

PSC 2경간 연속화에 따른 구속모멘트의 시간의존해석

The time-dependent analysis of restraint moment in continous PSC bridge

구민세* · 최인식** · 박찬***
Koo, Min-Se Choi, In-Sik Park, Chan

ABSTRACT

It is very important to know the magnitude of the restraint moment which is appeared at the inner-support of the continuous PSC girder. The Age-adjusted Effective Modulus Method(AEMM) is used to get the magnitude of the restraint moment for the purpose of the time-dependent analysis of the concrete. The important factors for computing the restraint moment, the creep coefficient and the shrinkage strain are computed by comparing Korean specification with ACI209. The restrain moment is created by the individual continuity load. The main purpose of this paper is ensuring the safety of structure by acquiring the time-dependent stress acting on the concrete because the process of construction is getting difficult due to the advance of technology. The negative moment at the inner-support is decreased about 55% by introducing the process of making the continuous bridge relatively early.

1. 서 론

지금까지 시공되어 온 PSC 연속보 교량은 대부분의 경우 내측 지점에 발생하는 부모멘트에 대한 적절한 대응없이 단순보형으로 정모멘트에만 대응되도록 시공되었다. 이런 교량을 연속화 하기 위해 단순보형으로 제작된 보를 가로보와 바닥판으로 연속 처리하는 방법이 사용되어져 왔다. 그러나 이는 일정기간 후에 내측 지점의 바닥판 콘크리트에 균열이 발생하여 구조물의 강성 및 내구성이 저하되는 단점이 있다. 특히 PSC 연속보 교량의 경우 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 모멘트 재분배가 시간의 경과와 더불어 증가함으로 인해 부모멘트 구간의 바닥판에 균열이 발생하게 되며 결국 이 균열은 구조 역학적으로도 불리한 거동을 유발시킨다. 즉 단순보 또는 단순보에 가까운 거동을 하게 하므로 정모멘트 구간에 큰 모멘트를 발생시킴은 물론 처짐 및 진동이 증가하게 되어 사용성과 내구성에 불리한 영향을 준다. 이러한 문제들을 해결하기 위해선 지점부에 발생하는 부모멘트의 크기를 명확히 알 필요가 있다. 본 연구에서는 PSC거더에 작용하는 각각의 지속적인 하중에 의해 발생하는 구속모멘트를 콘크리트구조 설계기준과 ACI209-95의 제안식에 의해 구하였다. 본 연구의 목적은 재령에 따라 발생하는 구속모멘트의 크기를 구하여 PSC 연속보의 거동을 정확히 해석하는데 있다.

* 인하대학교 토목공학과 교수

** 인하대학교 토목공학과 박사과정

*** 인하대학교 토목공학과 석사과정

2 콘크리트의 시간의존해석방법

2.2 재령보정 유효 탄성계수법(Age-adjusted Effective Modulus Method : AEMM)

콘크리트의 시간 의존적인 성질을 설명하는 유효 탄성계수법을 보다 발전시킨 재령보정 유효 탄성계수법(Age-adjusted Effective Modulus Method)은 1967년 Trost에 의해 제안되었으며 나중에 Bazant에 의해 보다 발전되었다.

그림 2.1는 콘크리트에 작용하는 두 개의 서로 다른 응력형태를 나타낸다. 하중 (a)는 시간 t_0 에서 일정한 응력 f_0 가 작용하여 시간 t 까지 응력이 일정한 것을 나타내고 하중 (b)는 응력이 시간이 t_0 에서 작용하기 시작하여 시간 t 까지 점차 증가하며 시간 t 에서 하중 (a)와 같은 f_0 가 되는 하중곡선을 나타낸다. 그림 2.2는 두 개의 하중형태가 작용할 때 크리프변형을 비교한 것이다.

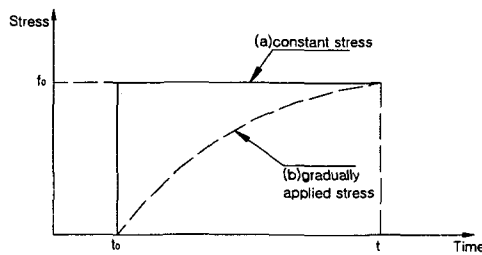


그림 2.1 콘크리트에 작용하는 응력

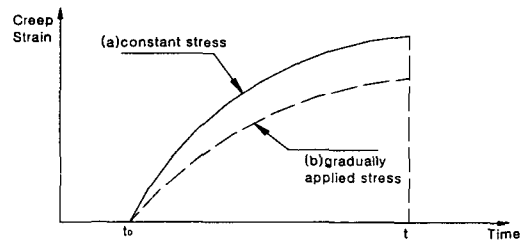


그림 2.2 크리프변형

시간 t_0 이후에 크리프변형은 하중(b)의 점차 증가하는 하중에 의한 변형이 하중(a)의 일시적 하중에 의한 변형보다 항상 작다. 이것은 하중이 시간에 따라 변화하기 때문인데 하중이 작용하는 콘크리트의 재령이 작을수록 크리프변형의 차이가 더 크다. 이처럼 하중이 시간에 따라 변화하게 되면 감소된 크리프계수를 구할 필요가 있는데 이때의 크리프계수는 $\kappa(t, t_0)\Phi(t, t_0)$ 로 나타내어진다. 여기서 $\kappa(t, t_0)$ 를 재령보정계수(aging coefficient)라 하는데 일반적으로 0.6에서 0.9이다.

시간 t 에서 $f(t)$ 에 의해 발생하는 크리프변형은 시간 t_0 에서 t 까지 점차적으로 작용하기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_c(t) = \frac{f(t)}{E_c(t_0)} \kappa(t, t_0)\Phi(t, t_0) \quad (2.1)$$

그림 2.3은 하중에 변화에 의한 콘크리트 응력의 변화를 나타낸다. 시간 t_0 에서 콘크리트의 응력은 f_0 이고 시간이 지나면서 점차 감소한다. 콘크리트의 응력변화 $\Delta f(t) (= f(t) - f_0)$ 는 외부하중의 변화, 크리프나 건조수축에 의한 구속모멘트, 온도 변화 등에 의해 발생한다.

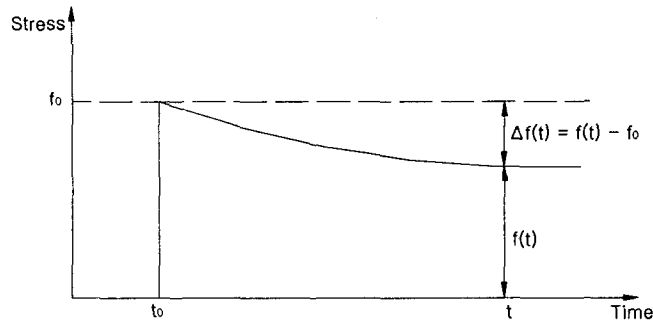


그림 2.3 시간에 따른 콘크리트 응력변화

시간 t 에서 콘크리트 변형은 일시에 가해지는 하중에 의해 발생하는 변형과 점차적으로 가해지는 하중에 의한 변형, 건조수축에 의한 변형의 합으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{f_0}{E_c(t_0)} [1 + \Phi(t, t_0)] + \frac{\Delta f(t)}{E_c(t_0)} [1 + \kappa(t, t_0)\Phi(t, t_0)] + \varepsilon_{sh}(t) \\ &= \frac{f_0}{E_c''(t, t_0)} + \frac{\Delta f(t)}{E_c''(t, t_0)} + \varepsilon_{sh}(t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기서 $E_c''(t, t_0)$ 는 재령보정 유효 탄성계수로 다음과 같이 나타낸다.

$$E_c''(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \kappa(t, t_0)\Phi(t, t_0)} \quad (2.3)$$

재령보정계수 $\kappa(t, t_0)$ 는 크리프계수와 마찬가지로 하중이 재하된 재령이나 하중 지속기간, 부재의 크기나 모양 등에 영향을 받는다. ACI209와 CEB-FIP는 응력변화에 의한 크리프계수의 변화를 고려하기 위한 재령보정계수 $\kappa(t, t_0)$ 를 연속함수로 가정할 경우 0.5, 불연속함수로 가정할 경우 1.0으로 제안하였는데 많은 실험과 연구결과에 의해 하중 재하재령이 5일 이상이고 크리프계수가 1.5~3.5인 경우에 0.8을 사용할 수 있도록 하였다.

3. 구속모멘트의 계산

3.1 크리프에 의한 구속모멘트

그림 3.1은 작용하는 하중에 의해 발생하는 초기지점부의 처짐각과 크리프에 의한 변형을 나타낸다.

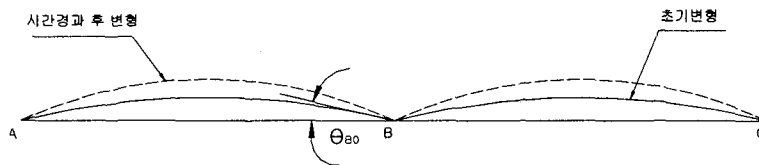


그림 3.1 지점부의 처짐각과 크리프변형

연속화가 이루어지지 않고 지점 B가 힌지상태이면 작용하는 하중에 의해 지점 B에 발생하는 초기 처짐각이 θ_{B0} 이고 시간 t 에서 크리프계수가 $\Phi(t, t_0)$ 라 하면 시간 t 에서 크리프에 의한 처짐각의 변화는

$\Phi(t, t_0)\theta_{B0}$ 이다. 여기서 t_0 는 하중이 작용할 때의 콘크리트의 재령이다. 지점 B에 단위 모멘트를 작용시킬 때 발생하는 처짐각이 θ_{B1} 이라 하면 이 단위하중에 의해 시간 t 에서 발생하는 처짐각은 $[1 + \Phi(t, t_i)]\theta_{B1}$ 이 된다. 여기서 t_i 는 구속모멘트가 발생하기 시작할 때의 콘크리트의 재령이다. 구속모멘트는 재령 t_i 에서 발생하기 시작하여 천천히 증가함으로 이에 대한 크리프변형은 재령보정 유효 탄성법에 의해 계산되어야 한다. 따라서 시간 t 에서 발생하는 처짐각은 $[1 + \kappa\Phi(t, t_i)]\theta_{B1}$ 이 된다. 지점 B가 연속화 되어 변형이 완전히 구속되었다고 가정하면 연속화 이후에 변형은 0이어야 함으로 크리프에 의해 생길려는 처짐각에 대해 반대방향의 다음과 같은 구속모멘트가 발생된다.

$$X(t) = \frac{\Phi(t, t_0)\theta_{B0}}{[1 + \kappa\Phi(t, t_i)]\theta_{B1}} \quad (3.1)$$

여기서 재령보정계수 κ 는 2.2.2에서 설명한 것과 같이 0.8을 사용한다.

3.2 부등건조수축에 의한 구속모멘트

PSC거더와 바닥판은 건조됨에 따라 두 부재 모두에 건조수축이 발생하게 된다. 그러나 PSC단면이 바닥판과 합성단면으로 거동하게 될 때에 PSC단면의 건조수축은 이미 어느 정도 발생된 후이므로, 바닥판이 PSC거더에 부착된 후에는 PSC거더보다 바닥판 단면에 더 많은 건조수축이 그림 3.2와 같이 발생하게 된다.

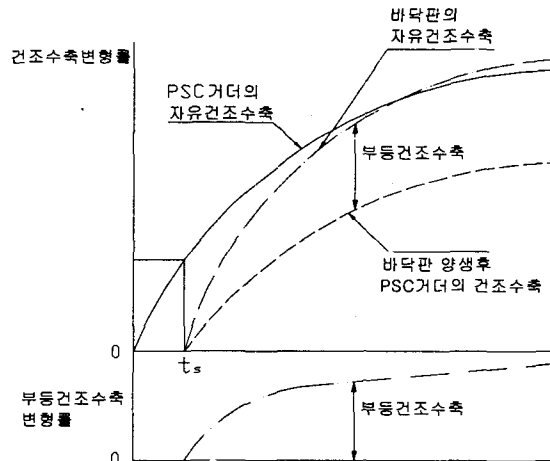


그림 3.2 PSC거더와 바닥판의 부등건조수축

두 단면이 변형에 대해 구속되지 않았다면, 바닥판이 양생된 후에는 PSC단면과 바닥판 단면 사이에 건조수축에 차이가 발생하게 된다. 이러한 차이를 부등 건조수축이라 하나, 실제로는 PSC단면과 바닥판의 접합면에서 부착되기 때문에 건조수축에 의한 이동이 자유롭지 못하다. 이러한 결과로 부등건조수축의 구속은 합성보를 아래로 치지게 하며 그 크기는 다음과 같이 계산된다.

$$M_s = \epsilon_s E_{cip} A_{cip} \left(e' + \frac{t_{cip}}{2} \right) \quad (3.2)$$

여기서 M_s 는 부등건조수축에 의해 합성보에 발생하는 모멘트이고 ϵ_s 는 시간 t 에서 PSC거더와 바닥판의 부등건조수축 변형률, E_{cip} 는 바닥판 콘크리트의 탄성계수, A_{cip} 는 바닥판 콘크리트의 단

면적, e' 는 합성단면의 도심축에서 PSC단면 상연까지의 거리, t_{cip} 는 바닥판의 두께이다.

PSC거더와 바닥판의 부등건조수축에 의한 모멘트 M_s 는 합성보를 아래로 처지게 만들지만 PSC 거더가 연속화된 이후에 지점 B는 이러한 처짐을 구속하므로 지점 B에서는 이에 대한 구속모멘트가 발생된다. 이 지점부의 구속모멘트는 다음과 같이 계산된다.

$$X(t) = \frac{\theta_{B0}}{[1 + \kappa\phi(t, t_i)]\theta_{B1}} \quad (3.3)$$

여기서 θ_{B0} 는 시간 t 에서 부등건조수축력 M_s 에 의해 발생하는 지점 B의 처짐각이고 θ_{B1} 은 단위 모멘트를 지점 B에 작용시켰을 때 발생하는 처짐각으로 모멘트 면적법에 의해 계산된다. 부등건조수축에 의한 구속모멘트는 바닥판 콘크리트가 공기중에 노출되는 재령 t_s 부터 발생되므로 크리프계수 $\phi(t, t_i)$ 는 하중이 재령 t_s 에 작용할 때 바닥판 콘크리트의 크리프계수이다.

3.3 구속모멘트의 시간해석

식(3.1)과 식(3.3)에 의해 계산된 각 하중에 대한 구속모멘트를 PSC거더의 재령에 따라 중첩하면 연속화된 지점에 발생하는 구속모멘트를 구할 수 있다. 내측지점에 발생하는 구속모멘트는 한 경간에서 선형으로 변화하며 외측지점은 힌지상태이므로 모멘트는 0이다.

3.3.1 콘크리트구조 설계기준에 의한 구속모멘트

콘크리트구조 설계기준의 크리프계수와 건조수축변형도를 이용하여 긴장력, PSC거더 자중, 바닥판 콘크리트의 자중, 부등건조수축에 의해 내측지점부에 발생하는 구속모멘트를 시간별로 중첩하여 나타내면 그림 3.3과 같다.

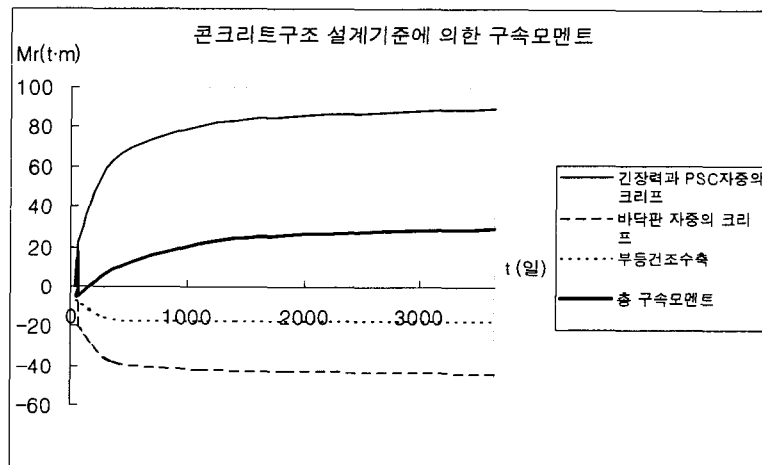


그림 3.3 콘크리트구조 설계기준에 의한 구속모멘트

3.3.2 ACI209-95에 의한 구속모멘트

ACI209-95의 크리프계수와 건조수축변형도에 의한 각 하중의 구속모멘트를 콘크리트의 재령에 따라 중첩하면 그림 3.4와 같다.

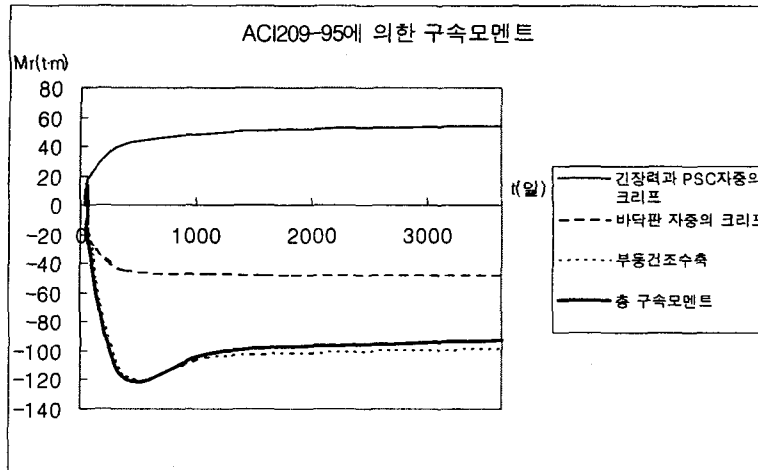


그림 3.4 ACI209-95에 의한 구속모멘트

3.4 해석결과 분석

그림 3.3와 그림 3.4는 콘크리트구조 설계기준과 ACI209-95의 크리프와 건조수축으로 인해 발생하는 지점부 구속모멘트의 해석결과 이다. 이 구속모멘트는 합성단면이 되기전엔 PSC거더에 작용되지만 바닥판 콘크리트가 타설되고 경화가 된 후부터는 합성단면에 작용하게 된다. ACI209-95의 부등 건조수축에 의한 구속모멘트는 재령 365일 부근에서 가장 크게 작용하였다가 점차 감소한다. 그리고 콘크리트구조 설계기준의 부등 건조수축변형도에 의한 모멘트는 계속 증가하지만 이에 대한 구속모멘트는 재령 1825일 이후부터 조금 감소함을 알 수 있다. 이것은 재령이 증가하면서 부등 건조수축에 의한 구속모멘트를 구하는 식 (3.3)에의 θ_{B0} 의 증가보다 바닥판 콘크리트의 크리프계수 $\phi(t, t_i)$ 의 증가량이 더 크기 때문이다.

위에서 구한 각 하중별 구속모멘트는 크리프계수와 건조수축변형도에 의해 많은 영향을 받는다. 따라서 콘크리트구조 설계기준이나 ACI209-95등 어떤 방법을 이용하여 구속모멘트의 크기를 구할 것인지는 매우 중요하다. 계산결과에 의하면 콘크리트구조 설계기준이 ACI209-95보다 크리프계수는 더 크고 건조수축변형도는 더 작다는 것을 알 수 있다. 콘크리트구조 설계기준의 계산결과에 의하면 긴장력의 크리프에 의한 정(+)의 구속모멘트는 PSC거더의 자중, 바닥판 콘크리트의 자중, 부등건조수축에 의한 부(-)의 구속모멘트보다 큰 것을 알 수 있다. 반면에 ACI209-95의 계산결과에 의하면 긴장력에 의한 크리프계수와 바닥판 콘크리트의 자중에 대한 크리프계수의 차이가 크지 않고 부등건조수축에 의한 구속모멘트가 매우 크므로 부(-)의 구속모멘트가 발생하는 것을 알 수 있다.

4. 시공 과정에 따른 구속모멘트의 변화

구속모멘트의 크기는 크리프와 건조수축에 많은 영향을 받으므로 연속화된 PSC합성거더의 제작과정은 구속모멘트의 계산에 있어 매우 중요한 요인이다. 그러므로 긴장력의 크기나 단면의 크기, 지

점의 연속화 재령과 바닥판 콘크리트의 타설시기 등에 대한 요소가 지점부에 발생하는 구속모멘트에 어떤 영향을 주는가에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 PSC거더의 시공과정을 고려하여 바닥판 타설시점을 연속화 이후 10일로 하였으며 단순보로 제작된 PSC거더의 연속화 재령을 10일, 20일, 30일, 40일로 변화하였다.

4.1 시공과정을 고려한 콘크리트구조 설계기준의 구속모멘트 해석

PSC거더의 연속화 재령을 10일, 20일, 30일, 40일로 변화하였을 때 콘크리트구조 설계기준의 크리프계수와 건조수축변형도를 이용하여 계산되는 내측지점부의 구속모멘트는 그림 4.1과 같다.

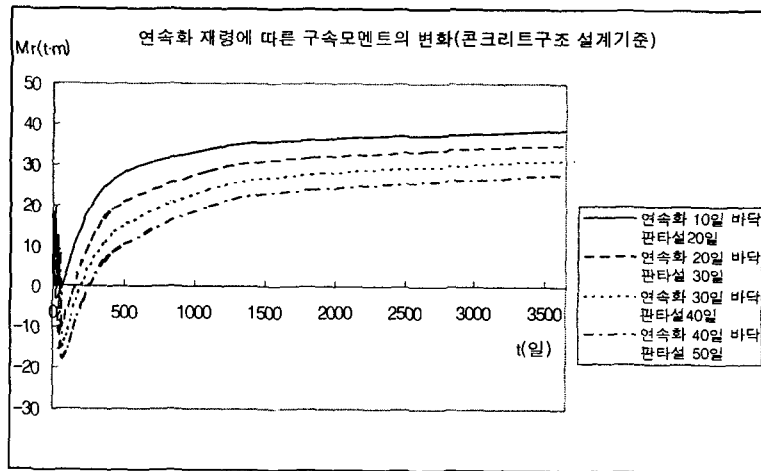


그림 4.1 연속화 재령에 따른 구속모멘트의 변화(콘크리트구조 설계기준)

지점부에 발생하는 구속모멘트를 ACI209-95제안식의 크리프계수와 건조수축변형도를 이용하여 구하면 그림 4.2와 같다.

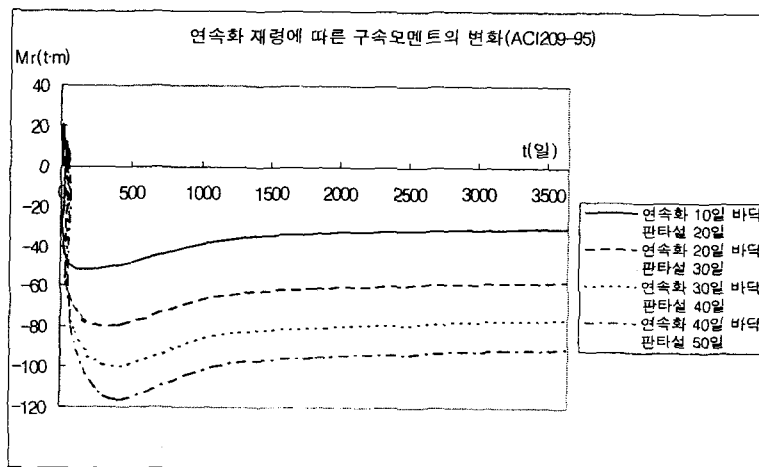


그림 4.2 연속화 재령에 따른 구속모멘트의 변화(ACI209-95)

그림 4.1과 그림 4.2의 구속모멘트의 변화를 보면 PSC거더를 연속화시키는 재령이 작을수록 지점부에 발생하는 구속모멘트는 정(+)으로 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 PSC거더를 연속화시키는 재령이 짧을수록 긴장력에 의해 발생하는 긴장력의 크리프변형이 적은 상태에서 구속이 되어 구속이 된 후의 크리프변형에 대해 더 큰 정(+)의 구속모멘트를 발생시키기 때문이다. 한편 부등 건조수축력은 바닥판 콘크리트의 타설재령이 클수록 더 많은 부(-)의 구속모멘트를 발생시킴을 알 수 있다. 연속화된 PSC거더는 지간 중앙에서 정(+)모멘트, 내측 지점에서 부(-)모멘트에 취약하다. 그러나 일반적으로 내측지점에 부(-)모멘트에 의해 교량이 파괴되는 경우가 빈번하므로 PSC거더를 연속화시키는 재령을 앞당기고 바닥판 콘크리트 역시 조기에 타설하는 것이 지점부에 발생하는 부(-)모멘트의 양을 감소시킬 수 있는 방법이다.

5. 결론

단순보로 만들어진 PSC거더를 일정한 시간이 지난 후에 연속화를 시킴으로서 내측지점부에 발생하는 구속모멘트는 크리프와 건조수축에 의해 결정된다. PSC연속교는 정모멘트구간과 부모멘트구간에서 각각 불리한 구속모멘트에 대한 검토가 필요하다. 정모멘트구간의 경우 콘크리트구조 설계기준에 의해 계산되는 구속모멘트는 연속화시키는 재령을 늦게하고 바닥판 콘크리트를 천천히 타설하는 것으로 감소시킬 수 있다. 반면 부모멘트구간에서의 구속모멘트는 ACI209-95의 제안식에 의해 계산되는데 연속화와 바닥판 콘크리트 타설재령을 빨리 하므로써 감소시킬 수 있다. 연속화된 PSC합성거더에서 내측지점부에 발생하는 균열을 방지하기 위해 부모멘트구간에 작용하는 구속모멘트의 크기를 감소시킬 필요가 있다. 본 연구에 의하면 최대 구속모멘트가 발생하는 재령은 PSC거더 제작 후 약 365일이고, 구속모멘트는 연속화 재령 40일을 기준으로 30일인 경우 14%, 20일인 경우 31%, 10일인 경우 56%가 감소한다.

참고문헌

1. Michael P. Collins and Denis Mitchell, *Prestressed concrete structures*, PRENTICE-HALL, 1991, pp.484~518
2. R.I.Gilbert, *Time effects in concrete structures*, ELSEVIER. 1998, pp64~71
3. Walter H. Dilger, "Creep analysis of prestressed concrete structures using creep-transformed section properties" *PCI Journal*, 1982, pp98~117
4. 한국건설기술연구원, 프리캐스트 PS콘크리트 교량의 설계에 관한 연구, 1992, pp.242~288
5. 김민관, "지점 상수·하강에 의한 3경간 연속 PSC 교량의 개발", 인하대학교 공학석사 학위논문, 2000, pp.1~11
6. 건설교통부, 콘크리트구조 설계기준, 2000