말뚝의 동적공식의 평가 및 새로운 방법의 적용

Appraisal of Driving Pile Formula and Its new Application

Abstract

Although pile driving formulas(or dynamic pile formulas) are regarded as the most practical tool of pile quality control by most engineers, their reliability has long been questioned due to their inherent problems. In reality the dynamic formulas are fundamentally incorrect in terms of the pile driving process, that is, the driving system, the soil and the pile. Nevertheless much research on the application of dynamic formula has been carried out regardless of the problems. In this study the problems of the dynamic formula were analysed and new pile driving formula was suggested on the basis of analysis of the problems. New dynamic formula was appraised using the values which were measured at the end of initial driving of piles and at restriking after driving of piles by Pile Driving Analyzer. It has been again confirmed that the reliability of the existing driving formula can not but be very low ; however new ones were proposed for the practical tool of pile quality control.

요약

말뚝의 동적공식(또는 항타공식)은 간단하게 품질관리를 수행할 수 있는 실용적인 방법으로 여겨져 왔지만 그것의 신뢰도는 내부적인 문제점으로 인해 매우 낮은 것으로 평가되고 있다. 실제적으로 동적공식은 항타시스템 및 항타과정 측면에서 보면 근본적으로 문제가 있으며 그간의 많은 연구들은 이러한 사실이 고려되지 않은 상태에서 이루어져 왔다. 본 연구에서는 동적공식의 문제점에 대해 평가해보고 이를 바탕으로 새로운 동적공식을 제안하였다. 그리고 현장에서 항타분석기로 실측된 항타시 및 항타후 시험자료를 이용하여 새로운 동적공식의 신뢰도와 적용성을 평가하였으며 그 결과 이의 실용성을 확인 할 수 있었다.

Key words : Dynamic pile formula, Pile driving formula, Set-up effect, Damping coefficient, PDA,

1. 개요

말뚝의 동적공식(또는 항타공식)은 많은 결점에도 불구하고 수많은 지지력 예측방법중 시공말뚝 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 동적공식의 신뢰도는 거의 절대적이라 할 수 있으며 경우에 따라서는 동적공식을 전제로 한 최종관입량 기준이 시공관리의 유일한 척도가 되는 경우도 많이 있다.

동적공식은 많은 연구결과들에 의해 신뢰도가 매우 낮은 것으로 밝혀졌으며 국내에서도 이 등(1992)에 의해 이러한 결과가 보고된 바 있다. 그러나 지금까지의 신뢰도 분석에 대한 연구결과는 동적공식에 의한 항타시 지지력과 항타후 시간이 경과된 상태의 정재하시험(혹은 동재하시험) 결과를 비교하였는 바 엄밀한 의미에서 합리적인 신뢰도 평가가 될 수 없었다고 판단된다. 즉, 동적공식에 의한 값은 동적저항이 포함되어 있는 항타시 전체 지지력이고, 시험지지력은 set-up효과가 반영된 정적지지력이므로 개념이 서로 다른 값을 비교한 것이다.

동적공식은 말뚝을 집중된 질량으로 가정하여 해머가 한 일과 말뚝이 한 일이 동일하다는 에너지 보존법칙에 따라 유도한 후 이를 이론적 혹은 경험적으로 보완한 것이다. 따라서 동적공식은 후술할 여러 가지 문제점들을 포함하고 있는데, 이중 동적공식에 대한 고유의 문제라 볼 수 있는 가정조건, 즉 말뚝을 집중된 질량으로 가정하는 문제를 제외한 문제들은 해결될 수 있는 것으로 평가된다. 이러한 문제점 들이 만족스럽게 해소될 경우 동적공식은 실무에서 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

실제로 Cheng 등(1996), Paikowsky 등(1996), 홍 등(1997)의 최근 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 수행되었지만 전술한 문제점들을 모두 해소할 수 있는 방법으로는 아직 미흡하다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 각종 동적공식에 대한 신뢰도를 합리적인 관점에서 평가한 후 전술한 문제점을 해소할 수 있는 방안을 제시하고 이의 적용성을 검토함으로써 신뢰성있는 동적공식을 제시하고자 한다.

2. 동적공식의 개요 및 문제점

1893년 Wellington이 엔지니어링 뉴스 공식(Engineering News Formula)을 제안한 이래 수많은 동적공식이 제안되어 왔으며 이러한 동적공식들의 기본원리는 에너지 보전의 법칙과 충격이론에 근거한 것이다. 에너지 보전법칙과 충격이론에 근거하여 동적공식에 대한 일반공식을 유도

(Poulos, 1980)하면 식(2.1)과 같다.

$$R_u = \frac{e_h \cdot W_r \cdot H}{S + (C \cdot R_u \cdot L)/(2AE_p) + \triangle S_{pp}} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \quad \cdots\cdots \ (2.1)$$

여기서, R_u : 극한지지력, e_h : 해머효율

W_r : 램의 무게, H : 낙하고

S : 타격당 관입량, C : 보정상수

L : 말뚝길이, A : 말뚝의 단면적

E_p : 말뚝의 탄성계수, $\triangle S_{pp}$: 말뚝의 소성변형

W_p : 말뚝중량 + 말뚝머리 부착물 중량

n : 해머와 말뚝머리의 반발계수

식(2.1)은 말뚝의 재료를 완전한 탄성체로 가정하여 Newton의 충격이론을 도입하여 유도하였으므로 실제의 타입말뚝조건을 충분히 나타내지는 못하였다고 볼 수 있으므로 이를 단순화하거나 경험상수를 도입한 많은 공식이 개발되었다. 이러한 동적공식은 450개 이상이 제안되어 이용되고 있는 것으로 알려지고 있다(US DOT, 1984).

표 2.1 주요 동적공식의 개요

공식명	공식 및 적용변수
Hiley공식	$R_u = \frac{e_h \cdot W_r \cdot H}{S+(C_c+C_p+C_q)/2} \cdot \frac{W_r+n^2W_p}{W_r+W_p}$ R_u : 극한지지력(ton), e_h : 해머효율 H : 낙하고(cm), W_r : 램중량(ton) W_p : 말뚝중량+말뚝머리부착물 중량(ton) S : 타격당 관입량(cm) C_c : 말뚝머리 부착물의 탄성변형량(cm) C_p : 말뚝재료의 탄성변형량(cm) C_q : 지반의 탄성변형량(cm) n : 해머와 말뚝머리의 반발계수
ENR공식	$R_u = \frac{W_r \cdot H}{S+0.25}$ R_u : 극한지지력(ton), W_r : 램중량(ton) H : 낙하고(cm) S : 타격당 관입량(cm)
Danish공식	$R_u = \frac{e_h \cdot W_r \cdot H}{S+C_1}$ $C_1 = \sqrt{\frac{e_h \cdot W_r \cdot H \cdot L}{2AE_p}}$ R_u : 극한지지력(ton), e_h : 해머효율, H : 낙하고(cm) S : 타격당 관입량(cm), L : 말뚝 관입길이(cm) A : 말뚝의 단면적(cm^2) E_p : 말뚝의 탄성계수(ton/cm^2)
Gate공식	$R_u = 4.0\sqrt{e_h \cdot W_r \cdot H}\ \log(25/S)$ R_u : 극한지지력(ton), S : 타격당 관입량(cm) e_h : 드롭해머(0.75), 기타해머(0.85) $W_r \cdot H$: 타격에너지(t·cm)
일본건설성고시식 (J2)	$R_a = \frac{E}{5S+0.1}$ R_a : 허용지지력(ton), E : 타격에너지(ton·m) S : 타격당 관입량(m)

대표적인 동적공식으로는 표 2.1과 같은 엔지니어링 뉴스공식, Hiley공식, Danish공식, Gate공식, Janbu공식 등을 들 수 있다. 에너지 보전법칙 및 충격이론에 근거한 동적공식들은 적용하는데 있어 가정조건을 포함하여 여러가지 문제점이 있는데 이를 고찰하면 다음과 같다.

◦ 동적공식에서는 말뚝을 한 개의 집중 질량으로 간주함으로써 말뚝이 지반에 관입되는데 영향을 주는 말뚝의 길이나 강성도, 시간의존적인 응력 및 변형의 거동 등이 무시되고 따라서 실제적인 항타조건과 거리가 있다.

◦ 동적공식에서 산출되는 흙의 저항력은 정적지지력과 같은 것으로 가정된다. 그러나 항타중에 발생하는 말뚝의 지지력에는 정적 저항력외에 높은 전단변형율(high shear rate)에 의해서 발생하는 동적 저항력도 포함되어 있다.

◦ 동적공식에서 산출되는 흙의 저항력은 항타시점에서의 저항력이다. 따라서 산출된 지지력은 시간경과에 의해서 변할 수 있는 값이다. 결국, 동적공식에 의한 지지력은 시간효과와도 관련되어 있으므로 지반조건과 관계가 있다.

◦ 동적공식에서는 복잡한 항타 시스템을 너무 간단하게 가정함으로써 항타 시스템내의 각종 요소들에 의한 에너지 손실 및 에너지의 분포, 장비의 성능 등을 고려하지 못하고 있다.

상기와 같은 문제점에도 불구하고 동적공식들은 간편성 및 적용성이 인정되어 많은 연구가 오래전부터 최근까지 계속적으로 수행되었으며 대표적으로 Peck(1941), Chellis(1961), Agerschou(1962), Olson 등(1967), Tavenas 등(1972), George 등(1979), Tejchman 등(1984), 황(1987), Fragasny(1988), Broms 등(1988), 이 등(1992), Paikowsky 등(1994, 1966), Cheng 등(1996), 홍 등(1997) 등의 연구를 들 수 있다.

이들 연구중 초기 연구들은 항타공식의 부정확성에 초점을 둔 반면, 후기 연구들은 항타분석기 등의 장비를 이용하여 동적공식의 신뢰도를 높이는데 목표를 두고 있다. 그러나 아직까지도 전술한 문제점을 모두 만족할 수 있는 방법을 제시하고 있는 연구는 없는 것으로 평가된다.

Peck(1941), Tavenas 등(1972)의 연구들은 항타공식의 신뢰도에 대해 매우 부정적인 연구결과를 제시하고 있으며, 특히 Tavenas 등(1972)의 연구는 이에 대한 이유로 에너지 전달의 문제점과 시간경과효과의 미반영을 주요 원인으로 보고하고 있다. Broms 등(1988), Cheng 등(1996)의 연구는 전술한 문제점 중 네 번째 문제에 주안을 두어 식(2.2)와 같이 Hiley 공식중 타격에너지와 리바운드량을 항타분석기 및 항타시 측정값으로 대체하여 산출한 지지력을 동재하시험 결과와 비교하여 ±25.0% 정도의 신뢰도를 갖는다고 보고하였다. 그러나 전술한 동적공식의 나머지 문제점들에 대해서는 고려되지 않았다.

$$R_u = \frac{EMX}{S + \frac{1}{2}(c_p + c_q)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (2.2)$$

여기서, EMX : 항타분석기로 측정된 말뚝에 전달된 에너지

Paikowsky(1994, 1996)는 에너지 보존법칙에 근거하여 식(2.2)를 유도한 후 여기서 계산된 값을 최대 저항력으로 간주하여 정재하시험 결과와 비교함으로써 식(2.3)와 같은 정적 지지력 계수를 결정하여 이의 신뢰도를 비교, 평가하였다.

$$K_{sp} = \frac{R_{st}}{R_u} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (2.3)$$

여기서, R_u : 동적공식에 의한 지지력

R_{st} : 정재하시험에 의한 지지력

K_{sp} : 정적지지력 계수

Paikowsky는 제안된 방법은 동재하시험(CAPWAP) 결과보다도 더 잘 맞는 것으로 보고하고 있는데, 이는 제한된 데이타의 이용과 비교된 동재하시험 및 정재하시험의 값에 있어서 시간경과효과가 명확하게 반영되지 않은 것에 기인하는 것으로 평가된다. 한편 Paikowsky는 K_{sp}의 보수적인 값으로 0.8을 제안하였다.

FHWA(US DOT, 1996)에는 특정한 조건 외에는 동적공식의 적용을 추천하지 않고 있으며 대신 WEAP 혹은 항타분석기를 이용한 측정 및 분석을 적용할 것을 제안하고 있다. 그러나 최근 항타분석기를 이용한 동적시험기가 확대보급됨에 따라 이를 이용하면 전술한 동적공식의 문제점을 어느 정도 해결할 수 있다는 점에서 본 방법의 고유의 장점인 간편성 및 보편성을 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

홍 등(1997)의 연구는 전술한 동적공식의 문제점을 해결하는데 있어 앞서의 연구보다 실용적인 결과를 제시하고 있다. 홍 등(1997)의 연구에서는 말뚝에 전달된 에너지, 말뚝의 소성 및 탄성침하량으로 실측값을 적용하여 계산된 값을 항타시(EOID) 지지력 값과 비교함으로써 전술한 문제점 중 세 번째 문제를 해결하고자 했으며 또한 현장안전율(site specific factor of safety) 및 현장별 적용공식을 도입함으로써 지반조건, 동적조건, 현장조건 등의 다른 문제점들을 통합조정하여 신뢰도를 높인 것으로 평가할 수 있다.

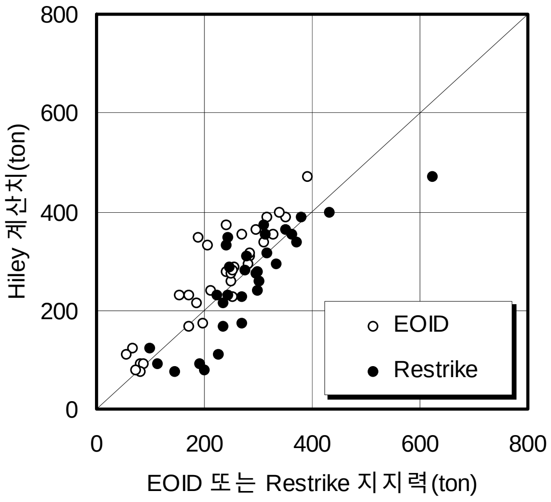
동적공식의 네가지 문제점중 고유의 가정조건에서 연유되는 첫 번째 항목을 제외하면 다른 문제점들은 해결할 수 있다고 판단되며 이러한 문제점들이 해결될 경우 동적공식을 이용한 지지력 예측방법의 가장 큰 장점인 간편성을 현장에서 충분히 활용할 수 있을 것으로 보이며 더욱이 최근에는 항타분석기의 사용이 용이해 졌으므로 이를 이용할 경우 신뢰성있는 동적공식의 개발이 가능할 것으로 평가된다.

3. 기존 동적공식의 신뢰도 평가

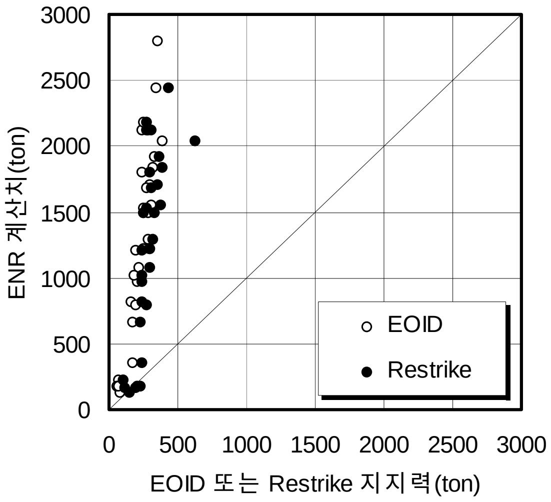
그림 3.1은 기존의 동적공식들에 대한 신뢰도를 평가하기 위해 동적공식으로 계산된 지지력값과 항타시 및 재항타시의 실측지지력값을 비교분석한 것이다. 분석에 이용된 자료는 6개 지역의 실물실험 결과들로써 일정현장의 데이타 편중을 없애기 위해 각 현장별로 4개씩의 데이타를 선정하였다(광양현장의 경우 2개 지점, 시흥현장의 경우 2종류의 말뚝을 시공하였으므로 8개 자료 선정). 분석된 동적공식은 많이 알려진 4개의 동적공식(ENR 공식, Hiley 공식, Danish 공식, Gate 공식)을 이용하였으며 계산조건은 표 3.1과 같다. 각 동적공식에 의한 계산시에는 보다 합리적인 신뢰도 평가를 위해 가능한한 현장에서 측정한 실측치를 이용하였으며 해머효율은 특별한 제안값이 없는 경우는 WEAP에서의 제안치 $(e_h = 0.95)$를 입력하였다. 표 3.2에는 분석 결과를 요약하였다.

그림 3.1에서와 같이 각 공식들의 신뢰도는 일부분 실측치를 입력하였음에도 불구하고 전체적으로 낮은 것으로 평가할 수 있다.

동적공식에 의한 지지력은 말뚝을 항타할 때의 지지력인 바 항타시 실측지지력과 양호한 상관관계를 나타내 주어야 한다. 또한, 동적공식 계산결과에는 동적저항도 포함되어 있으므로 동적저항을 제거한 항타시 실측지지력보다는 큰 값을 가져야 한다. 그럼에도 불구하고 그림 3.1에 나타난 바와 같이 동적공식에 의한 지지력은 재항타시 지지력과 더 좋은 상관관계를 갖는 것처럼 보인다. 이는 과거의 동적공식 연구자들이 항타로부터 상당한 시간이 경과한 후의 말뚝지지력과 연계하여 공식을 보정하였기 때문으로 판단된다.

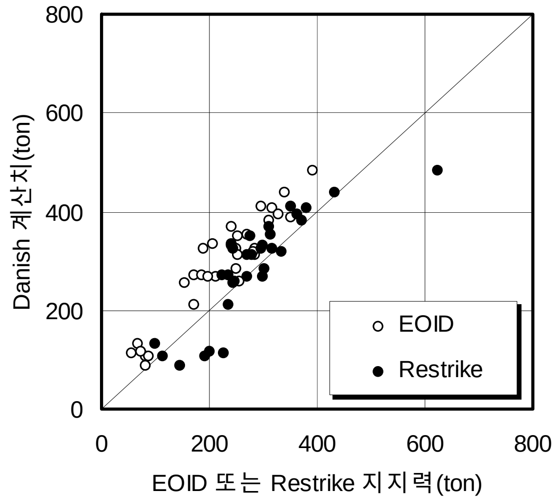


(a) Hiley 공식 계산값과 실측치의 비교

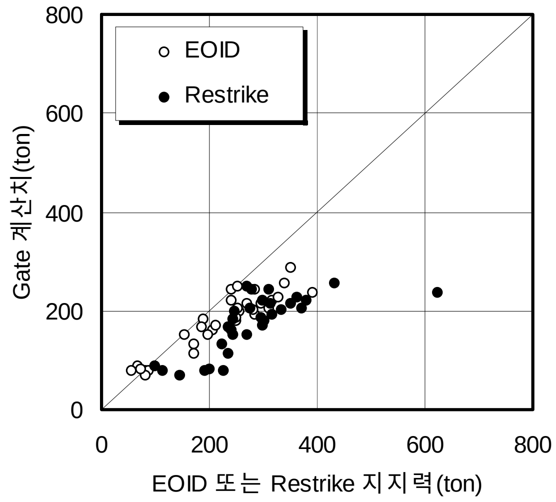


(b) ENR 공식 계산값과 실측치의 비교

그림 3.1 동적공식에 의한 계산값과 실측치의 비교(계속)



(c) Danish 공식 계산값과 실측치의 비교



(d) Gate 공식 계산값과 실측치의 비교

그림 3.1 동적공식에 의한 계산값과 실측치의 비교

표 3.1 분석에 이용된 동적공식의 계산방법

공식이름	공식 및 변수	입력방법
Hiley 공식	$R_u = \frac{e_h \cdot W_r \cdot H}{S+(C_p+C_q)/2} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$ R_u : 극한지지력(ton), e_h : 해머효율 H : 낙하고(cm) W_r : 램중량, W_p : 말뚝중량+말뚝머리부착물 중량 S : 타격당 관입량(cm) C_p : 말뚝재료의 탄성변형량(cm) C_q : 지반의 탄성변형량(cm) n : 해머와 말뚝머리의 반발계수	e_h = 0.95 H : 실측치 $C_p + C_q$: 실측치 n = 0.5 S : 실측치
ENR 공식	$R_u = \frac{W_r \cdot H}{S+0.25}$ R_u : 극한지지력(ton), W_r : 램중량(ton) H : 낙하고(cm), S : 타격당 관입량(cm)	H : 실측치 S : 실측치
Danish 공식	$R_u = \frac{e_h \cdot W_r \cdot H}{S+C_1}$ $C_1 = \sqrt{\frac{e_h \cdot W_r \cdot H \cdot L}{2AE}}$ R_u : 극한지지력(ton), e_h : 해머효율, H : 낙하고(cm), S : 타격당 관입량(cm) L : 말뚝관입길이(cm), A : 말뚝의 단면적 (cm^2) E_p : 말뚝의 탄성계수 (ton/cm^2)	e_h = 0.95 C_1 : 계산치 S : 실측치
Gate 공식	$R_u = 4.0\sqrt{e_h \cdot W_r \cdot H}\ \log(25/S)$ R_u : 극한지지력(ton), S : 타격당 관입량(cm) e_h : 드롭해머(0.75), 기타해머(0.85) $W_r \cdot H$: 타격에너지(t·cm)	e_h = 0.85 H : 실측치 S : 실측치

표 3.2

전술한 바와 같이 동적공식으로부터 얻어진 지지력은 실제값과는 의미가 다르므로 지지력의 절대치 비교로 신뢰도를 평가하는 것은 문제가 있다. 따라서 그림 3.1과 같은 방식의 신뢰도 평가를 위해서는 지지력의 절대치 비교보다는 지지력의 분포와 분산의 비교가 더 합리적일 것이다. 따라서 이러한 사실과 앞의 분석내용을 고려하여 정성적으로 동적공식의 신뢰도를 평가해보면 4개 공식중 Danish 공식과 Hiley 공식이 비교적 신뢰도가 있는 것으로 평가된다.

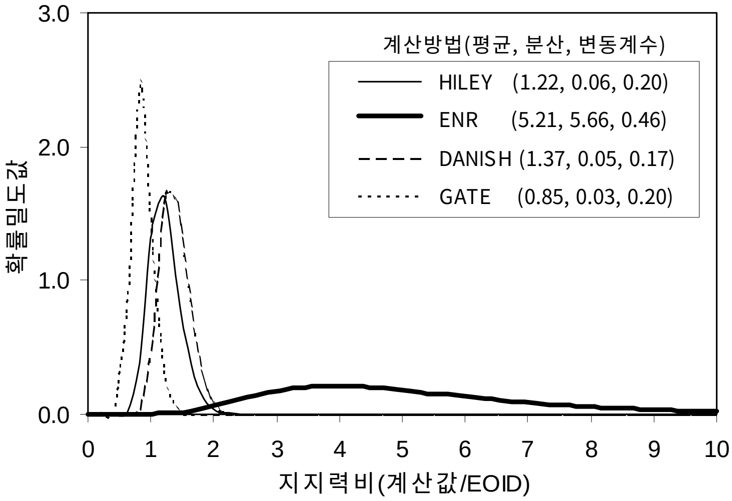


그림 3.2 기존 동적공식의 신뢰도 평가

그림 3.2에는 그림 3.1의 정성적인 분석내용을 정량적으로 평가해보기 위해 항타시 지지력에 대한 동적공식으로 계산된 지지력의 비(동적공식에 의한 지지력/항타시 지지력)를 대수정규확률분포곡선으로 분석해 보았다. 확률분포함수에는 여러 가지가 있지만 대수정규확률분포함수가 적용된 이유는 비대칭인 지지력비의 분포상태와 지지력비의 값($0 \le f(x) \le \infty$)을 잘 표현할 수 있기 때문이다. 또한, 그림에는 통계분석에 의해 평균, 분산, 변동계수(coefficient of variation = 편준편차/평균)를 나타내었다. 곡선의 폭이 좁을수록, 변동계수값이 작을수록 예측방법의 신뢰도가 높음을 의미하며 또한 곡선의 첨두값의 위치(혹은 곡선면적의 중심)는 1.0을 중심으로 과대 또는 과소평가함을 의미한다.

그림 3.2를 통해서 그림 3.1의 결과를 더욱 분명히 확인할 수가 있다. 즉, 지지력값의 분포와 확률분포의 분산이 동적공식의 신뢰도를 좌우한다고 볼 때 Hiley 공식, Danish 공식이 비교적 신뢰도가 높고 ENR 공식의 경우 신뢰도가 매우 낮음을 알 수가 있다. Gate 공식의 경우 분산 및 변동계수는 우수하나 평균치가 1.0보다 작은 것을 고려할 때 신뢰도를 높이기 위해서는 계수조정이 필요할 것으로 판단된다.

결과적으로 3.3절에서 논의한 바와 같이 동적공식에 의한 지지력과 실측치는 물리적인 의미에서 서로 다른 개념이기 때문에 이들을 대상으로 신뢰도를 논의하는 것은 의미가 없다고 볼 수 있으며 그동안 이에 관한 많은 연구들은 엄밀한 의미에서 신뢰도 평가가 아닌 단순히 두 절대치를 비교한 후 이의 오차를 안전율로 보완하는 것이라고 평가된다.

4. 새로운 동적공식의 유도

3장에서 논의한 바와 같이 지금까지 제안된 동적공식들은 항타에 의한 지지력 특성을 충분히 묘사하지 못하였으므로 신뢰도도 낮은 것으로 판단된다. 동적공식의 문제점들 중 가정조건에 대한 문제를 제외하면 기존의 동적공식에 대한 한계점은 크게 동적지지력의 포함, set-up효과의 미반영, 에너지 손실의 부적절한 고려 등 세 가지를 지적할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 한계점을 해소할 수 있는 동적공식을 유도해 보고자 한다. 동적공식의 유도는 에너지 보존법칙을 기본 이론으로 하되 적용변수들은 항타분석기를 이용한 실측값을 적용하도록 함으로써 신뢰도를 높이는데 목적을 두었다.

Smith(1960)의 파동방정식에 대한 기본모델에서 처럼 타입말뚝에 있어 변위와 저항력의 관계는 그림 4.1과 같이 소성변위(set value, S)와 탄성변위(q)에 의한 저항력의 변화로 표현할 수 있다. 이 경우 말뚝이 한 일은 식(4.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = R_t(S + \frac{q}{2}) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.1)$$

여기서, W : 말뚝이 한 일

R_t : 말뚝의 항타시 전체저항력

S : 소성 변위량

q : 말뚝과 흙의 탄성 변위량

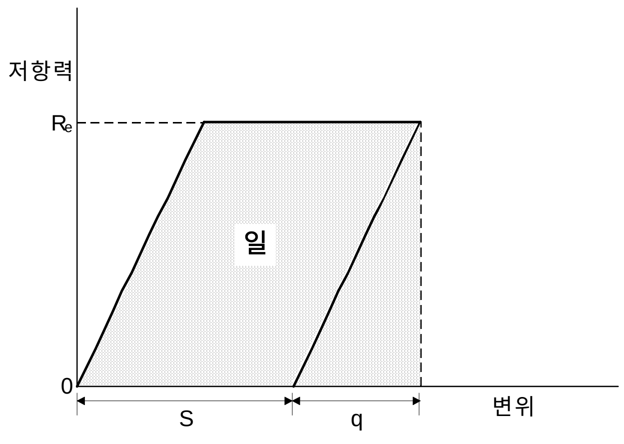


그림 4.1 항타시 말뚝머리에서의 변위량과 저항력의 관계

식(4.1)에서 항타시 전체저항력은 식(4.2)와 같이 정리할 수 있다.

$$R_t = \frac{W}{S + q/2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.2)$$

항타분석기를 이용하면 말뚝에 전달된 에너지(EMX), 말뚝과 흙의 탄성변위량(q)은 각각 식(4.3)과 식(4.4)에 의해 구할 수 있다(PDI, 1995).

$$EMX = E(t)_{max} = \int_0^t V(t) \cdot F(t) \cdot dt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.3)$$

$$q = \int_0^t V(t) \cdot dt - S$$

$$= DMX - S \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.4)$$

여기서, $V(t)$: 게이지 위치에서 측정된 속도

$F(t)$: 게이지 위치에서 측정된 힘

DMX : 게이지 위치에서 최대 변위량

식(4.2)에 식(4.3)과 식(4.4)를 대입하여 정리하면 식(4.5)와 같다.

$$R_t = \frac{EMX}{S + \frac{1}{2}(DMX - S)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.5)$$

식(4.5)에서 R_t는 항타시 전체저항력이므로 동적저항 (R_d)과 정적저항(R_s)의 합으로 볼 수 있다. 여기서 항타시의 동적저항은 주요 영향변수가 말뚝 선단부의 속도에 영향 받는다는 가정하에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_d = J_v \cdot V_t = J_s \cdot V_t \cdot R_s = J_c \cdot Z \cdot V_t \quad \cdots\cdots\cdots \quad (4.6)$$

여기서, J_v : Viscous damping상수 (t/m/s)

J_s : Smith damping상수 (s/m)

J_c : Case damping상수 (무차원)

Z : 임피던스 (t/m/s)

V_t : 말뚝 선단부의 속도 (m/s)

항타분석기를 이용한 지지력 계산시 Case 방법 및 CAPWAP 방법에서는 각각 Case damping 상수와 Smith damping ($R_s \fallingdotseq R_{ul}$ 가정)상수를 적용하고 있다. 따라서 항타시 전체저항력 (R_t)을 식(4.7) 및 식(4.8)과 같이 동적 및 정적지지력의 합으로 나타낸 후, 두 damping상수를 적용하여 정적지지력 (R_s)에 대해서 풀면 식(4.9)와 식(4.10)처럼 나타낼 수 있다.

$$R_t = R_d + R_s$$

$$= J_s \cdot V_t \cdot R_s + R_s \text{ (Smith damping 적용)} \cdots\cdots \quad (4.7)$$

$$= J_c \cdot Z \cdot V_t + R_s \text{ (Case damping 적용)} \cdots\cdots\cdots \quad (4.8)$$

$$R_s = \frac{R_t}{1 + J_s \cdot V_t} \text{ (Smith damping 적용)} \cdots\cdots\cdots \quad (4.9)$$

$$= R_t - J_c \cdot Z \cdot V_t \text{ (Case damping 적용)} \cdots\cdots\cdots \quad (4.10)$$

식(4.9)와 식(4.10)에서 얻어진 정적저항력 (R_s)은 항타시의 값이므로 실제적으로 설계에서 고려되는 장기지지력 (R_{lt})은 항타시 저항력에 지지력증가비를 고려하여야 한다. 즉, 말뚝의 장기 지지력 (R_{lt})은 식(4.11)과 식(4.12)에 지지력증가비를 반영한 후 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$R_{lt} = R_s \cdot S_f$$

$$= \left(\frac{S_f}{1 + J_s \cdot V_t}\right) \cdot \frac{EMX}{S + \frac{1}{2}q} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.11)$$

$$= S_f\left(\frac{EMX}{S + \frac{1}{2}q} - J_c \cdot Z \cdot V_t\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.12)$$

최종적으로 유도된 동적공식의 모든 변수는 현장에서 시항타시 항타분석기를 이용하면 측정이 가능하며 이를 적절히 활용할 경우 모든 말뚝의 품질관리가 가능하다고 판단된다. 변수중 S와 q는 항타분석기로도 측정이 가능하지만 이들 변위는 가속도를 두 번 적분한 값이고, 특히 연속항타에 의해 S의 정확도는 의문시 되는 경우가 많으므로 수동계측값을 이용하는 것이 보다 정확할 것으로 판단된다.

또한 damping상수 $(J_c,\ J_s)$ 및 지지력증가비 (S_f)의 산출이 용이하지 않을 경우는 5.4절에서 제안한 평균값 혹은 항타분석기 지침서(PDI, 1995)에서 제안하는 표준값을 참고할 수가 있을 것이다.

앞서 제안된 수정 동적공식은 물리적인 개념에서 실측값에 가깝게 표현했다는 점에서 의의가 있지만 여전히 가정조건의 문제가 해결되지 않았고, 또한 정확한 지지력을 구하기 위해서는 적절한 damping상수와 지지력증가비를 결정해야 하는 점이 있다. 그런데 damping상수와 지지력증가비는 지반조건과 항타조건에 관계되는 것이므로 이는 현장마다 특성화시킬 수 있다고 판단된다. 따라서 동적공식중 가장 큰 문제로 지적되는 에너지 전달문제는 실측값을 활용하는

방법을 바탕으로하고 damping 문제 및 지지력증가비는 현장별 보정치를 도입할 수 있다면 전술한 각종 동적공식의 문제를 단순화한 상태에서 해결할 수 있을 것으로 추정된다. 이러한 내용을 식(4.5)와 관련시켜 표현하면 다음과 같다.

$$S_a = \frac{\sum\left(\frac{R_{t_i}}{R_{u_i}}\right)}{m} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.13)$$

여기서, S_a : 현장보정계수

R_{t_i} : 동적공식을 이용한 항타시 지지력(식(4.5) 이용)

R_{u_i} : 항타분석기로 얻은 항타시 지지력

m : 시험수량

소수의 항타분석기결과를 이용하여 식(5.22)로부터 현장보정계수를 구한 후 간단한 항타기록(S, q)을 이용하여 다음의 식으로 항타시 지지력을 구할 수 있다.

$$R_u = \frac{R_t}{S_a}$$

$$= \frac{1}{S_a} \cdot \frac{EMX}{S + \frac{1}{2}q} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.13)$$

또한, 장기지지력은 지지력증가비를 고려하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{lt} = R_u \cdot S_f$$

$$= \left(\frac{S_f}{S_a}\right) \cdot \frac{EMX}{S + \frac{1}{2}q} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.14)$$

식(4.11), 식(4.12), 식(4.15)에서 S_a와 S_f는 현장에서 시항타 시에 소수의 시험으로 구할 수 있다. 또한, EMX는 낙하높이를 조정함으로써, S와 q는 항타시 간단한 수동측정에 의해서 모든 말뚝에 대해 측정이 가능하다. 따라서 제안된 식들을 이용하면 시항타시 소수 시험을 실시한 후, 간단한 측정으로 모든 말뚝에 대해 지지력을 예측하는 것이 가능하게 된다.

5. 새로운 동적공식의 신뢰도

4장에서 제시한 동적공식은 기존의 공식과는 달리 현장에서의 항타저항력에 대한 물리량을 보다 명확히 하고 또한 입력변수로 실측치를 활용하도록 하였으며 아울러 설계개념에서 중요한 지지력증가비를 고려하였다. 이러한 개념으로 유도된 새로운 공식의 신뢰도를 평가하기 위해 새로운 공식에 의한 계산값과 실측값을 비교하였다. 분석에 이용된 데이타는 4장에서와 같으며 표 5.1과 같은 방법으로 계산한 후 계산결과를 표 5.2에 정리하였다.

표 5.1 새로운 동적공식의 계산방법

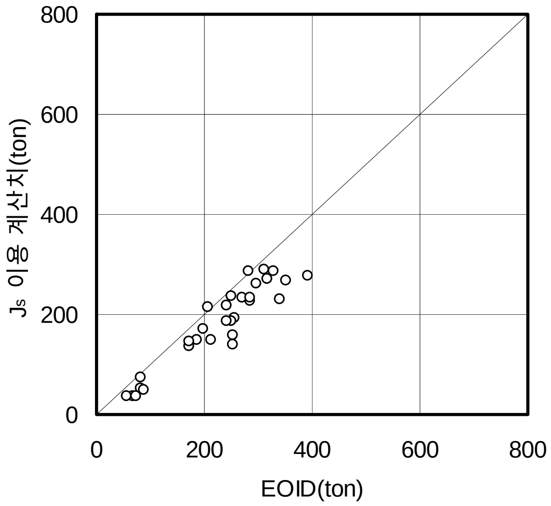
<table>
<tr><th>적용공식</th><th>공식 및 변수</th><th>입력방법</th></tr>
<tr><td>Case damping 적용 식(4.12)</td><td>$R_{lt} = S_f\left(\frac{EMX}{S+\frac{1}{2}q} - J_c \cdot Z \cdot V_t\right)$</td><td rowspan="3">$S_f$: 실측값(CAPWAP)
EMX : 실측값(CAPWAP)
J_c, J_s : 실측값(CAPWAP)
V_t : 실측값(CAPWAP)
S : 실측값(수동)
q : 실측값(수동)
S_a : 실측값(CAPWAP)과 계산값비의 평균</td></tr>
<tr><td>Smith damping 적용 식(4.11)</td><td>$R_{lt} = \left(\frac{S_f}{1+J_s \cdot V_t}\right) \cdot \frac{EMX}{S+\frac{1}{2}q}$</td></tr>
<tr><td>현장 보정계수 적용 식(4.15)</td><td>$R_{lt} = \frac{S_f}{S_a} \cdot \frac{EMX}{S+\frac{1}{2}q}$</td></tr>
<tr><td>비고</td><td>S_f : 지지력 증가비
S_a : 현장보정계수
EMX :말뚝에 전달된 최대에너지(t·cm)
S : 말뚝의 소성침하량(cm)
q : 말뚝과 흙의 탄성변위량(cm)</td><td>J_c : Case damping상수 (RSP 혹은 RMX)
J_s: Smith damping상수 (cm/s)
V_t : 말뚝 선단부의 속도(cm/s)
Z : 말뚝의 임피던스(t/cm/s)</td></tr>
</table>

표 5.2

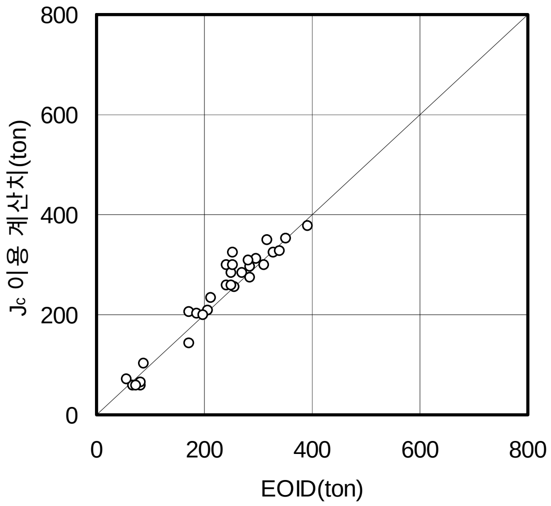
그림 5.1에서와 같이 수정공식에 의한 계산값은 실측치에 근사함을 알 수가 있다. 두 공식중 Case damping상수를 적용한 공식이 Smith damping상수를 적용한 식보다 실측치에 근사하고 또한 후자의 경우는 전체적으로 실측치보다 작게 산정하고 있음을 알 수 있다. Smith damping상수를 적용한 식이 실측값보다 작게 평가되는 것은 CAPWAP에서는 R_s값을 고정시키기 위해 R_{ul}값으로 대체하고 있는데, 식(4.6)에서와 같이 정적지지력 (R_s)은 속도(V), 즉 변위값에 따라 변화되므로 말뚝이 충분히 모빌라이즈되지 못하였을 경우는 상대적으로 R_s값이 작게 표현되는 것이라고 판단된다.

그림 5.2는 지지력증가비를 고려한 수정공식 식(4.11), 식(4.12), 식(4.15)를 이용하여 계산한 값과 실측치를 비교한 것이다. 계산은 표 5.1의 방법에 따라 하였고 결과는 표 5.2에 나타내었다. 분석결과는 그림 5.1에서 분석한 내용과 유사한데, 특히 현장보정계수를 도입하여 단순화한 식(4.15)의 결과가 실측값과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수가 있다. 이는 Case 방법 역시 동적저항의 주요 영향변수로 선단속도를 취한 기본적인 가정문제에 한계가 있으며 이러한 문제들은 현장보정계수로 보완할 수 있음을 보여주는 것이다. 분석한 식들로 얻어진 지지력은 지지력증가비에 크게 의존하므로 현장에서 측정하여 평가하는 지지력은 지지력증가비의 값에 따라 적용할 수 있는 설계지지력도 차이가 있게 된다.

그림 5.3에는 새로운 동적공식의 신뢰도를 평가하기 위해 그림 5.2의 내용을 대수정규확률분포함수로 나타낸 것이다. 대수정규확률분포함수의 적용은 5.5.2절에서 설명한 바와 같다. 그림 5.3에서와 같이 확률밀도함수의 모양, 평균, 분산, 변동계수 등으로부터 각 방법의 신뢰도를 판단할 때 현장보정계수 적용방법과 Case damping상수 적용방법이 신뢰성이 있는 것으로 평가된다.



(a) Smith damping상수 적용(식(4.9))



(b) Case damping상수 적용(식(4.10))

그림 5.1 새로운 공식에 의한 계산치와 실측치의 비교

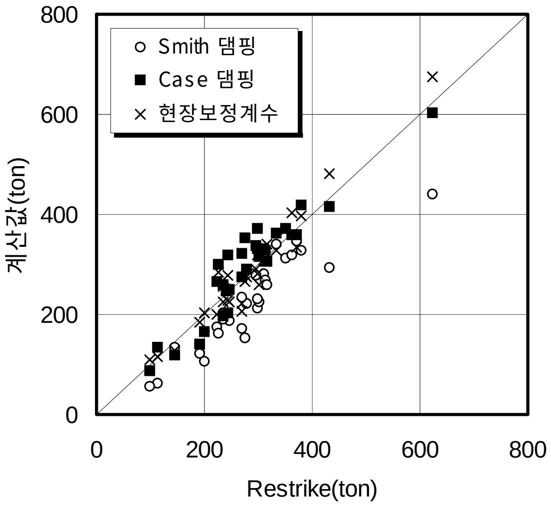


그림 5.2 새로운 동적공식에 의한 계산값과 실측치의 비교

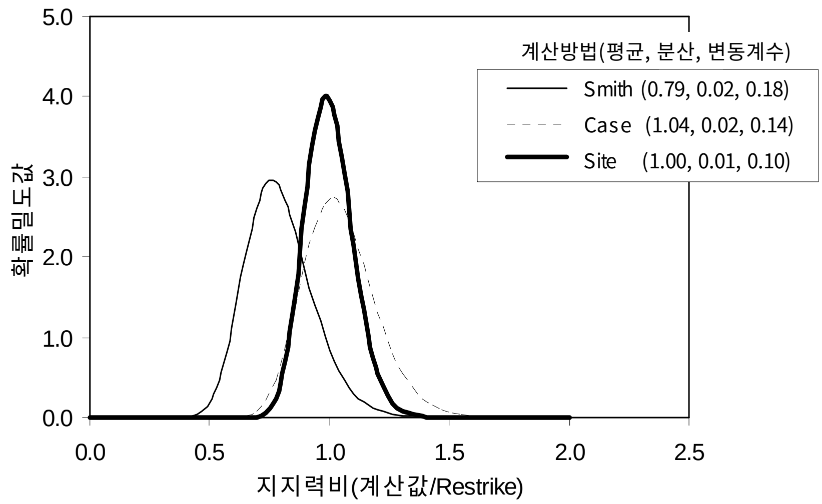


그림 5.3 새로운 동적공식의 신뢰도

6. 결론

Peck(1942)이 "동적공식으로 지지력을 계산하는 것 보다는 추측하는 편이 더 낫다."라고 할 만큼 동적공식의 신뢰도는 매우 낮은 것으로 평가되어 왔다. 그럼에도 불구하고 동적공식은 시공 말뚝 전부에 대해 간편하게 품질관리를 수행할 수 있는 유일한 방법이라 할 수 있다. 동적공식의 장점은 지나치게 강조되어 현실적으로도 동적공식은 실무에 있어 높은 호응을 받고 있으며 이러한 경향은 향후에도 계속될 것으로 전망된다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 동적공식의 문제라고 볼 수 있는 가정조건의 비현실성, 동적저항력의 무시, 항타에너지의 전달, set-up효과의 미고려 등을 해결할 수 있는 방안을 제시하였다. 본 논문에서 제안된 방법의 기본사항은 일찌기 Terzaghi(1943)의 언급 "동적공식은 근본적으로 결점이 있기 때문에 얻어진 지지력은 신뢰성이 없으며 따라서 동적공식의 신뢰도를 높이기 위해서는 타격시 말뚝에 전달된 동적 측정결과를 이용하는 것이 필요하다."와도 부합된다. 지금까지의 많은 연구결과들은 상기의 문제들을 충분히 고려하지 않고 동적공식에 의한 지지력과 정재하시험에 의한 지지력을 직접 비교하는 경우가 많았는데 엄밀한 의미에서 합리적인 신뢰도 평가가 되었다고 볼 수 없다. 사실상 비교하는 두 값은 물리적으로 같은 개념이 아니다.

제안된 동적공식은 에너지 보존법칙에 근거하여 유도되었으며, 동적저항력을 제거하기 위해 damping상수를, 그리고 set-up효과를 고려하기 위해 지지력증가비를 도입하였다. 또한, 항타에너지 전달문제를 해결하고 보다 정확한 지지력을 산출할 수 있도록 동적측정기를 이용한 실측자료를 이용하도록 제안하였다. 유도된 공식중 동적저항력을 제거하는 데 있어 Smith damping상수를 이용하는 것보다는 Case damping상수를 이용하는 것이 더 신뢰도가 있었으며 또한 현장보정계수를 이용한 방법도 신뢰도가 있었다. 실무적인 관점에서는 적용이 간편한 현장보정계수를 이용한 방법이 효과적이라 판단된다.

set-up효과와 관련된 지지력의 예측은 현장자료를 기준하지 않는 한 그 정확도가 거의 없다는 것이 필자의 생각이며 이러한 관점에서도 소수의 시험을 바탕으로 하는 본 연구에서 제안된 방법은 만족할 만한 품질관리방안으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 홍헌성, 조천환, 김성회, 엄재경, 이명환(1997), “항타공식에 의한 말뚝지지력 산정의 신뢰도 연구”, '97 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.55 62.
2. 황정규(1987), “파동이론 및 잔류응력에 의한 항타해석”, 박사학위 논문, 한양대학교 대학원, pp.93.
3. Agerschou, H.A.(1962), "Analysis of the Engineering News Pile Formula", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 88, No. SM5, Oct. 1962, pp.1 11.

4. 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.591 600.

5. 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.

6. GRL Associates, Inc.(1996a), CAPWAP User Manual

7. Olson, R.E. and Flaate, K.S.(1967), "Pile-Driving Formulas for Friction Pile in Sand", ASCE, Vol. 93, No. SM6, Jan. 1967, pp.279 295.

8. Paikowsky, S.G. and Chernauskas, L.R.(1992), "Energy Approach for Capacity Evaluation of Driven Piles", F. Barends(ed.), Proceedings of Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, A.A. Balkema, The Hague, pp.595 601.

9. Paikowsky, S.G. and LaBelle, V.A.(1996), "Examination of the Energy Approach for Capacity Evaluation of Driven Piles", Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Pile, pp.1133 1149.

10. Palisade Corporation(1996), BestFit, Probability Distribution Fitting For Windows.

11. 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.

12. Peck, R.B.(1942), "Discussion to Pile Driving Formulas : Progress Report of the Committee on the Bearing Value of Pile Foundations", Proc. ASCE, 68, pp.323 324.

13. Pile Dynamics, Inc.(1995), PDA User Manual.

14. Poulos, H. G., and Davis, E. H.(1980), Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley and Sons, pp.52 58.

15. Sakai, T., Sawai, H. and Shioi, Y.(1996), "Theoretical Analysis of the Pile Driving Formula", Proceedings of the 5th Int. Conf on the Application of Stress-Wave Theory to Pile, pp.81 88.

16. 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.

17. Tejchman, A. and Klos, J(1984), "An Example of Dynamic Formulae Determined on the Basis of Field Load Test", Proceedings of the Second International Conference on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm, pp.58   63.
18. Terzaghi, K.(1943), Theoretical Soil Mechanics, NewYork, Wiley, pp.136   143.