

## 연약지반 깊은 굴착에서 지보재 및 지반 파괴 사례 연구 Case Study of Ground and Supporting System Failure in Soft Ground Deep Excavation

김성욱<sup>1)</sup>, Sung-Wook Kim, 한병원<sup>2)</sup>, Byung-Won Han

<sup>1)</sup> (주)바이텍코리아 전무이사, Executive Director, Baytech Korea Inc.

<sup>2)</sup> (주)바이텍코리아 기술연구소 책임연구원, Responsible Researcher, Institute of Technology, Baytech Korea Inc.

**SYNOPSIS** : We find out many soft ground deep excavation cases where results of careless overexcavation accelerate the advance of loosening zone of adjacent ground, bucklings of struts and bottom heaves happen due to delayed supporting time. This article introduces a soft ground deep excavation case where steel pipe sheet piles were used with struts as an earth retaining system. There were 2 times of buckling in the supporting system and heaving of bottom ground due to overexcavation and insufficient penetration depth of the steel pipe sheet piles. The effort of this article aims to improve and develop the technique of design and construction in the coming projects having similar ground condition and supporting method.

**Key words** : overexcavation, bucklings of struts, bottom heaves, steel pipe sheet piles, penetration depth, technique of design and construction

### 1. 서 론

매우 연약한 연약지반상의 굴착공사에서 부주의한 과굴착에 의해 지반의 이완 진전이 촉진되고 또한 적정시기에 지보가 불가함에 따라 가시설 지보재의 변형 및 지반의 Heaving등이 발생하는 경우가 많다. 본 논문은 벽강관을 토류공법으로 하는 연약지반상의 굴착공사에서 과굴착 및 벽강관의 근입심도 부족에 기인한 벽강관 선단부 변형으로 2차례의 가시설 변형 및 지반 Heaving이 발생한 사례를 고찰함으로써 유사 지반 및 동일공법 적용 Project들의 향후 설계, 시공과정에서 개선, 보완해야할 사항들을 제안하고자 한다.

### 2. Arching Effect 발생사례 연구

#### 2.1 공사개요 및 시공현황

- 토류공법 : 벽강관( $\Phi 711.2 \times 16t$ )
- 지지공법 : 버팀보 공법(H-350x350x12x19, H-400x400x18x18, H-300x305x15x15 : 보강Corner Strut )
- 지반보조공법 : Well Point 공법
- 지반상태 : · 매립층(Sand ~ Silty Sand, 세립 ~ 중립질 모래)
  - Silty Clay층(very soft ~ medium dense)
  - Sand층(세립 ~ 조립질 모래, medium dense ~ dense)
  - Sandstone층(상당히 풍화, 손가락으로 부서짐)



## 2.2 지반조건

굴착대상 부지에 근접하여 시행한 지반조사 결과를 참고로 하면 지층은 상부로부터 매립층, Silty Clay 층, Sand층, Sandstone층, Shale층으로 구성되며 각 지층의 특성은 다음과 같다.

표 1. 지층분포 특성

구분	층후(m)	N 치	특성
매립층	10.9	4~15	Sand ~ Silty Sand, fine to medium Sand, very loose ~ medium dense, dark gray
Silty Clay층	18.0	1~7	Clayey Silt(상부), Silty Clay(하부), very soft ~ medium dense, 운모 파편 보임, dark gray
Sand층	1.5	25~48	fine to coarse Sand, medium dense ~ dense, 운모 파편 보임, dark gray
Sandstone층	0.9	100/9	completely to highly weathered, 손가락으로 부서짐, yellowish gray
Sandstone ~ Shale층	2.0(시추종료)	-	highly weathered to slightly weathered, fracture and joint 발달, T.C.R. = 40 ~ 83 %, R.Q.D. = 0 ~ 71%

\* 굴착대상 부지는 굴착시행시 13.5m 층후를 1:2 구배로 정리함  
 상기 지반조사 Boring 공에서 채취한 시료에 의한 실내시험 시행결과는 다음과 같다.

표 2. Result of Soil Test

Sample Depth (G.L.-m)	Wn (%)	Gs	Y <sub>t</sub> (t/m <sup>3</sup> )	Y <sub>d</sub> (t/m <sup>3</sup> )	e	S <sub>r</sub> (%)	U.S.S.R	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI	q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	St	Cc
1.9	46.3	2.68	1.784	1.219	1.20	100	CH	55.2	24.5	30.7	0.71	0.95	6.8	0.55
5.9	58.2	2.69	1.681	1.062	1.53	100	CH	70.2	26.7	43.5	0.72	0.72	7.2	0.65
9.9	50.2	2.70	1.734	1.154	1.34	100	CH	72.4	26.3	46.1	0.52	1.09	7.2	0.56
13.9	49.6	2.69	1.785	1.194	1.25	100	CH	69.8	26.4	43.4	0.53	1.04	6.9	0.55

## 2.3 계측결과 분석

### 2.3.1 지중경사계(S2)

- 경사계 S2는 굴착작업 시행전 3월 8일 설치가 완료되었으나 초기치 측정은 G.L.-2.5M까지의 굴착이 이루어진 상태에서 3월 16일 시행됨.
- G.L.-2.5M까지의 굴착영향이 3월 20일까지의 변위로 나타났으며 3월 21일에는 경사계 S2 좌측 전방의 추가 굴착(G.L.-6.0M)에 따른 원인으로 급격한 변형이 발생함.(영향범위 : 굴착깊이의 2배정도)
- 3월 23일 1단 버팀보 설치 완료시까지 변위가 증가되었으며 4월 1일 까지 약간의 변위가 더 증가함.
- 4월 3일에는 1단 버팀보 상부로의 추가 보강 Corner Strut 설치 및 경사계 S4 전면의 추가 굴착에 따른 영향으로 굴착배면쪽으로 변위의 방향이 바뀌는 경향을 보이다 4월 4일에는 다시 굴착면쪽으로 변위가 나타남.

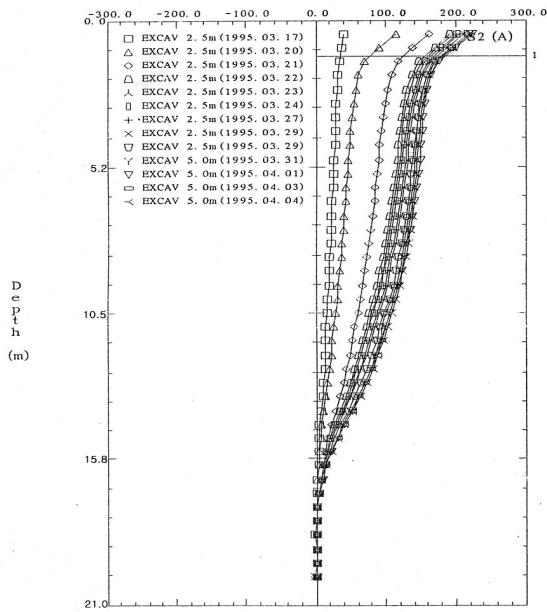


그림 4. Cumulative Deflection Graph

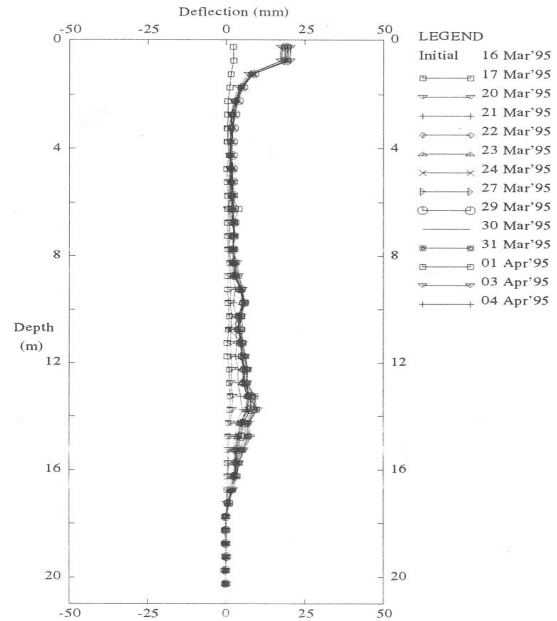


그림 5. Incremental Deflection Graph

- 이후 4월 19일 2단 버팀보 설치 완료시까지의 미세한 변위의 증가가 나타났으며 4월 18일 재개된 추가 굴착으로 점진적인 변위의 증가가 나타나다가 4월 28일에는 경사계 설치지점 전면부에서 경사계 S2쪽으로 추가 굴착 면적이 확대되면서 5월 4일까지 전반적으로 변형이 증가함. 이 기간 동안의 변위양상은 1, 2단 버팀보가 설치된 지점까지는 별다른 변위가 없고 G.L.-14M지점에서 급격한 Incremental Deflection의 증가가 나타남. 이 하루 Sand층에서의 Incremental Deflection은 경사계 S2가 최대값을 나타냈으며 전반적인 변위 양상은 경사계 S1, S2, S3 모두 비슷한 형태를 나타내었음.
- 지층 경계부인 Sand층에서의 급격한 Incremental Deflection의 증가로 5월 4일에는 1, 2단 Strut부에 변형이 발생함. 3단 버팀보 설치가 미비된 상태에서 무리하게 굴착이 진행되어 2단 버팀보가 분담할 하중이 증가하여 나타난 현상으로 이 시기에 1단 하중계는 축력이 급속히 감소하고 2단 하중계는 축력이 급속히 증가하는 경향이 나타남.
- 경사계 S2, S4의 수평변위 양상은 4월 25일부터 상부층은 굴착배면쪽으로 하부층은 굴착면쪽으로 움직이는 형태를 보여 측방유동의 상황을 관찰할 수 있으며 5월 4일 2단 버팀보 휨 변형 발생후 현장 조사 결과에서도 기 용접 설치된 3단 버팀보 설치용 받침 Bracket의 위치가 변경되어 설치된 사실에서도 지반 용기 현상이 확인되었으며 현장조사 결과는 그림9와 같음.
- G.L.-14M지점은 5월 6일 이후 6월 8일까지 약 7mm의 추가 Incremental Deflection이 발생함. 6월 8일 이후부터의 구조물 Con'c타설 작업, 덧채움 작업에 따른 별다른 변위의 증가 경향은 나타나지 않음.

### 2.3.2 하중계 및 변형률계

- 하중계 및 변형률계는 현장에서 굴착작업이 3월 11일부터 시작되어 1단 버팀보가 일부 설치된 상태에서 3월 21일 1단 버팀보, 벽강관, Wale에 변형이 발생한 후에 설치가 시작됨.
- 굴착과 연계된 신속한 지보재 설치가 미비된 상태에서 무리한 굴착작업에 따라 불필요한 지반 변형이 발생하여 굴착면 주위 지반이 이완되고 더욱 큰 토압이 버팀보에 작용하여 초기에는 일부 1단 버팀보 변형률계 계측치가 설계치 76.03Ton을 상회하는 결과가 나타남.(변형률계 S2-1A, S2-1B)
- 4월 3일에서 4일에 걸쳐 1단 Corner Strut를 추가로 보강하였으며 실시공 상태 및 현장여건, 설계내용을 재검토하여 2단 버팀보를 Double Strut로 변경함.

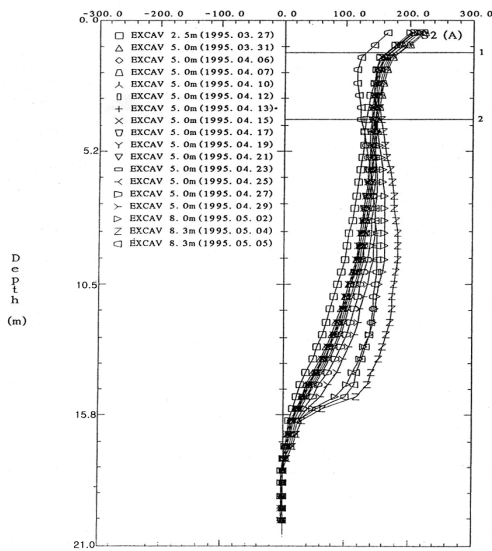


그림 6. Cumulative Deflection Graph

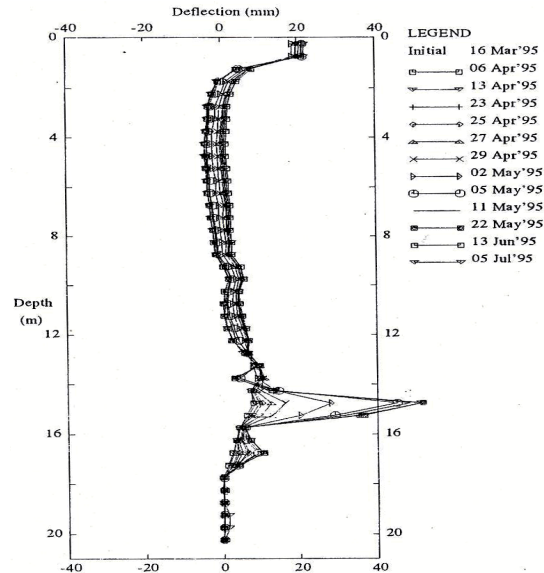


그림 7. Incremental Deflection Graph

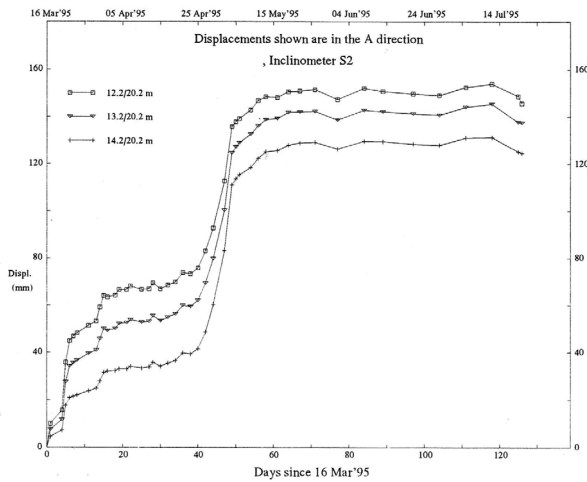


그림 8. Time & Displacement Graph

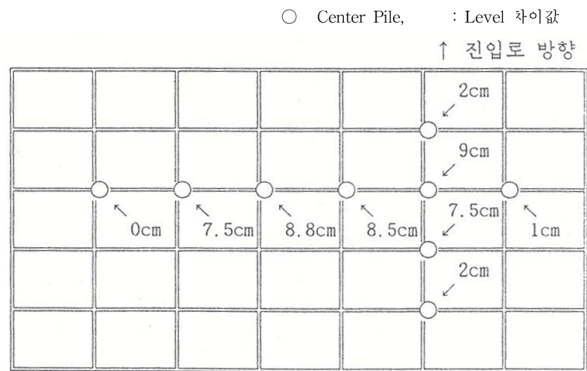


그림 9. 3단 Bracket 설치지점 위치 변경사항

표 3. 예상 버팀보 최대 축력 및 허용응력

구분	최초 설계치(Ton)	변경설계치(Ton)	허용압축응력(kg/cm <sup>2</sup> )
1단버팀보	76.03	195.8	1606
2단버팀보	132.54	431.4(D)	1656
3단버팀보	308.7(D)	153.2(D)	1656

D: Double Strut

- 버팀보에 작용하는 축력 및 부재의 응력은 2단의 경우 4월 20일경을 기점으로하여 증가 추세이며 1단은 감소추세임. 특히 1단 하중계 및 변형률계의 경우 4월 25일을 기점으로 축력이 급격히 감소하거나 응력의 부호가 변화하는 경향을 보였음. 이는 3단 버팀보 설치가 미비된 상태에서 무리한 굴착이 진행되어 2단 버팀보에서 분담하는 하중이 증가한 효과와 연약한 하부 해성 점토층의 측방유동에 의한 효과가 복합적으로 작용한 결과로 판단되었음.(그림 10, 11, 12참조)
- 5월 6일 이후 경사계 S4쪽 잔여 부분의 추가 굴착(G.L.-8.3 ~ 9.7M)에 따른 영향으로 다시금 2단 버팀보 하중은 증가하고 1단 버팀보 하중은 감소하는 상태를 나타냄. 이는 3단 버팀보 설치가 미비

된 상태에서 3단 버팀보 하부로 추가 굴착이 이루어지므로써 2단 버팀보 하부 Sand층에서의 변형을 유발하여 Arching현상(Load Transfer)에 의해 2단부 하중이 증가하는 현상을 초래한 것으로 판단됨. 1단부는 3단 버팀보 하부층의 변형에 따라 굴착면 배면쪽으로 변형하는 현상으로 하중이 감소된 것으로 판단됨.

- 이후 5월 15일까지 3단 버팀보 설치가 완료되고 3단 버팀보 Jacking을 시행한 결과 2단 버팀보 하중은 감소하고 3단 버팀보에는 하중이 나타나기 시작하였으며 2단은 이어서 바로 수렴하고 3단은 감소후 수렴하는 결과를 보임.
- 5월 27일 시행된 3단 버팀보 일부 제거로 인하여 잔여 3단 버팀보의 하중이 급증하는 상태를 보이다가 다시 감소후 수렴하는 경향을 나타냄. 6월 10일 완료된 2단 버팀보지점까지의 구조물 Con'c 타설작업으로 인하여 재하효과 및 이에 따른 하중 재분배 현상에 따라 6월 12일 부터 6월 15일 까지 2단 버팀보 하중이 감소하는 경향을 나타내었으며 이후 6월 20일 까지는 약간의 하중 증가현상을 보임. 6월 20일 1단 버팀보 위치까지 Con'c 타설 작업이 진행됨에 따라 2단부의 하중계 측정을 종료함.

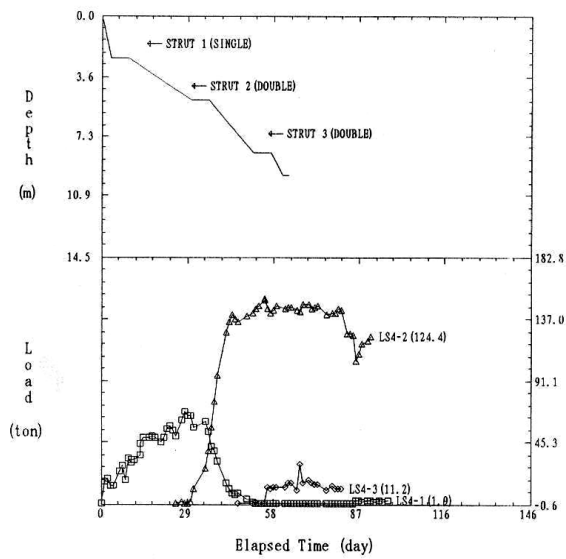


그림 10. 하중계 계측결과(장변쪽)

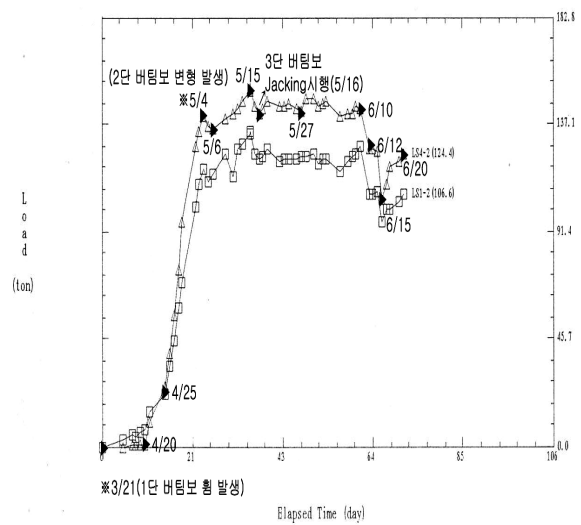


그림 11. 하중계 계측결과(LS1-2, LS4-2)

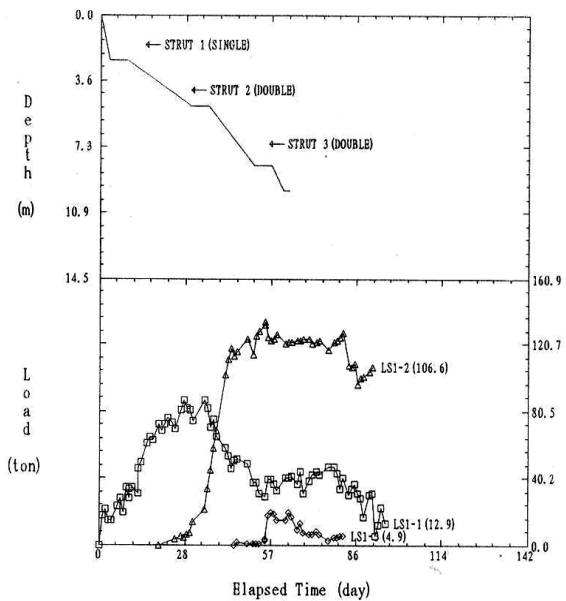


그림 12. 하중계 계측결과(단변쪽)

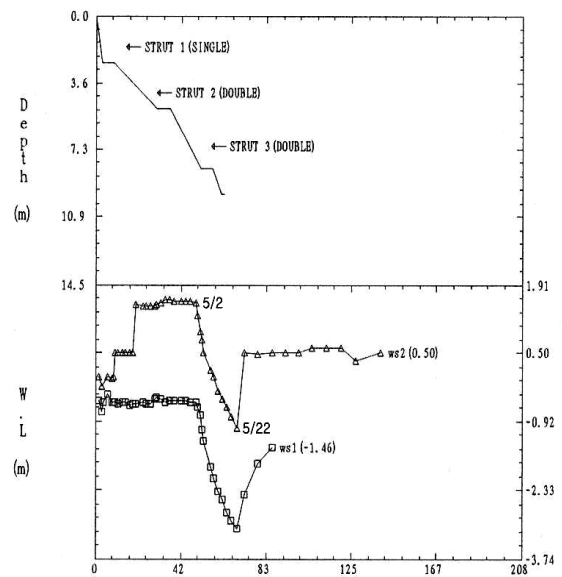


그림 13. 지하수위계 계측결과

### 2.3.3 지하수위계

- 지하수위계 WS1, WS2는 굴착작업 시행전 매설심도 G.L.-18M로 설치되었으며 굴착작업 개시후인 3월 14일 초기치 측정이 이루어짐. 지하수위계는 설치후 예상 수위보다 높은 수위를 나타내었는데 이는 하부지층의 투수계수 및 굴착면 용수상황에서 유추할 때 Well Point의 배수효과가 과잉간극수압을 포함한 수압을 소산시키기에 미흡한 것으로 판단됨.
- 5월 2일 이후 5월 22일까지 WS1은 2.59M(G.L.-3.12M), WS2는 2.62M(G.L.-1.08M)의 수위저하가 나타났는데 이는 5월 4일 발생한 버팀보의 변형 및 측방유동에 의한 굴착지반 Heaving현상과 관련이 있는 것으로 판단됨.
- 5월 22일 이후는 다시 수위가 상승되는데 이는 5월 24일 시행된 벽강관과 바닥 Con'c 타설부 사이의 Con'c 되메움 시행에 따른 결과로 생각되며 그 원인은 다음과 같이 추정됨.
- 최초 지하수위계 설치시는 과잉간극수압을 내제한 수압을 나타내다가 5월 4일 발생한 버팀보의 변형 및 측방유동에 의한 굴착면 바닥 지반 용기현상으로 Silty Clay층 하부 Sand층을 포함한 유동면이 발생, 이곳을 통한 수압의 감소가 발생함. 이후 바닥 Con'c 타설과 벽강관과 바닥 Con'c 타설부 사이 되메움 작업으로 굴착바닥면을 통한 배수가 완전히 차단되어 다시 수위가 상승한 것으로 판단됨.
- 지하수위계 WS1은 구조물 Con'c타설작업을 위한 장비 이동등으로 인하여 6월 10일 파손됨. 지하수위계 WS2는 지하수위 상승후 안정화되었으나 이 지점 부근의 벽강관 연결이 불량한 부분을 통해 Breaker를 사용한 1, 2단 Wale 제거작업시 26Cm정도의 수위저하가 발생하였으나 다시 약간 상승하여 안정화되는 경향을 보임. 이후 토사 뒷채움 작업시 이동 장비에 의해 파손되어 계측 종료됨.

### 2.4 계측결과에 대한 종합적인 고찰

본 현장의 시공 진행 과정에서 현장조사 및 계측결과 분석을 통하여 다음과 같은 총체적인 거동 Mechanism을 추정할 수 있었다.

- 최초 설계상의 인접 사면부 굴착 구배가 실시공시에는 불안전측으로 급구배로 시공되어 토압증가 사유가 발생함.
- 1단 버팀보가 제대로 설치, 완료되지 않은 상태에서 2단 버팀보 설치 위치까지의 과굴착으로 버팀보 1차 변형 발생 및 지반 이완영역이 확대됨.
- 3단 버팀보 미설치 상태에서 3단 버팀보 하부 바닥면(G.L.-8.3M)까지의 과굴착으로 인하여 2단 버팀보의 전반적인 변형 및 굴착 바닥면에서의 Heaving이 발생함. 이로 인하여 불필요한 지반 이완영역이 추가로 확대됨.
- 벽강관의 근입깊이가 상부 Silty Clay층과 하부 Sandstone층 경계부 까지만 도달되어 측방유동에 충분히 저항하지 못함.(Sand층에서 최대 지중 수평변위가 발생)
- 불필요한 이완영역 확대에 따라 Sand층을 연한 측방유동으로 진행성 활동면이 지중에 생성되었을 것으로 판단됨.
- 이 결과 측방유동에 의한 2단 버팀보 변형 및 굴착 바닥면 Heaving현상이 5월 4일 발생한 것으로 판단됨.(3단 버팀보용 Bracket 위치 변경 사실이 이를 뒷받침)
- 5월 4일의 버팀보 변형 및 굴착 바닥면 Heaving 발생 직전인 5월 2일부터 지하수위의 저하현상이 나타나기 시작하였는데 이는 이상 발생의 예고 조짐으로 평가됨.
- 지하수위 저하 이유는 Sand층을 연한 진행성 활동면의 생성으로 간극수압 소산을 돕는 결과를 초래한 것으로 판단됨.
- 3단 버팀보 설치 이후 1단 버팀보의 하중감소는 굴착면 하부 Sand층에서의 변형으로 측방유동이 발생, 벽강관 상부지반은 굴착면 배면쪽으로 이동하여 축력 및 응력이 감소한 것으로 판단됨.
- 3단 버팀보 설치이후 2단 버팀보의 하중증가는 3단 버팀보 설치전 과굴착에 의해 굴착면 하부 지반의 불필요한 변형이 발생하여 Arching효과(Load Transfer)가 나타난 것으로 판단됨. 또한 3단 버팀보 설치후 Jacking이 제대로 이루어지지않아 설치 직후에 축력이 제대로 전달되지 않은 이유도 있는

것으로 판단됨.

- 3단 버팀보 Jacking후 하중이 증가후 다시 감소하는 이유는 Sand층에서의 벽강관 지지가 제대로 안되어 Sand층에서 추가 변위가 발생하여 하중을 변위로 흡수하여 감소한 것으로 판단됨.
- 결론적으로 5월 4일 발생한 2단 버팀보 휨 발생 및 지반응기는 벽강관의 근입심도가 암반층에 이르지 못하여 벽강관 선단부가 Sand층에서 변위를 일으켜 발생하였으며 이 변위는 Sand 층을 연한 Sliding 면을 유발시켜 이곳을 통하여 간극수압이 소산된 것으로 판단됨. 또한 이러한 과정에서 강성이 큰 벽강관 상단부의 굴착면 배면쪽으로의 이동과 벽강관 하단부의 Sand층을 따른 굴착면 방향으로의 이동, 굴착면 하부지반의 과다 변위 발생에 따른 Arching현상으로 버팀보 하중은 2단은 급속히 증가, 1단은 감소하는 전반적인 예측결과가 나타난 것으로 판단됨.

### 3. 결론

- 1) 당현장과 같은 연약지반을 대상으로 하는 굴토 공사의 설계시에는 현장 및 작업여건을 충분히 고려하여 가시설의 변형이 반복되지 않도록 하여야 할 것임.(예상문제점에 대응한 설계 필요 : 투입장비 선정, 시공순서, 지반보강여부, 버력반출계획등)
- 2) 설계 및 시공계획 단계에서 예상되는 문제점에 대한 적절한 예측계획 및 관리방안의 사전수립이 요망됨.(벽강관 근입깊이 부족시 대책수립, 정밀 예측분석을 위한 변형률계의 하중계로의 대체, 정확한 간극수압 분석을 위한 간극수압계 추가 설치등)
- 3) 시공과 관련하여 불필요한 변형을 줄이기 위한 계획과 노력이 요망됨.(토공과 가설재 설치 공종의 단일업체 시공발주, 버력반출구등 작업여건을 고려한 가설재 설치계획, 분할굴착 순서, 굴착 및 지보의 균형을 고려한 시공계획, 소단 설치, 벽강관 타설깊이 확인 등)
- 4) 유사지반 예측계획시 연약지층이 깊은 경우 경사계관의 설치깊이는 굴착 바닥면 하부로 굴착깊이의 2배 정도까지 변형이 발생함을 고려하여 결정할 필요가 있음.
- 5) 굴토공사에 있어 경사계 예측 Data의 Incremental Deflection Graph를 잘 활용하여 벽강관의 움직임, 측방유동형태, 지층 경계부의 변형, Arching Effect등을 파악하고 타 예측 항목과의 연계분석에 활용해야 함.
- 6) 벽강관을 토류공법으로 채택한 굴착공사에서 버팀보 축력 분석시에는 벽강관의 경우 강성체에 가까운 변형거동을 나타내므로 지중경사계의 Cumulative Deflection 및 Incremental Deflection Graph 모두를 활용할 필요가 있음.

### 참고문헌

1. 김성욱, 김주봉(1998), “경사계의 전반적 고찰과 굴착공사에서의 변형분석 사례연구”, 한국지반공학회, 98 가을학술 발표회 논문집, pp.233~240.
2. 김성욱, 김주봉(1999), “깊은 굴착에서 근접시공에 따른 구조물 피해사례 연구”, 한국지반공학회, '99 봄학술 발표회 논문집, pp.113~120.
- 3 (주)흥인 Geo-Instruments(1995) “광양 박슬라브 열연 설치 2차공사 예측관리 중간 보고서”.
4. (주)흥인 Geo-Instruments(1995) “광양 박슬라브 열연설비 2차공사 예측관리 종합 보고서”
5. Bengt B Broms(1994), “Design and Construction of Struted and Anchored Sheet Pile Walls in Soft Clay”, 한국지반공학회, '94 가을 학술발표회 논문집, pp.1~59.