접수번호: 3297 토질 및 기초공학

타입말뚝의 지지력 증가의 예측

The Prediction of Bearing Capacity Increase of Driven Piles

조 천 환[1)]

Cho, Chun-Whan

Abstract

The exact prediction of pile capacity as time elapses after driving is very useful for design and quality control of pile foundations. The various equations for predicting the pile capacity gain with time have been suggested up to now; however it turned out that they were not suitable for representing physical phenomena on set-up effect of pile capacity. In this study an equation for predicting the set-up effect was derived from solving simplified mathematical model and verified through regression analysis with data published in some related papers and data tested for this study. It was shown that the proposed equation had good correlation with test data and can be applicable for estimating the set-up effect of driven piles and selecting the proper time of pile loading test.

Keywords: time effect, set-up effect, aging, EOID, Restrike, driven pile

요 지

항타 후 시간경과에 따라 말뚝의 지지력을 정확히 예측하는 것은 말뚝기초의 설계 및 품질관리시 매우 유용하게 이용될 수 있다. 이러한 관점에서 시간경과별로 지지력을 예측하기 위한 많은 방법들이 지금까지 제안되었지만, 이들은 현장에서의 말뚝의 지지력의 증가효과를 정확히 나타낼 수 없는 것으로 평가되었다. 본 논문에서는 말뚝의 지지력 증가효과를 표현하기 위한 모델식을 수학적으로 유도하여 제시하였다. 제안된 식은 기존의 논문에서 제시된 시험데이타는 물론 본 연구에서 실측한 데이터와도 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 본 제안식은 항타 후 일정시간 에서의 지지력의 예측과 재하시험을 위한 적정한 시간을 결정하는데 이용될 수 있는 것으로 평가되었다.

---

1) , ,

1. 서론

말뚝이 타입된 주변의 지반조건은 말뚝이 타입된 이후부터 시간경과에 따라 변화하게 되며 따라서 말뚝의 지지력도 시간의 존적인 함수가 되고 있는데 이를 말뚝지지력의 시간경과효과(time effect)라고 부른다. 이러한 시간경과효과는 말뚝의 지지력이 증가 또는 감소로 나타날 수 있다. 항타 후 시간경과에 따라 말뚝의 지지력이 증가하는 현상을 set-up(또는 freeze)이라 하고, 시간경과에 따라 말뚝의 지지력이 감소하는 현상을 relaxation이라 한다(US DOT, 1996).

일반적으로 항타 후 시간경과에 따른 말뚝 지지력의 변화는 지지력이 증가하는 현상(set-up효과)이 우세하게 나타나는데, 이는 지반조건별로 구분하여 설명할 수 있다. 점성토에 타입된 말뚝의 지지력은 항타 중에 발생된 말뚝 주변지반의 교란이 항타 이후 과잉간극수압의 소산, thixotropy 및 aging효과 등에 의해 증가되는 것으로 알려지고 있다(Mitchell, 1960 ; 1969 ; Karlsrud 등, 1986 ; Fellenius 등, 1989 ; Svinkin 등, 1994 ; Paikowsky 등, 1996). 점성토에 대한 set-up효과의 원인은 그동안 말뚝분야 외에도 강도특성 부문에서 여러 연구결과로부터 상세히 보고되었다. 그러나 사질토에서의 set-up효과는 주로 항타 후 과잉간극수압의 소산에 의한 것으로만 알려져 오다, 근래 들어서 과잉간극수압의 소산외에 aging효과에 의해서도 나타나는 것으로 보고되었지만(Tavenas 등, 1972 ; Preim 등, 1989 ; Svinkin 등, 1994), 이에 대한 원인은 아직 가설로만 이루어지고 있다(Mitchell, 1984, 1986 ; Schmertmann, 1991 ; York 등, 1994).

국내에서도 이 등(1994, 1995)에 의해 시간경과에 따른 타입말뚝의 지지력 변화 연구가 수행된 바 있으며 이에 의하면 지지력증가의 상당부분은 7일 이내에 나타나는 것으로 보고하고 있다. 또한 이 등(1997)은 사질토에서도 상당한 set-up효과가 일어난 사례에 대해서 보고하였다. 조 등(2001)은 set-up효과를 실무에 적용하는 방법에 대해 논의하였다.

시간경과에 따라 지지력이 감소되는 현상, 즉 relaxation 현상은 Parsons (1966)에 의해 처음으로 보고되고, McClelland 등(1969)이 설명을 추가하였지만 그 당시에는 이러한 현상을 논리적으로 설명하지 못하였고, 이후 Yang 등(1970)이 relaxation에 대해 보다 논리적인 분석을 수행하였다. relaxation 현상은 현장에서 흔치 않은데, 혈암(shale), 이암(mudstone) 등과 같은 판상형 풍화암에 말뚝이 관

입되었을 경우 나타나는 것으로 알려지고 있으며(Thompson 등, 1985 ; Samson 등, 1986 ; Siedel 등, 1992 ; 천 등, 1997), 또한 포화된 조밀 세사지반에서 일어날 수 있는 것으로 보고되고 있다(York 등, 1994).

항타 후 시간경과에 따른 지지력을 예측하는 것, 특히 현장에서 일반적으로 나타나는 set-up 효과를 반영한 지지력을 예측하는 것은 설계지지력을 결정하고 재하시험의 적절한 시점을 선정할 수 있다는 점에서 매우 유용하다고 할 수 있다. 최근까지 이에 대한 많은 연구가 이루어 졌지만 실무 적용에는 한계가 있다고 판단되므로 본 연구에서는 시간경과에 따라 지지력이 증가하는 set-up 효과를 예측할 수 있는 방안을 제시하고 이를 평가해 보았다.

2. 기존의 예측 방법 고찰

전술한 바와 같이 set-up 효과는 대부분의 지반에서 일반적으로 나타나는 현상으로 이를 무시할 경우 말뚝의 지지력을 제대로 평가하는 것이 곤란하고 비경제적인 설계 및 불안전한 시공상황을 초래 할 수가 있다. 최근까지 set-up 효과를 예측하기 위한 많은 연구가 이루어졌으며 주요 연구결과를 요약하면 표 1과 같다. 표 1에서와 같이 set-up 효과에 관한 연구결과들은 지반을 점성토와 사질토로 구분한 후 해당 시험자료를 회귀 분석함으로써 시간에 따른 지지력의 변화를 예측하는 식을 제시하였다.

표 1에서 언급한 연구들은 대부분 특정 현장에서 제한된 말뚝에 대해 시험결과를 분석한 후 주요 토질조건에 대해 지지력과 시간변화의 관계를 도출한 것들이어 엄밀히 말하면 해당 현장에만 적용할 수 있다고 판단된다. 그런데 실무적으로는 시험 이전에 지지력을 예측해야 하는 경우가 많이 있으므로 상기 결과를 실무에 일반적으로 적용하기에는 제한적이 될 수밖에 없다.

점성토에 관한 지지력의 예측방법에는 표 1에서와 같이 Skov 등(1988)이 제안한 후 Svinkin 등(1994), Paikowsky 등(1996)이 그것의 상관도를 분석한 바 있는 식(1)이 주류를 이루고 있다.

표 1 시간경과에 따른 지지력의 변화에 관한 연구 요약

연구자	지반조건	시간경과와 지지력의 관계	비 고
Tavenas 등(1972)	사 질 토	2 3주후 70% 증가	수시간후 과잉간극수압 소산
Karlsrud 등(1986)	과압밀점토	직선	6일후 과잉간극수압 소산
Skov 등(1988)	점 성 토	$Q/Q_0 - 1 = A\log_{10}(t/t_0)$	t_0 = 2.0, A = 0.6
	사 질 토		t_0 = 0.5, A = 0.2
Fellenius 등(1988)	실트질점토	곡선	1일 이내에 급격한 증가
Huang(1988)	점 성 토	$Q = Q_e + 0.263(1 + \log t)(Q_m - Q_e)$	흙의 전단강도 적용
Kehoe 등(1989)	사 질 토	11일후 (58 200)% 증가	지지력 증가의 50%는 항타후 100분 정도에 발현
Preim 등(1989)	세 립 모 래	직선	주면마찰력만 증가
Svinkin 등(1994)	점 성 토	$Q/Q_0 - 1 = A\log_{10}(t/t_0)$	
	사 질 토	$Q/Q_e = 1 + 0.145t$	불포화토
		$Q/Q_e = A\,t^{0.1}$	포화토
Paikowsky 등(1996)	점 성 토	$Q/Q_0 - 1 = A\log_{10}(t/t_0)$	말뚝의 크기 고려
이 등(1997)	점 성 토	$Q/Q_e = A\ln t + B$	
	사 질 토	직선	

주) Q 는 초기항타 후 경과 시간, t에서의 지지력; Q_0 는 시간 t_0 에서의 지지력; t_0 는 Q-logt 관계가 선형으로 시작되는 초기 항타후의 경과시간; Q_e 는 초기항타시(EOID, End of Initial Driving)의 지지력; Q_m 은 최대 지지력; A,B 는 상수

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

제안당시 Skov는 식(1)을 점성토는 물론 사질토에서도 적용하였지만 이후 Svinkin(1994)과 Paikowsky(1996)는 이 식이 점성토에 적합한 것으로 평가하였다. Skov의 식은 시간경과에 따라 지지력증가비가 감소하는 현상을 표현하기 위해 시간에 로그함수를 도입함으로써 짧은 기간내의 지지력 변화의 전체적인 경향을 적절히 나타낸 측면은 있지만 다음과 같은 점에서 한계가 있다고 판단된다.

◦ 제한된 구간, 즉 비교적 짧은 기간 동안의 실험결과만의 회귀분석에 중점을 두어 지지력의 증가는 $\log t$에 무한정 비례하도록 표현됨으로써, 실제로 존재하는 최종 수렴강도인 장기지지력(long-term bearing capacity)을 무시했다.

◦ Skov의 식중에서 t_0는 비례관계를 나타내는 최소시간을 의미하는 것으로 이를 통해서 지반조건별로 예측식을 구분하고자 했지만, 실제로는 회귀분석시 시간, t = 0에서의 지지력(항타시 지지력)을 로그함수에 적용할 수 없는 과정에서 도출된 것으로 보인다. t_0의 의미는 Q $\log t$ 관계에 이미 반영되었으며, 또한 t_0는 실험결과를 분석한 후에 알 수 있다는 점에서 공학적으로는 물론 실용적으로도 의미가 작다고 판단된다.

사질토에 대한 지지력의 예측방법은 표 1에서와 같이 공통적으로 인정되는 방법은 없는 것 같은데 이는 사질토로 분류되는 대상 지반조건의 광범위성에 기인하는 것으로 추정된다. Skov 등(1988)은 사질토의 경우도 식(1)을 제안하였지만, Preim 등(1989), Svinkin 등(1994)이 제안한 바와 같이 사질토의 경우 지지력과 시간의 변화는 직선관계에 있는 것으로 받아들여지고 있다. 특히 Svinkin 등(1994, 1996)은 사질토를 불포화토와 포화토 조건으로 나누어 다음 식들을 제안하였다.

$$Q/Q_e = 1 + 0.145\,t \quad \text{(불포화토)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

$$Q/Q_e = 1.4\,t^{0.1} \quad \text{(포화토의 하한치)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3)$$

$$Q/Q_e = 1.025\,t^{0.1} \quad \text{(포화토의 상한치)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4)$$

set-up효과가 나타나는 지반에서 항타 후 지지력은 계속 증가하여 장기강도에 이르게 된다. 이러한 과정에는 여러 가지 요인들이 영향을 주게 되는데, 이들의 영향정도는 지반조건에 따라 다르게 나타나지만, 지지력증가의 경향은 전술한 기존의 연구결과처럼 지반종류에 따라 변하는 것은 아니라고 판단된다. 즉, 전체적인 강도회복곡선의 경향은 지반종류에 관계없이 일정하고 항타로 인한 지지력 손실의 회복속도는 다르게 나타나는 것으로 평가된다.

그럼에도 불구하고 각종의 연구결과에서는 지지력 측정결과를 회귀분석하여 표

1에서와 같이 지반종류별로 경향이 서로 다른 별도의 지지력 예측식을 제안하였는데, 이는 비교적 짧은 기간동안 얻어진 시험 값만을 이용하여 회귀분석함으로써 이에 적합한 예측곡선을 찾으려는 것에 기인하는 것으로 보인다. 이에 대한 대표적인 예로 식(1)   식(4)를 들 수 있다. 본 연구에서는 시간경과에 따른 지지력증가 현상을 실질적으로 반영할 수 있는 새로운 예측식을 제안해보고 이의 적용성에 대해서 검토하였다.

3. Set-up효과의 예측모델 제안

항타 후 지지력이 점차 증가하여 장기강도에 이르는 과정에서의 주요 영향인자는 간극수압의 소산과 aging효과로 알려지고 있다. 점성토에서는 투수계수가 작아 과잉간극수압의 소산이 상대적으로 늦고 aging의 진행도 늦어 장기강도까지의 강도 발현이 완만하고 오래 걸리는 반면, 사질토에서는 투수계수가 크고 aging의 진행도 빨라 지지력 증가가 빨리 나타나게 된다. 한편, 장기강도의 일반적인 절대치는 점성토보다는 사질토가 크다. 이러한 과정을 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다.

그림 1에서 종축의 지지력은 다시 지지력증가비(임의시간에서의 지지력/항타시 지지력 = Q/Q_e)로 표시할 수 있으며 이를 도식적으로 나타내면 그림 2와 같다.

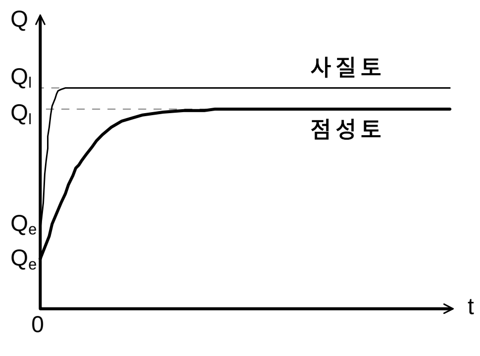

그림 1 시간경과에 따른 지지력증가

그림 2에서 보면 임의의 시간에서의 지지력증가비 $((Q/Q_e)_t)$는 식(5)와 같이 최대 지지력증가비 $((Q/Q_e)_1)$와 증가비차 (D_t)로 부터 구할 수 있다. 그런데 D_t와 지지력증가율 $\left(-\frac{d}{dt}(Q/Q_e)\right)$은 시간경과에 따라 감소하므로 D_t와 지지력증가율은 식(6)과 같이 선형관계(B는 상수)로 나타낼 수 있다.

$$(Q/Q_e)_t \;=\; (Q/Q_e)_l - D_t \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5)$$

$$D_t \;=\; B\frac{d}{dt}(Q/Q_e) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6)$$

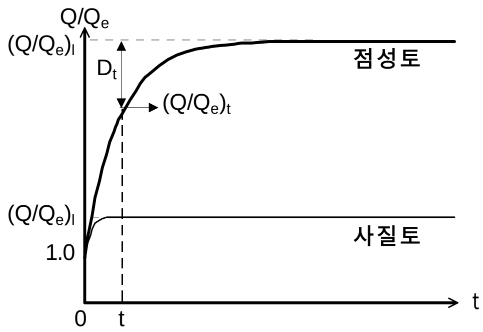

그림 2 시간경과에 따른 지지력증가비

따라서 일정 시간에서의 지지력증가비는 최대 지지력비에서 일정 시간에서의 지지력 증가율을 제한 형태로 표현할 수가 있으며, 이는 식(5)와 식(6)으로부터 식(7)과 같은 미분방정식으로 나타낼 수가 있다.

$$y \;=\; (Q/Q_e)_l \;-\; B\frac{d}{dt}\,(Q/Q_e) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7)$$

$$=\; A \;-\; B\frac{dy}{dt}$$

여기서, $y \;=\; Q/Q_e$

$A \;=\; (Q/Q_e)_l \;=\; y_l$

B : 상수(소산계수(K)와 aging계수(G)의 비 ≈ $\frac{G}{K}$)

식(7)에서 B는 지지력증가율을 지지력증가비 차 $(D_t = y_l - y)$로 환산하기 위한 상수로 이것은 지지력증가에 영향을 주는 인자들과 관계가 있다. 따라서 전술한 바와 같이 set-up효과의 주요 영향인자를 과잉간극수압의 소산과 aging효과로 본다면 B는 과잉간극수압의 소산도(K)와 aging효과(G)의 비로 표현할 수 있을 것이다. 여기서, K는 주변지반의 투수계수와 그리고 G는 예민비(sensitivity)와 비례 관계가 있을 것이다.

식(7)의 미분방정식을 풀어 경계조건을 대입하면 식(8)과 같은 해를 얻을 수가

있다.

$$y = A\left\{1 - \left(\frac{A-1}{A}\right)e^{-\left(\frac{t}{B}\right)}\right\} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (8)$$

식(8)은 시간경과에 따른 말뚝지지력의 set-up효과를 표현한 것으로 지반종류에 관계없이 모든 경우에 대해 나타낼 수 있다. 상수 A 및 B는 지반조건을 나타내는 것으로 이를 역으로 분석하면 지반조건을 파악할 수가 있을 것이다.

식(8)을 시간(t)에 대해 정리하면 식(9)와 같이 된다. 식(9)를 이용하면 소정의 지지력에 대한 소요시간을 예측할 수 있으므로 적절한 재하시험 시간 등을 선정할 수가 있다.

$$t = -B \ln\left(\frac{y-A}{1-A}\right) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (9)$$

4. 제안된 모델의 검증 및 응용

시간경과에 따른 지지력의 증가를 예측하고, 적절한 재하시험 시간을 결정할 수 있는 식(8)과 식(9)를 검증하기 위해 Skov 등(1988), Svinkin 등(1994)이 분석한 데이타와 현장에서 실측한 데이타를 적용하여 이를 평가하였다. 표 2는 검증에 이용된 Skov(1988)의 데이타 개요를 보여주고 있다.

표 2 검증에 이용된 시험자료(Skov, 1988)

주요 토질 분류	말뚝종류	관입 깊이	시간경과별 지지력, kN, (일)					
			항타시 시험	1차 재항타 시험	2차 재항타 시험	3차 재항타 시험	4차 재항타 시험	5차 재항타 시험
점성토	콘크리트말뚝 25cm×25cm	19 m	255 (0)	770 (1)	1270 (8)	1440 (48)	-	-
사질토	콘크리트말뚝 35cm×35cm	21 m	1150 (0)	1880 (0.5)	2310 (8)	2380* (15)	2450 (19)	2450 (23)
비 고	Hammer : UDDCOMB H5H		EOID	Restrike (t_0)	Restrike	Restrike	Restrike	Restrike

주) *는 정재하시험 결과

표 2의 데이타를 이용하여 Skov의 예측식과 실측치를 비교한 것이 그림 3이다. 데이타가 부족한 면은 있지만 그림 3에서와 같이 실측치들은 장기강도에 어느 정도 수렴되고 있음에도 불구하고, 예측치는 $\log(t/t_o)$에 비례로 계속 증가하고 있어 현장의 set-up효과를 충분히 나타내고 있지 못함을 알 수 있다. 또한, 표 2에서처럼 t_0는 1차 재항타시험에 대해 임의로 결정한 것이지 t_0 값 자체가 지반의 특성을 의미하는 것이 아님을 알 수가 있다.

그림 4에는 그림 3에서 이용한 데이타를 본 연구에서 제안한 식(8)로 커브피팅(curve fitting: 프로그램 CurveExpert 이용)한 것이다. 그림 4에서와 같이 제안식은 그림 3의 결과와는 달리 실측 데이타와 상관관계가 높음을 알 수가 있다. 또한, 앞서 언급한 Skov의 식의 한계를 해소하고 있음을 알 수가 있다.

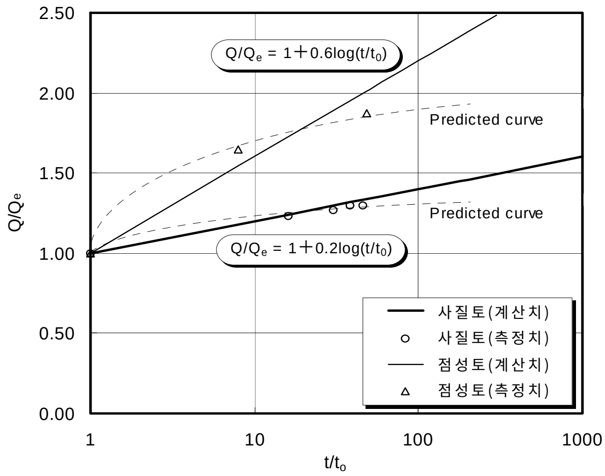

그림 3 Skov의 예측식과 실측치의 비교

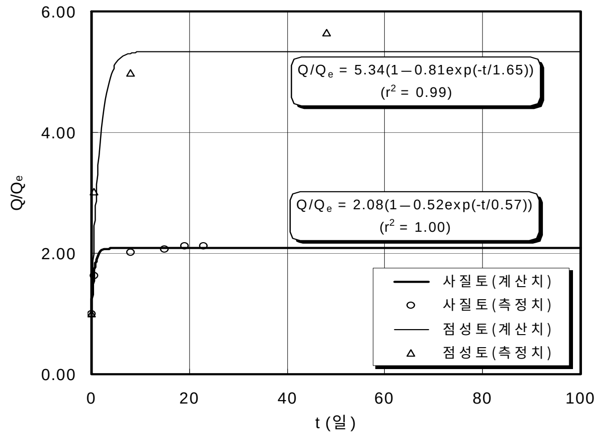

그림 4 제안식과 실측치(Skov의 결과)의 비교

특정 현장의 지지력의 set-up효과를 정확히 표현하기 위해서는 회귀분석에 이용되는 데이타의 신뢰도가 중요하며, 특히 말뚝 지지력을 충분히 모빌라이즈(mobilize)시켜 얻은 결과치를 이용하는 것이 필요하다. 이러한 조건을 얻기 위해서 일반적으로 정재하시험의 경우 극한파괴(plunging failure)를 시키고, 동재하시험의 경우 2.5 mm 이상의 순침하량을 발생시켜 지지력을 구하는 방법이 적용되고 있다(GRL, 1996).

표 3 검증에 이용된 시험자료(Svinkin, 1994)

토질 종류	시험차수	시간경과 (일)	관입저항 (mm/blow)	Q(kN)	Q/Q_e	비고
점성토	EOID	0	20.0	400	1.00	·말뚝 : PC 914×127 mm
	1차 재항타	1	8.8	885	2.21	
	2차 재항타	4	4.7	1241	3.10	
	3차 재항타	11	1.9	1766	4.42	
	4차 재항타	21	2.7	2300	5.75	
	5차 재항타	35	정재하시험	2406	6.02	
사질토	EOID	0	7.1	1907	1.00	·말뚝 : PC 457×457 mm ·관입깊이 : 22.9 m
	1차 재항타	2	3.6	2176	1.14	
	2차 재항타	11	5.0	2668	1.40	
	5차 재항타	21	정재하시험	2673	1.40	

그림 5는 말뚝의 지지력이 충분히 모빌라이즈된 상태로 시험된 데이타(표 3 참조)를 이용하여 제안식으로 분석을 수행하였다. 그림 5에서와 같이 예측곡선은 실험치와 높은 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 예측곡선의 식중 A계수와 B계수는 지반조건을 표현하는 것으로 결국 이값은 말뚝이 항타된 지점의 지반상태를 반영하는 것이라 평가된다. 특히, B계수는 식(7)에서와 같이 과잉간극수압의 소산과 aging효과의 비에 관계되는 것으로 B가 작을수록 set-up효과는 과잉간극수압의 소산에 의해서 더 영향받고, 클수록 aging효과에 더 영향받는 것으로 볼 수 있다. 따라서 극단적으로 보면 B가 크면 점성토, 작으면 사질토로 볼 수 있다.

그림 6은 그림 5의 예측곡선을 식(9)로 표현한 후 이를 도시한 것이다. 그림 6에서와 같이 식(9)를 이용하면 재하시험을 수행할 수 있는 적절한 시간을 예측할

수가 있다. 예로 그림 6에 의하면 해당 현장은 장기강도의 70%를 얻기 위해서는 점성토는 항타후 9일, 사질토는 항타후 1일 경과시에 시험을 할 수 있는 것이다.

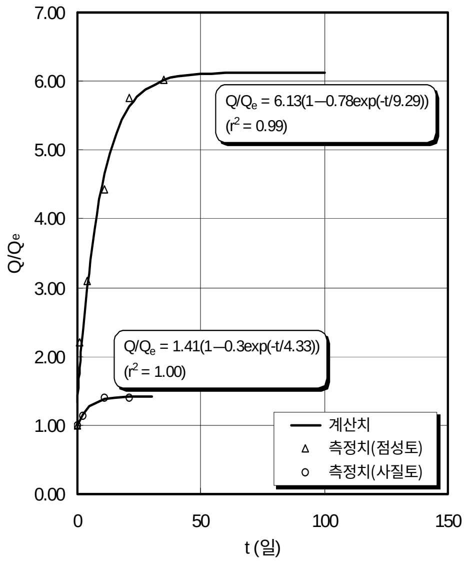

그림 5 제안된 식과 실측치(Svinkin의 결과)의 비교

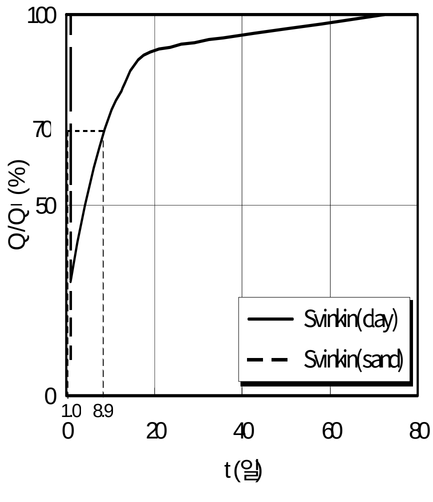

그림 6 시간경과별 지지력의 회복 비율

그림 7은 동재하시험을 수행하여 얻은 결과에 대해 제안식을 적용하여 회귀분석한 것이다. 동재하시험은 말뚝항타분석기(Pile Driving Analyzer, PDI, 1995)를 이용하여 ASTM 4945에 따라 동적 데이타를 얻은 후 이를 CAPWAP(Case Pile Wave

Analysis Program, GRL Inc., 1996)으로 분석하여 지지력을 구한 것이다(표 4 참조). 전체적인 시험은 동재하시험 위주로 이루어졌으나 시험전에 일부 말뚝은 동일 말뚝에 대해 정재하시험과 동재하시험을 실시하여 비교 분석함으로써 동재하시험의 신뢰도를 확인한 후 이를 적용하였다. 실험데이타에 대한 자세한 내용은 조(1998)를 참고할 수 있다.

그림 7에서와 같이 제안식은 실험치와 상관관계가 높음을 알 수 있다. 그러나 항타에너지가 충분치 않아 말뚝의 지지력이 충분히 발휘되지 못한 시흥현장에서 도출된 예측곡선은 해당 현장의 지반조건을 대표할 수 없을 것이다. 즉, 본 예측곡선들은 시험된 범위 내 에서만 의미가 있는 것이다. 일반적으로 연구시험용이 아닌 실제 적용말뚝(production pile)은 대부분 지지층까지 항타되므로 말뚝재료 및 해머 용량의 한계로 인해 말뚝이 충분히 변위되지 않은 상태에서 지지력이 얻어지는 경우가 대부분이라 할 수 있다. 그러나 이러한 결과로부터 도출된 곡선의 의미는 공학적으로 보수적인 개념이 되므로 실무적으로는 유효하다고 평가된다.

표 4 및 그림 7로 부터 모래에서의 A, B 계수를 개략적으로 유추해 보면 A와 B는 각각 2.0 이하 및 0.5 이하를 나타낼 것으로 평가된다. 이러한 가정은 소수의 시험결과를 통해 유추한 결과이므로 향후 더 많은 시험데이타를 바탕으로 A, B 계수를 도출한다면 제안된 식으로 set-up 효과를 예측하는데 활용이 가능할 것이다.

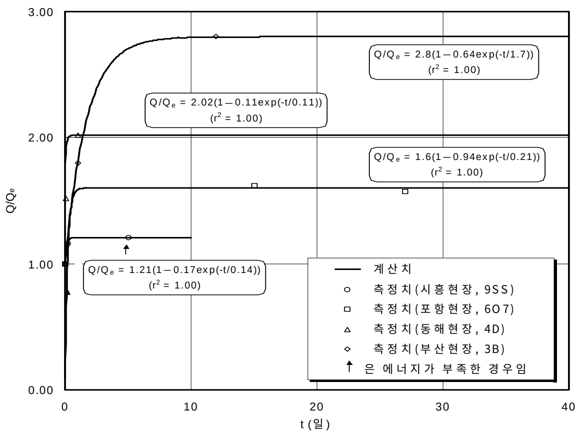

그림 7 제안식과 실측치의 비교

표 4 검증에 이용된 시험자료

현 장	시험차수	시간경과 (일)	지지력 (tonf)	지지력증가비 (Q/Q_e)	토질종류		비 고
					주면	선단	
시 흥	EOID	0	249.0	1.0	모래	모래	ø406×10(t)mm 강관, 관입깊이=28.0m
	1차 재항타	0.2	289.0	1.16			
	2차 재항타	5	300.5	1.21			
포 항	EOID	0	155.0	1.0	모래	모래	ø406×7.9(t)mm 강관, 관입깊이=13.9m
	1차 재항타	14	251.0	1.62			
	2차 재항타	27	244.0	1.57			
동 해	EOID	0	48.0	1.0	모래	모래 자갈	ø350mm PHC, 관입깊이=20.0m
	1차 재항타	0.09	73.0	1.52			
	2차 재항타	1	97.0	2.02			
부 산	EOID	0	78.0	1.0	점토	점토	ø450mm PHC, 관입깊이=21.5m
	1차 재항타	1	141.0	1.81			
	2차 재항타	12	222.0	2.85			

주) 주면부의 토질은 주면마찰력이 주로 발휘되는 구간의 토질조건임

5. 결론

항타 후 시간경과에 따른 말뚝의 지지력을 예측하는 것은 합리적인 설계지지력 및 항타관리 기준 결정하고 재하시험의 적절한 시간을 선정할 수 있다는 점에서 매우 유익하다고 할 수 있다. 이에 관한 대표적인 연구로 많은 논문에서 인용되고 있는 Skov(1988)의 식을 들 수가 있는데, 이는 장기강도를 무시했다는 점에서 한계가 있는 것으로 분석되었다.

시간경과에 따른 지지력의 경향은 기존의 연구결과처럼 단순히 과잉간극수압의 소산에만 의존하지 않고 말뚝의 종류 및 크기, 흙의 성상 등에 따라 복잡한 기구를 나타내고 있으므로 현장별로 실측을 하지 않고는 사실상 예측이 불가능하다고 판단된다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 시간경과에 따른 지지력의 증가현상을 수학적으로 표현하여 예측방정식을 유도하였으며 이는 실측치에 잘 맞는 것으로 평가되

었다. 제안된 예측방정식은 기존의 방법들과는 달리 토질의 종류에 상관없이 적용할 수 있으며, 또한 장기지지력에 대한 지지력의 회복정도를 시간으로 나타낼 수 있으므로 적절한 재하시험시간을 선정하는 것이 가능하다. 예측곡선을 나타내는데 있어 충분히 모빌라이즈된 지지력을 이용하지 않으면 예측방정식은 실제보다 작게 되어 보수적으로 평가된다. 그러나 실무에서는 말뚝 재료허용강도 및 일반적인 해머의 용량을 감안 할 때 평가된 지지력은 안전측이 되어 적용에 문제가 없다고 판단된다.

본 연구에서는 소수의 시험 데이터를 이용하여 사질토지반에 적용할 수 있는 제안식의 상수를 유추해 보았다. 향후 신뢰도 있는 많은 자료의 분석이 이루어 진다면 지반종류별 일반 상수를 도출할 수 있어 일반 예측식으로의 이용도 가능하다고 판단되므로 이에 대한 연구가 기대된다.

참 고 문 헌

1. 이명환, 홍헌성, 이원제(1994), "말뚝기초의 최적설계", Keynote Lecture, 한국지반공학회,'94 가을 학술발표회 논문집, pp.60 76.
2. 이영남, 이종섭(1997), 대구경말뚝의 거동예측 및 지지력 산정, 현대건설(주) 기술연구소, pp.149 289.
3. 이원제, 전영석, 홍헌성, 이명환(1995), "시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력 변화 연구", 한국지반공학회, '95 봄학술발표회 논문집, pp. 69 89.
4. 조천환(1998), "시간경과에 따른 타입 말뚝의 지지력 증대 특성에 관한 연구 ", 한양대학교 박사학위논문, 1998. 12, 193pp.
5. 조천환, 이명환(2001), "타입말뚝의 지지력증가효과의 실무적용", 한국지반공학회, 2001 기초기술위원회 워크샾, pp. 141 157.
6. 천병식, 조천환(1998), "항타 H말뚝의 연직지지력 특성", 대한토목학회 논문집 제 18권 제 III-3호, 1998.5, 대한토목학회,pp. 403 413.
7. Fellenius, B.H., Riker, R.E., O'Brien, A.J. and Tracy, G.R.(1989). "Dynamic and Static Testing in Soil Exhibiting Set-up," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.115, No.GT7, pp.984-1001.

8. GRL Associates, Inc.(1996), *CAPWAP User Manual*

9. Huang, S.M.(1988), "Application of Dynamic Measurement of Long H-pile Driven into Soft Ground in Shanghai", *Proc. of the Third Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Bi Tech Publisher, Ottawa, pp.635 643.

10. Karlsrud, K. and Haugen, T.(1986). "Axial Static Capacity of Steel Model Piles in Overconsolidated Clay," Bull. No.163, *Norwegian Geotechnical Institute,* Oslo, Norway

11. McClelland, B., Focht, J. and William, J.(1969), "Problems in Design and Installation of Offshore Piles", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 95, No. SM6, pp.1491 1514.

12. Mitchell, J.K.(1960), "Fundermental Aspects of Thixotropy in Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. SM3, pp.19 52.

13. Mitchell, J.K. and Solyman, Z.V.(1984), "Time-Dependent Strength Gain in Freshly Deposited or Densified Sand," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, November, 1984, pp.1559 1576.

14. Paikowsky, S.G, LaBelle and Hourani, N.(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.

15. Parsons, J.D.(1996), "Piling Difficulties in the New York Area," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.92, No.SM.1, January, 1966, pp43 64.

16. Pile Dynamics, Inc.(1993), *PDA User Manual*

17. Preim, M.J., March, R. and Hussein, M.(1989). "Bearing Capacity of Piles in Soil with Time Dependent Characteristics," Piling and Deep Foundations. *Proceedings of the 3rd International Conference,* London, pp.363-370.

18. 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.

19. Seidel, J.P et al(1992), "The Effect of Pile Relaxation on Toe Capacity and Stiffness," *Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Pile,* pp.619 626.
20. 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.
21. 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 on Piling and Deep Foundations,* Bruges, Belgium, paper 1.11.
22. Tavenas F. and Audy R.(1972), "Limitations of the Driving Formulas for prediction the Bearing Capacities of Piles in sand," *Canadian Geotechnical Journal,* Canada, 9(1), pp.47-62.
23. Thompson, C. and Thompson, D.(1985), "Real and Apparent Relaxation of Driven Piles", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 2, pp.225 237.
24. US Dpt. of Transportation(1996), *Design and Construction of Driven Pile Foundation,* Workshop Manual.
25. Yang, N.C.(1970). "Relaxation of piles in sand and inorganic silt," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering,* ASCE, Vol.96, SM2, pp.395-409.
26. 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.