The Journal of Engineering Geology, Vol.13, No.4, December, 2003. pp. 445-456

배면 및 압밀그라우팅에 의한 터널 라이닝 하중 연구

박동순[1] · 김학준*[2] · 김완영[3]
[1]한국수자원공사 용담댐관리단, [2]대전대학교 지구시스템공학과, [3]한국수자원공사 수자원연구원

Investigation of the Lining Load Induced by Backfill and Consolidation Grouting

Dong Soon Park[1] · Hak Joon Kim*[2] · Wan-Young Kim[3]
[1]Yongdamdam Office, Korea Water Resources Corporation
[2]Dept. of Geosystem Engineering, Daejeon University
[3]Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation

요 약

배면그라우팅과 압밀그라우팅 보강기술은 터널의 안정성 향상을 위해 터널현장에서 활발히 사용되고 있다. 그러나 이에 대한 시공 및 관리 기술 연구는 상대적으로 대단히 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 심부에 위치한 도수로 터널 시험 구간에 대하여 그라우팅 전후의 각종 현장 시험과 라이닝 계측을 실시하여 압밀그라우팅 및 배면그라우팅 보강이 콘크리트 라이닝의 응력 및 변형 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

터널 그라우팅 보강 효과를 연구한 결과, 그라우팅 보강으로 인해 암반의 탄성계수는 최대 5배까지 증가하였으며 전체적으로 그라우팅의 고결효과는 주목할 만 하였다. 또한, 라이닝 배면에 작용하는 그라우팅 압력은 주입압의 약 10%에 불과하였다. 본 연구 결과는 콘크리트 라이닝 설계시 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 배면 그라우팅, 압밀 그라우팅, 그라우팅 효과, 수로 터널

ABSTRACT: Backfill grouting and consolidation grouting are major reinforcing methods that enhance the stability of tunnel by filling the gap between the tunnel lining and the ground and increasing the stiffness of the ground. However, the effect of the grouting on the tunnel lining is not well established. Field measurements such as pressuremeter test, Lugeon test, and lining instruments were performed to analyze the grouting effect on the tunnel lining for a waterway tunnel.

The elastic modulus was increased up to 5 times than that of original rock mass due to consolidation grouting. This study shows that only 10% of grout pressure was acting on the back face of the tunnel lining. The final results are expected to be used for the design of the concrete lining.

Key Words : Backfill grouting, consolidation grouting, grouting effect, waterway tunnel

*Corresponding author : fulgent@kowaco.or.kr

서 론

터널 라이닝에 가해지는 하중은 다양한 인자들의 영향을 받는다. 특히 라이닝과 지반 사이에 발생하는 공동을 채우기 위해 실시하는 배면그라우팅(Backfill Grouting)과 연약한 주변 암반의 강성을 증가시키기 위한 압밀그라우팅(Consolidation Grouting) 보강은 라이닝의 하중에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 압밀그라우팅의 보강효과, 배면주입압력 및 압밀그라우팅 압력이 콘크리트 라이닝의 안정성에 미치는 영향에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 심부에 위치한 도수로 터널 시험 구간에 대하여 배면그라우팅 전·후에 투수시험과 공내재하시험을 실시하여 그라우팅에 의한 암반의 투수성과 강도 특성의 변화를 분석하였다. 또한 변형율 게이지와 응력계를 라이닝에 설치하여 배면 및 압밀그라우팅 보강이 콘크리트 라이닝의 응력 및 변형 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 그라우팅시 계측에 의한 라이닝 하중을 도출하여 향후 국내에서 시행될 예정인 콘크리트 라이닝 설계 및 그라우팅 보강에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다. 이와 같은 연구 결과는 콘크리트 라이닝의 철근 보강 필요성의 유무를 검토하는 기본 자료로도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

현 황

터널 개요

본 연구에 적용된 현장은 댐에서 물의 공급을 주목적으로 하는 대심도 수로터널로서 터널의 총 연장은 33 *km*에 달하며, TBM 굴착공사 구간 29.5 *km*와 재래식 굴착공사 구간 3.4 *km*를 포함한다. 시험 구간의 터널단면은 Figure 1과 같다. 시험 구간에 대한 보강은 우선 국부적으로 $\phi 8-100\times100$ 의 Wire Mesh 1열을 포함하여 두께 50 *mm*의 건식 숏크리트를 타설한 뒤, 50 *cm* 또는 100 *cm* 간격으로 $H-100\times100\times6\times8$ *mm* 크기의 강지보를 설치하고, 부분적으로 길이 2.5 *m*의 록볼트를 4~5 *EA/m* 로 설치하였다. 2차 라이닝은 두께 0.25 m의 무근 콘크리트 라이닝을 사용하였다.

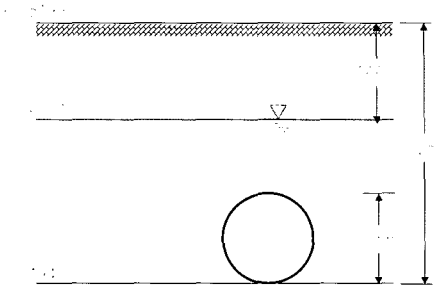

Fig. 1. Profile of the tunnel in the testing site.

지질 및 암반 상태

터널 현장의 지질은 터널의 연장이 매우 긴 만큼 지질조건은 복잡하나 세일, 사암 및 역암으로 구성되는 퇴적암류와 분출암류, 화강암과 맥암류로 구성되어 있다. 암석의 연대는 터널 입구부에 소규모로 분포하는 선캠브리아기의 흑운모 편마암을 제외하고는 중생대 백악기의 경상누층군으로 구성되어 있다.

지질구조는 경상분지의 지질구조와 팔공산 및 청송 융기부 주변의 지질구조의 지배를 받고 있다. 특히 터널 노선을 따라서 발달하는 대표적인 지질구조로는 NE, NW계열의 대·소규모 단층과 암층내에 발달한 절리 및 퇴적암 지역에 형성된 습곡구조를 들 수 있다.

본 연구에 사용된 시험구간은 ○○댐 도수로 터널의 출구에서 입구쪽으로 8,339 ~ 8,351 *m* 지점이며, 화강암류가 주된 암종이다. 본 구간은 그라우팅 보강을 필요로 하는 비교적 연약한 구간이므로 그라우팅 보강 효과를 살펴보기 위한 시험구간으로 선정하였다.

STA. 8335~8345 m 시험구간은 부분적인 파쇄대로서 방해석맥이 발달하고 있다. 풍화도는 약간 풍화 내지 보통 풍화 상태이고, RQD는 25% 이하, RMR값은 19이다 (Table 1). STA. 8345~8350 m 시험구간은 약 5m 폭의 단층파쇄대가 발달하고 있으며, 단층각력이 포함되어 있다. 또한 3~10 mm 정도의 방해석맥이 발달하고 있으며, 절리면의 거칠기는 smooth~slickensided 상태이다. 지하수 유출이 많이 발생하였고, 풍화도는 보통 내지 심한 풍화 상태이다. RQD와 RMR값은 각각 0과 9이다.

Table 1. Evaluated RMR in the Test Site

rating / parameter	STA. 8335~8345		STA. 8345~8350	
	Rock Mass Condition	Rating	Rock Mass Condition	Rating
Uniaxial Stength* (MPa)	50~100	7	25~50	4
RQD (%)	< 25	3	0	3
Spacing of Discontinuities	6~20 *cm*	7	< 6 *cm*	5
Condition of Discontinuities	continuity : >20 *m* separation : >5 *mm* roughness : rough filling : <5 *mm* moderately weathered	6	continuity : >20 *m* separation : 1~5 *mm* roughness : smooth filling : >5 *mm* highly weathered	2
Groundwater	flowing	0	flowing	0
Discontinuity Orientation	N75~85W / 85NW, V N16E / 85NW N50W / 20~45SE	-4	N35E / 85SE, V	-5
Total		19		9

* Estimated from Point-load Strength Index

배면 및 압밀그라우팅

배면그라우팅은 콘크리트 라이닝 타설 시 라이닝과 지반사이에 필연적으로 발생되는 배면 공동을 뒤채움하는 기술이다. 불가피하게 생기는 터널 천단부 공동은 누수 및 라이닝 열화와 손상을 유발하여 사용성을 저하시켜 터널구조물 수명단축의 원인이 될 수 있다. 본 현장에서 배면그라우팅에 사용한 최대압력은 4~5 kg/cm^2이다.

압밀그라우팅은 Fig. 2와 같이 1차와 2차로 나누어 한 단면에 대하여 4공씩 총 8공을 천공하였으며, 1차 압밀그라우팅의 경우 1(Crown) → 5(Invert) → 3(East Side) → 7(West Side)의 순서로 진행하였고, 2차 압밀그라우팅은 8 → 4 → 2 → 6의 순으로 대각선으로 엇갈리게 실시하였다.

STA. 8351에서 시작하여 STA. 8339까지 총 5단면에 대하여 Fig. 3과 같이 3 *m* 간격으로 그라우팅 작업이 수행되었다. 변형율 게이지를 비롯한 각종 계측기는 STA. 8343과 STA. 8346의 두 단면에 각각 매설하였다. 콘크리트 라이닝 타설 전부터 압밀그라우팅 후까지 계측이 수행되었는데, 압밀그라우팅시에는 라이닝의 거동을 정밀하게 파악하기 위하여 30초 간격으로 측정이 실시되었고 그 외에는 30분 또는 1시간 간격으로 측정이 이루어졌다. 압밀그라우팅에는 일반 포틀랜드 시멘트 및 마이크로 시멘트가 사용되었고 물-시멘트의 비율은 10:1, 7:1, 5:1, 3:1 및 1:1의 순서로 진행되었다. 주입압력은 시험구간임을 감안하여 15-20 kg/cm^2까지 시행되었다.

현 장 시 험

개요

본 도수로 터널 현장에 대하여 그라우팅 보강으로 인한 암반의 개량 효과를 정량적으로 평가하

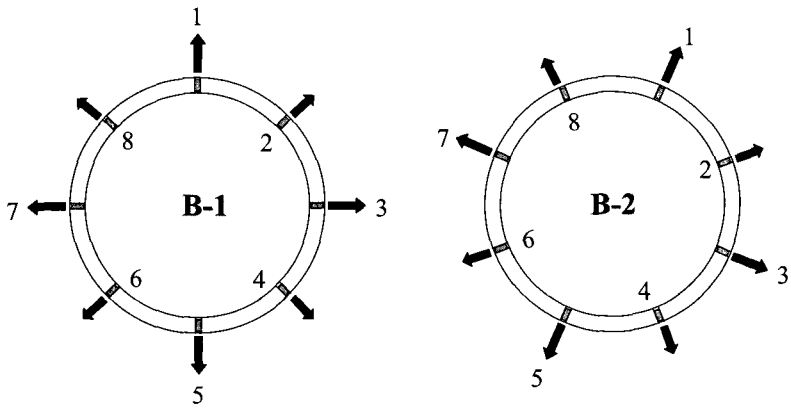

Fig. 2. Injection order of consolidation grouting.

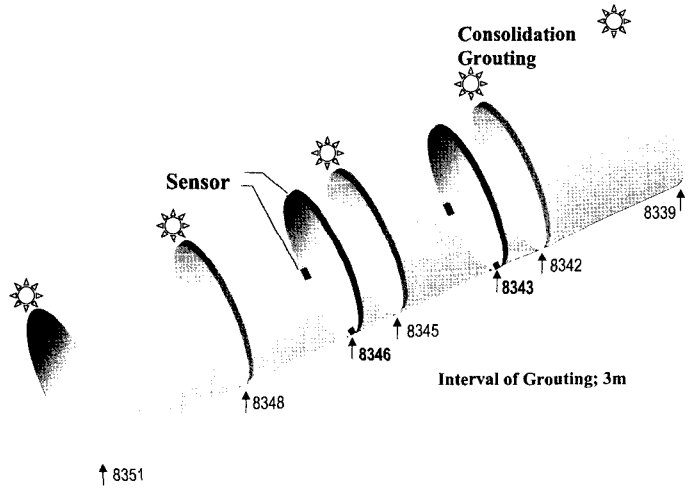

Fig. 3. Longitudinal arrangement of consolidation grouting.

기 위해 수압시험과 공내재하시험을 실시하였다. 암반의 개량 정도는 암반의 탄성계수와 투수성을 확인함으로써 알 수 있으므로, 원암반과 개량암반의 탄성계수와 Lugeon치를 조사하였다.

전반적인 시험의 순서는 우선 라이닝 타설 전에 현장시험을 진행한 뒤 계측기를 매설하고 라이닝을 시공하였다. 그 후 최초 배면그라우팅을 실시하고, 1차 압밀그라우팅을 연속적으로 시행하였다. 다시 2차 압밀그라우팅을 시행하고 그라우팅 후에 개량암반에 대하여 현장시험을 한 번 더 수행하였다.

공내재하시험 및 수압시험

공내재하시험은 보링공 내에 pressure cell을 삽입하여 공벽에 등분포의 내압을 가함으로써 공경의 확대량을 측정하고 그 값으로부터 지반이나 암반의 변형계수(D_m) 또는 탄성계수(E_m)를 구하는 시험이다. 공내재하시험 위치는 출구로부터 8349~8350 m 지점이었으며 터널 내에서의 천공 위치는 동일 단면에서 좌우 측벽부 1공씩과 인버트부 1공 등 총3공으로 하였다. 보링공의 직경은 NX 크기이며 심도는 6m이었다. 시험은 압밀그라우팅 구간에 대해서는 1.5 m 간격으로 실시하고,

그 이상의 심도에 대해서는 4.5~6.0 m 구간에서 실시하였다.

압밀그라우팅에 의한 암반의 투수성 개량 효과를 파악하기 위하여 수압시험을 수행하였다. 수압시험과 공내재하시험은 동일한 보링공을 사용하였으므로 수압시험의 위치는 공내재하시험 위치와 동일하다. 터널 내 동일 단면에서 좌우 측벽부 1공씩과 인버트부 1공 등 총 3공을 천공하여 double packer를 사용하여 수밀성을 유지한 뒤 실험을 실시하여 그라우팅 보강 전과 후를 비교 분석하였다. Packer 설치 후 주입압력을 1, 3, 5, 7, 10, 7, 5, 3, 1 kg/cm^2의 다단계 승압 및 감압을 실시하였으며, Lugeon값(L_u)과 투수계수(k)를 산정하는 식은 다음과 같다.

$$L_u = \frac{10Q}{pL} = \frac{10q}{p} \quad (1)$$

$$k = \frac{2.3Q}{2\pi HL} \times \log \frac{L}{r} \quad (2)$$

여기서, Q : 주입량 (l/min)

q : 1 m당 주입량 ($l/min/m = Q/L$)

L : 시험구간의 길이 (m)

p : 유효주입압력(kg/cm^2)으로서 입구주입압력에서 자연수압을 뺀 값

H : 총수두 (m)

r : 공의 반경 (cm)

시험 결과

압밀그라우팅 전·후의 공내재하시험 결과는 Table 2와 같다. 그라우팅 전의 변형계수(Dm)는 암반면으로부터 3m 내인 경우 1,055~35,027 kgf/cm^2, 탄성계수(Em)는 1,360~48,083 kgf/cm^{2}로 나타났으며, 그라우팅 후에는 각각 6,146~40,006 kgf/cm^{2}과 6,817~54,177 kgf/cm^{2}로 나타나 개량효과가 있는 것으로 나타났다. Kikuchi et al.(1993)에 의하면 암반의 변형성은 개량 전보다 1.3~4.0배까지 증가하며, 암질이 연약할수록 그라우팅 후의 변형계수 증가율이 큰 것으로 보고하였다. 본 연구에서도 변형계수는 1.03~5.83배, 탄성계수는 0.73~5.01배의 개량효과가 있는 것으로 나타나 Kikuchi 등의 연구와 유사한 결과를 보여주고 있다.

STA. 8349.5 m에 대한 수압시험(Lugeon Test)의 결과를 정리하면 Table 3과 같다. 적용패턴이 TF라 함은 여러 가지의 측정값들 중 가장 높은

Table 2. Results of pressuremeter test

Hole Location	Depth(m)	Before grouting	After grouting	Improvement ratio (Dm/Em)
		Dm/Em (kg/cm^2)	Dm/Em (kg/cm^2)	
Right Side	1.3 (1.5)*	17843 / 37301	18348 / 27404	1.03 / 0.73
	2.6	14461 / 18414	27556 / 48065	1.91 / 2.61
	4.6	5296 / 7936	18274 / 24194	3.45 / 3.05
Left Side	2.0 (1.3)*	6936 / 9695	37202 / 43416	4.48 / 1.38
	2.7 (4.3)*	19594 / 34564	27458 / 38331	1.38 / 1.11
	3.3 (5.5)*	43305 / 74434	49901 / 58585	1.15 / 0.79
Invert	0.7	1055 / 1360	6146 / 6817	5.83 / 5.01
	2.7	35027 / 48083	40006 / 54177	1.14 / 1.13
	5.5	23923 / 43304	32651 / 54271	1.36 / 1.25

※ ( )* Depth after grouting

Table 3. Results of Lugeon test

Test Location	Before Consolidation Grouting			After Consolidation Grouting			Notes
	Test Section	Applied Pattern	Lu	Test Section	Applied Pattern	Lu	
West Side	0.55-3.55	TF	0.48	1.0-4.0	LF	2.62	Increase
	2.95-6.0	TF	0.52	3.4-6.0	TF	0.29	Decrease
East Side	0.25-3.25	-	0.86	0-1.8	TF	17.8	Increase
	3.0-6.0	Severe leakage		3.0-6.0	TF	2.78	Decrease
Invert	0-3.0	Severe leakage		0-3.0	-	-	?
	2.76-5.76	-	0.67	3.0-6.0	LF	16.90	Increase

LF: Laminar Flow, TF: Turbulant Flow

값을 사용함을 말하며, 이는 가장 고압일 때 가장 낮은 Lugeon값을 보이는 경우 이를 난류의 흐름으로 해석하기 때문이다. 또한 LF는 층류의 해석으로서, 여러개의 Lugeon값이 비슷하거나 같을 때 적용하며, 측정 Lugeon값들의 평균을 사용한다. 수압시험 결과 자료에 의하면, 수압시험 측정값들의 분산 정도는 상당히 흩어짐이 심함을 알 수 있으며, 압밀그라우팅 보강이 투수계수 저감에 기여하는 효과에 대해 지배적인 성향을 찾기가 쉽지 않다. 부분적으로는 감소한 구간이 있으나, 다른 부분은 오히려 Lugeon치가 증가함으로써 투수성을 더 증대시키는 것으로 나타났다. Lugeon치가 증가한 구간은 압밀그라우팅압에 의해 암반의 절리 틈새가 다소 확장되었거나 그라우팅압에 의해 절리의 충전물이나 협재물이 씻겨져 나갔을 가능성이 있다. 즉, 본 시험구간과 같이 RMR 9~19로 절리가 심하게 발달된 풍화암 구간에서는 그라우팅압 등에 의해 국부적으로 악영향을 초래할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 지반상태가 불량할 경우에는 그라우트 주입압이 보강 효과에 미치는 영향을 신중히 검토하여 주입압을 결정하여야 한다. 즉, 지반상태가 불량하여 국부적으로 grouting 후 오히려 암반의 투수성이 증가하는 현상을 막기 위해서는, 근본적으로 최대 주입압(본 현장의 경우 20 kg/cm^2)을 외수압보다는 큰 범위 내에서 감소시켜 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료되며, 대상 암반의 절리분포 특성에 대한 면밀한 관찰이 요구된다. 그러나, 결과적으로 국부적인 투수성 증가문제는 외수압의 증가로 이어져 라이닝의 안정성에도 장기적으로 영향을 미칠 수 있으므로, 이 경우에는 수압시험의 목표치를 설정하여 기준치 초과시에는 재주입을 행하는 방법을 검토하여야 한다.

라이닝 계측

개요

배면 및 압밀그라우팅이 라이닝에 유발하는 응력을 조사 · 분석하기 위하여 변형율 게이지와 응력계를 이용하여 라이닝 계측을 수행하였다. Table 4와 같이 총 4종류의 계측기가 사용되었으며 센서는 모두 진동현식을 사용하였다. 계측기의 종류와 특징은 Dunnicliff(1988)에 의하여 상세히 제시되었다.

무응력 변형율 게이지(No stress strain gauge)는 매립형 변형율 게이지의 총 발생 변형율중 라이닝에 작용하는 하중이 아닌, 콘크리트 라이닝의 건조 · 수축에 의한 변형율과 온도변화에 의한 변형율을 측정하기 위하여 STA. 8343 지점과 STA. 8346 지점에 각각 2개씩 설치하였다. 계측결과는 크게 세 부분으로 나뉘며, 첫 번째는 게이지가 설

Table 4. Instruments used for the test site

Sensor	Objective	Numbers	Total
No Stress Strain Gauge	Correction of lining strain	2EA/section 2 section	4
Embedment Strain Gauge	Measurement of lining strain in tangential direction	4set/section 2EA/1set 2 section	16
Attachment Strain Gauge	Measurement of steel rib strain in tangential direction	2EA/section 2 section	4
Pressure Cell	Measurement of radial pressure acting on the lining	3EA/section 2 section	6

치된 무응력 셀 안에 콘크리트를 채우고 콘크리트 라이닝이 타설되기 전까지로서 아직 굳지 않은 콘크리트가 수화작용에 의해 열이 발생하면서 체적이 미소하게 팽창하는 구간이다. 둘째는 라이닝 타설 직후 단계로서 타설된 라이닝 콘크리트가 약 7일간에 걸쳐 수화반응과 함께 경화되어 가면서 점차 안정화 단계에 접어드는 구간이며, 건조수축 및 온도변화에 따른 대부분의 변형율이 이때 발생한다. 세 번째 단계는 완전히 안정화되어 가는 구간이며, 변형율 변화는 거의 발생하지 않는다.

매립형 변형율 게이지(Embedment strain gauge)는 배면 및 압밀그라우팅시 콘크리트라이닝의 접선방향으로의 응력변화를 파악하기 위해 설치하였다. 특히 콘크리트라이닝 단면내의 응력변화를 정밀하게 파악하기 위하여 동일 위치에서 터널 내측과 외측에 약 10 cm의 거리를 두고 접선방향으로 평행하게 설치하였다.

부착형 변형율 게이지(Attachment strain gauge)는 라이닝 타설 후 그라우팅시 강지보의 응력 변화를 측정하기 위해, STA. 8343과 8346 단면의 좌우측벽에 있는 강지보에 각각 2개씩 설치하였다. 설치방향은 매립형 변형율 게이지와 마찬가지로 접선방향이다.

압력계(Pressure cell)는 배면 및 압밀그라우팅시 라이닝에 작용하는 그라우팅압의 크기와 분포를 파악함을 목적으로, 편평한 모양의 cell을 터널 굴착면과 평행이 되도록 즉, 반경방향으로 작용하는 그라우팅압을 측정하도록 설치하였다.

계측결과 및 분석

무응력 변형율 게이지의 측정결과 콘크리트 라이닝의 건조·수축 및 온도변화에 따라 발생된 변형율은 약 +50 με이며 이 값에 콘크리트의 탄성계수(220,000 kg/cm^2)를 곱하여 응력으로 환산하면 11kg/cm^{2}의 응력에 해당된다. 이 응력은 콘크리트 자체의 건조·수축과 온도변화에 의해, 터널 하중과는 무관하게 발생되는 응력이며 전체 4개의 게이지에서 변형율이 거의 동일하게 측정되어 계측의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

대표적인 특성을 갖는 한 단면, 즉 STA 8343 크라운부에서 매립형 변형율 게이지에 의해 측정된 시간 경과에 따른 라이닝 발생 응력 분포도는 Fig. 4와 같다. 그림에서 가로축은 일정하지 않은 time interval에 대한 계측 기록 번호이며, 세로축은 응력분포를 나타낸다. 무응력 변형율 게이지의 Sampling Time마다 실제로 측정된 응력값들을 제외한 순수 외부하중에 의하여 유발된 콘크리트 라이닝 응력의 계측 결과 중 최대값들을 모아 정리하면 Table 5와 같다.

Fig. 5는 강지보의 부착형 변형율 게이지 계측결과 중 STA 8346 측벽부의 계측 결과이다. 부착형 변형율 게이지에서 나타난 강지보의 응력변화 양상은 두 단면에 대해 매입형 변형율 게이지의 분포와 동일하며, 최대 -567.8 kg/cm^2의 압축응력이 그라우팅으로 인해 유발되었다. 이는 본 수로터널의 주 지보재가 강지보인 점을 감안할 때, 주의를 기울일 필요가 있는 것으로 판단된다.

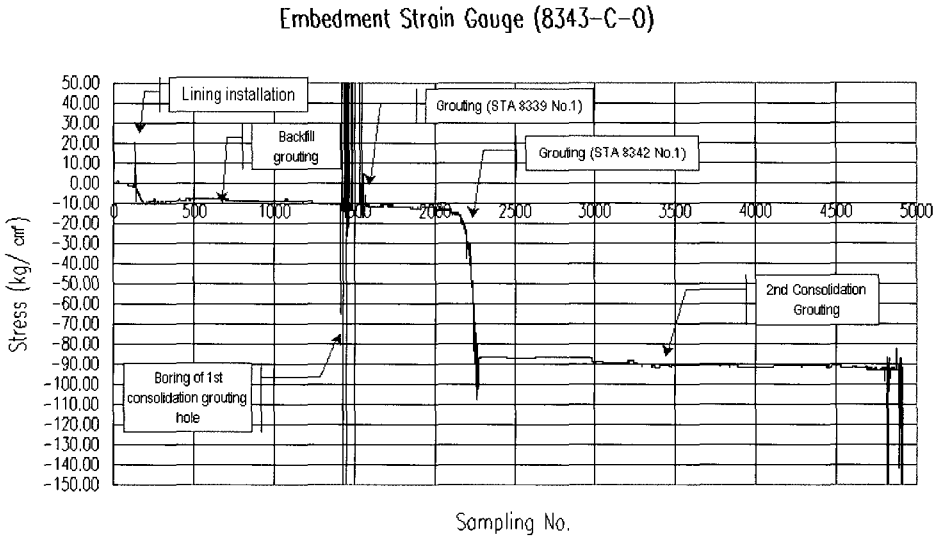

Fig. 4. Lining Pressure with time at the crown of STA 8343.

Table 5. Results of embedment strain gauges (units: kg/cm^2)

Location	Crown		West		Invert		East	
	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
STA. 8343	-58.7	-73.48	-	-22.81	-40.37	-35.74	-28.32	-20.18
STA. 8346	-13.41	-10.19	-22.27	-18.55	-	-39.63	-30.76	-22.03

Note: Negative signs indicate compressive stresses.

배면 및 압밀그라우팅시 그라우팅압의 크기 및 분포를 파악하기 위하여 토압계를 설치하였는데 예상치보다 훨씬 작은 압력인 약 2 kg/cm^2 이 작용하는 것으로 나타났다. 이와 같은 크기의 압력은, 배면그라우팅에 사용한 최대압력이 4~5 kg/cm^2이며 압밀그라우팅시 최대 20 kg/cm^2 정도의 고압 주입을 실시한 것을 고려할 때 상대적으로 매우 작은 압력이 라이닝 배면에 걸리는 것으로 나타났다.

이는 현재 터널 설계 단계에서 그라우팅 주입압을 고려한 구조해석시, 그라우팅 주입압이 라이닝 원주면을 따라 100% 작용한다고 보는 가정과는 판이하게 다른 결과를 보이는 것이다. 즉, 지금까지 수로터널 라이닝 안정해석시 적용해오고 있는 가정이 상당히 보수적이어서 가정치보다는 훨씬 작은 압력값을 사용할 수 있음을 시사한다. 그러나, 본 현장의 암반 조건만을 가지고 전체적인 그라우트압 경감 효과를 확신하기는 어려우며, 암반 상황에 따라 탄력적인 적용과 이에 대한 심도 깊은 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

그라우팅 효과 분석

압밀그라우팅의 효과 분석을 위한 공내재하시험 결과, 주변 암반은 상당한 개량효과가 있는 것으로 나타났으며, 주입심도를 3 m로 유지한 본 연구에서는 종방향으로는 5 m 정도까지 충분히 보

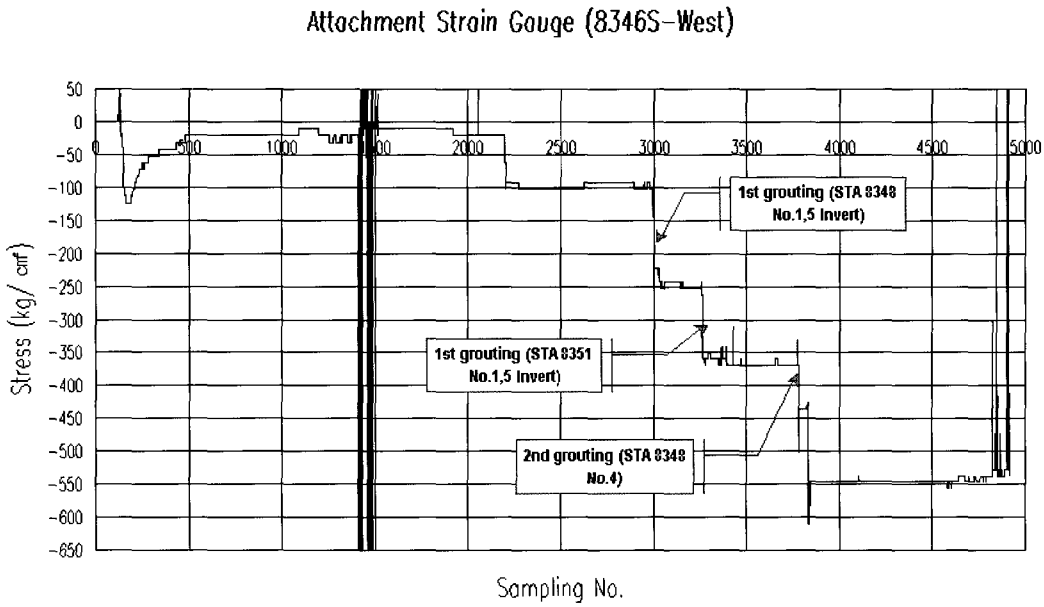

Fig. 5. Results of attached strain gauges at the sidewall of STA 8346.

강효과가 전달되며, 동일 단면에 대해서는 반경 6 m 선까지도 효과가 유효한 것으로 나타났다. 그러나 최대 20 kg/cm^2의 주입압으로 분사시켰을 때 개소에 따라 라이닝 콘크리트의 허용응력을 초과할 수도 있는 큰 응력을 유발시킬 수 있으므로, 주입압을 감소할 필요성이 있다. 경우에 따라서 과도한 주입압은 연약한 암반지대에서는 절리면의 틈을 오히려 넓히며, 협재물 등이 씻겨 내려감으로 인해 저항이 커져 오히려 불리한 결과를 초래할 수도 있으므로 주의를 요한다. 또한, 배면 그라우팅이 콘크리트 라이닝에 미치는 영향은 대단히 미소한 것으로 나타났으며, 거의 영향이 없다고 간주해도 무방하였다.

복합 지보 시스템의 하중 산정

계측 결과를 바탕으로 본 현장과 같은 그라우팅 보강시 복합 지보 시스템에서의 지보 하중을 정량적으로 산정하여 그라우팅압이 지보 하중에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

강지보와 숏크리트의 조합의 경우, 강지보와 숏크리트가 분담하는 하중을 별도로 분리해서 고려해야 한다. Eisenstein 등(1991)은 숏크리트와 강지보 사이의 하중(T)에 관한 분담율을 각 구조재의 강성(E)과 면적(A)의 비로 나타내었다.

$$\frac{T_{rib}}{T_{shotcrete}} = \frac{(EA)_{rib}}{(EA)_{shotcrete}} \qquad (3)$$

강지보와 숏크리트로 지지된 터널의 하중을 구할 경우 강지보 축력과 숏크리트 축력을 합하여 구하거나, 둘 중 하나의 지보재에서만 터널 하중을 측정한 경우 식 (3)을 이용하여 다른 지보재의 하중을 구한 후 이 두 값을 더해주어야 한다.

위 이론을 본 현장에 적용시켜 지보재에 걸리는 하중을 강지보 측정자료를 이용하여 계산하였다. 계산에 적용되는 물성치 및 단면 재원은, 강지보의 단면적 0.00219m^2, 강지보 간격 0.5m, 강지보 탄성계수 2.1x10^7 t/m^2, 반경 1.75m, 숏크리트 두께 0.05m, 숏크리트의 탄성계수 1.5x10^6 t/m^2 이다. 그라우팅 주입시 순간적으로 발생한 최대 응력

계측값(STA.8343 - East)으로부터 지보재에 작용하는 응력(P)는 T = PR의 공식을 이용하면 Fig. 6과 같이 계산된다.

그라우팅에 의한 라이닝 하중은 무차원 계수(n)를 도입하여, 라이닝에 의해 지지되는 암반이 완하중고가 직경의 몇 배에 해당하는지를 정량적으로 표현할 수 있다(Kim, 1997).

$$n = \frac{P}{\gamma D} = \frac{P/\gamma}{D} \quad (4)$$

라이닝 하중평가 결과는 Rib + Shotcrete 복합 지보시스템에서의 계측 결과에 따라 Table 6과 같이 정리된다.

따라서 강지보와 숏크리트의 복합 지보 시스템을 사용하는 본 현장 조건의 경우, 그라우팅 주입

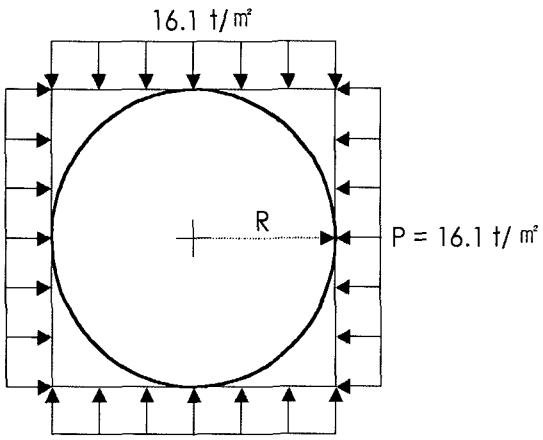

Fig. 6. Stresses acting on the steel rib and shotcrete due to grouting.

압이 최대 20 kg/cm^2 ,즉 200 t/m^2일 경우, 이에 의한 1차 지보재에 걸리는 응력은 최대 16.1 t/m^2 만큼 증가하는 것으로 나타났다. 이는 암반의 단위중량이 2.4 t/m^3임을 고려할 때 터널 직경(3.5 m)의 약 1.9배에 해당하는 암반하중과 같은 값이다. 단, 본 현장의 경우 종방향으로 계측 센서의 매설 지점과 압밀그라우팅 실시 지점이 최소 1 m에서 최대 8 m까지 떨어져 있으며, 계측 결과는 평균 응력값을 적용하였다는 점을 감안하여야 한다. 일반 현장 적용시에는 다양한 기초 자료가 더 확보되어야 할 것이다.

결 론

계측에 의한 터널 그라우팅 보강 효과를 연구한 결과, 종합적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 그라우팅 보강으로 인해 암반의 탄성계수는 최대 5배까지 증가하였으며, 전체적으로 그라우팅의 고결효과는 주목할 만하다. 그러나 투수계수 저감효과는 그 편차가 큰 편이며, 암반 절리면의 분포 특성과 선택적 투수성에 지배됨을 반증해주었다.

2) 본 현장에서는 최대 주입압 20 kg/cm^2일 때, 2 kg/cm^2의 압력이 걸림으로서 실제 주입압의 10%만 라이닝 배면에 압력으로 작용하였다. 따라서, 라이닝 설계시 그라우팅압을 고려할 경우 라이닝 배면에 미치는 그라우팅압의 크기를 주입압의 100%로 보는 것은 보수적인 설계이므로, 수치해석 단계에서 주입압에 대한 적절한 저감 인자 도입이 필요하다.

Table 6. Maximum lining load induced by grouting pressure

Sensor Location	Maximum lining load (t/m^2)	n
STA.8343 East	16.1	1.9
STA.8343 West	11.5	1.4
STA.8346 West	8.0	1.0

3) 본 현장과 같은 복합 지보 시스템 조건의 경우, 그라우팅 주입압(최대 20 kg/cm^2)으로 인한 지보재 하중 증가량은 최대 16.1 t/m^2로 나타났다. 이는 그라우팅 전의 경우 암반이완하중고가 터널 직경의 1/2정도 이던 것이 그라우팅 주입압으로 인해 터널 직경(3.5 m)의 1.9배까지 증가할 수 있는 것으로 드러났다.

4) 추후 연구과제로서, 위의 라이닝 하중 산정기법과 암반이완하중과의 합리적인 비교방법, 보다 많은 사례연구를 통하여 계측에 의한 합리적인 라이닝 하중 산정법, 그라우팅 주입압 저감 인자의 추정방법, 암반의 그라우팅 보강 효과와 터널 라이닝 안정성에 미치는 영향을 객관적으로 정량화하는 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

Dunnicliff, J., 1988. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. John Wiley & Sons, 577p.

Eisenstein, Z., Kuwajima, F. M. and Heinz, H. K., 1991, Behaviour of Shotcrete Tunnel Linings. Proceedings, Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Seattle, 47-57.

Kikuchi, K., Mito, Y., Yoshino, N. and Naruse, T., 1993, An Experimental Study of the Grouting Effect on Deformability of Rock Masses, Proceedings of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, Austria, A. A. Balkema, 437-441.

Kim, H. J., 1997, Estimation for Tunnel Lining Loads, Ph. D. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Canada, 284p.

투 고 일 2003년 9월 29일
심 사 일 2003년 9월 30일
심사완료일 2003년 11월 4일

박동순
한국수자원공사 용담댐관리단
567-852 전북 진안군 안천면 삼락리 산18
Tel: 063-430-4213
E-mail: fulgent@kowaco.or.kr

김학준
대전대학교 공과대학 지구시스템공학과
300-716 대전시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2574
E-mail: hakkim@dju.ac.kr

김완영
한국수자원공사 수자원연구소
305-390 대전광역시 유성구 전민동 462-1
Tel: 042-860-0322
E-mail: wykim@kowaco.or.kr

박동순 · 김학준 · 김완영