

도심지에서의 지반침하 발생 원인과 사례 분석 그리고 대응방안 (해외 사례를 중심으로)



조 성 하

(주) 다산이엔지
지반기술연구소 전문



이 경 수

(주) 다산이엔지
지반기술연구소 차장

1. 서론

최근 전국적으로 싱크홀로 지칭되는 지반침하가 빈번히 발생함에 따라 주민의 심리적 불안감은 커지고 있다. 일반적으로 도심지에서의 지반침하는 기본적으로는 지하수위의 변화에 기인한다. 대형 지하 구조물이 설치되면서 양압력에 저항하기 위해 강제적인 배수가 일반화되고, 경우에 따라서는 집수된 지하수를 용수로 활용하기도 한다. 또한 도시지역에서는 개발에 따라 지표면이 불투수화되기 때문에 적절한 물수지 균형을 맞추기 어렵다. 아울러 노후된 상하수도관의 파열이나 대규모 구조물 굴착공사시 지반불안정에 의해 인접 지반에서 지반이 함몰되는 경우도 있다.

서울시의 경우 2001년에서 2007년까지 도심지내 130개소에 설치된 관측소에서 측정된 지하수위를 분석한 결과 상업 및 주거지역의 수위는 최대 3.2m 강하하였다. 이와 함께 대규모 굴착공사와 노후화된 상하수도관의 파열 등으로 2010년 이후부터 서울시 도심지를 중심으로 폭이 2m가 넘는 대규모 지반침하만 13개소에서 발생하였고 향후에도 지속될 전망이다. 서울 도심뿐만 아니라 인천, 울산, 천안 등의 지역에서도 원인이 불확실한 지반 함몰 현상이 계속 발생하고 있다.

국내 뿐만 아니라 세계적인 대도시에도 지하수계 변화에 따른 지반침하 현상이 빈번하다. 호치민과 자카르타는 지하수 과잉 채수로 지반고가 수 m 이상 낮아져서 2000년 이후부터 도심지 곳곳에서는

지반침하로 도로, 건축물이 붕괴되며 해수가 범람하여 수억 달러 이상의 피해가 발생하였다. 급속하게 도시화가 진행되고 있는 중국 상하이나 심천에서도 지반 함몰이 다수 발생하였고, 도쿄, 휴스턴 등의 대도시도 지하수계 변화에 따른 문제점이 나타나고 있다.

도심지에서의 지반침하는 불특정 구간에서 전조현상 없이 갑작스럽게 발생하기 때문에 이는 국가적 차원에서 주의 깊게 관리되어야하며 대응책 마련 또한 시급하다(전석원과 전병규, 2014). 그러나 국내의 경우 인식부족과 예산의 취약성, 전담부서의 다원화로 매년 피해규모는 증가함에도 불구하고 발생 후 피해복구에 초점을 두며 호우, 태풍, 산사태 등과 같은 자연재해와 달리 체계적 연구가 부족한 실정이다. 또한 지반침하와 지하수 오염을 방지하기 위한 지하수법을 제정하여 지하수 보전 구역을 지정한 뒤 이를 엄격히 관리하게 하고 있지만 현재 이 법은 소수의 지자체에만 적용되고 있다. 본 내용에서는 도심지에서의 지반침하 발생원인과 해외 도심지에서 발생한 대표적 지반침하 사례 그리고 피해사례를 통한 지반침하 대응방안에 대하여 소개한다.

2. 지반침하의 정의 발생원인

2.1 지반침하 정의

지반침하는 지반을 구성하는 물질 이동에 따른 지반의 안정화 또는 갑작스런 함몰 현상으로 정의된다. 이는 형상, 규모에 따라 그림 2.1, 그림 2.2의 연속형, 불연속형 침하로 분류되며 연속형은 연약지반, 불연속형은 도심지에서 주로 발생한다. 각각의 특징은 표 2.1과 같다. 한편, 최근 국내에서는 도심지에서 발생하는 지반침하를 형태가 비슷하다는 이유로 싱크홀(sinkhole)로 불리고 있다. 그러나 싱크홀은 석회암의 주성분인 탄산칼슘이 지하수에 의하여 용해되어 형성된 지하공동이 상부압력을 견디지 못하고 붕괴하면서 형성된 것으로 이는 도심지에서의 지반침하와는 발생 메커니즘이 다르다. Mendonca 외(1994)는 카르스트 지형이 아닌 점토, 모래층에서 발생한 불연속형 지반침

표 2.1 연속형, 불연속형 지반침하의 특징

항 목	연속형	불연속형
발생구간	광역구간	국부적 구간
침하량	작음	큼
발생기간	서서히 진행됨	갑작스럽게 진행됨
발생구간	연약지반	폐광산, 도심지
대표적 형태	완만한 경사 (트리프형)	원통형 또는 원추형 (함몰형)

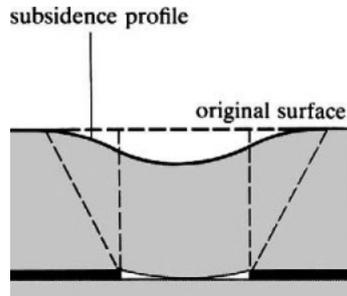


그림 2.1 연속형 지반침하 형태(Brady and Brown, 2005)

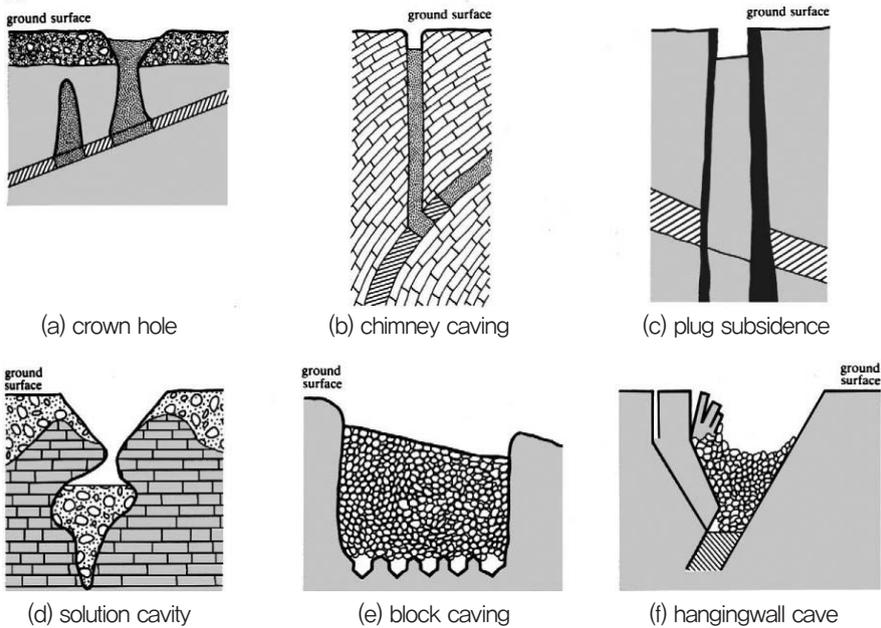


그림 2.2 불연속형 지반침하 형태(Brady and Brown, 2005)

하를 pseudo-sinkhole, Hollzer 외(1985)는 충적층에서 과잉 지하수 양수에 의한 불연속형 침하를 지반붕괴(ground failure)라 정의하였다. 본 내용에서는 지반침하 발생 메커니즘, 국내외 도심지에서 지반침하 사례, 형태, 규모 등을 고려하여 도심지에서의 지반침하는 소규모인 경우에는 지반침하, 발생규모가 수 십 m를 초과하는 대규모인 경우에는 지반붕괴로 정의한다.

2.2 지반침하 발생원인

2.2.1 지하수위 강하에 의한 지반침하 메커니즘

지하수(groundwater)가 분포하는 대수층(aquifer)에 가해지는 하중은 대수층을 구성하는 조직

(skeleton)과 지하수가 각각 분담하며 지하수 유출입이 평형한 상태에는 조직의 체적변화는 일어나지 않는다. 그러나 지하수 과잉 채수로 지하수위가 하강하면 지하수에 작용하는 하중은 조직으로 전이되며 이에 따라 조직은 하중증가로 수축한다. 이후 조직에 가해지는 하중이 증가하면 조직은 더욱 수축하며 소성변형으로 입자는 재배열하고 간극수가 외부로 유출되어 대수층의 저장능력은 점진적으로 감소하고 지반은 영구적으로 침하된다.

2.2.2 상하수도관 파열에 의한 지반침하 메커니즘

상하수도관 파열에 의한 지반침하는 관의 노후화 또는 지반침하로 관의 결함구간에 균열이 발생함에 따라 관 주변의 토사가 내부로 유입되어 지반에 공동이 형성되었기 때문에 발생한다. 다음 그림 2.3은 개략적으로 손상된 관내에 상부 토사가 유입되면서 지표면까지 연장되는 지반 함몰의 형태를 나타낸 것이다. 지반함몰은 매설관로의 상부면까지 발생하기 때문에 그 깊이가 매설관의 위치에 따라 달라지며 도심지에서는 비교적 얇은 깊이로 형성된다.

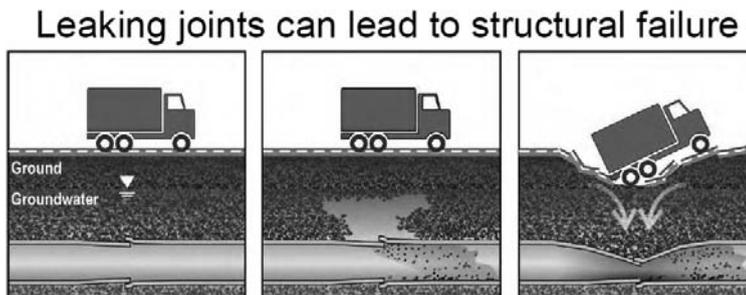


그림 2.3 손상된 관로에 의한 지반 함몰

3. 해외 지반침하 사례

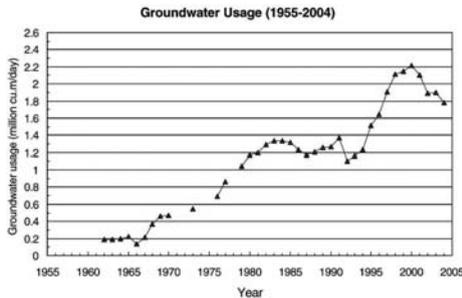
3.1 지하수위 강하에 의한 지반침하 사례

3.1.1 태국 방콕

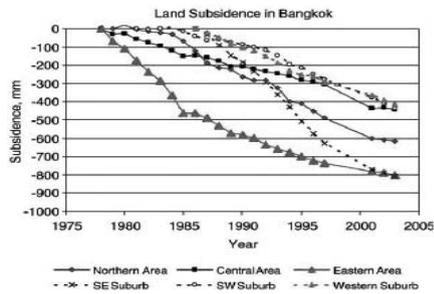
방콕은 지하수위 과잉 채수로 도시전체가 수 m 이상 지반침하가 발생한 대표적 도시이다. 지하 심부의 대수층 지하수 사용이 1950년대부터 본격적으로 시작되었으며 1990년대 초에는 지하 200m 아래에 위치한 대수층에 설치된 관정수가 15,000개 이상으로 조사되었다. 빠른 도시화와 지하수 과잉 사용으로 지하수 사용량은 그림 3.1(a)와 같이 1975년에는 연간 650,000m³, 1980년에는 1,200,000m³, 2000년에는 22,000,000m³로 급격히 증가하였다. 그 결과 2002년 태국 도심지에서 측정된 지하수위는 1981년 측정당시의 결과보다 15.0m 아래에 위치하였다.

| 기획특집 |

방콕 도심지는 지하수위 강하로 그림 3.1(b)와 같이 매년 10cm 이상의 지반침하가 발생하였다. 그 결과 도시 곳곳에서는 그림 3.1(c)와 같이 건축물, 도로, 상하수도 등이 파괴되었다. 또한 방콕은 지표면이 해수면보다 불과 0.5~1.5m 높기 때문에 기상이변과 수 m 이상의 지반침하와 전 세계적인 해수면 상승의 영향으로 그림 3.1(d)와 같이 해수의 범람 또한 빈번히 발생하였다. 방콕의 경우 향후 특별한 조치가 취해지지 않으면 2050년에는 홍수위기가 현재보다 4배 이상 높아질 것으로 예상된다.



(a) 방콕 도심지 지하수위



(b) 방콕 도심지 누적지반침하량



(c) 방콕 도심지에서 빈번히 발생한 지반침하



(d) 지반침하에 의한 해수 범람

그림 3.1 지하수위 저하에 따른 방콕 도심지의 지반침하와 이에 따른 피해사례

3.1.2 일본 도쿄

도쿄는 빠른 도시화로 1914년부터 지하 심부 대수층의 지하수 개발을 시작하였으며 1970년까지 이에 대한 사용량은 급격히 증가하였다. 그 결과 1971년 도쿄 도심지에서 측정된 지하수위는 1920년대 측정된 결과보다 40m 감소한 지표에서부터 60m 아래 지점에 위치하였다. 지하수위 강하로 도쿄 전역에는 매년 수 cm 이상 지반침하가 발생하였으며 1968년 측정당시에는 연간 침하량이 24cm 이상인 구간도 보고되었다. 따라서 1970년대까지 수 m 이상(최대 누적침하량 : 4.5m)의 지반침하가 도쿄 전역에 걸쳐 발생하였으며 이에 따른 영향으로 도쿄시 전역에서는 철도, 도로, 항만, 시설물 등이 파괴되었다. 이에 따라 도쿄시는 1957년~1970년까지 약 2억 달러를 투입하여 피해를 복구하였다(Poland, 1984).

3.2 상하수도관 파열, 공사장 지하수 유출에 의한 지반침하 사례

3.2.1 상하수도관 파열에 의한 시카고 도심지에서의 지반함몰

2013년 4월 시카고 도심에서는 전날 내린 폭우로 주택가 도로에 폭 12m 규모의 지반함몰이 발생하여 차량 3대가 매몰되었다. 붕괴는 강우로 지반이 느슨해지면서 1915년 설치된 상하수도관에 균열이 발생하며 그 결과 강한 압력으로 하부 토사가 유실됨에 따라 지하공동이 형성되면서 발생한 것으로 분석된다.

3.2.2 굴착공사에 의한 심천시에서의 지반함몰

중국 심천시는 2013년 1월에는 굴착공사장 인근에서 지반이 붕괴되어 인접한 건물 6동이 매몰되었으며 3월에는 건물입구의 갑작스러운 붕괴로 경비원 1명이 사망하는 사고가 발생하였다. 또한 5월에는 Huamo Industrial Park 인접 지반이 폭 10m 규모로 지반이 함몰되어 행인 4명이 사망하는 사건이 발생하였다. 이는 굴착공사가 수행되면서 지하수와 토사 유출로 인접지반에 공동이 형성되었기 때문으로 분석된다.

4. 해외의 지반침하 대응방안

4.1 지하수 사용 규제정책

도쿄에서는 지반침하에 의한 피해를 최소화하기 위하여 1960년부터 공업용수법(Industrial Groundwater Law)과 건물용수법(Building Groundwater Law)을 제정하여 지하수 과잉 양수를 엄격히 규제하고 있다. 또한 1971년에는 지하 심부에 위치하는 지하수 개발을 법으로 금지하였다. 그 결과 1970년대부터 지하수위는 점진적으로 회복되기 시작하였으며 이에 따라 1970년대부터 도쿄의 지반침하 등급은 지반침하가 거의 발생하지 않는 침하 마지막 단계인 4단계에 속하는 것으로 나타났다(Nakao and Kamata, 1991; Llamas 외, 2001). 이와 같은 정책은 일본 이외에도 태국, 중국 일부 도시에 적용되고 있다.

4.2 지하수 주입

상하이에서는 연간 막대한 양의 물을 대수층에 주입하여 지반침하를 억제하는 것으로 보고되고 있다. 이와 같은 방법은 도시가 일찍 형성된 영국, 런던, 리버풀, 도쿄, 파리 등에서 적용된 바 있다

(Xie, 2013). 그러나 지반침하를 저감하기 위하여 대수층에 인위적 방법으로 지하수를 주입하면 구조물에 양압력이 작용할 수 있기 때문에 하중 증가로 균열이 발생하거나 지하시설물이 침수될 수 있다(이진용과 구민호, 2007).

4.3 굴착공사 관리감독 강화와 노후화된 상하수도관 정비사업

환경부에서 발표한 ‘지반침하 및 맨홀 뚜껑 솟구침 현황’자료에 따르면 2012년부터 2014년 7월까지 전국 53곳에서 지반침하가 발생하였다. 침하의 원인은 하수 누수에 따른 지반유실이 77%로 가장 크며 하수관로의 꺼짐과 굴착공사에 따른 지하수위 강하 또한 주요 원인으로 분석되었다.

선진국에서는 이와 같은 피해를 사전에 예방하기 위해서 굴착공사 구간에 대한 관리감독 강화와 공사구간 및 인접구간에 대한 상시 모니터링과 노후화된 상하수도관 정비사업을 수행하고 있다. 여기서 주의할 점은 지하에 매설된 상하수도관, 가스관은 지반침하로 상재하중이 증가하면 파손 가능성은 매우 커진다. 실제로 대도시에 매립된 상하수도관을 조사한 결과 노후화, 열화, 침하에 의한 상재하중 증가로 7.3m마다 균열이 있는 것으로 나타났다. 가스관에는 균열이 존재하면 대형 참사를 유발할 수 있기 때문에 지반침하를 고려한 설계가 반드시 수행되어야 한다.

4.4 대응기법 개발

도심지에서의 지반침하는 예고 없이 불특정 구간에서 갑작스럽게 발생하기 때문에 이를 사전에 예측하는 것은 상당한 어려움이 따른다. 그러나 국내외에 발생 사례를 검토해보면, 붕괴는 공사구간, 지하수 과잉 채수지역, 상하수도관 매설지역을 중심으로 발생하였다. 선진국에서는 붕괴 예상구간을 중심으로 수리·지반특성을 고려한 3차원 전산해석(3D coupled mechanical and hydraulic numerical analysis)과며 위험구간을 중심으로 정밀조사와 항시 모니터링이 수행하여 붕괴를 저감하고 있다. 또한 지반침하는 도심지 모든 구간에서 발생 가능하기 때문에 특정지역에 대해서는 지진파, 전자파거리측정기(electronic distance measuring device) 등의 장비를 활용하여 파악하고 있다. 또한 보다 광역적으로 InSAR, Lidar 등과 같은 영상정보를 활용하는 방식도 연구되어 활용되고 있다.

5. 결론

세계적으로 도시화가 진행됨에 따라 다양한 원인에 의하여 지반침하가 발생하며 발생빈도와 규모

는 매년 증가하고 있다. 그러나 국내의 경우 개발시대 이후 급격하게 진행된 도시화의 문제점이 발견되고 있고, 향후 확대될 것으로 예상된다. 현재까지 이러한 문제점을 포괄적으로 조망하는 관점이 없었다. 그렇기 때문에 전담부처가 없고 당연히 이와 관련된 연구나 대응도 이루어지고 있지 않아서 문제의 심각성은 커지고 있다.

국내 도심지에서 발생한 지반침하 사례를 검토해보면, 침하는 주로 대형 구조물 굴착공사구간, 지하수 과잉 채수 구간, 상하수도관 매설지역을 중심으로 발생하였다. 따라서 지반침하에 의한 피해를 사전에 예방하기 위해서는 우선적으로 지반침하가 발생할 수 있는 지반 및 지질 조건에 대한 기본지도가 작성되어야 한다. 또한 이 건설현장에서 주변 지반에 침하나 함몰이 발생하지 않도록 기술적인 검토와 안전관리가 강화될 필요가 있다. 아울러 발생할 수 있는 지역에 대한 상시 모니터링 수행, 상하수도관 정비는 우선적으로 수행되어야 한다. 또한 국가적 차원의 체계적 연구지원, 예방시스템 개발, 지하수 과잉채수 규제, 도시 재정비를 통하여 도시에서의 지반침하를 사전에 예방해야 할 것이다.

6. 참고문헌

1. 전석원, 전병규, 2014, 국내 폐광산지역의 지반침하 방지 및 복구 사업에 대한 고찰, 한국자원공학회지, 제 15권, pp. 141~150.
2. 이진용, 구민호, 2007, 도시화가 지하수에 미치는 영향 및 도시지역 지하수 문제 고찰, 지질학회지, 제 43권, pp. 517~528
3. B.H.G. Brady, E.T. Brown., 2005, Rock mechanics for underground mining, Kluwer Academic publishers, New York.
4. R. Llamas, E. Custodio, C. Coletto, A. Guerga, M. Cortina., 2001, Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities, pp.484.
5. A. F. Mendonca, A. C. B. Pires, J. G. C. Barros., 1994, Pseudosinkhole occurrences in Brasilia, Brazil, Environmental Geology, Vol. 23, issue 1, pp. 36~40.
6. Holzer, Thomas, Johnson, 1985, Land subsidence caused by groundwater withdrawal in urban areas, GeoJournal, Vol. 11, pp. 245~255.
7. T. Nakao, A. Kamata., 1991, Countermeasures for and monitoring of land subsidence in the Northwestern part of the Kanto plain, Japan, Land subsidence, proceedings of 4th international symposium on land subsidence.
8. J. F., 1984, Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal, UNESCO, 7 Place de Fontenoy, 75700 Paris, France.
9. L. Xie, 2013, Hydraulic engineering II, Proceedings of the 2nd spree conference on hydraulic engineering, Hong-Kong.