

교량 거더의 처짐측정 보정에 관한 연구

A Study on the Correction of Deflection Measurements of Bridge Girders

민지홍^{*†}, 추희창^{*}, 손문배^{**}Ji Hong Min^{*†}, Hui Chang Chu^{*}, Moon Bae Son^{**}

초 록 교량거더의 수직처짐 측정은 대표적으로 변위측정자기센서, 레이저 측정기, CCTV방법 등 다양한 방법이 있으며 장단점이 있다. 교량거더의 처짐은 주로 LVDT와 링타입변위계를 사용하고 있다. LVDT로 측정할 때 거더와 게이지를 설치하는 고정점과 형하고 사이가 큰 경우 소구경 강선으로 연결하게 된다. 이때 해당 강선도 구조적으로 스프링으로 볼 수 있으며, 강선의 스프링계수는 길이에 비례하여 감소하므로 측정기기인 LVDT의 수직 변위에 영향을 미치게 된다. 형하고가 높은 경우 강선의 길이가 증가하게 됨에 따라, 거더의 처짐량이 강선의 영향으로 감소되어 LVDT에 전달되므로, 거더의 실제 처짐과 LVDT의 측정치에는 오차가 발생되며 이는 교량의 내하력을 과대 평가하는 단점이 있다. 본 연구는 강선이 영향할 수 있는 처짐측정보정에 관한 연구로서 교량 내하력의 합리적 평가를 위한 연구이다.

주요어 : 재하시험, 교량 처짐 측정, 강선, 내하력 산정

1. 서 론

교량의 정밀안전진단에서 실제 내하력 평가는 중요한 요소로 재하시험은 교량거더의 처짐을 측정하여 응답보정계수를 산정한다. 이 응답보정계수는 하중-처짐관계, 즉 교량의 실제 거동으로부터 실제 성능을 파악하는 것이다.

교량 거더의 응답보정계수는 하중-처짐 관계로부터 산정하는 것이 일반적으로 상황에 따라 하중-변형률로도 산정할 수 있으나 변형률 특성상 국부에서 측정되어 보편성이 낮으며, 특히 국부변형률은 인장, 압축, 비틀림 등 방향의 응력이 발생할 수 있으므로 대표성이 저감된다.

현재 교량의 정밀안전진단의 재하시험에서 거더의 처짐은 주로 LVDT와 링타입변위계를 사용하고 있다.

이들은 측정 시 거더와 게이지를 연결하는 고정(기준)점과 형하고 사이가 큰 경우 소구경 강선으로 연결하게 된다. 이때 해당 강선도 일종의 스프링으로 볼 수 있으며, 강선의 스프링계수($W_s = EA/L$)는 길이에 비례하여 감소하므로 측정기기인 LVDT의 수직 변위에 영향을 미치게 된다. 형하고가 높은 경우 강선의 길이가 증가하게 되는데, 거더의 처짐량이 강선의 영향으로 감소되어 LVDT에 전달되므로, 거더의 실제 처짐과 LVDT의 측정치에는 오차가 발생되게 된다.

본연구는 역학적으로 내재되는 측정오차와 이에 대한 보정에 관한 연구이다. 여기서 검토하는 측정오차는 링타입변위계에 의한 측정오차에도 유사하게 적용될 것이다.

*† 교신저자: 철도안전연구소 대표이사

* 한국철도공사 시설처 시설조사팀장

**한국종합시설안전 전문이사

2. 본 론

2.1 교량의 처짐 측정방법과 내하력 산정

거더의 처짐 측정은 LVDT, 링타입변위계, 레이저 측정기, CCTV(Closed Circuit Television), 사진, GPS(Global Positioning System)를 이용한 처짐 측정 또는 유선 계측 장비를 이용하는 방법 등 다양한 방법들이 있다.

일반적으로 형하고가 낮은 경우에는 강관이나 틀비계를 쌓아 LVDT를 직접 거더에 고정하여 측정하고, 이 경우에는 강관이나 틀비계 등의 스프링계수가 LVDT의 스프링 보다 매우 커서 측정에 미치는 영향은 공학적으로 무시해도 무관하다. 그러나 형하고가 5m 이상인 경우 강관은 좌굴이나 바람에 의한 영향을 받을 수 있으며, 다수의 틀비계를 수직으로 조립하여 높이는 방법은 교량 하부 상황에 따라 설치에 제한이 크고 지반진동 등에 영향을 받을 수 있다. 따라서 현행 재하시험에서 수직변위는 일반적으로 강선(Wire)을 이용한 계측을 주로 사용하고 있다.

또한 거더의 내하력 평가는 다음 식과 같이 재하시험 하중에 의한 실측정적처침(d_{st}) 측정량과 실측충격계수(i_t) 등을 통해 결정됨으로 보다 정확한 처짐을 계측 하는 것이 중요하다.

$$P = \frac{d_s (1 + i_s)}{d_{st} (1 + i_t)} \times \frac{f_a - f_d}{f_l (1 + i_s)} \times F \quad \text{식(1)}$$

2.2 강선을 이용한 처짐 계측시 보정방법

강선을 이용하여 처짐을 계측 할 경우 교량 형하고가 높아질수록 강선의 길이도 증가하게 되는데 강선의 스프링계수는 강관이나 틀비계 등에 비해 무시할 수 없으며 길이가 길어짐에 따라 그 영향을 무시하기 어렵다. 이를 계산하기 위해 다음 그림과 같이 거더에 강선(Wire)을 연결하고, 강선의 끝단에 LVDT 결속한 뒤 스프링을 연결하여 인장력(수직방향)을 가한다. 이때 인장력은 약

1~5kg으로 당겨 지반 고정점에 결속한다.

Fig.1의 처짐계 설치 개념도와 같이

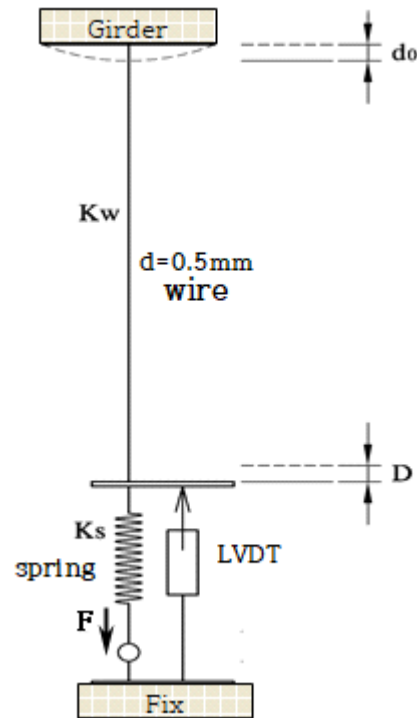


Fig. 1 Concept of deflection measurement using steel wire

처짐계를 설치하고 스프링을 하향으로 인장력(F)을 가하면 상부 강선과 하부 스프링이 하향으로 변위가 발생한다. 이때 강선과 스프링의 변위는 각각 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D_w = \frac{F}{K_w} \quad (\text{강선의 신축량}) \quad \text{식(2)}$$

$$D_s = \frac{F}{K_s} \quad (\text{스프링의 신축량}) \quad \text{식(3)}$$

따라서 긴장력을 가하는 F 위치에서의 총 수직변위량을 d_a 라 하면, d_a 는 다음과 같다.

$$D_a = D_w + D_s = \frac{F}{K_w} + \frac{F}{K_s} \quad \text{식(4)}$$

강선의 스프링계수 K_w 는 봉의 처짐식 PL/EA 으로부터 다음과 같이 구한다.

$$K_w = \frac{EA}{L} \quad \text{식(5)}$$

위 식(5)는 구조해석에서의 축강성으로 스프링의 스프링상수는 스프링강선의 직경, 스프링의 외경, 스프링 권선수, 강 전단탄성계수 등으로 산정할 수 있으나, 실제 스프링을 인장시켜 인장량(dL)과 인장력(F_s)으로 부터 반복실험하여 다음과 같이 간단히 계산할 수 있다.

$$K_s = \frac{F_s}{dL} \quad \text{식(6)}$$

위에서 보는 바와 같이 스프링에 인장력과 변위를 제어하면서 LVDT의 최대 신축량을 고려하고 실제 거더의 처짐량을 계산하거나 경험적으로 판단하여 LVDT에 변위(압축)가하여 하부 고정점에 결속시켜 설치한다.

이로부터 스프링에 인장력을 가하면 스프링과 더불어 강선도 인장되는 것을 확인할 수 있으며, 이들 사이의 인장비는 K_s/K_w 임을 알 수 있다. 따라서 거더가 상부 통과 하중으로 거더에 처짐이 발생하면 이 처짐이 그대로 LVDT에 전달될 수 없다는 것을 알 수 있다.

예를 들어 직경 50mm, 두께 3mm 길이 5m의 강봉 등을 사용하여 변위계를 설치하면 개략 스프링계수는 식(9)로부터 약 18.4MN/mm로 계산되며, LVDT의 수직이동 레버의 스프링계수는 1N/mm정도로 약하므로 수직처짐 측정오차의 공학적 의미는 없을 것이다.

그러나 거더와 LVDT를 연결하는 강선은 일반적으로 $d=0.5\text{mm}$ 강선을 사용하며, 위와 같이 강선 길이가 5m인 경우, 강선과 스프링의 스프링계수는 식(5)과 식(6)으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_w = \frac{EA}{L} = \frac{204,000 \times 0.196}{5,000} = 7.8469 \text{ N/mm}$$

$$K_s = \frac{F_s}{dL} = \frac{2}{89} = 0.2202 \text{ N/mm}$$

위 처짐계설치 개념도에서 상재 하중에 의하여 d_0 만큼 처짐이 발생된 경우에 강선에 발생하는 수직변위로 인하여 LVDT에는 단축된 D 의 변위가 발생될 것이다. 따라서 강선과 스프링에 발생된 변위는 각각 d_0-D 와 D 의 변위가 발생되고 여기에 작용하는 긴장력 F 는

동일하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(d_0 - D) \times K_w = D \times K_s = F \quad \text{식(7)}$$

$$d_0 = D \times \left(1 + \frac{K_s}{K_w}\right) = D \times (1 + p) \quad \text{식(8)}$$

($p = K_s/K_w$: 스프링과 강선의 상수 비)

$$p = \frac{K_s}{K_w} \quad \text{식(9)}$$

실제 처짐 d_0 는 측정기에 읽힌 D 보다 스프링 강성비 $p \times D$ 만큼 더 크다는 것을 알 수 있으며 $p > 0$ 이다. 만약 극단적으로 $K_s = K_w$ 인 경우 LVDT에서 변위 D 로 측정되었다면 식(11)에서 $p=1$ 이므로 거더의 실제처짐 $d_0=2D$ 가 된다는 것을 알 수 있다. 강관 외경 42.7mm, 두께 2.3mm인 강관(단면적 $A=291.9\text{mm}^2$)을 사용하여 거더 높이 5m 에 설치하여 측정한다면 강관의 수직강성은 EA/L 이므로 1191.0 N/mm이다.

2.3 현장시험

교량거더처짐 보정에대한 현장시험은 도로교와 철도교에서 각각 1회씩 실험하였다. 도로교는 FP거더로 형하고 3.9m로 비교적 낮은 형고에서 실험하였다. 앞에서 기술한 바와 같이 거더의 처짐을 측정하기 위해 거더에 강선(Wire)을 연결하고, 강선 끝단에 LVDT 결속 및 스프링을 연결하여 인장력을 가한다. 이때 인장력은 약 2kg으로 당겨 지반 고정점에 결속하였다.

비교를 위한 거더 처짐 직접측정 방식은 스텔레스강관($d=30\text{mm}$, $t=1\text{mm}$, $L=3.8\text{m}$)를 사용하였으며 이때 강관의 스프링계수는 4897.7N/mm이고 LVDT 수직이동 레버의 스프링 계수는 0.01N/mm 정도로 미소하므로 거더처짐이 10mm 발생했다면 강봉의 단축은 0.00002mm로 거더처짐에 미치는 영향은 생략할 수 있을 것이다.

한편 와이어를 사용하여 측정하는 경우 와이어 강선은 $d=0.5\text{mm}$, $L=3.6\text{m}$ (LVDT 고정 높이 짐이 5mm 이상되는 곳을 찾아 전후 각각 30초 정도가치 총 60초이상의 처짐이 0

이하로 측정되는 곳을 기준으로 15개를 산정하였다. 이때 스프링과 강봉의 스프링 계수는 각각 0.1962N/mm, 10.910N/mm이다.

다음 그래프는 거더의 처짐 형상을 나타낸 것이며 표1은 이들의 통계치를 나타낸 것이다.

실제 처짐 d_0 는 계측기에 측정된 D보다 스프링 강성비 $\rho \times D$ 만큼 더 크다는 것을 알 수 있으며 $\rho > 0$ 이다. 만약 극단적으로 $K_s = K_w$ 인 경우 처짐계 LVDT에서 변위 D로 측정되었다면 식(11)에서 $\rho = 1$ 이므로 거더의 실제처짐 $d_0 = 2D$ 가 된다는 것을 알 수 있다.



Fig. 2 Field Test

Table 1 Comparison of test results

No.	Time	ST.Pipe(a)	Wire(b)	Ratio(b/a-1)
1	12:05:57	8.614	8.524	-0.010
2	12:08:56	7.405	7.352	-0.007
3	12:16:57	6.434	6.325	-0.017
4	12:26:06	6.663	6.559	-0.016
5	12:37:52	7.642	7.617	-0.003
6	12:42:41	7.555	7.526	-0.004
7	12:48:21	6.021	5.912	-0.018
8	13:03:38	6.288	6.176	-0.018
9	13:07:59	7.678	7.542	-0.018
10	13:12:18	7.369	7.244	-0.017
11	13:16:09	8.781	8.742	-0.004
12	13:23:38	6.663	6.552	-0.017
13	13:36:54	5.820	5.725	-0.016
14	13:47:28	5.677	5.578	-0.017
15	14:00:11	5.380	5.284	-0.018
Average		6.933	6.844	-0.013

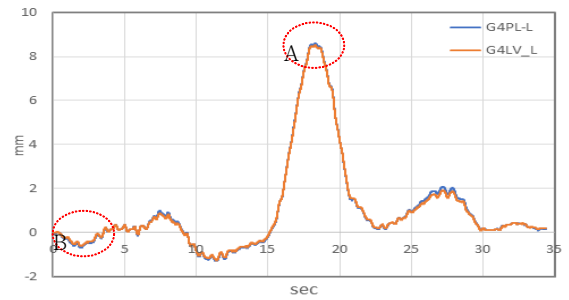


Fig. 3 Deflection graph

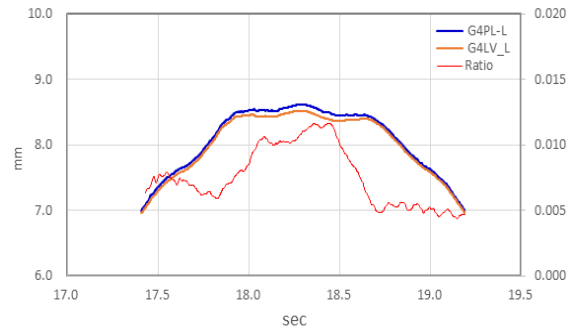


Fig. 4 Error ratio of steel pipe and steel wire
(A: Upward deflection)

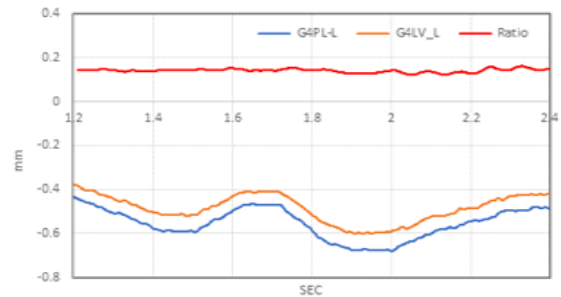


Fig. 5 Error ratio of steel pipe and steel wire
(B: Downward deflection)

그림 3은 강관을 사용하여 설치하여 측정한 처짐 결과와 강선을 사용하여 측정한 처짐 결과를 나타낸 것이다.

그래프에서는 이들의 위상차가 미소하므로 이들 정점부와 저점부를 확대해서 나타낸 것이 그림 3과 그림 4이며 이들을 15회 측정하여 정리하여 나타낸 것이 표 1이다. 강선 길이가 3.6m로 짧아 강성비는 $(K_s/K_w)=0.0170$ 으로 낮아 절대치의 차이는 미소하며 통행되는 동적하중 및 거더의 진동 특성에 따라 다르게 측정될 수도 있을 것이다.

자료의 평균비율은 0.013% 낮게 측정되어

계산상 강성비 보다는 낮게 측정되었다. 낮은 형하고에서 실험하였으므로 실험결과가 명료하지 않았으나 강선을 사용하는 경우 실제보다 낮게 측정됨을 확인할 수 있었으며, 길이가 길어질수록 그 편차는 높아질 것이다.

위 결과로 부터 강선의 오차로 인해 식 (1)의 분모가 감소됨으로 이에 비례하여 내하력이 과대평가되는 오류가 발생할 수 있으며, 향후 이들에 대한 추가 실험을 통하여 더 많은 결과값을 도출하고 이에 대한 개선방안을 연구하고자 한다.

3. 결 론

교량거더의 처짐측정에서 형고가 높은 경우 대부분 강선을 사용하여 상부 거더의 처짐을 강선을 통하여 하부에서 측정기인 LVDT에 전달되어 측정한다. 이 과정에서 강선의 작은 단면적과 긴 길이로 강성이 감소되므로 실제 처짐이 실제보다 낮게 측정되며 공용내하력 의 과대평가를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 이를 이론 및 현장실험을 통해 확인하였으며, 향후 이에 대한 추가 실험과 개선방안에 대하여 연구하고자 한다.

참고문헌

- [1] K.J. Min, S.U Lee, Y.K. Woo, et al. (2010) Loadtest and load carrying capacity evaluation for the railway bridge using operation train, *Autumn Conference of Korean Society for Railway*, Seogwipo, pp.1457-1485.