

말뚝기초

김원철*1, 박태순*2, 이우진*3, 김동수*4, 최용규*5, 박영호*6, 정성기*7

1. 서론

말뚝기초는 길이의 크기가 단면의 크기에 비하여 매우 크고 그 길이의 전부 또는 일부가 지중에 삽입되어 상부구조물의 하중을 지지하는 기능을 가진 기초 구조물이다. 말뚝기초는 인류가 발명한 기초 형태 중 가장 오랜 역사를 가지고 있으며 가장 확실하고 효과적인 기초로 평가되고 있다. 말뚝기초는 고대로부터 특별한 이론이나 진보된 시공장비 없이도 사용되어져 왔는데 현재와 비교했을 때 재료의 종류와 시공장비가 바뀌었을뿐 기본적인 시공방법은 현재도 유사한 방법으로 행해지고 있는 기초 시공법이다.

국내 말뚝기초 시공의 대표적인 예로는 조선 태조 이성계가 한양으로 도읍으로 옮기고 도성인 서울 성곽 축조 당시 태조 5년 동대문 지역의 공사 수행시 이 지역은 지대가 낮고 웅덩이가 많이 있어서 다른지역에 비하여 배이상의 기초공사에 힘이 들었다는 기록이 전해지고 있다. 이 외에도 건물의 기초에서 발견된 예로는 창경궁의 명정전 북측의 건물터로 습지 지반을 보강하기 위해서 직경 15cm의 나무말뚝을 30 cm 간격으로 박아 시공하였으며 교량의 경우에는 경복궁 향원지 북측에서 중앙섬에 이르는 다리 유지지역에 8경간 다리의 교각을 받치는 나무말뚝으로 직경 150 - 230cm 크기로 시공

하였다. 이 외에도 연지호안, 개천의 석축 기초로 여러 곳에서 사용했다는 기록이 전해지고 있는데 한 현장에서 말뚝을 가장 많이 사용한 기록은 조선 총독부 건물기초로서 직경 25cm의 말뚝을 총 9,388본을 시공하였다.

근래 들어서는 국내 시멘트 산업의 발전과 PC 공장의 보급으로 기성 말뚝의 보급이 활발하게 이루어지고 있어서 국내의 경우 외국에 비하여 기성 말뚝의 보급과 이용이 매우 활발하게 이루어지고 있다. 그러나, 구조물의 대형화, 중량화, 지반조건의 열악성 심화로 인한 말뚝기초의 설계와 시공의 어려움, 도심 주변의 토목공사로 인한 소음 및 진동 저감을 위한 현장타설 콘크리트 말뚝의 보급과 기술발전도 함께 발전해 가고 있다. 경제적이며 효과적인 기초로서 말뚝기초의 중요성과 기술발전과 장비 개발 역시 활발하게 진행되고 있으며 말뚝의 설계이론 및 시공기법이 제측장비와 센서의 발달로 인하여 10여년전과 비교했을때 크게 발전해 가고 있다.

본고는 2000년을 맞이하여 국내의 말뚝기초 기술을 재조명하고자 여러 많은 분야가 있지만 국내 말뚝 기초 기술 동향을 고려하여 말뚝기초에 대한 국내의 설계 및 시공 동향, 시방서 및 설계기준, 재하시험 방법, 대규모 말뚝의 설계와 시공법, 건전도 비파괴 시험에 대한 사항을 실무자 수준에 맞게 작성하였다.

2. 말뚝기초 관련 국내 설계기준 및 공시방식

*1 정회원, (주) 파카흥산 이사, 공학박사

*2 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 조교수

*3 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 부교수

*4 정회원, KAIST 토목공학과 조교수

*5 정회원, 경성대학교 건설환경공학과 부교수

*6 정회원, 한국도로공사 연구소, 공학박사

*7 정회원, 부산시청 감사관실

2.1 개요

말뚝기초의 설계기준은 건설·교통부에서 제정하여 시행하는 도로교 설계기준(2000년도 시행예정)과 구조물기초설계기준(1997년 개정), 철도청에서 제정한 철도설계기준(철도교편), 해양수산부에서 제정한 항만 및 어항 설계기준, 고속철도공단의 고속철도 구조물 기초설계 표준시방서 등이 있으나, 건설부에서 제정하여 시행하는 2종류의 설계기준이 대표적인 것으로 볼 수 있다. 공사시방서는 건설·교통부, 철도청, 해운항만청, 한국도로공사, 대한주택공사, 한국고속철도공단 그리고 대한건축학회 등에서 제정하여 사용하고 있다. 여기에서는 말뚝기초와 관련하여 가장 근간이 되는 설계기준들에서 중요한 개념들을 요약하고 최근에 개정된 도로교 설계기준을 기초로 하여 향후의 전망을 고찰하였다.

2.2 말뚝기초 설계기준의 주요 개념.

(1) 도로교 설계기준

2000년 중에 시행될 도로교 설계기준(구 도로교 표준시방서의 설계편의 기준)에서는 다음과 같은 주요 개념을 반영하였다.

① 시험말뚝(test pile)의 개념 도입

일정 규모이상의 교량에서는 시험시공된 말뚝(test pile, 실물크기 또는 축소 말뚝)에 대한 정재하시험을 설계단계에서 실시하여 말뚝기초의 설계에 반영하도록 하였다. 이때, 시험말뚝에는 축하중계측장치를 부착 또는 매설하여 축하중전이를 측정하도록 하였다. 설계단계에서 시험말뚝을 시공하여 말뚝재하시험을 수행할 경우 최적화 설계를 수행하여 경제적인 설계가 가능할 수 있으나 설계단계에서 시험말뚝에 대한 재하시험이 극히 곤란할 경우에는 시공초기이라도 말뚝재하시험을 수행하여 추정설계의 적정여부를 검증하도록 하였다.

이와 같은 시험말뚝의 시공 및 말뚝재하시험은 상당한 중요성을 가지는 도로용 교량 이외의 토목 구조물들(즉, 단면적 20m² 이상의 박스구조물, 폐수처리장, 하수처리장, 지하철 공사, 연면적 2만 km² 이상의 건축물 등)에도 적용시킬 수 있을 것이다.

② 극한 지지력의 결정

지반조건에 따라 결정되는 외말뚝의 극한 연직 압축지지력은 대표적인 지반조건에 설치된 실물크기 말뚝이나 축소말뚝에 대한 연직 재하시험을 수행하여 결정하도록 하였다. 이때, 축하중전이를 측정하여 말뚝기초의 하중지지거동을 확인하도록 하였다. 다만, 지지력 계산공식이 말뚝재하시험에 준하는 신뢰성을 가질 경우나 시험말뚝에 대한 재하시험이 극히 곤란할 경우에는 정역학적 지지력 산정공식을 사용하여 지지력을 추정할 수 있도록 하였다.

극한 연직 인발지지력과 수평지지력도 말뚝재하시험을 수행하여 결정하는 것이 가장 신뢰성이 높은 것으로 규정하였다.

③ 침하량 검토

외말뚝의 침하는 시험말뚝에 대한 재하시험결과를 보정하여 산정하여야 하며 침하량 산정 공식을 이용하여 추정하도록 하였다. 이 때, 마찰지지특성을 고려할 수 있도록 하기 위해 말뚝 축하중전이 특성을 반드시 고려하도록 하였다.

④ 안전율에 대한 설계자의 재량권 부여

말뚝기초의 허용 연직압축지지력과 연직인발지지력의 결정에 사용하는 안전율에 대한 구체적인 값을 삭제하여 설계시 설계자가 적정 안전율을 선택할 수 있도록 하였다.

⑤ 마찰지지 말뚝으로 설계개념 전환

기존의 도로교 표준시방서 설계편에도 나타나 있는 하였으나 인식의 부족으로 설계에 거의 반영되지 않았던 마찰력을 설계에 반드시 활용할 수 있도록 하기 위하여 시험말뚝에 대한 정재하시험 결과를 활용하여 설계를 수행하도록 하였다. 하중지지거동을 확인하여 각 지층별로 발휘된 마찰응력을

구하여 설계에 반영한다면 말뚝기초에 대한 경제적인 설계를 이룰 수 있을 것이다.

1999년 광안대로 건설공사 현장에서 수행된 연암과 풍화암에 소켓된 대구경 강관말뚝 (직경 1000mm)에 대한 정재하시험 결과에서 알 수 있듯이 대구경 소켓 강관말뚝은 풍화암층에서 대부분의 하중을 지지하는 마찰말뚝으로 거동하였으며 연암부 소켓에서는 마찰력 자체도 거의 발휘되지 않는 것을 확인하였다. 따라서, 이와 같이 대부분의 상부하중을 지지할 수 있는 마찰력을 무시하여 설계한다면 극히 안전측의 설계가 될 수 밖에 없을 것이다.

⑥ 지지층의 개념 구체화

그 동안 구 시방서에서 “양호한 지지층”이라는 용어에서도 정의되어 있었으나 설계자들의 보수적인 (conservative) 개념 적용으로 인하여 “연암”만이 “양호한 지지층”으로 인식되어 왔다. 이와 같은 인식으로 인하여 지중에 절감가능한 많은 예산을 낭비하여 왔다.

지지층은 기초로부터 전달된 하중을 충분히 지지할 수 있는 지반이며, 절대적인 기준에 의해 결정되는 것이 아니라 상부하중과 말뚝기초의 지지력을 비교하여 상대적으로 결정되어야 한다. 예를 들면, 신선한 암반 뿐만 아니라 풍화암, 풍화토, $N > 30$ 의 사력층 및 사질토층, 그리고 $N > 20$ 의 점성토층도 상부하중을 충분히 지지할 수 있으면 지지층이 될 수 있다.

(2) 구조물 기초 설계기준

구조물 기초 설계기준에 포함되어 있는 중요한 개념들도 요약하였다.

① 말뚝정재하시험에 의한 축방향 허용 지지력 추정
말뚝정재하시험을 실시하여 말뚝의 축방향 극한 지지력을 추정하고 소정의 안전율을 적용시키도록 하였다. 이 방법이 여러 가지 방법들 중에서 가장 신뢰도가 높은 것으로 규정하였으나, 국내에서는 실제로 설계에 적용시킨 사례는 없었다.

이 때, 소정의 안전율도 말뚝정재하시험의 방법에 따라 달리 적용시킬 수 있도록 하였다.

② 지지력 산정공식

정역학적 지지력 산정공식, 현장시험 (CPT, PMT, SPT)결과를 이용한 지지력 산정공식, 항타 공식 등으로 지지력을 추정할 수 있도록 하였으며, 구 도로교 표준시방서 설계편의 해설에 설명된 SPT결과를 이용한 지지력 산정공식보다 다소 신뢰성이 높은 산정방법을 수록하였다. 여기서, 제안된 지지력 산정공식들을 사용하기 위하여 정확한 지반조사, 실내 및 현장시험을 수행하여 지반특성치를 구하여야 할 것이다.

③ 말뚝정재하시험방법

말뚝 정재하시험 뿐만 아니라 동적 재하시험 (PDA), 정·동적 재하시험 (Statnamic test), 간편 재하시험 (SPLT) 그리고 가정적재하시험 (PSPLT) 등을 사용할 수 있다고 설명하였다. 그러나, 현재까지는 정재하시험 방법이 가장 신뢰성이 높으므로 정재하시험 이외의 방법을 사용할 경우에는 반드시 해당 현장에서 동일한 말뚝에 대한 정재하시험결과와 비교하는 검증과정을 거친 후 적용하도록 규정하였으나 국내에서는 정재하시험 결과와 비교 검증하는 절차는 생략된 채 시행되고 있는 실정이다.

2.3 향후전망

(1) 검증시험 (proof test)을 통한 설계절차의 정립

시험말뚝에 대하여 설계목적의 말뚝정재하시험을 통하여 검증시험을 실시한 후 추정된 예비설계를 수정하여 설계를 완성하는 절차를 정립하여야 할 것이다. 이와 같은 설계절차는 선진외국에서는 이미 보편화되어 있는 상태이나 국내에서는 남향대교 실시설계의 일부 사례를 제외하고는 적용된 사례가 전혀 없는 실정이다.

검증시험을 통하여 극한지지력을 구하고 침하에

대한 안정성과 하중지지특성을 파악한다면 그 동안 국내의 설계에서 무시해 온 마찰력을 활용한 설계가 일반화될 수 있을 것이며 연암만이 지지층이라는 인식도 개선될 수 있을 것이다.

(2) 시험말뚝(test pile)의 시공 및 검증시험 비용을 설계용역비에 반영

설계용역 발주처에서는 설계단계에서 시험말뚝의 시공 및 검증시험을 수행하는데 소요되는 비용을 설계비에 반영해 주어야 할 것이다. 이 비용은 통상적인 말뚝재하시험에 소요되는 비용보다 다소 고가이므로 설계비에서 다소 증가될 수 있으나 최적설계방식에 의해 경제적인 설계를 이룰 수만 있다면 말뚝기초 분야의 시공비를 약 30% 이상 절감할 수 있을 것으로 예상되므로 전체 건설예산은 크게 절감할 수 있을 것이다.

그러므로, 설계용역비에서 다소 증가될 수 있으나 시공비를 크게 절감시킬 수 있다면, 발주처에서는 설계용역비에 검증시험 비용을 확보해 주어야 할 것이며, 이러한 설계방식은 국가 경제적인 측면에서 반드시 시행되어야 할 제도인 것으로 판단된다.

(3) 말뚝재하시험에 대한 개념 전환

통상적으로 수행되어온 말뚝재하시험에서는 재하 하중의 부족으로 말뚝머리하중 - 침하량 관계의 일부분만을 측정할 수 있었을 뿐 말뚝축하중의 분포를 측정하지 못하였다. 따라서, 반드시 극한 하중을 확인할 수 있을 정도까지 하중을 재하하여야 하며 말뚝축하중측정을 위한 센서를 설치하여 말뚝축하중전이특성을 파악할 수 있어야 한다. 또한, 연직압축재하시험 뿐만 아니라 연직인발재하시험과 수평재하시험도 포함시켜야 한다.

(4) LFRD방법의 도입 필요

상부구조와의 연계성을 긴밀하게 하기 위하여 말뚝기초의 설계에서도 LFRD(Load Resistance Factor Design)방법을 도입하여 일관된 해석 및

설계 체계를 이루도록 하여야 할 것이다.

(5) 각 말뚝 형식별 설계기준 및 시공시방 제시 필요

말뚝의 구성재료, 시공방법, 크기 등에 따른 말뚝 종류별 및 지반종류별로 설계기준 및 시공시방을 자세하게 제시해야 할 필요가 있다. 이와 관련하여 차후 발간될 "도로교 설계기준"의 해설집에서 상세하게 기술할 예정이다.

(6) 설계기준들 간의 일관성 필요

도로교 설계기준과 구조물 기초 설계기준에 제시된 내용들의 일관된 체계를 이룰 수 있도록 해야 할 것이다.

(7) 간단한 구조계산 수행 필요성

지반 공학관련 전문가들은 말뚝기초의 지지력과 침하량 산정에만 관심이 있는 경우가 많으며, 말뚝체, 말뚝두부와 캡과의 연결부 등에 대한 간단한 구조 계산은 구조공학 기술자들의 몫으로 간주하는 경우가 있어 지반공학 기술자들의 역할을 축소시키는 경향이 있다. 이에 대하여 지반공학기술자들의 인식을 새롭게 하여 전공영역을 회복할 필요가 있다.

(8) Piled raft 의 개념 도입 필요성

최근의 중요한 연구주제의 하나인 Piled raft의 개념을 교량기초 이외의 토목 구조물 기초설계기준에 도입하여 새로운 설계절차를 수립해야 할 필요가 있을 것이다.

3. 기성 말뚝의 설계법, 시공법

3.1 기성 말뚝의 설계법

말뚝을 설계할 때는 말뚝재료의 장기허용 강도와 지반의 허용지지력을 산정한 후 두 값을 비교하여 낮은 값으로 말뚝의 설계하중을 결정한다.

3.1.1 말뚝재료의 장기허용강도

말뚝재료의 장기허용강도라하면 말뚝재료의 허용압축응력에 말뚝재료의 장기허용강도를 곱한 값이다. 건교부제정 「구조물기초 설계기준」(1997)과 건교부제정 「도로교 표준시방서」(1996)에서는 말뚝재질에 따라 일정한 값의 허용압축응력을 규정하고 있다. 즉, 강관말뚝의 경우 SPS400의 재질의 말뚝을 $1400\text{kg}/\text{cm}^2$, SPS490은 $1900\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 허용압축응력에 부식을 고려한 강관말뚝의 재료의 유효단면적을 곱한다.

강관말뚝의 부식환경 중 대기부식은 아주 미미하기 때문에 고려하지 않아도 무방한 것으로 보고 있지만 지반 중에 강관말뚝이 있는 경우 국내의 연구 결과를 종합하여 본 결과 평균부식속도가 $0.02\text{mm}/\text{year}$ 로 보고 일반설계시 현재 일반적으로 적용되고 있는 강관말뚝 외곽면에 2mm 의 부식을 고려하기로 한다.

콘크리트 말뚝인 경우에는 장기허용 압축응력에서 유효프리스트레스 응력을 뺀 후 여기에 유효단면적을 곱하여 장기허용강도를 산정한다. 실제로 말뚝은 가늘고 긴 구조적 부재인바 직경대비 관입 길이비(세장비)가 어떤 범위를 초과하면 시공중 또는 시공후 하중재하에 따라 좌굴 우려가 높아진다. 또한, 기성말뚝은 공장제품으로 그 품질의 신뢰도가 높지만 일정한 길이 이상이 되면 현장 용접이음이 불가피하다. 이러한 말뚝의 이음과 세장비는 말뚝재료의 장기허용강도에 직접적인 영향을 미치게 된다.

3.1.1 지반의 허용지지력

말뚝이 지반내에 시공되었을 때 말뚝이 받을 수 있는 지반의 축방향 허용지지력은 말뚝의 극한지지력을 안전율로 나누어 구할 수 있다. 이러한 말뚝의 지반지지력의 산정방법으로는 다음과 같은 5가지로 분류할 수 있다.

(1) 이론적 해석방법

- (2) 현장시험에 의한 방법
- (3) 파동이론에 의한 해석
- (4) 항타공식에 의한 방법
- (5) 재하시험에 의한 해석

이러한 5가지 방법중에서 설계 단계에서 사용할 수 있는 지지력을 구하는 방법으로는 (1)(2)(3)의 방법이 사용되고 있으며 (4)의 방법은 설계단계에서 항타관리기준 제시 목적으로 사용되고 있다.

(1) 이론적 해석방법

말뚝의 지지력은 선단지지력과 주면마찰력의 합으로 나타낼 수 있으며 말뚝의 선단지지력은 얇은 기초의 지지력공식과 유사하다. 사질토의 경우 말뚝의 선단지지력은 지지력계수(N_q)와 직접적인 관계가 있으며, 이러한 지지력계수는 선단부 부근에 형성되는 지반의 변형형태(mode of deformation)에 따라 큰 차이가 있는 것으로 알려지고 있다.

점성토의 선단지지력은 비배수상태를 가정하여 산정하며 지지력계수(N_c)와 비배수 전단강도의 곱으로 나타내는데 지지력계수(N_c)는 Skempton이 제안한 $N_c=9$ 를 일반적으로 사용한다.

말뚝의 주면마찰력은 말뚝재료와 주변지반간의 경계면에서 직접전단현상이 발생하는 것으로 가정하여 산정하며 주면마찰력에 영향을 미치는 요소는 토압계수, 유효응력, 말뚝과 재료의 마찰각 등이 있다.

점성토의 경우 말뚝의 주면마찰력은 전응력방법(α 방법), 유효응력방법(β 방법), 혼합방법(λ 방법)으로 나누어 구할 수 있다. 하지만 말뚝의 주면마찰력 산정은 α 방법과 같은 비배수 전응력 해석보다는 장기적 안목에서 유효응력해석이 합리적이다. 유효응력 해석시 β 값은 $0.25\sim 0.32$ 의 값을 갖으며 부마찰력 산정시에도 β 방법은 보편적으로 적용한다. λ 방법은 주로 장대말뚝중에서 해상말뚝의 주면마찰력 산정시 적용한다.

(2) 현장시험에 의한 방법

현장시험의 결과를 직접이용한 경험식으로부터

말뚝의 지지력을 산정할 수 있다. 이러한 현장시험으로는 표준관입시험, 콘관입시험, 공내재하시험등이 있다. 표준관입시험결과로부터 말뚝의 지지력을 계산하는데는 Meyerhof공식 또는 수정공식이 사용되고 있으며 국내에서와 같이 지반조사가 표준관입시험만으로 이루어지는 경우 거의 대부분의 실무 설계에서 채택되고 있는 실정이다. 콘관입시험(CPT)의 경우 콘시험 장비가 말뚝의 지지력을 신뢰성있게 평가하기 위해 개발된 장비로 국내에서는 말뚝의 지지력 산정시 적용에는 한계가 있는데 이는 국내에서는 말뚝의 선단부가 풍화토 또는 풍화암층까지 시공되는 경우가 대부분인 선단지저말뚝 개념으로 설계가 되는데 콘장비의 관입심도에 제약이 있어 주로 국내에서는 콘관입시험을 연약지반조사시에만 한정적으로 적용하기 때문이다.

공내재하시험(PMT)결과로부터도 말뚝의 지지력을 산정할 수 있다. 프랑스의 LCPC에서 콘관입시험의 결과와 공내재하시험으로부터 말뚝의 지지력을 산정한 결과를 말뚝재하시험결과와 서로 상관관계를 추정한 결과 콘관입으로 추정한 말뚝의 지지력은 36%의 상관성이 있는 반면 공내재하시험 결과로 추정한 말뚝의 지지력은 99%의 상관성이 있었다고 발표하였다(Bustamante, 1983). 이러한 공내재하시험은 국내현장에서 콘관입시험처럼 깊이에 따른 한계가 없으므로 말뚝의 지지력산정시 적용이 가능하다.

(3) 파동이론에 의한 지지력 산정

파동방정식 해법은 해머가 말뚝을 타격하여 발생하는 응력과 말뚝축을 따라 일차원적으로 전파되는 현상을 파동방법식을 이용하여 해석하는 방법이다. 파동방정식의 해석은 해머와 쿠션 그리고 말뚝을 스프링과 dashpot로 연결된 몇 개의 요소로 나누어 유한차분법의 수치해석적방법을 이용

- (1) 말뚝의 타입을 위한 항타장비선정
- (2) 항타중 말뚝에 작용하는 항타응력 결정

(3) 최종관입량으로부터 말뚝의 지지력을 구할 수 있는 방법으로 국내에서는 주로 weap 해석프로그램을 사용한다.

3.2 기성말뚝의 시공법

3.2.1. 기성말뚝의 재질

목장에서 소나 말이 도망가지 않도록 나무로 울타리를 만들 때 울타리가 넘어가지 않도록 지면속에 끝을 뾰족하게 한 나무말뚝으로 타설한다. 이와 같이 공장 등에서 제작한 말뚝체를 시공전에 제조하여 지면상이나 해상에서 햄머 등으로 흠속에 박는 말뚝을 기성말뚝이라 한다. 기성말뚝의 재질은 나무말뚝(wood pile, timber pile), 강말뚝, 기성철근콘크리트 말뚝, 그리고 무근 콘크리트말뚝과 철근콘크리트말뚝의 외주에 강재를 감은 합성말뚝(composite pile)이 있다.

3.2.2 기성말뚝의 시공법

(1) 종류

기성말뚝의 시공법에서는 타격과 진동 햄머 등으로 타입하는 공법 이외에 진동이나 소음을 방지하는 목적으로 말뚝내부가 빈 말뚝속으로 흠을 강제적으로 굽어내는 내부굴착공법이다. 그리고 말뚝을 박을 장소에 미리 오거 등으로 구멍을 뚫어 놓고 말뚝을 삽입하여 넣는 프로보링공법 등이나, 타입하지 않고 밀어넣는 압입공법 등이 있다. 기성말뚝의 설치방법을 역학적 특성으로 대별하면 타격과 천공에 의한 것으로 나눌 수 있다. 그럴 경우, 압입말뚝을 타입말뚝에, 내부굴착말뚝과 프로보링말뚝을 매입말뚝(bored precast pile)에 포함시킬 수 있다.

(2) 배토와 비배토말뚝

타입에 의한 말뚝은 말뚝체와 거의 같은 제적의 흠을 밀어내며 설치하므로 배토말뚝이라 하고, 매입말뚝 및 현장타설말뚝은 흠을 파낸 후에 설치하므로 시공에 의해 흠을 밀어내는 것이 적으므로 비

배토말뚝이라 한다. 이것은 역학적 관점을 중시한 정의이며 시공법에서는 전혀 반대로 흙을 파낸 후에 설치하는 말뚝을 배토말뚝이라 하고, 타입말뚝과 같이 흙을 파내지 않는 말뚝을 비배토말뚝이라 하는 경우도 있다.

(3) 타입말뚝(driven pile)

기성말뚝은 거의 전길이에 걸쳐 지반내로 타입하여 설치한 말뚝을 말한다. 말뚝 타입은 타격에 의한 경우가 많으며 바이브로 햄머의 진동을 써서 관입시키는 방법도 있다. 항타기와 기성말뚝의 반력을 이용하여 압입하는 방법으로 설치한 말뚝을 압입말뚝(jacked pile)이라 한다. 타격공법(pile driving by hammer)에서는 디젤햄머(diesel hammer)가 많이 쓰이고 있으며 증기햄머(steam hammer)와 드롭햄머(drop hammer)도 쓰이고 있다. 디젤햄머는 사이클 디젤기관을 응용한 것으로서 햄머의 형식은 피스톤(piston, ram)의 중량과 관련있다. 예를 들면, AB-40은 AB사제의 햄머로서 피스톤 중량이 약 4ton인 것을 나타내고 있다. 디젤햄머는 육상공사에서는 크롤러형 항타기(crawler type pile driver)와 조합시켜 쓰는 경우가 많고, 또한 수상공사에서는 대선(臺船)상에 설치한 항타기를 사용하는 예가 많다.

타입 공법은 능률도 좋고 경제적인 공법이지만 시공에 따른 소음 및 진동이 크므로 시가지에서는 쓰지 못하게 되어 있다. 타격공법에서는 중추(램, 햄머, 몽겐)에 의한 말뚝머리의 파손을 방지하고 타격력을 균등하게 말뚝에 전달하기 위하여 말뚝머리 부분에 캡(cap, driving cap, driving helmet)을 돕과 동시에 캡의 상부에 견목이나 우레탄 등으로 만든 쿠션재를 놓는다 또한 말뚝머리부를 지반면보다 아래까지 타입하는 경우에는 말뚝머리부분에 이음말뚝(follower pile)를 붙여 타입한다. 최근에는 소음이 적은 유압햄머(hydraulic hammer)를 많이 쓰고 있다.

● 말뚝의 시공 정밀도

말뚝 타입의 시공 정밀도는 평면위치, 경사, 말뚝 축의 직선성 등으로 관리하며, 이들 타입 정밀도는 각 시공 시방서 등에서 규정되어 있지만, 도로교표준시방서(1996)에서는 말뚝타입후 평면상의 위치가 설계도면의 위치로부터 말뚝지름의 1/4과 10cm 중 큰 값이상으로 벗어나지 않아야 하고, 말뚝의 연직도나 경사도는 1/100 이내로 관리할 것을 권장하고 있다.

● 항타말뚝의 시공관리

실무에서는 설계시 지질주상도와 실제 지반의 지질주상도와 불일치 때문에 설계도서상에 제시한 말뚝길이 만큼을 지반에 말뚝을 타입하는 것이 아니라, 설치할 푸팅내의 말뚝들 중에서 대각선상에 있는 2개의 시험말뚝에 대해 최종관입량 2mm에 도달할 때까지 말뚝박기종료작업을 실시하여 관입된 말뚝길이에 1~2m를 더해 본말뚝의 길이로 결정한다(고속도로전문시방서, 1998). 이때 말뚝지지력은 항타공식으로 결정하므로 실제 지지력보다 과대 및 과소평가하는 경향이 있다. 이 공식은 말뚝의 정적인 극한지지력을 동적인 관입저항으로 극한지지력을 구하려는 것부터 원리적인 모순이 있을 뿐만아니라 말뚝-항타장비의 경계조건과 항타장비의 성능 그리고 시간경과에 따른 지지력 증감현상(set-up과 relaxation)을 제대로 반영하지 못하고 있다. 그럼에도 불구하고 실무에서 말뚝 지지력 관정에 항타공식을 널리 사용하는 이유는 간편하다는 이점과 도로교표준시방서(1996)의 규정 때문에 현장 실무자들이 널리 사용하고 있다. 요즘 우리나라에서는 항타공식보다 동재하시험에 의해 기성말뚝을 항타시공관리하는 방안을 마련하고 있거나 시행 중에 있다. 다음 내용은 고속도로전문시방서(2000)에 새로 추가된 항타말뚝의 시공관리방안 내용이다.

- ① 설계시 또는 시험타전에 파동방정식을 이용한 말뚝의 항타관입성을 검토한다.
- ② 항타관입성 분석을 통해 적절한 항타장비를

선정한 후, 본항타 전에 시험말뚝에 대해 정해진 빈도대로 동재하시험(E.O.I.D)을 수행한다.

표 1 기성말뚝의 동재하시험 빈도

교량기초 빈도	시험항목 및 방법	시험횟수	시험시기	시험말뚝 위치
푸팅별 말뚝수: 1~80본까지	동재하시험 (E.O.I.D)	2	시험타시	대각선상이나 감독자가 원하는 위치의 시험말뚝
푸팅별 말뚝수 1~160본까지	동재하시험 (E.O.I.D)	3	시험타시	
푸팅별 말뚝수 160본 이상	동재하시험 (E.O.I.D)	4	시험타시	

③ 시험말뚝의 결과를 이용하여

- 말뚝설계길이의 확인
- 지지층 확인
- 최종관입량 설정
- 시공성 및 시공능률 확인
- 항타장비 선정의 적정성 확인
- 햄머쿠션과 말뚝쿠션 등의 적합성
- 말뚝재료의 건전도
- 지반조건의 이상유무(설계내용과 비교)
- 편타발생 여부 및 그 원인 분석 등

시공관리에 필요한 자료를 얻고, 파동방정식 분석을 재수행하여, 본항타시 시공관리 방안을 확립하여야 한다.

④ 동적측정결과 분석용 프로그램을 이용하여 허용지지력을 결정할 경우, 극한지지력에 안전율 2.5(CAPWAP) 또는 3.0(TNOWAVE)를 적용하여야 한다.

⑤ 항타공식에서 구한 지지력은 정적지지력과 근본적으로 다르므로 시공관리목적으로만 사용하여야 한다.

(4) 매입말뚝(bored precast pile)

기성말뚝을 양질의 지지층까지 굴착한 지반속에 매입하여 설치한 말뚝을 말한다. 이 정의에 적합한

공법은 대단히 많지만 크게 2가지로 분류된다. 먼저 말뚝 설치방법에서는 오거등으로 미리 굴착한 공내에 말뚝을 삽입하는 프리보링공법(pile installation by preboring)과 선단개방형 말뚝의 내부에 오거를 삽입하여 말뚝선단 하부 지반을 굴착하면서 어느 정도의 타격을 가하든가 아니면 말뚝타설기계 등의 반력을 이용하여 압입 및 설치하는 내부굴착공법(pile installation by inner excavation)이 있다. 이들 방법은 모두 말뚝의 삽입을 용이하게 하기 위하여 주변마찰과 선단저항을 저감이라는 작업이 행해지고 있기 때문에 결과적으로는 말뚝의 지지력을 현저히 저하시키게 된다. 따라서 이들 공법에서는 지지력을 증가시키기 위하여 다음과 같은 선단 처리방법을 행하고 있다.

- 1) 지지지반에 도달한 곳에서 타격을 가함(최종 타격방식)
 - 2) 시멘트 밀크 등을 지반내에 주입하여 지반을 굳힘
- 또한 2)는 다음 2종류의 방법이 있다.

① 말뚝선단부 주변의 지반을 확대굴착하고 그 부분을 몰타르등으로 치환하든가(시멘트 밀크분출교반방식) 또는 고압에 의한 몰타르의 압입에 의해 말뚝선단부 주변의 지반의 강도를 크게 하여 선단지지력을 증가시키는 방법이다(콘크리트 치기 방식).

② 말뚝지름보다 3~10cm 크게 굴착하고 지반과 말뚝사이를 시멘트 밀크 등으로 주입 하여 선단지지력 뿐만아니라 주변마찰력을 증가시키는 방법이다. 그리고 시멘트 밀크를 주입했을 때와 그후 최소한 7일 경과후에 동재하시험을 실시하여 이 말뚝의 축방향지지력을 검토하여야 한다(고속도로 전문시방서, 2000).

4. 말뚝기초의 재하시험

4.1 서론

최근 각종 구조물의 건설을 위한 부지확보의 어려움으로 인하여 열악한 지반조건에서의 건설활동이 증가하는 추세이므로 깊은기초의 수요가 더욱 늘어날 전망이다. 깊은기초의 설계 및 시공단계에서 말뚝의 극한지지력을 추정 또는 측정하는 방법에는 정적재하시험(Static Pile Load Test), 동적하중에 의한 말뚝시험, 파동방정식에 의한 항타해석(Wave Equation Analysis of Pile), 동적공식(Dynamic Formula), 정적공식(Static Formula) 등이 있다. 그러나 이들 방법들은 결과의 신뢰도 면에서 상당한 차이가 있으며 피육군 공병단은 표2에 보이는 바와 같이 지지력 추정방법의 신뢰도와 하중조건에 따라 안전율을 다르게 적용하고 있다. 현장에서는 일반적으로 시험타시 또는 항타후 말뚝에 대한 시험을 수행하여 말뚝의 지지력을 확인하는 것이 일반적인 관행이다. 말뚝의 시공관리를 위해 현재까지 개발된 시험방법 중 정적재하시험과 항타분석기(Pile Driving Analyzer)에 의한 말뚝시험이 국내에서는 가장 보편적으로 쓰이는 방법이며, 정동적 재하시험(Statnamic), 네달란드의 Fundex사의 의사정적재하시험(Pseudo Static Pile Load Test)과 오스터버그 셀을 이용한 재하시험(Osterberg Load Cell Test)등은 국내에서는 아직 사용실적이 미미한 편이다. 이들 시험법들의 장단점을 인식하고 시험목적, 비용 및 시간의 측면을 고려하면서 여러시험방법을 적절히 조화하여 말뚝의 시공관리에 이용한다면 말뚝의 설계 및 시공성 향상, 시공관리 및 품질 향상, 공비절감 등 상당한 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

4.2 정적재하시험

정적재하시험은 말뚝의 시공품질을 확인할 수 있는 가장 신뢰도 높은 방법으로 현재 국내외에서 가

표 2. 말뚝의 지지력에 대한 안전율

Method of Determining Capacity	Loading Condition	Minimum Factor of Safety	
		Compression	Tension
Theoretical or empirical prediction to be verified by pile load test	Usual	2.0	2.0
	Unusual	1.5	1.5
	Extreme	1.15	1.15
Theoretical or empirical prediction to be verified by PDA	Usual	2.5	3.0
	Unusual	1.9	2.25
	Extreme	1.4	1.7
Theoretical or empirical prediction not verified by load test	Usual	3.0	3.0
	Unusual	2.25	2.25
	Extreme	1.7	1.7

장 많이 쓰이고 있는 방법이다. 국내의 경우 현재 약 2000본 이상의 말뚝에 대해 정적재하시험을 실시하고 있는 것으로 추산된다. 만약 telltale 또는 strain gage를 설치한 말뚝에 정적재하시험을 실시하면 주변마찰력과 선단지지력을 분리할 수 있으며, 말뚝-흙의 하중전이를 정확히 알 수 있다는 장점이 있다. 근래들어 많은 전문시험업체의 등장, 대용량 시험장비의 확보, 기술력의 축적으로 시험기간의 단축 및 시험비용의 감소가 이루어지고 있으나 다른종류의 시험방법들에 비해 상대적으로 경비와 시간면에서 현장의 부담이 큰 것이 사실이다. 또한 지반의 상태변화가 심하고 말뚝의 물량이 많은 경우 극히 일부의 말뚝에 대해 정적재하시험을 실시한 결과로 전체말뚝의 시공관리를 하기에는 무리가 있다.

4.2.1 시험방법

말뚝의 압축재하시험에는 설계하중의 2~3배에 달하는 재하하중이 필요하다. 하중재하방법에는 사하중을 말뚝머리에 직접 재하하는 방법도 있지만 반력말뚝 또는 반력양가의 인발저항력을 이용하여 원하는 하중만을 유압잭을 통해 말뚝에 전달시키는 방법이 보편적이다. 말뚝의 압축재하시험을 위한

재하방법에는 완속재하시험(Slow Maintained Load Test), 급속재하시험(Quick Maintained Load Test), 하중증가평형시험(Load Incremental Equilibrium Test), 일정침하율시험(Constant Rate of Penetration Test), 일정침하량시험(Constant Settlement Increment Test) 등이 있으며 국내에서는 완속재하시험이 많이 시행되고 있다.

완속재하시험은 ASTM D 1143-81에 자세한 사항이 규정되어 있으며 설계하중의 200%를 8단계로 나누어 재하한다. 각 하중단계에서 말뚝머리의 침하율이 시간당 0.01 inch(0.25 mm)이하가 될 때까지 또는 하중지속시간이 최대 2시간을 넘지 않도록 하여 재하하중을 유지하며, 설계하중의 200%에 도달하면 시간당 침하량이 0.01 inch(= 0.25mm) 이하일 경우 12시간, 그렇지 않을 경우 24시간동안 하중을 유지시킨다. 시험이 완료되면 설계하중의 25%씩 각 단계별로 1시간씩 간격을 두어 하중을 제거한다. 필요에 따라 반복재하시험(Cyclic Loading Test)을 실시하기도 하는데 재하하중이 설계하중의 50%, 100% 및 150%에 도달하였을 때 재하하중을 각각 1시간동안 유지시킨 후 표준재하방법의 재하시험과 같은 단계를 거쳐 단계별로 20분 간격을 두면서 재하한다. 하중을 완전히 제거한 후 설계하중의 50%씩 단계적으로 다시 재하하고 표준 시험방법에 따라 다음 단계로 재하한다.

4.2.2 정적재하시험의 오차요인

정적재하시험은 어떤 상황에서도 말뚝의 지지력을 가장 정확하게 판정할 수 있는 시험방법이다. 그러나 재하시험방법, 하중단계별 허용시간 등에 따라 상이한 하중-침하곡선을 얻을 수 있으며 극한하중이 뚜렷하지 않은 경우에는 해석방법에 따라 상이한 허용하중이 산정된다. 또한 재하시험시 측정되는 하중 및 침하량에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 요인이 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

국내의 경우 대부분의 재하시험은 설계하중의

200%를 8단계로 나누어 재하하고 각 하중단계별로 0.25mm/hr 이하의 침하율에 도달하거나 최대 2시간까지의 침하를 측정한다. 그러나 하중제거전 하중지속기간이나 하중제거중 하중단계 및 단계별 허용시간을 지키지 않는 경우가 일반적이므로 잔류 침하 측정치의 신뢰도가 적다. 반복식 하중재하시험시에도 재하 및 재제하단계에서 하중단계 및 허용시간을 일정하게 하지 않는 경우가 많다. 또한 현장여건에 따라 완속재하시험과 급속재하시험을 혼합한 형태의 시험을 실시하는 경우도 있으나, 시험의 결과는 상이할 수 있음에 유의하여야 한다. 예를 들면 동일한 항두하중 작용시 급속시험이 완속시험에 비해 상대적으로 적은 침하를 유발하나, 급속시험에 의한 극한하중은 완속시험에 비해 상대적으로 적을 가능성이 크다.

정적재하시험 수행시 유압잭의 압력계만을 읽어 말뚝의 두부에 작용하는 하중을 추정하는 경우에는 최대 25%까지의 오차가 발생하는 것으로 알려져 있으며 재하시험에는 더 큰 오차가 발생할 수 있다. 로드셀을 사용하는 경우에도 최근에 검교정을 받았는지 여부를 확인하여야 하며, 현장시험중 작용하중의 편심 및 온도변화 등으로 인해 20% 이하의 오차가 발생할 수 있다. 시험말뚝에 근접한 인발말뚝을 이용하여 하중을 작용시키는 경우에는 간섭현상으로 인해 시험결과에 오차가 발생할 수 있으므로 재하법의 용량 및 길이가 허용하는 최대이격거리를 확보하는 것이 유리하며, 특히 모래지반에 말뚝이 타설된 경우에 오차가 클 것으로 판단된다. 하중작용에 따른 변위를 측정하기 위한 다이얼게이지는 reference beam을 가능하면 인발말뚝에서 최대로 이격하여 고정시켜야 하며, 온도변화에 따른 범의 처짐을 최소화하기 위해 열팽창계수가 적은 나무를 사용하여야 하나 대부분 철제빔을 사용하므로 시험기간 중의 대기온도 및 햇볕에의 노출여부에 의해 상당한 오차가 포함되어 있을 것으로 판단된다.

4.2.3 재하시험결과의 해석

(1) 극한하중의 결정

말뚝재하시험의 목적은 말뚝의 허용하중을 결정하는데 있다. 극한하중은 하중의 증가가 없음에도 불구하고 침하량이 무한대로 증가할 때의 하중을 의미한다. 그러나 국내의 경우 기초를 마찰말뚝으로 설계/시공되는 경우는 거의 없으므로, 말뚝재하시험 결과 극한하중이 분명하게 관찰되는 경우는 흔치 않으며, 하중증가에 따라 침하량이 서서히 증가하는 상태에서 시험이 종료되는 경우가 일반적이다. 따라서 plunging failure가 관찰되지 않은 정적재하시험의 결과로부터 말뚝의 극한지지력 해석을 위해 적용한 방법들에 따라 해석결과에 차이가 발생한다. 말뚝재하시험 결과의 해석에 대한 각국의 설계기준들도 의견상 극한 또는 항복하중을 기준으로 하는 개념과 침하량 기준개념으로 대별할 수 있다.

재하시험에 의한 하중-침하량 관계는 다양한 형태로 나타나며, 따라서 말뚝재하시험 결과로부터 항복하중(yield load) 또는 파괴하중(failure load)을 판정하기 위한 여러가지 방법이 일찍부터 제안되어 왔다. 하중-침하량 곡선을 해석하는 데에는 곡선의 특성을 기하학적으로 분석하거나 수학적 변형을 통하여 극한하중을 도출하는 방법과 하중-침하량외에 침하량 발생의 시간경과에 따른 특성을 추가하여 해석하는 방법 등 다양한 해석방법이 제안되어 왔지만, 지반조건, 말뚝조건, 시공조건 등의 다양함을 모두 만족시키는 범용성 있는 해석법은 아직까지 개발되지 못한 실정이다. 극한하중을 결정하기 위한 해석법은 Chin(1970), Hansen(1963), Mazurkiewicz (1972), Vander Veen(1953) 등에 의해 제안되었으며 동일한 시험결과에 적용시 Chin의 방법으로 해석된 지지력이 가장 큰 것으로 알려져 있다.

건설부 제정「구조물기초 설계기준」에서 채택하고 있는 극한 또는 항복하중 결정과 여기에 일정한 안전율을 적용하는 해석법은 설계개념에 있어 분명하다는 장점을 갖고 있다. 다만 극한 또는 항복하중

결정방법에 있어 다양한 전침하량 또는 잔류침하량 기준들이 포함되지 않아 상대적으로 보수적인 해석으로 치우칠 수 있는 가능성이 있다.

(2) 침하에 의한 제한하중 결정

이러한 해석기법상 불가피한 차이를 해소하는 방안으로 하중재하시 발생하는 침하량만을 기준으로 하여 극한하중 또는 설계하중을 결정하는 방법이 폭넓게 사용되기도 한다. 침하량 기준 판정법에는 전침하량(total settlement)기준과 순침하량(net settlement)기준이 있다. 그러나 침하량 기준 판정법은 말뚝의 길이, 지반조건 등이 감안되지 않아 해석 대상 구조물의 성격에 따라 설계개념에 적합하도록 조정하는 것이 필요하다. 특히 말뚝의 관입깊이가 큰 변화를 보이는 지반조건에서는 부등침하에 대한 고려가 되어야 한다. 말뚝기초의 허용침하량은 지반의 지지능력이외에 말뚝의 재질, 길이 등에 따라 큰 차이가 있을 수 있어 순수한 침하량 기준으로는 볼 수 없다. 오히려 침하량기준, 예를들면 BS의 0.1D 전침하량기준 또는 DIN의 2.5%D 잔류침하량기준, New York시의 0.01inch/ton 잔류침하량 기준들은 재하시험 결과인 하중-시간-침하량 관계의 불분명한 해석을 인위적인 침하량기준으로 단순화시켰지만 결국 그 기준침하량에 해당하는 하중을 극한 또는 항복하중으로 간주하여 안전율을 적용하는 해석법의 한 편법으로 보는 것이 타당할 것이다. 그러나 엄밀한 의미에서 이러한 규준은 일정한 침하의 제한치에 상응하는 하중을 의미하므로 극한하중보다는 제한하중(limit load)이라고 하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

전 침하량 기준으로는 Singapore 지하철 설계기준에서 규정한 설계하중에서 6~9 mm, 설계하중의 1.5배 하중에서 9~20mm와 같은 엄격한 기준에서부터, 일본 토질공학회의 25mm, 러시아에서 적용되는 40~80mm 등 광범위한 기준들이 있다. BS규정에서는 말뚝직경의 10% 침하량을 기준으로 하며 Terzaghi and Peck이 제안한 25mm의

기준도 많이 채택되고 있다. 인위적인 기준값은 말뚝의 설치방법과도 밀접한 관계에 있어 De Beer는 항타말뚝의 경우에는 말뚝직경의 10%, 현장타설 콘크리트 말뚝에서는 말뚝직경의 30% 침하를 기준 값으로 할 것을 제안하고 있다. 또한 선단지지력의 발휘에 요구되는 변위는 말뚝의 직경에 비례하는 것으로 알려져 있으므로 말뚝직경의 고려없이 일정한 침하량에서의 하중을 말뚝의 제한하중으로 해석하는 것은 문제가 있다.

(3) 항복하중의 결정

지지력 기준과 침하량 기준외에 말뚝에 하중이 재하되었을 때의 하중(P)-시간(t)-침하량(S) 거동 특성이나 하중재하에 따른 말뚝재료의 탄성변위를 감안하는 방법에 의하여 소위 항복하중(Yield Load)을 구하여 판정하는 방법이 있다. 여기에는 P-S 곡선분석, log P - log S 곡선분석, S-log t 분석, S-log P 분석, P-log S 분석, dS/d(log t)-P 분석, Fuller and Hoy(1970) 방법, Butler and Hoy(1977) 방법, Davisson(1972) 방법 등이 있다. 건설부 제정 "구조물 기초설계 기준" 해설편에서는 "극한하중이 확인되면 문제없으나" 그렇지 못할 경우 항복하중에 의하도록 하고 ① S-log t 분석 ② dS/d(log t)-P 분석 ③ log P - log S 분석과 ④ 잔류침하량에 대한 log P-log S 방법을 권장하고 있다. 아울러 항복하중의 1.5배를 극한하중으로 가정하지만 이 방법에 의한 극한 하중이 실제 극한하중보다 크지 않도록 주석을 두고 있어 항복하중에 의한 분석을 안전하게 하는 장치를 하고 있다.

말뚝의 하중(P)-시간(t)-침하량(S) 관계는 주변마찰 성분과 선단지지 성분에 있어 그 특성이 상이하다. 선단지지력과 주변마찰력을 분리하여 측정하는 재하시험 결과에 의하면 주변마찰력은 하중증가에 거의 정비례하는 침하량을 보여주며, 말뚝직경과 관계없이 대부분 5~10mm의 침하량에 도달하면 극한 상태가 된다. 반면 선단지지력은 선단의 극한 파괴조건에 따라 하중-침하량 관계가 다양하게

나타난다. 실제로 말뚝에 제 1구간에 해당되는 하중이 재하되면 침하량-시간관계도 주변마찰의 특성이 위주가 된다. 극한 주변마찰력을 초과하는 하중상태인 제 2구간과 3구간에서는 선단저항의 침하량-시간관계만이 나타나게 되며, S-log t 관계가 변화하게 된다. S-log t 분석으로 항복하중을 판정할 때, 주변마찰력의 비율이 높은 경우에는 제 1구간과 제 2구간의 경계부와 항복하중의 2가지 하중에서 요(凹)형 상태가 판정되기도 하여 항복하중 판정이 애매해 질 수도 있다. 같은 이유에서, 제 3구간까지 재하를 하지 않고 말뚝재하시험을 중단하면 S-log t 분석은 물론 S-P 분석, log P-log S 분석은 진짜 항복하중이 아닌 주변마찰 특성과 선단지지 특성의 교차점인 가(假)항복하중만을 분석할 가능성도 있다.

Davisson의 판정법은 말뚝의 전침하량과 말뚝직경, 단면적, 탄성계수 및 말뚝길이 등을 고려한 순침하량 판정을 복합적으로 적용한 것으로 최근 서구에서는 가장 합리적인 말뚝 허용하중 판정법으로 인정받고 있다. 국내에서도 Davisson 판정법에 의한 말뚝지지력 해석 결과 국내의 항복하중 기준 설계법과 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나 Davisson의 판정법은 말뚝길이가 지나치게 짧거나 주변마찰력이 낮은 말뚝의 경우에는 다른 판정기준보다도 낮은 허용하중을 나타내 준다. 이와 같은 경우 다른 판정기준들과의 비교를 통한 기술자의 판단이 요구된다.

4.3. 항타분석기에 의한 말뚝시험

4.3.1 항타분석기

항타분석기는 1차원 파동전달이론을 이용하여 항타시 충격파의 전달을 해석하는 장비로 1960년대 말 개발된 이후 수차례의 개선을 통하여 미국의 PDI사에서 현재의 항타분석기로 발전시켜 왔다. 미국, 홍콩, 유럽 등지에서는 70년대부터 널리 항타분석기를 이용해 왔으며, 국내에는 1994년에 최초로 도입된 이래 약 25대의 항타분석기가 도입되었다.

또한 네덜란드 TNO와 일본의 건설성 토목연구소에서도 비슷한 장비를 개발되었으며 국내에도 TNO의 장비가 5대 내외의 도입된 것으로 추정된다. 우리나라에서는 매년 약 2000~2500본 이상의 말뚝이 항타 분석기에 의해 시험되는 것으로 추정된다.

항타분석기는 항타로 인한 최대압축응력, 최대인장응력, 말뚝에 전달되는 항타에너지, 말뚝의 건전도지수, 말뚝의 예상 극한지지력 등을 항타와 동시에 화면에 제시하므로 항타시스템의 거동, 말뚝의 overstress 여부, 말뚝의 손상정도 및 위치, 말뚝의 지지층 관입 여부 등을 항타와 동시에 즉시 판단할 수 있다. 특히 CAPWAP해석을 실시하면 정적재하시험을 모사한 하중-변위 곡선, 주면마찰력과 선단지지력, 예상극한지지력을 비교적 정확히 추정할 수 있다. 항타분석기를 이용한 시험방법은 시험비용 면에서 정적재하시험의 약 1/4 ~ 1/5 정도이고 하루에 약 5 ~ 10분까지 시험 가능하다. 항타분석기에 의한 말뚝시험은 말뚝에 적절한 타격을 가할 수 있는 낙하추만 있다면 타입말뚝, SIP말뚝, 현장타설말뚝 등 모든 종류의 말뚝에 적용이 가능하다.

4.3.2 항타분석기의 적용

(1) 말뚝지지력의 추정

항타분석기는 항타시 두부에서 측정된 힘과 속도를 1차원 파동전달이론으로 해석하여 말뚝의 정적지지력을 예측한다. 지지력 예측에는 Case방법과 CAPWAP방법이 있다.

(가) Case 방법

Case방법은 항타와 동시에 간략식으로 예상지지력을 제시하며 말뚝의 정적극한지지력(RS)은 전체저항력(RTL)에서 동적저항력(RD)을 제거함으로써 구할 수 있다(Rausche 등, 1985).

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

여기서, RTL은 전체 항타저항력; RD는 동적저항력; RS는 정적저항력 또는 정적지지력; FT1과 FT2는 각각 시간 T1과 T2에 말뚝두부에서 측정된 힘; VT1과 VT2는 각각 시간 T1과 T2에 말뚝두부에서 측정된 속도; EA/C는 말뚝의 impedance이다. JC는 Case damping으로 무차원 계수이고 0.05~1.10의 범위를 갖으며 점성이 클수록 값이 크다. 일반적으로 가속도계와 변형계를 설치한 위치에서 말뚝선단까지의 길이가 L이라면, 시간 T1은 측정된 속도가 최대인 때로 정의되며 시간 T2는 T1으로부터 2L/C가 경과한 시간을 말한다.

(나) CAPWAP방법

Case방법은 현장에서 항타와 동시에 말뚝의 예상극한지지력을 제시하므로 항타관리에 매우 편리하지만, 계산방법 자체가 간략식에 의존하고 JC값이 경험적으로 가정되어야 하므로 예상지지력에 오차가 발생할 수 있으며, 단면이 변화하는 nonuniform말뚝에 대한 해석은 불가능하다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 개발된 것이 CAPWAP(Case File Wave Analysis Program)방법이다. CAPWAP은 Rausche(1970)에 의해 개발된 컴퓨터 프로그램으로 항타분석기에서 얻은 힘과 속도를 이용하여 시행오차법으로 두 파형을 일치시켜 경계조건(지지력 분포, quake 및 damping 특성)을 결정하는 방법이다.

CAPWAP방법은 말뚝두부에서 측정된 파형중 하나를 입력치로, 말뚝 및 흙의 모델링 parameter 들을 경계조건으로 하여, 항타시 말뚝의 거동을 계산한 후 측정된 파형과 비교하는 wave matching technique을 사용한다. 반복적인 계산과정중, 계산된 출력치와 실제 측정치가 잘 일치하도록 경계조건을 조절하는 작업이 필요하며 CAPWAP에서는 자동 또는 수동으로 이 작업을 수행할 수 있다. 반복작업시 조정되는 경계조건중 중요한 것은 quake, unloading quake, 흙과 말뚝의 damping, unloading level, reloading level, radiation damping, plug mass, 흙의 저항분포 등이다. 이

와같은 반복계산으로 best match가 얻어지면, CAPWAP은 이들 경계조건을 이용하여 프로그램 상에서 모사정적재시험(Simulated Static Pile Load Test)을 실시하여 하중-변위곡선을 얻으며 주면마찰력의 분포 및 선단지지력을 제시한다. 그림 1은 CAPWAP해석의 일반적인 출력 예를 보이고 있다.

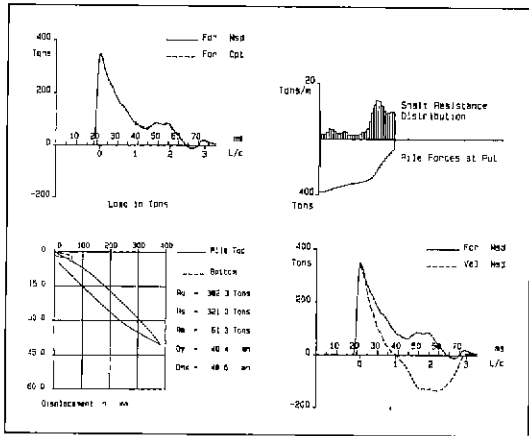


그림1. CAPWAP 해석 예

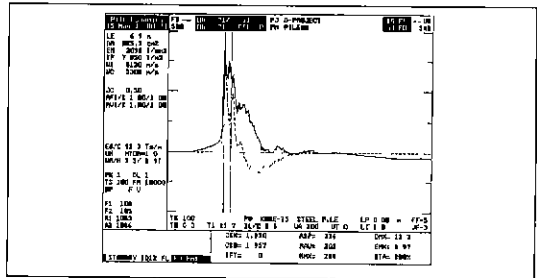
(2) 항타시스템의 평가

항타분석기로 말뚝두부에서 얻은 힘과 변형속도를 이용하면 항타시스템(항타기, 헬멧, 쿠션 등)에 의해 말뚝두부에 실제로 전달된 에너지는 다음 식으로 계산할 수 있다.

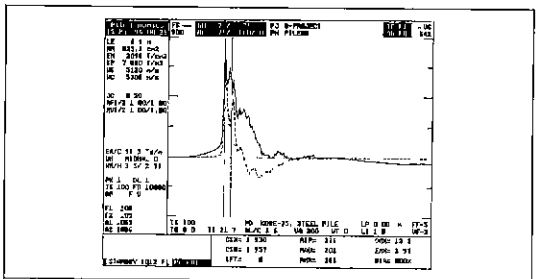
$$E(t) = \int_0^t F(t) V(t) dt$$

여기서, E(t)는 말뚝두부에 전달된 에너지; F(t)는 항타분석기로 얻은 힘-시간 곡선; V(t)는 항타분석기로 얻은 속도-시간 곡선을 나타낸다. 이때 E(t)의 최대값이 말뚝두부에 전달된 최대 항타에너지(EMX)가 된다. EMX는 항타기의 효율뿐만 아니라 항타시스템 전체(항타기, impact block, 항타기 쿠션, 헬멧, 말뚝쿠션 등)에 의해 영향을 받기 때문에 항타시스템의 거동을 평가하는 중요한 척도이다.

그림 2는 정상적인 항타기 작동시와 조기점화 (Preignition)가 발생한 경우에 항타분석기로 관찰된 과정을 보여주고 있다. 정상적으로 작동하는 디젤항타기는 램이 impact block에 타격됨과 동시에 연료의 폭발이 발생하므로 충격력과 폭발력이 동시에 말뚝에 전달된다. 그러나 조기점화시에는 타격 직전에 디젤유의 폭발이 발생하므로 항타에너지가 충분히 전달되지 않으며 따라서 상당히 적은 관입량이 관찰된다. 따라서 조기점화가 발생할 때 관찰된 최종관입량으로 동적공식에 의해 지지력을 산정하면 지지력이 과대평가될 가능성이 크므로 상당히 위험한 결론에 도달할 가능성이 있다.



(a) 정상작동시



(b) 조기점화시

그림2. 디젤항타기의 거동

또한 말뚝의 두부를 파손하면서 항타하는 경우 전달된 에너지의 일부가 두부파손에 소모되므로 실제로 말뚝의 관입에 소요되는 에너지는 말뚝두부가 손상되지 않도록 항타하는 경우와 비교하여 상당히 적은 것으로 판단된다. 두부가 손상되도록 항타하는 경우 항타관리를 위한 최종관입량이 과소평가되어

동적지지력공식으로 추정한 말뚝의 지지력이 과대평가됨에 유의하여야 한다. 따라서 현장기술자의 경험과 육안관찰에만 의존하는 것 보다는 향타분석기로 시공관리를 실시하여 향타기의 정상적인 작동여부, 향타시스템의 적합성, 말뚝두부 손상으로 인한 에너지 전달률의 감소 여부를 예의 주시하여야 한다.

(3) 향타용력의 평가

향타분석기를 이용하면 향타로 인해 말뚝두부에 발생하는 최대압축응력(CSX), 선단에서의 최대압축응력(CSB), 말뚝에 작용하는 최대인장응력(TSX)을 향타와 동시에 알 수 있다. 향타의 목적상 말뚝에 손상이 발생하지 않는 범위내에서 최대의 향타에너지가 말뚝에 전달되어야만 소정의 지지력을 갖는 말뚝을 시공할 수 있으므로, 향타중 향타분석기로 CSX, CSB, TSX 등을 관찰하여 말뚝두부 및 선단의 손상, 인장균열의 발생을 최대한 억제하면서 향타관리를 실시함으로써 효율적인 향타관리를 실시할 수 있다.

특히 말뚝선단의 파손은 현장기술자의 육안으로는 판단하기 어려우므로 CSB를 관찰하면 눈에 보이지 않는 위치에서의 말뚝손상을 방지할 수 있다. 콘크리트 말뚝의 초기향타시 말뚝의 선단이 자유단에 가까운 상태이므로, 향타로 인한 압축파가 선단에서 인장파로 반사되는 경우가 발생한다. 이 경우 말뚝에 인장균열이 발생할 가능성이 크므로 향타시 인장응력도 유의하여 관리하여야 한다. 향타분석기는 향타시말뚝에 발생하는 최대인장응력(TSX)을 추정할 수 있으므로 향타관리에 유용하다.

(4) 말뚝건전도의 평가

Rausche 등(1978)은 말뚝선단에서의 반사파가 돌아오는 시간(2L/C) 이전에 인장파의 반사가 발생하는 경우 말뚝의 중간부분이 손상된 것이라고 주장하였다. 즉, 말뚝의 중간부분에서 손상 또는 단면의 감소가 발생하면 시간 2L/C 이전에 F가 감소하고 V는 상대적으로 증가하여 두 파형이 서로 접

근하거나 교차하는 현상이 발생한다. 이때 향타분석기 화면에는 말뚝의 손상이 추정되는 위치에 blinking line이 표시되고 말뚝의 손상정도를 나타내는 건전도 지수(BTA)가 제시된다. Rausche 등(1978)은 F와 V 파형의 접근 정도에 따라 말뚝의 건전도 지수(BTA)를 결정하는 방법을 제안하였으며 BTA는 원래의 말뚝 단면적에 대한 손상되지 않은 말뚝의 단면적과 대략 비슷하다.

4.4 정동적재하시험

정동적재하시험은 캐나다의 Berminghammer사와 네덜란드의 TNO가 1988년부터 개발을 시작하여 1990년부터 실용화한 방법이다. 그 원리는 포탄 발사시의 작용-반작용과 유사하며 실린더 내부의 추진연료 연소시 발생하는 가스압을 이용하여 반력하중을 밀어올리는 반작용으로 말뚝의 두부에 하중을 가하는 시험이다. 정동적재하시험 장비는 전세계적으로 20여대가 있는 것으로 추산되며, 국내에는 500톤 용량의 장비 수대와 3400톤 용량의 장비 1대 도입되었다. Berminghammer사의 시험기록에 의하면 1990년부터 현재까지 전세계적으로 수행된 시험은 수백 회 정도로 추산되나 이들 대부분은 600톤 이하의 하중을 작용시킨 경우이고 1600톤 장비는 1994년 1월, 3400톤 장비는 1994년 11월 시험에 투입되었다. 이 시험은 초기투자가 크며 시험비용면에서는 정적재하시험과 비슷하고, 시험시간은 약간 빠르며 인발말뚝이 없는 경우에도 시험이 가능하다. Statnamic에 의한 말뚝의 주면 마찰력 측정사례는 일본에서 연구차원으로 실시된 적이 있으며, 횡방향재하시험은 1994년 연구목적으로 60톤급 시험이 실시된 사례가 있다.

4.4.1 시험장치의 구성

정동적재하시험을 위한 장비는 기초 후레임(base frame), 반력하중(reaction mass), 자갈챔버(gravel chamber), piston cylinder, 소음기(silencer), 하중계(load cell), 레이저 장비(laser

equipment), 시험조정과 데이터 수집을 위한 컴퓨터 시스템으로 구성되어 있다. 그림 3은 정동적재하시험 장비가 말뚝에 설치된 모습을 보이고 있다. 반력하중은 일반적으로 콘크리트, 주철, 납 등으로 제작되며 도넛모양으로 제작되어 원하는 중량만큼 소음기에 끼워 넣게 되어 있다. 반력하중의 무게는 대개 말뚝에 가할 최대하중의 5% 내외이며 시험시 상향으로 1 ~ 2 m 추진되었다가 낙하한다. 자갈 챔버는 낙하하는 반력하중으로부터 piston cylinder를 보호하기 위한 것으로 반력하중의 상승시 자갈이 중력에 의해 cylinder 주변을 채워주므로 반력하중은 자갈위에 낙하하게 된다.

정동적재하시험은 네덜란드의 TNO에서 개발된 FPDS (Foundation Pile Diagnostic System)로 시험과정의 조정, 데이터 수집, 결과해석을 실시한다. FPDS는 하중계와 레이저 센서로부터 1초당 5,000개의 데이터를 수집하여 하중 및 변위를 측정한다. 그림 4는 측정된 결과 예를 보이고 있다.

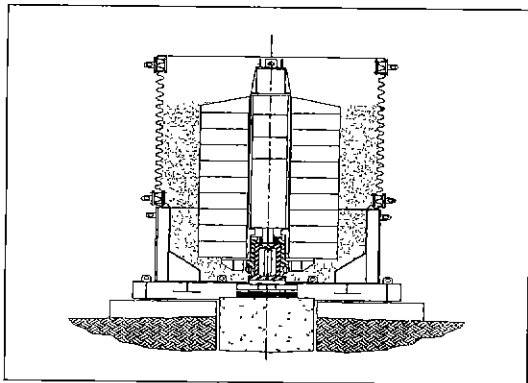


그림 3. 정동적재하시험 장비구성

4.4.2 정동적재하시험의 해석

정동적재하시험시 말뚝에 발생하는 가속도는 약 20g 정도이고 하중의 지속시간은 약 150 ms로 동적재하시험에 비해 가속도는 작고 하중지속기간은 상대적으로 크다. 이를 근거로 Janes 등(1991)은 정동적재하시험의 말뚝/흙의 거동은 압축과의 이동에 의해 영향을 받는 동적재하시험과는 다르며, 정

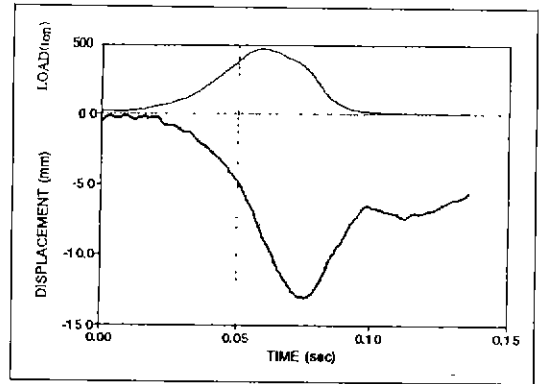


그림 4. 정동적재하시험의 측정예

동적재하시험중 말뚝은 지속적인 압축을 받으며 정적재하시험에 가까운 거동을 보인다고 주장하였다.

Middendorp (1992)는 정동적재하시험시 말뚝을 정동적 하중(F_{stat}), 관성력(F_a), 흙의 저항(F_{soil})들이 작용하는 mass로 모델링하였다. 흙의 저항은 흙의 정적저항 (F_u), 흙의 동적저항 (F_v), 간극수압에 의한 저항(F_p)로 구성된다. 힘의 평형에 의해 다음의 식을 얻으며,

$$F_{stat}(t) = F_{soil}(t) + F_a(t) \quad (2)$$

여기서 $F_{soil}(t) = F_u(t) + F_v(t) + F_p(t)$ 이다. 만약 간극수압에 의한 저항이 무시할만큼 작다고 가정하면 식 2는 다음 식으로 표현된다.

$$F_{stat}(t) = F_u(t) + F_v(t) + F_a(t) \quad (3)$$

여기서 $F_v(t) = C \cdot v(t)$, $F_a(t) = m \cdot a(t)$, C = 감쇠계수, $v(t)$ = 속도, m = 말뚝의 질량, $a(t)$ = 가속도이다.

Middendorp (1992)는 정동적재하시험으로부터 얻은 하중-변위곡선을 5단계로 분리하여 각단계별 특성을 다음과 같이 설명하였다.

- 1) 말뚝에 반력하중이 재하된 단계로 변위를 d_{stat}

이라 하면 하중-변위 관계는 다음과 같다.

$$k_1 = \frac{F_{stat}}{d_{stat}} \quad (4)$$

2) 반력하중이 추진되면서 반발작용으로 말뚝에 하중이 재하되기 시작하는 단계로 흙의 저항은 탄성으로 가정할 수 있고 말뚝에는 inertia force와 damping force가 작용한다.

3) 흙의 저항이 최대치에 도달하고 말뚝의 관성력은 점차적으로 증가하는 단계로 이 단계의 끝에서 정동적 하중이 최대값 (F_{max})에 도달한다.

4) 정동적 하중은 감소하나 관성으로 인해 말뚝의 침하는 계속 증가하는 단계이다. 이 단계의 마지막에서 ($t=t_{umax}$) 말뚝의 변위는 최대치에 도달하며 말뚝의 속도는 0이 된다.

5) 흙의 저항으로 인해 말뚝이 unloading되는 단계이다.

식 3으로부터 흙의 정적저항은 다음식으로 표현된다.

$$F_{soil}(t) = F_{stat}(t) - C \cdot v(t) - m \cdot a(t) \quad (5)$$

여기서 $F_{stat}(t)$ 는 하중계로 측정되며 $a(t)$ 는 측정된 변위-시간으로부터 계산할 수 있다. 감쇠계수 C 는 각 단계별로 구분하여 다음과 같이 계산한다.

- 1) 1단계는 정적인 거동이므로 $C_1=0$ 으로 한다.
- 2) 2단계에서의 스프링계수 (spring stiffness) k_2 는 1단계에서의 stiffness k_1 (식 4)와 같다고 가정하여 감쇠계수는 다음식으로 산정한다.

$$C_2 = [F_{stat}(t) - k_1 \cdot u(t) - m \cdot a(t)] / v(t) \quad (6)$$

3) 4단계에서 흙의 정적극한저항이 완전히 발휘되었고 그 값이 F_{max} 와 같다고 가정하면 감쇠계수는 다음과 같이 계산된다.

$$C_{3or4} = [F_{stat}(t) - m \cdot a(t) - F_{max}] / v(t) \quad (7)$$

이 값을 3단계와 4단계 감쇠계수의 대표치로 가정하여 흙의 정적지지력을 계산한다. 이때 $t=t_{umax}$ 일때의 말뚝속도와 가속도는 0 이므로 흙의 정적저항은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$F_u(t_{umax}) = F_{stat}(t_{umax}) \quad (8)$$

그림 5는 정동적재하시험 곡선과 위와 같은 과정으로 추정된 정적재하시험 곡선의 예를 보이고 있다

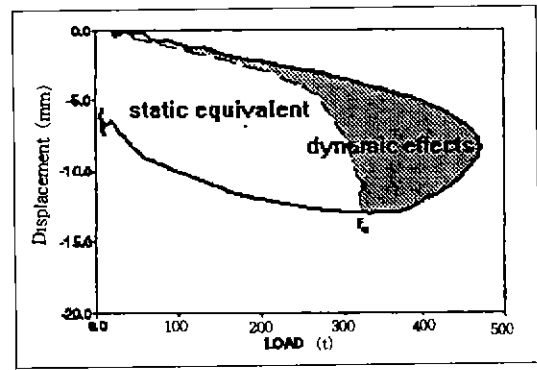


그림 5. 정동적재하시험 해석예

5. 대구경 말뚝기초의 설계 및 시공

5.1 개요

현장타설말뚝에서는 직경 760 mm이상의 말뚝을 대구경 말뚝으로 정의하고 있으며, 강관말뚝에서는 구체적인 정의는 찾아 볼 수 없었으나 본 설명에서는 동일한 정의를 사용하도록 하였다. 국내의 대구경 말뚝의 현황, 현행 설계와 시공상의 문제점 등을 고찰해 보고 국제적인 기술 및 학문적인 동향에 비추어 국내의 현행 설계와 시공상의 개선대책을 포함하여 향후 발전방향을 전망해 보았다.

5.2 국내 현황 및 문제점

(1) 현황

대구경 말뚝은 국가단체, 지방자치단체 등의 발주처에서 시행하는 중요한 국가기간 시설인 고속철도, 육상 및 해상 장대교량, 일부 지하철 등의 대형 토목분야 건설공사에서 주로 사용되고 있으며, 대형 건축물의 기초로도 사용되고 있다. 1990년대 들어와 신공항, 신항만, 고속철도, 장대교량 등의 대규모 사회간접 시설이 급속히 확충되고 건물의 초대형화 추세에 있어 대구경 말뚝들의 사용은 급증하고 있는 실정이나 그 적용사례는 집계되고 있지 않아 전체적인 통계를 인용할 수 없는 실정이라서 안타까울 뿐이다. 다만, 건국이래 최대의 건설공사인 고속철도 건설공사의 경우 직경 1,200 mm와 1,500 mm의 현장타설말뚝을 478개정도 사용하고 있다. 여기서, 지면 관계상 적용 예를 모두 설명하지는 못하였고 표 1에는 국내에서 최근에 시행된 대구경 말뚝의 주요한 적용사례를 요약하였다.

(2) 국내에 적용된 대구경 말뚝의 종류 및 시공법

재료에 따른 분류로는 강관말뚝과 현장타설콘크리트말뚝을 들 수 있다. 강관말뚝의 경우 강관을 소정의 깊이까지 항타관입시켜 속채움 하지않고 개단말뚝의 형태로 사용하거나 강관 내부에 속채움 콘크리트를 타설 또는 모래 채움하여 사용한다. 현장타설말뚝의 경우 역회전 굴착기(Reverse Circulation Drilling Machine)에 의해 소정의 깊이까지 굴착한 후 콘크리트를 현장타설하여 말뚝을 형성시키는데 해상이나 강상에서는 두께 12mm 정도의 희생강관을 사용하기도 한다. 또한, 철근콘크리트로 이루어진 말뚝선단부를 암반에 소켓시킨 암반소켓강관말뚝이 광안대로 건설공사에서 사용되기도 하였다.

시공법에 따라 전선회식 올케이싱 공법(일명 뚝바늘 공법), 요동식 올케이싱 공법(일명 베노토공법) 그리고 RCD 공법 등으로 분류할 수 있으나 국내에서는 이들 시공법이 현장여건에 따라 선택적으로 사용되고 있다. RCD 공법의 경우 케이싱을 사

용하지 않고 벤토나이트 안정액으로 굴착공벽의 안정을 유지시키면서 말뚝을 시공하는 공법인데 국내에서는 벤토나이트 안정액으로 인한 환경문제를 피하고 풍화암층을 관통하여 연암층까지 굴착해야 하는 설계관행으로 인해 올케이싱 공법과 혼합하여 사용하고 있다. 즉, 케이싱으로 공벽붕괴를 방지하면서 그 내부에서 해머 그랩 또는 RCD굴착기로써 연암층까지 굴착해낸다. 또한, 말뚝시공현장의 시공여건에 따라 시공개념을 혼합하여 사용하기도 한다. 즉, 현장타설말뚝의 경우 육상부에서는 올케이싱 공법, 해상부에서는 희생강관 내부 속파기 시공법 등을 사용한다. 강관말뚝의 경우 항타시공하며, 소켓강관말뚝의 경우, RCD굴착후 강관항타 시공, 강관항타후 RCD에 의한 속파기 시공 등을 사용할 수 있다.

(3) 현행 국내의 설계 및 시공 관행

대구경 말뚝은 대용량의 하중을 지지하는 기초 구조물인 관계로 국내 설계에서는 연암층에 말뚝선단을 1D(여기서, D : 말뚝직경)이상 소켓시키는 설계를 일반화시켜 사용하고 있다. 또한, 표 3에서도 볼 수 있듯이 선단지지 말뚝의 개념도 일반화되어 있다.

이와 같은 잘못 적용되어 온 말뚝기초의 설계관행으로 인하여 국내의 현행 말뚝기초의 설계는 극히 안전측으로 되어 경제적인 손실을 크게 초래하고 있으며, 시공 안전성도 크게 위협 받아오고 있는 실정이다.

대구경 말뚝기초의 지지력과 침하량의 산정에 대한 설계는 검증되지도 않은 산정공식에 의해서만 추정하여 이루어지고 있으며, 여기에 사용되는 지반특성치들도 실내역학실험이나 원위치시험을 실시하여 예측하지 않고 N치에만 의존하여 추정하거나 참고 문헌이나 기존의 설계자료 등에서 경험적으로 추정하여 사용하고 있는 실정이다. 즉, 국내의 현행 말뚝기초에 대한 설계는 예비 설계단계에서 종료되고 있는 실정이며, 검증시험(proof test)에 의해 완성된

표 3. 국내에서 적용된 대구경 말뚝의 주요 사례 요약

건설공사명	말뚝기초 종류	직경 (mm)	시행주체	설계개념	시공개념	시공위치	말뚝 선단위치	특기사항
남항대교 건설공사 (1997)	항타강관말뚝	1,800	부산광역시	마찰(主) + 선단(副)	항타관입	해상	자갈층 / 풍화암층	강관내부 속채움 미실시
	현장타설말뚝	1,500			올케이싱공법	육상	연암층	케이싱회수
광안대교 건설공사 (1994)	암반소켓 강관말뚝	2,500	부산광역시	선단지지	올케이싱공법	해상	연암층	강관내부 콘크리트 속채움
	현장타설말뚝	2500, 1500, 1,000			올케이싱공법	해상 (일부육상)	연암층	케이싱회수
		현장타설말뚝			1,500	서울특별시	선단지지	올케이싱공법
방화대교 건설공사 (1993)	현장타설말뚝	1,500	한국도로공사	선단지지	올케이싱공법	축도부	연암층	케이싱회수
영종대교 건설공사 (1993)	현장타설말뚝	1,500	한국도로공사	선단(主) + 마찰(副)	올케이싱공법	해상	연암층	희생강관사용
	현장타설말뚝	1,000			올케이싱공법	축도부	연암층	희생강관사용
서해대교 건설공사 (1992)	현장타설말뚝	2,500	한국도로공사	선단(主) + 마찰(副)	올케이싱공법	해상부	연암층	희생강관사용
	현장타설말뚝	1,500			올케이싱공법	축도부, 해상부	연암층	희생강관사용
고속철도 건설공사 (1991)	현장타설말뚝		한국고속 철도공단	선단+마찰	올케이싱공법	육상	연암층	케이싱회수

설계는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

설계하중 지지여부를 확인하기 위한 대구경 말뚝 재하시험이 부분적으로 실시되기도 하였으나, 말뚝 축하중의 측정이 수반되지 않아 말뚝기초의 하중지지 특성을 규명하지 못하여 향후의 기술적인 진보나 학문적인 접근이 어려운 상태이다. 또한, 기시행된 대구경 말뚝재하시험들은 설계단계나 시공초기에 이루어지지 않아 설계의 수정이나 시공법의 개선에 전혀 활용되지 못한 아쉬움이 남는다.

그러나, 최근에 이루어진 설계에서는 선단지지의 개념에 마찰지지의 개념이 부분적으로라도 도입되고 있으나 마찰지지력을 충분하게 활용하고 있지는 못한 상태이다 (표 3 참조). 이와 같은 설계개념은 설계용역회사, 건설사업 및 사업주체 등에 따라 각기 다르게 적용되어 오고 있으며, 일관성있는 설계는 이루어지고 있지 않은 실정이다. 그러나, 1997년도에 종료된 남항대교 말뚝기초설계에서는 대구

경 항타강관말뚝(직경 1,800 mm)을 추천하였으며, 이 개단강관 말뚝은 풍화암이나 그 상부 자갈층에 지지되도록 하여 종전의 설계 관행을 크게 개선한 사례로 볼 수 있을 것이다. 또한, 이러한 새로운 시도에 대한 안정성 확인을 위하여 시공초기에 5개의 대구경 말뚝(직경 1,800 mm의 항타강관말뚝 : 3개, 직경 1,500 mm의 현장타설말뚝 : 2개)에 대한 하중전이의 측정이 수반된 대구경 말뚝정재하시험을 실시하도록 제안하였다.

국내 말뚝기초의 설계가 추정된 예비설계로 종료되고 있음에 따라 실시설계단계에서 말뚝기초의 정확한 시공시방을 제시하지 못하고 있는 실정이다. 즉, 시공시방도 개략적으로만 제안하고 있어 시공초기에 실제말뚝에 대하여 시험하던 시험을 수행하면서 시행착오를 겪을 수밖에 없다. 대구경 항타말뚝의 경우에는 시공초기에 실제 말뚝을 대상으로 하여 시험항타를 수행하여 말뚝의 항타관입성을 확

인하고 항타장비의 조합을 할 수 있지만, 대구경 현상타설말뚝에서는 실제 말뚝을 대상으로 시험시공을 수행한다는 것은 극히 곤란할 수 밖에 없다.

(4) 국내 설계 및 시공상의 문제점

1) 추정설계만으로 설계 종료

국내지반에서의 적용성이 검증되지도 않은 각종 지지력 산정공식에 의하여 지지력을 추정하여 이루어진 예비설계로써 설계를 종료하고 있는 정도이다. 특히, N치에 의한 지지력산정 공식을 지반의 종류에 관계없이 적용시키고 있을 뿐만 아니라 보정되지 않은 N치를 그대로 사용하고 있다. 또한, 설계단계에서는 물론이고 시공초기에서도 말뚝재하시험을 수행하지 않아 추정된 예비설계의 검증이 이루어지지 않는 관계로 말뚝기초의 경제적인 설계는 극히 곤란한 실정이다.

2) 실제 거동과 상이한 설계 수행

산악지형에 건설되는 교량기초로는 확대기초나 대구경 단말뚝(short pile)을 사용할 수 있으나 대부분의 장대교량 기초로는 대구경 장말뚝(long pile)을 사용하고 있다. 대구경 장말뚝의 경우에는 마찰지지말뚝으로 거동함에도 불구하고 마찰력을 무시하거나 일부만 고려한 채 선단지지 말뚝으로 설계하고 있다. 이와 같은 설계 관행은 말뚝축하중을 측정하지 않아 말뚝의 하중지지 거동을 파악하지 못하기 때문에 비롯된 것으로 보인다.

3) 지지층에 대한 인식 부족

말뚝기초의 지지층에 대한 왜곡된 인식으로 인해 말뚝기초의 선단을 반드시 연암층에 1D이상 소켓시키는 설계가 이루어지고 있다. 이와 같은 관행은 말뚝기초의 경제적인 설계나 올바른 말뚝기초공법 선정을 곤란하게 할 뿐만 아니라 시공안전성을 위협하고 공기를 지연시키는 요인이 되기도 한다.

4) 지반조사 자료의 활용 곤란

지층확인을 위한 지반조사가 대부분이며, 지반특성치 산출을 위한 조사가 부족한 상태이다. 실내역학 실험이나 원위치 시험이 부분적으로 수행되었더라도 대구경 말뚝기초의 설계에 활용할 수 없는 경우가 대부분이어서 지반조사를 실시하고도 참고문헌이나 종래의 설계자료에 의존하는 설계를 수행할 수 밖에 없는 실정이다.

5) 정확한 시공시방의 미실정

설계단계에서 시험말뚝을 시공하지 않은 채 설계를 종료하여 현실성 있는 정확한 시공시방이 제시될 수 없는 실정이다. 또한, 설계단계에서 시공성이 결여된 공법을 추천하여 실제 시공시 공법의 변경과 공기의 지연을 초래하기도 한다.

5.3 향후 전망

대구경 말뚝에 대한 국내의 설계 관행을 개선하기 위하여 국제적인 기술적 및 학문적 동향에 비추어 개선 방향과 향후전망을 다음과 같이 고찰하였다.

(1) 시험말뚝(test pile) 시공

외국의 여러 설계기준들(AASHTO, NAVFAC DM7, 일본도로교 시방서 등)과 국내의 설계기준들(도로교 설계기준, 구조물기초 설계기준 등)에서 채택하고 있거나 제안하고 있는 대구경 시험말뚝을 설계단계에서 시공하여 말뚝재하시험을 수행하면, 말뚝기초의 지지력, 하중지지거동 뿐만 아니라 시공시방도 정확하게 결정할 수 있으므로 말뚝기초의 최적화된 경제적인 설계를 수행할 수 있을 것이다.

(2) 설계 절차의 정립

지지력 산정공식에 의해 추정된 예비설계를 토대로 시험말뚝을 시공하여 예비설계에 대한 검증시험(proof test)을 수행하여야 한다. 검증시험에서는 말뚝기초의 극한지지력을 확인할 수 있을 정도의 하중재하가 이루어져야 한다. 이 때, 말뚝의 축하중

전을 측정하여 말뚝기초의 하중지지거동을 확인하여야 한다. 시험말뚝에 대한 검증시험 결과에 근거하여 예비 설계를 수정하거나 재설계를 수행하여 설계를 완성하여야 한다.

(3) 지지층에 대한 인식 제고

대용량의 하중을 지지하는 대구경 말뚝의 선단을 지지층에 도달되도록 하여 침하에 대한 안정성을 확보할 수 있어야 한다.

여기서, 국내에서는 지지층을 일반적으로 연암층으로 등식화시켜 인식하고 있는데, 이와 같은 인식은 개선되어야 한다. 국내에서 사용하고 있는 연암의 기준은 외국의 그것에 비해 과대하게 안전측으로 설정되어 있으므로 풍화암층, 자갈층, 풍화토층, $N > 30$ 인 자갈층과 사질토층 및 $N > 20$ 인 점성토층도 상부의 하중을 지지할 수 있고 침하에 대해 안전하다면 충분한 지지층이 될 수 있다는 인식의 전환이 있어야 하겠다.

참고로 외국에서는 Soft rock뿐만 아니라 $N > 30$ 의 토사지반에도 말뚝의 선단을 지지시키는 경우가 많은데 이 경우의 외국에서 사용하는 Soft rock은 단어의 뜻 그대로 연한 암반을 의미하므로 국내에서 사용하는 연암의 기준에 비해 극히 낮은 강도수준으로 현장타설된 콘크리트 강도보다 낮은 강도의 암을 Soft rock으로 정의하고 있다.

(4) 하중지지 거동 확인을 통한 경제적 설계 수행

시험말뚝 시공시 축하중계측용 센서를 설치하여 하중지지거동을 확인할 수 있다면 말뚝의 실제 거동을 반영한 설계를 수행할 수 있을 것이다. 또한, 시험말뚝에 대한 말뚝재하시험에서 지지력을 확인할 수 있다면 대구경 말뚝에 대한 최적설계를 이룰 수 있고 경제적인 손실도 줄일 수 있을 것이다.

(5) 설계에 활용가능한 지반조사 수행

지층확인을 위한 시추조사 외에도 지반특성치 산

출을 위한 실내역학실험과 원위치시험을 정밀하게 실시하여 설계에 활용가능한 자료를 얻도록 해야 한다. 실내역학실험에서는 강도정수(c, ϕ)와 압밀 특성 등을 구하여야 하며 원위치시험(CPT, PMT, DMT, SPT)에서는 강도특성치와 지반의 변형특성치를 구하여야 한다.

(6) 정확한 시공시방의 설정

시험말뚝에 대한 시공결과를 토대로 대구경 황타 강관말뚝에서는 황타관입성을 검토하여야 하며, 대구경 현장타설말뚝에서는 시공방법과 현장타설콘크리트의 품질확인방법 등을 검토하여 설계단계에서 정확한 시공시방을 제시하여야 한다.

6. 현장타설말뚝기초에 대한 비파괴시험기법

6.1 개요

현장타설말뚝기초(drilled shaft)가 대규모 교량의 하부기초로 널리 사용됨에 따라 그에 대한 품질 관리가 더욱 중요시 되고 있다. 왜냐하면 말뚝 내부의 결함은 지지력을 감소시키거나 또는 부등침하 등을 초래하여 상부구조물의 안전에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 따라서 현장타설말뚝기초의 품질 관리를 위하여 말뚝의 건전도를 비파괴적으로 평가할 수 있는 기법을 외국의 사례를 중심으로 살펴보고 또한 국내의 기술 및 현황을 파악하고자 한다.

최근의 기술조사에 의하면 현재 미국에서 주로 사용되고 있는 현장타설말뚝기초의 비파괴시험기법은 다음의 4가지로 구분된다 [1].

- (1) 공대공 초음파 검사
(Cross Hole Sonic Logging)
- (2) 감마선을 이용하는 방법
(Nuclear Density Testing through the use of Gamma-Gamma Testing)

- (3) 충격반향기법 (Sonic Echo Testing)
- (4) 충격응답기법 (Impulse Response Testing)

6.1.1 공대공 초음파 검사 (Cross Hole Sonic Logging)

본 방법은 현장타설말뚝기초의 원주를 따라 일정한 간격으로 여러 개의 검측공(borehole)을 매설해 놓은 후 한쪽 검측공에 sonic emission source를, 그리고 다른 검측공에 receiver를 넣고 말뚝의 깊이 방향으로 이들 source와 receiver를 이동시키면서 말뚝 내부의 결함을 검사하는 방법이다. 검측공으로서 강관이 가장 이상적이며 PVC관도 사용되지만 콘크리트와 PVC의 물리적 성질로 인하여 검측공과 콘크리트가 서로 떨어지는 현상이 간혹 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상 때문에 파가 차단되는 문제점이 있다. 현장타설말뚝기초의 콘크리트가 일단 초기 응결하기 시작하면 한쪽 검측공에 sonic emission source를, 그리고 다른 검측공에 receiver를 넣은 후, 이들 source와 receiver를 이동시키면서 말뚝을 검사할 수 있다. 즉, 두 검측공 사이의 파의 전파속도와 전파 에너지를 분석함으로써 콘크리트의 상대적인 균질성을 평가한다. 이때 속도는 콘크리트의 밀도와 탄성계수의 함수이므로 속도가 일정하면 균일한 물성으로 판단된다. 그리고 서로 다른 여러 개의 검측공을 조합하여 사용함으로써 불량 콘크리트나 병목부 등과 같은 결함부위를 탐지할 수 있다.

6.1.2 감마선을 이용하는 방법

본 방법은 앞에서 언급한 CSL logging 방법과 마찬가지로 현장타설말뚝기초의 원주를 따라 일정한 간격의 검측공을 필요로 한다. 이 때 검측공은 PVC를 사용한다. 감마선 source와 receiver를 검측공 안으로 집어 넣은 후, 감마선을 방출시키고, 다시 반사된 광자(photon)를 분석함으로써 검측공 주변의 콘크리트 밀도를 평가할 수 있다. 검측공의 간격은 CSL 방법과 비슷하며 검측공으로부터 반

경 125 mm 이내의 콘크리트를 평가할 수 있으며, 최근에는 검측공으로부터 반경 250 mm 까지의 콘크리트도 평가할 수 있는 장비가 개발되었다.

(1) 충격반향기법 (Sonic Echo Testing)

본 방법은 말뚝 머리를 해머로 타격하고 이 때 발생한 탄성응력파(elastic stress wave)의 신호를 가속도계나 속도계로 잡아 말뚝 내부의 결함을 추정하는 방법이다. 즉, 말뚝을 타격하면 저변형률의 파(low-strain wave)가 발생되며 이 파는 말뚝 내부의 결함부 또는 말뚝의 바닥에서 반사하게 되는데 이 때의 반사파를 감지기로 감지하는 방식이다. 파의 해석은 주로 시간 영역에서 이루어지며, 만일, 파의 속도를 알면 반사되는 깊이를 계산할 수 있다.

(2) 충격응답기법 (Impulse Response Testing)

본 방법은 말뚝 머리를 충격력이 측정되는 해머로 타격하고 이 때 발생한 탄성응력파(elastic stress wave)의 신호를 충격반향기법과 마찬가지로 가속도계나 속도계로 잡아 말뚝 내부의 결함을 추정하는 방법이다. 본 방법은 파를 시간영역에서 뿐만 아니라 주파수 영역에서도 해석할 수 있으며 이 주파수 영역에서 동적 강성(dynamic stiffness)을 계산할 수 있다. 이렇게 함으로써 말뚝 가까이에 있는 결함 등을 충격반향기법에서 보다 더욱 쉽게 정량화 할 수 있다.

(3) 각 방법의 특징

● 공대공 초음파 검사 (CSL)

본 방법은 검측공을 사용하므로 여러 개의 결함을 탐지할 수 있으며, 깊이에 제한이 없고, 검사결과가 지반의 강성에 영향을 받지 않는다. 그리고 결과를 분석하는 방법이 비교적 쉬우며 결함의 깊이를 정확히 탐지할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 검측공 설치 비용이 추가로 들고, 검측공이 설치되어 있지 않은 철근망 밖의 콘크리트 품질을 평가하

기 어려우며, 검측공을 정해진 위치에 정확히 설치하는 것이 어렵다. 그리고 검사할 말뚝을 사전에 선정해야 하며, 미세한 균열을 찾을 수 없고, 검사속도가 느리다는 단점이 있다. 이외에도 검측공과 콘크리트의 접촉이 서로 떨어지는 문제가 있고, 전문기술자가 부족하며 따라서 본 방법에 의한 검사결과는 육안 검사(visual inspection)결과와 함께 대조하여 검토되어야 한다.

6.2 감마선을 이용한 방법

이 방법은 철근망 밖의 결함을 탐지할 수 있으며, 여러 개의 결함을 탐지할 수 있고, 결과가 지반의 강성에 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 그리고 결함의 위치를 정확히 추정할 수 있으며 콘크리트의 밀도를 정량화 할 수 있고 또한 깊이에 제한을 받지 않는다. 이에 반하여 검측공 설치 비용이 비싸며, 검사속도가 느리며, 방사선을 취급하는데 주의해야 하므로 장비의 운반이 어렵다. 그리고 검사할 말뚝을 사전에 선정해야 하며 검측공을 정해진 위치에 정확히 설치하는 것이 난점이다. 또한 검사는 검측공 주위의 작은 면적에 국한되어 있으므로 검사 범위가 좁다는 단점을 가지고 있다. 이 방법에 의한 검사결과도 CSL방법과 마찬가지로 육안 검사결과와 함께 대조하여 검토되어야 한다.

6.3 충격반향기법

이 방법은 말뚝 머리에서 실험이 이루어지므로 말뚝 머리에만 접근할 수 있다면 실험이 언제든지 가능하다. 즉, 검측공이 필요 없으므로 경제적이며 검사가 신속히 이루어진다는 장점이 있다. 그리고 CSL방법과 같이 건전도 시험을 행할 말뚝을 말뚝 건설 이전에 선정할 필요가 없다. 하지만 길이 대 직경(L/D)의 비가 30/1이상인 긴 말뚝에는 적용하기 어려우며, 전문기술자가 부족한 점 등이 단점으로 지목된다. 또한 작은 크기의 결함을 찾을 수 없으며, 결함부의 위치 추정 오차는 20~30%로 보여진다. 이러한 오차는 구조적 결함이 아닌 단면 확

대부(bulge), 즉, 말뚝 주위 지반의 강성 변화와 같은 말뚝 직경의 변화에서 비롯되는 신호를 잘못 해석한 때문일 수 있으며 이 방법은 말뚝을 불합격 판정하는 유일한 시험방법이 될 수 없다.

6.4 충격응답기법

이 방법은 말뚝 머리에서의 상대적인 동적 강성을 얻을 수 있으며, 단면의 확대부와 감소부를 구별할 수 있는 장점이 있다. 하지만 말뚝 선단부에 생긴 결함 탐지에 어려움이 있으며 충격반향기법과 동일한 단점을 가지고 있다. 앞서 언급한 충격반향기법과 함께 이 방법도 말뚝의 직경 대 길이의 비(L/D), 지반의 전단파 속도와 말뚝에서의 파의 속도, 그리고 지반의 층상 구조에 의하여 제한을 받는다. 이 방법도 말뚝을 불합격 판정하는 유일한 시험방법이 될 수 없다.

6.5 국외 동향

(1) 1993년 미연방도로국(FHWA)의 지원으로 현장타설말뚝기초에 대한 광범위한 비파괴검사 연구가 이루어졌으며 그 연구결과가 Drilled Shafts for Bridge Foundations란 제목의 보고서로 출간된 바 있다. 이 보고서에는 미국의 California Site와 Texas A&M 대학교 Site에 각각 건설된 11개 및 9개의 결함을 가진 시험말뚝을 대상으로 비파괴 검사기법의 적용결과가 자세히 수록되어 있다. 실험 결과에는 각각의 비파괴 검사기법에 대한 장단점 및 적용성이 포함되어 있으며 이들을 요약하면 다음과 같다.

- 결함면적이 말뚝 단면적의 15% 정도이면 그 결함의 존재를 알고 있다 하더라도 탐지하는데 어려움이 있다.
- 말뚝 바닥의 얇은 층(thin layer) 또는 연약층(soft layer)은 탐지가 어렵다.
- 말뚝의 중간에 존재하는 불량 콘크리트층(weak concrete)은 충격반향기법 또는 충격응답기법으로 찾을 수 있다.

- 콜드조인트(cold joint)는 충격반향기법으로는 탐지가 가능하지만 충격응답기법으로는 불가능하다.
- 말뚝 단면적의 50% 이상 되는 결합은 모든 비파괴 시험기법으로 탐지 가능하다.
- 모든 비파괴 검사기법은 일정 수준 이상의 전문 인력에 의하여 운영되어야 한다.

(2)한편, 현재 미국에서는 현장타설말뚝기초의 미세결합이라는 연구를 포함하여 현장타설말뚝기초에 관련된 많은 연구를 수행하고 있으며 연방도로국(Federal Highway Administration, FHWA) 및 각 주에서도 현장타설말뚝기초의 건전도 평가에 대한 연구비 지원을 하고 있다. 이와 같이 미국 내에서는 현장타설말뚝기초의 품질관리에 사용되고 있는 비파괴 검사기법의 기술 향상을 위하여 수많은 연구를 수행하고 있다. 하지만 이들 비파괴 검사기법은 에너지의 전달 및 반사의 형태로 나타나는 신호를 어떻게 분석하고 처리하느냐에 따라 달라지며, 이러한 신호는 잡음과 간섭 등 수많은 외부 요소들에 의하여 영향을 받기 때문에 비파괴 검사기법은 반드시 육안 검사와 병행하여 사용되어야 한다고 밝히고 있다.

6.6 국내 동향 및 발전방향

국내에서는 한국도로공사에 의해 공동공 초음파 검사기법이 실제 현장타설말뚝기초의 품질관리에 적용되고 있으며 이 때 초음파 검사는 총 말뚝의 30% 이내를 기준으로 시행함을 원칙으로 하고 있다. 또한 결과 분석을 위해 모형 말뚝에 결합 유형을 인위적으로 만들어 초음파 검사를 실시하여 초음파 검사 결과에 대한 판정 기준을 마련해 놓고 있다. 따라서 나머지 70% 이상의 말뚝에 대해서는 검측공을 사용하지 않는 충격반향기법 및 충격응답기법으로 품질관리를 해야 하며, 따라서 정확한 결과를 얻기 위한 이에 대한 연구가 절실히 필요한 실정이다.

현재 국내 학계에서도 모형 말뚝 및 실제 현장타설말뚝기초에 대한 이들 연구를 수행하고 있으며 비파괴 검사기법에 있어서 중요한 분야인 신호처리에 대한 연구도 이루어지고 있다. 그리고 최근에는 결합말뚝의 신호로부터 결합의 크기 및 위치 등을 정량적으로 파악해내는 역해석 기법에 대한 연구도 수행되고 있다.

하지만 이와 같은 연구에는 여러 가지 다양한 인위적인 결합의 모형 말뚝이 필요하며 이러한 모형 말뚝의 제작에는 막대한 비용이 소요되므로 국내에서도 외국의 예와 마찬가지로 현장타설말뚝기초에 관련된 연구를 함께 수행할 수 있는 공동실험부조성이 바람직할 것으로 사료된다. 또한, 비파괴 검사기법이 모든 결합과 건전도를 확실히 평가할 수 있다는 환상을 버리고, 각 기법의 장단점을 파악함과 동시에 건전도 평가가 가능한 범위와 불가능한 범위를 객관적으로 분석하여 현업에 적용하는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

따라서 현장타설말뚝기초에 대한 비파괴 검사를 공동으로 수행하고 그 결과를 함께 검증하며 또한 공유할 수 있는 전문가 그룹을 만들어 이에 대한 연구를 진행한다면 더욱 더 훌륭한 기술발전이 이루어질 것으로 판단된다.

7. 결론 및 향후 동향

토목기술자 특히 지반기술자 라면, 말뚝기초가 기초지반의 가장 대표적인 기초형식이라는 것에 이견이 없을 것이다. 그러나, 우리나라의 지반은 워낙 다양한 지반 특성을 가지고 있기 때문에 아직도 우리나라 기술자들이 극복하여야 할 과제가 많지만 그 중에서도 특히 국내의 말뚝기초에 대한 기술은 기초연구에 대한 투자가 미흡하여 주로 외국에서 개발된 설계기준에 의존하고 있는 실정이다. 따라서, 향후 이 분야에 대한 깊은 관심과 연구 투자가 이루어져야 할 것이다.

이제 막 출발한 새천년에 우리가 말뚝기초 분야에 있어서 극복하여야 하고 지속적인 연구가 이루어져야 할 부분에 대한 앞으로의 동향에 대한 요약으로 결론을 대신코자 한다. 가장 먼저 해결되어야 할 부분은 각 지방서 간의 일관성이다. 이를 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 지속적인 관심과 연구 투자가 선행되어야 하며 시공 후 확인시험, 설계 및 시공에 대한 충분한 예산 확보등을 들 수 있으며, 향후 LRFD(Load Resistance Factor Design) 방법의 도입과 연구 및 pile rafting 시스템 개념 도입을 들 수 있다. 또한, 현장타설말뚝의 비파괴검사에 대한 연구가 일부 진행되고 있으나 이를 좀더 활성화하여야 하며 체계적이고 합리적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 앞에서는 언급이 없었으나 지진에 대비한 말뚝기초의 설계에 대한 합리적인 규정이 없는 바 이에 대한 연구도 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 이우진, 이인모, 최유중, 이정학, 김병철 (1994). "항타 분석기를 이용한 말뚝기초의 시공관리 및 해석", 한국 지방공학회 말뚝기초위원회 학술세미나, pp. 109-131.
2. 건설부, (1986). 구조물기초 설계기준, pp. 185-309.
3. Chin, F. K., (1970). Estimation of the Ultimate Load of Piles from Tests not Carried to Failure, Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, Singapore, pp. 81-90.
4. De Beer, E. E., (1963). The Scale Effect in the Transportation of the Results of Deep Sounding Tests on the Ultimate Bearing Capacity of Piles and Caisson Foundation, Geotechnique, 13(1), pp. 39-75.
5. Felienius, B. H., (1980). The Analysis of Results from Routine Pile Load Tests, Ground Engineering, 13(6), pp. 19-31.
6. Fuller, F. M., and Hoy, H. E. (1970) Pile Load Test Including Quick-Load Test Method, Conventional Method and Interpretaton, Highway Research Record, No 333, Transportation Research Board, Washington, pp. 74-86.
7. Goble, G. G., Rausche, F., and Likins, G., (1980). The Analysis of Pile Driving, A State-of-the-Art, The First Seminar on the Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm, Sweden, pp. 131-161.
8. GRL Associates, Inc., (1993). User's Manual for CAPWAP-Case Pile Wave Analysis Program, Cleveland, Ohio.
9. Janes, M. C., Horvath, R. C., and Bermingham, P. D., (1991). An Innovative Dynamic Test Method for Piles, Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, pp. 253-261.
10. Rausche, F., Goble, G. G., and Likins, G., (1985) Dynamic Determination of Pile Capacity, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111(3), pp. 367-383.
11. Vander Veen, C., (1953). The Bearing Capacity of a Pile, Proceedings 3rd ICSMFE, Vol. 2, pp. 84-90.
12. Report of a Task Force Sponsored by the G-I Deep Foundations Committee, 2000, Nondestructive Evaluation of Drilled Shafts, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 126, No.1, pp.92-95