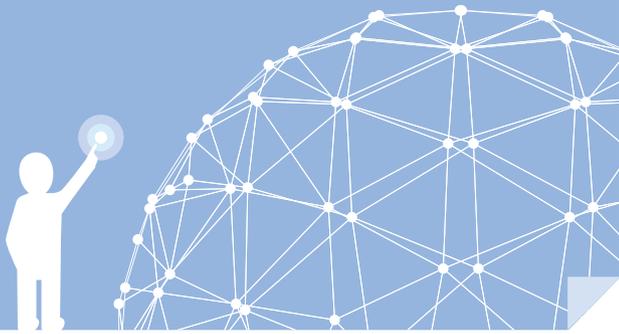


● 지반함몰 사례와 굴착공사 관리 Ground Subsidence Related to the Excavation in Urban Area



조 성 하 Cho, Seong ha
㈜다산이엔지 지반기술연구소
shacho88@gmail.com

1. 서 언

일반 대중이 싱크홀(sinkhole)이라고 인식하는 지반함몰이 사회문제가 되고 있다. 2014년 서울 서베이에서 조사된 도시정책지표에서 지반침하를 포함한 사고로 인해 시민이 느끼는 도시위험도가 증가되었고, 향후 10년 후 더 위험이 커질 것으로 응답하였다. 시민이 가진 막연한 불안감을 일소하고 공학적으로 해결해야 하는 시점이다. 정부와 지자체도 적극 나서고 있다. 사례 분석을 통해 발생 배경을 살펴보고 도심지 굴착공사에서 유의하여야 할 점에 대해서 논하고자 한다.



a 석촌지하차도 도로 함몰 (2014. 08. 05)



b 용산역 앞 보도 함몰 (2015. 02. 20)



c 이태리 나폴리 도로 함몰 (2015. 02. 22)

Fig. 1 최근 지반 함몰 사례

2. 다양한 지반 함몰

지반공학적 측면에서 지반함몰은 기본적으로 평형이 손상된 것이라고 본다. 물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 것처럼 평형을 해치는 조건이 발생하면 자연은 스스로 평형을 찾으려는 쪽으로 거동한다. 지반 내에 평형이 손상되어 지반 함몰을 발생시키는 원인은 자연적이기도 하고 인위적인 배경도 갖는다. 석회암, 암염, 석고와 같이 녹을 수 있는 암반 지대에서 자연적인 동공이 지표면까지 확대되어 지반이 함몰된다.

일본에서는 1930년대부터 대도시 중심으로 지반침하 현상이 발생하여 도로함몰과 같은 사회문제가 발생하였다. 서둘러 지하수법을 제정하여 지반침하 문제에 적극적으로 대응하여 현재는 크게 줄어들었다. 중국 상하이 를 비롯한 대도시는 1950년대부터 심각한 지반침하 현상을 겪고 있다. 1980년대부터 지하수 개발과 이용을 엄격히 통제하면서 관리하고 있으나, 2000년대에 들어 대형 건축물이 연이어 시공되면서 다시 침하현상이 증가되고 있는 추세이다. 지하수를 용수로 활용하는 미국의 캘리포니아, 휴스턴, 멕시코시티, 베트남 하노이, 태국 방콕 등 대도시들도 광역적인 지반침하 현상을 겪고 있다. 특히 해안도시의 경우에는 지반침하와 아울러 해수면 상승으로 인해 도시 전체가 침수될 위험에 직면해 있다.

지하굴착 공사시 흙막이 구조물은 변형이 수반된다. 순수한 토사지반을 굴착할 때 수평변위량과 배면지반 침하량은 비례 관계에 있다. 암반층이 포함된 지층을 굴착할 경우에는 암반에 내재된 불연속면의 특성에 따라 거동양상이 달라진다. 토사층 굴착에 따른 수평변위가 과다하거나 대규모 암반활동이 발생하면 배면지반 침하와 더불어 지반 함몰이 발생할 수 있다. 터널을 굴착할 때 설계시 파악하지 못한 지층을 만나거나 지하수에 의해 지반강도가 저하되면서 붕락되면서 지표면이 함몰될 수 있다.

인구가 밀집된 대도시는 도로를 따라 각종 관로가 매

설되어 있다. 구도심의 경우에는 노후화 정도가 심하며 무분별한 신설과 변경으로 인한 하자요인이 많다. 손상된 부분이 적절히 처리되지 않아 토사가 유입되거나 느슨하게 되메워진 부분이 침하되면서 도로 함몰을 야기할 수 있다. 되메움 재료가 불량하거나 다짐이 충분하지 않은 경우에 지표수가 침투되면 물다짐 효과로 인해 지반이 침하되어 관로에 부등침하가 발생하고 지표면 함몰로 이어질 수 있다. 또한 충적층이 분포하는 지역은 지하수위 변동에 따른 침하가 함몰의 원인이 된다. 광산을 개발하는 과정에서 탄광굴착, 암석의 파쇄, 분쇄, 운반, 선광 등으로 인하여 나타나는 지반침하, 오염수 배출, 폐석유출, 먼지날림, 소음 및 진동 등으로 자연과 사람에게 피해를 발생시키는 것을 광해(광해)라고 한다. 채광시에 형성된 채굴적 또는 지하공동이 붕괴·이완되면서 지표가 함몰되어 지상구조물이 파손되는 경우가 있다.

3. 서울시의 지반 함몰

서울의 지질은 선캠브리아기인 12~13억 년 전에 만들어진 편마암과 2억 년 전부터 관입된 화강암으로 구성되어 있다. 경계면을 따라 형성된 하천에 충적층이 분포하고 있다. 최근 5년 사이에 발생한 도로함몰은 송파구,

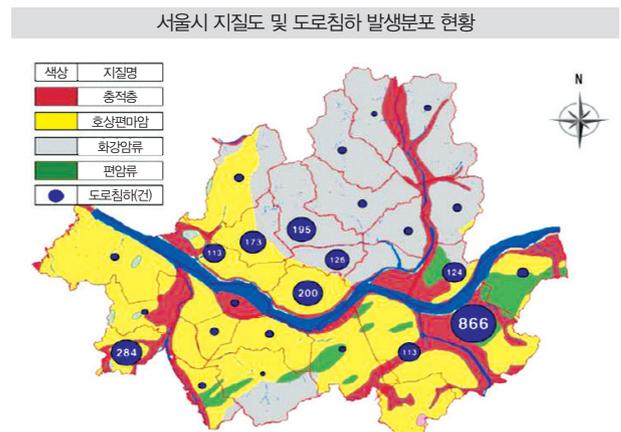


Fig. 2 서울특별시 송파구의 도로함몰(싱크홀) 발생 건수

영등포구, 광진구 등의 충적층과 구도심인 용산, 종로, 마포, 서대문구에 집중되었다. 서울시가 2013년에 발표한 서울시 지하수 보조관측망 지하수위 분석 결과에 따르면 2001년 이후 지하수위는 하강 추세에 있다. 반면에 서울시 불투수율은 1962년도 7.8%에서 2010년 47.8%로 크게 증가했다.

지하수위면은 점점 하강하는데 지하수위를 유지할 수 있는 지표면으로부터의 유입 가능성이 대폭 적어졌다. 수위면이 낮아지면 지반 침하 요인이 증가하고, 도로면 을 따라 매설된 각종 구조물이 부등침하에 의한 손상 가능성이 커질 것이다.

4. 지반함몰 방지를 위한 지하굴착 공사관리

도심지 지하굴착시 지반함몰은 수평변위에 의한 침하와 토립자 유출을 동반한 배수 및 퇴메우기 불량에 의해 발생한다. 수평변위 발생에 영향을 미치는 주된 요인은 흙막이 벽체와 지지구조물의 강성이다. 설계 당시에 면밀한 지반조사와 구조 검토를 통해 충분한 안정성을 확보하는 것이 가능하다. 굴착공사 안정성을 좌우하는 요소를 다음 표와 같이 정리할 수 있다.

배면지반에 지하수가 분포하는 지반을 굴착할 경우 지하수위가 하강하게 된다. 이때 차수벽체가 제 기능을 발휘하면서 유선을 흙막이 벽체 하부로 유도(c)하는 것

이 바람직하다. 그림 (a)와 같이 결함이 있거나 피압대수층에서 흐름이 발생하는 경우(d)에 과도한 지반침하로 인해 함몰이 발생할 수 있다.

지하수가 유출될 수 있는 지반을 굴착할 때는 차수벽체를 시공하거나 보조 그라우팅 공법을 적용하여 지하수 유출을 방지하고 유선을 연장하여 지반침하를 방지한다. 차수벽로는 지중연속벽(Diaphragm wall)과 겹침형 주열식 말뚝(Secant pile wall, C3공법)을 들 수 있다. 지중연속벽은 트렌치를 형성한 후 철근망과 콘크리트를 타설하여 벽체를 구성한다. 겹침형 주열식 말뚝공법은 기

고려 요소	구체적 검토 내용
1. 지반조사와 주변 현황	시추조사, 지하수조사, 매설물 현황, 배면지반 불건전부
2. 지반조건과 거동 형태	사질토, 점성토, 암반에 따른 거동양상
3. 시공 방법	흙막이 구조물 형태, 강성, 설치간격
4. 공정 진행	소단형성, 과다굴착, 해체방법
5. 초기 지반 응력	배면 재하조건, 캔틸레버 상태 거동
6. 지하수 조건	지하수 광역흐름, 지하수위면 위치, 피압상태, 지표수 유입 조건, 굴착에 따른 지하수위면 변화 양상, 지하수 집수 및 배수
7. 지지구조물	강성과 연성, 프리스트레스 유무, 저항력발생 기구
8. 시공 숙련도, 시공 품질	공사담당 조직 구성, 품질 확인 기법, 안전관리 수준
9. 온도변화	강재 구조물의 응력상태 변화
10. 굴착 형태	하중 집중 완화 조건
11. 시공 상세	구조물 설치 상세도
12. 계측 관리	적정 계측 설계, 정밀도와 정확도, 계측빈도

Table. 1 지하굴착공사 검토 내용

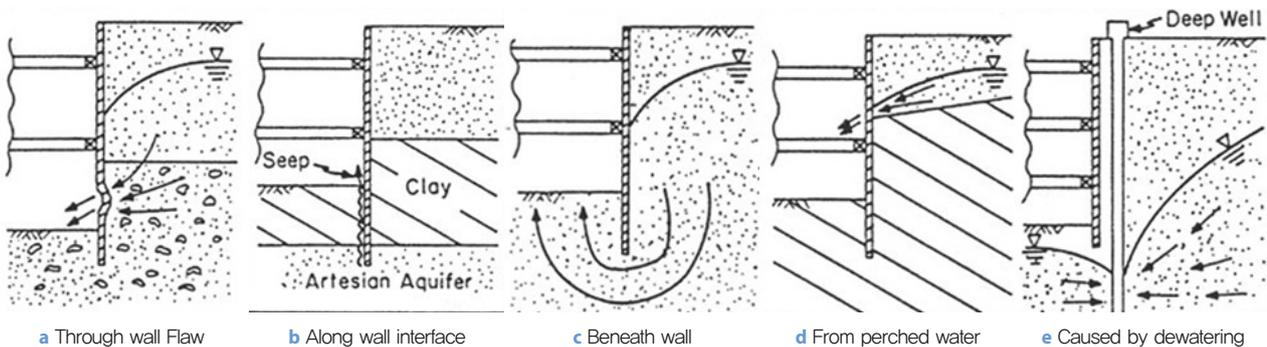


Fig. 3 지반침하로 이어지는 굴착지반에서의 지하수 흐름 예 (after Clough & O'Rourke, 1990)

존의 CIP가 중첩되지 않은 틈새에서 발생하는 문제점을 해결한 공법이며 후면에 별도의 보조 공법이 불필요하므로 경제적이다.

지표면 하부의 건전성을 확인하는 기법으로는 GPR 탐사와 전기비저항 탐사가 있다. 일반적으로 GPR탐사 방법은 탐사대상과 목표심도에 따라 안테나를 선정하며, 송/수신 안테나의 간격을 일정하게 유지하며 측선을 따라 조사한다. 안테나 별로 100MHz는 약 7~10m, 250MHz는 약 3~4m, 암반의 경우 약 3배정도 더 깊은 심도까지 전달된다고 하나, 현장 여건에 따라 감쇠현상으로 인하여 실제 투과심도는 감소한다. 보다 깊은 심도의 이상대를 확인할 때에는 전기비저항 탐사를 활용한다. 지하매질에 존재하는 전기비저항 이상대(anomalous zone)에 의한 이상 전위차를 측정하고 해석하여 지질구조, 단층, 파쇄대 및 지하수 흐름 등의 지하구조를 파악한다.

5. 지반함몰 대응

국토교통부는 2015년 3월초에 관련 정부부처와 지자체에 건설공사 안전관리계획에 지반침하 관련 사항을 추가토록 하였다. 안전관리계획은 「건설기술진흥법」 제 62조에 따른 사항으로 작년부터 한국시설안전공단에서 검토를 수행하고 있다. 공사 중 지하매설물의 방호, 인접 시설물의 보호 등 공사장 및 공사현장 주변에 대한 안전관리에 관한 사항을 다루며 공사장 주변 안전관리 대책에 지반침하 방지대책을 포함하여 작성한다.

서울시는 2005년도에 폐지된 건축심의 중 굴토심의를 올해부터 부활시켰다. 관련 건축위원 15명이 새롭게 위촉되었다. 지반침하에 대한 이해와 관리기준이 대폭 상향조정된 셈이다.

지반함몰에 관련한 법 제정이 추진되고 있다. 국토교통부를 중심으로 「지하의 안전관리에 관한 특별법」을 연내에 제정하는 것을 목표로 하고 있다. 특별법에는 국가-

지자체-사업자-시설관리자의 위계에 따라 안전관리체계를 확립하고, 대규모 굴착이 수반되는 경우에는 사업승인 전에 지하안전영향평가를 실시하는 것이 주요 골자다.

6. 결론

서울시의 도로함몰 사례건수가 증가하는 추세이며, 노후 하수관로도 일시에 정비되기 어렵다. 이러한 여건 하에서 지반함몰은 지속하여 발생할 것이다. 국토해양부에서 발간한 유출지하수 관리요령(2009)은 유출량을 감소시키고 유출되는 지하수를 이용하는 기준을 제시하고 있다. 지금까지 운용상태를 보면 이용에 대한 부분에 초점이 맞춰졌다.

지반 함몰 현상이 사회문제가 되고 있는 현실에서 유출에 대한 부분의 중요성이 높아질 것이다. 유출량이 큰 지하철 구조물, 지하 전력 및 통신 시설물, 대형 건물은 영구배수 개념으로 상향수압을 처리하고 있다. 유출을 기정사실화한 것이다. 서울시는 2050년까지 절반이 불투수면인 조건을 개선하여 강우량의 40%를 지중에 침투시키고 저류한다는 계획을 발표했다.

‘공유지의 비극(The tragedy of the Commons)’이란 누구나 공유하는 자원을 사적이익을 추구하는 시장에 맡길 경우 남용되어 고갈될 가능성이 크고, 그로 인하여 다음 세대가 부담을 모조리 안게 된다는 개념이다. 즉 다수의 행동에 대한 면죄부 인식을 지적하고 정책을 입안하는 정부나 지자체 뿐 만 아니라 관련 당사자가 모두 관심을 가지고 대응할 필요성을 역설한 것이다.

당장에 벌어지는 지반함몰을 효과적으로 대응할뿐더러 보다 장기적인 측면에서 지하수위면 하강에 대한 영향을 연구하고 지하수 함양, 피해 최소화 방안 등을 강구할 때다. ■