



비정형 초고층 건축물의 지진응답 저감 성능 분석: TMD 및 아웃리거 시스템의 적용

Performance Analysis of Earthquake Response
Reduction in Irregular High-Rise Buildings:
Application of TMD and Outrigger Systems

1. 서론(머리말)

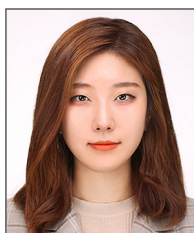
최근 세계 주요 도심지에 건설되는 많은 건축물은 다양한 요구와 공간 효율성을 충족시키기 위해 정형화된 박스 프레임이 아닌, 다양한 비정형 형태로 설계되고 있다[1]. 특히, 초고층 건축물의 비정형화는 현대 건축에서 단순히 기능적 공간을 제공하는 것을 넘어, 도시경관을 재정의하고 사회·문화적 랜드마크 역할과 더불어 새로운 건축적 가능성을 제시하는 상징적인 구조물로 자리 잡고 있다[2].

그러나 비정형 형상은 그 독특한 형태로 인해 중력하중과 횡하중에 대한 예측 불가능한 구조적 거동을 보이므로, 이에 따른 구조적 안정성을 확보하기 위한 비정형 초고층 구조물의 구조 설계는 특히 중요한 과제로 부각되고 있다[3]. 일반적으로 초고층 건축물의 구조 설계시 적절한 강성설계를 통해 풍하중과 지진하중과 같은 횡하중에 의한 횡변위를 제어하는 것이 중요하다[2]. 특히, 비정형 구조물은 형상적 특성으로 인해 구조물의 질량이 비대칭적으로 분포될 수 있으며 [4], 횡력 저항시스템도 비정형 형태와 디자인에 맞추어 비정형으로 설계될 수 있어 구조물의 내진성능이 저하되거나 지진응답이 크게 증가할 수 있다.

또한, 비대칭적 형상에 의한 구조물의 질량중심과 강성중심의 차이에 의해 구조물의 전도와 비틀림 변형이 유발되어, 비정형 구조물의 불균형한 하중 분포로 인해 응력집중이 발생하는 구조물의 단부나 연결부와 같이 상대적으로 횡 강성이 낮은 부분에 심각한 손상을 야기한다[5]. 이처럼 지진하중에 취약한 거동을 보일 수 밖에 없는 비정형성 구조물의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 비정형 건축물 설계 시 구조시스템 이외에 추가적인 지진응답 제어시스템을 적용하는 대안적인 방법이 강구되어야 한다.

이를 위해 최근까지 현대의 비정형 초고층 건축물을 3T(Twisted, Tilted, Tapered)의 형상으로 분류하고 각 형상의 설계 파라미터별 구조시스템을 적용하여 횡응답 거동을 분석하거나 평가하는 연구가 수행되고 있다[6~9]. 하지만 현재까지는 다양한 형태의 비정형 구조물의 유형별 구조물의 특성을 분석하고, 내진성능을 향상시켜 지진응답을 저감시킬 수 있는 연구 결과가 제한적으로 제시되고 있어[10~11], 비정형 유형별 지진응답 제어시스템의 설계 프로세스 정립을 위한 지속적인 연구가 필요하다.

본 기사에서는 현대 비정형 초고층 건축물 중 비틀림(Twisted)형상 구조물과 경사진(Tilted)형상 구조물에 중점을 두어 유형별 특성을 분석하고, 제진장치 중 하나인 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD) 시스템과 아웃리거 시스템을 적용하여 지진하중에 따른 횡변위 응답 저감 효과를 평가하고자 한다.



이 다 혜

영남대학교 건축학과 박사과정



김 현 수

선문대학교 건축학부 교수



강 주 원

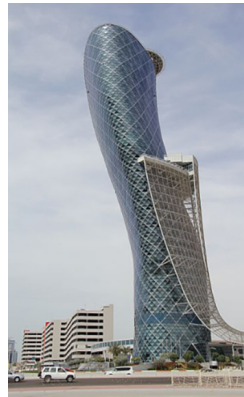
영남대학교 건축학부 교수



Cayan Tower(Dubai, UAE)



Evolution Tower(Moscow, Russia)



Capital Gate(Abu Dhabi, UAE)



Puerta de Europa(Madrid, Spain)

그림 1 Twisted 및 Tilted 형상 비정형 건축물 사례

2. 비정형 구조물의 특성과 지진응답 제어시스템

2.1 비정형 구조시스템 특성

비틀림(Twisted) 형상 건축물은 평면의 기준축을 중심으로 각 층이 일정한 각도로 회전된 형태를 가진다. 초기 비정형 초고층 건축물의 형태로 채택된 Twisted 형상 구조물은 풍하중에 의한 진동 저항 측면에는 유리한 입면 형태를 가지나, 비틀린 구조로 인해 편심과 상당한 전도모멘트를 발생시켜 구조물 전체의 변형을 유발할 수 있다. 또한, 비틀어진 평면과 연결된 경사 기둥 시스템은 상부층에서 전달되는 축하중만으로도 수평 전단력을 유발하여 기둥에 과다한 전단력과 휨모멘트가 발생되며, 이와 연결된 구조부재는 불연속적인 하중 경로로 인한 응력 집중에 의해 취약층이 발생할 수 있다[12]. 이러한 경사기둥 시스템은 수직 기둥에 비해 횡강성이 낮아 횡력 저항능력 측면에서도 횡하중에 의한 횡변위가 더욱 크게 증가할 수 있으며, 비틀린 평면의 회전각도와 세장비가 증가할수록 구조물의 횡강성이 낮아져 횡응답이 크게 증가하는 양상이 나타난다[13].

경사진(Tilted) 형상 건축물은 평면이 높이에 따라 수평 축 방향으로 이동하는 입면 기울기를 가지며, 수직이 아닌 특정 각도로 기울어진 형태를 통해 보다 드라마틱한 시각적 영향을 준다. 그러나 경사진 입면으로 인해 각 층별 편심하중이 발생하게 되며, 이는 횡하중뿐만 아니라 중력하중에 의한 경사에 따른 전도모멘트를 유발하여 수직 부재들 간의 축응력 차로 경사진 방향으로 횡변위와 부등축소를 초래할 수 있다. 또한, 경사진 형상 구조물의 경사부에서의 중력하중의 이동 경로가 수평분력을 일으키며, 특히 경사부 하부층에서 기둥이 소실되는 경우 해당 층에 전달

력이 집중되어 보-기둥 접합부에 상당한 저항력이 요구될 수 있다[14].

이와 같이, 비정형 초고층 건축물의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 비정형 구조시스템 및 다양한 지진응답 제어장치에 대한 적합성 검토 전 비정형 형상 건축물의 유형, 형태 및 핵심 설계 변수에 따른 내진 성능과 구조 거동의 변화를 체계적으로 분석하고, 예제 구조물을 작성하는 과정이 필요하다.

2.2 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD) 시스템

비정형 초고층 구조물의 진동을 저감시키기 위해 동조질량감쇠기(Tuned mass damper, TMD)와 같은 제진시스템이 적용되고 있다. TMD는 진동 에너지를 구조물의 고유진동수에 동조하여 기계적 감쇠비를 증가시키는 진동 제어장치이다[10]. TMD는 구조물의 1차 고유진동수에 맞춰 설계되기 때문에 다른 진동수를 가진 구조물에 적용될 경우 진동 제어 효과가 감소되거나 TMD 질량체로 인해 진동이 증폭될 수 있다[15]. 따라서 TMD 설계 시 구조물에 적절한 질량체, 스프링의 강성값과 감쇠기의 감쇠값을 설계하는 것이 중요하다. 특히 최적의 TMD 설계를 위해서는 최적 감쇠비와 최적 진동수비를 먼저 구해야 하며, 이를 위해 Warburton(1982)[16]이 제안한 산정식을 적용할 수 있다.

TMD 시스템의 대표적 적용 사례로는 보스턴의 John Hancock Tower(1977)와 대만의 Taipei 101(2004)이 있다. John Hancock Tower의 경우 최초로 TMD가 적용된 구조물로, 58층에 300ton의 TMD가 설치되었으며, Taipei 101

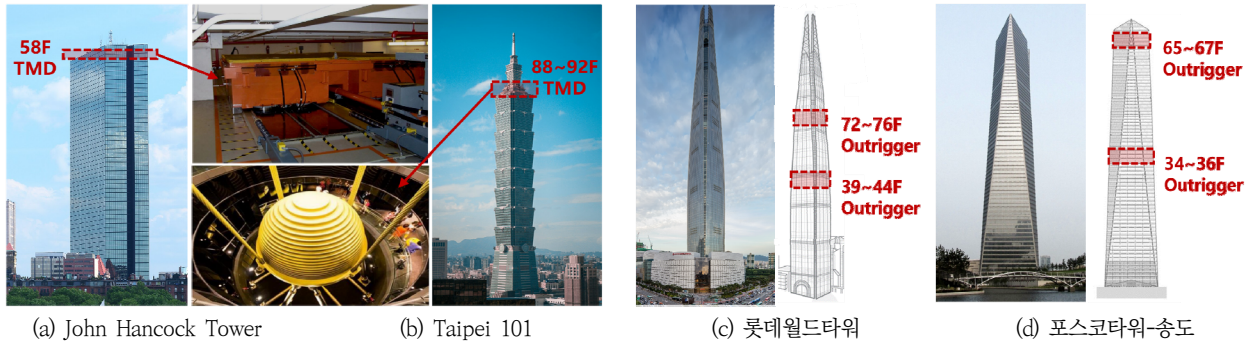


그림 2 국내외 비정형 초고층 건축물의 TMD 및 아웃리거 적용 사례

의 경우 구조물의 88층과 92층 사이에 660ton의 TMD가 설치되어 구조물의 진동을 효과적으로 제어하고 있다.

시스템 및 다양한 지진응답 제어장치의 적합성을 검토하여 최적 시스템을 선정하는 과정이 필요하다.

2.3 아웃리거 시스템

아웃리거 시스템은 일부 층에 중앙부 코어와 외부 기둥을 높은 강성을 가지는 구조체로 연결하는 시스템으로, 건물에 태풍, 지진 등의 횡력이 작용할 경우, 외부 수직부재에 인장 및 압축력으로 전달하여 횡력에 저항하는 구조시스템이다. 아웃리거 시스템은 수평력 저항에 건물의 외곽 전체폭을 사용하게 되어 구조적으로 매우 효율적이며, 뛰어난 수평강성으로 인해 전체 구조물량을 저감할 수 있다.

건축물에 아웃리거 시스템 적용 시 코어의 모멘트와 건물의 수평변위를 저감시킬 수 있으나, 전단력의 경우 코어 벽체가 전부 부담하게 되므로 전단력에 비해 전도 모멘트의 영향이 상대적으로 큰 세장한 고층건물에 적용될 경우 아웃리거 시스템의 효과가 증대되어 초고층 건축물에 국내 외적으로 다수 적용되고 있다.

아웃리거 시스템이 적용된 국내 사례로는 서울의 롯데월드타워(2016)와 인천의 포스코타워-송도(2014)가 있다. 롯데월드타워의 경우 아웃리거 트러스가 39층에서 44층, 72층에서 76층 총 2개소에 설치되며, 각각 5개층, 4개층에 걸쳐 연결되어 있다. 포스코타워-송도의 경우 34층에서 36층, 65층에서 67층 총 2개소 모두 3개층에 걸쳐 아웃리거 트러스가 연결되어 있다.

이와 같이 비정형 초고층 건축물의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 다양한 비정형 형상 건축물의 유형별 특성에 맞춘 설계 프로세스를 구축하는 것이 중요하다. 이를 위해 비정형 형상 건축물의 유형에 따라 동적 특성과 구조적 거동을 분석하고, 예제구조물을 작성한 후 비정형 구조

3. Twisted 및 Tilted 형상 구조물의 지진응답 해석 및 제진시스템 적용

비정형 구조물은 특유한 형태로 인해 중력하중과 횡하중에 대한 예측 불가능한 구조적 거동을 보이며, 특히 비정형 초고층 건축물의 대표적 유형인 Twisted 및 Tilted 형상 구조물은 질량중심과 강성 중심이 일치하지 않아 지진하중에 대해 취약할 수 있다. 본 연구에서는 각 형상 건축물의 고유한 구조적 특성을 반영한 해석모델을 선정하고, 정적 및 동적해석을 통해 지진하중에 대한 횡변위 응답을 평가하였다.

3.1 예제구조물 구성

TMD와 아웃리거 시스템을 적용한 비정형 초고층 건축물의 지진응답 제어성능을 검토하기 위해 선행연구[13~14]를 참고하여 Twisted 형상과 Tilted 형상 예제 해석모델을 선정하였다. 비정형 유형에 따른 두 형상 해석모델 모두 상용구조해석 프로그램인 Midas Gen Ver.940를 사용하여 평면 대비 약 11%의 코어면적을 가진 60층 규모의 비정형 구조물로 모델링하였다.

Twisted 형상 예제구조물의 경우 층당 평면 회전각도를 설계변수로 각각 1° 및 2°씩 회전하는 ‘T1’모델과 ‘T2’모델로 구성되었다. Tilted 형상 예제구조물의 경우 중층부(21~40층)가 X축 방향으로 약 12.7도(2 Span)가 기울어졌으며, 불규칙한 평면형상을 가진 비정형 구조물의 하중분배

를 확인하기 위해 단일코어 ‘SC’모델과 이중코어 ‘DC’모델로 구성되었다.

3.2 해석방법

TMD 및 아웃리거 시스템 적용에 따른 두 형상 해석모델의 거동과 지진하중에 따른 횡변위 응답 저감 효과를 검토하고자 다음과 같은 과정을 통해 해석을 수행하였다.

3.2.1 TMD 시스템

먼저, TMD 시스템은 고유치 해석에 따라 Twisted 형상 및 Tilted 형상 해석모델의 설치위치와 개수를 고정화한 후, TMD의 총 질량비를 설계변수로 설정하여 해석을 진행했다. TMD의 총 질량비는 1.0%부터 0.1%까지 감소시켜 총 5개의 변수를 설정하였다. 이를 통해 TMD의 질량비 변화에 따른 구조물의 응답제어 효과를 분석하였다.

3.2.2 아웃리거 시스템

다음으로 아웃리거 시스템의 변위응답 제어 효과를 평가하기 위해 Twisted 형상 해석모델의 경우 그림 3과 같이 아웃리거 설치위치를 설계변수로 설정하였으며, 선행연구 [17~18]를 참고하여 아웃리거를 33층, 45층에 설치하였다. Tilted 형상 해석모델의 경우, 그림 4와 같이 아웃리거 시스템의 설치 위치와 설치 개수를 변수로 두어, 코어 배치에 따른 예제구조물의 횡변위 응답 저감이 공통적으로 탁월한 위치를 선정하였다.

비정형 유형별 해석모델의 아웃리거 시스템의 설치 위치, 개수에 따른 최상층 변위를 분석하기 위해 정적해석을 우선 진행하였으며, 이를 위해 중력하중과 100:30법을 사용한 지진하중의 하중조합을 가력하여 구조물의 응답을 분석하였다.

3.2.3 동적 해석

앞서 선정된 비정형 형상 유형별 변수로 설정한 예제구

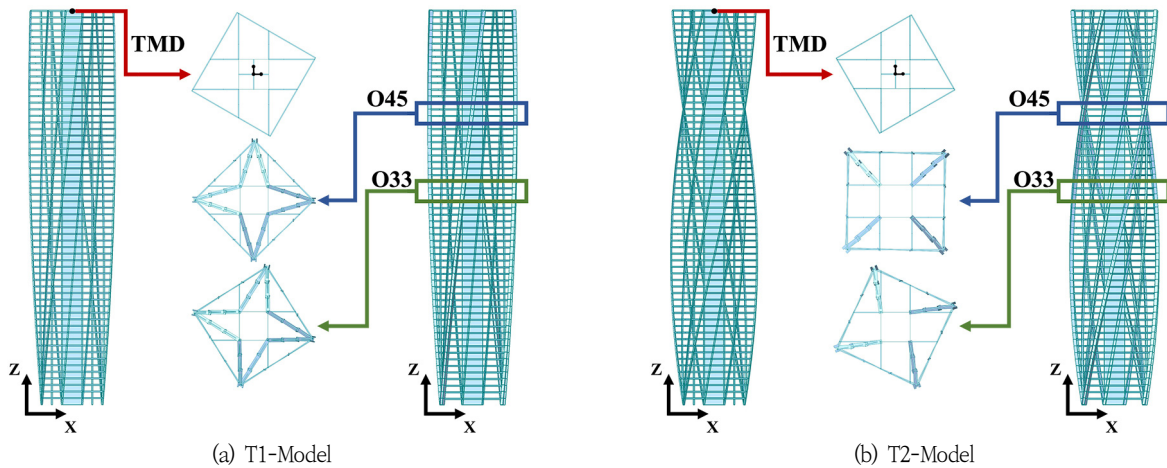


그림 3 Twisted 형상 해석모델의 평면 비틀림 각도별 TMD 및 아웃리거 설치 위치

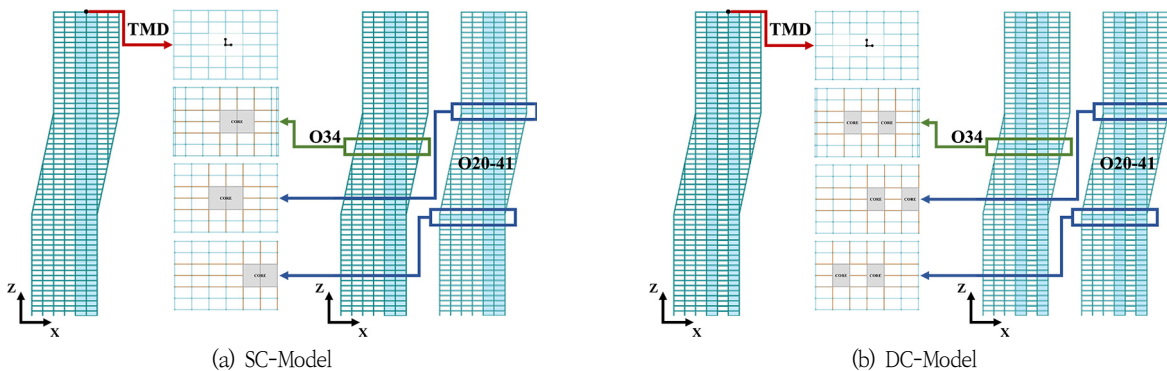


그림 4 Tilted 형상 해석모델의 코어 배치별 TMD 및 아웃리거 설치 위치

조물의 TMD 및 아웃리거 시스템 적용에 따른 횡응답 거동을 시간이력 해석을 통해 평가하였다. 비정형 초고층 예제 구조물의 동적 거동을 평가하기 위해 사용된 세 가지 역사 지진파는 Northridge 지진파(1994), Loma Prieta 지진파(1989), Mexico city 지진파(1985)를 선정하여 X, Y축 양방향으로 가력하였다.

4. 비정형 초고층 건축물의 제진시스템 성능 분석

4.1 비정형 형상 건축물의 TMD 시스템 적용 효과 분석

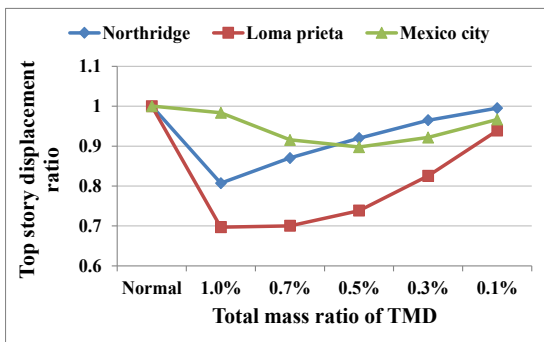
비정형 구조물의 TMD 설치에 따른 지진응답 제어성능을 검토하기 위하여 TMD의 총 질량비를 변수로 두어 세 가지 지진파에 대한 Twisted 형상 및 Tilted 형상 예제구조물의 최상층 변위비를 그림 5~6에 나타내었다. x축은 TMD의 총 질량비(1.0%, 0.7%, 0.5%, 0.3%, 0.1%)를, y축은 최상층 변위 비율을 뜻하며, 'Normal'은 TMD가 적용되지 않은 상태를 의미한다.

Twisted 형상 해석모델은 TMD 설치시 변위응답제어에 효과적으로 나타났으며, TMD의 총 질량비가 1%일 때 전반적으로 TMD 적용 효과가 컸으며, Mexico-city 지진파의 경우 총질량비가 0.5%일 때, 변위응답 제어성능이 가장 효과적으로 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

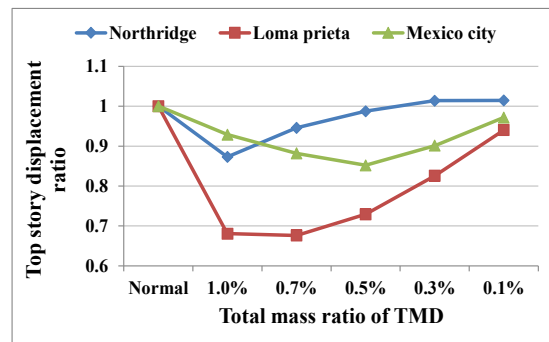
Tilted 형상 해석모델 또한 마찬가지로 TMD의 총 질량비를 1%로 설치시 변위응답제어에 효과적으로 나타났으며, Mexico-city 지진파의 경우 TMD의 총질량비가 0.7%일 때 응답제어성능이 가장 효과적이었으며, 이중코어 해석모델에서 가장 효과적인 응답제어가 나타났다.

4.2 비정형 형상 건축물의 아웃리거 시스템 성능 분석

비정형 구조물의 형상별 아웃리거 시스템 적용에 따른 지진응답 제어성능을 검토하기 위하여 우선 정적해석을 통해 아웃리거 시스템의 설계변수에 따른 횡응답 저감에 효과적인 해석모델을 선정할 필요가 있다.

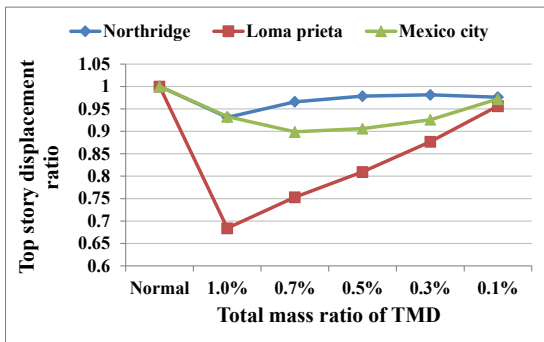


(a) T1-Model

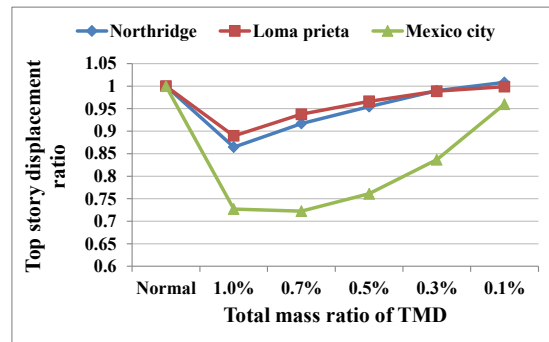


(b) T2-Model

그림 5 TMD 총 질량비에 대한 Twisted 형상 해석모델의 최상층 변위비

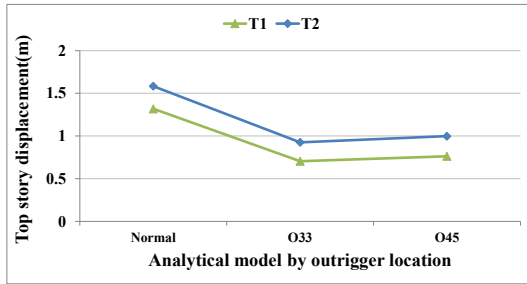


(a) SC-Model

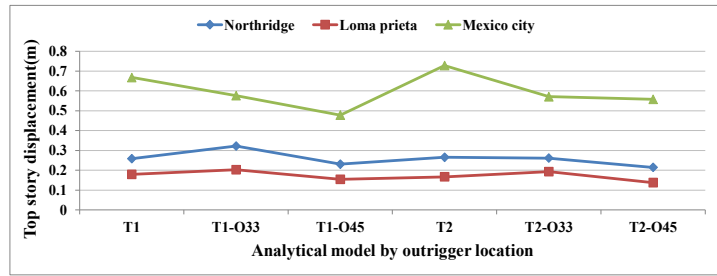


(b) DC-Model

그림 6 TMD 총 질량비에 대한 Tilted 형상 해석모델의 최상층 변위비



(a) 정적응답



(b) 동적응답

그림 7 Twisted 형상 해석모델의 최상층 변위

4.2.1 Twisted 형상 해석모델

아웃리거 시스템이 적용된 평면 비틀림 각도별 해석모델의 정적응답 결과, 비정형성이 더 큰 T2 해석모델에서 횡응답 거동이 크게 나타난 것을 확인할 수 있으며, 아웃리거가 33층에 설치된 해석모델의 응답저감이 더 효과적이었다. 동적응답 분석 결과, 평면 비틀림 각도와 관계없이 아웃리거가 45층에 설치된 해석모델의 횡응답저감이 효과적인 것을 확인할 수 있다.

4.2.2 Tilted 형상 해석모델

코어배치에 따른 경사진 형상 구조물의 아웃리거 시스템 설치 개소별 최적 설치위치를 분석하기 위해 각 층별 아웃

리거를 설치하여 정적해석을 실시하고, 횡응답저감이 가장 높게 나타난 해석모델을 선정하여 그림 8에 나타내었다.

아웃리거를 설치하지 않은 모델에 비해 아웃리거를 1개소 및 2개소 설치시, 단일코어 해석모델의 경우 각각 약 47.7%, 약 58.3%, 이중코어 모델의 경우, 각각 약 40.6%, 약 52.2% 응답저감이 나타났으며, 단일코어 해석모델의 응답저감이 더 효과적인 것을 확인할 수 있다.

또한 코어배치에 따른 예제구조물의 횡변위 응답 저감이 공통적으로 탁월한 위치인 ‘SC-O34’, ‘DC-O34’ 및 ‘SC-O20-41’, ‘DC-O20-41’를 선정하여 동적응답 분석을 진행하였다. 그림 9와 같이 이중코어 해석모델의 횡응답 거동이 단일코어 모델에 비해 전반적으로 크게 나며, 아웃리거를 2개소에 설치 시 지진응답 저감성능에 효과적인 것으로 판단할 수 있다.

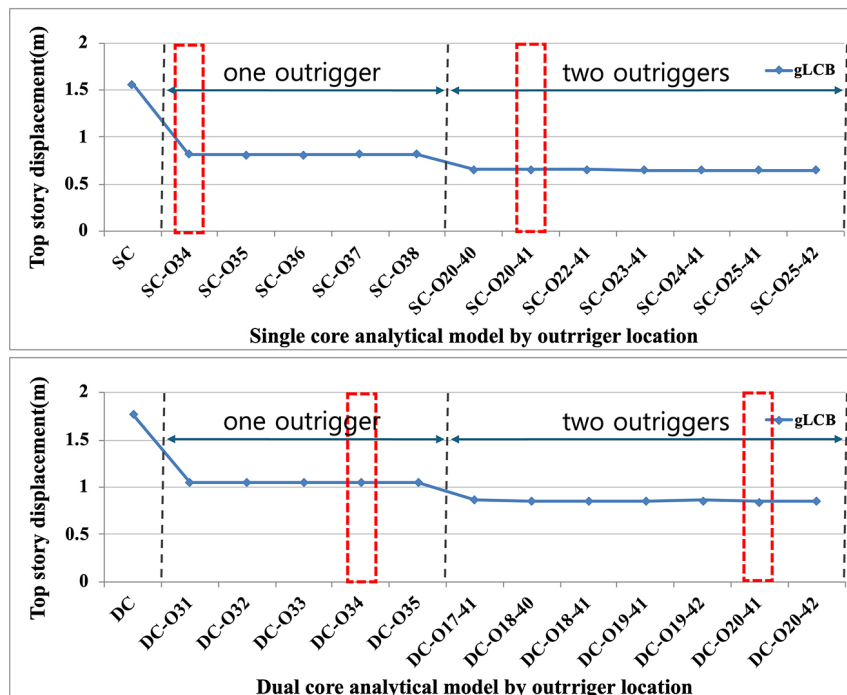
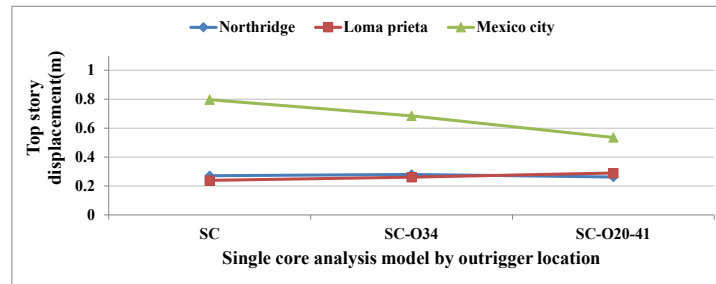
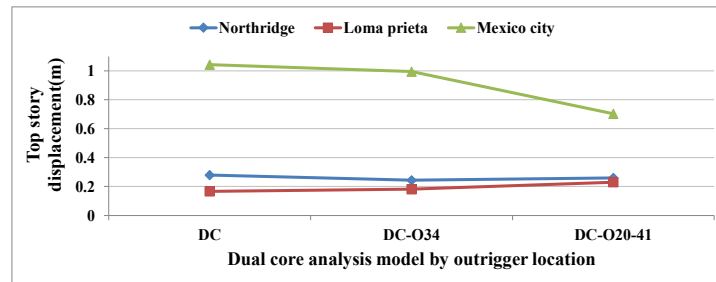


그림 8 Tilted 형상 해석모델의 아웃리거 시스템 설치에 따른 최상층 변위



(a) 단일코어 해석모델 최상층 변위



(b) 이중코어 해석모델 최상층 변위

그림 9 Tilted 형상 해석모델의 동적 응답

4.3 소결

Twisted 및 Tilted 형상 비정형 초고층 건축물에 대한 TMD 시스템 및 아웃리저 시스템의 성능을 분석한 결과 두 시스템 모두 Twisted 및 Tilted 형상 구조물 모두에서 지진응답 저감에 효과적인 것을 알 수 있다. 특히 TMD 시스템의 질량비를 적절히 설정함으로써 비정형 구조물의 지진응답을 효과적으로 저감할 수 있으며, 비정형 구조물 유형별 아웃리저 시스템의 설치 위치를 최적화함으로써 효과적인 횡변위 응답 저감이 가능함을 확인할 수 있다.

5. 결론

비정형 구조물은 그 특유의 형태로 인해 중력하중과 횡하중에 대한 복잡한 구조적 거동을 보이며, 특히 질량 중심과 강성 중심의 불일치로 인해 지진하중에 취약할 수 있다. 본 연구에서는 비정형 초고층 건축물의 대표적 유형인 Twisted 형상과 Tilted 형상 구조물에 대한 지진응답 해석을 수행하고, 제진 시스템인 TMD와 아웃리저 시스템의 적용 효과를 평가하였다.

비정형 초고층 건축물의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 TMD와 아웃리저 시스템과 같은 제진 시스템의 적절한 적용이 필수적이다. 특히, 비정형 형상별로 적합한 구조

시스템 혹은 진동제어시스템을 선택하고, 설계 파라미터를 최적화하는 것이 중요하며, 이를 통해 구조물의 안전성을 향상시키고 지진하중에 대한 응답을 효과적으로 저감할 수 있다. 본 연구의 결과는 비정형 초고층 건축물의 설계 및 안전성 확보에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NRF-2023R1A2C1002542)

References

1. Choe, H.C., Lee, Y.J. (2014) Computational Design of Freeform Tall Buildings, *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 27(4), pp.7~19
2. Kim, H.S., Kang, J.W. (2021) Seismic Response Control of Tilted Tall Building based on Evolutionary Optimization Algorithm, *Korean Association for Spatial Structures*, 21(3), pp.43~50

3. Kim, J.Y. (2009) Structural Considerations and Stability during Construction of Complex-Shaped High-Rise Buildings, *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 22(5), pp.23~31
4. Lee, K.H., Jeong, S.H. (2010) Verification of the Torsional Amplification Factor for the Seismic Design of Torsionally Imbalanced Buildings, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 14(6), pp.67~74
5. Han, S.W., Kim, T.O., Ha, S.J. (2017) Seismic Performance Evaluation of Special Moment Steel Frames with Torsional Irregularities – I Seismic Design, *Korean Society of Steel Construction*, 29(5), pp.361~368
6. Kim, H.S., Kang, J.W. (2011) Vibration Control Performance Evaluation of Smart TMD for a Tilted Diagrid Tall Building, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, 11(4), pp.79~88
7. Moon, K.S. (2011), Outrigger Structures for Twisted Tall Buildings, *Advanced Materials Research*, 255-260, pp. 737~741
8. Moon, K.S. (2016) Outrigger Systems for Structural Design of Complex Shaped Tall Buildings, *International Journal of High-Rise Buildings*, 5(1), pp.13~20
9. Moon, K.S. (2018) Comparative Evaluation of Structural Systems for Tapered Tall Buildings, *Buildings*, 8(8), p.108
10. Yoo, S.H., Kim, H.S., Kang, J.W. (2024) Displacement Response Analysis of Twisted Irregular Buildings According to TMD, *Korean Association for Spatial Structures*, 24(1), pp.89~96
11. Youn, W.S., Lee, D.H., Cho, C.H., Kim, E.S., Lee, D.C., Kim, J.H. (2012) Seismic Performance Evaluation of Complex-Shaped Tall Buildings by Lateral Resisting Systems, *Journal of the computational structural engineering institute of Korea*, 25(6), pp.513~523
12. Lee, D.H., Kim, H.S., Kang, J.W. (2020) Analysis of the Static Characteristic of High-Rise Structures With Twisted Shape, *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, 20(4), pp.93~100
13. Lee, D.H., Kim, H.S., Kang, J.W. (2021) Dynamic Response Analysis of Twisted High-Rise Structures by Plane Rotation Angle, *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, 21(1), pp.105~112
14. Chae, Y.W., Kim, J.M., Lee, D.G., Kang, J.W. (2022) Static Response Analysis of Tilted Structure by Core Location, *Architectural Institute of Korea-RA*, 24(6), pp.41~48
15. Lee, Y.R. (2021), Optimal Design of Tuned Mass Damper for Seismic Response Control of Large Spatial Structures (Doctor's thesis)
16. G. B. Warburton. (1982), Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, *International Association for Earthquake Engineering*, 10, pp. 381~401
17. Taranath, B. S. (1974) Optimum Belt Truss Locations for High-Rise Structures, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, 11, pp. 18~21
18. Lee, D.H., Kim, H.S., Kang, J.W. (2021) Seismic Response Analysis of Twisted Buildings with Three Planar Shapes, *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, 21(4), pp.23~30 