

용접결함을 가진 강교량의 피로수명평가 시뮬레이션

Simulation on the Fatigue Life Estimation of Steel Bridge with Weld Defects

○趙 相明(부산공업대학교 생산가공공학과)

堀川浩甫(大阪大學 溶接工學研究所 溶接構造體部門)

1. 서 언

1994년 10월 21일 추락한 성수대교와 같이 용접에 의하여 제작한 강교량의 경우는 단면 급변부와 용접결합등이 항상 존재하게 된다. 이러한 단면급변부와 용접결합등은 응력집중을 유발하게 되고, 여기에 차량의 통과등에 의한 반복하중이 작용하면 피로균열이 발생.성장하여 불안정 파괴를 일으키는 수가 있다. 미국, 캐나다 및 일본등의 강교량 파손사고례에 관한 조사보고에 의하면, 용접부가 피로균열의 발생점으로 된 사례가 상당히 많았다고 알려지고 있다.

본 연구에서는 우선 日本 土木學會와 鋼構造協會가 실시한 高張力鋼 溶接部材에 대한 피로시험과 피로균열전파수명 평가에 대하여 검토하였다. 이어서 강교량의 주요 강도부재를 가정하여, 여기에 존재하는 용접결합이 강교량의 피로수명에 미치는 영향을 파괴역학의 적용으로 시뮬레이션하여 제시하였다.

2. 피로강도에 미치는 용접결합의 영향에 관한 기초적 검토

반복하중을 받는 용접구조물에 큰 용접결합이 존재하면, 전체의 피로수명 N_f 중에서 매우 초기에 피로균열이 발생하여 전파하게 되므로 균열전파수명 N_p 가 전체의 피로수명 N_f 의 대부분을 차지하게 되는 것으로 알려지고 있다. 따라서 일본 강구조학회나 ECCS T-6(Fatigue)등에서는 초기의 용접결합 평가와 사용중인 교량에서 발견된 균열이 구조물의 피로한계상태에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 파괴역학을 적용하도록 권고하고 있다. 다음의 균열전파식은 피로균열전파수명 평가를 위하여 자주 사용되는 것이다.

$$da/dN=C(\Delta K^m-\Delta K_{th}^m) \text{-----}(1-1)$$

C, m : 정수, ΔK_{th} : 하한계응력확대계수 범위

$$da/dN=0, \Delta K \leq \Delta K_{th} \text{-----}(1-2)$$

또는,

$$da/dN=C(\Delta K)^m, \Delta K \geq \Delta K_{th} \text{-----}(2-1)$$

$$da/dN=0, \Delta K \leq \Delta K_{th} \text{-----}(2-2)$$

또는,

$$da/dN=C(\Delta K)^m \text{-----}(3)$$

최근의 동향을 보면, 역시 합리적이면서도 안전한 수명평가가 가능한 상기의 Eq.(1)을 적용하는 것이 일반적이다. Eq.(1)의 정수인 C, m 및 ΔK_{th} 는 다음 Table 1과 같은 값을 적용할 수 있다.

Table 1에서 상수C와 ΔK_{th} 의 값은 鋼材의 종류(인장강도의 高低)에 따라서 다른 값을 가지는 것으로 간주해야 하는 경우도 있다. 그러나, 용접구조물의 용접부는 높은 인장잔류응력이 작용하고 있으며, 강교량에서 피로균열의 성장이 우려되는 곳은 주로 인장의 死荷

Table 1 Constants of steels to estimate the fatigue crack propagation life

	C(m/cycle)	m	$\Delta K_{th}(MPa\sqrt{m})$
최안전설계곡선	2.7×10^{-11}	2.75	2.0
평균설계곡선	1.5×10^{-11}	2.75	2.9

중이 함께 작용하기 때문에 실제로 매우 높은 응력비 R이 작용하게 된다. 따라서 피로균열은 거의 열린 상태 즉 균열개구비U=1.0인 상태에서 성장할 가능성이 높기 때문에 균열전파속도를 ΔK_{eff} 에 의하여 평가해야 하며, 각종 재료 상수들도 이것을 고려하는 것이어야 할 것이다. 田中等에 의하면 통상적으로 많이 쓰이는 용접구조용 강재에 있어서 U=1.0의 경우는 그 강도의 고저에 관계없이 거의 일정한 재료상수를 가지게 되고 이러한 경향을 고려하여 결정한 것이 상기 Table 1의 값이다.

한편, 피로균열전파 수명은 다음과 같이 적분하여 구할 수 있으나, 실제로 수명추정을 하는 경우에는 수치적분을 행하는 것이 일반적이다.

$$N_f = \frac{1}{C} \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{\Delta K^m - \Delta K_{th}^m} da \quad \text{-----(4)}$$

3. 강교량 용접부의 용접결함을 고려한 피로수명 평가 시뮬레이션

Fig. 1은 최근 많이 적용되는 박스단면 부재의 모서리 용접부(Corner joint)에 대하여 日本 土木學會가 本四連絡橋의 피로설계와 용접부 품질보증을 위하여 실시한 피로시험결과(각종 기호)와 파괴역학을 적용하여 수명추정 시뮬레이션을 실시하여 얻은 피로균열전파 수명 곡선(각종 실선)을 보인 것이다. 여기서 a_i 는 용접부 내부에 존재하는 직경 $2a_i$ 의 기공을 균열로 가정하여 수명 추정시에 초기 균열로 간주한 것이다. 여기서 이 모서리 용접부는 하중방향으로 용접선을 가진 세로비드 용접이음부로 간주할 수 있으므로 日本 土木學會에서는 이 용접부를 피로강도등급 분류 B등급으로 간주하였다. Fig.1의 수명곡선에서 a_i 가 1.0mm이면 B등급 곡선의 피로강도를 만족할 수 없게 되며, a_i 가 0.5mm이면 충분히 만족하게 되었으므로 本四連絡橋의 모서리 용접부에는 반경0.75mm이상의 기공 즉 직경 1.5mm이상의 균열은 허용하지 않게 된 것이다.

Fig. 2는 판두께 9mm인 박스거더 하부플랜지의 맞대기 용접부에 존재하는 언더컷 또는 토우부의 용합불량을 가정하여 파괴역학의 적용으로 수명추정 시뮬레이션을 실시한 것이다. 사용한 재료 상수는 Table 1의 최안전설계곡선에 따른 것이다. 일본 강구조협회의 용접부 피로강도등급 분류에 의하면 비드의 덧살을 삭제 가공하지 않은 양면맞대기 용접부(하중과 직각방향)는 D등급으로 간주한다. D등급곡선은 표면균열 $a_i=0.5mm$ 인 곡선의 약간 상부쪽에 위치하게 되므로 0.5mm이상의 언더컷이나 용합불량은 허용할 수 없게 된다. 그러나 사용중에 용접부에서 이러한 결함이 발견되었다면, 바로 보수용접을 하기 전에 Fig. 2와 같은 수명곡선을 이용하여 안전성 평가를 할 수 있다. 예를 들면, $a_i=2.0mm$ 인 표면결함이 발견되었다면, 이것을 이용하여 응력확대계수범위 ΔK 가 ΔK_{th} 이상이 되는 응력만을 고려하여 1일의 응력스펙트럼을 얻는다. 이 응력스펙트럼을 이용하면 몇백일 후에 위험한 상태에 이르게 될 지를 예측할 수 있다. Fig. 2에서 위험한 상태 즉 피로수명은 균열이 판두께의 1/2에 이르렀을 때로 가정하였다.

이상과 같은 방법을 적용하면, 맞대기 용접부 내부에 존재하는 각종 결함이나, 필렛용접

부의 토우에 존재하는 각종 결함의 평가도 합리적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

<결론 및 참고문헌 생략>

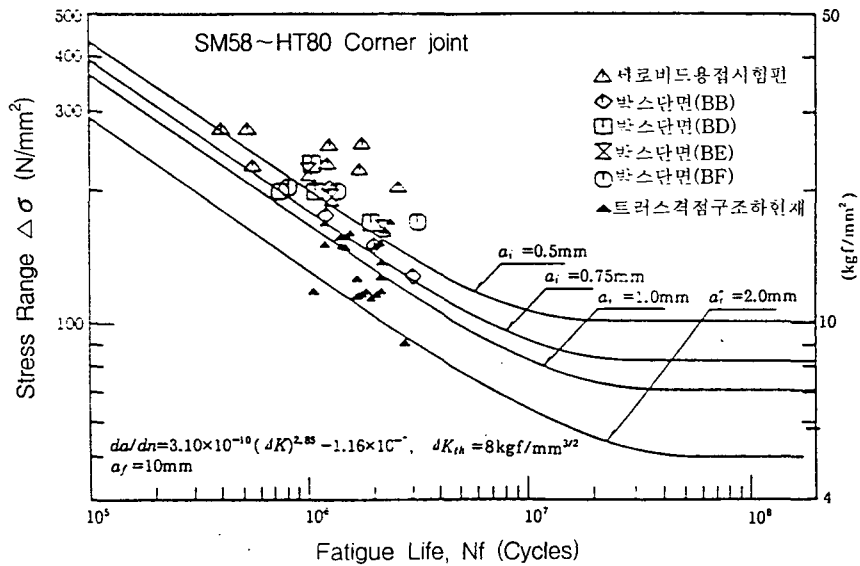


Fig. 1 Experimental results and estimated fatigue life curves for corner joints and longitudinal bead specimens with welding defects.

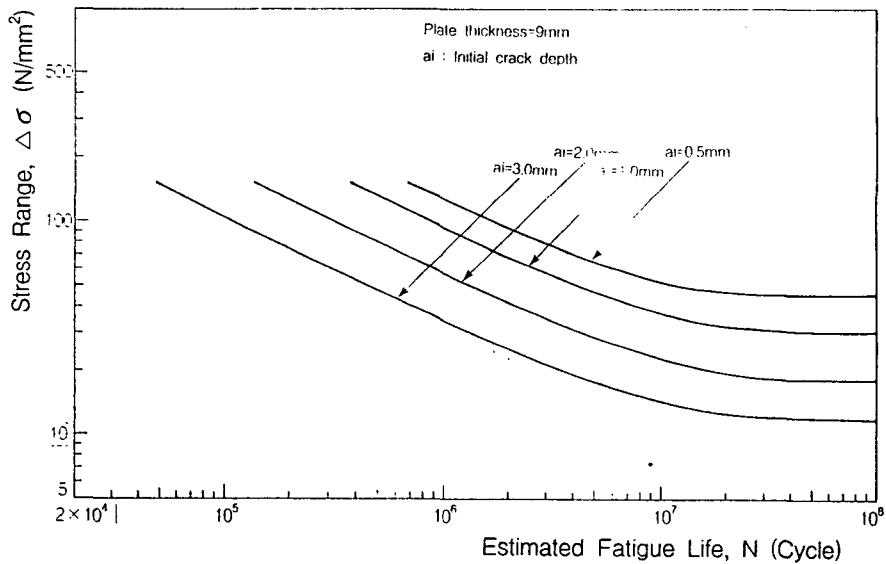


Fig. 2 Estimated fatigue life curves for butt joint with surface defects.