

초고층건물 초기 구조시스템 선정을 위한 강성증가요인 효과 분석

Analysis of Effects of Stiffness Increment Factors for Deciding the Initial Structural System of Tall Buildings

이재철* · 정종현**

Lee, Jae-Cheol · Jung, Jong-Hyun

ABSTRACT

The purpose of this research is to compare the stiffness increment effects with the floor plan shapes by the stiffness increment factors. For this, we generated the standard floor plans with Box and T type shapes. Then applied the stiffness increment factors -outrigger, material strength, member section- to those floor plans, and generated several alternative analysis models that make the effects of the factors to the lateral displacement exposed. Finally, we analyzed the stiffness increment effects and compared with each other by the stiffness increment factors. As a result, we found that the increment effects have not influence to floor plan shapes, and orders of stiffness increment effects are outrigger, core wall and material strength. We expect that the results of this study could be effectively utilized in the schematic structural design of tall buildings.

Keywords: tall buildings, stiffness increment factors, schematic structural design.

1. 서론

국내 초고층건물의 평면형상은 몇 가지 형태로 대별할 수 있으며(서현주, 2002) 각각의 평면형상에 따라 구조시스템을 구성하는 강성증가요인이 횡변위 저감에 기여하는 효과도 다를 것으로 추정된다. 이에 본 논문에서는 다양한 대안들에 대한 구조해석을 통해 초고층건물 구조시스템에 적용되는 강성증가요인들의 강성증가 효과를 정량적으로 분석하고, 이를 통해 전형적인 형상을 가진 50~70층 규모의 실제 프로젝트 수행 시 초기 구조시스템 선정에 따른 시행착오를 줄이기 위한 구체적인 지침을 제시하고자 한다.

이를 위해 본 논문에서는 60층 규모 철근콘크리트조 건물의 평면형상을 전형적인 형태의 Box형과 T형으로 구성하여 대안모델을 생성하고 이들 평면형상에 따른 강성증가요인의 강성증가 효과를 정량적으로 분석하였다. 이때 강성증가요인은 아웃리거 적용, 재료강도 증가 및 코어단면 증가로 분류하고 ETABS 6(Habibullah, 1995)를 통한 구조해석 결과를 이용해 적용효과를 분석하였다. 각각의 대안들은 실무적으로 활용도가 높은 최상층변위를 중심으로 분석하였으며 다수의 초고층건물 대안모델에 대한 구조검토는 건설교통부 “초고층건물 구조설계 업무 자동화” 과제(현대건설 등, 2003)를 통해 개발된 분석도구를 이용하여 수행하

* 정회원 · 동명대학교 건축공학과 조교수 Email: jclee@tu.ac.kr

** 정회원 · 경남대학교 건축학부 조교수 Email: ironbell@kyungnam.ac.kr

였고, 해당 구조시스템을 구성하는 강성증가요인이 구조시스템의 강성증가에 미치는 효과는 기존논문(김종호와 박영욱, 2003)의 구조시스템 분석 방법을 준용하여 분석하였다.

2. 대안모델

2.1 평면형태별 기본모델

기본모델은 Box형과 T형의 평면형태를 갖는 60층 규모의 철근콘크리트조 프레임-코어시스템으로 하였으며 평면형태별 기본모델의 구조평면을 표 1에 나타내었다. 각각의 기본모델은 전체 바닥면적에서 코어면적이 차지하는 비율이 20% 수준이고, 세장비는 일반적인 초고층건물의 세장비인 5 수준이 되도록 구성하였다. 표 2는 기본모델의 주요부재 단면크기를 나타낸 것이다.

표 1 60층 규모 기본모델의 구조평면

평면형태	Box형	T형
구조평면		
평면조건	$A_{total} = 1536.64m^2$ $A_{core} = 313.60m^2 \Rightarrow 20.41\%$ $H/W = (3.5 \times 60) / 39.2 = 5.36$	$A_{total} = 1503.32m^2$ $A_{core} = 317.52m^2 \Rightarrow 21.12\%$ $H/W = (3.5 \times 60) / 40.6 = 5.17$

2.2 강성증가요인의 적용

초고층건물의 횡력저항 강성을 증가시키기 위한 방법 중 본 논문에서는 ①아웃리거 적용, ②재료강도 증가, ③코어단면 증가의 3가지 강성증가 방법에 의한 구조시스템의 강성증가 효과를 분석하였다.

2.2.1 아웃리거 적용

코어-프레임 모델에 아웃리거를 추가하여 코어-프레임-아웃리거 모델을 구성하였다. 일반적으로 초고층건물의 아웃리거 개수는 최대 4개를 넘지 않으며(Wu와 Li, 2003) 본 논문에서 분석대상으로 삼은 60층 규모에서는 아웃리거를 2개 설치하는 것이 일반적이다. 본 논문에서 아웃리거의 설치위치는 기존 연구(Smith와 Coull, 1991; Taranath, 1975; McNabb과 Muvdi, 1975; Smith와 Salim, 1981)의 결과를 바탕으로 20층과 40층으로 하였다.

2.2.2 재료강도 증가

기둥(C1, C2, C3)과 코어월(W1, W2, WG)의 콘크리트 재료강도 크기를 원래의 크기로부터 9.8MPa(C100)씩 29.4MPa(C300)까지 증가시킴에 따라 구조시스템의 강성증가에 미치는 효과를 분석하였다. 아울러 전체 층고를 H/5, H/4, H/3, H/2로 구분하여 해당 층수까지만 재료강도를 증가시킨 결과를 분석함으로써 재료강도 증가범위에 따른 효과를 분석하였다.

2.2.3 코어단면 증가

코어월의 단면두께를 100mm에서 200mm까지 50mm 단위로 증가시킴에 따른 결과와 전체 층고를 H/5, H/4, H/3, H/2로 구분하여 해당 층수까지만 단면두께를 증가시킨 결과를 분석함으로써 코어단면 증가크기 및 범위에 따른 효과를 분석하였다.

3. 강성증가요인의 효과 분석

3.1 기본모델 분석

평면형태별 기본모델의 초기상태 변위비와 강성참여도는 표 3과 같으며, 프레임의 강성참여도가 25% 이상이므로 구조해석 수행 시 지진하중 적용을 위한 반응수정계수로는 이중골조방식에 해당하는 값 5.5를 사용하였다.

3.2 아웃리거 적용의 효과

60층 규모의 기본모델에 아웃리거를 적용시킨 결과로 나타나는 평면형태별 아웃리거 개수에 따른 강성참여도는 평면형태에 관계없이 아웃리거가 없는 경우에는 코어의 강성참여도가 크며 아웃리거를 설치함에 따라 아웃리거의 강성참여로 인해 코어의 강성참여도가 감소하였다. 평면형태별로 아웃리거에 의한 강성증가율은 Box형의 경우 아웃리거 1개, 2개일 때 각각 43.8%, 73.1%이며, T형은 25.8%, 49.0%로 나타났다. 이 결과에서 보면 아웃리거를 추가함에 따라 평면형태에 관계없이 횡강성이 상당히 증가했으며, Box형에서 상대적으로 더 큰 효과를 발휘하였다. 하지만, 첫 번째 아웃리거의 추가에 의한 강성증가율은 43.8%인데 비해 두 번째 아웃리거의 추가에 의한 강성증가율은 29.3%(=73.1-43.8)에 그치고 있다. T형의 경우에도, 다소 미약하기는 하지만, 같은 경향을 보여주고 있다. 이 결과는 단순히 아웃리

표 2 기본모델 주요부재의 단면크기(mm)

구분	해당 층	Box형	T형	
코어벽체 (W1)	41-60	550	550	
	21-40	700	700	
	B6-20	850	850	
기둥	C1	41-60	900×900	900×900
		21-40	1050×1050	1050×1050
		B6-20	1200×1200	1200×1200
	C2	41-60	900×900	900×900
		21-40	1050×1050	1050×1050
		B6-20	1200×1200	1200×1200
C3	41-60	-	900×900	
	21-40	-	1050×1050	
	B6-20	-	1200×1200	
보	G1	전체	400×600	400×600
	G2	전체	450×700	450×700
	G3	전체	800×400	800×400
	G4	전체	900×400	900×400

표 3 기본모델의 초기상태

평면형태	변위비	강성참여도(%)	
		코어	프레임
Box형	H/346	75	25
T형	H/352	54	46

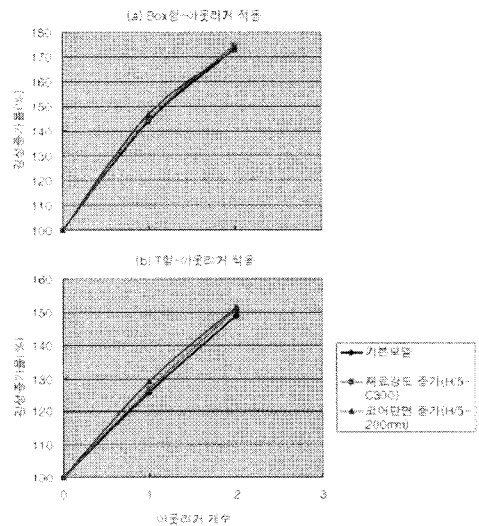


그림 1 아웃리거 개수에 따른 재료강도 증가 및 코어단면 증가 영향

거의 수를 증가시키는 것만큼 강성이 계속해서 증가하지는 않는다는 것을 의미하는 것으로 40층의 T형 평면을 주된 대상으로 설정하여 아웃리거의 수에 따른 강성증가 효과를 분석한 선행연구(이재철과 정종현, 2006)의 결과와도 부합한다.

그림 1은 기본모델에 재료강도 증가(H/5-C300) 및 코어단면 증가(H/5-200mm)를 적용시킨 후 아웃리거 개수에 따른 강성증가 효과를 분석한 것으로 아웃리거 설치에 의한 강성증가 영향이 재료강도 증가 및 코어 단면 증가에 의한 영향과 무관하게 독립적으로 작용한다는 것을 확인할 수 있다.

3.3 재료강도 증가의 효과

재료강도 증가범위에 의한 효과는 기둥과 코어월의 재료강도를 원래의 크기(C300, C400, C500)로부터 C100(9.8MPa)씩 증가시키되 증가범위를 H/5~H/2 범위로 구분해 해당범위까지만 증가시켰을 때의 효과를 분석하였다. 그림 2와 같이 Box형과 T형 평면에서 재료강도의 증가범위에 따라 강성은 완만하게 증가하며 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 재료강도의 증가범위는 평면형태 또는 아웃리거 설치에 의한 강성증가 효과에 독립적이며 재료강도 증가범위에 따른 강성증가율은 최대 6% 수준으로 비교적 작았다.

재료강도 증가크기에 의한 효과는 기둥과 코어월의 재료강도를 H/5 범위까지 증가시키되 기본모델의 재료강도 크기(C300, C400, C500)를 C100(9.8MPa)씩 C300(29.4MPa)까지 변화시켰을 때의 효과를 분석하였다. 그림 3과 같이 Box형과 T형 평면에서 재료강도의 증가크기에 따라 강성은 거의 직선으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 재료강도 증가크기에 따른 강성증가율은 최대 10% 수준으로서 재료강도 증가범위의 경우보다는 큰 값을 보였다.

따라서 재료강도의 증가에 의한 강성증가 효과는 범위를 확장하는 것보다 크기를 증가시키는 것이 더 효과적인 것으로 판단된다.

3.4 코어단면 증가의 효과

코어단면 증가범위에 의한 효과는 코어월의 단면두께를 기본모델에 비해 100mm씩 증가시키되 증가범위를 H/5~H/2 범위로 구분해 해당범위까지만 증가시켰을 때의 효과를 분석하였다.

그림 4와 같이 Box형과 T형 평면에서 코어단면 증가 범위에 따라 강성은 완만하게 증가하나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 코어단면의 증가범위 역시 평면형태 또는 아웃리거 설치에 의한 강성증가 효과에 독립적이다. 다만 코어단면 증가범위에 따른 강

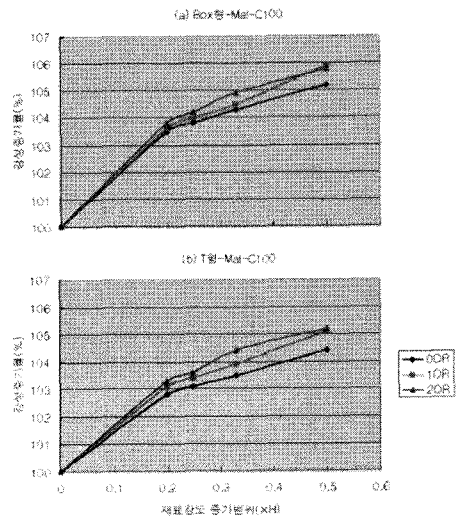


그림 2 평면형태별 재료강도 증가범위의 영향

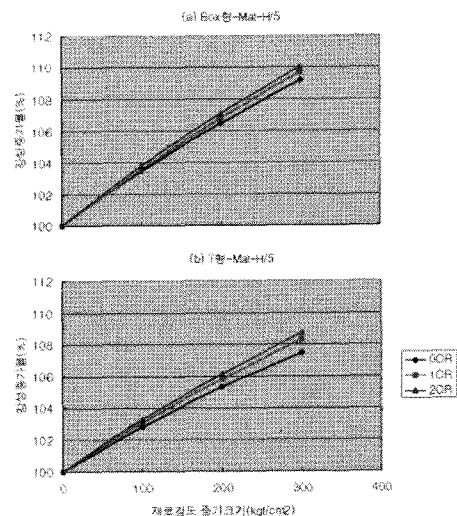


그림 3 평면형태별 재료강도 증가크기의 영향

성증가는 최대 21% 수준으로서 재료강도 증가의 경우에 비해 강성증가 효과가 우수함을 확인할 수 있다.

코어단면 증가크기에 의한 효과는 코어원의 단면두께를 H/5 범위까지 증가시키면 증가크기를 기본모델에 비해 100, 150, 200mm까지 50mm 단위로 증가시켰을 때의 효과를 분석하였다. Box형과 T형 평면에서 코어단면 증가크기에 따른 강성증가 경향은 그림 5와 같으며, 코어단면 증가크기에 따른 강성증가는 최대 23% 수준으로서 코어단면 증가범위의 경우보다 큰 값을 보였다.

따라서 코어단면 증가의 경우에도 재료강도 증가의 경우와 마찬가지로 강성증가 효과는 범위를 확장하는 것보다 크기를 증가시키는 것이 더 효과적인 것으로 판단된다.

4. 강성증가요인별 강성증가율

본 연구에서는 이상의 분석결과를 종합하여 초고층건물의 예비구조설계 단계에서 시행착오를 감소시킬 수 있는 기초적인 설계지침으로 활용할 수 있도록 횡강성 증가요인별 강성증가율 예측값을 표 4와 같이 정리하였다.

표 4의 재료강도와 코어단면 증가에 따른 강성증가율 예측값은 아웃리거를 추가하더라도 큰 차이가 발생하지 않았으므로 아웃리거가 없는 경우의 값을 그대로 적용하였다. 실제로 아웃리거 유무에 따른 차이를 검토하기 위해 재료강도를 H/2 범위까지 C300에 해당하는 29.4MPa만큼 증가시킨 경우와 코어단면을 H/2 범위까지 200mm 증가시킨 경우를 대상으로 표 4의 예측값과 구조해석을 수행해서 구한 실제값을 비교하였으며 그 결과는 표 5와 같다. 아웃리거 유무에 따른 강성증가율의 예측값과 실제값의 차이는 최대 5% 수준으로 비교적 작음을 확인할 수 있다.

표 4의 예측값은 최상층의 변위가 H/350 수준인 기본모델을 바탕으로 얻은 값이다. 이 예측값이 최상층의 변위가 H/350 수준과 차이가 나는 경우의 적용가능성을 검토하기 위해 최상층의 변위가 H/450 수준의 Box형 평면과 H/400 수준인 T형 평면에 대해 표 4의 예측값과 구조해석을 통해 구한 실제값을 비교하여 표 6에 나타내었다. 두 경우 모두 표 4에서 제시한 H/350 수준 모델에 대한 예측값과 최대 5% 수준의 차이를 보였다. 표 5, 6의 결과 및 본 연구의 기본모델이 (6)층 규모라는 점을 고려해 보면, 표 4의 강성증가율 예

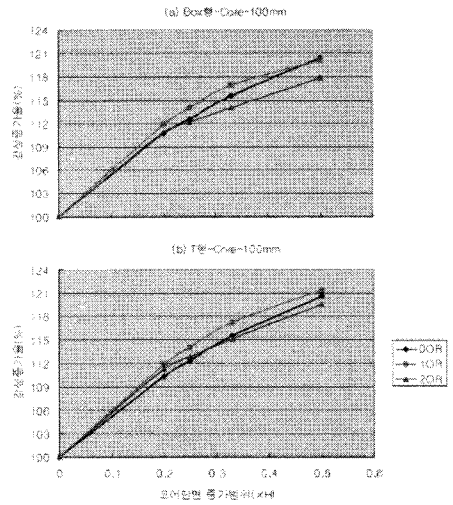


그림 4 평면형태별 코어단면 증가범위의 영향

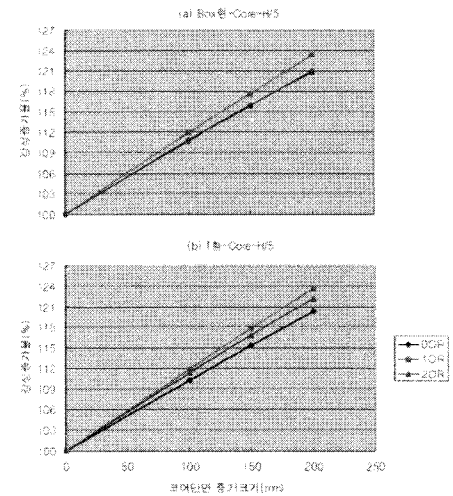


그림 5 평면형태별 코어단면 증가크기의 영향

표 4 강성증가요인별 강성증가율 예측값(단위:%)

강성증가요인	평면형태		Box형		T형	
	10R	20R	10R	20R	10R	20R
아웃리거 적용	43.9	73.0	25.8	49.0		
(OOR 기준)	H/5	H/2	H/5	H/2		
재료강도	C100	3.5	5.2	2.8	4.4	
	C200	6.5	9.9	5.3	8.3	
	C300	9.2	14.3	7.4	11.9	
코어단면	100mm	10.7	20.4	10.3	20.6	
	150mm	15.9	30.4	15.3	31.0	
	200mm	20.9	40.2	20.3	41.3	

층값은 50~70층 규모의 초고층건물 예비구조설계 단계에서 평면의 형태, 아웃리거의 설치 여부, 횡강성의 크기 등에 관계없이 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 표 4에 포함되어 있는 강성증가요인 자체가 철근콘크리트조에만 적용이 가능하므로 철골 및 합성부재에는 적용이 곤란하다.

6. 결 론

(1) 아웃리거 적용, 재료강도 증가, 코어단면 증가 등은 각각 독립적으로 강성증가에 기여한다.

(2) 아웃리거에 의한 강성증가율은 설치개수에 따라 Box형의 경우 43.9~73.0%, T형의 경우 25.8~49.0% 수준으로 나타났으며, 첫 번째 아웃리거의 적용효과가 추가되는 두 번째 아웃리거보다 우수하였다.

(3) 재료강도 증가에 의한 강성증가율은 범위에 따라 최대 6%, 크기에 따라 최대 10% 수준이었다.

(4) 코어단면 증가에 의한 강성증가율은 범위에 따라 최대 21%, 크기에 따라 최대 23% 수준이었다.

(5) 재료강도 및 코어단면 증가에 의한 강성증가율은 범위보다 크기를 증가시키는 것이 더 효과적이었다.

표 5 아웃리거에 따른 강성증가율 비교(단위:%)

강성증가요인		평면형태	
		Box형	T형
재료강도 H/2-C300	제안값(OOR)	14.3	11.9
	실제값(2OR)	15.9	14.3
	차이	-1.6	-2.4
코어단면 H/2-200mm	제안값(OOR)	40.2	41.3
	실제값(2OR)	35.0	39.3
	차이	5.2	2.0

표 6 초기 최상층 변위비에 따른 강성증가율 비교(단위:%)

강성증가요인		평면형태		
		Box형 (H/450)	T형 (H/400)	
재료강도	제안값(H/350)	14.3	2.8	
	실제값	H/2-C300	14.0	-
		H/5-C100	-	1.5
	차이	0.3	1.3	
코어단면	제안값(H/350)	20.4	20.3	
	실제값	H/2-100mm	16.6	-
		H/5-200mm	-	15.0
	차이	3.8	4.7	

참고문헌

- 김종호, 박영욱 (2003) “초고층 건축물의 구조설계”, 제1회 초고층 도시건축 정기 국제 세미나 발표자료, **대한건축학회**, pp.64~122.
- 서현주 (2002) “국내 사례로 본 고층 주상복합건물의 구조시스템”, 한국 초고층의 현안과 비전에 대한 2차 심포지엄 발표자료, **한국초고층건축 포럼**, pp.145~162.
- 이재철, 정중현 (2005) “초고층건물의 횡력저항요인에 따른 횡변위 저감 효과”, **대한건축학회 논문집**, 21(10), pp.11~18.
- 현대건설, 서울대학교, 전우구조, 선문대학교 (2003) 초고층건물 구조설계 업무 자동화, 건설교통부, 한국건설기술연구원, '99년 산학연 공동연구개발사업 최종보고서, 99건축-10, p.206.
- Habibullah, A. (1995) *ETABS ver.6 User Manual*, Computers & Structures Inc., p.217.
- McNabb, J.W., Muvdi, B.B. (1975) “Drift reduction factors for belt high-rise structures”, *Engineering Journal*, 3rd Quarter, pp.88~91.
- Smith, B.S., Coull, A. (1991) *Tall Building Structures - Analysis and Design*, John Wiley & Sons Inc.
- Smith, B.S., Salim, I. (1981) “Parameter study of outrigger braced tall building structures”, *Journal of Structural Engineering*, 107(T10), pp.2001~2014.
- Taranath, B.S. (1975) “Optimum belt truss location for high-rise Structures”, *Structural Engineer*, 53(8), pp.18~21.
- Wu, J.R., Li, Q.S. (2003) “Structural Performance of Multi-Outrigger-Braced Tall Buildings”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 12(2), pp.155~176.