

근접 깊은 굴착에서 천공장비에 의한 지반교란 특성 사례 연구 Case Study of Ground Disturbance Characteristic due to Drilling Machine in Adjacent Deep Excavation

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

¹⁾(주) 바이텍코리아 전무이사, Executive Director, Baytech Korea Inc.

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

SYNOPSIS : Deep excavations in the urban areas have been frequently going on in large scale. Soil-nailing and Earth-anchor supporting methods are generally used in deep excavation. These construction methods cause ground disturbances during drilling process, and damages of adjacent structures and ground due to the differential settlement throughout construction period, and unexpected behaviors of supporting system according to the characteristics of drilling machine and ground condition. This article introduces two actual examples of adjacent deep excavation for the construction of university buildings in granitic Seoul area. The important results of construction and measurements obtained using Crawler drilling machine for Soil-nailing and Earth-anchor supporting methods are summarized. And some suggestions are given to improve and develop the technique of design and construction in the deep excavation projects having similar ground condition and supporting method.

Key words : deep excavation, soil-nailing, earth-anchor, ground disturbance, crawler drilling machine, suggestion, technique of design and construction.

1. 서론

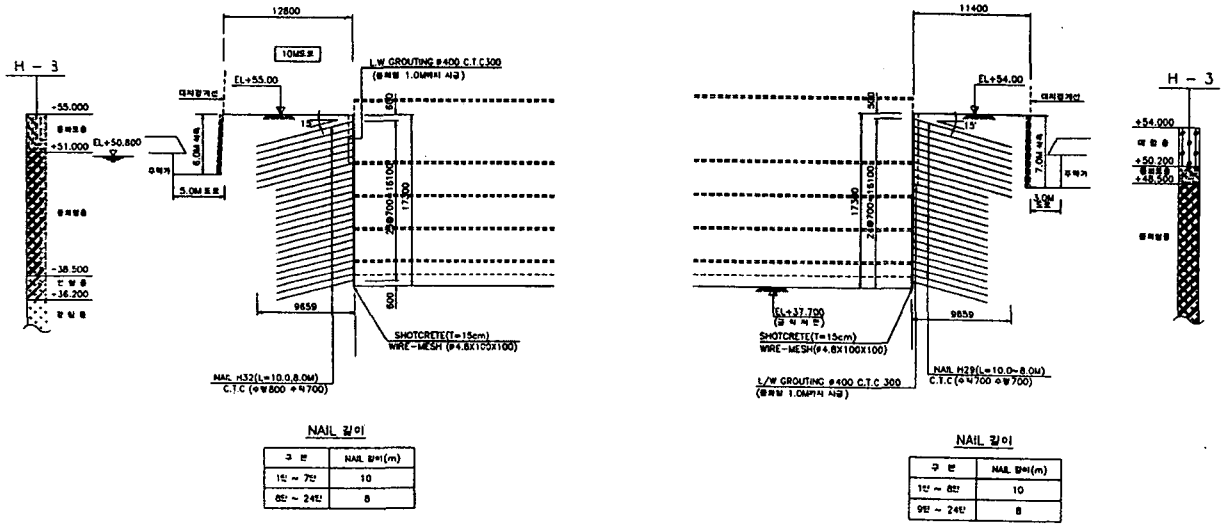
도심지에서 대규모의 근접시공이 빈번하게 이루어지고있다. 깊은 굴착과 관련한 지지공법으로 Soil-nailing공법, Earth anchor공법이 많이 사용되고 있는데 이들 공법과 관련하여 사용되는 천공장비의 특성과 지반조건의 특성으로 말미암아 시공과정에서 야기되는 지반교란으로 인접 지반 및 구조물에서의 부등침하에 의한 피해, 지보자체의 이상거동 등이 나타나는 사례가 많다. 본 논문은 학교 부속건물 시공을 위한 서울의 화강암을 기반암으로 하는 2개소의 근접 깊은 굴착현장에서 국내에서 주로 사용되고 있는 Earth anchor 및 Soil-nailing 천공장비인 Crawler drill을 이용한 시공 및 계측 결과들을 소개함으로써 유사지반 및 동일 공법 적용 project들의 향후 설계, 시공과정에서 개선, 보완해야 할 사항들을 제안하고자한다.

2. 지반교란 특성사례 연구 1 (Nail 시공구간)

2.1 공사개요 및 시공현황

- 토류공법: Shotcrete (t=15cm, Ø4.8×100×100 Wire Mesh)
- 지지공법: Soil-nailing 공법 (H29, H32, L=7~10M)
- 지반보조공법: L.W.Grouting (Ø400, C.T.C 300)
- 지반상태:
 - 매립층(실트 및 모래로 구성, 교란된 풍화토 및 소량의 자갈혼재)
 - 풍화토(실트질 모래)
 - 풍화암(화강암이 심하게 풍화, 수분이나 충격에 의하여 쉽게 실트질 모래화)
- 투수계수 : 풍화토 및 풍화암(1.690×10⁻⁵~9.104×10⁻⁴cm/sec)
- 지하수위 : G.L.-2.2M~6.7M

본 현장은 학교 부속건물 신축현장으로 굴착면에 인접하여 10M폭의 도로와 주택가가 동일 횡단면상에 위치하고 있는데 모두 석축지지의 구조로 되어있어 Nailing공법에 의하여 지보토록 설계되었다. 이들 굴착면 4개 단면에 대하여 굴착과정에서 Nail에 Strain Gauge를 부착하여 Nail축력의 변화상태를 굴착완료 및 구조물 시공 완료 단계까지 관찰하였는데 각 단면에서의 계측결과는 지반조건, 시공조건에 따라 각각의 축력분포특성을 보였다. 본 사례를 통하여 경사계 Data와 Nail 축력 Data의 상관성 파악, Nail 축력분포특성 및 변화특성에서 천공과정에서의 문제점 파악, Nail 축력에 미치는 시공조건의 영향파악은 의미가 있는 것으로 판단되며 향후 유사 Project의 시공과정에서 하나의 시공관리상의 지침이 될 수 있을 것이다.



(a) 1-1, 2-2 단면

(b) 6-6 단면

그림 1. 단면도

2.2 계측결과 분석

2.2.1 1-1단면 및 2-2단면

- 경사계 SD1, SD2에서는 전반적으로 굴착진행에 의한 지반 이완 변형, Nail 시공을 위한 천공작업에 의한 지반의 교란변형이 복합적으로 나타남.
- 경사계 SD1과 SD2의 변형 증가 일자인 10월 4일, 10월 6일과 Nail의 상대적인 큰 양의 축력증가일자인 10월 4일의 상관관계에서 인접 10M도로에서의 Crack발생에 대한 가능성이 나타남(그림 2,3,4,5)

참조)

- 1-1단면 및 2-2단면 철근계는 10월 23일, 27일 3.0Ton 이상의 인장력 증가를 보여 이 무렵 10M 도로 부에서의 Crack 발생 및 진전과 연계된 것으로 판단됨. (그림 6,7 참조)

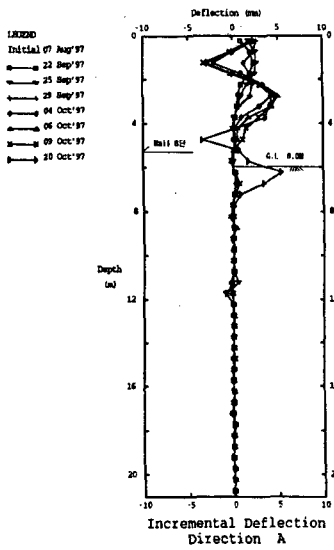


그림 2. 경사계 SD1

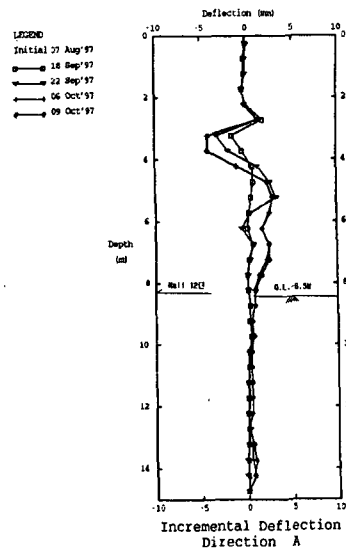


그림 3. 경사계 SD2

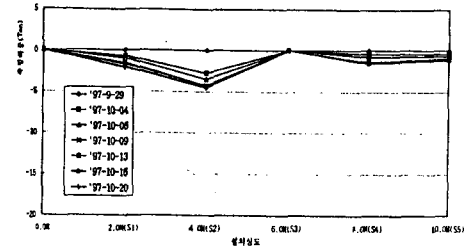


그림 4. 철근계 N1-2

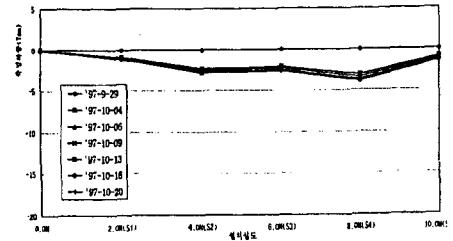


그림 5. 철근계 N2-5

- 계측기간 중 상부지반에 근접하여 설치된 일부 철근계에서 상대적으로 큰 인장력 증가를 나타내어 지표면에서 이와 연관된 침하 및 균열진전이 나타남.
- 계측치의 최대값이 나타나는 지점은 1-1단면에 비해 2-2단면이 굴착벽면에서 멀리 나타나고 있어 상대적으로 더 많이 이완된 것으로 판단됨(그림 8, 9참조).

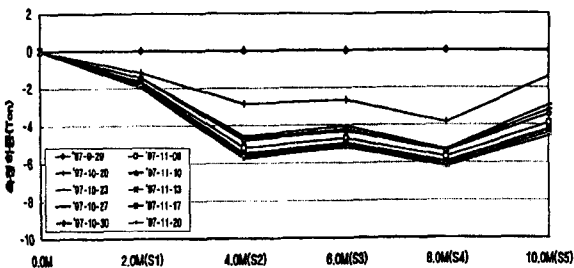


그림 6. 철근계 N2-5

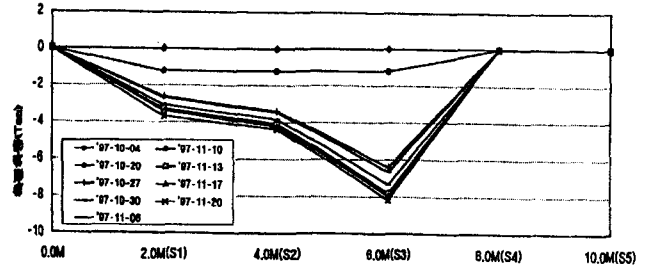


그림 7. 철근계 N1-2

2.2.2 5-5단면 및 6-6단면

- 6-6단면 철근계는 97년 11월 24일, 27일, 12월 4일에 1.0Ton 이상 최대 6.83Ton의 축력증가를 보여 경사계 SD6에서의 급격한 Incremental 변형증가와 상관성을 나타냄. 97년 12월 3일 현장조사결과 굴착배면 약 20.0M 지점까지 지표면상에 Crack이 나타났으며 인접부 석축 및 인접건물에서도 지반변형과 연계된 Crack들이 발견됨. 12월 5일 이후 6-6단면 굴착배면 Crack발생부위에 대하여 부분적인 Cement Paste 주입 및 Cement Mortar에 의한 보수작업시행 (G.L-4.0M ~ 6.0M 구간에서 매립토층과 풍화토층, 풍화토층과 풍화암층의 지층경계부 존재, 그림 10, 11 참조)
- 5-5단면 및 6-6단면 철근계는 토사구간에서 2단 연속 Nail시공을 위한 천공작업에 따른 지반교란효과로 98년 1월 계측시 N5-5, N6-12, N6-14는 전체길이에 걸쳐 짧은 기간에 급격한 인장력 증가현상이 나타남. 이러한 인장력 증가현상은 지반교란 후 안정화과정에서의 침하와 연계된 결과로 판단되어 토류벽 상부에 위치하는 민가들의 침하와 관련된 민원야기의 가능성이 크므로 추가 침하방지를 위한 시

공법의 변경 검토가 필요한 것으로 판단됨. (그림 12,13,14 참조)

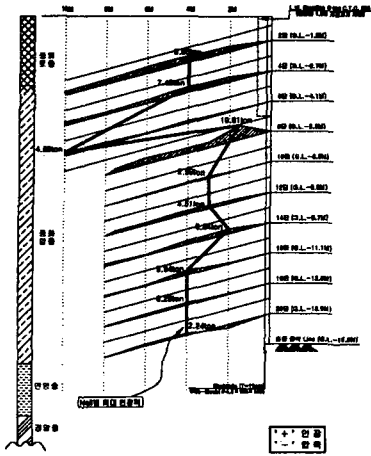


그림 8. 1-1 단면 Nail 최대축력분포도

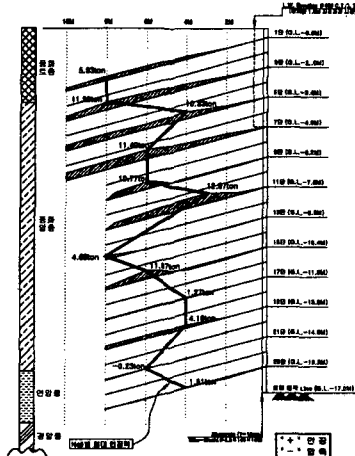


그림 9. 2-2 단면 Nail 최대축력분포도

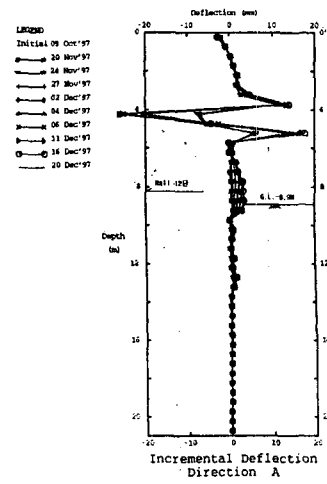


그림 10. 경사계 SD6

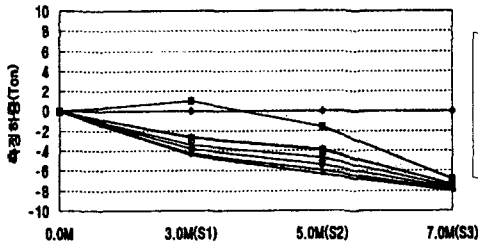


그림 11. 철근계 N6-8

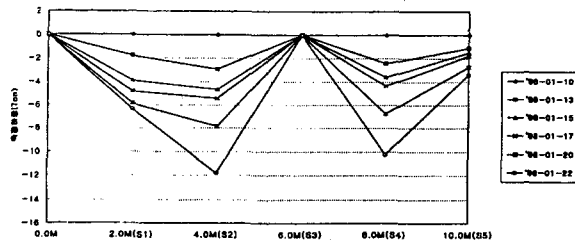


그림 12. 철근계 N6-12

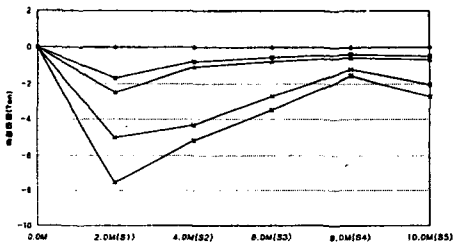


그림 13. 철근계 N5-5

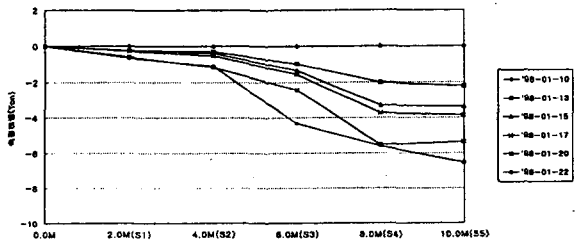


그림 14. 철근계 N6-14

- 5-5단면 및 6-6단면 철근계는 2단 연속 Nail시공을 위한 천공작업에 따른 지반교란의 영향으로 전반적으로 상당기간 큰 양의 인장력 증가현상을 보였으며 이후에는 일부 철근계들에서 부분적인 인장력 증가현상을 나타내었다. 부분적인 인장력 증가현상은 지반내 안정화 과정에서의 경시적인 국부적인 침하현상에 의한 결과로 판단됨.
- 5-5단면 및 6-6단면에서 계측치의 최대값이 나타나는 지점은 주로 굴착벽면 내측 Nail 선단부로 1-1 단면, 2-2단면에 비해 이완영역이 크게 나타나고 있는 것으로 판단됨. (그림 15,16 참조)

2.3 계측결과에 대한 종합적인 고찰

본 현장에서 Nailing공법 적용 시공과정에서 현장조사 및 계측결과 분석을 통하여 다음과 같은 사항들을 파악할 수 있었다.

- 지층경계부에서의 변형을 포함한 경사계 Incremental 변형량의 급증현상과 해당구간에서의 Nail축력의 급증현상이 상호 연계되어 나타날 때는 인접 배면지반 지표부에서의 Crack발생, 지표면 침하에 따른 인접 석축 및 건물에서의 Crack 발생이 나타날 수 있음.

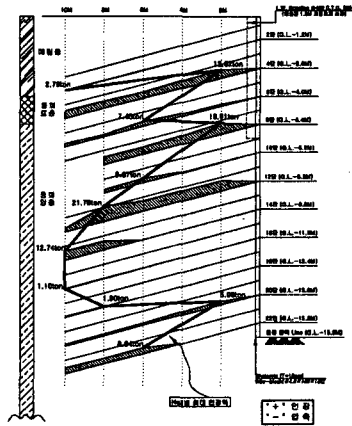


그림 15. 6-6 단면 Nail
최대축력분포도

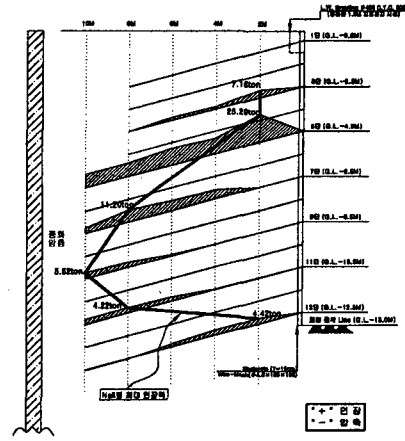


그림 16. 5-5 단면 Nail
최대축력분포도

- 일반적인 Crawler Drill을 사용한 Nail시공을 위한 천공작업은 토사 지반에 교란 및 이완을 부가하며 천공작업 완료 후 장기간에 걸쳐 지반 내 교란상태에 따라 굴착작업과는 상관없는 지반 안정화 과정에서 불규칙한 침하현상을 유발하는 것으로 나타남.
- 당 현장의 5-5단면, 6-6단면에서와 같이 공기 등의 이유로 2단 굴착 및 2단 연속 Nail시공을 위한 천공작업이 진행될 경우 지반은 더욱 교란되고 이완되어 Nail길이 전체에 걸쳐 단기간에 급격한 인장력 증가현상을 가져오며 굴착면 배면 지반 및 지반상의 구조물에 침하에 의한 더욱 큰 피해를 주는 것으로 나타남.
- Nail의 최대 축인장 변형률을 연결한 가상 파괴선은 단면별 지반조건 및 시공특성을 반영한 형태를 나타내었는데 지반 및 시공조건이 유사한 경우 비슷한 모양의 가상파괴선이 나타남을 알 수 있음. 가상파괴선의 형태에 가장 큰 영향을 주는 시공특성은 천공과정에서의 전반적인 지반교란 및 이에 따른 침하 발생으로 판단되는데 이러한 지반교란 및 침하발생으로 Nail에 비슷한 크기의 휨 응력에 의한 축력이 발생하는 것으로 추정됨.
- 5-5단면, 6-6단면의 Nail축력 분포도는 정밀시공의 정도를 반영한 결과로 평가되어 추후 축력분포에 따른 시공정밀성의 판단이 가능할 것으로 생각됨. (2단 굴착 및 2단 연속 천공 구간에서는 이완 범위가 크게 나타남)

3. 지반교란 특성사례 연구2 (Earth Anchor 시공구간)

3.1 공사개요 및 시공현황

- 토류공법: H-pile(H-300×300×30×15) + 토류판(t=10cm, 150×100×1780)
- 지지공법: Earth Anchor 공법 (Ø12.7×3Ea ~6Ea)
- 지반보조공법: L.W.Grouting (Ø400, C.T.C 300)
- 지반상태:
 - 매립층(실트질모래, 잔자갈 및 콘크리트, 모래혼재)
 - 풍화암(화강암이 극풍화, 수분이나 충격에 의하여 쉽게 실트질 모래화)
 - 연암층(보통풍화상태, 질리 및 균열 발달 T.C.R:4~42%, R.Q.D:0~8%)
- 투수계수 : 풍화암 ($1.767 \times 10^{-3} \sim 8.805 \times 10^{-5}$ cm/sec)
- 지하수위: G.L- 2.0M~6.4M

본 현장은 학교 종합 강의동 신축현장으로 굴착면에 인접하여 기존의 6층 종합강의동, 지상4층 교수회관, 지상3층 교수회관이 위치하는데 Earth Anchor가 주된 지지공법으로 사용되는바 이중 건물의 기초가

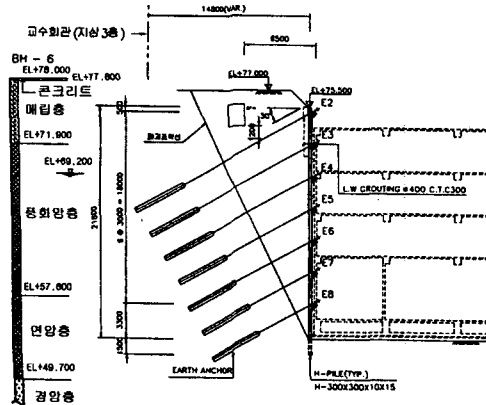


그림 17. 단면도(5-5단면)

없는 지상 3층 교수회관 건물의 피해와 관련하여 굴착과정 및 구조물 시공단계에서의 경사계, 지하수 위계, 하중계, 건물경사계 Data의 상호연계성 파악, 구조물 손상 피해 특성 파악 및 원인규명은 의미가 있는 것으로 판단되며 향후 유사 Project의 설계 및 시공과정에서의 지침 및 개선사항이 될 수 있을 것이다.

3.2 계측결과 분석

3.2.1 5-5단면

- 경사계 SC5에서는 전반적으로 굴착진행에 의한 굴착면 방향으로의 변형과 Earth Anchor 인장에 따른 굴착면 배면지반 압축현상이 상부 구간에서 나타남. (느슨한 밀도의 매립토층)

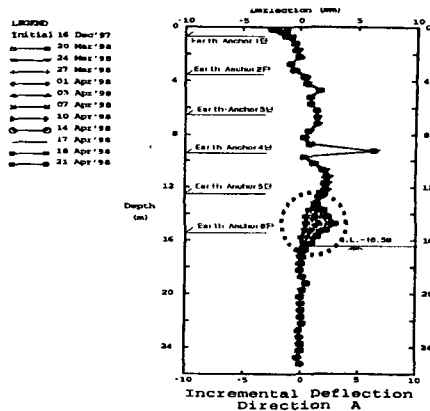


그림 18. 경사계 SC5

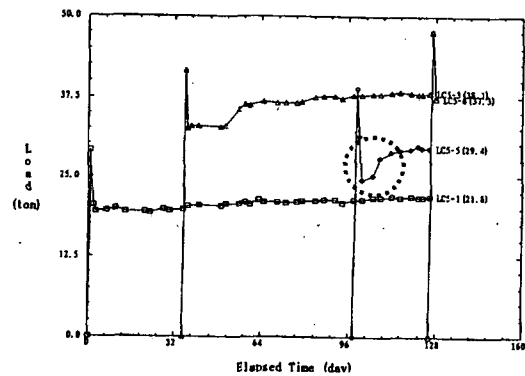


그림 19. 하중계 LC5-5

- 경사계 SC5에서는 굴착심도가 지층경계부를 통과함에 따라 지층경계면에서의 변형과 추가굴착에 의한 지반이완 변형이 복합되어 나타났으며 이와 연관하여 인접배면 지표부에서 Crack 발생 및 진전현상이 나타남. (G.L-9.0M 지점 부근에서 풍화암과 연암의 지층경계부 존재, 그림 18참조)
- 경사계 SC5에서는 Earth Anchor 시공을 위한 천공작업과 Earth Anchor 해체작업과 연계된 굴착면 방향의 변형진전이 나타남
- 3월 27일에서 4월 3일 부근에서 경사계, 건물경사계, 지하수위계, 하중계 계측치의 연계된 큰 변화현상이 나타났는데 경사계 SC5는 추가굴착 진행에 따라 G.L-15M 부근에서 3MM 정도의 Incremental 변형발생, 하중계 LC5-5에서는 3.4Ton의 축력증가, 수위계 SCW5에서는 1.91M의 수위저하 (G.L-12.53M → G.L-14.44M), 건물경사계 TC-5에서는 0.075/1000의 경사각 증가가 생김.(그림 18~21참조)

- 위와 관련 4월 18일 현장조사결과에서 교수회관이 전반적으로 침하의 영향을 받아 보 및 기둥과 연결되는 조적부에서 상당량의 Crack이 발견되었으며 또한 1층 현관 바닥부에서도 Crack이 발견됨.

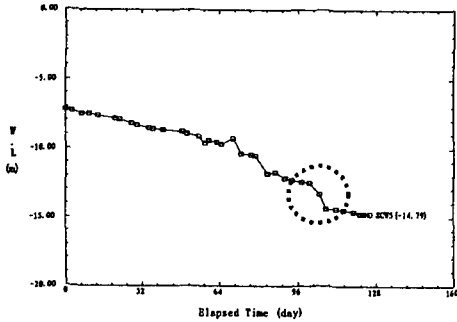


그림 20. 수위계 SCW5

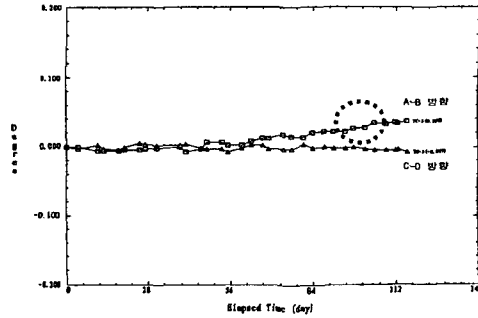


그림 21. 건물 경사계 TC-5

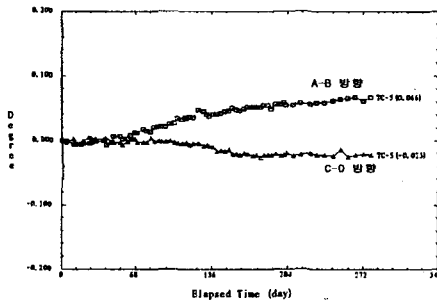


그림 22. 경사계 TC-5(전체기간)

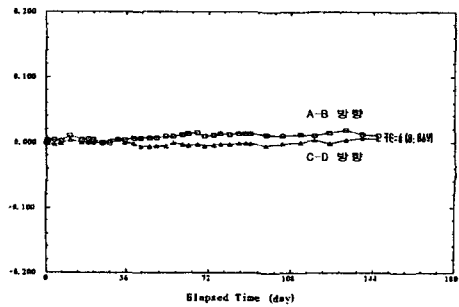


그림 23. 건물 경사계 TC-6

- 5월 중 현장조사시 교수회관 뒷쪽 건물부위까지 부등침하에 의한 구조물에서의 균열발생 및 진전이 나타남. 이는 시공기간중의 지하수위 저하 및 교란지반 안정화 과정에서 광범위한 거리까지 영향을 미치는 것으로 판단됨. 6월 5일 현장조사시 교수회관 바닥부 및 기둥부 Crack 발생부위에서 추가적인 균열진전이 관찰되었으며 교수회관 전면부 및 측면부 유리창에서도 균열 및 파손사례가 나타남. 이후 지속적으로 미소한 변형각 증가 현상을 나타냄.
- 건물경사계 TC-5 계측결과와 관련하여 계측 종료시까지 지속적인 변형각 증가현상을 보인 이유는 교수회관 건물이 굴착면에 인접하여 위치하며 별도의 건물하부지지 구조가 없어 굴착에 따른 변형 및 침하에 민감한 반응을 보이는 것으로 판단되었으며 건물하부로의 Earth Anchor 시공시 연약한 풍화 마사토 지반 조건에 기인하여 지반 교란이 많이 발생한 결과로 판단됨.(그림 22 참조)
- 건물 경사계 TC-5가 설치된 동일건물의 같은 바닥 타워치에 설치한 건물 경사계 TC-6 계측결과가 TC-5와는 다르게 별다른 변형각의 큰 변화를 보이지 않고 미소한 변형각 증가를 나타낸 것은 건물 바닥부 지반의 교란상태에 따라 위치별로 침하하는 특성이 다른 이유에 기인한 결과로 판단되어 특정위치에서의 계측치만에 의한 현장관리는 문제가 있을수 있음을 시사하는 것으로 평가됨.(그림 23 참조)

3.3 계측결과에 대한 종합적인 고찰

본 현장에서 Earth Anchor 공법 적용 시공과정에서 현장조사 및 계측결과 분석을 통하여 다음과 같은 사항들을 파악할 수 있었다.

- 지층 경계부 통과시 경사계 Incremental 변형량이 급증할 경우는 인접 배면 지반 지표부에서의 Crack 발생 및 지표면 침하에 따른 인접구조물에서의 Crack 발생이 나타날 수 있음.(경사계 Incremental 변형 평가의 중요성)
- 특히 당 현장에서와 같이 경사계, 지하수위계, Earth Anchor용 하중계, 건물경사계 계측치들이 상호 연계하여 크게 변화할 때는 필히 정밀 현장조사를 시행하여 지반 및 구조물의 변형유무를 파악하고

변형의 진행이 예상될 시에는 지반조건 및 시공방법을 면밀히 검토하여 초기에 변형 억제 대책 또는 구조물 보호 대책을 수립하여야 함.

- 당 현장에서와 같이 굴착시 대기에 노출되거나 물과 접촉시에는 연약한 화장 풍화토(마사토)의 특성을 보이는 풍화암 지반에서 일반적인 Crawler Drill을 사용한 Earth Anchor 시공용 천공작업은 앞의 Nail 시공을 위한 천공사례와 마찬가지로 지반에 교란 및 이완을 부가하여 장기간에 걸쳐 지반내 교란상태에 따라 굴착작업과 상관없이 지반안정화 과정에서의 부등침하를 유발하여 인접구조물 존재시에는 사용성 및 안정성에 문제를 야기시킬 수 있음.
- 당 현장과 같이 Earth Anchor용 천공작업에 따른 지반교란은 인접지반에 불규칙한 교란을 부가함으로 건물경사계 분석시 계측위치에 따른 계측치의 차이로 인해 구조물 안전성 평가에 오류를 범할 수 있으므로 전문가의 계측계획 및 현장평가, 분석이 요망됨.

4. 결 론

- 1) 본 원고의 피해사례들에서와 같이 Soil Nailing이나 Earth Anchor 시공을 위한 천공작업시 일반 Crawler Drill을 사용시는 지반조건에 따라 천공작업시 지반교란 및 이완에 의해 장기간에 걸친 지반안정화 과정에서의 부등침하가 유발될 수 있으므로 천공장비 및 방법의 개량, 개선이 필요하다.(특수 비트를 이용한 이중관 천공방법의 적용 등: 일본高瀬하수처리장 예)
- 2) Soil Nailing 공법 적용시 경사계와 Nail축력계, Earth Anchor 공법적용시 경사계와 하중계, 지하수위계, 건물경사계 등 계측 항목간 상관 분석으로 지반 및 구조물에서의 피해를 예측, 확인하고 대책을 강구하며 시공과정에서의 계측결과분석에 따른 정밀 시공의 유도가 필요하다. (경사계 Incremental 변형 분석의 중요성)
- 3) 근접 시공시 Soil Nailing 벽체의 안정성과 더불어 인접구조물의 부등침하에 의한 피해를 줄이거나 방지하기 위해 정밀 계측 결과의 축적과 함께 이용에 더욱 노력할 필요가 있다.
- 4) 모형 실험이나 이론적 연구 결과와 다른 Nail의 축변형을 발생특성의 규명을 위하여 지반조건, 시공조건 등에 유념한 정밀계측 및 시공단계별 계측결과와 정밀분석이 필요하다.(지반안정화 과정에서의 휨 변형을 발생등)
- 5) Earth Anchor 공법적용을 위한 설계시에는 지반 및 시공 장비특성을 고려한 적극적 인접구조물 보호대책의 사전 수립이 필요하다. (지반 교란 및 이완, 인접구조물에의 영향 파급 flow 및 특성 인지 필요)
- 6) 유사 Project들에서의 많은 경험 축척에 근거한 계측계획의 수립이 필요하며 계측 결과 분석시에도 전문가의 적극적 관여로 인접구조물의 피해를 예방, 감소할 수 있는 관리체계가 구축되어야 하겠다.

참 고 문 헌

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. 김준석, 이상덕, 이승래(1997), “모래를 사용한 지반 네일 구조물의 실험적 연구”, 한국지반공학회지, 제13권, 제2호, pp.91~100.
4. 成田愛世, 廣瀬 稔, 官坂 潤(1997), “고피압 세사층의 어스앵커 시공”, 토목기술, 제5권 4호, pp.76~81.
5. 전성근(1999), “단계별 굴착시 쏘일 네일링 벽체의 변위와 네일의 인장력 분석”, 한국지반공학회지, 제15권, 제6호, pp.71~86.
6. (주)홍인 E&I(1998), “성균관대 600주년 기념관/종합강의동 C동 계측관리 종합보고서”
7. (주)홍인 E&I(1997~1998), “성균관대 600주년 기념관/종합강의동 C동 월간계측관리보고서”