

초기결함을 갖는 강교량의 피로시험 및 수명 평가

방 명 석

충주대학교 안전공학과

(1999. 12. 6. 접수 / 2000. 10. 16. 채택)

Fatigue Test and Service Life Assessment of Steel Truss Bridges with Initial Imperfections

Myung-Seok Bang

Department of Safety Engineering, Chungju National University

(Received December 6, 1999 / Accepted October 16, 2000)

Abstract : The truss bridge is composed of numerous steel beams. In long span bridges the size of beams is getting larger, so the number of plate girders is increasing instead of rolled beams. This plate girder has long welding lines at the intersection of steel plates. The improper welding at the intersection line causes the steel bridge to be structurally unsafe. In this paper the loss of member section from improper welding was measured and the experimental testing was performed to get the S-N curve from testing models with sectional losses. The improper welding resulted in the lowering of structural safety and the shortening of life cycle.

Key Words : be structurally unsafe, sectional losses

1. 서 론

최근에 국내교량의 동향을 보면 장대화에 따라 서, 시간이 길어지고 교량을 구성하는 부재의 수나 크기가 대형화되고 있다. 강교량에서 부재의 크기가 커지는 경우에 공장에서 생산되는 형강(rolled beam)을 이용하는 데에는 한계가 있으므로 판형재(plate girder)를 현장에서 제작하여 사용하게 된다. 판형재는 강판을 용접하여 제작되므로 용접부가 많게 되고 용접부의 제작불량은 교량의 안전성에 큰 영향을 미치게 된다. 용접불량은 부재의 단면성능의 저하를 가져오게 되어 부재의 내하력을 저하시킬 뿐만 아니라, 균열과 같은 부재파괴의 중요한 원인이 되기도 한다. 교량의 파괴사례를 분석한 결과를 보면, 제작당시의 용접불량에 의한 초기결함이 공용중 발전하여 교량사고에까지 이르는 원인이 빈번하였음을 알 수 있다¹⁾. 본 연구에서는 불량 제작된 판형부재가 존재하는 트러스교량을 대상

으로, 용접불량에 의한 교량의 안전도와 피로수명에 미치는 영향을 분석하기 위하여 시험을 실시하고 해석을 실시하였다. 용접불량에 따른 부재의 피로강도를 정확히 규명하기 위하여 실제 불량용접된 부재와 거의 같은 시험편을 제작하기 위하여 노력하였으며, 제작된 시험부재를 가지고 피로시험을 실시하였다.

2. 시험교량 및 용접단면 선정

2.1. 시험교량

본 연구의 시험교량은 강트러스 교량이다 구조형식은 게르버구조로서 중앙부의 48m가 교각부의 36m 앵커트러스에 연결되어 있다. 연결부는 수직재 상부에서 핀구조로 되어 있으며 응력집중에 대비하여 수직재길이 5m 중 상부의 핀연결부는 판형강의 강판두께가 40mm이고 나머지는 18mm로 제작되었다. 따라서 수직재는 부재상부에 용접연결부를 갖게 되고 이 용접부의 용접불량에 의하여 교량의 신축이음부에 처짐이 발생하였다. 이는 트러

스부재에 손상이 발생하여 처짐이 발생한 것으로 판단되어 용접부를 현장조사하고 용접불량정도를 측정하였다.

2.2. 용접단면의 측정

연결부 용접단면의 초음파측정결과²⁾는 용접불량으로 수직재의 단면이 크게 부족함을 보여주었다. 따라서 단면부족이 교량의 안전도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 교량의 수직재 중 일부에 대하여 부재를 교체하고, 교체된 구부재를 절단하여 용접단면부의 용접손상량을 측정하고 유효단면을 평가하였다. 측정결과는 5개 유형으로 분류하여 모형화하였으며 그 결과는 Fig. 1과 같다. 즉, 용접이 정상적으로 된 경우(normal design state), 결함을 갖고 있는 3가지 경우, 공용하중에 의하여 최초의 용접불량부에서 균열이 발생하여 진전되고 있는 경우이다. 용접부의 균열진전은 2단계로 진행되는 데, 첫 단계에는 균열진전속도가 매우 느리게 장기간 진행되며, 두 번째 단계에서는 균열진전속도가 매우 빨라서 짧은 순간에 부재의 파단에 이르게 된다. 실제 시험교량의 파단면을 관찰한 결과 피로균열의 성장형상이 5번째 모형처럼 진전되었음을 알 수 있다.

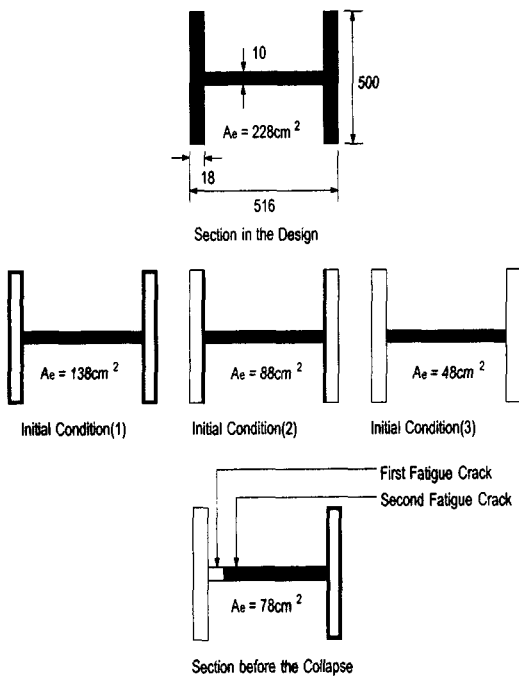


Fig. 1. Measured effective sectional areas in various conditions

3. 설계하중에 의한 안전도 분석

용접불량된 단면이 설계하중하에서 안전도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 구조해석을 하였다. 시험교량의 설계하중은 DL18이었으나 교량의 공용중에 설계하중이 DL24로 33.3% 상향되었으므로³⁾, 두 종류의 설계하중에 대하여 분석하였다. 시험교량은 총길이 600m로 120m 경간이 5개로 구성된다. 해석모델은 Fig. 2와 같이 게르버형식의 특성을 고려하여 1경간에 추가하여 양단교각의 양측 앵커트러스를 포함하는 구간을 해석한다. 연속교의 특성은 중앙게르버의 사하중반력을 모델구간의 양 끝에 하중으로 재하함으로써 고려할 수 있다. Fig. 1에서 제시된 5개 유형의 용접상태에 대하여 유효단면적(Ae)을 측정하고 이 데이터를 이용하여 구한 구조해석의 결과는 Table 1과 같다⁴⁾.

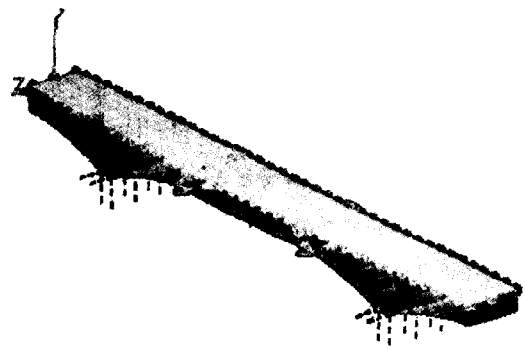


Fig. 2. Numerical modelling of the truss bridge

Table 1. Stresse in various load cases ($\sigma_{sa} = 1400$, $\sigma_y = 2400$, $\sigma_f = 4100$: kg/cm^2)

Section	Effective section A_e (cm^2)	Dead Load	DL24 (including impact)	DL18 (including impact)	Dead Load +DL24	Dead Load +DL18
Design state	228	729.4	332.2	249.1	1061.6	970.5
Initial condition(1)	138	1205.1	566.2	424.6	1771.3	1629.7
Initial condition(2)	88	1889.8	887.9	665.9	2777.7	2555.7
Initial condition(3)	48	3464.6	1627.8	1220.8	5092.4	4685.4
1st crack progress	85.9	1935.9	909.6	682.2	2845.5	2618.1
Before collapse	78.2	2126.6	999.1	749.4	3125.7	2876.0

이 결과를 보면 설계대로 용접이 된 경우에는 설계당시의 설계하중 DL18에서 뿐만 아니라 공용중에 상향된 설계하중 DL24에 대해서도 허용응력(σ_{sa})보다 작아서 충분히 안전함을 알 수 있다. 그러나 용접이 불량한 초기조건(1),(2),(3)의 경우 모두가 설계당시의 설계하중 DL18에서 뿐만 아니라, 공용중에 상향된 설계하중 DL24에 대해서도 허용응력(σ_{sa})보다 커서 허용기준을 초과하고 있다. 또한 초기조건(2)에서는 설계당시의 설계하중 DL18에서 뿐만 아니라 설계하중 DL24에 대해서도 항복응력(σ_y)을 초과하고, 초기조건(3)에서는 설계하중 DL18에서 뿐만 아니라 설계하중 DL24에 대해서도 파단강도(σ_f)를 초과한다. 즉 H형거더의 플랜지의 용접이 모두 떨어지면 부재는 즉시 파단되게 되므로 초기조건(3)의 상태는 실제 부재의 거동과 다름을 알 수 있다. 초기에 균열이 발생하여 진전되어 가는 경우에는 설계하중 DL18에서 뿐만 아니라 설계하중 DL24에 대해서도 항복응력을 초과하므로, 계속되는 통행차량에 의하여 피로손상이 계속될 수 있다. 시험교량은 준공후 15년간 공용되었으므로 이와 같은 파괴과정을 보인 것임을 알 수 있다.

4. 피로시험 및 수명 분석

4.1. 피로시험용 시편

부재의 용접이 완전한 경우에는 기존 강재의 피로-응력곡선을 사용할 수도 있으나 본 연구의 경우에는 부재가 용접결합을 갖고 있으므로, 위에 가정된 5가지 모형에 대하여 시험을 실시하여 피로강도를 구해야 한다. 그러나 구조해석을 통한 안전도 분석결과 조건(2),(3)의 경우는 실제상태와 다름을 알 수 있으므로 조건(1)을 기본모형으로 결정하고, 현장에서 측정된 수직재의 치수를 참조하여 실제 상태와 최대한 유사하게 시험편을 제작하였다. 제작된 피로시험용 시편의 상세는 Fig. 3과 같다.

4.2. 피로시험

측정된 용접단면의 피로성능을 평가하기 위 이상의 차량만이 하여는, 공용기간중 통행한 모든 차량에 대한 교량의 피로손상 및 수명을 평가해야 한다. 통행차량의 종류나 중량, 그리고 통행량은 모두 다르기 때문에 모든 통행차량에 대한 영향을 분석하는 것은 불가능하다. 그리고 교량을 통행하는 모든 차량이 교량에 손상을 주는 것은 아니며, 일정한

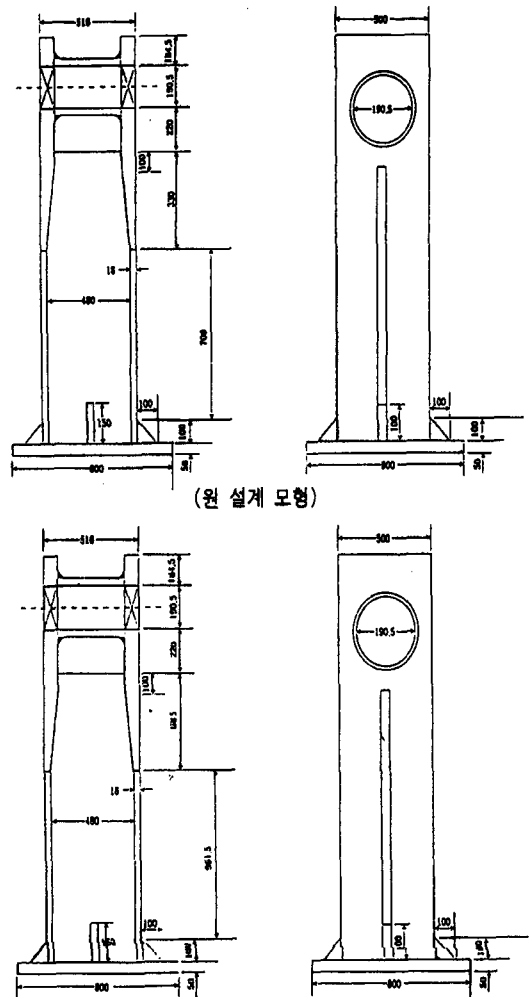


Fig. 3. Detail drawings of testing specimens

중량 교량의 손상과 수명에 영향을 미친다. 교량을 통행하는 모든 차량에 대한 응력수준에서 피로시험을 실시하는 것은 불가능하므로, 설계하중인 DL18과 DL24 하중에 대한 응력수준에 대하여 시험을 실시하였다. 시험하중을 구하기 위하여 DL18과 DL24 하중이 작용하는 경우에 수직재에 발생하는 응력을 구조해석을 통하여 구하였다. 시험장치는 Fig. 4와 같다.

구조해석 결과 사하중에 의한 수직력은 166.3 Ton이고 DL18하중에 의한 수직력은 56.8 Ton이며 DL24하중에 의한 수직력은 75.7 Ton이다. 시험시에는 고정하중 166.3 Ton을 작용시키고 있는 상태에서 변동하중 56.8 Ton과 75.7 Ton을 반복하여 재하하였다.

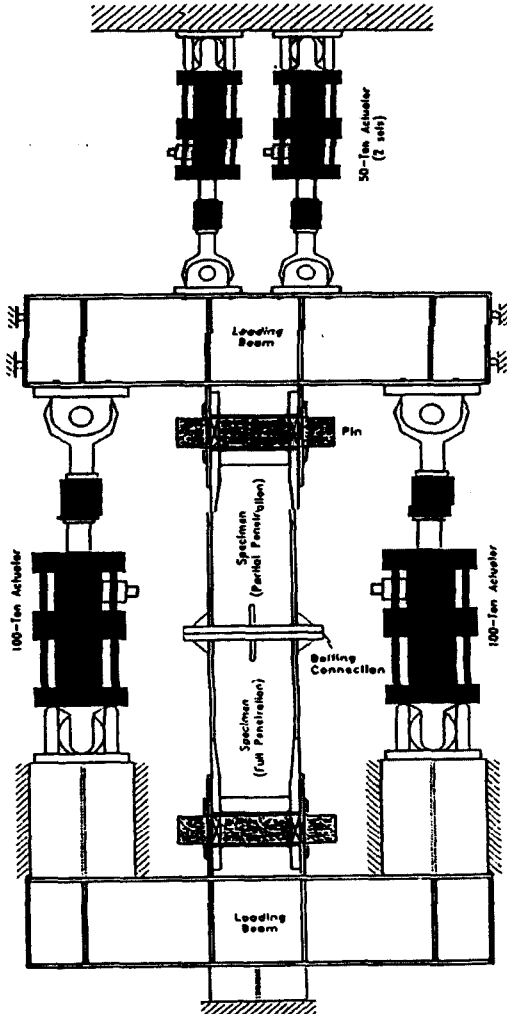


Fig. 4. Experimental testing set for fatigue test

4.3. 시험결과 분석

변동하중 56.8 Ton의 경우에는 120만 사이클에서 피로균열이 발생하여 성장해 나가기 시작하였다. 그리고 계속된 반복하중이 260만 사이클 작용된 시점에서 시편의 파단가능성 때문에 시험을 중지하였다. 변동하중 75.7 Ton의 경우에는 50만 사이클 전후에서 피로균열이 발생하기 시작하여 99.3만 사이클에서 파단가능성 때문에 시험을 종료하였다. 즉, DL18일 경우에는 260만 사이클, DL24일 경우에는 99.3만 사이클이 피로강도임을 알 수 있었다. 이와 같은 시험을 통하여 급속피로의

지수법칙을 가지고 Paris의 지수식을 구해 보면 대략 $N = 4.0 \cdot 10^{13} \cdot (Sr)^{-3}$ 과 같은 응력-반복횟수 곡선을 얻을 수 있다. 시험대상교량에 대한 교통량분석 보고서⁵⁾에서는 Miner의 공식에 따라서 구한 등가 응력변동범위(Equivalent stress range)가 111.46 kg/cm²이다. 이 값을 가지고 위에서 구한 Paris공식을 이용하여 시험교량의 피로수명을 구해 보면 28.89*10⁶사이클이 되며, 도로교시방서³⁾의 일일교통량 2500대를 기준으로 평가하면 15.8년이 된다. 이는 시험교량이 준공 후 15년된 시점에서 수직재가 파단된 것과 비교해 볼 때 시험결과가 시험교량의 거동과 비교적 정확하게 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

용접부가 많은 판형강재로 건설되는 트러스 교량이나 강상형교에서는 용접결합이 존재할 가능성이 많으며, 이 결합부위가 구조물의 안전성과 피로수명에 나쁜 영향을 주게 된다. 본 연구결과에서 알 수 있는 것처럼, 용접결합에 의한 부재단면의 감소는 부재응력을 크게 증가시켜서, 정하중하에서도 허용응력이나 항복응력을 초과하게 되며, 차량과 같은 반복하중에 대해서는 피로수명을 단축시킴을 알 수 있다. 시공불량에 의한 부재의 단면손실이 부재의 피로수명을 크게 감소시켜서 구조물의 불안전성과 사고의 확률을 크게 높일 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) Schilling, C. G., Klippstein, K. H., Barsom, J. M., Blake, G. T. "Fatigue of Welded Steel Bridge Members under Variable Amplitude Loadings," NCHRP Report 188, Transportation Research Board, USA, 1978.
- 2) Bang M. S., "Report on the Causes of the Collapse in the Sungsoo Bridge", 2nd Korea - U.S.A Joint Seminar, Washington, U.S.A, 1997.
- 3) MOCT, "Specifications for Highway Bridges," 1996.
- 4) 방명석, "불량용접을 갖는 트러스교의 피로수명", 한국구조물진단학회, 1999. 10.
- 5) Traffic Management Office in Seoul City, "Report on the Traffic Survey," 1980~1994.