

콘크리트구조물의 장기거동 모델과 해석 기술

Structural Analysis for Time-Dependent Behavior of Concrete Structures



김한수*
Han-Soo Kim



양인환**
In-Hwan Yang

1. 서 론

콘크리트에 하중을 가하면 즉시변형이 발생하고 시간이 경과함에 따라 크리프에 의한 변형이 추가적으로 발생한다. 또한 콘크리트는 하중과 관계없는 건조수축에 의한 변형도 발생한다. 크리프와 건조수축에 의한 변형은 시간이 경과함에 따라 증가하는 특성을 가진다. 사용하중 상태에서 생기는 콘크리트의 즉시 변형률은 응력의 수준에 따라 다르지만 보통 300×10^{-6} 정도 된다고 추정할 수 있는데 시간이 1년 정도 경과하였을 경우 건조수축에 의한 변형률은 $400 \sim 900 \times 10^{-6}$ 에 이르며 크리프에 의한 변형률은 즉시 변형률의 2~3배인 $600 \sim 900 \times 10^{-6}$ 에 달한다. 이와 같이 크리프와 건조수축에 의한 변형은 즉시 변형보다 훨씬 큰 변형을 나타내게 되므로 콘크리트구조물의 장기거동을 구하고자 할 때는 반드시 크리프와 건조수축에 의한 효과를 고려하여야 한다.

콘크리트구조물의 장기거동해석이란 즉시 변형과 함께 시간이 경과함에 따라 증가하는 크리프와 건조수축에 의한 변형과 응력의 변화를 구하는 것이다. 보통 철근콘크리트구조물의 변형은 크게 문제가 되지 않지만 원자력 발전소, 초고층건물, 장대교량과 같이 특수한 구조물인 경우에는 시간의 경과에 따른 변형을 구하여 구조물의 사용목적에 적합한지를 따져보아야 한다. 또한, 크리프와 건조수축에 의한 변형은 프리스트레스 콘크리트에서 긴장재의 장력을 감소시키는 요인이 되므로 프리스트레스 콘크리트를 설계할 때 크리프와 건조수축에 의한 변형을 고려하여야 한다.

콘크리트구조물의 장기거동해석은 <그림 1>과 같이 콘크리트 자체의 시간 의존적 변형 특성을 수식으로 나타낸 콘크리트 모델과 외부 및 내부 구속에 의한 응력 변화를 해석하는 장기거동 해석법으로 나누어 볼 수 있다.

콘크리트의 크리프는 <표 1>에 나타낸 바와 같이 콘크리트의

배합, 양생 조건, 주변 환경, 경과시간, 하중의 크기, 재하시의 세령 등에 의해 영향을 받으며 건조수축은 배합, 양생 조건, 주변 환경, 경과시간 등에 의해 영향을 받는다. 실제 콘크리트구조물에서 크리프와 건조수축 변형률을 직접 측정하여 장기거동해석에 반영하는 경우는 거의 없고 공시체를 사용한 실험을 통하여 크리프와 건조수축 특성을 얻게 된다. 공시체와 실제 구조물은 크기, 주변 환경, 경과 시간 등의 조건이 다르므로 달라진 조건에 따라 크리프와 건조수축 특성을 보정하여야 한다. 더욱이 설계 단계에서는 공시체의 실험 결과도 없는 경우가 보통이므로 압축 강도로부터 크리프와 건조수축 특성을 추정할 수 있는 방법이 필요하다. 크리프와 건조수축에 영향을 주는 요인들의 효과를 정량적으로 표현하고 압축강도로부터 크리프와 건조수축 특성을 추정할 수 있는 수식들의 모음을 콘크리트 모델이라고 한다. ACI 모델, CEB-FIP 모델 등이 대표적인 콘크리트 모델이다.

콘크리트가 정정 구조물 상태일 경우 하중에 의해 생기는 변형은 응력이 발생하면서 변형이 발생하는 역학적 변형인 반면에 크리프와 건조수축이 발생하면 변형만이 발생하고 응력은 발생하지 않는다. 온도 변화에 의한 변형도 마찬가지로 변형만이 발생하고 응력은 발생하지 않는다. 크리프 변형, 건조수축 변형, 온도 변형과 같은 변형을 비역학적 변형이라고 한다. 대부분의 철근콘크리트구조물은 다른 부재와 연결되어 있는 부정정 구조물이 많고, 철근콘크리트 단순보와 같은 구조는 구조 전체로는 정정구조이지만 단면 내에서는 철근과 콘크리트가 합성되어 있으므로 단면으로 보면 부정정 구조에 해당한다. 부정정 구조의 철근콘크리트

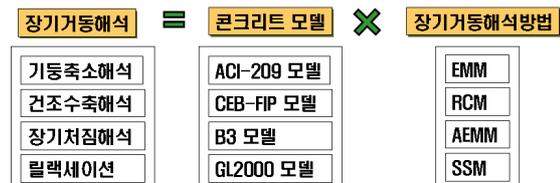


그림 1. 철근콘크리트구조의 장기 거동 해석

* 정회원, 건국대학교 건축공학부 교수
hskim@konkuk.ac.kr

** 정회원, 군산대학교 토목공학과 교수

표 1. 크리프와 건조수축에 영향을 미치는 요인들

Creep	Shrinkage
<ul style="list-style-type: none"> ·Level of stress ·Duration of loading ·Strength and age of concrete ·Ambient conditions ·Rate of loading ·Size of the concrete mass ·Type, fineness, and content of cement ·Water-cement ratio ·Type and grading of aggregate ·Type of curing 	<ul style="list-style-type: none"> ·Cement and water content ·Composition and fineness of cement ·Type and grading of aggregate ·Ambient conditions ·Admixtures ·Size and shape of the concrete

트구조물에 비역학적 변형이 발생하면 부재와 부재사이 또는 철근과 콘크리트 사이에서 응력 재분배가 발생한다. 부정정구조물에서 크리프와 건조수축 변형률과 같은 시간 경과에 따른 비역학적 변형이 발생하는 경우에서 구조물의 응력과 변형을 구하는 특수한 해석 방법을 장기거동해석법이라고 한다.

본 기사에서는 콘크리트 모델과 유한요소프로그램에서 사용되는 장기거동해석법을 소개하고 건축분야와 토목분야에서의 장기거동해석이 적용된 사례를 소개하고자 한다.

2. 콘크리트의 장기거동 모델

콘크리트에 발생하는 전체 변형률은 <그림 2>와 같이 재하시의 즉시 변형률, 크리프에 의한 변형률 그리고 건조수축에 의한 변형률의 합으로 주어진다.

크리프는 하중이 재하되는 즉시 생기는 처짐 이외에 시간이 경과됨에 따라 하중에 비례하여 증가되는 변형을 의미하며 크리프는 타설 후 경과 시간 t 와 타설 후 하중이 작용할 때까지 경과 시간 t_0 과의 두 가지 시간 변수로 표현된다. 크리프를 정량적으로 표현하는 방법으로는 크리프 계수(creep coefficient) $\phi(t, t_0)$, 특정크리프(specific creep) $C(t, t_0)$, 크리프함수(creep function or creep compliance) $J(t, t_0)$ 등이 사용되며 각각의 정의는 다음과 같다.

$$C(t, t_0) = \frac{\epsilon_{cr}(t, t_0)}{\sigma(t_0)} \tag{1}$$

$$\phi(t, t_0) = \frac{\epsilon_{cr}(t, t_0)}{\epsilon_e(t_0)} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 J(t, t_0) &= \frac{\epsilon_e(t_0) + \epsilon_{cr}(t, t_0)}{\sigma(t_0)} \tag{3} \\
 &= \frac{1}{E_c(t_0)} + C(t, t_0) \\
 &= \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E_c(t_0)}
 \end{aligned}$$

여기서 $\epsilon_e(t_0)$ 는 하중이 작용하는 시점 t_0 에 서의 즉시변형률이고 $\epsilon_{cr}(t, t_0)$ 는 시점 t 에서의 크리프 변형률이다. $E_c(t_0)$ 는 하중이 작용하는 시점 t_0 에서의 콘크리트의 탄성계수이다.

위의 수식에서 알 수 있듯이 특정크리프, 크리프계수, 크리프함수 중의 하나의 방법으로 표현되더라도 나머지 다른 표현 방법으로 쉽게 변환될 수 있다.

건조수축변형률 $\epsilon_{sh}(t, t_0)$ 은 타설 후 경과 시간 t 와 양생 시간 t_0 의 두 가지 시간 변수로 표현된다.

크리프와 건조수축은 경과 시간이외에도 콘크리트의 배합, 양생조건, 주변환경 등의 요인들에 의하여 영향을 받는다. 이러한 다양한 요인들의 효과를 직접 실험을 통하여 얻을 수 없으므로 재료거동에 대한 이론적 연구 결과와 과거의 실험, 현장계측 등을 자료를 분석한 결과를 이용하여야 한다. 크리프와 건조수축과 같은 콘크리트의 시간의존적 특성을 수식으로 나타낸 것을 콘크리트 시간의존적 재료특성 모델이라고 한다. 콘크리트 재료모델로는 ACI 모델, CEB-FIP 모델, B3 모델, GL2000 모델등이 주로 많이 사용되고 있다. 각각의 모델은 영향을 주는 요인들의 효과를 각각 어떻게 평가하는가에 따라 차이가 있다. 각각의 요인들

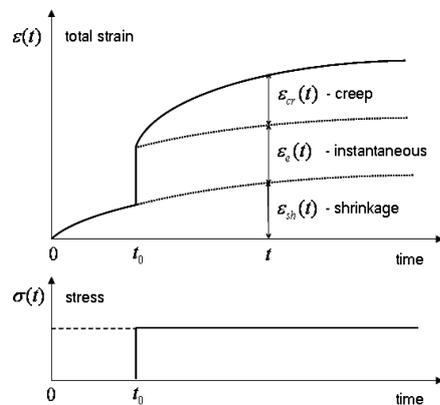


그림 2. 일정한 응력을 받는 콘크리트의 변형률

을 독립적으로 반영하는 모델이 있는가 하면 요인들이 서로 중속되어 표현되어 있는 모델도 있다. 예를 들어 건조수축의 경우 ACI모델에서의 부재 크기 효과는 독립적인 요인으로 고려되는 반면에 CEB모델에서는 경과시간에 의한 효과와 결합되어 있다.

콘크리트모델의 개략적인 형태를 살펴보기 위하여 콘크리트 모델 중에서 가장 많이 사용되어 온 ACI 모델을 간단하게 소개하면 다음과 같다. ACI 모델은 1970년 Branson 등이 제안한 모델을 참고한 것으로 표준상태의 극한값을 기준으로 하고 영향을 미치는 요인들을 계수로 표현한 것으로 비교적 사용하기 간단하지만 정확성은 다소 떨어지는 것으로 평가된다.

ACI 모델에서 크리프는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi(t, t_0) = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \phi(\infty, 7) CR_H CR_{la} CR_{vs} \quad (4)$$

여기서 $\phi(\infty, 7)$ 는 극한크리프계수이다. CR_H , CR_{la} , CR_{vs} 는 상대습도, 하중이 작용할 때의 재령, 크기효과들이 크리프계수에 영향을 미치는 효과를 수식으로 나타낸 계수값이다.

ACI 모델에서 건조수축은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{(t - t_0)}{b + (t - t_0)} \epsilon_{sh}(\infty, 7) SH_H SH_{vs} \quad (5)$$

여기서 $\epsilon_{sh}(\infty, 7)$ 는 극한건조수축변형률이다. b 는 양생조건에 따라 결정되는 상수이다. SH_H , SH_{vs} 는 상대습도, 크기효과들이 건조수축에 영향을 미치는 효과를 수식으로 나타낸 계수값이다.

콘크리트 모델을 이용하면 배합조건과 양생조건 그리고 상대습도가 다른 여러 가지 콘크리트의 장기거동을 예측할 수 있다. 하지만 콘크리트의 변형이 구속되지 않고 자유롭게 변형될 수 있는 경우에만 한정되고 구속이 있는 경우에는 콘크리트 모델만으로는 정확한 거동을 예측할 수 없다.

3. 콘크리트의 장기거동 해석 방법

시점 t_0 에 응력 $\sigma(t_0)$ 가 작용하였을 때, 콘크리트에 발생하는 전체 변형률은 다음 식과 같이 재하시의 즉시 변형률, 크리프에 의한 변형률 그리고 건조수축에 의한 변형률의 합으로 주어진다.

$$\epsilon(t) = \epsilon_e(t_0) + \epsilon_{cr}(t) + \epsilon_{sh}(t) \quad (6)$$

크리프는 탄성변형률에 대한 크리프변형률의 비인 크리프계수 $\phi(t, t_0)$ 로서 주로 표현되며 콘크리트 모델 또는 재료실험을 통하여 결정된다. 외부 및 내부 구속이 없는 상태에서의 일축 변형률과 일정한 응력 $\sigma(t_0)$ 와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E_c(t_0)} [1 + \phi(t, t_0)] + \epsilon_{sh}(t) \quad (7)$$

여기서 $E_c(t_0)$ 는 하중이 작용하는 시점의 콘크리트의 탄성계수이며 $\epsilon_{sh}(t)$ 는 건조수축에 의한 변형률로 응력상태와 무관하다.

철근콘크리트구조물이 철근에 의한 내부구속 또는 연결된 다른 부재 또는 지점에 의한 외부구속을 받는 경우에 크리프 변형과 건조수축변형이 발생하면 (7)식으로 주어지는 변형이 그대로 발생하지 않고 구속에 의한 응력이 발생된다. 구속에 의한 응력이 발생하면 이 응력에 의한 크리프도 발생하므로 콘크리트모델만으로 주어지는 (7)식으로는 구속을 받는 콘크리트구조물의 장기 거동을 예측할 수 없고 추가되는 모든 응력변화에 의한 크리프를 모두 구하여야 한다. 사용상태의 일반적인 콘크리트구조물이 해당하는 콘크리트에 작용하는 응력의 수준이 콘크리트 강도의 1/2보다 작은 경우에는 콘크리트의 응력과 변형률의 관계가 선형이라고 볼 수 있으므로 중첩의 원리를 장기거동해석에도 적용할 수 있다. 따라서 내부 응력이 재분배되어 변화하는 경우의 변형률은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E_c(t_0)} [1 + \phi(t, t_0)] + \int_{t_0}^t \frac{1 + \phi(t, \tau)}{E_c(\tau)} \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau + \epsilon_{sh}(t) \quad (8)$$

(8)식에서의 적분항은 응력변화에 의한 변형률을 나타내고 있는 항이며 응력증분이 미지수이므로 적분 결과를 수식으로 나타낼 수 없다. (8)식의 해를 얻기 위하여 여러 가지 장기응력해석법이 개발되어 왔으며 수치적분을 이용한 반복법(Step by Step Method, 이하 SSM), 유효탄성계수법(Effective Modulus Method, 이하 EMM), 재령보정탄성계수법(Age-adjusted Effective Modulus Method, 이하 AEMM), 크리프율법(Rate of Creep Method, 이하 RCM) 등이 대표적이 해석방법들이다.

이중에서 SSM은 해석대상 시간을 여러 개의 구간으로 나누어 각각의 해석 결과를 누적해 가는 방법으로 그 계산과정이 복잡하지만 이론 해에 가장 가까운 결과를 얻을 수 있는 방법이다.

3.1 수치해석을 이용한 반복법

해석대상 시간을 <그림 3>과 같이 여러 개의 구간으로 나누고 각 구간의 중간시점에서 일정한 응력이 작용한다고 하면 i 번째 구간에서의 변형률 증분은 아래식과 같다.

$$(\Delta \epsilon)_i = \frac{(\Delta \sigma)_i}{E_c(t_{i-1/2})} [1 + \phi(t_i, t_{i-1/2})] \quad (9)$$

$$+ \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{(\Delta \sigma)_j}{E_c(t_{j-1/2})} [\phi(t_i, t_{j-1/2}) - \phi(t_{i-1}, t_{j-1/2})] \right)$$

$$+ (\Delta \epsilon_{sh})_i$$

여기서 $t_{i-1/2}$ 는 i 번째 구간인 시작시점 t_{i-1} 과 끝시점 t_i 의 중간시점을 나타내며 로그 스케일로 중간시점으로 정하는 것이 해의 정확도를 높이에 도움이 된다. (9)식 우변에서 첫 번째 항은 i 번째 구간의 응력증분 $(\Delta \sigma)_i$ 에 대한 즉시변형률과 크리프 변형률 증분을 나타낸다. $(\Delta \sigma)_i$ 은 i 번째 구간에 작용하는 외력에 의해 결정된다. 두 번째 항은 이전 구간에서 발생한 응력 증분에 의한 i 번째 구간에서의 크리프 변형률 증분을 나타낸다. 세 번째 항은 i 번째 구간에서 발생한 응력과 무관한 건조수축변형률을 나타낸다.

(9)식에서 알 수 있는 바와 같이 장기거동해석은 이전 구간에서의 응력을 모두 저장하고 그 각각의 응력 증분에 대한 변형률 증분을 누적하여야 한다. 하지만 특정크리프 또는 크리프함수를 지수함수를 이용한 Dirichlet 수열로 나타내고 (8)식을 적분하면 이전 구간의 응력이력을 직전 구간에서의 누적계수를 이용하여 나타낼 수 있으므로 이전 구간의 해석 결과를 저장할 필요가 없게 된다. Dirichlet 수열은 콘크리트 크리프 모델을 스프링과 대시포트(dashpot)을 이용한 리올로지(rheology) 모델로 표현한 것이며 사용하는 콘크리트 모델을 Dirichlet 수열로 변환하는

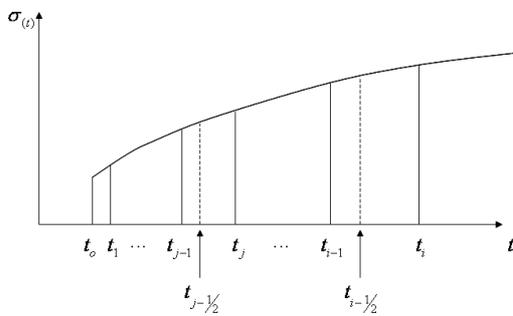


그림 3. 반복법에서의 해석 구간과 하중 작용 시점

과정이 필요하다. DIANA를 비롯한 대형구조물 해석을 위한 상업용 유한요소해석 프로그램에서는 대부분 Dirichlet 수열을 이용한 장기거동해석법을 적용하고 있다.

(9)식에서 구한 $(\Delta \epsilon)_i$ 은 i 번째 구간에서 구속이 없는 조건에서 구한 크리프 변형률 증분이므로 구조해석 과정에서는 크리프 하중으로 변환되어 절점하중으로 작용시켜 구속이 있을 경우의 변형률을 구하게 된다. 콘크리트구조물의 장기거동해석은 해석 구간 수 만큼의 (9)식에 해당하는 선형탄성해석을 수행하고 이를 누적하는 해석이라 할 수 있다.

3.2 보 요소의 크리프 해석

가장 간단한 유한요소 중의 하나인 평면 보 요소를 이용하여 유한요소해석 프로그램에서의 장기거동 해석 방법을 개념적으로 이해해 보고자 한다. 평면 보요소의 절점변위와 절점부재력은 <그림 4>와 같다. i 번째 구간의 보 요소 절점하중 증분과 절점 변위 증분과의 관계는 다음 식과 같다.

$$[K]_i \{\Delta u\}_i = \{\Delta f\}_i \quad (10)$$

여기서 $\{f\} = \langle N_1 V_1 M_1 N_2 V_2 M_2 \rangle$ 로 보 요소의 절점 하중 벡터이고 $\{u\} = \langle u_1 v_1 \theta_1 u_2 v_2 \theta_2 \rangle$ 로 보 요소의 절점 변위 벡터이다. $[K]$ 는 강성행렬이다. $[K]_i$ 는 i 번째 구간의 강성행렬이고 $\{\Delta u\}_i$ 와 $\{\Delta f\}_i$ 는 i 번째 구간의 절점 하중과 절점 변위의 증분을 나타낸다.

(9)식에 의하여 i 번째 구간에서의 변형률을 구하는 것은 i 번째 구간에 해당하는 (10)식의 변위를 구하는 것에 해당한다. 강성행렬은 이 해석 구간에서의 탄성계수와 크리프계수를 고려한 다음과 같은 유효강성을 이용하여 구성한다.

$$(E'_c)_i = \frac{E_c(t_{i-1/2})}{[1 + \phi(t_i, t_{i-1/2})]} \quad (11)$$

(10)식에서의 절점하중은 (9)식의 우변에서 주어지는 절점하

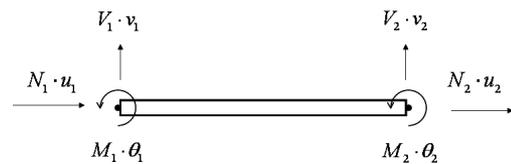


그림 4. 평면 보 요소의 절점 변위와 부재력

중으로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\Delta f\}_i = \{\Delta f_{ext}\}_i + \{\Delta f_{cr}\}_i + \{\Delta f_{sh}\}_i \quad (12)$$

$\{\Delta f_{ext}\}_i$ 은 i 번째 구간에서 작용하는 외력에 의한 절점하중이고 $\{\Delta f_{cr}\}_i$ 와 $\{\Delta f_{sh}\}_i$ 은 크리프와 건조수축에 의한 절점하중으로 다음식에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{\Delta f_{cr}\}_i &= [A][E]\{\Delta \epsilon_{cr}\}_i \\ \{\Delta f_{sh}\}_i &= [A][E]\{\Delta \epsilon_{sh}\}_i \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $[A]$ 는 보 요소에서의 절점하중과 응력과의 관계행렬이다. $[E]$ 는 보요소의 강성을 나타내는 행렬이다. $\{\Delta \epsilon_{cr}\}_i$ 와 $\{\Delta \epsilon_{sh}\}_i$ 는 (9)식에서 구해지는 i 번째 구간에서의 크리프 변형률 증분과 건조수축 변형률 증분이며 보 요소에서는 변형률은 $\{\epsilon\} = \langle \epsilon_x \ \kappa_1 \ \kappa_2 \rangle$ 로 축방향 변형률, 절점에서의 곡률로 구성된다.

(9)식에 의하여 크리프변형률을 계산하려면 (9)식의 $(\Delta \sigma)_j$ 에 해당하는 이전 단계의 응력을 저장해 놓아야 한다. 보 요소에서의 응력은 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{\Delta \sigma\}_j &= [E]_j(\{\Delta \epsilon\}_j - \{\Delta \epsilon_0\}_j) \\ &= [E]_j([B]\{\Delta u\}_j - \{\Delta \epsilon_0\}_j) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 $\{\sigma\} = \langle \sigma_x \ m_1 \ m_2 \rangle$ 은 응력행렬로 축방향 응력, 절점에서의 내부모멘트이다. $\{\epsilon\} = \langle \epsilon_x \ \kappa_1 \ \kappa_2 \rangle$ 이며 $\{\epsilon_0\}_j$ 는 응력을 유발하지 않는 변형률로 크리프 변형률과 건조수축변형률이 포함된다. $[B]$ 는 변형률-절점변위 관계행렬이다.

i 번째 구간이 경과한 시점에서의 변위는 각 구간에서 구한 변위 증분을 다음 식과 같이 누적하여 구한다.

$$\{u\}_i = \sum_{j=1}^i \{\Delta u\}_j \quad (15)$$

크리프와 건조수축에 의한 변형은 비역학적 변형이므로 콘크리트 단면에 작용하는 i 번째 구간의 부재 내력은 (16)식을 이용하여 구한다.

$$\{\Delta F\}_i = [A]_i[E_c]_i([B]\{\Delta u\}_i - \{\Delta \epsilon_0\}_i) \quad (16)$$

4. 장기거동해석 적용 사례

4.1 고층건물의 기동축소해석

초고층 건물에서는 부동기동축소에 의하여 외부와 내부의 마감재 그리고 내부 칸막이벽체 및 설비 시설 등이 피해를 입을 수 있으므로 기동축소는 초고층건물의 설계 및 시공단계에서 중요하게 검토되는 항목이다.

부동기동축소는 기둥과 벽체에 작용하는 응력이 차이가 생김에 따라 발생한다. 고층건물에서는 수직하중보다는 수평하중에 의한 수평변위를 제한하는 조건에 의해 부재의 단면 크기가 결정되고 또한 수평하중과 수직하중을 부담하는 수직부재와 중력하중만을 부담하는 수직부재를 분리하여 설계하는 경우가 많으므로 각 기둥과 벽체에 작용하는 응력이 크게 차이가 나는 경우가 많다. 이러한 응력의 차이는 변형률의 차이를 불러오고 변형률에 기둥의 높이를 곱한 축소량은 층수가 높아짐에 따라 층수만큼 누적되어 초고층 건물의 경우 상당한 부동축소량을 보이게 된다. 부동축소량은 바닥이 수평이 되지 못하게 하여 칸막이벽, 마감재 등의 파손과 균열을 일으키게 되고 보와 슬래브와 같은 수평부재에 추가적인 응력을 발생시키기도 하고 아웃리거와 같이 큰 강성을 가진 부재에는 작은 부동축소에 의해서도 큰 응력이 유발되기도 한다. 기동축소를 요인별로 나누어보면 즉시탄성변형에 의한 기동축소와 크리프와 건조수축에 의한 시간의존적 비탄성변형에 의한 축소가 있으며 철골구조에서는 탄성축소만이 발생하고 콘크리트 구조의 경우에는 탄성축소와 비탄성축소가 모두 발생한다. 기동축소에 의해 발생하는 피해를 방지하기 위해서는 기동축소량을 미리 예측하고 이를 시공단계에서 보정하여야 하는데 보정량을 결정하기 위해서는 시공시점에서 자동보정되는 축소량과 이후에 발생하는 축소량으로 구분하여 그 값을 구해야 한다. <그림 5>에서와 같이 각 층의 슬래브가 타설 된 이후에 발생하는 축소량이 보정의 대상이 되는 축소량이며 시공 전 축소량과 시공 후 축소량은 각 층 시공단계를 반영한 장기거동해석을 수행하여야만 정확한 값을 얻을 수 있다. 현재 축소량 해석에서 가장 많이 사용되는 방법은 1987년 Fintel 등에 의해 발표된 PCA 방법이다. PCA 방법은 슬래브 타설 전 축소량과 타설 후 축소량을 해석하기 위한 수식을 제시한 것으로 콘크리트 모델로는 ACI모델

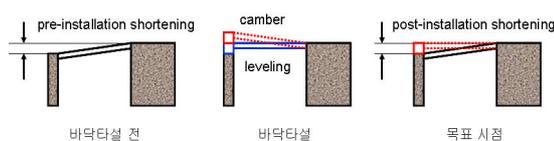


그림 5. 슬래브 시공 전 축소량과 시공 후 축소량

을 근간으로 하여 다른 연구자들의 연구결과를 혼합한 모델을 사용하고 있다. 장기거동해석법으로는 잔류크리프계수라는 형태로 RCM을 사용하고 있다. PCA 방법은 하나의 기등을 독립적으로 보고 해석하는 방법으로 외부구속조건은 작용하는 하중을 전체 구조해석을 통하여 구함으로써 초기상태만 간접적으로 반영한다고 볼 수 있으며 내부구속조건은 잔류크리프계수로 고려하고 있다. 하지만 잔류크리프계수의 이론적 배경이 되는 RCM이 1930 년대에 제시된 것으로 이론적 모순점을 가지고 있으며 실험결과와도 잘 맞지 않는다고 알려져 있다. 또한 PCA 방법은 수식에서 시간개념 대신에 층 개념을 사용하고 있어 임의시점에서 특정 층의 변형률을 계산하기가 곤란한 단점이 있다.

기등축소해석을 위해서는 우선 각 층 기등에 발생하는 변형률을 계산하여야 한다. 각 기등에서의 변형률을 계산하기 위한 하중은 계산 대상 기등을 포함한 높은 층에서 작용하는 하중만을 고려해야 하므로 i 층 상부에 작용하는 하중만을 고려한다. 각 층에서의 변형률이 계산되면 i 층에 발생하는 기등축소는 변형률에 기등의 높이를 곱하여 각 층에 발생하는 변형을 계산하고 i 층 이하층에서의 변형을 누적하여 구한다.

특정 층의 슬래브가 시공되는 시점 t' 이전에 발생한 수축량과 이후에 발생한 수축량은 시점 t' 에서의 축소량을 계산하여 저장하여 두고, 최종 시점 t 에서의 축소량을 계산하여 t 에서의 축소량에서 t' 에서의 축소량을 빼면 보정대상이 되는 타설 이후의 축소량을 구할 수 있다.

4.2 콘크리트 교량의 장기거동 제어

4.2.1 콘크리트 교량의 장기거동 특성

FCM(free cantilever method) 공법으로 시공되는 콘크리트 교량은 상대적으로 경간장이 긴 장점이 있으나, 콘크리트의 크리프와 건조수축 및 프리스트레싱 긴장재의 릴랙세이션 등은 시간에 따른 프리스트레스의 장기 손실을 초래하여 FCM 교량의 장기 처짐 및 단면력 변화를 유발하는 주요한 요인이 되고 있다. FCM 교량의 이러한 특성이 정확히 고려되어야 교량 시공시 정밀한 시공관리가 가능하며, 교량 공용시에도 효율적인 유지관리가 가능하다.

FCM 교량은 상부구조와 하부구조가 일체화된 라멘 구조형식이 주로 적용되고 있으며, 시공 특성상 경간중앙에서의 연결텐던 긴장에 의한 캔틸레버 구조체의 연결은 콘크리트의 크리프 및 건조수축 등의 변형으로 인해 시간에 따른 상부구조의 처짐 및 모멘트 변화를 유발한다. 또한, 라멘 구조는 상부구조와 하부구조가 일체화되어 있으므로 상부구조의 모멘트가 하부구조로 분배되며, 교각 하단에서 시간에 따른 모멘트가 추가로 발생하여 구

조적으로 불리한 영향을 미칠 수 있다. FCM 공법의 콘크리트 교량에서, 하부구조의 콘크리트의 크리프와 건조수축에 의한 모멘트를 감소시킬 수 있는 기법을 살펴본다.

4.2.2 장기거동 제어기법

교각의 모멘트 제어 기법은 FCM 교량에서 상부와 하부 구조가 일체화 되어 있는 두 개의 캔틸레버를 연결한 후, 콘크리트의 크리프와 건조수축에 의한 장기 거동에 대응하는 외력을 제어하중으로 미리 구조물에 재하하여 모멘트를 조절하는 개념을 바탕으로 한다. 캔틸레버 구조체를 연결하기 전에 제어 하중을 재하하여 발생된 교각 하단의 모멘트는 캔틸레버 연결후에 발생하는 모멘트와 상쇄되어지며, 이러한 사전보정기법의 개념을 <그림 6>에 나타내었다.

FCM 교량 가설은 캔틸레버 가설단계와 캔틸레버 연결단계로 이루어진다. 다경간 FCM 교량의 경우에도 이 두 단계의 반복과정을 통하여 구조물을 완성시킨다. 캔틸레버 구조물은 교각 주두부 중심을 기준으로 대칭 시공되므로 교각 하단부의 모멘트는 거의 발생하지 않는다. 캔틸레버 연결후 정정 구조시스템은 부정정 구조시스템으로 변환된다. 캔틸레버 연결시 두 개의 캔틸레버 사이에 연결세그먼트(key-segment)를 타설한 후에 연결 텐던을 긴장한다. 연결텐던 긴장시 상부의 박스 거더는 수축변형을 유발한다. 거더의 변형은 교각의 변형과 더불어 교각의 하단에 모멘트를 유발한다. 부정정 구조시스템에서 교각 하단의 모멘트는 교각의 높이 조건 및 단면 조건에 영향을 받는다. 또한, 캔틸레버 연결 등의 교량 가설 중에 발생한 교각의 모멘트는 교량의 완공 후에도 콘크리트의 크리프와 건조수축효과에 의해 영향을 받는다.

FCM 교량은 <그림 6(c)>에서 보듯이 캔틸레버 연결시 교각 하단에 모멘트 ($-M_2$)가 발생한다. 캔틸레버 연결 전에 <그림 6(b)>와 같이 제어하중을 재하하여 미리 교각에 모멘트 M_1 을 유발시킨다. 제어하중을 적용한 경우, 최종모멘트는 <그림 6 (d)>와 같이 교각의 모멘트 $M = M_1 - M_2$ 가 되며, 제어하중을 적용하지 않은 경우의 모멘트 M_2 보다 작게 된다. 따라서, 크리프와 건조수축을 고려한 정밀 구조해석을 통하여 모멘트 ($-M_2$)에 대응하는 M_1 을 산정하여 모멘트 M_1 에 대응하는 보정하중을 재하 함으로써 교각의 최종 모멘트 M 을 효율적으로 제어할 수 있다.

5. 결 론

콘크리트구조물의 유한요소해석에서 크리프와 건조수축에 의한 장기거동해석 방법에 대하여 살펴보았다. 장기 거동 해석은

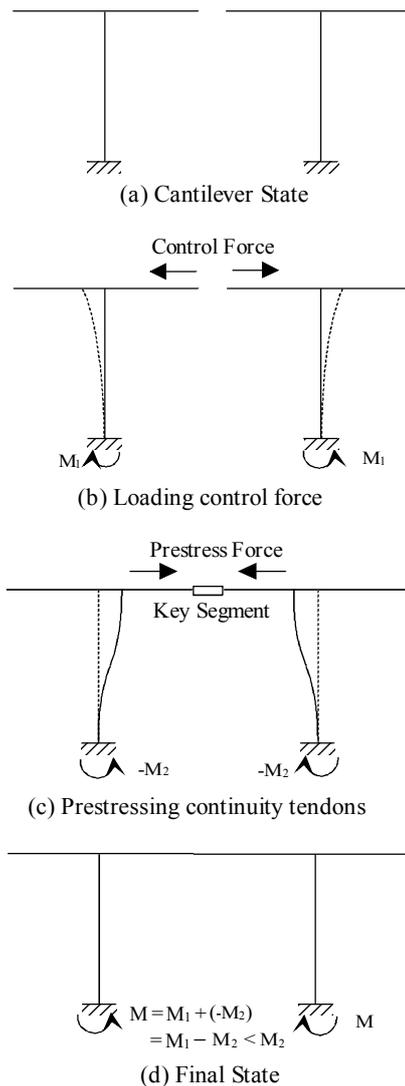


그림 6. 장기거동 제어 개념

콘크리트 재료모델과 장기 거동 해석 방법으로 나눌 수 있다. 크리프와 건조수축은 콘크리트 배합으로부터 양생, 사용 환경 등의 많은 요인들에 의하여 영향을 받으므로 정확한 예측이 대단히 어려운 부분이라 할 수 있다. 콘크리트구조물 설계시에는 제한된 정보만이 알 수 있으므로 콘크리트 재료모델 또는 과거의 경험에 의존할 수 밖에 없어 그 정확도는 더욱 떨어진다. 따라서 장기거동해석에서의 정확도를 높이기 위해서는 재료 실험을 실시하는 것이 필요하며 90일 또는 180일 정도의 단기간 실험 결과를 통하여 장기거동을 추정하는 과정이 필요하다. 재료모델의 오차에 비하여 장기거동해석 방법 상의 오차는 비교적 적은 편이다. 최근의 컴퓨터의 능력이 대단히 향상되어 많은 요소를 사용한 해석 모델과 로그스케일로 정의되는 수십 개의 해석구간을 사용하여

충분한 정확도의 해석 결과를 얻을 수 있다. 하지만 현재 유한요소해석에서 사용하고 있는 방법은 축첩의 원리를 바탕으로 하고 있어 비선형 크리프, 단면내 부등 건조수축, 균열발생과 관련된 인장 크리프 등의 효과를 반영하지는 못하고 있어 이에 대한 추가 연구 및 개발이 필요하다고 할 수 있다. 

참고문헌

1. ACI Committee 209, *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structure*, ACI 209R-92, American Concrete Institute, 1997.
2. Al-Manaseer, A., *The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects*, ACI SP-194, ACI, 2000. 11.
3. Bangash, M. Y. H., *Manual of Numerical Methods in Concrete*, Thomas Telford, 2001.
4. Bazant, Z. P. and Wu, S. T., "Dirichlet Series Creep Function for Aging Concrete," *J. of Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol. 99, No. 2, 1973, pp. 367 ~ 387.
5. Bazant, Z. P. and Wittmann, F. H., *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, John Wiley & Sons, 1982.
6. CEB(Comite Euro-International Du Beton), *CEB-FIP Model Code 1990*, Thomas Telford Services Ltd., 1993.
7. Cruz, P. J. S., Mari, A. R., and Roca, P., "Nonlinear Time-Dependent Analysis of Segmentally Constructed Structures," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 3, 1998, pp. 278 ~ 287.
8. Fintel, M., Ghosh, S. K., and Iyengar, H., *Column Shortening in Tall Structure-Prediction and Compensation*, Portland Cement Association, 1987.
9. Gardner, N. J. and Weiss, J., *Shrinkage and Creep of Concrete*, ACI SP-227, ACI, 2005.
10. Ghali, A. and Favre, R., *Concrete Structures: Stresses and Deformations*, E&FN Spon, 1994.
11. Gilbert, R. I., *Time Effects in Concrete Structures*, Elsevier, 1988.
12. Neville, A. M., Dilger, W. H., and Brooks, J. J., *Creep of Plain and Structural Concrete*, Construction Press, 1983.
13. TNO, DIANA User's Manual, *TNO Building and Construction Research*, 1998.
14. 김한수, "고층건물에서 콘크리트의 장기거동해석을 위한 시공단계 구조해석," *전산구조공학*, 20권, 4호, 2007, pp. 19 ~ 25.
15. 양인환, "FCM 공법으로 시공되는 콘크리트 교량의 교각모멘트 제어," *콘크리트학회 논문집*, 18권, 6호, 2006, pp. 711 ~ 720.