Set-up 효과를 반영한 말뚝의 파동이론해석
Consideration of Set-up Effect in Wave Equation Analysis of Piles

천 병 식[*1]
Chun, Byung-Sik
조 천 환[*2]
Cho, Chun-Whan

Abstract

The bearing capacity of piles driven in soils showing set-up tendency increases with time. Though WEAP is an excellent tool for evaluating the driveability of driven pile, it has some limitations to predict reliable bearing capacity of pile after driving. It is because the existing WEAP method can not take into account time dependent soil properties after driving. The set-up effect should be accounted for to obtain a reliable bearing capacity by the WEAP. Unfortunately, there are no sufficient methods to take the set-up effect into cosideration in wave equation analysis. This paper suggests an alternative to consider time effect in wave equation analysis through statistical analysis of dynamic load test data both at the end of driving and in the beginning of restrike. It is shown that the suggested parameters(quake and damping) would be more reliable than the existing one for the wave equation analysis of driven piles.

요 지

Set-up 현상이 나타나는 지반에 항타된 말뚝의 지지력은 시간경과에 따라 지지력이 증가하게 된다. 파동이론해석법(WEAP해석법)은 말뚝의 항타관입성을 평가하는데 매우 유용한 것으로 평가되고 있다. 그러나 기존의 WEAP 해석법은 항타후 변화하는 지반의 강도특성을 고려할 수 없다는 측면에서 재항타시의 신뢰도 있는 지지력을 예측하는데 한계가 있다고 평가된다. WEAP에 의한 항타말뚝의 지지력 평가가 신뢰성 있기 위해서는 set-up 효과가 반영되어야만 한다. 그러나 아직까지 이를 고려할 수 있는 만족할 만한 방법이 없다. 본 논문에서는 항타시와 재항타시의 동재하시험 결과 들을 통계분석하여 WEAP 해석시 set-up 효과를 반영할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 현장 시험결과와의 비교를 통해서, 제안된 변수(quake, damping)를 적용한 파동이론해석 결과는 기존의 방법보다 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.

Key words : WEAP, set-up, damping, quake, driven pile

[*1] 정회원, 한양대학교, 토목공학과, 교수
[*2] 정회원, 삼성물산(주), (02) 2145-6584

1. 서 론

Smith(1960)가 개발한 말뚝의 파동이론해석법(Wave Equation Analysis of Pile Driving, WEAP)은 원래 항타시(at the end of initial driving ; EOID) 말뚝의 관입성 및 지지력을 예측하기 위해 개발되었다. 그러나 WEAP은 항타후 일정기간이 경과한 시점의 재항타시(Restrike) 지지력을 예측하는 데에도 이용되고 있다. 시간경과효과(time effect)에 의해서 항타후 지반과 말뚝의 시스템은 시간에 따라 변화하는 성질이 있음에도 WEAP에서는 지반정수에 대한 단일 표준값 만을 제시하고 있으므로 WEAP으로부터 도출된 지지력은 측정값과는 물리적으로 다른 의미를 갖게 된다.

항타후 말뚝과 주변지반의 조건은 시간에 따라 변화하게 되고 지지력 특성 또한 시간경과에 따라 변화하므로 WEAP에 의한 말뚝의 지지력의 예측시에는 이러한 상태를 반영해야만 신뢰도있는 지지력을 얻을 수 있는 것이다. WEAP으로 항타말뚝의 지지력을 예측할 경우 항타시 저항력은 지금까지의 방법으로 유효하다 하더라도, 항타후 지지력을 예측하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 말뚝과 지반간의 상호조건, 즉 그림 1의 WEAP의 수치해석모델에서 지반의 저항변수, 지반의 탄성변위(quake)와 감쇠계수(damping상수)의 변화를 고려해야만 한다. 그 동안의 연구는 이러한 고려없이 WEAP으로 계산된 지지력을 정적지지력의 결과와 직접 비교하는 경우도 많이 있었다(Hannigan,1984 ; Parmar 등,1996).

상기의 점을 고려하여 Hunt 등(1988), York 등(1994)은 동적측정기의 결과를 WEAP의 입력자료로 활용함으로써 WEAP의 계산값이 측정값에 일치한다는 결과도 보고하였다. 그러나 Rausche 등(1996)의 최근 연구에서 조차 WEAP으로 항타시와 재항타시 두 시점의 지지력을 구하는 데 있어 동일한 표준지반정수를 입력하고 최종 타격당 관입량(set value) 만을 변화시킴으로써 항타시와 재항타시의 지지력을 구하여 비교하고 있다. 더욱이 실무에서는 WEAP에서 평가된 지지력을 장기지지력으로 직접 적용하는 경우도 자주 있다.

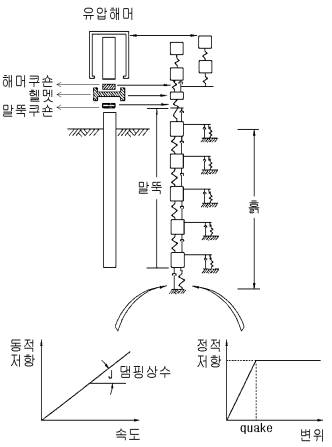

그림 1. 파동방정식의 수치해석 기본모델

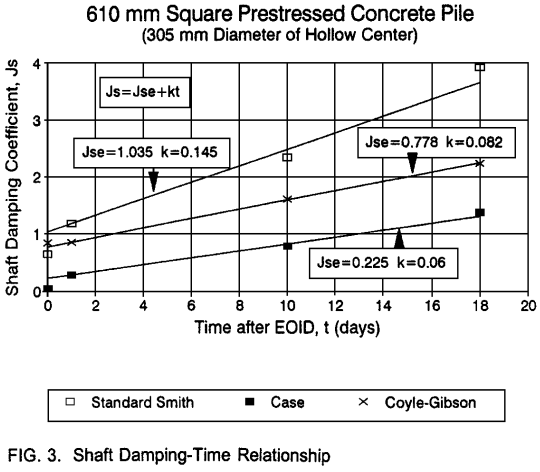

FIG. 3. Shaft Damping-Time Relationship

그림 2. 시간경과에 따른 damping상수의 변화

WEAP의 입력자료는 크게 지반조건, 말뚝조건, 해머조건으로 구분되며 시간경과효과를 반영하기 위해서는 지반조건을 고려할 수 있다. 이러한 점에 착안하여 최근에 Svinkin(1998)은 WEAP 해석시 시간 의존적인 흙의 저항특성을 반영하기 위한 주요 변수로 damping상수를 선정하여 WEAP을 이용한 역계산을 통해 시간경과에 따른 damping상수의 변화함수를 제안하였다(그림 2 참조). 그러나 Svinkin의 방법은 흙의 저항변수의 시간변화를 고려하는데 있어 WEAP의 각종 입력변수중 damping상수 만을 변화시킴으로써 지지력중 동적저항만을 고려하였고, 실제로 시간에 따라 크게 변화하는 정적 저항의 입력변수인 quake을 무시하였다.

또한 Svinkin의 방법을 적용하기 위해서는 시간경과에 따른 damping변화의 예측함수를 알아야만 이용이 가능한데 이것은 사전시험없이는 곤란하므로 계획단계에서 예측에 많이 활용되는 WEAP 해석시에는 의미가 없게 된다. 따라서 WEAP 해석이 보다 실질적이 되기 위해서는 시간경과에 따른 지반변화를 반영할 수 있는 저항변수의 제시가 필요하다. 이를 위해서 동일한 말뚝에 대해 항타시 및 재항타시에 측정 분석된 저항변수를 분석하여 비교 평가하는 것은 적절한 WEAP의 입력변수를 구하는 측면에서 의미가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 시간경과별로 측정한 동재하시험 데이타를 이용하여 토질별 지지력 증가비, 동적분석에 적용되는 흙의 저항변수(quake, damping)의 set-up효과에 대해서 통계분석을 실시하였다. 또한 통계분석자료를 바탕으로 set-up효과를 반영한 WEAP 해석을 실시할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이를 이용한 분석결과를 현장에서 측정한 실측자료와 비교함으로써 신뢰도를 확인하였다.

2. 분석방법

토질별 지지력증가비(set-up factor : 재항타시 지지력/항타시 지지력), 파동분석에 적용되는 흙의 저항변수(quake, damping)의 set-up효과에 대한 통계분석을 위해 28개 현장에서 시간경과별로 측정한 동재하시험 데이타를 이용하였다. 결과의 편중성을 배제하기 위해 동일현장에서는 2개 이하의 시험데이타 만을 취하였으며 총 말뚝수는 54개이다. 그러나 저항변수 분석시에는 데이타가 누락된 경우가 있어 총 46개의 말뚝이 분석되었다. 시험 데이타의 상세는 조(1998)에서 설명되었다.

분석자료들은 동재하시험을 통해 얻은 결과들로서 항타시와 재항타시의 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program ; GRL,1996)해석 결과 들로 구성되었는데, 재항타시의 자료들이 여러 개일 경우는 최종시점의 자료를 선택하였다. 대부분의 재항타 시험자료들은 해머용량 및 말뚝재료강도의 한계로 인해 말뚝이 충분히 모빌라이즈(mobilize)되지 않았으므로 지지력 증가비는 Davisson 판정에 의한 항복하중의 비교, (항타시의 선단지지력+재항타시의 주면마찰력)/항타시의 지지력중 큰 값을 선정하였다.

이용된 자료수가 충분치 않으므로 말뚝의 종류는 구분하지 않았지만 선단조건은 개단 및 폐단으로 구분하였다. 토질종류는 자료수의 제한으로 다양한 종류로 구분하지 못하였다. 선단부의 경우 선단 위치의 토질을 사질토(S), 점성토(C), 실트질모래(SM), 모래자갈(SG) 등 4종류로 구분하고, 주면부의 경우 사질토(S), 점성토(C), 실트질모래(SM) 등 3종류로 구분하였다. 실트질모래는 대부분 우리나라에서 지지층으로 많이 이용되는 풍화잔류토에 주로 해당된다. 주면부는 일반적으로 말뚝의 관입깊이에 걸쳐 층상으로 이루어진 경우가 대부분이지만 주면지지력에 가장 큰 영향을 주는 층의 토질종류로 분류하였다.

CAPWAP 방법은 시행착오에 의한 signal matching 방법으로 지지력과 토질변수를 구하는 것이므로 분석시 이러한 입력변수들이 상호 영향을 주어 도출된 결과에 뚜렷한 경향이 나타나지 않을 가능성도 있지만, Svinkin의 방법에서와 같은 문제를 피하고 여러 변수를 일시에 구하기 위해서는 signal matching의 정도(matching quality ; MQ)가 높은 가능한 많은 자료를 통계분석하는 방법이 적절하다고 판단된다.

통계분석에 이용된 자료들은 전술한 바와 같이 CAPWAP 해석결과이므로 이를 바탕으로 결정한 WEAP 해석용 제안치 역시 한계를 포함하고 있을 수 있다. 따라서 제안값에 대한 적용성을 분석하기 위해 제안값과 WEAP의 표준값을 이용하여 6개현장에 대해 WEAP해석(GRL,1996)을 실시하였다. 대상 시험말뚝은 현장당 4개의 자료를 선정하여 총 24개의 데이타를 분석하였다.

WEAP 해석시에는 비교대상의 정확도를 높이기 위해 WEAP 해석결과중 전달된 타격에너지(EMX), 타격력(FMX)을 실측값과 10% 이내로 조정한 후 단위 미터당 타격수(blows per meter, BPM)에 해당하는 지지력을 산출하여 실측지지력과 비교하였다. EMX와 FMX의 동시 조정이 어려운 경우는 EMX를 기준으로 분석하였다. 이외 입력조건(마찰력비, 말뚝조건, 마찰력 분포, 해머조건 등)은 시험조건 및 CAPWAP 분석 결과를 기준하였다.

분석된 WEAP 해석결과의 신뢰도를 통계적으로 분석하기 위해 본 연구의 제안 변수와 WEAP의 표준변수로 산출된 각각의 결과와 실측치의 비를 확률밀도함수(probability density function)로 표현하였다. 확

률밀도함수에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 비교값의 분포가 0 ∞이고 함수곡선의 형상이 비대칭인 것을 고려하여 대수정규확률분포함수(log normal probability density function)를 적용하였다.

3. 분석결과

그림 3은 항타시에 대한 재항타시 지지력비 즉, 지지력 증가비(set-up factor)를 주면부의 토질종류별로 통계분석한 것이다. 그림 3에서 m은 평균값, SD는 표준편차, N은 분석 자료수를 의미한다. 지지력 증가비는 흙의 입자가 작을수록 크게 나타나고 있으며 이의 평균값은 사질토에서 1.5, 실트질모래에서 1.5, 점성토에서 2.5 정도가 됨을 알 수 있다. 이러한 값은 WEAP이나 FHWA(US DOT,1996)의 제안값(표 1 참조)보다 약간 크지만 전술한 바와 같이 재항타시험 결과의 대부분이 극한지지력에 미치지 못하는 것을 감안하면 보수적인 값으로 평가할 수 있다.

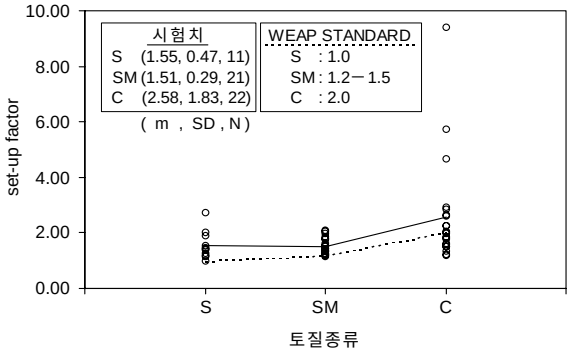

그림 3. set-up factor

표 1. 토질종류별 지지력증가비(WEAP,FHWA)

말뚝주면의 유력한 토질종류	지지력증가비 (보수적인 값임)
Clay	2.0
Silt - Clay	1.0
Silt, Sand - Clay	1.5
Sand - Silt, Fine Sand	1.2
Sand, Sand - Gravel	1.0

사질토와 점성토에서는 지지력증가비의 분산도가 비교적 큰데 표준편차를 벗어난 데이타의 지질주상도를 분석해 보면 하상퇴적토가 대부분인 것으로 보아 set-up 효과는 입자의 크기뿐만 아니라 조성이력에도 영향을 받는 것으로 판단된다. 조(1998)는 일반적으로 알려진 것과는 달리 사질토의 경우라 하더라도 하상퇴적토에서는 다짐정도 및 광물조성이 set-up 효과에 큰 영향을 미치는 것으로 보고하고있다.

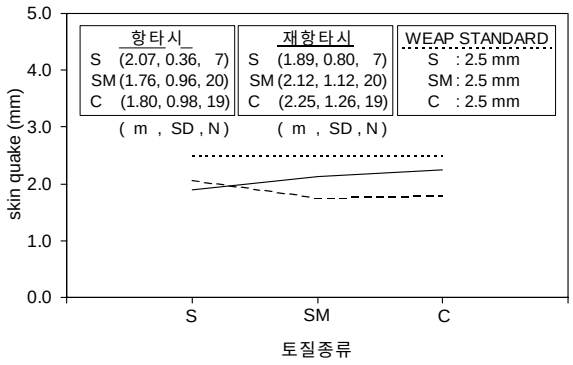

그림 4. 주면부의 토질종류별 항타시 및 재항타시 quake 값의 변화

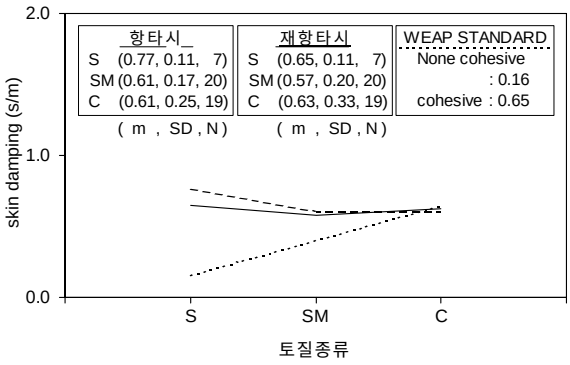

그림 5. 주면부의 토질종류별 항타시 및 재항타시 damping상수의 변화

그림 4는 말뚝의 주면부에서의 quake 값을 토질별로 항타시와 재항타시에 대해 비교·분석한 것이다. 주면부의 평균 quake 값은 그림 4에서와 같이, 항타시 및 재항타시 모두 토질별로 거의 변화가 없어 뚜렷한 경향은 나타나고 있지 않다. 평균 quake값의 분포는 항타시 및 재항타시 구별없이 2.0±0.2(mm) 정도이며 이것은 WEAP의 제안값, 2.5 mm 보다 작은 것으로 나타났다.

그림 5는 말뚝의 주면부의 토질종류에 대한 Smith damping(이하 damping) 상수를 항타시와 재항타시에 대해서 비교·분석한 것이다. damping상수는 토질별로나 시간경과에 따라서 뚜렷한 경향이 없는 것으로 나타났으며 평균 damping상수의 분포는 시간경과 및 토질종류에 관계없이 0.65±0.1(s/m) 정도로 damping상수의 절대치에 있어서도 실측치가 WEAP의 제안치보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 값은 WEAP에서 토질별로 제시하는 표준치와는 차이를 보여주고 있는데 이는 현장의 토질구조가 표준값의 구분처럼 단순하지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 시간경과별 주면부 damping상수의 차이가 크지 않은 것은 타격시 말뚝의 입자속도에 관련된 것으로 평가된다. 즉, 표 2에서와 같이 시험자료들의 최대입자속도(VMX ; 주면부의 값을 대표하는 것으로 간주할 수 있음)를 분석해 본 결과 주면부에서의 항타시 및 재항타시의 입자속도는 타격에너지(EMX)에 주로 영향을 받는 것으로 보아 선단부와는 달리 주면부의 damping상수는 set-up효과와 크게 관계가 없는 것으로 평가된다.

표 2. 재항타시에 대한 항타시의 최대입자속도 비교

	최대 입자속도비	최대 에너지비	선단부의 입자속도비	선단부의 에너지비
평 균	0.94	0.89	1.69	3.26
표준편차	0.19	0.19	0.87	4.80
자 료 수 (개)	43	43	43	43
비 고	VMX	EMX	V_{toe}	E_{toe}

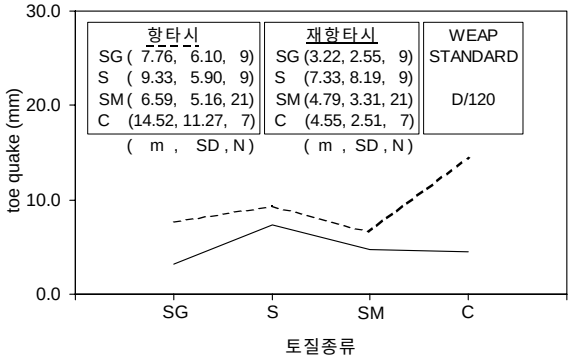

그림 6. 선단부의 토질종류별 항타시 및 재항타시 quake 값의 변화

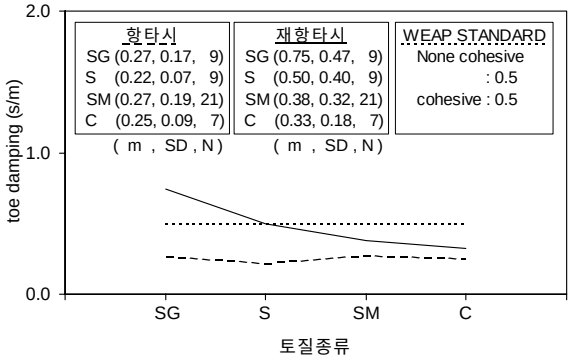

그림 7. 선단부의 토질종류별 항타시 및 재항타시 damping상수의 변화

그림 6에서와 같이 재항타시의 quake 값은 항타시의 그것에 비해 크게 감소했음을 알 수 있다. 이러한 경향은 점성토에서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있는데, 이는 시간경과에 따른 흙의 강도 경화가 다른 흙에 비해 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 사실로부터 WEAP 해석시 damping상수만을 고려한 Svinkin(1998)의 방법은 한계가 있음을 알 수 있다. 그림 6에서 보면 토질종류별 quake 값의 변화는 일정한 경향이 없는 것으로 분석되었는데 이는 quake에 대한 영향이 단순히 지반종류에만 국한되지 않은 것에 기인한다. 일반적으로 quake은 Davisson(1973)이 제안한 바와 같이 말뚝의 직경과 선형관계로 표현되고 있으며 말뚝 선단부의 모양에도 영향받는 것으로 알려지고 있다.

따라서 표 3에는 quake의 변화를 지반종류 및 시간경과 그리고 선단부의 모양에 따라 구분하여 분석하였다. 표 3의 회귀분석결과에 의하면 상관계수(r^2)는 전반적으로 비교적 낮은 것으로 평가되지만 전체적인 경향은 분명하게 나타나고 있다. 또한 WEAP에서 항타시 분석의 입력치로 제안하고 있는 Davisson의 quake 기준치, D/120(D는 말뚝직경)는 실측치(항타시 D/52, 재항타시 D/94)보다 작고, 특

히 항타시 값과는 큰 차이가 있음을 알 수가 있다.

앞서의 분석에서와 같이 시간경과에 따른 quake 값의 감소현상이 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수있다. 또한 전체적으로 보아 흙의 입자가 작을수록 quake 값이 크게 나타나고 있지만 SM에서는 약간 차이가 있음을 볼 수 있는데, 이것은 SM의 토질구분에 우리나라에서 지지층으로 많이 이용되는 풍화토와 풍화암이 포함되어 있는 것에 기인하는 것으로 생각된다.

선단모양에 따른 quake 값의 변화를 살펴보면 역시 시간경과에 따라 quake 값이 감소하고, 폐단말뚝보다 개단말뚝에서 quake 값이 작게 나타나고 있는데 이는 개단말뚝의 폐색(plugging)효과에 기인하는 것으로 판단된다.

그림 7은 말뚝선단부의 토질별 damping상수를 항타시와 재항타시에 대해 비교·분석한 것이다. 그림 7에서와 같이 시간경과에 따라서 damping상수가 증가하고 있는데 이는 set-up효과에 의한 지반강도의 증가 및 재항타시의 에너지 수준에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 표 2에서와 같이 재항타시에는 말뚝의 주면부 및 선단부근 지반의 강도가 증가됨에 따라 선단부의 속도는 상대적으로 작아지게 되므로 damping상수가 상대적으로 커지는 것으로 평가된다. 세립토일수록 재항타시 damping상수의 증가량이 작은 것은 항타 이후 재항타시험 시점의 상대적인 차에 의한 것으로 보인다.

항타시 선단부의 damping상수는 지반조건에 거의 영향받지 않고 평균값도 0.25±0.02(s/m) 정도로 WEAP의 제안치(0.5 s/m)보다 훨씬 작게 나타나고 있으며, 재항타시의 평균 damping상수는 WEAP의 제안치와 유사함을 알 수가 있다.

표 3. 지반조건별 시간경과 및 선단부 모양에 따른 quake 값의 변화

구분 \ 구분		항타시 (EOID)			재항타시 (Restrike)			비고
		회귀식	상관계수(r^2)	표준편차	회귀식	상관계수(r^2)	표준편차	(데이타수)
지반 종류	C	D/25	0.53	10.31	D/80	0.64	2.07	7개
	S	D/51	0.52	7.06	D/72	0.45	9.53	9개
	SM	D/62	0.21	5.40	D/87	0.34	3.59	21개
	SG	D/71	0.54	7.36	D/177	0.61	3.17	9개
전체		D/52	0.28	7.64	D/94	0.39	5.10	46개
선단 모양	개단	D/58	0.10	3.83	D/102	0.54	4.07	23개
	폐단	D/47	0.34	10.14	D/88	0.32	6.03	23개

4. 분석결과의 적용 및 신뢰도

전술한 바와 같이 현장에서 측정된 지지력증가비와 항타시 지반의 저항변수는 WEAP에서 제안하는 표준값과 상당히 차이가 있음을 알 수 있으며 이러한 차이는 주로 말뚝지지력의 set-up효과에 기인하는 것으로 분석되었다. 따라서 분석결과를 정리하여 말뚝지지력의 set-up효과를 반영할 수 있는 WEAP 해석을 위한 새로운 값을 표 4와 같이 제안하였다.

동적분석에 적용되는 저항변수는 사실상 흙의 고유한 특성이 아닌 시험 당시의 조건(시험시점, 입자속도, 토질종류 및 성상 등)에서의 값으로 항상 변화의 여지가 있게 된다. 따라서 실내시험 등 일정한 조건하에서 동적분석의 입력변수를 구하기 위한 각종의 연구가 Reese 등(1964), Coyle 등(1970)에 의해 있었지만 결국 이들은 현장조건을 대표한다고 볼 수 없는 바 표 4에서 제시한 바와 같이 많은 현장조건에서 도출된 신뢰도 있는 결과를 이용하는 것이 더 바람직하다고 생각된다. 즉, 이러한 값 들은 특정시료에 대한 절대값이 아닌 현장을 대표하는 일종의 평균값을 의미하게된다.

표 4에서 지지력증가비는 분석데이타중 표준편차를 벗어난 값을 제외한 평균값인데 재항타시 충분한 지지력을 측정하지 못한 상황까지 고려하면 상당히 보수적인 값으로 평가할 수 있다. WEAP에서 제안하는 표준값은 측정값과 비교할 때 전체적으로 재항타시(Restrike)의 값에 더 근접함을 알 수 있다. 실트질모래는 우리나라에서 지지층으로 주로 이용되는 풍화잔류토층으로 된 입경에 의한 토질분류(실트질

모래)와는 달리 강도 및 이의 증진효과가 비교적 큰 것으로 나타나고 있다. 표 4의 제안값은 파동이론 해

표 4. set-up효과를 반영할 수 있는 WEAP 해석을 위한 제안변수

구 분	항타시(EOID)				재항타시(Restrike)				set-up factor
	주면부		선단부		주면부		선단부		
	quake	damping	quake	damping	quake	damping	quake	damping	
	(mm)	(s/m)	(mm)	(s/m)	(mm)	(s/m)	(mm)	(s/m)	
점 성 토	2.0 (2.54)	0.65 (0.65)	D/25 (D/120)	0.25 (0.5)	2.0	0.65	D/80	0.5	2.0 (2.0)
사질토층	2.0 (2.54)	0.65 (0.16)	D/50 (D/120)	0.25 (0.5)	2.0	0.65	D/70	0.5	1.3 (1.0)
자갈혼합층	2.0	0.65	D/70	0.25	2.0	0.65	D/180	0.5	-
풍화잔류토	2.0	0.65	D/60	0.25	2.0	0.65	D/90	0.5	1.5
비 고			개단말뚝은 1.2배 감소				개단말뚝은 1.2배 감소		

주) ( )은 WEAP에서 제안하는 표준값임

표 5 실측치(CAPWAP)에 대한 WEAP 해석 결과비

말뚝번호 (시험현장)	최대 타격력				최대 전달에너지				극한지지력			
	ER	ES	RR	RS	ER	ES	RR	RS	ER	ES	RR	RS
포항1	0.90	1.19	1.00	1.00	1.12	1.10	1.11	1.11	0.94	1.04	0.93	0.88
포항2	1.01	1.21	0.98	1.11	0.97	0.93	1.10	1.05	1.04	1.12	0.89	0.98
포항3	1.00	1.24	1.20	1.36	1.05	0.97	0.91	0.91	1.04	1.13	0.99	1.11
포항4	1.02	1.27	1.27	1.51	0.95	0.91	0.91	0.92	1.04	1.16	0.94	1.11
광양1	0.99	1.19	1.09	1.26	1.05	1.04	0.94	0.92	1.01	1.11	1.00	1.09
광양2	0.99	1.15	1.17	1.51	1.05	1.05	0.92	0.92	0.98	1.08	0.98	1.11
광양3	0.96	1.16	1.10	1.37	1.07	1.07	0.90	0.90	1.00	1.11	0.99	1.10
광양4	0.96	1.12	1.09	1.25	1.09	1.11	1.06	1.06	0.94	1.10	0.97	1.10
시흥1	1.02	1.27	1.03	1.14	1.01	0.97	0.99	0.98	0.98	1.06	1.02	1.15
시흥2	0.96	1.22	1.00	1.10	1.02	0.97	1.01	0.99	1.05	1.14	0.99	1.14
시흥3	1.04	1.10	1.01	1.06	1.00	1.00	1.10	1.08	0.95	1.07	0.93	1.12
시흥4	1.03	1.23	0.97	1.00	0.98	0.95	1.04	1.04	1.11	1.16	1.00	1.17
영종도1	1.13	1.13	1.07	1.06	0.94	0.94	0.99	0.99	1.08	1.05	1.06	1.06
영종도2	1.09	1.09	1.11	1.11	0.95	0.95	0.96	0.96	1.05	1.02	1.00	0.99
영종도3	1.07	1.06	1.03	1.01	0.97	0.97	1.02	1.02	1.03	0.94	0.91	0.87
영종도4	1.03	1.15	1.08	1.08	0.94	0.93	1.01	1.01	1.03	0.98	0.92	0.90
동해1	1.00	0.96	1.08	1.00	0.93	0.93	0.92	0.94	1.28	1.48	1.18	1.48
동해2	1.05	1.00	1.07	0.99	0.99	0.99	0.92	0.97	1.13	1.35	1.12	1.40
동해3	1.06	1.00	1.10	1.00	1.02	1.03	0.91	0.95	0.99	1.15	1.04	1.24
동해4	0.98	0.96	1.00	0.94	1.06	1.07	1.02	1.09	1.04	1.42	0.96	1.17
부산1	1.02	1.02	1.10	1.14	0.93	0.94	0.91	0.92	1.14	1.39	0.99	0.96
부산2	1.01	1.18	0.99	1.08	1.01	0.93	0.99	0.97	0.96	1.18	1.04	1.05
부산3	1.11	1.11	1.09	1.09	1.01	1.02	1.00	1.00	0.94	1.08	0.84	0.84
부산4	1.02	1.13	1.26	1.31	1.02	0.97	0.96	0.93	0.93	1.19	0.98	0.99
평 균	1.02	1.13	1.08	1.15	1.01	0.99	0.98	0.98	1.03	1.15	0.99	1.08
표준편차	0.05	0.09	0.08	0.16	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.13	0.07	0.15

주) ES, RS : WEAP 의 표준변수에 대한 항타시 및 재항타시의 조건
ER, RR : 본 연구의 제안변수에 대한 항타시 및 재항타시의 조건

석시 기준치로서 현장상황에 따라 적의 조정할 수 있으며, 특히 시간경과에 따른 말뚝의 저항력을 결정하는데 적용될 수 있다고 판단된다.

표 4의 제안값에 대한 신뢰도를 분석하기위해 6개 현장의 24개 실측치에 대한 WEAP 해석결과의 비교 내용을 표 5에 정리하였다. 표 5에서와 같이 본 연구의 제안값을 이용한 결과는 WEAP의 표준값을 이용한 결과보다 실측치에 더 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히 표준값을 적용한 WEAP 해석결과중 최대타격력(FMX)은 전달에너지(EMX)가 유사함에도 실제조건과 차이가 있는 것으로 보아 항타관입성 분석시에도 오차를 줄 수 있는 것으로 평가된다.

그림 8에서 그림 11은 제안변수를 이용한 WEAP 해석 결과의 신뢰도를 파악하기 위해 표 5의 내용을 대수정규분포함수로 나타낸 것이다. 그림 8과 그림 9의 평균, 분산,변동계수(표준편차/평균) 등으로 판단할 때 제안값을 사용한 항타시 및 재항타시의 WEAP 해석결과 모두 표준값을 사용한 것 들 보다 신뢰도가 있는 것으로 평가할 수 있다. 특히 그림 10과 그림 11은 항타시 타격력과 전달에너지 비를 확률밀도함수로 나타낸 것인데 전달된 에너지는 표준값 및 제안값에 있어 모두 실측치와 일치함에도 불구하고, 타격력은 표준값으로 분석한 결과의 경우 실측치와 차이가 있는 것으로 보아 표준값을 이용할 경우 항타관입성 분석시에 오차를 줄 수 있을 것으로 판단된다.

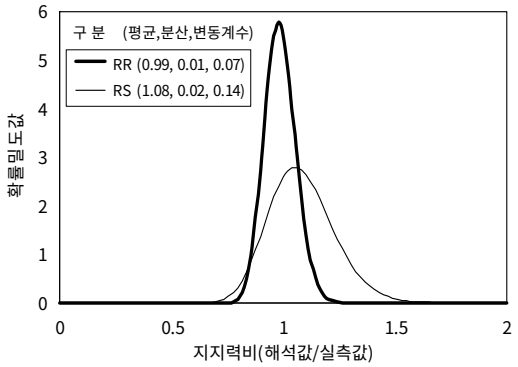

그림 7. 실측지지력에 대한 WEAP 해석값의 대수정규분포(재항타시)

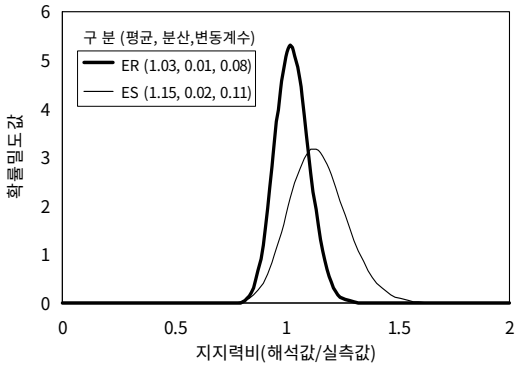

그림 8. 실측지지력에 대한 WEAP 해석값의 대수정규분포(항타시)

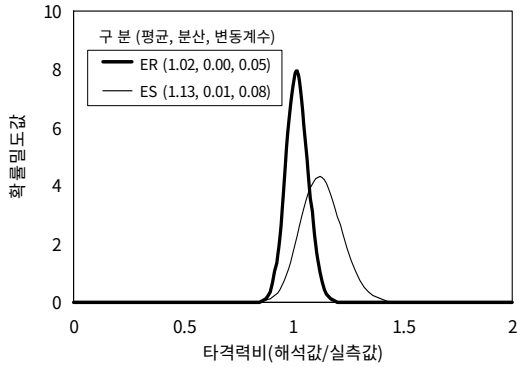

그림 9. 실측타격력(FMX)에 대한 WEAP 해석값의 대수정규분포(항타시)

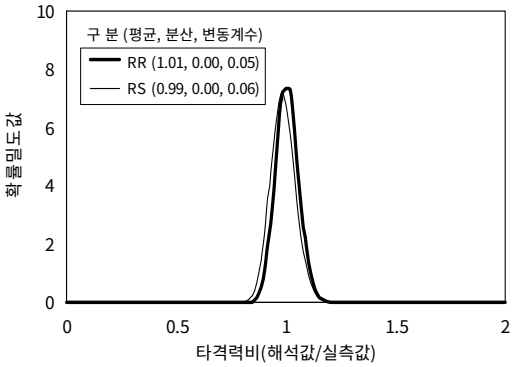

그림 10. 실측에너지(EMX)에 대한 WEAP 해석값의 대수정규분포(항타시)

5. 결 론

항타후 말뚝의 지지력은 시간경과에 따라 변화하게 되므로 WEAP에 의한 말뚝지지력의 예측시에는 이러한 상태를 반영해야만 신뢰도 있는 지지력을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 54개 말뚝에 대해 항타시와 재항타시의 동재하시험을 실시하여 얻은 결과를 이용하여 기존의 WEAP제안치와 비교한 결과 상

당한 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 분석결과를 바탕으로 set-up효과를 반영할 수 있는 새로운 WEAP 해석용 지반저항변수(damping, quake)를 제안하였다.

제안된 지반저항변수를 이용하여 WEAP 해석을 실시하고 실측치와 비교하여 이의 신뢰도를 평가해 본 결과, 기존의 WEAP에서 제안된 표준치보다는 실측값에 가까운 향상된 결과를 주고 있는 것으로 나타났다. 향후 더욱 많은 자료가 축적되어 보다 구체적이고 현장조건을 더욱 잘 반영할 수 있는 입력치가 제시되기를 기대한다. 항타후 시간경과에 따른 지지력의 변화는 본 연구에서 검토한 set-up 효과가 나타나는 것이 일반적이지만 특수한 토질조건 및 토성상태에서는 relaxation 효과도 간혹 나타날 수 있음에 유념해야 한다.

참고문헌

1. 조천환(1998), “시간경과에 따른 타입말뚝의 지지력증대 특성에 관한연구”, *박사학위논문*, 한양대학교, pp.193.
2. Coyle, H.M. and Gibson, G.C.(1970), "Empirical Damping Constants for Sand Caly", *Journal of the Soil Mechanics. and Foundation Division*, ASCE, Vol. 96, SM3, pp.949 965.
3. Davisson M.T.(1973), "High Capacity Piles", *Soil Mechanics Lecture Series*, Soil Mechanics and Foundation Division, Illinois Section of ASCE, pp.81.
4. GRL Associates, Inc.(1996), *CAPWAP User Manual*
5. GRL Associates, Inc.(1996), *GRLWEAP User Manual*
6. Hunnigan, P., J.(1984), "Large Quake Development During Driving of Low Displacement Piles", *Proceedings of the 2nd International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, pp.126 133.
7. Hunt S.W. and Baker C.N.(1988), "Use of Stress-Wave Measurements to Evaluate Piles in High Set-up Conditions", B. Fellenius (ed.), *Proceedings of the Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles,* BiTech Publisher, Ottawa, pp.689-705.
8. Parmar, H. and Brown, D.(1996), "Comparison of Dynamic and Static Methods of Evaluating Static Pile Capacity", *Conference Papers, 6th Int. Conf. and Exhibition on Piling and Deep Foundations*, Bombay, pp.4.6.1. 4.6.6.
9. Smith, E.A.L.(1960), "Pile Driving Analyses by the Wave Equation", *Journal of the Soil Mechanics. and Foundation Division,* ASCE, Vol. 86, pp.35 61.
10. Rausche,F., Thendean,G., Svinkin,M. and Likins,G.(1996), "Wave Equation Correlation Studies", *Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles,* pp.144-162.
11. Reese, J.L. and Forehawd, P.W.(1964), "Prediction of Pile Capacity by the Wave Equation", *Journal of the Soil Mechanics. and Foundation Division*, ASCE, Vol. 90, SM2, pp.1 25.
12. Svinkin M. R and R. D. Woods(1998), "Accuracy of determining Pile Capacity by Dynamic Methods", *Conference Papers, 7th International conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations*, Austria, 1998, pp.1.2.1-1.2.8.
13. York D.L., Brusey W. G., Clemente F.M. and Law S.K.(1994), "Setup and Relaxation in Glacial Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120(9), pp.1498-1513.
14. US Dpt. of Transportation(1996), *Design and Construction of Driven Pile Foundation*, Workshop Manual pp 16-1 17-70.