

캔틸레버 공법(FCM)에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계

Design of Prestressed Concrete Box Girder Bridge by Free Cantilever Method



주 성 문*

1. 개 요

PS 콘크리트 교량은 그 가설 공법에 따라 여러 가지가 있으나 FCM공법에 의한 PS 콘크리트 교량은 여타 ILM, MSS, FSM공법 등에 의한 교량보다 긴 지간 시공이 가능하며 구조적, 미적으로 우수하고, 또한 험난한 지형에서의 시공성도 우수하여 전 세계적으로 널리 사용되는 교량형식으로서, 국내에서는 1978년 원효대교에 채용된 이래 비약적인 발전을 하여 상진대교(1985년), 강동대교(1989년)등에 적용되어 왔다.

여기서는 전주권 지역 운암호에 위치한 운암교(1984년 설계, 1989년 시공완료, 라멘 구조)와 나로도교(1990년 설계, 시공중, 연속구조)를 예로 들면서 FCM공법에 의한 현장타설 PC BOX GIRDER 교량의 설계 개요를 보이고자 한다.

여기서는 횡방향 해석이나 횡범, 정착부 보강 등의 문제는 여타 공법과 중복되므로 생략하고 FCM공법의 특징이 나타나는 부분에 관하여 중점적으로 논하고자 한다.

2. 일반사항

2.1 구조계 선정

FCM공법에 의한 PC 박스거더교는 경간 중앙에 힌지가 설치된 라멘구조와 연속보 형식으로 나눌 수 있다. 힌지가 설치된 구조는 경간 중앙 연결부에서 전단력을 전달하고, 종방향 변위를 허용함으로써 교량의 자유로운 신축을 허용한다. 이러한 구조는 힌지설치에 의해서 부정정 수직 반력이 발생하므로 설계 계산을 간편하게 해 준다.

반면에 연속보 구조형식은 부정정 차수가 증가하여 설계 및 계산에 복잡한 면이 있으나 크리이프에

*정희원, (주)유신설계공단 전무이사, 토목구조기술사

의한 장기처짐량 (특히 교량 완공후 1~3년 경과 후)이 힌지 구조 형식 보다 3~4배 정도 작기 때문에 추후 교량의 미관 및 차량 주행성이 양호한 이 점이 있다. 본 고의 예로서 제시하는 운암교와 같이 힌지가 설치된 라멘구조의 경우에는 완성후의 장기처짐이 문제가 되므로 시공시 사하중에 의한 탄성처짐 뿐 아니라 장기처짐을 미리 예측하여 솟음(camber)을 설치 시공할 수 있도록 하는 것이 설계시 반드시 고려해야 할 점이다.

또한, 추후의 FCM 교량은 크리이프에 의한 장기처짐 등에 대처하기가 용이하고, 구조해석 역시 컴퓨터의 발달로 복잡한 수치 해석이 가능한 연속교 형식으로 하는 것이 바람직할 것이며, 최근의 세계적인 추세도 연속교 형식을 선호하고 있다.

2.2 지간 분할 및 단면 치수 결정

2.2.1 지간 분할

FCM공법에 의한 PC 박스거더 교는 주로 60~200 m 지간의 교량에 사용하며, 270 m(아르헨티나 PARAGUAY교 1978년 완공) 까지도 시공실적이 있으나 일반적으로 200m 이상의 지간은 비 경제적인 것으로 알려져 있다.

보통 3경간 연속교에서 측경간의 중앙 경간에 대한 비율은 0.75~0.8 정도이나 FCM공법에 의한 PC 교에서는 개략 0.65~0.7의 경간비가 적당한 것으로 알려져 있다.

실제적으로 측경간이 중앙 경간의 0.5배 정도 일 때는 교대부에 부반력이 야기될 우려가 있으므로 주의해야 한다.

운암교의 경우는 측경간 95m, 중앙경간 160m로서 경간비는 약 0.6 정도로 지형상 중앙 경간이 약간 길게 분할되었으나 측경간의 단면을 키움으로써 시공시 및 완성후의 단면력의 균형을 꾀하였다.

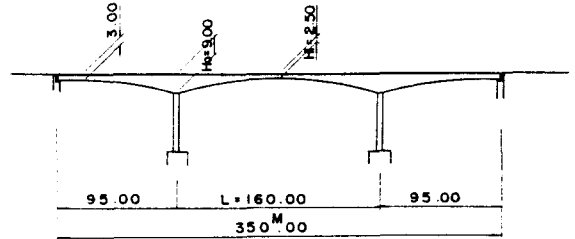


그림 1.3경간 FCM 교량의 예 (운암교)

2.2.2 단면 치수 결정

지점에서의 형고-지간비(slenderness ratio)인 $\frac{H_0}{L}$ 는 1/16~1/20 정도이며, 경제적으로는 1/17 정도가 적합한 것으로 알려져 있고, $\frac{H_1}{L}$ 은 1/30~1/60정도가 사용된다.

이론상 힌지 구조의 지간 중앙에서의 형고는 0이지만 힌지 설치 및 전단력 전달을 위하여 1.0~1.4m의 최소 형고가 필요하며, 연속구조일 때는 박스 내부 기푸집 작업, PC 케이블의 긴장, 구조물의 검사 등을 위하여 최소 1.6m의 형고가 필요하다.

그러나 부정정력, 온도와 크리이프등에 의한 응력의 재분배를 고려하면 위에서 언급한 지간 중앙의 최소 치수는 좀 더 커지는 것이 일반적이다.

운암교의 경우는 중앙경간 $L=160.0m$, 지점부 $H_0=9.0m$, 지간중앙의 $H_1=2.5m$ 로서 $H_0/L=1/17.8 \approx 1/18$, $H_1/L=1/64$ 로서 적합한 형고-지간비를 갖고 있음을 알 수 있다.

3. 종방향 해석

FCM 교량의 종방향 해석은 완성 구조계에서의 사용 하중 상태에 대한 응력 검토 뿐 아니라 시공 방법의 특성상 시공 단계별 단면력의 변화, 측경간 및 지간 중앙부 연결에 따른 구조계의 변화, 각

각의 세그먼트의 재령의 차에 따른 크리이프 계수의 변화 등을 신중히 고려하여야 한다.

3.1 설계시 고려해야 할 하중 및 하중조합

3.1.1 시공시 하중

시공시에는 각 시공단계에 따라 세그먼트의 자중 및 작업차자중, 작업하중 등을 고려하여야 하며, 각 세그먼트의 재령에 따른 크리이프 및 건조수축 계수를 적용하여 단면력과 처짐을 계산한다.

이때 시공 단계별 세그먼트의 재령차를 고려하기 위한 공정개요를 그림 2에 보였다.

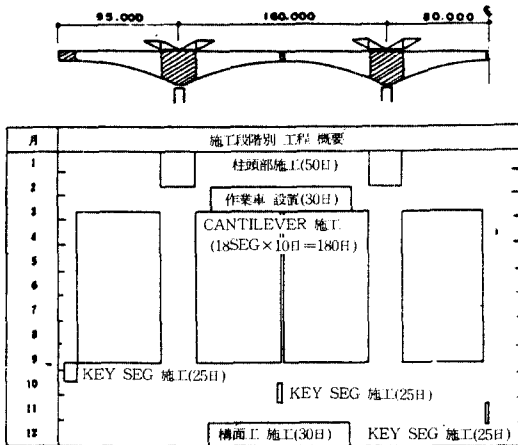


그림 2. 시공단계별 공정개요도

3.1.2 완성시 하중

완성시에는 설계 활하중을 재하하여 최대 정,부 모멘트를 산출하고 축경간 및 중앙부 연결시 발생하는 부정정력 및 크리이프, 건조수축에 의한 부정정력, 온도 변화, 부등침하 및 2차 사하중 등을 고려하고 이들의 조합에 대해 가장 불리한 경우에 대해 검토한다.

완성시 응력 검토의 조합은 통상 다음과 같다.

- 사하중 + 활하중 + PS + 지점침하 (활중계수=1.0)
- 사하중 + 활하중 + PS + 지점침하 + 온도 변화(활중계수 1.15)

도 변화(활중계수 1.15)

- 사하중 + 활하중 + PS + 지점침하 (소요년도 경과후, 활중계수 1.0)
- 사하중 + 활하중 + PS + 지점침하 + 온도 변화(소요년도 경과후, 활중계수 1.15)

3.2 시공 단계별 해석 개요

FCM 공법 교량의 시공 단계별 해석은 통상 주두부 가설 및 캔틸레버 완성시, 축경간 연결시, 중앙경간 연결 및 작업차 제거시, 연속구조일 때의 가지점 제거 및 2차 사하중(포장, 난간 등) 시공시, 그리고 소요 경과년수에 따른 크리이프 고려시 등에 대하여 검토해야 한다.

캔틸레버 시공시는 각 세그먼트 타설에 따라 점진적으로 증가하여 축경간 및 중앙 경간 연결 직전에 최대가 된다. 그림 3은 시공 단계별 캔틸레버 모멘트로서 이때 빗금친 부분의 모멘트 증가량을 고려하여 각 세그먼트에 대한 추가 강선량을 결정할 수 있다.

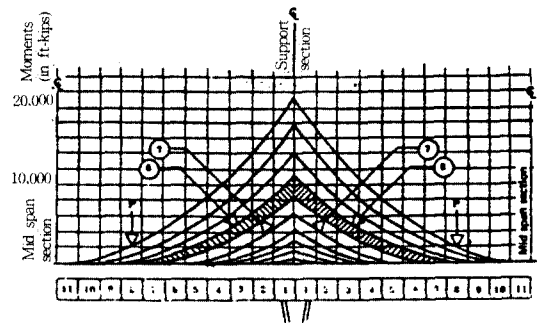


그림 3. 시공단계별 휨모멘트도

축경간 연결 후 구조계가 정정에서 부정정으로 변화하고, 또 세그먼트의 재령차이에 의한 2차 응력이 발생하게 되는데, 그에 따른 단면력 변화의 개요를 그림 4에 나타내었다. 또한, 이때 시공 단계에 따른 지점의 경계조건 변화를 고려해야 하는 바 임시 고정장치(temporary fixity) 및 임시지지

대(prop)등의 설치 및 해체시기를 적절하게 모델링해야 한다.

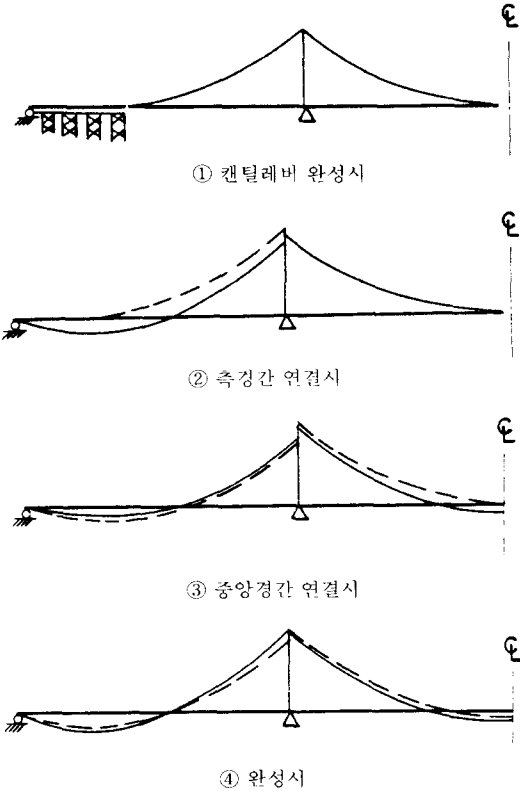


그림 4. 시공단계별 힘모멘트도

3.3 휨 강도 검토

FCM 교량의 단면은 통상 탄성이론에 따라 사용하중(service load)에 대해 설계 한다. 이때 구조물의 사용성은 확보되지만 파괴에 대한 안전도는 검토할 수 없다.

따라서 시방서의 관련 규정에 의하여 통상 다음과 같은 하중 조합에 대해 검토한다.

$$\begin{aligned}
 V_1 &= 1.2D + 1.0S + 1.8L \\
 V_2 &= 1.5D + 1.0S \\
 V_3 &= 1.5D + 1.0S + 1.3T \\
 V_4 &= 1.2D + 1.0S + 1.3T + 1.8L
 \end{aligned}$$

D: 사하중
 L: 활하중
 S: 2차 P.S
 T: 팽창, 수축 변형

이때 사하중에 의한 단면력은 완성 직후와 크리이프 종료후에 대해, 그리고 활하중 지점침하, 온도 변화 등에 의한 단면력은 각각 최대·최소에 대하여 검토한다.

3.4 전단 강도 검토

전단에 대한 설계는 각국의 시방서 규정이 서로 다르고 변화의 폭이 크므로 설계시 신중을 요한다. 이때 고려해야 할 사항은 사용 상태에서 철근의 부식 및 피로를 피함으로써 균열을 방지하거나 억제하고 극한상태에서 적절한 안전성을 확보하는 문제이다.

총 전단력은 작용하중에 의한 전단력, 경사텐던의 수직분력에 의한 감소치, 변단면 거더 하부 플랜지에 배치한 연속텐던 경사에 따른 증가치, 하부 플랜지 압축 응력에 의한 감소치 등을 고려하여 결정된다. 이때의 총 전단력에 대해 전지간에 걸쳐 적절한 전단 강도를 확보해야 하는데 이를 위해 PC강봉을 수직 전단 보강용으로 사용함으로써 2축 압축 응력 상태를 유도하는 경우도 있다.

단, 과도한 수직 응력을 가할 경우 균열 발생 각도가 45 이상이 되는 수도 있으므로 이를 방지하기 위하여 $f_y < f_x$ 의 범위에 들도록 한다.

PC 스트랜드는 국내 생산이 되는데 비해 PC 강봉은 국내 생산이 되지 않아 문제가 될 경우도 있으나 100m 이상의 긴 기간일 경우 전단 보강철근만으로 전단에 저항하기가 곤란하며, 미리 배치된 일부의 PC 강봉은 시공시 작업차 고정용으로도 검용되므로 FCM 공법에서 PC 강봉의 역할은 대단히 중요하다.

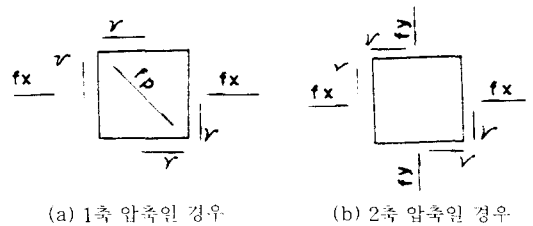


그림 5. 1축 및 2축 압축 상태의 전단 거동

3.5 시공솟음(camber)의 예측

FCM 공법에 의해서 교량 상부를 현장 타설하여 가설할 때에는 콘크리트의 탄성처짐과 크리이프 진행에 따른 장기 처짐에 대비하여 적절한 솟음을 설치하는 것이 교량의 안전 및 주행성 확보를 위하여 대단히 중요하다. 특히 시간중양에 현지가 설치된 구조는 크리이프에 의한 잔류처짐량이 연속구조에 비하여 3~4배에 달하므로 각별한 주의를 요한다.

3.5.1 각 시공단계별 크리이프 계수의 계산

크리이프 계수의 예측을 위해서는 각 단계별 진행 공기 파악이 중요하며 이에 따라 콘크리트의 재령별 탄성계수, 재령별 크리이프 계수등의 계산이 가능하다.

각 단계별 소요 공기를 그림 2에 보인 바와 같이 산출하게 되면, 도로교 시방서(1986년 건설부)에 제시된 다음 식에 의해 크리이프 계수를 계산할 수 있다.

$$\phi(t, t_0) = \phi_{d_0} * \beta_d(t-t_0) + \phi_{f_0} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)]$$

참고로 ACI 및 CEB-FIP 모델을 제시하면 다음과 같다.

$$ACI: \phi(t, \tau) = K_S K_H K_h K_t \frac{(t-\tau)^{0.6}}{10+(t-\tau)^{0.6}} \phi_u$$

$$CEB-FIP: \phi(t, \tau) = \beta_a(\tau) + \phi_d \beta_d(t-\tau) + \phi f [\beta_f(t) - \beta_f(\tau)]$$

$$\beta_a(\tau) = 0.8 [1 - f_c'(\tau) / f_c'(\infty)]$$

우리나라의 도로교 시방서에는 최종 크리이프 계수가 2.8로 되어 있으나 CEB-FIP의 ϕ 와 비슷한 형태로서 $\beta_a(\tau)$ 항이 생략되어 있다. 즉, 유럽쪽의 ϕ 값보다 개략 0.8 정도가 작은 값이 채택되어 있다.

일반적으로 FCM 공법이 채용되는 교량은 장대 시간으로서 고강도의 콘크리트를 사용하게 되므로 단위 시멘트량이 많고 단면이 커서 크리이프에 의한 변형이 크게 일어난다.

따라서 설계시에도 크리이프 계수가 $\phi=2.8$ 보다도 큰 CEB-FIP, ACI 모델에 대해서도 검토하여 현장 시공시 계산치 보다 큰 처짐이 발생할 가능성에 대처해야 할 것이며, 실제로 운암교의 경우 $\phi=2.8$ 로 계산된 처짐보다 큰 처짐이 발생하는 것이 실측 결과 확인 되었다.

3.5.2 처짐의 계산

처짐의 계산방법은 각 단계마다 크리이프 계수의 평균치를 구하여 처짐을 구하는 평균치에 의한 방법과 단계마다 각 세그먼트의 콘크리트 재령에 따른 크리이프 계수를 고려하여 콘크리트 탄성계수 E 값을 변환시키는 유효계수법(effective

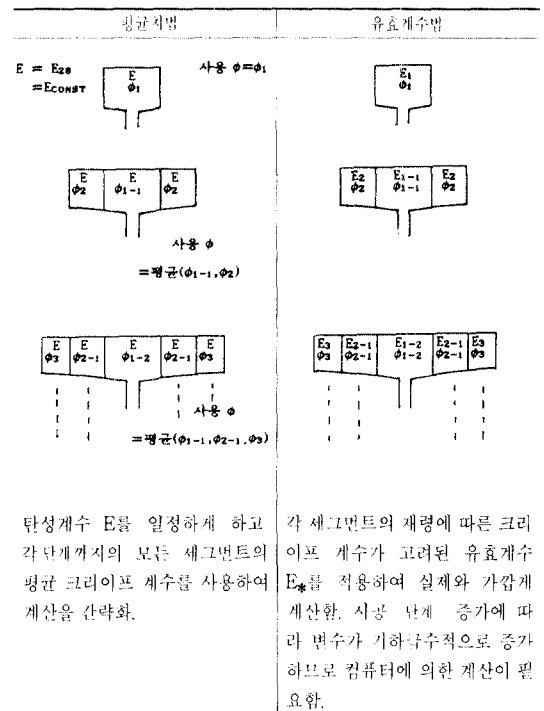


그림 6. 평균치법과 유효계수법에 의한 처짐의 계산개요

표 1. CAMBER TABLE

I. 탄성처짐		
1	동바리상의 측경간 자중	δ_{d2}
2	중앙 힌지부 자중	δ_{d3}
3	측경간 연속 강선	δ_{p2}
4	교면공 자중	δ_{d4}
소계		
II. 콘크리트의 크리이프에 의한 처짐		
1	캔틸레버 자중 $\times\phi$	$\delta_{d1\phi}$
2	캔틸레버 강선 $\times\phi$	$\delta_{p1\phi}$
3	동바리상 측경간 자중(δ_{d2}) $\times\phi$	$\delta_{d2\phi}$
4	측경간 연속 강선(δ_{p2}) $\times\phi$	$\delta_{p2\phi}$
5	중앙 힌지부 자중 (δ_{d3}) $\times\phi$	$\delta_{d3\phi}$
6	교면공 자중 (δ_{d4}) $\times\phi$	$\delta_{d4\phi}$
7	캔틸레버 강선의 응력 감소	$\delta_{p1\phi}$
8	연속 강선의 응력 감소	$\delta_{p2\phi}$
소계		
(I) + (II)		
III. 캔틸레버 시공중의 콘크리트의 CREEP에 의한 처짐		
1	캔틸레버 자중 $\times\phi$	$\delta_{d1\phi}$
2	캔틸레버 강선 $\times\phi$	$\delta_{p1\phi}$
소계		
IV. 작업차에 의한 처짐		
1	작업차 제거시의 탄성 처짐	δ_w
2	작업차 사체의 탄성 변형	δ_{wE}
소계		
V. 캔틸레버 시공중의 솟음		
1	캔틸레버 자중에 의한 솟음	$\delta_{d1h} = \delta_h^o - \delta_h^p$
2	캔틸레버 강선에 의한 솟음	$\delta_{p1h} = \delta_h^o - \delta_h^p$
소계		
총 솟음 = - [I + II + III + IV] + V		$\delta_{d2\phi}$

modulus method)이 있다. 이 두가지 방법의 계산 개요를 그림 6에 나타내었다.

평균계수법의 경우는 계산이 간편하여 손 계산으로 가능하며, 따라서 현장 시공시 쉽게 상황변화에 대처할 수 있는 장점이 있는 반면 캔틸레버 단부의 처짐량이 실제보다 작게 평가되므로 이에 대한 보완이 필요하다.

한편, 유효 계수법은 각 세그먼트 마다의 탄성 계수 값이 다르고 단계 진행에 따른 E_* (effective modulus) 값의 변화가 고려되어야 하므로 컴퓨터의 도움이 없이는 해석이 곤란하며, 따라서 시공 현장에도 컴퓨터와 프로그램, 컴퓨터 운영요원이 있어야 상황 변화에 대처할 수 있다.

그러나 유효 계수법은 계산 결과가 평균 계수법보다 정확한 장점이 있으므로 앞으로는 이를 이용하는 방향으로 발전되어 가야 할 것이다.

3.5.3 솟음 계산

시공 솟음은 모든 시공 단계별 항목을 고려하여 계산된 처짐을 역산하여 신중히 계산되어야 하며 평균 계수법에 의할 때의 솟음 테이블의 예를 표 1에 보았다.

이와 같이 계산된 솟음 테이블의 장점은 시공시에 동결기 작업 중지, 천체지면에 의한 공기 지연 등과 같은 상황변화가 발생했을 때, 혹은 설계시 예측한 크리이프의 양을 초기 시공분의 실측치에 의해 수정할 필요가 있을 때에 간단한 손 계산으로 수정 보완하여 시공에 변경 적용하기가 용이하다는 것이다.