국내 말뚝기초의 미래

Next Decade of Pile Foundation in Korea

조 천 환 (Chun-Whan Cho)
삼성건설 기술본부 TA팀 전문위원
chunwhan.cho@samsung.com

| 약 력 |

공학박사, 토질 및 기초기술사
건기연 지반연구실 근무
파일테크 근무

Ⅰ. 서언

구조물의 건설이 보다 열악한 지역에 집중되고, 구조물은 점점 대규모, 중량화 되는 경향이 있어 구조물 기초로써 말뚝기초가 많이 채택되고 있다. 고층건물의 경우 지지 지반이 암반이어 직접 기초로 충분한 지지력을 확보할 수 있어도 지상층의 착공시기를 앞당겨 공기를 단축시키기 위해 흙막이 공법으로 탑다운공법을 채택함으로써 직접 기초 하부에 현장타설말뚝을 설치하여 이용하기도 한다. 이러한 것을 고려하면 기초분야 중 말뚝기초의 수요는 여전히 상당부분을 점유할 것 같다.

최근 10여 년 간 국내의 말뚝기초의 설계기술은 크게 진전되었다. 이러한 진전이 있는 반면, 전반적으로는 불충분한 점도 없지 않다. 특히 건설부문의 원가절감이 절실해지면서 말뚝기초의 최적화에 대한 노력이 시도되고 있음에도 이를 뒷받침해야 할 시공의 품질은 커다란 변화가 없다. 이에 대한 기술자들의 관심이 절실한 시기이다.

환경에 대한 관심이 커짐에 따라 말뚝기초 시공법의 선정에서 이에 대한 고려가 무엇보다도 중요해졌다. 말뚝기초공법의 선정 시 격리된 지역 외에는 타입말뚝의 채택은 거의 어려워졌으며 따라서 매입말뚝, 현장타설말뚝이 주류를 이루고 있다. 타입말뚝은 시공관리 중 품질의 확인이 가능한 반면, 매입말뚝이나 현장타설말뚝은 양생 후 품질의 판정이 가능하다는 점에서 말뚝기초의 시공관리 및 품질관리의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

본 고에서는 국내 말뚝기초의 현황을 바탕으로 미래 전망에 대해 살펴보았다. 미래라는 개념이 너무 막연하기도 하고, 또한 말뚝기초기술은 상품기술이라기보다는 요소기술이라 할 수 있으므로 본 고에서는 개략 10년 후의 말뚝기초기술에 대해 언급하였다. 말뚝기초의 현황과 전망에 대한 논의를 위해서는 여러 정량적인 자료가 필요하지만 이러한 자료가 여의치 않은 바 주로 필자의 주관과 경험에 의해 서술하였다.

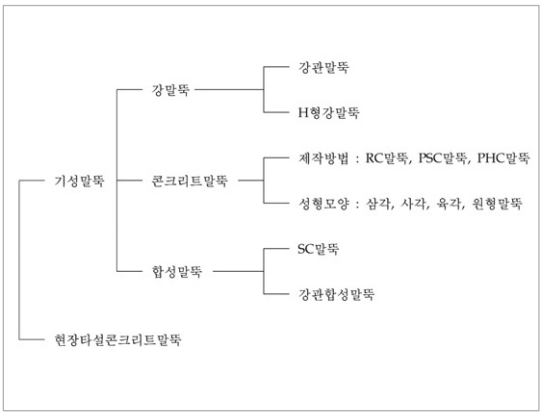

그림 1. 재료에 따른 말뚝의 분류

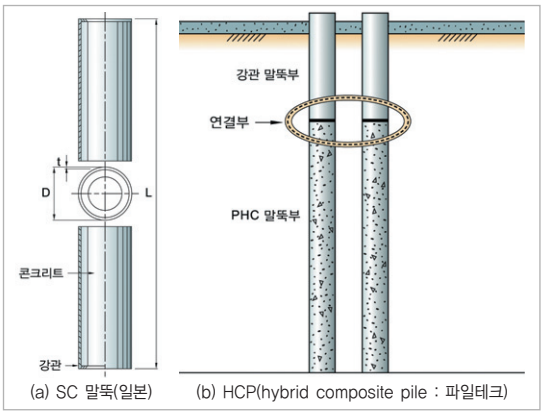

그림 2. 합성말뚝의 예

Ⅱ. 말뚝기초의 재료

그림 1은 현재 국내에서 사용되는 말뚝을 재료에 따라 분류한 것이다. 그림 1에서와 같이 말뚝은 기성말뚝과 현장타설말뚝으로 나눌 수 있으며, 국내에서는 기성말뚝 중 강관말뚝, PHC말뚝, 대구경현장타설말뚝이 주 사용재료이다.

강관말뚝은 안전성과 공공성이 강조되는 구조물 기초에 널리 활용되고 있다. 국내에서 RC말뚝은 오래전에 사라졌고, PSC말뚝도 거의 사라졌으며, 1992년에 도입된 PHC말뚝이 경제성이 강조되는 건축구조물에서 선호되고 있다. 그림 2와 같은 합성말뚝(강관+콘크리트)을 포함하여 여러 합성말뚝이 제안되었으나 아직 그 사용은 활발하지 않다.

국내에서 강관말뚝과 PHC말뚝은 경쟁적으로 사용되고 있으며, 이러한 가운데 기술도 발전되었다고 생각된다. 2006년 현재 강관말뚝의 수요는 정체 또는 약간 증가하는 추세에 있고, PHC말뚝의 수요는 약간 감소하는 상태에 있는데 이는 주로 SOC사업이 활발하고 주택시장이 위축되는 건설시장의 현상을 반영한 결과이기도 하다. 그러나 최근 강재의 가격이 급상승하였고, 건설환경문제가 더욱 민감해졌으며 기초의 내진설계가 의무화 되는 등 말뚝기초에 대한 제반 환경도 많이 달라지고 있으므로 향후 수요전망은 다른 양상을 보일 수 있을 것이다.

2003년 구조물기초설계기준해설(한국지반공학회, 2003)에서 현장타설말뚝의 설계 시 보강재의 역할을 고려하도록 개정되었고, 도로교설계기준(2005)은 콘크리트 및 보강재의 설계강도에 따라 허용응력을 인정하도록 개정되어 현장타설말뚝의 경제성이 과거에 비해 크게 향상되었다. 또한 현장타설말뚝공법은 최근 장비의 발전에 힘입어 장대구경 현장타설말뚝의 시공이 용이해짐에 따라 수요가 증가하고 공사비에도 경쟁력이 있게 되었다. 더욱이 현장타설말뚝은 저공해공법의 일종이므로 이의 사용성은 더욱 증가되었다. 이러한 이유들로 최근 강재의 가격이 급등한 강관말뚝 기초와 현장타설말뚝 기초의 경제성이 역전되는 현상이 나타나고 있다.

말뚝 재료에 대한 수요는 자체 재료의 발전, 시공법의 변화, 건설환경문제(진동소음, 잔토 등) 등에 영향을 받는 것은 물론, 전반적인 건설환경 문제, 즉 원자재의 수급과 가격, 건물의 리모델링 및 재건축(또는 재개발) 동향, 신소재 말뚝의 개발 등과 맞물려 향후 말뚝의 수요 전망은 복잡해질 것이다. 또한, 말뚝 재료의 수요는 2005년 4월부터 시행된 내진설계 조례(3층 이상 건물로 연면적 1000㎡ 이상에 내진설계를 도입)의 시행에 따라 달라질 것으로 보인다.

향후 말뚝 재료분야에 있어 새로운 시도가 이루어

질 것으로 예상되는 항목으로 ①말뚝 재료의 고강도화, ②기존 재료의 개선 및 활용(합성말뚝 등), ③친환경적 말뚝재료, ④신소재 말뚝재료 개발(폴리머 콘크리트, FRC 말뚝 등) 등이라 생각된다.

Ⅲ. 말뚝기초의 설계

말뚝기초에 대한 국내의 설계기술은 최근 10여 년간 크게 발전하였다. 이는 기술자들의 노력에 기인한 것이며, 또한 Turnkey 설계입찰제도 또한 기여를 하였다고 본다. 설계기술 중 발전이 두드러진 항목으로 타입말뚝의 시간경과효과의 실무 적용, 현장타설말뚝의 암반근입 설계기법 및 단일 현장타설말뚝의 설계, 말뚝지지 전면기초, 하중저항계수 설계법(LRFD, load resistance factor design)의 도입 등이 있으며, 여러 가지 요소기술을 이용하여 말뚝의 재료능력을 최대한 활용하고자 하는 최적설계의 지향 등을 꼽을 수 있다.

타입말뚝 지지력의 시간경과효과에 대한 연구는 1980년 말 국외에서부터 활발히 연구가 시작되었으며, 국내에서도 1990년 중반부터 이러한 연구(조천환 등, 1998)가 시작되어 근래에는 말뚝기초의 설계 시공 시 시간경과효과의 반영이 가능해 졌다. 국내에서 시간경과효과에 관한 연구는 동재하시험의 도입 및 활용에 힘입어 짧은 기간 동안 급속히 발전하였다. 말뚝지지력의 시간경과효과에 대한 국내의 기술은 국제적으로도 경쟁력이 있다고 생각되며, 앞으로 이를 보편화시켜 현장기술자들에게 전달하여 제대로 적용하는 관점이 보다 중요시되고 있다.

지금까지 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면지지력의 예측은 주로 암석의 일축압축강도만을 사용하는 경험적인 방법에 의존하였다. 그러나 이러한 경험식들은 현장상황을 충분히 반영할 수 없는 관계로 신뢰도가 작고 불안전성이 내포되어 있다는 것이 지적되었다. 따라서 파일테크 등(2004), 설훈일 등(2005) 등은 실험 및 이론적인 분석을 통해 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면지지력에 영향을 미치는 주요 변수(일축압축강도 외에 암반의 변형계수, 응력상태, 근입부 직경, 암반과 콘크리트면의 잔류마찰각, 공벽거칠기 등)를 분석하고 이를 설계방법에 사용하였다. 이러한 설계법은 기존 경험설계법의 문제를 보완해 줄 수 있을 것으로 평가된다. 현장타설말뚝 설계 시 풍화암의 물성치 결정이 쉽지 않아 설계자들의 고민거리가 되어 왔다. 이 문제를 해결하기 위해 1999 FHWA 설계법 내용을 참고하여 국내에서도 IGM(intermediate geo-material)에 대한 연구를 시작하였다. 이러한 연구는 국내 풍화암에 대한 현장자료 수집을 통해 보다 신뢰도 있는 말뚝기초의 설계법의 제시에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

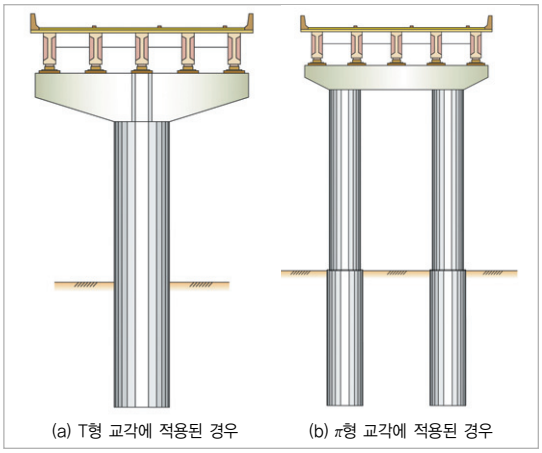

그림 3. 단일현장타설말뚝기초의 개념도

최근에 도로교설계기준에서는 그림 3과 같은 단일현장타설말뚝기초를 채택하였다. 단일현장타설말뚝기초는 기초판을 설치하지 않고 현장타설말뚝을 직접 코핑부까지 연장하여 상부구조물을 설치하는 것으로 기존의 설계법에 비해 경제적이라 볼 수 있다. 다른 측면에서 보면 그만큼 설계 및 시공에 대한 신뢰도가 요구되며 이에 대한 대안이 뒷받침되어야 하겠다. 단일현장타설말뚝기초는 최근 소수 현장(전주~광양고속도로, 인천대교 등)에서 이미 시공된 바 있

으며, 몇몇 현장에서 실시설계에 반영되었다. 단일현장타설말뚝에 대한 내용은 토목구조물에 대한 상황이며, 건축구조물에서는 단일현장타설말뚝기초가 보편적으로 이용되어 왔다. 즉, 고층건물의 경우 일기둥 일기초 형식의 기초가 오래전부터 이용되어 왔다. 최근에는 일기둥 일기초 형식이 발전되어 시공절차를 감안한 복합기초형식(조천환 등, 2006)을 사용하기도 한다.

기존의 전통적인 기초설계법에서는 기초판(footing, 혹은 raft라고도 함) 또는 말뚝이 구조물의 하중을 지지 지반에 전달하는 것으로 가정하였다. 따라서 설계에서도 기초판 또는 말뚝 중 하나가 구조물의 하중을 지지하는 것으로 가정한다. 그러나 말뚝지지 전면기초의 설계에서는 실제와 같이 기초판과 말뚝 모두 지지력을 부담하는 것으로 본다. 말뚝지지 전면기초의 장점으로는 기존 말뚝기초와 비교하여 말뚝개수의 최적화, 침하 및 부등침하의 감소로 기초의 안정성 증대 등을 들 수 있다. 국내에서도 김경남 등(1999) 등 여러 연구가 수행되었다. 그러나 아직까지 말뚝과 기초판, 기초판과 지반 사이의 복합적인 거동특성이나 이질지반에서의 거동 등은 정확히 파악이 되지 않고 있는 실정이므로 보다 많은 현장실험과 지속적인 연구를 통하여 말뚝지지 전면기초의 설계방법을 발전시켜 나갈 것으로 기대한다.

말뚝지지 전면기초와 유사한 개념이지만 건축구조물에서는 복합기초 형식을 이용한다. 고층 건물의 기초를 암반 위에 설치할 경우라도 탑다운공법을 채택함으로써 말뚝과 기초판을 조합하는 복합기초형식을 이용하고 있다. 탑다운공법에서는 현장타설말뚝이 먼저 타설되고 상부와 하부구조물을 동시 진행해 가면서 흙막이 벽은 슬래브로 지지되고 굴착 전까지 기둥에 걸리는 하중은 말뚝이 받게 되며, 지하층의 굴착이 완료되면 기초판을 타설하여 이후 하중(또는 전하중)을 기초판이 부담하는 개념으로 설계된다. 이러한 설계는 과거에 배해 매우 진전된 것이 틀림없으나 아직은 말뚝기초 내에서의 하중전이, 말뚝과 기초판의 하중분배에 대해서는 불분명한 점이 있어 보수적인 설계가 이루어지고 있다. 향후 일련의 계측 및 F/B을 통해 합리적이고 경제적인 설계가 이루어 질 것이라 기대된다.

기초의 설계는 설계공용기간 중에 상부구조물을 안전하게 지지하고 유해한 변위를 발생하지 않도록 설계해야 한다. 과거의 기초의 설계에는 안전율을 바탕으로 탄성론에 근거한 허용응력설계법(WSD, allowable stress design)이 주를 이루었으나, 근래에 신뢰성이론과 탄소성론적 개념의 한계상태설계법(LSD, ultimate limit state design)이 채택되기 시작하였다. 한계상태설계법에서는 하중과 저항계수의 관계를 하중저항계수설계법(LRFD)으로 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\phi R_n \geq \sum r_i Q_i \qquad (1)$$

식(1)에서 R과 Φ는 각각 저항치와 저항계수, r과 Q는 각각 하중계수와 하중이다.

한계상태설계법을 적용하기 위해서는 말뚝과 같은 깊은 기초의 설계에 근본적인 요소가 되는 적절한 저항계수의 결정이 중요하다. 그러나 국내에서는 아직 이러한 준비가 없음에도 외국 설계기준에 준하여 하중저항계수설계법이 이미 적용되었다. 한계상태설계법은 허용응력설계법에 비해 일관성이 있고 합리적인 방법으로 인정되고 있으며, 또한 향후 국제적인 기초설계법으로 광범위하게 사용될 것으로 전망된다. 따라서 국내에서도 신뢰도 있는 저항계수 선정을 위한 연구 등이 필요하며 최근 이러한 연구가 김대호 등(2006) 등 여러 연구 팀에 의해 시작되었다.

근래에는 건설부문에서도 원가절감이라는 목표가 절실해짐에 따라 말뚝재료의 허용하중을 최대한 사용하고자 하는 설계, 즉 최적설계에 대한 관심과 노력이 이루어지고 있다. 특히, 설계단계에서의 시험시공 및 시험을 바탕으로 설계하중을 최적화하려는 시

표 1. 국내에서 많이 사용되는 말뚝 재료의 축방향력 설계효율(이명환, 2004)

재료 규격	재료하중(ton)	통상설계하중(ton)	설계효율, %
강관(D400T9)	119.8(162.5)	80.0	67.3(49.2)
강관(D508T12)	213.8(290.1)	100.0	46.7(34.5)
강관(D609T12)	257.7(349.8)	120.0	46.5(34.3)
PHC400	105.0	80.0	76.2
PHC500	165.0	90.0	54.5
PHC600	255.0	120.0	47.0

*( ) 안은 고강도강재(SPS490)임.

도도 이루어지고, 설계 시 과거와는 다르게 다양한 선진 기법들이 사용되고 있다. 이러한 시도는 전시용으로 흐르는 경우도 없지는 않은 것 같으며, 또한 설계내용의 현장 적용 측면(표 1 참조)에서 보면 국내에서의 최적설계는 아직 시간이 필요할 것으로 평가된다. 그럼에도 전체적으로 볼 때 동일 조건에서의 설계하중은 점차 증가하고 있는 추세라 볼 수 있다. 따라서 최적설계를 하기 위해서는 설계는 물론 향상된 품질과 이를 뒷받침하는 제도적 장치도 필요하다고 생각된다.

설계부문에서 가장 아쉬운 부분 중의 하나는 매입말뚝과 관련된 것이다. 최근 건설환경문제가 부각되면서 매입말뚝의 이용이 크게 증가하였다. 그럼에도 불구하고 매입말뚝과 관련된 설계기준은 거의 변화하지 못해 실무를 뒷침하지 못하고 있는 실정이다. 매입말뚝의 거동은 타입말뚝의 거동에 비해 복잡하며 경험도 상대적으로 미천하다. 매입말뚝에 관한 연구가 시도되었지만 이러한 연구는 아직 설계기준에 반영될 만큼 충분하지 못한 것으로 평가되는 분위기이다. 따라서 현재의 국내 설계기준만으로 매입말뚝을 설계하는 것은 곤란하며, 결국 설계는 설계기준을 참고하여 실시하되 현장에서 시험시공으로 이를 확인하는 과정이 강조되고 있다(조천환, 2007). 앞으로 매입말뚝의 이용은 계속 증가할 것으로 전망되므로 많은 관심과 연구가 진행되어 실무에서 필요한 설계기준이 만들어지고 다양한 공법의 개발로 발전되길 기대한다.

향후 10년 간 중점적으로 추진이 예상되는 말뚝기초의 설계분야는 주로 경제성과 관련된 부분이라 생각된다. 따라서 최적설계를 위한 요소기술 연구, LRFD설계를 위한 요소기술 연구가 이루어지고, 이러한 것들은 자동화 계측 등을 통한 F/B으로 보완되면서 설계는 더욱 경제적인 방향으로 진전될 것으로 기대된다. 또한 이러한 자료를 바탕으로 설계기법의 통합 및 자동화 등이 이루어질 것으로 예상된다.

Ⅳ. 말뚝기초의 시공

그림 4에서와 같이 말뚝공법은 시공법에 따라 타입말뚝, 매입말뚝, 현장타설말뚝으로 나눌 수 있으며, 각 공법별에는 여러 공법들이 포함되어 있다.

건설환경문제에 대한 관심이 증대됨에 따라 근래에는 타입말뚝의 사용이 급속하게 퇴조하고 있으며, 따라서 각종의 매입말뚝공법, 현장타설말뚝과 같은

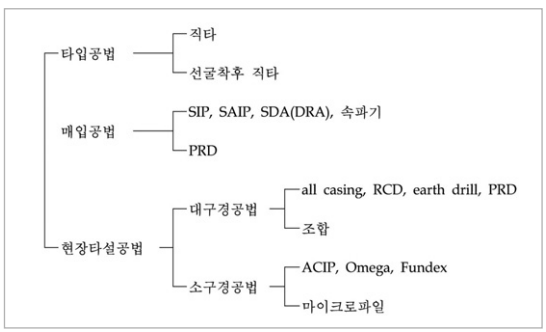

그림 4. 시공방법에 따른 말뚝공법의 분류

저소음 · 저진동 공법의 사용이 증가되고 있다. 현장 여건상 소음 · 진동의 문제가 없는 경우 여전히 타입말뚝공법도 활용되고 있는데, 타입말뚝은 해상 또는 임해지역에서 주로 계획되어, 장대말뚝으로 많이 시공되기도 한다.

이제 저소음 · 저진동 공법의 사용에 대한 필요성은 일반화되어 국가 간에 차이가 없지만, 저소음 · 저진동 공법의 종류는 국가 간에 차이가 있는 것 같다. 국내와 일본에서는 지반을 굴착하고 기성말뚝을 삽입하는 매입말뚝공법이 주로 이용되고 있고, 중국 및 동남아시아에서는 압입공법을 주로 사용하고 있다. 유럽에서는 케이싱(또는 오거)을 이용하여 지반을 굴착하고 굴착공 내에 콘크리트를 타설하면서 케이싱을 인발하는 소구경 현장타설말뚝이 주로 사용되고 있으며, 북미에서는 소구경 현장타설말뚝인 ACIP(auger cast in place pile) 공법이 주로 사용되고 있다. 1997년 비배토형의 소구경 현장타설말뚝(Omega 공법)이 유럽에서 국내에 도입된 적이 있지만, 국내의 건설조건과는 거리가 있는 것으로 평가되어 현재 거의 사용되지 않고 있다. 저소음 · 저진동 공법으로 대구경 현장타설말뚝도 사용되고 있다.

최근 국내에서 구조물이 대규모화, 중량화되면서 대구경 현장타설말뚝이 많이 사용되고 있다. 이러한 경향은 2003년 말 급작스런 강재의 가격인상과 현장타설말뚝의 저공해에 대한 장점이 상대적으로 부각되어 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 국내의 현장타설말뚝은 주로 암반에 근입되어 설치되고 있으며, 여기에는 RCD공법, all casing공법, earth drill공법이 있지만 조합한 방법이 주로 사용되고 있다. 한편, 최근 건축기초에서 1.2m 이하의 현장타설말뚝은 시공효율이 좋은 PRD공법으로 많이 시공되고 있다.

국내에서 지금까지 계속 이용되는 매입말뚝공법은 SIP공법, SDA공법, PRD공법 등이며 SAIP공법, Correx공법, 속파기공법 등은 이제 거의 사용되지 않고 있다. 전체적인 매입말뚝공법의 변천은 단순하고 실용적인 시공형태로 바뀌고 있으며, 이는 1997년 말 IMF 이후 급감한 시공비와도 관계가 있을 걸로 생각된다(조천환, 2007). 최근까지 국내에서 이용되는 매입말뚝공법은 SIP공법, SDA공법, PRD공법 등이다. SIP공법도 경타하는 공법 위주로 적용되고, 원래 경타가 필요 없는 공법으로 고안된 SDA공법과 PRD공법도 경타를 실시하는 방식으로 변화되었다. 이들 매입공법들은 공법의 원리와 관계없이 시공관리 및 품질확인이라는 명목으로 대부분 경타를 사용하고 있으므로 엄격한 의미에서 현재의 매입말뚝공법은 저소음 저진동공법으로 만족스럽지 못하다고 할 수 있다. 향후 경타를 수용할 수 없는 주변 환경조건은 증가할 것이며, 건설공해에 대한 규제는 더욱 심해질 것이므로 이에 대처하기 위해서 현재의 공법들은 보다 엄격한 저소음 저진동 공법으로 발전되어야 할 것이다. 또한, 보다 다양한 공법이 개발될 수 있는 여건이 조성되길 기대해 본다.

근래에는 근접시공이 자주 발생하고 기존 건물의 리모델링이 시도되고 있으므로 마이크로파일의 사용이 증가하고 있다. 그러나 최근에 주거용 아파트의 리모델링 증가평수가 최대 9평으로 제한되어 리모델링이 정체되고 있지만, 향후 재건축의 여건이 악화되면 리모델링의 수요 증가와 근접시공의 필요에 따라 보강방법으로써 마이크로파일의 활용이 증가될 것으로 예상된다.

장차 기존 건물의 재건축은 점점 확대될 것으로 전망된다. 이 경우 기존 건물의 말뚝에 대한 재사용 또는 제거에 대한 결정을 위해 적지 않은 고민을 해야 할 것으로 생각된다. 향후 기존 기초의 재사용 및 제거라는 항목이 현재의 시공법 선정에도 영향을 줄 것으로 보인다. 일본에서는 신설 구조물 시공시 기존말뚝을 제거하는 방법이 개발되어 활용되고 있다(그림 5 참조). 그러나 현재의 말뚝기초에 대한 설치 깊이나 규모를 보면 다음 세대에서의 재건축시 기존건물의 기초에 대한 처리는 그림 5와 같은 소극적인 방식

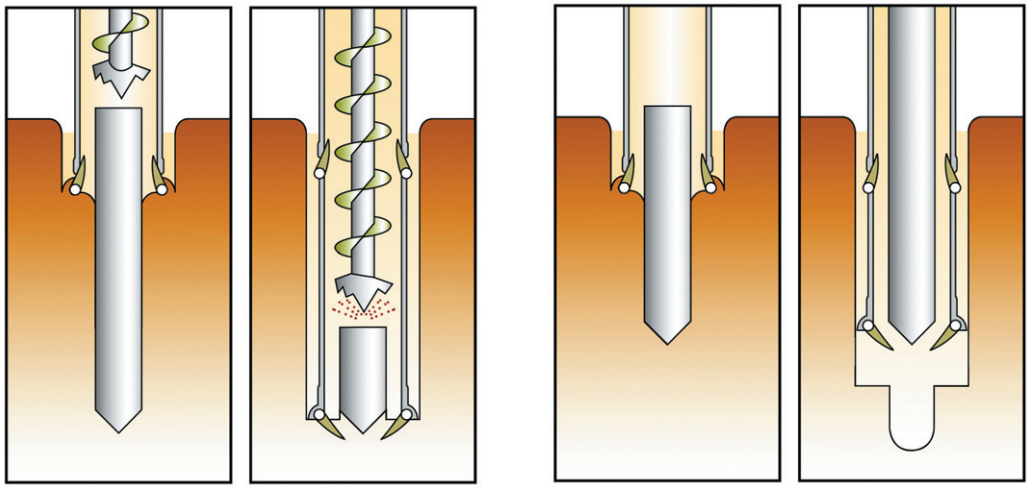

그림 5. 기존말뚝의 제거 방법

만으로는 곤란할 것으로 생각된다. 따라서 이제는 구조물의 기초 선정 시 다음 세대의 재건축 시 기초처리에 대한 영향이 하나의 고려인자가 될 수 있을 것이다. 이것은 현재의 신설기초는 차세대에서 재활용하거나 처리가 쉬운 기초여야 한다는 것을 의미한다.

향후 말뚝기초의 시공은 환경문제의 적응, 장비의 개발 및 활용에 의해 그 발전여부가 결정될 것으로 판단된다. 국내의 여건에서 장비의 발전에 따른 매입말뚝공법 및 현장타설말뚝의 발전이 예상되며, 장비의 발전에 따라서는 새로운 공법도 출현될 것이다. 시공과 품질확인이 별도로 이루어져 왔던 기존의 시공법과는 달리 앞으로는 시공과 품질관리가 함께 진행되는 공법의 개발도 시도될 것으로 기대된다.

Ⅴ. 말뚝기초의 품질확인 시험

말뚝기초의 품질확인 시험으로 이용되는 주요 재하시험방법은 정재하시험, 정동적재하시험, 동재하시험, 오스터버그셀시험, 유사정적재하시험 등이 있다. 국내에서는 유사정적재하시험을 제외한 사용실적이 있으며, 정동적재하시험은 1990년 초 도입되어 초기에 사용 실적이 있으나 이후 거의 사용되고 있지 않다.

국내에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 재하시험방법은 동재하시험이며, 이는 경제성과 시험으로부터 얻어지는 다양하고도 유용한 정보에 기인한다고 생각된다. 동재하시험은 1994년 국내에 도입되어 말뚝기초의 품질확인, 말뚝기초의 연구 등에 지대한 역할을 하였다고 평가된다. 이제 동재하시험은 현장타설말뚝의 품질확인에까지 활용되고 있다.

동재하시험은 신뢰도 문제가 지적되고 있는데 이는 시험자체의 신뢰도 문제라기보다 분석자의 능력과 관계되는 것이다. 따라서 외국에서는 자격증제도를 공식화하는 추세에 있다. 국내에서도 동재하시험의 신뢰도에 대한 문제가 자주 지적되자 구조물기초설계기준해설(1993)에서는 일정 규모 이상의 현장의 경우 정재하시험과 동재하시험을 동일 말뚝에 실시하여 동재하시험자의 능력을 평가한 후 전체적으로 동재하시험을 적용하도록 제안하고 있다. 이러한 제안은 대단히 바람직함에도 불구하고 제안 내용의 실행이 간단치는 않아 아직 현장에서 받아들이지 못하는 면이 있다.

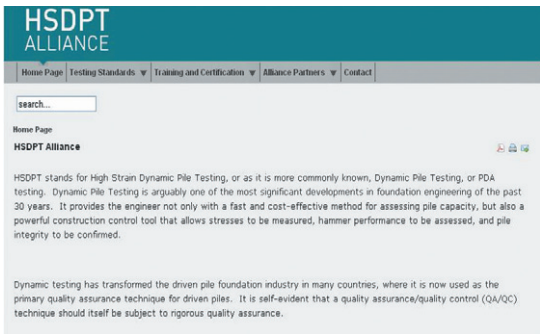

그림 6. 동재하시험의 국제적인 협조시스템의 개요(추진 중)

2004년 개최된 Stresswave 2004에서 동재하시험에 대한 국제적인 협조 시스템(HSDPT Alliance : High Strain Dynamic Pile Test Alliance)에 대해 토론이 있었다(그림 6 참조). 이 시스템은 국제적으로 동재하시험자에 대한 교육과 자격증 제도, 계측기의 검증, 시험분석 내용의 확인, 시험 데이터 및 분석결과의 데이터베이스화 등을 총괄하여 관리하는 것이다. 현재 이 시스템의 추진은 상당히 진척되었으며 곧 웹사이트를 통해 공개되고 시행될 것이다. 국내에서도 HSDPT Alliance에 참여하여 국내의 동재하시험의 신뢰도와 말뚝기초의 품질을 향상시키는 방안으로 고려해 볼 필요가 있다고 생각된다. 동재하시험은 다른 시험 방법과는 달리 시공 전 본 시공의 관리기준을 작성하고 시공 후 품질을 확인해 준다는 점에서 시험자의 신뢰도가 특히 중요한데, 이것이 실패할 경우 현장에 심각한 문제를 초래할 수 있으므로 시험자의 신뢰도에 대한 관심이 보다 강조되어야 한다.

국내에서 말뚝의 정재하시험도 많이 이용되고 있다. 근래에는 정재하시험 시 스트레인게이지 등을 통해 하중전이 측정이 시도되고 있으며, 이러한 결과는 설계 시 유용한 자료를 제공할 수 있을 것이다. 또한 정재하시험의 시험하중도 커지고, 시험 시 자동화 측정 시스템도 도입되어 이용되고 있다.

재하시험의 하중이 점차 커짐에 따라 재래식 방법보다 오스터버그셀시험(또는 양방향재하시험) 방법의 활용이 국내에서도 증가하고 있으며 이에 대한 기술개발(최용규 등, 2006)도 활발하다. 대구경 말뚝에서는 재하용량을 증가시키는 것이 용이하고 시험환경이 어렵고 복잡할 수 있는 해상 말뚝기초에서 오스터버그셀시험의 활용이 증가할 전망이다. 다만 이 시험은 많은 장점에도 불구하고 사전에 말뚝을 지정하고 시험을 한다는 점에서 품질확인 시험으로 의미가 줄어드는 점을 이해해야 한다. 또한 품질확인을 위한 오스터버그셀 시험은 소켓팅된 본 말뚝을 전단시킬 수도 있으므로 시공 후 품질 확인시험보다는 설계 시 설계하중 및 시공계획을 위해 보다 적극적인 활용을 고려해야 할 것이다.

현재 국내에서는 동재하시험의 사용이 증가함에 따라 상대적으로 정재하시험의 이용이 과거에 비해 적은 것으로 보인다. 정재하시험은 모든 시험의 기준이 될 수 있는 시험으로써 그 가치와 중요성을 이해하는 것이 중요하다. 국내에는 기술자에 따라 정재하시험과 동재하시험에 대한 고정관념을 갖는 경우가 있으며 현장에서는 이와 관련된 마찰도 종종 있다. 상기에 언급된 모든 시험방법은 국제적으로 인정된 방법들이므로 기술자는 어떠한 시험방법에 대해 고정관념을 가질 필요는 없다고 생각한다. 오히려 각 시험법의 효용성에 따른 현장별 선정에 더욱 관심을 갖는 것이 중요하다고 생각된다. 다만 이러한 시험방법들의 개선 및 발전에 대한 것은 물론 시험 결과에 대한 신뢰도에 대해서 보다 관심을 가져야 할 것이다.

말뚝기초의 품질관리항목으로 재하시험에 의한 지지력확인 외에도 말뚝 본체의 건전도 확인이 중요하다. 건전도 확인을 위해서는 기성말뚝의 경우 동재하시험의 적용이 가능하다. 현장타설말뚝의 건전도 확인을 위해 공대공 초음파 검사(crosshole sonic logging, CSL), 충격반향기법(impact echo, IE) 등이 이용되고 있다. 전자는 보다 실질적인 정보를 주는 반면 초기 시설이 필요하고 조사튜브의 바깥 공간은 확인할 수 없다는 단점이 있으며, 후자는 측정이 간편하고 경제적인 반면 해머의 타격 에너지가 작아

(a) 향타관입성을 무선측정기로 측정하는 장면 (말뚝 내 계측기의 배터리 전원 이용)
(b) 현타말뚝의 하중전이를 자동 측정하는 장면(말뚝위부 설치한 태양열 전원 이용)

그림 7. 말뚝기초의 무선시험 및 자동화 계측

말뚝깊이의 제한(≤30*D*, *D*는 말뚝 직경)이 있으며 해석에 경험이 필요하다. 일반적으로 고층 건물의 현장타설말뚝에서는 철근 외에 철골을 삽입하는데, 이러한 경우는 이들 시험방법의 적용이 곤란하다.

현장타설말뚝말뚝의 건전도를 확인할 수 있는 방법으로 코어링(coring)방법도 이용되고 있다. 코어링은 토그라우팅(toe grouting)이 계획되어 있는 경우 그라우팅 파이프를 이용하여 코어링을 실시함으로써 경제적으로 간단히 수행할 수 있는 이점이 있다. 또한 코어링 방법은 콘크리트 본체의 건전도 확인은 물론 콘크리트와 암반 접촉부의 슬라임 상태, 지지암반의 강도 등을 확인할 수 있다는 점에서 매우 유용한 시험방법이다. 아직까지 코어링 방법 외에 콘크리트 본체와 암반의 건전도, 콘크리트 본체와 암반 사이의 슬라임 확인 등을 효과적으로 확인할 수 있는 방법은 없는 것이 현실이므로 코어링 방법의 적극 활용이 필요하다.

지금까지 재하시험은 주로 표본 말뚝에 대한 품질확인 위주로 사용되어 왔다고 생각된다. 그러나 앞으로 설계하중은 점차 커져 최적설계가 정착되기 시작하면 품질확인의 중요성은 더욱 강조될 것이다. 따라서 보다 간편하고 경제적인 재하시험방법으로 보다 많은 수량의 말뚝에 대해 품질을 확인하는 것에 관심을 갖게 될 것이다. 이러한 경향에 따라 말뚝의 재하시험 및 유지관리 계측에도 IT기술을 융합하는 요소기술이 실용화되거나 도입될 것으로 전망된다. 따라서 말뚝기초의 시험 및 계측에도 무선 및 자동화가 추진될 것으로 생각된다(그림 7 참조).

Ⅵ. 결언

표 1에서와 같이 국내 말뚝의 경우 설계하중은 재료허용하중의 평균 46%~76% 정도로 활용하고 있으며, 종종 지지력이 미달한 말뚝도 보고되고 있다. 이러한 사실로부터 국내 말뚝의 설계는 전반적으로 보수적이며 시공능력은 설계보다 약간 높지만 여전히 품질의 문제가 있는 것을 알 수가 있다.

선진외국에서는 설계하중을 재료허용하중에 맞추어 설계하는 최적설계가 이루어지는 반면, 국내에서는 말뚝크기에 따른 관용적인 설계가 이루어지는 경향이 있다. 이와 같은 설계의 차이는 설계방식에 대한 기본적인 생각의 차이에서 기인한다고 생각한다. 즉, 선진외국에서는 재료의 허용하중을 최대로 사용할 수 있는 지반조건과 공법을 선정하는 것이 설계의 과정으로 인식하고 있는 반면, 국내에서는 말뚝의 공법별 치수별로 사용되는 관용적인 설계하중을 바탕으로 설계가 이루어지는 경향이 있다. 향후는 어쩔 수 없이 경제성이 더욱 강조되며 이에 적응되지 못하는 모든 기술은 실무 적응이 어려워질 것이라 생각된다. 최적설계가 이루어지기 어려운 이유 중의 하나는 최적설계에 가까울수록 설계자들은 위험측이라고 생각하고, 시공자는 공사비가 줄어든다는 고정관념이 현업에서 엄연히 존재하는바 이러한 것을 보다 효율적으로 극복하기 위해서는 인센티브 등 제도적인 부분의 보완도 필요하다고 생각된다.

향후 말뚝 기초공에서 영향을 줄 또 하나의 큰 변수는 환경문제라 생각한다. 말뚝기초의 환경문제는 단순한 건설환경문제를 포함하여 에너지, 경제, 건설동향 등 전체적인 지구환경(global environment)의

상황에 따른 새로운 변화를 포함할 것이다.

따라서 우리 기술자들은 말뚝기초의 최적화, 친환경화를 위해 요소기술에 대한 관심을 갖는 것은 물론 크게는 지구환경변화에 따른 말뚝기초 기술 전반에 대한 사고와 준비가 필요한 때이다. 특히, 향후 10년간 국내 말뚝기초 분야의 큰 진전은 ①보다 실증적이고 정확한 설계, ②주어진 말뚝재료를 최대로 활용하는 최적설계를 달성하기 위한 말뚝의 시공기술 및 품질확인 기술 향상, ③고강도 재료 및 신소재의 이용, ④국내에 맞는 저공해 기초공법의 도입 및 개발 등에서 나타날 것으로 전망된다.

참고문헌

1. 김경남, 이수형, 정충기, 이해성(1999), "Piled Raft 기초의 부등침하 최소화를 위한 최적말뚝배치", 대한토목학회논문집, 19(Ⅲ-4), pp. 831~839.
2. 김대호, 이준환(2005), "말뚝기초 지지력에 대한 안전율과 신뢰도 지수 평가", 2006 봄 학술발표회, 한국지반공학회.
3. 설훈일, 정상섬, 우상윤(2005), "굴착면 거칠기를 고려한 암반근입 현장타설말뚝의 주면하중전이 특성", 2006 봄 학술발표회, 한국지반공학회.
4. 이명환(2004), "국내 말뚝기초의 현황 및 향후 전망", 현장기술자를 위한 워크숍, 한국지반공학회, 대한건축기술사회, pp. 165~177.
5. 조천환(1998), "시간경과에 따른 타입말뚝의 지지력 증대 특성에 관한 연구", 한양대학교 박사학위논문.
6. 조천환(2007), 매입말뚝공법, 이엔지북.
7. 조천환, 석정우(2006), "고층건물 현장타설말뚝기초의 설계 및 품질확인시험", 2006 가을 학술발표회, 한국지반공학회. pp. 585~592.
8. 최용규, 정성민(2006), "양방향말뚝재하시험 기준제정에 나타난 주요 개념", 2006 가을 학술발표회, 한국지반공학회. pp. 603~608.
9. 파일테크, 한양대(2004), "암반층에 근입된 현장타설말뚝의 새로운 설계기법개발 연구", 연구보고서, 파일테크, 한양대 공동연구.
10. 파일테크, Hybrid composite pile 브로슈어.
11. 한국도로교통협회(2005), 도로교설계기준.
12. 한국지반공학회(2003), 구조물기초설계기준해설.
13. (社)コンクリートパイル建設技術協會(2002), 既製コンクリート杭 - 基礎構造設計マニュアル - (建築編)

기획 : 강민수 편집간사 ms5210.kang@samsung.com

학회지 일반 원고 투고요령

**'대한토목학회지'에서는 토목학회 회원들의 원고(분야 및 항목 구분없음)를 접수 받고 있습니다.
투고된 기사는 학회지 편집위원회의 심사를 거쳐 학회지에 게재되며,
소정의 원고료를 드리고 있습니다.
토목인들의 많은 관심과 참여를 부탁드립니다**

투 고 요 령

- **담당자** : 전지연 (02-3400-4505 / solasys@ksce.or.kr)
- 담당자에게 이메일로 원고를 접수하신 후에 연락 주시기 바랍니다.
- **작성 방법** : A4 3~8매 이내 (사진포함)로 자유롭게 작성