시간에 따른 영향을 고려한 프리스트레스트 콘크리트 합성 거더의 피로해석

A Fatigue Analysis of Prestressed Concrete Composite Girders with Time Dependent Effects

김 지 상*, 오 병 환**

Kim, Jee Sang, Oh, Byung Hwan

ABSTRACT

Recently, fatigue problem has become a critical issue in the design of prestressed concrete bridges due to the increase of traffic volumes and use of high-strength materials. Most existing studies are mainly concerned with the fatigue behavior of component materials only such as concrete, reinforcing bars, and prestressing steels and few studies exist that deals with the fatigue behavior of bridge members.

An improved analytic formulation for both uncracked and cracked prestressed concrete composite section with cyclic creep effect is developed to take into account the change of neutral axis with crack propagation. The procedure also enables to investigate serviceability limit states, deflection and crackwidth. The present study allows more realistic analysis and design of prestressed concrete composite girder bridges under fatigue loadings.

1. 서론

최근 들어 강도설계법의 도입, 고강도 재료의 사용과 교통량의 급격한 증가에 따른 차량 하중의 변화는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 설계 및 해석에 있어서 피로하중에 대한 별도의 고려를 요구하게 되었다. 그러나, 현재까지의 연구 내용은 대부분 프리스트레스트 콘크리트 교량을 구성하는 부재의 재료인 콘크리트, 철근 그리고 PS 강재 각각의 피로특성에 관한 연구에 머물러 있고, 피로하중을 받는 교량의 전반적인 거동에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 국내외의 실험자료를 이용하여 프리스트레스트 콘크리트 합성거더를 구성하는 재료의 피로특성을 모델링하고, 이를 바탕으로 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의

* 정회원, 한국통신 선로기술연구소 선임연구원

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

피로해석을 수행할 수 있는 일반적인 이론을 정립하였다.

2. 구성재료의 피로 특성

프리스트레스트 콘크리트 합성거더는 콘크리트, 철근 및 PS강재로 구성되어 있는 부재이므로 부재의 피로특성을 규명하기 위하여는 각 구성재료와 피로하중을 받을 때의 거동에 대한 정확한 지식이 필요하다.

2.1 콘크리트

콘크리트에 반복하중이 작용하는 경우에 재료 내부에 영구적인 변화가 점진적으로 일어나면서 균열이 생기게 되며 하중의 반복이 충분히 지속되면 피로파괴가 일어나게 된다. 콘크리트의 피로파괴는 정적하중하에서 일어나는 파괴모드와 비교하여 볼 때 큰 변형도와 미세균열의 발생으로 특징지워지는데 콘크리트의 피로 강도는 $1x10^7$번의 하중이 작용할 때 압축 인장 및 휨에 대하여 각각 정적강도의 55% 정도 되는 것이 알려져 있다.(1)

2.2 철근및 PS강재

발표된 실험결과에 따르면 정상적으로 설계된 프리스트레스트 콘크리트 부재의 경우 반복하중을 받을 때 인장강재의 피로파괴에 의한 파괴가 가장 빈번한 파괴모드인 것이 알려져있다.(2,3) 철근 및 PS강재의 피로특성은 작용하는 반복응력의 크기보다 최대응력과 최소응력의 상대적인 차이에 의하여 지배되며, 그 차이인 응력범위와 피로수명과의 관계로 S-N 곡선을 나타내는 것이 일반적이다.

3. PC 합성거더의 피로 해석

3.1 기본가정

프리스트레스트 콘크리트 합성부재의 피로해석을 수행하기 위하여 본 연구에서 이루어진 비균열 단면에 대한 기본적인 가정은 다음과 같다.

(1) 콘크리트와 강재는 고려되는 응력범위 내에서는 선형 탄성재료이다.

(2) 하중이 작용하여도 평면은 유지된다.

(3) 콘크리트와 강재의 부착은 완전하다.

(4) 슬래브와 거더의 부착은 미끄럼이 일어나지 않는다.

또, 균열단면을 해석하기 위하여 추가되는 가정은 다음과 같다.

(5) 균열이 발생한 후에 콘크리트의 인장응력은 무시한다.

(6) 하중이 재하되기 전에 자중과 프리스트레스힘의 작용만으로는 프리스트레스트 콘크리트거더에 균열이 발생하지 않는다.

(7) 합성작용 이후의 외력에 대하여 슬래브와 거더가 일체로 거동한다.

본 연구에서 콘크리트의 압축응력을 양으로, 강재의 인장응력을 양으로 각각 규정하였다.

3.2 평형조건 및 적합조건

본 연구의 대상인 프리스트레스트 합성거더는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 I형거더와 현장타설 콘크리트 슬래브로 이루어진 것으로 그림 3.1은 그 형상을 도시한 것이다.

그림 3.1에 보인 것과 같은 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로해석을 수행하기 위하여는 2개의 평형조건과 3개의 적합조건으로 이루어진 연립방정식을 풀어야한다.

(1) 평형조건

합성단면에 작용하는 외부 모멘트와 단면의 저항모멘트는 평형을 이루어야하는데, 아래 식은 그 평형조건을 나타낸 것이다.

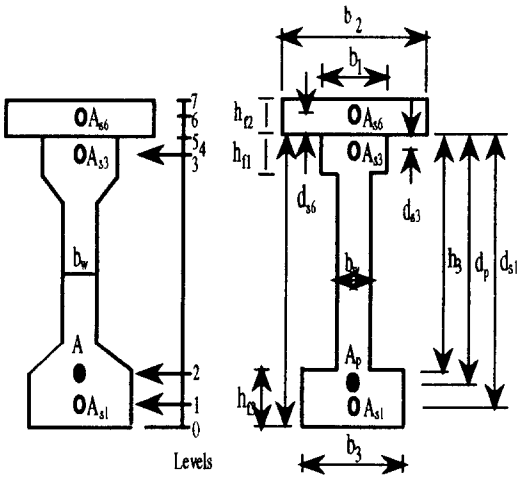

그림 3.1 전형적인 합성단면

$$M = E_p\varepsilon_{ps}A_pd_p + E_{s1}\varepsilon_{s1}A_{s1}d_{s1} + E_{s3}\varepsilon_{s3}A_{s3}d_{s3} - E_{s6}\varepsilon_{s6}A_{s6}d_{s6} - M_{cp} + M_{cs} \quad (3.1)$$

여기서, M_{cp} 및 M_{cs}는 각각 거더와 슬래브에서 강재의 면적을 제외한 콘크리트가 부담하는 모멘트를 나타내며, 그 밖에 사용된 변수는 그림 3.2에 정리되어 있다.

또, 단면 내의 축방향력은 프리스트레스힘을 포함하여 평형을 이루어야하며, 식(3.2)의 형태로 정리될 수 있다.

$$E_p\varepsilon_{ps}A_p + E_{s1}\varepsilon_{s1}A_{s1} + E_{s3}\varepsilon_{s3}A_{s3} + E_{s6}\varepsilon_{s6}A_{s6} = F_{cp} + F_{cs} \quad (3.2)$$

여기서, F_{cp} 및 F_{cs}는 각각 거더와 슬래브의 콘크리트에 해당되는 축방향력을 나타낸다.

(2) 적합조건

변형도 적합조건과 선형변형도의 가정, 그리고 합성작용 이후 슬래브와 거더가 일체로 작용한다는 가정으로부터 다음 3개의 적합조건식을 얻을 수 있다. 즉,

$$\varepsilon_4 = \phi_p c \quad (3.3)$$

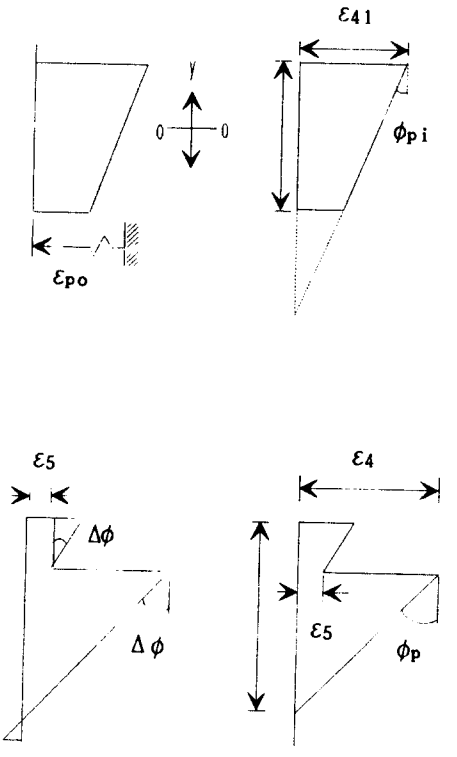

그림 3.2 콘크리트 단면의 탄성 변형도

$$(\varepsilon_4 + \varepsilon_{t4}) - (\varepsilon_5 + \varepsilon_{t5}) = (\varepsilon_{4i} + \varepsilon_{t4i}) \quad (3.4)$$

$$\phi_p - \Delta\phi = \phi_{p1} \quad (3.5)$$

여기서, 첨자 t는 시간의 영향을 고려하여 결정된 변형도를 나타내며, 숫자는 변형도가 정의된 단면상의 지점을 나타내는 것으로 그림 3.2에 정리되어 있다.

(3) 시간에 따른 영향을 고려한 피로해석

실제 구조물의 피로하중은 오랜 기간에 걸쳐서 작용하게 되므로 시간의 진행에 따라 부재의 구성재료에 생기는 효과를 고려하여야한다. 일반적인 정적하중이 재하되면 시간의 경과에 따라 콘크리트 재료는 크리이프와 건

조수축이 발생하게 되며, PS강재에는 리락세이션 현상이 유발된다. 특히 반복하중이 작용하는 경우 크리이프 현상은 정적하중이 작용하는 경우와는 다른 양상을 보이며 이 효과를 고려할 수 있도록 반복 크리이프(cyclic creep)의 개념을 도입하였다.(4)

(4) 사용성 한계 상태

피로하중에 의한 부재의 파괴와 같은 극한 한계상태 이외에 처짐 및 균열폭과 같은 사용성 한계 상태는 반복하중이 작용할 때에 정적 하중하에서와는 상이한 거동을 보인다. 전술한 단면 해석의 결과를 이용하여 피로 하중이 반복되는 동안 임의 시점에서의 처짐 및 균열폭을 계산할 수 있다.

4. 해석 예제

본 연구에서 정립된 이론을 적용하기 위하여 건설부에서 제정한 교량의 표준단면 중에서 프리스트레스트 I거더 합성단면을 선택하여 피로해석을 수행하였고, 그림 4.1은 그 단면의 형상 및 치수를 도시하여 놓은 것이다.

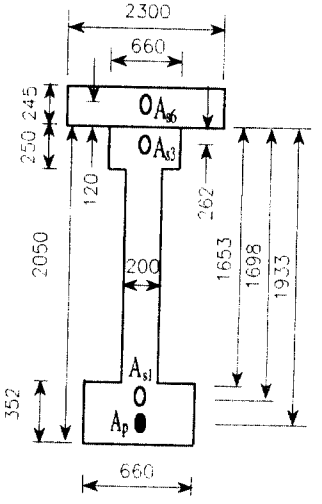

그림 4.1 표준단면의 단면성질

그림 4.1에 보인 단면에 재하시킨 하중은 단면의 정적 극한 능력을 기준으로 하여 일정비율, 30, 40, 50, 60, 70, 80 및 90%로 나타낸 것이다. 또, 하중의 재하속도는 일일평균 통행량으로 표시하였는데 재하속도의 범위는 1일당 1,000대 부터 20,000대까지 순차적으로 변화하였다. 그림 4.2는 재료의 S-N곡선과 같은 형태로 해석 결과를 정리하여 놓은 것으로 이 그림을 이용하여 크기가 변화하는 피로하중(variable amplitude fatigue laod)이 작용할 때에 피로손상의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

또, 그림 4.3은 프리스트레스트 콘크리트의 구성요소 중 피로하중에 의하여 주로 파괴

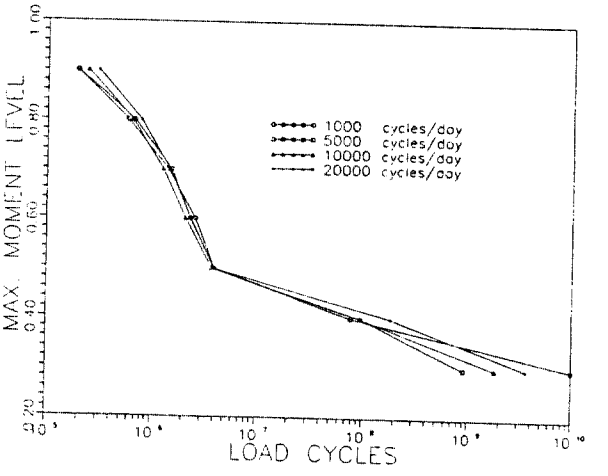

그림 4.2 부재의 S-N 곡선

되는 것으로 알려진 인장강재의 응력변화를 정리한 것이다. 즉, 반복하중이 재하될 때 각 하중단계에서 계산된 PS강재의 응력범위를 도시하여 놓은 것으로 하중의 반복에 따른 응력의 변화를 볼 수 있다.

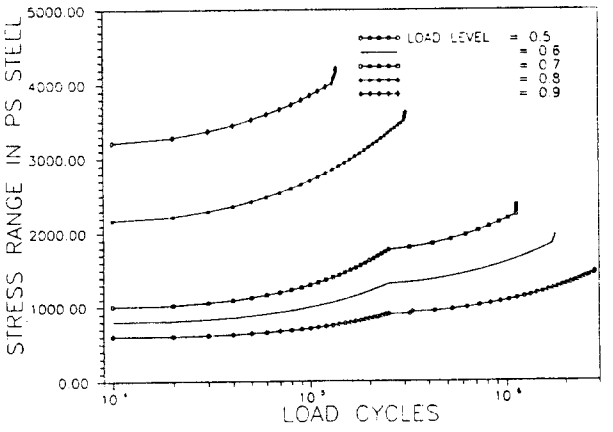

그림 4.3 PS강재응력 범위의 변화

5. 결론

본 연구에서는 기존의 콘크리트, 철근 및 PS 강재의 피로특성 자료로부터 일반적인 프리스트레스트 콘크리트 단면의 피로응력 및 사용성 한계상태를 검토할 수 있는 이론을 정립하였다. 또, 반복크리이프의 개념을 도입하여 반복하중 재하시에 시간의 경과에 따르는 거동을 합리적으로 기술하였으며, 단면의 균열진전에 따라 중립축이 변화하는 현상을 고려하였다. 그 결과로 임의 단면의 피로저항능력을 산정할 수 있었으며, 이를 바탕으로 변동피로하중이 작용하는 경우에 피로손상의 누적을 추정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ACI Committee 215, " Considerations for Design of Concrete Strustures Subjected to Fatigue Loading," ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, 1988.

2. Bennet, E.W. and Joynes, H.W.," Fatigue Resistance of Reinforcement in Partially Prestressed Beams," Journal of PCI, March-April, 1977.

3. Ozell, A.M. and Diniz, Z.F., " Composite Prestressed Concrete Beams under Repetitive Loading," PCI Journal, March, 1958.

4. Balaguru, P.N., " Analysis of Prestressed Concrete Beams for Fatigue Loading,", PCI Journal, May-June, 1981.

5. Al-Zaid, R.Z., and Naaman, A.E., " Analysis of Partially Prestressed Composite Beams," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112, No.4, April, 1986.

6. Al-Zaid, R.Z., Naaman, A.E., and Nowak, A.S., " Partially Pretressed Composite Beams under Sustained and Cyclic Loads," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.2, Feb., 1988.

7. Oh, B.H., " Fatigue Analysis of Plain Concrete in Flexure," Journal of Structural Engineering, ASCE, Feb., 1986.