

초고층건물의 초기 구조설계를 위한 횡강성 증가율 예측

Prediction of the Ratios of Increase in Lateral Stiffness for Preliminary Structural Design of Tall Buildings

정 종 현†

Jung, Jong-Hyun

(논문접수일 : 2007년 2월 21일 ; 심사종료일 : 2007년 3월 29일)

요 지

본 연구의 목적은 초고층건물의 횡강성 증가요인 효과를 분석하고 이를 바탕으로 초기 구조설계에서 활용할 수 있는 횡강성 증가율 예측값을 제시하는 것이다. 이를 위해서 먼저 Box형과 T형의 전형적인 평면을 갖는 60층의 초고층건물 기본 모델을 생성하였다. 그리고 초고층건물의 횡강성 증가요인으로서 아웃리거의 추가, 재료강도의 증가, 코어 벽체 단면크기의 증가, 아웃리거 연결기둥 및 아웃리거 벽체의 단면크기 증가를 선정하였다. 다음에는 이 요인들을 기본모델에 적용하여 구조해석을 수행하고, 그 결과로부터 각 요인이 횡강성 증가에 미치는 영향과 상호관계 등을 분석하였다. 마지막으로, 이 분석결과를 바탕으로 초고층건물의 초기 구조설계를 위한 횡강성 증가요인별 강성증가율 예측값을 제안하였으며, 예제 초고층건물에 적용하여 그 타당성을 검토하였다.

핵심용어 : 초고층건물, 횡강성, 강성증가율

Abstract

The purpose of this study is to predict the ratios of increase in lateral stiffness for preliminary structural design of tall buildings. For this, the basic models of tall buildings with 60 stories are generated. The basic models have typical floor plan of Box or T type. And the factors for increase in lateral stiffness are selected as follows; the addition of outriggers, increase in material strength, and increase in member size of core walls, outrigger columns, and outrigger walls. Then these factors are applied to the basic models and their effects are investigated using the results of structural analysis. Finally, based on the investigation, the ratios of increase in lateral stiffness for preliminary structural design of tall buildings are proposed and applied to examples of tall building for verification of the ratios.

Keywords : tall buildings, lateral stiffness, ratios of increase in stiffness

1. 서 론

초고층건물의 구조시스템 선정은 전체 프로젝트의 구조적 성능과 경제성에 지대한 영향을 미치는 중요한 작업이다. 그럼에도 불구하고 구조시스템 대안의 생성 및 평가에 소요되는 많은 시간과 노력 때문에 초고층건물의 초기 구조설계 단계에서 다양한 구조시스템 대안의 생성 및 평가가 제대로 이루어지지 못하고 있다. 따라서 초기 구조설계 단계에서 보다 다양한 대안의 검토가 가능하도록 그에 소요되는 시간과 노력을 감소시키기 위한 노력이 필요하다.

초고층건물의 초기 구조설계에서는 횡변위를 제한값 이내로 줄이기 위해서 재료의 종류 및 강도, 부재의 배치와 접합 방법, 단면의 크기 등을 결정해야 하는데, 초고층건물의 규모 및 복잡성 때문에 그 구체적인 방법은 아주 다양하다. 이와 관련하여 이한주 등(2002)은 횡변위 구속조건을 갖는 45층 규모의 초고층건물에 대한 효율적인 최적설계 및 단면 재산정 방안을 제시하였으며, 이재철 등(2005)은 T형 평면의 40층 규모 건물에 대해 횡강성 증가방법 및 횡력저항 구조요소의 적용효과를 분석한 바 있다. 하지만, 여러 횡강성 증가요인들의 효과를 구체적으로 체계화하여 초기 구조설계에서 활용하

† 책임저자, 정회원 · 경남대학교 건축학부 조교수
Tel: 055-249-2681 ; Fax: 055-249-2682
E-mail: ironbell@kyungnam.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 10월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

기 위해서는 보다 다양하고 지속적인 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 초고층건물의 초기 구조설계 단계에서 횡변위를 줄이기 위해 적용할 수 있는 주요 방법들이 초고층 건물의 횡강성(lateral stiffness)에 미치는 영향의 정도와 상호 관계 등을 분석하고자 한다. 그리고 이를 정리하여 초고층건물의 초기 구조설계 단계에 수반되는 시행착오를 감소시킬 수 있도록 횡강성 증가요인별 강성증가율 예측값을 제시하고자 한다.

이를 위해 본 연구에서는 먼저 Box형과 T형 평면을 갖는 60층 규모의 초고층건물 기본모델을 생성하였다. 다음에는 초기 구조설계 단계에서 이 기본모델의 횡강성을 증가시키기 위해서 적용할 수 있는 주요한 방법, 즉 주요 횡강성 증가요인을 적용하여 구조해석을 수행하였다. 그리고 그 해석결과를 이용하여 횡강성 증가요인에 의한 횡강성의 증가 정도 및 증가 경향, 증가요인의 상호관계 등을 분석하였다. 이 과정에서 구조해석의 전처리(pre-processing)와 후처리(post-processing)에는 현대건설 외 3개 기관에서 개발한 초고층건물 구조해석 및 결과분석 도구(현대건설 등, 2003)를, 구조해석에는 ETABS 6.1(Habibullah, 1995)을 이용하였다. 그리고 초고층건물의 횡강성 증가요인이 미치는 효과를 정량적으로 표현하는 데에는 김종호 등(2003)의 다음과 같은 구조시스템 분석 방법을 이용하였다. 먼저 식 (1), (2)를 이용하여 모든 층의 횡변위를 고려한 강성대표값을 계산한다. 그리고 식 (3), (4)를 이용하여 상대강성과 강성참여도를 구하고 식 (5)로부터 강성증가율을 계산한다.

$$\text{변위대표값: } x = \sqrt{\frac{\sum u_i^2}{N}} \quad (1)$$

$$\text{강성대표값: } I = \frac{1}{x} \quad (2)$$

$$\text{상대강성} = \text{강성대표값}_{n+1} - \text{강성대표값}_n \quad (3)$$

$$\text{강성참여도} = \text{상대강성의 백분율}(\%) \quad (4)$$

$$\text{강성증가율} = \frac{\text{강성증가요인의 강성참여도}}{(1 - \text{강성증가요인의 강성참여도})}(\%) \quad (5)$$

여기서, u_i : i 층의 변위

N : 전체층수

$n+1$: 강성증가요인 적용 후

n : 강성증가요인 적용 전

2. 초고층건물 기본모델 및 횡강성 증가요인

본 연구에서는 지하 6층, 지상 60층 규모의 초고층건물 기본모델을 생성하였다. 그리고 여기에 초기 구조설계 단계

에서 횡변위를 줄이기 위해 사용할 수 있는 주요한 방법을 횡강성 증가요인으로 기본모델에 적용하여 횡강성 증가요인의 효과를 분석할 수 있는 대안모델을 생성하였다.

횡하중은 풍하중과 지진하중을 모두 적용하였다. 하지만 대상지역인 서울의 경우 풍하중이 지진하중을 상회하므로, 본 연구에서는 풍하중으로부터 얻은 횡변위 해석결과를 이용하였다. 또한 대상모델의 횡변위를 검토하기 위해 약축방향 횡변위를 대상으로 분석하였다.

2.1 초고층건물 기본모델

본 연구에서는 국내 30층 이상 초고층건물의 평면형태 분석(서현주, 2002) 결과를 바탕으로 벽식을 제외하면 가장 수가 많은 Box형 평면을 갖는 초고층건물 기본모델을 생성하였다. 그리고 여기에 다른 평면형태를 고려하여 T형 평면을 갖는 기본모델을 추가로 생성하였다. 초고층건물의 횡강성에 초점을 맞춘 본 연구에서 중요한 점은 재료의 종류에 따른 부재의 구체적인 단면크기가 아니라 구조물의 횡강성에 기여하는 부재의 휨강성(flexural rigidity)이다. 따라서 기

표 1 60층 규모 기본모델의 평면

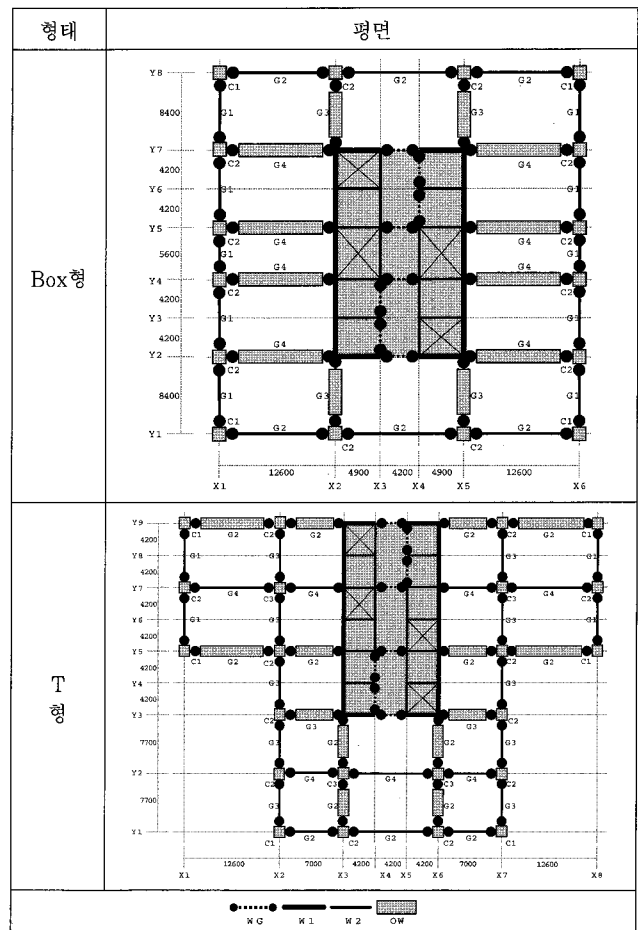


표 2 기본모델 주요부재의 단면크기(mm)

구분	해당 층	Box형	T형
코어	W1	41-60	550
		21-40	700
		B6-20	850
	W2	전체	200
	WG	전체	200×600
기둥	C1, C2	41-60	900×900
		21-40	1050×1050
		B6-20	1200×1200
	C3	41-60	-
		21-40	-
		B6-20	-
보	G1	전체	400×600
	G2	전체	450×700
	G3	전체	800×400
	G4	전체	900×400

본모델의 재료는 일반적인 구조해석에서 부재의 휨강성을 간편하게 표현할 수 있는 철근콘크리트로 하였다.

기본모델은 모두 평면 중앙부의 벽체(wall)로 이루어진 코어(core)와 그 외곽의 프레임(frame)으로 구성된다. 한 층의 면적은 약 1,500m², 코어의 면적은 약 300m²로 한 층 면적의 20%정도, x-방향의 형상비(aspect ratio)는 약 5.2정도이다. 표 1은 기본모델의 평면을 나타낸 것이다.

표 1에서 OW로 그룹핑(grouping)된 부재는 아웃리저(outrigger) 벽체로서 두께는 600mm이다. 재료는 모두 지상 20층까지는 C500(49MPa), 지상 40층까지는 C400(39.2MPa), 최고층인 지상 60층까지는 C300(29.4 MPa)으로 하였다. 코어 벽체와 기둥, 보 등 각 부재 단면의 크기는 표 2와 같다.

2.2 횡강성 증가요인

초고층건물은 다양한 종류의 부재들이 여러 가지 방식으로 배치되어 있기 때문에 횡강성을 증가시킬 수 있는 방법은 대단히 많다. 하지만 본 연구에서는 효율성 측면을 고려하여 초고층건물의 초기 구조설계 단계에서 이용할 수 있는 주요 횡강성 증가요인으로 ① 아웃리저 설치, ② 재료강도 증가, ③ 코어단면 증가, ④ 아웃리저 연결기둥단면 증가, ⑤ 아웃리저 벽체단면 증가의 5가지를 선정하고 이를 기본모델에 적용하여 그 횡강성 증가효과를 분석하였다. 가새(brace)의 경우에는 그 형태, 위치, 범위 등이 개구부나 입면에 많은 영향

을 미치므로 쉽게 적용하기 어려운 점이 많아, 본 연구에서는 횡강성 증가요인에서 제외하였다.

2.2.1 아웃리저 설치

아웃리저는 초고층건물에서 횡강성을 증가시키기 위해 가장 우선적으로 적용해 볼 수 있는 방법이며, 그 효과도 우수한 것으로 인식되고 있다. 초고층건물의 아웃리저 개수는 최대 4개를 넘지 않으며(Wu and Li, 2003), 본 연구에서 분석대상으로 삼은 60층 규모에서는 아웃리저를 2개 설치하는 것이 일반적이다. 아웃리저의 설치위치는 Wu and Li(2003), CTBUH(1995), Smith and Coull(1991), Taranath(1975), McNabb and Muvdi(1975), Smith and Salim(1981)의 결과를 바탕으로 1개인 경우에는 중간인 30층에, 2개인 경우에는 20층과 40층으로 하였다.

2.2.2 재료강도 증가

재료강도를 증가시키는 것은 콘크리트의 탄성계수 증가를 통해 초고층건물의 강성을 증가시킬 뿐 아니라 수직부재 단면의 크기를 줄여 가용공간을 증가시키는 효과도 있어 횡변위를 제한할 수 있어 줄이기 위해 우선적으로 적용할 수 있는 방법 중의 하나이다. 하지만 재료강도를 증가시키는 구체적인 방법에 있어서는 선택의 폭이 넓다. 즉, 재료강도의 크기를 얼마나 증가시킬지, 건물 높이의 어떤 부분의 재료강도를 증가시킬지 결정함에 있어서 다양한 선택이 가능하다.

이에 따라 본 연구에서는 기둥(C1, C2, C3)과 코어 벽체(W1, W2, WG)의 콘크리트 재료강도를 C100(9.8MPa), C200(19.6MPa), C300(29.4MPa)만큼 각각 증가시켰다. 아울러 기본모델 전체 층고 H를 H/5, H/4, H/3, H/2로 구분하여 지하층부터 해당 층수까지만 재료강도를 각각 증가시켰다. 그리고 이러한 재료강도의 증가에 따른 횡강성의 증가 정도, 경향 및 효율성을 분석하였다.

2.2.3 코어단면 증가

초고층건물에서 코어는 횡강성에 있어서 아주 중요한 역할을 한다. 그러므로 횡강성이 부족할 경우 코어 벽체의 단면을 증가시켜 횡강성을 증가시키는 것은 상당히 효과적인 방법이 될 수 있다. 하지만, 재료강도 증가의 경우와 마찬가지로, 코어 벽체의 단면을 증가시키는 경우에도 두께를 어느 정도나 증가시켜야 하는지, 건물 높이의 어떤 부분의 단면을 증가시켜야 하는지에 있어서 선택의 폭이 넓다.

이에 본 연구에서는 코어 벽체 단면(W1, W2, WG)의 두께를 각각 100mm, 150mm, 200mm 증가시킨 결과와 기본모델 전체 층고를 H/5, H/4, H/3, H/2로 구분하여 해당

표 3 대안모델 분류 (MF : Moment Frame, OR : Outrigger)

모델이름	구조시스템	변경내용
0OR-Core	Core	기본모델에서 프레임을 삭제한 코어 모델
0OR	Core + MF	코어-프레임으로 구성된 기본모델
2OR	Core + MF + OR	기본모델에 아웃리저를 추가
0OR-Mat-H/5(~H/2)-C100	Core + MF	0OR에서 재료강도 증가범위 변경 (H/5, H/4, H/3, H/2)
0OR-Cre-H/5(~H/2)-100	Core + MF	0OR에서 코어단면 증가범위 변경 (H/5, H/4, H/3, H/2)
0OR-Mat-H/5-C100(~C300)	Core + MF	0OR에서 재료강도 증가크기 변경 (C100, C200, C300)
0OR-Cre-H/5-100(~200)	Core + MF	0OR에서 코어단면 증가크기 변경 (100, 150, 200mm)
2OR-Mat-H/5(~H/2)-C100	Core + MF + OR	2OR에서 재료강도 증가범위 변경 (H/5, H/4, H/3, H/2)
2OR-Cre-H/5(~H/2)-100	Core + MF + OR	2OR에서 코어단면 증가범위 변경 (H/5, H/4, H/3, H/2)
2OR-Mat-H/5-C100(~C300)	Core + MF + OR	2OR에서 재료강도 증가크기 변경 (C100, C200, C300)
2OR-Cre-H/5-100(~200)	Core + MF + OR	2OR에서 코어단면 증가크기 변경 (100, 150, 200mm)
2OR-Col-100(~200)	Core + MF + OR	2OR에서 OR 연결기둥단면 증가크기 변경 (100, 150, 200mm)
2OR-ORW-100(~200)	Core + MF + OR	2OR에서 OR 벽체단면 증가크기 변경 (100, 150, 200mm)

표 4 기본모델의 변위비와 강성참여도

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

층수까지만 단면두께를 각각 증가시킨 결과를 분석함으로써 코어단면 증가크기 및 범위에 따른 효과를 분석하였다.

2.2.4 아웃리저 벽체 및 연결기둥의 단면 증가

아웃리저는 코어와 외곽의 기둥을 강하게 연결하여 횡강성을 증가시키는 역할을 하기 때문에 아웃리저의 효율을 높이기 위해서 아웃리저 자체의 단면을 증가시키거나 아웃리저와 연결되는 기둥의 단면을 증가시키는 방법도 고려해 볼 수 있다. 본 연구에서는 아웃리저 연결기둥(OC1, OC2, OC3)의 단면치수와 아웃리저 벽체단면(OW)의 단면두께를 각각 100mm, 150mm, 200mm 증가시킨 결과를 분석하였다.

표 3은 이상에서 기술한 대안모델의 분류를 정리하여 나타낸 것으로, 아웃리저를 1개 설치한 1OR 모델의 경우는 2OR 모델의 경우와 동일하게 구성하였다.

3. 횡강성 증가요인 효과 분석

본 장에서는 기본모델에 횡강성 증가요인을 적용하여 생성한 대안모델의 구조해석 결과를 통해 횡강성 증가요인의 효과를 각 요인별로 평면형태에 따라 분석한 결과를 기술하였다.

강성참여도

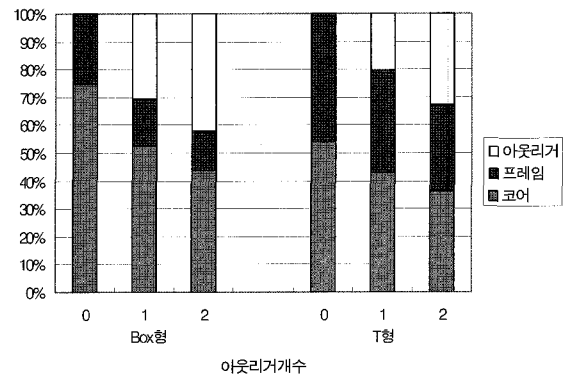


그림 1 아웃리저 개수에 따른 강성참여도 분포

3.1 기본모델 분석

평면형태별 기본모델의 변위비와 강성참여도는 표 4와 같다. 식 (1)~(4)에 의해 계산한 프레임의 강성참여도가 25% 이상이므로 구조해석 수행 시 지진하중 적용을 위한 반응수정 계수로는 이중골조방식에 해당하는 값 5.5를 사용하였다.

3.2 아웃리저 추가의 효과

기본모델에 아웃리저를 추가했을 때 평면형태별 아웃리저 개수에 따른 강성참여도는 그림 1과 같다.

평면형태에 관계없이 프레임의 강성참여도는 거의 일정하고 아웃리저를 추가함에 따라 코어의 강성참여도는 감소하였다.

평면형태별로 아웃리저에 의한 강성증가율은 Box형의 경우 아웃리저 1개, 2개일 때 각각 43.8%, 73.1%이며, T형

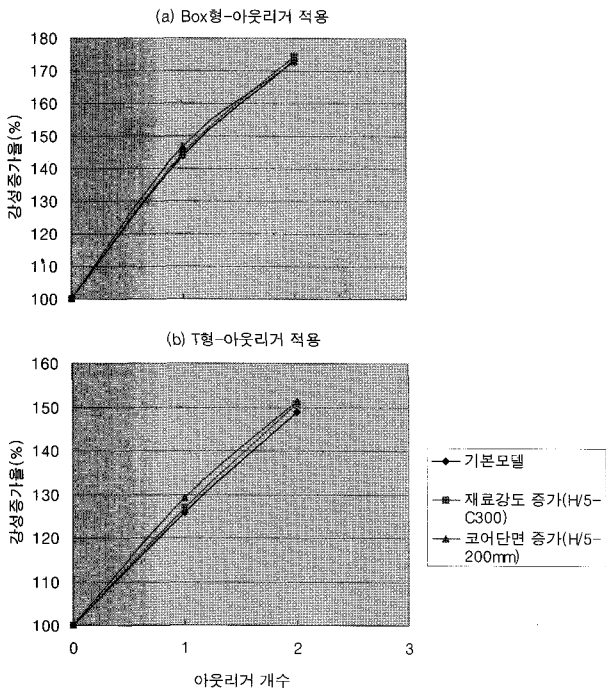


그림 2 아웃리거 개수에 따른 재료강도 및 코어단면 증가의 영향

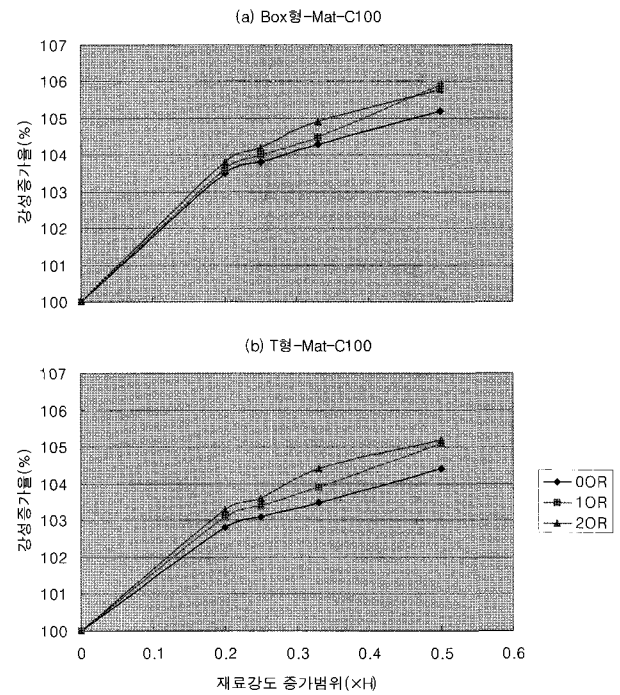


그림 3 평면형태별 재료강도 증가범위의 영향

은 25.8%, 49.0%이다. 이 결과에서 보면 아웃리거를 추가함에 따라 횡강성이 상당히 증가하였으며, Box형에서 상대적으로 더 큰 효과를 발휘하였다. 하지만, 첫 번째 아웃리거의 추가에 의한 강성증가율은 43.8%인데 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 아웃리거의 수를 증가시키는 것만큼 강성이 계속해서 증가하지는 않는다는 것을 의미하는 것으로 40층의 T형 평면을 주된 대상으로 설정하여 아웃리거의 수에 따른 강성증가 효과를 분석한 이재철 등(2005)의 결과와도 부합한다.

그림 2는 기본모델에 재료강도 증가(H/5-C300) 및 코어단면 증가(H/5-200mm)를 적용시킨 후 아웃리거 개수에 따른 강성증가 효과를 분석한 것이다. 아웃리거를 적용한 경우에도 재료강도 증가 및 코어단면 증가에 의한 강성증가 크기 및 경향이 기본모델의 경우와 거의 동일하다. 이것은 아웃리거 추가에 의한 강성증가 효과는 재료강도 증가 및 코어단면 증가에 의한 강성증가 효과와는 거의 무관하게 독립적으로 작용한다는 것을 의미한다.

3.3 재료강도 증가의 효과

재료의 강도를 증가시킨다는 것은, 전술한 바와 같이 재료 강도 증가를 적용하는 범위와 재료강도를 증가시킨 정도에

따라 다양한 효과가 나타날 수 있다. 그러므로 여기에서는 먼저 평면형태별로 재료강도를 증가시킨 범위를 변화시켜 그에 따른 횡강성의 증가효과를 분석하고, 다음에는 재료강도를 점차 증가시켜 그 효과를 분석하였다.

3.3.1 재료강도 증가범위

본 연구에서는 재료강도를 증가시킨 범위를 기본모델 전체 높이의 H/5, H/4, H/3, H/2로 구분하여 재료강도 증가 범위에 따른 강성증가율을 조사하였다. 그림 3은 지하층부터 H/5, H/4, H/3, H/2에 해당하는 층까지의 범위에 대해서 기둥과 코어 벽체의 재료강도를 원래의 크기(C300, C400, C500)로부터 C100에 해당되는 9.8MPa만큼 증가시키고 그에 따른 강성증가율을 아웃리거의 수에 따라 나타낸 것이다. Box형 평면의 경우, 강성을 증가시킨 범위를 H/5, H/4, H/3, H/2로 넓혀감에 따라 강성이 최대 6%정도까지 커졌지만 그 증가하는 비율은 점차 감소하였다. 이러한 경향은 아웃리거 설치 여부와는 관계없이 모두 동일하였으며, T형 평면의 경우에도 마찬가지였다.

이를 통하여 재료의 강도를 증가시키는 경우에는, 평면의 형태나 아웃리거의 설치 여부와는 관계없이, 일반적인 예상대로 되도록이면 건물의 하부(본 연구에서는 지하층부터 H/5에 해당되는 층까지)를 대상으로 하는 것이 더 효율적이라는 것을 알 수 있다. 하지만 실제 강성이 증가하는 정도는 그리 크지 않은 것으로 판단된다.

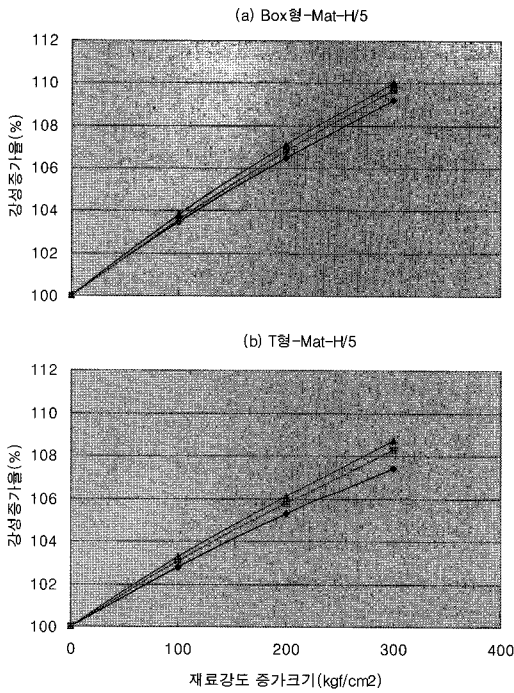


그림 4 평면형태별 재료강도 증가크기의 영향

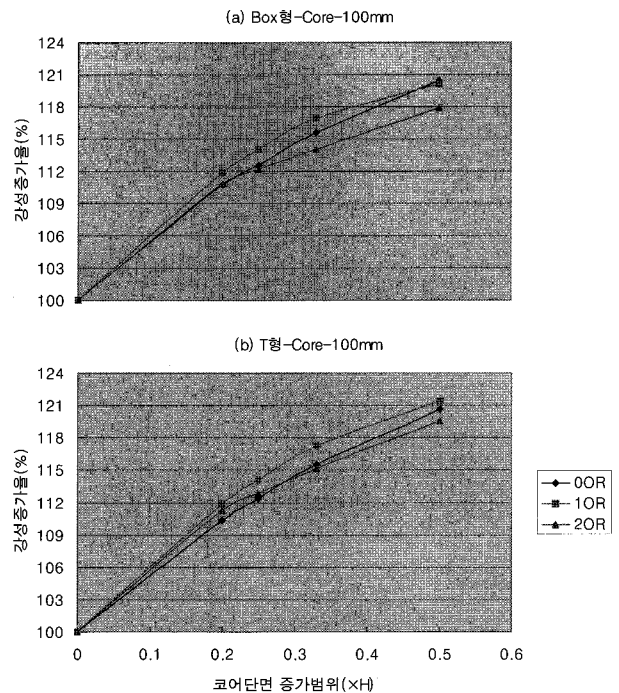


그림 5 평면형태별 코어단면 증가범위의 영향

3.3.2 재료강도 증가크기

재료강도 증가크기에 의한 효과는 기둥과 코어 벽체의 재료강도를 적용범위에서 가장 효율적이었던 H/5까지 증가시켜 분석하였다. 재료강도는 기본모델 하부의 재료강도 C500 (49MPa)을 C600, C700, C800까지 9.8MPa씩 차례로 증가시켰다. 그림 4는 그 결과이다. Box형 평면의 경우 재료강도가 증가함에 따라 강성이 최대 10%정도까지 점차 증가하였고, 그 증가하는 비율은 거의 그대로 유지되었다. 이러한 경향은 아웃리저의 설치 여부와는 거의 관계가 없었으며 T형 평면의 경우에도 마찬가지였다.

그림 4를 통하여 재료의 강도를 증가시킴에 따른 강성의 증가는 평면의 형태나 아웃리저의 설치 여부와는 거의 관계가 없다는 것을 알 수 있다. 그리고 그 증가율이 최대 10% 정도로서 재료강도의 증가 범위를 H/2까지 확대하는 것 보다는 더 크다는 것을 알 수 있다.

3.4 코어단면 증가의 효과

코어단면을 증가시키는 것도 재료강도를 증가시키는 것과 같이 증가를 적용하는 범위와 증가시키는 정도에 따라 다양한 효과가 나타난다. 그래서 코어단면 증가 효과는, 재료강도 증가의 경우와 마찬가지로, 평면형태별로 코어 벽체의 단면 두께를 증가시키되 증가범위를 변화시킨 효과와 증가크기를 변화시킨 효과로 나누어 분석하였다.

3.4.1 코어단면 증가범위

코어단면 증가범위에 의한 효과는 코어 벽체의 단면두께를 100mm, 범위를 H/5~H/2까지로 구분하여 지하층부터 해당 범위까지만 증가시켰을 때의 효과를 분석하였다. 그림 5는 그 결과를 나타낸 것이다.

그림 5에 나타난 바와 같이 Box형 평면의 경우 코어단면을 증가시키는 범위를 H/5에서 H/2로 높여감에 따라 횡강성이 10%정도에서 21%정도까지 점차 증가하였다. 하지만 증가하는 비율은 점차 감소하였다. 이러한 경향은 아웃리저를 1개 혹은 2개를 추가한 경우에도 크게 다르지 않았으며, T형 평면 역시 마찬가지였다.

이 결과를 통해서, 코어단면을 증가시키는 경우에는 평면의 형태나 아웃리저의 설치와는 관계없이 되도록 건물 하부를 대상으로 하는 것이 더 효율적이라는 것을 알 수 있다. 그리고 그 효과는 최소 10%, 최대 21%정도로 재료강도를 증가시키는 것보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

3.4.2 코어단면 증가크기

코어단면 증가 크기에 의한 효과는 코어 벽체의 두께를 각각 100mm, 150mm, 200mm 증가시키되, 적용범위를 가장 효율적이었던 H/5까지로 하여 분석하였다. 그림 6은 그 결과를 나타낸 것이다.

Box형과 T형 모두에서 코어단면이 증가함에 따라 약 10%정도에서 최대 23%정도까지 횡강성이 증가하였다. 그림 6의 그래프에서 보면 그 증가하는 하는 비율이 그대로 유

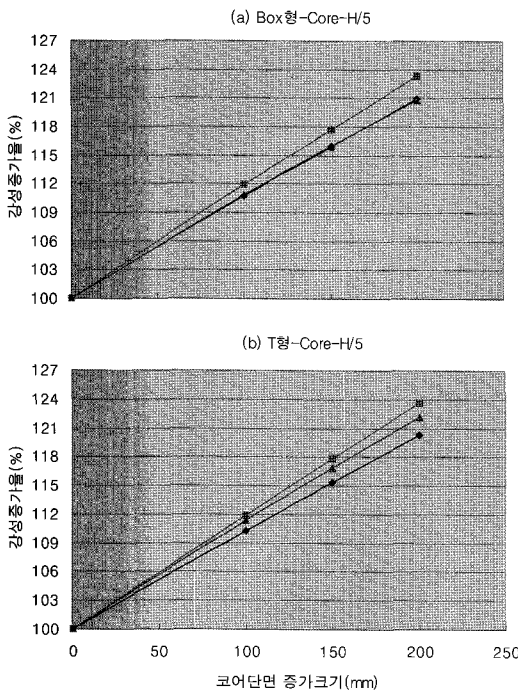


그림 6 평면형태별 코어단면 증가크기의 영향

지되었으므로 추가로 코어단면을 증가시켜도 횡강성이 어느 정도 더 증가할 여유가 있는 것을 알 수 있다. 이로 미루어 보면 코어단면 증가의 경우에도 재료강도 증가의 경우와 마찬가지로 강성증가 효과는 범위를 확장하는 것보다 크기를 증가시키는 것이 큰 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 코어단면 증가에 따른 이러한 횡강성의 변화경향은 아웃리저의 설치 여부와는 거의 독립적이었다.

3.5 아웃리저 연결기둥단면 증가의 효과

아웃리저 연결기둥단면 증가의 효과를 분석하기 위해서는 아웃리저를 설치한 층 이하에 대해 아웃리저에 연결된 기둥의 단면을 각각 100mm, 150mm, 200mm 증가시켰다. 따라서 아웃리저가 설치된 모델만을 대상으로 하며, 연결기둥 단면의 증가범위에 대해서는 고려하지 않았다.

Box형과 T형 평면에서 아웃리저 연결기둥단면 증가크기에 따른 강성변화율은 표 5와 같다. 아웃리저 연결기둥단면 증가크기에 따른 강성증가율은 아웃리저 연결기둥의 단면크기에 단순비례함을 알 수 있으며 최대 7% 수준으로 비교적 작은 값을 나타냈다.

3.6 아웃리저 벽체단면 증가의 효과

아웃리저 벽체단면 증가의 효과를 분석하기 위해서는 아웃리저 벽체의 단면을 각각 100mm, 150mm, 200mm 증가

표 5 아웃리저 연결기둥단면 증가크기에 따른 강성증가율(단위:%)

증가크기	평면형태			차이
	Box형	T형		
1OR	100mm	2.5	2.2	0.3
	150mm	3.6	3.3	0.3
	200mm	4.8	4.3	0.5
2OR	100mm	3.9	3.2	0.7
	150mm	5.8	4.8	1.0
	200mm	7.6	6.3	1.3

표 6 아웃리저 벽체단면 증가크기에 따른 강성증가율 (단위:%)

증가크기	평면형태			차이
	Box형	T형		
1OR	100mm	1.0	0.8	0.2
	150mm	1.4	1.0	0.4
	200mm	1.6	1.3	0.3
2OR	100mm	1.3	1.2	0.1
	150mm	1.8	1.7	0.1
	200mm	2.2	2.1	0.1

시켰다. 그리고 아웃리저 연결기둥단면 증가의 경우와 마찬가지로 아웃리저가 설치된 모델만을 대상으로 하며, 벽체단면의 증가범위를 고려하지 않았다.

Box형과 T형 평면에서 아웃리저 벽체단면 증가크기에 따른 강성변화율은 표 6과 같다. 아웃리저 벽체단면 증가크기에 따른 강성증가율은 아웃리저 벽체의 단면크기에 단순비례하며 최대 2% 수준으로 강성증가 효과가 거의 없는 것으로 판단된다. 이는 기본모델에 아웃리저를 추가할 때 아웃리저 벽체단면의 두께를 600mm로 상당히 두껍게 했기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 아웃리저 벽체의 두께는 600mm 정도면 충분한 것으로 판단된다.

4. 횡강성 증가요인별 강성증가율 예측값

이상으로 횡강성 증가요인별로 초고층건물의 횡강성에 미치는 효과를 구체적으로 분석하였다. 본 연구에서는 이 분석 결과를 종합하여 초고층건물의 초기 구조설계 단계에서 시행착오를 감소시킬 수 있는 기초적인 지침으로 활용할 수 있도록 횡강성 증가요인별 강성증가율 예측값을 표 7과 같이 정리하였다.

다른 유형의 건물에 대한 적용성을 고려하면 표 7에서 단면크기와 재료강도의 증가량을 증가비율로 표현해야 하지만, 일반적인 범위의 단면크기와 재료강도를 갖는 건물에 대한 실무적 활용성을 고려하여 단면크기와 재료강도의 증가량을

표 7 횡강성 증가요인별 강성증가율 예측값(단위:%)

강성증가요인	평면형태	Box형		T형	
		1OR	2OR	1OR	2OR
아웃리거 적용		43.9	73.0	25.8	49.0
아웃리거 연결기둥 단면	100mm	2.5	3.9	2.2	3.2
	150mm	3.6	5.8	3.3	4.8
	200mm	4.8	7.6	4.3	6.3
아웃리거 벽체단면	100mm	1.0	1.3	0.8	1.2
	150mm	1.4	1.8	1.0	1.7
	200mm	1.6	2.2	1.3	2.1
(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

표 8 아웃리거 유무에 따른 강성증가율 비교(단위:%)

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

100mm, C100(9.8MPa) 등으로 표현하였다.

표 7의 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 재료 강도를 H/2 범위까지 C300에 해당되는 29.4MPa만큼 증가시킨 경우와 코어단면을 H/2 범위까지 200mm 증가시킨 경우를 대상으로 표 7의 예측값과 구조해석을 수행해서 구한 실제값을 비교하였으며 그 결과는 표 8과 같다. 아웃리거 유무에 따른 강성증가율의 예측값과 실제값의 차이는 최대 5% 수준으로 비교적 작음을 확인할 수 있다.

표 7의 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 7의 예측값과 구조해석을 통해

표 9 초기 최상층 변위비 차이에 따른 강성증가율 비교(단위:%)

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

표 10 기본모델과 예제모델 비교

비교항목	평면형태	Box형		T형	
		기본모델	예제모델	기본모델	예제모델
층수		60층	60층	60층	60층
층고		3.5m	3.2m	3.5m	3.7m
전체높이		210m	192m	210m	222m
코어면적비		20.4%	15.7%	21.1%	12.5%
세장비	장변	5.36	4.47	4.05	5.69
	단변	5.36	6.19	5.17	6.73

구한 실제값을 비교하였고, 표 9는 그 결과이다. 두 경우 모두 표 7에서 제시한 H/350 수준 모델에 대한 예측값과 최대 5% 수준의 차이를 보였다.

표 8, 9의 결과, 그리고 본 연구의 기본모델이 60층 규모라는 점을 고려해 보면, 표 7의 강성증가율 예측값은 50~70층 규모의 초고층건물 초기 구조설계 단계에서 평면의 형태, 아웃리거의 설치 여부, 횡강성의 크기 등에 관계없이 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 표 7에 포함되어 있는 횡강성 증가요인 자체가 철근콘크리트조에만 적용이 가능하므로 철골 및 합성부재에는 적용이 곤란하다.

5. 예제 검토

표 7에서 제시한 강성증가율 예측값의 타당성을 검토하기 위해, 표 10과 같이 본 연구의 기본모델과 형태는 유사하나 층고, 코어면적비, 세장비 및 부재 배치 등이 상이한 예제모델에 표 7의 강성증가율 예측값을 적용하여 구조해석을 수행했으며 그 결과는 표 11과 같다.

Box형 평면 예제모델의 초기 변위비는 H/332로서 기준에서 정하는 H/500 수준을 만족하기 위해서는 $500/332 = 1.506$ 이상의 강성증가가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서 선택한 횡강성 증가요인 중에서 아웃리거를 1개 추가하고 코어단면을 H/5 범위까지 100mm 증가시키는 방법을 검토하

표 11 예제모델 검토 결과

	Box형	T형
초기 최상층변위비	H/332	H/300
강성증가 요구량	500/332=1.506	500/300=1.667
횡강성 증가요인 적용	① 아웃리거 1개 적용 (43.9%) ② 코어단면 H/5까지 100mm 증가 (10.7%)	① 아웃리거 2개 적용 (49.0%) ② 코어단면 H/5까지 200mm 증가 (20.3%) ③ 코어단면 H/2까지 200mm 증가 (41.3%)
예측 강성증가율	54.6%	69.3%
실제해석 강성증가율	53.8%	52.2% (64.3%)

였다. 이 경우 표 7로부터 아웃리거를 1개 추가했을 때의 강성증가율은 43.9%이고 코어단면을 H/5 범위까지 100mm 증가시켰을 때의 강성증가율은 10.7%로 예측할 수 있으므로 총 54.6%의 강성증가가 기대된다. 실제로 횡강성 증가요인을 적용하여 해석한 결과, 강성증가율이 53.8%로서 강성증가요구량 50.6%에 근접한 결과를 보였다.

T형 평면 예제모델의 경우에는 초기 변위비가 H/300로서 500/300=1.667 이상의 강성증가가 필요하다. 이를 위해 아웃리거를 2개 추가하고 코어단면을 H/5 범위까지 200mm 증가시키는 방법을 검토하였다. 이 경우 표 7로부터 아웃리거를 2개 추가했을 때의 강성증가율은 49.0%이고 코어단면을 H/5 범위까지 200mm 증가시켰을 때의 강성증가율은 20.3%로 예측할 수 있으므로 총 69.3%의 강성증가가 기대된다. 그러나 횡강성 증가요인을 적용하여 해석한 결과, 실제 강성증가율이 52.2%로서 강성증가요구량에 14.5%(=66.7-52.2) 부족하여 다소 큰 차이를 보였다. 이에 따라 부족한 강성증가율을 보충하기 위해 코어단면을 H/2 범위까지 200mm 증가시키는 방법으로 대체한 결과, 강성증가율 64.3%로서 강성증가요구량 66.7%에 근접한 결과를 얻을 수 있었다.

이상의 예제를 통해 본 논문에서 제시한 횡강성 증가요인별 강성증가율이 실제 해석결과와 다소 차이는 있지만 50~70층 규모 철근콘크리트 초고층건물의 초기 구조설계에 수반되는 시행착오를 줄이는데 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 60층 규모의 Box형 및 T형 평면을 갖는 철근콘크리트 초고층건물을 대상으로 횡강성 증가요인에 따른 강

성증가율을 분석하였다. 아웃리거는 2개까지 설치하였고 재료강도와 코어단면은 H/5~H/2로 범위를 구분하여 해당범위까지만 증가시켰으며, 크기의 경우 재료강도는 9.8MPa, 19.6MPa, 29.4MPa만큼, 코어단면은 100mm, 150mm, 200mm만큼 증가시켰다. 아웃리거 연결기둥단면과 아웃리거 벽체단면의 경우에는 크기만 100mm, 150mm, 200mm만큼 증가시켜 분석하였다. 그리고 그 결과를 종합하여 초고층 건물의 초기 구조설계 단계에서 기초적인 지침으로 활용할 수 있는 횡강성 증가요인별 강성증가율 예측값을 정리하였다. 이 과정을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 횡강성 증가요인 중에서 아웃리거 적용, 재료강도 증가, 코어단면 증가는 각각 독립적으로 강성증가에 기여한다.

(2) 아웃리거에 의한 강성증가율은 설치개수가 1개, 2개로 증가함에 따라 Box형은 약 40, 70%, T형은 약 25, 50% 수준으로 상당히 높게 나타났다. 그리고, 첫 번째 아웃리거의 적용효과가 두 번째 아웃리거보다 우수하였다.

(3) 재료강도 증가에 의한 강성증가율은 범위에 따라 최대 6%, 크기에 따라 최대 10%수준이다. 그리고 범위를 확장하는 것보다 크기를 증가시킨 효과가 더 컸으며, 범위를 확장하는 경우에는 되도록이면 건물의 하부를 대상으로 하는 것이 더 효율적이다.

(4) 코어단면 증가에 의한 강성증가율은 범위에 따라 최대 21%, 크기에 따라 최대 23%수준으로 나타났다. 그리고 역시 범위를 확장하는 것보다 크기를 증가시킨 효과가 더 컸으며, 범위를 확장하는 경우에는 되도록이면 건물의 하부를 대상으로 하는 것이 더 효율적이다.

(5) 아웃리거 연결기둥단면 증가에 의한 강성증가율은 최대 7%, 아웃리거 벽체단면 증가에 의한 강성증가율은 최대 2%수준으로 그 효과가 작은 것으로 나타났다.

(6) 강성증가요인에 따른 강성증가율의 크기는 아웃리거 설치>코어단면 증가>재료강도 증가>아웃리거 연결기둥단면 증가>아웃리거 벽체단면 증가 순으로 나타났다. 하지만 아웃리거와 코어단면 증가는 상당히 큰 강성증가율을 나타낸 반면, 나머지는 작게 나타났다.

(7) 이상의 분석결과를 종합하여 제시한 횡강성 증가요인별 강성증가율 예측값은, 예제에 적용해본 결과, 50~70층 규모의 철근콘크리트 초고층건물의 초기 구조설계에 수반되는 시행착오를 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구결과물은 2005학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의하여 이루어졌음

참 고 문 헌

김중호, 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, 정종현 (2005) 초고층건물의 횡력저항요인에 따른 횡변위 저감 효과, 대한건축학회 논문집, 21(10), pp.11~18.

이한주, 김치경, 김호수 (2002) 횡강성 영향행렬을 이용한 고층건물의 횡변위 제어 및 단면 재산정 방안, 한국전산구조공학회 논문집, 15(2), pp.271~279.

현대건설, 서울대학교, 전우구조, 선문대학교 (2003) 초고층 건물 구조설계 업무 자동화, 건설교통부, 한국건설기술연구원, '99년 산학연 공동연구개발사업 최종보고서, 99건축-10, pp.206.

CTBUH (1995) *Structural systems for Tall Buildings*,

McGraw-Hill Inc.

Habibullah, A. (1995) *ETABS ver.6 User Manual*, Computers & Structures Inc., pp.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.