

콘크리트말뚝 타입시 발생하는 압축응력의 산정식에 관한 연구

A Study on the Formulae for the Compressive Stresses
in Concrete Piles during Driving

임 중 석*
Lim, Jong-Seok

Abstract

Maximum stress in pile is developed when it is driven. If the stress is greater than allowable stress of the pile, the pile will be damaged and result in stability problem. Therefore, the stress should be estimated correctly beforehand and overstress should be prevented during pile driving. There are many methods to estimate compressive stresses in concrete piles when they are driven. Nowadays, computer analysis on wave equation offers a satisfactory results. But, under certain circumstances, application of this method is difficult. Then, estimation of the stress utilizing simple formulae might be practical. In this study, relatively reasonable formulae were selected and the stresses which were measured in situ and calculated from the formulae were compared and analysed. The results show that the calculated values from Uto and Huyuki's formula were reasonably accurate and more accurate values were acquired if the values are modified by multiplying the reduction factors according to ground and construction conditions.

요 지

말뚝은 타입될 때 가장 큰 응력이 발생하며 이 응력이 말뚝의 허용응력보다 크면 말뚝이 손상되어 위험을 초래할 수 있다. 따라서 사전에 이를 정확히 예측하여 과도한 항타를 미연에 방지해야 한다. 콘크리트말뚝 타입시 말뚝에 발생하는 압축응력의 예측방법은 여러 가지가 있으며 현재는 파동이론의 전산해석으로 만족스러운 결과를 얻을 수 있다. 그러나 경우에 따라서는 이 방법의 적용이 곤란할 수 있으며, 이 때에는 간단한 산정식을 적용하는 것이 실용적이다. 본 연구에서는 이 산정식들 중 비교적 합리적이라고 평가되는 산정식들만을 선정하고 현장에서 실측한 항타응력과 선정된 산정식들로부터 구한 값을 비교, 분석하였다. 그 결과 Uto와 Huyuki의 식이 비교적 정확한 값을 제공하며 지반 및 시공조건에 따라 이 값에 감소계수를 곱하여 수정하면

* 정회원, 목포대학교 공과대학 토목공학과 조교수

보다 더 정확한 값을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Pile driving, Compressive stress, Concrete pile, Uto and Huyuki's formula, Reduction factor, Ground condition, Construction condition

1. 서 론

말뚝기초를 설치할 때에는 말뚝이 설치될 지반의 지지력이 상부구조물의 하중을 지지하기에 충분한지와 말뚝의 허용응력이 상부구조물로 인하여 말뚝에 발생하는 응력보다 큰지를 검토해야 한다. 안전한 말뚝기초의 설치에 이와 같은 검토를 거침으로써 이루어지게 된다.

말뚝을 설치하는 방법에는 여러 가지가 있다. 타입공법은 그중의 하나로써 현재 많은 제약조건이 있음에도 불구하고 아직까지는 가장 일반적으로 적용되고 있는 방법이다. 타입공법을 적용하여 말뚝을 지반에 설치할 경우 말뚝에는 상부구조물로 인해 발생할 응력보다 더 큰 응력이 발생한다. 즉, 말뚝에 발생하는 응력은 타입시에 최대이다. 따라서 이와 같은 경우에 대한 말뚝기초의 설치에 있어서는 말뚝의 허용응력이 타입시 발생하는 응력보다 큰지를 검토해야 한다. 이 조건을 만족시키면 말뚝은 손상 없이 설치되어 안전하게 상부구조물을 지지할 수 있을 것이다. 특히 재료의 강도가 상대적으로 작은 콘크리트말뚝의 경우에는 타입시의 손상을 방지하는 것이 매우 중요하다.

콘크리트말뚝 타입시 말뚝에 발생하는 응력을 예측하는 방법으로는 간단한 산정식에서부터 복잡한 전산해석에 이르기까지 여러 가지가 있으며 그들의 이론적 근거도 에너지평형이나 파동이론 등과 같이 다양하다. 이 방법들 중에서 파동이론을 전산해석하는 방법이 전자계산기의 하드웨어와 소프트웨어의 발달에 힘입어 현재에 있어서는 가장 편리하고 정확한 방법으로 인정되고 있으며 잘 만들어진 상용프로그램도 널리 사용되고 있다. 그러나 현장상황에 따라서는 말뚝이나 항타기를 갑작스럽게 교체해야 하는 경우, 항타시스템의 정확한 제원을 알

수 없는 경우, 숙달된 기술자의 즉각적인 개입이 불가능한 경우 등이 복합적으로 발생하여 시급을 요하면서도 파동이론의 전산해석이 곤란한 경우가 발생할 수 있다.

이와 같은 경우에 쉽고 간편하게 사용할 수 있는 방법으로는 간단한 산정식의 적용을 들 수 있다. 이 방법에 사용되는 산정식들에 대해서 외국에서는 몇몇 학자들의 제안식과 검증을 위한 시험이 있었으나 국내에서는 별로 연구된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트말뚝 타입시 말뚝에 발생하는 압축응력을 예측하는 여러 가지 산정식들을 알아보고 이들 중 항타시스템의 기본적인 변수들만으로도 비교적 용이하게 적용할 수 있는 방법들을 선정한 다음 이들로부터 구한 결과와 현장에서 실측한 결과를 비교하여 안전한 말뚝기초의 설치를 위하여 적용할 수 있는 적절한 산정식을 제시하고자 한다.

2. 항타시의 압축응력 산정식

항타시의 압축응력 산정식으로서 이용할 수 있는 것으로는 먼저 각종 항타공식들을 들 수 있다. 항타공식을 이용하면 관입량과 지지력의 관계를 구할 수 있으며 이 지지력을 말뚝에 작용하는 힘으로 보고 항타응력을 구하는 것이다. 그러나 이 방법은 공식 자체도 부정확할 뿐더러 지지력을 말뚝에 작용하는 힘으로 본다는 가정도 적합하지 않은 것으로 보인다.

타격에너지의 평형에 의한 타격응력 산정식으로서 에너지평형식이라 불리는 방법이 있다 (Glanville et al., 1936). 이 방법에서는 해머의 유효타격에너지와 말뚝 및 지반의 흡수에너지의 평형조건으로부터 다음과 같은 식을 구하였다.

$$\sigma_p = \sqrt{2e \frac{E_p F}{A_p L_p}} \quad (1)$$

여기서, σ_p 는 타격응력, e 는 타격효율로서 드롭해머의 경우는 0.6이고 디젤해머의 경우는 0.8, E_p 는 말뚝재료의 탄성계수, F 는 해머의 타격에너지로서 드롭해머의 경우는 $F = W_r \cdot H$ 이고 디젤해머의 경우는 $F = 2W_r \cdot H$, W_r 은 램의 무게, H 는 램의 낙하높이, A_p 는 말뚝의 단면적, L_p 는 말뚝길이이다. 이 식은 말뚝선단이 딱딱한 지지층에 도달한 경우에 대하여 말뚝측면의 흙의 마찰을 무시하고 구한 것으로서 말뚝의 응력이 말뚝선단에서 말뚝머리까지 일정하다고 가정하였다.

항타응력을 구하는 방법으로서 파동이론을 이용하는 방법이 있다. Young은 St. Venant의 해에 근거하여 다음과 같이 파동이론에 의한 탄성봉의 타격응력을 고찰하는 경우의 기본식을 구하였다(Timoshenko and Goodier, 1951).

$$\sigma = \frac{\nu}{c} E \quad (2)$$

여기서, σ 는 타격응력, ν 는 변위속도, c 는 파동의 전파속도, E 는 탄성봉의 영계수이다.

이와 같은 Young의 기본식을 이용하여 Nanninga(1953)는 다음과 같은 말뚝머리 타격응력 계산식을 제시하였다.

$$\sigma_p = \alpha \sqrt{2e E_p \gamma_p H} \frac{A_r \sqrt{E_r \gamma_r}}{A_r \sqrt{E_r \gamma_r} + A_p \sqrt{E_p \gamma_p}} \quad (3)$$

여기서, α 는 계수로서 드롭해머의 경우는 1이고 디젤해머의 경우는 2, γ_p 는 말뚝의 단위중량, A_r 은 램의 단면적, E_r 은 램의 탄성계수, γ_r 은 램의 단위중량이다.

Ozaki(大崎)와 Kisita(岸田)(1962)는 Nanninga의 이론을 확장하여 램, 쿠션, 말뚝머리의 운동량의 변화로부터 구한 타격응력 계산식을 제안하였다. 이 식은 강제외력을 받은 경우의 탄성체인 봉의 관성력과 응력의 평형으로부터 구한 파동방정식에 말뚝타격시의 조건을

넣어 구한 것이다.

$$\sigma_p = \frac{\alpha \sqrt{2e E_p \gamma_p H}}{\left(1 + \frac{A_c}{A_r} \sqrt{\frac{E_c \gamma_c}{E_r \gamma_r}}\right) \left(1 + \frac{A_p}{A_c} \sqrt{\frac{E_p \gamma_p}{E_c \gamma_c}}\right)} \quad (4)$$

여기서, A_c 는 쿠션의 단면적, E_c 는 쿠션의 탄성계수, γ_c 는 쿠션의 단위중량, α 는 계수로서 드롭해머는 1.0이고 디젤해머는 $\sqrt{2}$ 또는 2이다. 이 식에 의한 결과는 안전측으로 나타난다고 알려져 있다(土質工學會, 1985).

Nanninga의 식이나 Ozaki와 Kisita의 식을 사용하려면 램이나 쿠션 등에 대한 상세한 변수들을 알아야 한다. 이 값들은 쉽게 얻을 수 없는 값이어서 이 식들을 신속하고 간편하게 이용하기에는 다소 어려움이 있다.

이상의 결과를 종합하여 탄성봉을 전파하는 타격응력과 에너지의 평형으로부터 구한 타격응력 계산식이 제안되었다[Uto(宇都), 1967; Uto et al., 1975]. 이 식은 Ozaki와 Kisita의 이론식에 쿠션부분의 운동에너지를 고려한 것과 동일하며 St. Venant의 해와 유사하다.

이 식에서 말뚝의 타격면에 발생하는 충격응력의 시간에 따른 변화는 St. Venant의 해와 유사하였으며 또한 실측값을 St. Venant의 이론파형과 비교한 결과 램의 충돌시부터 최대압축응력 σ_0 가 발생하기까지의 시간 t_0 이후에는 이 두 값이 거의 일치하였다. 실측에 의하면 말뚝머리에 발생하는 최대압축응력은 일반적으로 램의 충돌 후 약 2~3ms 경과 후에 나타났다. 이는 램과 말뚝머리 사이에 개재하는 캡이나 쿠션 등으로 인한 결과로 보이며 실용상 2ms의 값을 채용하였다. 이상의 과정을 거쳐 Uto와 Huyuki(冬木)는 다음과 같은 말뚝머리 타격응력 계산식을 제시하였다(鋼管杭協會, 1982).

$$\sigma_p = \sigma_0 \exp\left[-\frac{\gamma_p A_p}{W_r} c_p t_1\right] \quad (5)$$

여기서, σ_0 는 강제해머에 의해 말뚝의 타격면에

발생하는 응력의 극대값으로서 앞의 식 (2)에 나타낸 Young의 기본식으로 구한 타격응력이며, c_p 는 말뚝몸체 내의 파동의 전파속도, t_c 은 램의 충돌 후 말뚝머리에 최대 타격응력이 발생하기까지의 경과시간으로서 위에서 설명한 바와 같이 실용상 0.002sec이다.

이 식에서는 말뚝몸체를 이동하는 파동의 시간변화 및 램의 중량을 고려하여 종래의 식보다 타입시의 말뚝몸체 내에 발생하는 타격응력현상을 잘 설명하고 있다. 이 식은 디젤해머나 고체쿠션형 유압해머에 적용했을 때는 양호한 결과를 주지만 액체쿠션형 유압해머는 응력파의 파형이 매끄러워서 곤란하므로 수정을 요한다(國土開發技術研究センター, 1984).

이 밖에도 외국의 경우에는 많은 현장측정값에 근거하여 구한 실험식도 Yosinaru(吉成) (1970), Broms(1973) 등에 의해 제안되어 있으나 우리나라에 바로 적용하기는 곤란하다고 본다.

따라서 본 연구에서는 이상의 여러 가지 방

법 중 에너지평형식, Nanninga의 식 및 Uto와 Huyuki의 식을 검토대상으로 삼았다. 이들 방법으로 구한 결과들을 실제 현장에서 실측한 값들과 비교해 보고 적절한 방법을 모색하고자 하였다.

3. 현장조건 및 실측방법

실측은 5개의 현장에서 이루어졌다. 편의상이 5개의 현장을 각각 A, B, C, D, E로 하기로 한다. 각 현장의 지반조건을 그림 1에 나타내었다. 그림에 나타낸 지반조건은 지반조사 결과 중에서 말뚝시공위치와 가장 가까운 보링공에 관한 것으로서 말뚝이 타입되는 지점의 지반조건과는 정확히 일치하지 않을 수도 있으나 대체적으로는 비슷할 것으로 사료된다. 그림에서 알 수 있듯이 각 현장은 지반조건이 각각 다르며 타입된 콘크리트말뚝의 종류와 길이 및 관입깊이도 각각 다르다. 각 현장에 타입된 콘크리트말뚝의 조건을 표 1에 정리하였다.

표 1. 각 현장의 시공조건

현장	말뚝번호	말뚝종류	말뚝지름 (mm)	말뚝깊이 (m)	관입깊이 (m)	해머종류	램무게 (t)	램 낙하고 (m)
A	1	PHC	400	10.0	8.0	유압	7.0	1.2
	2				6.0			1.0
	3				4.0			0.8
B	1	PHC	450	10.0	6.3	유압	7.0	1.2
C	1	PC	400	15.0	13.4	디젤 디젤	2.5	1.4
	2				3.5		1.5	
D	1	PC	1,000	33.9	18.9	증기	15.0	1.2
	2			31.6	12.4			
	3			34.5	16.8			
	4			30.8	19.3			
E	1	PC	1,000	27.7	8.6	증기	15.0	1.2
	2			24.0	7.1			
	3			22.7	8.5			
	4			20.8	7.7			
	5			17.9	5.3			

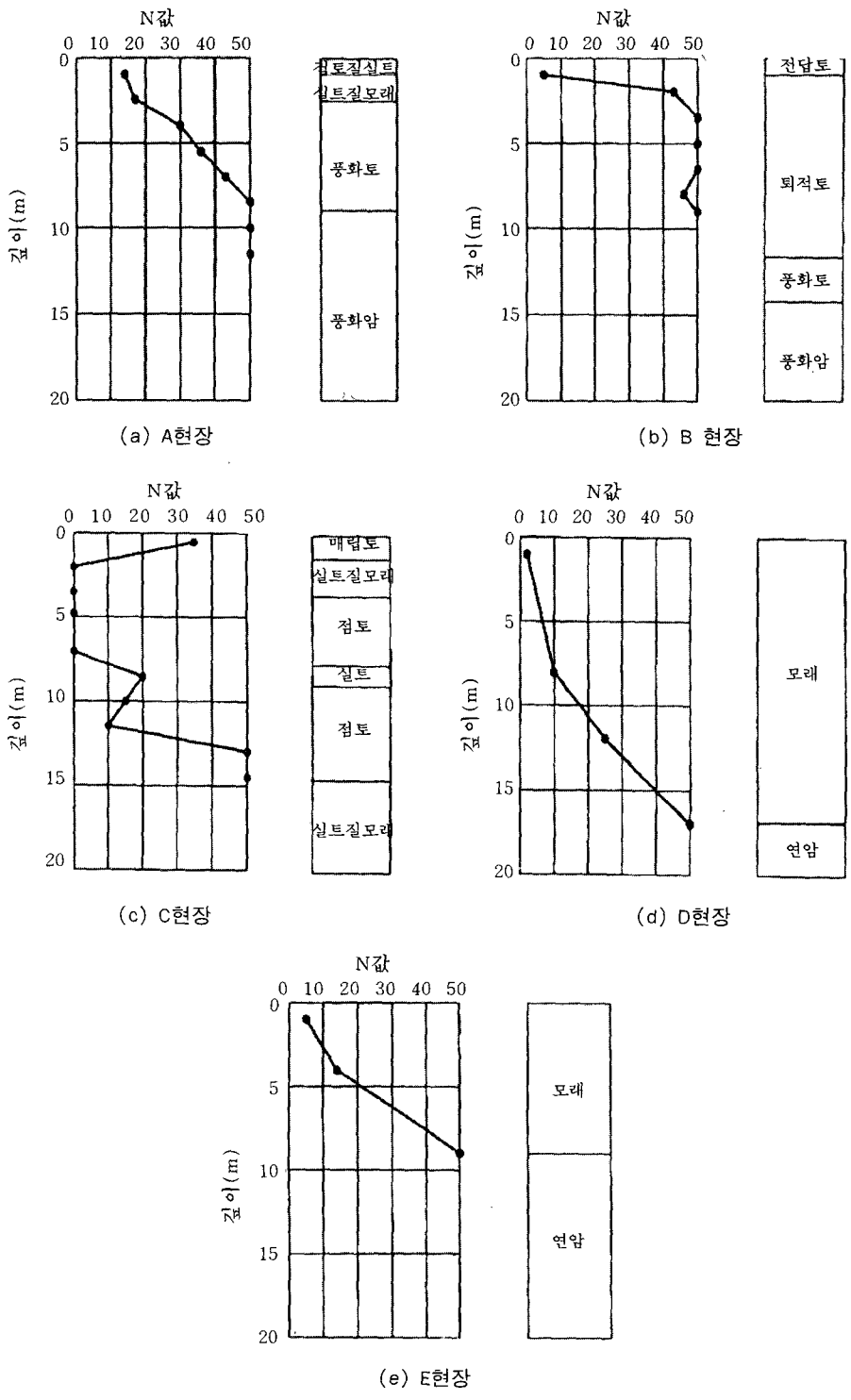


그림 1. 각 현장의 지반조건

이 중 A현장을 제외한 B, C, D, E현장에서는 동재하시험이 실시되었으며 항타응력은 이 과정에서 측정되었다. A현장에 있어서는 말뚝에 변형률계를 부착하여 변형률을 측정한 다음 이를 응력으로 환산하여 항타응력을 구하였다. A현장에서의 측정장치를 그림 2에서 보이고 있다.

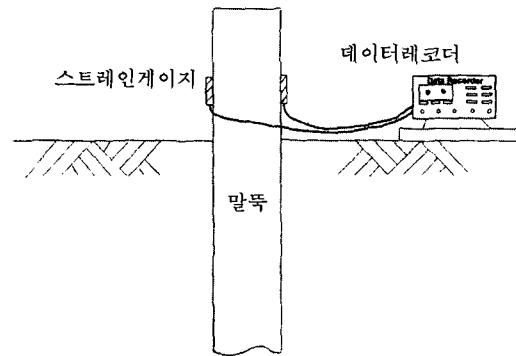


그림 2. 항타응력 측정장치

4. 실측값과 계산값의 비교 및 분석

그림 3~5에는 실측에 의한 값과 3장에서 언급한 산정식들로 계산한 값들을 비교하여 보이고 있다. 그림들에 나타낸 등가선(45° 선)은 비교의 편의를 위하여 첨부한 것이다.

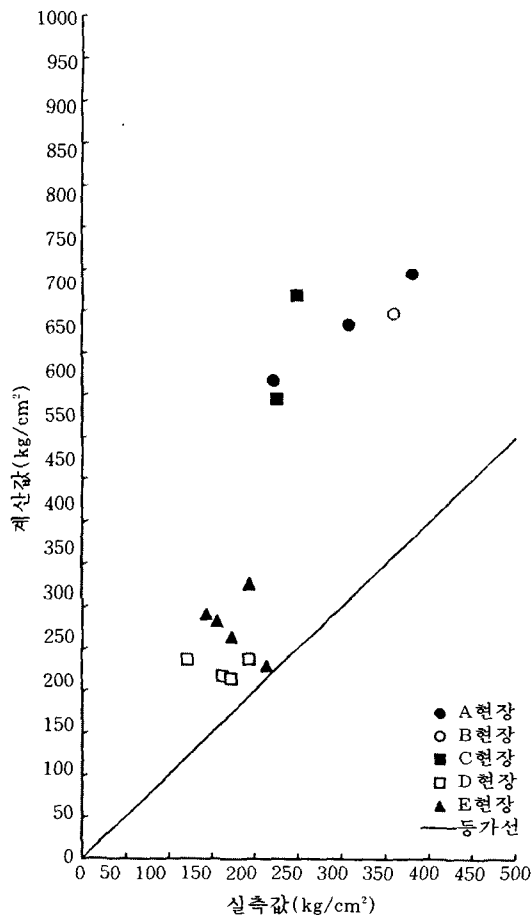


그림 3. 실측값과 계산값(에너지평형식)비교

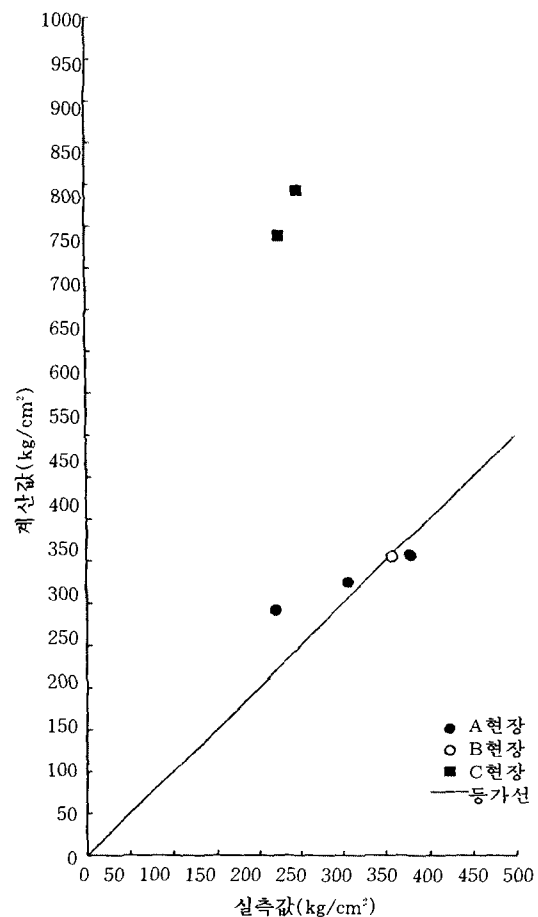


그림 4. 실측값과 계산값(Nanninga의 식)비교

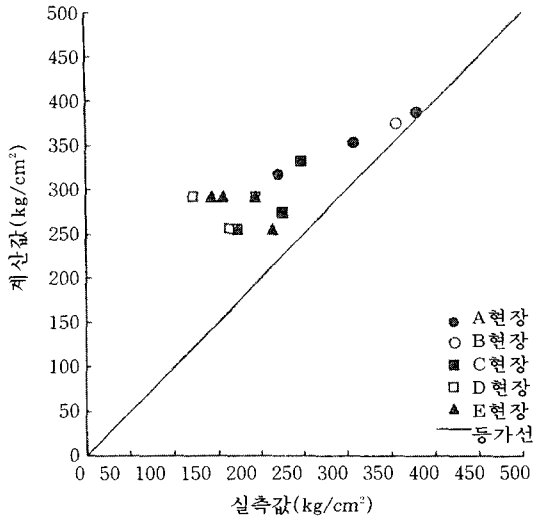


그림 5. 실측값과 계산값(Uto와 Huyuki의 식) 비교

그림 3에는 실측값과 에너지평형식에 의한 계산값의 관계를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 에너지평형식에 의한 값은 실측값과 커다란 차이를 보이고 있다. 더욱이 이 경우에 있어서는 두가지 값들 사이에 특별한 관계도 찾을 수 없다.

그림 4에는 실측값과 Nanninga의 식에 의한 계산값의 관계를 보이고 있다. 이 경우는 데이터의 부족으로 A, B, C 3개 현장의 값들만을 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 Nanninga의 식에 의한 계산값은 실측값과 일관성 없는 관계를 보이고 있다.

그림 5에는 실측값과 Uto와 Huyuki의 식에 의한 계산값의 관계를 보이고 있다. 그림에서 살펴보면 이 경우도 앞의 두경우와 마찬가지로 두가지 값들 사이에 차이가 있지만 상대적으로 그 차이가 작고 안전측이다. 그러므로 이 식은 실용상 별 문제가 없으며 기존의 방법들 중에서는 가장 추천할만한 방법이라고 볼 수 있다.

그림 5에서 보면 실측값과 계산값 사이에는 일정한 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 Uto와 Huyuki의 식을 좀더 보완하면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라는 가능성

을 제기하는 것이다. 따라서 이 방법을 상세히 분석하여 보다 정확하고 실용적인 식을 도출하기로 한다.

5. 감소계수를 이용한 계산값의 수정

그림 5에서 보면 계산값이 실측값보다 크다. 그런데 그 차이는 A현장, B현장, C현장, D현장, E현장의 말뚝의 순서로 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 같은 현장에서도 차이가 다르게 나타난다. 여기서 각 현장 및 각 말뚝에 있어서의 타입조건의 차이에 주목할 필요가 있다.

즉, 전반적으로 볼 때 전체말뚝길이에 대한 관입깊이의 비가 작고 관입된 지반이 연약할수록 실측값과 계산값의 차이가 커짐을 알 수 있다. Poulos와 Davis(1980)에서는 케이크(quake)와 댐핑(damping)이 증가하면 즉, 지반이 연약해지면 극한지지력이 감소하며, 따라서 항타응력이 작아진다고 하고 있다. 이것은 본 연구에서 나타난 결과와 일치한다. 이와 같이 나타나는 이유는 관입깊이가 작을수록, 지반이 연약할수록 타격에너지의 일부가 말뚝의 관입에 소모되기 때문으로 추정된다.

당초 Uto와 Huyuki의 식에서는 이와 같은 지반 및 시공조건을 고려하지 않았다. 따라서 항타응력의 예측에는 말뚝이 관입된 지반 및 시공조건을 감안해야 한다는 것을 알 수 있다. 이 외에도 항타응력에 영향을 미치는 요소는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 뚜렷한 경향을 보인 지반 및 시공조건만을 고려하기로 한다.

여기서 Uto와 Huyuki의 식에 지반 및 시공조건을 감안하여 수정을 가하기로 한다. 즉, 전체말뚝길이의 50% 이상이 비교적 단단한 지반에 관입된 경우(A현장의 1, 2번 및 B현장의 말뚝)에는 식으로 구한 값을 그대로 사용하고 전체말뚝길이의 50% 이상이 비교적 연약한 지반에 관입된 경우(C현장 및 D현장의 1, 4번 말뚝)에는 0.85, 관입깊이가 50% 이하인 경우(A현장의 3번, D현장의 2, 3번 및 E현장의 말

쪽)에는 0.70의 감소계수를 곱하여 계산값을 수정하여 실측값과 비교하기로 한다. 그 결과를 그림 6에 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 지반 및 시공조건을 고려하여 계산값을 수정한 결과는 실측값과 거의 일치하면서도 안전측의 결과를 보이고 있다.

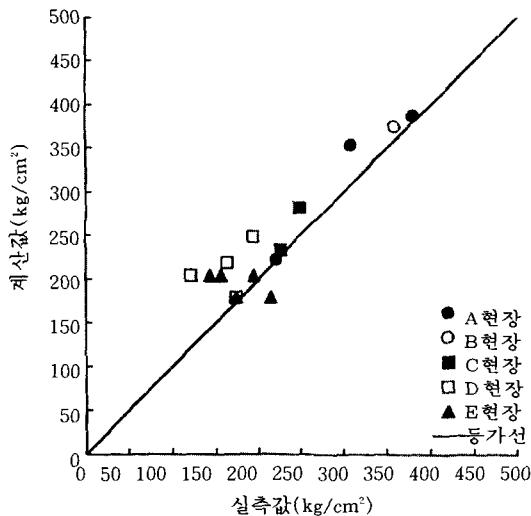


그림 6. 실측값과 계산값
(수정된 Uto와 Huyuki의 식) 비교

더욱 정확하게 항타응력을 예측하려면 다양한 요소를 고려한 많은 자료를 분석할 필요가 있다. 본 연구의 결과만으로는 관입깊이나 지반의 강도 등을 구체적으로 구분하기는 곤란하였다. 향후 보다 많은 실측자료를 이용하여 지반 및 시공조건을 엄밀히 구분하고 정밀한 분석을 행하면 보다 정확하게 항타응력을 예측할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 파동이론의 전산해석의 적용이 곤란한 경우에 말뚝타입시 발생하는 압축응력을 간편하면서도 정확하게 예측할 수 있는 방법을 제시하기 위하여 산정식을 이용한 방법들을 분석하여 그중 일부를 선정하였으며 그

방법들에 의한 계산값을 현장에서의 실측값과 비교, 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 여러 가지 항타응력 예측방법 중 Uto와 Huyuki의 식이 간편하면서도 비교적 정확하고 안전측인 결과를 제공한다. 그러나 이 방법은 지반이 연약하거나 관입깊이가 작은 경우에는 항타응력을 과대평가하는 경향이 있다.

(2) 전체말뚝길이의 50% 이상이 비교적 단단한 지반에 관입된 경우에는 Uto와 Huyuki의 식으로 구한 결과를 그대로 사용하고 전체말뚝길이의 50% 이상이 비교적 연약한 지반에 관입된 경우에는 0.85, 관입깊이가 50% 이하인 경우에는 0.70의 감소계수를 곱하여 사용하면 정확하면서도 안전측이다.

많은 경우에 있어서 말뚝의 손상은 압축응력이 아닌 인장응력 등에 의해 발생하기도 하며 최대압축응력이 말뚝의 하부에 나타나기도 한다. 따라서 말뚝의 전반적인 응력은 파동이론의 전산해석에 의하여 파악하는 것이 바람직하며 본 연구결과는 제한적으로 사용하기 바란다. 그러나 부득이한 경우에 본 연구결과의 사용은 매우 효율적일 수 있다. 향후 보다 많은 실측자료를 이용하여 지반 및 시공조건 등을 엄밀히 구분하고 정밀한 분석을 행하면 보다 정확한 항타응력 산정식을 제시할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 1997학년도 목포대학교 기성회 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 宇都一馬(1967). 杭の打込み(彈性波としての打撃應力について), 橋梁と基礎, pp.1~7.
2. 宇都一馬, 冬木 衛, 近藤 博(1975). "波動理論による打込み時杭頭應力の算定式について," 第30回土木學會年次學術講演會講演概要, III-

85. pp.163~164.
3. 大崎順彦, 岸田英明(1962), “鋼ぐいの支持力, 打撃應力に関する2, 3の問題.” *日本建築學會論文報告集*. No.79. pp.29~33およびNo.80, pp.24~27.
 4. 鋼管杭協會(1982), *鋼管杭の打撃應力と適正ハンマ*.
 5. 国土開發技術研究センタ (1984), *低騒音型油壓パイルハンマ施工研究報告書*. pp.25~31.
 6. 土質工學會(1985), *杭基礎の設計法とその解説*. pp.636~639.
 7. 吉成元伸(1970), “ぐいの支持力および施工合理化—ぐい打ちにおける打撃エネルギーの決め方に関する研究.” *昭和45年度建設研究所年報*. 建設省建築研究所. pp.377~388.
 8. Glanville, W. H., Grime, G. and Davies, W. W.(1936), “The Behavior of Reinforced Concrete Piles during Driving,” *Journal of the Institution of Civil Engineers*, Vol.1.
 9. Nanninga, N.(1953), “The Problem of Pile Driving,” *Proc. 3rd ICSMFE*. pp.71~74.
 10. Poulos, H. G. and Davis, E. H.(1980), *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley and Sons, p.68.
 11. Timoshenko, S. and Goodier, J. N.(1951), *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, pp.497~504.

(접수일자 1998. 8. 18)