

굴착공사시 주변지반 침하 및 인접 건축물 피해

1. 개 요

도심지에서 구조물 축조를 위한 터파기 공사시 주변지반 및 환경에 전혀 영향을 주지 않고 시공하는 것은 불가능에 가깝다. 주변에 주는 영향으로서는 정신적 고통인 '소음'과 육체적 그리고 인접 구조물에 실질적 피해를 주는 '진동', '침하' 등이 있다.

침하 현상은 노면의 균열, 경사, 함몰, 지하 매설물의 파손, 인접 구조물의 부등침하, 전도, 붕괴 등을 초래하므로 단순히 경제상의 문제 뿐만 아니라 사회적 도의적 관점에서도 충분히 주의해야만 하는 문제이다.

터파기 공사시 침하는 크게 나누어 흙의 이동에 의한 것과 배수에 따른 지하수위 저하에 의한 압밀, 압축 현상에 기인한다. 흙의 이동에 의한 침하는 흙막이벽의 변형에 따른 배면 흙의 이동에 의한 것, 지반이 느슨하거나 토사의 유출에 따른 이동에 의한 것, Heaving 현상에 의한 것 등이 있다. 이것은 흙의 이동량에 상당하는 양이 지표면의 침하로 나타난다고 보아도 좋다.

최근 도심지에서의 대규모 굴착이 이루어지는 과정에서 주변 건물에 피해를 주어 이에 대한 민원 및 보상 문제로 어려움을 겪는 경우가 빈번하게 나타나고 있으며, 일부 건물이 붕괴하여 인명 및 재산에 많은 손실을 가져오고 있다. 따라서, 굴착 작업시 조사, 계획, 설계, 시공 전 과정에서 이에 대한 검토와 안전관리가 절실히 요구되고 있는 상황이다.

2. 현 황

가. 침하발생원인

터파기 공사시 침하는 크게 나누어 흙의 이동에 의한 것과 배수에 따른 지하수위 저하에 의한 압밀, 압축 현상에 기인한다. 흙의 이동에 의한 침하는 흙막이벽의 변형에 따른 배면 흙의 이동에 의한 것, 지반이 느슨하거나 토사의 유출에 따른 이동에 의한 것, Heaving 현상에 의한 것 등이 있다. 이것은 흙의 이동량에 상당하는 양이 지표면의 침하로 나타난다고 보아도 좋다.

흙막이벽의 변형은 흙, 수압 등의 횡방향 압력에 의한 흙막이벽 자체의 휨 이외에 버팀대의 느슨함이나, 압축변형 등이 가산되어 발생한다. 이러한 변형량은 설계단계에서 거의 계산 예측될 수 있으므로 필요에 따라서 흙막이벽의 강성을 높이거나 버팀대에 선행

하중을 도입하는 등의 대책을 취한다.

배수에 의한 지하수위 저하에 따른 침하는 모래지반이나 과압밀 충적토 지반에서 문제가 되는 경우가 적고, 주로 유기질이 섞여 있는 모래지반이나 압밀층 또는 정규압밀점토 지반인 경우에는 문제가 되며 충분한 검토와 대책이 필요하다. 특히 유기질 섞인 흙은 탈수에 의한 수축이 아주 커서 굴착 지역으로부터 상당히 떨어진 건물에까지 영향이 미치게 되므로 주의해야 한다.

이상의 도심지에서 굴착에 기인된 주변지반 침하 원인을 항목별로 열거하면 아래와 같다.

- 1) 주변 공사시 되메움 상태가 불완전했던 곳의 항타 및 기계진동에 의한 침하
- 2) 토류벽의 변위에 의한 배면토 이동으로 발생하는 침하
- 3) 배수에 수반된 토사 유출에 의한 침하
- 4) 배수에 의한 상부 점성토의 압밀침하
- 5) Heaving 에 의한 주변 지반 침하
- 6) Strut 설치시 시공불량에 수반된 배면토 이동에 의한 침하
- 7) Sheet Pile 인발시 되메움 불량에 기인한 침하
- 8) 2차적 침하 - 1차 침하에 의해 상수도관 등이 파손되고 이로 인한 일시적인 대량의 물의 유출로 인해 토사유출이 발생하여 생기는 함몰침하

이들 원인 중 설계·계획 시점에서 정량적으로 검토할 수 있는 것은 2), 4), 5) 항 정도이고 나머지는 시공자가 충분히 주의를 갖고 대처해야 하는 사항이다.

이와 더불어 터파기 공사에 의한 인접구조물 침하 원인은 아래와 같은 항목이 있다.

- 1) 인접구조물의 기초지반이 터파기공사 굴착 저면보다 얇은 경우는 전술한 주변 지반 침하 원인과 같은 양상에 의한 침하가 발생할 수 있다.
 - 2) 인접구조물이 말뚝 기초에 의해 견고한 지층에 지지되고 있고 이들 말뚝기초의 지지 지반면이 굴착 저면보다 깊더라도 다음과 같은 원인에 의한 부등침하 발생할 수 있다.
- ① 토류벽의 변위에 의한 배면토의 이동에 의해 말뚝 주변의 지반이 느슨해지고, 지지력 저하가 생김에 따른 인접 구조물의 침하

- ② 배수에 의해 말뚝 주위의 토사 유출에 따른 인접 구조물의 침하
- ③ 배수에 수반하여 발생한 압밀침하에 의해 부마찰력이 말뚝에 가해져 생기는 인접구조물의 침하
- ④ Heaving에 의해 말뚝 주위 지반의 침하에 의한 인접구조물의 침하
- ⑤ 토류판의 설치나 Sheet Pile 철거후 되메움 불완전에 의한 지반의 느슨함이 말뚝에 영향을 미침으로써 발생하는 인접구조물의 침하
- ⑥ 함몰침하 등의 급격한 지반 침하에 의한 인접구조물의 침하 또는 전도

이상 인접 구조물의 침하 원인이 되는 것을 구체적으로 열거해 보았지만, 이것도 주변 지반의 침하 원인과 거의 같은 원인에 의해 발생되고 있음을 알 수 있다.

[굴착으로 인한 주변 건물 피해 사례]

가. 건물 개요 : 지상 2층 조적조

나. 지반 조건

- 상부로부터 매립층, 실트질 모래층, 풍화토, 풍화암 순으로 분포함
- 지하수위는 GL-6.5 m 에 위치

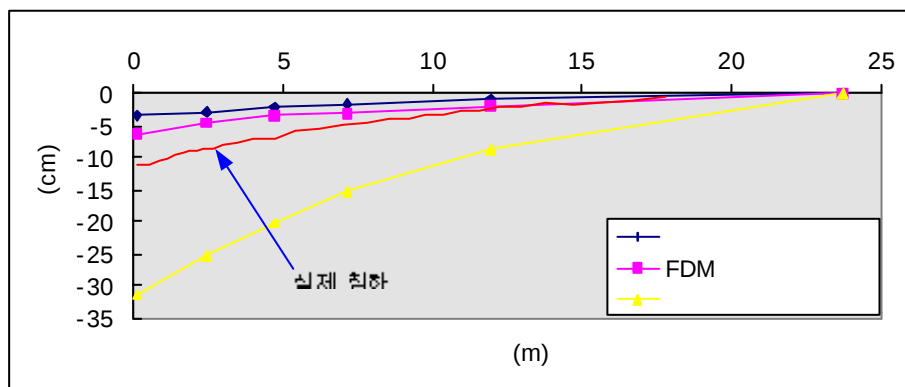
다. 굴착 설계

- 굴착 깊이 : GL-20.4m (풍화암 상부에 위치)
- 토류벽체 : H-pile + 토류판
- 지보공 : Strut(8단) 및 Earth Anchor(1단)
- 차수공 : SCW를 1열 시공하여 차수함.

라. 피해 현황

- 굴착 및 퇴메우기 과정에서 건물에 최대 11.5 cm 의 침하 발생
- 건물 최대 기울기가 1/105 정도의 부등침하가 발생하여, 벽체의 균열이 심각하여 안전진단 결과 붕괴 우려가 있는 것으로 나타남.

마. 분석 결과



(단, 경사계변위로 추정 1차 계측결과 → 벽체변위(체적)량 → Caspe방법으로 침하량산정)

1) 탄소성 해석 및 FDM 해석 결과 침하량은 실제 발생한 침하량보다 약간 작게 나타났는데, 그 이유는 다음같이 추정할 수 있다.

- ① 해석시 적용한 굴착 단계보다 과굴착한 현장의 시공 조건
- ② 해석 결과는 굴착시 벽체의 변형에 따른 침하 및 지반의 응력 이완만을 고려한 것으로, **시공 중 토류판 배면의 공동 및 국부적인 지하수 및 토립자의 유출, 토류벽 시공시의 진동 및 공동 형성 등에 의한 영향**이 고려되지 않은 것이므로, 실제 주변지반의 영향은 해석 결과보다 상대적으로 크게 나타남.
- ③ 특히 경사계 계측 결과 굴착 하부측의 변위가 큰 것은 시공 중 또는 해체 과정에서 벽체의 변위를 수반할 만한 시공 상황(국부적인 토립자의 유출 또는 무리한 해체작업 등)이 원인인 것으로 분석되었다.
- ④ 지반 물성으로부터 산정한 지반반력계수, 토압계수 등의 산정오류에 기인하는 벽체변위의 과소 산정등이 원인인 것으로 분석되었다.

2) 경사계 계측 결과를 이용한 침하량 추정치가 상당히 크게 나타난 것은 벽체의 변형에 의한 지반 침하의 가능성이 크다는 사실을 의미하여, 실제 침하량이 이보다 작은 이유는 굴착 배면에 시공된 차수 목적의 지반 보강의 영향인 것으로 추정된다.

따라서, 건물 하부의 지반이 느슨해져 있는 상태이며, 그 영향으로 어느 정도 침하가 계속 진행될 것으로 판단되었다.

바. 피해 원인 분석

- 굴착 과정에서 상당 부분이 과굴착되어 토류벽체의 변형이 과다 발생
(경사계 계측 결과 최대 12 cm 정도의 수평변위 발생)
- 하부 풍화토 부분 굴착시 지하수 유출과 함께 다량의 토립자 유출
- 해체 과정에서 Strut 2단을 일시에 제거하는 무리한 공사 진행

3. 문제점

가. 토류벽체의 과다한 변형

배면지반 침하 및 인접구조물에 미치는 영향이 발생하는 경우의 대부분은 토류벽체의 변형이 상당히 크게 발생한 경우이다. 그 원인으로는 다음과 같은 경우가 있다.

- 1) 과굴착 : 굴착 단계별로 설계시 가정했던 굴착 깊이 이상으로 굴착하여 지보재에 과도한 응력이 작용하게 되는 경우
- 2) 버팀보 시공시 느슨한 결합 : 버팀보 설치시 버팀보와 락강 혹은 락강과 토류벽 사이의 공간이 남아 있어 과도한 변위의 원인이 됨.
- 3) 앵커의 변형 : 앵커 시공시 적절한 시험을 통하여 설계 정착력이 확보되어야 하나, 이를 소홀히 하여 Sleep 변형 등이 발생하거나, 앵커체가 빠지게 되는 경우.
- 4) 무리한 해체 작업 : 해체과정을 고려한 굴착 설계가 필요하며, 공기, 작업성 등을 이유로 무리한 해체 작업 과정에서 과다한 변위 또는 붕괴 발생.

나. 지하수 및 토사 유출

굴착으로 인한 지하수위 저하와, 뿐만 아니라 지하수 유출 과정에서 토립자가 함께 유출되어 배면의 공동 형성으로 지반 침하 및 인접 구조물에 피해를 주는 경우가 있다. 또한 토류판 배면 및 토류벽 인발 과정에서 발생한 공동을 제대로 되메움하지 않는 경우 이로 인한 지반 침하가 발생.

다. 계측 결과를 무시한 시공

일반적으로 지반 물성 등에 대한 많은 가정에서 출발한 굴착 설계이므로, 굴착 및 되메움 과정에서 계측을 수행하여 그 결과를 설계 및 시공 과정에 반영하여야 한다.

굴착에 따른 인접지반의 거동 및 인접 건물의 영향을 파악하기 위해 지표침하, 지중수평변위, 건물의 변위 등에 대한 현장계측이 수행되어야 한다. 계측 계획은 가장 Critical한 부위를 중심으로 설계 내용에 Feed Back 될 수 있도록 수립되어야 하며, 특히 초기치의 계측이 중요하다.

4. 대 책

가. 토류벽체의 과다한 변형 방지

- 1) 과굴착 방지 : 시공 관리시 지보재 위치에서 최대 1.0 m 이상 과굴착 되지 않도록 철저한 시공관리가 요구된다.
- 2) 소단(Beam) 유지 : 불가피하게 과굴착이 이루어지게 되는 경우라도, 반다시 소단을 두어 이 부분의 수동저항이 발휘되어 변위에 저항할 수 있도록 하여야 한다.
- 3) 선행 재하를 통한 버팀보 시공 : 주변 지반의 영향이 우려되는 경우 버팀보에 선행 하중을 크게 도입(유압잭 등을 이용)하여, 버팀보와 띠장 혹은 띠장과 토류벽 사이의 공간을 없앴으로써 벽체의 변위를 상당량 줄일 수 있다.
- 4) 앵커에 대한 적절한 시험 : 적절한 시험(인발시험, 인장시험, 확인시험)을 실시하여 설계 정착력이 확보되도록 하며, 필요한 경우 설계 사항을 수정해야 한다.
- 5) 해체 과정을 고려한 설계 : 해체 과정을 고려한 굴착 설계를 실시하여, 무리한 해체 작업이 이루어지지 않도록 사전에 준비하여야 한다.

나. 지하수 및 토사 유출

지하수위가 높은 지반인 경우 반드시 차수벽을 시공하여 굴착 저면의 안정성 확보 및 지하수 유출로 인한 토립자의 유출을 방지해야 한다. 만약 국부적으로 지하수 및 토립자가 유출되는 경우 즉시 굴착을 중지하고 신속한 조치를 하여야 한다. 이를 위해 굴착 과정에서 이러한 경우에 대비한 사전 준비도 필요할 것이다.

다. 적절한 계측 및 시공 반영

굴착에 따른 주변 지반의 영향은 설계 과정에서도 어느 정도 예측은 가능하나, 설계에서 고려할 수 없는 많은 상황이 있으므로, 반드시 계측을 통한 시공 관리 및 설계 상황에 대한 Feed Back 이 이루어져야 한다.

특히 시공 단계와 연계한 계측 결과 분석이 신속히 이루어져, 설계 및 시공에 반영되도록 하여야 하며, 이상 징후(과다한 변형, 응력 및 주변 건물의 변화 등)가 있는 경우 즉시 되메우기 하고 이에 대한 분석 및 대책을 수립하여야 한다.