

부등수분분포를 고려한 SRC 기둥의 축소량에 관한 연구

설현철¹⁾·김윤용¹⁾·권승희¹⁾·김한수²⁾·김진근^{1)*}

¹⁾한국과학기술원 건설 및 환경공학과 ²⁾건국대학교 건축공학부

(2005년 1월 31일 원고접수, 2005년 12월 30일 심사완료)

Column Shortening of SRC Columns Considering the Differential Moisture Distribution

Hyun Cheol Seol¹⁾, Yun Yong Kim¹⁾, Seung Hee Kwon¹⁾, Han Soo Kim²⁾, and Jin Keun Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

²⁾College of architecture, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

(Received January 31, 2005, Accepted December 30, 2005)

ABSTRACT

Steel reinforced concrete(SRC) columns, which have been widely employed in high-rise buildings, exhibit a time-dependent behavior because of creep and shrinkage of concrete. This long-term behavior may cause a serious serviceability problem in structural systems, so it is very important to predict the deformation due to creep and shrinkage of concrete. However, it was found from the previous experimental studies that the long-term deformation of SRC columns was quite dissimilar from that of RC columns. A new method is required to quantitatively predict the long-term deformation of SRC columns. In this study, the causes of the discrepancy between the behaviors of RC and SRC columns are investigated and discussed. SRC columns exhibit a time-dependent relative humidity distribution in a cross section differently from that of reinforced concrete(RC) columns owing to the presence of an inner steel plate, which interferes with the moisture diffusion of concrete. This relative humidity distribution may reduce the drying shrinkage and the drying creep in comparison with RC columns. Therefore it is suggested that the differential moisture distribution should be taken into account in order to reasonably predict column shortening of SRC columns.

Keywords : SRC column, moisture diffusion, drying shrinkage, drying creep, differential moisture distribution

1. 서 론

설계 및 시공기술에 대한 꾸준한 연구에 의해 국내 건축 기술 수준이 향상되고, 재료적으로도 고성능 콘크리트의 개발이 가속화되면서 콘크리트를 사용하여 건설되는 초고층 건물의 수가 증가하는 추세이다. 이는 콘크리트가 경제성과 시공성, 그리고 내구성 측면에서 많은 장점을 보유하고 있으며, 지금까지 구조재료로서 널리 사용되고 많은 연구를 수행함으로써, 구조물을 정확하고 합리적으로 설계할 수 있게 되었고, 안전하고 경제적인 시공을 할 수 있게 되었기 때문이다.

반면에 크리프 및 건조수축과 같은 콘크리트 재료의 비탄성 거동 특성은 시간 의존적인 변형 특성을 갖고 있기 때문에 아직까지도 정확하게 예측 하는데 어려움이 있다.

콘크리트 재료의 장기 비탄성 거동은 구조물에 과다한 처짐을 유발하여 사용성을 저하시키거나 구조부재에 예상치 못한 큰 응력을 발생시킴으로써 심각한 구조적 문제 또한 발생시킬 우려가 있다. 따라서 지금과 같이 구조물이 보다 대형화 및 고층화가 이루어지면 이러한 장기거동 특성을 정확히 예측할 필요가 있다.

초고층 건물의 기둥으로는 RC 기둥과 더불어 효율적이고 복합적인 구조시스템을 위해 철근콘크리트 부재와 구조용 강재를 조합한 SRC(steel reinforced concrete) 기둥이 널리 사용되고 있다. 그런데 최근 연구 보고에 따르면 SRC 기둥의 경우에는 기존의 해석 방법을 사용하여 기둥 축소량을 예측하는 경우 실제보다 과다 예측 하게 되는 경향을 보여주고 있다. 또한 SRC 기둥의 경우 H-형강 플랜지의 외측부에 있는 콘크리트에서 과다한 균열이 발견되는데, 이러한 현상 역시 기존의 해석 방법으로는 설명이 어려운 부분이다. 따라서 SRC 기둥에서 발생하는 기둥 축소량의 과다 예측이나 플랜지 외측부 콘크리트의 과다 균열

* Corresponding author

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

©2006 by Korea Concrete Institute

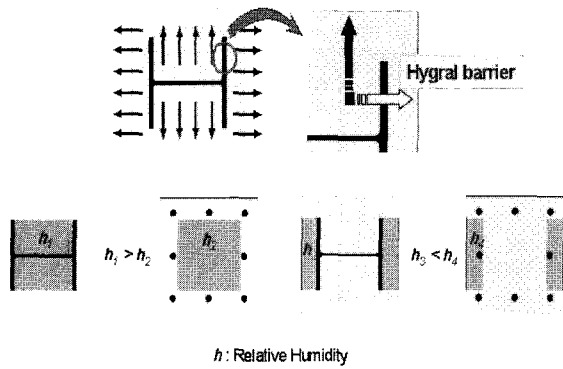


Fig. 1 Obstruction of the moisture diffusion route as it occurs in SRC columns

과 같은 문제들을 해결하여 보다 합리적이고 정확한 기둥 축소량을 예측하기 위해서는 RC 기둥과는 다른 SRC 기둥의 특성을 고려할 수 있는 새로운 해석 방법이 요구된다.

SRC 기둥은 Fig. 1과 같이 콘크리트가 건조될 때 내부의 수분확산 경로를 H-형강과 같은 철골 부재가 차단한다는 점에서 RC 기둥과는 수분확산 진행과정이 다르며, 이와 같은 수분확산 차단 영향으로 인해 건조수축 및 건조크리프의 감소가 발생한다. 따라서 SRC 기둥의 축소량을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 단면 내부에서 부등수분분포로 인해 발생하는 건조수축 및 건조크리프의 감소 효과를 고려해 줄 필요가 있다.

이 논문의 경우 SRC 기둥의 수분확산 특성에 주안점을 두어 수분확산 실험 및 해석을 통해 SRC 기둥 내부에서 발생하는 H-형강에 의한 수분확산 차단의 영향을 검토하였다. 또한 이러한 수분확산 해석 결과를 이용하여 단면의 각 위치에서 발생하는 부등건조수축 및 부등건조크리프 해석을 수행함으로써 단면의 부등수분분포를 고려하여 기둥 축소량을 계산할 수 있는 새로운 해석 방법을 제안하였다.

2. 이론적 배경

2.1 기존 해석법에서 사용되는 예측 모델식의 문제점

콘크리트 재료를 사용한 기둥의 축소량을 예측할 때 콘크리트의 배합 및 콘크리트 구조물이 놓인 환경 조건을 고려하여 예측 모델식을 사용하게 된다. 이러한 예측 모델식은 건조수축이나 크리프와 같은 콘크리트의 장기변형을 산정할 때 사용되며, 어떤 모델식을 적용하는가에 따라 기둥 축소량의 예측 값도 각각 차이를 보이게 된다. 현재 건조수축 및 건조크리프와 같은 콘크리트의 수분확산과 관련된 장기변형을 예측하기 위해서는 일반적으로 ACI, fib, 그리고 PCA 등에서 제시하고 있는 단면에서 평균적인 변형을 나타내는 모델식을 이용하여 산정하고 있다. 여기서 평균적인 변형이라는 것은 실제 단면 내부에서 발생하게 되는

부등수분분포를 전 단면에서 동일한 평균수분분포로 가정하고 단면 각 위치에서 발생하는 건조수축 및 건조크리프 역시 모두 동일하다고 보는 개념이다. 따라서 이러한 기존의 예측 모델식을 SRC 기둥 축소량 예측에 적용하게 되는 경우 H-형강에 의한 수분확산 차단의 영향으로 발생하는 부등수분분포를 고려할 수 없게 되어 실제 축소량과는 상이한 결과를 예측하게 된다.

fib 모델식의 경우 수분확산으로 인한 건조수축의 발생 정도를 식(1)과 같은 건조수축이 시작된 후의 시간에 따른 수축변형률의 변화를 나타내는 함수에서 개념부재치수(notional size of member) h_t 의 함수로 고려하고 있으며, h_t 는 콘크리트의 단면적 A_c 와 외기와 접하는 둘레 길이 u 로서 표현된다¹⁾.

$$\beta_s(t-t_o) = \sqrt{\frac{(t-t_o)}{t_1}} \left(\beta_{SH} + \frac{(t-t_o)}{t_1} \right) \quad (1)$$

여기서, $t_1 = 1$ 일, $\beta_{SH} = 350(h/h_o)^2$, $h_o = 100$ mm, $h_t = 2A_c/u$ (mm)

또한 fib 모델식에서는 ACI 모델이나 PCA 모델과 같이 크리프 변형에 있어 기본크리프와 건조크리프를 별도로 구분하지 않고 하나의 크리프 예측 모델식으로 제안하고 있으며¹⁾, 수분확산으로 인한 건조크리프의 발생 정도를 식(2)와 같이 건조수축 모델식에서 고려한 것과 동일한 방법으로 콘크리트의 단면적 A_c 와 외기와 접하는 둘레 길이 u 로서 표현되는 개념부재치수 h_t 의 함수로 고려하고 있다.

$$\beta_c(t-t') = \left(\frac{(t-t')}{t_1} \right)^{0.3} \left(\beta_H + \frac{(t-t')}{t_1} \right) \quad (2)$$

여기서, $t_1 = 1$ 일이며, 는 아래 식(3)과 같다.

$$\beta_H = 150 \left[1 + (1.2h)^{18} \right] \frac{h_t}{h_o} + 250 \leq 1500 \text{ (일)} \quad (3)$$

식(3)에서 h 는 상대습도, $h_o = 100$ mm이고, $h_t = 2A_c/u$ (mm)이다.

이러한 예측 모델식을 사용할 경우에는 같은 콘크리트 단면적과 외기 노출 면적을 가지는 RC 기둥 및 SRC 기둥의 건조수축과 건조크리프가 서로 같은 결과를 보이게 된다. 따라서 SRC 기둥에서 H-형강에 의한 수분확산 차단의 영향으로 발생하는 건조수축과 건조크리프의 감소를 고려할 수 없게 되어 과다 예측하게 되는 것이다.

예를 들면 RC 및 SRC 기둥 실험체에 대하여 수행된 장기거동 실험 결과²⁾에 대하여 CEB-FIP 모델식을 사용하여

기존의 해석법으로 그 결과를 예측하면 아래 Fig. 2와 같이 RC 기둥의 경우는 기존의 해석방법으로 예측한 결과가 실험결과를 비교적 정확히 모사하고 있으나, SRC 기둥의 경우는 기존의 해석 방법에 적용된 예측 모델식이 H-형강의 수분확산 차단 영향으로 인한 부등수분분포를 고려할 수 없어 SRC 기둥에서 발생하는 건조수축 및 건조크리프를 과다 예측함으로써 예측한 결과가 실험결과보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 ACI 모델이나 PCA 모델에서도 수분확산으로 인한 건조수축 및 건조크리프의 발생 정도를 수분이 발산할 수 있는 표면적에 대한 전체 콘크리트 부피비(v/s)의 함수로만 고려하고 있으므로 마찬가지로 SRC 기둥의 수분확산 특성을 고려할 수 없게 되어 건조수축과 건조크리프를 과다 예측할 우려가 있다. 그러므로 SRC 기둥의 축소량을 합리적으로 예측하기 위해서는 우선 해석 단면에 대해 수분확산 해석을 수행하고, 해석결과로 얻은 시간에 따른 수분분포 변화를 바탕으로 수분확산의 정도에 따라 단면 각 위치에서 발생하는 건조수축 및 건조크리프를 예측할 수 있는 해석방법이 도입되어야 한다.

2.2 수분확산계수와 표면계수

콘크리트 재료에서 건조로 인해 발생하는 부등건조수축

및 부등건조크리프를 예측하기 위해서는 단면 내부의 각 위치에서 시간에 따른 수분분포를 예측할 필요가 있으므로 수분확산 해석이 필수적이며, 이러한 수분확산을 해석하기 위해서는 수분확산 이론이 사용되고 있다. 수분확산 이론에서 다루는 수분확산계수(moisture diffusion coefficient, m^2/h)는 상대습도와 온도의 영향을 주로 받고, 물-시멘트 비, 골재의 양과 질 등 콘크리트의 품질에도 영향을 받게 되므로 콘크리트 내부에서 수분확산 과정을 통해 나타나는 수분의 분포는 고차의 비선형성³⁾으로 나타난다. *fib*의 경우 등온조건에 대해 수분확산계수를 공극의 상대습도 함수로 표현하고 있으며, 식(4)와 같이 수분확산계수⁴⁾를 나타내고 있다.

$$D(h) = D_1 \left(\alpha + \frac{1-\alpha}{1 + [(1-h)/(1-h_c)]^n} \right) \quad (4)$$

여기서, D_1 : $h=1.0$ 인 경우의 수분확산계수(최대 수분확산계수), m^2/h

D_0 : $h=0.0$ 인 경우의 수분확산계수(최소 수분확산계수), m^2/h

α : D_0/D_1

h_c : $D(h)=0.5 D_1$ 에서 공극의 상대습도

n : 지수

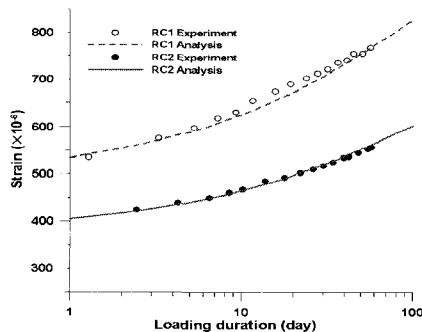
h : 공극의 상대습도

*fib*에서는 근사적으로 $\alpha=0.05$, $h_c=0.80$, $n=15$ 를 제시하고 있다. 그리고 최대 수분확산계수 D_1 은 압축강도의 함수이며, 식(5)와 같다.

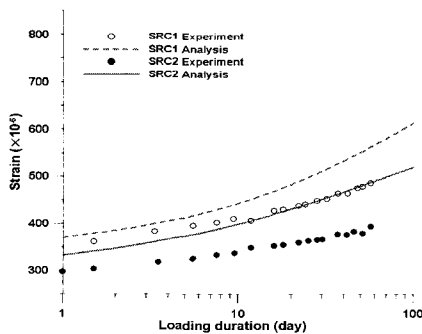
$$D_1 = \frac{D_{1,0}}{f_{ck}/f_{ck0}} \quad (5)$$

여기서, $D_{1,0}=3.6 \times 10^6 m^2/h$ 이고, $f_{ck0}=10 MPa$ 이다. f_{ck} 는 설계기준강도이며 콘크리트의 평균 압축강도(f_{cm})로부터 구할 수 있다($f_{ck}=f_{cm}^8 MPa$).

이 논문의 경우 수분확산 해석에서 중요한 해석변수인 수분확산계수를 결정하기 위해서 *fib*에서 제안하는 식(4)를 사용하였으며, 최대 수분확산계수 D_1 을 주요 해석변수로 두고 SRC 기둥 실험체 제작에 사용된 콘크리트²⁾로 수행된 수분확산 실험 결과에 대해 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석 결과로 실험 결과를 최적으로 모사하는 D_1 값을 구하여 식(4)에 대입함으로써 수분확산계수를 결정하고, 이후에 전개되는 SRC 기둥 단면에 대한 수분확산 해석에 적용하였다. 콘크리트 표면부의 상대습도는 노출된 외부 환경의 습도에 따라 좌우된다. 수분확산 해석을 위해 주로 콘크리트 표면의 상대습도와 외부 습도의 관계는 아래 식(6)과 같은 경계조건으로 주어지고 있다.



(a) RC column specimen



(a) SRC column specimen

Fig. 2 Analysis results of the RC and SRC column shortening obtained with the existing method compared with experimental results

$$D\left(\frac{\partial h}{\partial n}\right)_s = f(h_{en} - h_s) \quad (6)$$

여기서, f 는 표면계수(surface factor, m/s)이며, h_{en} 은 외기의 상대습도, 그리고 h_s 는 노출된 표면의 상대습도를 나타낸다. Sakata는 콘크리트와 외기의 경계면에서 표면계수와 물-시멘트비의 관계에 대하여 식(7)과 같은 식으로 제시하였다⁵⁾.

$$f = 2.17 \times 10^{-3} \left(\frac{w}{c}\right) - 8.56 \times 10^{-4} \quad (7)$$

여기서, f : 표면계수(m/h), w/c : 물-시멘트비(0.7~0.4)

이 논문의 경우 수분확산 해석에서 경계조건을 나타내는 식(6)에서 사용되는 표면계수 f 를 주요 해석변수로 두고 SRC 기둥 실험체 제작에 사용된 콘크리트²⁾로 수행된 수분확산 실험 결과에 대해 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석 결과로 실험 결과를 최적으로 모사하는 f 값을 구하여 식(6)에 대입함으로써 경계조건을 결정하고 이 후에 전개되는 SRC 기둥 단면에 대한 수분확산 해석에 적용하였다.

2.3 부등건조수축과 부등건조크리프의 예측

앞서 살펴본 바와 같이 SRC 기둥의 건조수축량을 보다 합리적으로 산정하기 위해서 단면 각 위치의 부등수분분포에 따라 발생하는 부등건조수축을 정량적으로 예측할 필요가 있다. 이 논문의 경우 SRC 기둥에서 발생하는 부등건조수축량을 예측하기 위해서 단면 각 위치의 상대습도와 건조수축과의 관계에 대하여 Bazant가 제안한 다음 식(8)⁶⁾을 사용하였다.

$$\Delta\epsilon_{sh} = k_{sh}\Delta h \quad (8)$$

여기서, $\Delta\epsilon_{sh}$ 는 콘크리트 내부의 각 위치에서 발생하는 상대습도의 변화 Δh 에 따른 부등건조수축 변형률의 변화량이다. 그리고 건조수축계수(shrinkage coefficient)라고 표현되는 k_{sh} 는 식(9)와 같다.

$$k_{sh} = \epsilon_s^0 g_s(t) \quad (9)$$

여기서, ϵ_s^0 : 극한 건조수축으로 최종 건조수축량의 크기를 의미하는 재료 상수

$$g_s(t) = E_c(t_0)/E_c(t)$$

$$E_c(t) = E_c(28) \sqrt{\frac{t}{4 + 0.85t}}$$

$$E_c(28) = 33w^{1.5} \sqrt{f_{ck}}$$

위와 같은 식(8)과 식(9)를 사용하여 콘크리트 내부의 각 위치에서 발생하는 부등수분분포에 따른 부등건조수축량을 예측할 수가 있다. 이 논문의 경우 극한 건조수축 ϵ_s^0 를 주요 해석변수로 두고 SRC 기둥 실험체에 사용된 것과 동일한 콘크리트에 대해 수행된 건조수축 실험 결과²⁾에 대한 회귀분석을 통해 실험 결과를 가장 잘 모사하는 ϵ_s^0 값을 구함으로써 SRC 기둥 실험체의 축소량 예측에 사용하였다.

콘크리트에서 크리프는 크게 두 가지 경우로 나누어진다. 실험체를 밀폐시켜 수분의 증발을 막은 상태에서 발생하는 크리프를 기본 크리프(basic creep)라고 하고, 외기에 노출된 상태에서 발생한 크리프를 건조크리프(drying creep)라고 한다. 부등건조수축이 발생하면 각 위치에서 건조에 의한 함수량이 다르기 때문에 건조크리프도 각 위치에 따라 다르다. 즉 콘크리트 내부의 부등수분분포로 인하여 각 위치에서 부등건조크리프 현상이 발생하게 된다. 따라서 건조에 의해 발생하는 콘크리트의 내부 응력을 정량적으로 해석하기 위해서 부등건조수축뿐만 아니라 부등건조크리프를 동시에 고려할 수 있어야 한다.

이 논문의 경우 SRC 기둥에서 발생하는 부등건조크리프를 예측하기 위해서 단면 각 위치의 상대습도와 건조크리프의 관계에 대하여 Bazant가 제시한 식(10)⁶⁾을 사용하였다.

$$\Delta\epsilon_{dc} = k\Delta h \quad (10)$$

여기서, $\Delta\epsilon_{dc}$: 각 위치에서 발생하는 부등건조크리프의 변화량

k : 응력에 의존하는 계수

Δh : 각 위치에서 발생하는 상대습도의 변화량

응력에 의존하는 계수 k 는 다음과 같다.

$$k = k_{sh} r \sigma \text{sign}(\bar{h}) \quad (11)$$

여기서, k_{sh} : 건조수축계수로서 식(9)와 같음

γ : 내부 수분의 미소확산 유속 \bar{h} 와 관계있는 상수

α : 각 위치에서 발생하는 응력

$\text{sign}(\bar{h})$: 내부 수분의 미소확산 유속 \bar{h} 의 부호(방향성)

위와 같은 식(10)과 식(11)을 사용하여 콘크리트 내부의 각 위치에서 발생하는 부등수분분포에 따른 부등건조크리프를 예측할 수가 있다. 이 논문의 경우 내부 수분의 미소확산 유속 \bar{h} 와 관계있는 상수 γ 를 주요 해석변수로 두고 SRC 기둥 실험체에 사용된 것과 동일한 콘크리트에 대해 수행된 건조크리프 실험 결과²⁾에 대한 회귀분석을 통해 실험 결과를 가장 잘 모사하는 γ 값을 구함으로써 SRC 기둥 실험체의 축소량 예측에 사용하였다.

3. 해석변수를 결정하기 위한 실험 및 해석

3.1 수분확산 관련 해석변수 D_f 과 f 의 결정

수분확산 관련 해석변수인 D_f 과 f 를 결정하기 위해서 수분확산 실험 및 해석을 수행하였으며, 회귀분석을 통해 실험결과를 가장 잘 묘사하는 D_f 과 f 값을 결정하였다.

양생 초기에 외기에 노출된 콘크리트 부재는 수분확산 현상과 더불어 콘크리트의 수화 반응에 의해서 발생하는 자체건조(self-desiccation)에 의해서도 내부 수분이 감소한다. 또한 수화반응으로 소모된 물은 비증발성인 화학적 결합수가 되어 보통의 건조상태에서 증발하지 않으며, 1000 °C 정도의 강제건조에 의해서만 증발한다. 따라서 수분확산에 의한 내부 습도 감소만을 고려하기 위해서는 자체건조에 의한 내부 수분 손실을 감안하여야 한다. 이 논문에서는 콘크리트 수분확산 실험과 자체건조 실험을 병행하여 자체건조에 따른 내부 손실을 고려하였다.

수분확산 실험은 2.1절에서 언급한 SRC 기둥 실험체와 동일한 배합을 사용하여 수행하였으며, 배합표는 아래 Table 1과 같다.

모든 콘크리트 실험체는 100×100×200 mm 크기의 직육면체 형태로 제작하였으며, 타설 후 1일간 습윤 양생을 실시하고 온도 20 °C, 상대습도 60%로 유지되는 항온항습 챔버로 실험체를 옮겨 내부의 상대습도를 측정하였다. 이 때, 수분확산 조건을 1차원으로 만들기 위해서 100×100 mm 한쪽 면을 제외한 모든 면을 밀봉하였으며, 자체건조 실험체의 경우에는 모든 면을 밀봉하였다. 상대습도를 측정하는 위치는 노출 표면으로부터 30 mm, 60 mm, 그리고 100 mm 거리의 3군데로 하였으며, 자체건조로 인한 수분 손실은 실험체 길이 200 mm의 중간 지점에 해당하는 100 mm 위치에서 측정하였다. 측정 장치를 삽입한 깊이는 실험체 깊이(100 mm)의 중간 지점인 50 mm로 하였다. 상대습도 측정 장치는 Vaisala HMP44 probe와 HMI41 indicator를 사용하였다. 모든 측정 기기들에 대해 실험 전에 미리 포화상태를 기준으로 상대습도 출력값을 기록하여 출력 오차를 보정하는데 사용하였다. 타설할 때, 내부 습도를 측정하고자 하는 위치에 플라스틱 슬리브를 미리 삽입, 고정하여 양생한 뒤에, 실험체를 항온 항습 챔버에 넣기 전에 측정 장치를 플라스틱 슬리브에 삽입하고 고무 플러그로 틈새를 막은 뒤 그리스로 봉하여 슬리브 내부를 외기로부터 밀폐시켰다.

Table 1 The mix proportion

Cement type	Water-binder ratio(%)	Fine agg. ratio(%)	Unit weight(kg/m ³)						
			Water	Cement	Fly ash	Slag	Fine agg.	Coarse agg.	Super plasticizer
1	33.9	43	161	403	48	24	720	976	6.65

부등수분분포를 고려한 SRC 기둥의 축소량에 관한 연구

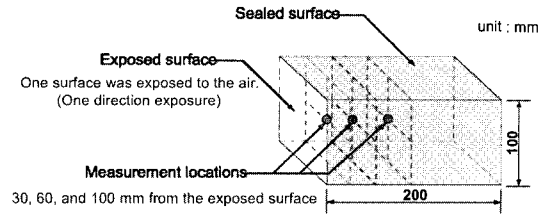


Fig. 3 The shape of specimens and measurement locations

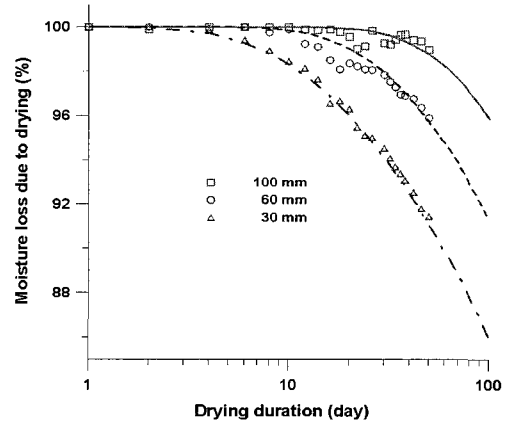


Fig. 4 Analytic results compared with experimental result

제작된 실험체 형상 및 상대습도 측정위치는 아래 Fig. 3과 같다. 1면 노출로 측정된 수분확산 실험 결과는 수분확산에 의한 수분 손실뿐만 아니라 자체건조에 의한 수분 손실이 포함되어 있으므로 모든 면을 밀봉하여 자체건조를 측정할 실험체로부터 얻은 수분 손실량 만큼을 증가시켜 보정하였다. 아래 Fig. 4는 회귀분석을 통해 결정된 해석변수 D_f 과 f 를 적용한 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 시간축을 log scale로 나타낸 그래프이다.

모든 측정 위치에서 실험 결과와 해석 결과가 대체적으로 근접한 결과를 보이고 있음을 알 수 있으며, 상대습도 측정기기의 오차 및 실험 오차를 감안하면, 해석 결과가 콘크리트의 수분확산을 잘 묘사한다고 볼 수 있다. 수분확산 실험 결과를 최적으로 묘사하는 D_f ($h=1.0$ 인 경우의 수분확산계수, 최대 수분확산계수) 값은 $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ 이고, 표면계수 f 값은 $12 \times 10^{-6} \text{ m/h}$ 이었다. 이렇게 구한 두 해석변수는 다음에 수행할 콘크리트의 부등건조수축 및 부등건조크리프 해석에 사용하였다.

3.2 부등건조수축 및 부등건조크리프와 관련된 해석변수 ϵ_s^0 와 r 의 결정

부등건조수축과 관련된 해석변수 ϵ_s^0 및 부등건조크리프와 관련된 해석변수 r 을 결정하기 위해서 부등건조수축 및

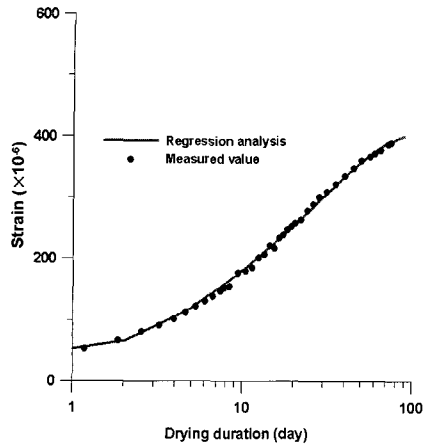


Fig. 5 Regression analysis of drying shrinkage

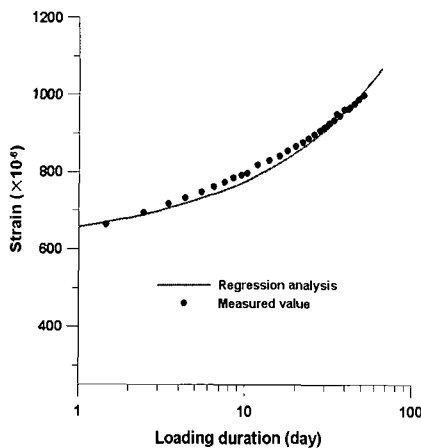


Fig. 6 Regression analysis of drying creep

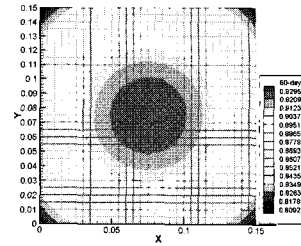
부등건조크리프 해석을 수행하였으며 이 해석 결과를 이전에 동일한 배합의 콘크리트로 수행한 건조수축 및 전체크리프 실험결과²⁾에 대해 회귀분석하여 ϵ_s^0 및 r 값을 결정하였다. 부등건조수축 및 부등건조크리프 해석은 3.1절에서 설명한 수분확산 해석 결과를 바탕으로 2.3절의 부등건조수축 예측식(식(8)) 및 부등건조크리프 예측식(식(10))을 사용하여 해석법으로 수행하였다⁶⁾.

아래 Fig. 5는 무근 콘크리트에 대해 수행한 건조수축 실험결과²⁾에 부등건조수축 해석 결과를 회귀분석한 결과를 시간축을 log scale로 나타낸 그래프이다.

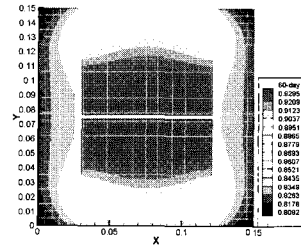
회귀분석을 통해 건조수축 실험결과를 가장 잘 모사하도록 결정된 해석변수의 값은 $\epsilon_s^0 = -1000 \times 10^{-6}$ 이었다.

Fig. 6은 무근 콘크리트에 대해 수행한 전체크리프 실험결과에 부등건조크리프 해석 결과를 회귀분석한 결과를 시간축을 log scale로 나타낸 그래프이다.

부등건조크리프 해석에 사용된 해석변수는 식(11)의 r (내부 수분의 미소확산 유속 \bar{h} 와 관계있는 상수)이었으며 회귀분석 결과 $r = 1.77 \times 10^{-8} (1/(kgf/m^2))$ 과 같이 나타났다.



(a) Moisture diffusion in a RC column



(b) Moisture diffusion in a SRC column

Fig. 7 The results of moisture diffusion analyses of SRC and RC columns at 60 days

이와 같은 회귀분석을 통해 결정된 두 해석변수 $\epsilon_s^0 = -1000 \times 10^{-6}$ 과 $r = 1.77 \times 10^{-8} (1/(kgf/m^2))$ 는 4장의 SRC 기둥 축소량 예측에서 부등건조수축 및 부등건조크리프 해석에 적용되었다.

4. 부등수분분포를 고려한 SRC 기둥의 축소량 예측

4.1 SRC 기둥 실험체의 수분확산 해석 결과

SRC 기둥의 내부 강제는 콘크리트 내부 수분의 확산을 방지하는 역할을 하며, 따라서 RC 기둥과는 매우 다른 수분분포를 갖게 된다. 이러한 수분분포의 차이는 건조수축과 건조크리프에 직접적으로 영향을 미치게 되어 RC 기둥과는 상이한 장기거동 특성을 나타낸다. RC 기둥의 경우는 철근이 수분확산에 미치는 영향을 무시하면 콘크리트의 수분확산 형태가 무근 콘크리트 기둥과 같다고 볼 수 있다. 따라서 수분분포의 차이를 확인하기 위해 2.1절의 SRC 기둥 실험체와 더불어 같은 크기의 단면을 갖는 철근 콘크리트에 대한 수분확산 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 최대 수분확산계수와 표면계수는 각각 3.1절에서 결정한 $1.8 \times 10^{-6} m^2/h$ 와 $12 \times 10^{-6} m/h$ 를 사용하였다.

Fig. 7은 철근 콘크리트 기둥과 SRC 기둥 실험체에서 건조기간이 60일일 때의 수분확산 해석 결과를 나타낸다.

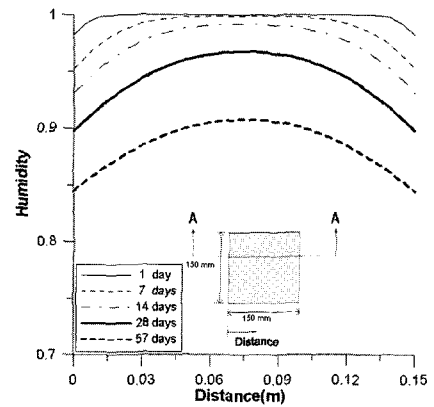
위의 해석 결과에서 알 수 있듯이 철근 콘크리트 기둥의 경우 전 단면에 걸쳐 방사형으로 수분확산이 진행되지만 SRC 기둥의 경우에는 H-형강의 플랜지 부위가 내부 수분

의 이동을 차단하게 되므로 플랜지 외부와 복부의 쪽 방향으로 수분확산이 진행되어 플랜지 내부와 외부사이의 수분 분포에 차이가 발생하게 된다. 즉 같은 단면 크기를 가지는 기둥이라 할지라도 시간이 지남에 따라 RC 기둥과 SRC 기둥은 서로 다른 수분분포를 보이게 되며, 이러한 현상은 건조수축 및 건조크리프에 직접적인 영향을 주게 된다. Fig. 8은 무근 콘크리트 기둥과 SRC 기둥 실험체에서 단면 A-A를 따라 변화하는 수분분포를 시간에 따라 나타낸 것이다. SRC 기둥 실험체에 대한 수분확산 해석 결과인 Fig. 8(b)와 철근 콘크리트 기둥에 대한 해석결과인 Fig. 8 (a)를 비교해 보았을 때, 강제 외부 콘크리트의 수분 손실은 철근 콘크리트에 비해 시간에 따라 현저히 빠르게 나타나고 있으며, 강제 내부 콘크리트의 수분 손실은 철근 콘크리트에 비해 매우 느린 것으로 나타났다. 이러한 해석 결과로 보았을 때, SRC 기둥에서 플랜지 외측부의 콘크리트는 다른 부위에 비해 수분확산이 매우 빠른 속도로 진행되므로 과도한 균열이 발생하게 되는 것을 알 수 있다. 내부 콘크리트의 경우는 수분확산이 차단되어 느리게 진행됨으로써 건조수축과 건조크리프가 같은 단면 크기와 노출 면적을 가지는 RC 기둥에 비해 매우 작을 것으로 판단된다. 또한 단면의 크기가 큰 경우 내부 콘크리트의 단면적이 외부에 비해 상대적으로 커지므로 건조수축과 건조크리프의 감소효과가 증가할 것으로 사료된다.

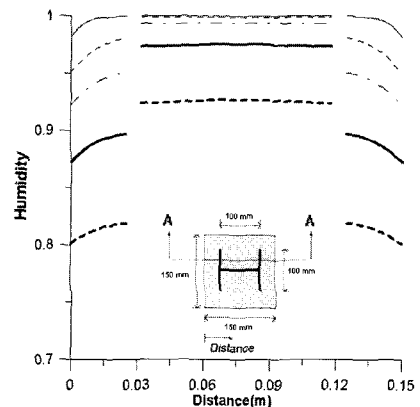
4.2 부등건조수축 및 부등건조크리프를 고려한 SRC 기둥의 축소량 예측

SRC 기둥의 축소량을 합리적으로 예측하기 위해서 4.1절에서 설명한 수분확산 해석 결과를 바탕으로 2.3절의 부등건조수축 예측식(8) 및 부등건조크리프 예측식(10)을 사용하여 단면의 각 위치에서 발생하는 부등건조수축 및 부등건조크리프를 계산하였다. 이러한 방법으로 예측된 SRC 기둥 실험체의 축소량 해석 결과를 실험으로부터 측정된 값과 비교하기 위해서 수분확산 실험체와 동일한 콘크리트 배합으로 제작되어 동일한 온도 및 습도조건(20°C, 상대습도 60%)하에서 수행된 SRC 기둥 축소량 실험 결과²⁾를 사용하였으며, SRC 기둥 실험체의 형상 및 크기는 Fig. 9와 같다. 아래 Fig. 10은 SRC 기둥 실험체 단면내의 부등수분분포를 고려하여 기둥 축소량을 예측한 경우와 고려하지 않은 경우를 실험 결과와 비교하여 나타낸 그래프이다.

이미 2.1절에서 확인한 바와 같이 SRC 기둥의 단면 내부에서 H-형강에 의해 수분확산이 차단되어 발생하는 부등수분분포를 고려하지 않고 전 단면에 걸쳐서 동일한 건조수축 및 건조크리프가 발생한다고 보는 경우, 실제 측정되는 축소량보다 더 많이 발생한다고 보게 되므로 SRC 기둥의 축소량을 과다 예측하게 될 우려가 있다. 그러나 SRC 기둥 단면에 대한 수분확산 해석을 통해 단면의 각



(a) RC column specimen



(b) SRC column specimen

Fig. 8 The results of moisture diffusion analyses of SRC and RC columns

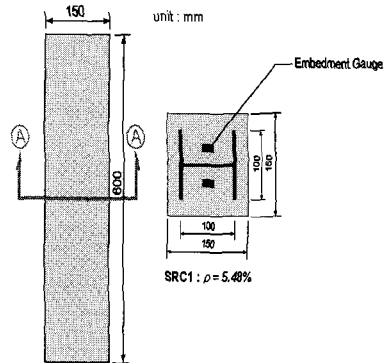


Fig. 9 Specimen geometry and instrumentation of SRC column

위치에서 부등수분분포를 고려하여 부등건조수축 및 부등건조크리프를 고려해 줄 경우 위 Fig. 10에서 보듯이 실제 실험에서 측정된 실험 결과를 더욱 정확하고 합리적으로 예측할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, SRC 기둥의 축소량을 더 정확하고 합리적으로 예측하기 위해서는 수분확산 해석을 통해 단면의 각 위치에 따른 부등수분분포를 구하고 이를 부등건조수축 및 부등건조크리프 해석에 적용하는 것이 바람직하다.

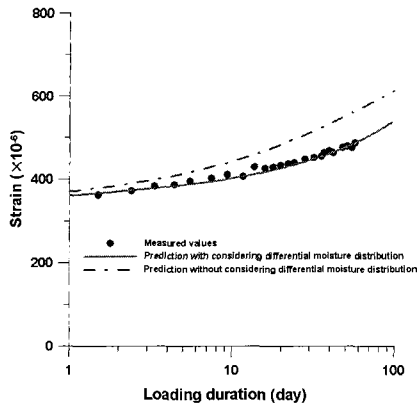


Fig. 10 Column shortening analysis considering differential moisture distribution

5. 결 론

이 논문은 SRC 기둥의 기둥 축소량을 보다 정확하고 합리적으로 예측하기 위해서 SRC 기둥의 수분확산 특성에 주안점을 두고 수분확산 실험 및 해석을 통해 SRC 기둥 내부에서 발생하는 H-형강에 의한 수분확산 차단의 영향을 검토하는 연구를 수행한 것이다. 또한 이러한 수분확산 해석결과를 이용하여 단면의 각 위치에서 발생하는 부등 건조수축 및 부등건조크리프 해석을 수행함으로써 SRC 기둥에서 단면의 부등수분분포를 고려하여 보다 정확한 기둥 축소량을 예측할 수 있는 새로운 해석방법을 제안하였다. 이 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) SRC 기둥의 기둥 축소량을 예측할 때 실제 단면 내부에서 발생하게 되는 부등수분분포를 전 단면에서 동일한 평균수분분포로 가정하고 단면 각 위치에서 발생하는 건조수축 및 건조크리프 역시 모두 동일하다고 가정하는 평균적인 개념의 예측 모델식을 적용하는 기존의 기둥 축소량 해석법은 실제 기둥 축소량보다 과다 예측한다.
- 2) SRC 기둥은 단면 내부의 H-형강이 콘크리트의 수분확산을 제한하게 되므로 RC 기둥과는 다른 내부 수분분포를 보이게 되고, 이러한 현상은 건조수축 및 건조크리

프에 직접적으로 영향을 주게 되어 RC 기둥과는 상이한 기둥 축소량을 보인다.

- 3) SRC 기둥은 단면 내부의 H-형강에 의한 수분확산 차단의 영향으로 같은 단면 크기와 외기 노출 면적을 가지는 RC 기둥에 비해 플랜지 내부 콘크리트에서 높은 상대습도를 보이게 되고, 이는 건조수축 및 건조크리프의 감소로 인한 전체 축소량의 감소를 가져온다.
- 4) SRC 기둥의 축소량을 합리적이고 정확히 예측하기 위해서는 수분확산 해석 결과를 부등건조수축 및 부등건조크리프 해석에 사용하여 SRC 기둥이 가지는 단면 내부의 부등수분분포 특성을 고려해 주어야 한다.

감사의 글

이 연구는 현대건설 “고층건물 합성기둥의 축소량 연구”의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Comite Euro-International Du Beton, “CEB-FIP Model Code 1990”, 1990, pp.51~58.
2. S. H. Kwon, J. K. Kim, and H. W. Jung, “Experimental Study on Long-term Behavior of RC and SRC Columns (in Korean)”, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.15, No.1, Korea Concrete Institute, 2003. 5, pp.481~486.
3. Sakata, K., “A Study on Moisture Diffusion in Drying and Drying Shrinkage of Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.13, No.2, 1983, pp.216~224.
4. Comite Euro-International du Beton, “CEB-FIP Model Code 1990”, 1993, 437pp.
5. Sakata, K., “A Study on Moisture Diffusion in Drying and Drying Shrinkage of Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.13, No.2, 1983, pp.216~224.
6. Bazant, Z. P. and Yunping Xi, “Drying Creep of Concrete: Constitutive Model and New Experiments Separating Its Mechanisms”, *Materials and Structures*, Vol.27, 1994, pp.3~14.

요 약

초고층 건물에서 널리 사용되고 있는 SRC 기둥은 콘크리트의 크리프와 건조수축으로 인하여 시간 의존적인 거동을 보인다. 이러한 장기거동은 초고층 구조물에 기둥의 부등 축소량을 야기시키게되어 심각한 사용성 문제와 구조적 문제를 유발하게 되므로, 구조물의 장기 변형을 정확히 예측하는 것이 중요하다. 최근 연구보고에 따르면 SRC 기둥의 장기변형은 RC 기둥의 장기변형과 매우 다른 양상을 보이고 있다. 따라서 SRC 기둥의 축소량을 정량적으로 예측하기 위해서는 기존의 평균적인 개념의 해석방법과는 다른 SRC 기둥의 수분확산 특성을 고려할 수 있는 새로운 해석방법이 요구된다. 이 연구에서는 RC 기둥과 SRC 기둥이 보이는 장기거동이 서로 다른 원인을 수분확산 특성에 주안점을 두어 검토하였다. SRC 기둥은 내부 형강의 플랜지가 콘크리트의 수분확산을 제한하게 되어 RC 기둥과는 다른 수분분포를 보이게 되며, 이러한 부등수분분포의 영향으로 인해 건조수축과 건조크리프의 양이 감소하게 된다. 따라서 SRC 기둥의 축소량을 보다 합리적이고 정확히 예측하기 위해서는 수분확산 해석을 통해 수분분포를 파악하고 이를 건조수축과 건조크리프 해석에 적용함으로써 단면 내부의 부등수분분포를 고려하여야 한다.

핵심용어 : SRC 기둥, 수분확산, 건조수축, 건조크리프, 부등수분분포