

석회암 공동의 지질공학적 특성

Engineering Geology of Cavernous limestone area

박형동¹⁾, Hyeong-Dong Park

¹⁾ 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 조교수, Assistant Professor, School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

1. 서론

자연적인 지반침하는 석회암 (limestone) 지대에서 가장 빈번하게 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이는 전 세계적으로 퇴적암의 분포가 광범위하며 그 중 상당한 면적을 차지하고 있는 석회암의 용해성이 강하기 때문이다 (Beck, 1993). 석회암 지대는 용해과정을 거치면서 카르스트(Karst) 지형구조를 보이게 된다 (그림 1). 특히 대규모의 공동형성이나 함몰대의 발달, 하부 암반면의 불규칙성 등이 지반굴착공사 시 극복해야할 과제로, 전세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다 (Beck, 1995; Beck & Stephenson, 1997). 광산지대의 지반침하나 터널굴착으로 인한 지반침하에 비해 훨씬 불규칙한 침하양상을 보이므로 공학적 예측에 있어 지질학적인 현상들을 충분히 이해하고 그에 따른 지반조사 계획 및 대책공법을 수립하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 우리나라에도 존재하고 있는 (최용근, 1997) 석회암의 구성성분에 따른 공학적 특성변화와 석회암 지대의 공학적 문제점을 분석해 보고자 한다.

2. 석회암의 구성성분에 따른 특성

2.1. 석회암의 주성분

석회암은 주로 방해석 (calcite), 돌로마이트 (dolomite) 등으로 구성되어 있다. 상기 두 광물의 함량에 따라 좀 더 자세한 지질학적인 암석명칭이 부여되므로 방해석이 많은 경우 calcareous limestone으로, 돌로마이트가 많을 경우 돌로마이트 (또는 광물 돌로마이트와 구분하기 위해 돌로스톤으로 표기하기도 함)로 부르게 된다 (그림 2).

석회암의 용해성은 방해석으로부터 기인한다. 석회암의 용해성을 정성적으로 확인하기 위해서는 차가운 염산용액, Alizarine Red-S 등의 용액을 사용한다. 방해석은 차가운 염산에도 반응하여 기체를 발생시키지만 돌로마이트는 반응을 보이지 않는다. Alizarine Red-S 용액을 떨어뜨리면 돌로마이트는 분홍색으로 염색되고 방해석은 염색이 되지 않는다. 염색한 시료를 0.03 mm 두께의 박편으로 가공하여 현미경으로 관찰하면 구성성분을 정량적으로 파악할 수 있게 된다 (그림 3).

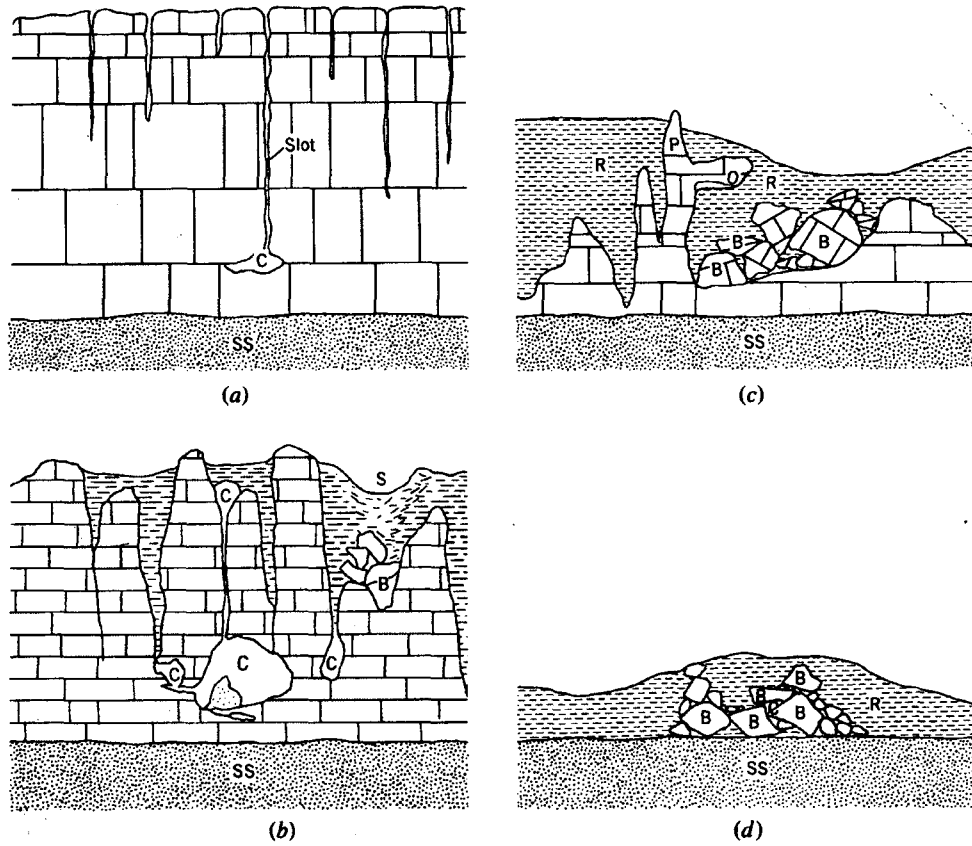


그림 1. 카르스트 지형의 발달 (from Goodman, 1993)

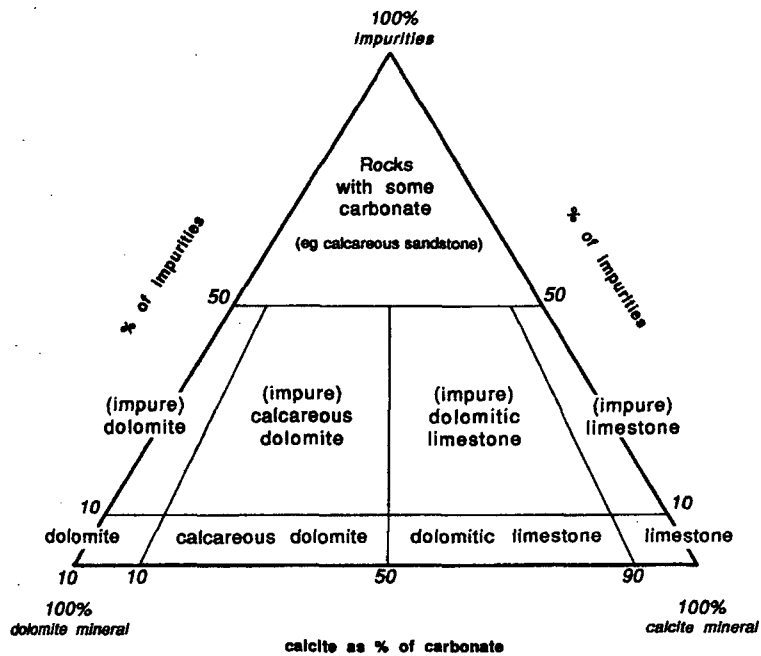


그림 2. 구성광물성분에 따른 석회암의 구분 (after Leighton & Pendexter, 1962)

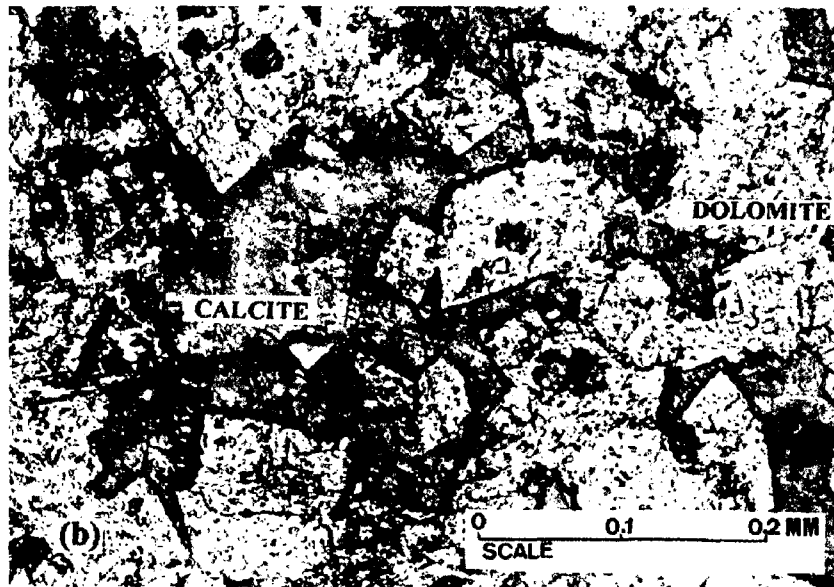
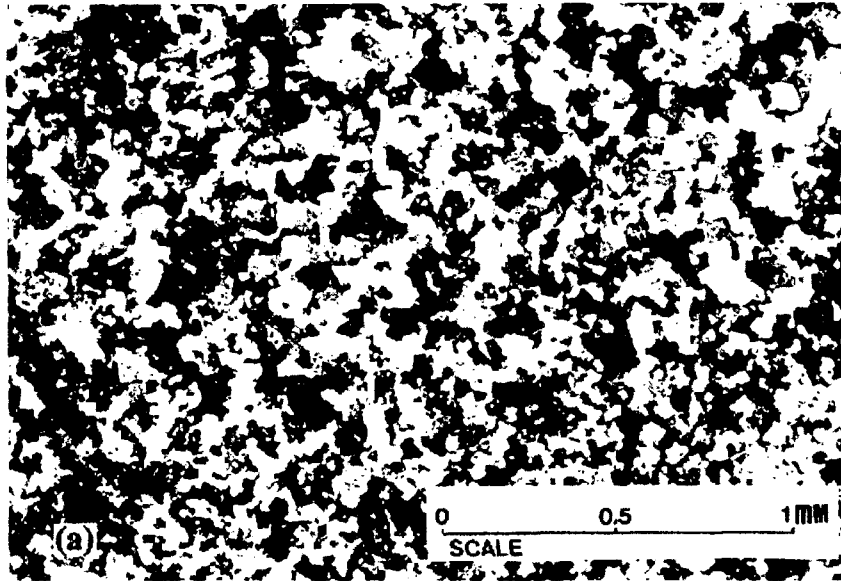


그림 3. Dolomitic limestone의 현미경 관찰사진 (Park, 1994)

2.2. 방해석의 용해과정

방해석은 이산화탄소 및 물과 반응하여 용해되는 것으로 몇가지의 반응과정을 거치게 된다 (그림 4). 이 반응과정에서 물은 농도가 낮은 대기 중의 이산화탄소와 반응하기 보다는 토양에 존재하는 이산화탄소와 반응하여 방해석을 용해시키게 된다 (그림 5). 따라서 석회암 지대의 용해속도는 상부 토양층 성분 및 기후조건에 따라 좌우된다. 토양 중의 동식물의 함량이 높거나 열대 등의 기후에서는 용해반응이 활발하므로 말레이시아 쿠알라룸푸르 등에서는 석회암의 풍화심도가 수십 미터에 도달하고 있다. 방해석의 용해속도를 실험적으로 연구한 결과 지름 1 미터의 석회암 동굴이 형성되기 위해서는 약 5000년의 시간이 필요한 것으로 보고되므로 토목건설 프로젝트에 영향을 주는 급속한 용해현상은 없다 (Waltham, 1989).

Process equation	Kinetics	Description
$\text{CO}_2 \text{ (air)} \rightleftharpoons \text{CO}_2 \text{ (dissol)}$	slow	diffusion of CO_2 into water
$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$ dissol	slow	hydration of dissolved carbon dioxide to form carbonic acid
$\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$	fast	dissociation of carbonic acid into hydrogen and hydrogen carbonate ions
$\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	slow	dissociation of calcite crystal lattice to ions
$\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$	fast	association of carbonate ions with hydrogen ions to form a hydrogen carbonate

그림 4. 방해석의 단계별 반응과정

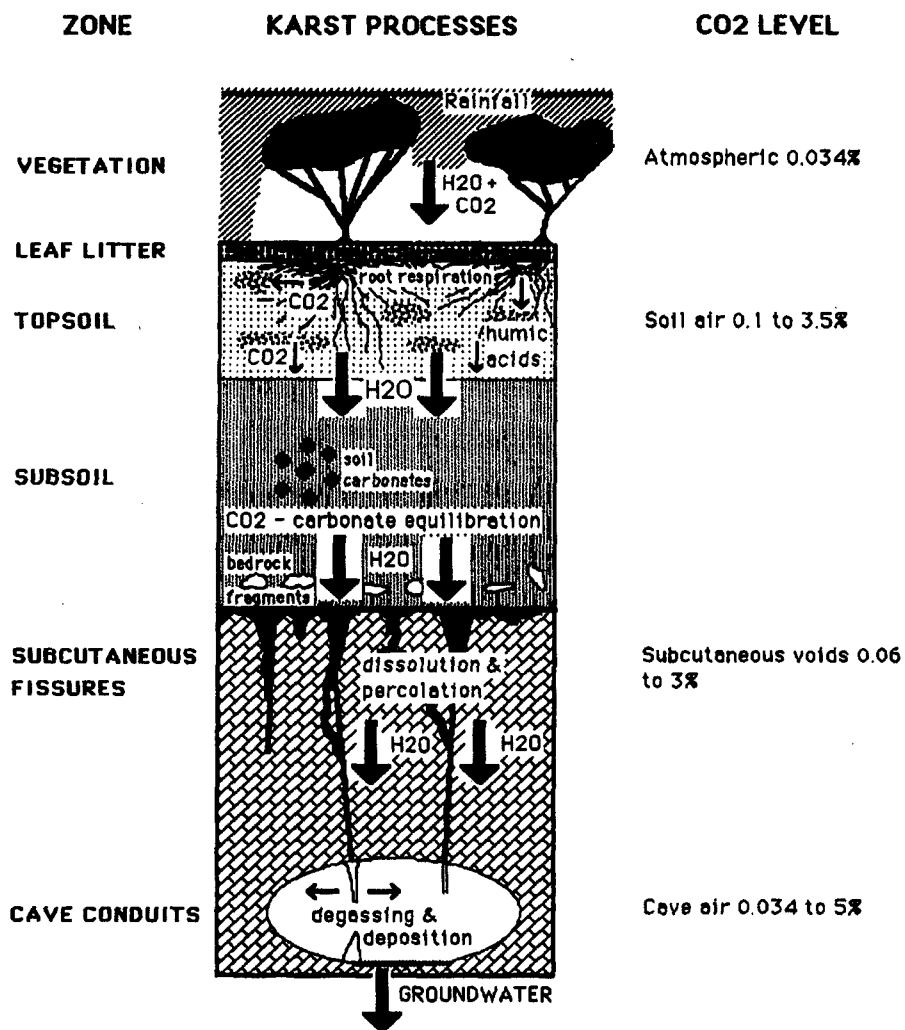
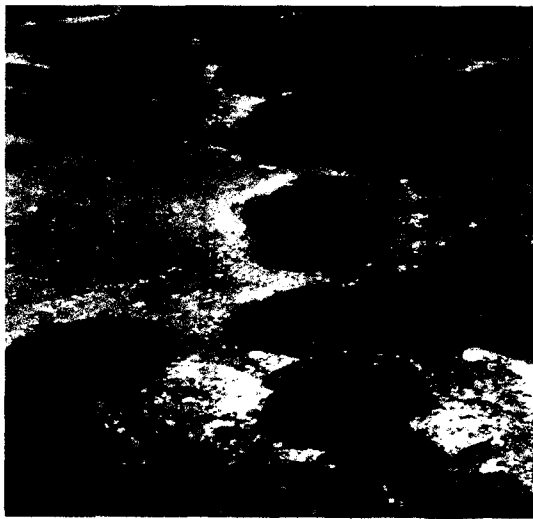


그림 5. 카르스트 지형의 생성환경 중 이산화탄소의 역할

2.3. 석회암지대에서 발견되는 특징적 구조

방해석의 용해특성에 의해 석회암 지대에는 특징적인 구조들이 발달하게 된다 (그림 6). 물과의 반응에 의해 원형을 형성하여 연결되거나, 기존의 절리면을 따라서 용해작용이 활발히 일어나기도 한다. 이 경우 집중 호우시 빗물이 빠른 시간 내에 지반으로 흡수되어 지하수면을 급상승시켜 주변 토사면의 산사태를 야기시키는 경우도 있다. 용해성이 거의 없는 대부분의 다른 암석들에서는 흠과 암반의 경계가 되는 rockhead는 평면의 형태로 나타나므로 공학적인 예측이 비교적 수월하다. 이에 비해 석회암지대에서는 불규칙한 형태를 보이는 pinnacled rockhead 형태가 발달하게 된다. pinnacle의 발달심도차는 수미터에서부터 수십미터까지 나타나므로 특히 지반기초공사시 문제가 되고 있다.

용해작용이 수천년 이상동안 진행된 경우 동굴이 형성되어 상부지반의 침하위험성을 나타내게 된다. 석회암 상부지반의 침하는 석회암 자체의 붕괴에 의한 경우는 드문 편이며, 상부 흠이 점진적으로 하부 공동으로 이동함에 따른 발생이 다수를 차지하고 있다.



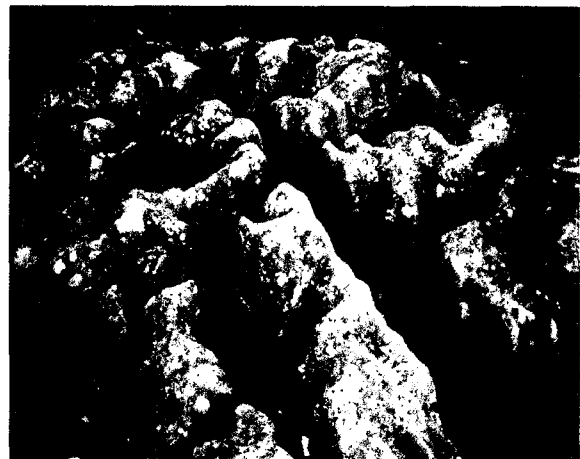
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6. 카르스트 지형에서 발견되는 특징들



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

그림 6. 카르스트 지형에서 발견되는 특징들 (계속)

석회동굴은 크게 두가지 형태로 요약된다. 암반에 존재했던 불연속면을 따라서 좁은 폭의 네트웍 형태의 발달구조와 (그림 7a), 폭이 수십 내지 수백미터의 대규모 공동으로 발달구조가 (그림 7b: 길이 700 미터, 전체폭 400 미터, Sarawak지역) 있다. 불연속면을 통해 발달된 석회암 동굴은 시간경과에 따라 상부로 붕괴범위가 확산되며 지표침하를 야기시킨다 (그림 8).

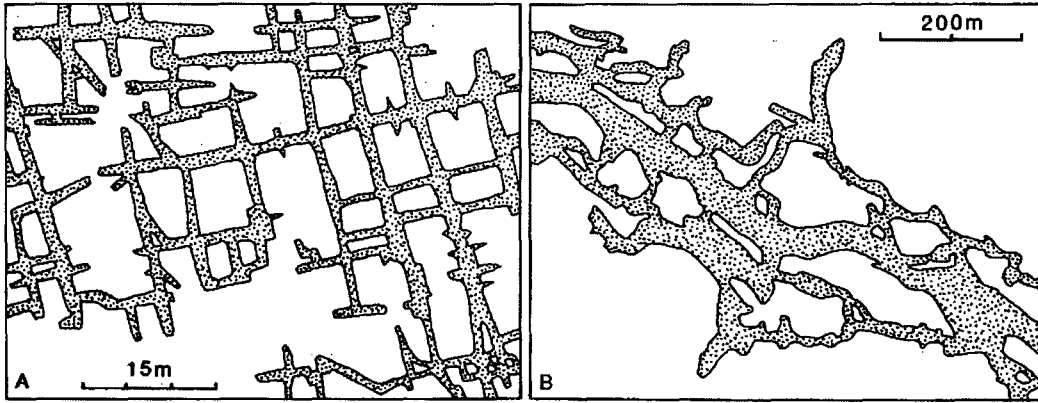


그림 7. 석회암 동굴 크기에 따른 대표적인 분류 (from Waltham, 1989)

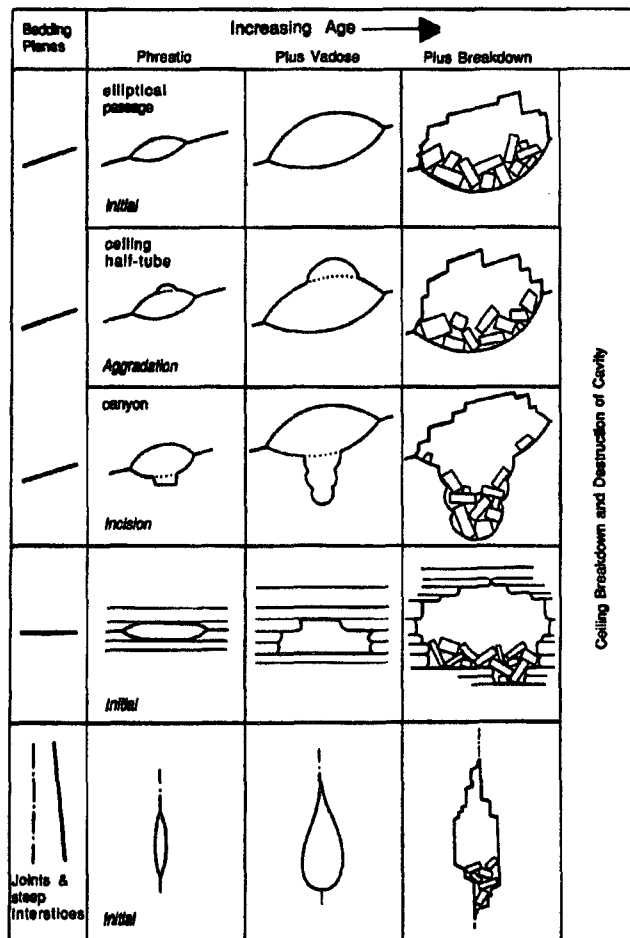


그림 8. 불연속면을 통한 석회암 동굴의 형성과정 (from Gillieson, 1996)

불연속면의 종류에 따라 석회암 동굴의 형상이나 크기가 결정되기도 한다. 수직절리(vertical joint)가 발달한 곳은 좁은 폭을 가진 네트워크가 형성되고 (그림 9), 연장성이 높은 층리(bedding)가 발달한 곳은 주로 대규모 공동을 형성하게 된다 (그림 10). 단층이 존재하는 경우 파쇄영향권에 공동이 우세하게 발달하기도 한다 (그림 11). 이러한 석회암 동굴의 형성은 지하심도 1000 미터에서도 발견되고 있다.

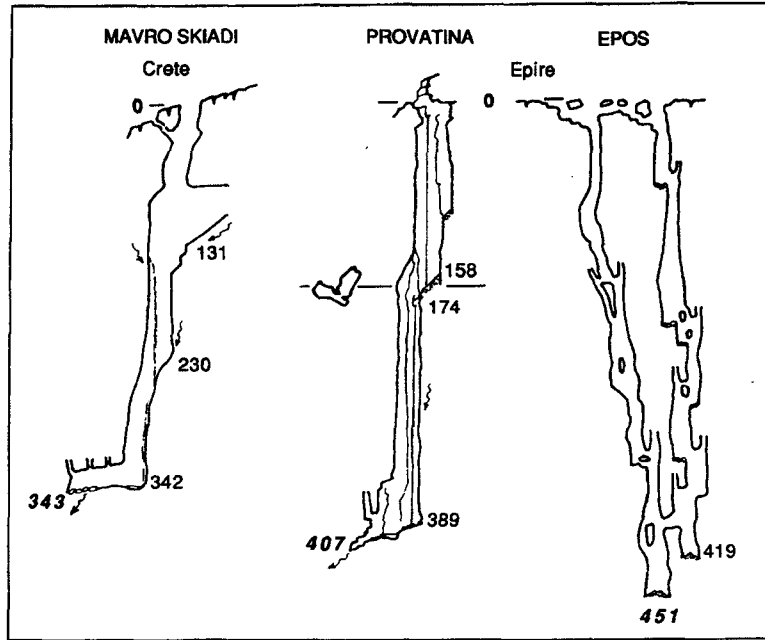


그림 9. 수직절리에 의한 석회암 동굴의 형성 (from Gillieson, 1996)

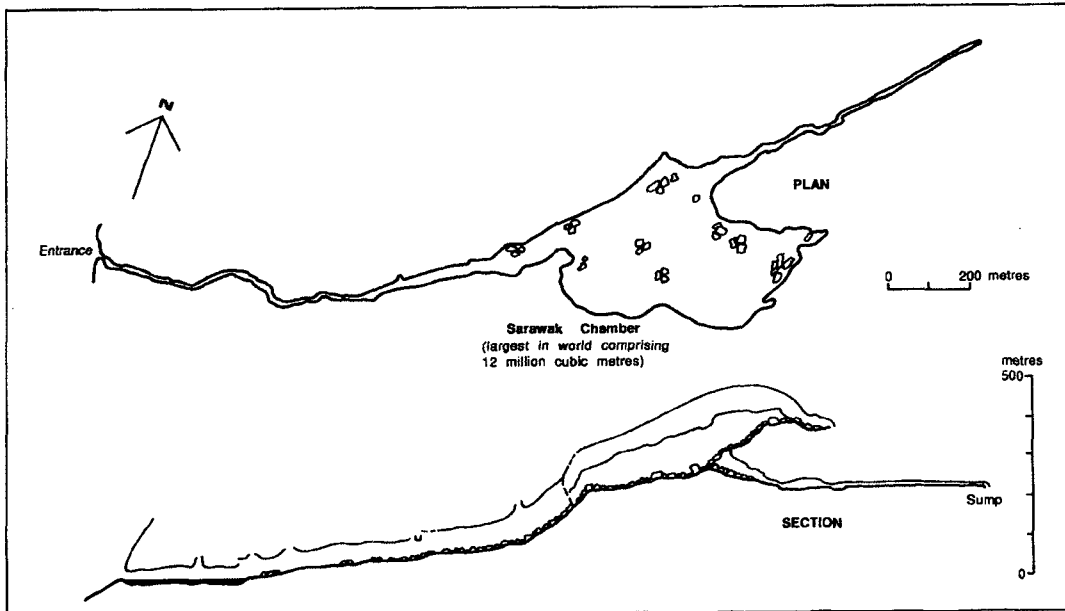


그림 10. 층리에 의한 석회암 동굴의 형성 (from Gillieson, 1996)

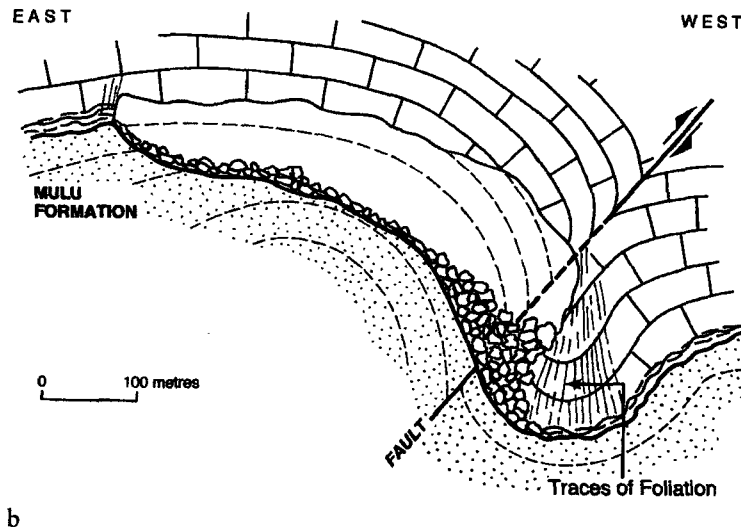
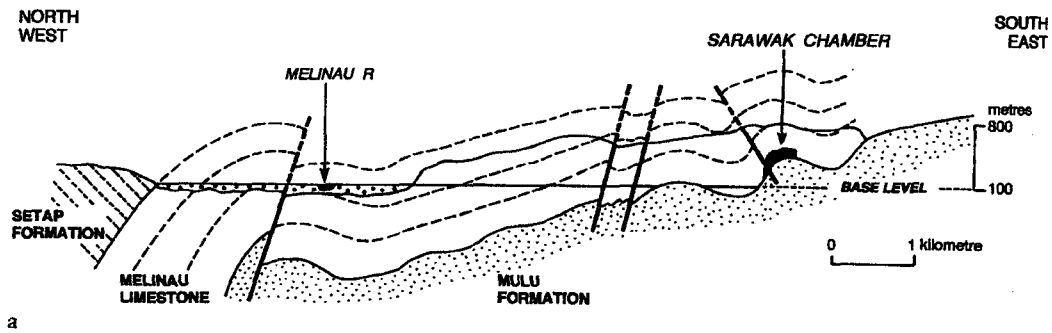
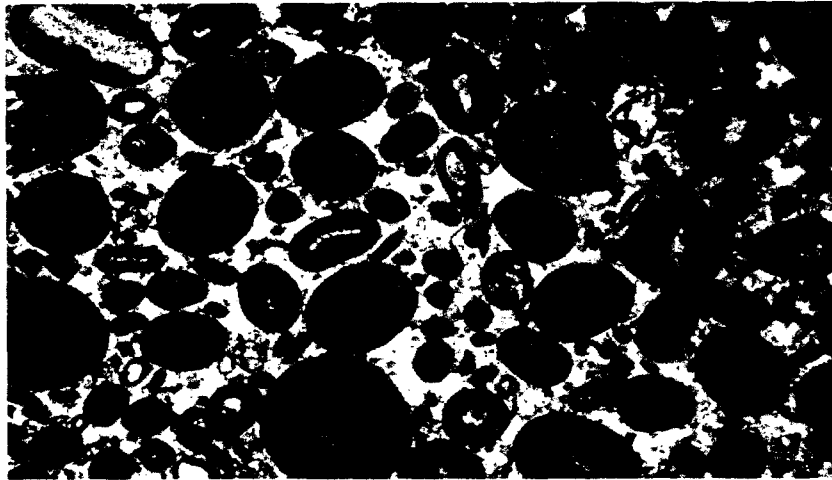


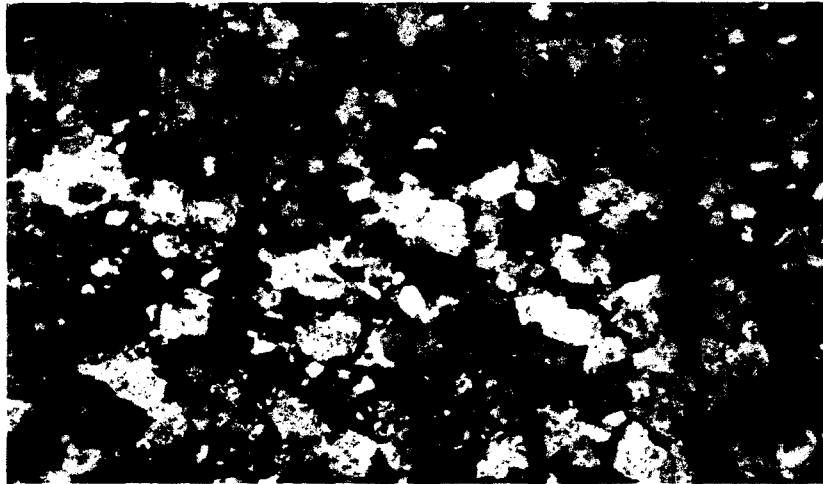
그림 11. 단층지대의 석회암 동굴 형성 (from Gillieson, 1996)

2.4. 석회암 지대의 지표침하

석회암지대에서 나타나고 있는 등근형태의 함몰구조를 doline 또는 sinkhole로 정의하고 있다. 영국의 경우 sinkhole은 호수가 형성된 등근 함몰구조만을 의미하였으나 현재 전세계적으로는 미국에서 정의하고 있듯이 호수생성여부에 관계없이 모든 등근 함몰구조로써 통용되고 있다. Sinkhole에는 (i) solution sinkhole, (ii) collapse sinkhole, (iii) buried sinkhole, (iv) subsidence sinkhole 등이 있다 (그림 12). Solution sinkhole은 느린 속도로 지표가 침식되면서 발생한 것으로 지하부에 공동이 존재하는 결정적인 증거가 된다. Collapse sinkhole은 허부 기반암의 파괴로 인해 발생하는 것으로 지질학적 시간과정에서는 별로 발생되지 않는다. Buried sinkhole은 상기 두 종류의 발생후 상부가 토사층으로 덮힌 경우이며 대부분 불규칙한 토사-암반 경계면 (즉, Rockhead)을 나타내므로 기초공사 설계시 주의할 요소이다. Subsidence sinkhole은 석회암지반 상부의 토사층 또는 연암의 붕괴로 말미암는 것으로 전세계적으로 가장 흔하게 발견되는 형태이다. 또한 발생과정이 빠르게 진행되므로 토목공사에 치명적인 영향을 주게



(a)



(b)

그림 14. 석회암의 강도에 영향을 끼치는 요소- 입자조직과 구성성분의 현미경 관찰사진
(가로 크기는 6 mm: (a) Oolitic limestone, (b) Sandy dolomite)

3.2. 석회암 공동의 크기와 분포에 따른 위험요소

석회암에 존재하는 공동은 크기 및 하부로의 심도에 따라 위험도가 다르게 나타난다 (그림 15). 현재까지 세계적으로 보고되고 있는 경험적인 자료를 요약하면 다음과 같다. (i) 석회 공동 상부 암반의 두께가 10 미터 이상이면 자연적인 붕괴 위험성은 없다. (ii) 토목시공시 construction loading으로 인해 붕괴할 위험이 항상 존재하지만 공동 상부 암반의 두께가 30 미터 이상이면 영향이 거의 없다. (iii) 석회 공동 상부 암반의 두께가 공동의 폭보다 클 경우 붕괴위험성은 없다 (Waltham, 1989). 서로 다른 기준을 제시하고 있는 이상의 경험적인 자료들은 실제 공사시 적절한 기준인 것으로 보고되고 있으나 석회암 공동의 형성을 좌우하는 용해특성은 지역에 따라 현저히 다르게 나타나므로 국내에 그대로 적용하기에는 충분한 경험적 자료가 차후 확보되어야 할 것이다.

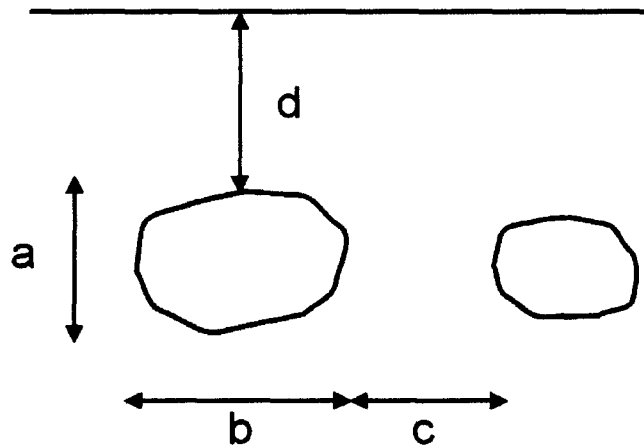


그림 15. 석회암 공동의 크기 및 위치에 따른 위험요소

3.3. 지질구조의 조건에 따른 위험요소

전세계적으로 석회암 지대의 층리의 간격은 대개 30 - 60 cm 정도로 나타나지만 지역에 따라서는 수 cm 이하로부터 수 m 이상이 되는 경우도 흔하게 발견된다. 층리 간격 이외에도 절리 간격, 방향성 등에 의해 석회암 공동의 크기와 분포가 영향을 받게 된다 (그림 16).

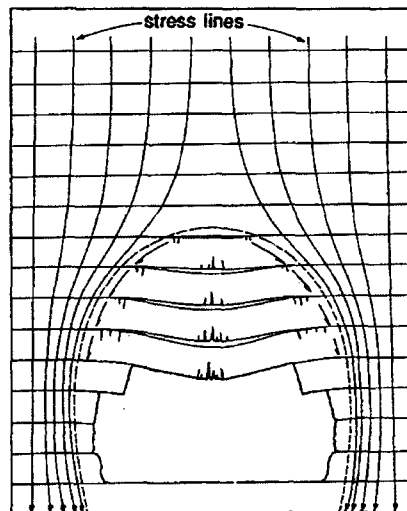


그림 16. 불연속면에 의한 석회암 공동의 침하 위험도

3.4. 주변 암상 및 형상에 의한 침하 위험도

지질도상에 나타나는 석회암의 분포 뿐만 아니라 주위의 불투수성 암석과의 경계부는 특히 공동 발달의 가능성이 높다 (그림 17). 따라서 사전 기초지질조사시 지질도 등을 통해 정밀 조사지역을 선정하게

된다. 또한 항공사진을 통해서 함몰지형을 파악할 경우 Sinkhole지역에 대한 광역적인 구분이 가능하다.

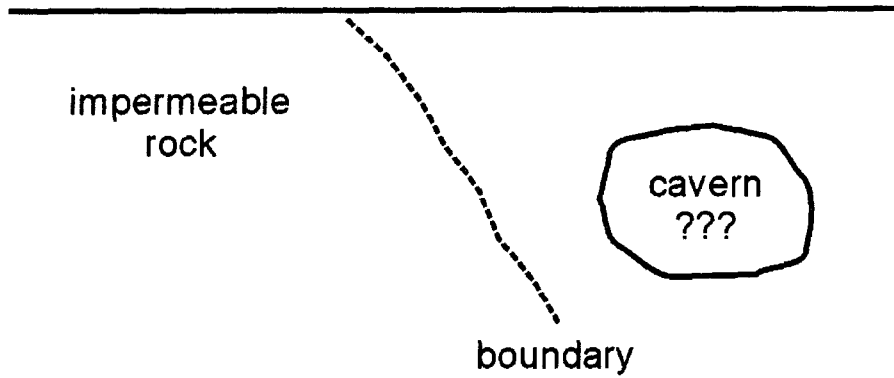


그림 17. 주변 암석분포에 의한 석회 공동의 발달 가능성

3.5. Rockhead에 의한 공학적 위험요소

석회암의 차별침식으로 인한 Pinnacled rockhead가 형성되어 기초공사의 대상이 되는 기반암의 파악이 어렵게 된다. 따라서 말뚝기초 등 작업의 설계심도 결정과정을 위해 다른 암반지대에 비해 훨씬 더 정밀한 조사가 필요하다 (그림 18). 따라서 실제 프로젝트 수행시 기본조사에서는 Pinnacled rockhead의 존재여부를 확인해야 하며, 존재할 경우 분포형태를 정량적으로 파악하게 된다 (그림 19).

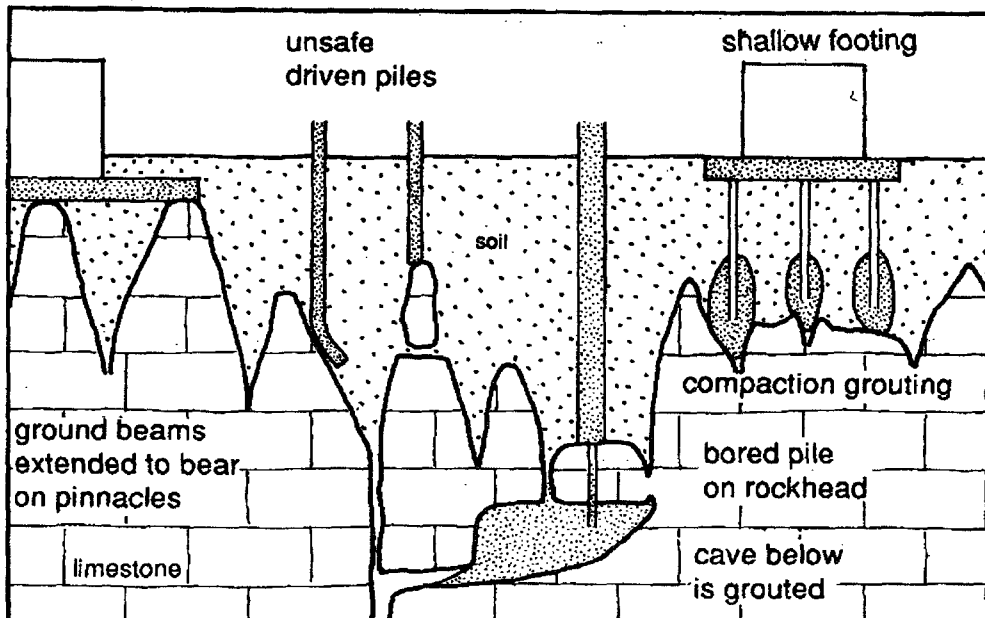


그림 18. Pinnacled rockhead로 인한 공학적 문제점 (from Waltham, 1994)

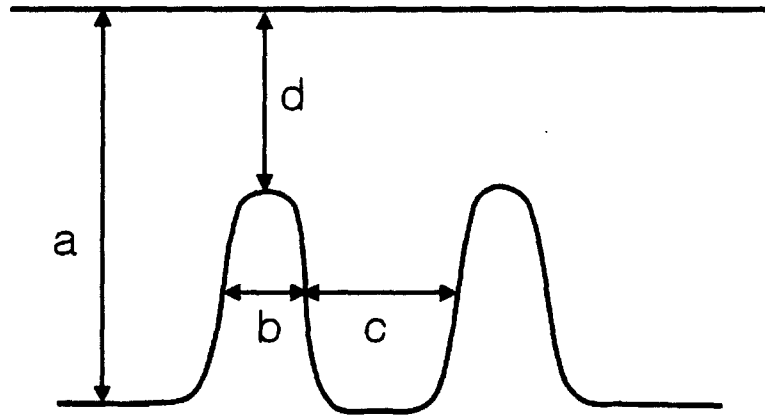


그림 19. Pinnacled rockhead 조사 항목

3.6. 지하수위의 변동에 따른 침하위험성

석회암 지대의 대부분의 Sinkhole 붕괴는 상부 토사층의 함몰을 동반한 형태가 많으며 이는 주로 지하수위의 변동에 따라 발생하게 된다 (그림 20). 전세계적으로 이러한 형태의 지반침하 발생이 다수 보고되고 있으므로 국내 프로젝트 수행시 지하수위의 계절적 변화, 공사에 따른 급격한 수위변동 등의 자료를 확보하여 영향분석에 사용하게 된다.

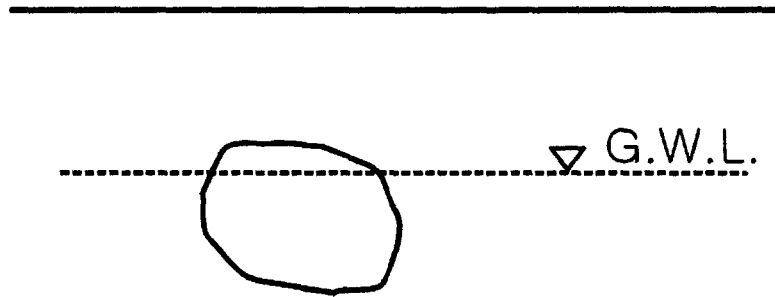


그림 20. 지하수위 변동으로 인한 위험도 평가요소

4. 외국사례를 통한 국내 지반조사시 활용요소 파악

4.1. 남아프리카의 Rand 금광 지역

금광개발로 인한 지하수위의 변동으로 돌로마이트 지역의 공동 상부에서 지반침하가 발생한 경우이다. Sinkhole의 발생위치는 지하수위 변동이 발생한 금광지역과 일치하고 있다 (그림 21). 1957년 이후로 수백개의 Sinkhole이 발생되어, 38명 사망, 100개 이상의 건물이 붕괴되었다.

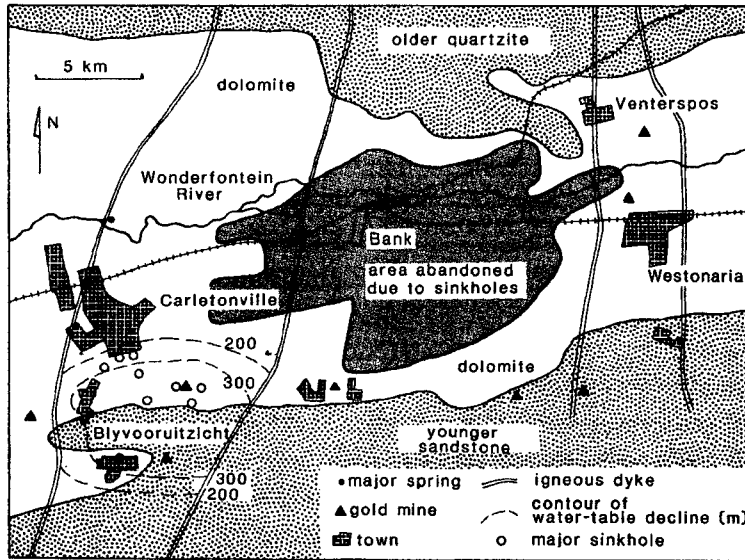


그림 21. 석회암 지반침하로 인한 공학적문제: 사례 1 (from Waltham, 1989)

4.2. 중국 Guizhou 지역

상부 토사층의 두께가 10 m 이내로 발달한 석회암 지대에서 17개의 관정을 통해 공업용수를 개발한 결과 지하수위가 20 m 낮아지게 되었고 이로 인한 지반침하로 주택, 건물 등의 붕괴가 발생하였다 (그림 22).

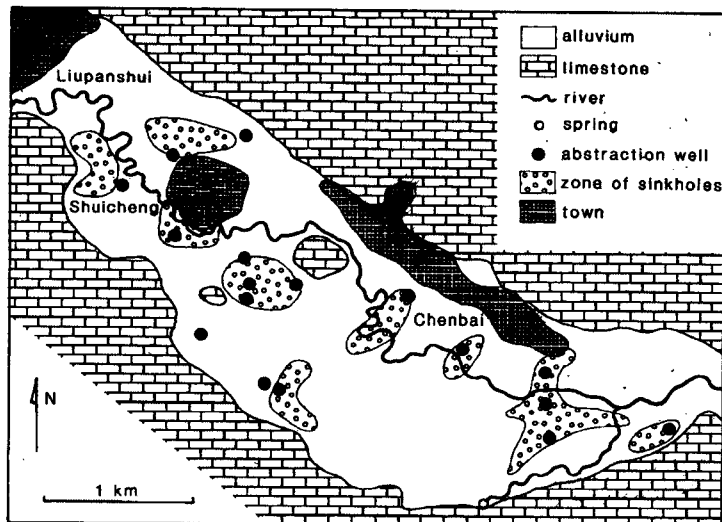


그림 22. 석회암 지반침하로 인한 공학적문제: 사례 2 (from Waltham, 1989)

4.3. 벨기에 Remouchamps viaduct

이 지역은 석회암, 셰일, 사암 등으로 구성되어 있다 (그림 23). 설계 전의 기초문헌조사과정에서 이 지역 석회암에는 공동이 발달된 것으로 나타났다. 총 13개의 각 교각하부에서 4 - 8개의 시추공을 통해

분석한 결과 강도가 낮은 풍화된 셰일층에 대한 교각 부분을 재설계 하였다. 이후 굴착과정에서 석회암 지대 5개 교각 중 2개 부분에서 석회공동이 새로 발견되었다. 주변의 공동 분포를 정밀조사하기 위해 추가로 300개의 시추공 작업을 했으나 더 발견되지 않았다. 결국 채움에 의한 공동보강, 교각위치 재선정 등으로 설계하중 등을 다시 고려하여 전체적으로 15%의 경비가 추가되었다.

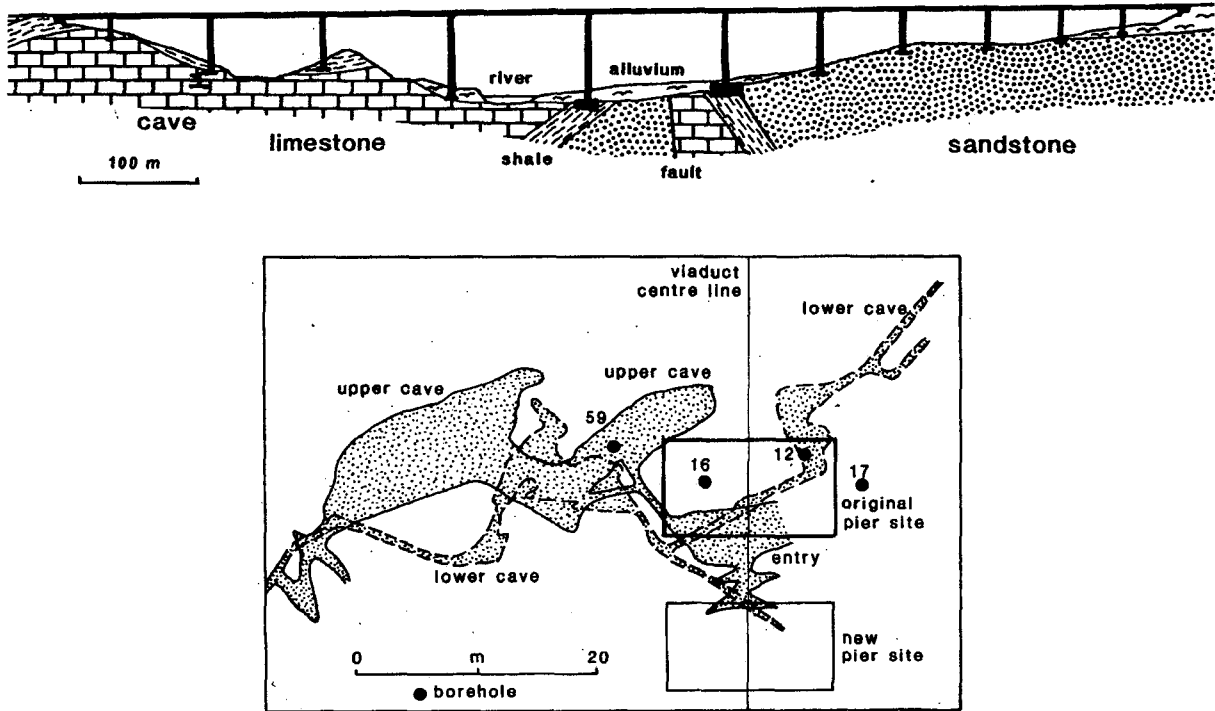


그림 23. 석회암 지반침하로 인한 공학적문제: 사례 3 (from Waltham, 1989 & Waltham, 1994)

4.4. 영국 남웨일즈 Cheostow 지역 수퍼마켓 건설부지

공사부지는 폭 20m, 깊이 5m 정도의 비교적 소규모로 기초지반조사시 시추공에서 별다른 문제점은 발견되지 않았다. 이후 공사 중에 Pinnaced rockhead의 흔적이 발견되어 추가로 시추작업을 진행하여 정확한 토사-암반 경계면을 설정하였다 (그림 24).

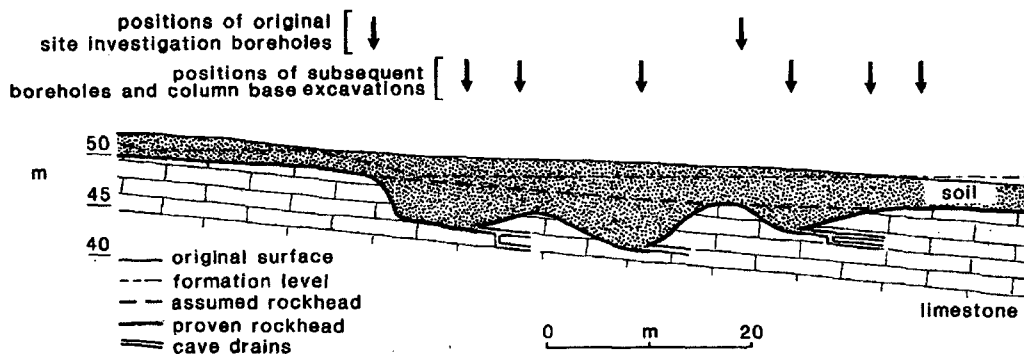


그림 24. 석회암 지반침하로 인한 공학적문제: 사례 4 (from Waltham, 1989)

4.5. 말레이시아 쿠알라룸푸르 지역

이 지역은 기후 특성상 석회암의 풍화작용이 활발히 진행되어 Rockhead까지의 심도가 비교적 깊으며, 또한 불규칙한 형태를 보이는 전형적인 Pinnacled rockhead가 발달한 지역이다. 일부 지역에서는 Rockhead의 심도가 5 - 60 m 정도의 변화를 보여 정밀한 지반조사 없이는 기초공사가 불가능한 대표적인 지역이다 (그림 25).

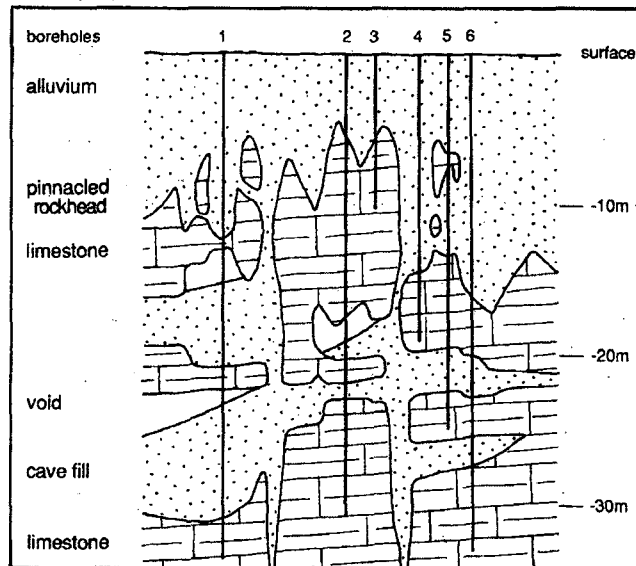


그림 25. 석회암 지반침하로 인한 공학적문제: 사례 5 (from Waltham, 1994)

5. 결론

석회암 지역의 용해현상으로 인한 지반침하 위험성 및 공학적 주의요소를 파악하기 위해서는 다음의 내용들을 지반조사에 포함하여야 한다.

(1) 다른 암석에 비해 석회암의 강도 등 물성은 변화범위가 크다. 따라서 광물성분, 입자조직, 지층시대 등에 따라 동질 그룹의 지역을 나누고 (zoning), 이를 대상으로 각각의 물성을 파악하여 이후의 수치해석 등의 지반정소로 사용한다. 또한 공극율이 높은 석회암의 경우 수분함량에 따른 강도변화가 심하므로 건조상태의 강도, 수분포화 상태의 시료강도 등을 각각 파악하여 수치해석시 지하수위면을 경계로 각각 분석할 필요성이 대두된다.

(2) 대상 지반의 불연속면 분포에 따라 석회공동의 발달 패턴이 좌우된다. 기초조사시 파악된 불연속면의 분포 (방향성, 연장성 등)는 이후의 물리탐사 결과해석시 보조자료로 활용될 수 있다. 특히 불연속면을 따라 발달한 좁은 소규모 틈새공동에 의해서도 상부 지반침하가 유도되므로 불연속면의 분포를 파악해야 한다. 또한 불투수성의 암반과 경계를 이루는 석회암 지대에서는 공동의 발달이 더 많은 것으로 보고되고 있으므로 지질도를 통해 집중조사 대상지역을 사전 선정할 수 있다.

(3) 공학적으로 문제가 되는 지반침하하는 주로 상부는 토사층으로 하부는 석회암으로 이루어진 공동지대에서 나타난다. 특히 지하수위의 변동에 따른 피해사례가 많으므로 계절적 수위변화, 공사시 일시적인 수위변화 등의 영향을 미리 분석해야 한다.

(4) Pinnacled rockhead는 그 자체로 지표함몰을 유도하기 보다는 오히려 말뚝타설 등의 기초작업시 문제가 된다. 따라서 주위의 동질 암상 지역의 노출된 Pinnacled rockhead를 대상으로 야외조사를 실시하여 그 규모를 파악하여 설계에 반영한다. 노출된 부분이 없을 경우 GPR (지오레이다) 등의 물리탐사기법을 사용하면 유용한 정보를 얻을 수 있다 (McCann et al, 1997). 단, 이를 통해서도 파악되지 않는 좁은 폭의 공동이 불연속면을 따라 발생될 수 있으므로 지질조사 자료와 함께 해석할 필요가 있다.

참고문헌

1. 최용근 (1997), *동굴탐험의 세계*, 한림미디어, pp.74-80.
2. Beck, B. (ed.) (1993), *Applied karst geology*, Proc. 4th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Panama City, Florida, 295p.
3. Beck, B. (ed.) (1995) *Karst geohazards*, Proc. 5th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Gatlinburg, Tennessee, 581 p.
4. Beck, B. and Stephenson, J. (ed.) (1997), *The engineering geology and hydrogeology of karst terranes*, Proc. 6th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Springfield, Missouri, 516p.
5. Gillieson, D. (1996), *Caves: Processes, development, management*, Blackwell publishers, 324 p.
6. Goodman, R.E. (1993), *Engineering geology: Rock in Engineering Construction*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 143-194.
7. Leighton, M.W. and Pendexter, C. (1962), "Carbonate rock types", Am. Ass. Petrol. Geol. Mem. 1, pp.33-61.
8. McCann, D.M., Eddleton, M., Fenning, P.J. and Reeves, G.M. (1997), Modern geophysics in engineering geology, Geol. Soc. Eng. Geol. Spec. Publ. No. 12, pp.153-173.
9. Park, H.D. (1994), *Tensile rock strength and related behaviour revealed by hoop tests*, PhD thesis, Imperial College, University of London, 498 p.
10. Waltham, A.C. (1989), *Ground subsidence*, Blackie, pp.4-40.
11. Waltham, A.C. (1994), *Foundations of engineering geology*, Blackie Academic & Professional, pp.3-59.