

## 高層建物の垂直不等變位解析

Analysis of Differential Shortenings of High-Rise Building

辛 永 洙\*  
Shin, Young Soo

### 1. 서론

19世紀 말엽부터 始作된 高層建物は 주로 商業用, 住居用 目的으로 建設되었는데 最近 우리나라에서도 都市의 人口集中, 産業化에 따른 土地價의 上昇등으로 業務施設, 住居施設이 高層化 되고 있다.

高層建物は 地震이나 바람등에 의한 橫荷重을 效率적으로 支持할 수 있는 構造시스템의 選擇이 重要한 設計因子이며 現在까지 여러 형태의 골조 방식에 創案되었다.

建물이 高層化 하면서 橫荷重을 支持하는 壁體와 기둥에서 發生하는 여러 問題중 하나는 壓縮應力의 差異에 의한 縮小量의 差異인데 壓縮應力에 比例하여 기둥과 壁體의 크기를 全體적으로 같은 縮小量이 發生하도록 決定한다면 不等變位에 의한 應力은 發生하지 않을 것이다.

그러나 實際로 全體기둥과 相對적으로 壓縮力이 작은 橫力 支持 構造體와 並存하게 됨으로 高층건물의 設計시 기둥의 不等變位 效果에 대해 考慮하여 強度上, 使用上 問題가 없도록 해야 한다.

高層建物の 수직不等變位가 發生하게 되면 間막이벽, 外壁, 設備 파이프 등의 非構造材에 影響을 주게되며 슬래브의 傾斜를 惹起하여 심할경우 使用性의 問題가 된다.

一般的으로 構造物의 解析시 건물全體가 完成된 것으로 하여 荷重을 適用시키는데 이 境

遇 内部 기둥의 壓縮力이 크게 發生하여 기둥의 縮小量이 增加하여 外部 기둥에서 모멘트가 크게 發生하고 보의 모멘트가 기둥의 縮小量에 크게 影響을 받은 경우가 많다.

構造物을 正確하게 解析 하기위해서는 施工過程 및 荷重歷을 考慮할 수 있는 方法을 選擇해야 한다.

우리나라도 콘크리트 高強度化의 必要性이 절실해지고 있는 時點에서 鐵筋콘크리트 기둥의 必須的인 彈性變形, Creep과 乾燥收縮에 따른 非彈性 變形에 대해 고려하여 기둥의 縮小量 算定 構造物에 適用한 예를 소개한다.

### 2. 連續 載荷(Sequential Loading) 方法

고층 구조물에서 재하되는 狀態가 既存 解析에서와 같이 完成된 構造物에 荷重이 作用하는 것이 아니라 施工過程에 따라 한 層씩 올라가게 됨으로 1層이 完成된 후 2層 構造物이 재하되어 1層 기둥의 縮小量이 2層 타설시에는 影響이 없게되므로 應力이 없는 狀態에서 2層이 形成된다. 3層바닥의 경우도 1, 2層 기둥의 縮小量에 關係없이 재하된다.

이와같은 方法으로 全層을 自重에 대해 解析하여야 하나 既存 解析프로그램을 利用하여 해석할 경우 解析이 번거롭고 시간이 많이 걸리게 되는 短點이 있다.

연속 재하 方法에 의한 해석법을 간략히 소개하면 다음과 같다.

첫번째 段階로 1층 기둥과 2층 바닥만 存在

\* 建築(建築構造技術士), 단 構造研究所 研究室長

하여 固定荷重을 適用시키고 이 段階에서 계산된 部材力은 두번째 段階의 初期應力이 된다.

두번째 단계로는 1층 부재는 初期應力으로 첫번째 段階의 해석결과에서 발생한 부재력 값이지만 2층 부재 즉 2층 기둥과 3층 바닥의 應力은 없는 狀態(Stress Free)로 하여 재하하고 2층 바닥의 하중은 除去한다.

이러한 方式으로 N층까지 解析하는 方式으로 彈性限界 內에서 평면골조를 完成된 構造物에 대한 解析과 연속재하에 의한 해석결과를 비교하여 경향성을 나타내면 다음 그림 1과 같다. 여기서 既存 解析法은 지붕층으로 갈수록 縮小量이 심각해지며 連續 載荷 方法은 中央部가 심각해진다는 것을 알 수 있다.

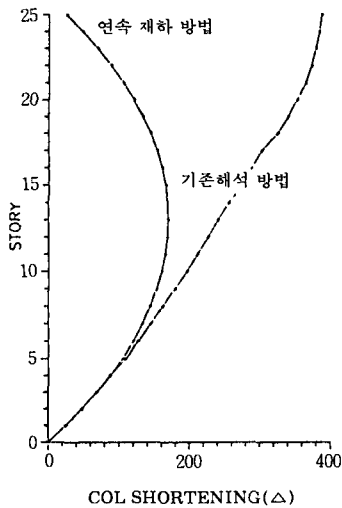


그림 1 25층 구조물의 기둥축소량의 변위경향

### 3. 기둥의 不等 垂直變位の 計算

기둥의 垂直變形은 탄성變형과 비탄성 變형으로 나눌 수 있다. 彈性變形은 構造設計時 使用하는 解析結果에 의해서 豫測可能하나 非彈性變形 卽 Creep에 의한 變形은 應力의 差異, 철근비, Loading History, 體積-表面積 比 等을, 乾燥收縮에 의한 變形은 應力狀態와는 無

關하게 體積-表面積比, 부재크기등을 고려해서 變形량을 계산하여야 한다. 기둥의 垂直變形的 發生하여도 建物の 完工된 후 슬래브가 水平을 維持하기 위해서는 다음 2段階로 考慮해야 한다.

1. 슬래브의 打設 前까지의 縮小量 : 기둥의 높이를 調節하여 슬래브 豫定된 곳에 위치하기위한 解析의인 豫測이 必要하다.
2. 슬래브의 打設 後의 縮小量 : 모든 荷重이 作用하고 Creep과 乾燥收縮이 發生한 後에도 슬래브가 豫定된 位置있도록 하기위해서 縮小量의 算定이 必要하다.

철근콘크리트 構造物에서 슬래브는 콘크리트 打設時 水平을 維持하게 함으로 기둥의 縮小量은 考慮하지 않아도 된다. 그러나 슬래브가 타설된 後 發生하는 縮小量을 計算하여 슬래브가 豫定된 位置에 形成되기 위해서 기둥길이를 補整하고 슬래브 형틀을 傾斜지게 하여 補整할 수 있다.

그림 2와 같은 構造物에서 N층까지 슬래브가 타설된 경우에 대해 縮小量을 考慮해 보면 N층의 슬래브는 1層부터 N層 사이에서 發生하는 變位를 받게되며 또한 앞으로 施工될 지붕층까지의 荷重에 의한 變形에 대해서도 考慮

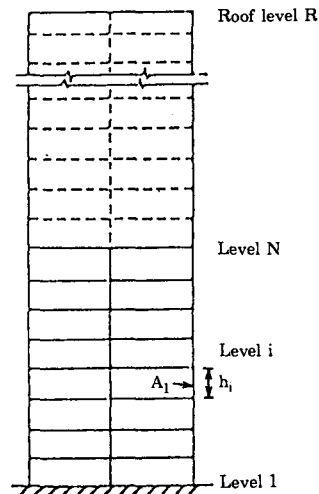


그림 2 고층건물 입면

해야 한다.

이때 積載荷重은 建物이 完工된 後 혹은 層別로 段階的으로 適用시킨다.

N層에서 考慮해야 할 기둥의 變位는 다음과 같다.

1. N層과 지붕層 사이에서의 附加荷重으로 인한 工事進行 동안의 彈性縮小量
2. 슬래브 타설전에 作用하는 荷重으로 인한 Creep變形
3. N층에서 지붕층까지의 積層으로 인한 荷重에 대한 Creep變形
4. 乾燥收縮에 의한 變形

### 3.1 彈性 縮小量 計算

N層에서 기둥의 縮小量은 다음과 같이 計算된다.

- (1) 슬래브의 타설 시점까지의 縮小量

$$\Delta_{1,p}^e = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j}^N \frac{P_i h_i}{A_{t,ij} E_{\alpha,ij}}$$

- (2) 슬래브의 타설 후의 縮小量

$$\Delta_{1,s}^e = \sum_{j=1}^N \sum_{i=N+1}^n \frac{P_i h_i}{A_{t,ij} E_{\alpha,ij}}$$

- (3) 後續 荷重에 따른 縮小量

$$\Delta_2^e = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j}^n \frac{P_k h_j}{A_{t,ki} E_{\alpha,ki}}$$

$E_{\alpha,t} = 33w^{1.5} \sqrt{f'_{\alpha,t}}$  : 時間에 따른 콘크리트의 탄성계수(psi)

$$F'_{\alpha,ij} = \frac{f_{c,i}(t_i - t_j)}{4.0 + 0.85(t_i - t_j)} : 時間에 따른 콘크리트 強度(psi)$$

$A_{t,ij} = A_{g,i} + A_{s,i}(m_{ij} - 1)$

$$m_{ij} = E_s / E_{\alpha,t,ij}$$

$P_i$  = 通用荷重

$h_i$  = 層高

$A_t$  = 기둥 斷面의 時間에 따른 換算 斷面積

$t$  = 타설 후의 荷重適用 時間

$n$  = 總層數

### 3.2 Creep에 의한 縮小量

N층의 슬래브를 타설할 시점에서의 Creep에 의한 기둥의 縮小量은 다음식으로 計算할 수 있다.

- (1) 슬래브 타설 시점까지의 縮小量

$$\Delta_{1,p}^c = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j}^N \frac{P_i CR_{LA,ij}}{A_{t,ij}} \epsilon_c \alpha_c, j \cdot h_j \cdot CR_{v,s,j} \cdot CR_H \cdot CR_{t,ij} \cdot CR_{R,ij}$$

- (2) 슬래브의 타설 후의 縮小量

$$\Delta_{1,s}^c = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j}^N \frac{P_i CR_{LA,ij}}{A_{t,ij}} \epsilon_c \alpha_c, j \cdot h_j \cdot CR_{v,s,j} \cdot CR_H \cdot (1 - CR_{t,j}) \cdot CR_{R,ij}$$

- (3) 後續荷重 適用에 따른 縮小量

$$\Delta_2^c = \sum_{j=1}^N \sum_{k=j}^n \frac{P_k CR_{LA,kj}}{A_{t,kj}} \epsilon_c \alpha_c, j \cdot h_j \cdot CR_{v,s,j} \cdot CR_H \cdot CR_{R,ki}$$

$\epsilon_c \alpha_c, j =$  公稱 Creep 變形度  $0.003 / f'_c \sim 0.005 / f'_c$  (ACI 209)

$CR_{LA,ij} =$  荷重 適用 時點의 재령에 따른 CREEP 效果

$CR_{LA,ij} = 2.3 t_{LA}^{-0.25}$ ,  $t_{LA}$  : 荷重 載荷時 콘크리트의 재령 (ACI 209)

$CR_{LA,ij} =$  體積-表面積 比에 따른 Creep 效果

$CR_{v,s,j} =$  體積-表面積 比에 따른 Creep 效果

$$CR_{v,s} = \frac{0.044(v:s) + 0.934}{0.1(v:s) + 0.85} \quad (v:s \text{ in inch})$$

$CR_{t,ij} =$  時間 經過에 따른 Creep 效果

$$CR_t = \frac{\epsilon_c t}{\epsilon_c \alpha_c} = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \quad (\text{ACI 209})$$

$CR_H =$  相對 濕度에 따른 效果 (ACI 209)

$$CR_H = 1.40 - 0.01H$$

$H$  : 相對 濕度(%), 年平均

$CR_R =$  殘餘 Creep 係數

$$CR_R = \frac{1}{P \epsilon^* \alpha_c E_s} (1 - e^{-\frac{pm}{1+pm} \epsilon^* \alpha_c E_s t})$$

$P$  : 기둥 斷面의 鐵筋比

$\epsilon^*c\alpha$  : 無筋콘크리트의 Specific Creep

m : 時間에 따른 彈性係數比,  $E_s/E_c$

$E_s$  : 鐵筋의 彈性係數

$$A_{t,ij} = A_{g,j} + A_{s,j}(m_{ij} - 1)$$

### 3.3 乾燥收縮에 의한 縮小量

N층의 슬래브 타설시점을 분기점으로 하여 乾燥收縮에 의한 기둥의 縮小량을 다음식으로 구할 수 있다.

(1) N층 슬래브 타설 시점까지의 縮小量

$$\Delta_p^s = \sum_{j=1}^N h_j \cdot \epsilon_c \alpha_{n,j} \cdot SH_{v:s,j} \cdot SH_H \cdot (1 - SH_{t,j}) \cdot SH_{R,j}$$

(2) N층 슬래브 타설후의 축소량

$$\Delta_s^s = \sum_{j=1}^N h_j \cdot \epsilon_c \alpha_{n,j} \cdot SH_{v:s,j} \cdot SH_H \cdot (1 - SH_{t,j}) \cdot SH_{R,j}$$

$\epsilon_c \alpha_{n,j}$  : 極限 乾燥收縮값 (일반적으로  $500 \times 10^{-6}$  -  $800 \times 10^{-6}$ )

$SH_{v:s,j}$  : 體積-表面比에 따른 乾燥收縮效果

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

$SH_{t,j}$  = 時間 經過에 따른 乾燥收縮 效果

$SH_H$  = 相對濕度에 따른 效果

$$SH_H = 1.40 - 0.010 \quad 40 \leq H \leq 80(\%)$$

$$SH_H = 3.00 - 0.03H \quad 82 \leq H \leq 100$$

$SH_{R,j}$  = 殘餘 Creep 要所에 따른 效果

$$SH_{R,j} = \frac{\sum_{i=j}^N CR_{R,ij}}{n - j + 1}$$

### 3.4 其他 要인에 의한 不等變形

高層建物の 기둥과 벽체는 鉛直荷重 의한 彈性, 非彈性 길이 變化 外에도 바람, 季節的 溫度變化, 基礎의 침하 등으로 因하여 길이 變化가 發生한다.

構造不在와 強度와 使用性を 해치지 않고 여

러위치에서 收用될 수 있는 制限基準을 세우기 위해서는 이러한 여러가지 效果들이 同時에 發生할 수 있는 경우에 대해 考慮해야 하며 一般的으로 不等變位를  $L/240$  ( $L$ =스팬) 內에 있도록 한다.

바람 및 溫度變化에 의한 기둥의 縮小량은 단기적이지만 기초의 침하로 인한 길이 變化는 장기적으로 슬래브와 보에 影響을 미치게 된다.

(1) 風荷重에 의한 變形

風荷重에 의한 構造物의 變形은 短期的 效果로 나타나며 풍하중 하에서 構造物의 垂直部材는 길이변화와 수평변형을 동시에 받게된다.

축소량은 바람 方向의 뒷면에 있는 기둥에서 留意해야 하며 특히 鉛直荷重 및 Creep, 乾燥收縮 등의 效果와 동시에 作用할 때 考慮해야 한다.

(2) 溫度變化에 의한 變形

溫度 變形에서는 一般的으로 日日變化는 큰 影響이 없는 것으로 보며 季節的 變化에 의해 發生하는 것으로 간주한다.

外部 기둥이 露出될 경우 溫度 變化에 敏感하게 되는데 室內 溫度는 季節적으로 큰 變化가 없으므로 外部 溫度가 내려가면 기둥이 縮小하게 됨으로 이 效果가 鉛直荷重에 의한 變形과 組合될 때 그 影響을 고려해야 한다.

## 4. 實際 構造物에의 適用

地下 4層 지상 36층 鐵筋콘크리트 構造物에 前述했던 論理的 背景을 適用하여 기둥의 縮小량과 隣接 기둥 間의 不等 縮小량을 計算한다.

解析에 使用한 프로그램은 P.C.A의 Ghosh 博士가 開發한 SHORT를 使用하였다.

構造物의 基準層 平面은 그림 3과 같고 解析時 入力된 材料의 常數 및 斷面에 관한 事項 표 1과 같다.

표 1 Column No 2.

층 수	콘크리트 강도(KSI)	전체단면적(IN <sup>2</sup> )	철근단면적(IN <sup>2</sup> )	바닥하중(KIPS)	후속바닥하중(KIPS)	부피대표면적의비율(IN.)	극한 건조수축 X10 <sup>-6</sup> (IN/IN)	Specific Creep X10 <sup>-6</sup> IN/IN/PSI
1-2 2-2	7.14	3038.0	59.3	182.56 251.37	45.64 62.83	13.8	650	0.250
3-3 4-4	7.14	2620.0	59.3	213.22 251.37	53.31 62.84	12.8		
5-5 6-6	7.14	2232.0	59.3	192.06 182.57	48.02 45.64	11.8		
7-7 8-8 9-10	7.14	2232.0	41.5	192.06 213.22 151.92	48.02 53.31 37.98	11.8		
11-12 13-16	7.14	2232.0	41.5	151.92 151.92	37.98 37.98	10.8		
17-22	5.71	2232.0	41.5	151.92	37.98	10.8		
23-28	5.71	1550.0	23.7	142.66	35.67	9.8		
29-29 30-30 31-31 32-32 33-33	4.29	1255.0	17.8	156.33 69.24 151.92 182.57 151.92	39.08 17.31 37.98 46.63 37.98	9.8		
34-34 35-35	4.29	760.0	17.8	108.05 0.00	27.01 0.00	6.9		

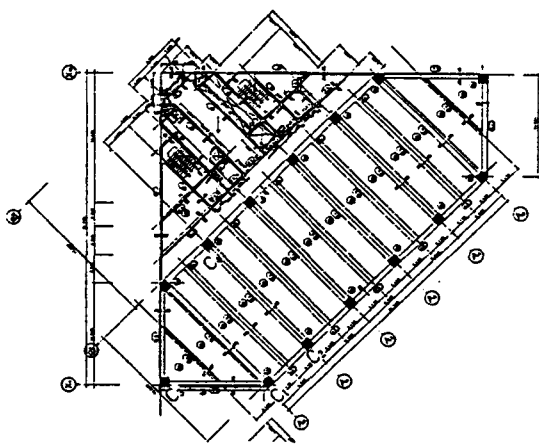


그림 3. 실제구조물의 구조평면

解析 結果 기둥의 縮小量을 나타내면 그림 4와 같다.

隣接 기둥間의 不等 變位는 그림 5와 같다.

따라서 이 不等 變位量을 施工時 補整해야하는데 一般的으로 몇층에 한번 씩 기둥의 길이를 보정하는 方式을 擇하고 있다.

### 5. 結論

以上에서 建物이 高層化되어 發生하는 기둥의 길이 變化로 인한 影響에 대해 檢討하였다. 高層建物에서 기둥의 彈性, 非彈性 縮小量은 一般的으로 기둥의 높이의 1/1000정도 發生하는 것으로 나타나 있으나 建物에 影響을 주는

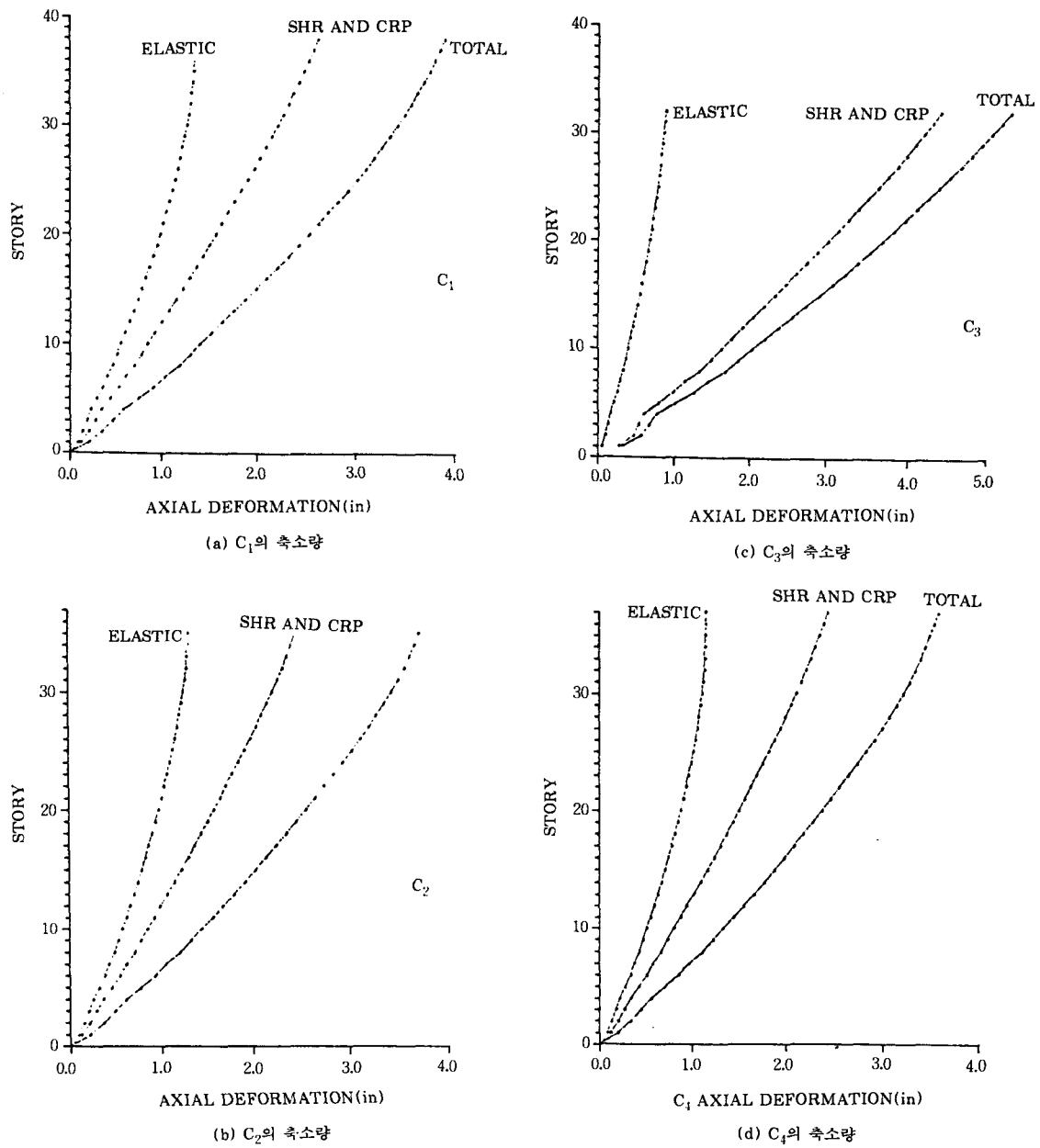


그림 4 기둥의 탄성 비탄성 축소량

것은 隣接기둥 相互間의 不等 變位로 외벽 마감, 간막이등의 非構造體에 심각한 影響을 미치게 된다.

이러한 影響을 최소화 할 수 있도록 非構造

體와 構造部材의 接合部 詳細를 만들어야 하며 축소량 解析 結果에 의해 슬래브의 水平을 維持할 수 있도록 補整되어야 한다.

특히 바람, 溫度 變化 등의 環境的인 要因에

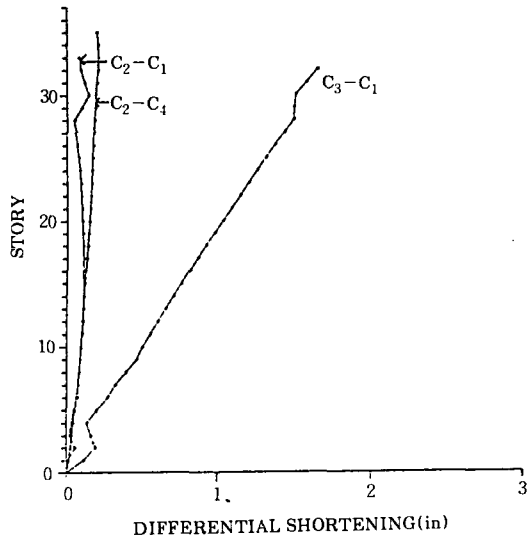


그림 5 기둥간의 부등 변위

의한 變形과 鉛直荷重의 變形을 組合하여 불리한 境遇에 對해 構造物을 設計하여야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. Russel, H. G "Shortening of High-Strength Concrete Members", High Strength Concrete,

SP 121, American Concrete Institute, 1990. pp 1-20

2. Russel H. G "High-Rise Concrete Buildings : Shrinkage, Creep and Temperature Effects" Analysis and Design of High-Rise Concrete Buildings, SP-97, American Concrete Institute, 1986, pp 125-137

3. Fintel, M., Ghosh, S.K, and Iyengar, S.H., Column Shortening in Tall Structures-Prediction and Compensation, PCA Engineering Bulletin EB108D, Portland Cement Association, 1987.

4. Russel, H. G and Larson, C.C., "Thirteen Years of Deformation in Water Tower Place" Structural Journal, American Concrete Institute, VOL. 86, NO2, March-April, 1989 pp 182-191

5. Smith, B., Coull, A., Tall Building Structures: Analysis and Design, John Wiley & Sons INC., 1991

6. 고층건물의 축소량 산출에 관한 이론적 해석 및 프로그램 사용자 지침, 기연-92013, 삼성종합건설 기술연구소, 1992

7. Choi, C.K, and Kim, E.D. "Multistory Frames Under Sequential Gravity Loads", Journal of Structural Engineering, ASCE, VOL. 111, NO2. 1985.