

로드셀 실내시험을 통한 터널 격자지보 계측 기법

김학준^{1*} · 박시현² · 이기세³

¹대전대학교 지반설계정보공학과, ²한국시설안전공단 진단계획팀, ³대전대학교 토목공학과

Suggested Method for the Tunnel Instrumentation on the Lattice Girder from the Results of the Laboratory Test using Load Cells

Hak Joon Kim^{1*}, Si-Hyun Park², and Kise Lee³

¹Daejeon University, Dept. of Geotechnical Design Engineering

²Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

³Daejeon University, Dept. of Civil Engineering

최근 국내 터널현장에서는 기존 H형 강지보를 대체하는 격자지보의 사용이 증가하고 있다. 그러나 터널 현장에서 격자지보 계측은 거의 수행되지 않고 있으며 적절한 계측 방법도 확립 되지 못한 상태이다. 기존 연구결과에 의하면 H형 강 계측에 사용되는 진동현식 변형률 게이지는 격자지보 계측에는 부적합하다. 본 연구에서는 격자지보용 로드셀을 개발하여 격자지보 시료에 부착한 후 압축시험기를 이용하여 로드셀에 대한 신뢰성을 검증하였다. 압축시험 결과분석을 통하여, 터널 계측시 격자지보에 로드셀을 사용할 경우의 계측 방법을 제시하였다.

주요어 : 격자지보, 로드셀, 터널 계측

The use of lattice girder is increased at the tunnel site in Korea recently for the substitute of H-steel rib. However, field measurements at the lattice girder are rarely performed at the tunnel site and the method of the measurement is not well established. The use of the vibrating wire strain gauges used for the H-steel rib was proven to be not suitable for the strain measurements of the lattice girder according to the previous research. The credibility of the load cell was investigated using laboratory compression tests for load cells, specially manufactured for the lattice girder for this study, installed at the specimen of the lattice girder. The method of the tunnel instrumentation for the lattice girder using the load cell is given from the interpretation of the compression test results.

Key words: lattice girder, load cell, tunnel instrumentation

서 론

터널에 지하하중이 작용하는 경우 하중은 슛크리트와 격자지보에 의해서 지지된다. 따라서 지하하중을 측정하기 위해서는 슛크리트와 격자지보에서 동시에 계측을 수행하거나 어느 한쪽에서만 수행한 후 강성과 단면적을 고려하여 측정 응력을 환산해 주어야 한다. 현재까지는 국내에서 격자지보에 대한 계측이 거의 수행되지 않았으므로 격자지보 계측 방법이 정립되지 못한 상태이다.

김학준 등(2008)에 의한 격자지보 계측 결과에 의하면,

격자지보의 강봉은 콘크리트 라이닝이나 H형 강지보와 달리 터널 종방향으로 상당히 큰 휨이 발생된다. 따라서 일부 국내 터널현장에서 격자지보의 응력을 측정하기 위해서, 콘크리트 라이닝이나 H형 지보재의 경우와 같이, 관행적으로 강봉의 중립축(neutral axis)에 해당되는 지점에 한 개의 게이지를 부착하는 것은 매우 큰 측정 오차를 야기할 수 있다.

기존 연구 결과, 격자지보에서의 축력을 측정하기 위해서는 변형률게이지를 이용한 방법은 신뢰성이 떨어지므로 본 연구에서는 로드셀을 이용한 격자지보 축력 측정 방법의 타당성을 실내 압축시험을 통하여 조사하고자 한다.

*Corresponding author: hakkim@dju.ac.kr

격자지보 실내시험

로드셀 제작 및 게이지 상수 결정

현장에서는 로드셀이 격자지보에 설치된 후 슛크리트에 의하여 피복되므로 로드셀과 격자지보의 직경이 다를 경우 슛크리트에 작용하는 하중에 의하여 격자지보 하중이 영향을 받을 수 있다. 따라서 격자지보 하중을 정확하게 측정하기 위해서는 로드셀과 격자지보의 직경이 유사해야 한다. 또한, 격자지보에는 많은 휨 응력이 작용하므로 로드셀은 이러한 편심을 최대한 적게 받도록 설계되어야 한다. 로드셀에 작용하는 편심을 최소화하기 위해서 Fig. 1과 같이 로드셀 내부를 원형으로 깎고 원주형 봉을 원형으로 절삭하였으며 2.5인치 진동현식 변형률게이지 3개를 120° 각도의 간격으로 원통형 로드셀 내부의 원주 부분에 설치하였다.

제작된 로드셀의 게이지 상수를 결정하기 위하여 압축시험기를 이용하여 실내시험을 수행하였다. 실험 방법은 압축시험기를 이용하여 로드셀에 500 kg에서 3,000 kg 까지 6단계로 하중을 가하였으며 2회 반복시험을 수행한 후 평균값을 이용하여 로드셀의 게이지 상수를 구하였다. 하나의 로드셀에서 얻어진 실험 결과 예는 Fig. 2와 같다.

격자지보 압축 시험 방법

총 3개의 로드셀을 격자지보 시료의 주강봉 1곳과 부강봉 2곳에 설치하여 압축시험을 수행하였다. 실험에 사용된 격자지보 시료는 현장에서 사용되는 Type 70의 격자지보를 45 cm로 절단하여 제작하였다. Fig. 3은 격자지보 모형에 용접하여 고정된 로드셀 및 압축

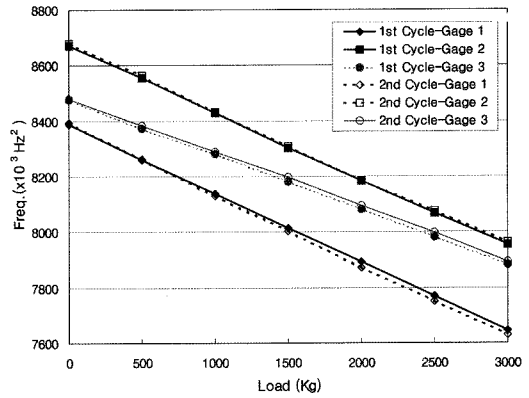
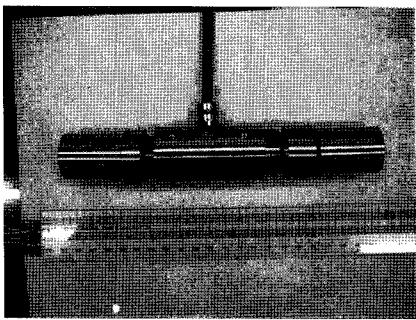
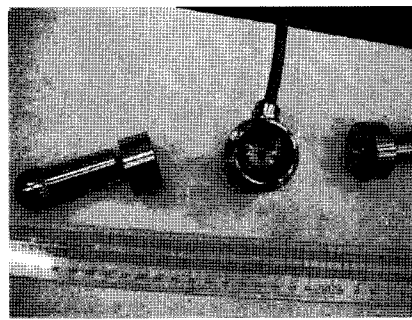


Fig. 2. Determination of the gauge factor of a load cell using the compression test.

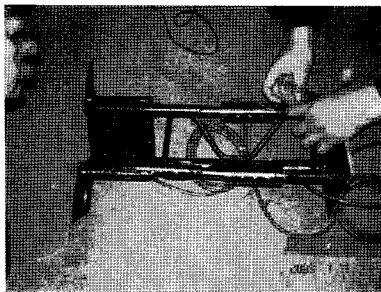


(a) Outside of the load cell

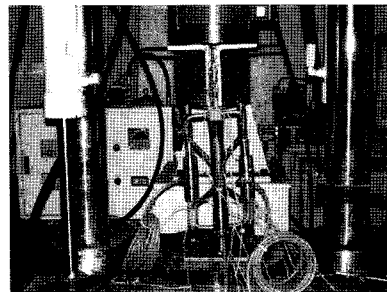


(b) Inside of the load cell

Fig. 1. Load cell manufactured for the lattice girder.



(a) Load cells installed in the lattice girder



(b) Lattice girder ready for the test

Fig. 3. Compression test for the lattice girder.

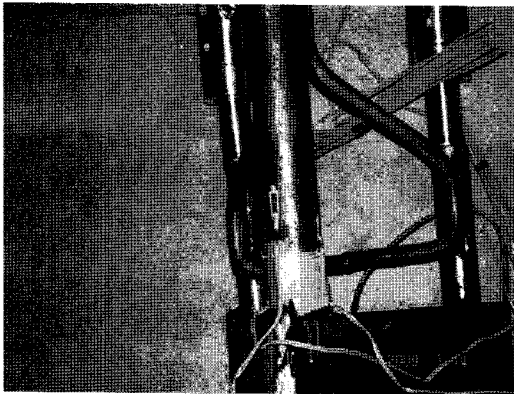


Fig. 4. Electrical resistance strain gauges installed at the lattice girder.

시험기에 설치된 격자지보를 보여주고 있다. Fig. 3(b)에 설치되어 있는 격자지보의 3개 강봉중에서 가장 중앙에 있는 것이 주강봉(Main Bar)이고 그림 우측이 부강봉 1(Side Bar 1), 좌측이 부강봉 2(Side Bar 2)이다.

격자지보에 발생하는 휨응력 및 축응력을 정밀하게 측정하기 위해서 격자지보에 일본 Kenkyujo사의 5 mm 전기저항식 변형률게이지를 Fig. 4와 같이 각 봉당 4군데(전후좌우)에 부착하여 실험을 수행하였다. 압축시험기를 이용하여 하중 제어 방식으로 1,000 kg에서 5,000 kg 까지 5단계로 나누어 일정하게 격자지보에 하중을 가하면서 각 단계별로 변형률게이지와 로드셀에 대한 계측

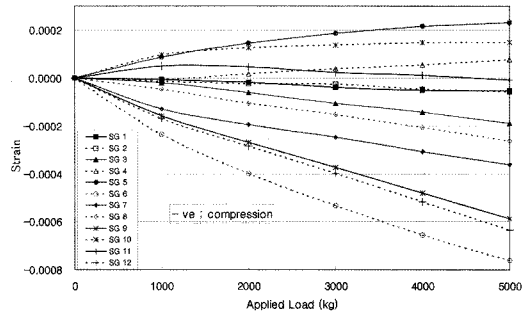


Fig. 5. Measured strain obtained from strain gauges at the lattice girder.

을 실시하였다. 격자지보에 임의의 편심하중이 작용하는 현장 상황을 재현하기 위하여 격자지보 바닥부의 수평을 정밀하게 맞추지 않은 상태에서 실험을 수행하였다.

변형률게이지 측정 결과 및 토의

격자지보에 부착된 전기저항식 변형률게이지에 의하여 측정된 변형률은 Fig. 5와 같다. Fig. 3(b)의 정면에서 보았을 때 각 강봉의 전후좌우로 주강봉(SG1~SG4), 부강봉 1(SG5~SG8), 부강봉 2(SG9~SG12)의 순서로 변형률게이지의 명칭을 부여하였다.

Table 1은 Fig. 5의 강봉에서 측정된 변형률을 이용하여 각 강봉의 축 변형률, 휨 변형률 및 축하중을 계산한 것이다. Table 1에 의하면 각 강봉 별로 휨응력이 발생되고 있으며 주강봉과 부강봉 1은 후방 우측, 부강봉 2는 전방 좌측으

Table 1. Measured strain and loads at the lattice girder obtained using the electrical resistance strain gauges (E = 2,100,000 kg/cm²).

		Applied Load	1,000 kg	2,000 kg	3,000 kg	4,000 kg	5,000 kg
Main Bar	Axial Strain ($\times 10^{-5}$)		1.1252	2.1258	3.2342	4.5916	5.4818
	Bending Strain ($\times 10^{-5}$)	(F-B)	0.3449	0.2952	0.7071	0.1142	0.2015
		(L-R)	0.7260	3.8858	7.2254	9.8463	13.3677
	Measured Load		167 kg	316 kg	480 kg	682 kg	814 kg
Side Bar 1	Axial Strain ($\times 10^{-5}$)		8.0336	13.8313	18.6448	23.7926	28.8256
	Bending Strain ($\times 10^{-5}$)	(F-B)	16.1516	27.2676	35.9288	43.5594	49.6804
		(L-R)	4.0888	4.4785	4.8102	5.0292	4.9624
	Measured Load		530 kg	912 kg	1,230 kg	1,569 kg	1,901 kg
Side Bar 2	Axial Strain ($\times 10^{-5}$)		4.4412	9.5138	15.2802	20.9840	27.0185
	Bending Strain ($\times 10^{-5}$)	(F-B)	12.6802	19.7516	25.5125	31.4983	36.8999
		(L-R)	10.9868	16.5059	21.1735	26.5303	31.3912
	Measured Load		293 kg	628 kg	1,008 kg	1,384 kg	1,782 kg
Total	Axial Strain ($\times 10^{-5}$)		3.6813	6.8992	10.0984	13.4899	16.7019
	Measured Load		990 kg	1,855 kg	2,718 kg	3,635 kg	4,497 kg

Note) F-B: Front-Back, L-R: Left-Right

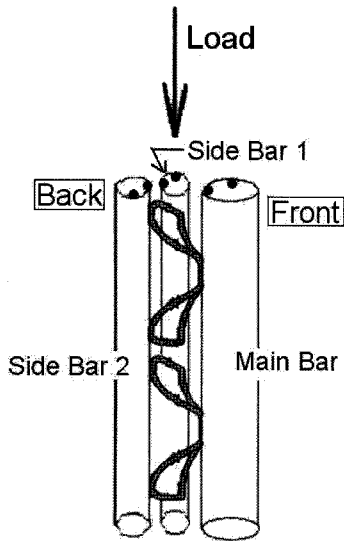


Fig. 6. Bending direction of the bars indicated by black dots.

로 휨이 발생하였다. 휨 발생으로 압축변형이 증가한 방향을 검은 점으로 표시하면 Fig 6과 같다. 5,000kg의 하중이 격자 지보에 가해졌을 때 전후 및 좌우방향으로, 주강봉은 각각 0.2015×10^{-5} 및 13.3677×10^{-5} , 부강봉 1은 49.6804×10^{-5} 및 4.9624×10^{-5} , 부강봉 2는 36.8999×10^{-5} 및 31.3912×10^{-5} 의 휨 변형률이 발생하였다. 즉, 부강봉 1 후방, 부강봉 2 전방, 부강봉 2 좌측, 주강봉 우측, 부강봉 1 우측, 주강봉 후방의 순서로 휨에 의한 압축하중이 증가하였다.

측정된 변형률에 강지보의 탄성계수와 단면적을 곱하면 강지보에 작용하는 하중을 구할 수 있다. 격자지보에 5,000 kg의 하중이 작용시 강지보 탄성계수로 널리 사용되고 있는 $2,100,000 \text{ kg/cm}^2$ 을 사용하여 계산된 측정 하중은 Table 1과 같이 4,497 kg으로 작용하중보다 약 10%정도 적은 값이 측정된다. 측정된 하중에 대한 역해석 결과에 의하면 Table 2와 같이 $2,242,280 \text{ kg/cm}^2$ 을 강지보

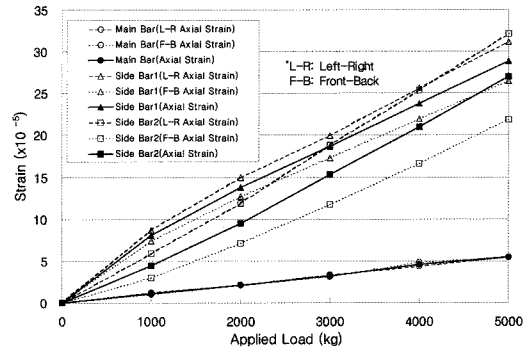


Fig. 7. Axial strain at the three bars for the each loading stage.

의 탄성계수로 사용하는 경우 작용하중과 가장 일치된 값을 얻을 수 있었다. Table 2에 의하면 $2,240,000 \text{ kg/cm}^2$ 을 강지보의 탄성계수로 사용하더라도 결과에는 큰 영향을 주지 않으므로 본 연구에서는 이를 격자지보 탄성계수로 사용하였다. 국내 현장에서 터널 계측시 격자지보에 대한 탄성계수는 별도 실험을 통하여 산정하는 것이 권장되지만 실험값이 없는 경우에는 $2,240,000 \text{ kg/cm}^2$ 을 격자지보 탄성계수로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1의 각 강봉별 축 변형률을 그림으로 나타내면 Fig. 7과 같다. Fig. 7에 의하면 작용하중이 1,000 kg에서 5,000 kg으로 증가함에 따라 부강봉 1과 2의 축 변형률 비율은 1.81배에서 1.07배로 감소되어 거의 일정해지는 반면 부강봉 1과 주강봉의 축 변형률 비율은 6.46배에서 5.27배, 부강봉 2와 주강봉의 축 변형률 비율은 3.57배에서 4.94배로 약간 감소하거나 오히려 증가함을 보인다.

격자지보에 5,000kg의 하중이 작용시, 각 강봉에 응력이 균등하게 분포하는 경우에는 주강봉과 부강봉의 단면적 차이에 의하여 주강봉에는 2,648kg, 부강봉 1 및 2에는 각각 1,176 kg의 하중이 가해지게 된다. 그러나 본 압축시험의 경우, 5,000 kg의 하중이 작용시 부강봉 1에는

Table 2. Applied and Measured loads at the lattice girder using different elastic modulus.

Applied Load (kg)	Measured Axial Load (kg), (Error %)					
	E = 2,100,000 kg/cm ²		E = 2,242,280 kg/cm ²		E = 2,240,000 kg/cm ²	
	Bending not included	Bending included	Bending not included	Bending included	Bending not included	Bending included
1,000	990(1.0)	1,032(3.2)	1,057(5.7)	1,102(10.2)	1,056(5.6)	1,101(10.1)
2,000	1,855(7.2)	1,934(3.3)	1,981(0.9)	2,065(3.3)	1,979(1.0)	2,063(3.2)
3,000	2,718(9.4)	2,831(5.6)	2,902(3.3)	3,023(0.8)	2,899(3.4)	3,020(0.7)
4,000	3,635(9.1)	3,782(5.4)	3,881(3.0)	4,038(1.0)	3,877(3.1)	4,034(0.9)
5,000	4,497(10.1)	4,682(6.3)	4,802(4.0)	5,000(0.0)	4,797(4.1)	4,995(0.1)
Avg. Error%	7.4	4.8	3.4	3.0	3.4	3.0

2,030 kg, 부강봉 2는 1,903 kg, 주강봉에는 869 kg의 축하중이 측정되었다. 2개의 부강봉에 작용한 하중이 주강봉보다 더 큰 원인은 격자지보 시료의 부강봉쪽이 주강봉에 비하여 약간 더 높음에도 불구하고 격자지보를 압축시험기에 설치할 때 수평을 맞추려는 노력을 하지 않아서 부강봉쪽에 더 큰 하중이 전달되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 7에 의하면, 작용하중이 1,000 kg에서 5,000 kg으로 증가함에 따라 부강봉 1과 2의 축 변형률 차이가 감소된다. 이러한 현상은 작용하중에 대한 두 강봉의 변형률 차이에 따라, 두 강봉의 길이가 유사하게 되어 거의 일정한 하중을 받게 되기 때문으로 판단된다. 그러나 예상과 달리, 작용하중이 증가함에 따라 부강봉과 주강봉의 축하중 비율이 큰 차이를 보이지 않거나 오히려 증가한 것은 격자지보의 각 강봉 뿐만 아니라 주강봉과 부강봉 사이에서도 휨응력이 발생되고 있음을 보여 준다. 따라서 격자지보 전체에 작용하는 하중을 구하기 위해서는 주강봉과 부강봉 사이에 발생하는 휨응력을 고려해야 한다.

주강봉과 부강봉 사이에 발생하는 휨응력을 고려한 작용하중 계산 방법은 하나의 강봉에서 휨응력을 고려하여 축력을 계산하는 것과 동일하다. Table 2에서와 같이 주강봉과 부강봉 사이에 발생하는 휨응력을 고려하여 작용하중을 계산하는 경우 평균 오차가 더 감소함을 보였다.

Fig. 8은 강봉 사이에서 발생하는 휨응력을 고려하여 계산한 측정하중이 작용하중과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 실제 터널 현장에 설치되는 격자지보의 경우에는 실내 시험에 비하여 부강봉과 주강봉 사이의 휨응력이 훨씬 더 크게 발생될 것이므로 이완하중 산정시 반드시 이를 고려해야 한다.

로드셀 측정 결과 및 토의

Fig. 3(a)와 같이 격자지보의 주강봉과 2개의 부강봉에

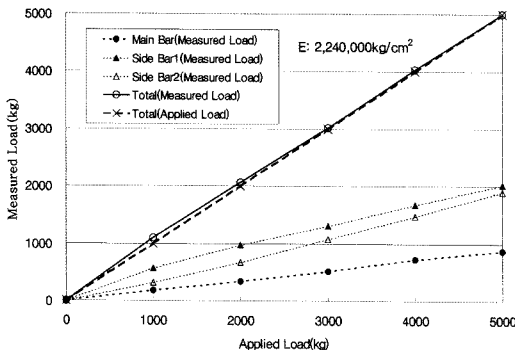


Fig. 8. Applied and measured loads at the lattice girder for the each loading stage.

로드셀을 설치한 후 압축시험기를 이용하여 하중 제어 방식으로 1,000 kg에서 5,000 kg까지 5단계로 나누어 일정하게 격자지보에 하중을 가하면서 각 단계별로 로드셀에 대한 계측을 수행하였다. 3개의 로드셀 계측값은 유사한 유형을 보여주고 있으며 로드셀과 전기저항식 변형률 게이지를 이용하여 부강봉 2에서 측정된 결과는 Fig. 9와 같다. 로드셀의 게이지 상수(1.4249)에 의한 하중값과 로드셀 내부에 설치된 3개의 변형률 게이지에 대한 상수값을 사용하여 계산된 하중값을 상호 비교한 결과 약 4% 이내의 오차를 보이고 있다. 또한 전기저항식 변형률 게이지에 의하여 측정된 하중값과도 유사한 결과를 보인다.

로드셀에 발생하는 휨응력을 최소화하기 위하여 로드셀의 끝부분을 Fig. 1과 같이 원형으로 제작하여 격자지보에 설치하였으나 Fig. 9에서와 같이 여전히 부강봉 2의 로드셀내에 설치된 각각의 변형률 게이지에 휨응력이 발생되고 있다. 그러나 Fig. 10에 의하면 로드셀에서 측정된 하중은 전기저항식 변형률 게이지에서 측정된 값과 유사한 결과를 보

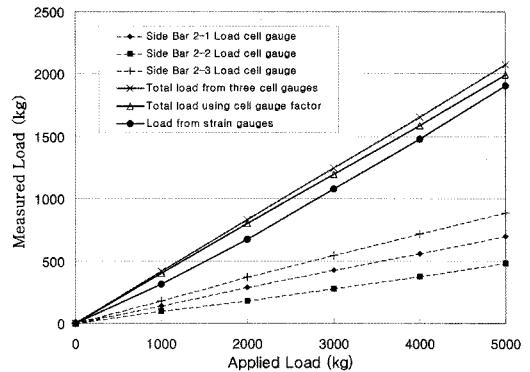


Fig. 9. Comparison of the measured loads from a load cell and the individual three gauges in a load cell for the side bar 2.

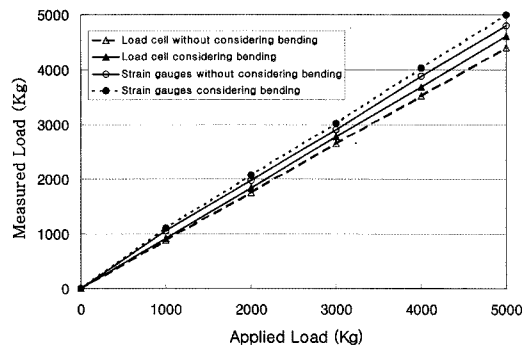


Fig. 10. Measured loads from a load cell and strain gauges at the lattice girder with and without considering bending moments between the main bar and two side bars.

여 준다. 특히, 주강봉과 부강봉 사이에 발생하는 휨응력을 고려하여 하중값을 계산하는 경우의 오차율은 평균 7.7%로 휨응력을 고려하지 않은 경우의 오차율인 11.9%보다 더 향상된 계측값을 보여 준다. 결론적으로, 본 연구에서 격자지보용으로 특수 제작된 로드셀은 휨응력이 발생되어 개선의 여지가 있으나 측정된 하중과 작용하중이 상당히 일치되는 결과를 보여주고 있다. 따라서 터널 현장의 격자지보에 로드셀을 설치할 경우, 격자지보에 작용하는 이완하중에 대한 신뢰성 있는 계측이 가능할 것으로 판단된다.

로드셀 현장 적용 방법 제안

본 연구의 실내시험을 통하여 검증된 로드셀을 현장 격자지보에 적용하기 위해서는 로드셀 설치 방법과 측정된 결과의 해석방법이 정확해야 한다. 로드셀을 격자지보에 설치하기 위해서는 격자지보를 절단한 후 로드셀을 삽입하고 용접을 해야 한다. 따라서 절단되는 격자지보의 길이를 최소화하기 위해서 Fig. 1의 실내시험에 사용된 로드셀 본체의 양단 연결부분을 Fig. 11과 같이 일부 절단하였다. 또한 로드셀에 직접 열을 가하여 용접을 수행할 경우 고온으로 인하여 로드셀이 손상될 우려가 있고 현장에서 정밀용접에 어려움이 있어 격자지보에 Fig. 11과 같은 별도의 정사각형 금속판을 용접한 후 로드셀 본체는 볼트로 연결할 수 있도록 제작하였다. 로드셀을 설치할 경우 로드셀의 길이를 측정한 후 로드셀과 동일 길이로 격자지보를 정밀하게 절단해야 로드셀 설치로 인한 측정 오차를 최소화할 수 있다.

격자지보 실내시험 결과에 의하면 격자지보의 주강봉과 부강봉 사이에서 발생하는 휨응력을 고려하여 로드셀 하중값을 보정해주면 측정 결과의 신뢰성을 높일 수 있다. 따라서 로드셀 측정값을 식 (1)에 대입하면 터널에서 발

생하는 이완하중을 산정할 수 있다.

$$\text{이완하중} = A \times 0.5 \times \{(L_M/a_1) + [(L_{s1} + L_{s2})/a_2] \times 0.5\} \quad (1)$$

식 (1)에서 A , a_1 , a_2 는 각각 전체 격자지보, 주지보, 부지보의 단면적이며 L_M , L_{s1} , L_{s2} 는 각각 주지보, 부지보 1, 부지보 2에서 측정된 로드셀 하중이다.

결 론

본 연구에서는 격자지보에 작용하는 터널하중을 측정하기 위하여 격자지보용 로드셀을 제작한 후 실내시험을 통하여 로드셀에 대한 신뢰성을 검증하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 측정된 하중에 대한 역해석 결과에 의하여 2,240,000 kg/cm²을 격자지보의 탄성계수로 산정하였으며 작용하중과 측정하중의 오차는 약 3% 정도로 일치하고 있다.
2. 격자지보에 대한 압축시험 결과에 의하면 각 강봉별로 휨응력이 발생되고 있으며 또한 주강봉과 부강봉 사이에서도 휨응력이 발생되고 있음을 보여 준다.
3. 로드셀에서 측정된 하중은 전기저항식 변형률 게이지에서 측정된 값과 유사한 결과를 보여 주며 특히, 주강봉과 부강봉 사이에 발생하는 휨응력을 고려하여 하중값을 계산하는 경우 더 향상된 계측값을 보여 준다. 따라서 격자지보에 작용하는 이완하중을 구하기 위해서는 본 논문에서 제시된 수식을 이용하여 주강봉과 부강봉 사이에 발생하는 휨응력을 고려해야 한다.
4. 본 연구에서 격자지보용으로 특수 제작된 로드셀은 개선의 여지가 있으나 측정된 하중과 작용하중이 상당히 일치되는 결과를 보여주고 있다. 따라서 터널 현장의 격자지보에 로드셀을 설치할 경우, 격자지보에 작용하는 이완하중에 대한 신뢰성 있는 계측이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2008년 건설교통부가 출현하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설핵심연구개발사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공기술개발(과제번호: C105A1020001-08A050200241)” 연구사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 격자지보 시편 제작에 도움을 주신 선산철강공업(주) 관계자분들께 감사드립니다.

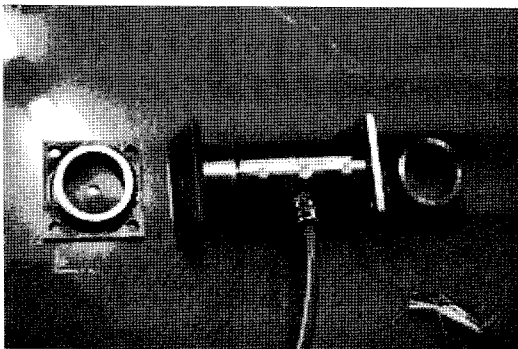


Fig. 11. Shape of the load cell developed for the field use.

참고문헌

김학준, 진수환, 박시현, 2008, 격자지보와 슛크리트 계측에 대한 현장시험 연구, 지질공학, 대한지질공학회 논문집, 18(1), 93-102.

2009년 6월 25일 원고접수, 2009년 7월 17일 게재승인

김학준

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

박시현

한국시설안전공단 진단계획팀
경기도 고양시 일산구 대화동 2311
Tel: 031-910-4085
E-mail: parksh@kistec.or.kr

이기세

대전대학교 공과대학 토목공학과
300-716 대전시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2523
E-mail: kiselee@dju.ac.kr