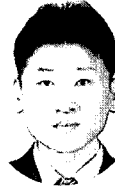


Tunnelling Technology

산악터널 공사의 지하수 문제(II)



윤상길
(주)바우컨설팅
전무이사/기술사



김선명
(주)바우컨설팅
차장/공학박사

본고는 일본의 학술지인『터널과 지하』에 2002년 7월부터 2003년 9월까지『산악터널공사의 환경보전』이라는 제목으로 15회 연재된 강좌 중에서 (9), (10)번 강좌를 편역한 것으로 원저자는 일본『산악터널공사의 환경보전 연재강좌 소위원회』임을 밝혀두는 바이다. 총 2회 중 2006년 3월 기술강좌 “산악터널 공사의 지하수 문제(I)”에 이어 그 두 번째이다.

2. 조사·예측 방법과 대책

2.1 조사·예측방법

2.1.1 대책의 근거으로서의 조사와 예측

조사의 목적 및 성격은 노선계획 단계에서부터 준공 이후까지, 터널공사의 진행에 따라서 자연스럽게 변화한다. 조사는 일반적으로 목적에 따라 ①노선선정을 위한 조사, ②설계·시공계획을 위한 조사, ③시공 중 조사, ④시공

후 조사의 4단계로 대별된다.^{1,2)}

각각의 단계마다 조사에서 요구되는 목적에 맞춰 최적의 방법을 선정해야 한다. 또한「조사는 건설공사라고 하는 목적에 대한 수단이며 조사 자체를 목적으로 해서는 안 된다」라는 것을 명심해야 한다.

조사는 그 후에 예측, 평가되어 대책으로 이어지는 하나의 흐름에 있어서 근거이다(그림 19). 자연현상을 정량화하기 위한 시도이며 그 시기를 놓치지 않도록 주의할 필요가 있다. 동일한 조건하에서의 재조사는 불가능하며 예측방법과의 관련에 있어서 그 판단자료가 될 수 있도록 처음부터 조사 성격을 염두에 두어야 한다.

이와 같이 요구되는 내용 및 사항 등을 충분히 검토한 후에 조사의 종류, 방법, 순서, 시기, 시간, 정밀도, 범위 등에 대해서 결정해야 한다. 정밀도에 있어서는 개략조사에서부터 정밀조사로 또 범위에 있어서는 광범위한 부분에서부터 한정된 범위까지를 목적에 적합하게 조합할 수 있다. 특히 주의를 요하는 것은 기간 및 범위(위치)이다.

• 기간 : 강수량, 하천유량, 지하수위, 용수량 등은 비

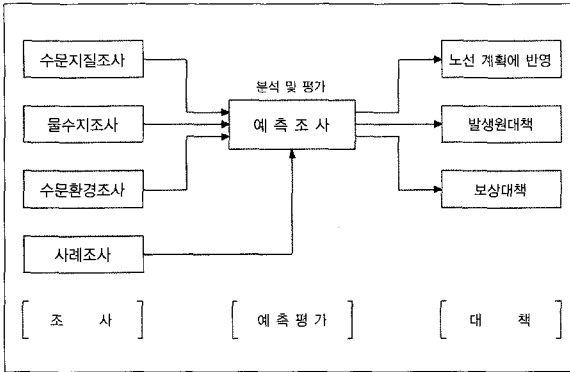


그림 19. 조사와 예측 평가·대책

정상적인 것이며 어느 정도의 패턴을 파악하는 데에는 착공 전까지 수년의 장기간 관측이 필요하다.

- 범위(위치) : 시·군과 같은 인위적인 경계로 결정되는 일이 없이 지형·지질학적 구분 및 물이용의 범위 등을 구분하여 결정할 필요가 있다.

2.1.2 조사방법

조사는 크게 4가지로 분류되지만 이들 4가지 조사 중에 어느 하나만으로 가능한 것은 아니다. 그러므로 가장 효과적인 성과가 얻어지도록 양호한 조합으로 진행하는 것이 중요하다.

각각의 조사방법의 상세한 내용에 대해서는 다른 문헌(예를 들면「터널시공에 따른 용수·갈수에 관한 조사·연구(II)」·(사)일본터널기술협회® 등)를 참조한다.

(1) 사전 조사(시공 전의 조사)

광역적인 지하수 유동계와 지표수를 포함한 물 순환계 전체를 대상으로 고려해야 하며 물순환을 구성하는 물수지 요소를 포괄하는 수문학적인 조사가 필요하다.

a) 수문지질 조사

대수층의 구조·능력을 평가하고 터널굴착에 따른 지하수 영향범위의 예측을 위한 조사이다. 최초에 지형·지

질분포 및 구조에 대해서 조사하고 이를 근거로 용수의 형태를 분류하고 그 결과에 맞는 조사방법을 채용하여 대수층의 능력을 평가해서 영향범위를 예측한다.

b) 물수지 조사

강수량·하천유량·우물수위·용천량 조사는 물수지를 산정하기 위한 기본적인 자료가 되는 동시에 지하수 문제 발생시의 원인 판정에도 필요하기 때문에 향후 보상차원에서도 가장 중요한 조사이다. 이들은 계절·년에 따라 변하기 때문에 측정은 장기간에 걸쳐서 할 필요가 있다. 중요한 물이용 시설을 대상으로 하여 착공전의 장기간 조사(관측체제의 하나)를 실시한다.

또, 강수량 조사에 관해서는 주변의 기상청 관측 데이터(가장 일반적인 것은 AMEDAS(Automated Meteorological Data Acquisition System) 데이터)를 수집·정리하여 활용하면 좋다.

이러한 사전조사는 터널 착공 후에 나타나는 변동이 공사에 기인하는 것인가의 판단이 가능하도록 강수량과의 관계에 대해서 터널 공사전의 유량 또는 수위 변동예측식으로 조합할 수 있다.

c) 수문환경조사

① 물이용 조사

터널 주변에 물이용 수량이 없는 지역에서는 지하수 지하 현상이 발생하여도 민원문제는 발생하지 않는다. 터널 주변의 물이용 현황에 있어서 예측되는 영향 범위를 참고로 지형도 판독, 지표답사, 탐문조사에 의해 물이용 형태와 개략의 이용수량 등을 조사한다.

② 수원조사

각각 물이용에 관해서는 그 수원을 조사할 필요가 있다. 조사는 탐문이 주가 되지만 병행해서 지표답사도 실시한다. 수원이 추정된 영향범위로부터 상당히 떨어져 있는 경우에는 조사 대상에서 제외시켜도 된다.

기술강좌

산악터널 공사의 지하수 문제(II)

d) 사례조사

기존문헌, 터널 주변의 공사 사례 등을 바탕으로 대상 터널과 유사한 터널의 용수·고갈현상에 대해서 실적이 나 현상을 조사하여 예측에 반영하는 것이다.

(2) 시공 중의 조사

시공 중의 조사는 터널 공사와 직접적으로 관련된 조사로 사전조사의 단계에서는 어떠한 방법을 동원하여도 예측의 수준에서 벗어나지 못하는 것에 비해 시공시에는 실제현상으로서 확실하게 파악되며 사전조사 결과로부터의 예측과 비교 검토하므로서 향후 보다 정밀한 예측이 가능하게 된다.

또 공사 중에 지하수문제가 발생한 경우에 그 원인을 평가할 수 있기 때문에 중요한 조사가 된다.

일반적으로 시공 중의 조사는 시공전에서부터 연속적으로 실시하고 있는 강수량, 수량(용수, 하천), 수위 측정과 더불어 다음 3개 항의 조사를 추가한다.

- 갱내 지질관찰과 용수 가소 및 양의 조사
- 공사의 진행과 용수량의 시간적 변화
- 공사의 진행과 주변수문환경의 변화

평상시에 터널 용수나 주변 수문환경을 공사의 진행에 따라 관찰한다면 연속조사의 수량이나 지하수위의 이상현상을 미리 발견하여 돌발용수 등에 의한 막장 붕괴사고 등을 미연에 방지하는 일이 가능하다. 갱내 뿐 만 아니라 터널 중심 부근, 특히 현재 굴착하고 있는 지표 부근을 중심으로 정기적으로 관찰하면 생각하지 못한 정보를 얻는

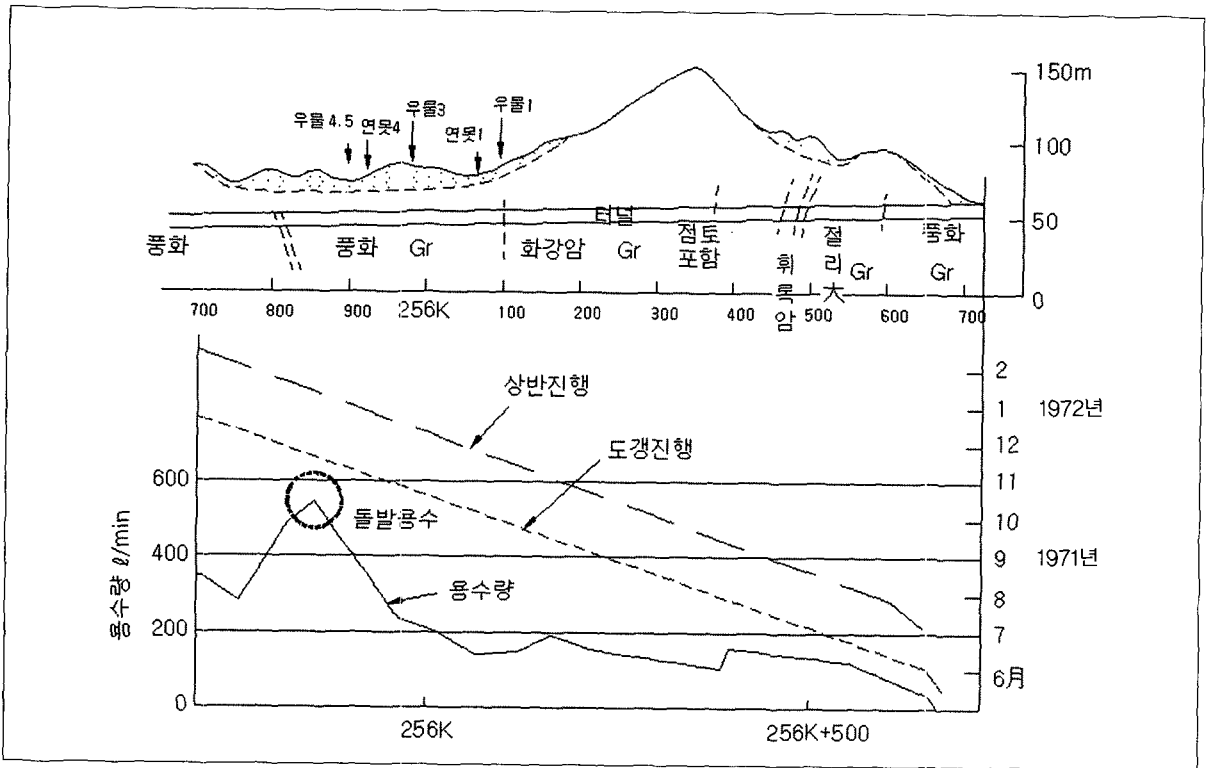


그림 20. 공사 진행에 따른 터널 용수량과 지질

경우도 있다.

획득 가능한 개별 데이터 등을 사용하여 정기적으로 막장 전방의 지질 예측을 재검토하는 등, 그 시점에 있어서 가장 확실한 지질종단·평면도로서 적절하게 수정하는 노력이 중요하다.

a) 갱내 지질관찰과 용수 개소 및 양의 조사

지표지질조사에서 예측된 지질분포·암질 등과 실제 막장 상황과의 차이를 확인하고 지반으로부터의 용수개소와 용수량을 시간경과에 따라 측정하므로써 보다 정밀한 예측이 가능하고 동시에 지하수문제가 발생할 때 그 원인 평가의 기초 자료로 사용한다.

터널 굴착 진행에 따라 수행되는 갱내 관찰결과는 암종·암질구분, 균열분포와 상태, 용수개소와 양을 1/200 정도의 지질전개도에 정리한다.

터널 막장부근의 용수량 측정은 균열로부터의 용수는 한 개소에 집중하며 호스 등을 가지고 유도하지만 집중하는 균열계로부터 다량의 집중 용수가 있는 경우에는 터널 노반부에 간단한 보(堰)를 설치하여 용수량을 측정한 후 경시변화를 기록한다. 측정은 초기에는 1일 2~3회, 용수량의 변화가 안정되면 1일~수일에 1회 정도로 하지만 강우가 있는 경우에는 그 영향을 평가하기 위해서 정밀한 측정을 하는 것이 좋다. 또한 최근에는 막장에서의 선진 보링 조사가 매우 일반적으로 행하여지고 있다. 이와 같이 막장 전방의 지질조건을 상당히 정밀하게 예측 가능하다고 하면 전방의 물빼기 효과도 기대할 수 있어 유효한 조사·시공대책 방법이 되고 있다.

이 조사에 병행해서 막장의 지온측정을 수행한다면 막장전방의 대수층 예측에 대한 효과적 예측방법의 하나가 될 가능성이 있다⁴⁾.

b) 공사의 진행과 용수량의 시간적 변화

터널공사의 진행(굴착과 복공)과 갱구용수량, 또는 막장용수량과의 관계를 그림-20과 같이 막장위치·용수량

변화도로서 정리해보았다. 돌발용수에 막장이 정지한 시기 등 대수층의 분포 및 규모 추정이 가능하고 갈수의 범위와 규모 추정에도 이용가능하다. 한편 터널의 항상용수량 등을 판단하는 경우에는 횡축을 시간 축으로 표현한 경시변화도를 작성한다. 보통 그 두 가지의 도면을 작성하여 시공관리에 이용하는 것이 좋다.

갱구용수량의 추정은 터널 용수를 펌프 배수하여 순간적으로는 큰 변동이 있는 경우가 많기 때문에 갱구에 보를 설치하여 측정용 파이프를 유도하여 1회 당 수차례 측정하여 평균값으로서 하는 것이 좋다.

측정회수는 1일 2회 정도로 하지만 강우시, 다량의 집중용수발생시 등에는 그 감쇄경향을 파악하기 위하여 상세하게 측정하는 것이 바람직하다. 또 용량은 물수지적으로는 중요한 값이기 때문에 가능한 자동적으로 연속측정이 가능하도록 고려하는 것이 좋다.

c) 공사의 진행과 주변 수문환경 변화

① 지하수위의 변화

최근 일본에서는 막장 전방의 수위저하 상황을 모니터링하기 위해 수위관측용 보링공을 설치하는 사례가 늘고 있다. 염령(Shiomine)터널의 경우 터널 주변의 지하수위 변동을 보여준 사례로(그림 14 참조) 막장이 관측점에 접근하기 1년 전에서부터 수위저하가 시작하여 통과 후 약 1년이 경과한 후에서야 안정되고 있다.

안방(Awa)터널의 경우 시공 중 갱구용수량과 막장전방에 설치한 수개의 관측정의 수위변동을 보여준 사례로(그림 21) 막장이 저속도대를 통과함에 따라 큰 출수가 발생하게 되는 시점보다 1년 전부터 저속도대에서는 관측 수위의 저하가 일어나기 시작했다. 이렇게 터널 굴착이 주변 물환경에 미치는 영향에 대해서 막장 전방에 관측정을 설치하여 지하수위 센서를 이용하면 사전에 정보를 얻을 수 있다.

② 토양수분의 변화

토양수는 강우의 양에 지배를 받고 있다는 사실은 일강

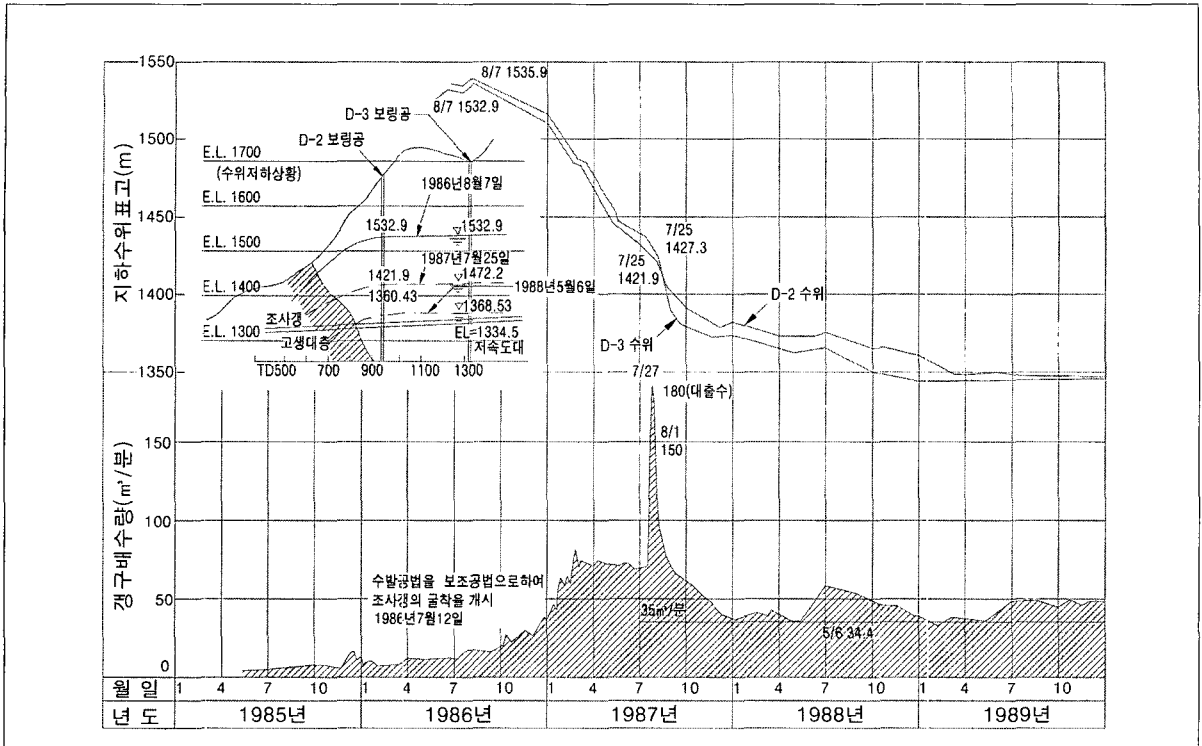


그림 21. 안방터널에 있어서 용수량과 지하수위 저하⁷⁾

수량과 pF 변동의 관계(그림 17 참조)를 보면 알 수 있다. 이것은 일본과 같은 기후에서는 일반적으로 식생이 토양수에 의존하고 있기 때문에 터널 굴착에 의한 지하수위가 직접적으로 식생에 영향을 줄 가능성이 거의 없다는 것이다.

터널 굴착 전후에 pF 변동에 변화가 없다고 하는 관측 데이터에 의해서 터널 굴착에 의한 영향은 없다는 사실을 알 수 있다. 그러므로 토양수분의 변화에 관해서도 필요에 따라 측정을 하는 것이 바람직하다.

2.1.3 예측방법

물의 고갈문제 예측은 터널 용수를 지하수, 지표수, 강수 등과 함께 물순환계 속에 포함되는 사항으로 다음 두 단계로 구분할 수 있다.

① 지하수 영향범위와 감수량의 예측

② 주변 용수에 미치는 영향예측

도시 터널의 경우는 특별한 용수와 별개로 수도가 보급되어 있는 경우가 많기 때문에 ②의 예측은 지하수 흐름 차단 가능성과 그 영향이라는 관점에서의 수행되는 경우가 많다.

(1) 지하수 영향범위와 감수량의 예측

영향의 정도를 예측하는 방법에는 기존 사례에 의해 추정하는 방법으로부터 시뮬레이션 방법까지 다양한 방법이 있다. 필요에 따라 예측내용이나 정밀도 현지의 수문지질조건, 물이용 현황 등을 충분히 고려하여 적용하는 예측방법을 선택할 필요가 있다.

또 시뮬레이션 방법 등 다수의 조건을 입력하여 종합적

으로 예측을 할 경우에는 사전에 보다 단순한 조건으로부터 구하는 방법(예를 들면 다카하시의 수문학적 방법 등)으로 예측하여 거시적으로 크게 벗어남 없게 하는 것이 바람직하다.

a) 통계적·경험적 예측방법

이 방법은 유사 터널의 과거 공사기록을 바탕으로 지하수에 미치는 영향 정도를 통계적으로 추정하는 것이다. 전체적으로 조건이 동일한 터널은 없겠지만, 노선 선정 단계, 설계·시공계획 단계의 예측방법으로서는 크게 벗어나지 않는 유효한 참고자료가 된다.

터널 토피, 지형·지질조건이 비교적 유사한 기존사례로부터 용수, 지하수 영향범위의 정도를 개략 추정한다. 적절한 유사 사례가 없는 경우에는 기존의 철도 터널의 비용수량과 지질의 관계(그림 12 참조)나 지질과 터널 용수량, 영향범위와의 관계를 바탕으로 터널 기술협회의 자료³⁾가 참고가 된다. 한 예로 영향범위에 관해서는 그림 22에 제시한 「겉보기 집수범위」의 경향성을 들 수 있다. 이것은 토피가 크게 되면 감수의 범위(잠 집수범위)는 넓어지지만 감수량은 분산되어 얇아지기 때문에 지하수 저하의 영향범위가 겉보기에 좁아지게 보인다는 것이다.

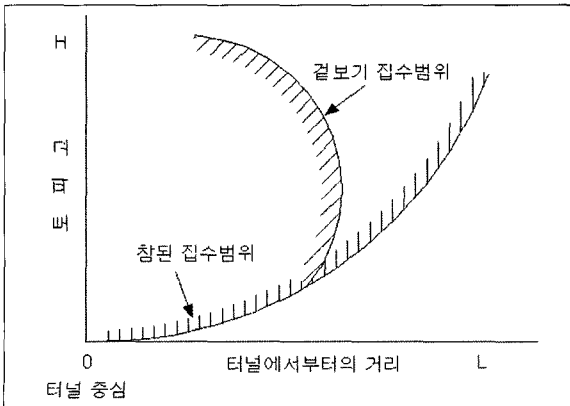


그림 22. 터널 수평거리-토비고와 집수범위의 관계(모식도)¹⁾

b) 수리공식을 이용한 예측방법(표 3)

터널 용수는 시공 중 집중용수와 준공 후의 항상용수량으로 분류되지만 지하수 저하는 주로 항상용수량과의 관계가 크다. 이렇게 개략의 항상용수량을 추정하기 위해서 수리공식을 사용할 수 있다. 도시 터널에서는 토립자의 입경과 양수정호의 영향범위와의 관계^{표 9)} 등을 참고로 영향범위를 간단하게 추정하고 있다.

이 방법은 해당 터널 주변에 대한 수문조사 등의 실측 결과를 바탕으로 용수량, 집수범위 등을 예측하는 것이기 때문에 모두 초기 조사단계에서도 적용가능한 방법이다. 다만 수리공식에는 많은 종류가 있고 각각에 대한 적용조건이 있기 때문에 대상지반이나 구조물이 어떤 공식의 조건에 가까운가를 고려하여 타당한 식을 선정할 필요가 있다. 또한 용수량은 수위, 투수계수, 영향범위 등에 크게 관계되기 때문에 기본값을 정확하게 구할 필요가 있다.

c) 다카하시의 수문학적 방법(표 3)

최근에는 컴퓨터 계산능력이 비약적으로 향상됨에 따라 후술한 시뮬레이션 방법을 이용하여 복잡한 지반 내의 지하수 유동상황을 해석하는 것이 용이해지고 있다. 그러나 산악터널의 경우 지질구조의 복잡성과 지하수의 실태를 추정하는 것이 곤란하기 때문에 실효성 있는 결과를 도출하기 위해서는 특히 많은 준비작업을 필요로 하며 간단하게 이용할 수 없는 것이 현실이다.

이 때문에 기본적인 가정하에서 항상용수 단계의 영향범위나 용수량을 대략 추정하는 것이 가능한 방법으로서 다카하시의 수문학적 방법이 널리 이용되고 있다. 다카하시의 수문학적 방법은 「터널굴착시의 항상용수량은 주변 계곡의 기저유출량에 비례한다」라는 사고방식에 바탕을 둔 것으로 1961년에 다카하시에 의해 제안되었다²⁾.

이 방법은 지형학적으로 구한 유출범위(A)와 기저유출량을 유역면적으로 나눈 비유량(Sp)으로 항상용수량(Q)를 추정하기 때문에 북륙(Hokuriku)터널에서 제안되어 그 후 육갑(Rokkoo)터널을 시작으로 다수의 터널에 적용되고 있다.

표 3. 터널 용수량과 집수범위의 산정방법

방법	적용조건	산정식	참고도
수리공식에 의한 상용수량	자유수면을 가진 지하수로 참고도에 제시한 바와 같은 경우:	$Q = \frac{2a \cdot k \cdot H \cdot l}{l_n R - l_n r}$ $a = \pi/2 + H/R$ r: 터널 반경 R: 영향범위 l: 터널의 길이 H: 수두	
	자유수면을 유지하는 지하수로 불투수층까지 매우 깊지 않지만 암거 바닥이 불투수층에 도달하지 않는 경우	$Q = \frac{k \cdot l}{R} \cdot \frac{H^2 - h^2}{\left(\frac{h}{t + 0.5r_0}\right)^{0.5} \left(\frac{h}{2h - t}\right)^{0.25}}$ r: 터널의 반경 h: 터널 내 지하수위에서 불투수층까지의 깊이 t: 터널내의 수심 l: 터널의 길이	
	자유수면을 가진 지하수로 수평의 불투수층 위에 집중암거가 있고 지하수는 측벽의 양측까지 유입하며 터널 길이를 l로 한 경우	$Q = \frac{k \cdot l (H^2 - h^2)}{R - r}$ Q: 항상용수량 k: 투수계수 H: 원지하수심 l: 터널의 길이 h: 터널내 수심 R: 영향범위 r: 터널 반경	
	자유수면을 가진 지하수로 불투수층이 깊고 암거 바닥은 불투수층으로 도달하지 않는 경우 바닥으로부터 유입이 없는 경우 또 측벽에서도 유입이 있는 경우 상기식과의 차이가 생긴	$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot l (H - h)}{l_n 2R/r}$ k: 투수계수 r: 터널반경 h: 터널내 수심 R: 영향반경 H: 수두 l: 터널 길이	
영향범위	Sichardt의 우물내의 최대수위 저하량(S)과 암반의 투수계수(k), 영향권(R)과의 경험식	$R = 3000S \sqrt{k} (m)$ S: 기존지하수면에서 터널 저면까지의 높이(m) k: 지반의 투수계수(m/s)	
	터널 통과부근의 하천 평균 유역폭을 가지고 터널의 영향범위(R)를 구함. 못과 능선과의 비고가 터널의 평균적인 토피와 일치하는 위치를 몇 곳 선택	$2R = A/L = A/(L1 + L2 + L3)$ A: 유역면적 L: 주 계곡의 유로 길이	

기술강좌

산악터널 공사의 지하수 문제(II)

방법	적용조건	산정식	참고도
다카하시의 방법	영향범위(R) : 관계하천의 유역의 형상 특성으로부터 평균투수성(k _t)를 구하고, H-R 곡선(√6ktH)를 터널 FL에 맞춰 지표면과의 교차점을 터널 영향범위로 한다. 이 방법은 지질이 등방등질하다는 가정이 있기 때문에 지질구조 등을 고려한 보정이 필요	$k_t = \frac{R^2}{6H_m}$ $2R = A/L$ A: 유역면적 L: 주계곡의 유로길이 $H_m = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (H_{Li} + H_{Ri})$ H _{Li} , H _{Ri} : 계곡에 직각인 i단면에서의 좌우능선과 하상과의 비교 $R = \sqrt{6ktH}$	<p>영향범위</p> <p>H-R곡선과 터널의 종합 예</p>
	항상용수량(Q) : 터널 용수량은 하천의 갈수비유량에 해당한다고 하고 구함. 하천의 갈수비유량이 지하수 유출의 기저유량을 보이지 않는 경우(표토층이 두껍고 화산암 지대, 선상지 상부 등)는 적용할 수 없음	$Q = \sum q_i \cdot l_i \cdot (R_{Ri} + R_{Li}) \cdot \sum q_i \cdot A$ q : 단위구간 연장의 갈수비유량 l : 단위구간의 연장(지형지질구조로부터 판단) R _R +R _L : 단위구간에 터널 좌우측 영향범위	

d) 탱크모델 해석법

지하수위나 용수량을 주로하여 강수에 따른 시간적인 변동을 예측하는 방법으로서 유출해석 등에 종종 사용되는 탱크모델을 응용한 방법이 있다.

측면과 저면에 다수의 공을 설치한 직렬식의 탱크모델을 이용하여 상당히 복잡한 변동을 나타내며 갭구 용수량이나 지하수위 변동을 매우 정확하게 추정하는 것이 가능하다.

e) 大島(Oshima)의 물수지 시뮬레이션 기법

터널 주변의 수문지질을 모델링하고 터널 시공계획을 입력하여 터널 용수량을 예측함과 동시에 지하수·지표수에 미치는 영향을 시간적인 변화에 따라서 수행하는 방법이다.

암반을 3차원 블록화하므로써 ①터널용수량의 산출 ②주변지하수위의 저하 ③지표유출량의 변화(감소)라는 3단계로 터널 굴착에 따른 물수지의 변화를 시간에 따라서

시뮬레이션한다.

지하수 변동이 평면 2차원 흐름으로서 취급하는 경우가 많고 국소적인 시공에 미치는 영향을 취급하는 데에는 한계가 있지만 광역적인 물문제를 취급하는 데에는 적용

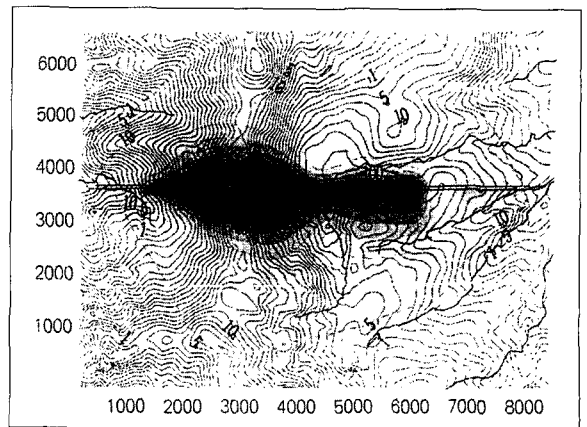


그림 23. 단나터널에의 적용사례(지하수위 저하량 분포도)⁵⁾

사례가 많은 실용적인 방법이다. 이 방법을 단나터널에 적용한 사례를 그림 23에 제시한다.

시뮬레이션 예측결과는 지반 모델의 투수계수 등 수리 파라미터에 크게 좌우되지만 현장에서 실측된 투수계수 등은 수 order 정도의 범위에서 분포되는 경우가 많아서 복수의 수리 파라미터를 적용한 모델 해석을 실시하여 터널 용수량, 지하수 영향을 예측하여 평가하는 것이 바람직하다.

f) 침투류 시뮬레이션 기법

포화·불포화 침투류 해석에 의해 지하수 포텐셜을 산출하여 지하수두 분포, 터널 용수량을 구하는 방법이다. 터널을 횡단하는 단면상에서 해석하는 2차원 모델이 많이 사용된다. 이 방법의 경우, 지하수 포텐셜 분포가 정확하게 구해지는 이점이 있으며 시공에 대한 영향을 검토하기 위해 이용되는 경우가 많다.

한편 지하수와 지표수와의 상호작용의 모델링이 어렵

기 때문에 물순환계 전체를 포괄적으로 취급하는 것이 곤란하고, 2차원 모델의 경우에는 터널 종단방향의 유동이 고려되지 않는 등 주변 물이용·물순환에 대한 광역적인 영향을 평가하는 데에는 불리한 점도 있다.

(2) 이용수에 미치는 영향 예측

a) 예측방법의 개요

굴착에 따른 터널 용수는 지반의 지하수 유출 뿐만 아니라 터널 주변의 지표수 유출량에도 영향을 미친다. 즉 지표수를 예로 들면 연못물 또는 하천수는 일반적으로 농업수 등으로 이용되고 있고 이들의 감소에 따라 영향이 발생한다.

영향의 정도는 수량의 감소라는 한가지만을 가지고 결정하는 것이 아니며 연못물이나 하천수로부터 논에서의 취수량, 감소한 수심(논에서 하루에 필요한 수량을 높으로 표시한 것) 등에 따라 각각 다르게 된다.

그러므로 이용수에 미치는 영향량=감수량은 아니며 영

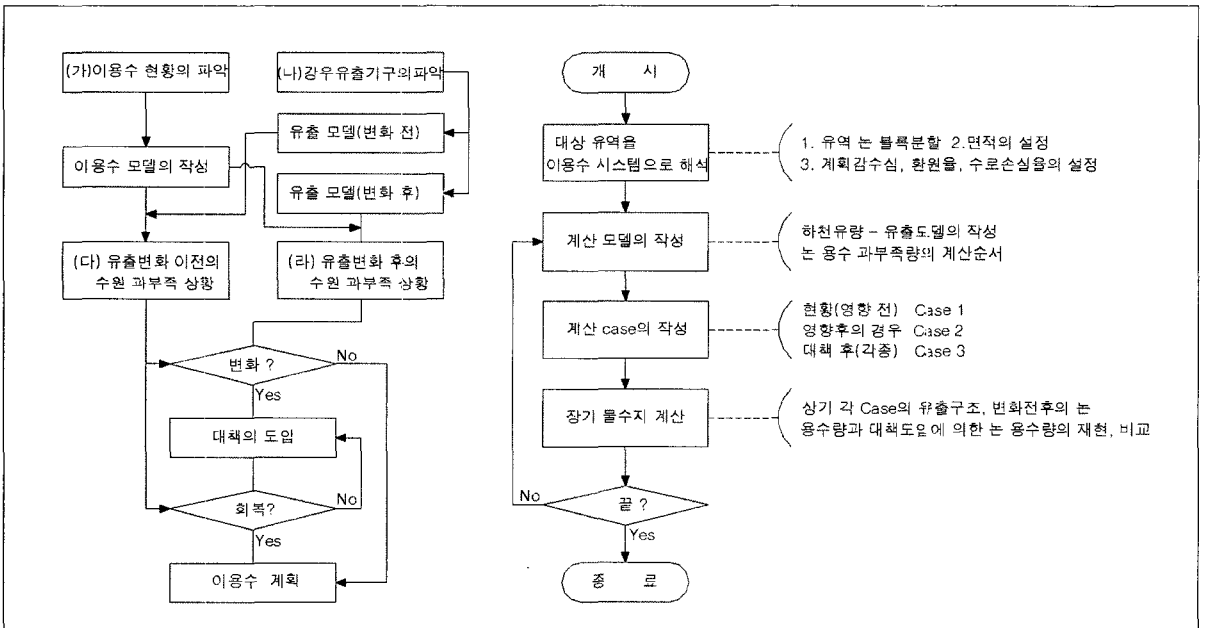


그림 24. 이용수 계산순서¹⁾

향수량=이용수량-잔수량이다. 이들 영향예측방법은 그림 24의 좌측 열에 제시한 바와 같은 흐름으로 판단한다. 그림에 있어서 기본사항은 “(가)이용수 현황의 파악→이용수 모델의 작성, (나)강우유출 기구의 파악→유출 모델의 작성”이며, 이 흐름에 의해 터널 용출수에 의한 수원의 과부족 현황을 평가할 수 있다.

또 모델의 작성은 각 수계의 이용수 현황의 정밀한 조사결과와 이용수 영향범위 내의 취수구, 배수구의 유량 등의 장기계획 데이터를 바탕으로 반드시 해야 한다.

b) 이용수 현황의 파악과 이용수 모델의 작성

그림 24 좌측에서 논에 대한 용수의 과부족의 상황 (다), (라)의 산정에는 그림 24 우측에서 제시한 순서로 이용수 계산을 하지만 이것에 필요한 각종 데이터를 준비해야 한다. 또 이용수 모델이라는 것은 유역→하천→용수지역이라는 실제의 물 흐름을 모델화하여 그 시스템에 의해 대상지역을 대표하는 것이다. 이용수 시스템을 구성하는 것으로서는 유역 논 블록의 각각의 면적, 계획 감수심, 환원율, 수로손실율 등이다. 이들의 제원이나 하천유량 데이터 등을 이용수 모델에 입력하여 물수지를 계산하면 이용수 현황을 재현할 수 있다.

- 환원율 : 논에서 취수된 물은 침투되어 하위의 논이나 배수구·하천으로 환원되기 때문에 소 블록 단위로 취수된 수량 속에 다음 블록 취수지점까지 재이용 가능한 수량 부분을 반복 이용을 또는 환원율이라고 한다. 그러므로 감수심 × 논면적 = 논이용량 이라고 할 수는 없다.
- 수로손실율 : 용수로를 따라 용수가 흐르고 논에 도달할 때까지의 사이에 침투손실이 되기 때문에 일반적으로는 계획감수심의 10%가 포함되어 있다. 더욱이 도·배수를 가능하게 하는 양은 계획 감수심의 18%가 포함되어 있다.

c) 유출기구의 파악과 유출 모델의 작성

이용수량의 평가는 강우가 없는 평상시의 유량이며 이를 「저수유출」이라 부른다.

저수유출량의 대부분은 강수가 지하로 침투하여 지하수가 되며 이것이 유출되고 있는 것이라 여겨지고 있다 (기저유량이라고도 부르지만 이것은 거의 지하수의 유출이다). 저수유출의 계산은 강우시 직접유출의 계산과 증발산, 지하수의 침출(환원), 용설유출 등의 요소가 조합되어야만 한다.

d) 이용수에 미치는 영향 예측계산

이용수 모델에 있어서 유량은 탱크모델¹⁴⁾ 등에 의해 구할 수 있기 때문에 현황에 있어서 영향전의 이용수량의 과부족을 계산할 수 있다. 이용수 블록의 모델을 이용하여 수량의 계산을 수행하는 순서는 다음과 같다(그림 25)

- ① 유역에 있어서 하천유량을 일강우량 등으로부터 예측한다(탱크모델).
- ② 각 논 블록에 있어서 일소비수량(-)은 논면적, 계획 감수심, 반복이용율, 수로손실율로부터 계산하고 당일의 유효우량(+)을 합계한다.
- ③ 그 합산이 정(+)인 용수량은 과다이고, 부(-)이면 부족을 나타낸다.
- ④ 만약 합계치가 -(부족)이면 당일의 하천유량(+)을 합계한다.
- ⑤ 합계치가 부족하면, 저수지로부터 부족분을 차감하여, 합계를 0으로 한다.
- ⑥ ⑤과정에서 부족하면 부족량을 저수지의 일부족량으로서 계산한다.
- ⑦ 이상의 1일분의 계산을 반복하고 15일, 1개월 및 연간의 단위로 누계를 출력한다.

다음에 착공 후의 지하수위 저하에 따른 유출수량을 상기 계산에 추가하여 같은 순서를 반복하면 이용수에 미치

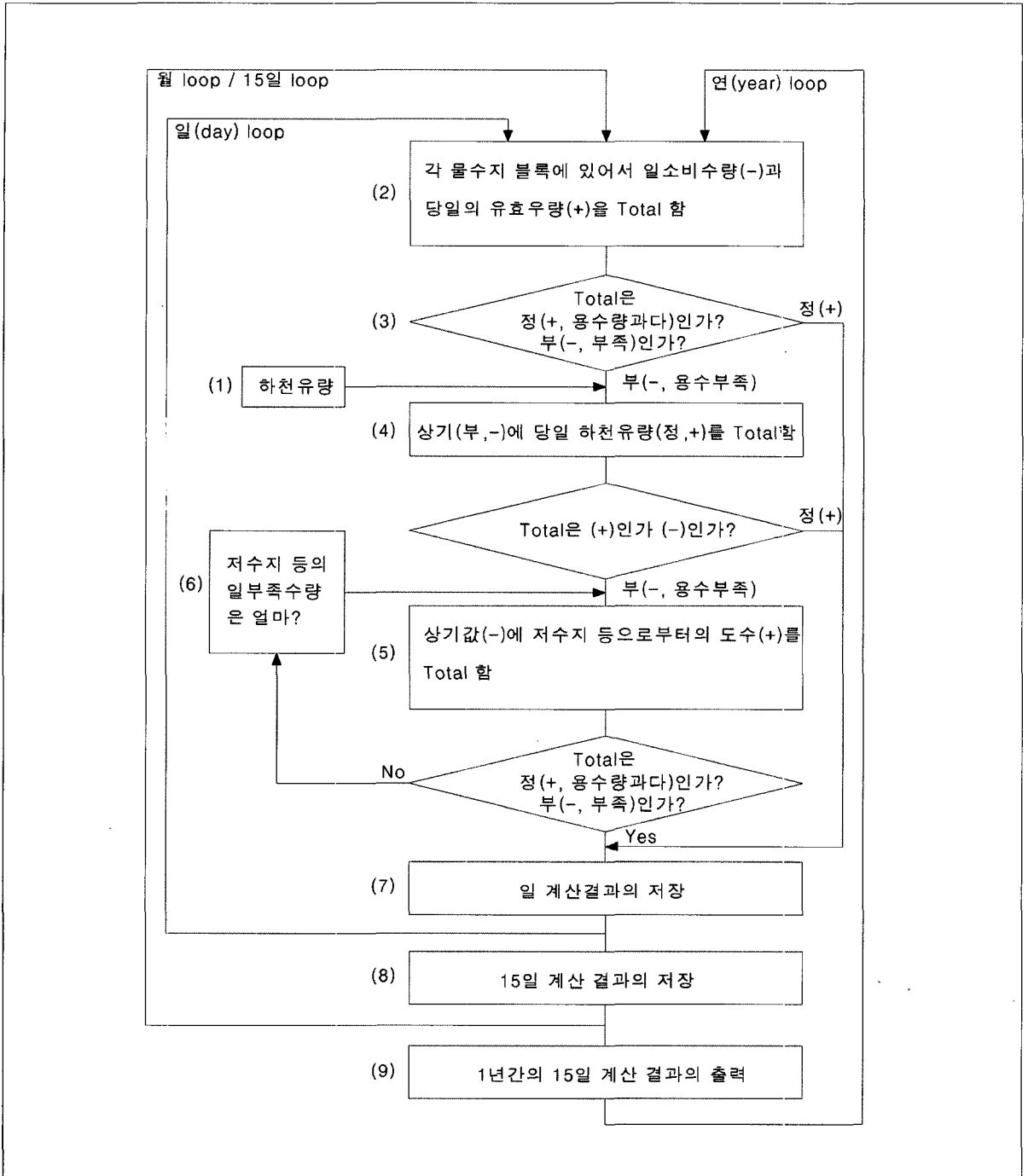


그림 25. 이용수량의 과부족을 구하는 흐름도⁶⁾

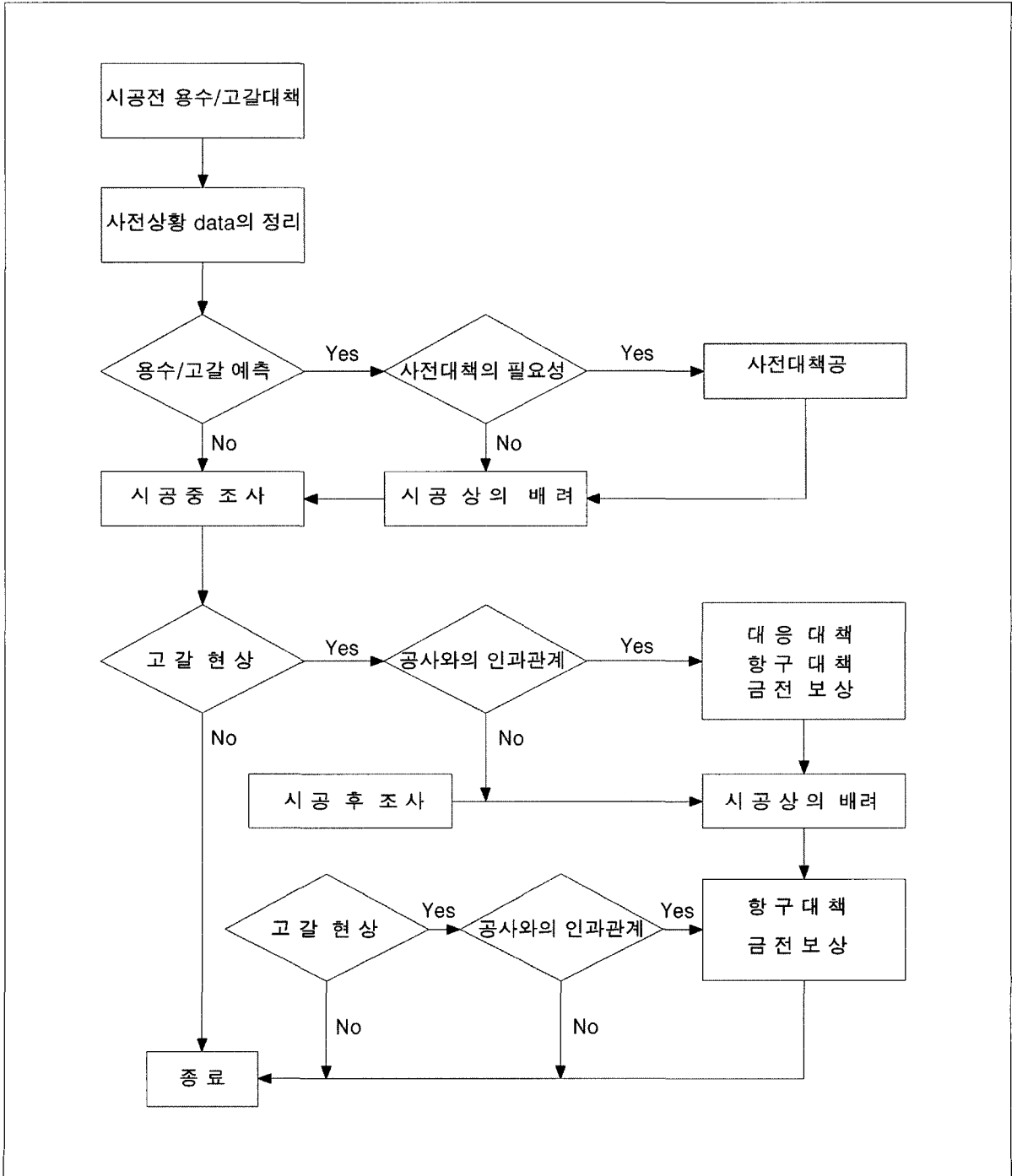


그림 26. 지하수 고갈 문제의 대책과 지역주민 보상의 흐름도(flow chart)

기술강좌

산악터널 공사의 지하수 문제(II)

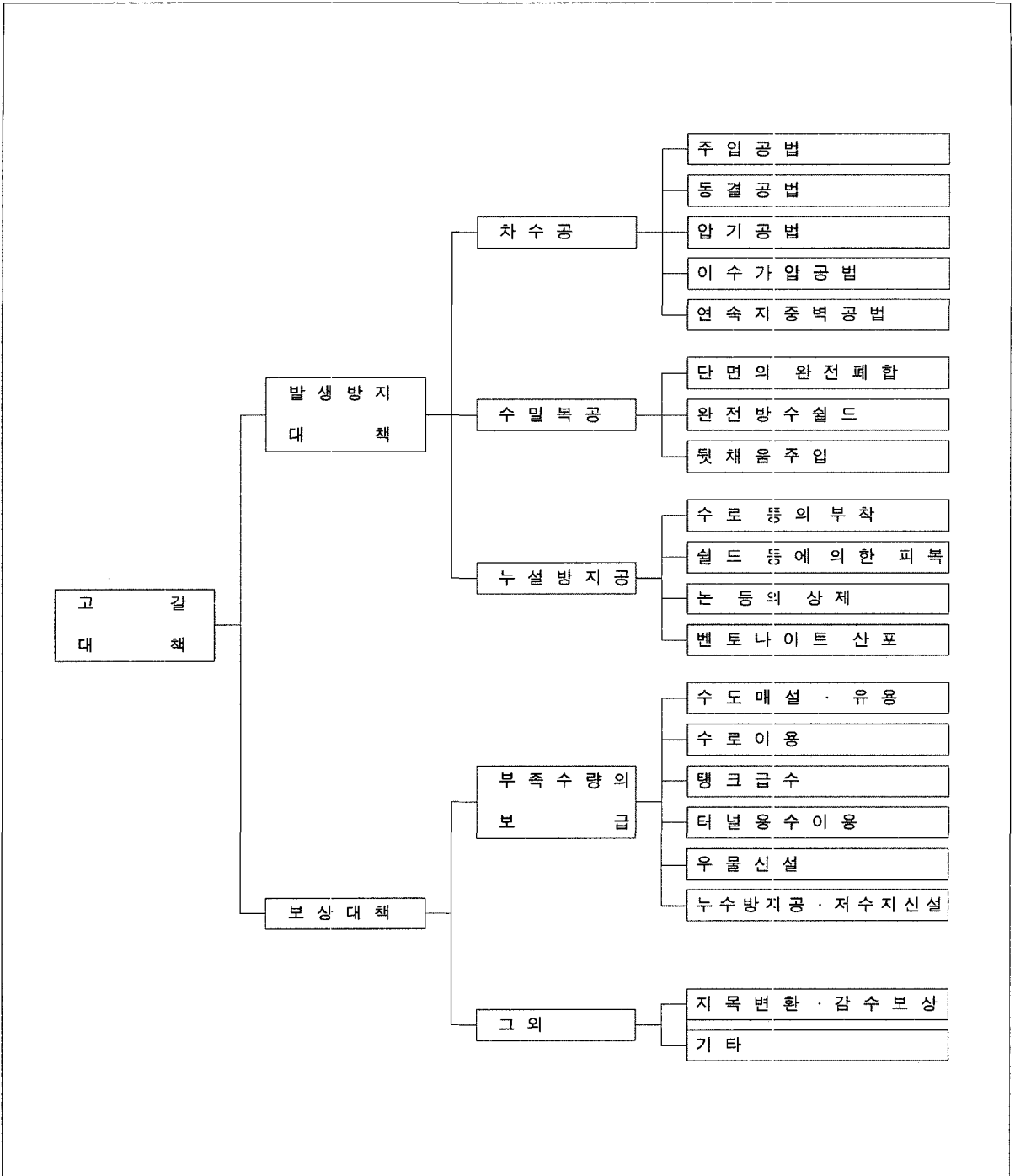


그림 27. 대책의 종류¹¹⁾

는 영향량이 예측가능하다.

이상의 생각을 더욱 발전시켜 논지역에 터널을 시공하는 경우의 물수지 과부족을 검토하는 방법을 大島(Oshima)·榎本(Eromoto) 등은 제안하고 있다.

2.2 지하수 문제의 방지·경감대책

2.2.1 방지·경감대책의 기본적인 사고방식

터널 굴착에 따른 지하수 대책의 흐름은 그림 26에 제시한 바와 같다. 이 흐름에서도 알 수 있는 바와 같이 노선선정에서부터 준공 후까지 일관성 있는 조사를 통해 지하수 영향 규모나 문제의 성격을 최대한 예측하고 필요한 처리를 사전에 하기 위한 것이다.

또 충분한 조사가 실시된다면 실제로 문제가 발생한 후에도 사후대책이 신속하게 이루어져 조기해결에 큰 해결방안이 된다. 특히 지하수 문제는 한번 발생하면 원래의 상태로 되돌리기 어렵고 공사 전의 상태를 파악하기 위해 조사를 충분히 해야만 한다.

지하수 문제의 방지·경감대책에는 시공단계의 경우 그림 27에서 제시한 바와 같이 터널 굴착에 따른 용수를 억제하는 발생방지대책과 보상(사후처리) 대책을 고려하는 것이 일반적이다.

그러나 노선을 결정하는 단계에서 사전에 고려된다면 문제를 경감시킬 수 있기 때문에 노선계획에 종사하는 기술자는 소홀이 대해서는 안 된다.

한편, 단나터널의 용수는 이후에서도 양 갱구에서 매분 100m³ 정도이지만, 아타미 방향에 흐르는 물은 아타미 지역의 귀중한 수자원으로서 사용되고 있다. 이 터널 용수가 없으면 온천의 고장 아타미의 발전은 없었을 정도로 귀중한 수자원이란 점은 앞에서 서술하였다.

2.2.2 노선 선정 단계에서의 고려

와타나베는 단나터널에서의 난공사의 이유가 충분한 지질조사 없이(without geological investigation and

boring) 노선을 결정한 무모함에 있으며 당시의 미국과 유럽 각국의 기술자로부터 다양한 입장에서 비판받은 점을 그의 저서에 소개하고 있다.

노선 선정 단계에서 필요한 수문지질조사를 실시하고 그 결과를 바탕으로 노선 선정을 하여 지하수 문제를 미연에 방지하도록 하는 것이 가장 최선의 선택이라고 일컬어진다.

大島(Oshima)의 물수지 시물레이션 방법은 이러한 노선 선정의 단계에서의 지하수 문제를 경감하기 위해서 수문지질조사법의 체계화를 도모하는 동시에 그 결과에 따른 예측평가를 수행하는 것을 개발하였다.

각지에서 착공되고 있는 정비신간선을 시작으로 다수의 터널 노선 선정에 있어서 이 방법이 사용되고 있다. 축자(Tsukuba)터널(구주신간선), 전원판(Tabarasaka)터널(구주신간선), 소조(Kotori)터널(고산청경도로), 신농천(Shinanokawa)수로터널과 기존 터널과의 교차 등 많은 터널에서 성과를 가지고 있다.

2.2.3 시공단계에서의 고려(그림 27)

(1) 발생방지·경감대책

산악터널에 있어서 지하수의 처리방법에 따라 표 4와 같이 정리할 수 있다. 산악터널에서는 안전성, 경제성 등을 바탕으로 배수구조가 전제로 되고 있어 필연적으로 지하수위 저하는 피할 수 없다.

최근에는 주입공법에 의해 최대한 용수를 억제하는 사고방식으로 처리하는 경우도 증가하고 있다. 이 경우, 주입에 의한 지수효과는 일반적으로 10⁻⁵cm/s 정도가 한계라고 하지만 주입재를 통과하는 갱내 누수에 발생하는 수질문제 등 단점도 고려할 필요가 있다.

앞으로는 갱내에 유출되는 용수를 지하수개발로 간주하여 활용하는 방법과 적극적인 주입공법 등으로 터널 용수량을 억제하는 방법을 비교 검토하여 방침을 결정할 필요가 있다.

수밀복공은 준공후의 항상용수량을 주입 등에 의한 지

표 4. 지하수 처리에 따른 터널의 구조 예

구조종별	배수구조	난투수층구조	차수구조
개요도			
구조의 특징	터널 하부의 배수공에 의해 배수하기 때문에 복공에는 수압이 거의 작용하지 않는다.	터널 하부의 배수공에 의해 소량의 배수를 하기 때문에 복공에는 수압이 거의 작용하지 않는다.	터널 내에는 일질 배수하지 않기 때문에 복공에 정수압이 작용한다.
지하수위와의 관계	깊으면 지하수 저하 영역이 넓게 된다. 지하수위의 저하량은 크다.	깊을수록 난투수층의 두께가 커진다. 지하수위의 저하량은 작다.	깊을수록 터널 구조물은 대규모가 된다. 지하수위의 변화는 없다.
시공사례	일반적인 산악터널	침하(Seikan)터널, 복습지야(Kitanarashiro)터널, 굴지내(Horinouchi)터널의 일부 구간 등	일반적인 쉴드터널

(사) 일본터널기술협회「대단면터널의 설계·시공법에 관한 조사연구(제2)」291p. 에 의함¹⁹⁾

반의 개량 또는 터널 본체공 및 배수 관계의 부대공으로 터널의 지하수 유입을 경감시키고자 하는 복공이다.

쉴드공법의 경우, 통상 수압을 설계에 고려하고 있기 때문에 Tail Void에 의한 침하방지의 목적으로 주입, 수압에 지지하기 위한 2차복공, 방수공 등을 채용하는 것으로 최대한 수밀복공으로 계획하고 있다. 한편, NATM에 의한 산악터널에서는 지반과 밀착하는 슛크리트의 시공 방수쉬트 등이 채용되고 있지만 이것은 갱벽에 누수를 허용하지 않고 배수구에 지하수를 유도하는 구조이기 때문에 수밀복공이라고는 하기 어렵다.

산악터널에서 수밀복공을 하기 위해서는 고수압을 설계에 고려해야 하며 일반적으로 결정된 대책은 없다. 만일 사용한다하더라도 배수공 등에 의한 지하수의 배수량과 복공에 작용하는 수압의 관계 또는 복공의 배면을 터널에 따라 지하수가 유동할 가능성 등에 있어서 미해결된 점이 많기 때문에 별도 전문가에 의한 기술적인 검토를 수행함과 동시에 대책과의 경제성 검토를 할 필요가 있다.

누설 방지공으로서의 수로, 저수지 등에 쉬트 등에 의

한 피복, 지반의 다짐이나 벤토나이트 살포 등이 있다.

지하수 흐름의 차단이라는 특수한 문제에 대해서는 수밀복공으로 함과 더불어 터널의 상부까지는 하부에 인공적인 투수층을 시공하는 것으로 대처할지만 상류 쪽의 지하수를 양수하므로써 하류측의 지반에 주수(Recharge) 하는 대책으로 처리한다면 좋다.

(2) 보상대책

터널 시공에 원인이 있다면 지하수 저하현상에 대해서 부족수량을 공급하는 것을 원칙으로 한다. 보상의 시기에 따라 사전대책, 사후대책(응급대책과 영구대책)으로 나뉜다. 또 보급이 불가능한 경우 등에서는 작물에 대한 피해보상 등을 하여 금전적으로 보상하는 경우도 있다.

보상 시에 주의를 요하는 것은 갱내 용수량의 배분비는 약속하여도 수량의 약속을 결정하지 않는 것이다. 그 이유는 공사 중의 용수는 준공 직전의 무렵을 Peak로 점차 감소하며 터널 개통 후 항상적인 용수로 떨어진다고 하는 경향을 가지고 있기 때문이다.

표 5. 응급대책·영구대책

피해대상구분 대책방안	응급대책									영구대책										
	음료수			농업용수				온천		그외	음료수			농업용수				온천		그외
	상수도	간이수도	개인	논	밭	과수	양식어	광천	상수도		간이수도	개인	논	밭	과수	양식어	광천			
수도 부설	○	○	○	○	○					○	○	○	○			○		○		
수도 유용	○	○	○							○	○	○			○					
수로(Pump up의 경우)			○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
금전 보상		○	○	○	○	○	○	○		○		○	○	○						
용도 변환													○							
탱크차 급수	○	○	○	○		○	○		○											
터널 용수를 이용(배관을 포함)			○	○			○			○	○	○	○				○			
우물 신설(보링 공을 포함)		○	○	○			○				○	○	○	○				○		
누설 방지공													○							
저수지 신설		○	○				○	○		○	○	○			○	○				
보일러 설비								○									○			

사전대책으로 조사·예측에 근거하여 대체수원을 확보하는 것이 있지만 이것은 언제까지나 예측에 근거한 대책이며 시공에 있어서는 신중을 요하는 것이다. 응급대책은 지하수문제의 발생과 동시에 행하는 대책이며 항구대책은 지하수문제가 터널 완성 후에도 장기적으로 확인해 볼 필요가 있는 경우에 실시된다.

보상대책 공사로서는 산악터널에서의 앙케이트 조사 결과에서는 표 5와 같은 것이 실시되고 있다. 또 응급대책과 항구대책에 있어서는 물의 용도별로 구분하면 다음과 같다.

a) 음용수의 경우

음용수는 그 긴급성 때문에 우선 응급대책으로 즉시 급수를 실시하며 그 후에 항구대책을 실시하는 예가 많다. 특히 상수도의 경우 수원의 고갈은 다수의 주민 생활을 위협하기 때문에 대부분의 경우가 응급대책을 수행하고 있다.

b) 농·어업용수의 경우

논의 경우 농사에 의한 수입이 주민의 경제기반이 되기

때문에 이용수 고갈에 대해 응급대책을 수행해야 하지만 이 설비가 완성되기까지는 일시적인 휴경 및 이전보상을 하는 경우도 있다. 또 응급·영구설비 설치를 통한 급수가 곤란한 경우에는 감소한 수량에 대한 보상, 이전보상 등을 강구해야 한다. 그 외의 용수의 경우는 어느 정도 피해의 실태가 명확히 되는 시점에서 항구적인 대책을 실시하는 예가 많다.

c) 그 외의 경우

직접 일상생활에 관련되지 않는 용도로 이용되고 있는 물에 대해서는 항구대책만으로 해결하고 있는 예가 많다. 또 이들 보상대책을 구체적으로 수행함에 있어서는 지자체, 단체, 개인과의 협의가 필요하다.

(3) 터널 용출수의 수자원 이용

터널굴착은 물이용에 악영향을 미치는 경우도 있지만 한편 터널 용출수를 음료용, 관개용, 양어용 등에 새롭게 개발된 안정적인 수원으로서는 이용하는 경우도 많다.

최근 이상기상이 빈번해지며 강수량의 변동이 크게 되

는 경향이 있어 가뭄이 증가하고 있다. 터널 굴착에 따른 지하수 감소 규모, 영향을 받는 수원의 현황 등을 파악하는 일도 중요하지만 앞으로 안정적인 지하수자원의 개발이라는 관점에도 바라볼 필요가 있다고 여겨진다.

참고문헌

- 1) 토목학회: 터널표준시방서 「산악공법편」· 동해설, 1996
 - 2) 大島洋志 (감수(監修)): 알기쉬운 토목지질학 (제 3판), 토목공학사, 2002.12.
 - 3) 일본터널기술협회: 터널용수조사법에 관한 조사연구 (II) 보고서, 1980
 - 4) 赤松幸生 외: 열영상을 사용한 터널 막장전방의 지하수 예측, 터널과 지하, Vol.20, No.10, 1999.10.
 - 5) 大島洋志, 西森紳一: 터널공사를 대상으로 한 수문조사법의 연구, 철도기술연구보, No.1108, 1979
 - 6) 大島洋志: 터널굴착에 의한 용수와 이로 인한 물수지 변화에 관한 수문지질학적 연구, 철도기술연구보고, No.1228, 1983.3.
 - 7) 松下敏郎: 고열대와 고수압 저속대대를 극복한 조사갱 관통, 일반국토 158호선 安房터널, 터널과 지하, Vol.23, No.3, 1992.3.
 - 8) 大島洋志: 지반공학자를 위한 지형·지질정보의 활용법 입문 12지형 지질정보의 활용례 (제 6호) -- 지하굴착공사와 지하수환경문제, 휴과 기초, Vol.44, No.7, 1996.
 - 9) 河野伊一郎: 지하수공학, 카시마 출판사, 1989.
 - 10) 大島洋志·高木盛男·榎本秀明·辻徹: 철도터널의 용수량 실태조사, 터널과 지하, Vol.18, No.1, 1987.1.
 - 11) 터널공사와 환경보전 (제 5장: 갈수), 일본터널기술협회, 1985.7.
 - 12) 高橋彦治: 터널용수에 관한 응용지질학적 고찰- 용수량 추정 방법론에 관한 검토-, 철도기술연구보고, No.279, 1962.
 - 13) 宮崎政三·高橋彦治: 토목지질학, 교리츠출판, 1970.
 - 14) 大島·辻: 지하수유출량의 변동예측법에 관한 제안 철도기술연구보고, No.1295, 1985.3.
 - 15) 大島洋志·藤原幹之: 터널굴착에 동반하는 지하수 영향평가, 지하수 기술, 제 40권, 제 8호, 1998.8
 - 16) 일본터널기술협회: 터널시공에 따른 용수 및 갈수에 관한 조사연구 (제 2호) 보고서, 1983.
 - 17) 大島洋志·榎本秀明·辻徹: 터널공사에 기인하는 논용수량의 영향평가법, 터널과 지하, Vol.20, No.9, 1989.
 - 18) 渡邊 貫: 지질공학, 고금서원, 1936, PP.284-285.
 - 19) 일본터널기술협회: 대단면 터널의 설계 및 시공에 관한 조사연구 (제 2호), 1994.
- * 집필에 관해서는 상기 이외에 하기의 문헌 등도 참고하였음
- 21) 大島洋志: 건설공사에 관련된 지하수의 다양한 문제, 평성 11년도 심포지움 예고집, 일본응용지질학회, 1999.5.
 - 22) 토질공학회: 토질기초공학 라이브러리 19, 건설공사와 지하수, 1980.10.
 - 23) 鈴木 守·大島洋志: 산악터널의 지질에 관한 강습회 텍스트, 터널기술협회, 1992.2.
 - 24) 菅谷正巳: 유출해석법, 교리츠출판, 1975.
 - 25) 토목학회: 수리공식집
 - 26) 건설산업조사회: 개정지하수핸드북 제7장 산악터널, pp.797-836, 1998.9 (구판: 1979)