

철근콘크리트와 프리스트레스트 콘크리트 보의 시간의존적 거동해석

Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Beams

곽 효 경*

Kwak, Hyo Gyoung

Abstract

This paper deals with the time-dependent analysis of reinforced and prestressed concrete beams. Based on the age-adjusted effective modulus method, the structural behavior in accordance with time is analyzed using the force equilibrium and strain compatibility condition within a typical section. Unlike most of presented approaches adopting some assumptions, such as non-cracking of concrete and consideration of steel effect as a transformed concrete area only, more accurate results can be obtained at all loading conditions since all materials are considered together so as to be maintained their given properties and the cracking effect is included at the same time. Several parameter studies are conducted with the objective to identify the significance of various effects on the time-dependent response of concrete members, *i.e.*, stress re-distribution of each material and occurrence of long-term deflection, etc. Moreover, the obtained results can be used at design and/or construction stage for the purpose of more accurate prediction of structural response with time.

요 지

본 논문은 철근콘크리트와 프리스트레스트 콘크리트 보의 시간의존적 거동해석에 관한 내용으로 재령-보정 유효 탄성계수법에 토대를 두고 단면 내 힘의 평형관계와 변형의 Compatibility 조건을 사용한 반복해석을 통해 부재의 거동을 파악하였다. 콘크리트의 전 단면이 유효하고 부재가 선형 탄성체로 거동하며 강재의 효과는 단지 환산단면적 개념에 따라 해석시 강성만으로 보정되는 기존의 해석방법과는 달리 모든 재료가 고유의 성질을 유지할 수 있도록 함께 고려하며 균열의 영향도 동시에 고려함으로써 모든 하중조건에서 보다 정확한 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 특히 예제해석을 통해 시간에 따른 각 재료의 응력 재분배, 장기처짐의 발생 등 시간의존적 거동에 영향을 미치는 여러 인자의 비교 검토와 균열의 영향분석을 하였으며 설계시 보다 정확하고 합리적으로 이들의 효과를 고려할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

프리스트레싱을 가하지 않은 콘크리트 구조물의

* 정회원 · 삼성건설 기술연구소 선임연구원

경우 일반적으로 사용하중 작용시 균열과 과도한 처짐으로 인해 종종 사용상의 문제가 유발된다. 특히 구조물이 장대화되고 시공속도가 빨라짐에 따라 시간에 따른 콘크리트 재료특성의 변화를 고려한 설

계와 시공의 필요성이 증대되고 있으며 그 일환으로 부재에 부분적 또는 완전한 프리스트레싱을 가해 구조물의 처짐이나 균열 등 사용성의 문제를 해결하고 보다 경제적인 시공을 하려고 하는 노력이 모든 구조물에 폭넓게 시도되어 오고 있다. 일반적으로 긴장력에 의한 콘크리트 단면의 압축력은 무근 콘크리트 단면을 기준으로 산정하며 크리이프와 건조수축, 응력이완 등 시간에 따른 긴장재 응력의 손실량은 정량적인 계산식 또는 설계기준에서 명시하고 있는 관계식을 이용하여 산정한 후 이를 토대로 선형탄성 해석 후 발생한 변위장을 기준으로 하여 시간에 따른 장기처짐과 단면 내 응력의 재분배를 각각 산정하고 있다. 그러나 이러한 일련의 계산과정에서 철근의 효과가 무시된 관계로 해석결과가 실제 거동과는 상당한 차이가 발생할 수 있으며 경우에 따라서는 시공시나 사용하중 작용시 문제점을 유발시킬 수 있다. 특히 단면 내에 균열이 발생할 경우 균열부분에서는 시간의 변화에 따른 재분배되는 응력을 포함한 더이상의 인장응력에 저항할 수 없는 관계로 크리이프와 건조수축 등 시간의존적 거동이 더욱 복잡하게 나타난다. 또한 부재의 상부와 하부가 각각 성질이 전혀 다른 철골과 콘크리트의 복합구조물이 될 경우도 실제 거동과 큰 차이가 발생할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하고 시간의존적 변화를 보다 정확히 예측하기 위해 해석시 철근의 영향을 고려하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 이러한 추세는 계속 증가할 전망이다. 그러나 현재까지의 연구는 대부분 균열이 발생하지 않은 선형탄성 상태에서의 시간의존적 해석에 국한되어져 있었으며^(1,2) 근자에는 균열단면의 거동해석이 부분적으로 진행되고 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 시간에 따른 재료의 변형과 구조체의 거동을 계산하기 위해 재령-보정 유효 탄성계수법(Age Adjusted Effective Modulus Method)에 토대를 둔 변형률의 개념을 사용하여 프리스트레스트 콘크리트와 철근콘크리트 보의 시간의존적 거동을 해석하였으며 해석시 철근의 효과와 균열의 효과를 고려함으로써 임의의 하중상태에서 보다 개선된 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 특히 PS 콘크리트 부재의 경우 각 시방서에서 크리이프와 건조수축에 의한 텐던의 정량적인 손실량 계산에 의존하지 않고

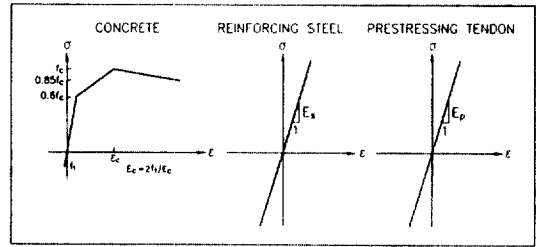


그림 1. 각 재료의 응력-변형률 관계.

콘크리트와 철근, 텐던의 효과를 동시에 고려하여 임의의 단면에서 힘의 평형관계와 변형률의 적합성(Compatibility)으로부터 각 재료의 변형을 산정하므로 보다 정확한 단면 내의 변형과 처짐 등 사용하중하에서의 거동을 예측할 수 있도록 하였다. 나아가 구조물의 거동에 영향을 미치는 철근비, 단면 형태, 경계조건, 하중조건 등 여러 인자의 비교, 분석을 통해 변형에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 분석하고 각 재료의 시간 변화에 따른 응력 재분배율을 검토함으로써 설계 또는 시공시 사용성의 검토와 여러 인자의 변화에 따른 구조물의 거동을 예측하여 이에 적절히 대응할 수 있도록 도모하였다.

2. 각 재료의 응력-변형률 관계

부재의 시간의존적 거동을 파악하기 위해 콘크리트 단면을 여러개의 층으로 나누는 층상모델(layered model)을 사용하였으며 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Hognestad⁽⁴⁾가 제안한 모델의 압축축 응력-변형률 관계를 선형으로 단순화시킨 수정된 모델을, 작용하중이 그다지 크지 않은 사용하중을 기준으로 삼았으므로 단순화를 위해 철근과 긴장재는 선형탄성체의 모델을 각각 사용하였다(그림 1 참조). 그밖에 콘크리트 구조물의 해석시 채택하고 있는 다음과 같은 일반적인 가정을 사용하였다: (1) 변형률은 중립축으로부터 선형으로 변화한다; (2) 철근과 콘크리트는 완전부착(perfect bond)을 유지한다; (3) 콘크리트는 인장강도에 도달하면 균열이 발생한다. 본 연구에서는 해석의 편의상 사하중과 상재하중이 작용할 시의 초기 탄성상태와 작용하는 하중에 의한 시간의존적 변형상태 및 일정시간 경과 후에 활하중이 작용할 시 거동상태의 크게 3부분으로 구분하였으며 각 영역에서의 변형상태는 다음

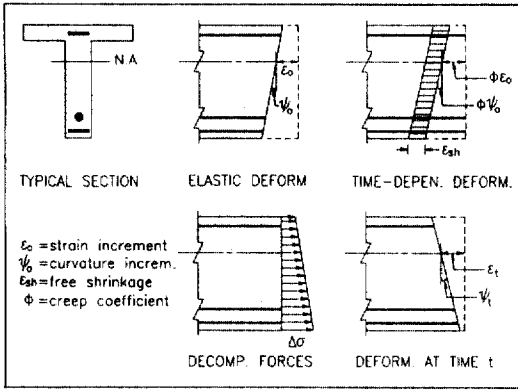


그림 2. 각 해석단계에서의 변형률.

과 같다(그림 2 참조).

2.1 초기 탄성거동

텐던력과 사하중 및 상재하중에 의해 임의의 단면에 작용하는 축력과 모멘트를 각각 N_e , M_e 라고 하면 이 부재력에 의해 단면 내에는 변형이 유발되며 그 관계는 다음 식 (1)과 같다.

$$\epsilon_y = \epsilon_0 + \psi_0 y \quad (1)$$

여기서 ϵ_0 = 콘크리트 단면내 임의의 기준점에서의 변형률을, ψ_0 = 변형률의 기울기로서 단면의 곡률, y = 임의의 기준점으로부터의 거리를 각각 나타낸다.

이때 발생한 응력에 의한 단면력 N_i , M_i 는 식 (2), (3)에 의해 산정하며 작용하는 외력 N_e , M_e 와 단면력 N_i , M_i 의 평형관계로부터 단면내의 최종 변형률을 산정하게 된다(그림 3 참조).

$$N_i = \int \sigma(\epsilon_y) dA = \sum \sigma_c(\epsilon_y) b_y d_y + \sum \sigma_s(\epsilon_y) A_{sy} \quad (2)$$

$$M_i = \int y \sigma(\epsilon_y) dA = \sum \sigma_c(\epsilon_y) y b_y d_y + \sum y \sigma_s(\epsilon_y) A_{sy} \quad (3)$$

여기서 b_y , d_y , A_{sy} 는 중립축으로부터 거리 y 에서의 단면의 폭, 깊이의 증분, 철근의 단면적을 각각 의미한다.

2.2 시간의존적 거동

콘크리트 부재의 변형은 크리이프와 건조수축의 영향으로 시간이 경과함에 따라 계속해서 발생하게 되며 크리이프와 건조수축에 의한 영향은 상호 관련성을 유지하나 일반적으로 이를 분리하여 고려하

고 있다. 수치해석 상으로 시간에 다른 콘크리트의 변형을 고려하기 위해 다양한 수치해석 모델이 사용되어 지는데 일반적으로 유효 탄성계수법(Effective Modulus method)이 널리 사용되어진다. 그러나 이 모델은 시간영역 $[t_0, t]$ 에서의 변형을 유발시키는 응력이 시간 t_0 에서 작용하여 응력의 크기에 변함이 없이 계속 유지된다는 가정을 포함하고 있으므로 이의 문제점을 극복하고 시간에 따른 응력의 점진적 증가효과를 고려하기 위해 Bazant⁽⁶⁾가 시간개념을 도입하여 재령-보정 유효 탄성계수법(Age Adjusted Effective Modulus method)을 제안하였는데 이 모델을 사용하면 임의의 시간 $[t_0, t]$ 에서의 콘크리트 변형을 증분은 다음 식 (4)로 표현된다. 특히 이 모델에서 재령계수 χ 는 하중이 작용하는 시간의 함수로써 크리이프 계수의 값이 1.5와 3.0 사이의 값을 갖으며 t_0 가 5일 이상인 경우 일반적으로 한 계값 0.82를 큰 문제없이 사용할 수 있다는 것이 널리 알려진 사실이므로 본 연구에서는 0.8의 고정 값을 사용하였다.⁽³⁾

$$\Delta \epsilon(t, t_0) = \Delta \sigma(t, t_0) / E_{eff}(t, t_0) \quad (4)$$

$$E_{eff}(t, t_0) = E(t_0) / (1 + \chi \phi) \quad (5)$$

여기서 ϕ = 크리이프계수(도로교 표준시방서(1986) 참조)

즉 시간영역 $[t_0, t]$ 에서 야기되는 변형은 식 (4)의 관계를 유지하며 콘크리트의 강성은 식 (5)로 표시될 수 있다. 나아가 임의의 시간 t 에서의 변형률은 식 (6)으로 정리되며 수치해석상의 편의를 위해 근사식이긴 하나 건조수축과 크리이프 변형사이에 비례 관계가 있다고 가정하면⁽³⁾ 시간영역 $[t_0, t]$ 에서의 응력증분 $\Delta \sigma$ 는 선형-탄성인 경우 식 (7)로, 비선형인 경우 변형률의 함수로 표현되는 응력의 관계식을 이용하여 식 (8)로 각각 표현할 수 있다.

$$\epsilon_t = \epsilon_{elastic} + \epsilon_{cr} + \epsilon_{sh} = \epsilon_{elastic} + \phi \epsilon_{elastic} + \epsilon_{sh} \quad (6)$$

$$\Delta \sigma = E_{eff}(\phi \epsilon_{elastic} + \epsilon_{sh}) = E_{eff} \epsilon_t - E_{eff} \epsilon_{elastic} \quad (7)$$

$$\Delta \sigma = \sigma(\epsilon_y) / (1 + \chi \phi) - \sigma_0 / (1 + \chi \phi) \quad (8)$$

따라서 이러한 시간의존적인 추가 변형으로 인해 정정 구조물 일지라도 단면내의 응력은 시간의 경과에 따라 변화가 일어나게 되며 이러한 변형에 의한

가상의 구속응력은 식 (7)의 유추를 통해 식 (9)로 표현할 수 있다. 또한 이러한 구속응력에 의해 야기되는 단면력의 변화는 식 (10)~식 (13)으로 정리된다. 이때 시간의존적 거동은 콘크리트만의 효과이므로 계산에서 철근과 긴장재의 영향은 무시한다.

$$\Delta\sigma_{\text{restraint}} = -E_{\text{eff}}[\phi\epsilon_{\text{elastic}} + \epsilon_{\text{sh}}] \quad (9)$$

$$\Delta N_{\text{creep}} = -\phi/(1+\chi\phi)\int\sigma(\epsilon_{\text{elastic}})dA_c \quad (10)$$

$$\Delta M_{\text{creep}} = -\phi/(1+\chi\phi)\int y\sigma(\epsilon_{\text{elastic}})dA_c \quad (11)$$

$$\Delta N_{\text{sh}} = -E_{\text{eff}}\epsilon_{\text{sh}}A_c \quad (12)$$

$$\Delta M_{\text{sh}} = -E_{\text{eff}}\epsilon_{\text{sh}}\int ydAc \quad (13)$$

프리스트레스트 콘크리트 부재의 경우는 시간영역 $[t_0, t]$ 에서 긴장재의 이완에 의해 추가적인 손실이 유발되며 이 영향은 시간과 초기 긴장력의 함수로 표현할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 단순화를 위해 일정한 값의 손실량으로 고정시켰으며 이에 따른 단면력의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta N_{\text{relaxation}} = \sum(A_{ps}\Delta\sigma_{pr}) \quad (14)$$

$$\Delta M_{\text{relaxation}} = \sum(A_{ps}y_{ps}\Delta\sigma_{pr}) \quad (15)$$

위의 식 (10)~식 (15)를 토대로 시간영역 $[t_0, t]$ 에서의 단면력의 변화는 크리이프, 건조수축, 긴장재의 응력이완에 의한 단면력의 합으로 나타낼 수 있다. 나아가 계산된 동일한 크기의 단면력을 반대 방향으로 작용시킴으로써 가상의 구속력을 제거할 수 있으며 이로 인한 시간의 경과에 따른 부재의 변화량을 산정할 수 있다(그림 3 참조). 가상의 구속력에 의해 각 재료의 응력증분을 산정하면 시간 t 에서의 응력을 산정하게 되는데 참고로 임의의 시간에서 콘크리트의 응력은 다음과 같이 결정된다.

$$\sigma_c(t) = \Delta\sigma_{\text{restraint}} + \sigma_0 + \Delta\sigma \text{ (식 (8))} \quad (16)$$

2.3 활하중 작용시의 거동

시간 t 에서 다시 활하중이 추가로 작용할 경우 이의 해석은 시간에 따른 재료상수의 효과를 고려하는 것 외에는 초기 탄성상태의 해석과 동일한 과정을 따른다. CEP-FIP(1978) 규준에서는 이의 효과를 고려하기 위해 다음의 관계식을 제안하고 있

으며 본 연구에서도 이를 고려하여 해석을 수행하였다.

$$f_{cy}(t)/f_{inf} = 1/1.276[t/(4.2 + 0.85t)]^{3/2} \quad (17)$$

$$E(t) = E_{28}[t/(4.2 + 0.85t)]^{1/2} \quad (18)$$

특히 시간 t 에서의 단면이 선형 탄성상태라 할지라도 하중이 작용할 경우 부재에 균열과 과도한 비선형성이 나타날 수 있으며 이로 인한 수치해석상의 불안전성(unstability)이 유발될 수 있다. 이러한 현상은 부재 내에 균열을 허용하는 부분 프리스트레스트 부재나 철근콘크리트 부재에서 현저하게 나타나는데 이를 극복하기 위해 시간 t 에서 임의의 단면에 존재하는 콘크리트 응력을 소거할 수 있는 부재력(decompression force)과 그 여분의 외력 $(\Delta N_{\text{ext}}, \Delta M_{\text{ext}})$ 으로 분리하여 작용시키는 것이 바람직하며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta N_{\text{decom}} = -\int\sigma(t) dA_c \quad (19)$$

$$\Delta M_{\text{decom}} = -\int y\sigma(t) dA_c \quad (20)$$

3. 해석단계

3.1 해석과정

탄성영역, 시간의존영역 및 활하중이 작용하는 영역에서의 작용하중 N, M 이 결정되면 이 하중에 의한 임의 부재단면에서 축력과 모멘트에 의한 힘의 평형관계를 동시에 만족시키는 변형 ϵ 과 ψ 를 각각 산정하게 된다. 만약 콘크리트의 전 단면이 균열이 없는 유효단면인 동시에 응력이 중립축으로부터 선형으로 변화한다고 가정하면 각 영역에서의 단면상수인 단면적, 단면 1차 모멘트, 단면 2차 모멘트를 산술적으로 계산할 수 있다.⁽³⁾ 그러나 하중이 과도한 경우 응력이 선형으로 변화하지 않으며 동시에 전 단면이 유효하지도 않다. 따라서 응력이 선형으로 변화한다는 가정에 토대를 둔 정량적인 관계식에 의한 계산식의 적용은 한계가 있으므로 응력-변형률 관계의 비선형성을 고려할 경우는 반복계산에 의해 변형률을 산정해야 한다. 먼저 변형률의 기울기인 곡률을 가정한 후 주어진 곡률에 대해 단면의 연직력이 평형을 이루는 변형률을 반복해석을 통해 결정한다. 결정된 변형률과 곡률을 토대로 휨 모멘

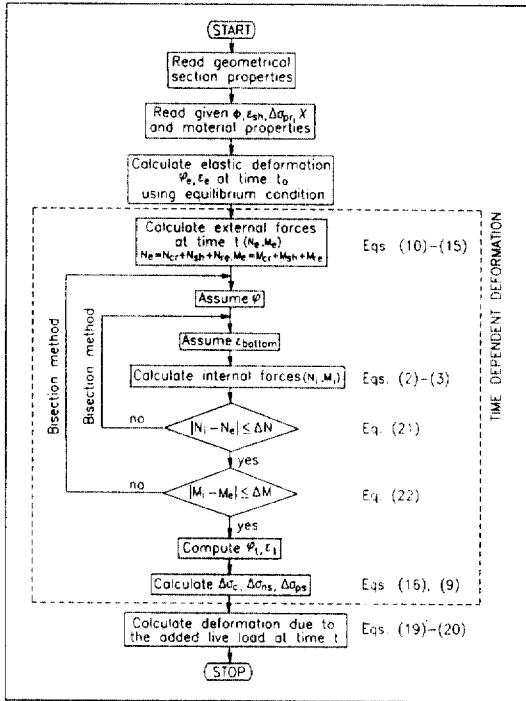


그림 3. 해석의 흐름도.

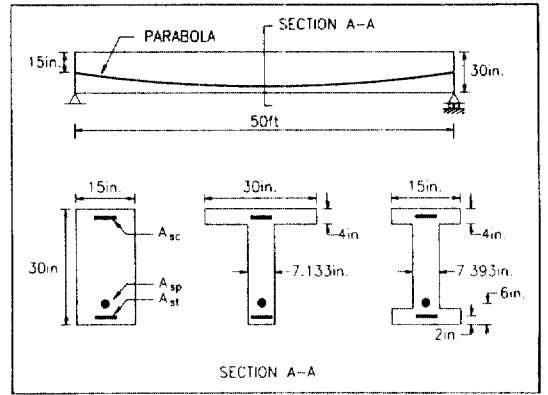


그림 4. 예제 구조물의 형상.

순보 또는 연속보에서 그다지 큰 오차없이 적용이 가능하다. 위의 변형률을 산정할 경우 각 영역에서 균열단면과 비균열 단면에 의한 효과 즉 Tension-Stiffening 효과를 포함하여 처짐을 보다 정확히 계산할 수 있으며 양단에서의 변형에 의한 효과를 무시하고 중앙부의 변형에 관련된 항만을 고려함으로써 기본계산 과정에서 간략식으로 사용이 가능하다.⁽⁶⁾

4. 예제해석

4.1 예제의 형상

콘크리트 구조물의 시간의존적 거동을 파악하기 위해 사용한 부재는 그림 4에 나타낸 바와 같이 지간이 50ft(15.24 m)인 1경간 보로서 긴장재의 영향을 고려할 경우 긴장재는 양단에서 편심이 없고 보의 중앙부에서 6 in.(15.24 cm)의 편심을 유지하는 포물선 배근으로 가정하였다. 특히 단면에 따른 거동의 비교 분석을 위해 직사각형, T-형, I-형의 3가지 단면형태를 사용하였으며 콘크리트 구조물의 시간의존적 거동이 표면적의 비율에 따라 차이를 보이는 하나 예제 구조물이 휨부재인 관계로 사용 단면 모두 양단에서 강재까지의 거리가 동일하며 일정한 높이와 콘크리트 단면 도심에서의 단면 2차 모멘트값이 동일하도록 각 단면의 폭과 두께를 각각 결정하였다. 각 경우에 대한 예제결과의 비교, 분석을 위해 처짐과 이에 따른 휨 모멘트가 크게 작용하는 부재의 중앙단면을 기준단면으로 삼았으며 모든 예제에서 공통적으로 사용한 재료상수는 다음 표

트의 평형을 검토하여 허용오차 이상의 차이가 발생할 경우 곡률을 새로이 가정하여 두 힘의 성분인 축력과 모멘트가 동시에 평형조건을 만족할 때까지 이를 반복적으로 수행한다(식 (21), (22) 참조). 시간의존적 거동을 검토하기 위해 본 연구에서 수행한 해석과정을 정리하면 그림 3과 같다.

$$N_i = N_e \pm \Delta N \quad (21)$$

$$M_i = M_e \pm \Delta M \quad (22)$$

3.2 변위의 산정

임의의 위치에서 부재의 변위는 가상일의 원리 또는 구조해석에 의한 축방향 변형률과 곡률을 이용하여 산정할 수 있으며 그 대표적인 약산법은 중앙부 연직처짐에 대해 식 (23)으로 표현할 수 있다.

$$\Delta\delta = l^2/96(\Delta\psi_1 + 10\Delta\psi_2 + \Delta\psi_3) \quad (23)$$

여기서 1, 2, 3은 부재의 왼쪽 끝단, 중앙부, 오른쪽 끝단의 위치를 각각 나타내며 이 관계식은 곡률과 축방향 변형률이 부재의 길이를 따라 포물선으로 분포한다는 가정에 토대를 두고 산정된 것으로 단

표 1. 공통적인 재료상수 (단위 : ksi)

E_s	E_p	E_c	f_c	f_t
29000	27000	$E_{28}[t/(4.2 + 0.85t)]^{1/2}$	4.0	0.4

(1 ksi = 70.306 kg/cm²)

1에 정리하였고 콘크리트의 크리이프 계수, 건조수축률 등은 도로교 표준시방서(1986)에 따르며 그밖의 변화되는 재료상수는 각 예제에서 언급하기로 한다. 또한 기존의 다른 방법에 의한 예제해석 결과⁽¹⁾와 비교, 검토를 통해 먼저 본 논문에서 언급한 이론 전개과정과 이에 따른 프로그램의 정확성을 검증하였다.

4.2 단면의 형상에 따른 거동

본 예제에서 사용한 단순지지보 부재의 긴장력은 300 kips(136 tons), 초기에 작용하는 사용하중은 0.5 kips(7.44 kg/cm)의 등분포 하중으로 하였으며 시간 t 경과 후 다시 1.0 kips/ft(14.88 kg/cm)의 활하중이 작용하는 것으로 하였다. 상단 및 하단에 위치한 철근은 동일한 양을 사용하였으며 각 단의 철근비 (A_s/bh)는 직사각형단면을 기준으로 하여 산정한 값이므로 결과의 정리에서 사용한 철근비는 각 단면의 정확한 철근비가 아니고 단지 동일한 철근량을 의미한다. 또한 임의의 시간 t 에서의 크리이프 계수는 3.0, 건조수축률은 -0.0003 in/in(cm/cm), 응력이완에 의한 긴장재응력의 손실량은 시간의 경과에 따라 변화하며 콘크리트의 크리이프, 건조수축 및 초기 긴장재응력에 의해 영향을 받으나 본 논문은 콘크리트의 크리이프와 건조수축의 영향에 초점을 맞춘 관계로 해석의 편의상 시간 1년을 기준으로 하고 초기 긴장력을 항복강도의 80%로 작용시키는 경우를 기준으로 하여 초기 긴장력의 6.6%에 해당하는 고정값을 사용하였다.

그림 5에 나타난 바와 같이 처짐의 변화는 구형과 I-형 단면이 유사한 거동을 보이는 반면 T-형 단면이 다른 두 단면에 비해 시간의존적 처짐량이 크게 나타남을 알 수 있으며 T-형 단면과 유사한 거동을 보이는 박스단면의 경우도 시간의존적 변형량이 상대적으로 크게 나타날 것으로 생각된다. 특히 이 그림들을 통해 볼 때 동일한 크리이프 계수와 건

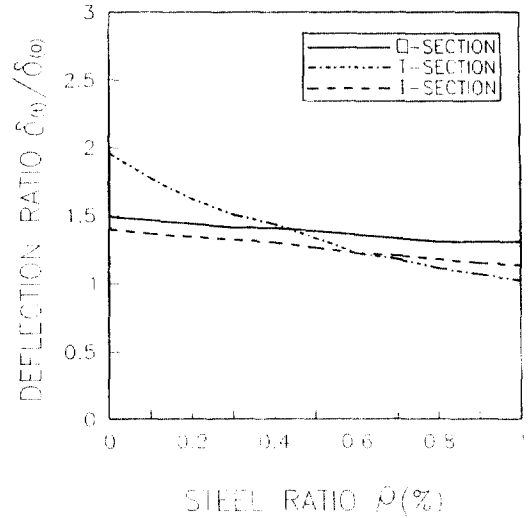


그림 5. 철근비에 따른 시간의존적 처짐변화.

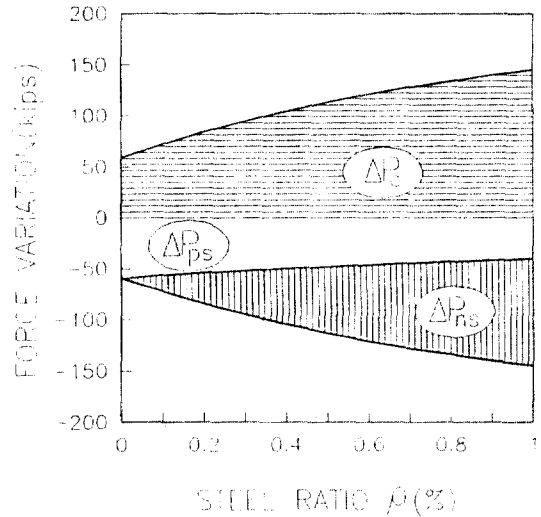


그림 6. 철근비에 따른 단면력의 변화.

조수축률에 대해 유효단면이 비대칭인 경우가 대칭 단면에 비해 시간의존적 변형이 크게 나타나는 것과 철근비가 증가함에 따라 시간의존적 변형이 감소하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한 그림 6(직사각형단면)에서 보듯이 철근비가 증가함에 따라 긴장재의 응력 손실량이 감소하는 반면 철근이 부담하는 응력이 증가하고 그 증가비율은 철근비가 증가함에 따라 차차 둔화되는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 철근이 콘크리트의 크리

표 2. 프리스트레스트 T-형 단순보의 철근비에 따른 시간의존적 거동

(단위 : ksi)

응력\철근비		0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
응력	$\sigma_{top}(t_0)$	-0.209	-0.219	-0.237	-0.257	-0.267	-0.271
	$\sigma_{bot}(t_0)$	-2.110	-1.994	-1.884	-1.778	-1.693	-1.617
	$\sigma_{top}(t)$	-0.365	-0.346	-0.307	-0.288	-0.254	-0.219
	$\sigma_{bot}(t)$	-1.123	-0.878	-0.712	-0.566	-0.468	-0.385
변형	$\sigma_{com}(t_0)$	0.0	-2.715	-2.786	-2.885	-2.910	-2.900
	$\sigma_{ten}(t_0)$	0.0	-15.09	-14.27	-13.49	-12.85	-12.29
	$\sigma_{com}(t)$	0.0	-20.78	-19.52	-18.81	-17.79	-16.74
	$\sigma_{ten}(t)$	0.0	-40.80	-36.01	-31.77	-28.84	-26.31
PS	$\Delta\sigma_{ps}(t)$	-40.62	-35.12	-31.17	-27.72	-25.27	-23.12
변화	ΔP_{ps}	0.0	-31.52	-55.40	-73.89	-88.90	-100.3
	ΔP_{ps}	-79.61	-68.84	-61.09	-54.33	-49.52	-45.32
	ΔP_c	79.61	100.36	116.45	128.22	138.42	145.60

(1 ksi = 70.3066 kg/cm²)

이프와 건조수축에 의한 변형을 억제하고 있고 동일한 변형에 의한 강재의 저항에서 철근비가 증가함에 따라 철근이 부담할 수 있는 능력이 그만큼 증가하기 때문에 판단된다. 한편 시간에 따른 콘크리트의 단면 하부 압축응력 변화는 철근비가 증가함에 따라 더 크게 나타나며 시간에 따른 변형 후 콘크리트 응력은 초기 응력의 40%~70% 이상이 감소되는 현상이 나타난다. 따라서 정량적 계산에 의한 긴장력 손실량만을 고려하고 철근의 효과와 시간의존적인 콘크리트 응력의 변화를 고려하지 않고 있는 현재의 설계로는 콘크리트의 응력이 과다하게 평가될 수 있으며 이로 인한 문제가 유발될 수 있다. 각 단면의 형상에 따른 거동이 유사하게 나타나는 관계로 대표적으로 시간의존적 변화가 심한 T-형 단면의 철근비에 따른 각 재료의 시간의존적 응력의 상세한 변화를 표 2에 나타내었다.

4.3 긴장재의 긴장력 변화에 따른 거동

콘크리트 구조물에 작용하는 긴장력이 증가함에 따라 철근콘크리트 부재에서 프리스트레스트 콘크

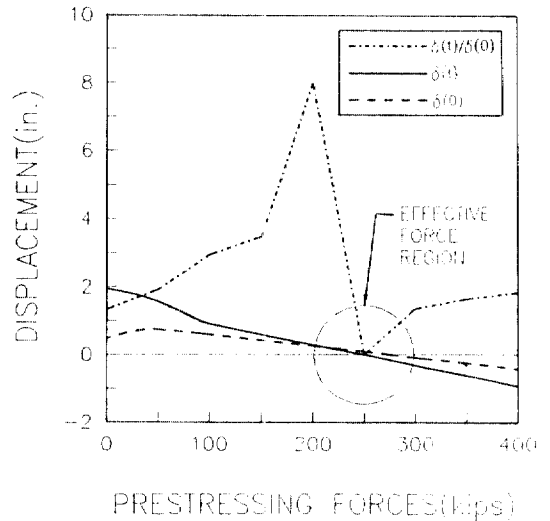


그림 7. 긴장력의 변화에 따른 시간의존적 처짐변화.

리트 부재로 점차 그 거동이 옮겨가게 된다. 이러한 구조적 거동을 파악하기 위해 본 예제에서 사용한 재료상수와 제반조건은 인장축 및 압축축 철근비가 각각 0.6%로 고정된 것 이외에는 앞의 예제와 동

일하며 단지 긴장력이 변화하는 것으로 하였다.

긴장력은 자중과 상재 사하중이 작용하는 경우 부재의 하부면에 인장력이 발생하지 않는 수준을 유지하도록 설계되고 있는데 이는 그림 7에서도 보듯이 긴장력이 부족한 경우는 철근콘크리트 부재의 거동을 나타내며 이를 개선하기 위해 프리스트레싱을 가할 경우 긴장력이 과다하면 오히려 시간의존적 처짐이 증가하게 되어 구조물의 거동과 사용성에 악영향을 미치게 되기 때문으로 판단된다. 또한 초기 탄성처짐과 시간의존적 처짐의 비가 긴장력에 따라 차이가 나며 이는 유효 긴장력을 중심으로 RC 구조물의 거동과 PS 콘크리트 구조물의 거동으로 대변될 수 있다. 따라서 프리스트레스트 콘크리트 부재의 시간의존적 처짐을 계산하기 위해 각 시방서에서 언급하고 있는 RC 부재에 대한 규정을 PS 콘크리트 부재에 적용할 수 없으며 프리스트레스트 부재의 경우 시간의존적 처짐의 계산은 작용하는 긴장력과 이의 편심률을 고려하고 나아가 탄성처짐에 대한 비가 아닌 절대값의 차이로 표현하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 특히 본 예제 구조물의 경우는 탄성처짐과 시간의존적 처짐의 변화가 상대적으로 작게 나타나는 유효 긴장력이 대략 250 kips(113.4 tons)로 판단된다.

한편 긴장력이 증가함에 따라 각 재료의 응력은 선형으로 변화하는 현상을 나타내는 반면(그림 8 참조) 그 기울기가 일정함을 볼 수 있다. 즉 각 재료의 단면력 변화량은 긴장력의 변화량과 비례관계가 있음을 알 수 있으며 이를 토대로 설계시 임의의 긴장력에 의한 각 재료의 단면력을 알 경우 변화된 긴장력에 대한 각 재료의 단면력 변화를 추론할 수 있을 것으로 생각된다.

4.4 철근비의 변화에 따른 거동

프리스트레스트 콘크리트 부재에서 철근비의 변화에 따른 구조적 거동을 고찰하기 위해 직사각형 보의 인장측(하부)에 위치한 철근을 0.6%로 고정시킨 후 압축측(상부)에 위치한 철근량을 변화시킨 경우와 압축측의 철근을 0.6%로 고정시킨 후 인장측의 철근을 변화시킨 경우를 각각 검토하였다. 그 중 하부 철근량의 변화에 따른 결과를 정리하면 표 3과 같으며 대표적인 변화는 그림 9~그림 10에서 볼 수 있다. 편의상 하부에 위치한 철근을 인장철

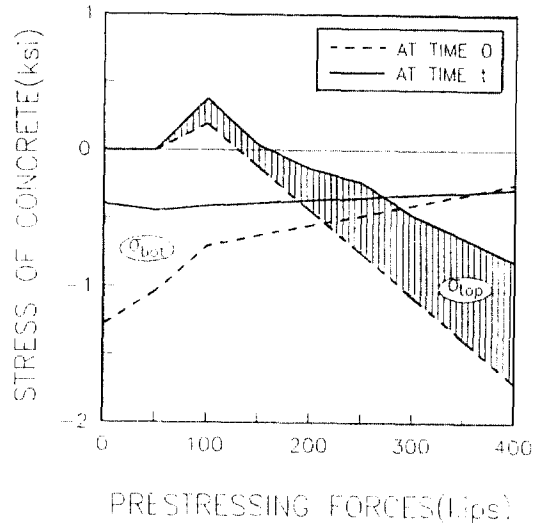


그림 8. 긴장력의 변화에 따른 콘크리트 응력변화.

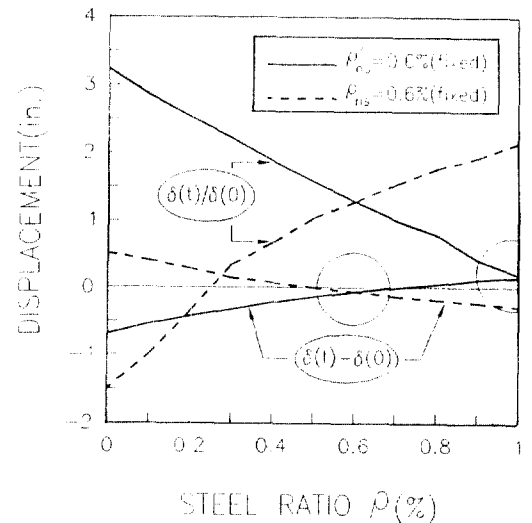


그림 9. 상부와 하부 철근비 변화에 따른 처짐변화.

근으로, 상부에 위치한 철근을 압축철근으로 각각 명명하기로 한다.

먼저 그림 9에서 볼 수 있듯이 프리스트레스트 콘크리트 부재에서도 철근콘크리트 부재와 마찬가지로 철근비에 따라 구조적 거동이 크게 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며 특히 하부에 위치한 철근량(실선)이 증가함에 따라 시간의존적 처짐이 상대적으로 감소하는 반면 상부에 위치한 철근량(점선)이 증가할 경우는 시간의존적 처짐량이 오히려 증가하는 정반대의 거동을 나타내고 있다. 이러한

표 3. 하부(인장축)에 위치한 철근량의 변화에 따른 구조적 거동 (단위 : kips, ksi, in)

응력\철근비		0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
표유	인장	$\sigma_{top}(t_0)$	-0.337	-0.363	-0.393	-0.410	-0.422	-0.440
		$\sigma_{bot}(t_0)$	-1.224	-1.166	-1.111	-1.070	-1.029	-0.995
		$\sigma_{top}(t)$	-0.181	-0.248	-0.300	-0.338	-0.356	-0.385
		$\sigma_{bot}(t)$	-0.869	-0.702	-0.571	-0.470	-0.388	-0.318
표유	압축	$\sigma_{com}(t_0)$	-3.185	-3.351	-3.545	-3.650	-3.717	-3.839
		$\sigma_{ten}(t_0)$	0.0	-8.947	-8.552	-8.250	-7.950	-7.704
		$\sigma_{com}(t)$	-16.81	-18.31	-19.54	-20.37	-20.72	-21.41
		$\sigma_{ten}(t)$	0.0	-32.45	-28.96	-26.26	-24.04	-22.14
PS	$\Delta\sigma_{ps}(t)$	-32.43	-28.19	-25.61	-23.61	-21.91	-20.51	
하부면표유	ΔP_{ps}	-29.43	-49.23	-63.94	-75.02	-83.07	-89.92	
	ΔP_{ps}	-61.61	-55.25	-50.20	-46.27	-42.93	-40.20	
	ΔP_c	91.04	104.48	114.14	121.29	126.00	130.12	
치짐	$\Delta\delta(t_0)$	-0.308	-0.278	-0.249	-0.229	-0.211	-0.192	
	$\Delta\delta(t)$	-0.996	-0.703	-0.469	-0.293	-0.165	-0.037	

(1 kips = 453.59 kgs, 1 ksi = 70.3066 kg/cm², 1 in. = 2.54 cm)

거동은 프리스트레스트 콘크리트 부재의 경우 초기 긴장력으로 인해 단면의 상부보다 하부에서 압축력이 크게 작용하고 큰 변형률에 따른 크리이프와 건조수축 등 시간의존적 변형이 하부에서 크게 발생하는 바 이를 구속하는 하부철근 역할이 상대적으로 중요한 작용을 하기 때문에 판단된다. 또한 시간의조직 치짐과 탄성 치짐에 의한 차이를 비교해 볼 때 상부와 하부의 철근량 차이가 적을수록 시간의존적 치짐에 의한 변형이 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 상부와 하부의 철근량 차이가 적을수록 건조수축에 의한 변형이 상대적으로 극히 작게 되며 철근량의 차이가 클 경우 건조수축에 의한 변형으로 과도한 치짐이 유발되기 때문으로 판단된다. 즉 하부철근이 많은 경우 정(+)의 곡률이 발생하고 상부철근이 많은 경우 부(-)의 곡률이 발생하게 되며 이러한 변형은 상부와 하부의 철근량 차이가 심할수록 크게 나타난다.

또한 그림 10에서 보듯이 긴장력에 의해 초기에

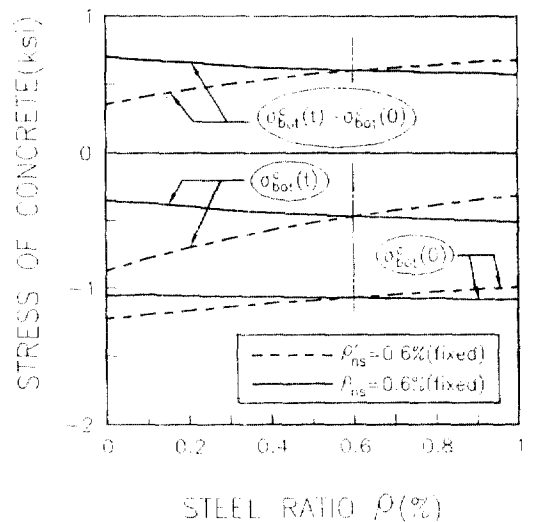


그림 10. 상부와 하부 철근비 변화에 따른 콘크리트 응력변화.

큰 압축응력이 작용하는 단면 하부의 콘크리트 응력이 하부 철근비가 증가함에 따라(점선) 감소하는

경향을 나타내는 반면 변화량이 상대적으로 작기는 하지만 상부 철근이 증가할 경우(실선) 오히려 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 하부 철근량이 일정한 경우(실선) 초기의 응력과 일정시간 경과 후의 응력이 거의 평행선을 유지하는 경향을 나타내고 있는데 이를 통해 볼 때 프리스트레스트 콘크리트 부재도 철근콘크리트 부재와 마찬가지로 압축응력이 크게 작용하고 있는 부분에 배근된 철근량에 따라 시간의존적 거동이 크게 지배됨을 유추할 수 있다. 한편 표 3에서 보듯이 하부에 위치한 철근량이 증가함에 따라 긴장재의 크리프와 건조수축에 의한 손실량이 감소하는 반면 하부의 철근량이 고정되고 상부의 철근량이 변화할 경우는 철근비의 증가에 따른 큰 변화없이 긴장재의 손실량이 일정하게 나타나는 현상을 보인다. 이를 통해서도 콘크리트 구조물의 시간의존적 거동에 있어 특히 압축응력이 크게 작용하는 위치에 배근된 철근의 중요성을 볼 수 있다.

4.5 시간의 경과에 따른 거동

한편 철근콘크리트 부재의 시간의존적 거동을 비교하기 위해 철근은 직사각형 단면을 기준으로 인장축과 압축축에 각각 0.6% 배근된 직사각형과 T-형 단면의 단순보와 양단 고정보의 4경우를 선택했으며 긴장력이 없이 초기에 0.5 kips/ft(7.44 kg/cm)의 등분포 하중이 작용하는 것으로 하였다. 크리프 계수와 건조수축률은 도로교 표준시방서(1986)의 상대습도 40%, 2년의 시간 경과 후를 기준으로 하여 각각 2.4와 -0.00022를 사용하였다. 이 하중에 의해 양단고정 직사각형 단면을 제외한 모든 경우가 초기 탄성상태에서 균열이 발생했으며 양단 고정 직사각형 단면도 50일의 시간의존적 변형 후 인장 균열이 발생하기 시작했으나 균열의 깊이가 그다지 크지 않기 때문에 처짐은 균열이 발생하지 않은 단면의 경우와 유사하게 나타나고 있다.

균열단면과 완전한 단면 사이에는 시간의존적 거동에 있어 큰 차이를 나타내고 있음을 그림 11~그림 12에서 볼 수 있다. 특히 균열이 발생한 단면의 경우는 시간의존적 거동을 지배하는 콘크리트 단면적이 상대적으로 작기 때문에 시간의존적 변위의 증가가 현격하게 감소하는 현상이 나타나며 완전 단면의 철근콘크리트 부재는 프리스트레스트 콘크

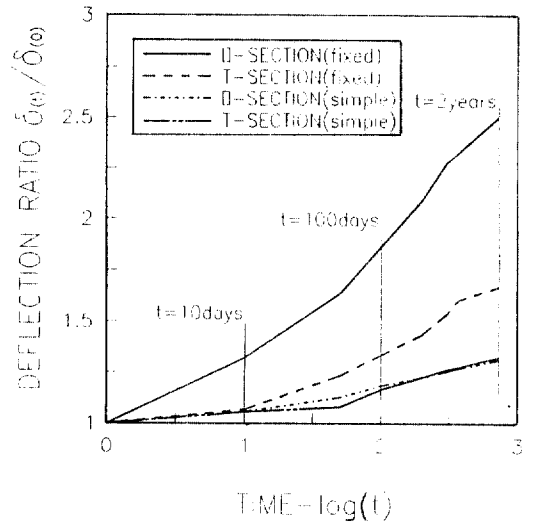


그림 11. 시간에 따른 RC 부재의 처짐.

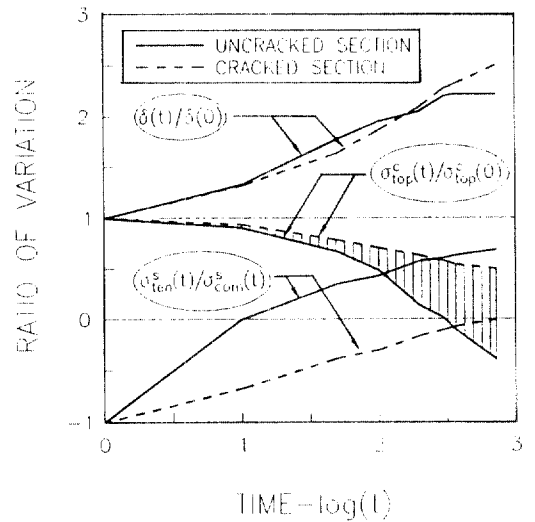


그림 12. RC 부재에서의 균열에 따른 거동.

리트 부재에 비해 상대적으로 시간의존적 거동이 크게 나타남을 알 수 있다. 한편 양단 고정 직사각형 보에 극히 작은 0.1 kips/ft(1.488 kg/cm)의 등분포 하중을 작용 작용시킴으로써 시간 경과에 따른 균열이 발생하지 않도록 한 경우와의 비교를 통해 초기에 균열이 발생하지 않고 시간이 경과한 후 균열이 발생한 경우 시간의존적 균열효과를 살펴보면 그림 12에서 보듯이 시간의존적 처짐에는 큰 차이가 없으나 각 재료의 응력에는 상당한 변화가 있음을 알 수 있다. 따라서 보다 정확한 해석을 위

해서는 초기의 균열 뿐만 아니라 시간의 경과에 따른 균열의 효과도 고려해야 함을 알 수 있다.

5. 결 론

철근콘크리트와 프리스트레스트 콘크리트 부재의 장기거동을 예측할 경우 강재(철근과 긴장)를 대개 환산 단면적에 의한 등가의 콘크리트로 치환함으로써 이의 효과를 강성에 반영하고 있다. 이러한 접근방법은 단기 선형-탄성해석의 경우 효과적으로 사용될 수 있으나 크라이프와 건조수축에 의한 구조물의 장기거동을 예측함에 있어서는 많은 문제를 나타낼 수 있다. 이는 콘크리트 구조물이 시간의존적 변형이 큰 콘크리트와 시간의존적 변형을 무시할 수 있는 철근의 복합체로 구성된 관계로 시간이 경과함에 따라 콘크리트는 계속적인 변형을 유발시키는 반면 강재는 이를 억제시키려 하며 이로 인해 부재 내 임의의 단면에서 각 재료간에는 응력의 재분배가 유발되기 때문이다.

따라서 구조계의 변화에 따른 시간의존적 부재력의 변화는 물론 구조계가 변화하지 않는 경우도 시간의존적 변화에 따른 처짐과 각 재료의 응력변화를 고려함으로써 보다 정확하고 합리적인 해석 및 설계가 이루어질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 각 재료의 힘의 평형과 변형률의 적합성(Compatibility)에 토대로 둔 해석방법을 통해 설계기준이나 정량적인 수식에 의해 긴장재를 비롯한 강재의 응력 손실량을 가정하거나 해석시 철근의 영향을 무시함으로써 유발되는 해석결과의 부정확성을 제거하는 동시에 이러한 계산과정 없이 직접 콘크리트 구조물의 장기처짐을 비롯한 단면내 응력의 재분배 등 시간의존적 거동을 정확히 파악할 수 있도록 하였으며 이를 설계에 효과적으로 반영토록 하였다. 특히 철근량을 비롯한 여러 재료상수와 단면, 경계조건에 따른 영향분석을 통해 각 인자가 구조물의 거동에 미치는 효과를 비교 분석하였으며 예제해석 결과를 통한 대표적 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 콘크리트 구조물의 장기거동시 배근된 철근량 특히 압축철근량에 의한 영향이 지배적이므로 환산 단면적 개념이 아닌 단면내 힘의 평형관계를 통해 이의 효과를 정확히 고려하여야 한다.

(2) 동일한 크라이프 계수와 건조수축률을 사용할 경우 단면의 형태와 경계조건에 따른 시간의존적 거동은 균열이 발생하지 않은 경우 대칭인 직사각형, I-형 단면보다 비대칭인 T-형 단면에서 다소 심하게 발생하기는 하나 그 차이는 다른 인자와 비교해 볼 때 극히 작다. 그러나 크라이프와 건조수축은 표면적의 비에 영향을 받으므로 실제의 거동은 다소 차이를 보일 수 있다.

(3) 사용하중 작용시 과도한 처짐으로 인한 초기 균열을 방지하고 사용성을 개선할 목적으로 콘크리트 구조물에 프리스트레싱을 가하게 되는데 프리스트레싱이 과도한 경우 오히려 장기처짐이 증가하게 되므로 유효 긴장력을 산정할 경우 작용하는 하중, 편심을 등을 고려하여 적절한 긴장력이 작용하도록 하는 것이 바람직하다.

(4) 비균열단면보다 균열단면에서 탄성변형에 대한 시간의존적 변형의 비율이 상대적으로 작게 발생하지만 절대값의 차이가 작은 것은 아니다. 이는 균열단면의 경우 장기변형이 유발되는 콘크리트의 면적이 작은 반면 초기에 상대적으로 과도한 변형이 유발되기 때문으로 판단된다. 특히 균열단면에서 각 재료의 응력 변화는 비균열 단면과는 상당한 차이가 있으므로 균열단면의 시간의존적 해석을 위해서는 보다 세심한 주의가 요구된다.

참고문헌

1. Moustafa, S.E., "Nonlinear Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Members", *PCI Journal*, Vol. 31, No. 5, September-October 1986, pp. 126-147.
2. Al-Zaid, R.Z., 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, Feb., 1988, pp. 269-291.
3. Ghali, A., "Stress and Strain Analysis in Prestressed Concrete: A Critical Review", *PCI Journal*, Vol. 34, No. 6, November-December 1989, pp. 80-97.
4. Hognestad, E., "A Study of Combined and Axial Load in Reinforced Concrete Members", University of Illinois, Engineering Experiment Station, Bulletin Series No. 399, Bulletin No. 1, 1951.
5. Bazant, Z.P., "Prediction of Concrete Creep Effects

- Using Age-Adjusted Effective Modulus Method", *ACI Journal*, Vol. 69, No. 4, April 1972, pp. 212-217.
6. Ghali, A. and Favre, R., *Concrete Structures: Stresses and Deformations*, Chapman and Hall, London and New York, 1986, 350pp.
7. Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J., *Creep of Plain and Structural Concrete*, Construction Press, London and New York, 1983, 361pp.
8. Prestressed Concrete Institute and Post-Tensioning Institute, *Precast Segmental Box Girder Bridge Manual*, PCI and PTI, Chicago, Illinois, 1978, 116 pp.

(接受：1993. 1. 18)