



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

건축물 지하층의 부력방지 시공법
선정에 관한 사례연구



2007년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

건 축 공 학 과

김 기 식

공학석사 학위논문

건축물 지하층의 부력방지 시공법
선정에 관한 사례연구

지도교수 이 수 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2007년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

건 축 공 학 과

김 기 식

김기식의 공학석사 학위논문을 인준함

2006年 11月 30日



주 심 공학박사 임 영 빈 (인)

위 원 공학박사 이 재 용 (인)

위 원 공학박사 이 수 용 (인)

목 차

그림목차	i
표목차	ii

ABSTRACT

I. 서 론	3
1.1 연구 배경 및 목적	3
1.2 연구의 방법 및 범위	4
II. 지하수압 대응구조의 이론적 고찰	5
2.1 개요	5
2.2 지하수 흐름 이론	5
2.3 수압대응공법의 설계이론	7
2.3.1 매스콘크리트를 이용한 수압대응 공법	7
2.3.2 수리이론을 이용한 수압대응 공법	11
2.3.3 영구앵커를 이용한 수압대응 공법	13
III. 지하층 수압대응공법 비교 및 적용 결과 고찰	16
3.1 매스콘크리트를 이용한 수압대응 공법	16
3.2 수리이론을 이용한 수압대응 공법	19
3.3 영구앵커를 이용한 수압대응 공법	21
3.4 수압대응공법의 일반적 비교	48
3.5 사례적용 결과분석 및 고찰	49
IV 결 론	54

참고문헌

그 립 목 차

그림 2.1	지하수 흐름해석에 관한 신뢰성 해석 흐름도	7
그림 2.2	기초바닥에 작용하는 상향수압의 균형	9
그림 2.3	상향수압에 의한 모멘트와 저항모멘트의 균형문제	10
그림 2.4	기둥과 기둥사이의 지간이 될 경우 수압 안정성	11
그림 2.5	영구앵커체 단면도	13
그림 3.1	드레인매트 영구배수공법의 개념도	21
그림 3.2	방식 처리	22
그림 3.3	재인장 시스템 개념도	23
그림 3.4	이중 부식 방지형 영구앵커체	23
그림 3.5	강선 삽입기	24
그림 3.6	자유장 벌빙 그리싱 처리 전경	24
그림 3.7	수밀성 시험 현황 전경	25
그림 3.8	자유장 열수축 시트 처리 전경	25
그림 3.9	자유장 부위 에폭시 방수 작업 전경	26
그림 3.10	NOSE CONE 연결 부위 단면 상세	26
그림 3.11	천공 작업 전경	27
그림 3.12	그라우팅 작업 전경	27
그림 3.13	그라우팅 시험	28
그림 3.14	작업 상세도	37
그림 3.15	최적안 선정을 위한 매트릭스 평가표	52

표 목 차

표 3.1 인장재의 규격	29
표 3.2 인장작업 관리기준	37
표 3.3 OO현장 앵커 제원표	40
표 3.4 지반상태에 따른 각종 하중 비교표	42
표 3.5 수압대응공법의 일반적 비교	48
표 3.6 평가항목 선정표 예	51



A Study of Practice on the Method of Anchoring for Uplift Force in Building Basement

by Gi-Sik, Kim

Department of Architectural Engineering
Graduate School of Industry, Pukyong National University

Abstract

This study discussed the theoretical review on the Uplift Force Method due to the presence of the underground water and also executed the comprehensive comparison about its constructability, economy and stability, etc. Through the analyses of ongoing applications more specifically, I presented the optimal Uplift Force Method by studying many Uplift Force Method based on the mathematical principles, focusing on the presentation of the blueprint toward the future city development with infinite potential about making the underground space.

The method of study was investigated by comparing and analyzing the general Uplift Force Method using the re-tensioning permanent anchors applied at OOProject site located in Kimhae, Kyungsang-namdo province, and another Uplift Force Method using the Mass Concrete applied on many construction sites. Eventually, I wanted to present the optimal Uplift Force Method.

The results of this study are as follows;

1. Stability

The Uplift Force Method using the permanent anchors was the most favorable to the stability of the building in terms of the adaptability to the building size or to the underground inconsistency, the response to the variable load conditions and waterproof function.

2. Constructability

The Uplift Force Method using the permanent anchors did not excel other construction methods in the Constructability. However, it was possible to keep the consistent quality with load-bearing capacity and standardized units made in factories.

3. Economy

The initial investment cost of the Uplift Force Method using the permanent anchors was found to be overly inputted. But I expected the cost-saving effects from the additional cost-saving effects during the post-construction maintenance and from the durability period of the buildings.

I. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 도시집중화 및 도심지의 지가 상승에 따른 부지의 효율적 이용, 건축 관련법규 등의 강화로 점차 건축물에 있어서의 지하층수 증가와 주차장 또는 생활공간으로서의 지하공간 활용도가 높아져서 이에 대한 개발 필요성이 증가하고 있다. 따라서 점차 도심지 대규모 건축공사에서 지하 층수가 깊어지고 단위층의 면적이 커짐에 따른 설계와 시공측면에서의 검토요소가 늘어나게 되고 또한 이 문제가 중요하게 취급되는 실정이다.

지상공간과 수변공간에 이어 제3의 공간으로 일컬어지는 지하공간은 이제 전기 및 가스공급, 상·하수관 매립, 폐기물 매립 등 단순히 도시기반을 지원하는 구조물로서의 기능에서 새로운 사고에 기초한 쾌적하고 안락한 거주공간으로까지의 활용에 기대를 모으고 있다.

이와 같이 지하공간의 활용도가 높아짐에 따라 지하구조물의 수압에 대한 안전성 확보가 요구되고 있으며, 이에 따른 수압 처리방안이 강조되고 또한 이를 해결해야 하는 문제점을 안고 있는 현실이다.

따라서 본 연구는 지하공간 건축에서 필연적으로 대두되는 지하수에 의한 양압력의 처리방법을 매스콘크리트(Mass Concrete)를 이용하여 수압에 대응하게 하거나 수리이론에 근거한 시공공법을 이용해 수압에 대응하게 한다든지, 또는 영구앵커를 이용한 수압대응공법 등 일반적으로 적용 가능한 기존의 수압대응공법에 대하여 고찰하고, 이들의 특성을 비교, 분석하여 지하수로 인한 양압력 처리공법에 대한 적정성을 판단하고 효율적인 공법을 선정하는데 필요한 기초 자료를 제시하는데 목적을 두었다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 지하수로 인한 수압대응공법에 대한 이론적 검토 및 기존의 현장 적용 사례분석을 통한 시공성, 경제성, 안정성 등을 종합적으로 검토하고, 수리이론에 근거한 건축물의 수압대응공법 등을 비교 분석하여 특성을 파악함으로써 적합한 수압대응공법을 선정하는데 필요한 기초자료가 제시될 수 있도록 하였다.

연구의 구체적인 내용을 보면 다음과 같다.

첫째, 지하수 흐름 이론을 이해하고, 이에 대한 유한요소해석, 지반정수들의 확률분포 특성과 신뢰성 해석에 관한 국내의 연구현황을 검토하였다.

둘째, 수압대응공법의 설계이론을 이해하고, 이에 따른 수압대응공법, 즉 매스콘크리트를 이용한 수압대응공법, 수리이론을 이용한 수압대응공법, 영구앵커를 이용한 수압대응공법 등의 정의와 특징, 개발의 필요성 등 설계이론을 검토하였다.

셋째, 분석한 수압대응공법의 특징을 비교, 분석하여 각각의 공법들의 적용성 및 문제점들을 발췌, 고찰하였다.

넷째, 고찰 결과에 따른 각 공법들의 안정성, 시공성, 경제성 등을 분석하였으며,

다섯째, 위의 각 수압대응공법들을 분석, 검토한 내용에서 도출된 특성들을 향후 공법선정 과정에서 필요한 기준이 되는 참고자료로서 제시하고자 하였다.

II. 지하수압 대응구조의 이론적 고찰

2.1 개 요

지하수위 하부에 구조물을 축조할 경우에는 지하수위면 하부측 구조체면에 연직방향으로 수압이 작용하게 된다.

이러한 수압 중에서 특히 구조체의 바닥면에 작용하는 상향력을 양압력(Uplift Force, Uplift Pressure) 또는 부력이라 한다.

이러한 상향력 작용이 확실한 경우에는 이것을 고려해야 하며, 그 작용이 확실하지 않더라도 물의 침투 혹은 구조물의 접지상태에 따라 이 힘들의 작용을 예측하여 설계시 안전측이 되도록 그 영향을 고려하여 안전율을 보통 1.2 이상으로 적용하게 된다.

양압력에 대해 안전성을 유지하는지의 여부는 다음 식으로 검토한다.

$$F_s = \frac{Wb + Q_s}{U_p} \geq 1.2 \quad (\text{식 1})$$

여기서, Wb : 각 시공단계별 구조물의 자중

Q_s : 흙의 저단저항 혹은 측벽과 흙의 마찰저항

U_p : 각 시공 단계별 기초 구조물의 저면에 작용하는 정수압에 의한 부력

($\because Q_s$ 는 시공조건 등을 고려하여 적용여부 결정)

2.2 지하수 흐름 이론

대부분의 지하수 흐름에 대한 수치해석은 지층의 두께가 일정하고, 대수층내의 지하수는 2차원적으로 흐르는 것으로 특성화시켜 지하수 흐름 해석을 수행하고 있다. 그러나 지하수 포텐셜이 3차원 방향으로 서로 차이가 있거나 경계조건이 3차원적인 형태를 가질 경우에는 제반 지반특성 및 형상을

고려하여 3차원 지하수 흐름 해석을 실시하여야 한다. 최근에는 도심굴착 및 터널공사 등이 대규모로 진행되고, 지하수 오염 등에 관한 문제에 관심이 고조되면서 수직, 수평 흐름에 따른 3차원적 수치 해석의 중요성이 증대되고 있다.

지하구조물의 축조에서는 대부분의 경우 지하수면의 위치와 지하수의 흐름 방향을 결정하는 것이 매우 중요한 문제가 된다. 이를 위해서는 지하수위의 고도 또는 기준면으로부터의 높이를 결정하는 것이 필요하다. 그러나 대부분의 지역에서 일반적으로 지하수 유동방향에 대한 결론은 지형을 관찰함으로써 얻는다.

중력은 지하수를 움직이게 하는 가장 중요한 힘이다. 자연조건에서 지하수는 지표에 도달하여 샘으로 유출되거나 하상을 통해 흐르기 전까지는 고지대에서 저지대로 흐른다. 따라서 포화대의 가장 심도가 낮은 부분을 흐르는 지하수는 강어귀에서 강 또는 해안으로 흐른다. 만일 지표면의 사소한 불규칙성을 무시한다면 지표면의 경사는 항상 강이나 해안 쪽으로 향하고 있음을 알 수 있다.

지하수위까지의 심도는 땅속 기존의 습지보다 하천들의 경계에서 더 깊다. 사실 지하수위는 일반적으로 지표면의 복사판과 같다고 볼 수 있다. 지하수를 수질이 양호한 상태로 사용할 경우에는 정화조, 폐기물매립지 등이 상부지역보다는 하부지역에 있어야 한다.

따라서 이러한 지하수의 흐름 이론을 제대로 이해하고, 철저한 검증과 분석을 통해 수압에 대응할 수 있는 공법 선택이 필요하다.

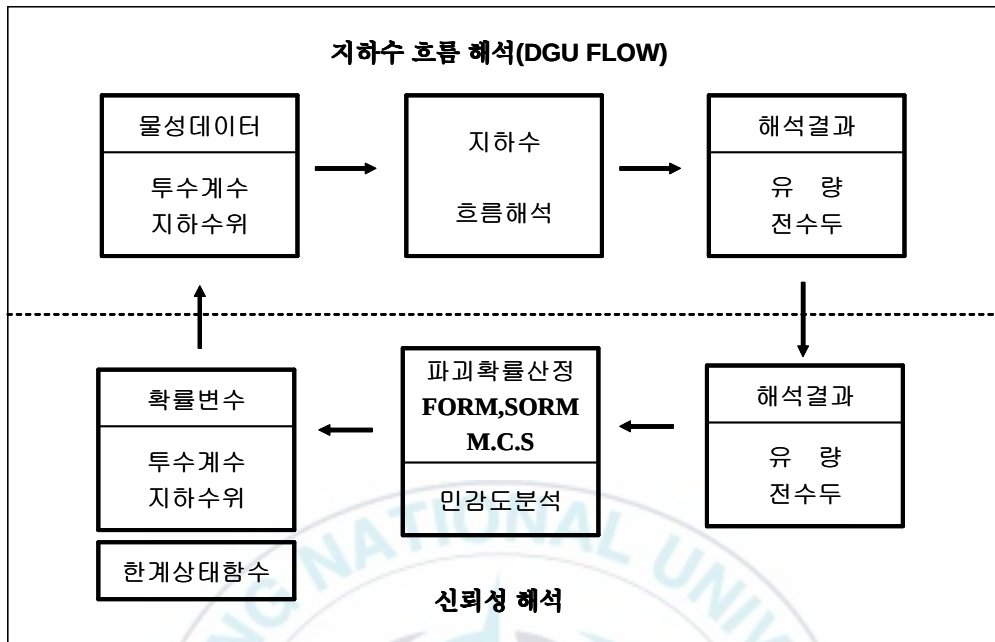


그림 2.1 지하수 흐름해석에 관한 신뢰성 해석 흐름도

2.3 수압대응공법의 설계이론

수압대응공법으로는 일반적으로 매스콘크리트를 이용한 건물 전체 무게와 영구배수공법을 혼합하여 사용하는 수압대응공법, 수리이론에 근거한 수압대응공법 그리고 영구앵커를 이용한 강제적인 수압대응공법 등으로 대별될 수 있다.

이러한 공법들은 모두 수압에 대응한다는 공통점을 가지고 있지만 안정성과 경제성, 시공성 등을 고려하여 최적의 대안을 강구하여야만 한다.

2.3.1 매스콘크리트를 이용한 수압대응공법

(1) 현장 지반 조건이 현장의 지질조사서 및 시공자료를 토대로 볼 때 최종 굴착 레벨 아래 투수계수가 낮은 풍화 암반층 이상의 지반조건이면(또는 Cut of Wall 형성시) 부지내로 유입되는 유입수량은 크지 않은 것으로 본

다. 이것은 미미한 유한의 지하수를 부지내의 일정한 곳으로 배수시설 파이프를 이용하여 집수정으로 모아 일정 간격 주기로 제거가 가능하다는 것이다.

따라서 매트기초 바닥 슬래브에 미치는 지하수압의 직접적인 작용을 피할 수 있고 슬래브에 작용하는 지하수압의 임의 조절이 가능하여 기초 바닥 슬래브의 단면조정 및 단일 기초슬래브 처리가 가능하다. 지하연속벽 선단부가 연암반 이상 지층에 근입 되면, 부지내 지하수 유입은 지하연속벽 하부에서 집수정을 통한 일일 양수작업을 통해 배제관리가 가능하다. 아울러 번거로운 부력앵커에 의한 지하수압저항 장치를 생략할 수 있으며 부력앵커의 스트레스 감소에 의한 직접적인 위험요소를 배제할 수도 있다.

(2) 매스콘크리트를 이용한 수압대응공법은 지하 암반 굴착에 따른 어려움 감소 및 암반 굴착량의 감소에 따른 공기단축이 가능하다. 이 경우에는 기초슬래브를 불투수층으로 처리할 경우 해당 영구배수시스템 적용시 토공량의 감소는 물론 이중매트를 생략하고 단일 매트 슬래브로의 처리가 가능하기 때문에 단면의 증가분만큼의 토공량을 절감할 수 있어 전체적으로는 공기단축을 통한 공사비 절감의 효과를 기대할 수 있다.

(3) 부력앵커 설치에 의한 지하수압저항 방법을 실시한다면 영구배수시스템보다 구조물공사가 최소 1개월 정도가 지연된다. 부력앵커의 근본적인 문제점은 부력앵커에 요구되는 기술적인 문제, 즉 인장력 손실, 방청, 유지보수를 해결할 수 있는 국내 전문 시공업체가 희소하며 비용 또한 고가이다. 영구배수시스템의 시공은 아주 단순한 작업으로 부력앵커 설치에 비해서 시공의 능률면에서도 월등하다.

(4) 매스콘크리트 공법은 기초슬래브 등 철근콘크리트공사의 단일슬래브 처리가 가능하기 때문에 철근 및 콘크리트공사가 단순(지중보 생략 가능)해지며 그만큼 재료의 절감도 기대할 수 있다.

(5) 단일슬래브 처리에 따른 기초보, 이중매트 부분의 방수면적이 감소되며, 기초슬래브에 수압이 작용하지 않는 관계로 수압에 의한 구조물, 방수층

의 손상이 거의 없다.

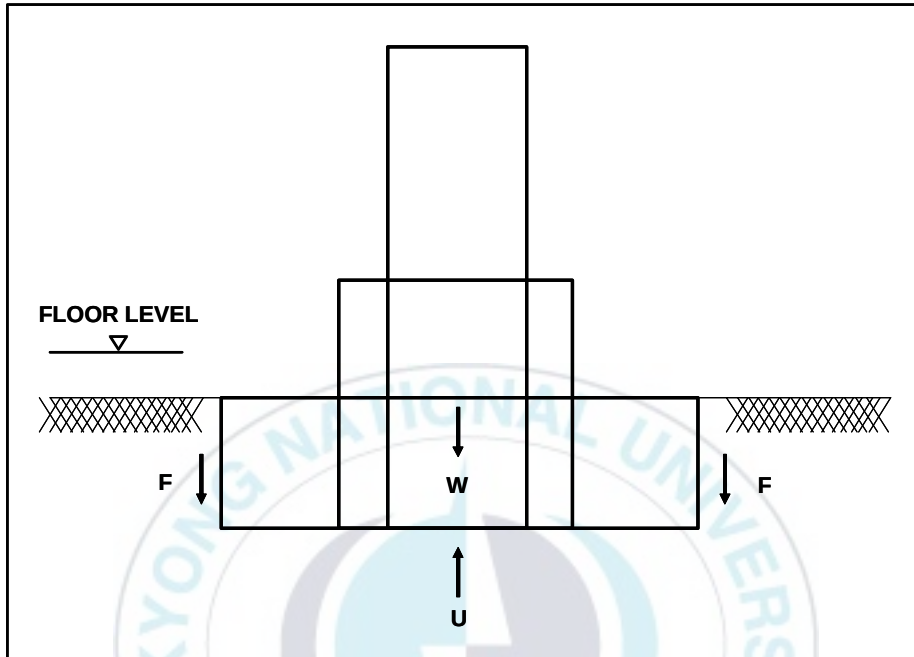


그림 2.2 기초바닥에 작용하는 상향수압의 균형

$$U > W + F$$

U = Uplift Force

W = Total Dead Weight of the Building

F = Friction between the Basement Wall and the Soil

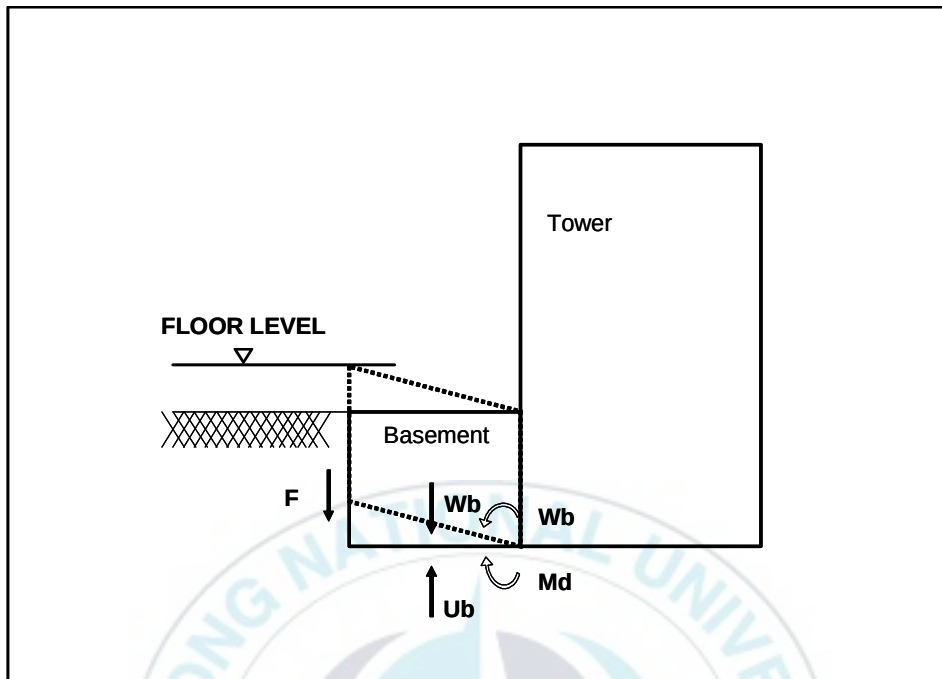


그림 2.3 상향수압에 의한 모멘트와 저항모멘트의 균형

$$M_d > M_r$$

M_d = Driving Upward Moment due to U_b

M_r = Resisting Downward Moment due to U_b and F

W_b = Dead Weight of Basement U_b

= Uplift Force at Basement Area

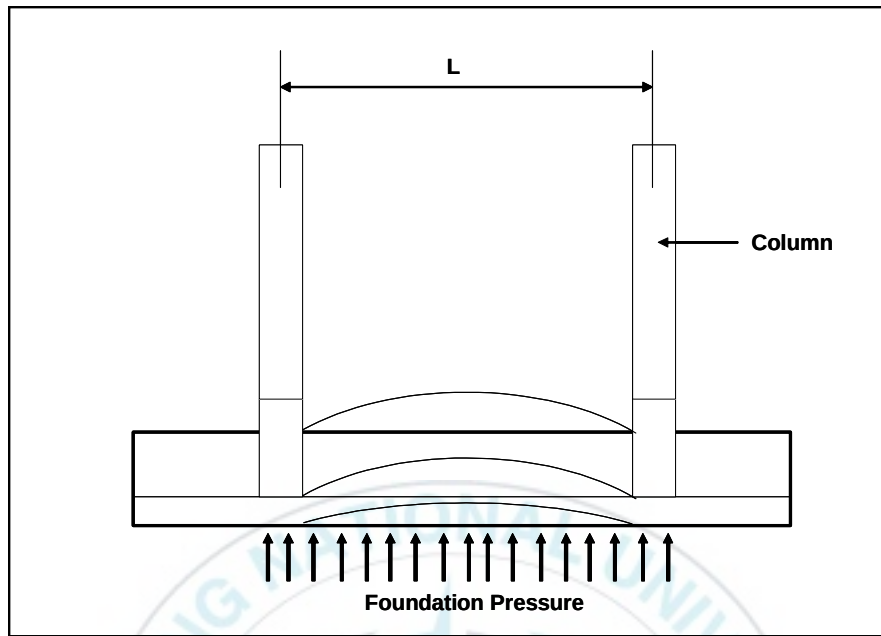


그림 2.4 기둥과 기둥사이의 지간이 될 경우 수압의 안정성

2.3.2 수리이론을 이용한 수압대응공법

기초바닥 및 외벽에 영구적으로 작용하는 상향수압은 계측기기, 즉 간극수압계(Piezometer) 매설을 통한 장기적인 관측이 되지 않는 한 설계수압을 조정하기 위한 정량화는 매우 어렵다. 따라서 설계에 반영하는 수압은 외·내부 지하수위 수두차에 의한 삼각형 분포를 채택하는 것이 일반적이다.

깊은 굴착에 따른 지하구조물 시공은 필연적으로 지하수압에 대한 문제가 야기된다. 다음에 시공 및 영구조건하에서 지하수 흐름에 따른 지하수압(Uplift Pressure)에 대한 지하구조물 거동모델링을 요약하면 다음과 같다.

(1) 시공 중의 지하수압은 가설(또는 본체벽) 흙막이 벽의 외력으로 작용하고 기초지반의 상태(점토, 모래, 암반층은 제외)에 따라 지하수의 흐름에 의해서 지반의 융기(Heaving), 파이프링(Piping)현상 등을 유발하게 된다.

(2) 영구 조건하에서 지하층 바닥에 작용하는 양압력(Uplift)의 문제는 대

체로 다음의 모델로 요약될 수 있다.

① 기초 바닥에 작용하는 상향수압(Uplift Pressure)의 균형 문제로서 지하벽체가 지하연속벽으로 시공되어 시공, 영구조건을 만족하는 구조체로 시공되었을 경우 건물전체 무게와 지하외벽과 흙과의 상호작용에 의한 마찰력(Friction)에 대한 저항은 대단히 크다.

② 상향수압 모멘트와 저항모멘트의 관계에 따른 건물무게 균형이 문제가 된다.

③ 기둥 주위가 충분히 상향수압을 견딜 수 있는 자중일지라도 대단면 스펀일 경우 중앙부의 저항 내력이 문제가 될 수 있다. 이것은 영구배수시스템을 적용할 경우 부력저항 균형이 이루어지는 기둥, 기초 아래에는 별도로 부력저항 시설인 자갈 배수층을 생략할 수 있으나 일반 기초슬래브 구간에는 인위적인 배수층을 중점적으로 배치하게 되는 이유가 여기에 있다. 따라서 ①, ②, ③ 모든 부분에 대한 안전성이 유지될 수 있는 방법이 강구되어야 함은 물론이다.

다음으로는 배수조건에 따른 지하수압 적용에 대한 설계기준을 요약하면 다음과 같다.

(1) 무배수 조건(No Drainage Condition)

부지내 최대지하수위에 대응하는 정수학적 상승 압력을 바닥슬래브 설계에 적용해야만 한다.

(2) 배수조건(Permanent Drainage Condition)

기초 바닥 슬래브에 적용하는 정수학적 양압력은 인위적인 영구배수 시스템 시설을 기초바닥 아래에 설치하여 제거할 수 있기 때문에 기초 바닥 슬래브 설계용 수압은 내부에 설치할 경우 최대 3.0t/m^2 이하 적용이 가능하다.

2.3.3 영구앵커를 이용한 수압대응공법

지반앵커공법은 구조물에서의 인장, 활동, 전도, 동하중 등 하중의 불균형에 관련된 문제를 해결하기 위해 지반에 프리스트레스(Prestress)를 도입하여 안정성을 확보하기 위한 공법으로 1874년 최초 적용된 이래 현재까지 그 공법의 유용성이 입증되어 사용범위가 급격히 증가하고 있는 공법이다.

지반앵커의 구성은 크게 정착장부와 자유장부, 그리고 정착구부로 크게 나누어지는데, 먼저 정착장부(Bond Length)는 지반과 그라우트와 인장재의 부착 저항력을 통해 소요 응력을 발휘하고, 자유장부(Free Length)는 정착장의 부착응력을 목적하는 구조체에 전달하는 탄성체이다. 그리고 정착구부(Anchorage Zone)는 소요응력을 목표로 하는 구조체에 직접 작용토록 하여 하중을 재하하는 정착체이다.

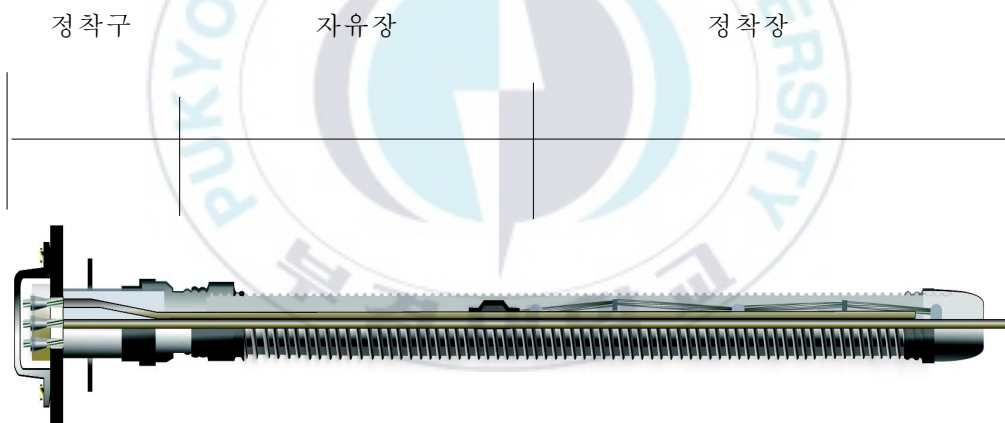


그림 2.5 영구앵커체 단면도

(1) 공법의 역사

- ① 1874년 Frazer : London-Birmingham간 제방공사에 시험 적용
(철근 이용)
- ② 1900년 Anderson : 수압대응 앵커공법 최초 시도.

③ 1934년 Coyne : Cheurfas Dam에 적용. (Algeria)

④ 미국 : 1960년대 깊은 굴착에 처음 적용.

1970년대 750ton Anchor Test (U.S Army Corps)

⑤ 유럽 : 독일 ; 1958년 Bauer System 시도. (강봉 이용)

스위스 ; 1969년 VSL에서 탐다운 방식의 굴착공사에 처음 적용. 이후 지반앵커 공법은 유럽에서 교량기술과 함께 지속적으로 발달.

⑥ 1960년~1970년 : 압축형, 지압형, 마찰형 등 다양한 앵커방식이 개발되었으나 시공성, 경제성, 안정성 등의 문제로 70년대 이후 영구앵커는 이중부식방지가 가능한 마찰형 앵커로 표준화.

⑦ 영구앵커 관리기준 : 1874년 지반앵커 도입 후 1970년까지의 지반 앵커 사고 유형 및 원인 분석을 통해 가설앵커와 영구앵커의 관리 규정을 제정.

1974년 F.I.P(Federation Internationale De La Precontrainte)

(2) 공법의 특징

① 마찰형 영구앵커공법

: 지반의 불균질성에 대한 적응성이 뛰어난 국제적으로 검증된 마찰형 영구앵커공법(지반앵커 공법의 95%이상)

② 폭넓은 적용성

: 스트랜드를 이용한 마찰형 앵커로 하중에 대한 대응성이 좋고 경제적인 앵커공법(적용하중 10ton ~ 300ton)

③ 이중방식 방지형 영구앵커공법

: 1974년 제정된 FIP기준에 따른 이중방식 방지형 영구앵커 (Double Corrosion Protection Permanent System)

④ 재인장형 영구앵커공법

: 재인장을 위한 여유고 확보가 불필요하며 간단하게 인장력

보정이 가능.

(Restressable Permanent Anchor System)

⑤ 차수, 방수 시스템

: 영구앵커의 내구성 확보를 위해 차수, 방수 기능 강화

⑥ 엄격한 품질관리

: 국제 기준에 따른 단계별 품질관리시험

(B.S, DIN, PTI, FIP, GEO-SPEC)



Ⅲ. 지하층 수압대응공법 비교 및 적용 결과 고찰

본 연구에서의 수압대응공법 비교분석 적용결과 고찰은 2001년 11월부터 2005년 11월까지 약 4년여에 걸쳐 건축된 경남 김해시 문화회관 신축공사의 건축공사 시공과정에서 실제 지하층부분에 발생한 지하수위에 의한 양압력 대응방법 검토 및 적용 사례이다. 검토과정은 수압에 대응하는 여러 가지 기존 공법에 대하여 실제 현장조건과의 부합성을 검토하고 그 결과에 쫓아서 적절한 공법을 채택하여 적용하였다. 이 과정에서 나타난 구체적인 검토 사례 사항은 향후 이와 유사한 경우에 적용할 수 있는 기초 자료로서의 가치가 충분히 있을 것으로 본다. 이러한 일련의 검토 작업 과정과 적용기준 및 공식을 포함한 도출결과의 내용이 건축시공 과정에서 부딪히는 지하수압 대응의 공법선정에서 필요로 하는 참고 자료로서의 활용이 기대되므로 이것을 제시하는 것을 본 연구의 범위로 하였다.

3.1 메스콘크리트를 이용한 수압대응공법

3.1.1 공법개요

밀창콘크리트 내에 일체화된 유도수로와 배수로를 설치하여 유도 수로로 유도된 지하수를 배수로에서 직접 처리하여 토립자 및 부유물 등에 의한 상향수압에 항구적으로 안전하게 한 영구배수공법으로 전체적으로 건물 자중에 의해 상향 수압에 대응하는 공법이다.

3.1.2 시공방법

- ① 기초 바닥면 정리
- ② 드레인 매트 시스템 설치
- ③ 버림 콘크리트 타설

④ 기초 바닥 콘크리트 타설

3.1.3 적용조건

- ① 기초 바닥면 아래가 풍화토층 이상이면 양호 (지하수위에 따라 모든 토질 적용 가능함)
- ② 대심도 굴착에 따른 지하수압 저항시설을 고정하중 등의 사하중에 의존하기 어려운 경우 사용 가능
- ③ 경제성, 시공성 등이 요구될 경우

3.1.4 적용지반

지하연속벽 또는 별도의 차수시설이 풍화암반 이상에 근입되어 있을 경우 (지하수위 측정 결과에 따라 모든 토질 적용 가능)

3.1.5 장.단점

- ① 유도수로와 배수로가 일체화되어 있어서 통수 속도가 빠르며 토립자 등 부유물에 항구적으로 안전하다.
- ② 트랜치의 설치작업이 없어 공사비와 공기를 절감할 수다.
- ③ 비내수압으로 기초 슬래브를 구조적으로 하중이 전혀 실리지 않는 상태의 설계가 가능하다.
- ④ 기초바닥 슬래브에 균열의 발생이 없으며 항구적으로 안전하고 방수층 보존도 영구적이다.
- ⑤ 인접건물에 대한 피해발생은 없으며 시공비와 유지관리 측면에서도 부력앵커와 기존 영구배수공법보다 매우 경제적이다.
- ⑥ 투입자재가 영구적이고 안전하다.
- ⑦ 지하수의 처리속도가 빠르고 시공방법이 단일공정으로 전체 공정관리가 용이하다.
- ⑧ 원가절감 및 품질확보가 용이하다.

- ⑨ 토질전문가에 의한 정확한 수리모델링 및 수리, 지반공학적 설계가 요구된다.
- ⑩ 밀창콘크리트 타설시 드레인 매트 시스템 자재 파손 등의 하자가 발생될 소지가 많다.

3.1.6 적용효과

매스콘크리트를 이용한 수압대응공법은 기존 영구배수공법과 사하중 및 영구앵커의 합성에 의한 상향수압대응공법에서의 불필요한 공정과 구조적 기능의 문제점을 해결한 공법이라 할 수 있다.

기초 바닥 콘크리트를 온통기초에서 비내수압 부재로의 온통기초로 변경 시공이 가능하며 기존 영구배수공법의 수리계산 결과를 이용하여 드레인 매트 시스템으로의 변경시공이 가능하다. 그리고 기존 매트 기초에 적용하여 기초 침하 등 바닥콘크리트의 부실에 따른 누수 등을 예방할 수 있다. 또한 지하수 처리속도가 빠르고 공정이 단일 공정으로 시공관리가 편리한 장점이 있다.

점토 및 사질토 지반에서 기존 영구배수시스템은 건물 자중에 의해 트렌치 부분의 단면 축소가 발생하고 그로 인한 자갈층 안에 설치된 다발관의 외주단면 축소가 가능하다. 다발관의 형상 및 구조상 외주 단면이 축소하면 다발관으로 지하수를 유입하여 집수정으로 보내는데 있어 많은 양압력을 필요로 하게 된다. 특히 트렌치의 수량을 축소하기 위한 트렌치와 드레인 보드를 혼용한 수압대응공법은 상기 원인으로 트렌치 내에 설치한 다발관의 기능이 상실되면 드레인 보드 기능이 상실되어 많은 양압력을 필요로 하게 되는 것이다.

따라서 매스콘크리트를 이용한 수압대응공법은 기존 영구배수공법 및 영구앵커공법 대비 상향수압을 처리하는데 있어서 장·단기적으로 매우 안전하며 경제적인 공법이라 할 수 있다.

3.2 수리이론을 이용한 수압대응공법

3.2.1 공법개요

매트기초 아래의 굴토 마감면에 설치한 수개소의 트렌치 안에 자갈을 포설하여 드레인 보드로 유도된 지하수를 자갈층을 통하여 다발관이 배수기능을 하도록 한 영구배수공법이다.

3.2.2 시공방법

- ① 기초 바닥면 정리
- ② 트렌치 터파기 및 자갈 포설
- ③ 다발관, 부직포 설치
- ④ 드레인 보드 설치
- ⑤ 버림콘크리트 타설
- ⑥ 기초콘크리트 타설

3.2.3 적용조건

- ① 기초 바닥면 아래 풍화암층 이상의 불투수성 지반이 두꺼울 때(연암반층 이상이면 양호)
- ② 지하수위가 높지 않고 지하수의 양이 많지 않을 경우

3.2.4 적용지반

토립자 등 부유물이 많지 않은 지반에 사용

3.2.5 장.단점

- ① 비내수압으로 기초 슬래브를 구조적으로 하중이 전혀 가해지지 않는 상태의 설계가 가능하다.

- ② 기초 바닥 슬래브에 균열의 발생이 거의 없으며 방수층 보존도 영구적이다.
- ③ 인접건물에 대한 피해발생은 없으며 유지관리비 측면에는 영구앵커보다 효율적이다.
- ④ 투입자재의 내구성이 양호하다.
- ⑤ 시공방법이 3~4개 공정으로 비교적 복잡하다.
- ⑥ 드레인 매트 시스템 대비 공사비가 고가이다.
- ⑦ 통수속도가 느리다.
- ⑧ 부유물 등에 의하여 부직포 등의 기능 상실시 양압력이 발생한다(정기적인 공기주입 등 청소 필요).
- ⑨ 토질전문가에 의한 정확한 수리공학적인 설계가 요구된다.
- ⑩ 과설계와 과시공이 될 수 있다.
- ⑪ 공정이 여러 공정이다.

3.2.6 적용효과

수리이론을 이용한 수압대응공법은 가장 기초적인 수압대응공법이라 볼 수 있다.

또한 안정성 측면이나 시공성, 경제성을 고려해 보더라도 여타 공법보다는 가장 손쉽고 단순한 공법이라 할 수 있다. 일반 토사층에서의 시공성은 타 공법과 비교할 때 상당한 효과를 기대 할 수 있지만 암반층에서는 트렌치 굴착 등의 공정으로 인한 공사비 상승과 공기가 늘어나는 단점이 있을 수 있다.

그리고 기초 슬래브의 양압력 처리 방법도 격자형 배수 트렌치로 유도한 물을 계획된 Sump Pit 및 Pump에 의존하여 유입된 지하수를 유도, 배수하여야 하는 공법이므로 가장 기본적인 수압대응공법이라 할 수 있다.

가장 두드러진 특징은 격자형의 트렌치 형성으로 투수능력이 확보되나, 트렌치와 트렌치 사이에 부분적인 양압력 증가 현상이 발생하는 단점이 있

으며, 트렌치 과다 굴착에 따른 부분적인 지반 지지력 저하도 우려된다. 또한 별도의 유도 배수시스템 및 유지관리가 필요하며 일반적인 토사지반에 적합한 공법이라 할 수 있다.

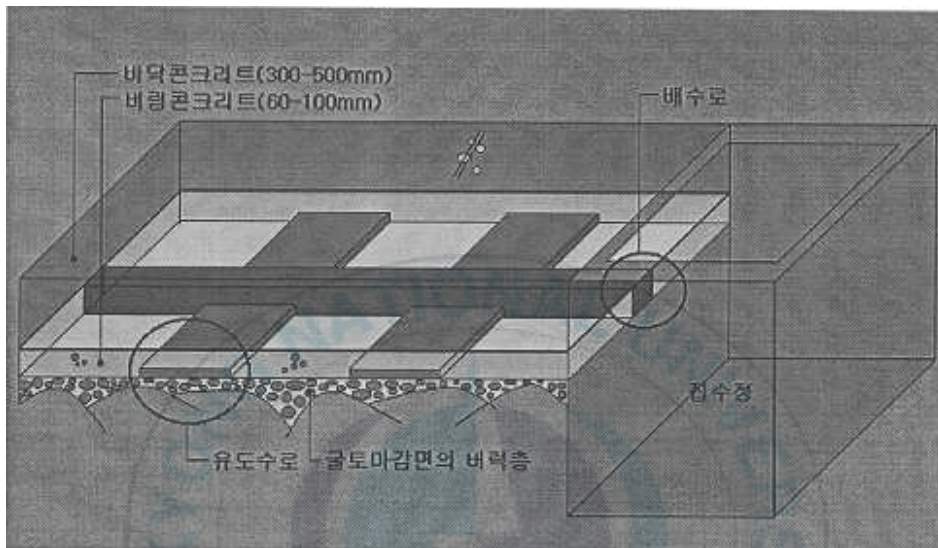


그림 3.1 드레인 매트 영구배수공법의 개념도

3.3 영구앵커를 이용한 수압대응공법

3.3.1 공법개요

지반앵커공법은 구조물에서의 인장, 전도, 활동, 동하중 등 하중의 불균형에 관련된 문제점 등을 해결하기 위해 천공장비에 의한 천공작업 후 공장에서 제작된 앵커체를 현장에 반입, 삽입 및 그라우팅작업 실시, 기초콘크리트 타설 양생 후 인장작업에 의해 안정성을 확보하는 공법이다.

요즘은 기존 영구앵커의 취약점이었던 방수, 차수기능을 극대화하여 앵커의 내구성을 극대화시키고 유지관리가 가능토록 한 재인장형 이중부식방지형 영구앵커공법까지 도입되어 많은 발전과 개발을 거듭하고 있다.



그림 3.2 방식 처리

: 자유장과 정착장의 분리지점에 Strand를 Bulbing하여 방수용 실리콘을 주입한 후 P.E Hose를 열수축 튜브로 압착시켜 방수 처리하여야 함.

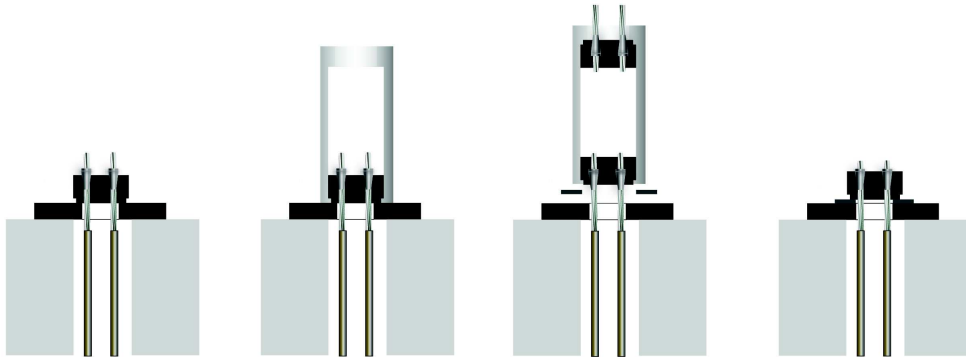


그림 3.3 재인장 시스템 개념도

: 초기 인장력 저하나 유지관리를 위해 재인장이 필요할 때 그림 3.3과 같은 순서로 재인장하여 소요 인장력이 발현되도록 하여야 함.

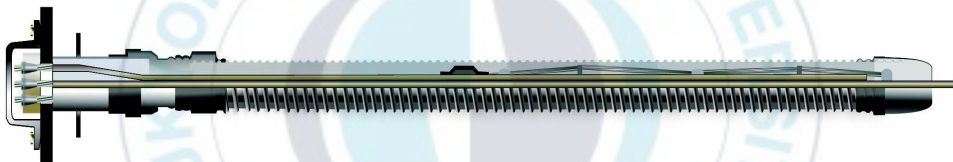


그림 3.4 이중 부식 방지형 영구앵커체

3.3.2 시공방법

(1) 공장 제작

: 원자재 구입 ⇨ 원자재 시험 ⇨ 영구앵커 조립 ⇨ 영구앵커 시험 ⇨ 현장 반입



그림 3.5 강선삽입기(별빙머신)



그림 3.6 자유장 별빙 그리싱 처리 전경



그림 3.7 수밀성 시험 현황 전경



그림 3.8 자유장 열수축 시트 처리 전경



그림 3.9 자유장 부위 에폭시 방수 작업 전경



그림 3.10 Nose Cone 연결부위 단면 상세

(2) 현장 시공

: 측량 및 준비 ⇨ 천공장비 투입 ⇨ 천공위치 확인 ⇨ 천공 작업 ⇨
천공심도 확인 ⇨ 앵커채 설치 ⇨ 그라우팅 ⇨ 인장 및 마감



그림 3.11 천공 작업 전경



그림 3.12 그라우팅 작업 전경

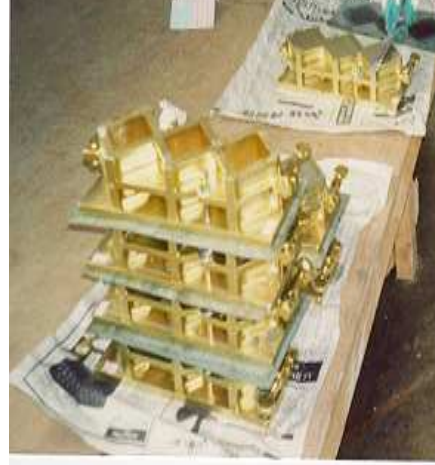


그림 3.13 그라우팅 시험 장비

: 그라우팅 시험을 위한 FLOW CONE 및 사각 MOULD FLOW TIME의 측정은 배합 후 15분 후에 실시하여 12초에서 21초 이내 이어야 하며, 팽창성 및 블리딩 시험은 직경 10cm, 높이 10cm의 Plexiglass 용기를 사용하여 시험한다.

3.3.3 앵커방식 및 설계

영구앵커는 시공 전 설계에 관한 다음 사항들에 대한 상세한 계획을 수립하여 이행하여야 하며, 지반조건이 현저히 다르거나 설계에 적용한 주변마찰력이 적절치 못한 경우 면밀히 재검토하여 이를 설계에 반영하여야 한다.

① 소요강선(Strand)의 산정근거

② 자유장 및 정착장 산정근거

③ 설계 인장력의 유지 계획

(인장력 감소를 고려한 초기 인장력 산정, 재인장 가능성여부)

④ 지압판의 규격 및 산정근거

⑤ 보강철근의 규격

⑥ 유지관리를 위한 재인장형 정착구 제원

(1) 자재

1) 인장재(Strand)

: 냉간 인발 가공된 7연선 Wire Relaxation Strand로 KS D 7002 SWPC7B 사양에 의한다.

표 3.1 인장재의 규격

구 분	12.7mm(0.5")	15.2mm(0.6")
공 칭 직 경	12.7mm	15.2mm
공 칭 단 면 적	98.7mm ²	138.7mm ²
공 칭 중 량	0.774kg/m	1.101kg/m
최 소 파 괴 하 중	18,700kg	26,600kg
0.2% 영구신율에 의한 최소항복하중	15,900kg	22,600kg
70% 초기 하중에서 20℃, 1,000시간 후 릴렉세이션	2.5%이하	2.5%이하

2) 덕 트

: 덕트는 경질P.E 파형관으로 t=2.5mm 이상으로 이음사용이 없도록 하여야 한다.

3) Nose Cone

: Nose Cone은 t=2.0mm의 강판을 압축시킨 재료이어야 하며 파상형 주름관과 이음이 용이하도록 파상형으로 가공되어야 한다. Nose Cone 과 Duct의 연결은 Epoxy로 충전 후 열수축 튜브(Raychem)로 압착시켜 지하수의 유입을 완전 방지할 수 있도록 하여야 한다.

4) Grout Hose

: Grout Hose는 최대 20Bar의 압력에 견딜 수 있는 P.E Hose 이어야 하며, 12/17mm 또는 16/21mm의 규격을 사용한다.

5) 자유장 피복 P.E Hose

: 각 Strand의 자유장에 피복되는 호스는 P.E Hose 이어야 하며, 규격은 14.5/16.5mm 이다. Strand와 P.E Hose 사이에 Grease를 충분히 충전시킬 수 있는 여유를 가져야 한다. 자유장과 정착장의 분리 지점에 Strand를 설치하여 방수용 실리콘을 주입한 후 P.E Hose를 열수축 튜브(Raychem)로 압착시켜 방수 처리 하여야 한다.

6) Anchor Head

: Anchor Head는 순수한 열연강을 사용, 제작하여야 하며 향후 유지 관리가 가능한 재인장형 정착구를 사용하여야 하며, Head소재는 국립화학연구소의 품질시험 또는 국제적으로 공인된 제품을 사용하여야 한다.

7) Bearing Plate 및 보강철근

: Bearing Plate는 콘크리트 28일 강도에 맞게 구조 검토되어야 한다. 스파이럴 보강철근은 SD30을 사용한다.

8) Wedge

: Wedge는 영구앵커의 핵심소재로서 도입된 앵커력을 발휘하는 역할을 담당하므로 원활한 정착력의 분배와 영구적인 정착 효과를 발휘하는 부분임으로 다음 2가지 사항에 대한 안전성이 공인기관을 통해 검증되어야 한다.

① 금속 시편 재질시험

② 피로시험

9) Sleeve Coupler

: 영구앵커공법에서 Sleeve의 연결은 구조체의 방수에 직접적인 영향을 미치는 부분이므로 Sleeve는 열수축 튜브를 이용하여 앵커체와 완전히 일체식으로 연결되어야 하며, $t=2.0\text{mm}$ 이상의 Mild Steel을 이용하여

파상형으로 제작되어 덕트와의 연결이 용이하여야 한다.

10) 그라우트(Grout)

: 그라우트는 보통포틀랜드시멘트, 물, 혼화제로 구성되고 W/C비는 매우 중요하므로 세심한 주의가 필요하며 다음 사항을 만족 시킬 수 있도록 하여야 한다.

- ① 블리딩 : 최대 4%이내, 24시간 0%
- ② 압축강도 : 7일강도 170kg/cm^2 이상
28일강도 250kg/cm^2 이상
- ③ 물시멘트비 : 45%이하

(2) 장비

1) 그라우트믹서

- ① 믹서는 혼합조, 주입조, 저장조 및 수조로 분리되어 있어 배합설계에 의한 배합을 항시 확인할 수 있어야 한다.
- ② 믹서는 혼합과 주입을 동시에 할 수 있어야 하며, 그라우트가 종료 될 때까지 연속적으로 주입이 이루어 질수 있어야 한다.
- ③ 펌프는 평균 주입압력 7Bar, 최대 주입압력 20Bar를 낼 수 있어야 하며, 검측된 압력계가 부착되어 있어야 한다.

2) 인장 Jack

- ① Jack은 Center-Hole 타입의 내부마찰이 적고 가벼우며 작동이 간편한 것이어야 한다.
- ② Jack은 자동 물림 장치(Self Gripping Assembly)와 잭 체어(Jack Chair)가 부착되어 있어야 한다.
- ③ Jack의 Max, Pull Capacity가 소요인장력 이상 규격의 장비를 사용 하여야 한다.
- ④ Jack 압력계는 정기적으로 국가공인 기관에서 검정시험을 하여야 하

며 시험 결과가 첨부되어야 한다.

3.3.4 영구앵커의 작업

(1) 천공

- 1) 천공직경은 영구앵커 조립체 DIA+2.5cm 이상을 확보하여 앵커체에 걸리는 Stress가 지반에 충분히 전달될 수 있도록 하여야 한다.
- 2) 천공보고서는 앵커공 각각에 대하여 작성하고 설계주상도와 비교하여 정착장의 신뢰도 및 Pulling-Out에 대한 신뢰도가 확인되어야 한다.
- 3) 천공 후 일정시간까지(Anchor체 삽입에서 Grouting까지) 천공 벽면이 교란되지 않도록 필요한 조치를 취한다.
- 4) 천공장비는 자주식 천공장비로서 Crawler Drill 또는 MINI T-4 등을 사용한다.
- 5) 소요 천공 깊이보다 약 0.5m 더 천공하여 천공 면으로부터 교란된 이물질이 낙하되어도 소요 천공 깊이에 지장이 없도록 한다.

(2) 영구앵커 공장조립

- 1) 영구 앵커체는 품질확보를 위해 공장조립을 원칙으로 하며 부득이한 경우 현장에 청결하고 품질관리가 이루어질 수 있도록 조립라인을 설치하여야 한다. 또한 Low Relaxation Strand를 Dispenser를 이용하여 Grinder로서 Cutting한다.
- 2) Strand에 이물질의 부착을 방지하기 위하여 청결한 조립대 위에서 조립하여야 하며, Bulbing Greasing기를 사용하여 자유장 구간에 7-Wire Strand를 벌려서 Greasing하며 이때 일정한 주입압을 유지토록 하여 각 강선과 P.E Hose내에 그리스가 충분히 충전될 수 있도록 하여야 한다.
- 3) Greasing 되어진 각기 Strand를 P.E Hose에 삽입하고, Strand의 자유장과 정착장으로 분리되는 지점 각각을 방수용 실리콘 처리 후 열수축 테이프를 이용하여 압착시킨다.

4) 소요 개수 만큼의 Strand를 Spacer 및 Clamp를 이용하여 조립하고, 이 때 Nose-Cone($T=2.0\text{mm}$)과 Duct를 Epoxy로 충전시켜 연결 후 열수축 쉬트(Heat Shrinkage Sleeve)로 압착시켜 지하수의 유입을 차단할 수 있도록 한다.

5) Sleeve Coupler 연결

: 영구앵커공법에서 Sleeve 연결은 구조체의 방수에 직접적인 영향을 미치는 부분으로 Sleeve가 영구 앵커체와 완전히 일체식으로 연결될 수 있도록 Sleeve Coupler를 이용, 열수축 쉬트로 압착시켜 지하수 유입을 차단할 수 있도록 한다. 또한 제작된 영구 앵커체는 공압시험 등 관련시험을 통하여 그 수밀성이 확인되어야 한다.

(3) 영구앵커체 설치

: 앵커체는 인력이나 장비를 이용하여 삽입하고, 삽입시 앵커체 위치가 천공 Hole의 중앙에 위치하도록 한다.

(4) Grouting

: 내부 및 외부 그라우트 호스를 통해 Grouting을 실시하여 천공 홀 하부로부터 그라우트가 충전될 수 있도록 한다.

(5) Sleeve 거치 및 철근보강

1) Sleeve는 Metal Sleeve로서 지중보 내에 설치하여 Anchor Body가 관통될 수 있도록 하며, Sleeve Coupler 와 연결 후 Sealing 하고 열수축 테이프로 압착하여 지하수의 유입을 완전히 차단할 수 있도록 한다.

2) Sleeve의 외부에 차수판을 설치하여 Seepage-Line을 증대시켜 지하수의 유입을 방지하여야 한다.

3) 지중보에 작용하는 집중하중(Anchor Force)에 대응할 수 있도록 보강 철근 등으로 보강한다.

(6) 기초 콘크리트 타설

: M/S Sleeve의 수직도를 유지할 수 있도록 조치한 후 콘크리트를 타설한다. 이때 앵커 정착구 설치를 위한 블랙아웃 폼을 설치하여 위치를 확인하여야 한다.

(7) 2차 Grouting

: 기초 콘크리트에 설치된 Sleeve와 앵커체 사이의 공극에 그라우트를 주입하여 충전 시킨다. 또한 Corr. P.E Duct와 피복 되어진 Strand 사이의 공극에 그라우트를 주입하여 밀실하게 충전 시켜야 한다.

(8) 지압판 설치

: 지중보 콘크리트의 완전 양생 후 지압판을 설치한다. 그리고 지압판 하부에 Sealing Pad를 설치한다.

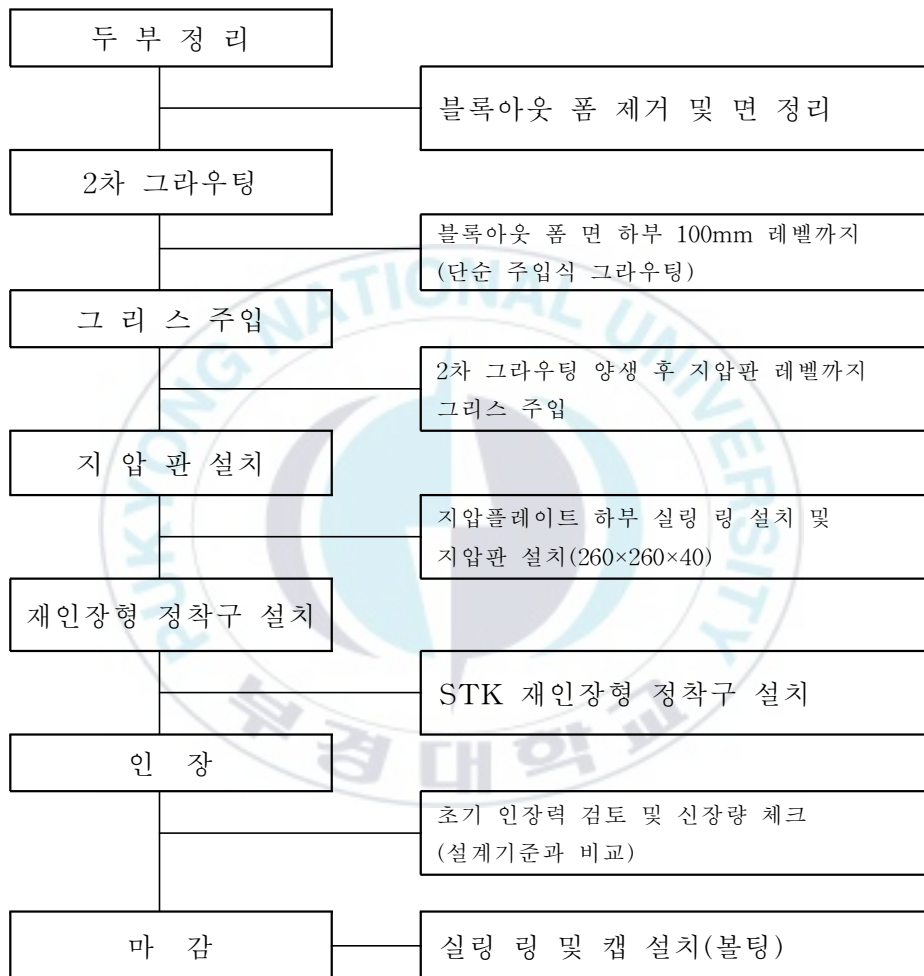
(9) 인장작업

: 영구앵커 시공이 완료되고 그라우트가 충분히 양생되고 후 인장계획서에 의거 인장을 실시하여야 하나, 다음과 같은 사항이 검토 되어야 한다.

- ① 신장량 계산서
- ② 정착구 및 인장 장비 제원
- ③ 앵커력 손실을 고려한 초기 인장력 계산 근거
- ④ 재인장 계획도

(10) 인장계획서

1) 인장작업 순서도



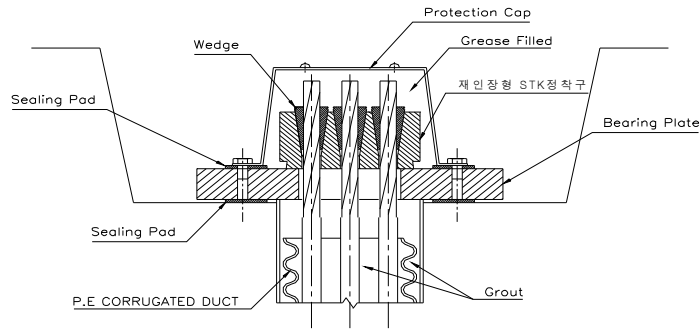


그림 3.14 작업 상세도

표 3.2 인장 작업 관리 기준

구 분	세 부	항 목	비 고
준 비	인장 계획서	인장 계획서	
	정착장치 응력 손실 계산근거	구조 계산서	
	인장재의 Relaxation 손실 계산근거	구조 계산서	
	creep손실 계산근거	구조 계산서	
	지압판 계산근거	구조 계산서	
	자재 시험성적서	시험 성적서	
	재인장형 정착구 상세도	특허 사용 협약서 및 상세도면	
	재인장 계획서	유지 관리 계획서	
장 비	Center-Hole 방식여부	장비 제원표	
	자동물림장치 여부		
	시험성적서	시험 성적서	
	Jack Max. Pull capacity	장비 제원표	
	Pump 제원		
작 업	1차 인장	손실을 고려한 초기 응력 도입	
	2차 인장	인장력 보유능력 확인시험 (응력손실 확인, 구조계산서와 비교)	필요 시

2) 인장 작업 순서 및 방법

① 2차 그라우팅 작업

Sleeve내부 Grouting으로 Sleeve상단-10cm 레벨까지 Grouting을 한다(Strand 휨에 대한 허용 공간 확보).

② 그리스 주입

2차 그라우팅 레벨에서 슬리브 상단까지의 공간에 그리스를 주입 하여 Strand를 방식처리 한다.

③ 지압판 (Bearing plate) 설치

기초 콘크리트 양생 후 상단부분과 B/P와의 접촉면이 고르지 않을 시는 면고르기 실시 후 지압판을 설치하며 이때 지압판 하부에 실링 링을 설치한다.

④ 강선 피복 절취 및 강선 절단

강선피복은 B/P 두께(45m/m)내에서 절취 후 강선을 인장에 필요한 길이(=700m/m)로 절단한다.

⑤ Head 및 Wedge 거치

⑥ 인장 작업

㉠ 인장기 거치공

- 강선배열을 인장기 배열과 같이 조정한다.
- 인장기를 들어 강선을 인장기에 삽입한다.
- Gripper 손잡이를 1-2회 들어주어 강선과 Grip Bar가 엇물리지 않게 한다.

㉔ 유압기 레버 조작공

- 잠금 레버를 돌려 유압을 통제한다.
- 가압 레버를 사용하여 50Bar까지 승압하여 강선을 정렬(Alignment 하중)한다.
- 다시 잠금 레버를 돌려 유압을 통제한 후 100Bar씩 단계적으로 규정된 하중까지 재하 한다.

⑦ 신장량 측정

- ㉔ 강선이 인장기에 삽입되어 가압준비가 완료되면 신장량 측정공은 강선의 늘음량 측정자를 인장기 상단에 댄다.
- ㉔ 유압기 레버공이 일정량씩 가압시마다 강선의 늘음량을 측정 기록 한다.

⑧ 강선 절단

- ㉔ 인장작업이 종료되면 Head와 Wedge의 정착상태를 확인한다.
- ㉔ Hand Grinder를 이용하여 Head 상단부위로부터 2.5~3cm 상단부위를 절단한다.

⑨ Grease 주입

- ㉔ Protection Cap안에 Grease를 채운 후 Bearing Plate에 보호캡을 설치한다.
- ㉔ Grease 주입기를 이용하여 Cap 상단부 2개의 Hole 중 한 곳에 그리스를 주입한다.

3) 구조 계산서

① 초기 인장력 검토

㉠ 앵커 제원

표 3.3 OO현장 앵커 제원표

구 분	설계하중	자유장	정착장	여유장	총길이	비 고
A-TYPE	80 ton	15.0 m	6.0 m	1.0 m	22.0 m	BH-4 적용
B-TYPE	80 ton	14.0 m	6.0 m	1.0 m	21.0 m	BH-25 적용
C-TYPE	80 ton	12.0 m	6.0 m	1.0 m	19.0 m	BH-24 적용

㉡ 앵커의 응력손실을 고려한 초기인장력 검토

(1) Wedge draw-in 에 의한 응력 손실

[A - TYPE (Lf = 15.0m)]

$$\Delta P_s = \frac{\Delta l \times A \times E}{L_f} = \frac{0.6 \times 2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8}{15.0 \times 100} = 6,317 \text{ kg} = 6.32 \text{ ton}$$

[B - TYPE (Lf = 14.0m)]

$$\Delta P_s = \frac{\Delta l \times A \times E}{L_f} = \frac{0.6 \times 2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8}{14.0 \times 100} = 6,768 \text{ kg} = 6.77 \text{ ton}$$

[C - TYPE (Lf = 12.0m)]

$$\Delta P_s = \frac{\Delta l \times A \times E}{L_f} = \frac{0.6 \times 2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8}{12.0 \times 100} = 7,897 \text{ kg} = 7.90 \text{ ton}$$

(2) Jacking Force Check (Relaxation, Creep 등 손실량 Max. 5.0%)

$$\text{Max. } P_j = 0.75 \times P_u \times n = 0.75 \times 18.7 \times 8 = 112.2 \text{ ton}$$

$$\text{try } P_j = 93.0 \text{ ton}$$

$$* \text{ A-TYPE : } P_j = (1-0.05) \times (93.0-6.32) = 82.35 \text{ ton} > 80 \text{ ton} \quad \text{O.K}$$

$$* \text{ B-TYPE : } P_j = (1-0.05) \times (93.0-6.77) = 81.92 \text{ ton} > 80 \text{ ton} \quad \text{O.K}$$

$$* \text{ C-TYPE : } P_j = (1-0.05) \times (93.0-7.90) = 80.85 \text{ ton} > 80 \text{ ton} \quad \text{O.K}$$

따라서, 초기 인장력 $P_j = 93.0 \text{ ton}$ 적용

㉔ 기초의 지지력을 고려한 초기 인장력 검토

- 기초지반의 지지력 추정

영구앵커 인장력이 도입되는 기초지반의 위치는 굴착심도 G.L-10.0m 위치이며 이 때 지반 조건은 실트질 모래로 표준관입시험 결과 평균 N 치는 25정도로 나타난다.

N = 25 인 지반의 허용 지지력은 지지력표를 이용하여 추정하면

$$\text{안전율 2.0을 적용할 때 Max. } q_a = 52.0 \text{ ton/m}^2,$$

$$\text{안전율 3.0을 적용할 때 Max. } q_a = 36.0 \text{ ton/m}^2$$

또한 앵커의 인장력 작용에 따른 기초의 접지면적은 기초 슬래브 두께 500mm를 적용하면, $\text{Min. } A = 1.28 \times 1.28 = 1.64\text{m}^2$ 이 때, 기초의 허용지지력 $Q_a = 1.64 \times 36 = 59.04 \text{ ton/m}^2$ 가 된다.

표 3.4 지반상태에 따른 각종 하중 비교표

지반 의 상태	표준관입 저항치	일축압축 강도	극한 지지력 (KN/m ²)		허용 지지력 (KN/m ²)			
					안전율 3.0		안전율 2.0	
			직사각형 기초	연속기초	직사각형 기초	연속기초	직사각형 기초	연속기초
매우 연약	< 2	< 25	< 92	< 71	< 30	< 22	< 45	< 32
연 약	2~4	25~50	92~185	71~142	30~60	22~45	45~90	32~65
중 간	4~8	50~100	185~370	142~285	60~120	45~90	90~180	65~130
강 성	8~15	100~200	370~740	285~570	120~240	90~180	180~360	130~260
매우 강성	15~30	200~400	740~1480	570~1140	240~480	180~360	360~720	260~520
경 성	> 30	> 400	> 1480	> 1140	> 480	> 360	> 720	> 520

표 : 점성토 지반에서의 표준관입 저항치에 의한 허용지지력(Terzaghi & Peck)

- 기초지반의 허용 지지력을 고려한 초기 인장력 검토

기초의 허용지지력을 고려하여 2항의 초기인장력 $P_j = 93.0 \text{ ton}$ 을 적용할 경우 초기 앵커 인장력 재하 단계에서 배수가 이루어지고 있고 이 때 지하수에 의한 수압 작용이 배제되고 있는 상황이므로 순수 지반의 지지력에 의해 앵커의 도입하중을 저항하게 된다. 따라서 앵커의 인장력 재하단계에서는 초기인장력 $P_j=93\text{ton}$ 재하시 기초의 침하량이 허용 침하량을 초과할 수 있고, 이로 인한 기초지반의 파괴 등이 우려되며 또한 인접되어 설치되는 깊은 기초(지지력 90ton/본)에 의해 억제 되므로 기초 슬래브의 경계부분에 전단력이 작용케 되므로 기초의 전단파괴 및 앵커 정착부의 Punching 파괴의 가능성을 내포하게 된다.

따라서 기초 구조물의 전단력 발생을 억제하는 앵커의 초기 인장력은 기초지반의 침하량이 허용치 이내로 제한되는 $P_j = 59.04\text{ton}$ 이내로 제한 할 필요가 있다.

- ㉔ 초기 인장력에 따른 앵커의 늘임량 검토

- $P_j = 93.0 \text{ ton}$ 적용시

$$\text{Max. } \Delta \ell = \frac{P_j \times L_f}{E \times A}$$

[A - TYPE]

$$\text{Max. } \Delta \ell = \frac{95.0 \times 1000 \times 15.0 \times 100}{2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8} = 8.83 \text{ cm}$$

[B - TYPE]

$$\text{Max. } \Delta \ell = \frac{95.0 \times 1000 \times 14.0 \times 100}{2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8} = 8.42 \text{ cm}$$

[C - TYPE]

$$\text{Max. } \Delta \ell = \frac{95.0 \times 1000 \times 12.0 \times 100}{2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8} = 7.22 \text{ cm}$$

- 구조물 허용변위 1.0 inch를 기준으로 한 인장력 검토

$$\text{Max. } \Delta \ell = \frac{P_j \times L_f}{E \times A}$$

에서 $\text{Max. } \Delta \ell \leq 2.54 \text{ cm}$

$$P_j = \frac{\text{Max. } \Delta \ell \times E \times A}{L_f}$$

[A - TYPE]

$$P_j = \frac{2.54 \times 2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8}{(15.0 \times 100) \times 0.9} = 29.72 \text{ ton}$$

[B - TYPE]

$$P_j = \frac{2.54 \times 2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8}{(14.0 \times 100) \times 0.9} = 31.84 \text{ ton}$$

[C - TYPE]

$$P_j = \frac{2.54 \times 2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8}{(12.0 \times 100) \times 0.9} = 37.14 \text{ ton}$$

따라서 지반 지지력을 고려하여 앵커의 초기인장력 $P_j = 60\text{ton/공}$ 을 적용한다.

- 앵커의 응력 손실을 고려한 잔류 응력 검토

Jacking Force Check (Relaxation, Creep 등 손실량 Max. 5.0%)

try $P_j = 60.0 \text{ ton}$

* A-TYPE : $P_j = (1-0.05) \times (60.0-6.32) = 51.00\text{ton} > 80 - 29.72 = 50.28\text{ton}$ O.K

* B-TYPE : $P_j = (1-0.05) \times (60.0-6.77) = 50.57\text{ton} > 80 - 31.84 = 48.16\text{ton}$ O.K

* C-TYPE : $P_j = (1-0.05) \times (60.0-7.90) = 49.50\text{ton} > 80 - 37.14 = 42.86\text{ton}$ O.K

② 신장량 계산

(1) $P_j = 60$ ton 적용

$$\text{Min. } \Delta \ell = \frac{P_j \times 0.9 L_f + (P_j \times L_j)}{E \times A}$$

$$\text{Max. } \Delta \ell = \frac{(P_j \times L_f + 0.5 L_b) + (P_j \times L_j)}{E \times A}$$

[A - TYPE]

$$\text{Min. } \Delta \ell = \frac{(60 \times 1000 \times 0.9 \times 15.0 \times 1000) + (60 \times 1000 \times 0.69 \times 1000)}{2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8} = 53.9 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } \Delta \ell = \frac{(60 \times 1000 \times (15.0 + 0.5 \times 6.0) \times 1000) + (60 \times 1000 \times 0.69 \times 1000)}{2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8} = 71.0 \text{ mm}$$

[B - TYPE]

$$\text{Min. } \Delta \ell = \frac{(60 \times 1000 \times 0.9 \times 14.0 \times 1000) + (60 \times 1000 \times 0.69 \times 1000)}{2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8} = 50.48 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } \Delta \ell = \frac{(60 \times 1000 \times (14.0 + 0.5 \times 6.0) \times 1000) + (60 \times 1000 \times 0.69 \times 1000)}{2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8} = 67.20 \text{ mm}$$

[C - TYPE]

$$\text{Min. } \Delta \ell = \frac{(60 \times 1000 \times 0.9 \times 12.0 \times 1000) + (60 \times 1000 \times 0.69 \times 1000)}{2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8} = 43.65 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } \Delta \ell = \frac{(60 \times 1000 \times (12.0 + 0.5 \times 6.0) \times 1000) + (60 \times 1000 \times 0.69 \times 1000)}{2.0 \times 106 \times 0.9871 \times 8} = 59.60 \text{ mm}$$

3.3.3 적용조건

- ① 기초 바닥면 아래 지질층과 관련 없이 시공 가능
- ② 지하수위가 높으면 구조계산에 의거 앵커체의 인장강도 증대 가능

3.3.4 적용지반

: 지질층에 제약이 없음

3.3.5 장.단점

- ① 마찰형 앵커로 하중 보유능력이 좋다.
- ② 재인장이 가능하므로 유지관리가 용이하다.
- ③ 부식 방지 처리가 가능하고 방수처리가 되어 최적의 품질 확보가 가능하다.
- ④ 하중 적용 범위가 다양하여 여타한 건축구조물에 적용이 가능하다.
(30ton~210ton)
- ⑤ 최근에는 국내개발 앵커체의 출현으로 비용절감이 가능하다.
- ⑥ 앵커체의 현장제작이 어렵다.
- ⑦ 지반조건에 따라 건물하중을 지지할 수 있는 별도의 기초 공법이 필요하다.

3.3.6 적용효과

영구앵커를 이용한 수압대응공법은 구조물에서 발생하는 인장력, 활동력, 전도, 동하중 등 제반 하중의 문제점을 해결하기 위해 지반에 Prestress를 도입하여 안정성을 확보하기 위한 공법으로 최근에 도심지 지하심도가 깊어지는 건축물 공사에서 가장 유용하게 쓰이는 공법이다.

1970년대 이후에는 기존 영구앵커공법의 취약점이었던 방수, 차수기능을 극대화하여 앵커의 내구성을 극대화 시켰으며, 유지관리가 가능토록 한 재

인장형 이중부식 방지형 영구앵커공법의 출현으로 영구앵커를 이용한 수압 대응 공법의 발전을 거듭하여 왔다.

여러 가지의 수압대응공법들이 출현해 지하건축에 많이 사용되어지고 있지만, 근본적이고 합리적인 공법을 찾기란 어려운 실정이다.

따라서 건축물의 성격과 지하층 주위의 토질의 성질 등에 융합하여 최적의 공법이 정해져야 하며, 이를 토대로 경제성, 시공성, 안정성 등을 조합, 검토 및 분석하여 최적의 공법을 적용하여야 한다.



3.4 수압대응공법의 일반적 비교

앞에서의 각종 수압대응공법에 대한 고찰결과를 정리하여 나타내면 다음 표 3.5와 같다.

표 3.5 수압대응공법의 일반적 비교

구 분	사하중 증가 방법	차수 및 배수 병용	강제 배수 공법	영구 앵커 공법
개 요	Mass Con'c 또는 이중 슬래브 내부에 자갈, 잡석 등을 채워 구조물의 자중을 증가시키는 방법.	지반의 불투수층까지 차수벽을 설치하여 지하수의 흐름을 차단하고 부지내 유입 지하수에 대하여 소규모 강제 배수를 통하여 기초에 작용하는 수압을 제거하는 방법	강제 배수로 지하수위를 저하시켜 기초에 작용하는 수압을 제거시키는 방법. Dewatering, Deep well system	구조물의 자중을 증가시키는 방법과 동일한 개념으로 지반에 영구앵커를 설치하여 구조물의 자중에 해당하는 Prestress를 도입함으로써 작용 수압에 대응토록 하는 공법
특 정	지하공간 개발 초기에 이용된 공법으로 굴착심도가 낮은 경우 유리하며 주로 소규모 구조물에 적용.	이론적으로 가장 합리적인 공법이나 기반암의 정확한 투수특성 규명이 어렵고 차수벽 설치에 따른 공사비가 고가인 관계로 근래는 거의 적용안함.	수압 발생의 원인이 되는 지하수위를 강제 배수를 통하여 제거하므로 유리한 점이 많아 1980년대에 주로 적용되었으나 근래 지하수위 저하에 따른 민원 및 지하 환경 훼손으로 점차 적용이 줄고 있는 경향	1980년대 이후 국내 적용되기 시작하였으며 부력에 대한 저항효과 가장 확실한 환경 친화적 공법으로 90년대 이후 널리 적용
장 점	-굴착 심도가 낮은 소규모 굴착공사에 유리 -수압 대응 효과 확실 -구조물 방수에 유리	-슬러리 월을 이용한 top-down 공법 등에서는 경제적. -이론적으로 가장 합리적인 공법	-수압을 제거하므로 지하 구조물 방수에 유리. -배수된 지하수를 정수하여 재사용이 가능 (정수시설 필요) -정밀 검토시 지하 구조물 단면 감소	-부력대응 효과 외에 동하중 및 내진 저항성이 뛰어나다. -적용후 유지관리 불필요 -지반 생태계를 변화시키지 않는 환경친화적 공법
단 점	-굴착심도가 깊을 경우 적용 불가능 -굴착심도 깊어질수록 경제성 떨어짐	-차수벽 설치에 따른 비용이 고가. -지하수위 변화로 지반침하 및 지하 생태계 변화로 인한 민원 발생 -배수관이 막힐 경우 대책마련이 불가 -기반암의 정확한 투수특성 분석이 현실적으로 불가능.	-인접지반의 지하수위를 저하로 지반침하 및 민원 발생. -배수 시스템에 대한 유지관리 필요 -지하생태계 변화로 환경문제 발생 -배수관이 막힐 경우 보수 보강대책이 없다. -비상시에 대비한 발전 설비 필요	-초기 공사비 증가 -엄격한 품질관리 및 정밀 시공 요구
경제성	추가 굴착비 + Mass Con'c 타설비	차수벽 설치비 + 배수 시스템 설치비 + 민원 처리비	배수 시스템 설치비용 + 준공후 유지관리비 + 민원처리비	영구앵커 설치비
적용 예	150%	150%	100%	120%
		여의도 럭키그룹 사옥	분당 터미널 외.	포스코 사옥, 서울지하철6호선 외 다수
흐름	1970년대 지하공간 개발 초기에 이용	강제 배수 공법에 대한 지반침하, 지하 생태계 파괴등 문제점을 최소화 하기위해 일부 시도 되었던 공법	영구앵커공법이 발달하지 못하고 지반 환경에 대한 이해가 부족했던 1980년대 주로 이용	1990년대 이후 주로 적용되는 환경 친화적 공법

3.5 사례적용 결과 분석 및 고찰

3.5.1 결과 분석 및 고찰

최근 도심지의 지가상승, 산업화에 따른 토지의 효율적 이용, 지하수의 흐름 이론 등을 분석 및 고찰해 본 결과, 수압대응공법에는 여러 가지의 사례에도 불구하고 아직까지 경제적인 요인으로 인한 저가 공법 채택, 사전 지반 조사 미비 등으로 설계 오류, 급격한 지하수위 변동에 능동적으로 대처하지 못하여 건물의 수해 피해 등 인재로 인한 부실 사례가 적지 않음을 알 수 있었다.

또한 지하수 유입에 따른 피해에 적극적으로 대처하지 못하여 주먹구구식의 땀질 처방에 건축물의 내구연한 단축, 이에 따른 유지관리비의 상승, 상향수압의 이동에 따른 지반지지력 저하 등 많은 문제점을 야기하고 있으며, 건축물의 안정을 고려하여 추가적인 수압대응공법에 대한 검토 및 반영 여부 등 별도의 비용이 반영되고 있는 실정이다.

따라서 이와 같은 문제점을 사전에 예방하고 지하공간의 활용이 극대화되고 있는 요즘 지하 굴착시 필연적으로 대두되는 양압력 처리방법을 매스콘 크리트를 이용한 수압대응공법, 수리이론에 근거한 건축시공공법, 그리고 영구앵커를 이용한 수압대응공법 등을 설계단계와 시공단계에서부터 재검토, 완벽한 수압대응공법을 도출하고자 기존 현장의 적용 사례를 중심으로 안정성, 시공성, 경제성 등을 종합적으로 검토하여 이를 VE 검토를 통하여 그 대안을 정량화하기 위하여 매트릭스 평가법을 이용한 최적의 수압대응공법을 선정하고자 하였다.

3.5.2 VE기법에 의한 대안(代案) 선정

일반적인 관리 기법에서 여러 가지 안(案) 중에서 최적안을 선정하는 방법의 하나로 VE기법이 활용된다. 건설공사에서 최적안 선정기법의 목적은 경제적인 측면뿐만 아니라 결정하고자 하는 대상의 전체적인 측면에서 종합적으로 판단하여 최종적으로 가장 적절한 VE대안을 선정하는 있다. 이 때 발주자·사용자 요구측정 단계에서 작성된 품질모델과 기능분석 단계에서 작성된 FAST 다이어그램 등을 참고로 하여 대안이 이에 부합하는지를 판단하여야 한다. VE에서의 최적안 선정기법에는 가장 일반적으로 사용되는 매트릭스 평가법이 있는데 본 연구에서는 이러한 매트릭스 평가법을 통해서 최적안 선정과정을 진행하였다.

1) 매트릭스 평가법

매트릭스 평가법은 각 대안에 대해서 대안이 실행되었을 때 영향을 받을 평가항목을 결정하고 영향도에 대해 점수를 매긴다. 점수의 범위는 가장 빈약한 것은 1점에서 가장 좋은 영향을 주는 대안에 5점을 부여하는 방식으로 평가한 각 대안의 합계점수를 구해서 가장 점수가 높은 대안을 최적안으로 한다. 평가항목으로는 대안이 평가항목에 주는 영향도를 고려하여 결정한다.

매트릭스 평가법의 변형인 가중치 부여 매트릭스 평가법은 특정 공정의 여러 대안 가운데서 최적안을 선정할 때 가장 널리 사용되고 있다. 매트릭스 평가법에서는 “각 평가항목의 중요도가 같다.”라는 전제가 있다. 그러나 각 항목의 중요도가 모두 같은 경우는 드문 것이므로, 이 방법에서는 각 평가항목에 가중치를 부여한다. 각 대안의 평가점수는 평가항목별 점수에 평가항목의 가중치를 곱한 점수를 합계해서 계산한다.

(1) 평가항목의 선정

최적안 선정을 하기에 앞서 우선 평가항목을 결정해야 한다(표 3.6 참조).

이 때 품질모델과 FAST 다이어그램을 참고로 하여 평가항목을 결정한다.

평가항목은 보통 5~10항목 정도이다. 그리고 각 항목은 상호 독립적이어야 한다. 만약 항목의 내용이 서로 중첩되면, 특정 항목의 가중치가 편중이 되게 된다. 예를 들면 생애주기비용과 건설사업비용이 같이 평가되면 후자는 전자의 일부이므로 후자에 과중한 수치가 부여될 수 있다.

표 3.6 평가항목 선정표 예

평가기준	평가항목
경제적 요인	건설사업비용
	운용 및 유지관리비
경제외적 요인	미적성능
	기능성
	편리성
시공성	작업성
	안전성
	유지관리 성능

(2) 최적인 선정을 위한 매트릭스 평가표 작성 절차

- ① 중요한 평가기준 항목들을 평가항목란에 나열한다.
- ② 평가항목들은 서로 쌍방으로 비교되고, 가중치 측정기준을 참고하여 「A-4」(A : 평가기준 항목, 4 : A평가항목이 비교되는 다른 평가항목보다 최상위로 중요한 경우)와 같은 형식으로 그 비교정도를 오른쪽란에 기입한다. 만약에 두 평가항목의 중요도가 동일하게 평가되었을 때에는 A/B와 같은 방법으로 표기한다.
- ③ 평가항목에 대한 점수를 합산하여 평가 합계 점수란에 기입하게 되는데, 그 점수 합산 방법은 같은 평가항목을 가진 점수를 모은 다음, 전부 더하여 계산한다.
- ④ 평가항목에 대한 가중치를 구하기 위해서 합산된 점수를 10등급으로 나눈다. 가장 높은 점수를 받은 항목을 10으로 두고 이를 기준으로 하여 남은 항목들은 비례 환산한다.

- ⑤ 평가 매트릭스에서 대각선으로 표시된 란 중 왼쪽에는 각 평가항목에 대한 대안의 평가치를 5점 척도(예 - 훌륭함 : 5, 아주 좋음 : 4, 좋음 : 3, 보통 : 2, 나쁨 : 1)를 사용하여 나타내게 된다.
- ⑥ 대각선으로 표시된 란 중 오른쪽 란에는 각 평가항목의 가중치와 대안의 평가치를 곱한 값을 기입하고 그 합계를 총점란에 기입한다.
- ⑦ 각 대안의 총점을 구한다.
- ⑧ 가장 높은 점수를 확보한 대안을 최종 대안으로 선정한다.

그림 3.15 최적인 선정을 위한 매트릭스 평가표

총점 ;

① 매스콘크리트를 이용한 수압대응공법 = 273

② 수리이론을 이용한 수압대응공법 = 229

③ 영구앵커를 이용한 수압대응공법 = 287*

영구앵커 ; 287 > 매스콘크리트 ; 273 > 수리이론 ; 229

* 최종 선정 대안명 : 영구앵커를 이용한 수압대응공법

이상과 같이 VE기법의 매트릭스평가 결과를 적용한 대안 선정을 반영하여 본 현장의 지하수압 대응 공법을 택하였다.



IV. 결 론

본 연구에서는 건축물의 지하구조부에 있어서 지하수로 인한 수압대응공법 선정에 관한 일련의 과정 분석을 대상으로 하였다. 연구 과정 및 범위는 건축물 지하구조부에 미치는 지하수압에 대한 이론적 검토 및 기존의 현장 적용 사례분석에서 나타나는 대안선정 기법까지로 하였다. 대안선정은 시공성, 경제성, 안정성 등을 종합적으로 비교 할 수 있도록 항목을 설정하고, VE기법의 매트릭스 평가법으로 분석하였다. 이러한 대안선정 과정은 지하 공간 건축에 있어서 필요한 수압대응 공법선정의 참고자료가 되도록 하였다.

연구 대상의 사례현장은 경남 김해에 소재한 RC조 다중이용 공연장시설이며, 검토 대안의 종류는 재인장형 영구앵커공법, 기존 여러 현장에 적용사례가 많은 매스콘크리트를 이용한 공법 및 수리이론에 바탕을 둔 건물전체의 수압대응공법으로 한정 하였다.

(1) 안정성

건축물의 규모나 지반의 불균질성에 대한 적응성이 뛰어나고, 하중에 대한 대응성이 좋으며, 또한 차수, 방수 기능이 강화된 영구앵커공법을 이용한 수압대응공법이 사례건물의 경우에는 안정성 측면에서 가장 유리한 것으로 평가 되었다.

(2) 시공성

영구앵커를 이용한 수압대응공법이 다른 공법과 비교하여 시공성은 좋지 않지만, 지반지지력 저하 방지, 공장제작 규격품 사용 등의 장점으로 인해 균일한 품질 확보에서 유리한 것으로 평가되었다.

(3) 경제성

영구앵커를 이용한 수압대응공법이 초기 투자비가 타 공법과 비교하여 과다하게 투입되지만, 향후 유지관리비 절감, 건물의 내구연한 증대 등 추가비용의 절감효과를 기대할 수 있는 것으로 평가 되었다.

이상의 내용에서 나타난 결과는 사례 건축물의 제반 조건에 한정된 결과이므로 이를 일반적인 기준으로 삼기에는 많은 무리가 따를 것으로 본다. 다만, 현장 조건이 유사한 경우에 검토방식이나 적용기준은 충분히 참고할 수 있을 것으로 보며 향후 더욱 많은 사례 실적 자료가 축적되어 신뢰성이 높은 공법선정 기준으로서의 도구가 개발되어야 할 것으로 본다.



참 고 문 헌

1. 장연수, 지하수흐름과 지반오염, 한국지반공학회, pp.165~169, 1992.
2. 최윤영, 지하수흐름의 유동시스템 해석, 영남대대학원, pp.254~262, 1998.
3. 홍성훈, 지하수 흐름을 고려한 압밀해석, 동아대대학원, pp.177~184, 2001.
4. 김홍석, 지하굴착지반에서의 지하수 흐름해석에 관한 신뢰성 연구, 동국대대학원, pp.1~15, 2004.
5. 정상진, 건축시공 신기술공법, 기문당, pp.68~77, 2002.
6. 건설기술네트워크, 튼튼하고 아름다운 건축시공이야기2, pp.58~65, 2001.
7. 한국콘크리트학회, 시멘트·콘크리트의 품질시험 및 품질관리, 한국콘크리트학회, pp.233~156, 2000
8. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학, pp.199~208, 2005.
9. 삼성중공업건설, 초고층 요소기술, 기문당, pp.188~196, 2002.
10. 서규우, 수리수문해석, 구미서관, pp.225~232, 2004.
11. 박영진외, 수리수문학, 성안당, pp.76~88, 2004.
12. 김형무, 건축시공학, 형설출판사, pp.72~80, 2001.
13. 신현식, 건축시공학, 문운당, pp.105~112, 2000.
14. 장기인, 건축시공학, 보성각, pp.88~98, 1998.
15. 심우갑, 지하건축공간, 시공문화사, pp.26~38, 1997.
16. 죽임아부 저, 윤지선 역, 지하공간건설공학, 구미서관, pp.107~126, 1996.

감사의 글

바쁜 현장생활과 병행하여 시작한 공부에 힘이 부쳐 몇 번이고 중단하고
픈 마음을 끝까지 다잡아 주시고, 갑작스런 서울 본사생활에도 항상 저에게
열과 성을 다하여 시종일관 지도하여 주시며, 따뜻한 인간애로 참다운 사랑
을 일깨워 주신 이수용 교수님과 이재용 교수님께 진심으로 감사의 마음을
전하고자 합니다.

아울러 심사과정 중 보다 좋은 결실을 맺게끔 유익한 조언과 격려로 본
논문을 심사해주신 임영빈 교수님, 박천석 교수님, 그리고 많은 힘과 격려
의 말씀을 해주신 류종우 교수님, 김영찬 교수님, 김기환 교수님, 신용재
교수님, 조홍정 교수님께도 진심어린 감사의 마음을 전합니다.

또한 본 논문을 완성하는데 아낌없는 협력과 성원을 보내주신 이승철 선
배님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

그리고 바쁜 학업 중에도 물심양면으로 정말 많은 도움을 준 연구실 후배
지현이, 정은이 에게도 감사의 뜻을 전합니다.

그리고 마지막으로 항상 묵묵히 보이지 않는 곳에서 나의 힘이 되어준 집
사람 지현에게도 깊은 고마움을 표하고, 머나먼 이국땅에서 아버지의 긍정
적인 모습에 늘 응원의 박수를 보내준 쌍둥이, 승현, 승진에게도 아버지의
자랑스런 모습을 보여주게 되어 매우 기쁘게 생각합니다.

마지막으로, 제가 하는 모든 일에 매진할 수 있도록 격려와 힘이 되어주
시고, 늘 무한한 사랑과 믿음을 보내주신 부모님과 회사선배 나기덕 담당
님, 그리고 여러 자료를 아낌없이 내어주신 김지호 사장님께 이 작은 결실
을 바칩니다.

2007년 1월

김 기 식