

응력비 변화에 따른 십자형 접합부의 피로거동 평가

김태봉[†] · 서상구 · 우상익^{*}

대덕대학 산업응용계열 안전공학전공 · ^{*}청양대학 토목과
(1999. 5. 30. 접수 / 2000. 1. 16. 채택)

An Estimation of the Fatigue Behavior on the Cruciform Type Specimen by Variation of the Stress Ratio^{*}

Tae-Bong Kim[†] · Sang-Ku Seo · Sang-Ik Woo^{*}

Department of Safety Engineering, Division of Industrial Application, Taedok College

^{*}Department of Civil Engineering, Chongyang College

(Received May 30, 1999 / Accepted January 16, 2000)

요 약 : 강교량 부재인 십자연결형 접착부를 하중비전달형과 하중전달형으로 각각 제작하여 피로강도 저감 정도와 응력비 변화에 따른 피로거동을 평가하였다. 또한, 필렛용접 비드의 기하학적 형상에 따른 응력집중을 확인하기 위하여 전산해석을 수행하였다. 피로실험 결과 시험편의 응력비가 피로강도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며, 하중전달형 시험편과 대부분의 밀착 시험편은 용접지단부에서 균열이 발생하여 모재가 파단됨을 알 수 있었다. 모재가 파단된 십자형 시험편의 피로강도는 $\Delta\sigma_c=63.5$ MPa로 하중 비전달형 시험편의 피로강도 $\Delta\sigma_c=83.8$ MPa보다 약 24% 작게 나타났다. 본 연구대상 시험편은 도로교 시방서상에 모재단면에 대한 응력으로 피로범주 C등급으로 규정하고 있으므로, 실험결과를 모재단면에 대한 응력으로 피로강도를 환산하면 78.27 MPa로 허용 피로강도보다 작은 것으로 나타났다.

Abstract : This paper was composed with fatigue test of the cruciform specimens, as load carrying and non-load carrying type. It also has performed computational analyses for geometric condition of the fillet welding bead. As test results, the effect of stress ratio in the specimen was insignificant. Stress ranges were varied with $R=0.1\sim 0.2$. The fatigue cracks that were found in the load carrying type specimens and most specimens welded with contact were developed at the end of welds. The fatigue strength of specimen that have fractured in maternal plate was found about $\Delta\sigma_c=63.5$ MPa. It's about 24% less than that of the non-load carrying type specimens having about $\Delta\sigma_c=83.8$ MPa. A category of the Fatigue design specifications which provide for cruciform details was defined grade C as a stress of the maternal member. And then, the fatigue strength to be transformed into the maternal stress was found about 78.27 MPa, it tends to be less than that of allowable fatigue strength.

1. 서 론

강교량 부재중 십자연결형 접착부는 하중이 필렛용접의 축에 직각 방향으로 작용하는 경우에 대한 것으로 휨모멘트를 받는 주형의 복부에 용접된 수직보강재와 같이 용접금속이 직접 하

중을 전달하지 않는 경우와 수직보강재에 수평 보강재가 필렛용접된 상재와 같이 직접 하중이 용접부를 통해 전달되는 경우로 구분된다.

AASHTO에서는 응력방향에 수직으로 필렛 용접한 연결부재의 경우 모재응력에 대하여 응력범주 C로 규정¹⁾하고 있으며, 연결부재의 두께가 1.25cm 이상인 경우에는 용접치수와 모재의 두께를 고려한 계수를 곱하여 피로강도를 구하도록 되어있다. 이것은 Frank와 Fisher의 연구^{2,3)}에

[†] To whom correspondence should be addressed.
tbkim@mail.ddc.ac.kr

근거한 것으로 하중전달형 용접부의 용접치수가 모재의 두께에 비하여 일정한 값 이하인 경우에 용접루트에서 피로균열이 시작하여 용접금속이 파단되므로 모재단면에 대한 공칭응력으로 나타낸 피로강도의 감소를 고려한 것이다. 한편 Eurocode⁴⁾에서는 이 경우 용접 목두께에 대한 공칭응력을 기준으로 등급 36으로 규정하고 있다.

본 연구에서는 국내생산 강재와 국내 용접기술에 의해 제작된 강교량 부재의 피로실험 자료를 축적하고, 도로교시방서에서 제시하고 있는 피로설계기준의 사용성을 검토하고자 하였다.

연구수행을 위해 강교량에 빈번하게 적용되는 십자연결형 접합부에 대해 하중비전달형에 비해 하중전달형의 피로강도 저감 정도를 조사하기 위하여 모재로부터 부착물의 돌출 높이를 일정하게 한 상태에서 동일용접조건의 부분용입에 대하여 하중비전달형과 하중전달형으로 구분하여 시험체를 제작하였고, 하중전달형에서는 용접지단파괴와 루트파괴에 따른 피로강도의 효과를 조사하기 위하여 모재에 부착물을 밀착시킨 시험편과 모재와 부착물을 2mm 이격시킨 시험

편을 제작하여 실험연구를 수행하였다. 또한, 응력비 변화에 따른 피로거동의 변화를 검토하고자 각 시험편 종류별로 응력비 0.1과 0.2를 각각 적용하였다.

시험편은 일반 강구조물 제작시 사용되는 SM490B 강종으로 폭 100mm, 두께 10mm, 용접치수 6mm로 2개의 구조상세를 1개의 시험편으로 하중 비전달형(TS1) 6개, 하중전달형 중 용접루트서 2mm 이격시킨 것(TS3)과 간격없이 밀착시킨 것(TS2)을 각각 6개씩 총 18개의 시험편을 제작하였다. 각 시험편의 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

2. 피로실험

피로실험은 정적 45ton, 동적 30ton의 시험용량을 갖는 Shimadzu사의 기종으로 하중제어법으로 수행되었으며, GPIB 인터페이스를 이용하여 하중과 스트로크 변위를 실시간으로 측정하였고, 스트레인 게이지를 시험편의 최대 응력부에 부착하여 동적 변형을 측정기와 연결된 컴퓨터로 실시간 측정하였으며, 시험 중인 시험 장치를 Photo. 1에 나타내었다.

하중제어는 일정 진폭의 완전 편진 인장하중을 20Hz로 재하하며, 시간에 따른 하중과 스트로크 변위를 측정하였다. 각 시험편에 대한 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

응력범위($\Delta\sigma$)는 모재에서 피로균열이 발생하여 파괴된 횡보강재 시험편과 밀착 십자형 시험

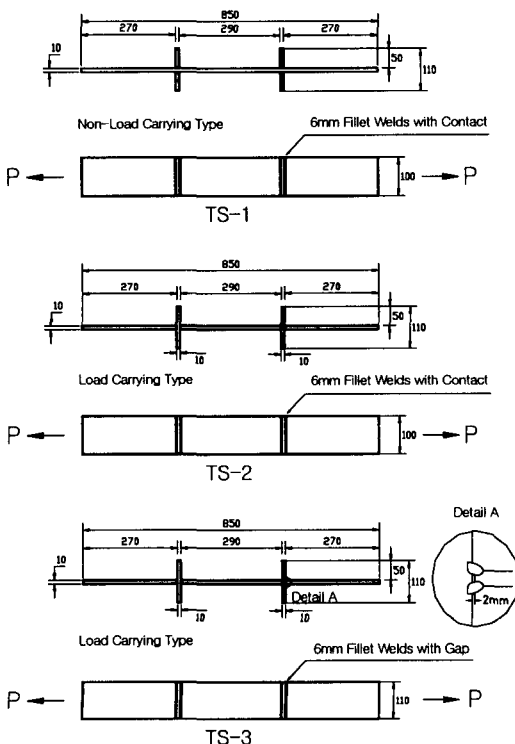


Fig. 1. Schematics of the cruciform specimen

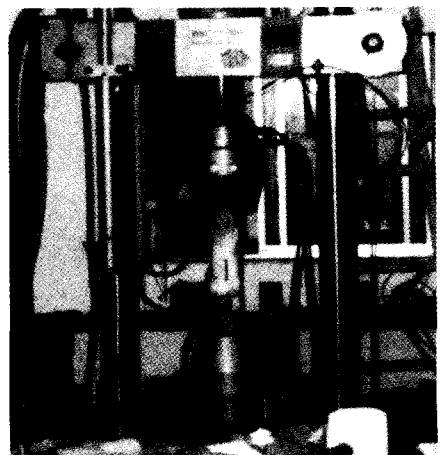


Photo 1. Test set-up for fatigue test

Table 1. Test conditions

Id.	No.	Pmax (ton)	Pmin (ton)	R	ΔP (ton)
TS1	1	15.646	1.565	0.1	14.081
	2	7.823	0.782	0.1	7.041
	3	23.469	2.347	0.1	21.122
	4	8.801	1.760	0.2	7.041
	5	17.602	3.520	0.2	14.082
	6	26.403	5.281	0.2	21.122
TS2	1	5.471	0.547	0.1	4.924
	2	10.942	1.094	0.1	9.848
	3	16.413	1.641	0.1	14.772
	4	6.155	1.231	0.2	4.924
	5	12.310	2.462	0.2	9.848
	6	18.465	3.693	0.2	14.772
TS3	1	5.471	0.547	0.1	4.924
	2	10.942	1.094	0.1	9.848
	3	16.413	1.641	0.1	14.772
	4	6.155	1.231	0.2	4.924
	5	12.310	2.462	0.2	9.848
	6	18.465	3.693	0.2	14.772

편의 경우 모재 단면에 대해 구한 공칭 응력을 적용하였으며, 용접루트로부터 균열이 진행하여 용접금속이 파괴된 간격 십자형 시험편의 경우에는 용접의 품질에 따른 차이를 제거하기 위하여 실측 평균 용접 목두께에 대해서 구한 공칭 응력을 각각 적용하였다. 동일한 2개의 구조상세를 갖는 시험편을 1개로 제작하여 먼저 파단이 발생한 쪽의 상세를 절단한 다음 파단되지 않은 상세에 대해서는 동일한 조건하에서 계속 시험을 수행하였다. 먼저 파단된 쪽을 a로 나중에 파단된 쪽을 b로 나타내었다. 한편 TS2-a는 TS3 시험편과 같이 용접부가 파단되었으므로 TS3로 분류 정리하였다.

실험이 완료된 각 시험편의 파괴형상, 용접상태 등을 조사한 결과 초기균열발생 추정 위치 및 파단면 특징을 조사한 바 횡보강재 시험편(TS1)과 대부분의 밀착 십자형 시험편(TS2)은 용접지점에서 모재에 균열이 발생하여 모재의 파단으로 진행되었다. 실험결과를 Table 2에 나타내었다.

간격 십자형 시험편(TS3)과 밀착 십자형 시험편중 TS2-2a의 경우는 용접루트에서부터 피로균열이 시작되어서 용접금속이 파단되었다.

시험편 TS2-6a, TS2-6b 등의 경우에는 용접루트에서도 일부 피로균열이 발견되었으나 파단에는 이르지 못하였다. 용접루트를 지나는 파단면

Table 2. Fatigue test results

Specimen	Stress range (MPa)		Fatigue limit(NF)		Remark	
	a	b	a	b		
TS1	1	140.7	140.7	540,000	857,120	
	2	70.3	70.3	4,500,000	4,500,000	NF
	3	211.0	211.0	155,870	192,610	
	4	70.3	70.3	5,234,000	5,234,000	NF
	5	140.7	140.7	592,270	890,420	
	6	211.0	211.0	174,590	177,340	
TS2	1	49.2	49.2	7,000,000	7,000,000	NF
	2	-	98.5	-	894,640	
	3	147.7	147.7	201,190	409,450	
	4	49.2	49.2	6,011,250	6,011,250	NF
	5	98.5	98.5	982,000	982,000	
	6	147.7	147.7	148,920	175,340	Disalign
TS3	1	39.5	39.5	6,000,000	6,000,000	NF
	2	68.0	85.8	680,500	1,249,220	
	3	89.6	128.7	172,590	182,130	Disalign
	4	39.5	39.5	6,000,000	6,400,000	NF
	5	85.8	85.8	931,200	1,004,260	
	6	109.6	128.7	151,200	293,280	
TS2	2	85.8	-	883,240	-	

을 살펴보면 간격 십자형 시험편의 경우 모재가 표면에서 1~2mm 정도만 용융되어 접합된 것으로 나타났다.

피로실험 결과를 회귀분석하여 이들의 결과를 200만회에 대한 값으로 환산한 피로강도는 TS1 시험편에 대해서 응력비 0.1인 경우 81.70MPa, 응력비 0.2인 경우 85.72MPa로 나타난 반면, 응력비를 고려하지 않은 경우에는 83.83MPa으로 나타나 본 시험결과로는 응력비가 피로강도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 생각된다.

3. 분석 및 고찰

십자연결형 시험편의 피로실험을 통해 얻은 각 응력범위에 대한 피로수명을 통계·확률적으로 분석하였다. 피로강도는 세계 각국의 시방서에서 일반적으로 많이 적용하고 있는 생존확률 95%의 값을 취하였다. 분석에서는 우선 시험편의 종류와 피로 파단 형태에 따라 구분하고, 응력비 R=0.1과 0.2를 구분한 경우와 구분하지 않은 경우, 그리고 시험편의 제작오차가 크고 부재의 정렬이 불량하여 피로강도가 유별나게 작은 경우를 제외한 경우 등을 각각 다루었다. 각 실험결과에 대한 분석 결과는 하중 반복횟수 200만회에 대한 피로강도 $\Delta\sigma_c$ 로 나타내면 Table 2

와 같다.

응력비의 영향은 응력비가 클수록 피로강도가 낮을 것으로 예상되었으나 횡보강재 시험편과 용접금속 파단 십자형 시험편의 경우는 작은 차이이지만 반대로 나타났다. 그러나 이와 같은 크기의 차이는 피로실험에서 흔히 있을 수 있는 범위이므로 응력비의 영향은 거의 없는 것으로 간주할 수 있다.

횡보강재 시험편의 경우 하중 작용방향으로 부재 정렬상의 제작오차 문제가 없으므로 이로 인한 특별히 낮은 피로강도를 나타내는 실험결과와는 없었으며, 십자형 시험편의 경우에는 제작오차가 심한 시험편에 대한 실험결과를 제외시키면 피로강도는 약간 증가하는 것으로 나타났다. 용접금속부가 파단된 시험편과 모재가 파단된 시험편의 파면 사진을 Photo 2와 3에 나타내었다.

횡보강재 시험편과 시험편 TS2-2a를 제외한 모든 밀착 십자형 시험편은 모재가 파단되었다. 횡보강재 시험편(TS1)의 경우 피로강도가 AASHTO LRFD의 상세범주 C와 Euro code의 상세범주 80



Photo 2. Fractography of TS2-2a



Photo 3. Fractography of TS2-6b

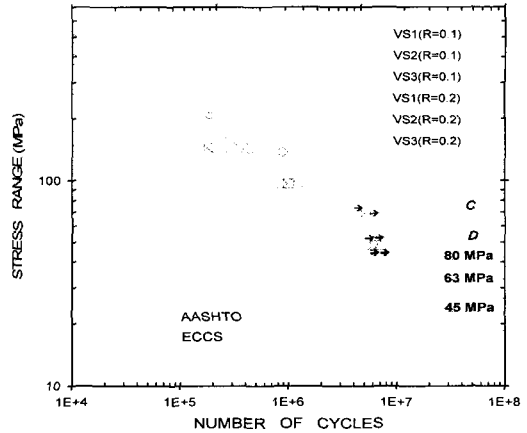


Fig. 2. S-N curve for test results

사이에 놓이나 모재가 파단된 십자형 시험편 (TS2)의 경우는 상세범주 C등급에 비하여 30% 정도 작게 나타났다.

전반적으로 기존의 일반적인 소형 시험편 피로실험에 의한 피로강도보다 작게 나타난 것은 시험편 제작시 절단 후 수동용접하여 용접 시작점과 끝점의 결합과 불균일한 용접 형상이 많은 영향을 주었을 것으로 추정된다. 또한 모재가 파단된 십자형 시험편의 피로강도가 특히 더 작게 나타난 것은 시험편의 부재 정렬이 좋지 못하여 힘의 편심으로 인한 휨응력이 용접지단에 추가로 작용하였기 때문인 것으로 판단된다.

간격 십자형 시험편(TS3)과 밀착 십자형 시험편중 TS2-2a는 용접 루트에서 균열이 발생하여 용접금속이 파단되었다. 이 경우의 파단면을 조사한 결과 용접 루트부에서 모재의 일부가 용융되어 용접금속과 일체화되어 있으며 실측한 목두께의 평균값은 공칭 용접목두께보다 2~3mm 정도 더 큰 것으로 나타났다. 실측한 평균 용접목두께를 기준으로 한 피로강도는 AASHTO LRFD의 규정에 의한 값과 거의 비슷하고 Eurocode의 값보다는 조금 큰 것으로 나타났다. 피로실험 결과를 S-N선도 상에 AASHTO와 ECCS의 피로규준과 비교하여 Fig. 2에 나타내었다.

4. 용접형상에 따른 구조해석

해석모델의 요소분할은 하중전달형과 하중비전달형으로 구분하여 두 가지 종류로 수행되었으며, 용접열 냉각시 발생하는 용접부의 잔류응

력의 영향을 배제한 경우에 대해 비드의 필렛 형상조건 및 용접 목두께의 크기 등에 따른 응력 집중부의 전반적인 응력변화를 검토하기 위하여 수행되었다. Table 3에 하중전달형과 하중 비전달형의 해석결과를 수직응력과 Von-Mises 등가응력으로 정리하였다.

Table 3에 나타난 모델형상은 필렛 용접부 비드형상의 밀면 각장과 높이의 비율로서 1/1인 경우 곡률을 고려하지 않은 정삼각형의 필렛 비드를 갖는 것으로 간주한 것이고 1/5인 경우는 이 등변 삼각형 형상의 비드를 모델화한 것이다. 5/5 모델의 경우 정삼각형의 대칭 비드를 갖고 있지만 용접 목두께가 가장 크게 모델링된 것이다.

1/1인 경우 필렛 형상이 대칭으로 용접되었다 하더라도 목두께 단면이 부족하게 되므로 Von-Mises 응력집중이 크게 일어남을 알 수 있다. 해석결과에 따르면, 목두께가 충분히 매끄러운 형상이 되면 모재쪽으로 두꺼운 쪽이 얇은 쪽보다 유리하지만 어느 쪽으로 집중되어도 발생응력은 거의 비슷하게 나타나고 있다. 한편 5/5의 경우 목두께가 너무 커도 응력집중이 커짐을 알 수 있다.

응력집중부인 용접지단부의 요소를 더욱 세분화하면 비드형상이 매끄러운 것보다는 오히려 것이 큰 응력집중을 받게 될 것이므로 기하학적 형상만으로는 용접지단부가 원호상으로 매끈한 편이 유리할 것으로 생각된다. 물

론, 이 경우에도 충분한 목두께가 확보되어야 한다. 하중전달형은 하중 비전달형에 비해 1/1인 경우 약 58%, 5/5인 경우 약 40% 정도의 큰 응력이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

실제 실험에서 과단된 시험편의 과단 형상을 고려하면 역시 용접 목두께의 크기 및 용접 상태의 영향이 크게 나타남을 확인하였다. 용접 비드부의 형상과 해석결과를 일부를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

Table 3. Analysis results of specimen

모델 형상	하중비 전달형		하중전달형			
	수직 응력	Von Mises	내부연결없음		내부분연결	
			수직 응력	Von Mises	수직 응력	Von Mises
1/1	1.027	1.119	1.654	1.767	1.037	1.210
1/3	1.042	1.096	1.551	1.661	1.042	1.130
1/5	1.055	1.073	1.490	1.590	1.055	1.087
3/1	1.047	1.086	1.597	1.704	1.047	1.090
3/3	1.054	1.079	1.502	1.605	1.054	1.084
3/5	1.061	1.064	1.433	1.529	1.061	1.094
5/1	1.059	1.064	1.536	1.635	1.060	1.106
5/3	1.064	1.065	1.471	1.567	1.064	1.108
5/5	1.068	1.072	1.407	1.499	1.068	1.110

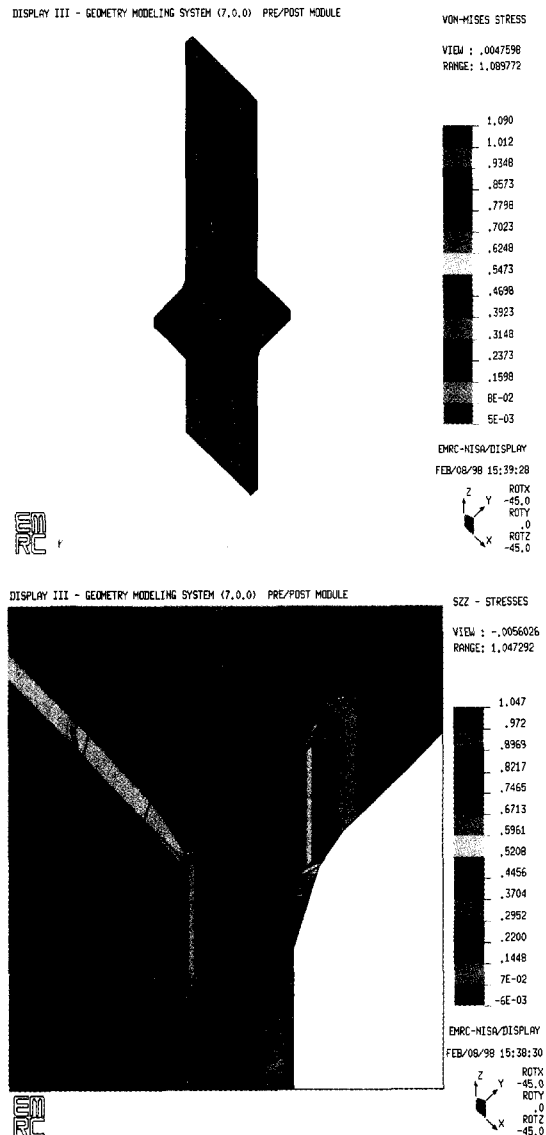


Fig. 3. Stress distribution of load carrying type

응력비 변화에 따른 십자형 접합부의 피로거동 평가

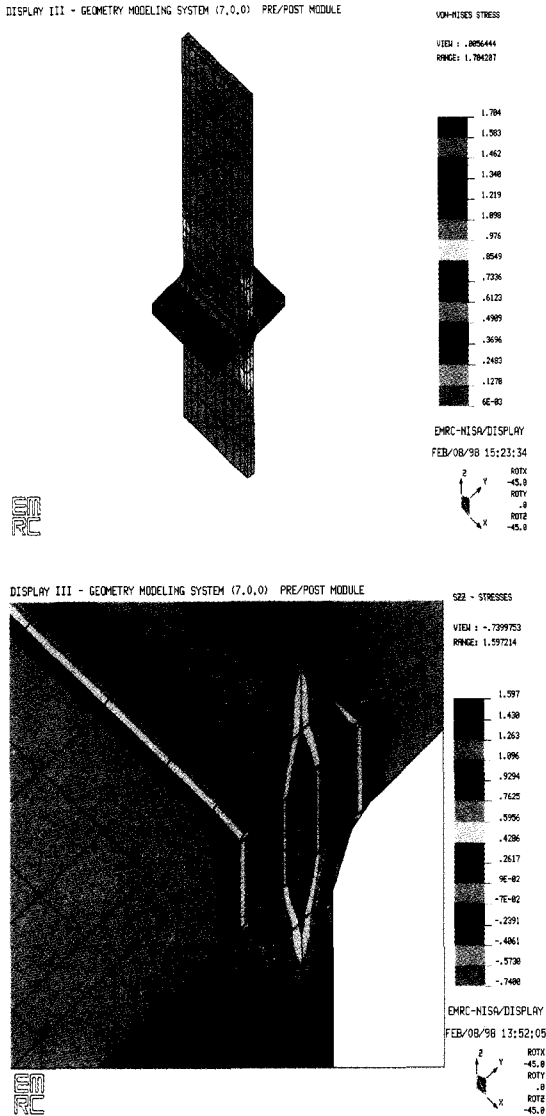


Fig. 4. Stress distribution of non-load carrying type

5. 결론

AASHTO 시방서에서 제시하고 있는 하중 방향에 직각인 필렛용접부 구조상세에 대해서 하

중전달형과 하중 비전달형(황보강재) 시험편에 대한 피로실험 결과 시험편의 피로강도에 있어서 응력비 $R=0.1$ 과 0.2 의 차이에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며, TS2-a를 제외한 모든 밀착 시험편은 용접지단에서 균열이 발생하여 모재가 파단됨을 알 수 있었다. 또한, 모재가 파단된 십자형 시험편의 피로강도는 $\Delta\sigma_c = 63.5\text{MPa}$ 로 황보강재 시험편의 피로강도 $\Delta\sigma_c = 83.8\text{MPa}$ 보다 약 24% 작게 나타났다.

간격 십자형 시험편과 밀착 십자형 시험편 중 1개는 용접루트에서 균열이 진행되어 용접금속이 파단되었다. 국내 도로교 시방서상에는 모재 단면에 대한 응력을 기준으로 상세범주 C로 구분되어 있으며, 실험결과를 모재단면에 대한 응력으로 피로강도를 환산하면 78.27MPa 로 허용 피로강도보다 작은 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 1st Ed., pp. 6-18~6-32, 1994.
- 2) Fisher, J. W., Frank, Karl H., Hirt, Manfred A. and McNamee, Bernard M., Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams, NCHRP Report No. 102, Highway Research Board, pp. 5~32, 1970.
- 3) Fisher, J. W., Albrecht, P., etc., Fatigue Strength Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments, NCHRP Report No. 147, Highway Research Board, pp. 9~22, 1974.
- 4) Design of Steel Structures-Part 1 General Rules and Rules for Buildings, Eurocode No. 3, Liaison Engineers, Apr., pp. 1~6, 1989.
- 5) Sang-Ik Woo, Yeong-Wha Chung, Kyoung-sup Jung, Jae-Byoung Jo and Doo-Byoung Bae, An Experimental Study of Tensile Fatigue Specimen for Identification of the Fatigue Design Provisions, 5th Pacific Structural Steel Conference, Oct., Vol. 1, pp. 159~164, 1998.