

고층 콘크리트 건물의 기둥축소량 계측연구

Measured and Predicted Column Shortening of a Tall Reinforced Concrete Building



김원상*

Kim, Won-Sang



조한욱**

Cho, Han-Wook



오정근***

Oh, Jung-Keun



염경수****

Yom, Kyung-Soo

ABSTRACT

The KLCC Petronas Tower 2, one of the world tallest twin reinforced concrete towers constructed in Kuala Lumpur, Malaysia, was instrumented during construction for the measurement of vertical time-dependent deformations of columns and corewall. Field measurements were made by means of vibrating wire strain gauges at the corewall, tower and bustle perimeter columns at selected floor levels of the building. Parallel to this observation, laboratory tests were performed on concrete cylinders made in the field in order to obtain the variations of concrete compressive strengths, elastic moduli, strains of creep and shrinkage with time. Monitored vertical deformations are in a good agreement with the prediction based on actual construction sequence and concrete properties from laboratory tests, as well as the analytical results reflected in actual column compensation of the building.

keywords: column shortening; KLCC Petronas Tower 2; vibrating wire strain gauges; creep; shrinkage

* 삼성물산(주) 기술연구소 주임연구원
** 삼성물산(주) 기술연구소 수석연구원, 공학박사
*** 삼성물산(주) 기술연구소 선임연구원, 공학박사
**** 삼성물산(주) 건축기술팀 과장

•본 논문에 대한 토의를 1999년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다

1. 서 론

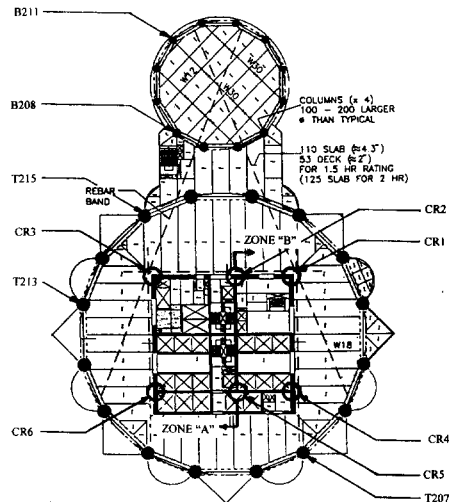
건설기술의 발전에 따라 고강도 콘크리트의 개발이 가능하게 되고, 그와 더불어 철근콘크리트 건물의 고층화가 진행되어 왔다. 철근콘크리트 고층건물은 철골구조와는 달리, 크립과 건조수축이라는 재료특성을 가지고 있는 콘크리트를 사용하기 때문에, 하중에 의한 탄성변형 외에 장기간에 걸친 수직부재의 축소현상을 동반하게 된다. 이와 같은 고층건물 철근콘크리트 기둥의 수직방향 축소량은 설비, 마감재 등의 변형을 유발시켜 건물의 안전성에도 영향을 미치게 된다. 그러므로, 철근콘크리트 고층건물의 설계시에는 수직부재의 축소량 및 인접기둥간의 부등축소량을 정확히 예측하고, 이에 대한 적절한 보정방법을 통하여 시공에 반영하는 작업이 필요하게 된다.

기둥축소현상에 관한 연구는 Fintel and Khan¹⁾, ACI Committee 209²⁾, Russell and Corley³⁾, Fintel, Ghosh and Iyengar⁴⁾, Rangan and Warner⁵⁾ 등에 의하여 수행되어 왔고, 그 결과는 고층건물의 구조설계시에 반영되어 왔다. 이들 연구의 축소량 예측기법은 철근콘크리트 건물의 실제 기둥축소량의 계측을 통하여 검증되는데, 계측의 어려움으로 인하여 측정자료는 많지 않은 실정이다. 이에 현존하는 세계 최고 높이 452m(지하 21m)의 말레이시아의 KLCC 페트로나스 건물의 기둥축소현상을 계측을 통하여 분석하고자, 골조공사 시공시 기둥 및 코어벽에 동적 스트레인 게이지를 매립하여 1층 타설시부터 3년 4개월 동안 계측을 수행하였다. 이와 병행하여 실내에서 공시체를 이용하여 재령, 작용하중을 변수로 한 콘크리트 압축강도, 탄성계수, 크립 및 건조수축량을 측정하였다. 현장 계측된 수직변형도같은 기둥축소량으로 치환되어, 실내실험 결과치를 이용한 해석치 및 실제건물에 적용된 설계치와 비교 분석 하였다. 그러나, 38층과 84층의 기계실층에서 계획된 기둥과 코어벽간의 상호레벨 측정은 그 사이에 골조설비의 설치로 인하여 실현되지 못하였다.

2. KLCC건물의 기둥축소량 계측

KLCC 건물은 지하 6층, 지상 92층의 쌍둥이 철근 콘크리트 건물로써 각 타워별로 주 타워부

와 45층의 버슬(Bustle)부로 이루어져 있다. 수직부재로는 주 타워부의 철근콘크리트 내부코어 전단벽과 외부 원형기둥, 버슬(Bustle)부의 철근콘크리트 원형기둥이며, 바닥구조는 철골보와 데크플레이트(Bon Deck)가 사용되었다. 또한, 최상부에 73.6m 높이의 철골조 첨탑(pinnacle)과 쌍둥이 건물을 연결하는 58.4m 경간의 2층 높이의 철골조 다리가 41층에 설치되어 있다. 골조공사 1층당 소요된 기간은 평균 6일이며, 수직재에는 큐브 압축강도 $f_{cu} = 80, 60, 40$ MPa 의 고강도 콘크리트가 높이별로 세 구간으로 구분되어 타설되었고, 시공은 1994년 3월에 시작되어 1996년 6월까지 118주가 소요되었다. KLCC 건물의 기준층 평면(Tower #2)은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 타워부분의 코어전단벽은 상부로 진행함에 따라 평면이 다소 바뀌며, 원형기둥은 동일한 형식을 상부층까지 유지한다. 수직방향의 변형도를 측정하기 위한 변형도 게이지는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 코어벽체에 6개소, 타워의 3개 기둥, 버슬(Bustle)의 2개 기둥에 설치되었다. 모두 6개층(1, 19, 38, 45, 58 및 65층)에 119개가 설치되었으며, 기둥의 경우 한 개소에 3개의 게이지를 삼각형 모양으로 매립하였다. 측정은 타설후 첫주에는 12시간, 7일에서 28일사이는 24시간, 6개월까지는 5일, 1년까



B: Bustle, CR: Corewall, T: Tower
T213: Tower #2, Column #13

Fig. 1 KLCC typical floor plan with the locations of strain gauges

지는 1달 그리고 3년까지는 3개월에 한 번 간격으로 수행하였다. 최초 계측을 시작한 1층 기둥의 경우에는 1994년 6월 30일부터 1997년 10월 1일까지 계측을 수행하였다. 기둥 축소량 최종 계측시점에는 마감공사가 진행중에 있었다. 구조 설계자인 Thornton & Tomasetti(이하 T&T)는 20년후 바닥 부재가 수평을 유지하도록, 타워부의 코어벽체와 기둥, 버슬(Bustle)부의 기둥에 대한 축소량과 그로 인한 부등축소량에 대한 보정치를 제시하였다. 보정방법은 시공순서상 먼저 타설되는 코어벽체의 설계높이에 매층 6-7.5mm의 보정치를 가산하여 시공하였으며, 보정치의 검증작업은 5개층의 누계를 확인하는 방법으로 수행하였다. 타워부의 기둥은 코어 레벨을 기준으로 최대 35mm까지의 치울림(Camber)을 주어 높이 타설하고, 버슬(Bustle)부의 기둥은 타워 기둥을 기준으로 최대 10mm까지의 치울림을 준다. 전층의 누적보정치는 코어벽체가 573mm, 타워와 버슬부의 기둥이 각각 598, 326mm이다.

3. 기둥축소량 해석

기둥 축소량의 해석을 위하여는 부재들의 크립과 건조수축에 대한 해석모델과 타설된 콘크리트의 재료물성치가 요구된다. 본 연구에서 수행된 KLCC 기둥축소량의 해석을 위하여 ACI⁽⁶⁾, CEB-FIP(78)⁽⁷⁾, CEB-FIP(90)⁽⁸⁾, BP⁽⁹⁾, BP-KX⁽¹⁰⁾, B3⁽¹¹⁾, Fintel, Ghosh and Iyengar⁽⁴⁾(이하 FGI 모델로 칭함) 등이 제시한 모델의 비교, 분석이 선행되었다. 실제 계측되는 변위량은 하중에 의한 탄성변위와 장기적으로 추가되는 비탄성변위의 합으로 나타나게 되며, 비탄성변위는 크립과 건조수축으로 구분하여 분석하게 된다. 검토된 모델식들은 비슷한 구조적 개념을 가지고 있으나 각각의 변수에 대한 제안식들은 다소 차이를 나타내고 있다. 또한, 각 제안식들은 일반적으로 표준공시체인 $\phi 15 \times 30$ cm 의 실험결과를 근거로 제시되었기 때문에, 본 연구의 대상인 KLCC 건물의 대형 원형기둥(직경=1.8m)에 적용할 경우에는 제안식과 실구조물의 축소량은 편차가 매우 심한 결과를 초래할 수 있다. 따라서 각 모델의 특성을 검토한 후에 이 건물의 해석을 위하여 FGI⁽⁴⁾ 모델을 채택하였으며, 일부변수의 제안식을 수정하였다. 이 모델안에서 해석값을 제시하기 위해 필요한 콘크리트

압축강도와 탄성계수의 변화, 특정크립 변형도와 극한 건조수축 변형도에 대한 물성치는 현장 계측 기간중에 병행하여 실제 재료시험을 통하여 측정하였다. 특정크립 변형도란 표준공시체를 사용하여, 7일 습윤양생 후 온도 23°C, 상대습도 40%를 유지하고, 28일에 하중을 가한 상태에서 적용 단위하중당 수렴된 최종 크립변형도로 정의되며, 극한 건조수축 변형도는 같은 환경에서 하중만 가하지 않은 상태의 최종 수렴된 수축 변형도로 정의된다. 사용된 해석 프로그램의 단위가 pound-inch이기 때문에, 본 논문에서는 kg/cm², MPa, psi 단위들을 병용하였다.

3.1 해석모델

FGI⁽⁴⁾ 모델은 하중에 의한 탄성변형과 크립 및 건조수축에 의한 콘크리트의 장기 비탄성변형으로 수직변위를 예측하고 있다. 탄성변형의 산정을 위하여, 28일 표준공시체 압축강도를 기준으로 식 (1), (2)를 이용하여, 시간의 진행에 따른 콘크리트 압축강도 및 탄성계수의 증가를 고려하고 있다^(2,6). 비탄성 변형도는 크립과 건조수축으로 구분하여, 각각 콘크리트 부재의 재령, 상대습도, 부피 대 표면적의 비, 잔유응력을 고려한 네 가지 변수에, 특정크립 변형도와 극한 건조수축 변형도의 곱으로 나타나게 되며, 해당층 콘크리트 타설전과 타설후의 경우로 나누어 산정한다.

$$f_{ct} = \frac{t}{4 + 0.85t} f_c \quad (1)$$

f_{ct} =재령 t(일)에서의 콘크리트 압축강도(psi)

f_c =재령 28일에서의 콘크리트 압축강도(psi)

t=재령 (days)

$$E_{ct} = 33 \omega^{1.5} \sqrt{f_{ct}} \quad (2)$$

w = 콘크리트 단위중량 150 lb/ft³

이 모델에서는 크립과 건조수축 변형의 계산을 위해 필요한 4개의 변수에 대한 식을 채택하고 있는데, 4개식 가운데 건조수축의 재령에 관한 시간변수인 SH_t에 Hansen and Mattock⁽⁴⁾의 식 (3)을 사용하였다.

$$SH_t = \frac{\epsilon_{s,t}}{\epsilon_{s,\infty}} = \frac{t}{26.0e^{0.36(\alpha s)} + t} \quad (3)$$

$\epsilon_{s,\infty}$ = 극한건조 수축 변형도
 $\epsilon_{s,t}$ = 시간 t(날짜)에서의 건조수축변형도

식(3)은 시간과 부피:표면적 비(v:s)의 함수로 표현되어 있는데, 표준공시체(v:s=1.5")인 경우와 본 논문의 대상인 KLCC 대형 기둥(최대직경=1.8m, v:s=26.62")인 경우에 큰 차이를 보여준다. 표준공시체에 대해 식(3)은 3년에 95.7%, 10년에 99%의 변형도 수렴을 제시하나, KLCC 기둥의 경우에 3년에 0.8%, 10년에 3%만의 접근을 보여준다. 이와 같은 모델식의 차이는 부재크기에 따른 변형도의 수렴속도에 대한 검토를 요하게 된다. 그러므로, 여러 모델식의 건조수축 시간변수를 검토한 후에 부재의 크기 효과를 고려하고 있는 CEB-FIP (1978)⁷⁾의 시간변수 제안식 (4)를 채택하였다.

$$SH_t = \frac{t^{0.8}}{0.25h_0 + t^{0.8}} \quad (4)$$

$$h_0 = \lambda \frac{2A_c}{u} \quad (\text{unit:mm})$$

A_c = 콘크리트 단면적
 u = 공기와 접하는 물레의 길이
 λ = 상대습도 계수(RH=40%, $\lambda=1.03$)
 *표준 공시체 : $0.25h_0 = 19.5$

3.2 실내 콘크리트 물성치 시험

탄성 기둥축소량을 예측하기 위한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 시간에 따른 변화와 비탄성 축소량을 해석하기 위한 특정크립(specific creep) 변형도 및 극한건조수축(ultimate shrinkage) 변형도를 얻고자, 타설된 콘크리트로 제작된 공시체를 이용하여 상대습도 50%인 환경에서 실내시험을 수행하였다.

KLCC 타워에서는 저층부, 중층부와 상층부로 나누어 각각 $f_{cu}=80, 60, 40$ MPa의 고강도 콘크리트를 사용하였다. 사용된 콘크리트의 압축강도별 배합비는 Table 1과 같다.

Table 1 Mix proportion of concrete strengths

f_{cu} MPa	W/C (%)	S/A (%)	C kg	M kg	S kg	W kg	CA kg	FA kg	Admix(L)	
									A	B
80	27	40	184	345	35	152	1040	694	0.80	8.50
60	30	44	500	-	-	150	1000	785	1.00	5.50
40	42	48	420	-	-	175	920	850	0.85	3.40

C=cement, M=mascrete, S=silica fume,
 CA=coarse aggregate, FA=fine aggregate,
 A=P300N, B=R1000

(1) 압축 강도

ASTM C 39-86 기준에 근거해서 $\phi 15 \times 30$ cm의 표준 실린더 시험체를 제작하였으며, 200톤 UTM을 이용하여 압축강도 시험을 수행하였다. 실린더 압축강도 시험결과와 28일 강도를 기준으로 한 압축강도의 변화를 Fig. 2에 보여주고 있다. 시간에 따른 압축강도의 예측을 위해 식 (1)이 사용되었다.

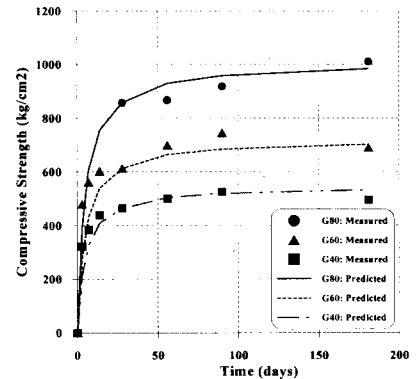


Fig. 2 Variation of cylindrical concrete compressive strength with time

상기 그림에 나타난 바와 같이, 설계 큐브강도 80, 60, 40 MPa에 상응하는 실린더 28일 강도 $f'c = 714, 510, 330 \text{ kg/cm}^2$ (CEB-FIP (1990)⁸⁾의 압축강도 관계식에 따름)보다 큰 값을 보이며, 시간에 따른 콘크리트 강도의 변화는 식(1)을 이용한 추정값과 근사함을 보여준다.

(2) 탄성계수

콘크리트의 재령별 탄성계수값을 측정하기 위하여, ASTM C 469-8a 기준에 의해 시험편을 제작하여 강도별로 시험하였다. 또한, 설계강도를 식(1), (2)에 적용하여 탄성계수의 시간에 따른 변화를 예측하여 Fig. 3에서 측정결과와 비교하였

다. 실험결과는 압축강도가 증가할수록 예측치가 실험치보다 크게 나타내는 경향을 보인다. 즉, G40인 경우는 비교적 일치하지만, G80인 경우는 약 10-15%의 차이를 보이고 있다. 이와 같은 경향은 기존연구^{12),13)}의 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

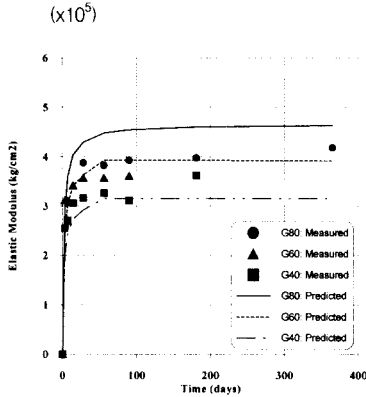


Fig. 3 Variation of concrete elastic moduli with time

(3) 특정 크리프 변형도

콘크리트의 크리프 시험은 ASTM C 512 기준을 적용하였고, 공시체는 수중양생 후 하중을 적용하였다. 하중은 0.1f_{cu}, 0.2f_{cu}, 0.4f_{cu}의 세가지를 적용하여 약 400일 정도 측정하였다. 크리프 변형도의 최종수렴값을 추정하기 위해 아래 식(5)을 이용하였다.

$$CR_t = \frac{\epsilon_{cr,t}}{\epsilon_{cr,\infty}} = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \quad (5)$$

크리프 변형도의 수렴값으로 재령 28일에 0.2f'c의 하중을 가한 경우에 콘크리트 압축강도 G80, G60, G40별로 각각 259.43x10⁻⁶, 685.15x10⁻⁶, 577.87x10⁻⁶를 구하였다.

크리프 변형도의 수렴값은 상대습도 40%에 대하여 보정하였으며, 보정된 크리프 변형도의 수렴값은 재하된 하중으로 나누어 특정 크리프 변형도로 환산되었다. 특정 크리프 변형도는 적용하중이 0.2f'c 이외의 경우에도 산정되어 평균치를 구하였으며, 최종적으로 콘크리트 압축강도 G80, G60, G40별로, 0.10683, 0.3516, 0.4405 in/in/psi의 값을 구하

었다.

(4) 건조수축 변형도

콘크리트의 건조수축 시험은 ASTM C 157 기준의 방법을 적용하였으며, 공시체는 크리프 측정시와 동일한 크기를 사용하였다. G80과 G60의 경우는 각 7일, 28일의 재령, G40의 경우는 14일의 재령에 측정을 시작하였고, 측정을 400일 정도 수행하였다. 최종적으로 수렴하는 극한건조수축 변형도를 추정하기 위해 식(4)를 적용하였다.

최종 수렴된 평균변형도를 상대습도 40%로 보정한 극한 건조수축 변형도로 G80, G60 및 G40의 경우에 각각 506.0x10⁻⁶, 570.0x10⁻⁶, 610.0x10⁻⁶ in/in를 구하였다.

4. 현장계측치와 해석치의 비교분석

타워 1층에서 94년 6월 30일 시작한 현장의 기둥축소량 계측은 3년 3개월간 수행되었으므로 이 기간은 비탄성 축소량의 수렴값을 얻기에는 짧은 편이다. 또한, 최종 계측시에도 마감공사가 진행 중인 상태이었으므로, 아직 설계 적재하중만큼 재하되지 않아 추후 변형량이 더 발생할 것으로 예측된다. 그러므로, 계측된 수치에 대한 모의해석 시, 외부마감재(cladding)와 최상층 첩탐을 포함한 고정하중과 적재하중으로 시공하중 200kg/m² 만을 고려하여 축소량 해석치를 구하였으며, 이를 계측치와 비교, 분석하였다. 각 층에서 계측된 변형도는 누적된 값이 아닌 그층 자체만의 변위량이므로, 해석시 해당층과 바로밑층의 누적 변위량의 차이를 구하여 비교하였다.

4.1 기둥 축소량의 변화

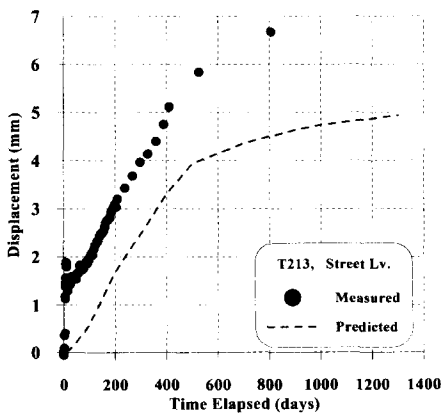
총 5개 기둥의 측정된 결과 중, 본 논문에서는 대표적으로 타워부의 기둥 #13을 선택하여 계측치와 해석치를 비교하였다. 해석을 위한 콘크리트 기둥 #13의 단면 및 재료 성능은 Table 2에 정리되어 있다. 기둥 #13에 대한 1, 19, 38, 45, 58, 65층에서의 각 계이별 변형도를 각 층의 타설시점으로부터 축소량으로 치환한 값과 Table 2의 부재성능을 근거로 한 해석치를 Figs. 4에 비교하였다.

Table 2 Properties of KLCC column #13

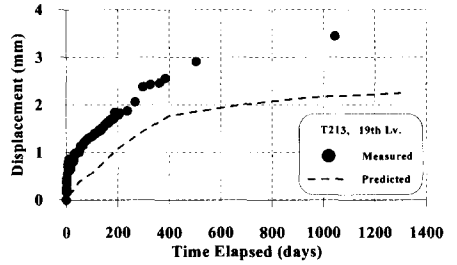
Story	f_{cu} MPa	Col. Area (in ²)	Steel Area (in ²)	Load (kips)	v/s (inch)	Ult. Shr. (x10 ⁻⁶)	Specific Creep (1/psi)
1-1	80	7012	70.15	97	23.62	506	0.1068
2-4		7012	70.15	216	23.62		
5-7		7012	70.15	314	23.62		
8-22		5369	54.15	192	27.00		
23-36	60	5369	54.15	192	27.00	570	0.3516
37-39		3944	39.38	309	20.67		
40-42		3944	39.38	198	17.72		
43-49		3944	39.38	179	17.72		
50-56		2739	27.08	168	14.76		
57-60		2739	27.08	195	14.76		
61-72	40	2739	27.08	135	14.76	610	0.4405
73-79		1753	18.46	116	11.81		
80-81		1753	18.46	148	11.81		
82-83		1753	18.46	97	11.81		
84-86		1753	18.46	86	11.81		
87-87		1753	18.46	260	11.81		

*Relative humidity= 50%

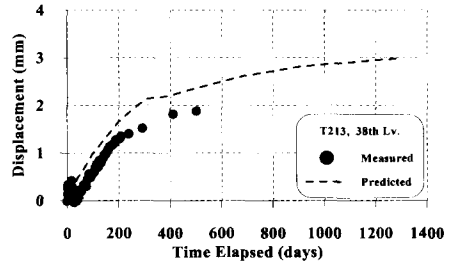
Figs. 4에서 흑색 점으로 표시된 각 층별 계측 값에서 공통적으로 보이는 현상은 초기 변형치의 급격한 증가 및 감소에 이은 완만한 변형의 증가이다. 초기증가현상의 원인으로는 탄성계수가 충분히 확보되지 않은 상태에서 하중이 가해졌기 때문이며, 고강도콘크리트의 빠른 경화현상에 따른 탄성계수의 증가와 수화열 등으로 인하여 이 변형은 빠르게 줄어들고 있다고 추정된다. Fig. 4(a)의 1층 경우는 최종 87층 타설시인 약 500일 경과시까지 상부층의 타설에 따른 추가하중으로 인하여 급한 기울기를 보이다가, 그 후에는 시공 하중과 장기변형만으로 인하여 경사가 완만해지고 있다. Fig. 4(b)-(f)의 19, 38, 45, 58, 65층의



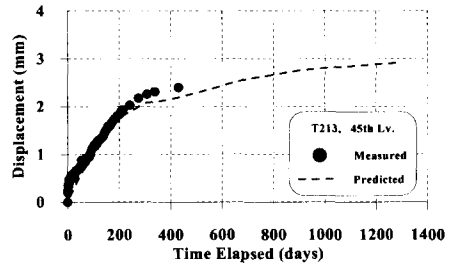
(a) Street level



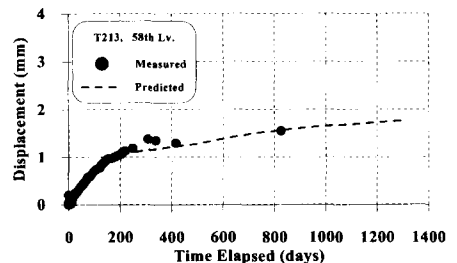
(b) 19th floor level



(c) 38th floor level

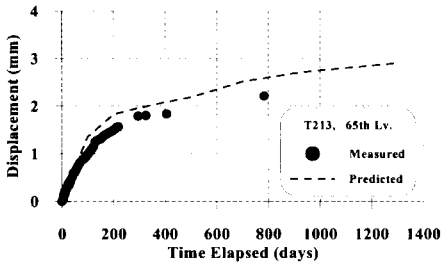


(d) 45th floor level



(e) 58th floor level

4.2. 코어벽체의 축소량 변화



(f) 65th floor level

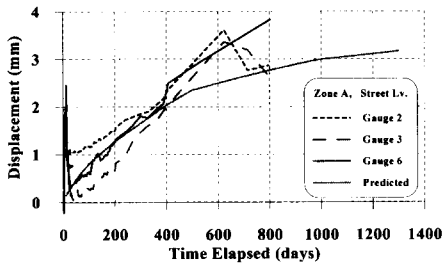
Fig.4 Column shortening of column T213

경우도 각 층 타설 시점부터 약 380일, 270일, 230일, 150일, 120일 경에 수행된 최종 골조공사의 완료후에는 축소 변형의 증가속도가 줄어드는 같은 경향을 보여준다. 기둥의 층별 탄성 및 비탄성 축소량의 합계인 계측치는 1층에서 약 7mm, 상부층에서는 약 3mm전후의 수렴치를 보인다. 1층의 축소량이 큰 이유는 층고가 9m로 4m의 기준층고보다 크기 때문이며, 거의 전 층에 걸쳐 약 750×10^{-6} 의 변형도 크기를 평균적으로 나타낸다.

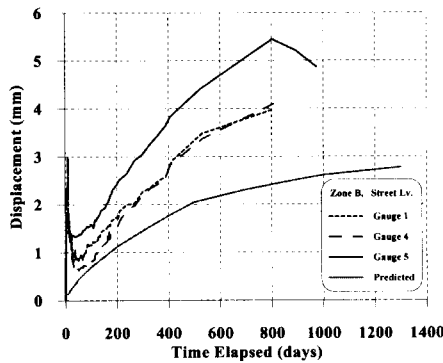
각 그림에서 점선으로 표시된 해석치는 계측치에 대한 근사치를 잘 보여주고 있다. Fig 4(a),(b)의 G80을 적용한 1, 19층의 경우는 약 1mm의 차이를 나타내고 있다. 그 원인으로는 골조공사후에 계속 진행된 마감공사 등에 대한 영향이 저층부 해석에 정확히 반영되지 않은 점과 해석모델에서 사용된 탄성계수의 예측식이 고강도 콘크리트를 사용할수록 실험치보다 다소 크게 평가됨으로써 해석에 의한 기둥축소량이 작게 나타난 것으로 사료된다. Fig. 4(c)-(e)는 콘크리트 압축강도 G60을 적용한 38, 45, 58층의 측정치와 해석치를 비교하고 있다. 38층의 기둥은 저층부와 비슷한 이유로 해석값이 약 0.5mm 차이를 보이며, 45, 58층의 경우는 거의 일치하고 있음을 보여준다. 58층에서의 기둥축소량이 다른 층에 비해 약 1mm 정도 작게 나타나는 현상은 이 층에서의 경사기둥을 보완하기 위해 확대기둥(elongated column)이 사용되어 단면적이 늘어난 이유로 사료된다. Fig. 4(f)는 콘크리트 압축강도 G40을 적용한 65층 기둥축소량의 변화로써, 측정값과 해석값이 잘 일치하고 있다.

코어벽체는 A, B구역(Fig. 1 참조)으로 분리되어 타설되었으며, 현장 계측치와 해석치도 A, B구역으로 구분하여 비교, 분석하였다. 코어벽체를 구역별로 하나의 기둥으로 가정한 해석치는 각 구역별 설치된3개씩의 계측치와 비교하였다. 그러나 Fig. 1에 나타난 바와 같이 각 계층의 위치는 상당한 거리를 두고 있어, 재하 하중의 편차가 클 수 있기 때문에 측정값들간의 차이가 클 수 있다. 대표적으로 1층과 65층 축소량을 Fig. 5에서 비교하였으며, 계층 번호는 Fig. 1을 따랐다.

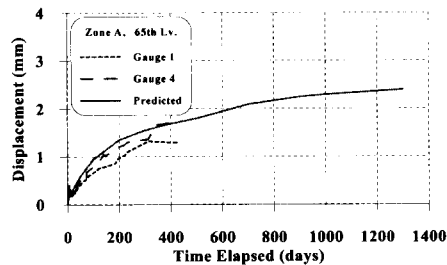
코어벽체의 축소량계측에서도 기둥의 경우와 유사한 초기의 급격한 증가와 감소현상이 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 다소 크기의 차이는 있지만 모든 계층에서 하중이 최초로 가해지기 시작하는 6-8일 시점에서 나타나고 있다. 하중재하시 비성숙된 탄성계수로 인한 급격한 변위의 증가후에, 콘크리트 경화 및 수화열로 인한 축소량의 감소가 뒤따르고 있다. Fig. 5(a), (b)의 1층 벽체에 대한 6개의 변형값 중에서 CR 1, 3, 4, 6 계층의 시간에 따른 축소량 변화 경향은 매우 유사하며, 계층 CR 2, 5의 값만이 약간 큰 값을 보인다. 그 이유로는 이 두 계층의 위치에서 타워 크레인이 계속 작업을 수행하였으므로, 이로 인한 변형의 증가라고 생각된다. 계측치의 전반적인 변화가 최종 골조 타설 시점인 약 500일까지는 선형증가를 보이며, 그 후에 완만한 수렴경향을 보여주고 있다. A구역에서 600일 후의 CR 2, 3과 B구역의 CR 5가 800일 후에 계측치가 약간 줄어드는 경향에 대한 정확한 원인은 알 수 없으나, 현장의 상황변화, 혹은 계층의 손상 등으로 추정된다. 이 그림에서 실선으로 표시된 해석치는 600일경에 Zone A는 약 0.5mm, Zone B는 약 1.2mm 정도의 편차를 나타낸다. Fig. 5(c), (d)는 65층의 경우를 보여주는데 약 400일까지 계측결과와 해석치가 잘 일치함을 보여준다. 코어벽체에 있어서도 기둥에서와 유사하게 상부층으로 이동할수록 해석치와 측정치가 근사해지는 경향을 보이고 있다.



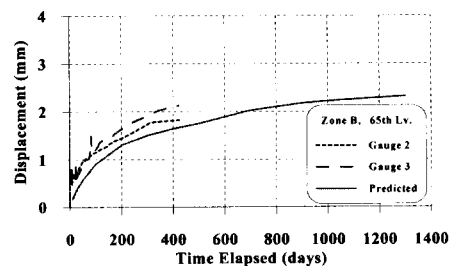
(a) Zone A: Street level



(b) Zone B: Street level



(c) Zone A: 65th level



(d) Zone B: 65th level

Fig. 5 Vertical shortening of corewall

4.3 계측치와 설계치의 비교

실 KLCC 타워 시공시 적용된 T&T의 보정설계치는 20년 후를 기준으로 하였으므로, 약 3년간의 현재 측정자료와는 직접적인 비교를 할 수 없다. 그러므로, T&T에서 제출하였던 1층 타설시점부터 2년 후의 예측치와 그 때까지의 현장계측치 및 해석치를 비교하여 Table 4에 정리하였다. 계측치와 해석치는 매우 근사한 값들을 보이나, T&T의 값은 주 다워부의 1층을 제외하고는 전반적으로 약간 큰 값을 보인다. 이와 같은 결과는, 해석시 적재하중의 초기적용(건물의 조기입주가 계획되어 있었음)을 가정하였기 때문이라 추정된다. 이와 같은 차이는 상부층으로 올라가며 축적되는 적재하중의 영향이 작아지기 때문에 감소하게 된다.

Table 4 Comparison of column shortening at 2 years

Floor Level	Tower Column #13		
	Measured (mm)	Predicted (mm)	T&T (mm)
1	6.30	4.50	4.30
19	3.00	2.00	4.30
38	2.85	1.95	3.50
45	2.40	2.35	2.00
58	1.40	1.25	2.00
65	2.00	1.95	2.00
	Bustle Column #8		
1	2.53	2.80	4.60
19	1.97	2.25	4.80
	Corewall, Zone A		
1	3.00	2.80	3.50
38	2.80	1.50	3.00
58	1.20	1.20	2.00
65	1.45	1.65	2.00

5. 결론

초고층 건물인 KLCC 페트로나스 건물에서 발생하는 기둥축소현상의 실제 경향을 파악하고자, 수직방향 기둥변형도에 대한 현장계측을 수행하고, 축소량 예측 및 보정방법에 대한 검증은 위하여 실내실험을 병행하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 계측된 기둥축소량의 추이는 초기 재하기간 동안의 빠른 증가 및 감소에 이은 완만한 상승으로 이어지는 경향을 보인다. 각 층별로 예상되는 최종 수렴변형도는 약 750×10^{-6} 로써, 각 층

별로 약 3mm의 수직 변위량을 평균적으로 보인다.

(2) 초기 변위의 빠른 상승과 감소현상의 원인으로서는 탄성계수가 제대로 발현되지 않은 상태에서 초기 하중재하(타설후 8일경)가 이루어졌으며, 탄성계수의 빠른 증가와 수화열로 인해 회복된다고 사료된다.

(3) 기둥축소의 해석시, G80을 적용한 저층에서는 콘크리트 탄성계수가 약 10-15% 크게 평가되기 때문에 해석값이 측정값보다 1mm 정도 작게 나타난 것으로 판단되며, G60, G40을 적용한 고층부에서는 잘 일치하고 있다.

(4) 전단벽의 경우에도 저층부에서는 해석값이 측정값보다 약간 작게 나타나는 경향을 보이며, 고층부에서는 잘 일치하고 있다.

(5) T&T의 1층 타설후 2년 시점에서의 기둥 축소량 해석치는 약간의 오차를 수반하지만 그 시점의 계측치와 매우 근사함을 보여준다.

(6) 건조수축의 시간에 관련된 변수를 수정한 FGI모델은 KLCC 대형기둥의 실제 측정된 축소량을 잘 묘사하고 있다.

참고문헌

1. Fintel, M., and Khan, F.R., "Effects of Column Creep and Shrinkage in Tall Structures - Prediction of Inelastic Column Shortening," ACI Journal, Proceedings, Vol. 66, No. 12, American Concrete Institute, Detroit, Mich., December 1969, pp. 957-967.
2. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures," ACI 209R-92, ACI Manual of Concrete Practice, Part I, 1996.
3. Russell, H.G., and Corley, W.G., "Time-Dependent Behavior of Columns in Water Tower Place," Publication RD052B, Portland Cement Association, Skokie, Ill., 1977.
4. Fintel, M., Ghosh, S.K. and Iyengar, H., "Column Shortening in Tall Structure - Prediction and Compensation," Portland Cement Association, 1986.
5. Rangan, B.V. and Warner, R.F., Large Concrete Design and Construction Series, Longman, 1996, pp. 54-101.
6. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary," ACI 318-95, American Concrete Institute, 1995.
7. "CEB-FIP Model Code for Concrete Structure", International du Beton, Paris, 1978.
8. "CEB-FIP Model Code", Thomas Telford Services Ltd, London, 1990.
9. Bazant, Z. P. and Panula, L., "Practical Prediction of Time Dependent Deformations of Concrete", Materials and Structures, Vol. 12, No. 69, 1979, pp. 169-183.
10. Bazant, Z. P., Kim, J.K. and Panula, L., "Improved Prediction Model for Time dependent Deformation of Concrete", Materials and Structures, Vol. 24, No. 148, 1991, pp. 218-337.
11. Bazant, Z. P., and Baweja, S., "Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage, 1. Statistics and Sensitivity", Materials and Structures, RILEM, Vol. 28, 1995, pp. 415-430.
12. Ahmad, S.H., and Shah, S.P., "Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete," Journal of the Prestressed Concrete Institute, V.30, No. 6, 1985, pp. 92-119.
13. Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H., and Slate, F.O., "Properties of High Strength Concrete subjected to Short-Term Loads," ACI Journal, V. 78, No 3, 1981, pp. 171-178.

요 약

현재 세계에서 제일 높은 KLCC (Kuala Lumpur City Center) 페트로나스 쌍둥이 건물 2에 철근콘크리트 수직부재인 기둥과 코어벽체의 크립과 수축에 따른 장기 수직변형 현상을 분석하고자, 건물의 골조 시공중에 타워의 외부기둥과 벽체, Bustle의 외부기둥에 변형도 게이지를 6개층에 걸쳐 설치하여 시간에 따른 축소량을 계측하였다. 이와 병행하여 실제 현장에서 타설된 콘크리트의 물성치인 콘크리트 압축강도, 탄성계수, 크립 및 수축계수를 구하기 위하여, 실험실내에서 공시체를 이용한 시험을 수행하였다. 기둥축소량 계측치는 실내시험 결과를 이용한 해석치 및 실제 건물시공에 반영된 축소량 해석치와의 비교, 분석에서 잘 일치함을 보여준다.

(접수일자 : 1998. 5. 8)