

지지지반의 종류별 SDA매입말뚝의 선단지지력 산정

Estimation of End Bearing Capacity of SDA Augered Piles on Various Bearing Stratum

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo

채 수 근² Chai, Soo-Geun

Abstract

The standard construction manual of the SDA (Separated Doughnut Auger) piling method was proposed so that the resisting capacity of the augered piles could work effectively. 405 dynamic pile load tests and 30 static pile load tests were performed for 265 test piles, which were installed by the SDA piling method in 33 sites in Korea. The results of the pile load tests showed that the end bearing capacity of the SDA augered piles depended on the property of various soil stratum and did not agree with ones estimated by the existing formula based on several standard design codes. On the basis of the pile load test results, four formulas were presented according to bearing stratum to estimate quantitatively the unit end bearing capacity of the SDA augered piles. The formulas for the unit end bearing capacity of piles on soils or weathered rocks were related to N-value given by SPT (Standard Penetration Test), while the unit end bearing capacity on bedrock was suggested to be more than 1500 tf/m². The presented formulas were compared with the existing formulas, which were presented by several standard design codes to design the augered piles. In order to use correctly the presented formulas, the quality of Standard Penetration Test should be controlled precisely. Also it is desirable to choose a pilot construction site, where both dynamic and static pile load tests are performed.

요 지

SDA매입말뚝의 지지능이 잘 발휘될 수 있는 표준시공법에 대한 매뉴얼을 정리하여 제시하였다. 또한 전국 33개 현장에서 SDA매입공법으로 시공한 265개 시험말뚝에 대하여 405회의 동재하시험과 30회의 정재하시험을 시행하였다. 말뚝재하시험 결과 SDA매입말뚝의 선단지지력은 지층의 조건에 따라 차이가 있었으며 여러 설계기준에 제시된 기존의 지지력 산정식으로 산정한 값과 차이가 있었다. 말뚝재하시험 결과에 근거하여 지지지반의 종류별로 SDA매입말뚝의 단위선단지지력을 정량적으로 계산할 수 있는 네 개의 식을 제안하였다. 토사층과 풍화암반에 지지되는 말뚝의 단위선단지지력은 표준관입시험의 N치와의 상관식으로 나타낼 수 있었으며, 기반암 위의 단위선단지지력은 1500 tf/m² 이상 되는 것으로 나타났다. 이들 제안식을 기존의 표준시공서에 제시되어 매입말뚝설계에 적용되는 기존의 식들과 비교 고찰하였다. 이들 제안식을 사용하기 위해서는 표준관입시험의 정밀도를 높여야하며, 현장에서 시험시공과 재하시험을 시행하는 것이 바람직하다.

Keywords : Augered pile, Cement milk, End bearing capacity of pile, EOID, Pile load test, Restrike, N-value

1 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Chung-Ang Univ.)

2 정회원, 중앙대학교 대학원 박사수료 (Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang Univ., csg@gsenc.co.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

매입말뚝공법은 천공장비를 사용하여 선단지지층까지 지반을 미리 굴착한 후 말뚝을 삽입하고 압입 또는 경타 방법으로 말뚝을 최종 설치하는 공법이다. 또한 말뚝을 삽입하기 전후에 시멘트밀크를 천공 내에 주입함으로써 이 시멘트밀크의 양생과 함께 말뚝의 지지력을 더욱 증대시키는 공법이다.

현재 국내에서는 매입말뚝공법으로 시공하고 있는 말뚝의 비율이 매우 높아졌다. 그럼에도 불구하고 매입말뚝의 시공법과 지지력산정방법은 아직 표준화되지 못하고 있는 실정이다. 다만 SIP공법(두성건설, 1987)에 대해 시공품질관리와 정량적인 지지력 추정방법에 대한 연구가 기관 및 대학에서 진행되어 있다(이원제, 2000; 대한주택공사, 2001; 김정수, 2003). 그리고 채수근(2002), 홍원표 등(2002, 2003, 2005) 등은 SDA매입말뚝(채수근, 1997, 2000)의 지지력 산정식을 국내 13개 현장의 자료를 분석하여 제안하였으며, 일부 설계회사에서 이용하고 있다. 현재 구조물기초설계기준해설(한국지반공학회, 2003), 도로교설계기준해설(대한토목학회, 2001) 및 건축기초구조설계기준(대한건축학회, 2005)에는 선굴착공법 또는 중굴공법으로 시공하는 말뚝의 지지력 산정식이 제안되어 있다.

그러나 이들 산정식은 모든 지반조건에 따른 지지력 산정식이 아니기 때문에 실무에 적용하는데 한계가 있다. 또한 제안된 일부 지지력 산정식은 현장에서의 경험치가 아닌, 외국 문헌과 외국 기준식에 준해서 제안된 것이기 때문에 현장에서 측정된 지지력 결과와 많은 차이를 보였다(채수근, 2002; 홍원표 등, 2002; Hong & Chai, 2003, 2005).

이에 따라 매입말뚝의 지지력은 타입말뚝에 비해 작은 지지력을 채택함에 따라 경제적 손실이 큰 실정이다. 본 연구대상 현장에서도 54~72%정도의 설계효율(설계지지력/말뚝재료의 허용하중)로 SDA매입말뚝시공법을 실무에 적용함에 따라 말뚝 재료허용하중 또는 내력(耐力)의 28~46%는 활용하지 못하고 있다. 이와 같은 설계효율은 일본이나 유럽국가, 러시아, 중국 및 동남아보다도 낮은 수준이다. 더욱 문제가 되는 것은 매입말뚝시공법에서 말뚝의 선단지지력 확보가 강조됨에 따라 모든 현장에서 말뚝을 경타시공하는 점이다. 그 결과 민원으로부터 자유로운 저소음·저진동공법이 되지 못할 뿐만 아니라 경타를 지나치게 함에 따라 큰 타격응력이

작용되어 말뚝이 파손되는 사례가 종종 발생되고 있다.

따라서 본 논문에서는 SDA매입말뚝의 표준시공법을 제안하고자 한다. 또한 본 논문에서는 전국의 33개 현장에서 SDA매입말뚝 시공법으로 설치된 265개의 시험말뚝에 동재하시험과 정재하시험을 시행하여 선단지지력을 측정하고자한다. 이 말뚝재하시험 결과에 의거하여 선단지지력 산정식을 지반종류별로 정리 제안하여 경제적이고 안전한 기초말뚝공사가 될 수 있도록 함이 본 연구의 궁극적인 목적이다.

2. SDA매입말뚝 시공법

2.1 공법 개요

SDA매입말뚝공법은 상호 역(逆) 회전하는 오거스크류와 케이싱스크류로 동시에 지반을 천공하고 말뚝을 삽입한 후 압입, 회전관입 또는 경타(輕打) 방식으로 시공하는 공법이다. 말뚝 직경보다 50mm정도 큰 케이싱스크류(외측)와 연속날개를 가진 오거스크류(내측)에 의해 2중으로 천공함에 따라 굴착효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 양호한 연직도(鉛直度)로 말뚝을 시공할 수 있다. 또한 케이싱스크류를 사용하기 때문에 지하수위가 높은 모래·자갈 퇴적층이나 연약한 점성토 지반에서도 공벽을 유지할 수 있으며 아울러 말뚝주변 지반의 교란을 방지할 수 있다.

굴착된 토사는 오거스크류와 압축공기로 배토(排土)함으로써 토사나 암편을 육안으로 관찰하여 각 지층 확인은 물론이고 말뚝 지지층을 용이하게 결정할 수 있다. 그리고 말뚝 삽입 전후에 말뚝의 선단부와 주변부에 1, 2차로 나누어 시멘트밀크를 충분히 주입함으로써 말뚝 선단과 주변 지반의 지중응력이 이완되는 것을 방지할 수 있기 때문에 높은 선단지지력과 마찰지지력의 확보가 용이하다.

2.2 시공순서 및 품질관리 내용

SDA매입말뚝공법의 표준시공방법 및 시공순서는 그림 1 및 그림 2와 같으며, 여덟 단계로 구분할 수 있다. 각 단계별 품질관리 내용도 함께 제시한다.

① 단계 : 시공준비

가) 장애물을 확인하고 제거한다.

나) 말뚝과 장비(항타기, 시멘트밀크 플랜트, 서비

스 크레인, 굴삭기, 용접기)를 준비한다. 말뚝은 제작상태, 길이, 손상 등을 검사한 후 유해한 변형이 발생되지 않도록 2단 이하로 적재한다. 장비는 성능을 확인하고, 전력량, 급수량 및 시멘트량을 확인한다(시공장비는 사진 1과 같다).

다) 말뚝 시공위치를 측량하여 표시하고, 장비의 안전운행을 위해 철판을 사용한다.

② 단계 : 장비설치 및 말뚝중심 맞추기

가) 말뚝 시공장비를 설치하고, 표 4에 제안된 시멘트밀크 배합비를 확인한다. 시멘트밀크는 반드시 자동계량장치를 이용하여 정확한 시멘트와 물의 양을 계량하고 배합한다.

나) 케이싱스크류의 중심과 말뚝 시공지점을 일치시킨다. 연직도는 1/100 이상 되도록 한다.

③ 단계 : 천공

가) 상부(내측) 오거스크류와 하부(외측) 케이싱스크류를 상호 역회전시키면서 천공한다.

나) 트랜쉬어나 내림 추를 이용하여 천공 연직도가 1/100 이상 되도록 한다.

④ 단계 : 오거스크류와 압축공기에 의한 배토 및 지층 확인

가) 천공시 발생하는 굴착토사나 암편은 오거스크류와 압축공기를 이용하여 배토한다.

나) 지지층과 천공깊이는 시추주상도, 배토되는 토사와 암편, 장비의 토크 크기 등으로부터 확인한다.

⑤ 단계 : 1차 시멘트밀크 주입후 오거스크류 인발 및 말뚝 삽입

가) 오거스크류를 통해 시멘트밀크를 주입하여 선단부에 남아있는 슬라임과 충분히 교반한 후에 말뚝을 삽입하여도 넘치지 않을 정도의 시멘트밀크량을 주입하면서 오거를 인발한다.

나) 말뚝을 케이싱스크류 내측에 삽입하여 설치한다. 용접이 필요한 경우 용접검사 및 연직도를 확인한다.

⑥ 단계 : 말뚝 회전관입 또는 압입

가) 보조장치를 이용하여 말뚝을 회전관입시키거나 압입하여 설치한다.

나) 말뚝을 경타방식으로 설치하는 경우 압입만 한다.

⑦ 단계 : 2차 시멘트밀크를 주입하면서 케이싱스크

류 인발

가) 말뚝두부를 오거스크류로 누른 상태에서 시멘트밀크를 주입하면서 케이싱스크류를 역회전시켜 천천히 인발한다. 말뚝의 연직도를 확인한다.

나) 선단부에 사용한 동일한 배합비의 시멘트밀크를 말뚝과 천공벽 공간이 충전되도록 주입하고 주입량을 확인한다. 또한 시멘트밀크는 강도시험을 한다.

⑧ 경타

가) 회전관입 또는 압입방식을 채택하지 않은 경우에는 말뚝을 드롭해머나 유압해머로 경타하여 천공 바닥에 지지되도록 시공한다.

나) 말뚝을 무리하게 경타하면 말뚝이 손상될 수 있으므로 최대 천공 바닥까지만 타입한다.

3. SDA매입말뚝의 지지력 산정식 검토

3.1 말뚝지지력 산정 일반식

일반적으로 말뚝의 축방향 극한지지력의 산정식은 식 (1)과 같이 표현된다(한국지반공학회, 2003). 이 식에서 단위선단지지력(q_p)과 각 지층의 단위주면마찰력(f_s)을 알게 되면 축방향 극한지지력을 구할 수 있다.

$$Q_u = Q_p + Q_s = q_p A_p + \sum f_s A_s \quad (1)$$

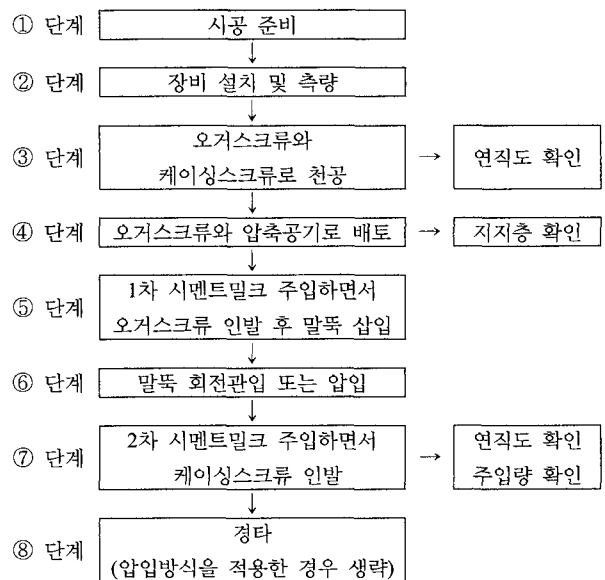
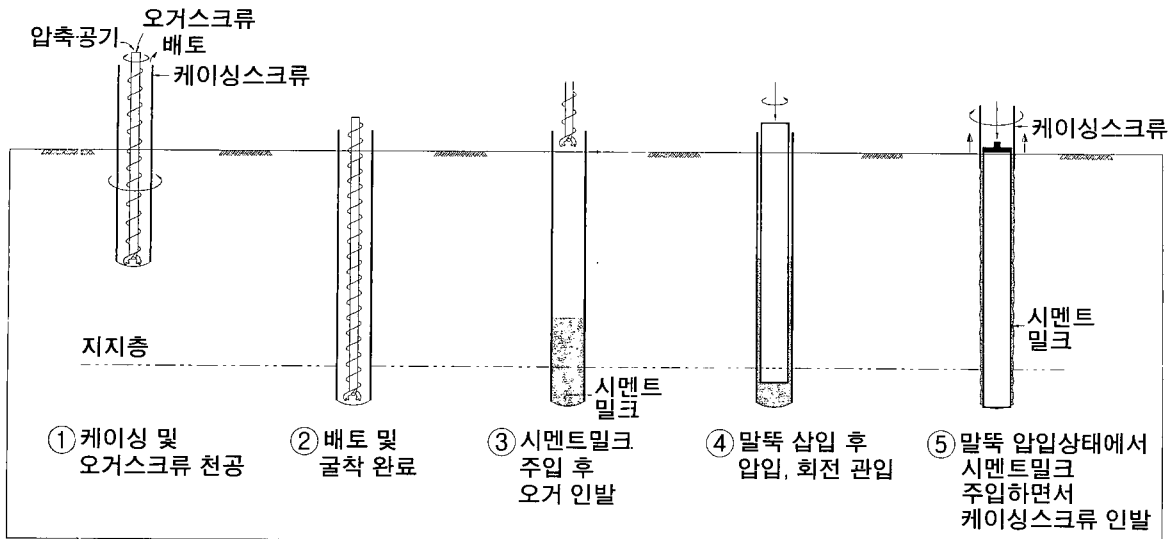
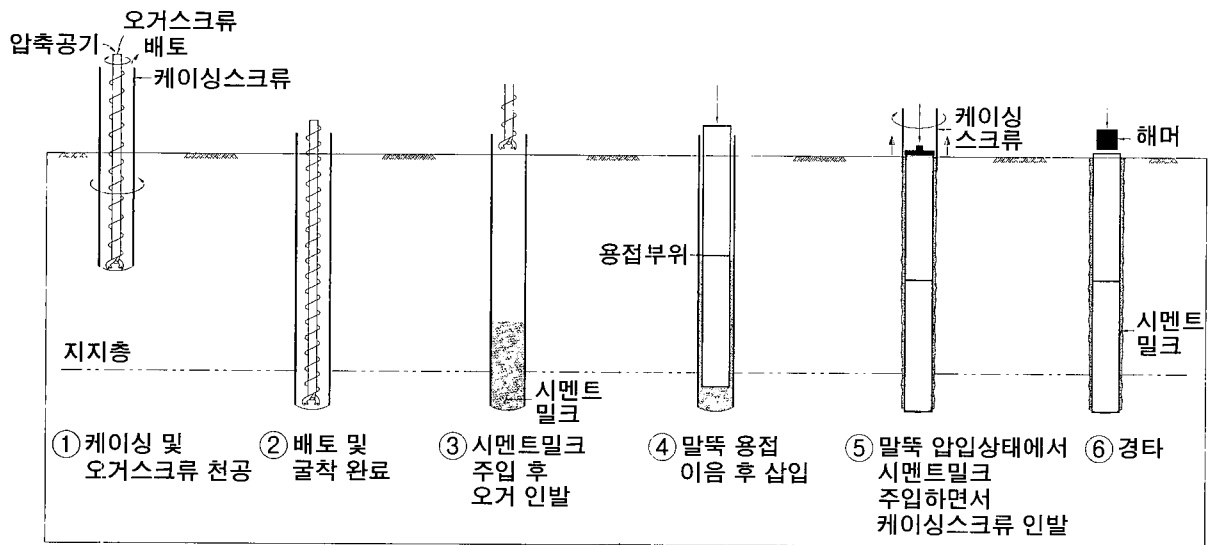


그림 1. SDA매입말뚝공법 표준시공 단계

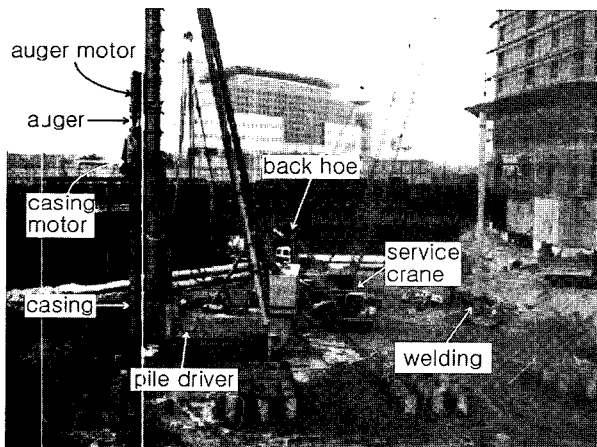


(a) 압입방식

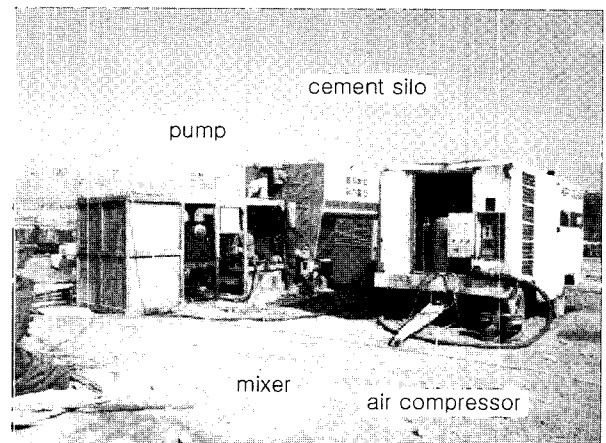


(b) 경타방식

그림 2. SDA매입말뚝공법 시공순서도



(a) 장비



(b) 시멘트밀크 플랜트

사진 1. SDA매입말뚝 시공장비

여기서, Q_u : 말뚝의 축방향 극한지지력(tf)
 Q_p : 극한선단지지력(= $q_p A_p$)
 Q_s : 극한마찰지지력(= $f_s A_s$)
 q_p : 단위선단지지력(mN' , tf/m^2)
 m : 선단지지력계수
 N' : 말뚝선단부의 N치
 A_p : 말뚝 선단면적(m^2)
 f_s : 단위주면마찰력(nN_s , tf/m^2)
 n : 마찰지지력계수
 N_s : 말뚝주면지반의 평균 N치
 A_s : 말뚝마찰지지면적(m^2)

3.2 매입말뚝의 지지력 산정식에 대한 고찰

3.2.1 개요

매입말뚝의 시공법에 대한 표준시방서와 설계지지력을 산정하는 기준식, 즉 매뉴얼이 없어 말뚝의 지지력을 올바르게 산정하지 못하고 있다. 매입말뚝의 지지력을 타입말뚝의 지지력보다 작게 채택하는 것도 이 때문이다. 즉 설계 및 시공기준이 미흡하여 설계지지력을 본체의 허용 내력(耐力)으로 나눈 값인 설계효율을 낮게 적용하기 때문이다.

선굴착공법은 일본과 한국에서만 주로 사용되는 시공법이며, 국내에서 사용하고 있는 대부분의 매입말뚝 시공법도 일본에서 도입된 경우가 많다. 그러나 천공방식, 시멘트밀크 배합비와 주입방식, 최종 말뚝설치방법은 일본과 차이가 있으므로 지지력 산정식도 차이가 있어야 할 것이다.

3.2.2 국내 설계기준

표 1에서 보는 바와 같이 구조물기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2003)에 의하면, 선굴착공법으로 시

공된 말뚝의 선단지지력은 지반의 종류와 관계없이 타입말뚝의 선단지지력을 1/3~1/2로 감소시켜 $q_p=10\sim 15N'(\leq 750tf/m^2)$ 인 식을 적용하도록 제안하고 있다. 여기서 N' 는 말뚝선단부의 N치이다. 한편 건축기초구조설계기준(대한건축학회, 2005)에서는 사질토에 시공되는 매입말뚝의 단위선단지지력을 $q_p=20N'(\leq 1,200tf/m^2)$ 인 식으로 산정하도록 제안하였으며, 점성토지반에서는 $q_p=6c_u(tf/m^2)$ 를 제안하였다. 여기서, c_u 는 점성토의 비배수전단강도이다. 그리고 이들 식에 대한 안전율로는 모두 3을 적용하고 있다.

그러나 이와 같은 매입말뚝의 선단지지력 산정식은 시멘트밀크 배합비와 지반종류에 따라 달라질 수 있는 지지력 특성이 고려되어 있지 않다. 따라서 시멘트밀크 배합비를 임의로 사용하고, 지반종류별로 동일한 시멘트밀크 배합비로 시공하는 국내 실정을 감안해볼 때 매입말뚝의 지지력은 현장마다 크게 달라질 수 있다.

3.2.3 일본 설계기준

일본에서 사용되는 매입말뚝의 지지력 산정식은 대부분 표준관입시험 결과인 N치를 이용하였으며 표 2에서 보는 바와 같이 공법에 따라 상이한 기준식을 적용하고 있다(COPITA, 2006). 일본에서 사용하는 매입말뚝시공법은 표 2에서 보는바와 같이, 선굴착최종타격공법, 선굴착최종경타공법, 선굴착근고공법 및 선굴착확대근고공법의 4가지가 있다.

이 중 첫 번째 매입말뚝시공법인 선굴착최종타격공법은 지지층까지 빗트나 오가로 천공한 후에 선단부에 캡을 부착한 말뚝을 삽입하고 말뚝내부에 해머를 삽입하여 말뚝의 선단캡을 타격함으로써 말뚝이 지지층에 설치되도록 하는 공법이다. 주로 말뚝주변에 시멘트밀크를 주입하지 않지만 표 2에 정리된 제안식은 시멘트밀크를 주입하는 KSD공법에 대한 식이다.

표 1. 선굴착공법 및 매입공법으로 시공된 말뚝의 선단지지력 산정식

극한선단지지력(tf) 산정식		안전율
구조물기초설계기준 해설 (선굴착공법)	건축기초구조설계기준 (매입공법)	
$Q_p = mN'A_p(tf)$ $mN' \leq 30 \times 50 = 1500tf/m^2$ (타입공법) $mN' \leq 10 \sim 15 \times 50 = 500 \sim 750tf/m^2$ $m \leq 30 \times 1/3 \sim 1/2 = 10 \sim 15$ (선굴착공법)	$Q_p = q_p A_p(tf)$ $q_p = 20N'(\leq 1200tf/m^2)$: 사질토 $q_p = 6c_u$: 점성토	3
Q_p : 극한선단지지력(= $q_p A_p$) N' : 말뚝선단부의 N치 A_p : 말뚝 선단면적(m^2)	q_p : 단위선단지지력(mN' , tf/m^2) c_u : 점성토의 비배수 전단강도(tf/m^2) m : 선단지지력계수	

다음으로 선굴착최종경타공법은 교반날개와 드럼을 붙인 롯데 선단부로부터 시멘트밀크를 분출하면서 천공하여 토사와 교반하고 천공벽체를 밀어 천공홀을 형성한 다음에 선단부에 칼날같은 강판을 붙인 말뚝을 회전압입시켜 설치하고 드롭해머로 경타시공하는 공법이며, 대표적인 공법으로는 니딩공법과 ALT공법이 있다.

이와 달리 선굴착근고공법은 교반날개와 드럼을 붙인 롯데로 천공후에 롯데를 인발하기전과 인발하면서 시멘트밀크를 주입하고나서 말뚝을 회전압입 방식으로 천공심도까지 설치하는 방법으로 BFK공법과 FP-BESTEX공법 등이 있다. 이와 같은 선굴착근고공법의 대부분 공법은 말뚝의 마찰지지력을 향상시키기 위해 마디를 갖는 말뚝을 주로 사용하는 것이 특징이다.

선굴착확대근고공법은 일본에서 가장 많이 적용하고 있는 공법이다. 이 공법은 교반날개를 붙인 롯데 선단부로부터 시멘트밀크를 분출하면서 롯데를 정회전과 역회전 또는 상하방향으로도 반복하여 지반을 소일시멘트화하면서 천공한 후에 말뚝의 지지층에는 부배합의 시멘트밀크를 주입하여 교반한 후에 말뚝을 회전압입 방식으로 설치하는 공법이다. 이 공법에서는 말뚝선단부를 천공홀 바닥으로부터 말뚝직경의 2배 이상 또는 1.0m 이상을 띄워 설치하되, 말뚝 선단부만 천공을 확장하는 방법과 천공직경을 전체적으로 크게 하는 공법이 있다. RODEX공법, BRB공법 및 ATRAS공법 등이 이 공법의 대표적 공법이다.

이들 공법은 다년간 시행한 시험시공과 말뚝재하시험 결과로 지지력 특성이 규명되었으며 시공관리체계

가 잘 확립되어 있다. 또한 일본 건설성으로부터 품질에 대한 철저한 심사를 받아 인정된 공법이므로 현장 적용시 별도의 시험시공과 재하시험을 시행하지 않고 직접 적용하고 있다. 표 2에 제시된 안전율 3은 상시하중 작용시의 안전율이다.

그러나 이들 공법은 현재 국내에서 적용하고 있는 대표적인 매입공법과 시멘트밀크 배합비와 주입방식에서 크게 다르다. 국내에서는 말뚝 주변과 선단부에 동일한 배합비의 시멘트밀크 배합비를 사용하고 있지만, 일본에서는 대부분 선단부에는 부배합(W/C=60~70%), 주변브에는 선단부와 동일한 배합비 또는 빈배합의 시멘트밀크를 주입하고 있다(일본 콘크리트말뚝 건설기술협회, 1994). 천공방식도 국내에서는 배토방식을 채택하고 있지만 일본의 공법은 비배토방식, 즉 교반날개를 사용하여 시멘트밀크와 토사를 교반시킨다. 최종설치방법에서도 국내에서는 주로 경타방식을 채택하는 반면에 일본에서는 대부분 회전압입방식으로 말뚝을 설치하고 말뚝의 선단부도 천공심도까지 설치하지 않고 일정 길이만큼 띄워서 설치하고 있다. 따라서 일본에서 사용하는 지지력 산정식을 직접 사용해서는 안된다.

4. SDA매입말뚝의 시험시공 및 말뚝재하시험

4.1 시험시공 개요

4.1.1 현장

SDA매입말뚝의 지지력 특성을 분석하기 위해 표 3

표 2. 매입말뚝의 선단지지력 산정식(COPITA, 2006)

시공법	선단지지력 산정식	공법명	안전율
선굴착 최종타격공법	$Q_p = \alpha N' A_p (kN)$ $\alpha = 300$	KSD공법	3
선굴착 최종경타공법	$Q_p = \alpha N' A_p (kN)$ $\alpha = 250 \dots\dots\dots (l \le 100D)$ $\alpha = 250 - 50(\frac{l/D - 100}{10}) \dots\dots (100D < l \le 110D)$	니딩공법 ALT공법	3
선굴착 근고(根固)공법	$Q_p = \alpha N' A_p (kN)$ $\alpha = 175$ (모래지반, 자갈지반) $\alpha = 166$ (점성토지반)	BFK공법 FP-BESTEX공법 (주로 마디가 있는 말뚝을 사용함)	3
선굴착 확대근고공법	$Q_p = \alpha N' A_p (kN)$ $\alpha = 250 \dots\dots\dots (l < 90D)$ $\alpha = 250 - 2.5(l/D - 90) \dots\dots (90D < l \le 110D)$	RODEX공법, BRB공법 ST-RODEX공법 ATRAS공법 BESTEX공법	3

Q_p : 극한선단지지력(kN)

N' : 말뚝선단부 N치

l : 말뚝길이(m)

α : 선단지지력계수

A_p : 말뚝선단면적(m²)

D : 말뚝직경(m)

표 3. 현장별 말뚝규격, 시공조건 및 지반조건

Site No.	말뚝 선단 지리지반*	말뚝주면 지반**	말뚝 규격 및 시공조건				현장 위치
			규격	W/C***	관입깊이(m)	FIM****	
1	ML(2), CL(2)	C, M	PHC500	59	27.8~29.2	압입	인천 운서(1)
2	CL(2)	C, M	PHC500	59	27.3~28.5	압입	인천 운서(2)
3	SG(5), WR(1)	M, S, SG, WR	PHC400	68	10.1~13.4	경타	충주 칠금
4	SG(4)	SG	PHC400	83	13.8~14.0	경타	서울 목동
5	GP(4), WR(1)	C, G, SM, WR	PHC500	59	17.8~21.0	경타	부산 업궁
6	RS(1), WR(1)	RS, WR	PHC500	83	6.0~14.8	경타	광주 품암(1)
7	RS(1), SR(1)	G	PHC500	59	25.0~25.7	경타	서울 양평
8	RS(2), WR(1)	RS	PHC500	68	8.8~13.7	경타	광주 품암(2)
9	RS(3), WR(2)	RS	PHC400	68	18.1~19.3	경타	통영 무전
10	RS(4)	C, G, RS	PHC500	68	23.8~27.2	경타	여수 국동
11	RS(3)	SM, RS	PHC400	68	10.9~14.3	경타	양주 구암
12	RS(6), WR(1), SR(1)	SM, RS	PHC400	68	4.6~14.0	경타	과천 주암
13	RS(1), WR(1)	C, SM, RS	PHC400	59	14.3~17.9	경타	강릉 입암
14	RS(18)	ML, C, RS	PHC500	59	32.4~33.9	경타	인천 항동
15	RS(1), WR(1)	S, C, SM	PHC400	68	12.1~13.2	경타	여수 화치
16	RS(2), WR(5)	M, S, G, RS, WR	PHC500	83	10.8~13.8	경타	광명 일직
17	WR(3)	M, RS	PHC400	68	11.0~12.6	경타	의왕 삼동
18	WR(1), RS(3)	C, RS	PHC400	68	11.7~12.1	경타	천안 성정
19	WR(4), RS(7)	SM, RS	PHC400	68	8.5~14.0	경타	서산 등문
20	WR(2)	C, SM, G	PHC400	68	15.0~15.8	경타	서울 가산
21	WR(2), SR(1)	G	PHC500	68	21.5~22.0	경타	서울 잠실
22	WR(1), SR(1)	RS, WR	PHC400	68	7.0~13.8	경타	원주 단계
23	WR(5)	S, RS	PHC400	68	9.0~10.3	경타	인천 논현
24	WR(7)	S, RS, WR	PHC400	68	8.2~12.3	경타	서울 중계
25	WR(14)	M, S, G, RS, WR	PHC500	59	4.7~11.2	경타	오산 부산동
26	SR(3), WR(2)	C, S, G, SG, RS, WR	PHC400	68	9.6~11.1	경타	서울 금천
27	SR(8), WR(7)	SG, RS, WR	PHC500	83	4.9~9.6	경타	안양 박달
28	SR(9), WR(3), SG(4)	C, M, SG, WR	PHC450	68	13.3~23.9	경타	부산 화명
29	WR(3)	G, M	PHC450	68	7.7~13.4	경타	광주 첨단
30	SR(2), RS(1)	C, SM, G	PHC500	59	22.1~25.1	경타	안산 성포
31	SR(84)	C, SM, S	PHC500	59	22.6~23.7	경타	목포 옥암
32	SR(4), RS(1), WR(2)	S, G, C, RS, WR	PHC500	59	12.9~16.6	경타	인천 운서(3)
33	SR(2)	ML, C, RS	PHC500	59	16.0~29.1	경타	부산 우동

* CL, ML : 점성토지반, SG : 사질토지반, RS : 풍화토지반, WR : 풍화암반, SR : 연암반

말뚝 지리지반중 () 내 수치는 시험말뚝 본수임

** C : 점토층, M : 실트층, S : 모래층, G : 자갈층, SG : 사질토층, RS : 풍화토층, WR : 풍화암반

*** W/C : 시멘트말뚝의 배합비(%) **** FIM : 말뚝 최종설치방법(Final Installation Method)

에서와 같이 전국 33개 현장에서 실시한 시험시공 자료를 이용하였다. 지역별로 구분해 보면 서울지역 6개 현장, 경기·인천지역 12개 현장, 충청도지역 3개 현장, 전라도지역 6개 현장, 부산과 경상도지역 4개 현장, 강원도지역 2개 현장 등이다.

4.1.2 말뚝규격 및 시공조건

시험말뚝으로 고강도 콘크리트말뚝(PHC, Pretensioned

spun High strength Concrete, KS F 4306)을 사용하였다. 직경 400mm PHC말뚝은 15개 현장에서, 직경 450mm PHC말뚝은 2개 현장에서, 직경 500mm PHC말뚝은 16개 현장에서 각각 사용되었다. 말뚝길이는 4.6~33.9m 정도이다. 매입말뚝 시공법에는 강관말뚝보다 재료가 상대적으로 저렴한 고강도 콘크리트말뚝이 주로 사용되고 있으며, 앞으로도 이와 같은 추세는 지속될 것으로 예상된다. 사용되는 말뚝의 직경도 구조물과 건축물의

규모가 점점 증가함에 따라 커지고 있다.

본 연구에서는 SDA매입말뚝의 선단지지력 특성을 파악하기 위해 총 265본의 말뚝에 대하여 시험시공하고 나서 모든 말뚝에 대해 동재하시험을 실시하였다. 모든 현장의 말뚝은 제2장에서 제시한 SDA매입말뚝의 표준 시공법에 따라 시험시공하였으며, 최종설치방식에 따른 말뚝의 지지력 특성을 분석하기 위해 경타방식과 압입 방식을 적용하였다.

4.1.3 지반조건

국내의 대부분의 현장에서는 말뚝선단을 풍화암반 또는 연암반에 시공하고 있다. 그러나 본 연구에서는 지반 조건으로 국내의 대표적인 지반인 점성토지반(CL, ML), 사질토지반(SG, S, G), 풍화토지반(RS), 풍화암반(WR) 및 연암반(SR) 등 다섯 종류로 구분하고 이들 지반에 선단지지되어 시공된 SDA매입말뚝의 자료를 수집·분석하였다. 점성토지반(C, M)과 사질토지반(SG, S, G)은 통일분류법에 근거하여 구분하였으며, 풍화토, 풍화암반 및 연암반은 서울시 표준지반분류기준(서울특별시, 1996)에 따라 구분하였다.

4.1.4 시멘트밀크 배합비

일본으로부터 SIP공법이 1987년 도입되면서 물시멘트비(W/C) 83%의 시멘트밀크가 주로 사용되었으며 대한주택공사(1997)에서는 이 배합비를 표준배합비로 시방서에 규정하였다. 그러나 이와 같은 빈배합비를 갖는 시멘트밀크는 너무 묽어서 투수성이 큰 사질토지반에서는 말뚝주변에 여러 번 주입하더라도 주변지반으로 빠져나가 충전이 되지 않으며, 지하수가 많은 경우에는 희석되어 더욱 빈배합이 되어 지지력이 작아지게 된다. 이에 따라 투수성이 큰 지반이나 지하수가 많은 현장에서는 부배합으로 변경하여 사용하고 있다(채수근, 2000b, 2002, 2004; Eong & Chai 2003, 2005).

본 연구자는 83%의 물시멘트비인 시멘트밀크보다 부배합의 배합비를 사용하고 있다. 사용된 배합비중 현장 기술자나 기능공이 기억하기 쉬운 배합비인 68%의 물시멘트비를 제안하여 많은 현장에 유용하게 적용하였다(표 3에 제시된 현장 참조). 이와 같은 배합비는 풍화토나 풍화암반에서는 매우 효과적인 배합비로 사용되고 있다.

그러나 지하수가 많거나 투수성이 큰 사질토지반과 연약한 점성토지반에서는 59%인 배합비의 시멘트밀크

표 4. 시멘트밀크 표준 배합비(m³)

배합비 (W/C, %)	시멘트 (kg)	물 (kg)	비 고
59	1100	650	말뚝 주변 및 선단부에 동일한 배합비를 적용함
68	1000	680	
83	880	730	

를 적용하는 것이 설계효율을 높일 수 있다는 것이 많은 현장에서 확인되었다.

한편 국내 현장에선 말뚝의 선단부와 주변부에 동일한 시멘트밀크 배합비를 적용하고 있다. 왜냐하면 서로 다른 배합비를 사용하면 품질관리가 용이하지 않을 뿐만 아니라 말뚝시공속도가 현저히 떨어질 수 있기 때문이다. 일본에서도 과거와 달리 최근에는 말뚝의 선단부와 주변부에 동일한 배합비를 사용하는 추세이다(COPITA, 1994). 따라서 본 연구에서도 선단부와 주변부에 동일한 배합비의 시멘트밀크를 주입하여 시공한 말뚝의 자료를 이용하여 선단지지력 특성을 분석한다. 현장별로 사용한 시멘트밀크의 배합비는 표 4와 같다.

4.2 말뚝재하시험결과

4.2.1 개요

33개 현장에서 시험시공된 265본의 말뚝을 대상으로 총 405회 동재하시험(EOID 262회, Restrike 143회)과 30회의 정재하시험을 실시하였다. 동재하시험에는 초기동재하시험(EOID : End Of Initial Driving)과 재항타동재하시험(Restrike)이 있다. 초기동재하시험은 타격에너지, 항타응력, 말뚝의 건전도 및 선단지지력을 측정할 목적으로 시행한다. 본 연구에서는 초기동재하시험에서 측정된 선단지지력으로 단위선단지지력을 산정하였다. 또한 말뚝 시공 후 일정시간이 경과된 상태에서 시간경과에 따른 지지력의 변화와 허용지지력을 구하기 위해 재항타동재하시험을 시행하며, 본 연구에서는 재항타동재하시험에서 마찰지지력을 측정하여 단위주면마찰력을 산정하였다. 이와 같은 말뚝의 시험시공방법 및 시험방법에 대한 상세한 내용은 표 5와 같다. 시험시공한 말뚝에 대해 PDA(Pile Driving Analyzer)에 의한 초기동재하시험(EOID)을 ASTM D 4945 규정 및 KS F 2591에 따라 실시하고 Case 분석과 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program) 분석을 실시하여 말뚝의 지지력과 건전도 등을 확인하였다. 동재하시험은 말뚝 시공직후 주

면마찰저항성분이 배제된 조건에서 말뚝의 선단지지력 위주로 측정되는 초기동재하시험(EOID) 시험결과와 시공 후 일정시간이 경과되어 주입된 시멘트밀크가 양생된 조건에서 마찰지지력이 측정되는 재항타동재하시험(Restrike)으로 구분하여 시행하였다.

SDA매입말뚝의 선단지지력 특성을 분석하기 위해서 점성토지반, 사질토지반, 풍화토지반, 풍화암반 및 연암반 등 다섯 종류의 지반에 시공된 말뚝의 EOID 시험결과와 Restrike 시험결과를 이용하였다. 아울러 현장별로 1~3본의 말뚝에 대해 연직 정재하시험을 실시하여 지

지력을 확인하고 동재하시험과의 상관성을 비교 검토하여 동재하시험 결과의 신뢰도를 검증하였다.

4.2.2 동재하시험결과

265본의 시험말뚝에 대해 시행한 동재하시험(EOID, Restrike) 자료를 이용하여 SDA 매입말뚝의 선단지지력 특성을 분석하였다. 지지력은 단위지지력으로 표현하여 말뚝종류나 직경 등의 영향에 따른 절대값의 차이가 배제되도록 하였다. 시험말뚝에 대한 초기동재하시험과 재항타동재하시험 결과는 CAPWAP방법으로 해석하였

표 5. 동재하시험결과

Site No.	설계 지지력 (tf/본)	동재하시험 말뚝(본수)		시험 조건(EOID*)		시험 조건(Restrike**)		
		EOID	Restrike	단위선단 지지력(tf/m ²)	선단지지력비율 (%)	경과시간 (days)	단위선단 지지력(tf/m ²)	선단지지력 비율(%)
1	120	4	5	450~477	71~94	7~25	300~550	19~23
2	120	2	4	305~463	81~85	14~25	303~542	19~38
3	60	6	3	994~1683	90~97	6~7	939~1268	56~76
4	70	2	2	974~991	83	12	760~765	60
5	90	5	1	705~1077	83~99	4	1523	70
6	120	2	2	1171~1547	80~94	5	571~1137	27~68
7	120	2	2	583~1176	87~98	16	688~956	43~60
8	80	3	2	423~703	82~98	7~12	711~1192	65~67
9	70	5	3	710~1103	88~99	13~64	674~816	43~55
10	110	4	3	489~1140	87~100	7~30	472~917	19~54
11	70	3	3	949~1208	78~97	15~16	583~859	9~56
12	60	8	2	856~1568	88~93	13	876	14~54
13	70	2	-	1179~1642	86~94	-	-	-
14	90	18	13	566~758	77~98	6~22	371~498	21~74
15	60	3	-	1806~1847	88~97	-	-	-
16	105	7	6	560~1532	91~100	6~75	519~855	38~53
17	70	3	1	1499~1648	82~95	5	1556	-
18	70	4	5	488~744	84~95	12~35	665~1182	43~60
19	70	11	10	885~1560	74~89	9~12	663~1412	39~64
20	60	2	-	533~1802	87~95	-	-	-
21	110	3	3	644~813	61~75	7~10	686~907	37~54
22	70	2	1	1598~1129	79~81	7	750	49
23	110	5	-	1159~1612	88~100	-	-	-
24	70	7	1	1145~1611	84~98	4	439	27
25	110	14	12	803~1472	79~94	11~14	803~1093	41~75
26	60	5	4	1842	87~92	5~8	580~1190	45~64
27	105	15	18	1205~1508	97~99	2~14	666~1545	29~78
28	85	16	14	1081~2043	79~96	5~23	774~1629	35~73
29	70	3	2	561~947	89~91	10	472~769	45~62
30	110	3	3	721~855	93~98	4~19	764~900	45~70
31	150	84	16	1617~2427	84~100	6~15	1661~2182	72~87
32	110	7	1	1076~1468	86~94	28	1184	75
33	120	2	1	1317~1520	77~94	5	962	54

* EOID(End Of Initial Driving) : 초기동재하시험을 의미하며, 본 연구에서는 타격에너지, 항타응력, 말뚝의 건전도 및 선단지지력을 측정할 목적으로 시행한 시험임.

** Restrike : 재항타동재하시험을 의미하며, 말뚝 시공후 일정시간이 경과된 상태에서 시행하는 시험으로써 시간경과에 따른 지지력의 변화와 허용지 지력을 구하기 위한 시험임.

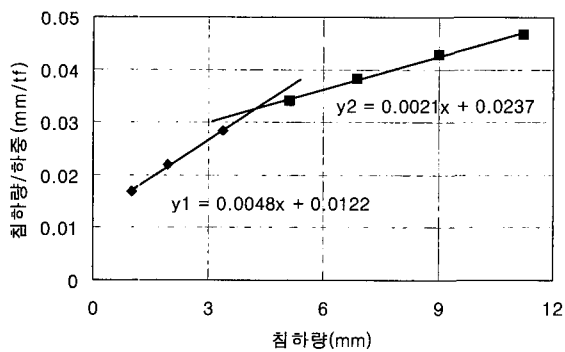
다. 시험말뚝의 설계지지력, 단위선단지지력 및 선단지지력 비율은 표 5와 같다.

4.2.3 정재하시험결과

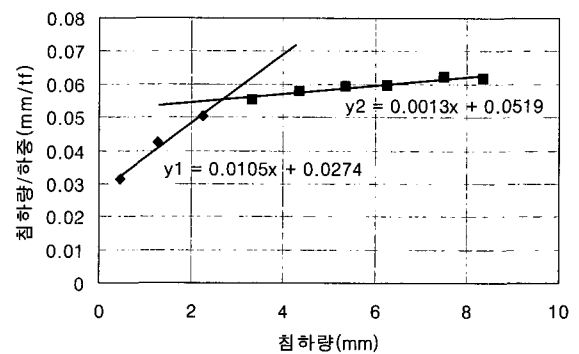
본 연구에서는 정재하시험 결과자료를 이용하여 선단지지력과 주변마찰력을 Stability Plot 방법으로 구분하여 해석하였다. Stability Plot 방법은 Chin & Vail(1973)이 제안한 것으로서 정재하시험에서 극한하중까지 재하하지 않아도 극한하중을 판정할 수 있으며 선단지지력과 주변마찰력을 분리하여 해석할 수 있다.

이 방법은 그림 3과 같이 Y축을 침하량/하중으로 하

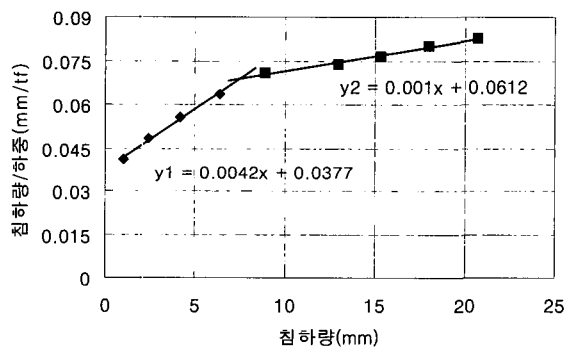
고, X축을 침하량으로 하여 재하시험 자료를 정리하면 하중-침하량 곡선이 2개의 직선으로 나누어진다. 두 직선 중에서 첫 번째 직선의 기울기를 역으로 계산한 값이 극한마찰지지력이다(식 (2) 참조). 전체 극한지지력은 식 (3)으로 계산할 수 있다. 따라서 극한지지력에서 극한마찰지지력을 빼면 극한선단지지력을 구할 수 있다. 4개 현장에 대한 하중-침하량 곡선은 그림 3과 같으며, 식 (2) 및 식 (3)에 의거하여 각 현장별로 구한 시험말뚝의 극한마찰지지력(Q_s)과 단위주면마찰력(f_s), 극한선단지지력(Q_p)과 단위선단지지력(q_p) 및 극한지지력(Q_u)을 표 6에 제시하였다.



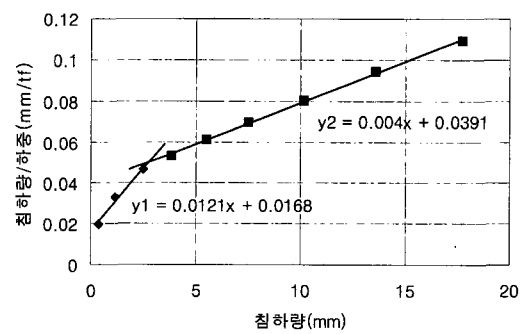
(a) 점성토지반(Site 2)



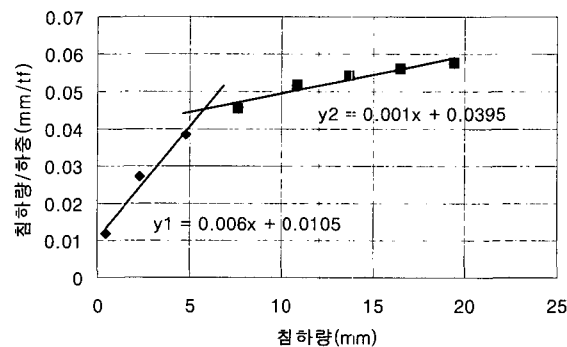
(b) 사질토지반(Site 3)



(c) 풍화토지반(Site 14)



(d) 풍화암반(Site 24)



(e) 연암반(Site 31)

그림 3. Stability Plot 방법에 의한 하중-침하량 곡선

$$Q_s = \frac{1}{m_1} \quad (2)$$

여기서, m_1 : 첫 번째 직선의 기울기

$$\frac{\Delta}{Q_u} = m_2 \cdot \Delta + c_2 \quad (3)$$

여기서, Q_u : 극한지지력

m_2 : 두 번째 직선의 기울기

Δ : 말뚝직경의 10% 침하량(0.1D, mm)

c_2 : 두 번째 직선의 $\frac{\Delta}{Q_u}$ 축과의 절편

4.2.4 동재하시험과 정재하시험의 비교분석

동재하시험 결과로부터 분석된 매입말뚝의 지지력 특성에 대한 신뢰도를 검증하기 위해서는 동일한 말뚝에 대해 동재하시험과 정재하시험을 함께 시행하여 두 시험의 결과를 서로 비교하여 볼 필요가 있다. 따라서 대부분의 시험현장에서 동재하시험을 시행한 동일말뚝에서 정재하시험을 시행하였으며 부득이한 경우에만 인접 말뚝에서 정재하시험을 시행하였다. 동재하시험과 정재하시험을 비교하기 위해서는 하중-침하량의 거동 또는 극한지지력을 비교하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 하중-침하량 거동을 지반종류별로 5개 현장의 자료를 이용하여 분석하였다. 그림 4에서 보는

표 6. 정재하시험결과

Site No.	말뚝 번호	말뚝 직경 (mm)	말뚝 길이 (m)	W/C (%)	양생 기간 (일)	극한마찰지지력		극한선단지지력		극한 지지력 (Q_u , tf)
						(Q_s , tf)	(f_s , tf/m ²)	(Q_p , tf)	(q_p , tf/m ²)	
1	P1	500	29.0	59	16	250.0	5.68	67.86	345.63	317.86
2	P1	500	28.0	59	27	208.83	4.74	180.17	917.58	388.50
3	P1	400	10.1	68	19	95.24	7.50	289.75	2305.74	384.99
	P2	400	13.4	68	20	111.11	6.60	124.04	987.12	235.16
6	P1	500	11.5	83	11	107.53	5.95	520.61	2651.46	628.14
	P2	500	21.3	83	21	83.88	9.31	232.72	1185.24	316.06
7	P1	500	28.0	59	58	217.39	9.54	184.86	941.49	402.25
8	P1	500	10.5	68	17	121.95	7.39	56.88	289.67	178.83
	P2	500	11.0	68	22	125.00	7.23	366.16	1864.83	491.16
9	P1	400	19.0	68	42	135.14	5.66	58.38	464.59	193.52
10	P1	500	28.0	68	27	147.06	3.34	283.98	1446.28	431.03
12	P1	400	5.0	68	12	76.92	8.74	143.34	1140.67	220.26
14	P1	500	32.0	59	13	238.10	4.74	221.89	1130.06	459.98
	P2	500	33.3	59	19	88.50	1.69	162.38	827.01	250.88
15	P1	400	12.0	68	19	82.64	5.48	178.11	1417.37	260.76
18	P1	400	13.3	68	26	112.36	7.27	63.46	505.04	175.82
19	P1	400	11.5	68	27	175.44	12.14	144.05	1146.32	319.49
	P2	400	11.5	68	30	78.74	5.45	93.38	743.07	172.12
23	P1	500	7.5	68	25	142.86	12.13	120.44	613.39	263.30
	P2	500	7.5	68	29	105.26	14.57	184.26	938.41	289.52
24	P1	400	12.1	68	14	82.64	5.44	118.26	941.08	200.90
25	P1	500	7.0	59	24	113.64	9.65	236.50	1204.50	350.14
	P2	500	7.9	59	30	99.01	7.98	263.57	1342.36	362.58
	P3	500	13.0	59	13	135.14	6.62	311.69	1587.44	446.83
26	P1	400	9.7	68	17	89.29	7.32	245.72	1955.40	335.01
	P2	400	11.1	68	18	103.09	7.39	355.10	2825.78	458.19
30	P1	500	12.3	59	53	126.58	6.55	188.88	961.93	315.46
31	P1	500	22.0	59	20	222.22	6.43	315.41	1606.38	537.62
	P2	500	20.4	59	15	166.67	5.20	391.99	1996.40	558.66
	P3	500	22.0	59	15	188.68	5.46	273.43	1392.56	462.11

바와 같이 말뚝지지 지반종류별로 시험시공된 말뚝에 대한 동재하시험과 정재하시험의 하중-침하량 관계곡선은 두 시험의 시험시기 차이에도 불구하고 대체로 부합하는 양상을 보이고 있다. 사질토지반을 제외한 나머지 지반에 시공된 말뚝에서 말뚝재료의 탄성침하량과 유사하거나 작은 말뚝머리 침하량이 측정되는 것으로 볼 때 시멘트밀크의 양생에 의한 주변마찰력이 더 크게

작용하고 있음을 알 수 있다. 특히 점성토지반(Site 1)은 부배합인 물시멘트배합비 59%의 시멘트밀크를 사용하고 경과시간도 26~29일로 충분함에 따라 큰 마찰지력이 발휘되었기 때문에 말뚝의 탄성침하량에 훨씬 못 미치는 침하가 발생되었다.

또한 그림 5는 동일한 말뚝 또는 인접한 말뚝에서 시행한 정재하시험 결과로 구한 극한지지력(표 6 참조)과

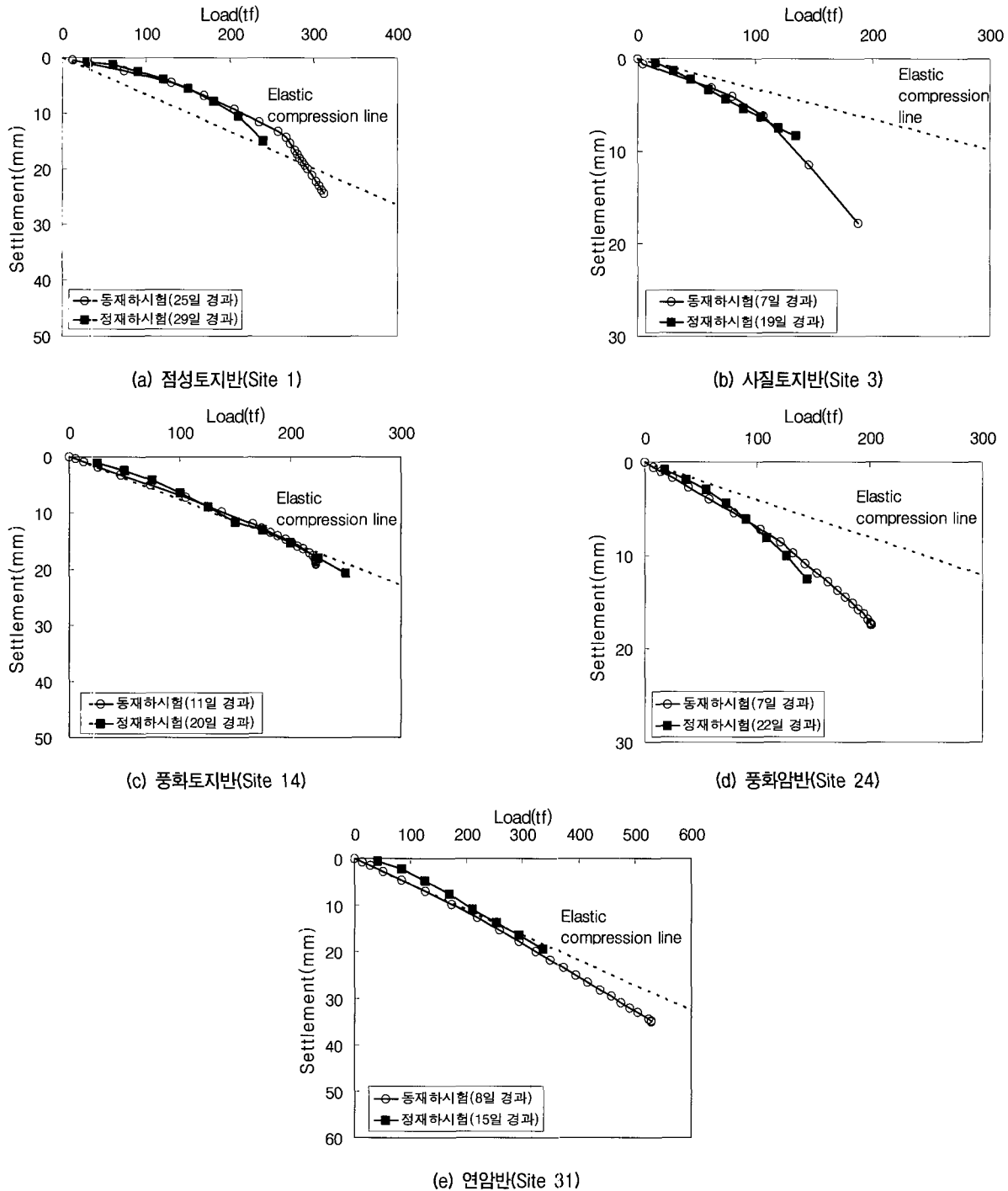


그림 4. 동정재하시험 하중-침하량 곡선

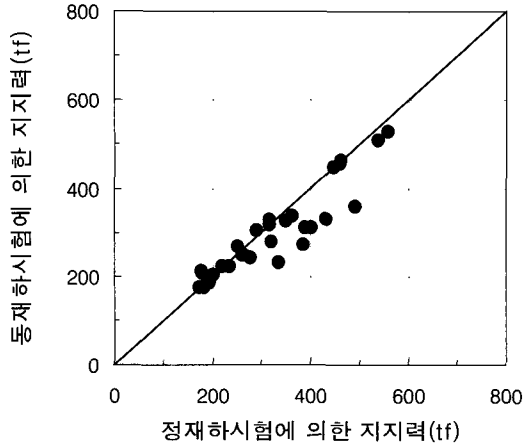


그림 5. 동재하시험결과와 정재하시험결과의 비교

재항타동재하시험 결과를 비교한 것으로 대체로 높은 신뢰도를 갖는 것으로 나타났다. 그림 5에서 지지력이 큰 범위에서 재항타동재하시험 결과치가 정재하시험 결과치보다 작은 것은 타격에너지가 작아 말뚝 선단부의 마찰지지력이 충분히 발휘되지 못했기 때문으로 보여 진다.

4.3 최종시공법에 따른 선단지지력 비교분석

말뚝의 최종시공법에 따른 선단지지력의 차이점을 비교하기 위해 그림 6과 7에서 보는 바와 같이 인천 운서지구 2개 현장에서 경타방식과 압입방식을 동시에 채택하여 시험하였다. 경타방식은 59%의 물시멘트비인 시멘트밀크를 주입하되 드롭해머(3ton)로 낙하고 2m에서 경타하였으며, 압입방식은 59%의 물시멘트비인 시멘트밀크를 주입하면서 슬라임과 교반하고 말뚝을 장비하중으로 눌러 슬라임 내에 관입시켰다.

그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 최종시공방식에

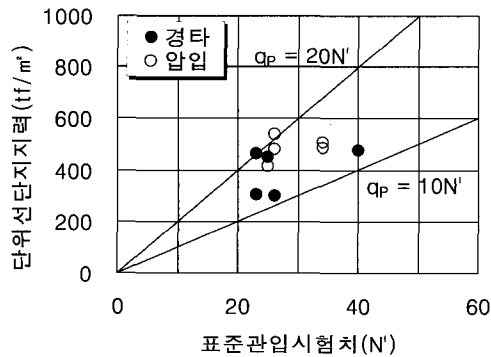


그림 6. 단위선단지지력과 N치와의 관계

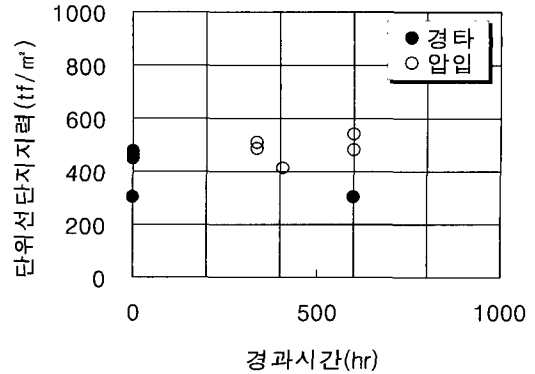


그림 7. 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

따른 단위선단지지력 차이는 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 경타로 인해 민원발생과 건전도 저하가 우려될 때는 압입방식으로 시공하되 부배합의 시멘트밀크를 사용하고 오거스크류로 슬라임과 충분히 교반하고 말뚝을 설치하면 경타할 때와 유사한 설계지지력을 얻을 수 있다는 것이 확인되었다(Hong & Chai, 2005).

4.4 선단지지력의 분담비율

채수근(2002)은 SDA매입말뚝의 선단지지력 산정식을 국내 11개 현장의 자료를 분석하여 제안한 바 있으며, Hong & Chai(2005)는 점성토지반에 시공된 SDA매입말뚝의 지지력 특성을 분석하고 지지력 산정식을 제안한 바 있다.

제안된 이들 산정식은 많은 현장에 적용하면서 그 신뢰성 및 현장 적용성을 검증할 필요가 있다. 특히 말뚝의 지지반별로 여러 현장의 많은 자료를 확보하여 보다 신뢰도가 높은 선단지지력 산정식을 확립할 필요가 있다. 말뚝의 단위선단지지력(q_p)은 초기동재하시험(EOID)으로 구한 말뚝의 선단지지력을 말뚝의 선단 지지면적으로 나누어 구할 수 있다. 또한 재항타동재하시험 자료도 이용하여 시간경과에 대한 영향도 함께 고려하였다.

각 지반 및 현장별로 말뚝의 단위선단지지력을 분석해본 결과는 표 5 및 그림 8과 같다. 표 5 및 그림 8에 의하면 시공 초기에는 선단지지력이 지배적이지만 일정한 시간이 경과하면 마찰지지력이 증가하여 선단지지력의 분담비율이 작아지는 것으로 나타났다. 이는 시멘트밀크의 양생으로 마찰지지력이 점차 증가하기 때문이다. 그림 8에 의하면 대부분의 매입말뚝은 시멘트밀크의 양생기간이 3주(21일)정도 경과될 때 전체 지지력에 대한 선단지지력의 분담률이 50% 값으로 수렴되

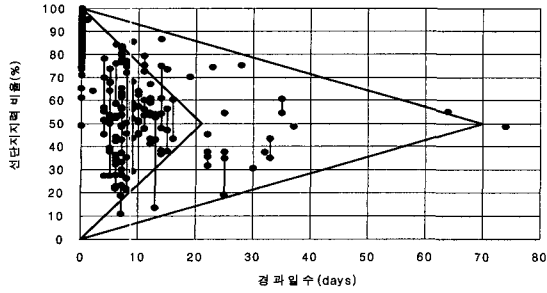


그림 8. 시간경과에 따른 선단지지력의 분담률

는 경향을 보이고 있다. 그 밖의 매입말뚝의 경우도 10주(70일) 이내에 선단지지력 분담률이 50%에 수렴함을 확인할 수 있다.

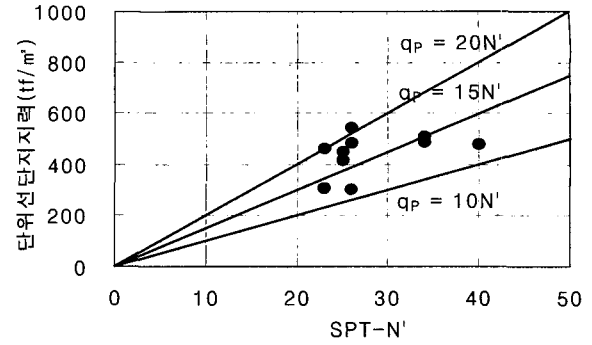
5. SDA매입말뚝의 선단지지력 분석

5.1 점성토지반에서의 선단지지력

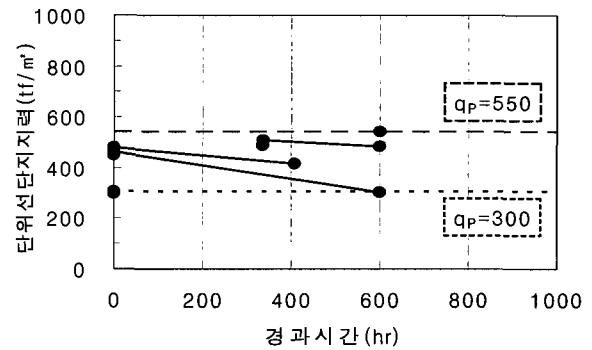
표 3에 정리된 현장의 시험말뚝 중 점성토지반에 지지된 SDA매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)과 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와의 상관성을 분석한 결과는 그림 9와 같다. 그림 9(a)에서 보는 바와 같이 말뚝의 단위선단지지력(q_p)은 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와 10~20N' 범위로 나타났으며, 전체평균치는 15N'로 나타났다. 따라서 단위선단지지력 산정식으로 $q_p=15N'$ 를 사용하여도 무방할 것이다.

또한 그림 9(b)에서 보는 바와 같이 단위선단지지력(q_p)은 시공 직후 305~477tf/m²이나 시간경과에 따라 시멘트밀크가 양생되어 마찰력이 증가되고 단위선단지지력은 작게 측정되었다. 일정시간 경과 후에는 말뚝 선단부의 슬라임과 시멘트밀크의 교반강도가 증가하면서 단위선단지지력이 300~550tf/m² 범위로 나타났다. 그러나 이와같은 결과는 모두 N'치가 40 이하인 지반에 말뚝이 선단지지된 결과이므로 현장에서 적용할 수 있는 최대 단위선단지지력으로는 N'값이 40인 지반에 대응하는 600(=15×40)tf/m²를 선단지지력의 최대치로 제한함이 바람직하다.

이 제안식은 구조물기초설계기준해설(한국지반공학회, 2003)에 제시된 $q_p=15N'$ (≤750tf/m²)과 동일하다. 또한 표 2에 제시된 일본의 선굴착최종경타공법 보다는 작지만, 선굴착근공법과는 유사한 것으로 나타났다.



(a) 단위선단지지력과 N'치와의 관계



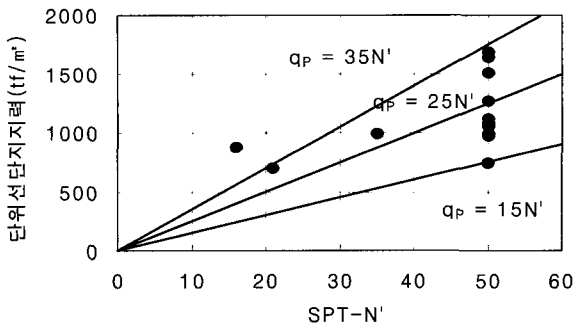
(b) 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

그림 9. 점성토지반에서의 단위선단지지력

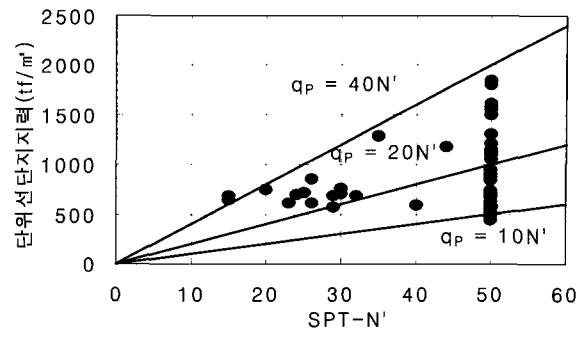
5.2 사질토지반에서의 선단지지력

표 3에 정리된 현장의 시험말뚝 중 사질토(S), 모래-자갈퇴적층(SG)지반에 지지된 SDA매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)과 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와의 상관성을 분석한 결과는 그림 10과 같다. 그림 10(a)에서 보는 바와 같이 말뚝의 단위선단지지력(q_p)은 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와 15~35N' 범위로 나타났으며, 평균치는 25N'로 나타났다. 따라서 단위선단지지력 산정식으로 $q_p=25N'$ 를 사용함이 바람직할 것이다.

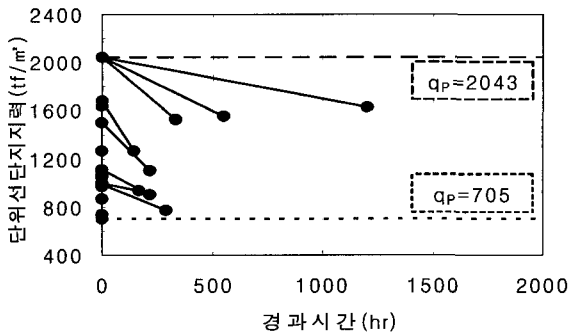
또한 그림 10(b)에서 보는 바와 같이 단위선단지지력(q_p)은 시공 직후에 705~2,043tf/m² 정도가 되는 것으로 측정되었지만 일정시간 경과 후에는 760~1,629tf/m²로 작게 측정되었다. 선단지지력이 감소되는 것으로 측정된 것은 시간경과에 따라 시멘트밀크가 양생되어 마찰력이 증가함에 따라 재항타동재시험시에 타격에너지가 작아 선단지지력이 충분히 발휘되는 것을 확인하지 못했기 때문에 선단지지력이 과소평가된 것이다. 한편 현장에서 적용할 수 있는 단위선단지지력은 최대 N'값 50에 대응하는 1,250(=25×50)tf/m²를 단위선단지지력의 최대치로 제한함이 바람직하다.



(a) 단위선단지지력과 N'치와의 관계

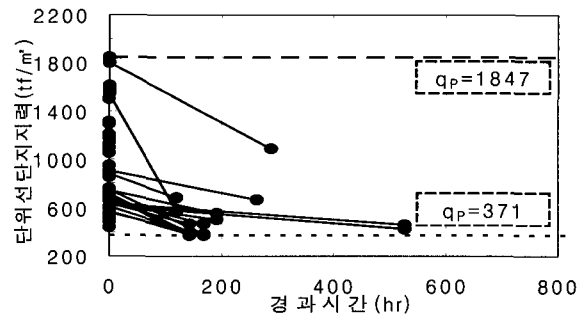


(a) 단위선단지지력과 N'치와의 관계



(b) 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

그림 10. 사질토지반에서의 단위선단지지력



(b) 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

그림 11. 풍화토지반에서의 단위선단지지력

이 제안식은 구조물기초설계기준해설(한국지반공학회, 2003)에 제시된 산정식 $q_p=15N'$ ($\leq 750\text{tf/m}^2$)보다 클 뿐만 아니라, 사질토지반에 대해 건축기초구조설계기준(대한건축학회, 2005)에 제안된 산정식 $q_p=20N'$ ($\leq 1,200\text{tf/m}^2$)보다도 크다. 한편 표 2에 제시된 일본의 선굴착최종경타공법 또는 선굴착확대근고공법과 동일하지만, 선굴착근고공법보다는 큰 것으로 나타났다. 또한 이 값은 사질토지반에 대해 일본의 도로교시방서에 제시된 $15N'$ ($\leq 750\text{tf/m}^2$)보다는 훨씬 큰 편이다(津田, 2003).

5.3 풍화토지반에서의 선단지지력

표 3에 정리된 현장의 시험말뚝 중 실트질 모래(SM)로 대표되는 풍화토지반에 지지된 SDA매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)과 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')의 상관성을 분석한 결과는 그림 11과 같다. 그림 11(a)에서 보는 바와 같이 말뚝의 단위선단지지력(q_p)은 말뚝 지지지반의 표준관입시험치(N')와 10~40N'범위로 나타났다. 평균치는 $q_p=20N'$ 로 나타났다. 따라서 단위선단지지력 산정식으로 $q_p=20N'$ 를 제안함이 바람직할 것이다.

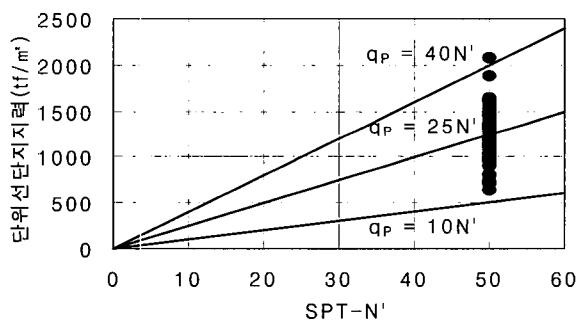
또한 그림 11(b)에서 보는 바와 같이 단위선단지지력(q_p)은 시공 직후에 $423 \sim 1,847\text{tf/m}^2$ 정도로 측정되었지만 일정시간 경과 후에는 $371 \sim 1,192\text{tf/m}^2$ 로 작게 측정되었다. 이와 같이 선단지지력이 감소하는 것으로 측정된 것은 시간경과에 따라 시멘트밀크가 양생되어 마찰력이 증가함에 따라 재항타동재하시험시에 타격에너지가 작아 선단지지력이 충분히 발휘되는 것을 확인하지 못했기 때문에 선단지지력이 과소평가된 것으로 생각된다. 따라서 현장에서 적용할 수 있는 단위선단지지력은 최대 N'값 50에 대응하는 $1,000(=20 \times 50)\text{tf/m}^2$ 를 단위선단지지력의 최대치로 제한함이 바람직하다.

이 제안식은 구조물 기초설계기준해설(한국지반공학회, 2003)에 제시된 산정식 $q_p=15N'$ ($\leq 750\text{tf/m}^2$)보다는 큰 편이지만, 건축기초 구조설계기준(대한건축학회, 2005)의 제안식 $q_p=20N'$ ($\leq 1,200\text{tf/m}^2$)과는 같다. 그러나 최대선단지지력은 $1,200\text{tf/m}^2$ 보다 작다. 또한 이 값은 표 2에 제시된 일본의 선굴착최종경타공법과 선굴착확대근고공법 보다는 작지만, 선굴착근고공법 보다는 큰 것으로 나타났다.

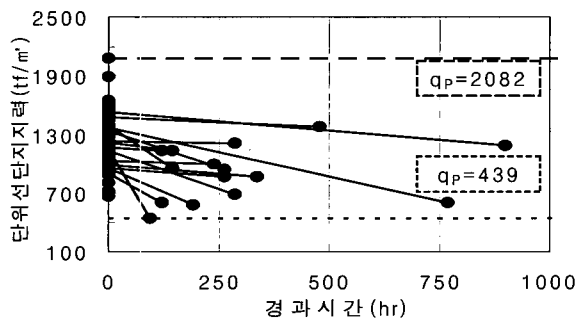
5.4 풍화암반에서의 선단지지력

표 3에 정리된 현장의 시험말뚝 중 풍화암반에 지지된 SDA매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)과 말뚝 지지지의 표준관입시험치(N')와의 상관성을 분석한 결과는 그림 12와 같다. 그림 12(a)에서 보는 바와 같이 말뚝의 단위선단지지력(q_p)은 말뚝 지지지의 표준관입시험치(N')와 10~40N'범위로 나타났으며, 평균치는 $q_p=25N'$ 로 나타났다. 그러나 풍화암반의 풍화 정도에 따라 지지력차이가 큰 것으로 확인되었다. 일반적으로 풍화암반의 풍화도가 낮은(D-4) 경우의 말뚝 단위선단지지력은 풍화도가 높은(D-5) 경우보다 크다. 따라서 단위선단지지력 산정식으로 평균치인 $q_p=25N'$ 를 적용하면, 풍화도가 높은 풍화암반에서는 과대평가할 수 있으며, 풍화도가 낮은 풍화암반에서는 과소평가할 수 있다.

또한 그림 12(b)에서 보는 바와 같이 단위선단지지력(q_p)은 시공 직후에 $635 \sim 2,082 \text{tf/m}^2$ 에서 일정시간 경과 후에 $439 \sim 1,556 \text{tf/m}^2$ 정도로 작게 측정되었다. 이는 시간경과에 따른 마찰지지력 증가로 인해 단위선단지지력은 시공 직후에 비해 과소평가된 상태이다. 따라서 현장에서 적용할 수 있는 단위선단지지력은 N'값 50에 대



(a) 단위선단지지력과 N'치와의 관계



(b) 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

그림 12. 풍화암반에서의 단위선단지지력

응하는 $1,250 (=25 \times 50) \text{tf/m}^2$ 를 단위선단지지력의 최대치로 제한함이 바람직하다.

이 제안식은 국내의 규정 중 풍화암반에 시공된 매입말뚝의 지지력 산정식이 없어 직접 비교하기는 곤란하다. 다만 N'치 50이상의 화강풍화대 지반에 최종 정타방식으로 시공한 SIP매입말뚝의 선단지지력 산정식으로 김정수(2003)가 제안한 $q_p=20N'$ 보다는 큰 것으로 나타났다. 또한 N'치 50이상의 화강풍화대에 정타방식으로 시공한 매입말뚝 중 설계지지력을 만족한 말뚝의 자료만을 이용하여 이원재(2000)가 제안한 $q_p=23.5N'$ 보다도 큰 것으로 나타났다. 그리고 한국도로공사(2006)에서 제안한 $q_p=20N'$ 보다도 큰 것으로 나타났다.

5.5 연암반에서의 선단지지력

표 3에 정리된 현장의 시험말뚝중 연암반에 지지된 SDA매입말뚝에 대해 시공직후 동재하시험(EOID)결과와 일정시간 경과 후(Restrike)의 결과는 그림 13과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 단위선단지지력(q_p)은 시공 직후에 $1,063 \sim 2,427 \text{tf/m}^2$ 에서 일정시간 경과 후에 $721 \sim 2,182 \text{tf/m}^2$ 정도로 작게 측정되었다. 이는 시간경과에 따른 마찰지지력 증가로 인해 단위선단지지력은 시공 직후에 비해 과소평가된 상태임을 보이고 있다. 따라서 현장에서 적용할 수 있는 단위선단지지력은 $1,500 \text{tf/m}^2$ 를 최대치로 제한함이 바람직하다.

연암반 역시 풍화암반과 마찬가지로 국내의 규정이 없어 직접 비교하기가 곤란하다. 다만 이 값은 타입말뚝의 선단지지력에 대한 제한치($30N' (\leq 1,500 \text{tf/m}^2)$)와 동일하며, 기존 연구(채수근, 2002)에서 제시한 단위선단지지력($1,300 \text{tf/m}^2$) 보다 큰 것으로 나타났다.

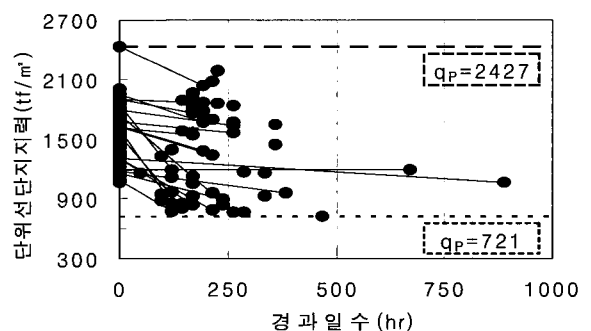


그림 13. 시간경과에 따른 단위선단지지력의 변화

5.6 지반종류별 선단지지력 고찰

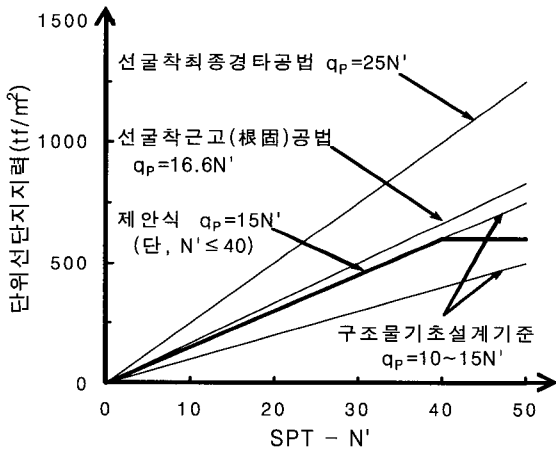
앞에서 제안된 말뚝의 선단지반 종류별 단위선단지지력(q_p)을 정리한 결과는 표 7과 같다. 표에서 보는 바와 같이 점성토지반에서의 단위선단지지력(q_p)은 $15N'$ 가 되며 풍화토지반에서는 $20N'$, 사질토지반과 풍화암반에서의 단위선단지지력은 $25N'$ 가 되는 것으로 나타났다. 이결과에 의하면 매입말뚝을 사질토지반과 풍화암반에 선단지지시켜 시공하면 경제적인 말뚝공사가 될 수 있음을 알 수 있다.

한편 단위선단지지력의 한계치로는 점성토지반의 경우는 600tf/m^2 이고, 풍화토지반에서는 $1,000\text{tf/m}^2$ 으로 정함이 바람직하다. 그러나 사질토지반과 풍화암반에서는 $1,250\text{tf/m}^2$ 로 제한함이 바람직하다. 한편 연암반에 지지시켜 시공한 매입말뚝의 단위선단지지력은 $1,500\text{tf/m}^2$ 를 최대치로 제한함이 바람직하다.

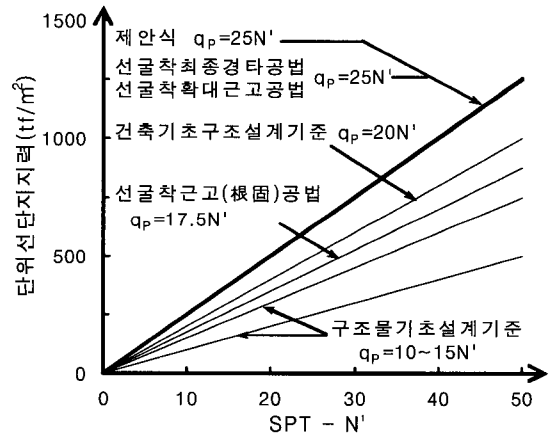
이 제안식을 각 지반종류별로 기존 사용식들과 비교하여 보면 그림 14와 같다. 즉, 우리나라에서 사용된 기존의 단위선단지지력 산정식은 지반의 구분 없이 표준관입 시험치 N' 의 15배 혹은 20배로 제안 사용되고 있으나 본

표 7. 지반종류별 단위선단지지력

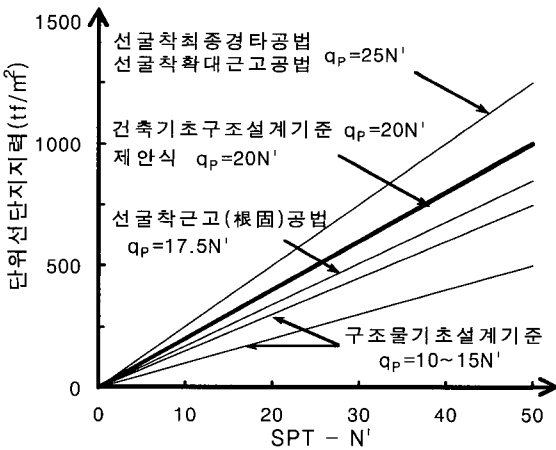
지반종류	단위선단지지력 (q_p , tf/m^2)	최대단위선단지지력 (tf/m^2)	기존 기준식
점성토지반	$15N'$	600	(a) 구조물기초설계기준해설 $q_p=15N'(\leq 750\text{tf/m}^2)$:지반구분 없음 (b) 건축기초구조설계기준 $q_p=20N'(\leq 1,200\text{tf/m}^2)$:사질토지반
풍화토지반	$20N'$	1,000	
사질토지반, 풍화암반	$25N'$	1,250	
연암반	-	1,500	



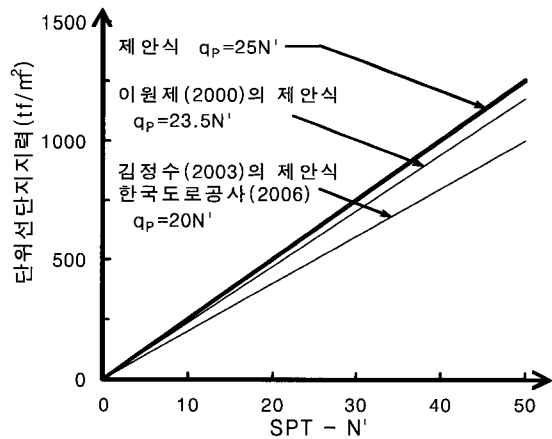
(a) 점성토지반



(b) 사질토지반



(c) 풍화토지반



(d) 풍화암반

그림 14. 지반종류별 선단지지력 산정식 비교

논문에서는 제안한 바와 같이 지반의 종류에 따라 표준 관입시험치 N' 의 15배에서 25배 사이로 구분하여 사용함이 바람직하다. 한편, 단위선단지지력의 최대치도 기존 산정식에서는 지반의 종류별로 구분없이 750tf/m^2 혹은 $1,200\text{tf/m}^2$ 으로 사용되고 있으나 이를 지반의 종류별로 구분하여 600tf/m^2 에서 $1,500\text{tf/m}^2$ 사이로 제한함이 바람직하다.

또한 그림 14에서 보는 바와 같이 점성토지반에서는 제안식이 국내 구조물기초설계기준식의 최대치와 동일하지만 일본의 기준식들 보다는 작거나 유사한 것으로 나타난다. 그러나 사질토지반에서는 제안식이 국내 기준 사용식들 보다는 크며 일본의 선굴착최종경타공법과 선굴착확대근고공법과는 동일하다. 풍화토지반에서는 국내 구조물기초설계기준식 보다는 크지만 국내 건축구조설계기준과는 동일하다. 한편 풍화암반은 이원제(2000), 김정수(2003) 및 한국도로공사(2006)에서 제안한 식보다 크며, 연암반에서는 기존 제안 식이 없어 직접 비교하기 곤란하다.

6. 결론

다섯 종류의 지반에 SDA매입공법으로 선단지지시켜 시공한 265본의 시험말뚝에서 시행한 동재하시험과 정재하시험의 결과를 이용하여 단위선단지지력을 정량적으로 산정하는 경험식을 수립하였다. 시험결과를 분석하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 말뚝을 지지하는 지반조건별로 시험시공된 말뚝에 대한 동재하시험과 정재하시험의 하중-침하량 관계 곡선은 대체로 유사한 양상을 보여준다. 또한 두 시험의 극한지지력은 경과시간, 재하시험법의 차이 및 재향타동재하시험시 타격에너지의 한계에도 불구하고 대체로 높은 신뢰도를 보여준다. 따라서 본 연구에 사용한 동재하시험 결과의 신뢰도는 양호한 것으로 평가할 수 있다.
- (2) 매입말뚝의 최종시공방식으로는 경타방식과 압입방식이 있으며 두 방식에 따른 단위선단지지력의 차이는 뚜렷하지 않다. 따라서 경타로 인해 민원발생과 건전도 저하가 우려될 때는 압입방식으로 시공하되 부배합의 시멘트밀크를 사용하고 오거스크류로 슬라임과 충분히 교반하고 말뚝을 설치하면 경타할 때와 유사한 설계지지력을 얻을 수 있다.

- (3) SDA매입말뚝의 단위선단지지력(q_p)은 말뚝지지지반의 N' 값과 비례관계에 있다. 즉 점성토지반에서는 N' 값의 15배가 되고, 풍화토지반에서는 N' 값의 20배가 되며, 사질토지반과 풍화암반에서는 N' 값의 25배가 된다.
- (4) 점성토지반의 제한 값은 600tf/m^2 이 바람직하며, 풍화토지반에서는 $1,000\text{tf/m}^2$, 사질토지반과 풍화암반에서는 $1,250\text{tf/m}^2$ 으로 함이 바람직하다. 연암반은 $1,500\text{tf/m}^2$ 정도로 함이 바람직하며 토사지반이나 풍화암반 보다 큰 것으로 확인되었다.
- (5) 제안식을 지반종류별로 기존 식과 비교 고찰해 보면, 점성토지반에서는 국내 구조물기초설계기준의 최대치와 동일하지만 일본의 기준식 보다는 작거나 유사한 것으로 나타난다. 그러나 사질토지반에서는 제안식이 국내 기준식보다는 크며 일본의 선굴착최종경타공법과 선굴착확대근고공법과는 동일하다. 풍화토지반에서는 국내 구조물기초설계기준식보다는 크지만 국내 건축구조설계기준과는 동일하다.
- (6) 제안식을 사용하기 위해서는 표준관입시험의 정밀도를 높여야 하며, 현장에서 시공할 때 중요한 품질관리 요소인 굴착토사 배출, 슬라임과 시멘트밀크 교반 및 경타를 반드시 표준시공법에 따라 시행해야 한다. 또한 현장에서 시험시공과 재하시험을 먼저 시행하여 말뚝의 길이와 설계지지력을 결정한다음에 기초설계를 진행하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

1. 김정수 (2003), *화강풍화대 지반에 매입된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구*, 박사학위논문, 한양대학교, pp.161-165.
2. 대한건축학회 (2005), *건축기초구조설계기준*, pp.172-184.
3. 대한주택공사 (1997), *표준시방서(건축) 30535 말뚝선굴착공법*, pp.1-9.
4. 대한토목학회 (2001), *도로교 설계기준 해설*, pp.207-313.
5. 두성건설 (1987), *SIP기초공법*, pp.1-68.
6. 서울특별시 (1996), *지반조사 편람*, pp.22-24.
7. 이원제 (2000), *광섬유센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이 측정 및 지지력 특성 연구*, 박사학위논문, 고려대학교, pp.114-121.
8. 임해식, 박용부, 박종배, 김정수, 한경렬, 김도형 (2001), *SIP공법의 품질개선방안과 지지력 산정법 제안에 관한 연구*, 대한주택공사 주택연구소, pp.68-79.
9. 채수근 (1997), *SDA 매입말뚝 시공법 연구 및 적용성 검토서*, pp.1-110.
10. 채수근 (2000a), "Q&A 매입말뚝 시공법", *한국지반공학회지*, Vol.16, No.7, pp.63-68.
11. 채수근 (2000b), "SDA매입말뚝 시공법 -한국고속철도 3공구 평택고가 적용 사례 중심으로", *대한토목학회지*, 제48권 제9호 pp.

54-62.

12. 채수근 (2002), SDA 매입말뚝의 연직지지력 산정, 석사학위논문, 중앙대학교, pp.1-121.
13. 한국도로공사 (2006), SIP 공법의 시공 및 설계 지침(안), 교통기술원, pp.1-26.
14. 한국지반공학회 (2003), 구조물 기초설계기준해설, pp.286-292.
15. 홍원표, 윤중만, 한중근 (1998), “매입말뚝의 지지력 특성”, 한국지반공학회 ‘98 말뚝기초위원회 세미나논문집, 1998, pp.3-49.
16. 홍원표, 한중근, 채수근 (2002), “SDA 매입말뚝의 마찰지지력”, 대한토목학회 학술발표논문, 2002, pp.5-8.
17. (社)콘크리트 파일 建設技術協會 (1994), 埋入工法 施工便覧, pp.13-182.
18. 津田 和義 (2003), 既製 콘크리트 杭 - 基礎構造設計 manual - 土木編, (社)콘크리트 파일 建設技術協會, 附錄5-1~5-5. “プレボーリング杭の設計と施工”
19. Chin, F. K. and Vail, A. J. (1973), “Behavior of Piles in Alluvium”, *Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Soviet Union, pp.47-52
20. COPITA (2006), (社)콘크리트 파일 建設技術協會, Concrete Pile Installation Technology Association, 2006. 4. NO.39, pp.21-76.
21. Hong, Won-Pyo and Chai, Soo-Geun (2003), “Skin Friction Capacity of Separated Doughnut Auger (SDA) Pile”, *The Proceeding of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2003)*, Honolulu, Hawaii, U.S.A, pp.740-745.
22. Hong, Won-Pyo and Chai, Soo-Geun (2005), “Bearing Capacity Characteristics of Separated Doughnut Auger (SDA) Pile in Clay and Silty Soil”, *The Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2005)*, Seoul, Korea, pp.548-554.

(접수일자 2007. 2. 6, 심사완료일 2007. 5. 26)