

캔틸레버 시공법에 의해 가설되는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 장기처짐해석

Time-Dependent Deflections of Prestressed Concrete Bridges Constructed by the Segmental Cantilever Method

오 병 환* · 최 계 식**
Oh, Byung Hwan · Choi, Kye Shick

Abstract

A numerical procedure is developed to analyze the time-dependent deflections of prestressed concrete bridges constructed by the segmental cantilever method. The developed computer program accounts for the time-dependent properties of prestressed concrete materials due to the varying modulus of elasticity, creep and shrinkage of concrete and the stress relaxation of prestressing steel. It also accounts for the stiffness increase due to the presence of the steel reinforcements and the effects of the shear deformation of the prestressed concrete bridge girders. The program is applied to a multi-span continuous segmental prestressed concrete bridge to demonstrate its capabilities and to explore the behavior characteristics of the segmental bridges.

요 약

캔틸레버 시공법에 의해 가설되는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 시간 단계별 장기 처짐을 정확하게 해석하기 위해 프리스트레스트 콘크리트의 시간 의존적 재료 특성과 캔틸레버 공법에 있어서의 분할 시공 과정을 고려할 수 있는 해석 모델을 개발하고, 이에 기초하여 컴퓨터 프로그램을 작성하였다. 본 프로그램에서는 시간의 경과에 따른 콘크리트의 크리프, 건조 수축 및 탄성 계수의 변화 그리고 PS 강재의 리락세이션을 고려한다. 그리고 시공 단계별 세그먼트의 발생, 다단계 프리스트레싱 그리고 지점 조건의 변화를 고려한다. 또한 철근으로 인한 단면의 강성 증가를 고려하고 전단변형의 영향을 고려하여 보다 정확하게 해석할 수 있도록 하였다. 본 프로그램을 이용하여 다경간 PS 콘크리트 교량을 해석함으로써, 프로그램의 실제 적용성과 캔틸레버공법에 의한 교량의 거동 특성을 규명하고자 하였다.

1. 서 론

캔틸레버 공법은, 교량 하부에서 하중을 지지하

*정회원 · 서울대학교 공과대학 부교수

**정회원 · 대림산업(주) 기술연구소장

는 동바리를 설치하지 않고 교각으로부터 좌우로 균형을 맞추면서 이동식 작업차(Form Traveler)를 이용하여 3~5m길이의 세그먼트를 순차적으로 시공한 후 경간 중앙에서 캔틸레버 거더를 연결시키는 공법이다. 이 공법은 지면으로부터의 동바리 설치가 곤란한 깊은 계곡이나 하천, 해상 등에 장경간의 교량을 가설할 경우에 적합한 공법이다.

이 공법은 1950년대에 서독의 Dyckerhoff & Widmann (Dywidag)사에 의해서 개발된 공법으로 개발 회사의 명칭을 따서 Dywidag공법이라 부르기도 한다. 세계적으로 수 많은 교량이 이 공법에 의해서 시공되었으며 국내에서는 1980년에 원효대교가 이 공법에 의해 시공된 이래 5~6개의 교량이 시공되었거나 시공 중에 있다.

이 공법은 현장 타설 공법 뿐만 아니라 공장에서 제작한 세그먼트를 가설현장에서 각종 장비를 이용하여 순차적으로 연결하여 나가는 프리캐스트 세그먼트 공법도 개발되어 캔틸레버 공법의 이용도를 더욱 높이고 있다.

프그림 1은 캔틸레버 공법의 시공 과정을 도시하고 있다.

일반적으로 동바리를 이용하여 시공되는 콘크리트 교량은 시공 단계에서의 처짐이 크게 문제시 되

지 않는데 비해, 캔틸레버 공법으로 시공되는 교량은 시공 단계별 처짐량 계산이 매우 중요하다.

캔틸레버 공법에서는 캔틸레버의 구조적 특성 때문에 시공중에 자유단에서 상당히 큰 처짐이 발생하게 되고, 경간 중앙에서 캔틸레버 자유단끼리 결합시킬 때 교량의 종단선형을 확보하기위해 처짐의 정확한 예측이 매우 중요한 문제로 대두된다. 이를 해결하기 위해 시공 단계별로 설계 캠버(Camber)량을 정밀히 계산해서 제시해 주어야 한다.

캔틸레버 공법에 의한 교량의 시공 단계별 처짐 계산시 고려해야 할 하중에는,

- 각 세그먼트의 자중
- Form Traveler의 자중
- 단계별 Prestress 힘
- 기타 작업 하중 등

이 있으며, 다음과 같은 프리스트레스트 콘크리트의 재령 경과별 재료 특성의 변화를 고려해야 한다.

- 콘크리트의 탄성 계수
- 콘크리트의 크리프
- 콘크리트의 건조 수축
- PS 강재의 리락세이션

캔틸레버 공법 교량에서 2개의 마주보는 캔틸레버를 경간 중앙에서 연결시키는 방법에는, 크게 힌지 방식과 강결 방식으로 대별할 수 있다. 힌지 방식은 캔틸레버의 끝단이 자유단 상태로 유지되며 그 부분에 신축 이음 장치가 설치되기 때문에, 주행성 및 유지 보수 면에서 불리할 뿐만 아니라 장기적인 처짐량도 상대적으로 크게된다. 따라서 근래에는 연속보 형태로 연결시키는 강결 방식이 많이 채택되는 데, 이 방식에서는 시공 단계별로 구조계가 바뀌면서 응력 재분배 현상을 일으키며 처짐 거동 또한 매우 복잡하게 되므로, 설계시의 처짐량 계산 및 시공시의 Camber 관리에 더욱 세심한 주의를 요한다⁹⁾.

즉 시공 단계에 따라 구조계가 변경되면서 서로 독립된 정정구조물이 접합되어 하나의 연속된 부정정 구조물이 되고, 더우기 구조물 각 부분의 재령 차이 및 콘크리트의 크리프로 인해 응력이 재분배되는 과정을 겪으면서 복잡한 거동을 하게 된다. 이를 정확히 해석하기 위해서는 일반 구조 해석 프로그램으로는 곤란하며 캔틸레버 시공법의 특성을

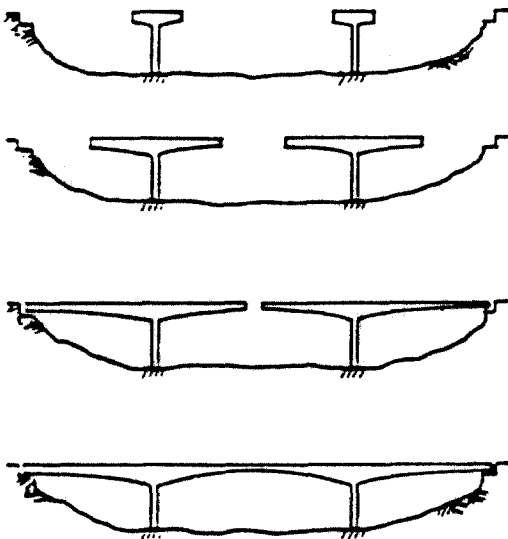


그림 1. Cantilever Construction

효과적으로 고려할 수 있는 전용 프로그램의 개발이 필수적이다.

현재 국내에서 시공되었거나 시공중인 캔틸레버 시공법에 의한 교량의 해석은 대부분 외국 전문 회사의 기술 지원하에 이루어지고 있는 실정인데, 이들이 사용하는 프로그램⁶⁾은 분할 시공 과정(Segmental Operation)을 자동적으로 고려할 수 있으며 간단한 크리프 모델을 이용하여 선형 탄성 해석을 할 수 있는 것이지만, 철근의 영향을 고려하지 않을 뿐 아니라 재령의 경과에 따른 콘크리트 탄성 계수의 변화를 고려하지 않는다. Dilger 등^{3),4)}은 세그먼트의 재령차이 및 다단계 프리스트레싱을 고려하여 시공 단계별로 순차적으로 응력 및 처짐을 변위법에 의해 계산하였으나, 프리스트레스의 초기 손실을 계산하지 않고 PS 강재의 전길이에 걸쳐 일정한 값으로 가정한 초기 유효 프리스트레스를 이용하여 계산하였다. Ketchum⁵⁾은 이러한 점을 보완, 보다 정확한 해석 프로그램을 개발하여 분할 시공 콘크리트 교량의 응력 재분배에 대해 상세히 설명하였다. 그러나 전단 변형의 영향을 고려하지 않아서, 교각 등 두꺼운 부재의 해석시 정확도가 떨어질 수 있다.

본 연구의 목적은 기존 연구에서의 이러한 문제점들을 보완하여, 캔틸레버 시공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 교량의 장기 처짐을 정확하게 계산할 수 있는 해석 모델을 개발하고, 이에 근거한 컴퓨터 프로그램을 개발하여 설계 및 시공시의 보다 정확한 처짐 계산 및 효율적인 관리가 가능하도록 하기 위해서이다.

2. 프리스트레스트 콘크리트 재료 성질의 시간에 따른 변화

콘크리트는 시간에 따라 물리적·화학적 성질이 변화되면서 사용하중하에서도 변형과 강도가 계속적으로 변하는 복잡한 재료이다. 콘크리트의 이러한 시간 의존 현상이 캔틸레버 공법에 의한 교량의 거동에 크게 영향을 끼친다. 이러한 교량의 응력 및 처짐을 정확하게 계산하기 위해서는 콘크리트 성질의 시간에 따른 변화를 정확하게 고려하는 것이 필수적이다.

2.1 콘크리트의 변형도

콘크리트 구조물의 시간 의존 거동을 해석하는

데 있어서 중요한 가정은 콘크리트의 총 변형도를 여러 요인들에 기인하는 개별 변형도들의 합으로 간주하는 중첩의 원리이다. 엄밀히 말해 개별 변형도들이 서로 영향을 주지만, 콘크리트 변형도에 대한 중첩 가정은 콘크리트 구조물의 시간 의존 거동을 연구하는 데 널리 적용되고 있다¹⁾.

시간 t 에서 콘크리트의 총 변형도 $\epsilon(t)$ 는 식 (1)과 같으며, 이를 도시하면 그림 2와 같다.

$$\epsilon(t) = \epsilon_{el}(t) + \epsilon_{cr}(t) + \epsilon_{sh}(t) \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_{el}(t)$: 탄성 변형도

$\epsilon_{cr}(t)$: 크리프 변형도

$\epsilon_{sh}(t)$: 건조수축 변형도

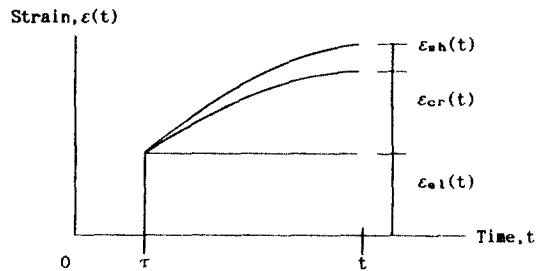


그림 2 콘크리트의 변형도

콘크리트의 탄성 변형도 및 크리프 변형도는 응력의 작용에 기인하는 변형도로서, 크리프 변형도가 작용 응력에 비례한다는 가정하에 다음과 같이 적분식을 이용하여 나타낼 수 있다.¹⁾

$$\epsilon_{el}(t) + \epsilon_{cr}(t) = \int_0^t \frac{1 + \phi(t, \tau)}{E(\tau)} \cdot \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

여기서, $\phi(t, \tau)$: τ 일에 도입된 지속 응력으로 인한 t 일에서의 크리프 계수

$E(\tau)$: τ 일에 있어서 콘크리트의 탄성 계수

$\sigma(\tau)$: τ 일에 콘크리트에 작용하는 응력

2.2 콘크리트의 시간에 따른 재료 특성 예측

콘크리트 구조물의 시간 의존 변형을 해석하기 위해서는 재료 성질에 대한 많은 실험 데이터가 요구된다. 그러나 필요한 모든 데이터를 매년 실험에 의해 구하기는 어렵기 때문에, 경험적인 예측 공식을 이용한다. 수 많은 연구자들에 의해 여러 예측 공식들이 제안되었는데⁷⁾, 일반적으로 ACI 모델, CEB-FIP 모델, BP 모델 등이 널리 이용된다. 국내 도로교 시방서에서는 CEB-FIP 모델이 적용되고

있는 데, 본 연구에서는 위의 세 가지 모델들을 선택적으로 사용하여 시간 단계별 콘크리트의 탄성 계수, 크리프 계수, 건조 수축율을 계산한다.

각 모델별로 크리프 계수를 구하는 식은 각기 다음과 같은 형태로 되어 있으며, 상세한 내용은 참고 문헌 (7)에 잘 나타나 있다.

(1) ACI 모델에서,

$$\phi(t, \tau) = K_S \cdot K_H \cdot K_h \cdot K_r \cdot \frac{(t-\tau)^{0.6}}{10 + (t-\tau)^{0.6}} \cdot \phi_0 \quad (3)$$

여기서, $\phi(t, \tau)$

= 크리프 계수 = $\frac{\text{시간 } t \text{에서의 크리프 변형도}}{\text{시간 } \tau \text{에서 재하시의 탄성변형도}}$

ϕ_0 = 최종 크리프 계수 = 표준 상태 하에서 2.35

$K_S = 0.81 + 0.07s$, 슬럼프 보정 계수

$K_H = 1.27 - 0.0067H$, $H > 40\%$, 습도 보정 계수

$K_h = 1.0 - 0.0167(th - 6.0)$, $th > 6in.$, 부재 두께 보정 계수

$K_r = 1.25\tau^{-0.118}$, 7일간 습윤 양생 콘크리트에 대한 재하시 재령 보정 계수

s = 슬럼프(in.)

H = 상대습도(%)

th = 최소 부재 두께(in.)

t = 콘크리트 재령(일)

τ = 재하시 재령(일)

(2) CEB 모델에서, 크리프 계수는 식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이, 28일 탄성계수에 근거한 탄성 변형도에 대한 크리프 변형도의 비로서 나타낸다.

$$\epsilon_c(t, \tau) = \frac{\sigma(\tau)}{E_c(28)} \phi'(t, \tau) \quad (4)$$

여기서, $E_c(28)$ = 재령 28일 탄성 계수

$$\phi'(t, \tau) = \beta_a(\tau) + \phi_d \beta_a(t - \tau) + \phi_f [\beta_f(t) - \beta_f(\tau)] \quad (5)$$

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

$\phi_d = 0.4$: 지연 탄성 변형도(Delayed Modulus of Elasticity)

$\phi = \phi_n \times \phi_e$: 소성 변형도(Flow Coefficient)

ϕ_n : 습도의 영향을 받음

ϕ_e : 부재의 가상 두께의 영향을 받음

β_a : 지연 탄성 변형도의 재령에 따른 변화에 대한 함수

β_f : 지연 소성 변형도(Delayed Flow Strain)의 재령에 따른 변화에 대한 함수

$$\phi(t, \tau) = \frac{E_c(\tau)}{E_c(28)} \phi'(t, \tau) \quad (6)$$

(3) BP 모델에서, 크리프 변형은 기본 크리프와 건조 크리프의 합으로 표현된다.

$$J(t, \tau) = J_b(t, \tau) + J_d(t, \tau, t_0) \quad (7)$$

여기서, $J(t, \tau)$: Creep Function

$J_b(t, \tau)$: Basic Creep

$J_d(t, \tau, t_0)$: Drying Creep

t_0 : 건조가 시작될 때의 콘크리트의 재령

$$\phi(t, \tau) = E(\tau) \cdot J(t, \tau) - 1 \quad (8)$$

2.3 PS 강재의 리락세이션

리락세이션이란 일정 변형이 지속될 때 응력이 감소하는 현상으로서, PCI의 Prestress Loss Committee⁽⁵⁾에 의하면, 두 고정점 사이에서 τ 일에 긴장된 텐던의 t 일에서의 리락세이션은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\sigma_n(t, \tau, \sigma_{ps0}) = K \cdot \sigma_{ps0} \cdot \left(\frac{\sigma_{ps0}}{\sigma_{psy}} - 0.55 \right) \cdot \log \left(\frac{24 \cdot t + 1}{24 \cdot \tau + 1} \right); \sigma_{ps0} \geq 0.55 \cdot \sigma_{psy} \quad (9)$$

여기서, σ_{ps0} : PS 강재의 초기응력

σ_{psy} : PS 강재의 항복강도

K : 상수

식 (9)는 변형이 일정하며 작용 하중이 초기 긴장력 뿐이라는 가정에 바탕을 두고 있는 데, 실제 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서 PS 강재의 긴장력 및 길이가 크리프, 건조수축 등으로 인해 계속적으로 변화되면서 리락세이션 값은 σ_n 보다 적은 감소 리락세이션(Reduced Relaxation) σ_r 이 된다⁽⁴⁾. 뒤의 3.2절에서 유도되는 PS 강재에 대한 응력-변형도 관계식에 이 감소 리락세이션 σ_r 을 적용한다.

3. 캔틸레버 시공법에 의한 교량의 처짐 해석

3.1 구조 해석 모델

교량의 거더를 직선의 등단면 부재 요소들이 서로 절점을 통해 연결되어 있는 평면뼈대 구조로 이상화시키고, 절점은 단면의 중심축 상에 둔다. 거더의 단면은 콘크리트, PS 강재, 그리고 철근으로 구성되는 복합 단면이며, 계산 시점에서 각 재료 사이의 탄성계수비에 의해 콘크리트로 환산한 단면

성질을 이용한다.

본 요소의 강성도 매트릭스 [k]에는 식 (10)과 같이 전단 변형의 영향을 포함시킨다⁶⁾.

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ \frac{12EI}{L^3(1+\alpha)} & \frac{6EI}{L^2(1+\alpha)} & 0 & -\frac{12EI}{L^3(1+\alpha)} & \frac{6EI}{L^2(1+\alpha)} & 0 \\ \frac{(4+\alpha)EI}{L(1+\alpha)} & 0 & -\frac{6EI}{L^2(1+\alpha)} & \frac{6EI}{L(1+\alpha)} & \frac{(2-\alpha)EI}{L(1+\alpha)} & 0 \\ \text{Symm.} & & & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & & & \frac{12EI}{L^3(1+\alpha)} & \frac{6EI}{L^2(1+\alpha)} & 0 \\ & & & \frac{(4+\alpha)EI}{L(1+\alpha)} & \frac{(2-\alpha)EI}{L(1+\alpha)} & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

- 여기서, E : 콘크리트의 탄성 계수
- A : 콘크리트 환산 단면적
- I : 콘크리트 환산 단면 2차 모멘트
- L : 요소의 길이
- $\alpha : 12EI / (GA_s L^2)$, Shear Deformation Parameter
- G : 전단 탄성 계수
- A_s : 전단 유효 단면적

PS 강재의 긴장력은 정착시의 정착구 활동 및 덕트 내에서의 마찰에 기인하는 초기 손실을 먼저 계산한 후의 유효 프리스트레스가 콘크리트 단면에 외력으로 작용되게 한다. 시간의 경과에 따라 발생하는 장기손실은 본 절의 뒷 부분에서 설명하는 과정에 따라 자동적으로 고려된다. PS 강재의 단면은 그라우팅 전에는 고려하지 않고 그라우팅 후에는 부재 단면의 강성 계산에 포함시킨다.

3.2 재료별 응력-변형도 관계

응력의 작용이 시간에 따라 변화되기 때문에 시간을 적정한 수의 구간(Interval)으로 나누어 각 구간의 중앙 시각에 응력 변화가 있는 것으로 간주한다. 자중 혹은 프리스트레싱 등의 순간적으로 작용하는 하중은 길이가 영(0)인 해당 구간의 중앙 시각에 작용하는 것으로 가정한다.

i번째 구간에서의 콘크리트 변형도의 증분 $\Delta \epsilon_c(i)$ 는, 그 구간에서의 응력 변화로 인한 탄성 변형

도와 크리프 변형도, 그 이전 구간들에서의 응력 변화로 인한 크리프변형도 그리고 그 구간 동안의 건조 수축 변형도를 더하여 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \epsilon_c(i) = \frac{\Delta \sigma_c(i)}{E_c(i)} \{1 + \phi(i+1/2, i)\} + \left[\sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta \sigma_c(j)}{E_c(j)} \{\phi(i+1/2, j) - \phi(i-1/2, j)\} \right] + \Delta \epsilon_{s,i}(i) \quad (11)$$

- 여기서, $i+1/2$: i번째 구간의 끝 시각
- i : " 중앙 시각
- $i-1/2$: " 시작 시각
- $\Delta \sigma_c(i)$: i번째 구간에서의 콘크리트 응력 변화량
- $E_c(i)$: i번째 구간에서의 콘크리트 탄성 계수
- $\Delta \epsilon_{s,i}(i)$: i번째 구간에서의 콘크리트 건조 수축율

식(11)에서 대괄호 안의 항은 i번째 구간에서의 응력 변화량 $\Delta \sigma_c(i)$ 와는 무관하게 그 전 구간까지의 계산 결과로 부터 결정될 수 있다. 이를 $\Delta \bar{\epsilon}_c(i)$ 로 표시하고, 크리프의 영향을 감안한 유효 탄성 계수⁷⁾를 사용하면 식 (11)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \epsilon_c(i) = \frac{\Delta \sigma_c(i)}{E_{ec}(i)} + \Delta \bar{\epsilon}_c(i) \quad (12)$$

PS 강재와 철근에 대해서도 위와 마찬가지로 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\Delta \epsilon_{ps}(i) = \frac{\Delta \sigma_{ps}(i)}{E_{ps}} + \left[\frac{\Delta \sigma_r(i)}{E_{ps}} \right] = \frac{\Delta \sigma_{ps}(i)}{E_{ps}} + \Delta \bar{\epsilon}_{ps}(i) \quad (13)$$

$$\Delta \epsilon_{rs}(i) = \frac{\Delta \sigma_{rs}(i)}{E_{rs}} \quad (14)$$

- 여기서, ps : PS 강재 (Prestressing Steel)
- rs : 철근 (Reinforcing Steel)
- $\Delta \sigma_r(i)$: i번째 구간에서의 PS 강재 리락세이션

3.3 강성도 방정식(Stiffness Equations)

식 (12)와 식 (13)에서 $\Delta \bar{\epsilon}_c(i)$ 는 콘크리트의 크리프와 건조 수축 그리고 PS 강재의 리락세이션에 기인하는 비하중 변형도 (Non-mechanical Strain)로서, 이를 일반 구조 해석에서의 온도변화의 영향에 대한 해석과 같은 방식으로 등가 하중으

로 치환하여 계산한다.⁽⁴⁾ 즉 i 번째 구간에서의 보 요소의 강성도 방정식(Stiffness Equations)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\{r(i)\} + \Delta\{\bar{r}(i)\} = [k] \cdot \Delta\{d(i)\} \quad (15)$$

여기서,

$\Delta\{r(i)\}$: i 번째 구간의 중앙 시각에 도입된 외력으로 인한 절점 하중

$\Delta\{\bar{r}(i)\}$: i 번째 구간에서의 비하중 변형으로 인한 등가 절점 하중

$[k]$: 강성도 매트릭스 (식(10))

$\Delta\{d(i)\}$: i 번째 구간에서의 절점 변위량의 증분
 i 번째 구간까지의 총 변위량은 다음과 같이 결정된다.

$$\{d(i)\} = \{d(i-1)\} + \Delta\{d(i)\} \quad (16)$$

여기서, $\{d(i)\}$: i 번째 구간까지의 총 절점 변위량

3.4 해석 프로그램

본 연구로부터 개발된 해석 모델에 기초하여, 캔틸레버 시공법에 의한 교량의 해석 프로그램인 'FCM'을 작성하였다.

프로그램 'FCM'에서 콘크리트의 재령별 크리프 계수 및 수축율은 ACI 모델, CEB-FIP 모델, BP 모델을 선택적으로 사용하여 자동 계산되도록 하였다. 크리프 변형도의 계산에는 전 단계들에서의 응력 이력(Stress History)을 고려하기 위해 내부 파일을 이용하여 단계별 모든 응력들이 순서대로 보관되도록 했다. 각 단계별 응력 변화는 해당 단계(Interval)의 중앙 시각에 순간적으로 이루어지는 것으로 가정하였다. PS 강재의 리락세이션은 PCI에서 적용하는 식을 이용하여 계산되도록 하였다.

구조 모델은 절점 자유도가 3인 평면 뼈대 구조로 하고, 강성도 매트릭스에는 전단변형으로 인한 처짐 증가의 영향을 고려하기 위해 전단 변형 계수를 포함시켰다. 프리스트레스 힘은 콘크리트에 작용하는 외력으로 간주하며, 정착시의 초기 손실 뿐만 아니라 크리프·건조 수축·리락세이션으로 인한 장기손실을 단계별로 계산하도록 하였다. 그리고 부재의 단면이 콘크리트·철근·PS강재로 구성되는 복합 단면임을 감안하여, 철근과 그라우팅 후의 PS강재로 인한 강성 증가를 고려하였다.

하중은 교량의 자중, PS 강재의 긴장력, 외적으로 가해지는 집중 하중이나 등분포 하중 등을 작용시킬 수 있다. 계산은 전 시공 기간 및 사용 기간에

걸쳐서 시간 단계별로 순차적으로 변위법에 의해 수행되며, 각 단계에서의 콘크리트, 철근 및 PS강재의 응력과 각 절점에서의 변위가 출력된다.

프로그램 'FCM'은 캔틸레버 공법에 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 간단한 수정에 의해 연속 압출 공법(Incremental Launching Method), 이동식 비계 공법(Movable Scaffolding System), 등바리 상의 가설 공법(Full Staging Method) 등의 각종 시공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 교량의 거동 해석에 적용할 수 있다.

그림 3에 컴퓨터 프로그램-'FCM'의 Flow Chart를 나타낸다.

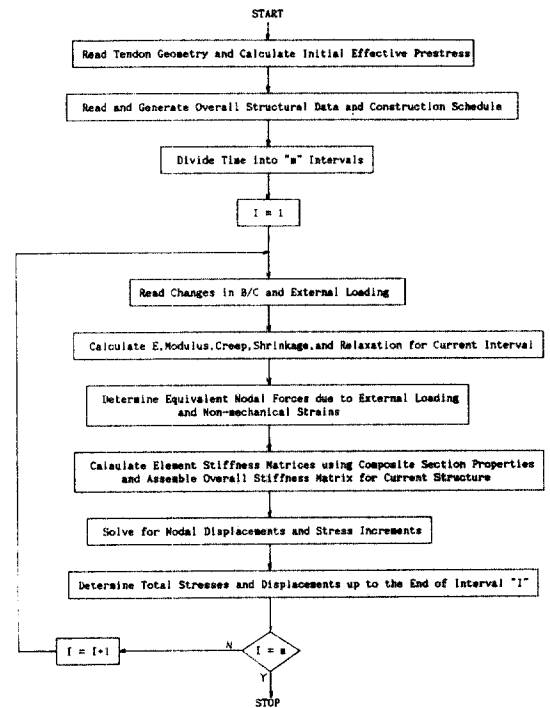


그림 3. Flow Chart of the Program 'FCM'

4. 해석 예제

본 연구에 의해 개발된 Computer Program 인 'FCM'을 이용하여, 실제로 캔틸레버공법으로 시공되고 있는 다경간 PS콘크리트 교량을 해석함으로써 본 프로그램의 실제적용성 및 해석가능 범위를 보이고 또한 이런 종류 교량의 거동 특성을 파악하고자 한다.

4.1 예제 개요

현재 한강 상에 캔틸레버 시공법에 의해 건설되고 있는 7경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 교량인 강동대교의 한 경간(125m span)을 예제로 채택하였으며, 교량 거더의 Segment 분할 및 PS 강재의 배치 형상은 그림 4와 같다.

사용된 재료의 성질은 다음과 같다.

1) 콘크리트

- 28일 일축 압축 강도 $\sigma_c' = 400 \text{ kg/cm}^2$
- 28일 탄성계수 $E_c (28) = 344,460 \text{ kg/cm}^2$
- 단위중량 $W = 2.5 \text{ t/m}^3$
- 최종 크리프 계수 $\phi_u = 2.8$
- 최종 건조 수축률 $\epsilon_{sh} = 0.00024$
- Poisson's Ratio $\nu = 0.17$

2) PS강재

- 극한 강도 $\sigma_u = 18,900 \text{ kg/cm}^2$
- 탄성 계수 $E_s = 2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
- 최종 고유 리락세이션 $\sigma_{rs} = 315 \text{ kg/cm}^2$
- Wobble Friction Coefficient $k = 0.0019/\text{m}$
- Curvature Friction Coefficient $\nu = 0.18/\text{rad.}$
- Anchor Slip $d = 6\text{mm}$

3) 철근

- 탄성 계수 $E_{sb} = 2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
- 철근비 $\rho = 0.4\%$ (균등 배치)

해석의 단순화를 위해 교량 구조의 대칭성을 이용하여 그림 5와 같이 강동 대교의 Typical 경간의 절반만을 해석 모델로 하였다. 실제로는 시공시에 경간 중앙의 접합 직전까지는 Pier부를 중심으로 좌우로 대칭을 이루지만 경간 중앙의 접합이후에는 Pier부 뿐만 아니라 경간 중앙부에서도 대칭성을 갖지 않는다.

그림 5의 각 절점의 좌표 및 단면 성질은, 표 1과 같다.

Segment당 실제 시공 주기는 타설 1일, 양생 3일, 긴장 1일, 거푸집 해체 이동 설치 3일, 철근 및 덕트 설치 2일을 포함하여 총 10일 정도가 보통이다. 그러나 휴일이나 우천시 등 비작업일수를 감안하여 시공 주기를 15일로 하고 타설 후 5일째에 긴장 및 거푸집 해체를 하는 것으로 한다. 즉 콘크

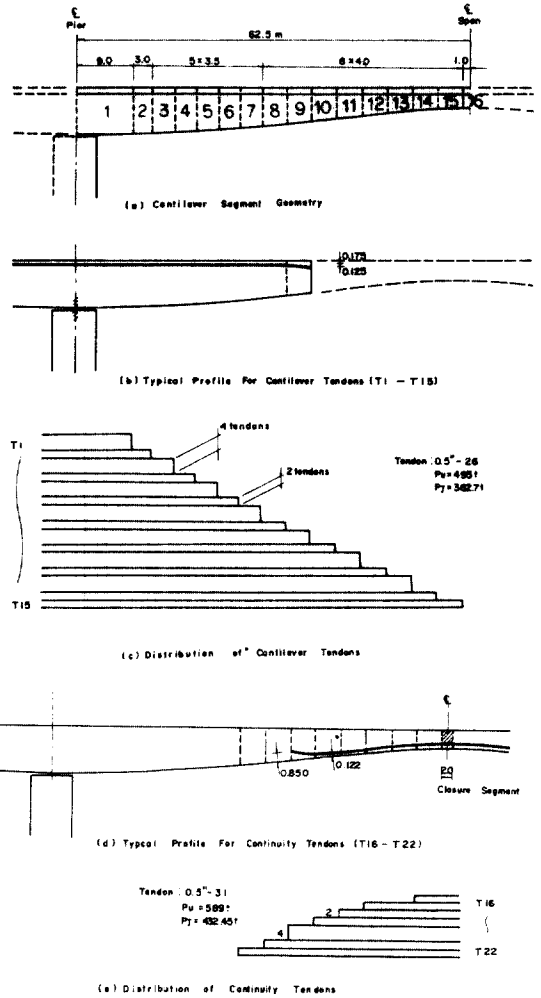


그림 4. Segment 분할 및 Prestressing Tendon Geometry

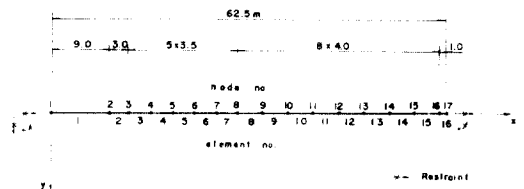


그림 5. 해석 모델

리트 재령 5일 째에 긴장력 및 자중이 작용하는 것으로 한다. 경간 중앙부의 시공에는 30일이 소요되는 것으로 가정한다. 경간 중앙부 접합 후의 장기 거동을 계산하기 위해 2000일째까지 계산을 수

표 1. Section Properties

Node	Coordinates		Section Properties			
	x	y	H(m)	A(m ²)	I(m ⁴)	Ay(m)
1	0.0	3.43	7.0	16.453	121.862	7.7
2	9.0	2.99	6.216	15.241	89.683	6.838
3	12.0	2.81	5.917	14.734	78.643	6.509
4	15.5	2.61	5.578	14.183	67.323	6.136
5	19.0	2.43	5.252	13.643	57.326	5.777
6	22.5	2.25	4.939	13.125	48.768	5.433
7	26.0	2.08	4.640	12.618	41.255	5.104
8	29.5	1.91	4.355	12.063	34.462	4.791
9	33.5	1.74	4.050	11.556	28.429	4.455
10	37.5	1.59	3.708	11.071	23.387	4.145
11	41.5	1.44	3.513	10.549	19.030	3.864
12	45.5	1.32	3.219	10.130	15.613	3.620
13	49.5	1.21	3.110	9.755	13.364	3.421
14	53.5	1.13	3.0	9.398	11.672	3.3
15	57.5	1.13	3.0	9.398	11.672	3.3
16	61.5	1.13	3.0	9.398	11.672	3.3
17	62.5	1.13	3.0	9.398	11.672	3.3

H: 보의 높이 A: 단면적 I: 단면 2차모멘트

Ay: 전단 유효 단면적

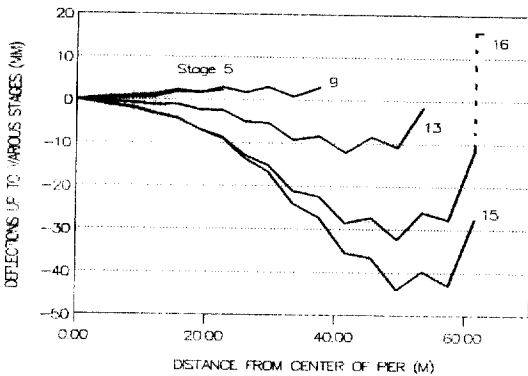


그림 6. 시공 단계별 처짐량

행한다.

4.2 해석 결과

시공 단계별 처짐량을 그림 6에 나타낸다. 시공 초기 단계에는 자중에 의한 하향 처짐보다는 프리스트레스 힘에 의한 상향 처짐이 보다 커서 위로 올라 가게 되지만, 캔틸레버 거더의 길이가 길어지게 되면 자중의 영향이 커지면서 점차 하향으로 처

지게 된다. 경간 중앙의 접합(Stage 16) 후에는 Continuity Tendons의 프리스트레싱으로 인해 접합 세그먼트가 위로 올라 가게 된다. 캔틸레버 거더의 끝단과 접합 세그먼트와의 연결부(16번 절점)에서의 불연속은 시공시의 Camber 보정을 고려하지 않았기 때문이다. 16번 절점에서의 시간의 경과별 처짐량의 변화는 그림 7과 같다.

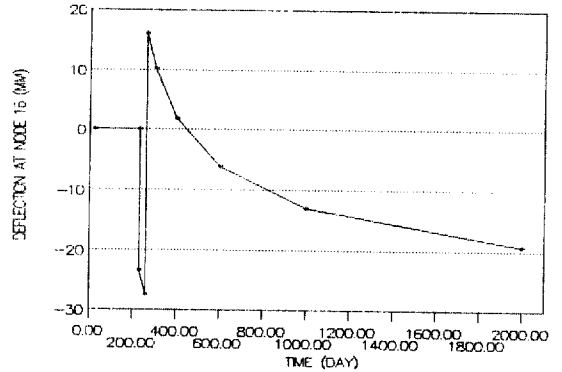


그림 7. 16번 절점에서의 처짐 변화

그림 8은 같은 조건하에서 본 연구에서 개발된 프로그램인 'FCM'과 기존 프로그램인 'RM'을 사용하여 계산한 Stage 15까지의 처짐량을 나타낸 것이다. 여기서 'FCM'의 결과가 약간 크게 나타난 이유는, 'RM'에서는 단계별 크리프 계수를 CEB모델의 표와 그래프로부터 수계산하여 입력하는 데 반해, 'FCM'에서는 CEB모델의 표와 그래프를 근사화시킨 수식으로 부터 프로그램 내에서 자동 계산하기 때문에 약간의 차이가 발생할 수 있었으리라 생각된다.

그림 9로부터, 전단 변형의 영향을 고려하는 경우 처짐량이 크게 계산됨을 알 수 있다. 특히 상대적으로 보가 두꺼운 시공 초기 단계일수록 그 경향이 더욱 심함을 알 수 있다. 따라서, 전단변형의 영향을 고려하여 처짐을 계산하여야 함을 알 수 있다.

철근비의 변화에 따른 계산 처짐량의 차이를 그림 10에 나타내었는데, 그 차이가 미미함을 알 수 있다. 이는 철근과 콘크리트와의 탄성 계수 비에 의한 환산 단면을 이용하여 철근의 존재로 인한 단면의 강성 증가만을 고려하기 때문이라고 여겨진

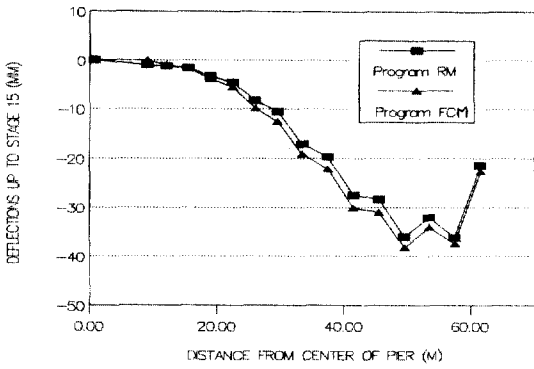


그림 8. 기존 Program과의 비교

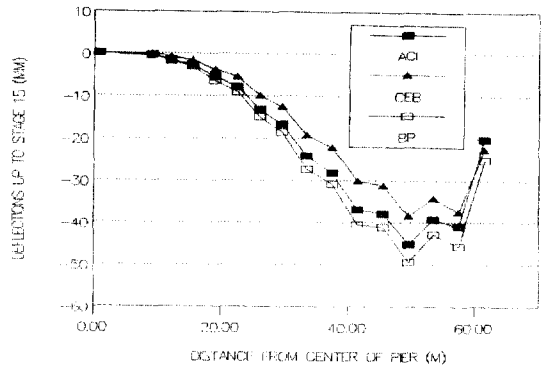


그림 11. Creep 모델별 비교

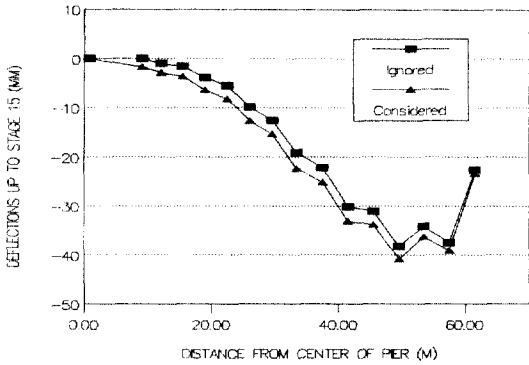


그림 9. 전단 변형의 영향

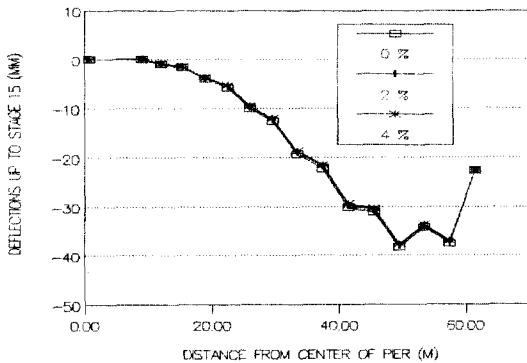


그림 10. 철근의 영향

다. 따라서, 앞으로 압축철근으로 인한 크리프의 감소효과 등에 대한 고려가 필요한 것으로 사료된다.

끝으로, 그림 11의 크리프 예측 모델별 처짐량

계산 결과에 따르면, CEB모델에 비해서 ACI모델이나 BP모델의 경우 처짐량이 더욱 크게 계산됨을 알 수 있다.

즉, CEB모델결과가 불안전측이므로 우리나라 도로교시방서에서 채택하고 있는 CEB모델의 적정성을 잘 검토해야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

캔틸레버 공법에 의해 시공되는 프리스트레스트 콘크리트 교량은, 콘크리트의 크리프로 인해 시간의 경과에 따라 계속적으로 응력의 재분배가 이루어 질 뿐만 아니라, 시공 과정에 따라 세그먼트별 콘크리트의 타설과 프리스트레싱이 단계별로 이루어 지기 때문에 해석이 복잡하며 시공시의 단계별 처짐 관리가 매우 중요하다는 특징을 갖고 있다.

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트의 시간의존적 재료 특성과 캔틸레버 공법에 있어서의 분할 시공 과정을 고려할 수 있는 해석 모델을 개발하고, 이에 기초하여 캔틸레버 공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 교량을 정확히 해석하기 위한 프로그램을 작성하였다. 본 프로그램에서는 시간의 경과에 따른 콘크리트의 크리프, 건조 수축 및 단성 계수의 변화 그리고 PS강재의 리락세이션을 고려한다. 그리고 시공 단계별 세그먼트의 발생, 단단계 프리스트레싱 그리고 지점 조건의 변화를 고려한다. 또한 철근으로 인한 단면의 강성 증가를 고려하고 전단 변형의 영향을 고려하여 보다 정확하

게 해석할 수 있도록 하였다.

본 프로그램의 실제 적용성 및 해석 능력을 보이기 위해, 캔틸레버 공법에 의해 시공되는 다경간 프리스트레스트 콘크리트 교량의 일부 경간을 본 프로그램을 이용하여 조건을 변화시키면서 여러 경우에 대해 해석하였으며, 그 결과 같은 조건 하에서 본 프로그램과 기존 프로그램인 "RM"[®]을 사용하여 해석하면 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 전단 변형의 영향을 고려하면, 상대적으로 보다 두꺼운 시공 초기단계일수록 처짐이 크게 계산됨을 알 수 있었다. 따라서, 처짐의 정확한 해석을 위해서는 전단 변형의 영향이 반드시 고려되어야 한다.

또한 크리프 예측 모델에 따라서 처짐량이 다르게 계산되는 데, 국내 도로교 시방서에서 적용하고 있는 CEB모델에 비해서 ACI모델이나 BP모델의 경우 처짐량이 더욱 크게 계산되었다. 따라서 CEB모델등의 적정성을 다시 고려하여 검토하는 것이 필요한 것으로 사료된다. BP모델등은 비교적 최근에 개발된 크리프 예측이론이며, CEB의 결과가 불안전측의 결과를 주기 때문이다.

본 연구는 캔틸레버 공법에 의해 시공되는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 장기 처짐 해석에 효율적으로 이용될 수 있으며, 앞으로 이 분야의 좀더 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

謝 辭

이 論文은 1989년도 서울대학교 공과대학 현대 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Kang, Y.j., "Nonlinear Geometric, Material and Time-Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames", *UCB/SESM-77/01*, PhD Dissertation, U.C.Berkeley, 1977.
2. Ketchum, M.A., "Redistribution of Stresses in Segmentally Erected Prestressed Concrete Bridges", *UCB/SESM-86/07*, U.C.Berkeley,

- 1986.
3. Tadros, M.K., Ghali, A., and Dilger, W.H., "Time-Dependent Analysis of Composite Frames", *ASCE*, Vol. 103, No. ST4, 1977, pp. 871-884.
4. Tadros, M.K., Ghali, A. and Dilger, W.H., "Long-term Stresses & Deformation of Segmental Bridges", *PCI Journal* Vol. 24, No. 4, 1979, pp. 66-87.
5. PCI, "Recommendations for Estimating Prestress Losses", *PCI Journal*, July-August 1975, pp. 43-75.
6. Przemieniecki, J.S., *Theory of Matrix Structural Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1968.
7. Neville, A.M., Dilger, W.H., and Brooks, J.J., *Creep of Plain and Structural Concrete*, Construction Press, 1983.
8. Pircher, H., *User Manual for RM-Program*, Austria, 1984.
9. *Report on the Control of Deformations*, Gateway Bridge, Brisbane, Australia, 24. 2. 1983.
10. Kang, Y.J., "SPCFRAME-Computer Program for Nonlinear Segmental Analysis of Planar Prestressed Concrete Frames". *UCB/SEMM-89/07*, U.C.Berkeley, 1989.
11. 강영진, "철근 콘크리트 평면 뼈대 구조물의 비선형 해석", *대한토목학회논문집*, 제 3권, 제 4호, 1983.
12. Bazant, Z.P., and Panula, L., "Creep And Shrinkage Characterization for Analyzing Prestressed Concrete Structures", *PCI Journal*, May-June 1980.
13. Brown, R.C., and Burns, N.H., "Computer Analysis of Segmentally Erected Bridges", *ASCE*. Vol. 101, No. ST4, 1975.
14. 이상희, "캔틸레버 시공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 교량의 장기 거동 해석", *서울대학교 공학 석사학위논문*, 1990. 1.

(接受: 1990. 4. 26)