

장시간 깊은 굴착에서 지반변형 및 버팀보 축력변화 특성 사례연구(II)

Case Study of Characteristic of Ground Deformation and Strut Axial Force Change in Long Span Deep Excavation(II)

김성욱¹⁾, Sung-Wook Kim, 한병원²⁾, Byung-Won Han

¹⁾ (주)바이텍코리아 계측 엔지니어링 사업본부 사장, President, Baytech Korea Inc.

²⁾ (주)바이텍코리아 계측 엔지니어링 사업본부 이사, Director, Baytech Korea Inc.

SYNOPSIS : In the case of relatively good ground and construction condition in the deep excavation for the construction of subway, railway, building etc., flexible earth retaining systems are often used in an economical point of view. It is generally known that the mechanism of behavior in the flexible earth retaining system is relatively more complicated than the rigid earth retaining system. Moreover in the case of long span strut supporting system the analysis of strut axial force change becomes more difficult when the differences of ground condition and excavation work progress on both sides of excavation section are added. When deeper excavation than the specification or installation delay of supporting system is done or change of ground condition is faced due to the construction conditions during construction process, lots of axial force can be induced in some struts and that can threaten the safety of construction. This paper introduces one example of long span deep excavation where struts and rock bolts were used as a supporting system with flexible wall structure. The characteristics of ground deformation and strut axial force change, the measured data obtained during construction process, were analysed, the effects of relatively deeper excavation than the specification on one excavation side and rapid drawdown of ground water level on the other excavation side were deeply investigated from the viewpoint of mutual influences between ground deformations of both excavation sides and strut axial force changes. 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.

Keywords : deep excavation, flexible earth retaining systems, long span strut, rapid drawdown of ground water, mutual influences, technique of design and construction

1. 서론

지하철, 철도, 건물 등의 시공을 위한 깊은 굴착에 있어 지반조건 및 주위여건이 비교적 양호한 경우에는 경제성을 고려하여 토류공법으로 연성벽체가 많이 사용된다. 일반적으로 강성벽체에 비하여 연성벽체의 경우가 거동 Mechanism이 상대적으로 복잡한 것으로 알려져 있으며 여기에서 버팀보 지지의 장시간인 경우 굴착단면 양쪽의 지반조건과 굴착공정의 차이가 부가되면 버팀보 축력변화 분석은 더욱 어렵게 된다. 시공과정에서 현장여건에 의한 과굴착이나 지보재의 설치지연, 지반조건의 변화 등이 발생할 경우 특정 버팀보에 큰 축력이 발생하여 안전 시공을 위협하게 될 수 있다.

본 논문에서는 버팀보 및 Rock Bolt 지지의 장시간 연성벽체 깊은 굴착단면 시공과정에서 얻어진 계측결과인 지반변형 및 버팀보 축력변화 특성을 분석하였는데 한쪽 굴착면에서의 상대적으로 큰 과굴착과 더불어 반대쪽 굴착면에서 발생한 급격한 수위 저하현상이 양쪽 지반의 지반변형 및 버팀보 축력변

화에 미친 영향을 심층 고찰함으로써 향후 유사지반 및 동일공법 적용 Project들의 설계, 시공과정에서 개선, 보완해야 할 사항들을 제안하고자 한다.

2. 지반변형 및 버팀보 축력변화 분석사례 연구

2.1 공사개요 및 시공현황

- 토류공법 : H-Pile(H-300x305x15x15, C.T.C. 2.0M) + 토류관(t=15cm), H-Pile + Shotcrete(t=5cm)
- 지지공법 : 버팀보 공법(H-300x305x15x15, C.T.C. 2.5M), Rock Bolt(D=29MM, L=5.0M)
- 지반보조공법 : S.G.R. 공법(Φ1000, C.T.C. 800, 좌측), M.S.G.공법(Φ1000, C.T.C.800, 우측)
- 지반상태 :
 - 매립층(습윤, 느슨, 실트 및 모래섞인 자갈, GM)
 - (좌측)
 - 충적층(습윤, 보통조밀 내지 조밀, 세립내지 중립의 모래, SM)
 - 풍화암층(습윤, 대단히 조밀, 실트질 모래)
 - 연암층(화강암의 연암으로 중립내지 조립질, T.C.R.=50 ~ 100%, R.Q.D.=0%)
 - 경암층(화강암의 경암으로 중립내지 조립질 T.C.R.=100%, R.Q.D.=12 ~ 97.5%)
 - (우측) :
 - 매립층(습윤, 매우조밀, 모래섞인 실트질 자갈, 지표 ~ G.L.-0.4M)
 - 풍화토층(습윤, 보통조밀 내지 매우조밀, 실트질 세립내지 조립 모래, G.L.-0.4M ~ 7.0M)
 - 풍화암층(습윤, 매우조밀, 암편섞인 실트질 세립 내지 조립 모래, 13.0 ~ 19.6M : 풍화암 Core 35Cm회수(완전풍화 내지 심한 풍화), 19.6 ~ 22.0M : 풍화암 Core 70Cm회수(심한 풍화), G.L.-7.0M ~ 22.0M)
 - 경암층(보통균열 내지 약간균열, 약간풍화 내지 신선, T.C.R.=100%, R.Q.D.=76%, G.L.-22.0M ~ 23.7M)
 - 보통암층(심한균열 내지 보통균열, 보통풍화 내지 약간풍화, T.C.R.=81~100%, R.Q.D.=12 ~ 39%, G.L.-23.7M ~ 27.5M)
 - 연암층(심한균열 내지 보통균열, 심한풍화 내지 보통풍화, T.C.R.=100%, R.Q.D.=21 ~ 43%, G.L.-27.5M ~ 30.6M)
 - 보통암층(심한균열 내지 약간균열, 보통풍화 내지 약간 풍화, 38.2 ~ 39.0M : 파쇄대, T.C.R.=93 ~ 100%, R.Q.D. : 28 ~ 66%, G.L.-30.6M ~ 40.0M)
 - 경암층(보통균열 내지 약간균열, 약간풍화 내지 신선, 45.2 ~ 45.5M : 파쇄대, T.C.R.=100%, R.Q.D.=62 ~ 100%, G.L.-40M ~ 46M)
- 투수계수 :
 - 충적층(평균 4.529×10^{-4} cm/sec)
 - 풍화암층(평균 1.166×10^{-4} cm/sec)
- 지하수위 : G.L.-4.1M ~ 5.2M

본 현장은 서울지역 ○○○○시공현장으로 굴착폭 44M ~ 47.6M, 굴착 깊이 44.0M인 충적층과 화강암기반의 풍화토층, 풍화암층, 연암층, 경암(보통암)층이 주 굴착대상인 개착 구간이다. 본 사례연구 구간은 2개의 다른 사업이 당 구간에서 병행 시행됨으로써 좌측과 우측의 굴착 및 구조물 시공이 2개의 회사에 의해 각각 분리 시행되었는데 굴착공사에 따른 가시설은 각각 설치후 연결되어 통합으로 계측에 의해 안정성이 관리되었다. 2개 사업구간의 통합 굴착에 따라 형성되는 장지간의 굴착단면은 버팀보에 의해 지지되었으며 좌, 우측의 지반조건 및 굴착공정의 차이로 인하여 시공과정에서 발생한 버팀보 축력의 급증현상들에 대하여 보강시행 과정에서는 축력급증에 대한 원인 규명과 보강시행의 책임에 대하여 협의 및 조정에 어려움이 있었다. 상기에 기록된 지반상태는 2개 사업에서 각각 별도로 시행된 지반조사 결과에서 본 사례 연구 단면에 가장 근접한 위치에서의 시추 주상도를 근거로 정리하였다.

본 사례연구는 가시설 계측단면 좌우측에 각각 설치된 지중경사계 및 지하수위계, 버팀보 좌측 짝수 단 및 버팀보 우측 홀수단에 설치된 버팀보 하중계의 정밀분석에 의하여 굴착이 거의 완료된 상태에서 최대 142.2Ton까지의 지속적인 버팀보 축력 급증으로 1차적으로 4, 5단 버팀보 보강 작업이 시행되고 이어서 굴착작업이 완료된 상태에서 6, 9, 10단 버팀보 축력의 119.2Ton ~ 125.5Ton까지의 추가적인 축

력급증 현상으로 2차적으로 9, 10단 버팀보 보강 작업이 추가로 시행된 장시간, 깊은굴착, 연성벽체 굴착단면에서의 버팀보 축력 및 지반 변형 변화 Mechanism의 상호 연계성을 고찰하였다. 이 과정에서 버팀보 축력변화에 대한 최대 영향 요소인 해당 지점 좌우측 지중경사계 지점변형(Incremental Deflection)의 기여도, 단기간에 나타난 지하수위의 급격한 저하현상이 지반변형 및 이완에 미친 영향, 120Ton을 상회하여 발생한 큰 버팀보 축력에도 보강을 시행하지 않은 6단 버팀보의 경우에서 경시변화에 따른 축력변화 특성 및 6단 버팀보 해체시의 타단 버팀보에 대한 영향 등을 분석함으로써 연성벽체 굴착공사에서 주의하여야 할 많은 교훈을 얻을 수 있었다. 이는 향후 유사 Project의 설계 및 시공과정에서의 경제성, 안전성 향상을 위한 지침 및 개선사항이 될 수 있을 것으로 판단된다.

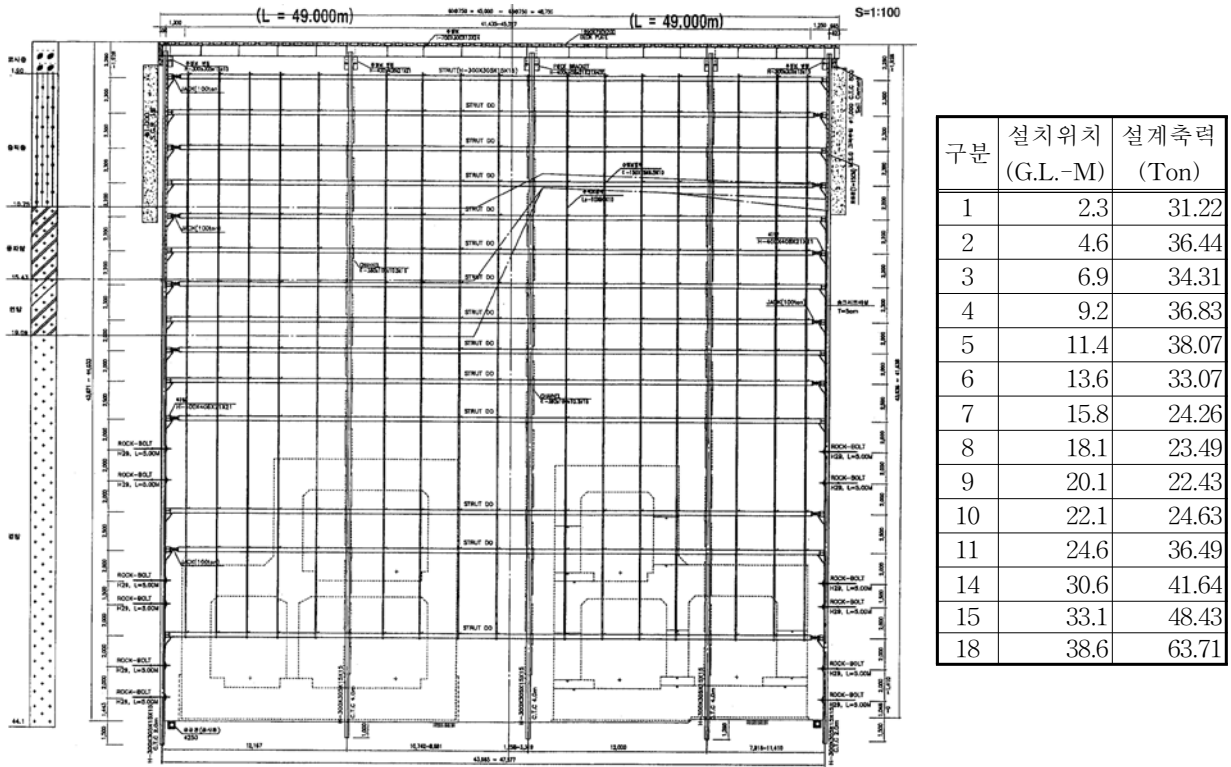


그림 1. 단면도

2.2 계측결과 분석

지중경사계는 계측단면의 좌, 우 S.G.R. 및 M.S.G.공법 시행위치 배면에 설치하여 좌측은 굴착심도가 G.L.-1.5M인 2004년 6월 30일 초기치를 측정하였고 우측은 굴착심도가 G.L.-4.0M 2004년 7월 22일 초기치를 측정하고 굴착진행과 더불어 지속적인 계측이 수행되었다. 본 논문에서는 기간별 지중경사계 지점변형 특성에 따라 기본적으로 좌측 지중경사계의 지점변형 Pattern은 크게 6가지, 우측 지중경사계의 지점변형 Pattern은 크게 2가지로 분류하되 버팀보 축력변화에 대한 정밀 분석을 위하여 계측결과 분석에서는 좌측 지중경사계의 기간별 6가지 지점변형 Pattern에 대응하여 우측 지중경사계의 지점변형 Pattern을 세분화하였다. 좌측 지중경사계는 초기치 측정일로부터 풍화암 및 연암층 구간에서 주된 지점변형이 발생한 2004년 11월 22일 까지를 기간1, 2004년 11월 22일부터 경암층 구간에서 주된 지점변형이 발생한 2005년 5월 19일까지를 기간2, 2005년 5월 19일부터 전체심도 구간에서 굴착배면쪽 방향으로의 일률적인 지점변형을 나타낸 2005년 6월 24일 까지를 기간 3, 2005년 6월 24일부터 전체심도 구간에서 굴착면쪽 방향으로의 일률적인 지점변형을 나타낸 2005년 11월 24일 까지를 기간4, 2005년 11월 24일부터 전체 심도 구간에서 굴착배면쪽 방향으로의 일률적인 지점변형을 다시 나타낸 2006년 7월 31일 까지를 기간5, 2006년 7월 31일부터 6단 버팀보 해체 이전인 2006년 9월 20일까지를 기간6으로 구분하고 각 기간별 버

탐보 축력 및 지반변형 변화를 분석하였다. 우측 지중경사계는 초기치 측정일로부터 전체 심도 구간에서 주로 지하수위 저하에 따른 토립자 유출 변형 Pattern을 보인 2005년 1월 13일까지의 기간과 2005년 1월 13일부터 주로 풍화암구간과 일부 경암 구간에서 굴착면 방향으로의 일시적 급속한 지점변형을 시작으로 하부 연암, 보통암층 구간에서의 변형이 진전된 6단 버팀보 해체 이전인 2006년 9월 21일까지의 기간으로 지점변형 Pattern을 구분하였다(그림 2, 3 참조)

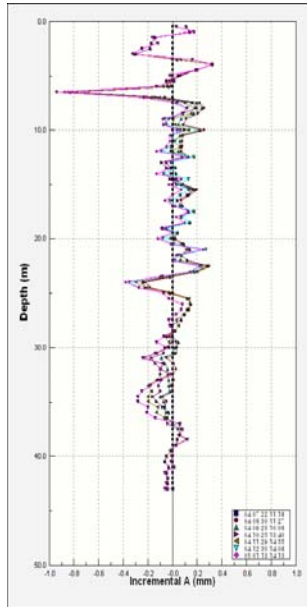


그림 2 지점변형 그래프(우측)

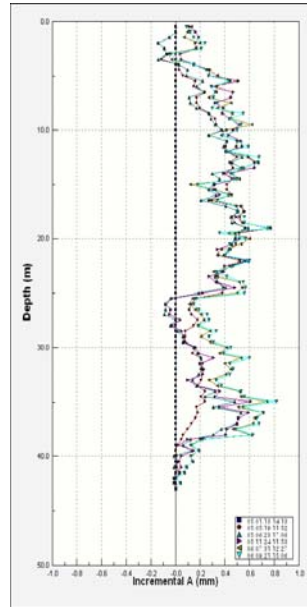


그림 3 지점변형 그래프(우측)

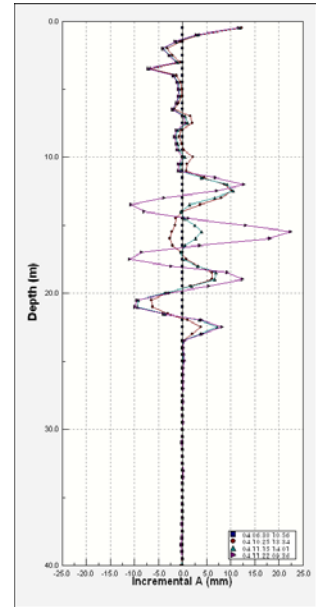


그림 4 지점변형 그래프(좌측)

2.2.1 기간 1 계측결과

- 2004년 6월 30일부터 2004년 11월 22일 사이에 좌측 경사계는 G.L.-11.0M ~ 23.5M 구간에서 지점 변형이 주로 발생하였는데 대상 지층은 풍화암, 연암, 경암임. 이 기간 동안 지하수위는 G.L.-10.48M에서 G.L.-15.7M까지 5.22M의 수위저하가 일어났는데 이 기간 동안의 지점변형은 최초 지하수위와 최종 굴착면인 G.L.-20M 지점 사이의 지층경계부 근처 구간들에서 대부분 발생하였으며 이는 무지보 구간에서의 지반 이완에 기인한 결과로 판단되었음.(그림 4 참조)
- 한편 우측 경사계의 경우는 기간 1 동안에 수위저하에 따른 토립자 유출현상을 시사하는 전형적인 지점변형 Graph양상을 나타내었는데 우측 수위계의 경우 2004년 11월 8일 G.L.-17.122M의 수위에서 2004년 11월 24일 G.L.-33.7M의 수위로 16.578M의 급격한 수위 저하 현상이 나타났으며 본 사례 연구 지점에서 시점 쪽으로 40M 이격되어 설치된 다른 수위계에서는 2004년 11월 11일 G.L.-15.019M의 수위에서 11월 12일 G.L.-29.472M의 수위로 14.453M의 급격한 수위 저하 현상이 1일 동안에 발생함.(그림 2, 5, 6 참조)
- 좌측 버팀보에는 짝수단, 우측 버팀보에는 홀수단에 각각 하중계가 설치되어 버팀보 축력이 측정되었는데 2004년 11월 8일에서 11월 14일 사이에 1단 버팀보 축력이 37.713Ton에서 10.102Ton으로 27.611Ton이 급감하였으며 5단 버팀보 축력은 2004년 11월 12일 설치 후 급격한 축력증가 현상을 나타냄. 또한 4단 버팀보 축력은 2004년 10월 20일 설치 후 5단 버팀보 축력보다 더욱 급하게 축력이 증가하는 현상을 나타냄.(그림 7, 8참조)

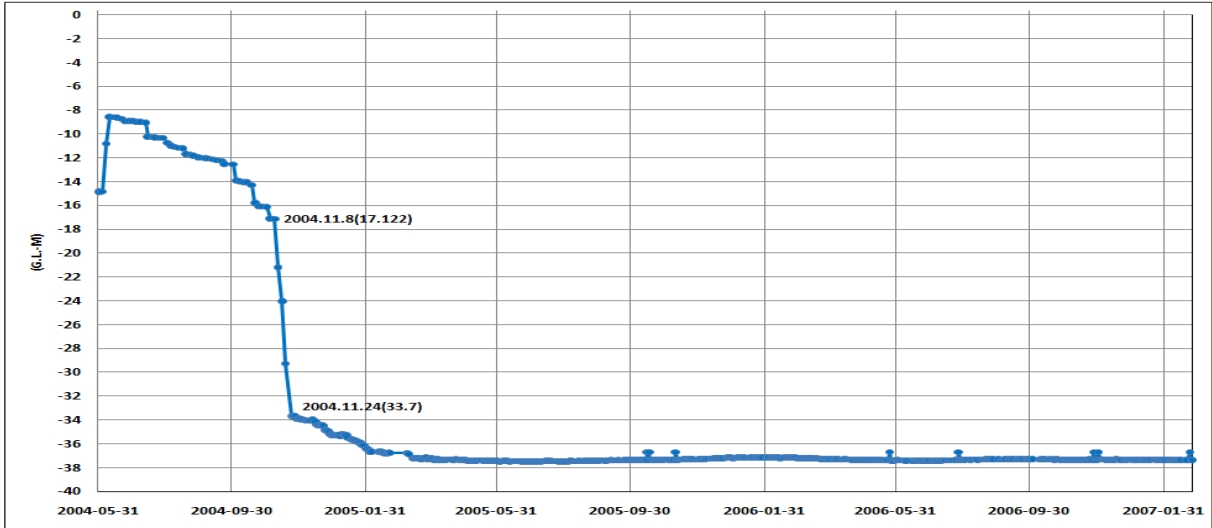


그림 5. 수위계 그래프(우측)

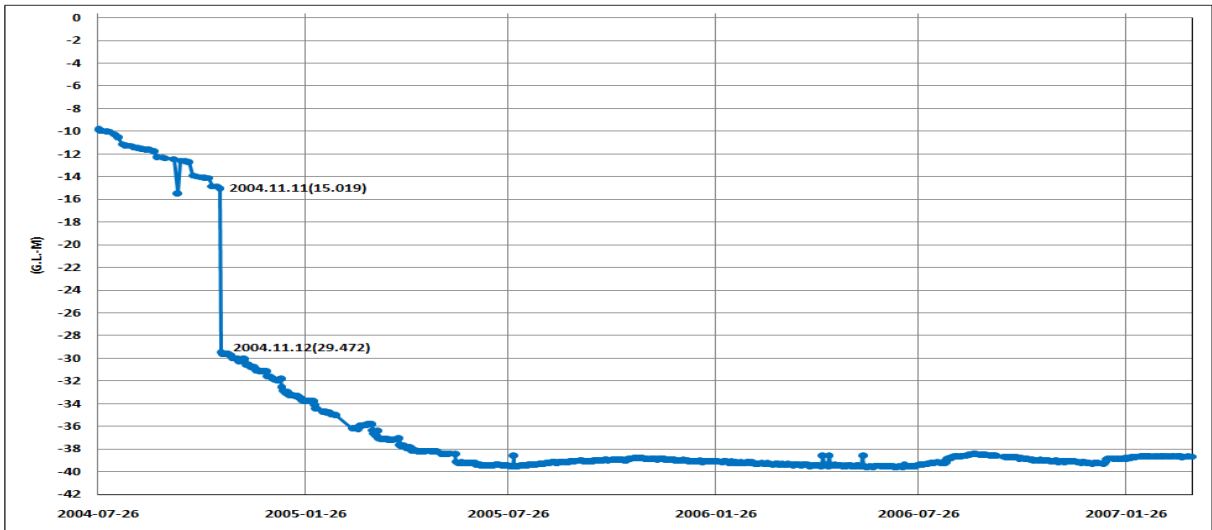


그림 6. 수위계 그래프(우측, 인접지역)

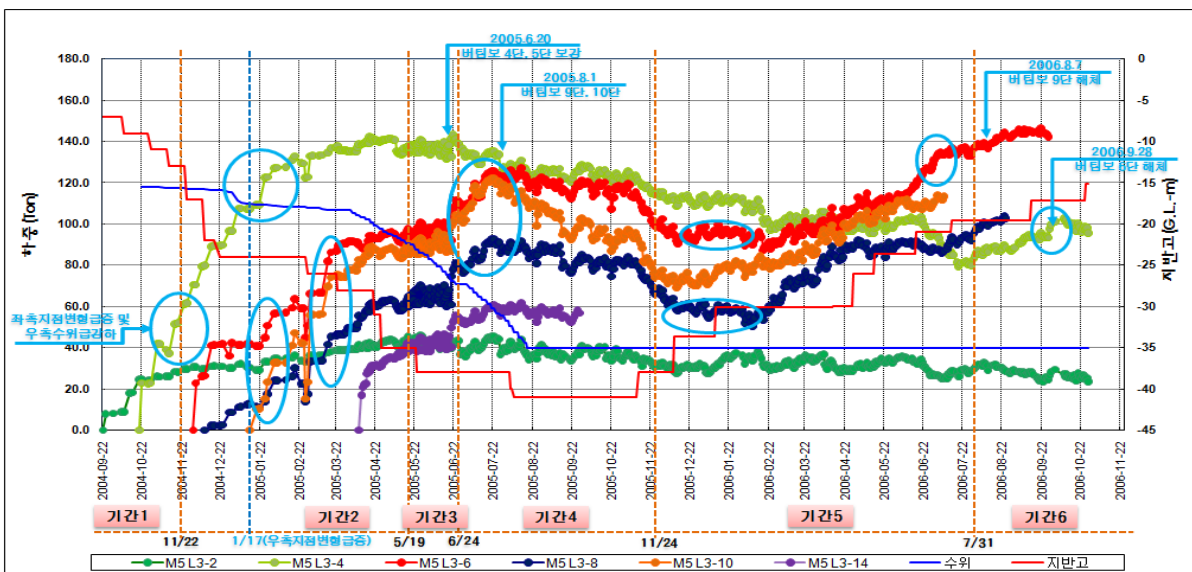


그림 7. 버팀보 축력변화도(하중계, 좌측)

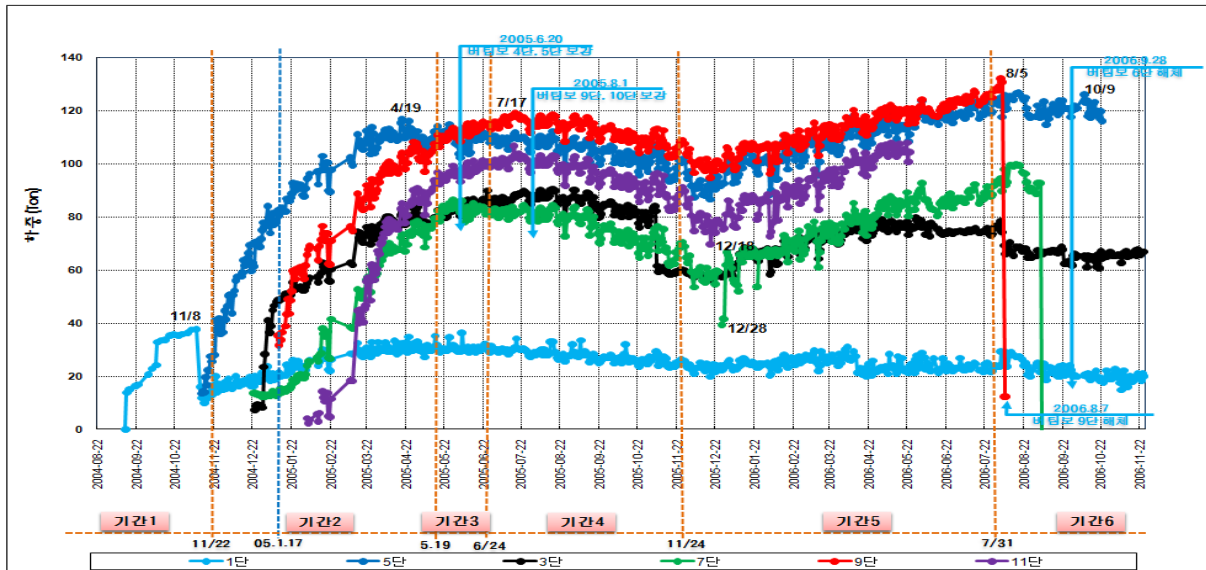


그림 8. 버팀보 축력변화도(하중계, 우측)

- 위에서 언급한 1단 버팀보 축력의 일시적 급감현상은 동일지점에서의 급격한 지하수위 저하와 연계한 버팀보 배면 지반의 이완에 따른 결과로 판단되었으며 4단 및 5단 버팀보 축력의 급증현상은 좌측 지반의 경우 과굴착에 의한 버팀보 4단 하부 지점에서의 지반변형에 따른 4단 버팀보 위치에서의 Arching 현상과 이완진전, 과굴착에 의한 버팀보 5단부 지반변형과 이완진전, 버팀보 5단 하부지점에서의 지반변형에 따른 5단 버팀보 위치에서의 Arching 현상과 이완진전, 우측 지반의 경우 수위 급강하에 따른 토립자 유출을 포함한 지반이완 및 토압증가 효과가 상호작용하여 나타난 결과로 판단되었음. 특히 4단 버팀보 위치는 층적층 지반으로 상대적으로 지반조건이 열악하고 이완의 진전이 컸을 것으로 판단되었음.

2.2.2 기간 2 계측결과

- 2004년 11월 22일부터 2005년 5월 19일 사이에 좌측 경사계는 G.L.-19M 지점 상부구간은 굴착배면 쪽 방향의 지점변형을 보였으며 G.L.-19M지점 하부구간은 굴착면 방향으로의 지점변형을 연암, 경암 구간에서 나타냄.(그림 9 참조)
- 한편 우측 경사계의 경우는 2005년 1월 13일에서 27일 사이에 G.L.-4.0M ~25.5M 구간에서 굴착면 방향으로의 지점변형의 급진전을 나타내었는데 경사계 초기치 기준으로 지속적인 굴착면 방향으로의 지점변형 증가구간은 버팀보 4단에서 10단까지의 구간임.(그림 10, 11 참조)
- 버팀보 축력은 4단의 경우 기간 1 이후에도 지속적인 축력의 증가를 보였는데 2004년 12월 31일 96.7Ton에서 2005년 1월 5일 107.4Ton으로 10.7Ton의 축력증가를 보이며 100Ton을 상회하였으며 이어 2005년 1월 21일에서 2월 2일 사이에는 109.3Ton에서 127.3Ton으로 18Ton의 축력 급증현상을 나타내었음. 2005년 1월 21일에서 2월 2일 사이에는 버팀보 6, 8, 10단도 각각 15.7Ton, 13.0Ton, 22.3Ton의 축력 급증현상을 나타내었는데 이것은 우측 경사계의 2005년 1월 13일에서 27일 사이의 지점변형 급진전에 따른 결과로 판단되었음. 즉 그동안의 지하수위 저하 및 지하수위 급강하 영향으로 이완이 진전된 우측의 이완 토압이 2005년 1월 13일에서 27일 사이의 급격한 우측 경사계 지점변형을 유발시키고 이어서 좌측 지반쪽으로 전이되면서 2005년 1월 21일에서 2월 2일 사이의 버팀보 축력 급증현상을 유발시킨 것으로 판단되었음.(그림 7 참조)
- 2005년 3월 11일에서 18일 사이에 버팀보 6, 8, 10단은 각각 19.4Ton, 11.7Ton, 17.7Ton의 축력증가를 2005년 3월 11에서 15일 사이에 버팀보 3, 5, 7, 9, 11단은 각각 12.5Ton, 11.6Ton, 14.7Ton, 14.0Ton,

26.5Ton의 축력증가를 나타내었는데 해당 기간 동안 좌, 우측 경사계의 해당 지점들에서는 특별한 지점변형의 증가가 없었던 점에서 이완 진전에 따른 토압 증가효과에 기인한 결과로 판단되었음. 특히 11단 버팀보 축력의 증가가 상대적으로 컸던 것은 과굴착 및 버팀보 14단, 15단 설치지연에 따른 Arching 현상에 기인한 결과로 판단되었음.(그림 7, 8 참조)

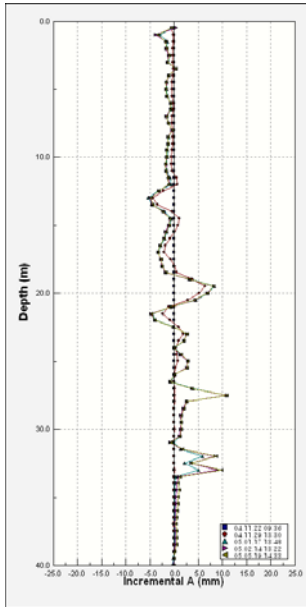


그림 9. 지점변형 그래프(좌측)

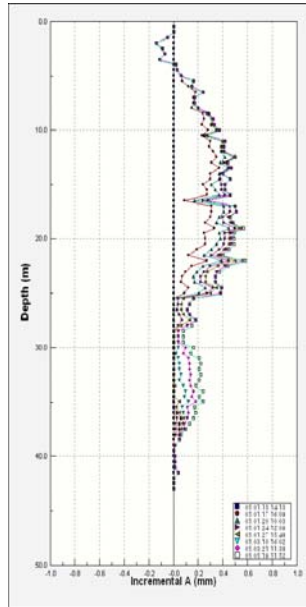


그림 10. 지점변형 그래프(우측)

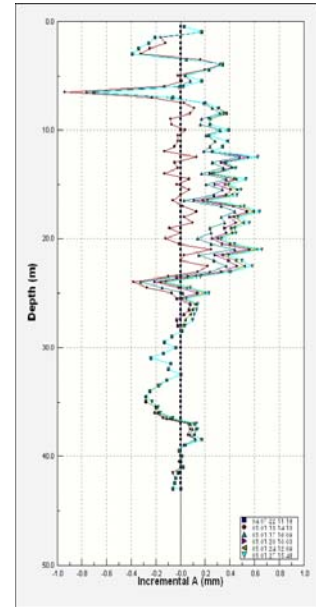


그림 11. 지점변형 그래프(우측)

- 그 동안 상대적으로 가장 큰 축력을 나타냈던 4단 버팀보 축력은 2005년 4월 17일 142.2Ton의 최대 축력을 기록한 후 큰 변화를 나타내지 않았으며 5단 버팀보 축력도 2005년 4월 19일 116.9Ton의 최대 축력을 기록한 후 큰 변화를 보이지 않았음. 버팀보 우측에 설치된 7단, 9단, 11단, 15단 하중계 축력은 이완진전 및 기온증가에 따라 지속적인 증가 추세를 나타내었는데 9단의 경우 2005년 5월 17일 110.8Ton의 축력을 기록함. 버팀보 좌측에 설치된 6단, 8단, 10단, 14단 하중계 축력도 지속적인 증가 추세를 나타냄.
- 버팀보 축력의 증가에 따라 2005년 5월 6일에는 구체적인 보강 대책을 협의하였으며 5월 16일에는 다가올 장마철의 강우에 의한 토압증가 요인, 하절기 기온상승에 의한 축력 증가요인, 버팀보용 Jack 용량(100Ton)과 구조물 완료시까지의 잔여 공정을 고려하여 추가 축력 증가 요인이 많은 것으로 판단하고 가시설의 안전을 위하여 1차적으로 버팀보 4단, 5단을 보강하기로 결정함. 보강은 사례연구 단면에서 L=9.0M구간을 추가 버팀보 5열 설치에 의해 시행하여 2005년 6월 20일 완료함. 기간 2 동안의 우측 하중계 계측결과 분석에서는 기온 상승에도 버팀보 축력이 감소하여 가시설의 미소변형으로 축력이 흡수되는 현상이 나타나는 것으로 판단되었음.

2.2.3 기간 3 계측결과

- 2005년 5월 19일부터 6월 24일 사이에 좌측 경사계는 지표에서 G.L.-34M 구간에서 일률적으로 굴착 배면쪽으로 0.2mm ~ 0.5mm 정도의 지점변형 진전을 나타냄.(그림 12 참조)
- 한편 우측 경사계의 경우는 2005년 5월 19일부터 6월 23일 사이에 G.L.-34M ~ 40M 구간에서 굴착면 방향으로 최대 0.4mm 정도의 지점변형을 나타냄.(그림 13 참조)
- 버팀보 좌측에 설치된 짝수단 하중계 축력은 2005년 5월 19일에서 6월 20일 사이에는 축력변화가 미미하게 나타났는데 이것은 좌측경사계의 굴착배면쪽 지점변형 진전과 연계된 결과로 판단되었음. 즉 우측 지반에서의 단기간 내에 발생한 수위급강하와 후속으로 나타난 지점변형의 급속한 진전, 이에

수반된 지속적인 이완진전에 의한 이완토포압이 좌측지반으로 전달된 결과로 판단되었음.

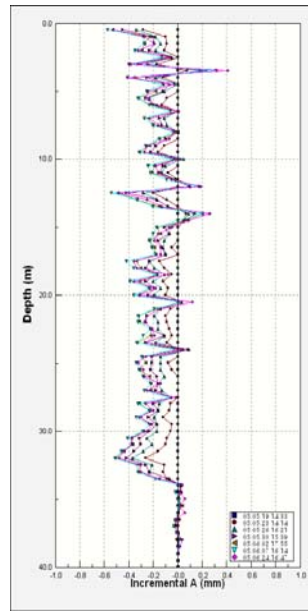


그림 12 지점변형 그래프(좌측)

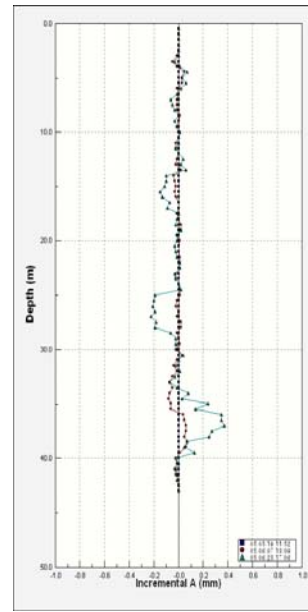


그림 13 지점변형 그래프(우측)

- 2005년 6월 20일 버팀보 4단 및 5단의 보강이 완료되었으며 4단 버팀보 축력은 2005년 6월 21일 143.2Ton의 최대 축력 기록후 보강효과로 감소하는 경향을 보였으나 6, 8, 10, 14 단 버팀보 축력은 2005년 6월 20일 이후 다시 증가하기 시작함. 한편 기간 3 동안 9, 11, 15단 버팀보 축력은 약간 증가하는 경향을 나타내었는데 9단 버팀보 축력은 2005년 6월 22일 115.8Ton의 축력을 나타냄.

2.2.4 기간 4 계측결과

- 2005년 6월 24일부터 11월 24일 사이에 좌측 경사계는 전체심도에서 0.2mm ~ 0.4mm 정도의 굴착면쪽 지점변형 진전을 나타내었으며 풍화암 및 연암층 구간인 G.L.-10 ~ 20M 구간이 상대적으로 큰 변형을 나타냄.(그림 14 참조)
- 한편 우측 경사계의 경우는 2005년 6월 23일부터 11월 24일 사이에 지표에서 G.L.-20M 구간에서 0.1mm ~ 0.35mm 정도의 굴착면쪽 지점변형을 나타냄.(그림 15 참조).
- 버팀보 좌측에 설치된 6, 8, 10단 하중계 축력은 다시 증가하기 시작하여 2005년 7월 23일에는 6단은 125.5Ton, 10단은 122.1Ton을 기록하였는데 이것은 양쪽지반에서의 지점변형 진전 및 이완진전, 기온 상승에 기인한 결과로 판단되었음. 한편 버팀보 우측에 설치된 9, 11, 15단 하중계 축력도 지속적 증가 추세를 나타내어 9단은 2005년 7월 17일 119.2Ton, 11단은 2005년 7월 16일 106.8Ton의 축력을 나타내었는데 버팀보 6단 및 10단과 마찬가지로 동일한 원인에 기인한 결과로 판단되었음.
- 상기와 같은 버팀보 축력의 지속적 증가로 인하여 2차로 버팀보 9단 및 10단 보강시행을 결정하고 사례연구 단면에서 L=7.0M구간을 추가 버팀보 4열 설치에 의해 2005년 8월 1일까지 보강시행을 완료함. 버팀보 9단 및 10단 보강이후 10단 버팀보 축력은 바로 감소 추세로 바뀌었으며 6, 8, 9, 11단 버팀보 축력은 작은 변화 양상을 보인후 감소 추세로 바뀌었는데 이것은 버팀보 9단 및 10단 보강 이후의 지반이완 진전, 기온변화, 가시설 미소변형에 의한 축력흡수 등의 요인이 복합하여 축력변화에 기여한 것으로 판단됨.
- 9단 및 10단 버팀보 보강 시행이후 2005년 8월 7일 현장조사를 시행하였는데 현장조사 결과 굴착면 좌측 6, 8, 11단 띠장의 보강 Stiffener의 심한 휨현상, 토류판과 Shotcrete면의 경계지점인 7단과 8단 중간지점 직상부 토류판의 배부름 현상, 9단 버팀보 부근 H-Pile과 Shotcrete면 접촉부에서의 균

열발생 현상, 9단과 10단 버팀보 사이 Shotcrete면에서의 균열발생이 관찰됨.

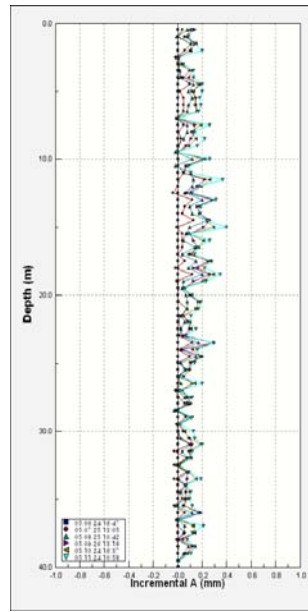


그림 14 지점변형 그래프(좌측)

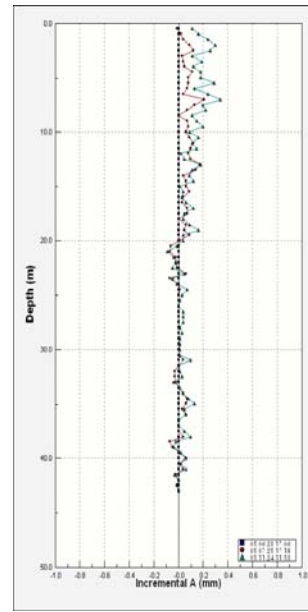


그림 15 지점변형 그래프(우측)

2.2.5 기간 5 계측결과

- 2005년 11월 24일부터 2006년 7월 31일 사이에 좌측 경사계는 전체심도에서 1mm ~ 2mm 정도의 굴착배면쪽 지점변형을 나타내었는데 2005년 12월 29일에서 2006년 7월 31일 사이에는 시공과정에서 현장 여건상 경사계 위치에 Container Box가 위치하여 지속적인 계측수행은 이루어지지 못하였음.(그림 16 참조)
- 한편 우측 경사계의 경우는 2005년 11월 24일부터 2006년 7월 31일 사이에 G.L.-23.5M ~ 43M 구간에서 전반적으로 굴착면 방향으로 0.2mm 정도의 지점변형을 나타내었는데 2006년 2월 16일에서 7월 6일 사이에 대부분의 지점변형이 발생함.(그림 17 참조)
- 버팀보 축력은 기간 5 동안에 대체로 기온변화에 따른 축력감소와 증가현상을 나타내었는데 굴착면 우측 홀수단에 설치된 하중계 축력이 2005년 12월 18일까지 기온저하에 따라 감소한 후 다시 증가하는 경향이 뚜렷한 반면 굴착면 좌측 짝수단에 설치된 하중계 축력은 우측보다 2개월 정도 늦은 2006년 2월 9일(8단 버팀보의 경우) 또는 2월 17일(6단 버팀보의 경우)에 최저치를 기록한 후 다시 증가하는 양상을 보임. 즉 우측과 비슷한 시기(2005년 12월 12일에서 13일)에 최저치 부근에 도달하고 약 2개월 정도 미소 변화를 나타낸 후 다시 증가하는데 이것은 우측 지반에서 좌측 지반쪽으로 지반 이완진전에 따른 이완 토압이 전달되어 좌측경사계 지점변형을 굴착배면쪽으로 발생시켰을 것으로 추정되는 현상과 연계된 결과로 판단됨.
- 버팀보 6단의 축력이 2006년 6월 10일에서 7월 5일 사이에 115Ton에서 134.8Ton으로 19.8Ton이 급증하였는데 이것은 이미 2005년 7월 23일에 125.5Ton의 최대치를 기록한 6단 버팀보에 대한 보강이 2차 보강 단계에서 시행되지 않아 일시적으로 이 시기에 이완이 급진전된 결과로 추정, 판단됨.
- 기간 5 후반부에는 10단을 제외한 5단 ~ 11단의 모든 버팀보 축력이 이전에 기록한 축력의 최대치를 경신하게 되는데 이것은 5단 ~ 11단이 속한 좌, 우측 지반의 지층이 기간 1, 2 동안 상대적으로 큰 지점변형이 발생한 후 이완 진전이 지속되거나 또는 Rock Bolt 지지부 직상으로 해당부위에서 지점변형 발생 후 하부지반의 지점변형 진전에 따른 Arching 효과가 나타난 구간으로 후반부의 기온상승효과와 더불어 지반 이완 진전 효과가 복합된 결과로 판단됨. [(5단, 2006.7.31, 123.89Ton), (6단, 2006.7.24, 137.4Ton), (7단, 2006.7.31, 92.967Ton), (8단, 2006.7.31, 95.4Ton), (9단, 2006.7.31,

128.23Ton), (11단, 2006.5.22, 107.97Ton)] 특히 5단 및 9단 버팀보의 경우는 1차 및 2차로 보강이 시행되었으나 보강이 시행되지 않은 버팀보 6단, 8단의 영향으로 이들 버팀보들의 축력을 분담하게 되어 보강을 시행하였음에도 불구하고 기존 발생 축력의 최고치를 경신한 것으로 판단됨.

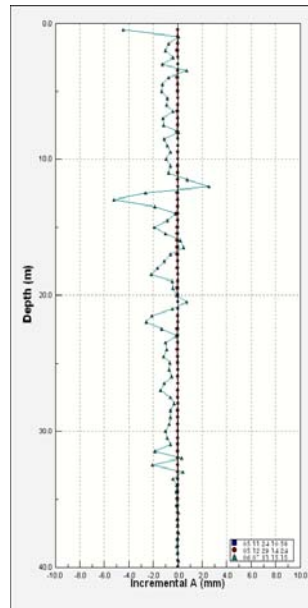


그림 16. 지점변형 그래프(좌측)

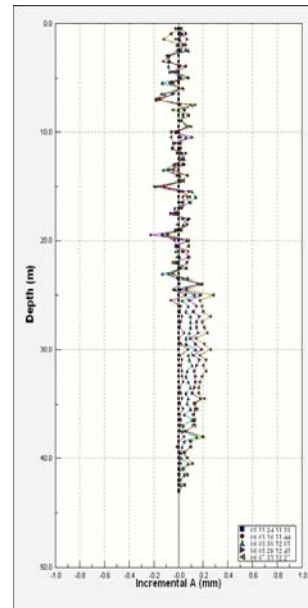


그림 17. 지점변형 그래프(우측)

2.2.6 기간 6 계측결과

- 2006년 8월 7일 9단 버팀보가 해체되었는데 2006년 8월 3일 대비 8월 9일 좌측 경사계 계측결과 지표에서 G.L.-20M 구간에서는 굴착배면 방향으로 0.1mm ~ 0.3mm 정도의 지점변형이 나타났으며 G.L.-20M ~ 25M 구간에서는 0.1mm 정도의 굴착면 방향 지점변형이 나타남. 버팀보 9단 상, 하 구간에서 상대적으로 큰 지점 변형이 나타난 후 2006년 8월 9일에서 9월 20일까지는 전체심도에서 굴착면 방향으로 0.1mm 정도의 일률적인 지점변형이 나타남.(그림 18 참조) 한편 우측경사계의 경우는 9단 버팀보 해체의 영향이 특별히 나타나지 않았음.(그림 19 참조)
- 9단 버팀보 축력은 9단 버팀보 해체직전인 2006년 8월 5일 130.9Ton의 최대치를 기록하였는데 9단 버팀보 해체의 영향으로 8단은 3.0Ton 증가(8/4 ~ 8/8), 7단은 5.1Ton 증가(8/3 ~ 8/7)의 변화가 나타남.
- 2006년 9월 28일 6단 버팀보가 해체되었는데 좌측 및 우측 경사계 계측결과 6단 버팀보 해체의 영향이 특별히 나타나지 않음. 버팀보 축력은 6단 버팀보 해체의 영향으로 5단은 8.5Ton 증가(9/28 ~ 10/9, 6°C 기온저하), 4단은 9.5Ton 증가(9/27 ~ 10/9)함. 2006년 6월 10일 이후 축력증가 현상이 크게 나타났던 버팀보 6단은 6단 버팀보 해체 직전인 2006년 9월 25일 143.9Ton의 최대치를 기록하였는데 6단 버팀보 해체로 버팀보 5단 및 4단이 축력을 분담하게 되어 축력증가 현상이 나타난 것으로 판단됨.

2.3 계측결과에 대한 종합적인 고찰

본 사례의 계측결과 분석을 통하여 다음과 같은 사항들을 파악할 수 있었다.

- 장시간 깊은 굴착에서 좌우측 지반의 지반조건 및 시공 상황의 차이는 버팀보 지지의 경우 버팀보를 매개로 좌우측 지반의 지반변형 및 축력변화에 상호 영향을 미치는 것을 파악 할 수 있었음.

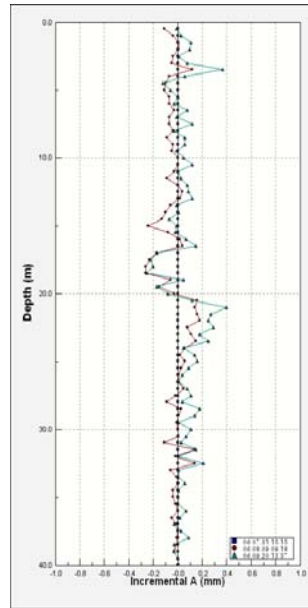


그림 18. 지점변형 그래프(좌측)

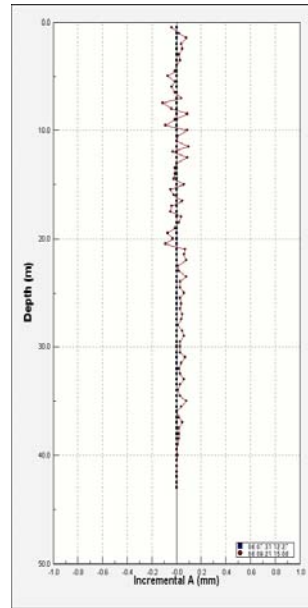


그림 19. 지점변형 그래프(우측)

- S.G.R. 이나 M.S.G. 등의 지반 보강이 시행된 굴착면의 경우 지반보강 선단부 하부 굴착과정에서 과 굴착이 이루어질 때 지반변형 및 상부지반에의 Arching 현상 유발로 굴착면 직상의 버팀보들에서 축력 급증 현상이 발생할 수 있음을 확인함.
- 지반조건 및 시공 상황에 따른 큰 값의 급격한 수위저하 현상은 풍화가 심한 풍화암의 경우 수위저하에 따른 지반내 토립자 유출, 단위중량 증가, 이완축진 등을 통하여 지반의 전단강도를 저하시키며 나아가 지반변형 및 이완토압의 급격한 증가 현상을 발생시킬 수 있음을 확인함.
- 장지간 깊은 굴착에서 상기의 2가지 고찰내용과 같은 좌우측 지반의 취약요소가 상호 동시에 결합할 경우 가시설의 안전을 위협할 수 있는 지속적인 축력 급증현상이 단기간 내에 일어날 수 있음을 확인함.(기간 1, 2 참조)
- 장지간 깊은 굴착에서 이완 토압의 진전이 큰 곳에서 작은 곳으로 하중이 전이되어 하중이 전이되는 지반의 변형을 유발시킬 수 있음과 이로 인하여 버팀보 축력의 변화에도 영향을 미침을 확인함.(기간 3, 5 참조)
- 본 사례에서 버팀보 축력이 120Ton을 상회한 6단을 적절한 시기에 보강하지 않은 경우 후속 시공과정에서 지반특성에 따라 일시적으로 추가적인 축력 급증현상이 나타날 수 있음을 확인함.(기간 5 참조)
- 본 사례의 버팀보 4 ~ 11단에서와 같이 상대적으로 큰 지점변형이 1차적으로 발생하고 후속적으로 이완이 많이 진전된 지층구간에 속하는 버팀보들은 설계에서와는 전혀 다른 100Ton 이상의 큰 축력들을 나타내었으며 또한 이들 버팀보들 중 9단 및 6단의 경우에서와 같이 해체 직전에 130Ton을 상회하는 축력을 보인 경우들에서는 버팀보 해체시 상부 버팀보들에 일시적으로 큰 영향을 줄 수 있음을 확인함.

3. 결론

- 1) 본 원고의 사례에서와 같이 장지간 버팀보 지지의 깊은 굴착에서 좌우측 지반의 지반조건 및 시공상황의 차이에 기인한 각 계층항목 계층치의 변화와 계층항목간 상호 연계성의 정밀분석을 위해서는 계층계획시 지중경사계, 지하수위계, 하중계는 각각 좌우측에 대칭으로 설치하여야 할 것으로 판단된다.
- 2) 본 사례 분석을 통하여 장지간 버팀보 지지의 연성벽체 깊은 굴착에서 지하수위계, 지중경사계 및 버

팀보 하중계 연계 분석의 중요성을 알 수 있었으며 특히 지중경사계의 경우 지점변형(Incremental Deflection)형태 파악으로 지반변형 및 버팀보 축력변화 원인 규명에 이용하여야 할 것이다.

- 3) 과굴착에 의한 지반보강공법 시행 선단부 및 암층구간에서의 큰 양의 지점변형 발생은 지반 이완진전 및 상부지층에 대한 Arching효과 유발로 버팀보 축력의 급증을 야기하므로 정밀 시공이 필요한 것으로 판단된다.
- 4) 본 사례 분석 우측지반의 경우에서와 같이 풍화암층 구간에서 일시에 급격한 수위저하 발생과 후속적인 경사계 지점변형의 급진전이 있는 경우에는 이완토압의 급증에 따른 버팀보 축력의 급증이 나타날 수 있으므로 특별한 주의가 필요한 것으로 판단된다.
- 5) 연성벽체에 있어 버팀보 축력변화는 지반변형 및 이완진전, 기온변화, 가시설 미소변형에 의한 축력 흡수 등의 복합적 결과이므로 계측결과 분석에 전문성 및 주의가 필요한 것으로 판단된다.
- 6) 본 논문의 사례에서와 같이 체계적인 계측분석 경험에 근거하지 않는 상식이나 제한적인 자료 및 단순화에 근거한 설계에서의 예상과 전혀 다른 지반변형, 축력변화에 적절히 대처하여 사전 사고 예방을 통한 정보화 시공의 목적 달성을 위해서는 정밀 계측 분석을 통한 연성벽체 거동 Mechanism 규명 사례들의 Data Base 축적과 이를 이용한 실질적인 설계 및 시공관리 수준 향상을 위한 노력이 요망된다.

참고문헌

1. 김성욱, 김주봉(1998), “경사계의 전반적 고찰과 굴착공사에서의 변형분석 사례연구”, 한국지반공학회, 98 가을학술 발표회 논문집, pp.233~240.
2. 김성욱, 한병원(2009), “장지간 깊은 굴착에서 지반변형 및 버팀보 축력변화 특성 사례연구(I)”, 한국지반공학회, 2009 봄학술 발표회 논문집, pp.308~319.
3. 김성욱, 한병원(2007), “시공중 계측을 통한 버팀보 축력변화 특성 사례연구”, 한국지반공학회, 2007 봄학술 발표회 논문집, pp.128~139.
4. 김성욱, 한병원(2008), “깊은 굴착에서 파쇄대를 갖는 연암 및 경암 지층의 지반 거동분석 사례연구”, 한국지반공학회, 2008 봄학술 발표회 논문집, pp.521~532.