

특 집

콘크리트 구조물의 공사 계측 기술 현황

지하 구조물 공사의 지반 계측 - Ground Instrumentation on Substructure under Construction -



여유현*

1. 지반 계측 개요

1.1 계측의 필요성

지반 굴착시 지보재 및 주변 지반의 거동 양상은 관련 이론과 각종 토질 시험, 축적된 시공 경험에 의해서 어느 정도 예측이 가능하며, 이러한 거동을 감안한 구조물 설치가 이루어지고 있다. 그러나, 실제의 지반 거동 특성은 지반의 비균질, 비등방성, 조사 및 시험의 한계성, 모델 및 이론의 단순성 등에 따라 설계시의 예측 거동과 현저한 차이를 보이게 된다. 이와 같은 점을 고려하면서 경제적이고 안전한 시공을 실현하기 위해서는 실제의 지반 거동을 정확히 파악하여 예상치 못했던 원인으로 인한 인명 및 구조물의 피해를 사전에 예방할 필요가 있으며 이를 위해 필요한 것이 계측 관리이다.

1.2 계측의 목적

지반 굴착시 계측은 지반의 거동이나 지보재의 변형 유무를 체계적으로 점검하기 위해 예민한 계측 기기를 설치하여 주기적으로 계측함으로써 굴도 공사의 안정성을 확보 및 다양한 목적에 의해 관리하게 된다. 일반적으로 지반 굴착은 시공 전 조사된 지반 조사 자료에 근거하여 이루어지므로, 비균등, 비균질한 지반의 거동에 의한 영향을 파악하면서 시공을 진행하는 것은 최근 도심지 근접 시공으로 이루어지는 건설 현장에서 매우 중요하게 다루어지고 있다.

2. 계측 항목

2.1 계측 항목 선정

계측 항목은 공사 진행시 또는 공사 후의 구조물 안정성과 경제성을 파악할 수 있고 주변 환경의 영향성을 평가할 수 있는 적정 항목으로 선정되어야 한다 (<표 1> 참조).

* (주)가야이엔지 대표이사

표 1. 공사에 따른 현장 계측 항목, 사용 계기 및 측정 항목⁽¹⁾

계측 항목	계측 계기	계측 장소	계측 목적	계측 형태
지중 수평 변위 측정	경사계(Inclinometer)	가시설 구조물의 자체 및 그 주변의 지반	가시설물의 주변 수평 변위를 심도별로 파악, 각각의 횡적 거동 파악	수동 또는 자동 계측
지표 침하 측정	침하 측정핀과 측량 장비	가시설물·주변 지역	공사장 주변 지반의 침하 발생 감시와 관리	측량 후 전산 처리
지중 침하 측정	Probe 삽입식 또는 진동현식 침하 센서	가시설 구조물의 자체 및 그 주변의 지반	흙막이 굴착 심도보다 하부까지 심도별 침하량 계측	흙막이 굴착 심도
Earth Anchor 축력 측정	Load Cell	E/Anchor의 Bracket 설치 지점	Earth Anchor의 가시설 벽체 고정/지지 효과 및 그 변화 추이 파악	수동 또는 자동 계측
Strut의 응력 측정	Strut Load Cell 설치용 Assembly	각 단 Strut의 단부	각단 Strut에 가해지는 Load의 추이를 압력 단위로 직접 측정(kg/cm ²)	수동 또는 자동 계측
수위 측정	관 측정 내 전기식 측정기	가설벽 및 인근 구조물	주변 구조물의 지하수위 변동 파악 설계 기준 평가	수동 계측 후 전산 처리
부재 변형 측정	온도계 내장형 Strain Gauge(표면 부착 형식)	가시설 부재	Strut 부재, 가시설 벽체의 거동 파악, 부재 평가	수동 또는 자동 계측
간극 수압 측정	간극 수압계	가설벽 인접 지점(암반층 및 점토층)	주변 지반의 심도별 간극 수압 추이 파악, 공학적 특성 파악	수동 또는 자동 계측
토압 측정	Pressure Cell	가시설벽의 대표 단면(각 Strut의 위치와 같은 심도)	가시설 벽체에 가해지는 Load의 추이를 압력 단위로 직접 측정(kg/cm ²)	수동 또는 자동 계측
구조물 기울기 및 균열 측정계	Tiltmeter & DEMEC Crack Gauge	가시설 벽체 및 인근 구조물	가설벽 및 인근 구조물의 경사 변화량과 균열 진행 추이 파악	수동 또는 자동 계측
Rockbolt 축력 측정	진동현식 또는 기계식	Rockbolt 설치 지점(흙막이 벽체 하단)	Rockbolt의 축력 파악(지지효과) 굴착 자유면 하부 거동 추이 파악	전기식 센서 사용, 수동 또는 자동 계측
발파 진동/작업 진동/소음 측정/진동/소음 측정/	진동/소음 측정기와 소음, 음압측정용/Microphone	작업 환경 영향권 내의 우선 순위에 따름.	환경 영향을 고려한 제어 발파/작업 중장비 동원 조절을 통하여 작업장 인접 시설물의 위해 방지 및 민원 사전 처리	수동 또는 자동 계측

2.2 계측 기기 선정

〈표 1〉에서와 같이 각 계측 항목 및 장비는 현장의 지반 특성과 굴착 공법, 토피와 지하 구조물 등을 종합적으로 고려하여 계측의 기능과 목적이 최대한 발휘되도록 구체적인 평가 및 활용 방안을 상세히 검토하는 선정 기준에 의해 선정이 되어야 한다. 반입 자재의 철저한 검수를 실시하여 적합한 계측기를 설치하게 되면 계측 관리 기간 중 망실률을 줄이고 적절한 관리를 실시하게 된다.

2.3 계측 시스템의 운용

계측 시스템은 계측 결과를 컴퓨터로 처리하여 정보를 구하는 일련의 과정에서 사용되는 하드웨어와 정보를 운용하는 인적 조직으로 대별할 수 있다. 일반적으로 계측 시스템은 단순 기능을 가진 구성 요소들을 결

합하여 단일한 통합적 기능을 수행토록 한 체계를 의미한다.

일반적으로 계측 시스템은 ① 수동식 ② 반자동 ③ 자동 측정 방식으로 구분되며, 측정 수와 빈도, 계기의 배치 상황 등을 검토하여 현장 여건에 맞는 방식을 선택하여야 한다. 계측 시스템은 일련의 세트로 고정화되어 있지 않고 이용자가 자유로이 조합하여 사용할 수 있으므로, 기존의 컴퓨터와 측정기를 조합하여 사용할 수도 있다. 그러나, 시스템을 구성하는 기기를 선정할 때는 센서와 측정기의 특성이 일치하는지의 여부와 컴퓨터의 결합 방식에 대해 세밀하게 살펴야 한다.

3. 계측 관리

3.1 계측 빈도

지반 계측은 계측 결과의 절대치 관리의 개념보다

는 시간 경과에 따른 추이와 변화 속도를 더 중요시하므로 일반적으로 계측 빈도가 공사 현장마다 다르게 결정되어 사용된다. 지하 터파기 공사 진행시 계측기별 계측 시기와 계측 빈도는 다음 <표 2>와 같다.

표 2. 계측 기기별 측정 빈도 예(Hunt, 1987)²⁾

계측 항목	측정 시기	측정 빈도	비고
지 중 수평 변위계	설치 완료 후 4일	1회/1일(3일간)	초기치 선정
	굴착 진행 중	2회/주	
	굴착 완료 후	1회/주	
지 하 수위계	설치 후	1회/1일(1일간)	초기치 선정
	굴착 진행 중	2회/주	우천 1일 후 3일간 연속 측정
	굴착 완료 후	1회/주	
E/A 하중계	설치 후	3회/일	초기치 선정
	굴착 진행 중	3회/주	
	굴착 완료 후	2회/주	
변형률계	설치 후	3회/일(2일간)	초기치 선정
	굴착 진행 중	3회/주	
	굴착 완료 후	2회/주	
건물 경사계	설치 후 1일	1회/일(3일간)	초기치 선정
	굴착 진행 중	2회/주	
	굴착 완료 후	2회/주	
지표 침하계	설치 후	1회/일(3일간)	초기치 선정
	굴착 진행 중	2회/주	
	굴착 완료 후	2회/주	

3.2 계측기 배치

현장 계측은 가능하면 다양한 거동을 밝힐 수 있도록 많은 위치를 선정하는 것이 바람직하지만, 합리적이고 경제적인 측면에서 흙막이 구조물 및 배면 지반의 거동을 대표할 수 있는 최소한의 측정점을 선정하는 것이 더 효과적이다.

이와 같이 계측 지점을 정한 후 가능한 계측 기기가 동일 단면에 설치되게끔 배치하는 것이 중요하며, 상호 설치 계측기와의 연관성을 유지하여 종합적으로 분석함으로써 계측의 신뢰성을 얻게 된다.

3.3 지반 계측시 고려 사항

최근 굴착 공사는 도심지 근접 시공으로 이루어지는 경우가 많고, 대형화에 따라, 공사 진행 중 굴착 지역의 안정성 및 주변 지반(구조물)의 안정성 확보는 매우 중요하게 된다.

굴착 공사에 계측 관리가 도입되기 전인 1980년대 까지 국내의 굴착 공사는 기술자의 경험에 의해 최소한의 안정성을 확보하면서 시공이 이루어졌으나 잦은 사고 발생으로 인해 굴착 공사의 안정 관리를 위한 계측 관리 법규가 강화되어 GL-5.0m 이상 또는 안정상 고려가 필요한 현장에 대하여 지반 계측을 의무화하고 있다. 그러나, 과거의 관행에 의해 아직까지 지반 계측을 형식적으로 수행하여 오고 있는 경우도 있으므로 지반 계측 수행시 다음의 사항을 염두에 두고 철저한 정보화 시공이 이루어지도록 하여야 한다.³⁾

① 기중 선정 및 자재 검수에 관한 사항

대부분의 계측 자재는 지반 속에 설치하는 경우가 많으므로 계측 불능 상태가 발생할 경우 안정성 확보에 큰 문제가 발생할 수 있다. 따라서 계측기 설치 전 반입 자재에 대해서는 검수를 통하여 이를 확인토록 하여야 한다.

② 설치 시기 및 측정에 관한 사항

지보재 및 주변 지반의 거동 특성을 정확히 파악하기 위해서는 정지 토압 상태 및 zero 응력 상태에서 계측이 이루어져야 한다. 계측시에는 동일인이 동일한 장비로 주기적으로 실시하여야 위험 상황을 시공에 반영할 수 있는 정보화 시공이 가능하다.

③ 시공 중 유지 관리에 관한 사항

굴착 현장에서 시공 중 지속적으로 안정성을 확보하기 위해서는 체계적인 계측 수행과 계측 결과를 시공에 적극 반영할 수 있는 현장 조직의 구성이 필요하다. 특히 계측 수행자는 정보화 시공을 위한 전문 기술자라는 인식이 수립되어야 한다. 특히 많은 현장에서 계측 수행 중 계측기 망실 사고가 발생하는데, 이로 인해 주변 지반(구조물)의 거동 특성에 대한 정량적인 평가는 매우 어려우므로, 계측기 특성, 지반 특성, 현장 작업 조건 등을 종합적으로 고려한 유지 관리 계획이 수립되어야 한다.

④ 분석 및 검토에 관한 사항

흙막이 가시설 현장의 일반적인 계측 관리 수행자의 위험 상황 예측의 자료는 시공자 및 감리자가 검토할 수 있도록 결과를 즉시 현장에 제출하여야 한다. 최근 컴퓨터 및 통신 시설이 발달하여, 수동 계측을

수행할 경우에도 빠른 시간 내에 결과를 정리하여 현장에 제출이 가능하므로 정보화 시공을 매우 용이하게 한다.

상기와 같이 흙막이 가시설 현장에서 조금만 더 관심을 기울이면 정보화 시공이 가능하다. 그러나, 국내 시공 현장에 계측 관리 도입 이후 계측사간의 과열된 경쟁과 시공사의 횡포로 용역 단가가 하락하여 정상적인 계측 수행이 어려울 수 있으므로 관계자(설계자 & 시공자 & 감리자 & 계측 수행자)는 철저한 계측 관리 기준(자재, 구매, 설치, 투입 기술자)에 의한 계측 수행이 이루어져야 효율적인 정보화 시공이 가능할 것으로 판단된다.

이와 같은 정보화 시공을 위한 계측 수행을 위하여 다음과 같은 계측 제도 개선 방안이 필요한 실정이다.

- ① 일정 수준 이상의 기술 인력과 업무 능력을 갖춘 전문 업체로 하여금 계측을 수행토록 하는 관계 법규의 제정 정비
- ② 계측업체가 시공사에 종속된 계약 형태를 지양하고 전면 책임감리·용역에 계측 부분을 포함시키는 발주 방법의 개선
- ③ 계측비 산출 기준은 토질 및 기초공사 표준품셈에 기초한 계측 자재비, 계측 기기, 설치비, 측정비, 분석비, 역해석비, 유지 관리비 등을 합리적으로 정할 수 있는 품셈 기준 정립
- ④ 계측 기기의 공신력 확보를 위해서 정기적인 검교정을 필한 장비 사용

4. 계측 관리 기준^{4),5)}

계측 결과를 시공 관리에 보다 효율적으로 사용하기 위한 계측 관리의 절차를 다음 <그림 1>에 나타내었다.

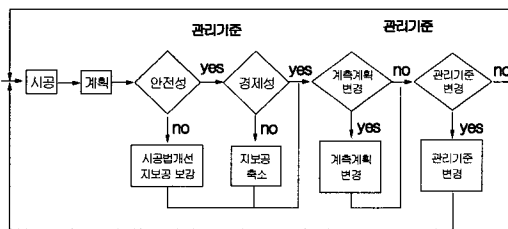


그림 1. 계측 관리 흐름도

계측 관리의 성공적 수행을 위해서는 적절한 관리 기준의 설정이 필요하며 이를 통하여 안정성, 경제성 등의 측면에서 완벽한 시공으로 유도될 수 있다.

4.1 계측 기준 설정시 고려 사항

계측 항목별 관리 기준치의 설정을 위하여 다음 사항을 고려하는 것이 바람직하다.

- 토질 시험 결과 : 지반 조사 보고서 등을 참조하여 굴착 지반의 구성 및 특성을 파악하고, 토질 정수 등을 구하여 설계 및 모형 해석을 위한 자료 확보
- 기존의 실시 예 : 공사 현장 주변 및 유사한 굴착 공사 현장에서의 공사 경험 및 관리 기준치를 참조하여 현장에 적용
- 설계 계산 결과 : 토질 시험 결과를 이용한 가설 구조물에 대한 설계 계산 결과에서 토류벽의 응력, 지보재 축력, 설계 토압 등을 구하여 관리 기준치 설정을 위한 자료 사용
- 수치 해석 결과 : 탄소성 해석법 및 FEM 해석법에 의하여 각 굴착 단계마다 가설 구조물 및 굴착 지반을 시뮬레이션하여 해석한다. 이 방법에 의하여 각 굴착 단계마다의 가설 구조물의 응력 및 변위, 굴착 지반의 변형, 토류벽의 변형, 주변 지반의 수평 변위 및 침하를 계산하여 관리 기준치 설정을 위한 기준 자료로 활용

4.2 일반적인 계측 관리 기준

4.2.1 토압계(earth pressure cell)

설계시 사용한 토압 분포의 최대값 P_{max} 가 기준이 되어 실측에 의한 토압이 한계치를 넘어서면 흙막이 벽체가 위험하게 된다. 흙막이 벽체의 파괴에 대한 장기적인 안정성의 확보는 $(P_{max}/1.2)$ 값이 실측에 의한 토압보다 클 때 이루어지는 것으로 평가한다.

표 3. 계측 토압의 관리 기준치(한국지반공학회, 1992)

안정	$실측치 < \frac{P_{max}}{1.2}$
주의	$\frac{P_{max}}{1.2} \leq 실측치 < \frac{P_{max}}{0.8}$
위험	$\frac{P_{max}}{0.8} \leq 실측치$

4.2.2 지하수위계(water level meter) 및 간극수 압계(piezometer)

지하수위에 대해서는 설계시에 고려된 지하수위를 기준으로 하여 실측된 지하수위가 설계 수위보다 높을 경우가 안전에 대한 주의 대상이 되어, 실측 토압의 관계로부터 위험 여부를 판정하게 된다.

투수성 지반에서 지하수위보다 깊게 터파기할 경우 보일링(boiling)에 대한 흠막이 구조물의 안정은 간극 수압을 측정하여 침투에 의한 유출부의 최대 동수경사 i_{exit} 를 구함으로써 검토될 수 있다(〈표 4〉 참조).

표 4. 보일링에 대한 관리 기준치

안정	$i_{exit} < 0.25$
주의	$0.25 \leq i_{exit} < 0.75$
위험	$0.57 \leq i_{exit}$

4.2.3 하중계(load cell)

지보재의 하중은 하중계로 측정한다. 설계시에 사용하는 토압 분포에 의해 각 지보재마다의 지보 하중이 산정되고, 지보재 종류에 따라 지보 단면이 결정된다. 따라서 사용되는 지보재의 종류에 따른 허용 축력이나 허용 인장력과 같은 실측된 지보 하중을 비교하여 〈표 5〉와 같이 구조물의 안정 여부가 검토될 수 있다. 그러나, 어쌍앵커의 경우 실측된 값이 인정되지 않고 계속해서 감소하는 경우와 증가하는 경우는 흠막이벽의 안정에 영향을 미치므로 주변에 다른 계측기의 추가 설치를 고려하여 정착구, 자유장, 자유장의 이상 유무를 확인하는 것이 필요하다.

표 5. 하중계의 관리 기준치(한국지반공학회, 1992)

안정	실측치 < $\frac{\text{부재의 허용축력}}{1.2}$
주의	$\frac{\text{부재의 허용축력}}{1.2} \leq \text{실측치} < \frac{\text{부재의 허용축력}}{0.8}$
위험	$\frac{\text{부재의 허용축력}}{0.8} \leq \text{실측치}$

4.2.4 응력계(strain gauge)

측정된 응력에 의해 검토할 때에는 흠막이벽이나 얽지말뚝, 그리고 띠장의 종류에 따른 허용 휨 응력을 〈표 6〉과 같은 기준으로 평가할 수 있다.

표 6. 응력계의 관리 기준치

안정	실측응력 < $\frac{\text{허용 휨응력}}{1.2}$
주의	$\frac{\text{허용 휨응력}}{1.2} \leq \text{실측응력} < \frac{\text{허용 휨응력}}{0.8}$
위험	$\frac{\text{허용 휨응력}}{0.8} \leq \text{실측응력}$

4.2.5 지중수평변위계(inclinometer)

흠막이벽 인접 지반의 수평 변위량과 위치 및 방향을 측정하기 위하여 지중경사계를 설치한다. 지중경사계의 계측 관리 기준은 수평 변위/수직 거리에 대한 변위인 경사도가 1/200 ~ 1/300로 하는 경우도 많지만, 이 값 외에 상호 연관이 되는 흠막이벽 변위, 주변 지반 침하량 및 인접 구조물의 경사도에 대한 계측치를 상호 비교하여 검토하고 주변 도로, 지하철 또는 주변 구조물 등의 관계자와 협의하여 결정하게 된다.

4.2.6 건물경사계(tiltmeter)

인접 주요 구조물의 경사 진행 상태를 측정하기 위하여 건물경사계를 구조물에 부착한다. 건물경사계의 계측 관리는 구조물에 미치는 영향에 대한 각 변위(경사도)의 한계를 기준으로 하여 실시한다(〈표 7〉 참조).

표 7. 여러 가지 구조물의 최대 허용 침하량(Sowers, 1962)

침하 형태	구조물의 종류	최대 침하량
전면 침하	· 배수 시설 · 출입구 · 부등 침하 가능성	· 15.0 - 30.0 cm · 30.0 - 60.0 cm
	- 석적 및 벽돌 구조 - 뼈대 구조 - 굴뚝, 사이로, 매트	· 2.5 - 5.0 cm · 5.0 - 10.0 cm · 7.5 - 30.0 cm
	전 도	· 탑 굴뚝 · 물체 적재 · 크레인 레일
부등 침하	· 빌딩의 벽돌 벽체 · 철근 콘크리트 뼈대 구조 · 강뼈대 구조(연속) · 강뼈대 구조(단순)	· 0.0005 S - 0.0002 S · 0.003 S · 0.002 S · 0.005 S

* S : 기둥 사이의 간격 또는 임의의 두 점 사이의 간격

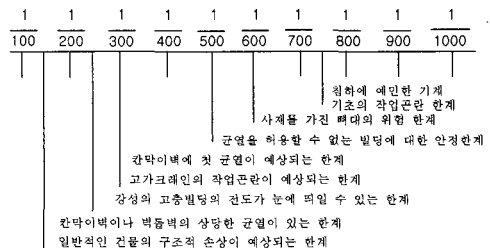


그림 2. 허용 각 변위 및 건물의 피해 상황(by Bjerrun)

4.2.7 지표면 침하판(Surface settlement plate)

토류벽 배면 지반의 침하는 여러 가지 요인에 의해 발생할 수 있고, 이론 해석에 의한 정확성도 아직 결여되어 있지만 가장 중요한 원인 중의 하나라고 생각되는 것은 굴착 중 누적되는 벽체의 수평 변위일 것이므로 이를 최소화하기 위해서는 벽체와 지반의 강성을 높이고 근입 깊이를 늘리는 방법이 있다. 예측 침하량은 인접 도로, 지하철, 매설물 등 각종 구조물과 인접 건물의 손상 한계 및 허용 침하량을 넘지 않도록 하여, 이를 계측 기준치의 설정에 이용한다(〈표 8〉 참조).

표 8. 인접 지반 침하량에 대한 관리 기준

안정	실측침하량<허용 침하량
주의	예측침하량≤실측침하량<허용 침하량
위험	허용침하량≤실측침하량

공식적인 계측 기록이 있는 주요 현장에서의 굴착 고에 따른 발생 침하량은 다음 〈표 9〉와 같다.

표 9. 굴착고에 따른 최대 발생 침하량

공사 지역	공구	굴착고 H(m)	최대 침하량 δ _{MAX} (mm)	δ _{MAX} (%)
Oslo 지하철	Vaterland	8.0	230	2.9
	Vaterland	8.0	250	3.1
	Vaterland	10.0	110	1.1
	Gronland	8.0	190	2.4
	Gronland	11.0	180	1.6
	Technical school	6.0	80	1.3
동경 지하철	1 k 575m	9.5	80	0.8
	2 k 100m	9.4	87	0.9
	2 k 225m	9.4	75	0.8
동경시내	하정지지부	6.5	90	1.4
	산수대지부	8.0	20	0.3

4.2.8 균열측정기(crack gauge)

콘크리트의 허용 균열 폭은 기능상과 미관상으로 구분되어 결정하는 것이 일반적으로 외국의 관련 규정을 살펴보면 다음 〈표 10〉, 〈표 11〉과 같다.

표 10. ACI-committee 224의 허용 균열 폭

노출 조건	최대 허용 균열 폭
건조 공기 또는 보호층	0.40
습기 및 xhdiod	0.30
동결 방지제	0.18
해수, 해수 살포	0.15
저수 구조	0.10

표 11. 보수 여부에 관계되는 균열 폭의 기준 (시설안전기술공단, 1996)

구분	기타 요인#1 환경#2	내구성으로 본 경우			방수성으로 본 경우
		극심함	중간	완만함	-
(1) 보수를 필요로 하는 균열 폭(mm)	대	0.4 이상	0.4 이상	0.6 이상	0.2 이상
	중	0.4 이상	0.6 이상	0.8 이상	0.2 이상
	소	0.6 이하	0.8 이상	1.0 이상	0.2 이상
(2) 보수를 필요로 하지 않는 균열(mm)	대	0.1 이하	0.2 이하	0.2 이하	0.05 이하
	중	0.1 이하	0.2 이하	0.3 이하	0.05 이하
	소	0.2 이하	0.3 이하	0.3 이하	0.05 이하

- #1. 기타 요인(대, 중, 소)이란 콘크리트 구조물의 내구성 및 방수성에 미치는 유해성 정도를 표시하고 요인별 영향(균열의 깊이, 형태, 피복 두께, 콘크리트 표면 피복의 유무, 재료 배합, 연속 치기 등)을 종합 판단하여 결정한다.
- #2. 주로 철근의 부식 발생 조건의 단점으로 본 환경 조건임.

5. 계측 사례

도심지 근접 시공으로 정보화 시공을 통하여 시공이 완료된 서울 지하철 ○○현장의 계측 사례를 살펴보고자 한다.⁶⁾

5.1 계측 수행 개요

평균 깊이 220m에 굴착 폭 17.8m로 굴착이 진행되었던 본 구간은 측벽과 상당히 인접하여 직접 기초 형식으로 처리된 지상 7층 규모의 빌딩이 위치한 구간이다. 특히 본 구간은 굴착이 진행됨에 따라 상재 하중이 굴착 측벽에 미치는 영향이 다른 구간에 비해 훨씬 크게 나타날 것으로 예상되었다. 더욱이 GL-4.0m까지가 매립 지반이고 N치는 4 이하의 매우 연약한 실트질 모래의 층적층으로 이루어져 있어 지반이 정지 상태로부터 주동 상태로 전이됨에 따른 거동 양상의 파악이 필요하였다. 굴착 공사 기간 중 본 구간에 대한 시공 이력을 간단히 요약 기술하면 〈표 12〉와 같다. 또한 시공 이력을 그림으로 나타내면 다음 〈그림 3〉에 나타낸 바와 같다.

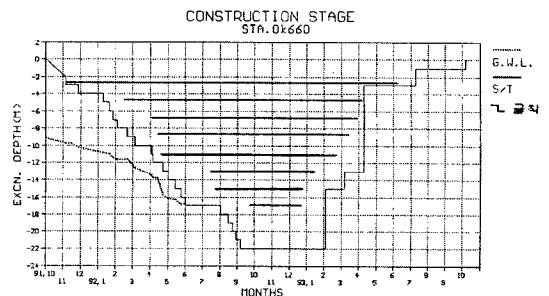


그림 3. 굴착 공사 시공 이력

표 12 굴착 공사 시공 이력

일시	시공 내용 요약
91.11	- 굴착 깊이 3.0m, 지보재 설치없이 H-pile만 진입 - 종점부쪽으로 하향 Ramp 형성, 토류판 미설치
91.12	- 굴착 깊이 4.0m/Strut 1단 설치 - 종점부를 향해 하향 Ramp 유지, Strut 2단을 위한 락 거치 중 OO빌딩 옆 정화조 파이프의 탈락으로 인한 누수 현상 발생
92.01	- 굴착 깊이 5.0m - GL -2.0~5.0m까지 토류벽 콘크리트 시공 - OO빌딩 주변 LW 그라우팅 보강 실시
92.02	- 굴착 깊이 6.0~8.0m/Strut 2단은 락만 설치 - OO빌딩 주변 LW 그라우팅 보강 실시
92.03	- 굴착 깊이 9.0~10.0m Strut 2단 설치 - GL -5.0m 하부는 토류판 시공 - LW 그라우팅 시공 완료, 하향 Ramp 형성
92.04	- 굴착 깊이 11.0~12.0m/Strut 3단 설치 - Strut 4단은 락만 설치 - Strut 2단은 double 보강
92.05	- 굴착 깊이 13.0~14.0m/Strut 4, 5단 설치 - Strut 6단은 락만 설치 - 굴착 바닥면에 다량의 용출수 누출
92.06	- 굴착 깊이 15.0~17.0m/Strut 6, 7단은 락 설치 - 지반보강공으로 Cement Get Grouting 실시
92.07	- Cement Get Grouting 실시 완료
92.08	- 굴착 깊이 18m/Strut 8단 거치 준비
92.09	- 굴착 깊이 19~22.0m/굴착 완료, 바닥 콘크리트 타설
92.10	- Strut 8단 설치
93.01	- 바닥 구조물 시공 완료/Strut 7, 8단 철거
93.02	- GL -15.0m까지 되매움/Strut 6단 철거
93.03	- GL -13.0m까지 되매움/Strut 5단 철거
93.04	- GL -3.0m까지 되매움/Strut 2, 3, 4단 철거
93.07	- GL -1.0m까지 되매움/Strut 1단 철거
93.10	- GL -0.0m까지 되매움/노면 다짐 완료

5.2 지층 상태

본 구간에서의 지층 상태를 그림으로 나타내면 <그림 4>와 같다.

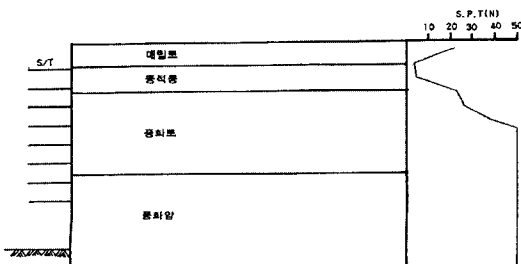


그림 4. 지층 상태

5.3 계측 결과 및 분석

5.3.1 수평 변위

본 구간의 경사계는 굴착 초기 단계에 매설하여 계측을 수행해 오던 중 주변 지반에 발생한 과대 변위를 억제하기 위하여 1992년 6, 7월에 Cement Jet Grouting 실시 중 작용 압력에 의해 파손되어, 재설치 후 계측을 수행하였다.

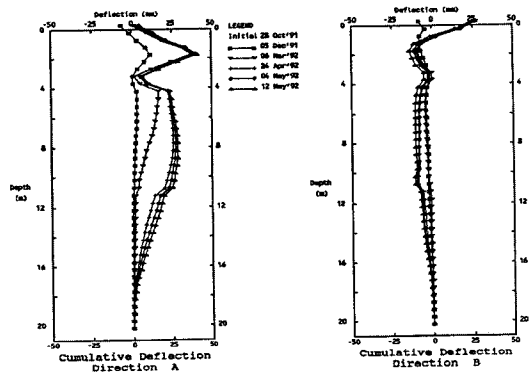


그림 5. 지중 수평 변위 경시 변화

<그림 5>의 계측 결과에 따르면 1992년 3월 GL -2.0 m 부근에서 약 38 mm 정도의 변위가 발생한 것으로 나타났는데, 이는 1991년 12월에 발생한 "정화조 파이프 탈락"에 의해 생긴 누수 현상 억제를 위해 1992년 1월에 LW 그라우팅을 실시함에 따른 국부적 지반 변위 현상으로 파악하였고 그 이후에는 수렴 상태를 유지하였다.

1992년 3, 4월의 변위 양상을 비교하면 GL -4.5 ~ 11.0 m에 이르는 구간에서 7 ~ 17 mm에 이르는 변위가 추가로 발생한 것을 알 수 있다. 이는 본 구간에 대한 시공 이력(<표 12>, <그림 3> 참조)에서 알 수 있듯이 1992년 3월에 2단 Strut가 거치된 이후로 약 5 m의 굴착이 진행되는 동안 지보재의 설치가 적절히 이루어지지 않아 발생한 변위로 여겨진다. <그림 4>를 참조하면 6, 7단 Strut 역시 거치 시기가 다소 지연된 것을 알 수 있으나, 해당 지보재는 풍화암 내지 N치 50 이상의 풍화도 구간에 위치하고 있어 3, 4단 Strut의 경우만큼 큰 지반 변위 양상은 보이지 않았을 것으로 추정되며, 기존 건물의 구조적 피해를 막기 위하여 1992년 6, 7월에 걸쳐 주변 구간에 시

공한 Cement Jet Grouting으로 인해 계측기가 망실됨에 따라 그 자료는 얻지 못하였다. 또한 Cement Jet Grouting의 효과를 확인하기 위하여 1992년 10월에 재설치하여 얻어진 경사계 지중경사계 경시 변화를 살펴보면 주변 빌딩층의 기초 바닥면인 GL-4.5m에서의 수평 변위 발생 양상은 수렴 상태를 유지하고 있는 것으로 나타나 지반의 거동 방지를 위해 실시한 Cement Jet Grouting은 효과가 있었음을 알 수 있다.

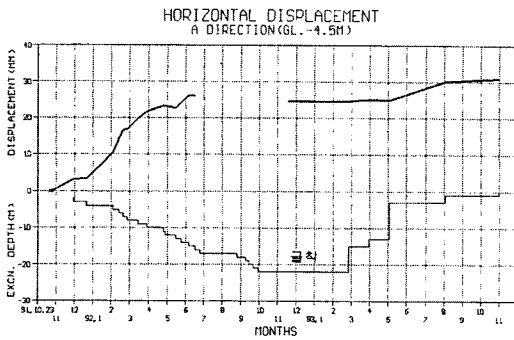


그림 6. 지중 수평 변위 경시 변화(GL-4.5m)

5.3.2 지중 침하 및 지하수위

본 구간은 "시공 이력"에서도 기술했던 바와 같이 인접한 빌딩이 굴착 면과 매우 인접하여(약 2m 이격) 위치해 있다. 따라서 굴착이 진행됨에 따라 건물의 상당 부분이 배면토의 활동 영역 내이므로 이로 인한 건물의 부등 침하 발생이 우려되었다. 계측 관리 기간 중 지중 침하 경시 변화(〈그림 7〉 참조)와 각 심도별 지중 침하량은 다음 〈표 13〉과 같다.

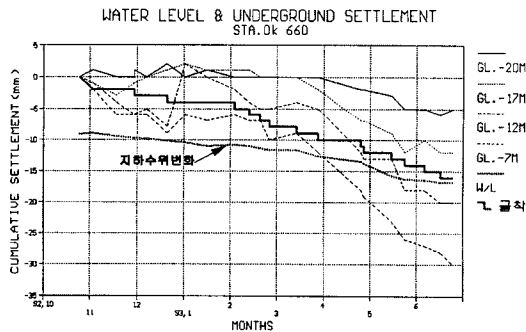


그림 7. 수위 및 지중 침하 경시 변화

표 13. 침하 소자 위치별 지중 침하량

심도	GL-7.0m	GL-12.0m	GL-17.0m	GL-20.0m
침하량	30mm	20mm	12mm	5mm

상기 〈표 13〉에 따르면 GL-20.0m 위치에서는 침하량이 약 5mm로 나타났으나 굴착 심도 이하 지역으로 거의 침하가 발생하지 않은 것으로 판단하였다. 빌딩 기초의 허용 부등 침하량은 Sower가 제안(〈표 7〉 참조)한 바에 따르면 철근 콘크리트 구조물에 있어서 0.003S 이내로 기둥 간격이 7.0m인 점을 감안하면 Bowels에 의해 제안된 평가 방법을 이용하여 침하 영향에 따른 지표면 침하량은 다음과 같다.

표 14. 침하 영향에 따른 표면 침하량

굴착면으로부터의 거리	0m	2.0m	5.7m	12.7m
발생 침하량	90mm	40mm	6mm	0mm

본 구간은 굴착에 의한 침하 영향장이 17.2m이며 굴착 배면으로부터 12.7m까지는 굴착에 의한 지반의 부등 침하 양상이 두드러지게 나타나는 것으로 예상된다.

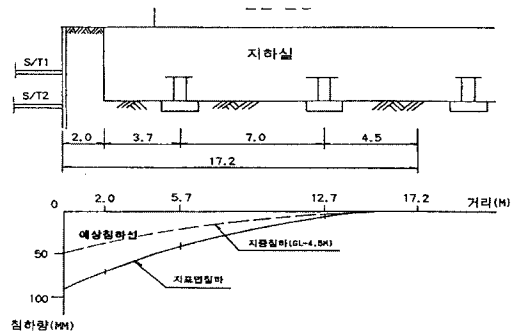


그림 8. 주변 지반 지표 침하 및 지중 침하(GL-4.5m)

빌딩층의 기초가 GL-4.5m에 위치하는 점을 감안할 때 빌딩의 거동은 GL-4.5m에서의 지중 침하 양상에 의해 영향을 받으며, 〈표 13〉으로부터 GL-7.0m에서의 지중 침하량이 30mm였다는 점을 감안하면 GL-4.5m 위치에서의 지중 침하량은 약 50mm 전후가 되었을 것으로 추측이 가능하다. 이와 같이 빌딩층 바닥면의 전침하량을 50mm로 판단할 경우 각 기둥간 부등 침하량은 〈그림 8〉로부터 20mm를 초과하

지 앓을 것으로 판단되어 빌딩 구조는 굴착 진행에 기인한 부등 침하의 영향은 작았을 것으로 판단된다.

지하수위 측정 결과는 <그림 7>에 나타난 바와 같이 초기 계측시부터 계측 종료시까지 지속적으로 강하하여 약 7.55 m의 강하를 보인 것으로 나타났으며 특히 굴착 마무리 시점에서 약 4.5 m의 수위 급강하 현상이 계측되었다. 이와 같은 수위의 급격한 강하 현상(<표 12> 참조)은 3~5월의 시공 이력(<표 12> 참조)에 나타난 바와 같이 굴착면 바닥에서 다량의 지하수 누출 현상이 발생한 데 기인한 것으로 판단된다.

5.3.3 Strut 축력

각 굴착 단계별로 작용 응력 변화 추이를 살펴보면 전반적으로 굴착 마무리 시험에서 수렴 상태가 유지되어 안정 상태로 접어드는 것으로 보이며, 전체적으로 지보재의 안정 상태는 양호한 편이며, 따라서 지보재는 가시설의 역할을 효과적으로 하고 있는 것으로 나타났다.

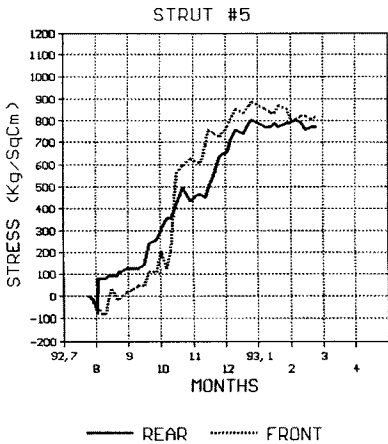


그림 9. strut축 응력 경시 변화

5.3.4 건물 기울기

<그림 10>에 나타난 바와 같이 각 변위량은 최대 $0.04^\circ(1/1431)$ 로서 Bjerrum의 구조물에 대한 각 변위 한계와 비교하면 건물 자체는 굴착에 의한 영향은 거의 받지 않은 것으로 나타났다. 이는 시공 과정에서 계측 결과를 이용하여 주변 지반 피해 상황을 파악하고 지반 보강 계획을 수립하여 현장에 적용한 Cement Jet Grouting의 적용성으로 빌딩 주변 지반의 거동이 안정화한 것으로 여겨진다.

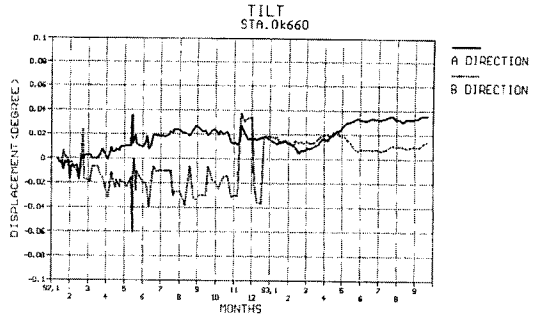


그림 10. 건물 기울기 경시 변화

5.4 검토 결과

본 계측 구간은 굴착에 따른 지보재 설치 지연으로 인해 지반의 변위가 다소 과대하게 발생하였던 구간으로 그 영향에 의해 인접 건물에도 미약하나마 계측 결과로부터 피해 정도를 예측하였다. 계측 결과를 이용하여 보강 계획을 수립하였으며 보강 공사 실시 및 완료 후의 개량 효과를 확인할 수 있었다. 이와 같은 체계적인 정보화 시공을 통하여 배면 지반 및 인접 구조물 전반에 걸쳐 안정화한 상태로 공사를 마무리하였다.


6. 맺음말

본고에서는 지반 계측의 일반적인 사항과 계측 수행시 고려하여야 할 사항을 열거하였으며, 1990년대 초 도심지 근접 시공으로 굴착 공사가 이루어진 정보화 시공 현장의 사례를 들어 대략적으로 설명하였다. 이를 토대로 국내 지반 계측의 현황과 문제점 및 개선되어야 할 사항을 열거하면 다음과 같다.

- ① 국내 도심지 굴착 현장에서도 굴착 깊이 5.0 m 이상인 경우 계측 관리 수행을 통하여 굴착 현장의 안정성은 확보할 수 있을 것으로 평가된다. 그러나, 체계적인 정보화 시공을 위해서는 개선되어야 할 사항이 매우 많은 실정이다.
- ② 본고의 계측 사례에서와 같이 지반 보강시 계측기 망실 사례가 있고, 초기 측정이 잘 이루어지지 않은 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 국내의 굴착 현장에서 매우 빈번히 발생하는 것

으로 계측 수행시 안정성 확보를 염두에 둔 보다 철저한 계측 관리가 이루어지도록 하여야 할 것이다.

- ③ 계측 수행자는 설계, 시공 전반에 걸쳐 전반적으로 이해하여 관리 기준치를 설정하고, 계측 관리를 수행하여야 하며, 신속하고 체계적인 검토를 통한 정보화 시공의 기틀 마련을 위한 노력이 필요하다.
- ④ 지반 계측은 국내 계측 관리 도입 후 계측업체 간의 과다 경쟁과 시행자의 개념 부족에 의한 부작용으로 형식적인 계측 수행이 이루어지고 있는 경우도 있는 바, 시공의 안정성 및 정보화 시공을 염두에 둔 보다 체계적인 계측 수행이 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- ⑤ 본고에서 정보화 시공 사례에서와 같이 시공 과정 중 정확한 계측 분석 결과로부터 구조물의 이상 징후를 예측하고 이에 대한 보강 대책을 수립하는 등의 대책이 이루어진 바, 시공 과정

중 설계자 & 시공자 & 감리자 & 계측 수행자의 상호 기술적인 접근이 이루어져야 한다. 이와 같은 정보화 시공이 가능한 계측 수행을 위하여 국내 계측 관리 제도 개선 방안의 정착이 필요한 것으로 판단된다(3.3항 참조). 

참고문헌

1. 천병식의, 「지반공학 -이론과 실제-」, 1998. 2. 구미서관, pp. 543 ~ 602.
2. 한국지반공학회, 「지반 굴착시 주변 지반의 해석 기법과 시공 관리를 위한 계측 및 품질관리방법에 관한 연구」, 1995. 4, pp. 245 ~ 256.
3. 천병식, “토목 근접 시공에 있어서 지반 안정 처리에 관한 고찰”, 대림기술정보, 1989. 5, pp. 12 ~ 29.
4. 송정락, “굴토 계측 변위의 관리 기준”, (주)대우엔지니어링 기술보, pp. 3 ~ 14.
5. 대우엔지니어링, “평지 굴착공사를 위한 지하 가설구조물의 설계 및 시공연구”, (주)대우엔지니어링 기술보, 1988. 5, p. 82.
6. (주)대우엔지니어링, 「서울지하철 00호선 00공구 계측관리 종합보고서」, 1994. 7, pp. 1 ~ 130.