KGS Fall '98 National Conference / November 6 7, 1998 / Seoul / Korea

시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력증가

Time-Dependent Capacity Gain of Driven Piles

천병식[1], Byung-Sik Chun, 조천환[2], Chun-Whan Cho, 이명환[3], Myung-Whan Lee

[1] 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dpt. of Civil Engineering, Hanyang Univ.
[2] 삼성물산(주), (02) 2145-6584
[3] (주)파일테크, 대표, Principal, Piletech Consulting Engineers (02) 3402-2361

SYNOPSIS : When piles are driven into ground, ground conditions around pile are greately disturbed. The disturbed ground conditions are also gradually recovered with time after installation of piles. Accordingly, bearing capacity of piles is increased with time, and this phenomenon is reffered to as time dependent capacity(set-up or freeze) of driven piles. Set-up effect should be accounted in order to obtain a reliable bearing capacity of piles. Despite many related researches, set-up effect has not yet been considered in piling practice since it is not easy to quantify the effect. Some ideas to consider set-up effect are suggested in this paper

Key words : driven pile, set-up, bearing capacity, WEAP, dynamic formula

1. 서 론

말뚝이 지반내에 항타시공되면 항타관입에 따라 주변지반은 극심한 변화를 겪게 되며 이후 지반의 지지력은 시간에 따라 변화하게 된다. 이러한 지반조건의 변화는 말뚝이 설치된 이후 부터 시간경과에 따라 변화하게 되며 따라서 말뚝의 지지력도 시간의존적인 함수가 되는데 이를 말뚝지지력의 시간경과효과라고 부른다. 항타후 시간경과에 따른 말뚝의 지지력은 증가(set-up 또는 freeze)할 수도 있고 감소(relaxation)할 수도 있는데 대부분의 현장에서는 증가현상이 나타나는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 말뚝지지력의 증가현상에 대해서만 국한하였다. 그러나 relaxation이 일어나거나 set-up이 거의 일어 나지 않는 지반도 국내에서 보고(이명환 등,1998)되고 있어 이에 대한 주의가 요망된다.

일반적으로 시간 경과에 따른 지지력의 증가현상, 즉 set-up 효과는 지반조건별로 구분하여 설명할 수 있다. 점성토의 경우 지지력은 항타후 과잉간극수압의 소산, thixotropy 및 ageing 효과 등에 의해 증가되는 것으로 알려지고 있다(Skov 등(1988) ; Svinkin(1994) ; Paikowsky 등(1996)). 사질토의 경우도 지지력이 증가하게 되는데 이는 주로 항타후 과잉간극수압의 소산, 상대밀도의 변화, ageing효과 등으로 나타나는 것으로 보고되고 있다(Mitchel 등(1984) ; Preim 등(1989) ; Schmertmann (1991) ; Svinkin 등(1994)). 따라서 점성토의 경우 항타후 지지력은 상당한 시간에 걸쳐 증가하게 되지만, 사질토의 경우 과잉간극수압의 소산에 긴 시간이 걸리지 않아 지지력의 증가도 상대적으로 급속히 이루어진다. 결국, 사질토에서는 실무적으로 시간경과효과를 고려하지 않는 것이 일반적으로 받아 들여져 왔으나

근래들어 사질토에서도 과잉간극수압의 소산이후 ageing 효과 등에 의한 지지력 증가현상이 보고되고 있다.

시간경과효과에 의해 말뚝의 시공기준은 물론 설계지지력도 크게 달라질 수 있으므로 이를 무시할 경우 위험측과 안전측의 가능성이 상존하게된다. 시간경과효과에 대한 많은 연구에도 불구하고 아직까지 실무에서는 시간경과 효과를 적극적으로 반영하지 못하고 있는데 이는 시간효과에 따른 지지력 변화의 연구가 용이치 않고 정량화도 쉽지 않다는데 기인한다. 그러나 대규모 현장에서는 최적설계를 위해 시간별로 재하시험을 실시하여 그 지역에 적합한 시간경과에 따른 지지력변화 계수를 찾아서 이용하는 경우도 있다.

항타말뚝의 지지력을 예측하는 방법들은 시간경과효과를 배제하고는 사실상 논의가 곤란함에도 불구하고 시간경과 효과를 고려하지 않아 문제에 봉착하는 경우가 자주있다. 본 논문에서는 말뚝 지지력의 시간경과효과의 중요성과 이를 실무에 반영하는 방법에 대한 최근까지의 연구와 현장에서의 이의 거동을 분석한후 필요한 대안에 대해 고찰하였다.

2. 시간경과에 따른 지지력의 변화 및 측정

시간별로 지지력을 예측하는 데 있어 동재하시험은 효용성이 대단히 크고 또한 정재하시험 결과와 비교한 신뢰도도 우수한 것으로 알려져있다. 말뚝지지력에 대한 시간경과효과를 규명할 수 있었던 지금까지의 연구결과 들은 상당부분 동재하시험의 발전에 의존하였다고 볼 수 있다. 말뚝지지력의 시간경과효과를 규명하기 위해서는 항타직 후(end of initial driving, EOID)의 지지력을 측정하는 것이 필수적이며 이후 시간경과에따라 일련의 파괴하중(failure load)을 계속적으로 측정해야 하는데, 이러한 과정은 사실상 정재하시험으로는 거의 불가능 하다고 할 수 있다. 정재하시험에 있어 말뚝재료의강도 및 재하시험의 용량, 비용 및 시간의 문제를 해결한다 하더라도, 항타직 후의 재하시험수행은 해결할 수가 없다. 일반적으로 set-up 특성이 있는 지반에서는 항타직 후 지지력이 급속히 변화하는데(그림 1 참조) 정재하시험을 위해서는 항타후 최소한 1일 정도의 시간이 필요하기 때문이다.

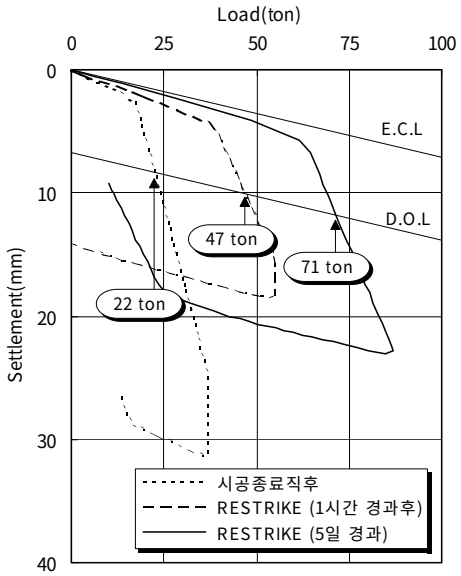


그림 1. 시간경과별 하중-침하량 곡선

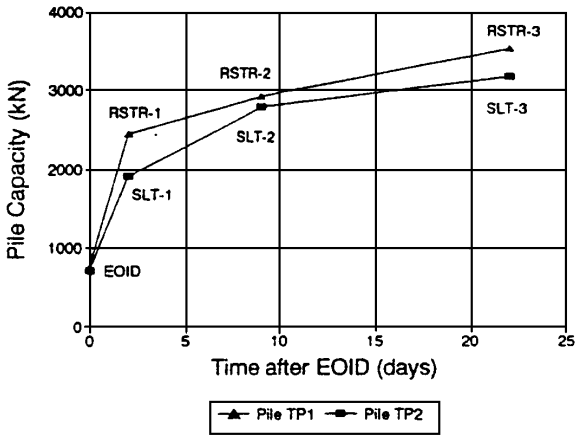


그림 2. 시간경과에 따른 말뚝지지력의 변화

시간효과를 확인하기 위한 정재하시험의 수행시 또 하나의 문제는 두 시험의 결과 비교가 곤란하다는 것이다. 두 종류의 시험은 하중을 도입하는 장치가 서로 달라 시험하중의 크기를 일치시키기가 어렵다. 결국 두 시험으로부터 도출된 지지력들은 비교 대상이 아니며, 또한 동재하시험의 경우 해석자의 능력

(홍헌성,1995), 정재하시험의 경우 지지력의 해석방법(천병식 등,1997)에 따라 지지력의 절대값이 차이가 크게 날 수 있다. 또한, 정재하시험 및 동재하시험으로 판정된 지지력은 시험당시의 지지력을 의미하며 이 크기는 시간에 따라 계속적으로 변화함에도 불구하고 정재하시험의 결과치를 변하지 않는 기준치로 생각하는 경우가 자주있다. 따라서 얻어진 지지력을 비교하기위해서는 두 종류의 시험시간이 서로 일치 해야 하는 데 현장에서의 실물시험인 경우 두 시험시간을 일치시키기가 사실상 곤란하다. 왜냐하면 set-up 이 일어나는 현장의 경우 항타 후 초기에는 수 시간 내에도 지지력의 차이가 큰 것이 일반적이기 때문이다(그림 1 참조). 항타후 상당한 시간이 지나 지지력의 증가속도가 둔화된 후 두 시험을 실시할 수도 있지만 실물말뚝인 경우 현장 여건이 여의치 않고 또한 이때에는 재하용량 또는 재료강도의 제한에의해 시험이 곤란한 경우가 있다.

따라서 말뚝지지력의 시간효과에 대한 검토는 동재하시험을 위주로 하되 필요에 따라 동재하시험을 검증하기 위한 정재하시험이 이루어지는 것이 바람직하다고 판단된다. 그림 2에는 이러한 예가 잘 나타나 있다. 정재하 시험으로 동재하시험을 검증할 경우에는 두 시험의 하중-침하량 곡선을 비교하되 반드시 두 시험의 시간차이와 순서 그리고 동재하시험에서는 타격수(blow number)를 고려해야한다. 그러나 정·동재하시험 비교에 관한 많은 연구에서는 두 시험을 비교하는 데 있어 언급한 내용을 간과 하는 경우가 자주 있다.

3. 시간경과에 따른 지지력의 예측

말뚝지지력의 시간효과에 대한 지금까지의 연구결과들은 실무에서 주로 나타나는 set-up 효과를 다루고 있다. 항타후 시간경과에 따른 지지력의 증가를 예측하는 것은 설계지지력을 결정하고 재하시험의 적절한 시간을 선정할 수 있다는 점에서 매우 경제적이고 유익하다고 할 수 있다. 따라서 최근까지 이에 대한 많은 연구가 이루어졌으며 이 연구결과들은 지반을 주요 토성에 따라 점성토와 사질토로 구분한 후 국부적인 시험자료를 이용하여 시간에 따른 지지력의 변화를 예측하는 식을 제시하였다.점성토에 관한 지지력의 예측방법에는 Skov 등(1988)이 제안한 후 Svinkin 등(1994), Paikowsky 등(1996)이 그것의 상관도를 연구한 바 있는 식(1)이 주류를 이루고 있다.

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = A \log_{10}(t/t_0) \qquad (1)$$

여기서, Q : 시간 t에서의 지지력

t : 초기항타후 경과시간

Q_0 : 시간 t_0에서의 지지력

t_0 : $Q-\log t$ 관계가 선형으로 시작되는 초기항타후의 경과시간

A : 토질종류별 보정계수

제안당시 Skov의 식은 점성토 및 사질토에도 적용되었지만 이후 Svinkin(1994), Paikowsky(1996) 등은 이 식이 점성토에 적합한 것으로 제안하였다. 그런데 Skov의 식은 시간경과에 따라 지지력 증가율이 감소하는 현상을 표현하기 위해 시간에 로그함수를 도입했지만 지지력 증가는 $\log t$에 무한정 비례하도록 표현됨으로써 최종적으로 수렴되는 장기강도(long-term capacity)를 무시했다. 또한 Skov의 식중에서 지반종류를 구분하는 변수, t_0는 시간 $t=0$에서의 지지력(항타시 지지력)을 로그함수에 적용할 수 없는 과정에서 도출된 것이고, 이는 실험결과를 분석한 후에 알 수 있다는 점에서 공학적으로도 의미가 없다. 그림 3에는 Skov 등(1988)이 제안한 방법에 대해 앞서 언급한 한계를 나타내었다.

사질토에 관한 지지력의 예측방법의 경우는 공통적으로 인정하는 방법은 없는 것 같다. Skov 등(1988)은 사질토의 경우도 식(1)과 같은 예측식을 제안하였지만 대부분의 연구는 오히려 사질토의 경우 Preim 등(1989), Svinkin 등(1994),이 등(1997) 이 제안한 바와 같이 지지력과 시간의 변화는 직선관계에 있는 것으로 받아들여지고 있다.

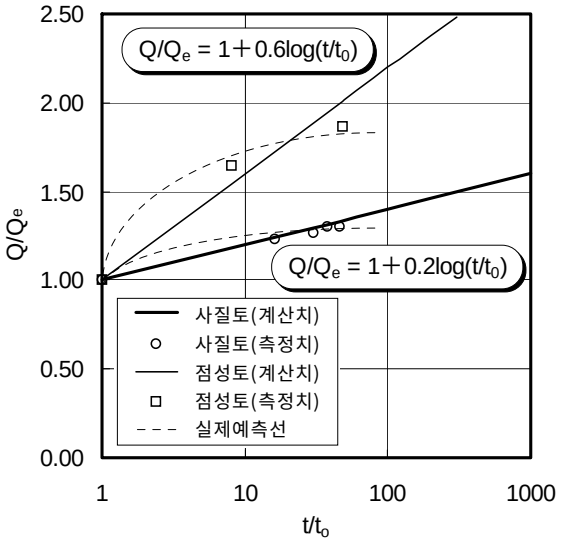


그림 3. Skov의 예측식과 실측치의 비교

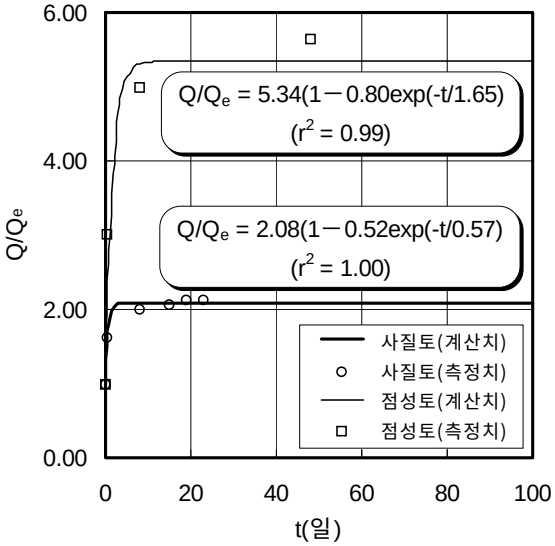


그림 5. 제안식과 실측치(Skov)의 비교

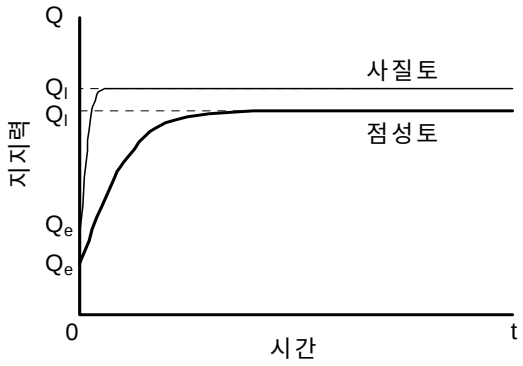


그림 4. 시간경과에 따른 지지력 증가

그러나 전술한 바와같이 시간경과에 따른 지지력 변화의 경향은 지반종류에 따라 달라지는 것은 아니며 다만 지반종류에 따라 곡선의 수렴 속도와 수렴치가 달라지는 것이라고 생각된다. 그림 4에는 시간경과별 지지력의 변화에 대한 전형적인 곡선을 실측자료를 이용하여 도시하였다. 그림에서와 같이 지지력증가 경향은 지반종류에 관계없이 같지만 지지력증가비(set-up factor)는 점성토에서 크고 지지력 증가 속도는 사질토에서 크게 나타난다.

시간경과에 따라 지지력이 증가하는 경향을 예측하는 것은 경제적인 설계 및 품질관리의 관점에서 대단히 중요하며 지금까지 각 종의 예측방법이 제안되었다. 그러나 이 방법들은 제한된 현장에서 시간경과별로 얻어진 지지력을 회귀분석하여 유도된 것이므로 다른현장에서도 이들을 일반적으로 적용하는 것은 문제가 있다고 판단된다.

시간경과에따른 말뚝의 지지력 증가현상은 기존의 연구결과 처럼 단순히 과잉 간극수압의 소산에 의존하지않으며 말뚝의 종류 및 크기는 물론 흙의 성상과 관련이 있으므로 현장별로 실측을 하지않고는 사실상 예측이 불가능 하다고 판단된다. 이러한 관점에서 시험시공을 실시하여 이 결과를 가지고 제안된 식으로 해당 현장의 지지력을 평가하는 것은 의미가 있다고 판단된다. 따라서 시간경과에 따른 지지력의 예측식의 연구도 이러한 관점에서 이루어져야 할 것이다.

그림 5는 시간경과에 따른 지지력의 증가현상을 수학적으로 풀어 얻어진 식을 그림 3의 자료에대해 적용한 것이다.이러한 식을 이용하면 소수의 시험결과를 이용하여 해당현장의 지지력은 물론 재하시험의 시점도 예측할 수 있다.

4. 파동이론분석시 시간경과효과의 고려

60년대초 Smith가 개발한 말뚝의 파동이론분석법(Wave Equation Analysis of Pile Driving, WEAP)은 원래 항타시(at EOID) 말뚝의 관입성 및 지지력을 예측하기 위해 개발되었다. 그러나 WEAP은 항타후 일정시간이 경과한 시점의 재항타시(Restrike) 지지력을 예측하는 데에도 이용되고 있다. 전술한 바와 같이 시간효과에 의해서 항타후 지반과 말뚝의 시스템은 시간에 따라 변화하는 성질이 있음에도 WEAP에서는 지반정수에 대한 단일 표준값 만을 제시하고 있으므로 WEAP으로 도출된 지지력은 실측값과는 물리적으로 다른 의미를 갖게 된다. 즉 항타시와 재항타시 말뚝주변지반의 거동은 크게 차이가 있는 데도 불구하고 지지력을 분석하는 지반정수는 단일값으로 이용하도록 되어있다.

상기의 점을 고려하여 York 등(1994)은 PDA 등의 동적 측정결과를 WEAP의 입력자료로 활용함으로써 WEAP의 계산값이 실측값에 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(그림 6 참조). 더욱이 실무에서는 아무런 고려없이 WEAP에서 평가된 지지력을 장기 지지력으로 직접 적용하는 경우도 자주있다.

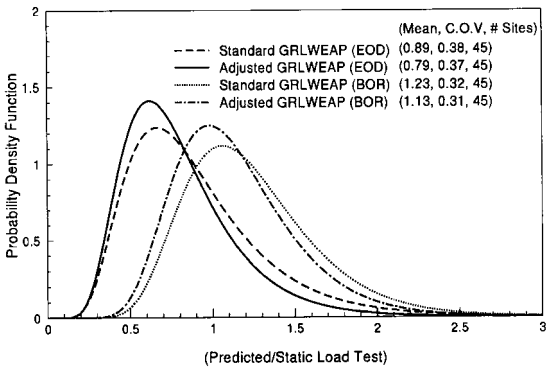


그림 6. 항타시와 재항타시의WEAP 분석결과

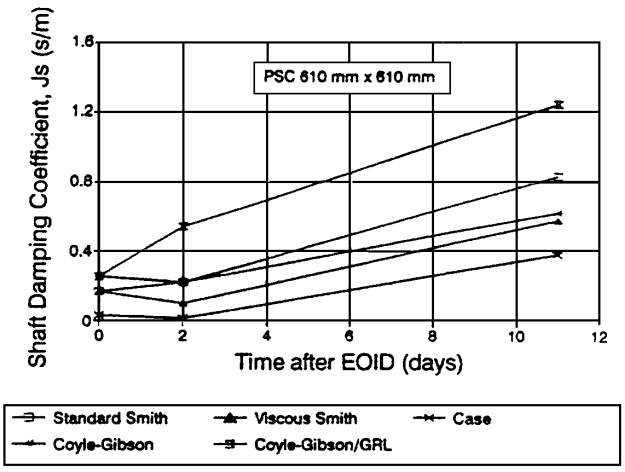
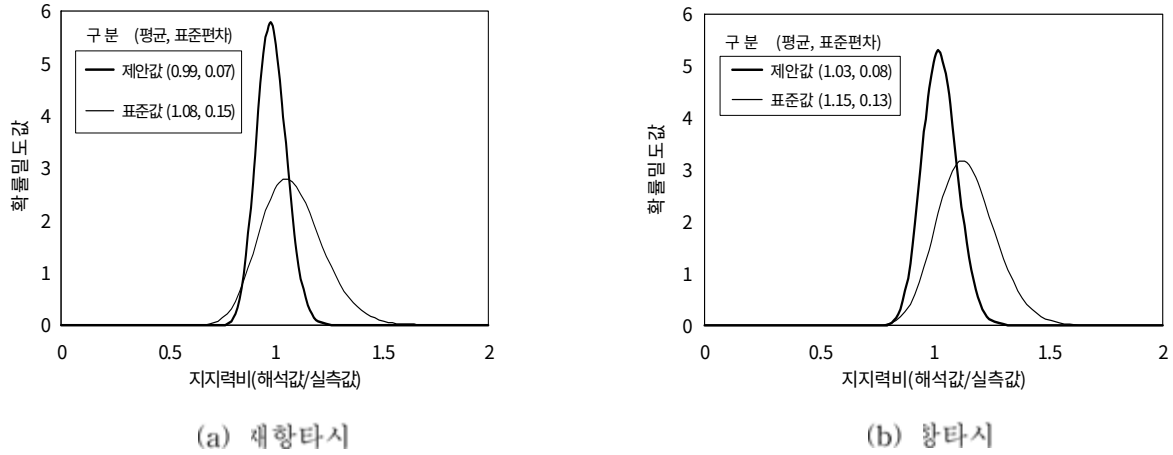


그림 7. 항타후 시간변화에 따른 댐핑상수의 변화

전술한 내용을 통해 WEAP 분석시에 대한 지금까지의 연구들은 시간경과효과를 적절히 반영하지 못하고 있음을 알 수 있다. WEAP의 입력자료는 크게 지반조건, 말뚝조건, 해머조건으로 구분할 수 있는데 시간경과효과를 반영하기 위해서는 지반조건을 고려하면 된다. 이러한 점에 착안하여 Svinkin(1998)은 WEAP으로 시간경과효과를 반영하기위해 댐핑상수(damping coefficient)만을 고려하도록 제안하였다(그림 7 참조). Svinkin(1998)의 이러한 제안 배경에는 시간경과에 따른 말뚝의 입자속도의 변화 고찰, 댐핑상수에 대한 고찰 등의 훌륭한 연구가 있었지만 시간경과에 따른 지지력의 주 영향인자로 댐핑상수만을 고려함으로써 실제 상황과 부합하지 않는 측면이 있다. 즉, Svinkin의 연구는 지반정수에 대한 시간경과효과를 반영하는데 있어 댐핑값 만을 선택하여 전체지지력중 동적지지력 만을 고려하였을 뿐 현장에서 시간경과효과로 뚜렷이 확인되는 정적지지력 항목의 quake값을 무시하였다.

WEAP 분석이 보다 실질적으로 되기 위해서는 시간경과에 따른 지반의 변화를 반영하는 것이 필요하다. 따라서 지금까지 WEAP에서 제시하는 표준값만으로는 이러한 효과를 고려할 수가 없으며 또한 댐핑값 만으로도 불완전하다고 판단된다. 따라서 이를 고려하기 위한 바람직한 방향은 York 등(1994)이 제안한 바와 같이 동재하시험을 실시하여 이러부터 도출된 변수를 이용하는 방법이 있을 수 있으나 이러

한 선 시험조건이 현장에서 만족되기는 쉽지 않고 또한 설계이전에 주로 활용되는 WEAP의 특성상 충분하다고는 볼 수 없다. 이러한 관점에서 조천환 등(1998)은 많은 동재하시험 결과의 통계분석을 통해 시간효과를 반영할 수 있는 WEAP 분석방법을 제안하였는데 그림 8은 이의 결과를 보여주고 있다.



(a) 재항타시 (b) 항타시

그림 8. 실측지지력에 대한 WEAP 분석 지지력의 대수정규분포

5. 동적공식에서의 시간경과효과의 고려

일찌기 Peck(1942)은 "The chance of guessing the bearing capacity of pile are better than of computing it by a pile driving formula"라고 할 만큼 동적공식의 신뢰도는 매우 낮은 것으로 알려져 왔다. 동적(항타)공식은 많은 결점에도 불구하고 수많은 지지력 예측방법중 시공말뚝의 전부에 대해 간단하게 품질관리를 수행할 수 있는 잠재력을 가진 유일한 방법으로 평가할 수 있다. 현실적으로 동적공식은 그 간편성으로 인해 실무기술자들에게 시공시 품질관리의 목적으로 높은 호응을 받고 있다. 특히 국내의 경우 실무기술자들에게 항타공식의 신뢰도는 거의 절대적이라 할 수 있으며 경우에 따라서는 항타공식을 전제로한 최종관입량 기준이 시공관리의 유일한 척도가 되는 경우도 많이 있다.

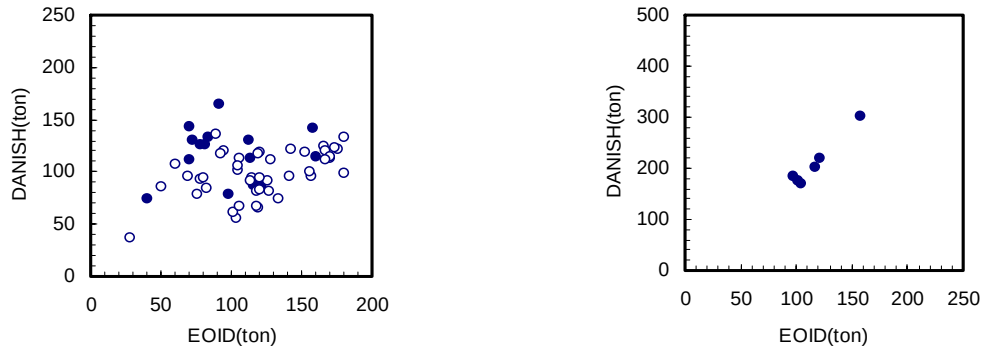
동적공식은 말뚝을 집중된 질량으로 가정하여 해머가 한 일과 말뚝이 한 일이 동일하다는 에너지 보존법칙과 타격시 충격이론에 따라 유도한 후 이를 이론적 혹은 경험적으로 보완한 것이다. 따라서 동적공식은 가정조건의 비현실성, 동적 저항력의 무시, 시간효과의 미고려, 항타에너지의 전달 등에 있어 문제점을 포함하고 있어 이의 신뢰도는 매우 낮다고 하겠다(표 1참조). 이러한 문제점에도 불구하고 동적공식 들의 간편성을 활용하기위해 신뢰도를 높이려는 연구가 오래전부터 계속적으로 수행되고 있다. 특히 Broms 등(1988), Cheng 등(1966), Paikowsky 등(1996), 홍헌성 등(1997)의 연구는 동적측정장비를 이용하여 동적공식의 신뢰도를 높이는 연구를 수행하였다.

표 1. 각 공식별 신뢰도 분포(홍헌성 등,1997)

	HILEY	EN	DANISH	J1	J2
±10%	18.3%	6.7%	13.3%	1.7%	15.0%
±20%	33.3%	26.7%	26.7%	5.0%	31.7%
±30%	58.3%	56.7%	50.0%	11.7%	50.0%
±30%이상	41.7%	43.3%	50.0%	88.3%	50.0%
평균 안전율	2.52	11.53	3.27	4.14	0.56
최소 안전율	1.36	4.77	1.77	1.06	0.25
최대 안전율	4.78	28.89	6.69	18.13	1.25

동적공식의 문제점중 본 연구의 주제와 관련이 있는 시간경과효과는 동적공식의 신뢰도를 높이기위해서는 반드시 해결해야 할 문제이다. 동적공식에서 산출되는 흙의 저항력은 항타시점의 저항력이며 따라서 산출된 지지력은 지반의 시간효과와 관련이있다. 그러나 지금까지 동적공식의 신뢰도 분석에 대한 연구결과는 동적공식에 의한 항타시 지지력과 항타후 시간이 경과된 상태의 정재하시험 결과를 비교하였는 바 엄밀한 의미에서 합리적인 신뢰도 평가가 될 수 없었다고 판단된다. 일 예로 그림 2에서와 같이 비교의 기준치로 적용되는 정재하시험의 결과도 시간에 따라 변화하고 있는데 동적공식의 신뢰도 평가에 관한 그간의 논문에서는 이에 대한 명확한 언급이 없다.

홍헌성 등(1997)의 연구는 동적공식의 문제점을 해결하는 데 있어 다른 연구보다 실용적인 결과를 제시하고 있다. 여기서는 말뚝에 전달된 에너지, 탄성 및 소성 침하량으로 실측값을 적용하여 계산된 값을 항타시 지지력과 비교하였으며 지반조건, 동적지지력의 포함 문제는 현장안전율을 도입하여 해결하였다. 그림 9는 동적공식의 향상된 결과를 보여주고 있다. 따라서 그림 9에서와 같은 방법에 현장에서 측정한 지지력증가비(set-up factor)를 고려하면 신뢰도있는 동적공식을 활용하는 방안이 될 수 있을 것이다.



(a) 기존 동적공식 (b) 수정 동적공식

그림 9. 동적공식에 의한 말뚝지지력과 동재하시험결과(EOID)의 비교

6. 결론

시간경과에 따른 말뚝지지력의 변화에 대한 규명을 위해서는 동재하시험이 효과적이며 필요할 경우 정재하시험에 의한 검증도 실시할 수 있다. 정재하시험 및 동재하시험 모두 시간경과에 따라 지지력이 변하게 되므로 두 시험의 비교를 위해서는 연속적으로 수행하되 동재하시험의 타격수, 하중-침하곡선, 시험순서 등을 고려할 필요가 있다.

시간경과에 따른 말뚝지지력의 증가 현상은 단순히 과잉간극수압의 소산에 의존하지 않고 말뚝의 종

류 및 크기, 흙의 성상 등과 관련이 깊으므로 현장별로 실측을 하지 않고는 사실상 예측이 불가능하다고 판단된다. 따라서 시간경과에 따른 지지력의 예측을 위해서는 시험시공결과를 바탕으로 한 예측을 실시하되 해당현장에만 국한하는 것이 바람직하다.

WEAP분석이 보다 실질적이기 위해서는 시간경과에 따른 지반의 변화를 반영하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 동재하시험 결과로 부터 도출된 변수를 이용할 수 있으며 이 경우 댐핑상수, quake, 마찰력의 변화 등을 고려하는 것이 필요하다.

동적공식은 많는 결점에도 불구하고 간편성 및 보편성이라는 큰 장점 때문에 향후에도 실무에서는 계속 활용될 것으로 전망된다. 동적공식의 신뢰성을 높이기 위해서는 에너지전달문제,동적지지력의 제거, 시간경과효과 등 동적공식의 문제점을 해결하여야 하고 이를 위해서는 동재하시험의 결과를 바탕으로 한 제안된 방법의 활용이 효과적이라 판단된다.

시간경과효과에 대한 문제는 본 연구에서 언급한 set-up 효과외에 시간경과에 따라 지지력이 감소하는 relaxation 효과도 현장에서 발견되고 있으므로 이에 대한 연구도 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. 이영남, 이종섭(1997), "대구경말뚝의 거동예측 및 지지력 산정", 현대건설(주) 기술연구소, pp.149 289.
2. 이명환, 홍헌성, 조천환, 김성회(1998), "시간경과효과를 고려한 항타말뚝의 시공관리 방안", '98 대한토목학회 논문발표회집, 대한토목학회, 4 pp.
3. 조천환, 이명환, 홍헌성, 김성회, 전영석(1998), "말뚝의 파동이론분석의 신뢰도 제고방안", '98 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 8 pp.
4. 천병식, 조천환(1997), "항타 및 매입말뚝의 하중-침하량 곡선의 분석", 한국지반공학회지, 제13권, 제6호, pp.61-70.
5. 홍헌성, 조천환, 김성회, 엄재경, 이명환(1997), "항타공식에 의한 말뚝지지력 산정의 신뢰도 연구", '97 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.55-62.
6. 홍헌성, 조천환, 이장덕, 이원제, 이명환(1995), "동재하시험의 신뢰도", '95 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. I-26 II-30.
7. Broms, B.B. and Choo, L.P(1988), "A Simple Pile Driving Formula Based on Stress-Wave Measurements", Proceedings of the Third International Conference on the Application of Stress-Wave theory to Piles, BiTech Publisher, Ottawa, pp.501 600.
8. Cheng, Y.M and Tsui, Y(1996), "Use of PDA Results in Pile Capacity Estimation", Second International Conference on Soft Soil Engineering, Nanjing, pp.1053 1057.
9. Paikowsky, S.G et al(1996), "Dynamic Analysis and Time Dependent Pile Capacity", Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Pile, pp.325 339.
10. Peck(1942), "Discussion to 'Pile Driving Formulas' : Progress Report of the Committee on the Bearing Value of Pile Foundations", Proc. ASCE, pp.523-324.
11. Schmertmann, J.H.(1991), "The Mechanical Ageing of Soils", The 25th Karl Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.GT9, pp.1288-1330.
12. Skov, R. and Denver, H.(1988), "Time-dependance of Bearing Capacity of Piles", Proceedings of the 3rd International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, BiTech Publishers, Ottawa, Canada, pp.879-888.
13. Svinkin, M.R., Morgano, C.M. and Morvant, M.(1994), "Pile Capacity as a Function of Time in Clayey and Sandy Soils", Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on

Piling and Deep Foundation, Bruges, Belgium, pp.1.11.1-1.11.8.
14. Svinkin, M.R. and R.D. Woods(1998), "Accuracy of determining Pile Capacity by Dynamic Methods", Conference Papers, 7th Int. Conf. and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Vienna Austria, 1998, pp.1.2.1-1.2.8.
15. 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 Pile, pp.144-162.
16. 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.