

2009年 2月

碩士學位論文

매입말뚝기초의 지지력 결정에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

土 木 工 學 科

崔 珍 鎬

매입말뚝기초의 지지력 결정에 관한 연구

*A Study on the Decision of Bearing Capacity
for Bored Pile Foundation*

2009年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

土 木 工 學 科

崔 珍 鎬

매입말뚝기초의 지지력 결정에 관한 연구

指導教授 安 鍾 弼

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함.

2008年 10月

朝鮮大學校 大學院

土 木 工 學 科

崔 珍 鎬

崔珍鎬의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 _____ (印)

委員 朝鮮大學校 教授 _____ (印)

委員 朝鮮大學校 教授 _____ (印)

2009年 2月

朝鮮大學校 大學院

< 목 차 >

ABSTRACT

제1장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향 및 내용	3
제2장 매입말뚝기초의 이론적 고찰	5
2.1 매입말뚝기초의 개요	5
2.2 매입말뚝기초의 설계기준	9
2.3 매입말뚝기초의 시공절차 및 제한요인	13
제3장 매입말뚝기초의 지지력 산정방법	17
3.1 매입말뚝기초의 지지력 이론	17
3.1.1 기본 개념	17
3.1.2 매입말뚝기초의 극한지지력	18
3.1.3 정역학적 지지력 공식	21
3.2 정재하시험에 의한 지지력 산정방법	24
3.2.1 정재하시험의 개요	24
3.2.2 정재하 시험 및 분석 방법	24

3.3 동재하시험에 의한 지지력 산정방법	36
3.3.1 동재하시험의 개요	36
3.3.2 동재하시험 및 분석방법	37
제4장 사례현장 지지력 분석 및 고찰	49
4.1 지반조건	49
4.2 매입말뚝기초의 적용현황	51
4.3 동재하시험 결과 및 PDA분석	52
4.4 분석 및 고찰	57
4.4.1 선단지지력 분석결과	57
4.4.2 주면마찰력 분석결과	58
4.4.3 허용지지력 분석결과	60
4.4.4 지지력 분담률 분석결과	62
4.4.5 정역학 및 동역학적 지지력 분석결과	64
제5장 결 론	66
참 고 문 헌	67

< 표 목차 >

표 2.1	매입말뚝공법의 종류	6
표 2.2	매입말뚝의 지지력 산정식	11
표 2.3	매입말뚝의 설계지지력 공식(일본)	12
표 2.4	SIP공법의 표준 배합비(m ³ 당)	15
표 2.5	매입말뚝의 시공관리	16
표 3.1	각종 매입말뚝의 지지력 공식(일본 기관별 기준)	20
표 3.2	국가별 계획최대하중 기준	25
표 3.3	각국의 극한하중 결정방법	28
표 3.4	극한하중에 대응하는 전체 침하량의 규정치	34
표 3.5	말뚝항타분석기(PDA)의 계산 출력치	38
표 3.6	지반종류에 따른 Jc값의 범위 및 추천값	42
표 3.7	CAPWAP 계산 방법	43
표 3.8	대표적 항타기의 효율	46
표 3.9	항타기와 말뚝에 따른 에너지 전달율	46
표 3.10	최대항타응력 추천치	47
표 3.11	손상정도의 판단기준	48
표 3.12	C.O.E EM 1110-2-2906 규정(안전율)	48
표 4.1	사례현장의 지반조건	49
표 4.2	사례현장의 지반조사 성과분석	50
표 4.3	개소별 시험말뚝 제원	51
표 4.4	항타응력의 평가결과	56
표 4.5	항타에너지 전달율 측정	56
표 4.6	선단지지력 분석결과	57
표 4.7	주면마찰력 분석결과	59
표 4.8	허용지지력 분석결과	61
표 4.9	시공심도별 선단지지력 대 주면마찰력의 분담률	62
표 4.10	정역학 및 동역학적 허용지지력 산정결과 분석	64

〈그림 차례〉

그림 2.1a 중굴공법의 시공개요도	7
그림 2.1b 선굴착공법의 시공개요도	7
그림 2.1c 회전압입공법의 시공개요도	8
그림 2.2 SIP공법의 시공절차	13
그림 3.1 P-S 분석법	30
그림 3.2 logP-logS 분석법	30
그림 3.3 S-logt 분석법	31
그림 3.4 $\frac{\Delta S}{\Delta \log t}$ -P 분석법	31
그림 3.5 Divisson에 의한 산정법	33
그림 3.6 동재하시험 개요도	37
그림 3.7 말뚝향타 분석기(PDA)	37
그림 3.8 PDA의 구조 시스템	39
그림 3.9 CASE method of predicting static bearing capacity ..	40
그림 3.10 CASE 방법의 적용 예	43
그림 3.11 CAPWAP에서의 말뚝주면과 선단에 대한 흙의 저항 모델 ..	44
그림 3.12 정적 선단저항력과 상대 선단침하량	45
그림 4.1 개소별 말뚝길이 및 매입심도	53
그림 4.2 소각동NO.1 PDA분석 데이터	54
그림 4.3 소각동NO.2 PDA분석 데이터	54

그림 4.4 주민 편익시설 NO.1 PDA분석 데이터	55
그림 4.5 주민 편익시설 NO.2 PDA분석 데이터	55
그림 4.6 굴뚝 NO.1 PDA분석 데이터	56
그림 4.7 관리동 NO.1 PDA분석 데이터	56
그림 4.8 선단지지력 분석결과	59
그림 4.9 주면마찰력 분석결과	61
그림 4.10 허용지지력 분석 결과	62
그림 4.11 분담률(%) 비교 분석	64
그림 4.12 허용지지력 비교 분석	66

ABSTRACT

A Study on the Decision of Bearing Capacity for Bored Pile Foundation

Choi, Jin - Ho

Advisor : Prof. Ahn, Jong-Pil, Ph.D.

Department of Civil Engineering,

Graduate School of Chosun University

This study has undertaken the theoretical contemplation on the bearing capacity calculation method of the bored precast pile foundation, and use the foundation survey of case on site that applied actual SIP foundation engineering, and the result of pile driving analyzer and others to interpret the case method and the CAPWAP method simultaneously with the comparison and analysis for allowable bearing capacity as it is interpreted by the static method under the Meyerhof formula. In addition, the bearing capacity share rate and others are compared and analyzed through the calculation result of the end bearing capacity of a pile and the frictional resistance, and review the appropriateness on the determinant method of the allowable bearing capacity of the bored precast pile foundation.

As a result of calculating the unit end bearing capacity of a pile on the case site of the bored precast pile from the pile driving analyzer result, it was in the average of 1,235t/m² that is higher value than the standard figure of base design for the structure that defined the end

bearing capacity of a pile of the bored precast pile for 500~750t/m². In addition, the frictional resistance for each area of the bored precast pile was analysed for the average of 22 tons that most exceed the domestic standard figure of 5t/m², and any data that falls short of the standard figure has to make the stringent quality control.

Next, the ratio of the average end bearing capacity of a pile and the frictional resistance calculated from the result of the pile driving analyzer is the share rate of 88 : 12, respectively that the share rate was much less than 50%, as analyzed for much less of the frictional resistance, and the allowable bearing capacity following the pile driving analyzer was analyzed for 23% higher than the design weight, and the allowable static bearing capacity of Meyerhof was analyzed for 19% higher compared to the design weight that the two methods showed similar results.

Currently, there insufficient researches on the estimation of the allowable bearing capacity following the end bearing capacity of a pile and the frictional resistance of the bored precast pile that, in order to undertake safer and more reasonable bored precast pile work, it would be prudent to supplement the analyses of substantial data for mutual comparison of the end bearing reinforcement N figure, static loading test and pile driving analyzer.

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적

현재 고도의 산업화와 경제발전에 따라 사회간접자본시설 등이 대형화 추세에 있으며, 동시에 이들 시설물의 대형화와 함께 구조물 기초말뚝의 중요성이 더욱 증대되고 있는 실정이다. 특히 연약지반에 토목 및 건축구조물을 시공할 경우에는 말뚝기초의 사용빈도가 날로 증가하고 있고, 이에 따라 말뚝기초의 시공방법에 있어 다양한 연구와 시공이 이루어지고 있으며, 말뚝을 시공하는 방법에는 크게 타입말뚝(Driven Pile) 기초공법과 매입말뚝(Bored Pile) 기초공법이 사용되고 있다.

최근에는 환경문제가 심각한 사회적 관심사로 대두됨에 따라 건설현장에서 말뚝의 항타로 인한 지반진동이나 소음 및 매연 등 각종 공해 유발사태에 대한 민원발생이 급증하고 있으며, 1994년 11월 건설공사에 대한 소음 및 진동 규제법이 공포된 이후 민원이 발생할 여지가 있는 현장에서는 직항타 공법의 적용이 불가능하게 되었다. 특히 이제까지 국내에서 가장 보편적으로 적용된 디젤해머에 의한 타입말뚝의 경우 각종 건설공해 측면에서 가장 불리한 방법으로서 도심지나 산업단지 등 개발이 진행된 곳에서의 적용은 거의 불가능한 실정이다(박찬국 등, 1995).

이러한 문제점들에도 불구하고 항타공법은 경제성 측면에서 우수하고 시공 관리가 적절하게 이루어질 경우 말뚝의 지지력 측면에서 가장 신뢰도가 좋은 장점을 지니고 있기 때문에 문제점을 다소 보완한 유압해머에 의한 항타공법은 디젤해머에 의한 항타공법의 장점을 어느 정도 만족시켜 주면서도 지반진동 및 소음 수준을 공해관리 기준 이하로 낮출 수 있어 도심지 공사 등에서 많이 이용되고 있다.

그러나 국내의 경우 향타로 인한 지반진동 및 소음 등에는 명확한 공해관리 기준이 설정되어 있지 못한 문제점과 진동 및 소음 등으로 인간이 불편함을 느끼는 정도는 개인별로 큰 차이가 있어 외국의 공해관리 기준이하를 적용하는 시공현장에서는 적용하기 어렵다. 이 때문에 매입말뚝은 이와 같은 향타 공해가 문제시 되는 현장에서 타입말뚝을 대체할 수 있는 대안공법으로 채택되고 있으며 최근에 들어 그 적용이 급증하는 추세에 있다. 그러나 지금까지 국내에는 매입말뚝 기초공법에 대한 기술적 연구 및 활용이 부족하여 공사비 절감 및 품질 향상 차원에서는 거의 진전이 없다고 해도 과언이 아니다.

매입말뚝 기초공법으로서 대표적인 SIP(Soil Cement Injected Precast Pile) 공법은 1968년 일본에서 개발된 공법으로서 지반을 소정의 심도까지 먼저 굴착하고 시멘트 페이스트를 주입한 후에 말뚝을 삽입하고 최종 마무리하는 저소음·저진동 말뚝기초공법이다. 이 공법은 1987년 국내에서 처음 적용된 이후부터 택지난과 민원 등으로 인해 매년 시공현장이 증가되고 있으며 2001년에는 말뚝 기초분야에서 약 50% 정도를 차지하고 있다(대한주택공사, 2001).

타입말뚝 기초공법과 매입말뚝 기초공법은 지지력 분포의 측면에서 각기 다른 장단점을 가지고 있다. 타입말뚝의 경우 말뚝시공 초기 발휘되는 지지력이 크나 차후 토질의 Set up 효과 등으로 인해 발생하는 장기적인 지지력 상승이 적다. 반면에 매입말뚝의 경우 말뚝시공 초기 발휘되는 지지력은 작으나 차후 Soil Cement 등으로 인해 발휘되는 장기적인 지지력의 상승이 크다.

현재 국내에서 적용되고 있는 SIP공법은 일본에서 개발된 시공법과는 다르게 변형된 형태로 적용되고 있지만 설계지지력은 향타말뚝과 동일하게 Meyerhof 지지력 산정식에서 N치 계수를 보정하여 사용하고 있으며 기관별·공법별·분야별로 차이가 있는 실정이다. 또한 SIP공법의 지지력 거동은 지반조건이나 굴착방법, 시멘트 페이스트 배합 및 양생 등 많은 요소에 의해 영향을 받을 뿐만 아니라 국내의 지반 대다수가 화강 풍화토이며 시공시 선단부를 풍화암층 이상의 지반에 거치시키는 등 국내 지반조건 및 현장조건에 부합되는 적절한 설계지지력 산정식이 정립되어야 하며 이에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 매입말뚝기초의 지지력 산정방법에 대한 이론적 고찰을 수행하고 실제 SIP 기초공법을 적용한 사례현장의 지반조사 및 동재하시험 결과 등을 이용하여 CASE 방법과 CAPWAP 방법으로 해석함과 동시에 Meyerhof공식에 의한 정역학적 방법으로 해석하여 허용지지력을 비교 분석하여 보았다. 또한 선단지지력과 주변마찰력 산정결과를 통해 지지력 분담률 등을 비교·분석하고, 매입말뚝기초의 허용지지력의 결정방법에 대한 적합성을 검토해 보고자 한다.

1.2 연구동향 및 내용

매입말뚝 기초공법에 대한 국내의 연구로서 이명환(1995)은 “매입말뚝공법의 지지력 특성”에 대해 한국지반공학회를 통해 발표한 바 있고, 이인모(1995)는 “SIP말뚝의 지지력 특성”에 대해 연구한 바 있으며, 채수근(1997)은 “새로운 매입말뚝 공법의 지지력 특성”에 관해 발표하였고, 대한주택공사 주택연구소(2001)에서는 “SIP공법의 품질개선방안과 지지력 산정식 제안에 관한 연구”를 수행하였다.

또한 이원제(2002)는 “광섬유 센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이 측정 및 지지력 특성 연구”를 수행하였고, 박종배(2002) 등은 “SIP공법의 지지력 특성에 관한 연구”를 수행하였으며, 최도웅(2002) 등은, “매입말뚝공법의 지지력 예측식 개선에 관한 연구”를 수행한 바 있고, 김정수(2003)는 “화강 풍화토 지반에 매입된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구”를 수행하였으며, 박종배(2004) 등은 “개선된 기준으로 시공된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구”를 수행하였다.

일반적으로 말뚝기초의 지지력을 확인하기 위해서는 시공초기에 말뚝의 동재하시험을 실시하고 말뚝의 선단지지층 확인 및 주변마찰력의 검증을 통하여 말뚝의 시공기준 및 관리지침을 정하고 공사를 진행하게 된다. 그러나 매입

말뚝 공법의 경우 초기에 주변마찰력이 발휘되지 않음으로 인해 선단지지력만을 확인할 수밖에 없다. 지금까지의 연구 결과에 의하면 초기에 확인된 선단지지력의 확보만으로 설계지지력을 만족할 수 있다면 차후 발휘되는 지지력은 상당한 상승효과에 의해 설계지지력 이상 충분히 만족하는 것으로 나타나고 있다.

본 연구에서는 매입말뚝기초인 SIP 공법의 합리적인 길이, 동재하시험의 신뢰도, 기존 지지력 공식의 적정성 및 품질관리 방안을 제시하기 위하여 6개소의 매입말뚝에 대해 현장 시추조사 및 실내시험을 통한 지반조사 결과를 분석하였다. 다음으로 동재하시험 결과를 이용하여 선단지지력과 주변마찰력에 대한 각각의 해석과 함께 허용지지력과 지지력 분담률을 분석하였으며, 또한 정역학적 해석과 동역학적 해석에 따른 허용안전율을 설계하중과 비교·분석하여 보고자 한다.

제2장 매입말뚝기초의 이론적 고찰

2.1 매입말뚝기초의 개요

말뚝기초를 시공하는 방법에는 크게 타입말뚝(Driven Pile) 공법과 매입말뚝(Bored Pile) 공법이 사용되고 있다. 말뚝기초 공법 중에서 타입말뚝이 지지력이나 시공관리 측면에서 가장 유리하나 향타시 소음·진동에 대한 법적, 사회적 규제로 시공이 불가능한 경우가 많다. 이에 대한 대책으로 저소음·저진동 말뚝기초공법으로 매입말뚝 공법이 적용되고 있다.

매입말뚝은 지반을 먼저 굴착한 후 기성말뚝을 설치하는 공법으로 선 굴착으로 인해 관입저항인 주면마찰력을 감소시키므로 일정 심도에서 향타를 하거나 시멘트 페이스트를 주입하여 말뚝주면을 보강하고 있다. 매입말뚝 공법에서는 오거를 사용하여 지반 내에 굴착을 실시한다. 오거는 연속오거(continuous flight auger)가 일반적으로 사용되지만 경우에 따라서는 오거날개 대신에 교반용 날개를 부착하기도 한다. 오거의 직경은 말뚝직경보다 50mm 큰 경우에서부터 150~200mm 큰 다양한 규격들이 적용공법에 따라 상이하게 사용되지만 국내의 경우에는 말뚝직경보다 100mm 큰 오거직경이 일반적으로 통용되고 있다.

지반굴착시 오거 룯드 증공부를 통하여 굴착액을 주입하는데 굴착액의 사용 목적은 굴착을 용이하게 해주며 동시에 굴착공벽을 보호하기 위함이다. 굴착액의 성분은 물+시멘트+벤토나이트로 되어 있으며 soil cement 1m³당 시멘트 120kg, 물 450ℓ, 벤토나이트 25kg의 비율로 혼합하여 펌프로 압송 주입한다.

굴착이 진행되어 오거선단부가 말뚝의 선단지지층에 도달하면 물-시멘트 비가 1/1.2~1/1.4인 선단부 고정액을 주입하면서 선단부 부근의 원지반 토사와

충분히 혼합되도록 한다. 이때 시멘트 사용량은 선단부 지지층의 지반조건에 따라 상이하지만 400 ~ 800kg 정도가 혼합되도록 한다.

선단부 고정액의 주입 및 혼합이 완료되면 오거 증공부를 통하여 굴착액을 주입하면서 오거를 인발하여 굴착공내에 cement paste가 충전되도록 한다. 굴착 및 cement paste 주입이 완료된후 굴착공내에 기성말뚝을 삽입하고 드림해머로 최종 관입되도록 향타함으로써 시공이 완료된다.

매입말뚝 공법은 표 2.1과 그림 2.1에서와 같이 굴착장비·굴착방식·시멘트 페이스트 주입유무 및 주면 또는 선단처리 방식에 따라 중굴공법, 선굴착공법, 회전압입공법으로 분류할 수 있다.

표 2.1 매입말뚝공법의 종류

매입말뚝공법	말뚝 처리방법
중굴공법	- 최종 향타 - 시멘트 페이스트 주입 후 교반 - 콘크리트 타설
선굴착공법	- 최종 향타 - 시멘트 페이스트 주입 후 경타 - 시멘트 페이스트 주입 후 압밀
회전압입공법	- 오거 스크루나 비트에 의한 회전압입

중굴공법은 말뚝 내부에 굴착장비를 넣어 말뚝선단부의 지반을 굴착하면서 말뚝을 회전 관입하는 공법으로서 말뚝의 선단지지력 발현 방법으로는 해머를 이용하여 타격하는 최종 타격 방식과 말뚝선단에 시멘트 밀크(cement milk)를 주입하여 선단지반과 혼합된 소일 시멘트(soil cement)를 형성하는 시멘트 밀크 교반방식 및 말뚝선단에 콘크리트를 치는 콘크리트 타설방식이 대표적인 방법이다.

선굴착공법은 미리 지반을 천공한 다음 말뚝을 압입 또는 회전관입한 다음 최종 경타 또는 타격하여 시공하는 방식으로 시멘트 밀크 주입방식과 최종경타방식을 함께 적용하거나 최종타격방식을 적용하는 공법이다. 회전압입공법은

말뚝본체를 지반에 회전 압입하여 시공하는 공법으로 말뚝중공부에 삽입한 오거를 말뚝과 같은 방향 또는 반대방향으로 회전시켜 굴진하면서 압입하는 방법과 말뚝선단에 드릴 슈(drill shoe)를 용접하여 고정한 후 말뚝을 회전시켜 압입하는 방법으로 대별할 수 있다.

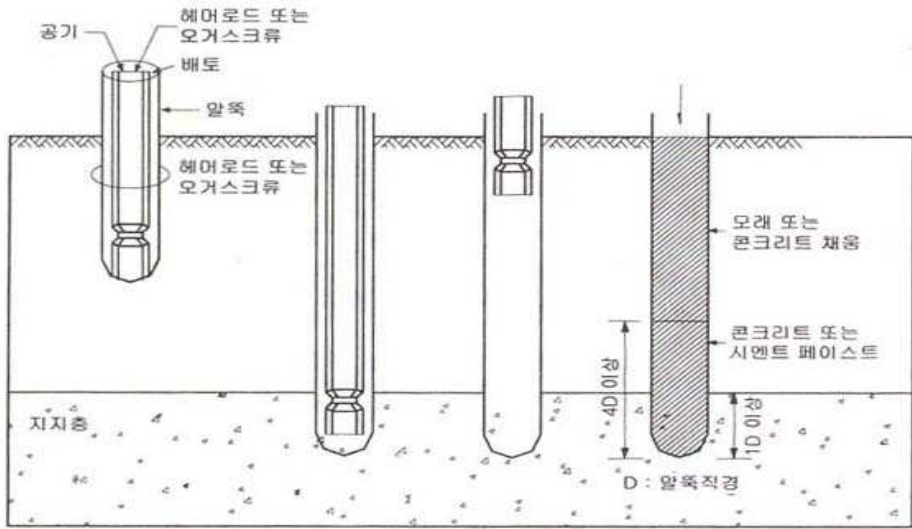


그림 2.1a 중굴공법의 시공개요도

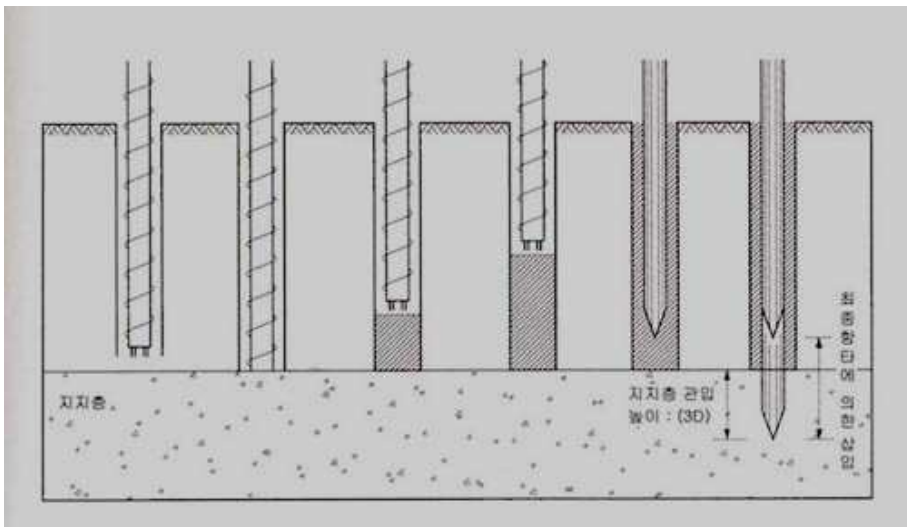


그림 2.1b 선굴착공법의 시공개요도

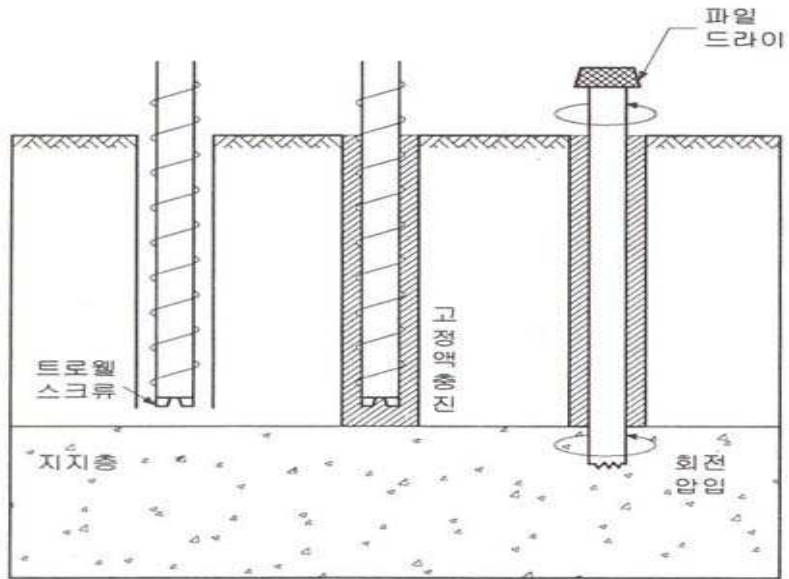


그림 2.1c 회전압입공법의 시공개요도

본 연구에서 수행하고자 하는 매입말뚝의 지지력 결정에 관한 연구 대상은 선굴착공법 중 하나인 SIP공법이다. 이 공법은 1968년 일본에서 개발된 저소음·저진동 말뚝기초공법으로서 지반을 소정의 심도까지 먼저 굴착하고 시멘트 페이스트를 주입한 후에 말뚝을 삽입하고 최종 마무리하는 선굴착 최종경타공법이다.

SIP공법은 1987년 국내에서 처음 적용된 이후부터 택지난과 민원 등으로 인해 매년 시공현장이 증가되고 있으며 2001년에는 말뚝 기초분야에서 약 50% 정도를 차지하고 있다. 말뚝을 마무리 향타 하는 과정에서 발생하는 진동이나 소음에 대해서도 민원이 발생하는 건설 환경으로 인해 SIP 공법은 점차 사용실적이 증가될 것으로 예상되나 일본에서 개발된 당시의 시공원리가 변형되어 도입됨으로서 지지력이 부족한 경우가 발생하는 경우가 많으므로 특별한 시공관리가 반드시 필요하다.

현재 국내에서 적용되는 SIP 공법에서 나타나는 현상은 주변마찰력 증진을 위하여 주입하는 시멘트 풀만 가지고는 기대하는 지지력을 얻을 수 없는 경우가 대부분이다. 따라서 국내에서 SIP 공법을 시행할 때에는 선단지지력 확보를 위하여 최종 향타가 필수적으로 요구된다는 것이다.

2.2 매입말뚝기초의 설계기준

국내에서 대표적으로 사용되고 있는 SIP공법 등 매입말뚝에 대한 고유의 지지력 산정식은 별도로 규정되어 있지 않다. 다만 일본의 건설성 고시 기준과 인정기준에 따라 N치를 이용한 산정식인 경험식을 인용하고 있는 실정이다. 국내에서는 “도로교 표준시방서”와 “구조물 기초설계 기준”에서 외국의 산정식을 준용하여 보다 더 보수적인 산정식을 제시하고 있다.

따라서 실제 실무에서 적용하고 있는 지지력 산정식은 국내 기준을 위반하는 결과를 초래하게 되며 외국의 산정식은 국내 지반조건과는 맞지 않는 불합리한 실정이다. 일본의 매입말뚝 지지력 산정식은 선단부 조선 또는 최종 향타 여부에 따라 선단지지력 $R_p = 20 \sim 30\overline{N}A_p$ 까지 적용하고 있다. 주변마찰력은 시멘트 페이스트 주입여부, 굴착방법에 따라 마찰력 산정식을 상이하게 사용하고 있다.

표 2.2과 표 2.3에 제시된 매입말뚝의 지지력 산정식은 경험식에 해당하는 것으로 말뚝규격, 지반조건, 시멘트 페이스트 배합비 및 시공방법에 따라 지지력 특성이 다르며 정확한 지지력 산정을 위해서는 반드시 시험시공, 재하 시험 등을 통해 선단지지력, 최종 경타 또는 해머의 적정성, 말뚝의 건전도를 확인하고 시멘트 페이스트 양생 후 시간경과 효과를 고려하는 것이 바람직하다.

그러나 국내 여건에서는 설계 단계에서 1차적으로 지지력을 산정하여 기초 설계를 해야 하는 단계가 필수적이며 이 결과가 향후 최종 기초 시공단계까지 유지되는 경우가 많으므로 설계 단계에서 정확한 지지력 산정이 더욱 중요하다.

SIP 등의 매입말뚝은 고유의 지지력 산정식이 없고 타입말뚝의 지지력 산정식으로 부터 경험 등을 반영한 경험식을 적용하고 있다. 일반적으로 적용하고 있는 산정식은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \text{ 선단지지력} : R_p \leq 20\bar{N}A_p \quad (2.1)$$

여기서, \bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 50$

$$\textcircled{2} \text{ 주면마찰력} : R_F = \left(\frac{1}{5}\bar{N}_s L_s + \frac{1}{2}\bar{q}_u L_c \right) \psi \quad (2.2)$$

여기서, $\bar{N}_s \leq 25$, $\bar{N}_c \leq 4$, ψ : 말뚝의 주면장, A_p : 선단부 단면적

\bar{N}_s : 사질토층의 평균 N값, \bar{N}_c : 점성토층의 평균 N값

L_s : 사질토층의 관입된 말뚝길이, L_c : 점성토층에 관입된 말뚝길이

위 식에 의해 산정된 SIP말뚝의 지지력은 재하시험에 의해 확인하고 기초 지지력을 재설계하는 과정을 거치도록 되어 있으나 많은 경우 재하시험을 설계 단계에서 산정된 지지력 값의 확인 절차로만 끝내는 경우가 대부분으로 재하시험을 실시하고 있으면서도 그 결과를 활용하지 않고 있을 뿐 아니라 비경제적인 설계를 하고 있는 실정이다.

표 2.2 매입말뚝의 지지력 산정식

설계기준 구분	구조물기초설계기준	도로교표준시방서	비 고
극한선단 지지력	$Q_p \leq 30N_b A_p$ (타입말뚝) $\times(1/3\sim 1/2)$	$Q_p = q_p A_p$ 최종 타격방식 $q_p = 30N_b, N \leq 40$ 시멘트밀크 분출 교반방식: $q_p = 15N_b$ ($\leq 750\text{tf/m}^2$) : 모래층 $q_p = 20N_b$ ($\leq 1000\text{tf/m}^2$) : 모래자갈층 콘크리트 치기방식 : $q_p = 300\text{tf/m}^2$: 모래자갈 및 모래층 ($N \geq 30$) $q_p = 3q_u$: 단단한 점성토층	허용지지력 산정을위한 안전율: - 구조물기초 설계기준:3.0
극한주면 지지력	$Q_s = nN' A_s$ $n=0.2(\text{타입말뚝}, nN' \leq 1$ $0\text{tf/m}^2)\times 1/2$	$Q_s = A_s f_s$ 최대단위주면마찰력 (f_s) 사질토 : $0.1N(\leq 5)$, 점성토 : $0.5C$ 또는 $0.5N(\leq 10)$	-도로교 표준시방서 : 3.0 (지지말뚝)
기호설명	N_b : 말뚝선단부근의 보정N치 A^p : 말뚝의 선단폐쇄 면적 (m^2) N' : 말뚝이 접하는 사질토지반의 평균 N치 q_p : 단위면적당 극한선단지지력 (tf/m^2) q_u : 일축압축강도 A_s : 말뚝주면적(m^2) C : 점성토의 전단강도		4.0 (마찰말뚝)

표 2.3 매입말뚝의 설계지지력 공식 (일본)

시공법	선단지지력 산정법	말뚝선단부의 조건	주면마찰력의 산정식	비고
타격공법	$Q_p \leq 30\bar{N}A_p$	\bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$ $\bar{N}_s \leq 50, \bar{q}_u \leq 20 (\bar{q}_u = 1.25N)$	건설성 고시기준
시멘트 주입공법	$Q_p \leq 20\bar{N}A_p$	\bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10 (\bar{q}_u = 1.25N)$	건설성 고시기준
선굴착 근고공법	$Q_p \leq 25\bar{N}A_p$	\bar{N} 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10$	건설성 인정공법
선굴착 최종타격공 법	$Q_p \leq 30\bar{N}A_p$	\bar{N} 1D~4D평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10$	건설성 인정공법
선굴착 최종타격공법	$Q_p \leq 25\bar{N}A_p$	\bar{N} 1D~4D평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(0.9L_c + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$	건설성 인정공법
선굴착 확대근고공법	$Q_p \leq 25\bar{N}A_p$	\bar{N} 1D~4D평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10$ 주면고정액을 사용하지 않는 경우 15L	건설성 인정공법
속파기 확대근고공법	$Q_p \leq 25\bar{N}A_p$	\bar{N} 1D~4D평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = 1.5L\psi$	건설성 인정공법
회전 근고공법	$Q_p \leq 25\bar{N}A_p$	\bar{N} 1D~4D평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$ $R_F = 1.5L\psi$	건설성 인정공법

2.3 매입말뚝기초의 시공절차 및 제한요인

매입말뚝의 대표적인 공법인 SIP공법은 연속오거나 교반용 날개를 부착하여 소요의 말뚝직경보다 10cm정도 크게 굴착한 후 오거를 인발하면서 시멘트 페이스트를 주입하고 최종적으로 말뚝을 삽입한 후 항타 하는 공법으로서 그림 2.2은 시공개요도를 나타내고 있다. SIP공법은 주로 소음·진동 등 건설공해가 문제될 수 있는 현장이나 중간지층에 전석층·자갈층 등 타입이 곤란 또는 불가능한 경우 또는 연약층과 경사진 암반층으로 형성되어 말뚝의 미끄러짐이 우려되는 경우에 적용한다.

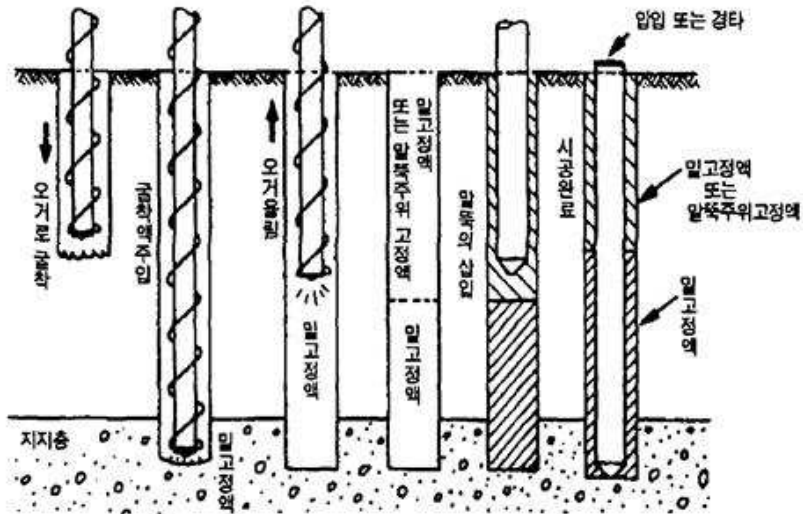


그림 2.2 SIP공법의 시공절차

SIP공법에 의한 매입말뚝의 시공에 있어 먼저 오거로 지지층(N치 50이상) 아래까지 굴착하게 된다. 이 때 지지층은 지반종류, 장비특성 및 노후도, 굴착시 장비의 부하도를 나타내는 암페어, RPM 등을 지반조사 결과와 비교하여 지지층을 확인하고 있으나 신뢰성이 다소 부족하므로 말뚝 재하시험 결과로

나타난 지지력을 고려하여 천공종료 심도를 결정하는 것이 타당하다.

다음은 굴착완료 후 오거를 인발하면서 선단 및 주면 고정액을 주입하게 된다. 이 때 사용되는 시멘트 페이스트가 유출되는 경우가 많으므로 수시로 유출여부를 확인하고 재충전을 해야 한다. 특히, 투수성이 큰 모래질 지반에서는 재충전을 반드시 실시하여 주면 마찰력이 완전히 발현하도록 해야 한다. 마지막으로 말뚝매입 및 해머에 의한 최종 경타를 실시하게 되는데 말뚝이 자중에 의해 매입되므로 말뚝직경보다 10cm 크게 굴착되어 수직오차가 발생한다. 따라서 수준기로 수직을 보정한 후 항타장비에 의해 최종 근입 경타를 실시한다.

그림 2.2에서와 같은 SIP말뚝 공법의 시공순서를 보다 자세히 설명해 보면 다음과 같다.

- ① 사용기계 및 기구를 점검하고 오거길이, 치수를 정확히 측정하여 10cm 단위로 눈금 표시를 한다. 또한 혼합기 및 계량기에 대해 배합비 등을 파악한다.
- ② 말뚝의 시공위치에 설치된 표식과 오거의 중심을 일치시킨 후 오거의 수직도를 확인한 다음 굴진을 시작한다.
- ③ 지지층을 배토하는 흙과 암폐어 수치 등을 종합적으로 고려하여 설계심도까지 굴진한다. 이때, 설계심도는 지지층안에 말뚝직경의 3배이상 관입시킨다.
- ④ 설계심도까지 도달하면 배합비 83%(시멘트 880kgf, 물 730ℓ)의 주면 및 선단부 고정액을 주입하면서 오거를 인발한다. 오거 인발시 2~3회 상하 왕복하면서시멘트 페이스트와 천공면이 충분히 교반되도록 한다. 시멘트 페이스트 주입장치는 자동계량이 되는 것을 원칙으로 하고 시료를 채취하여 적합 여부를 확인한다.
- ⑤ 오거인발 후 기성말뚝을 굴착공의 중심과 수직이 되도록 세운 후 말뚝 자중에 의해 자유 낙하시킨다. 자유 낙하시킨 말뚝은 1~2m 정도 들어올린 다음 다시 2~3회 자유 낙하시켜 말뚝 선단부의 슬라임과 시멘트 페이스트를 2차 교반시킨다.

⑥ 말뚝시공 후 24시간이 경과한 다음 시멘트 페이스트 충전상태를 확인하고 부족할 경우에는 밀실하게 재충전한다.

⑦ ①~⑥ 순서로 시공 후 항타기록부, 천공 심도 및 관입깊이, 고정액, 램중량 및 낙하고, 말뚝 재하시험(시험방법, 재하하중 및 시간 등) 등 SIP말뚝에 대한 주요 관리항목을 정리하여 보존한다.

SIP공법에 의한 매입말뚝의 시공에 있어 배합비는 일반 토사층에서는 표준 배합비를 사용하며 연약한 점토층이나 느슨한 지반에서는 부배합은 적용하되 부배합은 시멘트량을 50%이상 할증한 것으로 이때 W/C비가 50%이상 되어야 압송 주입이 가능하다(표 2.2참조).

표 2.4 SIP공법의 표준 배합비 (m³당)

구 분	물	시멘트	W/C
주면 및 선단고정액	730kg	880kg	83%

저소음·저진동 말뚝공법으로 적용되는 SIP말뚝의 문제점은 굴착 공벽의 붕괴, 근입심도 확인 등이며 선굴착함으로서 원지반 교란에 의한 선단 지지력의 저하, 시멘트 페이스트 주입에 따라 주면마찰력의 충분한 발현 문제 등이다. 선단지지력에서는 지지층 미달, 선단부에 과도한 슬라임 발생, 선단부 고정액 유실, 말뚝 선단부를 굴착선보다 2D(D:말뚝 직경)만큼 위에서 천공 종료 등이 지지력 약화 원인이다.

주면마찰력은 시멘트 페이스트가 한쪽에만 형성되거나 주변으로 유실되는 경우, 토사와 시멘트가 섞여 시멘트 페이스트 강도가 약화되는 경우 등이 있다. 이런 시공 상의 문제점을 개선하기 위해 주택공사에서는 선단지지력 및 주면마찰력의 주요 저하원인에 대해 대책방안을 제시하였다(대한주택공사, 2001).

매입말뚝기초를 시공할 경우에는 반드시 사전에 시공법 선정을 위한 시험 시공을 실시하여 설계하중 조건에 부합하는 시공방법을 결정할 필요가 있으며 시공시에는 표 2.5에 나타낸 바와 같이 시공관리사항을 준수하여야 소정의 기초구조물 안전이 확보될 것으로 판단된다.

표 2.5 매입말뚝의 시공관리

구 분	선굴착 말뚝시공법 (S.I.P)
말뚝의 지지력	주면마찰력 + 선단지지력
굴착심도	충분한 지지층까지 굴착
공벽유지	공벽붕괴 방지 (필요시 시멘트 Paste + 벤토나이트 주입)
말뚝관입심도	말뚝의 선단부가 최종굴착심도 보다 50cm 범위 이내의 높은 곳까지만 관입 1)
시멘트의 품질	주면고정액의 시멘트 배합비 유지 2) 선단부고정액의 시멘트 배합비 유지 3)

- 주) 1) 부배합의 시멘트 Paste를 선단부 고정용으로 사용할 경우 말뚝의 선단부가 선단부 고정액내에 위치하도록 한다.
- 2) 주면고정액의 표준시멘트 배합비는 물:시멘트:벤토나이트
= 450ℓ : 120Kg : 25Kg
- 3) 선단부고정액은 물-시멘트가 0.7~0.8 정도가 되게 하며 말뚝직경에 따라 시멘트 함유량을 400~800Kg이 되도록 한다.

제3장 매입말뚝기초의 지지력 산정방법

3.1 매입말뚝기초의 지지력 이론

3.1.1 기본 개념

상부지반의 지지력이 충분하지 못하거나 침하가 과도하게 일어나는 경우에는 깊은기초를 설치하여 지지력이 충분히 큰 하부의 토층이나 암반층에 상부 구조물의 하중을 전달하게 하며, 이러한 깊은기초에서 가장 일반적인 방법이 말뚝기초이다. 말뚝은 타입이나 매입 등의 방법으로 주위의 지반을 배제하면서 지반내부에 설치하는 길이가 긴 기둥모양의 부재를 말하며, 기초슬래브가 말뚝으로 지지된 기초를 말뚝기초라 한다.

말뚝기초의 지지층이 암반 또는 매우 조밀한 모래나 자갈과 같이 단단하고 굳은 지반인 경우에는 말뚝지지력의 대부분은 선단에 있는 토층의 저항으로부터 얻어지며, 이러한 말뚝을 선단지지말뚝(point-bearing pile)이라 한다. 반대로 말뚝을 견고한 지지층까지 도달시키지 않고 관입이 가능한 토층의 일부 깊이까지만 타입하면 말뚝지지력은 선단지지력과 주변마찰력에 의해 얻어지며, 이러한 말뚝을 마찰말뚝(friction pile)이라 한다.

말뚝의 극한파괴를 유발하는 극한하중의 상태에서는 구조물의 침하량이 허용한도를 초과하기 때문에 공학적인 의미에서의 파괴는 극한하중에 도달하기 전에 발생하는 것으로 한다. 따라서 말뚝의 축방향 허용지지력은 말뚝의 축방향 극한지지력을 소정의 안전율로 나눈 값을 기준으로 한다. 이 때 말뚝의 축방향 극한지지력을 결정하는 방법으로는 정역학적 지지력공식에 의한 방법, 동역학적 항타공식에 의한 방법 및 재하시험에 의한 방법 등이 있다.

말뚝의 극한지지력은 이론적으로 지반의 선단강도정수(c), 내부마찰각(ϕ) 및

흙의 단위중량(γ_s) 등을 고려하여 말뚝기초와 구조물간에 정역학적 힘의 평형조건을 적용시켜 추정하게 된다. 즉 말뚝상부에 가해지는 하중은 말뚝선단 저항력과 주변마찰저항력에 의해 평형상태를 이루게 되며, 말뚝의 축방향 극한지지력은 말뚝선단저항력과 주변마찰저항력이 상호 독립적으로 작용한다고 간주하여 산술적으로 합한 값으로 하게 된다.

3.1.2 매입말뚝기초의 극한지지력

현재 국내 시방규준의 경우 1996년 도로교 표준시방서 및 2001년 지정된 도로교 설계기준 해설(하부 구조편)에는 내부굴착공법이 포함되었으나 선굴착 및 시멘트풀 주입공법으로 시공된 매입말뚝기초의 지지력을 지반조건과 연계하여 계산하는 지지력 공식은 규정되어 있지 않은 실정이다. 따라서 매입말뚝기초의 지지력을 사전에 정확하게 산정하는 것은 기술적으로 한계가 있으며, 매입말뚝기초의 실제 적용 및 지지특성에 대하여 최근에 국내에서 연구가 시작된 분야로서 이에 대한 자료가 충분하지 못한 상태이다.

도로교 표준 시방서에 제시된 타입말뚝기초의 극한 지지력은 식 (3.1)과 같다.

$$Q_u = q_p \cdot A_p + U \sum l_i f_i \quad (3.1)$$

여기서, Q_u : 극한 지지력(ton)

q_p : 단위면적당 극한선단지지력(t/m^2)

A_p : 말뚝 선단부 면적(m^2)

U : 주변길이(m)

f_i : 각층의 단위 면적당 주변마찰력(t/m^2)

l_i : 각층의 두께(m)

• 선단 지지력

$$q_u = q_p \cdot A_p = 30 \times N \times A_p \quad (3.2)$$

• 주변 마찰력

$$U \sum l_i f_i = \pi \times D \times \sum l_i f_i \quad (3.3)$$

여기서, $f = 0.2 \times N (\leq 10 t/m^2)$: 사질토의 경우

$f = c$ 또는 $N (\leq 15 t/m^2)$: 점성토의 경우

도로교 표준 시방서에 제시된 매입말뚝기초의 극한 지지력은 식 (3.4)와 같다.

$$Q_u = q_p \cdot A_p + U \sum l_i f_i \quad (3.4)$$

여기서, Q_u : 극한 지지력(ton)

q_p : 단위면적당 극한선단지지력(t/m^2)

A_p : 말뚝 선단부 면적(m^2)

U : 주변길이(m)

f_i : 각층의 단위 면적당 주변마찰력(t/m^2)

l_i : 각층의 두께(m)

• 선단 지지력

선단처리 방법	말뚝선단의 극한 지지력 산정
최종타격방식	타입말뚝의 산정법을 적용한다.
시멘트밀크 분출 교반방식	극한지지력(t/m^2) $q_p = 15N (\leq 750)$ 모래층 $q_p = 20N (\leq 1000)$ 모래자갈층 여기서, N : 말뚝선단지반의 N값
콘크리트치기방식	현장치기말뚝의 극한지지력을 적용한다.

• 주면 마찰력

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

점성토 : $f_s = 0.5c$ 또는 $0.5\overline{N}_c (\leq 10t/m^2)$

여기서, c : 점착력

\overline{N}_s : 사질토의 N치의 평균치

\overline{N}_c : 점성토의 N치의 평균치

매입말뚝기초의 지지력 공식에 대한 일본 기관별 기준은 표 3.1와 같다. 표 3.1에서 보는 바와 같이 일본의 매입말뚝의 지지력 산정 공식은 기관별로 큰 차이를 나타내고 있다.

표 3.1 각종 매입말뚝의 지지력 공식 (일본 기관별 기준)

구 분	선단 지지력 $q_p(t/m^2)$	선단부 조건	주면 마찰력 $f_s(t/m^2)$
1) 도로 (도로교 지방서) 중굴말뚝 : 시멘트 밀크 분출 교반방식	$q_p = 10N \leq 400$ $q_p = 15N \leq 600$	모래층 모래 · 자갈층	$f_s = 0.1N \leq 5$, 사질토 $f_s = c/2$ 또는 $N/2 \leq 10$, 점성토
2) 철도 (국철 건조물 설계표준) 중굴말뚝 : 선단다지기공법	$q_p = 10N \leq 750$ $q_p = 20N \leq 1500$ 단, N : 말뚝선단 하향으로 말뚝직경(D)의 3배 범위의 평균 N치	모래층 모래 · 자갈층	$f_s = 0.1N \leq 3$, 사질토 $f_s = c/2$ 또는 $N/2 \leq 3$, 점성토
3) 건축 (건축기초구조 설계기준) 시멘트 밀크 주입공법	$q_p = 25N \leq 600$ 단, N : 말뚝선단 하향으로 10D 상향으로 4D 범위 지반의 평균치	-	$f_s = 1.5$

3.1.3 정역학적 지지력 공식

정역학적 지지력공식을 이용하여 말뚝의 축방향 극한지지력을 추정하려면 말뚝이 매입된 지층에 대하여 지층두께, 흙의 전단강도정수, 내부마찰각, 각 지층의 단위중량 및 지하수위 등의 자료가 필요하게 되나, 말뚝은 지층 깊이 박히는 구조물이므로 위와 같은 여러 가지 시험자료를 얻기 어려운 경우가 있다. 특히 사질토 지층에서는 비교란시료의 채취가 불가능하므로 단위중량이나 전단강도정수를 측정할 수 없게 되며, 이런 경우 표준관입시험결과를 이용하여 매입말뚝의 극한지지력을 구하게 된다.

또한 정역학적 방법에 의한 지지력의 예측에는 Meyerhof, Dorr, Terzaghi, Caquot & Kerisel 및 Szechy 등에 의해 여러 가지 방법들이 제안되어 왔지만 지지력에 영향을 미치는 요소, 즉 지반조건, 말뚝의 특성, 말뚝설치 후 시간경과 등 다양한 요소들로 인해 그것의 신뢰도에 불확실성이 많기 때문에 실무설계에 채용 시는 많은 주의가 요구된다.

(1) Meyerhof의 말뚝지지력공식

Meyerhof는 표준관입시험의 결과 N 치를 이용하여 말뚝의 지지력을 구하는 방법을 제시하였다. Meyerhof의 말뚝지지력공식에서 제 1항은 말뚝 선단 지지력을, 제 2항은 사질토층의 주변마찰력을, 제3항은 점착력을 나타낸다. 따라서 말뚝의 주변에 점토층이 있는 경우에도 적용할 수 있으며, 다음의 식 (3.5)와 같다.

$$Q_u = 40NA_p + \frac{1}{5} N_s A_s + \frac{N_c}{2} A_c \quad (3.5)$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력 (kN)

A_p : 말뚝선단의 지지면적(m^2)

N : 말뚝선단지반(모래지반)의 N치 $N=(N_1+N_2)/2$

N_1 : 말뚝 선단부분의 N치(단, 말뚝 선단하부에서 깊이에 따라 N치가 감소하면 말뚝 선단아래 2B 깊이 범위내의 평균 N치)

N_2 : 말뚝 선단에서 위로 10B의 범위내의 평균 N치

N_s : 말뚝주변 모래층의 평균 N치

A_s : 모래층내의 말뚝의 주변 면적(m^2) $A_s = U l_s$

U : 말뚝의 둘레길이(m) l_s : 모래층내의 말뚝길이(m)

N_c : 말뚝주변 점토층 N치의 평균치

A_c : 점토층내의 말뚝의 주변면적(m^2) $A_c = U l_c$

l_c : 점토층내의 말뚝길이(m)

(2) DÖrr의 말뚝지지력 공식

DÖrr의 말뚝지지력 공식은 토압론에 기인한 고전적 방법에 의하며 말뚝주변에 작용하는 수평토압에 의한 주면마찰저항과 점착력에 의한 주면점착저항 및 말뚝선단에 작용하는 수동토압의 합에 의해 결정된다. 이 식은 주로 마찰 말뚝에 적용하고 현장타설말뚝과 같이 주변지반을 압축하지 않는 말뚝에는 적용하지 않으며 다음의 식 (3.6)와 같다.

$$Q_u = \frac{1}{2} U \gamma L^2 K \tan \delta + U c L + A_p \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \gamma L \quad (3.6)$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력(kN) U : 말뚝의 둘레길이(m)

L : 말뚝의 관입길이(m) A_p : 말뚝선단의 지지면적(m^2)

C : 흙의 점착력(kN/m²) γ : 흙의 단위중량(kN/m³)

ϕ : 흙의 내부마찰각(°) K : 토압계수($k = \sec^2 \phi$)

δ : 말뚝주변과 지반 사이의 벽마찰각(°)

(3) Terzaghi의 말뚝지지력 공식

Terzaghi의 말뚝지지력 공식에서는 말뚝을 얇은기초로 간주하고 기초폭을 말뚝의 직경, 근입깊이를 말뚝의 관입깊이로 간주하여 얇은기초에 대한 지지력공식으로부터 말뚝지지력을 구하게 되며, 다음의 식 (3.7)과 같다.

$$Q_u = (\alpha c N_c + \frac{1}{2} \beta \gamma_2 B N_r + \gamma_1 L N_q) A_p + U L f_s \quad (3.7)$$

- 여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력(kN) U : 말뚝의 둘레길이(m)
 L : 말뚝의 관입깊이(m) B : 말뚝의 직경 또는 폭(m)
 A_p : 말뚝선단의 지지면적(m^2) α, β : 기초의 형상계수
 c : 흙의 점착력(kN/m^2) f_s : 평균주면마찰력
 γ_1 : 말뚝선단 하부지반의 단위중량(kN/m^3)
 γ_2 : 말뚝주변지반의 단위중량(kN/m^3)
 N_c, N_r, N_q : 말뚝선단 하부지반의 수정지지력계수

(4) Caquot와 Kerisel의 말뚝지지력 공식

Caquot와 Kerisel는 말뚝의 지지력 공식을 다음의 식 (3.8)와 같이 제안하였으며 제 1항은 선단저항, 제 2항은 주면마찰저항을 나타낸다.

$$Q_u = A [N_q(\gamma L + P) + c N_c] + \frac{1}{2} U \gamma L^2 K_a \tan \delta \quad (3.8)$$

- 여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력 (kN) A : 말뚝의 단면적(m^2)
 L : 말뚝의 길이(m) P : 지표등분포 상재하중(KN/m^2)
 K_a : 주동토압계수 δ : 말뚝주변 마찰각(。)
 N_c, N_q : 말뚝선단 하부지반의 수정지지력계수

(5) Szechy공식

Szechy의 말뚝지지력공식은 사질토에 적용되며 제 1항은 선단지지저항, 제 2항은 주면마찰저항을 나타낸다. Szechy의 말뚝지지력공식은 다음의 식 (3.9)과 같다.

$$Q_u = A N_q (\gamma L + P) + \frac{1}{2} U \gamma L^2 K_a \tan \delta \quad (3.9)$$

여기서, Q_u : 말뚝의 극한지지력 (kN) A : 말뚝의 단면적(m^2)

L : 말뚝의 길이(m) P : 지표등분포 상재하중(KN/ m^2)

K_a : 주동토압계수 δ : 말뚝주변 마찰각(°)

N_q : 수정지지력계수

3.2 정재하시험에 의한 지지력 산정방법

3.2.1 정재하시험의 개요

환경에 대한 인식이 높아짐에 따라 건설공사에 대한 소음·진동 규제법이 매우 엄격하게 개정되어 있어 과거에는 말뚝의 항타공법이 도심지 위주로만 제한되었으나 이제는 민원이 발생할 수 있는 모든 지역에서 사실상 적용이 불가능하게 되었으며, 이에 대한 대안으로 각종의 매입공법이 이용되고 있다. 그러나 이러한 매입공법으로 시공된 말뚝의 거동은 항타말뚝과는 크게 다르며 또한 여기서 얻어지는 하중-침하량 곡선의 특성도 항타공법에서 적용해 왔던 방법을 그대로 실무에 적용하고 있는 것이 현실이나 정확한 기준이 정립되지 않아 불안전한 요소를 가지고 있다.

3.2.2 정재하 시험 및 분석 방법

(1) 재하 하중의 결정

계획최대 재하 하중은 말뚝 재료의 항복 또는 파괴강도를 초과하지 않은 범위 내에서 결정하여야 하며, 일반적으로 사용하고 있는 방법으로 말뚝의 극한지지력을 확인하고자 할 경우는 시험말뚝을 별도로 시공하여 설계하중의 2~3배를 가하며, 장치 사용할 말뚝 중에서 일부를 선정하여 시험을 할

경우는 1.5~2.0배를 가한다.

표 3.2는 각국의 계획최대 하중에 대한 기준으로 극한 및 항복하중을 추정하여 이 값을 계획 최대하중으로 하는 방법, 임의의 침하량을 얻을 때까지의 하중을 계획 최대하중으로 결정하는 방법 등이 있다. 현재 KS F-2445 및 ASTM D-1143 규정에서는 단항에서 설계하중의 2배~3배, 균항에서는 설계하중의 1.5배로 되어있다.

표 3.2 국가별 계획최대하중 기준

기준 국가	계획 최대 하중
ISSMFE(국제토질기초공학원)	설계하중의 2배 여유가 있으면 설계하중의 0.1% 추가
ASTM	단항 : 설계하중의 200% 균항 : 설계하중의 150%
DIN	한계하중이 구해질 때까지
프랑스	설계하중의 1.5배 이상, (2배를 추천)
스위스	하중하중의 1.5배 (지반의 파괴까지)
중국	공사용 말뚝시험 : 사용하중의 1.5배 역학적 시험 : 2배
폴란드	파괴하중(설계하중의 3배) 또는 사용하중의 2배
멕시코	설계하중의 2배 이상
일본 토질 공학회	예상하는 극한지지력 이상 설계하중 × 안전율 이상

(2) 시험 방법

말뚝재하시험은 KS F2445 규정 및 ASTM D1143 규정에 의거 실시하며, 현장 여건에 따라 그 적용이 조금씩 다르다. ASTM 및 KS에 규정되어 있는 방법들은 다음과 같다.

- ① 완속재하 시험방법(Slow Maintained Test, 표준재하 시험방법)
- ② 급속재하 시험방법(Quick Maintained-Load Test)
- ③ 하중 증가 평형 시험방법
- ④ 일정 침하율 시험방법
- ⑤ 일정 침하량 시험방법
- ⑥ 반복 하중 재하 방법

(3) 재하 방법

현재 국내에서 시행되는 정재하시험의 재하 방법은 크게 반력을 이용한 방법과 실하중을 이용한 방법이 있다. 이중 반력을 이용하는 방법에는 시험말뚝 주위의 말뚝을 반력 말뚝으로 이용하는 방법과 Anchor등의 반력 물을 시공하여 반력을 이용하는 방법이 있으며, 실하중을 이용하는 방법은 현장여건에 따라 실하중(철근, 콘크리트 블록 등)을 직접 말뚝에 재하하여 시험하는 방법이 있다.

(4) 말뚝의 허용지지력 평가

말뚝의 허용지지력을 결정하는 방법은 다음의 4가지 방법이 있다.

- ① 극한하중 $\times 1/3$ 이하
- ② 항복하중 $\times 1/(1.5\sim 2.0)$ 이하
- ③ 말뚝 재료의 허용응력 이하
- ④ 말뚝이 허용하는 침하량 이내의 하중이하

재하시험 결과로부터는 ①과 ②만 해당되며 항복하중과 극한하중은 말뚝의 재하시험에서 하중-침하량 관계 곡선으로 구하는데 항복하중은 구하기 쉬우나 극한하중은 하중조건, 안전관리 등의 이유로 구하기가 매우 어렵다.

(5) 극한 하중의 결정

말뚝의 극한하중 또는 극한지지력은 말뚝 본체의 파괴 또는 말뚝을 지지하고 있는 자반의 파괴에 의하여 결정되는 지지력이다. 지지력이 매우 커 어떤 하중에도 지반이 견딜 수 있는 경우, 말뚝 본체의 파괴응력에 따라 극한하중이 결정되지만, 대부분의 말뚝기초는 지지 지반의 파괴응력에 따라 극한하중이 결정된다. 극한하중 상태에서는 말뚝이 연속적인 침하가 발생되고, 미소 하중 증가에도 급격한 침하량 증대가 발생된다.

그러나 현재 시행하고 있는 재하 시험에서는 재하 장치의 능력, 시험 완료 조건 또는 공사의 진행 사항 등의 제약이 있으므로 침하가 무한대로 기록되는 극한 상태까지 재하를 실시한 예는 거의 없으며 그다지 실용적인 의미는 없다고 본다. 따라서, 설계예상 지지력의 약 1.5배~2.0배의 하중을 재하하여 말뚝의 허용지지력은 구하는 것이 통례이며 본 연구에서는 말뚝 본당 설계하중이 70ton/본이므로 설계하중의 200%이상 시험하는 것을 원칙으로 하였다. 참고로 각국의 극한하중 결정방법은 표 3.3과 같이 제안하고 있다.

표 3.3 각국의 극한하중 결정방법

기준의 명칭	기 준 의 내 용
일본건축학회 기준	· 극한하중 또는 극한하중이 명확하지 않은 경우는 말뚝 · 직경의 10% 침하시의 하중(또는 잔류침하량W 기준인 경우는 말뚝직경의 2.5%
영국 (CP 2004)	· 극한하중 또는 항두침하가 말뚝직경의 10%일 때의 하중
캐나다 건축 기준법	· 잔류침하량이 25mm일 때의 하중
미국 ASTM	· 하중 1t당 침하량이 1.27mm 또는 하중 1t당 잔류 침하량이 0.76mm일 때의 하중
독일 DIN	· 극한하중 또는 침하량 기준(현장타설말뚝은 총 침하량이 20mm일 때의 하중, 항타말뚝은 잔류침하량이 직경의 2.5%일 때의 하중). · 상기 기준이 만족스럽지 않을 경우 최대 하중을 항복하중으로 간주
스웨덴	· 극한하중(p), 또는 0.9p의 침하량을 s라고 할 때, p의 침하량이 2s일 경우의 하중

(6) 항복하중의 결정

항복하중을 결정하는 방법에는 나라마다 규정이 다르지만 다음의 5가지 방법이 많이 이용되고 있다. 항복하중은 자갈을 함유하고 있거나 풍화암의 경우 항복점을 구하기가 힘든 때가 있는데, 이 때는 실험결과로 여러 방법으로 구하여 보아야 한다.

- ① P-S 곡선법
- ② logP-logS 곡선법
- ③ S-logt 곡선법
- ④ $\frac{\Delta S}{\Delta \log t}$ -P 곡선법

⑤ Chin 방법

⑥ Davisson 방법

건설부에서 제정된 “구조물 기초설계 기준” 해설편에서는 극한하중이 확인되면 문제없으나 그렇지 못할 경우 항복하중에 의하도록 하고 S-logt 분석, $\frac{\Delta S}{\Delta \log t}$ -P 분석, logP-logS 분석, 잔류침하량 측정에 의한 logP-logS 분석을 권장하고 있다. 아울러 항복하중의 1.5배를 극한하중으로 가정하지만 이 방법에 의한 극한하중이 실제 극한하중보다 크지 않도록 주석을 두고 있어 항복하중에 의한 분석을 안전하게 하는 장치를 하고 있다.

(가) P-S 분석법 (그림 3.1)

하중과 말뚝머리의 침하량을 산수 눈금으로 표시하고, 각 점을 연결하여 얻어지는 선이 꺾어지는 점에서 교선을 그어 그 교선과 하중과 침하량 곡선이 교차하는 점의 하중을 항복하중으로 한다.

(나) logP-logS 분석법(그림 3.2)

하중과 말뚝머리의 침하량을 양대수 눈금으로 표시하고, 각 점을 연결하여 얻어지는 선이 꺾어지는 점의 하중을 항복하중으로 한다.

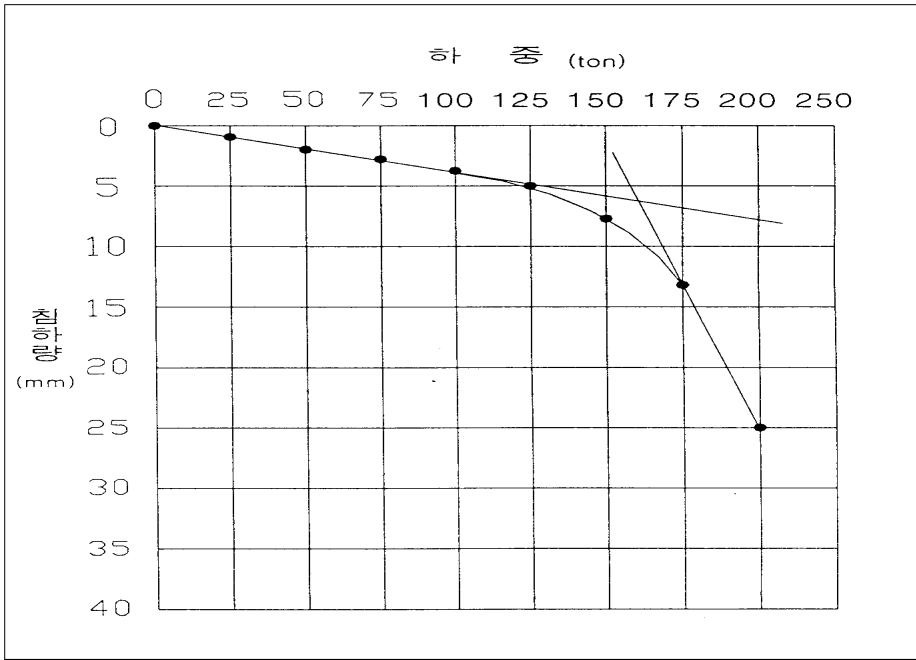


그림 3.1 P-S 분석법

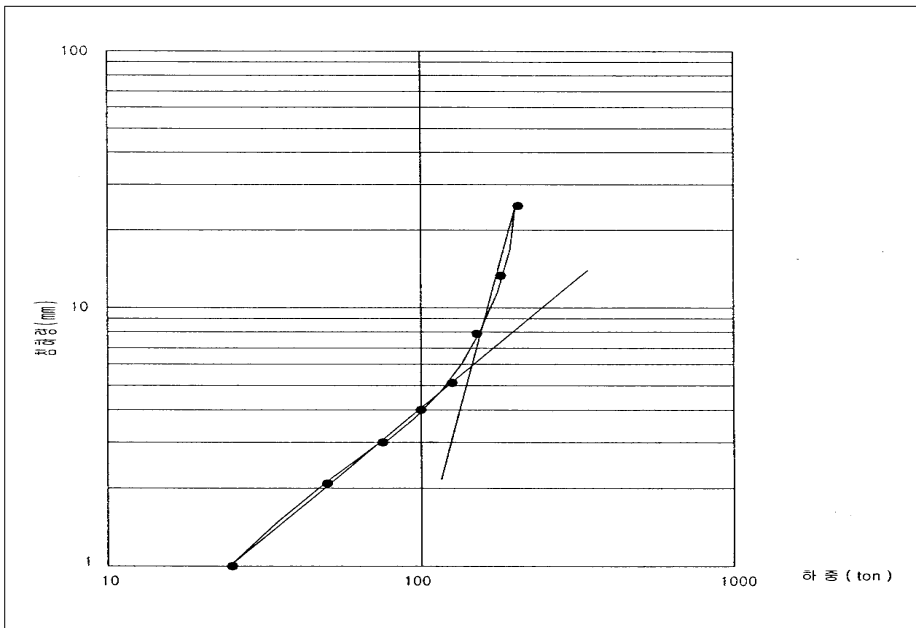


그림 3.2 logP-logS 분석법

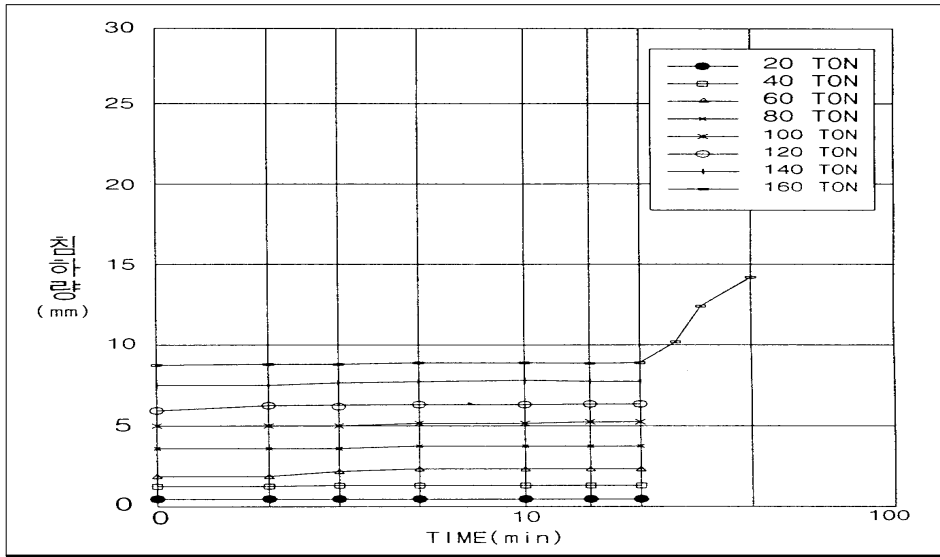


그림 3.3 S-logt 분석법

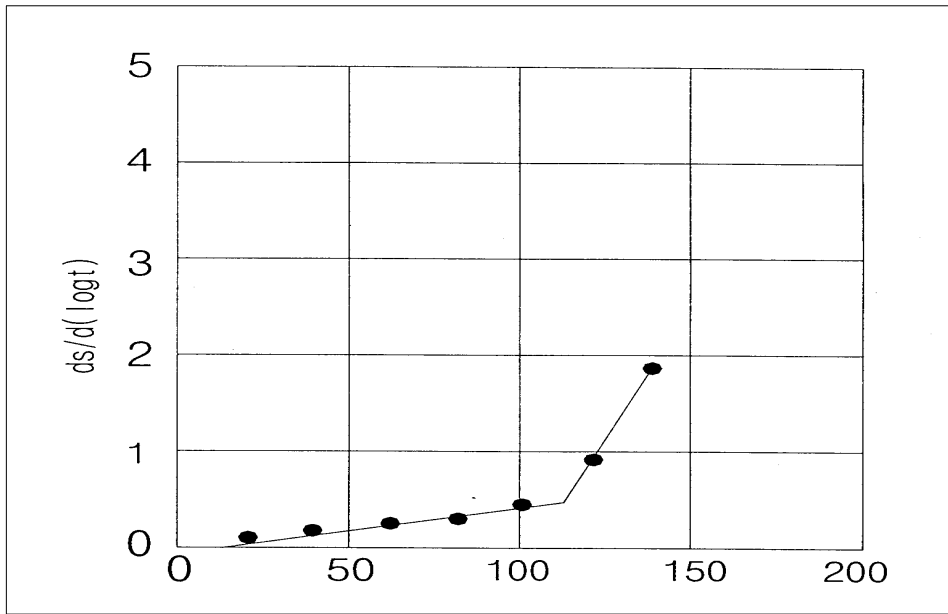


그림 3.4 $\frac{\Delta S}{\Delta \log t}$ -P 분석법

(다) S-logt 분석법(그림 3.3)

각 재하단계에 대해 경과시간을 대수 눈금에 표시하고, 말뚝머리의 침하량을 산수눈금에 표시하였을 때 각 하중단계의 관계선이 직선적으로 되지 않는 점의 하중을 항복하중으로 한다.

(라) $\frac{\Delta S}{\Delta \log t}$ -P 분석법(그림 3.4)

각 하중단계에서 일정시간(10분 이상)후의 대수침하속도 $dS/d(\log t)$ 즉, S-logt 곡선의 경사를 구하고, 이것을 하중에 표시하여 연결한다. 이와 같이 하여 구한 선이 급격히 구부러지는 점의 하중을 항복하중으로 한다.

(마) Davisson 분석법

Davisson은 말뚝의 전 침하량과 말뚝 직경, 단면적, 탄성계수 및 말뚝길이 등으로 고려한 순침하량 판정을 복합적으로 적용하여 말뚝 기초의 허용하중을 결정하는 방법을 제안하였다. 지반조건 뿐만 아니라 말뚝의 강성 등도 고려가 되기 때문에 서구에서는 가장 합리적인 방법으로 인정받고 있고, 국내에서도 항복하중 기준 설계법과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.

Davisson은 파괴기준에 말뚝의 길이를 고려하는 방법으로 말뚝 머리의 변위가 그 말뚝의 식 (3.10)와 같은 탄성압축변위량을 초과하는 상태에서의 하중을 파괴하중으로 보고 있다.

$$\Delta = \frac{PL}{AE} \quad (3.10)$$

여기서, A : Pile의 단면적

E : Pile의 탄성계수

P : 작용된 하중

L : Pile의 관입깊이

즉, 그림 3.5와 같이 탄성압축변위선을 $0.15 + \frac{D}{120}$ (inch) 만큼 평행이동시킨 선과 침하곡선과의 교점에서 하중을 파괴하중으로 가정하는 방법이다.

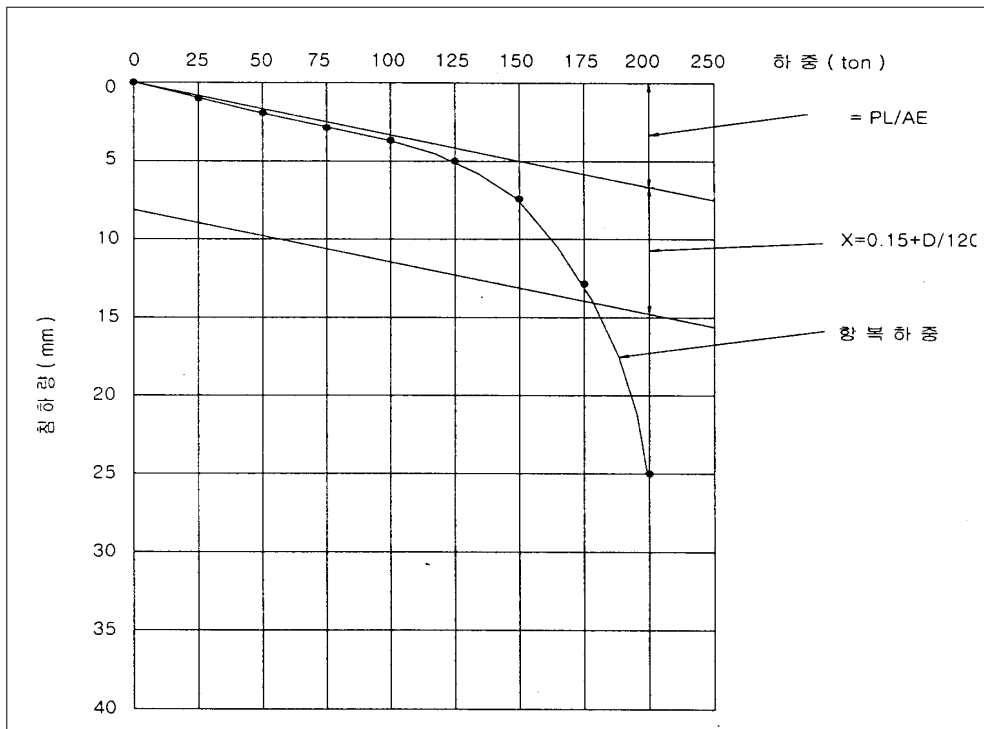


그림 3.5 Divisison에 의한 산정법

(7) 침하량 기준에 의한 해석

말뚝의 극한하중이 말뚝 선단과 관련이 있다는 점에 근거하여 말뚝 선단의 침하량을 기준하여 이에 대응하는 하중을 극한하중으로 결정하여 1.5~2.0의 안전율을 고려하여 허용지지력을 구하는 방법을 전침하량에 의한 방법이라 한다.

표 3.4 극한하중에 대응하는 전체 침하량의 규정치

기준명 또는 제안자	침하량 기준(mm)	안전율	비 고
독일 DIN 4014	20		
프랑스	20		
벨기에	20		
체코슬로바키아	15~20	2.0	
오스트리아	25		
네덜란드	25.4		
뉴욕시 기준	25.4		
인도 I.S 2911 기준	12	1.5	
문스 (Muns)	20		
Terzaghi and Peck	25.4	1.5	
Wood Ward	12.7~25.4	1.5~2.0	
Touma and Reese	25.4	2.0	
키에프 건축공 연구소	30~40		
우크라이나 건축시공 과학연구소	80		부등침하에 민감하지않은 구조물
	40		부등침하에 민감한 구조물
중국협서성 도로연구소(1973)	60		대구경 현장 말뚝
중국 도로연구원(1974)	40		대구경 현장 말뚝
중국 북경시 말뚝기초 연구소(1976)	15~20	2.0	소구경 현장 말뚝
일본 구건축학회 기준	25	2.0	현장타설 말뚝
일본 토질공학회(1993)	0.1D		제2한계 하중
영국 기초공업기준	0.1D		
Tomlinson	0.1D		※ D : 말뚝직경
Singapore 지하철 기준	6~9		설계하중에서
	9~20		설계하중의 1.5배에서
일본 토질 공학회	25		
러시아	40~80		
De Beer	0.1D		항타 말뚝
	0.3D		현장타설 말뚝

전 침하량 기준으로는 표 3.4와 같이 인도 IS2911에서 규정한 12mm의 엄격한 기준부터 러시아에서 적용되는 40~80mm 등 광범위한 기준이 있다. Terzaghi와 peck이 제안한 25.4mm의 기준이 가장 적합하여 많이 채택되고 있다. 이 때의 안전율은 1.5로 본다.

전 침하량의 절대값만으로 말뚝의 설계하중을 결정하는 것은 말뚝의 길이와 재료특성으로부터 결정되는 탄성압축량 값의 영향을 고려할 수 없기 때문에 장대말뚝의 경우 적용이 곤란하며, 말뚝의 관입 깊이의 변화가 큰 지반 조건에서는 부등 침하에 대한 별도의 고려가 있어야 한다. 또한, 말뚝의 지반조건, 말뚝 설치방법에 따라 선단지지력 또는 주변마찰력의 비율이 상이하게 되고, 이에 따라 말뚝의 하중-침하량 거동이 결정되는 점을 감안할 수 없다는 단점이 있다. 따라서, 전침하량 기준에 의한 말뚝의 설계하중결정은 극히 제한적인 경우에 국한하여 적용할 수 있으며, 반드시 다른 해석결과와 비교하는 과정이 필요하며 본 연구에서는 말뚝직경의 10%값을 전침하량 기준으로 적용하였다.

3.3 동재하시험에 의한 지지력 산정방법

3.3.1 동재하시험의 개요

말뚝을 향타할 때의 향타에너지는 지반내에서 소산된 에너지와 같다. 즉, 말뚝이 관입되는 동안에 말뚝표면의 마찰에 의한 에너지손실과 말뚝의 변형에 의한 에너지손실이 일어나며 그 밖에 열이나 소리 및 빛 등으로 에너지가 소모된다. 이러한 원리를 이용하여 말뚝의 향타에너지로부터 말뚝의 극한지지력을 구하려는 시도가 오래 전부터 이루어져 왔으며, 현재까지 여러 가지 방법들이 제시되어지고 있다.

말뚝의 동역학적 지지력공식은 말뚝 타격시 소요되는 에너지와 말뚝의 관입으로 인한 일량 사이의 평형관계로부터 유도된 공식을 말하며, 지반내에서 소산된 에너지를 추적하는 방법에 따라 여러 가지 방법이 파생되어진다. 향타공식은 말뚝의 정적인 극한지지력을 동적인 관입저항에서 구하려는 것이기 때문에 원리적으로 모순이 있다. 따라서 이를 사용할 때는 그 적용성의 한계를 충분히 인식하여야 한다. 점성토의 경우 향타시 흙의 교란으로 인해 주변 마찰력이 일시적으로 감소하기 때문에 향타공식을 전혀 신뢰할 수 없게 된다. 향타에너지는 주로 램의 위치에너지이며 극한지지력을 말뚝의 관입량으로부터 간단히 구할 수 있다(그림 3.6 참조).

1964년 Goble은 향타해석을 통해 말뚝의 지지력을 예측하기 위한 CASE 방법을 개발하였다. CASE방법을 이용하기 위해서는 향타시 말뚝두부에서의 힘과 속도를 측정하여야 하며, 이들 측정치를 이용하여 향타기 및 향타시스템의 거동(Likins, 1982), 말뚝의 향타 응력(Goble 등, 1980), 말뚝의 건전도(Rausche 등, 1978), 말뚝의 지지력(Rausche 등, 1985)의 평가가 가능하다. 향타 분석기는 WEAP 해석과는 달리 말뚝두부에서 측정된 결과를 이용하므로 향타장비 및 향타시스템의 모델링으로 인한 오차를 제거하였다.

말뚝항타분석기(Pile Driving Analyzer ; PDA)는 그림 3.7와 같은 힘과 속도에 대한 측정 장비로서 항타 장비에 의한 말뚝의 항타 때 지반의 거동을 정량화 하기 위해서 사용된다. 즉, PDA는 말뚝의 지지력, Hammer의 능력 및 에너지 전달의 측정, 말뚝 항타 응력계산, 말뚝의 손상 여부 등의 평가와 아울러 파동방정식의 대표적인 입력계수의 제공을 위하여 힘과 속도를 측정 하는데 사용된다.

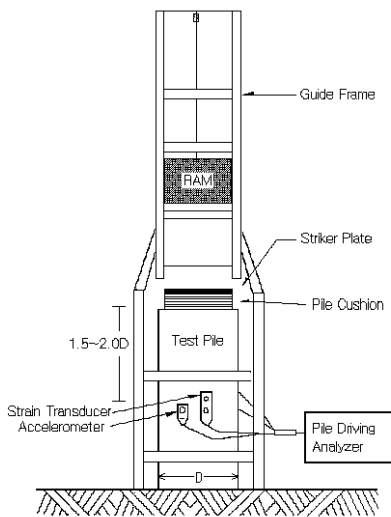


그림 3.6 동재하시험 개요도



그림 3.7 말뚝항타 분석기(PDA)

3.3.2 동재하시험 및 분석방법

(1) 말뚝항타분석기(PDA)

말뚝항타분석기(Pile Driving Analyzer)는 두쌍의 변형계(Strain Transducer)와 가속도계(Accelerometer)를 시험말뚝의 두부(말뚝의 직경 2 ~ B.S배 떨어진 지점)에 고정시키고, 측정된 말뚝의 변형율과 가속도를 이용하여 말뚝의 지지력을 계산할 수 있는 장비로써, 현장에서 간단한 시험으로 손쉽게 말뚝항타장비의 특성, 지반의 감쇠율(Damping Ratio), 주변마찰력의

크기, 주변마찰력의 분포, 말뚝의 건전도 등의 관찰이 가능하다. 그림 3.8에서와 같이 변형계와 가속도계는 향타시 편타로 인한 오류를 방지하기 위하여 말뚝의 반대편에 각각 설치하여 시험한다.

변형율과 가속도는 향타분석기에 의해 힘과 속도로 변환되며 이와 함께 CASE 방법으로 추정된 각종 수치가 분석기 화면에 함께 출력된다. 말뚝향타 분석기는 향타와 동시에 36가지의 측정량을 나타낼 수 있으며, 이들 중 중요한 것들은 표 3.5와 같다.

표 3.5 말뚝향타분석기(PDA)의 계산 출력치

출력치	내용
CSX	Gauge 위치에서의 최대 압축응력
FMS	Gauge 위치에서의 최대 압축력
CSB	말뚝 선단부에서의 최대 압축응력
CFB	말뚝 선단부에서의 최대 압축력
TSX	말뚝에 작용하는 최대 인장응력
CTN	말뚝에 작용하는 최대 인장력
DMX	Gauge 위치에서의 최대 변위
EMX	Gauge 위치에서의 최대 전달에너지
BPM	향타기의 분당 타격수
ETR	에너지 전달율
FT1	시간(t1)일 때의 작용력
VT1	시간(t1)일 때의 입자속도
DT1	시간(t1)일 때의 변위
WD1	시간(t1)일 때의 하향파(Downward Wave)
WU1	시간(t1)일 때의 상향파(Upward Wave)
BTA	말뚝의 손상정도를 나타내는 건전도 지수
RTL	말뚝의 전체 저항력(Total Resistance), (정적+동적)
RSP	Case 방법에 의한 정적 극한지지력
PR#	Case Damping(jc)이 0.# 일 때의 RSP
RMX	Case 방법에 의한 최대 정적 극한지지력
RX#	Case Damping(jc)이 0.# 일때의 RMX
RMN	Case 방법에 의한 최소 정적 극한지지력
RSU	초기 Unloading을 보정한 정적 극한지지력
RU#	· Case Damping(jc) 0.# 일때 RSU

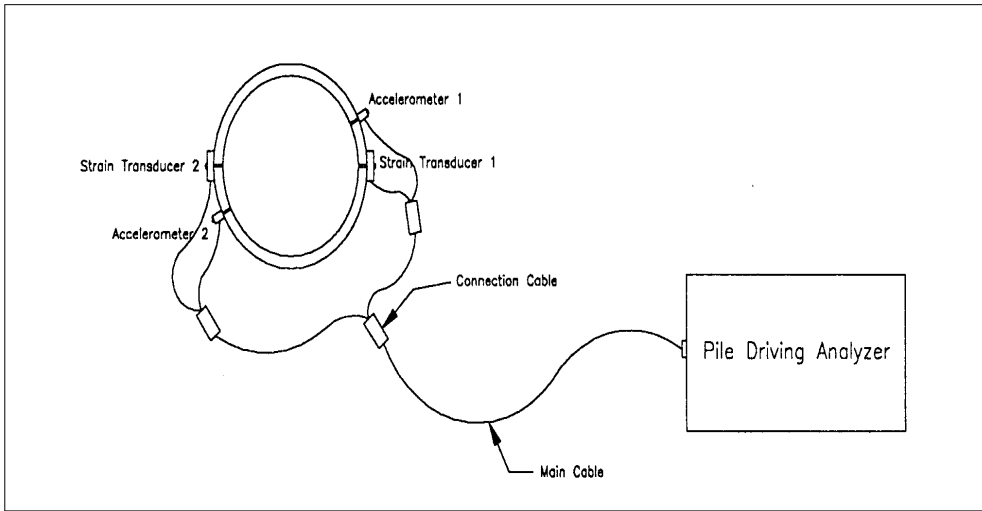


그림 3.8 PDA의 구조 시스템

(2) CASE 방법

Ohio주 Cleveland에 있는 CASE Western Reserve University에서 행해진 연구결과로서 말뚝항타시 측정된 전자장치에 의한 기록을 이용하여 말뚝의 지지력을 예측하는 방법이 개발되었다. 이 방법은 말뚝 두부에서 측정된 가속도 a_p 와 힘 F 를 사용하고, 말뚝은 질량 m 을 갖는 탄성체로 가정한다.

지반의 전체 정적저항력(선단지지력+ 주면마찰력)은 Newton의 법칙으로부터 다음 식과 같이 된다.

$$R_t = F - ma_p \tag{3.11}$$

여기서, a_p : 말뚝의 가속도

F : 말뚝에 작용하는 힘

m : 말뚝의 질량

R_p : 극한 선단지지력

R_s : 극한 주면마찰력

R_t : 지반의 전체 지지력(= $R_p + R_s$)

말뚝의 속도로 인한 동적 저항력 성분을 제거하기 위해 가속도 측정값을 적분하여 얻어지는 말뚝 두부의 속도 V 가 0일 때의 F 와 a_p 의 값을 취한다.

그림 3.9는 CASE 방법에서 고려되는 힘의 성분을 나타낸 것이다.

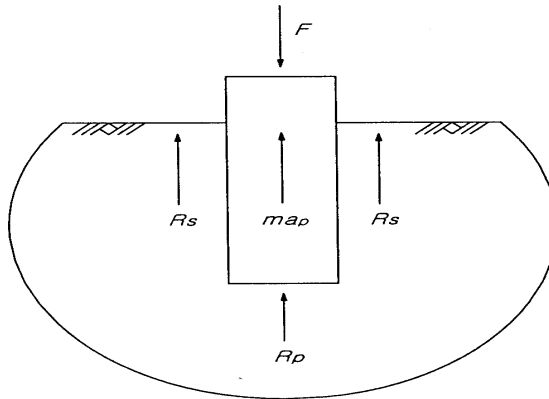


그림 3.9 CASE method of predicting static bearing capacity

말뚝항타분석기로 측정되는 말뚝의 전체 항타저항력은 정적 저항력과 동적 저항력으로 이루어지며, 말뚝 두부에 변형률 측정기와 가속도 측정기를 설치하여 계측한 값을 가지고 지지력을 예측할 수 있는 공식에 대입하여 구하는 방법으로, CASE Damping 계수를 고려한 동적 저항력을 제거하므로써 말뚝의 정적 지지력을 결정할 수 있게 된다. CASE 분석방법은 항타와 동시에 말뚝의 예상지지력을 제시할 수 있는 간편법으로 식(3.12)과 같이 나타낼 수 있다.

장대말뚝 즉, 길이 18m 이상을 포함한 말뚝들에 대한 계속적인 연구결과 대체로 말뚝의 탄성은 간과되어서는 안되는 것으로 나타났으며, 말뚝의 단면적이 일정하고, 지반이 이상적인 소성체라면 일차원 파동방정식의 해는 다음 식과 같이 된다.

$$RTL = RD + RS$$

$$= \frac{1}{2} [FT_1 + FT_2] + \frac{1}{2} \cdot \frac{AE}{C} [VT_1 - VT_2] \quad (3.12)$$

여기서, RTL : 전체 저항력

RD : Damping으로 인한 동적 저항력

RS : 정적 저항력

FT₁, FT₂ : 시간 T₁과 T₂의 말뚝 두부에서 측정된 힘

VT₁, VT₂ : 시간 T₁과 T₂의 말뚝 두부에서 측정된 속도

AE/C : 말뚝의 임피던스 (Impedance)

말뚝의 동적 저항력은 말뚝 선단의 변형속도와 말뚝의 임피던스에 비례한다고 가정하였으며, 비례계수를 CASE Damping 계수로 정의하였고, 식(3.13)와 같이 나타내었다(Rausche, 1985).

$$\begin{aligned} RD &= J_C \frac{AE}{C} V_T \\ &= J_C \left[\left(\frac{AE}{C} \right) VT_1 + FT_1 - RTL \right] \end{aligned} \quad (3.13)$$

여기서, J_C : CASE Damping 계수

V_T : 말뚝 선단의 입자속도

전체 항타저항력에서 CASE Damping 계수를 고려한 동적 저항력을 제거함으로써 말뚝의 정적 극한지지력을 계산할 수 있으며 식(3.14)과 같다.

$$\begin{aligned} RS &= RTL - RD \\ &= \frac{1}{2} (1 - J_C) [FT_1 + \left(\frac{AE}{C} \right) VT_1] + \frac{1}{2} (1 - J_C) [FT_2 - \left(\frac{AE}{C} \right) VT_2] \end{aligned} \quad (3.14)$$

식(3.14)의 FT₁, FT₂, VT₁, VT₂ 는 항타분석기로 측정하며, 지반의 종류

에 따라 J_C (Damping Constant)를 가정하여 계산한다. J_C 는 원칙적으로 그 지역 지반특성에 따라 다르며, 정적 지지력 시험결과와의 상관 관계를 이용하여 구하여야 하나, 지반조건에 따른 계략적인 J_C 값의 추천값은 표 3.6과 같다(Goble, 1975).

표 3.6 지반종류에 따른 J_C 값의 범위 및 추천값

지층의 지반조건	Correlation Value J_C	Suggested Range J_C
모래	0.05	0.05 ~ 0.20
실트질 모래 또는 모래질 실트	0.15	0.15 ~ 0.30
실트	0.30	0.20 ~ 0.45
실트질 점토 또는 점토질 실트	0.55	0.40 ~ 0.70
점토	1.10	0.60 ~ 1.10

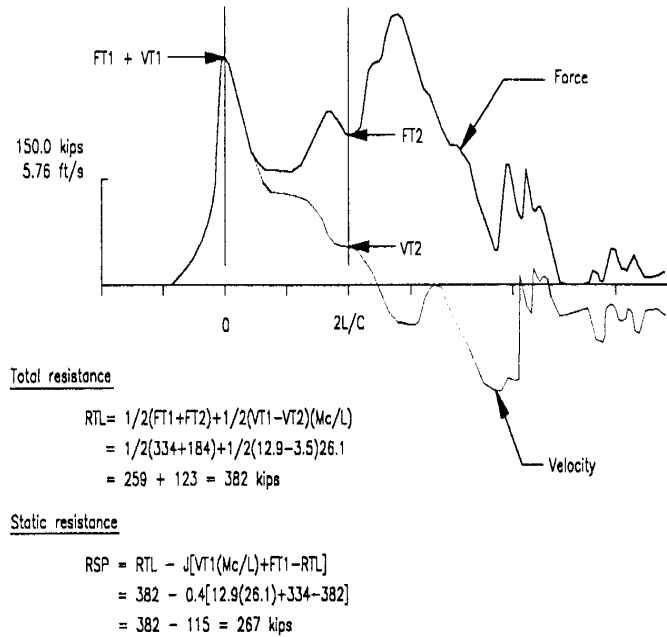


그림 3.10 CASE 방법의 적용 예

(3) CAPWAP 방법

CAPWAP(CASE Pile Wave Analysis Program) 방법은 향타분석기로 측정한 힘(F)과 속도(V)를 시행착오법을 이용하여 경계조건(총 20여개 : 흙의 저항력 분포, 탄성침하 한계(quake), 감쇠율(Damping Ratio), Toe Gap, Geometrical Damping, Plug Mass)을 가정하고 계산파형과 측정파형을 비교하면서 반복 계산하여 두 파형이 일치할 때의 출력치를 이용하여 모사 정적 재하시험 곡선(Simulated Static Pileload Curve)의 정적 극한지지력을 산출하는 해석방법이다

표 3.7 CAPWAP 계산 방법

입력파형	계산파형	비교파형
F	V	V
V	F	F
WD	WU	WU

말뚝 두부에서 측정된 파형중 하나를 입력값으로 하여 말뚝의 경계조건을 변화시키면서 실제 측정파형과 계산파형을 비교하는 파형일치기법 (Wavematching Techniques)을 이용한다. 계산된 출력치와 실제 측정치가 잘 일치하도록 경계조건을 조절하는 작업이 필요하며, CAPWAP에서는 자동과 수동의 작업이 모두 가능하다. 반복 작업시 조정되는 Modeling Parameter 중 대표적인 것은 흙과 말뚝의 감쇠율, 탄성침하 한계, Unloading Quake, Unloading Level, Reloadinglevel, Plug Mass, 흙의 저항분포(그림 3.11과 그림 3.12 참조) 등이다.

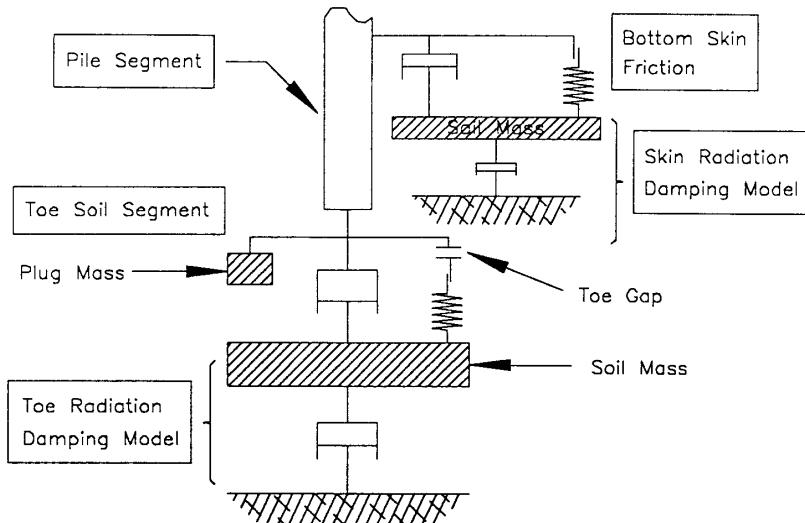


그림 3.11 CAPWAP에서의 말뚝주면과 선단에 대한 흙의 저항 모델

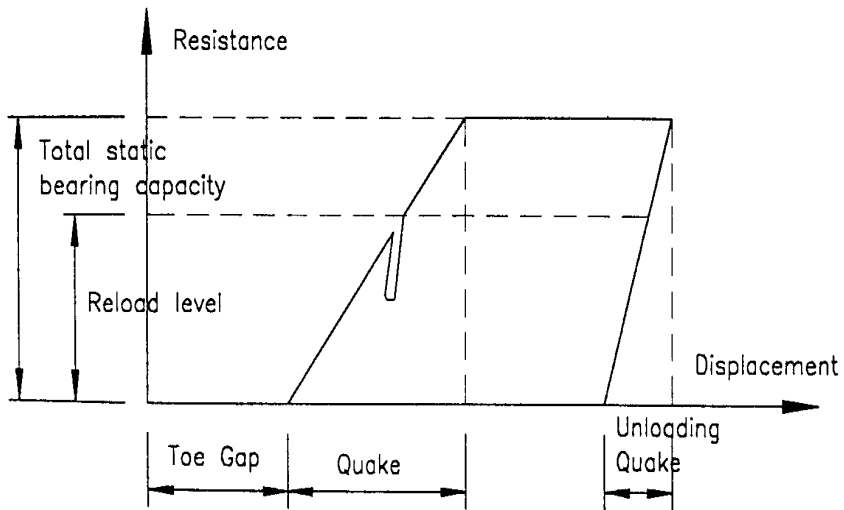


그림 3.12 정적 선단저항력과 상대 선단침하량

CAPWAP은 계산된 경계조건을 이용하여 모사 정적 재하시험을 실시하며, 말뚝의 두부에 하중을 작용시켜 말뚝의 관입과 이에 소요되는 흙의 정적 저항력의 관계를 얻을 수 있으며, 주변마찰력의 분포를 제시한다.

Goble(1980)은 CAPWAP 방법에 의한 극한지지력 예측치의 정확도를 알아보기 위해 계산치와 정적재하시험을 비교한 결과 해석결과가 약 $\pm 15\%$ 이하의 오차를 보인다고 주장하였다. CAPWAP 방법은 항타로 인한 말뚝의 변위가 충분하지 않으면 지지력을 과소평가하는 경향이 있으며, 어떤 입력과 형을 사용하느냐에 따라 추정되는 경계조건에 약간의 차이가 있다.

또한, CAPWAP 해석결과는 말뚝항타분석기로 측정된 시점의 말뚝지지력을 예측하므로 응력회복 효과(Setup Effect), 응력이완 효과(Relaxation Effect)에 의한 지지력 증감은 기술자에 의해 판단되어야 한다.

(4) 향타에너지의 평가

말뚝 두부에 전달되는 향타에너지는 식(3.15)와 같이 나타낼 수 있으며, E(t)의 최대값은 말뚝 두부에 전달된 최대 향타에너지(EMX)가 된다.

$$E(t) = \int_0^T F(T) V(t) dt \quad (3.15)$$

여기서, E(T) : 말뚝 두부에 전달된 에너지
 F(t) : 향타분석기로 얻은 힘-시간 곡선
 V(t) : 향타분석기로 얻은 속도-시간 곡선

EMX와 향타기의 향타에너지 또는 WH(W; 향타기 램의 무게, H; 향타기 램의 낙하고)의 비를 에너지 전달율(Energy Trasfer Ratio, ETR)이라고하며, 향타기 쿠션, 말뚝 캡, 말뚝 쿠션 등 향타시스템 전체와 말뚝의 종류에 따라 변화한다.(Rausche, 1985)

표 3.9는 향타기와 말뚝에 따른 에너지 전달율을 나타낸다.

표 3.8 대표적 향타기의 효율

향타기 종류	향타기 효율
단동식 디젤(Open Ended Diesel)	0.72
유압(Hydraulic)	0.90

표 3.9 향타기와 말뚝에 따른 에너지 전달율

향타기 종류	말뚝 종류	에너지 전달율		
		평균치	표준편차	범위
Single Acting Air/Setam	Steel	49%	10%	29~71%
	Concrete or Timber	46%	16%	25~95%
Double Acting Air/Steam	Steel	33%	9%	24~51%
	Concrete or Timber	27%	8%	15~44%
Open End Diesel	Steel	34%	10%	15~59%
	Concrete or Timber	25%	6%	13~43%
Closed End Diesel	Steel	36%	7%	23~48%
	Concrete or Timber	26%	6%	18~33%

말뚝향타분석기를 이용하여 향타와 동시에 말뚝 두부의 편타에 의한 말뚝의 Bending, 말뚝 선단의 최대 압축응력(CSB)을 통한 선단부의 손상, 말뚝 두부의 최대 압축응력(CSX)을 통한 말뚝 두부의 손상, 말뚝에 걸리는 최대 인장응력(CTN)을 통한 콘크리트 말뚝의 인장균열을 관찰할 수 있다.

향타시 두꺼운 쿠션의 사용과 말뚝 두부의 향타응력은 램의 낙하고에만 관계되므로 무거운 향타기로 낙하고를 줄여 향타함으로써 과다향타로 인한 말뚝의 선단 및 두부의 파손을 방지할 수 있다. 두부손상시 최종관입량이 적어져 지지층에 도달한 것으로 판단할 수 있으므로 CSX의 관찰과 선단에서의 파손은 육안으로 확인할 수 없기 때문에 CSB를 관찰하면서 향타하여 말뚝의 손상을 방지할 수 있다.

말뚝의 초기향타시 향타로 인한 압축파가 선단에서 인장파로 반사되어 말뚝의 허용 인장응력보다 클 경우 말뚝에 인장균열이 발생할 수 있으므로 말뚝에 걸리는 최대 인장응력도 유의하여 관찰하여야 한다.

표 3.10은 최대 향타응력의 추천치를 나타낸다.

표 3.10 최대항타응력 추천치

말뚝종류	미국 연방 도로국(FHWA)		국 내	
	최대압축응력	최대인장응력	최대압축응력	최대인장응력
PC	$0.85\sigma_{ck} - \sigma_{ep}$	$3\sqrt{\sigma_{ck} + \sigma_{ep}}$	$0.6\sigma_{ck}$	$0.85\sigma_{ep}$
Steel	$0.9\sigma_y$	$0.9\sigma_y$	$0.9\sigma_y$	$0.9\sigma_y$

(5) 말뚝 건전도의 평가

시험항타시 말뚝의 손상정도는 시험장비에 나타난 BTA(Pile integrity factor for pile damage analysis)로 판정할 수 있다. 말뚝의 증가시 『파는 감소하고, V파는 증가하는 현상이 발생하여 두 파형이 서로 접근하거나 교차하는 현상이 발생한다. 말뚝의 손상정도 및 손상위치를 항타와 동시에 관찰할 수 있으며, 말뚝의 손상정도를 나타내는 말뚝의 건전도 지수(Rausche Goble, 1978)는 다음의 식(3.16)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 손상정도의 판단기준은 표 3.11과 같다

$$BTA = \frac{\text{원래의 말뚝 단면적} - \text{손상된 말뚝 단면적}}{\text{원래의 말뚝 단면적}} \quad (3.16)$$

표 3.11 손상정도의 판단기준

BTA	손상도	비 고
100	Nomal (손상없음)	BTA=200인 경우 ▶ 항타로 인한 Wave 길이가 말뚝의 길이보다 클 경우에 표시됨 (손상이 없는 것으로 판단)
80 ~ 100	Minor Damage (약간손상)	
60 ~ 80	Major Damage (심한손상)	
60 이하	Broken (파괴)	

(6) 안전율의 적용

동재하시험의 결과로부터 허용하중을 결정하기 위해서는 적절한 안전율로 나누어서 결정한다. 이때 하중-침하 거동을 잘 분석하여 사용하중 범위에서 과도한 침하가 일어나지 않도록 허용하중을 결정하여야 한다. 안전율에 대해서는 국내의 경우 정적 재하시험에 대하여 건설부 제정 구조물기초 설계기준에서 명시한 항복하중에 대해서는 2.0을, 극한하중에 대해서는 없는 상태이다. 따라서 부득이 외국의 규정을 적용할 수 밖에 없으며, 본 분석에서는 CAPWAP에서 분석한 전체지지력에 보수적인 개념의 안전율 3.0를 적용하여 허용하중을 산정하였다.

표 3.12 C.O.E EM 1110-2-2906 규정(안전율)

Method of Determing Capacity	Load Condition	Minium Factor of Satefy	
		Compression	Tension
Theoretical of empirical	Usual	2.5	3.0
Prediction to be verified	Unusual	1.9	2.25
by pile driving analyzer	Extreme	1.4	1.7

제4장 사례현장 지지력 분석 및 고찰

4.1 지반조건

본 연구에서는 매입말뚝기초의 허용지지력 예측에 대한 적정성을 검토하고자 6개소의 매입말뚝에 대해 현장 시추조사 및 실내시험을 통한 지반조사 결과를 분석하였다. 다음으로 동재하시험 결과를 이용하여 선단지지력과 주변마찰력에 대한 각각의 해석과 함께 허용지지력과 지지력 분담률을 분석하였으며, 또한 정역학적 해석과 동역학적 해석에 따른 허용안전율을 설계하중과 비교·분석하여 보았다.

사례현장의 지반조건을 표 4.1에 나타내었다.

표 4.1 사례현장의 지반조건

구분	단위중량 (KN/m ³)	내부마찰각 ∅ (°)	점착력C Kh(kN/m ²)	지반반력계 수Kh(kN/ m ³)	변형계수E (kN/m ²)	포아송비 ν
성토층	18.6	25	14.7	20,000	17,500	0.30
전답토층	16.7	10	19.6	9,800	6,860	0.40
붕적층 및 표토	17.6	26	0.0	17,934	10,780	0.30
퇴적층	17.6	25	9.8	15,778	7,840	0.30
풍화토층	18.6	30	9.8	28,420	33,320	0.28
풍화암층	20.6	35	29.4	39,200	196,000	0.25

사례현장의 현장 지형은 서측으로 탐천이 흘러 만경강과 합류하여 서해로 유입되며, 북측으로 미륵산이 위치하고 있으나 대부분이 평야지대 및 구릉성 산지로 낮은 지형을 이루고 있다. 지질은 시대미상의 하부천매암대, 병성사질 암대에 유라기 대보관입암류의 화강암류가 관입하고 이를 제 4기층적층이 부정합으로 덮고 있는 형태이고, 화강암이 기반암을 이루고 있다. 전답토층에서만 내부마찰각이 작게 나왔고 거의 유사한 값을 나타냈으며 붕적층 및 표토층에서는 점착력이 없었고 풍화암층에서 지반반력계수값이 가장 크게 나온 결과로 보아 지반하부에 안착된 것으로 사료된다.

사례현장의 지반은 균일한 상태로 분포되어 있으며, 성층상태는 전답토층, 붕적 및 표토, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층으로 구성되어 있다. SIP 공법이 적용된 6개소의 지반조사 결과에 따른 지층구성 상태를 표 4.2에 나타내었다.

표 4.2 사례현장의 지반조사 성과분석

구 분	지층별 개요
전답토층	<ul style="list-style-type: none"> • 실트섞인 점토 구성 • 두께 : 0.5 ~ 0.7m, 습윤~포화
붕적 및 표토	<ul style="list-style-type: none"> • 실트 및 점토섞인 모래 • 두께 : 0.5 ~ 0.39m, 느슨~보통조밀
퇴적층	<ul style="list-style-type: none"> • 실트섞인 모래 ~ 실트섞인 점토 • 두께 : 0 ~ 0.30m, 보통 보통단단
풍화토층	<ul style="list-style-type: none"> • 실트섞인 모래 구성 • 두께 : 4.1 ~ 25.5m, 조밀~매우조밀
풍화암층	<ul style="list-style-type: none"> • 굴진시 실트섞인 모래 성분으로 분해 • 두께 : 2.5 ~ 6.0m, 매우조밀

4.2 매입말뚝기초의 적용현황

본 연구의 사례현장 구간에 대한 분석 결과 수평하중은 작고 연직하중이 지배적이므로 내구성 및 시공성이 우수한 PHC말뚝을 적용하였다. 표 4.3은 6개소의 시험말뚝 제원을 나타내고 있으며, 그림 4.1은 각각의 말뚝길이 및 매입심도를 보여주고 있다.

표 4.3 개소별 시험말뚝 제원

시험번호	말뚝번호	말뚝종류	말뚝직경	말뚝길이	관입심도	시공방법
P.D.A-1	소각동 No.1	PHC	Ø450mm (70t)	16.0m	15.3m	매입공법 (SIP공법)
P.D.A-2	소각동 No.2	PHC	Ø450mm (70t)	22.0m	20.5m	매입공법 (SIP공법)
P.D.A-3	주민편익시설 No.1	PHC	Ø450mm (70t)	17.0m	16.2m	매입공법 (SIP공법)
P.D.A-4	주민편익시설 No.2	PHC	Ø450mm (70t)	17.0m	16.2m	매입공법 (SIP공법)
P.D.A-5	굴뚝 No.1	PHC	Ø500mm (80t)	18.0m	16.5m	매입공법 (SIP공법)
P.D.A-6	관리동 No.1	PHC	Ø450mm (70t)	21.0m	17.9m	매입공법 (SIP공법)

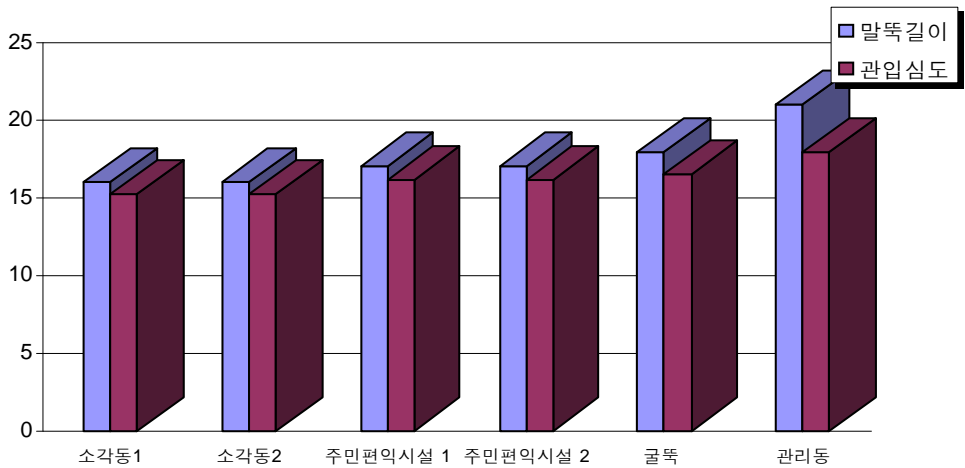


그림 4.1 개소별 말뚝길이 및 매입심도

4.3 동재하시험 결과 및 PDA분석

본 연구에서는 SIP 기초공법이 적용된 6개소에 대한 동재하시험을 실시하여 그 결과를 CAPWAP분석법과 CASE분석법을 이용하여 허용지지력, 선단 지지력과 주변마찰력의 분담률 등을 결정하고, 기존 경험식에 어느 정도 안정성을 가지고 있는지 비교 분석하였다. 다음의 그림 4.1부터 4.6까지는 동재하시험에 따른 PDA분석결과를 보여 주고 있다.

말뚝기초의 목적상 말뚝에 손상이 발생하지 않는 범위 내에서 최대의 에너지가 말뚝에 전달되어야만 소정의 지지력을 갖는 말뚝을 시공할 수 있으므로, 동재하시험 중에는 항타분석기로 CSX, CSB, TSX 등을 관찰하여 말뚝두부 및 선단의 손상, 인장균열의 발생을 최대한 억제하면서 시험을 실시함으로써 효율적인 동재하시험 관리를 실시할 수 있다.

	<p>Project Information PROJECT: daewoo PILE NAME: DWSK-14 DESCR: drop2.5 OPERATOR: FILE: DWSK-14_25 2007-08-23 오후 1:16:37 Blow Number 25</p> <p>Pile Properties LE 15.1 m AR 835.66 cm² EM 400 t/cm² SP 2.45 t/m³ WS 4000.0 m/s EA/C 83.5 tn-s/m ZL/C 7.60 ms JC 0.60 [] LP 15.1 m</p>	<p>Quantity Results CSX 24.1 MPa CSB 28.4 MPa TSX 0.3 MPa EMX 2.47 tn-m FMX 205 tn DMX 22 mm RMX 200 tn RAZ 175 tn BTA 100.0 (%)</p> <p>Sensors F1: [] 96 (1) F2: [] 95 (1) A1: [] 1072 g/s/v (1) A2: [] 1050 g/s/v (1) CLIP: OK F1/F2: LOW 0.04 V1/V2: OK 0.94</p>	<p>CSX: 최대압축응력</p> <p>CSB: 말뚝선단부에서의 최대압축응력</p> <p>TSX: 말뚝에 작용하는 최대인장응력</p> <p>RMX: CASE방법에 의한 정적극한지지력</p>
	<p>Project Information PROJECT: daewoo PILE NAME: DWSK-86 DESCR: drop2.5 OPERATOR: FILE: DWSK-86_19W18.w01 2007-08-25 오후 1:45:03 Blow Number 19</p> <p>Pile Properties LE 21.1 m AR 835.66 cm² EM 400 t/cm² SP 2.45 t/m³ WS 4000.0 m/s EA/C 83.5 tn-s/m ZL/C 10.60 ms JC 0.60 [] LP 20.5 m</p>	<p>Quantity Results CSX 32.6 MPa CSB 25.5 MPa TSX 1.4 MPa EMX 3.47 tn-m FMX 278 tn DMX 26 mm RMX 231 tn RAZ 244 tn BTA 86.0 (%)</p> <p>Sensors F1: [] 96 (1.3) F2: [] 95 (1.2) A1: [] 1072 g/s/v (1.3) A2: [] 1050 g/s/v (1.1) CLIP: OK F1/F2: OK 1.09 V1/V2: OK 1.08</p>	<p>CSX: 최대압축응력</p> <p>CSB: 말뚝선단부에서의 최대압축응력</p> <p>TSX: 말뚝에 작용하는 최대인장응력</p> <p>RMX: Case방법에 의한 정적극한지지력</p>

그림 4.2 소각동NO. 1(Pile Driving Analyzer) PDA분석 데이터

	<p>Project Information PROJECT: daewoo PILE NAME: DWSK-86 DESCR: drop2.5 OPERATOR: FILE: DWSK-86_19W18.w01 2007-08-25 오후 1:45:03 Blow Number 19</p> <p>Pile Properties LE 21.1 m AR 835.66 cm² EM 400 t/cm² SP 2.45 t/m³ WS 4000.0 m/s EA/C 83.5 tn-s/m ZL/C 10.60 ms JC 0.60 [] LP 20.5 m</p>	<p>Quantity Results CSX 32.6 MPa CSB 25.5 MPa TSX 1.4 MPa EMX 3.47 tn-m FMX 278 tn DMX 26 mm RMX 231 tn RAZ 244 tn BTA 86.0 (%)</p> <p>Sensors F1: [] 96 (1.3) F2: [] 95 (1.2) A1: [] 1072 g/s/v (1.3) A2: [] 1050 g/s/v (1.1) CLIP: OK F1/F2: OK 1.09 V1/V2: OK 1.08</p>	<p>CSX: 최대압축응력</p> <p>CSB: 말뚝선단부에서의 최대압축응력</p> <p>TSX: 말뚝에 작용하는 최대인장응력</p> <p>RMX: Case방법에 의한 정적극한지지력</p>
	<p>Project Information PROJECT: daewoo PILE NAME: DWSK-86 DESCR: drop2.5 OPERATOR: FILE: DWSK-86_19W18.w01 2007-08-25 오후 1:45:03 Blow Number 19</p> <p>Pile Properties LE 21.1 m AR 835.66 cm² EM 400 t/cm² SP 2.45 t/m³ WS 4000.0 m/s EA/C 83.5 tn-s/m ZL/C 10.60 ms JC 0.60 [] LP 20.5 m</p>	<p>Quantity Results CSX 32.6 MPa CSB 25.5 MPa TSX 1.4 MPa EMX 3.47 tn-m FMX 278 tn DMX 26 mm RMX 231 tn RAZ 244 tn BTA 86.0 (%)</p> <p>Sensors F1: [] 96 (1.3) F2: [] 95 (1.2) A1: [] 1072 g/s/v (1.3) A2: [] 1050 g/s/v (1.1) CLIP: OK F1/F2: OK 1.09 V1/V2: OK 1.08</p>	<p>CSX: 최대압축응력</p> <p>CSB: 말뚝선단부에서의 최대압축응력</p> <p>TSX: 말뚝에 작용하는 최대인장응력</p> <p>RMX: Case방법에 의한 정적극한지지력</p>

그림 4.3 소각동NO. 2(Pile Driving Analyzer) PDA분석 데이터

	<p><u>Project Information</u> PROJECT: DAEWOO PILE NAME: ES-164 DESCR: ;DROP2.5; OPERATOR: FILE: ES-164_12 2007-09-19 오전 10:50:33 Blow Number 12</p>	<p><u>Quantity Results</u> CSX 15.8 MPa CSB 22.0 MPa TSX 0.0 MPa EMX 2.44 tn-m FMX 135 tn DMX 15 mm RMX 217 tn RA2 212 tn BTA 100.0 (%)</p>	<p>CSX: 최대압축응력 CSB: 말뚝선단부에서의 최대압축응력</p>
	<p><u>Pile Properties</u> LE 16.0 m AR 835.66 cm² EM 400 t/cm² SP 2.45 t/m³ WS 4000.0 m/s EA/C 83.5 tn-s/m ZL/C 8.00 ms JC 0.50 [] LP 16.2 m</p>	<p><u>Sensors</u> F1: [F1] 91.2 (1) F2: [F2] 97.7 (1) A1: [A1] 1000 g's/v (1) A2: [A2] 980 g's/v (1) CLIP: OK F1/F2: LOW 0.60 V1/V2: OK 1.06</p>	<p>TSX: 말뚝에 작용하는 최대인장응력 RMX: Case방업에 의한 정적극한지지력</p>

그림 4.4 주민 편의시설 NO.1(Pile Driving Analyzer) PDA분석 데이터

	<p><u>Project Information</u> PROJECT: DAEWOO PILE NAME: ES-45 DESCR: ;DROP2.5; OPERATOR: FILE: ES-45_1 2007-09-21 오전 10:57:04 Blow Number 1</p>	<p><u>Quantity Results</u> CSX 10.5 MPa CSB 15.4 MPa TSX 0.0 MPa EMX 2.77 tn-m FMX 90 tn DMX 11 mm RMX 227 tn RA2 230 tn BTA 100.0 (%)</p>	<p>CSX: 최대압축응력 CSB: 말뚝선단부에서의 최대압축응력</p>
	<p><u>Pile Properties</u> LE 16.0 m AR 835.66 cm² EM 400 t/cm² SP 2.45 t/m³ WS 4000.0 m/s EA/C 83.5 tn-s/m ZL/C 7.40 ms JC 0.50 [] LP 16.2 m</p>	<p><u>Sensors</u> F1: [F1] 91.2 (1) F2: [F2] 97.7 (1) A1: [A1] 1000 g's/v (1) A2: [A2] 980 g's/v (1) CLIP: OK F1/F2: LOW 0.48 V1/V2: OK 1.04</p>	<p>TSX: 말뚝에 작용하는 최대인장응력 RMX: Case방업에 의한 정적극한지지력</p>

그림 4.5 주민 편의시설 NO.2(Pile Driving Analyzer) PDA분석 데이터

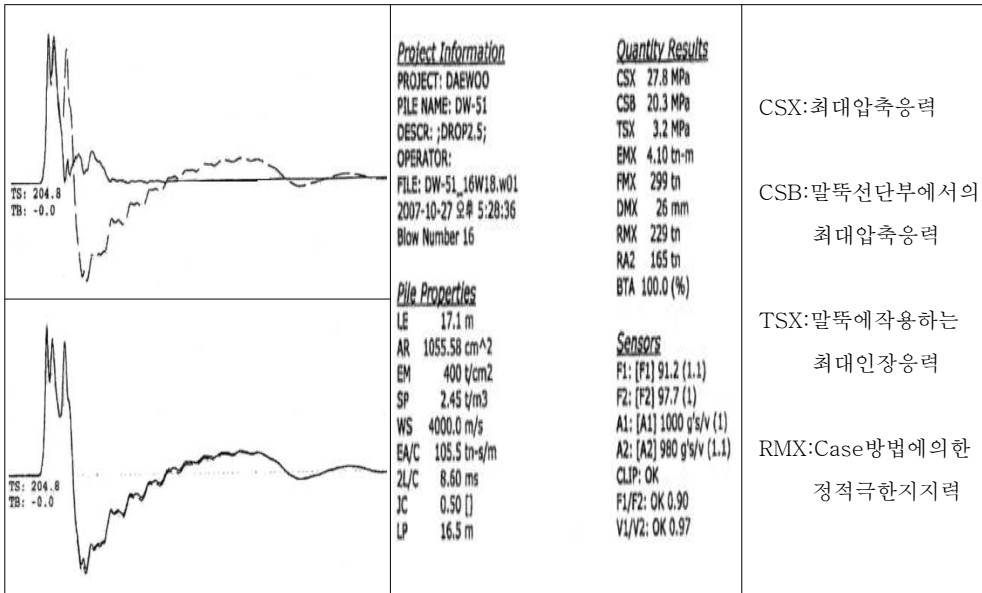


그림 4.6 굴뚝 NO. 1(Pile Driving Analyzer) PDA분석 데이터

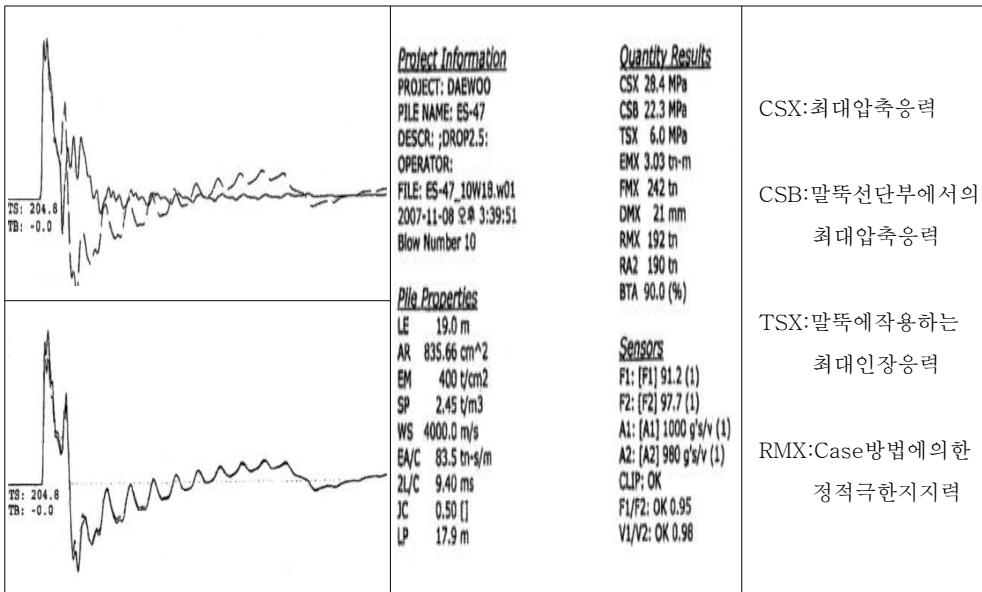


그림 4.7 관리동 NO.1(Pile Driving Analyzer) PDA분석 데이터

PHC 말뚝의 허용압축응력은 항타응력에 대하여 $0.6f_c$ 를 보는 것이 보통이므로 $0.48t/cm^2$ 으로 볼 수 있다. 6개소의 항타응력은 표 4.4에 나타난 바와 같이 허용압축응력 이내로 측정되었고, 항타에너지의 전달을 측정결과를 표 4.5에 나타내었다.

표 4.4 항타응력의 평가결과

시험번호	말뚝번호	CSX (ton/cm ²)	CSB (ton/cm ²)	TSX (ton/cm ²)	허용항타응력 (ton/cm ²)	비고
P.D.A-1	소각동 No.1	0.241	0.284	0.003	0.480	O.K
P.D.A-2	소각동 No.2	0.326	0.255	0.014	0.480	O.K
P.D.A-3	주민편의시설 No.1	0.158	0.220	0.000	0.480	O.K
P.D.A-4	주민편의시설No.2	0.105	0.154	0.000	0.480	O.K
P.D.A-5	굴뚝 No.1	0.278	0.203	0.032	0.480	O.K
P.D.A-6	관리동 No.1	0.284	0.223	0.060	0.480	O.K

표 4.5 항타에너지 전달을 측정

말뚝번호	RAM중량	낙하고	항타에너지	전달에너지	에너지전달율	BTA(%)	평가
소각동 No.1	2.5ton	3.0m	7.50ton	2.47ton·m	32.93	100.0	Nomal (손상없음)
소각동 No.2	2.5ton	3.0m	7.50ton	3.47ton·m	46.26	86.0	Minor Damage (약간손상)
주민편의시설 No.1	2.5ton	2.0m	5.00ton	2.44ton·m	48.80	100.0	Nomal (손상없음)
주민편의시설 No.2	2.5ton	2.0m	5.00ton	2.77ton·m	55.40	100.0	Nomal (손상없음)
굴뚝 No.1	2.5ton	2.0m	7.50ton	4.10ton·m	54.67	100.0	Nomal (손상없음)
관리동 No.1	2.5ton	2.0m	5.00ton	3.03ton·m	60.60	90.0	Minor Damage (약간손상)

4.4 분석 및 고찰

4.4.1 선단지지력 분석결과

사례현장의 개소별 선단지지력 산정결과를 표 4.6에 나타내었다. 본 연구에서는 설계지지력 산정의 기준 제시를 위해 실제 측정된 지지력값을 분석한 결과를 근거로 각 재하시험 결과별 선단부의 지지력값을 산정하였다.

표 4.6 선단지지력 분석결과

말뚝번호	극한지지력	주면마찰력	선단지지력	단위 선단지지력
소각동 No.1	193.9ton	1.9ton	191.9ton	1206.9t/m ²
소각동 No.2	244.8ton	36.9ton	207.9ton	1307.5t/m ²
주민편익시설 No.1	210.4ton	13.2ton	197.2ton	1240.3t/m ²
주민편익시설 No.2	228.0ton	12.1ton	215.9ton	1357.9t/m ²
굴뚝 No.1	238.1ton	45.9ton	192.3ton	1209.4t/m ²
관리동 No.1	199.2ton	22.1ton	177.2ton	1114.5t/m ²
평 균	219.1ton	22.0ton	197.1ton	1239.6t/m ²

전술한 바와 같이 SIP 기초공법이 개발된 일본에서는 선단지지력을 각종 기관이나 기준마다 고유의 방법에 따라 $R_p = 20 \sim 30 \bar{N}A_p$ 를 사용하고 있다. 또한 일본 건축학회 등에서는 $R_p = 20 \bar{N}A_p$ (최대한계값 : 1,200t/m², $\bar{N} \leq 60$)을 사용하며, 건설성 인정공식이나 고시기준은 $R_p = 20 \sim 30 \bar{N}A_p$ 를 적용하고 있다. SIP 기초공법 등 매입공법의 선단지지력을 규정한 구조물 기초설계기준에서 Meyerhof 방법에 의한 타입말뚝의 최대 한계값은 1,500t/m²이고, 매입말뚝에서는 타입말뚝의 1/3 ~ 1/2에 해당하는 500 ~ 750t/m²으로 규정하고 있다.

본 연구의 사례현장에 대한 지지력 산정에 있어 실제 현장에서 시공된 매입말뚝의 동재하시험 결과로부터 구한 개소별 매입말뚝의 단위 선단지지력을 산정한 결과 표 4.6 및 그림 4.8에서와 같이 1114 ~ 1357t/m²로 나타났으며, 평균 1235t/m² 정도로서 매입말뚝의 선단지지력을 규정한 구조물 기초설계기준치인 500 ~ 750t/m²에 비해 높은 값으로 나타났다.

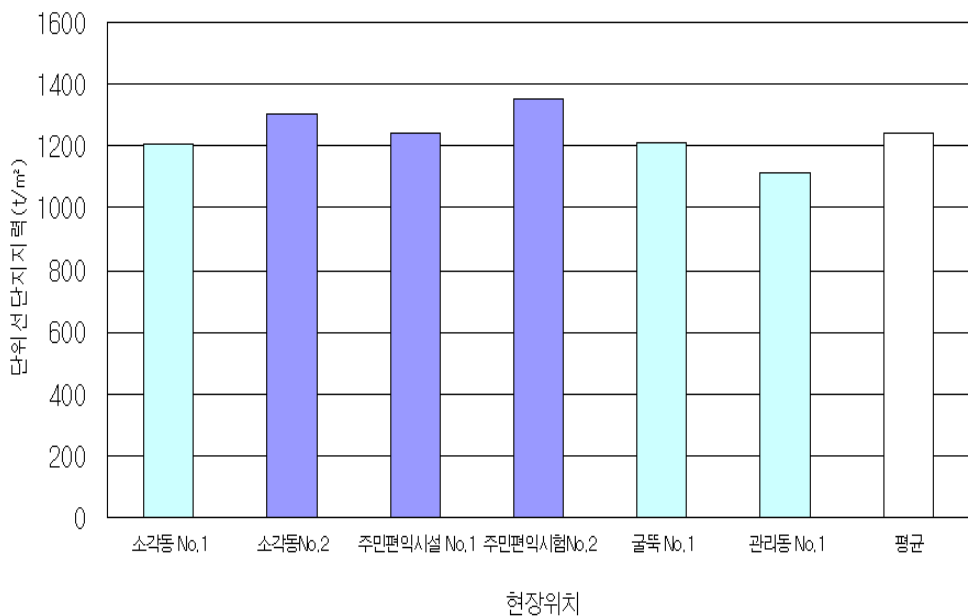


그림 4.8 선단지지력 분석결과

4.4.2 주변마찰력 분석결과

사례현장의 개소별 주변마찰력 산정결과를 표 4.7에 나타내었다. 매입말뚝 중 국내에서 주로 적용되는 SIP 기초공법에서 나타나는 현상은 주변마찰력 증진을 위하여 주입하는 시멘트 풀만 가지고는 기대하는 지지력을 얻을 수 없는 경우가 대부분이다. 따라서 국내에서 SIP기초공법을 시행할 때에는 선단지지력 확보를 위하여 최종 향타가 필수적으로 요구된다는 것이다.

표 4.7 주면마찰력 분석결과

말뚝번호	관입심도	주면마찰력
소각동 No.1	15.3m	1.9ton
소각동 No.2	20.5m	36.9ton
주민편의시설 No.1	16.2m	13.2ton
주민편의시설 No.2	16.2m	12.1ton
굴뚝 No.1	16.5m	45.9ton
관리동 No.1	17.9m	22.1ton
평 균	17.1m	22ton

표 4.7 및 그림 4.9에서와 같이 매입말뚝의 개소별 주면마찰력은 1.9 ~ 45.9ton으로 나타났고, 평균 22ton으로 분석되었다. 말뚝이 매입된 주면부가 실트질 모래, 풍화토 등 화강풍화토 계열의 사질토로 분포하고, 선단지지층이 N치 50이상으로 된 구간에서는 주면마찰력이 평균치 이상을 나타내었고, 지반조건이 불량한 구간에서는 평균치 이하의 분포를 나타내었다.

이와 같은 결과 값은 구조물 기초 설계기준에서 Meyerhof에 의해 제시된 타입말뚝기초의 극한주면마찰력 한계치 $10t/m^2$ 에 근접하며, 타입말뚝기초의 1/2을 적용하는 국내 기준치 $5t/m^2$ 을 대부분 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 기준치에 미치지 못하는 데이터는 적절히 시멘트 페이스트비를 조정하고 엄격한 품질관리가 이루어져야 함을 알 수 있다.

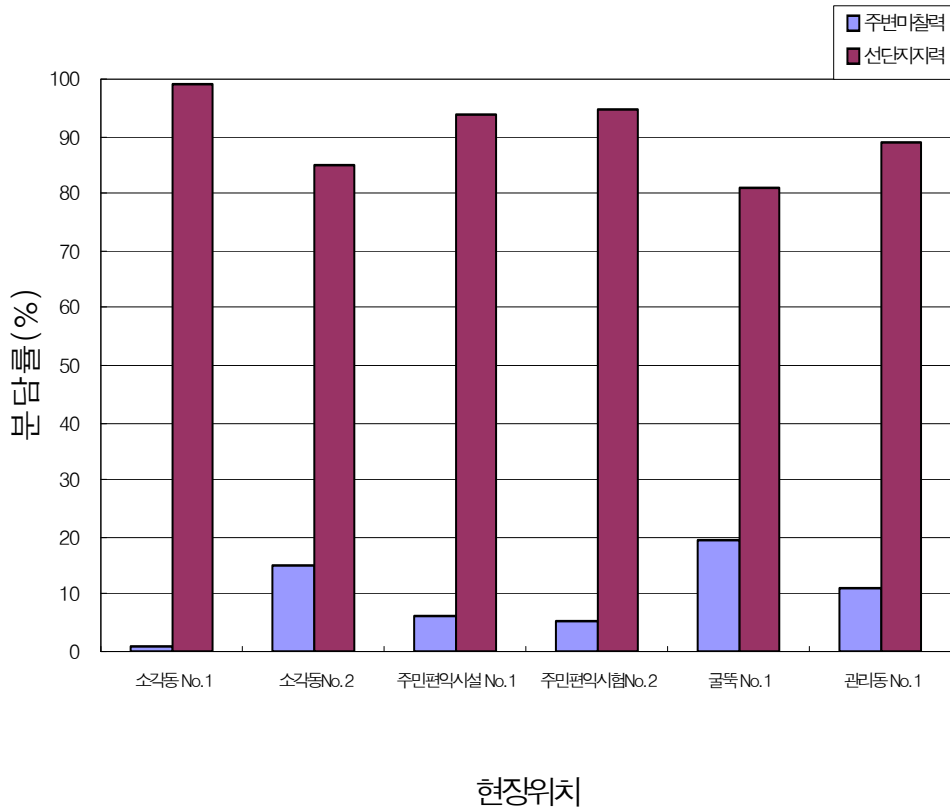


그림 4.9 주변미찰력 분석결과

4.4.3 허용지지력 분석결과

허용지지력 판정기법들은 여러 가지가 있으나 그 적용성에는 어느 정도의 한계가 있으며 본 연구에서는 비교적 신뢰도가 높은 동재하시험에 따른 CAPWAP 방법에 의해 허용지지력을 분석하였다. 산출된 허용지지력을 비교 분석한 결과는 표 4.8 및 그림4.10과 같다.

표 4.8 허용지지력 분석결과

시험번호	말뚝번호	극한지지력	주면마찰력	선단지지력	안전율(S.F)	허용지지력	N
P.D.A-1	소각동 No.1	193.9ton	1.9ton	191.9ton	2.5	77.56ton	59.5
P.D.A-2	소각동 No.2	244.8ton	36.9ton	207.9ton	2.5	97.92ton	64.4
P.D.A-3	주민편의시설 No.1	210.4ton	13.2ton	197.2ton	2.5	84.16ton	61.1
P.D.A-4	주민편의시설 No.2	228.0ton	12.1ton	215.9ton	2.5	91.20ton	66.9
P.D.A-5	굴뚝 No.1	238.1ton	45.9ton	192.3ton	2.5	95.24ton	59.6
P.D.A-6	관리동 No.1	199.2ton	22.1ton	177.2ton	2.5	79.68ton	54.9
평균		219.1ton	22.0ton	197.1ton	2.5	87.63ton	61.1

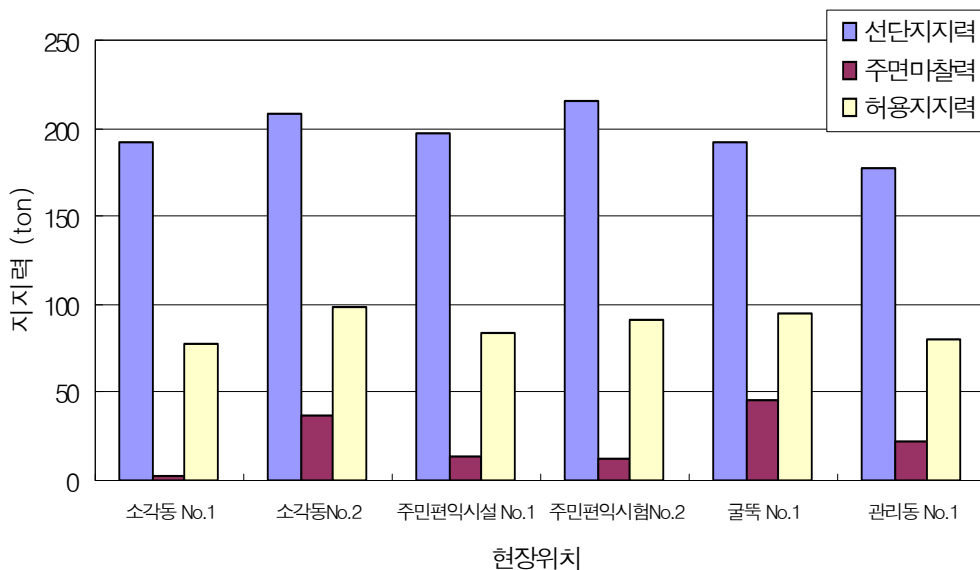


그림 4.10 허용지지력 분석 결과

4.4.4 지지력 분담률 분석결과

매입말뚝 기초공법의 지지력은 선단지지력과 주면마찰력으로 구성된다. 선단지지력과 주면마찰력의 구성비율이나 크기는 지반조건과 시공특성에 따라 다르게 나타난다. 이 때문에 매입말뚝기초의 전체 지지력에서 선단지지력과 주면마찰력의 분담률에 대한 연구들이 국내연구자들에 의해 진행 중이다.

주면마찰력이 선단지지력의 평균 10% 이하의 하중 분담률을 가지고 하중의 대부분을 선단에서 분담한다는 결과를 비롯하여 현장 SIP 기초에 관한 동재하시험 중 동일 말뚝에서 시험 결과를 분석한 결과 선단지지력 대 주면마찰력이 53 : 47 으로 제시된 경우가 있다(김정수, 2003). 다음의 표 4.9은 시공심도별 선단지지력 대비 주면마찰력의 분담률을 참고로 나타내고 있다.

표 4.9 시공심도별 선단지지력 대 주면마찰력의 분담률

시공심도(m)	선단지지력(%)	주면마찰력(%)
0~5m	89	11
5~10m	87	13
10~15m	85	15
15m 이상	86	14
평 균	88	12

다음의 그림 4.11은 SIP 기초공법을 적용한 사례현장의 선단지지력과 주면마찰력비를 분석한 결과이다. 이 때 동일한 말뚝에서 실시한 동재하시험 결과를 시공심도별로 0~5m, 5~10m, 10~15m 및 15m이상으로 분류하여 선단지지력 대 주면마찰력의 분담률을 산정하였다.

본 연구의 사례현장에서 동재하시험의 실시 결과로부터 선단지지력과 주면마찰력 비를 88 : 12의 분담률로 분석되어, 선단지지력이 우세한 지지성분임을 도출할 수 있었다. 다만 주면마찰력은 실험당시에 순 침하량이 미소하여 충분히 발현되지 않았음을 고려할 때 과소평가된 것으로 분석된다.

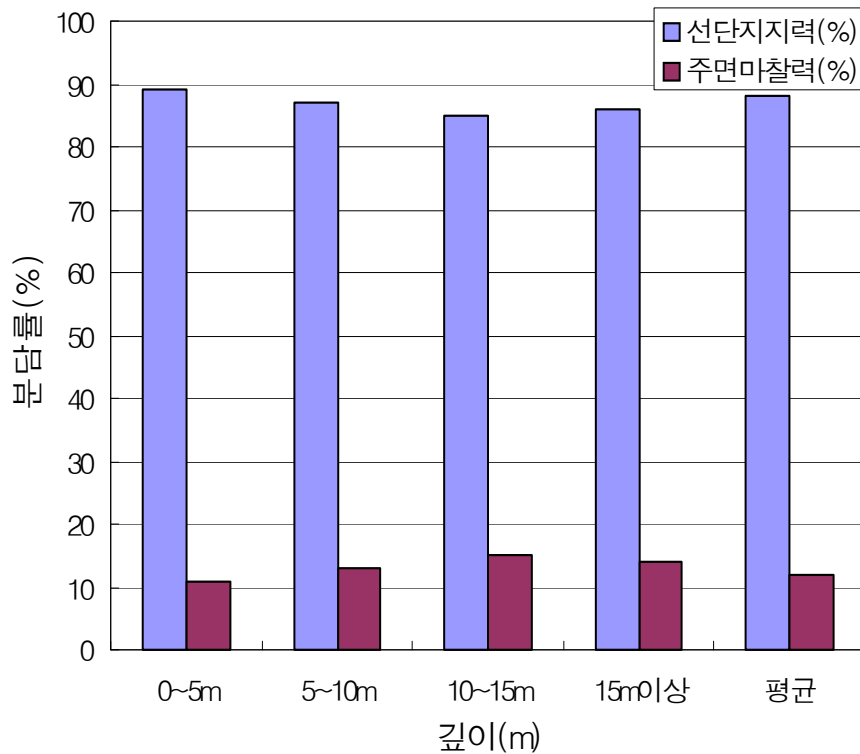


그림 4.11 분담률(%) 비교 분석

그림 4.11에서 보는 바와 같이 시공심도에 관계없이 선단지지력이 주면마찰력보다 크게 분담하는 것으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 Restrike 시험 시 낙하에너지에 의해 관입량이 충분히 발현되지 않았기 때문이라 분석된다. 또한 매입말뚝 기초공법을 사용함으로써 항타시보다 주면마찰력에 분담을 주는데 본 연구에서는 직항타시와 별로 차이가 없는 결과 값이 도출되었고, 국내의 많은 연구진들에 의해 연구되고 있는 50%의 분담률에 훨씬 못 미치는 결과를 얻었다.

4.4.5 정역학 및 동역학적 지지력 분석결과

지금까지의 연구 결과에 의하면 매입말뚝 기초공법에 대해서는 “지반조건과 시공조건을 고려하여 적절한 지지력 예측방법을 선정하고 정역학적 지지력 공식에 의한 지지력 산정과 함께 재하시험을 통하여 별도로 허용지지력을 검토함이 바람직한 것”으로 알려져 있다.

현행 국내에 적용되고 있는 SIP 기초공법 등을 포함한 매입말뚝의 허용지지력 산정식은 항타말뚝을 대상으로 제안된 표준관입시험의 N값을 이용하여 지지력을 산정하는 Meyerhof 방법(구조물기초설계기준, 1997)과 속파기 공법에 적용되는 도로교 표준시방서의 규정이 주로 준용되고 있다.(최용규, 2001)

본 연구에서는 SIP 기초공법을 적용한 사례현장의 지반조사 및 동재하시험 결과 등을 이용하여 CAPWAP 및 CASE 방법으로 산정한 허용지지력과 Meyerhof공식에 의한 정역학적 방법으로 해석한 허용지지력을 비교 분석하여 보았으며, 그 결과를 표 4.10에 나타내었다.

표 4.10 정역학 및 동역학적 허용지지력 산정결과 분석

구 분	동역학적 산정결과	정역학적 산정결과	설계하중	비고
소각동 No.1	77.6ton	71.2ton	60.7ton	O.K
소각동 No.2	97.9ton	94.3ton	70.0ton	O.K
주민편익시설 No.1	84.2ton	83.6ton	65.7ton	O.K
주민편익시설 No.2	91.2ton	89.7ton	70.0ton	O.K
굴뚝 No.1	95.2ton	85.3ton	76.0ton	O.K
관리동 No.1	79.7ton	73.5ton	60.8ton	O.K

Meyerhof 방법(구조물기초설계기준, 1997)에 따른 정역학적 방법으로 매입 말뚝의 허용지지력을 산정한 결과와 동재하시험에 따른 동역학적 방법에 따라 허용지지력을 산정하여 비교 분석해 본 결과 설계하중보다는 모두 높은 값으로 산정되어 개소별로 비교적 안정한 지지력값을 나타내고 있다.

동재하시험에 따른 허용지지력은 설계하중에 비해 23% 정도 높게 분석되었고, Meyerhof의 정역학적 허용지지력은 설계하중에 비해 19% 정도 높게 분석되었다. 따라서 동재하시험에 따른 허용지지력과 Meyerhof의 정역학적 허용지지력은 모두 설계하중에 비해 높게 나타나 상호 유사성을 보여 주고 있다.

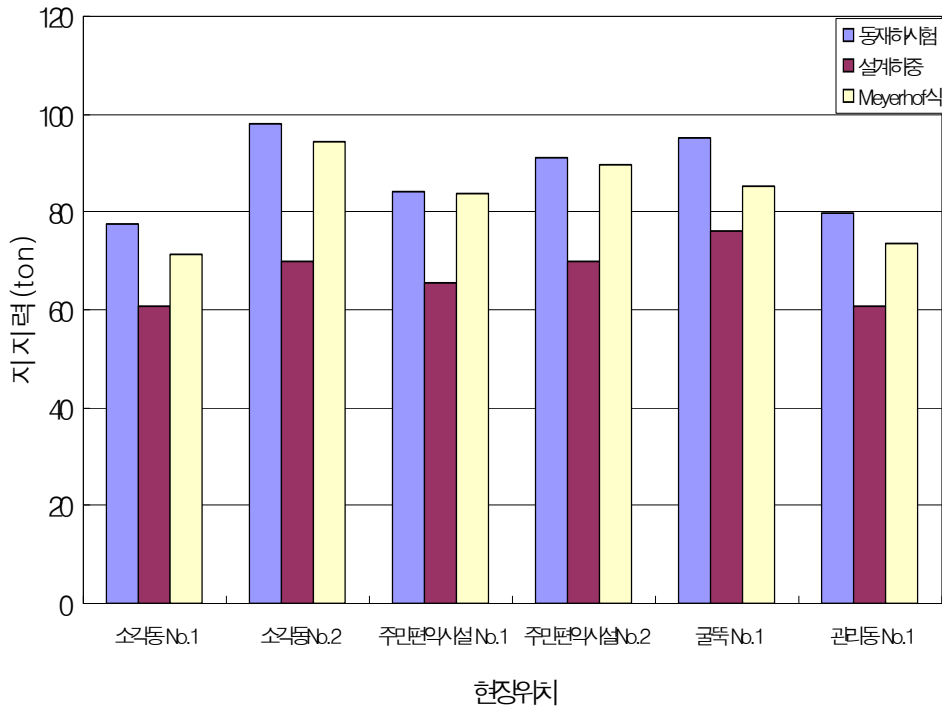


그림 4.12 허용지지력 비교 분석

제5장 결 론

본 연구에서는 매입말뚝 기초공법을 적용한 사례현장의 지반조사 및 동재하시험 결과 등을 이용하여 CASE 방법과 CAPWAP 방법으로 선단지지력과 주변마찰력 및 지지력 분담률 등을 분석하고, 정역학적 방법으로 해석한 허용지지력과 비교 분석하여 보았으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 매입말뚝 사례현장에 대한 단위 선단지지력을 동재하시험 결과로부터 산정한 결과 평균 1235t/m^2 정도로서 매입말뚝의 선단지지력을 규정한 구조물 기초설계기준치인 $500 \sim 750\text{t/m}^2$ 에 비해 높은 값으로 나타났다.

(2) 매입말뚝의 개소별 주변마찰력은 평균 22ton 으로 분석되어 국내 기준치 5t/m^2 을 대부분 초과하는 것으로 나타났으며, 기준치에 미치지 못하는 데이터는 엄격한 품질관리가 이루어져야 함을 알 수 있다.

(3) 동재하시험 결과로부터 산정된 평균 선단지지력과 주변마찰력의 비는 88 : 12의 분담률로서 50%의 분담률에 훨씬 못 미치는 결과를 나타내어 주변마찰력이 과소평가된 것으로 분석되었다.

(4) 동재하시험에 따른 허용지지력은 설계하중에 비해 23% 정도 높게 분석되었고, Meyerhof의 정역학적 허용지지력은 설계하중에 비해 19% 정도 높게 분석되어 두 방법이 유사한 결과를 나타내었다.

현재 매입말뚝의 선단지지력과 주변마찰력에 따른 허용지지력의 추정에 관한 연구가 미흡한 실정이므로, 향후 보다 안전하고 합리적인 매입말뚝 시공을 위해서는 선단지지력 N치 및 정재하시험과 동재하시험을 상호 비교하는 많은 데이터의 분석이 보완되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 건설교통부(2003), "구조물 기초설계기준", pp. 283~292
- 김명학(2001), "저소음 저진동 말뚝기초의 지지력 산정법", 한국지반공학회, 2001 현장기술자를 위한 말뚝기초 워크샵, pp. 1~28
- 김정수(2003), "화강 풍화토 지반에 매입된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위 논문, pp. 124~165
- 대우건설 "PDA를 이용한 동재하시험 결과 보고서
- 대한토목학회(2001), "도로교설계기준 해설(하부구조편)", pp. 217~238
- 대한주택공사(2001), "SIP공법의 품질개선방안과 지지력 산정식 제안에 관한 연구", 대한주택공사 주택연구소, pp. 20~78
- 대한주택공사(2002), "주택건설 전문시방서(건축)", pp. 64~85
- 박종배 · 임해식 · 박용부(2002), "SIP공법의 지지력 특성에 관한 연구", 한국지반공학회, '02년 기초기술 학술발표회 논문집, pp. 59~76
- 박종배 · 임해식 · 박용부(2004), "개선된 기준으로 시공된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구", 한국지반환경공학회 논문집, 제 5권 제 3호, pp. 5~15
- 박찬국, 박용부, 이명환, 조천환, 이장덕, 이원제(1995), "매입말뚝공법의 항타공해 저감효과," '95 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. I~31 ~ I~40.
- 이원제(2002), "광섬유 센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이 측정 및 지지력 특성연구", 고려대학교 대학원 박사학위 논문, pp. 66~67, 115~135
- 이인모외 3인(1995), "SIP말뚝의 지지력 특성", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 399~402
- 채수근(1997), "새로운 매입말뚝 공법의 지지력 특성", 한국지반공학회지, Vol. 13, No. 4, pp. 25~35
- 최도웅, 한병권, 서영화, 조성한(2002), "매입말뚝공법의 지지력 예측식 개선에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, pp. 382~389

최용규(2001), “개정된 도로교 설계기준의 말뚝기초설계 주요개념”, 2001
기초기술위원회 워크샵, pp. 182~195

한국도로공사(2000), “말뚝기초설계”, pp. 91~99

Bowles, J.E(1988), Foundation Analysis and Design.

Canadian Geotechnical Society(1992), Foundation Engineering
Manual(3rd.ed)

Meyerhof.G.G(1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile
Foundation", Journal of Geotechnique Div., Vol.109, No.6 June, pp.
797~806

NAVFAC(1982), "Soil Mechanics Design Manual", Department of the
Navy Facilities Engineering Command, pp .192~196

Roscoe. G. H.(7984), "The behavior of flight auger bored piles in
sand", piling and ground improvement, pp. 241~250

Tomlinson, M. J.(1987), "Pile Design and construction Practice, 3rd
edition", A Viewpoint Publication, pp. 378

Van Impe, W. F. "Developements in pile design", DFI-Conference,(Stresa
: 1991), pp. 1~31

논문요지

본 연구에서는 매입말뚝기초의 지지력 산정방법에 대한 이론적 고찰을 수행하고 실제 SIP 기초공법을 적용한 사례현장의 지반조사 및 동재하시험 결과 등을 이용하여 CASE 방법과 CAPWAP 방법으로 해석함과 동시에 Meyerhof공식에 의한 정역학적 방법으로 해석하여 허용지지력을 비교 분석하여 보았다. 또한 선단지지력과 주면마찰력 산정결과를 통해 지지력 분담률 등을 비교·분석하고, 매입말뚝기초의 허용지지력 결정방법에 대한 적합성을 검토해 보았으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저 매입말뚝 사례현장에 대한 단위 선단지지력을 동재하시험 결과로부터 산정한 결과 평균 $1,235\text{t/m}^2$ 정도로서 매입말뚝의 선단지지력을 규정한 구조물 기초설계 기준치인 $500\sim 750\text{t/m}^2$ 에 비해 높은 값으로 나타났다. 또한 매입말뚝의 개소별 주면마찰력은 평균 22ton 으로 분석되어 국내 기준치 5t/m^2 을 대부분 초과하는 것으로 나타났으며, 기준치에 미치지 못하는 데이터는 엄격한 품질관리가 이루어져야 함을 알 수 있었다.

다음으로 동재하시험 결과로부터 산정된 평균 선단지지력과 주면마찰력의 비는 88 : 12의 분담률로서 50%의 분담률에 훨씬 못 미치는 결과를 나타내어 주면마찰력이 과소평가된 것으로 분석되었고, 동재하시험에 따른 허용지지력은 설계하중에 비해 23% 정도 높게 분석되었으며, Meyerhof의 정역학적 허용지지력은 설계하중에 비해 19% 정도 높게 분석되어 두 방법이 유사한 결과를 나타내었다.

현재 매입말뚝의 선단지지력과 주면마찰력에 따른 허용지지력의 추정에 관한 연구가 미흡한 실정이므로, 향후 보다 안전하고 합리적인 매입말뚝 시공을 위해서는 선단지지력 N치 및 정재하시험과 동재하시험을 상호 비교하는 많은 데이터의 분석이 보완되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

최선을 다하여 모든 일에 열심히 하려는 마음가짐을 갖고 대학원에 입학했는데 벌써 2년여의 시간이 지나 논문을 쓰고 졸업하는 제 자신을 보니 감회가 새롭습니다. 처음 지반공학연구실 산행 때 정상에서 연구실 선배님 형수님 교수님 사모님께 인사 했던게 불과 몇 일전 일이듯 한데 소중한 시간이 흘러 결실을 맺게 되었습니다.

석사 과정동안 본 논문이 완성되기까지 학문적으로나 인간적으로 사랑과 열정을 아끼지 않고 배풀어 주신 안종필 교수님께 깊은 감사에 말씀을 드립니다. 또한 바쁘신 와중에도 불구하고 여러 가지로 미흡한 논문을 보다 좋은 논문이 될 수 있도록 조언과 격려를 아끼지 않으시고 심사하여 주신 심태섭 교수님, 오재화 교수님, 박길현 교수님, 김운중 교수님, 박정웅 교수님, 김성홍 교수님, 김대현 교수님께도 감사에 말씀을 드립니다. 항상 건강하시고 앞으로 하시는 모든 일 건승하시길 소망합니다.

대학원 생활이 힘들 때마다 친형님처럼 옆에서 힘이 되어주신 김일구 선배님, 주기적으로 전화 또는 문자 주시면서 격려를 아끼지 않으셨던 유덕찬 선배님, 항상 저를 볼 때마다 밝게 웃어주시며 방겨 주셨던 박용훈 선배님, 연구실에 웃음을 주고 관심과 애정을 갖고 힘들 때 마다 격려 해주신 김현태·서재우 선배님, 말씀은 없지만 묵묵히 옆에서 지켜봐 주신 김석호 선배님, 서울에 계시면서 내려오실 때마다 후배들 잘 챙겨주시고 깔끔하신 안기문 선배님, 수업하러 내려오셔서 논문 쓴다고 격려해주신 박상범 선배님, 비록 서울에 있어 자주는 못보지만 서울에 계신 나상훈·박경호·김대해 선배님께도 진심으로 감사에 말씀을 전합니다.

본 논문에 완성되기 까지 힘써주시고 때로는 질책해 주시며 격려과 용기를 아끼지 않았으며 많은 도움을 주셨던 김선학 선배님, 바쁘신 시간을

할애하여 논문의 완성도에 도움주신 박주원 선배님, 언제나 그렇듯 숨어서 도움주신 선배님께 고개 숙여 감사 말씀을 드립니다. 대학원 2년 동안 함께 생활했던 친구이자 나의 벗인 유준규 자격증 진심으로 합격을 축하하며 진심으로 고맙고 대학원 동기이자 후배인 김진택 차에 대한 희박한 지식과 넓은 대인관계를 앞으로도 계속 유지해서 훌륭한 사람 되길 바라고, 박세원 조용하지만 항상 묵묵히 자기 일을 했던 너 이기에 다른 사람에게는 돋보이는 사람은 아니지만 내가 생각하기에 너에 자리는 빛났던 것 같다. 2년을 돌아 보면서 너희들 때문에 더욱 잘 할 수 있었던 것 같아 너무 고맙다. 구조연구실에 있는 막내 장석인 후배님과 임현우 후배님 함께 수영으로 살도 빠려고 운동을 같이했었고, 지금도 노력 중에 있지만 언젠가 좋은 결실 거둘 것 이라고 생각하고 시간 있을 때 조금씩 열심히 노력해서 졸업 할 때 짬 좋은 결실 거두길 바란다. 조강균 후배님 오랜 시간동안 함께 시간 보내면서 좋았고 또한 친구의 사촌동생이어서 더욱 마음 쓰였던 후배 요즘 토익공부도 열심히 하던데 꼭 좋은 곳에 취업했으면 좋겠고 고마웠다.

크고 작은 일에 관심 갖고 생각해 준 허홍균·임재춘 선배님께도 감사하고, 여수에서 회사를 운영하는 체구는 작지만 일하는데 있어 누구보다 열성적이신 오희주 선배님께도 감사합니다. 항상 마음은 있지만 표현하지 않은 이정욱 선배님께도 감사합니다. 그리고 저에게는 은사님이자 선배님이신 양승현 선생님 답답할 때 마다 좋은 말씀 감사합니다. 수리실험을 하면서 많은 편의를 봐주셨으며 항상 정으로 대해 주신 김영균 선배님, 비록 1층 토질재료실험실에 있어 자주 못 보지만 항상 잘 챙겨주시는 최중 선배님, 구조연구실에 황선하 선배님 이성현 선배님께도 감사드립니다. 앞으로 세상에 나아가 여러분들이 주신 사랑 관심 더욱 베풀면서 멋지게 성장하는 모습 보여 드리겠습니다.

조선대학교 대학원 지반공학연구실 일원과 모든 선후배님들 모두 하시는 일 다 건승하시길 기원합니다.

내가 지금 여기에 있기까지 가장 많은 도움과 토목이란 학문을 배우기까지 많은 열정과 사랑을 주신 아버님에 친구이자 저에 은사님이신 이대우 교수님 항상 제가 먼저 연락드리고 자주 전화 드려야 하는데 이제 부터라도 자주 연락드리고 찾아뵙겠습니다. 또한 제가 군 생활 하면서 가장 힘들게 해 드렸던 김석준 중대장님 아버님처럼 항상 대해주시고 아버님처럼 신경 써 주셨는데 오랜 시간동안 연락도 찾아뵙지도 못한 것 같아 죄송합니다. 내년 따뜻한 봄에 꼭 찾아뵙도록 하겠습니다.

제가 있기까지 과거에서 지금까지 모든 역경을 함께 했던 나의 벗 이동언 너에 결혼식 소식을 접했을 때 정말 기뻐고 친구지만 너에게 끈기와 노력을 배울수 있어서 참 좋은 친구다. 이정훈 고등학교 선생님 항상 말과 언행을 조금만 바르게 하면 좋겠고 너에게 부지런함을 배웠다. 또한 내가 힘들때 너에 위로가 많은 약이 되었다. 장민우 지금 이 시간에도 교도관으로 근무 중 일지 모르지만 언제나 있는 듯 없는 듯 존재감 없지만 깊게 생각하고 넓게 보는 너에 행동을 배웠다. 김우람 욕심도 많고 의욕도 많은 너 오랫동안 연락이 안됐지만 예전에 못했던 연락 더욱 자주하여 앞으로 서로에 등불이 되어주자. 신동선 우리나라에 안전과 질서를 정립하려고 주야에 봉사하고 있는 우리 포들이 제일 먼저 결혼했지만 아직 친구들에게는 조금 미흡하지만 그래도 성심만큼은 착한 친구이다. 김민규 커피프린스를 꿈꾸는 친구 지금은 케냐본사에서 본인의 업무에 충실히 해내고 있으며 요즘 바빠서 얼굴은 못보고 있지만 너에 자리에서 잘하고 있을 거라 생각한다. 또한 후배이자 친구처럼 항상 옆에서 키만큼이나 든든하게 나를 지켜주었던 정수환 지금 나와 비슷한 상황에서 길고 긴 터널을 지나고 있지만 저 멀리에서 밝은 빛이 있는 것 분명한 명제이니, 지금 컴

کم하다고 주저하지 말고 한발 한발 서로 기대어 계속 갔으면 좋겠다. 어려서부터 같은 아파트에서 살고 항상 형들과 달갑게 웃는 얼굴을 잃지 않은 박상은 좋은 소식 듣게 되어 형이 정말 기쁘다. 너에 잠재력을 제대로 평가하지 못한 기업들이 원망스럽지만 열심히 하다보면 언젠가 너의 기량을 알아보는 기업이 있을 것이다.

미국에서 공부도 하고 지금은 인천에서 열심히 내일에 꿈을 위해 노력하고 있는 김선일 한살 차이지만 부지런하고 항상 긍정적인 모습이 너무 보기 좋고 꼭 너에 꿈을 이루기 바란다. 서울 갈 때 마다 시간 내어 이곳저곳 많은걸 보여주고 가르쳐준 유형선 고맙고, 부여에서 공무원 생활하고 있는 가늘고 긴 류정선 매번 연락 못했다고 구박하지만 그래도 나의 삼종사 중에 한명으로 너무 고맙고, 광주에서 이쁘다고 자부하는 김소연, 지금은 거제도에서 선생님하고 나오는 항상 아옹다옹 했지만 마음은 여린이주아, 다시 만난 지는 얼마 안됐지만 카리스마 있는 서동욱, 말수 없지만 믿음직한 김찬중, 회사일과 기타 등등 항상 바쁜 안송기, 백화점에서 열심히 일하고 남자 성격처럼 시원시원하며 곧 결혼하게 될 김보아 그리고 마지막으로 어려서 말을 잃어 버렸지만 마음은 우리 누구보다 따뜻한 김형수 너희들이 있어 내가 살아 있는 걸 느낀다.

언제 어디서나 항상 믿음과 사랑으로 지금까지 공부하는 자식을 위해 묵묵히 지켜봐 주신 아버님, 어머님께 진심으로 감사에 말씀 드립니다. 그리고 항상 마음속 깊이 성원해 주신 우리 가족 모두에게도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

오늘의 결실에 맺기 까지 많은 관심을 가져주신 모든 분들께 고개 숙여 다시금 감사에 말씀드립니다.

저작물 이용 허락서

학 과	토목공학과	학 번	20077065	과 정	석사
성 명	한글: 최 진 호 한문 : 崔 珍 鎬 영문: Choi Jin Ho				
주 소	광주광역시 동구 지산 2동 푸른맨션 c동 306호				
연락처	E-MAIL : 0072sky@naver.com				
논문제목	한글 : 매입말뚝기초의 지지력 결정에 관한 연구 영어 : A Study on the Decision of Bearing Capacity for Bored Pile Foundation				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2009년 2월

저작자: 최 진 호 (인)

조선대학교 총장 귀하