

사례분석을 통한 효율적 상향수압(Up-Lift Pressure) 처리공법 적용방안에 관한연구

- ○ ○ 상업지역 현장사례 중심으로

A Case study and Analysis on the Up-Lift Pressure Treatment Evaluation of Underground Installations for their Efficient Adoption

고 옥 렬* 권 오 철** 심 재 광*** 박 태 은****
Ko, Ok-Yeol Kwon, Oh-Chul Shim, Jae-Kwang Park, Tae-Eun

Abstract

Building construction trends have been changed dramatically in terms of size and mass. With the need to maximize land usage, there has been an increase in the construction of high-rise buildings. This affects not only the entire construction duration and cost, but also subsequent construction activities, such as work to increase underground facilities and in reclamation land area construction. These types of site conditions require soft ground reinforcement and the proper uplift water pressure treatment. In general, two kinds of methods have been used for uplift water pressure treatment systems. However, there have been some problems arising as the result of a lack of research and analysis on underground construction techniques, and a reliance on experiments over actual survey and analysis of site conditions. This paper focused on the problems of conventional selection procedure, by analyzing drawings and proposing a kind of modeling for a reasonable procedure. The results were applied to oo project as a sample construction case to be verified in this research. The initial plan in the case project was the Rock Anchor System. However, as there were terrible miscalculations of basic site conditions that had an extraordinary influence on the underground water level, such as the site's proximity to the Han-river, it was necessary to change the plan to include a permanent drainage system. This achieved a direct construction cost reduction ₩ 406,702,000 and a maximum savings of 4% of operational cost, based on the 50-year building Life Cycle Cost.

Keywords : uplift water pressure, permeability coefficient, drainage system, permanent drainage system, permanent rock anchor system

1. 서 론

1.1 연구의 목적

일반적으로 상향수압에 대한 대처공법은 구조물자체의 자중을 증가시키는 방법, 영구앵커를 사용하는 방식과 영구배수공법에 대한 설계시공방법과 이들의 혼합 방식이 가장 많이 사용되고 있다 그러나 이러한 공법의 채용에 있어서 토질시험 및 계측자료를 이용한 대상 현장의 굴착 심도에 따른 지하수와 토질, 건물의 규모 등에 따른 공법간의 상호체계적인 분석이 부족한 상태에서 일반적으로 경험이나 선입관에 의해 공법을 선정하고 시행하는 경향이 있다.

우리나라는 지반의 대부분이 풍화암이나 연암층을 보이므로 영구앵커공법을 선호하고 있다. 반면 영구배수공법의 경우는 공사비가 영구앵커 공법에 비하여 상대적으로 저렴하다는 이유만으로 사용이 증가 추세이나 아직까지도 대상 프로젝트의 수행에 있어서 토질과 지하수에 따른 부력 등의 처리를 위한 적절한 분석과정 없이 선정되고 있다.

따라서 본 연구에서는 고층건물의 지하구조물에 작용하는 부력(Uplift Water Pressure)을 처리 하는 기존의 방식들인 고정하중 증가법과 영구앵커공법(Permanent anchor system), 영구배수공법(Permanent Drainage system)에 대한 설계원리에 대한 이론적 고찰을 실시하였다. 또한 사례 현장을 중심으로 지반의 종류와 굴착심도에 따른 지하수의 영향 등에 대하여 현장의 계측자료를 분석하였고, 이러한 분석 자료를 토대로공법선정 시 영향을 주는 제반요인을 도출하여 실제 현장 여건을 고려한 건축규모와 지층을 구성하는 하부 토질 및 굴착심도별 지하수에 따른 부력에

* 국방시설본부 건축공학박사, 기술사, 교신저자 (Korealeo@paran.com)

** 대림대학 교수 건축공학박사

*** 삼성(주) 연세대학교 건축공학과 박사과정, 기술사

**** 홈센타(주) 연세대학교 건축공학과 박사과정

대한 영향을 현장의 토층성상과 지하수위를 고려한 합리적, 경제적인 공법적용 방안제시에 연구의 목적이 있다.

1.2 연구의 방법 및 범위

상향수압처리공법은 건축, 토목공사에 있어서 여러 가지 공법이 사용되고 있으나 본 연구에서는 건축시공 시 초고건물에 많이 사용되고 있는 영구앵커공법과 영구배수공법에 대해 사례연구 대상인 ○○ 건설현장에 대한 기초공사시의 지질조사 보고서와 계측관리 보고서, 컴퓨터 수리모델링에 의한 지하수 유입량 산정 결과를 중심으로 건물의 규모와 지하굴착심도, 지하수에 따른 토층의 투수계수, 수위, 수압에 따른 건물 하부 바닥슬라브의 상향수압에 대한 처리공법을 중심으로 연구의 범위를 한정하였으며 연구의 진행 방법은 다음과 같다.

- (1) 이론적 고찰을 통한 기존의 지하 구조체 바닥 슬라브에 적용하는 상향수압처리공법에 대하여 현재 사용하고있는 공법의 종류와 시공방법, 시공상의 특성 등을 문헌조사 및 실적자료를 통하여 조사, 분석한다.
- (2) 영구앵커공법과 영구배수공법의 설계원리와 절차를 분석하고 구조물에 적용시키는 원리를 비교분석하고 이에 대한 문제점과 적용상의 타당성을 검토한다.
- (3) 시공단계에서의 영구앵커공법과 영구배수공법의 비용과 성능을 건물의 규모, 토층의 성상 지하수위에 따른 피압수의 영향 등을 고려하여 비교분석한다.
- (4) 상기의 연구를 종합하여 건축공사 시 상향수압처리를 위한 기능을 충족하면서 합리적이고 경제적인 공법선정 요인을 설정한다.
- (5) 사례연구를 통하여 선정공법에 대한 타당성을 검증하고, 실제 대상 건축물의 지질조사서와 계측보고서를 분석하여 선정공법의 타당성을 검토하고 산정식을 이용하여 공사비의 합리적 투입과 공법선정의 타당성 여부에 대한 자료를 제시한다.
- (6) 이와 같은 결과를 바탕으로 건설 프로젝트 수행에 있어서 부력처리공법에 대한 향후 연구 과제를 제시 한다

2. 상향수압 처리공법에 대한 예비적고찰

2.1 부력(양압력)의 정의

기원전 250년경에 아르키메데스(Archimedes)는 “액체속에 잠겨있는 물체의 무게는 공기 중의 무게에 비해 그의 체적에 해당하는 액체의 무게만큼 가벼워진다” 는 사실을 밝혔으며 이는 아르키메데스의 원리(Archimedes' Principle)로 잘 알려져 있다. 정수학적 압력(Hydrostatic Pressure)이란 정지상태의 유체속에 작용하는 물의 압력을 말한다. 일반적으로 정지하고 있는 물은 마

찰력, 전단력이 작용하지 않으며 수중에 작용하는 압력만이 작용한다.²⁾ 정수중의 물체는 모든 방향으로 정수압을 받고 있으며 그 정수압의 수평분력의 합력은 곡면을 수평방향으로 투영한 면에 작용하는 크기가 같고 방향이 서로반대인 수압이므로 항상 평형상태를 이루고 있다. 따라서 정수중의 물체에 작용하는 정수압은 연직분력만 고려하면 된다.

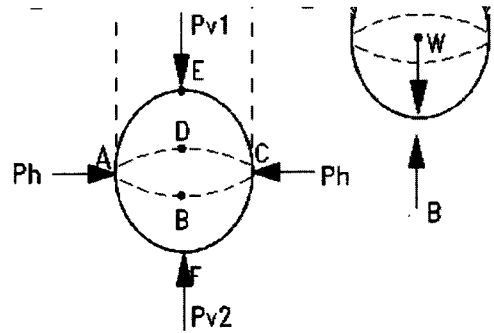


그림 1. 부력의 원리

그림 1.과 같이 연직수주와 물체가 외접하는 면 ABCD를 생각하여 면ABCD의 상부곡면AEC를 저면으로 하는 수주의 중량 Pv_1 이 연직하중으로 작용하고, 면 ABCD하부곡면AFC에는 곡면AFC를 저면으로하는 수주의중량 Pv_2 가 연직상향으로 작용한다. 이를 식으로 표시하면

$$Pv_1 = w \times (\text{곡면AEC를저면으로하는연직수주의체적}) \dots\dots(2-1)$$

$$Pv_2 = w \times (\text{곡면AFC를저면으로하는연직수주의체적}) \dots\dots(2-2)$$

따라서 물체에 작용하는 정수압의 연직분력의 합을 B라하면 $B = Pv_2 - Pv_1 = w \times (\text{물체의 체적}) \dots\dots(2-3)$

물체의 일부분만 물속에 잠겨있는 경우 수중부분에 대해서만 이 관계를 적용하면 된다.

수중에 잠겨져있는 부분의 체적을 배수용적이라 하며, 이것을 Ψ 라 하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$B = w \times (\text{수중부분의체적}) = w \times \Psi \dots\dots(2-4)$$

여기서 연직분력의 합력 B를 浮力이라고 하고, 이浮力の作用點을 浮深이라고 하며 작용방향은 연직방향이다. 부력은 배수용적과 같은 체적의 물의무게, 즉 배수량과같고 부력의 작용선은 물체의 수중부분의 중심을 통하는 연직상향이다.

정지한 물속의 임의의점의 수압강도는 그 점의 수심과 물의 단위 체적중량의 용적과 같으며 깊이 H점의 정수압 P는 $P = r_0 \cdot H$

1) 이원한, 수리학, 문운당
2) 정인준, 토질역학, 구미서관

(r_0 : 물의 단위체적중량(g/cm^3))으로 표시되며 $H=0$ 일경우의 대기압강도를 P_0 라 하면 식(2.5)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = P_0 + r_0 \cdot H \dots\dots\dots(2-5)$$

P : 정수압강도, P_0 : 대기압, r_0 : 물의 단위체적중량 (g/cm^3)

정수압의 강도는 단위면적에 작용하는 압력의 크기로 표시되며 정수중 한 점에 있어서 정수압의 강도는 모든 방향에 대하여 동일하며 수중의 임의의 점이 받는 정수압의 강도는 수심에 비례한다고 할 수 있다. 이러한 이론에 의하여 지하층을 갖는 대부분의 건축물의 경우 최하층 바닥슬라브(Slab on grade) 저면에 위치하는 지하수와 그 지역의 지하수 수두차에서 양압력이 발생되며, 최하층의 바닥슬라브에 직접 작용하여 건물을 상부로 부상시키는 역할을 한다.

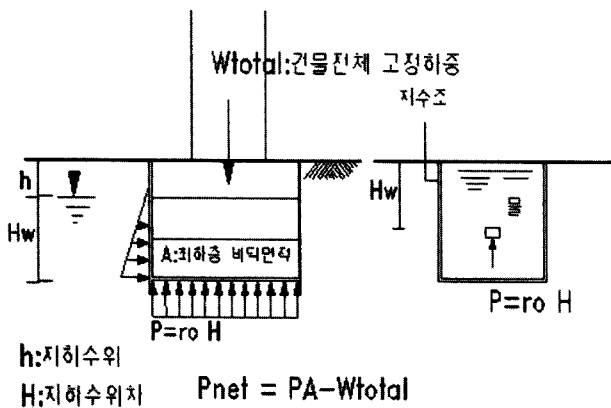


그림 2. 건물저면 지하수에 의한 상향수압의 작용원리

2.2 건물 평형원리

지하수의 수두차에 의해서 발생하는 상향압력이 건물에 미치는 영향을 분석하여 건물 자체의 평형을 계산하기 위한 방법은 다음과 같은 절차에 의해서 구축할 수 있다.

- (1) 건물 자체의 하중과 건물 벽체의 흡과의 마찰력이 지하바닥 슬라브에 작용하는 평형관계를 분석한다.
- (2) 지하구조물과 상부구조물과의 형상 및 면적의 차이가 있을 경우 지하수에 의한 상향수압으로 발생하는 모멘트와 이에 저항하는 모멘트와의 평형관계를 분석한다.
- (3) 최하층 바닥 슬라브의 외주길이에 대하여 상향수압에 안전한가를 분석한다.
- (4) 건물 지하층 부위의 지하수 포화 깊이

건물 지하층 부위의 지하수 포화 깊이 (H_w)에 따라서

지하층 하부 상향수압 크기를 결정하게 된다. 이 깊이는 대상 현장의 지하수위와 지하층의 깊이로부터 산정되므로

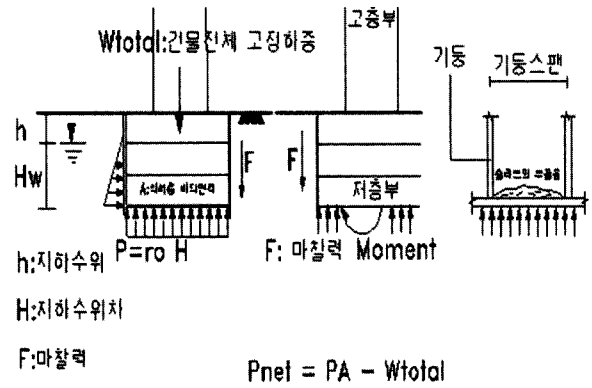


그림 3. 建物 평형의 원리

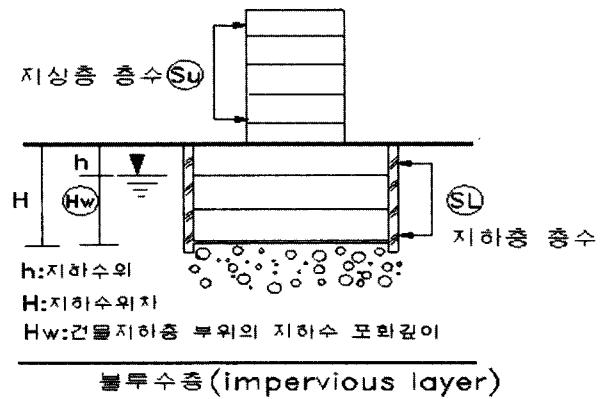


그림 4. 건물 지하층 부위의 지하수 포화 깊이

현장의 지하수위를 정확히 파악하는 지질조사가 반드시 수반되어야 한다.

$$H_w = H - h \dots\dots\dots(4-3)$$

여기서 H_w : 건물 지하층 부위의 지하수 포화 깊이(m)

H : 지하굴착 깊이(m)

h : 지표로부터 지하수의 깊이(m)

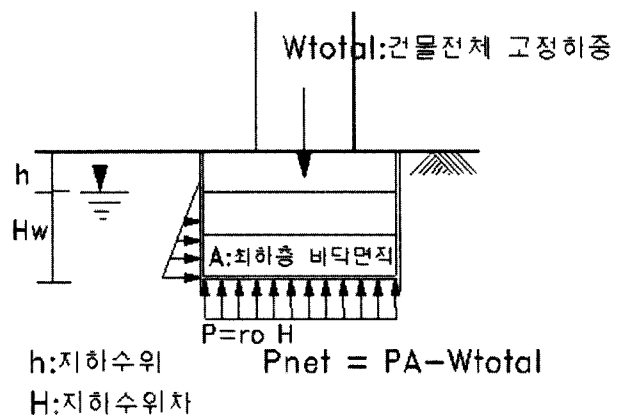


그림 5. 전수압 설계 모형

이와 같이 건물의 평형관계에 대하여 종합적으로 분석하여 구조설계가 이루어지고 있으나 본 연구에서는 그림 3.과같은 원리에 따라서 건축 공사 시 지하층 설계 및 시공 시공방법별 경제성과 시공성, 공기, 성능 관계를 중심으로 연구를 진행하여 공법 선정에 따른 의사결정 방향에 대한 대안을 제시 할 수 있도록 하였다.

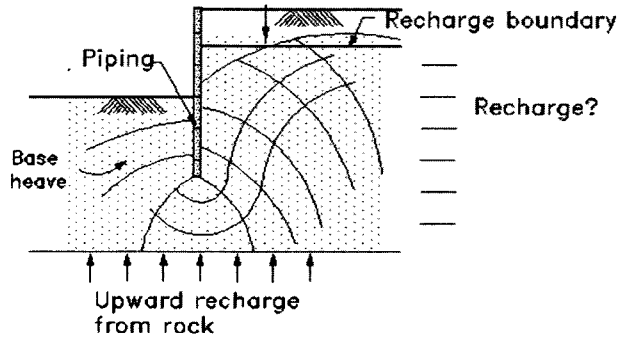


그림 7. 지하수의 유동에 따른 문제점

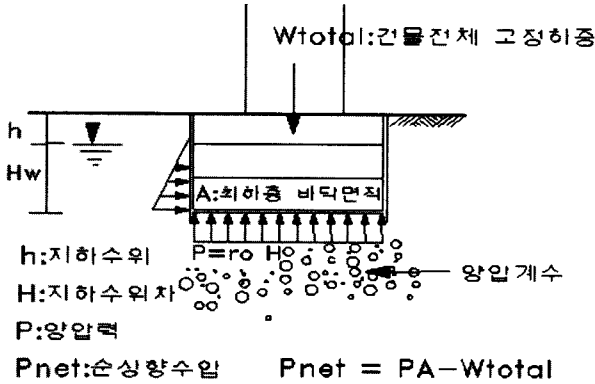


그림 6. 상향수압계수를 고려한 설계 모형

2.3 상향수압 처리 공법의 종류 및 특성3)

일반적으로 지하 구조물에 작용하는 상향수압을 처리하는 공법에는 구조체의 자중을 증가시키는 사하중에 의한 방법과 영구앵커(Holding Down Anchor)공법 또는 인장파일(Tension Pile)에 의한 방법이 있으며 배수에 의한 방법으로 영구배수공법(Permanent Drainage System) 및 이들의 조합형으로 분류할 수 있다. 상향수압 처리시스템 설계를 위한 기초바닥 및 지하외벽에 작용하는 수압은 계측 장비(Piezometer 등)를 통한 장기적인 관측이 되지 않는 한 실제 작용하는 설계수압의 명확한 정량화는 매우 어렵고, 대신도의 굴착일수록 기초바닥에 작용하는 과대한 수압처리 문제는 기초단면중대, 부력앵커 개소의 증가, 시공성, 경제성, 안정성 등에서 여러가지 문제를 안고 있다. 따라서 깊은 굴착에 따른 지하구조물의 시공은 필연적으로 지하수압에 대한 문제가 야기된다.

다음은 시공 및 영구조건하에서의 지하수 흐름에 따른 지하상향수압(Uplift Pressure)에 대한 지하구조물의 거동을 요약 하였다.4)

- (1) 시공중의 지하수압은 가설흙막이 벽에 외력으로 작용하고 기초지반의 상태 (점토, 모래, 암반층은 제외)에 따라 지하수의 흐름에 의해서 지반의 융기(Heaving), 파이프(Piping)현상 등을 유발하게 된다.
- (2) 또한 영구조건하에서 지하층바닥에 작용하는 양압력(Uplift)의 문제는 대체로 그림 8의 모델로 요약될수 있다.

① 은 건물전체 무게와 지하외벽과 흙의 상호작용에 의한 마찰력(Friction), 기초바닥에 작용하는 상향수압(Uplift Pressure)의 균형 문제로서 지하벽체가 지하 연속벽으로 시공되어, 시공, 永久條件을 만족하는 구조체로 시공되었을 경우, ①에 대한 저항은 대단히 크다.

② 는 상향수압 모멘트와 저항모멘트의 관계에 따른 건물 무게 균형의 문제이다.

③ 은 기둥주위가 충분히 상향 수압을 견딜 수 있는 자중 일지라도 대단면 스패일 경우 중앙부의 저항 문제에 대한 모델링이다. 이것은 상향수압에 대한 영구배수공법을 적용할 경우 부력 저항 균형이 이루어지는 기둥, 기초아래에서는 별도로 부력저항시설인 자갈 배수층을 생략할 수 있으나, 일반기초 슬라브 구간에 인위적인 배수층을 중점적으로 배치하는 이유가 있다. 따라서 ①,②,③ 모든 부분에 대한 안전성이 유지될수 있는 방법이 강구되어야 한다.

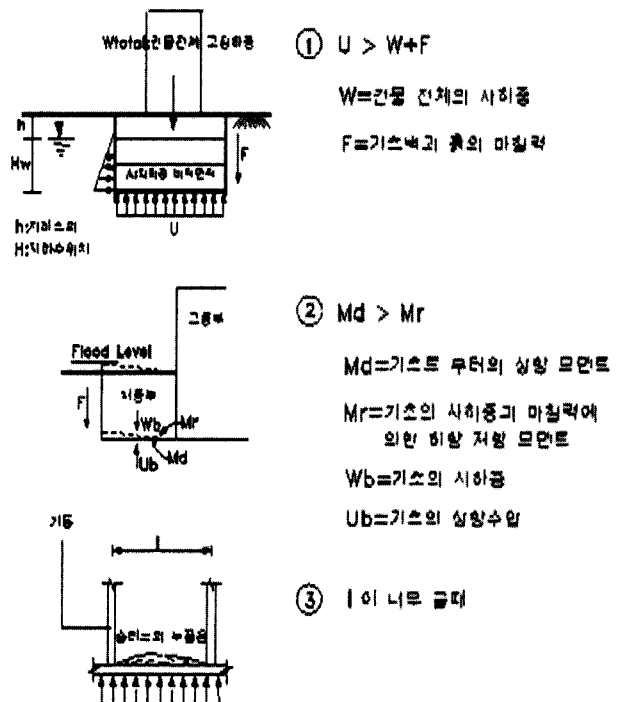


그림 8. 영구조건하에서의 지하수압 저항모델

3) 고옥렬, 연세대 석사논문, 지하구조체 상향수압처리공법에 관한연구, 1996

4) 이정영, L-백화점 상향수압 처리 보고서, 2005

2.4 상향수압 처리 방법의 대안별 비교

1) 구조물 자체의 사하중 증가방법

건물의 순수하중과 건물에 작용하는 마찰력이 상향수압력보다 크도록 설계하는 방법으로서, 특히 무게 균형 검토를 위한 하중산정시 건물에 실제로 작용하는 하중만을 순수하중으로 고려한다. 사하중(Dead Load)에 의한 지하수압의 저항은 구조물 자체의 사하중을 증가시켜 지하 바닥에 작용하는 상향수압을 상쇄하여 전체적인 균형(Balance)을 이루게 하는 방식으로 사하중에 의한 지하수압의 저항은 건축 초기에서는 흔히 2중 매트나 통 매트 형식을 이용하는 것으로 국내에서 건축물 기초바닥 슬라브의 상향수압 처리방법으로 가장 널리 이용되고 있다. 어떠한 상향수압도 구조물의 사하중을 증가시키는 방법으로 극복할 수 있으나 이러한 추가 하중은 저층부 구조체 및 기초의 두께를 증가시키거나, 하중균형을 위한 비중이 큰 재료를 계획된 공간에 채움으로서 가능하다. 그러나 굴착 깊이와 기초 및 구조물의 단면 증가에 따른 공사비의 증가와 공기의 증가가 단지 상향수압력 극복을 위한 용도뿐만 사용되는 약점이 있다. 따라서 이 방법은 지하수위가 낮고 얇은 굴착에 효과적이라 할 수 있다.

2) 영구앵커(Holding Down Anchor)에 의한 방법

건물의 순수하중과 건물에 작용하는 마찰력이 상향수압보다 작은 경우에 그 차이의 상향수압에 대한 부분만큼을 기초바닥 아래 암반층에 강제적으로 긴장된 스트랜드 다발강선(Anchor Cable Tendon)을 설치 상향수압력에 저항 하기 위한 것으로 기초 공사에서 프리스트레스(Pre-Stress)기법을 도입한 것으로 경사면, 옹벽, 기타 부력이 작용하는 바닥 슬라브에 적용해 왔으며 가설앵커공법과 영구앵커공법으로 대별된다. 해석 방법으로는 앵커루트(Anchor Root)에 의한 안정, 마찰실린더(Friction Cylinder)에 대한 안정, 앵커체의 인장파괴, 앵커체와 그라우팅과의 슬립(Slip) 파괴에 대해 검토하는 방법이 있으며 앵커 설계시는 상기의 모든 방법에 안전해야 한다. 영구앵커 공법은 본 구조물이 축조되기 이전에 일정기간동안의 인장력을 발휘하는 가설앵커와는 달리 구조물과의 일체성을 목적으로 한것으로 상향수압의 크기에 앵커의 규모 및 간격의 선택이 자유롭고 슬라브 바닥을 관통하여 지지층에 설치됨으로 슬라브에 작용하는 휨모멘트를 감소시키는 효과가 있다. 영구앵커 공법은 인장재를 경암층에 고정시켜 인장력을 발휘하므로 통상, 락-앵커(Rock Anchor)또는 상향수압에 저항한다하여 부력앵커로 불리운다.

3) 배수에 의한 방법

건물 저면에 발생하는 상향수압을 배수에 의하여 감소시키는 방법으로 기존의 사하중을 증가시키거나 영구앵커를 사용하는 인위적인 방법과는 달리 지하수위차에 의한 정수압을 초래하는 물의 성질을 이용한 자연배수공법의 일종이라할 수 있다. 이 공법은 크게 외부배수처리공법(Permanent External Drainage System)과 내부배수처리공법(Permanent Under Drainage System)과 내, 외부 영구배수시스템, 복합공법)으로 분류된다.

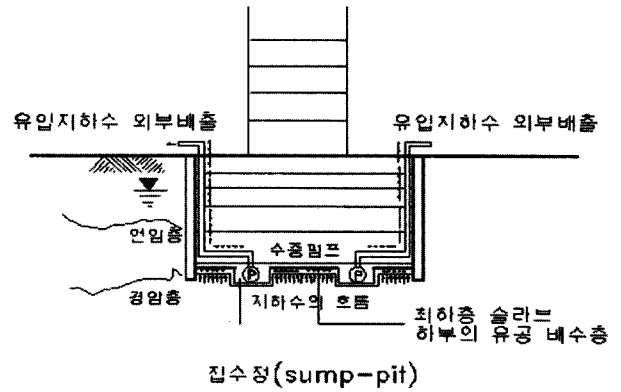


그림 9. 내부배수처리 공법의 원리

표 1. 상향수압 처리 공법비교

공법	영구배수공법	사하중 + 부력앵커
공법 개요	기초스라브 또는 외부에 인위적인 배수층을 만들고 집수관을 통하여 유입 지하수를 집수정으로 모아 펌프에 의한 배수 처리로 지하수압(양압)을 감소시키는 방법	건물하중과 양압의 균형을 검토하여 부족분만큼의 하중을 양압의 반대방향으로 암반층까지 천공 스트랜드 삽입후 요구하중이상을 인장하여 정착시키는 방법
시공 방법	1. 기초 바닥면 정리 2. 트렌치 또는 전단면 배수층 토목성유,드레인매트,자갈 포설 3. 유공관 매설 및 집수정 연결 4. 기초 슬라브 타설	1. 천공 및 PC strand삽입 2. 기초 슬라브 타설 3. 그라우팅 및 인장
적용 조건	1. 기초 바닥면 아래 풍화암층 이상의 불투수성 지반이 두터울 때 2. 지하수위가 높고,대심도 굴착에 따른 지하수압 저항 시설을 사하중에 의존하기 어려운경우 3. 경제성,시공성 조건이 최우선일 때	1. 양호한 앵카 정착장이 있고 지하수위가 높지 않을때 2. 건물하중과 상향수압의 차이가 크지 않은 경우
적용 토질	1. 기초 바닥면 아래 지층이 풍화암층 이상이면 양호 2. 연속벽인 경우 선단부가 풍화암층 이상 근입될경우 상부토질은 모든 토질 적용가능	연.경암층 이면 양호
장점	1. 시공이 단순하여 시공관리용이 2. 비 내수압 기초슬라브 설계가 가능 구조물 공사용이,공기,공사비절감효과 3. 투입자재가 영구적, 내구성측면유리 4. 방수면적 감소 방수층 보호가 용이 5. 부력앵커공법에비하여 토공량 감소	1. 앵카의규모 및 간격선택용이 2. 부력앵커를 지점으로 해석 할 경우 슬라브에작용하는 모멘트를 감소시키는 효과기대 3. 배수에 따른 오수처리비를 고려 하지 않아도 된다
단점	1. 토질 전문가에 의한 정확 수리모델링 및 수리,토질학적 설계가 요구된다 2. 정확한 계측관리와 토질조사가 필수 조건이다 3. 배수에 따른 장비의 유지보수와 오수처리에 대한 부담이 있다	1. 기초단면증가,시공기간, 공사비가 고가이다 2. 긴장된 강선의 부식 및 스트래스 감소에 의한 구조물손상 우려 보수가 어렵다 3. 재인장 시스템의 경우 일반공사비의 2-3배이다 5. 앵카 천공부 방수 하자가 많다

5) 박옥교, 건축물의 상향수압 감소를 위한 지하수 배수로 시공방법 및 그 시스템, 2007

3. ○○사업현장 사례연구

○○ 사업은 연건평105,480㎡, 지상50층 지하6층의 규모로 지상층은 A동과 B동으로 나누어지며, 행정구역상 서울시 광진구 자양동 227-7번지 일대로 한강변에 인접한 대지로 기초의 형식은 Mat 기초로 허용지내력 고층 주 동부 저층부 공히 3,000kgf/m²(300tf/m²)으로 계획되었다.⁶⁾ 특히 한강변에 인접한 지역적인 특성을 감안하여 공사관리 핵심주안점으로 지내력, 연야지반확인 및 대책수립, 지하수 유입과 상향수압관련 공법의 적정성 검토를 선정하였다. 이를 위한 각종 시험결과를 요약해보면 다음과 같다.

3.1 기초 및 보강을 위한 지반조사

1) 지내력 시험

평판재하시험 10개소(기초 바닥면 7개소, 기초 바닥면 상부 약 2m지점 3개소) 시험결과 기반암의 허용지지력은 900tf/m²으로 설계기준 지지력 300tf/m²보다 커 안정으로, 지반 반력계수 95.2 ~ 500kgf/cm², 지반 변형계수 2,047 ~ 10,749kgf/cm²으로 모두 설계기준을 만족 시키는 것으로 판명되었다.

2) 기초 암반 안정성조사

기초 암반 안정성조사는 시추조사, 암반노두 조사 및 Face Mapping, 실내 암석시험을 실시하였으며 결과는 다음과 같다.

- ① 시추조사는 총 14곳을 계획 하였으나 추가적으로 7개소를 실시하여 NX볼링으로 21개소를 실시하였다. 시추조사결과 NX-4 시추 위치도에서 심도 3.5 ~ 13.0m에 연약대 구간 존재가 추정되어 기초보강이 필요한 것으로 판단하였다.

- ② 암반 노두조사 및 Face Mapping 는 대지 남측 및 서측 굴착벽면의 정밀지질 조사를 통하여 기초암반의 불연속면을 발달특성과 풍화특성을 파악하고 평판재하시험 및 시추조사에 의한 기초 암반의 지내력 검토결과에 대한 타당성을 평가하기 위한 목적으로 실시하였으며, 조사결과 주절리가 양호하게 분포되어 있고 점토가 충전 되어있는 부분을 제외하면 절리의 틈새가 없고, 풍화의 정도가 대체로 신선할 뿐 만 아니라 건조하며 RMR 분포 63~86으로 이는 양호~아주 우수한 상태로 나타났다.

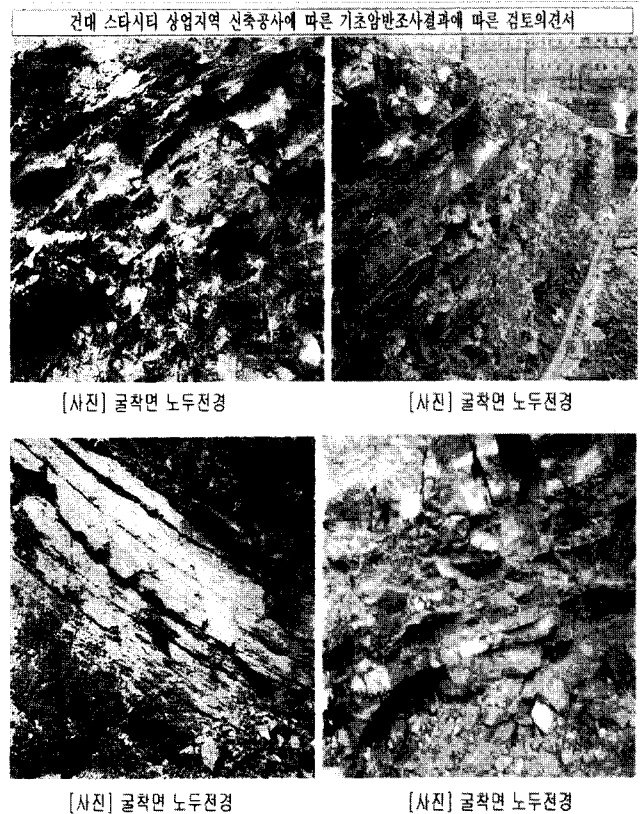
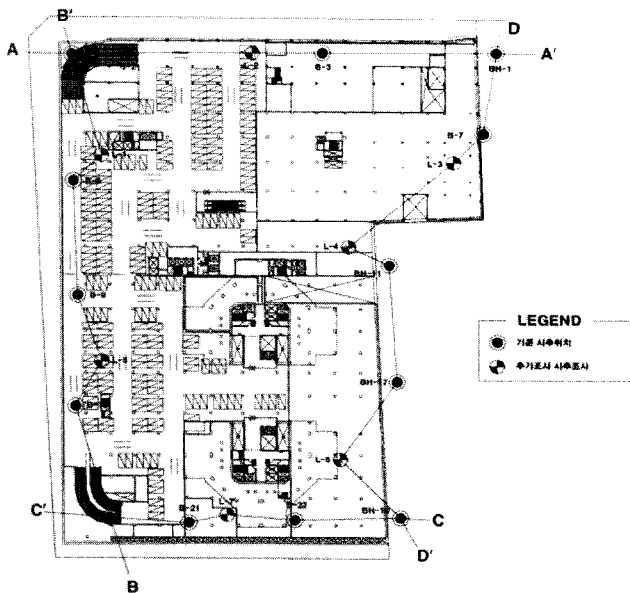


그림 11. 지하 굴착면 노두전경



[그림] 지반조사위치도
그림 10. 지반조사 위치도

- ③ 실내 암석시험결과 추정압축강도가 81.8~1,208 kgf/cm²으로 넓은 범위의 분포를 보이고 있으나 대부분의지역에서 대부분의 지역에서 한국도로공사의 도로설계 기준에 따른 연암~보통암의 분포를 보이는 것으로 나타났다.

2) 침하 안정성조사

시추조사결과 연약대층 구간이 존재함에 따라 종합적인 조사 및 시험실시결과 현장의 연약대 층은 발생 침하량 및 부동 침하량의 허용치를 좌하는 것으로 그림 8과 같이 나타나서 보강이 필요한 것으로 판단하였다.

6) ○○현장 건립지, 2009.4

표 2. 침하 안정성 검토결과

단위: mm

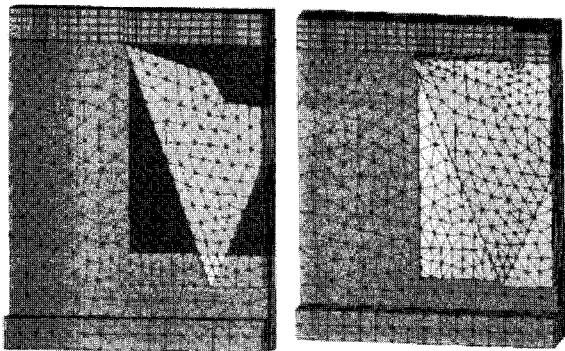
구분	발생 침하량		부동 침하량	허용부동 침하량	허용 침하량	비고
	최대	최소				
ALT-1	80.62	25.34	55.80	22.80	25.00	N.G
ALT-2	73.91	18.99	54.92	22.80	25.00	N.G

※ ALT-1: 현장시험결과, ALT-2: 문헌자료 기준
보강 방안으로 기초의 안정성을 확보하기위해 여러 가지 보강 방안을 검토한 결과 Micro Pile공법⁷⁾ 적용이 가장 타당한 것으로 검토 되었으며, 보강 깊이 변화에 따른 안정성 및 경제적인 보강을 위하여 보강 간격 및 보강 깊이에 따른 안정성 검토결과는 아래와 같다.

표 3. 시추조사결과 지층별 분포상태

단위: mm

구분		발생 침하량		부동 침하량	허용부동 침하량	허용 침하량	비고
		최대	최소				
1.0 m 간격	L15m	23.19	21.45	1.74	22.80	25.00	O.K
	L13m	23.78	21.74	2.04	22.80	25.00	O.K
1.5 m 간격	L15m	36.39	23.90	12.49	22.80	25.00	N.G
	L13m	36.28	23.92	12.36	22.80	25.00	N.G



[그림] 보강 모델링도 (C.T.C=1.0m~1.5m, L=13m) [그림] 보강 모델링도 (C.T.C=10m~1.5m, L=15m)

그림 12. 보강 모델링도 비교

보강영역을 결정하기 위해 추정 연약대층에 대한 보강깊이, 간격, 영역 등을(기초 하부 노출부에 대해 좌측까지 연장한 경우(폭(B)=10.8m, 길이(L)=9.0m)와 노출부 까지만 보강하는 (폭(B)=7.5m, 길이(L)=9.0m) 으로 구분) 변화시켜 가면서안정성 해석을 수행한 결과 보강깊이(L) 15.0m, 보강간격(C.T.C)1.0m X 1.0m, 보강영역(B=10.8m, L=9.0m)으로 결정하였다.

3.2 상향수압관련 지반 조건 분석

일반적으로 대형화 고층화된 건물의 경우 지하공간을 구축하게 되며 이때 지하수위가 건물기초 Level보다 높을 경우 기초 및 좌측 바닥 Slab에는 저면의 지하수에 의한 부력을 받게 된다. 사례 현장은 상향수압에 대한 대책으로 사항중(Dead weight 또는 Pre-loading)에 의한 방법과 영구Anchor(Holding Down Anchor)에 의한 방법, 배수에 의한 방법, 조합형 및 기타방법을 다각적으로 검토하였다.

1) 지반 현황분석

시추조사(지층별 분포상태)조사결과는 표 4.와 같으며, 표준관입 시험결과는 표5.와 같다.

표 4. 시추조사결과 지층별 분포상태

공번	지층두께(m)							SPT (회)
	매립층	퇴적층 1	퇴적층 2	풍암	연암	경암	계	
1	3.5	3.8	6.5	5.7	3	9.5	32.0	12
2	1.4	5.4	6.0	5.2	13	-	31.0	11
3	1.3	-	-	-	13.7	-	15.0	
4	-	-	-	-	12.0	-	12.0	
5	-	-	-	-	9.0	-	9.0	
6	-	-	-	-	8.0	-	8.0	
7	-	-	-	-	8.0	-	8.0	
합계	6.2	9.2	12.5	10.9	66.7	9.5	115	23
공수	3	2	2	2	7	1	-	-

표 5. 표준관입 시험결과

공번 \ 심도	1	2	3	4	5	6	7
1.5m	8/30	5/30	-	-	-	-	-
3.0m	10/30	6/30	-	-	-	-	-
4.5m	10/30	8/30	-	-	-	-	-
6.0m	12/30	8/30	-	-	-	-	-
7.5m	15/30	20/30	-	-	-	-	-
9.0m	18/30	50/15	-	-	-	-	-
10.5m	25/30	50/13	-	-	-	-	-
12.0m	50/17	50/5	-	-	-	-	-
13.5m	50/8	50/4	-	-	-	-	-
15.0m	50/5	50/4	-	-	-	-	-
16.5m	50/4	50/2	-	-	-	-	-
18.0m	50/4	-	-	-	-	-	-
합계	12	11	-	-	-	-	-

7) ○ ○ 건설지 pp.58~61, 2009.4

2) 현장 수압시험 결과

표 6. 현장 수압시험결과표

공번	심도 EL(m)	투수계수 K(cm/sec)	Lugeon치
1	23.0~25.0	9,170E-05	5,011
	26.0~28.0	-	-
	30.0~32.0	-	-
2	4.5~9.0	-	-
	10.5~12.0	7,828E-06	-
	13.5~15.0	3,777E-06	--
3	4.0~5.0	3,058E-05	0,952
	7.0~8.0	6,816E-06	0,190
	-	-	-
4	6.0~7.0	-	-
	8.0~10.0	-	-
	10.0~12.0	4,097E-07	0,048
5	2.0~3.0	-	-
	4.0~5.0	-	-
	7.0~9.0	2,185E-05	1,905
6	2.0~3.0	-	-
	4.0~5.0	-	-
	7.0~8.0	7,093E-07	0,190
7	2.0~3.0	-	-
	4.0~5.0	4,857E-06	0,003
	7.0~8.0	2,414E-06	0,095

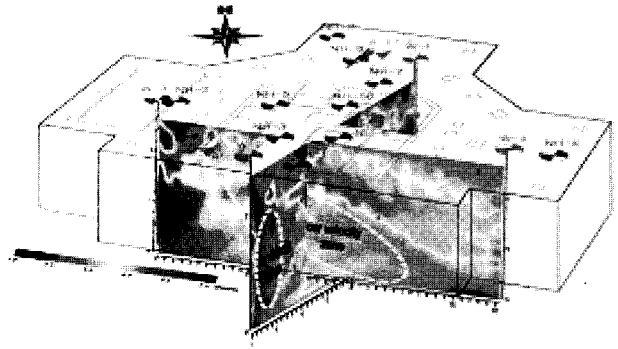


그림 13. 탄성파 토모그래피 결과 A동 3D

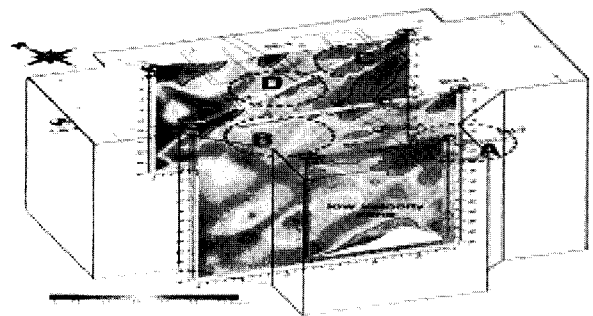


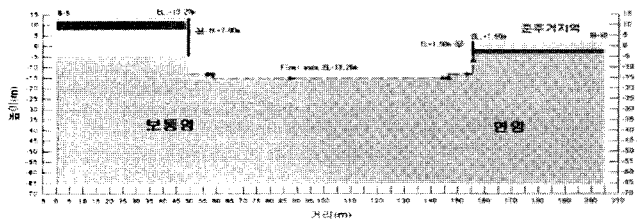
그림 14. 탄성파 토모그래피 결과 B동 3D 단면도

3.3 컴퓨터 수리모델링에 의한 지하수 유입량 산정

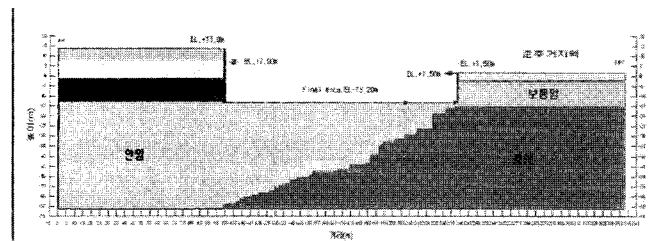
굴착 현장의 지하수 유입량 검토는 시공 중 우수 유입에 의한 양수작업량 추정을 위한 일시적 유입량과공사중 건물의 부력(상향수압) 설계에 관계되는 양수량 예측으로 분리하는데 본 연구에서는 상향수압 처리를 위한 영구조건하에서 배수 시스템 적용 시 고려해야할 기초 지반 하부로 유입되는 지하수 유입량을 유한요소 해석 프로그램인 SEEP/W를 이용하여 산정하였으며 산정 결과는 표 7.과 같다.

표 7. 영구배수 시스템 적용시 지하수 유입량 산정결과)

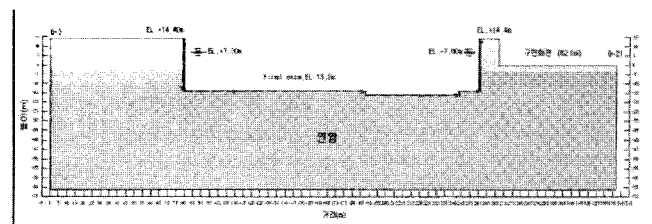
구역	Net Flux		범위 (m)	침투유량 (m³/day)	FS	설계 침투유량 (m³/day)
	m³/day/m	m³/day/m				
A	4,1683E-06	0,360	112,5	41	3,0	123
B	6,0618E-06	0,524	63,1	33	3,0	87
C	4,3290E-06	0,374	128,4	48	3,0	129
계				122	3,0	366



Section-A



Section-B



Section-C

그림 15. 지하수 유입량 해석단면

8) 동아건설턴트, S-TECH 컨설팅그룹, 현장지반서, 2005.5

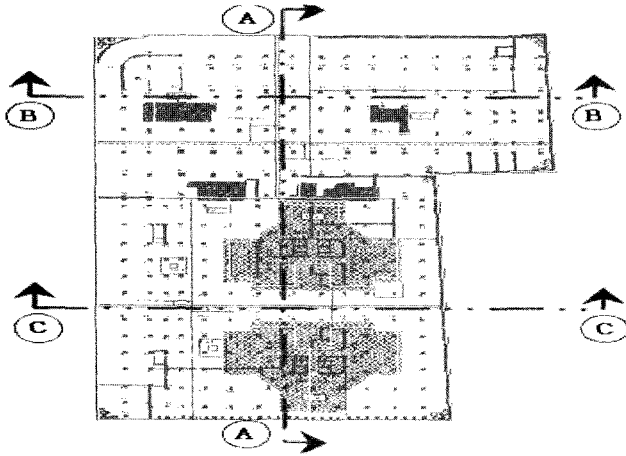


그림 16. 지하수 유입량 해석 대지단면도

4. 적용 가능한 상향수압 처리공법 선정

사례현장은 대형, 초고층 건물로 현장 주변의 건물들의 형태는 단독주택, 연립, 아파트, 저층의 상가 건물 등 비교적 낮은 지하층을 이루고 있는 반면에 지하 6층의 깊은 지하층을 이루고 있어 일종의 호수 또는 커다란 웅덩이 형상을 이루고 있는 상황에서 한강에 인접한 지리적인 요인에 의해 지하수위가 한강수위변화와 밀접하게 연계되어 있어서 지하수의 유입량이 한강의 수위에 영향을 받음으로 인해 변수가 대단히 많아 결과적으로 부력(상향수압)에 대하여 힘으로 저항하는 Rock anchor system 공법 보다는 유입되는 지하수를 유도, 배수시킴으로써 변동폭이 큰 부력(양압력) 통제가 용이한 영구배수 공법의 하나로 Drain mat 배수 System이라는 최적공법의 선정을 통해 직접공사비 406,702,000 원 및 Life Cycle Cost 차원에서 검토한 결과 건물수명 50년 기준 운용 수익률 년 4% 절감의 효과를 달성하였다. 사례현장에 적용한 Drain mat 배수 System 공법적용의 장점을 분석하기위해 우선 일반적인 영구배수공법으로 부분 Trench 배수 System공법의 시공상 문제점을 열거해 보면 다음과 같다.

1) 부분 Trench 배수 System공법

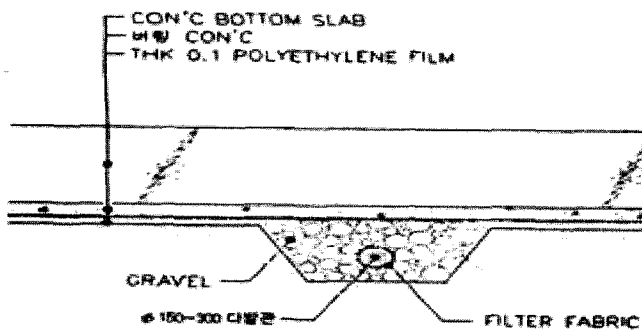


그림17. 부분 Trench 배수 시스템

- ① Trench 배수 System공법은 일반적으로 시공 중 유입수를 처리하는 가설 배수공법으로 많이 사용되나, 이를 영구조건으로 사용하기 위해서는 별도의 전단면 자갈 배수층을 형성시키거나 판형 배수재를 보조재료로 이용해야만 한다.
- ② 영구배수의 통수능력은 토목섬유에 의해서 좌우되고 장기적으로 Trench내의 다발관을 감싸고 있는 토목 섬유층의 눈막힘이 발생할 경우 통수능력이 현저하게 떨어진다.
- ③ 공기면에서 자갈 배수층 형성을 위한 터파기 물량의 증가와 공사비용면에서 배수층 형성을 위한 양질의 자갈 수급에 많은 어려움이 있다.
- ④ 공정이 복잡하여 토공사 진행에 맞추어 신속한 영구배수공법 시공이 어렵고 이에 따른 공기지연의 우려가 크다.

2) Drain mat 배수 System 공법

일반적인 영구배수공법과의 객관적인 비교를 통해 알아낸 Drain mat 배수 System 공법의 장점을 분석해보면 다음과 같다.

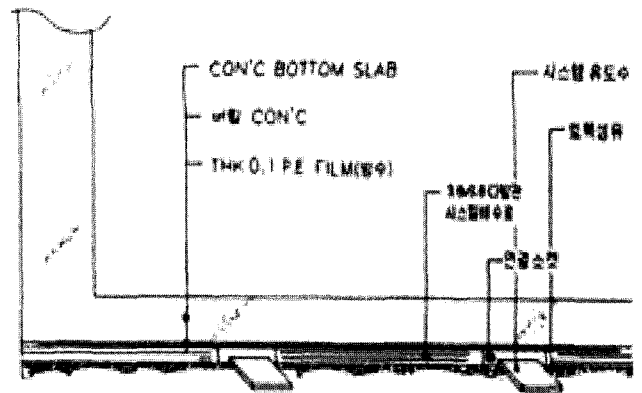


그림18. Drain Mat 배수 시스템

- ① 배수 System의 일체화를 통한 통수능력과 집수 능력을 향상시켜서 장기적인 배수능력을 최소화하고 안전성을 향상시켰다.
- ② 모든 재료를 공장제작, 현장반입 설치로 품질관리가 우수하며 또한 모든 공정을 전문인력에 의해 직접시공 토록 하여 정밀시공이 가능하였다.
- ③ 공법 특성상 토공사 완료 후 시공기간이 공사구간 및 면적에 관계없이 1일 이내에 완료됨으로써 기초 바닥면의 장기간 노출로 인한 지반이완을 최소화 할 수 있었다. 특히, 기초 Con'c 타설계획 등에 있어서 별도의 배수 System을 설치하기 위한 공기가 소요되지 않아 공중 간 간섭배제 및 공기절약에 기여하였다.
- ④ 기존의 영구배수 공법의 문제점을 개선한 신기술, 신공법을 적용 및 효과를 검증하였다.

5. 결 론

건물의 고층화와 지하공간이용의 증가에 따른 공사비용 절감과 안전성확보 차원에서 건물저면에 작용하는 상향수압처리를 위한 합리적이고 경제적인 공법선정은 매우 중요한 사안이다. 따라서 본 연구에서는 각 공법의 설계 및 시공절차의 분석에 따른 공법선정 방안을 제시하였으며, 사례로 한강에 인접한 지리적 요인에 의해 지하수위가 한강의 수위와 연계되어 있는 ○○ 현장을 대상으로 실질적인 분석을 실시하고 컴퓨터 수리모델링(Modeling)을 통한 공법의 특성과 기능을 비교분석(Simulation)하였다. 사례분석 결과 유입되는 지하수를 유도, 배수함으로써 지하수위에 따른 상향수압을 통제할 수 있는 Drain mat System이라는 최적공법의 선정을 통해 직접공사비 절감과 LCC 차원에서 운용수익률 년 4% 절감의 효과를 달성하였다. 이상과 같은 연구결과와 더불어 보다 합리적인 상향수압 처리공법을 발전을 위해서는 건물의 규모 및 지층의 종류에 따른 투수계수 값의 실측데이터 집성과 실제 지하수에 의한 건물저면에 작용하는 상향수압을 정기적으로 측정하는 정보화 시공(Real Time Construction)과 우리나라의 지질(토질)의 성상에 근접하여 적용할 수 있는 설계기준에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 건국 스타시티 건립지, pp.80~86, 2009.4
2. 김상규, 홍병만, 침투해석 프로그램의 활용과 사례연구, 2007
3. 박옥교, 건축물의 상향수압 감소를 위한 지하수 배수로 시공방법 및 그 시스템, 2007
4. 이정영, 지하구조체 설계 및 시공시 상향수압처리방법에 대한 대안별 비교, 시지엔지니어링(주), 2007
5. 지하구조물 시공 및 감독기술, 시지엔지니어링, 2005
6. 특수공법 시공 보고서, 삼부토건(주), 2003
7. Das, B.M, Principles of Foundation Engineering, 2004
8. Davis, Discussion notes on ground water control for the construction of deep basement, 1992.9
9. Joseph E. Boweles, Foundation Analysis and Design 4th edition, Mcgrawhill,

(접수 2009. 6. 30, 심사 2009. 7. 14, 게재확정 2009. 7. 24)

요 약

최근의 건축활동은 초고층화 대형화 복잡화 되고 있으며 도심지내에 근접 시공되어 짐에 따라 건축물의 지상층 높이증가와 더불어 지가의 양등, 토지이용의 극대화로 지하구조물의 중요성이 증가되고 있으며 지하층의 면적 및 층수가 증가되어 가는 추세이다. 이에 따라 지하굴착심도가 깊어지고 있으며 토지 이용의 효율극대화 측면에서 우리나라의 경우 해안매립지등 매립지반에서의 건축활동이 급증하는 추세로 연약지반에 대한 대책과 아울러 지하수위에 대한 영향을 신중하게 검토해야할 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 일반적으로 지하굴착 후 시공되는 건축물은 지층의성상과 토질, 수압 등에 대한 고려로 건물의 최하층 바닥슬라브 하부에 위치하게 되는 지하수위와의 수두압차에 의한 정수학적 압력(Hydrostatic Pressure), 즉 부력(Uplift Water Pressure)이 건물저면에 작용하게 되므로, 이러한 浮力에 합리적으로 대처할 수 있는 설계 및 시공법의 개발과 이를 적용하기 위한 노력은 지하층공사에 있어서 안전, 공기, 비용, 건축의질 측면에서 필수적이라고 할 수 있다.

그러나 이제까지의 지하층 공사는 부력 처리방법 등에 대한 연구가 미흡하며 기존의 공법 중 대상 프로젝트의 합리적인 수행을 위한 설계초기단계에서의 지반에 대한 사전조사와 면밀한 분석이 이루어지지 않고, 경험에 의존하는 경향이 크다. 본 연구는 상기와 같은 문제점을 바탕으로 ○○ 건설현장 실 사례를 중심으로 현장은 한강에 인접한 지리적 요인에 의해 지하수위가 한강의 수위와 연계되어 있는바 최초 계획되었던 Rock anchor System 대신 Drain mat System을 적용하여 유입되는 지하수를 유도, 배수함으로써 지하수위에 따른 상향수압을 통제할 수 있는 최적공법 선정을 통해 직접공사비 406,702,000원 및 Life Cycle Cost 차원에서 검토한 결과 건물수명 50년 기준 절감액 운용수익률 년 4% 절감의 효과로 이는 건설초기단계에서의 과다설계에 따른 투입 공사비의 과다책정, 공기의 증가 등에 따른 재산성 문제를 합리적으로 제어하여 건설공사의 원가절감을 위한 성공사례로 평가되고 있다.

키워드 : 상향수압, 투수계수, 배수방식, 영구배수공법, 영구앵커공법