

터널에서의 슛크리트 응력 측정 사례 연구

김학준* · 김미란

대전대학교 지반방재공학전공

Case Studies for the Stress Measurements on the Shotcrete Tunnel Lining

Hak Joon Kim* and Mi-Ran Kim

Daejeon University, Dept. of Geotechnical Disaster Prevention Engineering

국내 터널현장에서는 일차 지보재의 안정성 및 이차라이닝의 두께와 시공 시기 등을 결정하기 위하여 슛크리트에서 응력 측정을 수행하고 있다. 본 연구에서는 국내 여러 지역의 터널 현장에서 수행된 슛크리트 응력 측정 사례의 분석을 통하여 슛크리트 계층 현황 및 슛크리트 안정성 평가 기준의 문제점을 제시하였다. 또한 개선된 슛크리트 응력 계층 방법을 시공 중인 터널현장에 적용한 사례를 제시하였다. 현재와 같이 슛크리트의 안정성 평가를 측정응력의 절대적 크기를 통하여 수행하기 위해서는 슛크리트 응력 측정의 신뢰성 향상이 필요하다.

주요어 : 슛크리트 라이닝, 지반하중, 슛크리트 계층

Stress measurements of shotcrete lining were performed to evaluate the stability of the primary lining and to determine the thickness and the construction timing of the secondary lining. The current situation of stress measurements of shotcrete and problems related to judging the safety of shotcrete linings are presented, based on the results of several case studies. An improved method of performing stress measurements on shotcrete lining is also presented. In evaluating the safety of shotcrete lining, the use of absolute values of measured stresses would improve the reliability of the measurements.

Key words : Shotcrete lining, Ground loads, Stress measurements on shotcrete

서 론

국내 터널 건설에 가장 활발히 적용되고 있는 NATM 공법에서는 슛크리트 안정성 및 이차라이닝의 두께와 시공 시기 등을 결정하기 위해서 주로 슛크리트에 응력계를 설치하여 계층을 수행하고 있다. 국내의 슛크리트 계층 방법은 MOCT (Ministry of Construction and Transportation, 2007)의 터널설계기준과 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009)의 터널 표준시방서에 의하여 제시되었다. 그러나 슛크리트 응력

측정은 슛크리트의 건조·수축 등과 같이 지반하중과 관계없이 발생하는 변형과 변형률을 응력으로 환산할 때 사용되는 슛크리트 변형계수 값의 시간 경과에 따른 변화 등으로 인하여 신뢰성 있는 슛크리트 응력측정 결과를 얻기가 매우 어렵다(Kim et al., 2010). 그러므로 국내 터널의 슛크리트 응력 계층값은 지반 하중에 의해 발생하는 절대적인 슛크리트 응력값이 아닌 슛크리트 타설 이후 시간 경과에 따른 슛크리트 라이닝의 상대적인 응력 변화에 더 의미를 두고 있다. 본 연구에서는 국내 8개 지역, 9개 터널에서 측정된 슛크리트 응력 결과를

*Corresponding author: hakkim@dju.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

분석하여 국내 슛크리트 계측의 현황과 문제점을 분석하고자 한다. 또한 시공 중인 터널에서 기존의 슛크리트 계측 방법과 Kim et al. (2010)이 제안된 방법을 사용한 슛크리트 응력 계측 결과의 비교를 통하여 슛크리트 응력 측정의 신뢰성을 검증하고자 한다.

국내 슛크리트 응력 측정 현황

MOCT (2007)에 의하면 슛크리트 응력 측정은 지반 거동의 정밀분석을 위한 정밀계측에 해당되는데 슛크리트의 접선 및 반경방향 응력을 측정하여 응력의 변화속도와 수렴여부, 슛크리트 두께의 적정성, 이차라이닝의 시공시기 등을 판단한다. 일반적으로 1단면마다 좌우 측벽부 및 천단부 등을 포함하는 3~5개소에 응력계를 배치하여 계측을 수행하며 10 kPa (0.1 kg/cm²) 이상의 정확도로 측정된 응력을 허용 응력과 비교함으로써 부재의 적정성을 확인한다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009). 슛크리트 응력측정은 계측기 설치 후부터 변위의 수렴이 확인될 때까지 수행되는데 변위 속도 혹은 막장 거리에 따라 2회/일~1회/주 빈도로 실시한다.

국내 터널 현장에서는 라이닝 응력계(Embedment VW strain gages)와 슛크리트 응력계(VW Shotcrete stressmeter)가 슛크리트 응력 측정에 주로 사용된다(Fig. 1). 라이닝 응력계는 일반적으로 길이 약 14 cm (5.5인치)의 진동현식 게이지를 슛크리트 내부에 매설하여 변형률을 측정한다. 슛크리트 응력계는 길이 약 5 cm (2인치)의 진동현식 게이지가 압력 감지판의 양단 사이에 있어 변형률을 측정하며 한 쌍이 수직으로 조립되어 터널 반경과 접선 방향의 변형률을 동시에 간편하게 측정할 수 있다.

스�크리트 응력은 측정된 슛크리트 변형률에 슛크리트

변형계수를 곱하여 구한다. 측정된 응력값은 MOCT (2007)에서 규정한 재령 28일 슛크리트 설계기준 강도 (210 kg/cm²)의 40%인 허용 압축응력(84 kg/cm²)과 비교하여 터널의 안정성을 평가한다.

국내 슛크리트 응력 측정 사례

계측 사례 터널의 현황 및 지질

국내 슛크리트 응력 측정의 사례를 검토하기 위하여 국내 8개 지역, 9개 터널의 슛크리트 응력 측정 자료를 분석하였다. 각 터널의 명칭은 현장의 보안 사항을 고려하여 제시하지 않았다. 조사 항목은 계측이 수행된 지점의 응력 계측 결과, 지질, 터널 연장, 규격, 슛크리트 두께, 계측기 설치 위치 및 개수, 계측 지점의 터널 심도(지표에서 터널 측벽부까지), 암반등급, 지보패턴, 응력 환산에 사용된 슛크리트 변형계수 등이다. Table 1은 사례 연구가 수행된 터널에서 얻어진 정보를 요약한 것이며 Table 2는 각 터널에서 지보패턴별로 사용된 슛크리트 두께를 보여주고 있다.

A 터널의 지질은 시대미상의 옥천계 녹니석 편암과 이보다 후기로 추정되는 흑운모 화강암과 화강반암으로 구성된 화성관입암체가 분포한다. 주 불연속면은 편리와 절리로 구성되어 있으며 터널방향과의 상관관계는 비교적 양호하다. B 터널에는 시대미상의 함역 천매암으로 구성된 옥천계 변성 퇴적암류와 이보다 후기로 추정되는 화성관입암체가 분포한다. 주 불연속면은 편리와 절리로 구성된다. C 터널은 중생대 경상계의 적갈색 내지 청회색의 세일이 기반암으로 분포하고 있으며 후기에 이를 관입한 화강섬록암, 염기성암맥 및 산성암맥 등으로 구성되어 있다. 층리면의 주향은 터널축 방향과 거의 유사한 경향을 가지며, 층리의 경사는 거의 수평인 반면에



(a) Embedment VW strain gages



(b) VW Shotcrete stressmeter

Fig. 1. Gages for stress measurement of shotcrete lining.

Table 1. Tunnels used for in case studies.

Tunnel Name	Length (m)	Dimension (m)	Geology	Maximum Stresses (kg/cm ²)	Deformation Modulus (kg/cm ²)	Purposes
A	859	H: 7.9 W: 11.0	Schist	13.9	217,370	Highway
B	547	H: 7.9 W: 11.0	Phyllite	25.1	217,370	Highway
C	510	H: 7.3 W: 9.3	Shale	21.5	217,370	National road
D	457	H: 7.4 W: 9.3	Gneiss	11.5	217,370	National road
E	350	H: 5.6 W: 9.3	Tuff	22.7	217,370	National road
F	590	H: 8.5 W: 13.0	Hornfels	16.2	217,370	Highway
G1	620	H: 8.9 W: 13.8	Shale	52.4	150,000	Highway
G2	1690	H: 9.1 W: 14.8		29.0	217,370	
H	925	H: 7.9 W: 11.2	Shale, Sandstone	84.3	217,370	Highway

H: height, W: width

Table 2. Shotcrete thicknesses used in the case studies (unit: mm).

Tunnel Name	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	Type VI
A	50	50	80	120	160	160
B	50	50	80	120	160	160
C	50	100	100	150	200	200
D	50	50	100	150	200	200
E	50	50	100	150	200	200
F-1	50	50	80	120	160	160
F-2	80	120	120	160	160	-
G1, G2	80	120	120	160	160	-
H	50	50	80	120	160	200

절리는 거의 수직의 경사를 가진다.

D 터널에는 선캄브리아기의 흑운모 편마암과 터널 입·출구쪽에 중생대 주라기 흑운모 화강암이 기반암을 이루고 있으며 그 상부로 기반암의 풍화대, 최상부에 신생대 제 4기의 붕적층이 피복되어 있다. E 터널은 응회암이 주를 이루고 있으며 하부에는 화강암, 편마암, 석영반암 등으로 구성된 각력암이 분포하며 상층으로 접근할수록 반암, 흑색 셰일의 입자 및 장석결정의 파편을 함유한 응회암질 암석이 우세하다. F 터널은 백악기 퇴적암층과 화성암류로 구성되어 있는데 퇴적암은 심성암

과 접촉대에서 혼펠스로 변성되었다.

G 터널은 백악기 셰일층이 주를 이루며 부분적으로 관입한 화성암류인 안산암류 및 유문암류로 구성된다. 본 구간에는 층리, 단층 및 절리 등이 있으며 그 규모가 큰 편이다. 층리는 비교적 완경사로 5~15° 내외의 경사각을 보인다. H 터널은 중생대 백악기 퇴적암류와 퇴적암을 관입하는 규장암층, 신생대 제 3기의 응회암질 안산암층 및 미고결의 이암층이 주를 이룬다. 본 터널구간은 양산단층 지역과 인접하고 있어 파쇄대 및 전단대가 일부 분포한다.

-shotcrete 응력측정 결과 및 토론

A, B, D, F, G, H 터널에서는 한 단면 당 5개의 shotcrete 응력계를 상반 좌/우, 하반 좌/우, 천단 등의 위치에 설치하여 계측이 수행되었다. C 터널은 한 단면 당 좌/우 총 2개, E 터널은 천단부, 좌/우 측벽부에 총

3개의 shotcrete 응력계를 설치하여 계측을 수행하였다. 따라서 사례 연구 터널의 shotcrete 응력 측정에서는 한 단면 당 총 5개의 shotcrete 응력계를 설치하는 것이 가장 일반적이었다.

shotcrete 응력 계측 결과를 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3. Maximum stresses measured in the shotcrete.

	Location	Depth (m)	RMR	Support type	Maximum Stresses (kg/cm ²)
Tunnel A-1	1K+750	21.1	V	V	8.1
	1K+975	126.1	III	II	8.3
	2K+125	121.1	I	I	11.2
	2K+195	131.1	II	III	4.4
	2K+515	16.1	V	VI	12.9
Tunnel A-2	1K+750	21.1	VI	VI	9.2
	1K+975	111.1	III	II	7.6
	2K+125	111.1	I	I	10.4
	2K+195	141.1	II	III	5.7
	2K+515	31.1	V	IV	10.8
Tunnel B-1	8K+425	11.1	V	V	13.7
	8K+475	36.1	IV	III	14.6
	8K+605	71.1	II	II	8.6
	8K+775	46.1	III	III	13.5
Tunnel B-2	8K+425	11.1	V	V	11.7
	8K+475	31.1	IV	III	12.5
	8K+605	81.1	II	II	11.3
	8K+775	41.1	III	III	25.1
Tunnel C-1	0K+605	13.4	IV	IV	7.6
	1K+045	19.1	IV	IV	21.5
Tunnel C-2	0K+700	13.7	III	III	7.2
	1K+050	19.2	IV	IV	11.3
Tunnel D-1	0K+817	16.3	IV	V	10.9
	0K+930	53.3	II	II	11.0
	1K+150	46.3	III	III	8.9
Tunnel D-2	0K+835	28.3	IV	IV	2.6
	0K+925	46.3	II	II	11.5
	1K+155	9.3	III	IV	8.9
Tunnel E-1	2K+553	22.9	V	V	22.7
	2K+857	17.9	V	V	12.5
Tunnel E-2	2K+533	17.4	V	V	17.5
	2K+817	12.4	V	V	17.2
Tunnel F-1	4K+900	226.3	V	V	1.8
	5K+230	228.7	IV	IV	0.7
	5K+405	218.0	IV	V	0.5
Tunnel F-2	4K+925	233.4	IV	IV	1.3
	5K+245	230.5	IV	IV	16.2
	5K+387	220.2	IV	IV	14.0

Table 3. continued.

	Location	Depth (m)	RMR	Support type	Maximum Stresses (kg/cm ²)
Tunnel G1-1	0K+520	11.6	III	V	8.0
	0K+640	31.1	V	IV	7.9
	0K+940	25.1	V	IV	7.1
	1K+070	13.4	II	V	15.2
Tunnel G1-2	0K+560	11.6	II	V	2.7
	0K+610	15.6	V	V	5.8
	0K+940	42.7	V	III	2.9
	1K+030	37.4	V	IV	52.4
	1K+120	13.2	III	V	11.5
Tunnel G2-1	0K+250	29.9	III	IV	13.5
	0K+680	81.9	III	III	29.0
	1K+805	39.9	IV	IV	9.9
Tunnel G2-2	0K+250	36.9	V	V	9.4
	0K+720	67.9	III	III	18.9
	1K+830	8.9	V	V	8.2
Tunnel H-1	6K+685	14.6	V	V	47.2
	6K+705	14.6	V	V	27.7
	6K+945	77.1	V	V (B)	38.4
	7K+022	80.6	V	V (B)	67.0
	7K+135	119.6	IV	III	50.7
	7K+215	94.6	V	V (A)	54.6
	7K+495	94.6	IV	IV	21.9
	7K+532	47.1	V	V	9.7
Tunnel H-2	6K+686	220.1	V	V	56.8
	6K+703	34.6	V	V	20.9
	6K+940	84.6	V	V (B)	42.7
	7K+100	125.1	IV	IV	84.3
	7K+278	124.6	V	V (B)	23.1
	7K+531	35.1	V	V	20.2
	7K+545	44.6	V	V (A)	20.6
	7K+568	32.1	V	VI (B)	24.4

A 터널의 응력 계측은 녹니석 편암으로 구성된 암반에서 수행되었으며 A 터널 숏크리트의 최대 응력값인 12.9 kg/cm²은 계측 시작 후 약 10일 경과 후에 반경방향으로 측정되었다. B 터널에서의 응력 계측은 함역 천매암에서 수행되었으며 B 터널 숏크리트의 최대 응력값 (25.1 kg/cm²)은 계측 시작 후 약 10일 경과 후에 반경방향으로 측정되었다. C 터널의 4개 지점에서 측정된 숏크리트의 최대 응력값의 범위는 7.2~21.5 kg/cm²이다. C 터널의 최대 응력값은 계측 시작 후 약 55일 경과

후에 접선방향으로 측정되었다. D 터널의 최대 응력값은 계측 시작 후 약 30일 경과 후에 반경방향으로 측정되었다.

E 터널의 4개 지점에서 측정된 숏크리트의 최대 응력값의 범위는 12.5~22.7 kg/cm²이다. E 터널의 최대 숏크리트 응력값은 계측 시작 후 약 25일 경과 후에 반경방향으로 측정되었다. F 터널은 산계가 비교적 험준한 지세를 이루고 있고 기복이 심한 고산 지대이어서 숏크리트 응력계가 설치된 지점의 심도는 다른 터널에 비하

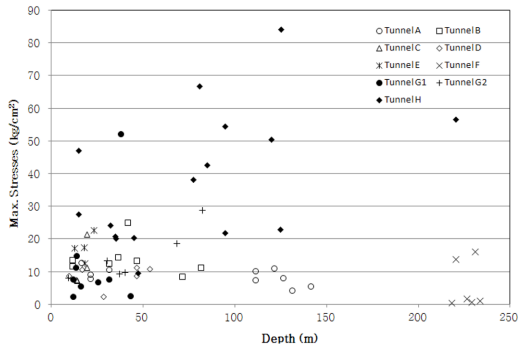


Fig. 2. Maximum stresses measured in shotcrete linings with depth.

여 깊다. F 터널의 최대 응력값은 계측 시작 후 약 2 일 경과 후에 반경방향으로 측정되었다.

G1과 G2의 9개와 6개 지점에서 측정된 슛크리트의 최대 응력값의 범위는 각각 2.7~52.4 kg/cm²과 8.2~29.0 kg/cm²이다. G1 터널의 최대 응력값(52.4 kg/cm²)은 계측 시작 후 약 28일 경과 후에 접선방향으로, G2 터널의 최대 응력값은 계측 시작 후 약 10일 경과 후에 측정되었다. H 터널의 16개 지점에서 측정된 슛크리트의 최대 응력값의 범위는 9.7~84.3 kg/cm²이며 H 터널의 최대 응력값은 계측 시작 후 약 80일 경과 후에 접선방향으로 측정되었다.

본 사례 연구 터널들의 경우 최대 응력값은 계측 시작 후 약 2~80일(평균 27.8일) 경과 후에 측정되었다. 지질과 최대 응력값 측정 기간과의 상관성은 자료수가 한정되어 있으므로 뚜렷하게 규명하기는 어렵지만 세일에서 평균 43일로 가장 길었고 혼펠스에서는 2일로 가장 짧았다.

일반적으로 토사터널의 경우에는 심도가 증가할수록 지반하중이 증가하는 경향이 있다. 그러나 암반 터널의 경우에는 원지반 응력이 매우 큰 지역을 제외하고는 지반하중은 Terzaghi (1946), Barton et al. (1974), Bieniawski (1989) 등이 제안한대로 암반의 상태에 영향을 크게 받으며 심도에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. Fig. 2에 의하면 터널 심도와 슛크리트 최대 응력값은 뚜렷한 상관관계를 보이지 않으며 오히려 일부 터널의 경우 얇은 터널에서 높은 최대 응력값을 보이고 있다. 이러한 현상은 터널 깊이가 얕으면 지반이 아칭 효과(arching effect)를 충분히 발휘하지 못하기 때문으로 판단된다.

암반 상태와 지반하중의 상관관계를 규명하기 위하여

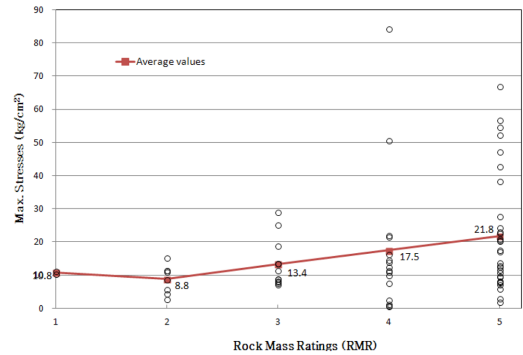


Fig. 3. Maximum stresses measured in shotcrete linings with RMR.

전체 10개 터널의 암반 등급과 슛크리트 최대 응력을 Fig. 3과 같이 나타내었다. 각 등급별 평균 최대 응력은 I 등급(10.8 kg/cm²), II 등급(8.8 kg/cm²), III 등급(13.4 kg/cm²), IV 등급(17.5 kg/cm²), V 등급(21.8 kg/cm²)이며 전체 등급의 평균은 14.5 kg/cm²이다. 사례 연구가 이루어진 모든 슛크리트 계측 결과의 최대 응력 평균은 17.4 kg/cm²으로 전체 등급 평균 보다 높는데 이것은 계측이 V 등급 암반에서 가장 많이 이루어졌기 때문이다. 일반적으로 암반 등급이 불량하면 터널 굴착 후에 지반으로 전이되는 하중에 대한 지반의 지지력이 저하되어 슛크리트에 작용하는 하중은 증가할 것이 예상된다. Fig. 3의 각 암반 등급 별 평균 최대 응력은 I, II 등급을 제외하고 이러한 예측과 일치한 결과를 보여주고 있다. 그러나 암반 등급과의 상관성을 보이지 않는 개별적인 계측 결과도 상당히 관찰된다. 이러한 현상은 암반 등급이 불량한 경우에는 적절한 시기에 지보량의 증가와 함께 보강공법이 추가되는 것이 지반의 강도를 증진시키는 효과가 있기 때문으로 판단된다.

국내의 경우 슛크리트 응력 측정 자료에 의한 터널의 안정성 평가는 슛크리트의 허용 압축응력(84 kg/cm²)과 비교하여 수행된다. 그러나 슛크리트 계측 결과를 응력으로 환산하는 데 상당한 오차가 포함되기 때문에 신뢰성 있는 터널의 안정성 평가에는 한계가 있다. 응력환산을 위한 슛크리트 변형계수는 Table 1에서와 같이 G1 터널을 제외한 나머지 8개 터널에서는 217,370 kg/cm²이 사용되었다. 슛크리트 변형계수로 가장 많이 사용된 217,370 kg/cm²은 현장 슛크리트 설계 기준강도인 210 kg/cm²을 ACI (1971)의 콘크리트에 대한 압축강도(f'_c)를 이용한 탄성계수 환산식 $15,000 \sqrt{f'_c}$ (단위 kg/cm²)에 대입하여 산정한 값이다. 그러나 이 환산식은

Brierley (1975)와 Kuwajima (1991) 등의 여러 학자들에 의하여 실제 슛크리트의 변형계수가 상당히 과대평가됨이 보고되었다. 측정된 변형률을 응력으로 환산할 경우 과대평가된 변형계수를 이용하는 경우 실제보다 더 큰 슛크리트 응력을 얻게 된다. 또한 국내 대부분의 슛크리트 응력 측정에는 슛크리트의 건조수축 및 온도변화에 따라 지반하중과 관계없이 발생하는 변형률에 의한 응력을 고려하지 않고 있다. 지반하중과 관계없이 발생하는 변형률을 고려하지 않는 경우에는 슛크리트 응력이 실제 지반하중에 의하여 슛크리트에 작용한 응력보다 더 크게 측정된다. Park et al. (2003)에 의하여 국내 도수로터널에서 슛크리트의 건조수축 및 온도변화에 따라 측정된 응력은 약 11 kg/cm^2 이었으며 Kim et al. (2008)에 의해 무응력 상태에서 측정된 슛크리트 응력의 평균값은 $3\sim 8 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위를 보였으므로 측정되는 슛크리트 응력을 고려하였을 때 무시할 수 없는 크기이다.

국내 8개 지역, 9개 터널의 슛크리트 응력 측정 자료에 의하면 H-2 터널의 84.3 kg/cm^2 을 제외한 대부분의 터널이 슛크리트의 허용 압축응력인 84 kg/cm^2 에 크게 미치지 못하여 안정한 것으로 평가되었다. 더욱이 슛크리트의 응력 환산에서는 실제보다 더 큰 슛크리트 변형계수가 사용되고 지반하중과 관계없이 발생하는 응력을 고려하지 않는 국내 상황을 고려했을 때 실제 슛크리트에 작용하는 응력은 허용 압축응력보다 더 작을 것이다. 따라서 MOCT (2007)에 의한 터널의 안정성 평가는 안정한 측면이므로 국내 터널 실무자에 의하여 큰 문제가 없이 사용되어져 왔으나 신뢰성과 경제성을 고려했을 때는 슛크리트 안정 평가 기준에 대한 재검토와 개선된 평가 기준에 대한 연구가 필요하다.

개선된 슛크리트 계측 방법의 현장 적용

본 연구에서는 Kim et al. (2010)에 의해 제안된 슛크리트 계측 방법을 실제 터널 현장에 적용하였다. 연구가 수행된 현장은 경부고속철도 OO공구의 단선 터널이며 NATM 공법으로 상·하반 단면 굴착공법이 적용되었다. 터널의 직경은 15.7 m , 높이는 9.5 m , 연장은 4.75 km 이며 슛크리트 계측이 수행된 구간의 지질은 육천계 창리층 천매암질 편암으로 구성되어 있다.

무응력 상태에서 지반하중과 관계없이 발생하는 슛크리트 변형률을 측정하기 위하여 20 mm 두께의 목재로 $600 \times 600 \text{ mm}$ 의 규격의 몰드를 현장 슛크리트 타설 두께로 제작하였고 무응력 몰드를 70° 이상으로 세워 놓



Fig. 4. Shotcrete stressmeters installed in the unstressed mold.

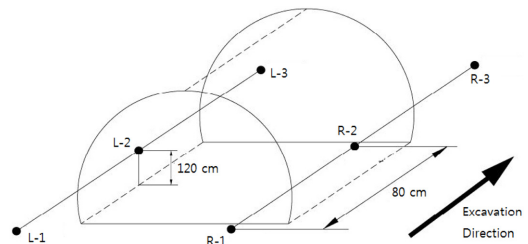


Fig. 5. Location of stress measurements in the shotcrete lining.

은 상태에서 라이닝을 타설하는 노즐맨에 의하여 현장 터널에 슛크리트를 타설하는 방법과 동일하게 분사하였다.

스�크리트 응력측정에는 진동현식 슛크리트 응력계가 사용되었으며 Fig. 4와 같이 철근을 이용하여 몰드에 고정하였다. 몰드에서 측정된 변형률을 응력으로 환산할 때 사용된 변형계수는 무응력 몰드에 타설된 슛크리트가 초기 재령임을 고려하여 You et al. (2007) 및 Ha et al. (2008)에 의하여 제시된 $50,000 \text{ kg/cm}^2$ 을 사용하였다. 무응력 몰드에서 측정된 최대 압축응력은 반경방향 2.51 kg/cm^2 , 접선방향 2.16 kg/cm^2 이었다.

현장에서의 슛크리트 응력 측정은 Fig. 5와 같이 터널 바닥으로부터 1.2 m 떨어진 좌측과 우측의 측벽부에 각 세 개씩 총 여섯 개의 슛크리트 응력계를 설치하여 수행되었다. 슛크리트 응력은 슛크리트 지보재에서 측정된 변형률에서 동일 시간에 측정된 무응력 몰드 변형률을 뺀 후 $100,000 \text{ kg/cm}^2$ 의 슛크리트 변형계수를 이용하여 결정하였다. $100,000 \text{ kg/cm}^2$ 의 변형계수는 슛크리트가 완전히 경화되지 않은 상태에서 많은 하중을 받게 됨을 고려하여 결정된 값이며 이 값은 Kuwajima (1991)에 의해서도 검증되었다.

기준에 국내에서 널리 사용된 $217,370 \text{ kg/cm}^2$ 의 슛크

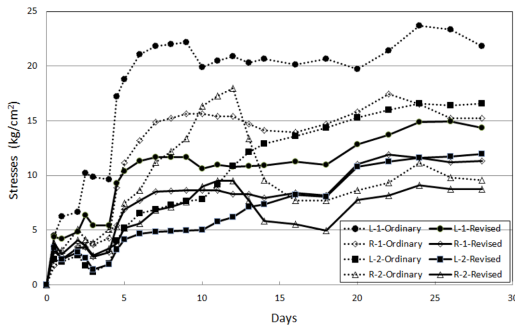


Fig. 6. Stresses measured in the shotcrete lining using two methods.

Table 4. Maximum stresses measured in the shotcrete using two methods.

Gauge No.	Stresses calculated using the ordinary method (kg/cm ²)	Stresses calculated using Kim et al. (2010)'s method (kg/cm ²)
L-1	23.71	14.95
R-1	17.46	11.91
L-2	16.56	11.95
R-2	17.97	9.49

리트 변형계수와 무응력 상태에서 발생하는 변형률을 고려하지 않고 계산된 슛크리트 응력과 Kim et al. (2010)에 의해 제안된 슛크리트 계측 방법을 적용하여 측정된 응력은 Fig. 6과 같다. 여섯 개의 응력계중에서 L-3은 계측기 설치 후에 손상이 발생되어 계측이 수행되지 못하였으므로 두 단면에서 측정된 슛크리트 응력만을 Fig. 6에 제시하였으며 측정된 최대 슛크리트 응력은 Table 4와 같다. 반경방향과 접선방향에서 동시에 계측이 수행되었으나 모든 계측 지점의 접선응력이 반경방향 응력보다 더 크게 측정되었으므로 Fig. 6과 Table 4에서는 접선응력만 제시하였다.

기존에 국내에서 사용되는 슛크리트 응력 계산 방법으로 결정된 슛크리트 응력은 예상대로 Kim et al. (2010)의 방법으로 계산된 슛크리트 응력보다 더 큰 값을 보였다. 기존 방법에 의한 슛크리트 응력은 1단면(L-1, R-1)이 2단면(L-2, R-2)보다 약 5.7 kg/cm², 좌측(L-1, L-2)이 우측(R-1, R-2)보다 약 6.8 kg/cm²의 더 큰 응력이 작용하였다. Kim et al. (2010)의 방법에 의한 슛크리트 응력은 1단면이 2단면보다 약 2.6 kg/cm², 좌측이 우측보다 약 1.3 kg/cm²의 더 큰 응력이 작용하였다.

두 방법에 의해서 계산된 최대 응력값의 오차 범위는 약 36%이었으며 전체 측정값의 평균 오차는 약 34%이

었다. 국내 터널 건설의 경우 대부분 암반에서 공사가 이루어지며 암반상태가 불량한 경우에는 적절한 보강과 함께 슛크리트 지보재가 사용되므로 실제 슛크리트에는 대부분 허용응력보다 상당히 작은 응력이 작용하게 된다. 따라서 기존 방법에 의하여 계산된 슛크리트 응력값은 실제보다 더 큰 슛크리트 응력 측정값을 보이더라도 국내 터널현장에서 큰 문제없이 사용되어져 왔다. 그러나 보다 신뢰성 있는 슛크리트 응력 측정을 위해서는 슛크리트 변형계수의 결정 및 지반하중과 상관없이 발생하는 변형률에 대한 보다 개선된 지침이 필요하다. 이를 위해서는 공신력 있는 기관에 의한 추가적인 연구가 필요하며 슛크리트 응력 측정의 신뢰성이 높아졌을 때 비로소 현재와 같이 슛크리트의 안정성 평가를 슛크리트 설계기준 강도의 40%인 허용 압축응력(84 kg/cm²)과 비교하여 수행하는 것에 대한 타당성이 확보될 것으로 사료된다.

결 론

본 연구에서는 국내 여러 지역의 터널 현장에서 수행된 슛크리트 응력 측정의 사례 분석을 통하여 슛크리트 계측 현황 및 슛크리트 안정성 평가 기준의 문제점을 제시하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 국내 8개 지역, 9개 터널의 슛크리트 응력 측정 자료를 분석한 결과에 의하면 슛크리트 계측은 한 단면당 총 5개의 슛크리트 응력계를 설치하는 것이 가장 일반적이었으며 각 터널별로 측정된 슛크리트의 최대 응력값과 측정시기를 제시하였다. 측정 결과의 분석에 의하면 터널 심도와 슛크리트 최대 응력 값은 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았으며 일부 터널의 경우 얇은 터널에서 높은 최대 응력 값을 보였다.

2. 슛크리트의 최대 응력은 일반적으로 암반등급이 양호할수록 감소하는 경향을 보였으나 암반 등급과의 상관성을 보이지 않는 개별적인 계측 결과도 상당히 관찰되었다. 이러한 현상은 암반 등급이 불량한 경우에는 적절한 시기에 지보량의 증가와 함께 보강공법이 추가되는 것이 지반의 강도를 증진시키는 효과가 있기 때문으로 판단된다.

3. 응력환산을 위한 슛크리트 변형계수는 1개 터널을 제외한 모든 터널에서 비현실적으로 매우 큰 217,370 kg/cm²이 관행적으로 사용되었으며 사례 대상의 모든 터널에서 지반하중과 관계없이 발생하는 변형률에 의한 슛크리트 응력을 고려하지 않은 문제점이 있었다. 사례 연

구 결과에 의하면 이러한 문제로 인하여 슛크리트 응력 측정값은 평균 약 34%의 오차를 보였다.

4. 현재와 같이 슛크리트의 안정성 평가를 슛크리트 설계기준 강도의 40%인 허용 압축응력(84 kg/cm²)과 비교하여 수행하기 위해서는 슛크리트 응력 측정의 신뢰성 향상이 필요하다. 이를 위해서는 슛크리트 변형계수의 결정 및 지반하중과 상관없이 발생하는 변형률에 대한 공신력 있는 기관에 의한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- ACI, 1971, ACI Standard building code requirement for reinforced concrete, American Concrete Institute, 143p.
- Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics*, 6(4), 189-236.
- Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering rock mass classifications, John Wiley & Sons, 251p.
- Brierley, G. S., 1975, The performance during construction of the liner for a large, shallow underground opening in rock, Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 318p.
- Ha, T. W., Kim, D. Y., Shin, Y. W., and Yang, H. S., 2008, Evaluation methods of shotcrete lining stresses considering steel rib capacities by two-dimensional numerical analysis, *Tunnelling Technology*, Korean Tunnelling Association, 10(3), 269-282 (in Korean).
- Kim, H. J., Jin, S. H., and Park, S. H., 2008, Field measurements for the lattice girder and the shotcrete lining, *The Journal of Engineering Geology*, The Korean Society of Engineering Geology, 18(1), 93-102 (in Korean).
- Kim, H. J., Park, S. H., and Bae, G. J., 2010, Suggestion for the improvement of the field measurements on the shotcrete lining, *Tunnelling Technology*, Korean Tunnelling Association, 12(2), 177-192 (in Korean).
- Kuwajima, F. M., 1991, Behavior of shotcrete in shallow tunnels, Ph. D. Thesis, University of Alberta, Edmonton, Canada, 511p.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009, Standard specification for tunnelling, Korean Tunnelling Association, 135p (in Korean).
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation), 2007, Design standard for tunnelling, Korean Tunnelling Association, 138p (in Korean).
- Park, D. S., Kim, H. J., and Kim, W. Y., 2003, A study on the lining load induced by backfill and consolidation grouting, *The Journal of Engineering Geology*, The Korean Society of Engineering Geology, 13(4), 445-456 (in Korean).
- Terzaghi, K., 1946, Rock defects and loads on tunnel supports; In: *Rock tunneling with steel supports* by Proctor, R. V and White, T. L., Commercial Shearing Co., Ohio, 17-99.
- You, K. H., Lee, M. H., and Park, Y. J., 2007, Comparison and validation on shotcrete modelling method for the quantitative stability estimation of a tunnel, *Tunnelling Technology*, Korean Tunnelling Association, 9(2), 99-107 (in Korean).

원고접수일: 2014년 1월 28일

수정본채택: 2014년 3월 13일

게재확정일: 2014년 3월 17일

김학준

대전대학교 공과대학 지반방재공학전공

300-716 대전시 동구 용운동 96-3

Tel: 042) 280-2574

E-mail: hakkim@dju.ac.kr

김미란

대전대학교 공과대학 지반방재공학전공

300-716 대전시 동구 용운동 96-3

Tel: 042) 280-4578

E-mail: miran0718@nate.com