

구조물 기초 설계기준(깊은기초) 주요 개정 내용

1. 서 언
2. PC 및 PHC말뚝 재료의 장기 허용압축응력
3. 현장타설 콘크리트말뚝의 재료 허용압축하중
4. 시험말뚝 시공
5. 항타공법에서 파동이론 분석 적용
6. 시간경과효과의 고려
7. 동재하시험의 신뢰도
8. 항타공식의 적용
9. 부주면마찰력 산정
10. 기초 푸팅의 지지효과
11. 결 언

이명환

Myung-Whan Lee

(주)파일테크

Piletech Consulting Engineers

구조물 기초 설계기준(깊은기초) 주요 개정 내용

이명환¹⁾, Myung-Whan Lee,

¹⁾ (주)파일테크, Piletech Consulting Engineers

1. 서 언

현행 구조물 기초 설계기준은 1997년도에 개정된 것으로 그로부터 5년이 경과한 금년 2002년에 다시 개정하게 되었다. 금번 개정에는 기존의 내용에 항만구조물 기초와 내진 설계 부분이 추가되었다. 기존의 구조물 기초 설계기준은 명칭상 기준으로 되어 있지만 그 내용이 매우 상세하며 설명 위주로 작성되어 있어 사실상 설계편람(design manual)과 같은 성격이었다. 그러나 금번 개정에서는 건설기술 관리법 제 34조 3항에 근거한 건설공사 설계기준 작성 및 관리 요령에서 규정한 제반 내용들을 준수하여 작성되었다. 따라서 2002년 개정 구조물 기초 설계기준은 기준이라는 명칭에 걸맞도록 세부적인 내용들은 포함하지 않고 가장 기본적인 내용들만으로 구성되어 있다는 것이 이전과는 크게 차이가 나는 점이다. 기존의 구조물 기초 설계기준과 같은 세부적인 내용들은 별도 해설서를 발간하여 수용할 예정이다. 개정되는 구조물 기초 설계기준은 해설서와 함께 8월경 발간될 예정이다. 여기에서는 그중 제 5장 깊은 기초의 내용중 주요 개정 내용을 설명하도록 한다. 제 5장 깊은기초는 필자와 연세대학교의 정상섭 교수가 집필을 담당하였으며 우대기술단의 양현승회장님과 건설기술연구원의 홍성완박사님의 자문을 거쳐 확정하게 되었다.

2. PC 및 PHC말뚝 재료의 장기 허용압축응력

기존의 구조물 기초 설계기준에서는 RC, PC, PHC말뚝 모두 구분 없이 콘크리트 압축강도의 $\frac{1}{4}$ 을 말뚝재료의 장기 허용압축응력으로 규정하고 있다. 이는 RC말뚝에 적용할 수 있는 내용이며 PC 및 PHC말뚝의 경우에는 프리스트레싱의 영향을 고려하여야 하기 때문에 적용하는 것은 무리이다. 말뚝재료의 장기 허용압축응력에 프리스트레싱의 영향을 고려함은 당연하다. 기존의 기준에서 이 내용을 간과한 것은 잘못된 것으로 이번 개정에서는 “PC말뚝 및 PHC말뚝 본체의 허용압축하중은 콘크리트의 허용압축응력에 콘크리트의 단면적을 곱한 값에 장경비 및 말뚝이음에 의한 지지하중 감소를 고려하여 결정한다. PC말뚝 및 PHC말뚝의 콘크리트의 허용압축응력은 프리스트레싱의 영향을 감안하여야 한다”라고 하여 이를 바로잡았다.

기성 콘크리트말뚝에서 프리스트레싱의 영향을 고려하지 않았던 기존의 설계기준도 실무적으로는 설계에 전혀 영향을 미치지 못하였다. 이는 전적으로 우리나라의 말뚝기초 설계 기술수준이 낙후되었던 데 기인한다. 즉 우리나라의 말뚝기초 설계하중은 거의 대부분 말뚝재료의 허용하중과 비교하여 훨씬 낮은 지반의 허용지지력에 의해 결정되었기 때문에 말뚝재료의 허용하중 내지는 허용응력의 크기는 사실상 설계에 영향을 주지 못하였다.

그러나 근래 말뚝기초 관련기술의 발전으로 일부 고급설계에 국한하기는 하지만 말뚝재료가 허용하는 한계에 근접하는 설계도 시행되고 있기 때문에 현행의 설계기준을 적용할 경우에는 혼란이 예상되는 부분이었다. 따라서 향후의 말뚝설계에서는 지반의 허용 지지력 뿐만 아니라 재료의 허용하중도 필히 검토되어야 하겠으며 이번 개정으로 그 바탕을 마련하였다.

3. 현장타설 콘크리트말뚝의 재료 허용압축하중

기존의 설계기준에서 현장타설 콘크리트말뚝의 재료 허용압축하중은 현장여건에 따라 콘크리트의 압축강도의 20~25%까지 계산하도록 규정되어 있다. 그러나 보강철근에 대해서는 언급하지 않고 있기 때문에 일반적으로 이를 말뚝재료의 허용하중 산정에서 무시하는 것으로 해석되었다.

보강철근을 재료의 하중지지 부재로 취급하는지 여부는 나라에 따라 또 기준에 따라 상이하다. 우리나라 건설업체가 진출하고 있는 여러 나라에서도 보강철근의 하중지지 능력을 설계에 반영하는 경우가 많이 있으며 그로 인해 구조물의 안전이 문제되지 않음을 볼 때 이 주제에 대해서는 전향적인 개선을 할 시기가 된 것으로 판단되었다. 또한 우리나라에서도 건축구조물의 경우에는 이미 보강철근을 설계에 반영하고 있기 때문에 이를 더 이상 지연할 수도 없는 형편이다. 이에 금번 개정에서는 “*현장타설 콘크리트말뚝 본체의 허용압축하중은 콘크리트부위와 보강철근부위로 구분하여 두 부분의 허용압축하중을 각각 산정한 다음 이 두 값을 합하여 결정한다*”라고 보완하여 보강철근의 하중지지능력을 설계에 반영할 수 있도록 추가하였다.

이는 단순히 현장타설 콘크리트말뚝의 압축설계하중 값을 크게 하는 것만으로는 달성될 수 없다. 현재 토목구조물에서 일반적으로 많이 적용하는 직경 1500mm 말뚝의 설계하중은 700톤 내외이다. 이러한 설계에서도 설계조건을 만족하기 위하여 철저한 품질관리가 요구되고 있는데, 이 규격의 말뚝을 보강철근을 반영하여 1300톤 내외까지 설계할 경우 품질관리 수준이 이에 맞도록 보완되어야 하는 과제 또한 해결되어야 할 것이다.

4. 시험말뚝 시공

말뚝의 지지력은 많은 요소들에 의해 좌우된다. 말뚝 지지력에 영향을 미치는 요소들 중 중요한 것으로는 지반조건, 시공조건, 시공장비조건, 시공으로부터 경과한 시간 등을 들 수 있다. 그러나 설계에서

이들 조건들을 모두 충분히 고려하는 것은 사실상 가능하지 않다.

- (1) 모두 다 잘 알고 있는 바와 같이 한정된 위치에서 현재 우리나라에서 시행되는 정도의 지반조사 결과만으로 말뚝의 지지력을 추정한다는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 시공 중 조사된 내용과는 상이한 조건이 나타날 가능성이 많으며 결국 설계내용과는 다른 말뚝이 시공되는 예들을 흔히 볼 수 있다. 이는 결국 구조물의 안전에 영향을 미치며, 경제적인 최적설계를 어렵게 한다.
- (2) 비록 지반조사가 현장조건을 충분히 대표할 수 있을 정도로 정밀하게 시행된 경우에도 말뚝기초에 대한 현재의 기술수준으로는 충분히 신뢰할 수 있을 정도로 말뚝지지력을 예측할 수 있는 방안은 없는 실정이다. 예를 들면 우리가 가장 일반적으로 사용하는 표준관입시험 결과인 N값으로부터 말뚝의 지지력을 산정하는 공식들의 계산결과와 실제로 측정한 값들 간에는 큰 차이가 있는 것을 보더라도 우리의 기술수준을 짐작할 수 있다.
- (3) 최근 말뚝 항타로 인한 건설공해 문제로 인하여 항타공법의 적용이 감소하고는 있지만 아직도 중요 구조물 공사에서는 항타공법이 많이 사용되고 있다. 항타공법의 경우 지지력 산정공식의 신뢰도 문제보다 말뚝의 항타시공 관입성이 선결되어야 한다. 즉 어떤 말뚝재료를 어떠한 지반조건에서 어떠한 시공장비를 사용하여 항타 시공하는 경우 말뚝을 어떤 깊이까지 관입시킬 수 있는 지 여부는 지반조건상 분명한 경우도 있지만 대부분의 경우에는 실제 시공을 해보지 않고서는 알 수 없다.
- (4) 토질역학 이론에 의하면 점성토 지반이 아닐 경우 말뚝의 지지력은 시공후 경과한 시간과 관계없이 변화가 없어야 한다. 그러나 지난 10여년간 국내외에서 시행된 각종 연구결과에 의하면 사질토에서도 말뚝 지지력은 시간에 따라 변화하는 것으로 밝혀지고 있다. 이와같은 시간경과 효과는 실제 시공을 해보기 전에는 알 수 없으며 따라서 예측이 불가능하다.
- (5) 건설공해로 인하여 말뚝을 항타할 수 없는 경우, 선굴착 또는 속파기 등과 같은 저공해공법이 적용된다. 저공해 말뚝 공법의 경우 그 지지력 미케니즘이 아직까지 밝혀지지 못하고 있으며 따라서 신뢰할 수 있는 지지력 공식은 사실상 없다.

이밖에 말뚝의 지지력은 무리말뚝 조건, 지반의 압밀침하 조건, 지하수 조건, 시공장비의 성능 등 다양한 요소들에 영향을 받기 때문에 현재 시행되는 정도의 지반조사 결과만으로 말뚝의 설계하중을 결정하는 것은 사실상 무리이다. 그럼에도 불구하고 지금까지의 설계기준에서는 이를 간과한 결과 현재와 같은 비경제적인 말뚝설계가 보편화하는 원인이 되었다.

금번 개정에서는 이를 개선하기 위하여 “일정규모 이상의 공사에서는 시험 말뚝을 설치하고 압축재하 시험을 실시하여 지반의 축방향 극한압축지지력을 확인하도록 한다. 공사 규모가 작으며 제반 여건상

시험말뚝 시공과 압축재하시험이 곤란한 경우에는 지반조사와 토질시험 결과를 이용한 정역학적 지지력 공식을 이용하거나 표준관입시험, 정적관입시험, 공내재하시험과 같은 원위치시험 결과를 이용한 경험식에 의하여 계산할 수 있다. 그러나 이들 방법의 신뢰도는 극히 낮기 때문에 공사 초기에 실제 말뚝을 대상으로 압축재하시험을 실시하여 축방향 허용압축지지력을 확인하여야 한다”라고 개정하였다.

5. 항타공법에서 파동이론 분석 적용

이 문제는 앞의 내용과도 밀접하게 연관된 것이다. 실제 공사 현장을 보면 말뚝의 항타시공 관입성에 대하여 검토를 실시한 설계는 많지 않은 실정이다. 많은 설계에서 지반조건이나 시공장비조건은 고려하지 않고 과거의 경험만으로 강관말뚝은 표준관입시험 결과 N값이 50이상인 곳까지 관입되는 것으로 가정하였음을 발견하게 된다. 그러나 실제 시공결과는 이와는 큰 차이가 나타나는 경우가 많고 그로 인하여 심각한 부실이 확인되는 경우도 드물지 않다.

또한 많은 설계에서는 항타장비 선정의 중요성을 간과하고 일본의 자료를 무분별하게 인용하여 시공장비를 지정하고 있다. 그러나 항타장비는 말뚝 규격(직경, 두께, 길이, 선단부 형태 등)과 지반조건을 모두 고려하여 결정하여야 한다. 그런데 일본의 자료들의 경우에는 단순히 말뚝의 직경과 길이 정도를 고려하고 있기 때문에 실제와는 큰 차이가 있을 수 있다. 이러한 잘못된 항타장비 선정은 구조물의 안전에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

이에 금번 개정에서는 “항타공법으로 말뚝을 시공하는 경우에는 반드시 파동이론 분석을 실시하여 항타장비선정, 항타시공 관입성 및 지반의 축방향 극한압축지지력등을 검토하되 시험말뚝 시공시 동적거동측정을 실시하여 이를 확인하여야 한다.”고 기준을 강화하였다.

파동이론 분석을 실시하면 항타장비의 합리적 선정과 항타시공관입성의 파악이 가능하고 결과적으로 합리적 시공이 가능하다. 그러나 파동이론 분석 결과도 실제 현장 조건과는 차이가 있을 수 있기 때문에 시험시공을 실시하여 이를 확인하도록 보완하였다.

6. 시간경과효과의 고려

토질역학을 토대로 한 기초공학에서도 점성토지반에서 말뚝의 지지력이 시간 경과에 따라 변화하는 효과는 일찍부터 잘 알려져 왔다. 연약 점성토의 경우 말뚝 항타로 인하여 발생한 과잉간극수압은 시간이 경과함에 따라 소산하며 그 결과 지반내의 유효 연직응력이 증가하고 따라서 지지력은 시간이 경과함에 따라 증가하게 된다. 굳은 점성토의 경우 말뚝항타로 굳은 점성토내에 균열이 발생하고 이 균열을 통하여 말뚝항타로 발생한 과잉간극수압이 급격히 소산함에 따라 지반내에는 부간극수압이 형성된다. 따라서 항타시 지반내의 유효연직응력은 매우 큰 값을 갖지만 시간이 경과함에 따라 이 부간극수압은

소산하고 결과적으로 말뚝의 지지력은 감소하게 된다.

그러나 사질토의 경우에는 말뚝항타로 일시적으로 과잉간극수압이 발생하더라도 지반의 투수계수가 크기 때문에 즉시 소산하며 따라서 말뚝의 지지력은 시간경과에 따라 변화하지 않는 것으로 알려져 왔다. 지난 10여년간 말뚝기초의 이론과 실제에 있어 가장 큰 변화는 이러한 사질토에서도 말뚝의 지지력은 시간이 경과함에 따라 변화하는 것을 확인한 것이다.

이러한 시간경과 효과는 지반에 따라서는 말뚝지지력 결정에 가장 중요한 요소가 되기도 한다. 지금까지의 경험에 의하면 이러한 시간경과효과를 고려하지 않은 많은 설계에서 과잉 설계 또는 과잉 시공으로 예산의 낭비가 문제점으로 제기되고 있다. 또 이를 확인하지 못하였기 때문에 부실시공이 되었던 경우도 발견된다. 금번 개정에서는 이러한 부분을 보완하기 위하여 “말뚝의 압축지지력은 지반조건에 따라 말뚝을 시공한 후 경과한 시간에 따라 변화한다. 이를 확인하기 위하여 동일한 말뚝에 대하여 시공 시점과 일정한 시간이 경과한 후 압축재하시험을 실시하여야 한다.”는 조항을 신설하여 모든 공사에서 시간경과 효과를 확인하도록 하였다.

7. 동재하시험의 신뢰도

우리나라에 동재하시험이 정식으로 도입된 것은 1994년이였다. 그 이전에도 미국GRL사에서 1980년대에 우리나라에 와서 동재하시험을 실시하였다는 기록이 있고, 1980년대말에도 네덜란드 기술자에 의해 동재하시험이 실시되기는 하였지만 이들을 본격적인 적용으로 볼 수는 없다.

1994년 동재하시험이 도입된 이래 현재까지 30대 이상의 동재하시험기가 도입되었다. 동재하시험은 말뚝에 타격력을 가해주고 그 결과 나타나는 파(wave)를 해석하여 말뚝의 지지력 뿐만 아니라 항타장비의 성능, 타격력의 크기, 주면마찰력의 분포, 선단지지력의 크기, 말뚝의 건전도 등 다양한 정보를 확인할 수 있는 유용한 시험법이다.

그러나 이러한 분석을 하기 위해서는 말뚝의 동적 거동에 대한 지식과 말뚝 지지력에 대한 전문적인 지식이 요구된다. 또 동재하시험기가 개발된 미국의 말뚝재료 조건, 장비조건, 지반조건, 시공방법 등은 우리나라와는 상이하기 때문에 우리나라에서 동재하시험을 적용하기 위해서는 우리나라의 공사 여건에 대한 지식과 경험이 필수적이다. 따라서 동재하시험을 제대로 적용하기 위해서는 동재하시험에 대한 기본교육을 이수해야 함은 물론이고 지속적인 연구가 필요하다. 그럼에도 불구하고 우리나라의 경우에는 필요한 최소의 기본교육을 이수하지도 못한 상태에서 말뚝기초에 대한 전문적인 지식이 없는 기술자에 의해 동재하시험이 실시되는 사례가 많이 있다. 그 결과 지지력이 부족한 말뚝이 안전한 것으로 판정되고, 안전한 말뚝에 대하여 보강 공사를 하는 일도 그리 드물지 않다.

이는 전적으로 기술자의 자질을 검증할 수 있는 장치가 없는 상태에서 무조건적으로 가격만을 조건으로 하여 시험이 시행되기 때문이다. 또한 동재하시험은 그 특성상 여기에 종사하는 기술자가 아닐 경우 시험이 적절하게 시행되고 해석되었는지를 확인하기 곤란한 것도 주요 원인이 되었다.

금번 개정에서는 이와 같은 문제점을 해소하기 위한 방편으로 “동재하시험은 실시 기술자의 자질에 따라 그 신뢰도가 크게 영향을 받는 문제점을 해결하기 위하여 시험 말뚝을 시공하여 동재하시험을 먼저 실시한 다음 동일한 말뚝에 대하여 정재하시험을 실시하고 그 결과를 비교함으로써 동재하시험 결과를 검증하도록 한다.”는 조항을 신설하여 동재하시험 실시 기술자의 자질을 검증하도록 하였다.

8. 항타공식의 적용

항타공법으로 말뚝을 시공할 때 말뚝의 지지력을 확인할 수 있는 가장 간편한 방법은 항타공식을 적용하는 것이다. 항타공식은 원칙적으로 말뚝을 항타할 때 말뚝에 가해지는 에너지는 한 일과 같다는 에너지 보존법칙을 토대로 한다. 과거에는 항타할 때 말뚝에 가해지는 에너지를 기술자들이 쉽게 알 수 있는 것으로 가정하였다. 그러나 근래에 들어 말뚝 항타과정을 계측할 수 있는 장비가 개발됨에 따라 과거 기술자들이 추측하였던 것과는 상황이 크게 상이하다는 것이 밝혀지게 되었다. 즉 말뚝에 가지는 타격 에너지는 과거 항타장비 종류에 따라 일률적으로 적용하던 값보다는 훨씬 작은 값이며 또 각 장비에 따라서도 그 차이가 크며 더구나 같은 장비에서도 시간 및 시공 조건에 따라 변화한다는 것을 알 수 있었다.

또 앞에서 설명한 시간경과효과는 항타공식을 적용할 수 없는 치명적인 증거가 되었다. 정밀 계측을 실시하여 타격에너지를 알 수 있는 상태에서 가장 신뢰도가 높은 항타공식을 적용하더라도 계산된 결과는 말뚝을 항타할 시점의 지지력일 뿐이다. 이 값은 시간경과 효과에 따라 증가하거나 감소한 상태로 구조물의 하중을 지지하게 된다. 즉 우리 기술자들이 필요로 하는 지지력은 항타시점의 지지력이 아니고 장기적인 지지력이기 때문에 항타공식 계산 결과와는 차이가 있을 수밖에 없다.

이번 개정에서는 항타공식의 이러한 문제점을 고려하여 원칙적으로 사용하지 않도록 아래와 같이 기준을 강화하였다. 그러나 실무에서는 실제로 항타공식 이외의 현실적 대안이 없는 점을 감안하여 해머의 에너지 효율을 실측하는 경우 항타공식을 시공관리 목적에 한하여 적용하도록 하였다. 이 경우에도 물론 시간경과 효과는 별도로 고려하여야 한다는 점을 전제로 한다.

- (1) 항타공식은 해머의 효율에 따라 압축지지력이 크게 영향을 받기 때문에 동재하시험으로 해머의 효율을 실측하는 경우를 제외하고는 사용하지 않아야 한다.
- (2) 동재하시험을 실시하여 해머의 효율을 실측하는 경우에도 시간이 경과함에 따라 해머 효율이 변화할 수 있으므로 일정 기간마다 동재하시험을 실시하여 해머 효율의 변화여부를 확인하여야 한다.
- (3) 항타공식 계산 결과는 항타시의 말뚝의 압축지지력인 바, 시간경과 효과를 추가로 고려하여야 한다.
- (4) 동재하시험을 실시하여 그 결과인 실측 해머 효율을 적용하고 시간경과효과를 추가로 고려하는 경우에도 항타공식 계산 결과는 시공관리 목적으로만 사용할 수 있다.

9. 부주면마찰력 산정

기존의 설계기준에서는 부주면마찰력 산정 방법을 구체적으로 설명해준다. 그러나 부주면마찰력은 그 특성상 실제 현장조건에서 그 크기를 확인하는 것이 용이하지 않기 때문에 제시된 산정방법들의 신뢰도는 문헌에 의존할 수밖에 없었다.

개정 설계기준에서는 구체적인 부주면마찰력 산정방법은 소개하지 않았다. 이들은 같이 발간되는 해설서에서 설명될 것이다. 다만 개정되는 설계기준에서는 “부주면마찰력이 발생하는 지반조건에서는 선단 지지력의 크기와 주면마찰력의 크기 및 분포를 판단할 수 있는 말뚝압축재하시험을 실시하여 축방향 허용압축지지력을 결정하는 것이 가장 좋다.”는 조항을 추가하여 실제 부주면마찰력을 실측할 수 있도록 권장하고 있다.

또 기존의 설계기준에서도 무리말뚝의 부주면마찰력을 산정하는 방법을 제시하고는 있지만 개정되는 설계기준에서는 적극적인 개념의 무리말뚝효과 개념을 적용할 수 있도록 하였다.

10. 기초 푸팅의 지지효과

기존의 설계기준에서는 “말뚝기초의 연직하중은 말뚝에 의해서만 지지되며 기초 푸팅의 지지효과는 무시된다.”라고 하여 기초 푸팅의 하중지지효과를 설계에 고려할 수 없도록 하고 있다. 그러나 지난 20여년간의 연구에 의하면 지반조건 및 말뚝의 특성에 따라 기초 푸팅의 지지효과를 무시할 수 없는 경우가 많이 보고되고 있다. 여러 가지 조건이 적합할 경우에는 기초 푸팅의 하중지지효과가 말뚝의 하중지지효과 보다도 오히려 더 큰 경우도 많이 있는 것으로 보고되고 있다.

이에 개정되는 설계기준에서는 “말뚝기초의 연직하중은 말뚝에 의해서만 지지되며 기초 푸팅의 지지효과는 무시한다. 다만 기초 푸팅의 지지효과에 대하여 충분히 신뢰할 수 있는 조건이 만족될 경우에는 이를 고려할 수 있다.”라고 하여 충분한 검증이 될 경우 선진 설계기술을 적용할 수 있는 길을 열었다.

11. 결론

개정되는 구조물 기초 설계기준은 기존 설계기준에서 누락되었거나 고려되지 못한 부분들을 보완하였다. 우리 나라에서 시행되는 깊은기초 설계는 외국의 설계에 비하여 그 수준이 많이 낙후된 것으로 평가되고 있다. 건설시장의 문호 개방으로 우리 업체의 해외 진출 기회가 커지는 효과도 기대할 수 있겠지만 우리 나라 시장에 외국 업체의 진출도 그만큼 용이해질 것이다. 건설공사의 다른 부분들에 비하여 깊은기초 부분의 기술력 낙후는 전체공사의 향방에 큰 영향을 미칠 수 있기에 기술력 보완이 시급히 요청된다. 급변 개정으로 우리의 기술력 강화에 도움이 될 것으로 기대된다. 아울러 지금까지 보다 높은 설계 수준이 적용됨에 따라 그에 걸맞는 시공기술 개발 및 시공관리 기법의 개발과 정착이 필요할 것이다.