

프리스트레스트 콘크리트 합성거더 교량의 피로해석

Fatigue Analysis of Prestressed Concrete Composite Girder Bridges

김 지 상* 오 병 환**
Kim, Jee Sang Oh, Byung Hwan

요약

본 논문은 일정진폭의 피로하중을 받는 프리스트레스트 콘크리트 합성거더 교량의 피로해석 절차를 시간의 진행에 따른 재료 특성의 변화양상을 고려하여 정립하였다. 본 논문에서 제시된 방법은 피로하중의 재하에 따라 균열이 진전되면서 생기는 중립축의 이동현상을 고려하였으며, 해석결과는 기존의 제한된 실험자료와 부합되었다. 또한, 건설부에서 규정한 표준 I 단면의 프리스트레스트 콘크리트거더의 피로저항능력을 검토한 결과 충분한 안전도를 갖고 있음을 확인하였다. 그리고 이 방법의 적용으로 임의의 단면형상을 갖는 프리스트레스트 콘크리트 거더의 피로특성을 S-N 곡선의 형태로 나타낼 수 있도록 하였으며, 이는 향후 변동진폭하중하에서의 피로거동 해석에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract

A fatigue analysis procedure for prestressed concrete composite girder bridges is established, which includes the time-dependent effects of component materials. The procedure can take into account the movement of neutral axis depth as crack develops and give quite good agreement with experimental results available. It is also assured that Korean Standard prestressed concrete composite girder has enough fatigue resistance. The procedure in this paper gives a way to express the fatigue capacity of prestressed concrete beams in the form of S-N curve, which can be utilized under variable amplitude fatigue load.

keywords : prestressed concrete, fatigue analysis, prestressed concrete composite girder bridge, S-N curve, time dependent effects

* 정회원, 한국통신 선로기술연구소 토목기술개발부 토목2 연구실장
** 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 1994년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 들어 산업의 급속한 발전에 따라 교량을 통과하는 교통량 및 중차량의 비율이 증가하고 있으며, 구조공학 기술의 향상에 의한 고강도 재료의 사용에서 비롯된 구조 부재 단면의 경박화가 이루어짐에 따라 프리스트레스트 콘크리트 교량 등의 설계에 있어서 피로를 고려할 필요가 대두되게 되었다. 또한, 교량등의 구조물 사용수명 동안 피로하중에 대한 구조물의 손상정도를 정확하게 규명하여 구조물의 안전도 또는 내하력을 파악함으로써 이를 바탕으로 적절한 대책을 수립하여야 하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 그러나, 지금까지 국내외에서 이루어진 대부분의 연구는 프리스트레스트 콘크리트 부재를 구성하고 있는 재료인 콘크리트, 철근 및 PS 강재의 피로특성에 관한 내용에 치중되어 왔으며, 부재의 피로거동 및 피로해석에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 그리고, 부재의 피로거동에 대한 몇몇 연구도 피로하중에 의하여 부재단면에 발생하는 단면력을 각 구성재료의 응력 범위로 나타내어 시방서 등에 규정된 각 재료의 허용피로응력과 비교하는 방법을 택하고 있다.^(1, 2, 3, 4) 이러한 방법은 실제 교량등의 구조물에 작용하는 피로하중이 크기와 작용속도가 불규칙하게 변화하는 하중임을 고려할 때에 그 적용범위가 일정진폭의 피로하중을 받는 경우로만 한정되고, 피로현상에 의한 손상의 누적을 고려할 수 없는 단점이 있다.

본 논문은 정적하중과는 성질이 다른 피로하중이 작용하는 점을 고려하여 시간에 따르는 재료의 특성변화를 합리적으로 고려할 수 있는 프리스트레스트 콘크리트 합성거더 교량의 피로해석절차를 수립하고 이를 이용하여 실제 차량의 통과를 모델링하여 변동진폭하중하에서의 피로해석을 수행할 수 있는 부재의 피로특성을 도출하는데 그 목적을 두고 있다. 이를 위하여 교량의 각 구성재료의 피로특성에 관하여 발표된 연구자료에 대한 광범위한 문헌조사를 수행하였다. 또한 기존의 프리스트레스트 콘크리트 합성거더에 대한 피로해석절차⁽¹⁾가 피로하중의 재하에 따라 균열이 진전되어 발생하는 단면 내의 중립축 깊이 변화를 고

려하지 못하는 점을 개선하여 보다 진보된 해석방법을 제시하였다. 이 방법은 프리스트레스트 콘크리트 합성거더 이외에 철근콘크리트 부재를 포함한 모든 형태의 단면을 갖는 부재의 피로해석에 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 이 방법의 타당성은 실제 실험결과가 보고된 구형단면의 프리스트레스트 콘크리트 거더⁽²⁾와 건설부에서 제시한 합성 I 단면 거더에 대한 피로해석을 수행한 수치해석예제를 이용하여 검증하였다.

2. 프리스트레스트 콘크리트 휨 부재의 피로 거동

2.1 피로파괴 모드

프리스트레스트 콘크리트 교량의 피로파괴 모드는 하중의 크기, 설계조건 및 단면의 형태등에 따라 다양한 경우가 발생하는데 정적 하중하에 일어나는 파괴모드와 같이 압축파괴, 인장파괴 및 전단파괴의 형태로 구분할 수 있다. 그러나, 피로 파괴모드와 정적파괴모드와 특별한 상관관계는 없는 것으로 보고되어 있다⁽⁵⁾.

Ozell과 Diniz⁽⁶⁾는 일정한 크기의 처짐을 반복적으로 가함으로써 피로실험을 수행하는 방법으로 6.10m길이의 합성프리스트레스트 콘크리트 들보 시편 4개에 대하여 실험결과를 보고하고 있다. 이에 따르면 3개의 시편은 콘크리트와 스트랜드 사이의 부착파괴가 일어났고, 1개의 시편은 스트랜드의 파괴가 일어났다. 또한 슬래브와 거더의 접합면 사이에서는 특별한 파괴의 징후는 나타나지 않았으나, 긴조수축의 차이에 따라 접합면 사이에서 발생하는 부등변형도(differential strain)에 대한 검토가 이루어져야한다고 보고하였다. Venuti⁽⁵⁾는 프리스트레스트 콘크리트 들보의 피로실험결과를 통계적인 방법으로 해석하려고 시도하였다. 그는 단면이 동일한 106개의 시편을 다양한 크기의 하중에 대하여 실험하였는데, 파괴모드는 콘크리트의 압축파괴와 스트랜드의 인장파괴의 2가지 형태로 일어났다. 최대하중의 크기가 정적강도의 50, 60, 및 70%의 경우 강재의 파괴에 의한 피로파괴가 일어났으며 이 보다 하중의 크기

가 큰 경우에는 압축파괴형태로 부재의 파괴가 일어났다.

Hanson⁽⁴⁾은 전단지간과 들보 유효깊이의 비 (shear span-effective depth ratio)가 2.8에서 6.4의 범위에서 변화하도록 설계된 프리스트레스트 콘크리트들보에 대하여 피로시험을 수행하였는데, 피로하중을 재하하기 전에 휨균열 및 사균열(inclined cracks)이 발생하도록 정적하중을 가하였다. 그 실험결과에 의하면 시편의 휨피로 수명은 프리스트레싱 강재의 피로수명에 대한 기존의 자료로 추정된 것보다 작은 값을 보였다. 이들은 많은 반복횟수의 피로하중이 재하되는 경우에 피로설계의 기준으로 부재하단부의 응력을 제한하도록 콘크리트의 공칭인장강도값을 제안하였다. Harajli와 Naaman⁽⁷⁾은 프리스트레싱 정도가 다른 12개의 부분 프리스트레스트 콘크리트들보에 대한 피로시험을 수행하였다. 그들의 보고에 의하면 완전프리스트레스트 콘크리트들보의 피로파괴는 균열발생지점인 일정모멘트구간에서 프리스트레싱 강재의 파괴(fracture)로 유발되며, 처짐, 균열 및 곡률의 증가는 피로하중재하초기에 급속히 일어났다. 또, 5×10^6 번의 피로하중재하 후에 피로파괴를 일으키지 않은 시편은 극한강도의 감소는 보이지 않았으나 연성의 현격한 감소를 보였다. Shahawi와 Batchelor⁽⁸⁾는 프리스트레싱 정도를 주요 실험변수로 하여 부착된 프리스트레스트 콘크리트 T형들보에 관한 피로시험을 수행하였다. 실험결과 프리스트레싱 강재의 파괴는 일어나지 않았으며 보통철근의 연속적인 파괴가 일어났다. 그들은 실험결과에 바탕을 두고 특히 프리스트레싱 정도가 높은 부분 프리스트레스트 콘크리트 들보를 포함한 모든 경우에 적절한 양의 보통철근을 배근하여야 한다고 제안하였다.

2.2 프리스트레스트 콘크리트 부재의 피로강도

프리스트레스트 콘크리트 부재는 상이한 재료인 콘크리트, 철근 및 프리스트레싱 강재로 구성되어 있으므로 하나의 값으로 피로강도를 규정하는 것은 많은 어려움이 따른다.

Ekberg⁽⁹⁾은 문헌조사를 통하여 프리스트레

스트 콘크리트 부재를 구성하는 콘크리트 및 강재 각각의 피로특성 자료로부터, 부재의 피로해석을 수행하고자하였다. 즉, 각 재료의 피로파괴포락선(fatigue failure envelopes)을 이용하여 프리스트레스트 콘크리트 부재의 휨피로파괴에 대한 응력-모멘트 선도를 작성하여 이를 이용하였다. Bennet과 Joynes⁽³⁾는 Ekberg등이 제안한 방법을 보통철근의 피로특성을 포함한 Goodman도표 형태의 자료를 이용하는 방법으로 개선하였다. 또, Naaman과 Siriaksorn⁽¹⁰⁾은 사용성한계 상태에 기초를 둔 부분 프리스트레스트 콘크리트 부재의 해석절차를 제시하면서, 부재의 피로저항 능력을 사용성 한계상태의 하나로 고려하였다. 이 연구에서는 부재의 처짐 및 균열폭을 ACI 규정에 의거하여 도출하고 이를 실험결과와 비교하였다. Balaguru⁽¹¹⁾은 콘크리트의 탄성계수를 결정할 때에 반복크리이프(cyclic creep)의 효과를 포함하여 피로하중의 영향에 의한 들보 강도(stiffness)의 점진적인 저하를 고려하였다. 또한, 콘크리트 휨인장강도의 감소를 다음 형태의 식으로 나타내어 이를 피로파괴의 기준으로 하였다.

$$f_{t,N} = f_t \left(1.0 - \frac{\log N}{13.0}\right) \quad (1)$$

여기서, $f_{t,N}$ = N번 하중 반복 이후의 휨 인장강도, f_t = 피로하중이 가해지기 이전의 휨 인장강도를 각각 나타낸다. 그러나, 그 방법은 피로하중의 크기를 무시한 재하중의 반복횟수만을 계산에 포함시킨 단점을 갖고 있다. 그는 또한 Naaman과 Siriaksorn⁽¹⁰⁾이 제안한 것과 유사한 절차에 따라 프리스트레스트 콘크리트 I단면의 응력계산에 대한 해석적인 절차를 제시하고, 그 응력해석결과를 허용피로응력범위와 비교하여 피로하중에 대한 안전여부를 검토하였다. 그리고, Al-Zaid⁽¹²⁾은 프리스트레스트 콘크리트 들보와 합성 프리스트레스트 콘크리트들보에 대한 일반적인 시간단계해석법(time step analysis method)을 제안하였다. 즉, 반복 크리이프를 포함한 크리이프 효과, 건조수축 및 강재의 리락세이션등을 고려하여 단면에서 임의 시점에서 적합조건과 평형조건을 만족시키는 방법을 정립하였다. 그러나, 이 방법

의 경우 균열의 진전을 고려하지 않아서 중립축이 하부 플랜지 내에 있을 때에만 평형방정식이 만족되는 단점이 있다. 프리스트레스트 콘크리트틀보의 피로특성에 관하여 현재까지 수행된 연구 중 비교적 중요한 성과가 이루어진 것에 관하여 검토하였다. 그러나, 이들 모두가 일정진폭하중을 받는 경우만 고려하였으므로 실제로 크기가 변화하는 피로하중에 적용하는 것을 적절히 고려하지 못하였다.

3. 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로해석

프리스트레스트 콘크리트 틀보의 피로해석 연구에는 많은 어려움이 있다. 프리스트레스트 콘크리트 부재를 구성하고 있는 각각의 재료에 대한 피로특성 규명이 이루어지지 않았으며, 이들이 하나의 부재를 구성하여 보이는 피로거동에 대한 연구는 더욱 미흡한 실정이다. 또한 프리스트레스트 콘크리트의 특성은 시간에 따라 변화하는데 이 양상이 정적하중하에서와는 분명히 다를 것이나, 이에 대하여 일반적으로 받아들여지는 수학적인 모델이 아직 없다. 특히, 본 연구에서 고려하고 있는 프리스트레스트 콘크리트 합성거더, 현장타설 슬래브와 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 거더의 조합의 경우 슬래브와 거더의 재령이 상이함에 따라 생기는 부등 변형도(differential strain)를 피로하중하에서 적절히 고려하여야 할 필요가 있다.

Al-Zaid 등⁽¹²⁾은 지속하중과 반복하중하에서 부분 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 해석을 수행할 수 있는 일반적인 절차를 제안하였는데 그 유도절차는 다음과 같다. 우선, 단면의 상연단을 중심으로 취한 단면력의 모멘트합은 작용모멘트, M , 와 크기가 같다는 조건으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$M = E_p \cdot \epsilon_{ps} \cdot A_p \cdot d_p + E_{s1} \cdot \epsilon_{s1} \cdot A_{s1} \cdot d_{s1} + E_{s3} \cdot \epsilon_{s3} \cdot A_{s3} \cdot d_{s3}$$

$$\begin{aligned} & -E_{s6} \cdot \epsilon_{s6} \cdot A_{s6} \cdot d_{s6} - \int_0^c E_{cp}(\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot b \cdot b(y) \cdot y dy \\ & + \int_0^{h_c} E_{cs}(\epsilon_5 + \Delta\phi \cdot y) \cdot b(y) \cdot y dy \\ & + E_{cp}(\epsilon_4 - \phi_p \cdot d_{s3}) A_{s3} \cdot d_{s3} \\ & - E_{cs}(\epsilon_5 - \Delta\phi \cdot d_{s6}) A_{s6} \cdot d_{s6} \end{aligned} \quad (2)$$

또, 단면 내의 축방향력의 평형조건을 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & E_p \cdot \epsilon_{ps} \cdot A_p + E_{s1} \cdot \epsilon_{s1} \cdot A_{s1} + E_{s3} \cdot \epsilon_{s3} \cdot A_{s3} \\ & + E_{s6} \cdot \epsilon_{s6} \cdot A_{s6} \cdot \\ & = \int_0^c E_{cp}(\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot b(y) dy \\ & + \int_0^{h_c} E_{cs}(\epsilon_5 + \Delta\phi \cdot y) \cdot b(y) dy \\ & - E_{cp}(\epsilon_4 - \phi_p \cdot d_{s3}) A_{s3} - E_{cs}(\epsilon_5 - \Delta\phi \cdot d_{s6}) A_{s6} \end{aligned} \quad (3)$$

그리고, 변형도 적합조건식과 단면 변형도의 선형성 조건으로부터 다음의 세식을 쓸 수 있다.

$$\epsilon_4 - \phi_p \cdot c = 0 \quad (4)$$

$$(\epsilon_4 + \epsilon_{t4}) - (\epsilon_5 + \epsilon_{t5}) = (\epsilon_{t4} - \epsilon_{t5}) \quad (5)$$

$$\phi_p - \Delta\phi = \phi_{pi} \quad (6)$$

여기서, ϵ_{t4i} = 거더와 슬래브의 합성작용 직전의 프리캐스트 거더 상연단의 변형도로서 시간의 효과를 고려한 것이다. 식 (2)-(6)으로 구성된 연립방정식은 $\epsilon_4, \epsilon_5, \phi_p, \Delta\phi$ 및 c 등 5개의 미지수를 포함하고 있으므로 이를 풀면 해를 구할 수 있다. 식들에 사용된 변수는 Fig.1 및 Fig. 2에 정의되어 있다.

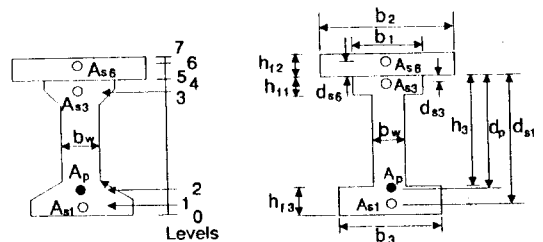


Fig. 1 Typical composite section⁽¹²⁾

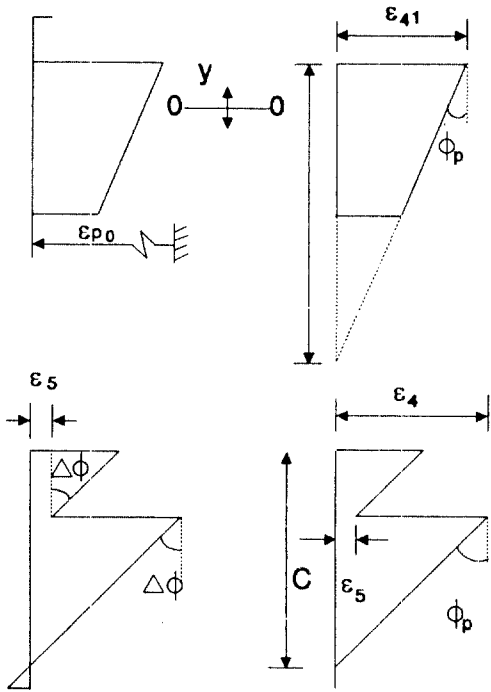


Fig. 2 Elastic diagram in concrete section⁽¹²⁾

앞의 연립방정식을 풀어 단면 내 각 지점의 변형도 및 응력을 구할 때, 식(2) 및 (3)에 적분항으로 표현된 콘크리트의 단면력은 균열의 진전에 따라 중립축의 깊이, c 가 변화하는 것을 고려하여 산정하는 것이 타당하다. 그러나, 전술한대로 참고 문헌 12.에서는 균열의 진전에 따르는 중립축의 이동을 무시하고 중립축의 깊이를 하부플랜지 내에 제한하여 해를 구하고 있으므로 본 연구는 이 점을 고려하여 보다 실제적인 해를 얻을 수 있도록 적분항의 산정절차를 다음과 같이 구분하였다.

(1) 중립축이 하부플랜지 내에 있는 경우

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \int_0^c E_{cp} (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot b(y) \cdot y dy \\
 &= E_{cp} \cdot b_3 \int_0^c (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy \\
 I_2 &= \int_0^c E_{cp} (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot b(y) \cdot y dy \\
 &= E_{cp} \cdot b_3 \int_0^c (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy
 \end{aligned} \quad (7)$$

(2) 중립축이 복부 내에 있는 경우

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \int_0^c E_{cp} (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot b(y) \cdot y dy \\
 &= E_{cp} \cdot b_3 \int_0^{h_1} (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy \\
 &+ E_{cp} \cdot b_w \int_{h_{f3}}^c (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy
 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \int_0^c E_{cp} (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot b(y) \cdot y dy \\
 &= E_{cp} \cdot b_3 \int_0^c (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy \\
 &+ E_{cp} \cdot b_w \int_{h_{f3}}^c (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy
 \end{aligned}$$

(3) 중립축이 상부플랜지 내에 있는 경우

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \int_0^c E_{cp} (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot b(y) \cdot y dy \\
 &= E_{cp} \cdot b_3 \int_0^{h_1} (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy \\
 &+ E_{cp} \cdot b_w \int_{h_{f3}}^h (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy \\
 &+ E_{cp} \cdot b_1 \int_h^c (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy
 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \int_0^c E_{cp} (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot b(y) \cdot y dy \\
 &= E_{cp} \cdot b_3 \int_{0_{f3}}^h (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy \\
 &+ E_{cp} \cdot b_w \int_{h_{f3}}^h (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy \\
 &+ E_{cp} \cdot b_w \int_h^c (\epsilon_4 - \phi_p \cdot y) \cdot y dy
 \end{aligned}$$

여기서, $\hat{h} = h_3 - h_{f1}$

본 연구에서 제안한 절차에 따라 연립방정식의 해를 구하면 보다 다양한 경우의 피로하중 상태에 대하여 피로해석이 가능할 것으로 사료된다.

전술한 바와 같이 현재까지 프리스트레스트 콘크리트 부재의 피로강도에 대하여 수행된 대부분의 연구는 피로하중의 반복에 따른 각 구성재료의 응력변화의 범위를 도출하여 이 값을 시방서 등에 규정된 허용값과 비교하여 피로파괴에 대한 안전 여부를 검토하였다. 그러나, 이는 프리스트레스트 콘크리트 부재가 서로 다른 재료로 구성되어 있으나 구조적으로 하나의 요소로 거동한다는 점을 간과한 것이다. 즉, 힘을 받는 부재의 정적강도를 극

한 휨모멘트의 향으로 나타내듯이 피로강도 역시 부재 전체의 특성을 나타낼 수 있는 값으로 규정하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 구형단면 및 합성 I 단면의 프리스트레스트 콘크리트 거더에 대하여 피로해석을 수행하고 그 결과를 재료의 피로특성을 나타내는 일반적인 방법인 S-N 곡선의 형태로 제시하였다. 이를 이용하여 향후 변동진폭의 피로하중을 받는 휨부재에 대한 실제적인 피로해석이 가능할 것으로 기대된다.

4. 해석예제

현재까지 수행된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로거동에 관한 실험적 연구는 매우 드물고, 특히 재료의 시간효과가 나타날 정도로 장기간에 걸친 실험을 하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 따르므로 실험자체의 수행이 곤란하다. 따라서, 본 연구에서 제안된 해석 방법의 타당성을 입증하기 위한 예제로 참고문헌 2.에 보고된 구형 프리스트레스트 콘크리트 들보를 선택하였다. 이 실험결과를 이용할 수 있도록 실험조건과 동일한 하중을 재하하여 3개의 부재에 대하여 피로수명, 강재의 응력범위 및 부재상단의 변형도를 비교하였다. 또한 건설부에서 제정한 표준단면의 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로해석을 수행하여 피로수명, 하중재하속도에 따르는 피로수명의 차이 등을 분석하였다.

4.1 구형 프리스트레스트 콘크리트 들보

Harajli와 Naaman⁽²⁾은 12개의 프리스트레스트 콘크리트 들보의 피로시험을 수행하였다. 모든 들보의 단면은 229x114mm의 단면을 갖는 구형으로 2.74m 지간의 단순지지 형태로 4점휨하중을 재하하였는데, Fig.3에 그 단면형태를 나타내었다.

그들의 실험결과에 의하면 12개의 시편 중 3개만이 피로파괴를 일으켰는데, 이 시편들은 모두 프리스트레스트 강재만으로 보강된 것으로 본 논문에서는 이 3개의 시편에 대한 해석을 수행하였다. Table 1은 이 시편들의 강재성질을 정리한 것

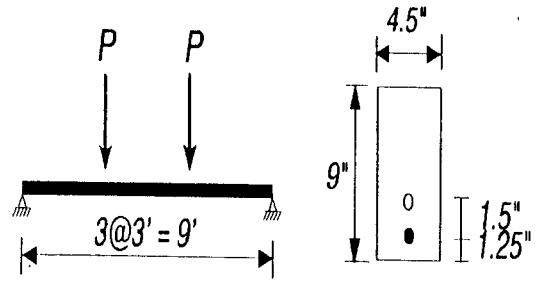


Fig. 3 Sectional properties of rectangular prestressed concrete beams⁽²⁾

Table 1 Summary of reinforcing parameters⁽²⁾

| Beam | Prestressing steel(mm ²) | Compressive Steel(mm ²) | f _c '(MPa) |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| PD1 | 1(3/ 8in.strand) | 2#D1 | 38.4 |
| | 52.996 | 10.968 | |
| PD2 | 2(3/ 8in.strand) | 2#D1 | 39.0 |
| | 105.791 | 10.968 | |
| PD3 | 3(3/ 8in.strand) | 2#D1 | 39.5 |
| | 158.687 | 10.968 | |
| f _{ps} =1 862 MPa, E _{ps} =197 000MPa | | | |
| f _y =276MPa, E _s =200 000MPa | | | |

이다.

각 시편에 재하된 피로하중의 최대 및 최소값은 정확히 알 수 없었으므로 ACI 318-89⁽¹³⁾규정에 의하여 계산한 정적설계강도의 40 및 60%로 하여 해석을 수행하였다. 또, 하중의 재하속도는 6-7cycles/sec로 하였는데, 하중의 1회 반복을 교량의 1회 차량통과로 고려하면 이 값은 하루에 교량을 통과하는 평균차량의 대수가 560,000 정도가 되는 값으로 실제의 차량통행량과 비교하여 볼 때 하중의 재하속도가 빠르다고 할 수 있으나 피로시험에 소요되는 시간의 제약때문에 불가피한 것으로 사료된다. 전술한 바와 같이 파괴된 시편은 3개였고 그들의 피로수명이 본 논문에서 비교되었는데, 그 명칭은 프리스트레싱의 정도에 따라 각각 PD1, PD2 및 PD3이다. 실제 피로하중의 작용으로 구해진 피로수명은 각각 1.21x10⁶, 2.20x10⁶, 및 1.94x10⁶이었으며, 본 논문에서 제시한 방법에 의한 피로수명은 각각 3.65x10⁶, 5.34x10⁶ 및 5.89x10⁶이다. 이 값의 차이는 피로특성에서 보

이는 통계적 분산성을 고려하고, 실제 실험에 사용된 재료의 피로특성을 정확히 파악하지 못하여 일반적인 재료의 피로특성을 계산의 입력자료로 이용한 점을 고려할 때 그리 크지 않은 것으로 판단된다.

각 시편의 피로파괴는 부재의 프리스트레싱 스트랜드의 파괴로 시작되었으며, Fig. 4는 각 시편에서 피로하중이 재하됨에 따라 변화하는 스트랜드의 응력범위(stress range) 변화를 도시한 것이다. 그림에서 PD1의 응력범위가 급격히 증가한 것은 균열의 발생에서 비롯된 것으로 판단되며, 본 연구에서 계산된 응력의 범위는 47.5MPa에서 150.2MPa이고, 참고문헌의 실험에 의한 값은 52.4MPa에서 186.9MPa의 범위여서, 비교적 근사한 값을 보였다.

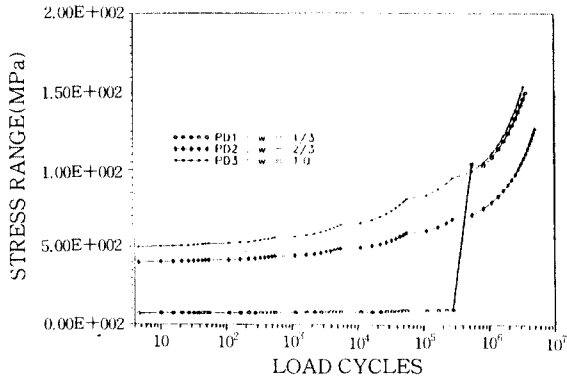


Fig. 4. Variation of stress ranges in prestressing strands due to repetitive loads

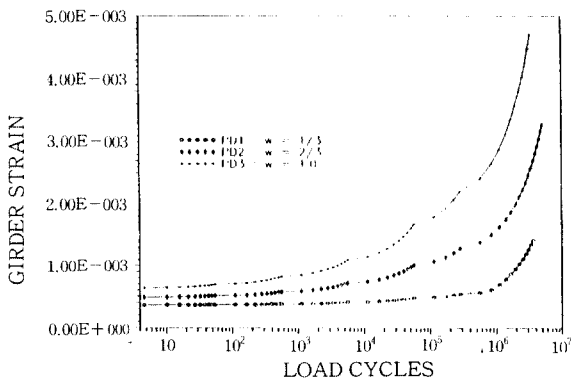


Fig. 5 Variation of strains at top fiber due to fatigue loads

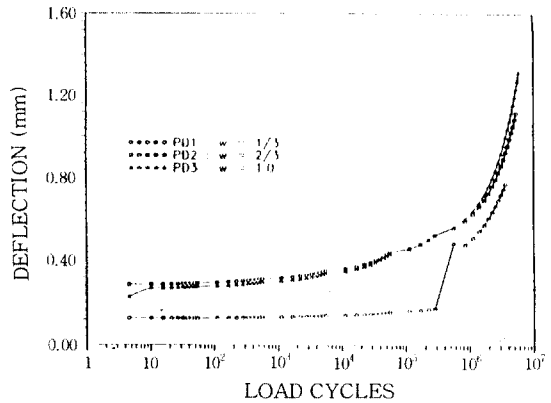


Fig. 6 Increase in deflections due to fatigue loads

또, Fig. 5는 부재 상연단에서 피로하중재하에 따른 압축변형도의 변화양상을 도시한 것이며, Fig. 6은 들보 중앙점에서의 처짐 변화를 도시한 것이다.

본 논문에서 제시된 방법에 의하여 피로해석을 수행한 결과를 구형단면의 들보에 의한 실험결과와 비교하였는데, 비교적 근사한 결과를 보여준다고 할 수 있을 것으로 사료된다. 전술한 바와 같이 합성 I형 단면의 프리스트레스트 콘크리트 들보의 피로해석을 수행한 실험자료를 입수하기가 곤란하여 건설부에서 제정한 표준 단면의 거더에 대하여 피로해석을 해석예제로 선정하였다.

4.2 합성 I형 프리스트레스트 콘크리트 거더

본 논문에서 제시한 방법을 적용하는 예제로 선정된 합성 I형 프리스트레스트 콘크리트 거더의 단면성질 및 재료특성을 정리한 것이 Table 2이고, Fig. 7은 해석을 수행하기 위하여 이상화된 단면을 도시한 것인데, 사용된 기호들은 Fig. 1에 설명되어 있다.

작용하중은 단순지지 조건으로 해석한 들보의 중앙점에서의 모멘트로 나타내었는데, 사하중에 의한 하중으로 거더의 자중에 의한 모멘트, 슬래브의 자중에 의한 모멘트 및 포장에 의한 모멘트는 각각 1851.5KN-m, 1617.2 KN-m, 그리고 297.6KN-m의 값을 갖는다. 피로하중의 크기에 따른 표준단면의 거동을 조사하기 위하여 활하중은 극한모멘트에 대한 바로 나타내었는데, 표준단면의

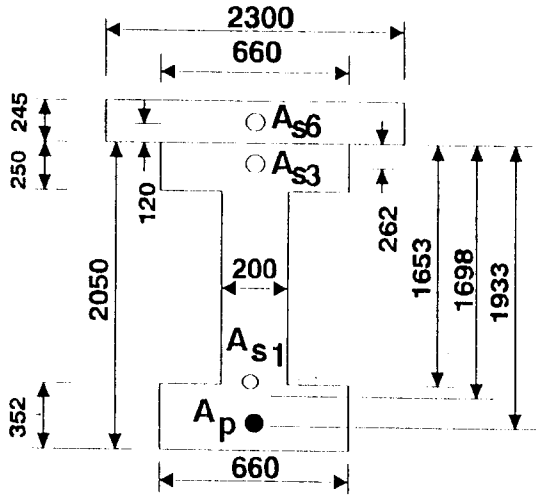


Fig. 7 Sectional properties of the Standard Section in Korea

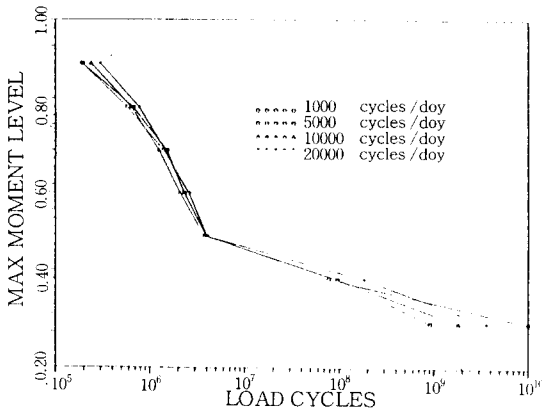


Fig. 8 S-N curves for various loading rates

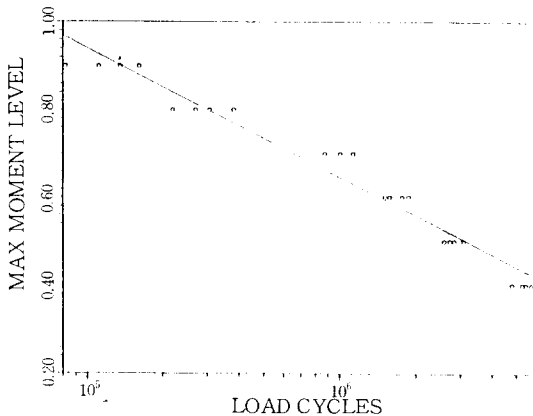


Fig. 9 Regression line for S-N curve

극한모멘트는 1900 KN-m이다. 사하중에 의한 모멘트는 피로하중으로 고려할 때에 M_{min} 으로 고려할 수 있는데 극한 하중의 20% 정도가 되며, 활하중에 의한 M_{max} 의 변화는 사하중을 포함하여 극한하중의 40, 50, 60, 70, 80 및 90%가 되도록 하여 해석을 수행하였다. 이 때 하중의 재하속도는 1회의 하중반복을 1대의 차량통과로 간주하여 국내 각종 교량의 일평균 트럭통행량의 범위를 고려하여 각각 1,000, 5,000, 10,000 및 20,000 cycle/day로 하였으며, 그 결과를 S-N곡선의 형태로 정리한 것이 Fig. 8이고, 각각의 하중속도에 대한 결과를 회귀분석하여 직선의 형태로 도시한 것이 Fig. 9이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 프리스트레스트 콘크리트 부재도 각각의 구성재료와 같이 피로수명의 대수치와 응력의 관계는 선형성을 갖고 있다. 여기서 일평균하중재하횟수가 큰 것은 차량의 통행이 많은 것을 의미하며, 이는 전체적인 하중의 재하시간은 짧은 것을 나타내는데, 하중의 재하속도는 프리스트레스트 콘크리트 합성 거더의 피로수명에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 해석결과에 따르면 부재의 파괴는 모든 경우의 하중재하속도에 있어서 PS강재의 파괴로 일어났으며 이는 구형보의 해석결과와 같은 경향을 보였는데, 피로하중의 재하에 따라 생기는 강재의 응력범위의 변화를 도시한 것이 Fig. 10이다.

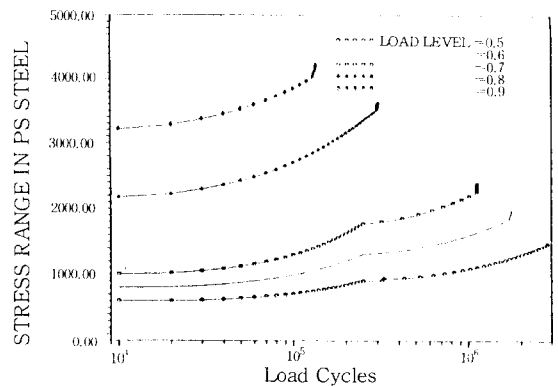


Fig. 10 Changes of stress range in PS strands

Table 2 Summary of section properties and material properties

| (1) Section Properties | (2) Material Properties |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $b_1=660\text{mm}$ | 1. PS steel $f_{py}=1,550\text{MPa}$ $E_p=200,000\text{MPa}$ |
| $b_2=2,300\text{mm}$ | 2. Reinforcing steel $f_{y1}=300\text{MPa}$ $E_{s1}=210,000\text{MPa}$ $f_{y3}=300\text{MPa}$ $E_{s3}=210,000\text{MPa}$ $f_{y6}=300\text{MPa}$ $E_{s6}=210,000\text{MPa}$ |
| $b_3=660\text{mm}$ | |
| $b_w=200\text{mm}$ | |
| $h=2,050\text{mm}$ | |
| $h_{d1}=245.25\text{mm}$ | |
| $h_{d2}=250.0\text{mm}$ | |
| $h_{d3}=352.4\text{mm}$ | |
| $h_3=1,698.0\text{mm}$ | |
| $d_y=1933.2\text{mm}$ | |
| $d_{s1}=1653.3\text{mm}$ | |
| $d_{s3}=262.0\text{mm}$ | 3. Concrete $f_{cp}=37.0\text{MPa}$ $E_{cp}=28,800\text{MPa}$ $C_{up}=2.2$ $f_{cs}=24.0\text{MPa}$ $E_{cs}=23,500\text{MPa}$ $C_{us}=2.6$ $\epsilon_{shu}=20.0 \times 10^{-5}$ |
| $d_{s6}=120.0\text{mm}$ | |
| $A_p=7,153.3\text{mm}^2$ | |

5. 결 론

본 논문에서는 다양한 경우의 하중조건에 대하여 시간에 따른 재료의 특성변화를 고려하여 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로해석을 수행할 수 있는 보다 진보된 절차를 정립하고 이를 이용하여 두 가지의 해석예제를 검토하여 그 타당성을 검증하였는데 그로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로해석을 하기 위하여는 각 구성재료의 피로특성에 대한 규명 및 적합한 수학적 모델의 도출이 선행되어야 한다.

2. 본 논문에서 제안된 피로해석방법은 다양한 형태의 단면을 갖는 철근 콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 들보의 피로해석에 적용될 수 있으며, 특히 균열의 진전을 합리적으로 고려할 수 있다. 또한, 구형단면의 프리스트레스트 콘크리트 들보의 해석예제로부터 제안된 방법의 타당성을

확인할 수 있었다.

3. 본 논문에서 제안된 방법에 의한 해석결과에 따르면 건설부에서 제정한 표준단면의 프리스트레스트 콘크리트 합성거더는 피로하중에 대하여 충분한 저항능력을 갖고 있는 것으로 판단된다.

4. 피로하중의 변동성 중 하나인 하중의 재하속도 또는 지속시간은 본 논문에서 적용한 해석예제의 결과에 의하면, 부재의 피로수명은 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단되며, 그 밖의 요소에 대한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

5. 본 논문에서 피로해석의 결과로 도출된 S-N 곡선은 적절한 누적피로손상 이론을 적용하므로써, 하중의 크기 및 작용시간이 변화하는 실제의 변동진폭피로하중에 대한 피로설계를 가능하게 할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Al-Zaid, Rajeh Z. and Naaman, Antonie E., "Analysis of Partially Prestressed Composite Beams," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 4, April, 1986.
2. Harajli, M. H. and Naaman, A. E., "Static and Fatigue Test on Partially Prestressed Beams," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 7, July, 1985.
3. Bennet, E. W. and Joynes, H. W., "Fatigue Resistance of Reinforcement in Partially Prestressed Beams," Journal of PCI, March-April, 1977.
4. Hanson, J. M., Somes, N. F., and Helgason, T., "Investigation of Design Factors Affecting Fatigue Strength of Reinforcing Bars - Test Program," (RD036. 01D), Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, 1976.
5. Venuti, William J., "A Statistical Approach to the Analysis of Fatigue Failure of Prestressed Concrete Beams," Journal of ACI, November, 1965.
6. Ozell, A. M. and Diniz, Z. F., "Composite Prestressed Concrete Beams under Repetitive Loading," PCI Journal, March, 1958.
7. Harajli, M. H. and Naaman, A. E., "Static

- and Fatigue Test on Partially Prestressed Beams,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No.7, July, 1985.
8. Shahawi, Moheson El and Batchelor, Barrington deV, “Fatigue of Partially Prestressed Concrete,” Journal of Structural Engineering, Proceedings of ASCE, Vol. 112, No.3, March, 1986.
 9. Ekberg, C. E. Jr., Walther, R. E., and Slutter, R. G., “Fatigue Resistance of Prestressed Concrete Beams in Bending,” Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol. 83, No. ST4, July, 1957.
 10. Naaman, A. E. and Siriaksorn, A., “Serviceability Based Design of Partially Prestressed Beams, Part 1: Analytic Formulation,” PCI Journal, March-April, 1979.
 11. Balaguru, P. and Shah, S. P., “Analysis of Prestressed Concrete Beams for Fatigue Loading,” PCI Journal, May-June, 1981.
 12. Al-Zaid, R. Z. and Naaman, A. E., and Nowak, A. S. , “Partially Prestressed Composite Beams under Sustained and Cyclic loads,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 2, February, 1988.
 13. ACI Committe 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete Structures, ACI 318-89, American Concrete Institute, 1989.
 14. 오 병환, 이 희택, “콘크리트 휨피로수명의 확률 분포,” 대한토목학회논문집, 제6권 2호, 1986년 6월, pp. 103-109.
 15. 오 병환, “변동진폭의 피로하중을 받는 콘크리트의 누적손상이론,” 대한토목학회논문집, 제6권 4호, 1986년 12월, pp. 79-88.
 16. 오 병환, 김 지상, “콘크리트 해양구조물의 피로 거동과 확률론적 피로해석,” 대한토목학회논문집, 제8권 3호, 1988년 9월, pp. 31-42.

(접수일자 : 1993. 6. 25)