

산악 터널시공에 따른 주변 지하수위 변화에 대한 수리 및 수문학적 해석

김선명^{1*}

Hydraulic and hydrological study on the change in groundwater level during tunnel construction

Sun-Myung Kim

ABSTRACT It is not uncommon that private wells and small streams are used for daily life in the regions where mountain tunnels are located. Then serious social problems such as well water level fall, being attributable to tunnel excavation can occur. In the design stage, firstly we evaluated that the quantity of leakage water into tunnels. And groundwater drawdown area was simulated using numerical modeling such as MODFLOW to reduce adverse effects on life environment around tunnel. In addition we also used hydrological method to evaluate the groundwater change of tunnel area.

Keywords: hydraulic and hydrological study, groundwater level change, MODFLOW, mountain tunnel

요약 산악터널이 건설되는 지역에 있는 우물이나 작은 하천들은 흔히 주민들의 일상생활용수원으로 사용되고 있다. 이때 터널이 굴착됨에 따라 우물의 수위 저하와 같은 문제들이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 설계단계에서 터널 주위의 지하수에 대한 부정적인 영향을 경감시키기 위해 MODFOLOW와 같은 수치모델링 기법을 사용하여 터널내 지하수 유입량과 지하수위 저하 지역에 대한 평가를 실시하였다. 또한 수문학적인 방법에 의해서 터널주변 지역의 지하수의 용수량을 평가하였다.

주요어: 수리학적 및 수문학적 연구, 지하수위 변화, MODFLOW, 산악터널

접수일(2010.12.15), 수정일(2011.1.26), 게재확정일(2011.3.7)

¹정희원, 한북대학교 에너지자원학과, 전임교원, 공학박사, 기술사

*교신저자: 김선명 (E-mail: sunmkim@hanbuk.ac.kr)

1. 서론

터널 공사에 의해 발생하는 물 문제는 터널이 지하수면 아래를 굴착하는 것을 피할 수 없기 때문에 터널공사에 있어서는 특별히 중요한 고려사항으로 여겨진다. 건설공사에 따른 지하수 문제는 『터널시공에 미치는 영향=지하수로부터 받는 영향』과 『주변에의 영향=지하수에 미치는 영향』이라는 양면이 있다. 즉, 『시공에의 영향』이라는 것은 용출수가 있기 때문에 막장이 붕괴하고, 침투수압이 커지고, 기초의 지지력이 저하하며, 배수불량을 일으킴에 따라 시공에 영향을 미친다고 하는 시공 상의 내부문제이다. 한편 『주변에의 영향』이라는 것은 터널 굴착에 따른 용수로 인해 기존의 물이용이나 물 환경에 영향을 미친다고 하는 문제이다 이 두 가지 문제는 반드시 같이 현장에서 동시에 발생한다고 한정지을 수는 없지만 둘은 서로 밀접한 관계를 가지고 있다(김선명 외, 2006).

과거 터널공사에서는 『시공에의 영향』이 터널공사의 안전 상 큰 문제이며 또 공사기간이나 공사비에 중대한 영향을 미치기 때문에 지하수위 저하(물빼기)공법이나 지수공법을 채용하여 지하수로부터 미치는 영향을 가능한 한 작게 함으로써 터널공사를 안전하고 능률적으로 시공한다고 하는 것이 중요한 과제였다. 그러나 최근 들어서는 지하수 유동의 변화로 인해 종종 지표수의 고갈을 가져오기도 하여 인근 주민들의 민원을 야기하기도 한다.

즉, 터널 굴착공사가 진행되던 도중에 인근 마을에 지표수량이 감소되어 생활용수는 물론 농업용수가 부족으로 인해 주민들과 건설 업체 간에는 그 원인에 대한 논쟁이 발생하는 사례가 종종 있어서 이를 규명하기 위한 추가조사 및 검토가 요구되기도 한다. 그러나 현재 국내의 실정은 이와 관련하여 무엇을, 어떻게 조사하여야 하는가에 대한 체계화된 바가 거의 없다고 보는 것이 타당하다(김선명 외, 2006).

본 연구에서는 터널 건설에 따른 주변 지하수 시스템에 대한 영향에 의해 인근 지역의 약수터 고갈 문제 등의 민원 문제 발생이 예상됨에 따라 이에 대한 사전 검토로 주변의 정천 현황 및 지하수 유동 시스템과 관련하여 체계적인 조사 및 평가를 수행하고자 하였다. 먼저 터널시공단계에 따른 3D 지하수 모델링을 통한 수리학적인 검토와 계곡부의 유역 및 유량 조사결과를 활용한 수문학적 분석에 의한 검토를 병행하였으며 그 결과를 바탕으로 조치계획을 수립하였다.

2. 대상지역의 지형 및 지질특징

연구 대상 터널이 통과하는 지역의 산계는 서쪽 설봉산(394 m)을 중심으로 북북서-남남동방향의 능선과 서쪽의 승명산을 중심으로 역시 같은 방향으로 발달한 두개의 능선 외에는 두드러진 산세를

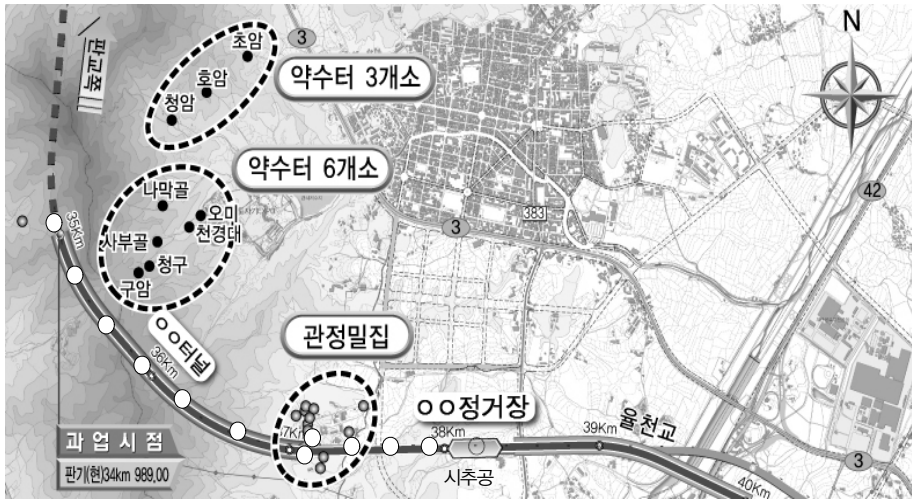


그림 1. 대상지역의 약수터, 관정 및 관측공 현황

보이지 않으며 대체로 위의 두 능선과 평행한 방향으로 독립된 소능선 들이 발달하며 방사상의 형태를 취하고 있다.

연구 대상지역의 지질은 시대미상의 선캠브리아기의 변성암류와 이를 관입한 시대미상의 화강암류 및 중생대 백악기의 맥암류, 그리고 제4계의 충적층으로 대별되어 구성되고 있다. 특히 주라기 흑운모화강암이 가장 넓은 분포를 보이고 있다.

터널 주변에는 9개소의 약수터가 비교적 넓은 지역에 산재해 있으며 터널 종점부에 관정11개소가 밀집하고 있다(그림 1).

3. 3차원 지하수 모델링을 이용한 수리학적 검토

3.1 개요

터널은 지하수계의 지하수위 변화를 포함하여 주변 수계를 위시한 인근 환경에 직·간접적인 영향을 미친다. 특히 터널 공사로 인한 지하수 배수 시에는 터널 주변 지하수계에서의 지하수위 저하가 초래되며, 이로 인해 대수층과 상호작용을 하게 된다. 이러한 영향을 정량적으로 해석하기 위해서는 지하수 전산모델의 사용이 불가피하다. 이의 적용을 통해 8공구 구간의 터널로 인한 지하수위 및 지하수 유동량의 시·공간적 변화를 파악하는 것이 본 분석의 목적이다. 지하수 흐름 분석에 사용한 전산모델은 미국 HydroGeoLogic Inc.의 MODFLOW - SURFACT ver.2.2로서 이는 기존의 일반적인 MODFLOW가 쉽게 처리할 수 없었던 비포화대의 특성을 간접적으로 반영함으로써 건조셀

(dry cell)의 처리를 획기적으로 개선한 것이다. 모델 내의 방수로 설치 인근에서 건조셀(dry cell)들이 발생하기 쉬우므로 MODFLOW- SURFACT의 적용은 더욱 정확하고 효율적인 계산을 가능하게 하였으며(Doherty, 2001), 그래픽 입출력 처리기로는 Visual MODFLOW 4.0을 사용하였다.

3.2 모델의 구성

전체 모델의 구성은 크게 2단계로 구분된다. ① 첫 번째는 본 대상 터널의 건설공사가 시행되기 이전 상태, 즉 인위적인 영향이 없는 자연상태를 모의한 것이다(그림 5). 이는 정류상태의 지하수 유동 모델로서, 이를 통해 불확실성이 많이 내재된 수리지질 인자의 보정을 실시하였다. 공사 개시 이전 초기상태의 지하수위 분포와 모의 결과를 서로 비교하여 모의 결과 수두값(model head)과 실측값(target head)이 서로 최대한 일치되도록 하였다(그림 4). 이를 정류 보정단계라 한다. ② 두 번째 단계는 정류보정 단계에서 분석, 결정된 인자들을 바탕으로 하여 건설공사 및 복선전철 운영 이후 본 터널과 인근지역에 분포된 지하수 환경에 미칠 수 있는 각종 영향에 대한 예측을 수행키 위해 예측 모델(prediction model)을 설정하고 장기 예측을 실시하였다.

3.2.1 경계조건

그림 2는 조사지역내 수리적인 경계조건을 보여 주고 있다. 8공구를 포함하는 3개 수역을 모의 대상지역으로 설정하였다(그림 2 참조). 제1수역은 8공구의 대부분을 포함하고, 면적이 약 18.0 km²

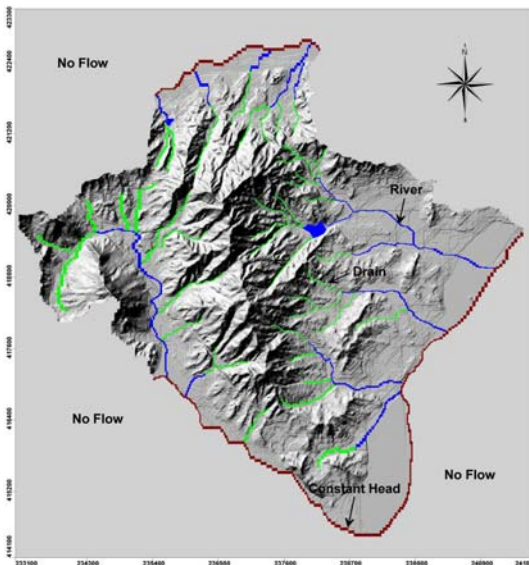


그림 2. 조사지역내 경계조건

로서 3개 구역 중 가장 넓으며, 수지상 수계를 이루고 있다. 제1구역에 함양된 지하수가 하류구배구간인 설봉산에서 발원하여 동남쪽으로 관류하는 중리천을 따라 남쪽에서 북동쪽으로 흐르는 부하천으로 유출되는 것을 고려하기 위하여 부하천을 고정수두(constant head) 경계로 처리하였다. 8공구 시점을 포함하는 제2구역은 이천시 마장면 장암리를 포함하여 면적이 약 11.7 km²로서 설봉산에서 발원하여 서쪽으로 유출되어 서쪽에서 동남쪽으로 흐르는 장암천을 따라 부하천으로 유출되는 수계로서 모의 영역의 남쪽에 위치한 장암천을 고정수두 경계로 처리하였다.

8공구의 북측에 인접한 7공구의 터널구간은 설봉산을 관통하여 모의 영역의 북측에 위치한 제3구역을 지나므로 8공구만 분리하여 지하수영향을 예측하는 것은 7공구와 8공구의 터널구간이 복합적으로 영향을 미치는 지역의 지하수영향을 과소평가하게 되므로 7공구와 8공구의 건설공사 및 복선전철의 운영으로 인한 지하수 영향범위가 제 1, 2 구역의 경계를 초과할 것으로 판단된다. 따라서 8공구 구간의 북측에 위치한 7공구의 터널구간이 관통하는 제3구역 약 5.1 km²를 모의 대상영역에 추가하였다. 이 구역 역시 모의영역의 수리적 경계를 이루는 하류구배구간에 위치한 신둔천을 고정수두 경계로 처리하여 유역의 상류구배구간에서 함양되어 하류구배구간으로 유출하는 지하수를 고려하였다. 모의 영역 내에 분포하는 중리천, 장암천, 그리고 신둔천의 주요 지류는 강(river) 경계로, 소규모의 계곡 지류는 배수(drain) 경계로 치환하였다. 또한 8공구의 복선전철 공사구간들은 배수경계로 처리하였다. 8공구 공사구간의 사방을 둘러싸고 있는 지형적인 분수령과 수리적 경계를 이루는 부하천, 장암천, 신둔천은 수리적 분수령을 이루므로 이곳에는 무흐름(no flow) 경계를 설정하였다.

모델 대상지역의 전체면적은 80.4 km² 정도이나 이 가운데 무흐름 경계를 제외한 실제 계산 대상 지역인 활성셀(active cells)의 면적은 약 34.8 km² 정도이며, 이를 둘러싼 경계의 연장은 약 30 km이다.

표 1은 모델에 적용한 입력조건 및 자료를 나타낸다.

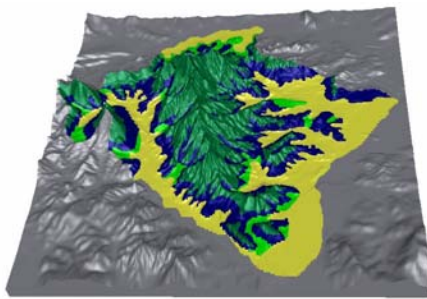
3.2.2 개념모델의 수리전도도 분포

모의 대상지역에는 흑운모 화강암이 기반암을 이루고 있으며, 그 상부에 기반암의 풍화대, 풍화잔류토 및 충적퇴적층과 같은 미고결암이 분포하고 있다.

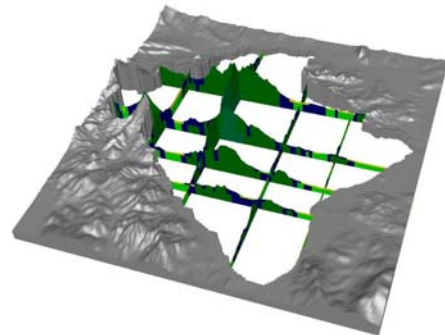
개념모델에서는 각 지질의 수리특성을 고려하여 충적층, 풍화잔류토가 분포하는 구간과 구릉지에 분포하는 풍화암과 기반암의 일부가 포함되는 구간까지 제1층으로 설정하였으며, 제2층은 기반암의 특성 값을 할당하였다. 보정단계에서 대수층 수리지질인자들의 값을 산출하여 적용하였다. 모델에 적용한 각 지층의 수평적인 분포는 그림 3 (a)와 같고, 수직적인 지층 분포는 그림 3 (b)와

표 1. 모델에 적용한 입력조건

입력인자		내 용
격자망	Cell의 수	495행 × 434열 × 2층
	Cell의 크기 (m)	10 × 10 ~ 100 × 100
대수층의 형태	1층	자유면 대수층 (충적층, 풍화잔류토, 풍화대, 기반암 일부)
	2층	피압/자유면 전환 대수층(기반암)
대수층 두께 (m)	1층	8.85 ~ 270 (지하수면의 고도에 따라 변함)
	2층	20.9 ~ 124.5 (바닥면은 일정 심: EL+0 m)
수리전도도 (cm/s)		$7.006 \times 10^{-7} \sim 0.00234$
터널 단위길이당 전도계수 (m/일)		0.011 ~ 0.034
비산출율		0.002 ~ 0.131
비저류계수 (m^{-1})		$0.00025 \sim 10^{-5}$
지하수함양량 (mm/년)		175.05 (강수량의 12.45%; $1374.9\text{mm/년} \times 0.1245$)
수렴한계 (Tolerance level)		0.001



(a) 수평적 수리전도도 분포



(b) 수직적 수리전도도 분포

그림 3. 수리전도도 분포

같이 2개층으로 이루어져 있다.

3.3 모델의 보정 및 수리지질인자 결정

지하수 유동해석을 위한 첫 단계로 정류보정을 실시하였다. 현장에서 관측한 실지하수위(target head)와 모델에서 계산한 지하수위(model head)를 비교·분석하여, 비교 지점의 계산 수위가 실제 관측수위에 합리적으로 접근할 때까지 반복적으로 대수성 수리특성값과 같은 입력인자들을 변화시키면서 수행하였다.

8공구 건설공사가 시작됨에 따라 주변 지하수계는 스트레스를 받게 되어 8공구를 향해 지하수를

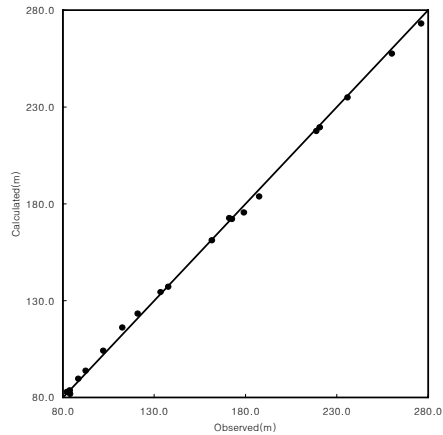


그림 4. 실측수위자료 와 예측수위자료의 비교

배출하게 된다. 이러한 상황을 모델에 적용하기 위해 8공구가 통과하는 지점들을 배수경계로 처리하여 시간 경과에 따른 지하수위 변동을 예측하였다.

8공구의 건설공사가 본격적으로 시작되기 이전 시기 동안은 이 공사가 주변 지하수 환경에 인위적인 영향을 주지 않는 상태로 볼 수 있다. 따라서 이를 정류상태로 가정하고 정류 보정을 실시하여 이 시기의 지하수계의 현장상황을 재현하였다. 2005년 1월 8공구 건설공사 이전에 예정 공사구간을 따라 지반조사를 위해 굴착한 시추조사공 11개소와 8공구 인근에 위치한 약수터 9개소 등 총 20개 지점에서 관측한 지하수위 자료를 정류보정에 이용하였다.

보정에 사용된 지하수위의 관측시기(2005년 1월)는 1년 중 갈수기에 해당하기 때문에 이로부터 보정을 통해 구해진 수리특성인자들은 부정류 모의 시 지하수위 강하 측면에서 실제의 경우보다 다소 보수적인 결과를 제공한다. 정류상태 보정을 통해 표 1의 대수성 수리특성인자들 가운데 수리전도도의 분포 및 값을 결정하였으며, 지하수 함양율은 앞서 설명한 바와 같이 “지하수관리 기본계획 보고서”에서 8공구가 위치한 유역에 소재한 국가 지하수 관측망(경기도 이천시 울현동 179-1)의 자동 수위 관측자료를 이용하여 분석한 함양률인 강수량의 12.45%를 적용하였다(한국지하수토양환경학회, 2002).

조사지역 일대에 소재한 관측점에서 실측한 수위자료(observed head)와 모델로 계산한 예측 수위자료(calculated head)에 대한 정류상태의 보정결과에 따른 산점도(scatter diagram)는 그림 4와 같다.

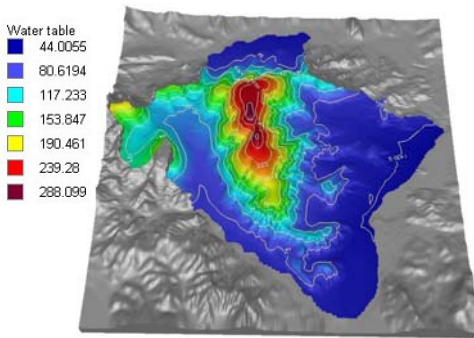


그림 5. 정류상태에서 예측모델을 이용하여 재현한 등수위선도

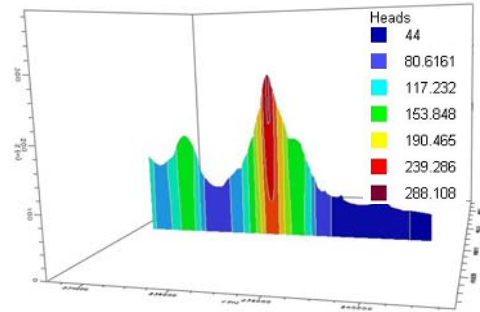


그림 6. 정류상태의 수직적인 지하수위 분포

보정 결과 평균잔차(residual mean)는 -0.34 m이고, 절대평균잔차(absolute residual mean)는 1.67 m이며, SEE는 0.46 m이고, RMS는 2.02 m였다. 특히 normalized RMS가 10% 미만인 1.04% 로서 보정은 비교적 합리적으로 양호하게 이루어졌다.

설계된 모델을 이용하여 인공적인 스트레스가 가해지지 않은 정류상태의 지하수위 분포를 모의한 결과는 그림 5와 같다. 또한 그림 6은 지하수의 수직 등포텐셜선(equipotential line)을 나타낸 그림으로서 모의 지역의 지하수위는 지하수위가 높은 지역을 제외하면 지하수의 수평적인 흐름이 수직적인 흐름에 비해 매우 우세하게 나타난다.

3.4 터널건설공사가 주변 지하수계에 미치는 영향분석

3.4.1 터널내 지하수 유입량 변화

각 공사 구간별로 유입되는 지하수 유입량은 공사가 개시 후 초기에는 급격히 증가하다가 지하철 터널의 굴진구간이 확장되면서 증가추세가 둔화된다. 공사 완료 후에는 초기에는 증가추세가 급격히 감소하다가 지하수 흐름이 준정류상태에 도달하면서 지하수 유입량이 감소추세로 돌아선다. 이후 감소율이 줄어들어 비교적 짧은 기간 내에 안정적인 정류상태로 변한다(그림 7). 즉 8공구 터널 구간의 경우 공사완료 직후 843 m³/일로 지하수 유입량이 최고치에 달했다가 유입량이 감소하여 공사완료 후 20년이 지나면 약 519 m³/일로 안정된다.

3.4.2 공사에 따른 등수위선도 변화

모의결과에 의하면 그림 8과 같이 8공구의 복선전철 터널인 설봉터널은 지하수의 배출원이므로 설봉터널을 따라 새로운 수리적 경계가 형성된다. 특히, 설봉터널이 모의영역의 상류구배구간에

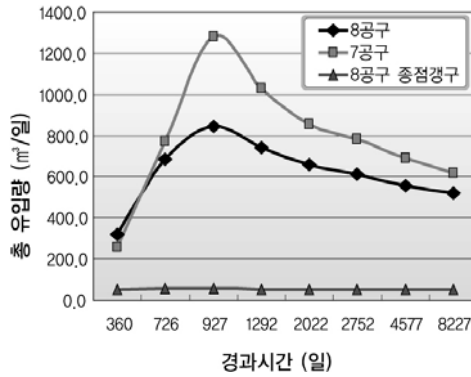


그림 7. 경과시간별 터널내 지하수유입량변화

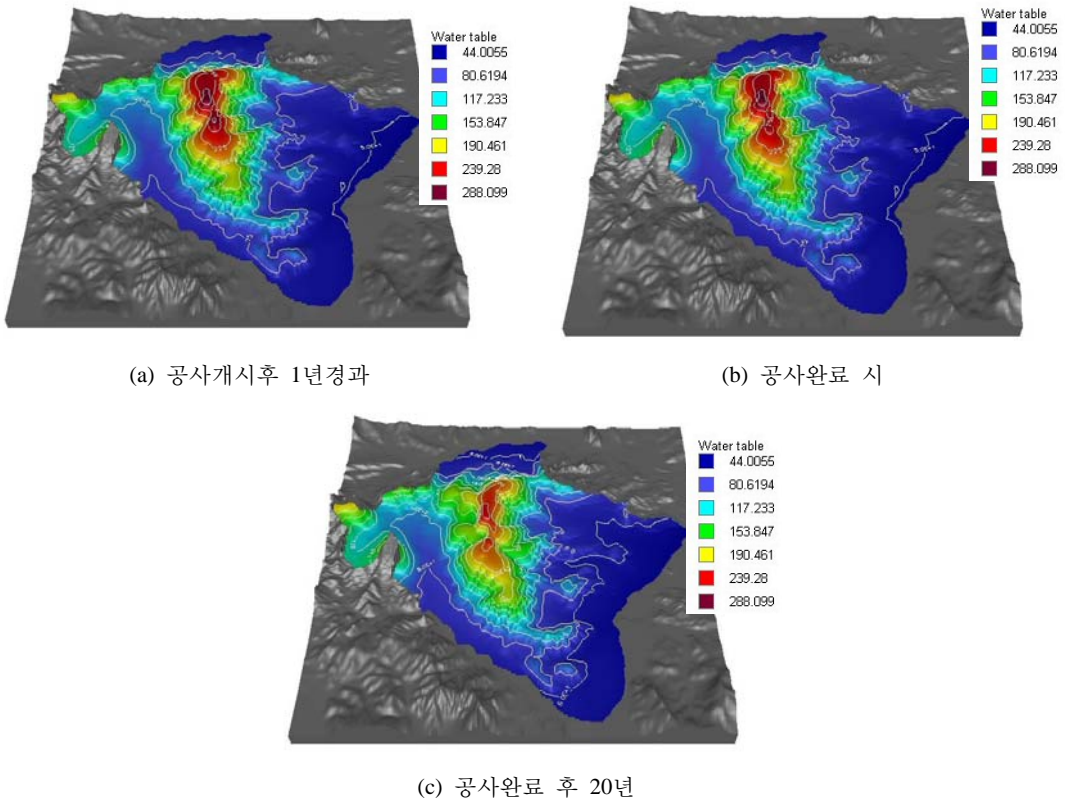


그림 8. 터널 공사 중 및 완료 후 시간경과별 등수위선도

위치하기 때문에 8공구 인근구간의 지하수의 유동방향은 공사이전 시기와는 달리 모두 터널쪽으로 향하며, 하류구배구간에 위치한 구간은 새로운 분수령이 형성된다. 새로운 수리적 경계는 시간이 지날수록 고착되어 5년 이후에는 정류 상태에 도달한다.

3.5 지하수 영향권 및 주변관정의 수위변화

3.5.1 지하수 영향 구간 검토

터널인근의 지하수위의 강하가 30 cm 이상 발생하는 구역을 영향권으로 가장하였다. 그림 9는 시간이 경과함에 따라(1년, 3년, 5년, 10년, 20년후) 지하수 영향구간이 확대하고 있음을 보여주고 있다. 그림 10은 공사완료후 20년 경과시의 지하수 영향구역은 보여준다.

3.5.2 약수터의 수위변화

약수터의 수위변화는 수위변화가 가장 많은 구암약수터의 경우 0.34 m이고, 오미약수터의 경우 0.12 m로 가장 작은 수위변화를 보이고 있다(그림 11 참조). 이는 모델링의 수치적 한계에서 나오는 오차범위이며, 터널 굴착에 따른 약수터의 수위변화는 발생하지 않을 것으로 예상된다. 하지만 공

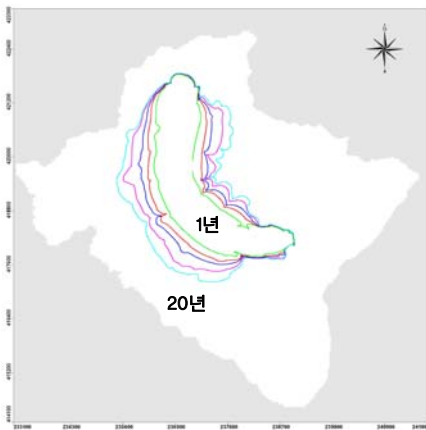


그림 9. 터널공사 완료 후 시간경과별 지하수 영향구간

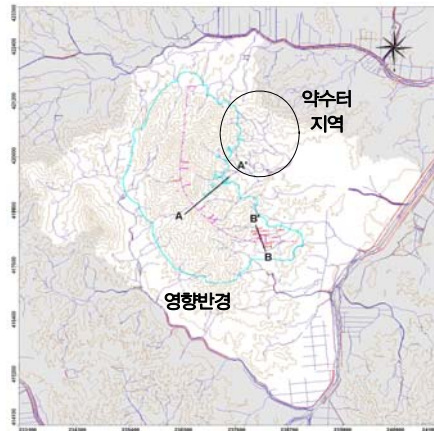


그림 10. 터널공사 완료 후 20년 경과 후 지하수 영향구역

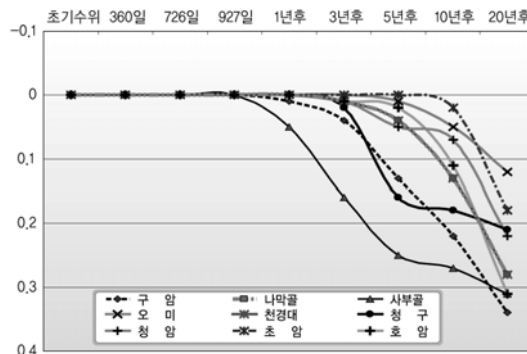


그림 11. 시간경과별 약수터 수위변화

사기간 중 또는 완료 후에도 지속적인 관측이 요구된다.

4. Takahashi의 수문학적 기법을 이용한 검토

4.1 개요

터널 통과 구간의 미세 구역에서의 갈수시 유출량을 구역의 기저유출로 가정하여 터널이 구축될 구간에 대하여 항상 용수량에 대한 예측을 실시하였다.

기저 유출량이 지하수 유출양인 것을 제창한 것은 20세기초경의 프랑스인 Boussinesq나 Mariotte이다. 산악터널 주변의 지하수 조사에서는 골짜기를 흐르는 물이나 계곡의 시냇물의 유량을 일정기간 매일 측정하여 기저유출량을 구한다. 이것을 산으로부터의 지하수 유출양으로 간주한다.

Takahashi는 Abe의 연구 등을 기초로 지형, 지질 조건을 고려하여, “터널굴착시의 항상 용수량은 주변하천의 기저 유출양에 비례한다”라고 하는 이른바, “Takahashi의 수문학적 방법”을 제안하였다(大島洋志, 2001). 또한, Takahashi는 산악지대에서의 지하수는 하천에서 갈수시의 유량에 상당하는 만큼 항상 유출한다고 생각하였으며, 갈수시의 하천유출량을 구역의 면적으로 나눈 값을 갈수 비유량이라 하였다. 이 갈수 비유량을 이용하여 항상용수량을 제안하였으며 그 식은 다음 식(1)과 같다.

$$Q = \Sigma q \cdot l \cdot (R_R + R_L) \quad (1)$$

여기서, q : 단위 구간 연장 길이 당의 갈수 비유량($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$), l : 단위 구간의 연장(km)
 $R_R(R_L)$: 단위 구간에서의 터널 오른(왼)쪽의 영향 범위(km)

4.2 영향범위 산정방법

- ① 지형도에 분수계를 기입해서 단위 유역도를 그린다.
- ② 이 면적을 $A(\text{km}^2)$, 주유로를 직선으로 취해서 그 길이를 $L(\text{km})$ 로 하면 단위 유역의 평균 유역 폭 R 을 구한다. $2R = A/L(\text{km})$ (그림 12-(b))
- ③ 주유로를 적당한 길이로 n 으로 분할하고 각각의 위치의 표고에서 우 분수계하상좌 분수계의 표고를 도시해서 비고도를 그린다(그림 12-(a)).
- ④ 하상과 분수계와의 표고차를 H 로 하고 좌우의 비고의 합계를 $2n$ 으로 나눈 값으로부터 유역의 평균 비고 H_m 을 구한다. 이상으로부터 평균 투수성 k_t 를 $k_t = R^2/6H_m$ 에 의해 구한다.

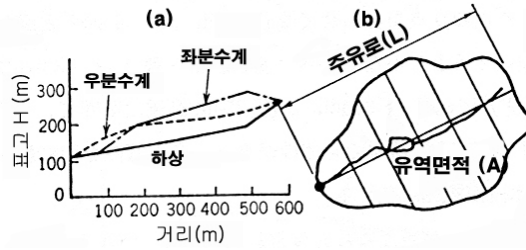


그림 12. 주요 용어 개념도

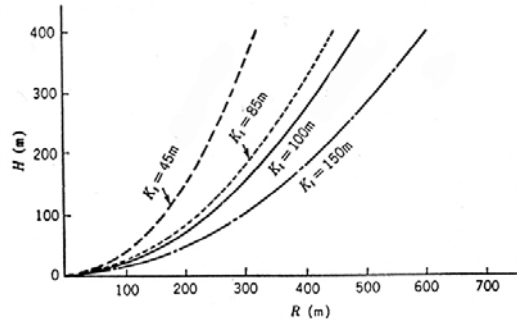


그림 13. 평균 투수성(k_t) 그래프

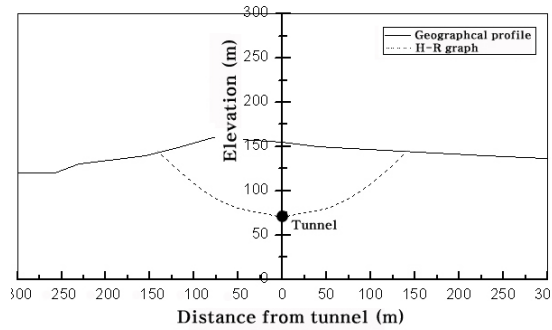


그림 14. 터널 용수의 유출 범위도

- ⑤ $k_t = R^2/6H_m$ 에 k_t 를 대입하여 H(표고)와 R(유역 폭)사이의 관계곡선(그림 13)을 작성한다.
- ⑥ 다음으로 터널과 직교하는 단면을 적당한 간격마다 그린다.
- ⑦ 터널 위치와 H-R 곡선의 0점을 일치시켜서 지질 단면도를 겹쳐서 H-R 곡선이 지표면과 교차하는 곳을 터널 용수의 영향범위로 생각한다(그림 14).

4.3 대상영역에서의 항상용수량 예측

4.3.1 터널 주변의 미세 유역의 설정

터널주변의 미세 하천을 지형도상의 분수계를 이용하여 유역을 나누었다. 대상 유역의 1개 저수지를 중심으로 각 유역에서의 지표지질 답사 결과 측수가 가능한 지역 12개소의 하천과 설봉지역의 약수터 9개소를 선정하고 유량을 측정하여 갈수 비유량을 계산하였다(약수터는 유량만 측정). 이 갈수 비유량 값을 이용하여 대상구간에서의 터널내의 항상용수량을 예측하여 보았다.

4.3.2 유역면적의 계산

분수계를 이용하여 나눈 미세 유역에 대한 유역 면적은 1:5000 축척의 수치지형도상에서 계산하였으며, 표 2에 유역 면적을 나타내었다.

4.3.3 유량 측정

측수 시기는 갈수기이며, 강우가 없는 날이 지속되어 하천에서의 유량을 기저유출로 가정하였다. 각 유역에서 측정된 유량은 강우에 의한 영향이 없는 기간에는 유량의 변동의 폭이 거의 없으며 유효 강우 후(1월 3일 1.5 mm) 10일 이상 지속되어 유량이 수렴하였다고 생각한 1월 13일의 값을 기저 유출량으로 가정하였다. 각 미세 유역에서의 유량은 표 2와 같다. 1월 13일 측수 이후 2차례 적설에 의해 유량이 증가하였으며, 시간이 흐르면서 감소하여 기저 유출량 값에 수렴하는 추세를 보였다.

표 2. 유역별 갈수 비유량

유역	Baseflow ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$)	Catchment area (km^2)	Specific flow rate in droughty season ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}^2$)
Basin 1	335	2.59	129.3
Basin 2	309.0	0.6	515
Basin 3	371.0	1.48	250.7
Basin 4	450	1.23	365.9
Basin 5	330.9	0.13	2545.4
Basin 6	440.3	1.24	355.1
Basin 7	456.3	0.6	760.5
Basin 8	302.7	0.57	531.1
Basin 9	444.8	1.82	244.4
Basin 10	328.5	0.82	400.6
Basin 11	429.8	2.88	149.2
Basin 12	438.6	1.26	348.1

4.3.4 유역별 갈수 비유량의 산정

유역별 기저 유출량을 유역의 면적으로 나눈 값을 비유량이라 한다. 터널이 12개의 유역을 통과하므로, 터널의 항상용수량 계산 시에 표 3의 값을 이용하였다.

4.3.5 영향 범위의 산정

(1) H-R 그래프의 작성

터널 통과구간에서 유역에 대하여 각각의 하천 비고에 따른 영향 반경을 이용하여, H-R 그래프를 작성하였다. 이는 각 유역에서의 고도에 따른 평균 투수성을 나타내는 것이다.

(2) 터널 구간에서의 영향범위

터널 통과구간을 제 7공구 19개, 제 8공구 14개의 단면으로 분할하여, 각각의 위치에서 터널 종단면도와 H-R 그래프(그림 15)를 이용, 터널 통과 구간에서 영향범위를 산정하여 지형도 상에서 터널에 의한 영향 범위를 구하였다(그림 16 참조). 구간별 지형 횡단면도 및 영향범위의 한 예를 표 3에 나타내었다.

4.3.6 각 구간별 항상용수량 예측

식 (1)을 이용하여 터널 전 구간에 대하여 항상 용수량을 계산하였다. 단위 구간연장(l)은 150 m이다. 각 구간에서의 항상용수량은 표 3에 나타내었으며, 터널 내로 유입하는 전체 항상용수량은, $0.803 \text{ m}^3/\text{min}(803.44 \text{ l}/\text{min})$ 이다.

4.4 지질별 터널 비용수량(比湧水量)

비용수량이란 단위길이를 1 km로 한 경우의 용수량으로 터널에서의 항상용수량을 터널의 연장으로 나눈 값으로써 Takahashi에 의해 다음과 같이 제안되었다(志田和彦, 大島洋志, 1991).

$$\text{비용수량}(\text{m}^3/\text{min}/\text{km}) = \text{항상용수량}(\text{m}^3/\text{min}) \div \text{터널의 연장}(\text{km}) \quad (2)$$

본 역의 지질은 시대미상의 선캠브리아기의 변성암류와 이를 관입한 시대미상의 화강암류 및 중생대 백악기의 맥암류, 그리고 제4계의 충적층으로 대별되어 구성되고 있다. 특히 주라기 흑운모 화강암이 가장 넓은 분포를 보이고 있다. 따라서 표 4의 중생층에 속한다고 볼 수 있으며 대상 터널에서의 비용수량은 $Q = 0.167 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 일반적인 중생층의 비용수량 범위인 0.0~0.95

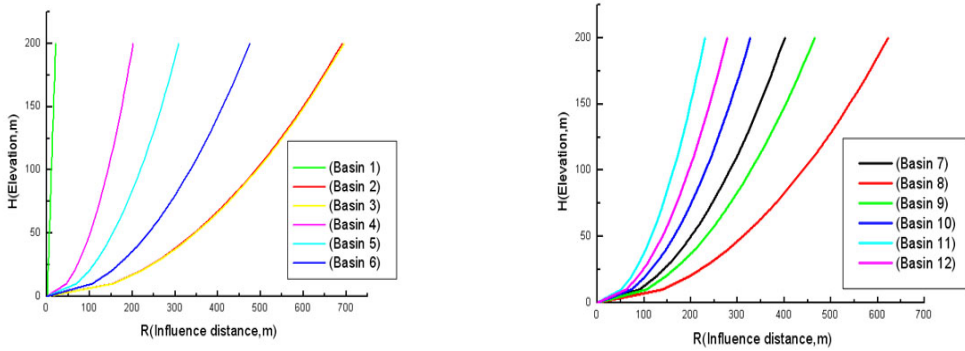


그림 15. 각 유역의 H-R 그래프

표 3. 각 구간에서의 항상용수량

Section (km)	Constant inflow rate ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$)
32.58	1.73
32.73	2.41
32.88	3.18
33.03	4.09
33.18	3.92
33.33	59.79
33.48	60.1
33.63	6.83
33.78	7.12
33.93	8.30
34.08	9.56
34.23	10.73
34.38	3.35
34.53	4.66
34.68	28.98
34.83	29.40
34.98	28.30
35.13	27.20
35.28	27.52
35.43	10.36
35.58	9.51
35.73	8.86
35.88	9.29
36.03	79.62
36.18	82.25
36.33	80.08
36.48	82.25
36.63	28.96
36.78	26.36
36.93	20.86
37.08	17.41
37.23	12.21
37.38	8.25

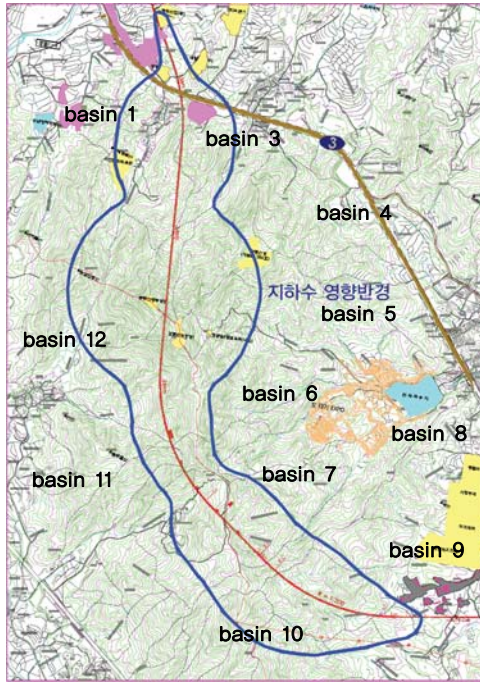


그림 16. 터널 주변의 지하수 영향범위

표 4. 일본의 지질별 터널 비용수량(志田和彦, 大島洋志, 1991)

지질 분류		비용수량의 범위 (m ³ /min/km)	평균 비용수량 (m ³ /min/km)
화산암		0.85~1.0	3.71
화산쇄설암		0.035~0.9	0.3
심성암류		0.17~3.8	1.38
편마암		0.018~0.84	0.20
고생층		0.10~4.5	0.79
중생층		0.0~0.95	0.17
제3기 ~ 홍적세	사력층	0.02~3.6	0.84
	사암-혈암-응회암	0.014~0.95	0.25
	이암	0.0~0.26	0.07

m³/min/km의 범위(표 5 참조)에 속하므로 본 수문학적 기법을 이용한 항상 용수량 예측치와 부합함을 알 수 있었다. 이를 지질별 비용수량의 분포로 나타낸 결과, 중생층의 평균적인 비용수량(0.17 m³/min/km)에 근접함을 알 수 있었다.

5. 결론 및 고찰

터널 공사시 지하수의 변동은 가장 예측도 어렵고 현실과 잘 맞지 아니하여 검증도 어려운 분야이다. 또한 지하수의 유출로 인한 환경적 영향의 규명이 무엇인지도 아직 불명확 부분이 많다. 수치 모델을 이용한 지하수 변동의 예측은 지하 환경이 모의현상과 정확히 맞기 어려워서 예측과 실제가 일치하는 경우가 매우 드물다. 또한 국내에서는 지하수 영향에 대한 중요성이 최근에 부각되었지만 그동안은 터널공사 현장에서 유출량에 대한 조사자료가 충분히 축적되지 아니하였다. 경험상으로 보면 터널 공사시 지하수는 터널의 굴착과 함께 유출량이 증가하고, 파쇄대 등에서는 유출량이 급증한다. 터널의 완공 후에도 차수가 완전하지 않기 때문에 지하수는 계속 유출된다. 그러나 자연유출량과 터널로 인한 유출량을 직접 비교하기 어려워 지하수 유출이 과다한지 여부와 이 지하수 유출로 인하여 상부의 지하수가 고갈되는지 여부는 관측자료의 부족 및 그 인과관계에 대한 파악 곤란 등에 의해 확실한 결론을 내리기는 어렵다.

본 연구에서는 설봉 터널 통과 구간 중 과업시점부 약수터 9개소 및 종점부 우물 11개소의 민원 문제 발생 여지가 있었다. 이에 터널 설계 단계에서 터널시공에 따른 3D 지하수 모델링 및 수문학적 분석에 의한 주변 지하수 영향 검토를 수행하였다.

본 연구의 검토수행 결과는 다음과 같다.

1. MODFLOW를 이용한 지하수 모델링 결과 구암 약수터 등 9개 약수터의 경우 터널굴착 20년 경과 후 지하수위저하가 약 0.3 m 이내, 종점부 기존우물은 0.8 m로 공사이전의 자연수위와 큰 차이가 없으며 터널영향범위에 속하지 않음을 알 수 있었다. 유출지하수량도 8공구 터널구간의 경우 공사완료 직후 843 m³/일로 지하수 유입량이 최고치에 달했다가 유입량이 감소하여 공사완료 후 20년이 지나면 519 m³/일로 안정된다.
2. Takahashi의 수문학적 방법에 의해 예측한 터널 통과구간 전체에서의 항상용수량은, $Q = 0.803 \text{ m}^3/\text{min}$ (803.44 l/min)로 예측되었으며, 단위 연장당의 용수량인 비용수량으로 표현하였을 경우에 $Q_{sp} = 0.167 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 예측되었다. 설봉산 지역의 약수터 9개소는 터널 영향 범위에 내에 속하지 않는 것으로 나타났다.
3. 각각의 결과에서 유출 지하수량의 경우 MODFLOW는 0.858 m³/min = 843 m³/일(공사완료 직후), 0.360 m³/min = 519 m³/일(공사완료 20년후)이며 Takahashi 방법에 의한 결과는 0.803 m³/min으로 가장 높은 값을 보였다. 하지만 두 값 모두 일반적으로 지하철 터널 등의 배수용량 설계에서 고려하는 유출 지하수량보다는 현저히 낮았다. 두 방법 모두 터널 상부 주변의 약수터

및 우물에 영향을 주지 않을 정도로 지하수 영향반경은 작았다. 하지만 영향반경의 형태는 약간은 상이하였으며 특히 Takahashi의 방법에서 나타난 영향반경은 산지의 작은 계곡들에 영향을 크게 받고 있는 형태로 나타났다.

4. 현재 터널공사에 의한 지하수 고갈문제가 종종 환경문제로 대두되고 있는데 이처럼 서로 성격을 달리하는 검토방법을 통해서 그 영향을 평가하는 것이 좋을 것이다.

참 고 문 헌

1. 김선명, 윤상길(2006), 산악터널공사의 지하수문제(Ⅰ), 한국터널공학회지 Vol. 8, No.1, pp. 64~78.
2. 김선명, 윤상길(2006), 산악터널공사의 지하수문제(Ⅱ), 한국터널공학회지 Vol. 8, No.2, pp. 82~98.
3. 이병대, 조병욱, 성익환(2002), 터널굴착 공사에 따른 지하수 유출량과 수리지질학적 특성, 한국터널공학회지, Vol. 4, No. 1, pp.16~27.
4. 이병대, 성익환, 조병욱, 신희순(2002), 터널 굴착 주변지역의 지하수유동 모델링을 위한 지하수 함양량 산정, 한국터널공학회지, Vol. 4, No. 2, pp. 22~31.
5. 한국지하수토양환경학회(2002), “지하수관리 기본계획 보고서”, 건설교통부.
6. Doherty, J.(2001), Improved calculations for bewatered cells in MODFLOW, Ground Water, Vol. 39, No. 6, pp. 863~869.
7. 大島洋志(2001), “わかりやすい 土地地質學”, 土木工學社, pp. 150~154.
8. 志田和彦, 大島洋志(1991), “わかりやすい 土地地質學入門”, 土木工學社, pp. 112~139.