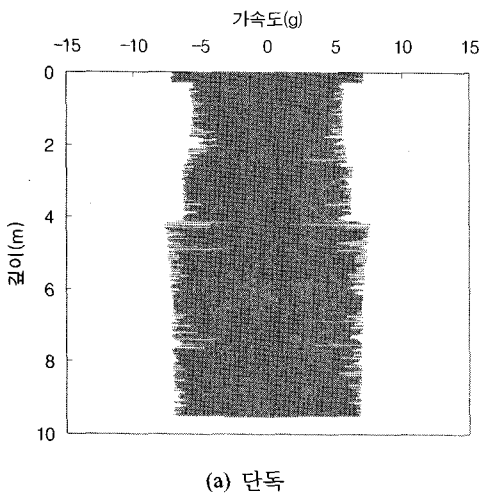


그림 8. 800×150×8mm 단면의 가속도

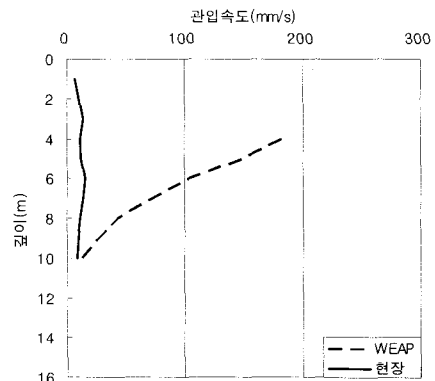
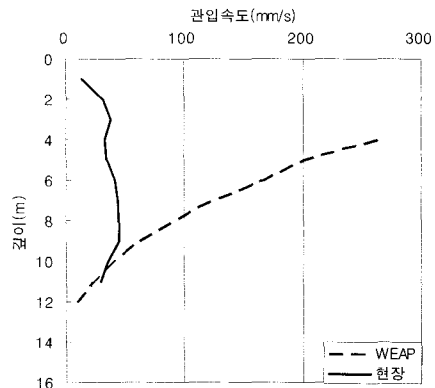
3.3 가속도계 측정결과

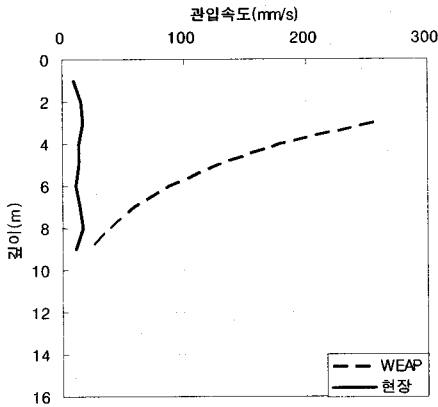
광폭 Hat형 널말뚝 단면에 대한 가속도 측정결과는 그림 8과 같다. 그림 8은 800×150×8mm 널말뚝 단면의 두부에 부착한 가속도 측정 결과이며, 그래프는 0.05초 간격의 값을 사용하여 나타내었다. 가속도는 전 영역이 음(-)과 양(+)이 대칭으로 나타났으며, 연결 시공한 경우의 가속도 진폭이 단독 시공한 경우보다 큰 것으로 나타났으며, 그 최대 값은 10g 이하로 나타났다.

3.4 WEAP 해석 결과와의 비교

(1) 관입속도

그림 9와 같이 단면별로 현장과 WEAP 해석시 관입속도를 비교하면, 최종 관입깊이는 비슷하나, WEAP 해석을 통해 나온 관입속도는 현장의 관입속도보다 현저히 빠르다. 이것은 현장에서 널말뚝을 시공할 때 지표면 근처에서는 보통 출력을 조절하여 관입속도를 늦춰 시공하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 9의 WEAP해석과 실제 시공의 관입속도 차이는 매우 큰 편이며, WEAP 해석 결과를 현장에 적용하기 위해서는 초기관입속도 및 현장조건을 고려할 수 있는 방법을 모색해야 할 것으로 보인다.



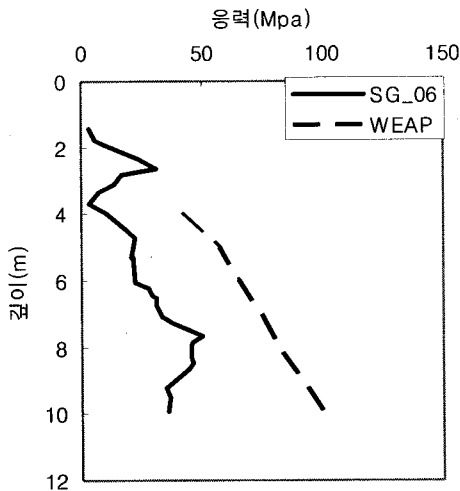


(c) 900×200×9mm 단면

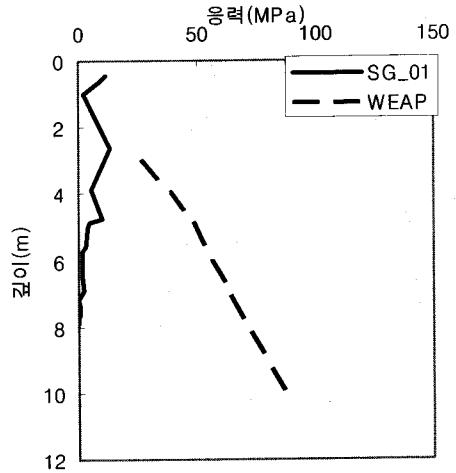
그림 9. 현장과 WEAP 해석의 관입속도 비교

(2) 향타응력

그림 10은 현장에서 측정한 변형율을 이용하여 실제와 WEAP으로 해석한 향타응력을 비교하였다. 그림 10에서 SG_06은 800×150×8mm 단면 상단에 설치된 변형률 게이지로 하나의 강널말뚝에서 측득된 응력 중 가장 큰 값을 나타내는 것으로 30초 단위 최대값을 연결하였으며, SG_01은 900×200×9mm 단면 하단에 설치된 변형률 게이지로 하나의 강널말뚝에서 측득된 응력 중 가장 큰 값을 나타내는 것으로 30초 단위 최대값을 연결하였다. 실제 측득 결과는 WEAP 해석을 통해 얻은 결과보다 훨씬 작은 값을 갖는 것으로 나타났다.



(a) 800×150×8mm 단면



(b) 900×200×9mm 단면

그림 10. 현장과 WEAP 해석의 향타응력 비교

4. 결론

광폭 Hat형 강널말뚝 시제품에 대하여 현장 실물 진동 향타시험을 실시한 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- 1) 지반조건에 따라 차이는 있으나 전반적으로 광폭 Hat형 강널말뚝의 관입속도는 기존 U형 강널말뚝에 비해 관입속도가 느린 것으로 나타났다. 그러나 단위폭당 관입시간을 고려하고, 또한 단위 폭당 시공 본수가 늘어남으로서 향타준비 시간이 길어진다는 점 등을 고려할 때 광폭 Hat형 강널말뚝의 시공성은 U형 강널말뚝과 큰 차이가 없다고 판단된다.
- 2) 강널말뚝의 두부와 선단에 설치한 변형률계 값의 해석 결과 향타시 발생하는 허용응력이 재료의 허용값보다 훨씬 작은 값을 나타내어 해석결과와의 일치성을 확인할 수 있었으며, 광폭 Hat형 강널말뚝의 현장 적용시 재료의 지내력 관점에서 문제가 없음을 확인할 수 있었다.
- 3) 강널말뚝 두부와 선단에 부착한 가속도계로 측정한 가속도 값은 강널말뚝 단면 크기에 따라 약간의 차이를 보이거나 최대값이 10g를 넘지 않았다.
- 4) 시험을 통해 구한 널말뚝의 관입속도를 WEAP 프로그램에 의한 관입속도와 비교한 결과 얇은 시공깊이에 대해서는 두 값 사이에 큰 편차를 보였으나 깊이가 깊어짐에 따라 유사한 관입속도값을 보였다. 얇은 깊이에서의 이러한 편차는 향후 추가적인 연구를 통해 줄여나가야 한다.

참고문헌

[1] Viking, K., Vibro-driveability, "A field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils", Doctorial thesis, Div. of Soil and Rock Mechanics, Royal Inst. of Technology, Stockholm, Sweden. 2002.

[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] GRLWEAP 2005 Manual, "Wave Equation Analysis of Pile Driving", BasisSoft Inc., 2005.

[4] Ferron, Daniel, Eindringverhalten von Spundwandentbohlen und Rambarkeit von Boden bei der Vibrationsstrammung., Diplomarbeit Nr. 326653, Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau, Univeritat Kaiserslautern, p.153, 2001

[5] 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

김 재 규(Jac-Kyu Kim)

[정회원]



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

<관심분야>
토질역학, 기초공학

백 인 철(In-Chul Back)

[정회원]

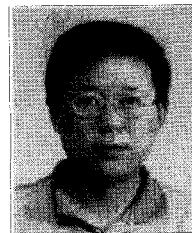


- 2006년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

<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 토목공학과 부교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학