KGS Spring Conference 2004 / March 25~26, 2004 / Seoul / Korea

매입말뚝 공법의 지지력 특성에 관한 연구
Bearing Capacity Characteristics of Auger-Drilled Piling

곽수정[1], Soo-Jeong Gwak, 서인석[2], In-Seok Seo

[1] 지한 엔지니어링(주) 대표이사, President, Jihan Engineering Co.
[2] 지한 엔지니어링(주) 차장, General Manager, Jihan Engineering Co.

SYSNOSIS : This study set out to analyze the appropriateness of the piling distance installed in weathered layer in the auger-drilled piling method and the reasonable piling distance for the unfinished parts. For that purpose, an investigation was done of the reliability of the dynamic test, the appropriateness of the old bearing capacity formula for the auger-drilled piling, and the quality control measures for obtaining the required bearing capacity.

Keywords : auger-drilled piling, bearing capacity, dynamic test, static test, weathered layer

1 서 론

최근 도심 재건축 및 민원발생지역에 말뚝시공법으로서 매입공법의 적용이 급격히 증가하고 있다. 그러나 매입공법에서 공통적으로 나타나는 현상은 주면마찰력 증진을 위하여 주입하는 시멘트풀만 가지고는 기대하는 지지력을 얻을 수 없는 경우가 대부분이며 시공 완료 후 소요 지지력 부족으로 인한 문제점이 자주 발생하고 있는 것이 현실이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 매입말뚝공법으로 풍화대층에 기시공된 말뚝길이의 적정성 및 미시공 구간의 합리적인 말뚝길이 분석을 통하여 동재하시험의 신뢰도, 기존 매입말뚝 지지력 공식의 적정성 및 소요 지지력 발현을 위한 품질관리 방안을 연구하는데 목적이 있다. 이를 위하여 동재하 및 정재하 시험을 병행하고 이것을 이론적인 지지력 계산 결과와 상호 비교 분석하였다.

2 지지력 계산에 의한 말뚝길이 분석

2.1 기존 지지력 계산식

본 연구에서는 매입말뚝의 지지력이 각 기관 및 시공상태에 따라 크게 변할 수 있으므로 국내 도로교 설계기준 해설(하부구조편, 2001)에서 제시하는 내부 굴착말뚝공법에 따른 선단 극한 지지력 공식 및 일본 도로교 시방서에서 제시하는 공식을 적용하여 분석하였다. 도로교 설계기준에 제시된 매입말뚝의 극한 지지력은 식 (1)과 같다.

$$Q_u = q_p \cdot A_p + U\sum l_i f_i \qquad (1)$$

여기서, Q_u : 극한 지지력(ton)

q_p : 단위면적당 극한 선단지지력(t/m^2)

(국내 도로교 : 20N≤1000 : 모래자갈층, 일본 도로교 : 15N≤600 : 모래자갈층)

N : 말뚝선단의 N값

A_p : 말뚝선단부 면적(m^2),

U : 주면 길이(m)

f_i : 각층의 단위 면적당 주면마찰력(t/m^2)

(국내 : $f_s = 0.1\overline{N_s} \leq 5t/m^2$: 사질토, 일본 : $f_s = 0.1N \leq 5t/m^2$: 사질토)

$\overline{N_s}$: 사질토의 N치의 평균치

l_i : 각층의 두께(m)

2.2 지지력 계산에 의한 말뚝길이 산출

그림 2.1은 도로교 설계기준 해설에 제시되어 있는 지지력 공식 및 일본 도로교 공식을 이용하여 기시공된 매입말뚝의 지지력 및 미시공 구간의 소요지지력을 만족하는 말뚝길이를 산출한 결과로서 다음과 같은 상관관계를 도출하였다. 또한 그림 2.2는 설계하중과 허용지지력의 전체적인 관계를 나타낸다.

국내 도로교 : 말뚝길이(m) = 0.3136 × 허용지지력 − 16.03 (2)

일본 도로교 : 말뚝길이(m) = 0.3136 × 허용지지력 − 7.82 (3)

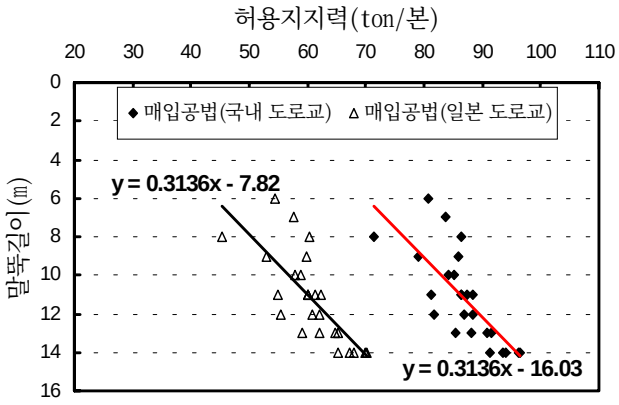

그림 2.1 말뚝길이와 허용지지력

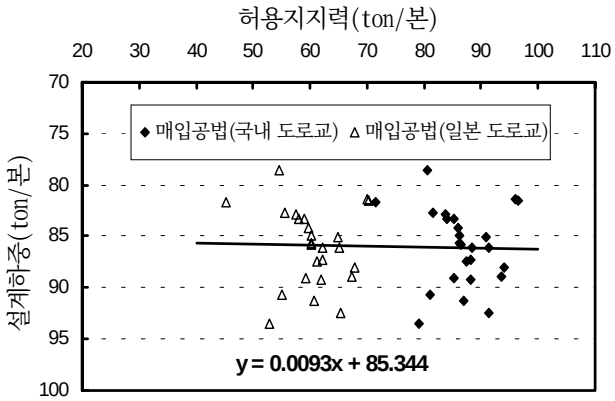

그림 2.2 설계하중과 허용지지력

3 매입말뚝의 현장 재하시험

3.1 매입말뚝의 정재하 시험

3.1.1 시험 말뚝의 제원 및 내용

본 연구에서 매입말뚝의 지지력 특성을 파악하기 위한 정재하 시험말뚝의 제원 및 내용은 표 3.1과 같으며 본 시험에서의 최대하중은 설계하중의 250%이상의 재하를 목적으로 실시하였으며 압축 재하시험은 완속 재하시험방법(표준재하시험방법)을 기본으로 하여 KS에 명시되지 않은 사항은 ASTM에 의거 실시하였다. 재하방법은 표 3.1에 나타낸 바와 같이 시험말뚝과 인접하여 Anchor를 천공하여 Cement를 주입, 양생시킨 후 재하대를 설치하고 Anchor의 반력을 이용한 압축재하시험을 실시하였으며

시험결과는 표 3.2와 같다.

표 3.1 시험 말뚝의 내용 및 제원

시험번호	시험방법	재하방법	설계하중 (ton/본)	시험최대하중 (ton/본)	관입 깊이 (m)	종 류	시공방법
Pier 114	표준재하 시험방법	Anchor 지지방법	86.134	186.0	9.0	PHC PILE ϕ500	매입말뚝 공법

3.1.2 정재하시험 결과분석

표 3.2의 정재하시험 결과에서 보듯이 매입공법으로 시공된 PHC 말뚝(L=9.0m)에 대하여 허용지지력은 50.0~77.5ton으로서 설계하중 86.134ton을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

표 3.2 정재하시험 결과 요약

분석방법 \ 시험번호		Pier 114				
		극한하중 (ton)	항복하중 (ton)	안전율		허용지지력 (ton)
				극한하중	항복하중	
항복하중 분석법	P-S	175.0	128.0	3.0	2.0	58.33
	log P - log S	183.0	112.0	3.0	2.0	56.00
	S - log (t)	-	155.0	-	2.0	77.50
	ΔS/Δlog(t) - P	-	124.0	-	2.0	62.00
	Davisson's	-	100.0	-	2.0	50.00
전체 침하량		68.63mm				
허용 지지력		50.0 ~ 77.5 ton				
설계 지지력		86.134 ton/본				
비 고		N.G				

3.2 매입말뚝의 동재하 시험

3.2.1 시험 말뚝의 제원

표 3.3에 제시한 바와 같이 초기항타 및 재항타 시험을 총 5개소에 대하여 실시하였다.

표 3.3 동재하 시험 말뚝의 제원

구 분	P.D.A-1		P.D.A-2		P.D.A-3	
	E.O.I.D	RESTRIKE	E.O.I.D	E.O.I.D	RESTRIKE	RESTRIKE
설계 지지력	83.134 ton/본	83.278 ton/본	83.278 ton/본	83.278 ton/본	85.599 ton/본	83.278 ton/본
말뚝 번호	P114		P117 D1		P112 E2	
관입 심도	9.0m		11.0m		11.9m	
말뚝종류 및 항타방법	ϕ500mm t=8.0mm P.H.C PILE, 매입공법(DROP 3.5ton Hammer을 이용)					

표 3.3 동재하시험 말뚝의 제원(계속)

구 분	P.D.A-4		P.D.A-5	
	E.O.I.D	RESTRIKE	E.O.I.D	RESTRIKE
설계 지지력	85.599 ton/본	85.599 ton/본	85.599 ton/본	83.278 ton/본
말뚝 번호	P112 D1		P117 A1	
관입 심도	12.8m		13.5m	
말뚝종류 및 항타방법	ϕ500mm t=8.0mm P.H.C PILE, 매입공법(DROP 3.5ton Hammer을 이용)			

3.2.2 동재하시험 결과분석

동재하시험 결과는 표 3.4에서 보듯이 평균말뚝길이가 11.64m일 경우 주면마찰력은 68.05ton이고 선단지지력은 194.81ton으로서 대부분 허용지지력이 선단 지지형태를 나타내었다. 평균극한지지력은 283.07ton이며 안전율 2.5적용시 평균허용지지력은 105.23ton으로서 평균설계지지력 84.78ton을 24% 상회하였다.

표 3.4 허용지지력의 산정

시험 번호		CAPWAP 분석결과					설계 지지력 (ton)	관입 심도 (m)
		주면마찰력 (ton)	선단지지력 (ton)	안전율 (SF)	극한지지력 (ton)	허용지지력 (ton)		
P.D.A-1	EOID	71.1	146.8	2.5	217.9	87.96	83.134	9.0
	RESTRIKE	83.2	155.6	2.5	238.8	95.52	83.134	
P.D.A-2	EOID	43.9	141.6	2.5	185.5	74.2	83.278	11.0
	RESTRIKE	106.9	109.5	2.5	216.4	86.56	83.278	
P.D.A-3	EOID	37.2	217.7	2.5	254.9	101.96	85.599	11.9
	RESTRIKE	86.2	242.6	2.5	328.8	131.52	85.599	
P.D.A-4	EOID	43.0	311.5	2.5	354.5	141.80	85.599	12.8
	RESTRIKE	69.6	197.9	2.5	267.6	107.04	85.599	
P.D.A-5	EOID	57.2	274.6	2.5	331.8	132.72	83.278	13.5
	RESTRIKE	82.2	150.3	2.5	232.5	93.00	83.278	
평 균		68.05	194.81	2.5	283.07	105.23	84.78	11.64

그림 3.1은 동재하시험 결과에 의한 허용지지력과 말뚝길이의 관계를 비교 분석한 결과로서 (식 2)와 같은 상관관계를 도출하였다.

말뚝길이(m) = 0.0474 × 허용지지력 + 6.529 (4)

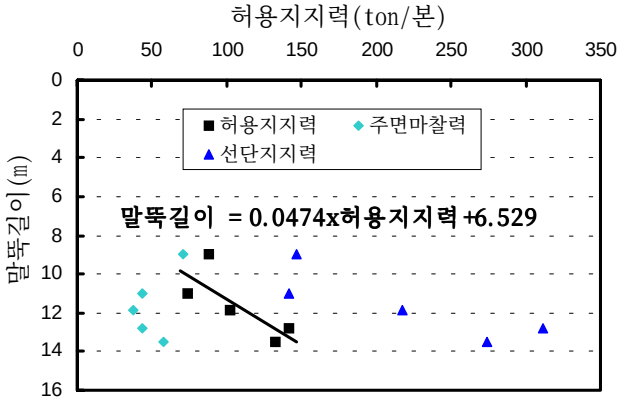

그림 3.1 동재하시험 허용지지력과 말뚝길이

4 재하시험 결과 및 지지력 계산식 상호분석

4.1 정재하 시험 및 지지력 계산식 결과의 분석

그림 4.1에서 보듯이 정재하 시험에 의한 평균 허용지지력 60.77(ton/본)이며 그림 4.2와 같이 지지력 공식에 의한 허용 지지력 83.22(ton/본)과 비교하여 보면 37%정도 지지력 공식에 의한 값이 크게 나타났다. 따라서 지지력 계산에 의하여 매입말뚝의 길이를 산출할 경우에는 Qu=20N · Ap(식 1)보다 보수적이어야 할 것으로 판단된다.

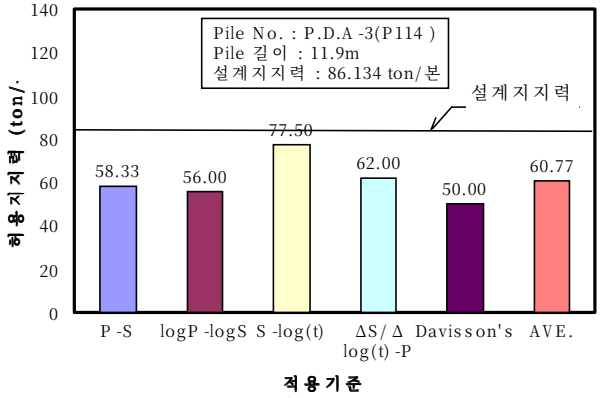

그림 4.1 정재하 시험결과

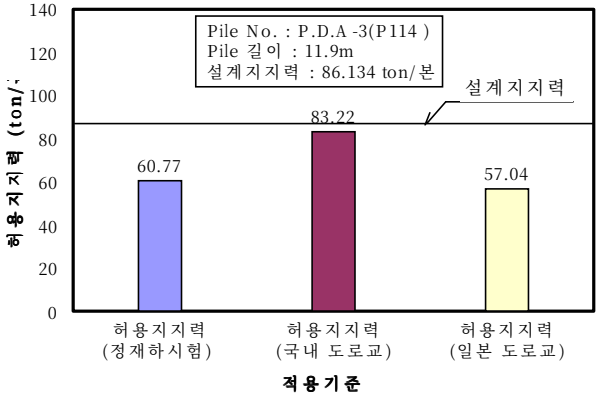

그림 4.2 정재하 시험 결과와 지지력 계산결과

4.2 동재하 시험 및 지지력 계산식 결과의 분석

그림 4.3~4.7은 동재하시험에 의한 허용지지력과 국내 도로교 설계기준 및 일본 도로교 지지력 공식에 의하여 분석한 결과로서 재항타시험에 의한 허용지지력은 86.56ton~131.52ton으로 국내도로교 지지력 공식에 의한 허용지지력 83.22ton~93.25ton보다 P.D.A-1,3,4지점에서 15%~48%크게 나타났다. 또한 P.D.A-2,5 지점은 재항타시험에 의한 허용지지력과 이론적 허용 지지력이 일치하는 것으로 분석되었다.

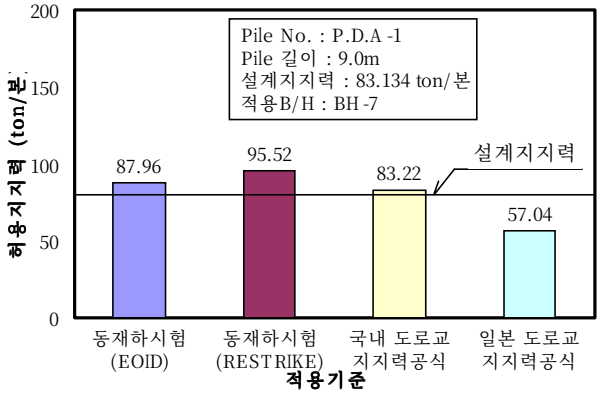

그림 4.3 P.D.A-1

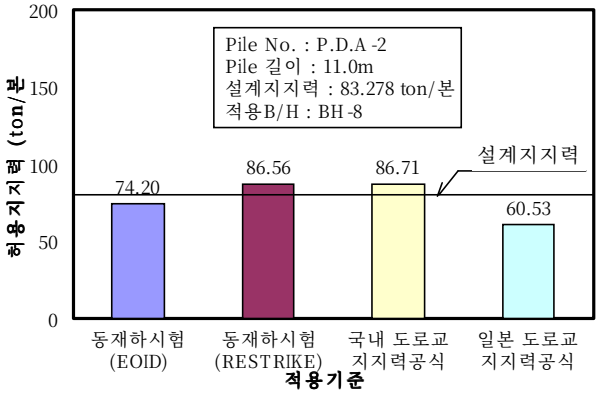

그림 4.4 P.D.A-2

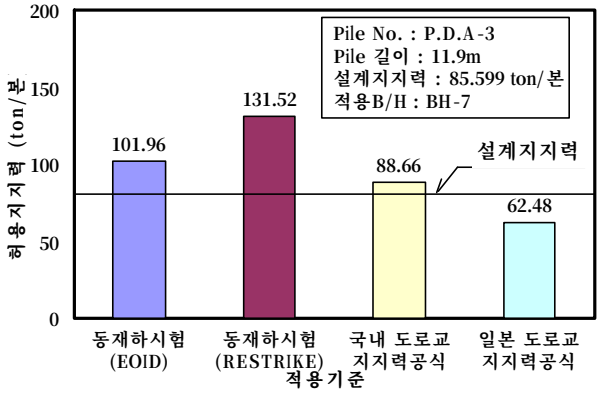

그림 4.5 P.D.A-3

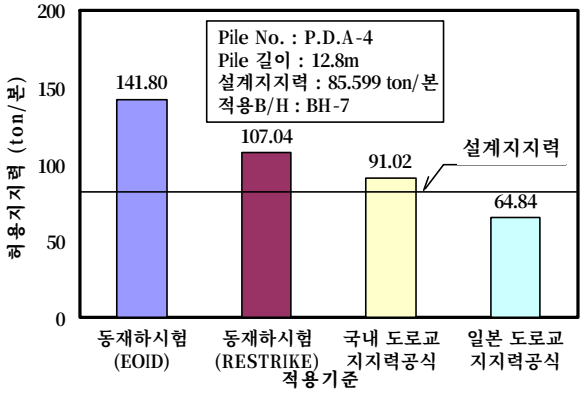

그림 4.6 P.D.A-4

그림 4.8에서 보듯이 동재하시험에 의한 허용지지력(E.O.I.D, RESTRIKE)과 말뚝길이의 관계에서 (식 2)와 같은 상관 관계를 도출하였으며, 빗금친 영역내로 말뚝길이를 관리한다면 설계하중 84.78ton을 만족할 수 있는 것으로 분석되었다.

$$\text{말뚝길이(m)} = 0.0337 \times \text{허용지지력} + 8.3458 \qquad (5)$$

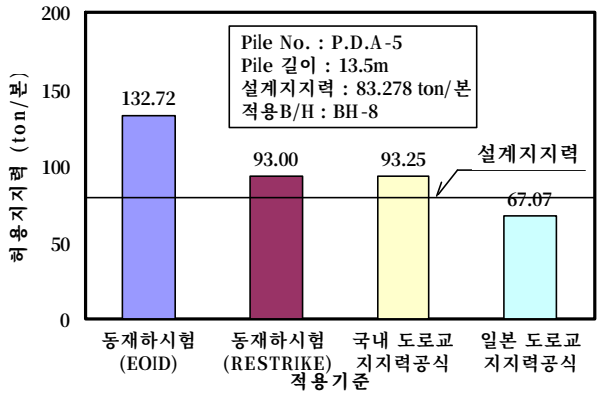

그림 4.7 P.D.A-5

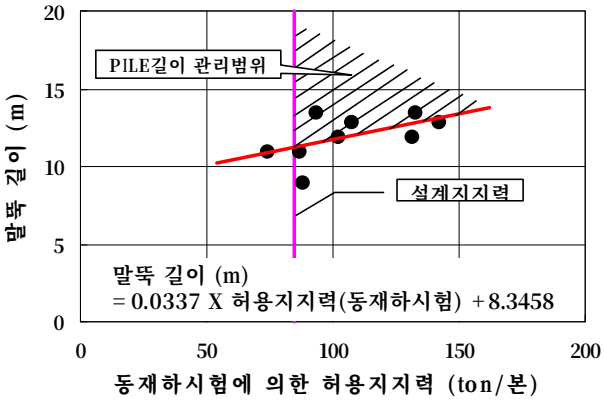

그림 4.8 동재하시험에 의한 허용지지력과 말뚝길이

4.3 정재하 시험 및 동재하 시험 결과의 분석

그림 4.9는 P.D.A-3(Pier 114)에서 시행한 동재하시험에 의한 허용지지력 결과와 정재하 시험 결과에 의한 허용지지력을 비교 분석한 결과로서 동재하시험에 의한 허용지지력은 91.74ton이나 정재하시험에 의한 허용지지력 중 S-Log(t) 분석에 의한 값이 77.5ton으로서 비교적 일치하는 경향을 나타냈으며, 평균적으로는 동재하시험에 의한 값이 51% 크게 나타나 동재하 시험에 의한 허용지지력이 과대평가됨을 확인할 수 있었다.

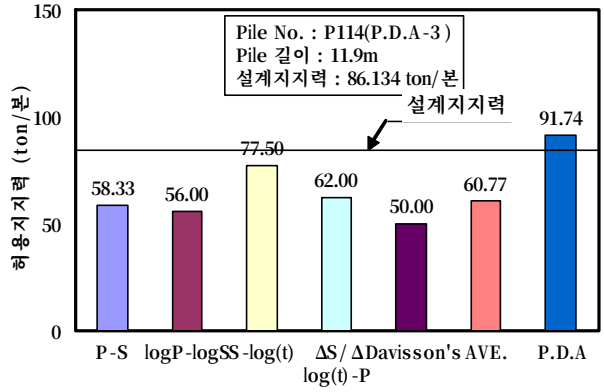

그림 4.9 동재하시험과 정재하 시험에 의한 허용지지력

5 합리적 매입말뚝 길이의 분석

말뚝길이와 지지력 공식, 동재하 및 정재하시험의 허용지지력 관계에서 그림 5.1과 같은 상관관계를 도출하였다.

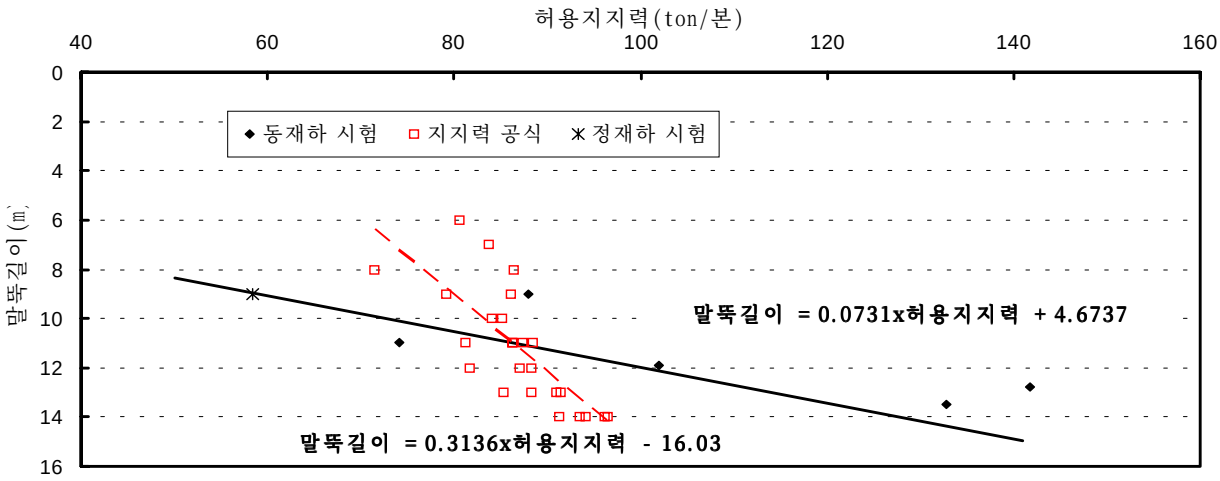

그림 5.1 말뚝길이와 허용지지력

그림 5.1에서 보듯이 지지력 공식에 의한 말뚝길이 산출의 경우 말뚝길이가 증가할수록 허용지지력이 급격하게 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 이러한 현상은 말뚝길이가 증가하므로 인해 주면 마찰력이 증가하기 때문이며 실제 시공시 이론적으로 예상한 만큼의 주면 마찰력 향상은 말뚝의 한계 근입비 개념 및 시공상의 오차 등으로 인해 기대하기가 어려운게 현실이다. 이러한 관점에서 말뚝길이와 이론적 지지력 공식, 동재하 및 정재하 시험의 허용지지력 관계에서 평균적인 매입말뚝길이 산출을 위한 관계식을 도출하였다.

$$\text{전체평균 말뚝길이(m)} = 0.0731 \times \text{허용지지력} + 4.6737 \qquad (6)$$

식 (6)에 의하면 금회 연구대상 구조물의 PHC 말뚝 평균 설계 지지력이 86ton/본인 점을 감안하면 약 11.0m 정도일 경우 설계지지력을 만족할 수 있을 것으로 예측된다.

6 결 론

본 연구에서는 매입공법으로 풍화대층에 시공된 말뚝에 대하여 말뚝의 지지력 신뢰도를 검증하기 위해 시추조사, 동재하 및 정재하 시험을 병행하고 이것을 이론적인 지지력 계산 결과와 상호 비교하여, 동재하시험의 신뢰도, 기존 매입말뚝 지지력 공식의 적정성 및 소요 지지력 발현을 위한 품질관리 방안을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 정재하 시험에 의한 평균 허용지지력은 60.77ton/본으로서 도로교 설계기준해설에 제시된 지지력 공식에 의한 허용 지지력 83.22ton/본과 비교하여 보면 37%정도 지지력 공식에 의한 값이 크게 나타났다.

(2) 동재하시험에 의한 허용지지력과 국내 도로교 설계기준 및 일본 도로교 지지력 공식에 의하여 분석한 결과로서 재항타시험에 의한 허용지지력은 86.56ton~131.52ton으로 국내도로교 지지력 공식에

의한 허용지지력 83.22ton~93.25ton보다 P.D.A-1,3,4지점에서 15%~48%크게 나타났다.

(3) 정·동재하 시험결과를 비교 분석한 결과 동재하시험에 의한 허용지지력은 91.74ton이나 정재하 시험에 의한 허용지지력 중 S-Log(t)분석에 의한 값이 77.5ton으로서 비교적 일치하는 경향을 나타냈으며, 평균적으로는 동재하시험에 의한 값이 51% 크게 나타나 동재하 시험에 의한 허용지지력이 과대 평가됨을 확인할 수 있었다.

(4) 잔여 시공분에 대하여 최적의 매입말뚝길이를 분석하고자 말뚝길이와 지지력 공식, 동재하 및 정재하시험의 허용지지력 관계에서 다음과 같은 상관관계를 도출하였다.

지지력계산 : 매입말뚝길이(m) = 0.3136 × 허용지지력 − 16.03 (2)

동재하시험 : 매입말뚝길이(m) = 0.0337 × 허용지지력 + 8.3458 (4)

평균매입말뚝길이(m) = 0.0731 × 허용지지력 + 4.6737 (6)

(5) 동재하 시험에 의한 품질관리로서는 향후 시공장비의 적정성, 설계하중의 적절성 판단 및 합리적인 시공관리 방안을 수립하기 위한 지지층 확인 시험과 같이 보수적으로 활용되는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 매입말뚝의 지지력 계산시 도로교 설계기준해설에 의한 지지력공식 Qu=20N·Ap(식 2.4)은 다소 크게 산정 되므로 보다 보수적이어야 할 것으로 판단되며 선단지지층의 N치 및 정재하시험과 동재하시험을 상호 비교분석하여 지속적으로 보완되고 수정되어야 할 것으로 판단된다.

*** 참고문헌**

1. 건설교통부(2003), 구조물 기초설계기준 해설, pp.342~345.
2. 대한토목학회(2001), 도로교설계기준 해설(하부구조편), pp.217~238.
3. 이송, 박준홍, 박중배, 김태훈(2002), “국내 SIP말뚝의 지지력 특성에 관한 연구”, 한국지반공학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 319~327.
4. 박종배, 임해식, 박용부(2002), “SIP공법의 지지력 특성에 관한 연구”, 한국지반공학회, '02 기초 기술 학술발표회 논문집, pp. 59~76.
5. 채수근(1997), “새로운 매입말뚝 공법의 지지력 특성”, 한국지반공학회지, Vol. 13, No. 4, pp. 25~35.
6. 최도웅, 한병권, 서영화, 조성한(2002), “매입말뚝공법의 지지력 예측식 개선에 관한 연구”, 한국지반공학회 '02 가을 학술발표회 논문집, pp. 382~389.
7. 한국도로공사(2000), “말뚝기초설계”, pp. 91~99.
8. Bowles, J.E(1988), Foundation Analysis and Design.
9. Canadian Geotechical Society(1992), Foundation Engineering Manual (3rd.ed.)
10. Tomlinson, M., J.(1987), "Pile Design and Construction Practice, 3rd edition", A Viewpoint Publication, pp378
11. Roscoe. G. H.(1984), "The behaviour of flight auger bored piles in sand", Piling and ground improvement, pp.241-250
12. Van Impe, W. F., "Developements in pile design", DFI-Conference, (Stresa: 1991), pp.1-31