

강교량 용접구조의 피로강도 및 응급보수효과에 관한 연구

장 동일*, 김 학 수**, 이 명 구***, 홍 성 욱*, 송 창 희*
한양대학교 토목공학과*, 호남대학교 토목공학과**, 서울보건전문대학 산업안전과***

1. 서 론

도로와 철도에서 사용되는 강교량에는 최근 차량의 중량화 등에 의해 피로손상이 발생되고 있으며, 이러한 피로손상은 성수대교 붕괴사고나 당산철교 철거 등에서와 같이 주로 구조물의 공용중에 발생되기 때문에 이로 인한 사회적·경제적 손실은 실로 막대하다.

이러한 실정에도 불구하고 현재 우리나라 도로교시방서(1996년 개정판)에서 채택하고 있는 피로설계편의 강교량의 허용피로응력범위에 대한 규정은 미국의 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program)에서 수행한 피로실험 결과를 기초로 한 AASHTO의 피로설계기준을 특별한 검증절차없이 그대로 수용하여 현재의 피로설계조항에 반영하고 있는 실정이다.

일반적으로 강교에서 발생하고 있는 피로손상은 교량설계시 피로검토를 반드시 수행하는 1차부재(또는 주부재)에서는 거의 피로손상이 발견되고 있지 않으나 피로설계계산시 일반적으로 무시하는 2차부재의 접합부(용접에 의한 접합, 고장력볼트 및 리벳에 의한 접합)에서 발생하는 2차응력, 즉 비구조적 부재의 접합부에서 발생하는 실제응력과 구조계산으로부터 산출되는 계산응력과의 차이에 기인하여 피로손상이 발생하는 것으로 알려져 있다.

이로 인한 피로손상을 유발하는 2차응력의 발생원인은 교량구조의 전체적인 3차원변형에 의해서 부재의 접합부 중 강성이 저하하는 부분에서 판의 면내 및 면외방향의 국부변형에 기인하는 것으로 규명되고 있다. 이와 같이 강교량 용접구조의 피로거동에 대한 많은 연구가 여러 학자들에 의해서 진행되고 있으나 주로 일축인장 소형시험체를 이용한 피로실험이 대다수를 차지하고 있고 이는 실제 구조물의 거동특성을 충분히 반영할 수 없는 한계가 존재한다.

따라서 본 연구에서는 강교량에서 주로 사용되는 용접구조형식인 면내거세트형, 면외거세트형, +자연결형 및 덮개판형의 4가지 용접구조가 부착된 실물 대형 시험체를 제작하여 일련의 실내실험을 수행함으로써 각 구조세목별 피로거동을 보다 정량적으로 평가하고자 하였다.

2. 실 험

2.1 시험체

구조상세별 피로특성을 규명하기 위하여 사용된 시험체의 강종은 SWS 490B로 구조세목의 용접은 CO₂ 반자동용접방법인 FCAW를 이용하였다. 또한 시험체

는 그림 1과 같이 두께 16mm, 폭 180mm의 플랜지와 두께 10mm, 폭 508mm의 웨브로 구성된 I형단면으로 길이가 7.8m인 보시험체를 제작하였다. 또한 시험체에 사용된 강종의 화학성분 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 강재의 화학성분 및 물리적 성질

강 종	화학성분 (%)					물리적 성질			
	C	Si	Mn	P	S	항복강도 (Mpa)	인장강도 (Mpa)	탄성계수 (Mpa)	신장률 (%)
SWS 490B	0.16	0.38	1.23	0.012	0.009	368.3	529.2	205274.5	23

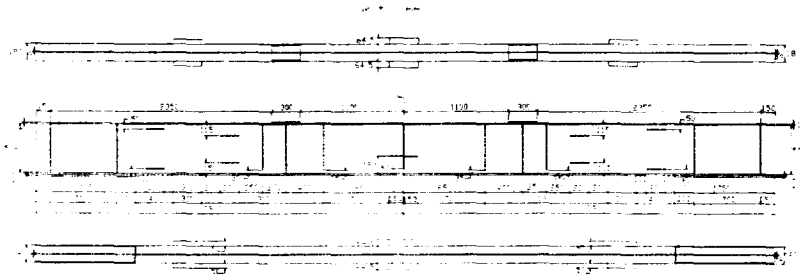


그림 1. 시험체의 형상 및 치수

2.2 실험방법

실험은 50tonf 용량의 썬피로시험기를 이용하여 4점 썬실험을 실시하였으며, 일정진폭의 반복하중으로서 파형은 정현파, 응력비는 0.1로 일정하게 하였다. 시험체는 총 2개를 제작하여 작용하중 및 재하속도는 시험체 1에 대해서는 38tonf 및 0.4Hz, 시험체 2에 대해서는 34tonf 및 0.5Hz로 일정하게 하였다.

피로시험중 어느 일정한 구조세목에서 균열이 발생되어 한계균열까지 도달하면 균열부를 보수하고 또다른 구조세목에서 파괴에 도달될 때까지 지속적으로 시험을 실시하였다. 이 때 한계균열길이는 각 구조상세별로 부착위치와 균열성장 형태에 따라 전체구조계에 미치는 영향을 고려하여 결정하였으며, 플랜지거셋형은 플랜지폭의 1/6에 해당하는 30mm, 웨브거셋형과 수직보강재형과 같은 복부부착물은 복부두께의 4배에 해당되는 40mm, 덮개판형은 플랜지두께의 3/4에 해당되는 12mm로 정하였다. 이 때 응급보수방법을 다르게 하며 보수·보강효과를 규명하고자 하였다.

3. 실험결과

각 구조세목별 피로실험결과를 AASHTO 및 JSSC의 기준과 비교하여 나타내면 그림 2 및 그림 3과 같다.

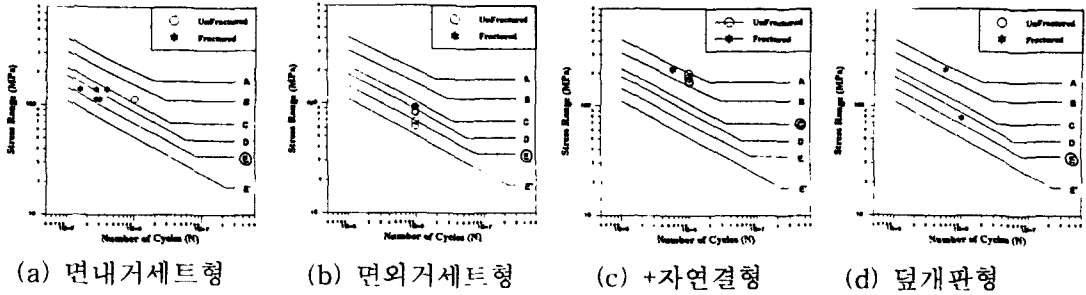


그림 2. S-N 선도 (AASHTO 기준)

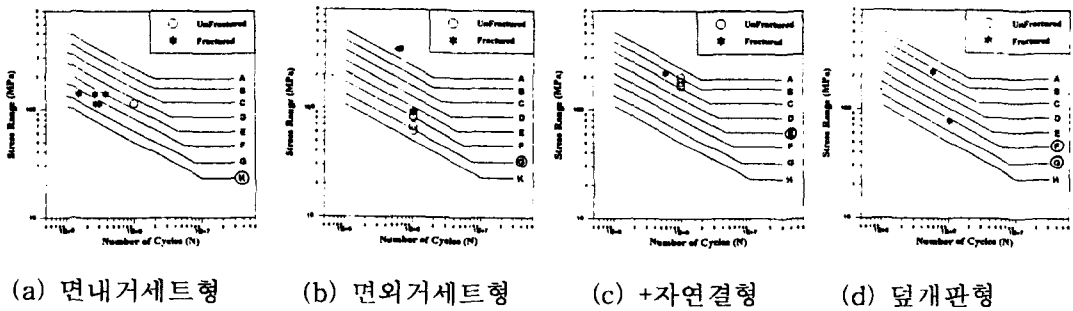


그림 3. S-N 선도 (JSSC 기준)

각 용접구조상세에 대한 피로시험 결과 모든 구조상세에서 AASHTO 및 JSSC에서 규정하고 있는 허용피로강도를 상회하는 것으로 나타났다.

이는 AASHTO 설계기준을 준용하고 있는 국내 도로교시방서의 피로설계기준은 타당한 것으로 평가되며, 국내생산강재 및 국내용접기술에 의한 강교량의 용접구조상세에도 적합한 기준이 되는 것으로 생각된다.

4. 응급보수효과

본 연구에서 실시한 피로손상 위치에서의 응급보수방법으로는 스톱홀(Stop Hole) 천공, 이음판의 부착 등의 형태로 실시하여 스톱홀의 크기와 고장력볼트의 크기 및 갯수에 따른 응급보수효과를 규명하였다.

4.1 스톱홀에 의한 보수

본 연구에서는 플랜지거세트형 구조세목에서 발생한 피로손상부에 대해서 스톱홀 천공에 따른 보수방법을 적용하여 이에 따른 보수효과를 규명하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다.

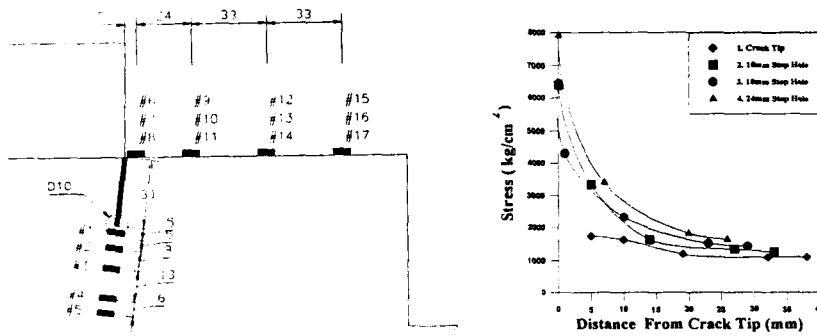


그림 4. 균열선단 및 스톱홀에서의 응력분포도

스톱홀의 크기를 변화시키며 측정된 응력값으로부터 균열선단에서의 응력비보다 스톱홀을 천공한 경우가 더 크게 나타났으며, 스톱홀의 크기가 증가할수록 응력비는 더욱 증가함을 알 수 있었다. 또한 균열선단 및 스톱홀 선단에서 각각 5mm 떨어진 위치에서 측정된 결과에서도 스톱홀의 크기가 증가할수록 응력비는 증가함을 알 수 있었다. 또한 스톱홀 크기의 증가에 따른 유효단면적의 감소효과를 고려한 결과는 그림 5와 같다.

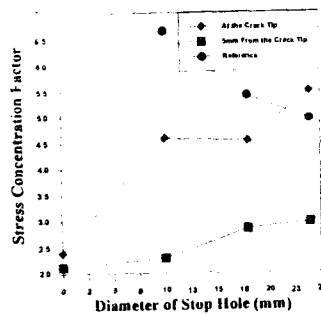


그림 5. 스톱홀 크기에 따른 응력비의 크기

본 실험결과로부터 스톱홀에 의한 응력비의 저감효과는 저항단면의 감소를 고려한 유효공칭응력의 응력비에 대해서도 스톱홀을 천공하지 않은 경우에 비해서 스톱홀을 천공한 경우가 응력비가 오히려 증가함을 알 수 있었으며, 스톱홀의 크기가 클수록 응력집중현상은 두드러진 것으로 나타나므로 인장플랜지에서 스톱홀에 의한 응력집중의 감소효과는 기대하기 어려운 것으로 판단되며, 기존 플랜지거세트부에 대한 응력집중계수의 계산식은 수정되어야 할 것으로 생각된다.

4.2 이음판에 의한 보수

본 연구에서는 플랜지 거세트 피로균열 발생부위에 두께 10mm의 이음판을 하부플랜지 상·하면에 부착하고 고장력볼트를 체결함으로써 응력저감효과를 측정하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

표 2. 이음판 부착에 따른 인장플랜지의 보수효과

볼트종류	볼트배치수	일련번호	측정위치	거리(mm)	보수전응력	보수후응력	응력저감률	하중(ton)
M16	3열	1	FG-T21	10	1906.8	980.7	0.51	38
		2	FG-T11	28	1115.1	819.0	0.73	34
	4열	3	FG-T22	28	1820.7	930.3	0.51	34
M22	3열	4	FG-T23	10	1913.1	861.0	0.45	38
		5	FG-T23	22	1108.8	879.9	0.79	34
	4열	6	FG-T14	22	1089.9	756.0	0.69	34

위의 결과로부터 F10T(M22)의 고장력볼트를 사용하는 경우가 F10T(M16) 고장력볼트를 사용하는 것에 비해서 보수효과가 우수함을 알 수 있었으며, 고장력볼트를 3열 배치하는 경우에 비하여 4열 배치하는 경우의 보수효과가 우수함을 알 수 있었다.

4.3 이음판의 응력전달체계

피로균열발생부분에 대해서 이음판을 고장력볼트로 체결한 후 고장력볼트 마찰접합부의 응력분포를 측정된 결과는 그림 6과 같다.

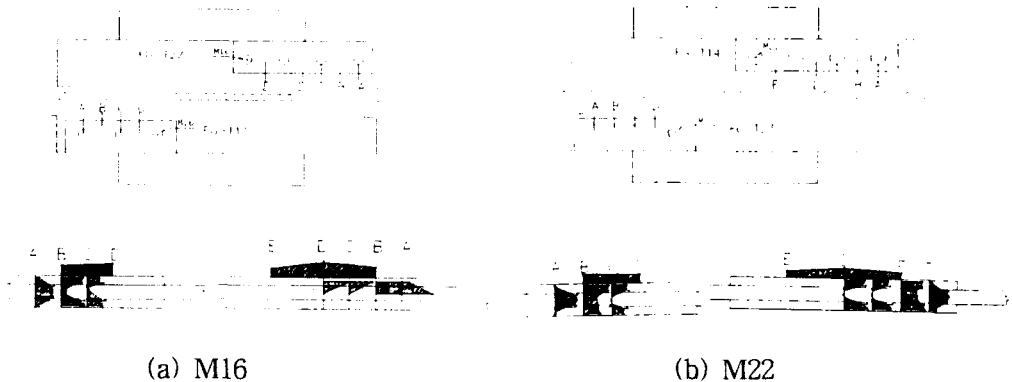


그림 6. 고장력볼트 마찰이음부의 응력분포

위의 결과로부터 외측볼트부에서는 모재의 응력전달이 내측볼트부보다 크고 이음판에서는 이와 반대의 응력전달을 하고 있음을 알 수 있었으며, 이음판의 외측에서 내측으로 응력이 전달됨에 따라 응력의 흐름은 모재에서 이음판으로 이동되고 있음을 알 수 있었다. 또한 모재 및 이음판 단면의 경우 모재와 이음판의 마찰면에서 응력전달이 원활하고 모재 단면의 중앙부 및 이음판의 외측면은 상대적으로 응력전달이 약화되고 있는 상태임을 알 수 있었다.

따라서 이와 같은 응력전달체계는 전형적인 마찰이음의 응력전달체계로서 모재와 이음판은 마찰접합이 적절하게 이루어지고 있음을 알 수 있었으며, 응력분포도로부터 M16과 M22 고장력볼트의 차이에 따른 응력전달체계에는 큰 차이를 나타내고 있지 않음을 알 수 있었다.

4.4 반복횟수에 따른 이음판 보수효과의 감소현상

이음판에 의한 보수시 반복하중에 따른 보수효과가 감소하여 피로균열 발생 부에 피로균열이 재진전할 수 있으므로 본 연구에서는 일정반복횟수별 응력을 측정하여 보수효과의 감소현상을 규명하였으며, 그 결과는 그림 7과 같다.

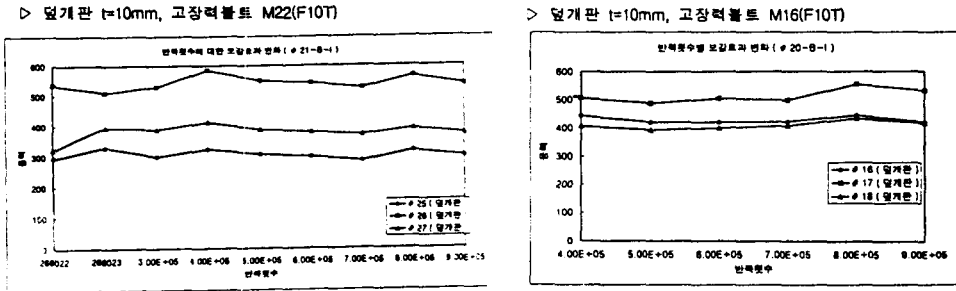


그림 7. 반복횟수별 응력상태

그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 응력변화가 거의 없음을 알 수 있으므로 이음판을 사용한 보수방법이 효과적임을 알 수 있었다.

5. 결 론

- (1) 각 용접구조상세별 피로강도는 AASHTO 및 JSSC에서 규정하고 있는 허용 피로강도를 모두 만족하고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 스톱홀의 크기가 증가함에 따라 응력집중현상이 증가하여 스톱홀에 의한 보수효과는 거의 없는 것을 알 수 있었으며, 기존 플랜지거세트부에 대한 응력 집중계수의 계산식은 수정되어야 할 것으로 생각된다.
- (3) F10T(M22) 고장력볼트를 4열로 배치한 보수방법을 적용하는 경우 응력저감률이 현저한 것으로 나타나 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- (4) 모재와 이음판 사이에는 마찰접합이 적절하게 이루어지고 있으며, 고장력볼트의 크기에 따른 응력전달체계에는 큰 차이를 나타내고 있지 않았다.

6. 참고문헌

- [1] P. Albrecht, "A Study of Fatigue Striations in Weld Toe Cracks", ASTM STP, pp.197~217, 1978.
- [2] Manfred A.Hirt, John W.Fisher, "Fatigue Crack Growth in Welded Beams", Engineering Fracture Mechanics, pp.415~429, 1973.
- [3] K.Yamada, Manfred, "Fatigue Crack Propagation From Fillet Welded Toes", ASCE, pp.1526~1540, 1982. 7.
- [4] K.Yamada, Makino, Baba, Kikuchi, "Fatigue Analysis Based on Crack Growth From Toe of Gusset end Weld", JSCE, Vol.303, 1980. 11.
- [5] P.Albrecht, K.Yamada, "Rapid Calculation of Stress Intensity Factors", ASCE, pp.377~389, 1977. 2.
- [6] 日本鋼構造協會, "鋼構造物の疲勞設計指針・同解説", 技報堂出版, 1993.