

실례를 통한 초고층 건물 기둥의 부등축소량 예측 및 시공오차 보정



송 진 규*

1. 서 론

고층 철근 콘크리트 건물에서 구조재 및 비구조재의 강도와 사용성을 모두 만족시키기 위해서는 수직콘크리트 부재에서 발생하는 탄성축소, 크립, 건조수축 등의 부등변형 효과를 특별히 고려해야 한다. 시간에 따른 변형량의 크기와 이것이 콘크리트 구조물에 미치는 영향에 대한 예측 및 모니터링은 기존의 부재해석 방법에 비해 매우 복잡하므로 정확도는 다소 떨어지더라도 해석이 용이한 약산해법에 의한 접근이 필요하다. 시간에 따른 재료의 거동 및 구조물의 응답을 예측하기 위하여 1987년 PCA에 소개되었던 약산해법은 기둥을 구조체에서 분리하여 따로 장기변형을 계산한 후에 기둥간 발생한 축소량의 차이를 구하는 것으로, 탄성해석과 유사한 정도의 계산량으로 임의의 시간 단계에서의 거동을 예측할 수 있다. 그러나 이 방법이 건물의 설계단계에서 비교적 근사적인 값

을 제공해 줄 수는 있으나 변형에 대한 골조의 구속 효과를 고려하지 못하게 되어 다소 결과치가 과대평가 되는 단점을 가지고 있어 정확도를 개선하기 위해서는 다양한 건물들에 대한 실측 데이터와 실험자료들에 의한 보정이 필요할 것이다. 본고에서는 현재 인도네시아에 시공중인 아마타푸라 아파트(52층,42층)[RC 플랫슬래브 구조]에 적용한 예측 사례를 소개함으로써, 추후 국내에 시공될 초고층 건물에 대한 기둥간 부등축소량의 정확한 예측 및 시공단계에서의 실질적인 보정이 가능하도록 하는 데 주안점을 두었다.

2. 장기변형의 평가

2.1 시공단계에 관련된 구조거동

전체 N개의 층수를 갖는 고층건물의 수직부재는 N개의 연속된 분할요소로 볼 수 있다(그림 1참조). 시공과정에 있어서 각 분할요소들은 타설후

* 정회원, 현대건설 기술연구소 선임연구원

에 가해지는 하중으로 인하여 탄성변형을 일으키게 되고 수분 손상에 의한 건조수축과 압축하중에 의한 크립이 발생하기 시작한다. 따라서, 이로인한 슬래브의 최종 위치는 다음과 같이 구분되는 두 단계의 지점 축소량의 합으로 표현될 수 있다.

1) Pre-installation shortenings :

슬래브가 타설되는 시점까지 발생한 축소량

2) Post-installation shortenings :

슬래브 타설 이후에 추가로 발생하는 축소량

철근 콘크리트 건물의 경우, 거푸집 설치시 수평레벨을 조절하게 되므로 Pre-installation shortening은 자동적으로 보정이 되고 실제로 보정이 필요한 것은 Post-installation shortening이다. 그러나 철골기둥의 경우에는 철근콘크리트조와는 달리 슬래브를 받치는 부가물이 기둥의 일부가 되므로 pre-installation shortening이 매우 중요하게 취급되어야 하며 이 때의 예측 보정량은 pre-installation shortening과 post-installation shortening의 합이된다.

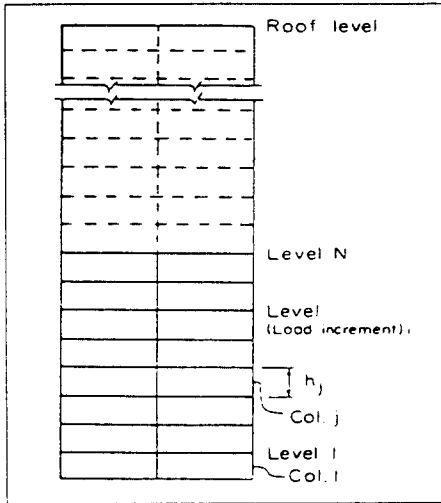


그림 1 Schematic section of a multistory building

2.2 장기하중에 의한 축소량 예측 흐름도

2.2.1 탄성 축소량 예측

$$\Delta_{l,p}^e = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j}^N \frac{P_i \cdot h_j}{A_{t,i,j} \cdot E_{ct,i,j}}$$

i = 특정한 층, 혹은 하중증가

j = 특정기둥

P = 작용하중

h = 층고

A_t = 시간에 따른 기둥단면의 변형면적

E_{ct} = 시간에 따른 콘크리트의 탄성계수

2.2.2 건조수축 축소량 예측

$$\Delta_p^s = \sum_{j=1}^N h_j \cdot \epsilon_{sx,j} \cdot SH_{v:s,j} \cdot SH_H \cdot SH_{t,j} \cdot SH_{R,j}$$

ε_{sx} = 극한 건조수축 변형도

SH_{v:s,j} = 부피에 대한 표면적 비 계수

SH_H = 상대습도 계수

SH_t = 시간에 따른 건조수축 계수

SH_R = 건조수축에 의한 평균 잔여계수

2.2.3 Creep 축소량 예측

$$\Delta_{l,p}^c = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j}^n \frac{P_i CR_{LA,i,j}}{A_{t,i,j}} \epsilon_{cx,j} h_j \cdot CR_{v:s,j} \cdot CR_H \cdot CR_{t,j} \cdot CR_{R,i,j}$$

CR_{LA,i,j} = 하중재하 시간에 따른 계수

ε_{cx,j} = 극한 크립 변형도

CR_{v:s} = 부피에 대한 표면적 비 계수

CR_H = 상대습도 계수

CR_t = 재하시간에 따른 크립계수

CR_R = 잔여 크립계수

3. 실례를 통한 예측이론의 적용 및 시공오차 보정

3.1 개요

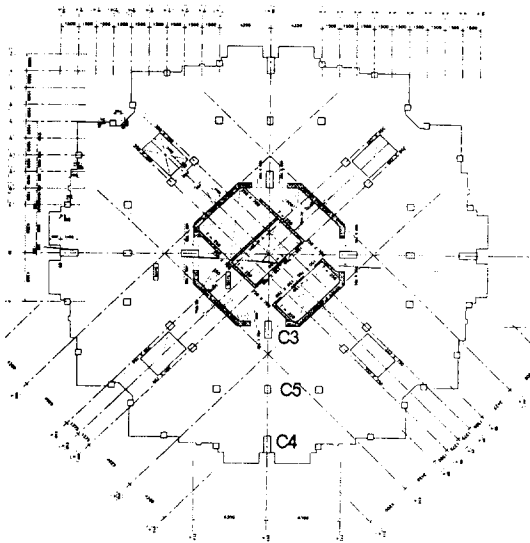
본 장에서는 기둥들간의 부등축소량을 계산하기 위하여 현재 인도네시아에서 현대건설에 의해 시공중인 Amatapura Apartment 건물을 대상으로 채택하였다. 이 건물은 내부 코아를 갖는 Tower형 RC 플랫폼슬래브 골조로서 52층(Tower A),

42층(Tower B)의 2동으로 이루어져 있다(그림 2 참조).

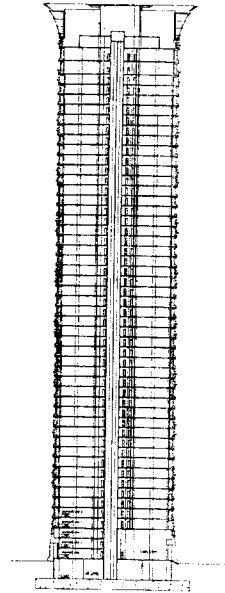
3.2 Amatapura Apartment in Indonesia

3.2.1 구조 시스템 및 재료 성능

부동축소량 예측을 위하여 사용한 기둥은 C3



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 2 아마트푸라 아파트(52층, 인도네시아)

표 1 아마트푸라 C-3 기둥의 재료성능

STORY	Design F'c (psi)	Gross area (in ²)	Steel area (in ²)	Floor dead load (kips)	Suspended dead load (kips)	V/S Ratio (in)	Basic Strain of Creep ($\times 10^{-4}$)	Basic Strain of Shrinkage
0-1	8520	2480	31.2	30.80	10.27	12.45	4.69	0.0008
1-5		1860	24.95	41.70	13.90	10.78		
5-7		1860	1860	24.95	41.70	13.90		
7-24	18.7							
24-26	21.83							
26-29	5680	1395	31.2	38.50	12.83	9.34	7.04	
29-31			24.95					
31-34			15.6					
34-39	4260	1395	15.6	38.50	12.83	9.34	9.39	
40-47			9.8				9.39	
47-48			9.8				9.48	
48-49			9.8				9.86	
50-51			9.8				10.49	
51-52			9.8				11.74	
52-HP			9.8				15.49	

* 층고는 전층이 9.8ft * Cycle time=5days /floor * 습도 80% * Suspended dead load는 건설 최상층의 20층 하부에서부터 올라감. * Construction live load=8.84 kips

표 2 아마타푸라 C-4 기둥의 재료성능

STORY	Design F ^c (psi)	Gross area (in ²)	Steel area (in ²)	Floor dead load (kips)	Suspended dead load (kips)	V/S Ratio (in)	Basic Strain of Creep (×10 ⁻⁴)	Basic Strain of Shrinkage
0-1	8520	2480	37.44	30.8	10.6	12.45	4.69	0.0008
1-2		1860	31.2	51.4	17.7	10.78		
2-5		1860	24.95	44.8	15.4	10.78		
5-10	7100	1860	24.95	44.8	15.4	10.78	5.63	
10-16			31.2					
16-26			37.44					
26-27	5680	1395	18.72	44.8	15.4	9.34	7.04	
27-31			18.72	39.8	13.7			
31-34			15.6	39.8	13.7			
34-39	4260	1395	15.6	39.8	13.7	9.34	9.39	
40-47			9.8				9.39	
47-48			9.8				9.48	
48-49			9.8				9.86	
50-51			9.8				10.49	
51-52			9.8				11.74	
52-HP			9.8				15.49	

표 3 아마타푸라 C-5 기둥의 재료성능

STORY	Design F ^c (psi)	Gross area (in ²)	Steel area (in ²)	Floor dead load (kips)	Suspended dead load (kips)	V/S Ratio (in)	Basic Strain of Creep (×10 ⁻⁴)	Basic Strain of Shrinkage
0-1	8520	1256	12.48	15.6	5.4	8.86	4.69	0.0008
1-2		837		46.7	16.1	7.23		
2-5		837		42.3	14.6	7.23		
5-26	7100	837	9.36	42.3	14.6	7.23	5.63	
26-27	5680	543	12.48	42.3	14.6	5.83	7.04	
27-34				39.1	13.5	5.83		
34-39	4260	543	9.36	39.1	13.5	5.83	9.39	
40-45		543	5.3	39.1		5.83	9.39	
45-46		388	4	39.1		4.92	9.39	
46-47		388	4	37.5		4.92	9.39	
47-48		388	4	37.5		4.92	9.48	
48-49		388	4	37.5		4.92	9.86	
50-51		388	4	37.5		4.92	10.49	
51-52		388	4	37.5		4.92	11.74	
52-HP		388	4	37.5		4.92	15.49	

(코아축 내부기둥), C4(외부기둥), C5(내부기둥)이며, 이들에 대한 재료 특성은 표1~표3 과 같다.

건설과정에서 기둥에 적용되는 하중은 크게 3가지 종류로 나눌 수 있다.

1. *Dead Load* : 슬래브 및 기둥 자중
2. *Suspended Dead Load* : *Cladding*, 내부 마감

재등 골조공사 과정중에 설치되는 고정하중

3. *Construction Live Load* : 가설재 등의 시공하중

3.2.2 기둥의 부등 축소량 예측 및 결과 분석
본 절에서는 각 기둥들의 시공단계에 따른 탄성 변형, 건조수축 및 크립에 의한 축소량을 4개층을

1 Tier로 구분하여 계산하였다(계산 예 [부록] 참고). RC 기둥에 발생하는 임의층의 변형에 있어서 그 층의 슬래브가 타설되기 이전에 발생한 축소량(up to slab)은 거푸집 설치시 수평보정을 하게 되므로 큰 의미가 없다. 따라서, 필요한 보정량의 예측은 슬래브 타설 후 상부층의 하중으로 인하여 발생하는 변형량에 대한 것(subsequent)만이 필요하게 된다.

변형량은 골조공사 완료 시점에서 발생하는 각

층의 최종 변형량(total)에서 슬래브 타설 단계에서 발생한 변형량(up to slab)을 제거해 줌으로써 구할 수 있다. C3, C4, C5기둥에 대한 축소량 예측 결과는 그림 4-그림6 과 같다. 골조공사가 끝나는 단계(255일)까지의 기둥 축소량의 크기는 탄성 변형량이 가장 크며 건조수축의 영향이 가장 적은 것으로 나타났다. 상부층에서의 최대 축소량은 내부기둥인 C5의 경우 99.39mm가 발생하였고 외부기둥 C4의 경우는 38.02mm가 축소되는 것으로 계

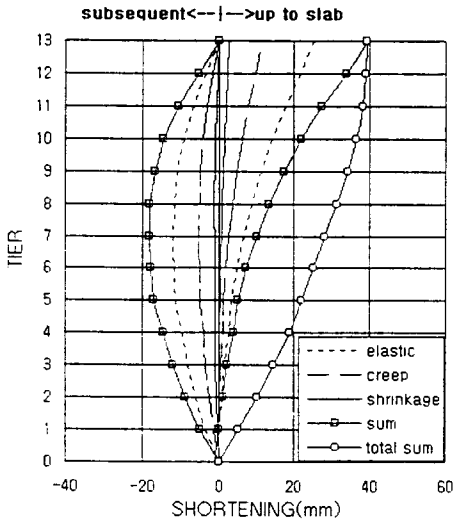


그림 3 C3 기둥의 축소량

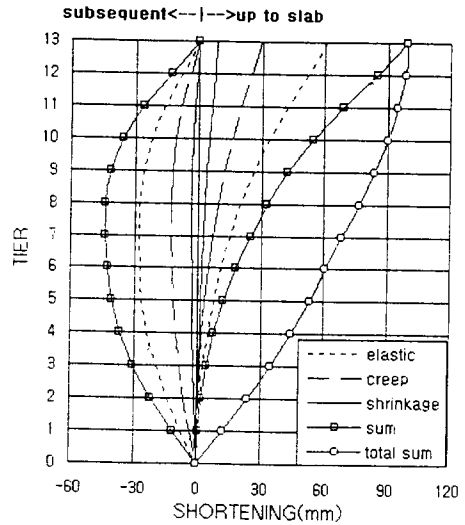


그림 5 C5 기둥의 축소량

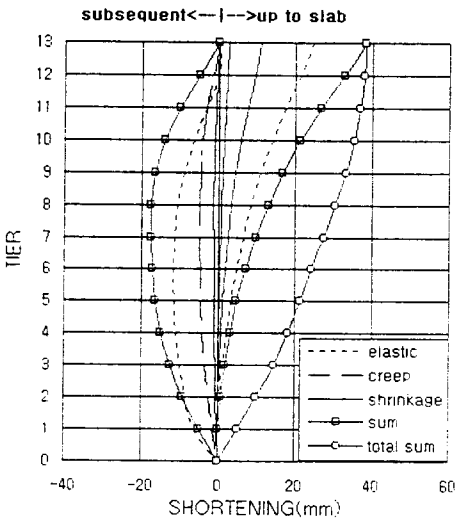


그림 4 C4 기둥의 축소량

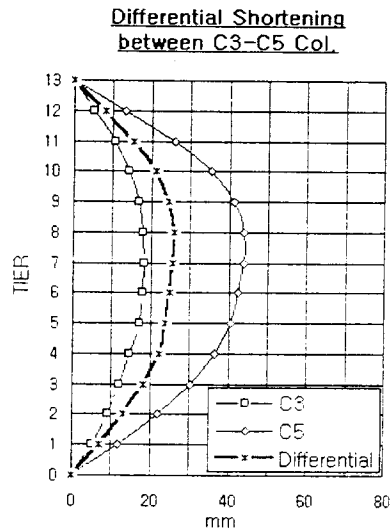


그림 6 기둥간 부등축소량, C3-C5

**Differential Shortening
between C4-C5 Col.**

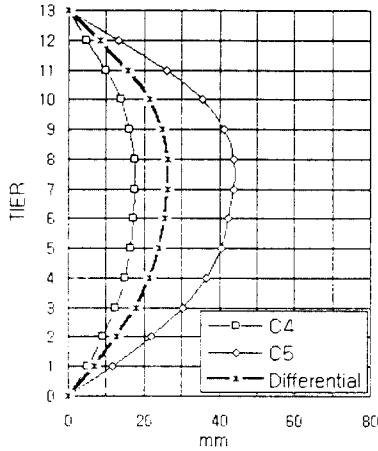


그림 7 기둥간 부등축소량, C4-C5

산되었다. 그러나 실제로 시공중에 보정이 필요한 것은 subsequent load에 의해서 발생하는 기둥간 축소량의 차이이며 수평보정이 슬래브 설치 단계에서 이루어지는 RC공사에서의 부등축소량은 그림 7-그림 8의 subsequent에 의한 상대변형량을 구함으로써 얻게 된다. 이 그림에서 보면, C3-C5 및 C4-C5 기둥간의 최대 보정량은 TIER 8(29층-32층)에서 각각 25.8mm, 26.4mm 인 것으로 예측되었다.

4. 맺음말

1) 본고에서는 고층건물의 건설과정에서 발생하는 시간의 진행에 따른 기둥의 (장기)변형을 정확히 예측하고 이를 시공중에 보정하도록 함으로써 비구조요소의 강도와 사용을 만족시키기 위한 방법론을 제시하였다.

2) 이 방법론은 실험적 통계치를 기초로 한 약산해법으로서 실무에 쉽게 적용할 수 있다.

3) 52층 RC 건물에 대한 적용 결과 기둥에 발생하는 축소량이 가장 큰 영향을 미치는 것은 탄성 변형이며, 건조수축의 효과가 가장 미세한 것으로 나타났다. 그러나, 2년 이상의 장기 변형이 지속될 경우 크립변형의 영향이 탄성변형에 비해 더욱 증가할 것으로 판단된다.

4) 고층의 RC건물인 경우 기둥간 부등축소량의 최대치(=최대 시공오차)는 중간층 근처에서 발생하는 것으로 나타났다.

5. 향후과제

상기 예측결과는 인도네시아 아마트푸라 아파트의 건설과정에 적용하였으며 결과의 검증은 위하여 현재 기둥의 축소량을 실측중에 있다. [2]

부 록

기둥 장기변형의 계산 예 [Level 50 of C3 column]

C3	ELASTIC SHORTENING				CREEP SHORTENING								SHRINKAGE SHORTENING						GRAND	TOTAL		
	TIER	Story	DL	DSL	CONST	BASIC STRAIN	TIRE OF LOADING	V/S FACTOR	HUMID FACTOR	TIME FACTOR	MODIFIED STRAIN	REINF STRAIN	TOTAL STRAIN	BASIC STRAIN	V/S FAC	HUMID FAC	TIME FAC	REINF STRAIN			TOTAL STRAIN	TIER
13	52-HP	0.001058	0.000000	0.000000	0.001549	1.54	0.75	0.55	0.298	0.000988	0.8568	1.25E-04	0.0008	0.540	0.45	0.007	0.850771	1.10E-06	0.001721	1.54E-06		
	51-52	0.001858	0.000000	0.000213	0.001174	1.29	0.75	0.55	0.285	0.000629	0.8869	1.59E-04	0.0008	0.540	0.45	0.013	0.868827	2.22E-06	0.003430	1.54E-06		
	50-51	0.002643	0.000000	0.000405	0.001049	1.17	0.75	0.55	0.337	0.000508	0.8969	1.51E-04	0.0008	0.540	0.45	0.020	0.870178	3.35E-06	0.005956	1.53E-06		
12	48-49	0.003422	0.000000	0.000589	0.000986	1.09	0.75	0.55	0.376	0.000445	0.9068	1.52E-04	0.0008	0.540	0.45	0.026	0.880083	4.16E-06	0.009754	1.34E-06		
	47-48	0.004200	0.000000	0.000771	0.000648	1.03	0.75	0.55	0.408	0.000404	0.9112	1.50E-04	0.0008	0.540	0.45	0.032	0.891106	5.59E-06	0.008401	1.32E-06		
	45	0.021389	0.004355	0.004027	0.000469	0.59	0.73	0.55	0.726	0.000111	0.9116	7.33E-05	0.0008	0.508	0.45	0.157	0.901036	2.59E-05	0.010511	0.25E-06		
1	3-4	0.021863	0.004513	0.004727	0.000469	0.58	0.73	0.55	0.728	0.000110	0.9113	7.32E-05	0.0008	0.508	0.45	0.160	0.901259	2.61E-05	0.010602	0.26E-06		
	2-3	0.022338	0.004671	0.004828	0.000469	0.58	0.73	0.55	0.731	0.000110	0.9118	7.31E-05	0.0008	0.508	0.45	0.163	0.901174	2.68E-05	0.0107212	0.16E-06		
	1-2	0.022812	0.004830	0.004928	0.000469	0.58	0.73	0.55	0.733	0.000109	0.9119	7.29E-05	0.0008	0.508	0.45	0.165	0.901093	2.73E-05	0.0108290	0.11E-06		
	0-1	0.031678	0.006765	0.006878	0.000469	0.58	0.71	0.55	0.735	0.000105	0.9176	7.09E-05	0.0008	0.478	0.45	0.180	0.901006	3.55E-05	0.0105502	0.06E-06		

Input Data

- Gross area $A_g = 1395 \text{ in}^2$
- Area of steel $A_s = 9.8 \text{ in}^2$
- Story height $h_s = 9.84 \text{ ft}$
- Cycle time $t_c = 5 \text{ days}$
- Design strength $F'_c = 4260 \text{ psi}$
- Humidity $H = 85\%$
- Dead load $P_{DL} = 38.5 \text{ Kips}$
- Suspended dead load $P_{SDL} = 0.0 \text{ Kips}$
- Construction load $P_{LL} = 8.84 \text{ Kips}$

Basic Property

1) Actual f'_c

$$t = 255-245 = 10 \text{ days}$$

$$f'_c = \frac{t}{4+0.85t} \times F'_c = 3408 \text{ psi}$$

2) Elastic modulus based on Actual f'_c

$$E_c = \frac{57000 \sqrt{f'_c}}{1000} = 3328 \text{ Ksi}$$

3) Volume to Surface ratio

$$v/s = \frac{\text{Story HT} \times \text{Area}}{\text{Perimeter} \times \text{Story HT}} = 9.34$$

4) Reinforcement ratio

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} = 0.0071$$

5) Modula ratio

$$n = \frac{E_{st}}{E_c} = 8.72$$

Elastic Shortening

6) Transformed Area

$$A_{TR} = (1395 - 9.8) + 9.8 = 1470 \text{ in}^2$$

7) Dead load

$$P_{DL} = \sum(\text{All load above}) = 77 \text{ Kips}$$

$$P_{DL} = \frac{P_{DL} \times h_k}{A_{TR} \times E_c} = 0.001858 \text{ in}$$

8) Superimposed dead load

$$P_{SDL} = 0, \Delta_{SDL} = 0$$

9) Construction live load

$$P_{LL} = 8.84 \text{ Kips}, \Delta_{LL} = 0.000213 \text{ in}$$

10) Sum of elastic shortenings of current level

$$\Delta_e = 0.00518 + 0 + 0.000213 = 0.002071 \text{ in}$$

Creep Shortening

11) Basic strain due to creep

$$\epsilon_a = \frac{4}{f_c(t)} = 0.001174 \text{ in/in}$$

12) Time of loading factor

$$CR_{LA} = 2.3t^{-0.25} = 1.293$$

13) Volume to Surface ratio

$$CR_{v:s} = \frac{0.044(v:s)+0.934}{0.1(v:s)+0.85} = 0.754$$

14) Humidity factor

$$CR_H = 1.4 - 0.01(H) = 0.55$$

15) Time factor

$$CR_t = \frac{t^{0.6}}{10+t^{0.6}} = 0.285$$

16) Modified strain

$$\begin{aligned} \epsilon^* &= \epsilon_a(CR_{LA}) (CR_{v:s}) (CR_H) \\ &= 0.000629 \end{aligned}$$

17) Reinforcement factor

$$\begin{aligned} CR_R &= \frac{(1 - e^{-\frac{P}{\rho E^* E_c}})}{\rho E^* E_c} \\ &= 0.886884 \end{aligned}$$

18) Total strain & shortening due to creep

$$\epsilon_c = \epsilon^* \cdot CR_t \cdot CR_R = 1.59 \times 10^{-4} \text{ in/in}$$

$$\Delta_c = \frac{P \cdot \epsilon_c \cdot h_s}{A_{TR}} = 0.001096 \text{ in}$$

Shrinkage Shortening

19) Basic strain

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= \text{average recommended value} \\ &= 0.0008 \text{ in/in} \end{aligned}$$

20) Volume to Surface factor

$$SH_{v:s} = \frac{0.037(v:s)+0.944}{0.177(v:s)+0.734} = 0.540$$

21) Humidity factor

$$SH_H = 3.0 - 0.30(H) = 0.45$$

22) Time factor

$$SH_t = \frac{t}{26e^{0.36(v:s)} + t} = 0.013$$

23) Reinforcement factor

$$SH_R = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k CR_R = 0.868827$$

24) Total strain and shortening due to shrinkage

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \epsilon_a^* \cdot SH_{v:s} \cdot SH_H \cdot SH_t \cdot SH_R = 2.22 \times 10^{-6} \\ &\text{in/in} \end{aligned}$$

$$\Delta_s = \epsilon_s h_s = 0.00263 \text{ in}$$

Total Shortenings

25) Combined shortenings of elastic, creep and shrinkage

$$\Delta_{\text{sum}} = \Delta_e + \Delta_c + \Delta_s = 0.003430 \text{ in}$$

Reference

1. Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI 318-83, American Concrete Institute, Detroit, Mich., 1983
2. Mark Fintel, S. K. Ghosh, and Hal Iyengar, "Column Shortening in Tall Structures- Prediction and Compensation", PCA, 1987 