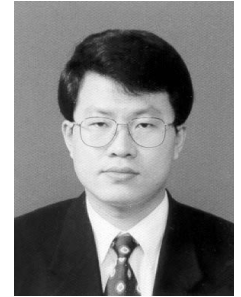


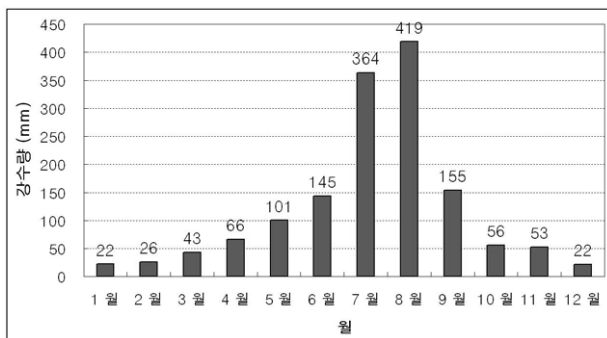
지하 구조물의 부상 원인과 방지



정 광 량
(주)동양구조안전기술 대표

1. 머리말

우리나라의 지역별 연평균 강수량은 중부지방의 경우, 1100~1400 mm이고 남부지방은 1000~1800 mm, 제주도지방은 1450~1850 mm 정도로 전반적으로 남부지방으로 내려 갈수록 강수량이 많은 편 이다. <그림 1>에 지난 20년간(1984년~2003년) 서울 지역에서의 월평균 강수량을 그래프로 표시하였는데 여름에 연강수량의 50~60%가 집중되어 있음을 알 수 있다.



<그림1> 월별 평균 강수량 (최근 20년간, 서울)

이렇듯 우리나라의 여름은 단시간에 많은 양의 비가 내리는 집중 호우적 강수 특성을 지니고 있는데, 이로 인하여 지하수위가 급격하게 상승되어 지하구조물이 지하수의 부력에 의해 부상하는 사례가 종종 발생하고 있다. 지하구조물이 부상하게 되면 골조의 손상이 발생하게 되는데 보수·보강을 통해 재사용할 수 있는 경우도 있지만 그렇지 못하고 철거해야 하는 경우가 발생할 수도 있기 때문에 지하구조물이 부상하지 않도록 설계와 시공과정 에서 각별한 주의를 기울여

야 한다. 본 고에서는 지하구조물의 부상원인과 사례, 부상 방지 대책 및 부상시 복구 방안에 대해 설명하기로 한다.

2. 지하수위와 지하구조물의 부상

건물의 모든 하중을 지지하고 있는 지반은 흙과 간극, 물로 구성되어 있는데 그 중에서 지반은 물에 의해 그 성질이 크게 달라지기 때문에 물과 지반의 관계를 정확하게 이해하고 구조물의 설계와 시공에 반영함으로써 구조물의 안전을 확보할 수 있을 것이다.

2.1 지하구조물의 부상원인

앞서 말한 바와 같이 지반은 흙, 간극, 물로 구성되어 있는데 간극을 채우고 있는 물을 지하수라고 한다. 지하수위보다 아래에 위치한 흙사이의 간극은 물로 포화되어 있기 때문에 지하수위보다 아래로 내려갈수록 수압은 증가하게 되는데 지하수위 아래로 1m 내려갈 때마다 1.0 tonf/m²의 수압이 증가하게 된다. 따라서 지하수위 아래에 잠긴 구조물은 지하수위에서 구조물 밑면까지의 깊이만큼 부력(<그림 2> 참조)을 받게 된다.

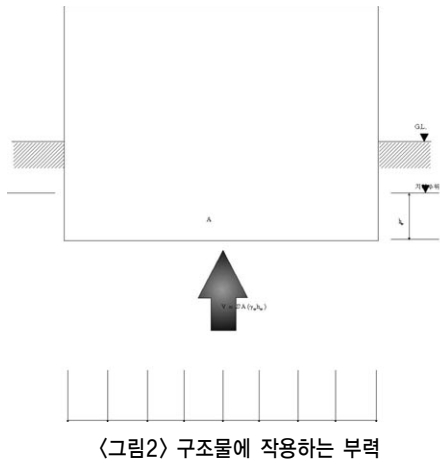
$$V = \Sigma A_i (\gamma_w h_{wi}) \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

여기서, V : 지하수에 의한 부력 (tonf)

A : 구조물 밑면의 면적 (m²)

γ_w : 물의 단위용적중량 (tonf/m³)

h_{wi} : 지하수위에서 구조물 밑면까지의 거리 (m)



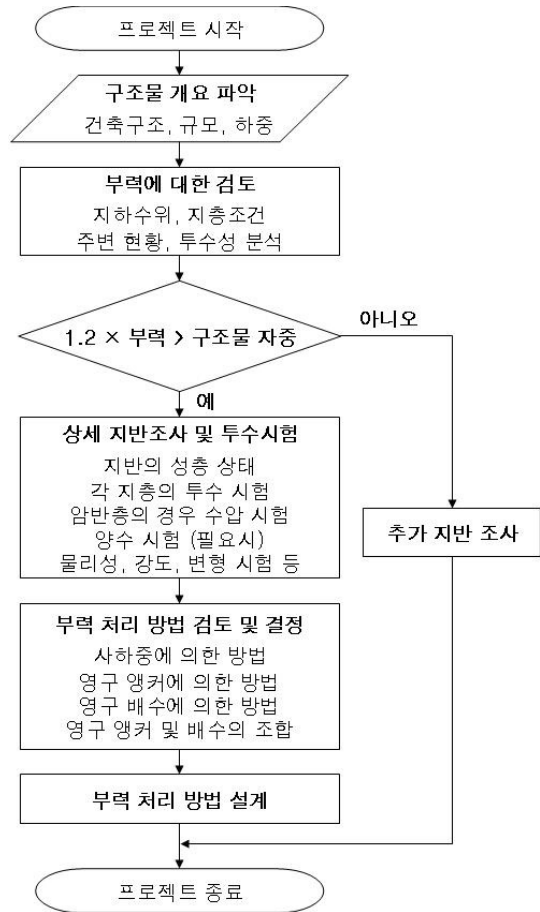
부력보다 구조물 전체의 하중이 가벼우면 건물이 떠오르게 되며 이러한 구조물의 부상을 막기 위해 건물의 자중이 부력의 1.2배 이상이 될 것을 도로교 시방서에서는 규정하고 있다. 또한 건물의 자중이 부력의 1.2배 이상이 된다고 하여도 건물자중의 중심과 부력의 중심이 일치하지 않을 경우에 모멘트가 발생하여 건물이 기울어질 수 있기 때문에 우려에 대한 검토도 이루어져야 한다. 이렇듯 지하구조물의 부상은 근본적으로 지하수의 부력보다 건물의 자중이 작은 경우 발생하게 되는데 그러한 현상을 발생시키는 주요 원인은 다음과 같다.

- ① 설계 단계에서 지하수위에 대한 평가가 잘못이루어진 경우
- ② 시공 중 집중호우로 인하여 지하수위가 급격하게 상승한 경우
- ③ 주변 환경의 변화로 지하수위가 상승한 경우

2.2 구조물의부상방지계획

지하구조물의 부상을 방지하기 위해서는 계획단계에서 지하수위와 구조물의 특성을 정확하게 파악하여 부력을 산정하고 그에 대한 계획은 세우는 작업이 매우 중요하다. 계획단계에서 구조물 부상 방지를 위한 업무순서를 (그림 3)에 나타내었다.

초기 계획단계에서 구조물의 자중이 부력의 1.2배 보다 작은 것으로 판정되면 구조물의 부상을 방지하기 위해 구조물의 자중을 늘이거나 부력을 줄이거나 혹은 별도의 장치를 통해 부력에 저항할 수 있는 방법을 고안하여 적용하여야 한다.



(그림3) 부상 방지를 위한 업무 순서

각각의 부력 처리방법에 대한 개요 및 특징은 다음과 같다.

① 사하중에 의한 방법

개요	- 기초 Slab 두께증가 혹은 2중 Slab내부 자갈 채움 - 기초 Slab를 벽체밖으로 연장하여 상부에 추가되는 흙무게를 이용 - 구조물외벽과 되메움재와의 마찰력이용
특징	- 굴착 증가로 공사비나 공기면에서 불리 - 부력이 크거나 구조물이 크고 중요한 경우 적용이 어렵다. - 초기에 되메우기 작업이 가능하며 다음 단계 시공에 유리함 - 2중 Slab 기초인 경우 시공공정이 복잡하고 공기가 연장됨
경제성	- 부력이 작거나 작은 규모에 경제적

② 영구 앵커에 의한 방법

개요	- 부력 방지용 Rock Anchor를 설치 - Mini Pile (Micro Pile)을 설치 - 인위적인 지하수위 변경이 어렵고 다른 공법을 채택하기 어려울 때 적당
특징	- 앵커의 용량 및 시공간격 선택이 용이 - 기초 슬래브나 지중보에 작용하는 모멘트 감소효과 - 초기에 뒤통수작업이 가능하며 시공공정에 유리 - 공사비 증가 및 공기 연장으로 비경제적 - 장기적 관점에서 강선 부식 및 스트레스 이완 또는 감소우려 - 지하수위 아래 부재는 모두 내수압 부재로 설계해야 한다.
경제성	- 공사비 증가 및 공기연장으로 비경제적

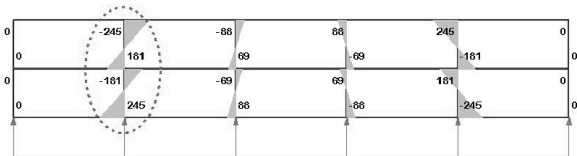
③ 영구 배수에 의한 방법

개 요	- 외부배수 시스템 (인위적으로 지하수의 조절) - 기초바닥 영구 배수시스템 (인위적으로 배수층을 만들어 침투 유입수를 강제 배수처리) - 내부로의 지하수 유입량이 적을 때 적합
특 징	- 지하수가 많아도 굴착면 하부지반이 암반일 경우, 배수로 인한 주변지반 침하문제가 없다. - 굴착 심도가 작아 상대적으로 공사비나 공기면에서 유리함 - Slurry Wall 등 불투수 지층까지 벽체가 시공된 경우 안전성과 경제성의 공법임 - 정전이나 Pump고장에 대한 대비가 필요 (비상발전기, 비상저수조, 비상펌프 설치) - 기초 지반의 지지력이 접지압보다 항상 커야함 - 지하 바닥기초는 내수압 부재로 설계하지 않아도 된다.
경제성	- 공사비가 저렴하다. (초기공사비는 작지만 유지 관리비 소요)

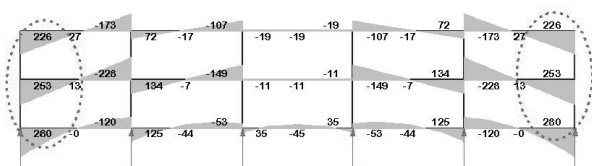
④ 영구 앵커 및 영구 배수의 조합

개 요	- 영구 앵커 + 영구 배수 - Barrette, RCD Pile Pier 및 Caisson 기초 + 영구 배수
특 징	- 가장 안전하고 확실한 공법
경제성	- 공사비 과다로 비경제적임

구조물의 자중을 초과하는 부력에 대응하는 방법을 결정할 때에는 현장요건 및 상황을 충분히 고려하여 결정하여야 한다.



(a) 기둥의 모멘트도



(b) 보의 모멘트도

〈그림4〉 부력 작용시 보와 기둥에 모멘트도

바닥 슬래브 전체에 부력이 작용할 경우, 최외곽부위의 보단부와 첫 번째 내부 기둥에 문제가 발생하기 쉽다. 〈그림 4〉는 지반에서 등분포의 부력이 작용하는 경우를 구조해석 프로그램을 사용하여 간략하게 모델링한 것이다. 지하외벽의 경우 토압과 토양과의 마찰 등에 의해 외력에 대해 비교적 영향을 적게 받으므로 최외곽 보의 단부와 첫 번째 내부기둥에서 가장 큰 모멘트가 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

부력에 의한 부상 방지계획을 수립하여 충실하게 이행하였으나, 예기치 못한 변수가 발생하였거나 사소한 부주의로 인하여 시공중에 지하구조물이 부상하는 경우가 생길 수 있는데 이러한 경우에는 부력에 의해 부상한 구조물을 안정적으로 다시 지반에 안착시키는 것

과 구조물의 정밀 안전진단을 통해 구조안전성을 확인하고 보수·보강을 하는 것이 매우 중요하다.

3. 지하구조물의 부상 사례

3.1 사례1

2002년 8월 2주간의 집중호우로 인해 지하주차장이 부상하였으나, 구조물 보수를 통해 재사용하고 있는 사례로서 기본적인 건물 개요는 다음과 같다.

건물명 : OO 아파트 지하주차장

건물규모 : 지하 2층

건물높이 : G.L. - 8.3 m (지하 1층: 3.6m, 지하 2층: 3.4m)

구조 : 철근콘크리트 라멘조

기초 : 온통기초(직접)

건물용도 : 지하주차장

구조물 부상이 발생한 후, 현장 조사를 실시하였는데 〈그림 5〉에 나타난 바와 같이 지하주차장 기둥이 파괴되는 손상이 발생하였으며 주근이 좌굴한 것도 확인할 수 있다.



〈그림5〉 기둥의 파괴



〈그림6〉 바닥 천공을 통한 지하수 제거

〈그림 6〉은 부상한 구조물을 지반에 안착시키기 위하여 지하주차장의 바닥을 천공하여 구조물 아래에 고인 지하수를 제거하는 사진이다. 안전진단을 통하여 구조물의 부상원인과 안전성 판정, 그리고 추후 보수·보강 조치 등의 종합적인 판단 내용은 다음과 같다.

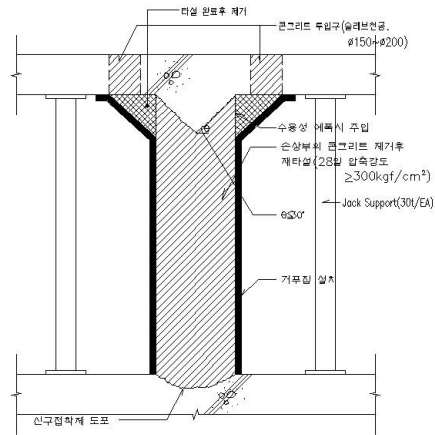
- ① 구조물에 피해를 발생시킨 주원인은 주차장 상부 마감공사가 되지 않은 상태에서, 기습적인 폭우가 지하수위를 급상승시켰으며 이로 인하여 구조물의 부상이 발생하였음.
- ② 구조물에 부력이 작용함에 따라 구조물 외곽부가 지지점이 되는 구조형식으로 변화였고, 벽체에 비해 강성이 약한 내부기둥 중 첫 번째 외곽 기둥에 축력과 더불어 전단력 및 모멘트가 복합적으로 작용하여 경사균열, 수평균열 및 부분적인 콘크리트의 박리·박락이 발생하였음. (〈그림 7, 8〉 참조)



〈그림7〉 기둥의 수평균열

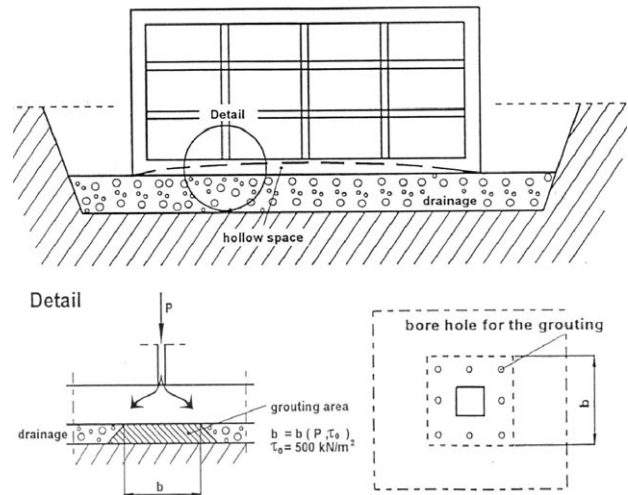


〈그림8〉 콘크리트의 박리



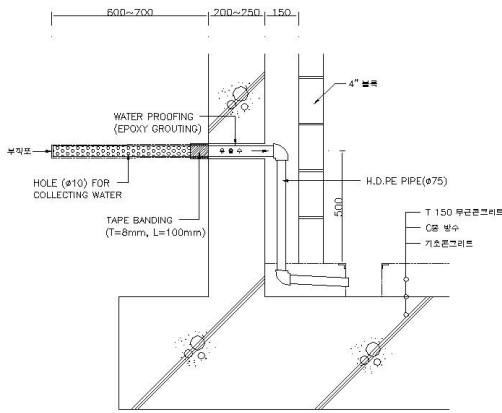
〈그림9〉 기둥 보수안

- ③ 콘크리트의 손상이나 박리·박락이 심한 구조부재의 경우에는 〈그림 9〉에서와 같이 기존 콘크리트를 제거한 후 신규 콘크리트를 재타설하여 보수하기로 계획하였고,
- ④ 수압에 의한 구조물의 부상 및 유입 지하수의 배수로 지하 2층 기초슬래브 하부에 공동현상이 일어나 구조물의 지지지반이 매우 불안정한 상태이므로, 지하 2층 기초 슬래브 하부의 공동부에 대한 그라우팅 작업이 요구됨 (〈그림 10〉 참조)



〈그림10〉 기초 슬래브 보강 상세

- ⑤ 그라우팅 작업 후, 각 부재들이 안정을 되찾은 다음에는 각 층 기둥과 다른 부재에 발생된 균열 및 기타 손상부에 대해서는 보수평안에 의거하여 보수공사를 실시한다면 건물의 안전에는 문제가 없으리라 판단됨.



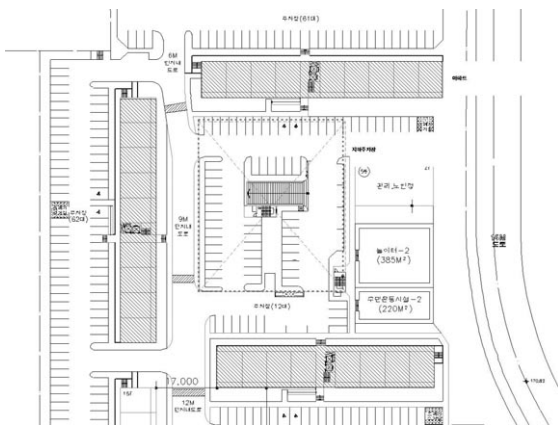
〈그림11〉 배수시설의 상세

⑥ 지질조사서 및 설계도면을 검토한 결과, 지하주차장은 장기적으로 수압(G.L. - 3.0m)에 의한 안전성을 만족하고 있으나, 2층의 안전조치 차원에서 외부벽체에 〈그림 11〉과 같은 방식의 자연 배수시설(Drainage System, G.L. -4.7m)를 함께 설치할 것을 건의하였음.

3.2 사례2

사례 1과 마찬가지로 2002년 8월에 2일간의 집중호우(강우량 434.5 mm)에 의한 지하수위 급상승 으로 지하주차장이 부상한 경우로 주요 구조 부재에 균열이 발생하거나 파손되어 지하주차장을 되메운 사례로서 기본 건물 개요는 다음과 같다.

- 건 물 명 : ○○ 아파트 지하 주차장
- 규 모 : 지하주차장 - 지하 2층
- 구 조 : 철근콘크리트 벽식구조
- 기 초 : 지하주차장 - 온통기초
- 건물용도 : 아파트 및 부대시설



〈그림 12〉 지하주차장 배치도

〈그림 12〉 에서와 같이 지하주차장 주변을 건물들이 둘러싸고 있는 형

태이어서 유입된 물의 배수가 원활하지 않아 부력이 증가한 경우이다.



〈그림13〉 보의 손상

구조물 부상이 발생한 후, 현장 조사를 실시하였으며 현장 사진은 다음과 같다. 〈그림 13〉은 보의 손상 사진이어서 많은 균열이 발생했음을 알 수 있다. 〈그림 14〉는 지하주차장 내부의 철근콘크리트 벽체와 조적벽체에 균열이 발생한 사진이다.



〈그림14〉 철근콘크리트 벽체와 조적 벽체의 손상

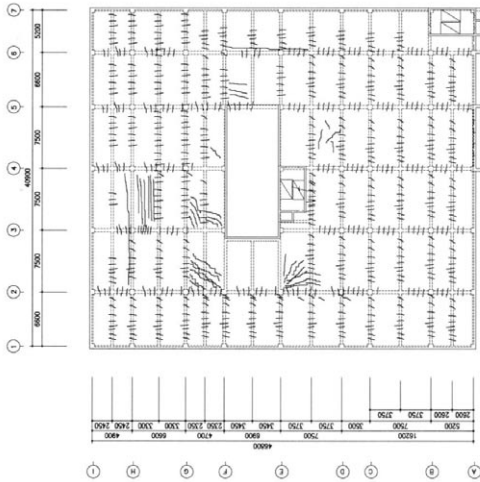


〈그림15〉 기둥의 손상

〈그림 15〉는 기둥의 손상 사진으로 구조물이 붕괴되지 않도록 기둥 주위에 동바리를 설치한 것을 확인할 수 있다.

정밀 안전진단을 통하여 구조물의 부상원인과 안전성 판정, 그리고 향후의 보수·보강조치 등과 같은 종합적인 판단 내용은 다음과 같다.

- ① 지하주차장 구조물에 피해를 발생시킨 주요 원인은 최초 설계시 예상하지 못했던 30년만에 발생한 기상 이변에 의한 부력으로서 현장보다 높은 도로 및 야산에서 물이 지하로 유입되면서 지하수위가 급상승함으로 인하여 지하주차장이 부상하게 됨.
- ② 이후 지하수 수압저감 및 배수로 인해 건물이 침하하면서 최초 온통기초의 무한지점이 불균등한 유한지점으로 변화되면서, 예상치 못한 2차 응력 발생이 발생됨.
- ③ 기둥에는 축력과 더불어 전단력 및 모멘트가 복합적으로 작용하여 경사균열, 수평·수직균열, 콘크리트 파괴(전반적으로 주두부에서 하부로 1/2 지점까지 파괴), 철근의 좌굴현상 등을 발생시킨 것이며, 슬래브, 보, 벽체(콘크리트 벽체 및 조적벽체)에는 인장력, 전단력, 모멘트 등의 힘들이 작용하여 균열, 콘크리트 박락, 철근 좌굴현상 등이 발생하였음. (〈그림 16〉 참조)



〈그림16〉 지하주차장 지하1층 손상현황도

- ④ 지하주차장이 약 90 cm 부상한 후, 구조물이 불균등하게 침하되면서 기초 하부 바닥면과 지반사이에 공동(최고 약 100 cm)이 관찰되었고 지하수도 존재하는 것으로 확인되어 계속적으로 변위가 발생할 우려가 있었음. (〈그림 17〉 참조)



〈그림17〉지하주차장 상부바닥 융기

- ⑤ 지하주차장의 기능을 상실할 정도로 손상이 심각하여 보수·보강 공사를 실시하여도 원상복구가 불가능할 뿐 아니라 안전성 및 경제성을 고려한 측면에서 철거하기로 결정함.

4. 맺음말

지하구조물의 부상은 주로 여름철 집중호우에 의한 지하수위 상승 혹은 지하수 유입으로 인하여 발생하게 되는데, 지하구조물의 부상으로 인한 구조부재의 손상은 구조물 안전성에 치명적인 영향을 끼칠 수 있으며 동시에 막대한 경제적 손실을 초래하기 때문에 그 예방이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 물론 계획단계에서 지하구조물의 부상에 대한 검토가 이루어지고 설계가 이루어지고 있지만 사소한 판단착오 및 예상치 못한 기상이변 등에 의하여 지하구조물이 부상하는 경우가 종종 발생한다.

따라서 시공중에는 구조물 부상의 가능성에 대해 항상 주의하여야 하며 전문가와 상의하는 노력이 수행되어야 한다.

아울러 지하구조물의 부상 사례는 여러가지 이유에 의해 사실 자체가 공개되지 아니하고 비밀리에 덮여지는 경우가 대부분이기 때문에 자료의 공유가 전혀 이루어지지 않는데, 이러한 부분에 대해 공사 관계자는 한번의 실패가 훗날의 지속적인 성공을 보장할 수 있다는 생각으로 실패사례를 공개함으로써 동일한 실패가 반복되지 않았으면 하는 바람이 있다.