

압력도수터널 콘크리트 라이닝 구조 계산시 외수압 처리에 관한 연구

이현섭^{1*} · 이영준¹ · 서승우² · 황영철¹

¹정회원, (주)유신

²비회원, (주)유신

A study on the treatment of external water pressure for the water pressure tunnel at the structural analysis of concrete lining

Hyeon-Sub Lee^{1*}, Young-Joon Lee¹, Seung-Woo Seo¹, Young-Chul Hwang¹

¹Korea, Yooshin Engineering Co, 8, 4Gil, Yeoksam-ro, Gangnam-gu, Seoul

ABSTRACT: When the structural analysis is performed for the concrete lining of the water pressure tunnel, many parameters are considered such as relaxed ground loads, internal water pressure, external water pressure, the shrinkage of the concrete lining, grouting pressure, etc. But, there are no standards and manuals for the structural analysis for the concrete lining of the water pressure tunnel. Above all, the external water pressure has an much effect on the stability of tunnel. So, in case that permeability of ground is large, the external water pressure should be decreased by installation of weep hole, or reinforced ground by ground improvement grouting should be pressed by the external water pressure instead. But, when weep hole is installed to reduce the external water pressure, the many problems may me occurred. Thus, reasonable approach for treatment of the external water pressure is necessary if weep hole is not installed. Therefore, the purpose of this study is to analyze design cases and studies for treatment of the external water pressure in performing structural analysis for the concrete lining of the water pressure tunnel, and to find reasonable method for tunnel lining modeling which is the treatment of the external water pressure according to permeability of ground and consequently the design of ground improvement grouting.

Keywords: Water pressure tunnel, Weep hole, Concrete lining modeling, External water pressure, Internal water pressure

초 록: 압력도수터널 콘크리트 라이닝 구조계산시 암반의 이완하중, 내수압, 외수압, 건조수축, 그라우팅압 등 다양한 하중조건을 고려하는데, 아직까지 국내에는 압력도수터널에 대한 콘크리트 라이닝 구조해석을 위한 설계기준 및 체계적인 매뉴얼이 없으므로 설계자에 따라 다르게 적용되고 있는 실정이다. 특히, 도수터널은 외수압을 저감시키기 위해 Weep Hole을 설치하는 경우도 있는데, Weep Hole 설치로 인해 많은 문제점이 야기될 수도 있으므로 Weep Hole을 설치하지 않을 시 외수압 처리에 대한 합리적인 접근 방법이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 압력도수터널 콘크리트 라이닝 구조 계산시 외수압 처리에 대해 기존 설계사례 및 문헌 등을 분석하여 합리적이고 적절한 설계개념에 대하여 서술하였다.

주요어: 압력도수터널, Weep hole, 콘크리트 라이닝 모델링, 외수압, 내수압

1. 서 론

최근 국내에서는 용수공급의 효율화와 공급능력을 확대하기 위한 광역상수도사업이 활발히 진행 중에 있다. 용수공급을 위한 도수관로 부설시 산악지역을 통과하게 되면 부득히 도수터널을 계획하게 된다. 도

*Corresponding author: Hyeon-Sub Lee
E-mail: lhs720@empal.com

Received October 23; Revised November 9;
Accepted November 11

수터널은 용수공급을 위한 터널로써 일반적으로 규모가 작아 굴착공법은 경제성 및 주변 여건을 고려하여 NATAM공법 또는 기계화 시공인 TBM공법을 적용한다. 도수터널의 연장이 1 km 미만인 경우에는 Table 1에서 보인 바와 같이 NATAM공법이 TBM공법에 비해 좀 더 경제성에서 유리하다.

경제성으로 인해 NATM공법으로 도수터널을 계획하게 될 때, 도수터널의 형상은 원형의 콘크리트 라이닝으로 물의 흐름이 원활히 이루어질 수 있도록 해야 한다. 도수터널은 콘크리트 라이닝 구조계산시 NATM터널 굴착으로 인한 암반의 이완하중, 내수압, 외수압, 건조수축, 그라우팅압 등 여러 가지 하중조건을 고려하는데, 아직까지 국내에는 압력도수터널에 대한 콘크리트 라이닝 구조해석을 위한 설계기준 및 매뉴얼이 없으므로 이러한 하중을 적용하는데 있어서 설계자에 따라 다르게 적용되고 있는 실정이다. 무엇보다 터널에 작용하는 외수압은 터널의 안정성에 많은 영향을 미치는데, 지반의 투수성이 큰 경우 Weep Hole을 설치하여 터널 주변 지반의 외수압을 저감시키거나 터널 주변지반에 대해 지반보강그라우팅을 실시하여 보강된 지반이 외수압을 대신 받게 한다. 그러나, 도수터널은 외수압을 처리하기 위한 별도의 배수시스템을 계획하지 않으므로 Weep Hole을 설치

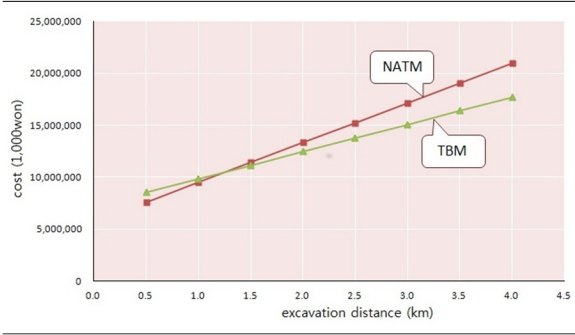
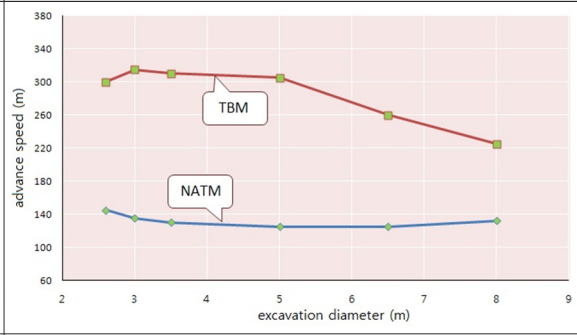
하지 않은 도수터널에 대한 콘크리트 라이닝 구조계산시 외수압을 고려할 경우, 지하수위의 위치에 따라 과도한 정수압을 작용시켜 라이닝 두께 증가 및 과도한 철근 보강이 이루어지게 될 수 있다.

따라서, 본 고에서는 도수터널의 콘크리트 라이닝 구조계산시 외수압 처리에 대해 기존 설계사례 및 문헌 등을 분석하여 지반의 투수성에 따른 외수압 처리와 그에 따른 지반보강그라우팅설계에 대한 것으로 터널 라이닝 모델링 기법에 대한 합리적인 방법을 찾고자 한다.

2. 도수터널 콘크리트 라이닝 구조계산시 외수압 처리

압력도수터널은 운용 중 만수위 조건으로서 내수압이 작용하는 수로터널이므로 내수압에 의한 인장응력이 콘크리트 라이닝에 발생하게 된다. 콘크리트는 허용인장응력이 허용압축응력의 약 1/15~1/16배 정도로서 인장력에 매우 취약한 재료이다. 따라서, 내수압으로 인해 발생하는 인장응력에 대해 철근을 보강하여 콘크리트 라이닝에 발생하는 균열 등을 제어하게 되며, 지하수위로 인해 발생하는 외수압에 대해서는 다음과 같은 검토를 통해 적용여부를 결정해야 할 것이다.

Table 1. Economic efficiency and construction period of water conveying tunnel

Economic efficiency	Construction period																																																
 <table border="1"> <caption>Data for Economic Efficiency Graph</caption> <thead> <tr> <th>Excavation distance (km)</th> <th>NATM Cost (1,000,000 won)</th> <th>TBM Cost (1,000,000 won)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.5</td><td>8</td><td>8</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>10</td><td>10</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>12</td><td>11</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>14</td><td>12</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>16</td><td>13</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>18</td><td>14</td></tr> <tr><td>3.5</td><td>20</td><td>15</td></tr> <tr><td>4.0</td><td>21</td><td>16</td></tr> </tbody> </table>	Excavation distance (km)	NATM Cost (1,000,000 won)	TBM Cost (1,000,000 won)	0.5	8	8	1.0	10	10	1.5	12	11	2.0	14	12	2.5	16	13	3.0	18	14	3.5	20	15	4.0	21	16	 <table border="1"> <caption>Data for Construction Period Graph</caption> <thead> <tr> <th>Excavation diameter (m)</th> <th>TBM Advance speed (m)</th> <th>NATM Advance speed (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3</td><td>300</td><td>130</td></tr> <tr><td>4</td><td>290</td><td>130</td></tr> <tr><td>5</td><td>280</td><td>130</td></tr> <tr><td>6</td><td>260</td><td>130</td></tr> <tr><td>7</td><td>240</td><td>130</td></tr> <tr><td>8</td><td>220</td><td>130</td></tr> </tbody> </table>	Excavation diameter (m)	TBM Advance speed (m)	NATM Advance speed (m)	3	300	130	4	290	130	5	280	130	6	260	130	7	240	130	8	220	130
Excavation distance (km)	NATM Cost (1,000,000 won)	TBM Cost (1,000,000 won)																																															
0.5	8	8																																															
1.0	10	10																																															
1.5	12	11																																															
2.0	14	12																																															
2.5	16	13																																															
3.0	18	14																																															
3.5	20	15																																															
4.0	21	16																																															
Excavation diameter (m)	TBM Advance speed (m)	NATM Advance speed (m)																																															
3	300	130																																															
4	290	130																																															
5	280	130																																															
6	260	130																																															
7	240	130																																															
8	220	130																																															
<ul style="list-style-type: none"> • When excavation distance is over 1.4 km, OPEN TBM is more economical - When below 1km, NATM is more economical 	<ul style="list-style-type: none"> • When excavation diameter is 3.0 m, NATM is about 155 m/month (two way excavation) and OPEN TBM is about 300 m/month - Advance speed of OPEN TBM is twice as fast as NATM 																																																

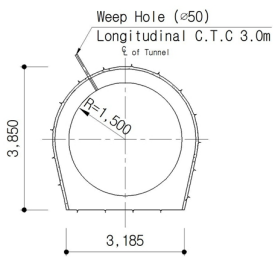
2.1 외수압 처리를 위한 Weep Hole 적용성 및 기존 사례 검토

일반적으로 철도 및 도로터널은 배수터널로서 외수압을 해소시키기 위해 종방향 배수관을 설치하는데, 콘크리트 라이닝 구조계산시 종방향 배수관의 Clogging 효과를 고려하여 암반등급에 따라 잔류수압을 $(1/3 \sim 1/2) \times H \times \gamma_w$ 를 적용하여 하중조합에 따라 반영한다.

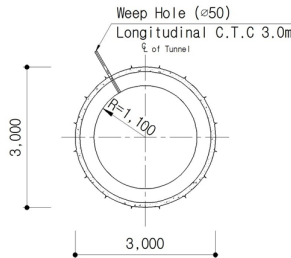
그러나, 압력도수터널은 철도 및 도로터널과 달리 외수압을 해소시키기 위해 Weep Hole을 설치하기도 한다. Weep Hole은 종방향 배수관 대신 터널단면의 크기에 따라 한 단면에 2~3개를 종방향 3 m~5 m 간격으로 설치하여 외수압으로 인한 도수터널의 안정성을 확보하게 된다. 「수로터널 설계 및 시공관리 지침(한국수자원공사, 2007년)」에 의하면, 외수압이 내수압의 2배 이상으로 높을 경우에는 암반 절리면을

Table 2. The cases of design and construction about application of weep hole at water conveying tunnel

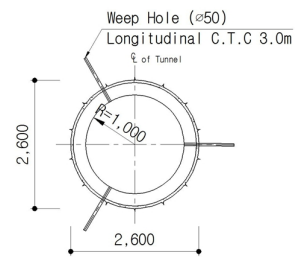
The project	Weep hole	The location and the number of installation	Application of external water pressure
(a) Water conveying tunnel 1,2,3 in Daechung-Dam (step 2) multi-regional water supply system	Installed	Shoulder, 1EA	No structural analysis
(b) 2nd water conveying tunnel in Han-river downstream	Installed	Shoulder, 1EA	Applied
(c) Water conveying tunnel connecting Gwangju city to the Donbok lake	Installed	120° interval, 3EA	Applied
(d) Water conveying tunnel of multi-regional water supply system in the southern part of Jeon-Nam	Installed	Shoulder, 1EA	-
(e) The step 5 project of capital area multi-regional water supply system	Not installed	-	Applied (Only grouting pressure)
(f) Yangsan region of Nakdonggang River riverbank filtrate	Not installed	-	Not applied



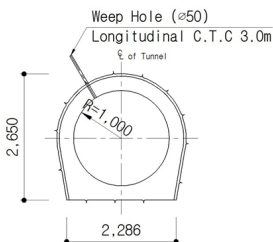
(a) Water conveying tunnel 1,2,3 in Daechung-Dam (step 2) multi-regional water supply system



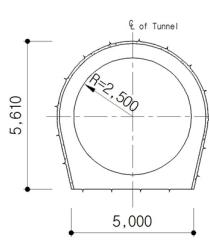
(b) 2nd water conveying tunnel in Han-river downstream



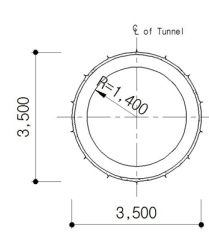
(c) Water conveying tunnel connecting Gwangju city to the Donbok lake



(d) Water conveying tunnel of multi-regional water supply system in the southern part of Jeon-Nam



(e) The step 5 project of capital area multi-regional water supply system



(f) Yangsan region of Nakdonggang River riverbank filtrate

통한 유입량이 콘크리트 라이닝의 통수능력을 상회할 것으로 간주하여 Weep Hole을 설치하며, 일반적인 Weep Hole의 간격은 종방향 3.0 m로 설치하는 것으로 기술되어 있다. 그러나, 내수압이 작용하는 압력도수터널에서는 Weep Hole을 통해 도수터널 내 물이 지중으로 유·출입 될 경우, 도수터널의 내수압 저감으로 인한 에너지 손실, Weep Hole을 통한 터널 주변 지반의 파쇄 등이 발생할 가능성과 그로 인한 지반 내 불순물의 터널 내 유입 등이 이루어져 도수터널 관로 내에 퇴적되어 통수단면적 감소 및 라이닝 내측 표면 마찰에 의한 내구성 저하가 이루어질 가능성이 존재하게 되므로 「수로터널 설계 및 시공관리 지침(2007년)」의 내용은 개수로인 댐의 보조여수로 터널과 같은 경우에 적용이 타당할 것으로 판단된다.

압력도수터널에서 외수압을 해소시키기 위해 Weep Hole을 적용한 기존 사례는 Table 2와 같다.

기존 사례에 의하면, 대부분 Weep Hole을 적용하여 도수터널에 작용하는 외수압을 해소시키도록 하였으나, 수도권 광역 상수도 5단계 사업과 낙동강 여과수 양산구간에서는 콘크리트 라이닝 타설후 콘택트 및 압밀 그라우팅압만을 적용하여 Weep Hole을 미설치하였다. 이처럼 과업별로 Weep Hole의 적용기준 및 사유가 다른 이유는 아직까지 압력도수터널에 대한 콘크리트 라이닝 구조계산시 외수압 처리에 대한 설계기준이 마련되어 있지 않고, 설계자의 판단에 따라 외수압 처리에 대한 대책이 수립되기 때문이다. 따라서, 다음 절에서는 콘크리트 라이닝 구조계산시 외수압 처리 방법에 대해 공학적인 근거를 바탕으로 기술하고자 한다.

2.2 터널의 배수조건에 따른 수압의 크기

Szechy (1973)는 지반압과는 대조적으로 작용수압은 압력의 손실 없이 전체수두(Full Hydraulic Head)가 작용하며, 하중 작용면에 대하여 수직방향으로 모든 점에 일정한 정수두(Hydrostatic Head)가 작용한다고 보고하였으며, 이는 Fig. 1과 같다.

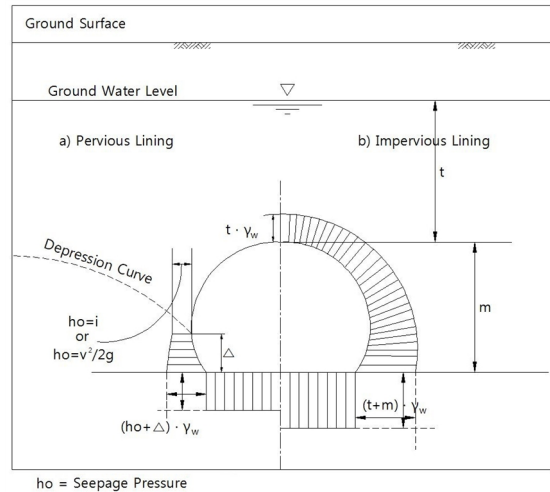


Fig. 1. External water pressure at concrete lining of drainage or undrainage tunnel

여기서, 비배수형 터널은 전체 지하수위를 고려한 정수압을 작용하며, 그 크기는 터널의 Crown부분에서는 $t \cdot \gamma_w$, 터널의 인버트 부분에서는 $(t+m) \cdot \gamma_w$ 의 수압이 작용하게 된다.

배수형 터널의 경우, 지속적인 배수에도 터널 측벽 하부와 인버트 부분에는 수압이 존재하며, 그 크기는 $[(h_0 + \Delta) \cdot \gamma_w]$ 로 적으나 이는 배수기능이 정상적인 상태를 가정된 것이다. Dep. of ARMY Corps. of Engineers (1978)는 정수압과 콘크리트 라이닝과의 관계를 제안하였는데, 라이닝의 두께와 터널 반경과의 관계를 이용하여 라이닝에 작용하는 응력을 다음과 같이 나타내었다.

만약, 라이닝 두께(t)가 반경의 1/10보다 작거나 같은 경우, $\sigma = -\frac{PR}{t} (\text{kg/cm}^2)$ 이며, 여기서 P는 외부 수압, R은 라이닝의 중심선까지의 터널반경이다. 또한, 라이닝 두께(t)가 반경(R)의 1/10 보다 큰 경우,

$$\sigma = -\frac{PR_2^2}{r^2} \frac{(R_1^2 + R_2^2)}{(R_2^2 - R_1^2)}$$

가 되며, 여기서 R_1 과 R_2 는 각각 라이닝의 내부 및 외부 반경이고 r 은 라이닝 내부의 임의의 위치이다.

2.3 터널 콘크리트 라이닝에 작용하는 절리수압

라이닝에 접한 지반은 이완되어 주변보다 투수성이 크며, 절리수압은 외압보다 먼저 라이닝에 작용하고, 라이닝과 지반의 밀착상태(분리도 κ)에 따라서 크기가 다르다.

라이닝이 수밀하고 지반에 밀착되어 있으면 수압은 라이닝 공극과 지반 내 균열에만 $P_w' = \kappa P_w$ 크기로 작용한다.

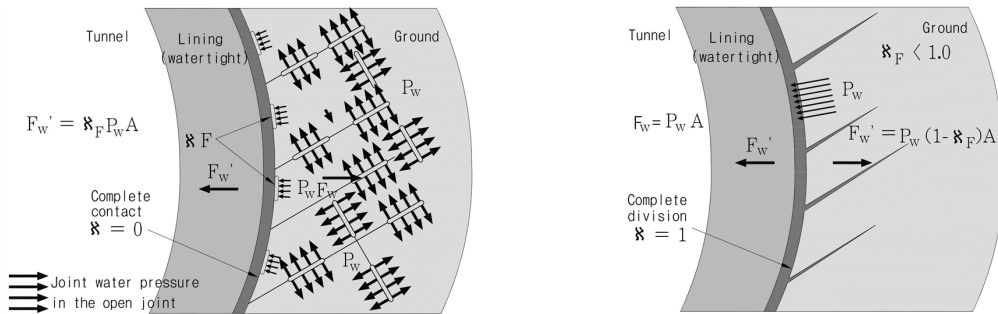
Seeber (1999)는 라이닝에 작용하는 절리수압에 대해 다음과 같이 제안하였다. 라이닝과 주변지반이 완전히 분리되어 있으면, 라이닝과 지반 접촉면의 분리도가 $\kappa = 1$ 이 되고, 라이닝 전체외면에 지반분리도 κF 에 따라 $P_w' = P_w(1 - \kappa F)$ 와 같은 수압이 Fig. 2와 같이 작용한다. 라이닝과 접촉면에 개구절리가

있어서 $\kappa = 1$ 이면, 라이닝이 압축력을 받고 지반의 절리는 더욱 벌어지므로 라이닝이 수밀하지 않으면 절리수가 터널 내로 유입된다.

실제 콘크리트 라이닝은 강성이 크므로 절리수압이 문제가 되는 경우는 드물다. 라이닝과 지반 접촉면의 분리도 κ 가 지반분리도 κF 보다 더 크면 비수압 κP_w (Specific water pressure)이 라이닝에 외압으로 작용하여 그 크기만큼 지반응력이 감소된다.

2.4 지반조건과 작용수압

Rourke (1984)는 토사지반과 암반 중의 터널에 대하여 각각 라이닝에 작용하는 수압설계 개념을 다음과 같이 제시하였다. 먼저 투수성이 양호한 사질토 및 사력토 등의 지반에서 터널이 지하수위 하부에



(a) Complete contact between lining and ground ($\kappa=0$) (b) Complete division between lining and ground ($\kappa=1$)

Fig. 2. Joint water pressure at watertight lining (Seeber, 1999)

Table 3. Estimate water pressure by permeated water at Joint

The inflow type of underground water at joint	Water pressure (kg/cm ²)	Remark
(1) Dry excavation or little permeated water (partial occurrence and permeated water below 5 /min)	under 1.0	1. (3)~(6) are inaccurate estimated value 2. There is no consideration for the effect of freezing
(2) Middle sized inflow and water pressure condition (the state that filled materials at joint is washed)	1.0~2.5	
(3) Water pressure and inflow magnitude are large, and much inflow is occurred at joint that has no filling	2.5~10	
(4) Water pressure and inflow magnitude are large, and filling is washed by inflow	2.5~10	
(5) In excavation, Water pressure and inflow magnitude are large-scale, and those are decreased as time passed	over 10.0	
(6) In excavation, water pressure and inflow magnitude are large-scale, and there are no decrease as time passed	over 10.0	

위치하는 경우, 라이닝의 설계는 지반의 유효응력과 전체 정수압을 모두 고려해야 하며, 비교적 불투수성 지반에 밀착된 라이닝의 경우는 전응력 상태로 휨 모멘트와 축력을 계산할 수 있다. 그러나 대부분의 암반 내 터널에서는 압력 주입으로부터 지하수의 유입경로들을 밀폐시켜 유입수량을 감소시키고, 수압과 접촉하는 영역을 감소시킬 수 있으므로 전체 외부 정수압을 지지할 필요가 없음을 제안하였다.

서울특별시 지하철공사(1983)에서는 지반조건에 따라 콘크리트 라이닝에 작용하는 수압은 이론적으로 전 수압을 적용하지만 실제 계측결과를 다음과 같이 보고하였다. 즉, 모래층에서는 이론수압(정수압)이 작용하고, 모래질 점토층에서는 이론수압의 80% 정도가 작용한다. 그리고 암반의 경우, 절리에 지수주입을 실시하고 콘크리트 라이닝을 암반에 밀착시킨 경우에는 수압이 작용하지 않는다. 참고로 Barton (1995)은 Q-System의 매개변수 결정방법 중 암반내 절리면을 따라 유입되는 침투수로부터 개략적인 수압을 추정하였는데, Table 3에 나타난 바와 같다.

상기 기술된 내용을 토대로 토사층의 경우는 전체 지하수위의 정수압이 작용하나 투수계수가 감소할수록 라이닝의 수압은 감소하는 것으로 판단할 수 있다. 또한 댐설계 기준 해설(한국수자원학회, 2011)에서는 투수계수(K)가 1.0×10^5 cm/s보다 작은 것을 불투수층으로 규정하고 있어 이보다 작은 투수계수를 가지고 있는 암반은 불투수층으로 고려하여 수압을 미적용하는 것으로 하고, 이보다 큰 투수계수를 가지고 있는 암반은 투수층으로 고려하여 도수터널의 누수차단 및 지반보강을 위한 그라우팅을 실시하여 수압을 미적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3. 도수터널의 누수차단 및 지반보강을 위한 그라우팅 설계

본 절은 압력도수터널 주변 지반에 행해지는 그라우팅에 대한 것으로 일반적으로 영구 보강재인 콘크

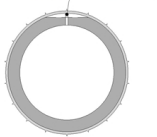
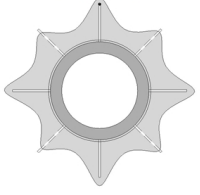
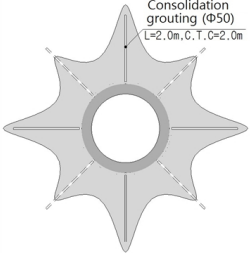
리트 라이닝 타설 후 재료의 건조수축, 강재 거푸집 틈새를 통한 배합수의 유출로 기인한 공극 채움을 위한 충전 그라우팅(Backfill Grouting)을 실시한다. 그러나 압력 수로터널에서는 도수계획에 따라 내수압이 불규칙하게 변동되며, 이완암반에 배면공극이 발생하면 라이닝은 심각한 손상을 입게 된다. 따라서 일반적으로 라이닝과 암반 사이의 작은 공극을 충전하여 내수압을 암반에 균등하게 전달시키고, 라이닝 주변의 암반 강도 증가 및 자연지반과 터널 용수를 차단하기 위하여 압력그라우팅을 실시한다. 본 절에서는 압력도수터널의 그라우팅 적용방안에 대해 검토하였다.

3.1 그라우팅의 설계 개념

압력도수터널은 내수압의 영향에 의해 라이닝 배면 지반이 안정하면 콘크리트 라이닝 또한 안정하다는 기본 개념에서 시작한다. 압력도수터널은 암반과 라이닝이 내수압을 부담하도록 설계되므로, 고수압의 압력터널일 경우 지반 분담압이 부족할 경우가 발생한다. 지반분담압이 부족할 경우는 압밀그라우팅(Consolidation Grouting)을 실시하여 지반보강을 통해 지반 분담압을 증가시켜야 하며, 그렇지 않은 경우에는 라이닝과 이완암반의 균열을 채우기 위한 콘택트 그라우팅(Contact Grouting)을 실시한다. 또한, 시공 중 발생하는 콘크리트 라이닝 타설 후 재료의 건조수축, 강재거푸집 틈새를 통한 배합수의 유출로 발생한 공극채움(터널 천장부)을 위해 충전 그라우팅(Backfill Grouting)을 실시한다. 이러한 압력도수터널에 대하여 일반적으로 적용되는 그라우팅을 Table 4에 나타내었다.

압력도수터널은 배수시설이 설치되지 않는 터널이므로 그라우팅을 실시하여 연약암반의 지반보강 및 차수를 실시함으로써 외수압을 지지하고 아울러 라이닝 배면의 지지력 향상 및 콘크리트의 균열발생시 외부로의 누수를 차단할 목적으로 설계되어야 한다.

Table 4. Grouting profile of water pressure conveying tunnel

Division	Backfill grouting	Contact grouting	Consolidation grouting
Outline			
Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> Gap filling for lining crown zone 	<ul style="list-style-type: none"> Cracks filling around tunnel ground Gap filling for ground-lining interval Water-proof and water-stops 	<ul style="list-style-type: none"> Stiffness increase for soft rock Gap filling for ground-lining interval Water-proof and water-stops
Installation	C.T.C 3.0 m	L = 1.0 m, C.T.C 2.0 m	L = 2.0 m, C.T.C 2.0 m

댐설계기준·해설(한국수자원학회, 2011)에서는 투수계수(K)가 $1.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$ 보다 작은 지반은 불투수층으로 규정하고 있으며 산악터널의 경우를 예를 들면, 일반적으로 암반 I ~ II 등급은 투수계수가 작고 암반의 강성이 높아 암반이 외수압을 지지하는 형태이므로 라이닝면에 수압이 작용하지 않고 누증되어 있으므로 수압은 작용하지 않는다. 그러나 투수계수가 이보다 큰 암반 III, IV, V 등급은 투수층으로서 그라우팅을 적용하여야 한다. 그라우팅은 내수압-지반분담비의 평형조건에 따라 그라우팅의 역할을 나누어 지반강도 증진용 압밀 그라우팅과 이완암반의 균열 및 라이닝 전주면의 접촉면 틈새를 채우기 위한 콘택트 그라우팅으로 구분한다.

3.2 내수압 영향에 따른 라이닝-지반 안정성 검토

라이닝에 작용하는 하중은 지반과 라이닝의 상대강성에 의해 결정된다. 라이닝에 작용하는 내수압은 콘크리트 라이닝을 설치한 경우 배면에 주입하여 긴장하지 않는 한 지반의 역할이 커서 내수압의 거의 대부분을 지반이 지지한다. 이상덕(터널역학, 2013)은 내수압이 작용하는 압력도수터널에 대한 암반-라이닝 상호작용에 관하여 다음과 같이 나타냈다. 도수터널

의 내수압(P_a)에 의해 라이닝과 지반의 경계에 경계압(P'_a)이 유발되어 라이닝 외주면에는 외압(P_A)로 작용하고, 지반 굴착면에는 지반반력(P_F)가 작용한다. 내수압(P_a)는 지반과 라이닝이 상대강성에 따라 분담하며, 지반과 라이닝 경계에서는 각 반경변위 u 와 허용 변형률 ϵ_{al} 이 같다($\epsilon_{al} = \epsilon_F = \epsilon_A$). 따라서, $P_a = P_A + P_F$ 로 나타낼 수 있다. 라이닝과 지반에서 압력과 변형률이 비례한다고 가정하고 각 특성곡선을 Fig. 3과 같이 나타내면 라이닝 분담압력과 소요두께를 구할 수 있다. 라이닝 분담압력(P_A)은 라이닝과 지반의 허용 변형률 $\epsilon_{a,A}$ 로부터 결정되며, 라이닝과 허용 변형률은 내압과 외압에 의한 탄성변형 외에도, 라이닝과 지반의 온도변화 및 크리프에 의한 변형과 라이닝 배면주입에 따른 변형을 고려하여 정한다. 지반분담압력(P_F)는 지반특성곡선의 허용 변형률 ϵ_{al} 에 대한 압력이다. 라이닝의 분담압력은 $P_A = P_a - P_F$ 이고, 콘크리트 라이닝에서 $P_A = P_B$ 이다. 라이닝 분담압력으로부터 라이닝의 소요두께를 계산할 수 있다.

양호(탄성상태)한 지반에서는 압력도수터널의 라이닝을 콘크리트로 두껍게 설치한다. 내수압은 지반이 균열없이 양호하면 라이닝의 내경과 외경의 비 R_i/R_c 만큼 감소되어서 굴착면에 전달된다. 지지력이 작은 지반에서는 라이닝을 철근 등으로 보강하여 라

이닝이 분담할 수 있는 하중을 증가시켜서 굴착면에 전달되는 압력을 지반이 지지할 수 있는 만큼 감소시킨다. 지반이 탄성상태(양호, 무균열)이고 지지력이 크면, 콘크리트 라이닝과 지반의 경계면에서 라이닝 분담압력 P_B 는 지반분담압력 P_F 와 힘의 평형을 이루므로 $P_B = P_F$ 이다.

내수압(P_a)는 라이닝을 통과하는 동안 라이닝의 내경과 외경의 비 R_a/R_c 만큼 감소되어 라이닝 외주면 경계압 $P_a' = P_a \cdot R_a/R_c$ 로 전달되며, 이는 라이닝과 지반이 강성에 따라 분담하여 지지한다. 지반은 내수압에 의하여 발생하는 경계압(P_a')을 지지할 수 있을 만큼 지지력이 커야 하며, 지반이 분담하는 압력(P_F)은 지반의 허용 변형률 ϵ_{aF} 와 변형계수 E_{r1} 에서 구한 압력보다 작아야 한다. 즉, $P_F = E_{r1} \times \epsilon_{aF} \approx (1.0 \times 10^{-4})E_{r1}$ 이다.

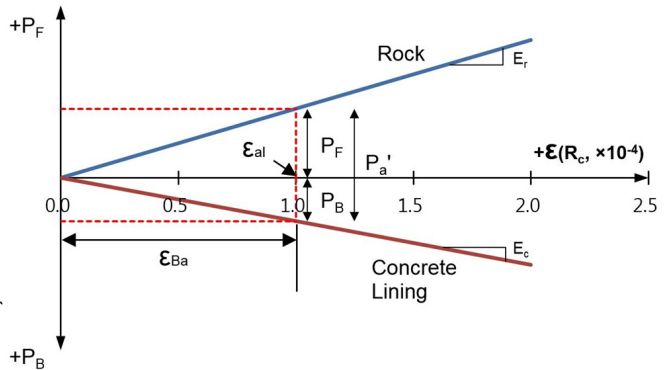
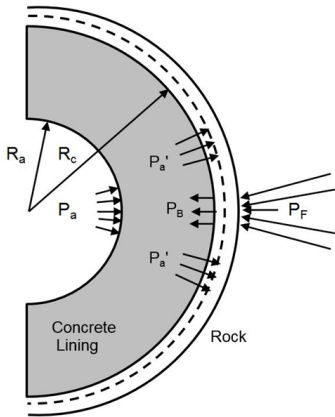
허용 반경변형률 ϵ_{al} 에 대한 지반분담압력 P_F 를

두꺼운 관 이론에 적용하여 라이닝 외주면 반경변형률 ϵ_{Ba} 를 식 (1)과 같이 구하고, 라이닝 분담압력 $P_A = P_a - P_F$ 를 구하여 Hooke 식에 적용하면 라이닝 외주면의 접선응력 σ_{ta} 를 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{Ba} &= \frac{u_{Ba}}{R_c} = \frac{P_a - P_F}{E_B} \left(\frac{R_c^2 + R_a^2}{R_c^2 - R_a^2} - E_{r1} \right) \\ &\approx \frac{P_a - P_F}{E_B} \frac{R_c^2 + R_a^2}{R_c^2 - R_a^2} = \frac{P_B}{E_B} \frac{R_c^2 + R_a^2}{R_c^2 - R_a^2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sigma_{ta} \cong \epsilon_{Ba} E_B = P_B \frac{R_c^2 + R_a^2}{R_c^2 - R_a^2} \quad (2)$$

라이닝 내공면의 허용 반경변형률 ϵ_{iB} 는 라이닝 분담압력 P_B 나 외주면 반경변형률 ϵ_{Ba} 로부터 식 (3)과 같이 구할 수 있고, ϵ_{iB} 를 Hooke 식에 적용하면



(a) Internal water pressure transfer at interface between rock and concrete lining

(b) Distribution of internal water pressure according to characteristic curve of rock-concrete lining

- R_a : Radius to inner surface of lining (m)
- ϵ_{al} : Allowable tensile strain of lining ($\epsilon_{al}=1.0E-4$)
- P_a' : $P_a \cdot R_a/R_c$ Internal water pressure at interface between rock and concrete lining (MPa)
- P_B : Distribution water pressure of concrete lining ($= (R_c^2 - R_a^2)/(2R_c^2) \times E_B \times \epsilon_{al}$) (MPa)
- P_F : Distribution water pressure of rock ($= E_{r1} \times \epsilon_{al}$) (MPa)
- R_c : Radius to outer surface of lining (m)
- P_a : Internal water pressure (MPa)
- E_{r1} : Deformation modulus of rock (MPa)
- E_B : Deformation modulus of concrete (MPa)

Fig. 3. Rock-concrete lining interaction for internal water pressure

라이닝 내공면 접선응력 σ_{ti} 를 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 접선응력이 인장강도 보다 크면 균열이 발생 된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{iB} &= \frac{P_a - P_F}{E_B} \frac{R_c^2}{R_c^2 - R_a^2} \\ &= \frac{P_B}{E_B} \frac{R_c^2}{R_c^2 - R_a^2} = \varepsilon_{Ba} \frac{R_c^2}{R_c^2 - R_a^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sigma_{ta} \cong \varepsilon_{iB} E_B = P_B \frac{R_c^2 + R_a^2}{R_c^2 - R_a^2} = P_B \frac{R_c^2}{R_c^2 - R_a^2} \quad (4)$$

이상에서 라이닝에서 외주면 접선응력 σ_{ta} 가 내공면 접선응력 σ_{ti} 보다 더 크므로 ($\sigma_{ta} > \sigma_{ti}$), 내수압에 의한 균열발생여부는 내공면 응력에 의해 결정된다.

압력도수터널에서는 Fig. 3과 같은 역학관계가 성립한다. 이러한 역학적 평형관계에서 암반접촉면 내수압(P_a')이 암반의 분담압(P_F)보다 클 경우는 지반을 압밀 그라우팅을 실시하여 보강(P_F 의 증가)하는 방법 또는 철근을 보강하는 방법을 채택할 수 있다.

이러한 관계를 정리하면 Table 5와 같이 나타낼 수 있다.

최근 ○○ 광역상수도 사업에 적용된 사례를 근거로 예를 들어 보면 콘크리트 라이닝 내경(Ra)이 2.4 m이고 라이닝 두께가 300 mm인 마제형 압력도수터널로서 터널주변지반의 투수계수 크기에 따라 Table 6과 같이 그라우팅 설계를 할 수가 있다.

라이닝-지반 압력평형조건 검토는 Fig. 3을 이용하여 지반그라우팅 보강여부 및 종류를 결정하게 되는데, 그 결과는 Table 7에 나타내었다.

암반 III등급 이상의 조건에서는 지반분담압력(P_F)이 접촉면 내수압(P_a')보다 높아 지반보강용 그라우팅은 필요 없으나, 암반 III등급은 주변지반이 투수성 지반으로 이완암반 및 라이닝 균열발생시 누수 차단을 위한 콘택트 그라우팅이 필요하였다. 그리고 암반 IV, V 등급의 경우 지반분담압력(P_F)이 접촉면 내수압(P_a')보다 낮아 지반보강용 압밀 그라우팅이 필요할 것으로 나타났다.

4. 결론

압력도수터널에 대한 콘크리트 라이닝 구조계산시 외수압 처리 방안에 대한 검토한 결과는 다음과 같다.

Table 5. The lining type of water pressure tunnel

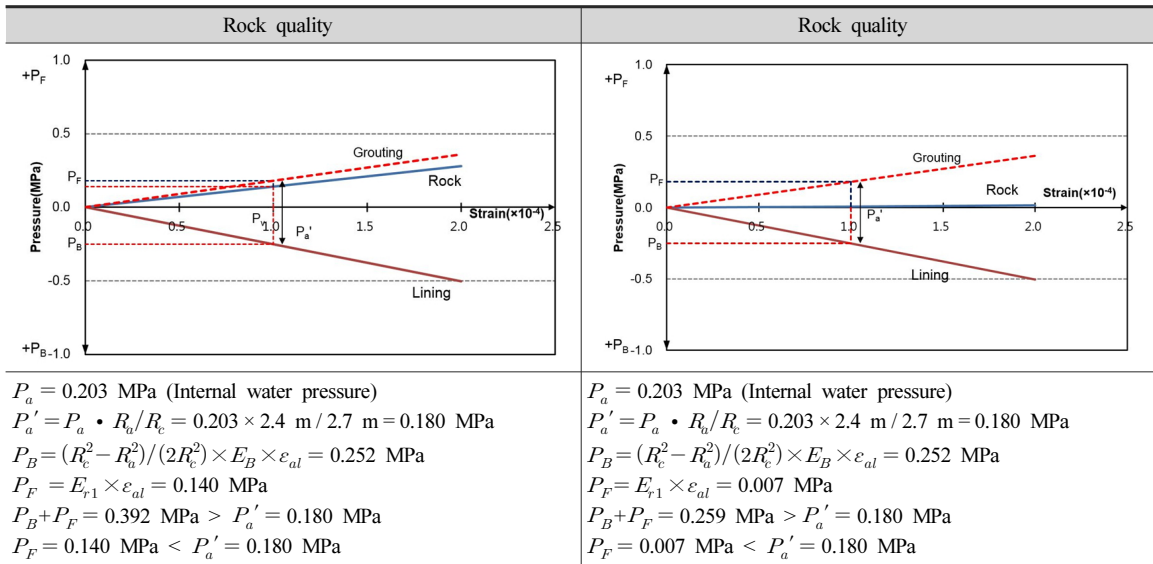
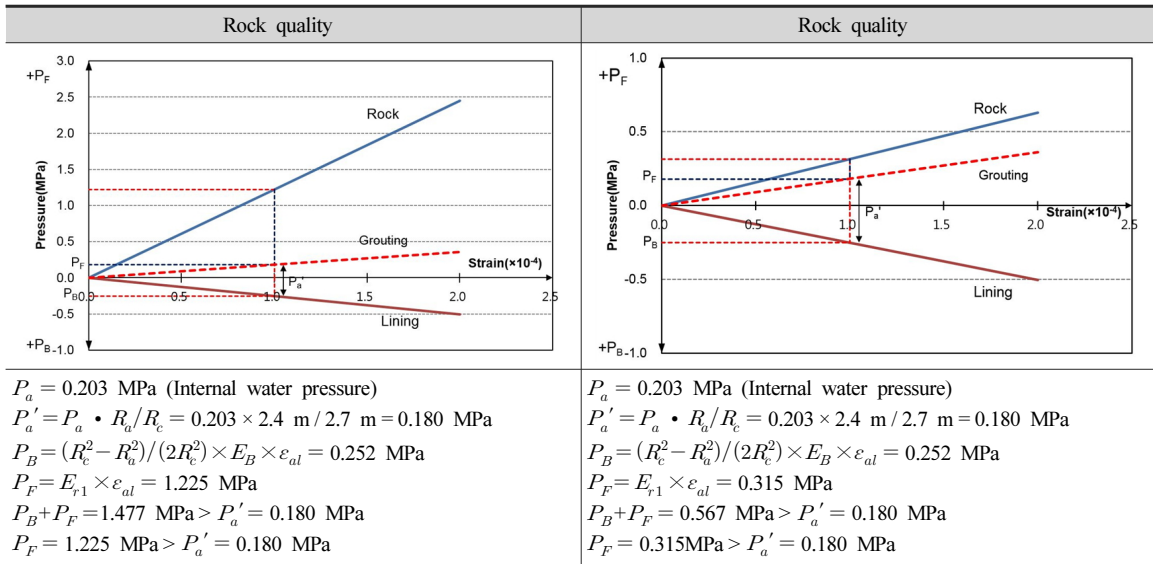
Condition	Lining type	Application
1 $P_a' < (P_B + P_F)$	plain concrete lining	-
2 $P_a' > (P_B + P_F)$	reinforced concrete lining or consolidation grouting for ground improvement	-
3 $P_a' > P_F$	consolidation grouting for ground improvement	
4 Hydro jacking	steel tube or reinforced concrete lining	-

Table 6. Grouting plan according to coefficient of water permeability for rock mass quality

Division	Impermeable layer		Permeable layer		
Coefficient of water permeability (cm/s)	1.0×10^{-6}	4.5×10^{-6}	1.9×10^{-5}	8.0×10^{-5}	3.4×10^{-4}
Design application	cutoff grouting is unnecessary		cutoff grouting is necessary		

the criteria of impermeability layer : 1.0×10^{-5} cm/s (Criteria and explanation of Dam design, Korea Water Resources Association, 2011)

Table 7. stability evaluation of concrete lining-ground for water conveying tunnel acting internal water pressure



(a) Grouting assessment according to coefficient of water permeability for rock mass quality

Rock mass quality	P'_a (MPa)	P_F (MPa)	Assessment	Reinforcement assessment	Permeability assessment
	0.180	1.255	$P'_a < P_F$	cutoff grouting is unnecessary	impermeability
	0.180	0.315	$P'_a < P_F$	cutoff grouting is unnecessary	permeability
	0.180	0.140	$P'_a > P_F$	cutoff grouting is necessary	permeability
	0.180	0.007	$P'_a > P_F$	cutoff grouting is necessary	permeability

(b) Results for grouting assessment according to coefficient of water permeability for rock mass quality

1. 압력도수터널에 대한 콘크리트 라이닝 구조계산시 외수압 처리에 대한 설계기준이 마련되어 설계자에 따라라도 일관되게 적용될 수 있도록, 향후 체계적인 설계기준 수립을 위한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.
2. 도수터널에 대해 외수압을 저감시키기 위한 Weep Hole을 설치하게 되면, Weep Hole을 통해 내수압 저감으로 인한 에너지 손실, Weep Hole 주변 지반 파쇄 등이 발생할 가능성, 그로 인한 지반 내 불순물의 터널 내 유입 등이 이루어져 도수터널 관로 내에 퇴적되어 통수단면적 감소 및 라이닝 내측 표면 마찰에 의한 내구성 저하가 이루어질 우려가 있으므로 Weep Hole을 설치하지 않는 것이 타당할 것으로 판단된다.
3. 댐설계 기준·해설(한국수자원학회, 2011)에서는 투수계수(K)가 1.0×10^5 cm/s보다 작은 것을 불투수층으로 규정하고 있어 이보다 작은 투수계수를 가지고 있는 암반은 불투수층으로 고려하여 수압을 미적용하는 것으로 하고, 이보다 큰 투수계수를 가지고 있는 암반은 투수층으로 고려하여 도수터널의 누수차단 및 지반보강을 위한 그라우팅을 실시하여 수압을 미적용하는 것으로 하는 것이 타당할 것으로 판단된다.
4. 투수계수(K)가 1.0×10^5 cm/s 보다 작은 암반 조건에서는 지반분담압력(P_f)이 접촉면 내수압(P'_a)보다 높아 지반보강용 그라우팅은 필요 없으나, 투수계수(K)가 1.0×10^5 cm/s 보다 큰 암반은 주변지반이 투수성 지반으로 이완암반 및 라이닝 균열발생시 누수 차단을 위한 콘택트 그라우팅이 필요하고, 지반분담압력(P_f)이 접촉면 내수압(P'_a)보다 낮은 암반조건에서는 지반보강용 압밀 그라우팅이 필요할 것으로 판단된다.

국내 압력도수터널 콘크리트 라이닝 구조계산시 지배적 인자인 외수압 처리방법에 대한 상기의 논문은 향후 경제적이고 안정성이 확보되는 콘크리트 라

이닝 구조계산시 체계적인 설계기준 정립을 위해 기존 설계사례 및 문헌을 토대로 평가하였다.

References

1. Barton, N. (1995), "Permanet support for tunnels using NMT", Research meeting of Korean Society for Rock Mechanics & The Korean Society of Engineering Geology, pp. 1-26.
2. Dep. of The ARMY Corps. of Engineers (1978), "Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock", ENGINEER MANUAL EM1110-2-2901 15 SEP.
3. Gwangju Metropolitan Waterworks Authority (2010), "Detailed design report of water conveying tunnel connecting Gwangju city to the Donbok lake".
4. Korea Water Resources Corporation (1995), "Detailed design report of the step 5 project of capital area multi-regional water supply system".
5. Korea Water Resources Corporation (1996), "Detailed design report of Daechung-Dam (step 2) multi-regional water supply system".
6. Korea Water Resources Corporation (2000), "Detailed design report of multi-regional water supply system in the southern part of Jeon-Nam".
7. Korea Water Resources Corporation (2007), "Water conveying tunnel design & construction management guidelines", pp. 641-642.
8. Korea Water Resources Corporation (2011), "Dam design standard & explanation", pp. 219-227.
9. Korea Water Resources Corporation (2011), "Detailed design report of 2nd water conveying tunnel in Han-river downstream".
10. Korea Water Resources Corporation (2013), "Detailed design report of Yangsan region of Nakdonggang River riverbank filtrate".
11. Lee, S.D. (2013), "Tunnel mechanics", Published by SSIAIAL, pp. 251, pp. 995-1047.
12. Rourke, T.D.O'. (1984), "Guidelines for tunnel lining design", American Society of Civil Engineers, New York, pp. 42-43.

13. Seeber, G. (1999), "Druckstollen and Druckschächte", Bemessung-Konstruktion. Ausführung, ENKE Verlag, Stuttgart/New York.
14. Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation (1983), "Technique result report for A team region of Seoul Subway 3·4 line", pp. 193-239.
15. Szechy, K. (1973), "The art of tunnelling", AKADEMIAIKIADO BUDAPEST, pp. 174-304.