

고층건물 기둥의 부등축소량 예측 및 시공오차 보정에 관한 연구
Prediction and Compensation of Differential Column
Shortening in High-Rise Building Structures

조창휘* 송진규** 이현호*** 조석희****
Cho, Chang-Hwi Song, Jin-Gyu Lee, Hyun-Ho Cho, Suk-Hee

ABSTRACT

The purpose of this study is to make a reasonable correction in construction stage through exact prediction of long-time differential column shortening that occurs in the high-rise RC building. For this, a self-developed program adopted PCA code is used to predict differential column shortening with sequential loading process. Using this program, the amount of the differential column shortening of Amatapura Apartment in Indonesia is predicted and the effect is analyzed. From the result, the major factor affecting the shortening amount in columns is elastic strain and the effect of shrinkage is very small rather than creep. And maximum differential column shortening is appeared near the middle of the building.

1. 서 론

고층건물에서 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 약산 해법에 의한 접근이 필요하다. 시간에 따른 재료의 거동 및 구조물의 응답을 예측하기 위하여 1987년 PCA에 소개되었던 약산해법에 의하면, 탄성해석과 유사한 정도의 계산량으로 임의의 시간 단계에서의 거동을 예측할 수 있다.

그러나 이 방법이 건물의 설계단계에서 비교적 합리적인 값을 제공해 줄 수는 있으나 정확도를 개선하기 위해서는 다양한 건물들에 대한 실측 데이터와 실험자료들에 대한 보정이 필요할 것이다. 본 연구에서는 고층 철근콘크리트 건물의 기둥간 부등축소량을 정확히 예측함으로써 시공단계에서의 실질적인 보정이 가능하도록 하는 데 주안점을 두었으며, 합성구조로 이루어진 건물에 대해서도 적용이 가능하도록 하였다.

2. 장기변형의 평가

2.1 기둥의 축소효과

* 현대건설 기술연구소 전무이사 ** 현대건설 기술연구소 선임연구원
*** 현대건설 기술연구소 주임연구원 **** 현대건설 기술연구소 연구원

임의층에서의 기둥 축소는 수직하중을 받도록 설계되지 않은 간막이벽이나 크래딩, 마감재, 배관과 같은 비구조재에 영향을 미쳐 변형을 야기시킨다. 따라서 건물에 이러한 부가물을 붙일 때 상대변형으로 인한 응력이 비구조재에 발생하지 않도록 설계하여야 한다.

기둥간의 상대변형이 누적되면 슬래브 바닥의 일부분이 치올려지는 현상이 발생하고 이것은 결국 칸막이재의 회전을 유발시키게 된다(그림 1참조).

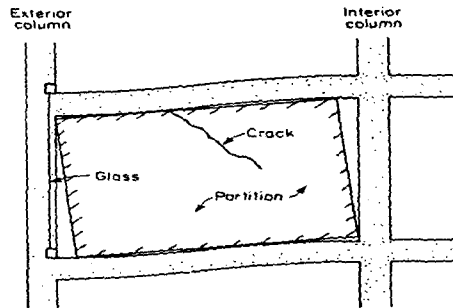


그림 1. Effect of tilted slabs

최근 설계되는 건식 간막이벽의 상세는 변형으로 인한 응력발생을 제거하기 위하여 수평 및 수직 접합부에 충분한 유연성을 가지도록 설계되는 경우도 있으며, 특히 고층건물의 경우에는 이러한 슬래브 수직변형 효과를 신중히 고려하여야 한다.

2.2 시공단계에 관련된 구조거동

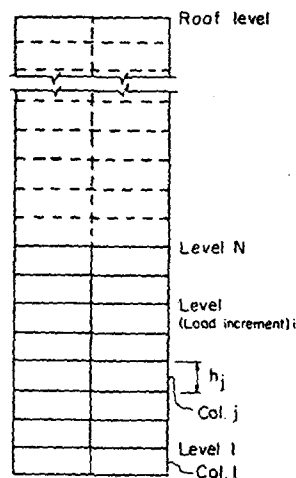


그림 2. Schematic section of a multistory building

전체 N개의 층수를 갖는 고층건물의 수직부재는 N개의 연속된 분할요소로 볼 수 있다(그림 2참조). 시공과정에 있어서 각 분할요소들은 타설후에 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-tinstallation shortenings :

슬래브 타설 이후에 추가로 발생하는 축소량

철근콘크리트 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 preinstallation shortening이 매우 중요하게 취급되어야 하며 이 때의 예측 보정량은 preinstallation shortening과 postinstallation shortening의 합이 된다.

2.3 기둥에 발생하는 탄성변형, 건조수축, 크립의 평가

1) 탄성계수(Modulus of Elasticity)

ACI Code 및 실험에 의하면 콘크리트의 재령에 따른 탄성계수는 하중재하 시점에서의 콘크리트의 압축강도에 관련된다.

$$E_{ct} = 33w^{1.5}\sqrt{f_{ct}} \text{ ----- (1)}$$

ACI Committee 209에 의하면 습윤양생된 콘크리트의 시간에 따른 압축강도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{ct} = \frac{t}{4.0 + 0.85t} f_c \text{ ----- (2)}$$

2) 건조수축(Shrinkage)

콘크리트의 건조수축량을 계산하기 위해서 ACI 에서 제안하고 있는 계수들은 다음과 같다.

- 극한 건조수축 변형도($\epsilon_{s\alpha}$)

극한 건조수축 변형도는 6 in 직경(=150mm)을 갖는 표준공시체($v:s=1.5$ in (=38mm))를 7일간 습윤양생하고 40%의 상대습도를 갖는 환경에 노출시킨 경우에서 발생하는 변형으로 정의된다.

이제까지 이에 대한 정확한 평가는 불가능한 상태이며 일반적으로 500×10^{-6} in/in ~ 800×10^{-6} in/in 정도의 범위를 갖는다. ACI Committee 209에서는 800×10^{-6} in/in를 극한 건조수축 변형도 값으로 채택하고 있다.

- 부재 크기의 영향에 관련된 계수($SH_{v:s}$)

수분의 증발은 부재의 표면으로부터 발생하므로 부피에 대한 표면적 비($v:s$ ratio)는 건조수축의 양에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

건조수축량의 계산에 영향을 미치는 $v:s$ factor($SH_{v:s}$)는 다음 식으로 정의된다.

$$SH_{v:s} = \frac{0.037(v:s) + 0.944}{0.177(v:s) + 0.734} \text{ ----- (3)}$$

- 상대습도에 관련된 계수(SH_H)

ACI 209에서 채택하고 있는 상대습도 계수는 다음과 같다.

- 40 % ≤ H(상대습도) ≤ 80 % 인 경우

$$SH_H = 1.40 - 0.010H \text{ ----- (4.1)}$$

- 80 % ≤ H(상대습도) ≤ 100 % 인 경우

$$SH_H = 3.00 - 0.030H \text{ ----- (4.2)}$$

- 시간에 따른 건조수축 계수(SHt)

시간의 진행에 따른 건조수축 계수는 Hansen과 Mattock에 의하여 다음 식으로 제안되었다.

$$SH_t = \frac{t}{26.0e^{0.36(us)} + t} \quad \text{----- (5)}$$

3) 크립(Creep)

크립은 지속적인 응력을 받고 있는 부재에 시간의 경과에 따라 증가하는 변형도로 정의 된다. 구조부재에 발생하는 크립발생 경향은 초기에 지배적이며 시간에 따라 점차로 증가율이 감소되어 궁극적으로 zero에 수렴하게 된다.

콘크리트의 크립에 영향을 미치는 계수들은 다음과 같다.

- 극한 크립 변형도(ϵ_{cx})

극한 크립 변형도는 v:s가 1.5이고 직경이 6 in인 표준공시체를 40% 상대습도를 갖는 환경에서 7일간 습윤양생하고 여기에 28일간 하중을 가해서 얻은 변형도로 정의된다. ACI Code에서는 대상 구조물에 대한 실험 데이터가 없을 경우 다음 식을 적용하도록 제안하고 있다.

$$\epsilon_{cx} = 3/f'_c \text{ (low value) to } 5/f'_c \text{ (high value)} \quad \text{----- (6)}$$

- 하중재하 시간에 따른 계수(CR_{LA})

크립 변형은 응력의 크기뿐만 아니라 하중재하 시간에 큰 영향을 받는다. ACI에서는 이들의 관계에 대한 실험적 검증 및 유럽코드(CEB)식을 근거로 하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$CR_{LA} = 2.3t_{LA}^{-0.25} \quad \text{----- (7)}$$

- 부재 크기에 관련된 계수

부피 대 표면적비에 관련된 ACI 계수는 유럽에서 연구된 결과를 바탕으로 Hansen과 Mattock에 의해 제안된 관계 curve를 근거로 하여 제안되었다.

$$CR_{us} = \frac{0.044(us) + 0.934}{0.1(us) + 0.85} \quad \text{----- (8)}$$

- 상대습도에 관련된 계수

상대습도가 40%가 넘을 경우 다음 식에 의한 계수를 크립변형에 곱하도록 제안하고 있다.

$$CR_H = 1.40 - 0.01H \quad \text{----- (9)}$$

4) 재하 시간에 따른 크립의 진행에 관련된 계수

이 계수는 유럽코드를 기초로 하여 제안되었으며 ACI-C and CA 코드와 유사한 결과를 보이고 있다

$$CR_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \quad \text{----- (10)}$$

5) 철근에 의한 잔류 변형

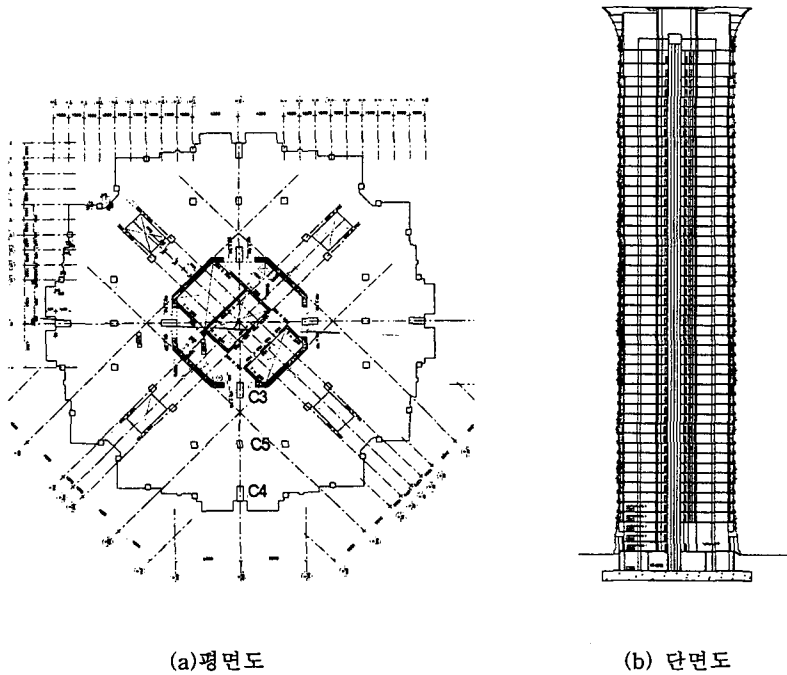
철근콘크리트 기둥의 경우, 콘크리트의 크립과 건조수축에 의한 변형은 보강철근으로 인한 구속효과로 인해 철근으로 재분배되는 경향을 띄게 된다. 이와같이 기둥부재에 최종적으로 잔류되는 변형에 대하여 ACI에서는 Fintel & Khan의 연구에 근거한 아래식을 적용하도록 제안하였다.

$$\epsilon_{cx}^R = \epsilon_{cx} \cdot CR_R = \epsilon_{cx} \cdot \frac{(1 - e^{-\frac{tm}{1+pm} \epsilon_{cx} E_s})}{\rho \epsilon_{cx}^* E_s} \quad \text{----- (11)}$$

$$\epsilon_{sx}^R = \epsilon_{sx} \cdot SH_R = \epsilon_{sx} \cdot \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k CR_{R,i} \quad \text{----- (12)}$$

3. 장기변형 예측이론의 적용을 통한 시공오차 보정

3.1 개요



(a) 평면도 (b) 단면도
그림 3. 아마트푸라 아파트 (52층, 인도네시아)

본 장에서는 기둥들간의 부등축소량을 계산하기 위하여 현재 인도네시아에서 현대건설에 의해 시공 중인 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 3참조).

3.2 Amatapura Apartment in Indonesia

1) 구조 시스템 및 재료 성능

부등축소량 예측을 위하여 사용한 기둥은 C3(코아측 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 마감재등 골조공사 과정중에 설치되는 고정하중
3. *Construction Live Load* : 가설재 등의 시공하중

2) 기둥의 부등 축소량 예측 및 결과 분석

본 절에서는 각 기둥들의 시공단계에 따른 탄성변형, 건조수축 및 크립에 의한 축소량을 4개층을 1Tier로 구분하여 계산하였다. RC 기둥에 발생하는 임의층의 변형에 있어서 그 층의 슬래브가 타설되기 이전에 발생된 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.

표1. 아마타푸라 C-3기둥의 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	24.95	24.95	41.70	13.90		
7-24	18.7		18.7					
24-26	21.83		21.83					
26-29	5680	1395	31.2	38.50	12.83	9.34	7.04	
29-31			24.95				24.95	
31-34			15.6				15.6	
34-39	4260	1395	15.6	38.50	12.83	9.34	9.39	
40-47			9.8				9.8	9.39
47-48			9.8				9.8	9.48
48-49			9.8				9.8	9.86
50-51			9.8				9.8	10.49
51-52			9.8				9.8	11.74
52-HP			9.8				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

표2. 아마타푸라 C-4기둥의 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	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						31.2	
16-26			37.44						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				9.8	9.39		
47-48			9.8				9.8	9.48		
48-49			9.8				9.8	9.86		
50-51			9.8				9.8	10.49		
51-52			9.8				9.8	11.74		
52-HP			9.8				9.8	15.49		

표3. 아마타푸라 C-5기둥의 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	1256	12.48	15.6	5.4	8.86	4.69	0.0008	
1-2		837	12.48	46.7	16.1	7.23			
2-5		837	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				39.1		13.5			5.83
40-45	4260	543	9.36	39.1	13.5	5.83	9.39		
45-46		543	5.3	39.1		5.83			
46-47		388	4	39.1		4.92			
47-48		388	4	37.5		4.92			
48-49		388	4	37.5		4.92			
50-51		388	4	37.5		4.92			
51-52		388	4	37.5		4.92			
52-HP		388	4	37.5		4.92			

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 탄성변형량이 가장 크며 건조수축의 영향이 가장 적은 것으로 나타났다. 상부층에서의 최대 축소량은 내부기둥인 C5의 경우 99.39mm가 발생하였고 외부기둥 C4의 경우는 38.02mm가 축소되는 것으로 예측되었다. 그러나 실제로 시공중에 보정이 필요한 것은 subsequent load에 의해서 발생하는 기둥간 축소량의 차이이며 수평보정이 슬래브 설치 단계에서 이루어지는 RC공사에서의 부등축소량은 그림 7-그림 8의 Subsequent

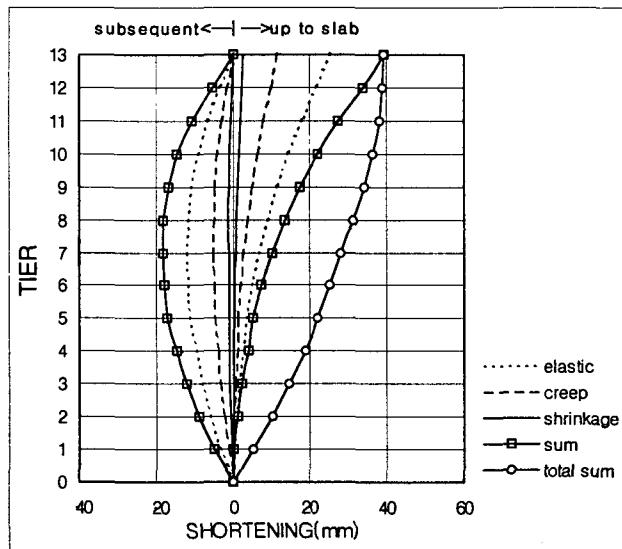


그림 4. C3 기둥의 축소량

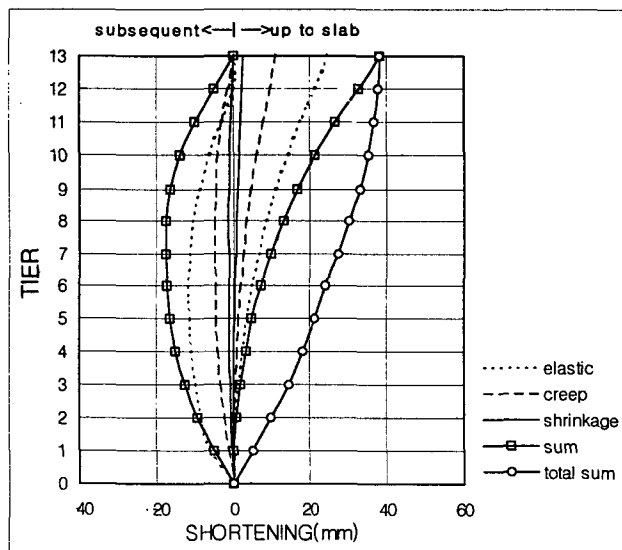


그림 5. C4 기둥의 축소량

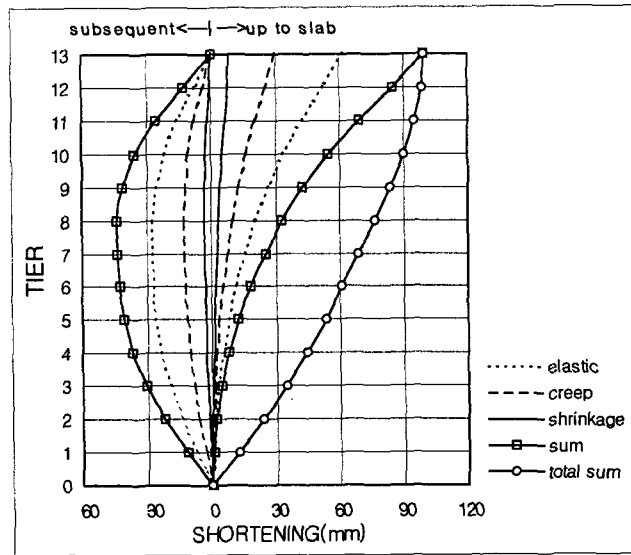


그림 6. C5 기둥의 축소량

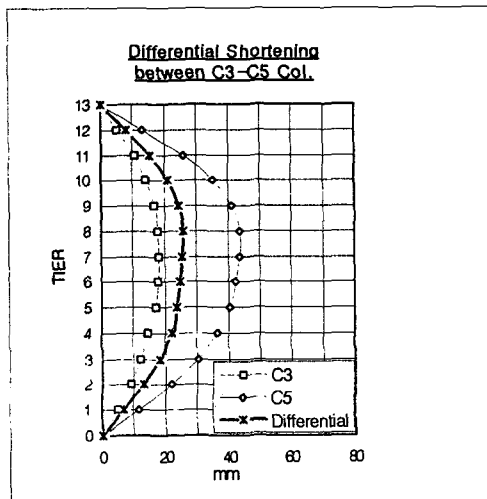


그림 7. 기둥간 부등축소량, C3-C5

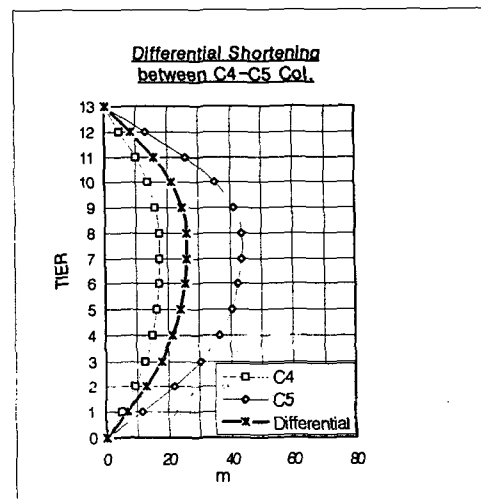


그림 8. 기둥간 부등축소량, C4-C5

에 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. 결 론

1) 본 연구에서는 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 축소량에 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) 철골과 RC를 혼용한 합성 구조에 대해서도 본 이론은 적용 가능하며 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

5. 향후과제

현재 다양한 구조형식에 대한 본 이론의 적용성을 검증하기 위하여 철근콘크리트+철골 복합구조물 또는 철골구조물에 대하여 분석중이며, 인도네시아 아마타푸라 아파트의 실측결과와 예측결과를 비교 분석할 예정이다. 또한, CEB-FIB 기준, B3 method등 장기변형에 관한 다양한 이론식들의 적용 및 부재실험을 통하여 실무에 적용이 가능한 보다 정확한 예측기법을 도출할 필요가 있다.

6. 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