



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

연약지반의 굴착공사로 인한  
피해 구조물 복구와 가시설  
설계 방법에 대한 고찰



부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

허 진

공 학 석 사 학 위 논 문

연약지반의 굴착공사로 인한  
피해 구조물 복구와 가시설  
설계 방법에 대한 고찰

지도교수 정두희

이 논문을 석사학위논문으로 제출함.

2019년 8월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

허 진

# 이 논문을 자신의 공학석사 학위논문으로 인준함

2019년 8월 23일



주 심 공학박사 정진호 (인)

위 원 공학박사 이영대 (인)

위 원 공학박사 정두희 (인)

# <목차>

I. 서론 .....	1
1. 연구배경 및 목적 .....	1
2. 연구내용 및 방법 .....	2
II. 토류벽의 설계 이론 .....	4
1. 연성벽체에 작용하는 토압 .....	4
2. 강성벽체에 작용하는 토압 .....	7
3. NAVFAC 토압분포 .....	9
4. 국내 연구 토압분포 .....	10
5. 흙막이 벽체의 거동 이론 .....	11
6. 인접지반(구조물) 침하 요인 .....	15
7. 흙막이벽 수평변위 발생 요인 .....	15
III. 연구대상 분석 및 고찰 .....	19
1. 현장 개요 .....	19
2. 대책 공법 .....	26
3. 오피스텔 기초공법의 재설계 .....	31
4. 가시설 검토에 따른 침하량 산정 .....	40
5. 유한요소해석을 통한 침하량 산정 .....	45
6. 계층 관리 .....	50
IV. 사례분석을 통한 가시설 설계방법 검토 .....	55
1. 유사사례 현장 개요 .....	55
2. 설계 조건 .....	56

3. 이론적 침하량 산정 .....	57
4. 계측 결과 .....	58
5. 유한요소해석을 통한 침하량 산정 .....	59
V. 결 론 .....	64
참고문헌 .....	66



## <표 목차>

<표 3.1> 공내전단시험 결과 (사질토 c, $\phi$ 측정) .....	21
<표 3.2> 공내재하시험 결과 (점토 변형계수 측정) .....	22
<표 3.3> 실내토질시험 결과 (흙의 분류, 점토 c, $\phi$ 측정) .....	23
<표 3.4> 00오피스텔 기초 공법 (00구조안전기술 구조계산서 자료, 2015. 09) .....	24
<표 3.5> 대책공법 비교 .....	27
<표 3.6> 지반개량 전 원지반 물성치 .....	31
<표 3.7> 하부모래층까지 지반개량 후 지반물성치 (개량율 16.72% 적용) .....	32
<표 3.8> 지반개량 후 기초 지지력 검토 결과 .....	34
<표 3.9> 기초의 종류별 구조물의 허용침하 (MacDonald & Skempton, 1955) .....	37
<표 3.10> 구조물의 최대허용 침하량과 변위의 한계 (Sowers, 1962) .....	37
<표 3.11> 구조물 기울기에 따른 등급별 관리기준 (시설안전관리공단, 1993) .....	38
<표 3.12> 기초 침하량 및 각변위 산정 결과 .....	39
<표 3.13> 당초 지반 물성치(가시설 설계시) .....	40
<표 3.14> 지반 물성치 재산정(재조사 및 토질시험 결과) .....	40
<표 3.15> 당초 지반물성치 적용 결과 (원설계) .....	42
<표 3.16> 재산정 지반물성치 적용 결과 (원설계) .....	42
<표 3.17> 당초 지반물성치 적용 결과 (변경설계) .....	43
<표 3.18> 재산정 지반물성치 적용 결과 (변경설계) .....	43
<표 3.19> 흙막이공법 적용에 따른 구조검토 결과 비교 .....	44
<표 3.20> 지반 투수계수 적용 .....	46
<표 3.21> 유한요소해석을 통한 침하량 및 각변위 산정 결과 .....	47



<그림 3.11> 00오피스텔 검토 도면 및 모델링 단면 .....	36
<그림 3.12> 00오피스텔 기초 안정성 검토 결과 .....	38
<그림 3.13> 지반재조사 위치도(지하수위 G.L(-)0.8m ) .....	41
<그림 3.14> 00오피스텔 유한요소해석 모델링 .....	45
<그림 3.15> 굴착에 따른 지하수위 저하 경향 .....	46
<그림 3.16> 굴착에 따른 지하수위 저하를 고려한 침하량 결과 (완전연계해석) .....	47
<그림 3.17> 대상 건축물(하단동 00오피스텔) 계측 측정 현황 .....	51
<그림 3.18> 대상 건축물(하단동 00오피스텔) 보강공사 및 건물 복원 추이 .....	54
<그림 4.1> 부산 00구 00동 호텔 신축공사 .....	55
<그림 4.2> 그림 4.2 검토단면(B-B) .....	57
<그림 4.3> 최대 침하량 산정 결과그래프(Caspe 방법,32mm) .....	57
<그림 4.4> 계측 위치도(침하계) .....	58
<그림 4.5> 계측 결과그래프(침하계) .....	58
<그림 4.6> 00호텔 신축공사 유한요소해석 모델링 .....	59
<그림 4.7> 굴착에 따른 지하수위 저하를 고려한 침하량 결과 (완전연계해석) .....	61

## <사진 목차>

<사진 3.1> 부산 사하구 하단동 00 신축현장 주변 현황 .....	19
<사진 3.2> 하단동 00오피스텔 복원 전·후 기울기 상태변화 사진 .....	30

Consideration for the restoration of damaged structures  
adjacent to excavated soft ground and the method of  
designing temporary facilities

Jin, Huh

Department of Civil Engineering, The Graduate School,  
Pukyong National University

**Abstract**

Excavating works in densely populated urban areas lead to subsidence of the surrounding ground, causing considerable damage to adjacent buildings. The main causes of the subsidence of the surrounding ground include the ground characteristics, wall displacement, depth of excavation, and groundwater level change.

Especially, in coastal area of Nakdong River estuary in Busan, particulated sedimentary clay layers are deposited thickly to form soft ground, . And recently, damage cases by excavating works are frequently occurring.

Damage caused by proximity drilling may cause the loss of technical credibility and enormous economic loss due to the suspension of construction and legal action. Therefore, it is necessary to examine the design method of temporary facility, especially which is in soft ground.

Therefore, in this study, we investigated the properties of the ground structure based on the results of the reinvestigated soil surveying of site regarding to the subsidence of the building which is adjacent to the Ha-dan dong excavating work in Busan,

and compare it with the original ground conditions. Also evaluated the behavior of the surrounding ground and the stability of adjacent buildings using original method of design and Finite Element Analysis and

compared the two methods.

The accuracy of the ground survey and the design method by finite element analysis were found to be closer to reality than the traditional classical method

**Keywords** : Design of earth retaining soil, Soft ground, Settlement,



# I. 서론

## 1. 연구배경 및 목적

현대 과학기술의 발달과 더불어 컴퓨터를 이용한 설계프로그램과 건설장비, 시공공법등의 발달로 토목공사 중 사고사례는 감소하고 있지만 현재도 흠막이공사 사고는 여전히 발생하고 있다. 흠막이공사 사고의 요인은 인적, 물적등 여러 가지의 원인이 복합적으로 연관되어 발생된다. 흠막이공사 시설물은 흠을 막는 시설로 대상 물질인 흙, 즉 지반의 특성은 아직도 명확히 규명되지 않고 있다.

이러한 상태에서 도심지 굴착공사는 굴착공사시 근접된 지반침하를 발생시켜 인접 건물에 많은 피해를 줄수 있으며, 이러한 주변 지반침하의 주요원인은 지반의 물리적 특성, 가시설 재료의 변형, 굴착깊이, 그리고 굴착시 지하수의 유출로 인한 침하등을 들 수 있다. 그리고 근접 시공시 발생하는 피해는 공사중단과 법적 책임으로까지 확대되어 건설기술의 신뢰성 상실과 많은 경제적 피해까지 발생한다. 그럼에도 불구하고 대부분의 사고가 명확한 원인 규명이 되지 않고 있고 도심지에서 근접 굴착공사가 증가함에도 유사한 형태의 인접건물의 피해가 반복되는 경향이 있다.

특히, 부산지역 낙동강 하구 해안지역은 미립의 퇴적점성토층이 두껍게 퇴적되어 연약지반을 구성하고 있는 지역으로 최근 굴착공사로 인한 피해사례가 빈번히 발생하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 2017년 9월에 발생한 부산시 하단동 00오피스텔 신축현장 굴착공사로 발생한 인접 건물 지반침하와 건물 기움현상과 관련하여 연약지반에서의 근접 굴착공사시 인접구조물에 미치는 영향과 피해 구조물의 기초보강공법 및 복원상태, 그리고 연약지반의 흠막이 설계시 실제 지반거동에 보다 근접된 설계방법을 검토해 보고, 이를 통해 향후 현장에서 연약지반 근접 굴착공사에 효율적으로 기여하는 데 목적이 있다.

## 2. 연구내용 및 방법

연약지반 굴착공사로 발생된 주변지반과 인접한 건물의 침하 및 기움 발생으로 야기된 문제점을 파악하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 내용 및 방법으로 구상하였다.

I 장에서는 본 연구의 배경 및 목적을 명시하고, 연구내용 및 방법을 설명한다.

II 장에서는 본 연구에서 이론적 배경이 되는 토류벽의 설계 이론들에 대해 고찰해 본다.

III 장에서는 연약지반 굴착공사 실제 현장을 통한 기존 자료 검토, 분석 (기초보강 대책공법 및 적용 결과), 흠막이벽 구조검토(탄소성해석-GeoXD), Caspe 이론공식에 따른 주위지반 및 인접건물 침하 분석, 유한요소해석을 통한 주위지반 및 인접건물 침하 분석(GTS NX), 계측관리 결과 분석을 제시한다.

IV 장에서는 유사한 현장의 계측사례를 분석하여 연약지반에서의 가시설 설계방법에 대해 재고(再考)한다.

마지막으로 V장에서는 본 연구의 결론을 제시한다.

이상의 본 연구는, 연약지반의 근접공사 피해사례를 통해, 피해구조물의 복구과정, 그리고 가시설 설계방법에 대해 검토하였다.

하지만 본 연구의 논의는 한정된 현장에서의 기초적인 연구이기에, 실제 현장에서 이의 적용에 따른 효과 및 심도 있는 연구는 앞으로의 연구과제로 남겨둔다. 향후 국내외의 다양한 사례를 연계함으로써, 궁극적으로는 연약지반에서의 안전 시공을 위한 완성된 매뉴얼의 단서를 구하고자 한다.



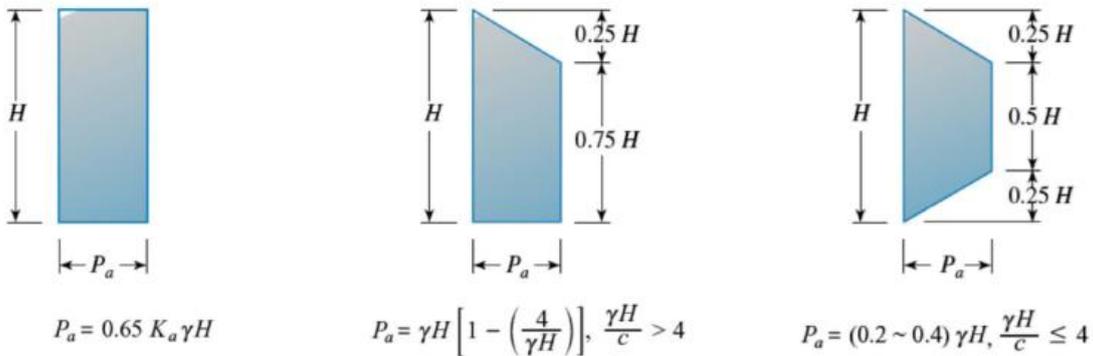
## Ⅱ. 토류벽의 설계 이론

### 1. 연성벽체에 작용하는 토압

#### 가. Terzaghi와 Peck 토압분포

Terzaghi(1936)는 흙막이벽(H-Pile+토류판)과 같은 연성벽체에서는 벽체의 변위뿐만 아니라 벽체의 변형과 기타 여러 요인으로 Rankine 이나 Coluomb의 토압이 작용하지 않는다는 것을 확인한 후 버팀보의 반력을 계측하여 흙막이벽체에 작용하는 측방토압을 최초로 추정하였다.

Terzaghi & Peck(1943)은 버팀보(Strut)로 지지된 흙막이 굴착현장에서 얻은 측정토압으로 벽체 외 버팀보의 설계를 위한 측방토압분포를 제안하였는데 이러한 토압분포에서 점성토지반의 경우는 Peck(1943)이 시카고 지하철공사의 굴착현장의 계측치로 사질토 지반의 경우는 Spilker(1937)가 베를린 지하철공사의 굴착현장에서 측정한 버팀보 하중의 계측치를 근거로 하였다. 그 후 더욱 많은 굴착현장에서 측정된 버팀보의 반력을 근거로 하여 그림 2.1과 같이 수정된 토압분포도를 제안하였다(Terzaghi & Peck;1967). 이 토압분포는 굴착깊이가 약 8.5m에서 12m까지 한정된 범위에서 측정한 결과로부터 얻어진 것이기 때문에 이보다 깊은 굴착에 적용할 경우에는 주의를 요한다고 하였다.



(a) 모래지반                      (b) 연약~중간점토지반                      (c) 견고한 점토지반

그림 2.1 Terzaghi & Peck의 수정 토압 분포도(1967)

여기서,

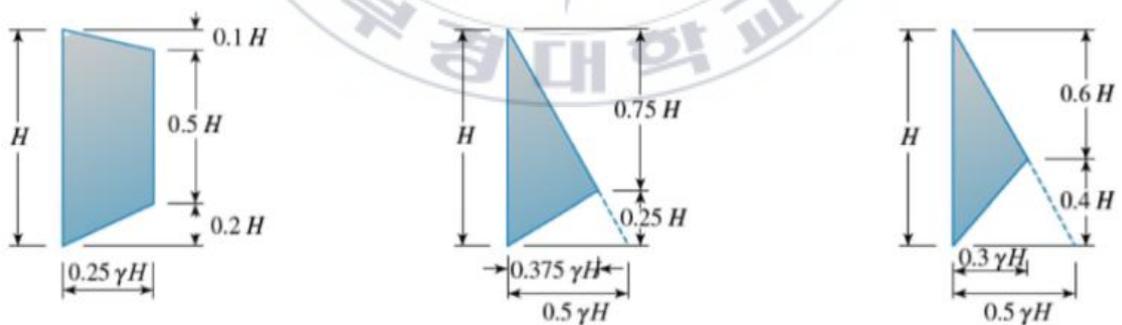
$P_a$  : 주동토압                       $K_a$  : 주동토압계수                       $\gamma$  : 흙의 단위중량

$H$  : 굴착깊이                       $c$  : 흙의 점착력

Peck(1969)과 Peck, Hansen 그리고 Thornburn(1974)등은 연약 또는 중간정도의 점토지반의 토압분포에 대해서는 안정계수  $N_b = \gamma H/S_u$ 를 도입하였다. 안정계수  $N_b > 6 \sim 8$ 일 때 깊은 굴착에서는 굴착저면 부근에서의 소성영역이 확대되기 때문에 추정하는 값보다 큰 토압이 발생한다고 하여 전단강도의 저감계수를 고려하여 토압계수( $K_a$ )를 산정하도록 하였다. 한편, 사질토와 점성토가 함께 존재하는 지반에 흙막이벽체를 설치할 경우에는 Peck(1943)이 제안한 등가점착력개념을 이용하여 평균점착력과 평균단위중량을 구한 다음에 흙막이벽체에 작용하는 토압분포는 그림 2.1에서 점성토지반의 토압분포를 사용하는 것으로 하였다.

## 나. Tschebotarioff의 토압분포

사질토지반에 대해 Tschebotarioff(1951)토압분포는 Terzaghi & Peck(1945)의 토압분포와 비교해서 그다지 큰 차이는 없지만 충분한 안전율을 가지고 있다는 점이 다르다. 그러나 점토지반에 대해서는 실측결과로부터 Terzaghi & Peck(1945)의 토압분포가 굴착깊이가 얇은 경우에는 과대하게 산정된다고 제시하고 삼각형 분포를 제안하였다. 소성점토에 대해서는 모래와 같이 상부토압이 증가가 없다고 생각하고 토압계수를 압밀평형상태의 토압계수와 거의 같다고 하여  $K_0 = 0.5$ 를 이용 굴착깊이 구간의 토압을 수압분포형태로 나타내었다. 굳은 점토의 경우는 굴착저면 상부의 어느 일정높이 구간에서부터 하부로 가면서 토압이 직선적으로 감소하여 굴착저면에서는 토압이 0이 되도록 토압분포를 수정하였다. Tschebotarioff(1973)는 Terzaghi & Peck의 토압분포를 수정하여 그림 2.2와 같은 버팀보 설계를 위한 토압분포를 제안하였다.



(a) 모래지반                      (b) 연약~중간점토지반                      (c) 견고한 점토지반

그림 2.2 Tschebotarioff의 수정 토압 분포도(1973)

## 2. 강성벽체에 작용하는 토압

일반적으로 강성벽체에 작용하는 토압의 크기 및 분포는 벽체의 변위형태 및 변위량, 뒷채움, 흙의 다짐도 등을 감안하여 결정함이 원칙이다. 그러나 대부분의 경우는 벽체의 움직임이 충분할 것으로 가정하여 한계평형상태에 관련된 주동토압 또는 수동토압을 이용해 설계가 이루어지고 있으며 Rankine 또는 Coulomb의 토압이론이 일반적으로 적용되고 있다.

### 가. Rankine-Resal 토압

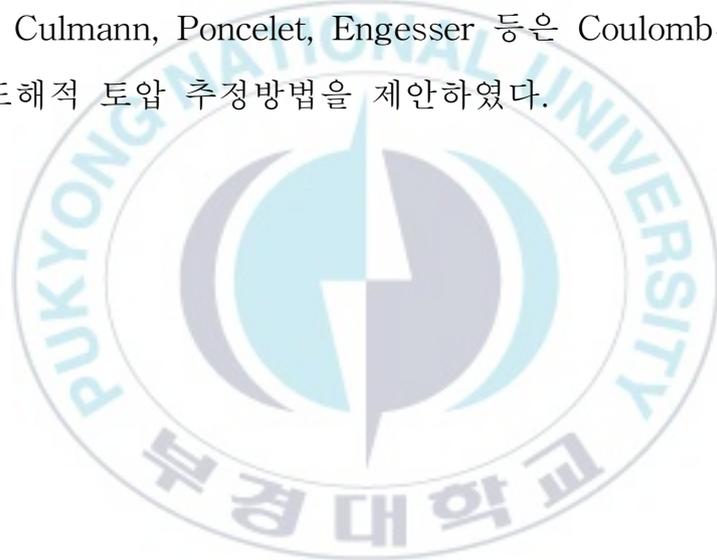
1856년 Rankine은 흙의 중력만이 작용하는 균질하고 등방인 반 무한체로 가정하여 지반이 소성평형상태에 존재할 때 지반내의 응력을 구하였다. 옹벽이 마찰이 없는 것으로 가정하고 소성평형상태는 지반이 파괴되기 직전의 상태로서 지반내의 응력을 나타내는 Mohr원이 파괴포락선에 접하는 상태이며 이때의 응력상태를 이용하여 토압을 구한다. Rankine의 토압론은 흙의 점착력을 무시하고 토압을 구하였으나 그 이후 1910년 Resal에 의하여 점착력이 있는 흙으로 확장되었으며 이를 Rankine-Resal의 토압이라 한다.

Rankine의 이론은 벽 마찰을 무시하였으나 실제로는 벽체의 재료에 따라 상당한 마찰이 발생하므로 벽 마찰을 무시한 Rankine의 주동토압은 과대평가되고 수동토압은 과소평가 되지만 안전측으로 평가되고 사용이 편리하므로 현재 가장 많이 이용되고 있다.

## 나. Coulomb의 토압

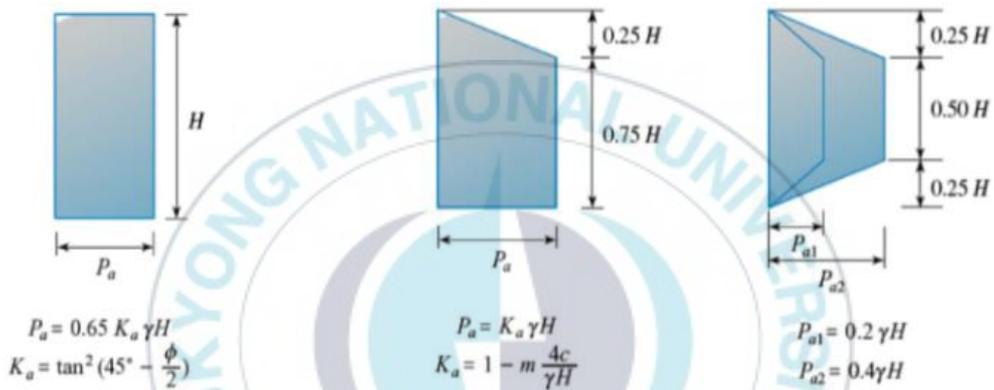
Coulomb은 전단파괴가 흙썰기 형태로 일어난다고 가정하고 옹벽과 배면 흙의 벽면마찰계수를 고려한 토압분포를 제안하였다. Coulomb의 이론에서 파괴면이 평면이라는 가정은 옹벽의 수동저항을 평가하는데 있어 지나치게 과대평가되어 설계 목적상 다소 불안한 점이 있다.

그 외 Sokolovski는 Mohr-Coulomb의 파괴기준과 경계조건 등을 이용하여 수치해석적 방법으로 토압을 계산하였으며 Caquot와 Kerisel은 대수나선 파괴면을 가정하여 벽면마찰을 고려한 삼각형 토압을 제안하였다. 또한, Culmann, Poncelet, Engesser 등은 Coulomb의 토압이론에 기초하여 도해적 토압 추정방법을 제안하였다.



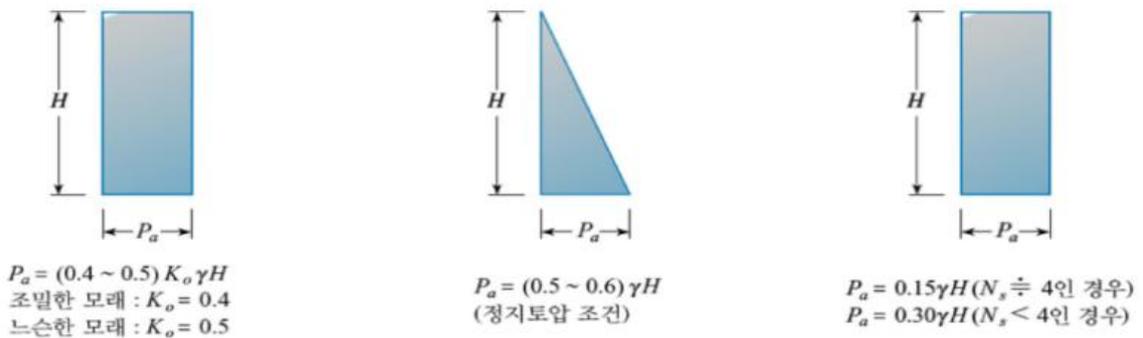
### 3. NAVFAC 토압분포

NAVFAC(1982)의 Design Manual에서는 그림 2.3과 같이 버팀보로 지지된 흙막이벽에 작용하는 측방토압분포 뿐만 아니라 그림 2.4와 같이 어스앵커로 지지된 흙막이벽에 대한 측방토압분포도 제시하고 있다.



(a) 모래지반      (b) 연약~중간점토지반      (c) 견고한 점토지반

그림 2.3 NAVFAC의 버팀보 지지력 측방토압분포

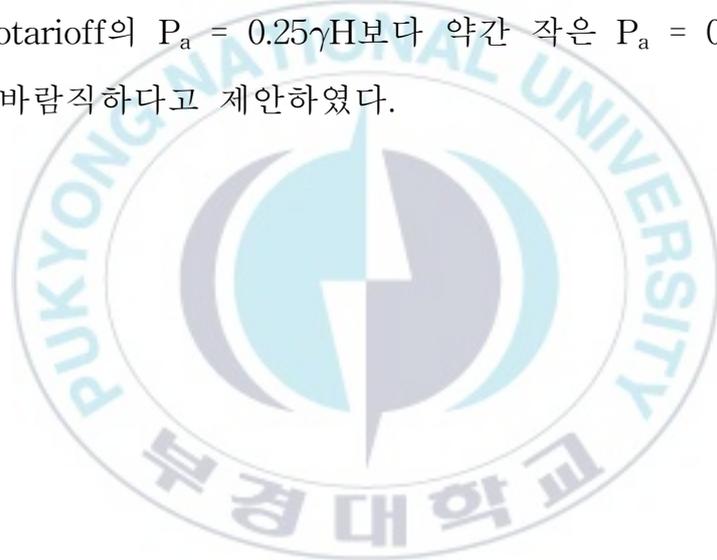


(a) 모래지반      (b) 연약~중간점토지반      (c) 견고한 점토지반

그림 2.4 NAVFAC의 어스앵커지지의 측방토압분포

#### 4. 국내 연구 토압분포

국내에서는 홍원표(1997)는 국내의 암반을 포함한 다층지반을 대상으로 앵커지지 흙막이벽체와 같은 연성벽체의 경우 벽체배면의 지하수위를 계측한 결과 굴착이 진행되는 동안 지하수위는 대부분 감소하므로 수압의 영향을 고려하지 않는다면 토사지반에 설치된 흙막이벽체에 작용하는 최대설계 토압의 크기는 Terzaghi & Peck의  $P_a = 0.65K_a\gamma H$ , Tschebotarioff의  $P_a = 0.25\gamma H$ 보다 약간 작은  $P_a = 0.20\gamma H$ 를 사용하는 것이 바람직하다고 제안하였다.



## 5. 흙막이 벽체의 거동 이론

지반굴착에서 나타나는 지반거동은 흙막이 벽체변위에 따른 배면지반의 침하, 굴착저면의 Heaving과 Piping 문제, 흙막이벽 사이로 배면 지하수와 함께 유출되는 토사에 의한 지반손실문제, 천공 및 굴착에 의한 진동에 따른 지반침하 등의 문제점들이 나타난다. 그림 2.5는 지반굴착에 따른 각종 거동현상을 나타낸 것이다.

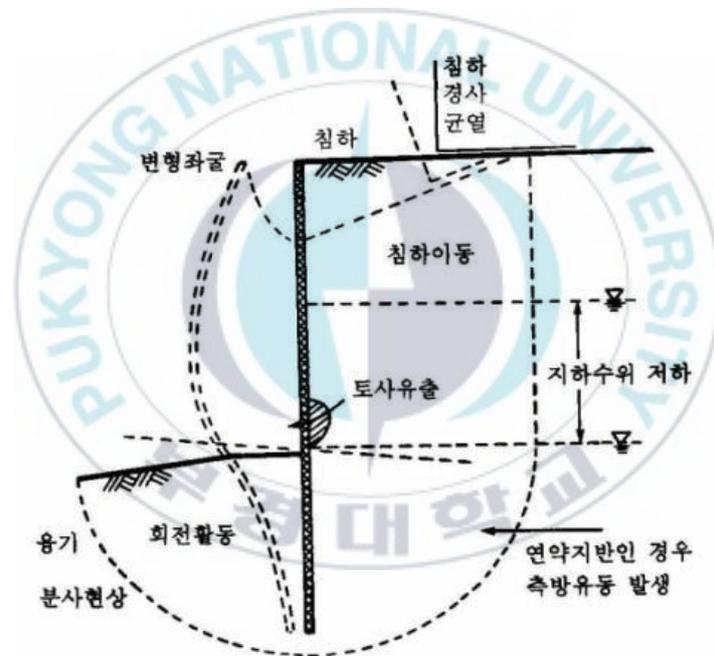


그림 2.5 지반굴착에 따른 거동현상

지반을 굴착할 때에 굴착면은 사면처리 또는 H-pile+토류판, 지중연속벽(주열식, 벽식) 등의 흙막이 벽체를 시공하여 안정성을 높이거나 굴착면을 보호하고 토압을 지지하여 주변지반의 붕괴 및 인접구조물의 손상을 막아야 한다. 이때에 흙막이벽은 주변여건에 따라 강성 또는

연성벽체를 설치하게 되는데 일반적으로 벽체가 강성이면 토압은 Coulomb이나 Rankine의 이론과 같은 삼각형 분포를 나타낸다. 비교적 강성이 작은 연성벽체는 수평변위는 굴착깊이가 깊어질수록 점차적으로 증가한다. 이때 벽체의 변위는 흙의 종류, 굴착깊이 그리고 지지구조의 형식등과 같은 여러 요소들의 영향을 받는다.

### 가. 단계별 굴착에 따른 거동

단계별 굴착시 연성벽체의 변형거동에 대하여 Bowles(1988)는 그림 2.6과 같은 이상화된 벽체변형 거동과 토압분포를 제안하였다. 그림 2.6의 단계1에서 벽체는 주동토압을 받고 횡방향 변위를 일으키고 이때의 횡방향 변위는 흙과 캔틸레버 벽체의 상호작용에 지배되며 유한 요소법(FEM)으로 구할 수 있다.

버팀구조(Strut 또는 Anchor)가 설치되면 단계2와 같이 되는데 이때 지보공에 가해지는 힘은 단계1에서와 같은 소성평형상태의 흙에 변형을 일으킬 수 있는 힘 즉, 주동토압보다 큰 힘이 작용해야 하므로 단계1에서의 주동토압의 크기는 증가할 것이고 그 결과 벽체에 가해지는 토압은 증가하게 되면 이 상태에서의 토압분포는 경험토압과 유사할 것이다.

단계2에서 굴착을 계속하면 b와 c사이에는 새로운 횡방향 변형이 발생하고 흙은 첫 단계 버팀구조 뒤쪽의 영역으로부터 아칭효과로 버팀구조의 하중은 감소할 것이다. 이 경우가 단계3인데 이때의 토압은 불명확하나 버팀구조 설치 전이므로 벽체의 변형거동으로 보아 단계1에서와 같은 토압을 산정하여야 한다. 단계3에서 두 번째 버팀구조를 설치하고 첫 번째 버팀구조를 긴장시키면 단계4에서와 같은 토압분포를

연계 되고 이 경우 역시 경험토압과 큰 차이는 생기지 않는다. 단계5는 밑면 c와 d로 굴착을 계속하면 단계3에서와 같이 굴착면 밑면이하에 새로운 횡방향 변위가 발생되어 추가적인 토압의 감소가 발생한다.

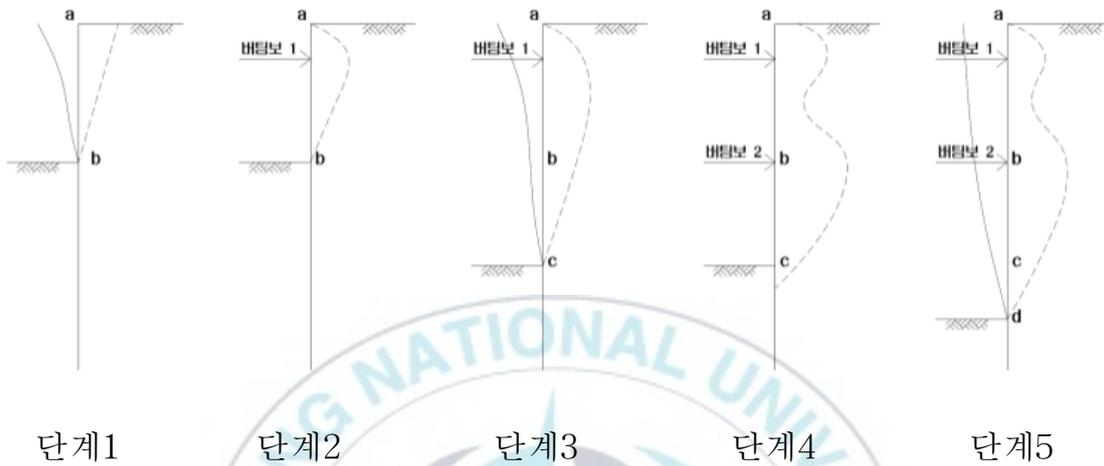
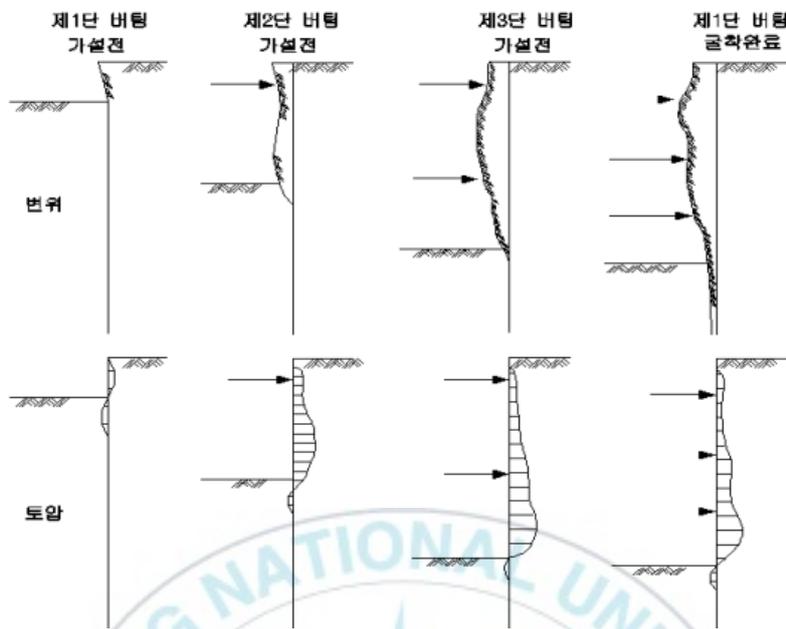


그림 2.6 굴착단계별 토압분포 및 벽체변위 변화(Bowles,1988)

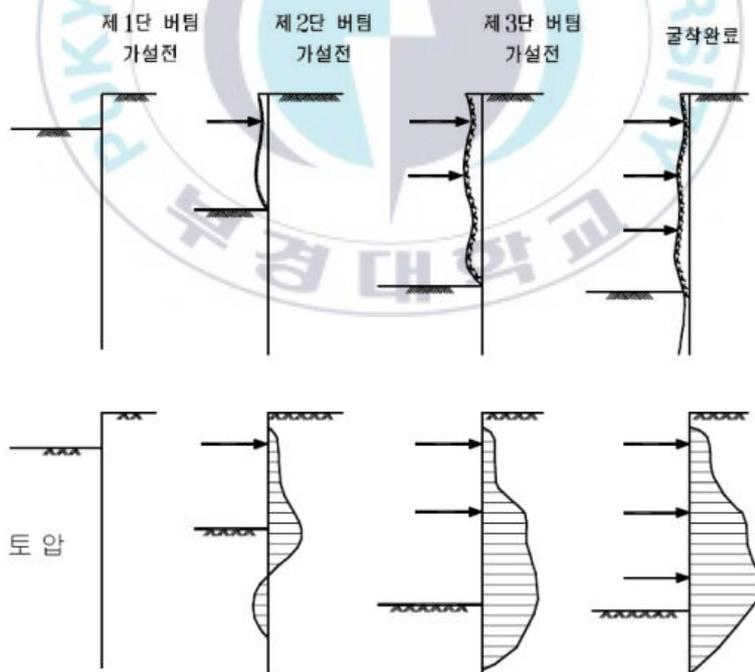
#### 나. 버팀보 선행하중에 따른 흙막이벽 거동

선행하중이란 벽체의 변위를 감소시키기 위하여 스트러트를 설치하고 하중을 가한 상태를 말한다.

그림 2.7은 버팀보의 선행하중 유무에 의한 토압과 흙막이벽체의 변위거동을 나타낸 것으로, (a)는 버팀보에 선행하중을 가하지 않은 경우로서 토압은 감소하나 벽체의 변위량이 크게 증가하고 (b)는 선행하중을 가한 경우로 토압은 크게 증가하나 벽체 변위량은 크게 감소한다.



(a) 버팀보에 선행하중을 가하지 않은 경우



(b) 버팀보에 선행하중을 가한 경우

그림 2.7 선행하중의 유무에 의한 토압과 흩막이벽체의 변위

## 6. 인접지반(구조물) 침하 요인

굴착공사로 인하여 인접지반의 침하가 발생할 수 있는 일반적인 요인으로는 다음과 같다.

- ① 주위 매설물의 매립상태가 불완전한 경우 말뚝관입시 천공작업의 진동으로 인한 압축 침하
- ② 흙막이벽의 수평변위에 따른 배면토의 이동으로 인한 침하
- ③ 지하수 유출시 토사가 함께 배출되어 발생하는 침하
- ④ 배수에 의한 점성토의 압밀침하
- ⑤ 굴착바닥의 연약한 지반인 경우 지반의 Heaving 및 Boiling 현상으로 인한 배면 지반침하
- ⑥ 굴착종료 후 지하구조물 시공과 되메우기시 뒷채움 시공불량으로 인한 배면 지반의 이동 및 침하
- ⑦ 엄지말뚝 인발시 진동 및 인발 후 공극의 처리불량에 따른 침하
- ⑧ 2차적 원인으로 위에 열거한 1차적 원인에 의해 발생한 침하로 인해 인접된 상하수도 관거의 파손으로 토사가 일시적으로 대량 유출됨으로서 발생하는 함몰 침하

## 7. 흙막이벽 수평변위 발생 요인

### 가. 흙막이벽 휨 강성

흙막이벽의 휨(Bending)은 버팀대의 변형과 일체로 나타난다. 휨량은 굴착시 최하단 버팀대 위치에서 굴착 밑면 가상 지지점까지의 거리

와 흙막이벽체의 강성 및 지반조건에 따라 다르게 된다.

### 나. 버팀대의 변형 및 Strut의 강성

버팀대의 압축 변형으로서는 자체의 탄성적 변형 및 좌굴에 의한 변형과 흙막이벽 사이의 연결부에 의한 변형이 있다.(E/A인 경우 좌굴변형은 제외) 탄성적 변형 및 좌굴에 의한 변형은 온도응력을 포함한 설계응력으로부터 정확하게 추정할 수 있으나, 후자는 시공정밀도에 의해 좌우되므로 연결부는 가능한 밀착시켜야 한다. 또한, Strut를 지보로 이용하는 경우 Strut의 강성을 충분히 발휘시킬 수 있도록 주의 시공이 이루어져야 하며, 기존 연구 결과에 따르면 Strut의 강성이 감소함에 따라 흙막이벽의 수평변위량 및 변위면적은 지속적으로 증가하고 흙막이벽의 최대휨모멘트 및 최대전단력 등은 거의 일정한 값을 보이는 것으로 나타나고 있다.

### 다. 버팀대의 설치시 시간적 지체

버팀대 설치시 시간적 지체로 일어나는 흙막이벽 변형에는 지나치게 길게 굴착하여 일어나는 경우와 설치를 지연시켜 일어나는 두 가지의 경우가 있다. 전자는 지점 사이가 크게 벌어져 큰 변형이 발생하고 후자의 경우에는 지반의 크리프(Creep) 특성에 따라 다르지만 버팀대의 실측기록에 의하면 점성토 지반에서는 4~8일 정도, 모래지반에 있어서는 2~3일 정도(단 액상화 지반 제외) 이후에 버팀대의 반력이 최대가 되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 버팀대는 가급적 조기에 설치하는 것이 바람직하고 굴착규모가 큰 경우에는 구역을 분할 시공할 필요가 있다.

## 라. 흠막이벽 근입깊이에 대한 영향

흠막이벽의 근입깊이가 부족하면 근입부가 이동, 변형되어 하부지반을 활동 회전시키거나 흠막이벽의 변형이 크게 발생한다. 이 영향은 비교적 광범위하고 그 양도 크다. 한편, 지하수위가 높은 모래질 지반에서는 보일링(Boiling)에 대한 영향을 검토하여야 하는데 근입깊이 영향이 매우 크다. 국내 도심지 굴착공사에서는 흠막이벽 근입장을 암반층 1.5m~2.0m정도, 일반 토사층은 3.0m~5.0m정도로 하는 경우가 일반적인데 굴착공사가 거의 최종단계에 이르렀을 때 굴착바닥면 부근에서 흠막이벽 수평변위가 크게 발생하는 경우가 많다. 이는 굴착시 제거된 수동층 토사와 흠막이벽의 작은 근입깊이의 영향을 크게 받기 때문이다. 기존 연구결과에 의하면 지반변형을 억제하기 위한 흠막이벽 특성 중에서 흠막이벽체 강성보다 벽체 전체의 길이와 근입깊이가 증가함에 따라 수평변위량은 감소하는 경향을 보였으며, 최종굴착깊이에 대한 흠막이벽의 최종 근입깊이의 비가 0.2정도일 때 수평변위를 억제하는데 가장 적절한 것으로 나타나고 있다.

## 마. Strut 선행하중

국내의 경우 Strut의 선행하중을 가하기 위해 최근에는 유압식잭을 많이 사용하고 있지만, 그에 못지않게 스크류잭도 많이 사용되고 있다. 스크류잭은 유압식잭에 비해 Strut의 선행하중이 상당히 작은 편으로 버팀대와 흠막이벽의 밀착, 흠막이벽의 과도한 변형방지, 버팀굴착시 흠막이벽에 사용하는 토압분포 등을 형성하는데 많은 문제점을 안고 있는 실정이다. 실제 시공시 계측에 의한 유압식잭을 사용하는 경우가 사용하지 않은 경우에 비해 2~3배 정도 적게 나타나고 있으며, 탄소

성 수치해석에서도 유압잭 사용시 Strut의 선행하중 효과는 지반변형 억제에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되고 있다.



### Ⅲ. 연구대상 분석 및 고찰

#### 1. 현장 개요

##### 가. 신축현장 주변 현황

본 대상 현장은 부산광역시 사하구 하단동 일원으로 괴정천과 낙동강에 인접한 지역이며 주변에 하단00아파트, 하단00학교 등이 있으며, 신축현장과 7.0m정도 근접하여 10층 00오피스텔이 위치하고 있다.

특히, 인접한 00오피스텔은 부등침하로 의심되는 기움(피해)현상이 공사현장 방향으로 발생하였다.



사진 3.1 부산 사하구 하단동 00 신축현장 주변 현황

## 나. 지반의 물리적 및 공학적 특성

본 연구 대상의 부지의 지질은 안산암류 분포지에 인접한 충적층(신생대 제4기) 분포지역으로 기반암은 안산암질암이 분포하는 것으로 판단된다. 지반조사 결과 지층은 매립층, 상부모래층, 점토층, 하부모래층, 모래질자갈층, 풍화토층(G.L-31.5m 시추종료)이 분포하고 있다.

지하수위는 지표에서부터 G.L-0.8m에 분포하였으며, 지반조사 위치 및 시추조사 결과는 그림 3.1, 그림 3.2와 같다.

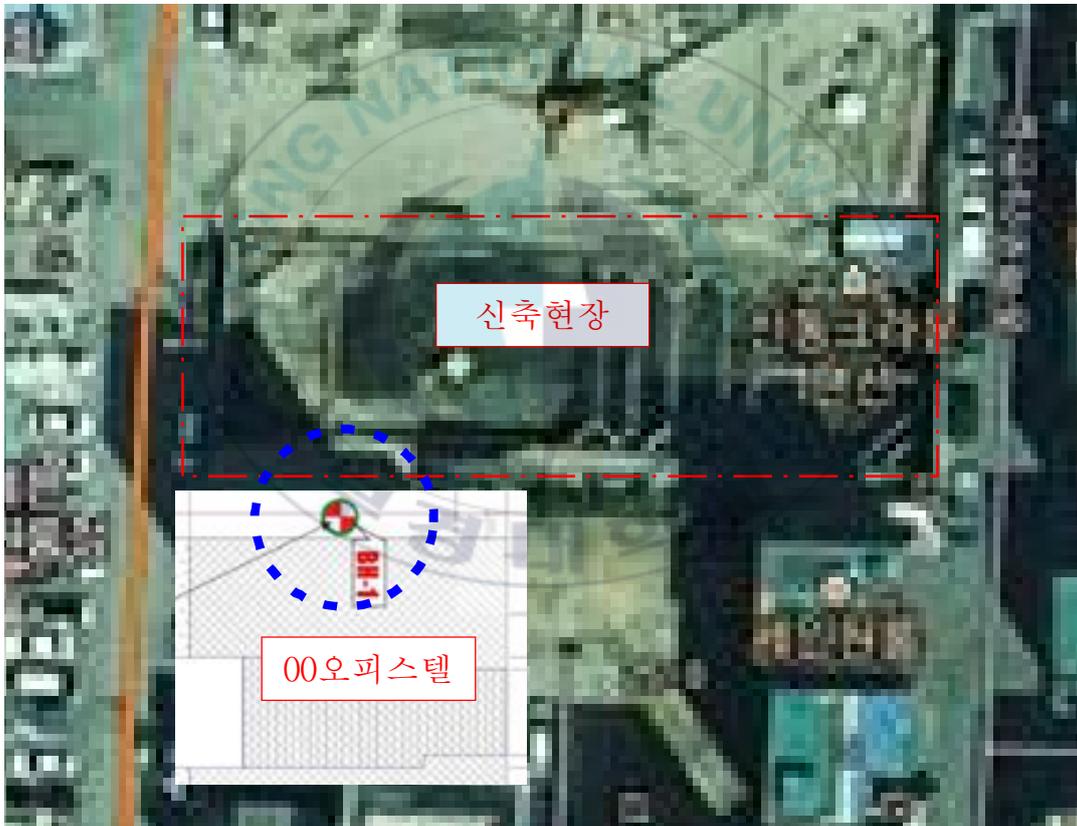


그림 3.1 부산 사하구 하단동 00 신축현장 지반조사 위치

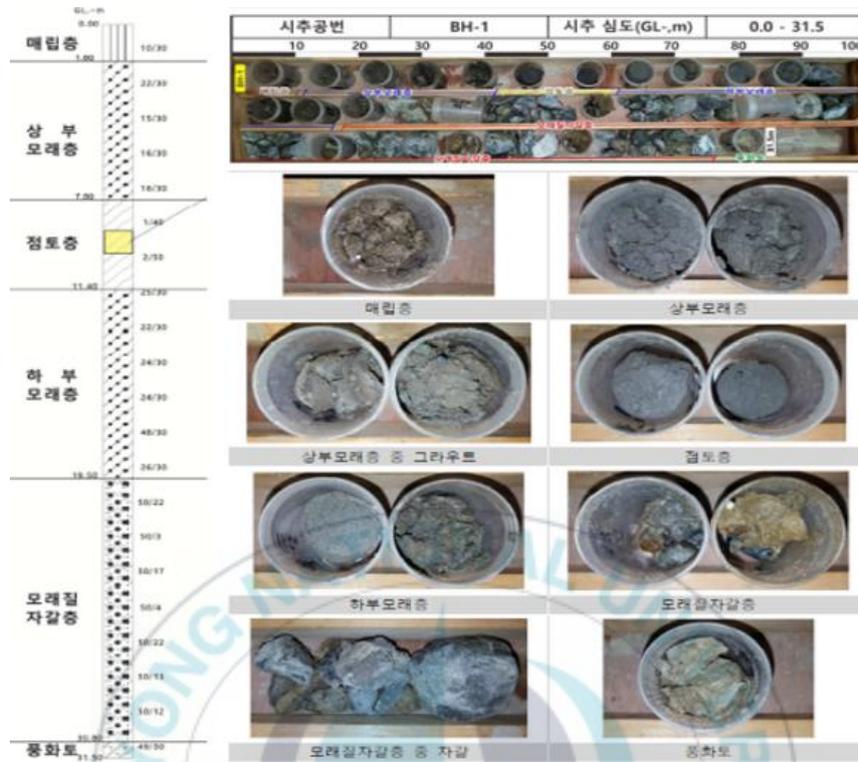


그림 3.2 시추조사 결과

토질시험은 원위치에서 공내전단시험(BST, BoreHole Shear Test)과 공내재하시험(LLT, Lateral Load Test), 그리고 자연시료를 채취하여 실내시험을 실시하였으며, 시험결과는 표 3.1 ~ 표 3.3과 같다.

표 3.1 공내전단시험 결과 (사질토 c,  $\phi$  측정)

공 변	시험구간 (GL-, m)	지층명	N-값 (회/cm)	시험결과		R <sup>2</sup> (상관계수)
				c (kPa)	$\phi$ (°)	
BH-1	0.5~1.0	매립층	10/30	16.34	22.67	0.99
	5.0~5.5	상부모래층	16/30	6.42	20.01	0.97
	13.0~13.5	하부모래층	22/30	15.76	25.96	0.97

매립층

상부 모래층

하부 모래층

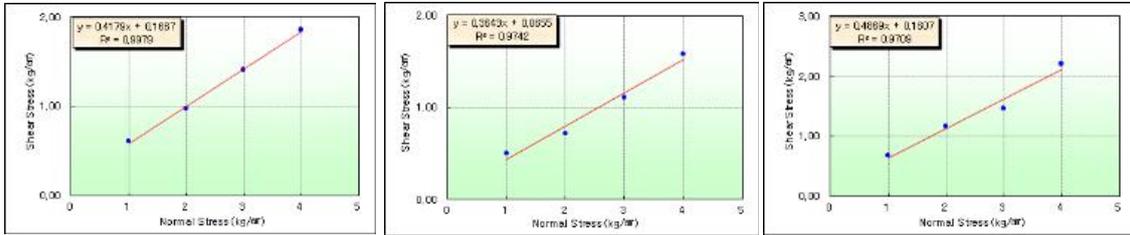


그림 3.3 공내전단시험 결과 그래프

표 3.2 공내재하시험 결과 (점토 변형계수 측정)

공 번	시험심도 (GL-,m)	N-값 (회/cm)	지층명	포아송비	항복하중 (kPa)	변형계수 (E, kPa)
BH-1	9.5	8.5m	1/40	점토층	0.45	54.70
		10.0m	2/50			

BH-1호공 점토층(9.5m)

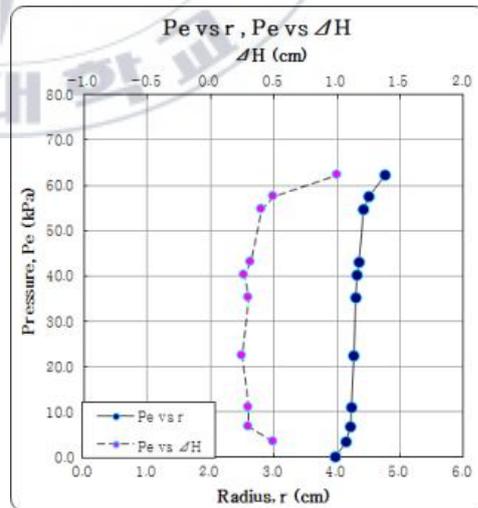


그림 3.4 공내재하시험 시험 전경 및 결과 그래프

표 3.3 실내토질시험 결과 (흙의 분류, 점토 c,  $\phi$  측정)

시료 번호	함수비 (%)	단위 중량 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	비중	연경도 특성(%)			체분석(%)				
				PL	LL	PI	자갈	모래	실트	점토	USCS
BH-1-1	22.54	18.01	2.619	N . P			45.24	49.05	3.31	2.40	SM -SP
BH-1-2	32.04	17.58	2.656	N . P			-	69.15	21.27	9.58	SM
UD-1	41.89	-	2.684	25.80	45.58	19.78	-	7.39	41.20	51.41	CL
BH-1-3	22.42	17.84	2.671	16.99	26.42	9.43	-	58.67	22.92	18.41	SC

시료번호	삼축압축시험							
	Type	Wn(%)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Total Stress		Effective Stress	
					Ccu(kPa)	$\phi_{cu}$ (°)	Ccu(kPa)	$\phi_{cu}$ (°)
UD-1 (점토층)	CU	42.64	17.45	12.24	7.5	14.7	10.2	18.9

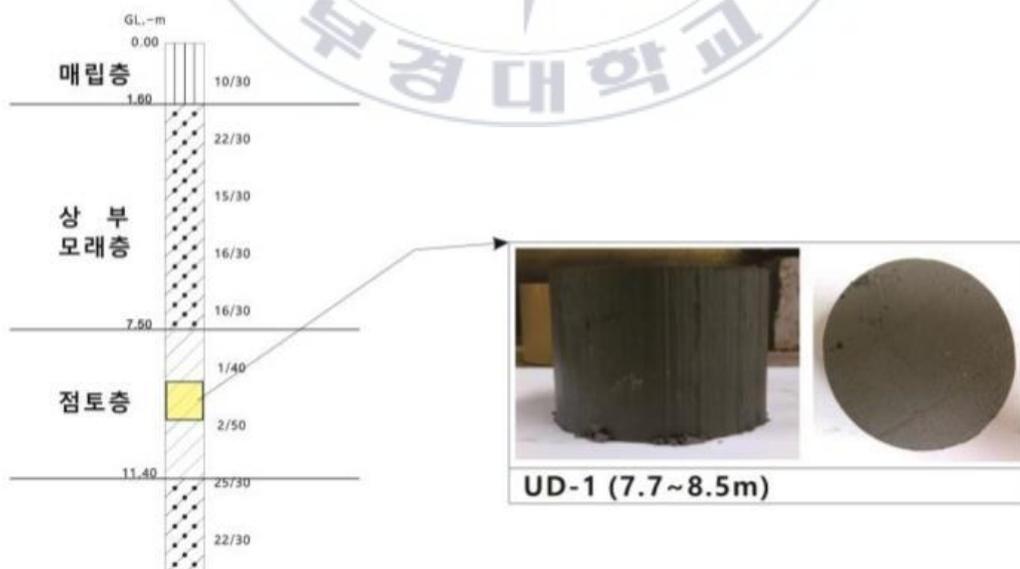


그림 3.5 불교란시료 채취 위치도

### 다. 피해 건물 기초 공법

신축현장과 약 7.0m 이격되어 위치한 00오피스텔은 모래층 및 점토층으로 깊게 형성된 지반에 직접기초(두께=900mm)시공되었고, 설계지하력은  $F_e=250\text{kN/m}^2$ 이다.

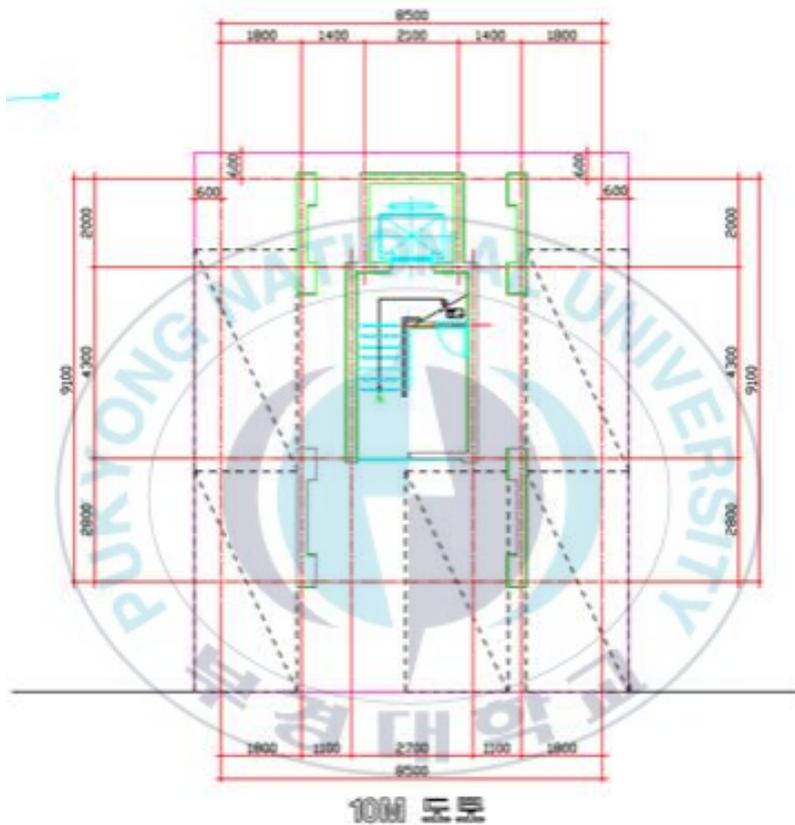


그림 3.6 00오피스텔 기초 평면

표 3.4 00오피스텔 기초 공법 (00구조안전기술 구조계산서 자료, 2015. 09)

구 분	적 용 치
설계지내력	$F_e=250\text{kN/m}^2$ 이상
지하수위	고려하지 않음
기초형식	온통기초 (Mat Foundation)

## 라. 사고 현황

부산 사하구 하단동 일원 신축현장은 Sheet Pile 흠막이벽체와 Strut 2단으로 지지하면서 G.L-6.2m까지 굴착공사를 실시하였고 굴착이 완료된 상태에서 굴착현장에서 약 7.0m 이격한 00오피스텔 건물이 공사 현장 측 방향으로 최대 35cm정도 부등침하와 함께 건물 상단이 최대 105cm까지 기울(피해)현상이 발생하였다.

부등침하 발생 원인으로는 Sheet Pile 틈새에서 지하수의 지속적인 유출에 따른 토립자의 유실과 건물하부 점토층의 압밀침하등에 의해 발생한 것으로 판단된다. 그림 3.7은 지하수 유출 압밀침하에 따른 피해 현황 및 전경사진이다.

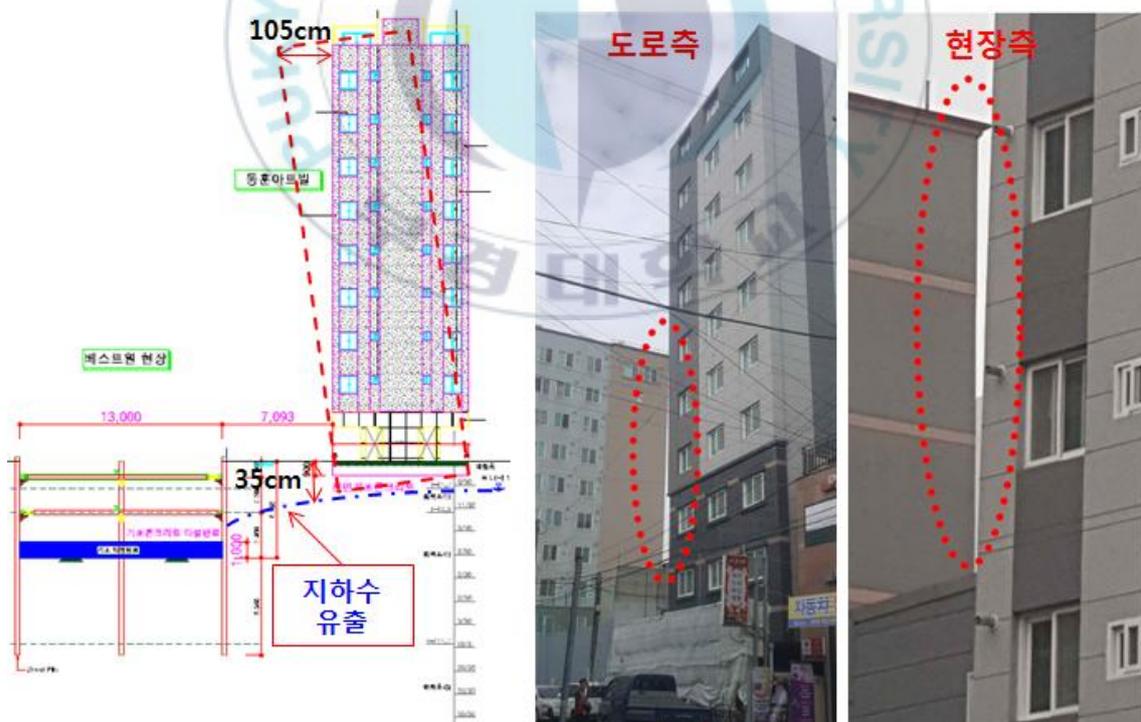


그림 3.7 지하수 유출에 따른 피해 현황 및 전경사진

## 2. 대책 공법

### 가. 대책 공법 개요

하단동 00오피스텔은 모래층 및 점토층으로 깊게 형성된 지반에 별도의 기초보강 없이 직접기초(두께=900mm)로 지지되어 있고, 인접신축 현장 굴착공사 중 지하수 유출에 따른 기초하부 지반침하로 건축물의 부등침하가 발생하였다. 건축구조물 안전진단 결과 기울기 등급은 E등급(1/150이하)으로 산정되어 건축물의 구조적 안정성 및 사용성 확보를 위한 기초보강(개량) 및 복원공법이 시급하였다.

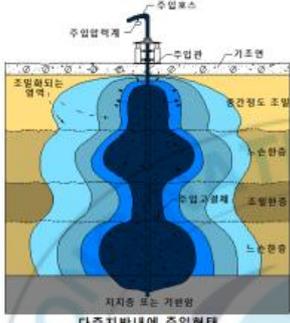
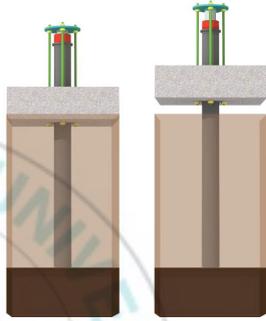
### 나. 대책 공법 선정

하단동 00오피스텔의 기초보강(개량)공법은 다음의 사항을 중점에 두고 선정하였다.

- ① 기초보강공법 시공 가능성
  - 공간제약이 다른 건축물에서 가능한 공법 선정(소형/인력)
- ② 구조적 안정성 확보 여부
  - 건축물의 장기적인 안정성 확보가 가능한 공법
- ③ 기울어진 건축물의 안정상태로 복원 여부
  - 피해 기울기 E 등급 → 기울기 A 등급으로 복원
- ④ 최종 대책 공법 선정 (2가지 대책방안 중 제1안 선택)
  - Eco CG 공법 (Eco Compaction Grouting) ; 제1안
  - 강관압입파일 공법 ; 제2안

이를 정리하면 표 3.5와 같다.

표 3.5 대책공법 비교

구 분	제1안 Eco C.G.S 공법	제2안 강관압입파일 공법
공 법 개요	Eco저유동성 몰탈을 지반내에 압밀충진하여 파일형태의 구근을 형성함과 동시에 지반을 압밀다짐시켜 지지력 및 지반을 개량하는 공법	가압장치와 유압잭 반력으로 구조물을 지지할 수 있는 보강파일을 소요지층까지 압입하여 기초를 보강하는 공법
공 법 개요도 및 특징	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 저유동 그라우트재</li> <li>• 모든지반 적용 가능[암반층 제외]</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 강관 및 충전강관파일</li> <li>• 모든지반 적용 가능[암반층 제외]</li> </ul>
장 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 좁은 공간내에서 저소음, 저진동으로 시공 가능.</li> <li>• 연약지반개량 및 콘크리트 파일형성으로 지내력 확보.</li> <li>• 유속이 있는 곳에서도 주입재가 이탈하지 않음.</li> <li>• 밀도증가에 의한 수로 차단으로 차수효과 있음.</li> <li>• 주입재료의 조정에 따라 슬럼프 및 강도 조정가능.</li> <li>• 저중점 주입으로 공사비절감과 공기단축, 균등복원 등에 탁월한 공법임.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 타공법에 비해 장비가 아주 작아 협소공간 및 접근 곤란지역 시공 가능.</li> <li>• 압입파일 지지력 정밀측정 가능</li> <li>• 무소음/무진동으로 사람거주상태 작업가능.</li> <li>• 지지층까지 파일을 압입하므로 추가침하 가능성 없음.</li> <li>• 모든 파일 내력 실시간 정량적 수치 확인가능.</li> <li>• 인상 중 완벽한 수직수평을 조절하기 위해 인상/인하가 자유롭게 가능함.</li> </ul>
단 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연약 지반 경우 주입압에 따른 지반 거동(융기)유발할 수 있음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 강관의 부식이 발생할 수 있음 [설계시 부식 고려]</li> </ul>



#### 다. 대책 공법 시행 결과

Eco CG공법을 선시공하여 기초지반의 안정성을 확보하고 D-ROG공법으로 5일간에 걸쳐 구조물 복원공법을 시행하여 그림 3.9에 나타난 바와 같이 복원전 최대변위량 105mm에서 0.5mm까지 복원되었다.

한국시설안전공단 세부지침(건축편, 2011, 12)에 따라 판정한 기울기 등급은 복원전 E등급(1/150초과)에서 복원 후 A등급(1/750이내)으로 상향되었다.

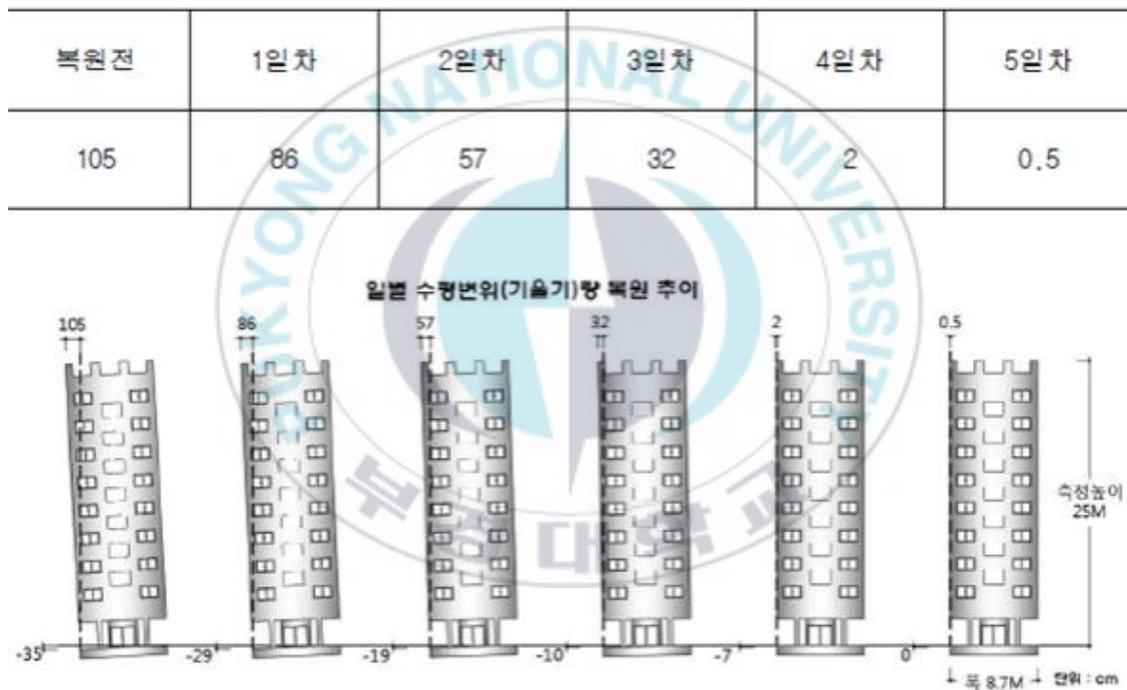


그림 3.9 하단동 00오피스텔 공사 일자별 기울기량 복원 추이량

복원 전·후 건축물 기울기 상태변화는 사진 3.2에서 육안으로도 명확하게 확인할 수 있었다.

따라서, 하단동 00오피스텔 기움현상에 대한 지반개량 Eco CG공법 및 복원 D-ROG공법 적용은 매우 효과적인 것으로 나타났다.



공사전(도로측에서 촬영)

공사후(도로측에서 촬영)

사진 3.2 하단동 00오피스텔 복원 전·후 기울기 상태변화 사진

### 3. 오피스텔 기초공법의 재설계

신축현장 굴착(지하수 유출)에 따른 부등침하로 발생한 하단동 00오피스텔에 대해 Eco CG( $\varnothing 600\text{mm}$ )로 총 48공으로 지반개량을 실시하였고, 개량된 기초지반에 대해 설계지지력( $F_e=250\text{kN/m}^2$ )을 기준하여 기초 안정성 검토를 수행하였다.

#### 가. 사용된 지반 물성치

Eco CG로 지반개량 전 지반물성치(토질시험 결과)를 기준으로 하여 지반개량을(개량을 16.72%)에 따른 복합지반으로 산정하였으며, 지반개량 전·후 지반물성치는 표 3.6, 표 3.7과 같다.

표 3.6 지반개량 전 원지반 물성치

구 분	$\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	C ( $\text{kN/m}^2$ )	$\varnothing$ ( $^\circ$ )	변형계수 ( $\text{kN/m}^2$ )	포와송비 (v)	비고
매립토	18.0	16	22	7,000	0.35	개 량 층
상부모래층	17.5	6	20	11,900	0.35	
점토층	17.4	10	18	1,130	0.45	
하부모래층	17.8	15	25	28,800	0.35	
모래질자갈층	19.0	0	30	60,000	0.31	
풍화토층	19.0	15	31	60,000	0.30	

표 3.7 하부모래층까지 지반개량 후 지반물성치(개량을 16.72% 적용)

구 분		복합지반 지반 물성치				비 고
		$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)	E (kPa)	
매립층	원지반	18.0	16	22	7,000	치환율 16.72%
	복합지반	18.3	71.8		469,308	
상부 모래층	원지반	17.5	6	20	11,900	
	복합지반	17.9	63.5		473,388	
점토층	원지반	17.4	10	18	1,130	
	복합지반	17.8	66.8		464,419	
하부 모래층	원지반	17.8	15	25	28,800	
	복합지반	18.2	71.0		487,463	
기초하부 지반평균	평 균 지 반	18.0	67.0	21	-	

복합지반에 대한 강도정수 산정은 다음과 같다.

(1) 개량 후 지반의 단위중량 산정

$$\gamma_{t\text{복합지반}} = A_p \times \gamma_p + (1 - A_p) \times \gamma_t$$

여기서,

$\gamma_{t\text{복합지반}}$  : 복합지반 단위중량

$A_p$  : 개량 면적율 (0.1672)

$\gamma_p$  : 개량체 단위중량 (20 kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_t$  : 원지반 단위중량

(2) 개량 후 지반의 점착력 산정

$$C_{\text{복합지반}} = A_p \times C_p + (1 - A_p) \times C_o$$

여기서,

$C_{\text{복합지반}}$  : 복합지반 점착력

$A_p$  : 개량 면적을 (0.1672)

$C_p$  : 개량체 점착력 (350 kN/m<sup>2</sup>, 사질토~점성토 평균적용)  
(구조물기초설계기준 해설, 2015, 개량체 설계기준강도 p772)

$C_o$  : 원지반 점착력

(3) 개량 후 복합지반 변형계수 산정

$$E_{\text{복합지반}} = A_p \times E_p + (1 - A_p) \times E_o$$

여기서,

$E_{\text{복합지반}}$  : 복합지반 변형계수

$A_p$  : 개량 면적을 (0.1672)

$E_p$  : 개량체 변형계수

$E_o$  : 원지반 변형계수

### 나. 개량지반 기초 지지력 검토 결과

개량(복합)지반에 대한 지지력 검토는 기초지지력 검토시 널리 활용하는 Terzaghi 지지력 산정방법과 Meyerhof 지지력 산정방법으로 검토하였고 검토 결과 표 3.8과 같이 개량 후 기초의 허용지지력은 만족하는 것으로 나타났다.

표 3.8 지반개량 후 기초 지지력 검토 결과

구 분	허용 지지력(kN/m <sup>2</sup> ) 검토 결과		판 정
	Terzaghi	Meyerhof	
설계지지력(kN/m <sup>2</sup> )			
250	266.69	554.59	만족

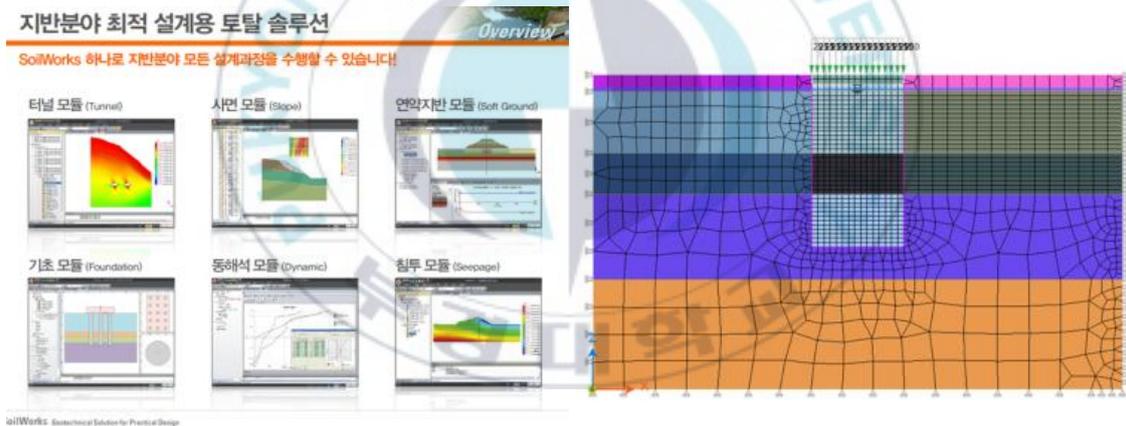


## 다. 기초 안정성 검토 결과

상부구조물의 안정성 확보는 지지력뿐만 아니라 발생침하량도 허용 침하량 이내에 만족하여야 한다. 기초 침하량 검토는 결정된 복합지반 강도정수를 적용하여 유한요소해석방법(FEM)으로 수행하였다.

### (1) 사용 프로그램

사용 프로그램은 Midas社에서 개발한 지반범용해석 프로그램인 Soil Works(Ver 5.3.0)을 사용하였고, 해석 모델링은 폭은 기초폭(B)의 2.5배로 결정하였으며, 깊이는 기초깊이(D)의 5배이상, 모래자갈층 30m까지 설정하였다.



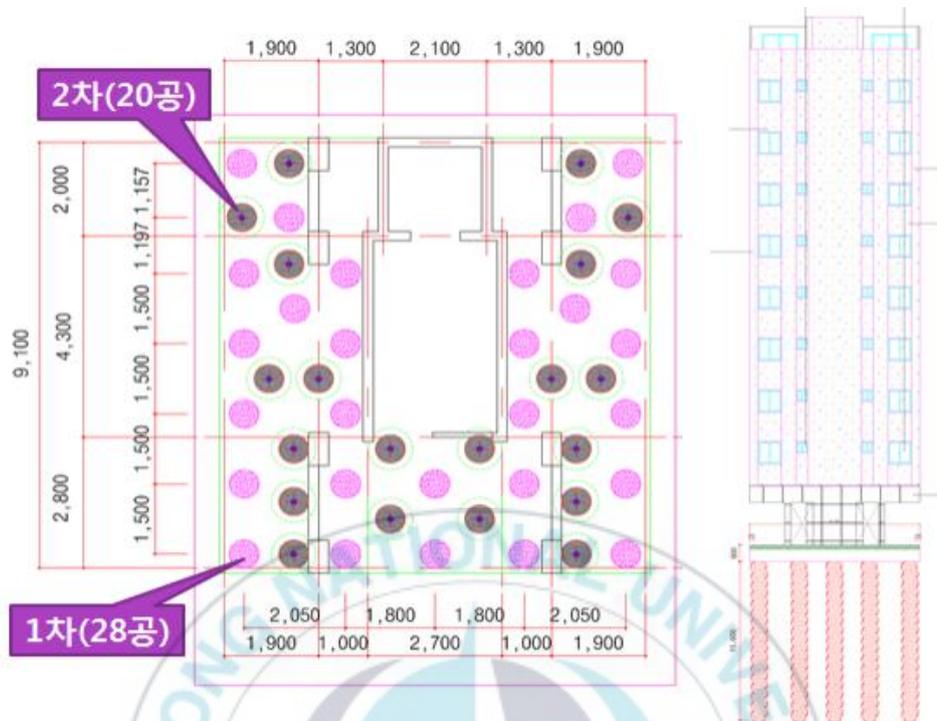
Soil Works 프로그램 활용

00오피스텔 해석 모델링

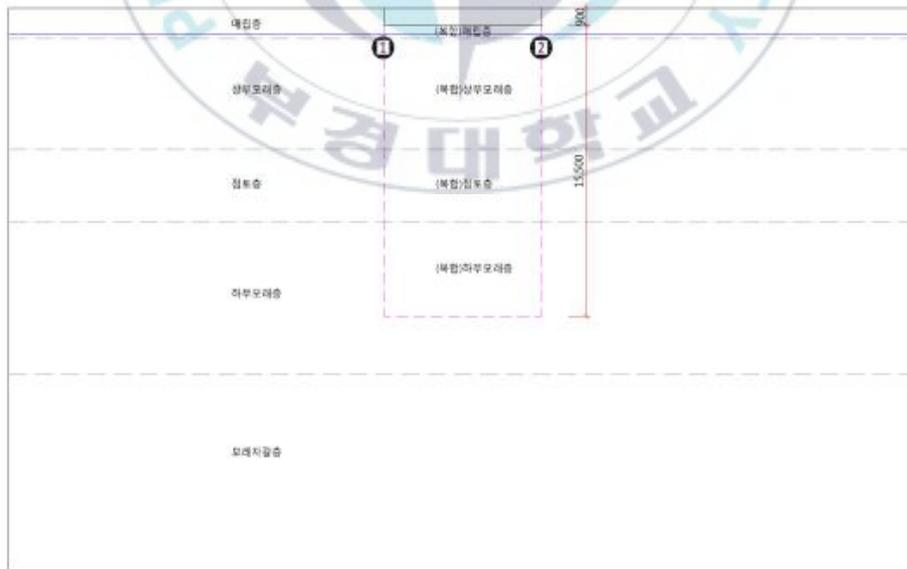
그림 3.10 00오피스텔 기초설계 프로그램 및 해석 모델링

### (2) 검토 도면

00오피스텔 기초에 보강된 Eco CG는 총 48공(1차 28공, 2차 20공)으로 개량되었고, 검토깊이는 지하30M(모래자갈층)까지 결정하였다.



(a) 검토도면



(b) 모델링 단면

그림 3.11 00오피스텔 검토 도면 및 모델링 단면

(3) 기초 안정성 평가 기준

구조물의 기초 안정성 평가기준은 국내 여러 기관들에서 추천하는 값을 비교하여 건물완공 후 발생하는 즉시 침하는 허용침하량을 3.8cm 로 하며 부등침하는 각변위는 1/500으로 적용하였다.

표 3.9 기초의 종류별 구조물의 허용침하 (MacDonald & Skempton, 1955)

규 정		독립기초	전면기초
각 변위( $\delta/L$ )		1/300 (L : span, $\delta$ : 부등침하량)	
최 대	점 토	44 mm (38 mm)	
부등침하량	사질토	32 mm (25 mm)	
최 대	점 토	76 mm (64 mm)	76~127 mm (64 mm)
침 하 량	사질토	51 mm	51~76 mm (38~64 mm)

주) ( )내의 값은 추천되는 최대값 임.

표 3.10 구조물의 최대허용 침하량과 변위의 한계 (Sowers, 1962)

침 하 형 태	구조물의 종류	최 대 침 하 량 (cm)
전 체 침 하	배수시설	15.0 ~ 30.0
	출입구	30.0 ~ 60.0
	부등침하의 가능성 석적 및 벽돌구조	2.5 ~ 5.0
	뼈대구조	5.0 ~ 10.0
	굴뚝, 사이로, 매트	7.5 ~ 30.0
경 사(TILT)	탑, 굴뚝	0.004S
	물품적재	0.01S
	크레인레일	0.003S
부 등 침 하	빌딩의 벽돌벽체	0.0005S ~ 0.002S
	철근콘크리트 뼈대구조	0.003S
	강뼈대구조 (연속)	0.002S
	강뼈대구조 (단순)	0.005S

주) S : 기둥 사이의 간격 또는 임의의 두 점 사이의 거리 (구조물 기초설계기준, 1997)

표 3.11 구조물 기울기에 따른 등급별 관리기준(시설안전관리공단, 1993)

구 분	기울기	내 용	안 전 조 치
A	1/750 이내	예민한 기계기초의 위험 침하 한계	정상적인 유지관리
B	1/600 이내	대각선구조를 갖는 라멘구조의 위험한계	주의관찰, 원인제거
C	1/500 이내	구조물의 균열발생 한계	정기적인 계측관리, 원인제거
D	1/250 이내	구조물의 경사도 감지	보수·보강 필요
E	1/150 이내	구조물의 위험할 정도	긴급보강 및 사용금지, 철거

(4) 기초 안정성 검토 결과(SoilWorks 프로그램)

00오피스텔 기초에 Eco CG(48공) 보강 후 안정성 검토 결과 표 3.12에 나타난 바와 같이 허용 최대침하량 및 허용각변위(기울기)에 만족하는 것으로 확인되었다.

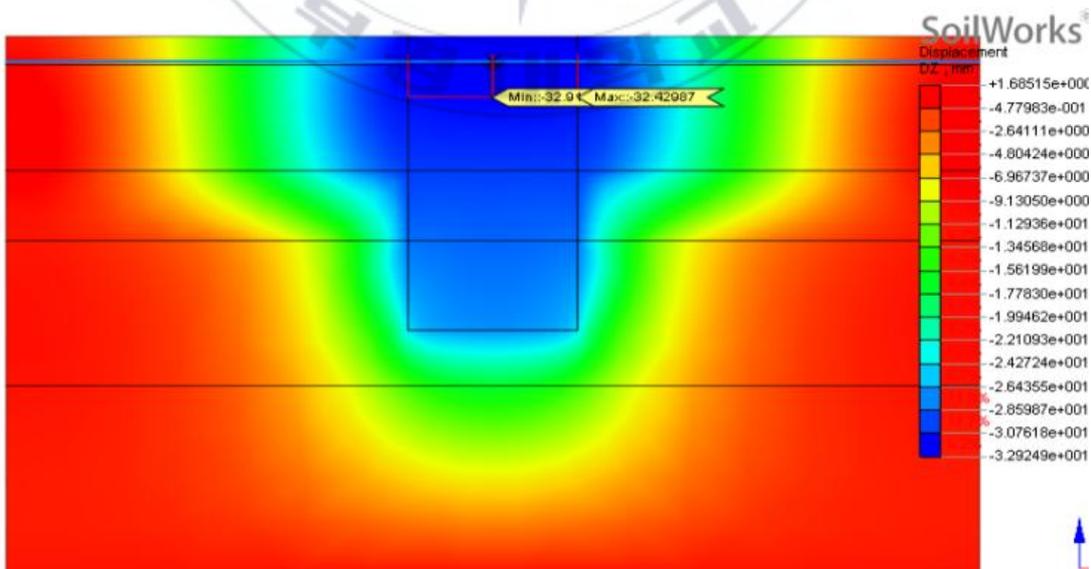


그림 3.12 00오피스텔 기초 안정성 검토 결과

표 3.12 기초 침하량 및 각변위 산정 결과

구 분	연직 침하량(mm)		각 변위( $\delta/L$ )		
	최대 발생	허 용	최대 발생	허 용	
Mat기초	-32.912	38.0	1/9,006	1/500	O.K

주) 단면 총길이(L) 8.7m,



#### 4. 가시설 검토에 따른 침하량 산정

본 장에서는 하단동 신축현장 가시설 설계시 적용한 당초 지반 물성치와 재조사 및 토질시험 결과를 반영한 지반 물성치를 반영하여 원설계 및 변경설계시 00오피스텔 건물의 침하량 결과를 Caspe방법으로 산정하여 비교하였다.

##### 가. 지반 물성치 비교

표 3.13 당초 지반 물성치(가시설 설계시)

구 분	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	수평지반반력 계수(kN/m <sup>3</sup> )	N값
매립토	17	0	21	10,000	3
퇴적층1	16	20	5	7,000	2
퇴적층2	18	5	30	26,000	27

표 3.14 지반 물성치 재산정(재조사 및 토질시험 결과)

구 분	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	수평지반반력 계수(kN/m <sup>3</sup> )	N값
매립토	18	16	22	12,100	10
상부모래층	17.5	6	20	21,000	17
점토층	17.5	10	18	3,000	1
하부모래층	17.8	15	25	28,000	24

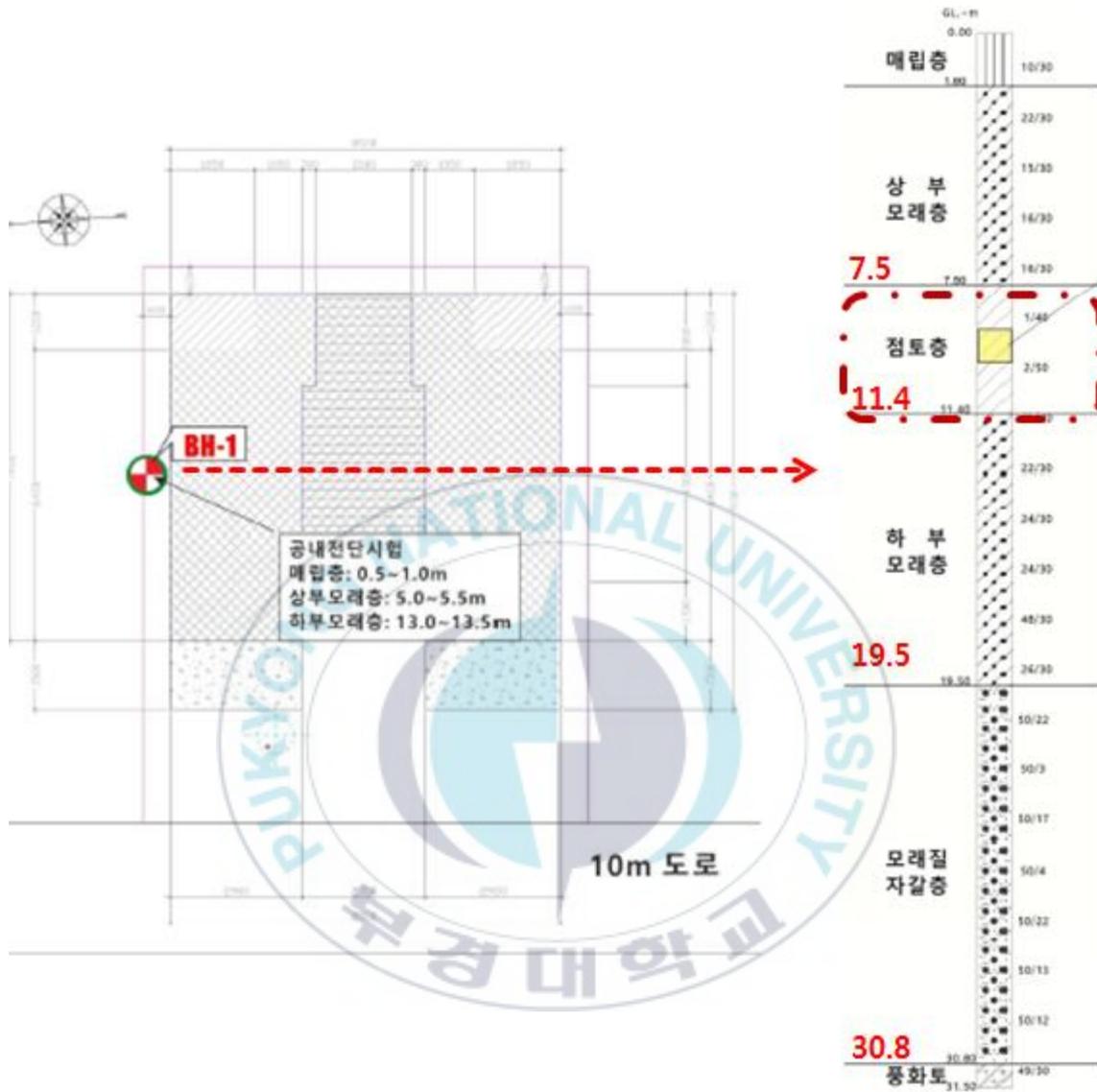


그림 3.13 지반재조사 위치도(지하수위 G.L(-)0.8m )

나. 원설계(SCW공법) 검토 결과(GeoXD 프로그램)

표 3.15 당초 지반물성치 적용 결과 (원설계)

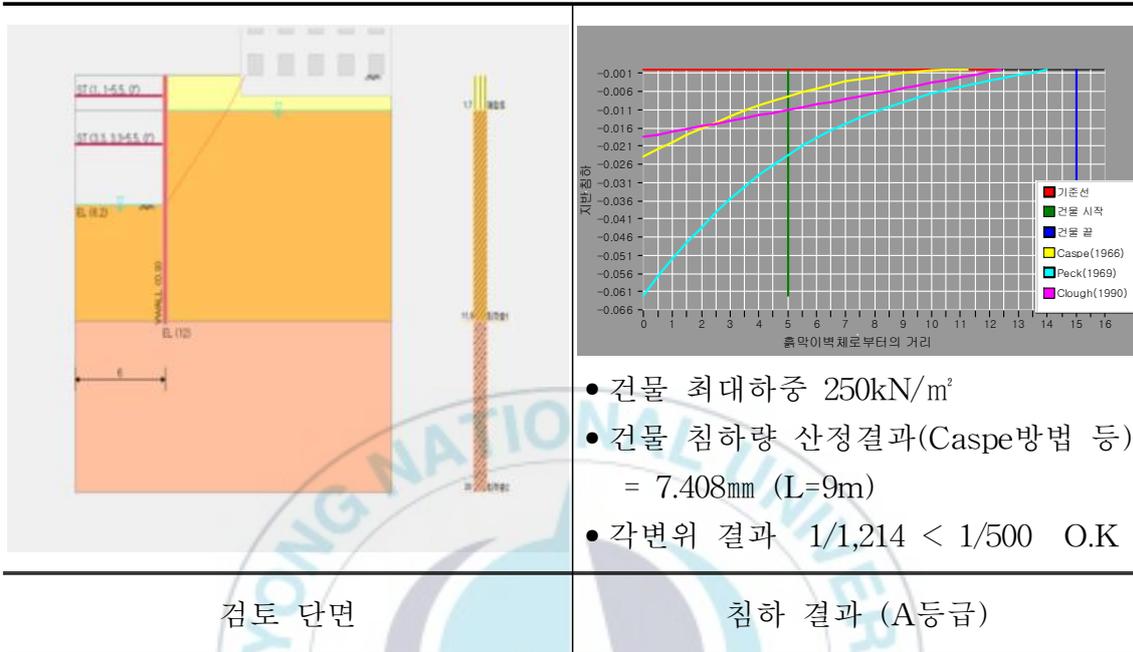
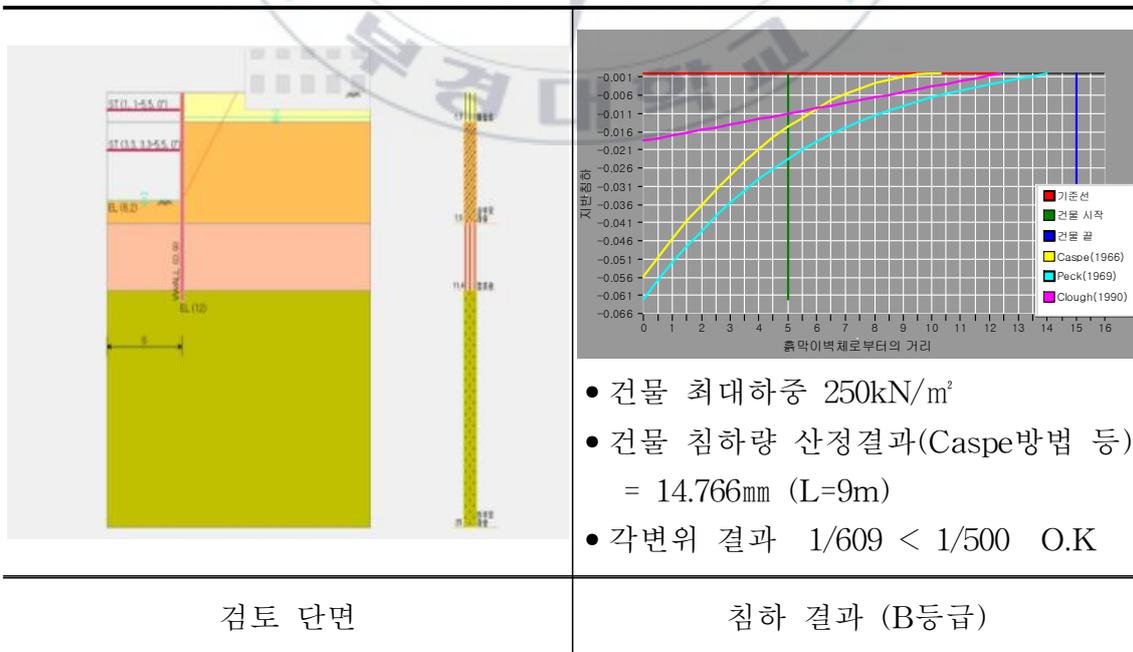


표 3.16 재산정 지반물성치 적용 결과 (원설계)



다. 변경설계(Sheet Pile공법) 검토 결과(GeoXD 프로그램)

표 3.17 당초 지반물성치 적용 결과 (변경설계)

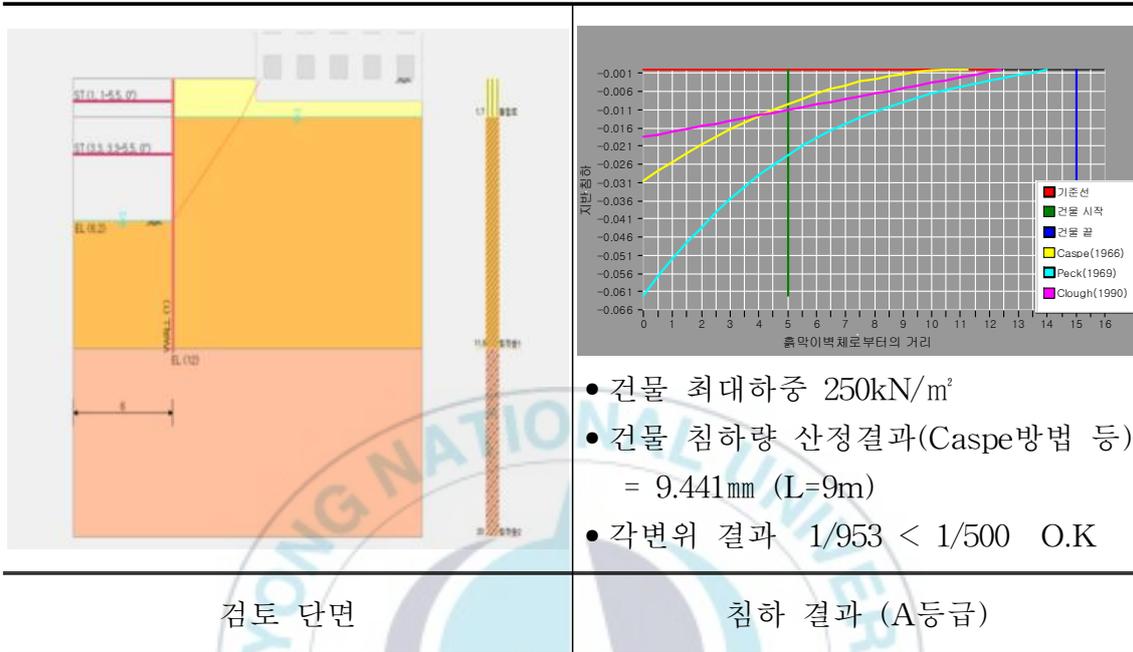
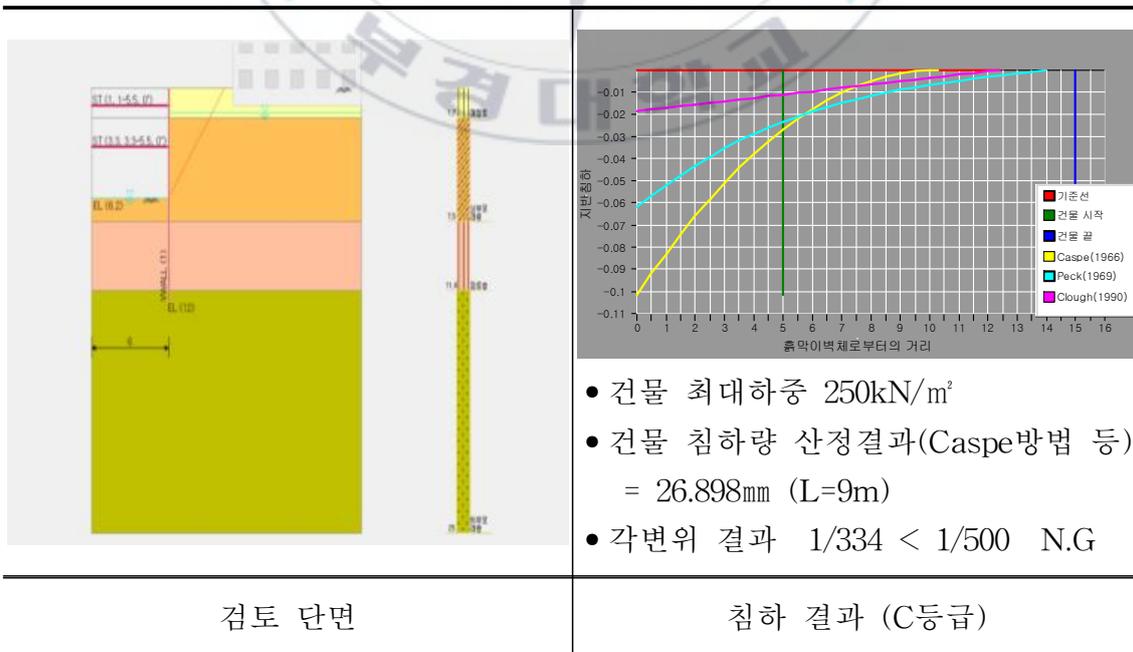


표 3.18 재산정 지반물성치 적용 결과 (변경설계)



## 라. 구조검토 결과 비교

당초 적용 지반에 비해 재산정된 지반에서 표 3.19와 같이 침하량 및 각변위가 크게 발생하였는데 이는 당초 원설계시 지반조건을 과다하게 양호한 상태로 반영하여 나타났다.

재산정된 지반조건에 당초설계 SCW공법 적용시 Sheet Pile공법 적용시보다 침하량 및 각변위가 작게 발생하는 것으로 나타났다. 분석 결과 당초설계 SCW공법(강성)이 변경 Sheet Pile공법(연성) 보다 지반 거동(침하)에는 유리한 것으로 나타났다.

표 3.19 흙막이공법 적용에 따른 구조검토 결과 비교

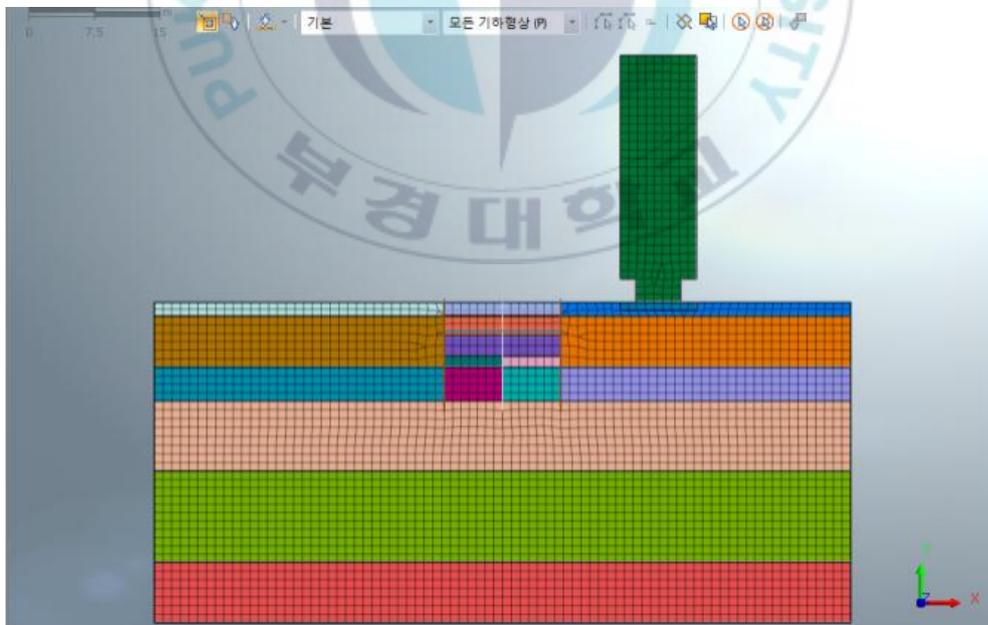
구 분 (건물 기준)		당초 지반 (Casper방법 등)	재조사 지반 (Casper방법 등)	비고
(원설계) SCW 공법 적용시	침하량	7.048 mm	14.766 mm	당초 대비 210% 증가
	각변위	1/1,214	1/609	기준 1/500
(변경설계) Sheet Pile 공법 적용시	침하량	9.441 mm	26.898 mm	당초 대비 285% 증가
	각변위	1/953	1/334	기준 1/500

## 5. 유한요소해석을 통한 침하량 산정

본 장에서는 하단동 신축현장 재산정 지반 물성치를 반영하여 굴착 단계시 지하수 저하에 따른 00오피스텔 건물의 침하량 결과를 유한요소해석방법(FEM, 완전연계해석)으로 수행하였다.

### 가. 사용 프로그램

사용 프로그램은 Midas社에서 개발한 지반범용해석 프로그램인 GTS NX(Ver 280)을 사용하였고, 해석 모델링의 폭은 기초폭(B)의 2.5배로 결정하였으며, 깊이는 기초깊이(D)의 3배이상, 풍화토층 37m까지 설정하였다.



00오피스텔 해석 모델링

그림 3.14 00오피스텔 유한요소해석 모델링

### 나. 지반의 투수계수 산정

본 검토시 적용한 지반투수계수는 각종 문헌자료 등을 토대로 합리적으로 적용하였으며, 적용값은 표 3.20과 같다.

표 3.20 지반 투수계수 적용

구분	매립토	모래층 자갈층	점토층	풍화토층	비고
투수계수 (k, m/sec)	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-5}$	문헌자료 참조

### 다. 굴착에 따른 지하수위 경향 분석

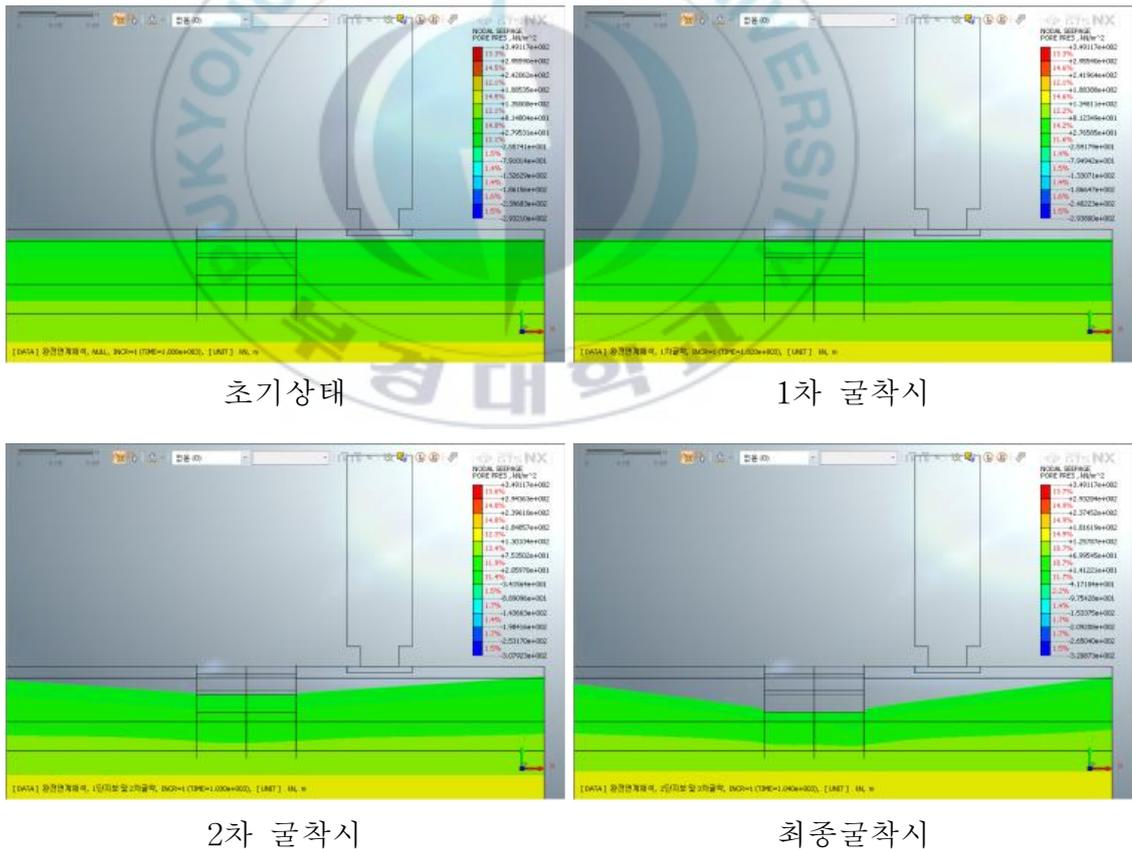
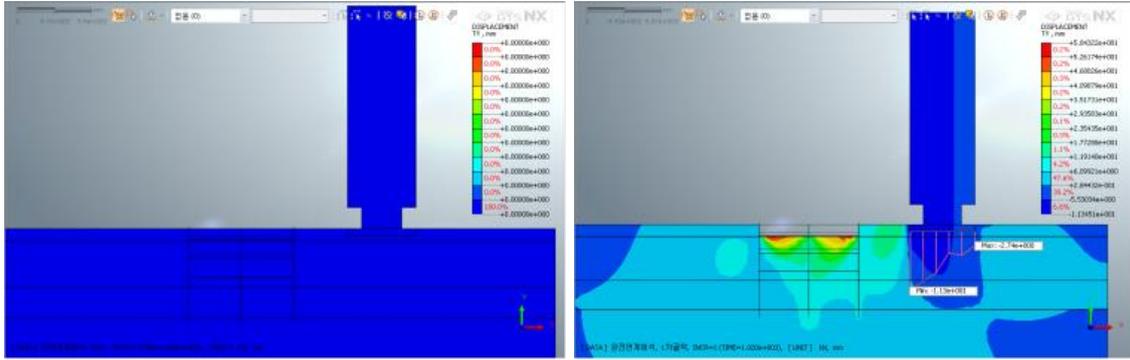
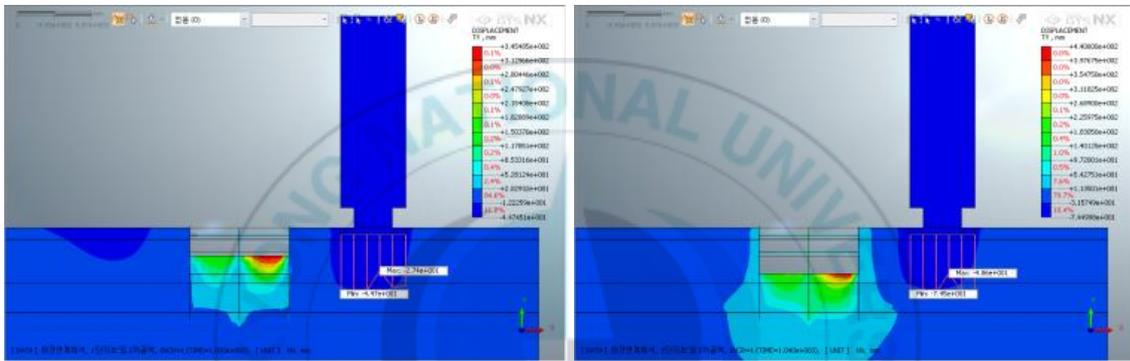


그림 3.15 굴착에 따른 지하수위 저하 경향



초기상태( $\delta_{Max} = 0.0mm$ )

1차 굴착시( $\delta_{Max} = 11.3mm$ )



2차 굴착시( $\delta_{Max} = 44.7mm$ )

최종굴착시( $\delta_{Max} = 74.5mm$ )

그림 3.16 굴착에 따른 지하수위 저하를 고려한 침하량 결과(완전연계해석)

표 3.21 유한요소해석을 통한 침하량 및 각변위 산정 결과

구 분	연직 침하량(mm)			판정	각 변위( $\delta/L$ )		판정
	최대 발생	최소 발생	허 용		최대 발생	허 용	
초기치	0.0	0.0	38.0	O.K	-	1/500	O.K
1차 굴착시	11.3	2.74	38.0	O.K	1/1,016	1/500	O.K
2차 굴착시	44.7	27.4	38.0	N.G	1/300	1/500	N.G
최종 굴착시	74.5	48.6	38.0	N.G	1/200	1/500	N.G

주) 최대 및 최소 길이(L) 8.7m(1차), 5.2m(2차, 최종)

## 라. 수치해석 결과 분석

① 경험적방법(Caspe방법, Peck방법, Clough방법)과 FEM수치해, 그리고 현장에 실제 발생된 각각의 연직최대 침하량과 각변위는 표 3.22과 같다.

표 3.22 경험적 방법(Caspe, Peck, Clough), FEM, 실제의 침하량 및 각변위 산정 결과

구 분	연직 최대침하량(mm)	각 변위( $\delta/L$ )	비고
Caspe 방법	26.8	1/334	
Peck 방법	23.4	1/383	
Clough 방법	11.1	1/810	
FEM 해석	74.5	1/200	
실제 발생	350	1/34	

② 과업부지 지반내 지하수위는 초기수위(G.L-1.4m)에서 신축현장 굴착단계에 따라 점차적으로 저하되는 것으로 경향이 확인되었고,

③ 지하수위의 저하를 반영한 완전연계해석시 굴착단계에 따라 침하량이 크게 저하되어 굴착최종시 74.5mm의 침하량과 1/200 부등각변위가 산정되었다. 이는 가시설 검토시 적용한 경험식방법(Caspe방법 등)에 의한 최대침하량 26.8mm 및 부등각변위 1/334에 비해 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

④ 분석 결과 탄소성법에서 경험식방법(Caspe방법 등)에 따른 침하량 및 부등각변위는 실제 발생된 인접건물의 변위 및 거동경향으로 볼 때 본 연구대상과 같은 연약 지반에서는 신뢰도가 낮은 것으로 사료되고, 연약지반에서는 지하수위와 연계한 수치해석방법으로 지반 및 인접건물에 대한 영향 분석을 하는 것이 더 타당한 것으로 나타났다.

⑤ 다만, 수치해석을 통해서 본 결과도 실제 연구대상 건물(00오피스텔)의 변위와는 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 지하수와 함께 유출된 토사유출이 미반영되고 건축물 하중에 따른 압밀영향 등의 조건을 고려하지 못하는 해석상의 한계인 것으로 분석된다.



## 6. 계측 관리

하단동 00신축현장 굴착으로 인해 인접한 하단동 00오피스텔 기움 현상(부등침하)에 대해 기울기 발생시부터 복원시까지의 기울기 변화를 계측하였다.

### 가. 일반적인 흙막이 계측관리 개요

계측관리란 굴착에 따른 흙막이벽과 지보공의 변형, 흙막이벽에 작용하는 수압, 주변 지반과 구조물의 상황 등을 측정하고, 그 결과를 설계상의 가정조건 및 계산결과와 비교 검토하여 공사의 안정성을 판단하고 후속 공정에서의 거동을 예측 분석한다.

흙막이에서의 계측관리 목적은 다음과 같다.

- ① 설계시 지반조건에 관한 정보부족으로 인한 설계상의 결점을 시공 중에 발견하여 제거하기 위한 수단
- ② 굴착 공사가 지반에 미치는 영향과 그에 따른 지반의 변화가 구조물에 미치는 영향을 계측하여 안전관리에 도움을 주기 위한 수단
- ③ 굴착공사로 인한 법적 분쟁 발생시 증거 자료로 제시
- ④ 굴착으로 인한 인접 건물 및 구조물의 변위를 계측하여 안전시공 관리를 위한 자료로 제공
- ⑤ 설계에서 적용된 설계값과 실측값을 대비, 분석하여 안전관리를 하기 위한 수단
- ⑥ 계측된 자료를 수집, 정리, 분석하고 차후 구조물 설계 및 시공에 적용하여 경제성 및 안정성을 도모

## 나. 본 연구 대상 건축물 계측관리 목적 및 현황

- ① 굴착공사로 인해 건축물 부등침하 발생. (현장방향 최대 350mm)
- ② 지반보강공사 전까지 지속 변위 발생. (최대 각변위 1/34 발생)
- ③ 지반보강공사 및 공사 완료 후 건물 각변위 관찰  
(보강공사 완료 이후 변위 수렴 및 복원 완료 검증)

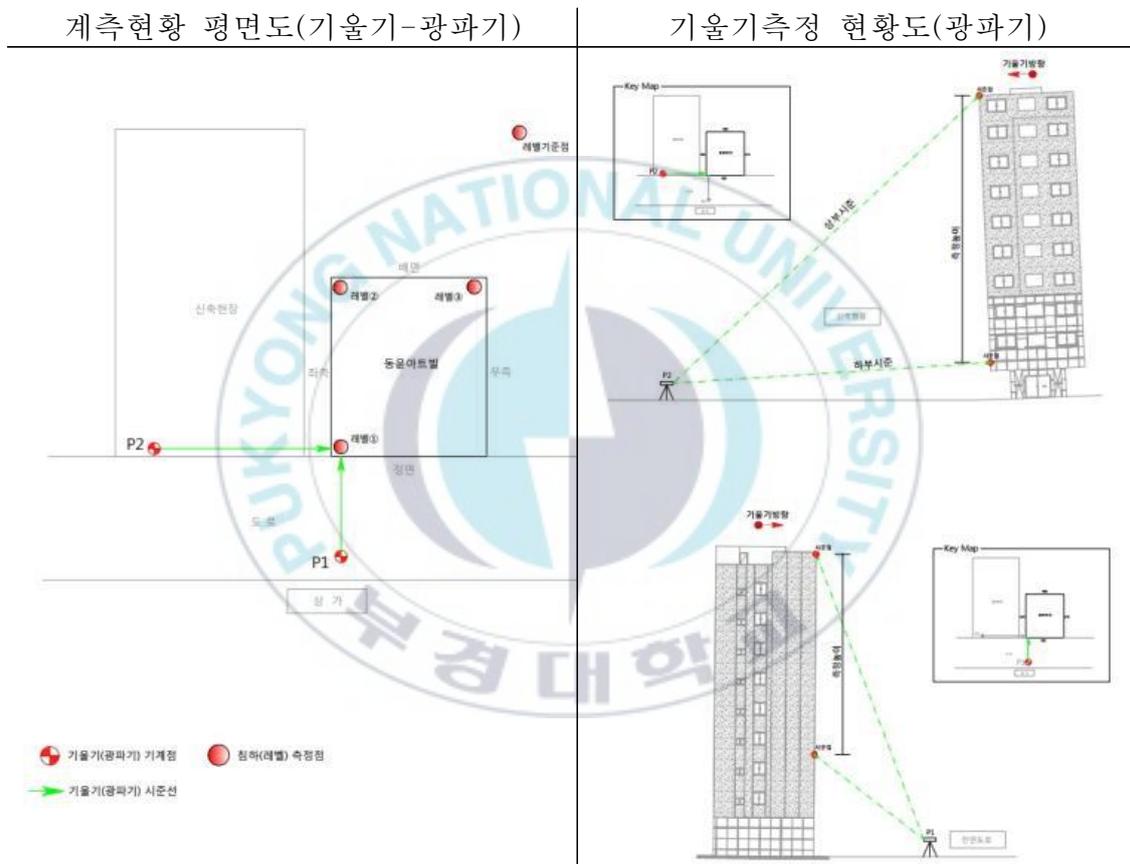


그림 3.17 대상 건축물(하단동 00오피스텔) 계측 측정 현황

### 다. 대상 건축물 계측관리 결과

본 연구 대상 건축물 계측관리는 2017년 9월 4일에 설치(초기치)하여 Eco CG 지반보강(2017.09.15) 및 D-ROG 복원공사(2017.10.17)를 완료하고 3개월 이후까지 계측한 결과는 표 3.23과 같으며, 부분적으로 요약하여 정리하였다.

표 3.23 대상 건축물 계측관리 결과 정리

구 분	P1지점		P2지점		비고
	수평변위(m)	기울기	수평변위(m)	기울기	
2017. 09. 04	0.215	1/116	0.735	1/34	초기치
09. 10	0.217	1/115	0.790	1/32	
09. 15	0.212	1/118	0.797	1/31	보강 시작
09. 22	0.216	1/116	0.999	1/25	보강 완료
09. 30	-	-	1.052	1/24	
10. 04	-	-	1.056	1/24	
10. 09	-	-	1.058	1/24	천공작업
10. 10	-	-	0.858	1/29	복원 1일차
10. 11	-	-	0.565	1/44	복원 2일차
10. 12	-	-	0.313	1/80	복원 3일차
10. 13	-	-	0.015	1/1,634	복원 4일차
10. 14	-	-	0.015	1/1,634	복원 완료

주1) 수평변위는 광파기 시준높이를 기준높이(25m)로 보정한 환산 값

주2) P1지점은 공사웬스 설치로 09. 25일 이후부터 측정 불가

표 3.23 대상 건축물 계측관리 결과 정리(계속)

구 분	P1지점		P2지점		비고
	수평변위(m)	기울기	수평변위(m)	기울기	
17' 10. 17	-	-	0.021	1/1,167	
10. 20	-	-	0.023	1/1,086	
10. 25	-	-	0.024	1/1,063	
10. 30	-	-	0.024	1/1,063	
11. 06	-	-	0.021	1/1,180	
11. 16	-	-	0.025	1/1,012	
11. 27	-	-	0.025	1/1,012	
12. 04	-	-	0.025	1/1,012	
12. 11	-	-	0.025	1/1,012	
12. 26	-	-	0.025	1/1,012	
18' 01. 05	-	-	0.025	1/1,012	
01. 12	-	-	0.025	1/1,012	
01. 22	-	-	0.025	1/1,012	

표 3.23과 같이 건축물 기울기 변위 진행은 초기치(09. 04)부터 Eco CG보강(10. 09)까지는 지반보강공사로 인한 거동으로 오히려 증가하였고 D-ROG복원공사(10. 10) 이후부터 변위는 점차 감소하여 기울기가 복원되고 있는 것을 알 수 있었다.

D-ROG복원공사 완료 시점을 기준으로 1/1,634 까지 복원되었으며 이후 1/1,063~1,167 범위에서 미소하게 변화를 보여주다 2017. 11. 06일부터는 최종계측인 2018. 01. 22일까지 1/1,012 기울기로 수렴된 결과를 보여주고 있다.

아래 그림 3.18은 보강공사 및 건물복원 추이를 나타내었다.

복원전	1일차	2일차	3일차	4일차	5일차
105	86	57	32	2	0.5



그림 3.18 대상 건축물(하단동 00오피스텔) 보강공사 및 건물 복원 추이

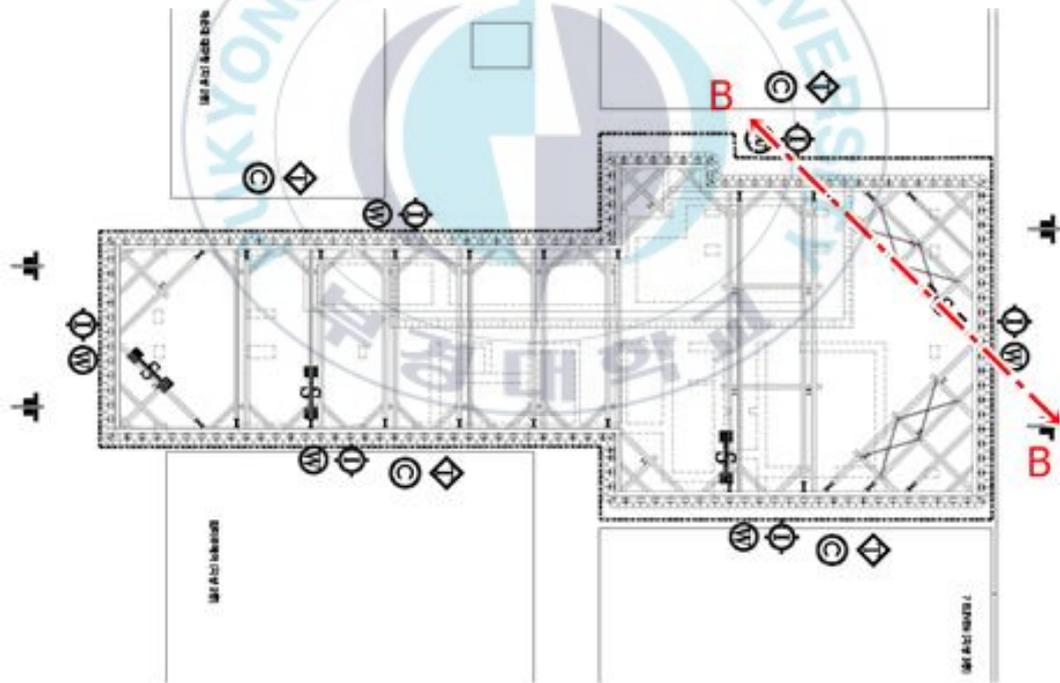
따라서, 대상 건축물(하단동 00오피스텔) 보강 및 복원공사를 완료한 최종 기울기는 1/750 이상으로 A등급으로 평가할 수 있으며, 부등침하로 인해 발생한 건물에 대해 적용한 보강 및 복원공법은 효과를 나타낸 것으로 분석된다.

## IV. 사례분석을 통한 가시설 설계방법 검토

### 1. 유사사례 현장 개요

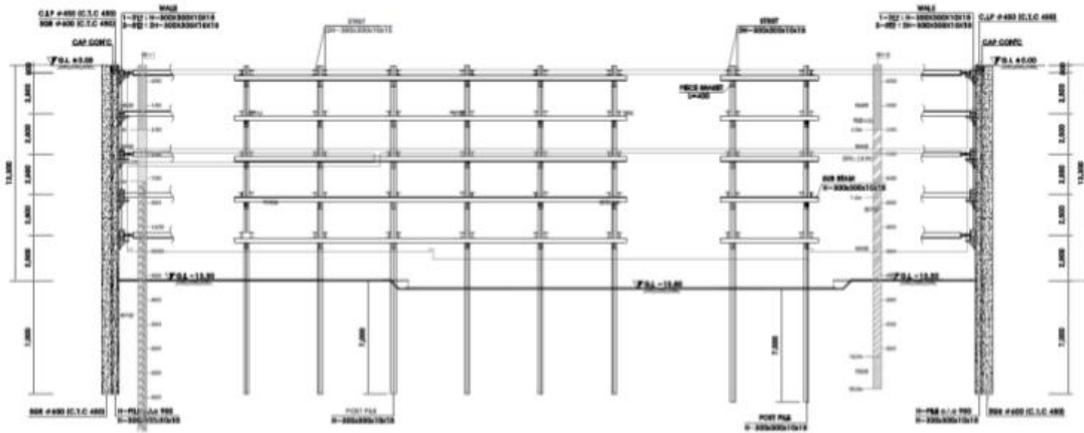
본 장에서는 연구대상과 유사한 연약지반 굴착현장에서 계측한 결과 값을 토대로 하여 흙막이 설계시 산정된 이론적 침하량과 지하수 유출에 따른 유한요소해석을 통한 침하량을 서로 비교해 보았다.

계측 사례는 부산 00구 00동 호텔 신축공사 현장이다.



(a) 가시설 (계측)평면

그림 4.1 부산 00구 00동 호텔 신축공사



(b) 가시설 단면(B-B)

그림 4.1 부산 00구 00동 호텔 신축공사 (계속)

## 2. 설계조건

- (1) 공사명 : 부산 00구 00동 00호텔 신축공사
- (2) 지하 굴토공사 개요
  - 가) 굴착방법 : C.I.P 공법(Ø450mm, C.T.C 450mm)
  - 나) 굴착심도 : G.L(-) 13.3m
  - 다) 사용자재
    - H-Pile : H-300×300×10/15, C.T.C 0.9m
    - Wale : H-300×300×10/15, H-300×305×15/15
    - Strut : H-300×300×10/15

### 3. 이론적 침하량 산정

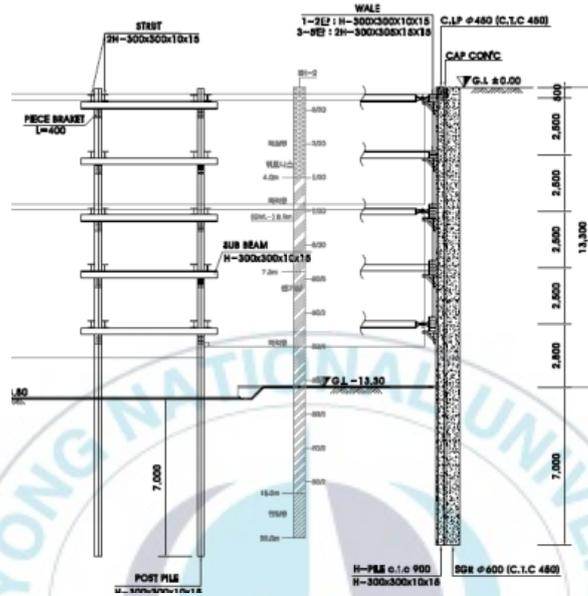


그림 4.2 검토단면도 (B-B)

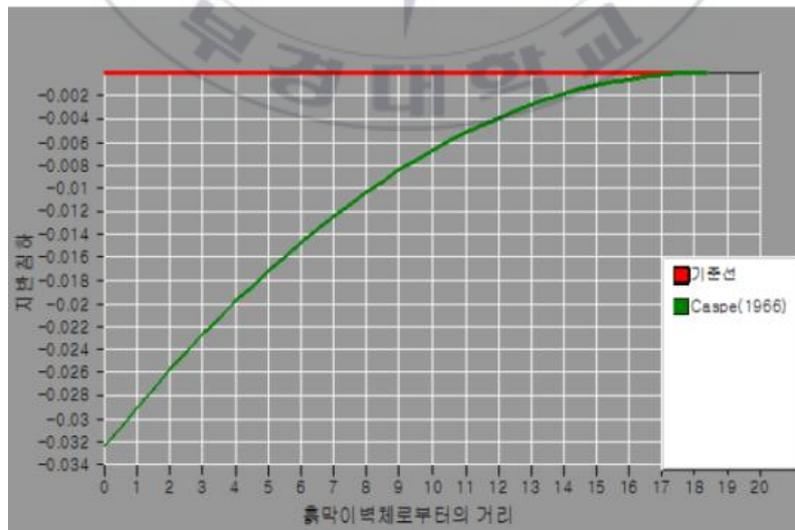


그림 4.3 최대 침하량 산정 결과그래프(Caspe 방법,32mm)



## 5. 유한요소해석을 통한 침하량 산정

본 장에서는 하단동 00호텔 신축공사 현장 굴착단계시 지하수 저하에 따른 지반 침하량 결과를 유한요소해석방법(FEM, 완전연계해석)으로 수행하였다.

### 가. 사용 프로그램

사용 프로그램은 Midas社에서 개발한 지반범용해석 프로그램인 GTS NX(Ver 280)을 사용하였고, 해석 모델링은 SEC B 반단면(Corner Strut, B=10m)을 기준하여 폭(B)은 5.0배로 결정하였으며, 깊이는 기초깊이(D)의 약 3배, 40m까지 설정하였다.

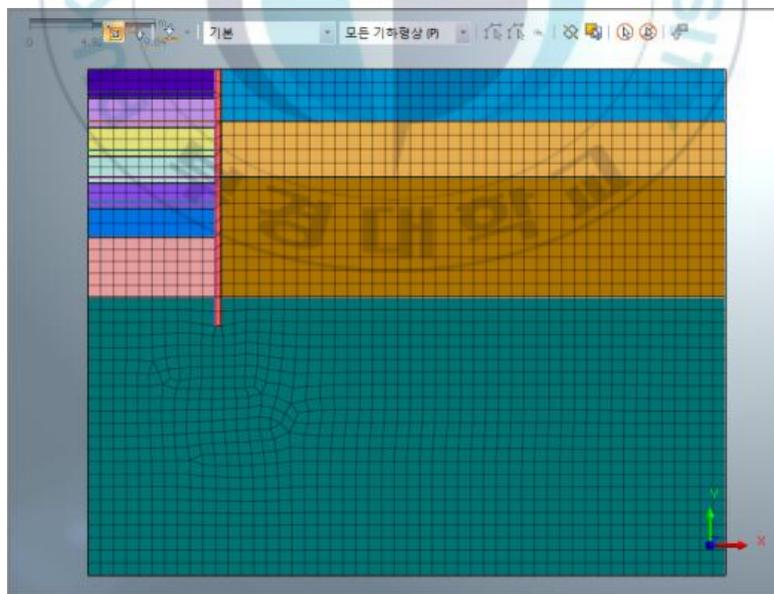


그림 4.6 00호텔 신축공사 유한요소해석 모델링

## 나. 해석 지반물성치(설계 지반물성치 인용)

표 4.1 해석 지반 물성치

구 분	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	마찰각 (°)	점착력 (kPa)	변형계수 (kPa)	포아송비	비 고
매 립 층	18.0	20	10	6,500	0.35	-
모래점토	19.0	15	15	5,000	0.35	-
모래자갈	20.0	35	0	60,000	0.30	-
연암층	24.0	30	50	1,000,000	0.20	-
CIP	24.0	35	100	2.3E+7	0.25	

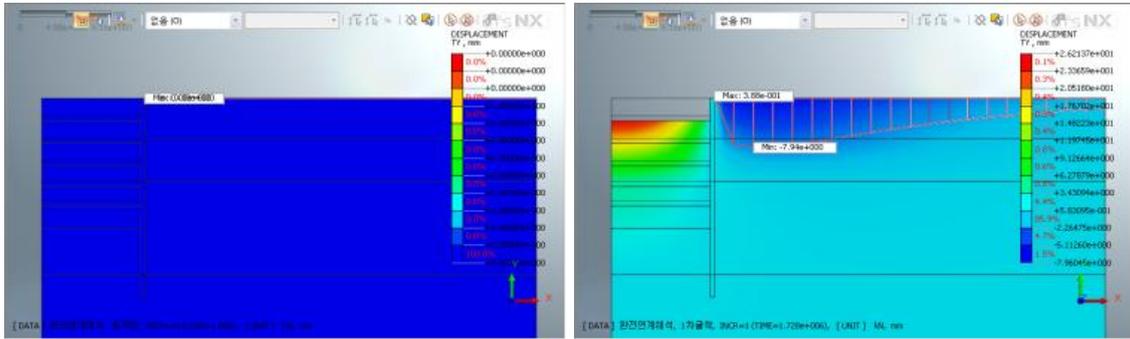
## 다. 지반의 투수계수 산정

본 검토시 적용한 지반투수계수는 각종 문헌자료 및 계측자료시 측정한 초기수위와 굴착시 최대(-)8.0m 지하수위 조건을 반영한 투수계수를 적용하였다.

표 4.2 지반 투수계수 적용

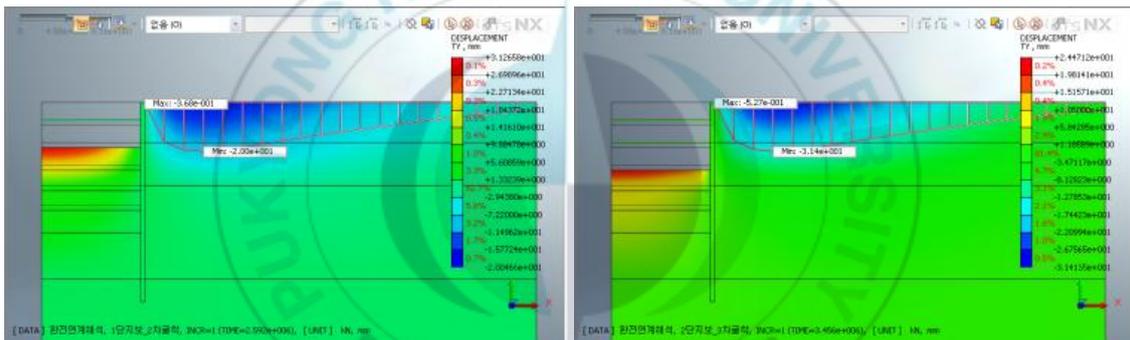
구 분	매립토	모래점토층	모래자갈층	연암층	비 고
투수계수 (k, m/sec)	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-6}$	문헌자료 계측자료

라. 굴착에 따른 지반 침하량 산정 결과



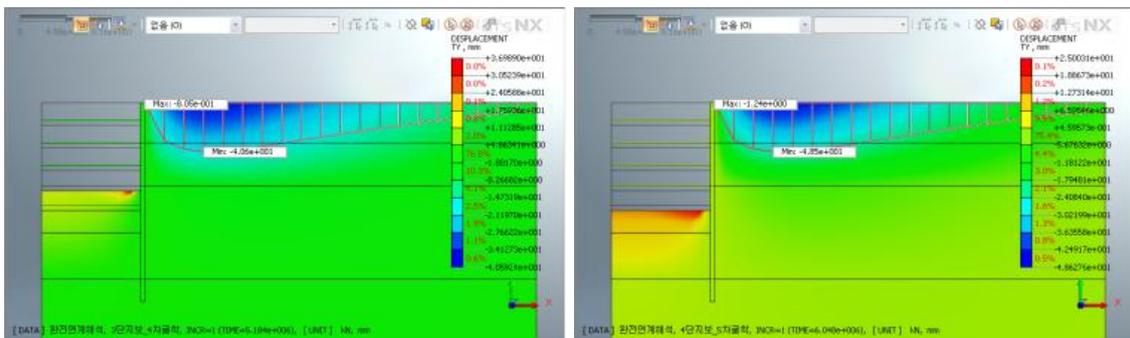
초기상태( $\delta_{Max} = 0.0\text{mm}$ )

1차 굴착시( $\delta_{Max} = 7.9\text{mm}$ )



2차 굴착시( $\delta_{Max} = 20.0\text{mm}$ )

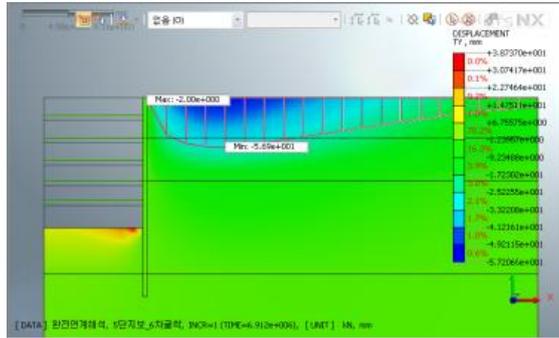
3차 굴착시( $\delta_{Max} = 31.4\text{mm}$ )



4차 굴착시( $\delta_{Max} = 40.6\text{mm}$ )

5차 굴착시( $\delta_{Max} = 48.5\text{mm}$ )

그림 4.7 굴착에 따른 지하수위 저하를 고려한 침하량 결과(완전연계해석)



최종 굴착시( $\delta_{Max} = 56.9\text{mm}$ )

그림 4.7 굴착에 따른 지하수위 저하를 고려한 침하량 결과(완전연계해석) (계속)

표 4.3 유한요소해석을 통한 침하량 산정 결과

구 분	최대 침하량(mm)	비 고																
초기치	0.0	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>원지반</th> <th>1차굴착</th> <th>2차굴착</th> <th>3차굴착</th> <th>4차굴착</th> <th>5차굴착</th> <th>최종굴착</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>침하량 (mm)</td> <td>0.00</td> <td>-7.62</td> <td>-19.47</td> <td>-30.81</td> <td>-40.14</td> <td>-48.24</td> <td>-56.91</td> </tr> </tbody> </table>		원지반	1차굴착	2차굴착	3차굴착	4차굴착	5차굴착	최종굴착	침하량 (mm)	0.00	-7.62	-19.47	-30.81	-40.14	-48.24	-56.91
	원지반		1차굴착	2차굴착	3차굴착	4차굴착	5차굴착	최종굴착										
침하량 (mm)	0.00		-7.62	-19.47	-30.81	-40.14	-48.24	-56.91										
1차 굴착시	7.9																	
2차 굴착시	20.0																	
3차 굴착시	31.4																	
4차 굴착시	40.6																	
5차 굴착시	48.5																	
최종 굴착시	56.9																	

## 라. 수치해석 결과 분석

① 경험적방법(설계시 Caspe방법)과 FEM수치해석, 그리고 현장에 실제 발생된 각각의 연직최대 침하량과 각변위는 표 4.4와 같다.

표 4.4 경험적 방법(Caspe방법), FEM수치해석, 실제의 침하량 산정 결과

구 분	연직 최대침하량(mm)	비고
Caspe 방법	32.0	
FEM 해석	56.9	
실제 발생	153.0	

② 과업부지 지반내 지하수위는 초기수위(G.L-1.0m)에서 최대 G.L (-)8.4m 까지 저하되는 것으로 반영하였으며,

③ 해당 지하수위의 저하를 반영한 완전연계해석시 굴착단계에 따라 침하량은 증가되어 굴착최종시 56.9mm의 침하량이 산정되었다. 이는 가시설 검토시 적용한 경험식방법(Caspe방법)에 의한 최대침하량 32.0mm에 비해 크게 증가되는 것으로 확인되었다.

④ 따라서, 타 현장의 사례 분석 결과에서도 탄소성범에서 경험식방법(Caspe방법 등)에 따른 침하량은 실제 발생된 지반침하 및 거동경향으로 볼 때 지하수위 저하와 연계한 수치해석방법으로 굴착에 따른 지반침하(거동) 영향 분석을 하는 것이 더 타당한 것으로 사료된다.

## V. 결 론

연약지반에서의 근접 굴착공사 시 피해가 발생한 현장의 사고원인 규명과 피해구조물 복구방안 검토를 위해 경험적인 방법과 수치해석을 수행하였고, 부등침하가 발생한 피해구조물의 기초보강(재설계)을 통한 건물의 안정성 및 복원, 이후 변화 결과는 계측을 통해 확인하였다. 그리고 유사사례를 검토하여 연약지반 조건의 가시설 설계방법에 대하여 검토하였다.

본 논문에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 토질시험으로 중간점토층을 발견하였고 재산정한 지반조건으로 산정한 인접건물 침하량이 당초 추정지반 특성에 크게 증가하는 것으로 나타났다.
2. SCW 흙막이벽체를 Sheet Pile 흙막이벽체로 변경하면 인접 건물 침하량이 크게 증가하는 것으로 확인되어 Sheet Pile 연성벽체가 SCW 보다 지반거동에 더 취약한 것으로 확인되었다.
3. 부등침하가 발생한 건물에 대한 기초보강공법으로 적용한 EcoCG 공법은 요구지지력을 만족하고, 건물복원을 위해 적용한 D-ROG공법의 경우 계측을 통해 A등급(1/750이상)으로 복원된 것으로 확인되어 인접 건물에 적용한 기초 및 복원공법은 적정하고 효과적인 것으로 나타났다.

4. 유한요소해석 방법으로 굴착에 따른 지하수위 저하와 연계한 침하량을 산정한 결과 경험적 Caspe방법 등에 의해 산정한 결과에 비해 크게 증가하는 것으로 나타났으며 이는 본 연구대상 지역의 지반거동에 부합되는 것으로 나타났다. 또한 타 현장 사례분석 결과에서도 연약지반을 굴착할 경우에는 유한요소해석 방법으로 주위지반의 거동(영향)을 분석하는 것이 실제 지반변위를 예측하는 데 가장 적합한 것으로 판단된다.

최종적으로 본 연구결과에서 당초 설계시 간접 추정된 지반특성은 토질시험에 따른 지반특성 즉 연약지반과 다른 지반임을 알 수 있었으며, 또한 SCW 강성벽체에 비해 Sheet Pile 연성벽체에서 침하량의 차이가 더 크게 나타나는 점을 감안하면 향후 연약지반 설계시 토질시험에 의한 지반특성 파악이 매우 중요하고 인접 건물 등의 주변 환경을 보다 정확히 고려한 설계법, 즉 지반해석(유한요소해석)을 수행한 거동 분석이 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 기홍석(1998), “깊은 굴착에 있어서 근접지반의 거동 예측”, 석사학위 논문, 전남대학교.
2. 심태섭, 정상국(1996), “Strut지지 흙막이벽체의 거동분석 및 관리기준치 산정에 관한 연구”, 96년도 학술발표회논문집(Ⅱ), 대한토목학회, pp.183~186.
3. 홍원표, 이기준(1992), “앵커지지 굴착 흙막이벽에 작용하는 측방토압” 한국지반공학지, 제24권, 제3c호, pp.183~191.
4. 오정환(1996), “지하굴토 흙막이공에서 유압잭 설치에 따른 흙막이벽 및 인접지반에 미치는 영향”, (주)한국지오컨설턴트 부설기술연구소.
5. 오정환, 조철연, 백영식(1998), “도심지 지하굴착시 인접지반 거동에 대한 분석”, 98학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.321~240.
6. 김영모, 정충기, 양구승(1996), “도심지 깊은 굴착시 발생하는 인접지반의 지표침하분석” 한국지반공학회 96학술발표회, pp.65~86.
7. 김연정(1998), “도심지 굴착에 따른 흙막이벽체의 거동과 겉보기토압” 성균관대학 석사학위논문.
8. 이상윤(2002), “지반굴착에 의한 인접구조물과 지반의 거동 특성” 아주대학교 석사학위논문.
9. 이민근(2002), “지반굴착시 인접구조물의 손상영향 평가에 대한 수치해석”, 단국대학교 석사학위논문.
10. 김경식(2007), “토류굴착 주변지반의 변위해석 연구”, 조선대학교

석사학위논문.

11. 최정호(2007), “지반굴착 시 인접건물에 미치는 영향에 관한 연구”, 전북대학교 석사학위논문.
12. 지반공학시리즈 “굴착 및 흩막이 공법”, 한국지반공학회(1998).
13. 한국시설안전공단 기준(1993), “건축물 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침”.
14. Bowles, J. E. (1988). "Foundation Analysis and Design", McGraw-Hill Book Company, pp.471~491.
15. Rankine, W. M. J. (1857). "On Stability on Loose Earth", Philosophic Transactions of Royal Society, London, Part I. pp.9~27.

