

암발과 굴착 시 발생하는 진동으로 인해 발생하는 계측기의 오류 및 파손을 방지하기 위한 지하수위계 적정 설치위치 검토



이태세
(주)하나기술단
대표이사



구은영
(주)하나기술단
연구전담부서 이사



김마루찬
(주)하나기술단
연구전담부서 과장

1. 머리말

최근 혼잡한 도시환경에서 지하공간의 활용을 위하여 사회기반시설 및 신축건물의 지하층 굴착공사가 나날이 증가하고 있다. 중·소형 아파트 신축공사에 따른 굴착공사를 비롯하여 터널, 전력구 공사 등 다양한 종류의 굴착공사가 진행 중에 있으며 이에 따라 안전한 시공·관리를 이행하기 위하여 예측하지 못한 사고에 선제적으로 대응하여 미연에 방지할 수 있는 계측관리 중요성이 대두되고 있다.

일반적으로 지반 굴착은 시공전 조사된 제한적인 지반 조사 자료에 근거하여 전체 굴착대상 지반을 설계하는 것으로 시공 시 실제 지층이 균질하지 못하고 설계 시 가정한 지반조건과 토질정수가 실제 현장조건과 정확히 일치하지 못하는 경우가 대부분이므로 계측을 통해 지반의 거동에 의한 영향을 파악하면서 시공을 진행하는 것은 최근 지하굴착 공사에서 매우 중요하게 평가되고 있다.

지반 굴착 시 계측기의 설치위치는 경제성, 시공성을 고려하여 흙막이 구조물 및 배면 지반의 거동을 대표할 수 있는 최소한의 위치를 선정하여 최대효과를 얻는 것을 목적으로 하며 이를 위하여 실제 시공현장에서 흙막이 구조물의 배면에 근접하여 설치하도록 계획하고 있으나 지하수위계의 경우 지반 굴착의 진동으로 인하여 계측의 오류 또는 파손이 발생할 경우 정확한 계측데이터의 수집 및 분석이 매우 어려우므로 본 연구에서는 굴착으로 인한 지하수위의 변화를 충분히 고려하면서 지반 굴착으로 인한 진동의 영향을 최소화 할 수 있는 적정 이격거리를 제시하고자 한다.

2. 국내 설계기준에서 제시하고 있는 계측기의 설치위치

현장 계측은 가능하면 다양한 거동을 파악 할 수 있도록 많은 위치를 선정하는 것이 바람직하지만, 합리적이며 경제적인 측면에서 흙막이 구조물 및 배면 지반의 거동을 대표할 수 있는 최소한의 관측점을 설정하는 것이 더 효과적이다.

그러나 국내 설계참고 문헌에는 굴착현장마다 현장 여건 및 지반조건이 다르기 때문에 각 현장에 맞게 계측기의 배치를 선정하도록 포괄적이고 모호하게 명기하고 있어 보다 명확한 설치위치 선정에 대한 연구가 필요하다.

2.1 지하안전영향평가 표준매뉴얼에서의 계측기 설치위치 선정

최근 최대굴착 깊이가 10m 이상인 굴착현장을 대상으로 실시하고 있는 지하안전영향평가의 표준매뉴얼에서는 계측기를 지반안전성 검토 대표단면에 설치하도록 하여 시공 중 예측치와 수치해석 등으로 검토된 계측치를 비교 검토하도록 하고 있다.

2.2 설계기준 지반계측(KDS 11 10 15 :2016)에서의 계측기 배치위치 선정

국토교통부에서 발행한 계측기의 설치계획은 현장 여건 및 인접구조물의 중요도, 사고이력 등이 상이할 수 있으므로 이를 포괄적으로 고려하여 현장에 맞게 계측 위치를 선정하도록 하고 있으며 세부 내용은 다음과 같다.

- (1) 계측 대상 시설물의 규모나 위험도를 기준으로 계측기기 배치밀도를 설정하는 것이 바람직하며, 일반적으로 붕괴나 활동 등의 위험인자별로 여러 종류의 계측기기를 수 개소에 배치하여 상호의 계측자료를 검토하여야 한다.
- (2) 계측기기는 경제성, 시공성을 고려하고 지층구성 및 성토시기 등을 감안하여 지반거동을 대표할 수 있는 최소한의 점을 선정하여 최대효과를 얻도록 배치하여야 한다.
- (3) 구체적인 계측기기의 배치에 대해서는 상세한 현장조사, 기존자료 및 구조계산서를 참고하여 붕괴 또는 활동의 형태를 추정한 다음, 각각의 원인별로 계측항목과 계측기기의 관련성을 검토한 다음에 배치 계획(설치위치, 배치밀도, 설치심도 등)을 수립하여야 한다.
- (4) 구조적으로 가장 위험한 단면에서 계측 대상 시설물의 최대변위와 최대응력이 작용할 것으로 예상되는 위치에 중점적으로 계측기기를 배치하여야 한다.
- (5) 계측목적을 고려하여 각 계측기기는 서로의 연관성을 유지하도록 하며, 가능한 동일단면에 배치하여야 한다.
- (6) 계측수량의 선정은 계측목적, 결과분석, 공사상황, 계측기기의 고장 등을 고려하여 수행되어야 한다.
- (7) 연약지반에 계측기를 매설할 경우 설치 시, 준설 또는 산토 매립 시, 프리로딩 재하 및 제거 시 계측기가 망실될 확률이 높으므로 현장여건을 감안한 계측기 망실률이 반영되어야 한다.

3. 발파 진동에 의한 계측기 오류 사례

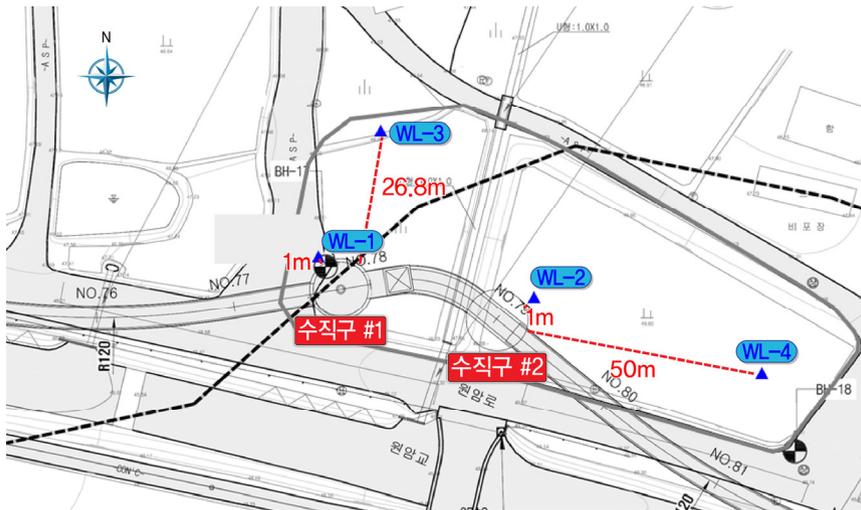
○○지역에 안정적인 전력을 공급하기 위한 변전소간 지중송전 계통망 구성을 목적으로 하여 시공이 완료된 ○○전력 구의 계측사례를 살펴보고자 한다.

3.1 계측 수행 개요

총 2개의 수직구로 각 수직구의 굴착깊이는 각각 51m(수직구#2), 47m(가설수직구)로 계획되어 있는 본 구간의 착공 전 지하수위 관측공 설치 후 초기지하수위는 GL.(-)3.21~3.70m로 측정되었다.

지반 및 지질현황 분석에 의하면, 수직구 #1 구간에서는 파쇄대가 GL.(-)10.5~15.9m, GL.(-).21.0~36.5m구간에서 분포하며, 수직구 #2의 경우 파쇄대는 GL.(-)12.1~14.4m, GL.(-).21.9~36.1m구간에서 분포고 있다.

지하수위계는 굴착공사 초기에 수직구와 1m 이격하여 각각 1개소씩 배치하였으나 수직구 굴착에 따른 관리구역 내 누적수위변화량 모니터링을 위해 안전관리 보완의견을 반영하여 수직구 반경으로부터 약 1H(약 60m) 이내에 지하수위 관측공을 추가 배치하여 총 4개소를 설치하였다.



〈그림 1〉 지하수위계 설치위치도

〈표 1〉 지하수위계 설치개요

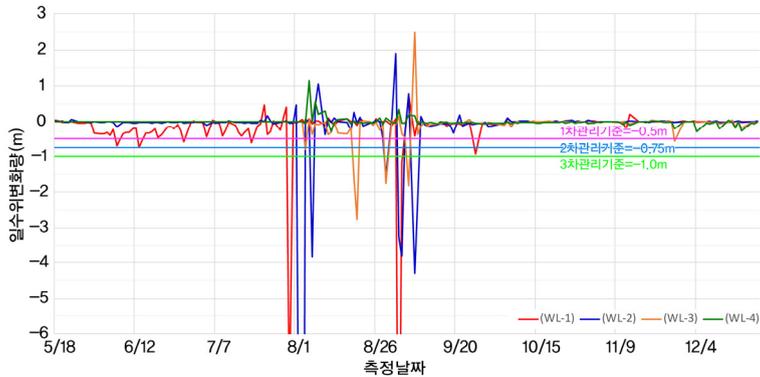
계측항목	계측수량(개소)		설치위치	설치심도	설치방법	비고
	수직구 #1	수직구 #2				
지하수위계	2	2	토류벽 배면지반	굴착 저면	굴착공사 전·중	수동계측

3.2 계측 결과

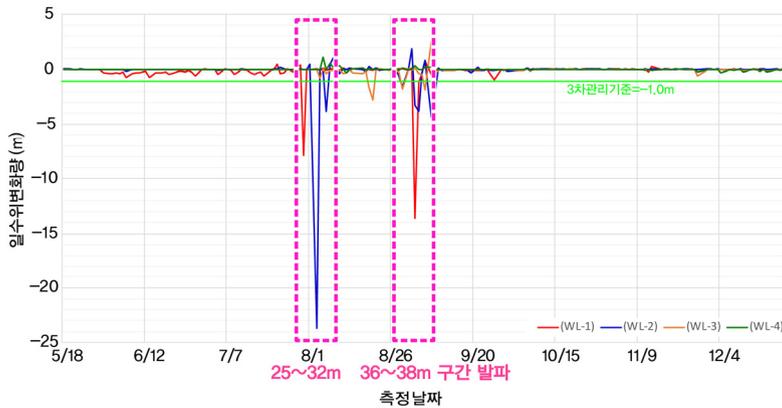
수직구 구간의 지하수위변화량 계측 결과 위 그래프와 같이 일수위 변화량이 3차 관리기준(1m)을 초과하는 구간이 발생하였으며, 수직구 굴착 중 발파로 인해 10일(회) 관리 기준초과가 발생하였다. 수직구 굴착을 위하여 심도 1~2.5m 구간 단위로 발파를 수행하였으며 발파와 동시 또는 발파 시점과 시간간격을 두고 지하수위는 급격하게 하강하여 일수위 변화량 관리기준을 초과하였다. 특히 두 수직구 사이에 심한 파쇄대가 발달한 구간(25~32m, 36~38m)에서는 일 수위 변화량이 10m 내외에 달하였다.

관리기준치 이상으로 급격한 지하수위 저하가 발생하는 계측기는 수직구와 근접하여 설치한 지하수위계인 WL-1, WL-2에서 발생했으며 25m 이상 이격하여 설치되어 있는 WL-3, WL-4에서는 관리기준 이내로 관측되었다.

발파 후 급하강한 지하수위는 이후 다시 회복하는 양상을 보이므로 지하수위의 급격한 변화는 발파로 인해 발생한 진동이 계측기 측정요소에 영향을 미쳐 계측 데이터에 신뢰도가 떨어지는 오류값이 발생했다고 보여진다.



〈그림 2〉 일수위변화량(m) vs. 1~3차관리기준



〈그림 3〉 일수위변화량(m) vs. 발파이후 급하강구간

4. 지하수위계의 적정이격 설치 위치 제안

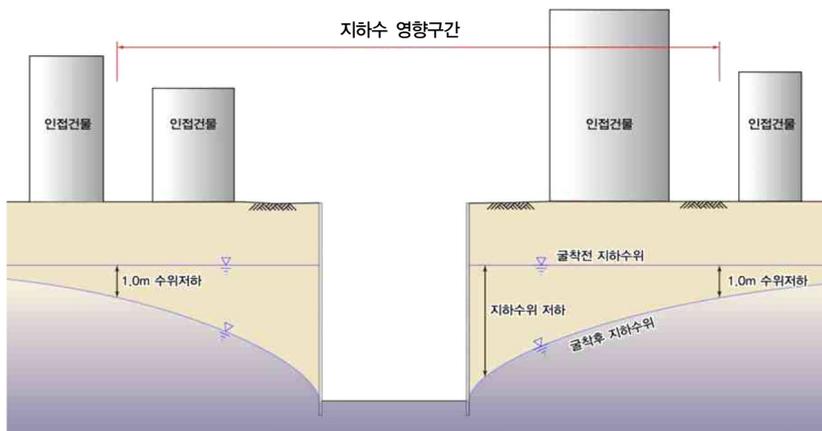
4.1 굴착에 따른 지하수 관리구역(영향구간) 선정

서울특별시에서 발행한 공사장 지하수 관리매뉴얼(2016)에서 제시하고 있는 지하수위 영향구간 선정 및 관리에 따르면 굴착심도의 증가에 따라 지하수 유출에 의해 지하수위 변화량은 굴착지점으로부터 거리가 멀어짐에 따라 줄어드는데, 여기에서 지하수위 강하가 발생하지 않는 지점까지를 지하수 영향구간이라 한다. 그러나 이를 현장에 그대로 적용하기는 어려우므로 굴착에 의해 지하수위 강하가 1.0m 되는 지점을 영향구간으로 설정하도록 명기하고 있다.

굴착공사 지점으로부터 지하수위 강하가 1.0m 되는 지하수 영향 구간은 수치해석에 의해 계산할 수 있으며 경험식을 통한 영향구간 산정은 대수층의 성격, 양수지속시간 또는 지하수위 강하량, 지하수 함양량 등에 좌우되므로 일률적으로 결정할 수 없지만 유출량을 입력변수로 사용하여 비교적 수리상수에 덜 민감한 Kozeny법 경험식을 적용하여 영향구간을 산정 할 수 있다.

$$R = \sqrt{\frac{12 \cdot t}{S}} \sqrt{\frac{Q \cdot K}{\pi}} \quad (1)$$

- 여기서, R : 영향반경(m)
 K : 수리전도도(m/일)
 t : 양수시간(일)
 S : 저류계수
 Q : 양수량(m³/일)



〈그림 4〉 지하수 영향구간 선정

4.2 발파진동 영향구간 검토

4.2.1 발파진동 관리기준 검토

국내의 발파진동 허용기준은 외국의 허용 기준치보다 매우 엄격한 실정이며 안전성을 고려하여 인체의 감응도를 고려하여 주거용 건축물의 경우 대부분 0.5cm/sec 이하를 기준으로 하고 있다.

그러나 이러한 엄격한 설정에도 불구하고 발파진동에 대한 피해가 끊임없이 발생하고 있기 때문에 지하매설물 및 도로구조물의 경우에도 보다 강도 높은 기준을 설정하여 운영하는 것이 일반적이다.

가스관 보호를 위한 가스공사의 관리지침(한국지질자원연구소, 류창하)에 의하면 진동이 있는 굴착작업(발파, 브레이크 작업) 등의 경우 10m 이상 이격거리에 대한 안전범위에서 노출가스관은 0.4cm/sec, 매설가스관은 1.0cm/sec로 규정하고 있다.

지하매설물에 관한 진동 허용기준에 의거하여 지중매립형식의 지하수위계는 매립가스관의 진동 허용기준인 1.0cm/sec를 적용하여 적용 이격거리를 산정하였다.

〈표 2〉 가스관 진동 허용기준(cm/sec)

구분	금지범위	대책범위	안전범위
노출가스관	3.0 이상	3.0~0.4	0.4 이내
매설가스관	4.0 이상	4.0~1.0	1.0 이내
대책내용		- 무진동 공법시공 - 보강후 시공	

4.2.2 표준발파공법 및 진동규제기준별 적용 이격거리 검토

표 3은 국토교통부에서 발간한 국토건설공사 설계실무 요령에 명기된 표준발파공법 및 진동규제기준별 적용되는 이격거리이다.

〈표 3〉 표준발파공법 및 진동규제기준별 적용되는 이격거리(m)

TYPE	발파공법	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	5.0
I	미진동 굴착공법	40m까지	25m까지	20m까지	15m까지	5m까지	3m까지
II	정밀진동 제어발파	40~80m	25~50m	20~40m	15~30m	5~20m	3~7m
III	소규모 진동제어발파	80~140m	50~90m	40~70m	30~50m	20~30m	7~10m
IV	중규모 진동제어발파	140~260m	90~170m	70~130m	50~90m	30~60m	10~25m
V	일반발파	260~450m	170~290m	130~220m	90~160m	60~110m	25~40m
VI	대규모 발파	450m 이상	290m 이상	220m 이상	160m 이상	110m 이상	40m 이상

앞서 지하수위계의 진동허용기준을 매립가스관의 진동허용기준인 1.0cm/sec로 설정하였으므로 지하수위계의 이격 거리는 발파공법에 따라 발파원으로부터 미진동 굴착공법 적용시 5m, 정밀진동 제어발파공법 적용시 5~20m, 소규모 진동제어발파공법 적용시 20~30m, 중규모 진동제어 발파 공법 적용시 30~60m, 일반 발파공법 적용시 60~110m로 검토되었다.

4.3 수치해석을 통한 흙막이 이격 거리별 지하수위 저하량 검토

본 연구에서는 3절에서 언급했던 ○○지역 전력구 공사를 대상으로 적정이격 설치위치 검토를 실시하였으며 현장 지반조사 결과 해석 대상 지반의 설계정수는 다음 표 4와 같다. 굴착에 따른 지하수위 저감을 고려하기 위하여 굴착 단계에 따른 응력-침투 연계해석을 실시하였으며 응력해석에서 변위에 대한 경계조건을 부여하는 것과 같은 개념으로 해석 영역에 대하여 수위 및 지하수 유출 조건을 경계조건으로 설정하여 해석을 실시하였다.

〈표 4〉 수치해석적용 설계 물성치

구분	탄성계수 E(MPa)	포아송비	단위중량 (kN/m ³)	접착력 (kN/m ²)	내부마찰각 (°)	투수계수 (K)	구성모델
매립층	10.0	0.33	18.0	5.0	25.0	5.23×10^{-3}	Mohr-coulomb' model
퇴적층 (사질토)	15.0	0.33	18.0	5.0	27.0	4.51×10^{-3}	
풍화토	60.0	0.32	19.0	20.0	32.0	4.65×10^{-4}	
풍화암	100	0.30	21.0	30.0	33.0	3.00×10^{-4}	
연암	2,000	0.28	24.0	150.0	35.0	1.03×10^{-4}	
경암	8,000	0.23	27.0	1,000.0	45.0	2.24×10^{-5}	
강재	210,000	0.35	78.5	-	-	-	Elastic model

해석과정은 현장의 흙막이벽체 시공과정을 동일하게 모사하였고, 도면 및 구조계산서에 따른 굴착 깊이를 단계별로 적용하였다. 각 토층에 투수 계수에 의한 불포화특성을 고려하여 비정상류 해석을 실시하였으며 수치해석 결과 굴착공사 지점으로부터 지하수위 강하가 1.0m가 되는 지하수위 영향구간은 아래 표 5와 같이 95m로 검토되었다.

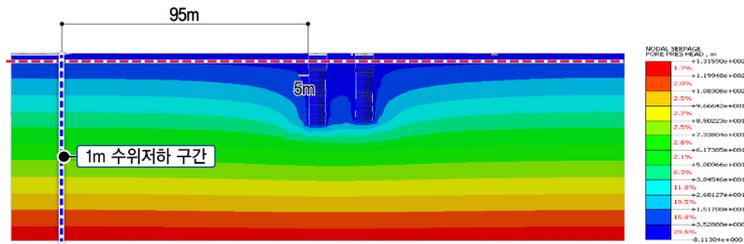
〈표 5〉 흙막이 벽체 이격거리 별 지하수위 저하량(m)

구분	흙막이 벽체로부터의 거리(m)							
	0	5	10	15	20	25	30	35
지하수위 저하량 (m)	-5.77	-5.52	-5.33	-4.96	-4.52	-4.20	-4.00	-3.90
	40	45	50	55	60	65	70	75
	-3.82	-3.62	-3.30	-3.15	-2.94	-2.60	-2.49	-2.08
	80	85	90	95	100	105	110	115
	-1.70	-1.50	-1.40	-0.99	-0.84	-0.70	-0.65	-0.50

지하수위 저하 경향을 살펴보면 흙막이 벽체에서 -5.77m로 가장 크게 지하수위 저하가 발생하였으며 흙막이 벽체에서 측정된 저하량 비교 시 5m 이격 지점에서는 0.35m, 10m 이격지점에서는 0.44m, 15m 이격지점에서는 0.81m 감소하여 15m 지점까지 1m 이내의 차이로 발생하였으며, 이를 흙막이 벽체에서의 지하수위 저하량과 백분율로 환산시 각각 4.30%, 7.66% 14.10%의 차이를 보이는 것으로 검토되었다.



〈그림 5〉 이격거리별 지하수위 저하량 그래프



〈그림 6〉 최종 굴착시 간극수압도

4.4 발파진동과 지하수위 영향구간을 고려한 지하수위계의 적정이격 설치 위치 제안

본 연구에서는 정밀한 지하수위 계측이 가능한 범위 내에서 굴착 또는 발파로 발생하는 진동으로 인한 지하수위계 계측 오류를 최소화 할 수 있는 적정 이격 설치위치에 대하여 다각적인 접근을 통해 분석을 실시하였으며, 분석 결과를 토대로 적정 이격설치 위치를 제안하고자 한다.

- (1) 지하 굴착공사를 수반하는 각종 사업을 시행하는 경우 지하안전평가를 실시하고 해당 사업의 착공후지하안전조사를 수행함에 있어서 지하수위계 측정에 따른 지하수위 계측관리기준치를 1차 관리기준, 2차 관리기준, 3차 관리기준으로 선정하여 현장에서 측정된 결과 지하수위 계측관리기준치 이하로 급저하되는 현상이 발생되어서 원인 분석결과 현장 발파영향에 따른 진동영향으로 주변에 지하수위가 급저하되는 현상이 발생되었다.

(2) 따라서, 지반 굴착 시 착공후지하안전조사를 수행함에 있어서 지하수위계 계측기의 설치위치에 따라서 주변에 대한 정확한 지하수위계 측정치를 확인하기 위해서는 다음과 같이 제안을 합니다. 측벽파일로부터 이격거리 5.0m 이상 위치에서 지하수위계를 설치하고, 추가로 지하수위 강하가 1.0m 되는 지점의 영향구간 이내에 추가로 설치하여 지하수위계를 설치하고 지하수위 계측관리기준치를 관리하여야 한다.

5. 맺음말

지하 굴착공사에 따른 착공후지하안전조사에서 적용하는 지하수위계 설치 위치에 대한 정확한 기준이나 사례가 없어서 지하수위에 대한 계측관리를 위하여 현장 적용사례를 근거로 지하 굴착공사 현장에서 효율적인 지하수위계 측정을 수행하기 위한 적정이격 설치 위치를 비교하고, 현장에 적용하도록 검토하여 제시하였다. 현장 지하 굴착공사 기간중에 지하수위계 설치 위치를 적정이격 거리를 미확보하여 지하수위계 계측기를 설치 시 공사중 지하수위 급저하에 따른 원 인분석 및 안전진단을 실시하여 승인기관에 승인을 득하고 시공을 재수행하는 공기 손실이 발생되므로 지하수위계 계측기 설치 위치를 제시하므로 현장 계측관리 품질을 개선하고 성능을 향상시켜서 공기에 대한 손실이 단축되고, 비용 절감과 공기를 확보하는데 유효한 방법 중 하나로서 향후 착공후지하안전조사와 현장 지하수위 계측관리 수행에 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 국토교통부, 지하안전영향평가 표준매뉴얼.
2. 국토교통부, 설계기준 지반계측(KDS 11 10 15 :2016).
3. ○○지역 전력구 공사 계측보고서.
4. 서울특별시, 공사장 지하수 관리매뉴얼.
5. 한국지질자원연구소, 가스관보호를 위한 가스공사의 관리지침.
6. 국토교통부, 국토건설공사 설계실무요령.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]