

터널 굴착으로 인한 터널인접 절리암반 투수계수 감소를 고려한 터널 내 지하수 유입량 산정방법

문준식^{1*}

¹정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 조교수

Groundwater inflow rate estimation considering excavation-induced permeability reduction in the vicinity of a tunnel

Joon-Shik Moon^{1*}

¹Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University

ABSTRACT: This paper discussed about the effect of permeability reduction of the jointed rock mass in the vicinity of a tunnel which is one of the reasons making large difference between the estimated ground-water inflow rate and the measured value. Current practice assumes that the jointed rock mass around a tunnel is a homogeneous, isotropic porous medium with constant permeability. However, in actual condition the permeability of a jointed rock mass varies with the change of effective stress condition around a tunnel, and in turn effective stress condition is affected by the ground water flow in the jointed rock mass around the tunnel. In short time after tunnel excavation, large increase of effective tangential stress around a tunnel due to stress concentration and pore-water pressure drop, and consequently large joint closure followed by significant permeability reduction of jointed rock mass in the vicinity of a tunnel takes place. A significant pore-water pressure drop takes place across this ring zone in the vicinity of a tunnel, and the actual pore-water pressure distribution around a tunnel shows large difference from the value estimated by an analytical solution assuming the jointed rock mass around the tunnel as a homogeneous, isotropic medium. This paper presents the analytical solution estimating pore-water pressure distribution and ground-water inflow rate into a tunnel based on the concept of hydro-mechanically coupled behavior of a jointed rock mass and the solution is verified by numerical analysis.

Keywords: Permeability of jointed rock mass, Hydro-mechanically coupled behavior, Ground-water inflow rate into a tunnel, Pore-water pressure distribution around a tunnel

초 록: 본 연구에서는 절리 암반 내 터널굴착 시 지하수 유출량 예측량이 실제 계측치와 큰 차이가 나는 이유 중 하나인 터널주변 절리암반의 투수계수의 감소 현상에 대해 논의하였다. 현재 터널 설계 시 일반적으로 사용되고 있는 지하수 유출량 산정식은 터널주변 암반이 등방, 균질하고 일정한 투수계수를 유지한다고 가정한다. 하지만, 실제로는 터널주변 절리암반의 투수계수는 터널주변 유효응력 상태에 따라 변화하며, 절리 내 지하수 흐름에 따라 다시 터널주변 유효응력 분포가 영향을 받는 수리-역학적 상호거동을 보인다. 터널굴착 직후 터널 접선방향 유효응력이 응력집중과 간극수압 감소로 인해 급증하고 그에 따라 절리의 닫힘현상이 발생하며, 결과적으로 터널인접 절리암반 링 구간에서 투수계수가 급격히 감소하게 된다. 이러한 터널인접 링 구간 내에서 상당히 큰 간극수압 감소가 발생하게 되어 터널주변 간극수압 분포는 등방 균질의 절리암반으로 가정한 산정식과 큰 차이를 보인다. 본 연구에서는 절리암반의 수리-역학적 상호거동의 개념을 도입하여 터널주변 간극수압 분포와 터널 내 지하수 유입량 산정방법을 제안하고 이를 수치해석을 통해 검증하였다.

주요어: 암반절리 투수계수, 수리-역학적 상호거동, 터널 내 지하수 유입량, 터널주변 간극수압분포

*Corresponding author: Joon-Shik Moon
E-mail: j.moon@knu.ac.kr

Received May 3, 2013; Revised May 16, 2013;
Accepted May 27, 2013

1. 서론

터널 시공 중 지하수 유입문제는 지반유실, 낙석, 과다굴착, 지반침하 등 안전사고와 공사비 증가의 주요한 원인이 된다. 또한, 터널 계획단계에서 지하수 유입량의 적절한예측은 터널노선, 지하수유입 대책공법, 라이닝 설계, 시공계획 및 공사비 산정에 있어 매우 중요하다. 하지만 터널설계 시 일반적으로 사용되고 있는 터널주변 간극수압 분포와 지하수 유입량 산정방법은 터널주위 절리암반이 균질, 등방성 투수 계수를 가진다고 가정하고 터널굴착으로 인한 지하수 위의 하강을 고려하지 않아 실제 계측치와 큰 차이를 보이고 있다.

균질 등방성의 암반 내 터널주변의 간극수압 분포

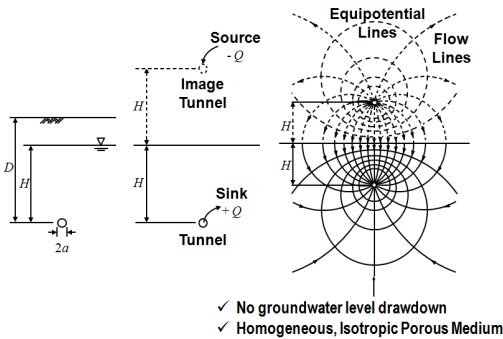


Fig 1. Image tunnel method

와 지하수 유입량 산정은 Harr (1962), Goodman et al. (1965), Fernandez and Alvarez (1994)가 제안한 Image Tunnel 방법을 통해 산술식으로 유도될 수 있다. Image Tunnel 방법은 Fig. 1과 같이 지하수위로부터 실제 터널과 같은 거리에 recharge 터널이 존재한다고 가정함으로써, 복잡한 반무한 경계조건의 문제를 상대적으로 산술식 유도가 간단한 무한 경계조건으로 변환할 수 있다. Image Tunnel 방법을 이용하여 터널 단위길이 당 지하수 유입율은 식 (1)과 같이 유도될 수 있다.

$$q_o = -\frac{2\pi H \cdot k_m}{\ln\left[1 + \left(\frac{2H}{a}\right)^2\right]^{0.5}} \approx -\frac{2\pi H \cdot k_m}{\ln(2H/a)} \quad (1)$$

여기서, k_m 는 암반의 등가 투수계수, H 는 지하수위로부터 터널 스프링라인까지 깊이, a 는 터널반경, q_o 는 터널 단위길이 당 지하수 유입율이다.

터널 주변 균질 등방성 암반 내 간극수압 분포는 image tunnel 방법을 써서 식 (2)와 같이 유도될 수 있으며, 터널의 스프링라인을 따라 간극수압 변화는 식 (3)과 같이 단순화 시킬 수 있다. Fig. 2는 터널 주변 균질 등방성 암반 내 간극수압 분포와 터널 스프링라인을 따라 정규화된 간극수압 변화를 나타내고 있다.

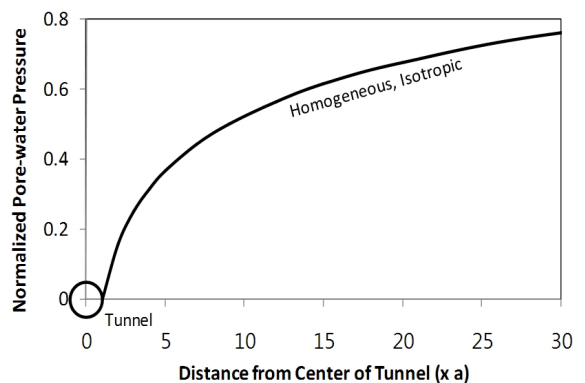
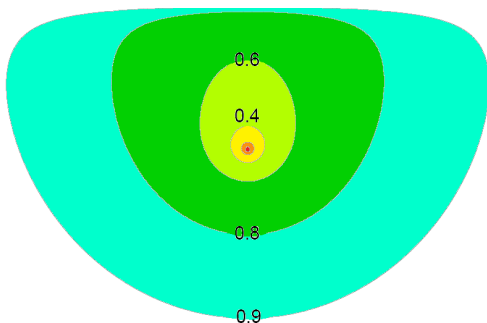


Fig. 2. Normalized porewater pressure distribution around a tunnel using equations (2) and (3)

$$p = \left[1 - \frac{\ln(\cos^2 \theta + (2H/r - \sin \theta)^2)}{\ln(1 + (2H/a)^2)} - \frac{r \cdot \sin \theta}{H} \right] \cdot H \cdot \gamma_w \quad (2)$$

$$p_{sp} = \left[1 - \frac{\ln(1 + (2H/r)^2)}{\ln(1 + (2H/a)^2)} \right] \cdot H \cdot \gamma_w \quad (3)$$

여기서, r 는 터널 중심으로부터의 거리, a 는 터널 반경, θ 는 터널 스프링라인으로부터 반시계방향 각도, H 는 지하수위로부터 터널 스프링라인까지 깊이, γ_w 는 지하수의 단위중량이다.

식 (1)의 지하수유입 예측량은 지하수위 깊이와 일반적으로 현장 팍커시험을 통해 산정되는 암반의 등가 투수계수에 좌우된다. Heuer (1995, 2005)는 터널설계 시 일반적으로 사용되는 Image tunnel 방법이 대체적으로 지하수 유입량을 과다하게 예측함을 현장 계측결과를 토대로설명하고 Fig. 3과 같이 경험적 산정법을 제안하였다. 하지만 Heuer의 방법은 이론적 바탕이 없는 경험식으로서 터널주변 암반의 지질조

건, 유효응력 변화에 따른 절리암반의 투수계수 변화, 시간에 따른 지하수위 강하 등 터널주변 암반의 지질학적, 역학적 특성을 상황에 따라 적절히 고려하지 못하는 단점이 있다.

터널 내 지하수 유입량 예측뿐만 아니라, 터널 굴착으로 인해 지하수의 흐름이 발생되면서 터널주변 절리암반내 유효응력이 변화하고, 다시 이러한 유효응력의 변화로 인하여 지하수의 흐름량이 변화하는 상호작용을 규명하기 위해서는 수리-역학적 상호작용을 고려하는 해석이 필요하다. 특히 이러한 수리-역학적 상호작용을 고려한 해석은 최근 이슈화되고 있는 하·해저 터널 설계 시 터널시공 안전에 매우 중요한 요소가 되지만, 현재 실무에서 적용되고 있는 각종 터널해석 프로그램 기능의 제한성 및 해석 모델링의 기술적인 어려움 등으로 인해 터널굴착과 지하수의 상호작용이 고려된 해석을 설계에 적절하게 반영한 예는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 현재 일반적으로 적용되고 있는 암반터널 내 지하수 유입량의 예측방법이 고려하지 못하는주요한 요인 중 터널 굴착으로 인한 터널 주변 절리암반의 투수계수 감소현

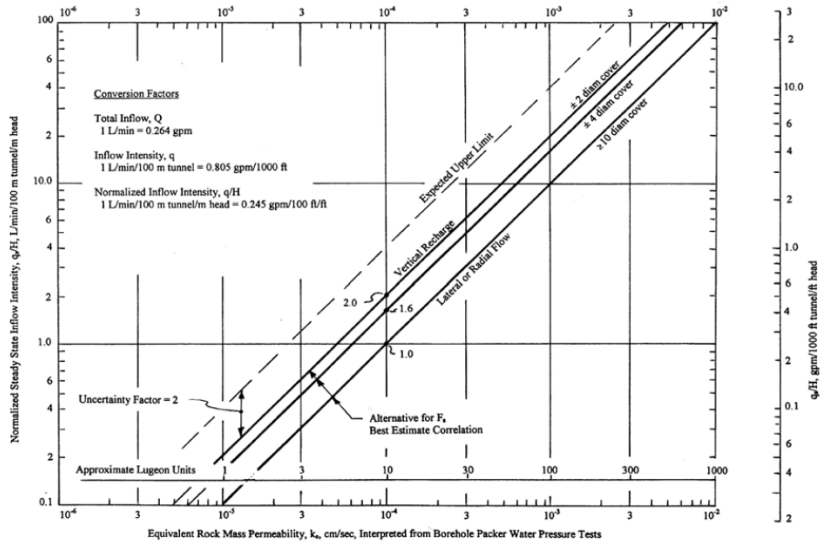


Fig. 3. Heuer's method for estimating ground-water inflow rate into a tunnel (Heuer, 2005)

상과 그에 따른 간극수압 분포의 변화에 대해 설명하고자 한다.

2. 암반절리의 수리-역학적 상호거동

절리암반의 역학적 및 수리학적 거동은 절리의 지질 특성에 의해 결정된다. 암반절리의 변형특성은 절리면의 접촉면적, 형상, 거칠기, 물리적 특성, 충전물질의 특성 등에 영향을 받는다. 일반적으로 절리의 수직변형(joint closure)은 유효수직응력 변화에 따라 영구 소성변형과 비선형적 특성을 보인다고 알려져 있다 (Snow, 1972; Goodman, 1974; Iwai, 1976; Bandis et al., 1983; Gale & Raven, 1980; Barton & Bandis, 1982). 절리의 수직변형과 유효수직응력 관계를 표현한 여러 경험식 중 식 (4)와 같은 쌍곡선식(hyperbolic function)이 가장 많이 쓰이고 있다.

$$\sigma_n' = \frac{K_m \cdot \Delta V_j}{1 - \left(\frac{1}{V_{mc}} \right) \cdot \Delta V_j} \quad (4)$$

여기서, K_m 는 절리의 초기 수직 강성도, V_{mc} 는 최대 절리 수직변형, σ_n' 는 유효수직응력, ΔV_j 는 절리의 수

직방향 변형이다.

절리 내 지하수 흐름은 평평하고 일정간격의 두 개의 판 사이의 흐름으로 단순화시키면 식 (5)와 같이 유도되며, 유량이 절리 간극의 3승에 비례하여 입방법칙(cubic law)으로 불린다. 입방법칙의 타당성에 대한 논란은 여러 학자들에 의해 제기되었다. 실제로, 절리면의 거칠기 영향, 흐름의 비틀림(tortuosity) 등으로 인해 절리 내 지하수 흐름은 식 (5)의 가정과 같이 단순화한 평평하고 일정한 간격의 판 사이의 흐름보다 훨씬 복잡하다. 이를 모사하기 위해 식 (5)의 절리의 역학적 간극 a_m 과 구별하여 식 (6)의 수리학적 간극 a_h 가 사용할 경우 입방법칙이 유효하게 적용할 수 있다고 파악되고 있다(Alvarez et al, 1995).

$$q = \frac{\gamma_w \cdot a_m^3}{12\mu} \cdot i \quad (5)$$

$$a_h = f \cdot a_m = f \cdot (a_{m0} - \Delta V_j) = a_{h0} - f \cdot \Delta V_j \quad (6)$$

여기서, μ 는 동적 점성도(물의 경우 1.0007×10^{-3} Pa-sec), a_m 는 절리의 역학적 간극(mechanical aperture), γ_w 는 물의 단위중량, i 는 지하수 흐름방향

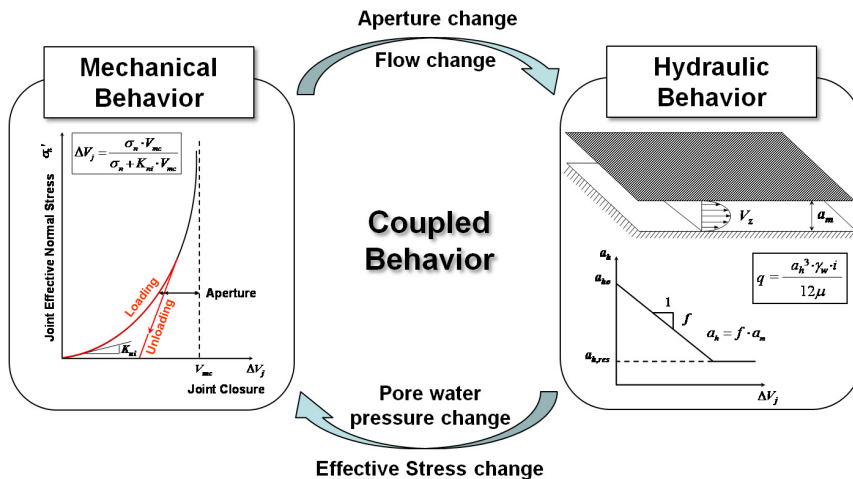


Fig. 4. Hydro-mechanically coupled behavior of rock joint

으로의 수두변화율, f 는 절리 간극의 감소계수, a_n 는 절리의 수리학적 간극(hydraulic aperture), a_{m0} 는 절리의 초기 역학적 간극, a_{n0} 는 절리의 초기 수리학적 간극이다.

절리암반의 투수계수는 일반적으로 절리 간극에 따라 결정되며, 절리 간극은 절리암반의 응력상태에 따라 결정된다. 마찬가지로 절리 내 지하수의 흐름량에 따라 간극수압 변화와 유효응력 변화가 발생하고 이로 인해 절리 간극이 결정된다. 이와 같이 절리의 수리학적 거동과 역학적 거동이 서로 영향을 주며 수렴해가는 현상을 수리-역학적 상호거동(hydro-mechanically coupled behavior)이라 정의한다(Fig. 4).

절리암반의 간극은 주로 절리의 수직응력에 좌우되지만 절리의 전단응력에도 영향을 받는다. 하지만, 전단 응력을 받는 절리의 투수계수는 탄성론에 근거하는 응력조건에 따른 영향뿐만 아니라 절리에 구속압으로 작용하는 수직응력 크기에 대한 절리면의 상대적인 강도, 절리면의 거칠기, 지질학적 특성 등 여러 추가적인 요인에 크게 영향을 받을 수 있으므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

3. 수리-역학적 상호거동을 고려한 터널 주변 절리암반의 수리학적 상태

터널굴착 직후 터널주위 암반절리 내 저장되어있던 지하수가 터널 내부로 급속히 빠져나오면서 초기 지하수 유입이 급증하고(flush flow), 간극수압의 급격한 감소와 응력집중으로 인해 터널 접선방향 유효응력이 크게 증가하게 된다. 터널 접선방향 유효응력의 증가로 인해 터널 인접구간 암반 내 절리의 닫힘현상이 발생하게 되고, 결과적으로 터널 인접구간 절리암반의 투수계수가 감소하게 되어 터널 내 지하수 유입량이 감소하게 된다. 따라서, 현재 터널설계 및 시공시 일반적으로 적용되고 있는 Image tunnel 방법과 같이 절리암반 내 지하수의 수리학적 거동만을 고려할 것이 아니라, 실제현장과 유사하게 터널 굴착으로

인한 간극수압 변화에 따른 터널주위 암반 절리의 역학적 거동과 그에 따른 절리암반의 투수계수 및 터널 내 지하수 유입량 변화를 연계한 해석을 수행하여야 한다.

절리암반이 탄성상태이고 축압계수, K_0 이 1.0인 경우를 고려하였을 때, 터널의 스프링라인 상의 절리암반 내 수직방향 유효응력, σ'_n 은 식 (7)과 같이 계산될 수 있다.

$$\sigma'_n = D \cdot \gamma_R \left(1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right) - p_{sp} \quad (7)$$

여기서, D 는 터널깊이, a 는 터널 반경, r 는 터널 중심으로부터 거리, p_{sp} 는 스프링라인 상의 절리암반 간극수압이다.

지하수위가 지표면가까이 있고($D \approx H$) 터널 굴착 후 지하수위 변화가 거의 없다고 가정할 경우, 터널 굴착으로 인해 터널 벽면($r=a, p_{sp}=0$)에서 유효응력은 터널 굴착 전에 비해 약 3배 이상 증가한다. 깊이가 $10a$ (a 는 터널반경) 이상인 깊은 터널의 경우 터널 벽면으로부터 $2a$ 떨어진 거리($r=2a$)에서 유효응력은 식 (3)의 p_{sp} 를 적용하면 터널 굴착 전 유효응력의 약 2~3배 증가함을 알 수 있다. 식 (5)의 입방법칙(Cubic Law)에 의하면 터널 인접 링 구간 내 절리의투수계수는 절리간극(a_n)의 3승에 비례하므로 유효응력 증가에 따라 절리간극이 초기값의 1/2~1/3 수준으로 감소하면 투수계수는 1/8~1/27로 감소하게 된다. 하지만, 절리의수직응력-수직변형 관계가 식 (4)와 같은 쌍곡선 함수를 따르므로, 유효응력 변화에 따른 절리 간극의 변화율은 초기 유효응력과 절리 초기 수직강성도의 크기에 따라 크게 차이가날 수 있음을 인지해야 한다. 즉, 절리의초기 수직 강성도, K_{ni} 가 작고 깊은 터널일수록 터널인접 암반절리의 간극이 유효응력 증가에 대해 더욱 민감하게 감소한다.

터널 인접구간에서의 유효응력 증가로 인한 투수계수 감소는 Pusch et al. (2003a)과 Buehler et al. (2003)

의 실험에서 관찰되었다. Pusch et al. (2003b)의 실험에서 터널 벽면으로부터 약 3 m (굴착반경 두께) 내의 구간에서 유효응력 증가로 인한 투수계수 감소효과로 교란되지 않은 절리암반의 투수계수보다 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 배 작은 4×10^{-9} cm/sec의 투수계수가 관찰되었고, 다른 투수실험에서도 벽면으로부터 0.7 m 이내의 암반에서 교란으로 인해 투수계수가 1.2×10^{-6} cm/sec인 것에 비해 0.7~3 m 구간에서의 투수계수는 주변 투수계수보다 작은 $2.3 \times 10^{-9} \sim 7.5 \times 10^{-9}$ cm/sec로 예측되었다. Buehler et al. (2003)은 터널 벽면에 가해지는 하중이 증가할수록 절리의 닫힘현상이 발생하고 점차 투수계수가 감소하는 것을 관찰하였다.

상대적으로 높은 유효응력 증가로 절리의 닫힘현상이 발생되어 주변 절리암반의 등가 투수계수, k_m 에 비해 낮은 투수계수, k_L 을 갖는 터널 인접 링 구간 (lining-like zone, Fig. 5)의 수리학적 거동은 낮은 투수성을 갖는 무근 콘크리트 라이닝과 비슷한 거동을 보인다. 따라서, 이러한 낮은 투수계수의 링 구간을 고려한 터널 주변 간극수압 분포는 Fernandez and Alvarez (1994)가 제안한 무근 콘크리트 라이닝이 타설된 터널 주변의 간극수압 분포 산정방법과 유사한 방법으로 산정할 수 있다.

터널주변 암반구간은 Fig. 5와 같이 유효응력 증가

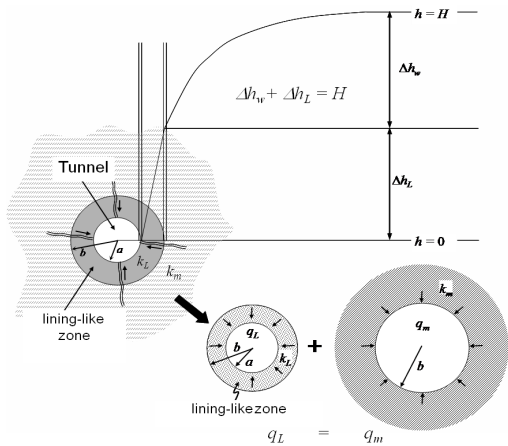


Fig. 5. Hydraulic head loss across permeability reduction zone and continuity of flow

로 인해 크게 감소된 투수계수 k_L 을 갖는 터널인접 링 구간과 투수계수감소가 크지 않아 굴착 전 투수계수 k_m 과 동일하게 가정한 링 바깥구간 등 두 구간으로 구분하여 분석하였다. 터널 인접 링구간을 통과하여 터널로 유입되는 지하수 침투량 q_L 은 Goodman (1980)이 제안한 무근 콘크리트 라이닝을 통과하는 지하수 침투량 계산식인 식 (8)로 추정할 수 있다. 터널인접 링 구간 외부에서 유입되는 지하수 침투량 q_m 은 image tunnel method의 식 (1)에서 터널 반경 a 와 초기 지하수위, H 대신 각각 링 구간의 바깥쪽 반지름인 b 와 Fig. 5의 수두차, Δh_w 를 대입하여 식 (9)와 같이 산정할 수 있다.

$$q_L = \frac{2\pi k_L \cdot \Delta h_L}{\ln(b/a)} \quad (8)$$

$$q_m = -\frac{2\pi \Delta h_w \cdot k_m}{\ln[1 + (2H/b)^2]^{0.5}} \approx -\frac{2\pi \Delta h_w \cdot k_m}{\ln(2H/b)} \quad (9)$$

여기서, k_L 은 터널인접 링 구간의 감소된 투수계수, Δh_L 는 터널인접 링 구간을 통과하며 발생하는 수두손실(Fig. 5), a 는 터널 반경, b 는 터널 인접 링 구간의 바깥쪽 반지름, k_m 는 링 구간을 둘러싸고 있는 암반의 등가 투수계수, Δh_w 는 링 구간을 둘러싸고 있는 암반 내 손실 수두(Fig. 5)이다.

연속법칙(continuity of flow)에 따라 q_L 과 q_m 의 값이 같고, 링 구간을 둘러싸고 있는 암반 내 손실수두, Δh_w 와 링 구간을 통과하며 발생하는 손실수두, Δh_L 의 합이 초기 수두, H 와 같으므로, 정리를 하면 식 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta h_L = \frac{H}{1 + C(k_L/k_m)} \quad (10)$$

여기서,

$$C = \frac{\ln(2H/b)}{\ln(b/a)} \quad (11)$$

식 (10)을 식 (8)에 대입을 하면 식 (12)와 같이 터널 인접 링 구간 내 투수계수 감소효과를 고려한 터널 내 지하수유입량 계산식을 구할 수 있다.

$$q_L = -\frac{2\pi k_m}{\ln(1+(2H/b)^2)^{0.5}} \cdot \left(\frac{C \cdot (k_L/k_m)}{1+C \cdot (k_L/k_m)} \right) \cdot H \approx -\frac{2\pi k_m}{\ln(2H/b)} \cdot \left(\frac{C \cdot (k_L/k_m)}{1+C \cdot (k_L/k_m)} \right) \cdot H \quad (12)$$

균질 등방성 암반터널 내 지하수 유입량 q_0 산정식인 식 (1)과 비교하여, 터널인접 링 구간 내 투수계수 감소효과로 인한 터널 내 지하수 유입량 감소율(q_L/q_0)은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{q_L}{q_0} = \frac{\ln(1+(2H/a)^2)}{\ln(1+(2H/b)^2)} \cdot \frac{C(k_L/k_m)}{1+C(k_L/k_m)} \quad (13)$$

식 (13)에 의하면 터널굴착으로 인한 인접암반의 투수계수 감소가 상대적으로 큰 경우($k_L = 1/20 \sim 1/10 k_m$), 터널 내 지하수 유입량은 약 50~80%정도 크게 감소한다($q_L/q_0 = 20 \sim 50\%$). 터널인접 링 구간 내 유효응력 증가로 인한 투수계수 감소가 작은 경우($k_L = 1/3 \sim 1/2 k_m$), 지하수 유입량 감소는 약 10~30%정도에 그치는 것으로 산정된다($q_L/q_0 = 70 \sim 90\%$).

투수계수 감소가 큰 링 구간을 둘러싸고 있는 절리암반 내 간극수압 분포는 image tunnel 방법과 유사하게 산정할 수 있으며, 이때 터널반경 a 대신 링 구간을 포함한 반경 b 를 적용하고 식 (1)의 q_0 대신 식 (12)의 q_L 을 적용하여 식 (14)와 같이 유도할 수 있다. 터널의 스프링라인($q = 0$) 상의 간극수압 변화는 식 (15)와

같이 나타낼 수 있다.

$$p = \left[1 - \frac{\ln(\cos^2 \theta + (2H/r - \sin \theta)^2)}{\ln(1+(2H/b)^2)} \cdot \frac{C(k_L/k_m)}{1+C(k_L/k_m)} - \frac{r \cdot \sin \theta}{H} \right] \cdot H \cdot \gamma_w \quad (14)$$

$$p_{sp} = \left[1 - \frac{\ln(1+(2H/r)^2)}{\ln(1+(2H/b)^2)} \cdot \frac{C(k_L/k_m)}{1+C(k_L/k_m)} \right] \cdot H \cdot \gamma_w \quad (15)$$

여기서, a 는 터널 반경, b 는 터널인접 링 구간의 바깥 반지름, k_L 는 터널인접 링 구간 내 감소된 투수계수, k_m 는 링 구간을 둘러싼 암반의 등가 투수계수이다.

Fig. 6은 여러 투수계수 비, k_L/k_m 에 대한 터널 스프링라인($q = 0$)을 따라 정규화된 간극수압의 변화를 보여주고 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 터널인접 링 구간의 투수계수 감소가 클수록, 즉 투수계수비(k_L/k_m)가 작을수록 링 구간 내 수두경사가 커지게 되고, 결과적으로 균질 등방성 암반을 가정하는 경우에 비해 링 구간을 둘러싼 암반구간에서는 간극수압

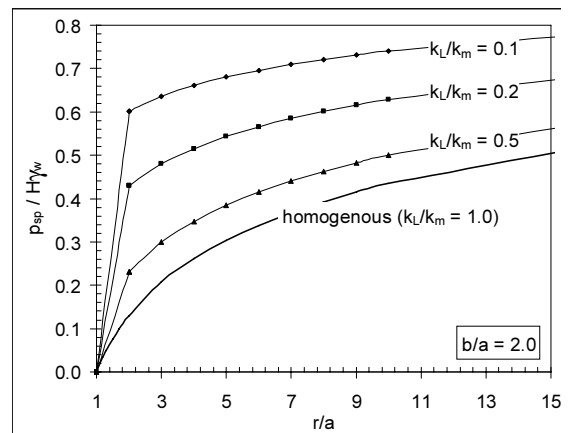


Fig. 6. Normalized pore-water pressure along springline considering permeability reduction zone

이 커지고 수두경사는 작아지게 된다. 앞서 설명한 대로, 링 구간 내 투수계수 감소효과는 터널심도가 깊어지고 주위 암반 절리의 초기 수직 강성도, K_{ni} 가 작아질수록(soft joint) 더욱 커지게 된다.

4. 수치해석을 통한 터널 주변 절리암반의 수리학적 상태 검토

터널인접 링 구간에서의 투수계수 감소효과를 확인하기 위해 2차원 Distinct Element Method 해석 프로그램인 UDEC을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 절리간극은 암반의 유효응력에 따라 결정되고 절리간극에 따라 절리 내 간극수압이 수정되고 다시 암반 내 유효응력이 수정되는 과정이 반복되는 절리의 수리-역학적 상호거동을 고려한 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 3 m 직경의 터널이 2개의 절리군을 포함한 암반에 30~150 m 깊이에 굴착된 것을 모사하였다. 절리의 간격은 3 m로서 터널직경과 동일하게 하였고 터널은 직교하는 두 절리의 교차점에 위치하는 것으로 모델링하였다. 지하수는 절리를 따라서만 흐른다고 가정하였으며, 절리 내 지하수 흐름량은 유효응력에 따라 결정되는 절리간극 a_j 의 3승에 비례하는 입방법칙에 의해 결정되었다. 여러 종류의 암반에

대한 실내시험을 통해 구해진 값을 참조하여 초기 절리간극은 $100\sim 300\ \mu\text{m}$, 초기 강성도는 $1.6\times 10^{-3}\sim 1.6\times 10^{-2}\ \text{MPa}/\mu\text{m}$ 으로 가정하였다(Alvarez, 1997; Bandis et al., 1983). 절리의 역학적 거동은 식 (4)에 주어진 절리 수직변위(ΔV_j) - 절리 유효수직응력(σ_n')의 쌍곡선 관계식을 적용하여 산정하였다.

4.1 절리 암반의 수리-역학적 상호거동

수치해석을 통해 얻어진 정규화된 간극수압분포와 스프링라인을 따라 변하는 간극수압이 Fig. 7에 나타나 있으며, 초기간극수압의 약 50%가 터널벽면으로부터 약 $1\sim 2a$ (a 는 터널반경) 거리 내에서 급감한 것을 볼 수 있다. Fig. 7(b)의 수치해석 예에서 볼 수 있는 바와 같이 터널주변 암반을 균질 등방성 물질로 가정하는 image tunnel 방법과 비교하였을 때 터널벽면으로부터 약 터널반경 거리만큼 떨어진 위치에서 간극수압이 최대 7배까지 크게 차이가 날 수 있음을 알 수 있었다. 터널인접지역에서 간극수압의 급감은 유효응력의 급증과 맞물려 발생하고 이러한 현상은 Fig. 7(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 초기 강성도 K_{ni} 가 작을수록 크게 나타난다. 이는 초기강성도 K_{ni} 가 작을수록 절리의 간극변화가 더욱 민감하게 발생하기 때

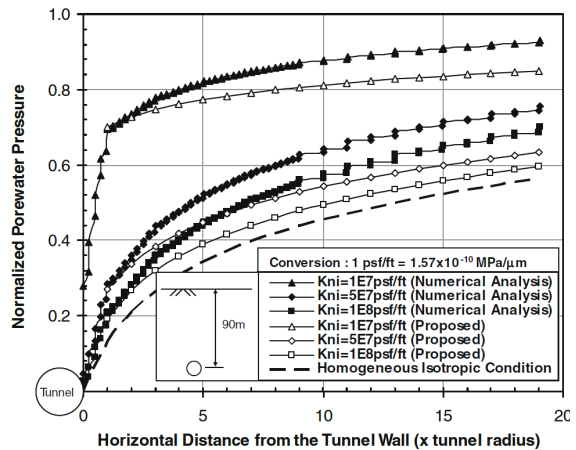
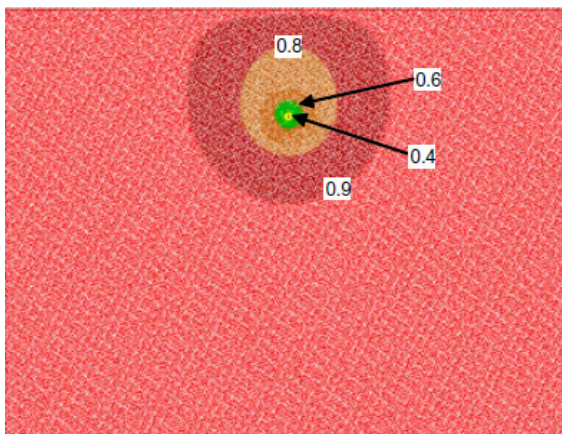


Fig. 7. Normalized pore-water pressure contours and normalized pore-water pressure along spring line of tunnels in jointed rock masses with various initial joint normal stiffness values

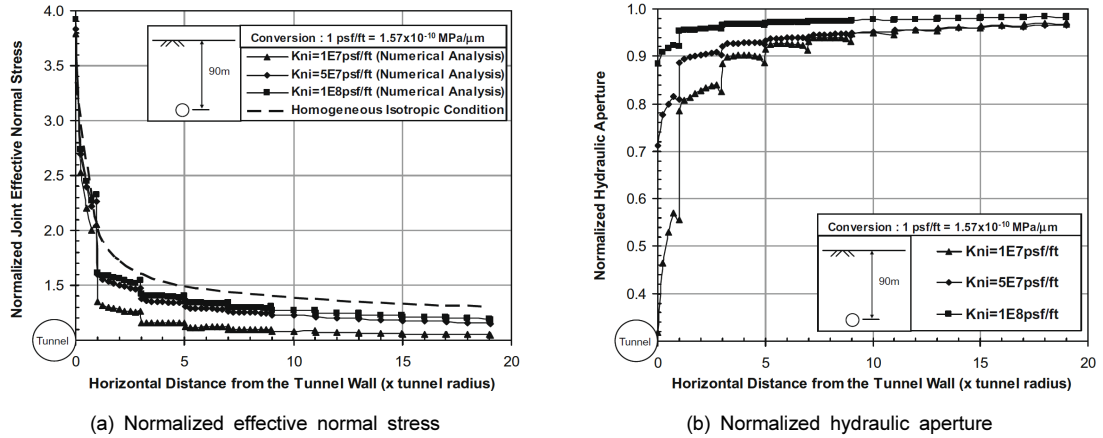


Fig. 8. Normalized effective normal stress and normalized hydraulic aperture along spring line of tunnels in jointed rock masses with various initial joint normal stiffness values

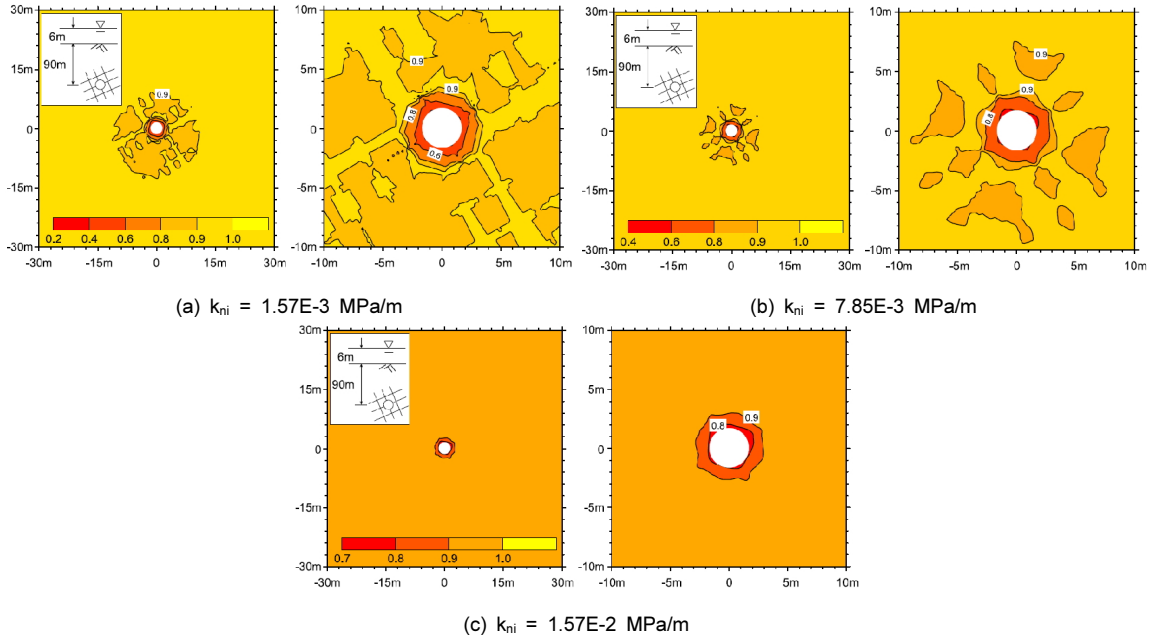


Fig. 9. Normalized joint aperture contour

문이다.

Fig. 8에는 터널의 스프링라인을 따라 유효응력과 절리간극의 변화를 나타내고 있다. 터널 벽면에서는 터널굴착으로 인한 응력집중과 간극수압의 급감으로 인해 유효응력이 초기치에 비해 4배정도까지 증가하지만, 터널로부터 멀어질수록 급격히 감소하여 터널

벽면으로부터 2a (a는 터널반경) 정도 떨어진 위치에서는 초기치에 비해 1.5배 정도 증가하는 수준으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 터널 인접구간에서의 유효응력의 증가는 Fig. 8(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 절리 간극의 급격한 감소를 일으키며, 결과적으로 터널 내 지하수 유입량을 감소시키게 된다.

Fig. 9는 터널 굴착 후 변화한 정규화 된 절리 간극의 분포를 보여주고 있다. Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 터널주위에 원형형태의 contour가 형성되어 있으며, 터널반경 두께의 링 구간에서 절리간극이 특히 크게 감소하였다. 이러한 현상은 절리의 초기 수직강성도, K_{ni} 가 작을수록 더욱 확연히 들어남을 볼 수 있다. 수치해석 결과에 의하면 절리간극이 초기값에 비해 20~50% 수준으로 감소하며, 이는 입방법칙에 따라 터널인접 링구간의 투수계수가 터널굴착 전 절리암반의 투수계수에 비해 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{8}$ 수준으로 감소함을 의미한다. 이 경우 제안된 터널 내 지하수 유입량 산정식인 식 (13)에 의하면 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{8}$ 수준으로 감소된 터널인접 링구간의 투수계수에 의해 지하수 유입량이 설계 시 일반적으로 사용되는 image tunnel method에 비해 약 10~45% 정도 작게 산정된다.

4.2 터널인접 절리암반의 투수계수 감소로 인한 지하수 유입량 감소

Fig. 10은 절리암반 내($K_{ni} = 1.57E-3 \text{ MPa}/\mu\text{m}$, $a_{ho} = 300 \mu\text{m}$) 터널깊이에 따른 지하수 유입량 변화를 보여주고 있다. 절리암반의 투수계수가 깊이에 따라 유효응력의 증가로 인해 감소하고, 이로 인해 터널 내 지하수 유입량 또한 터널깊이가 증가할수록 감소

한다. Fig. 10에서 지하수 유입량 q_0 는 절리암반이 일정한 투수계수 k_m 을 갖는 균질 등방성매체로 가정한 식 (1)을 이용하여 산정되었다. 절리암반의 투수계수는 깊이에 따라 감소하며, q_0 계산시 투수계수 k_m 은 터널깊이에서 절리암반의 등가투수계수를 적용하였다. 지하수 유입량 q_N 은 절리암반의 수리-역학적 상호작용을 고려한 수치해석을 통하여 얻어진 값이다. 따라서 지하수 유입량 q_0 와 q_N 의 차이(음영구간)는 터널 인접 링구간에서의 투수계수 감소효과로 인한 것이라 할 수 있다. q_L 은 q_0 와 마찬가지로 터널깊이에서 절리암반의 등가투수계수 k_m 을 적용하고, 터널 인접 링구간에서 감소된 투수계수 k_L 을 적용하여 식 (12)를 이용하여 산정되었다. k_L 은 수치해석 결과를 분석하여 산정하였고 링 구간은 터널반경 두께로 가정하였다. 수치해석을 통한 q_N 과 제안된 산술식을 이용한 q_L 의 값이 상당히 유사하게 얻어졌고, 두 산정값의 차이는 링 구간을 제외한 구간에서는 균질 등방 절리암반으로 가정하여 깊이에 따른 투수계수 감소현상을 고려치 않은 이유인 것으로 사료된다.

Fig. 11은 절리의 초기 수직강성도에 따라 달라지는 지하수 유입량의 터널 깊이 별 변화양상을 보여주고 있다. 절리의 초기 수직강성도가 상대적으로 작은($K_{ni} = 1.57E-3 \text{ MPa}/\mu\text{m}$) Case 1의 경우 깊이에 따라 터널 주변 투수계수 감소가 두드러져 터널 내 지하수 유입

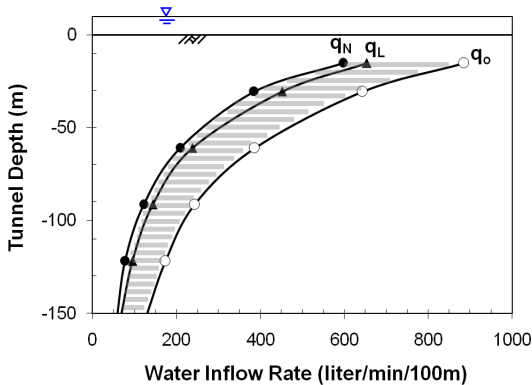


Fig. 10. Assessment of ground-water inflow rates under various hydraulic conditions

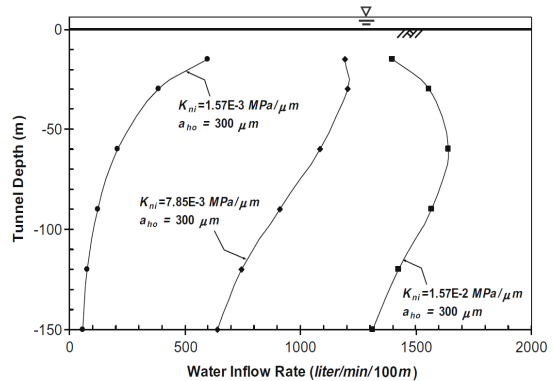


Fig. 11. Change of ground-water inflow rate with depth under various joint geological conditions

량은 터널 깊이가 깊어질수록 작아진다. 하지만, 절리의 초기 수직강성도가 커질수록 터널 굴착으로 인한 터널 인접 절리암반의 투수계수 감소 현상이 작아지고, 일정 깊이까지는 터널 깊이에 따라 증가하는 수두에 의한 영향이 상대적으로 커지게 되어 지하수 유입량은 터널 깊이에 따라 증가하게 된다. 한계깊이 이하에서는 터널 인접 절리암반의 투수계수 감소에 의해 유입량이 감소하는 양이 증가된 수두에 의해 증가되는 유입량보다 크게 되어 터널 내 지하수 유입량은 터널 깊이가 깊어질수록 작아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 한계깊이는 절리의 초기 수직강성도가 증가할수록 증가하는 것을 볼 수 있으며 이러한 현상은 실제 터널 현장에서도 계측되었다(Zhang and Franklin, 1993).

5. 결 언

터널굴착 직후 터널 인접구간에서 응력집중, 간극수압의 급격한 저하가 발생하여 터널인접 절리암반의 유효응력 상승을 일으킨다. 터널인접 절리암반 내 유효응력의 증가는 절리의 간극을 감소시키고, 투수계수의 감소로 이어진다. 이로 인해 터널 내 지하수 유입량이 감소하는 현상이 발생하는 데, 본 연구에서는 이러한 현상을 고려한 터널 내 지하수 유입량과 인접지반 내 간극수압 산정방법을 제안하였다.

이러한 급격한 유효응력 증가는 터널 벽면에서부터 $1a \sim 2a$ (a =터널 반경) 정도의 링구간에서 집중되며, 절리암반 링 구간이 마치 균질 등방의 지반 내 터널에 설치된 $1a \sim 2a$ 두께의 반투수성 콘크리트 라이닝과 비슷한 수리학적 거동을 보인다. 따라서, 터널굴착으로 인한 터널 주변 투수계수감소를 고려한 터널주위 간극수압 분포와 지하수 유입량 산정을 위해 무근 콘크리트 라이닝이 설치된 터널해석과 비슷한 방법으로 식을 유도하였다.

링 구간 내 암반에서의 절리 간극이 터널 굴착 전과 비교하여 20~50% 정도 감소하면, 그에 따라 투수계

수 감소가 50~90% 정도까지 발생하게 된다. 이 구간을 통과하면서 간극수압이 급격히 감소하고 터널 주변 암반이 균질, 등방으로 가정된 기존방법에 비해 수두변화가 매우 크다. 지하수 침투량은 기존 방법에 비해 20~50% 수준으로 감소한다. 즉, 현재 일반적으로 사용되는 계산식의 예측량에 비해 50~80%의 지하수 침투량 감소가 링구간 내 투수계수 저하로 발생한다. 이러한 터널 주변 투수계수 감소로 인한 지하수 침투량 감소는 여러 엔지니어들에 의해 현장에서 관찰되었고, 터널주변 투수계수 감소현상은 절리의 초기 수직 강성도 K_v 가 작고 터널심도가 깊을수록 크게 나타난다.

본 연구에서 제안된 방법은 터널 내 지하수 유출량에 역시 중요한 영향을 주는 지하수위 하강, 깊이에 따른 암반 투수계수의 감소, 굴착 중 암반의 교란 등의 인자들은 고려하지 않았다. 특히 얇은 터널 굴착 시 지하수위 하강은 터널 내 정상류 상태의 지하수 유출량에 큰 영향을 줄 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호: 2012 R1A1A1042512) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Alvarez, T.A., Cording, E.J., Mikhail, R. (1995), "Hydromechanical behavior of rock joints, A re-interpretation of published experiments", Proc. 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Daemen & Schultz, Eds., pp. 665-671.
2. Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N. (1983), "Fundamentals of rock joint deformation", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, No. 6, pp. 249-268.
3. Barton, N., Bandis, S. (1982), "Effects of block size on the shear behavior of jointed rock", 23rd

- U.S. Symp. on Rock Mechanics, Keynote Lecture, Univ. of California, Berkeley.
4. Buehler, Ch., Heitz, D., Trick, Th., Frieg, B. (2003), "In situ Self-Sealing of the EDZ as a consequence of loading, impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories", A European Commission CLUSTER Conference and Workshop, Luxembourg, 3 to 5 November 2003.
 5. Fernández, G., Alvarez, T.A. (1994), "Seepage-induced effective stresses and water pressures around pressure tunnels", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 1, pp. 108-128.
 6. Gale, J.E., Raven, K.G. (1980), "Effect of sample size on stress-permeability relationship for natural fractures", Technical Information Report No. 48, LBL-11865, SAC-48, UC-70.
 7. Goodman, R.E. (1974), "The mechanical properties of joints", *Proc. 3rd Congr. ISRM*, Denver, Vol. 1A, pp. 127-140.
 8. Goodman, R.E., Moye, D.G., Van Schalkwyk, A., and Javandel, I. (1965), "Groundwater inflows during tunnel driving", *Eng. Geol.*, Vol. 2, No. 1, pp. 39-56.
 9. Harr, M.E. (1962), *Groundwater and Seepage*, Chap. 10, pp. 249-264.
 10. Heuer, R.E. (1995), "Estimating rock tunnel water inflow", *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Chap. 3, pp. 41-60.
 11. Heuer, R.E. (2005), "Estimating rock tunnel water inflow", *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Chap. 3, pp. 41-60.
 12. Iwai, K. (1976), *Fundamental Studies of Fluid Flow Through a Single Fracture*, Ph.D. Thesis, Univ. of California, Berkeley, p. 208.
 13. Pusch, R., Börgesson, L., Ramqvist, G. (2003a), "Hydraulic characterization of EDZ in a blasted tunnel in crystalline rock-Measurements and excavation, impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories", A European Commission CLUSTER Conference and Workshop, Luxembourg.
 14. Pusch, R., Liedtke, L. (2003b), "EDZ formation in crystalline rock by TBM drilling and related alteration of hydraulic conductivity, impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories", A European Commission CLUSTER Conference and Workshop, Luxembourg.
 15. Snow, D.T. (1972), "Fundamentals and in-situ determination of hydraulic conductivity", *Proc. Symp. On Percolation Through Fissured Rock*.
 16. Zhang, L., Franklin, J.A. (1993) "Prediction of water flow into rock tunnels: an analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, Vol. 30, No. 1, pp. 37-46.