

구조물에 작용하는 부력에 관한 小考



이경남
(주)가미개발 대표

1. 序言

문명의 발전에 따른 인구의 도시 집중화 현상은 인류 역사 이래 지속되어져 왔으며, 향후에도 상당기간 지속되리라 생각된다. 인류의 도시집중에 따라 그들을 수용할 구조물 역시 도시의 집중화 및 대형화되어 왔으며, 이는 한정된 도시공간의 효율성 제고를 유발시켜 왔다. 구조물의 대형화 및 고효율화는 구조물을 더 깊은 곳까지, 또한 더 높은 곳까지 유도해 오고 있으며, 이에 따라 구조물은 땅과 땅속의 물에 노출되며, 우리 기술자들은 자연의 한 부분에 속하는 지반과 지반속의 물에 대하여 고민을 하지 않을 수가 없게 되었다.

지반의 거동이 일부분의 영역에 한하여 고찰되어진다면, 지반속 물의 거동은 훨씬 더 큰 영역의 평면, 단면 및 입체적 고찰을 필요로 하며 많은 경험을 갖고 있는 기술자라고 할지라도 명확한 규명을 한다는 것은 매우 어려운 일에 속하며, 어쩌면 불가능에 가까울 수도 있을 것이지만, 개념적 접근 및 일반적 기준의 접근은 가능하리라 사료되어 본 원고를 정리하였다.

2. 지반속의 물

- 1) 정의 : 지반속의 물이란 용어 그대로 지반속에 존재하는 모든 물을 칭하며
- 2) 종류 : 지반속의 물은 크게 2가지로 구분되며, 그 첫째는 우천에 의해 형성되는 것과, 둘째는 인간의 생활에 의해 형성되는 물(오수 및 상수의 누수)의 지하침투에 의하여 형성되는데, 구조물에 영향을 미치는 물은 우천에 의한 것이나 생활하수에 의한 것이나 모두 부력을 발생시키는 매체로서 역할을 한다.
- 3) 거동 특성 : 지반내 물의 유동은 연직방향의 흐름에 비해 수평방

향의 흐름이 매우 탁월하며, 이는 연직방향의 지층은 지반의 강성이 지층에 따라 변화하기 때문에 바로 이 변화하는 경계부가 대체적으로 불투수층(혹은 불량 투수층)으로의 역할을 함과 동시에 이 불투수층 또는 지층의 변화가 수평방향으로는 Channel(통로) 역할을 함으로써 지반내 유체의 거동은 연직성에 비해 수평성이 매우 크게 나타난다.

- 4) 구조물과의 연관성 : 지반내 물의 흐름은 매우 복잡한 요인에 의해 거동을 일으키지만 결국은 에너지 Level의 차이에 의해 그 흐름이 발생되며, 이 유체의 에너지가 바로 구조물에 부력으로 작용하며, 이 유체 에너지를 이해함으로써 부력에 대응해야 하는 에너지를 찾아낼 수 있다. 또한 부력에 대한 대응은 만에 한번 발생할 수 있는 부력에 의한 구조물의 영향(최대 에너지를 찾아내야 함)을 대비하는 것이므로, 최적(혹은 최대)에너지를 찾아내는 것이 그렇게 용이한 것은 아니다. 특히 구조물 설치후가 아닌 설계당시에 향후 발생할 수 있는 최적(혹은 최대) 부력 에너지를 찾는다는 것은 거의 불가능에 가까운 일이다. 그러므로 설계시에 예측할 수 있는 각종 부력 에너지의 영향요인을 고려하여 설계수위(Water Level)를 정하는 것이 기술자의 역량이라고 생각된다.

3. 설계시 고려할 요인

크게 수위(Water Level)와 수량(Water Quantity)의 두 요인이 있다. 수위는 구조물에 직접적인 영향을 주는 부력으로 작용하며, 수량에 대차 대조의 Balance에 상관하는 요인으로 유출에 비해 유입이 증가되면 이는 수두의 변화로 영향을 주게 된다.

토출수량의 예측이 중요한 이유는 구조물 하부에서의 토출수량이

적을 경우(구조물의 규모에 따라 기준이 달라지겠지만 통상 약 50~100 m³/day)에는 수두가 높아지더라도 구조물 내부로 물을 유출시키는 배수설계, 즉 Drain공법의 설계 적용이 용이하고, 그 반대의 경우에는 적극적 방법인 지반내의 물에 저항하는 공법, 즉 비배수 공법을 채택함이 용이하다. 배수 공법은 시공비는 저렴하나 유지 관리비가 소요되며, 비배수 공법은 유지 관리비는 불필요하나 초기 시공비가 많이 소요되므로, 설계 기술자의 판단에 의해 최적의 방법을 선택하여야 한다. 이 두가지 요인, 즉 수위와 수량을 예측하기 위한 세목으로 다음과 같은 요인들이 있다.

- 자연수위(Water Level)
- 설계전 상태의 본 부지와 인접대지의 등고관계
- 시공후 본 부지와 인접대지의 등고관계
- 시공후 우·오수관로, 구조물 및 인접대지의 등고관계
- 시공중 굴토 혹은 우기시의 예상 토출수량(Water Quantity)
- 부지 지반의 투수성
- 인접지반의 투수성
- 부지지반 내외의 구하상(Channel) 존재여부

1) 자연수위(Natural Water Level)

지반조사에 의해 자연수위를 인지할 수 있으며, 이때 지반 조사시 Rotary Wash Drilling 방법을 이용함으로써 시추공내로 작업용수가 유입된다. 그러므로 시추조사 완료후 수위측정용 Pipe를 설치하고, 지하수위가 안정되어질 때까지(최소 24시간이상 경과) 수위를 측정한다. 이때 수위를 잘못 인지할 수 있는 경우는 만일 시추공이 불투수성의 지층으로 형성되어 있다면, 시추공내의 물은 증발에 의해서만 수위가 낮아질 것이다. 비록 지반내 수위 및 수량이 전혀 존재하지 않더라도, 이 경우에는 수위가 존재하는 것으로 인지하게 됨으로써 잘못된 값의 자연수위를 인지하게 되는 경우가 된다.

2) 설계전 상태의 본 부지와 인접대지의 등고관계

만일 본 부지가 주변 대지보다 높은 곳에 있다면, 지반내의 물이 인접대지로 흘러나가는 양상을 보일 것이며, 그 반대일 경우에는 물이 흘러들어오는 양상을 나타낼 것이다. 예를 들어 산등성이 쪽에서는 물의 영향을 적게 받을 것이나, 계곡부에 있는 구조물은 우천시에 급격한 영향을 받을 것이다. 이때에도 수두와 수량 모두 구조물에 영향을 주게된다.

3) 시공후 본부지와 인접대지의 등고관계

시공중 성토를 할 경우, 기존 지표면이 불투수층 역할을 함으로써

수위는 시공전 지표면 상부로 올라올 수 있다. 통상적으로 지반조사 후, 수위를 시공전 지표면에 두는 경우가 있는데 이는 성토요인을 고려하지 않고 수두를 결정하는 것이므로 주의를 하여야 한다.

4) 시공후 우·오수관로, 구조물 및 인접대지의 등고관계

우·오수관로의 상태(누수량)에 따라 지반에 침투되는 수량(Water Quantity)에 영향을 주며, 우·오수관로의 누설량에 따라 지반의 수위가 영향을 받을 수 있다.

5) 부력에 영향을 미치는 요소

· 수두 요인
수두란 부력에 영향을 미치는 물의 위치 에너지(혹은 위치 에너지와 압력 에너지를 합한 에너지)를 의미한다. 수두는 여러 요인에 의하여 변화하는데 변화 요인은 다음과 같다.

- 자연적 요인 (계절적 요인)

지하수위는 1년을 우기와 건기로 구분할 때 우기에는 상승하고 건기에는 하강하는 경향이 있으며, 강우일수나 강우강도(강우량) 및 강우시 지반내로 침투되는 지하수의 통로 역할을 하는 지반 상태에 따라서 변화하기도 한다. 이런 이유로 설계 지하수위는 지반조사시 측정된 지하수위를 그대로 적용할 경우 부력에 의하여 구조물에 치명적인 피해를 주는 사례가 발생하기도 하는데, 우기에 지하수위 상승을 고려하여 지하수위를 선정하여야 한다..

- 인위적 요인

지하 구조물을 지하에 설치할 경우 기존의 지하수 흐름을 차단하거나 지하수의 유로를 변경시키기도 한다. 지표수의 처리를 위한 우수관로나 생활용수의 배출을 위한 하수도 혹은 오수관로로부터 우수 및 오수가 유출되기도 하는데 이로 인하여 구조물 주변의 지하수위 상승에 따라 부력이 급격히 증가하기도 한다. 따라서 설계시에는 구조물 주변에 위치하는 우·오수관로를 통하여 우·오수가 유입되지 않도록 계획 하여야 한다.

· 수량 요인

지하 굴착시 혹은 지하 구조물 완공 후 지하 구조물로 유입되는 지하수 유입량은 지하수위뿐만 아니라 지층상태에 따라서 크게 변화한다. 대체로 단층 파쇄대를 제외한 균질한 암반, 입자가 세립질인 풍화대 혹은 점성토(점토 혹은 실트의 함유량이 많은 흙)에서는 지하수 유입량이 적은 반면 암반의 단층 파쇄대, 모래층, 자갈층, 모래와 자갈이 혼합된 층에서는 많은 양의 지하수가 유입된다.

따라서 설계시에는 지반조건에 따른 지하수 유입량을 고려하여 부력 대책방안을 결정 하여야 한다.

6) 예상토출수량

토출수량을 예측한다는 것은 지반에 대한 매우 다양한 이론적, 현장적 경험을 필요로 하며, 통상적으로 이를 정확히 예측하는 것은 거의 불가능에 가깝다고 할 것이다. 특히 근래에 F.E.M 해석에 근거하여 접근하는 경우가 많은데 이는 입력 Data의 설정문제이므로 절대로 용이한 접근이 아님을 본인은 밝혀두고자 한다.

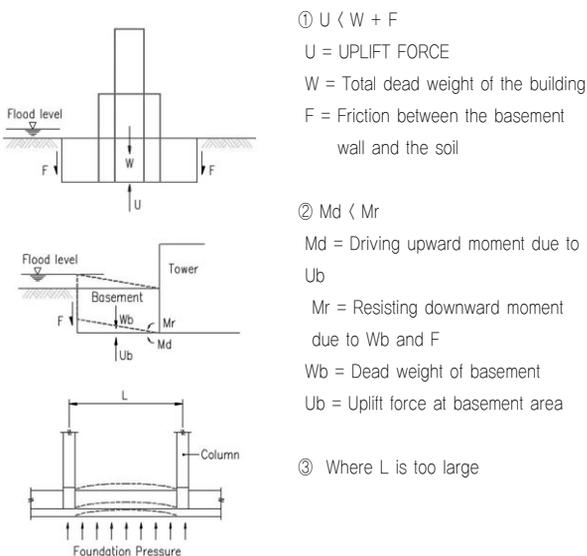
4. 설계시 부력에 대한 검토

영구 구조물에서 기초바닥 슬라브에 작용하는 부력(양압력 : Uplift Pressure)의 검토는 그림과 같이 다음 세가지로 요약된다.

그림 ①은 건물 전체 무게와 지하외벽과 흙과의 상호작용에 의한 마찰력(Friction), 기초바닥에 작용하는 양압력(Uplift Pressure)의 균형 문제로서 벽체를 지하 연속벽으로 하여, 시공중 또는 영구조건을 만족하는 구조체로 시공하였을 경우, ①에 의한 안정성은 크다.

그림 ②는 양압력에 의한 모멘트와 건물자중에 의한 저항모멘트의 균형 문제이며,

그림 ③은 기둥 주위가 충분히 양압력을 견딜 수 있는 자중일지라도 대단면 스펀일 경우 중앙부의 저항문제에 대한 모델링이다. 이것은 영구 배수시스템을 적용할 경우 부력저항이 큰 기둥, 기초 아래에는 별도로 부력 저항시설인 자갈 배수층을 생략할 수 있으나, 일반 기초 슬라브 구간에 인위적인 배수층을 중점적으로 배치하는 이유이다. 따라서 ①, ②, ③ 모든 부분에 대한 안정성이 유지될 수 있는 방법이 강구되어야 함은 물론이다.



〈그림〉 영구 조건하에서의 부력(양압력) 저항모델

5. 부력 대책공법

부력에 대응하는 공법으로는 크게 소극적 대응법과 적극적 대응법이 있으며, 소극적 대응은 배수공법 즉 Drain공법을 칭하며, 적극적 대응은 자중을 늘리거나 양키를 설치 하는 비배수 공법을 칭한다.

6. 결론

부력 검토시에는 강우량 및 지하수위의 계절적 변화, 지반조건, 예상 유입량, 경제성, 우·오수관로를 통한 유입 가능성 및 기타 현장여건을 종합적으로 고려하여 설계 지하수위를 결정하고, 유입량이 50~100m³/일 이상으로 예상되는 경우에는 적극적 대응방법인 Anchor System을 적용하고, 유입량이 적은 경우에는 영구배수 System을 적용하는 것이 합리적인 방안으로 판단되며,

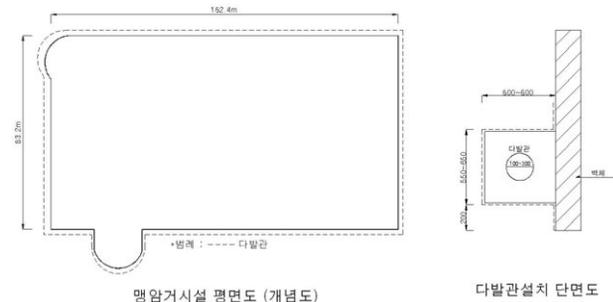
부력공법을 선택할 때, 주로 수두 에너지에 의해 결정이 이루어 지는데, 수두보다는 유입수량에 근거하여 소극적 또는 적극적인 대응법을 결정하여야 한다. 구조물 준공후, 지역, 지반, 구조물 등에 따른 정밀한 수두 에너지 측정자료를 지속적으로 모아서, 향후 불의의 사고를 예방할 수 있도록 우리 기술자들이 노력하여야 할 것으로 생각된다.

사례 1

1. 개요

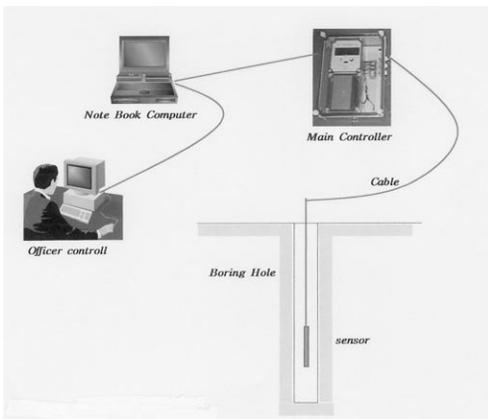
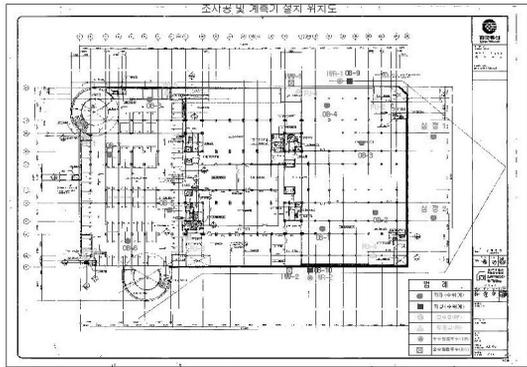
본 구조물은 경기도 OO지역에 위치하고, 시공시 영구 배수시스템이 도입되어 1998년에 완공된 구조물로서 2000년 8월에 내린 집중호우에 따른 지하수위 상승에 의한 부력으로 인하여 구조물의 변위 및 균열이 발생하여 이에 대한 원인분석을 정량적으로 실시하였음.

2. 기존 배수 시스템 현황

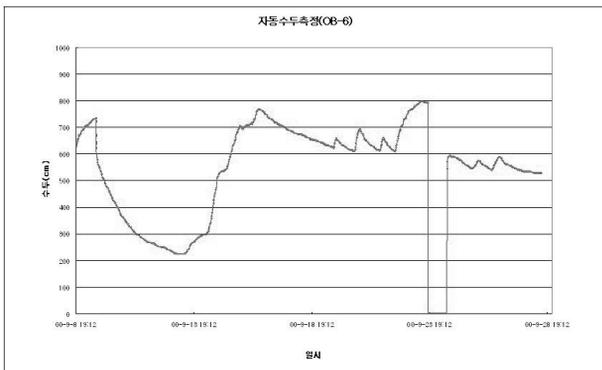


3. 현장 시험

구조물 전체 범위에 걸쳐 전반적으로 수위(수두)가 자동 관측될 수 있도록 10개소에 자동 수두 측정시스템을 설치하였고, 현장에서 배수시험(Sump Pit에서 외부로 배출), 주수시험(우수관로에 물주입) 및 강우에 따른 관측공에서의 수두 측정과 지하수로 유입 되는 유량을 측정하였다.



〈자동 수두 관측시스템의 운용〉



〈자동 수두 관측기 측정결과〉

4. 현장시험 결과에 의한 원인분석과 대책공법

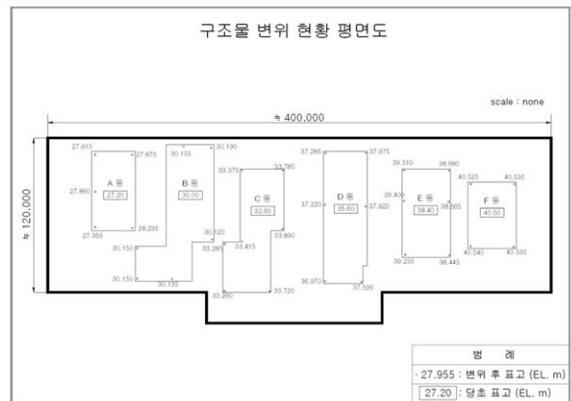
- 당초 영구 배수시스템의 설계시 산정된 홍수시 최대 유입량은 356m³/일이었으나, 현장에 설치되어 있는 우?오수관로를 통한 배수 및 주수시험 결과 시험기간중 측정된 최대유입량은 950m³/일(616m³/939분)으로 측정되었고, 지하수 유입에 따른 부력 발생요인이 현재 본 부지내의 우?오수관로부터 유출된 물에 의한 것으로 최종 결론지었다.
- 부력대책으로 우?오수관로의 보완시공과 아울러 우?오수관로에서

변위가 발생되거나 우?오수관로로부터 유출된 물이 지하로 침투하지 못하도록 조치하였고, 아울러 장기적으로 부력을 저감할 수 있도록 지하에 배수공을 설치하도록 하였다.

사례 2.

1. 구조물 개요

본 건물은 전남 00시 아파트 지하주차장으로서 2004년 7월초, 강우로 인하여 6개동 모두가 부상하였으며, 6개동 중 1개동을 제외한 5개동은 변위량이 10cm 이상으로 매우 심각한 상황이었으며 이에 대한 원인 및 복구시 유의사항과 설계시 고려사항에 대한 분석을 실시하였다.



구조물 변위 현황 평면도(2004년 7월 현재)와 같이 지하 주차장의 5개동(A~E동)이 현재 부력에 의해 구조물의 일부 또는 전부가 지하수위 상부로 부상되어 있는 상태이다.

2. 부상 원인

2004년 7월 심한 강우와 지반내에 투수성이 높은 자갈질 모래층이 0.6~3.8m층으로 분포하고 있어, 이를 통한 지하수의 공급으로 지하 주차장이 부상한 것으로 판단됨.

3. 복구 방안검토 (복구시 유의할 점)

지하 주차장을 원래의 지반까지 내려 앉히는 것은 기초저면에 잔존하는 전석 및 토사로 인해 불가능하며, 1차로 구조물 저면의 폐쇄공간에 갇혀 있는 물을 출수시킴으로써, 구조물의 침하를 유도하여야 함. 이때 급격한 출수는 구조물 저면의 반력 수압을 약화시킴으로써 구조물 붕괴를 유발시키므로(B동은 복구목적으로 급격한 출수도중 파괴되었음.) 구조물이 필요로 하는 최소한의 접지압을 유지하도록 하여야 함. 이를 위해 Computer 및 Sensor를 이용하여, 접지압을 인지하면서 이 접지압이 절대 상실되지 않도록 유지하면서 구조물 기초의 저면을 침하유도 및 Grouting하여야 할 것으로 판단된다.