

철근콘크리트 고층 건축물의 해석 및 설계

고층콘크리트 건축물에서 기둥재의 부등변형문제 및 해결기법

Differential Column Shortening in High-rise Concrete Buildings



최 완 철*

조 한 국**

1. 머리말

저층구조물과는 달리 고층건물에서 발생하는 중요한 현상중의 하나로, 고정, 적재하중 등 연직하중에 의한 기둥재의 축소차로 발생하는 부등변형을 들 수 있는데, 그 변형량은 고층화가 될 수록, 특히 콘크리트 건물에서는 상당히 크기 때문에 고층건물의 설계 및 시공과정에서 반드시 고려해야 할 사항이다.

콘크리트 기둥의 부등변형 현상은 연직하중에 의한 탄성응력외에 크리이프, 건조수축, 온도차이 등 여러 가지 요인으로부터 영향을 받는다. 이들의 현상은 근본적으로 다르지만 공통적으로 인접기둥수직재에 부등 변형을 발생시킴으로 인해 바닥 슬래브를 비틀어지게 하고 결과적으로 내부 벽체나 시월에 균열을 발생시킨다.(그림 1) 또한 이러한 요인외에 건설공사의 순서와 공사기간도 영향을 주게

된다. 예를들면, 내부코아 벽체를 공사 편이상 슬립 폼으로 먼저 시공하고, 골조 기둥재 및 보 슬래브를 후에 타설하게 될 때, 벽체는 이미 변형이 상당량 진행되었을 것이며, 후에 타설되는 기둥재의 수축량의 차이를 시공시 고려하여야 할 것이다.

최근 국내에서 건축물이 고층화됨에 따라 여러 가지 신기술이 요구되고 있으며 기둥재의 부등변형에 대한 해결기법이 요구되고 있다. 본 기사에서는 이러한 부등변형 해석에 포함시켜야 할 주요인, 즉 응력, 온도차 등 탄성변형외에 크리이프, 건조수축에 의한 변형을 현상 중심으로 고찰하고 해석법을 소개한다. 고층구조물에서 검토하여야 할 시공순서에 따른 연속재해 해석법 또한 기둥재의 부등변형 범주의 문제로 보고 해결법을 간략히 기술하였다. 본 기사는 이 분야에서 주 연구 결과로 꼽히는 Fintel의 자료¹⁾와 Wilson의 보고서²⁾에서 많은 부분을 참조하였다.

* 정회원, 숭실대학교 건축공학과, 부교수
** 정회원, 삼성물산(주) 건설기술연구소, 수석연구원

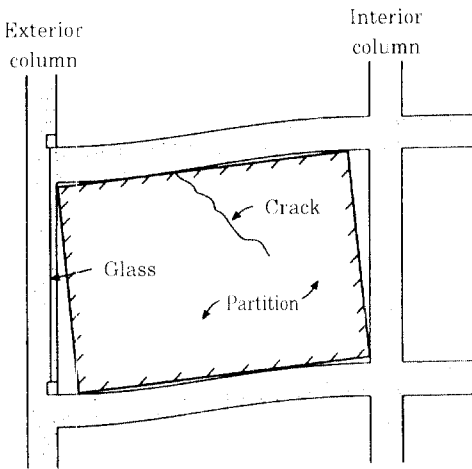


그림 1 기둥재의 부등변형에 의한 벽체의 손상

2. 온도차에 의한 기둥재의 부등변형

콘크리트 구조물은 일반적으로 높은 부정정구조이며, 이러한 특성으로 인하여 건물 내외부 온도차는 경우에 따라 심각한 응력과 변형을 발생시킨다. 온도차에 의한 응력은 내외부의 온도차이, 외부기둥의 노출정도, 콘크리트의 열전도성 (보통 콘크리트 또는 경량콘크리트에 따라), 건물의 높이, 기둥과 슬래브의 경간비 등에 따라 그 영향의 정도가 달라진다.

온도차에 의한 외부기둥의 축소량을 계산하기 위하여 먼저 최저(동절기) 또는 최고(하절기)의 일일 평균 온도를 정하고 실내외 설계온도차를 계산한다. (부재크기가 30cm 이상일 때는 3일 평균온도를 사용) 콘크리트 재료, 온도 등 열전달에 따라 기둥의 내부면의 온도를 계산하여 줄어드는 양을 계산한다. 골재 재료에 따라 열팽창계수가 달라지나 보통콘크리트에서 $\alpha = 9.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 값이 사용된다.

온도차에 의한 기둥재의 변형량은 통상적인 유한요소법으로 해석될 수 있다. 공사수행과 관련하여 온도응력을 모델화할 때에는 가장 하중요소를 추가하여 온도영향을 고려하며, 그후 공사단계에 따라 온도차가 반대가 되거나 없어졌을 때, 온도하중을 추가하거나 제거한다.

계설에 따른 온도차로부터 기둥의 부등변형 문제를 해결하기 위해서 손쉽게는 온도차를 건축시에

허용치 이하로 줄이는 방법을 쓸 수 있다. 열팽창에 의한 기둥의 부등변위는 내부, 외부 기둥경간의 1/200~1/300을 허용치로 정하고 있다. 내외부 사이에 14°C 정도의 온도 차이에 의해 기둥은 한 층 당 약 0.8 mm 정도 발생되며 40층에서는 32mm의 부등변형을 초래하여 상당한 구조변형을 발생시킬 수 있으므로 쉽게 허용범위를 가늠할 수 있다.

외부기둥에 단열재를 사용하거나 외기노출을 줄이는 방법 이외에 슬래브 접합을 힌지로 처리하는 기법을 쓰기로 한다. 우리나라 북부지역에서는 동절기 온도차를 고려하여 특히 20층 이상의 건축물로서 기둥이 외기에 노출되는 경우, 기둥의 부등변형에 대해 구조 검토되어야 할 것이다.

3. 크리이프와 건조수축에 의한 부등변형

크리이프 영향에 대한 고려는 온도영향에 비해 그 크기를 예측 해석하거나 설계에 적용함에 있어 훨씬 복잡하다. 1960년 후반부터 40~50층 정도의 고층건축물에서 크리이프의 영향에 대해 연구되었고 해결책이 제시되어 왔다. 최근 콘크리트 건축물 또는 콘크리트/철골 혼합 구조물의 높이가 70~80층 규모에 이르게 됨에 따라 초기 기법을 발전시키고 있다.

크리이프 변형치는 그 부재에 작용하는 응력수준에 비례하여 크리이프 해석에서 단위응력당 종국크리이프량(specific creep)을 기본값으로 계산하게 된다. 시간요인 또한 크리이프 변형에 영향을 주게 되며 일정한 응력을 받는 부재에서 재령에 따른 크리이프량은 크게 달라진다. 수화반응이 완료된 숙성콘크리트에서 크리이프 변형은 극히 적다. 대략적으로 초기 28일 내에서 약 40%의 변형이 일어나고 3~6개월 내에 60~70%, 2년 이내에 90% 정도의 변형이 발생되어 콘크리트 구조물은 공사 후 수년내에 대부분의 크리이프 변형이 발생하게 된다. 따라서 부재에 대한 재하시기가 크리이프 변형을 예측하는데 특히 중요하며, 공사순서와 재하속도가 크리이프 해석에 고려된다.

철근콘크리트 부재에서 부피대 표면적의 비 또한 크리이프에 중요한 영향 요인이 된다. 부재의 체적에 비해 표면적이 큰 부재에서 내부콘크리트와 외

기 사이에 수분교환이 활발하여져서 크리이프가 증가하게 되고, 결과적으로 큰 크리이프 변형이 발생된다. 철근배근량 또한 크리이프 및 수축에 영향을 미친다. 장기적으로 받은 하중상태에서 크리이프와 수축현상에 의한 결과로 콘크리트로부터 철근으로의 점차적인 응력의 전이가 발생하며 극단의 경우에는 콘크리트내에 인장응력이 발생하게 되어 부동현상을 상쇄시키는 경우 발생한다. 철근과 콘크리트 사이의 평형과 적합조건을 이용하여 철근량에 의한 효과를 계산할 수 있다.

크리이프와 건조수축이 기동재를 축소시키는 면에서는 유사하지만 건조수축은 공사기간에 무관하나 크리이프는 부재에 가해지는 응력과 밀접하기 때문에 공사순서 및 기간으로부터 큰 영향을 받게 된다. 따라서 크리이프와 건조수축 변형을 각각 해석한 후 그 결과는 건물은 수평부재가 최후의 수평을 유지하도록 보정을 하도록 검토되어야 한다.

표 1은 기동수축량의 수치에로서, 가상 80층 콘크리트 건물과 철골구조의 기동 축소값을 비교하여 보여준다. 콘크리트 기동재에서는 축소량이 16.8cm로 철골구조의 값 20.0cm보다 적게 나타난다. 콘크리트 기동재에서는 단기변형 즉 탄성변형에 의한 값이 6.1cm로 적게 나타나나 건조수축과 크리이프에 의한 장기변형이 각각 4.6cm(36%)와 6.1cm(28%)로 크게 나타난다.

표 1 80층 고층구조에서 요인별 기동재 감소량 (단위 : cm)

	콘크리트 부재	철골부재
탄 성 변 형	6.1	20.0
크 리 이 프	4.6	-
건 조 수 축	6.1	-
합 계	16.8	20.0

4. 크리이프 및 건조수축 해석기법

크리이프현상은 부재의 내부와 외부사이에 수분의 이동이 없는 상태, 즉 습성평형조건(hygral equilibrium)에서 발생하는 진크리이프(true creep)과 부재와 외기 사이에서 수분교환에 의해 발생하는 건조크리이프(drying creep)으로 구분한다. 진크리이프량은 항복강도의 40% 이전의 낮

은 값에서는 응력에 선형 비례하며 그 이상의 응력에서는 비선형이 된다.

크리이프는 응력외에 하중이력에 크게 영향을 받는다. 초기에 크게 응력을 받는 콘크리트 부재에 비해 그 후에 응력을 받는 부재는 적은 단위응력당 크리이프를 나타내며, 또한 재령이 지날수록 크리이프현상은 감소된다. 따라서 각 하중단계에서의 단위응력당 크리이프가 작은량으로 누적되어 종국 크리이프가 적어진다.

크리이프 해석에서 가장 기본값인 단위응력당 크리이프량(specific creep)은 구조물에 시공될 배합으로 제작된 시험체를 장기 수행하여 얻어내어야 하나 이는 프로젝트 수행과정에서 현실적으로 용이하지 않다. 대신에 그림 2와 같이 기존의 연구결과로부터 얻어진 콘크리트 탄성계수에 따라 단위응력당 크리이프량을 얻고 하중시기별 기본 크리이프를 예측한다. 콘크리트 강도가 얻어지면 기본 28일 단위응력당 크리이프는 추정되고 이 값에 공사기간, 부재치수에 따라 보정치를 적용하여 계산한다.

먼저 하중이력에 대한 보정 즉 공사기간에 따른 보정은 재하시기의 재령과 크리이프 관계 곡선으로 추정한다.(그림 3) 재령 28일자의 크리이프 계수를 단위값으로 하고 하중재하시기의 재령에 따른 비를 λ 로 하여 하중이력에 대해 보정한다. 재하시기가 다른 각 하중별로 크리이프량을 계산하여 전 크리이프량을 합함으로서 공사기간에 대해 보정한다.

부재치수에 대한 보정은 그림 4로부터 계수를 찾아 수행한다. 체적대 표면적비가 적어지면 부재와 외기 사이에 활발한 수분교환으로부터 크리이프가 증가한다. 건조 수축 또한 부재치수에 크게 영향을

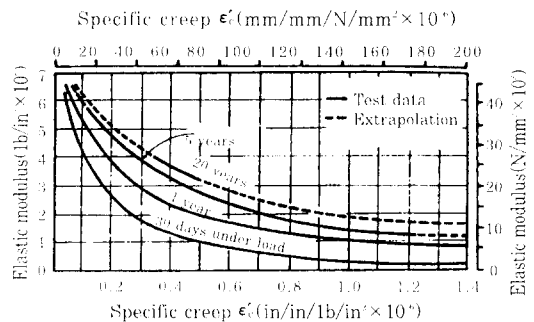


그림 2 재하시기에 따른 탄성계수별 크리이프

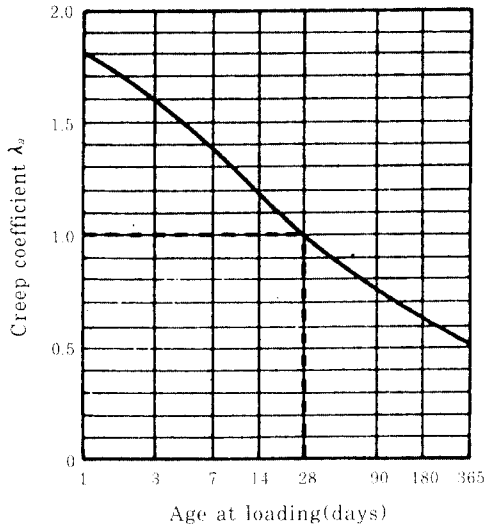


그림 3 재하시 재령에 따른 크리이프 계수 λ_c

받는다. 부재의 체적에 대한 표면적 비율과 크리이프 계수 λ_c 및 건조수축 계수 λ_s 는 그림 4와 같으며 이러한 건조크리이프는 초기 3개월에 크게 발생되고 4개월 이후에는 적어진다.

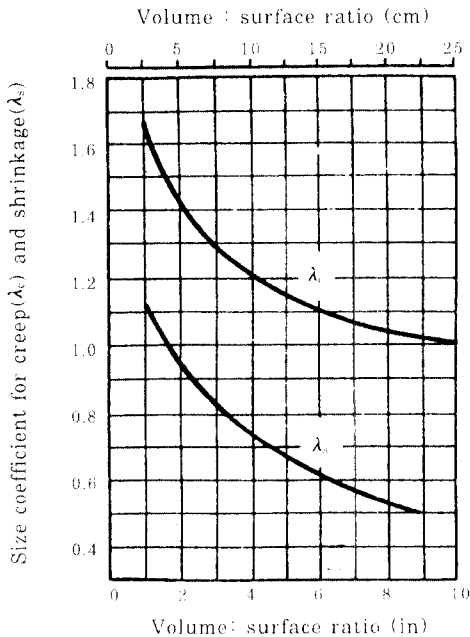


그림 4 체적대 표면적 비율에 따른 크리이프 계수 λ_c 와 건조수축계수 λ_s

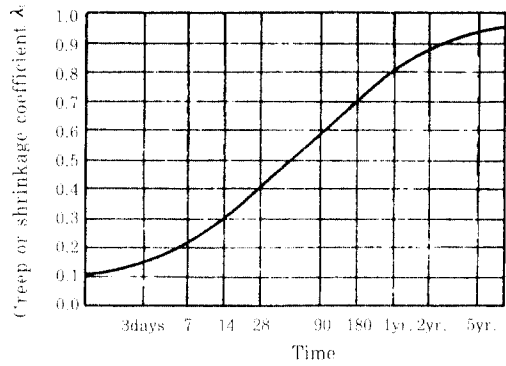


그림 5 시간에 따른 크리이프 또는 건조수축계수 λ

크리이프와 건조 수축의 시간에 대한 변화율도 그림 5에 따라 고려한다. 이 변화율 곡선을 이용하여 일정시기까지의 크리이프 실험결과로부터 종국 크리이프 또는 건조 수축량을 추정할 수 있으며 반대로 종국변형율로부터 일정시기의 변형율을 환산할 수 있다. 즉 일정기간 t_i 이후 크리이프 또는 건조수축량은 시간에따른 변화율 계수 λ_i 라고 할 때 $(1-\lambda_i)$ 를 곱하여 계산하게 된다.

이상에서 논의된 바와 같이 각 요인별 보정계수로부터 크리이프 계산을 수행할 수 있다. R층수를 갖는 건축물에서 N층 기둥재의 수직수축량은 1층과 N층 사이에서 발생한 변형량의 합이며 다음과 같이 4 요소로 계산된다. (그림 6)

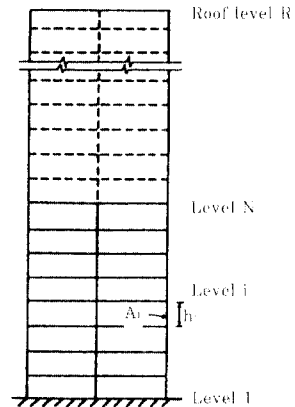


그림 6 크리이프 해석대상 고층건축물

1) N층 슬래브 타설 이전 1층부터 N층까지의 하중으로부터 크리이프량(Δ_{c1})

$$\Delta_{i,1} = \sum_1^N \delta_{i,1i}$$

$$\delta_{i,1i} = h_i \sum_1^N \epsilon'_i(28) \sigma_{i,1} \lambda_i \lambda_{i,1} (1 - \lambda_{i,1})$$

(여기서 $\sigma_{i,1}$ 는 i 층부터 N 층 까지 하중으로부터 환산단면적에 대한 응력)

2) N 층 슬래브 타설 이후 N 층부터 R (지붕층)까지의 하중으로부터 크리이프량($\Delta_{i,2}$)

$$\Delta_{i,2} = \sum_1^N \delta_{i,2i}$$

$$\delta_{i,2i} = h_i \sum_N^R \epsilon'_i(28) \sigma_{i,2} \lambda_i \lambda_{i,2}$$

(여기서 $\sigma_{i,2}$ 는 N 층부터 R 층까지 하중으로부터 환산단면적에 대한 응력)

3) 건조 수축량($\Delta_{i,3}$)

$$\Delta_{i,3} = \sum_1^N \delta_{i,3i} = \sum_1^N h_i \epsilon_s \lambda_i (1 - \lambda_{i,3})$$

(여기서 ϵ_s 는 종국 건조수축 변형률)

4) N 층부터 R 층까지 이후공사 하중으로부터 발생하는 탄성변형량($\Delta_{i,4}$)

$$\Delta_{i,4} = \sum_1^N \delta_{i,4i} = P \sum_1^N \frac{h_i}{E_i A_i}$$

(여기서 P 는 N 층부터 R 층 까지 이후의 하중의 합)

이상의 계산 결과에 철근 배근량을 고려하며 철근과 콘크리트의 응력에 재분배에 따른 부등변형을 계산하는데, 크리이프와 수축에 의한 잔유변형은 철근의 응력추가에 의한 추가 변형으로 최종 구해 질 수 있다. 철근에 작용되는 추가응력은 작용되는 응력, 크리이프 변형량, 건조수축량이 클수록 증가하고 반면에 철근비가 높을수록 감소한다. 즉 콘크리트의 크리이프 및 건조수축에 의해 발생한 철근의 잔유응력은 잔유변형 또는 수정크리이프 변형으

로 환산되고 탄성변형과 합해서 최종 기동변형량이 된다.

상기와 같이 예상되는 기동의 수축량은 설계시 검토되어 건물의 구조체에 큰 무리를 일으키지 않는 상태에서 최종적으로 수평을 이룰 수 있도록 보정을 해 주어야 한다. 그 보정방법의 한 예로서 큰 변형이 예상되는 기동재를 변형이 작은 인접기동보다 미리 높이 타설하는 방법을 생각할 수 있다.

5. 시공순서를 고려한 해석 : 연속재하 해석 (sequential analysis)

건물이 고층화됨으로서 연직하중 해석과정에서 재하 방법을 기존해석법과 다르게 수행하여야 한다. 실제로 건설공사 과정에서 구조 부재는 여러 단계로 나누어 시공되고 그 층이 시공될 때는 자중만이 먼저 작용된다. 건물의 설계 시공 순서를 고려한 하중 상태와 일치하는 해석기법을 사용함으로써 예상밖의 지나친 부등변위에 의한 결과를 방지할 수 있는 해석기법이 제안되고 있다.

시공순서를 고려한 해석기법은 시공단계별로 구조물의 강성을 얻고 그 구조물 자유도에 해당되는 변위를 계산한 후, 다음 시공단계에 포함하여 해석하며 완성단계까지 계속 수행한다. 시공단계별 구조물의 강성 매트릭스를 구성하여 다음층의 변위를 계산하게 되며, 다음 단계에는 그 단계의 하중만으로 변위를 구한다. 즉 다음 층이 추가될 때, 그 층은 기존의 구조물요소의 자중과는 관련이 없게 한다. 실제로 부등변위는 최소한 콘크리트가 타설될 때 상부 구조물에 영향을 주게 되며 기동의 변형이 이미 발생한 상태에서 한 층이 일체식 만들어 지기 때문에 아래층의 응력에는 영향을 받지 않게 되며 이러한 현상이 해석에 고려된 것이다. 이러한 시공순서를 고려하여 연속 재하기법의 결과와 기존의 해석법(자중을 일시에 재하)에 의한 결과 차이를 다음 사례에서 비교할 수 있겠다.

6. 사 례

사례 1 : 시공순서를 고려한 24층 내력벽/괄조 구조(참고문헌 4)

슬래브가 기둥과 내력벽으로 지지된 대표적인 콘크리트 고층건축물로서 자중에 대해 연속재해기법으로 해석한 결과를 예시한다.(그림 7) 내력벽 두께가 상부 14층까지는 35cm, 하부 10층까지는 45cm로 가정되었다. 각 층별 시공단계로하여 한 층을 공사 단위로 보고 해석하였으며 이 결과와 구조물에 자중을 일시에 작용시키는 기존해석방법에 의한 결과를 비교하였다.

내부기둥은 큰 면적을 지지하므로 외부기둥에 비해 큰 하중을 받게 되고 내력벽에 비해서도 물론 큰 응력을 받게 된다. 기존해석 프로그램에 의한 결과, 최상지붕층을 기준으로 측정하였을 때 내력벽은 1.24cm, 내부 기둥은 4.93cm, 외부 기둥은 3.45cm로 큰 부등변형을 보이고 있다. 그러나 시공순서를 고려한 해석기법의 결과 변위량은 상당량 감소하게 되어 내력벽은 0.10cm, 내부기둥은 0.05cm, 외부기둥은 0.33cm로 계산되었다. 기존 방법에 의하면 건물상부에서 변형이 지나치게 과장됨을 알 수 있으며 이러한 현상은 그림 8에서 보는 바와 같이 각

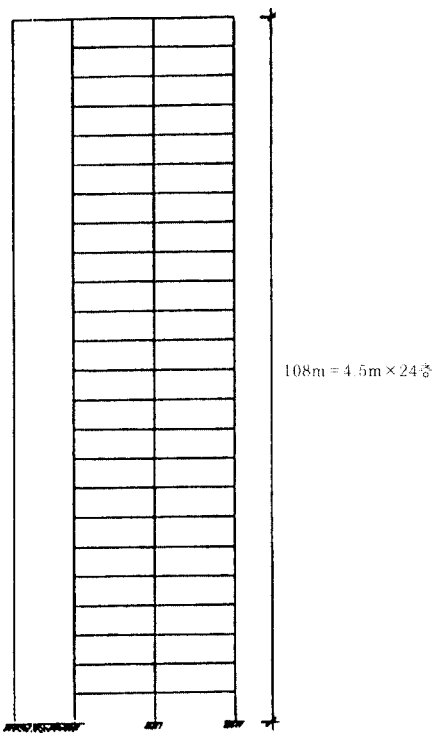


그림 7 골조와 전단벽 구조

부재의 휨모멘트에서 상당한 차이를 보이게 된다. 이러한 오류는 각 층의 고정하중, 특히 골조자중이 그 층의 상부, 하부 기둥에 동시에 작용된다는 가정 하에서 해석한 결과로 발생된 것이다. 실제 구조물에서는 각 층 하부의 기둥만이 그 층의 고정 하중에 의한 휨모멘트를 저항할 수 있고, 또한 자중에 의한 부등변형량은 각 층 타설시 보정이 이루어지기 때문에, 이러한 현상이 연속재해기법에서 고려됨으로써 실제 현상에 가까운 구조물의 해석을 수행할 수 있다.

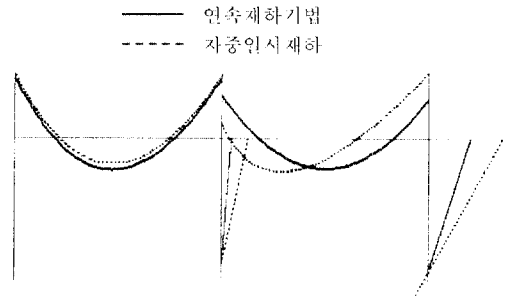


그림 8 최상층 보의 휨모멘트

사례 2 : 크리이프, 건조수축을 고려한 70층 내력벽/골조구조(참고문헌 1)

공사직후 각층의 연직력을 지지하는 부재는 상부 구조물의 하중으로부터 탄성변형을 하게 된다. 그 후에 콘크리트 기둥재는 수분손실로부터 건조수축하게 되고 작용되는 압축응력으로 인해 크리이프 변형이 진행된다.

현장타설 콘크리트 구조에서 슬래브 타설 이전의 기둥재의 부등변형은 각층을 시공할 때에 보상시공되며 부등변위에 의한 손상은 결국 타설이후 작용되는 하중과 재료성능에 의하여 장기변형으로써 발생한다.

그림 9는 대표적인 70층 고층 콘크리트 사무실로서 기둥재의 변형을 해석한 결과를 보여주고 있다. 그림 10은 전단벽과 기둥에서 슬래브 타설이전과 타설이후의 각요인별 수직 변형을 나타내고 있으며, 탄성 변형외에 콘크리트 재료의 건조수축 및 크리이프 계수를 가정하여 비선형 해석한 결과이다. 슬래브 타설전에 발생된 변형치는 타설시에 거꾸집으로 조정하여 이미 보상된 것으로 볼 수 있으며 슬

래브 타설이후의 변형치에 대해서만 보상함이 필요하다. 이러한 70층 구조물에서 슬래브 타설이후 예측되는 기둥과 벽체사이의 최대부등변형치는 40층 부근에서 약 27mm 정도로 계산되었다.(그림 11) 이러한 부등변위에 대해 시공시에 전단 벽체 보다 외부기둥을 부등변형치 만큼 높게 거푸집으로 조정하게 되며, 그 후 탄성변형, 건조수축, 크리이프로부터 기둥재가 줄어들어 결과적으로 슬래브는 평탄하게 될 수 있다.

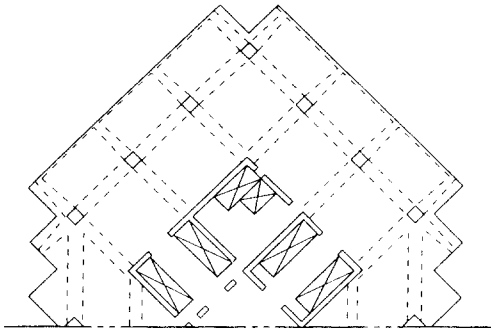


그림 9 크리이프 해석 70층 건물의 평면

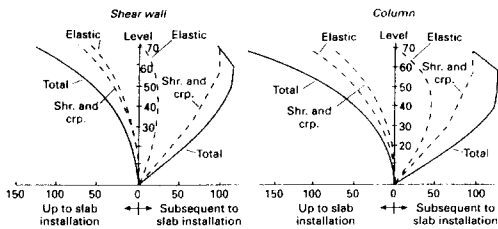


그림 10 70층 건물에서 기둥과 전단벽의 각 층별 변형량

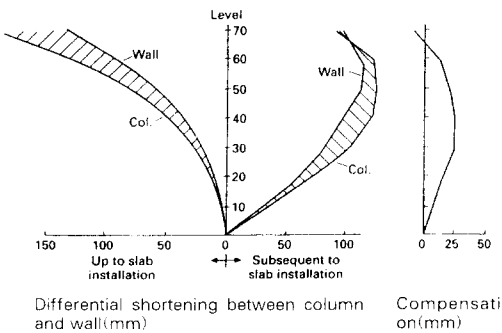


그림 11 70층 건물에서 전단벽의 부등변형량 비교

7. 맺음말

고층 콘크리트 건물의 기둥 체에서 인접 부재간의 부등변형에 따른 부재의 비틀림 현상은 반드시 검토하여야 할 중요한 문제이다. 이의 예측 및 보정을 통하여 슬래브의 비틀림을 최소화하고, 칸막이 벽, 엘리베이터 레일, 수직 설비 시설에 대한 손상을 예방하여야 한다. 이러한 부등변형을 최소화시키기 위해서는 콘크리트 재료 배합에서 뿐만 아니라, 양생 과정, 공사 순서(부재별 콘크리트 타설 시기 및 재령) 등에 대한 자료들을 면밀하게 검토하고 구조물의 해석, 설계 및 시공에 반영시켜야 한다.

국내 건설 업체의 실적으로는 최근 말레이시아의 세계 최고층 KLCC 빌딩의 기둥 부재의 보정치를 고려하여 타설이 되었으며, 실제 수축량의 측정도 진행되고 있으며 그외 다른 해외 고층 프로젝트에도 기둥수축량의 해석, 보정에 대한 검토가 진행되고 있다. 이러한 문제들의 해석은 실제 측정치와의 비교 검토, 신재료의 개발 등과 관련되어 계속적인 연구가 더욱 필요하다.

참고 문헌

1. Fintel M, Khan F R 1969. "Effects of Column Creep and Shrinkage in Tall Structures-Prediction of Inelastic Column Shortening", ACI Journal, Proceedings 66(12): pp.957-967
2. Kahn F R, Fintel M 1966. "Effects of Column Exposure in Tall Structures-Design Considerations and Field Observations of Buildings", ACI Journal, Proceedings 65(2): pp.99-110
3. Bryan Smith, Alex Coull, 1991 "Tall Building Structures : Analysis and Design", John Wiley & Sons, Inc, New York, pp. 461-479
4. Wilson, E D, Saffarini, H S, 1983, "New Approaches in the Structural Analysis of Building Systems", Report No. UCB/SESM-83/08, Univ. of California, Berkeley, p. 258.