

시공단계의 영향을 고려한 프리스트레스트 콘크리트 다층 구조물의 해석

Analysis of Multi-Story Prestressed Concrete Structure Considering the Effect of Construction Stage

전 찬 기*

Jeon, Chan-Ki

Abstract

This paper presents an analytical procedure for the time-dependent analysis of the multi-story prestressed concrete structure under the construction stage. To account for the actual structural behavior, the procedure considers the effects due to the construction interval and the time-dependent losses of prestress at every construction step on the entire structural response.

A numerical study is performed to demonstrate the general validity of the approach and to quantitatively evaluate the effects resulted from the time-dependent behaviors during construction.

Recommendations and conclusions are developed by comparisons with structural responses using the present and conventional methods of analysis. The comparative results show that both effects of sequential construction and time-dependent prestress losses should be considered for the construction stage analysis.

keywords : Prestressed Concrete Building, Sequential Construction Effect, Construction Interval, Multi-Story Structure

1. 서 론

PSC(Prestressed Concrete) 교량을 1962년 국내 최초로 건설한 이후에 산업기반시설로서 프리스트

레스트 콘크리트 구조물의 수요가 지속적으로 증대하여 왔다.⁽¹⁾ 최근에는 교량뿐만이 아니라 대형 미켓이나 주차구조물 등과 같은 일반 건축구조물에 있어서도 공간 확보 및 구조물의 자중 감소를 위해서 종종 PSC

* 정회원, 시립인천전문대학 토목과 교수, 공학박사

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2002년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

구조형식을 채택하고 있다. 이와 함께 PSC 구조물의 거동 해석 및 설계 기술도 많은 발전을 거듭하고 있으나, 콘크리트의 장기변형에 의한 구조적 거동의 변화와 관련된 문제의 해결은 아직도 미흡한 실정이다.

한편 대형 구조물은 최초 시공되는 구간과 최종 시공되는 구간에 시간 차이가 존재하기 때문에 이로 인하여 구조물을 형성하는 각 부재들의 강성 변화와 하중 전달의 메커니즘은 시공구간별로 변하게 된다. 또한, 콘크리트 구조물은 크리프와 건조수축으로 인하여 장기간에 걸쳐 구조물의 강성이 변하게 되므로, 콘크리트 구조물의 설계시에는 콘크리트의 시간 의존적(time dependent) 변형에 따른 영향과 시공단계에 의한 영향을 함께 고려한 해석이 요구된다고 할 수 있다.⁽²⁾

특히 PSC 구조물은 시간의 경과와 함께 시간 의존적인 프리스트레스 인장력의 손실이 발생하게 되고, 이로 인하여 초기에 예측한 프리스트레스 인장력은 시공 구간별로 변하게 된다. 따라서, PSC 다층 구조물의 실제 거동을 보다 합리적으로 예측하기 위해서는 시공단계에 의한 영향, 콘크리트의 장기변형에 의한 영향 및 시간 의존적 프리스트레스 인장력의 변화를 모두 고려한 해석이 필수적으로 요구된다.

이와 관련하여 그 동안 RC(Reinforced Concrete) 구조물 또는 PSC 보의 장기거동의 예측^{(2),(3)}과 RC 구조물의 시공단계별 고려한 해석^{(4),(5)}에 대해서는 기존에 많은 연구가 수행되었다. 그러나, 국내의 경우에 PSC 구조물의 시공단계별 고려한 해석에 대한 연구^{(6),(7)}는 교량 구조물에 대하여 한정적으로 수행되었을 뿐, 각 층별 분리 시공되는 PSC 다층 구조물의 시공 단계별 거동 예측에 대한 연구는 수행실적이 거의 없는 실정이다.

여기에 기동은 RC 구조이고 거더(girder)는 PSC 구조로 된 구조물은 더욱 복잡한 거동을 나타내고 있으나, 도목과 건축의 설계기준 및 구조해석적 특성을 복합적으로 고려해야 함으로 뚜렷한 연구 실적이 없는 상태이다. 그런 이유로 PSC 다층 구조물의 시공중 또는 시공후 균열 등의 하자가 종종 발생하고 있어 구조물의 안전에 큰 문제가 제기되기도 한다.

이러한 여건에 따라, 본 연구에서는 순차적으로 분

할 시공된 PSC 다층 구조물의 시공순서에 의한 영향과 프리스트레스(PS강재 인장력)의 시간적 손실 및 구조물의 강성 변화를 고려한 해석절차를 정립하고, 수치 예제를 통하여 그의 영향을 평가하고자 한다.

2. 시공단계를 고려한 해석 모델

여리 층으로 구성된 다층 구조물의 거동은 모든 공정이 완성된 전체 구조계에 대하여 일괄해석 하는 경우와 각 공정별 강성과 재하 영향을 고려하여 단계별 해석한 후, 그 결과를 조합하여 계산한 경우의 결과는 어느 정도 차이가 발생하게 된다.

이러한 차이는 구조물 전체에 하중을 동시에 재하할 경우에 하중이 실제 시공조건과는 달리 아직 시공되지 않은 상부층으로 전달되는데 따른 오차, 혹은 시공단계별 시공하중에 의한 수직부재의 부등변형(differential elastic shortening)에 따른 오차 등으로 인하여 비롯된다.⁽⁸⁾ 이에 추가하여 PSC 구조에서는 시간의 경과로 인하여 이미 시공된 구간의 프리스트레스 힘이 시공구간별로 서로 나르게 손실되는 것이 그 원인이 되기도 한다.

따라서, 각 층별 순차시공과 프리스트레스의 시간적 손실로 인한 영향을 동시에 고려한 PSC 구조물의 시공단계별 해석에서는 Fig. 1과 같이 시공순서에 따라 각 층별로 구조물의 자중을 재하하고, 프리스트레스의 힘과 손실을 함께 고려하여 해석한 후 그 결과들을 중첩함으로써 최종 결과를 얻어야 한다. 이를 위해서는 중첩의 원리⁽⁹⁾가 성립하여야 하는데, 시공단계에서의 구조물의 거동은 미래에 작용할 활하중 등의 영향이 배제되어 이 시점에서 구조물의 거동은 탄성영역 이내에 들도록 설계되므로 이 조건이 만족된다고 할 수 있다. 또한, PSC 구조물은 각 구간별 시공과정에서 프리스트레스가 도입될 시점에 콘크리트는 소요 강도 이상을 발휘하므로 동바리에 의한 영향은 무시될 수 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 각 층이 시공됨에 따라 시간이 경과하게 되고, 이로 인하여 이미 시공된 하부층에 도입된 프리스트레스 인장력은 추가 손실이 발생되므로 최종 구간의 시공이 완료될 때까지 이 손실은 각 층별로 계속하여 누적된다. Fig. 1에서 점선은 아

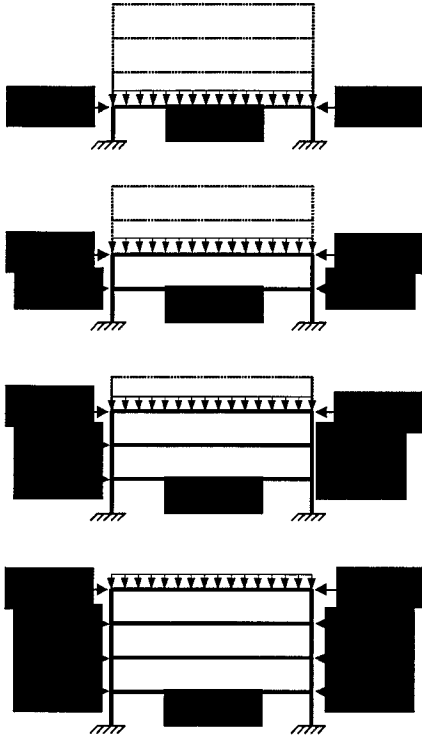


Fig. 1 시공단계별 재하 상태

각 시공되지 않은 구간을 의미하며, ω_a 는 구조물의 자중이고, P_i 는 i -번째 시점에서 도입되는 프리스트레스 인장력이며, ΔP_i 는 i -번째 시공단계에서 그 이전 단계까지 시공된 부재에 발생하는 프리스트레스 인장력의 손실을 의미한다. 또한 i -번째 단계를 시공하는 시점에서의 콘크리트의 단성계수는 $E(t_i)$ 이다.

이에 근거하여 구조물의 변위 혹은 부재력은 다음 식 (1)과 같이 최종 구간의 시공이 완료될 때까지 각 시공단계별 해석결과와 누적으로 구할 수 있다.

$$R(t_a) = \sum_{i=0}^n r_a(t_i) + \sum_{i=0}^n r_p(t_i) - \sum_{i=1}^n \Delta r_p(t_i) \quad (1)$$

여기서,

$R(t_a)$: 최종 구간의 시공이 완료되는 시간 t_a 에서의 최종 구조응답

$r_a(t_i)$: 시공단계 t_i 에서의 사하중으로 인한 구조응답

$r_p(t_i)$: 시공단계 t_i 에서의 프리스트레스 인장력으로 인한 구조응답

$\Delta r_p(t_i)$: 시공단계 t_i 에서의 프리스트레스 인장력의 손실로 인한 구조응답 변화량

3. 시간 의존적 특성 및 영향

3.1 콘크리트의 시간 의존적 변형

콘크리트 부재는 작용하중으로 인한 탄성 변형과 함께 시간이 경과됨에 따라 크리프와 건조수축으로 인한 추가 변형이 발생된다. 이 때 크리프와 건조수축으로 인한 재령 t_0 와 t 사이에 변화하는 콘크리트의 전체 변형을 $\epsilon_{cs}(t)$ 는 식 (2)로 표현된다.⁽¹⁰⁾

$$\epsilon_{cs}(t) = \phi(t, t_0)\epsilon_c(t_0) + \epsilon_{sh}(t, t_0) \quad (2)$$

여기서,

$\epsilon_c(t_0)$: 재령 t_0 에서의 콘크리트 탄성 변형률

$\phi(t, t_0)$: 재령 t_0 에서 t 까지의 콘크리트 크리프 계수

$\epsilon_{sh}(t, t_0)$: 재령 t_0 에서 t 사이에 발생하는 건조수축 변형률

그러나 콘크리트의 크리프와 건조수축을 정확히 예측한다는 것은 현실적으로 상당히 어렵기 때문에 국가별로 서로 다른 모델식을 개발하여 사용하고 있다. 국내에서도 종전의 '콘크리트 표준시방서'에 제시되었던 식은 'ACI 209R-92 Code'와 유사하였고, '도로교 시방서'에서는 'CEP-FIP-1978 Model Code'의 규정을 따랐으며, 건축구조물에 적용되는 '철근콘크리트 구조 계산규준'에서는 이에 대한 구체적인 수식 규정이 없었다. 한편 1999년에 도목과 건축이 통합된 '콘크리트구조 설계기준'과 '도로교 설계기준'에서는 'CEP-FIP-1990 Model Code'의 규정을 따르고 있다. 이처럼 각 모델

식은 앞으로도 더 많은 연구와 실험을 통하여 보완되겠지만, 현 제까지 제안된 각 모델의 정확성도 판단하기 어려운 실정이다.

3.1.1 콘크리트 크리프의 영향

앞에서 언급한 여건을 고려하여, 본 연구에서는 콘크리트의 크리프 변형률의 계산식을 증첩의 원리에 근거하여 최근에 Kawano와 Warner⁽¹¹⁾가 제시한 식 (3)을 채택하였다. 여기서, 콘크리트의 크리프 계수는 시간 경과 성분(time-hardening component) $\phi_d(t, t_0)$ 와 점탄성 성분(viscoelastic component) $\phi_v(t, t_0)$ 의 합으로 표현되며, 임의의 시간단계 t 에서 각각의 성분에 대한 크리프 계수는 다음 식으로 계산된다.

$$\phi_d(t, t_0) = \frac{(t-t_0)^{-0.6}}{10+(t-t_0)^{0.6}} \cdot \phi_d^* \quad (3a)$$

$$\phi_v(t, t_0) = \left[1 - \exp\left\{-\frac{(t-t_0)}{T_v}\right\}\right] \cdot \phi_v^* \quad (3b)$$

$$\phi(t, t_0) = \phi_d(t, t_0) + \phi_v(t, t_0) \quad (4)$$

여기서,

- ϕ_d^* : 시간경화 성분의 최종 크리프 계수로서 2.0
- ϕ_v^* : 점탄성 성분의 최종 크리프 계수로서 0.4
- T_v : 일(day) 단위의 지연시간(retardation time)으로서 여기서는 100일을 적용
- $\phi(t, t_0)$: 콘크리트에 발생하는 총 크리프 변형계수

3.1.2 콘크리트 건조수축의 영향

습윤양생한 콘크리트에 발생하는 초기재령 $t_0=7$ 일과 임의의 재령 t 사이의 건조수축 변형률 $\epsilon_{sh}(t, t_0)$ 는 Branson⁽¹²⁾이 제시한 다음 식 (5)로 계산될 수 있다. 이 때, 식 (5)의 최종 건조수축 변형률은 구조물의 양생방법 및 양생기간의 환경에 따라 다소 차이는 있으나, 보통의 경우 표준상태에 대하여 800×10^{-6} 을 적용할 수 있다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{t-t_0}{35+(t-t_0)} \epsilon_{sh,u} \quad (5)$$

여기서,

- t : 재령 7일 이후의 시간 경과 일(day)
- $\epsilon_{sh,u}$: 최종 건조수축 변형률

3.2 PS 인장력의 시간 의존적 손실

프리스트레스드 콘크리트 부재에 발생하는 프리스트레스 인장력의 손실은 즉시손실과 장기손실로 구분할 수 있다. 본 연구의 목적상 즉시손실에 의한 영향은 연구대상에서 제외되므로 별도의 기술을 생략한다.

프리스트레스의 장기손실은 시간 의존적 손실(time-dependent loss)로서 콘크리트의 크리프와 건조수축 및 PS 강재의 릴랙세이션으로 인하여 발생된다. 따라서, 임의의 시간 t 일이 경과한 후 프리스트레스의 시간적 손실 $\Delta f_{bs}(t)$ 는 다음과 같이 콘크리트의 장기변형으로 인한 손실 $\Delta f_{cs}(t)$ 와 PS 강재의 릴랙세이션으로 인한 손실 $\Delta f_{R}(t)$ 의 합으로 표현된다.

$$\Delta f_{bs}(t) = \Delta f_{cs}(t) + \Delta f_{R}(t) \quad (6)$$

3.2.1 콘크리트 변형으로 인한 장기손실

콘크리트의 크리프와 건조수축으로 인하여 발생하는 초기 프리스트레스 손실량 $\Delta f_{cs}(t)$ 는 식 (2)와 식 (5)를 이용하여 다음 식 (7)로 표현된다.

$$\Delta f_{cs}(t) = E_b \cdot [\epsilon_{c,el} \cdot \phi(t, t_0) + \epsilon_{sh}(t, t_0)] \quad (7)$$

여기서,

- E_b : 긴장재의 탄성계수 (2.0×10^6 kgf/cm²)
- $\epsilon_{c,el}$: 콘크리트 탄성변형률

그런데, 긴장재 위치에서의 콘크리트의 변형률은 탄성계수비를 이용하여 콘크리트의 응력으로 표현할 수

있으므로 이를 적용하면, 인장력의 손실은 다음 식 (8)로 변환된다.

$$\Delta f_{cs}(t) = \frac{E_p}{E_c(t)} \cdot f_c \cdot \phi(t, t_0) + E_p \cdot \epsilon_{sh}(t, t_0) \quad (8)$$

식 (8)에 포함된 긴장재 위치에서의 콘크리트 응력은 다음과 같이 계산된다.

$$f_c = \left(\frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i}{I_c} e_p^2 \right) - \frac{M_d}{I_c} e_p \quad (9)$$

여기서,

A_c, I_c : 각각 콘크리트의 단면적과 단면2차모멘트

P_i : PS 강재의 초기 인장력

e_p : 콘크리트 도심으로부터 PS 강재 도심까지의 거리

M_d : 부재 자중에 의한 휨모멘트

이 때 초기 프리스트레스 인장력에 의해 발생하는 긴장재 위치에서의 콘크리트 응력과 손실이 발생된 이후에 작용하는 응력은 차이가 있게 된다. 또한, 프리스트레스의 장기손실은 각각이 서로 분리되어 발생하는 것이 아니라 상호 의존적으로 진행되기 때문에 이들의 조합된 영향을 함께 고려하여 계산하는 것이 타당하다. 따라서, 식 (9)는 초기 프리스트레스 인장력으로 인한 응력과 손실이 발생된 이후에 콘크리트에 작용하는 응력의 차이를 비교하여 그 차이가 허용치 이하가 될 때까지 반복해서 구하게 된다.

한편, 임의의 재령 t 일이 경과한 후 콘크리트의 $E_c(t)$ 는 ACI Committee 209의 기준⁽¹³⁾에 따라 다음 식 (10)으로 계산된다.

$$E_c(t) = \left[\frac{t}{\alpha + t\beta} \right]^{1/2} \cdot E_{co} \quad (10)$$

여기서,

α, β : 시멘트의 종류와 양생방법에 따라 보정계수

E_{co} : 재령 28일의 콘크리트 탄성계수

ACI의 추천에 따라 국내에 주로 사용되는 보통 포틀랜드시멘트의 경우에 $\alpha=4$ 이고, $\beta=0.85$ 을 적용할 수 있다.⁽¹³⁾

3.2.2 PS 강재의 릴랙세이션 손실

저 릴랙세이션 강재(low-relaxation steel)를 사용한 포스트텐션 부재의 릴랙세이션으로 인한 프리스트레스의 손실량 $\Delta f_R(t)$ 는 다음과 같이 Branson⁽²⁾의 식을 적용하여 계산할 수 있다.

$$\Delta f_R(t) = f_{pi} \frac{\log t}{45} \left(\frac{f_{pi}}{f_{ty}} - 0.55 \right) \quad (11)$$

여기서,

f_{pi} : PS 긴장재의 초기 인장응력 ($f_{pi} \geq 0.55f_{ty}$)

f_{ty} : PS 긴장재의 항복응력

t : 최초 인장력 도입 이후 장기손실을 계산하는 시점까지 경과된 시간(hour)

4. 예제 해석

본 연구에서 제안된 해석절차의 유용성을 확인하고, 시공단계별 시간 의존적 거동의 영향을 정량적으로 검토하기 위하여 수치예제 해석을 수행하였다. 본 해석에 사용된 프로그램은 범용 구조해석용인 SAP 2000이다.

4.1 분석대상 구조 모델

예제로 선정된 구조물은 최근에 실제 건설된 주차건물로서 기둥은 RC구조이고, 거더는 부착식(bonded) 포스트텐셔닝이 설치된 다층 PSC 구조물이다. 본 연구에서 대상으로 하는 구조모델은 이 건물의 일부 구간에 포함된 단순화된 2차원 평면구조모델이다. 작성된 해석모델은 Fig. 2에 보는 바와 같이 4경간 4층 배대구조이다.

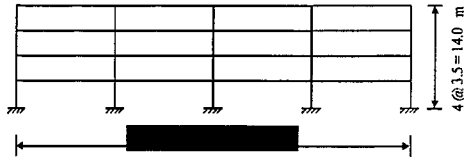


Fig. 2 구조해석 모델

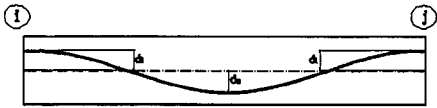


Fig. 3 PS 강재의 배치형태

Table 1 부재의 단면 특성

단면 특성 시간강성	A (m ²)	I (m ⁴)	y _t (m)	y _b (m)	비교
거더	1.290	0.040	0.24	0.36	T-형 단면
기둥	0.56	0.03	0.4	0.4	□-형 단면

기둥과 보 부재의 단면 제원은 Table 1에 나타낸 바와 같으며, 콘크리트의 설계강도는 28일 강도로서 300 kgf/cm²이다.

거더에 설치된 PS 강재는 33개의 7연선 SWPC 7B이고, 그의 배치형태는 Fig. 3과 같이 포물선형이다. Fig. 3에서 d_1 와 d_2 는 중립축으로부터 텐돈까지의 거리로서 각각 12cm와 24cm이다. 각 거더는 양 단긴장방식으로 시공된 것으로 가정하고, PS 강재 1개당 마찰손실을 고려한 평균 초기 긴장력은 17.96tonf 로 가정하였다.

4.2 순차시공의 영향 분석

다층 구조물의 순차시공이 구조응답에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 시간의 경과에 따른 PSC 구조의 시간적 거동 특성을 배제한 채, 두 가지 별도의 해석을 수행한 후 그 결과를 비교하였다. 즉, 구조물을 시공순서에 따라 각 층별로 단계별 해석한 후 각 단계별 응답을 중첩하여 구한 시공단계별 해석 결과와 기존의 실무에서 수행하고 있는 방법대로 전체 구조체에 대하여 일괄 해석한 결과를 비교하였다.

이 때, 각 층에 새하되는 하중은 콘크리트 구조물의

Table 2 시공단계별 해석과 일괄해석에 의한 단면력 비교

구조응답		해석종류	일괄 해석 (R1)	시공단계별 해석 (R2)	단면력 비 (R2/R1)
기	최상층	축력	-600.1 tf	-551.2 tf	0.92
		휨모멘트	-24.9 tf·m	-22.7 tf·m	0.91
더	최하층	축력	-492.3 tf	-570.7 tf	1.16
		휨모멘트	-22.6 tf·m	-20.3 tf·m	0.90
기	최상층	축력	-44.0 tf	-39.6 tf	0.90
		휨모멘트	10.7 tf·m	-52.1 tf·m	-
보	최하층	축력	-173.3 tf	-150.4 tf	0.87
		휨모멘트	-109.6 tf·m	-89.6 tf·m	0.82

자중과 초기 프리스트레스 인장력으로서 장기손실이 고려되지 않은 인장력이다. 비교 대상으로 선정된 응답은 최외측 기둥과 내측 거더의 경간 중앙부에 발생되는 축력과 휨모멘트이다.

Table 2에 두 해석결과 얻어진 단면력과 이들 단면력의 비, 즉 일괄해석결과에 대한 시공단계별 해석결과와의 비율 비교하였다. Table 2에서 보는 바와 같이, 부재의 위치에 따라 시공단계를 고려한 해석이 일괄 해석하는 경우에 비하여 최하층 축력의 경우(116%)를 제외하고는 82%~92%의 범위로 비교적 작게 산출되고 있음을 알 수 있다.

그러나, 최상층 기둥의 휨모멘트 값의 경우는 시공단계를 고려하면, 전체 구조체에 대하여 일괄 해석하는 경우와 부호가 역전되는 현상이 발생되며, 그 값의 변화도 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 시공단계를 고려하지 않은 구조해석 결과 얻어진 구조응답은 구조물의 실제 거동과 많은 차이가 발생하게 됨을 알 수 있다.

4.3 시간적 거동의 영향 분석

시공구간별 시간지연은 구조물의 강성과 프리스트레스 인장력에 모두 영향을 미치게 되므로 본 연구에서는 시간지연을 고려한 두 가지 해석방법에 대한 영향을 평가하였다. 그 중 하나는 프리스트레스의 시간적 손실에 의한 영향을 무시하고 단지 구조물의 강성변화만을 고려한 해석이고, 다른 하나는 시간단계별 구조물의 강성변화와 프리스트레스의 시간적 손실을 동시에 고려한 해석이다. 이에 대한 평가를 위하여 최상층

과 최하층의 외측기둥 하단과 내측 경간 거더 중앙부의 축력과 휨모멘트를 평가 대상 구조응답으로 선정하고, 각 해석방법별 이들의 단면력과 단면력 비를 함께 비교하였다. 각 구간별로 발생하는 프리스트레스의 손실을 계산하기 위해서는 앞서 논의된 바와 같이 반복 계산을 수행하게 되는데, 본 연구에서는 1%의 손실 변화량을 반복 기준으로 사용하였다.

4.3.1 강성 변화로 인한 영향 평가

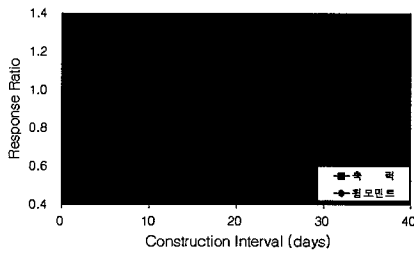
시공중에 발생하는 콘크리트 구조물의 강성 변화로 인한 영향을 평가하기 위하여 구조물의 강성변화를 고려한 시공단계별 해석결과와 강성변화를 고려하지 않은 단순 시공단계별 해석결과를 비교하였다. 여기서 강성 변화의 영향을 고려한 해석은 식 (10)으로 표현되는 콘크리트의 재령에 따른 단성계수를 적용한 해석을 의미한다.

Table 3은 시공구간별로 7일, 15일, 20일과 30일의 시간지연 간격으로 시공된 경우에 대한 두 가지 해석결과에 대한 분석이다. 이 때, 단면력 비는 Table 2에 계산된 구조물의 강성변화를 무시한 채 28일 강도와 탄

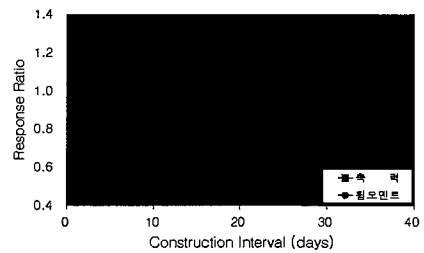
성계수를 사용한 단순 시공단계별 해석결과(R2)에 대한 강성의 변화를 고려한 해석결과(R3)의 비이다.

Table 3 강성 변화로 인한 영향 평가

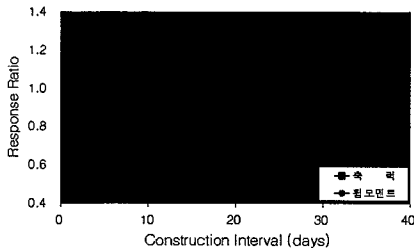
부재별 구조응답	시간간격		7일	15일	20일	30일		
단면력 (R3)	거	축력 (tf)	최상층	-549.5	-562.5	-562.6	-562.7	
			최하층	-572.3	-583.4	-583.3	-583.2	
	더	휨모멘트 (tf·m)	최상층	-22.7	-23.6	-23.6	-23.6	
			최하층	-20.2	-22.3	-22.3	-22.3	
	등	거	축력 (t)	최상층	-39.5	-40.7	-40.7	-40.7
				최하층	-149.8	-157.0	-157.0	-157.0
더		휨모멘트 (tf·m)	최상층	-55.0	-43.0	-42.7	-42.6	
			최하층	-51.8	-60.6	-60.6	-60.7	
단면력 비 (R3/R2)	거	축력	최상층	1.00	1.02	1.02	1.02	
			최하층	1.00	1.02	1.02	1.02	
	더	휨모멘트	최상층	1.00	1.04	1.04	1.04	
			최하층	1.00	1.10	1.10	1.10	
	기	거	축력	최상층	1.00	1.03	1.03	1.03
				최하층	1.00	1.04	1.04	1.04
등		휨모멘트	최상층	1.06	0.83	0.82	0.82	
			최하층	0.58	0.68	0.68	0.68	



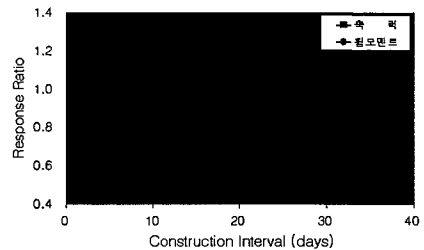
(a) 최상층 거더



(b) 최하층 거더



(c) 최상층 기둥



(d) 최하층 기둥

Fig. 4 강성 변화로 인한 구조응답의 변화

분석결과, Fig. 4에서 보는 바와 같이 PSC 구조물의 시공단계별 해석에서 시간지연에 따른 강성의 변화만을 고려하는 경우, 단순 시공단계별 해석에 비하여 거더의 축력 및 휨모멘트와 기둥의 축력에 대한 구조응답이 시일이 경과하면서 변화량이 약간씩 증가되어 최대 10% 정도 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 재료적 강성이 탄성계수에 지배되고 탄성계수는 시간의 경과에 따라 점차 커지는 영향으로 판단된다.

그러나, 기둥의 휨모멘트를 보면 최하층 기둥의 경우에는 순차시공으로 인하여 오히려 약 58%~68% 정도 감소되고, 최상층 기둥의 경우에는 약 6% 정도 크게 혹은 약 18% 정도 작게 계산된다. 이는 기둥의 휨모멘트가 시공의 진행에 따라 구조물 자중과 구조적 휨감성에 더 지배적이기 때문인 것으로 판단된다.

4.3.2 구조물 강성변화와 프리스트레스의 손실로 인한 영향 평가

PSC 다층 구조물의 시공구간별로 시간의 경과와 함께 진행되는 구조물의 강성 변화와 프리스트레스의 시간적 손실로 인한 복합적 영향을 평가하기 위하여,

Table 4 프리스트레스의 시간적 손실과 구조물 강성변화의 영향 평가

부재별 구조응답		시간간격		7일	15일	20일	30일
		축력	휨모멘트				
단면력 (R4)	거	축력 (tf)	최상층	547.7	560.5	560.3	559.9
			최하층	-535.4	-531.4	-525.8	-517.1
	더	휨모멘트 (tf·m)	최상층	-22.6	-23.5	-23.5	-23.5
			최하층	-15.1	-15.3	-14.6	-13.7
	기둥	축력 (tf)	최상층	-39.4	-40.5	-40.5	-40.4
			최하층	-149.4	-156.8	-156.8	-146.7
		휨모멘트 (tf·m)	최상층	-56.9	-45.3	-41.0	-40.5
			최하층	-42.3	-47.6	-50.3	-44.8
단면력 비 (R4/R3)	거	축력	최상층	1.00	1.00	1.00	1.00
			최하층	1.00	1.00	1.00	0.99
	더	휨모멘트	최상층	0.94	0.91	0.90	0.89
			최하층	0.75	0.69	0.66	0.61
	기둥	축력	최상층	1.00	1.00	1.00	0.99
			최하층	1.00	1.00	1.00	1.00
		휨모멘트	최상층	1.04	1.05	0.96	0.95
			최하층	0.82	0.79	0.83	0.74

시하중과 프리스트레스 인장력에 의한 구조응답 및 프리스트레스 인장력의 손실에 의한 구조응답을 각 시공 단계별로 각각 계산하고, 식 (1)에 의해 중첩함으로써 전체 구조계의 응답을 계산하였다.

이 때 시간적 변화의 기간 설정은 비교적 장기간으로 하는 것이 바람직하지만, 본 연구에서는 단계별 시공기간의 영향과 단순비교를 위해 시공단계별 기간과 동일하게 설정하였다.

Table 4는 시공단계별 시간적 손실과 강성변화를 모두 고려한 해석결과에 대한 분석으로서 표에서 단면력 비는 강성의 변화만을 고려한 해석결과(R3)에 대한 구조물의 강성 변화와 프리스트레스의 시간적 손실의 영향을 함께 고려한 해석결과(R4)의 비이다.

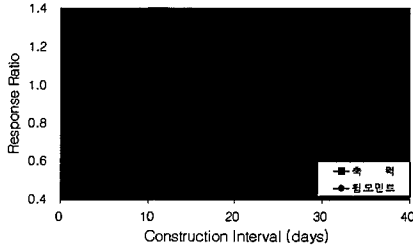
Table 4와 Fig. 5로부터 구조물의 강성변화와 프리스트레스의 시간적 손실 영향을 동시에 고려하는 경우, 구조물 강성만을 고려하는 경우에 비해 부재 종류에 관계없이 축력에서는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 휨모멘트는 다소 감소되며, 특히 최하층의 경우는 61%~83% 정도로 크게 감소되고 있다.

이로써 프리스트레스의 시간적 손실로 인해 단면력이 전반적으로 감소되고, 특히 축력보다 휨모멘트의 감소에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 PS강재 인장력 변화의 영향이 축력보다는 휨모멘트에 크게 미치기 때문인 것으로 판단된다.

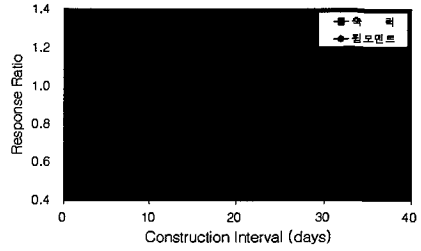
4.4 순차시공과 시간적 거동의 영향 평가

PSC 다층 구조물의 시공단계에서 순차적 시공의 영향과 프리스트레스의 시간적 손실 및 구조물의 강성 변화 영향을 종합 평가하기 위하여, 시간적 거동을 고려한 해석결과(R4)를 일괄해석결과(R1) 및 시공단계별 해석결과(R2)와 구분하여 비교하였다.

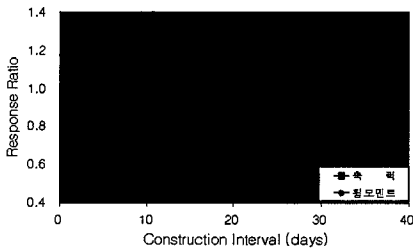
그 결과를 나타낸 Table 5와 Fig. 6에 의하면, 구조물의 시간적 거동 영향을 모두 고려한 해석 결과(R4)가 기존의 단순 일괄해석(R1)에 비해 기둥 최상층의 휨모멘트에서 부하가 반전되고, 거더나 기둥의 최하층 휨모멘트가 39~68% 정도로 극히 작은 단면력을 보여주지만, 그 외의 경우는 대부분의 경우 86~109% 정도로 비교적 작은 단면력을 보여주고 있다.



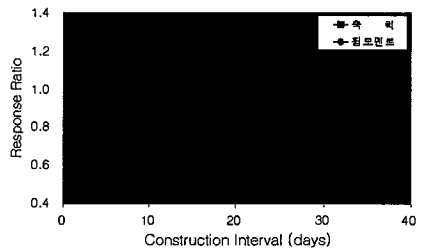
(a) 최상층 거더



(b) 최하층 거더



(c) 최상층 기둥



(d) 최하층 기둥

Fig. 5 프리스트레스의 시간적 손실과 구조물의 강성 변화로 인한 구조응답의 변화

Table 5 순차시공과 시간적 거동의 영향 평가

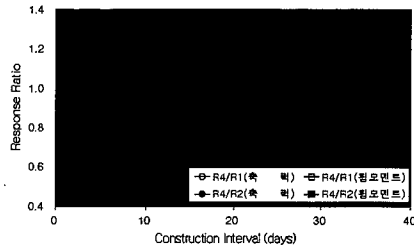
부재별 구조응답		시간간격		7일	15일	20일	30일	
		속력 (tf)	휨모멘트 (tf·m)					
단면력비 (R4/R1)	거	최상층	0.91	0.93	0.93	0.93		
		최하층	1.09	1.08	1.07	1.05		
	더	최상층	0.91	0.94	0.94	0.94		
		최하층	0.67	0.68	0.65	0.61		
	기둥	속력 (tf)	최상층	0.90	0.92	0.92	0.92	
			최하층	0.86	0.90	0.90	0.90	
		휨모멘트 (tf·m)	최상층	-5.31	-4.23	-3.82	-3.77	
			최하층	0.39	0.43	0.46	0.41	
단면력비 (R4/R2)	거	속력	최상층	0.99	1.02	1.02	1.02	
		최하층	0.94	0.93	0.92	0.91		
	더	최상층	0.99	1.04	1.03	1.03		
		최하층	0.75	0.75	0.72	0.67		
	기둥	속력	최상층	0.99	1.02	1.02	1.02	
			최하층	0.99	1.04	1.04	1.04	
		휨모멘트	최상층	1.09	0.87	0.79	0.78	
			최하층	0.47	0.53	0.56	0.50	

한편 구조물의 시간적 거동 영향을 모두 고려한 해석 결과(R4)를 순차적 시공단계 해석결과(R2)와 비교할 경우 위와 유사한 경향을 나타내지만 전반적으로 다소 큰 값을 보여주고 있다. 즉 구조물의 시간적 거동을 모두 고려한 경우가 시공단계를 고려한 경우에 비해 거더나 기둥 최하층의 휨모멘트는 47~75% 정도로 상당히 작게 나타나고 있고, 그 외의 경우는 78~109% 정도로 비교적 작게 나타나고 있으나, 전반적으로는 (R4/R1)에 비해 약간씩 크게 나타나고 있다.

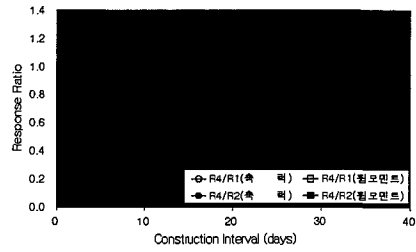
이들 결과들은 다층 PSC구조물 해석시 시간적 거동의 영향을 고려해야 함을 의미하며, 특히 기둥의 경우는 순차시공의 영향과 시간적 거동에 의한 영향이 크므로 해석시 이들의 영향을 모두 고려하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

5. 결론

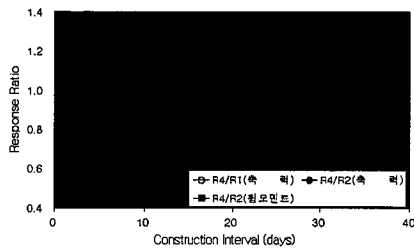
본 연구에서는 순차시공의 영향과 시간적 거동의 영향을 고려한 PSC 다층 구조물의 시공단계별 해석결과를 수립하고, 수치 예제 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



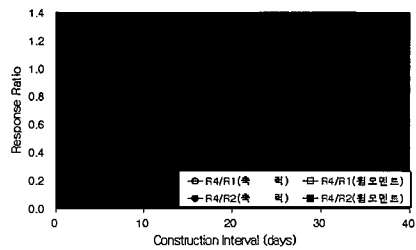
(a) 최상층 거더



(b) 최하층 거더



(c) 최상층 기둥



(d) 최하층 기둥

Fig. 6 시공단계별 해석시 시간적 거동의 구조응답 변화

- 1) 본 연구에서 제안된 해석절차는 시공 구간별 시간차를 두고 건설되는 PSC 다층 구조물의 순차 시공으로 인한 영향을 고려한 해석에 적용할 수 있으며, 실무 수준에서 쉽게 적용이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 순차 시공단계를 고려한 해석이 전체 구조체를 일괄 해석하는 경우에 비해서 일부를 제외하고는 단면력이 82%~92% 정도로 비교적 작게 산출됨을 알 수 있었다.
- 3) 구조물의 강성변화를 고려한 단면력 결과가 고려하지 않은 경우에 비해서 기둥의 휨모멘트를 제외하고는 재량이 커짐에 따라 약간씩 증가하여 10%까지 커진 반면, 구조물의 강성변화와 프리스트레스의 시간적 손실의 영향을 함께 고려한 경우는 강성변화만 고려한 경우에 비해 축력에서는 큰 차이가 없었으나 휨모멘트는 61%~105% 정도로 비교적 작은 단면력이 나타났다.

- 4) 다층 혹은 여러 구간으로 분리되어 순차 시공되는 PSC 다층 구조물의 시공단계별 해석에서는 구조물의 시공단계별 재하 영향과 강성변화 및 프리스트레스의 변화를 모두 고려한 해석이 요구되며, 특히 기둥의 단면력에 많은 변화가 예상되므로 구조물의 재평가 혹은 진단 시에 이에 대한 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김생빈, "장대교량과 고강도 및 고성능콘크리트 적용", 대한토목학회지, 제42권 제5호, 1994, pp. 95-109.
2. 박효경, "철근콘크리트와 프리스트레스트 콘크리트 보의 시간 의존적 서동해석", 구조공학, 대한토목학회논문집, 제14권, 제1호, 1994, pp. 1-12.
3. 심중성, 배인환, 김정구, "장경간 PSC-I형 거더 설계를 위한 해석적 연구", 구조공학, 대한토목학회 논문집, 제19권, 제1-4호, 1999, pp. 581-590.
4. 박효경, 서영재, "시공단계를 고려한 콘크리트 프레임

- 구조물의 해석”, 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제2호, 1999, pp. 171-184.
5. 이태규, 김진근, 송진규, “시공단계를 고려한 철근콘크리트 고층건물 기둥의 부등축소량 해석”, 콘크리트학회지, 제11권, 제1호, 1999, pp. 99-107.
 6. 박찬민, 강영진, “시공단계를 고려한 곡선변단면 프리스트레스트 콘크리트 박스거더교량의 해석”, 구조공학, 대한토목학회논문집, 제14권, 제1호, 1994, pp. 71-81.
 7. 이재석, 강영진, “시공단계를 고려한 프리스트레스트 콘크리트 사장교의 비선형 해석”, 구조공학, 대한토목학회 논문집, 제14권, 제1호, 1994, pp. 49-62.
 8. MIDAS, MIDAS GENw, “Analysis & Design”, 주식회사 포스마이다스, 1999.
 9. Zapata, M. A. and Bazant, Z. P., “Creep Deflections in Slab Buildings and Forces in Shores during Construction,” ACI Journal, Vol. 83, No. 5, 1986, pp. 719-726.
 10. Ghali, A. and Favre, R., Concrete Structures: Stress and Deformations, 2nd. Ed., E & FN Spon, 1994.
 11. Kawano, A., and Warner, R. F., “Model Formulations for Numerical Creep Calculations for Concrete”, J. Structural Engineering, ASCE, 122(3), 1996, pp. 284-290.
 12. Branson, D. E., Deformation of Concrete Structures, McGraw-Hill, 1977, New York.
 13. American Concrete Institute Committee 209, “Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, 209R-92, ACI, 1992, Detroit, Michigan.

(접수일자 : 2001년 6월 4일)