

## 항타공식의 신뢰도

### Reliability of Pile Driving Formula

박영호<sup>1)</sup>, Young-Ho Park, 김경석<sup>2)</sup>, Kyung-Suk Kim,

<sup>1)</sup> 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 실장, Research Director, Highway Research Center, KHC

<sup>2)</sup> 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 연구원, Researcher, Highway Research Center, KHC

**SYNOPSIS** : Prefabricated piles used for construction of highway bridges are most of steel pipe piles and few of prestressed concrete piles. Its installation and inspection are less controllable and have much uncertainty due to changes in subsoil and groundwater conditions. However, most of these piles have been controlled using outdated pile driving formula such as Hiley's formula which models just the energy conservation due to its simple applicability in the field. This formula results in overstriking or sometimes understriking due to buckling of pile head. Engineers cannot ensure by the formula whether pile is installed properly.

To compensate the drawbacks of existing pile formula, parameters in Hiley's formula and 5S formula are reviewed. Final sets used in pile formula and PDA test results(E.O.I.D) are measured during pile driving along the depth. These measured results along the depth were compared with each other and with N values, so that relations between the each result could be inferred. Also the factor of safety which can be used for pile driving formula are suggested.

**Key words** : PDA test, Reliability of pile driving formula, Hiley's and 5s equation, Factor of safety

## 1. 서 론

설계시 지질주상도와 실제 지반의 지질주상도와 불일치 때문에 설계도서상에 제시한 말뚝길이 만큼을 지반에 타입하는 것이 아니라, 설치할 푸팅내의 말뚝들 중에서 대각선상에 있는 2개의 시험말뚝에 대해 최종관입량 2mm에 도달할 때까지 말뚝박기종료작업을 실시하여 관입된 말뚝길이에 1~2m를 더해 본항타시의 말뚝길이를 결정한다. 이때 말뚝지지력은 항타공식으로 결정하므로 실제 지지력보다 과대 및 과소평가하는 경향이 있다. 항타공식은 말뚝의 정적인 극한지지력을 동적인 관입저항으로 극한지지력을 구하려는 것부터 원리적인 모순이 있을 뿐만아니라 말뚝-항타장비의 경계조건과 항타장비의 성능 그리고 시간경과에 따른 지지력 증감현상(set-up과 relaxation)을 제대로 반영하지 못하고 있다. 그럼에도 불구하고 실무에서 말뚝 지지력 판정에 항타공식을 널리 사용하는 이유는 대단히 간편하다는 이점과 도로교표준시방서의 규정 때문에 현장실무자들이 널리 사용하고 있다.

따라서 사질토지반에 관입된 기성말뚝에 대해 시간효과를 무시한 동재하시험(E.O.I.D)의 지지력을 정해라고 가정하고, 고속도로 전문시방서에 제시한 항타공식인 Hiley 식과 일본건설성고시식(약칭 5s)의 신

되도와 이에 적절한 안전율을 알아보기 위하여, 고속도로 건설현장(5지역)의 10개 기성말뚝 기초에 동재 하시험과 말뚝박기종료작업을 동시에 수행하였다. 또한 3개의 사전천공말뚝(SIP, Preboring 말뚝)에 대한 E.O.I.D의 지지력 거동과 SPT의 N값에 따른 지지력 거동을 조사하였다.

그 결과, 항타장비 효율을 고려한 *Hiley* 공식 안전율은 FS=3 보다는 FS=4가, FS=4 보다는 5s 식이 CAPWAP 해석결과에 근접하였다. 또한 직타말뚝과 사전천공말뚝에 대한 지지력을 최종관입량의 함수로 나타냈으며, SPT의 N값에 따른 PDA의 허용지지력 거동을 제시하였다.

## 2. 말뚝의 동역학적 지지력 산정

말뚝의 동역학적 지지력 산정법에는 ① 말뚝의 항타공식을 이용하는 방법과 ② 파동방정식에 의한 수치해석법을 이용하는 방법이 있다. 말뚝의 항타공식에 근거하여 산정된 말뚝의 지지력은 그 적용범위가 한정되어 있으며, 사용시 주의가 요망된다. 반면에 파동방정식에 의해 추정된 말뚝의 지지력은 항타공식에 의한 것보다 훨씬 정확한 것으로 알려져 있다.

### 2.1 항타공식

여기서는 한국도로공사 고속도로전문시방서(1998)에 나타나 있는 항타공식만을 언급하며, 이는 말뚝의 시공관리 차원에서 사용한다.

#### 2.1.1 *Hiley*의 항타공식(1930)

이 공식은 해머효율 이외에 타격효율을 고려하고, 에너지 손실( $\Delta E$ )을 3가지(쿠션, 말뚝, 흙)로 나누어 에너지 보존법칙을 적용하여 나타낸 식이며, 실무에서 가장 많이 사용하고 있다.

$$R_a = \left( \frac{e_h \cdot W_r \cdot h}{s + \frac{c + c_c}{2}} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \right) / FS \quad (1)$$

여기서  $R_a$  : 말뚝 항타시, 흙의 허용저항력,  $s$  : 최종관입량

$c_c, c_p, c_q$  : 쿠션재료, 말뚝, 흙의 최대탄성압축 변형량

$c = c_q + c_p$  : 항타시, 리바운드량으로 표시

*Hiley* 공식은 낙하해머, 증기해머, 디젤해머를 사용한 타입말뚝의 지지력 결정에 사용하며, 안전율(FS)은 3~4를 일반적으로 적용하며, 재하시험에서 결정한 안전율을 적용할 수 있다(고속도로전문시방서, 1998).

#### 2.1.2 일본건설성고시식

약칭 5s 식이라하며, 고속도로전문시방서(1998)에서는 유압해머를 사용한 타입말뚝의 허용지지력을 구하는데 사용한다고 언급하고 있다.

$$R_a = \frac{2W_h \cdot H}{5s + 0.1} \quad (2)$$

여기서,  $R_a$  : 허용지지력(ton)

$W_h$  : 해머의 무게(ton)

$H$  : 해머의 낙하고(m)

$s$  : 최종관입량(m)

항타공식들은 매우 간편하고 널리 사용하고 있지만, 정밀도인 오차가 크다. 이를 개선하기 위해서는

이 공식의 입력변수를 동재하시험으로 결정하여 말뚝의 지지력을 예측하면 보다 나은 결과를 얻을 수 있다.

## 2.2 파동방정식에 의한 수치해석의 기본이론

자유공간(freely space)에 떠 있는 탄성봉(elastic bar)의 응력파(stress wave)를 모사한 운동방정식을 “1차원 파동방정식(one-dimensional wave equation)”이라 하며, 식(3)의 우변 둘째항을 삭제한 식이다. 그러나 파동방정식을 이용한 말뚝해석에 있어서 말뚝은 자유공간에 존재하는 탄성봉과 달리 지반속에 관입되므로 말뚝의 선단 및 주변지반의 저항값, R을 고려하여 수정한 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \pm R \quad (3)$$

여기서  $C = \sqrt{E/\rho}$  : 탄성봉내의 종방향 파속도

이와 같은 파동방정식은 말뚝에서의 응력변화로부터 말뚝의 변화와 시간, 그리고 요소위치 사이의 관계를 결정하기 위해 초기조건과 경계조건을 사용하여 해를 구할 수 있다. 그러나 실제의 말뚝 항타시에 말뚝과 항타장비 그리고, 주변의 흙의 성질에 관련된 여러 복잡한 인자들로 인해 이론해로서 말뚝의 파동방정식을 해석하기는 상당히 어려운 실정이다. 그러므로 파동방정식을 해석하는 방법으로 적용되는 것은 실제 말뚝을 유한한 요소로 나누어서 항타에 의한 충격파의 전달과정을 각 요소마다 시간별로 표시하여 변위와 응력 등을 계산하고, 극한지지력에 따르는 최종항타관입량 등을 컴퓨터를 사용해서 해석하는 소위 수치해석 방법이 있다.

## 3. 현장재하시험의 개요

### 3.1 직타말뚝

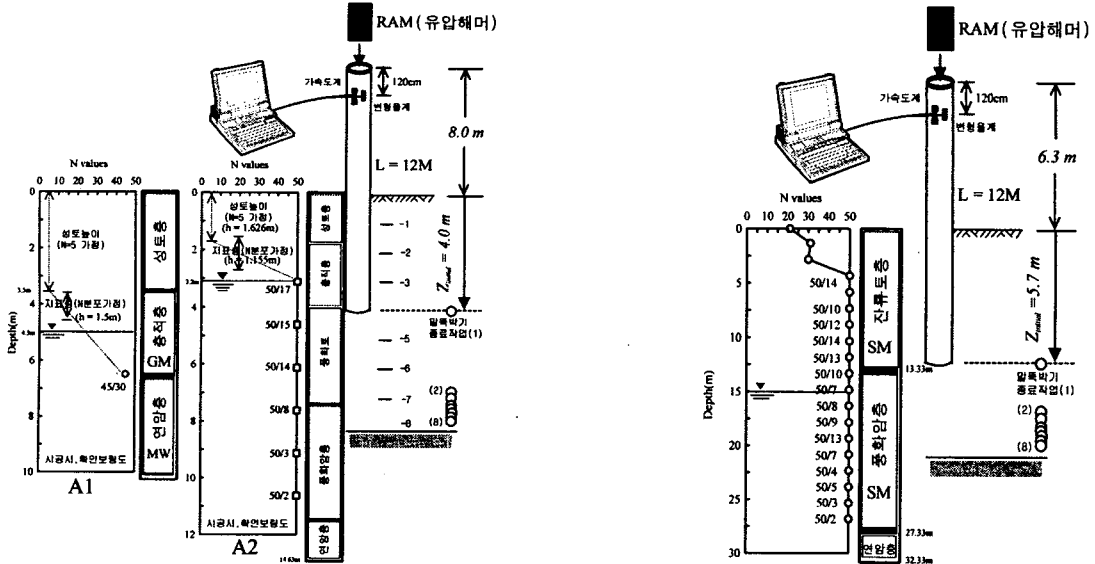
강관말뚝을 직타한 3개의 현장은 서해안건설사업소의 용암교(2개의 강관말뚝)와 수도권건설사업소의 장수교(1개의 강관말뚝)의 교각 말뚝기초 그리고 충청지역본부 오창육교의 교각 말뚝기초(6개의 강관말뚝)이다. 이들의 강관말뚝에 대해 최종관입량(final set, s)과 N값에 따른 허용지지력을 알아보기 위하여, 동적재하시험(E.O.I.D)과 말뚝박기종료작업을 동시에 실시하였다.

표 1. 현장재하시험한 말뚝기초와 항타장비 제원

	용암교 (서해3공구)	남왕교 (수도8공구)	장수교 (수도11공구)	방화대교 옹벽 (신공항4공구)	오창육교 (충청지역본부)
말뚝직경, $D$ (mm)	508	508	508	450	508
말뚝두께, $t$ (mm)	9(SPP)	9(SPP)	9(SPP)	70(PHC)	9(SPP)
초기관입깊이, $z_0$ (m)	4	12	5.7	5.7	4~5
유압해머 종류	DKH7	JUNTAN7	DKH-7	NH-7	DKH-7
낙하높이, $h$ (cm)	72 (6단)	84 (7단)	84 (7단)	64(4단)-80(5단)	70 (6단)
해머중량, $W_r$ (ton)	7	7	7	7	7
해머효율, $e_h$ (%)	(교대A2) 0.85 (교대A2) 0.81	92	84	89	70
해머반발계수, $n$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

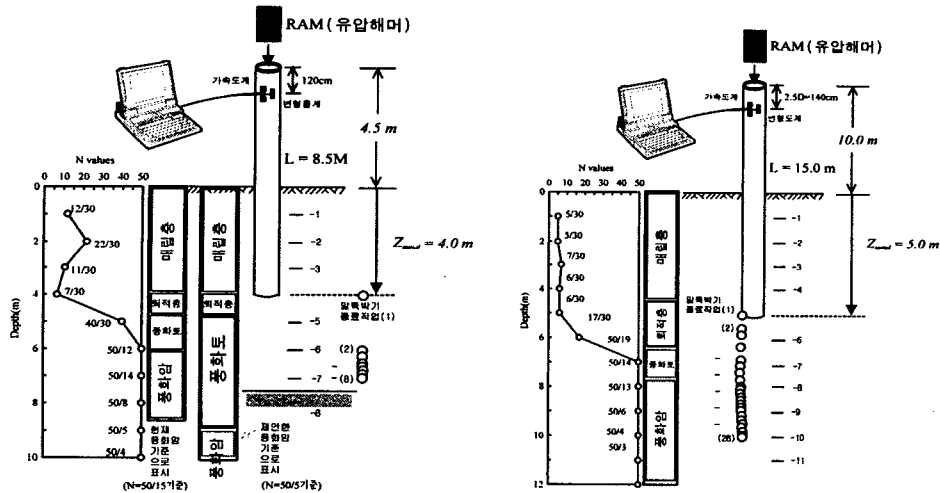
동재하시험에서 구한 항타장비의 효율,  $e_h$ 과 CAPWAP 방법의 허용지지력(Davisson's offset에 의한 FS=2.0과 극한지지력에 안전을 FS=2.5 적용)을 구하고, 말뚝박기종료작업의 항타기록지에서 최종관입량,

s과 리바운드량, c을 구하여 고속도로전문시방서(1998)에서 제시한 항타공식 즉, Hiley 공식과 5s 식에 대입하여 최종관입량에 따른 항타공식들의 신뢰도를 알아보고자 한다. 이를 위하여, 지질주상도를 다시 확인하고 사용한 항타장비와 말뚝의 제원 그리고 보링주상도는 표 1과 그림 1에 각각 나타나 있다.



(a) 용암교 교대 말뚝기초

(b) 장수교 교대 말뚝기초



(c-1) 오창육교 교대 A1

(c-2) 오창육교 교대 A2 (풍화암: N=50/15 기준)

그림 1. 직타말뚝의 지반조건과 E.O.I.D 실험

### 3.2 사전천공말뚝

#### 3.2.1 프리보링 말뚝

남왕교 교각기초의 강관말뚝을 직타하는 도중에 민원이 발생하여 2개의 프리보링(preboring pile)한 강관말뚝에 대해 동재하시험을 수행하여 말뚝의 지지거동을 파악하였다. 동재하시험방법은 그림 2와 같이, 지질주상도 상에서 양질의 지지층이라 생각하는 말뚝선단 위치에서 3m를 짧게, 강관말뚝 직경보다 3~10cm 더 크게 오거링장비로 사전천공한 후, 총 17m의 강관말뚝 길이를 12m 사전천공한 구멍 속

에 삽입하여 표 1과 같은 항타장비로, 말뚝관입 깊이별 동재하시험과 말뚝박기종료작업을 동시에 실시하였다.

### 3.2.2 SIP 말뚝

방화대교 현장내 웅벽기초 말뚝인 PHC말뚝( $\phi 450$ )에 대해 동재하시험을 상기 방법과 같이 직타와 사전천공 방법으로 수행하였다. 여기서 PHC말뚝을 항타할 때 사용한 쿠션재료는 합판(두께=3.0cm, 2개)이다. 이 쿠션재료의 말뚝머리 부착물의 탄성변형량,  $c_c=6\text{mm}$ 로 가정하였다. 그리고 사용한 항타장비와 말뚝의 제원 그리고 보링주상도는 표 1과 그림 3에 각각 나타나 있다.

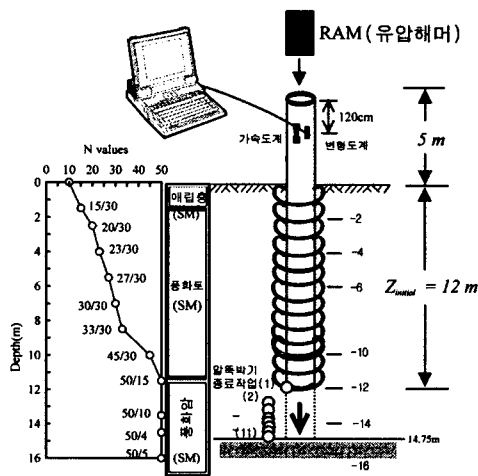


그림 2. 지반조건과 E.O.I.D 실험 (Preboring SPP)

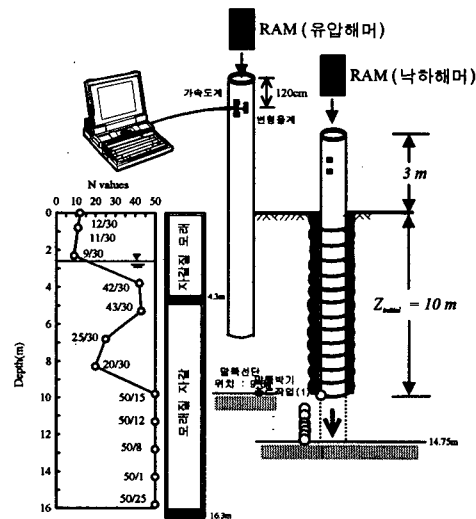


그림 3. 지반조건과 E.O.I.D 실험 (SIP, PHC말뚝)

## 4. 현장재하시험 결과

### 4.1 항타공식의 신뢰도 검토

CAPWAP 분석에서 구한 허용지지력이 정해라고 가정하고 2.1절의 두 항타공식의 허용지지력이 가정한 정해에 얼마나 근접하느냐에 따라 이 공식의 신뢰도를 언급하고자 한다. 이들의 곡선에서 항타장비 효율을 고려한 Hiley 공식의 허용지지력을 구하는데 필요한 안전율이 실무에서 흔히 사용하고 있는 값 (FS=3)과 부합하는지? 그렇지 않으면 CAPWAP 해석의 허용지지력에 근접하는 Hiley 공식의 안전율은 얼마인가?를 알아보하고자 한다. 또한, 직타말뚝과 사전천공말뚝에 대하여 최종관입량에 따른 CAPWAP 해석의 허용지지력 거동을 알아보기 위하여, 13개 말뚝(직타한 기성말뚝: 10개, 사전천공한 기성말뚝: 3개)에 대하여 동재하시험과 말뚝박기종료작업을 동시에 실시하여 최종관입량에 대한 허용지지력을 회귀분석한 결과는 그림 4와 같다.

이 그림에 의하면, 사질토지반이 느슨할수록 또는 최종관입량이 커질수록 말뚝의 허용지지력은 지수함수로 감소함을 알 수 있다. 그리고 Hiley 공식의 안전율, FS=3 보다는 FS=4가 가정한 정해에 근접하는 거동을 보였다. 또한 5s 식은 Hiley 공식(FS=4)의 보다 가정한 정해에 더욱 더 근접하는 거동을 보였다. 따라서 유압해머는 Hiley 공식 보다는 5s 식을 이용하여 허용지지력을 구하는 것이 합리적이고 만약, Hiley 공식을 적용할 경우에는 일반적으로 문헌에서 제시하는 유압해머의 효율 값인 90~100%를

사용하지 말고, 동재하시험으로 구한 유압해머의 효율을 이용하여 극한지지력을 구하고, 이에 안전율, FS=4을 적용하여 허용지지력을 구하는 것이 적절함을 알았다.

#### 4.2 직타말뚝에 대한 EOID의 지지거동

타입말뚝에 대하여 최종관입량에 따른 CAPWAP 해석결과와 허용지지거동을 알아보기 위하여, 전술한 자료를 회귀분석한 결과는 그림 5에 나타나 있다. 여기서 허용지지력은 CAPWAP 해석에서 극한지지력에 FS=2.5을 적용하거나 Davisson's offset 방법에서 FS=2.0을 적용하여 구한 값이다. 이 그림으로부터, 사질토지반에서 직타말뚝에 대한 허용지지력 식은 다음과 같다.

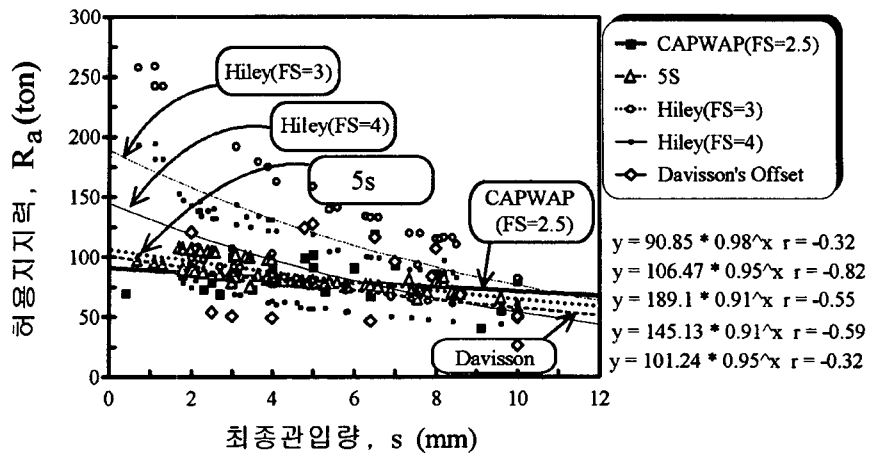
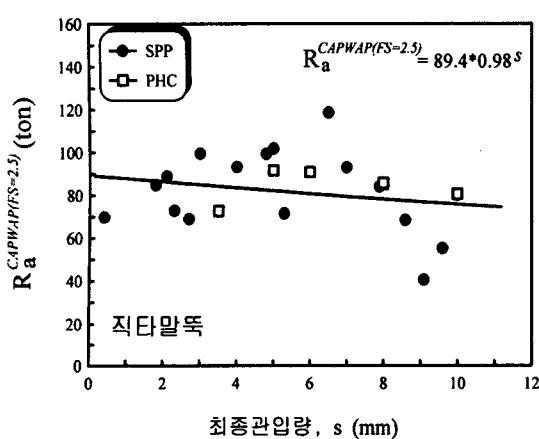
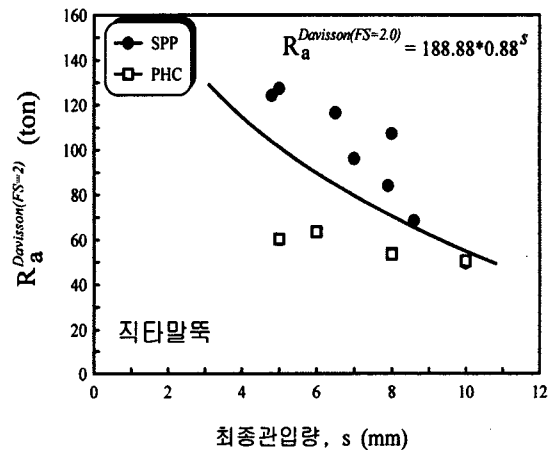


그림 4. 최종관입량에 따른 허용지지력,  $R_a$

귀분석한 결과는 그림 5에 나타나 있다. 여기서 허용지지력은 CAPWAP 해석에서 극한지지력에 FS=2.5을 적용하거나 Davisson's offset 방법에서 FS=2.0을 적용하여 구한 값이다. 이 그림으로부터, 사질토지반에서 직타말뚝에 대한 허용지지력 식은 다음과 같다.



(a) 극한지지력에 FS=2.5 적용



(b) Davisson's offset 방법(FS=2.0) 적용

그림 5. 직타말뚝의 허용지지력 거동

$$R_a^{CAPWAP(FS=2.5)} [ton] = 89.4 \times 0.98^s, \quad R_a^{Davisson(FS=2.0)} [ton] = 188.88 \times 0.88^s \quad (4)$$

여기서,  $s$  : 최종관입량(mm)

$R_a^{CAPWAP(FS=2.5)}$  : CAPWAP 해석시, 극한하중의 FS=2.5을 적용하여 구한 허용지지력(ton)

$R_a^{Davisson(FS=2.0)}$  : CAPWAP 해석시, Davisson's offset 방법(FS=2.0)으로 구한 허용지지력(ton)

#### 4.3 사전천공말뚝에 대한 EOID의 지지거동

사전천공말뚝에 대한 항타관리 기준식이 도로교표준시방서(1996)에 제시되어 있지 않기 때문에 이에 대한 지지거동을 살펴보기 위하여, 사질토지반에서 최종관입량에 따른 CAPWAP 해석의 지지거동을 그림 6과 같이 도식화하였으며, 이를 회귀분석한 사전천공말뚝의 허용지지력 식을 다음과 같다.

$$R_a^{CAPWAP(FS=2.5)} [ton] = 100.43 \times 0.94^s \quad (5-1)$$

$$R_a^{Davisson(FS=2.0)} [ton] = 95.43 \times 0.88^s \quad (5-2)$$

#### 4.4 N값에 대한 EOID의 지지거동

오창육교 지질주상도(그림 1(c))에 나타나 있는 N값에 따른 항타공식과 CAPWAP 해석 결과(FS=2.5)의 허용지지력 범위를 알아보기 위하여, 동일한 N값에 대한 평균 허용지지력을 나타낸 것이 그림 7과 같다. 여기서 SPT의 N값은 말뚝선단위치에서의 N값이다. 대부분 사질토로 구성된 지반속에, 항타장비 효율( $e=70\%$ ), 램무게( $W_r=7\text{ton}$ ), 항타높이( $h=70\text{cm}$ )의 제원으로 강관말뚝( $t=9\text{mm}$ ,  $D=508\text{mm}$ )을 타입할 때, 표준관입시험의 N값에 대한 지지거동은 지반이 느슨할수록 허용지지력이 감소함을 알 수 있다. 그리고 허용지지력 거동은 CAPWAP 방법과 5s 식은 정성적, 정량적으로 비슷하나, Hiley 식은 지반이 단단할수록 허용지지력이 증가하는 경향을 보였다. 그러나  $N=50/12$ 의 허용지지력은 주위의 허용지지력보다 작게 나타났는데 이는  $N=50/12$ 의 최종관입량( $s=9.1\text{mm}$ )이 주위의 N값의 최종관입량( $s=5.3\text{mm}$ 이하)보다 크게 발생하였을 뿐만 아니라 확인보링시 이 깊이에 해당하는 N값을 제대로 측정할 못한 것으로 판단된다.

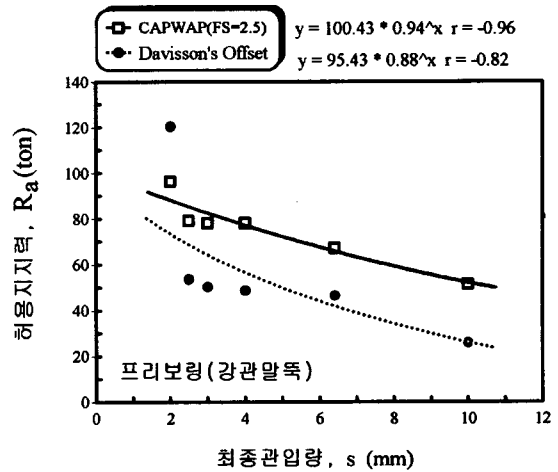


그림 6. 사전천공말뚝의 지지거동

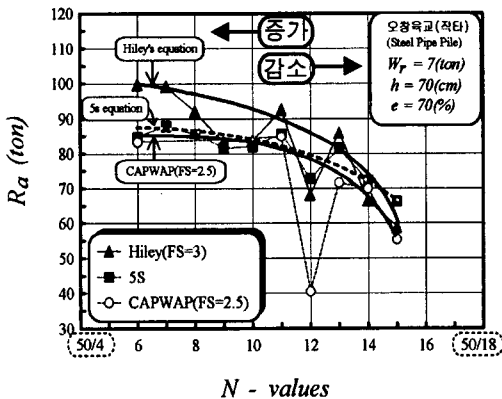


그림 7. N값에 따른 허용지지력,  $R_a$   
(오창육교)

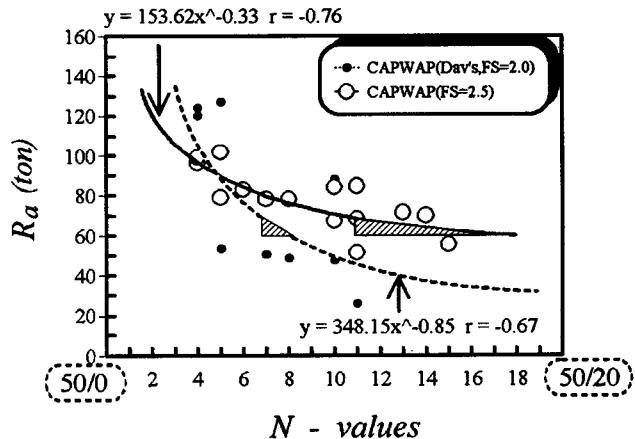


그림 8. N값에 따른 E.O.I.D의 허용지지력,  $R_a$

사질토 지반속에 관입된 말뚝의 선단위치에 해당하는 SPT의 N값에 따른 E.O.I.D의 허용지지력 값을 회귀분석하여 나타낸 것은 그림 8과 식(6)과 같다.

$$R_a^{CAPWAP(FS=2.5)} [ton] = 153.62 N^{-0.33}, \quad R_a^{Davisson(FS=2.0)} [ton] = 348.15 N^{-0.85} \quad (6)$$

여기서 N : SPT의 N 값에서 타격횟수가 아니라 관입깊이를 의미한다.

그리고 설계시 강관말뚝( $D=508\text{mm}$ ,  $t=9\text{mm}$ ) 머리에 작용시키는 하중크기는 일반적으로 60~70(ton)이므로 이에 해당하는 말뚝선단위치의 N값은 그림 8로부터  $N>50/11\sim 50/17$ (허용지지력=극한지지력에 FS=2.5을 적용),  $N>50/7\sim 50/8$ (허용지지력=Davisson 방법에서 구한 항복하중에 FS=2.0을 적용)이다. 참고로 지질주상도에 이 N값의 범위에 해당하는 말뚝관입 깊이를 이용하여 말뚝길이를 결정할 수도 있다.

## 5. 결론

최종관입량과 표준관입시험(SPT)의 N값에 해당하는 E.O.I.D의 지지거동으로 항타공식의 신뢰도를 살펴보기 위하여, 고속도로 건설현장의 직타와 사전천공 말뚝에 대하여 관입깊이별 동재하시험(E.O.I.D)과 말뚝박기종료작업을 동시에 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 지반이 느슨할수록, 최종관입량이 커질수록 말뚝의 허용지지력은 지수함수로 감소함을 알았다.
- (2) 말뚝관입깊이에 따른 동재하시험 결과, 직타말뚝과 사전천공말뚝에 대한 허용지지력을 최종관입량의 함수로 제안하였다.
- (3) 항타장비 효율을 고려한 Hiley 공식의 허용지지력을 산정하기 위해 사용하는 안전율(FS)은 실무에서 많이 사용하고 있는 FS=3 보다는 FS=4가 CAPWAP 해석결과의 허용지지력에 근접함을 알았다. 따라서 Hiley 공식을 사용하여 유압해머의 허용지지력 산정할 경우에는 항타장비 효율,  $e_h$ 을 고려한 안전율, FS=4을 사용할 것을 추천한다.
- (4) 유압해머의 전용식인 일본건설성고시식(5s)의 신뢰도를 알아보기 위하여 말뚝관입깊이에 따른 동재하시험을 실시한 결과, 5s 식의 허용지지력은 항타장비 효율을 고려한 Hiley 공식(FS=4)의 허용지지력보다 CAPWAP 해석의 허용지지력에 더욱 근접하는 거동을 보였다.
- (5) 항타장비 효율( $e=70\%$ ), 램무게( $W_r=7\text{ton}$ ) 그리고, 항타높이( $h=70\text{cm}$ )의 제원으로 강관말뚝을 타입할 때, N값에 대한 E.O.I.D의 허용지지력은 지반이 느슨할수록 감소하는 거동을 보였고,  $N < 50/10$ 부터는 허용지지력이 급속히 감소함을 알았다.
- (6) N값에 따른 E.O.I.D의 허용지지거동을 제시하였고, 설계시 강관말뚝( $D=508\text{mm}$ ,  $t=9\text{mm}$ ) 머리에 작용시키는 하중크기는 일반적으로 60~70(ton)이므로 이에 해당하는 말뚝선단위치의  $N > 50/11 \sim 50/17$  (허용지지력=극한지지력에 FS=2.5 적용),  $N > 50/7 \sim 50/8$  (허용지지력=Davisson 방법에서 구한 항복하중에 FS=2.0 적용)임을 알았다.

## 참고문헌

1. 건교부(1996), 도로교표준시방서, pp.924~938.
2. 한국도로공사(1998), 고속도로 전문시방서, pp.7-1~7-21.
3. ASTM D 1143-81(1992), "Standard Test Method for Piles under Static Axial Compressive Load", American Society for Testing and Materials, Vol.4, No.8, Philadelphia, pp.195-205.
4. Flaate, K. S.(1964), "An Investigation of the Validity of Three Pile Driving Formulas in Cohesionless Material", Pub, No.56, N.G.I., Oslo, Norway.
5. Gates, M.(1957), "Empirical Formula for Predicting Pile Bearing Capacity", Civil Engineering, ASCE, Vol.27, No.3, March, pp.65~66.
6. GRL Associates, Inc.(1996), CAPWAP User Manual.
7. Olson, R. E. and Flaate, K. S.(1967), "Pile Driving Formulas for Friction Piles in Sand", JSMFE, ASCE, Vol. 93, SM6, pp.279~296.
8. Smith, E.A.L.(1960), "Pile-Driving Analysis by the Wave Equation, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 86, SM 4, pp.35-61.
9. U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration(1980). Wave Equation Analysis for Piles, Arlington, pp. 14~47.
10. U.S. Dpt. of Transportation(1996), Design and Construction of Driven Pile Foundations, Workshop Manual.