

Takahashi의 수문학적 기법을 이용한 터널내의 항상용수량의 예측 Prediction of the Constant Water Inflow Rate in a tunnel using Takahashi's method

임 구¹⁾, Goo Lim, 김 달선²⁾, Dal-Sun Kim, 윤 지선³⁾, Ji-Sun Yoon

- 1) 인하대학교 지구환경공학부 석사과정, Graduate Student, Div. of Environmental & Geosystem Engineering, Inha University
- 2) 현대건설주식회사 국내 토목사업본부 부장, Department manager, Div. of Domestic Civil Works, Hyundai Engineering & Construction co.,Ltd.
- 3) 인하대학교 지구환경공학부 교수, Professor, Div. of Environmental & Geosystem Engineering, Inha University

SYNOPSIS : Water flow rate into the tunnel usually determined by numerical analyses and mathematical formulas using water levels and permeability is obtained only a few limited districts of the whole tunneling site. However, underground is not a homogeneous but complicated mass. Therefore these methods can't reflect structural and geological aspects. In this study, assuming that the mountain stream in droughty season is to be the same as baseflow of its basin, hydrological method is applied to predict the constant water flow rate into the tunnel on construction field. Prediction of constant water inflow rate is performed on each section of tunnel construction field divided into 20 sections.

Key words : constant water inflow rate, geological, baseflow, hydrological method,

1. 서 론

터널에서의 용수는 암석의 틈 등을 통해서 침투하는 것이며, 그 처리만 잘하면 문제가 되는 경우는 적지만 굴착 중의 용수는 굴진 작업을 곤란하게 만들뿐만 아니라 지반을 연약화시켜 지보공의 기초를 느슨하게 하여 지지력을 저하시켜 침하 등에 의한 지압의 증대와 편압의 작용, 때로는 돌발적인 대용수를 동반해서 주변 암반 붕괴의 원인으로 되는 것이기 때문에 터널 굴착전은 물론, 시공중에도 충분한 조사를 할 필요가 있다.

산악지역의 터널 굴착에서 가장 어려운 것 중의 하나가 지압과 용수에 관한 문제이다. 특히 용수량은 터널 구간 중 극히 일부분에서의 시추를 통해 얻어진 지하수위와 지반의 투수계수를 적용한 수리식을 이용하거나, 연속체 또는 불연속체로 가정한 수치해석을 통해 용수량을 결정한다. 그러나, 이는 복합적인 형태의 지질구조와 물수리적인 관점을 잘 반영한 것이라 할 수 없기 때문에 현실적이지 못한 실정이다.

본 연구에서는 수문학적인 방법을 이용, 터널 통과 구간의 미세 유역에서의 갈수시 유출량을 유역의 기저유출로 가정하여 터널이 구축될 구간에 대하여 항상용수량에 대한 예측을 실시하였다.

터널 통과 영역을 20개의 구간으로 나누어 각 구간에서의 항상용수량을 예측해 보았으며, 시추가 실시된 구간에 대해서는 수리식을 이용하여 계산한 항상 용수량을 수문학적 방법에서 구한 용수량과 비교

하였다.

2. Takahashi의 수문학적 용수량 예측방법

기저 유출량이 지하수 유출량인 것을 제창한 것은 20세기초경의 프랑스인 J. Boussinesq(1905)나 E. Mariotte이다.

산악터널 주변의 지하수 조사에서는 골짜기를 흐르는 물이나 계곡의 시냇물의 유량을 일정기간 매일 측정하여 기저유출량을 구한다. 이것을 산으로부터의 지하수 용출량으로 간주한다.

Takahashi Hikoji는 Abe Kenbu의 연구 등을 기초로 지형, 지질 조건을 고려하여, “터널굴착시의 항상 용수량은 주변하천의 기저 유출량에 비례한다”라고 말한다. 이른바, “다카하시의 수문학적 방법”를 제안하였다.(1961) 또한, Takahashi는 산악지대에서의 지하수는 하천에서 갈수시의 유량에 상당하는 만큼 항상적으로 유출한다고 생각하였으며, 갈수시의 하천유출량을 유역의 면적으로 나눈 값을 갈수 비유량이라 하였다. 이 갈수 비유량을 이용하여 항상용수량에 대한 다음의 식을 제안하였다.

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

여기서,

q : 단위 구간 연장 길이 당의 갈수 비유량 ($10^{-3} m^3/s/km^2$)

l : 단위 구간의 연장 (km)

$R_R(R_L)$: 단위 구간에서의 터널 오른(왼)쪽의 영향 범위 (km)

2.1 Takahashi의 영향범위 산정방법

- ① 지형도에 분수계를 기입해서 단위 유역도를 그린다.
- ② 이 면적을 $A km^2$, 주유로를 직선으로 취해서 그 길이를 $L km$ 로 하면 단위 유역의 평균 유역 폭 R 을 구한다. $2R = A/L(km)$ (그림 1-(b))
- ③ 주유로를 적당한 길이 n 으로 분할하고 각각 위치의 표고에서 우 분수계·하상·좌 분수계의 표고를 플랫폼해서 비교도를 그린다.(그림 1-(a))
- ④ 하상과 분수계와의 표고차를 H 로 하고 좌우 비교의 합계를 $2n$ 으로 나눈 값으로부터 유역의 평균 비교 H_m 을 구한다. 이상으로부터 평균 투수성 k_t 를 $k_t = R^2/6H_m$ 에 의해 구한다.
- ⑤ $k_t = R^2/6H_m$ 에 k_t 를 대입하여 H (표고)와 R (유역 폭)사이의 관계곡선을 작성한다.
- ⑥ 터널과 직교하는 단면을 적당한 간격마다 그린다.
- ⑦ 터널 위치와 $H-R$ 곡선의 0점을 일치시켜서 지질 단면도를 겹쳐 $H-R$ 곡선이 지표면과 교차하는 곳을 터널 용수의 영향범위로 생각한다.(그림 3)

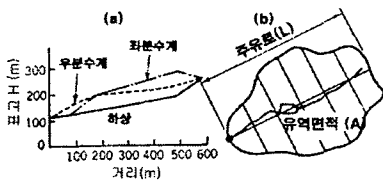


그림 1

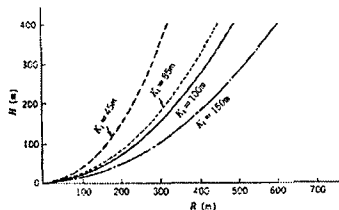


그림 2. 평균 투수성 (k_t) 그래프 (H-R 곡선)

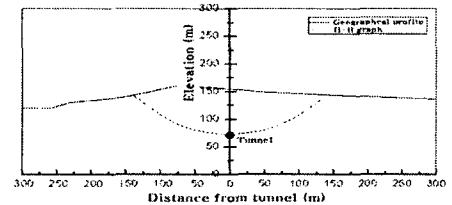


그림 3. 터널용수의 유출 범위도

3. 실제유역에의 적용

터널이 구축될 구간에서 Takahashi의 수문학적 방법을 이용하여 터널의 항상용수량을 예측하여 보았다.

3.1 대상유역

대상유역은 터널이 굴착될 예정인 지역으로서 경기도 광주시 ○○리이며, 터널의 연장은 총 2.4km이다. 대상영역의 지질구조는 선캄브리아기 경기편마암 복합체에 속하는 편마암류로 구성되었으며, 시점부는 호상흑운모 편마암이 우세하고, 터널 중앙부 이후에는 우백질 편마암과 교호를 이루고 있다.

3.2 미세 유역의 결정

지하수의 수계는 지형도상의 분수계와 일치한다고 가정하였으며, 지형도 상의 분수계를 이용하여 측수가 가능한 하천에 대하여 대상 유역을 8개의 미세유역으로 분류하였다.

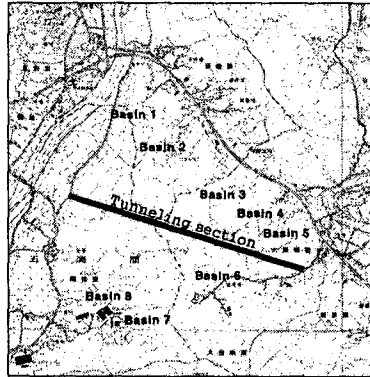


그림 4. 대상유역

3.3 유역 면적 계산

분수계를 이용하여 나눈 8개의 미세 유역에 대한 유역 면적은 구적기(Planimeter, X-Plan 360d)를 이용하여, 1:5000의 지형도상에서 계산하였으며, 표 1에 유역 면적을 나타내었다.

표 1. 유역면적

Basin	1	2	3	4	5	6	7	8
Catchment area(km^2)	0.16	0.52	0.36	0.42	0.11	0.84	0.33	0.28

3.4 유량 측정

측수시기는 갈수기(10월~11월)이며, 강우가 없는 날이 지속되어 하천에서의 유량을 기저유출로 가정하였다. 각 유역에서 측정된 유량은 강우에 의한 영향이 없는 기간에는 유량 변동의 폭이 거의 없었으며 유효 강우가 없는 날이 15일 이상 지속되어 유량이 수렴하였다고 생각한 11월 17일의 값을 기저유출량으로 가정하였다. 각 미세유역에서의 유량은 다음과 같다.

표 2. 미세유역에서의 유량

Date	Flow rate of Each basin($10^{-3}m^3/min$)							
	Basin1	Basin2	Basin3	Basin4	Basin5	Basin6	Basin7	Basin8
Oct. 24	6.00	66.60	25.20	18.60	None	97.80	2.40	21.60
Oct. 28	6.60	70.00	27.60	18.60	None	111.60	2.40	28.80
Nov. 1	6.00	76.80	29.40	19.20	None	102.60	3.00	37.20
Nov. 2	6.00	61.80	27.60	17.40	None	94.80	2.40	24.60
Nov. 14	5.40	58.80	27.60	15.60	None	80.40	2.40	21.60
Nov. 17	4.80	58.80	27.00	15.60	None	77.40	2.40	22.20

3.5 유역별 갈수 비유량의 산정

유역별 기저유출량을 유역의 면적으로 나눈 값을 비유량이라 한다. 터널이 8개의 유역을 통과하므로, 터널의 항상용수량 계산시에 다음의 값을 이용하였다.

표 3. 유역별 갈수 비유량

	Basin 1	Basin 2	Basin 3	Basin 4	Basin 5	Basin 6	Basin 7	Basin 8
Baseflow ($10^{-3}m^3/min$)	4.80	58.80	27.00	15.60	갈수	77.40	2.40	22.20
Catchment area (km^2)	0.16	0.52	0.36	0.42	0.11	0.84	0.33	0.28
Specific flow rate in droughty season ($10^{-3}m^3/min/km^2$)	30.38	113.08	75.00	37.14	-	92.14	7.27	79.29

3.6 영향 범위의 산정

3.6.1 H-R 그래프의 작성

터널 통과구간에서 전체 유역 8개에 대하여 각각의 하천 비고에 따른 영향 반경을 이용하여, H-R 그래프를 작성하였다. 이는 각 유역에서의 고도에 따른 평균 투수성을 나타내는 것이다(그림 5).

3.6.2 터널 구간에서의 영향범위

터널 통과구간을 20개의 단면으로 분할하여, 각각의 위치에서 터널 종단면도와 H-R 그래프를 이용, 터널 통과 구간에서 영향범위를 산정하여 지형도 상에서 터널에 의한 영향 범위를 구하였다.(그림 6 참조) 터널 종단면도와 각 구간에서의 영향범위는 그림 7에 나타내었다.

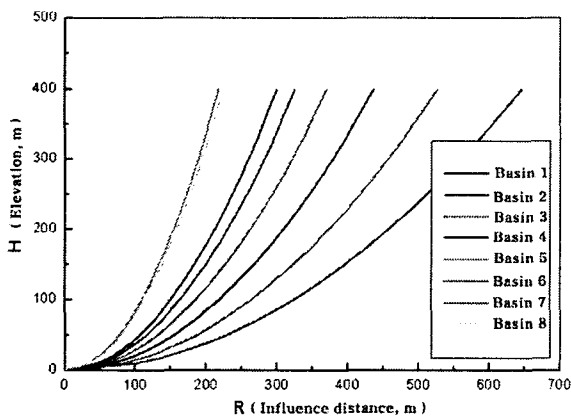


그림 5. H-R 그래프

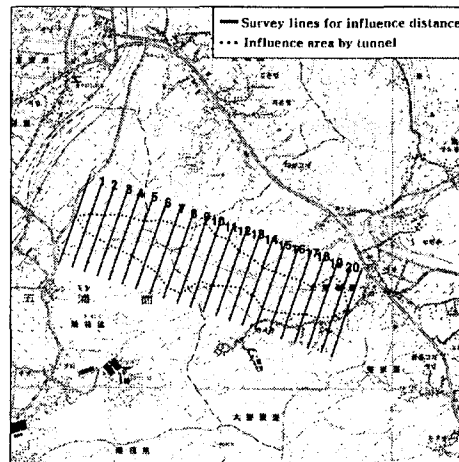
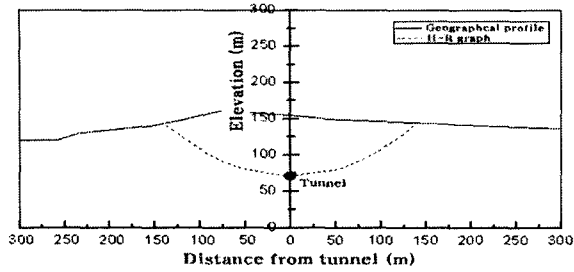
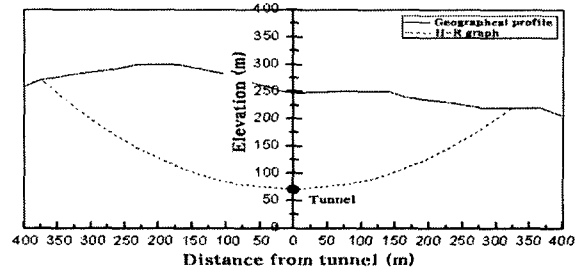


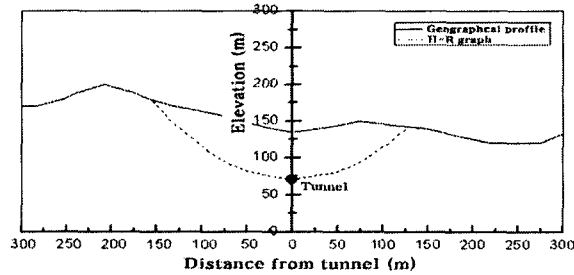
그림 6. 터널의 영향범위



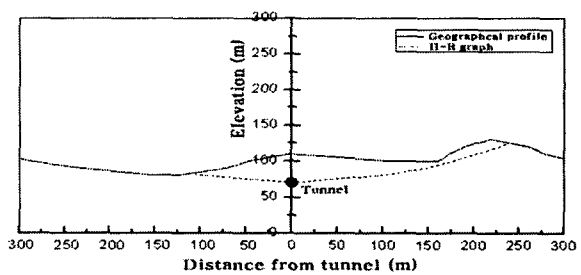
(a) section 3



(b) section 9



(c) section 13



(d) section 20

그림 7. 각 구간별 영향범위

3.6.3 각 구간별 좌·우 영향범위 (R_L, R_R)

터널내부로 유입하는 지하수의 유출범위를 구하기 위하여 20개의 구간에 대한 좌·우 영향범위를 구하였다. 이를 표 4에 나타내었다.

표 4. 각 구간에서의 좌·우 영향범위 ($R_R, (R_L)$)

Section	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Influence distance to the left (m)	89	121	139	168	193	219	241	340	373	206
Influence distance to the right(m)	55	102	141	177	191	207	217	213	323	282
Section	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Influence distance to the left (m)	190	180	157	168	259	258	223	128	159	112
Influence distance to the right(m)	252	174	127	96	118	129	141	110	277	238

3.7 각 구간별 항상용수량 예측

식 (1)을 이용하여 터널 전 구간(2.4km)에 대하여 항상 용수량을 계산하였다. 단위 구간연장 (l)은 120m이다.

각 구간에서의 항상용수량은 표 5에 나타내었으며, 터널 내로 유입하는 전체 항상용수량은 $Q = 0.056m^3/min$ (56 l/min)로 예측되었다.

표 5. 각 구간에서의 항상용수량

Section	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Constant Inflow rate($10^{-3}m^3/min$)	0.48	0.78	1.02	1.20	1.38	5.79	6.18	5.94	6.24	3.48
Section	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Constant Inflow rate($10^{-3}m^3/min$)	3.12	1.56	1.26	1.20	1.68	1.74	1.62	2.64	4.80	3.84

4. 지질별 터널 비용수량(比湧水量)

비용수량이란 단위길이를 1km로 한 경우의 용수량으로 터널에서의 항상용수량을 터널의 연장으로 나눈 값으로써 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$m^3/min$$

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

본 연구의 대상지역은 선캄브리아기 경기편마암 복합체에 속하는 편마암류로 구성되어있으므로 함편마암류에 속한다고 볼 수 있으며, 일반적인 함편마암류의 비용수량 범위는 $0.018 \sim 0.84 m^3/min/km$ 이며 본 대상구간에서의 비용수량은 $Q = 0.023 m^3/min/km$ 로써 평균적인 함편마암류의 비용수량($0.20 m^3/min/km$)보다 낮은 값이었다(표 6 참조). 그림 8에서는 지질별 비용수량을 그림으로 나타내었으며, 본 대상터널에서 예측된 비용수량의 값을 표시하였다.

표 6. 일본의 지질별 터널 비용수량

지질 분류	비용수량의 범위 $m^3/min/km$	평균 비용수량 $m^3/min/km$	지질 분류	비용수량의 범위 $m^3/min/km$	평균 비용수량 $m^3/min/km$
화산암	0.85~1.0	3.71	제3사력층	0.02~3.6	0.84
화산 쇄설암	0.035~0.9	0.3			
심성암류	0.17~3.8	1.38	기사암· ~혈암· 홍응회암	0.014~0.95	0.25
함편과암	0.018~0.84	0.20			
고생층 중생층	0.10~4.5	0.79	적세 이암	0.0~0.26	0.07
	0.0~0.95	0.17			

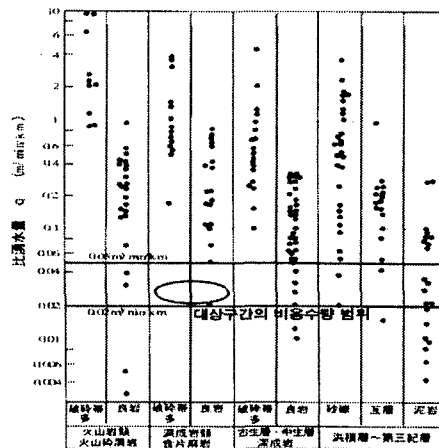


그림 8. 지질별 비용수량의 범위

5. 수리식을 이용한 방법과의 비교

Takahashi의 수문학적 방법으로 구한 항상용수량과 시추조사가 이루어진 구간 3, 구간 9, 구간 13, 구간 20에 대하여 지하수두와 지반 투수계수를 이용한 수리식을 적용하여 항상용수량을 구하여 비교해 보았다.

5.1 터널을 지중에 매설된 암거(暗渠)로 가정

수평한 불투수층 위에 암거가 있고 지하수는 측벽의 양쪽에서 유입한다고 가정한 경우에 대하여 계산하였다.

$$Q = \frac{k \cdot l (H^2 - h_o^2)}{R - r} \quad (3)$$

여기서, k : 지반의 투수계수 R : 영향범위 r : 터널 반경 l : 암거의 길이
 H : 원 지하수두 h_o : 암거내의 지하수두

식 (2)에서 일반적인 $h_o = (1/8 \sim 1/10)H$ 이므로, $h_o = (1/8)H$ 와 $h_o = (1/10)H$ 인 경우에 대하여 항상 용수량을 계산하였다.

5.2 정상류 상태에 의한 지하수 유입으로 가정

터널 내부로 유입하는 지하수가 정상 상태(steady state)로 가정하여 Goodman의 식을 적용하여 용수량을 예측해 보았다. 터널은 원형으로 가정하였다

$$Q = \frac{2\pi \cdot k \cdot H}{\ln \frac{4H}{d}} \quad (4)$$

여기서, d : 터널 직경

표 7 은 각 구간에서의 지반특성 및 영향범위를 나타내었으며, 표 8 은 수리식에 의한 항상용수량과 Takahashi의 수문학적 방법을 이용하여 구한 항상용수량을 비교한 결과이다.

표 7. 각 구간별 지반특성 및 영향범위

	Section 3	Section 9	Section 13	Section 20
Head (m)	70	173	79	47
Permeability of ground (m/s)	1.47×10^{-7}	6.86×10^{-8}	1.37×10^{-7}	1.90×10^{-6}
Influence distance (m)	119	177	277	140
Tunnel diameter (m)	15	15	15	15
Length of culvert (m)	120	120	120	120

표 8. Takahashi의 수문학적 방법과 수리식에 의한 방법과의 비교

	Constant Water Inflow Rate by Hydrological method ($10^{-3}m^3/min$)	Constant Water Inflow Rate by Hydraulic formula ($10^{-3}m^3/min$)		
		Cases of applying formula (4)	Cases of applying formula (3)	
			$h_o = (1/8)H$	$h_o = (1/10)H$
Section 3	1.02	1.32	47.78	46.02
Section 9	6.24	1.14	85.86	86.34
Section 13	1.26	1.14	22.50	22.60
Section 20	3.84	13.26	224.46	225.78

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 Takahashi의 수문학적 항상용수량 예측에 의해 터널내부로 유입하는 항상용수량에 대

하여 터널이 통과할 구간을 대상영역으로 선정하여 실시하여 보았다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

1) Takahashi의 수문학적 방법에 의해 예측한 터널 통과구간 전체에서의 항상용수량은 $Q = 0.056m^3/min$ (56 l/min)로 예측되었으며, 단위 연장당의 용수량인 비용수량으로 표현하였을 경우에 $Q = 0.023m^3/min/km$ 로 일반적인 함편마암류에서의 비용수량 범위(0.018~0.84 $m^3/min/km$)에 해당하므로 합당한 결과가 도출되었다고 생각된다.

2) 수리식에 의한 항상용수량 예측과 Takahashi의 수문학적 방법에 의한 항상용수량 예측을 비교한 결과는 다음과 같다.

- 지중의 압거를 가정한 경우는 수문학적 기법에 의한 항상용수량에 비해서 약 13~59배가 많은 양의 용수가 용출될 것으로 예측되었다.

- 정상류 상태로 가정한 경우는 수문학적 방법에 의한 항상용수량과 수리식에 의한 항상용수량과의 비교에서 구간 3과 구간 13에서는 용수량의 차가 크지 않았으며 구간 3에서는 수리식에 의한 값이 1.29배 많게 예측되었고, 구간 13에서는 Takahashi의 방법이 1.1배 큰 값이 나왔다

반면에, 구간 9에서는 수문학적인 방법으로 구한 값이 5.4배 정도 많이 용출될 것으로 예측되었으며, 구간 20에서는 수리식에 의한 방법이 3.45배 정도 크게 나타났다.

3) 지중의 압거를 가정한 경우에 전체적으로 수리식에 의한 항상용수량이 많이 예측된 이유는 시추를 통해서 한 점에서 구한 지반의 투수계수를 이용해 연속체로 가정한 상태에서 연장 120m 지반에 적용하였기 때문에 수문학적인 방법에 비해 큰 값이 예측되었다.

정상류 상태를 가정한 경우는 수문학적 방법에 의한 용수량과 큰 차이는 나타나지 않고 있지만, 각 구간에서의 차이는 수문학적 방법을 이용한 항상용수량 예측시에는 지형 및 지반의 지질 특성을 반영한 결과에 기인한 것이다.

4) 터널내부로 유입하는 용수량의 예측시 주로 이용되는 수리식을 이용한 방법과 수치해석적 방법은 전체 터널 통과 구간 중 일부 구간에서 시추를 통해 구한 지반의 특성(지하수위, 지반의 투수성 등)을 이용하여 터널 내부로 유입하는 용수량을 예측한다. 이는 터널 전체구간에 대한 지형 및 지질학적 특성을 잘 반영할 수 없다. 수문학적 방법을 이용한 항상용수량 예측을 통하여 전체 터널 구간에서의 항상용수량을 예측함으로써 배수구의 설계 등에 반영하는 기초적인 값을 제공하여야 한다.

참고문헌

1. 유 태훈(1997), “응용 수문학”, 청문각
2. 윤 용남(1999), “수리학”, 청문각
3. 윤 지선(1994), “터널 공학”, 구미서관, pp. 233~239
4. 최 영박, 지 정환(1997), “최신 수리학”, (주)교학사, pp. 555~558
5. 高橋彦治 外(1979), トンネルの變狀と保守, 土木工學社, pp. 287~288
6. 大島洋志(2001), “わかりやすい 土木地質學”, 土木工學社 pp. 150~154
7. ジェオフロンテ研究會(2000), シングルシェルトンネルの防水構造 pp.15~20
8. 志田和彦, 大島洋志(1991), “わかりやすい 土木地質學入門”, 土木工學社, pp. 112~139