

로드셀을 이용한 격자지보 계측

김학준^{1*} · 강희원²

¹대전대학교 지반방재공학전공, ²(주)희송지오택

Tunnel Instrumentation on the Lattice Girder using Load Cells

Hak Joon Kim^{1*} and Hee-Won Kang²

¹Daejeon University, Dept. of Geotechnical Disaster Prevention Engineering
²Heesong Geotek Co., Ltd.

국내 터널현장에서는 기존 H형 강지보를 대체하는 격자지보의 사용이 급격히 증가되고 있다. 터널에 작용하는 지반하중은 슛크리트와 격자지보에 의하여 지지된다. 따라서 터널의 안정성을 평가하기 위해서는 격자지보에 대한 계측이 필수적이다. 그러나 현재까지 국내에서는 격자지보에 대한 계측이 거의 수행되지 않았으며 적절한 계측 방법도 확립 되지 못한 상태이다. 본 연구에서는 격자지보용 로드셀을 이용한 신뢰성 있는 격자지보 계측 방법을 제안하였다. 또한 시공 중인 터널현장에서 격자지보 계측을 수행하여 격자지보에 작용하는 지반하중을 제시하였다.

주요어 : 지반하중, 격자지보 계측, 로드셀

The use of lattice girder is increased rapidly as a substitute for H-steel ribs at the tunnel sites in Korea. Ground loads acting on the tunnel are supported by shotcrete and lattice girders. To assess the safety of the tunnel, it is essential to obtain field measurements for the lattice girders; however, lattice girder measurements have rarely been performed at tunnel sites, and the method of measurement is not well established. In the present study we suggest a load cell method for the instrumentation of tunnels with lattice girders. Actual measurements of ground loads acting on lattice girders are presented for a specific tunnel under construction.

Key words : ground loads, lattice girder measurements, load cell

서 론

NATM 터널에 사용되는 강지보재는 굴착 직후 타설되는 슛크리트가 완전히 경화되기 전까지 지반의 초기 변형을 억제하기 위해 주로 사용된다. NATM 공법이 도입된 초기에는 강지보재로 H형 강지보가 널리 사용되었으나 H형 강지보가 자체중량이 무거워 시공성이 떨어지고 슛크리트 타설시 강지보재 배면과 굴착 지반 사이에 공동이 발생하여 굴착지반과 지보재가 완전히 밀착되지 않는 등의 문제점이 제기되었다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 스위스와 독일에서는 H형 강지보재 대신 강봉을 삼각형태로 용접하여 만든 격자지보(lattice girder)를 1970년대 말부터 개발하여 1980년대

초부터 사용하고 있다. Braun (1983), Baumeister & Ertel (1985), Betzle (1987) 등은 격자지보에 대한 기본적인 특성 및 현장 사례를 소개하였다. Baumann & Betzle (1984)은 격자지보에 대한 제원 소개, 실내시험 및 슛크리트와의 부착성에 대한 연구를 수행하였다.

국내에서는 KICT (1996), Yoo et al. (1997) Moon et al. (1996, 1997)에 의하여 격자지보에 대한 연구가 수행되었으며 건설교통부에 의하여 개정된 터널표준시방서(MCT, 1996)에서 격자지보를 새로운 강지보재로 인정하여 국내 터널공사에 사용할 수 있게 되었다. 최근 국내 NATM 터널현장에서는 국제적인 철근 가격 상승의 영향으로 가격이 저렴하고 시공이 용이한 격자지보의 사용이 급속히 증가하였다. 과거에는 격자지보에 대

*Corresponding author: hakkim@dju.ac.kr



Fig. 1. Lattice girder shape.

한 사용권이 외국기업에 소속되어 있어 국내에서 생산되는 격자지보에 대한 품질관리가 이루어졌으나 현재는 특히 기간이 만료되어 국내의 많은 중소기업들이 제작한 격자지보가 특별한 검증 과정 없이 터널 현장에서 활발히 사용되고 있다. Fig. 1은 현재 국내에서 널리 사용 중인 격자지보를 보여주고 있다.

KICT (1996)에 의하면 격자지보에는 H형 강지보에 비하여 지지 성능이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 따라서 현재도 국내 터널현장의 갱구부, 저토포구간 및 연약지반에서는 격자지보의 사용이 제한되고 있다. 외국의 경우에도 독일을 포함한 많은 유럽 국가에서는 격자지보가 활발히 이용되고 있으나 미국을 포함한 북미국가에서는 기존의 H형 강지보가 NATM 터널의 일차지보재로 주로 사용되고 있어 격자지보의 활용 범위 및 안정성에 대한 검토가 필요하다.

터널의 안정성 및 경제성을 정량적으로 평가하기 위해서는 터널에 작용하는 지반하중의 크기를 측정하는 것이 필수적이다. 특히 격자지보가 기존의 철근과 같이 단지 슛크리트를 보강해주는 역할만 하는지 혹은 H형 강지보와 같이 어느 정도 구조체의 역할을 담당하는지에 대한 개념조차 터널 분야 종사자들에게 혼동을 주고 있다. 따라서 격자지보의 지보효과에 대한 연구가 필요하다. 격자지보에 작용하는 지반하중을 정확히 측정하기 위해서는 격자지보에서 직접 계측을 수행하여야 한다. 현재까지는 Kim et al. (2008, 2009)에 의하여 격자지보 계측이 일부 수행되었으나 격자지보 계측 방법이 명확히 정립되지 못한 상태이다.

본 연구에서는 격자지보용 로드셀을 이용한 신뢰성 있는 격자지보 계측 방법을 개발하고 NATM 공법으로 시공되고 있는 터널 현장에서 격자지보 계측을 수행하여 격자지보에 작용하는 지반하중을 제시하고자 한다.

격자지보 계측용 로드셀 개발

격자지보 계측 기존 사례

국내외적으로 격자지보에 대한 계측 사례는 드물게 보고되고 있다. Baumann & Betzle (1984)은 격자지보의 하중 지지력을 평가하기 위한 실험에서 3개의 강봉에 작용하는 하중을 측정하기 위하여 각 봉당 4개의 변형률게이지를 부착한 상태에서 실험을 수행하였다. U.S Army Corps of Engineers (1997)에 의하면 슛크리트의 응력 측정을 위해 매립형 변형률게이지를 사용할 수도 있으나 응력과 상관없이 발생하는 변형으로 인하여 실패 가능성이 높으며 슛크리트에 매설된 격자지보에 변형률게이지를 설치한 계측이 효과적이었다. 국내에서는 KICT (1996)와 Moon (1999)에 의하여 현장에서 격자지보 계측이 수행되었는데 터널 내부로 향한 2개의 부강봉에 두께 10 mm의 철판을 용접한 후 변형률게이지를 부착하여 격자지보에 작용하는 응력을 측정하였다.

Kim et al. (2008)은 3개의 강봉에 진동현식 변형률게이지를 직접 부착하여 격자지보 계측을 수행하였다. 현장 계측 결과에 의하면, 격자지보의 강봉은 콘크리트 라이닝이나 H형 강지보와 달리 터널 종방향으로 상당히 큰 휨이 발생되었다. 따라서 콘크리트 라이닝이나 H형 지보재에서와 같은 방법으로 변형률게이지를 부착하여 격자지보 응력을 측정하는 것은 매우 큰 측정 오차를 야기할 수 있다. 또한 터널의 내부에서만 철판에 부착된 변형률게이지를 이용하여 격자지보 응력을 측정하는 경우 격자지보에 작용하는 휨 응력을 고려한 계측을 수행할 수 없다는 문제점이 있다.

Kim et al. (2009)은 2.5인치(6.4cm) 진동현식 변형률게이지 3개를 원통형 로드셀 내부의 원주 부분에 120° 간격으로 설치하여 로드셀을 특수 제작한 로드셀을 이용하여 격자지보 응력 측정 방법의 타당성을 실내 압축 시험을 통하여 검증하였다. 실험 결과 격자지보용으로 특수 제작된 로드셀은 작용하중과 측정하중 사이에 약 8%의 오차를 보였으나 기존의 변형률게이지를 이용한 계측에 비하여 신뢰성이 높음이 입증되었다.

로드셀 제작 및 신뢰성시험

격자지보용 로드셀을 현장에 설치할 경우 격자지보에 부착된 로드셀은 슛크리트에 의하여 피복되므로 로드셀과 격자지보의 직경이 다를 경우 슛크리트에 작용하는 하중에 의하여 격자지보 하중이 영향을 받을 수 있다. 따라서 격자지보 하중을 정확하게 측정하기 위해서는 로



(a) Inside of the load cell



(b) Four strain gauges installed in the load cell

Fig. 2. Load cell developed for lattice girder instrumentation.

드셀과 격자지보의 직경이 최대한 유사해야 한다. 또한, 격자지보에는 많은 휨 응력이 작용하므로 로드셀은 이러한 편심을 최대한 적게 받도록 설계되어야 한다. 따라서 Fig. 2 (a)와 같이 로드셀 내부를 원형으로 깎고 원주형 봉을 원형으로 절삭하였다. 기존에 Kim et al. (2009)에 의하여 개발된 로드셀은 각 로드셀 당 3개의 변형률게이지가 설치되어 있어서 격자지보의 휨 방향에 따라 오차가 발생할 여지가 있었다. 본 연구에서는 로드셀 측정의 신뢰성을 높이기 위하여 Fig. 2 (b)와 같이 2.5인치(6.4 cm) 진동현식 변형률게이지 4개를 90° 간격으로 원통형 로드셀 내부의 원주 부분에 설치하여 제작하였다.

제작된 로드셀의 게이지 상수를 결정하기 위하여 압축시험기를 이용하여 실내시험을 수행하였다. 실험 방법은 압축시험기를 이용하여 로드셀에 500 kg에서 3000 kg 까지 6단계로 하중을 가하였으며 2회 반복시험을 수행한 후 평균값을 이용하여 로드셀의 게이지 상수를 결정하였다. 총 6개의 로드셀에 대한 실험이 수행되었으며 하나의 로드셀(No. 1233)에서 얻어진 실험 결과 예는 Fig. 3과 같다. 이 로드셀의 게이지 상수는 1.3262 kg/digit로 결정되었고 로드셀에 작용하는 하중은 식 (1)에 의하여 kg 단위로 계산할 수 있다.

$$\text{작용 하중} = \text{게이지 상수} * (\text{초기값} - \text{측정값}) \quad (1)$$

총 6개의 로드셀을 2개의 격자지보(Type-70*22*32) 시료의 주강봉 1곳과 부강봉 2곳에 설치하여 압축시험을 수행하였다. 실험에 사용된 시료는 격자지보를 45 cm로 절단하여 제작하였다. Fig. 4는 격자지보에 부착된 로드셀 및 압축시험기에 설치된 격자지보를 보여주고 있다. Fig. 4에 설치되어 있는 격자지보의 3개 강봉중에서

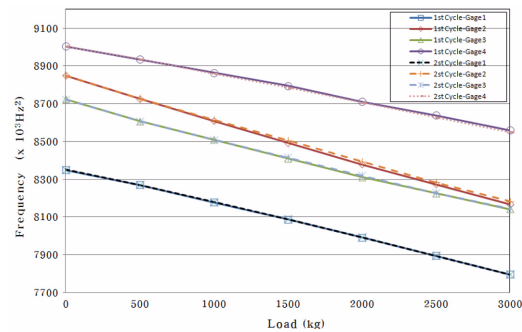


Fig. 3. Determination of the gauge factor for a load cell using the compression test.

가장 중앙에 있는 것이 주강봉(Main bar)이고 그림 우측이 부강봉 1(Side bar 1), 좌측이 부강봉 2(Side Bar 2)이다.

격자지보에 대한 압축시험은 격자지보를 압축시험기에 올려놓은 상태에서 하중 제어장치를 이용하여 1,000 kg부터 31,000 kg까지 9단계로 나누어 일정하게 격자지보에 하중을 가한 상태에서 각 단계별로 진동현식 측정기를 이용하여 로드셀에 대한 계측을 수행하였다.

2개의 격자지보에서 수행된 로드셀 계측 결과에 의하면 측정하중과 작용하중 사이에 1% 이내의 오차를 보였으며 1개의 격자지보에서 얻어진 실험 결과는 Fig. 5와 같다. 기존에 3개의 진동현식 변형률게이지를 설치하여 제작한 로드셀이 작용하중과 측정하중 사이에 약 8%의 오차를 보였으므로 개선의 여지가 있었으나 각 로드셀 당 4개의 진동현식 변형률게이지를 설치한 경우 게이지의 오차 범위가 1%이내로 매우 향상되었음이 검증되었다. 결론적으로, 본 연구에서 격자지보용으로 특수 제작된 로드셀을 터널 현장의 격자지보 계측에 활용



(a) Load cells installed in the lattice girder



(b) Lattice girder ready for testing

Fig. 4. Compression test for the lattice girder.

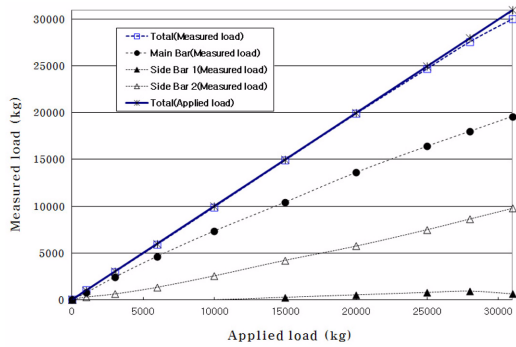


Fig. 5. Measured loads using load cells at the lattice girder for each loading stage.

할 경우 격자지보에 작용하는 지반하중에 대한 신뢰성 있는 계측이 가능할 것으로 판단된다.

현장 격자지보 계측

터널 개요

격자지보 계측은 대전 OO 고속철도 터널에서 수행되었다. 이 지역은 경기육괴와 영남육괴 사이의 옥천대에 위치하고 있으며 저변성의 퇴적암류들로 구성되어 있고, 여러 차례의 변형작용에 의하여 습곡, 단층, 연약대 구간 등이 다수 발달되어 있다. 터널의 규격은 직경 15.7 m, 높이 9.5 m, 총 터널 길이 4.50 km이며 병렬터널로 건설되었다. 터널은 NATM 공법으로 굴착되었으며 상·하반 분할 굴착공법이 적용되었다. 일차지보재는 격자지보(Type-70과 Type-95)가 지보패턴별로 0.8~ 1.5 m 간격으로 강섬유보강 슛크리트(P-2~6)와 함께 사용되었다.

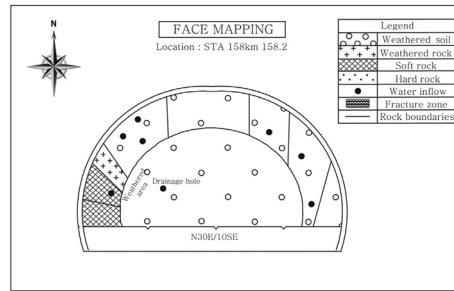


Fig. 6. Face mapping of the tunnel at the instrumented section.



Fig. 7. Load cells installed at the lattice girder.

격자지보 계측 개요

격자지보 계측은 지반상태가 불량한 구간(설계시 TYPE 5)에서 수행되었다. 격자지보가 설치될 때의 막장면은 거의 대부분이 토사 상태이었으며 Fig. 6과 같이 좌측 부분에 일부 연암이 관찰되었다. 로드셀은 Type-70의 격자지보에 Fig. 7과 같이 설치되었다. 로드셀을 설

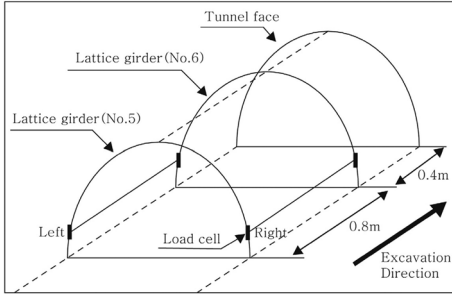


Fig. 8. Location of load cells installed at the lattice girder.

치할 때 용접에 의하여 로드셀 내부의 변형률게이지가 파손되는 것을 방지하기 위하여 정사각형 금속판을 격자지보에 용접한 후 볼트를 이용하여 로드셀을 격자지보에 부착하였다. 로드셀을 설치할 경우 로드셀과 동일 길이로 격자지보를 정밀하게 절단해야 측정 오차를 최소화할 수 있다.

Fig. 8은 격자지보의 주강봉 및 부강봉에 설치된 로드셀의 위치를 보여주고 있다. 로드셀은 지면과 수직방향으로 하중을 측정할 수 있도록 바닥면으로부터 1.2m 높이에 설치되었다. 5번과 6번 격자지보의 좌·우 측벽부에 각 3개의 로드셀이 설치되었으므로 총 12개의 로드셀이 사용되었다. 로드셀이 부착된 2개의 격자지보는 굴착 후 순차적으로 터널에 설치되었다. 6번 격자지보와 막장의 간격은 0.4m, 두 격자지보 사이 간격은 0.8m이었다.

격자지보 설치 직후에 슛크리트가 타설되었고 2시간 후 계측의 초기값을 측정하였다. 초기 1주일 동안은 2회일의 빈도로 계측을 수행하다가 계측 빈도를 점차 감소하였다. 격자지보에서 측정된 응력은 약 17일 경과 후 수렴되었으며 30일 경과 후 계측을 중단하였다.

격자지보 계측 결과 및 논의

격자지보 하중은 실내 보정시험을 통하여 얻어진 각 로드셀의 게이지 상수값과 식 (1)을 이용하여 산정하였다. 격자지보에 작용하는 축력은 단순히 1개의 주강봉 및 2개의 부강봉에서 측정된 하중을 합쳐서 계산하는 것이 일반적이지만 격자지보에 휨 응력이 작용되었을 수 있으므로 Kim et al. (2009)이 제안한대로 식 (2)를 이용하여 산정한 축력을 함께 계산하여 비교하였다.

$$\text{축력(휨 응력 고려)} = A \cdot 0.5 \cdot \{ (L_M/a_1) + [(L_{s1} + L_{s2})/a_2] \cdot 0.5 \} \quad (2)$$

식 (2)에서 A, a₁, a₂는 각각 전체 격자지보, 주지보, 부지보의 단면적이며 L_M, L_{s1}, L_{s2}는 각각 주지보, 부지보 1, 부지보 2에서 측정된 로드셀 하중이다.

계측 시점에서의 막장까지의 거리 및 휨 응력을 고려하여 2개의 격자지보에서 계산된 축력은 Table 1과 같다. Fig. 9는 시간경과에 따른 격자지보 축력의 경향을 보여주고 있다. 5번 격자지보의 좌측 측벽부 최대 하중은 23,298 kg, 휨 응력을 고려하여 계산된 최대 하중은 23,679 kg이다. 우측 측벽부의 최대 하중은 8,429 kg이며 휨 응력을 고려하여 계산된 최대 하중값은 8,521 kg이다. 휨 응력을 고려하여 계산된 축력이 보정 전의 축력에 비하여 약간 높은 값을 보이고 있으나 차이는 크지 않았고 좌·우측의 하중은 큰 차이를 보였다.

6번 격자지보의 좌측 측벽부 최대하중은 24,197 kg, 휨 응력을 고려하여 계산된 최대 축력은 24,516 kg이다. 우측 측벽부 최대하중은 19,880 kg, 휨 응력을 고려할 경우의 축력은 23,853 kg이다.

격자지보 계측 결과에 의하면 5번 우측 격자 지보제를 제외한 나머지 격자 지보제에서 휨 응력을 고려하여 측정된 최대 축력은 약 24,000 kg 안팎으로 측정하중의 크기와 증가추세가 유사하였다. 격자지보 계측 결과에 의하면 24,516 kg의 최대하중이 격자지보에 작용하였으므로 터널에서의 안정성 평가를 위해서는 격자지보 계측이 필수적이다.

격자지보에 작용하는 축력의 수렴은 계측 시작 후 약 17일 경과 후, 막장이 계측 지점으로부터 약 19m (1.2D) 이격된 거리까지 굴착되었을 때 발생하였다.

6번 격자지보가 5번 격자지보에 비하여 약간 더 큰 하중을 보이고 있는데 이것은 6번 격자지보가 5번보다 막장과의 거리가 더 가까운 것에 기인하는 것으로 판단되며 Ward (1978)의 계측 결과와 일치한다.

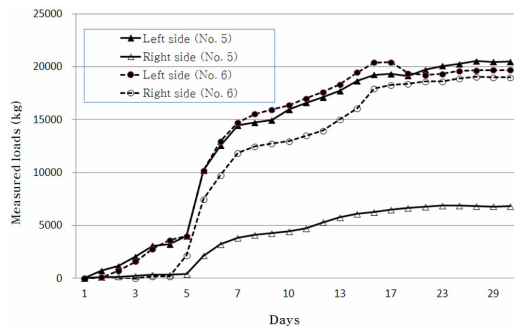
축력 측정 결과를 비교해 보면 5번 격자지보의 우측 부에서만 낮은 하중이 측정되었다. 하중에 영향을 미치는 요인으로는 지질상태, 터널 주변의 지형, 병렬 터널에서의 계측 위치 등이 원인일 수 있으나 같은 조건의 6번 격자지보 우측에서 높은 축력이 측정되었음을 고려하였을 때 격자지보와 지반의 접촉상태 불량이 주요 원인인 것으로 판단된다. 실제로 5번 격자지보의 우측 천단부를 굴착할 때 낙반으로 인한 여굴이 발생되었으며 슛크리트 타설 후에도 격자지보와 지반의 접촉이 양호하지 못한 것으로 관찰되었다.

Fig. 9에 의하면 5~7일 사이에 격자지보 하중이 급격히 증가하였는데 이것은 막장이 6번 격자지보에서 약

Table 1. Results of the field measurements at the lattice girder.

Days passed	Distance to the face (m)		Load at No. 5 (kg)		Load at No. 6 (kg)	
	No. 5	No. 6	Left	Right	Left	Right
1	1.2	0.4	0	0	0	0
2	1.2	0.4	818	167	85	-33
2	1.2	0.4	1262	208	763	22
3	1.6	0.8	2226	309	1726	177
4	2.4	1.6	3309	451	3182	412
4	2.4	1.6	3477	453	4076	397
5	2.4	1.6	4302	521	4289	2741
6	3.2	2.4	11100	2456	11610	9097
6	3.2	2.4	13467	3831	14592	11618
7	4.0	3.2	15669	4678	16800	14171
8	4.0	3.2	16108	5026	17815	14935
9	4.8	4.0	16273	5244	18347	15264
10	6.1	5.3	17430	5443	18887	15572
11	7.2	6.4	18675	5801	19751	16346
12	10.4	9.6	19185	6510	20600	17010
13	12.0	11.2	20181	7160	21679	18501
14	13.5	12.7	21730	7537	23170	19797
15	16.5	15.2	22581	7704	24298	22374
17	19.5	18.7	22987	8036	24516	22944
19	21.0	20.2	23168	8232	23667	23174
22	24.0	23.2	22894	8403	23628	23449
23	28.5	27.7	23232	8521	23801	23356
25	33.5	32.7	23485	8519	24182	23691
27	37.5	36.7	23679	8444	24410	23853
29	39.5	38.7	23598	8413	24406	23779
31	41.5	40.7	23631	8452	24406	23792

(- : tension)

**Fig. 9.** Measured normal loads at the lattice girder.

2.4 m 지점까지 전진했을 때 경압이 나타난 것에 기인되는 것으로 사료된다. 즉 계측 시작 후 약 5일 전까지

는 주로 풍화토에서 터널 굴착이 진행되었으므로 기계식 천공굴착작업을 실시하였으나 터널막장에서 경압이 발견된 후에는 발파작업을 실시하였다. 따라서 발파로 인한 터널 주변부의 암석 이완 현상 발생 및 터널 굴진 속도의 증가로 인한 막장 지지효과의 급속한 감소 등이 터널 하중 크기 및 속도 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다.

이완하중 계산

격자지보에서 측정된 축력을 이용하여 터널에 작용하는 이완하중을 산정하기 위해서는 슛크리트에서 측정된 응력을 함께 고려해주어야 한다. 격자지보 계측이 수행된 구간에서 슛크리트 계측이 동시에 수행되었다. 슛크

리트 계측은 5번과 6번 격자지보의 사이와 전후의 좌·우에 3개씩, 총 6개의 쏫크리트 응력계를 설치하여 계측을 실시하였다. 지반하중과 관계없이 발생하는 쏫크리트 변형을 측정하기 위해서 무응력 몰드 2개 를 터널 내부의 쏫크리트 응력 설치 지점에 설치하여 계측을 수행하였다. 무응력 몰드는 20 mm 두께의 목재로 600 × 600 × 300 mm의 규격으로 제작한 후 70°로 세운 상태에서 터널 라이닝에 쏫크리트를 타설하는 방법과 동일하게 분사하여 계측을 수행하였다.

쏘크리트 응력 환산을 위한 쏫크리트 변형계수는 Kim et al. (2010)에 의하여 제안된 대로 100,000 kg/cm²을 사용하였다. 총 8개의 쏫크리트 응력계 중에서 좌측부의 쏫크리트 응력계 1개와 무응력 몰드의 쏫크리트 응력계 1개가 계측기 손상으로 계측값을 얻지 못하였다. 무응력 몰드에서 접선방향으로 발생한 응력(2.16 kg/cm²)을 고려하여 계산된 터널 좌측부 및 우측부의 접선방향 최대응력의 평균값은 각각 11.29 kg/cm²과 7.60 kg/cm²이다.

측정된 쏫크리트 응력에 쏫크리트의 단면적을 곱하여 계산된 축력은 30,224 kg이며 6번 격자지보의 계측값을 토대로 계산된 격자지보 축력은 48,369 kg이므로 쏫크리트와 격자지보 축력을 합친 축력을 터널 직경(15.7 m)과 강지보재 간격(0.8 m)으로 나누어 계산된 토피응력은 6,257 kg/m²이다. 이 값을 일반적인 풍화암의 밀도(2,200 kg/m³)로 나누어 이완 토피고고를 계산하면 약 2.8 m에 해당된다.

국내 터널현장에서 격자지보 계측을 활발히 수행할 경우 본 연구에서와 같은 터널에 작용하는 이완 토피고 계산이 가능하며 이러한 계측 결과는 향후 터널 설계에 기초자료로 활용될 수 있다.

결 론

본 연구에서는 격자지보에 작용하는 터널하중을 측정하기 위하여 격자지보용 로드셀을 제작한 후 실내시험을 통하여 로드셀에 대한 신뢰성을 검증하고 현장 격자지보 계측을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 4개의 진동현식 게이지를 사용하여 격자지보용으로 특수 제작된 로드셀은 작용하중과 측정하중 사이에 1% 이내의 오차를 보였으며 기존에 3개의 진동현식 변형률게이지를 설치하여 제작한 로드셀과 비교하여 신뢰성이 매우 향상되었음이 검증되었다. 따라서 터널 현장의 격자지보에 로드셀을 설치할 경우, 격자지보에 작용하는 지반하중에 대한 신뢰성 있는 계측이 가

능할 것으로 판단된다.

2. 격자지보에 로드셀을 부착하여 현장 계측을 수행한 결과 모든 로드셀이 게이지 손상 없이 일관된 측정값을 보여주었다.

3. 격자지보 계측 결과에 의하면 24,516 kg의 축력이 격자지보에 작용하였다. 상당히 큰 축력이 격자지보에 작용하고 있으므로 터널의 안정성 평가를 위해서는 격자지보 계측이 필수적이다.

4. 본 연구에서 계측이 수행된 터널의 경우, 격자지보에 작용하는 축력의 수렴은 계측 시작 후 약 17일 경과 후, 막장이 계측 지점으로부터 약 19 m (1.2D) 이격된 거리까지 진행되었을 때 발생하였다.

5. 격자지보에서 측정된 축력과 쏫크리트 계측 결과를 이용하여 터널에 작용하는 이완하중을 산정하였다. 산정된 이완하중을 이용하여 계산된 특정 계측 지점의 이완 토피고고는 약 2.8 m에 해당되었다.

6. 로드셀을 이용한 격자지보 계측은 실내 및 현장 실험을 통하여 그 활용성이 규명되었으며 향후 격자지보 계측에 활발히 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

Baumann, T. and Betzle, M., 1984, Investigation of the performance of lattice girders in tunnelling, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17(2), 67-81.

Baumeister, A. E. and Ertel, J., 1985, Lattice girder construction and dimensioning, *Tunnel*, 2, May 95-106.

Betzle, M., 1987, Lattice girders giving arches a dig in the ribs, *Tunnels & Tunnelling*, 19(11), 53-54.

Braun, W. M., 1983, Lattice girders offer economy and performance for tunnel support, *Tunnels and Tunnelling*, 15(5), 19-22.

KICT (Korea Institute of Construction Technology), 1996, Application of lattice girders in tunnelling, Chunwon Industries, 281p (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).

Kim, H. J., Park, S. H., and Lee, G. S., 2009, Suggested method for the tunnel instrumentation on the lattice girder from the results of the laboratory test using load cells, *The Journal of Engineering Geology*, The Korean Society of Engineering Geology, 19(3), 269-275 (in Korean).

MCT (Ministry of Construction Transportation), 1996, Standard specification for tunnel, Korean Tunnelling

- Association, 154p (in Korean).
- Moon H. D., 1999, Evaluation on the applicability of a lattice girder for a support system in tunnelling, Tunnel and Underground, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 9, 204-213 (in Korean).
- Moon H. D., Baek, Y. S., and Bae, G. J., 1997, An experimental study on the characteristics of a composite structure of lattice girder and shotcrete, Journal of the Korean Geotechnical Society, 13(2), 155-167 (in Korean).
- Moon H. D., Lee, S. W., and Bae, G. J., 1996, Evaluation of an applicability of lattice girders for the tunnel support, Tunnel and Underground, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 6(2), 122-130 (in Korean).
- U. S. Army Corps of Engineers, 1997, Engineering and design tunnels and shafts in rock, Manual No. 1110-2-2901, 206p.
- Ward, W. H., 1978, Ground supports for tunnels in weak rocks, Geotechnique, Vol. 28, No. 2, pp. 133-171.
- Yoo, C. S., Kim, Y. J., Bae, G. J., and Moon, H. D., 1997, An experimental study on load bearing capacity of lattice girder as a steel support in tunnelling, Journal of the Korean Geotechnical Society, 13(4), 163-175 (in Korean).

김학준

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

강희원

(주)희송지오택
경기도 성남시 중원구 상대원동 146-8
Tel: 02-576-3801
E-mail: hansai444@naver.com

원고접수일 : 2012년 9월 9일
수정본채택 : 2012년 9월 19일
게재확정일 : 2012년 9월 20일