

論 文

## 각종 항타공식에 의한 말뚝의 허용지지력 연구

이진수\* · 장용채\*\* · 김용걸\*

### A Study on the Allowable Bearing Capacity of Pile by Driving Formulas

*Jean-Soo Lee · Yong-Chai Chang · Yong-Keol Kim*

**Key Words** : 말뚝지지력 (Pile bearing capacity), 표준관입시험 (Standard Penetration Test., SPT), 정적(Static), 동적(Dynamic), 경시효과(Time effect), 주변마찰력(Skin friction), 허용지지력(Allowable bearing capacity), CAPWAP

#### Abstract

The estimation of pile bearing capacity is important since the design details are determined from the result. There are numerous ways of determining the pile design load, but only few of them are chosen in the actual design. According to the recent investigation in Korea, the formulas proposed by Meyerhof based on the SPT N values are most frequently chosen in the design stage. In the study, various static and dynamic formulas have been used in predicting the allowable bearing capacity of a pile. Further, the reliability of these formulas has been verified by comparing the predicted values with the static and dynamic load test measurements. Also, in most cases, these methods of pile bearing capacity determination do not take the time effect consideration, the actual allowable load as determined from pile load test indicates severe deviation from the design value.

The principle results of this study are summarized as follows : As a result of estimate the reliability in criterion of the Davisson method, it was showed that Terzaghi & Peck > Chin > Meyerhof > Modified Meyerhof method was the most reliable method for the prediction of bearing capacity. Comparisons of the various pile-driving formulas showed that Modified Engineering News was the most reliable method. However, a significant error happened between dynamic bearing capacity equation was judged that uncertainty of hammer efficiency, characteristics of variable, time effect etc... was not considered.

As a result of considering time effect increased skin friction capacity higher than end bearing capacity. It was found out that it would be possible to increase the skin friction capacity 1.99 times higher than a driving. As a result of considering 7 day's time effect, it was obtained that Engineering News, Modified Engineering News, Hiley, Danish, Gates, CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program) analysis for relation, respectively,  $Q_{allowable} / Q_{static} = 0.971 t^{0.1}$ ,  $0.968 t^{0.1}$ ,  $1.192 t^{0.1}$ ,  $0.880 t^{0.1}$ ,  $0.889 t^{0.1}$ ,  $0.966 t^{0.1}$ .

\* 동진대학교 토목공학과 교수, 석사과정

\*\* 심희원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 조교수

## 1. 서 론

말뚝 기초의 지지력 결정 방법에는 재하시험에 의한 방법으로부터 정역학적, 동역학적 및 파동방정식에 의한 방법 등 다양한 방법들이 사용되고 있다. 그러나 통상 실시되는 지반조사 결과로부터 정밀한 토질상수 ( $c, \phi$ )의 결정에 불확정 요소가 많아 실무에서의 적용에는 어려움이 있다고 볼 수 있다. 설계토질상수를 얻기 위한 지반조사는 대부분 표준관입시험(SPT, Standard Penetration Test)결과에 의존하여 설계에서 활용할 수 있는 형편인 바, 표준관입시험결과인  $N$ 값으로부터 말뚝의 지지력을 도출하는 경험식적 방법이 대부분의 설계에서 채택되고 있다.

또한, 말뚝기초의 지지력에 대한 국내외의 연구 결과에 의하면 여러 가지 예측방법들의 신뢰도는 매우 낮으며, 이는 말뚝의 설치방법, 지반조건의 가변성 등에 기인하는데 현재의 기술적 수준으로는 미흡한 점이 많아 말뚝재하시험에 의하는 방법 이외에는 대안이 없는 실정이다. 정재하시험에 의한 말뚝의 지지력 산정은 여러 가지 방법들 중 가장 신뢰도가 높은 방법으로 알려져 있다. 그러나, 시간과 비용이 많이 소요되는 관계로 시공되는 모든 말뚝에 대하여 재하시험을 실시하기란 사실상 불가능하다고 할 수 있다. 이를 개선하기 위해 최근에는 항타분석기(Pile Driving Analyzer ; PDA)를 이용한 동재하시험이 널리 확산되는 추세이다. 동재하시험은 시험결과 신뢰도가 비교적 양호할 뿐만 아니라 시험소요시간과 비용면에서 경제적이므로 시험의 빈도수 증대로 기초의 시공관리차원에서 상대적으로 유리하다.

본 연구에서는 주변 반력말뚝을 이용한 36개소의 정재하시험 자료에 대한 Davisson의 허용하중 결정법을 기준으로 회귀분석을 하였고, 동재하시험은 29개소에서의 실측 허용지지력에 대한 각종 항타공식의 이론 허용지지력을 구하였다. 또한, 경시효과에 따른 말뚝 지지력 변화를 확인하기 위하여 항타시 동재하시험(EOID)과 7일이 경과한 후의 재항타

동재하시험(Restrike)을 실시한 5개소에서의 지지력 증가율, 그리고 그에 따른 항타공식과도 비교하였다.

## 2. 시험자료 및 접근방법

### 2.1 정역학적 지지력 공식

Meyerhof는 표준관입시험의  $N$ 치를 근거로 하여 항타말뚝의 선단지지력과 주변마찰력에 대해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$q_p = 40N_b (t/m^2) \dots\dots\dots (1)$$

$$f_s = \bar{N}/5 \leq 10 (t/m^2) \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $N_b$  : 말뚝선단지반의 평균  $N$ 치

$\bar{N}$  : 말뚝관입지반의 평균  $N$ 치

한편, 국내에서의 항타말뚝의 지지력계산은 현장 재하시험 결과를 근거로 하여 Meyerhof 공식을 수정한 다음 식이 널리 사용되고 있다.

$$q_p = 30N_b (t/m^2) \dots\dots\dots (3)$$

$$f_s = \bar{N}/3 (t/m^2) \dots\dots\dots (4)$$

### 2.2 정재하시험

시험에 사용된 정재하시험의 재하방식은 유압 Jack을 사용하였고 최대하중은 설계하중의 2배로 하여 이를 6~8단계로 나누어 재하하는 방식으로 이루어졌다. 시험말뚝의 허용지지력은 주변 반력말뚝을 이용한 36개소의 정재하시험 자료를 가지고  $P-S$  곡선에 전침하량 기준 25.4mm일때를 극한하중으로 본 Terzaghi & Peck 방법과 Davisson 분석법을 적용하여 항복하중을 구한 후 안전율 2를, Chin의 방법을 이용해 항복하중을 결정한 후 안전율 3을 적용하여 구하였다. 한편, 통상적으로 사용하고 있는 항복하중 판정법( $P-S$  분석법,  $\log P - \log S$  분석법,  $S - \log T$  분석법,  $P - ds/d(\log T)$  분석법)은 해석자의 개인오차나 축척 등의 영향으로 인해 항복하중을 결정하는데 신뢰성이 떨어지는 것으로 알려져 있어 본 연구에서는 사용하지 않았다.

Table. 1 말뚝의 항타공식

	Ultimate pile capacity	F.S
Engineering News	$Q_u = \frac{e_f E_h}{S + C}$	6
Modified Engineering News	$Q_u = \frac{e_f E_h}{S + C} \cdot \frac{W + n^2 W_p}{W + W_p}$	6
Hiley	$Q_u = \frac{e_f E_h}{S + 0.5(C_1 + C_2 + C_3)} \cdot \frac{W + n^2 W_p}{W + W_p}$	3
Danish	$Q_u = \frac{e_f E_h}{S + \sqrt{\frac{e_f E_h L}{2A E_p}}}$	3
Gates	$Q_u = 4.0 \sqrt{e_f E_h} \log \frac{25}{S}$	3

그러나 실제로 재하시험을 통해 극한하중을 찾기가 그리 용이하지 않으므로 통상 말뚝의 침하가 급격하게 일어나는 지점(항복하중 : Yield point)을 통해 허용지지력을 평가하거나 말뚝침하량의 기준을 정하여 전침하량(Total settlement) 및 순(잔류)침하량(Net settlement)을 통하여 말뚝의 허용지지력을 평가하고 있다.

한편, 건설교통부 발행 도로교 표준시방서에서는 말뚝직경의 10%에서의 침하량(0.1D)에 대응하는 하중을 극한하중으로 규정하고 있으며, 여기에 안전율 2.5를 적용하여 허용지지력을 평가한다. 0.1D 침하량에 대응하는 하중을 극한하중으로 하는 방법, 또는 규정에는 영국공업기준, Johnson의 방법, Capper와 Cassie의 방법, Tomlinson의 방법 등을 제시하고 있으며, 이들은 안전율 3을 적용하여 허용하중을 구하고 있다. 또한, 일본 토질공학회와 Terzaghi의 방법에서는 전침하량 25mm에 대응하는 하중을 항복하중으로 규정하고 있으며, 여기에 안전율 2를 적용하여 허용하중을 구하고 있다.

2.3 동재하시험

말뚝의 항타공식은 기본적으로 에너지 보존법칙

을 이용한 방법이라 할 수 있다. 즉, 무게 W인 해머가 H만큼의 높이에 있다면 이는 W · H만큼의 에너지를 갖게 되며, 만일 이 해머가 낙하하여 말뚝을 항타하면, 이 에너지는 일을 하게 되고, 그 일의 근간이 항타에 의해 말뚝에 전달된 힘 (R<sub>u</sub>) × 말뚝의 관입깊이(S)가 된다는 근거를 두고 있다. 본 연구에 사용된 동재하시험자료의 사용말뚝은 PHC pile과 Steel pile을 사용하였고 항타기는 램머무게 7ton인 유압해머로 낙하고 600~800mm를 적용하였으며, 실측 허용지지력은 말뚝의 상단부에 설치한 가속도계와 변형률계로부터 항타에 의한 말뚝의 가속도와 변형률을 측정된 PDA에서 CAPWAP 해석을 통해 말뚝의 지지력을 구한 것이다. 또한, 오차를 최소화하기 위해 Hiley 공식 계산시 temporary compression 값은 실측값을 적용하였고, e<sub>h</sub> 값도 PDA 측정에 의한 실측 에너지 효율을 적용하였다.

3. 분석결과 및 고찰

본 장에서는 국내에서 실시된 다수의 정·동재하시험의 수집된 자료를 가지고 말뚝기초 설계에 사용되는 이론식을 실측값과 비교 분석함으로써 향후 설계하는 데 있어서 합리적인 허용하중을 결정할 수 있는 기초자료를 제시하고자 하며, 대부분 경시효과를 고려하지 않고 설계가 이루어지고 있는데 이를 고려했을 시 말뚝 지지력에 미치는 영향도 고찰하고자 한다.

본 연구를 위하여 사용된 자료는 국내 여러 곳에서 시행한 정재하시험 36개소와 동재하시험 29개소의 말뚝보고서를 분석하여 정역학적, 동역학적 지지력을 구하였다. 한편, 시험을 시행한 지반을 대표할 수 있는 시추추상도를 Fig. 1에 나타내었으며 지층은 크게 상부 매립토층, 중부의 풍화토 또는 모래층, 하부는 풍화암 또는 연암층으로 층서를 이루고 있으며 대부분 말뚝의 선단부가 N>40이상인 지반이다.

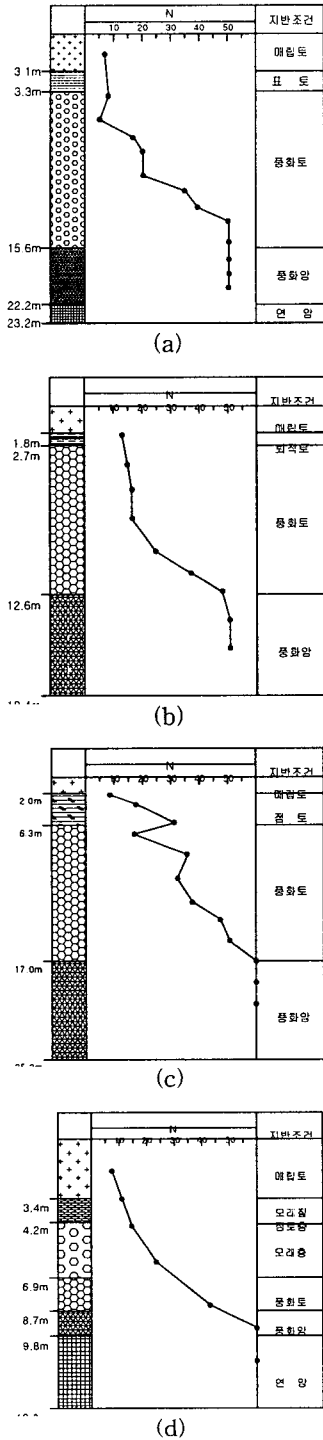


Fig. 1 대표적인 시추주상도

Fig. 2는 재하시험 결과에 대한 Meyerhof 방법, Modified Meyerhof 방법, Terzaghi & Peck의 방법, Chin의 방법에 의한 허용하중의 분산도를 작도하고 Davisson의 방법이 지지력을 추정하는데 적용성이 매우 좋은 방법으로 평가되고 있으므로 Davisson의 방법의 허용하중을 기준으로 회귀분석을 실시하여 보았다. Davisson 방법을 기준으로 정도를 평가한 결과, Terzaghi & Peck > Chin > Meyerhof > Modified Meyerhof 방법 순으로 기준값에 근접함을 알 수 있었다.

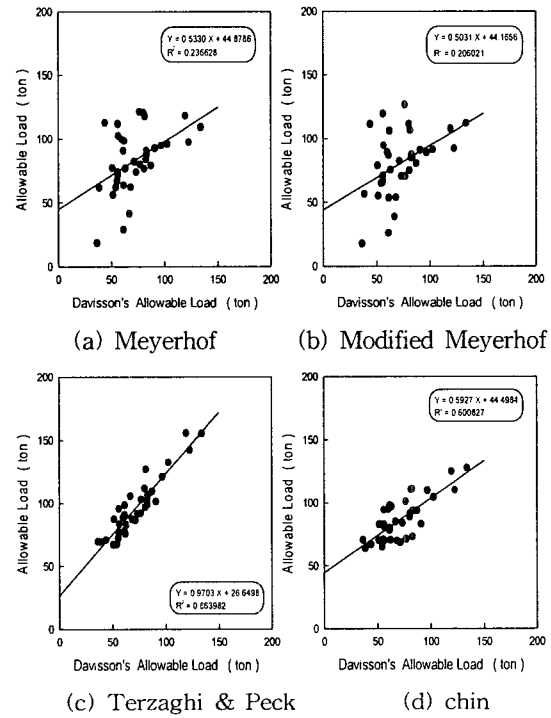


Fig. 2 정재하시험에 의한 허용지지력 관계

Meyerhof, Modified Meyerhof 공식을 이용하여 도식한 Fig. 2의 a), b)를 보면 분산도가 흐트러진 상태를 보여 신뢰성이 떨어지는데 이는 공식 자체가 갖는 특성과  $N_s$ ,  $N_b$ 를 말뚝을 설치한 지점의 주상도가 아닌, 대표적인 주상도에서 구하는 불확실성이 내재되어 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 3와 4는 Meyerhof, Modified Meyerhof 공식에서의 선단지지력 ( $Q_p$ ) 과 주변 마찰력 ( $Q_s$ ) 를 분리하여 시험현장의 주상도를 중심으로, 선단부 N 값은 말뚝 선단의 아래로 4D와 위로 10D에서의 N 값을 평균하여 구하였고, 말뚝 주변 N 값은 주변부의 평균값을 대상으로 구하여 각각 하나의 관계식으로 표현한 것이다.

Fig. 5는 동재하시험 결과를 파동방정식과 CAP-WAP 해석을 이용해 얻은 측정 허용지지력과 각각의 항타공식에 의한 이론 허용지지력을 비교한 것으로 이론치는 Danish 공식에서 16%, Hiley에서 41%, Engineering News에서 22%, Modified Engineering News에서 2%정도 크게 나타났으며 각 모델간

에 상당한 오차가 발생하였으나 그 중에서 Modified Engineering News 공식이 가장 근접하게 나타났다. 하지만, Gates 공식은 전체 시험결과에서 이론 허용지지력이 약 59%정도 적게 나타났다. 이와 같이 동적 지지력 공식간의 오차 발생요인은 해머 효율의 불확실성이라든가 변수의 자체특성, 경시효과 등이 고려되지 않는 등의 원인이 작용하기 때문으로 판단된다.

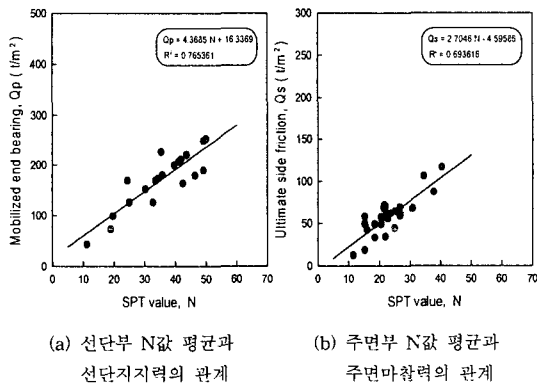


Fig. 3 Meyerhof

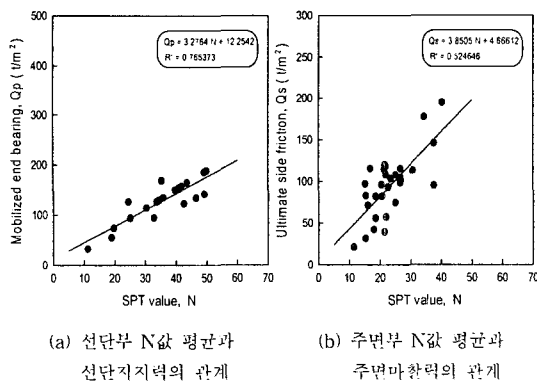
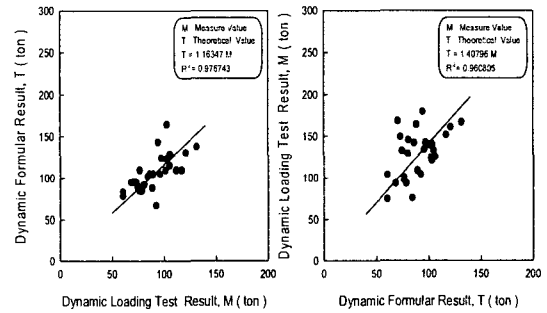
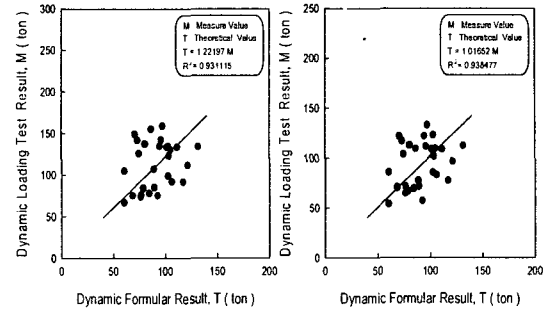


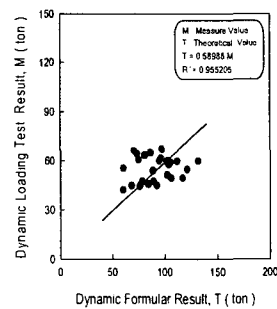
Fig. 4 Modified Meyerhof



(a) Danish (b) Hiley



(c) Engineering News (d) Modified Engineering News



(e) Gates

Fig. 5 동재하시험에 의한 허용지지력 관계

Fig. 6에서는 경시효과를 확인하기 위하여 항타시 시험과 7일이 경과한 후의 재항타시 시험을 비교한 5개소에서의 각종 항타공식과 CAPWAP 해석한 결과로서 지지력이 평균적으로 Engineering News 공식에서는 약 19%, Modified Engineering News에서도 19%, Hiley 에서는 44%, Danish에서 9%, Gates에서도 9%, CAPWAP 해석에서는 18%정도 증가하였다.

또한, CAPWAP해석에 의한 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화는 Table. 2에서 볼 수 있듯이 선단 지지력이 아니라 주로 말뚝의 주면마찰력이 증가한다는 것을 알 수 있었으며, 주면마찰력은 항타시 대비 평균 약 2배정도 증가하였다.

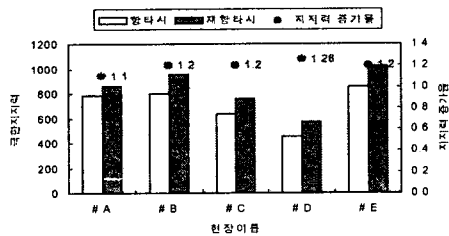
Fig. 6에서 7일의 경시효과를 고려한 결과 각종 항타공식과 CAPWAP 해석에 의한 관계식은 각각

$$Q_{u(Strike)} / Q_{u(EOID)} = 0.971 t^{0.1}, 0.968 t^{0.1}, 1.192 t^{0.1}, 0.880 t^{0.1}, 0.889 t^{0.1}, 0.966 t^{0.1}$$

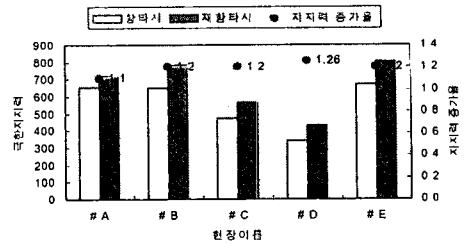
과 같이 성립되는 것으로 나타났다.

Table. 2 항타시와 재항타시의 시험 결과(CAPWAP 해석)

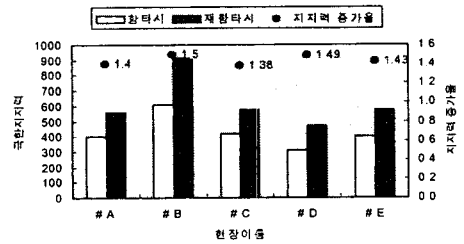
	EOID			Restrike			지지력 증가율
	주면	선단	전체지지력	주면	선단	전체지지력	
#A	89.6	173.8	263.4	142.7	198.5	341.2	1.30
#B	113.6	165.5	279.1	123.5	177.5	301.0	1.08
#C	92.5	160.7	253.2	104.5	195.2	299.7	1.18
#D	38.7	192.5	231.2	79.6	194.5	274.1	1.19
#E	13.5	227.1	240.6	55.4	217.3	272.7	1.13



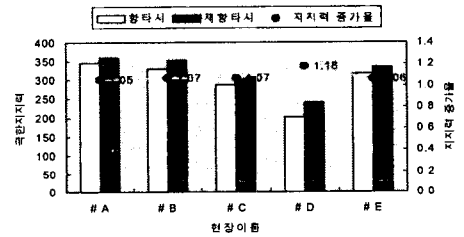
a) Engineering News



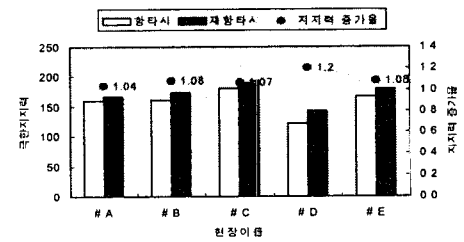
b) Modified Engineering News



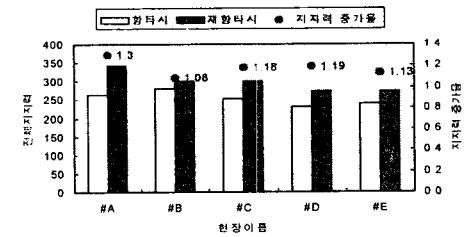
c) Hiley



d) Danish



e) Gates



f) CAPWAP 해석

Fig. 6 경시효과를 고려한 경우 지지력 증가

이상의 결과 항타 후 시간경과에 따라 말뚝의 지지력이 크게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 지지력 변화율은 지반조건이나 말뚝의 종류 등에 따라 상당한 차이가 있는데 시간경과에 따른 지지력 변화는 증가(set-up 효과)할 수도 있고 감소(relaxation 효과)할 수도 있으므로 경시효과를 고려한 시험이 많이 수행되어 차후 더 정밀한 관계식을 도출하기 위한 많은 연구가 있어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

말뚝에 대한 정재하시험과 동재하시험을 시행한 실측자료를 수집·분석을 통하여 말뚝의 지지력과 지지력식에 의한 결과를 상호 비교하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) Davisson 방법을 기준으로 정도를 평가한 결과, Terzaghi & Peck > Chin > Meyerhof > Modified Meyerhof 방법 순으로 기준 값에 근접하게 나타났다.
- 2) 동재하시험자료와 비교한 결과 항타공식 중 Modified Engineering News 공식이 가장 실측치와 근접한 결과를 주었다. 하지만, 동적 지지력 공식간의 상당한 오차가 발생하였는데 이는 해머 효율의 불확실성이라든가 변수의 자체특성, 경시효과 등이 고려되지 않았기 때문으로 판단된다.
- 3) 경시효과를 고려한 시험 결과 선단지지력에 비해 주면마찰력이 뚜렷하게 증가하였으며 항타시 대비 주면마찰력은 평균 약 2배정도 지지력이 증가하였다.
- 4) 7일의 경시효과를 고려한 결과 Engineering News, Modified Engineering News, Hiley, Danish, Gates, CAPWAP 해석시에 대한 관계식은 각각  $Q_{u(Resrike)}/Q_{u(EOID)} = 0.971 t^{0.1}$ ,  $0.968 t^{0.1}$ ,  $1.192 t^{0.1}$ ,  $0.880 t^{0.1}$ ,  $0.889 t^{0.1}$ ,  $0.966 t^{0.1}$  과 같이 성립되는 것으로 나타났다. 말뚝기초 설계시 재하시험에 의한 방법이 가장 신

뢰성이 뛰어난 것으로 평가되고 있지만 적절치 못한 시공 또한 많이 발생하고 있다. 최적의 말뚝기초를 설계하기 위해서는 시공성 분석 및 시험말뚝에 의한 확인과정이 필요할 것이며, 특히 경시효과에 따른 지지력 변화영향은 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Braja, M. Das, "Principles of foundation engineering", pp.564-673, 1986
- 2) Chin, F. K., "Estimation of the ultimate load of pile not carried to failure", Proceedings of Second Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, pp.81-90, 1970
- 3) Donald P. Coduto, PE, GE, "Foundation design principles and practices", Prentice-Hall, New Jersey, pp.403-416, 1994
- 4) Meyerhof, G. G., "Bearing capacity and settlement of pile foundation", Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.102, No.GT3, pp.197-228, 1976
- 5) T. William Lambe, Robert V. Whitman, "Soil mechanics", John Wiley & Sons, pp.498-513, 1969
- 6) 이명환, 이인모, "말뚝기초(VII)", 한국지반공학회, 제10권, 제1호, 1994
- 7) 이명환, 홍현성, 이원제, "말뚝기초의 최적설계", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.60-76, 1994
- 8) 이원제, 전영석, 홍현성, 이명환, "시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력 변화 연구", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp.69-90, 1995
- 9) 홍현성, 이원제, 김성희, 이명환, "동재하시험 결과로부터 말뚝의 허용지지력 결정방법에 대한 연구", 한국지반공학회 봄학술발표회, pp.43-53, 1995